

中央大学博士論文

港湾構造物の耐波設計における
デジタルシフトに対する検討

Digital Shift in Design of Maritime Structures
Against Waves

Iwao Hasegawa
長谷川 巖

博士（工学）

中央大学大学院
理工学研究科
都市人間環境学専攻

令和3年度
2021年7月

目 次

1. 序論	1
1-1. 本研究の背景と動機	1
1-1-1. 背景	1
1-1-2. 動機	2
1-2. 既往の研究	2
1-3. 研究目的と論文構成	6
1-4. 本研究で扱う範囲	8
1-4-1. 本研究で扱う波浪の範囲	8
1-4-2. 本研究で扱う検討対象範囲	8
1-4-3. 本研究で扱う水理模型実験の範囲	8
1-4-4. 本研究で扱う数値シミュレーションの範囲	8
1-5. 水理模型実験と数値シミュレーションの特徴	9
2. 発注実績に見るデジタルシフトの現状把握	13
2-1. はじめに	13
2-2. 発注実績とデジタルシフトの現状	13
2-3. まとめ	15
3. 数値シミュレーションと模型実験の変遷	16
3-1. はじめに	16
3-2. 数値シミュレーションの変遷	16
3-2-1. 波浪変形に関する数値シミュレーション	16
3-2-2. 水理性能に関する数値シミュレーション	16
3-2-3. 物体の移動に関する数値シミュレーション	18
3-2-4. 数値計算手法開発からの経過年数の影響	19
3-3. 水理模型実験の変遷と実験施設	20
3-3-1. 波浪に関する水理模型実験の変遷	20
3-3-2. 水理模型実験施設	24
3-3-3. 実験施設規模（模型縮尺）の影響	29
3-4. まとめ	29
3-4-1. 数値シミュレーションの変遷のまとめ	30
3-4-2. 水理模型実験の変遷のまとめ	30
4. デジタルシフトの現状と課題	33
4-1. はじめに	33
4-2. ヒアリング調査によるデジタルシフトの現状把握	33
4-3. まとめ（デジタルシフトに向けての課題）	34

5.	数値シミュレーションの精度と計算時間	35
5-1.	はじめに	35
5-2.	波浪変形に関する精度と計算時間	35
5-2-1.	波浪変形に関する断面模型実験	35
5-2-2.	数値シミュレーションによる断面 2 次元波浪変形の再現	37
5-2-3.	断面 2 次元波浪変形に関する実験と計算に要する時間	42
5-2-4.	波浪変形に関する平面模型実験	43
5-2-5.	数値シミュレーションによる 3 次元波浪変形の再現	45
5-2-6.	3 次元波浪変形に関する実験と計算に要する時間	55
5-3.	反射波に関する精度と計算時間	56
5-3-1.	反射波に関する模型実験	56
5-3-2.	数値シミュレーションによる反射波の再現	58
5-3-3.	反射波に関する実験と計算に要する時間	60
5-4.	伝達波に関する精度と計算時間	62
5-4-1.	伝達波に関する模型実験	62
5-4-2.	数値シミュレーションによる伝達波の再現	65
5-4-3.	伝達波に関する実験と計算に要する時間	72
5-5.	越波に関する精度と計算時間	74
5-5-1.	数値シミュレーションによる越波流量の再現	74
5-5-2.	越波に関する計算時間	75
5-6.	波圧に関する精度と計算時間	77
5-6-1.	波圧に関する模型実験	77
5-6-2.	数値シミュレーションによる波圧の再現	81
5-6-3.	波圧に関する実験と計算に要する時間	85
5-7.	ケーソンの滑動に関する精度と計算時間	87
5-7-1.	ケーソンの滑動に関する模型実験	87
5-7-2.	数値シミュレーションによるケーソンの滑動の再現	90
5-7-3.	ケーソンの滑動に関する実験と計算に要する時間	91
5-8.	消波ブロックの移動に関する精度と計算時間	91
5-8-1.	消波ブロックの移動に関する模型実験	91
5-8-2.	消波ブロックの移動に関する数値シミュレーション	93
5-9.	計算精度と計算時間	94
5-10.	計算負荷の指標	97
5-11.	計算機性能と計算時間	100
5-12.	まとめ	102
6.	デジタルシフトの将来予測と達成目標	104

6-1. はじめに	104
6-2. 業務件数の実績に基づくデジタルシフトの将来予測	104
6-2-1. デジタル化増加曲線	104
6-2-2. デジタルシフトの将来予測	106
6-3. デジタルシフトの達成目標	109
6-4. まとめ	110
7. デジタルシフトによる消費エネルギーの削減	112
7-1. はじめに	112
7-2. 造波による消費電力量	112
7-3. 身体活動を考慮した消費エネルギー量	115
7-4. 準備作業を考慮した消費電力量	116
7-5. まとめ	118
8. 港湾構造物の耐波設計における数値シミュレーションの活用例	119
8-1. はじめに	119
8-2. 数値シミュレーションと模型実験による検討内容	119
8-3. 模型実験による消波工被害の把握	119
8-4. 数値シミュレーションによる水理性能の評価	121
8-5. まとめ	124
9. 結論	125

1. 序論

1-1. 本研究の背景と動機

1-1-1. 背景

地球温暖化により海面上昇を生じることや、気候変動により波浪条件が厳しくなるなど、港湾と海岸の構造物は地球温暖化の影響を強く受ける。したがって、今後に建設する構造物の設計だけでなく、既存施設が受ける地球温暖化による影響の評価においても、耐波設計に関する模型実験や数値シミュレーションが果たす役割が大きい。

防波堤などの港湾外郭施設や離岸堤などの海岸施設の断面諸元の設定のために、波浪に関する水理模型実験が従前より実施されている。波浪に関する水理模型実験が開始された当初は規則波による実験であったが、その後は不規則波や多方向不規則波の造波が可能になるなどの発展を遂げている。

数値計算技術と計算機性能の向上により、波動現象や構造物の変形を数値シミュレーションで取り扱えるようになり、港湾施設や海岸施設の断面諸元の設定に数値シミュレーションが用いられるようになってきている。数値計算技術と計算機性能の向上により、数値シミュレーションで対応可能となる検討項目は今後さらに増えていくことは間違いない。数値シミュレーションを実施すると何らかの答えを得ることができるが、設計実務に適用するにあたっては、その精度を検証することが重要である。また、設計実務に適用可能な能力の計算機により実用的な計算時間で実行できなければならない。

港湾構造物の耐波設計に関する検討項目は多岐にわたる。検討項目ごとに数値計算手法の開発や模型実験との比較が行われているが、様々な検討項目を総合的に取り扱った検討は行われていない。

様々な分野のデジタル化が進む中で、港湾構造物の耐波設計においても数値シミュレーションが社会に貢献する役割は大きい。模型の製作や造波機の駆動に多くの資源やエネルギーを利用する模型実験に、計算機に使用する電力だけで実施できる数値シミュレーションが代替することができれば、環境負荷の軽減に貢献することができる。数値シミュレーションによる検討は、実験施設を持たない技術者や組織によっても実施が可能である。模型実験の実施には複数人による作業が必要であるが、数値シミュレーションは一人の技術者によって実施が可能であるため、少子高齢化による人口減少社会における人手不足の解消にも寄与する。

1-1-2. 動機

港湾施設の耐波設計は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾¹⁾（以下、「技術基準」と称す。）の定めに従って実施される。一般的な構造は技術基準に従って設計が可能であるが、複雑な構造や条件は技術基準では適切な設計を実施できないため、『詳細な検討』を行うことが望ましいとされている項目がある。詳細な検討とは、平成 19 年度版の技術基準では『水理模型実験による検討』とされていたが、平成 30 年度版において『数値シミュレーションによる検討』が加えられた。しかし、耐波設計の実務への数値シミュレーションの適用はあまり進んでいない。耐波設計の分野において模型実験から数値シミュレーションへの移行（デジタルシフト）があまり進んでいないことは、社会的共通認識であると思うが、それを定量的に示した事例は見当たらない。そこで、デジタルシフトの現状についてデータに基づいて確認するとともに、デジタルシフトの将来予測を行い、デジタルシフト達成の目標を示したい。また、港湾構造物の耐波設計において、水理模型実験から数値シミュレーションへの移行に対する障害が何であるかを確認し、移行を進めるために何が必要であるかを示したい。

数値計算技術が向上してきているため、2020 年現在において数値シミュレーションで実施可能な耐波設計の検討項目もある。ただし、信頼性や安定性の観点から水理模型実験に頼らざるを得ない検討項目や、2020 年時点では数値シミュレーションでは検討を行うことが難しい検討項目もある。そこで、港湾構造物の耐波設計に関する数値シミュレーションの精度を確認するとともに、数値シミュレーションの実施に必要な時間やコストについて模型実験との比較を行い、港湾構造物の耐波設計に関する検討項目ごとに数値シミュレーションの適用性を検討したい。数値シミュレーションに関しては、今後、多くの研究者が計算精度の向上や計算時間の短縮に取り組んでいくと考えられる。そこで本研究では、水理模型実験から数値シミュレーションへの移行の検討を行うと共に、当面は模型実験に頼らざるを得ない項目があることに着目し、その高精度化についてもとりまとめた。なお、数値シミュレーションと水理模型実験は必要なデータを取得するための手段の違いであり、取得したデータの解析の点では、高度化の技術が数値シミュレーションと模型実験の両方に適用可能である。

1-2. 既往の研究

港湾構造物の耐波設計のための数値シミュレーションによる検

討項目として、以下が挙げられる。

到達波高 反射波 越波・伝達波 波圧・波力 ケーソン滑動
ブロック安定 マウンド洗掘 地盤洗掘

これらの検討項目に対する数値シミュレーションについて、個別に計算精度の検証などが行われた事例はあるが、全体を通して模型実験から数値シミュレーションへの移行を研究した事例は見当たらない。また、計算時間やコストを模型実験と比較した事例もほとんどない。

防波堤などの港湾構造物の耐波設計を行うために、施設に到達する波高を算定する。到達波高の算定に関する数値シミュレーションとして、1970年代半ばからエネルギー平衡方程式による波浪変形計算が適用され始めた¹⁻²⁾。波の非線形性と分散性を考慮できる波動方程式を採用したブシネスクモデルが1990年代前半に海外で提案され、日本国内では1990年代後半にブシネスクモデルが開発された¹⁻³⁾。模型実験との比較によるブシネスクモデルの精度検証は多く実施されている(例えば¹⁻⁴⁾)。ブシネスクモデルの計算負荷の削減や計算時間の短縮の必要性が指摘されている¹⁻⁴⁾が、計算コストについての検討が十分には行われていない。

防波堤などの構造物による反射波について、想定される反射率と一致するように減衰領域のパラメタを調整するブシネスクモデルでは検討を行うことができず、CADMAS-SURF^{1-5),1-6)}、OpenFOAM¹⁻⁷⁾や粒子法^{1-8),1-9)}などのナビエ・ストークス方程式による解法を適用しなければならない。日本国内ではCADMAS-SURFが広く適用されており、土木学会論文集 B2(海岸工学)や土木学会論文集 B3(海洋開発)などに多くの研究成果が報告されている。研究開発書籍¹⁻⁵⁾にも模型実験との比較や計算時間の確認も行われている。しかし、計算時間以外のコストについては十分な検討は行われていない。

越波・伝達波に関してブシネスクモデルの非公開版において計算が可能なバージョンがあるが、構造物の詳細な構造を考慮することはできない。構造物の詳細な構造を考慮して越波・伝達波を数値シミュレーションで考慮するには、反射波と同様に Navier-Stokes (ナビエ・ストークス) 方程式による解法を適用しなければならない。

防波堤ケーソンなどに作用する波圧・波力の数値シミュレーションによる算定は、ナビエ・ストークス方程式による解法により算定が可能である。

混成式防波堤のケーソンの滑動など物体の移動を伴う現象は、CADMAS-SURF や OpenFOAM などの計算格子を有する算定手法では

取り扱うことができず、CADMAS-SURF と FEM による構造・地盤計算と組み合わせて計算を行う手法 (CADMAS-STR¹⁻¹⁰⁾) が開発されている。CADMAS-STR のその後の研究報告¹⁻¹¹⁾において計算時間が実時間の3000倍以上かかることが示されている。

防波堤ケーソンの前面に設置する消波ブロックやマウンド石材を保護する被覆ブロックなどのブロック層の変形についても、ケーソンの滑動と同様に計算格子を有する計算手法では取り扱うことができない。ブロック層の変形を数値シミュレーションで取り扱うためには、CADMAS-STR のような構造・地盤計算との組み合わせを行うか、計算格子を有しない粒子法を適用する。粒子法による計算事例として津波越流に対するマウンド被覆ブロックの安定性¹⁻¹²⁾があるが、不規則波によりケーソン前面に設置する消波ブロック層の安定性を検討した事例は見られない。

防波堤マウンドの洗掘や地盤の洗掘に関する計算事例として、粒子法を用いて混成式防波堤を津波が越流することにより背後地盤とマウンドの洗掘を生じ、最終的にはケーソンの変位を生じる現象を検討した研究¹⁻¹³⁾がある。

以上の記述のうち、ケーソンの滑動以降に示した物体の移動を伴う数値シミュレーションの事例は、いずれも津波または津波による越流が対象とされている。その理由として、物体の移動を伴う数値シミュレーションは計算負荷が大きいため、風波などの振動波を取り扱うことが難しいためと考えられる。

海外における港湾構造物の耐波設計に関する数値シミュレーションの事例として、以下が挙げられる。

- ・非線形波浪変形モデルによる透過式防波堤の越波¹⁻¹⁴⁾
- ・ナビエ・ストークス方程式を適用した数値波動水路による防波堤に作用する波圧¹⁻¹⁵⁾
- ・ナビエ・ストークス方程式と VOF による数値波動水槽に 3D CAD の機能を利用して消波ブロックの形状を詳細に再現して、消波ブロックで被覆した捨石堤の越波¹⁻¹⁶⁾
- ・3D の SPH による石積みマウンドを溝付き立方体ブロックで被覆した防波堤に対する規則波の遡上¹⁻¹⁷⁾
- ・2D の SPH と DEM による消波ブロックの移動¹⁻¹⁸⁾

計算手法は日本国内と同様に、非線形波浪変形モデル、ナビエ・ストークス方程式、VOF、粒子法 (SPH) である。3D の SPH の事例¹⁻¹⁷⁾で

は物体の移動を考慮しておらず、2D の SPH の事例¹⁻¹⁸⁾において消波ブロックの移動が取り扱われている。日本国内と同様に、物体の移動を取り扱う数値シミュレーションは計算負荷が大きいため、3D でのブロックの移動の検討事例が見られないと考えられる。

防波堤等の港湾構造物の耐波設計に関する数値シミュレーションの既往の研究は、以上のとおりである。港湾構造物の、反射波、越波・伝達波、波圧・波力などの水理性能を評価する数値シミュレーションはナビエ・ストークス方程式による解法が適用されている。その計算精度については模型実験との比較などにより検討されているが、越波や波圧など個別の検討であり、全体を包括した検討は行われていない。ケーソンの滑動や消波ブロック層の変形など物体の移動を伴う現象については、検討事例が少ないと共に、計算負荷が大きいため検討条件が限られている。また、反射波や物体の移動などのいずれの検討項目においても、計算時間や計算コストに関する検討は十分には行われていない。

本節の最後に、数値シミュレーションと模型実験の関係に関する欧州における認識を、「Scaling Issues in Hydraulic Modelling¹⁻¹⁹⁾」から抽出して以下に示す。

Physical and numerical modelling tools have developed enormously during the last years. However several issues need still further developments.

Numerical models represent the real problem but with some simplifications.

Several advantages and disadvantages of physical model testing are usually reported.

The cost of physical modelling is often more than that of numerical modelling, and less than that of major field experiments.

New experimental techniques provide useful information for the validation of numerical models.

The growing use of numerical models in coastal engineering has not stopped the use of physical models and in some cases they made progress in conjunction with each other. Recent trends have included the concept of “hybrid modelling” where results from a physical model of complex region are used as input or boundary conditions for a comprehensive numerical model covering a wider region of interest. Alternatively, numerical model results may be used to provide input conditions at the boundaries of the physical model.

1-3. 研究目的と論文構成

本研究の目的は以下のとおりである。

港湾構造物の耐波設計に関して、模型実験から数値シミュレーションへの移行、すなわちデジタルシフト、があまり進んでいないことが感覚的に認識されている。それについて、データに基づいて確認を行う。また、デジタルシフトを促進するために何が必要であるかを確認する。

港湾構造物の耐波設計において模型実験から数値シミュレーションに移行するにあたり、最も重要なことは、十分な計算精度を確保することである。そこで、模型実験結果との比較により数値シミュレーションの計算条件の設定により計算精度がどのように変化するかを把握する。

数値シミュレーションを設計実務に適用するにあたっては、実務計算に適用可能な能力の計算機により、実用的な計算時間で実行できなければならない。そこで、計算条件の設定により計算時間がどのように変化

するかを把握する。

上記により計算精度と計算時間の関係を把握する。計算精度と計算時間は計算負荷との関係が強いことから、計算負荷を表す指標を検討する。

デジタルシフトの将来予測を行うとともに、デジタルシフトの達成目標を提案する。

造波機を駆動する模型実験から、計算機で実施する数値シミュレーションへ移行することにより、消費エネルギーをどの程度削減できるかを把握する。

本研究の構成は以下のとおりである。

1. 序論

2. 発注実績に見るデジタルシフトの現状

国の機関からの発注実績に基づき、デジタルシフトの現状を把握する。

3. 数値シミュレーションと模型実験の変遷

対象項目によりデジタルシフトの進み具合が異なることに、数値計算手法開発からの経過年数が関係しているかを確認する。併せて、模型実験の変遷も確認する。

4. デジタルシフトの現状と課題

ヒアリング調査により、デジタルシフトの現状と課題を把握する。

5. 数値シミュレーションの精度と計算時間

複数の検討項目について数値シミュレーションを実施し、模型実験結果との比較により精度を検証する。また、計算条件設定による計算時間の違いを確認する。これらにより計算精度と計算時間の関係を把握する。

6. デジタルシフトの将来予測と達成目標

国の機関からの発注実績に基づき、デジタルシフトの将来予測を行う。また、デジタルシフトの達成目標を検討する。

7. デジタルシフトによる消費エネルギーの削減

数値シミュレーションは計算機により電力を消費し、模型実験は造波機の駆動によりエネルギーを消費する。数値シミュレーションと模型実験の消費エネルギーを比較して、模型実験から数値シミュレーションへの移行による消費エネルギー削減効果を確認する。

8. 港湾構造物の耐波設計における数値シミュレーションの活用例

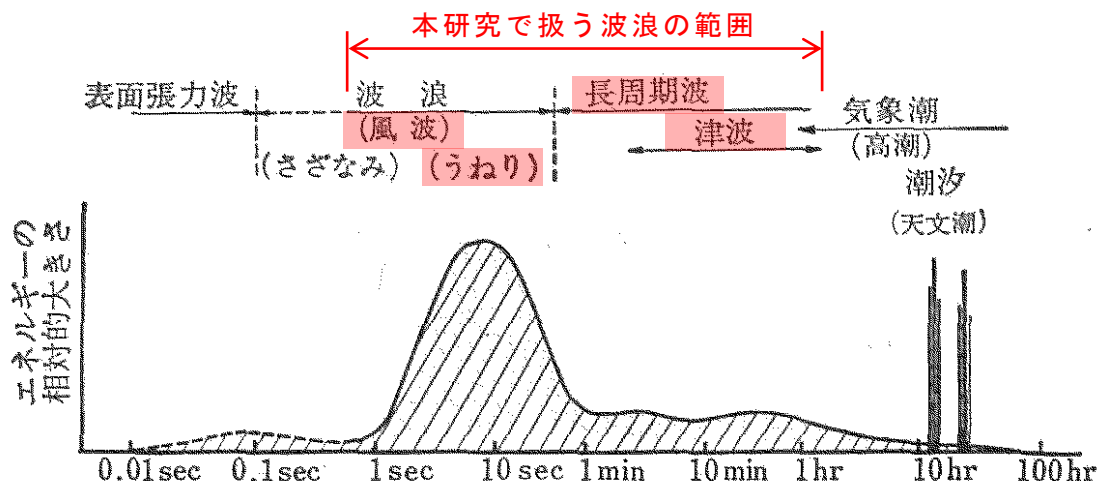
数値シミュレーションを模型実験を組み合わせる活用事例を示す。

9. 結論

1-4. 本研究で扱う範囲

1-4-1. 本研究で扱う波浪の範囲

本研究で扱う波浪の範囲は図 1-1 に示す風波から津波までとする。すなわち、風波、うねり、長周期波、津波であり、周期の範囲では数秒から 2 時間程度である。



(わかり易い土木講座 17 新訂版 海岸・港湾, 彰国社, 佐藤・合田, p.19)

図 1-1 周期による海面の運動の分類の例

1-4-2. 本研究で扱う検討対象範囲

本研究では、港湾外郭施設や海岸施設の断面諸元の設定のための検討を対象とする。従って、深海域、船体等の浮体の動揺、漂砂は取り扱わない。

港湾外郭施設や海岸施設の断面諸元の設定のために必要な検討項目として、波浪変形、反射波、越波・伝達波、波圧・波力、ケーソン等の滑動、消波ブロック等の移動、を検討の対象範囲とする。

1-4-3. 本研究で扱う水理模型実験の範囲

「1-4-2. 本研究で扱う検討対象範囲」に示した検討項目に対応する水理模型実験を対象範囲とする。従って、潮汐実験や地形模型を設置しない深海波の実験および浮体の動揺実験は対象外とする。

1-4-4. 本研究で扱う数値シミュレーションの範囲

本研究では港湾施設や海岸施設の断面諸元の設定のために、反射波、越波・伝達波、波圧・波力、ケーソン等の滑動、消波ブロック等の移動などを取り扱う。これらのうち少なくとも 1 項目は取り扱うことができ

る数値計算手法を本研究で取り扱う範囲とする。そのための最低条件として、水位などの時刻歴の出力ができる数値計算手法とする。

1-5. 水理模型実験と数値シミュレーションの特徴

波浪に関する水理模型実験は、実物を縮小模型で実験施設に製作し、波浪によって生じる物理現象を縮小模型で確認する行為である。実物の規模で実施する現地実験と比べて安価に行うことができる。現地実験と比べては安価であるけれども、水理模型実験の実施には決して安くはない費用がかかる。費用はかかるけれども、模型実験には実際の物理現象を目視で確認できる利点がある。ただし、小さな模型を用いることによる縮尺影響を避けることができない。したがって、実験結果の評価にあたっては、縮尺影響を考慮することが必要である。水理模型実験には縮尺の影響があるけれども、港湾や海岸の構造物の波浪に対する設計において、水理模型実験の結果に基づく算定式や算定図表が多く用いられていることから、水理模型実験は信頼性のある検討手法であると言える。

波浪に関する数値シミュレーションは、数値モデルを用いて計算機により数値実験を実施する行為である。一般的に、水理模型実験と比べると安価に実施することが可能である。ただし、計算の内容によっては実時間よりかなり多くの計算時間を要する。計算結果が実際の現象をどの程度適切に再現できているかを確認する必要がある、その確認手法として広く用いられている方法が水理模型実験との比較である。計算結果の再現性が確認されたのちには、計算条件を変更しての比較検討を行うことが可能である。数値計算技術が進歩してきた 2020 年現在においても、数値シミュレーションで再現し得る現象に限界がある。例えば、防波堤ケーソンの前面に設置する消波工の消波ブロックの安定性を、不規則波を作用させて数値シミュレーションで検討することは困難である。数値シミュレーションには様々な数値モデルがあり、検討対象とする条件に対して適切な数値モデルを選定する必要がある。また、同一の課題に対して複数の数値モデルで計算を実施して得られた結果が異なる場合に、どの結果を信用して採用すればよいか、判断が必要となる。

水理模型実験では、計測機器を設置した地点以外のデータを得ることができない。数値シミュレーションでは多くの地点のデータを得ることができる。

表 1-1 に波浪に関する水理模型実験と数値シミュレーションの特徴を示す。

水理模型実験と数値シミュレーションは、課題に対する検討の手法の

違いである。したがって、検討手法の違いはあっても、実験や計算で得られたデータの処理方法、解析方法、解析結果の検討内容についてはほぼ同じである。

模型実験と数値シミュレーションは、それぞれに得意点と不得意点（利点と欠点ともいえる）がある。どちらかの優劣をつけるものではなく、検討課題や検討環境に応じて適切な方法を選択すること、または模型実験と数値シミュレーションを組み合わせることで課題を解決していくことが望ましい。

表 1-1 波浪に関する水理模型実験と数値シミュレーションの特徴

水理模型実験	数値シミュレーション
実物を縮小模型で再現する。	数値モデルを用いて計算機により数値実験を実施する。
現地実験と比べて安価に検討を行うことができる。しかし、安くはない。	模型実験と比べると安価である。
造波・データ収録の時間は、模型縮尺に応じて実時間より短くなる。	計算の内容によっては実時間より多くの計算時間を要する。
模型で起こることは実際の物理現象である。	実現象の再現性についての確認が必要である。
実際の現象を目視で確認することができるので理解しやすい。	再現性が確認されたのちの条件変更による検討が可能である。
縮尺影響を避けることができない。	再現し得る現象に限界がある（例えば渦を厳密に計算することは困難である）。
実験施設を所有していないと実施が難しい。	複数の計算機を用意すれば同時に複数のケースの計算を実施できる。
計測機器を設置した地点以外のデータを得られない（データを得られる地点数に制約がある）。	多数の地点の結果を得ることができる。

参考文献

- 1-1) 国土交通省港湾局監修，公益社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2218p.，2018.
- 1-2) 永井康平，堀口孝男，高井俊郎：方向スペクトルをもつ沖波の浅海域における伝播の計算について，第21回海岸工学講演会論文集，pp.249-253，1974.
- 1-3) 平石哲也，上原功，鈴木康正：ブシネスク方程式を用いた波浪変形計算法の適用性，港湾技研資料，No.814，pp.3-22，1995.

- 1-4) 平成 23 年度ビジネスモデルによる波浪変形計算に関する勉強会，勉強会資料，平成 24 年 1 月，独立行政法人港湾空港技術研究所海洋研究領域波浪研究チーム，https://www.pari.go.jp/unit/haro/files/items/3781/File/H23d_paper.pdf，（参照 2020-04）
- 1-5) （財）沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究開発，沿岸開発技術ライブラリー，No.12，296p.，2001.
- 1-6) （財）沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発，沿岸技術ライブラリー，No.39，306p.，2012.
- 1-7) OpenCFD Ltd.: OpenFOAM, <https://www.openfoam.com/>, （参照 2020-04）
- 1-8) Shao, S., and Lo, E.: Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface, *Advances in Water Resources*, Vol.26, No.7, pp.787-800, 2003.
- 1-9) Koshizuka, S., and Oka, Y.: Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, *Nuclear Science and Engineering*, Vol.123, issue 5, pp.421-434, 1996.
- 1-10) 有川太郎，関克己，大木裕貴，平野弘晃，千田優，荒木和博，石井宏一，高川智博，下迫健一郎：階層型連成シミュレーションによる高精細津波遡上計算手法の開発，*土木学会論文集 B2(海岸工学)*，Vol.73，No.2，I_325-I_330，2017.
- 1-11) Arikawa, T., Chida, Y., Seki, K., Takagawa, T., and Shimosako, K.: Development and Applicability of Multiscale Multiphysics Integrated Simulator for Tsunami, *Journal of Disaster Research*, Vol.14, No.2, p. 225-234, 2019.
- 1-12) 五十里洋行，後藤仁志，小林裕司，藤原聖史：三次元高精度粒子法による海岸堤防裏法肩被覆ブロック離脱過程の数値解析，*土木学会論文集 B2(海岸工学)*，Vol.75，No.2，I-853-I_858，2019
- 1-13) 五十里洋行，後藤仁志，松島良太郎，丹羽元樹：MLS による応力補正を導入した弾塑性粒子法によるケーソン防波堤の津波越流洗掘解析，*土木学会論文集 B2(海岸工学)*，Vol.74，No.2，I_157-I_162，2018.
- 1-14) Reis, M.T., Neves, M.G., Hu, K., and Voorde, M.: Numerical And Physical Modelling of Wave Overtopping Over a Porous Breakwater, *Proc. of 18th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.691-697, 2008.
- 1-15) Jiang, X., Gu, H., and Li, Y.: Numerical Simulation on Hydraulic Performances of Quarter Circular Breakwater, *China Ocean Engineering*,

Vol.22, No.4, pp.585-594, 2008

- 1-16) Cavallaro, L., Dentale, F., Donnarumma, G., Foti, E., Musumeci, R.E., and Carratelli, E.P.: Rubble mound breakwater overtopping estimation of the reliability of a 3D numerical simulation, 33rd International Conference on Coastal Engineering, pp.1-9, 2012.
- 1-17) Altomare, C., Crespo, A.J., Rogers, B.D., Dominguez, J.M., Gironella, X., and Gesteira, M.G.: Numerical modelling of armour block sea breakwater with smoothed particle hydrodynamics, Computers & Structures, Vol.130, pp.34-45, 2014.
- 1-18) Ren, B., Jin, Z., Gao, R., Wang, Y-x., Xu, Z-l.: Sph-Dem modeling of the hydraulic stability of 2d blocks on a slope, J Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., 2013.
- 1-19) Coastal Wiki : Scaling Issues in Hydraulic Modelling, http://www.coastalwiki.org/wiki/Scaling_Issues_in_Hydraulic_Modelling, (This page was last edited on 29 July 2019, at 23:06.), (参照 2020-04)

2. 発注実績に見るデジタルシフトの現状把握

2-1. はじめに

近年では数値計算技術と計算機性能の向上により波動現象を数値シミュレーションで取り扱えるようになってきている。しかし耐波設計の分野において模型実験から数値シミュレーションへのデジタルシフトはあまり進んでいない。これについて感覚的には認識されているが定量的には示されていない。そこで、耐波設計分野におけるデジタルシフトの現状を定量的に把握するために、日本の国の機関からの調査設計業務の業務件数とその内訳を調査した。

2-2. 発注実績とデジタルシフトの現状

対象とした国の機関は国土交通省港湾局系列の機関と同系列の国立研究開発法人である。調査対象の期間は 2009 年から 2019 年である。表 2-1 に調査対象の業務件数とデジタル化率を示す。年ごとの業務件数の最大値は 733、最小値は 582、平均値は 648 である。年平均 648 のうち設計業務が 79、数値シミュレーションが 17、模型実験が 15 である。数値シミュレーションと模型実験の件数に占める数値シミュレーションの割合をデジタル化率と定義する。図 2-1 にデジタル化率の変化を示す。国の機関のデジタル化率は 0.4 から 0.6 の範囲で 10 年間変わらない。

“研究機関を除く”は 2009 年頃の約 0.45 が 2019 年頃には 0.75 に増大しており、デジタル化が進展している。研究機関は数値計算モデルの開発が進むと数値シミュレーションの発注件数が減りデジタル化率が低下する。図 2-2 に検討項目ごとの業務件数の変化を示す。波浪変形は模型実験より数値シミュレーションの業務件数が多く、デジタル化が進んでいる。反射波と越波は業務件数が少ない中で数値シミュレーションが模型実験より少ない。波圧波力は数値シミュレーションの業務件数が 1 件だけである。ブロック安定は数値シミュレーションの業務が皆無である。このように耐波設計に関する模型実験から数値シミュレーションへのデジタル化率は対象項目により異なる。波浪変形以外はデジタルシフトがあまり進んでいない。なお、波浪とは異なるが、高潮については模型実験の発注がなく、すべて数値シミュレーションで実施されている。

表 2-1 発注実績調査の業務件数

全体

研究機関を除く

	Physical	Numerical	Design	Overall		Physical	Numerical	Design	Overall
2009	16	14	69	611	2009	12	12	69	593
2010	12	15	59	619	2010	5	3	59	565
2011	17	21	62	582	2011	8	10	62	531
2012	22	20	71	626	2012	7	16	71	587
2013	20	25	111	733	2013	8	19	111	689
2014	12	16	90	641	2014	6	13	90	613
2015	13	15	83	631	2015	8	9	82	578
2016	11	12	82	631	2016	4	8	82	572
2017	17	12	73	658	2017	7	7	73	593
2018	14	13	73	677	2018	4	13	72	609
2019	13	20	92	717	2019	5	15	92	647
Average	15	17	79	648	Average	7	11	78	598

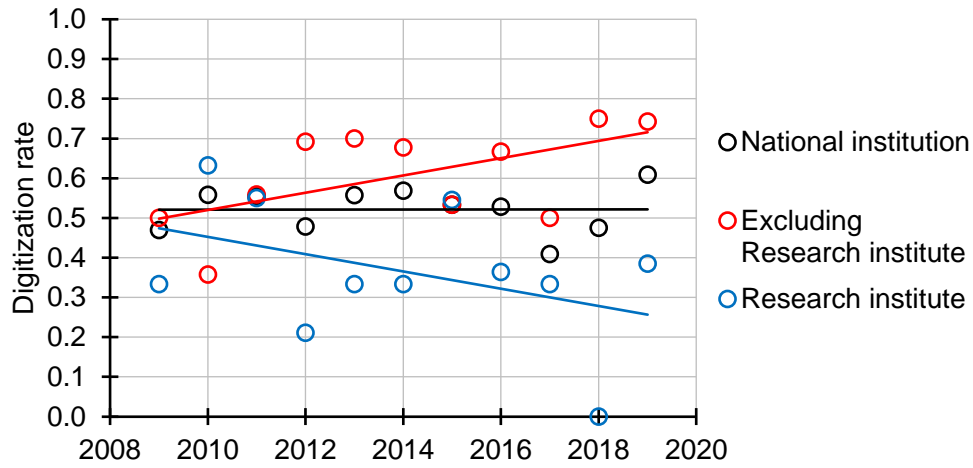


図 2-1 デジタル化率の変化

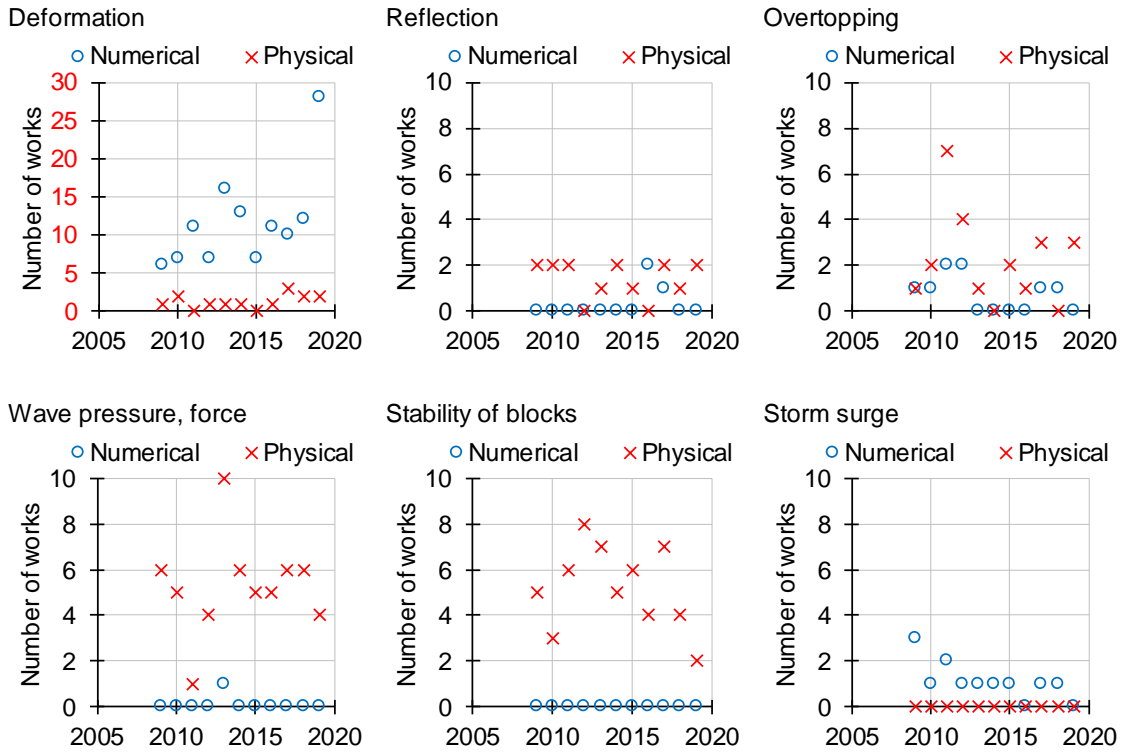


図 2-2 検討対象ごとの発注件数の変化

2-3. まとめ

模型実験から数値シミュレーションへのデジタルシフトの現状を把握するために、日本の国の機関からの調査設計業務の 2009 年から 2019 年の発注実績を調べた。数値シミュレーションと模型実験の合計件数に占める数値シミュレーションの割合をデジタル化率と定義した。発注実績に基づくデジタル化率は、0.4 から 0.6 の範囲で 10 年間変わらない。

耐波設計の対象項目によってデジタル化の進み具合に違いを生じている。

3. 数値シミュレーションと模型実験の変遷

3-1. はじめに

耐波設計の検討項目によって、模型実験から数値シミュレーションへのデジタルシフトの進み具合に違いを生じている要因として、数値計算手法が開発されてからの経過年数の違いが考えられる。そこで、耐波設計に関する数値シミュレーションの変遷を確認した。併せて模型実験の変遷も確認した。

3-2. 数値シミュレーションの変遷

3-2-1. 波浪変形に関する数値シミュレーション

港湾構造物の耐波設計を行う際には、施設設置位置に到達する波高を算定しなければならない。海底地形による屈折、陸地や構造物による回折の効果を考慮して構造物設置位置に到達する波高や波向きは、エネルギー平衡方程式による波浪変形計算で算定する方法が一般的である。エネルギー平衡方程式による波浪変形計算は 1970 年代半ばから適用され始めた¹⁻²⁾。水深が十分に大きい条件や海底地形が複雑では無ければ、エネルギー平衡方程式により到達波高を算定することで、設計上の問題は起こらない。したがって、港湾構造物への到達波高の検討方法は、1980 年代までに模型実験から数値シミュレーションへの移行が進んだ。しかし、急勾配地形において砕波を伴うような条件や海底地形が複雑な条件下ではエネルギー平衡方程式では到達波高を適切に算定することができず、1990 年代以降にも模型実験による到達波高の算定が行われてきた。一方で、砕波の効果を考慮することができる算定手法や、複雑な海底地形における波浪変形に対応できる数値計算手法の開発が進められた。それらの数値計算手法として、段階的砕波変形モデル³⁻¹⁾、ブシネスクモデル、数値波動水路 CADMAS-SURF/2D¹⁻⁵⁾や数値波浪水槽 CADMAS-SURF/3D¹⁻⁶⁾がある。弱非線形波浪変形計算手法であるブシネスクモデルは 1990 年代後半に開発された。複雑な条件における到達波高の算定は、2000 年代は模型実験とブシネスクモデルの双方が活用されていたが、2010 年代には模型実験で到達波高を求めることは非常に限られた条件だけになっていると考えられる。港湾構造物への到達波高の算定は、沖合からの波浪変形を考慮して算定する。そのような目的で CADMAS-SURF が適用された事例はない。

3-2-2. 水理性能に関する数値シミュレーション

石材層や消波ブロック層などの透過構造による反射波や、スリットケ

ケーソンなどの複雑な構造物による反射波は、それらの構造物の特性や形状を考慮できる計算手法を適用する。

防波堤等の港湾構造物の天端を波浪が乗り越えることで生じる越波伝達波、港湾施設の護岸や岸壁あるいは海岸護岸の天端を波浪が乗り越えることで生じる越波は、構造物の形状や消波ブロックによる消波工などの透過構造を考慮できる計算手法で算定する。

防波堤ケーソンなどに作用する波圧・波力は、砕波した波が構造物に衝突する現象を考慮できる計算手法で算定する。

上記の現象を考慮することが可能な計算手法はナビエ・ストークス方程式を適用した解法であり、CADMAS-SURF^{1-5),1-6)}、OpenFOAM¹⁻⁷⁾、粒子法^{1-8),1-9)}などがある。CADMAS-SURF と OpenFOAM は格子生成を必要とする VOF 法であり、粒子法は格子生成を必要としないラグランジュ法である。VOF 法ではスリットケーソンなどの構造物は、その形状を構造物セルとして再現し、石材層や消波ブロック層などの透過構造はポーラスセルとして設定する。粒子法では粒子を結合させて構造物の形状を表現する。したがって構造物の形状近似精度は粒子の大きさに依存するが、粒子を細かくすると粒子数が多くなるため、形状近似精度に限界がある。したがって、例えば、石材マウンドを消波ブロックで被覆した消波構造物の反射波の算定する場合に粒子法を適用することは難しく、2020 年時点では VOF 法が適していると言える。

越波・伝達波の算定に関して、弱非線形波浪変形計算のブシネスクモデルが越波を算定可能なように改良されている³⁻²⁾が、構造物の形状を十分に考慮することはできない。

CADMAS-SURF は 2 次元版が 2001 年に、3 次元版が 2012 年に公開されている。公開後には適用が広く進み、模型実験との比較も多数が報告されている。学会に投稿される論文の多くは研究目的や現象解明の内容である。設計実務への適用事例³⁻³⁾では、国土交通省の高潮対策整備事業において、CADMAS-SURF/2D を適用して越波を検討した事例が 2012 年に報告されている。この報告はソースコードの公開から 11 年が経過しており、CADMAS-SURF 単独での設計ではなく、模型実験と数値シミュレーションの併用が行われている。CADMAS-SURF による越波の検討は特定の現地を対象とした論文が複数報告されていることから、越波に関しては模型実験から数値シミュレーションへの移行が進んでいると考えられる。

CADMAS-SURF による波圧の算定に関しても、学会論文が多く投稿されている。ただし、数値シミュレーションの適用性の検討や津波を対

象とした内容の論文が多く、特定の現地を対象とした波浪による波圧を取り扱っている論文は少ない。したがって、波浪によって構造物に作用する波圧・波力を評価する設計実務において、模型実験から数値シミュレーションへの移行は、あまり進んでいないと考えられる。

3-2-3. 物体の移動に関する数値シミュレーション

混成式防波堤のケーソンの滑動、ケーソン前面に設置する消波ブロック層の変形、マウンド石材を保護する被覆ブロックの移動は、物体の動きを伴う現象である。計算格子を生成してナビエ・ストークス方程式を適用する計算手法では、物体の動きを取り扱うことができない。ケーソンなどの物体の移動を伴う現象を取り扱うためには、CADMAS-SURFとFEMによる構造・地盤計算と組み合わせたCADMAS-STR¹⁻¹⁰⁾や、計算格子を使用せず計算対象物を粒子の集まりとして表す粒子法によって計算を実施する。

マウンドの上に設置されているケーソンが津波の作用によって滑動を生じる現象は、CADMAS-STR¹⁻¹⁰⁾や粒子法^{3-4),1-13)}によって検討された事例がある。これらの事例はいずれも津波が対象とされている。波浪の作用に対するケーソンの滑動を対象とした事例は、国内では見られない。計算負荷の大きさが要因であると思われる。海外では規則波によるケーソンの滑動を2次元の粒子法で扱った事例³⁻⁵⁾が1件認められるが、計算条件や計算結果の詳細は確認できない。

ケーソン前面に設置する消波ブロック層の変形を取り扱った事例は、日本国内と海外の双方で認められない。主な要因は計算負荷の大きさによるとと思われる。例えば、A社の消波ブロックとB社の消波ブロックの安定性の比較を行う場合に、ブロックの形状の違いを考慮できる程度に解像度を高めることは容易ではない。

マウンド石材を保護する被覆ブロックの安定性に関しては、防波堤のマウンド法先の被覆ブロックに限定して、規則波の作用に対する安定性を粒子法で検討した事例³⁻⁶⁾がある。検討対象の被覆ブロックをマウンド法先に限定したのは、計算負荷の軽減のためと思われる。この事例の計算は規則波で実施されているが、ブロックの安定性を評価する模型実験の標準的手法として港湾基準¹⁻¹⁾に指定されている、「作用波数は1000波以上」、「波群を変えて3回以上の繰り返し」を数値シミュレーションで実現することは困難と思われる。

以上のように、物体の動きを伴う現象を数値シミュレーションで算定することは、設計実務に適用できる段階ではない。

3-2-4. 数値計算手法開発からの経過年数の影響

図 3-1 に港湾構造物の耐波設計のための数値シミュレーションの変遷を示す。青の矢印は研究や開発が始まった時期を示している。赤の矢印は耐波設計に適用され始めた時期を示している。波浪変形に関する数値シミュレーションは開発開始から 10 年程度で耐波設計への適用が開始されている。反射波、越波、伝達波、波圧、波力を算定可能な VOF は開発開始から設計への適用開始に 30 年を要している。粒子法の SPH は開発開始から 40 年が経過した 2020 年にも設計への適用が始まっていない。このように数値計算手法開発からの経過年数は対象項目によりデジタル化の進み具合に違いを生じる要因ではないことが確認された。

図 3-2 に数値計算手法と耐波設計項目との対応を示す。波浪変形は、ナビエ・ストークス方程式を適用しない計算手法で実施が可能である。反射波、越波、伝達波、波圧・波力などの水理性能については、VOF 法の適用が必要である。ケーソンの滑動や消波ブロックの安定性の検討は物体の移動を伴うので、水理性能よりも検討が難しい。このような検討項目による難易度の違いが、耐波設計の対象項目によるデジタル化の進み具合の違いに表れている。

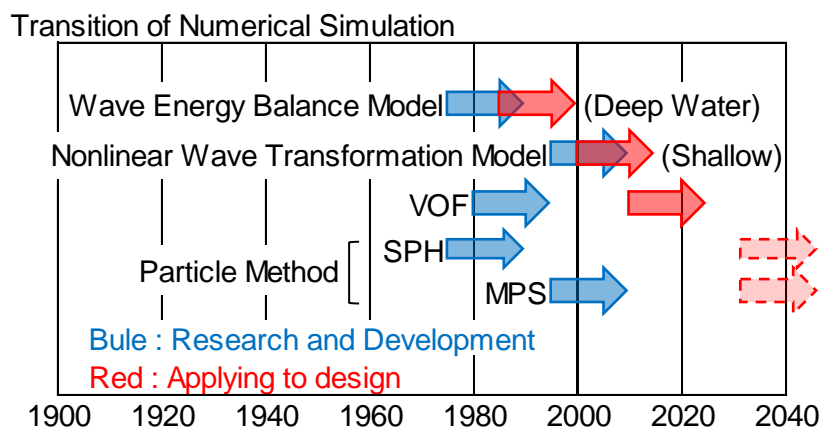


図 3-1 波浪に関する数値シミュレーションの変遷

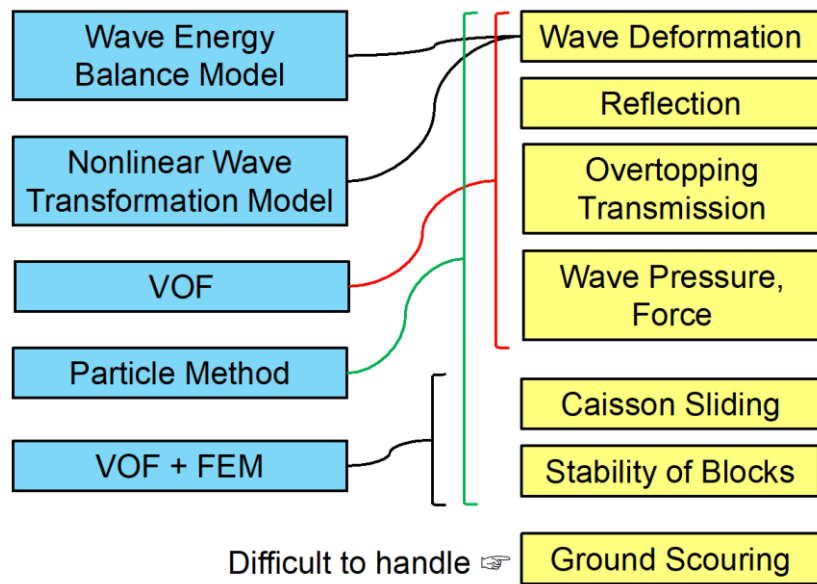


図 3-2 数値計算手法と耐波設計項目との対応

3-3. 水理模型実験の変遷と実験施設

3-3-1. 波浪に関する水理模型実験の変遷

港湾施設設計のための波浪に関する水理模型実験が開始された初期の実験施設の状況を把握するために、港湾や海岸に関する水理模型実験施設の発足や水理模型実験による研究事例等について確認した。この確認において、既往の書籍^{3-7)・3-8)}の記述を引用するほかに、論文の検索などにより情報を収集した。表 3-1 にその成果を年表として示す。初期段階の主要な施設の設置の確認を目的として、確認の対象を 1985 年までとした。表 3-1 に採用した論文等は^{3-9)・3-10)・3-11)・3-12)・3-13)・3-14)}である。

水理模型実験施設が最初につくられたのは 1914 年のドイツで、1927 年のオランダ、アメリカ、フランスと続いている。1914 年のドイツのハノーバー工科大学フランチウス水理研究所では 2020 年現在も活発に研究活動が行われており、ハノーバーで開催された Coastal Structures 2019 のテクニカル・ツアーの見学先とされた。日本国内では内務省土木試験所赤羽分室がオランダ等とほぼ同時期の 1926 年に設置された。土木試験所から波浪に関する水理模型実験が報告されたのは 1939 年³⁻⁹⁾が最初である。港湾技術研究所（現：港湾空港技術研究所および国土技術政策総合研究所横須賀庁舎）に 1956 年に設置された 105 m 造波水路と 1960 年に設置された台風防災実験水路は、設置から 60 年が経過した 2020 年現在でも稼働している。

表 3-1 実験施設の発足や研究事例等の年表

西暦	できごと
1914	ハノーバー工科大学フランチウス水理研究所（ドイツ）
1916	水路・波力実験ステーション（インド）
1926	内務省土木試験所・水工部門（赤羽分室）
1927	デルフト水理研究所（オランダ）
1927	水路実験ステーション（アメリカ）
1927	ネールピック(社)水理試験所（フランス）
1937	内務省北海道庁土木試験室
1939	港湾実験室（スペイン）
1939	内務省土木試験所報告に波浪実験が報告される
1946	国立水理研究所（フランス）
1946	内務省鉄道技術研究所第七部港湾研究室
1947	国立水理研究所（イギリス）
1947	国立土木研究所（ポルトガル）
1947	北海道庁土木試験室→北海道土木試験所
1948	土木試験所→建設省土木研究所
1950	海岸工学国際会議第1回が開催される
1950	運輸省運輸技術研究所（港湾物象部、港湾施設部）
1950	国立水理研究所（カナダ）
1951	北海道土木試験所→北海道開発局土木試験所
1954	海岸工学講演会第1回が開催される
1956	105m造波水路設置
1960	台風防災実験水路設置
1960	ノルウェー工科大学に不規則波造波装置設置
1961	土木研究所に鹿島水理試験所を設置
1961	農林省農業土木試験場設立
1962	国立水工研究所・海岸部門（ドイツ）
1962	運輸省港湾技術研究所
1963	不規則波造波装置設置
1964	デンマーク水理研究所（デンマーク）
1967	海岸工学論文集に不規則波実験が報告される
1969	デルフト水理研究所に不規則波造波装置設置
1970	土木研究所と京大防災研に不規則波造波装置設置
1971	大型水工実験場竣工
1971	不規則波造波装置設置（直流モータ制御）
1977	農業土木試験場が谷田部町に移転
1979	土木研究所が筑波研究学園都市に移転
1981	ソルターの多方向不規則波造波装置
1982	大水深海洋構造物実験棟竣工
1984	多方向不規則波造波装置設置
1985	津波造波機設置

できごとの分類

黒：海外の実験施設・研究所発足

緑：港湾技術研究所の施設

青：国内の実験施設・研究所発足

赤：研究事例等

橙：造波技術等

図 3-3 に、1954 年に始まった海岸工学講演会における波浪に関する水理模型実験の論文数の、1970 年までの推移を示す。不規則波実験が開始された時期を確認する目的で 1970 年までとした。模型実験に関する論文は、第 1 回から投稿されている。第 1 回の 1954 年は平面実験のみ、1957 年までは平面実験と断面実験がほぼ同数であるが、1958 年以降は断面実験が多くなっている。不規則波実験が報告されたのは 1967 年³⁻¹⁰⁾が最初で 1969 年までは年間 1 編であるが、1970 年には複数報告されている。

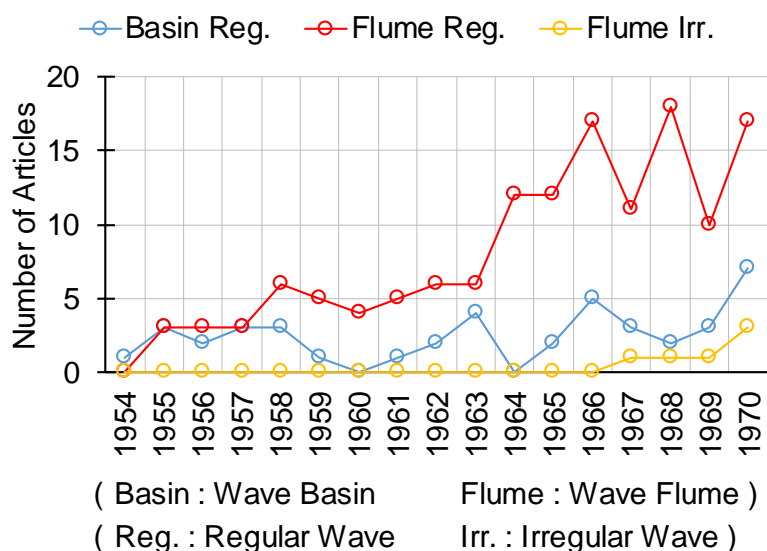


図 3-3 海岸工学論文集の波浪に関する模型実験の論文数

水理模型実験施設を用いた近年の研究状況を確認するために、土木学会論文集の B2（海岸工学）と B3（海洋開発）に投稿されている論文から、波浪に関する水理模型実験が実施されているものを抽出して、その内容を確認した。ただし、過去に実施された水理模型実験のデータを引用しているものは除外した。津波に関する水理模型実験を含めたが、潮汐および潮流に関する実験は除外した。表 3-2 に 2009 年、2017 年、2018 年に発表された水理模型実験に関する論文の、論文数、実験目的、造波装置、その他装置、外力種類を示す。なお、造波装置の形式が不明な論文は数えていないため、造波装置の合計数が論文数より少ない。

水理模型実験から数値シミュレーションへの移行が進みつつある中で水理模型実験の実施件数の減少が想定されるが、土木学会論文集 B2（海岸工学）および B3（海洋開発）への投稿件数として見る限りでは、10 年前と比べて水理模型実験の実施件数が減少していない。実験目的では、2009 年に件数が多い現象把握、工法開発、数値モデル開発が 2017

年と 2018 年には減り、海浜変形の検討と底質移動の検討が増えている。また、2017 年の B2 で港湾構造物の検討と海岸構造物の検討が多いことも特徴として挙げられる。造波装置は件数に若干の違いはあるものの、装置の内容は 10 年前と比べてほとんど変化がない。すなわち、二次元造波水路の造波機は反射波吸収機能の導入以降、平面造波水槽は多方向不規則波の導入以降に、大きな変化がない。

造波装置以外の外力発生装置は、2009 年には少なかった還流装置、ゲート急開、チャンバー型が 2017 年と 2018 年では増えている。これは 2011 年の東北地方太平洋沖地震に伴う津波（以降、「東日本大震災」と称す。）以降に津波の実験が増えたためである。前述したように 2017 年の B2 で港湾構造物の検討と海岸構造物の検討が多いのも、津波実験が多く実施されたためである。2017 年に津波実験が多いことは、外力種類において 2017 年は孤立波、半周期長周期波、段波、越流、流れが多いことから裏付けられる。

風波の実験について、2009 年には不規則波実験よりも規則波実験が 3 倍近く多い。これは 2009 年には工法開発と数値モデル開発に分類される実験が多いためと言える。2017 年と 2018 年には工法開発と数値モデル開発が減っているけれども、不規則波より規則波の実験が多いことから、不規則波造波装置が普及した後にも、研究目的においては規則波が多く活用されていると言える。

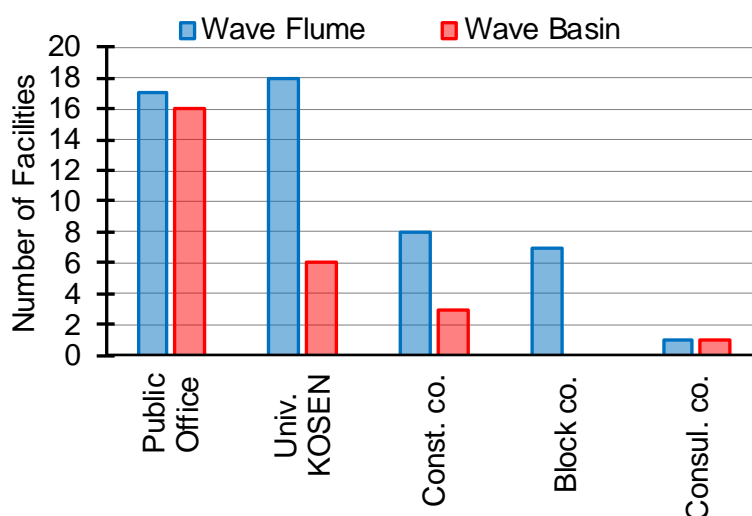
表 3-2 土木学会論文集 B2, B3 における近年の水理模型実験の内容

発表年		2009		2017		2018	
土木学会論文集		B2	B3	B2	B3	B2	B3
水理模型実験に関する論文数		35	34	61	26	49	24
実験目的	港湾構造物の検討	10	9	22	4	9	12
	海岸構造物の検討	4	4	14	6	4	5
	陸上構造物の検討	3	0	6	1	9	1
	海浜変形の検討	1	1	6	2	7	0
	底質移動の検討	0	0	8	3	10	2
	浮体の検討	2	2	0	0	2	0
	現象把握	7	10	0	8	1	2
	実験手法の構築	0	0	1	0	2	2
	実験装置の開発	0	1	2	0	0	0
	工法開発	4	2	1	2	0	0
	数値モデル開発	3	2	0	0	0	0
造波装置	ピストン型	7	12	15	3	5	4
	フラップ型	0	1	1	0	3	1
	プランジャー型	1	0	0	0	1	1
	多方向型	5	1	1	1	0	0
その他装置	還流装置・ポンプ	1	1	13	5	8	3
	ゲート急開・貯水式	2	1	9	3	6	1
	チャンバー型	0	0	3	1	1	1
	遠心載荷	0	1	2	4	2	4
	振動台	0	0	1	0	0	1
	物体突入	0	0	0	0	2	0
外力種類	規則波	22	19	15	6	13	6
	不規則波	8	7	9	3	10	9
	孤立波、半周期長周期波	4	1	6	4	4	3
	段波	3	1	6	4	5	1
	長周期波	0	2	1	0	0	1
	越流	0	0	7	3	0	2
	流れ	0	2	11	5	5	0

3-3-2. 水理模型実験施設

海外と国内の港湾・海岸等に関する水理模型実験を実施する実験施設を、インターネット検索で確認した。この原則に従うために、事前に把握していた施設についても出典をインターネット検索とした。検索対象は、造波装置を有する断面実験用の造波水路と平面実験用の造波水槽である。港湾・海岸施設等の模型実験用を対象としており、船舶用の実験施設は除外した。また、著者自身が実験施設の存在を把握していても、インターネット検索で確認できない施設は対象外とした。写真や記述により実験施設の存在を確認できても、施設規模や造波性能の記述が全くない施設も対象外とした。

図 3-4 に日本国内の水理模型実験施設数を示す。検索で確認できない施設もあるため、水理模型実験施設の日本国内の総数ではない。公官庁には国立研究開発法人と財団法人を含めてあり、公官庁のほとんどが研究機関である。造波水路は公官庁（Public Office）と大学・高専（Univ. KOSEN）が多く、研究目的で造波水路が活用されていることがわかる。建設会社（Const. co.）とブロック会社（Block co.）の造波水路数が公官庁の約 1/2 に及んでいない。造波水槽は公官庁が圧倒的に多く、第 2 位の大学・高専が公官庁の半分以下である。建設会社でも 3 件が確認できるが。造波水槽を所有しているブロック会社は確認できなかった。

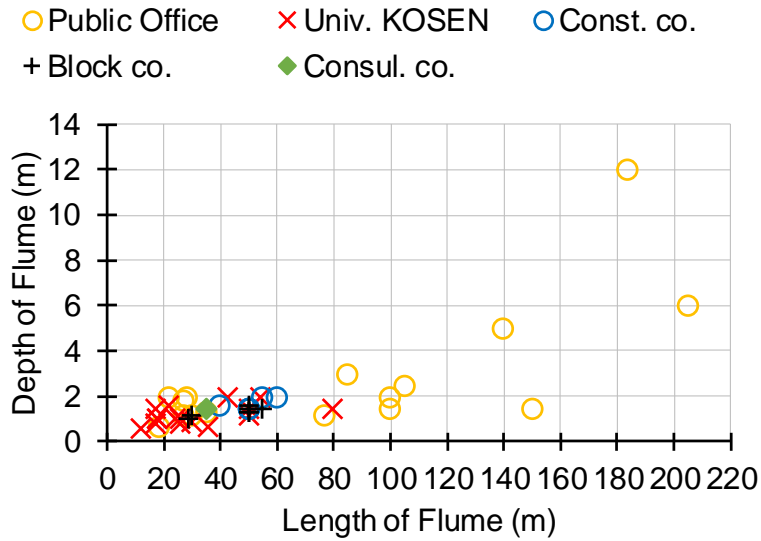


Univ. : University KOSEN : National Institute of Technology
 Const. co. : Construction Company
 Block co. : Block Company
 Consul. co. : Construction Consultants Company

図 3-4 日本国内の水理模型実験施設数

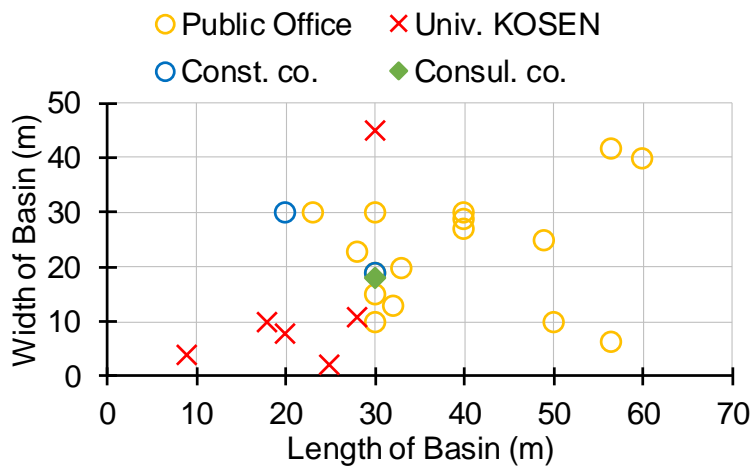
図 3-5 に日本国内の造波水路の規模を示す。公官庁（Public Office）の造波水路がその他と比べて大きな施設が多いことがわかる。造波水路数が最も多い大学・高専は（Univ. KOSEN）、造波水路の規模が小さいものが多い。建設会社（Const. co.）の造波水路は長さが 40～60 m で、ブロック会社（Block co.）の 29～55 m よりやや大きい。

図 3-6 に日本国内の造波水槽の規模を示す。公官庁の造波水槽が大きく、大学・高専の造波水槽は小さい傾向が明確である。建設会社と建設コンサルタントの造波水槽の大きさは、公官庁と大学・高専の境界に相当する。



Univ. : University
 KOSEN : National Institute of Technology
 Const. co. : Construction Company
 Block co. : Block Company
 Consul. co. : Construction Consultants Company

図 3-5 日本国内の造波水路の規模



Univ. : University
 KOSEN : National Institute of Technology
 Const. co. : Construction Company
 Block co. : Block Company
 Consul. co. : Construction Consultants Company

図 3-6 日本国内の造波水槽の規模

図 3-7 に海外と日本の造波水路の規模を示す。水路の高さと長さの比は 1:40 程度を中心に分布していて、この比に海外と日本に違いは見られない。図中の数値は大きめの施設が設置された年であり、造波水路は

年々大きくなっていることがわかる。海外と日本のどちらも、長さが 125 m 未満と 125 m 以上のグループに分かれている。125 m 以上のグループは日本の 140 m～205 m に対して海外は 291 m～456 m であり、海外の造波水路が日本より大きい。長さが 125 m 未満の造波水路規模の分布をみると、日本国内より海外がやや大きい傾向が認められる。なお、図 3-7 に設置年を示した造波水路は、1956 は港湾空港技術研究所の 105 m 造波水路、1979 は電力中央研究所の大型造波水路、1983 はドイツのハノーバー工科大学フランチウス水理研究所の G.W.K.³⁻¹⁵⁾、2000 は港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路、2015a はオランダの Deltares の Delta Flume³⁻¹⁶⁾、2015b は中国の大比尺波浪水槽³⁻¹⁷⁾である。また、港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路では、2013 年に振動装置が併設され、従来からの波と流れに加えて地震動も考慮できる複合的な外力に対応する施設となった³⁻¹⁸⁾。

図 3-8 に造波水路長深比の度数分布を示す。全体的には L/D が 30 を中心に分布している。水路長が 50 m 未満の施設は L/D が 25 に多く分布し、水路長が 50 から 100 m は L/D が 35 を中心に分布している。水路長が 100 m 以上は L/D が幅広く分布していて、L/D が 100 の施設もある。すなわち、施設規模が大きいほど L/D が大きい。

図 3-9 に海外と日本の造波水槽の規模を示す。海外の幅が 60 m で長さが 150 m の造波水槽は突出して大きい。全体的な分布として、造波水槽の幅と長さの比はさまざまであり、一定の傾向は見られない。日本国内の造波水槽は、幅は 45 m、長さは 60 m が最大であるが、海外は突出して大きい施設を除くと、幅が 50 m、長さが 80 m が最大であり、日本国内最大級よりやや大きい。

縮小模型を使用して実施する水理模型実験で生じる scale effect を小さくするためには実験模型を大きくすることが必要である。しかし、大きな実験施設における模型実験は、施設の建設費用と維持費用が高額である、模型製作に時間と費用がかかる、などの経済的な観点と、造波機等の駆動のための消費電力量が多い、模型撤去処分時に発生する廃棄物が多い、などの環境的な観点から、実験施設の大型化は限界に近付いていると考えられる。造波機の消費電力量については、長さが約 50 m 幅が約 1 m、高さが約 1.5 m の造波水路で約 7.5 kW に対し、図 3-7 に 2000 で示した水路は 880 kW であり、消費電力量が一般的な施設の 100 倍以上である。

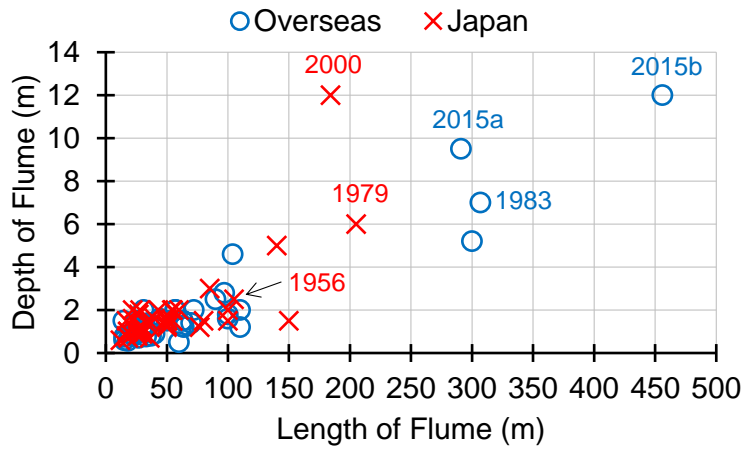


図 3-7 海外と日本の造波水路の規模

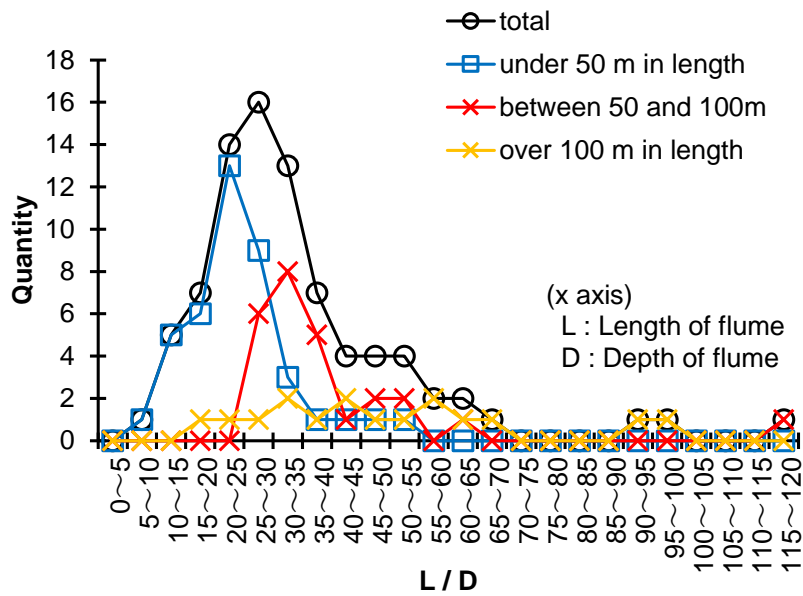


図 3-8 水路長深比の度数分布

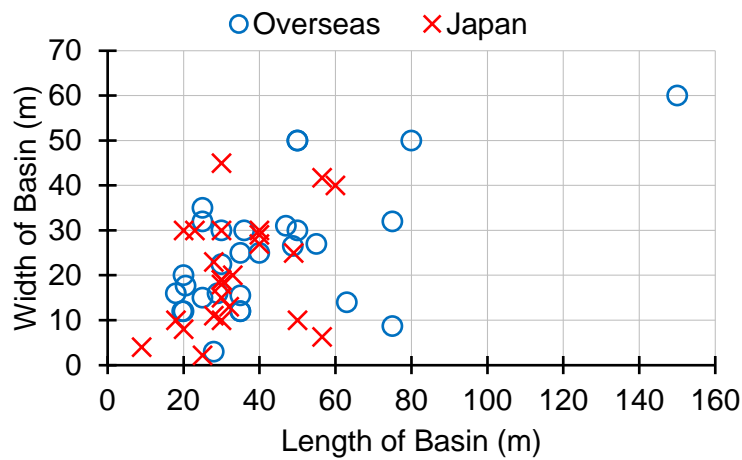


図 3-9 海外と日本の造波水槽の規模

3-3-3. 実験施設規模（模型縮尺）の影響

Streicher ら³⁻¹⁹⁾は海岸堤防に設置されている直立壁に作用する衝撃力について、大縮尺実験と中縮尺実験（原文では *small-scale*）で比較を行っている。模型縮尺は大縮尺が 1/4.3 で、中縮尺が 1/25 である。研究の成果として、「衝撃力の測定におけるスケールに関連した不確かさは、非反復性とモデル効果に関連した不確かさの中に消えてしまう」としている。すなわち、1/25 縮尺の模型も有用であることを示している。なお、大縮尺の模型実験は、図 3-7 に「2015a」で示す施設で実施された。

Hudson³⁻²⁰⁾は Rubble Mound Breakwater の Armor Stone の小規模実験による安定数 N_s を波高が 1.22 m までの大規模実験と比較した。その結果として、レイノルズ数 Re が 3×10^4 以上であれば *scale effects* を無視できることを示している。このレイノルズ数は Hudson³⁻²⁰⁾の論文の実験では 1/45 縮尺に相当する。Hudson³⁻²⁰⁾は現地と模型実験の波作用による防波堤の被災を二つの地点で比較している。一つ目は、被覆材の移動と最終形状が現地と実験で似ていることと、模型実験における *breakwater material* の移動は現地よりやや多い結果を示している。二つ目は、1/30 縮尺の模型実験のダメージがレイノルズ数が 6.4×10^4 の現地とよく一致している結果を示している。

関ら³⁻²¹⁾は捨石防波堤に規則波または不規則波を作用させた実験を 3 種類の模型縮尺で実施した。小縮尺実験は 1/50 縮尺で規則波が作用させられた。中縮尺実験は 1/25 縮尺で規則波と不規則波が作用させられた。大縮尺実験は 1/9 縮尺で不規則波が作用させられた。これらの 3 種類の縮尺の実験において、エネルギー損失量、反射率、透過率に関して明確な違いがないことが示している。なお、大縮尺実験は図 3-7 に「2000」で示す施設で実施された。

これら 3 件の研究の結果を考慮すると、中縮尺の実験でも耐波設計に適用が可能な精度が得られると言える。したがって、長さが 300 m を超えるような造波水路のさらなる大型化は必要ないと考えられる。また、長さが 50 m 程度で高さが 1.5 m 程度の中規模な造波水路での模型実験でも十分な精度が得られると言える。

3-4. まとめ

第 3 章では、港湾構造物の耐波設計に関する数値シミュレーションと水理模型実験の変遷について確認した。それぞれのまとめを以下に示す。

3-4-1. 数値シミュレーションの変遷のまとめ

波浪に関する数値シミュレーションの変遷の要約は前出の図 3-1 のとおりである。数値シミュレーションは、まず波浪変形計算が模型実験に代わって耐波設計に適用されるようになった。2010 年代からは VOF 法が耐波設計に適用されるようになった。粒子法の SPH と MPS は研究目的で実施されているが、2020 年現在では耐波設計の実務に適用されていない。

港湾構造物に到達する波高を算定する波浪変形は、海底地形が非常に厳しいなどの条件を除けば、模型実験から数値シミュレーションへの移行が済んでいる。防波堤などの構造物からの反射波や越波に関しては、模型実験から数値シミュレーションへの移行がかなり進んでいる。構造物に作用する波圧・波力に関しては、津波の作用については数値シミュレーションの実施事例が多いが、波浪の作用については特定の現地を対象とした数値シミュレーションの事例が少なく、模型実験から数値シミュレーションへの移行にはもう少し時間がかかる。ケーソンの滑動に関しては、津波の作用による検討事例はあるけれども、波浪の作用による検討事例はほとんどなく、模型実験から数値シミュレーションへの移行はほとんど進んでいない。防波堤ケーソンの前面を被覆する消波ブロック層の変形に関しては、計算負荷の大きさを考えると、計算機性能の革新的な進歩が必要であるなど、模型実験から数値シミュレーションへの移行について、先を見通すことが難しい状況である。

3-4-2. 水理模型実験の変遷のまとめ

波浪に関する水理模型実験の変遷を要約すると図 3-10 のとおりである。港湾施設設計のための波浪に関する水理模型実験の施設が最初に作られたのは、海外では 1914 年、日本国内では 1926 年である。すなわち、2020 年時点でおおよそ 100 年の歴史がある。日本国内で波浪に関する水理模型実験の最初の報告は、内務省土木試験所から 1939 年に行われている。不規則波実験は 1960 年代に開始され、多方向不規則波の実験は 1980 年代に開始されている。

造波水路の高さと長さの比は 1:40 を中心に分布しており、この比率に海外と日本の違いは見られない。造波水路の大きさは突出して大きい 1 施設を除くと、長さが 300 m、高さが 12 m が最大級である。

平面水槽の大きさは、日本国内では長さは 50 m、幅は 45 m が最大級である。海外では突出して大きい 1 施設を除くと長さが 80 m、幅が 60 m が最大級である。

縮小模型における scale effect を小さくするためには実験模型を大きくすることが必要であるが、実験施設の大型化は限界を迎えていると考えられる。大規模実験、中規模実験、小規模実験の結果の比較が行われ、1/50 から 1/25 の縮尺でも十分な精度が得られることが確認されている。

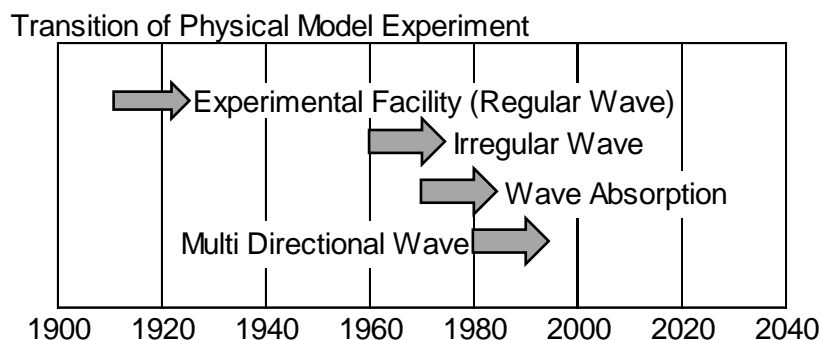


図 3-10 波浪に関する模型実験の変遷

参考文献

- 3-1) 合田良実：段階的碎波係数を用いた不規則波浪変形計算モデルの改良，海洋開発論文集，第 19 巻，pp. 141-146，土木学会，2003.
- 3-2) 平山克也，長谷川巖：ブシネスクモデルによる護岸越波・浸水過程に関する再現計算，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.67，No.2，pp.I_262-I_267，2011.
- 3-3) 梅崎康浩，小島治幸，南正治，鬼童孝，白井博己，笹井剛，石本健治，松原弘晃：二重パラペット型護岸（透水型）に対する数値波動水路と水理模型実験を用いた効果的な設計に関する考察，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，pp.I_741-I_745，2012.
- 3-4) 後藤仁志，五十里洋行，原口和靖，中島寿，殿最浩司，石井倫生：混成防波堤の越流破壊解析と対策工検討のための粒子法型数値波動水槽の開発，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，pp.I_881-I_885，2013.
- 3-5) Rogers, B.D. Dalrymple, R.A. Stansby, P.K. : Simulation of Caisson Breakwater Movement Using 2-D SPH, Journal of Hydraulic Research, 48(1) supplement 1, pp.135-141, 2009.
- 3-6) 後藤仁志，原田英治，五十里洋行，大江一也，安岡恒人：粒子法と DEM の融合モデルによる被覆ブロック群の耐波安定性評価，土木学会論文集 B, Vol.66，No.3，pp.258-267，2010.
- 3-7) 合田良実：海岸工学【その誕生と発展】，200p，技報堂出版，2012.

- 3-8) 港湾技術研究所 30 年史編集委員会：港湾技術研究所三十年史，502p，1992.
- 3-9) 本間仁：波による河口付近の砂の移動に関する実験，土木試験所報告第 46 号，pp.29-48，内務省土木試験所，1939.
- 3-10) 前田清康：実験波の不規則性，第 14 回海岸工学講演会論文集，pp.49-52，土木学会，1967.
- 3-11) 岩垣雄一，村上仁士，酒井哲郎，木村晃：電気油圧式不規則波発生機について，第 17 回海岸工学論文集，pp.409-414，土木学会，1970.
- 3-12) 土木研究所の沿革，https://www.pwri.go.jp/jpn/about/history/enkaku_1.html，（参照 2019-03-24）
- 3-13) 寒地土木研究所の沿革，<http://www.ceri.go.jp/contents/about/about01.html>，（参照 2019-03-24）
- 3-14) 農業工学研究所の沿革，<http://www.naro.affrc.go.jp/introduction/profile/history/history14.html>，（参照 2019-03-24）
- 3-15) 木村克俊：ドイツ・ハノーバー大学における港湾研究について，開発土木研究所月報，No.477，pp.20-24，土木研究所寒地土木研究所，1993.
- 3-16) Delta Flume，<https://www.deltares.nl/en/facilities/delta-flume/>，（参照 2019-03-24）
- 3-17) 大比尺波浪水槽，<http://www.tiwte.ac.cn/txtContent.aspx?cateid=95&bigcateid=68>，（参照 2019-03-24）
- 3-18) 有川太郎，下迫健一郎：港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路-大規模実験の研究成果と社会的役割について，日本マリンエンジニアリング学会誌，第 49 巻，第 3 号，pp.63-68，2014.
- 3-19) Streicher M., A. Kortenhaus, C. Altomare, S. Hughes, K. Marinov, B. Hofland, X. Chen, T. Suzuki, L. Cappietti : STUDY OF UNCERTAINTIES IN LABORATORY WAVE IMPACT MEASUREMENTS ON DIKE MOUNTED WALLS DUE TO NON-REPEATABILITY, SCALE AND MODEL EFFECTS, Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2019.
- 3-20) Hudson R. Y. : RELIABILITY OF RUBBLE-MOUND BREAKWATER STABILITY MODELS, MISCELLANEOUS PAPER H-75-5, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1975.
- 3-21) 関克己，有川太郎，水谷雅裕，平山克也：捨石傾斜堤におけるエネルギー損失量に関する実験的検討，港湾技術研究所資料，No.1229，2011.

4. デジタルシフトの現状と課題

4-1. はじめに

波浪変形以外の項目については模型実験から数値シミュレーションへのデジタルシフトが進んでいない。そこで、港湾構造物の耐波設計に用いる模型実験から数値シミュレーションへの移行に関する考えについて、ヒアリング調査を実施した。

4-2. ヒアリング調査によるデジタルシフトの現状把握

ヒアリングの相手は、波浪変形の研究者、港湾構造物の研究者、海浜変形の研究者、港湾行政の現職者とOB、民間企業の設計技術者と数値計算技術者である。ヒアリング調査は、ヒアリング相手を訪問して対面による方法で実施した。ヒアリングの結果は以下のとおりである。

1) 数値シミュレーションへの移行に対する現状

波浪変形と漂砂については模型実験から数値シミュレーションへの移行が進んでいる。

耐波設計に関しては数値シミュレーションに移行できる段階に達していない。

2) 耐波設計において数値シミュレーションへの移行が進まない要因

数値シミュレーションは信頼性がまだ十分ではない。

数値シミュレーションの実施に時間がかかる。

3) 模型実験と数値シミュレーションの関係

水理現象を実際に生じさせて目で見ることができる模型実験は信頼性がある。

数値シミュレーションの精度向上や結果の検証のデータとして実験結果を使用している。すなわち、数値シミュレーションよりも模型実験を信用している。

数値シミュレーションの精度が不足する現象や多くの計算時間を要する現象であれば、模型実験を実施する。

4) 2020年時点での数値シミュレーションの限界

数値シミュレーションは模型実験や現地のデータと一致するように計算条件の調整が必要である。それは数値シミュレーションは完全ではないことを意味する。

越波の現象ではうち上がりやしぶきを再現することが難しい。

波圧の現象では空気を巻き込む現象の再現が難しい。

消波ブロックの安定を数値シミュレーションで取り扱うことは難しく、模型実験に頼らざるを得ない。

3次元的な現象を数値計算で取り扱うことはまだ難しい。

5) 移行が可能となる条件

計算条件の調整や計算結果の検証を行う必要がなくなる程度に計算の精度が高まること。

1 ケースの計算が 1 から 2 時間で終了すること。

3次元のシミュレーションを手軽に実行できるようになること。

4-3. まとめ（デジタルシフトに向けての課題）

ヒアリングによって得られた意見は、予想以上に数値シミュレーションの信頼性の不足の指摘が多かった。数値シミュレーションの実施にかかる時間が長いことも、模型実験から数値シミュレーションへの移行の障害になっている。したがって、模型実験から数値シミュレーションへの移行を実現するためには、数値シミュレーションの精度の向上と計算時間の短縮が必要である。

5. 数値シミュレーションの精度と計算時間

5-1. はじめに

港湾構造物の耐波設計に関して、模型実験から数値シミュレーションへの移行を促進するためには、計算精度の向上と計算時間の短縮が必要であることが確認された。そこで複数の検討項目に対して数値シミュレーションを実施し、計算精度と計算時間を検証した。計算精度の検証は、数値シミュレーション結果を模型実験結果と比較することにより実施した。本研究は設計実務への数値シミュレーションの適用を検討する内容である。したがって計算機は研究目的の数値計算に用いる高性能なものではなく、通常のデスクトップパソコンを用いた。以降の各節において、比較対象の模型実験、模型実験を再現する数値シミュレーションの内容と計算精度、計算時間、の順に示す。

5-2. 波浪変形に関する精度と計算時間

防波堤などの港湾構造物の耐波設計を行う際に、施設に到達する波高を特定する必要がある。そのためには水深などによる波浪変形を考慮して、施設に到達する波高を算定する。

5-2-1. 波浪変形に関する断面模型実験

数値シミュレーションによる波浪変形の再現対象データとして、2次元造波水路における波浪変形実験について示す。ここに示す実験データは、2次元造波水路内に海底床模型を設置してあるが、防波堤等の構造物模型は設置していない状態で、海底床模型上の波高分布を測定したものである。

実験は、長さ 35 m、幅 1.0 m、高さ 1.5 m の 2次元造波水路で実施した。この造波水路には、反射波吸収機能付きのピストン型造波機が設置されている。

図 5-1 に造波水路と模型床の形状を示す。この図の横軸は造波板中立位置からの距離で示している。模型床斜面の法先位置は造波板から 15.81 m の地点である。模型床の高さは 0.75 m で勾配は 1:5 である。従って斜面の長さは 3.75 m である。模型床天端水平部の長さは 6.00 m なので、模型床の終端は造波板中立位置から 25.56 m である。実験水位は造波板前面で 0.875 m である。図 5-1 には波高測定位置も示してある。造波板前面の波高測定位置は、造波板中立位置から 4.875 m と 5.205 m である。模型床上の波高測定位置は、造波板中立位置からの距離で、15.81 m、17.685 m、17.96 m と、17.96 m から 22.56 m までは 0.20 m

間隔である。波高測定には容量式波高計を使用した。

実験波の条件は、造波板前面の2地点の水位データを用いた入・反射波の分離計算⁵⁻¹⁾を実施した後の入射波として、有義波高が14.44 cm、有義波周期が1.49 sの不規則波である。

波浪データの収録条件は、データの収録間隔が0.04 s、データ収集数が8192であり、約240波のデータを収録した。平均波の周期は有義波周期の1/1.1程度の1.36 sとするとデータ収録間隔は平均周期の1/34であり、 $0.04 \times 8192 = 327.68$ sは平均周期の約240倍である。

各地点で測定した波高と周期の空間分布を図5-2および図5-3に示す。

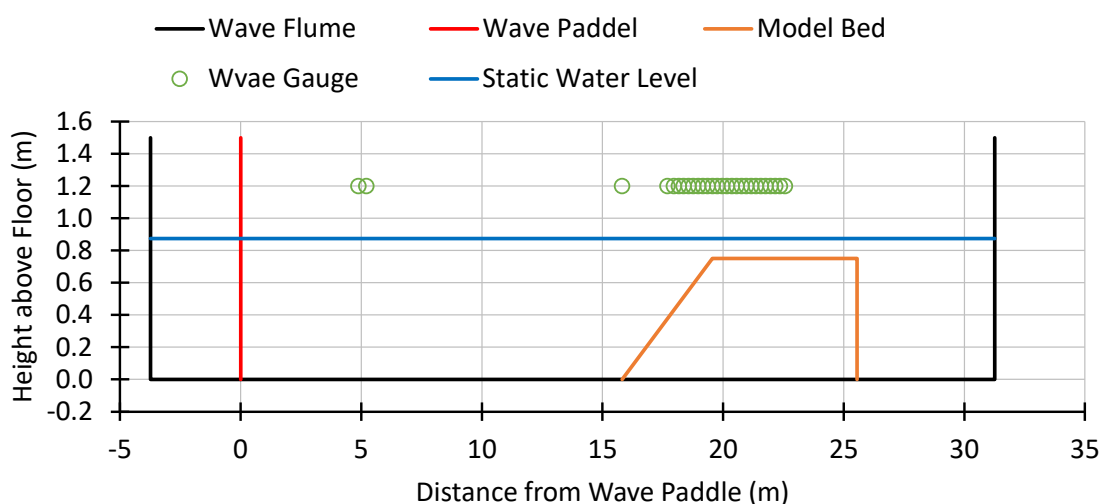


図 5-1 造波水路と模型床形状

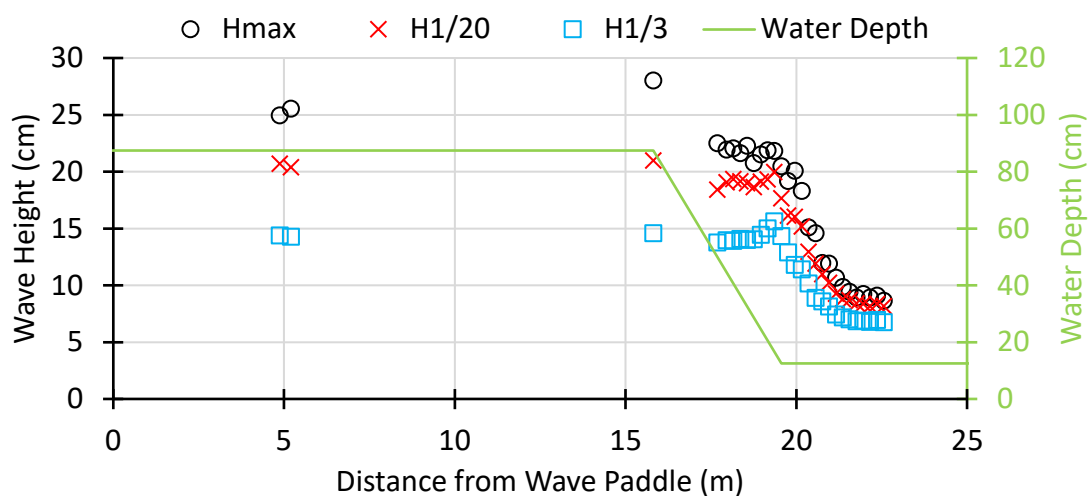


図 5-2 波高の空間分布

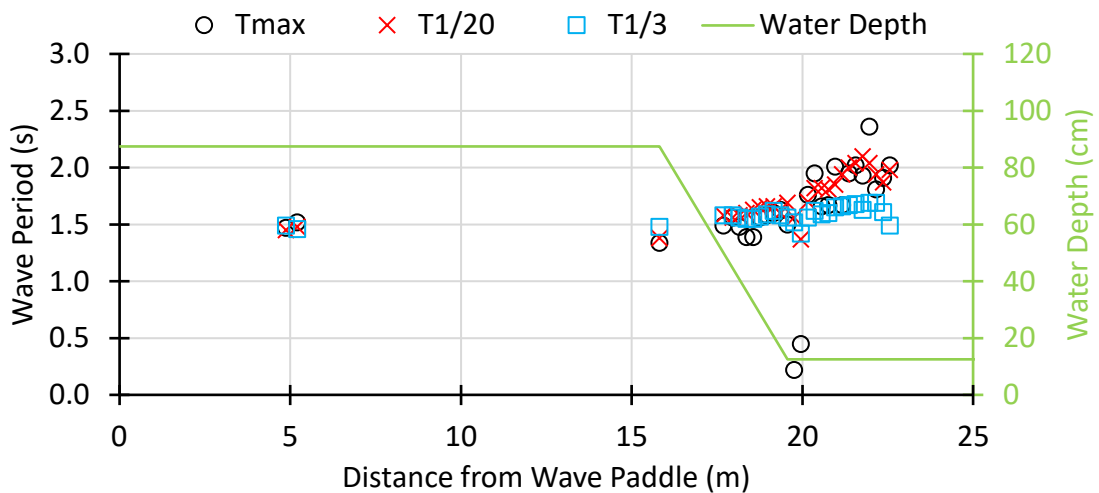


図 5-3 周期の空間分布

5-2-2. 数値シミュレーションによる断面 2 次元波浪変形の再現

「5-2-1. 波浪変形に関する断面模型実験」に示した模型実験を再現する数値シミュレーションを実施した。数値計算手法は段階的砕波変形モデル^{3-1), 5-2)} (以下、「PEGBIS」と称す。)、ブシネスク方程式モデル⁵⁻³⁾ (以下、「BSQ」と称す。)、2次元版の数値波動水路¹⁻⁵⁾ (以下、「CS2D」と称す。)とした。

PEGBIS について、表 5-1 に計算格子の条件設定を、表 5-2 に水深条件の設定を示す。PEGBIS は平面 2 次元モデルであるが、水深条件を仮想的に断面 2 次元的に示すと図 5-4 のとおりである。この水深条件の設定は、前出の図 5-1 に示した模型実験の造波板中立位置から模型床終端を再現している。波浪条件の入力値は、有義波高は模型実験の造波板前面で測定した入射波高と同じ 0.144 m、周期は造波板前面の入射波の有義波周期をスペクトル周期に換算した 1.386 s である。これら以外の計算条件は、プログラム開発者の推奨条件と一致させた。

表 5-1 段階的砕波変形モデルの計算格子の条件設定

	格子間隔 (m)	格子数	距離 (m)
x方向	0.05	511	25.55
y方向	0.05	5	0.25

表 5-2 段階的砕波変形モデルの水深条件の設定

距離 (m)	0.00	15.80	19.55	25.55
水深 (m)	0.875	0.875	0.125	0.125

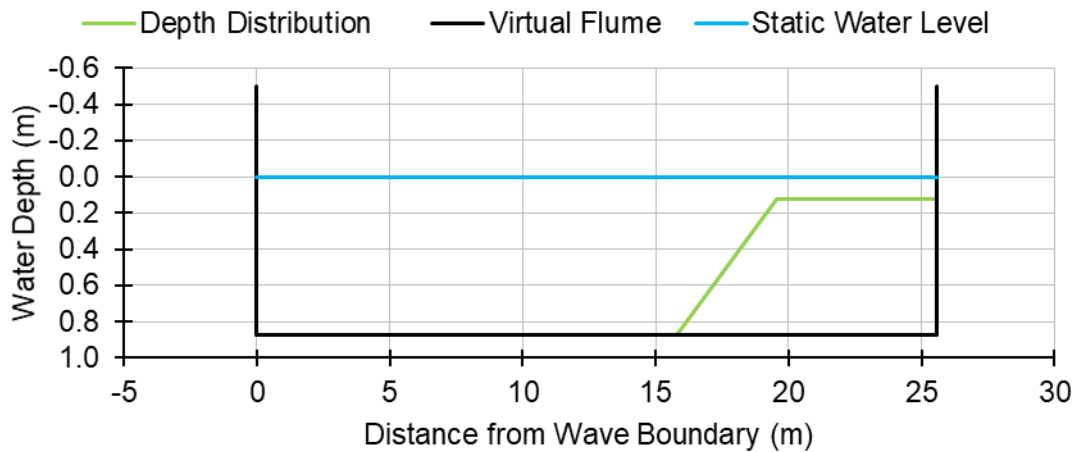


図 5-4 PEGBIS の計算領域設定の仮想的な断面 2 次元表示

BSQ について、図 5-5 に計算領域の設定を示す。BSQ は平面 2 次元モデルであるが、水深条件を仮想的に断面 2 次元的に示すと図 5-6 のとおりである。この水深条件の設定は、前出の図 5-1 に示した模型実験の造波板中立位置から模型床終端を再現している。

表 5-3 に BSQ による波浪変形の再現計算の計算条件設定を示す。BSQ の波浪の入力条件は、造波境界から 5 m 地点の波高が模型実験と一致するように、有義波高を 0.157 m、有義波周期を 1.49 s とした。また、波高分布を模型実験と一致させるために、底面摩擦係数を 0.125 m より深い部分は 0.2、浅い部分は 0.7 とした。上記以外を入力値はブシネスクモデルの推奨条件を採用した。計算時間刻み幅は計算を完走させるために 0.00005 s まで細かくした。

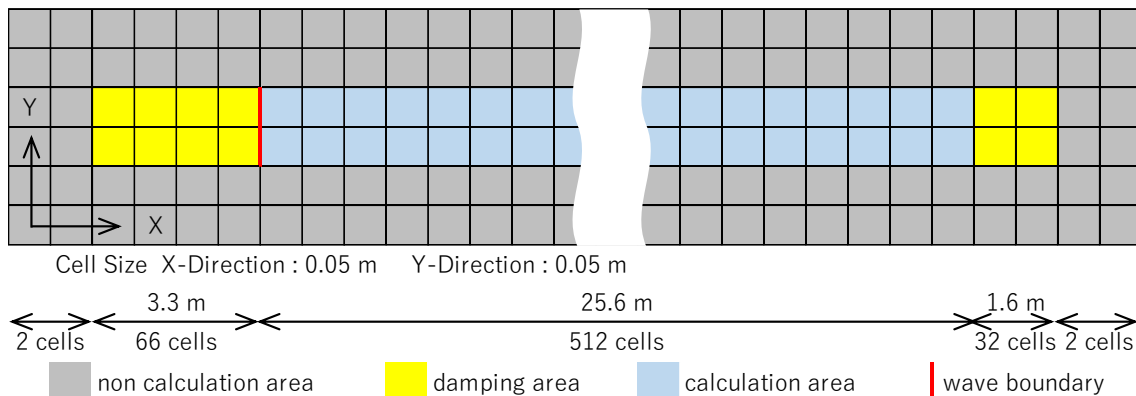


図 5-5 BSQ の計算領域の設定

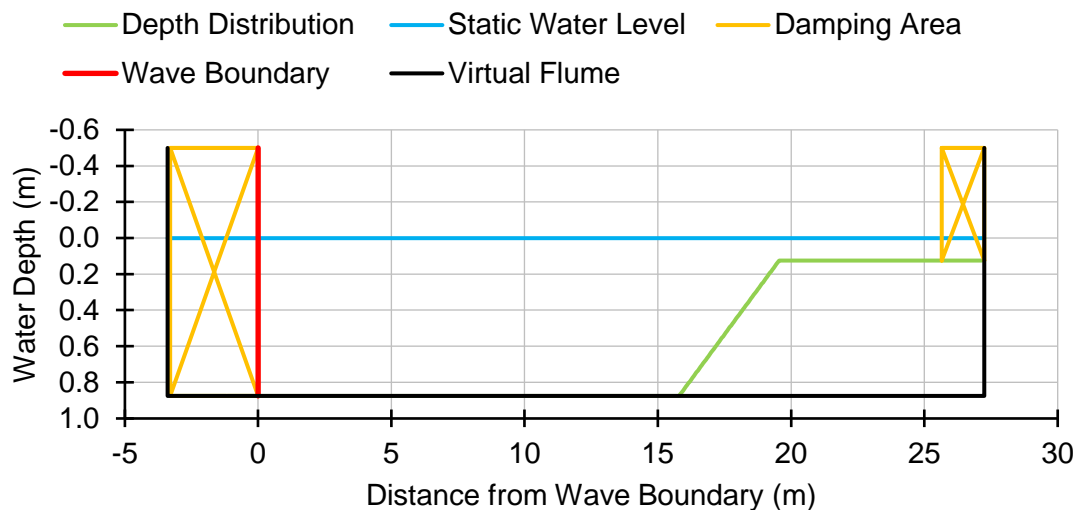


図 5-6 BSQ の計算領域設定の仮想的な断面 2 次元表示

表 5-3 BSQ による波浪変形の再現計算の計算条件設定

条件項目	条件設定
波高, 周期, 造波水深	$H_{1/3}=15.7\text{cm}$, $T_{1/3}=1.49\text{s}$, $h=87.5\text{cm}$
格子間隔	$dx=5\text{cm}$, $dz=5\text{cm}$
格子数	x方向: 610, z方向: 2
成分波数, Smax	512, 999
砕波指標	0.5
底面摩擦係数	深部: 0.2 浅部: 0.7 境界水深: 0.125m
計算時間, 時間刻み幅	480s, 0.00005s

CS2D の計算領域設定を図 5-7 に示す。CS2D は断面二次元モデルであり、前出の図 5-1 に示した模型実験の造波板中立位置から模型床終端の断面形状を、ほぼそのまま再現している。セルの大きさは水平方向と鉛直方向のどちらも 0.05 m である。セル数は減衰領域も含めて、水平方向が 627、鉛直方向が 30 である。表 5-4 に主要な計算条件を示す。CS2D の造波条件は、造波ソースを用いて造波関数は MATRIX とし、波高の入力値は 0.144 m で周期の入力値は 1.49 s で造波信号を作成した。計算時間刻み幅は計算を完走させられる条件として 0.001 s とした。

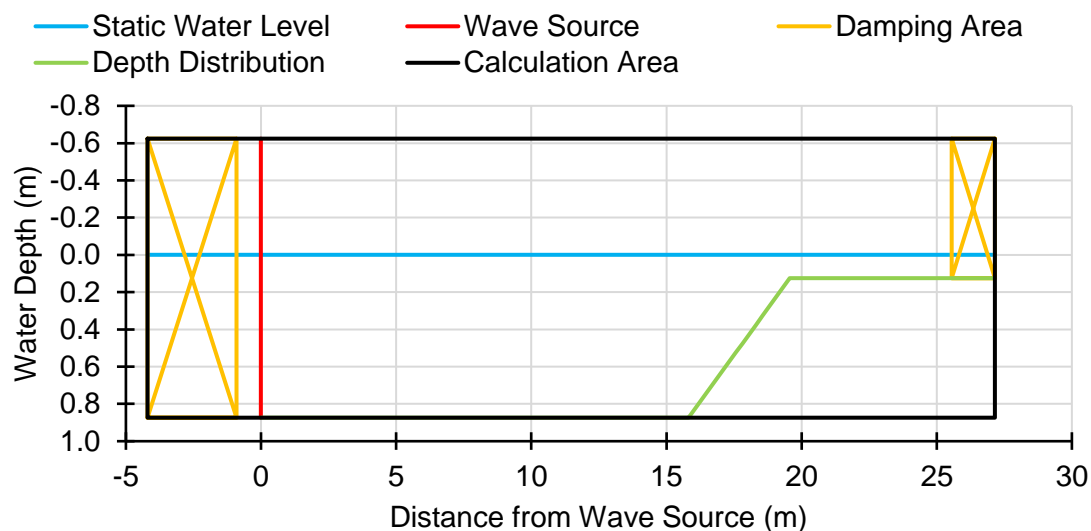


図 5-7 CS2D の計算領域設定

表 5-4 CS2D による波浪変形の再現計算の計算条件設定

条件項目	条件設定
波高, 周期, 造波水深	$H_{1/3}=14.4\text{cm}$, $T_{1/3}=1.49\text{s}$, $h=87.5\text{cm}$
格子間隔	$dx=5\text{cm}$, $dz=5\text{cm}$
格子数	x方向:628, z方向:31
造波モデル	造波ソース
造波関数	MATRIX
計算時間, 時間刻み幅	480s, 0.001s
ポララス下限値	0.001
VP-DONOR	0.2
VOF関数境界条件	フリー
流速・圧力境界条件	スリップ

図 5-8 に模型実験 (PME : Physical Model Experiment) と数値シミュレーションの波高の比較を示す。PME は波高が砕波点付近で立ち上がった後に減衰する。この現象を PEGBIS は再現できず、BSQ と CS2D は再現可能である。この結果から、急勾配斜面付近に建設する構造物の設計を行う場合には、砕波係数を適用して波高を算定する PEGBIS のような計算手法では、構造物への到達波高を過小評価してしまう可能性があることがわかる。

図 5-9 に数値シミュレーションによる有義波高の計算精度を示す。計算精度は式(5-1)のとおりに定義した。PEGBIS の計算精度は最小値が 0.74 で平均値が 0.86 とやや低い。BSQ と CS2D の計算精度は最小値が

0.8 以上あり、平均値も 0.9 を超えている。BSQ と CS2D 程度の計算精度があれば、構造物への到達波高の決定において、模型実験から数値シミュレーションへの移行が可能であると考えられる。

$$Accuracy = 1 - \frac{|V_c - V_e|}{V_e} \quad (5-1)$$

V_c : calculated value, V_e : experimented value

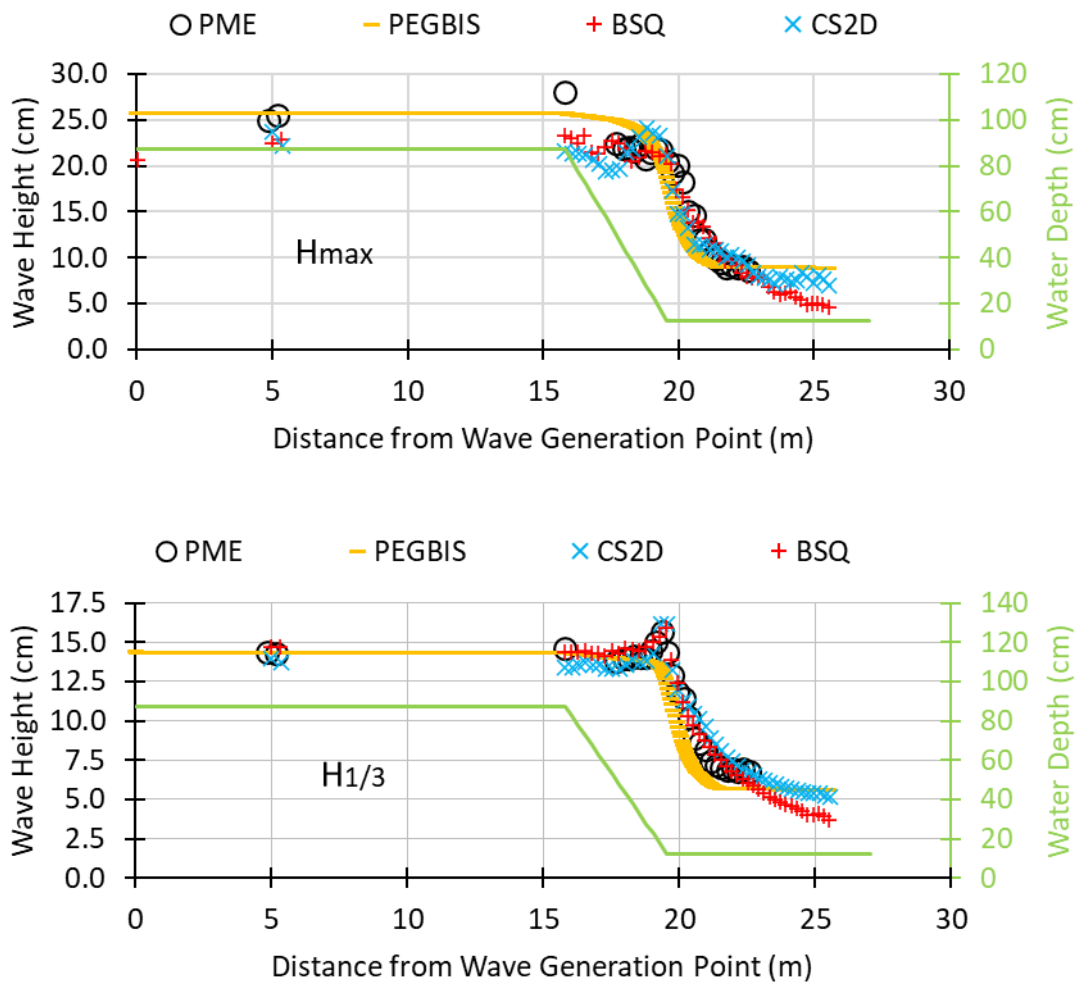
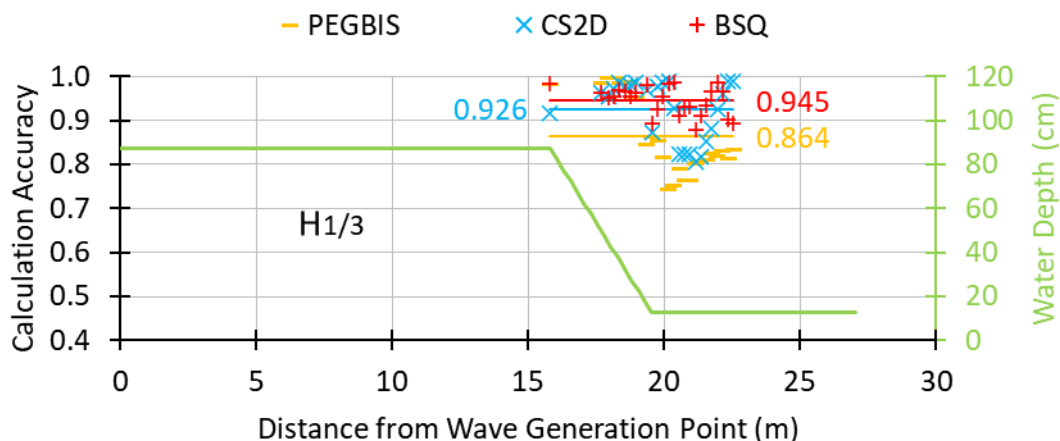


図 5-8 模型実験と数値シミュレーションの波高の比較 (上: H_{max} , 下: $H_{1/3}$)



(プロットは地点ごと、横棒と数値は Accuracy の平均値。)

図 5-9 数値シミュレーションによる有義波高の計算精度

5-2-3. 断面 2 次元波浪変形に関する実験と計算に要する時間

表 5-5 に BSQ と CS2D の実施にかかった計算時間を示す。数値シミュレーションの対象時間は「作用時間」に示した 480 s である。これを実時間と称す。計算に要した時間は「計算時間」に示すとおりで、2 時間以上の時間を要している。計算時間と実時間の比が実時間比である。CS2D は実時間の 17.3 倍、BSQ は実時間の 28.0 倍の計算時間を要する。BSQ はセル数が少ないが計算を完走させるために計算時間間隔を細かくしたので、実時間比が大きくなった。なお、BSQ と CS2D の計算は表 5-6 に示す計算機で実施した。マルチコアの計算機であるが、BSQ と CS2D は並列計算に対応していないので、シングルコアで計算を実施した。

波浪変形に関する 2 次元実験の代わりに実施する数値シミュレーションは、造波時間だけで考えれば模型実験が数値シミュレーションより多くの時間を要する。これらの計算を模型実験と同等の時間で実行するためには、計算機性能が表 5-6 に対して 20 から 30 倍に向上する必要がある。

設計実務のための波浪変形の検討では、通常は、複数の条件に対する検討を行う。表 5-7 に、複数の条件に対して模型実験と数値シミュレーションを実施する場合の所要日数を示す。模型実験は模型床製作と模型床撤去にも日数を要するので、周期 3 種類×波高 1 種類×波群 2 種類の条件数では、模型実験と BSQ および CS2D の所要日数が概ね同じになる。模型床製作と模型床撤去に必要な日数はケース数が増えても変わらない。したがって、周期 3 種類×波高 3 種類×波群 2 種類の条件数では

BSQ と CS2D の実施に必要な日数が模型実験より多くなる。

表 5-5 BSQ と CS2D による波浪変形の計算時間

計算手法	単位 (s)		ステップ数	総セル数	計算負荷 (*10 ⁹)	計算時間 (hour)	実時間比
	作用時間	時間間隔					
BSQ	480	0.00005	9,600,000	1,220	11.71	3.73	28.0
CS2D	480	0.001	480,000	18,810	9.03	2.30	17.3

表 5-6 BSQ と CS2D による波浪変形の計算に用いた計算機の性能

CPU	クロック	コア数	メモリ
Intel Core i7 -3770	3.4 GHz	8	24 GB

表 5-7 波浪変形に関する 2次元模型実験と数値シミュレーションの所要日数

周期 3 × 波高 1 × 波群 2 種類

項目	日数		日数		
	模型実験		PEGBIS	BSQ	CS2D
模型床製作	4		0.1	0.3	0.3
入射波検定	3		0	2	2
波浪変形実験	1		0	6	3
模型床撤去	2		0.1	3	3
合計	10		0.2	11.3	8.3

周期 3 × 波高 3 × 波群 2 種類

項目	日数		日数		
	模型実験		PEGBIS	BSQ	CS2D
模型床製作	4		0.1	0.3	0.3
入射波検定	4.5		0	2	2
波浪変形実験	2		0	18	9
模型床撤去	2		0.2	9	9
合計	12.5		0.3	29.3	20.3

5-2-4. 波浪変形に関する平面模型実験

数値シミュレーションによる波浪変形の再現対象データとして、平面水槽における波浪変形実験について示す。

図 5-10 に、水槽の形状と没水型構造物および波高計の配置を示す。

この実験データは平山ら⁵⁻⁴⁾よりご提供いただいた。実験水槽の造波装置は、角の斜めの部分も含めて3面に設置されている。造波板が設置されていない水槽壁の2面の前面には消波材が設置されている。模型床は設置しておらず、平らな水槽床の上に没水型構造物が設置されている。没水型構造物は、天端幅が0.8 m、延長が12.0 m、高さが0.48 mの不透過構造である。水槽床上の水深が0.60 mとされているので、没水型構造物の天端水深は0.12 mである。

この実験では造波装置の1st.フェースから直角方向に規則波を発生させている。造波板の制御は1st.フェースと2nd.フェースは反射波吸収造波、3rd.フェースは直立壁である。造波信号の入力周期は2.0 sである。

波高の測定に用いた計測機器は容量式波高計である。図5-11に波高計のch.番号を示す。波高計データの収録時間間隔は波周期の1/40の0.05 sである。収録データ数は10,000として500 sの収録時間である。データ収集開始の10 s後に造波を開始している。収集した波浪データは、ゼロ・アップ・クロス法による波別解析と統計処理を行い、平均波高と平均周期を求めた。

実験結果は、数値シミュレーションの結果と共に「5-2-5. 数値シミュレーションによる3次元波浪変形の再現」に後述する。

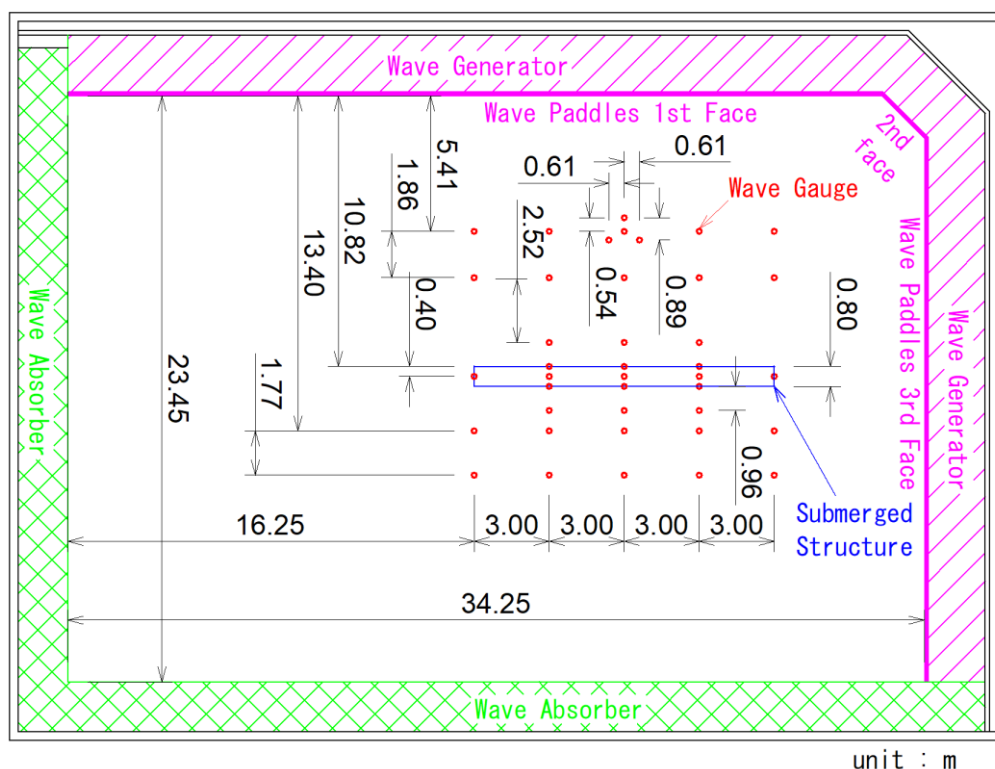


図 5-10 造波水槽の形状と実験模型および波高計の配置

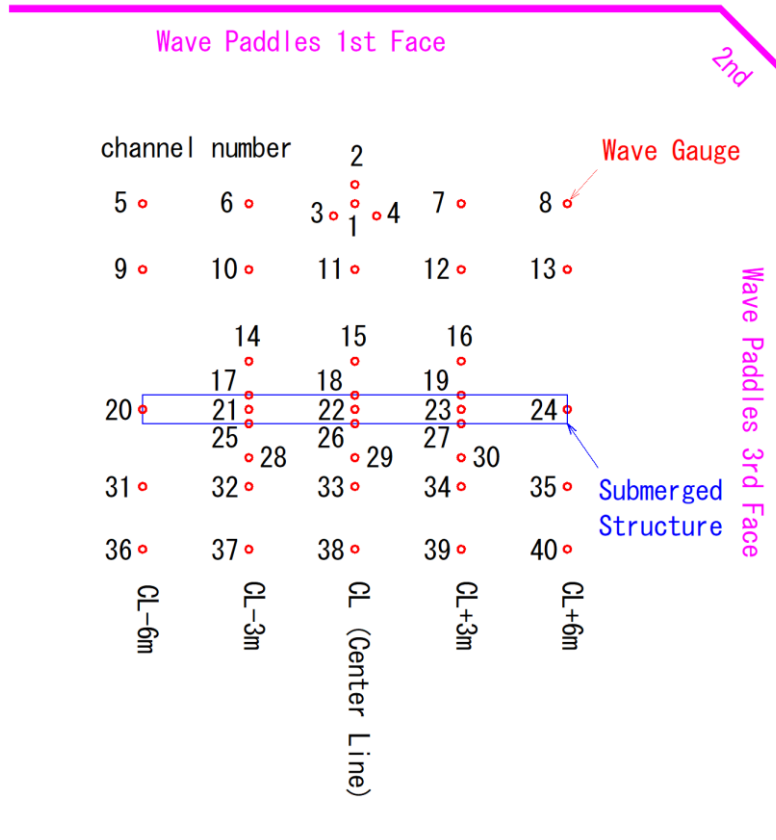


図 5-11 波高計の ch.番号

5-2-5. 数値シミュレーションによる 3次元波浪変形の再現

「5-2-4. 波浪変形に関する平面模型実験」に示した模型実験を再現する数値シミュレーションを実施した。数値計算手法は段階的碎波変形モデル^{3-1), 5-1)}(以下、「PEGBIS」と称す。)と、3次元数値波動水路 CADMAS-SURF/3D¹⁻⁶⁾(以下、「CS3D」と称す。)とした。

PEGBIS について、表 5-8 に計算格子の条件設定を示す。計算領域の大きさは、模型実験の造波板から消波材までと一致させた。海底地形なしで 0.60 m の一様水深の条件で、直線状構造物として没水型構造物を設置した。没水型構造物の設置位置は模型実験と同じであるが、0.05 m の格子サイズに合わせるため、造波境界からの距離は模型実験が 10.82 m であるのに対し、PEGBIS は 10.80 m とした。

表 5-8 段階的碎波変形モデルの計算格子の条件設定

	格子間隔 (m)	格子数	距離 (m)
x方向	0.05	469	23.45
y方向	0.05	685	34.25
	全体	321,265	

CS3D の計算領域設定を図 5-12 に示す。計算領域は可能な限り模型実験を忠実に再現した。模型実験の造波機は反射波吸収制御が行われているため、造波ソースの背後に波長の約 1 個分の長さの減衰領域を設定した。模型実験の造波機の 3rd.フェースは直立壁とされているので、計算領域の 3rd.フェース側には直立壁を設定した。模型実験において 1st.フェースの正面の水槽壁前面には消波材が設置されているので、計算領域の同じ位置に波長の約 1 個分の長さの減衰領域を設定した。模型実験において 3rd.フェースの正面の水槽壁前面にも減衰領域が設定されているが、CS3D ではこの位置に減衰領域を設定することができない。ポラスセルを設定して消波効果を表現することもできなくはないが、今回の検討条件は 1st.フェースから直角方向の造波であり、横方向への反射波は発生しないため、ポラスセルの設定は行わなかった。計算領域における没水型構造物の設置位置は、造波ソースからの距離を模型実験と一致させた。

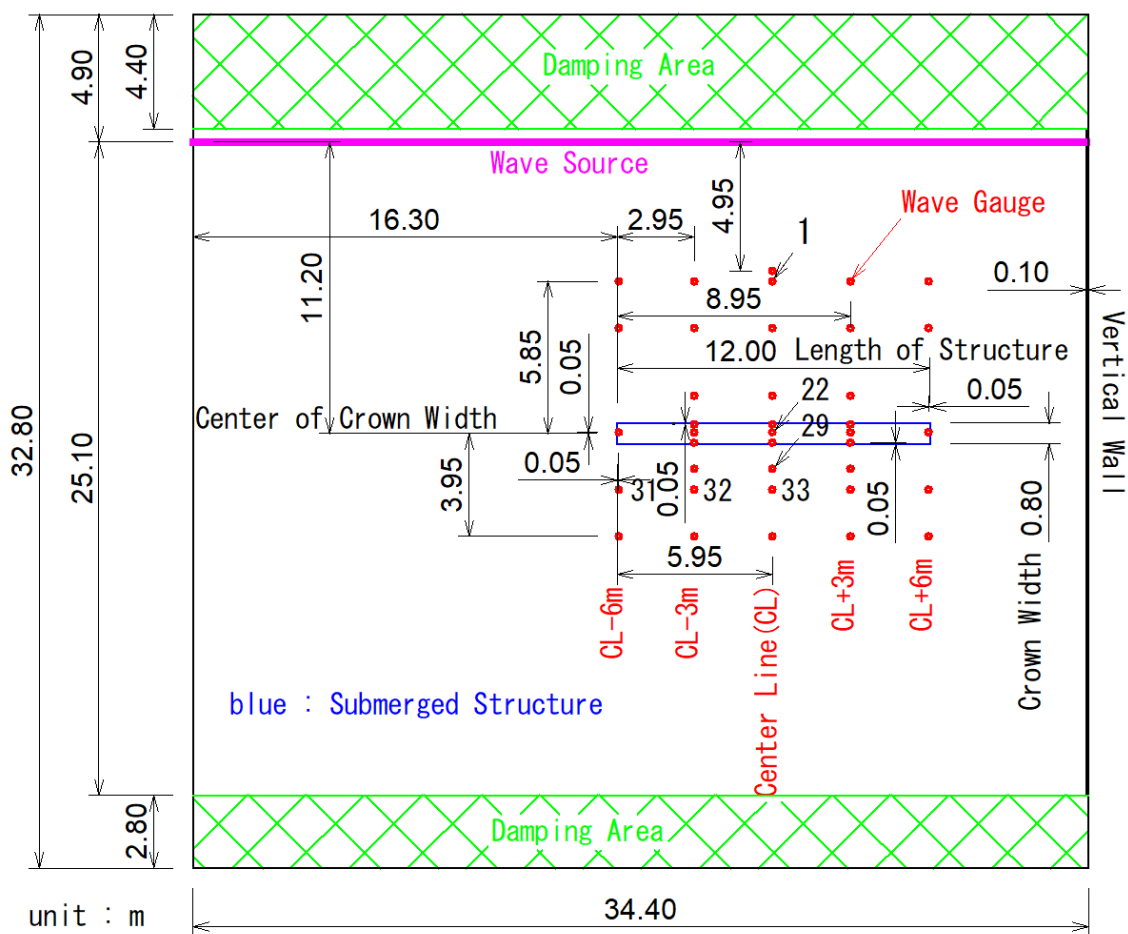


図 5-12 CS3D の計算領域の設定と水位出力点の配置

表 5-9 に CS3D のセルサイズ・セル数・造波モデルと水深を示す。表 5-10 に主要な計算条件を示す。造波ソースを用いて造波関数は「ストークス波またはクノイド波」とした。すなわち規則波である。波浪条件は周期が 2.0 s で波高は 0.04 m と 0.10 m の 2 種類である。波高 0.04 m は模型実験のデータ収録時間と同じ 500 s の計算を実施した。波高 0.10 m の計算対象時間が 271.325 s と半端な理由は「5-2-6」に示す。

図 5-12 に「Wave Gauge」で示す地点が、水位の出力地点である。CS3D の計算において水位の出力点は x, y の平面的なセルの位置で設定する。x, y のセルの大きさは 0.10 m であり、水位の出力点は模型実験の波高計設置位置に該当するセルに設定した。計算結果の表示において水位出力点の位置はセルの中央として取り扱った。そのため、模型実験の波高計設置位置と CS3D の水位出力点には若干のずれがある。

表 5-9 CS3D のセルサイズ・セル数・造波モデルと水深

cell size [m]	$dx=0.10, dy=0.10, dz=0.05$
number of cslls	$nx=328, ny=344, nz=16$ total 1,805,312
wave generation model	wave source
water depth [m]	$h=0.62$

表 5-10 CS3D による波浪変形の再現計算の計算条件設定

wave height [m]	H=0.04	H=0.10
wave period [s]	T=2.0	T=2.0
time length [s]	500	271.325
time step [s]	0.01 (constant)	0.0005 (constant)
number of steps	50,000	542,650
cells × steps	90,265,600,000	979,652,556,800

図 5-13 および図 5-14 に模型実験と CS3D の時系列波形を示す。図中の凡例の「N」は数値シミュレーションを、「P」は模型実験を表す。凡例の「ch.x」の x は測定位置の番号である。

図 5-13 は、波高が約 0.04 m の条件で、延長が 12.0 m の没水型構造物の中心線上の岸沖方向の地点の時系列波形である。ch.1 は造波ソースに近い位置であり、数値シミュレーションの周期が模型実験と一致している。ch.1 の水面振動は、28 s 程度までは数値シミュレーションが若干大きく、35 s 以降は反射波により模型実験の振幅が大きくなり、数値シミュレーションとの差を生じている。ch.22 は没水型構造物の天端幅の中央であり、ch.1 と比べて振幅が大きくなる点が、数値シミュレーショ

ンと模型実験で一致している。ただし数値シミュレーションの水面振動は模型実験よりやや大きい。ch.26 は没水型構造物の天端の岸側法肩であり、波形の形状の変化が数値シミュレーションと模型実験で一致している。ch.29 は没水型構造物の背後の近い位置であり、没水型構造物天端上の透過波が卓越する。この地点は波形の変化と振幅が数値シミュレーションと模型実験で一致している。ch.33 は没水型構造物の背後でやや離れた位置であり、天端上の透過波に加えて没水型構造物による屈折の影響が含まれる。この地点は波形の形状は数値シミュレーションと模型実験で一致しているが、振幅は数値シミュレーションが模型実験より小さい。

図 5-14 は、波高が約 0.04 m の条件で、没水型構造物の背後 1.78 m (CS3D では 1.75 m) 位置の、法線方向の地点である。5 地点とも波形の形状は数値シミュレーションと模型実験が一致しているが、振幅の一致度は場所により異なる。両端部の ch.31 と ch.35 は振幅が一致している。3rd.フェースに近い ch.34 は数値シミュレーションと模型実験の振幅が一致しているが、3rd.フェースから遠い ch.32 は数値シミュレーションの振幅が模型実験より小さい。数値シミュレーションは ch.32 と ch.34 の振幅がほぼ御同じであるが、模型実験は ch.32 の振幅が ch.34 より大きい。没水型構造物は 1st.フェースの中央ではなく、3rd.フェースに近い位置に設置されている。そのため、3rd.フェース側からは屈折波が入りにくいので、模型実験は ch.34 より ch.32 の振幅が大きくなった。数値シミュレーションの ch.32 と ch.33 の振幅が模型実験より小さいことは、CS3D は屈折現象の計算精度がやや低いことがうかがえる。

図 5-15 および図 5-16 は波高が約 0.10 m の条件での模型実験と CS3D の時系列波形の比較である。波形の変化は CS3D が模型実験と一致しているが、水面振動の大きさには若干の違いがある。

図 5-17 に、波高が約 0.04 m のケースについて、模型実験と数値シミュレーションの波高の比較を示す。没水型構造物の両端の CL-6m と CL+6m は模型実験 (PME) の波高の変化が小さく、PEGBIS と CS3D が PME に近い値を示す。PEGBIS は CL-3m から CL+3m の範囲において、没水型構造物天端上の波高の立ち上がりが過小評価される。CS3D は没水型構造物天端上の波高の立ち上がりが PME とほぼ一致する。ただし CL-3m における PME の極端な波高の立ち上がりは再現できない。CS3D は没水型構造物背後の波高の変化が PME より小さい。

表 5-11 に CS3D による波高の計算精度を示す。計算精度は前出の式 (5-1)により求めた。波高の計算精度は入力波高 0.04 m より 0.10 m がや

や高い。これは波高に対する格子分割数 $H/\Delta z$ が入力波高 0.04 m より 0.10 m で大きいことによると考えられる。

以上の結果より、PEGDIS と CS3D による平面実験の波浪変形の計算精度は以下のとおりである。

- (1) PEGDIS は屈折・回折が併存する波浪変形場に適用することができるとされている⁵⁻⁴⁾が、矩形の没水型構造物による波浪変形を十分に再現することはできなかった。
- (2) CS3D では没水型構造物の反射波がやや過小評価される。
- (3) CS3D は没水型構造物の天端上の波浪変形及び透過波の計算精度が高い。
- (4) CS3D は没水型構造物による回折現象の計算精度がやや低い。
- (5) 波高に対する格子分割数が大きい条件で波高計算精度が高い。

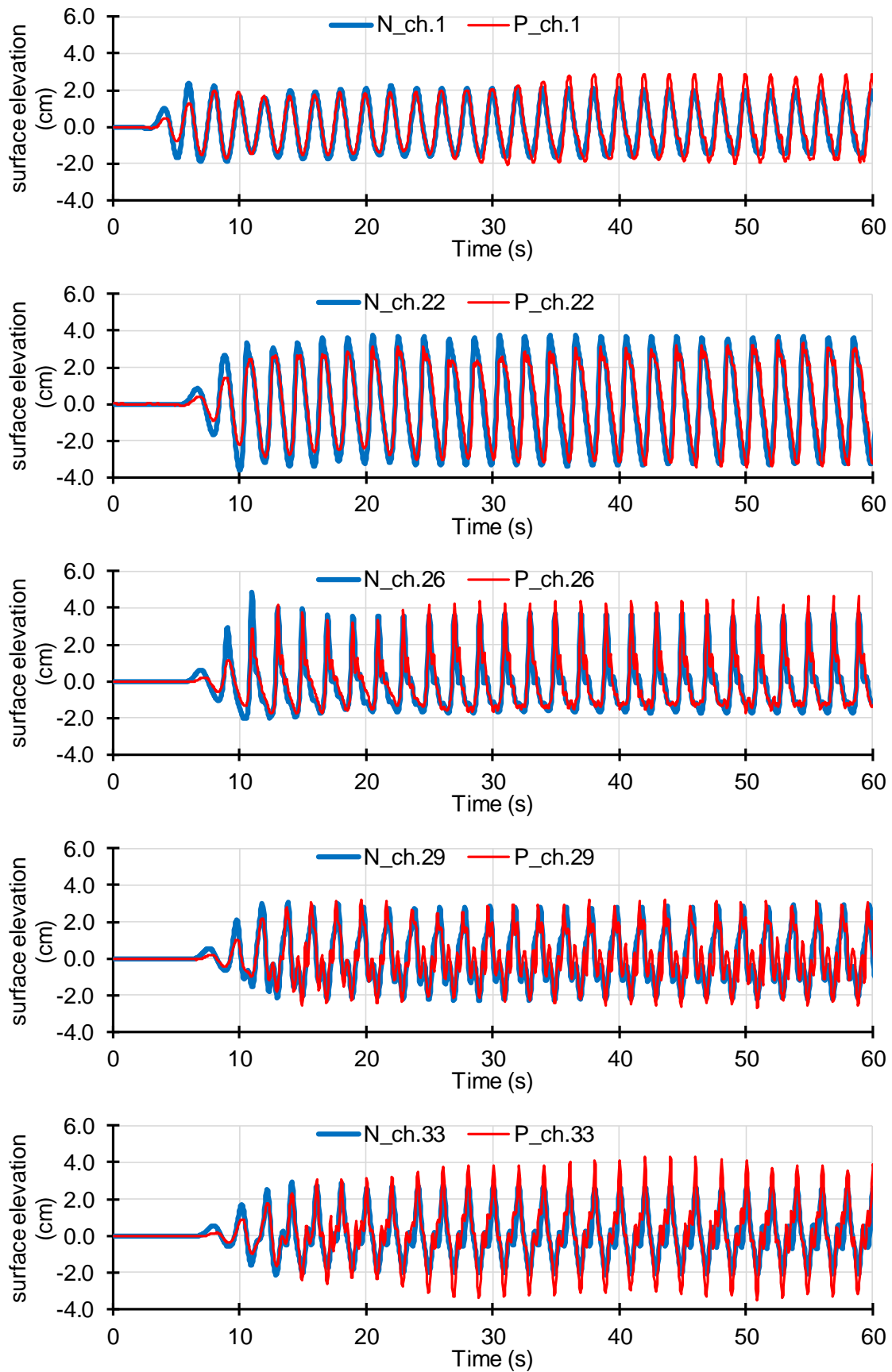


図 5-13 模型実験と CS3D の時系列波形の比較 (中心線上、入力波高 4cm)

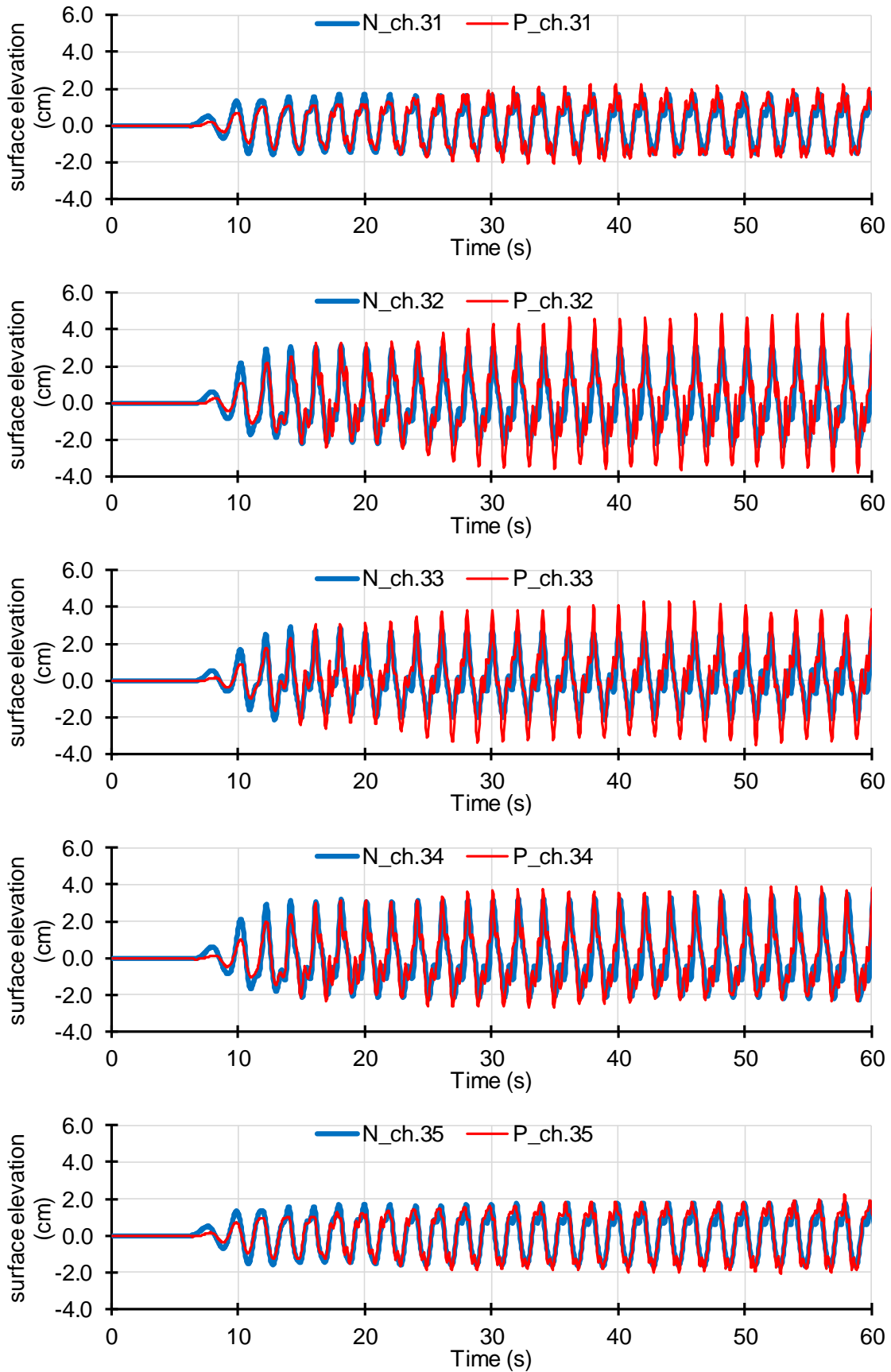


図 5-14 模型実験と CS3D の時系列波形の比較 (没水堤背後 1.78 m 地点、入力波高 4cm)

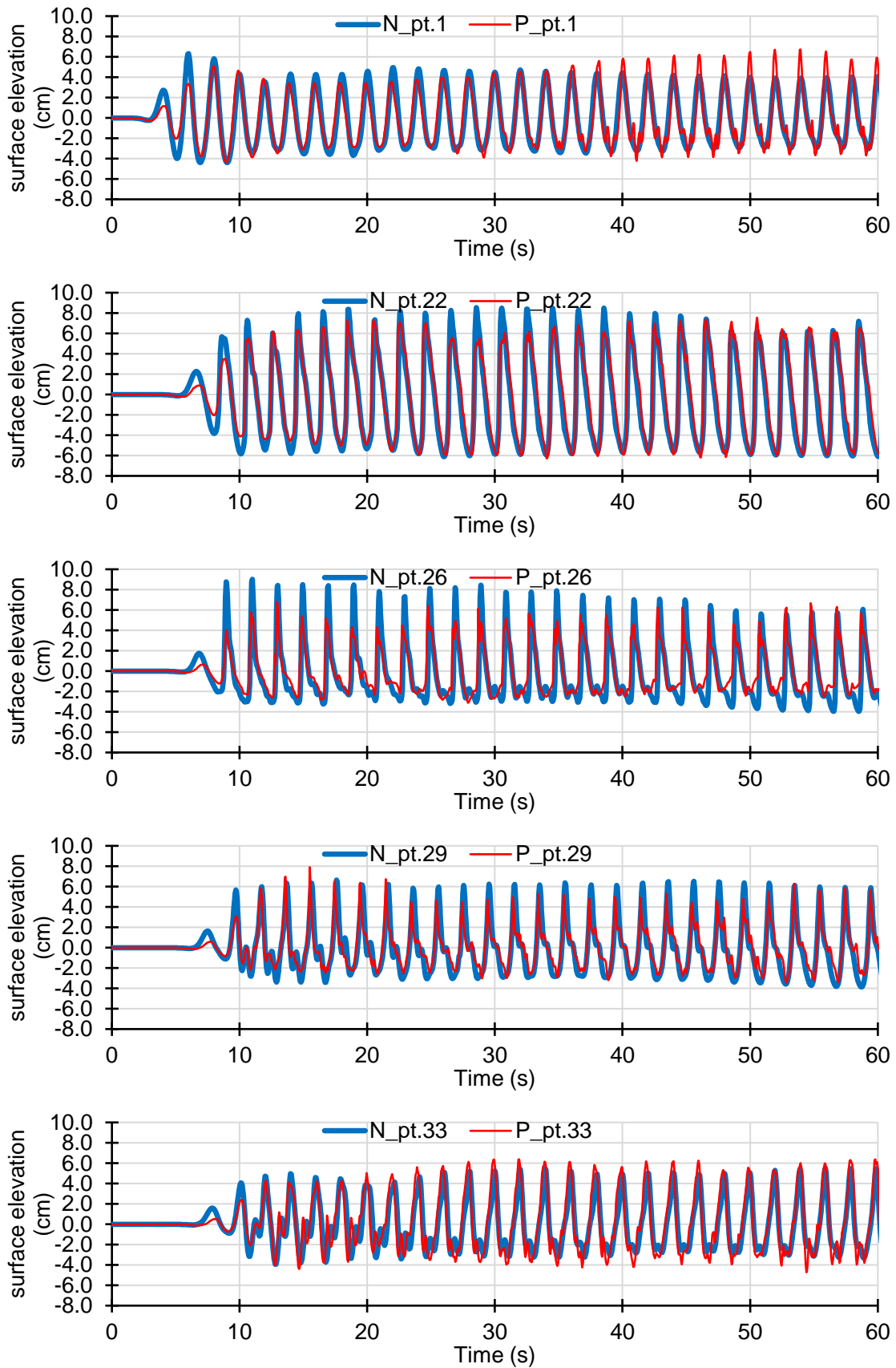


図 5-15 模型実験と CS3D の時系列波形の比較 (中心線上、入力波高 10cm)

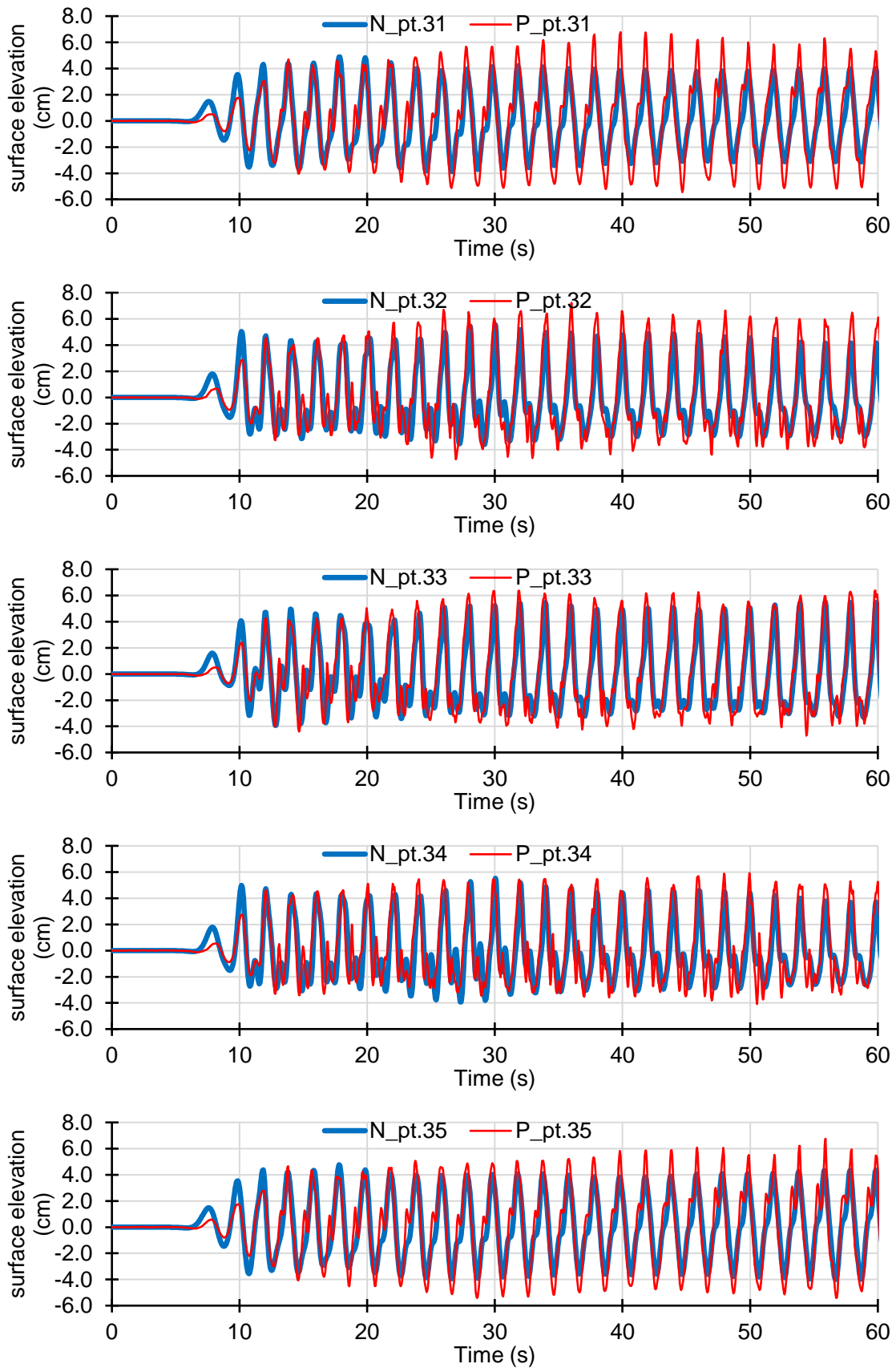
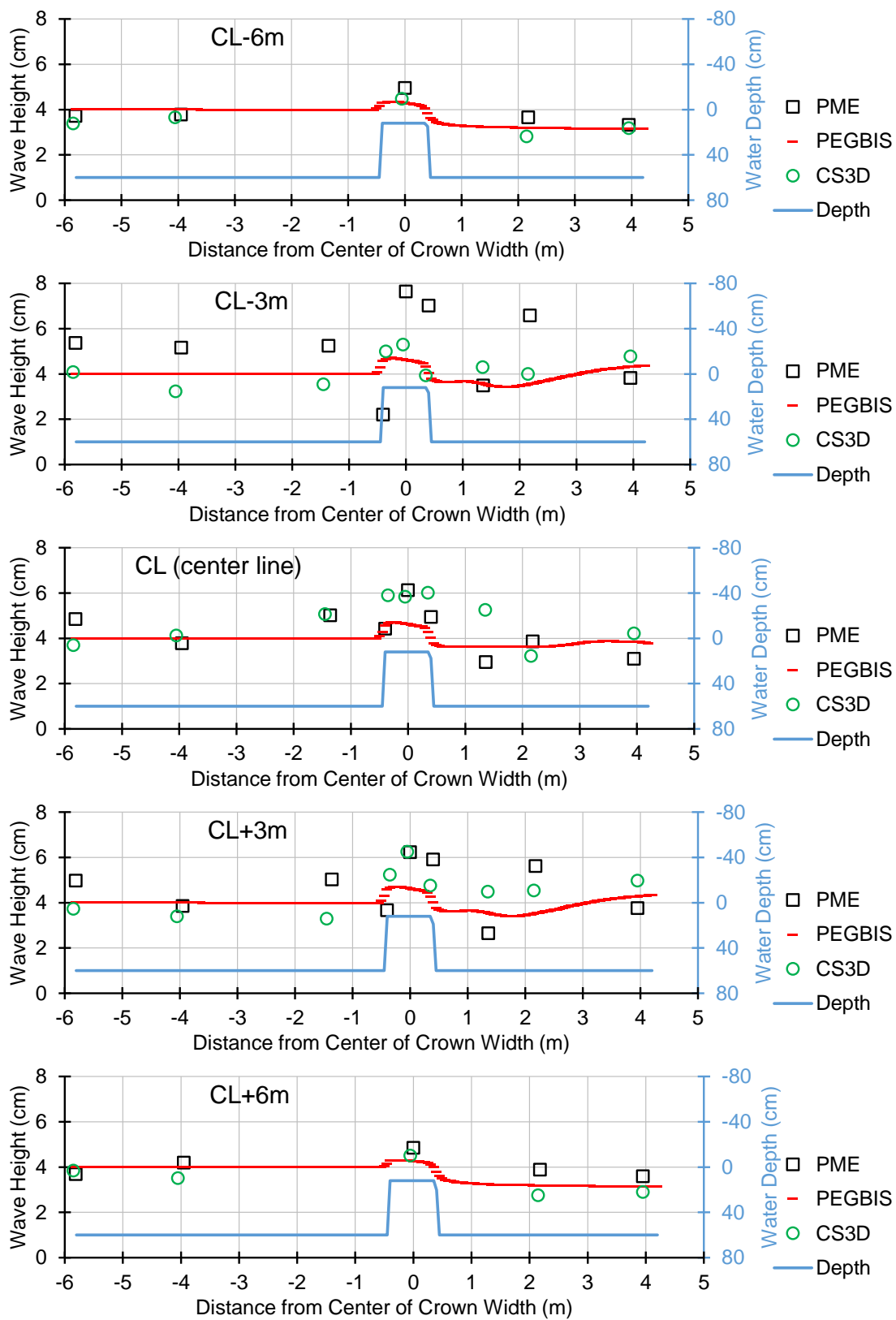


図 5-16 模型実験と CS3D の時系列波形の比較（没水堤背後 1.78 m 地点、入力波高 10cm）



(図中の CL-6m, CL-3m, CL, CL+3m, CL+6mは図 5-11 を参照)

図 5-17 模型実験と数値シミュレーションの波高の比較

表 5-11 CS3D による模型実験の波高の計算精度

入力波高 (m)	H/Δz	波高計算精度			
		全体	沖側	構造物上	陸側
0.04	0.8	0.823	0.917	0.735	0.773
0.10	2.0	0.881	0.928	0.797	0.898

5-2-6. 3次元波浪変形に関する実験と計算に要する時間

表 5-12 に CS3D の実施にかかった計算時間を示す。CS3D の計算は前掲の表 5-6 に示す計算機で 8 コアを使用した並列計算で実施した。H/h_d は入力波高と天端水深の比であり、h_d は天端水深で 0.12 m である。

入力波高 0.04 m の計算対象時間は「作用時間」に示した 500 s である。これを実時間と称す。計算に要した時間は「計算時間」に示すとおり 43.5 時間である。計算時間と実時間の比を実時間比と称す。入力波高 0.04 m の平面波浪変形実験の CS3D による再現には実時間の 300 倍を超える計算時間を要している。入力波高 0.10 m は計算時間間隔 0.01 s では計算が途中で破綻したので、計算時間間隔を徐々に細かくした。計算時間間隔を 0.002 s まで小さくしても 178.1 s で計算が破綻したので、最終的には 0.0005 s まで計算時間間隔を細かくした。しかし計算の実行にかかる時間があまりにも長いので、計算の終了を待ちきれずに途中で強制終了した。強制終了するまでに計算が走ったのは 271.325 s であり、計算時間は約 440 時間である。これは実時間の 5800 倍を超えている。

PEGBIS はノート PC により 3 時間かからずに計算を実行できるが、没水型構造物による波浪変形を適切に再現することができない。

設計実務のための波浪変形の検討では、通常は、複数の条件に対する検討を行う。表 5-13 に複数の条件に対して模型実験と数値シミュレーションを実施する場合の、所要日数を示す。PEGBIS は計算時間が 3 時間程度であり、造波が 10 分程度で終了する模型実験より時間がかかる。しかし、模型実験は模型製作などの実験準備に時間がかかるので、実施に必要な日数は PEGBIS が模型実験より少ない。CS3D は波高が小さい条件でも 1 条件の計算に 2 日を要するので、実施にかかる日数が模型製作の準備作業が必要な模型実験よりも多くなる。

表 5-12 CS3D による波浪変形の計算時間

入力波高 [m]	H/h _d	単位 (s)		ステップ 数	d 総セル数	e=c*d 計算負荷 (*10 ⁹)	f 計算時間 (hour)	g=f/a 実時間比
		作用時間	時間間隔					
0.04	0.33	500	0.01	50,000	1,805,312	90.27	43.50	313.2
0.10	0.83	271.325	0.0005	542,650	1,805,312	979.65	438.87	5823.0

表 5-13 波浪変形に関する 3次元模型実験と数値シミュレーションの所要日数

周期 3 × 波高 1 × 波群 2 種類

項目	日数	
	模型実験	日数
模型製作	10	
計測機器設置	5	
入射波検定	3	
波浪変形実験	1	
計測機器撤去	3	
模型撤去	1	
合計	23	

項目	日数	
	PEGBIS	CS3D
計算条件設定	0.3	0.5
試算	0	2
入射波検定	0	24
波浪変形計算	2.4	12
合計	2.7	38.5

周期 3 × 波高 3 × 波群 2 種類

項目	日数	
	模型実験	日数
模型製作	10	
計測機器設置	5	
入射波検定	4.5	
波浪変形実験	2	
計測機器撤去	3	
模型撤去	1	
合計	25.5	

項目	日数	
	PEGBIS	CS3D
計算条件設定	0.3	0.5
試算	0	2
入射波検定	0	72
波浪変形計算	7.2	36
合計	7.5	110.5

5-3. 反射波に関する精度と計算時間

5-3-1. 反射波に関する模型実験

港湾内において長周期波の反射波を抑制する工法として、防波堤などの反射面の前面へのマウンド構造物の設置が検討されている。図 5-18 に示すマウンド構造物について、模型実験により反射波抑制効果を検討した。

水理模型実験は、長さ 55 m、幅 1.2 m、高さ 1.5 m の二次元造波水路

において実施した。図 5-19 に模型床形状と実験模型設置位置を示す。反射壁設置位置から造波機側に 6.63 m の水平床があり、水平床の造波機側は長さ 16.30 m の 1:50 勾配斜面で、さらにその造波機側に 1:10 勾配の擦り付け部を設置した。模型縮尺を 1/50 として構造物と波周期はフルードの相似則で縮小した。図 5-19 の寸法は模型値で示してあるが、以降、実験に関する諸量は、模型値の明記がない限りフルードの相似則によって現地換算した値で示す。

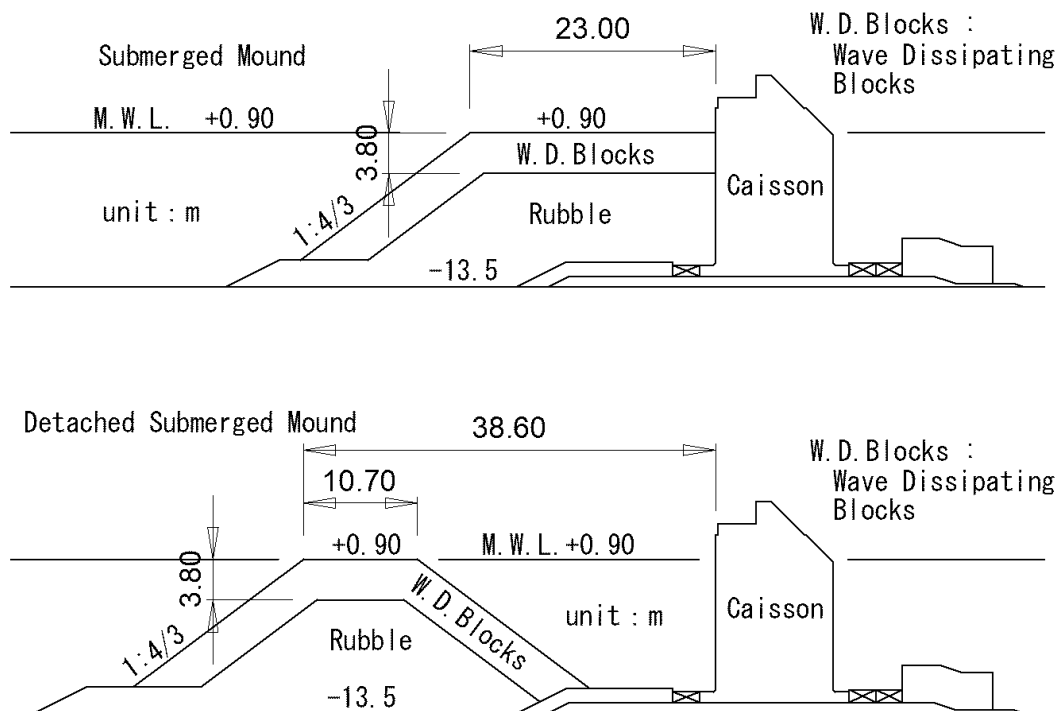


図 5-18 没水型と没水離隔型のマウンド構造物の断面形状

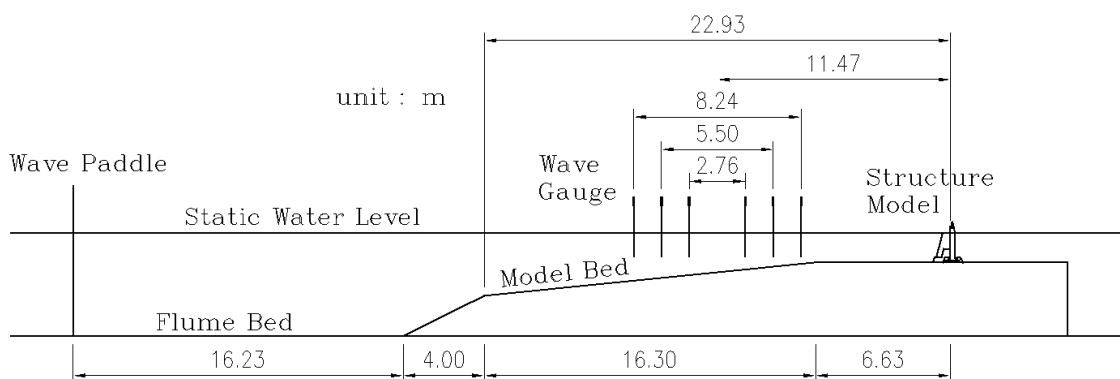


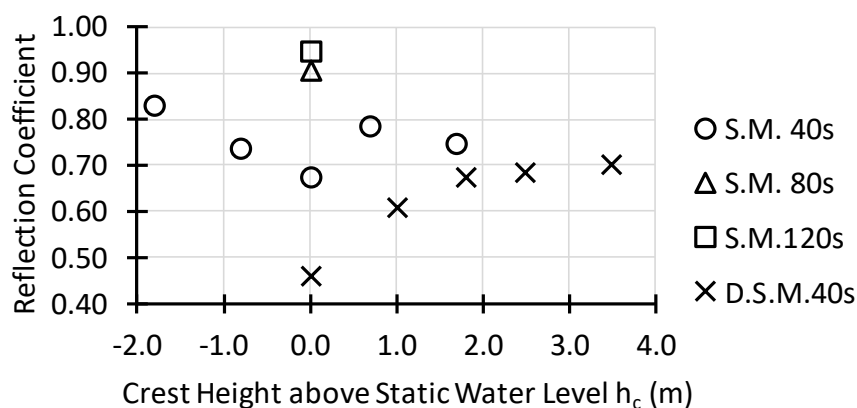
図 5-19 長周期波反射波実験の模型床形状と模型設置位置および波高測定位置

対象とする現地の波浪条件から、長周期波の周期は 40 s, 80 s, 120 s の 3 条件とした。長周期波の波高については、計測器による検出精度と

目視による視認性を考慮して模型量で 1 cm とした。この波高をフルードの相似則で現地量に換算すると 0.5 m であるため、実際に発生する長周期波高よりやや大きい。

水位変動（長周期波の波高）は容量式波高計で測定した。長周期波は規則波として造波し、造波水路内で多重反射系の反射波が安定した後の 30～40 波を解析対象とした。反射壁位置から水平床沖側端部までの距離の中央を中心に 1/4 波長間隔で設置した 2 本の容量式波高計による水位データを用い、合田ら⁵⁻¹⁾の方法を適用して入射波と反射波のエネルギー比により反射率を算定した。図 5-19 に 2 本ずつ 3 組の波高計を示してある。波高計間隔が小さい組を現地周期 40 s に、大きい組を 120 s の解析に用いた。

図 5-20 に静止水位上のマウンド天端高による反射率の変化を示す。図 5-18 に示す構造物断面において、静止水位を変更して反射率を測定した結果である。凡例の「S.M.」は Submerged Mound、「D.S.M.」は Detached Submerged Mound の略である。凡例の S.M. と D.S.M. の後の数値は実験波の周期である。静止水位上のマウンド構造物の天端高により反射率が変化することがわかる。



(S.M. : Submerged Mound, D.S.M. : Detached Submerged Mound)

図 5-20 静水面上のマウンド天端高による反射率の変化

5-3-2. 数値シミュレーションによる反射波の再現

「5-3-1. 反射波に関する模型実験」に示した模型実験を再現する数値シミュレーションを実施した。数値計算手法は 3 次元数値波動水路 CADMAS-SURF/3D¹⁻⁶⁾（以下、「CS3D」と称す。）とした。

図 5-21 に計算領域の設定を示す。表 5-14 に計算条件の設定を示す。CS3D は 3 次元モデルであるが、幅方向にはセルが一つだけの 2 次元的な計算を実施した。3 次元モデルを使用した理由は、マルチコアの並列

計算を実施するためである。格子間隔は dx と dy を 2.0 m、 dz を 0.5 m とした。周期を 3 種類に変更したが格子幅は共通のため、波長に対する格子分割数 L/dx が周期により異なる。マウンド構造物の寸法はできるだけ模型実験と同一としたが、天端幅がや設置位置が格子間隔と一致するように設定したので、模型実験と微妙に異なる。前述の模型実験は有限な水路長の条件で実施したが、数値シミュレーションは水槽の大きさに制約が無いので、計算領域の長さは波長の 5 倍程度となるように、実験波の周期により変更した。周期 40 s と 80 s は計算時間間隔を周期の 1/200 とした。120 s は 1/200 の 0.6 s の時間間隔では計算が破綻するため、計算時間間隔を周期の 1/300 の 0.4 s とした。

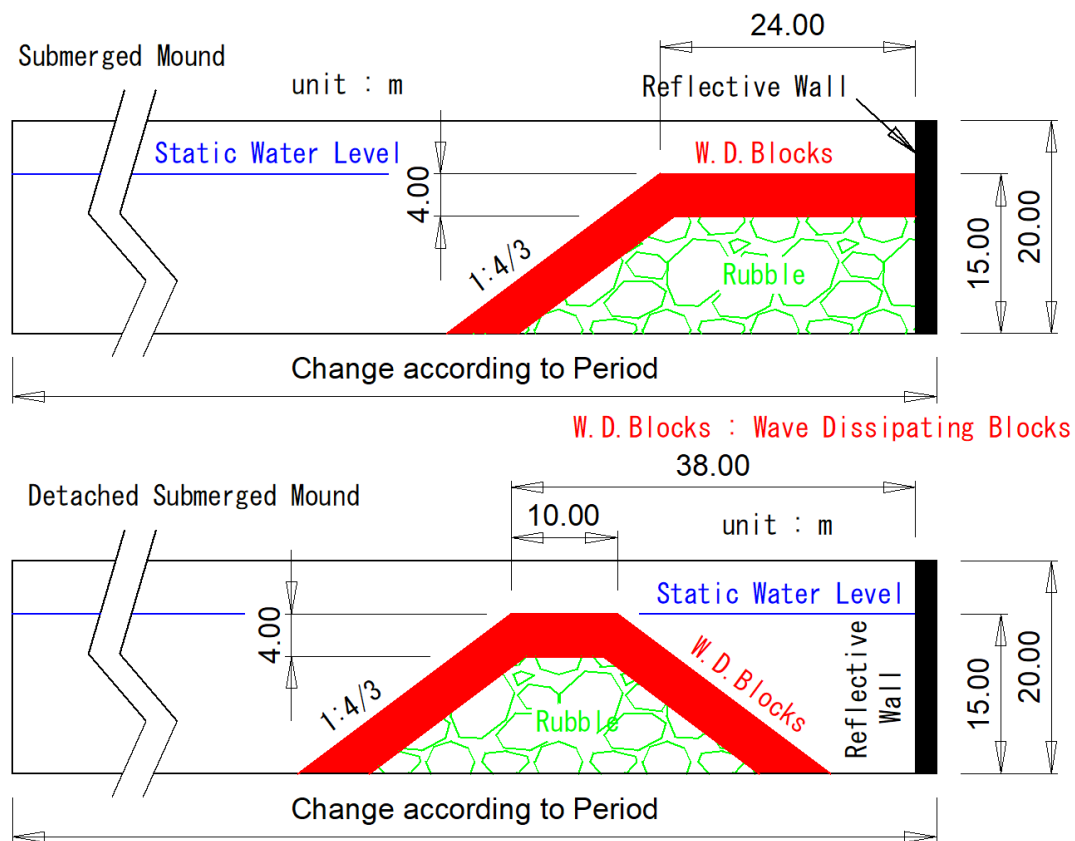


図 5-21 CS3D による反射波計算の計算領域の設定

表 5-15 に CS3D と模型実験による反射率の算定結果を示す。反射率の算定方法は模型実験と同様である。没水型 (Submerged Mound) において、模型実験より CS3D の反射率が大きく数値は一致していないが、周期が長くなると反射率が大きくなる傾向は模型実験と一致している。没水離隔型 (Detached Submerged Mound) の 40 s は模型実験と CS3D の反射率がほぼ一致している。また、没水型より没水離隔型の反射率が

小さい傾向も、CS3D が模型実験と一致している。以上のように、CS3D の計算結果は定量的には模型実験結果と異なる点があるが、定性的には一致している。表 5-15 の最下段は計算精度であり、前出の式(5-1)により算定した。没水型において、周期が長いほど反射率の計算精度が高い。その要因として波長分割数 L/dx の高さが考えられる。

表 5-14 CS3D による反射波計算の計算条件設定

設定項目	周期 40 s	周期 80 s	周期 120 s
計算時間間隔	0.2sで一定	0.4sで一定	0.4sで一定
造波モデル・関数	造波ソース・ストークス波またはクノイド波		
造波位置	270セル目	535セル目	805セル目
水深	15 m		
造波波高	0.5 m		
造波周期	40 s	80 s	120 s
計算時間長	2000 s	4000 s	6000 s
計算時間間隔	0.2 s	0.4 s	0.4 s
計算ステップ数	10,000	10,000	15,000
計算波数	50	50	50
減衰領域幅	490 m	970 m	1460 m
格子間隔	dx=2.0m, dy=2.0m, dz=0.5m		
波長 L (m)	485	970	1455
L/dx	243	485	728
x方向セル数	1,250	2,500	3,750
y,z方向セル数	y方向:1, z方向:40		
総セル数	50,000	100,000	150,000
水槽長/波長	5.2	5.2	5.2
慣性力係数	CM = 1.2		
D-F則の係数	石材 $\alpha_0=1500$ $\beta_0=3.6$		
	消波ブロック $\alpha_0=2100$ $\beta_0=2.2$		
空隙率	石材層:0.43 消波ブロック層:0.5		

表 5-15 CS3D と模型実験による反射率の算定結果

検討手法	没水型			没水離隔型		
	40s	80s	120s	40s	80s	120s
模型実験	0.672	0.904	0.945	0.459	—	—
CS3D	0.817	0.966	0.996	0.469	0.875	0.972
再現精度	0.784	0.931	0.946	0.978	—	—

5-3-3. 反射波に関する実験と計算に要する時間

表 5-16 に CS3D の実施にかかった計算時間を示す。CS3D の計算は前出の表 5-6 に示す計算機で 8 コアを使用した並列計算で実施した。長周期波の反射波の計算は、120 s で 50 波の計算を 1 時間強の時間で実行できる。数値シミュレーションの対象時間は「作用時間」に示した値であり、これを実時間と称す。計算に要した時間は「計算時間」に示した値であり、計算時間と実時間の比が実時間比である。周期が長いほど実

時間比が大きい。これは周期が長いほど総セル数が多いことと、120 s はほかの周期よりステップ数が多いことによる。周期 40 s と 80 s は周期の 1/200 の時間間隔で計算を実行した。120 s も 1/200 の 0.6 s で計算を実行したが、計算が途中で破綻したため周期の 1/300 の 0.4 s の時間間隔で計算を実施した。

表 5-16 CS3D による反射波の計算時間

T (s)	計算波数	単位 (s)		ステップ数	総セル数	計算負荷 (*10 ⁹)	計算時間 (hour)	実時間比	ステップ時間 (s)
		作用時間	時間間隔						
40	50	2000	0.2	10,000	50,000	0.50	0.22	0.40	0.08
80	50	4000	0.4	10,000	100,000	1.00	0.58	0.52	0.21
120	50	6000	0.4	15,000	150,000	2.25	1.12	0.67	0.27

設計実務のための長周期波の反射波の検討では、通常は、複数の条件に対する検討を行う。表 5-17 に、複数の条件に対して模型実験と数値シミュレーションを実施する場合の所要日数を示す。模型実験は、実験模型の製作、模型床製作と模型床撤去にも日数を要するので、これらの準備作業を必要としない CS3D による数値シミュレーションは、模型実験よりも実施に必要な日数が少ない。周期 3 種類×断面 3 種類では模型実験が CS3D の 4.9 倍であるが、周期 3 種類×断面 15 種類では 3.1 倍に小さくなる。これは、実験ケース数にかかわらない実験模型の製作や模型床製作に必要な日数の、1 ケースあたりの割合が少なくなるためである。

表 5-17 長周期波の反射波に関する2次元模型実験と数値シミュレーションの
所要日数

周期3種類×断面3種類

日数	
項目	模型実験
模型床製作	4
模型製作	22
計測機器設置	3
入射波検定	3
初回模型設置	2
反射波実験	6
計測機器撤去	2
模型床撤去	2
合計	34

日数	
項目	CS2D
計算条件設定	1
試算	2
入射波検定	1
反射波計算	3
合計	7

斜体文字は模型製作と
期間の重複が可能

周期3種類×断面15種類

日数	
項目	模型実験
模型床製作	4
模型製作	22
計測機器設置	3
入射波検定	3
初回模型設置	2
反射波実験	30
計測機器撤去	2
模型床撤去	2
合計	58

日数	
項目	CS2D
計算条件設定	1
試算	2
入射波検定	1
反射波計算	15
合計	19

斜体文字は模型製作と
期間の重複が可能

5-4. 伝達波に関する精度と計算時間

5-4-1. 伝達波に関する模型実験

越波によって生じる伝達波の数値シミュレーションによる再現対象データとして、2次元造波水路における伝達波実験について示す。

実験は、長さ 35 m、幅 0.6 m、高さ 1.3 m の 2次元造波水路で実施した。この造波水路には、反射波吸収機能付きのピストン型造波機が設置されている。

1) 伝達波に関する規則波実験

図 5-22 に造波水路と実験模型の形状を示す。造波板中立位置から 2087.5 cm 位置に高さ 20 cm で勾配 1:30 の斜面を設置し、斜面の上端に幅が 3 cm の直立壁を設置した。直立壁の背後は高さ 20 cm の水平床である。水路の終端には、水路壁からの反射波を抑制するために、消波材としてヘチマロンを 200 cm の幅で設置した。造波板前面の水深は 49.5 cm で、直立壁の天端高は初期水面から 13 cm である。なお、図中の「irreg.」の表示は、後述する不規則波実験の条件である。越波伝達波以外の透過波を生じさせないために、海底勾配斜面や直立壁と水路壁の間隙は止水処理を行ったので、越波が生じると直立壁背後の水位が上昇する。図 5-22 に示す ch.2、ch.3、ch.13、ch.16 の位置に容量式波高計を設置して水位変動を測定した。反射波吸収制御で規則波を造波した。波浪条件は ch.2 と ch.3 で入・反射波分離を行った入射波が $H=11.2$ cm、 $T=1.58$ s である。

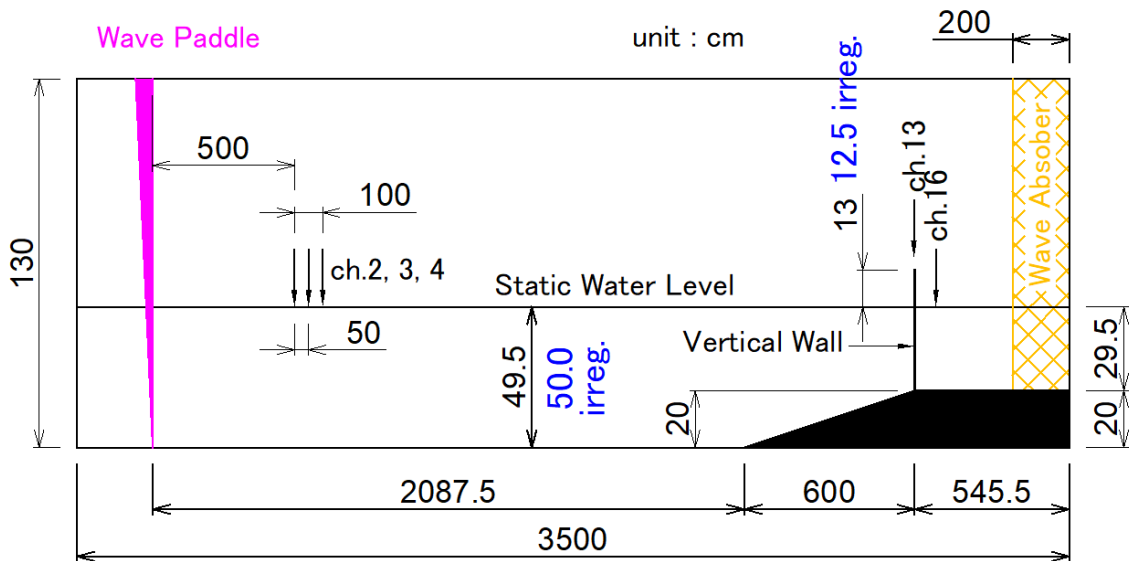


図 5-22 伝達波実験の造波水路と実験模型

図 5-23 に水面波形を示す。水位データの収録は造波開始と同時に始めているため、造波板前面の ch.2 に波が到達するまでの数秒間は水面の変動がない。造波板前面の ch.2 は、造波板の緩起動により最初の 2 波は波高が徐々に大きくなっているが、3 波目以降から約 30 s までは安定した波形が得られている。30 s より後の振幅が大きくなっているのは、実験模型からの反射波の影響である。30 s から 40 s までは波高が次第に大きくなっているが、40 s 以降は反射波が含まれた状態で大きな振幅

が続いている。40 s 以降の振幅には若干の脈動が見られる。直立壁直前の ch.13 は造波板の緩起動の 2 波よりやや長く 5 波程度は波高が徐々に大きくなり、その後は大きな振幅が続いている。規則波実験であるため直立壁直前の ch.13 の波高は概ね規則的であるが、直立壁背後の ch.16 の波は短周期の不規則な変化を生じている。伝達波の振幅が不規則に変化する要因の一つとして、直立壁直前の ch.13 の波高に脈動を生じているため、1 波ごとの越波量にばらつきがあるためと考えられる。なお、直立壁背後には越波水塊がたまっていくため、ch.16 平均水位が徐々に高くなっている。なお、ch.16 で測定した伝達波の波高は 0.64 cm である。

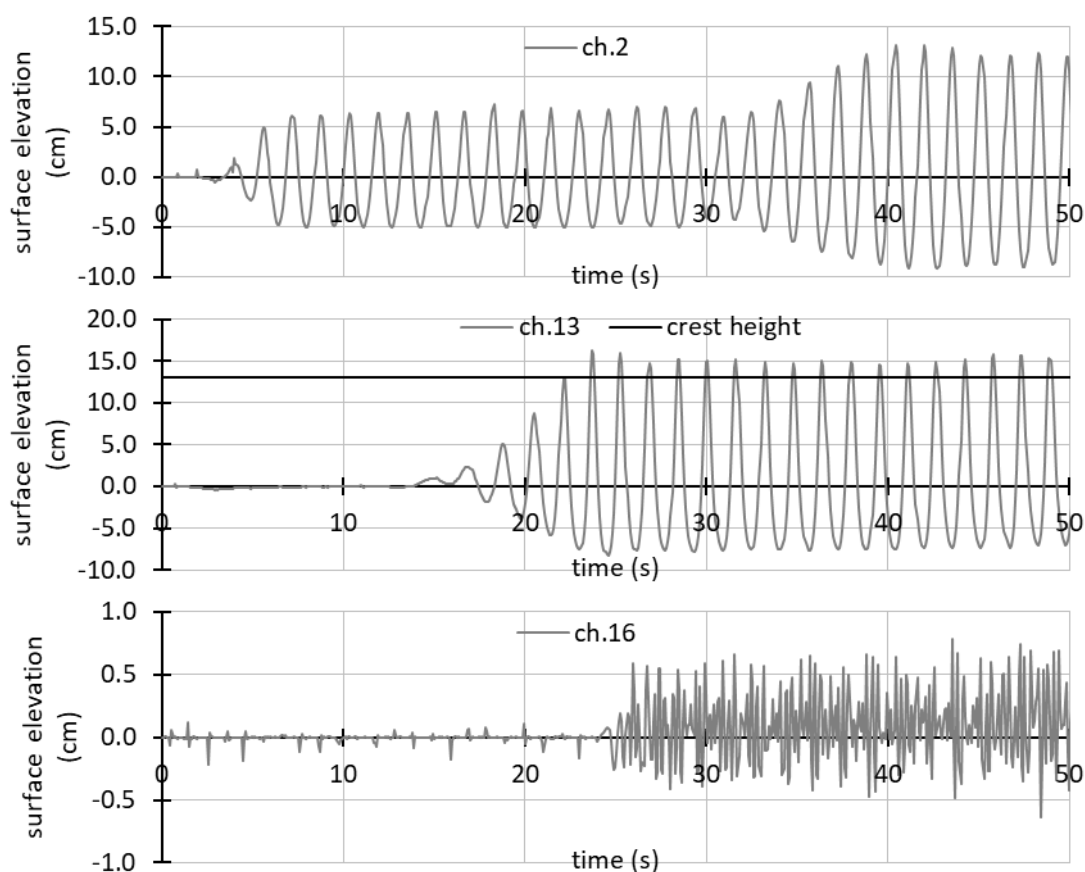


図 5-23 規則波による伝達波実験の水面波形

2) 伝達波に関する不規則波実験

不規則波実験は、規則波実験と同じ模型を用いて、図 5-22 に「irreg.」で示すように造波板前面の水深を 50.0 cm として実施した。したがって、直立壁の天端高は初期水面から 12.5 cm である。不規則波実験の波浪条件は、ch.2 と ch.4 のデータで入・反射波分離を行った入射波が $H_{1/3}=12.1$ cm、 $T_{1/3}=1.96$ s で、水深 50 cm における波長 L が 396 cm である。

図 5-24 に造波板前面の ch.2 と直立壁背後の ch.16 の周波数スペクトル解析結果を示す。造波板前面の ch.2 は入射波の周期に対応する約 0.5 Hz にスペクトル密度のピークがある。直立壁背後の ch.16 は 0.5 Hz 付近のスペクトル密度が小さくなり、1~2 Hz 程度が大きくなっている。

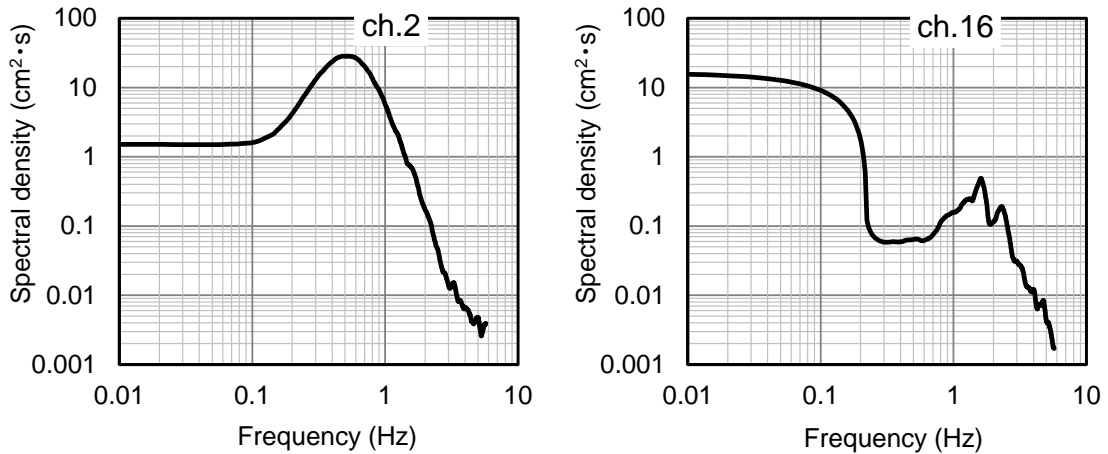


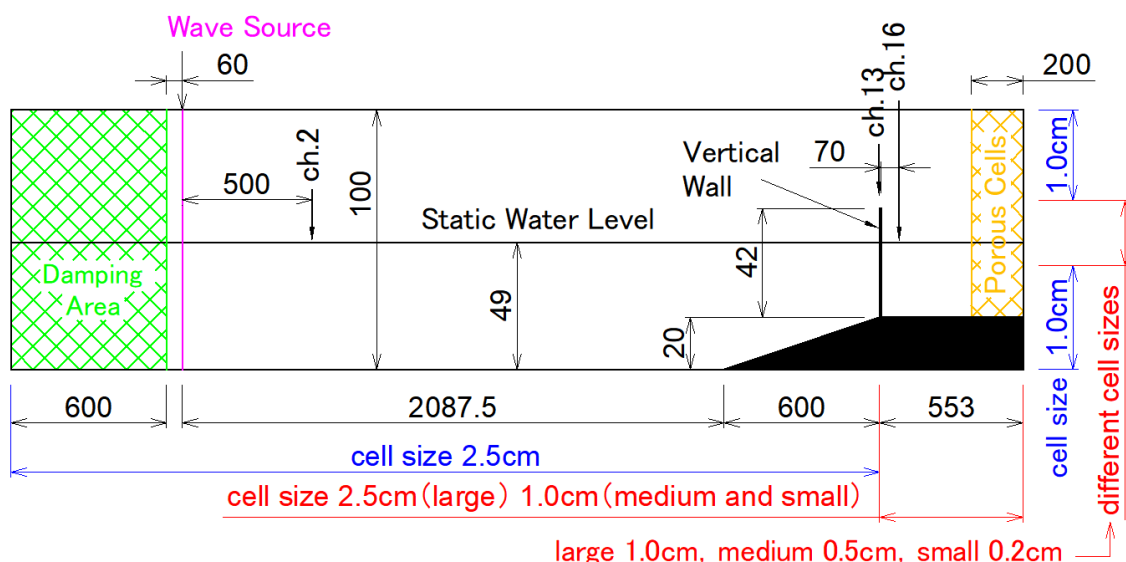
図 5-24 不規則波実験による伝達波実験の周波数スペクトル

5-4-2. 数値シミュレーションによる伝達波の再現

1) 規則波による伝達波の再現

「5-4-1.1) 伝達波に関する規則波実験」に示した模型実験を再現する数値シミュレーションを実施した。数値計算手法は 2次元版の数値波動水路¹⁻⁵⁾ (以下、「CS2D」と称す。)とした。

CS2D の計算領域は図 5-25 に示すとおりで、模型実験をできるだけ忠実に再現した。表 5-18 に計算条件設定を示す。CS2D を用いて直立壁に規則波を作用させて、模型実験と波形を比較した。CS2D の造波信号は、造波ソース前面の ch.2 の波高と周期が模型実験と一致するように、 $H=11.0\text{ cm}$, $T=1.58\text{ s}$ とした。CS2D のセルサイズの違いによる直立壁背後の波高の計算精度を比較するために、図 5-25 および表 5-19 に示すようにセルの大きさが異なる 3 種類の計算を実施した。



unit : cm (This figure is expanded ten times in the vertical direction.)

図 5-25 CS2D による伝達波の再現計算の計算領域設定 (規則波)

表 5-18 CS2D による伝達波の再現計算の計算条件設定 (規則波)

条件項目	条件設定
波高, 周期, 水深	$H=11\text{cm}, T=1.58\text{s}, h=49\text{cm}$
造波モデル	造波ソース
計算時間, 時間刻み幅	粗セル 160s, 0.001 中セル 160s, 0.001 細セル 56.11s, 0.0001
ポアラス下限値	0.0001
VP-DONOR	0.2
VOF関数境界条件	フリー
流速・圧力境界条件	スリップ
減衰領域 空隙率, C_M, C_D	空隙率0.9, $C_M=1.0, C_D=4.7$

表 5-19 セルサイズの設定 (規則波)

	水平方向 dx		鉛直方向 dz		
	左端～ 直立壁	直立壁 ～右端	下から 0～40cm	下から 40～ 65cm	下から 65～ 100cm
粗セル	2.5cm		1cm		
中セル	2.5cm	1cm	1cm	0.5cm	1cm
細セル	2.5cm	1cm	1cm	0.2cm	1cm

図 5-26 に CS2D の水位の時刻歴データを模型実験と比較して示す。ch.番号と位置の対応は図 5-25 のとおりである。造波位置前面の ch.2 は 30 s 程度までは入射波だけであり、模型実験と CS2D がほぼ一致している。約 35 s 以降に、反射波が含まれて振幅が大きくなる傾向は、模型実験と CS2D が一致している。ただし、模型実験より CS2D の振幅が若干

大きい。その要因は、直立壁直前の ch.13 の重複波高が、模型実験より CS2D が若干大きいことである。また、セルの大きさが小さいほど、振幅が若干大きい。ch.16 に示す直立壁背後の水位は、越波に伴う背面水位の上昇により、時間の経過とともに平均水位が徐々に高くなっている。直立壁直前の重複波高は模型実験より CS2D が大きいので、直立壁背後の平均水位の上がり方は模型実験より CS2D が若干大きい。直立壁背後の水面振動はセルサイズにより異なり、セルが大きいほど水面振動が小さい。CS2D の直立壁直前の重複波は波の到達直後が特に大きいため、直立壁背後に越波伝達波が到達した直後に振幅が大きくなり、その後は同程度の振幅が継続する。伝達波発生直後の大きな振幅を除外してそれ以降の波高を解析し、模型実験の波高に対する計算精度を前出の式(5-1)により算定した。図 5-27 に CS2D による伝達波高の計算精度を示す。セル数が多いほど計算精度が高いことが明確である。すなわち、セルのサイズを小さくして伝達波に対する分割数を多くするほど計算精度が高い。

細セルの計算は、エラーにより計算が破綻するため、計算時間刻み幅を 0.001 s から 0.0001 s まで段階的に細かくする計算を実施した。図 5-28 に計算時間刻み幅による波形の比較を示す。各計算時間刻み幅の波形の終了が計算停止時間である。計算時間刻み幅を細かくすると計算が長く回るようになるが、0.0001 s でも最後まで完走することはなかった。図 5-28 に示すように、計算時間刻み幅を変更しても水面波形に違いは見られない。

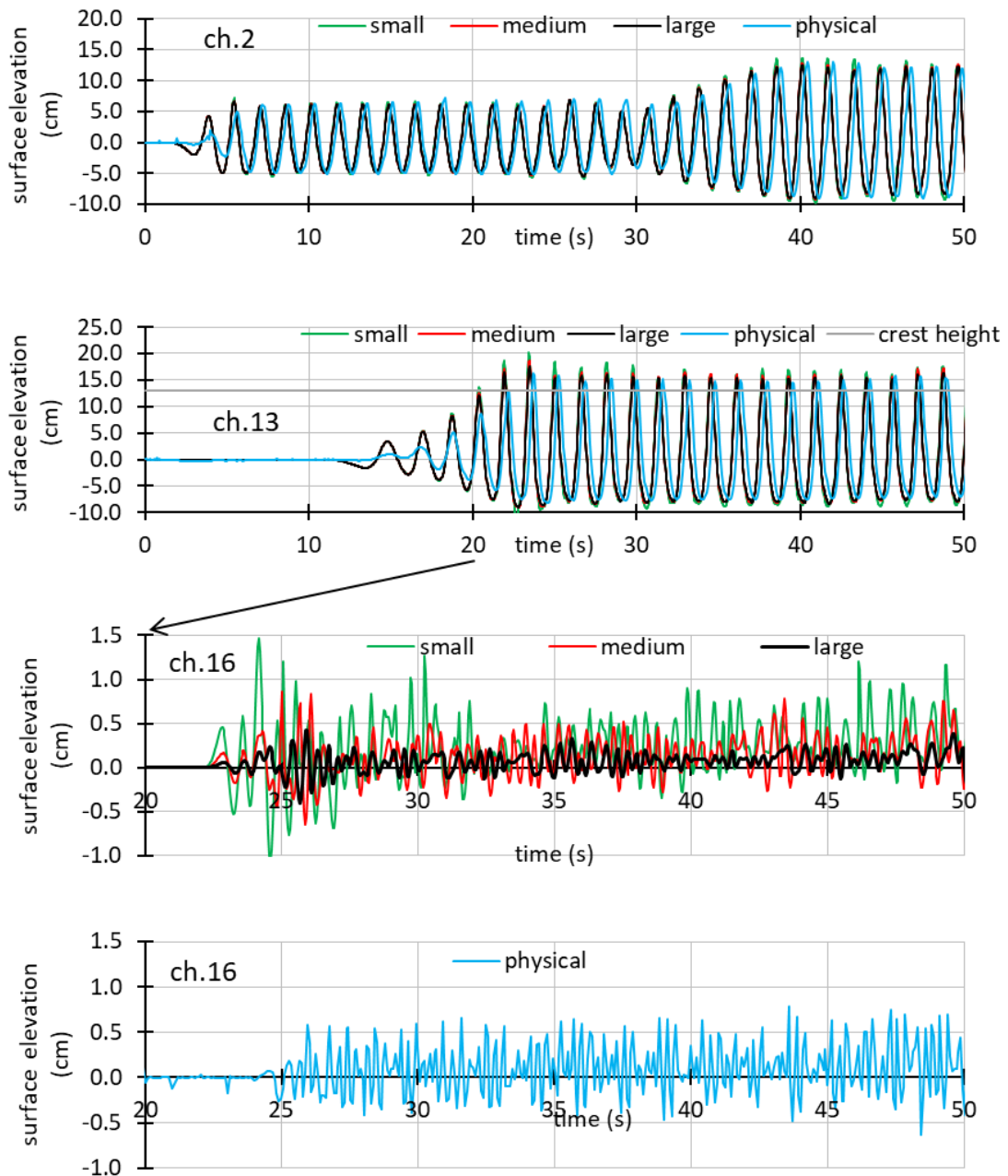


図 5-26 模型実験と CS2D による水面波形の比較

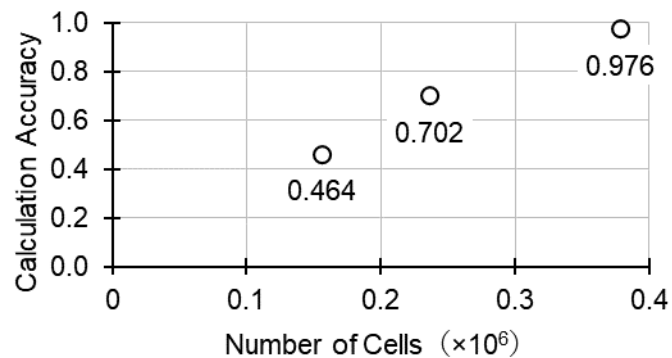


図 5-27 CS2D による伝達波高の計算精度

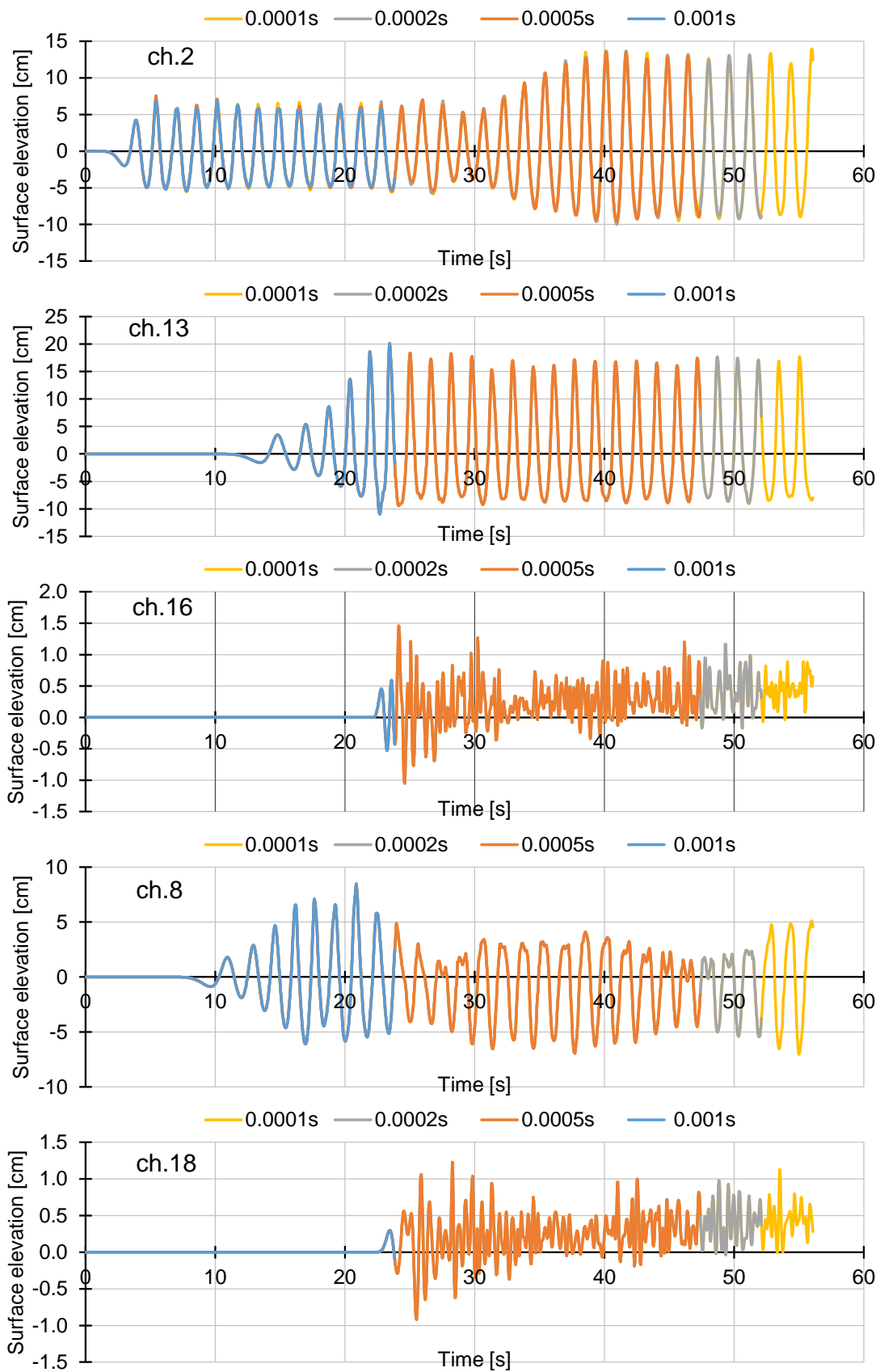


図 5-28 細セルにおける計算時間刻み幅による波形の比較

2) 不規則波による伝達波の再現

「5-4-1.2) 伝達波に関する不規則波実験」に示した模型実験を再現する数値シミュレーションを実施した。数値計算手法は2次元版の数値波動水路¹⁻⁵⁾(以下、「CS2D」と称す。)とした。

図5-29にCS2Dによる伝達波の計算領域を示す。計算時間短縮のために造波ソースから海底地形斜面法先までの距離を模型実験より短くした。CS2Dの海底地形法先から陸側の構造物条件は模型実験をできるだけ忠実に再現した。表5-20に不規則波による伝達波の計算条件の設定を示す。

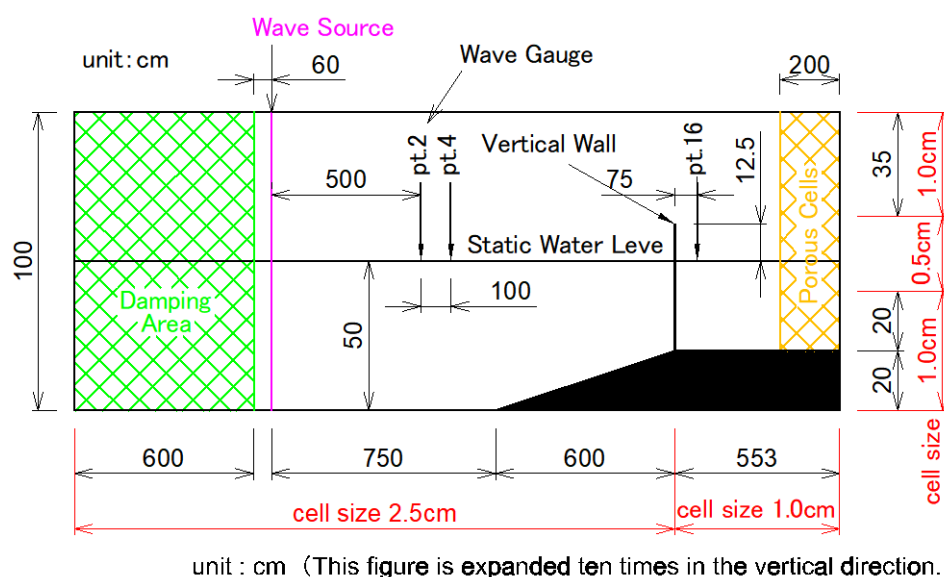


図 5-29 CS2D による伝達波の再現計算の計算領域設定 (不規則波)

表 5-20 CS2D による伝達波の再現計算の計算条件設定 (不規則波)

条件項目	条件設定
波高, 周期, 水深	$H_{1/3}=14.4\text{cm}$, $T_{1/3}=1.93\text{s}$, $h=50\text{cm}$
格子間隔	規則波計算の中セルと同じ
造波モデル, 造波関数	造波ソース, マトリックス
計算時間, 時間刻み幅	245s, 自動(安全率0.4)
ポラス下限値	0.1
VP-DONOR	0.2
VOF関数境界条件	フリー
流速・圧力境界条件	スリップ
消波材空隙率, C_M , C_D	空隙率0.9, $C_M=1.0$, $C_D=4.7$

図5-29に示すch.2とch.4のwave gaugeのデータを用いて合田らの方法⁵⁻¹⁾によって入射波と反射波の分離を行った。それにより得た反

射率と入射波の波高と周期は表 5-21 のとおりである。模型実験と CS2D の入射波の値はほぼ一致している。

図 5-30 に波高階級別の出現頻度を示す。横軸の H_{bar} は平均波高である。縦軸の n は波高階級ごとの出現回数で、 N は全体の波数である。造波ソース前面の pt.2 は波高階級の 0.5 から 1.25 にピークを持ち、2.50 を超える出現はない。直立壁より背後の pt.16 は 1.0 未満の出現頻度が圧倒的に多いが、最大で 7 倍や 8 倍の出現がある。模型実験における造波機前面と直立壁背後の波高の出現の傾向を CS2D の数値シミュレーションで再現できている。

表 5-21 反射率および入射波高と有義波周期（不規則波）

	反射率	$H_{1/3}$ [cm]	$T_{1/3}$ [s]
模型実験	0.826	10.49	1.49
CS2D	0.878	10.53	1.48

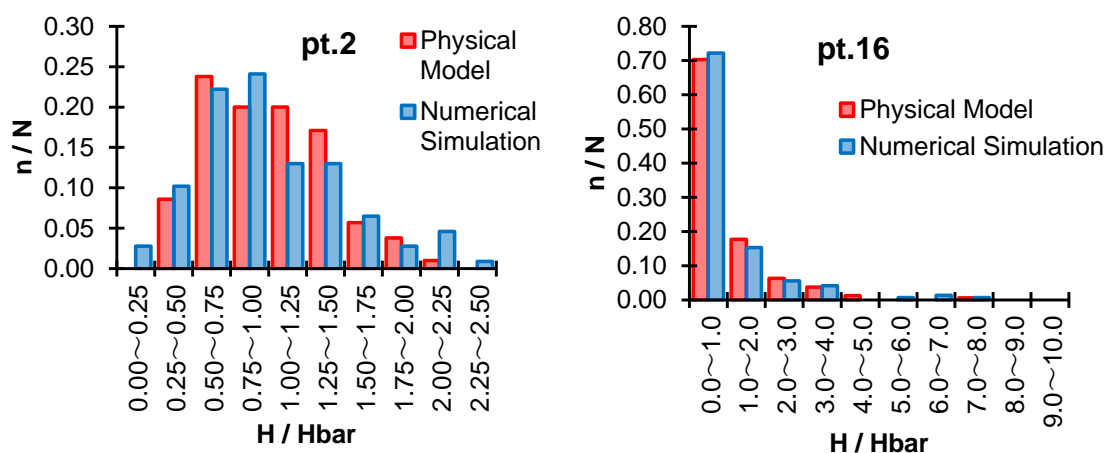


図 5-30 波高階級別の出現頻度（不規則波）

表 5-22 造波板前面と直立壁背後の波高と周期（不規則波）

	$H_{1/3}$ (cm)		$T_{1/3}$ (s)		pt.16 / pt.2	
	pt.2	pt.16	pt.2	pt.16	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$
模型実験 (PM)	13.29	3.28	1.41	0.90	0.247	0.638
CS2D (NS)	13.33	2.67	1.39	0.79	0.200	0.568
NS / PM	1.003	0.814	0.986	0.878		

表 5-22 に模型実験と数値シミュレーションの pt.2 と pt.16 の波高と周期を示す。pt.16 と pt.2 の波高の比は波高伝達率であり、模型実験の 0.313 に対し数値シミュレーションは 0.254 とやや小さい。不規則波の

計算は直立壁より右側の領域の z 方向のセルサイズを 0.5 cm で実施した。これは規則波を対象とした計算の中セルと同じである。前出の図 5-27 に示したように、規則波の計算において z 方向のセルサイズを 0.2 cm まで細かく（セル数を多く）したことで伝達波高の計算精度高めることができた。不規則波の計算も z 方向のセルサイズを細かくすることで、波高伝達率の計算精度が高まると考えられる。

5-4-3. 伝達波に関する実験と計算に要する時間

表 5-23 に CS2D でセルサイズを変更した計算の実施にかかった計算時間を示す。表 5-24 に使用した計算機の諸元を示す。数値シミュレーションの対象時間は「作用時間」に示した 160 s である。ただし細セルは計算時間間隔を細かくしても計算が途中で破綻したため、計算が破綻した 56.11 s とした。これらの作用時間を実時間と称す。計算に要した時間は「計算時間」に示すとおりで、セルを細かくするほど長い時間を要している。計算時間と実時間の比が実時間比である。実時間に対して、粗セルで約 250 倍、中セルで約 900 倍、粗セルで約 9000 倍の計算時間を要している。

表 5-23 CS2D による伝達波の計算時間

セル サイズ	単位 (s)		ステップ 数	総セル 数	計算 負荷 (*10 ⁹)	計算 時間 (hour)	実時間 比	ステッ プ時間 (s)
	作用 時間	時間 間隔						
粗セル	160	0.001	160,000	156,000	25.0	11.4	257	0.26
中セル	160	0.001	160,000	236,500	37.8	41.3	929	0.93
細セル	56.1141	0.0001	561,141	378,400	212.3	143.3	9193	0.92

表 5-24 CS2D による伝達波の計算に用いた計算機の性能

CPU	クロック	コア数	メモリ
Intel Core i7 -8700	3.2 GHz	12	15.3 GB

設計実務のための伝達波の検討では、通常は、複数の条件に対する検討を行う。表 5-25 に、複数の条件に対して模型実験と数値シミュレーションを実施する場合の所要日数を示す。模型実験は、入射波検定と伝達波実験の他に、実験模型の製作、模型床製作と模型床撤去にも日数を

要する。そのため、周期 3 種類×断面 3 種類で 22 日、断面 5 種類で 51 日の日数を要する。CS2D は模型や模型床の製作のような日数は必要ない。しかし CS2D による伝達波の計算は計算時間が長いので、周期 3 種類×断面 3 種類で 129 日、断面 5 種類で 345 日の日数を要する。計算機は土曜日や日曜日にも休まずに動くことを考慮しても、周期 3 種類×断面 5 種類では 1 年の期間を要する。計算機を複数台用意すれば期間の短縮を図ることはできるものの、CS2D による伝達波の計算は、現段階では実用的ではないといえる。

表 5-25 伝達波に関する 2 次元模型実験と数値シミュレーションの所要日数

周期3種類×断面3種類

日数	
項目	模型実験
模型床製作	4
<i>模型製作</i>	5
計測機器設置	3
入射波検定	3
初回模型設置	2
伝達波実験	6
計測機器撤去	2
模型床撤去	2
合計	22

日数	
項目	CS2D
計算条件設定	1
試算	2
入射波検定	72
伝達波計算	54
合計	129

斜体文字は模型床製作および計測機器設置と期間の重複が可能

周期3種類×断面15種類

日数	
項目	模型実験
<i>模型床製作</i>	4
模型製作	15
<i>計測機器設置</i>	3
入射波検定	3
初回模型設置	2
反射波実験	30
計測機器撤去	2
模型床撤去	2
合計	51

日数	
項目	CS2D
計算条件設定	1
試算	2
入射波検定	72
伝達波計算	270
合計	345

斜体文字は模型製作と期間の重複が可能

5-5. 越波に関する精度と計算時間

5-5-1. 数値シミュレーションによる越波流量の再現

「5-4-1.1) 伝達波に関する規則波実験」に示した伝達波実験では、前出の図 5-23 の ch.16 にみられるように、越波を生じることによって直立壁背後の水位が上昇する。その現象を再現する数値シミュレーションを、2次元版の数値波動水路¹⁻⁵⁾ (以下、「CS2D」と称す。)によって実施した。模型実験における直立壁背後の水位上昇量を越波量に換算し、数値シミュレーションではセルサイズを変更して越波量の計算精度を検証した。

図 5-31 に CS2D による越波量の再現計算の計算領域の設定を示す。セルのサイズは、高さ方向の全体を 1 cm とした「1 cm」、全体を 2 cm とした「2 cm」、水平床から直立壁の天端より上に 4 cm までの範囲を 1 cm でそれ以外を 2 cm とした「mix」の 3 種類である。水平方向のセルサイズは、「mix」と「2 cm」は全体が 2.5 cm であるが、「1 cm」は直立壁より右側を 1 cm とした。セルサイズ以外の計算条件は、前出の表 5-18 と同じである。前出の図 5-26 の ch.2 に示したように、CS2D による造波波高は模型実験と一致している。

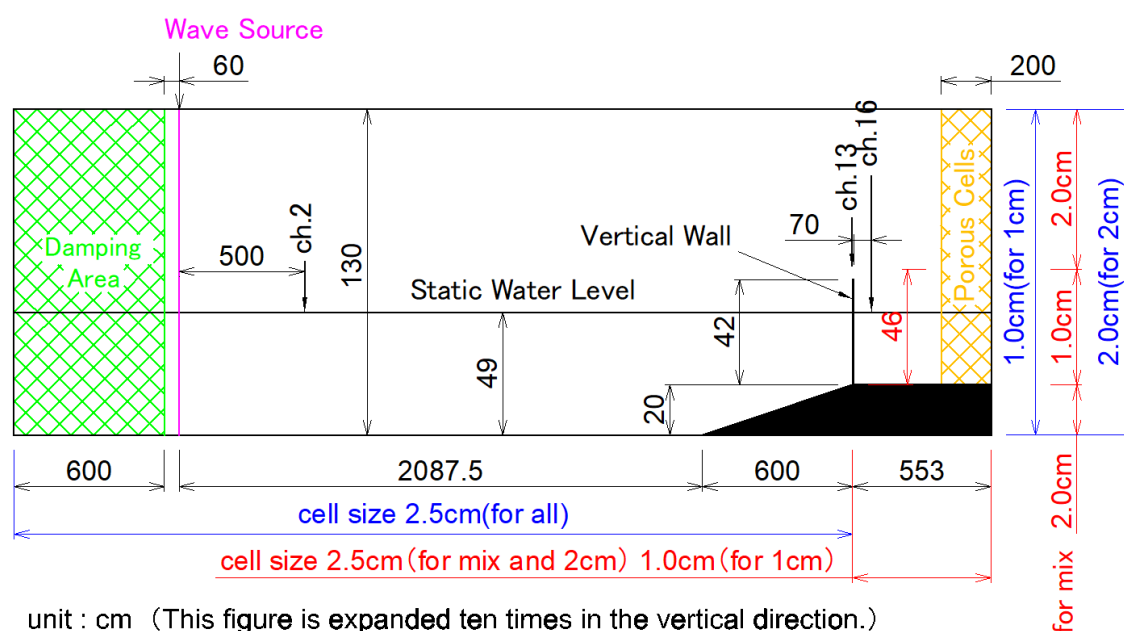


図 5-31 CS2D による越波量の再現計算の計算領域設定

図 5-32 に越波量の時間変化を示す。「2 cm」は越波量が極めて少なく、越波の現象を十分に再現できていない。「mix」では越波を生じてい

るけれども、越波量は模型実験より少ない。「1 cm」は時間の経過による越波量の増加状況が模型実験とほぼ一致している。

表 5-26 に 157.4 s 後の越波量と模型実験に対する計算精度を示す。「mix」の越波量は模型実験の 63.7 % であるが、「1 cm」は 97.9 % の高い精度である。「1 cm」の高さ方向のセルサイズと、直立壁より沖側のセルサイズは「5-4-2.1）規則波による伝達波の再現」に示した「粗セル」と同じ設定である。「1 cm」および「粗セル」の計算精度は、伝達波高に対しては 0.464 に過ぎないが、越波量に対しては 0.979 の高さである。したがって、越波量の計算精度を高めるためのセルは、伝達波高の計算精度を高めるほどには細かくなってよいことがわかる。

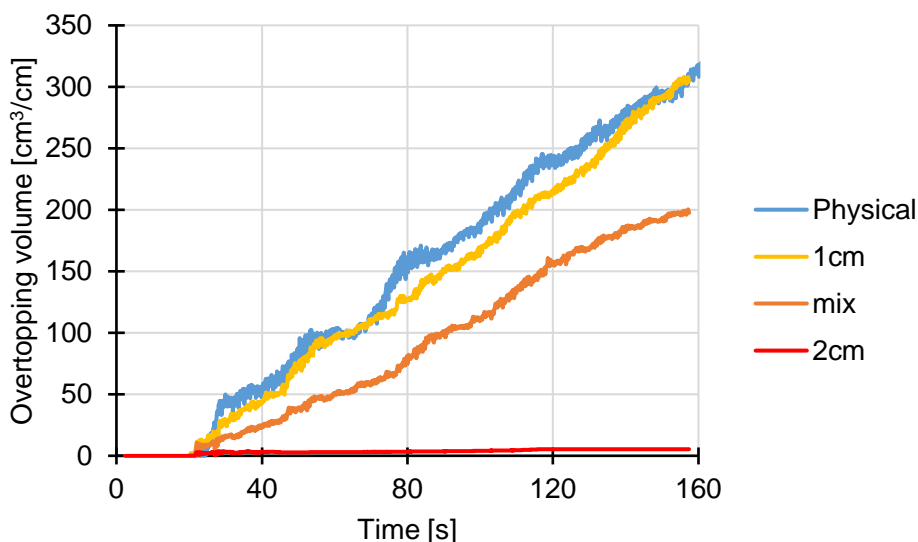


図 5-32 越波量の時間変化

表 5-26 越波量と計算精度

	Physical	1cm	mix	2cm
越波量 [cm ³ /cm]	310.6	304.2	197.9	5.53
計算精度	—	0.979	0.637	0.018

越波量の評価時間 157.4 s

5-5-2. 越波に関する計算時間

表 5-27 に CS2D により越波の計算に要した計算時間を示す。数値シミュレーションの対象時間は「作用時間」に示す 160 s である。この作用時間を実時間と称す。計算に要した時間は「計算時間」に示すとおりで、セルを細かくすると計算時間が増えている。計算時間と実時間の比が実時間比である。実時間に対して、「2 cm」が約 90 倍、「mix」が約 160 倍、

「1 cm」が約 240 倍の計算時間を要している。

表 5-27 CS2D による越波の計算時間

セル サイズ	単位 (s)		ステップ 数	総セル 数	計算 負荷 (*10 ⁹)	計算 時間 (hour)	g=f/a	h=f/c
	a	b						
	作用 時間	時間 間隔	c=a/b	d	e=c*d	f	実時間 比	ステッ プ時間 (s)
2cm	160	0.001	160,000	102,960	16.5	4.12	92.7	0.09
mix	160	0.001	160,000	138,840	22.2	7.13	160	0.16
1cm	160	0.001	160,000	189,200	30.3	10.72	241	0.24

設計実務のための越波の検討では、通常は、複数の条件に対する検討を行う。表 5-28 に、複数の条件に対して模型実験と数値シミュレーションを実施する場合の所要日数を示す。模型実験は、入射波検定と越波実験の他に、実験模型の製作、模型床製作と模型床撤去にも日数を要する。そのため、周期 3 種類×断面 3 種類で 22 日、断面 5 種類で 51 日の日数を要する。CS2D は模型や模型床の製作のような日数は必要ない。CS2D による越波の計算は、周期 3 種類×断面 3 種類で 13.5 日、断面 5 種類で 31.5 日の日数を要する。CS2D により越波の検討に要する日数は模型実験より少ない。計算条件を適切に設定すれば十分な計算精度を得ることができる。したがって、CS2D による越波の計算は、耐波設計への適用が 2020 年時点で可能であると言える。

表 5-28 越波に関する2次元模型実験と数値シミュレーションの所要日数

周期3種類×断面3種類

日数		日数	
項目	模型実験	項目	CS2D
模型床製作	4	計算条件設定	1
<i>模型製作</i>	5	試計算	2
計測機器設置	3	入射波検定	6
入射波検定	3	越波計算	4.5
初回模型設置	2	合計	13.5
越波実験	6		
計測機器撤去	2		
模型床撤去	2		
合計	22		

斜体文字は模型床製作および計測機器設置と期間の重複が可能

周期3種類×断面15種類

日数		日数	
項目	模型実験	項目	CS2D
<i>模型床製作</i>	4	計算条件設定	1
模型製作	15	試計算	2
<i>計測機器設置</i>	3	入射波検定	6
入射波検定	3	越波計算	22.5
初回模型設置	2	合計	31.5
越波実験	30		
計測機器撤去	2		
模型床撤去	2		
合計	51		

斜体文字は模型製作と期間の重複が可能

5-6. 波圧に関する精度と計算時間

5-6-1. 波圧に関する模型実験

混成式防波堤のケーソンに作用する波圧を、二次元水理模型実験によって測定した。図 5-33 に造波水路と実験模型の配置を示す。水路幅は1 mである。この造波水路には、反射波吸収機能付きのピストン型造波機が設置されている。ただし、規則波の有効波の実験を行ったので、反射波吸収機能は使用していない。設計実務においては模型実験で測定した波圧を現地量に換算して評価を行うので、図 5-33 に示す寸法は1/50縮尺で現地量に換算して示した。以降、この項に示す波高や圧力はフルードの相似則で現地量に換算して示す。

図 5-34 に防波堤模型の断面を示す。天端幅の広い石材マウンドのほぼ中央に矩形のケーソン模型を設置してある。図 5-35 にケーソンに作用する圧力の測定位置を示す。

実験波は規則波を適用し、波高と周期は表 5-29 に示す条件とした。

実験では、造波板からの再反射波の影響を避けるために、造波は模型量で 30 s で停止した。実験波の周期が 16.3 s で模型縮尺が 1/50 であるため、実験波の周期は模型量で 2.31 s である。従って、造波を行った波数は造波機の緩起動も含めて 13 波である。

図 5-36 に波圧測定位置 P2 の圧力の時系列データを示す。凡例の raw は生データ、LPF は 20 Hz の low pass filter をかけた時系列である。波高ランクを大きくすると圧力が大きくなっている。圧力データには、重複派的な成分の圧力のピークを過ぎた後の圧力低下時に、作用時間が短い大きな圧力変動を生じている。20 Hz のフィルターをかけると、圧力ピーク後の作用時間の短い大きな圧力変動を除去することができる。

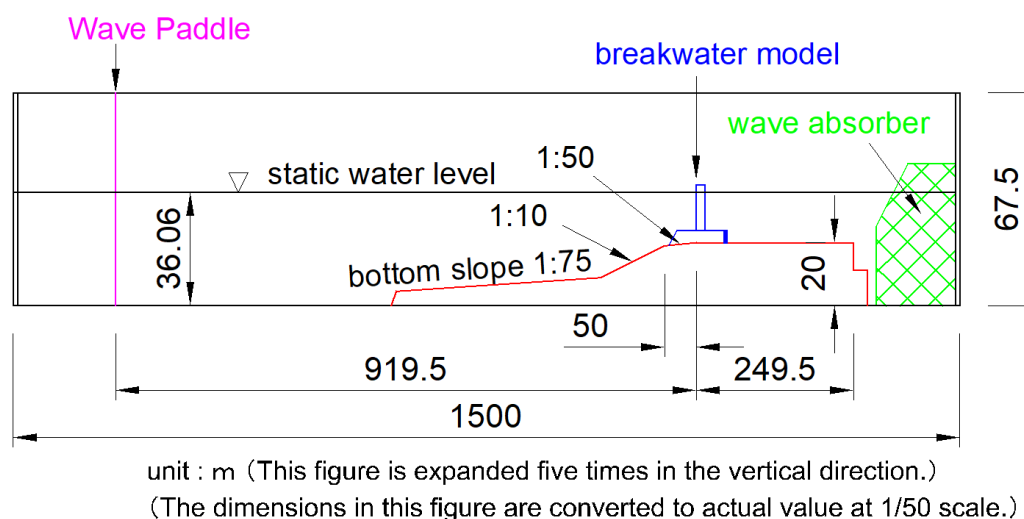


図 5-33 波圧実験の造波水路と実験模型

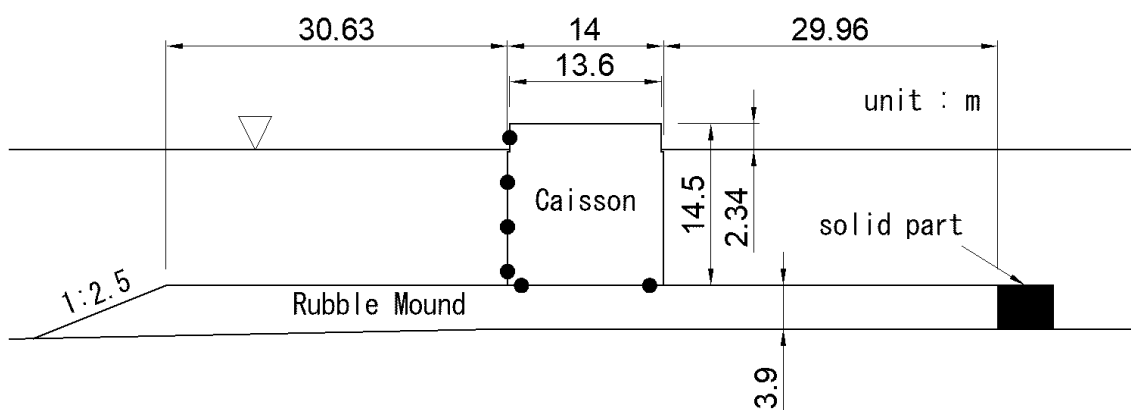


図 5-34 波圧実験の防波堤断面

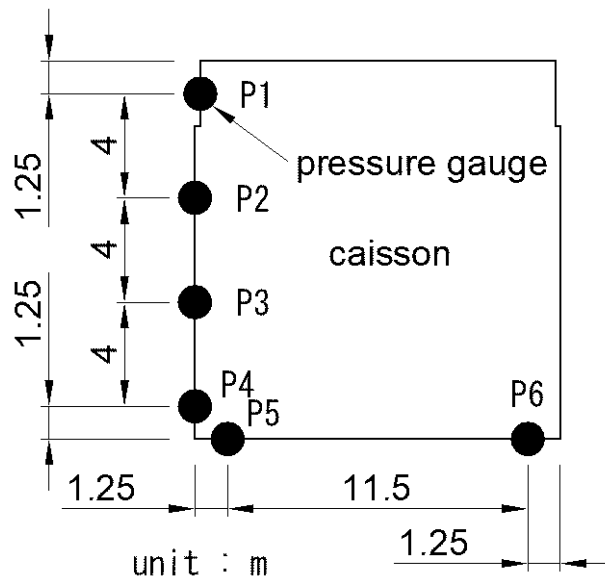


図 5-35 波圧実験の圧力測定位置

表 5-29 波圧実験の波浪条件

	ランク1	ランク2	ランク3	ランク4	ランク5
波高	7.7 m	8.9 m	10.1 m	11.3 m	12.5 m
周期	16.3 s				

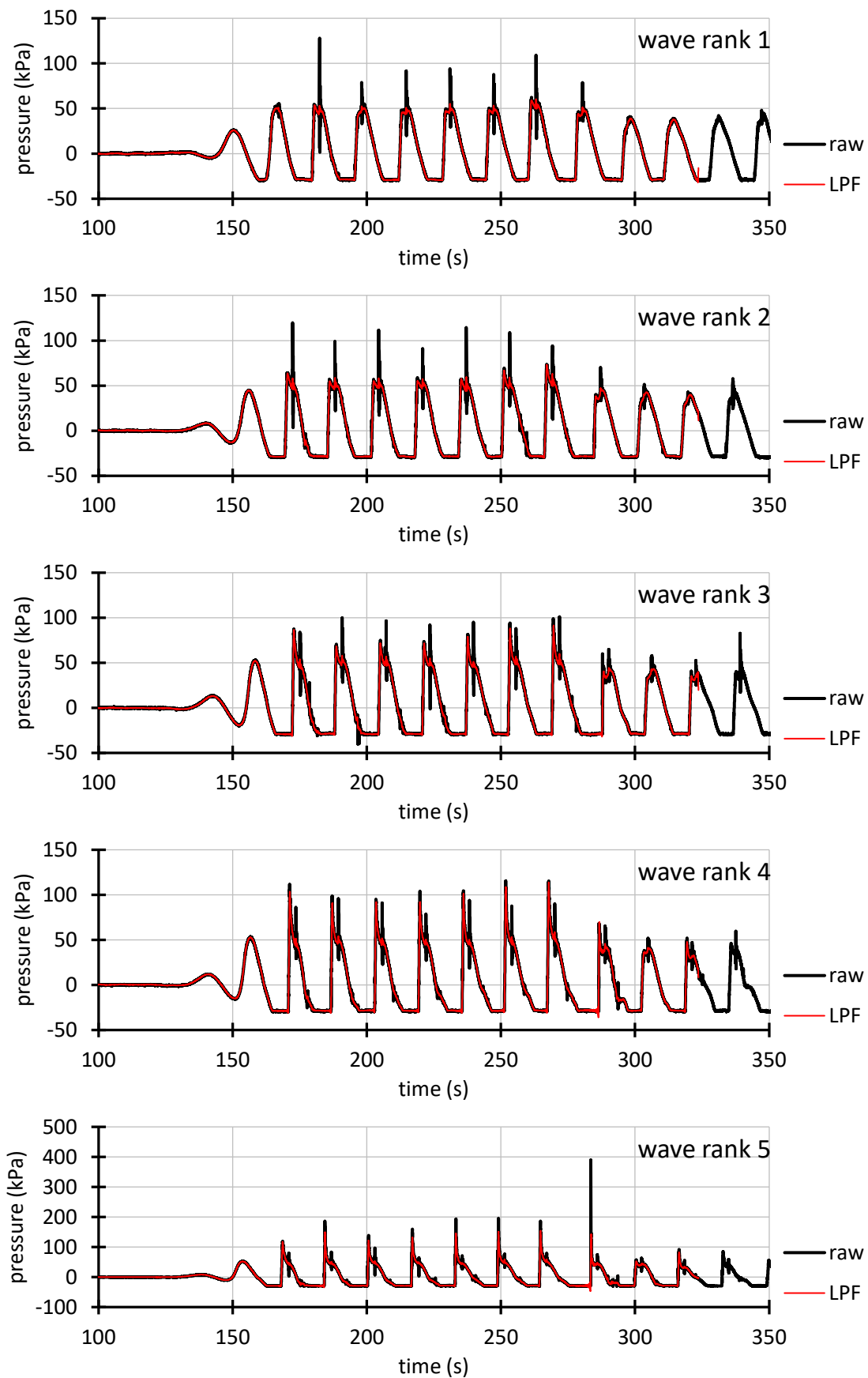


図 5-36 波圧実験における圧力の時系列データ (圧力測定地点 P2)

5-6-2. 数値シミュレーションによる波圧の再現

「5-6-1. 波圧に関する模型実験」に示した模型実験を再現する数値シミュレーションを実施した。数値計算手法は 3 次元数値波動水路 CADMAS-SURF/3D¹⁻⁶⁾ (以下、「CS3D」と称す。) とした。

図 5-37 に CS3D の計算領域を示す。模型実験の 1/75 勾配斜面を 1/10 勾配に置き換えてある以外は、模型実験をできるだけ忠実に再現している。図 5-37 にはセルサイズについても示してある。セルサイズを 2 種類に変更して波圧の計算精度を検証した。小さいセル (small) は波の進行方向の x はセルサイズが 1.0 m であるが、防波堤周辺は 0.5 m としてあり、水深方向の z は全体が 0.5 m である。大きいセル (large) はセルサイズを小さいセルの 2 倍とした。小さいセルと大きいセルのどちらも、水槽幅方向の y は 1 セルだけの 2 次元的な計算であり、 y 方向のセル幅は小さいセルは 0.5 m、大きいセルは 1.0 m とした。図 5-38 に小さいセルの防波堤の形状を示す。模型実験とほぼ同じ形状であるが、セル幅に合わせて 0.5 m 刻みの寸法としてある。大きいセルは x 方向のセルサイズが 1.0 m なので、ケーソンの沖側のマウンド肩幅を 30.0 m とした。図 5-39 に CS3D による圧力の出力範囲を示す。ケーソンの前壁前面の全てのセルと、ケーソン底面のすぐ下の全てのセルの圧力を出力した。なお、大きいセルはセルサイズが 1.0 m であるので、高さが 14.5 m のケーソンをモデル化する際に、ケーソン天端をポーラスセルとして設定した。表 5-30 に計算条件設定を示す。CS3D の計算では、セルサイズによる比較と、流速と圧力の計算の繰り返し回数による比較を実施した。

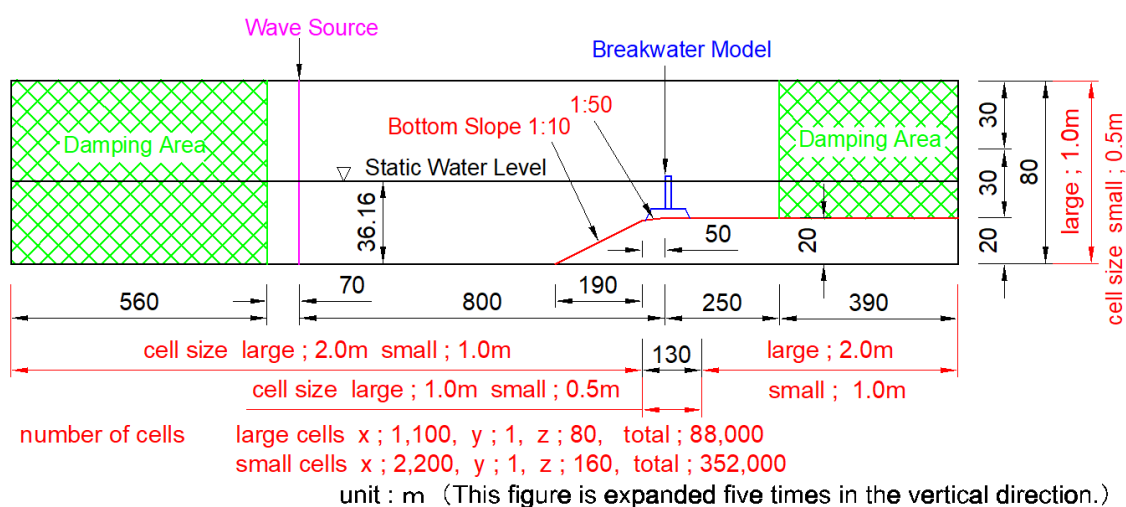


図 5-37 CS3D による波圧の再現計算の計算領域設定

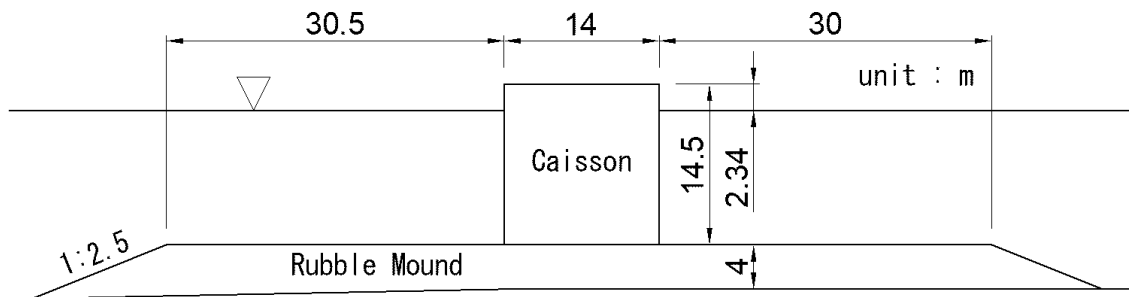


図 5-38 CS3D による波圧の再現計算の防波堤形状（小さいセル）

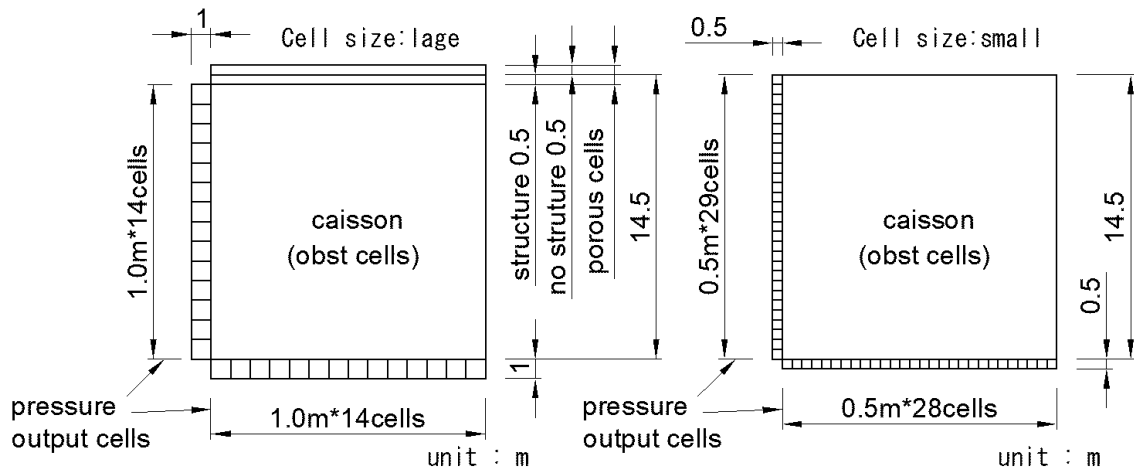


図 5-39 CS3D による波圧の再現計算の圧力出力範囲

表 5-30 CS3D による波圧の再現計算の計算条件設定

設定項目		設定内容
計算時間間隔		0.002 sで一定
造波モデル		造波ソース
造波関数		ストークス波またはクノイド波
造波波高・周期		7.0 m, 16.3 s
セル数	大きいセル	x:1100, y:1, z:80 総セル数:88000
	小さいセル	x:2200, y:1, z:160 総セル数:352000
慣性力係数		CM = 1.2
D-F則の係数		石材 $\alpha_0=1500$ $\beta_0=3.6$
空隙率		石材層:0.43
SUB-LOOP	大きいセル	2
	小さいセル	1, 2, 4 に変更

図 5-40 に、CS3D でセルサイズを変更した計算と模型実験の圧力の比較を示す。図 5-40 の圧力分布は滑動合成波力が最大の時刻の同時波圧である。流速と圧力の繰り返し計算の回数を指定する SUB-LOOP の値は 2 である。CS3D では大きいセルより小さいセルの波圧が大きい。そして大きいセルが模型実験の波圧に近い値である。ただし静水面より高い位置の大きいセルの波圧は模型実験より明らかに小さく、この地点

では小さいセルが模型実験に近い値を与えている。

CS3D の小さいセルでは SUB-LOOP を 1, 2, 4 に変更して計算を実施した。SUB-LOOP は流速と圧力の計算の繰り返し回数である。CS3D の波高と周期は、防波堤を設置しない状態において防波堤位置で模型実験と一致するように入力値を調整した。図 5-41 に、地形模型先端の水位、防波堤模型直前の水位とケーソン上段の波圧の時刻歴データを示す。凡例の SL は SUB-LOOP の略で、SL2 は SUB-LOOP が 2 回を意味する。exp は模型実験である。模型実験の造波機は緩起動がかかるので最初の 2 波の振幅がやや小さい。CS3D は緩造波を 1 波としたので最初の 1 波の振幅がやや小さい。防波堤を設置しない状態で CS3D の波高を模型実験とほぼ一致させたが、第 3 波と第 4 波も模型実験より CS3D の波高がやや大きい。また、CS3D は波の谷の手前で水面波形に高周波の振動を生じる点が模型実験と異なる。図 5-41 の(c)はケーソン前壁上部の波圧波形である。対象位置は図 5-35 の P1 の位置である。P1 の圧力は、SL1 においてスパイク状の大きな圧力を生じている。図 5-41 の(d)は SL1 を除外して示した。模型実験の第 3 波と第 4 波に見られる 2 回目の衝撃的な波圧が CS3D では生じないことや、CS3D の第 4 波は 1 回目の衝撃波圧が模型実験より小さいなどの違いがある。ただし重複波的成分は良く一致している。

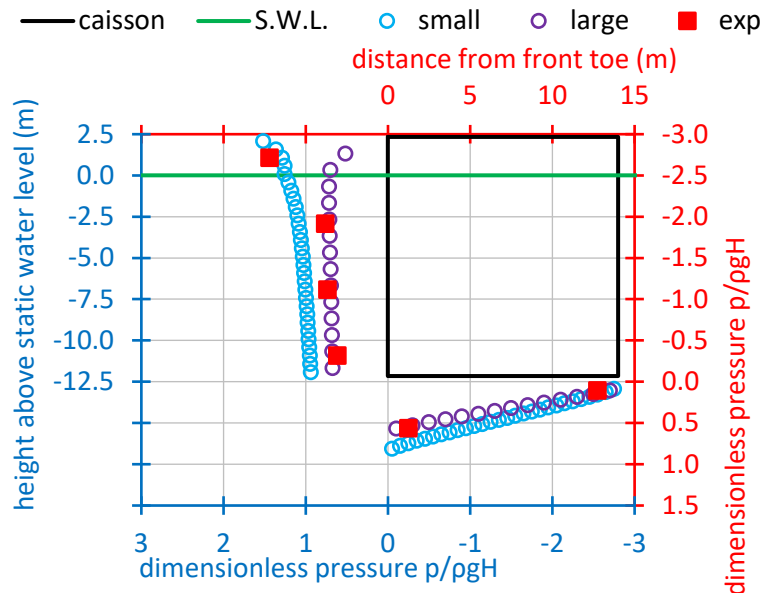


図 5-40 CS3D によるセルサイズの変更と模型実験の無次元圧力

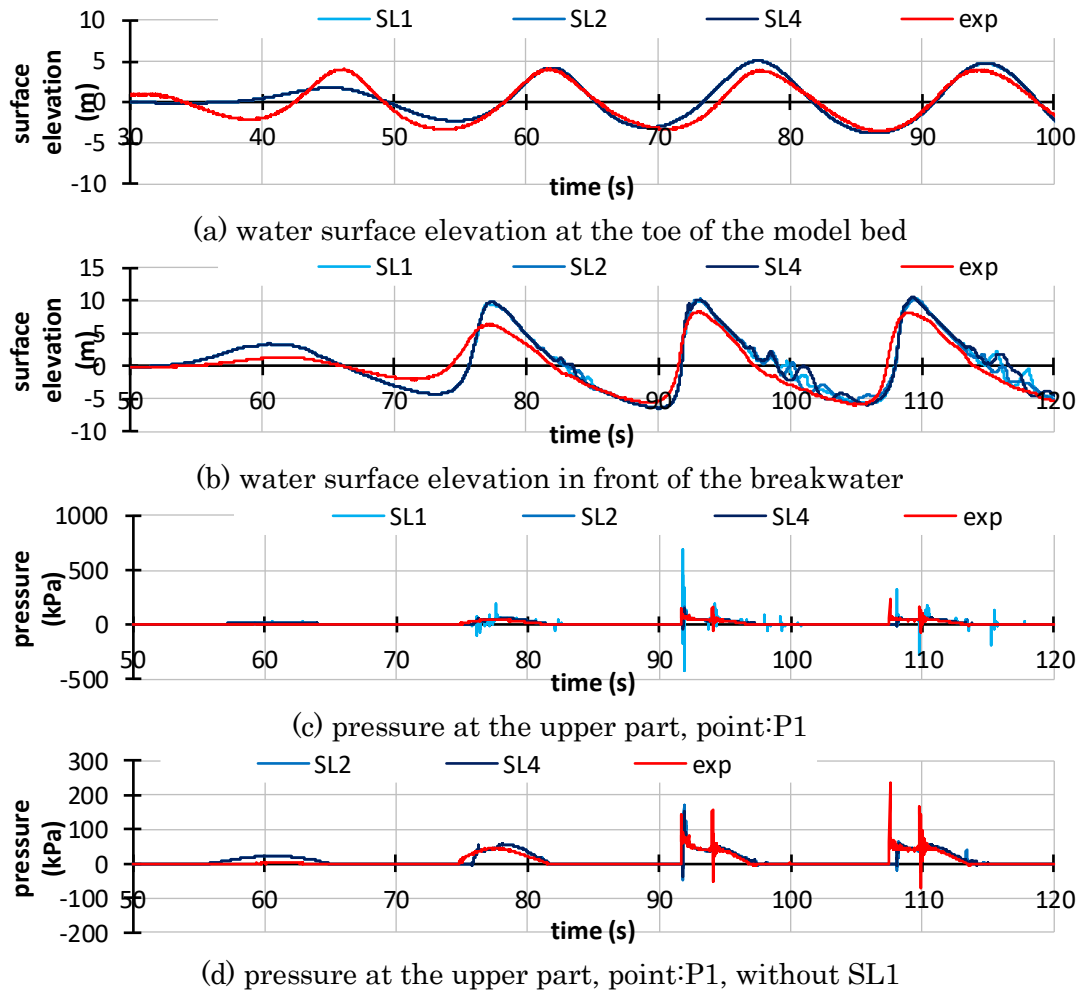


図 5-41 小さいセルで SUB-LOOP 回数を変更した CS3D の計算と模型実験の水
位と圧力の時系列データ

図 5-42 に、小さいセルで SUB-LOOP 回数を変更したケースの、ケーソン前面と底面に作用する波圧の分布を示す。凡例の略字は図 5-41 と同じであり、S.W.L.は静止水位である。図 5-42 の圧力分布は滑動合成波力が最大の時刻の同時波圧である。CS3D の圧力分布は SL の回数により大きく異なる。SL 1 回はスパイクノイズの影響が大きく、模型実験よりかなり大きな値を示す。前面の-2.5 m 以下と底面は SL 4 回が模型実験と良く一致しているが、静止水位より上の圧力が小さくなっている点は模型実験と異なる。前面は+1.09 m の高さに限っては SL 2 回が模型実験に近い値を示す。以上のように、SL の回数により圧力値が異なり、SL なし (1 回) より SL あり (2 回以上) が良いが、単一の SL 回数で全地点の圧力を模型実験と合わせることはできていない。

図 5-43 に小さいセルで SUB-LOOP 回数の変更による波圧の計算精度を示す。計算精度の算出方法は前出の式(5-1)のとおりである。波圧の

計算精度は SL 1 回が 0.134、SL 2 回が 0.628、SL 4 回が 0.841 であり、SL が 1 回から 4 回の範囲では SL 回数が多いほど計算精度が高い。しかし、計算精度が最も高い SL 4 回の条件では、模型実験による波圧が最も大きい P1 の計算精度が 0.44 しかない。波圧の算定は数値シミュレーションにより実施が可能であるが、計算精度の向上と検証が必要である。

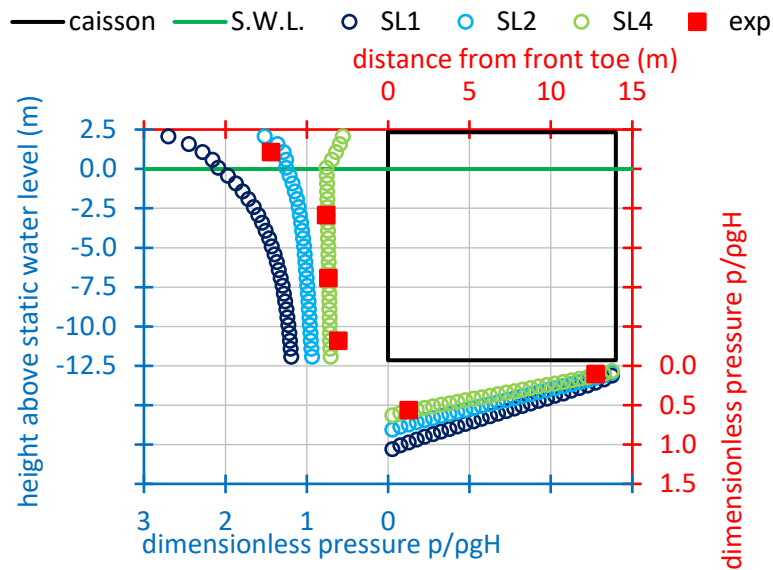


図 5-42 CS3D の小さいセルで SUB-LOOP 回数の変更と模型実験の無次元圧力

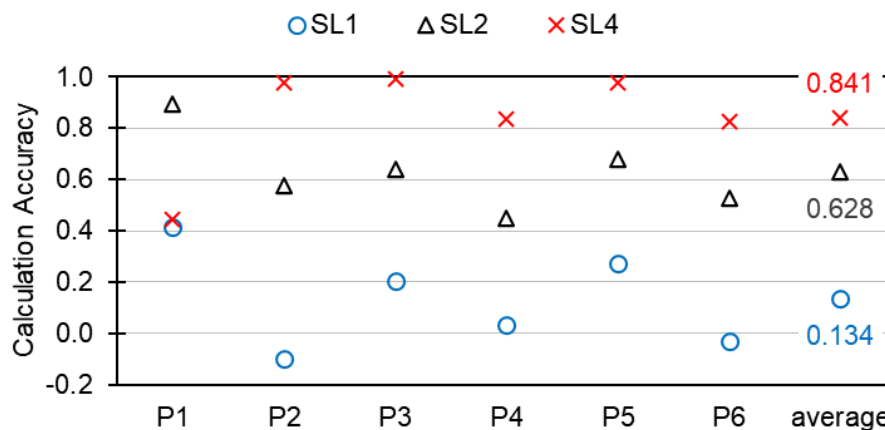


図 5-43 CS3D の小さいセルで SUB-LOOP 回数の変更による波圧の計算精度

5-6-3. 波圧に関する実験と計算に要する時間

表 5-31 に CS3D でサブループの回数を変更した計算の実施にかかった計算時間を示す。CS3D の計算は前掲の表 5-6 に示す計算機で 8 コアを使用した並列計算で実施した。数値シミュレーションの対象時間は 420 s であるが、計算が途中で破綻してしまうため、計算が破綻するま

での約 239 s を計算対象時間として「作用時間」に示した。これらの作用時間を実時間と称す。計算時間間隔を 0.002 s に設定しているので、周期 16.3 s に対する分割数は 8000 倍以上である。総セル数は 352,000 であり、8 コアで計算を行っているので、均等割り付けとした場合の 1 コアあたりのセル数は 44,000 である。計算に要した時間は「計算時間」に示すとおりで、サブループの回数を多くするほど長い時間を要している。計算時間と実時間の比が実時間比である。実時間に対して、サブループ 1 回で約 420 倍、サブループ 2 回で約 950 倍、サブループ 4 回で約 1500 倍の計算時間を要している。計算が途中で破綻せずに最後まで完走させるためには、計算時間間隔を小さくするなど、計算時間が長くなる方向の計算条件の変更が必要である。

表 5-31 CS3D による波圧の計算時間

サブ ループ 回数	単位 (s)		c=a/b	d	e=c*d	f	g=f/a	h=f/c
	作用 時間	時間 間隔						
1	239.422	0.002	119,711	352,000	42.1	28.0	421	0.84
2	239.848	0.002	119,924	352,000	42.2	63.3	950	1.90
4	239.406	0.002	119,703	352,000	42.1	103.9	1562	3.12

設計実務のための波圧の検討では、通常は、複数の条件に対する検討を行う。表 5-32 に、複数の条件に対して模型実験と数値シミュレーションを実施する場合の所要日数を示す。模型実験は、入射波検定と波圧実験の他に、実験模型の製作、模型床製作と模型床撤去にも日数を要する。そのため、周期 3 種類×断面 3 種類で 22 日、断面 5 種類で 51 日の日数を要する。CS3D は模型や模型床の製作のような日数は必要ない。しかし CS3D による波圧の計算は計算時間が長いので、周期 3 種類×断面 3 種類で 66 日、断面 5 種類で 174 日の日数を要する。模型実験の必要日数に対する CS3D の必要日数は断面 3 種類で 3.0 倍、断面 5 種類で 3.4 倍を要する。波圧に関して模型実験から数値シミュレーションに移行するには、計算時間の短縮が望まれる。

表 5-32 波圧に関する 2次元模型実験と数値シミュレーションの所要日数

周期3種類×断面3種類

	日数
項目	模型実験
模型床製作	4
<i>模型製作</i>	5
計測機器設置	3
入射波検定	3
初回模型設置	2
波圧波実験	6
計測機器撤去	2
模型床撤去	2
合計	22

	日数
項目	CS2D
計算条件設定	1
試算	2
入射波検定	36
波圧計算	27
合計	66

斜体文字は模型床製作および計測機器設置と期間の重複が可能

周期3種類×断面15種類

	日数
項目	模型実験
<i>模型床製作</i>	4
模型製作	15
<i>計測機器設置</i>	3
<i>入射波検定</i>	3
初回模型設置	2
波圧波実験	30
計測機器撤去	2
模型床撤去	2
合計	51

	日数
項目	CS2D
計算条件設定	1
試算	2
入射波検定	36
波圧計算	135
合計	174

斜体文字は模型製作と期間の重複が可能

5-7. ケーソンの滑動に関する精度と計算時間

5-7-1. ケーソンの滑動に関する模型実験

混成式防波堤のケーソンの滑動抵抗を増すために、ケーソンの港内側に背面補強体として設置した消波ブロックによる滑動抵抗の向上効果を、二次元水理模型実験によって検討した。図 5-44 に造波水路と実験模型の配置を示す。水路幅は 1 m である。この造波水路には、反射波吸収機能付きのピストン型造波機が設置されている。ただし、規則波の有効波の実験を行ったので、反射波吸収機能は使用していない。

図 5-45 に防波堤模型の断面を示す。ケーソンの港内側に背面補強体として消波ブロックを設置した。背面補強体の寸法 a と b は表 5-33 に

示す 4 種類である。図 5-46 に示すように、1m の水路幅の中に 3 個のケーソンを設置した。3 個のケーソンのうち 1 個は、滑動しないように設置して、図 5-45 に示す箇所で圧力を測定した。残りの 2 個で滑動量を測定した。滑動量測定用のケーソン模型の重量は 1.618 kN/m である。実験波は規則波とした。表 5-34 に示す 5 段階の波高を小さいほうから順に作用させて、各波高による滑動量を測定した。反射波の影響を避けるために、造波は 13 波で停止した。

図 5-47 に滑動量と水平波力の関係を示す。水平波力は波圧測定結果から算定した。背面補強体なしの No.0 と比べて、背面補強体を設置すると滑動量が小さくなる。また、背面補強体の断面形状、消波ブロックの質量、消波ブロックの種類によって滑動量に違いがある。波力に対する滑動量の違いは、背面補強体による滑動抵抗の違いである。

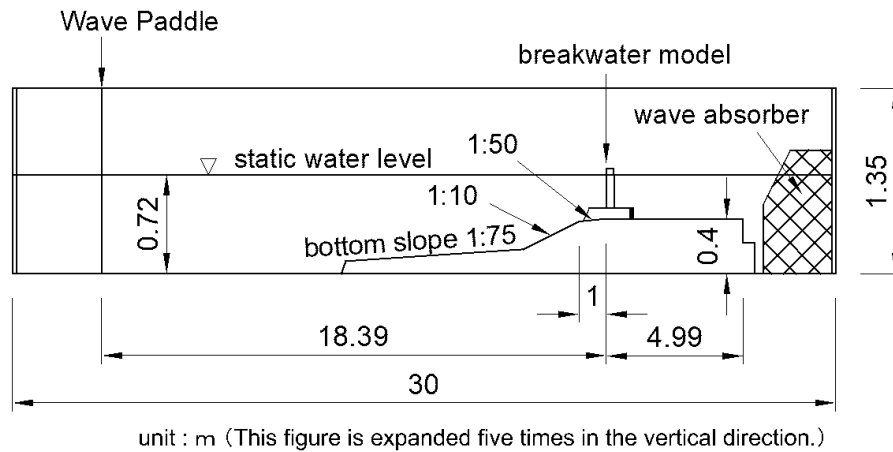


図 5-44 滑動実験の造波水路と実験模型

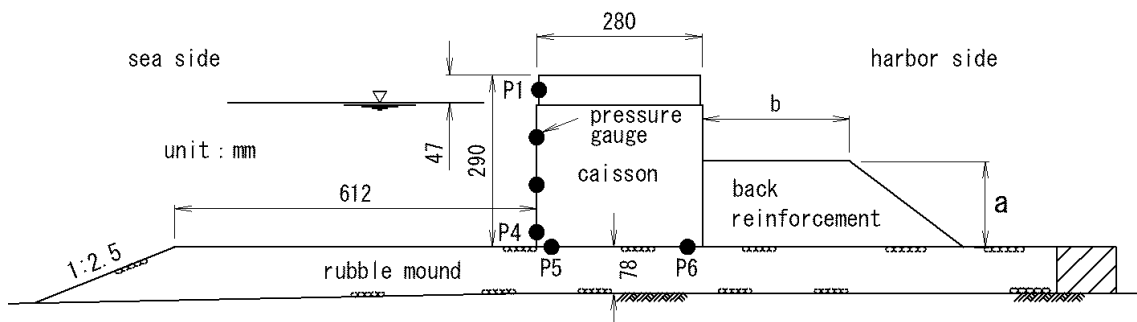


図 5-45 滑動実験の防波堤断面

表 5-33 背面補強体の断面寸法

番号	消波ブロック		背面補強体断面形状		
	種類	質量(gf)	高さ a (cm)	天端幅 b (cm)	斜面勾配
0	なし	—	—	—	—
1	A	296	20.0	11.8	1:4/3
2	A	296	14.5	24.9	1:4/3
3	A	184	18.0	16.0	1:4/3
4	B	168	25.6	9.9	1:4/3

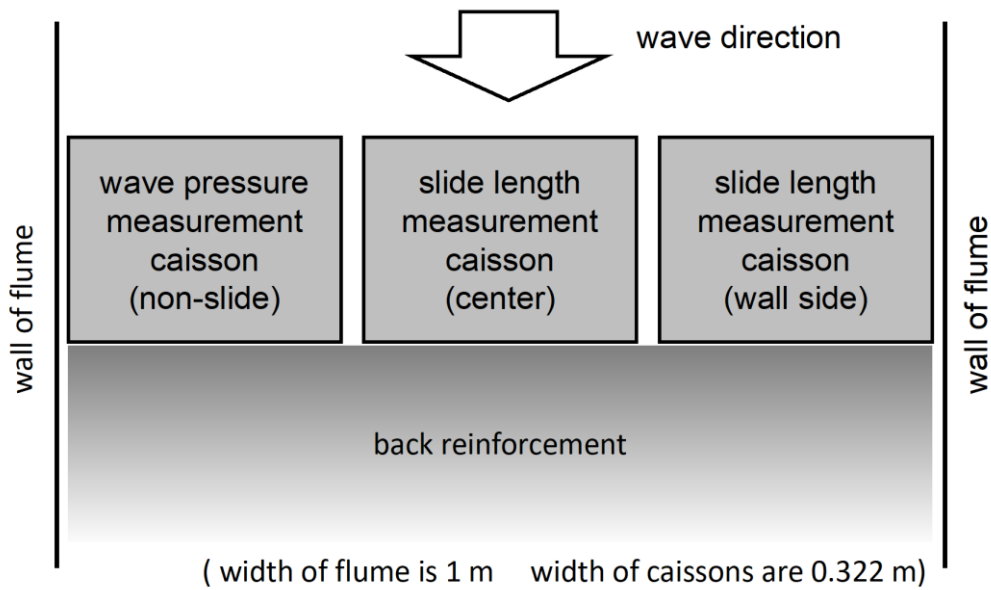


図 5-46 造波水路内におけるケーソン模型の配置

表 5-34 滑動実験の 5 段階の波高

	ランク1	ランク2	ランク3	ランク4	ランク5
波高	15.4 cm	17.8 cm	20.2 cm	22.6 cm	25 cm
周期	2.31 s				

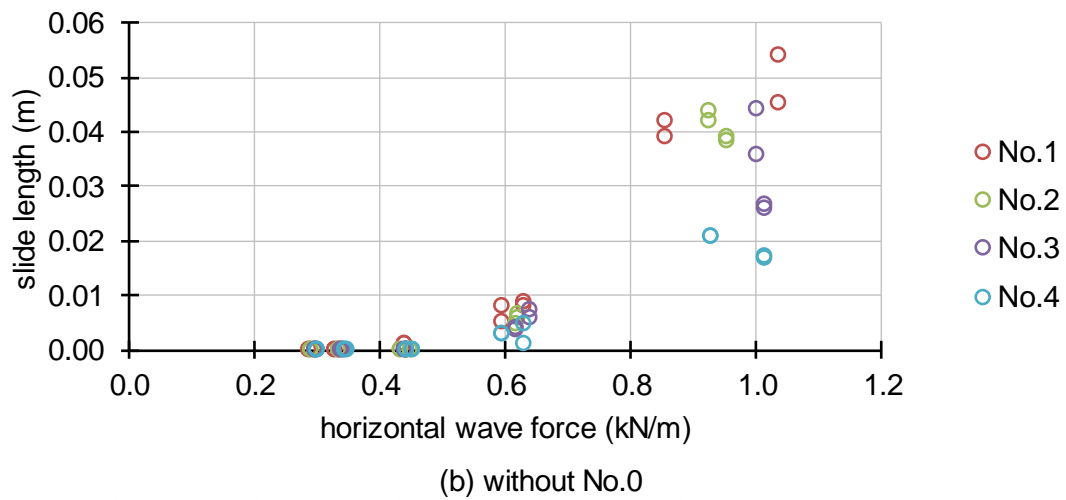
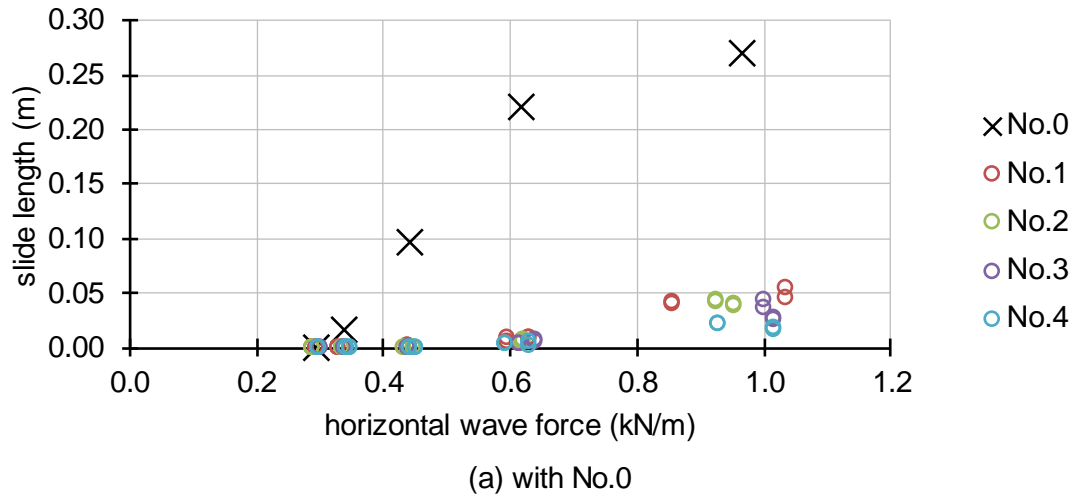


図 5-47 滑動量と水平波力

5-7-2. 数値シミュレーションによるケーソンの滑動の再現

「5-7-1. ケーソンの滑動に関する模型実験」に示した模型実験を再現する数値シミュレーションを実施した。数値計算手法は CADMAS-SURF と FEM による構造・地盤計算と組み合わせて計算を行う CADMAS-STR¹⁻¹⁰⁾とした。

模型実験と同様に海底地形とマウンドを設定し、水路幅方向に 3 箇のケーソンを設定した。ケーソンの背後に補強体は設置していないので、前述の模型実験のケース No.0 に相当する。図 5-48 に示すように手前のケーソンは滑動を生じず、中央と奥のケーソンは滑動を生じている。なお、現時点では粗いセルサイズでの計算である。

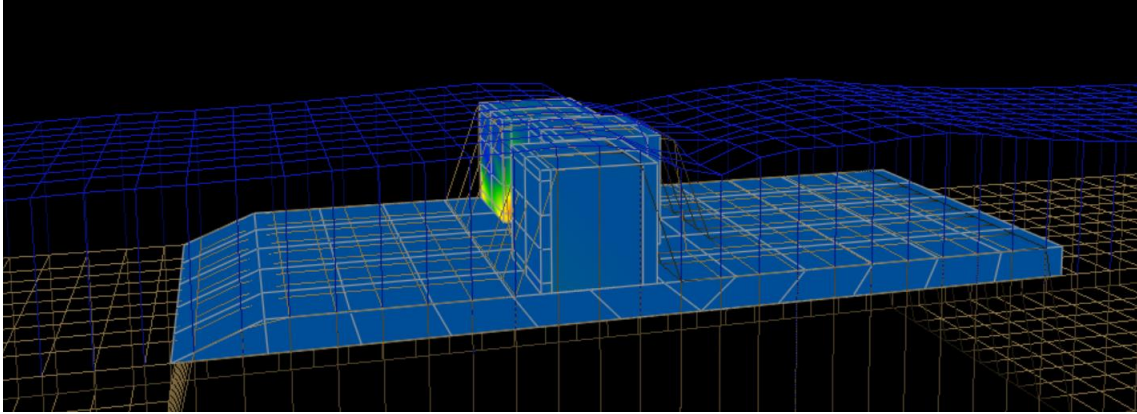


図 5-48 CADMAS-STR によるケーソンの滑動状況

5-7-3. ケーソンの滑動に関する実験と計算に要する時間

現状では、CADMAS-STR の計算を、模型量で水平方向が 0.1 m、鉛直方向が 0.05 m の粗いセルサイズで実施している状況であることから、本研究において計算精度や計算に要する時間を評価できる段階にない。ケーソンの滑動の耐波設計を数値シミュレーションで実施できるようになるには、かなり長い期間を要すると考えられる。

5-8. 消波ブロックの移動に関する精度と計算時間

5-8-1. 消波ブロックの移動に関する模型実験

港内において長周期波の反射波を低減するために、防波堤の港内側にマウンド構造物が設置される。このようなマウンド構造物の被覆材は、越波伝達波に対して安定性の要求性能を満たさなければならない。

防波堤の港内側に設置するマウンド構造物の被覆材の越波伝達波に対する安定性を、二次元水理模型実験によって検討した。図 5-49 に造波水路と実験模型の配置を示す。水路幅は 1.2 m である。この造波水路には、反射波吸収機能付きのピストン型造波機が設置されている。

図 5-50 に消波ブロック安定実験の検討断面を示す。設計実務においては模型実験で測定した値を現地量に換算して評価を行うので、図 5-50 に示す寸法は 1/50 縮尺で現地量に換算して示した。以降、この項に示す波高や滑動量はフルードの相似則で現地量に換算して示す。波は図に対して左側から入射して、ケーソンを越波した波が背後のマウンド構造物に作用する。実験波浪は修正 Bretschneider 光易型の不規則波とした。表 5-35 に波浪条件を示す。波高は防波堤を設置していない状態の防波堤設置位置の入射波の有義波高である。消波ブロックの安定限界波高を把握できるようにするために、実験では 5 段階の波高を小さいほうから順に 1000 波ずつ作用させた。

図 5-51 に消波ブロックの被害と入射波高の関係を示す。縦軸の N_0 は消波ブロックの被災度、 N は波数である。横軸の $H_{1/3}$ は防波堤を設置していない状態の防波堤設置位置の入射波の有義波高、 h_c は静止水面上の防波堤の天端高である。凡例の SM は Submerged Mound、NM は Normal Mound、DM は Detached Mound の略である。入射波高が大きくなると消波ブロックの被害が進行する。8-ton 型のブロックの中では NM、SM、DM の順にブロックの被害が大きいい。SM の中ではブロックが大きいほど被害が小さい。

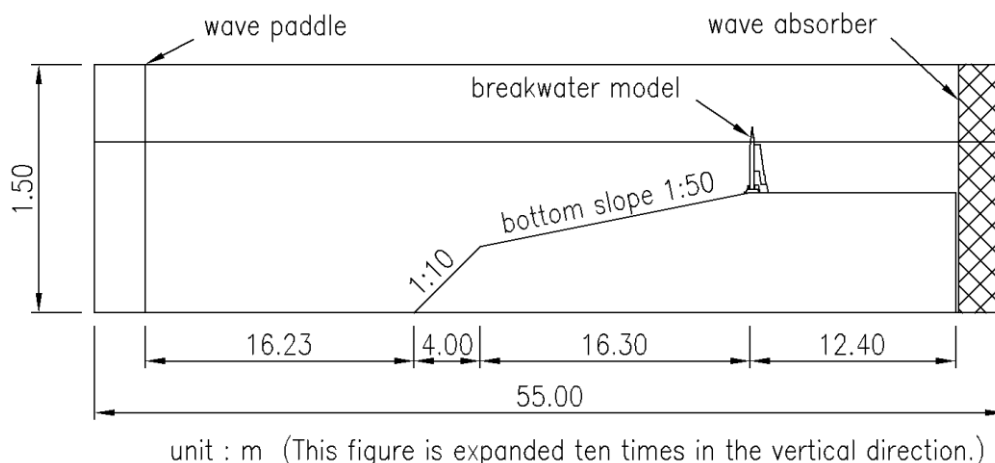


図 5-49 消波ブロック安定実験の造波水路と実験模型

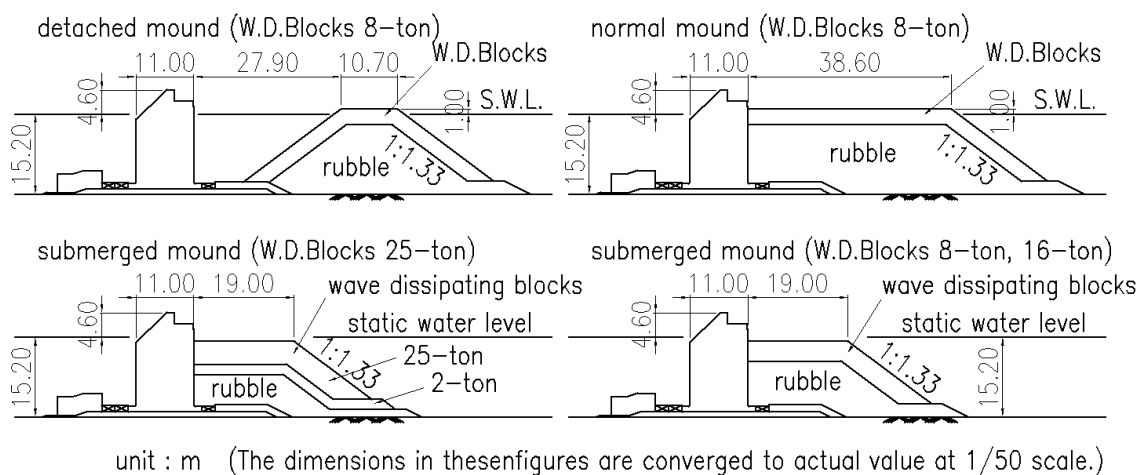


図 5-50 消波ブロック安定実験の検討対象断面

表 5-35 消波ブロック安定実験の波浪条件

波高	$H_{1/3}$	(m)	3.42	4.28	5.13	5.70	6.84
周期	$T_{1/3}$	(s)	13.0				

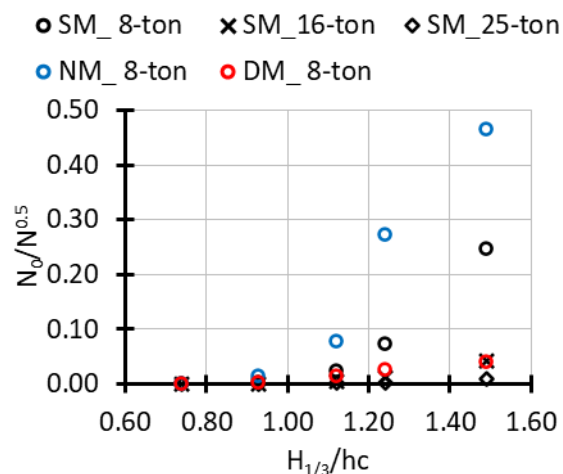


図 5-51 消波ブロックの被害と入射波高の関係

5-8-2. 消波ブロックの移動に関する数値シミュレーション

近年では数値シミュレーションにより構造物の変形を取り扱うことができるようになってきている。しかし、数値シミュレーションにおいて消波ブロックの形状を考慮できるほどに空間解像度を高くして、港湾基準 1-1) に指定されているとおり 1000 波を 3 波群以上作用させることは、2020 年時点では現実的でない。計算手法に関しては「3-2-3. 物体の移動に関する数値シミュレーション」に示したとおりである。計算時間に関しては、以下のとおりである。

消波ブロックの安定性を検討する数値計算の計算条件を下記のように設定する。

- (1) 消波ブロックの形状を表現するために、セルサイズはブロックの足の太さの 1/10 とする。
- (2) ブロックの質量から安定限界波高を算定する。
- (3) 波高に応じた周期を設定する。(防波堤位置の波高と沖波波長による波形勾配が 0.025 程度。)
- (4) 防波堤設置位置の波形勾配 0.04 で波長を算定する。
- (5) 計算領域の大きさは、長さは波長の 4.75 倍[#]、幅はブロックの大きさの 10 倍、高さは波高の 4.5 倍^{##}とする。
- (6) 造波波数は 1000 波とする。
- (7) 計算時間間隔はクーラン数 0.5 を満足する。

[#] 左側減衰領域：波長の 1.0 倍、減衰領域から造波ソース：波長の 0.25 倍、

造波ソースから構造物：波長の 3.0 倍、構造物から計算領域終端：波長の 0.5 倍。以上の合計で波長の 4.75 倍。

造波水深：波高の 3.0 倍、水面上の余裕高：波高の 1.5 倍。以上の合計で波高の 4.5 倍。

テトラポッド 50t 型を対象に算定すると次のとおりである。セルサイズは 0.1 m。波高は 7.46 m。周期は 13.5 s。波長は 186 m。セル数は x が 8860、y が 416、z が 336 で、総セル数は 1.24×10^9 。計算時間間隔は 0.01 s で計算波数が 1000 波なので計算ステップ数は 1.36×10^6 である。したがって、総セル数×計算ステップ数で求める計算負荷は 1.68×10^{15} である。この計算負荷は前出の表 5-31 に示した波圧に関する数値シミュレーションの計算負荷の約 4 万倍であり、非現実的な計算時間となる。ムーアの法則によれば計算機の性能が 4 万倍になるには 30 年を要する。波圧に関する数値シミュレーションも計算速度の向上が望まれることを考慮すると、消波ブロックの安定性を数値シミュレーションに適用できるようになるには、かなり長い年数を要する。

5-9. 計算精度と計算時間

図 5-52 に急勾配斜面における波浪変形の計算精度と計算時間の関係を示す。計算内容の詳細は「5-2-2」と「5-2-3」に示したとおりである。図中のプロットは対象範囲の計算精度の平均値で、エラーバーは対象範囲内の計算精度の変動幅を示している。計算時間は PEGBIS³⁻¹⁾、5-2)、CS2D¹⁻⁵⁾、BSQ⁵⁻³⁾の順に長くなり、それに応じて計算精度が高くなっている。異なる計算手法においても、計算精度を高めるためには長い計算時間が必要であることがわかる。

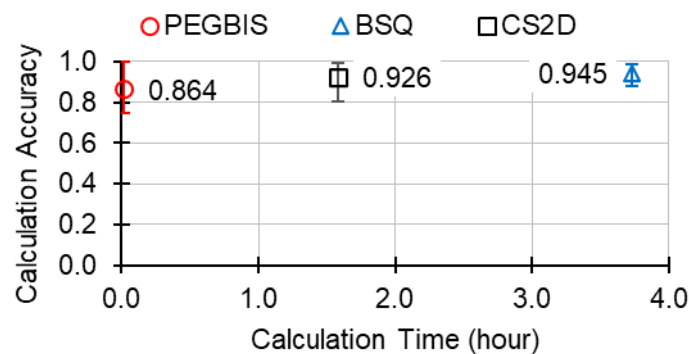


図 5-52 波浪変形の計算手法・計算時間と計算精度

図 5-53 に長周期波の反射波の計算精度と計算時間について示す。計算手法は CS3D¹⁻⁶⁾であり、内容の詳細は「0」と「5-3-3」に示したとおりである。図 5-53 (a)の横軸の波長分割数 L/d_x は、波長を水平方向のセル幅で除した値である。波長分割数を大きくすると、すなわちセルサイズを小さくすると、計算精度が高まる。図 5-53 (b)の縦軸は実時間比である。実時間比は計算の実施に要した時間の長さとの計算対象時間の比である。例えば周期 8 s の波を 100 波作用させる計算の実施に 1,600 s の時間がかかれば、実時間比は 2 である。長周期波の反射波については実時間とほぼ等しい時間で計算を実行することができる。計算条件による実時間比の変化が小さく、計算精度と実時間比の間に明確な傾向は認められない。

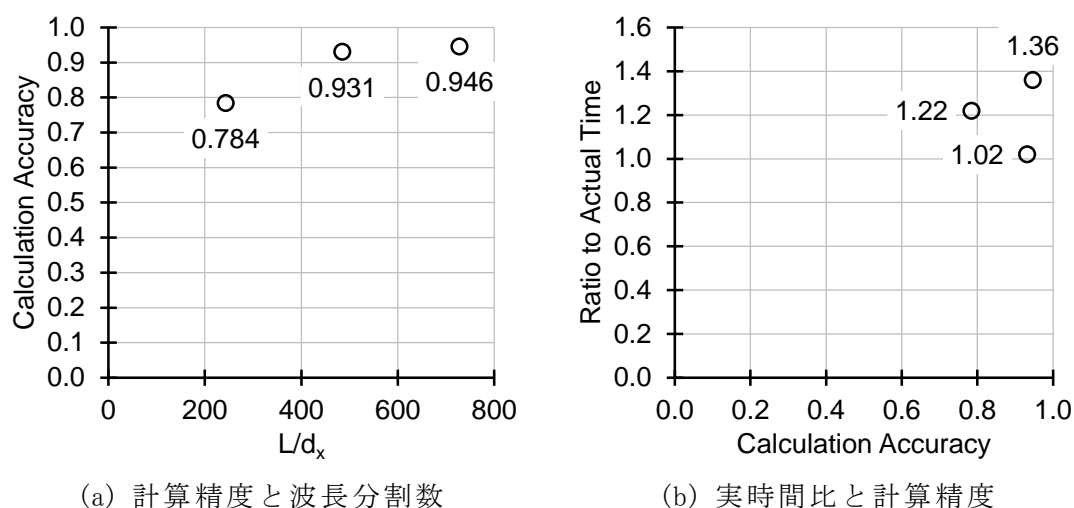
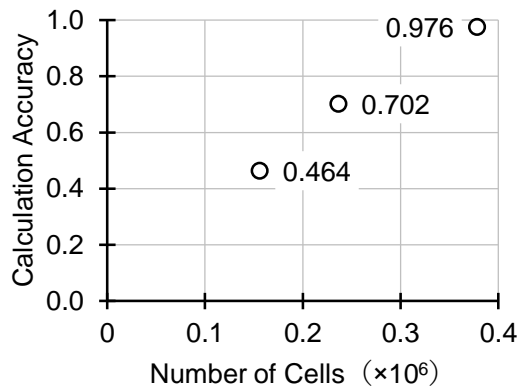
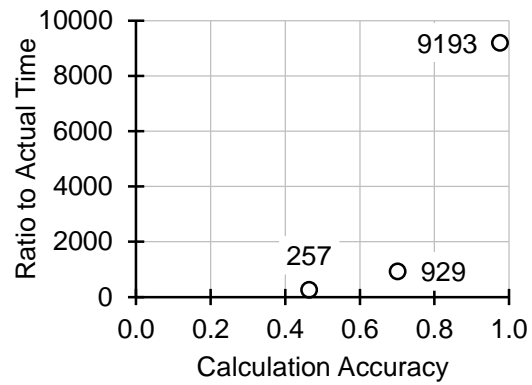


図 5-53 長周期波の反射波の格子解像度・実時間比と計算精度

図 5-54 に越波伝達波の計算精度と計算時間について示す。計算手法は CS2D であり、内容の詳細は「5-4-2」と「5-4-3」に示したとおりである。図 5-54 (a)より、計算セル数を多くすると、すなわちセルサイズを小さくすると計算精度が高くなる。図 5-54 (b)より、計算精度を高めると実時間比が非常に大きくなる。これには、セルサイズを小さくすると、クーラン条件を満たすために計算時間間隔を細かくしなければならない影響も含まれる。

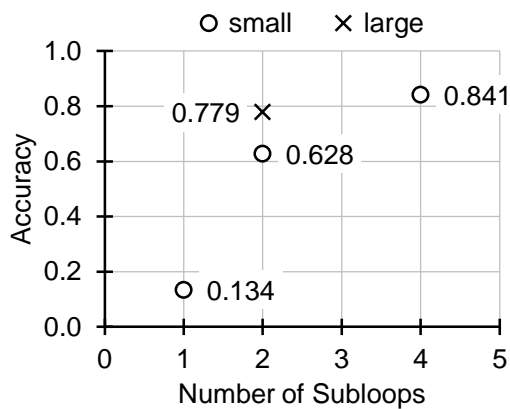


(a) 計算精度とセル数

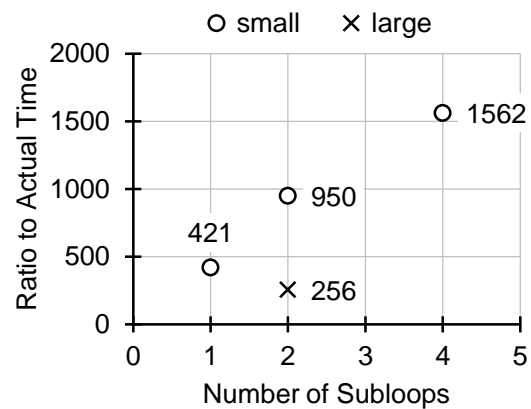


(b) 実時間比と計算精度

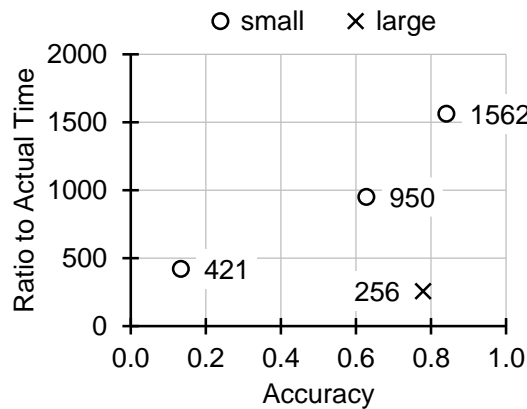
図 5-54 越波伝達波計算のセル数と計算精度・実時間比



(a) 計算精度とサブループ数



(b) 実時間比とサブループ数



(b) 実時間比と計算精度

図 5-55 波圧計算のサブループ回数と計算精度・実時間比

図 5-55 に波圧の計算精度と計算時間について示す。計算手法は CS3D であり、内容の詳細は「5-6-2」と「5-6-3」に示したとおりである。図 5-55 (a) は波圧の計算精度と SUB-LOOP 回数との関係である。セルサイズが small では SUB-LOOP 回数を増やすと計算精度が高くなっている。なお、SUB-LOOP が 2 回では、セルサイズが small より large の計算

精度が高い。この結果から、セルサイズを小さくすることが計算精度を高めるとは限らないことがわかる。図 5-55 (b)は実時間比と SUB-LOOP 回数との関係である。セルサイズが small では SUB-LOOP 回数に応じて実時間比が大きくなっている。SUB-LOOP が 2 回ではセルサイズが small よりも large の実時間比が約 1/4 に小さい。その比は総セル数の比とほぼ同じである。図 5-55 (c)に示すように、計算精度が最も高いのはセルサイズが small で実時間比が 1500 を超える計算である。しかしセルサイズが large で計算精度が 0.8 をやや下回る計算は実時間比が 1/6 で済むので効率的である。

5-10. 計算負荷の指標

数値シミュレーションにおいては、一般的にセルサイズや粒子を小さくすることにより計算精度を高めることができる。セルサイズを小さくするとクーラン条件を満たすために計算時間間隔を短くしなければならない。そのため計算精度を高めるためには計算時間が長くなる。したがって、計算時間に影響する要因として、セルの数、計算対象時間の長さ、計算時間間隔が挙げられる。セルの数は計算領域の大きさとセルの大きさによって決まる。例えば、計算領域の深さは波高の 4.5 倍、長さは波長の 5 倍、セルの高さは波高の 1/10、長さは波長の 1/100 などである。計算対象時間の長さは波の周期と計算対象の波数で決まる。計算時間間隔はクーラン条件を満たすように設定するので、波浪条件が厳しい条件であるほど計算時間間隔を小さくする。これらを式(5-2)に示すように無次元化して計算負荷指標 L_c とする。

$$L_c = \frac{S_d}{S_c} \cdot \frac{T \cdot N_w}{\Delta t} \quad (5-2)$$

S_d : Size of the computational domain [m^2]or[m^3]

S_c : Size of the calculation cell [m^2]or[m^3]

$$\frac{S_d}{S_c} = N_{cell} \quad N_{cell} : \text{Number of cells}$$

T : Wave Period [s]

N_w : Number of waves

Δt : Calculation time interval [s]

$$\frac{T \cdot N_w}{\Delta t} = N_{step} \quad N_{step} : \text{Number of time steps}$$

図 5-56 に計算精度と計算負荷指標 (L_C) を示す。計算対象項目により違いがあり、全体としてはまとまった分布となっていない。ただし計算項目ごとに見ると右上がりの分布であることから、計算精度を高めるためには多くの L_C を必要とすることがわかる。ただし、2D Pressure のように計算負荷を増やすことが計算精度の向上につながらない場合もある。

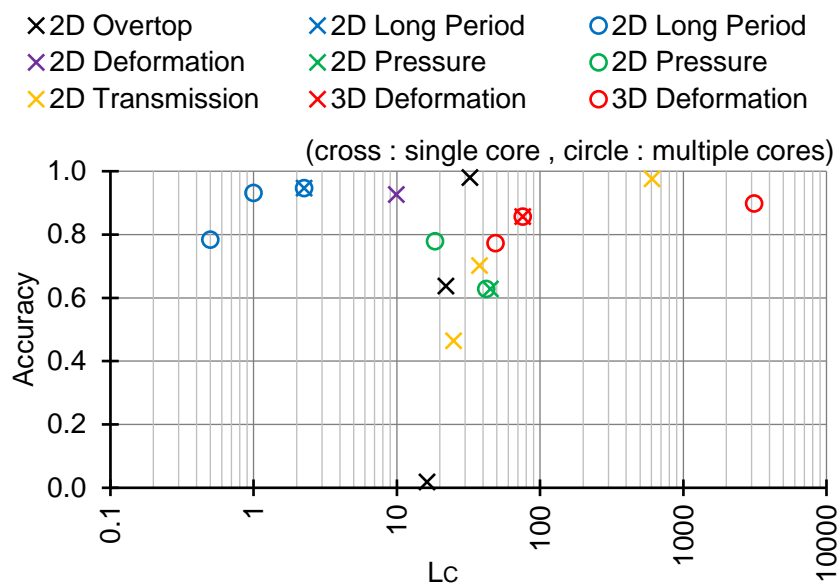


図 5-56 計算精度と計算負荷指標

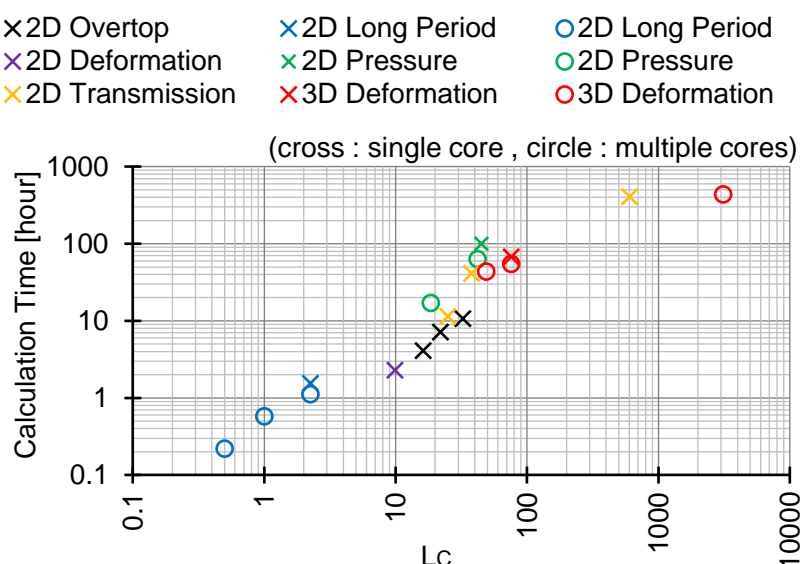


図 5-57 計算時間と計算負荷指標

図 5-57 に計算時間と L_C を示す。縦軸の Calculation Time は計算の実行にかかった時間である。計算を実行した計算機は、CPU が Intel Core

i7である。multiple coresのコア数は8である。single coreとmultiple coresで計算時間の差が小さいのは、図5-58に示すようにコア数を増やした並列計算による計算時間の短縮が少ないためである。図5-57において L_C が大きくなると計算時間が長くなる傾向が表れているので、 L_C が計算負荷を評価できる指標であることがわかる。

図5-58は並列計算の並列数を変更して1コアあたりのセル数による計算時間の比較を行った結果である。計算の並列数は1, 2, 4, 8の4種類である。使用した計算機はCPUがIntel Core i7-3770である。凡例に示す「2D Long period」は「0.

数値シミュレーションによる反射波の再現」に示した周期の長い規則波によるマウンド構造物の反射波の計算であり、「2D Pressure」は「5-6-2. 数値シミュレーションによる波圧の再現」に示した規則波による混成式防波堤のケーソンに作用する波圧の計算、「3D Deformation」は「5-2-5. 数値シミュレーションによる3次元波浪変形の再現」に示した波浪変形計算である。それぞれ同一の計算条件で並列数を1, 2, 4, 8に変更し、横軸は1コアあたりのセル数で示した。したがって、プロットが左側であるほど並列数が多い。縦軸の値は並列計算なしの1コアの計算に対する並列計算の計算時間比である。並列数を増やして1コアあたりのセル数を少なくすることにより計算時間が短くなっている。ただし2Dシミュレーションの 0.1×10^6 cell/core以下では並列数の増加による計算時間の短縮は少ない。3Dシミュレーションの並列数2は並列数1と比べて計算時間が2割程度削減されているが、並列数2から並列数8にかけては計算時間がほとんど短縮されていない。これは1コアあたりのセル数を減らすことによる計算時間の短縮と、並列数を増やすことによるコア間の通信時間の増加がほぼ同じであるためと考えられる。

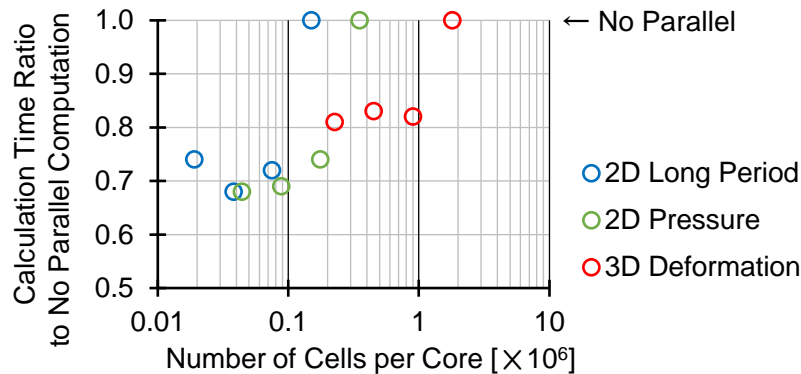


図 5-58 並列計算における1コアあたりのセル数による計算時間の変化

図 5-56 において計算精度が全体としてまとまった分布とならない要因として、検討対象ごとの難易度の違いが考えられる。図 5-59 に検討対象項目ごとの検討条件を示す。検討条件の枠内は条件の厳しさにより赤色の濃さを変えてあり、色が濃いほど条件が厳しい。上から下に向けて条件が厳しくなる順に並べてある。反射波は構造物前面を取り扱えばよいが、越波と伝達波は構造物背後まで取り扱わなければならない。波圧・波力とケーソン滑動は底面も含めた構造物全体を取り扱わなければならない。越波は構造物背後に超える水量を取り扱えばよいが伝達波は構造物背後に水塊が飛び込むことによって生じる構造物背後の水面変動を取り扱わなければならない。波圧・波力とケーソン滑動は砕波により空気が混入することの再現が難しい。検討項目によるこのような条件の違いが計算精度に影響していると考えられる。

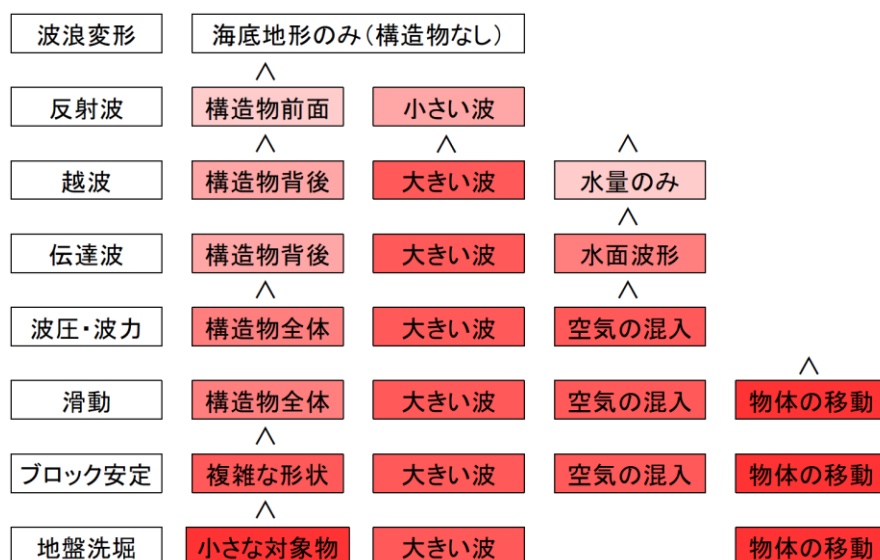


図 5-59 検討対象項目による難易度の違い

5-11. 計算機性能と計算時間

計算機の性能の向上に伴い、数値シミュレーションの実施に要する時間は短くなる。その効果を検証するために、表 5-36 に示す年代の異なる 3 種類の計算機で同一条件の数値シミュレーションを実施し、計算の実施に要する時間を比較した。

図 5-60 に計算機導入年による計算時間の違いを示す。計算手法は CS2D と CS3D である。CS3D で実施した並列計算は 1 コアの計算時間に換算した。マークの色で計算内容を示している。同一色でマークの形が異なるのは、計算条件の違いである。いくつかのケースはマークを線でつないである。Moore's Law の線は、「The number of transistors on

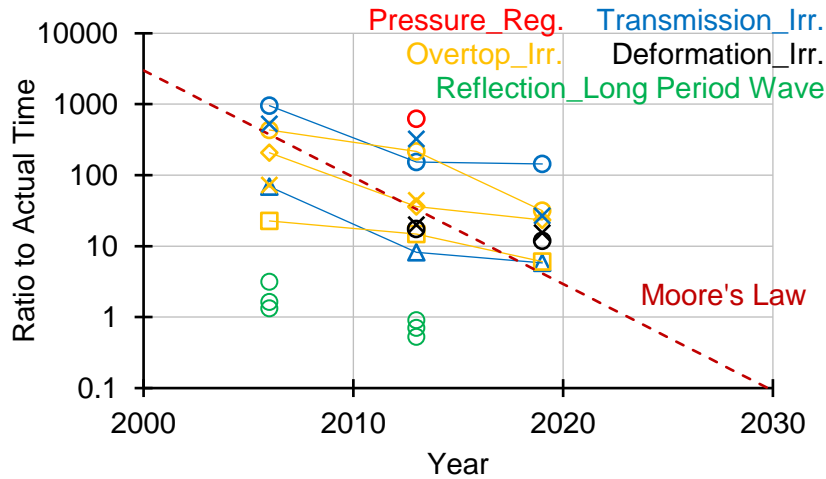
microchips doubles every two years.」というムーアの法則による計算時間の変化である。いずれの計算内容も計算機導入年が進むと実時間比が小さくなっている。ただし計算時間の短縮はムーアの法則よりやや鈍い。ムーアの法則は 1965 年に提唱されているが、現在では半導体の集積密度の向上が限界に近付いてきたためにムーアの法則に追い付かなくなっているためと考えられる。

図 5-60 において、不規則波伝達波や不規則波越波など同一の計算内容の中で、実時間比に大きな違いがみられる。すなわち、計算条件によって、計算の実施に要する時間が異なる。図 5-61 は計算機の年代による計算時間の比較を示している。横軸は計算負荷の指標として、「5-10. 計算負荷の指標」に示した計算負荷指標 (L_c) を採用した。計算負荷が小さい長周期波 (Infra Gravity Waves) と通常の波浪 (Ordinary Gravity Waves) はやや離れているが、計算負荷が大きくなると実時間比が大きくなる傾向が見られる。図 5-61 の中で二つまたは三つの年が縦並びになっているのは同一条件の計算である。2013 と 2019 の実時間比がほぼ同じであるケースも見られるが、全体の傾向としては年代の高い計算機の計算時間が短い。

以上のように、ムーアの法則よりは鈍いけれども、計算機性能の向上により耐波設計に関する数値シミュレーションの計算時間が短くなっている。しかし、2019 年の計算機でも実時間の 10 倍以上の計算時間を要しているのが現状である。

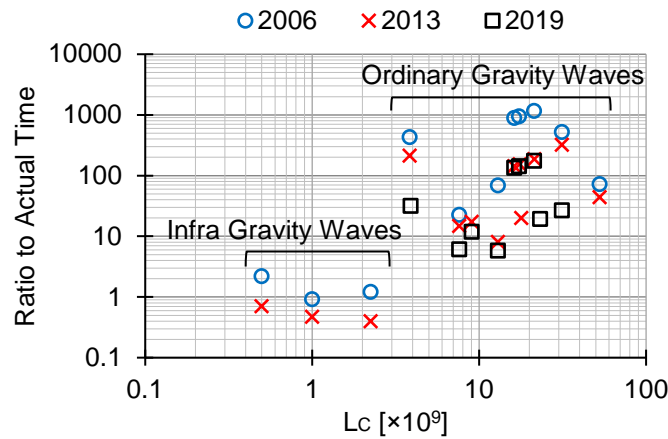
表 5-36 計算時間の比較に用いた計算機の諸元

計算機導入年	CPU	クロック	コア数	メモリ
2006	Intel Pentium4	3.8 GHz	8	1 GB
2013	Intel Core i7 -3770	3.4 GHz	8	24 GB
2019	Intel Core i7 -8700	3.2 GHz	12	15.3 GB



(Reg.: Regular wave, Irr.: Irregular wave)

図 5-60 計算機導入年による実時間比の変化



(凡例の数値は計算機導入年)

図 5-61 計算機の年代による計算時間の比較

5-12. まとめ

波浪変形に関して、数値シミュレーションにより模型実験を高い精度で再現することが可能である。マウンド構造物による反射波の抑制効果について、数値シミュレーションによる反射率が定量的には模型実験と異なる点があるが、マウンド形状や波浪条件による反射率変化の傾向は模型実験と一致する。直立壁の越波伝達波について、計算条件の調整により模型実験を高い精度で再現することができる。ただし、再現性向上のためには格子間隔を小さくする必要があり、非常に多くの計算時間が必要となる。ケーソンに作用する波圧について、数値シミュレーションにより算定することが可能である。ただし、スパイクノイズを除去するための調整が必要である。また、全地点の波圧を同時に再現することが

できないなどの課題がある。計算に多くの時間を要する点も、設計実務への適用に向けての課題である。波浪の作用による消波ブロックの安定性について、計算負荷の大きさなどにより、数値シミュレーションで検討を行うことは、2020年時点では現実的ではない。

数値シミュレーションの計算時間が長くなる要因は、計算精度向上のために計算セルを細かくしたり、計算時間間隔を短くすることによって計算負荷が大きくなることである。計算負荷の大きさを示す指標を提案し、計算精度および計算時間との関係を確認した。

年代の異なる計算機を用いて同一条件での計算を実施することにより、ムーアの法則よりは鈍いけれども、計算機性能の向上により耐波設計に関する数値シミュレーションの計算時間が短くなっていることを確認した。

参考文献

- 5-1) 合田良美, 鈴木康正, 岸良安治, 菊池治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No.248, 24p, 1976.
- 5-2) 合田良美: 方向スペクトル波浪による Wave Setup と沿岸流速の設計図表, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.301-306, 2005.
- 5-3) 平山克也, 岩瀬浩之, 加島寛章: 造波境界上の水深と方向スペクトルの空間変化を考慮した多方向不規則波の造波とその特性, 港湾空港技術研究所報告, 第 51 巻, 第 1 号, pp.3-2, 2012.
- 5-4) 平山克也, 濱野有貴, 長沼淳也: 没水堤周辺での不規則波の分裂・屈折変形に関する平面模型実験とその再現計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.75, No.2, I_763-I_768, 2019.
- 5-5) 合田良美: 段階的砕波係数を導入した 3 次元地形場の不規則波浪変形計算, 海洋開発論文集, 第 18 巻, pp.197-202, 2002.

6. デジタルシフトの将来予測と達成目標

6-1. はじめに

港湾構造物の耐波設計の多くは公的機関からの発注業務として実施されている。そこで、公的機関からの発注実績に基づき、港湾構造物の耐波設計における模型実験から数値シミュレーションへのデジタルシフトの将来予測と達成目標の検討を実施する。

6-2. 業務件数の実績に基づくデジタルシフトの将来予測

表 2-1 に示した国の機関から発注された調査設計業務の数に基づいてデジタルシフトの将来予測を行う。数値シミュレーションと模型実験の件数に占める数値シミュレーションの割合をデジタル化率と定義する。

6-2-1. デジタル化増加曲線

模型実験から数値シミュレーションへの移行の増加により、デジタル化率は徐々に高くなる。ただし、デジタル化率が 1.0 を超えることはないので、デジタル化率の増加は上限値を持つ増加曲線となる。上限値を持つ増加曲線は Logistic 関数で評価することができ、言語学の研究⁶⁻¹⁾や企業の成長戦略⁶⁻²⁾などに適用されている。Logistic 関数は Sigmoid 関数を一般化したものであり、式(6-1)で表される。

$$f(x) = \frac{L}{1 + \exp^{-\alpha(x-x_0)}} \quad (6-1)$$

L : $f(x)$ の最大値を決めるパラメータ

x_0 : S字カーブの変曲点の位置を決めるパラメータ

α : 最小値から最大値に至る増加の緩急を決めるパラメータ

図 6-1 に、国の機関からの発注実績に基づいた波浪変形のデジタル化率の変化を示す。数値シミュレーションの開始は、波浪変形計算が設計に適用され始めた頃の 1980 年に設定した。数値シミュレーションによる検討が可能となっても、模型実験による検討が完全になくなることはなく 1 割程度は残ると考えられるため、デジタル化率の最大値を 0.9 に設定した。変曲点の位置を決める x_0 は 0.0 とした。Logistic 関数によるデジタル化率増加曲線の検討方法を以下に示す。

- 1) デジタル化率の到達値 L を設定する。(この例では 0.9 とした。)

- 2) 発注実績の分布から、 L の $1/2$ (変曲点) に達した年を設定する。(この例では図 6-1 に縦線で示す 2003 年。) デジタル化開始年と変曲点の年差 d が決まる。
- 3) 上記 2) で決めた変曲点の年を横軸のゼロとして、横軸の $-d$ から d の範囲で Logistic 曲線が発注実績の分布と一致するように α を決定する。(図 6-2 ができる。)
- 4) 横軸の値に変曲点の年を加えて西暦に戻す。(図 6-3 ができる。)

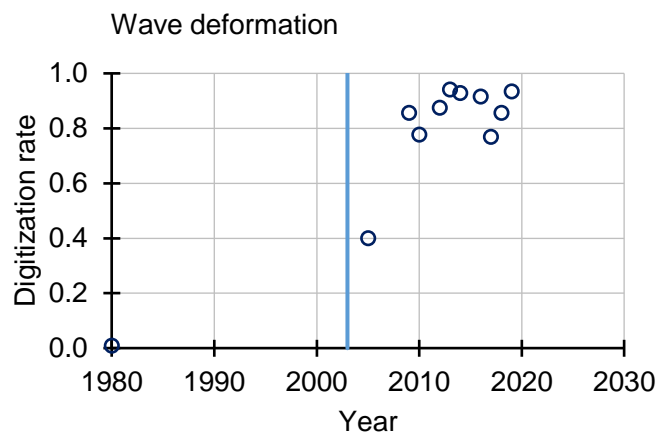


図 6-1 波浪変形のデジタル化率の変化

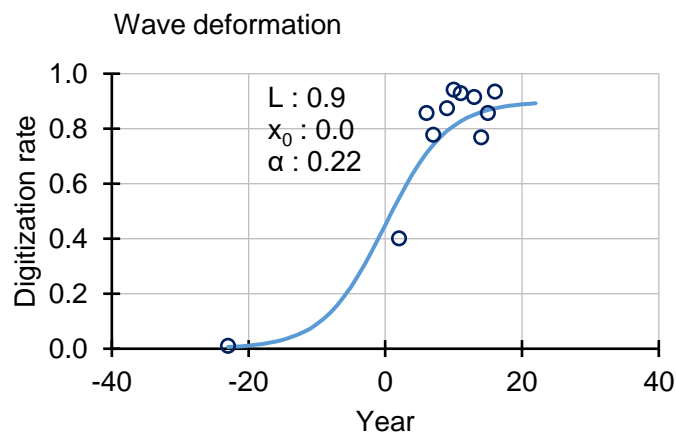


図 6-2 耐波設計に関するデジタル化率の増加曲線の検討

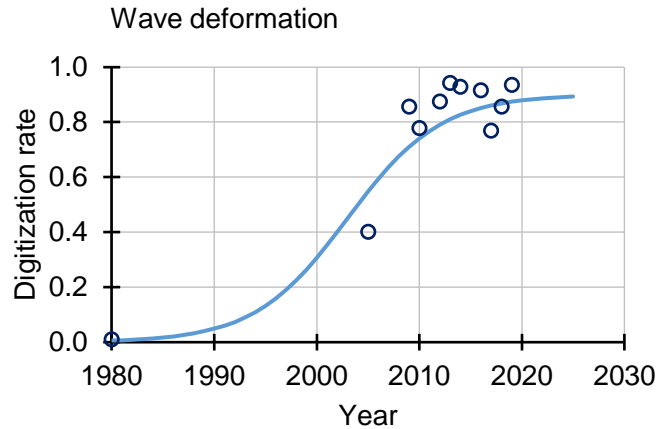
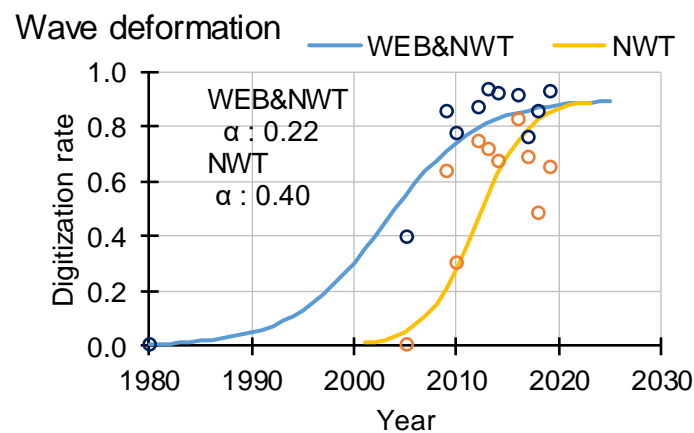


図 6-3 耐波設計に関するデジタル化率の増加曲線

6-2-2. デジタルシフトの将来予測

図 6-4 に波浪変形に関する数値シミュレーションのデジタル化率の増加曲線を示す。WEB&NWT の増加曲線は図 6-3 と同じであり、NWT についても同じ方法で求めた。○印は国の機関からの発注実績である。図 6-5 に波浪変形に関する数値シミュレーションと模型実験の占有率の変化を示す。緑の○印は 3D_NS と NWT の合計値で、赤の○印は 3D_NS と NWT と WEB の合計値である。3D_NS(3次元 Navier-Stokes) は 2019 年に 1 件の実績があり、2020 年以降は想定を示した。2010 年頃に NWT が急速に増えた。



WEB : Wave Energy Balance Model
 NWT : Nonlinear Wave Transformation Model

図 6-4 波浪変形に関するデジタル化率の増加曲線

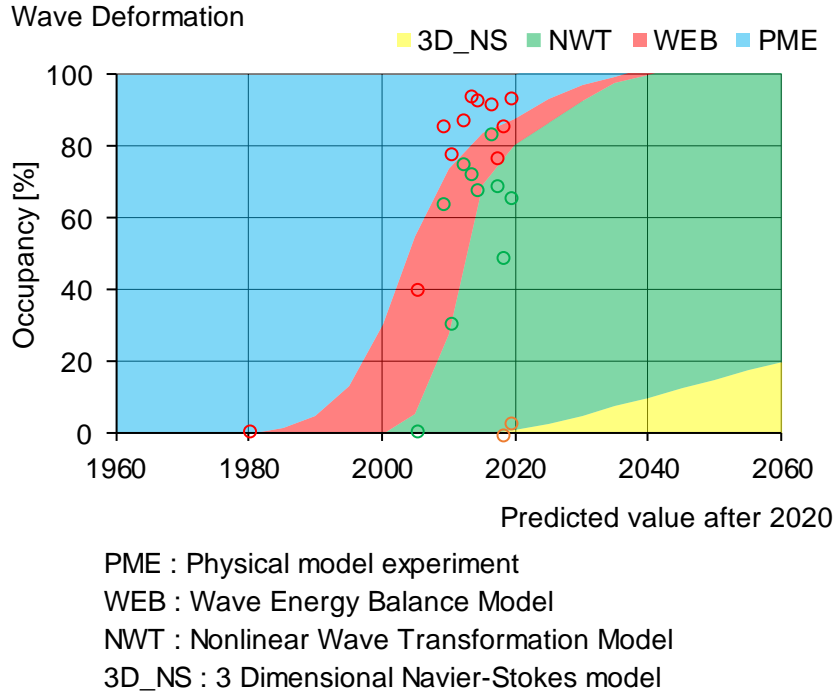


図 6-5 波浪変形に関する数値シミュレーションと模型実験の占有率の変化

反射波、越波、波圧などは耐波設計に数値シミュレーションが適用されるようになってからの年数が短く、2020年時点で適用実績が少ない。これらのデジタル化率を予測する増加曲線のシナリオを図 6-6 のとおりに設定した。シナリオ 1 は図 6-4 に示した WEB&NWT の増加曲線であり、デジタル化率 0.9 の達成に要する期間は 45 年である。シナリオ 2 は図 6-4 に示した NWT の増加曲線であり、デジタル化率 0.9 の達成に要する期間は 22 年である。シナリオ 3 はデジタル化率 0.9 の達成に要する期間をシナリオ 2 の半分の 12 年とした。表 6-1 に各シナリオのデジタル化増加曲線のパラメタを示す。

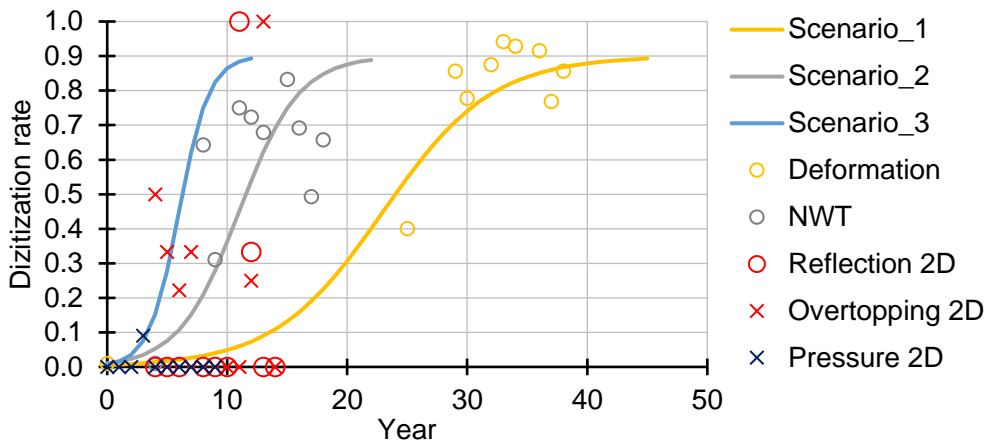


図 6-6 デジタル化率増加曲線のシナリオ

表 6-1 デジタル化増加曲線のパラメタ

	x_0	α	difference of year
Scenario_1	0	0.22	45
Scenario_2	0	0.4	22
Scenario_3	0	0.8	12

"difference of year" is years to reach 0.9 in the digitization rate.

図 6-6 の「Reflection 2D」と「Overtopping 2D」の分布は概ねシナリオ 2 と一致している。そこで、「Pressure 2D」と「Overtopping 3D」および「Pressure 3D」にもシナリオ 2 を適用して図 6-7 にデジタル化率増大の予測を示す。国の機関からの発注実績に基づき、「Reflection 2D」と「Overtopping 2D」のデジタル化開始年は 2005 年とした。同様に「Pressure 2D」のデジタル化開始年は 2010 年とした。「Overtopping 3D」および「Pressure 3D」は 2020 年時点で耐波設計に数値シミュレーションが適用されていない。「5-2-5. 数値シミュレーションによる 3次元波浪変形の再現」の 3D シミュレーションの計算では y 方向のセル数が 344 であることから、3D シミュレーションの計算負荷は 2D シミュレーションの 350 倍と想定する。“The number of transistors on microchips doubles every two years.”の Moore’s Law によれば、計算機の性能は 17 年後に 350 倍に達する。したがって、2D のデジタル化開始から 20 年後には 3D のデジタル化が可能と考えられる。よって 3D のデジタル化は 2D の 20 年遅れとした。なお、デジタル化率 0.9 の達成に要する期間は、デジタル化の開始が 1980 年の「Deformation」よりも 2005 年の「Reflection 2D」と「Overtopping 2D」が短い。このことから年代が進むにつれて計算機性能の向上などによりデジタル化率の増加が速くなることが考えられる。これを考慮して 2D から 20 年遅れの 3D にはシナリオ 3 を適用するとデジタル化率の増加を図 6-8 のとおりに予測できる。消波ブロックの安定や海底地盤の洗堀を取り扱う数値シミュレーションは 2060 年までに耐波設計に適用することはできないと考えられるため、図 6-8 に表示していない。

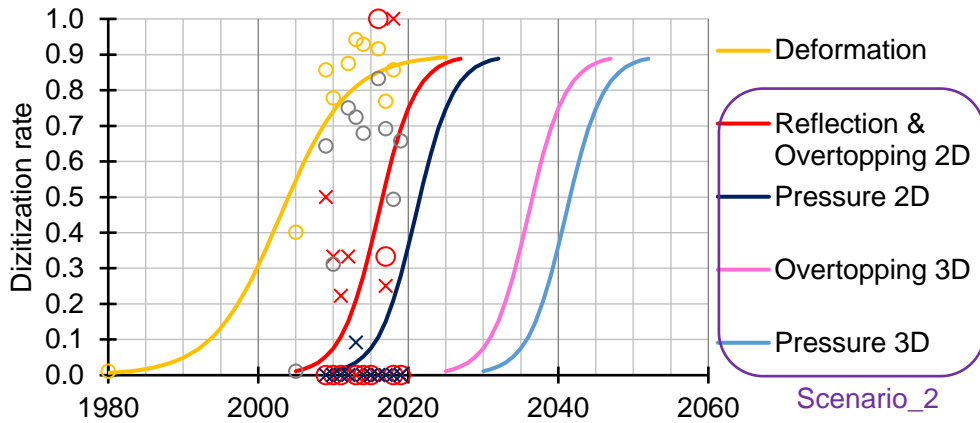


図 6-7 シナリオ 2 によるデジタル化率増加の予測

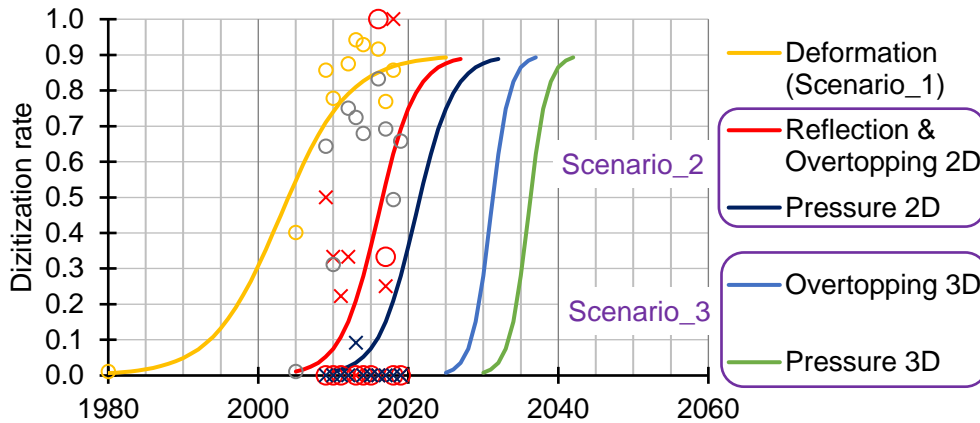


図 6-8 シナリオ 2 とシナリオ 3 によるデジタル化率増加の予測

6-3. デジタルシフトの達成目標

図 6-9 に計算精度と計算速度の関係を示す。横軸は設計業務に適用可能な計算機の現在の計算速度に対する倍率である。横軸の 1 に対する縦軸の値は、現在の計算機の性能により 10 時間の計算時間で実行できる計算負荷による計算精度である。10 時間の根拠は、「計算時間が 10 時間程度であれば、夕方の終業時に実行した計算が翌朝の始業時には終了しているので、耐波設計の業務に適用することができる」ことである。現在の計算機で 100 時間の計算時間を要する条件は横軸が 10 である。例えば、現時点で 10 時間で計算が終了する計算負荷では計算精度が 0.5 で、100 時間かかる計算負荷では計算精度が 0.7 まで上がると 1,0.5 と 10,0.7 を結んだ線になる。そこから先のデータがない場合には、その線を延長する。このように線を引けるデータはあまり多くないので、平均的な勾配を調べて全項目に同じ勾配を適用した。限られた数量のデータに基づく検討結果であるため、計算精度の推定には誤差を含んでいる。

上の横軸はムーアの法則による計算機性能の向上を表している。この検討結果によると、オレンジ色の実線を見るとわかるように、現時点で 0.5 の計算精度が 10 年後には 0.8 程度まで高まることが期待できる。そのような項目については、10 年後にデジタルシフトを実現できるように信頼性を高めるべきである。具体的には、計算精度の向上が上横軸の期間に遅れないようにすることと、計算が途中で止まらないような安定性を持たせることである。

以上のように、図 6-9 の上横軸の値がデジタルシフトの達成目標であると言える。

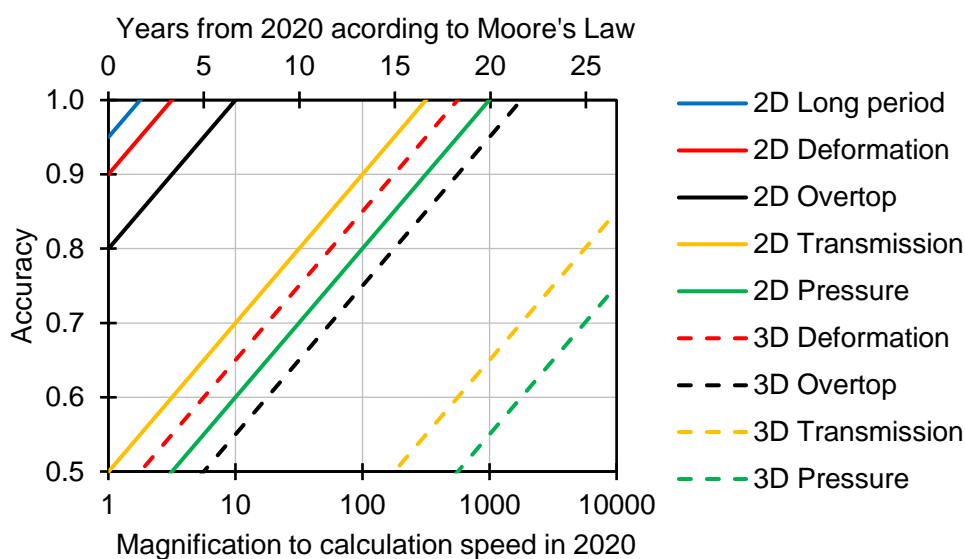


図 6-9 計算精度と計算速度およびムーアの法則による達成期間

6-4. まとめ

国の機関から発注された調査設計業務に占める数値シミュレーションと模型実験の業務数の割合の変化を調べた。数値シミュレーションと模型実験の件数に占める数値シミュレーションの割合で定義するデジタル化率は、1.0 を超えることはない。すなわち、デジタル化率は上限値を持つので、Logistic 関数を適用してデジタル化率の増加を予測した。また、計算精度と計算速度および将来的な計算機性能の向上を考慮して、デジタルシフトの達成目標を示した。

参考文献

- 6-1) 横山詔一，真田治子：多変量 S 字カーブによる言語変化の解析，計量国語学第二十六卷第三号，計量国語学会，pp.79-93，2007.
- 6-2) Jumping the curve, <https://medium.com/@climb.lean/jumping-the-curve-3cf828d0154e>, (参照 2021-05-29)

7. デジタルシフトによる消費エネルギーの削減

7-1. はじめに

模型実験は造波機の駆動に多くの電力を消費する。それと比べて数値計算に使用する計算機は消費電力が少ない。したがって模型実験から数値シミュレーションに移行することが達成されれば消費電力量の削減により環境負荷を軽減することができると考えられる。そこで、港湾構造物の耐波設計に関する模型実験と数値シミュレーションの消費電力量を比較する。

7-2. 造波による消費電力量

造波機の駆動に多くの電力量を必要とする模型実験から数値シミュレーション移行することができれば、消費電力量の削減により環境負荷を軽減することができると考えられる。そこで、港湾構造物の耐波設計に関する模型実験と数値シミュレーションの消費電力量を比較する。

図 7-1 に模型実験と数値シミュレーションの消費電力量を示す。1 ケースあたりの造波（数値シミュレーションでは計算の実施）に必要な消費電力量である。” 3D Multiple” は Multiple cores による 3 次元計算であり、模型実験は造波水槽による実験が対応する。” 2D Multiple” と” 2D Single” は Multiple cores と Single core による 2 次元計算であり、模型実験は造波水路による実験が対応する。模型実験は縮尺が 1/50 から 1/25 程度の一般的な規模を対象としており、造波機の消費電力は造波水路が 7.5 kW、造波水槽が 80 kW とした。数値シミュレーションの実施に用いる計算機は、研究目的の数値計算に用いるのワークステーションではなく、設計業務に適用が可能なコア数が 8 から 12 程度で消費電力が 200 W 程度のデスクトップパソコンを想定した。図 7-1 に示した消費電力量は 1 ケースあたりの値であり、実験準備や計算準備を含んでいない。

図 7-1 の 1:1 の対角線より上にプロットされているデータは、数値シミュレーションの消費電力量が模型実験より多い条件である。2D は対角線より上にプロットされているデータが多い。3D は 3 点のデータがすべて対角線より上にプロットされている。すなわち、多くの条件において模型実験より数値シミュレーションの消費電力量が多い。

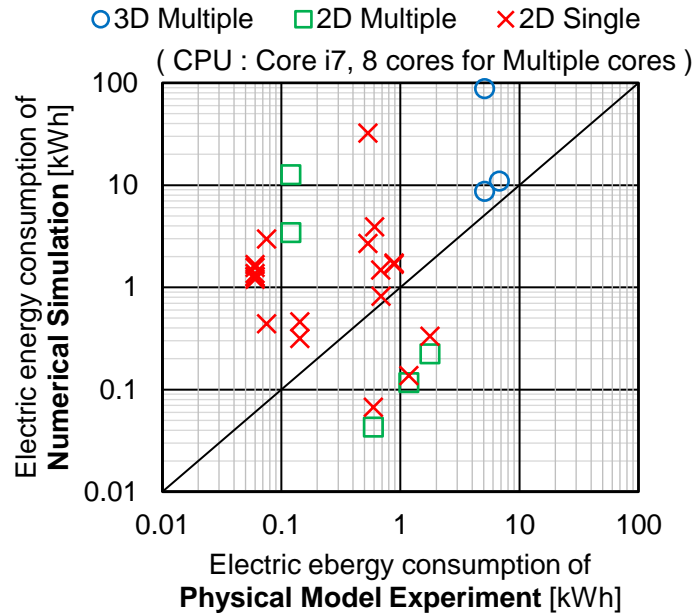


図 7-1 模型実験と数値計算の消費電力量の比較

この検討を始める時点では、模型実験よりも数値シミュレーションの消費電力量が少ないことを想定していた。しかし、予想に反して模型実験より数値シミュレーションの消費電力量が多い結果となった。数値シミュレーションの消費電力量が多くなる要因は計算時間が長いことである。模型実験は縮尺に応じて波作用時間が実時間より短くなる。しかし、数値シミュレーションは計算精度を高めるためにセルサイズを小さくすると計算時間が長くなってしまうため、消費電力量が多くなる。処理能力が高い計算機を使用すれば計算時間は短くなるが、単位時間当たりの消費電力が大きいので、計算に要する消費電力量は減らないと考えられる。例えば、ワークステーションは 10~20 数個のコア数で電力がおおよそ 1000 W であるので、デスクトップパソコンの 5 倍の消費電力である。スーパーコンピュータ「京」は、全能力をフル稼働させると 12,660 kW⁷⁻¹⁾、定常運用で 11,000 kW⁷⁻²⁾の電力を必要とする。「京」の消費電力は定常運用でデスクトップパソコンの 55,000 倍である。なお、「京」の後継機である「富岳」は「京」の約 3 倍の消費電力で「京」の約 100 倍の能力を発揮する。したがって「富岳」の消費電力は「京」の約 1/30 である。なお、「富岳」は 2019 年 11 月にプロトタイプが、スーパーコンピュータの消費電力性能を示すランキング「Green500」で世界 1 位を獲得した⁷⁻³⁾。2020 年 6 月時点では 4 位になっているが、LINPACK の実行性能を指標とした「TOP500」⁷⁻⁴⁾、実際のアプリでよく使われる CG 法のプログラムで性能を評価する「HPCG(High Performance

Conjugate Gradient)」⁷⁻⁵⁾、人工知能計算などで活用されている単精度や半精度演算器などの能力も加味した計算性能を評価する指標「HPL-AI」⁷⁻⁶⁾、大規模グラフ解析に関するスーパーコンピュータの国際的な性能ランキングである「Graph500」⁷⁻⁷⁾の4部門において、2020年11月に2期連続で1位を獲得している。「富岳」の開発には国費総額1,100億円が予定されている⁷⁻⁸⁾。計算能力が高くても、「京」や「富岳」のようなスーパーコンピュータを設計実務に使うことはできない。

半導体の集積密度を高めることでコンピュータの性能の向上が図られてきた。半導体の集積密度を高めることは、同時に消費電力の削減にも寄与してきた。しかし、現在では半導体の集積密度の向上が限界に近付いてきている。そのため、近年は計算の並列化により計算時間の短縮が図られている。

図7-2は計算機性能による計算時間の比較である。横軸は計算負荷の大きさを表す指標として、前掲の式(5.2)に示した計算負荷指標を採用した。この計算負荷指標は総セル数と計算ステップ数をかけ合わせた値である。Pentium4からCore i7 3rd Gen.への進化では0.12から0.66倍の範囲で短縮され、Core i7 3rd Gen.からCore i7 8th Gen.への進化では計算時間が0.08から0.95倍の範囲で短縮されている。平均値では、Pentium4からCore i7 3rd Gen.への進化では計算時間が0.37倍、Core i7 3rd Gen.からCore i7 8th Gen.への進化では計算時間が0.61倍である。半導体の集積密度の向上は限界に近付きつつあると言われていた中、ムーアの法則ほどではないが計算機性能の向上による計算時間の短縮が期待できる。ムーアの法則との関係については、「5-11. 計算機性能と計算時間」に示した。

また、前出の図5-58に示したように、数値シミュレーションでは複数のコアを用いた並列計算により計算時間を短縮することが可能である。

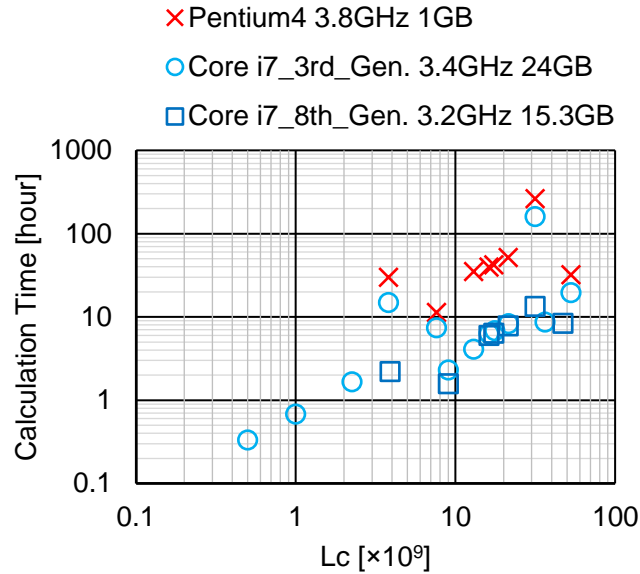


図 7-2 計算機性能による計算時間の比較

7-3. 身体活動を考慮した消費エネルギー量

図 7-3 の青色の×マークは 2D simulation に限定して模型実験との消費電力量の比較を行った。1 ケースあたりの造波に必要な消費電力量である。模型実験は造波水路の長さ、幅、深さが 50 m、1 m、1.5 m 程度で、消費電力を 7.5 kW とした。青色のマークは図 7-1 の” 2D Single core” と同じデータであり、模型実験より数値シミュレーションの消費電力量が多い。

図 7-3 の赤色の+マークは、造波機やコンピューターの消費電力量に、技術者の身体活動によるエネルギー消費量を加えた消費エネルギー量である。身体活動によるエネルギー消費量は厚生労働省の資料⁷⁻⁹⁾を参考に設定した。身体活動によるエネルギー消費量を表す指標としてメッツがある。メッツは身体活動時の消費エネルギー量と安静時消費エネルギー量の比である。模型実験は「屋内の掃除、家財道具の片付け、大工仕事」の 3.0 メッツを適用した。数値シミュレーションは「軽いオフィスワーク」の 1.5 メッツを適用した。運動中のエネルギー消費量を算出する場合、体重あたり、1 時間あたりで表すと、メッツとほぼ同じ値を示すとされている。例えば、体重 50 kg の人が、6 メッツの運動強度で 30 分運動したならば、エネルギー消費量は $6 \text{ kcal/kg/時} \times 0.5 \text{ 時間} \times 50 \text{ kg} = 150 \text{ kcal}$ となる⁷⁻⁹⁾。模型実験と数値シミュレーションのどちらも、1 ケースの実施に準備も含めて 1 日を要するものとした。1 日の作業時間は 7 時間、技術者の体重は 60 kg とした。技術者の人数は、数値シミュレーションは 1 人、模型実験は 2 人とした。これにより算定した

身体活動によるエネルギー消費量を 1 kcal/h=1.163 W で消費電力量に換算すると、数値シミュレーションが 0.733 kWh で模型実験が 2.93 kWh である。これらを造波機や計算機の消費電力量に加えると、図 7-3 の青色の×マークが赤色の+マークになる。身体活動を加えた消費エネルギー量は数値シミュレーションが模型実験より少なくなる。すなわち、模型実験から数値シミュレーションに移行することによって消費エネルギーを削減することができる。実験施設では数値シミュレーションを実施するオフィスよりも多くの照明を必要とする。模型実験では実験模型の製作が必要であり、実験終了後には実験模型が廃棄物となる。これらも考慮に加えると、模型実験から数値シミュレーションへの移行による環境負荷の軽減の効果はさらに大きくなる。

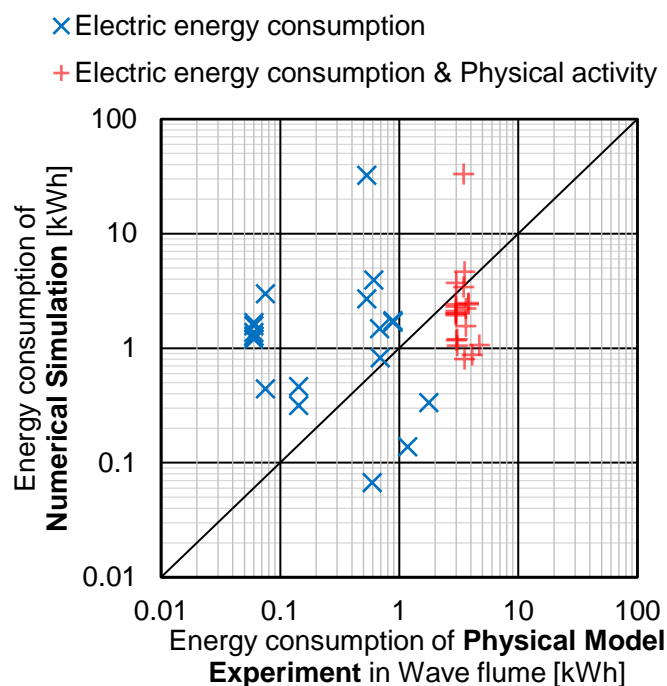


図 7-3 数値計算と造波水路における模型実験の消費エネルギー量の比較

7-4. 準備作業を考慮した消費電力量

数値シミュレーションの消費電力量について、準備作業も考慮して造波水路における一般的な規模の模型実験との比較を行った。

模型実験の実験準備作業は表 7-1 の内容を考慮した。前出の表 5-7、表 5-17、表 5-25、表 5-28、表 5-32 に示した内容に対して消費電力を算出した。それを、波浪条件が 3 種類で実験断面が 3 種類として 9 で除して 1 ケースあたりの消費電力量とした。模型実験は図 7-3 の青色のマークの消費電力量にこれを加える。数値シミュレーションについては、

模型実験と同じ表に示した「試計算」と「入射波検定」の計算に要する計算時間に対する消費電力量を算定し、本計算のケース数で除して1ケースあたりの消費電力量とした。その比較を図 7-4 に赤色の○マークで示す。準備作業に要する消費電力量も考慮すると、模型実験から数値シミュレーションに移行することによって、消費エネルギーを削減できることが明らかである。

表 7-1 消費電力量の検討に適用した模型実験の準備作業の内容

作業項目	作業内容	使用機材
模型床製作	中目砂投入	天井クレーン
	モルタル打設	コンクリートミキサー 天井クレーン
	照明	電灯
模型製作	材料加工	NCルーター
計測機器設置	照明	電灯
入射波検定	造波	造波機
	照明	電灯
初回模型設置	照明	電灯
計測機器撤去	照明	電灯
模型床撤去	モルタルはつり	ブレーカー
	ガラ・中詰め搬出	天井クレーン
	照明	電灯

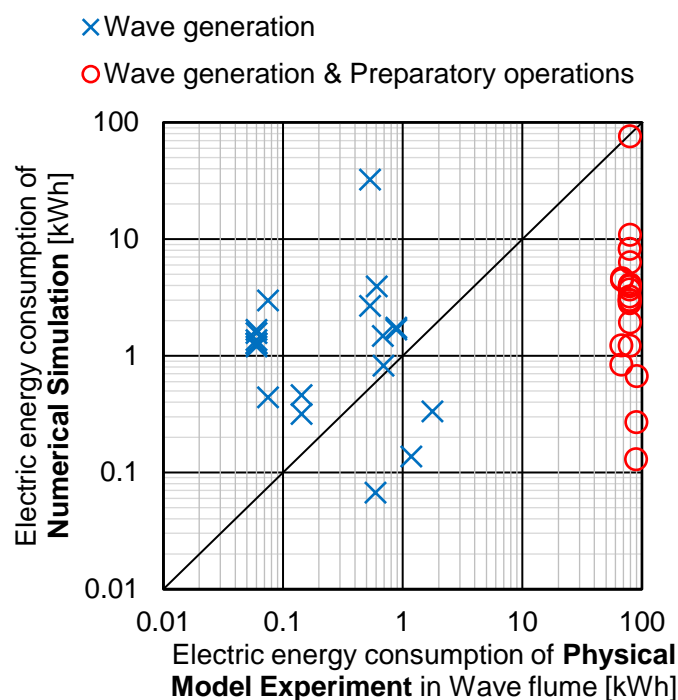


図 7-4 造波に要する消費電力量と準備を考慮した消費電力量

7-5. まとめ

数値シミュレーションの実施に多くの計算時間を要するため、造波に対する部分だけを対象にすると、予想に反して模型実験より数値シミュレーションの消費電力量が多いことが判明した。ただし、技術者の身体活動も考慮すると、複数人の技術者を必要とする模型実験よりも、単一の技術者で実施できる数値シミュレーションの消費エネルギーが少ない。すなわち、模型実験から数値シミュレーションに移行することによって消費エネルギーを削減することができる。また、計算機性能の向上により数値シミュレーションの計算時間が短縮されると、数値シミュレーションの消費エネルギー減少することが期待される。なお、技術者の身体活動を考慮しなくても、実験や計算の準備に必要な消費電力量を考慮すると、模型実験から数値シミュレーションにデジタルシフトすることにより、消費電力量を削減することが可能である。したがって、耐波設計において、模型実験から数値シミュレーションに移行することにより、環境負荷を軽減することができる。

参考文献

- 7-1) <https://www.fujitsu.com/jp/about/businesspolicy/tech/k/qa/k04.html>
- 7-2) https://blogs.itmedia.co.jp/be_prepared/2015/12/273.html
- 7-3) <https://www.top500.org/green500/lists/2019/11/>
- 7-4) <https://www.top500.org/lists/top500/list/2020/06/>
- 7-5) <https://www.top500.org/lists/hpcg/06/>
- 7-6) <https://icl.bitbucket.io/hpl-ai/>
- 7-7) https://graph500.org/?page_id=834
- 7-8) 文部科学省：HPCI 計画推進委員会（第 42 回）配付資料，【資料 1-1】「富岳」の開発状況等について，https://www.mext.go.jp/content/20200228-mxt_jyohoka01-000005354_01.pdf
- 7-9) <https://www.mhlw.go.jp/bunya/shakaihosho/iryouseido01/pdf/info03k-06.pdf>, (参照 2020-09-20)

8. 港湾構造物の耐波設計における数値シミュレーションの活用例

8-1. はじめに

波浪変形、反射波、越波、伝達波、波圧については模型実験から数値シミュレーションへの移行、すなわちデジタル化が進みつつある。一方、ケーソンの滑動や消波ブロックの安定などの耐波設計に数値シミュレーションを適用するにはかなり多くの年数を要することを確認した。したがって、当面は数値シミュレーションと模型実験を組み合わせ耐波設計を実施していくことが必要である。そのような数値シミュレーションの活用例として、消波工に対する地球温暖化の影響の検討を以下に示す。

8-2. 数値シミュレーションと模型実験による検討内容

地球温暖化により海面水位が上昇すると、防波堤ケーソンの前面を被覆する消波工の変状を生じやすくなる。消波工の変状を生じると、維持管理の観点から補修が必要となる。しかし、消波工にどれだけの変状を生じたら補修が必要であるかの判断基準が明確ではない。そのため、消波工の補修の必要性を適切に判断することが、防波堤の維持管理上の課題である。わが国では、建設から数十年が経過した防波堤が数多くある。これらの防波堤では、消波工補修の判断を必要とする施設が少なくない。

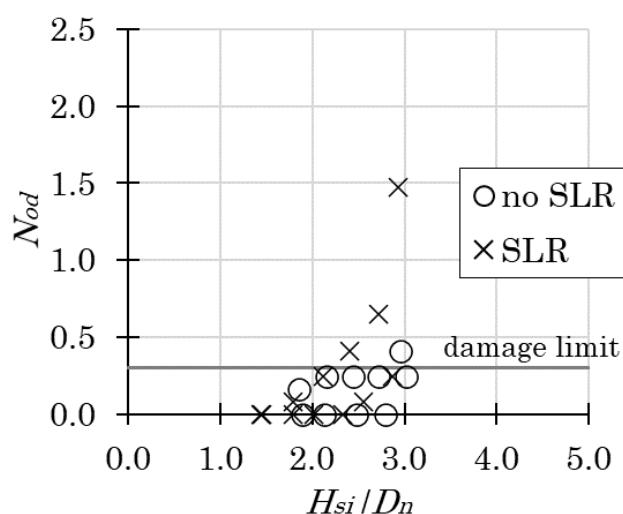
防波堤ケーソンの前面を被覆する消波工の変状が進むと、反射波抑制、伝達波抑制、ケーソンの安定性確保、などの水理性能に変化を生じる。ただし、水理性能の悪化が許容範囲内であれば、消波工の補修を行う必要はない。しかし、消波工の変状による水理性能の変化が明確ではないことが、消波工補修の必要性の判断を難しくしている。

反射波、伝達波、ケーソンに作用する波圧などの水理性能については、計算の実施に時間を要する項目があるものの、数値シミュレーションで検討が可能である。しかし消波ブロックの安定性については、2020年時点では数値シミュレーションで検討を行うことが困難である。そこで、消波ブロックの安定性は水理模型実験で検討し、水理性能は数値シミュレーションで検討を行うことが、2020年時点で模型実験から数値シミュレーションに移行可能な内容である。

8-3. 模型実験による消波工被害の把握

模型実験により消波工の安定性の検討を行った。図 8-1 に海面上昇の有無による消波工の被災度の比較を示す。不規則波の波高を段階的に大

きくしながら消波工の被害の変化を確認した実験である。作用波数は各波高段階で 1000 波である。 N_{od} は消波工の被災度、 H_{si} は防波堤設置位置の通過波高、 D_n は消波ブロックの代表径である。海面上昇量は D_n の 0.6 倍である。この海面上昇量には、地球温暖化による平均海面の上昇の他に、潮位偏差の増加分を含んでいる。図 8-1 において、 H_{si}/D_n が 2.0 以下では海面上昇なし (no SLR) と海面上昇あり (SLR) の N_{od} がほぼ同じである。しかし、 H_{si}/D_n が 2.0 を超えると、海面上昇ありの N_{od} が海面上昇なしより大きくなる。これにより、海面上昇により消波工の被災が大きくなることがわかる。



(SLR : Sea Level Rise)

図 8-1 海面上昇の有無による消波工被災度の比較

温暖化の影響により、従来よりも波浪条件が厳しくなっている。波高の経時変化の最大値が大きくなると、その前後を含めた高波の継続時間が長くなることが考えられる。図 8-2 に波高と波数の増加による消波工被害の変化を示す。縦軸の N_{od} は被災度、横軸の N は波数である。実験波浪は不規則波である。0 から 5000 波までは 1000 波ごとに波高を段階的に大きくしている。波高の増大とともに N_{od} が大きくなっている。4000 から 7000 波までは波高は同じであるが、波作用数の増加とともに N_{od} が大きくなっている。このことから、高波の継続時間が長くなると消波工の被害が大きくなることがわかる。

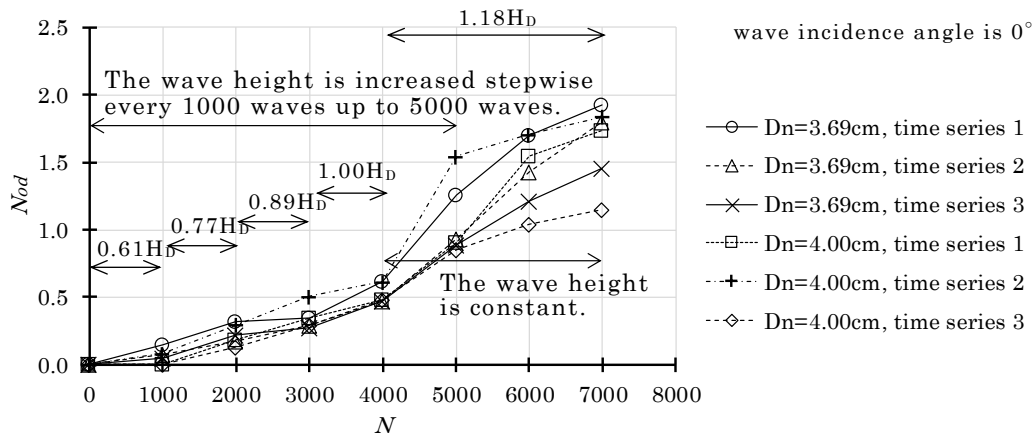


図 8-2 波高と波数の増加による消波工被害の変化

8-4. 数値シミュレーションによる水理性能の評価

混成式防波堤のケーソン前面に設置される消波工の断面形状が変化すると、反射波の抑制、越波伝達波の抑制、ケーソンに作用する波圧・波力の抑制などの水理性能が変化する。消波工の断面形状変化により水理性能が変化することは、模型実験によって確認されている(8-1,8-2)。これらの水理性能の変化について、数値シミュレーションで検討した。数値計算手法は2次元版の数値波動水路¹⁻⁵⁾(以下、「CS2D」と称す。)とした。

図 8-3 に消波工天端幅の減少による水理性能の変化を検討した断面を示す。石材マウンドは省略してある。設計波の周期は 12.0 s で防波堤設置位置の有義波高は 6.95 m である。ケーソンと消波工の水面上の天端高は有義波高の約 0.6 倍の 4.0 m である。

「no damage」の消波工天端幅 10 m は有義波高に対する所要質量のブロックの標準的な天端幅である。「damage W1」から「damage W3」は消波工の天端幅が減少した断面形状である。「no damage」から「damage W3」にかけて消波工の天端幅を 3 m ずつ小さくしてある。消波工の天端幅を小さくしても消波工の断面積が変化しないように、消波工の法先位置を変更してある。水位変化の他にケーソンに作用する波圧の変化を出力した。波圧出力位置は図 8-3 の damage W3 に示すとおりである。波高伝達率と反射率とケーソンに作用する波圧を解析するために、有義波高が 5.08 m で有義波周期が 12.0 s の不規則波を作用させた。また、反射率を解析するために有義波高が 0.99 m で有義波周期が 6.0 s の不規則波を作用させた。

図 8-4 に計算結果を示す。図 8-4(1)は波高伝達率と反射率である。天端幅の減少に伴い反射率が小さくなる。周期 12.0 s の波高伝達率は天端

幅の減少に伴い大きくなる。周期 12.0 s は波高が大きく越波を生じるので、消波工の天端幅が小さくなって越波が多くなると、反射率が低下する。波高が小さいので越波を生じない周期 6.0 s で、消波工の天端幅の減少により反射率が小さくなるのは、波頂の高さより下の消波ブロックの断面積が大きくなったためである。図 8-4(2)はケーソンに作用する波圧である。消波工天端幅の減少に伴い波圧が大きくなっている。特に、静水面における波圧の増大が顕著である。

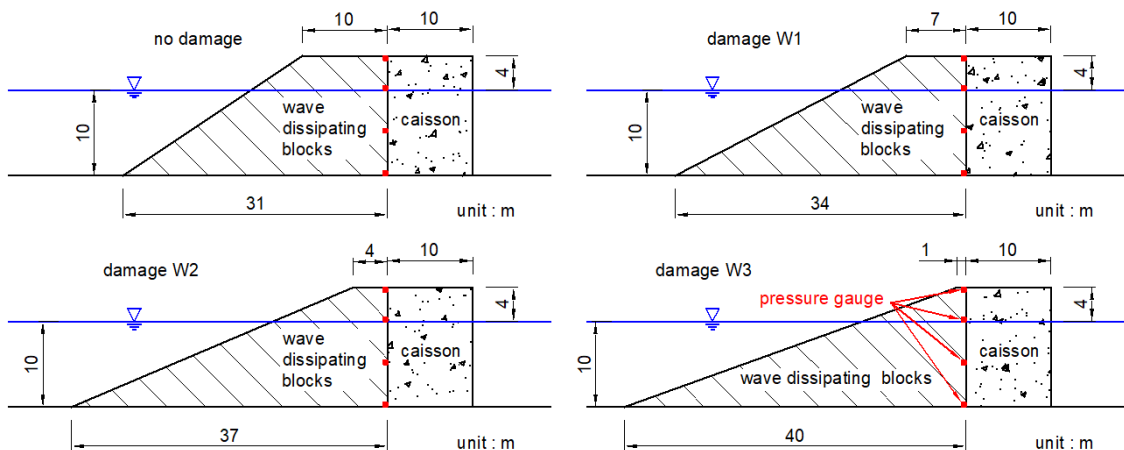
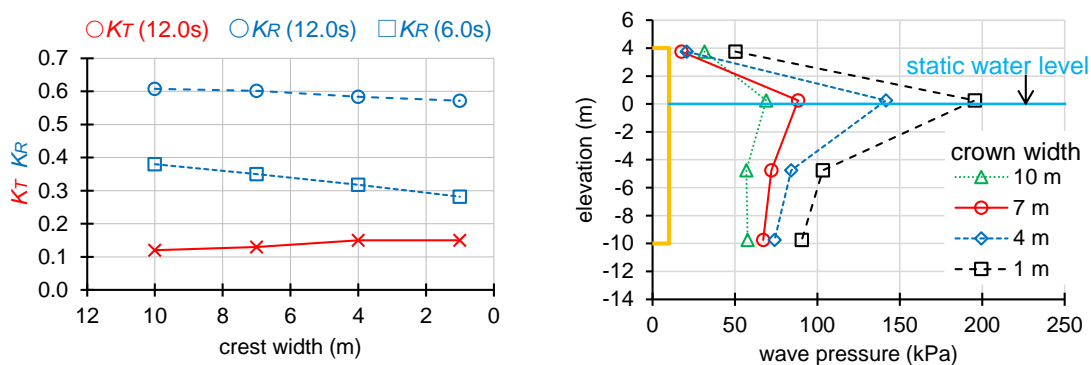


図 8-3 消波工の天端幅減少による水理性能の変化を評価する防波堤断面



(1) 波高伝達率と反射率

(2) ケーソンに作用する波圧

図 8-4 消波工の天端幅減少による水理性能の変化

図 8-5 に消波工天端高の低下による水理性能の変化を検討した断面を示す。石材マウンドは省略してある。設計波の周期は 12.0 s で防波堤設置位置の有義波高は 6.95 m である。ケーソンの水面上の天端高は有義波高の約 0.6 倍の 4.0 m である。

「no damage」の消波工天端幅 10 m は有義波高に対する所要質量のブロックの標準的な天端幅である。「no damage」の消波工天端高はケー

ソンの天端高と同じである。「damage H1」と「damage H2」は消波工の天端高が低下した断面形状である。「no damage」から「damage H2」にかけて消波工の天端高を 3.5 m ずつ低くしてある。消波工の天端高を低くしても消波工の断面積が no damage とほぼ同じになるように、消波工の天端幅を変更してある。水位変化の他にケーソンに作用する波圧の変化を出力した。波高伝達率と反射率とケーソンに作用する波圧を解析するために、有義波高が 5.08 m で有義波周期が 12.0 s の不規則波を作用させた。

図 8-6 に計算結果を示す。図 8-6(1)は波高伝達率と反射率である。消波工の天端が低くなるに伴い、波高伝達率が大きくなる。消波工の天端がケーソンの天端より 3.5 m 低い+0.5 m の波高伝達率は 0.18 であり、図 8-4 に示した天端幅 1.0 m の波高伝達率より大きい。反射率は天端高の減少に伴い小さくなる。越波が増えて波高伝達率が大きくなると反射率が小さくなる傾向は、天端幅の減少と同じである。図 8-6(2)はケーソンに作用する波圧である。消波工の天端高の低下に伴いケーソンに作用する波圧が大きくなる。

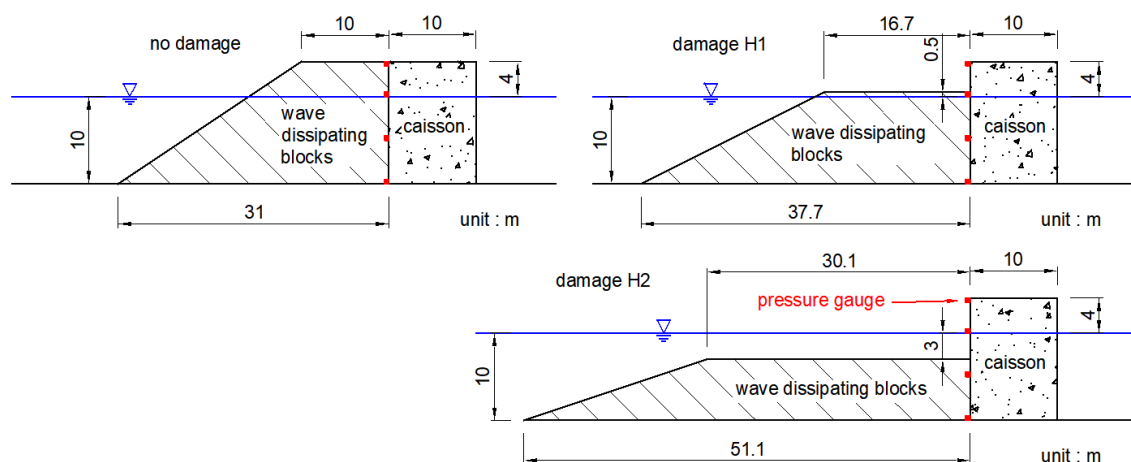
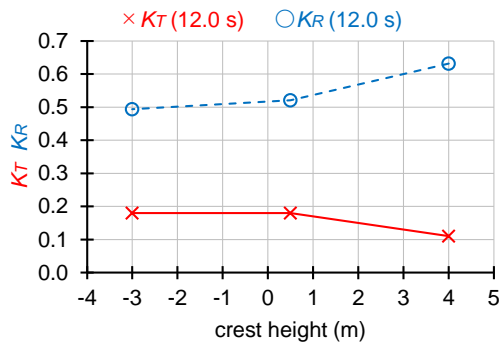
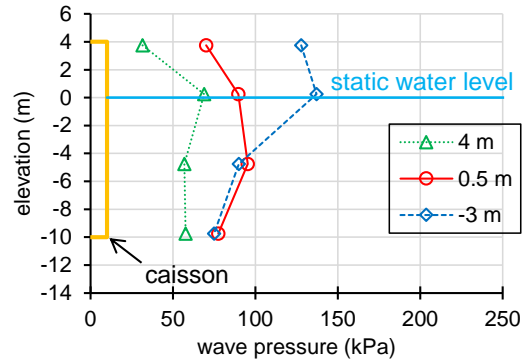


図 8-5 消波工の天端高減少による水理性能の変化を評価する防波堤断面



(1) 波高伝達率と反射率



(2) ケーソンに作用する波圧

図 8-6 消波工の天端高減少による水理性能の変化

図 8-4 および図 8-6 に示したように、数値シミュレーションにより消波工断面形状の変形による消波工の水理性能の変化を把握することができる。ここでの検討断面では、消波工の変形が進むと反射率は小さくなったが、波高伝達率とケーソンに作用する波圧は大きくなった。波高伝達率と波圧が要求性能を満たしている範囲では、消波工の変形を生じても補修の必要がない。実際に消波工の変形を生じた防波堤があれば、その変形状態に対して数値シミュレーションを実施して水理性能を確認し、消波工補修の必要性を判断することができる。

8-5. まとめ

「5-8-2. 消波ブロックの移動に関する数値シミュレーション」に示したように、消波ブロックの安定性を数値シミュレーションで検討することは、革新的な変化が起こらなければ難しい。そこで、消波ブロックの安定性は模型実験で検討し、反射波、越波伝達波、ケーソンに作用する波圧の水理性能は数値シミュレーションで検討する数値シミュレーションの活用例を示した。

参考文献

- 8-1) 久保田真一，山本方人，松本朗，半沢稔，荒木進歩，出口一郎：消波工の変形過程が波力低減効果の変化に及ぼす影響，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.66，No.1，pp.866-870，2010.
- 8-2) 鹿島遼一，榊山勉，松山昌史，関本恒浩，京谷修：安定限界を越える波浪に対する消波工の変形と防波機能の変化について，海岸工学論文集，第 39 巻，pp.671-675，1992.

9. 結論

日本の国の機関からの調査設計業務の発注実績に基づき、港湾構造物の耐波設計における模型実験から数値シミュレーションへのデジタルシフトの現状について確認した。その調査により、波浪変形に関してはデジタルシフトが進んでいるが、そのほかの項目についてはデジタルシフトがあまり進んでいないことを確認した。

研究者や設計技術者などに対して実施したヒアリング調査により、計算精度の向上と計算時間の短縮によりデジタルシフトを促進できることを確認した。

波浪変形や越波など複数の項目に対して数値シミュレーションを実施して模型実験との比較により計算精度を検証するとともに、計算時間を確認した。その結果に基づき計算負荷の大きさを表す指標を提案した。

日本の国の機関からの調査設計業務の発注実績に基づきデジタル化率の変化を分析し、Logistic 関数を適用してデジタルシフトの将来予測を行った。また、計算精度と計算時間の観点からデジタルシフトの目標期間を提案した。

消費エネルギーについては消費電力量で評価した。準備作業も含めて模型実験と数値シミュレーションの消費電力量を比較して、模型実験から数値シミュレーションへ移行することにより消費エネルギーが削減されることを示した。

模型実験から数値シミュレーションへ移行することの大きなメリットは、模型実験施設を所有しない人や機関でも検討を行えることである。また、模型実験施設の建設、維持、更新には多額の費用を必要とするが、それと比べると一般的な性能の計算機は安価である。模型実験から数値シミュレーションへの移行により、消費エネルギー量を軽減することができ、環境負荷の軽減に寄与することができる。模型実験の実施には 2 から 3 人の技術者が必要であるが、数値シミュレーションは 1 人の技術者で実施が可能である。したがって、模型実験から数値シミュレーションへの移行は、人口減少社会における人手不足の解消にも寄与する。以上のような理由により、港湾構造物の耐波設計において、模型実験から数値シミュレーションへの移行、すなわちデジタルシフトを進めるべきである。

港湾構造物の耐波設計に対する模型実験から数値シミュレーションへの移行についての評価を以下に示す。

計算精度に関して

- 1) 波浪変形に関しては、「5-2」に示したように耐波設計に適用が可能な程度に計算精度を得られるようになっている。
- 2) 伝達波に関しては、「5-4」に示したように伝達波の波高に対してセルサイズを十分に小さくすることによって耐波設計に適用が可能な程度に計算精度を高めることができる。
- 3) ケーソンに作用する波圧に関しては、「5-6」に示したように数値シミュレーションによる算定が可能である。ただし数値シミュレーションによる波圧の算定を設計に適用するためには、計算精度の向上が望まれる。
- 4) 消波ブロックの移動に関する数値シミュレーションは、不規則波を長時間作用させて計算精度を評価できる段階に至っていない。
- 5) 波浪の作用による地盤の洗堀に関しては、セルや粒子の大きさを砂粒と同じほどに小さくすることを考えると、数値シミュレーションを耐波設計に適用することの実現性が不明である。

計算時間に関して

- 1) 2次元の波浪変形と越波および長周期波の反射波に関しては、耐波設計に適用が可能な時間での実施が可能である。
- 2) 2次元の伝達波と3次元の波浪変形に関しては2020年時点に対して20から40倍程度の計算速度の向上が望まれる。ただし伝達波高が大きい条件ではセルを大きくして計算時間を短縮できる。
- 3) 波圧の数値シミュレーションに関しては計算速度の向上が望まれる。
- 4) 消波ブロックの安定性に関する耐波設計に数値シミュレーションを適用するには、革新的な計算速度の向上が必要である。物体の移動を伴う現象として、ケーソンの滑動も同様である。

港湾構造物の耐波設計に関する模型実験から数値シミュレーションへの移行に関する評価を整理すると、表 9-1 のとおりである。2020年時点で数値シミュレーションに移行（デジタルシフト）が可能である項目は限られている。2次元の伝達波に関しては主に計算時間の問題であり、2030年までにデジタルシフトがかなり進むと予測される。2次元の波圧に関しては計算時間の他に計算精度向上も必要であるため、伝達波よりやや時間を要し、2030年代にデジタルシフトが進むと予測される。

越波・伝達波と波圧の3次元のデジタルシフトは、2次元から20年程度の遅れで実現されると予測される。ブロック安定と地盤の洗堀はデジタルシフト実現時期の予測が困難なほどに時間を要すると考えられる。

表 9-1 港湾構造物の耐波設計に関する検討項目と評価

検討項目	評価	検討項目	評価
波浪変形・反射波 ・越波	1	ケーソン滑動	3
伝達波	2	ブロック安定	3
波圧	2	地盤の洗堀	4

- 1 現時点で移行可能 4 可能性が未知
 2 精度検証を要し、計算速度向上が望まれる
 3 計算手法の高精度化や革新的な速度向上を要する

港湾構造物の耐波設計における模型実験と数値シミュレーションには、研究者、国の機関、技術者が関与している。デジタルシフトに対するそれぞれの役割は以下のとおりである。研究者は計算精度の向上に寄与することができる。国の機関は港湾設計業務の発注において模型実験から数値シミュレーションに切り替えていくことができる。技術者は設計業務において数値シミュレーションを実施して事例を増やすとともに、事例の積み重ねにより精度向上に寄与することができる。デジタルシフトを加速させるためには、関係者がそれぞれの立場でそれぞれの役割を果たしていかなければならない。

数値シミュレーションへの移行に時間がかかる項目もあるので、今後模型実験で検討を行うことや、数値シミュレーションと模型実験を併用することが必要である。したがって、耐波設計におけるデジタルシフトを進めると同時に、模型実験の高精度化や模型実験の技術継承を行うことが必要である。

謝辞

本論文は、中央大学理工学部大学院理工学研究科都市人間環境学専攻の有川太郎教授のご指導の下、博士課程後期の3年間の成果をまとめたものです。有川太郎教授には博士課程後期の3年間のご指導の以前にも、前職の港湾空港技術研究所に在籍されていた時に模型実験のご指導をいただくとともに、数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会においては数値シミュレーションに関するご指導もいただきました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

無記名とさせていただきますが、多くの方にデジタルシフトに関するヒアリング調査にご協力いただきました。**Flanders Hydraulics Research** の鈴木智浩博士には欧州における研究の情報を提供していただきました。著者が所属する株式会社エコーの柴木秀之社長や顧問の先生方からは、研究内容に対して貴重なご意見をいただきました。加藤一正様には、海外論文投稿にあたり英語での論文作成に多大なご指導をいただきました。株式会社エコーの皆様、特に著者が所属する水理解析部の皆様には、社会人として仕事を行いながらの研究活動の実施にご協力いただきました。また、株式会社エコーからは博士課程後期で学ばせていただくにあたり助成金を頂きました。研究活動の実施にあたりご協力くださった皆様に、心より感謝申し上げます。

最後に、研究活動の実施にあたり、心の支えになるとともに、研究活動のために時間を使うことに協力してくれた妻や家族に感謝します。半年前に他界した父の生前に、博士学位取得の報告ができなかったことを申し訳なく思っています。博士学位の取得に向けた活動を応援してくれた母に感謝します。母は結婚後に私が生まれるまで、付属編 (p.13~14) に示した農業土木試験場の実験施設でアルバイトをしていました。そのため、私が幼少のころ、庭に消波ブロックのモルタル模型が数個あり、魚を飼う水槽の中に入れていたことを思い出します。私が港湾構造物に関する業務や研究に携わっているのは、そのような背景が影響しているのかもしれない。

港湾構造物の耐波設計における
デジタルシフトに対する検討
Digital Shift in Design of Maritime Structures
Against Waves

付属編

Iwao Hasegawa
長谷川 巖

中央大学大学院
理工学研究科
都市人間環境学専攻

令和3年度
2021年7月

目 次

1. はじめに	1
1-1. 付属編の位置づけ	1
1-2. 既往資料の確認	1
1-3. 付属編で扱う範囲	6
1-3-1. 付属編で扱う波浪の範囲	6
1-3-2. 付属編で扱う検討対象範囲	6
1-3-3. 付属編で扱う水理模型実験の範囲	6
1-4. 水理模型実験の特徴	6
2. 水理模型実験の変遷と実験施設	10
2-1. 波浪に関する水理模型実験の変遷	10
2-2. 水理模型実験施設	19
3. 水理模型実験の留意点と高精度化の手法	42
3-1. 共通事項	42
3-1-1. 相似則	42
3-1-2. 模型縮尺	44
3-1-3. 模型床	45
3-1-4. AD 変換の分解能	45
3-2. 波浪変形（波高測定）	47
3-2-1. 測定内容・方法	47
3-2-2. 高精度化のための工夫と波高測定の留意点	53
3-2-3. 解析方法	83
3-3. 反射波（入射波と反射波の分離）	86
3-3-1. 風波の入・反射波の分離（2次元実験）	86
3-3-2. 風波の入・反射波の分離（3次元実験）	91
3-3-3. 長周期波の入・反射波の分離（2次元実験）	93
3-4. 越波・伝達波	101
3-4-1. 越波	101
3-4-2. 伝達波	106
3-5. 波圧・波力	107
3-5-1. 波圧測定	107
3-5-2. 波力測定	111
3-6. 滑動・転倒	117
3-6-1. 実験波浪の選定	117
3-6-2. 滑動抵抗力の調整	117

3-6-3.	実験模型の設定.....	119
3-6-4.	滑動限界波力の評価.....	119
3-7.	被覆材安定	120
3-7-1.	被覆材安定実験の実験模型の設置.....	120
3-7-2.	被覆材安定実験の実験方法.....	120
3-7-3.	段階的波作用.....	120
3-7-4.	被覆材の安定性の評価.....	121
3-8.	防波堤の耐津波安定性.....	123
3-8-1.	水位差に対するケーソンの安定性.....	123
3-8-2.	マウンド被覆材の耐津波越流安定性.....	125
3-8-3.	海底地盤の洗掘を伴う場合.....	127

1. はじめに

1-1. 付属編の位置づけ

本編である「港湾構造物の耐波設計におけるデジタルシフトに対する検討 (Digital shift in design of maritime structures against waves)」において、「数値シミュレーションへの移行に時間がかかる項目もあるので、今後も模型実験で検討を行うことや、数値シミュレーションと模型実験を併用することが必要である。したがって、耐波設計におけるデジタルシフトを進めると同時に、模型実験の高精度化や模型実験の技術継承を行うことが必要である。」との結論を得た。そこで、付属編において「耐波設計のための水理模型実験」の変遷や手法などについて示す。

1-2. 既往資料の確認

1) 国内の水理模型実験の既往資料の確認

水理模型実験に関する国内の既往資料を調べ、水理模型実験の高精度化についてどのような記述があるかを確認した結果を、資料の年代が古い順に示す。

資料名：波浪に関する水理模型実験¹⁻¹⁾

著者：合田良美（水工部波浪研究室長）

発行組織：運輸省港湾技術研究所

発行年月：1969年1月

1969年に運輸省港湾技術研究所が作成した「専門技術者研修テキスト」である。この資料の目的は、水理模型実験が正しく行われ、その結果が正しく解釈されるために、水理模型実験の経験が少ない技術者に対して水理模型実験を説明するものである。

この資料では、静穏度実験、滑動実験、越波実験について、実験実施の基本的な考え方が示されていると共に、相似率、実験施設、測定機器についても示されている。

ただし、2020年時点で50年以上前の資料であるため、内容が古い。例えば、実験波浪は規則波である。また、一般技術者向けのテキストであり、説明されている内容は基本的な実験手法に限定されており、水理模型実験の高精度化に関する記述はない。また、上記の3種類の実験以外については示されていない。

資料名：港湾調査指針改定版¹⁻²⁾（第1編：水工 第10章：水理模型実験）

監修：運輸省港湾局

発行所：社団法人日本港湾協会

発行年月：1987年6月

現地調査など港湾に関する様々な調査の方法が示されている資料の一部に、水理模型実験が含まれている。この資料では、静穏度実験、消波実験、越波実験、滑動実験、波力実験、消波ブロック安定実験などについて、基本的な実験手法が示されている。また、不規則波実験が導入されている。

ただし、2020年時点で30年以上前の資料であるため、内容が古い。また、資料の一部分に水理模型実験が説明されているので文量が豊富ではない。そのため、「波浪に関する水理模型実験」よりも説明されている実験種類は多いが、説明されている内容は「波浪に関する水理模型実験」より簡単であり、水理模型実験の高精度化に関する記述はない。

資料名：水理模型実験¹⁻³⁾

編著：須賀堯三

発行所：山海堂

発行年月：1990年11月

河川、砂防、海岸、港湾、ダム、発電、下水道に関する水理模型実験について説明されている。説明項目は下記のとおりである。

実験計画 計測 実験結果の整理 水理模型実験例

2020年時点で30年前の書籍であるため、内容が古い。河川、砂防、ダム、発電、下水道を含む多岐にわたった内容であり、波浪に関する水理模型実験の記述は少ない。そのため、波浪の実験手法に関する記述は簡単な内容であり、水理模型実験の高精度化に関する記述はない。

資料名：耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計¹⁻⁴⁾ (I 設計実務編 8. 不規則波による水理模型実験)

著者：合田良實

発行所：鹿島出版会

発行年月：2008年6月

波浪の特性や港湾構造物の耐波設計など、430ページに及ぶ書籍の中で、11ページを割いて不規則波による水理模型実験が説明されている。その内容は、以下のとおりである。

相似率および模型縮尺

不規則波による水理模型実験の必要性

水槽内の不規則波の発生方法

不規則波実験の実施と留意点

2020年時点で約10年前の書籍であり、内容は比較的新しい。ただし、不規則波に着目した内容であり、各種実験の手法については示されていない。

2) 海外の水理模型実験の既往資料の確認

水理模型実験に関する海外の既往資料を調べ、水理模型実験の高精度化についてどのような記述があるかを確認した結果を以下に示す。

資料名 : Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering¹⁻⁵⁾

発行所 : World Scientific

編著 : Steaven A. Hughes

発行年月 : 1993 年

付録も含めると 568 ページを使って、Physical Models and Laboratory Techniques についての説明が行われているが、全体的に文章による説明であり、図や表を使った具体的な説明は少ない。

第 1 章は「Introduction」、第 2 章は「Dimensional Analysis」、第 3 章は「Principles of Similitude」で、導入部分と基礎的なことが書かれている。第 4 章の「Hydrodynamic Models」では、模型実験において波をどう取り扱うかが説明されている。第 5 章の「Coastal Structure Models」では、海岸構造物模型を模型実験においてどう取り扱うかが説明されている。説明順に Rubble Mound Structures、Sloping Impermeable Structures、Vertical-Wall Structures、Composite Structures、Floating Structures である。港湾構造物ではなく海岸構造物を対象としていることも理由の一つであると思われるが、ケーソン式の構造物の説明はなく、最初に Rubble Mound Structures が説明されている点に、日本との違いを感じる。

第 8 章は「Laboratory Measurement and Analysis」である。「8.2 Measurement Tools and Techniques」において Water Level Measurement にはポイントゲージやサーボシステムによるポイント・ロッド・センサーが、Sea Surface Elevation (Wave) Measurement には抵抗線式波高計や容量式波高計が、Flow Velocity Measurement にはピトー管、プロペラ式流速計、レーザー・ドップラー式流速計、PIV、熱線式流速計、電磁流速計、音響式流速計が、Pressure Measurement には圧力計が、Stress and Force Measurement にはひずみゲージやロードセルが紹介されている。これらの内容を見ると、水理模型実験に使用する計測機器に日本国内との違いは無いと思われる。

「8.4.2 Reflection Analysis of Irregular Waves」において、入射波と反射波の分離のための計測器配置が 3 種類紹介されている。一つ目は波の進行方向に並べた 2 本かそれ以上の波高計の時刻歴を用いる Spatially-Separated Wave Gauges であり、その中で Goda and Suzuki¹⁻⁶⁾が二次元水路での研究において一般的に用いられる方法であると紹介されている。二つ目の Vertical Array は鉛直に配置した流速計と波高計による時刻歴を用いる方法であり、日本国内でも用いられている Guza, et

al. ¹⁻⁷⁾が代表的な方法として紹介されている。三つめは1点の流速計による水平と鉛直の流速の時刻歴を用いる方法で、Co-Located Velocities とされている。

冒頭で説明したように、基本的に文章による説明であり、付属編で取り扱おうとしている水理模型実験の高精度化に関する記述は行われていない。

資料名 : Users Guide to Physical Modelling and Experimentation (Experience of the HYDRALAB Network)¹⁻⁸⁾

発行所 : CRC Press

編著 : L.E. Frostick, S.J. McLelland and T.G. Mercer

発行年月 : 2011 年

「Chapter 1 Introduction」の「1.4 AUDIENCE」において、「この書籍の対象者は水理研究所の新規採用者や大学の研究者などであるが、学生レベルの教科書ではない」とされている。

「1.5 CHOICE OF FACILITY」では水理模型実験の内容に応じてどのような実験施設を選定すればよいかが説明されている。

「Chapter 2 Waves」では波浪に関する水理模型実験の説明が、「Chapter 3 Breakwaters」では防波堤に関する実験の説明が行われている。しかし、全体的に文章による説明であり、数式や図表を用いた具体的な説明は行われていない。また、水理模型実験の高精度化に関する説明は行われていない。

なお、海外の文献ではあるが、「2.6.2 Wave analysis」の「Coping with reflecting waves」の中で、入射波と反射波の分離方法の一つとして、Goda and Suzuki ¹⁻⁶⁾が紹介されている。

資料名 : EurOtop, Manual on wave overtopping of sea defences and related structures, Second Edition 2018 ¹⁻⁹⁾

出典 : <http://www.overtopping-manual.com>

公開年 : 2018 年

ヨーロッパの研究施設、研究者によってまとめられた越波に関するマニュアルである。模型実験に基づく成果が多く採用されており、「physical model tests」、「wave flume experiments」などの用語が随所にみられる。水理模型実験に関する説明は「4.7 Physical modelling」の中で行われている。Physical modelling のページ数は3 ページ半に限られているが、越波量の時間変化を測定する方法が説明されている点は、水理模型実験の高精度化に該当する。

2020 年時点で数年前の資料であり、新しい技術が示されている。ただし、越波実験についてのみの説明である。

3) 港湾の施設の技術上の基準・同解説の確認

港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁻¹⁰⁾は平成30年5月に改訂版が発行された。一つ前の平成19年度版は上・下の2巻組であったが、平成30年度版は上・中・下の3巻組となり、下巻の参考技術資料が追加された。参考技術資料は、「共通編に関する参考技術資料」、「作用及び材料強度条件編に関する技術資料」、「施設編に関する参考技術資料」で構成されている。このうち、「作用及び材料強度条件編に関する技術資料」の「第1章 観測、調査及び試験」の中に「2.10 水理模型実験」があり、25ページにわたり水理模型実験の説明が行われている。発行されて間もない技術基準図書であり、新しい情報が示されている。

説明が行われている項目は、「実験装置・測定機器」、「自然条件の設定」、「水理模型実験における留意点」、「構造物の耐波安定性に関する水理模型実験」、「構造物の反射・伝達波に関する水理模型実験」、「構造物の越波対策に関する水理模型実験」、「構造物の耐津波性能に関する水理模型実験」、「平面波浪場に関する水理模型実験」、「移動床実験」である。比較的ていねいに説明が行われているが、文章による説明であり、数式や図表を用いた具体的な説明は行われていない。したがって、本研究で目指す波浪に関する水理模型実験の高精度化に対応した内容ではない。

4) 既往資料の確認結果

第1-2節で行った既往資料の確認結果を以下にまとめる。

水理模型実験について説明された国内の資料は、1990年以前の古いものである。内容は基本的な実験手法に限定されている。

2008年の耐波工学はやや新しいが不規則波の発生と留意点に限定されている。

海外のEurOtopは新しく、水理模型実験の高精度化に関する記述が若干あるが越波実験に限定されている。Users Guide to Physical Modelling and Experimentationは文章による説明のみであり、水理模型実験の高精度化に関する記述はない。

Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineeringも文章による説明のみであり、水理模型実験の高精度化に関する記述はない。

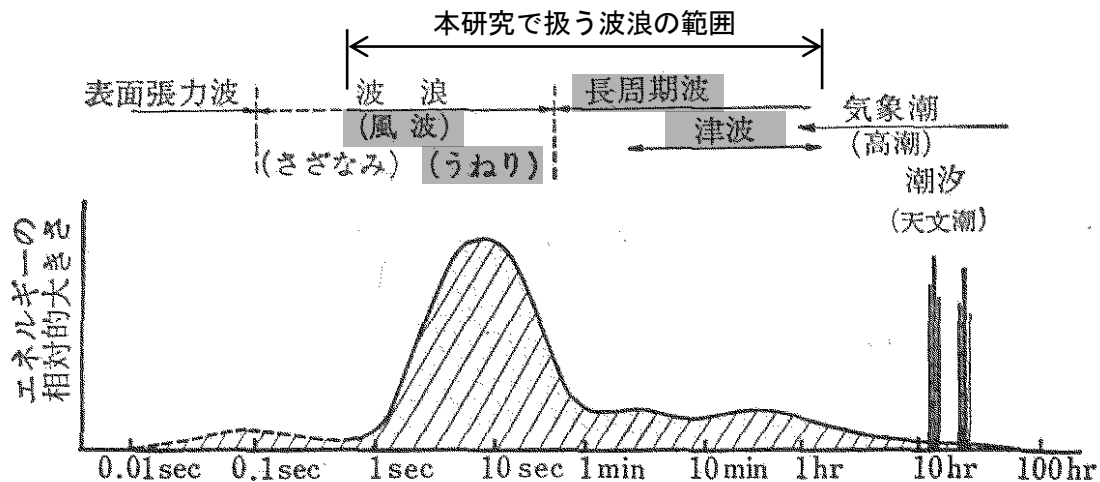
港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成30年度版)は、資料編に水理模型実験が説明されているが、水理模型実験の高精度化に関する記述はない。

以上のように、既往の資料において、波浪に関する水理模型実験の高精度化に関する研究(説明)は行われていない。そのため、本研究において「波浪に関する水理模型実験の高精度化」を研究することは有意義であると考えられる。

1-3. 付属編で扱う範囲

1-3-1. 付属編で扱う波浪の範囲

付属編で扱う波浪の範囲は図 1-1 に示す風波から津波までとする。すなわち、風波、うねり、長周期波、津波であり、周期の範囲では数秒から 2 時間程度である。



(わかり易い土木講座 17 新訂版 海岸・港湾, 彰国社, 佐藤・合田, p.19)

図 1-1 周期による海面の運動の分類の例

1-3-2. 付属編で扱う検討対象範囲

付属編では、港湾施設や海岸施設の断面諸元の設定のための検討を対象とする。従って、深海域や船体等の浮体の動揺は取り扱わない。

港湾施設や海岸施設の断面諸元の設定のために必要な検討項目として、波浪変形、反射波、越波・伝達波、波圧・波力、ケーソン等の滑動、消波ブロック等の移動、を検討の対象範囲とする。

1-3-3. 付属編で扱う水理模型実験の範囲

付属編で扱う波浪と検討対象の範囲に対応する水理模型実験を対象範囲とする。従って、潮汐実験や地形模型を設置しない深海波の実験および浮体の動揺実験は対象外とする。

1-4. 水理模型実験の特徴

水理模型実験の特徴について、数値シミュレーションと対比して以下に示す。

波浪に関する水理模型実験は、実物を縮小模型で実験施設に製作し、波浪によって生じる物理現象を縮小模型で確認する行為である。実物の規模で実施する現地実験と比べて安価に行うことができる。現地実験と比べては安価であるけれど

も、水理模型実験の実施には決して安くはない費用がかかる。費用はかかるけれども、模型実験には実際の物理現象を目視で確認できる利点がある。ただし、小さな模型を用いることによる縮尺影響を避けることができない。したがって、実験結果の評価にあたっては、縮尺影響を考慮することが必要である。水理模型実験には縮尺の影響があるけれども、港湾や海岸の構造物の波浪に対する設計において、水理模型実験の結果に基づく算定式や算定図表が多く用いられていることから、水理模型実験は信頼性のある検討手法であると言える。

波浪に関する数値計算（数値シミュレーション）は、数値モデルを用いて計算機により数値実験を実施する行為である。一般的に、水理模型実験と比べると安価に実施することが可能である。ただし、計算の内容によっては実時間よりかなり多くの計算時間を要する。計算結果が実際の現象をどの程度適切に再現できているかを確認する必要がある、その確認手法として広く用いられている方法が水理模型実験との比較である。計算結果の再現性が確認されたのちには、計算条件を変更しての比較検討を行うことが可能である。数値計算技術が進歩してきた現在においても、再現し得る現象に限界がある。例えば、渦を厳密に計算することは困難である。数値計算には様々な数値モデルがあり、検討対象とする条件に対して適切な数値モデルを選定する必要がある。また、同一の課題に対して複数の数値モデルで計算を実施して得られた結果が異なる場合に、どの結果を信用して採用すればよいか、判断が必要となる。

水理模型実験では、計測機器を設置した地点以外のデータを得ることができない。数値計算では多くの地点のデータを得ることができる。

表 1-1 に波浪に関する水理模型実験と数値計算の特徴を示す。

水理模型実験と数値計算（数値シミュレーション）は、課題に対する検討の手法の違いである。したがって、検討手法の違いはあっても、実験や計算で得られたデータの処理方法、解析方法、解析結果の検討内容についてはほぼ同じである。

模型実験と数値計算は、それぞれに得意点と不得意点（利点と欠点ともいえる）がある。どちらかの優劣をつけるものではなく、検討課題や検討環境に応じて適切な方法を選択すること、または模型実験と数値計算を組み合わせることで課題を解決していくことが望ましい。

表 1-1 波浪に関する水理模型実験と数値計算の特徴

水理模型実験	数値計算（数値シミュレーション）
実物を縮小模型で再現する。	数値モデルを用いて計算機により模擬実験を実施する。
現地実験と比べて安価に検討を行うことができる。 と言っても安くはない。	模型実験と比べると安価である。 計算の内容によっては実時間より多くの計算時間を要する。
模型で起こることは実際の物理現象である。 実際の現象を目視で確認することができるので理解しやすい。	実現象の再現性についての確認が必要である。 再現性が確認されたのちの条件変更による検討が可能である。
縮尺影響を避けることができない。	再現し得る現象に限界がある（例えば渦を厳密に計算することは困難である）。
実験施設を所有していないと実施が難しい。	複数の計算機を用意すれば同時に複数のケースの計算を実施できる。
計測機器を設置した地点以外のデータを得られない（データを得られる地点数に限界がある）。	多数の地点の結果を得ることができる。

参考文献（本編との重複あり）

- 1-1)合田良美（1969）：波浪に関する水理模型実験，専門技術者研修テキスト，水工部課程，運輸省港湾技術研究所，115p.
- 1-2)運輸省港湾局（1987）：港湾調査指針改定版，社団法人日本港湾協会
- 1-3)須賀堯三（1990）：水理模型実験，山海堂，339p.
- 1-4)合田良實（2008）：耐波工学 港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，430p.
- 1-5)Hughes, S. A. 1993. "Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering," Advanced Series on Ocean Engineering, Vol 7, World Scientific Publishing, Singapore, 568p.
- 1-6)Goda, Y. and Suzuki, Y. 1976. "Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments," Proceedings of the 15th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, Vol 1, pp.828–845.
- 1-7)Guza, R. T., Thornton, E. B., and Holman, R. A. 1984. "Swash on Steep and Shallow

Beaches," Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol 1, pp.708–723.

- 1-8) Frostick, L. E., McLelland, S. J., Mercer, T. G. 2011. "Users Guide to Physical Modelling and Experimentation, – Experience of the HYDRALAB Network –, " CRC Press, VitalBook file, 245p.
- 1-9) The EurOtop team. "EurOtop Second Edition 2018," <http://www.overtopping-manual.com/>, 304p.
- 1-10) 国土交通省港湾局監修, 公益社団法人日本港湾協会 (2018) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2218p.

2. 水理模型実験の変遷と実験施設

2-1. 波浪に関する水理模型実験の変遷

1) 世界各国の波浪に関する水理実験のはじまり

海岸や港湾に関する事業を進めるにあたり、水理模型実験による調査・研究は不可欠であり、世界各国で水理実験施設がつくられた。

世界各国で政府が中心となって整備してきた初期の水理試験センターは、創立年が古い順に、ハノーバー工科大学フランチウス水理研究所（ドイツ、1914年）、水路・水力実験ステーション（インド、1916年）、内務省土木試験所赤羽分室（日本、1926年）、デルフト水理研究所（オランダ、1927年）、水路実験ステーション（アメリカ、1927年）、ネールピック(社)水理試験所（フランス、1927年）、港湾実験室（スペイン、1939年）である。《この段落の出典：海岸工学【その誕生と発展】²⁻¹⁾》

第二次世界大戦終了（1945年）後に、各国は海岸侵食や船舶大型化への対応のために海岸水理の研究施設の整備や拡充を行った。第二次世界大戦後に創立された各国の水理研究所は、創立年が古い順に、国立水理研究所（フランス、1946年）、国立水理研究所（イギリス、1947年）、国立土木研究所（ポルトガル、1947年）、国立水工研究所（ドイツ、1948年、海岸部門の発足は1962年）、運輸省運輸技術研究所（日本、1950年）、国立水理研究所（カナダ、1950年）、デンマーク水理研究所（デンマーク、1964年）である。《この段落の出典：海岸工学【その誕生と発展】²⁻¹⁾》

2) 日本における波浪に関する水理模型実験のはじまり

我が国の政府が組織的に波浪に関する水理模型実験に取り組みを始めたのは、大正15年（1926年）の内務省土木試験所赤羽分室である。この組織は国土技術政策総合研究所および土木研究所の前身であり、大正10年（1921年）に内務省土木局に設置された道路材料試験所に始まり、大正11年（1922年）には内務省土木試験所（文京区本駒込）とされ、主に道路材料や築造維持に関する試験調査が行われた。大正15年（1926年）には赤羽分室（北区）が設置され、河川や港湾などの工事に関する模型実験や基礎研究が行われるようになった。日本国政府機関が組織的に港湾の模型実験を実施したのは、これが最初のものである。昭和22年（1947年）の内務省解体により、昭和23年（1948年）に建設省土木研究所に改称されている。昭和27年（1952年）にはダムおよび河川の水理実験施設として篠崎分室（江戸川区）、昭和35年（1960年）に新潟地すべり試験所（妙高市）が設置されている。昭和28年（1953年）のジェーン台風や昭和34年（1959年）の伊勢湾台風などの被害により、海岸や河川の堤防や護岸の設計および施工の面

で解決すべき課題が浮き彫りとなった。高潮や波浪の水理現象の解明には大型の模型実験が必要であり、それを実現するために、昭和 36 年（1961 年）に鹿島水理試験所（神栖市）が設置された。鹿島水理試験所の海岸関係の実験施設は、高潮実験施設、津波実験施設、波浪実験施設の三つである。《この段落の出典：研究所めぐりその 2²⁻²⁾》

我が国の港湾技術の研究を導いてきた港湾技術研究所（2021 年現在の港湾空港技術研究所）は昭和 37 年（1962 年）4 月に誕生したが、その前身は昭和 21 年（1946 年）5 月に設置された内務省鉄道技術研究所第七部港湾研究室（三鷹）である。鉄道研究所第七部港湾研究室は、内務省土木試験所の駒込本所と赤羽分室の一部を借用した。昭和 24 年（1949 年）に運輸省港湾局技術研究課が発足し、横須賀市久里浜に移転した。この組織は昭和 25 年（1950 年）に発足した運輸省技術研究所に吸収され、同所の港湾物象部（久里浜）と港湾施設部（三鷹）となった。その後、運輸技術研究所内での組織変更を経て、昭和 37 年（1962 年）に港湾局調査設計室と統合して港湾技術研究所とされた。《この段落の出典：港湾技術研究所三十年史²⁻³⁾》

港湾技術研究所（港湾空港技術研究所）の波浪に関する実験施設の昭和期の整備状況は以下のとおりである。《この段落の出典：港湾技術研究所三十年史²⁻³⁾》

昭和 31 年（1956 年）	105m 造波水路設置（港湾技術研究所発足前）
昭和 35 年（1960 年）	台風防災実験水路設置（港湾技術研究所発足前）
昭和 38 年（1963 年）	不規則波造波装置設置
昭和 46 年（1971 年）	大型土工実験場竣工
昭和 57 年（1982 年）	大水深海洋構造物実験棟竣工
昭和 59 年（1984 年）	多方向不規則波造波装置設置
昭和 60 年（1985 年）	津波造波機設置

前述のとおり、日本国の政府が組織的に波浪に関する模型実験に取り組みを始めたのは、1926 年（大正 15 年）の内務省土木試験所赤羽分室である。土木試験所自体は 1921 年（大正 11 年）に設置されている。内務省土木試験所の土木試験所報告は第 1 号が 1925 年（大正 14 年）に発行されているが、第 1 号から第 45 号までに波浪に関する模型実験の報告はない。

第 46 号として、1939 年（昭和 14 年 7 月）内務省土木試験所で行われた「波による河口付近の砂の移動に関する実験」²⁻⁴⁾において、幅が 3.5m の造波板を用いた 3 次元実験が報告されている。

1939 年（昭和 14 年 12 月）「防波堤に及ぼす波の圧力並びに堤体の安定に関する実験的研究」²⁻⁵⁾において、長さ 6.5 m、幅 0.6 m、高さ 0.47～0.74 m の側面ガラ

ス張り水路でフラップ型造波機による規則波の2次元実験が報告されている。

1948年(昭和23年8月)「八戸港の遮蔽に関する実験」²⁻⁶⁾において、幅4mの幅の広い水路(幅の狭い3次元水槽)で周期0.46sの規則波実験の実施が報告されている。水平縮尺は1/600、鉛直縮尺は1/100の歪み模型である。運輸省第二港湾建設局の依頼により実施とされている。

土木試験所の関連施設に北海道開発局土木試験所(現在の寒地土木研究所)がある。北海道開発局土木試験所の土木試験所報告から、波浪に関する模型実験についての報告の初期のものは以下のとおりである。

1948年(昭和23年)「室蘭輪西製鐵所中央船溜模型試験報告」²⁻⁷⁾において、9.4m×5.8mの造波水槽においてプランジャー型と思われる造波機で造波実験を実施し、防波堤配置を決定したことが報告されている。

1955年(昭和30年)「鬼脇港の遮蔽に関する模型実験報告」²⁻⁸⁾において、5.2m×4.5mの造波水槽で、水平縮尺1/800、鉛直縮尺1/400の造波実験を実施したことが報告されている。造波機は「フラッパータイプの起波機」とされており、フラップ型の造波機であると思われる。

1966年(昭和41年)「釧路西港模型実験(防波堤の遮蔽効果について)」²⁻⁹⁾において、20m×26mの造波水槽で、水平縮尺1/200、鉛直縮尺1/100のフラップ式造波機による造波実験が報告されている。

1966年(昭和41年)「2,3の異形ブロックの水理特性について」²⁻¹⁰⁾において、32m×0.8m×0.8mのガラス張り水路で1/20縮尺の造波実験の実施が報告されている。造波機に関する説明はされていないが、図から判断するとフラップ型の造波機であると思われる。北海道開発局土木試験所で最初の2次元実験と思われる。

3) 不規則波実験への移行

海岸工学講演会は1954年に第1回が開催され、全16編のうち2編で波浪に関する水理模型実験が報告されている。不規則波造波装置による実験が最初に報告されたのは1967年(第14回)である。図2-1に第1回から第17回までに波浪に関する水理模型実験が報告された件数を示す。このグラフに示したのは波浪に関する水理模型実験であり、潮汐・潮流実験や孤立波実験は含んでいない。第1回は波浪に関する模型実験2件が掲載されているが、うち1件は2次元実験と3次元実験のどちらであるか不明なため、図2-1では1954年を1件としてある。初期のころは件数が少なく2次元実験と3次元実験がほぼ同数であったが、1960年代前半から2次元実験の件数が増えている。2次元実験で不規則波の造波実験が始まったのは1967年からであるが、1969年までは毎年1件にとどまっており、

1970年に不規則波の件数が増えている。その内容を見ても、1967年から1969年は試験的な不規則波の造波で、1970年は本格的な不規則波の造波である。なお、不規則波を発生する造波機が開発される以前は、造波機で規則波を造波し、そこに風を作用させることで波の不規則性を考慮した事例がある。

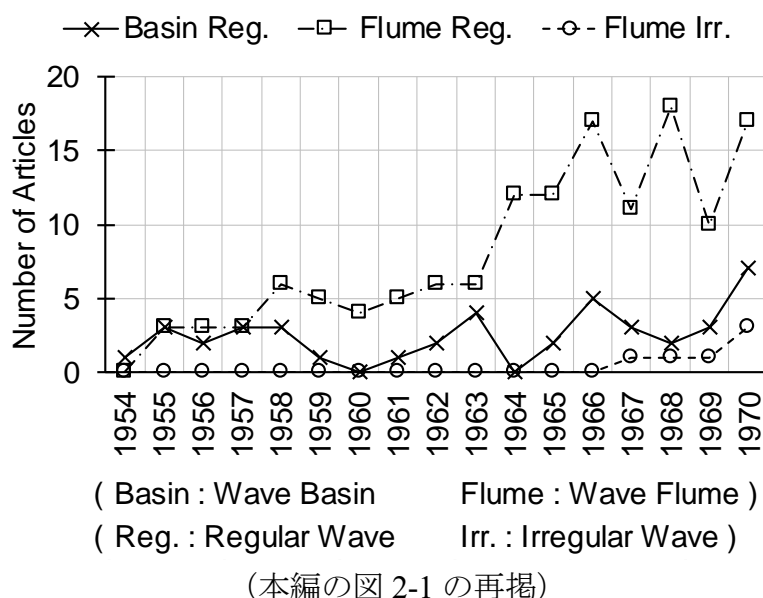


図 2-1 海岸工学論文集に掲載された波浪水理模型実験の件数 (第 1 回から第 16 回)

海岸工学論文集に掲載された波浪に関する水理模型実験の論文著者は、初期には大学からの投稿が多い。国立大学以外の国の機関としては、第 2 回 (1955 年) から運輸技術研究所、第 3 回 (1956 年) から土木研究所、第 5 回 (1958 年) に九州農業試験場、第 8 回 (1961 年) から北海道開発局土木研究所、第 9 回 (1962 年) から港湾技術研究所 (前身は運輸技術研究所) と農業土木試験場、第 12 回 (1965 年) から運輸省第三港湾建設局、第 15 回 (1968 年) から電力中央研究所、による投稿が行われている。

海岸工学論文集に農業土木試験場からの報告があるので、農業土木試験場の波浪に関する模型実験について調べた結果を以下に示す。

農業土木試験場による波浪に関する水理模型実験の海岸工学講演会への投稿は 1962 年に始まっている。農業土木試験場から海岸工学講演会以外への論文投稿を調べると、同じ 1962 年に沿岸海洋研究ノート (現在の日本海洋学会「沿岸海洋研究」) 第 1 巻第 2 号に、造波実験水路における波浪に関する模型実験が報告されている²⁻¹¹⁾。また、1967 年の沿岸研究ノート第 6 巻第 1 号に掲載された「研究所めぐり」で紹介された農業土木試験場の記事²⁻¹²⁾を見ると、海岸研究の主な実験施設として、表 2-1 が示されている。興味深いのは、海岸工学論文集に不規則波実

験が初めて報告された 1967 年に、農業土木試験場に不規則波造波装置を備えた造波水路があったことである。農業土木試験場は 1961 年に神奈川県平塚市に設置され、1977 年に茨城県筑波郡谷田部町（現つくば市）に移転している。

表 2-1 農業土木試験場の海岸研究の主な実験施設

(中村充²⁻¹²⁾より引用)

風洞付き造波水路	100 m×2 m×1.8 m 造波機：ピストン型、30 kW 送風機：軸流式、150 kW
風洞装置を持たない造波水路	50～100 m が 4 本、20～50 m が 3 本、造波機形式はピストン型またはフラップ型 特色があるものは不規則波造波水路および不定流発生装置付き造波水路
波浪実験用第平面水槽	100 m×70 m×1.2 m (潮汐実験と共用) 造波機：プランジャー型、造波幅 50 m (6 m×8 台)
中型平面水槽	35 m×25 m×1 m 35 m×40 m×60 m×0.7 m (資料の記述をそのまま転記) 20 m×20 m×
潮汐・高潮実験用大型平面水槽	100 m×70 m×1.2 m 起潮装置：気圧式、起潮幅 50 m、動力 75 kW 河川流装置：還流式、ポンプ 400 リットル/s 沿岸流装置：還流式、ポンプ 400 リットル/s
小型潮汐水槽	8m×12m×0.5m

水理模型実験は 19 世紀後半から河川や潮流などを対象として行われており、波浪に関しても 20 世紀前半には開始されたと思われる《この 1 文の出典：海岸工学【その誕生と発展】²⁻¹⁾》。我が国の波浪に関する模型実験が論文として残されている最も古いものは、前述した 1939 年（昭和 14 年）7 月の「波による河口付近の砂の移動に関する実験」²⁻⁴⁾（3 次元実験）と、同年 12 月の「防波堤に及ぼす波の圧力並びに堤体の安定に関する実験的研究」²⁻⁵⁾（2 次元実験）のようである。

不規則波実験の実施に欠かせない不規則波造波装置の開発は、造船工学の分野が先行していた。我が国の港湾・海岸分野では、1963 年に港湾技術研究所に不規則波造波装置が導入されたが、有効に活用されたのは 1969 年である。1970 年には土木研究所と京都大学防災研究所に油圧サーボ式の不規則波造波装置が導入され、1971 年には港湾技術研究所に直流モーター制御式の不規則波造波装置が導入されている。《この段落の出典：海岸工学【その誕生と発展】²⁻¹⁾》

1970 年に京都大学防災研究所に不規則波造波装置が導入されたことは 1970 年の岩垣ら²⁻¹³⁾の論文に示されており、この論文では、「水槽内に不規則波を発生さ

せようとする試みは・・・(中略)・・・最初にアメリカのカリフォルニア大学で船舶実験用として試作され、ついで 1960 年頃にノルウェイ大学でも不規則波発生装置の試作をはじめ成功したようである。1969 年 3 月にオランダのデルフト工科大学で長さ 100 m、幅 8 m の大型風洞水槽内にこの方式(ランダム振動を与える方式)の発生器は設置されたのを初めとし、イギリスの国立水理研究所でも製作されつつあるようであり、またフランスでも計画されている。」とされている。《この段落の出典：岩垣ら²⁻¹³⁾》

合田の耐波工学によると、「世界最初の多方向不規則波造波装置はエディンバラ大学のソルターが 1970 年代後半に開発したものであり、1980 年代後半には各国の主要な水理実験所で多方向不規則波造波装置が採用されている」とされている《この 1 文の出典：耐波工学¹⁻⁴⁾》。港湾技術研究所には 1984 年に多方向不規則波造波装置が導入された《この 1 文の出典：港湾技術研究所三十年史²⁻³⁾》。

表 2-2 に、国内外の実験施設発足、波浪に関する水理模型実験の研究事例、造波技術などの年表を示す。

表 2-2 国内外の実験施設発足や研究事例等の年表

(本編の表 2-1 の再掲)

西暦	海外の実験施設発足		国内の実験施設発足	
			研究事例等	港湾技術研究所の施設建設 造波技術等
1914	ハノーバー工科大学	フランチウス水理研究所	(ドイツ)	
1916	水路・波力実験ステーション		(インド)	
1926	内務省土木試験所・水工部門(赤羽分室)			
1927	デルフト水理研究所		(オランダ)	
1927	水路実験ステーション		(アメリカ)	
1927	ネールピック(社)	水理試験所	(フランス)	
1937	内務省北海道庁土木試験室			
1939	港湾実験室		(スペイン)	
1939	内務省土木試験所報告に波浪実験が報告される			
1946	国立水理研究所		(フランス)	
1946	内務省鉄道技術研究所第七部港湾研究室			
1947	国立水理研究所		(イギリス)	
1947	国立土木研究所		(ポルトガル)	
1947	北海道庁土木試験室→北海道土木試験所			
1948	土木試験所→建設省土木研究所			
1950	海岸工学国際会議第1回が開催される			
1950	運輸省運輸技術研究所			
1950	国立水理研究所		(カナダ)	
1951	北海道土木試験所→北海道開発局土木試験所			
1951	明快な造波理論が発表される			
1954	海岸工学講演会第1回が開催される			
1956	105m造波水路設置			
1960	台風防災実験水路設置			
1960	ノルウェイ工科大学に不規則波造波装置設置			
1961	土木研究所に鹿島水理試験所を設置			
1961	農林省農業土木試験場			
1962	国立水工研究所・海岸部門		(ドイツ)	
1962	運輸省港湾技術研究所			
1963	不規則波造波装置設置			
1964	デンマーク水理研究所		(デンマーク)	
1967	海岸工学論文集に不規則波実験が報告される			
1969	デルフト水理研究所に不規則波造波装置設置			
1970	土木研究所と京大防災研に不規則波造波装置設置(油圧サーボ)			
1971	大型水工実験場竣工			
1971	不規則波造波装置設置(直流モータ制御)			
1977	農業土木試験場が谷田部町に移転			
1979	土木研究所が筑波研究学園都市に移転			
1981	ソルターの多方向不規則波造波装置			
1982	大水深海洋構造物実験棟竣工			
1984	多方向不規則波造波装置設置			
1985	津波造波機設置			

4) 水理模型実験を活用した近年の研究状況

水理模型実験施設を用いた近年の研究状況を確認するために、土木学会論文集の B2 (海岸工学) と B3 (海洋開発) に投稿されている論文から、波浪に関する水理模型実験が実施されているものを抽出して、その内容を確認した。ただし、過去に実施された水理模型実験のデータを引用しているものは除外した。津波に関する水理模型実験を含めたが、潮汐および潮流に関する実験は除外した。表 2-3 に 2009 年、2017 年、2018 年に発表された水理模型実験に関する論文の、論文数、実験目的、造波装置、その他装置、外力種類を示す。なお、造波装置の形式が不明な論文は数えていないため、造波装置の合計数が論文数より少ない。

水理模型実験から数値シミュレーションへの移行が進みつつある中で水理模型実験の実験件数の減少が想定されるが、土木学会論文集 B2 (海岸工学) および B3 (海洋開発) への投稿件数として見る限りでは、10 年前と比べて水理模型実験の実験件数が減少していない。実験目的では、2009 年に件数が多い現象把握、工法開発、数値モデル開発が 2017 年と 2018 年には減り、海浜変形の検討と底質移動の検討が増えている。また、2017 年の B2 で港湾構造物の検討と海岸構造物の検討が多いことも特徴として挙げられる。造波装置は件数に若干の違いはあるものの、装置の内容は 10 年前と比べてほとんど変化がない。すなわち、二次元造波水路の造波機は反射波吸収機能の導入以降、平面造波水槽は多方向不規則波の導入以降に、大きな変化がない。

造波装置以外の外力発生装置は、2009 年には少なかった還流装置、ゲート急開、チャンバー型が 2017 年と 2018 年では増えている。これは 2011 年の東北地方太平洋沖地震に伴う津波 (以降、「東日本大震災」と称す。) 以降に津波の実験が増えたためである。前述したように 2017 年の B2 で港湾構造物の検討と海岸構造物の検討が多いのも、津波実験が多く実施されたためである。2017 年に津波実験が多いことは、外力種類において 2017 年は孤立波、半周期長周期波、段波、越流、流れが多いことから裏付けられる。

風波の実験について、2009 年には不規則波実験よりも規則波実験が 3 倍近く多い。これは 2009 年には工法開発と数値モデル開発に分類される実験が多いためと言える。2017 年と 2018 年には工法開発と数値モデル開発が減っているけれども、不規則波より規則波の実験が多いことから、不規則波造波装置が普及した現在でも、研究目的においては規則波が多く活用されていると言える。

前述したように、実験施設において津波や津波による流れを発生させる装置は東日本大震災以降に開発が進んでいるので、その内容を以下に示す。東日本大震災翌年の 2012 年の土木学会論文集 B2 (海岸工学) および B3 (海洋開発) に報告された津波実験の津波発生方法は、ピストン型造波機を使用した孤立波または正弦波の造波、ゲート急開流れ、循環流装置による流れ、ポンプにより港外側に給

水することで発生させる越流など、単純な波形や流れを発生させる方法である。これらの方法では津波の高さや防波堤前後の水位差を目標値と一致させることはできても、津波波形の時刻歴を実際の津波波形と一致させることはできない。2017年や2018年の論文では、実験水路本体よりも高い位置に設置されたチャンバー内にためた水塊を、チャンバー上部に設置された複数のバルブを開放することにより津波波形を発生させる装置や、実験水路より高い貯水槽から流出する水量を電動式ゲートにより調整する装置、造波板とゲート急開流れの組み合わせ、造波板とチャンバー式と循環流装置の組み合わせ、などにより波形を様々に調整可能な津波発生装置が報告されている。造波板とその他の装置を組み合わせた施設は複合的な外力の作用に対応した実験施設である。

表 2-3 土木学会論文集（海岸工学・海洋開発）における近年の水理模型実験の内容
（本編の表 2-2 の再掲）

発表年		2009		2017		2018	
土木学会論文集		B2	B3	B2	B3	B2	B3
水理模型実験に関する論文数		35	34	61	26	49	24
実験目的	港湾構造物の検討	10	9	22	4	9	12
	海岸構造物の検討	4	4	14	6	4	5
	陸上構造物の検討	3	0	6	1	9	1
	海浜変形の検討	1	1	6	2	7	0
	底質移動の検討	0	0	8	3	10	2
	浮体の検討	2	2	0	0	2	0
	現象把握	7	10	0	8	1	2
	実験手法の構築	0	0	1	0	2	2
	実験装置の開発	0	1	2	0	0	0
	工法開発	4	2	1	2	0	0
数値モデル開発	3	2	0	0	0	0	
造波装置	ピストン型	7	12	15	3	5	4
	フラップ型	0	1	1	0	3	1
	ブランジャー型	1	0	0	0	1	1
	多方向型	5	1	1	1	0	0
その他装置	還流装置・ポンプ	1	1	13	5	8	3
	ゲート急開・貯水式	2	1	9	3	6	1
	チャンバー型	0	0	3	1	1	1
	遠心載荷	0	1	2	4	2	4
	振動台	0	0	1	0	0	1
物体突入	0	0	0	0	2	0	
外力種類	規則波	22	19	15	6	13	6
	不規則波	8	7	9	3	10	9
	孤立波、半周期長周期波	4	1	6	4	4	3
	段波	3	1	6	4	5	1
	長周期波	0	2	1	0	0	1
	越流	0	0	7	3	0	2
	流れ	0	2	11	5	5	0

2-2. 水理模型実験施設

海外と国内の港湾・海岸等に関する水理模型実験を実施する実験施設を、インターネット検索で確認した。この原則に従うために、事前に把握していた施設についても出典をインターネット検索とした。検索対象は、造波装置を有する、2次元実験用の造波水路と、3次元実験用の造波水槽である。港湾・海岸施設等の模型実験用を対象としており、船舶用の実験施設は除外した。また、著者自身が実験施設の存在を把握していても、インターネット検索で確認できない施設は対象外とした。写真や記述により実験施設の存在を確認できても、施設規模や造波性能の記述が全くない施設も対象外とした。

1) 国内外の実験施設

表 2-4 から表 2-6 に海外の 2 次元実験用の造波水路を、表 2-7 から表 2-9 に海外の 3 次元実験用の造波水槽を、表 2-10 から表 2-12 に国内の 2 次元実験用の造波水路を、表 2-13 から表 2-14 に国内の 3 次元実験用の造波水槽を示す。海外は国名のアルファベット順に並べてあり、国内は所属機関が、公官庁、大学・高専、建設会社、ブロック会社、建設コンサルタントの順に並べてある。

施設数は、海外の造波水路が 41 施設、海外の造波水槽が 31 施設、国内の造波水路が 51 施設、国内の造波水槽が 26 施設である。

2) 2次元実験用の造波水路

図 2-2 に海外と国内の造波水路の規模の比較を示す。図 2-2 (1)は横軸が水路の長さ、縦軸が水路の幅である。海外には長さが 450 m を超える水路が 1 本と 300 m 級の水路が 3 本あるが、その他は 120 m 以下である。国内では長さが 200 m 級の 2 本が最大級で、他は 150 m 以下である。水路幅を見ると、国内よりも海外の水路の幅がやや広い。図 2-2 (2)は横軸が水路の長さ、縦軸が水路の高さである。水路長が概ね 75 m 以下は水路の高さが 2 m 以下で、水路長が 75 m を超える施設では水路の高さが 2 m を超える施設がある。水路の高さと長さの比は 1:40 程度を中心に分布していて、この比に海外と日本に違いは見られない。図中の数値は大きめの施設が設置された年であり、造波水路は年々大きくなっていることがわかる。ただし、2015b が異例に大きいことを考慮すると、造波水路の大型化は限界に近づいていると見ることができる。海外と日本のどちらも、長さが 125 m 未満と 125 m 以上のグループに分かれている。125 m 以上のグループは日本の 140 m~205 m に対して海外は 291 m~456 m であり、海外の実験水路が日本より大きい。長さが 125 m 未満の造波水路規模の分布をみると、日本国内より海外がやや大きい傾向が認められる。

同じデータを用いて、図 2-3 に造波水路の長さの度数分布を示す。海外は 25~

50 m の 13 施設が最多頻度であり、国内は 24～36 m と 48～60 m の各 14 施設が最多頻度である。

3) 3次元実験用の造波水槽

図 2-4 に海外と国内の造波水槽の規模の比較を示す。海外の幅が 60 m で長さが 150 m の造波水槽は突出して大きい。全体的な分布として、造波水槽の幅と長さの比はさまざまであり、一定の傾向はみられない。日本国内の造波水槽は、幅は 45 m、長さは 60 m が最大であるが、海外は突出して大きい施設を除くと、幅が 50 m、長さが 80 m が最大であり、日本国内最大級よりやや大きい。

図 2-5 に海外と国内の造波水槽の面積の度数分布を示す。データは図 2-4 と同じであり、水槽長と水槽幅の積で造波水槽の面積とした。海外は、図中右上に文字で示した 9000 m² が最大で、4000 m² 級や 2500 m² 級の大きな施設がある。それ以外は 1500 m² 以下である。国内は図中右上に文字で示した 2400 m² 級の 2 施設が最大で、他は 1440 m² 以下である。これにより、海外には国内よりもかなり大きな 3次元実験用の造波水槽があることがわかる。

3次元実験用の造波水槽の中で多方向波を造波できる施設数について、以下のとおりである。なお、多方向波を造波できることが明記されていなくても、造波機の形式などから多方向波を造波可能と判断できる施設については、多方向波の造波が可能として扱っている。海外の造波水槽の 31 施設中、多方向波を造波できる施設は 20 施設で、割合は 0.645 である。国内の造波水槽の 26 施設中、多方向波を造波できる施設は 11 施設で、割合は 0.443 である。

4) 国内の実験施設の所属区分別の施設数

図 2-6 に国内の造波水路および造波水槽について、所属区分別の施設数を示す。

造波水路は大学・高専が最も多く、公官庁、建設会社、ブロック会社の順である。造波水槽は公官庁が最も多く、大学・高専、建設会社と続くが、公官庁以外の数は多くない。また、造波水槽を所有するブロック会社はない。

大学・高専が所有している造波水路は、研究用に比較的小型のものが多いようである。大きな造波水槽を維持することは負担が大きいため、大学・高専や民間企業の造波水槽の施設数が少ないと思われる。ブロック会社は造波水路を所有するが造波水槽は所有していないことは、新型ブロックの開発のために造波水路が必要であることの特徴が現れている。

表 2-4 海外の水理模型実験施設（2次元実験用の造波水路）1/3

No.	Wave Flume Dimensions (m)			Wave generator				Others	Country	Flume name	Laboratory name
	Length	Width	Depth	Generate Type	Wave Type	Period (s)	Height (m)				
1	32	3	1.3	paddle type	Regular, Irregular		0.6		Australia	3 m wave flume	Water Research Laboratory UNSW
2	44	1.2	1.6					wind tunnel	Australia	1.2 m wave flume	Water Research Laboratory UNSW
3	35	0.9	1.4	paddle type	Regular, Irregular			wind tunnel	Australia	1 m wave flume	Water Research Laboratory UNSW
4	40	0.6	0.9	either piston-paddle or flap-paddle type	Regular, Irregular			wind tunnel	Australia	0.6 m wave flume	Water Research Laboratory UNSW
5	70	4	1.4	piston type	Regular, Irregular		0.65		Belgium	Wave Flume	Flanders Hydraulic Research
6	15	0.35	0.6	piston type			0.2		Belgium	Small physical wave flume	Ghent University
7	30	1	1.2	piston type	Regular, Irregular		0.35		Belgium	Large physical wave flume	Ghent University
8	97	2	2.8		Regular, Irregular		Hs 0.75		Canada	Large wave flume	National Research Council Canada
9	64	1.2	1.2		Regular, Irregular		Hs 0.25		Canada	Steel wave flume	National Research Council Canada
10	120	5		piston type	Regular, Irregular				Canada	Large scale wave flume (outdoor facilities)	Laboratoire hydraulique environnemental (Universite de Recherche)
11	456	5	12				3.5		China	大比尺波浪水槽	Tainjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T.
12	31	1.8	2		Regular, Irregular				France	Wave flume	ACRI-IN (company)
13	307	5	7	piston type combined with an upper flap	Regular, Irregular				Germany	Large Wave Flume (GWK)	Ludwig-Franzius-Institute or Forschungszentrum Küste (FZK)
14	110	2.2	2	piston type	Regular, Irregular				Germany	Wave Flume 'Schneiderberg'	Ludwig-Franzius-Institute or Forschungszentrum Küste (FZK)
15	90	4	2.5	flap type					India	Deep Water Wave Flume	Department of Ocean Engineering Indian Insitute of Technology Madras

表 2-5 海外の水理模型実験施設（2次元実験用の造波水路）2/3

No.	Wave Flume Dimensions (m)			Wave generator				Others	Country	Fulume name	Laboratory name
	Length	Width	Depth	Generate Type	Wave Type	Period (s)	Height (m)				
16	72	2	2	piston and hinge type					India	Shallow Water Wave Flume	Department of Ocean Engineering Indian Insitute of Technology Madras
17	15	0.75	0.75	2 hinged paddles					Ireland	Wave Watch Flume	Lir NOTF
18	35	1	1.3	serve-valve and position transducer	Regular, Irregular				Itaria	Wave flume (2D)	University of Padova
19	14.5	0.55	1.5			0.8 to 2.0	0.25		Itaria	Main flume	TPG (Thermochemical Power Group) based at the Polytechnic School of the University of Genoa
20	37	0.8	0.8	piston type	Regular, Irregular		0.35	bi-directional recirculation system	Itaria	Wave-Current Flume	Università degli Studi di Firenze
21	110	1	1.2	Piston-type, both sides		0.5 to 100	Hmax 0.4		Netherlands	Scheldt Flume	Deltares
22	291	5	9.5	dry-back piston-type		5.7 to 13.4	Hmax 3.3		Netherlands	Delta Flume	Deltares
23	18	0.38	0.56	piston type			0.28		Spain	CIEMito	CIEMLAB Universitat Politecnica de Catalunya
24	30	0.8	1	hydraulic paddle	Regular, Irregular				Sri Lanka	Wave flume	Lanka Hydraulic Institute Ltd. Coast and Water Tainan Hydraulics
25	300	5	5.2						Taiwan	Long wave flume	Laboratory (National Cheng Kung University) 台湾成功大学
26	100	3	1.6		Regular, Irregular				Taiwan	Large Wave Flume	Research Center for Ocean Energy and Strategies 国立台湾海洋大学
27	50	1.8	1.5		Regular, Irregular				Taiwan	Medium Wave Flume	Research Center for Ocean Energy and Strategies 国立台湾海洋大学
28	57	4	2	Hinge flap type			Hmax 1.0	pumping system	United Kingdom	Fast Flow Facility	HR Wallingford

表 2-6 海外の水理模型実験施設（2次元実験用の造波水路）3/3

No.	Wave Flume Dimensions (m)			Wave generator				Others	Country	Flume name	Laboratory name
	Length	Width	Depth	Generate Type	Wave Type	Period (s)	Height (m)				
29	57	2.6	2	same as above							
30	45	1.2	1.5	electric paddles	Regular, Irregular		Hs 0.3	United Kingdom	Physical modelling Wave flumes	HR Wallingford	
31	100	1.8	1.8	same as above							
32	20	0.45	0.9	bottom-hinged paddle	Regular, Irregular	0.5 to 2.5	0.3	United Kingdom	Aberdeen University Random Wave Flume	University of Aberdeen	
33	62	2.8	1.25	flap type	Regular, Irregular			United Kingdom	Long flume	Imperial College London	
34	23	0.6	0.8	piston type	Regular, Irregular			United Kingdom	Coastal flume	Imperial College London	
35	27	0.3	0.7					United Kingdom	Double-ended flume	Imperial College London	
36	60	0.3	0.5	flap type				United Kingdom	Wall mounted flume	Imperial College London	
37	104	3.7	4.6	piston type	Regular, Irregular	0.8 to 12	1.7m at 5 s	USA	Large Wave Flume	Oregon State University College of Engineering O.H. Hinsdale Wave Reserch Laboratory	
38	25	1.5	1.5	piston type	Regular, Irregular			USA	Wave and Current Flume Facility	Stony Brook University Department of Civil Engineering	
39	63	3	1.5	electro hydraulic	Regular, Irregular	0.75 to 10.0	Hmax 0.46	USA	10-ft Wave Flume	Engineer Reserch and Development Center US Army Corps of Engineers	
40	63	1.5	1.5	electro hydraulic	Regular, Irregular	0.75 to 10.0	Hmax 0.46	USA	5-ft Wave Flume	Engineer Reserch and Development Center US Army Corps of Engineers	
41	33	0.6	0.76	piston type				USA	Precision Wave Tank	Ocean Engineering Facilities University of Delaware	

表 2-7 海外の水理模型実験施設（3次元実験用の造波水槽）1/3

No.	Wave Basin Dimensions (m)			Wave generator			Others	Country	Basin name	Laboratory name
	Length	Width	Depth	Generate Type	Wave Type	Period (s)				
1	29	16	0.7	2 x piston type	Regular, Irregular			Australia	Wave basin	Water Research Laboratory UNSW
2	35	12	1	16 paddles			wind generator	Australia	35-meter-long Model Test Basin	AMC SEARCH
3	19.7	12	1.2	multi-directional wave paddle	long-crested oblique waves and short-crested waves			Belgium	Wave Tank	Flanders Hydraulic Research
4	50	30		portable wave machines	irregular long-crested waves		0.25	Canada	Large area basin	National Research Council Canada
5				portable directional wave generator	short-crested (directional) waves		Hs 0.4		same as above	
6	63	14			Long-crested, irregular waves		Hs 0.4	Canada	Coastal wave basin	National Research Council Canada
7	36	30	3	60-segment directional wave machine	wide range of regular, irregular (long-crested) wave, multidirectional (short-crested) wave		Hs 0.5	Canada	Multidirectional wave basin	National Research Council Canada
8	25	35	0.8	44 wave paddles, 18 + 4 m wide				Denmark	Shallow Water Basin	DHI
9	40	25	1	72 individual piston boards	regular and irregular reproduction of in-situ measurements		Pumping system	Germany	Multidirectional Wave Basin	Ludwig-Franzius-Institute
10	30	30	3	52 paddles	Regular, Irregular			India	Wave Basin	Department of Ocean Engineering Indian Insititute of Technology Madras
11	35	12	3	16 hinged force feedback paddles			Hs 0.6	Ireland	Deep Ocean Basin	Lir-NOTF University College Cork
12	25	15	2.5	80 hinged force feedback paddles				Ireland	Ocean Basin	Lir-NOTF University College Cork

表 2-8 海外の水理模型実験施設（3次元実験用の造波水槽）2/3

No.	Wave Basin Dimensions (m)			Wave generator				Others	Country	Basin name	Laboratory name
	Length	Width	Depth	Generate Type	Wave Type	Period (s)	Height (m)				
13	28	3	1.2	8 hinged force feedback paddles				Current greater	Ireland	Wave & Current Flume	Lir-NOTF University College Cork
14	20.6	17.7	0.8	movable hydraulic wave paddle	Regular, Irregular				Itaria	Wave basin (3D)	University of Padova
15	75	8.7	1.3	cradle-type, 8.7 m wide		0.5 to ∞	0.45	Pumping system	Netherlands	Atlantic Baisin	Deltares
16	30	22.5	1.25	cradle-type, 7 + 7 m wide		0.5 to ∞	Hmax 0.4 at	Pumping system	Netherlands	Pacific Basin	Deltares
17	50	50		segmented piston-type, 40 + 26.4 m wide	wave directions - 50 to 50 degrees multidirectional wave		Hmax 0.45	Pumping system	Netherlands	Delta Basin	Deltares
18	80	50	10	double flap wave maker (50m), multiflap wave maker (80m)					Norway	Ocean basin	NTNU (Norwegian University of Science and Technology)
19	35	25	0.8	4 paddles of 5.5m each	Regular, Irregular			Pumping system	Sri Lanka	Wave basin	Lanka Hydraulic Institute Ltd. Coast and Water
20	150	60							Taiwan	Near Shore Basin	Tainan Hydraulics Laboratory (National Cheng Kung University) 台湾成功大学
21	50	50	1.5	multidirectional wave	Regular, Irregular				Taiwan	Large Wave Basin	Research Center for Ocean Energy and Strategies 国立台湾海洋大学
22	25	32		multi-element random wavemakers			0.25		United Kingdom	Physical modelling Wave basins (smallest)	HR Wallingford
23	75	32		(HR Wallingford has six wave basins)						Physical modelling Wave basins (largest)	HR Wallingford
24	55	27						uni-or bidirectional current	United Kingdom	wave-current basin	HR Wallingford

表 2-9 海外の水理模型実験施設（3次元実験用の造波水槽）3/3

No.	Wave Basin Dimensions (m)			Wave generator				Others	Country	Basin name	Laboratory name
	Length	Width	Depth	Generate Type	Wave Type	Period (s)	Height (m)				
25	35	15.5		24 hinged flap absorbing paddles dry-backed	unidirectional and directional wave			longitudinal current, transverse current	United Kingdom	Ocean Wave Basin	University of Plymouth
26	20	12	1.5	56 flap-type wave paddles	directional sea states with frequency dependent spectra				United Kingdom	Wave basin	Imperial College London
27	18	16		24-paddles	wave angle 0° to 45°	1.0 to 3.5	0.55		United Kingdom	Portaferry Coastal Wave Basin	Queen's University Belfast
28	48.8	26.5	1.37	piston-type, 29 boards	Regular, irregular, Tsunami, Multidirectional	0.5 to 10	0.75		USA	Directional Wave Basin	Oregon State University College of Engineering O.H. Hinsdale Wave Research Laboratory
29			6.1	fingerlike paddles -216 in all	a variety of waves found in nature				USA	US Navy MASK basin	Naval Surface Warfare Center (US Navy)
30	47	31	6	48 paddles	unidirectional and multidirectional regular and irregular (random) waves			wind and current	USA	OTRC Wave Basin	Offshore Technology Research Center U.S. Oil the Gulf of Mexico's deepwater frontier
31	20	20	1.1	34 flap wave paddles					USA	Directional Wave Basin	Ocean Engineering Facilities University of Delaware

表 2-10 国内の水理模型実験施設（2次元実験用の造波水路）1/3

No.	水路規模 (m)			造波機				その他	所属区分	水路名称	施設名称
	長さ	幅	高さ	造波方式	波種類	周期 (s)	波高 (m)				
1	184	3.5	12	ピストン型	風波 津波		3.5 2.5	還流装置 振動台	公官庁	大規模波動地盤総合水路	港湾空港技術研究所
2	105	3	2.5			0.5~10	0.8		公官庁	105m堤体実験水路	港湾空港技術研究所
3	35	0.6	1.3	ピストン型		0.7~3.0, 長周其	0.3		公官庁	35m 二次元水路	港湾空港技術研究所
4	18.4	0.8	0.7	ピストン型		~4	~0.4	回流装置	公官庁	海底流動実験水槽	港湾空港技術研究所
5	205	3.4	6	ピストン型	不規則波 津波	3~20 20~100	2.0 0.25		公官庁	大型造波水路	電力中央研究所
6	77	0.9	1.2	ダブルモード	短周期波 長周期波	0.5~10 10~100	0~0.3 0~0.05		公官庁	風洞付き2次元造波水路	電力中央研究所
7	85	1.6	3						公官庁	2次元造波水路①	寒地土木研究所
8	28	0.8	2						公官庁	2次元造波水路②	寒地土木研究所
9	22	0.8	2						公官庁	2次元造波水路③	寒地土木研究所
10	27	0.6	1.2						公官庁	2次元造波水路 (風洞型)	寒地土木研究所
11	100	2	2	規則波ピストン型		1.0~5.0	0.6		公官庁	大型造波水路	水産工学研究所
12	100	1	1.5		不規則波	1.5~3.0	0.3	風洞装置、 還流ポンプ	公官庁	還流風洞付造波水路	水産工学研究所
13	27	2	1.8	ピストン型	規則波、不規則波	0.5~6.0	0.4		公官庁	波浪環境シミュレーション水槽	北海道立総合研究機構 水産研究本部 中央水産試験場
14	140	2	5	ピストン型	規則波、不規則波	1.0~6.0	1		公官庁	漂砂実験水路	国土技術政策総合研究所 つくば
15	150	0.6	1.5	ピストン型	規則波、不規則波	1.0~6.0	0.2		公官庁	不規則波実験水路	国土技術政策総合研究所 つくば
16	59	1.25							公官庁	長水路	新潟港湾空港技術調査事務所
17	30	2	1.2						公官庁	長水路	名古屋港湾空港技術調査事務所
18	24	0.6	1				0.2		大学	二次元不規則波造波装置	室蘭工業大学

表 2-11 国内の水理模型実験施設（2次元実験用の造波水路）2/3

No.	水路規模 (m)			造波機			その他	所属区分	水路名称	施設名称
	長さ	幅	高さ	造波方式	波種類	周期 (s)				
19	29	1		ピストン型				大学	造波水路	東京海洋大学
20	30	1			不規則波			大学	二次元造波水槽	名城大学 社会基盤デザイン工学科
21	43	1.2	2	プランジヤード式		0.5 ~ 3.0	0.2	大学	大型2次元造波水槽	広島大学
22	22	1	1.6		規則波、不規則波	~ 5.0	0.5	大学	大型断面二次元造波水槽	金沢大学
23	18	0.8	1		規則波、不規則波、孤立波	~ 5.0	0.25	大学	中型断面二次元造波水槽	金沢大学
24	18.1	0.8	1					大学	海洋流体エネルギー第一実証試験水槽	佐賀大学 海洋エネルギー研究センター
25	80	1.2	1.5		規則波、不規則波	0.4 ~ 3.3		大学	80m不規則造波水槽	大阪工業大学 八幡工学実験場 水理実験センター
26	50	0.8	1.2					大学	50m不規則造波水槽	大阪工業大学 八幡工学実験場 水理実験センター
27	30	0.7	0.9		規則波、不規則波、津波			大学	片面ガラス張り鋼製水路及び不規則波・津波発生装置	名古屋大学
28	17	1	1.5					大学	造波機付きガラス水槽	横浜国立大学
29	26	0.8	1		規則波、不規則波、孤立波			大学	2次元造波水路	岩手大学
30	54	1.5	2	プランジヤード式4分割				大学	送風機、回流装置	九州大学
31	17	0.6	0.8	プランジヤード式			0.1	大学	回流装置	九州大学
32	36	0.7	0.7	ピストン型		0.5 ~ 2.5		大学	風洞付内部波水槽	九州大学
33	50	1	1.5	ピストン型		0.5 ~ 5.0		大学	流れ制御造波水路	京都大学
34	12	0.4	0.6		規則波・不規則波、孤立波			大学	多目的造波水路	京都大学
35	26	0.6	0.8	ピストン型		0.5 ~ 3.0	0.2	高専	造波水路	早稲田大学
36		1.2			規則波、不規則波			建設会社	断面2次元造波水槽	福井工業高等専門学校
									マルチ造波水路	鹿島建設 技術研究所

表 2-12 国内の水理模型実験施設（2次元実験用の造波水路）3/3

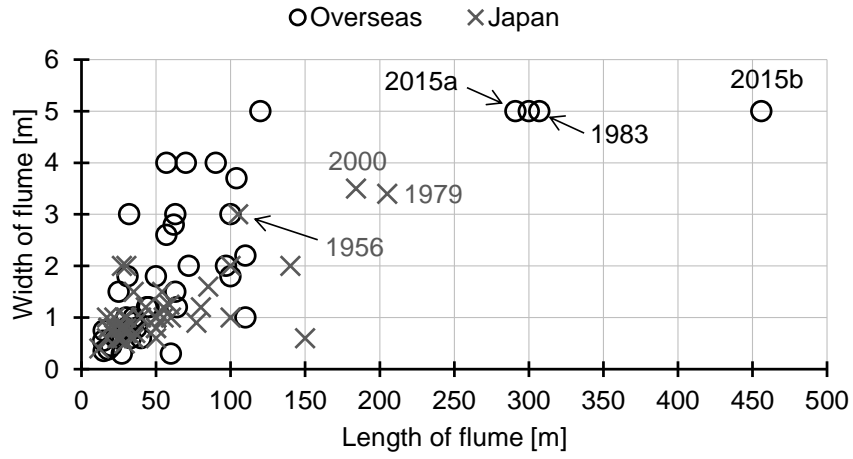
No.	水路規模 (m)			造波機				その他	所属区分	水路名称	施設名称
	長さ	幅	高さ	造波方式	波種類	周期 (s)	波高 (m)				
37		2			不規則波、津波				建設会社	不規則波造波水路	鹿島建設 技術研究所
38	50	0.8	1.5	ピストン型	規則波・不規則波	0.5~3	0.3	還流装置	建設会社	2次元造波水路	安藤ハザマ
39	60	1	2	ピストン型	規則波・不規則波、孤立波		規則波 0.6	段波装置、循環装置	建設会社	大型造波水路	東亜建設工業 技術研究所 発センター
40	40	1	1.6	ピストン型	規則波 不規則波 津波	0.5~4.0 0.8~2.5 20~40	0.6 Hs 0.4 0.1		建設会社	2次元不規則波水路 (40m津波造波水路)	東洋建設 技術研究所 尾研究所
41	55	1	2	ピストン型	規則波 不規則波 津波	0.5~4.0 0.8~2.5 20~40	0.6 Hs 0.4 0.1		建設会社	2次元不規則波水路 (55m津波造波水路)	東洋建設 技術研究所 尾研究所
42	50	0.6	1.5		規則波、不規則波、長周期波			流れ	建設会社	断面水槽	五洋建設 技術研究所
43	50	1	1.5		規則波、不規則波			往復の流れ	建設会社	2次元造波水槽	フジタ技術センター
44	30	0.8	1.2	ピストン型	不規則波	0.5~4.0	0.35	ポンプ	ブロック会社	2次元造波水路	三省水工
45	55	1.2	1.5	ピストン型	規則波、不規則波		Hs 0.3		ブロック会社	第一大型断面水槽	不動テトラ 総合技術研究所
46	50	1	1.5	ピストン型	規則波、不規則波		Hs 0.3		ブロック会社	第二大型断面水槽	不動テトラ 総合技術研究所
47	50	1	1.3	ピストン型	規則波、不規則波		Hs 0.25		ブロック会社	中型断面水槽	不動テトラ 総合技術研究所
48	29	0.5	1	ピストン型	規則波、不規則波		Hs 0.15		ブロック会社	小型断面水槽	不動テトラ 総合技術研究所
49	50	1	1.3	ピストン型	規則波、不規則波	0.5~3.0	0.5		ブロック会社	水路1	技研興業
50	50	1	1.6	フラップ型	規則波、不規則波	0.5~3.0	0.5		ブロック会社	水路2	技研興業
51	35	1.5	1.5						建設コンサルタント	2次元造波水路	東京久栄

表 2-13 国内の水利模型実験施設（3次元実験用の造波水槽）1/2

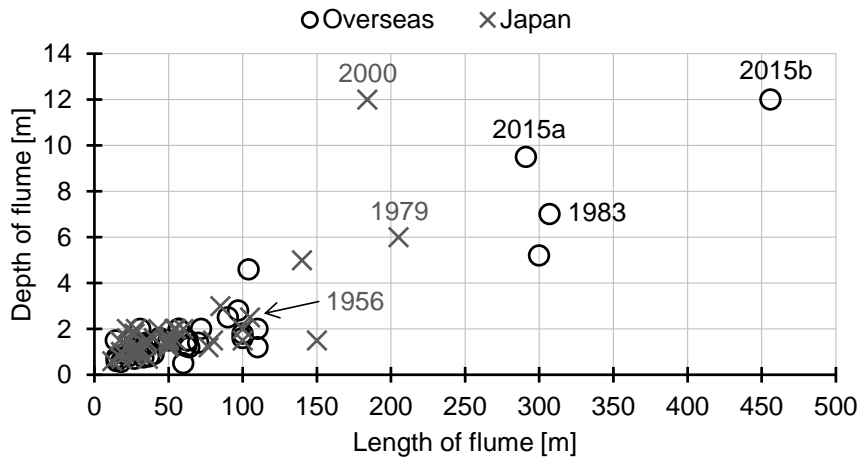
No.	水槽規模 (m)			造波機				その他	所属区分	水槽名称	施設名称
	長さ	幅	高さ	造波方式	波種類	周期 (s)	波高 (m)				
1	50	10		ピストン+フラップ				還流装置	公官庁	総合沿岸防災実験施設	港湾空港技術研究所
2	40	29	1.3	多方向不規則波造波装置:94台	短周期波 長周期波	0.7~3.0	0.3	流れ発生装置	公官庁	環境インテリジェント水槽	港湾空港技術研究所
3	49	25	1.5	多方向不規則波造波装置:100台	短周期波 長周期波	0.7~3.0	0.3		公官庁	デュアルフェースサーベント水槽	港湾空港技術研究所
4	30	10	6		規則波、不規則波	0.7~2.4	~0.5		公官庁	海洋ロボット水槽	港湾空港技術研究所
5	32	13	3.5			1~5	~0.5		公官庁	油回収実海域再現水槽	港湾空港技術研究所
6	28	23	1		一方向波				公官庁	大型平面水槽	寒地土木研究所
7	33	20	3		多方向波				公官庁	多方向造波大水深平面水槽	寒地土木研究所
8	60	40	1	規則波ピストン式		0.6~2.5	0.2		公官庁	波浪平面水槽	水産工学研究所
9	40	27	2					流れ発生装置、曳航台車	公官庁	海洋構造物試験水槽	海上技術安全研究所
10	30	30	1	ピストン式	規則波、不規則波	1.0~3.0	0.25		公官庁	不規則波平面水槽	国土技術政策総合研究所 つくば
11	23	30	1	ピストン式	規則波、不規則波	1.0~3.0	0.25	流れ発生装置	公官庁	潮流発生装置付・不規則波平面水槽	国土技術政策総合研究所 つくば
12	40	30	4	変形フラップ式	規則波、不規則波		0.5		公官庁	不規則波水槽	国土技術政策総合研究所 つくば
13	30	15	1.3		規則波 不規則波	0.5~120	0.2 0.4	津波発生装置、潮汐発生装置	公官庁	平面水槽	国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門
14	56.5	6.3		スネーク型造波板12枚	規則波、不規則波、多方向波	0.4~4.0	0.35		公官庁	平面水槽(A)	新潟港湾空港技術調査事務所
15	56.5	41.7		スネーク型造波板72枚	規則波、不規則波、多方向波	0.4~4.0	0.35		公官庁	平面水槽(B)	新潟港湾空港技術調査事務所

表 2-14 国内の水理模型実験施設（3次元実験用の造波水槽）2/2

No.	水槽規模 (m)		高さ	造波機			波種類	周期 (s)	波高 (m)	その他	所属区分	水槽名称	施設名称
	長さ	幅		造波方式	長さ	幅							
16	30	19	1.2							公官庁	波浪平面水槽	名古屋港湾空港技術調査事務所	
17	20	8	0.5	スネーク式ピストン造波機	多方向不規則波					大学	三次元不規則波造波装置	室蘭工業大学	
18	18	10			規則波					大学	平面造波水槽	名城大学 社会基盤デザイン工学科	
19	25	2.22	1		規則波、不規則波、津波					大学	コンクリート製蛇行水路用不規則波・津波発生装置	名城大学	
20	28	11	0.8		津波、高潮、風波、多方向波					大学	三次元高潮津波シミュレーションシステム	名城大学	
21	9	4	0.5						津波造波装置	大学	平面水槽	早稲田大学	
22	30	45	1	据置型多連続スネーク型 21台造波板				0.25		大学	実海域再現水槽	京都大学	
23		20		多方向不規則波造波装置					津波造波装置	建設会社	平面水槽	鹿島建設 技術研究所	
24	30	19	1.5	ピストン型 0.5m×30枚 = 15m	規則波 不規則波	0.5~30.0 0.5~30.0	0.5 Hs 0.35		津波流れ発生装置	建設会社	平面水槽	東洋建設 技術研究所 尾研究所	
25	20	30	1.5	スネーク型造波板 39枚	規則波、単方向不規則波、多方向不規則波					建設会社	平面水槽	五洋建設 技術研究所	
26	30	18	1							建設コンサルタント	平面水槽	東京久栄	



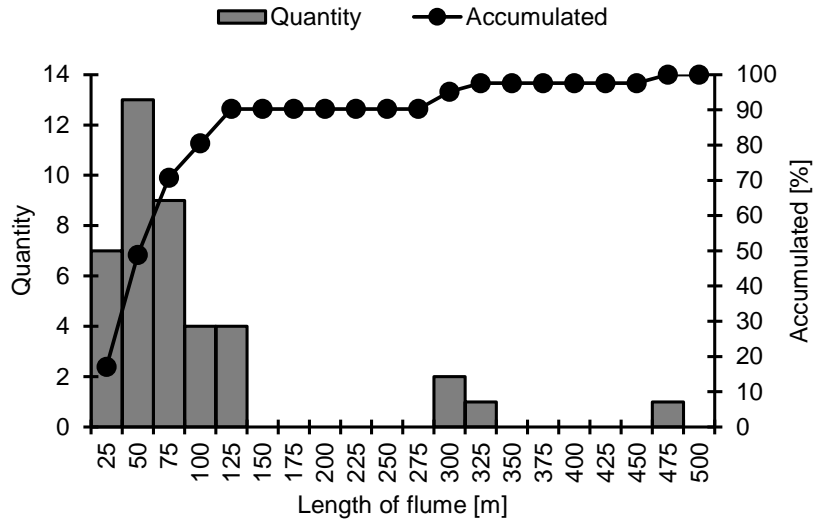
(1) 水路長と水路幅



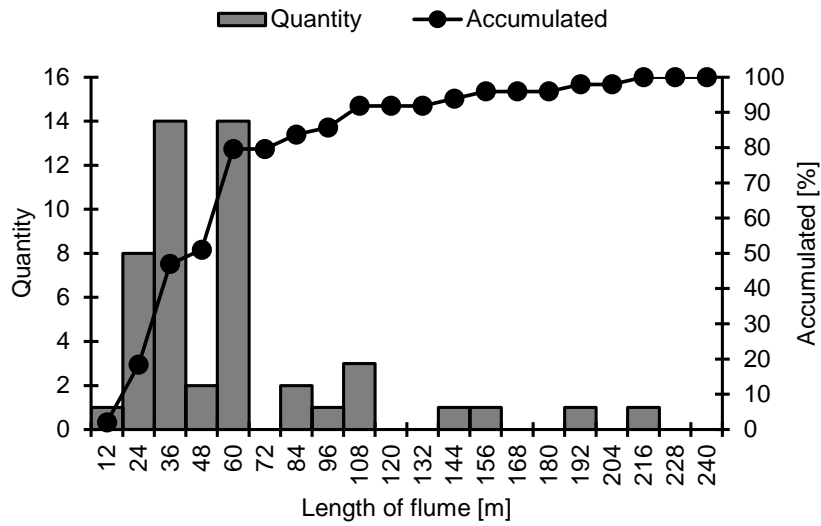
(本編の図 2-5 の再掲)

(2) 水路長と水路高さ

図 2-2 海外と国内の 2 次元実験用造波水路の規模

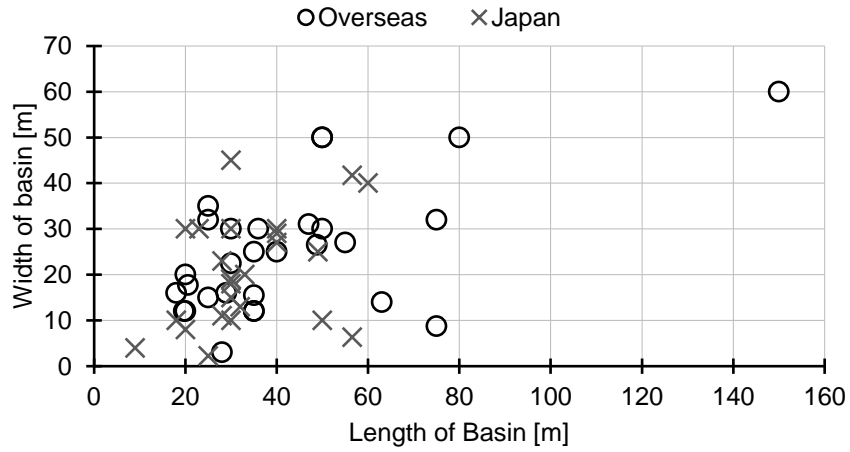


(1) 海外の2次元実験用の造波水路の長さの度数分布



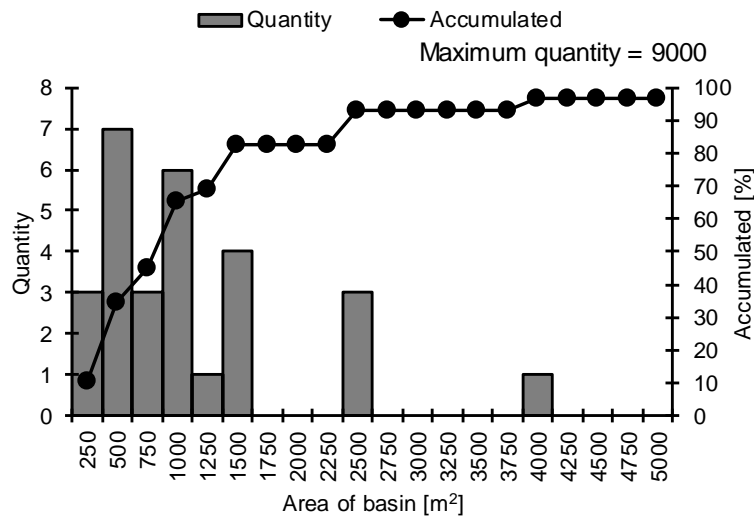
(2) 国内の2次元実験用の造波水路の長さの度数分布

図 2-3 2次元実験用の造波水路の長さの度数分布

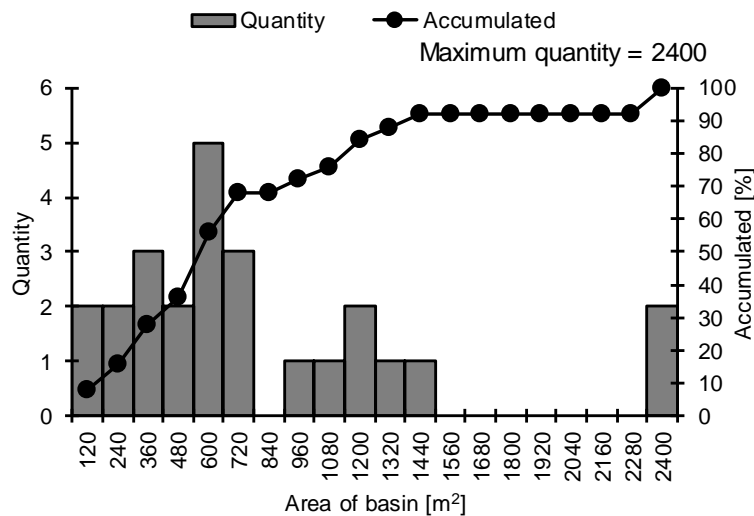


(本編の図 2-7 の再掲)

図 2-4 海外と国内の 3 次元実験用造波水槽の規模

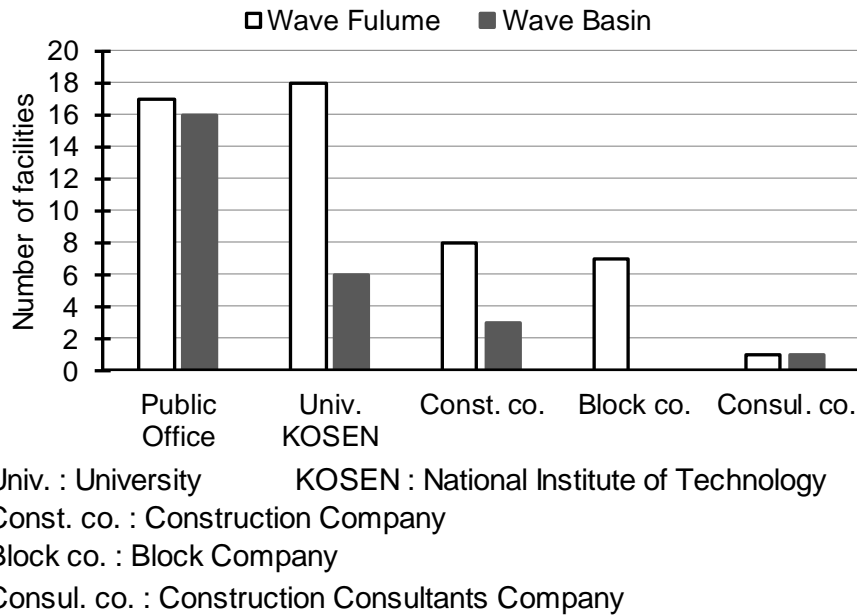


(1) 海外の 3 次元実験用の造波水槽の面積の度数分布



(2) 国内の 3 次元実験用の造波水槽の面積の度数分布

図 2-5 3 次元実験用の造波水槽の面積の度数分布



(本編の図 2-2 の再掲)

図 2-6 所属区分別の実験施設数 (国内)

5) 実験施設の URL

表 2-4 から表 2-14 に示した実験施設の URL を以下に示す。これら URL は 2018 年 5 月時点で確認したものである。

海外の造波水路 (Wave Flume)

- No.1 <http://www.wrl.unsw.edu.au/facilities-equipment/3-m-wave-flume>
- No.2 <http://www.wrl.unsw.edu.au/facilities-equipment/12-m-wave-flume>
- No.3 <http://www.wrl.unsw.edu.au/facilities-equipment/1-m-wave-flume>
- No.4 <http://www.wrl.unsw.edu.au/facilities-equipment/06-m-wave-flume>
- No.5 <http://www.watlab.be/en/physical-modelling>
- No.6 <https://www.ugent.be/ea/civil-engineering/en/research/coastal-bridges-roads/coastal-engineering/infrastructure-services>
- No.7 <https://www.ugent.be/ea/civil-engineering/en/research/coastal-bridges-roads/coastal-engineering/infrastructure-services>
- No.8 https://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/facilities/marine_performance_index.html
- No.9 https://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/facilities/marine_performance_index.html
- No.10 <http://lhe.ete.inrs.ca/en/flume/>
- No.11 <http://www.acri-in.fr/en/tools-methods/lab-and-wave-flume-acri-in>

- No.12 <https://www.fzk.uni-hannover.de/406.html?&L=1>
- No.13 <https://www.lufi.uni-hannover.de/home.html?&L=1>
- No.14 www.doe.iitm.ac.in/deep-water-wave-flume/
- No.15 <http://www.doe.iitm.ac.in/shallow-water-wave-flume/>
- No.16 <http://www.lir-notf.com/wavebasins/>
- No.17 <http://www.dicea.unipd.it/en/services/laboratories/maritime-laboratory>
- No.18 <http://www.tpg.unige.it/TPG/portfolio-item/wave-flume-facility/>
- No.19 <https://www.labima.unifi.it/vp-131-wave-current-flume.html?newlang=ita>
- No.20 <https://www.deltares.nl/en/facilities/>
- No.21 <https://www.deltares.nl/en/facilities/>
- No.22 <https://ciemlab.upc.edu/en/facilities/ciemito>
- No.23 <http://www.lhi.lk/facilities/wave-flume-and-basin>
- No.24 [https://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/gsri/list/2015/Taiwan_The%20Tainan%20Hydraulics%20Laboratory\(THL\),National%20Cheng%20Kung%20University\(NCKU\).pdf#search=%27Tainan+Hydraulics+Laboratory%27](https://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/gsri/list/2015/Taiwan_The%20Tainan%20Hydraulics%20Laboratory(THL),National%20Cheng%20Kung%20University(NCKU).pdf#search=%27Tainan+Hydraulics+Laboratory%27)
- No.25 http://www.rcoes.ntou.edu.tw/?page_id=76
- No.26 http://www.rcoes.ntou.edu.tw/?page_id=76
- No.27 <http://www.hrwallingford.com/facilities/fast-flow-facility>
- No.28 <http://www.hrwallingford.com/facilities/fast-flow-facility>
- No.29 <http://www.hrwallingford.com/facilities/physical-modelling>
- No.30 <http://www.hrwallingford.com/facilities/physical-modelling>
- No.31 <https://www.abdn.ac.uk/engineering/research/aberdeen-university-random-wave-flume-aurwf-211.php>
- No.32 <http://www.imperial.ac.uk/fluid-mechanics/hydrodynamics-laboratory/>
- No.33 <http://www.imperial.ac.uk/fluid-mechanics/hydrodynamics-laboratory/>
- No.34 <http://www.imperial.ac.uk/fluid-mechanics/hydrodynamics-laboratory/>
- No.35 <http://www.imperial.ac.uk/fluid-mechanics/hydrodynamics-laboratory/>
- No.36 <http://wave.oregonstate.edu/facilities>
- No.37 <https://you.stonybrook.edu/cherl/facilities-and-equipments/>
- No.38 <http://www.erdc.usace.army.mil/Media/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article-View/Article/476707/10-ft-and-5-ft-wave-flume-facility/>
- No.39 <http://www.erdc.usace.army.mil/Media/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article-View/Article/476707/10-ft-and-5-ft-wave-flume-facility/>
- No.40 <http://www.coastal.udel.edu/facilities.html>

海外の造波水槽 (Wave Basin)

- No.1 www.wrl.unsw.edu.au/facilities-equipment/wave-basin
- No.2 <https://www.amcsearch.com.au/model-test-basin>
- No.3 <http://www.watlab.be/en/physical-modelling>
- No.4 https://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/facilities/marine_performance/lab_large.html
- No.5 https://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/facilities/marine_performance/lab_large.html
- No.6 https://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/facilities/marine_performance/tools_lab_basin.html
- No.7 https://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/facilities/marine_performance/lab_multi.html
- No.8 <http://hydralab.eu/facilities--instruments/facilities-in-hydralab/Basins/Shallow-Water-Basin/>
- No.9 <https://www.lufi.uni-hannover.de/home.html?&L=1>
- No.10 www.doe.iitm.ac.in/wave-basin/
- No.11 www.lir-notf.com/wavebasins/
- No.12 www.lir-notf.com/wavebasins/
- No.13 www.lir-notf.com/wavebasins/
- No.14 <http://www.dicea.unipd.it/en/services/laboratories/maritime-laboratory>
- No.15 <https://www.deltares.nl/en/facilities/atlantic-basin-3/>
- No.16 <https://www.deltares.nl/en/facilities/pacific-basin-2/>
- No.17 <https://www.deltares.nl/en/facilities/delta-basin-2/>
- No.18 <https://www.sintef.no/en/all-laboratories/ocean-laboratory/>
- No.19 <http://www.lhi.lk/facilities/wave-flume-and-basin>
- No.20 [https://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/gsri/list/2015/Taiwan_The%20Tainan%20Hydraulics%20Laboratory\(THL\),National%20Cheng%20Kung%20University\(NCKU\).pdf#search=%27Tainan+Hydraulics+Laboratory%27](https://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/gsri/list/2015/Taiwan_The%20Tainan%20Hydraulics%20Laboratory(THL),National%20Cheng%20Kung%20University(NCKU).pdf#search=%27Tainan+Hydraulics+Laboratory%27)
- No.21 http://www.rcoes.ntou.edu.tw/?page_id=76
- No.22 <http://www.hrwallingford.com/facilities/physical-modelling>
- No.23 <http://www.hrwallingford.com/facilities/physical-modelling>
- No.24 <http://www.hrwallingford.com/facilities/physical-modelling>
- No.25 <https://www.plymouth.ac.uk/research/institutes/marine-institute/coast-laboratory>
- No.26 <http://www.imperial.ac.uk/fluid-mechanics/hydrodynamics-laboratory/>

- No.27 <https://www.qub.ac.uk/research-centres/cerc/Facilities/MarineFacilities/PortaferryCoastalWaveBasin/>
- No.28 <http://wave.oregonstate.edu/facilities>
- No.29 <https://www.popularmechanics.com/military/navy-ships/a10407/inside-the-wave-pool-where-the-navy-tests-its-warships-16656545/>
- No.30 <https://otrc.tamu.edu/otrc-wave-basin/>
- No.31 <http://www.coastal.udel.edu/facilities.html>

国内造波水路

- No.1 <https://www.pari.go.jp/about/facilities/dkbbj.html>
- No.2 <https://www.pari.go.jp/about/facilities/105m.html>
- No.3 <https://www.pari.go.jp/about/facilities/35m.html>
- No.4 <https://criepi.denken.or.jp/jp/civil/tech/zouha.html>
- No.5 <https://criepi.denken.or.jp/jp/civil/result/fluid/setsubi02.htm>
- No.6 http://www.ceri.go.jp/contents/facilities/con_faci01/index03.html#5
- No.7 http://www.ceri.go.jp/contents/facilities/con_faci01/index03.html#5
- No.8 http://www.ceri.go.jp/contents/facilities/con_faci01/index03.html#5
- No.9 http://www.ceri.go.jp/contents/facilities/con_faci01/index03.html#5
- No.10 <http://nrife.fra.affrc.go.jp/plant/suiri/suiri.html>
- No.11 <http://nrife.fra.affrc.go.jp/plant/suiri/suiri.html>
- No.12 <https://www.hro.or.jp/list/fisheries/research/central/section/kougaku/j12s220000000rfd.html>
- No.13 <http://www.nilim.go.jp/lab/fcg/facilities/05.html>
- No.14 <http://www.nilim.go.jp/lab/fcg/facilities/06.html>
- No.15 <http://www.gicho.pa.hrr.mlit.go.jp/gakusyu/suirijikken/index.html>
- No.16 <http://www.meigi.pa.cbr.mlit.go.jp/work/29/32/>
- No.17 <http://www.mmm.muroran-it.ac.jp/~ootabo/kakai/faci.html>
- No.18 <http://www2.kaiyodai.ac.jp/~okayasu/facility/facility.html>
- No.19 <http://civil.meijo-u.ac.jp/intro/facilities/water.html>
- No.20 http://www.naoe.hiroshima-u.ac.jp/tank/facilities_j.html
- No.21 <https://www.nst.kanazawa-u.ac.jp/master/envi/equipment/equipment.html>
- No.22 <https://www.nst.kanazawa-u.ac.jp/master/envi/equipment/equipment.html>
- No.23 https://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/collabo/collabo_facilities_list/fe-1
- No.24 <https://www.oit.ac.jp/japanese/yawata/facility/hydraulic.html>
- NO.25 <https://www.oit.ac.jp/japanese/yawata/facility/hydraulic.html>

- No.26 <http://www.coast.civil.nagoya-u.ac.jp/wiki.cgi?page=%BC%C2%B8%B3%C0%DF%C8%F7>
- No.27 <http://www.seakeeping.shp.ynu.ac.jp/facility.html>
- No.28 <http://eng.tech.iwate-u.ac.jp/top/?p=697>
- No.29 https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/joint/offering_5-1.html
- NO.30 https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/joint/offering_5-1.html
- No.31 <http://www.coast.dpri.kyoto-u.ac.jp/ja/index.php?Research%2FFacilities>
- No.32 <http://www.coast.dpri.kyoto-u.ac.jp/ja/index.php?Research%2FFacilities>
- No.33 <http://toshichan.be.fukui-nct.ac.jp/tayasu/exweb/exp1.html>
- No.34 https://www.kajima.co.jp/tech/katri/research/fac_kaiyou/index-j.html
- No.35 https://www.kajima.co.jp/tech/katri/research/fac_kaiyou/index-j.html
- No.36 <http://www.ad-hzm.co.jp/tr/giken/suiri.html>
- No.37 <https://www.toa-const.co.jp/trdc/facilities/w01.html>
- No.38 <http://www.toyo-const.co.jp/technology/602.html>
- No.39 <http://www.toyo-const.co.jp/technology/602.html>
- No.40 <http://www.penta-ocean-int.com/facility/suiri>
- No.41 http://www.fujita.co.jp/tech_center/facilities/center-sisetu/doboku/sui.html
- No.42 <http://www.sanshoku.co.jp/Institute-of-Technology.html>
- No.43 <http://www.fudotetra.co.jp/technology/facilities.html>
- No.44 <http://www.fudotetra.co.jp/technology/facilities.html>
- No.45 <http://www.fudotetra.co.jp/technology/facilities.html>
- No.46 <http://www.fudotetra.co.jp/technology/facilities.html>
- No.47 http://www.giken.co.jp/product/gijyutu-pdf/vol_1.pdf#search=%27%E6%8A%80%E7%A0%94%E8%88%88%E6%A5%AD+%E5%AE%9F%E9%A8%93%27
- No.48 http://www.giken.co.jp/product/gijyutu-pdf/vol_1.pdf#search=%27%E6%8A%80%E7%A0%94%E8%88%88%E6%A5%AD+%E5%AE%9F%E9%A8%93%27
- No.49 https://www.kyuei.co.jp/env_suiri_jikken.html

国内造波水槽

- No.1 <https://www.pari.go.jp/about/facilities/disaster.html>
- No.2 <https://www.pari.go.jp/about/facilities/kintr.html>
- No.3 <https://www.pari.go.jp/about/facilities/dual.html>
- No.4 http://www.ceri.go.jp/contents/facilities/con_faci01/index03.html#5
- No.5 http://www.ceri.go.jp/contents/facilities/con_faci01/index03.html#5

- No.6 <http://nrife.fra.affrc.go.jp/plant/harou/harou.html>
- No.7 https://www.nmri.go.jp/study/faci/facilities.html#4_kaiyoukoso
- No.8 <http://www.nilim.go.jp/lab/fcg/facilities/02.html>
- No.9 <http://www.nilim.go.jp/lab/fcg/facilities/03.html>
- No.10 <http://www.nilim.go.jp/lab/fcg/facilities/04.html>
- No.11 <http://www.naro.affrc.go.jp/nire/contents/lab/index.html>
- No.12 <http://www.gicho.pa.hrr.mlit.go.jp/gakusyu/suirijikken/index.html>
- No.13 <http://www.gicho.pa.hrr.mlit.go.jp/gakusyu/suirijikken/index.html>
- No.14 <http://www.meigi.pa.cbr.mlit.go.jp/work/29/31/>
- No.15 <http://www.mmm.muroran-it.ac.jp/~ootabo/kakai/faci.html>
- No.16 <http://civil.meijo-u.ac.jp/intro/facilities/water.html>
- No.17 <http://www.coast.civil.nagoya-u.ac.jp/wiki.cgi?page=%BC%C2%B8%B3%C0%DF%C8%F7>
- No.18 <http://www.coast.civil.nagoya-u.ac.jp/wiki.cgi?page=%BC%C2%B8%B3%C0%DF%C8%F7>
- No.19 <http://www.coast.dpri.kyoto-u.ac.jp/ja/index.php?Research%2FFacilities>
- No.20 https://www.kajima.co.jp/tech/katri/research/fac_kaiyou/index-j.html
- No.21 <http://www.toyo-const.co.jp/technology/2593.html>
- No.22 <http://www.penta-ocean-int.com/facility/suiri>
- No.23 https://www.kyuei.co.jp/env_suiri_jikken.html

参考文献（本編との重複あり）

- 2-1) 合田良實（2012）：海岸工学【その誕生と発展】，技法堂出版，200p.
- 2-2) 土屋昭彦（1963）：研究所めぐり その2 土木研究所鹿島水理試験所，沿岸海洋研究ノート 2(1)，pp.43-44，日本海洋学会沿岸海洋研究部会
- 2-3) 港湾技術研究所 30 年史編集委員会（1992）：港湾技術研究所三十年史，運輸省港湾技術研究所，502p.
- 2-4) 本間仁（1939）：波による河口付近の砂の移動に関する実験，土木試験所報告第 46 号，pp.29-48，内務省土木試験所
- 2-5) 松尾春雄（1939）：防波堤に及ぼす波の圧力並びに堤体の安定に関する実験的研究，土木試験所報告第 48 号，pp.65-92，内務省土木試験所
- 2-6) 佐藤濟一・柄澤郡治（1948）：八戸港の遮蔽に関する実験，土木研究所概報，第 1 号，建設省土木研究所
- 2-7) 古谷浩三（1948）：室蘭輪西製鐵所中央船溜模型試験報告，土木試験所報告，

- 第 5 号, pp.1-21, 北海道開発局土木試験所
- 2-8) 土木試験所報告 (1955) : 鬼脇港の遮蔽に関する模型実験報告, 土木試験所報告, 第 13 号, pp.1-21, 北海道開発局土木試験所
- 2-9) 星藤男・吉田義信 (1966) : 釧路西港模型実験 (防波堤の遮蔽効果について), 土木試験所報告, 第 41 号, pp.1-17, 北海道開発局土木試験所
- 2-10) 鴻上雄三 (1966) : 2, 3 の異形ブロックの水理特性について, 土木試験所報告, 第 42 号, pp.1-6, 北海道開発局土木試験所
- 2-11) 田村徳一郎・山田茂喜 (1962) : 最近における水産土木工事の水理実験について, 沿岸海洋研究ノート, 第 1 巻第 2 号, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会
- 2-12) 中村充 (1967) : 研究所めぐり その 9 農林省農業土木試験場, 沿岸海洋研究ノート 6(1), pp.63-66, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会
- 2-13) 岩垣雄一・村上仁士・酒井哲郎・木村晃 (1970) : 電気油圧式不規則波発生機について, 第 17 回海岸工学論文集, pp.409-414, 土木学会

3. 水理模型実験の留意点と高精度化の手法

3-1. 共通事項

3-1-1. 相似則

縮小模型を用いて実施する模型実験では、相似則に従って実験条件を検討しなければならない。港湾構造物の耐波設計に関する水理模型実験の相似則には、フルード相似則を適用する。

相似則について、既往の資料¹⁻¹⁾に詳しく示されているが、一般には入手が困難な資料であるため、引用して以下に示す。「3-1-1. 相似則」に示す内容は既往の資料¹⁻¹⁾の転記であることをご了承いただきたい。なお、相似則に関する同様な記述は Hudson³⁻¹⁾によっても示されている。

(以下、「3-1-1. 相似則」の終わりまでの丸文字部分は、既往の資料¹⁻¹⁾の転記。)

模型実験を行う場合には、模型と実物が相似でなければならない。その相似の程度には次の三段階がある。

1) 形状の相似性

実物の寸法が一定の割合（縮尺）で縮められて模型に再現されていることで、水平方向と鉛直方向が異なる縮尺で縮められていることもあり得る。

2) 運動の相似性

1)に加えて実物における速度・加速度が一定の縮尺で模型に再現されていること。

3) 力学的な同時性

1), 2)に加えて実物において働いているすべての力が一定の割合で縮められた大きさで模型に作用していること。

模型実験においては第3の力学的相似性を満足させることが望ましいのであるが、現実に取り扱わねばならない重力、慣性力、粘性力などはそれぞれ異なった特性を持っているため、すべての力を同時に再現することは不可能である。したがって実験に取りかかる前にどの力が一番重要であるかを見きわめた上で、その力について力学的相似性を満足させるようにし、残りの力についてはそれらの影響度を判定して適当に補正を行わなければならない。また河川や潮流に関する実験などのように非常に広い区域を実験に取り入れるときは、水平と鉛直の縮尺を変えることが珍しくない。このような時は鉛直方向の運動や水平方向でも細部の流れについては目をつぶって平均流速について議論することも多い。

模型実験の結果を現地の資料と照合して模型を修正するのは、こうした力学的相似性の不一致を最小限度にとどめるために必要となるのである。

【相似則とその誘導】

(1) 模型に作用する力

模型実験において、どのような割合で模型を縮めるか、すなわちどのような相似律に従って実験を行うかは、対象とする現象がどのような力によって支配されているかによって定まる。港湾に関する水理模型実験で通常現れる力としては、次の3種である。

$$\text{i) 慣性力} \quad F_I = m\alpha = \rho l^3 \frac{\partial v}{\partial t} \quad \left(= \rho l^3 \frac{v^2}{l}, \text{ Hudson の記述, 著者加筆} \right)$$

$$\text{ii) 重力} \quad F_G = mg = \rho gl^3$$

$$\text{iii) 粘性力} \quad F_V = \rho \nu \frac{\partial v}{\partial t} l^2$$

ただし、 ρ は流体（水）の密度、 g は重力の加速度、 ν は動粘性係数で、 l は長さを表している。流体に働く力としては、このほかにも圧力差による力、表面張力、弾性変形の力、などがあるが、普通は考慮しなくて良いことが多い。

一般に、実物と模型とで同じ試験材料（水理実験では水）を使って模型実験を行う場合には、力として2つまで相似にすることができる。ただし、2つと言っても、港湾水理実験ではもともと水の動きを対象とするものであるから慣性力を落とすことはできない。したがって残る一つを実験ごとに選ばなければならない。重力を相似にすればフルード相似則が、粘性力を選べばレイノルズ相似則が導かれる。

(2) フルード相似則

まず、重力の作用が主要な場合を考えると、これは i) と ii) の2つの力が同じ縮尺で模型に再現されていることが必要である。すなわち

$$\frac{(F_I)_m}{(F_I)_p} = \frac{(F_G)_m}{(F_G)_p} \quad \text{または} \quad (F_I)_r = (F_G)_r \quad \text{iv)}$$

がその条件である。ここで添字 m は模型、 p は実物の値を表わし、 r は縮尺比を示す。i) と ii) を縮尺比で書き表すと、

$$(F_I)_r = \rho_r l_r^3 \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)_r = \rho_r l_r^3 \frac{v_r}{t_r} = \rho_r l_r^2 v_r^2$$

$$(F_G)_r = \rho_r g_r l_r^3$$

したがって式iv) から

$$v_r = \sqrt{g_r l_r} \quad \text{および} \quad t_r = l_r / v_r = \sqrt{l_r / g_r} \quad \text{v)}$$

が導かれる。 g_r は地球上では1であるから、式v) は速度と時間の縮尺を長さの縮尺の平方根に取らなければならないことを示している。

式v) を実物と模型の値に書き直すと

$$\frac{v_m}{v_p} = \frac{\sqrt{g_m l_m}}{\sqrt{g_p l_p}} \quad \therefore \quad (F)_m = (F)_p$$

となり、実物と模型のフルード数が同一との条件を示している。ここで長さ l としては、現象における代表的な長さであることから、この取り方によっていろいろなフルード数が与えられる。河川の流れて、常流、射流の区別は、 l として水深 h をとった場合に $F = v/\sqrt{gh} \geq 1$ で現象が異なるのをうまく掴んだ例である。船の模型試験などでは船の長さを代表長 l に取っており、この場合は $F = 1$ は物理的意味を持たない。

(3) レイノルズ相似則

次に粘性力が重力よりも重要な場合には、式 i) の慣性力と、式 iii) の粘性力とを同じ縮尺で模型に再現する必要がある。したがって

$$(F_V)_r = \rho_r \nu_r \frac{v_r}{\ell_r} l_r^2 = \rho_r \nu_r l_r v_r = \rho_r l_r^2 \nu_r^2 = (F_I)_r$$

$$\therefore v_r = \nu_r / \ell_r \quad \text{または} \quad R_m = \frac{\nu_m l_m}{\nu_m} = \frac{\nu_p l_p}{\nu_p} = R_p \quad \text{vi)}$$

の関係が満たされなければならない。これがレイノルズ相似則であり、模型と現地のレイノルズ数を同一にすることに等しい。模型で実際と同じように水を使えば、動粘性係数 ν は同一であるから、式 vi) は速度の縮尺を長さの縮尺の逆数に取らなければならないことを意味する。式 v) のフルード相似則では速度の縮尺が長さの縮尺の平方根に等しいことが要求されるのであるから、フルード相似則とレイノルズ相似則を同時に満足させることは不可能である。

実際問題としては、港湾の水理模型実験で重力よりも粘性力が卓越することはまずない。したがって、相似則としては一応フルード則に従い、粘性すなわち摩擦の影響は粗度などで調整するのが慣用法である。

フルードおよびレイノルズ相似則の誘導にあたっては、力の比率から簡単に求めたけれども、むずかしく導くには、ナビエストークスの運動方程式を変形して求める。一般に現象が方程式で記述されているときは、方程式の形および各項の大きさから、相似律を導くことができる。しかし、方程式が立てられていることは、作用する力がわかっていることであり、相似律を考えると常に現象に働いている力の作用を考えることが重要である。すなわち、実際の現象について、自分で十分に考えることが大切である。

3-1-2. 模型縮尺

縮小模型を用いた水理模型実験では縮尺影響¹を避けることができない。縮尺影響をできるだけ小さくするためには、実験模型をできるだけ大きくすると良いが、実験模型を大きくすると実験に要する時間と費用が多くなる。取り扱う現象にも

¹ 縮尺影響：縮尺効果と呼ばれることが多いが、「効果」は良い結果を与える印象を受けるので、本研究では負の結果を連想できるように「影響」を用いる。

よるが、波浪変形を取り扱う実験では有義波高で 10 cm から 30 cm 程度あれば十分である。条件に制約があれば有義波高が数 cm でも許容できる。また、長周期波を造波する実験では、造波水路の長さや造波機性能の制約によって波高を 1 cm 程度にせざるを得ないことが多い。消波ブロックの安定性を検討する実験では、ブロック模型の大きさ（高さ）が 10 cm に満たないほどの小さな縮尺の採用は避けたい。なお、実験施設の大きさの制約により、造波水槽で実施する 3 次元実験は造波水路で実施する 2 次元実験よりも小さな縮尺になることがある。

Hughes¹⁻⁵⁾は Typical Short-Wave Model Scales として下記を提案している。

・ 2-D Wave Transformation	1:10 to 1:50
・ 3-D Wave Transformation	1:25 to 1:75
・ Breakwater Stability	1:30 to 1:50
・ Short-Wave Harbor Penetration	1:50 to 1:150
・ Force on Solid Bodies	1:10 to 1:50

模型縮尺の影響について、本編の「2-4. 実験施設規模（模型縮尺）の影響」を参照されたい。

3-1-3. 模型床

実験施設内で波を発生させることによって模型床の形状が変化すると、波の状態が変化してしまう。模型床の形状を復旧することには多くの手間を要する。したがって洗堀などの海底地盤の変形が検討対象ではなければ、波浪の作用によって模型床の形状が変形しない固定床で実施する。固定床とは波の作用により形状が変化しない模型床のことで、合板、樹脂板、鋼板、モルタルなどで表面処理を行った模型床のことである。

3-1-4. AD 変換の分解能

波高計、流速計、圧力計などの値は電圧のアナログ信号として出力され、AD 変換器によりデジタル信号に変換されてパソコンに収録する。AD 変換の分解能は変換器の bit 数によって異なる。分解能が粗すぎると、実験データを適切に評価できなくなる。例えば、11.111 cm の物理量を離散化して記録する際に、分解能によって表 3-1 に示すように離散量（デジタル量）に違いを生じる。

図 3-1 に bit 数による分解能の違いのイメージを示す。図 3-1 には軸を示していないが、横軸が時間で縦軸が物理量である。波高計等の出力電圧のアナログ信号をデジタル変換してコンピュータに収録する際には、図 3-1 に「デジタル」で示すように階段状のデータとなる。階段の縦軸方向の細かさが bit 数による違い

であり、bit 数が大きいほど細かい刻みで値を記録することができる。なお、図 3-1 のデジタルの階段の横軸方向の細かさはデータのサンプリング間隔の違いであるので、bit 数とは関係ない。分解能を確認できるより具体的な例は、後掲の図 3-17 である (p.62)。図 3-17 の(2)の波形をよく見ると、波形が階段状になっている。この階段の高さが分解能であり、図 3-17 の場合には波高に対して十分な分解能で実施されていることがわかる。

表 3-2 に AD 変換器の bit 数による分解能の違いを示す。12 bit はフルスケールを 2,048 分割することができ、16 bit では 32,768 分割できる。表 3-3 に分解能の例を示す。一般的な規模の実験施設で使用されることが多い、長さが 50 cm の波高計と定格容量が 10 kPa (約 100 gf/cm²) の圧力計について示してある。8 bit では波高を約 2 mm までしか分解できないので、分解能が不足する。12 bit であれば分解能が約 0.1 mm になる。10 kPa の圧力計の 12 bit の 0.0024 kPa は静水圧で考えると水深で約 0.24 mm に相当する。表 3-3 の例の場合には、16 bit であれば十分な分解能を得ることができる。

表 3-1 分解能による離散量 (デジタル量) の違い

物理量 [cm]	11.111				
分解能 [cm]	10	1	0.1	0.01	0.001
離散量 [cm]	10	11	11.1	11.11	11.111

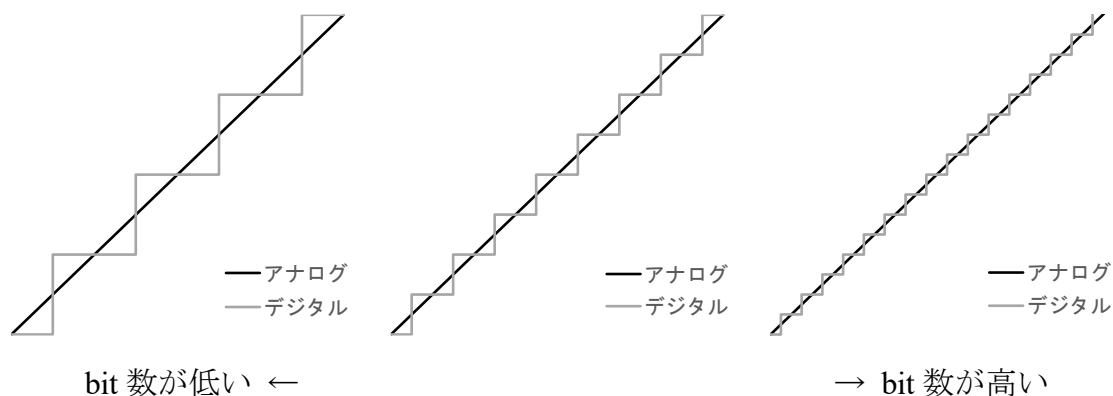


図 3-1 AD 変換における bit 数の影響

表 3-2 AD 変換器の bit 数による分解能の違い

		8 bit	12 bit	16 bit
分解能	符号なし整数	256	4,096	65,536
	符号付き整数	128	2,048	32,768

表 3-3 AD 変換器の bit 数による分解能の例

	8 bit	12 bit	16 bit
50cmの波高計 (±25cm)	0.195 cm	0.012 cm	0.00076 cm
10kPaの圧力計 (±5kPa)	0.039 kPa	0.0024 kPa	0.00015 kPa

3-2. 波浪変形（波高測定）

波浪に関する水理模型実験において最も基本的であり、非常に重要な測定項目が「波浪」である。一般的に「波高測定」と称するが、測定するのは時々刻々変化する水表面の高さの時刻歴であり、そのデータを解析することで波高や周期の値を得る。3-2 節では二次元造波水路において造波機により発生した波の水表面高さの測定と、波高や周期の値を得るための解析について示す。

3-2-1. 測定内容・方法

1) 測定項目

波高測定は水表面の高さの時刻歴を記録する測定であるので、水位の測定は必須である。流速測定は必要に応じて実施する。

2) 実験波数

不規則波の実験波数について、港湾基準¹⁻¹⁰⁾には、「少なくとも 200 波の波群を 3 組以上作用させることが必要」、「波高分布の統計的な観点から考えて（中略）400 波の波群を 3 組以上作用させることも一つの候補と言える」とされている。また、消波ブロック等の安定実験の項目では、「作用波数と作用波群は 1000 波及び 3 波群を標準とする」とされている。Frostick, et al.¹⁻⁸⁾は防波堤の安定性を検証する実験において、「信頼できる結果を得るためには波は特定の最小限の数を超えなければならない」として、その最小限の数を 500～3000 波の範囲であるとしている。

以上のように、不規則波の実験波数は実験目的によって異なり、異形ブロックや被覆石の安定性を評価する実験では 1000 波を 3 波群以上とし、波浪変形実験では 200 波以上でよいが最高波高が重要な場合には 400 波以上とする。なお、実験波数の考え方は、実験種類により異なる。波高や周期を確認する実験（反射波や伝達波を評価する実験を含む）は、造波開始後に反射波が安定するのを待った後の、解析対象波数を 200 波以上または 400 波以上とする。異形ブロックの安定実験など、構造物の安定性を評価する実験では造波開始直後の 1 波目から構造物に波が作用するので、造波開始から造波停止までの波作用数を 1000 波とする。図 3-2 に、造波と計測のタイミングのイメージを示す。図 3-2 の(1)と(2)は波高測定実験の場合で、(1)と(2)は測定波数の違いである。波高測定実験の場合、造波開始

後に水路内で反射波が安定するのを待ってから計測を開始し、200 波または 400 波を計測後に造波を終了する。消波ブロック等の安定実験の場合には、図 3-2 の (3)に示すように造波開始と同時に計測を開始し、1000 波で造波を停止したのちに計測を終了する。造波停止から計測停止までの時間は、最後に造波された波が波高計などの計測機器を通過するまでの時間により決定する。安定実験でこのような測定を行うと、造波された波が計測器位置に到達するまでの空白時間、造波機の緩起動や緩停止、造波停止後の空白時間が含まれるので、波形記録を見て解析区間を決定する。

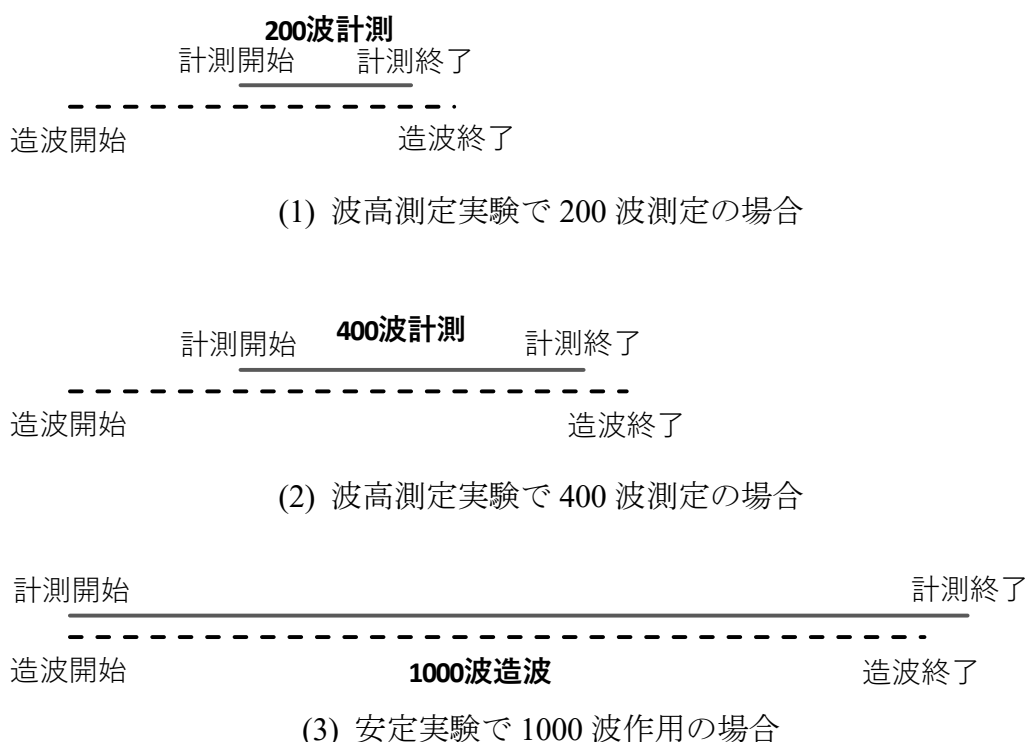


図 3-2 波高測定実験と安定実験の造波と計測のタイミング

実験波数を多くすると最高波高が大きくなることが期待される。最高波高比(最高波高 H_{max} と有義波高 $H_{1/3}$ の比)と波数は式(3-1)および式(3-2)に示す関係にあり(合田良實¹⁴⁾, p.17)、図 3-3 に示すように波数が多ければ最高波高比が大きくなる。なお、 $(H_{max}/H_{1/3})_{mode}$ は $H_{max}/H_{1/3}$ の相対度数分布の最多値、 $(H_{max}/H_{1/3})_{mean}$ は平均値である。表 3-4 に波数と最高波高比の数値を示す。波数が 360 あれば $(H_{max}/H_{1/3})_{mean}$ において 1.8 倍が期待できる。異形ブロックや被覆石の安定性を評価する実験では最高波高の大きさが影響するので、1000 波程度の波数が必要となる。しかし、反射波を取り扱う水理模型実験では最高波高の大きさは重要ではないので、実験波数は 200~250 波で十分である。

$$(H_{max}/H_{1/3})_{mode} = 0.706\sqrt{\ln N_0} \quad (3-1)$$

$$(H_{max}/H_{1/3})_{mean} = 0.706\{\sqrt{\ln N_0} + \gamma/(2\sqrt{\ln N_0})\} \quad (3-2)$$

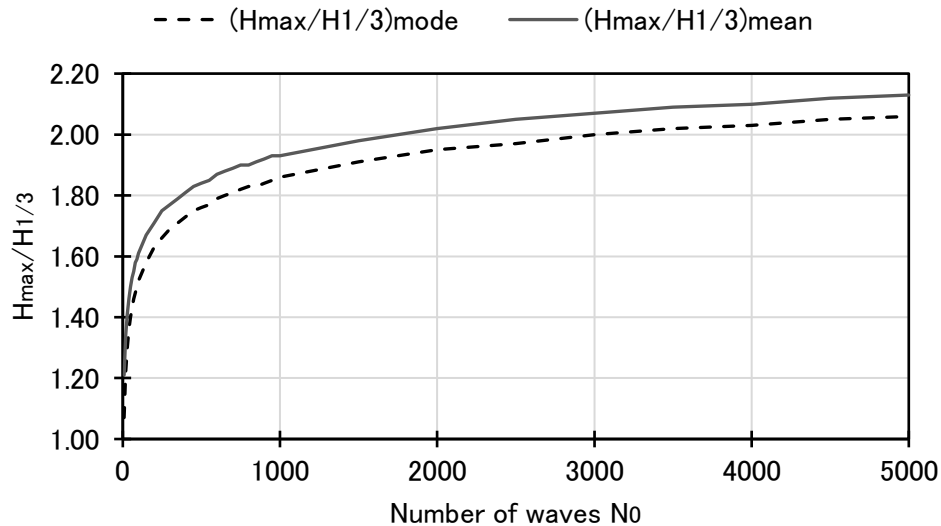


図 3-3 波数による最高波高比の変化

表 3-4 波数と最高波高比

No	(Hmax/H1/3)mode	(Hmax/H1/3)mean
100	1.52	1.61
200	1.63	1.71
250	1.66	1.75
360	1.71	1.80
500	1.76	1.84
1000	1.86	1.93

以下に、水理模型実験における実測値を用いて、実験波数による違いを具体的に示す。

図 3-4 は最高波高を有義波高で除した最高波高比と実験波数の関係である。2次元造波水路において不規則波を約 1000 波作用させた実験において、解析対象の波の数を、先頭からの 50 波、100 波、150 波、200 波、250 波、300 波、400 波、500 波、750 波、1000 波と変えたときの、最高波高比の変化を示している。ただし、実験波数が 1000 波に若干足りていない実験については、解析波数 1000 波の代わりに 900 波を採用した。造波機前面の水深が十分に大きい地点のデータであるため、砕波を生じていない条件である。なお、適用したデータは、4 種類の実験施設における 6 種類の実験で、それぞれ 2~3 種類の波群を解析対象とした。し

たがって、特定の実験施設の特性に影響された解析結果ではない。

全体の傾向として、解析波数を増やすと最高波高比が大きくなっている。最高波高は解析波数を増やすと、増やす前より大きくなるか増やす前と同じである。しかし有義波高は解析波数を増やす前と後とでの大小関係が一定ではない。そのため、最高波高比は解析波数を増やすと必ず大きくなるということではなく、場合によっては解析波数を増やすことで最高波高比が小さくなることもあり得る。したがって、解析波数による結果に逆転を生じているデータも一部にはあるが、全体の傾向としては解析波数を増やすことで最高波高比が大きくなっている。

解析波数が少なくても、少ない解析波数の中に偶然大きな最高波高が含まれれば、解析波数が少なくても最高波高比が大きくなる。図 3-4 において解析波数 50 波で最高波高比が 2.0 近くあるデータはその例である。そのような特別な例を除くと、解析波数が 50 波の最高波高比は概ね 1.5 未満である。解析波数を増やすと最高波高比が徐々に大きくなるが、解析波数 400 波以上では波数を増やすことによる最高波高比の増加が緩やかになる。×マークで示した平均値の数値データは表 3-5 のとおりであり、表 3-4 に示した理論値とおおむね一致している。

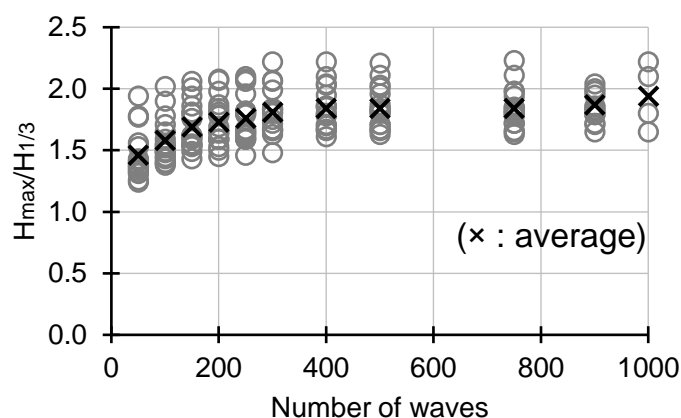


図 3-4 水理模型実験による最高波高比と実験波数の関係

表 3-5 水理模型実験による実験波数と最高波高比の平均値の数値データ

波数	50	100	150	200	250	300	400	500	750	900	1000
最高波高比	1.46	1.58	1.69	1.73	1.76	1.81	1.84	1.84	1.84	1.87	1.94

3) 計測待ち時間

「2) 実験波数」において、波高や周期を確認する実験（反射波や伝達波を評価する実験を含む）は、造波開始後に反射波が安定するのを待った後の波を解析対象とすることを示した。ここでは、造波開始から計測開始までの待ち時間について示す。

数 100 波を作用させる実験を実施する場合には、造波板で発生した波が実験模型や水路壁で反射波が発生し、反射波が造波板で反射する多重反射が、実験水路内で発生する。反射波吸収機能を有する低反射型の造波機が多く採用されるようになっているが、完全な無反射とはならない。そのため、造波開始後に多重反射が定常状態に待ってから波浪データの測定を開始する。

多重反射が定常状態に達するまでの待ち時間は谷本ら³⁻¹⁾により以下のとおり検討されているので、これを適用する。谷本らによれば、反射率が 0.6 以下では造波開始後有義波群速度の到達時間の 6 倍程度待てば、多重反射系が定常状態に達するのに十分であるとしている。有義波群速度 C_g の到達時間 t_{gs} は、造波板から反射面までの距離を l として $t_{gs} = l/C_g$ で得られるので、造波開始から計測開始までの待ち時間を $t = 6t_{gs} = 6l/C_g$ とする。模型床の高さが場所により異なる場合には、それぞれの水深で l/C_g を算定する。

4) サンプリング間隔

波高測定のサンプリング間隔について、港湾基準¹⁻¹⁰⁾には、「波浪データなど波の周期と同程度の時間スケールの現象であれば 20 Hz 程度の分解能があればよい」とされている。これは、実験波の周期が 1 s とすると波周期の 1/20、実験波の周期が 2 s とすると波周期の 1/40 である。合田良實¹⁻⁴⁾は、「波形記録の読み取り時間間隔は短いものほど良く、有義波周期の 1/10 以下、もしできれば 1/20 程度とする」としている。Hughes¹⁻⁵⁾は、「水表面高さを記録する際のサンプリング間隔の選定には十分注意しなければならない」、「一般の経験則は、1 周期間に少なくとも 10 個のサンプルが無ければならない」、「代表的な実験波の周期を 1 s とすると波データは少なくとも 10 Hz で取得しなければならず、20~30 Hz 程度の記録が望ましい」とされている。すなわち、Hughes の記述からは、波周期に対して少なくとも 1/10、できれば 1/20~1/30 の時間間隔が望ましい。以上の三つの資料は、波高測定のサンプリング間隔について、いずれも波の周期の 1/10~1/40 の時間間隔を推奨している。

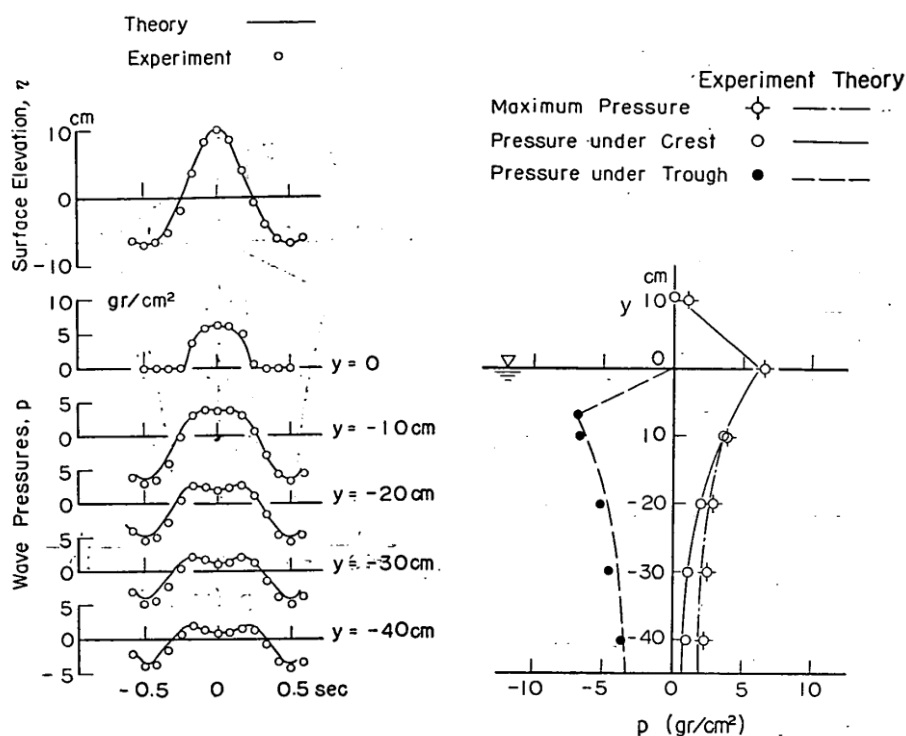
波高測定に対するサンプリング間隔の影響について「3-2-2. 高精度化のための工夫」に後述する。波圧・波力の測定においては高速サンプリングが必要であり、その内容について「3-5-1. 波圧測定」に後述する。

5) 水表面高さ測定の計測機器

波浪に関する水理模型実験における水表面高さの測定（波高測定）にもっとも一般的に用いられるのは容量式波高計であり、次にサーボ式波高計である。海底面などに設置した圧力計による圧力データから水深の変化を把握することも可能である。

容量式波高計は、水位変化と出力電圧の変化の関係を把握する較正試験を実験者が実施する。サーボ式波高計は計測機器会社の較正值を使用する。圧力計は計測機器会社の較正值を使用することも可能であるが、水深変化と出力電圧の変化の関係を把握する較正試験を実験者が実施することが望ましい。なお、直立壁前面の重複波の測定においては、図 3-5 に示すように海底面に近づくほど圧力データが水位データと一致しなくなる点に注意が必要である。直立壁の前面ではなくとも、現地波浪観測において生じる水圧波形と表面波形の不一致が、実験水槽においても発生するので、圧力計により水表面高さの測定を行う場合には注意を要する。

上述のとおり、水表面高さの測定（波高測定）にもっとも一般的に用いられるのは容量式波高計であるが、水理模型実験を実施するにはその応答特性を認識しておく必要がある。そこで、計測機器の応答性について「3-2-2. 高精度化のための工夫」に後述する。



(合田・柿崎³⁻¹⁾)

図 3-5 波圧形および波圧分布の測定

6) 流速測定

水理模型実験における波高測定時に実施する流速測定で、最も一般的に用いられている計測機器は電磁流速計である。電磁流速計はXYの水平2成分を測定するセンサーと、水平と鉛直の2成分(XZ)を測定するセンサーの2種類がある。

一般的に、2次元造波水路における模型実験ではXZ成分のセンサーを用い、3次元造波水槽における模型実験においてXY成分のセンサーを用いる。電磁流速計を干出状態で使用するとセンサー部分が過熱損傷してしまうので、基本的に水没状態でないと使用できない。なお、XYZの3成分を測定できる電磁流速計もある。

プロペラ式流速計が用いられることも多い。プロペラ式流速計で検出できる流れは1成分だけに限定される。なお、正方向のみの1成分1方向のセンサーと、正負の両方を測定できる1成分2方向のセンサーがある。測定は1成分に限定されるが、干出状態に設置することも可能なため、水没と干出を繰り返すような地点でも測定が可能である。ただし、干出している状態で風が作用しても、プロペラが回れば流速として検出されてしまうので、注意が必要である。プロペラ式流速計はプロペラ部分が損傷しやすいので、流れてきたゴミが衝突して破損してしまうことがある。したがって、実験実施前に実験水路・水槽内のゴミを除去しておく。

超音波ドップラー流速計が使用される場合もある。この形式は、センサーの数cm先の地点の流速を検出するので、流速測定地点におけるセンサーによる乱れの影響が少ない特徴がある。ただし、微粒子が含まれないきれいな水では流速を適切にとらえることができないので、室内実験で使用する場合には意図的に微粒子を投入するなどの措置が必要である。

以上の流速測定方法は、計測機器による固定点での流速測定法である。流れにより移動する粒子（または粒子群）の運動を追いかけるラグランジュ（Lagrange）法（例えばParticle Tracking Velocimetry）は、波浪に関する水理模型実験ではあまり用いられない。

トレーサーの濃度パターンの変化から流速を求めるParticle Image Velocimetry（PIV）の手法もあるが、波浪が作用する水路内に安定的にトレーサーを供給することの難しさから、波浪実験ではあまり用いられていない。なお、PIVは個々の粒子の運動を追いかけるのではなく、トレーサーの濃度パターンの変化を格子状に解析する手法であるためオイラー（Euler）法の一つである。

3-2-2. 高精度化のための工夫と波高測定の留意点

1) サンプリング間隔（波高測定における周期分割数）

波浪に関する水理模型実験において、波高と周期を解析するための水位データの収録時間間隔について検討する。

図3-6に示す長さ35mの水路に高さ0.75mの1/5勾配斜面と天端幅6mの水平床で構成する模型床を設置して、水路床上で0.875mの水深で不規則波の造波を実施した。造波信号の有義波周期の入力値は1.49sである。図3-7に示す地点に容量式波高計を設置し、0.001s間隔で150,000個の水位データ収録を実施した。

平均周期は有義波周期の 1/1.1 倍とすると、収録波数は約 110 波である。

0.001 s 間隔で収録した水位データを、データを読み飛ばして解析を行うことにより、0.001 s、0.01 s、0.025 s、0.05 s、0.1 s、0.2 s、0.3 s、0.4 s、0.5 s 間隔のデータとして取り扱った。表 3-6 に各データ間隔の有義波周期に対する分割数を示す。

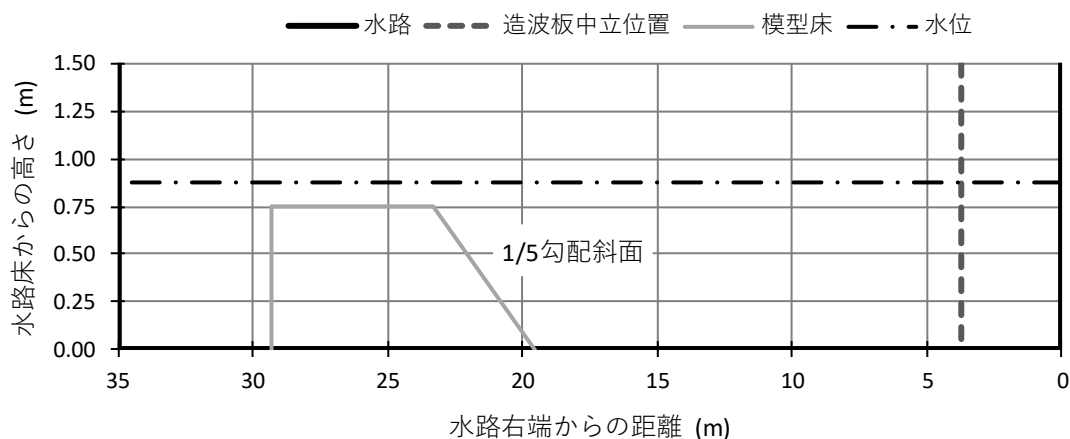


図 3-6 実験水路と模型床の形状

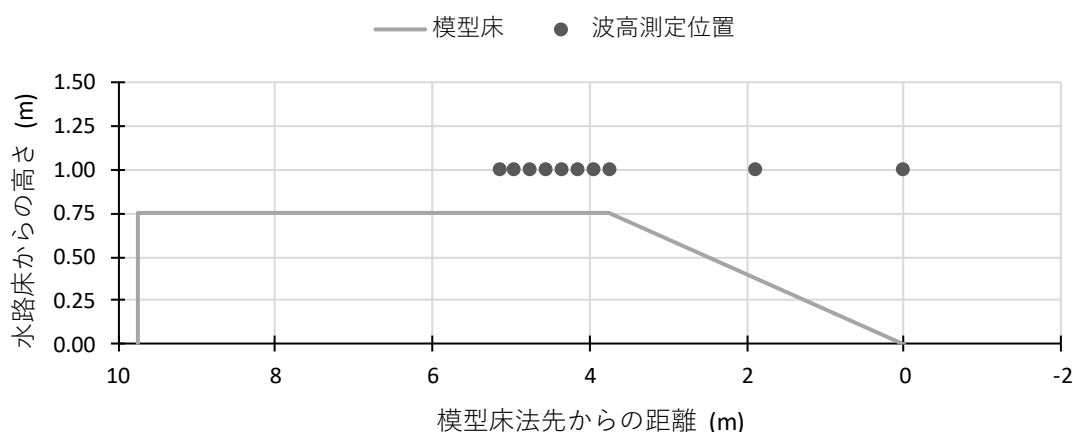


図 3-7 波高（水位データ）測定位置

表 3-6 データ間隔と有義波周期に対する周期分割数

データ間隔 (s)	0.001	0.01	0.025	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
周期分割数	1490	149	60	30	15	7.5	5.0	3.7	3.0

図 3-8 に、解析に用いたデータ間隔の周期分割数による波高解析結果の違いを示す。0.001 s 間隔で収録したデータを用いて、読み飛ばし間隔を変えて解析に用いた時間間隔を変えている。すなわち、全て同じ実験データを用いているので、正しく解析できていれば波高の値は同じである。解析に用いた水位データは、模型床法先の水深が十分に大きい地点である。

有義波周期に対する周期分割数 1490 から 30 までは、波高解析結果がほぼ同じ

である。周期分割数 15 では $H_{1/20}$ と H_{ave} がやや大きくなっているが、周期分割数が大きいものと概ね同じ波高解析結果である。周期分割数 7.5 以下では、分割数が少なくなるほど H_{max} から H_{ave} の波高解析結果が $H_{1/10}$ に近づいている。

図 3-9 に、解析に用いたデータ間隔の周期分割数による周期解析結果の違いを示す。有義波周期に対する周期分割数 1490 から 15 までは、周期解析結果が造波信号の入力値である 1.49 s とほぼ一致している。周期分割数 7.5 以下では解析される周期が長くなっている。

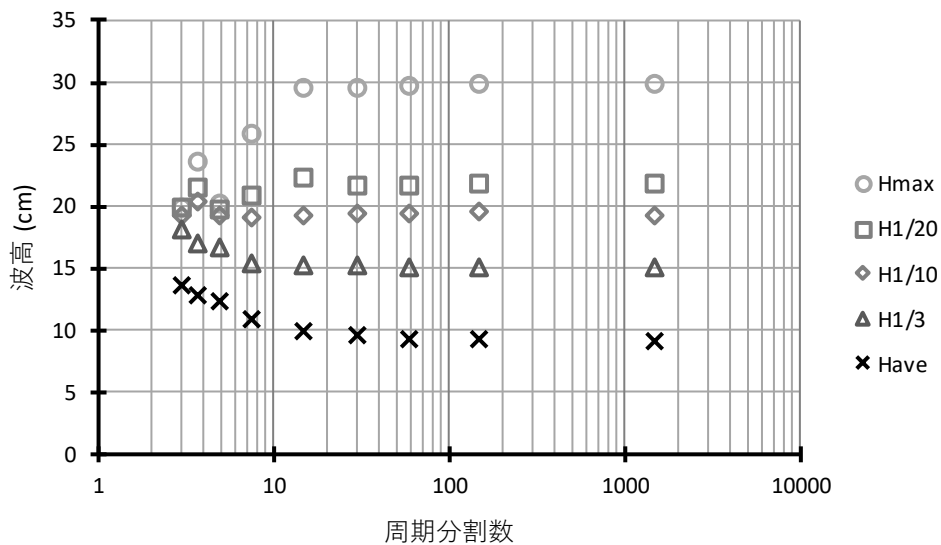


図 3-8 周期分割数による波高解析結果の違い

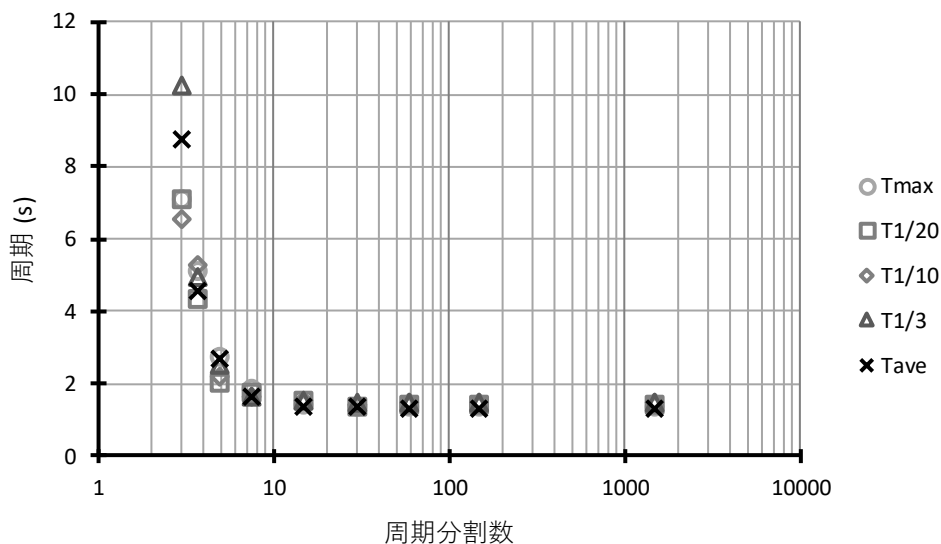


図 3-9 周期分割数による周期解析結果の違い

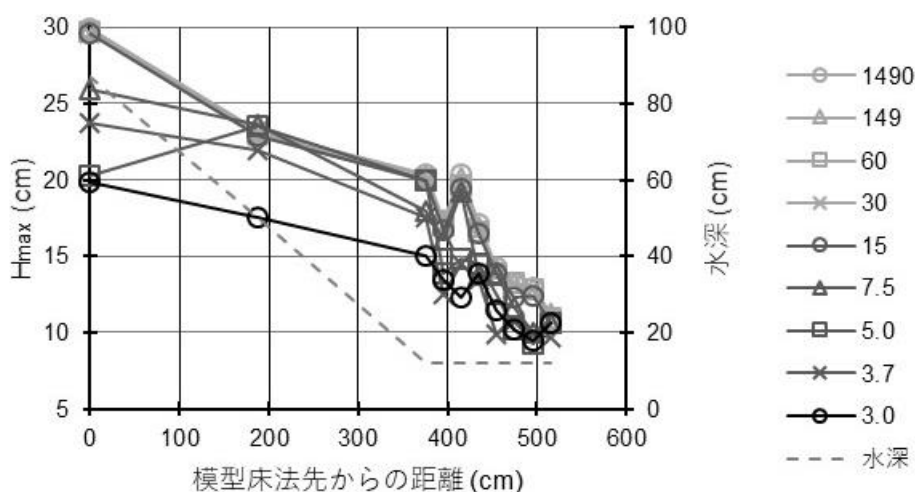
図 3-10 および図 3-11 は最高波高と有義波高の空間分布である。凡例の数値は有義波周期に対する解析データ間隔の周期分割数である。

いずれの周期分割数においても、水深が小さくなるにしたがって波高が小さくなること、浅くなった後の水平床上で波の進行とともに波高が徐々に小さくなる傾向は一致している。最高波高 H_{max} は周期分割数 1490 から 15 は波高解析結果がほぼ同じであるが、7.5 以下は最高波高の値が小さい。有義波高 $H_{1/3}$ は水深が大きい横軸 0 cm の地点（模型床法先）では、周期分割数 1490 から 15 はほぼ同じ値であるが、7.5 以下は波高解析結果が大きくなっている。横軸が 395 cm の模型床法肩地点の有義波高は、周期分割数 1490 から 15 はほぼ同じ値であるが、7.5 以下は小さくなっている。

図 3-12 および図 3-13 は最高波周期と有義波周期の空間分布である。凡例の数値は有義波周期に対する解析データ間隔の周期分割数である。

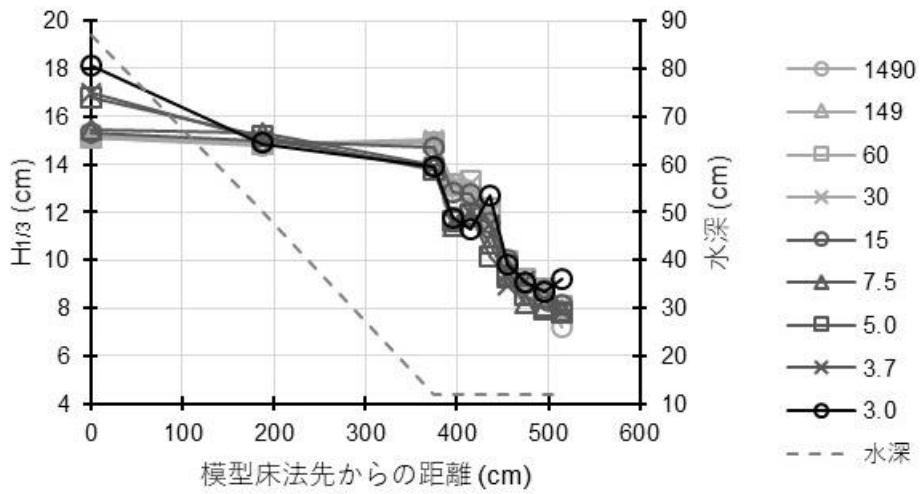
周期分割数 1490 から 15 は最高波周期の値が水深や水平床上での波の進行によらずほぼ一定であるが、周期分割数 7.5 以下は周期解析結果が長く、場所により周期解析結果が異なる。有義波周期は周期分割数 1490 から 7.5 は水深や水平床上での波の進行によらずほぼ一定であるが、5.0 以下は周期解析結果が長くなっている。

以上より、波高と周期を解析するために水位データを測定する場合には、有義波周期の 1/15 より細かい時間間隔で収録する必要がある。ただし、データ収録間隔を細かくしすぎるとファイルサイズが無駄に大きくなってしまう。また、容量式波高計など、水位変動を測定する計測機器は応答性があまり高くないので、0.001 s 間隔などの細かい時間間隔で収録する必要がない。したがって、波高と周期を解析するために測定する水位データ収録の時間間隔は、有義波周期の 1/30～1/15 程度が適切であると言える。



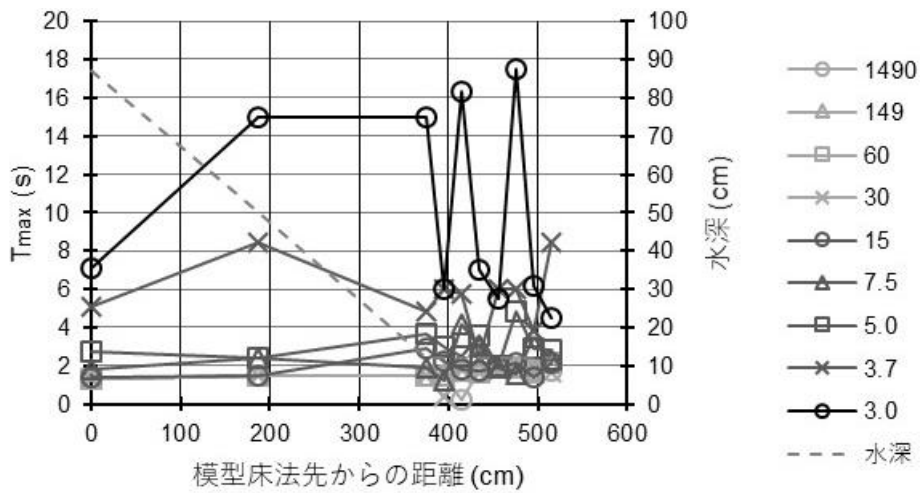
(凡例の数値は解析データ間隔の周期分割数)

図 3-10 最高波高の空間分布



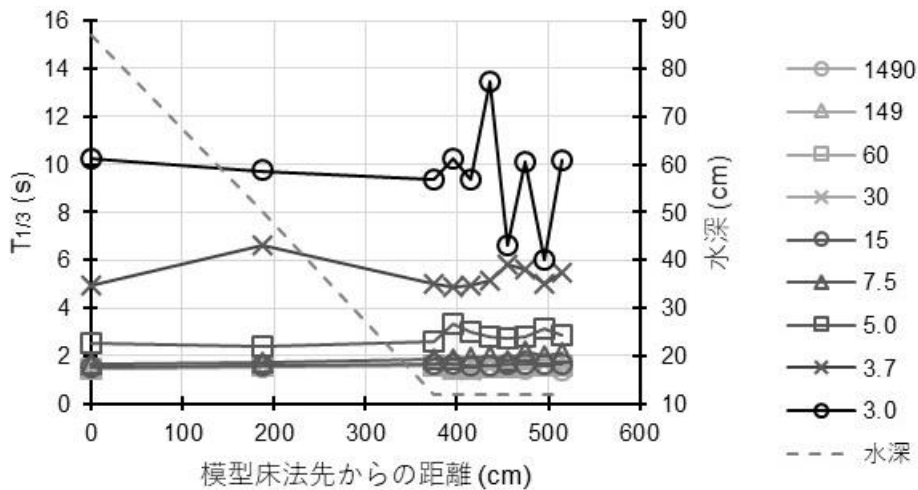
(凡例の数値は解析データ間隔の周期分割数)

図 3-11 有義波高の空間分布



(凡例の数値は解析データ間隔の周期分割数)

図 3-12 最高波周期の空間分布



(凡例の数値は解析データ間隔の周期分割数)

図 3-13 有義波周期の空間分布

図 3-14 から図 3-16 に、波高の出現頻度分布を示す。横軸の H/H_{bar} は 1 波ごとの波高を平均波高で除した値である。

周期分割数 1490 の出現頻度分布をみると、 H/H_{bar} が 3.2~3.4 の範囲に 1 回の出現が見られる。図 3-17 に示す 4s 付近の波であるが、ノイズによるものではない。水位データ収録時間間隔の周期分割数を小さくすると、 H/H_{bar} の大きい側と小さい側がなくなり、分布幅が狭まる。この観点からもある程度の周期分割数の細かさが必要である。ただし、必要以上に周期分割数を細かくすると収録データの容量が大きくなり、取り扱いしにくくなる。したがって、先の検討と同様に水位データ収録時間間隔の周期分割数は有義波周期の 1/30~1/15 が適切であると言える。

なお、長周期波実験の場合、例えば現地の周期が 100 s で模型縮尺が 1/50 とすると模型周期が 14.1 s である。これを 100 波収録すると収録時間は 1,410 s であり、サンプリング間隔を 0.1 s としてもデータ数は 14,100 データで済む。したがって周期分割数は 140 程度と不規則波に比べてやや細くなるが、長周期波実験の場合には、周期分割数を気にせずに 0.1 s 程度の時間間隔にすると良い。

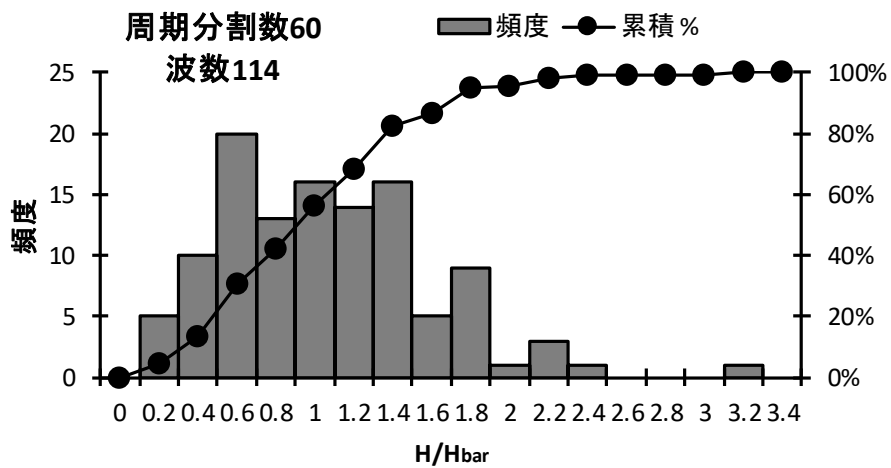
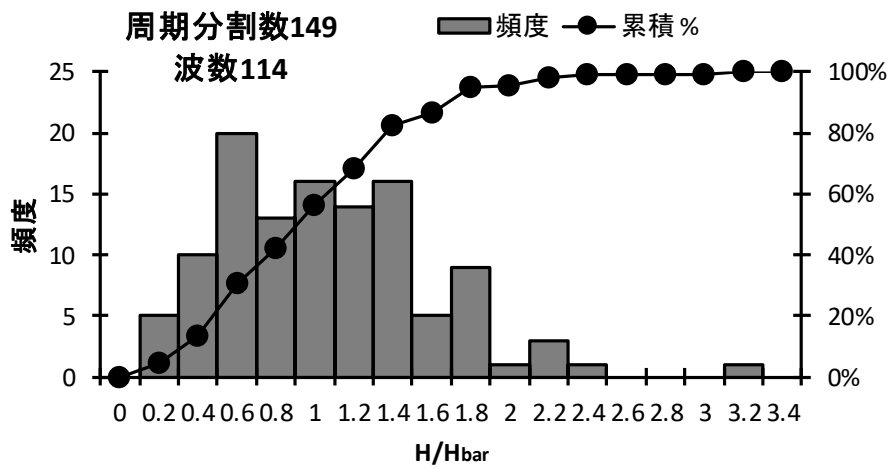
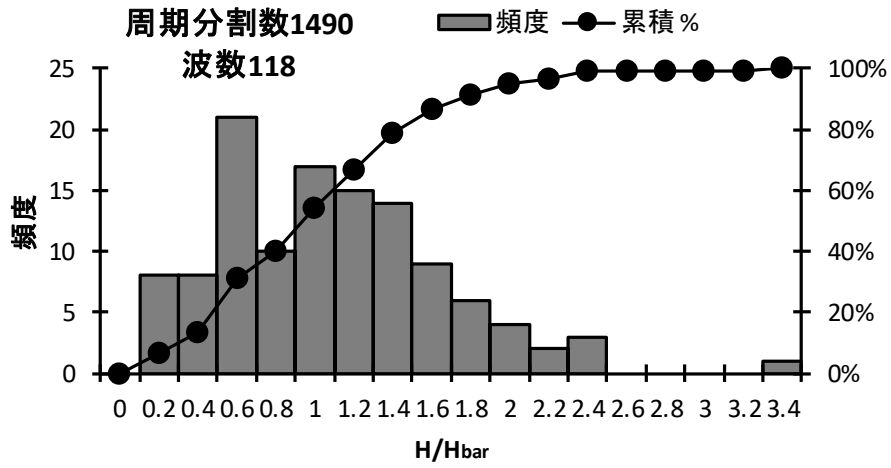


図 3-14 相対波高の出現頻度分布 (周期分割数 1490~60)

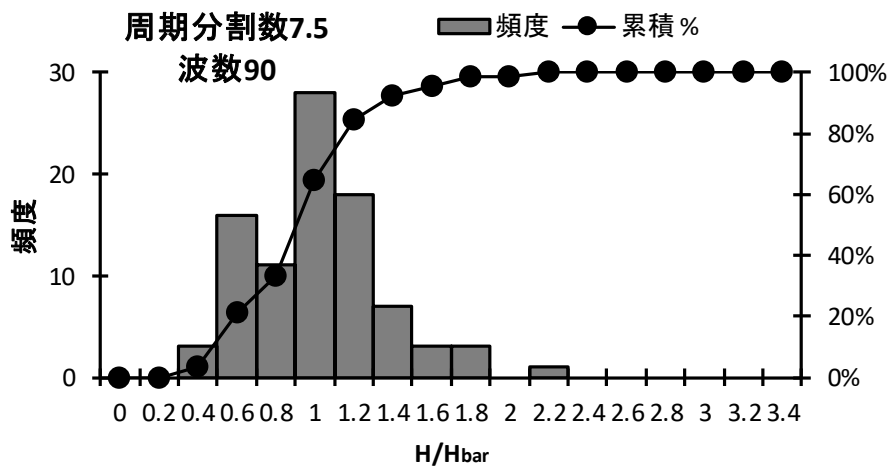
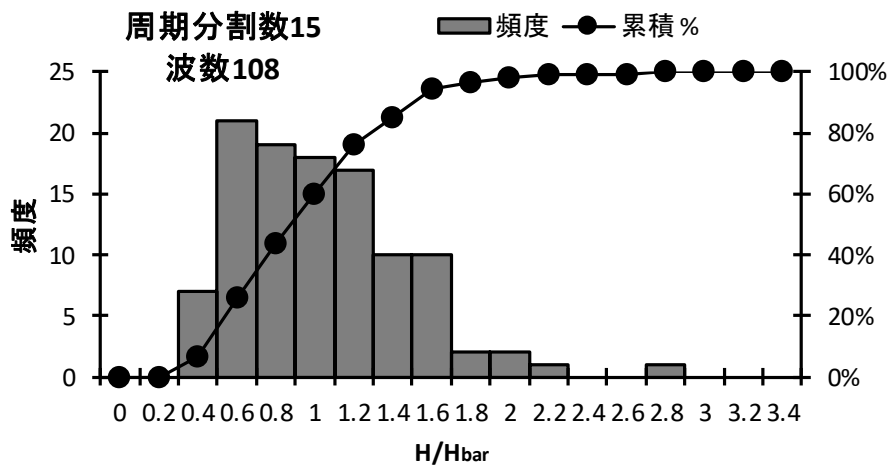
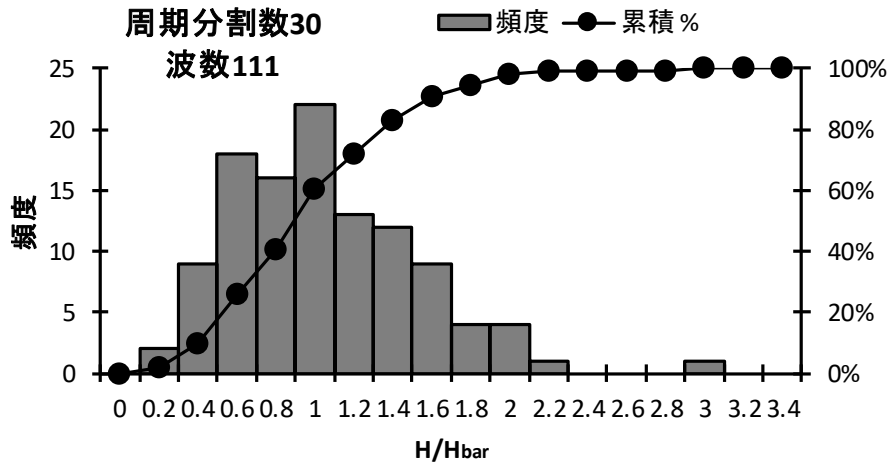


図 3-15 相对波高の出現頻度分布 (周期分割数 30~7.5)

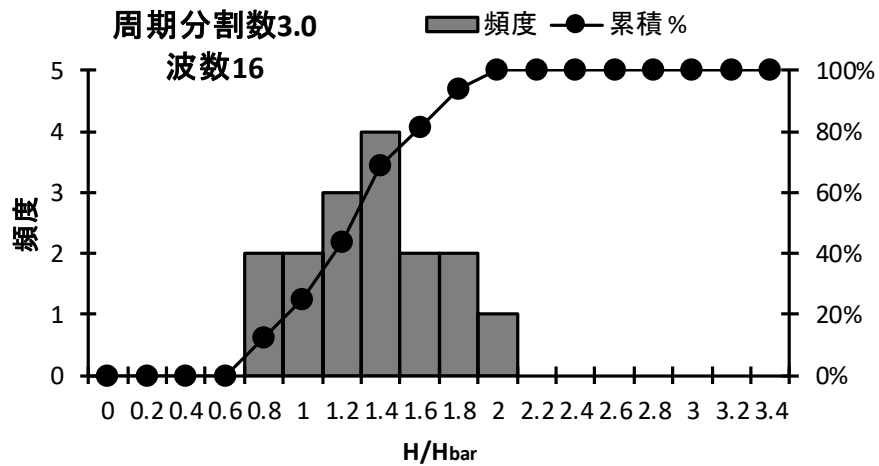
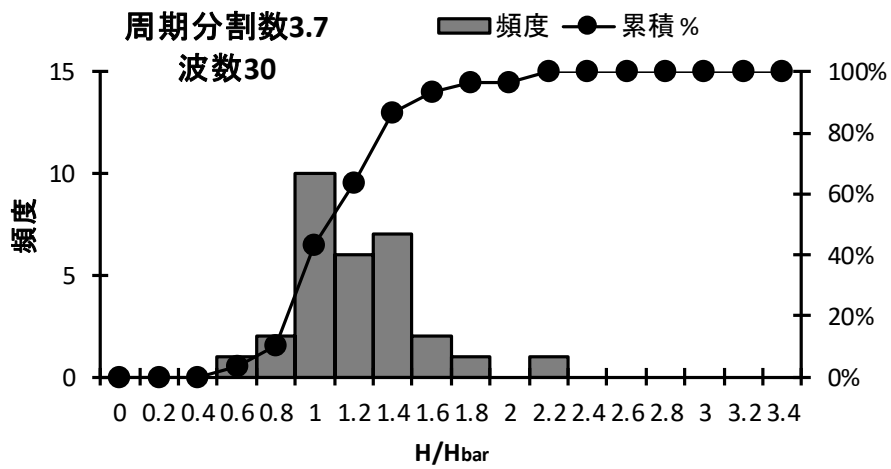
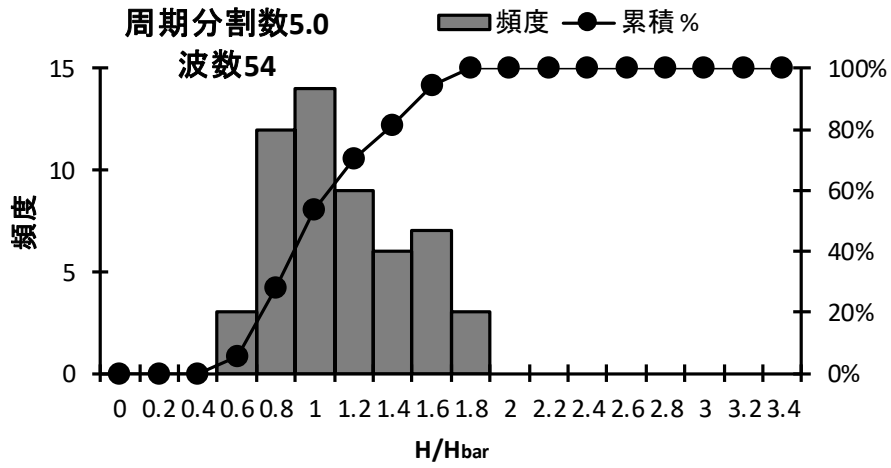
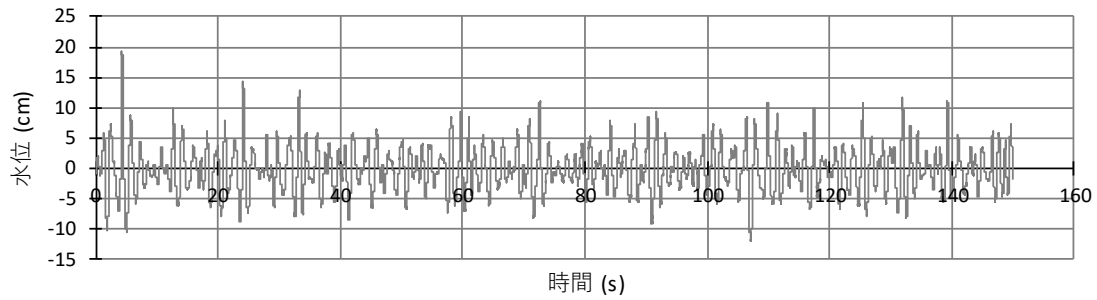
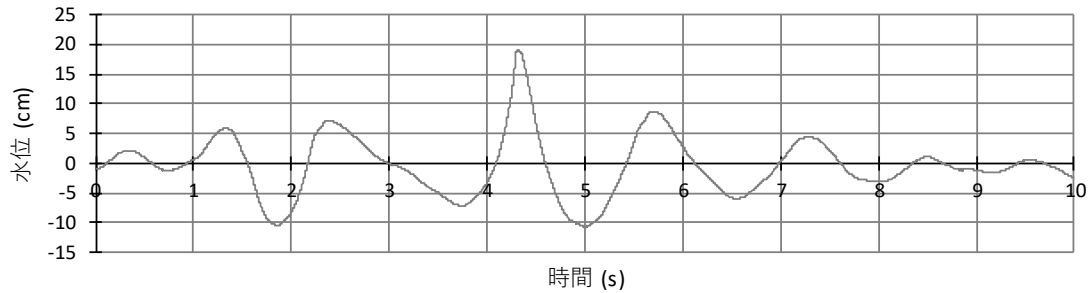


図 3-16 相対波高の出現頻度分布 (周期分割数 5.0~3.0)



(1) 全区間



(2) 最高波高付近

図 3-17 解析対象データ

2) 干出部における水位測定

防波堤や護岸の天端上、斜面模型の遡上域、海岸堤防の天端上など、干出と水没を繰り返すような地点で水位測定を行う場合がある。その場合に、図 3-18 (a) のように容量式波高計を模型表面に接触させて設置しても、水深が支持棒の太さより小さいような場合には、水深を正しく測定することができない。また、支持棒の横向き部分が水流を乱す影響が大きく現れる。このような干出部における水位測定を正確に行うために、図 3-18 (b) に示すように模型に溝を掘って水をため、そこに容量式波高計を差し込むことで、模型表面からの水位変化を正しく得ることができる。模型表面の溝の影響が大きい場合には、容量線と支持棒の部分を残して溝をふさぐなどの工夫を行う。

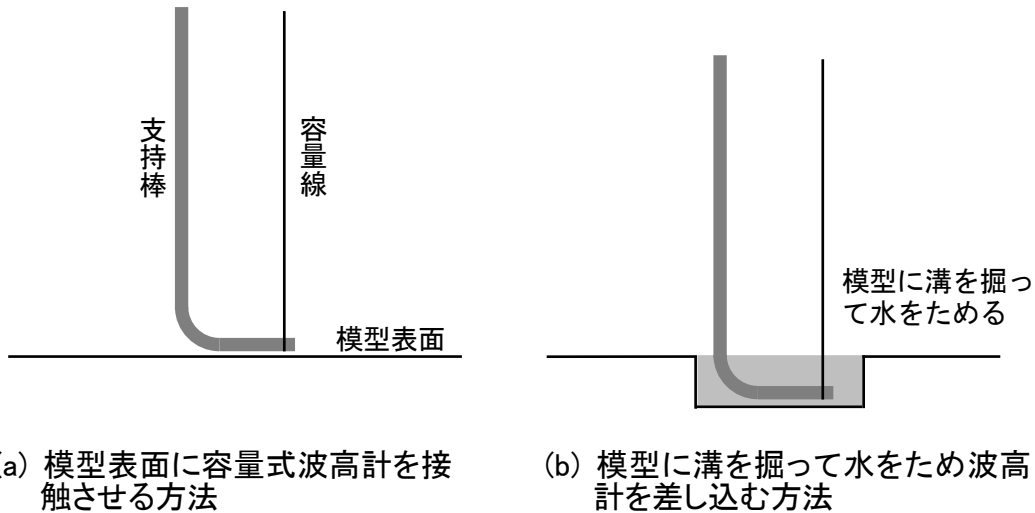


図 3-18 干出部での水位測定方法

3) 容量式波高計の測定精度と較正

容量式波高計は、短いものでは 10 cm、長いものでは 2 m など、さまざまな長さの製品がある。一般的な容量式波高計は出力電圧が $\pm 2.5\text{V}$ であるため、電圧の振幅は 5 V である。ここでは、容量式波高計のセンサー部分を検出器、電源装置などがついている箱を本体と称する。本体に内蔵の電圧計の精度（分解能）が 1 mV とすると、1 mV あたりの容量線の長さが容量式波高計の分解能であると考えられる。表 3-7 に容量線の長さと 1 mV あたりの容量線の長さを示す。容量線の長さが 10 cm では 1 mV あたりの容量線の長さが 0.02 mm であるが、容量線の長さ 200 cm では 0.4 mm である。水位変動 1 cm あたりの電圧の変化と考えると、表 3-7 の右端列のとおりで、容量線の長さが 10 cm では 0.5 V の電圧変化があるが、容量線の長さが 200 cm では 0.025 V しか変化しない。これを考慮して、水理模型実験で作用させる波高や実験によって生じる水位変化の大きさに合わせて、適切な長さの容量式波高計を選定する。

表 3-7 容量式波高計の長さと電圧精度

容量線の長さ (cm)	出力電圧 (V)	cm/V	cm/mV	mm/mV	V/cm
200	5	40	0.040	0.400	0.025
100	5	20	0.020	0.200	0.050
60	5	12	0.012	0.120	0.083
50	5	10	0.010	0.100	0.100
40	5	8	0.008	0.080	0.125
30	5	6	0.006	0.060	0.167
20	5	4	0.004	0.040	0.250
10	5	2	0.002	0.020	0.500

容量式波高計は、使用前に水位変化と出力電圧の変化の関係を把握する較正を実施する。具体的には、静止水位の状態では容量式波高計を上下に動かし、出力電圧の変化を確認する。このときの波高計の変動幅は、実験の波高に合わせて設定する。例えば、最高波高が 30 cm であれば、長さが 50 cm の検出器を選定し、40 cm 幅で較正をとる。最高波高が数 cm であれば、長さが 10 cm の検出器を選定し、5 cm 幅で較正をとる。

4) 計測機器の応答性

波浪に関する水理模型実験において、波浪の作用状態に対する計測機器の応答性を認識しておくことは、測定結果を正しく評価するうえで重要である。そこで、砕波状態の異なる波高条件の下で、容量式波高計と小型波圧計の測定データを比較して、計測機器の応答性を確認する。

実験断面は、高さ 0.75 m の 1:5 勾配斜面の後ろに水平床を設置した断面である。この地形条件に造波信号の入力周期 1.50 s の規則波を、造波板の振幅を変更して作用させた。水平床における水深は 12.5 cm である。反射波の影響が現れないように造波は造波板振幅の緩起動も含めて 10 数波で停止した。

図 3-19 に示すように、1:5 勾配斜面の法肩位置に容量式波高計と小型圧力計を設置した。小型圧力計は受圧面が直径 6 mm の円形である。これを幅が 10 mm で高さが 153 mm の金属板に高さ方向に 50 mm 間隔で取り付けた。波圧計を取り付けた金属板は幅がわずかに 10 mm なので、この板から反射波は発生しないに等しい。波高計と圧力計による測定の他に、波作用の状況を高速カメラで撮影した。これらの計測機器やカメラ等は表 3-8 のとおりである。

以上のように、規則波の造波を 10 波程度で終了する有効波の実験を実施し、水路終端からの反射波および造波板からの再反射の影響が含まれない状態で、解析対象の波を波形データやビデオ画像から選定できるようにした。

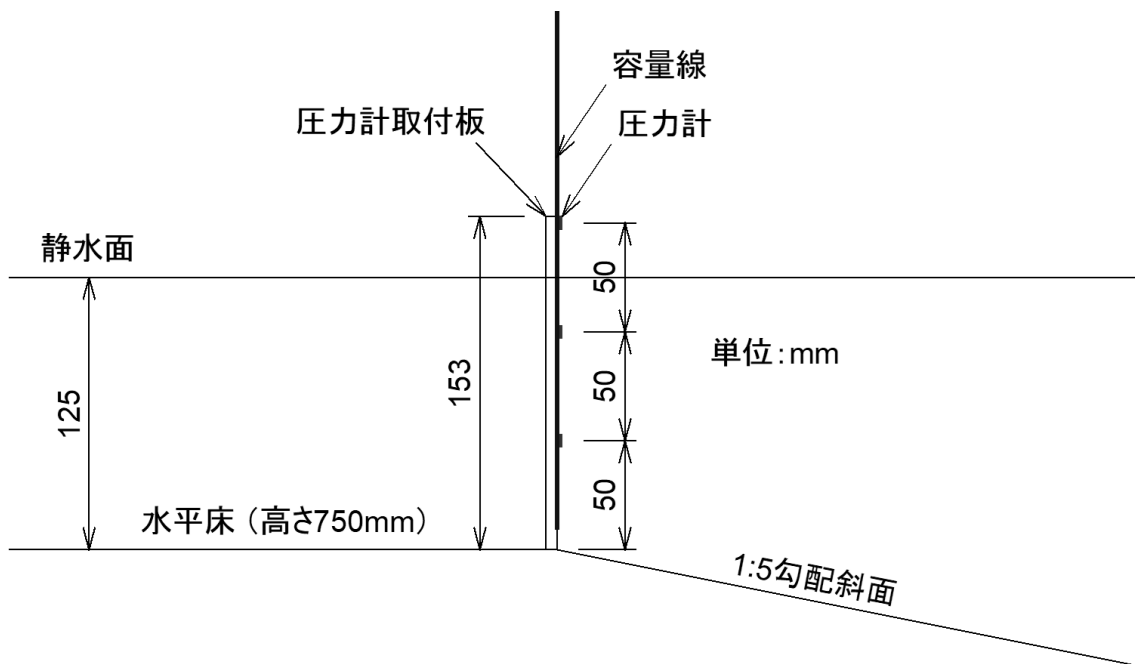


図 3-19 計測機器の応答性を確認した実験における計測機器配置（模型床法肩付近拡大）

表 3-8 計測機器の応答性に適用した計測機器

計測機器種類	計測機器会社	計測機器型番
容量式波高計	株式会社ケネック	検出部：CHT4-50 増幅器：CH-406A
小型圧力計	株式会社エス・エス・ケイ	検出部：P306-01 増幅器：M0112
高速カメラ	株式会社ディテクト	本体：HAS-L1 キャプチャカード：DPX-CLM100
	Kowa Optical Products	レンズ：LM5NCR

容量式波高計と小型波圧計のデータは、1000 Hz の高速サンプリングでデータ収録 PC にデータを収録した。高速カメラの画像データも、1000 Hz で画像データ保存用 PC に収録した。データ収録用 PC と画像データ保存用 PC の同期をとるために、トリガースイッチを ON にすると乾電池の電圧がデータ収録用 PC に保存され、同時に LED ライトを点灯させてトリガースイッチ ON の時刻が画像データでもわかるようにした。容量式波高計およびトリガー電圧の時系列データと、LED ライト点灯前後の画像データを図 3-20 および図 3-21 に示す。トリガー電圧が上昇した時刻と、画像データで LED ライトが点灯した時刻が同時であるものとして、両者の同期をとった。

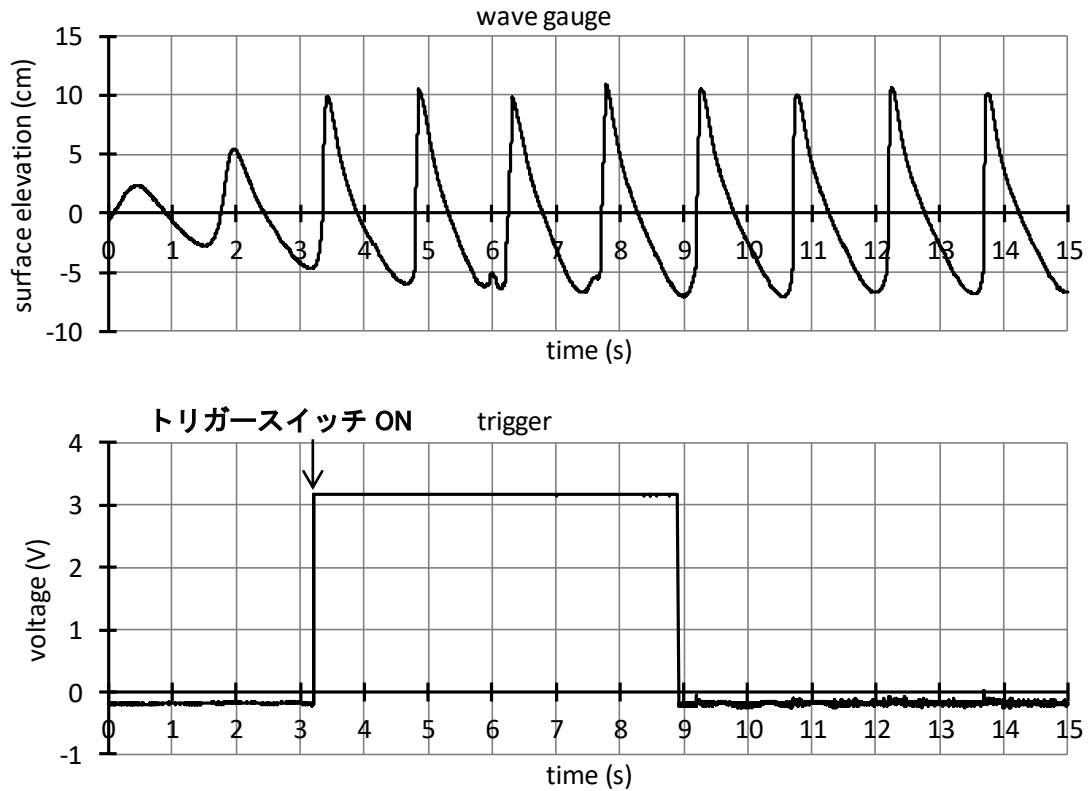
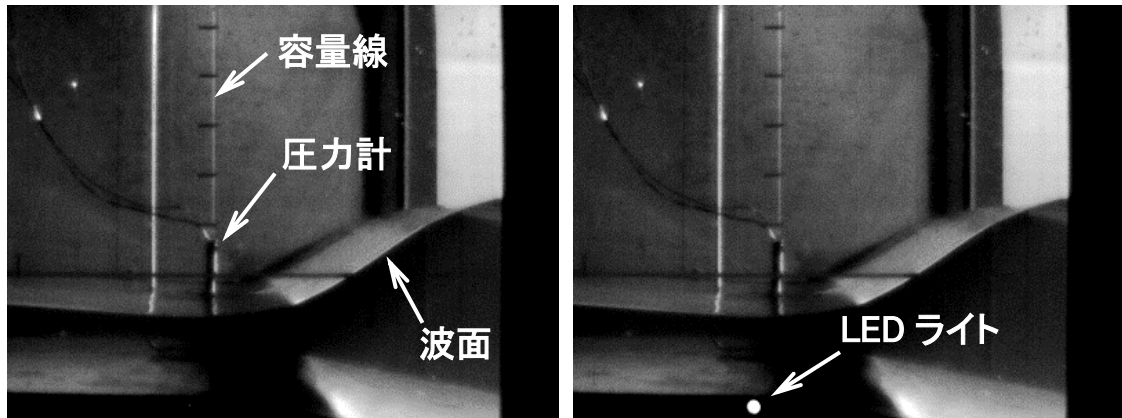


図 3-20 データ収録パソコンに収録した水位とトリガー電圧の時系列データ



① 3.209 s の静止画像（点灯直前）

② 画像①の 0.001 s 後の静止画像

図 3-21 トリガー電圧と同時点等の LED ライト

造波信号の入力周期 1.50 s で造波板振幅を変更して発生させた波の、模型床法肩位置における砕波状態は、非砕波条件、非砕波限界条件、直前砕波条件、砕波突入条件、砕波後条件、の 5 種類である。

【非砕波条件】

「非砕波条件」は、十分に余裕をもって砕波を生じない条件と定義する。

非砕波条件を容量式波高計で測定した水位の時系列データを図 3-22 に示す。図 3-23 は 1000 Hz (0.001 s 間隔) の画像データから抽出した静止画像である。図 3-23 に示してある時間は図 3-22 の横軸に対応する。6 s 付近の波は、造波機の緩起動が終わった後の安定した波高の 1 波目である。図 3-23 を見ると、実験波は砕波を生じず、波の変形も少ない状態で模型床法肩を通過していることがわかる。図 3-23 の中に静止水位 (写真中の水平の白線) からの水面の高さを記入してある。この水位と容量式波高計の計測値との比較については後述する。

図 3-24 に、容量式波高計と小型圧力計の時系列波形を示す。この波形は、図 3-23 に示した画像データの時刻付近を拡大してある。また、図 3-24 の中に示した縦線は、図 3-23 の 4 枚の画像データの時刻を示す。小型圧力計の値は波作用開始前の静水状態からの変化量であり、初期の静水圧を含んでいない。容量式波高計の波の谷と峰の時刻は、画像データの時刻とおおむね一致している。図 3-24 の最上段は容量式波高計による水位の時系列で、2 段目から 4 段目は小型圧力計の時系列である。容量式波高計と小型圧力計の波の谷と峰の時刻は一致している。

図 3-24 の圧力計の値は gf/cm^2 の単位で示してある。水深 1 cm の静水圧が 1 gf/cm^2 であるため、容量式波高計と小型圧力計の値が一致していれば、圧力計で検出された圧力が静水圧と一致していると言える。容量式波高計の水位のピーク値は約 5 cm である。波圧計のピーク値は、上段は 5 cm よりやや小さく、中段は 5 cm に一致しており、下段は 5 cm よりやや大きい。

【非砕波限界条件】

「非砕波限界条件」は、砕波を生じない最大の波高と定義する。

図 3-25 は非砕波限界条件を容量式波高計で測定した水位の時系列データで、図 3-26 は画像データから抽出した静止画像である。画像データを見ると、模型床法肩位置では砕波を生じていないが波面が切り立った状態となっており、模型床法肩を通過直後に砕波を生じている。容量式波高計の時系列データを見ると、波の谷から峰にかけて急激に水位が上昇している。

図 3-27 に容量式波高計と小型圧力計の時系列波形を示す。この波形は図 3-26 に示した画像データの時刻付近を示してある。画像データの 5.109 s には模型床法先に切り立った波形が到達している。容量式波高計の時系列データを見ると、切り立った波の到達を時刻どおりにとらえているように見える。しかし、小型圧力計時系列データの立ち上がりは 5.109 s より早いので、模型床法肩位置への波の到達時刻は小型圧力計のデータが立ち上がった時刻であると考えられる。小型圧力計の値の立ち上がりと比べると、容量式波高計の値の立ち上がりの勾配は緩い。すなわち、容量式波高計の応答性は小型圧力計ほど高くないことがわかる。

非砕波限界条件の上段圧力計の値が立ち上がる時刻には衝撃的な波圧が記録さ

れており、その値は容量式波高計の水位の最高値と比べて大きいことから、静水圧より大きな圧力が作用していることがわかる。

【直前砕波条件】

「直前砕波条件」は、検討対象位置のすぐ沖側で砕波を生じる条件と定義する。

図 3-28 は直前砕波条件を容量式波高計で測定した水位の時系列データで、図 3-29 は画像データから抽出した静止画像である。画像データを見ると、模型床法肩位置の直前で砕波した波が模型床法肩に作用している様子がわかる。6.262 s の画像データを見ると、模型床法肩位置では静止水位より低いところに波の谷の水面があり、静止水位より高いところに砕波して突入してきた水塊がある。

図 3-30 に容量式波高計と小型圧力計の時系列波形を示す。この波形は図 3-29 に示した画像データの時刻付近を示してある。15 s 間の波形を示した図 3-28 では容量式波高計の値が急激に立ち上がっているように見えるが、図 3-30 のように拡大してみると、容量式波高計のデータはやや時間をかけて上昇している。また、容量式波高計のデータからは、水塊が上下 2 層に分かれている状況はわからない。

図 3-30 の小型圧力計のデータを見ると、6.262 s には上段圧力計がすでに衝撃的な圧力を検出している。同時刻に下段圧力計のデータがすでに上昇していることから、下段圧力計も水没状態であることがわかる。しかし、中段圧力計はまだ圧力の上昇を検出していないことから、中段圧力計は気中に露出していることがわかる。したがって、複数の圧力計を使用することで、水塊が上下に分離している状態を把握することができる。

直前砕波条件の上段圧力計のピーク値は約 40 gf/cm^2 であり、容量式波高計のピーク値である約 10 cm の 4 倍に相当する。したがって静水圧の約 4 倍の衝撃的な圧力が作用していることがわかる。

【砕波突入条件】

「砕波突入条件」は、直前砕波条件より若干沖側で砕波を生じ、検討対象位置に水塊が突入してくる条件と定義する。

図 3-31 は砕波突入条件を容量式波高計で測定した水位の時系列データで、図 3-32 は画像データから抽出した静止画像である。画像データを見ると、直前砕波条件よりも若干沖側で砕波した波が、模型床法肩に突入している様子がわかる。6.194 s の画像データを見ると、模型床法肩位置では静止水位より低いところに波の谷の水面があり、静止水位より高いところに砕波して突入してきた水塊がある。

図 3-33 に容量式波高計と小型圧力計の時系列波形を示す。この波形は図 3-32 に示した画像データの時刻付近を示してある。容量式波高計のデータは、図 3-30

に示した直前砕波条件よりやや時間をかけて上昇している。また、容量式波高計のデータからは、水塊が上下2層に分かれている状況はわからない。

図 3-33 の小型圧力計のデータを見ると、上段圧力計は 6.194 s と 6.347 s の中間付近で上段圧力計が反応していることから、その時刻には水塊が上下2層に分かれていることが確認できる。また、中段圧力計の値は 6.347 s に上昇していることは、画像データにおいて 6.347 s に中段波圧計の高さに波面が到達していることと時刻が一致している。このことから、小型圧力計は水圧の変化に対する応答性が非常に高いことがわかる。

【砕波後条件】

「砕波後条件」は、砕波突入条件より若干沖側で砕波し、砕波による水塊の突入が検討対象位置の直前で生じる条件と定義する。

図 3-34 は砕波後条件を容量式波高計で測定した水位の時系列データで、図 3-35 は画像データから抽出した静止画像である。画像データを見ると、模型床斜面上で砕波した波が模型床法肩より沖側で水面に突入したのちに、模型床法肩位置に到達している状況がわかる。4 枚の画像データは、いずれも波の谷と峰が分離した状態では法肩位置に作用していない。その代わりに、4.638 s と 4.776 s は上下の水塊の間に気泡を多く含んだ状態を生じていることがわかる。

図 3-36 に容量式波高計と小型圧力計の時系列波形を示す。この波形は図 3-35 に示した画像データの時刻付近を示してある。容量式波高計のデータは、3 個のピークを持った乱れた形状をしている。これは波の中に空気が混入している影響であると考えられる。空気が混入しているので、水深の定義が難しいが、容量式波高計のデータは少なくとも水面の高さを水位として時間どおりに検出することはできていない。別の表現をすれば、容量式波高計の水位データは、画像データの水面高さとは一致していない。容量式波高計のデータは大きな変動を生じており、模型床法肩位置の波作用状態が複雑であることが確認できる。

図 3-36 の小型圧力計のデータを見ると、下段圧力計が最初に反応し、中段、上段と圧力の検出が進んでいることは、実際の現象と一致している。圧力データの立ち上がりの鋭さは容量式波高計より急激であることから、容量式波高計の応答性は小型圧力計に劣ることがわかる。

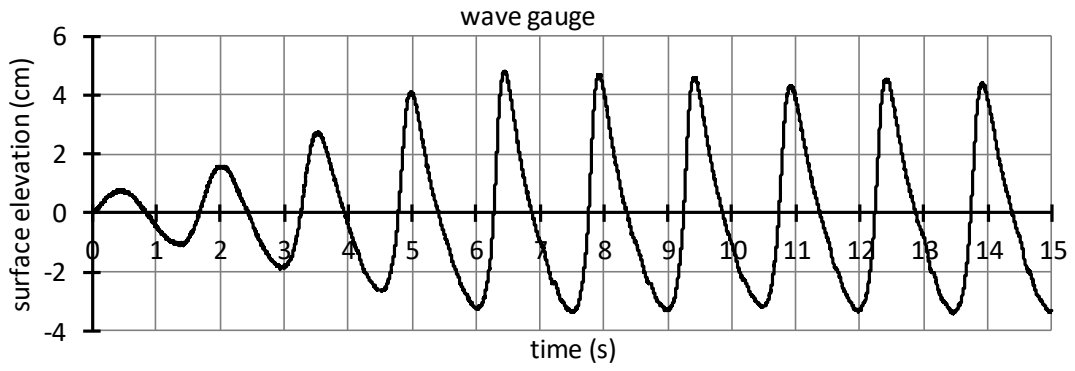


図 3-22 容量式波高計の時系列データ (非碎波条件)

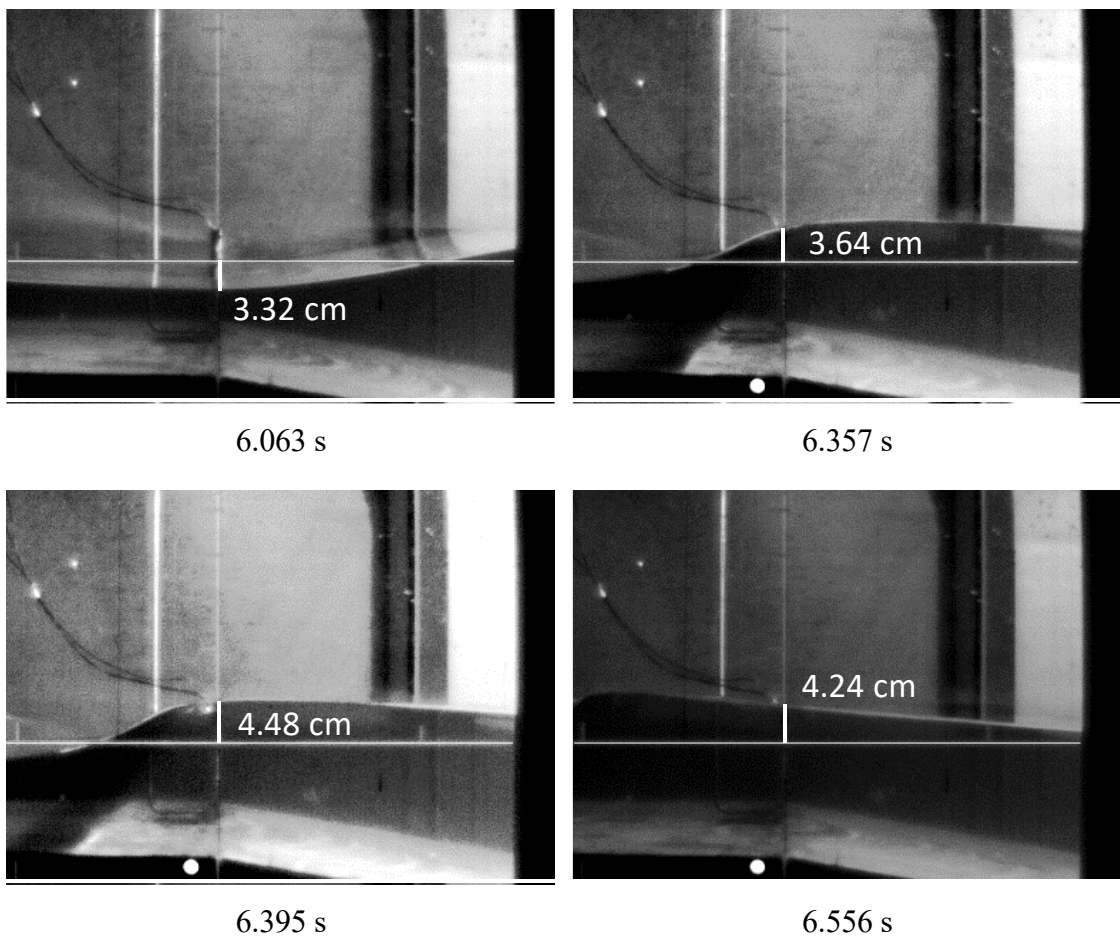
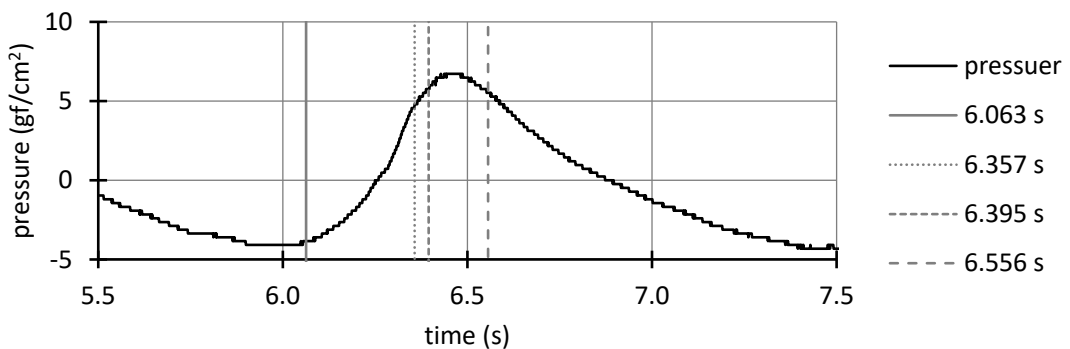
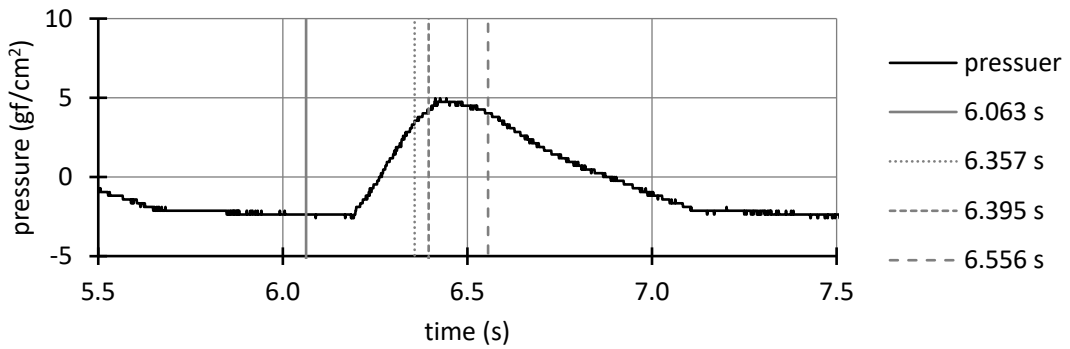
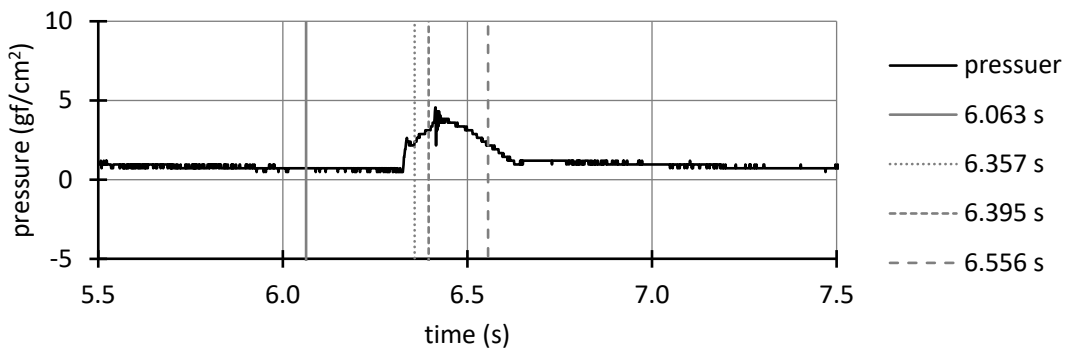
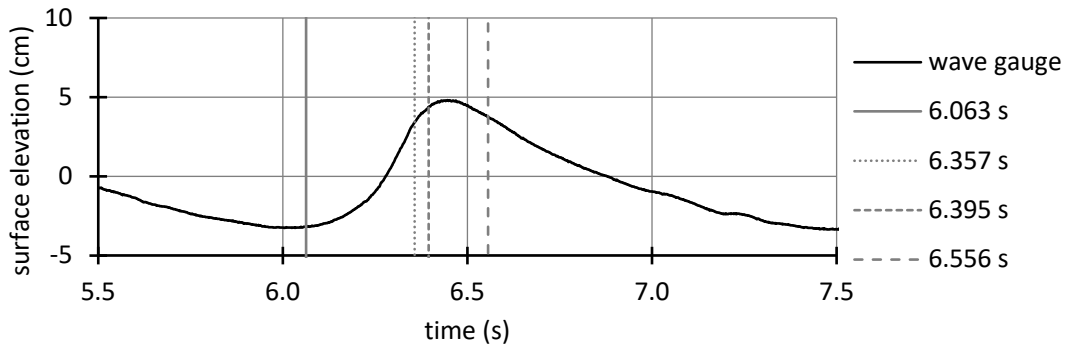


図 3-23 1000Hz の画像データから抽出した静止画像 (非碎波条件)



1 段目：容量式波高計，2 段目：上段圧力計，3 段目：中段圧力計，4 段目：下段圧力計

図 3-24 波高計と圧力計の時系列と静止画像の時刻（非碎波条件）

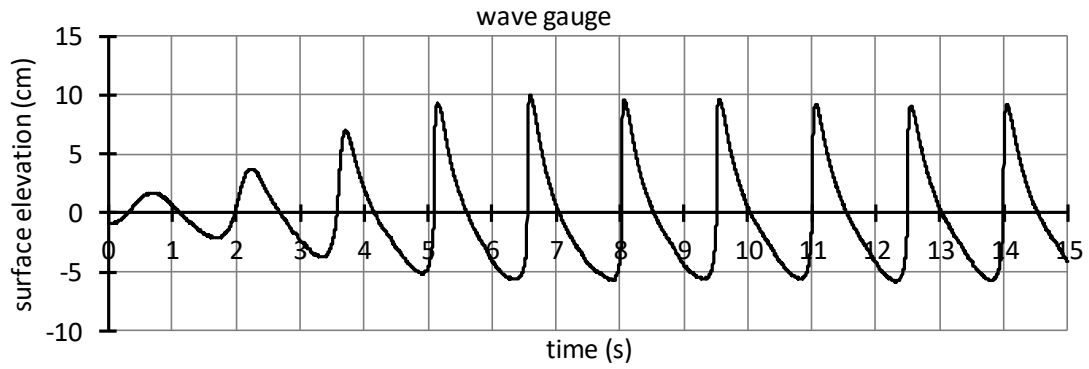


図 3-25 容量式波高計の時系列データ (非碎波限界条件)

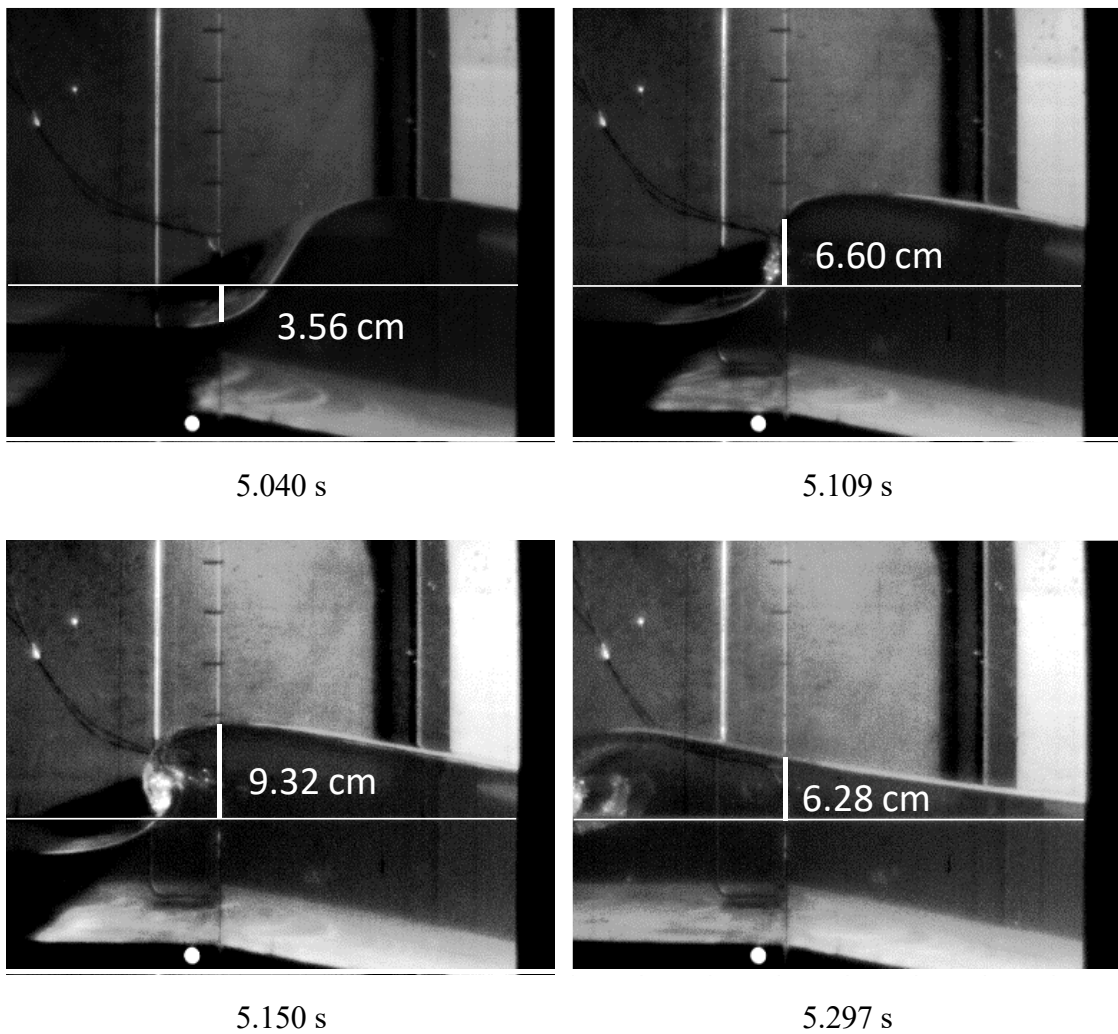
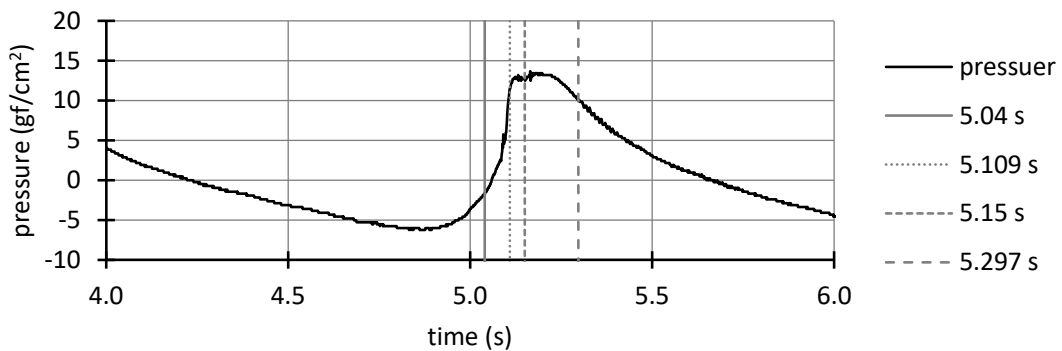
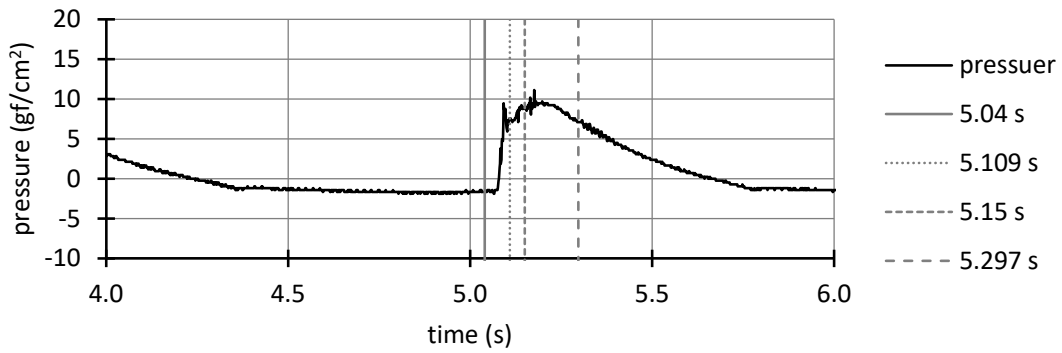
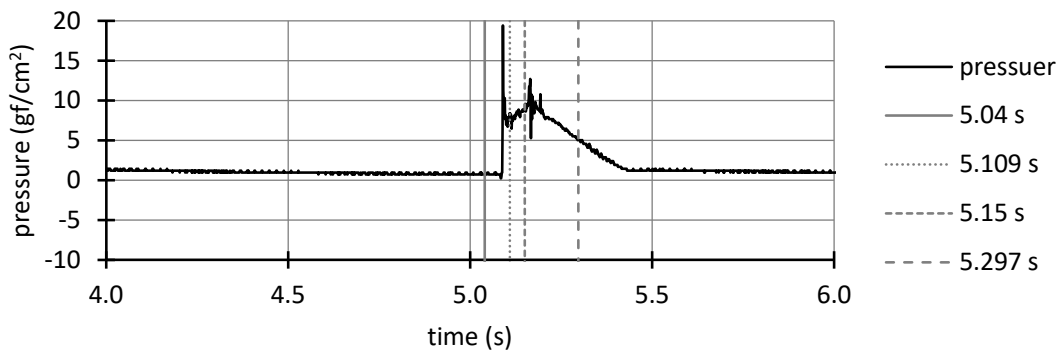
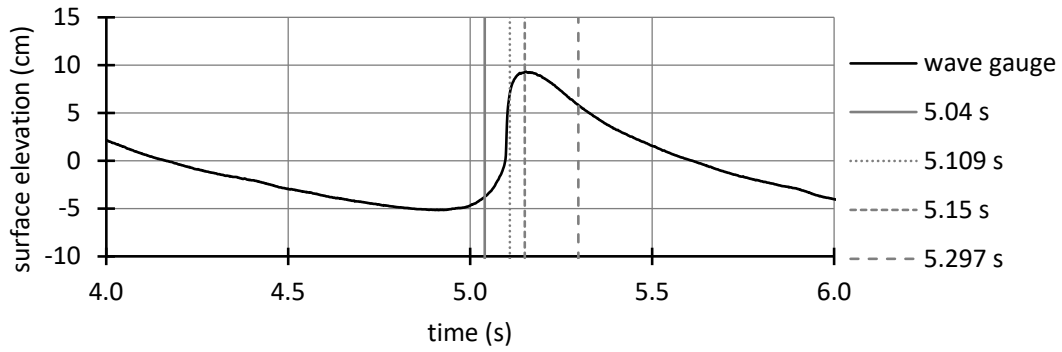


図 3-26 1000Hz の画像データから抽出した静止画像 (非碎波限界条件)



1 段目：容量式波高計，2 段目：上段圧力計，3 段目：中段圧力計，4 段目：下段圧力計

図 3-27 波高計と圧力計の時系列と静止画像の時刻（非砕波限界条件）

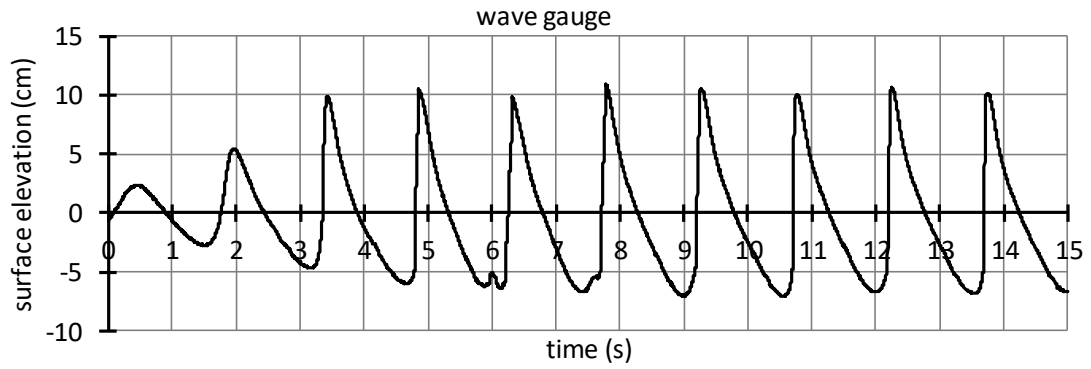


図 3-28 容量式波高計の時系列データ (直前砕波条件)

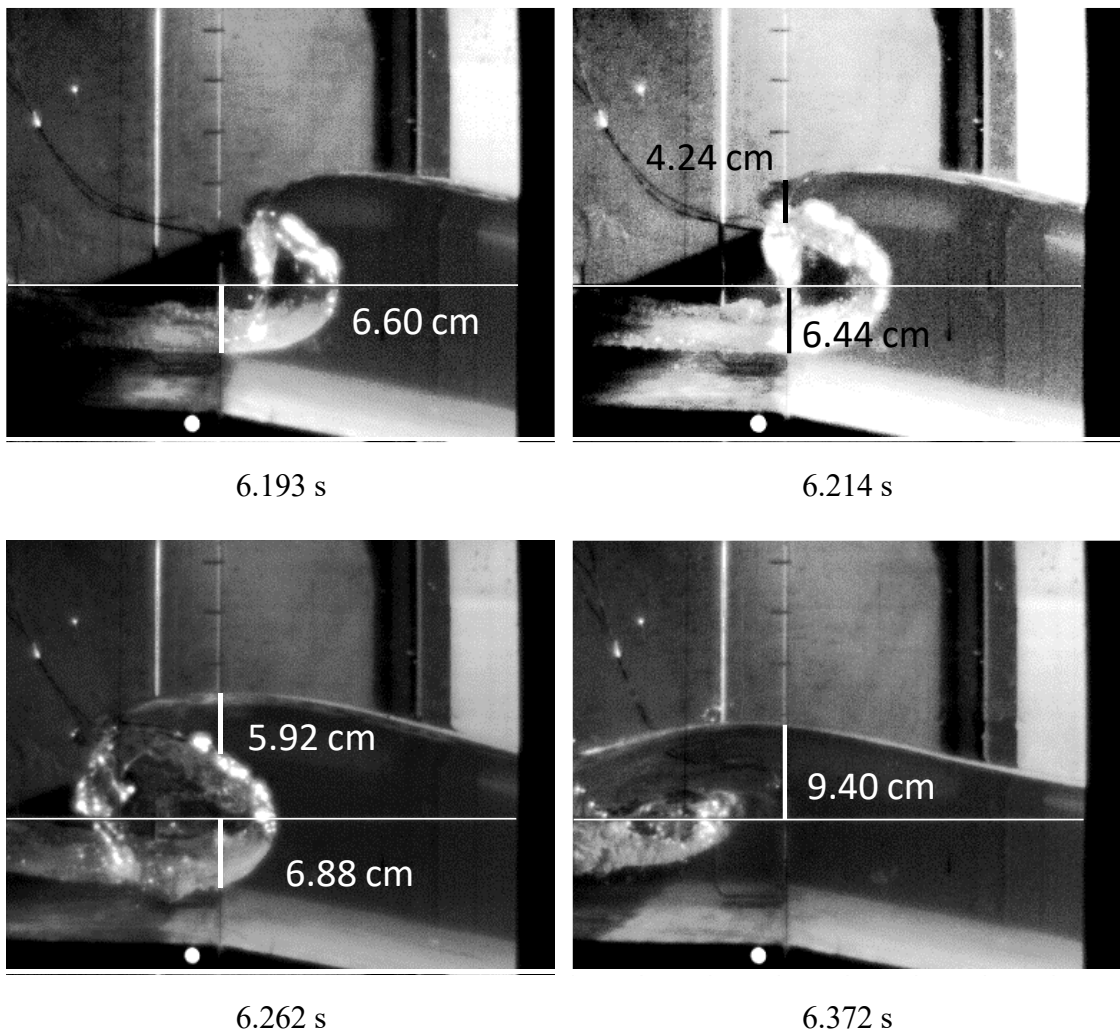
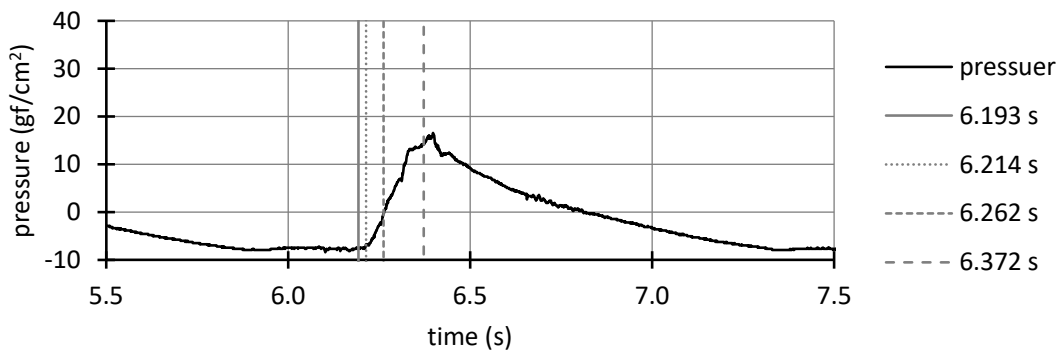
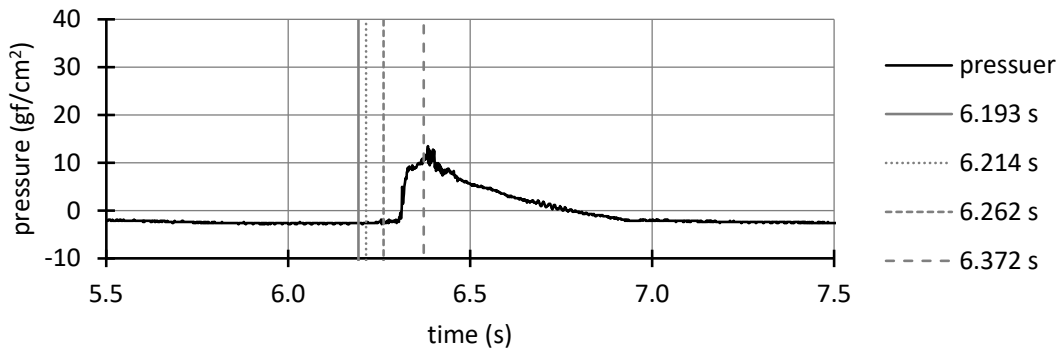
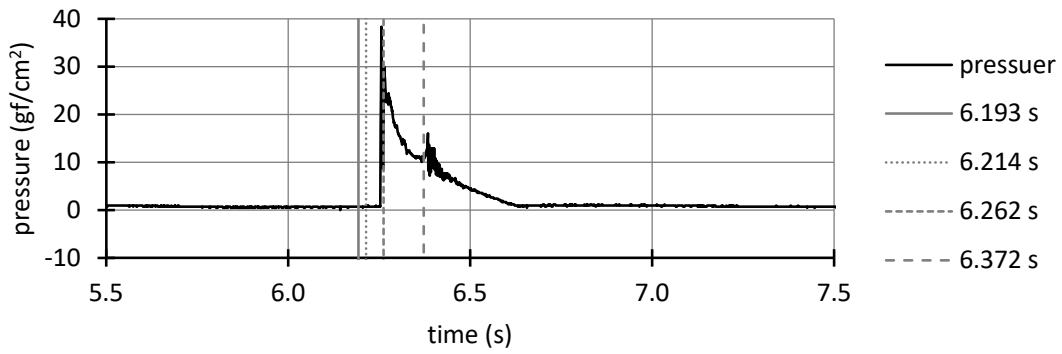
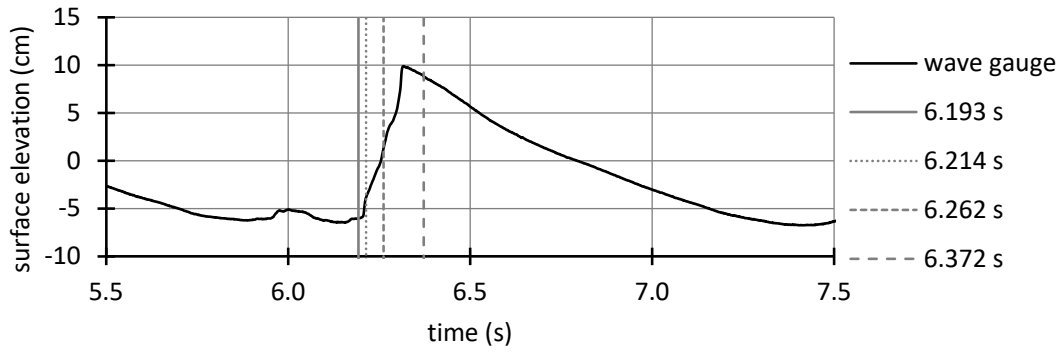


図 3-29 1000Hz の画像データから抽出した静止画像 (直前砕波条件)



1 段目：容量式波高計，2 段目：上段圧力計，3 段目：中段圧力計，4 段目：下段圧力計

図 3-30 波高計と圧力計の時系列と静止画像の時刻（直前砕波条件）

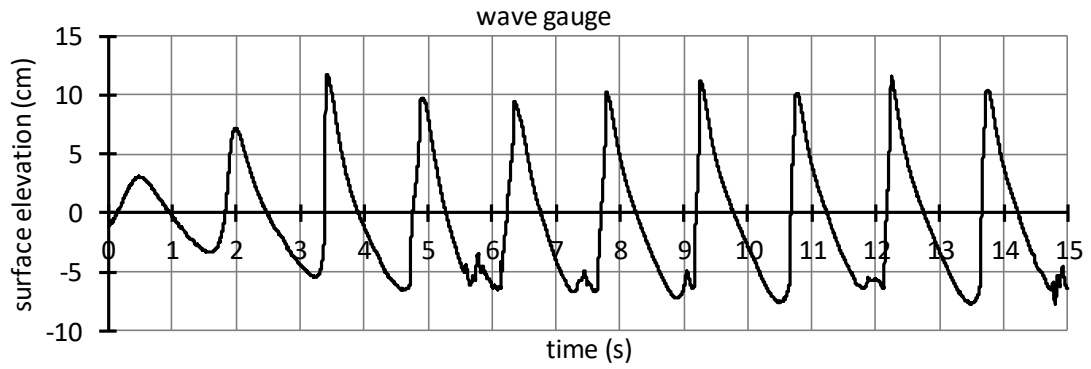


図 3-31 容量式波高計の時系列データ (碎波突入条件)

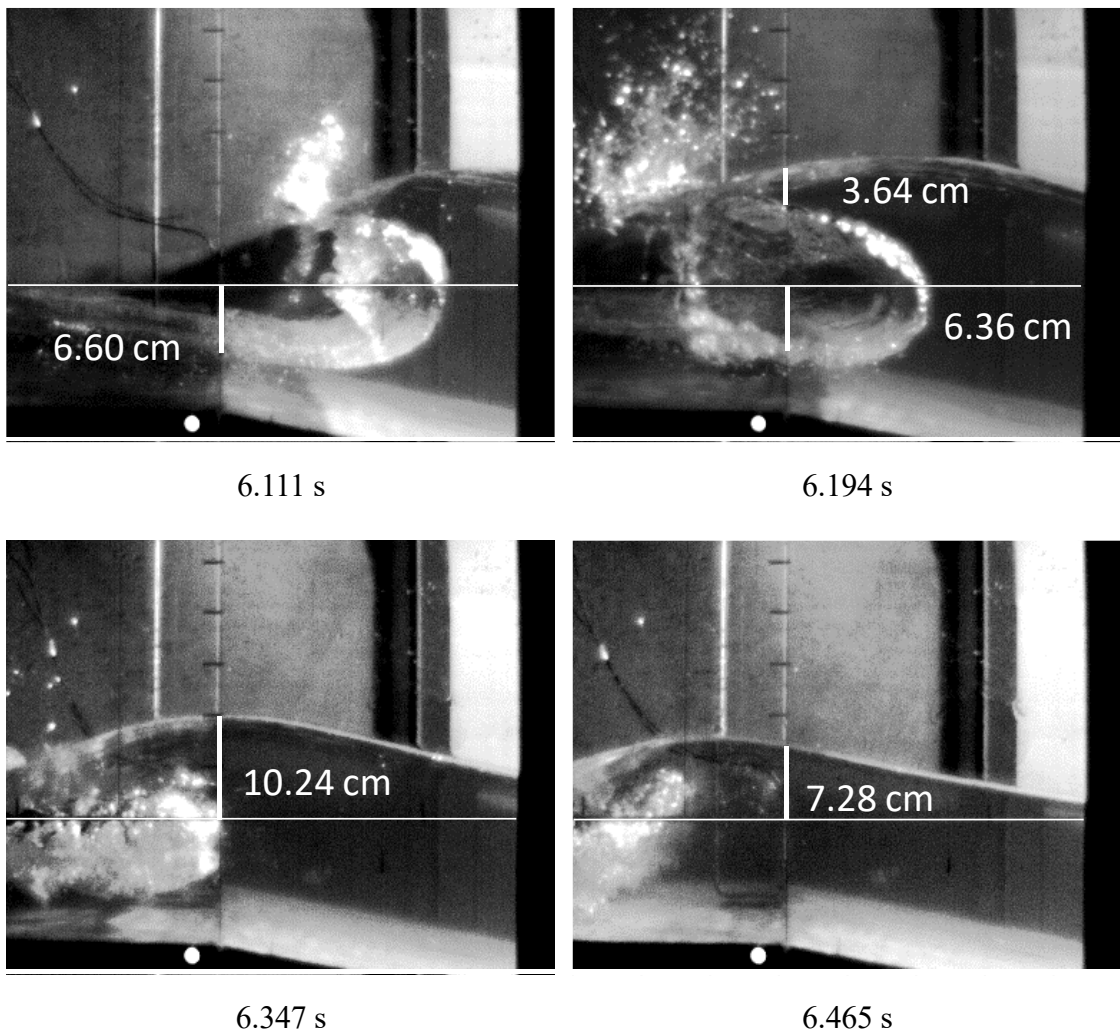
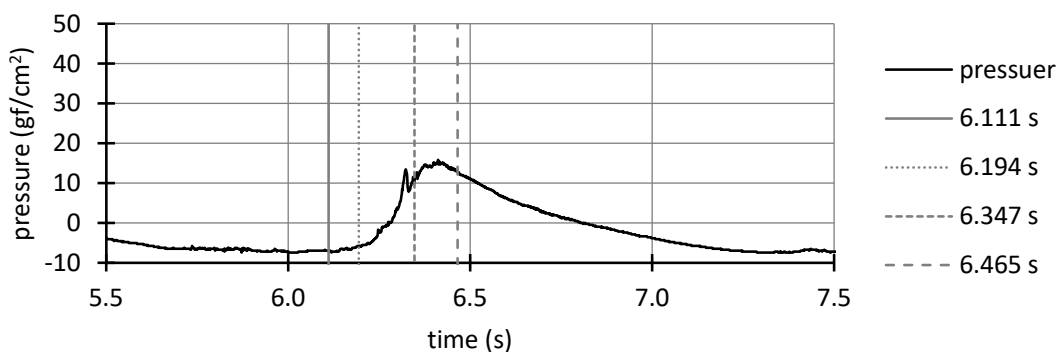
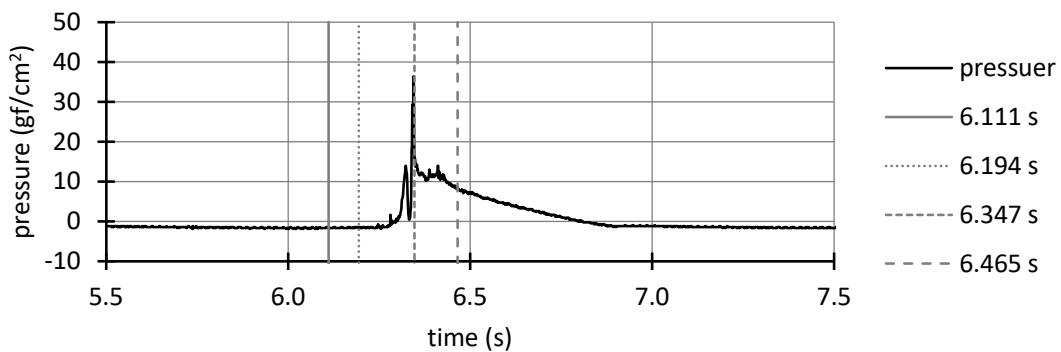
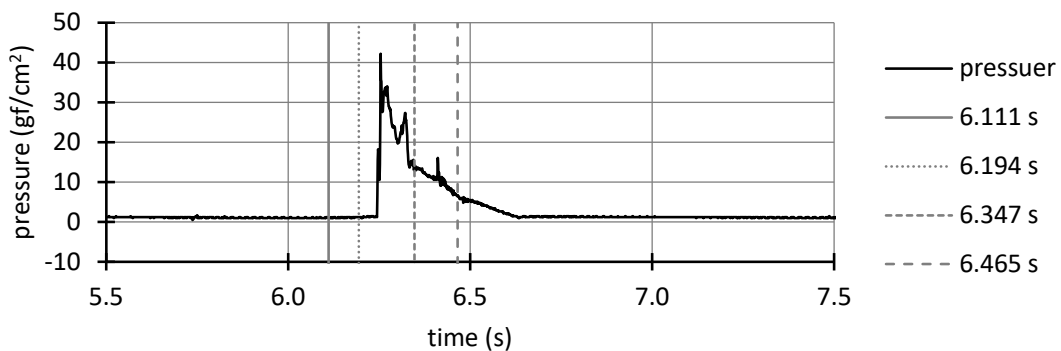
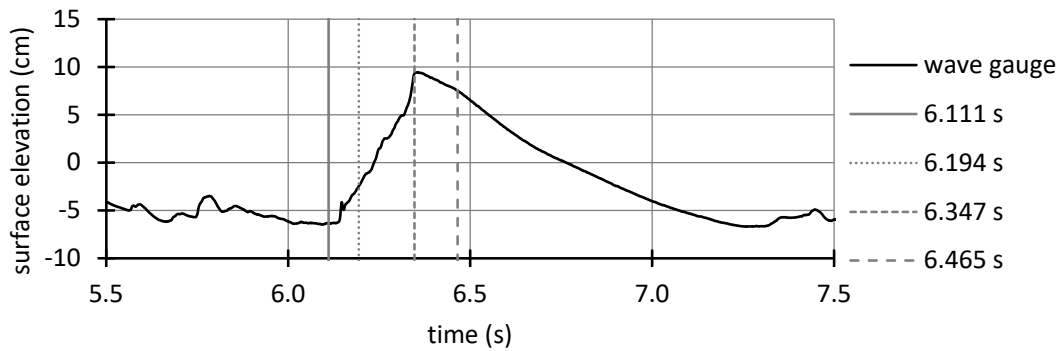


図 3-32 1000Hz の画像データから抽出した静止画像 (碎波突入条件)



1 段目：容量式波高計，2 段目：上段圧力計，3 段目：中段圧力計，4 段目：下段圧力計

図 3-33 波高計と圧力計の時系列と静止画像の時刻（砕波突入条件）

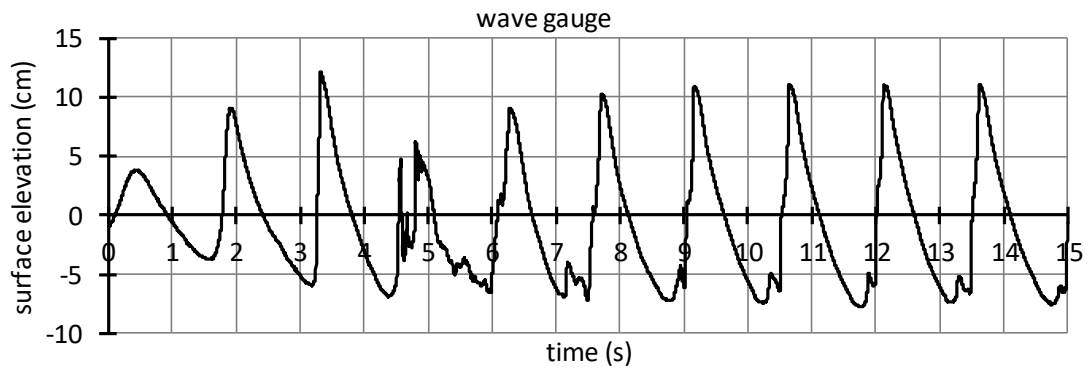


図 3-34 容量式波高計の時系列データ (碎波後条件)

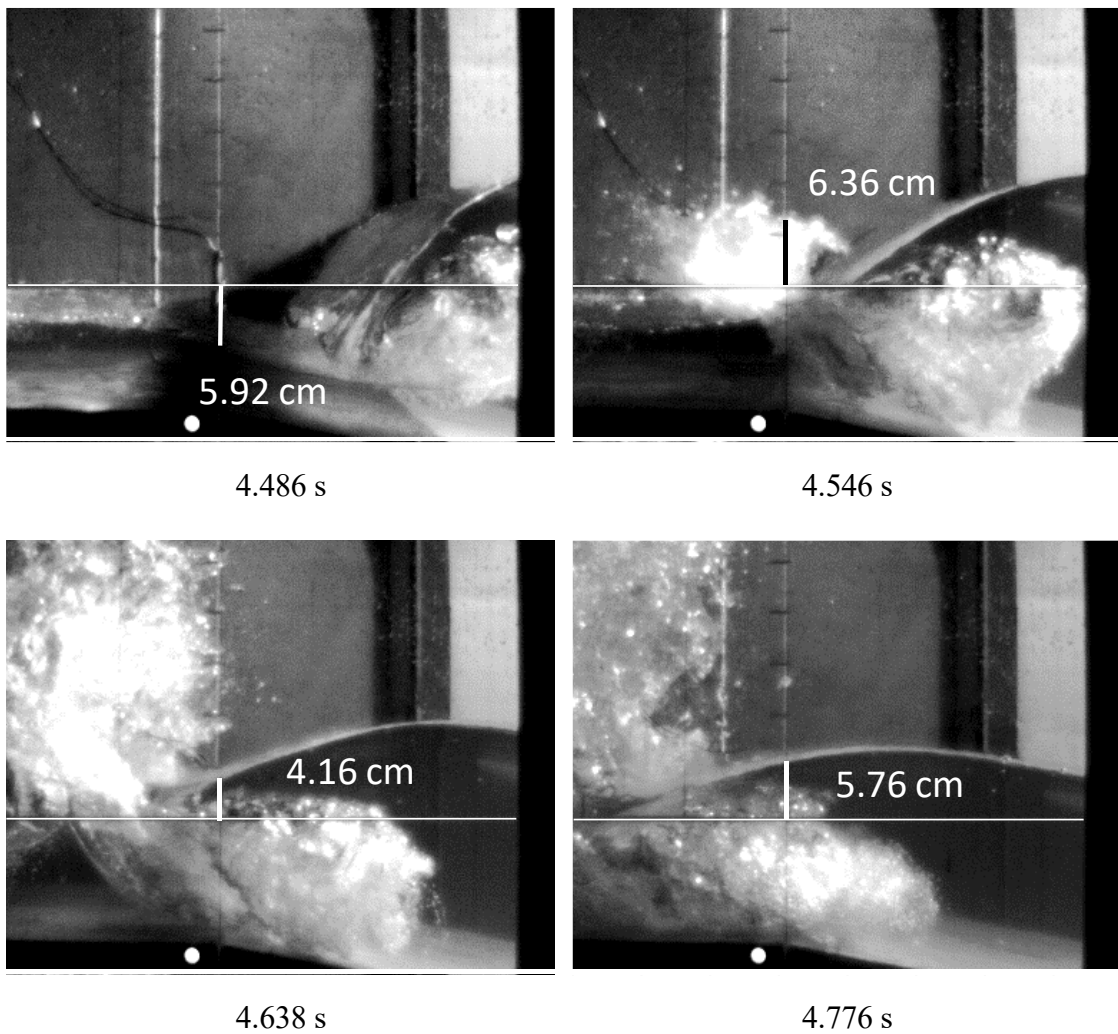
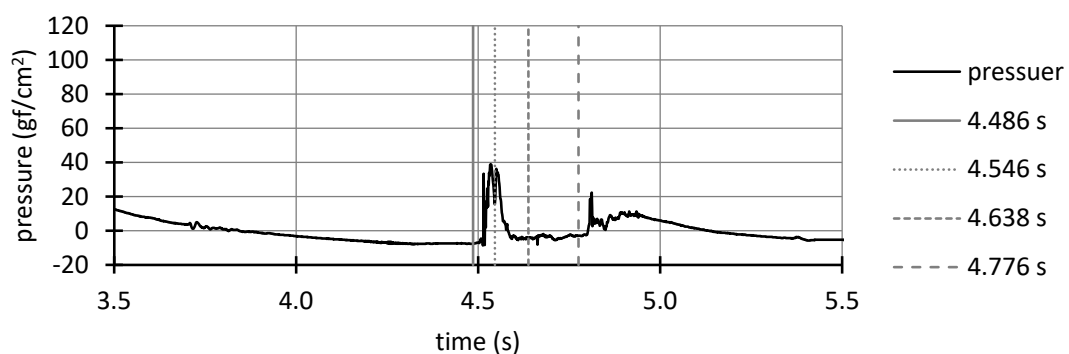
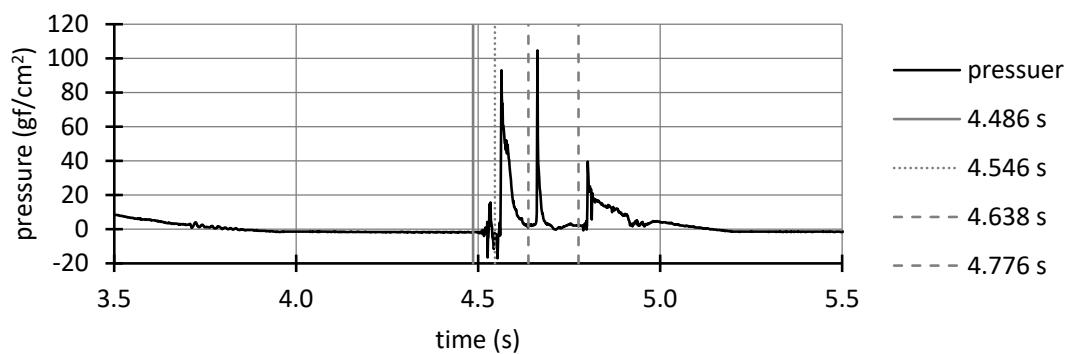
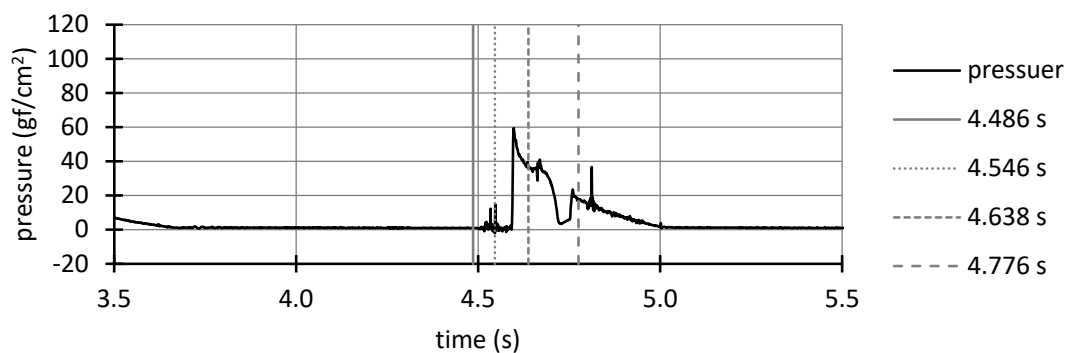
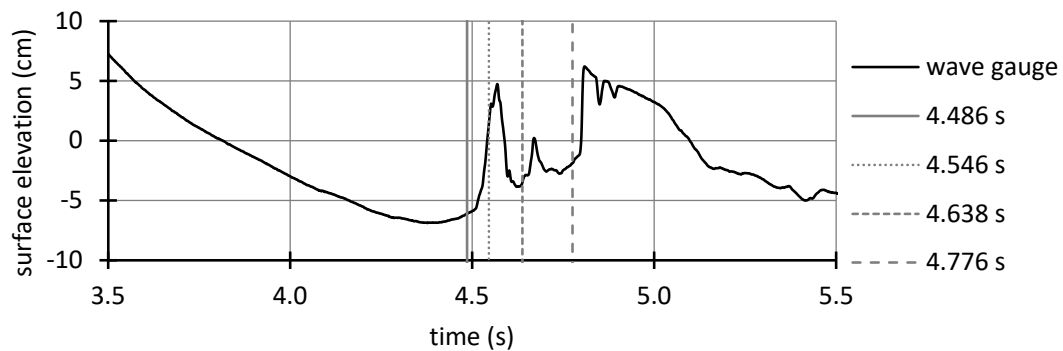


図 3-35 1000Hz の画像データから抽出した静止画像 (碎波後条件)



1 段目：容量式波高計，2 段目：上段圧力計，3 段目：中段圧力計，4 段目：下段圧力計

図 3-36 波高計と圧力計の時系列と静止画像の時刻（砕波後条件）

表 3-9 から表 3-13 に、容量式波高計で測定した水位と画像データの水位の比較を示す。容量式波高計のデータは波作用前の静止データを基準とした水面高さである。画像データは静止位から水面までの高さを読み取った値であり、波の谷の水面と砕波が突入している水塊の二つに分かれている場合には、「lower」に波の谷の水面の深さを、「upper」に突入している水塊の厚さを示した。したがって、 $upper + lower = total$ が空気層を含まない水面高さである。

非砕波条件と非砕波限界条件は、容量式波高計と画像データの水位が概ね一致している。ただし 4 行目の波の谷に向かう時刻においては、容量式波高計の値が画像データよりやや小さい。

直前砕波条件、砕波突入条件、砕波後条件は、波の谷の状態である 1 行目は容量式波高計と画像データが概ね同じ値であるが、2 行目以降の値は異なっている。その要因は、容量式波高計は応答性が低いので画像データより遅れて反応することと、水塊の中に空気が混入している状態の水位を正しく検出できていない可能性が考えられる。

以上のように、計測機器の応答性の違いにより、波圧強度の最大値と水位データの最大値には時間差を生じる。したがって、波圧強度最大時の波力を波力算定式と比較する場合に、波圧強度が最大となる時刻の水位を用いて波力を算定することは、適切な方法ではない。水理模型実験による波圧強度を波力算定式と比較する場合には、波圧強度の最大値が発生したのと同じ波の波高を抽出し、その波高に対する波圧強度を算定して比較する必要がある。

このように、計測機器の応答性の違いを理解し、それを考慮した測定および解析・考察を行うことが重要である。なお、ここで用いた圧力計は応答性の高い製品であるが、メーカーや製品が異なれば圧力計であっても応答性が高いとは限らないので、個別の製品ごとに応答性の確認が必要である。

表 3-9 容量式波高計 (W.G.) と画像データ (video) の水位の比較 (非砕波条件)

time (s)	surface elevation (cm)	
	W.G.	video
6.063	-3.18	-3.32
6.357	3.36	3.64
6.395	4.31	4.48
6.556	3.76	4.24

表 3-10 容量式波高計 (W.G.) と画像データ (video) の水位の比較 (非碎波限界条件)

time (s)	surface elevation (cm)	
	W.G.	video
5.040	-3.85	-3.56
5.109	6.57	6.60
5.150	9.20	9.32
5.297	5.90	6.28

表 3-11 容量式波高計 (W.G.) と画像データ (video) の水位の比較 (直前碎波条件)

time (s)	surface elevation (cm)			
	W.G.	video		
		lower	upper	total
6.193	-6.06	-6.60		-6.60
6.214	-4.11	-6.44	4.24	-2.20
6.262	0.96	-6.88	5.92	-0.96
6.372	8.92		9.40	9.40

表 3-12 容量式波高計 (W.G.) と画像データ (video) の水位の比較 (碎波突入条件)

time (s)	surface elevation (cm)			
	W.G.	video		
		lower	upper	total
6.111	-6.34	-6.60		-6.60
6.194	-2.59	-6.36	3.64	-2.72
6.347	9.11		10.24	10.24
6.465	7.56		7.28	7.28

表 3-13 容量式波高計 (W.G.) と画像データ (video) の水位の比較 (碎波後条件)

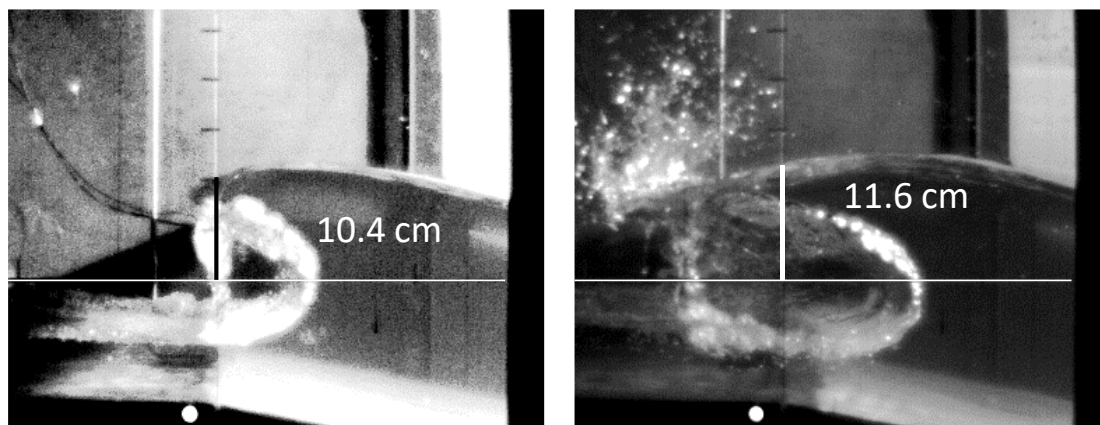
time (s)	surface elevation (cm)			
	W.G.	video		
		lower	upper	total
4.486	-6.13	-5.92		-5.92
4.546	0.82		6.36	6.36
4.638	-3.66		4.16	4.16
4.776	-1.90		5.76	5.76

5) 碎波帯での波高測定

碎波帯内の波は、前出の図 3-27 に示すように波面が直立に近く切り立っている状態や、図 3-28 に示すように碎波した波が空気層を伴って飛び込んでくるような状態がある。このような状態においては、水面検出針を上下動させて水面高さを検出するサーボ式波高計は使用できない。したがって、碎波帯内の波高は容

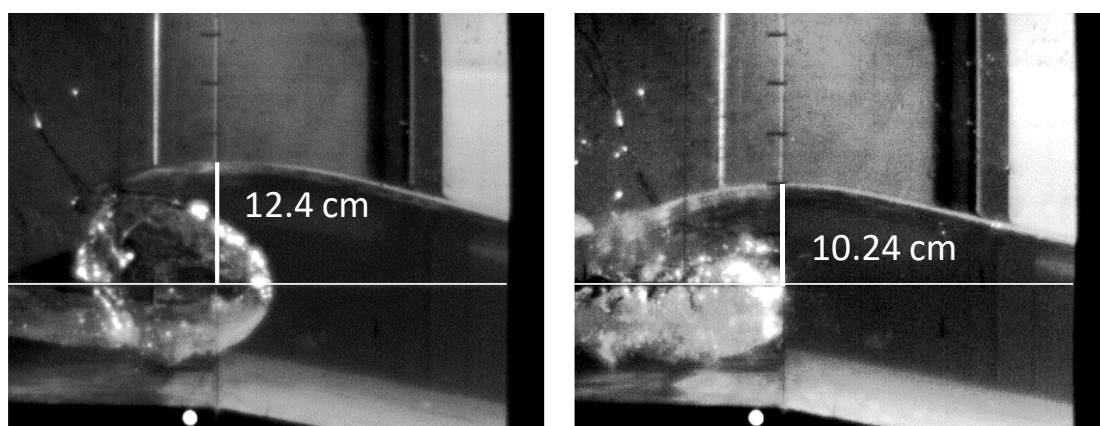
量式波高計で測定することが一般的である。しかし、容量式波高計を使用する場合にも、砕波帯内における波高の測定においては、「3-2-2.4）」に示した注意点がある。その他にも、砕波帯内における容量式波高計による測定には、波峰高を正確に把握することができないことにも注意が必要である。

図 3-37 は、「3-2-2.4）」と同じ静止画を用いて各時刻の波峰高を解析した結果である。波峰高は、本来は個々の波の水面の最高到達高さであるが、ここでは時々刻々の水面の高さを波峰高と定義する。なお、砕波状態で途中に空気層を生じている場合にも、空気層の高さも含めて水面の高さを波峰高とする。図 3-37 の中には各時刻の波峰高の数値を記入してある。これらを容量式波高計 (W.G.) の値と比較すると表 3-14 のとおりである。容量式波高計は空気層の高さを考慮することができないことと、応答性の低さのために、容量式波高計で得られる各時刻の波峰高は、静止画から解析した値と比べて明らかに小さい。また、容量式波高計で検出された解析対象とした波の最高水面高さも、静止画から解析した 2 時刻の波峰高より小さい。これは、容量式波高計は砕波状態で巻き込んだ空気層の高さを評価できないことと、応答性の低さによるものであると考えられる。このように、容量式波高計では砕波帯内の波峰高を過小に評価してしまうので、そのデータの取り扱いに注意を要する。例えば、容量式波高計のデータから波峰高を解析し、それよりも高い位置には波が到達しないものとして構造物の設計を行うと、波が当たらないはずの場所に波が当たって構造物が破壊されてしまう可能性がある。



(a)-1 直前砕波 6.214 s

(b)-1 突入砕波 6.194 s



(a)-2 直前砕波 6.262 s

(b)-2 突入砕波 6.347 s

図 3-37 画像データから読み取った各時刻の波峰高

表 3-14 各時刻の波峰高の比較

(a) 直前砕波			(b) 突入砕波		
時間 (s)	波峰高 (cm)		時間 (s)	波峰高 (cm)	
	W.G.	video		W.G.	video
6.214	-4.32	10.4	6.194	-2.64	11.6
6.262	0.77	12.4	6.347	8.94	10.24
W.G.最大値	9.89	—	W.G.最大値	9.44	—

3-2-3. 解析方法

1) 波別解析

波高計で測定するデータは、時々刻々の水面高さのデータであるため、データを取得しただけでは波高や周期を得ることはできない。波高と周期の値を得るためには、水位の時刻歴データを1波ごとに区別して、個々の波の波高と周期を解析し、統計処理により最高波高 H_{\max} 、1/10 最大波高 $H_{1/10}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ など、およびそれぞれに対応した周期などを算出する。水位の時刻歴データを1波ごとに

分離する方法はいくつかあるが、ゼロ・アップ・クロス法が一般的である。

図 3-39 にゼロ・アップ・クロス法による波別解析の例を示す。水面波形がゼロの線を上りながら通る点がゼロ・アップ・クロス点であり、波の始まりと波の終わりとする。なお、波の終わりは次の波の始まりである。図 3-39 の例の場合には 6 個の波があり、個々の波の最大値と最小値の差がその波の波高、波の始まりと終わりの時間差が周期である。波別解析では、このように時系列データを個々の波に分けて、それぞれの波の波高と周期を求める。

波別解析を実施した後は、波浪統計解析を実施する。統計解析の内容は以下のとおりである。

- ① 個々の波を波高の大きい順に並び変える。
- ② 一番目の波高と周期を抽出する。(最高波高 H_{max} 、最高波周期 T_{max})
- ③ 上位 1/20 の波高の平均値と周期の平均値を求める。(1/20 最大波高 $H_{1/20}$ 、1/20 最大波周期 $T_{1/20}$)
- ④ 上位 1/10 の波高の平均値と周期の平均値を求める。(1/10 最大波高 $H_{1/10}$ 、1/10 最大波周期 $T_{1/10}$)
- ⑤ 上位 1/3 の波高の平均値と周期の平均値を求める。(有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$)
- ⑥ 全体の波高の平均と周期の平均値を求める。(平均波高 \bar{H} 、平均周期 \bar{T})

なお、③から⑤は波高の大きい順に並べたデータの上位の平均値であるので、周期の上位値ではない。

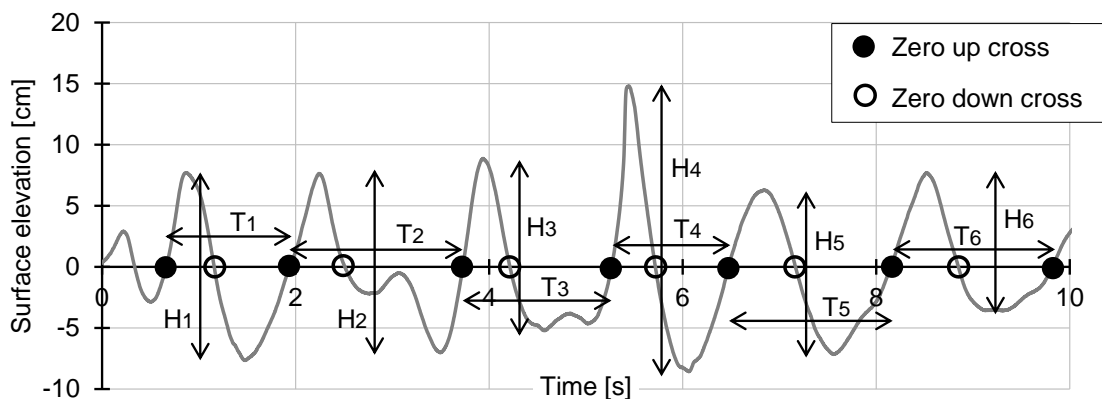


図 3-38 ゼロ・アップ・クロス法による波別解析の例

2) 高速サンプリングデータの解析

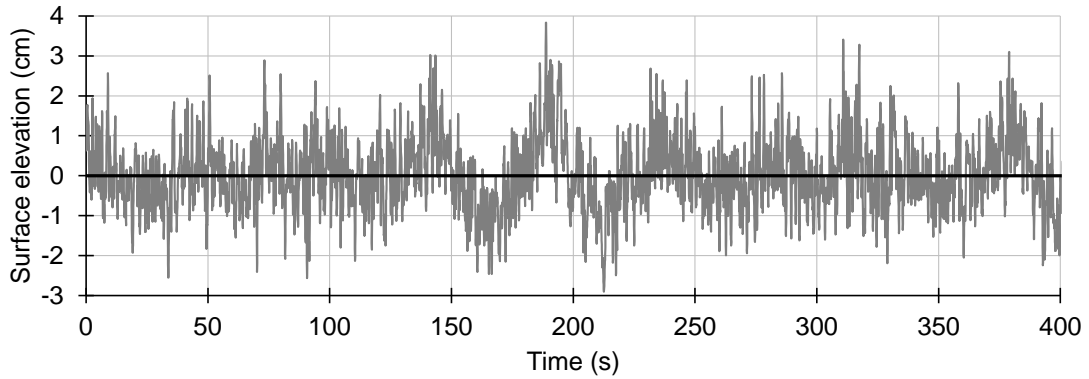
「3-2-2.1) サンプリング間隔 (波高測定における周期分割数)」に、波高データ収録時間の周期分割数について、有義波周期の 1/30~1/15 が適切であることを示した。一方で、波圧実験は 1000 Hz (0.001 s) の高速サンプリングが必要な場合がある。その際には波圧と同時に測定する波高データも高速サンプリングとなら

ざるを得ない。高速サンプリングされた波浪データを単純に波別解析を行うと、非常に細かい振動を波として解析してしまい、実際の波浪現象を正しく評価できなくなることがある。このような影響を避けるために、高速サンプリングを行った波高データは、解析の際にデータの読み飛ばし処理を行って、有義波周期の $1/30 \sim 1/15$ のデータとして取り扱う。または、波周期の $1/10$ より短い時間間隔でのゼロ・クロスは波として判別しないような処理を行う。

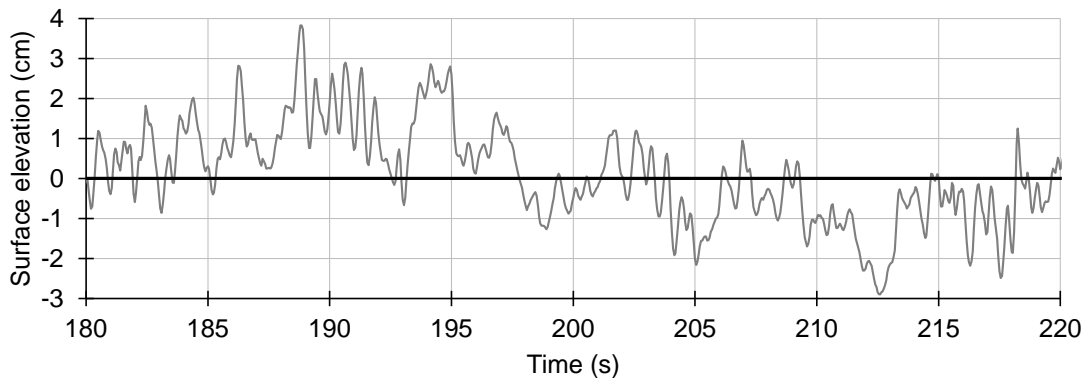
3) 長周期変動を伴う波浪データの解析

ゼロ・アップ・クロス法による波別解析を行う際に、通常は計測開始から終了までの全区間の時間平均データを差し引いて、平均値を上り勾配で横切る時刻を波の開始・終了時刻とする。しかし、長周期変動の成分を伴う波形データの場合には、上記の方法では風波成分を適切に評価することができない。

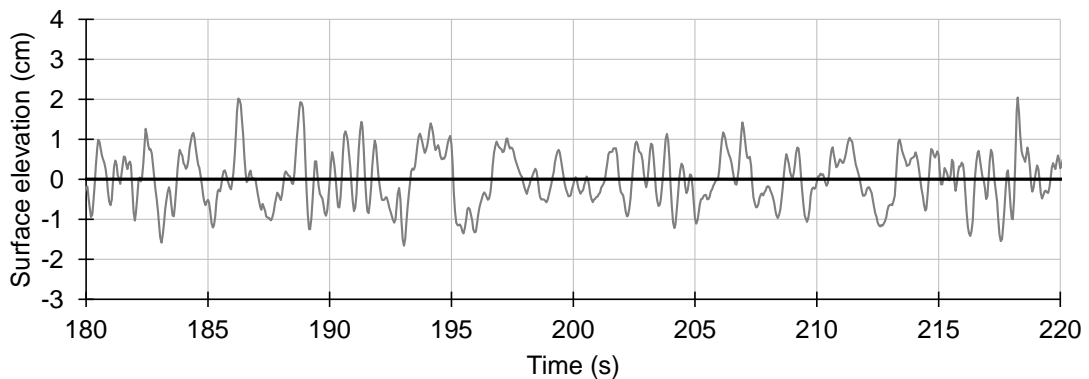
図 3-39 の(1)は全区間の時間平均データを差し引いた後の波高計データである。通常のゼロ・アップ・クロス解析では水位の 0 を上り勾配で横切る時刻を波の開始・終了時刻とする。しかし、長周期変動成分により水位の 0 を横切らない波が多数含まれる。図 3-39 の(2)は(1)の一部を拡大した波形であり、水位の 0 を横切らない風波成分が多数あることを確認できる。このような波形データから風波成分の波高と周期を解析する際には、フィルター処理または移動平均処理を行って長周期波成分を除去したのちに、ゼロ・アップ・クロス法による波別解析を実施する。図 3-39 の(3)は 0.2 Hz のハイ・パス・フィルターをかけた波形である。このような処理を行った後に、波別解析を実施する。



(1) 全体波形



(2) 部分拡大波形



(3) 0.2 Hz のハイ・パス・フィルターをかけた部分拡大波形

図 3-39 長周期変動が含まれる波高計データの例

3-3. 反射波（入射波と反射波の分離）

3-3-1. 風波の入・反射波の分離（2次元実験）

1) 風波の入・反射波の分離の一般的な手法

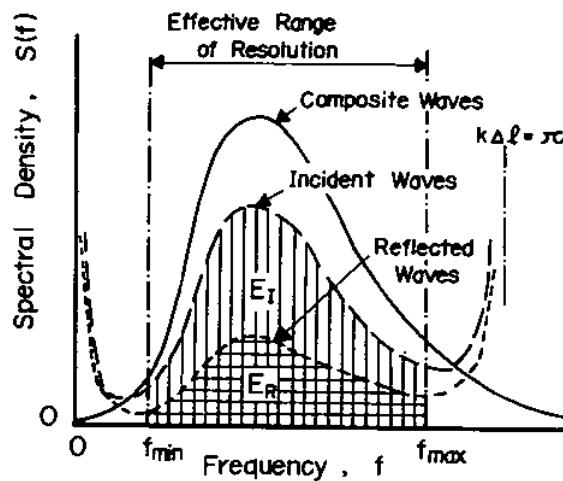
造波水路で実施する2次元実験において、風波の実験で得た水位データ（波高計データ）の入射波と反射波の分離は、合田ら³⁻⁴⁾の入・反射波分離推定法を適用して実施する。「1-2.2) 海外の水理模型実験の既往資料の確認」に示したように、Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering¹⁻⁵⁾と Users Guide to

Physical Modelling and Experimentation¹⁻⁸⁾のどちらにおいても、入射波と反射波の分離方法として、最初に合田ら³⁻⁴⁾の方法（正確には Goda and Suzuki¹⁻⁶⁾）が紹介されている。

造波水路における風波の実験で得た水位データは、合田ら³⁻⁴⁾の入・反射波分離推定法を適用して反射率を求め、この反射率から入射波高と反射波高を算出する。合田らの入・反射波分離推定法では、2 地点の水位データを用いて入射波のエネルギー E_I と反射波のエネルギー E_R を算出し、式(3-3)により反射率 K_R を算出する。

$$K_R = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}} \quad (3-3)$$

合田らの入・反射波の分離推定法で入射波と反射波のエネルギーを算出するのは図 3-40 に示す有効周波数範囲（Effective Range of Resolution）であり、その上限値 f_{max} と下限値 f_{min} は式(3-4)が提案されている。 L_{min} と L_{max} は有効周波数範囲の上限値 f_{max} および下限値 f_{min} にそれぞれ対応する波長である。 Δl について合田は、「実験の計画に際しては対象とする波のスペクトルの範囲を考え、エネルギーの大部分が $f_{min} \sim f_{max}$ に含まれるように Δl を選定する。」としている（合田良實¹⁻⁴⁾, p.288）。



（合田ら³⁻⁴⁾より引用）

図 3-40 不規則波の入・反射波高推定のための説明図

$$\left. \begin{array}{l} \text{下限}(f_{min}) : \frac{\Delta l}{L_{min}} = 0.05 \\ \text{上限}(f_{max}) : \frac{\Delta l}{L_{max}} = 0.45 \end{array} \right\} \quad (3-4)$$

2) 高精度化のための工夫

反射率を正しく求めるためには、有効周波数範囲が実験波の周波数特性に対して適切な範囲となるように設定する必要がある。以下にそのための工夫を示す。

簡単のために L_{\min} と L_{\max} は有義波周期に対する波長 $L_{1/3}$ とし、上限値と下限値の係数は 0.45 と 0.05 に固定して、波高計間隔 Δl を $L/4$ 、 $L/6$ 、 $L/8$ 、 $L/10$ 、 $L/15$ に変更して入射波と反射波のスペクトル解析を実施した。その結果を図 3-41 に示す。実験波は有義波周期が 1.5 s、有義波高が 14.7 cm であり、地形条件は地形模型なしで水深が 87.5 cm の水平床である。図 3-41 には、合成波 (Composit)、入射波 (Incident)、反射波 (Reflected) を示してある。入射波と反射波の周波数範囲の下限値が f_{\min} 、上限値が f_{\max} である。

波高計間隔が広い $L/4$ は有効周波数範囲が低周波数側に偏り、波高計間隔が狭い $L/15$ は有効周波数範囲が高周波数側に偏っている。また、 $L/15$ では高周波側の算定結果が発散する領域に入っている。有効周波数範囲が周波数スペクトルのピーク周波数を中心に低周波側と高周波側をほぼ均等に含むのは、この実験条件では $L/10$ である。合田らの方法による入・反射波分離のための波高計間隔の設定においては、このような検討を行って反射率を適切に評価できるようにする。図 3-42 に、波高計間隔 $L/10$ で有効周波数範囲の係数を下限値は 0.04 で上限値を 0.54 とした解析結果を示す。当然ではあるが下限値は図 3-41 の $L/10$ と比べて低周波数側に移行しており、下限値 0.05 より有効周波数領域を適切に評価していると言える。ただしこれよりも下限値を小さくすると合成波の周波数において長周期波 (低周波数) 成分が発生している周波数範囲にかかってしまうので、この実験条件の場合には下限値の係数は 0.04 が適していると言える。また、上限値の係数を 0.54 とすると解析結果が発散する周波数領域に入ってしまう。図 3-40 に示されるように高周波数側の発散周波数は $k\Delta l = \pi$ である。波数 $k = 2\pi/L$ より $\Delta l/L = 0.5$ であるため、上限値の係数を 0.5 より大きくすると解析範囲が発散する周波数領域に入ってしまう。したがって、上限値の係数は 0.45 が適切であると言える。

反射率が適切に求めれば、入射波高 H_I と反射波高 H_R を式(3-5)により得ることができる。なお、反射率は入射波と反射波のエネルギーの比により求めているので、式(3-5)による入射波高と反射波高の算定は有義波高と平均波高に適用可能であるが、波浪でデータ全体のエネルギーの比では評価できない最高波高や $H_{1/20}$ などには適用できない。なお、 H_S は入・反射波の分離解析に用いる 2 地点の合成波高の平均値である。

なお、合田ら^{3,4)}は図 3-43 に示すように反射面の近傍では合成波としての波高の場所的变化が著しいので、不規則波に対する入・反射波の分離推定に際しては、波高計を構造物および造波板から 1 波長以上離して設置する必要があることを指

摘している。

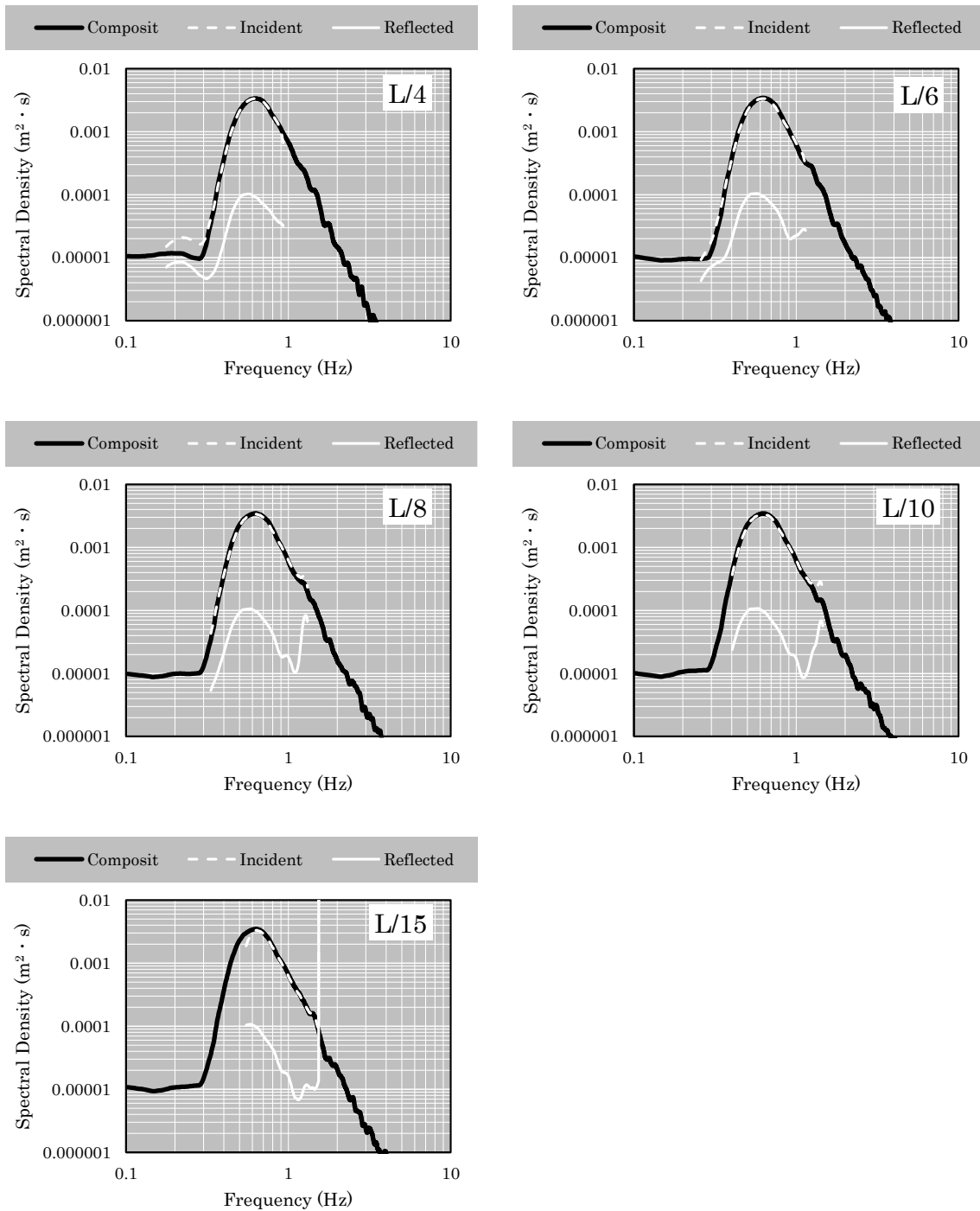


図 3-41 波高計間隔を変更して実施した入・反射波分離解析結果

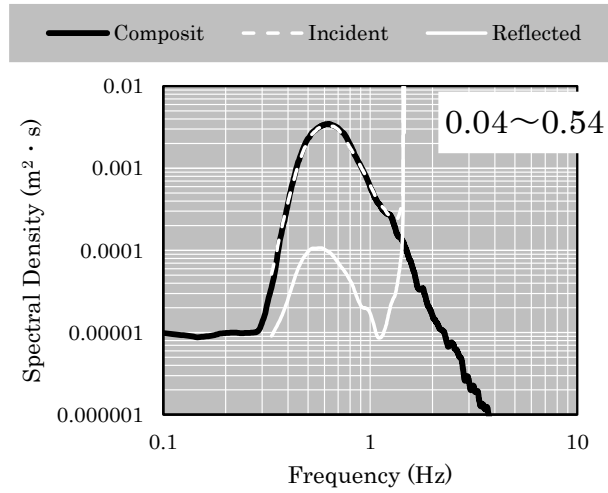
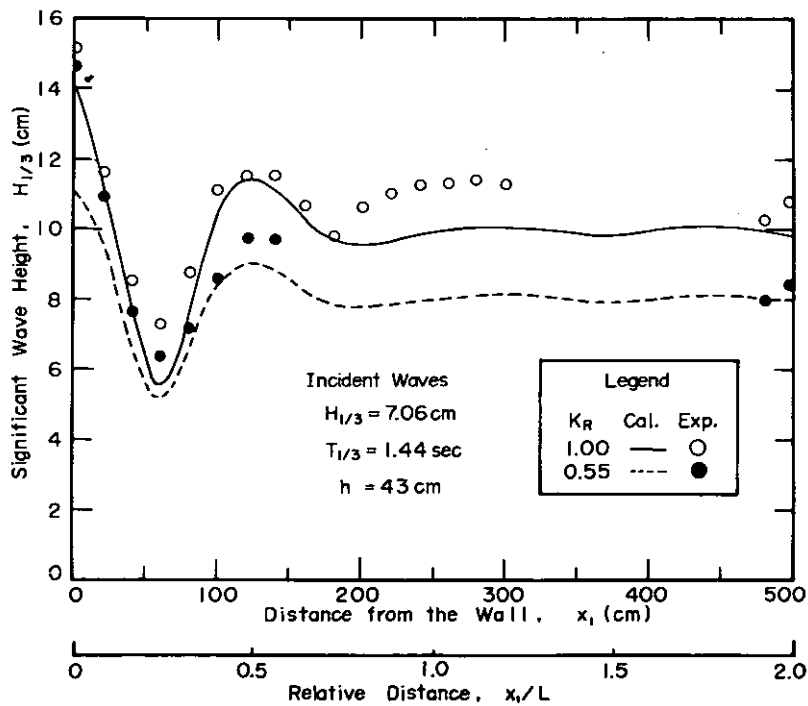


図 3-42 波高計間隔 $L/10$ で下限値 0.04~上限値 0.54 の入・反射波分離解析結果

$$\left. \begin{aligned} H_I &= \frac{1}{\sqrt{1+K_R^2}} H_S \\ H_R &= \frac{K_R}{\sqrt{1+K_R^2}} H_S \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$



(合田ら³⁻⁴⁾より引用)

図 3-43 不規則波の重複波高の場所的变化の例

3-3-2. 風波の入・反射波の分離（3次元実験）

造波水路における2次元実験では、入射波と反射波が正反対の方向に生じるため、「3-3-1」に示した方法で入・反射波の分離が可能である。しかし、造波水槽で実施する3次元実験では、入射波自体が斜め方向である場合や多方向性を持っている場合がある。たとえ直角入射の一方向波であるとしても、実験模型からの反射波はさまざまな方向に発生する。そのため、「3-3-1」に示した入・反射波分離方法が適切ではない場合もある。

谷本・吉本³⁻⁵⁾は構造物に対して斜め方向から入射波が作用する条件において、構造物法線の直角方向に設置する2本の波高計データにより、合田ら³⁻⁴⁾と同じ方法で入・反射波の分離が可能であることを示している。この方法は、波の状態が単一の入射角と反射角でほぼ決まるような地点において有効である。ただし、反射波の方向が複雑な条件や、入射波が多方向性を持つような条件では、この方法による入・反射波分離の精度が低下する。また、検討対象とする反斜面が明確であって、波斜面に対して直交方向に2本の波高計を設置している場合でないと、この解析方法と適用できない。

入射波に多方向性がある場合や、反射波が様々な方向に発生する場合には、方向スペクトル解析結果から反射率を得ることができる。図3-44は3次元実験における方向スペクトル解析結果である。方向スペクトルは橋本ら³⁻⁶⁾の方法により、容量式波高計による水位データと、電磁流速計による水平2成分の流速データを用いて解析した。波高計アレイによるデータを用いて方向スペクトルを解析する方法もある。横軸は方位角で、0度がN、90度がE、-90度がW、±180度がSである。実験水槽では0度の方向に造波機があると考えればよい。入射波成分のピークは約45度、反射波成分のピークは約-90度である。図3-45に入射角と反射率の解析方法を示す。図3-45(a)に示すように角度の差(difference)は135度である。反射波の矢印を図3-45(b)のように移動すると理解しやすくなる。入射波と反射波の角度の開きは $\text{difference} - 90^\circ$ であり、その1/2が入射角である。反射率を求めるための入射波のエネルギー E_I と反射波のエネルギー E_R は、図3-45(c)に示すように入射波と反射波のそれぞれのピーク角度を中心に difference の角度幅のスペクトル密度の積分値とする。反射率は前出の式(3-3)により得ることができる。この解析例の場合には、図3-45(d)に示すように波浪測定点(Incidentの矢印の先端)の先に反射面があり、IncidentとReflectedの1/2が入射角であると解釈できる。

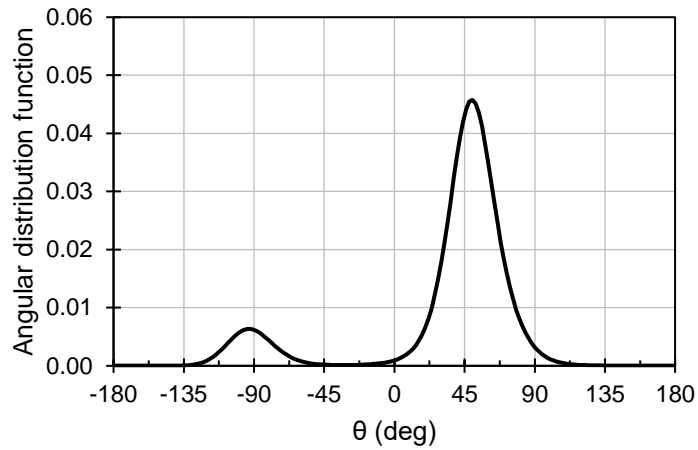
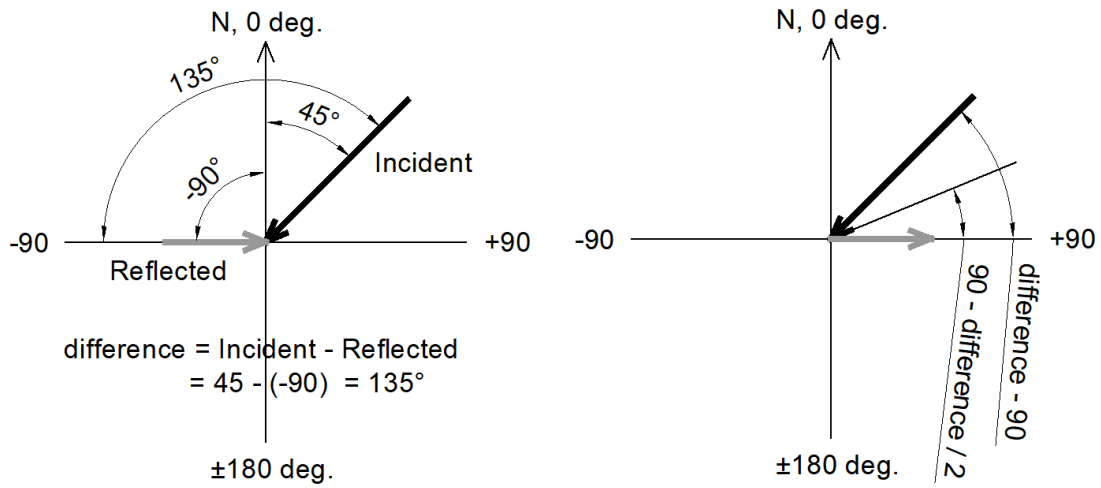
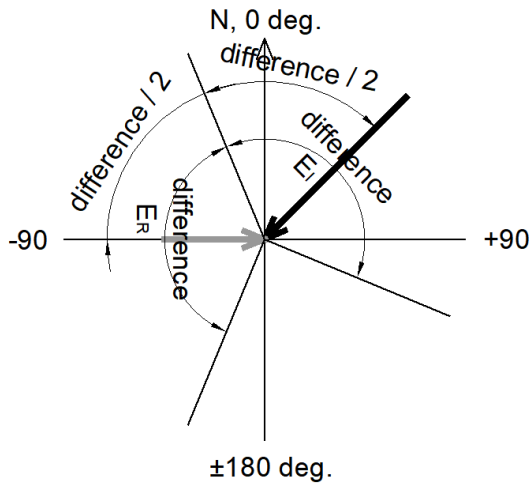


図 3-44 3次元実験における方向スペクトル解析例

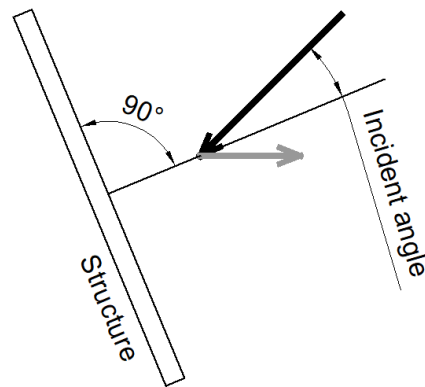


(a) 入射波と反射波のピーク角度

(b) 入射波と反射波の角度の開き



(c) 入射波と反射波のエネルギー範囲



(d) 入射角

図 3-45 方向スペクトル解析結果からの入射角と反射率の算出方法

3-3-3. 長周期波の入・反射波の分離（2次元実験）

長周期波の入射波と反射波の分離方法として、Guza, et al.¹⁻⁷⁾と合田ら³⁻⁴⁾の方法について示す。なお、ここで取り扱う長周期波は、造波水路において周期の長い波を規則波として造波する2次元実験とする。

1) Guza, et al. の方法

Guza, et al.¹⁻⁷⁾は線形長波理論を適用して、水位と流速のデータを用いて式(3-6)により、水位の時刻歴データを入射波と反射波に分離する方法を示している。

$$\eta_I = \frac{\eta + \alpha(h/g)^{1/2}u}{2}, \quad \eta_R = \frac{\eta - \alpha(h/g)^{1/2}u}{2} \quad (3-6)$$

Guza, et al. の方法では入射波と反射波の時刻歴データが得られるので、それぞれについてゼロ・アップ・クロス法による波別解析と波浪統計処理を行い入射波の波高 H_I と反射波の波高 H_R を得る。反射率 K_R の値が必要な場合には $K_R = H_R/H_I$ により反射率を求める。

図 3-46 に Guza, et al. の方法による入射波と反射波の分離解析例を示す。模型床なしの造波水路に水深 1.0 m まで給水し、周期 10 s の規則波を造波した 2 次元実験であり、図 3-46 の上段は水位の時刻歴データ、中段は同一地点の流速の時刻歴データである。水位計と流速計は水路幅方向には 5 cm 程度離れているが、水路長軸方向には同じ位置であるため、位相のずれは無い。下段は Guza, et al. の方法により分離した入射波と反射波の波形を、分離前の合成波の波形と共に示してある。合成波の波形は片振幅が 2 cm 程度しかないが、分離後の入射波は片振幅が 5 cm 程度ある。すなわち、この地点では入射波と反射波が打ち消しあって見かけの振幅は小さいが、実際には大きな入射波が存在することがわかる。Guza, et al. の方法は反射率を求める方法ではなく波形を分離する方法であるため、この例のように入射波と反射波の波形を知ることができる。

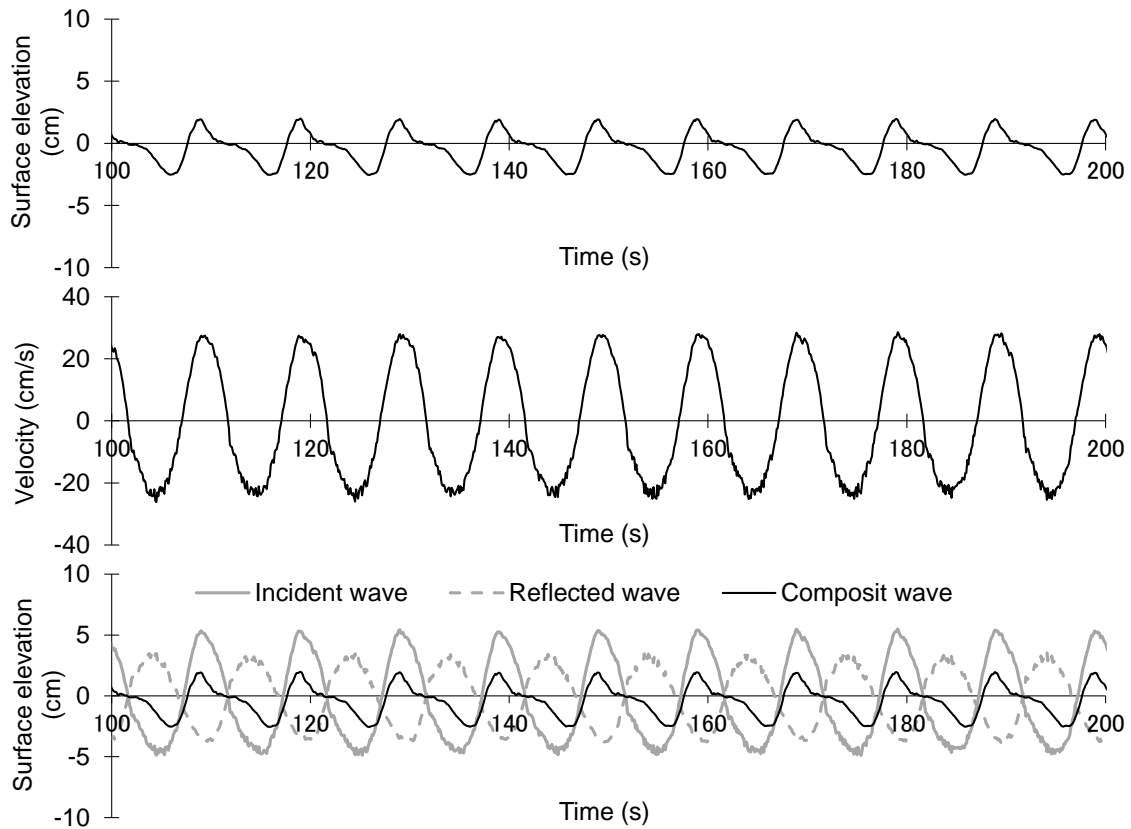


図 3-46 水位と流速の波形および Guza et al. の方法による波形分離例

2) 久保田らの方法

久保田ら³⁻⁷⁾は浅海域での非線形性を考慮するために二次のオーダーで非線形長波理論の連続の式を満足するように、Guza, et al.¹⁻⁷⁾を式(3-7)のように改良している。

図 3-47 に久保田ら³⁻⁷⁾と Guza, et al.¹⁻⁷⁾の入射波と反射波の分離結果の比較を示す。実験条件は、水深 0.158 m の水平床上で周期 8.49 s、波高約 0.009 m の周期の長い規則波である。2 種類の解析方法による差を確認すると最大で 0.01 cm であり、水深に対して波高が小さい条件であるため、解析方法による違いはない。港湾における長周期波は、一般に水深に対して波高が小さいので、この例のように久保田ら³⁻⁷⁾と Guza, et al.¹⁻⁷⁾の方法による違いは現れないと言える。

$$\eta_I = \frac{\eta + \alpha u \left(\frac{h}{g}\right)^{1/2} \frac{h}{h-\eta}}{2}, \quad \eta_R = \frac{\eta - \alpha u \left(\frac{h}{g}\right)^{1/2} \frac{h}{h-\eta}}{2} \quad (3-7)$$

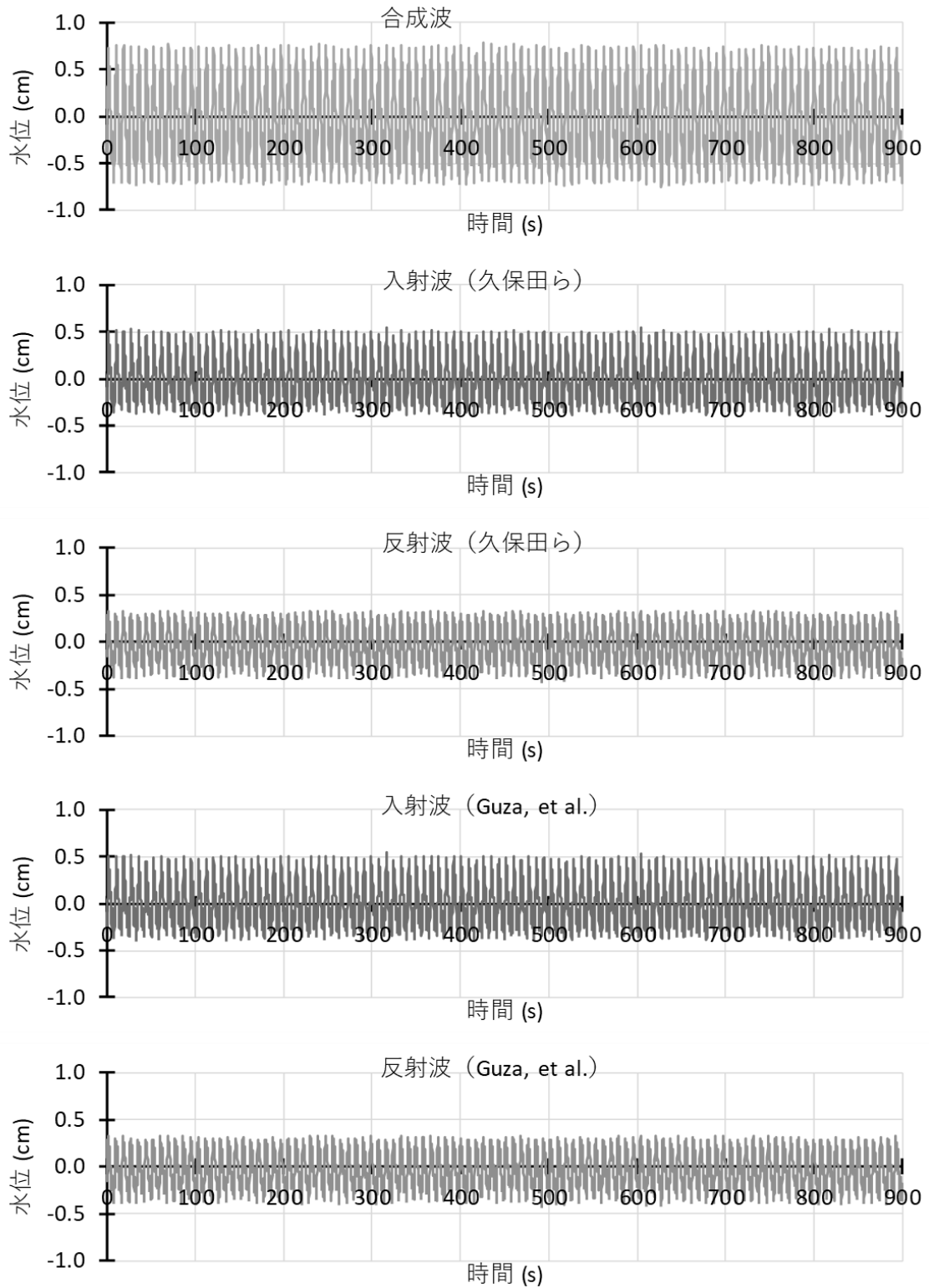


図 3-47 久保田らと Guza, et al.の入射波と反射波の分離結果の比較

3) 合田らの方法

合田ら³⁻⁴⁾による入・反射波の分離推定法について、「3-3-1. 風波の入・反射波の分離」に示した。ここには、周期の長い規則波を実験水路における長周期波と

する水理模型実験における、波高計間隔の設定について検討する。

図 3-48 に模型床形状と反射壁の位置を示す。長周期波は波長が長いので、測定位置を変更しても水深が変わらないように天端幅の広い水平床を設置して実施した。造波板前面で十分な造波水深を確保するために、模型床の沖側に 1/5 勾配斜面を設けて水平床の高さを 0.75 m としてある。反射壁の位置は模型床法肩から 20.222 m である。その設定根拠は「5) 長周期波実験の留意点」に示す。実験水深は水平床上で 0.158 m とした。実験波の周期 8.49 s (現地周期 60 s の 1/50 縮尺) の模型床上の波長は 10.56 m である。したがって、模型床法肩から反射壁までの距離は波長の約 2 倍である。

図 3-49 に波高計配置を示す。波高測定位置は模型床法肩と反射壁の中央とした。図 3-50 に波高計配置の模型床中央付近の拡大図を示す。この図の中に $L/10$ 、 $L/8$ 、 $L/4$ で示した 3 種類の波高計間隔で合田ら³⁻⁴⁾の入・反射波分離解析を実施した。 L は波長である。

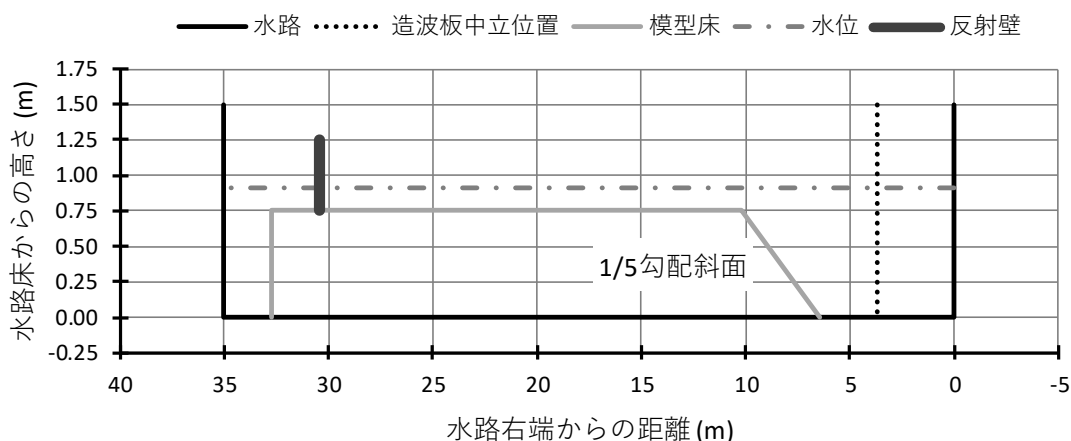


図 3-48 模型床形状と反射壁の位置 (長周期波実験)

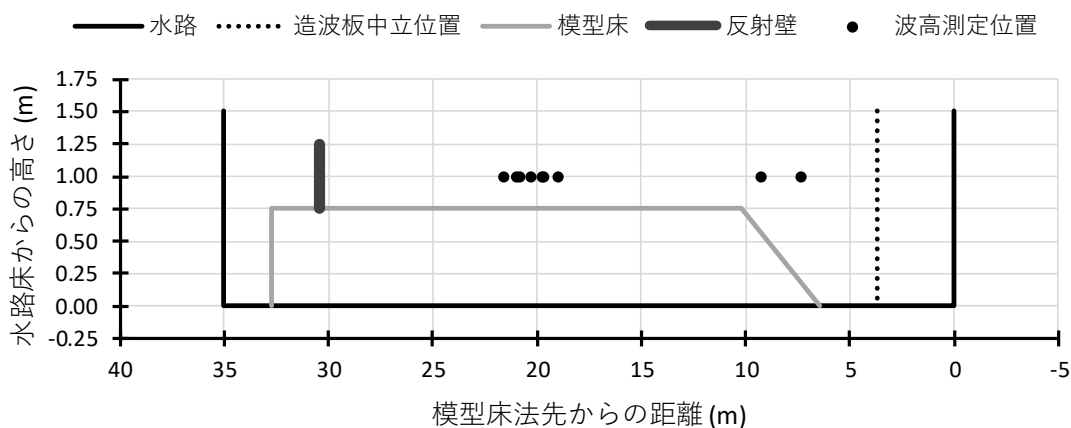


図 3-49 波高計配置 (長周期波実験)

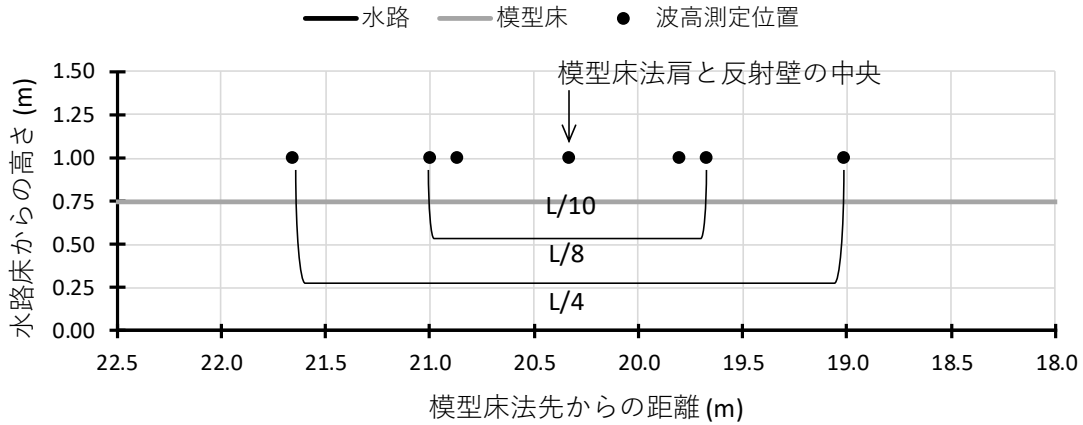
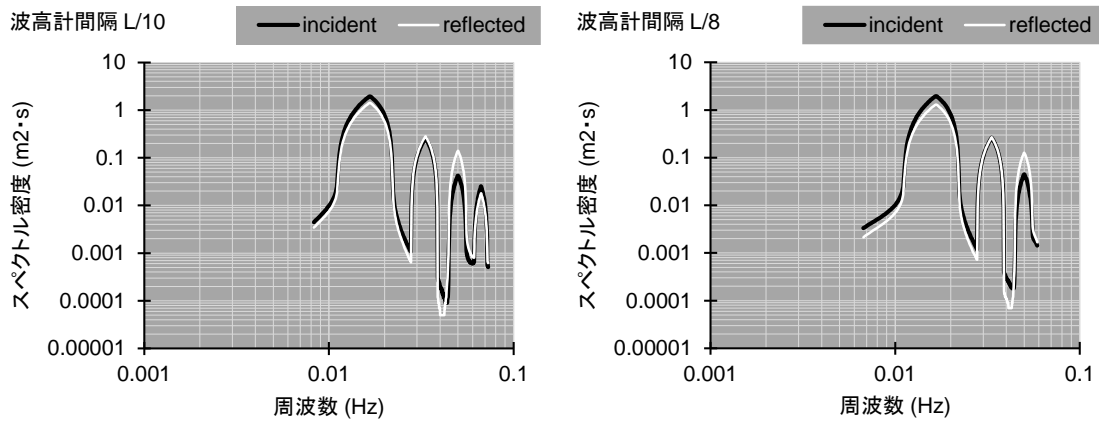


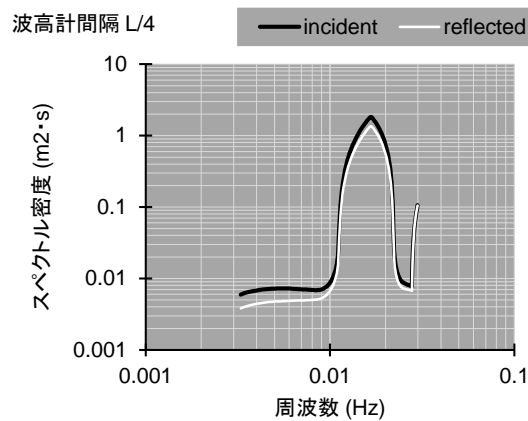
図 3-50 模型床中央の波高計配置の拡大図（長周期波実験）

図 3-51 に合田ら^{3,4)}の方法により分離した入射波と反射波の周波数スペクトルを示す。波高計間隔 $L/10$ は解析対象の周波数範囲の中に 4 個のスペクトル密度のピークが含まれており、 $L/8$ は 3 個のスペクトル密度のピークが含まれている。これらのうち、周波数が最も小さいピークが入射波の周期に相当し、それより高周波数のピークは反射等の影響により生じた短周期成分である。波高計間隔 $L/4$ はこれらの短周期成分が解析対象の周波数範囲に含まれず、長周期波のピークを適切にとらえることができている。したがって、合田ら^{3,4)}の方法による長周期波の入・反射波の分離には、波高計間隔 $L/4$ を用いる。この波高計間隔は「3-3-1. 風波の入・反射波の分離」に示した波高計間隔と異なる。なお、図 3-51 に示す反射波のエネルギーが入射波のエネルギーとほぼ同じであるのは、図 3-49 に示したように反射壁を設置した状態で実験を行っている、この反射壁が直立壁であるため反射率が大きいことによるものである。



(1) 波高計間隔 $L/10$

(2) 波高計間隔 $L/8$

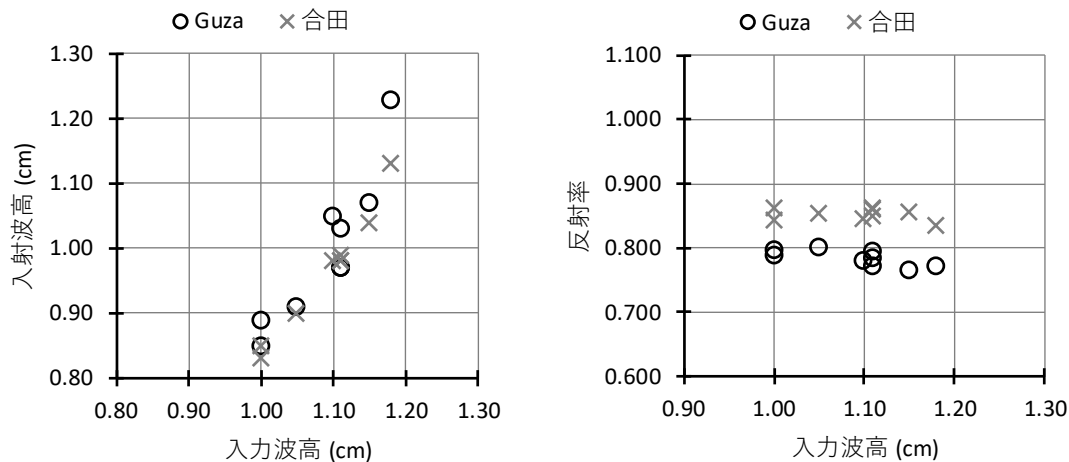


(3) 波高計間隔 $L/4$

図 3-51 合田らの方法により分離した入射波と反射波の周波数スペクトル（長周期波）

4) Guza, et al. と合田らの反射率の比較

図 3-52 に Guza, et al. と合田らの方法による入射波高と反射率を示す。Guza, et al. は図 3-49 および図 3-50 の「模型床法肩と反射壁の中央」の波高計のとなりには電磁流速計を設置して、この地点の水位と流速のデータにより解析を行った。合田らは図 3-49 および図 3-50 の $L/4$ の波高計の組み合わせで解析を行った。これらの計測機器はすべて同時に設置してあるので、解析に用いたデータは同時計測のデータである。図 3-52 (1)の入射波高は Guza, et al. が合田らより若干大きく、(2)の反射率は Guza, et al. より合田らが若干大きい。直立壁の反射壁を設置しているので、反射率は 1 に近い。ただし、底面や壁面での摩擦などにより反射波高が減衰する影響もあり、反射率が 1 とはならない。それでも、反射率が 1 に近いほうが実際の反射率に近いと考えると、このケースの場合には Guza, et al. より合田らの方法が反射率を適切に評価できていると言えそうである。



(1) 入射波高と造波板振幅入力波高 (2) 反射率と造波板振幅入力波高

図 3-52 Guza, et al. と合田らの方法による入射波高と反射率

5) 長周期波実験の留意点

長周期波は波高が小さいので、模型縮尺をあまり小さくすることができない。模型縮尺を 1/50 とすると模型の 1 cm が現地の 0.5 m となり、現地で発生する一般的な長周期波の振幅より大きくなってしまふ。そのため、長周期波実験の模型縮尺の下限値は 1/50 程度とする。港内の水深が 10 m で長周期波の周期が 60 s、90 s、120 s の現地を想定すると、模型縮尺 1/50 の波長は 11.9 m、17.8 m、23.8 m となる。前出の図 3-49 に示したように長さが 35 m の造波水路で確保できる模型床の天端幅は最大でも 25 m 程度であるため、模型床の長さは実験波の波長の 1~2 倍程度しか確保できない。造波板前面水深の波長はさらに長いので、水路の長さも十分であるとは言えない。したがって、風波のような短周期波の実験と異なり、長周期波の実験では反射波の状態に注意が必要である。

図 3-53 は二次元造波水路における長周期波実験で、反射壁の位置を変更して波高の空間分布を測定した結果である。反射壁の位置は図 3-54 に示すとおりで、造波板から遠い側が反射壁位置 1、造波板に近い側が反射壁位置 5 である。どの反射壁位置でも造波板の振幅と周期は同じであり、造波波高は約 1 cm である。しかし、測定された波高は、約 4 cm のグループと約 1 cm のグループに分かれている。波高が約 4 cm の反射壁位置は共振などの影響により波高が大きくなっていると考えられる。波高が約 1 cm のグループの中でも波高の空間変化の大きさに違いがあり、前述の図 3-49 に示した反射壁設置位置は、波高が 1 cm のグループの中で標準偏差が最も小さい反射壁位置 2 を選定した結果である。このように、長周期波実験においては、水路内の反射波の状態を確認して実験模型の設置位置を決定する必要がある。

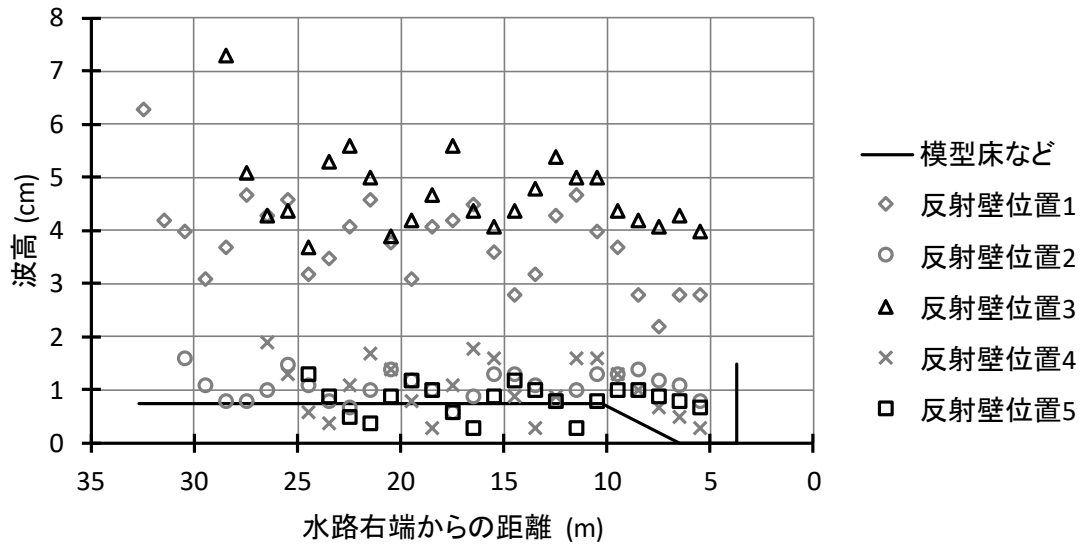


図 3-53 反射壁の位置を変更した実験における波高の空間分布

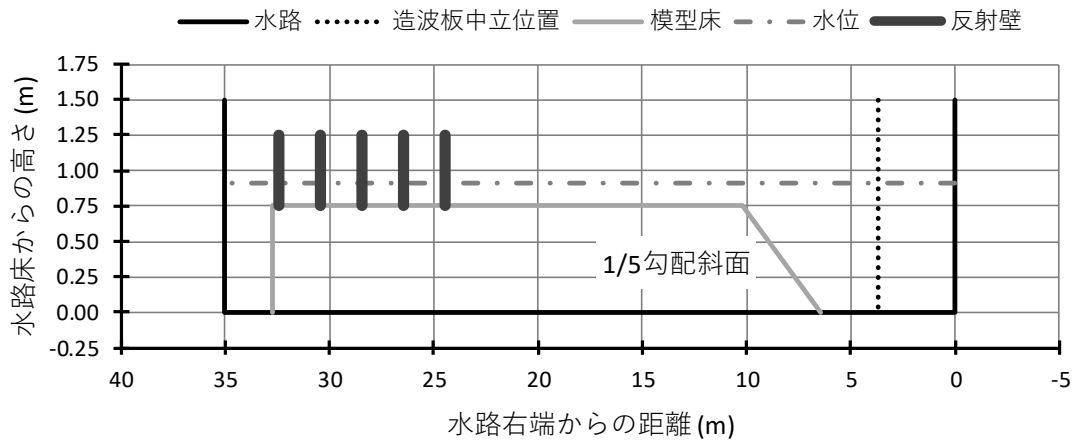


図 3-54 反射壁設置位置の検討箇所

図 3-55 は周期 8.49 s の規則波を造波開始と同時に 30 分間収録した時系列波形である。測定位置は図 3-49 および図 3-50 の「模型床法肩と反射壁の中央」である。造波開始から 300 s までは波高の時間変化を生じていることから、波高や反射率の評価を行うには、造波開始から収録開始までの待ち時間を、この条件の場合には少なくとも 5 分以上確保する必要がある。

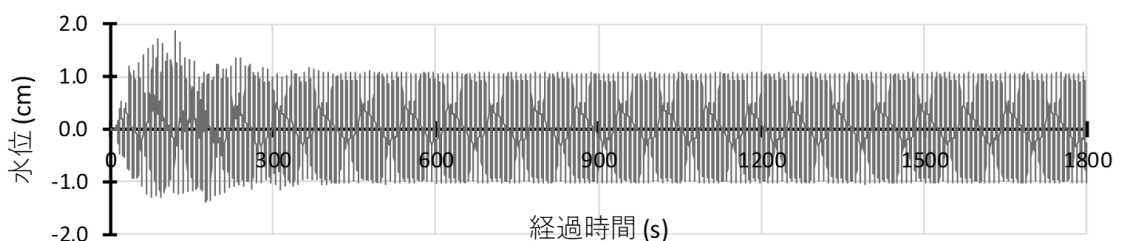


図 3-55 長周期波の長時間造波の時系列波形 (周期 8.49s)

3-4. 越波・伝達波

3-4-1. 越波

1) 越波量測定方法

EurOtop Second Edition 2018¹⁻⁹⁾の「4.7 Physical modeling」において、「物理模型実験 (Physical model test) が平均越波流量を決定するために認められた信頼できる方法である。」「物理模型実験は、予測することが困難なまだよく知られていない個別のまたは複合的ないくつかの要素より越波が影響されるときに、越波を評価する際に特に有用である。」とされている。以下に、EurOtop Second Edition 2018 に示されている越波実験の内容等について示す。

【EurOtop Second Edition 2018 の越波実験に関する記述】

- 模型縮尺は一般的に 1:5 から 1:50 の範囲で実施される。
- 2次元造波水路と3次元造波水槽に実物の模型を再現する。
- 頻繁に起こる条件や極端に厳しい波浪条件も再現できる。
- 2次元造波水路の一般的な規模は、幅が 0.3 m から 1.5 m、深さが 0.5 m から 2.0 m である。
- ピストン式の造波板がよく用いられる。
- いくつかの形式の波吸収システムが反射波の抑制のために造波水路で用いられる。
- 造波水槽の模型は大きさや複雑さが異なる。
- 3次元模型の越波流量はいくつかの場所で測定が可能である。

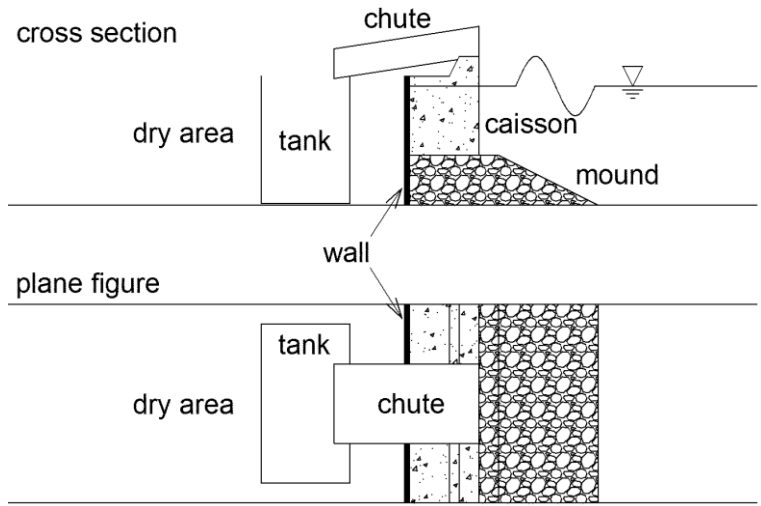
EurOtop Second Edition 2018 には写真とともにいくつかの越波実験事例が紹介されている。模型縮尺が明示されているのは2次元実験の1:50縮尺のみであるが、その他の事例も写真から判断すると1:50程度の縮尺であると思われる。

越波量の測定方法は、導水路を用いて越波水塊を箱の中に集め、箱にたまった水量を測定する方法と、堤防上の越流水深と流速を測定する方法であり、日本国内で実施されている方法と同じである。

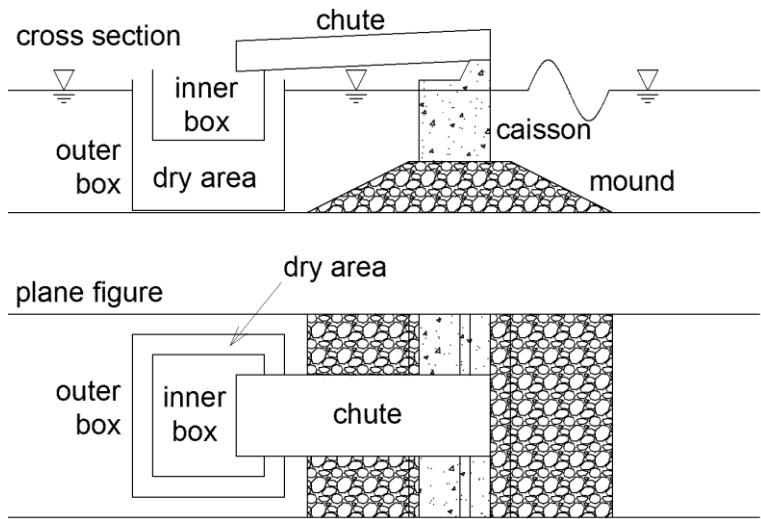
1 波ごとの越波量を測定する方法として、構造物の背後に大きな箱を沈めて空間をつくり、その中に設置した重量計の上に内側箱を設置し、越波水塊を内側箱に流入させて重量を測定する方法が紹介されている。

また、越波量の測定と同時に、傾斜堤式の構造物の天端上で越流水深と流速を測定する方法が紹介されている。この越流水深と流速の時刻歴データから越波量の時刻歴データを得ることができる。

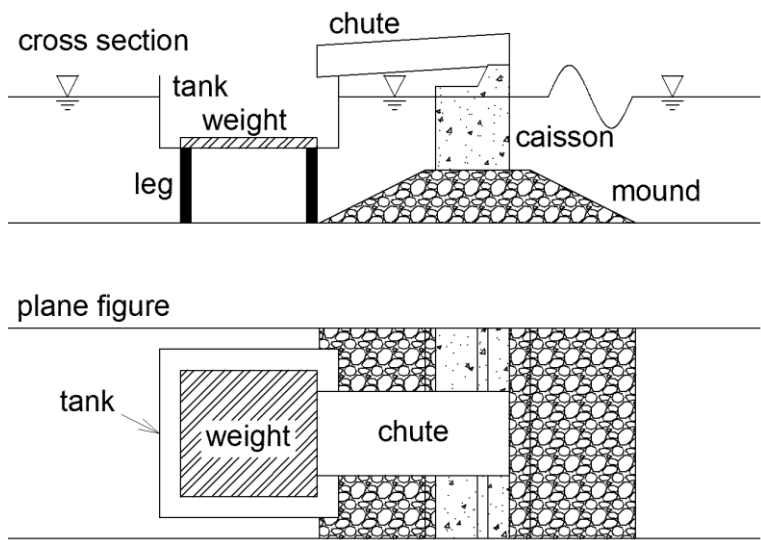
越波水塊をためる箱を設置する方法として、図 3-56 に示すような種類がある。



(1) 模型背後を水なしの領域にする方法



(2) 二つの箱を設置する方法



(3) おもりで箱を沈める方法

図 3-56 越波集水箱を設置する方法の例

2) 高度化のための工夫

時間平均越波流量を把握するためには越波量の総量を把握できればよい。そのためには「1). 越波量測定方法」に示したように構造物の背後に設置した箱の中に越波水塊をためればよく、非常に簡単な方法である。この場合には図 3-57 に示す方法で時間平均越波流量を求める。しかし、越波は常に一定量が越波しているのではなく、波作用中に越波を生じる時間帯と生じない時間帯がある。短時間に多量に越波を生じると被災を生じたり排水が間に合わないなどの問題を生じる可能性があるため、越波量の時間変化を知ることが重要である。以下に越波量の時間変化を把握する方法を示す。

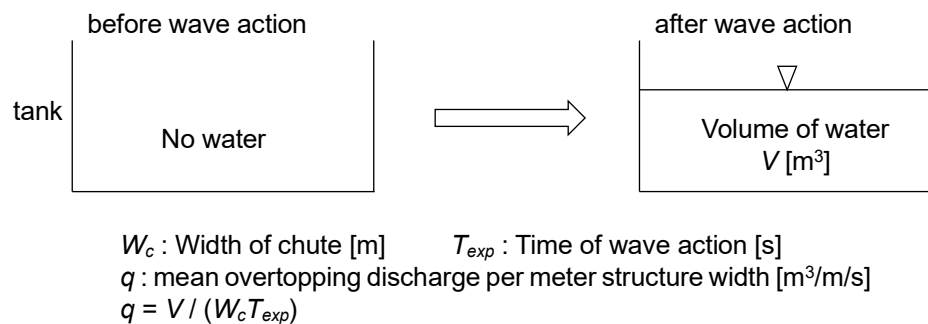


図 3-57 時間平均越波流量の測定および算出方法

図 3-58 に示すように越波水塊をためる箱の中の水位変化を把握することで、図 3-59 に示すように越波量の時間変化を把握することができる。図 3-59 の越波量の時間変化の右上がりの勾配が越波流量である。実験開始の点 (0,0) と実験終了の点を結んだ線の勾配が時間平均越波流量である。しかし、120 s を過ぎたあたりや 300 s 付近では急勾配の時間変化を生じている。この急勾配部分は短時間に多量に越波している時間帯である。越波箱内の水位測定によって、このように越波量の時間変化を把握することができる。ただし、越波を生じてから越波箱内の水位が上昇するまでに時間のずれがあるので、1 波ごとの越波量を解析する場合には注意を要する。なお、越波量の時間変化を把握する方法として、荷重計により越波箱の重量の変化を測定する方法もある。例えば、図 3-56 の(2)の outer box の中に荷重計を置き、その上に inner box を載せることで越波箱にたまる水量の時間変化を把握することができる。EurOtop Second Edition 2018 にはその方法が紹介されている。

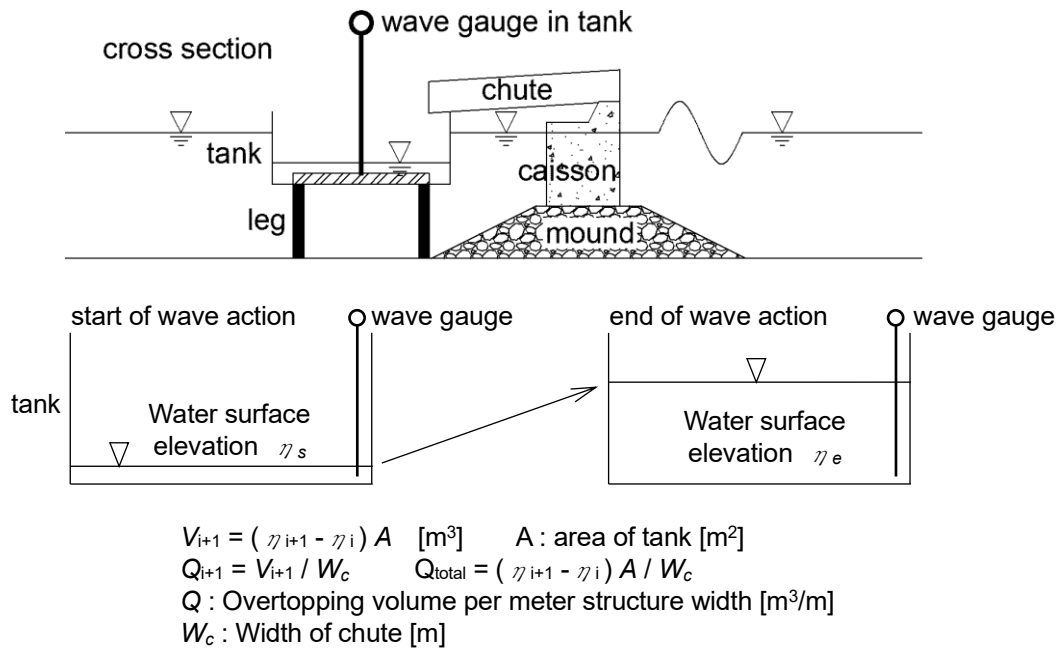


図 3-58 越波量時間変化測定用の越波箱内水位測定と越波量への換算方法

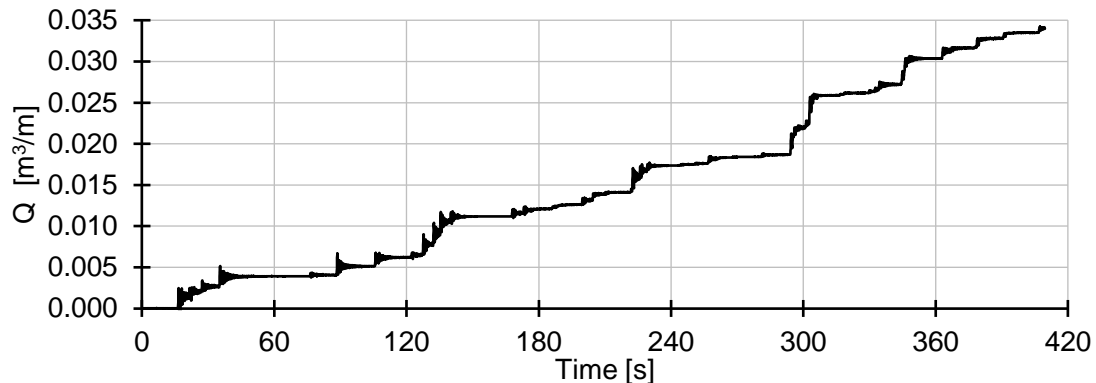


図 3-59 越波箱内水測定による越波量時間変化解析の例

上記の時間のずれの影響を生じさせない方法として、越流公式を採用し、越流係数を総越波量で決定する方法がある。この方法では、越波箱による越波量の測定のほか、図 3-60 に示すように構造物の直前に波高計を設置して、構造物先端の越流水深の時間変化を測定する。具体的には、静止水位からの構造物直前の水面高さを η 、静止水面上の構造物の天端高を h_c として、本間仁³⁻⁸⁾を参考に越波流量 q_{cal} [$m^3/m/s$]を式(3-8)で求める。

$$q_{cal} = C \frac{2}{3} \sqrt{2g} (\eta - h_c)^{3/2} \quad \text{ただし } \eta > h_c \quad (3-8)$$

ここに C は越流係数、 g は重力加速度 $[m/s^2]$ である。この式で計算する q_{cal} の合計

値が越波箱にたまった総水量 q_{exp} と一致するように C を決定することで、越波流量の時間変化の精度を高精度化することができる。 q_{exp} は図 3-60 の tank にたまった水量から図 3-57 の方法で求める時間平均越波流量である。

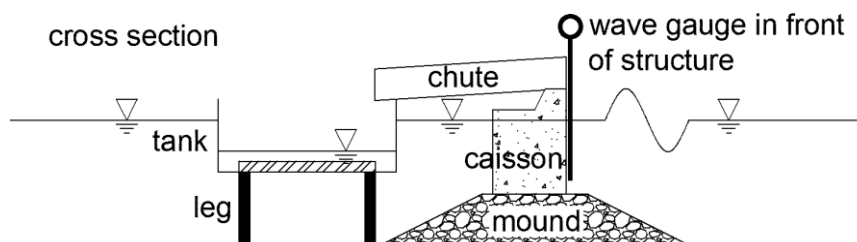


図 3-60 越流公式により越波流量を求める方法の測定内容

なお、越波量が多い条件において越波箱を大きくすると、越波箱内に水が移動した分だけ水路内の水位が低下する。その水位低下量が実験結果に与える影響が大きい場合には、越波を生じても水位が大きくは低下しない方法を採用しなければならない。具体的には、以下のように越波流量を把握することで、水路内の水位低下の影響を除去できる。

- (1) 実験結果に影響がないように越波箱を小さくし、越波箱の後端から越波水があふれ出るようにする。
- (2) 越波箱後端の水位の時間変化を波高計で測定し、式(3-9)に示す刃形堰の流量公式（全幅堰）³⁻⁹⁾により越流量を算定する。

$$Q = CBh^{\frac{3}{2}} \quad (3-9)$$

$$C = 1.785 + \left(\frac{0.00295}{h} + 0.237 \frac{h}{W} \right) (1 + \varepsilon)$$

ここに、 Q ：越流量 (m³/s)

C ：流量係数 (m^{1/2}/s)

B ：堰の幅 (m)

h ：越流水深 (m)

W ：水路底面より堰縁までの高さ (m)

ε ：補正項 ($W \leq 1$ m の場合には $\varepsilon = 0$ ， $W > 1$ m の場合には $\varepsilon = 0.55(W - 1)$)

である。

3-4-2. 伝達波

1) 伝達波の測定方法

護岸など背後が陸域の場合には構造物を乗り越えた波の量を取り扱うが、防波堤は背後が水域であるため、構造物を乗り越えた波が背後水域に与える影響を伝達波として取り扱う。伝達波の測定は、波高計を使用して防波堤背後の水面変動を測定することで実施する。

2) 高度化のための工夫

【伝達波測定位置】

防波堤を越波した水塊が港内側水面に飛び込む付近では水面の変動が大きいですが、距離がやや離れると水塊が打ち込みの直接的な乱れは弱くなり、水塊が打ち込むことで造波された波が伝達していく。つまり、防波堤からの距離によって伝達波高の大きさが異なる。したがって、実海域の防波堤背後の水域の広さを考慮して、防波堤からの距離が異なる数地点で伝達波を測定する。

【データ収録時間間隔と波高計の較正】

本編の「4-4-1. 伝達波に関する模型実験」の水面波形や周波数スペクトルに示したように、伝達波は入射波よりも周期が短くなるので、入射波の周期でデータ収録の時間間隔を決定すると、伝達波に対する周期分割数が不足する場合があります。そのため、伝達波の周期を考慮してデータ収録の時間間隔を決定する。

また、伝達波は入射波と比べて波高が小さい。したがって、波高計の較正值を構造物より造波機側と同じ設定にすると、測定精度が不足する場合があります。したがって、伝達波を測定する位置の波高計は感度を高めることが望ましい。

【水路終端からの反射波】

伝達波の測定データに水路終端からの反射波が含まれると、伝達波を実際より大きく評価してしまうので、水路終端に消波材を設置して反射波を小さくする。また、必要に応じて水路終端からの反射率を測定し、伝達波の入・反射波の分離を行って、伝達波の入射波としての波高を評価する。

【周波数特性】

伝達波の周期特性を把握するために、周波数スペクトル解析を実施する。港外側と港内側の周波数スペクトルを比較することにより、周期特性の変化を把握する。

【マウンド透過波】

防波堤背後に生じる水面変動は、越波水塊が防波堤の頂部を乗り越えて港内側に打ち込んで生じる越波伝達波の他に、マウンド透過波によっても生じる。マウンドが厚いほどマウンド透過波の影響が大きい。越波伝達波とマウンド透過波を区別して評価する必要がある場合には、この点に留意しなければならない。マウンド透過波の影響を考慮するためには、防波堤模型の前面に越波防止板を設置して越波を生じさせない状態にして防波堤背後の波高を測定することによってマウンド透過波を把握する。防波堤背後に生じる波高を H_{TS} 、マウンド透過波を H_p として、越波伝達波による波高 H_T を $H_T = (H_{TS}^2 - H_p^2)^{1/2}$ で求める。

【水位変化】

越波伝達波を生じると防波堤港外側の水が港内側に移動するので、港外側の水位が低下してしまう。伝達波実験では越波実験のように越波水塊を越波箱にためる必要が無いので、越波水塊を港外側に戻せばよい。実験水路の終端側と造波機側の間に還流装置がある場合には、還流装置を利用することで越波水塊を港外側に戻して水位低下を防止できる。還流装置がない実験水路においては、模型床の沖側端部と岸側端部に開口部を設けることで、越波水塊を港外側に戻して水位低下を防止することができる。

3-5. 波圧・波力

3-5-1. 波圧測定

1) 実験波浪の選定

港湾構造物に作用する波圧を測定する水理模型実験において、実験波浪は不規則波と規則波の2種類が考えられる。不規則波の場合は、検討対象波浪（多くの場合は設計波）を作用させて、波圧の最大値、上位 1/20 の平均値、上位 1/10 の平均値、上位 1/3 の平均値（有義値）などを評価する。規則波の場合には、反射波・再反射波の影響を受けない有効波の実験を実施し、波高を段階的に大きくする実験を実施する。規則波実験の利点は、1 波ごとの波高と波圧・波力の対応を取ることができる点である。図 3-61 に規則波実験による時系列データの例を示す。上の2段は構造物模型を設置せずに測定した波浪データであり、下の2段は構造物模型を設置した状態で測定した波浪と波圧のデータである。構造物模型を設置すると通過波の測定を行えないが、規則波実験では通過波検定との比較により、簡単に通過波のデータと比較することができる。規則波実験の場合には、目視やビデオ撮影による碎波状態の確認も行いやすい。具体的には、「3-2-2.4) 計測機器の応答性」に示したように、規則波の有効波の実験とすることで、解析対象の波

を選定しやすくして波高と波圧のデータの比較やビデオ画像からの砕波状態の確認を容易に行える。ただし、wave setup が大きい条件の場合には、規則波の有効波の実験は wave setup が十分に発生しないうちに造波を停止することになるので、そのような条件では不規則波実験が適している。または、wave setup 量に合わせて初期水位を高くした状態で規則波実験を実施する。

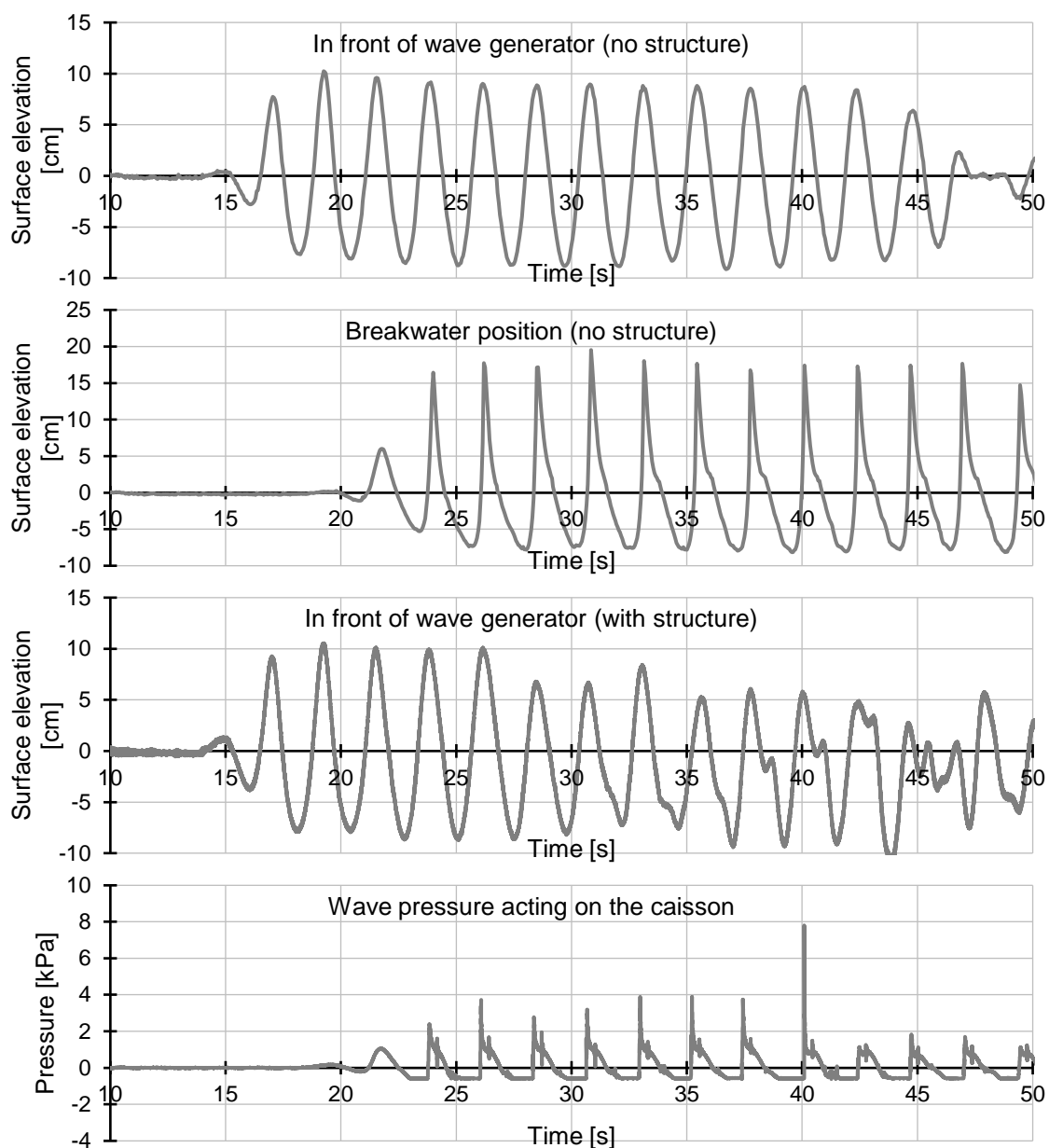


図 3-61 規則波実験による通過波検定と波圧実験の時系列データの比較

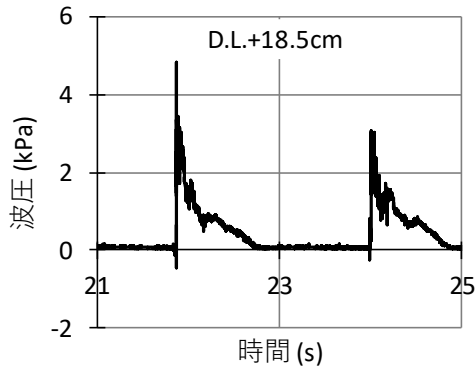
2) データサンプリング間隔および圧力計の選定

港湾構造物に作用する波圧・波力を測定する水理模型実験において、砕波状態の波が作用する場合には作用時間が極めて短い衝撃的な大きな波圧・波力が作用することが頻繁に起きる。そのような衝撃的な波圧・波力を測定することができ

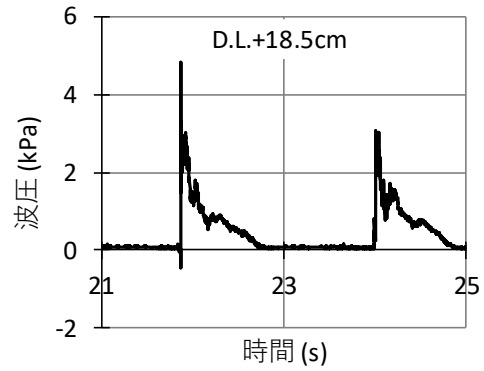
るように、波圧・波力を測定する実験ではデータ収録の時間間隔を短く設定する高速サンプリングの実験を行う。

図 3-62 は防波堤ケーソンの上部工に作用する波圧をサンプリング間隔 0.001 s で測定したデータの間引き処理を行い、サンプリング間隔を粗くすると波圧波形がどのように変化するかを確認した図である。サンプリング間隔 0.001 s では 22 s 付近に衝撃的な大きな波圧の作用が認められる。サンプリング間隔 0.002 s でも衝撃波圧が記録されているが、サンプリング間隔 0.005 s では衝撃波圧は記録されていない。サンプリング間隔を粗くしていくと波形は徐々に滑らかになり、サンプリング間隔 0.05 s では 22 s 付近の波の立ち上がりが斜めにやや緩やかになっており、0.001 s のような切り立った波形になっていない。この結果から、衝撃力が作用するような条件では高速サンプリングが必要であることがわかる。

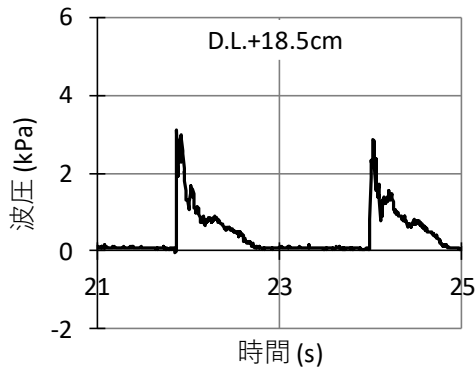
なお、衝撃力が作用する条件で衝撃力を測定する場合には、圧力計の応答速度が十分に速くなければならない。例えば、0.001 s の高速サンプリングを行っても、圧力計の応答速度が 0.1 s しかなければ衝撃力を検出することはできない。これに関して、Hughes, S. A.¹⁻⁵⁾は「圧力計は 1 MHz 以上で反応しなければならない」としている。したがって、水理模型実験に用いる圧力計の選定にあたっては、応答性の確認が必要である。



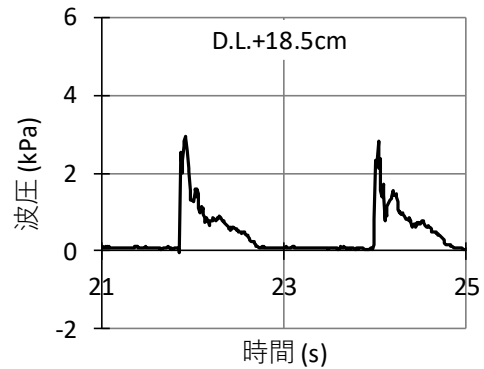
(1) サンプリング間隔 0.001 s



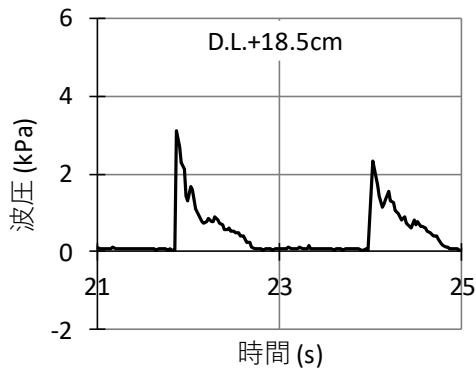
(2) サンプリング間隔 0.002 s



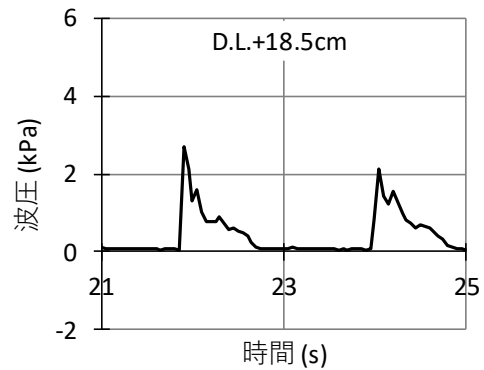
(3) サンプリング間隔 0.005 s



(4) サンプリング間隔 0.010 s



(5) サンプリング間隔 0.025 s



(6) サンプリング間隔 0.050 s

図 3-62 サンプリング間隔による波圧波形の比較

水理模型実験で使用する圧力計は、当然、防水構造でなければならない。

圧力計の定格容量は小さいものでは 10 kPa (約 100 gf/cm²) から大きいものでは 2000 kPa (約 20 kgf/cm²) など、幅が広い。定格容量が大きい圧力計で小さな圧力を測定すると十分な精度が得られない。波高が 10~30 cm 程度の条件であれば定格容量が 10 kPa 程度の圧力計を使用することが望ましい。ただし、定格容量が 10 kPa の圧力計を水深が 1 m の位置に取り付けると、静水圧だけで定格容量に達してしまうので、圧力計を取り付ける深さも考慮して定格容量を決定する必要が

ある。

3) 圧力計の取り付け

図 3-63 に波圧測定のための圧力計の取り付け方法を示す。左図のように模型表面に圧力計を取り付ける方法が簡単であるが、圧力計の受圧面が模型表面とそろっていないので、圧力を適切に測定することができない。波や流れが正面から作用する条件であればまだよいが、斜めに作用するような場合には圧力計の側壁にも波が作用するようになる。そのため、右図に示すように圧力計の受圧面が模型表面と揃うように、模型に圧力計を埋め込むように取り付ける。

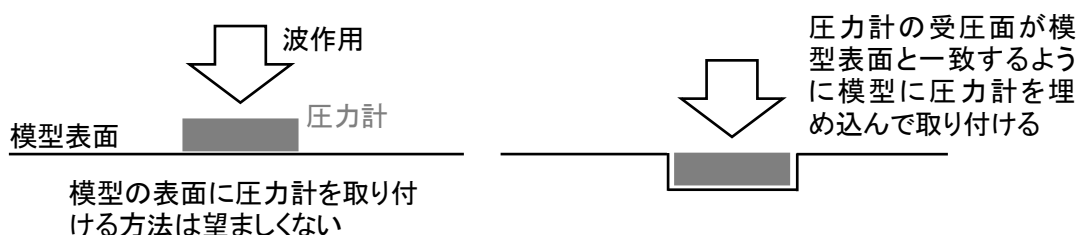


図 3-63 圧力計の取り付け方法

4) 模型の強度と模型の設置

波圧を測定する対象物が波により変形や移動をしてしまうと、測定される圧力が実際の圧力よりも小さくなってしまう可能性がある。そのため、波圧測定用の実験模型は、衝撃的な波圧が作用してもたわんだりしないような十分な強度を確保する必要がある。また、実験模型が波作用によって揺れ動かないように強固に設置する必要がある。したがって、波圧実験を「3-6. 滑動・転倒」に示す滑動実験と同時に実施する際には、配慮が必要である。例えば、造波水路の幅方向に 3 函のケーソン模型を設置し、壁際の 2 函は非滑動ケーソンとしてそのどちらかで波圧測定を実施し、中央のケーソンを滑動実験の対象とする方法がある。

3-5-2. 波力測定

1) データサンプリング間隔と計測機器の選定

「3-5-1. 波圧測定」に示したことと同様に、波力測定においても衝撃力を検出できるように高速サンプリングが必要であり、衝撃力を検出できる計測器を選定する必要がある。

2) 2次元実験と3次元実験における測定方法の違い

3 分力計を用いて港湾構造物に作用する波力を測定する際に、対象とする構造物の特性に合わせて分力計の測定成分や模型の取り付け方法を決定する。

図 3-64 に混成防波堤のケーソンに作用する波力と、分力計へのケーソン模型の取り付け方法を示す。混成防波堤ケーソンの設計において、ケーソンに作用する波力は図 3-64 の(1)に示すように水平波力と揚力を考慮する。(2)に示すようにケーソンの下に分力計を配置すると、ケーソンに作用する揚力を分力計が阻害するので鉛直力を適切に得ることができない。(3)に示すようにケーソンの上に分力計を配置すると、揚力の測定も可能である。ただし転倒モーメントを測定しにくい。(4)のようにケーソンの背面に分力計を設置すると、背面に作用する波力を適切に評価できない。ただし、波力最大時の港内側は波がない状態の静水圧と考えると、港内側の波力を考慮する必要はない。したがって、2次元水路における波力実験では、(4)の方法で F_x 、 M_y 、 F_z の3成分を測定することが望ましい。留意点として、ケーソン模型をマウンドに接触させずに、ケーソンがマウンドから離れた状態とする。3次元水槽における模型実験において波力測定を行う際に、転倒モーメントよりも水平波力の作用方向を重視する場合には、 F_x と F_y の水平2成分と F_z の鉛直成分を検出可能な3分力計を用いて、図 3-64 の(2)または(3)に示す配置で波力測定を行う。なお、図 3-65 に示すように3分力計を模型床の中に設置し、支持棒を用いてケーソンを固定すると、鉛直成分の測定において揚圧力を得ることができる。この場合、支持棒の周りに鞘管をつけて、支持棒をマウンド石材に接触させないことと、支持棒に波力が作用しないようにする配慮が必要である。ただし、支持棒が長いと正確に測定できない。

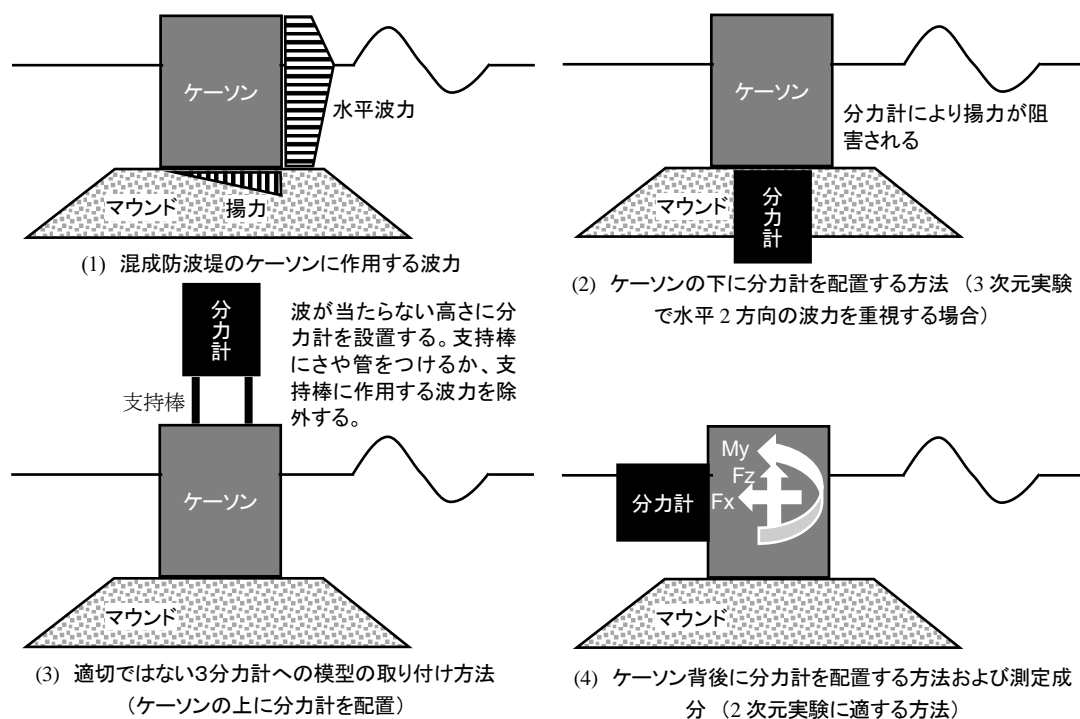


図 3-64 混成防波堤のケーソンに作用する波力と分力計へのケーソン模型の取り付け方法

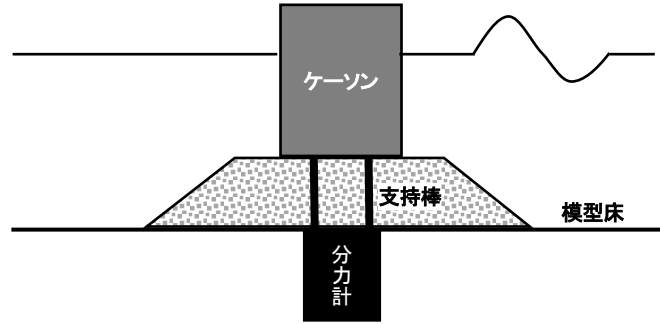


図 3-65 揚圧力の検出を可能とする分力計の使用法

3) 杭に作用する波力の測定

図 3-66 に杭に作用する波力と、分力計への杭模型の取り付け方法を示す。混成防波堤のケーソンと異なり、杭の場合には図 3-66 の(2)に示すように後流の影響が大きい。そのため杭の背面に分力計を配置することは適切ではない。杭には底面からの揚力が作用しないので、杭に作用する波力を測定する場合には、(3)に示すように模型床内に分力計を設置して杭模型を取り付ける。

杭に作用する波力を測定する実験において分力計を下に設置して上に模型を取り付ける方法は、分力計を後ろに設置して前に模型を設置する混成防波堤ケーソンに作用する波力を測定する実験と異なる。このように、測定対象の構造物の構造に合わせて分力計と模型の配置を決定する。

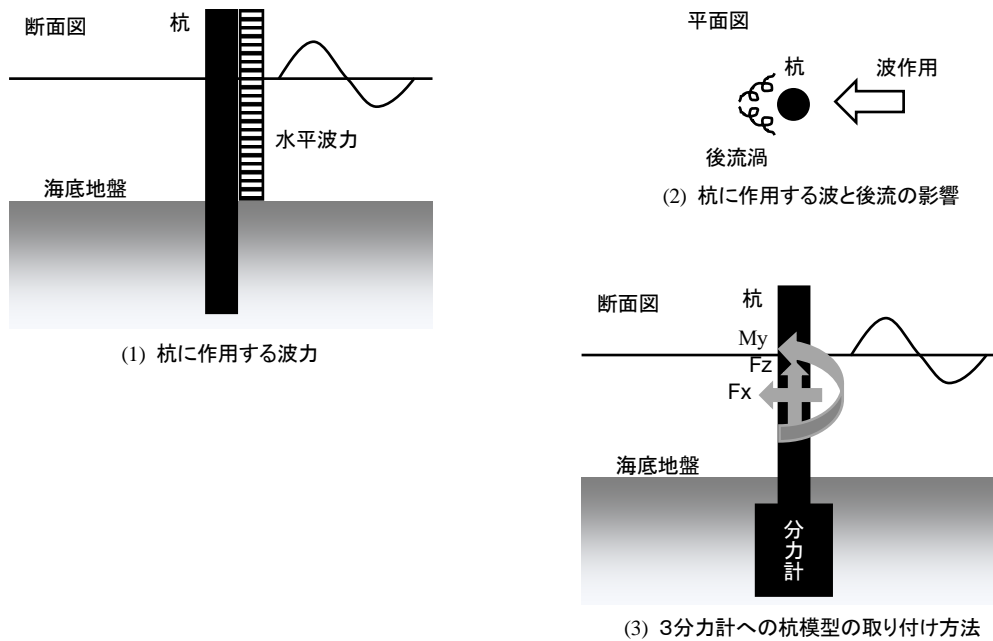


図 3-66 杭に作用する波力と分力計への杭模型の取り付け方法

4) 測定系の強度と固有周期

波力を測定する水理模型実験において、波作用により分力計取り付け台の振動や、模型の振動を生じると、波力の測定値に影響を与えてしまう。そのため、波力を測定する水理模型実験では、分力計および模型を強固に固定して測定を実施する。ただし、分力計は機器内部の部材のひずみにより荷重を検出する構造であるため、分力計に実験模型を強固に固定しても、特定の周波数に対して共振現象を生じることがある。その周波数は実験に使用する模型によって異なるので、共振周波数は実験模型によって異なる。そこで、分力計に模型を取り付けた状態で共振周波数を確認し、実験結果の評価の際に、測定された大きな荷重が共振周波数の影響を受けていないことを確認する。

図 3-67 に波力測定の測定系の固有振動を確認した実験模型配置を示す。岸壁背後の陸上部に設置した胸壁模型に作用する波力を測定する実験である。胸壁模型には揚圧力が作用しないので、波力を測定する分力計は陸上部模型の中に埋め込み、胸壁模型の底面を分力計に固定した。この状態で分力計を水平方向に打撃した際の水平荷重の時系列データを図 3-68 に示す。水平荷重は振動を伴って減衰している。図 3-69 に水平荷重の周波数スペクトル解析結果を示す。単一のピークを有するスペクトル形状であり、ピーク周波数は 36 Hz (0.028 s) である。

図 3-70 に孤立波を作用させた際の水平荷重の時系列データを示す。約 43.9 s と約 44.7 s の二つのピークを有する波形である。一つ目のピークは衝撃的な立ち上がりの後に振動しながら減衰している。二つ目のピークは立ち上がりがやや緩やかで減衰過程に振動は見られない。この波形の 43.9 s からの 1.024 s 間の周波数スペクトルを解析した結果を図 3-71 に示す。約 2 Hz の大きなピークの他に、約 6.8 Hz と約 32 Hz に小さなピークを有する。約 32 Hz のピークは打撃実験の 36 Hz とほぼ同じであるため、32 Hz のピークは測定系の固有振動が影響していると考えられる。ただし、32 Hz のスペクトル密度のピーク値は 2 Hz の 1/10 であるため、このケースの場合の測定系の固有周期が実験結果に与える影響は小さいと判断できる。もしも、造波実験におけるピーク周波数が測定系の固有周期と一致する場合には、測定系の共振の影響を考慮しなければならない。ここでいう測定系とは、計測機器取付架台に分力計を取り付け、さらに実験模型を取り付けた全体のことを指す。

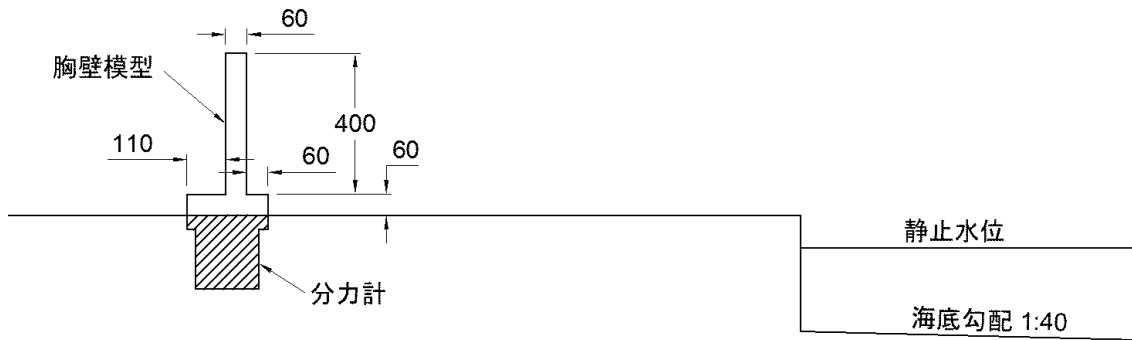


図 3-67 胸壁模型と分力計の配置

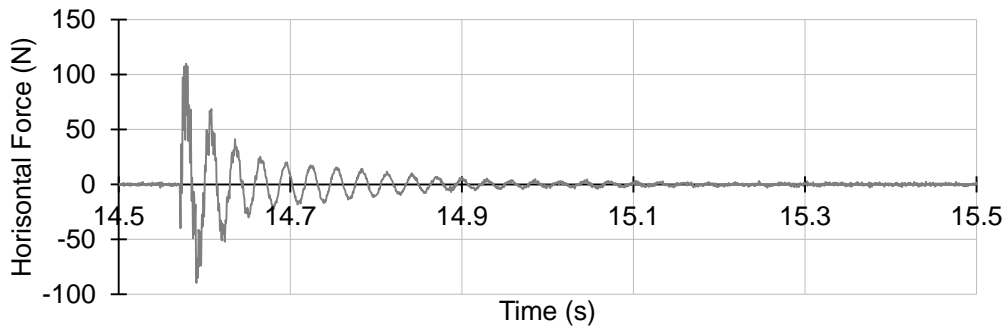


図 3-68 胸壁模型を打撃した際の水平荷重の時系列データ

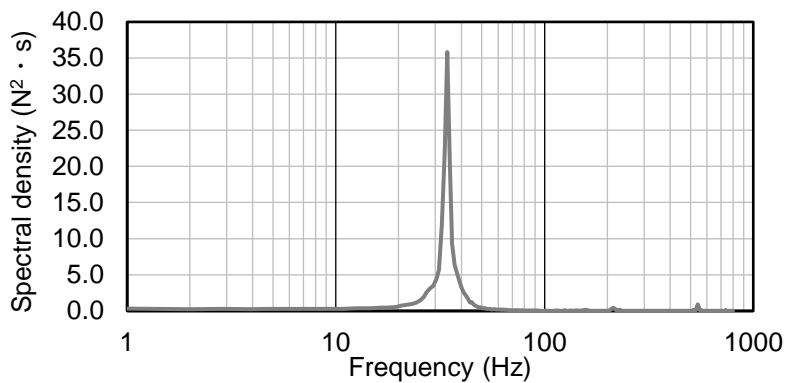


図 3-69 胸壁模型を打撃した際の水平荷重の周波数スペクトル解析結果

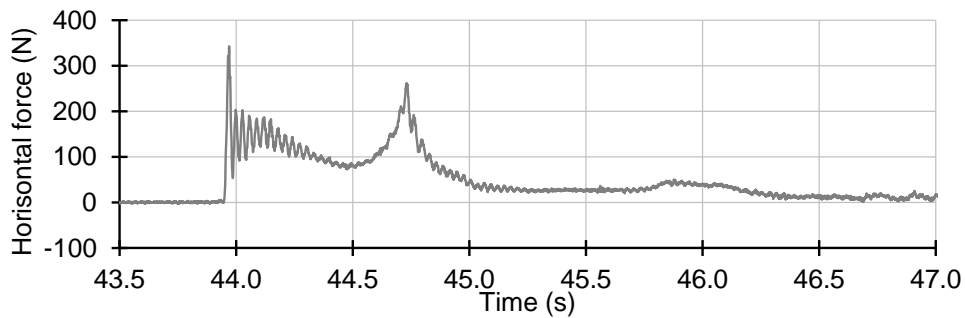


図 3-70 胸壁模型に孤立波を作用させた際の水平荷重の時系列データ

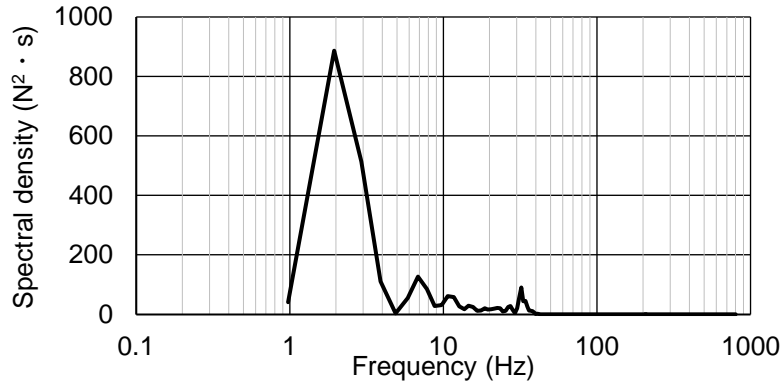


図 3-71 胸壁模型に孤立波を作用させた際の水平荷重の周波数スペクトル解析結果

5) 定格負荷と模型重量

測定精度を考慮して、分力計は作用荷重に近い定格負荷（許容荷重）の機器を選定する。例えば、ケーソン模型に作用する水平波力が 300 N が予想される条件では、定格負荷が 500 N 程度の分力計を選定する。杭に作用する波力を測定する実験において水平波力が数 N しか作用しない条件で定格負荷が 500 N の分力計を使用すると、荷重の測定精度が極めて悪くなる。そのため、作用波力が数 N の場合には定格荷重が 10 N 程度の分力計を使用するなど、作用荷重に適した定格荷重の分力計を選定する。また、定格荷重が 100 N の分力計に重量が 100 N の模型を取り付けると、模型重量だけで定格荷重を使い切ってしまう、波力を測定できなくなってしまう。場合によっては模型が重すぎて分力計が壊れてしまうこともあるので、分力計の選定や模型の取り付け方法の検討において、定格荷重と模型重量について考慮する。

3-6. 滑動・転倒

日本国内の防波堤は、石材マウンドの上にケーソンを設置する混成堤の形式が一般的である。混成堤形式の防波堤の波浪による被災形式は、ケーソンの滑動または転倒が多い。

3-6-1. 実験波浪の選定

混成式防波堤のケーソンの滑動・転倒を対象とする水理模型実験において、実験波浪は不規則波と規則波の2種類が考えられる。不規則波の場合は、検討対象波浪（多くの場合は設計波）を作用させて、波作用中の総滑動量を評価する。規則波の場合には反射波・再反射波の影響を受けない有効波の実験を実施し、波高を段階的に大きくする実験を実施する。規則波実験の利点は、1波ごとの波高と滑動量の対応を取ることができる点である。規則波実験の利点については波圧・波力実験と同じであり、具体的内容については「3-5-1.1) 実験波浪の選定」に示した。

3-6-2. 滑動抵抗力の調整

混成式防波堤の現地における構成材料は、石材マウンドとコンクリート製のケーソンである。実験模型はこれと同様な材料として、マウンド材料に砕石を用いる。ケーソン模型は木材で製作して底面のみモルタルとするか、または全体をモルタルで製作する。どちらの場合にも、ふたは取り外し可能な構造として、ケーソン模型内部に入れるおもりの量によって重量を調整する。

現地における石材マウンドとコンクリート製のケーソンの摩擦係数は、設計上は0.6として取り扱う。実験模型の砕石と底面モルタルのケーソン模型の摩擦係数も、確認実験を行うとほぼ0.6である。ケーソンの滑動安定性を評価する模型実験を実施する際には、模型の滑動抵抗力を測定する予備実験を実施する。図3-72に滑動抵抗力検定方法を示す。滑車を介しておもりでケーソンに引張荷重をかける。この方法は、ケーソンが滑り始めてもおもりを載せた台が床面に到達するまでは引張荷重がかかり続ける。引張荷重はおもりの重量で評価することもできるが、滑車による損失の影響が含まれる。図3-72に示すように模型と滑車の間にロードセルを用いれば、引張荷重を正確に把握することができる。

マウンド石材を台形状に積み上げた状態で引張荷重をかけると、石材層内にすべり面ができて、石材層とケーソン模型の滑動限界以外の要因でケーソン模型の変位を生じる可能性がある。図3-72に示すように箱の中に石材を敷き詰めて実施することで、石材層内にすべり面ができることを防ぐ。また、箱の中で石材層の表面まで水を注入することで、石材層とケーソン模型を湿潤状態にして滑動抵抗力を確認することができる。水かさを大きくしすぎるとケーソン模型に浮力が

作用するので注意する。

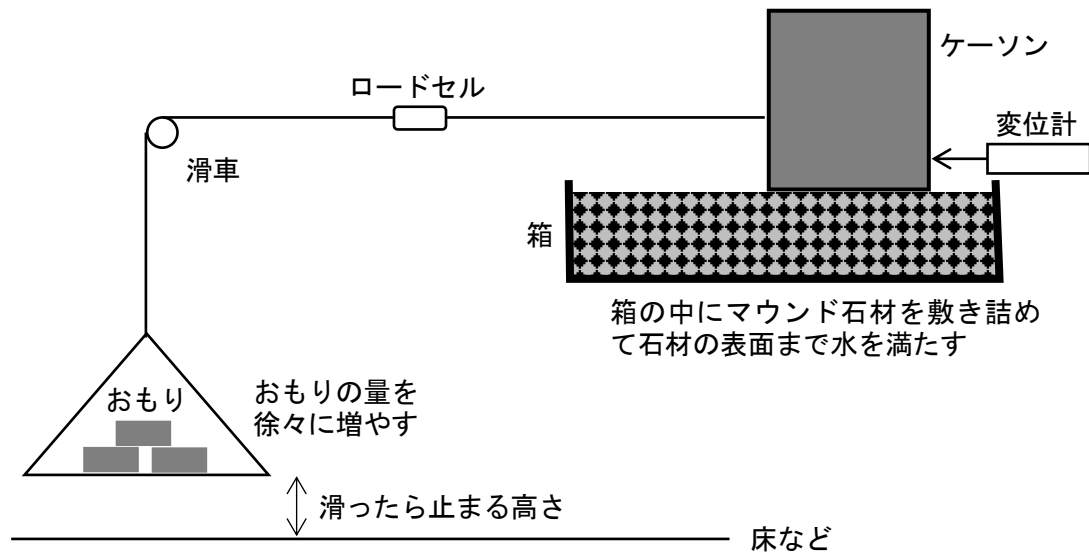


図 3-72 滑動抵抗力検定方法

混成式防波堤は、マウンドとケーソンの間にゴムやアスファルトの摩擦増大マットを入れる事例が多い。水理模型実験においては、ゴムマットやアスファルトマットの性能評価実験でなければ、摩擦増大マットの模型を採用することはほとんどない。現地で適用される摩擦増大マットを実験模型では適用しない場合には、マットによって増大する滑動抵抗力を、実験模型の重量を増やすことで対応する。滑動抵抗力を R_S [kN]、摩擦増大マットありの摩擦係数を μ' 、構造物の重量を W [kN]、摩擦増大マットなしの摩擦係数を μ とすると、滑動抵抗力を合わせるための構造物の重量を W' [kN]は以下のように求められる。

$$R_S = \mu'W = \mu W' \quad \therefore W' = \frac{\mu'}{\mu}W$$

例えば、現地では摩擦係数が 0.75 の摩擦増大マットを使用する施設について、模型実験ではマットなしの摩擦係数 0.60 で実施する場合には、模型ケーソンの重量を約 1.25 倍にする。これはあくまでも目安であり、実際には滑動抵抗力検定試験を実施して、滑動抵抗が目標値と一致するようなケーソン重量とする。

気中で実施する滑動抵抗力検定時はケーソン内に水は入っていないが、実験水路内に模型を設置して給水するとケーソン内に水が入るようでは、ケーソン重量が変わって滑動抵抗力も変わってしまうので、実験模型は気中と水中で模型重量が変化しないように注意する。

滑動抵抗力を調整するために、ケーソン模型内部に入れるおもりの量を調整するが、実験水路内で造波実験を行う際には、重心の高さに注意する。

3-6-3. 実験模型の設定

混成式防波堤のケーソンが滑動する場合には、滑動によりマウンドの崩壊が生じる。ケーソンが1函だけ滑動する場合に、マウンドの崩壊はそのケーソンの直下だけでなく、隣接するケーソンの下のマウンドにも影響する。2次元造波水路の全幅に滑動対象のケーソン模型を設置すると、隣接するマウンドを破壊しながら滑動する現象が発生しないので、滑動状態が現実とは異なった現象になってしまう。そこで、図 3-73 に示すように水路幅方向に三つのケーソンを設置して中央のケーソンを滑動実験対象とすることで、隣接するマウンドを崩壊させながら滑動する現象を再現する。両隣のケーソンは重量を大きくするなどにより滑動を生じないように、非滑動ケーソンとする。

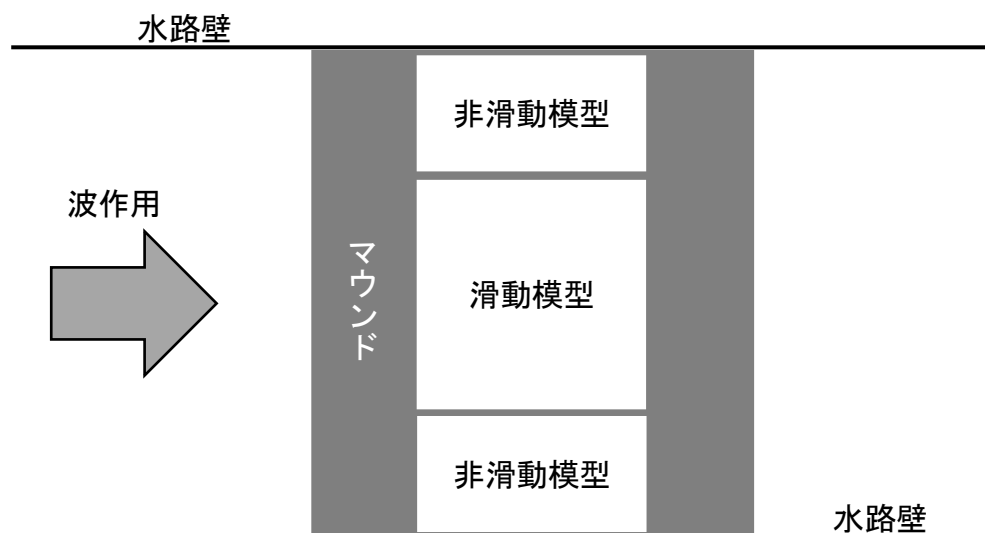


図 3-73 造波水路における滑動実験模型の配置例

3-6-4. 滑動限界波力の評価

設計波高に対して検討対象構造物の滑動安定性を評価する内容であれば、設計波高に対しての滑動の有無を確認すればよい。波力の評価を行う場合には、堤体重量と実験結果から得られた滑動限界波高の関係から滑動限界波力を算定する。衝撃砕波力が作用している条件でも、作用時間が短ければ衝撃砕波力は滑動には寄与しないことが考えられる。これを確認や検証する方法として、滑動実験と同時に波圧測定を実施する。波作用によりケーソン模型が振動や滑動を生じると波圧のデータに影響を生じるので、波圧測定は「3-6-3. 実験模型の設定」に示した非滑動ケーソンで実施する。

3-7. 被覆材安定

混成式防波堤のケーソン直立部は、波力の低減や反射波抑制のために消波ブロックで被覆されることが多い。被覆材の安定性を検証する水理模型実験について、以下に示す。

3-7-1. 被覆材安定実験の実験模型の設置

消波ブロックは形状の種類が豊富である。消波ブロックの種類ごとに空隙率が定められているので、消波工の断面形状と実験水路幅によって消波ブロックの設置個数が決まる。実験実施の際には所定の設置個数で消波工断面形状を形成する。消波工の断面形状内に所定の設置個数以上に消波ブロックが入ってしまう場合には、消波ブロックを詰め込みすぎであり、実際よりも安定性の高い断面を作っていることになる。消波ブロックの設置方法が不明な場合には、消波ブロック模型設置の際にはブロックのカタログやブロック会社へのヒアリングにより設置方法を確認する。

3-7-2. 被覆材安定実験の実験方法

防波堤の消波ブロックは、設置後に何度も波作用を受けて締め固められた状態となったのちに、設計波などの厳しい波浪が作用する。水理模型実験においてもこの状況を再現するために、設計波などの評価対象波浪を作用させる前に、小さな波を作用させて消波工断面が締め固められた状態を作る。その後設計波などの評価対象波浪を作用させて被覆材の安定性を評価する。

被覆材の移動は最高波高の1波で生じるとは限らず、不規則波の中で大きな波が連続する状態や、水面が大きく下がったのちに波が作用するような状態で被覆材が移動することがある。このように被覆材の安定性は不規則な波の連なりの影響が大きいので、不規則波の波群を変えて実験を繰り返す。波群を変えて実験を繰り返す場合には、一つ前の波群の実験で移動したブロックを元の位置に戻すのではなく、消波ブロック模型全体を撤去した後に再設置を行う。これにより、波の連なりの影響だけでなく、消波ブロックのかみ合わせの状態による安定性の違いも考慮することができる。港湾基準¹⁻¹⁰⁾において、ブロックの安定性を評価する模型実験の標準的手法として、「作用波数は1000波以上」、「波群を変えて3回以上の繰り返し」の実施が指定されている。

3-7-3. 段階的波作用

設計波高に対する被覆材の安定性を確認するだけであれば、かみ合わせのための小さい波を作用させた後に、設計波高を作用させて被覆材の状態を観察する。

被覆材の性能を評価する安定実験では、小さな波高から大きな波高へ段階的に

作用波高を大きくして、被覆材の安定限界波高を確認する。波高を段階的に大きくする際には、造波信号は同一の信号を使用して造波板振幅を大きくする。これは、波高以外の要素が被覆材の安定性に影響を与えることを防ぐためである。なお、波高を段階的に大きくしていく過程において設計波高を作用させることで、設計波高に対する安定性を確認することができる。例えば、波高を5段階に変更する際に、1～3段階目はかみ合わせのための波作用、4段階目を設計波高として設計波高に対する安定性の確認、5段階目は設計波高より大きな波高として、設計波高より大きな波が作用した時にどの程度の被害を生じるかを確認する、ということができる。

波高を段階的に大きくする実験においては、図 3-74 に示すように波高を変更する際にはブロック模型の積み直しは行わず、消波ブロックの移動個数は累積で評価する。作用波数は波高の各段階で 1000 波ずつとする。波高の最後の段階（図 3-74 の場合は 5 段階目）の作用が終わって波群を変更する際には、消波ブロック模型をすべて撤去してから、消波ブロック模型の再設置を行う。

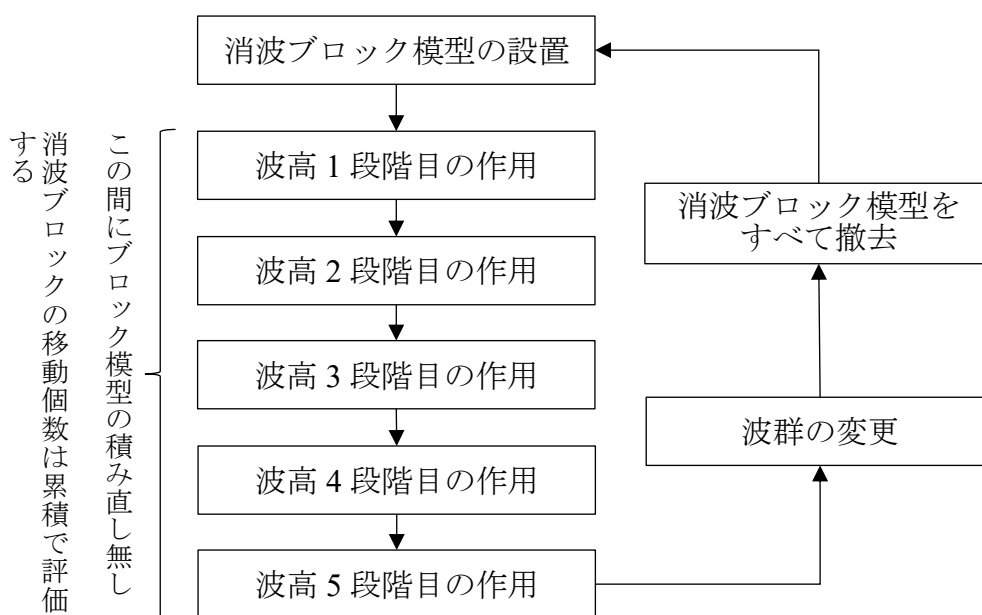


図 3-74 段階的波作用と波群変更における消波ブロックの積み直し

3-7-4. 被覆材の安定性の評価

2次元造波水路に消波ブロックによる消波工を設置すると、水路壁沿いの消波ブロックは壁面と接触しているので十分なかみ合わせが得られない。そのため水路壁沿いの消波ブロックは移動を生じても安定性の評価対象外とする。

水理模型実験では水道水を使用するので、水の単位体積重量が海水と異なるため、被覆材の安定性の評価においては水の比重の違いを考慮する。水道水の比重

を 1.00、海水の比重を 1.03 とすると、3%の違いがある。水の比重の違いを考量する方法はいくつかあり、それらを以下に示す。

- (1) 被覆材模型の比重を実物より 3%小さくする。
- (2) 実験結果に基づき被覆材の安定数を算出する際には水の比重を 1.00 とし、現地に適用するブロック質量を算定する際には水の比重を 1.03 とする。
- (3) 水の比重の違いを考慮して実験波高を大きくする。

3-8. 防波堤の耐津波安定性

津波による防波堤の被災形態は、津波波力型、越流洗掘型、堤頭部洗掘型、引波水位差型の4つに分類される(有川ら³⁻¹⁰⁾)。津波波力型は、波としての波力、段波津波波力、港内外の水位差によって生じる水平力のいずれかにより滑動する被災形態である。ここでは、水位差に対するケーソンの安定性と、越流による港内側マウンドの安定性について示す。なお、防波堤の耐津波安定性に対する水理模型実験は、防波堤の耐津波設計ガイドライン³⁻¹¹⁾の参考資料3に紹介されている。

3-8-1. 水位差に対するケーソンの安定性

1) 津波の発生方法

防波堤の港内外の水位差による水平力に対してケーソンの安定性が問題となる場合には、越流を伴うことが多い。そのため、ポンプを用いた循環流装置を用いて港内外の水位差を再現することが多い。ゲート式やチャンバー式で高いところにためた水塊を落下させて津波を発生させる方法でも水位差に対するケーソンの安定性を検討できなくもないが、津波の先端波力のほうが勝る可能性があるため、注意を要する。造波板を押し出す孤立波により水位差による水平力に対するケーソンの安定性を検討することは困難である。これらの津波発生方法の概要を図3-75に示す。

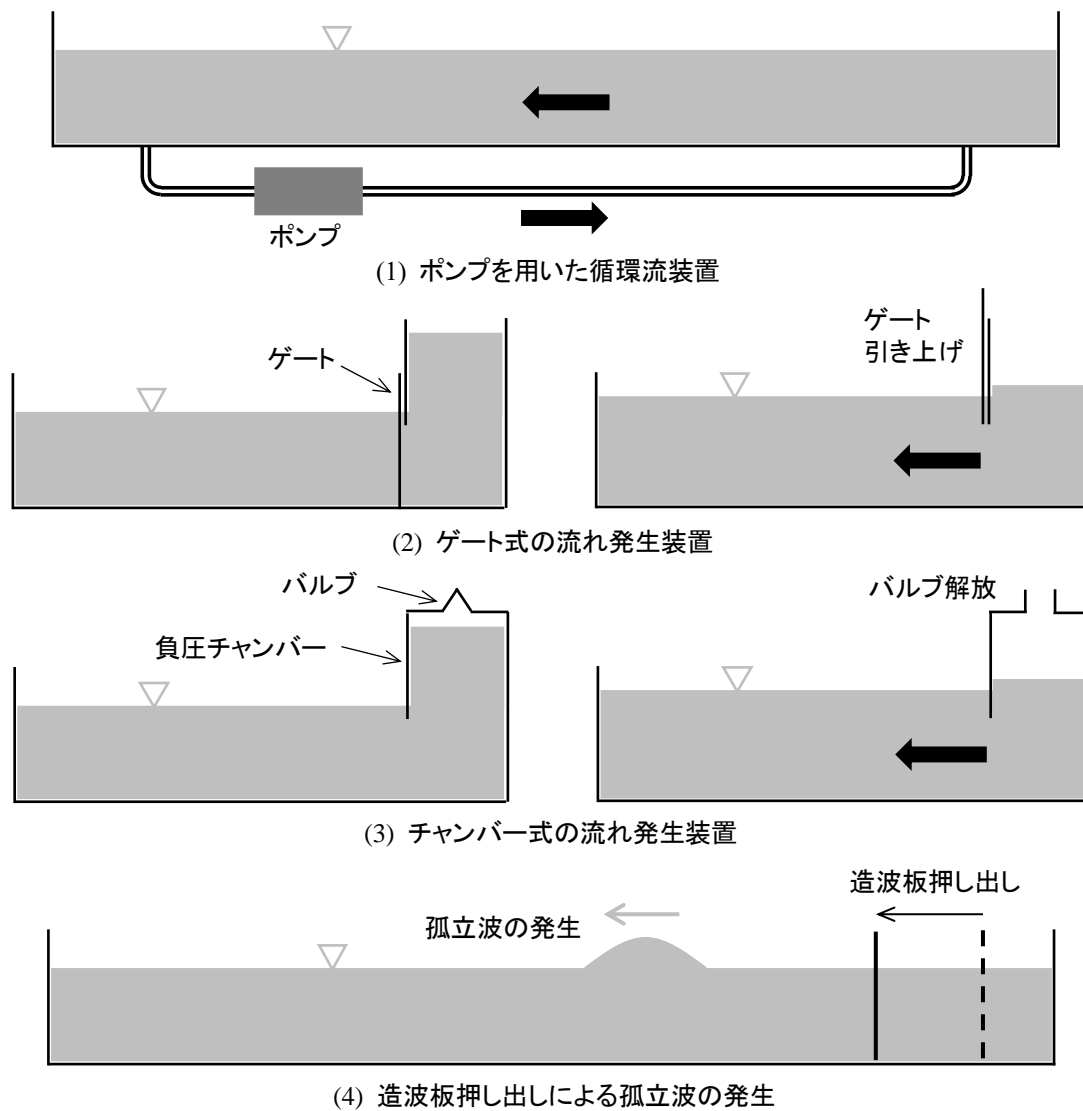


図 3-75 2次元水路における津波の一般的な発生方法

2) 実験方法

水位差による水平力に対するケーソンの滑動安定性を検討する実験であるため、外力の発生方法に違いはあるが、実験方法は「3-6. 滑動・転倒」と同じである。

防波堤の耐津波設計ガイドライン³⁻¹¹⁾に、静水圧差による算定式が示されており、前面は静水圧に 1.05 倍、背面は静水圧に 0.9 倍した静水圧で検討するとされている。水圧差に対するケーソンの安定性を検討する実験においては、「3-6. 滑動・転倒」に示した非滑動ケーソンにおいてケーソンに作用する圧力を測定し、静水圧の補正係数を確認する。その際にケーソン底面と上部工天端上の圧力も測定し、鉛直力の補正の必要性も確認する。

水位差による水平力は衝撃成分が含まれないので、データ収録において高速サンプリングの必要はない。風波の実験では波周期に対しての分割数でサンプリン

グ間隔を決めるが、津波は非常に周期が長いので、周期に対する分割数は考えない。衝撃的な成分が含まれないことから、データの収録は 10~20 Hz で十分である。

3) 実験条件の設定

水位差による水平力を対象とする場合には、港内と港外の静水圧の差が最も大きい条件が、堤体の安定に対して厳しい条件であると言える。したがって、津波シミュレーションの時系列データから港内外の水圧差を確認して、水圧差が最も大きくなる状態を実験条件とする。水圧差が最も大きくなる条件は、押し波の場合に港外側の水位が最も高い状態や、引き波の場合に港内側の水位が最も高い状態であるとは限らない。図 3-76 に示す津波波形の場合には、水位差がもとも大きくなるのは港外側の水位が高い第 1 波ではなく、港内側の水位が低い第 2 波で生じている。

実験水路内の水位変化を津波波形と完全に一致させることは困難であるため、上流側と下流側の水位が目標条件に到達する過程や、目標条件から終了状態に至る過程で、津波シミュレーションでは発生しないような厳しい条件になってしまう場合がある。予備実験において津波発生方法の調整を行う際には、目標水位条件への到達過程と終了過程において、目標条件よりも厳しい状態が発生しないことを確認する。

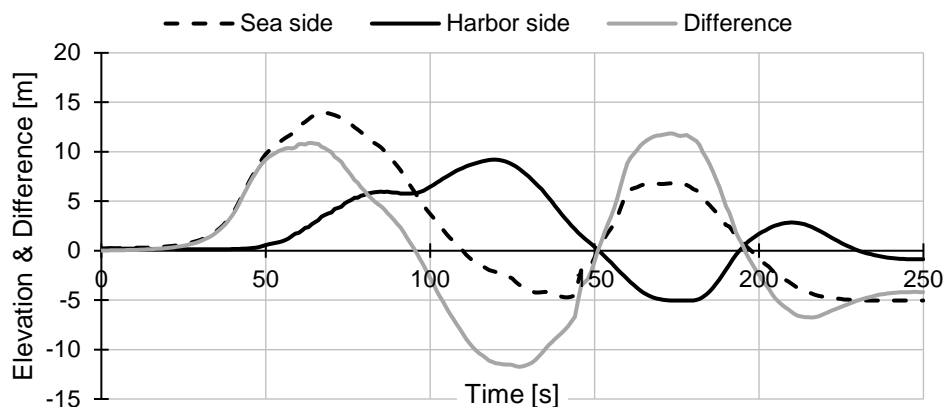


図 3-76 防波堤の港外側と港内側の津波波形と水位差の例

3-8-2. マウンド被覆材の耐津波越流安定性

1) 津波の発生方法

津波が防波堤を越流して港内側マウンドに作用することに対する、マウンド被覆材の安定性を検討するので、防波堤を津波が越流する状態を実験水路に再現する。そのため、ポンプを用いた循環流装置を用いて港内側の水を吸い上げて港外

側に供給することで越流状態を再現することが多い。ゲート式やチャンバー式で高いところにためた水塊を落下させて津波を発生させる方法でも越流状態を発生させることができる。この方法の場合、高所にためられる水量により越流を継続できる時間に制約を受けるので、越流継続時間が足りることが条件となる。造波板を押し出す孤立波により越流状態を作ることもできるが、越流の継続時間がごくわずかであるため、この方法をマウンド被覆材の耐津波越流安定性の検討に採用することは少ない。以上の津波発生方法を図示すると前出の図 3-75 のとおりである。津波越流状態の発生方法として、初期水位を構造物の天端より高くしておき、港内側の水をポンプで吸い上げて水位を下げることもできる。引き波時にマウンド被覆材の安定性が問題となる場合には、この方法が適している。陸上に遡上した津波が引き波時に岸壁から流れ落ちる現象も、これに相当する。

ポンプを用いて越流状態を発生させる場合に、ポンプの能力が足りないと水位の時間変化が実際の現象よりも緩やかになってしまう。実際の越流現象が完全ナップであっても、水位の上昇速度が遅いと付着ナップになってしまう場合がある。そのような場合には、水位上昇の速さが実際の現象と一致する程度に速くなるような工夫を行う。例えば、越流の継続時間が短い条件の場合に、造波板を用いて孤立波を作用させる方法で付着ナップを解消した事例がある。

2) 実験方法

津波越流に対するマウンド被覆材の安定性を検討する実験であるため、外力の発生方法に違いはあるが、実験方法は「3-7. 被覆材安定」と同じである。

津波越流に対するマウンド被覆材の安定性の検討は衝撃成分が含まれないので、データ収録において高速サンプリングの必要はない。風波の実験では波周期に対する分割数でサンプリング間隔を決めるが、津波は非常に周期が長いので、周期に対する分割数は考えない。衝撃的な成分が含まれないことから、データの収録は 10~20 Hz で十分である。

「1) 津波の発生方法」に水位上昇の遅さにより付着ナップとなる場合の対処方法を示した。その他の要因で付着ナップとなることもある。その解消方法として、ケーソンの上部工の下流側に空気を供給できるように細工をする方法がある。具体的には下記の方法が簡単である。

- ① 空気を供給したいところにパイプやチューブを差し込む。
- ② 水路仕切り壁のケーソン上部工の下流側の部分に穴をあける。(仕切り壁を立てて水路幅方向に分割する実験方法の場合。)

3) 実験条件の設定

上流側の水位が高いと越流量が多くなり、津波越流に対するマウンド被覆材の

安定性が厳しくなる。下流側の水位が低いと越流の水脈が着水後の減衰が少ない状態でマウンド被覆材に作用するので、津波越流に対するマウンド被覆材の安定性が厳しくなる。ただし、上流側の水位が高くても下流側の水位が高ければマウンド被覆材は厳しい状態とならない。同様に、下流側の水位が低くても上流側の水位が低くて越流水深が小さい場合にはマウンド被覆材が厳しい状態とはならない。したがって、実験対象とする上流側と下流側の水位の設定に配慮する。また、越流に対するマウンド被覆材の安定性は、越流がマウンドの水平部と斜面部のどちらに作用するかによっても異なる。図 3-77 に防波堤の港外側と港内側の津波波形と、マウンド被覆材の所要質量の例を示す。50 s 過ぎに被覆材の所要質量が最も大きくなっている。この時刻は港外側の水位が最大値になるよりも早い。120 s 付近で所要質量が大きくなっているのは、港外側の被覆材に対するものである。このように、どのような水位の状態が被覆材の安定性に対して厳しい条件であるかを見きわめて、実験条件を設定する。

「3-8-1.3) 実験条件の設定」に示したことと同様に、目標の越流状態への到達過程と終了過程において、目標の越流状態よりも厳しい状態を生じないように配慮する。目標の越流状態からの終了過程において生じる厳しい条件を避けることができない場合には、目標の越流状態までの結果でマウンド被覆材の安定性を評価し、その後の終了過程で被覆材の移動を生じても評価対象外とする。

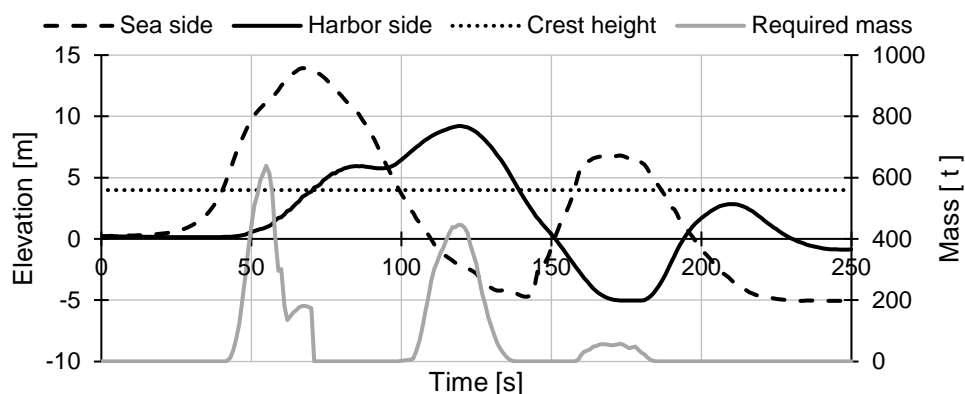


図 3-77 防波堤の港外側と港内側の津波波形とマウンド被覆材の所要質量の例

3-8-3. 海底地盤の洗掘を伴う場合

越流により海底地盤が洗掘される現象を対象に水理模型実験を実施する場合には、模型床を砂地盤などの移動床で製作して実験を実施する。越流の発生方法などは固定床実験と同じであるが、縮小模型における洗掘現象が現地とどの程度一致するかについて、配慮が必要である。

地盤の洗掘に限らず、砂浜海岸の安定性など、砂などの小さな粒子で構成され

る地盤の安定性に関する縮小模型の相似則は、確立されていない。その要因は、海底地盤を構成する粒子の大きさを、現地と縮小模型でほぼ同じとせざるを得ないため、縮尺模型で作用させる外力による砂地盤の変型が現地と一致しないことである。現地において、作用外力と地盤の断面変化の関係を確認し得るデータがあれば、それを実験水槽に再現するための確認実験を実施して、再現精度を高めることができる。

移動床実験における相似則の影響を小さくするためには、実験模型を大きくすることが確実な方法である。大きな実験施設を使って模型縮尺を 1/10 より大きくすれば、模型縮小の影響は小さくなる。ただし、大規模な実験には費用と時間がかかるので、費用対効果を考慮して実験施設や模型縮尺を決定する。表 3-15 に通常規模の実験と大規模実験の実験コストの比較を示す。一般的な規模の実験では手作業で断面設置を実施できるが、大規模実験では大型の天井クレーンやバックホーなどの建設機械の使用が必要となる。天井クレーンの操作は、5t 未満であれば特別教育で操作が可能であるが、5t 以上となるとクレーン運転士の資格が必要となる。

表 3-15 実験水路規模による実験コストの比較

水路規模 (m)		施設使用 料金	模型縮尺	模型設置に必要な人数や日数等 ³⁾	実験実施に必要な人数や日数 ⁴⁾
長さ	高さ				
40～50 ¹⁾	1～1.5	数万円/日	1/50 程度	2～3 人で 2 日程度	2 人で 1 日
150～200 ²⁾	4m 以上	数十万円/日	1/10 以下	4～5 人で 5 日程度 建設重機も必要	3～4 人で 2 日

- 1) 一般的な実験施設の中で比較的大きい実験水路。
 - 2) 大規模実験が可能な実験水路。施設使用料金は 1) の約 10 倍。
 - 3) 実験 1 ケース当たりの模型設置。模型床製作は含まない。
 - 4) 実験 1 ケース当たりの実験日数。移動床実験の場合にはこの 2 倍の日数が必要である。
- 全般) 施設使用料金、模型縮尺、人数や日数はそれぞれの施設における一般的な内容を想定したものであり、全てがこの条件によるものではない。

参考文献 (本編との重複あり)

- 3-1) Hudson R. Y. : RELIABILITY OF RUBBLE-MOUND BREAKWATER STABILITY MODELS, MISCELLANEOUS PAPER H-75-5, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1975.
- 3-2) 合田良美・柿崎秀作 : 有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 5 卷 10 号, 運輸省港湾技術研究所, 1966.
- 3-3) 谷本勝利・富永英治・村永努 (1983) : 水路における不規則波の再反射波の影響について, 港湾技研資料, No.467, 23p.

- 3-4)合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池治(1976):不規則波実験における入射分離の分離推定法, 港湾技術研究所資料, No.248, 24p.
- 3-5)谷本勝利・吉本靖俊(1984):斜め入射波に対する曲面スリットケーソンの反射および部材波力特性に関する実験的研究, 港湾技研資料, No.493, 49p.
- 3-6)橋本典明・永井紀彦・浅井正・菅原一晃(1993):海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法(MEP)の拡張, 港湾技術研究所報告, 第32巻, 第1号, pp.3-25.
- 3-7)久保田進・水口優・堀田新太郎・竹澤三雄(1989):現地遡上域における反射波の特性, 土木学会, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.119-123.
- 3-8)本間仁(1940):低溢流堰堤の流量係数(第1編), 土木学会誌, 第26巻, 第6号, pp.635-645.
- 3-9)水理公式集[平成11年版](1999), 土木学会, p.243.
- 3-10) 有川太郎・佐藤昌治・下迫健一郎・富田孝史・辰巳大介・廉慶善・高橋研也(2012):釜石湾港防波堤の津波による被災メカニズムの検討—水理特性を中心とした第一報—, 港湾技術研究所資料, No.1251, 52p.
- 3-11) 防波堤の耐津波設計ガイドライン(2015):国土交通省港湾局, 平成25年9月(平成27年12月一部改訂)