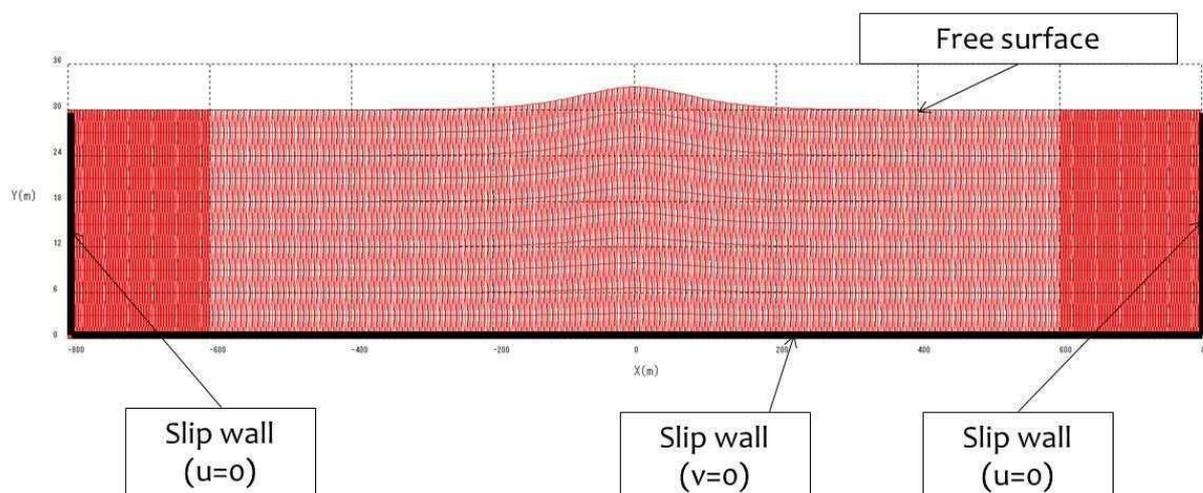


7. 2. 孤立波 (2次元)

次に、自由表面の取り扱いが必要となる孤立波の事例で、本モデルの妥当性を確認する。計算に用いたメッシュは図-5.7.9 通りである。



Nodes=5511, Elements=10,000

$\zeta=3\text{m}$, $h=30\text{m}$, $\zeta/h=0.1$

$L=1,800\text{m}$

図-5.7.9 孤立波の計算に用いたメッシュ図 (再掲)

なお、クーラン数としては、 $C_t = V \cdot \Delta t$ (時間刻み) / ΔL (要素長) = $10^{-4} \sim 10^{-3}$ と設定した。クーラン数の値をかなり小さく設定したことになるが、これは、孤立波が壁面に到達する直前において、自由水面が振動して不安定になる現象が見られたためである。

孤立波の計算結果として、いくつかのタイムステップのスナップショットを図-5.6.10に示す。カラーの凡例は圧力分布を示している。従来の音速法では、反射後に水面形が保持されないこともあったが、本モデルでは図-5.7.10の結果に示すように、孤立波の形状が保持され安定的に伝搬・反射している状況がわかる。このように、孤立波の計算でも、変数の無次元化処理の有無、安定化項の効果の違いが影響し、計算結果に差異が見られるものと考えられる。

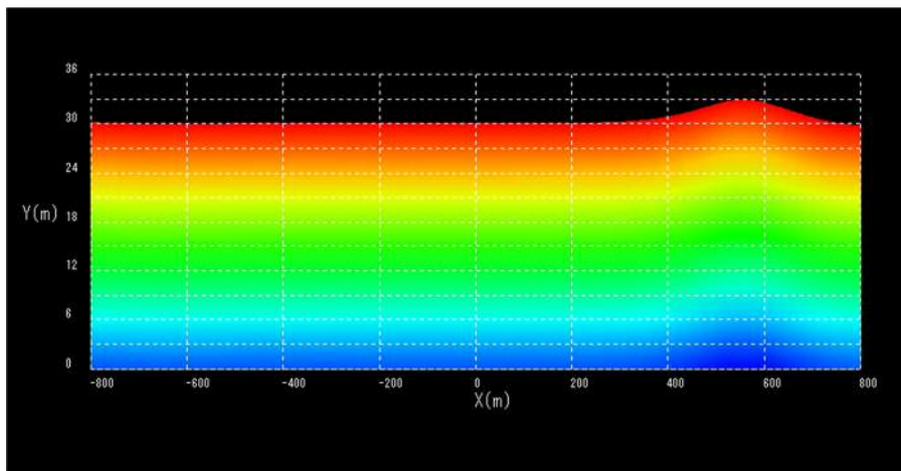
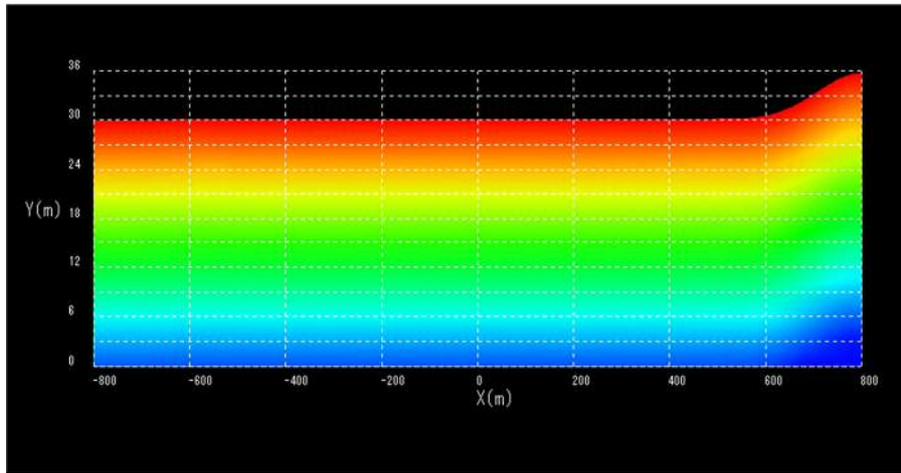
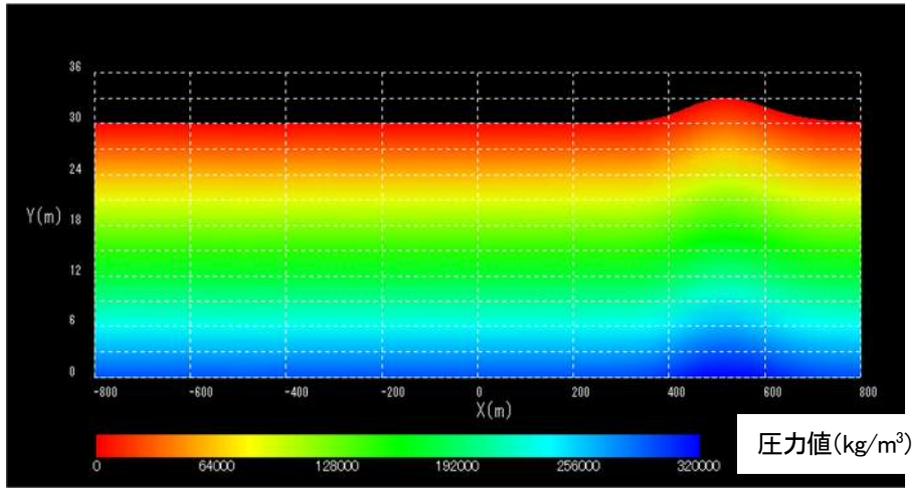


図-5.7.10 孤立波の伝搬状況
 (上段 ; T=30sec, 中段 ; T=45sec, 下段 ; T=60sec)

7. 3. リーフ地形上の孤立波

最後に、リーフ地形上の孤立波の計算の計算条件を図-5.7.11に示す。ノード数は $251 \times 11 \times 11=30,371$ 点、要素数は125,000個、水位 $\zeta=0.12\text{m}$ 、水深 $h=1\text{m}$ である。水路の途中に1/20の勾配を設け、下流側に水深を半分とした0.5mのリーフ地形を設けた。

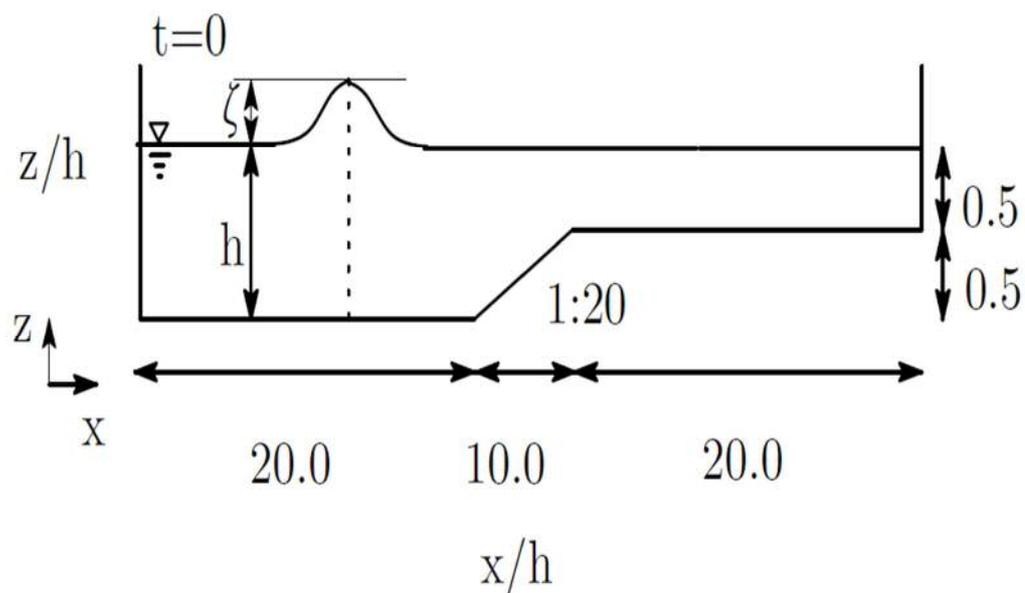


図-5.7.11 リーフ地形上の孤立波の計算条件

計算結果として、Streetらの実験結果との比較を図-5.7.12に示す。図-5.7.12は、リーフ地形の中央付近の $x/h=41.6$ における水位時刻歴の比較であるが、計算結果はStreetらの実験結果と非常によく一致している。また、図-5.6.13には3次元モデルによる孤立波の伝搬・反射状況のスナップショットを示し、図-5.7.14には水面形の時刻歴変化を示す。これの計算結果より、安定的かつ正確な計算結果が得られていることがわかる。

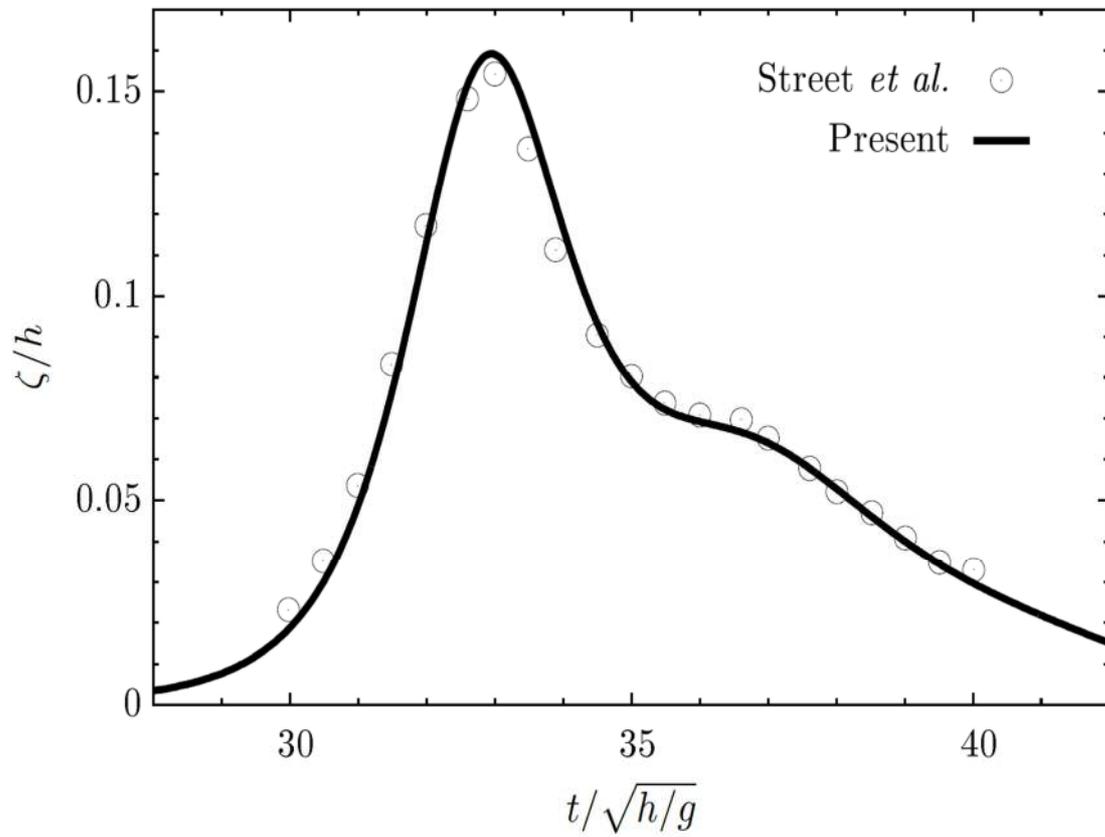


図-5.7.12 水位時刻歴の計算値と実測値の比較

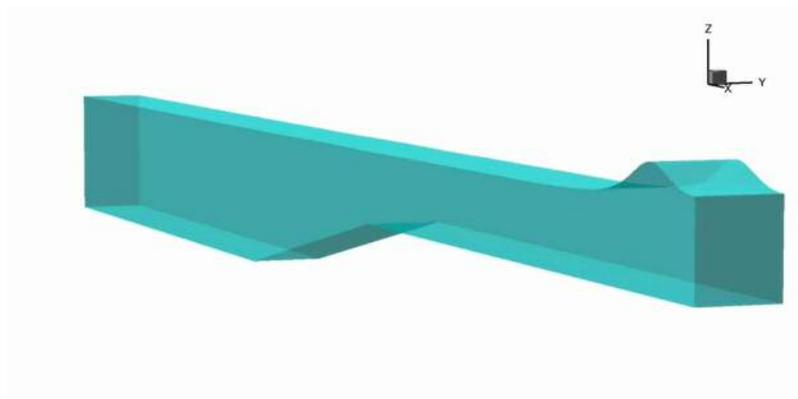
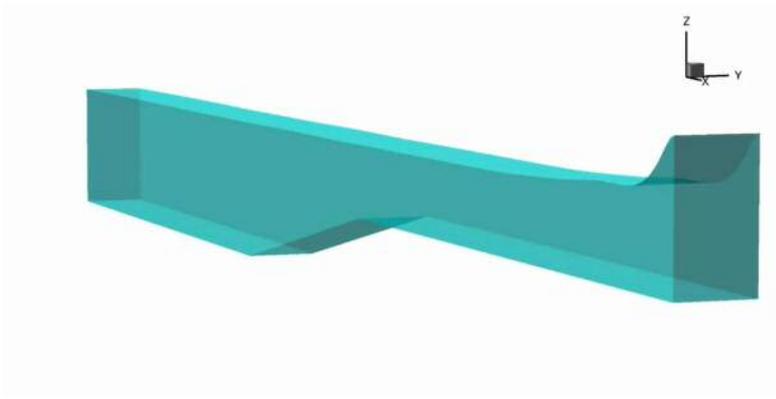
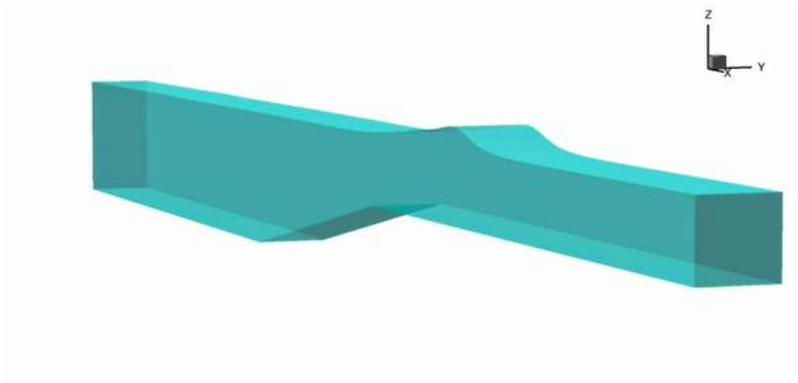
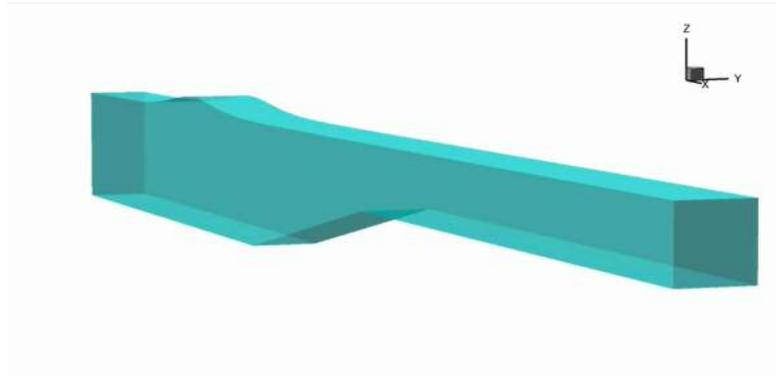


図-5.7.13 孤立波の伝搬・反射状況のスナップショット

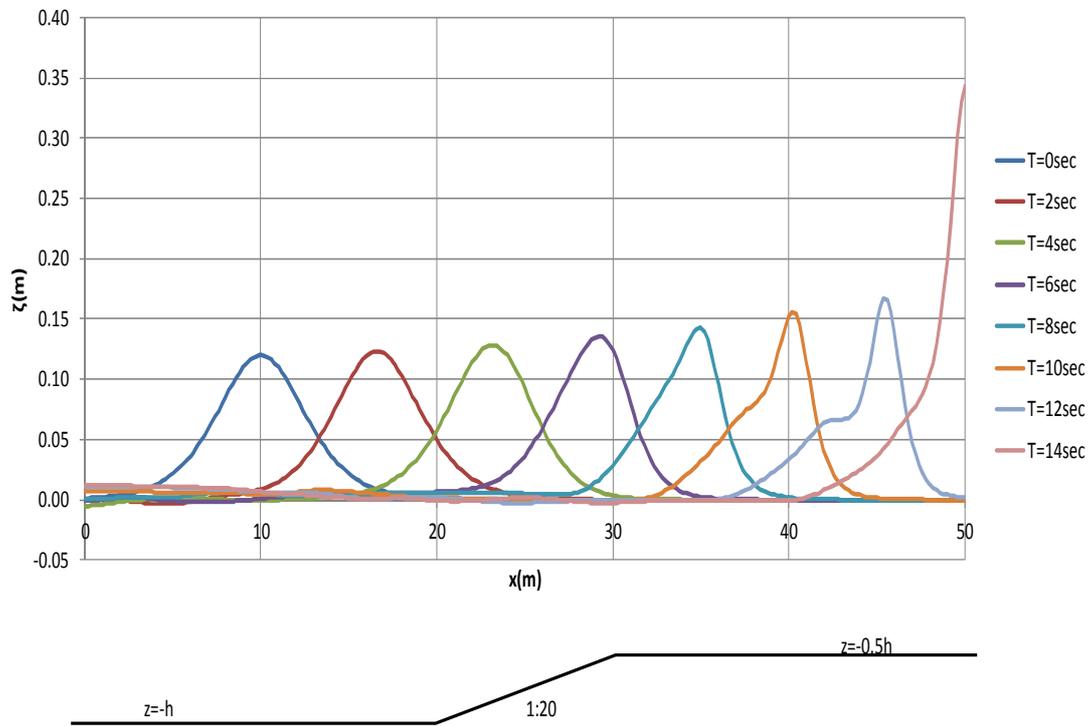


図-5.7.14 水面形の時刻歴変化

8. 計算結果のまとめ

2節および4節で前述したように、従来の音速法をその定式化から見直し、Tezduyarらが非圧縮流体を対象に開発したSUPG項等の安定化項を本来の形で包括的に組み込よう流体解析モデルを改良した。このようなモデルの改良を行うことにより、キャビティ流れや孤立波の事例計算を通じて、計算の精度・安定性が大幅に改良されたことを確認した。

なお、本研究で示した計算では、計算の高速化を図るため、コンパイラによるベクトル計算に加え、メインの計算ルーチンをOpenMPにより並列化させたことを付記しておく。

第 6 章 結論

1. 本研究で得られた成果

本研究で得られた成果を以下に整理する。

(1) 音速法の一般化

従来の音速法をその定式化から見直し、Tezduyar らが非圧縮流体を対象に開発した SUPG 項等の安定化項を本来の形で包括的に組み込よう流体解析モデルを改良した。このようなモデルの改良を行うことにより、キャビティ流れや孤立波の事例計算を通じて、計算の精度・安定性が大幅に改良されたことを確認した。また、従来法では変数の無次元化を慎重に行う必要があったが、一般化された音速法モデルでは無次元化の手続きは不要となった。

(2) 安定化手法の考慮

有限要素法で、SUPG 項・PSPG 項・LSIC 項の安定化項を本来の形で包括的に組み込むことができる定式化を行った。さらには、メッシュ移動に伴う不安定性を解消するため、ALE 法も取り込み、計算の安定性も高めた。これらの安定化手法を考慮することで、直接法で変数（流速、圧力）を求めることが可能となった。

(3) 今後の課題

今後、砕波や越波・越流などを評価できるように、モデルの改良は必要ではある。これらの現象を適確に再現できるようになれば、港湾・海岸分野の耐波設計の実務分野でも応用可能となる。

2. 将来的な展望

空気流体をターゲットとした流体解析では、FSI(Fluid-Structure Interaction)と呼ばれる流体と構造物の相互作用を考慮した研究が諸外国でも多く実施されているが、国内の海岸・港湾分野での事例はまだ少ない。一方、海岸・港湾分野では、東日本大震災以来、「構造物の粘り強さ」と呼ばれる設計思想が掲げられているが、具体的な設計手法はまだ確立されていない。構造物の粘り強さを評価するためには、図-6.1に示すように、設計条件を超える波浪や津波の作用に対して、流体と構造物の相互作用により構造物が少しずつ変形しつつも抵抗する状況を正確に評価できる「動的な耐波設計手法」が必要と考える。本研究で提案した解析手法は、このような分野にも将来的には応用可能と考える。なお、構造物の粘り強さの評価に際しては、基礎マウンドや現地盤のモデル化も重要な課題であり、実用化までには課題が山積している。

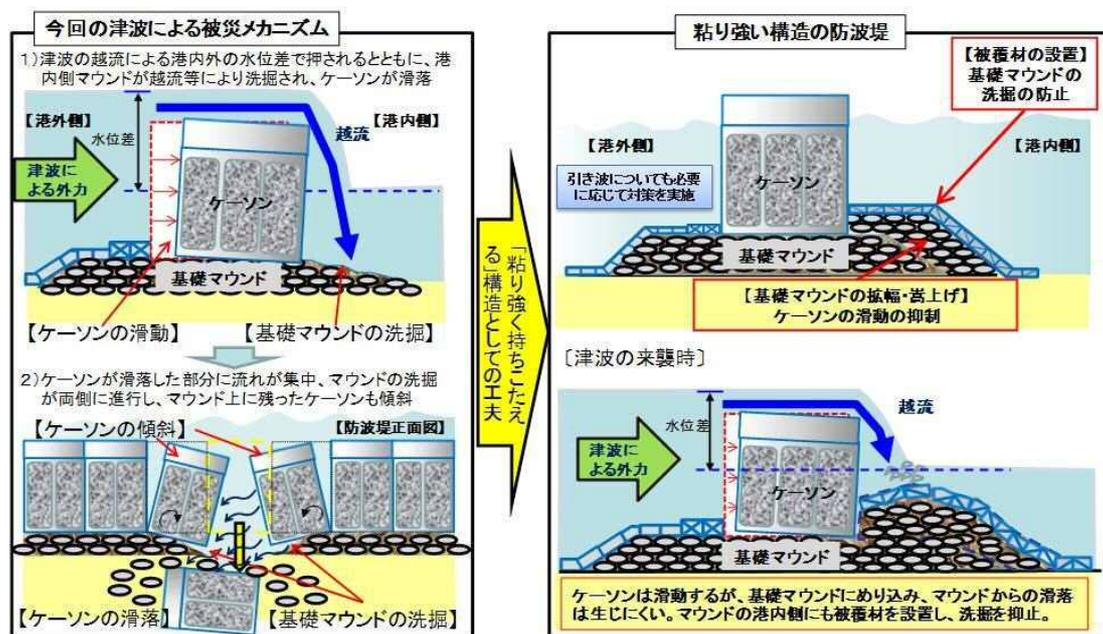


図-6.1 粘り強い構造の防波堤のイメージ (出典：国土交通省ホームページ)

謝辞

本研究を進めるに当たり、多くの方々のご支援をいただきました。最初に、全面的に研究をご指導・ご支援いただきました指導教授の山田正教授に心から感謝の意を表します。学位論文の作成・とりまとめ段階では、有川太郎教授、斉藤邦夫教授、中山司教授、東京大学の田島芳満教授からは貴重なアドバイスをいただきました。さらには、学術論文を作成・投稿する際には、川原睦人名誉教授、八戸工業高等専門学校丸岡晃教授、富山大学の奥村弘准教授からは、多大なるご支援をいただきました。心から感謝の意を表します。

また、このような学位取得の機会をご快諾いただいた日本海洋コンサルタント株式会社の有田正史代表取締役および同社のメンバー各位には、在学期間中に実務面も含め様々な面でサポートいただきました。この場を借りて、感謝の意を表します。

最後に、日頃からの家族の温かい励ましに感謝いたします。

参考文献

- U.Ghia, KN.Ghia, ST.Chan:High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method, *Journal of Computational Physics* , 48(1), 1982, 387-411.
- M. Kawahara: Finite element method of incompressible, adiabatic, and compressible flows: From Fundamental Concepts to Applications (Mathematics for Industry), Springer, 2016.
- M. Kawahara, H. Hirano: A finite element method for high Reynolds number viscous fluid flow using two step explicit scheme, *International Journal for Numerical Methods in Fluid*, Vol.3 (1983), 137-163.
- M. Kawahara, T. Miwa: Finite element analysis of wave motion, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.20 (1984), 1193-1210.
- A. Maruoka, I. Uchiyama, M. Kawahara: Finite element analysis of solitary wave propagation by acoustic velocity method, 2016.10, *Journal of Computational Mechanics*.
- S. Nasu, K. Nojima, M. Kawahara: SUPG finite element method for adiabatic flows, *Computer and Mathematics with Application*, Vol.66 (2013), 250-268.
- H. Okumura, Y. Hikino, M. Kawahara: A shape optimization method of a body located in adiabatic flows, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol.27 (2013), 297-306.
- R.L. Street, S.L. Burges, P.W. Whitford: Dept. of Civil Engng., Stanford Univ. Tech. Rept. No.93, 1968.
- K. Terachi, M. Kawahara: Shape optimization of a body located in viscous flows using the acoustic velocity method, Internal paper in Kawahara Laboratory, Chuo University.
- T. E. Tezduyar and S. Sathe: Stabilization parameter in SUPG and PSPG formulations, *Journal of computational and applied mechanics*, Vol.4, No.1 (2003), 71-88.
- T. E. Tezduyar: Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, *Advances in Applied Mechanics*, Vol.28 (1991), 1-44.
- I. Uchiyama, M. Kawahara: Finite element analysis of adiabatic flows, 13th US National Congress on Computational Mechanics, Jul.26th-Jul.30th, 2015, San Diego, CA.
- 奥村弘・有川太郎：GPUによるCADMAS-SURF/3DのCUDA並列化の検討，土木学会論文集B3（海洋開発），2013.
- 奥村弘・有川太郎：GPUとMPIによるCADMAS-SURF/3DのCUDAのハイブリッド並列化と検討，土木学会論文集B3（海洋開発），2014.
- 牛島 省：OpenMPによる並列プログラミングと数値計算
- 内山一郎・山田 正：Adiabatic流体モデルの耐波設計への適用可能性，計算工学講演会論文集 Vol. 20（2015年6月）
- 内山一郎・丸岡 晃・川原睦人：Adiabatic流体モデルへの安定化有限要素法の適用，計算工学講演会論文集Vol. 21（2016年6月）
- 川原睦人：有限要素法流体解析，日科技連出版

中山 司：流れ解析のための有限要素法入門，東京大学出版会
続・有限要素法による流れのシミュレーション，日本計算工学会
Adjoint感度解析を用いた勾配法による空力形状最適設計，宇宙航空研究開発機構研究開発報告，
2008-02-29
寺地和樹、中央大学大学院修士論文

フレア護岸の設計・製作・施工：神戸製鋼技報，Vol. 59, No. 2, 2009.8.

吉田尚史：流体大規模計算とスーパーコンピューター，平成 20 年度大阪大学サイバーメ
ディアセンタースーパーコンピュータシンポジウム，2008.