

Navier-Stokes方程式に基づく 三次元流体解析を用いた多方向不規則波造波手法の構築 Development of Multi-directional Irregular Wave Generation for Three-dimensional Navier-Stokes Simulations

中央大学大学院理工学研究科都市人間環境学専攻18N3100006D 岡嶋 理功
Department of Civil Engineering, Chuo University, Riku OKAJIMA.

1. はじめに

海洋構造物の設計において、波浪の外力を適切に評価することが重要である。既往の研究では、波の方向性を考慮した不規則波による検討が必要であると考えられ¹⁾²⁾、このような波浪は多方向不規則波と呼ばれる。

一般的に多方向不規則波はLonquet-Higgins³⁾らが提案した重ね合わせの表現方法、光易⁴⁾によるブレットシュナイダー・光易型関数スペクトル、合田⁵⁾による集中度パラメータ S_{max} が使用される。また、平山⁶⁾によるブシネスクモデルを使用した多方向不規則波浪場の検討などが実施されている。近年、海洋構造物の耐波設計に数値波動水路⁷⁾が適用されその適用性の高さが示されている。この数値波動水路はNavier-Stokes方程式を直接解くため、砕波を伴う複雑な波浪変形、波力や越波などの算定をすることが可能になる。しかしながら、三次元流体解析を使用した波の方向性を考慮した数値解析的検討は世界的に見ても検討例が少なく、課題が多く残されている。そこで、本検討では、Navier-Stokes方程式に基づく三次元流体解析を用いた、多方向不規則波造波手法の構築を行い、その妥当性の検証を行う。

2. 研究手法

(1) 数値計算モデルの概要

本検討では、有川⁸⁾によって開発されたCADMAS-SURF/3D (以下CS3D) を使用することとした。基礎方程式は、3次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式及びNavier-Stokes方程式をポーラスモデルに基づき拡張した式である。

(2) 多方向不規則波造波方法について

a) 多方向不規則波形の作成方法

多方向不規則波の水面波形は、式(1)を使用しシングルサンメーション法により作成した。

$$\eta(x, y, t) = \sum_{n=1}^{N_s} a_n \cos(k_n x \cos \theta_n + k_n y \sin \theta_n - 2\pi f_n t + \varepsilon_n) \quad (1)$$

ここで、 (x, y) は平面座標、 t は時刻、 a_n は各成分波の振幅、 k_n は波数、 f_n は周波数、 θ_n は波向き、 ε_n は初期位相、 N_s は波数である。これらの諸量は周波数スペクトルと方向分布関数から算出される。本検討では、ブレットシュナイダー・光易型関数スペクトル⁹⁾と光易⁴⁾が現地観測結果から導いた式を合田⁵⁾らが改良した方向関数⁶⁾を使用した。

各成分波の振幅値と周波数の導出の手順は次のように行う。初めに有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ 及び成分波数 N_s を決定し式(2)を使用することで周波数スペクトルを決定する。その後、式(3)を使用し、周波数スペクトルをエネルギーが等しくなるように分割し成分波毎の周波数 f_n を設定した後、式(4)から振幅値を導出する。

$$S(f) = 0.257(H_{1/3})^2(T_{1/3})^{-4} f^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3}f)^{-4}] \quad (2)$$

$$f_n = \frac{1.007}{T_{1/3}} \left[\ln\left(\frac{2N_s}{2n-1}\right) \right]^{-1/4} \quad (3)$$

$$a_n = \sqrt{2S_n(f)\Delta f_n} \quad (4)$$

また、各成分波の波向きは次の手順で決定される。初めに、設定した S_{max} と式(3)から算出された成分波毎の周波数 f_n を使用して、(5a)もしくは(5b)から S を算出する。ここで、 f_p は周波数スペクトルのピーク周波数である。その後式(6)、式(7)を使用して方向分布を決定後、図-1に示すような累積曲線を算出し、それに[0,1]の乱数を当てはめることで各成分波の波向きを決定する。

$$S = S_{max} \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)^5 \quad f \leq f_p \quad (5a)$$

$$S = S_{max} \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-2.5} \quad f \geq f_p \quad (5b)$$

$$G_o = \left[\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2}\right) d\theta \right]^{-1} \quad (6)$$

$$G(\theta) = G_o \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (7)$$

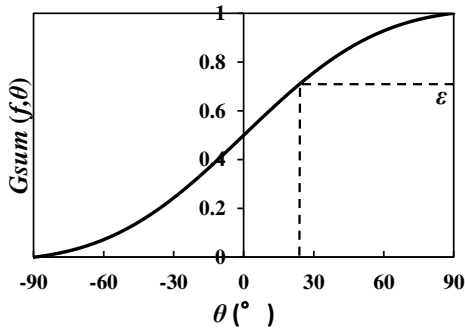


図-1 波向き決定の累積曲線

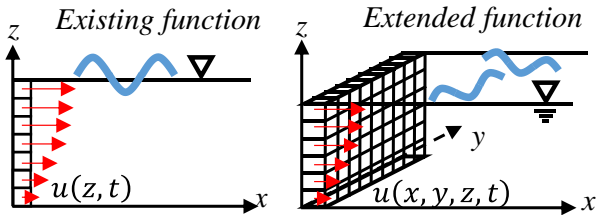


図-2 複数マトリクスデータの同時起動

b) ストークスドリフト分の考慮

多方向不規則波の検討をするとき、合田ら¹⁰⁾によると統計的変動量を減らすためには、200波程度以上を計測する必要があるとされている。しかし、数値波動水槽では、質量輸送により解析領域内の水量が増加してしまう問題が生じる。そこで本検討では藤原ら¹¹⁾を参考に、あらかじめ造波データとして与える水平方向流速からストークスドリフト分を差し引くこととした。

c) 複数マトリクスデータの同時起動及び造波

作成した時系列データをCS3Dへ外部入力するが、既存の機能では、セルごとに異なる時系列データを与えることはできない。そこで、本検討ではCS3Dに既存にあるマトリクスデータによる造波機能を、別々のセルに複数同時に与えることが出来るような機能の導入をした。図-2に示すのはイメージ図である。

d) 造波ソースの併用と二面造波

造波ソース¹²⁾は、指定したセルの中心位置において設定され、流速や水位を直接指定する方法と異なり、造波境界を横切る流量を考慮して湧き出しを与えることで造波を可能にするものである。そのため、構造物や斜面等からの反射波を通過させることが可能であり、長時間の安定した造波が可能になる。そこで本検討では、造波ソースを併用した多方向不規則波の造波が可能となるような改良をCS3Dに加えた。さらに、二面からの同時造波が

表-1 総水量抑制検討の解析条件

Calculation Time (s)	2000
Water Depth (m)	12.0
Wave Height (m)	2.0
Wave Period (s)	10.0
Component Wave Number	500
dx, dy, dz, y(m)	2.0, 2.0, 0.3, 10

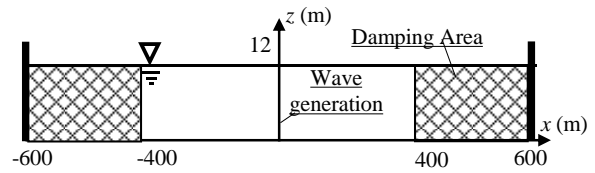


図-3 一方向不規則波解析図面

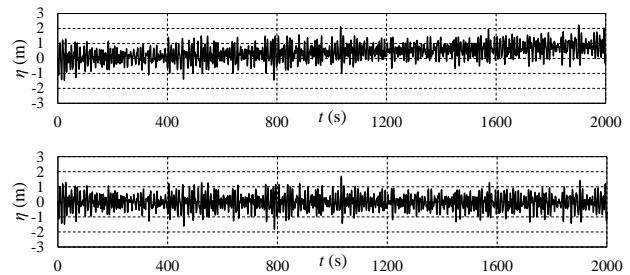


図-4 解析結果の時系列データ

可能となるような機能の追加も実施している。これらの機能の使用で、平山ら⁷⁾に示されている有効造波領域の拡張が可能となる。

3. 初期検討

(1) 一方向不規則波造波時の総水量増加検討

藤原ら¹¹⁾の提案した、ストークスドリフト分の考慮による総水量増加の抑制がCS3Dにおいても適用が可能かの基礎的検討を実施した。表-1に解析条件、図-3に解析図面、図-4には解析結果を示す。図-3に示すように、造波ソースによる造波をしているため減衰領域を前後に設置している。図-4に示す解析結果は造波地点において測定された時系列データである。上段はストークスドリフト分の考慮前で、解析領域内の総水量が+66%(水深で+0.8 m)増加していたのに対して、修正後である下段の時系列データは0.6%(水深で-0.06m)の減少となり、藤原らの手法がCS3Dへも適用が可能であることが示された。

(2) 位相差を考慮した斜め規則波の検討

山野ら¹³⁾を参考に造波ソースと二面造波の機能を併用して実施した。表-2に解析条件、図-5に解析図面、解析映像、及び解析結果を示す。図-5(中央図)は入射角度45度時の20秒時点での解析画像である。また図-5(右図)は、図

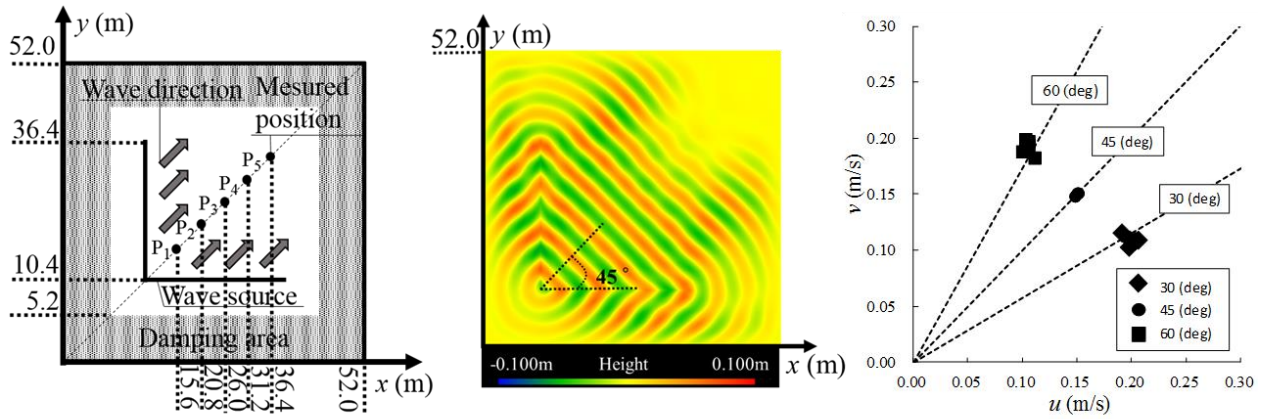


図-5 位相差を考慮した斜め規則波の検討(左:解析図面, 中央:解析映像, 右:解析結果)

表-2 斜め規則波検討の解析条件

Calculation Time (s)	40
Water Depth (m)	1.0
Wave Height (m)	0.1
Wave Period (s)	1.0
Incident Angle (deg)	30, 45, 60
dx, dy, dz (m)	0.4, 0.4, 0.04

表-3 多方向不規則波の造波検討の解析条件

Calculation Time (s)	2100
Water Depth (m)	12.0
Wave Height (m)	2.0
Wave Period (s)	10.0
Component Wave Number	500
dx, dy, dz (m)	20, 20, 0.3

5(左図)に記載したP1~P5地点において測定された、流速 u と流速 v の最大値と最小値の差をそれぞれ記載したものである。図-5 から、位相差を考慮することで指定した入射角度の斜め規則波の造波が可能であることが確認できた。

4. 多方向不規則波の造波検討

(1) 解析条件

表-3 に解析条件を示す。また方向集中度パラメータである S_{max} 値は合田¹⁹⁾を参考に $S_{max}=10, 25, 75$ とした。

図-6 に解析図面を示す。本検討では、造波ソースが境界造波と同様の波浪を造波可能か検証するため、造波位置からの距離が(200 m, 370 m)における計測点 P1 の時系列データを比較した。さらに計測データを使用し、FFT 変換及び EMLM 法¹⁹⁾を使用して周波数スペクトルと方向スペクトルの解析を行い妥当性の検証を行った。

(2) 造波ソースの検証

図-7 には風波($S_{max}=10$)想定時の 100 秒時点の解析映像を示す。映像から同等の波浪を造波出来ていることが確認できる。また、図-8 には造波ソースと境界造波における時系列データの比較を示している。いずれの造波手法においても同等の値が出力されていることが確認出来る。また総水量の増加を抑制する方法を使用することで、解析領域内の総水量は 0.32%(水深で 0.038 m)の減少に抑えることが出来、多方向不規則波の造波において造波ソース

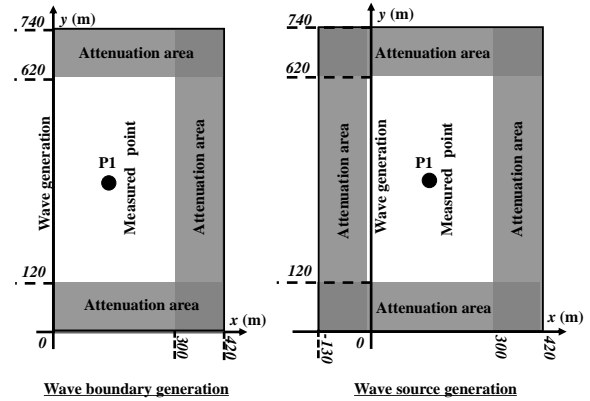


図-6 解析図面(左:造波境界, 右:造波ソース)

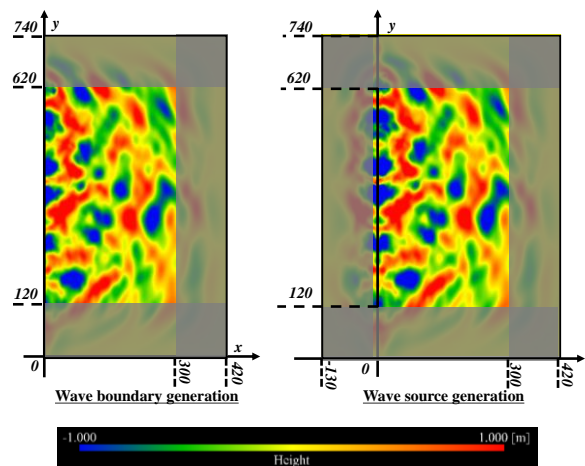


図-7 $S_{max}=10$ の解析映像(左:造波境界, 右:造波ソース)

が境界造波と同様に問題なく使用可能であることを示した。

(3) スペクトル解析結果

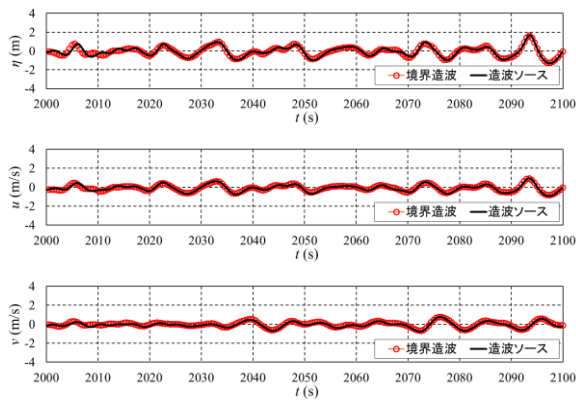


図-8 時系列データ比較(計測点P1)

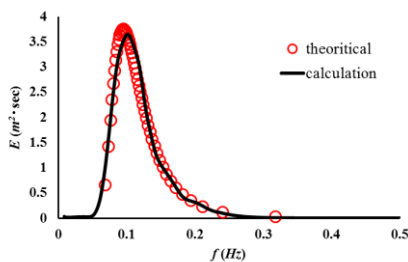


図-9 周波数スペクトル

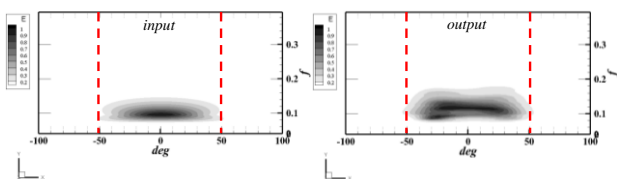


図-10 方向スペクトル(左:理論値, 右:解析結果)

ここでは $S_{max}=10$ における検討結果を示す。図-9 に示すのは、測定された周波数スペクトルである。理論値と同等の数値解析結果が出力されていることが確認できる。また、図-10 に示すのは EMLM 法の使用により得られた方向スペクトルである。理論値との比較により、機能の拡張をした CS3D の使用で、目標とする波浪場と同等の方向集中度を有する波浪場の再現が可能となった。

5. まとめ・今後の展望

本検討では導入した機能の妥当性を確認することが出来、造波ソースの併用で長時間の安定した多方向不規則波造波手法を構築することが出来た。

今後、FEM や漂砂モデルと連成解析を行うことで、耐波設計への適用のみならず、地球温暖化により予想される水深の増大に伴う構造物移動等の検討などへも適用が可能になると考えられる。

参考文献

1) 泉谷尊司：屈折・回折による方向スペクトルの変形計算法，第 32 回海岸工学講演会論文集，pp.169-173，

1985.

- 2) 平石哲也：多方向不規則波の発生とその応用に関する研究，港湾技術研究所報告，No. 723，pp.57-76，1992.
- 3) Weizhi Wang, Hans Bihs, Arun Kamath, Oivind Asgeir Arntsen：Multi-directional Irregular Wave Modelling with CFD，4th International Conference in Ocean Engineering，2019.
- 4) Longuet-Higgins, M.S.: The statistical analysis of a random moving surface, Phil. Trans. Rot., 1957.
- 5) 合田良実，鈴木康正：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算，港湾技術研究所報告，No. 230，45p，1975.
- 6) 光易恒：風波スペクトルの発達(2)-有限な吸送距離における風波のスペクトルの形について，第 17 回海岸工学講演会論文集，pp1-7，1970.
- 7) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港湾技術研究所報告，No.1036，pp47-49，pp91-117，2002.
- 8) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集，数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書，沿岸開発技術ライブラリー，No.30，2008.
- 9) 有川太郎，山田文則，秋山実：3 次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討，第 52 回海岸工学講演会論文集，pp.46-50，2005.
- 10) 合田良実：港湾構造物の耐波設計(増補改訂)，鹿島出版会，pp242-253.
- 11) 藤原隆一：数値波動水路で線形理論を用いて発生させた不規則波の特性及び適用限界に関する一考察，第 52 回海岸工学講演会論文集，pp.41-45，2005.
- 12) 山野貴司，有川太郎，川崎浩司，小竹康夫，秋山実：3 次元数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D への造波ソースの導入とその妥当性，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 66, No.1, pp.I_006-I_010，2010.
- 13) 合田良実：わかり易い土木講座 17 土木学会編集二訂版 海岸・港湾，彰国社刊，p52.
- 14) 磯部雅彦，近藤浩右，堀川清司：方向スペクトルの推定における MLM の拡張，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp173-177，1984.