マンチェスター大学（イギリス）　研修報告書

Wave field reproduction and fluid-structure interaction analysis by coupling potential theory and SPH.

先進理工系科学研究科　輸送・環境システムプログラム　小淵晃暉

1. はじめに

本報告書では2025年9月14日から10月19日の間，イギリスのマンチェスター大学にて行った海外共同研究について記載する．

2. 研修/共同研究課題の決定

本研究室は，波浪エネルギー発電機構を有する浮体式海洋構造物や浮体式洋上風力発電プラットフォームの様々な波浪場における挙動特性や係留索破断影響に関する研究を行っている．

一昨年は，マンチェスター大学の研究チームとともにエジンバラ大学が有する円形水槽(FloWave)で浮体式波浪エネルギー発電装置の挙動特性に関する実験を行った．

昨年は，海洋構造物に影響を与える砕波の再現実験と平滑化粒子を用いた数値流体力学手法(SPH)を用いたモデル化を行った．しかし，SPHを用いての波浪場再現には数値計算に膨大なコストと時間がかかることが常に問題としてあげられる．

そのため本研究では計算コストの削減を可能とするため，SPHによる仮想水槽の各側面に3次元流速ベクトルを付加した．この手法により計算コストを低減させながら複雑波浪場の再現が可能となった．この数値水槽環境に浮体式構造物の適応を行い，挙動特性や係留索モデリングの評価をする．

3. 研修/共同研究スケジュール

本共同研究は，数値解析を主として取り扱った．第1週目に数値計算モデルの実行と波浪特性を確認した．第2週では数値波浪環境下に浮体式構造物を付加して計算を行った．第3週以降では，係留索条件や浮体式構造物の初期位置を変更することによる結果の比較を進めた．

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

9月13日　出国
9月14日　～　10月19日　マンチェスター大学（解析，ミーティング，プレゼンテーション）
10月20日　帰国

共同研究大学名：　The University of Manchester
共同研究大学所在地：　Oxford Rd Manchester, M13 9PL, UK
指導教員：　Prof. Peter Stansby, Assoc. prof. Samuel Draycott

5. 研修/共同研究の内容

5.1　概要

本学研究室(輸送・環境システム流体研究室)では，SPH 法による浮体式構造物の極限波浪中運動解析を行ってきた．また，派遣先研究室(Manchester Hydrodynamic Lab)では，SPH 法のオープンソースコードである DualSPHysics の開発者の一人が教員をしており，波浪場に関する実験的・数値解析的手法の研究が有名である．SPH は計算時間に多くのコストと時間を必要とすることが知られており，計算負荷の低減が求められている．

そこで本共同研究では，派遣先研究室で研究が進められている波浪ポテンシャル理論と SPH のカップリングに浮体式構造物を組み込むことで，流体構造連成解析に使用可能なモデルであるかの評価と改良を行う．再現する波浪場は，Spike Wave と呼ばれる孤立波とする．Spike Wave は円形水槽でしか再現できないと考えられていたが，本カップリング解析を用いることで，正方形水槽での再現を可能とし，計算コストの削減が期待できる．

5.2　数値計算手法

本研究では，波浪ポテンシャル理論を基にした OceanWave3D と SPH 法の DualSPHysics を利用する．

① OceanWave3D

(An efficient flexible-order model for 3D nonlinear water waves.
Journal of Computational Physics 228 (2009) 2100-2118, A.P. Engsig-Karup *et al,.*)

・完全非線形ポテンシャル理論に基づく 3 次元波浪場モデル

・σ 座標系による空間マッピング

・高次有限差分法による離散化

〈支配方程式〉

$$\partial_t \eta = -\nabla\eta \cdot \nabla\tilde{\phi} + \tilde{w}(1 + \nabla\eta \cdot \nabla\eta) \tag{1}$$

$$\partial_t \tilde{\phi} = -g\eta - \frac{1}{2}(\nabla\tilde{\phi} \cdot \nabla\tilde{\phi} - \tilde{w}^2(1 + \nabla\eta \cdot \nabla\eta)) \tag{2}$$

$$\nabla^2\phi + \partial_{zz}\phi = 0, \qquad -h < z < \eta \tag{3}$$

$$\phi_z + \nabla h \cdot \nabla\phi = 0, \qquad z = -h \tag{4}$$

〈σ座標変換〉

$$\sigma(x,z,t) = \frac{z + h(x)}{\eta(x,t) + h(x)} = \frac{z + h(x)}{d(x,t)} \tag{5}$$

$$\nabla^2\phi + \nabla^2\sigma(\partial_\sigma\phi) + 2\nabla\sigma \cdot \nabla(\partial_\sigma\phi) + (\nabla\sigma \cdot \nabla\sigma + (\partial_z\phi)^2)\,\partial_{\sigma\sigma}\phi = 0, \qquad 0 < \sigma < 1 \tag{6}$$

$$(\partial_z\phi + \nabla h \cdot \nabla\sigma)(\partial_\sigma\phi) + \nabla h \cdot \nabla\phi = 0, \qquad \sigma = 0 \tag{7}$$

$$\nabla\sigma = (1 - \sigma)\frac{\nabla h}{d} - \sigma\frac{\nabla\eta}{d} \tag{8}$$

$$\nabla^2\sigma = \frac{1 - \sigma}{d}\left(\nabla^2 h - \frac{\nabla h \cdot \nabla h}{d}\right) - \frac{\sigma}{d}\left(\nabla^2\eta - \frac{\nabla\eta \cdot \nabla\eta}{\mathrm{d}}\right) - \frac{1 - 2\sigma}{d^2}\nabla h \cdot \nabla\eta - \frac{\nabla\sigma}{d} \cdot (\nabla h + \nabla\eta) \tag{9}$$

$$\partial_z\sigma = \frac{1}{d} \tag{10}$$

② DualSPHysics

(DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH).

Computer Physics Communications 187(2015)204-216, A.J.C. Crespo *et al,.*)

・SPH 法に基づいた数値流体解析ソルバー

・CPU と GPU の両アーキテクチャーで計算可能

・強非線形・不連続現象の解析に優れる

〈支配方程式〉

$$F(r) = \int F(r')\,W(r-r',h)dr' \tag{11}$$

$$F(r_a) \approx \sum_b F(r_b)\frac{m_b}{\rho_b}W(r_a - r_b, h) \tag{12}$$

$$W(r,h) = \alpha_D \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 & 0 \le q \le 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & 1 \le q \le 2 \\ 0 & q \ge 2 \end{cases} \tag{13}$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + g + \Gamma \tag{14}$$

$$\frac{dv_a}{dt} = -\sum_b m_b\left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \prod ab\right)\nabla_a W_{ab} + g \tag{15}$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab}\cdot\nabla_a W_{ab} \tag{16}$$

$$P = B\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma} - 1\right] \tag{17}$$

$$M\frac{dV}{dt} = \sum_{k\in BPs} m_k f_k \tag{18}$$

$$I\frac{d\Omega}{dt} = \sum_{k\in BPs} m_k(r_k - R_0)\times f_k \tag{19}$$

5.3 数値水槽

5.2 節で記述した 2 つの手法を組み合わせて Spike Wave の発生を行う．初めに，OceanWave3D を用いて波浪場を作成する.その後，波浪場の流体情報を binary データとして作成する．作成された binary データを DualSPHsycs の流体粒子流入条件として設定をする．OceanWave3D と DualSPHysics のカップリングを模した図を Fig.1 に示す.

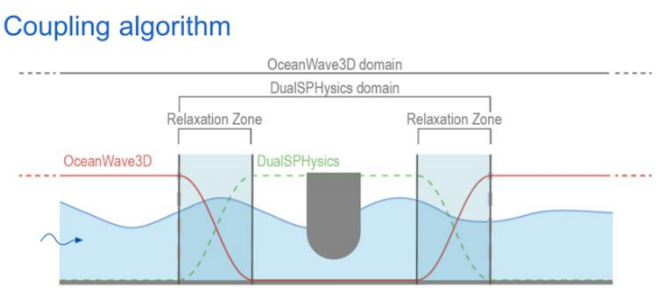


Fig. 1 カップリング手法

本カップリングは，既存の論文(※1)でも紹介されている．しかし，既存の流体流入粒子は 1 次元方向にしか速度ベクトル場を持ち合わせていなかったために，2 次元水槽での一方向波浪場再現にとどまっていた．

本共同研究では，マンチェスター大学の研究チームが進めている 3 次元水槽で成立させるための流入条件を用いた． 流入流体粒子に 3 次元速度ベクトル情報を付与することで，多方向波の再現や集中波浪の再現が可能である．Fig.2 には流入粒子のイメージ図を示す．

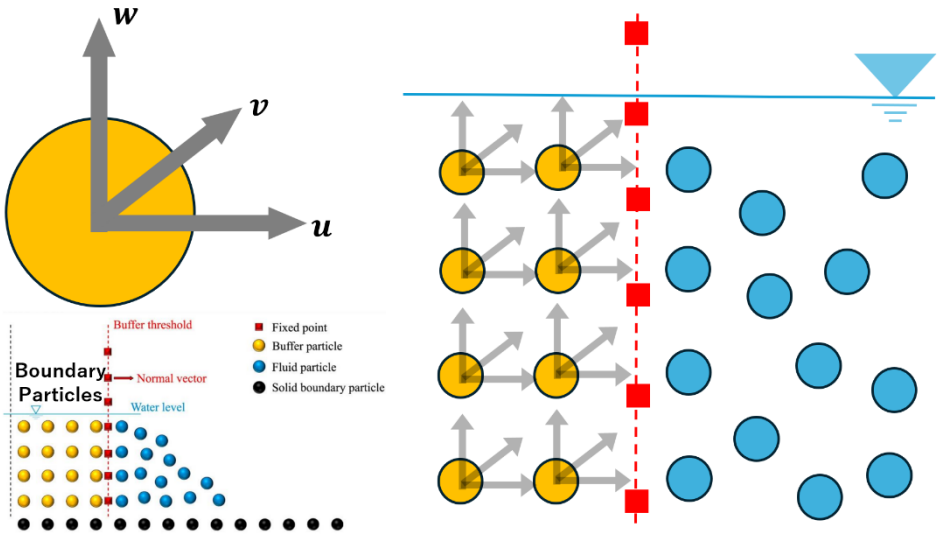


Fig. 2 流入流体粒子の 3 次元速度ベクトル (イメージ)

Fig.3 では本共同研究において対象とした Spike Wave の数値解析結果を示す．水槽サイズは 7×7×2(縦×横×高)であり，粒子径は 0.02[m]，流体粒子数は約 1700 万となっている．Spike Wave は水槽中央で波高 2.0[m]を発生させている．

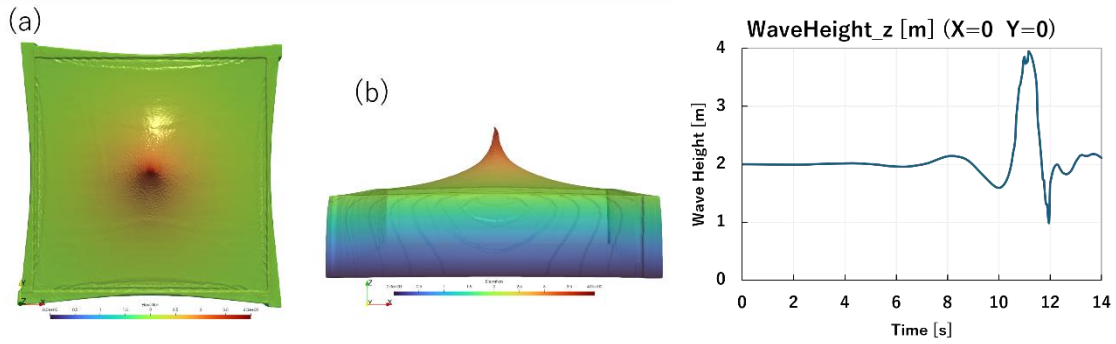


Fig. 3 Spike Wave のスナップショット (a)Top View (b)Side View と水槽中心での波高結果

※1: Coupling methodology for smoothed particle hydrodynamics modelling of non-linear wave-structure interactions.

Coastal Engineering 138 (2018) 184-198, Tim Verbrugghe *et al,.*

5.4 浮体式構造物

本研究での浮体式構造物には，マンチェスター大学の研究チームが開発を続ける Moored MultiModel Multibody Wave Energy Converter (M4 WEC)の 1/40 スケールモデルを用いた．Fig.4 には M4 WEC と係留索のモデルを示す．本モデルは，5 つのフロート，各フロートを接続するフレーム，中間フロート上部のヒンジで構成されている．フロートサイズは波上側から波下側にかけて体

積・重量を増加させる．この工夫により，方向波浪場での浮体構造物の受動的Yaw運動が確立される．係留手法として，水槽底面と水中ブイをつなぐための3本の係留索が存在しており，各係留索は平面で互いに 120° に分かれている．水中ブイからは水上ブイを途中で経由して2本の係留索で浮体式構造物(M4 WEC)と接続している．合計で5本の係留索はすべて変形・伸縮を許容する弾性係留索である．

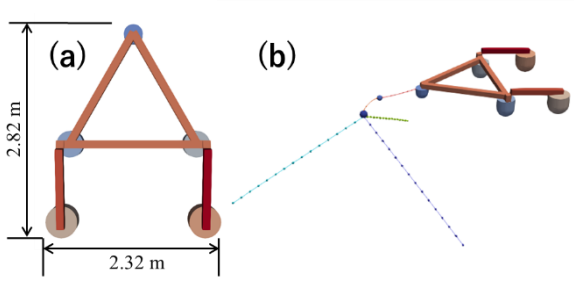


Fig. 4 (a)浮体式構造物 (M4 WEC) の Top View
(b)係留索を含めた構造物全体図

5.5 数値計算結果

派遣期間中には，集中波作用点を変更させて3種類の結果を取得した．今回は，特に弾性係留索にかかる負荷が最も高かった条件についての報告を行う．Fig.5にはSpike WaveがM4 WECの波上側フロートに作用した際のスナップショットを示す．ここから，構造物には大きなHeave運動，それに伴うPitch運動が生じていることが確認できる． また，M4 WECに作用した後の流体粒子が砕波現象を再現していることが 3 次元モデル，流体断面図の流体表面速度ベクトルから確認される．

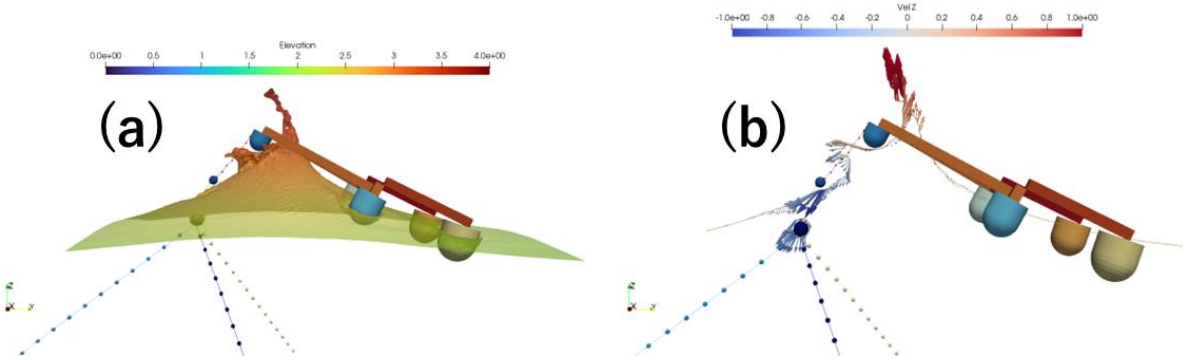


Fig. 5 Spike Wave 作用時のスナップショット
(a)3 次元モデル (b)集中波作用断面の流体表面速度ベクトル

Fig.6には各係留索の係留張力時系列を示す．波浪作用時である 10~12 秒における前方係留索の最大張力は 48.2[N]である．時系列から 13 秒前後で大きなスナップ荷重が確認される．浮体構造物に巨大波が作用した他の場合の数値解析でも同様のスナップ荷重が確認されていることから，今回の数値解析が適切にモデリング化されていることを証明している．また，Fig.6 緑色の線で示すブイ間係留索の高周期変動については，Spike Wave の特徴による影響と考えられる．

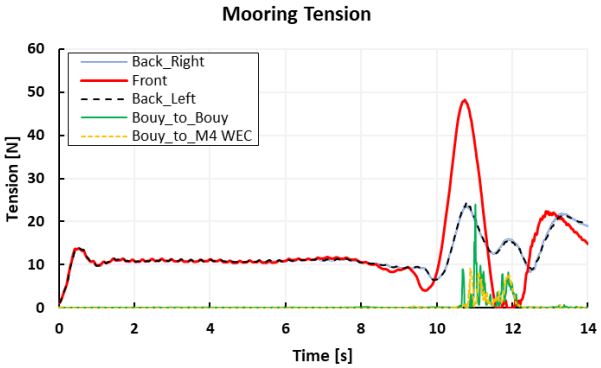


Fig. 6 係留張力時系列

Spike Wave は全方位から流体が集中することで発生する．今回のモデルにおける波浪作用点が波上側フロート位置であるため，ブイ同士が 10 秒付近で急激に接近した．その後，集中波による急

激なブイの運動から，ブイ間をつなぐ係留索の振動が発生したものと考えられる.

安全性の観点から，今回の波浪場における実験を行うことは不可能であるため，本共同研究では数値計算の精度検証にまで発展させることができなかった.

5.6　今後の方針

先述した通り,本共同研究で利用したSpike Wave波浪場と浮体式構造物の流体構造連成解析は,実験との比較･精度検証が行えないという問題点が発生した.ただし,OceanWave3DとDualSPHysicsのカップリングによる数値水槽に構造物の付加が可能であることを確認できた.本カップリングモデルを用いた単純波浪場に浮体式構造物を付加した際の解析を進めていきたい.

また，流入粒子に3次元速度ベクトル情報を付与できることから，多方向波浪場などの複雑波浪モデルの作成が可能である．任意のサイズで複雑波浪場再現可能なSPHモデルを利用することで,計算コストの改善が望まれる.

6. まとめ

５週間の滞在は短いものであったが，非常に多くの体験ができた.

英国内のみならず,世界的にも研究で有名なマンチェスター大学での留学は今後の私のキャリアを形成するうえでかけがえのないものであった.日本国内での研究活動では体験することがないほどの英語によるコミュニケーションを通じて，英語の必要性を感じることができた．また，不完全で文法的には正しくない英語であったとしても，意欲的に発言を行い積極的にコミュニケーションを図ろうとする重要性を強く感じた.

現地では，博士課程学生への扱いが日本と異なる点にも驚きがあった．私が滞在した研究室には博士課程学生，研究者，教授陣しかおらずレベルの高い研究環境が整えられていた．今後の世界の中で働く人材となるためには，彼らと議論ができる人材となる必要性があるとも感じた.

今回の留学体験は，私の現在の世界の中での立ち位置が明確となり能力不足を強く痛感するものであった．今後の研究活動や英語学習に対する強い危機感と意欲が芽生えた体験となった.

7. 謝辞

本研究において,多大なるご指導を承りましたマンチェスター大学のPeter Stansby先生,Samuel Draycott先生をはじめとした教員の皆様，研究室の学生の皆様に深くお礼申し上げます.

また，このような貴重な機会を設けてくださいました陸田秀実教授，輸送・環境システム流体研究室の皆様に厚く御礼申し上げます．更に，海外共同研究プログラムにおいて支援をいただきました諸先生方，工学系総括支援担当室(国際事業担当)の皆様に深く御礼申し上げます.