（ 様式D－２ ）
（ 別　　紙 ）

令和７年度　海外派遣研究員研究報告書〔研究実績〕

令和　８年　５月　１２日

日本大学理事長　　殿
日 本 大 学 学 長　　殿

所　　属　　理工学部　（理工学研究所）
資格・氏名　　准教授　相田　康洋

令和７年度海外派遣研究員（　長期　）の研究実績を，下記のとおり報告いたします。

記

１　区　　分　　長期

２　研 究 課 題

Peridynamics と MPS 法をハイブリッドしたシミュレーションシステムの開発と並列化に関する研究

３　派 遣 期 間　　西暦２０２５年　５月１２日　～　２０２６年　３月２３日

４　派　遣　先　　○英国，ブラジル

５　研 究 目 的

Peridynamics と MPS 法をハイブリッドしたシミュレーションシステムの開発と並列化に関する研究を進めるため，ストラスクライド大学のアルカン・オテルクス教授の PD 研究所にて定期的な意見交換を実施し，Peridynamics に関する知見を得て，日本での海洋開発研究の発展に寄与できる粒子法シミュレーションシステムの構築に向けた示唆を得ることを目的とする。

（ 様式D-２ ）

6　研 究 概 要

① 研究の方法

世界的にもPeridynamicsで実績のあるストラスクライド大学のアルカン・オテルクス教授のPD研究所にて定期的な意見交換を実施し，Peridynamicsに関する知見を得る。また，同時にストラスクライド大学図書館等にて文献調査を実施し，PeridynamicsとMPS法によるハイブリッド手法の技術的方向性を定め，ソフトウェアの開発を進める足掛かりとする。

② 渡航先での活動内容

(1) ストラスクライド大学（英国・グラスゴー）での研究活動

英国・グラスゴーにあるストラスクライド大学ペリダイナミクス研究所に滞在し，ペリダイナミクス（Peridynamics, PD）と粒子法（MPS 法）を組み合わせたハイブリッド解析手法に関する研究を実施した。ストラスクライド大学は，非局所理論に基づく破壊解析の分野で国際的に高い評価を受けており，特にアルカン教授を中心とする研究グループは，材料破壊，マルチスケール連成，数値解析の高度化において豊富な実績を有している。今回の滞在では，同研究所が蓄積してきた理論的知見や数値実装技術を取り入れつつ，流体－構造連成問題への応用を視野に入れた新たな解析枠組みの構築を目指した。

研究所では，アルカン教授，博士研究員，大学院生らとともに週1回の定例ミーティングを実施した。ミーティングでは，私の研究進捗報告に加え，ペリダイナミクスに関する最新論文のレビュー，非局所相互作用の取り扱いに関する理論的議論，MPS 法との連成に向けた定式化の検討等，多岐にわたるテーマについて活発な意見交換が行われた。特に，相互作用力の扱い方や粒子法とのデータ構造の統合に関する議論は，ハイブリッド手法の実現の可能性を検証する上で重要な示唆を与え，研究の方向性を明確にする大きな助けとなった。

また，研究所の学生やスタッフと日常的に議論する機会も多く，ペリダイナミクスの基礎理論から応用事例，さらには数値安定性や計算効率化に関する実装ノウハウまで，多くの知識を得ることができた。これらの交流を通じて，PD-MPS ハイブリッド手法の課題や可能性を多角的に検討することができ，研究の深化につながった。特に，非局所モデルと粒子法の親和性に関する議論は，今後の連成手法の発展に向けた重要な視点を提供するものであった。

(2) サンパウロ大学（ブラジル・サンパウロ）での研究視察

ブラジル・サンパウロでは，サンパウロ大学（Universidade de São Paulo, USP）を訪問し，海洋開発分野における研究体制の視察を行った。USP は南米最大規模の総合大学であり，海洋工学・船舶工学分野においてもブラジル国内の研究を牽引する存在である。今回の滞在では，研究施設の見学，教員・学生との意見交換，研究活動の観察を通じて，同大学が持つ研究力・研究基盤の特徴を多面的に把握することを目的とした。

滞在中は，海洋工学・船舶工学を担当する研究室を中心に訪問し，実験水槽，模型製作設備，数値解析環境等，海洋開発研究に必要なインフラを直接確認した。特に，港湾・沿岸域の防災研究や船舶運動解析に関するプロジェクトが活発に進められており，産業界との共同研究も盛んであることが印象的であった。また，学生が主体的に研究テーマを設定し，教員と密に議論しながら研究を進める教育スタイルは，日本の大学とは異なるダイナミズムを感じさせ，研究者育成の観点からも興味深いものであった。

さらに，教員や大学院生とのディスカッションを通じて，ブラジルにおける海洋資源開発，港湾物流，沿岸防災といった社会的課題に対し，大学が積極的に研究成果を社会へ還元している姿勢を学ぶことができた。南米特有の地理条件や産業構造を踏まえた研究テーマの設定は，国際的な視点で海洋開発を考える上で大きな刺激となり，今後の研究活動においても重要な示唆を与えるものであった。

7　研究結果・成果

ペリダイナミクス（Peridynamics, PD）と MPS（Moving Particle Semi-implicit）法は，ともにメッシュレス手法として発展してきた数値解析技術であり，複雑な変形や大変位を伴う現象の解析に広く利用されている。しかし，両者が得意とする物理現象や数値的特性には明確な違いが存在する。PD は非局所相互作用に基づく定式化を採用しており，亀裂の発生・進展，材料の破断といった連続体の不連続現象を自然に表現できる点に大きな強みを持つ。一方で MPS 法は，流体の自由表面挙動や圧力場の安定計算に優れ，津波・波浪・衝突流れ等の大規模流体解析において実績が豊富である。このように，両手法は互いの弱点を補完し合う関係にあり，両者を統合することで，従来の手法では困難であった流体-構造連成問題をより高精度に扱える可能性が高い。

特に，津波作用下の構造破壊，港湾施設の損傷評価，船舶・浮体構造物の破断挙動等，流体力と固体破壊が同時に進行する現象は，既存の解析枠組みでは十分に再現できない場合が多い。PD と MPS を組み合わせたハイブリッド手法は，こうした複雑現象に対して新たな解析基盤を提供し得る点で，学術的にも工学的にも高い意義を持つ。

現時点では，PD と MPS を統合した標準的な手法は確立されていないものの，既存研究や関連する粒子法の知見から，実装可能なアプローチは大きく三つに分類できる。

(1) 領域分割型ハイブリッド手法

この方法では，固体領域を PD，流体領域を MPS で扱い，界面において力・変位・速度等の物理量を交換する。MPS と格子法の連成解析で用いられる情報交換層の概念を応用できるため，比較的実装が容易であり，既存の枠組みを拡張する形で導入できる利点がある。特に，津波が構造物に作用する際の流体力と構造破壊を同時に評価する場面では，領域分割型のアプローチが有効に機能すると考えられる。

(2) 相互作用力ベースの連成手法

このアプローチでは，MPS が計算する圧力・粘性力を PD 粒子に外力として与え，逆に PD が算出する非局所変形勾配や内部力を MPS 側へ反映する。PD と粒子法の定式化は数学的に類似していることが知られており，この特徴を活かすことで，より密接で自然な力学連成が可能となる。既に SPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）と PD の連成研究が存在するため，その枠組みを MPS に適用する形で発展させることができ，理論的整合性と実装の現実性の両面で優れた手法といえる。

(3) 粒子統一型ハイブリッド手法

この手法では，PD 粒子と MPS 粒子を同一の粒子として扱い，粒子属性に応じて相互作用モデルを切り替える。流体粒子には MPS の相互作用，固体粒子には PD の相互作用を適用し，界面では両者をブレンドすることで連成を実現する。実装難易度は高いものの，粒子データ構造を統一できるため，大規模並列化やクラスタ計算との親和性が高く，将来的な拡張性に優れる点が特徴である。

ストラスクライド大学での研究を通じて，これら三つのアプローチの比較検討を行った結果，特に第二の「相互作用力ベースの連成手法」が，理論的整合性・実装容易性・計算効率の観点から，最も現実的な選択肢であることが明らかとなった。

今後の課題と展望

PD と MPS のハイブリッド手法は，流体-構造連成問題に対して新たな解析枠組みを提供する可能性を持つ一方で，実用化に向けて解決すべき課題も多い。特に，界面条件の安定化，計算効率の向上，並列化への適応，さらには大規模計算における負荷分散の最適化等が重要な研究テーマとなる。また，津波や波浪等の実現象に適用するためには，実験データとの比較検証やパラメータ同定の精緻化も不可欠である。

総じて，PD と MPS のハイブリッド手法は，従来の解析手法では困難であった複雑現象の理解と予測に大きく貢献し得る有望なアプローチであり，今後の研究発展が期待される。