

ムーンショット目標 8

2050年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現

実施状況報告書

2022年度版

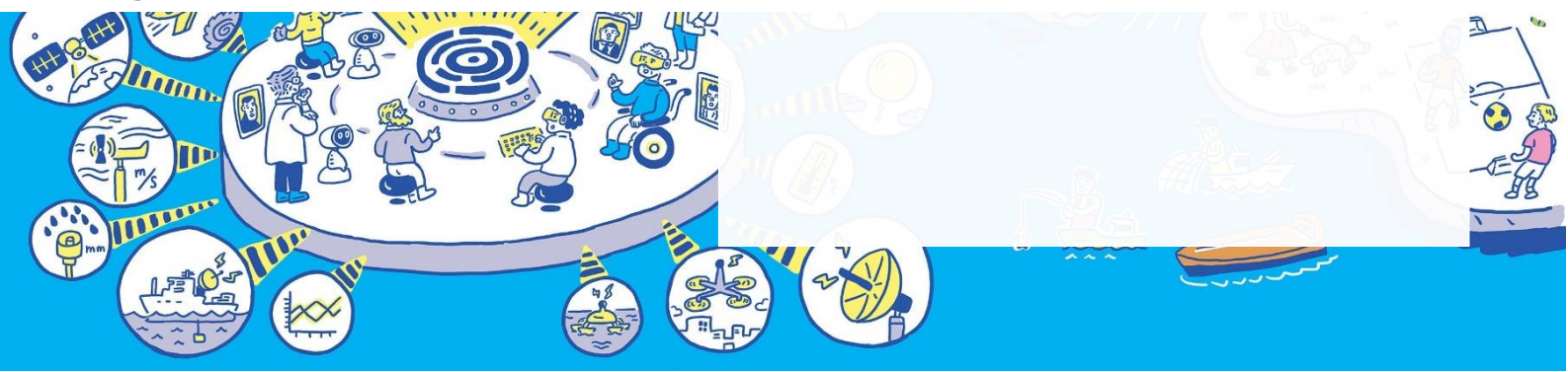
台風下の海表面での運動量・熱流束の

予測と制御

高垣 直尚

兵庫県立大学 大学院工学研究科

 **MOONSHOT**
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



研究開発プロジェクト概要

気象制御を実現するためには、精度の高い予測が必要です。特に台風においては、（１）台風強度予測精度が悪い、（２）自然現象と台風制御効果とを見分ける事が難しい、という２つのボトルネックがあります。本プロジェクトでは、台風を模倣する大型室内実験水槽を用いて、台風下の海面を通しての運動量・熱の輸送機構の解明と、運動量・熱の輸送量の定式化を行い、ひいては２つのボトルネックの解決を目指します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal8/85_takagaki.html

課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
高垣 直尚	兵庫県立大学 大学院工学研究科	准教授
鈴木 直弥	近畿大学 理工学部	教授
岩野 耕治	名古屋大学 大学院工学研究科	助教

1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

研究開発プロジェクト「台風下の海表面での運動量・熱流束の予測と制御」では精緻化された大気・海洋間の熱・運動量輸送モデルを開発し、海水面状態を変化させることで台風の制御(弱体化)が可能であるかどうかを示すことを主たる標的と定める。

台風の強度は台風下の海表面を通しての運動量・熱の輸送量(フラックス:流束)などに大きく支配される。従来の台風予測においても、大気・海洋間の熱・運動量のフラックス実験式が、気象モデルに組み込まれている。しかしながら、その計算式は50年ほど前に実施されたわずかなフィールド観測・室内実験から導かれた古い実験式であり、その妥当性について十分な検証がなされているとは言い難い。また、従来の実験式には、後述の3.に詳述する高風速時における輸送係数のレジームシフト等は考慮されておらず、台風下における熱・運動量のフラックスを適切に反映しているものとは考えにくい。

そこで提案する研究開発プロジェクトでは、世界でも最大規模の吹送距離をもつ台風シミュレーション水槽を用いて、熱・運動量の輸送という物理現象から、マクロな気象現象への拡張に資する4つの達成目標を定める:(1)台風に相当する高風速下の海水面を通しての運動量および熱輸送フラックスの測定、(2)高風速下における大気海洋間運動量・熱輸送機構の解明、(3)運動量および熱輸送フラックスの定式化、(4)砕波や風波のパラメータを人為的に制御することによる台風制御の可能性の調査。本研究開発プロジェクトが達成された暁には、従来の台風予測において用いられる信頼性に欠ける大気・海洋間の熱・運動量の輸送モデルではなく、砕波の影響をも考慮した信頼性の高い新規の輸送モデルを使用することにより、運動量・熱フラックスの推定精度を向上させることが可能となる。さらに、界面活性剤を利用して、砕波や風波の状態を人為的に制御することにより、つまり大気・海洋間熱・運動量フラックスを人工的に制御することにより、台風制御の実現可能を検討する。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

本年度はプロジェクトの初年度であり、台風下の海表面における運動量と熱のフラックスを精度よく反映する実験式を得るための、台風シミュレーション水槽での実験環境の構築と、測定結果の検証を開始した。実験研究では、熱流動場および波動場の測定に必要な風波に関する諸量 A を十分な精度で測定できる手法を確立した。ここで、 A は風波エネルギー E および卓越周波数 f_m を用いて $A = \ln(E^2 f_m^{-6})$ と表される。また、四連水位計と運動量収支法を用いて、一様風速下における運動量フラックスが吹送距離に依存しない可能性を見出した。更に、水槽における熱測定環境を検証すると同時に、飛散液滴の熱フラックスへの影響を解析するための、シャドウ法を用いた粒子検出システムを構築した。

計算研究においては、MSSG モデルを用いて、過去の台風の再現シミュレーションの手法を構築し、海表面における抗力係数 C_D および熱輸送係数 C_K の変化が、台風の最大風速や最低気圧に対して顕著な影響を及ぼしうることを示した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

令和4年度には、9回のチーム運営会議、2回の課題推進者会議、43回のPI研究会、3回のPI研究場所訪問を実施し、各課題の研究進捗の把握と調整を実施した。なお、研究課題の

進展に伴う課題推進者の変更のため、運営会議を開催し、令和 5 年度以降の項目1課題2については、海洋研究開発機構(JAMSTC)の松田景吾博士をPIとする方針を可決した。

令和 5 年 3 月には当プロジェクトとしては初となるワークショップを九州大学にて開催し、研究計画の概要と台風シミュレーション水槽を公開した。また、広報・アウトリーチ活動として、ホームページと動画を作成した。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1: :抗力係数と熱輸送係数のモデル作成と海面フラックス変化による台風制御の可能性検証

研究開発課題1:高風速時の温度勾配および水面波を伴う気液乱流場の作製・制御

当該年度実施内容:

① 風速 40 m/s までかつ吹送距離 30 m までの状態における風波乱流場の作製

本研究では、九州大学・応用力学研究所に備え付けてある風波水槽実験装置(以下、台風シミュレーション水槽)を用いた。上流側から送風機、整流胴、テストセクション、液滴除去装置から構成される装置である。テストセクション内部における風速の測定には L 字型ピトー管、ウェスタン型ピトー管、トラバースならびに精密差圧計を使用した。なお、高風速下では、砕波を伴うためピトー管の全圧孔への飛散液滴の衝突により測定が困難となる。そこで、高風速下の測定においては飛散液滴によるピトー管の目詰まりが起これにくいウェスタン型ピトー管を使用した。

測定した風速の鉛直方向分布を図 1 に示す。図より界面近傍で風速が遅く対数分布に従う風速分布となっていることがわかる。したがって、L 字型ピトー管およびウェスタン型ピトー管を使用することにより風速の測定のための準備が完了し、さらに風速測定が可能であることが確認された。さらに、測定された風速の値より 95%信頼区間と標準偏差を測定誤差とみなして検証を行った。その結果、測定誤差はわずかであることが確認された。

② 風波形状や砕波強度の特性量の推定

風波に関する諸量 A は、水槽の水位変動のヒストグラムから算出した。抵抗式波高計を用いて、複数のファン回転数に関する速度測定を行った。なお、計測位置は吹送距離 20 m 地点である。

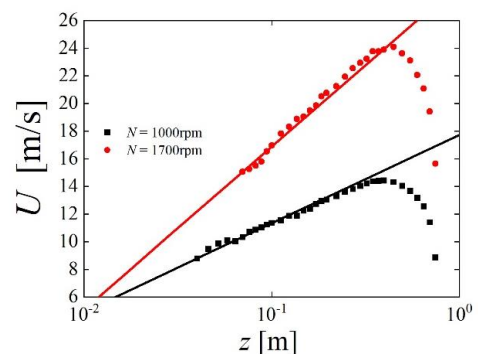


図 1. 風速の鉛直方向分布

水位変動データにゼロアップクロス法を適用し、有義波の波高および対応する周期の平均値をとることにより、有義波高 H_s 、有義波周期 T_s を求めた(図2)。風波エネルギー E は、波浪スペクトル $S(f)$ [$m^2 \cdot s$] で考えた場合は波浪スペクトルの 0 次モーメント m_0 から推定された。卓越周波数 f_m はスペクトルから自動推定された。その結果、有義波高 H_s 、風波エネルギー E [m^2]、卓越周波数 f_m [Hz]、有義波周期 T_s [s] の測定に成功した。さらに、風波エネルギー E [m^2]、卓越周波数 f_m [Hz]、有義波高 H_s [m]、有義波周期 T_s [s]、風波に関する特性量 A のそれぞれについて分散や 95% 信頼区間を求め、誤差解析を行った。その結果、誤差は数%と小さく、標準偏差や 95% 信頼区間についても大きなばらつきが無いいためよくまとまった結果が得られた。

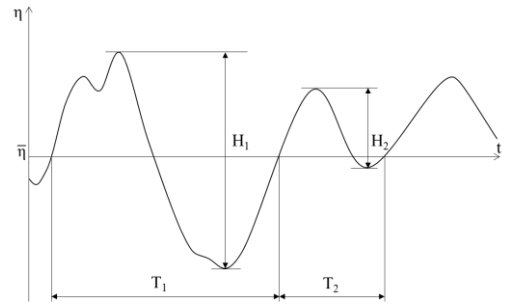


図2 風波による水位変動の解析

課題推進者： 高垣直尚(兵庫県立大学)

研究開発課題2:新規のフラックスモデルを使用した台風シミュレーションの実施と 台風制御法の提案

当該年度実施内容:

小課題(1) 台風強度予測計算の実施

台風強度予測計算に先立ち、フラックスモデルの実装と、感度実験シミュレーションのためのコード変更を行った。今年度は吹送距離 6.5 m での実験式である Komori et al. (2018) のモデルを用いて、 C_D 及び C_K を推算するスキームを構築した。

再現シミュレーションの対象事例として、台風 T1330 (Haiyan) を選定した。当該台風は、2013 年 11 月 4 日にトラック諸島近くの洋上にて発生、西進の後、フィリピンに上陸し甚大な被害をもたらしたものである。観測された最低気圧は 895 hPa、最大風速は 64 m/s であった。

シミュレーションには、MSSG の大気コンポーネントを用い、全球スケールおよびメソスケールの計算領域を設定したネスト計算を実施した。解像度は全球で約 7 km、ネスト領域で約 3 km とした。初期値データおよび海表面温度データには日本気象庁のデータを使用した。積分時間を 66 時間(2013 年 11 月 5 日 18:00 UTC

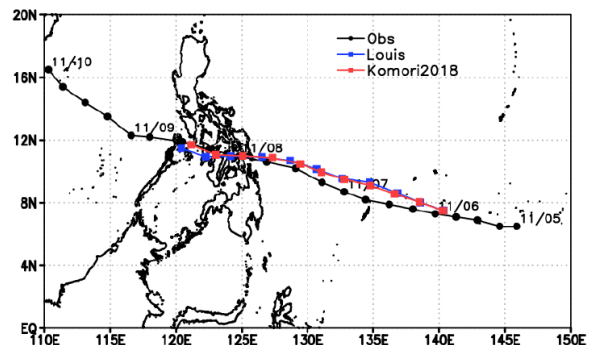


図3. T1330 の再現シミュレーションの結果
黒：観測データ、青：Louis スキーム、
赤：Komori et al.(2018)

- 2013 年 11 月 8 日 12:00 UTC) とした。図3に T1330 の再現シミュレーションにおける台風経路を示す。比較のため、従来フラックスモデルのひとつである Louis スキームを用いたシミュレーション結果と並べている。再現シミュレーションの結果、台風の経路はベストトラックデータとほぼ一致した。

小課題(2) 台風強度予測計算の実施

海表面における抗力係数 C_D および熱輸送係数 C_K の変化が、台風強度にどのような影響を与えるかについて、小課題(1)で作成した新しいモデルを用いて計算を行った。ここでは試験的に、 C_D と C_K の両方を全風速域にわたって同じ比率で増加又は低下させ、台風 T1330 の最低気圧と最大風速のシミュレーションを実行した。いずれの条件においても台風の最低気圧には大きな変化は見られなかった。一方、最大風速については、特に抗力係数および熱輸送係数を小さくした場合に顕著な増加が見られた。

次に、洋上の一部に台風制御領域を設定し、台風 T1330 の最大風速および最低気圧について検証を行った。その結果、制御領域を台風進路の右側及び中央に設定したとき、台風の気圧は上昇し、台風の最大風速は 10~15%程度低下した。

以上の結果から、台風の最大風速および最低気圧は海表面のフラックススキームの違いに対して一定程度の感度があり、高風速域の海表面フラックスの変化が、台風の最大風速や最低気圧に対して顕著な影響を及ぼしうることが明らかになった。

課題推進者： 高垣直尚(兵庫県立大学)

(2) 研究開発項目2:高風速時の海面を通しての運動量・熱輸送機構の解明

研究開発課題1:高風速時の海面を通しての運動量輸送機構の解明

当該年度実施内容:

小課題1:砕波を伴う海水面を通しての運動量フラックスの測定

台風下の海洋は激しく波立ち荒れた海模様となる。このとき、海面上には風由来のせん断力により風波が発生する。気流と風波との相互作用により風波乱流場が形成される。その気液界面を通して運動量が輸送される。この運動量のフラックス(すなわち海上を吹く風による界面応力) τ は、一般に海上 10 m の高さにおける風速 U_{10} を用いて次式のように表されてきた。なお、 ρ_a は空気の密度、 C_D は抗力係数、 u^* は気側摩擦速度である。

$$\tau = \rho_a u^{*2} = \rho_a C_D U_{10}^2$$

本研究では、高風速下での運動量フラックスを推定するために、台風シミュレーション水槽に図4のような四連水位計を設置した。計算根拠は割愛するが、水槽内の2つの測定点を x_1 、 x_2 としたとき、四連水位計による水位測定のみから、運動量のフラックス τ および摩擦速度 u^* を算出した。また、運動量フラックスの相対誤差を推定した。その結果、運動量フラックスは風速 30m/s 付近でレジームシフトすることが確認された。

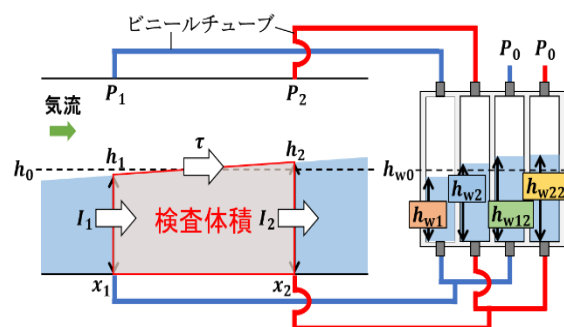


図4. 4連水位計の模式図

小課題(2) 風速 U_{10} に対する抗力係数 C_D の推算

ピトー管により風速鉛直分布を測定し、台風シミュレーションモデル中で使用される高度 10 m での風速 U_{10} への変換を行った。 U_{10} と小課題(1)で測定した運動量フラックス τ を用いて、 $\tau = \rho C_D U_{10}^2$ により抗力係数 C_D を算出した。本解析より抗力係数に関しても風速 30m/s にてレジームシフトが観察された。

課題推進者： 鈴木直弥(近畿大学)

研究開発課題2: 高風速時の海面を通しての熱輸送機構の解明

当該年度実施内容:

小課題(1) 熱フラックスの測定

本課題では まず台風シミュレーション水槽を用いて伝熱実験が可能な環境を構築した。伝熱実験では多数の熱電対を水槽内に設置し多点で温度の測定を行う。各熱電対の個体差を事前に較正しておくことが必要となるため、熱電対較正システムを構築した。熱電対ごとに $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 程度のばらつきと 0.5°C 程度の偏り誤差がみられたが、当該システムにより測定誤差を $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 程度まで低減できることが確認された。なお、水温は、図5に示す水槽内の9点で測定した。

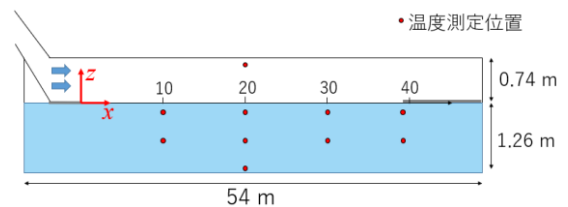


図5. 水槽内の温度測定位置の模式図

造波機側の取水管から取り込まれた水を水槽外に設置された熱交換器(ボイラ)で加熱し、消波装置側から水槽に戻すことで循環させる。ボイラを使用することで、水槽内には成層が形成された。この成層は送風により崩れるものの、図6のように大きな振動を描きながら均一化していくことが示された。

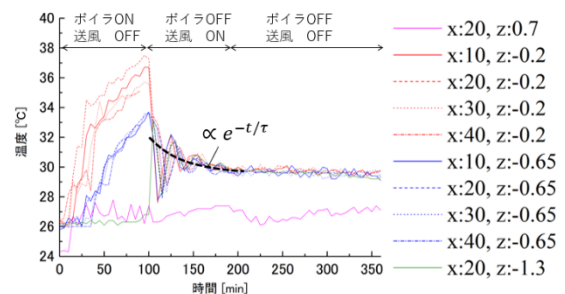


図6. 水温の時間変化

以上のように、高精度な水温測定システムを確立した。ただし、多重熱収支法においては、水温は指数関数的に減少していくことが期待される。試行的に、図6の破線のような近似式を用いて熱輸送係数を試算したところ、過去の知見よりも大きな値となった。実験水槽の温度一様性の不足が、熱輸送係数の精度に影響している可能性が高く、台風シミュレーション水槽での高精度な熱フラックスの計測には、より強力な水循環システムにより一様な液側温度場を作る必要があることが示された。

小課題(2) 砕波強度特性量の測定

本プロジェクトで購入したシャドウサイジングシステムでは、バックライト法により撮影されたグレースケール画像に輝度や輝度の空間勾配に閾値を設けることで、粒子のサイズと数密度を検出することができる。今年度は、課題推進者らによる過去の実験で撮影された飛

散液滴と巻き込み気泡の画像を用いて、新しいシステムによる粒子の検出方法を確立した。

本システムによって飛散液滴および巻き込み気泡を解析した例を図7示す。輝度閾値を調整することにより小さな液滴についても検出可能なことが確認できた(図7左)。また、気泡は飛散液滴と異なり非球形をしているが、本システムでは非球形粒子に対しても正確に輪郭を検出できることが確認できた(図7右)。

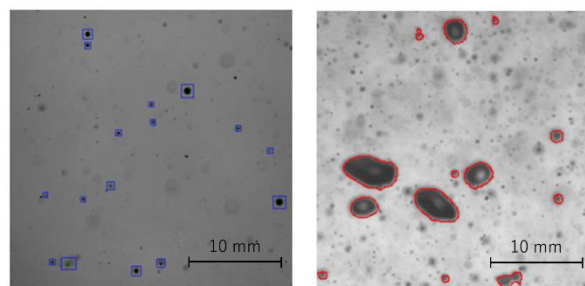


図7 シャドウサイズンシステムによる粒子検出
左：飛散液滴、右：巻き込み気泡。

飛散液滴は、空中を飛行している間に空気との間で熱のやり取りを行う。また、水中に巻き込まれた気泡と海水の間にも熱輸送が生じる。つまり、上図の様な微細な粒子についても、正確な熱輸送を考慮しようとしたとき無視できない可能性がある。そこで、飛散液滴と巻き込み気泡の影響について、Andreas (2008)等の過去のデータを元に再計算を行った。これらのデータは風速 20 m/s までであるが、より速い風速に対してモデルを延長したところ、 U_{10} が 30 m/s を超えたあたりから、液滴による熱輸送の効果が海面を通しての熱輸送よりも大きくなると見積もられ、高風速域における飛散液滴の重要性が示唆された。気泡による熱輸送の研究は極めて少ないが、Andreas & Monahan (2000) のデータを元に再計算したところ、仮に海上 1m の高さの空気が海中に巻き込まれると仮定した場合においても、気泡による熱輸送は海表面を通しての熱輸送の数%に過ぎないと推定された。以上のことから、飛散液滴による熱輸送を中心に検討することをプロジェクト内に提案し、合意を得た。

課題推進者： 岩野耕治(名古屋大学)

3. 当該年度のプロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

- 代表機関内の経理および契約を兵庫県立大学姫路工学キャンパスの総務職員が担当した。PM 事務作業補助の一部をアルバイト雇用学生が行った。また、PM 補佐 1 名の雇用を開始した(令和 5 年 2 月～)。
- 令和 5 年度の研究体制について、電子メールによる運営会議を行った。令和 5 年 3 月 23 日～3 月 24 日にかけて、電子メールによる運営会議を実施し、項目 1 課題 2 の PI として松田景吾(海洋研究開発機構)を新たに迎え新体制とすることを可決した。
- PM および課題推進者の研究実施場所へ PD がサイトビジットを行い、実際の研究進捗状況や台風シミュレーション水槽を含む実験機材・技法等の確認を行った(令和 4 年 9 月 12 日実施)。
- 重要事項の決定・連絡およびプロジェクト運営のために、オンラインでのチーム運営会議を 9 回実施した。実施日は令和 4 年 6 月 13 日、7 月 12 日、7 月 25 日、8 月 24 日、9 月 15 日、9 月 26 日、10 月 17 日、11 月 9 日、12 月 2 日である。

- 研究開発機関における研究の進捗状況の把握のために、オンラインでの課題推進者会議を二回実施した。実施日は令和4年9月26日、12月2日である。
- 課題ごとの迅速な進捗状況確認と方向性の確認のために、隔週頻度で行われる課題推進者ごとのオンラインセミナーにPMが出席し討論した。
 - ・ 項目1課題1(高垣PI研究会:12回)(オンライン/対面)
令和4年9月22日、10月13日、10月27日、11月10日、11月24日、12月8日、12月22日、令和5年1月5日、1月18日、2月21日、3月16日、3月30日
 - ・ 項目1課題2(10回)(高垣PI研究会:オンライン)
令和4年10月13日、10月27日、11月10日、11月24日、12月8日、12月22日、令和5年1月5日、1月18日、2月2日、3月30日
 - ・ 項目2課題1(9回)(鈴木PI研究会:オンライン)
令和4年9月29日、10月13日、10月26日、11月8日、11月24日、12月8日、令和5年1月23日、2月2日、3月30日
 - ・ 項目2課題2(12回)(岩野PI研究会:オンライン)
令和4年9月21日、10月11日、10月27日、11月10日、11月24日、12月8日、12月22日、令和5年1月18日、2月2日、3月1日、3月16日、3月30日
- 課題推進者の研究実施場所へ PM が訪問を行い、実際の研究進捗状況や実験機材・技法等の確認を行った。
 - ・ 項目1課題1 PI サイト訪問(九州大学) 令和4年9月12日
 - ・ 項目1課題2 なし(オンラインによる研究会実施にて対応)
 - ・ 項目2課題1 PI サイト訪問(九州大学) 令和4年9月28日
 - ・ 項目2課題2 PI サイト訪問(九州大学) 令和4年9月21日
- 九州大学応用力学研究所の大型実験水槽などの共同利用機器の利用にあたり、九州大学の受入れ研究者および事務担当者との調整を行った。ボイラ費用や水槽洗浄費用の取り扱いについて検討を進めた。

研究開発プロジェクトの展開

- 研究開発体制における競争戦略として、課題推進者会議や各 PI 研究会において、進捗報告を受けた。なお、ここで中止とした課題はない。
- 研究の進展状況を踏まえ、令和5年度の研究体制について運営会議を実施した。令和5年3月23日～3月24日にかけて、電子メールによる運営会議を実施し、項目1課題2のPIとして新たに迎え新体制とすることを可決した。

(2)研究成果の展開

- 現時点において、研究開発プロジェクトにおいて知財出願や事業化の可能性は生じていない。

(3)広報、アウトリーチ

- 室内実験水槽使用者や大気海洋相互作用研究者などを主に対象として、九州大学にて下記のワークショップを開催した。

- ・ 第1回「ムーンショット目標8 高垣プロジェクト」ワークショップ

日時：令和5年3月6日(月)10:00～12:30

場所：九州大学 筑紫キャンパス 応用力学研究所

本館2階 大会議室およびオンライン(Zoom)

- プロジェクトのホームページを作成し公開した。

<https://www.eng.u-hyogo.ac.jp/faculty/takagaki/moonshot.html>

- ホームページ等に掲載する動画コンテンツを作成し公開した。

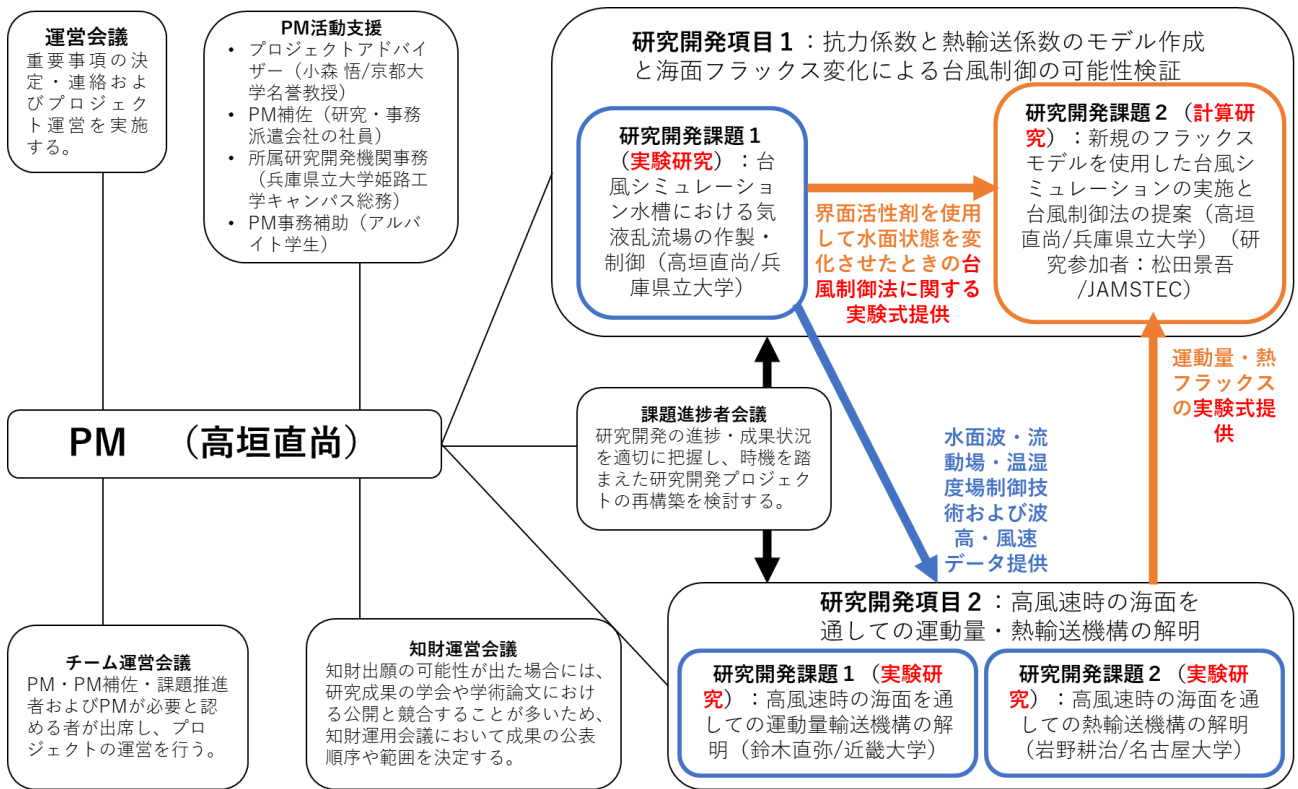
<https://www.youtube.com/watch?v=LGeIIAOLUx8&t=2s>

(4) データマネジメントに関する取り組み

データマネジメントの方針を策定し、策定した指針に従いデータの保管を実施している。

現時点で、論文公表時に公開を求められたデータはない。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



運営会議 実施内容

開催日時：令和5年3月23日（木）9：49 ～ 24日（金）12：24

開催場所：メール審議

主催：高垣直尚

参加人数：10名

【会議の内容】

計算研究の実務担当である海洋研究開発機構（JAMSTEC）の松田景吾氏を、項目1課題2のPIとして新たに迎え新体制とするかについて、電子メールによる審議を行った。電子メールは令和5年3月23日にPM:高垣直尚より関係者に配送され、翌24日までに回答を得た。本議題は可決された。

5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT含む)	国内	国際
未登録件数	0	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	0	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	0	0	0
口頭発表	5	0	5
ポスター発表	0	1	1
合計	5	1	6

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	0	0
(うち、査読有)	0	0	0

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	0	0	0
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	0	0	0

受賞件数		
国内	国際	総数
0	0	0

プレスリリース件数
0

報道件数
0

ワークショップ等、アウトリーチ件数
1