

領域略称名：新海洋混合学
領域番号：4702

令和2年度科学研究費助成事業
「新学術領域研究（研究領域提案型）」
に係る研究成果報告書（研究領域）兼
事後評価報告書

「海洋混合学の創設：物質循環・気候・生態系の維持と
長周期変動の解明」

領域設定期間

平成27年度～令和元年度

令和2年6月

領域代表者 東京大学・大気海洋研究所・教授・安田 一郎

目 次

研究組織

- | | | |
|---|----------------|---|
| 1 | 総括班・総括班以外の計画研究 | 2 |
| 2 | 公募研究 | 3 |

研究領域全体に係る事項

- | | | |
|----|-----------------------------------|----|
| 3 | 交付決定額 | 6 |
| 4 | 研究領域の目的及び概要 | 7 |
| 5 | 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況 | 9 |
| 6 | 研究目的の達成度及び主な成果 | 11 |
| 7 | 研究発表の状況 | 16 |
| 8 | 研究組織の連携体制 | 21 |
| 9 | 研究費の使用状況 | 22 |
| 10 | 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況 | 24 |
| 11 | 若手研究者の育成に関する取組実績 | 25 |
| 12 | 総括班評価者による評価 | 26 |

研究組織

(令和2年3月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

1 総括班・総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	15H05817 海洋混合学の創設：物質循環・気候：生態系をつなぐ統合的理解の推進	平成27年度 ～ 令和元年度	安田 一郎	東京大学・大気海洋研究所・教授	8
Y00 国	15K21710 海洋混合学の国際展開	平成27年度 ～ 令和元年度	安田 一郎	東京大学・大気海洋研究所・教授	2
A01-1 計	15H05818 鉛直混合の観測手法・システム開発と広域観測	平成27年度 ～ 令和元年度	安田 一郎	東京大学・大気海洋研究所・教授	7
A01-2 計	15H05819 大規模観測データの統合による太平洋循環の実態把握とメカニズムの解明	平成27年度 ～ 令和元年度	増田 周平	海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・グループリーダー	2
A02-3 計	15H05820 オホーツク海・ベーリング海における混合と物質循環の解明	平成27年度 ～ 令和元年度	西岡 純	北海道大学・低温科学研究所・准教授	4
A02-4 計	15H05821 黒潮とその源流域における混合過程・栄養塩輸送と生態系の基礎構造の解明	平成27年度 ～ 令和元年度	郭 新宇	愛媛大学・沿岸環境科学研究センター・教授	8
A03-5 計	15H05822 北太平洋の海洋低次生態系とその変動機構の解明	平成27年度 ～ 令和元年度	原田 尚美	海洋研究開発機構・地球環境部門地球表層システム研究センター・センター長	7
A03-6 計	15H05823 水産生物の環境履歴と水産資源変動	平成27年度 ～ 令和元年度	伊藤 進一	東京大学・大気海洋研究所・教授	6
A04-7 計	15H05824 鉛直混合の素過程の解明とその定式化	平成27年度 ～ 令和元年度	日比谷 紀之	東京大学・大学院理学系研究科・教授	4
A04-8 計	15H05825 鉛直混合を取り入れた海洋循環・物質循環・気候モデル開発と影響評価	平成27年度 ～ 令和元年度	羽角 博康	東京大学・大気海洋研究所・教授	4
総括班・総括班以外の計画研究 計 8 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	16H01596 チャクチ・ベーリング海における乱流混合の生物生産・気候変動への影響評価	平成28年度 ～ 平成29年度	川口 悠介	東京大学・大気海洋研究所・助教	1
A01 公	16H23456 海洋広域観測網による等密度面上塩分分布を利用した混合分布推定と長期変動の評価	平成28年度 ～ 平成29年度	瀬瀬 慎也	海洋研究開発機構・海洋観測研究センター・主任研究員	1
A01 公	16H01594 黒潮再循環域の表層・亜表層における生物地球化学的循環の解明	平成28年度 ～ 平成29年度	石井 雅男	気象庁気象研究所・研究総務官	1
A02 公	16H01584 北太平洋西部亜寒帯域における海洋中規模渦の物質循環・低次生態系への影響の解明	平成28年度 ～ 平成29年度	上野 洋路	北海道大学・大学院水産科学研究院・准教授	1
A02 公	16H01590 黒潮源流が陸棚縁で生成する近慣性内部波と躍層における鉛直混合メカニズムの解明	平成28年度 ～ 平成29年度	長井 健容	東京海洋大学・海洋環境学部門・助教	1
A02 公	16H01586 光分解性成分の鉛直プロファイルから読み解く表層混合層の構造	平成28年度 ～ 平成29年度	大木 淳之	北海道大学・大学院水産科学研究院・准教授	1
A02 公	16H01592 親潮・黒潮およびその源流域における鉄輸送への有機リガンドの寄与の解明	平成28年度 ～ 平成29年度	近藤 能子	長崎大学・水産環境科学総合研究科・准教授	1
A02 公	16H01588 海洋混合過程の解明に向けたネオジム同位体比のモデリング	平成28年度 ～ 平成29年度	岡 顕	東京大学・大気海洋研究所・准教授	1
A02 公	16H01595 鉛直混合変動が駆動する鉄循環を介した気候・海洋生態系変動の解明	平成28年度 ～ 平成29年度	三角 和弘	電力中央研究所・環境科学研究所・主任研究員	1
A02 公	16H01585 北太平洋栄養物質循環の数値モデリング	平成28年度 ～ 平成29年度	三寺 史夫	北海道大学・低温科学研究所・環オホーツク観測研究センター・教授	1
A03 公	16H01593 極微小領域の耳石安定同位体比分析技術の確立による魚類回遊履歴の超高解像度解析	平成28年度 ～ 平成29年度	石村 豊穂	国立高等専門学校機構・茨城工業高等専門学校・准教授	1

A03 公	16H01599 親潮周辺海域における春季珪藻ブルームの形成機構と長期変動	平成28年度 ～ 平成29年度	桑田 晃	国立研究開発法人水産研究教育機構東北水産研究所・グループ長	1
A04 公	16H01587 内部波と渦の相互作用による海洋上層の鉛直混合過程	平成28年度 ～ 平成29年度	中村 知裕	北海道大学・低温科学研究所・講師	1
A04 公	18H04913 海洋混合層厚の変動が十年規模気候変動に果たす役割	平成28年度 ～ 平成29年度	東塚 知己	東京大学大学院・理学系研究科・准教授	1
A02 公	18H04909 数値シミュレーションによる北太平洋栄養物質循環の三次元構造と長期変動の解明	平成30年度 ～ 令和元年度	三寺 史夫	北海道大学・低温科学研究所・環オホーツク観測研究センター・教授	1
A02 公	18H04910 北太平洋中層水により長距離輸送される溶存鉄の起源と化学形態の解明	平成30年度 ～ 令和元年度	山下 洋平	北海道大学地球環境科学研究院・准教授	1
A02 公	18H04912 黒潮・親潮域におけるサブメソスケールの前線構造と混合過程	平成30年度 ～ 令和元年度	伊藤 幸彦	東京大学・大気海洋研究所・准教授	1
A02 公	18H04914 沖縄トラフ・トカラ海峡等、黒潮上流域で高鉛直波数近慣性波シアに伴う乱流が卓越するメカニズムの解明	平成30年度 ～ 令和元年度	長井 健容	東京海洋大学・学術研究院・助教	1
A02 公	18H04915 黒潮周辺域における鉛直混合が植物プランクトン変動に与える影響評価	平成30年度 ～ 令和元年度	石坂 丞二	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授	1
A02 公	18H04917 東シナ海におけるサブメソスケール渦が海洋生態系に及ぼす影響の評価	平成30年度 ～ 令和元年度	吉江 直樹	愛媛大学・沿岸環境科学研究センター・講師	1
A02 公	18H04919 北西太平洋における鉄有機リガンドの動態とその鉄循環制御機構	平成30年度 ～ 令和元年度	近藤 能子	長崎大学・水産・環境科学総合研究科(水産)・准教授	1
A02 公	18H04920 黒潮流域で強化される乱流が低次生態系に与える影響	平成30年度 ～ 令和元年度	小針 統	鹿児島大学・農水産獣医学域水産学系・准教授	1
A02 公	18H04922 潮汐による鉛直混合が西部北太平洋亜寒帯域の基礎生産を維持する機構の解明	平成30年度 ～ 令和元年度	三角 和弘	一般財団法人電力中央研究所・環境科学研究所・主任研究員	1

A03 公	18H04921 極微小領域の耳石安定同位体比分析技術の応用による魚類回遊履歴の超高解像度解析	平成30年度 ～ 令和元年度	石村 豊穂	茨城工業高等専門学校・国際創造工学科・准教授	1
A03 公	18H04924 マサバとマイワシの耳石を利用した生息環境履歴データベースの開発	平成30年度 ～ 令和元年度	米田 道夫	国立研究開発法人水産研究教育機構・瀬戸内海区水産研究所・主任研究員	1
A03 公	18H04925 黒潮周辺海域におけるカイアシ類の分布・再生産速度と海洋混合との関係の解明	平成30年度 ～ 令和元年度	日高 清隆	国立研究開発法人水産研究教育機構・中央水産研究所、主任研究員	1
A04 公	18H04911 北太平洋大気20年振動の起源と潮汐18.6年周期変調の影響	平成30年度 ～ 平成30年度	見延 庄士郎	北海道大学・理学研究院・教授	1
A04 公	18H04913 海洋の密度非一様性を考慮したエクマン理論に基づく表層混合層に関する研究	平成30年度 ～ 令和元年度	東塚 知己	東京大学・大学院理学系研究科・准教授	1
A04 公	18H04918 潮汐混合ホットスポットの形成に関わる内部波共鳴現象の解明	平成30年度 ～ 令和元年度	大貫 陽平	九州大学・応用力学研究所・助教	1
A04 公	18H04923 海洋中の乱流混合過程が太平洋の炭素吸収および物質循環に果たす役割の解明	平成30年度 ～ 令和元年度	渡辺 路生	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(環境変動予測研究センター)・特任研究員	1
公募研究 計 30 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	331,370 千円	254,900 千円	76,470 千円
平成 28 年度	306,401 千円	235,700 千円	70,710 千円
平成 29 年度	307,580 千円	236,600 千円	70,980 千円
平成 30 年度	362,410 千円	253,900 千円	76,170 千円
令和元年度	270,760 千円	194,800 千円	58,440 千円
合計	1,528,670 千円	1,175,900 千円	352,770 千円

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

1) 研究の学術的背景と目的

着想に至る経緯と関連する研究活動

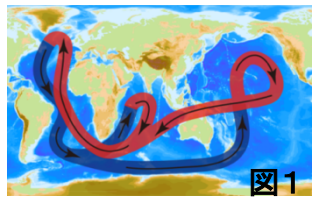


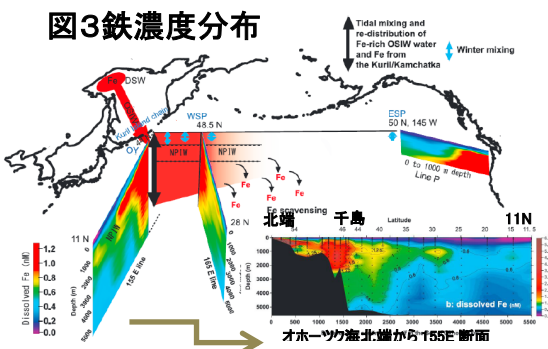
図1

海洋の鉛直混合は、高緯度で冷却され沈み込んだ海洋中・深層水を、上下に混ぜることによって、少しずつ暖め湧昇流を作る(図1)。その結果、熱が鉛直方向に伝わり、海面水温を変えて気候に影響を与える。深層循環の終着点である北太平洋の中深層に蓄えられている栄養塩や炭酸系物質は、鉛直混合を通じて表層へ輸送され、海洋生態系(海の恵み)を維持し、炭素循環に影響する。このように海洋の鉛直混合は、物質循環・気候・生態系をつなぐ、重要かつ基本的な物理要素であるが、理論的に解明されていない微小な乱流渦によって維持され、また、観測データが圧倒的に不足しているため、現在でも実態は殆ど不明である。数少ない観測から得られた鉛直混合強度は、北太平洋深層循環を維持するために必要な強度に比べて一桁小さく、北太平洋の中深層水がどこでどれだけ湧昇し、熱循環や気候に影響し、栄養塩等の物質を表層の生態系に供給しているか、明らかではない。IPCCの気候モデル等にも、現実の海洋の鉛直混合分布は反映されておらず、気候・海洋生態系等の変動予測の大きな不確定要因となっている。これらの問題の解決のためには、生物生産による二酸化炭素の吸収能力が世界で最も高く、大きな鉛直混合による栄養塩供給が予想される西部北太平洋を中心に、海洋国日本が主導して鉛直混合を観測し、鉛直混合の実態と海洋循環・気候・物質循環・生態系の維持と変動に与える影響を解明する必要がある。

一方、数少ない観測によって、鉛直混合の分布や役割についての認識が大きく変貌しつつある。海底の起伏と潮流の強さに応じて、鉛直混合の強度は数桁も違い、深海でも通常の数万倍もの混合が生じ得ることが発見された。この大きな鉛直混合や時空間変化は、海洋循環、物質循環や生態系に、計り知れない程大きな影響を与える可能性がある。さらに、月の公転軌道が18.6年周期で変動することに伴う潮汐混合の変動によって、海洋はもとより気候変動にも影響が及ぶ、という大気海洋科学の常識を覆す発見が、本領域関係者によってなされた。これらの新発見を基に、物質循環学や海洋生物学・水産海洋学、気候力学を含めた、新しい学術への展開が始まろうとしている。

鉛直混合の解明は、海の恵みをもたらす仕組みの解明につながる。 大きな潮汐混合は親潮の源流にあたる千島列島海峡部(図2)で発見された(Yagi&Yasuda 領域代表2012等)。北太平洋北部海域の生物生産を支える微量必須元素である溶存鉄が、この大きな鉛直混合によって表層へもたらされ(Nishioka 代表他2013 図3)、親潮水を肥沃化し、生態系を支え、日本に海の恵みをもたらしている可能性がある。強い潮汐が存在する東シナ海等黒潮源流域周辺でも、強化された鉛直混合(Matsuno 分担他2005; Liu, Yasuda 他2013; Kaneko, Yasuda 他2012;2013)が、中深層の栄養塩を表層へ輸送し、黒潮を生育場とする回遊性魚等の生態系を維持している可能性がある。これらの仮説は、親潮や黒潮およびその源流域において、鉛直混合と栄養塩・生態系の統合的な観測を行い、栄養塩の輸送量を定量化することで、検証できる。

図3鉄濃度分布



オホーツク海北端から155E断面

鉛直混合過程の解明は、海洋を通じた気候の長周期変動の予測につながる。 月の地球に対する公転軌道の変動に伴い、一日周期の潮汐力は18.6年周期で振幅が約2割変動する。大きな潮汐混合が存在する千島やアリューシャン海峡部とその下流等で、表・中層水塊の約20年周期変動が発見され(Yasuda 他2006等 Osafune&Yasuda 2006)、さらに、太平洋10年規模振動(PDO 図4 Yasuda 2009)やエルニーニョ(ENSO)、アリューシャン低気圧等の気候指標にも見いだされた。千島列島付近に潮汐混合の18.6年周期変動を与

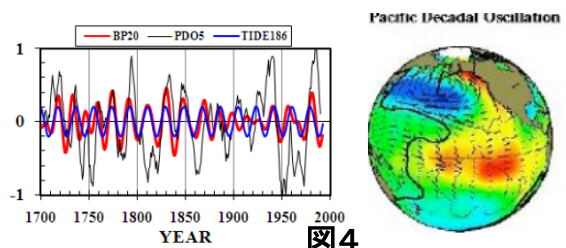
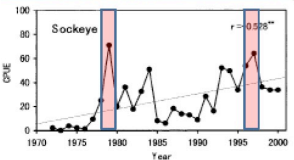


図4

えた気候モデル実験から、潮汐混合変動が太平洋規模の気候・海洋の変動に規則性を与え、**月が海を通じて気候変動を制御**する、ことが示されつつある(Hasumi 代表 Yasuda 他 2008; Tanaka 分担 Yasuda 他 2012 等)。気候・海洋で卓越する 18.6 年の約 3 倍の 50-70 年周期変動についても、18.6 年潮汐振動に伴う鉛直混合変動と関係している可能性が高い。一日周期潮汐の振幅が大きい千島・アリューシャン海峡部やインドネシア海域等の東アジア縁辺海で観測される鉛直混合過程をモデルに導入し、潮汐振動と気候の関係を明らかにできれば、気候の長期予測を進展させることができる。

鉛直混合の解明は、水産資源の長周期変動の予測につながる



ベニザケは約20年周期(1979/1997極大)
(Ishida et al. 2002 PIO)

素の約 20 年周期変動が、亜寒帯海域や亜熱帯海域で観測(Tadokoro, Yasuda 他 2009 等)された。日本周辺の水産資源にも約 20 年周期変動(図 5)やその約 3 倍の 50-70 年周期変動(マイワシ・マサバ・マアジ等)が卓越し、潮汐振動に起因する気候、水塊や餌の変動と連動している可能性が高い。同位体を利用した生態系や魚類の環境履歴解析手法を開発し、約 20 年の蓄積がある北太平洋亜寒帯での沈降粒子連続観測データの解析や、時系列観測から得られる物質循環・生態系・魚類成長生残過程をモデルに組み込むことを通じて、西部北太平洋海域で確認されている事象のつながりを明らかにすることは、栄養塩循環・生態系・水産資源の長期変動過程の理解や予測可能性を高めることにつながる。

近年改良が進んだ鉛直混合測定機器を様々な海洋観測装置に取り付け、超深海に至る鉛直混合を観測する手法や、鉛直混合と同時に海流や栄養塩を昇降しながら自動観測する装置等、画期的な鉛直混合観測手法の開発・導入が、本領域関係者によって進められている。これらの観測手法と日本が誇る海洋観測網を活用して、広域かつ深層に至る鉛直混合を高頻度で実測することにより、鉛直混合分布の実態を明らかにできる。また、観測から得られる海流と鉛直混合の関係をを用いて混合過程を定式化し、モデルに導入することで、観測がない場所での鉛直混合を推定することや鉛直混合の影響を調べることが可能となる。微量物質・生態系の観測や数値モデリングの技術が著しく進歩した今こそ、鉛直混合とその影響を解明する研究に取り組む時である。

領域目標：本領域では、月と地球の関係が生み出す鉛直混合の実態の解明を通じて、深層循環の終着点である北太平洋において、どこでどのような鉛直混合が働き、栄養塩を含む中深層水が湧昇し、親潮や黒潮に影響を与えて、気候を変え、生物生産(海の恵み)の維持と長周期変動につながるのか、混合過程を軸として統合的に解明し、新しい学術領域「海洋混合学」を構築する。

2) 本領域の重要性・発展性：本領域の特徴の一つは、地球外(月)の変動が、地球に伝達され、海底から潮汐と鉛直混合を通じて海全体に影響し、気候や豊かな生態系を維持し変動させる原動力となる、という「新しい視点」からの研究である点である。新しい視点の基となった、強烈な潮流や混合とその 18.6 年周期振動および鉄分布や気候への影響等の研究成果は、本領域関係者が発見・検証し、研究を進展させてきた、**国際的にも極めて独創性の高い研究**である。海洋の乱流や鉛直混合過程は、海洋物理学の中心的な研究課題であるが、物質循環を通じて海洋科学の全ての分野に波及する重要問題である。本領域によって、我が国で特に進展が著しい分野を超えた学際的研究、および新しい概念や次世代の観測手法から生まれる研究が発展し、混合過程と物質・生物・気候との間をつなぐ革新的な発見や統合的な理解を通して、鉛直混合の時空間変動が作る生物の多様性や気候・水産資源の長周期変動の謎の解明等、世界をリードする新学術の創出が期待できる。

3) 研究期間終了後に期待される成果：深海まで測定できる鉛直混合の観測システムが整備され、西部北太平洋での鉛直混合分布とその発生過程が明らかとなり、中深層循環が維持される機構や湧昇量が定量的に評価される。栄養塩の流れが、源流域から西部北太平洋へ広がる 3 次元的な物質循環像として捉えられ、その時間的変動が低次生態系の応答を通じて水産資源へ伝搬する過程が明らかになる。これらは、新しい海洋生態系力学、水産資源論や漁場形成論の展開に活用され、東北地方の漁業再生にも貢献する。混合過程とその変動の導入によって大気海洋相互作用過程が改善された次世代の数値モデルを用いて、様々な時空間スケールの気候・海洋現象の理解が進むとともに、地球温暖化など今後の未知の環境における変動予測の精度が向上する。また、開発された魚類の環境履歴の解析手法は、様々な種に展開され、水産資源変動の理解に貢献する。本領域での観測海域は、ロシア等周辺国の排他的経済水域(EEZ)や領海を含んでおり、長期的に築いてきた良好な関係を通じて観測を実施する。係争海域でもある黒潮や親潮の源流域で、本領域によって大きく海洋科学を進展させることは、周辺各国との科学的な対話を進展させ、正常な関係を維持することにも貢献する。

5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

(審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

所見指摘事項 特定の分野・手法に偏ることがないように、研究分野間のバランスや連携に配慮した領域マネジメントが望まれる。

留意事項 海洋物理学が中心となって領域全体を牽引することは本研究領域の目的達成に必要不可欠であるが、研究分野・手法・組織を越えた連携も成果を最大化するためには必要不可欠である。海洋物理学を扱う研究者間で共有されている海洋混合に関するビジョンが、他分野の研究者においても同様に共有されるための方策について更なる工夫が求められる。

参考意見 海洋物理学的観測に集中されている傾向があり、海洋生物学・海洋化学的観測やモデリングはやや弱い傾向があるように見られるため、公募研究は海洋物理学的観測への更なる集中とならないよう、より多様な研究提案を採択する必要があるとの意見があった。

国際活動支援留意事項 計画全体としては概ね妥当ではあるあるが、海外の共同研究者や海外研究機関への長期派遣者あるいは招待者（及びその選考方法）など、計画を具体化すること。

参考意見 国際支援活動の戦略的な目標について、更に具体化することが望まれる。

「指摘事項：研究分野間のバランスや連携に配慮した領域マネジメント」への対応

混合等の物理的観測と化学・生物的観測及びそれらの研究者をバランス良く配置し、分野の壁を外した研究成果を上げることができるよう航海を実施してきた。その結果、例えば、トカラ海峡の黒潮海域で発見された強烈な乱流に伴う鉛直混合によって表層へもたらされる栄養塩が定量的に明らかにされ、そこで見積もられた栄養塩の添加によってある特定種の植物プランクトンが増殖することが船上実験で確認される、などの成果が得られた。また H29-30 年度には、A03-5 課題で実施する昇降式係留計を用いた生態系時系列観測システムに、当領域で開発した高速水温計乱流計を取り付け、栄養塩の乱流鉛直輸送の時系列観測を企画するなど、海洋生態系関連課題と海洋混合の物理関連課題との連携を図った。これら多分野の観測成果を取りまとめ、モデリング結果と比較することなどを意図したシンポジウム・学会セッションを行うことによって、分野・手法間の連携を図った。

作業部会を通じた物理・化学・生物の協働によって、特に亜寒帯海域での高い生物生産が、千島列島やアリューシャン列島の周辺で強化された鉛直混合による中深層からの栄養塩輸送と、陸からオホーツク海・ベーリング海に供給され海峡部で鉛直混合によって表層にもたらされる鉄によって支えられていること、について統合的な現場観測とモデルの両面から明らかにすることに結実した。

「指摘事項：海洋混合に関するビジョンを他分野の研究者で共有するための方策」への対応

本領域での中心課題となっている「海洋の鉛直混合過程とそれがどのような影響を及ぼすのか」については、海洋物理学を専門とする研究者であっても、必ずしも十分に理解されているわけではない。まして、他分野の研究者には重要な物理過程であることは理解されていても、実際にどのように自分の分野に関わるのかについて理解を共有することは、極めて重要なことだと認識している。海洋の混合過程そのものがどのように認識され、どのようなことに影響を与える可能性があるのか、また、それを定量的に明らかにするためには、どんな観測やモデリングが有効なのか、それらの知見の現状と課題についての理解を共有するために、領域内外の専門家に講演を依頼し、作業部会主導のシンポジウムを初年度の全体会議の目玉行事として実施した。その成果は、年度報告書として早期に領域内で出版し知見を共有するとともに、広く成果を公表するために、日本海洋学会のオープンアクセスの学術機関誌である「海の研究」に出版し、学会レベルでの研究の現状と課題の認識の共有に務めた。

「参考意見：公募研究は海洋物理学的観測への更なる集中とならないよう、より多様な研究提案を採択する必要」への対応

平成 28-29 年度公募研究 14 課題のうち、海洋物理学的観測に特化した課題は 2 課題であり、やや弱い傾向と指摘を受けた、海洋生物学的観測研究 2 課題、海洋化学的観測研究 3 課題、モデリング課題 4 課題、気候や長期変動に関わる研究 3 課題、と多様な研究課題を採択できた。平成 30-31 年度公募 16 採択課題のうち、海洋物理学的観測に限定された課題は 2 課題であり、乱流理論 1 課題、気候関連モデル課題 3 課題、海洋生物学・水産関連 4 課題、化学観測・物理/化学モデリング 6 課題、とバランス良く多様な研究課題を採択することができた。観測やモデリングの協働作業や作業部会・全体会議を通じて、計画研

究と公募研究の連携が図られ、全体目標を共有できたことが、目標達成に貢献できたと考えている。

国際活動支援班指摘事項「戦略目標を定め、海外の共同研究者や海外研究機関への長期派遣者あるいは招待者及びその選考方法を明示し、計画を具体化すること」への対応

国際活動支援班の国際活動推進委員会で領域の目標達成のための長期計画を策定し、戦略目標：全体目標及び計画研究の目標に貢献できる国際共同航海の調整、拠点形成に関わる派遣・招聘、国際共同研究関連、研究者派遣、海外研究者招聘、研究技術研修、研究動向調査、と優先順位を定め、各計画研究班での長期目標を具体化した。その上で各年度の公募を行い、その時々に応じた応募を受け付ける柔軟な体制で運営した。重要案件に重点的に経費を配分することを念頭におき、国際学会などでの発表については枠外（研究動向調査とその報告を義務づける）としたため、各年度での応募は予算内で行うことができ、最終年度のインドネシア船の傭船経費などに充当することができた。

長期の研究者の交流については、若手研究者をワシントン大への約1ヶ月の派遣で論文の共同執筆とともに共同観測計画を立案し、米国側研究者のNSFへの申請が採択され、国際共同観測航海が実現するなど大きな成果を挙げた。また、ラトガース大への1ヶ月程度の派遣を4年度にわたり行い、生態系モデルの高度化に関わる研究を進展させるなど効果を挙げた。

「参考意見：国際支援活動の戦略的な目標について更なる具体化」への対応

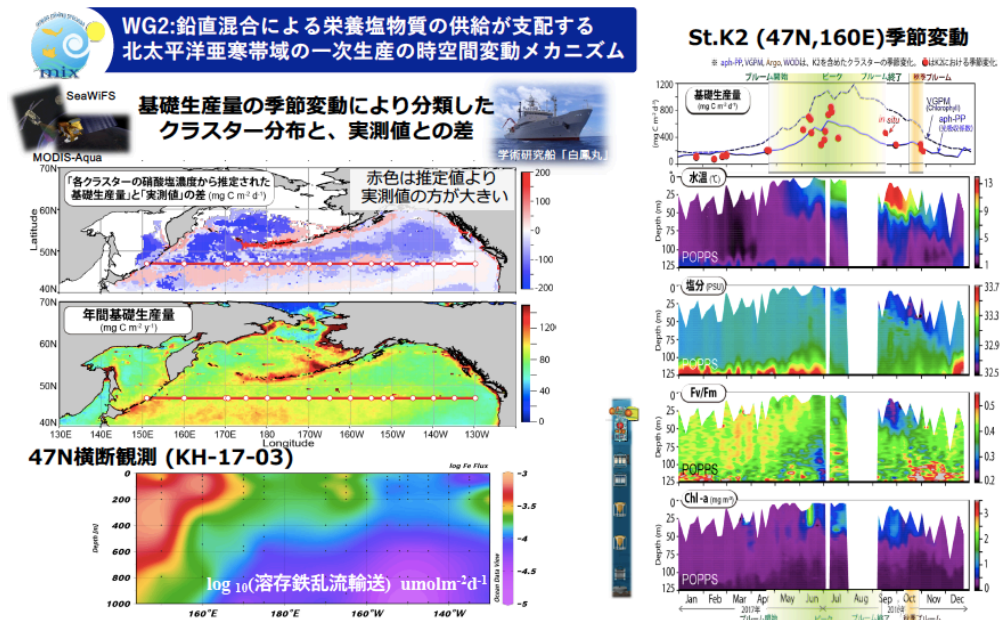
国際共同研究、特に、本領域で目標の一つとしていた「国境をまたぐ海域での国際共同観測」の実現を最優先事項として、ロシア・インドネシア・台湾・フィリピン・中国・米国の共同研究者との長期にわたる交渉を経て、計画していた以上の国際共同観測航海が実現することができた（2018年度カムチャッカ・ベーリング海西部ロシア海域日露共同観測、2017年度白鳳丸フィリピン・ルソン海峡共同観測、2018年度白鳳丸インドネシア海域観測・2019年度インドネシア船観測、2018年度・2019年度台湾観測船による台湾東黒潮観測、2017年度・2018年度米国他との新青丸共同観測）。

（中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況）

中間評価における所見において、1位置付けがやや不明瞭な計画研究があり、総括班を中心に活動の成果を集約すること、及び、2研究体制が一部の研究機関に集中している計画研究が見られ、海外の研究機関など研究領域外との連携を積極的に測ることが望ましい、との指摘があった。

これに対応して、1)に対してはA03-5班がA02-3親潮班との連携や合同班会議によって鉄や栄養塩供給とプランクトン生産研究の連携を図ること、及び、A01-1班と昇降式係留系に高速水温計を搭載し（波浪によって高速水温計含む昇降部分が亡失）共同研究を行う等、作業部会WG2を通じて物理・化学

研究者が連携する等の対応を行った。右図は、北太平洋西部亜寒帯で高い生物生産が維持される原因を追求するために、WG2で取りまとめた、係留時系列観測(A03-5)・衛星観測・船舶観測(A02-3とA01-1)のまとめの図である。西部で溶存鉄乱流輸送が大きいことが、持続的高生物生産につながっていること、植物プランクトン大增殖の発生や終焉が表層に共有される鉄によって支配されている



ことが、プランクトン活性を表すFv/Fm値（鉄濃度の間接指標）観測データから、明らかにされた。2)については、A01-2班では、海外データ同化コミュニティを通じて各国の研究者と連携するとともに、英国J.P. Matthews博士・中国Chuanyu Liu博士、米国Sylvia Cole博士を招聘した他、WG2での連携を活かして鉄・生態系統合モデルを開発した。A03-5班については、親潮域での主要植物プランクトンである珪藻の長期変動と及び種別の動物プランクトンの長期変動について、東北区水産研究所の研究者2名を分担者として加えるなど、対策を行った。

6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

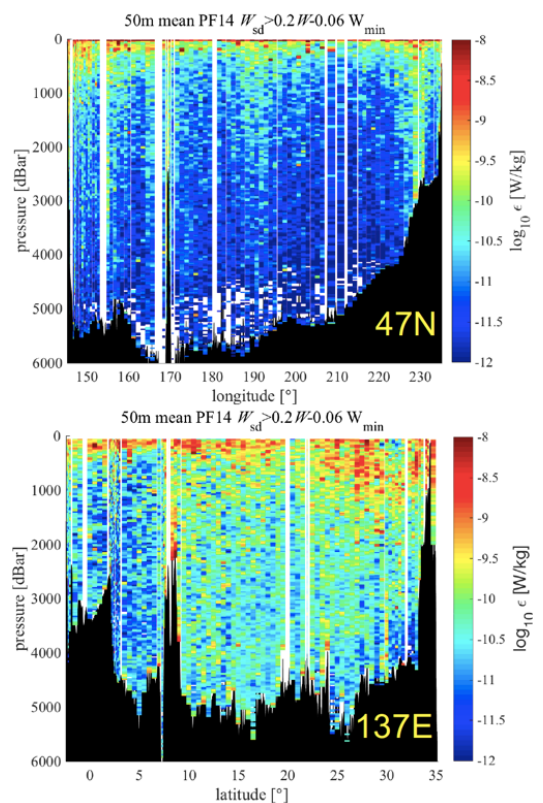
本新学術領域では、効率的に鉛直混合を実測できる革新的な観測システムを構築し、広域かつ集中的な統合観測を行い、それら観測データを統合し、北西太平洋での鉛直混合の実態を明らかにする。それら混合の素過程を明らかにし、鉛直混合を組み込んだモデルを開発して、太平洋の中深層循環や気候に対する鉛直混合の役割を明らかにするとともに、栄養塩等物質輸送を通じて日本周辺海域での高い生物生産(海の恵み)を維持する仕組みを解明する。18.6年周期で変動する潮汐に伴う鉛直混合が、気候・海洋・海洋生態系・水産資源の長期変動に与える影響を評価して、変動予測につなげる。これらを総合して、次世代の研究の礎となる新しい研究領域「海洋混合学」を創ること、を目的として研究を実施してきた。

項目 A01: 鉛直混合観測・データ同化システム開発と広域観測による中深層循環の解明

(1 計画:A01) 「深層に至る海洋の鉛直混合を効率的に観測できる革新的な観測手法を開発し広域観測を行うとともに、モデルに混合の観測データを直接統合することで、物理・化学・生物過程に整合的な統合的なデータセットを構築することを通じて、北西太平洋の鉛直混合分布とその影響を明らかにする」

(2 成果:A01-1) 鉛直混合の観測手法・システム開発と広域観測

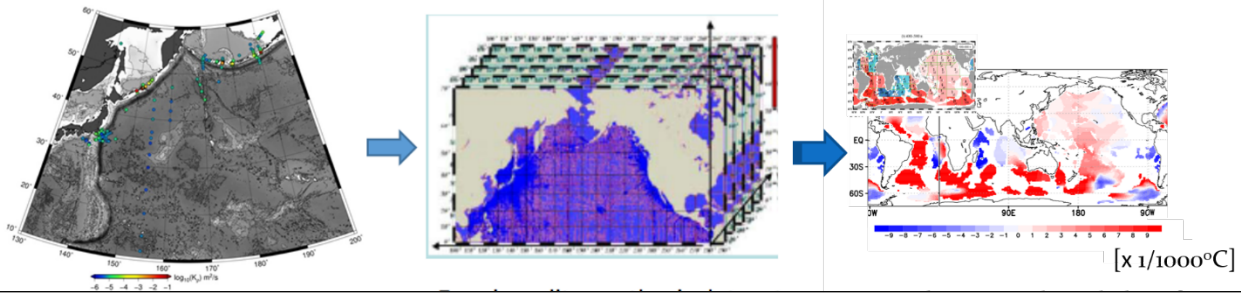
深層の弱い乱流エネルギー散逸率 ϵ をカバーする 10^{-11} - 10^{-8} W/kg の範囲を測定でき、通常の海洋観測に併用してシブタイムを使わずに、簡便に観測できる、CTD 取り付け型的高速水温計を用いた画期的な観測手法を開発し、太平洋を東西(右上図)、南北(右下図)に横切る海底までの乱流エネルギー散逸率分布を初めて明らかにした(A01-1-3, 5)。この高速水温計による観測手法は、浮力調節時の振動が避けられない水中グライダーやフロート(4)に取り付けた混合観測にも応用され、自動での混合観測に道を拓いた。この観測システムを気象庁・海洋研究開発機構・水産庁・大学関係のCTD観測ネットワークに適用することによって、2015-2019年度に2000キャストを超える観測データが取得され研究(1, 2)に供された。海底から離れた ϵ の鉛直構造が密度勾配に比例すること、内部潮汐エネルギー分布に対応すること、また、従来モデルで設定されていた ϵ は観測に比較して過大であることが示された。それらの情報は作業部会1を通じて共有され、A01-2班のデータ同化、及び、A04のモデルに反映され、太平洋の深層循環の定量化に寄与した。高速水温計混合観測手法は、センサ校正・耐久化、海底・海面付近での測定限界を向上させることで、自動観測等さらに発展が見込まれる他、蓄積された観測データは人類共通のデータとして次世代の研究に活用される。



(2 成果:A01-2) 大規模観測とデータ同化を用いた海洋観測データ統合による太平洋子午面層循環の理解とメカニズムの解明

世界でも初めてとなる、 ϵ の観測データを四次元変分法を用いて直接統合する、データ同化システムを開発した。海盆を横切る海底に至る大規模観測を、A01-1で開発されたCTD取り付け型乱流観測システムを用いて、完遂した(A01-2-2)。統計学の知見を取り込むことでA01-1, 2で取得した乱流観測データの性質の解釈を整理し(3)、データ同化への応用法を確立した。不確実性が大きかった乱流強度を決めるモデルパラメタを最適化するというアプローチで変分法を用いた観測データの統合を実施し、 ϵ の

3次元分を推定した。統合データセットでは、深層海洋環境変動の精緻な再現に成功しており、鉛直混合の3次元分布が重要な役割を担っていることを示唆する結果を得るとともに、いくつかの科学的知見を得た(1)。さらに、A02-3の鉄観測データにも同様のデータ同化を試み、3次元の動態推定に成功した(4)。これらのアプローチを発展させることで海洋混合学をさらに深化することが期待できる。



まばらな乱流観測データ → データ同化手法を用いた統合 → 海洋循環や深層昇温等環境変化の知見の更新

(2 成果:公募石井) 北西太平洋炭酸系物質分布・変動と海水循環の役割(A01-P1, P3)

(2 成果:公募川口) 北極域での乱流観測に基づく渦に捕捉された波動による乱流強化等を示した(A01-P4)

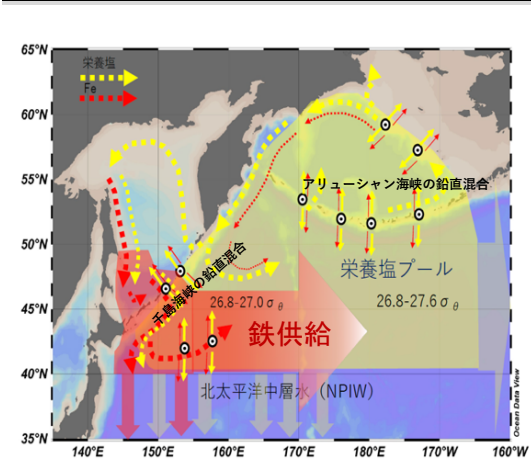
(2 成果:公募瀬川) 北太平洋における水温塩分分布に整合する混合強度分布推定(A01-P2)及び中層変動伝搬(A01-2-1)。

(1 評価:A01) 計画は達成され、観測手法・統合システムとデータ等研究資源を次世代に遺し高く評価。

項目 A02：親潮・黒潮とその源流域における統合的現場観測による混合と物質輸送の解明

(1 計画:A02) 「なぜ西部北太平洋は豊かな水産資源や生物ポンプ能力を有するか?を明らかにするという領域目標に寄与するため、栄養物質がどこでどれだけ中深層から表層に回帰し、その後、どのように栄養物質が輸送されて西部北太平洋の基礎生産に繋がっているのか、について明らかにする」

(2 成果:A02-3) オホーツク海・ベーリング海における混合と物質循環の解明



北太平洋の溶存鉄と栄養塩の循環

オホーツク海・ベーリング海と親潮を経由して北太平洋へと至る長大な物質循環システムを考慮し、特に鍵となる千島・アリューシャン列島周辺およびベーリング海北西部に焦点を当て、西部北太平洋及びロシア海域での国際共同観測(A01-1と連携)を成功させた。北太平洋表層で生物生産に重要な溶存鉄と硝酸塩などの栄養物質の3次元分布が明らかとなり、オホーツク海・ベーリング海の影響を受けて形成される北太平洋中層水NPIWの鉄や栄養塩のプールと、海峡部で起こる強い混合が、深層と表層を繋ぎ、北太平洋に独特で豊かな海洋生態系を維持する役割を果たしていることが明らかとなった(A02-3-1, 2, 3, 4, 5)。

(2 成果:公募山下) 陸起源腐植物質によって溶解した鉄が除去されずに長距離輸送される(6)

(2 成果:公募近藤) 鉄と錯形成し溶解するリガンドの現場観測

(投稿準備中)

(2 成果:公募三角) ゆっくり沈降する粒子と溶存態を行き来する可逆スクャベンジング機構を組み込んだモデルを用いて、潮汐混合が生態系を活発化させることを示した(投稿準備中)

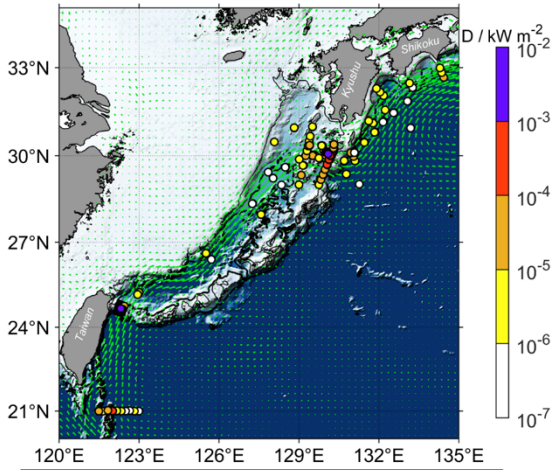
(2 成果:公募三寺) 鉄・生態系高解像度モデルによる亜寒帯海域での潮汐混合の効果と季節・経年変動(7)

(2 成果:公募上野) おしよ丸航海現場観測による亜寒帯海域の渦が生態系に与える影響解析(投稿中)

(2 成果:公募大木) 亜寒帯海域での光難分解成分から推定した表層混合層の成因解析(投稿準備中)

(2 成果:A02-4) 黒潮とその源流域における混合過程・栄養塩輸送と生態系の基礎構造の解明

北太平洋北部で中層に供給された栄養物質、特に亜熱帯海域表層で枯渇する硝酸塩は、北太平洋亜熱帯循環を通じて亜熱帯海域・黒潮域に運ばれ、黒潮が通過する海峡・海嶺部で生成された強烈な乱流によって上方へ輸送され、黒潮が育む生態系を活発化することが、明らかとなった。黒潮流域上に、ルソン



黒潮流域で観測された鉛直積分乱流運動エネルギー散逸率。マーカーの色が散逸率を表す

海峡、台湾東沖、東シナ海陸棚縁辺部、トカラ海峡とその下流域における計 14 回の観測航海 (A01-1 及び公募班と連携) と数値モデリングを通じて、海山・海嶺・島嶼・陸棚縁辺等顕著な海底地形の周囲で従来知られていなかった対称不安定等新しい混合機構を通じて強烈な乱流が発生していることが明らかになった (A02-4-1, A02-4-2, A02-4-6)。また、乱流によって表層にもたらされる硝酸塩の添加が、植物プランクトンを増殖させ、それが直ちに動物プランクトンに摂餌されることが、船上培養実験によって明らかにされた (A02-4-7)。黒潮流域は植物プランクトンが少なく、貧栄養な海域であるにも拘らず、多くの魚類の産卵・生育場となっていることが「黒潮パラドックス」と呼ばれ、謎であったが、強烈な乱流による栄養塩添加によって増殖した植物プランクトンは、効率良く動物プランクトンに摂餌されることで、現存量が少ないように見える、というパラドックスの一つの要因を解明した。これらの観測は、フィリピン、台湾、

米国、中国、韓国との国境を超えた国際連携を通じて実現した。

(2 成果:公募長井) 現場乱流観測と数値モデリングによるトカラ海峡を通過する黒潮における近慣性内部波や対称不安定が乱流を強めることを実証 (A02-4-2, A02-4-6)

(2 成果:公募伊藤) 東北沿岸海域での前線に伴う乱流強化過程の観測と解析

(2 成果:公募石坂) 人工衛星観測を用いたトカラ海峡で発生する植物プランクトンの分布パターンの解析

(2 成果:公募吉江) 東シナ海における前線渦に伴う生態系応答の観測と解析

(2 成果:公募小針) 上記栄養塩添加実験によるプランクトン応答の研究 (A02-4-7)

(1 評価:A02) 活発な鉛直混合が栄養物質循環に重要であることを実証したことで、計画は達成され、かつ、新しい乱流混合ホットスポットの発見やパラドックスの解明、新たな国際連携航海など、想定を上回る成果を挙げた。

項目 A03 : 鉛直混合とその変動が海洋生態系に与える影響の解明

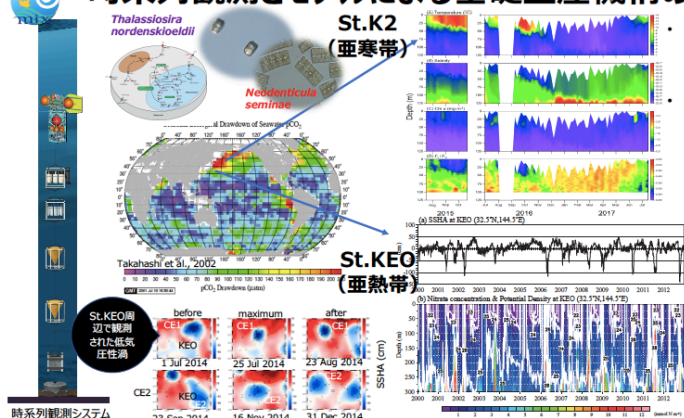
(1 計画:A03) 「鉛直混合や海流変動などの物理過程と栄養塩供給過程の変化に対する海洋生物生産の応答過程を明らかにするとともに、魚類耳石酸素同位体微量分析手法を開発して、水産資源変動と環境の関係を明らかにする」

(2 成果:A03-5) 北太平洋の海洋低次生態系とその変動機構の解明

亜寒帯 (K2: 47N, 160E) で、昇降式ブイによる各種センサーを搭載したハイブリッド・セジメントトラップ係留系による定点時系列観測や、生物地球化学フロートによる広域かつ高い時間分解能の時系列観測を実施し、植物プランクトンブルームの発生から終焉までの全データを荒天の亜寒帯域で初めて取得した。この観測の成功により初夏と秋のブルームについて、光や栄養塩など複数の候補から推測で述べられてきた発生と終焉の季節による違いやその要因を、鉛直混合との関係性を含めて突き止めることができた。一方、亜熱帯 (KEO: 32.4N, 144.4E) に設置した時系列係留系の観測とモデルから、特に低気圧性中規模渦の

存在が基礎生産に影響をもたらしており、高い栄養塩濃度の水塊が浅部へ移動することで基礎生産を促し、St. KEO 周辺で見積もられた年間新生産の 80% を中規模渦によってもたらされる栄養塩で説明できることを定量的に示した (A03-5-2)。北太平洋亜寒帯域の生物生産の長期的変動と変動要因について、1990~2009 年での沈降粒子フラックスの時系列観測データと生態系モデル出力の対応から、太平洋 10 年振動 PDO やエルニーニョ指標 ENSO が正の時期に、亜寒帯群集に比べて亜熱帯群集が増加 (円石藻が珪藻よりも優先) することを示した。

時系列観測とモデルによる基礎生産機構の検証



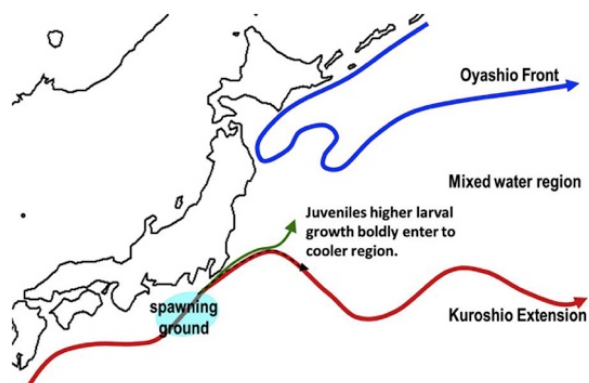
- 推測の域を出ていなかった亜寒帯の初夏と秋のブルーム発生 & 終焉の仕組みを特定
- 高濃度 Chla を持つ珪藻には硝酸塩取り込みに適した遺伝子が備わっていることを発見
- 季節変化の小さい亜熱帯では、渦が重要な栄養塩の輸送機構であることを定量的に示した
- St. KEO の年間新生産の 80% は渦が運ぶ栄養塩で説明可能

(2 成果:公募桑田) 親潮海域での珪藻の種による環境応答とブルームの発生を通じた高次生産への移行過程を明示 (A03-5-5)

(2 成果:公募日高) 黒潮が伊豆海嶺を横切の際に引き起こす強乱流とプランクトン増殖 (投稿予定)

(2 成果:A03-6) 水産生物の環境履歴と水産資源変動

これまで観測が不可能だった仔稚魚期の魚類経験水温を、耳石酸素同位体の微量分析手法を開発することで、マサバ・マイワシ・マアジについて初めて推定した (A03-6-2, 4)。その結果、マサバは、温暖かつトカラ海峡や伊豆海嶺での混合で餌料生産が強化された黒潮に輸送されることで初期成長が好転し、稚魚期に低温高餌料の親潮海域に回遊して成長が促進される (正成長スパイラル) ことが明らかとなった (A03-6-3, 1)。また、スケトウダラの成長一回遊モデルを用いた解析から、潮汐混合による縁辺海からの栄養塩供給の強化がスケトウダラの着底成功を支えていることが示された。



(2 成果:公募石村) 世界最高精度の超高解像度耳石安定同位体分析技術の提供

(2 成果:公募米田) 飼育実験によるマサバ・マイワシの耳石酸素同位体—水温関係の確立 (A03-6-2)

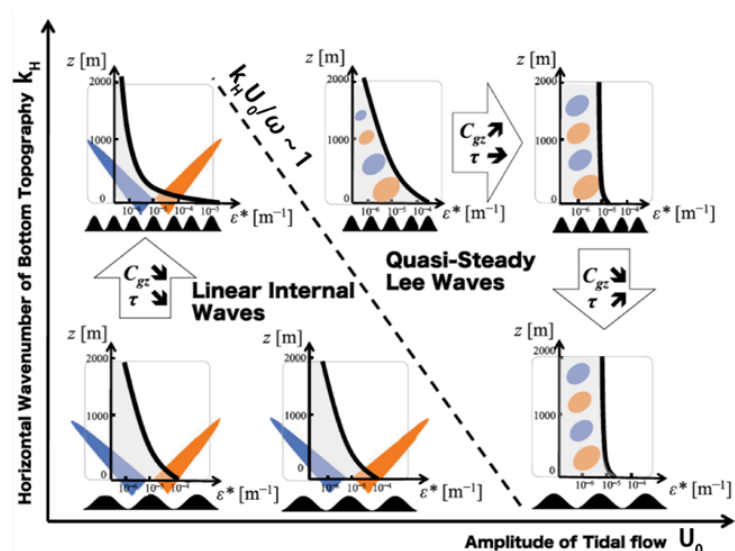
(1 評価:A03) 鉛直混合が低次生態系を通じて水資源変動へ直接影響するメカニズムがマサバ、スケトウダラなどで示され、計画は概ね達成された。特に、魚類の個体毎の経験水温履歴を耳石から推定する手法が開発されたことは、今後水産資源研究にとって極めて画期的な成果と評価できる。

項目 A04 : 次世代数値モデルの開発と混合の影響評価

(1 計画:A04) 「乱流の素過程を明らかにすることで、海面から海底までシームレスに適用できる乱流パラメタリゼーションを定式化し、全球モデルに組み込むことによって次世代数値モデルを開発し、鉛直混合とその 18.6 年周期変動が海洋循環や気候に及ぼす影響を評価する」

(2 成果:A04-7) 鉛直混合の素過程の解明とその定式化

海洋の表層から、中・深層、さらに底層までの鉛直乱流混合強度の全球分布の把握に向けて、それぞれの深度範囲における内部波の励起から散逸に至るまでの物理機構を理論的に解明し、その物理機構に基づいた高精度の乱流パラメタリゼーションの定式化とともに、その検証を実際の乱流観測を通じて行った。

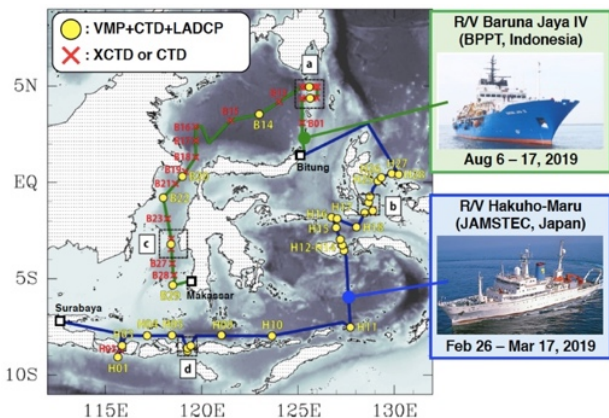


潮汐流の振幅 U と海底地形の水平波数 k で分類した海底地形上に形成される乱流ホットスポットの鉛直スケール概念図

海洋の表層については、詳細な数値実験を通じて、波浪と吹送流との相互作用によるラングミュア循環の新たな駆動機構を明らかにすることにより、乱流混合予測の高精度化に貢献した (A04-7-2)。

また、海洋の中・深層については、ファインスケールの鉛直シア—鉛直ストレインの比を用いた補正項により内部波場の周波数方向の歪みを考慮することで、より正確な乱流パラメタリゼーションの式を構築するとともに、その有効性を数値計算と乱流観測によって確認した (5)。さらに、海洋の底層については、潮汐流と海底凹凸地形との相互作用を再考察し、発生する内部風下波の碎波によって形成される乱流混合域の海底からの鉛直スケールが、海底地形の凹凸の程度よりも潮流の振幅の方に強く依存することを示す (3) とともに、この知見を取り入れた乱流パラメタ

リゼーションの有効性を乱流観測によって確認した。



一方、ともに世界気候への大きな影響が推察されながらも、過酷な環境のために乱流観測が極めて困難であった南大洋(1)と、これまで観測船を領海内に入れることさえ困難だったインドネシア多島海(4)で乱流観測を実施し、現在まで長く残されてきた乱流強度のグローバルマップの空白域を解消するという世界的な快挙を成し遂げた(左図)。

(2 成果:公募大賞) 内部潮汐波ビームの不安定(6)及びシア不安定とは異なる内部波中での新しい共鳴による乱流発生理論(7)

(2 成果:公募中村) 渦と内部波の相互作用に伴う混合

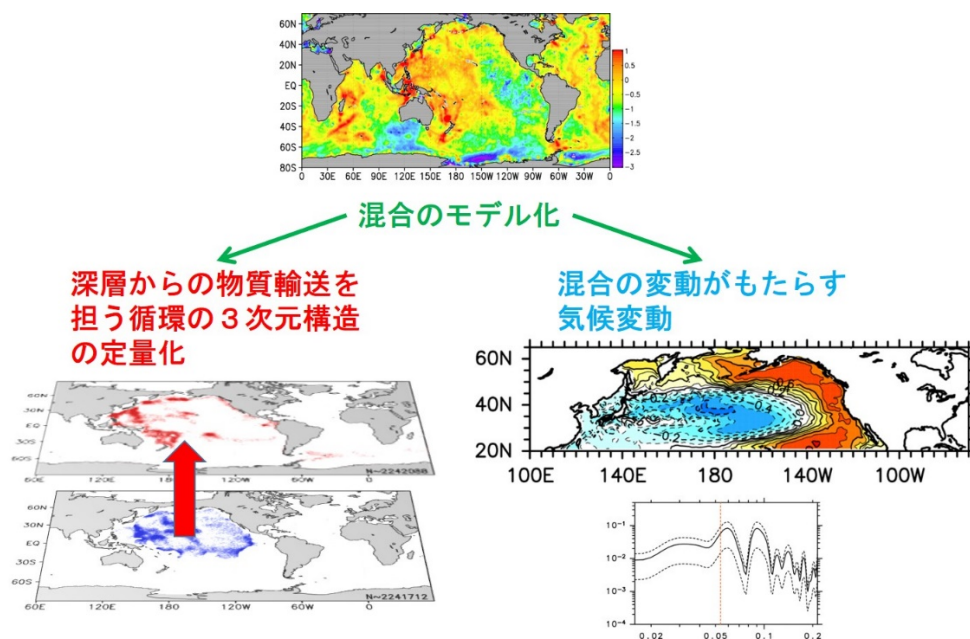
(2 成果:A04-8) 鉛直混合を取り入れた海洋循環・物質循環・気候モデル開発と影響評価

A04-7 班の超高解像度 3 次元潮汐モデル出力から得られた内部潮汐発生・散逸の水平分布をベースとして、海底からの混合距離と近接散逸効率をパラメータとして近接影響を表現するとともに、A01-1 班の観測に整合する形で遠隔影響を表現して乱流混合分布のモデルを構築し、海洋循環モデル・気候モデルに適用した(A04-8-4, 7)。

従来よりも弱乱流という観測結果を反映させたモデルであっても、地熱分布などを考慮することで、太平洋の放射性炭素 $\Delta^{14}\text{C}$ 分布を再現する深層循環をモデル化できることを明らかにした。北太平洋で 2500m 深を南に戻る太平洋深層水 PDW が高密度を保って南極周辺で湧昇することで、成層が強化され、海水面積を拡大する等を通じて、全球気候や地球温暖化速度(2)に影響する。気候が太平洋深層の乱流混合に敏感であるという、混合の重要性を明らかにした。

粒子追跡モデルを開発することによって、深層からの物質輸送が、鉛直混合強度の大きいところで主に生じ、北太平洋の深層水の世界海洋への輸送を可視化することができた(6)。

観測される 18.6 年周期変動と整合的な太平洋 10 年振動 PDO を再現する、潮汐 18.6 年周期混合変動を取り入れた最新の気候モデルの開発に成功した(5)。混合分布・モデル特性に敏感に依存するため、今後さらに検討が必要だが、A03 で示されたように、PDO は気候の長期変動を通じて海洋生態系・水産資源と関係することから、今後の大きな発展が期待できる。



(2 成果:公募渡辺) 気候システムモデルを用いた鉛直混合が地球温暖化に及ぼす影響解析(1)

(2 成果:公募東塚) 18.6 年周期混合変動を組み込んだ気候モデル解析及び黒潮続流前線強度が躍層変動と連動して変動することを示した(3)

(2 成果:公募見延) 伊豆海嶺付近の中層及びバミューダ島付近の酸素濃度に 18.6 年周期変動を発見

(1 評価:A04) 18.6 年周期変動を再現できる気候モデル開発に最終段階で成功したため、変動メカニズムの全貌解明には至っていないが、想定していた計画は期待通りに成果をあげ、また、インドネシア観測の成功や新しい乱流素過程の発見など今後の海洋混合学の発展に大きく寄与する成果を挙げた点で想定以上の成果と評価できる。

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和2年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

総括班・国際活動支援班

主催シンポジウム：下記の3件の主催国際シンポジウムの他、国際学会での主催セッション48件、国内学会主催セッション・研究集会59件

<http://omix.ori.u-tokyo.ac.jp/achievements/#international>

第1回海洋混合学国際シンポジウム：東京大学山上会館、2017年3月16-17日海外の著名な研究者8名を招聘し、研究発表と共同研究の議論。16件の口頭発表、38件のポスター発表。この会議を元に、台湾東での黒潮での共同観測が実現した。

第2回海洋混合学国際シンポジウム：2018年11月4日、東大大気海洋研、5名の海外研究者を招聘。12の口頭発表と21のポスター発表。

第3回海洋混合学国際シンポジウム：2019年5月23-24日、東京大学山上会館、8名の海外研究者を招聘。16件の口頭発表、44件のポスター発表。5月26日及び29日の日本地球惑星科学連合大会における3件の国際セッション。

受賞・基調講演・招待講演：受賞28件、招待講演61件、基調講演16件

<http://omix.ori.u-tokyo.ac.jp/achievements/#lecture>

ホームページ：

「海洋混合学ホームページ」<http://omix.ori.u-tokyo.ac.jp>

アウトリーチ：

<http://omix.ori.u-tokyo.ac.jp/achievements/#outreach>

「ニュースレター」本領域ニュースレター9件発行、その他3件、計12件発行

http://omix.ori.u-tokyo.ac.jp/news_letter/

「領域パンフレット」http://omix.ori.u-tokyo.ac.jp/wp-content/uploads/2015/11/OMIX-pamph_0527.pdf

「一般向け講演会・セミナー」計64件

「小中高向け授業・実習・実験」計40件

「サイエンスカフェ」計5件

「メディア報道・プレスリリース」計68件

「研究レビュー・航海写真・一般講演会の案内」<http://omix.ori.u-tokyo.ac.jp/>一般の方々へ/

国際活動：海洋混合学の国際展開を図るため、1)国際共同研究航海、2)国際共同研究・拠点形成、3)国際的な研究動向把握、4)成果の発信、を優先順位として各年度で募集し、各年度10件前後の課題を支援した。特に、ロシア船航海、インドネシア船航海、台湾船航海など外国船でしか不可能である航海を成功させるなど貴重な成果を挙げた。成果を共有するため、下記HPに報告を掲載し公開した。

「国際活動報告」<http://omix.ori.u-tokyo.ac.jp/international-activity/>

項目 A01: 鉛直混合観測・データ同化システム開発と広域観測による中深層循環の解明

A01-1: 鉛直混合の観測手法・システム開発と広域観測

雑誌論文(下記を含め42件)

A01-1-1) *Hasegawa, D. (2020) Island Mass Effect. In Kuroshio Current (eds T. Nagai, H. Saito, K. Suzuki and M. Takahashi). doi:10.1002/9781119428428.ch10

A01-1-2) *T. Tanaka, D. Hasegawa, I. Yasuda, H. Tsuji, S. Fujio, Y. Goto, and J. Nishioka (2019) Enhanced vertical turbulent nitrate flux in the Kuroshio across the Izu Ridge. J. Oceanogr., 75, 195-203,

<https://doi.org/10.1007/s10872-018-0500-2> A02-3 班との共同研究

A01-1-3) *Y. Goto, I. Yasuda and M. Nagasawa (2018) Comparison of turbulence intensity from CTD-attached and free-fall microstructure profilers. J. Atmos. Ocean. Tech., 35, 147-162, DOI: 10.1175/JTECH-D-17-0069.1

A01-1-4)*Inoue, R., M. Watanabe, and S. Osafune (2017) Wind-induced mixing in the North Pacific DOI: 10.1175/JPO-D-16-0218.1

A01-1-5)*Y. Goto, I. Yasuda and M. Nagasawa (2016) Turbulence estimation using fast-response thermistors attached to a free-fall vertical microstructure profiler. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 33, 2065-2078.

A01-2:大規模観測データの統合による太平洋循環の実態把握とメカニズムの解明

雑誌論文(下記を含め 11 件)

A01-2-3) *Masuda, S. (2019) Determining subsurface oceanic changes in the Indian sector of the Southern Ocean using Argo float data, *Polar Science*, 21, 1-8, 10.1016/j.polar.2019.100498.

A01-2-1) *Kouketsu, S., Osafune, S., Kumamoto, Y., and Uchida, H. (2017). Eastward salinity anomaly propagation in the intermediate layer of the North Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017–2033. <https://doi.org/10.1002/2016JC012118>.

学会発表 (下記は国際学会での基調講演・招待講演、下記含め 21 件)

A01-2-2) *Sugiura, N.(2019) Estimating energy input rate from vertical profiles of energy dissipation rate, 3rd International Symposium “Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem” 2019/05/23, Tokyo, Sanjo-kaikan, Japan.

A01-2-4) *Doi, T., S. Osafune, S. Masuda and N. Sugiura (2018), Multi-decadal changes in dissolved inorganic substances in the Estimated Ocean State for Climate Research (ESTOC) which integrated BGC Argo data, The Sixth Argo Science Workshop (ASW-6) “The Argo Program in 2020 and beyond: Challenges and opportunities”, 2018/10/22, Tokyo Hitotsu-bashi hall, Japan.

A01 公募 雑誌論文(下記を含め 22 件)

A01-P1)*Gruber, N., D. Clement, B. R. Carter, R. A. Feely, S. van Heuven, M. Hoppema, M. Ishii, R. M. Key, A. Kozyr, S. K. Lauvset, C. Lo Monaco, J. T. Mathis, A. Murata, A. Olsen, F. F. Perez, C. L. Sabine, T. Tanhua and R. Wanninkhof (2019), The oceanic sink for anthropogenic CO₂ from 1994 to 2007, *Science* 363 (6432), 1193-1199, doi:10.1126/science.aau5153.

A01-P2) *Kouketsu, S. (2018) Spatial distribution of diffusivity coefficients and the effects on water mass modification in the North Pacific, *J. Geophys. Res.: Oceans*, 123. <https://doi.org/10.1029/2018JC013860>

A01-P3)*Chen, C.-T. A., H.-K. Lui, C.-H. Hsieh, T. Yanagi, N. Kosugi, M. Ishii, G.-C. Gong (2017), Deep oceans may acidify faster than anticipated due to global warming, *Nature Climate Change*, 7, 890–894, doi:10.1038/s41558-017-0003-y.

A01-P4) *Kawaguchi Y., S. Nishino, H. Takeda, J. Inoue, M. Katsuhisa, K. Oshima (2016) Enhanced diapycnal mixing due to near-inertial internal waves propagating through an anticyclonic eddy in the ice-free Chukchi Plateau, *Journal of Physical Oceanography*, 46, 8, 2457-2481, do:10.1175/JPO-D-15-0150.1.

項目 A02 : 親潮・黒潮とその源流域における統合的現場観測による混合と物質輸送の解明

A02-3 : オホーツク海・ベーリング海における混合と物質循環の解明

雑誌論文(下記を含め 116 件)

A02-3-1) *Nishioka, J., H. Obata, H. Ogawa, K. Ono, Y. Yamashita, K. J. Lee, S. Takeda, I. Yasuda (2020) Sub-polar marginal seas fuel the North Pacific through the intermediate water at the termination of the global ocean circulation, *Proc. Natl Acad Sci.* doi.10.1073/pnas.2000658117. **A01-1 班&山下公募班との共同研究**

A02-3-2) *Waga, H., T. Hirawake, H. Ueno (2019), Impacts of mesoscale eddies on phytoplankton size structure. *Geophysical Research Letters*, 46, 13191-13198. doi: 10.1029/2019GL085150.

A02-3-3) *Obata, H., J. Nishioka, T. Kim, K. Norisuye, S. Takeda, Y. Wakuta, T. Gamo (2017) Dissolved iron and zinc in Sagami Bay and the Izu-Ogasawara Trench, *Journal of Oceanography*, 73, doi.10.1007/s10872-016-0407.

A02-3-4) *Kim, T., H. Obata, J. Nishioka, T. Gamo (2017) Distribution of dissolved zinc in the western and central subarctic pacific, *Global Biogeochemical Cycles* 31 (9) 1454-1468, doi: 10.1002/2017GB005711.

A02-3-5) *Nishioka, J. and H. Obata (2017) Dissolved iron distribution in the western and central subarctic Pacific – HNLC water formation and biogeochemical processes -, *Limnology and Oceanography*, doi:10.1002/lno.10548.

公募 (下記を含め 9 本)

A02-3-6) *Yamashita, Y., J. Nishioka, H. Obata, and H. Ogawa (2020) Shelf humic substances as carriers for basin-scale iron transport in the North Pacific. Scientific Reports, 10, 4505, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61375-7>.

A02-3-7) *Nakanowatari, T., T. Nakamura, K. Uchimoto, J. Nishioka, H. Mitsudera, M. Wakatsuchi (2017) Importance of Ekman transport and gyre circulation change on seasonal variation of surface dissolved iron in the western subarctic North Pacific, Journal of Geophysical Research-Ocean, 122, 4364-4391, doi: 10.1002/2016JC012354.

学会発表 (下記は国際学会での基調講演・招待講演、下記含め 7 件)

Nishioka, J., H. Obata, I. Yasuda, Micro- and macro-nutrient supply from the marginal seas to the North Pacific Ocean and its changing, invited plenary talk, PICES annual meeting 2019, 22 Oct. 2019, Victoria, Canada

Obata, H., Trace metals in the Indian Ocean and North Pacific Ocean -From GEOTRACES-Japan section cruises-. 2018. 1. 23. Seoul National University, Seoul, Korea.

A02-4 : 黒潮とその源流域における混合過程・栄養塩輸送と生態系の基礎構造の解明

雑誌論文(下記を含め 47 件)

A02-4-1)Tsutsumi, E., T. Matsuno, R.-C. Lien, H. Nakamura, T. Senju, X. Guo (2017) Turbulent mixing within the Kuroshio in the Tokara Strait, Journal of Geophysical Research: Oceans, 122, 7082-7094.

A02-4-2)Nagai, T., D. Hasegawa, T. Tanaka, H. Nakamura, E. Tsutsumi, R. Inoue, T. Yamashiro (2017) First Evidence of Coherent Bands of Strong Turbulent Layers Associated with High-Wavenumber Internal-Wave Shear in the Upstream Kuroshio, Scientific reports, 7, 14555.

A02-4-3)Zhang, J., Q. Liu, L.-L. Bai, T. Matsuno (2018) Water mass analysis and contribution estimation using heavy rare earth elements: Significance of Kuroshio intermediate water to Central East China Sea shelf water, Marine Chemistry, 204, 172-180.

A02-4-4)Jeon, C., J.-H. Park, H. Nakamura, A. Nishina, X.-H. Zhu, D.-G. Kim, H.-S. Min, S.-K. Kang, H. Na, and N. Hirose (2019) Poleward-propagating near-inertial waves enabled by the western boundary current, Scientific Reports, DOI:10.1038/s41598-019-46364-9.

A02-4-5)Liu, Z.-J., H. Nakamura, X.-H. Zhu, A. Nishina, X. Guo, and M. Dong (2019) Tempo-spatial variations of the Kuroshio current in the Tokara Strait based on long-term ferryboat ADCP data, Journal of Geophysical Research: Oceans, DOI:10.1029/2018JC014771.

公募(下記を含め 32 件)

A02-4-6)Nagai, T., G. S. Durán, D. A. Otero, Y. Mori, N. Yoshie, K. Ohgi, D. Hasegawa, A. Nishina, T. Kobari (2019), How the Kuroshio Current delivers nutrients to sunlit layers on the continental shelves with aid of near-inertial waves and turbulence, Geophysical Research Letters, 46 (12), 6726–6735.

<https://doi.org/10.1029/2019GL082680>

A02-4-7)Kobari, T., T. Honma, D. Hasegawa, N. Yoshie, E. Tsutsumi, T. Matsuno, T. Nagai, T. Kanayama, F. Karu, K. Suzuki, T. Tanaka, X. Guo, G. Kume, A. Nishina, and H. Nakamura (2020) Phytoplankton growth and consumption by microzooplankton stimulated by turbulent nitrate flux suggest rapid trophic transfer in the oligotrophic Kuroshio, Biogeosciences, 17, 2441–2452, doi:10.5194/bg-2019-377.

学会発表 (下記は国際学会での基調講演・招待講演、下記含め 13 件)

松野 健, 吉川 裕, 遠藤貴洋, 石坂丞二, 張勁, 武田重信, 梅澤有, 市川香, 千手智晴, Jae Hak Lee, Meixun Zhao, 東シナ海陸棚域における学際的・国際的共同観測, 2016 年度九州沖縄地区合同シンポジウム, 2016.12.9, 鹿児島.

Guo, X., J. Zhang, L. Zhao, and Y. Miyazawa, Water exchange across isobaths over the continental shelf of the East China Sea, 10th WESTPAC International Scientific Conference, 2017.04.20, Qingdao, China.

Matsuno, T., E. Tsutsumi, T. Senju, T. Endoh, D. Hasegawa, Y. J. Yang, S. Jan, H. Nakamura, X. Guo, I. Yasuda, Vertical mixing intensified around sea mounts in the Kuroshio, The 16th Japan-Korea Joint Seminar on Ocean Sciences, 2020.1.20-21, Miyazaki, Japan

項目 A03 : 鉛直混合とその変動が海洋生態系に与える影響の解明

A03-5 : 北太平洋の低次海洋生態系とその変動機構の解明

雑誌論文(下記を含め 41 件)

- A03-5-1) *Shiozaki, T., Y. Hirose, K. Hamasaki, R. Kaneko, K. Ishikawa, N. Harada (2019), Eukaryotic phytoplankton contributing to a seasonal bloom and carbon export revealed by tracking sequence variants in the western North Pacific, *Frontiers in Microbiology* 10:2722, doi:10.3389/fmicb.2019.02722.
- A03-5-2) *Honda, M.C., Y. Sasai, E. Siswanto, A. Kuwano-Yoshida, H. Aiki and M.F. Cronin (2018): Impact of cyclonic eddies and typhoons on biogeochemistry in the oligotrophic ocean based on biogeochemical / physical / meteorological time-series at station KEO. *Progress in Earth and Planetary Science* 5:42, doi:10.1186/s40645-018-0196-3.
- A03-5-3) *野口 (相田) 真希, 千葉早苗, 田所和明 (2018) 北太平洋域における十年規模の気候変動と海洋低次生態系の応答, *海の研究*, 27(1), 43-57.
- A03-5-4) *Chikamoto, M.O., A. Timmerman, Y. Chikamoto, H. Tokinaga, N. Harada (2015) Mechanisms and predictability of multiyear ecosystem variability in the North Pacific. *Global Biogeochemical Cycles*, 29, 2001–2019. DOI: 10.1002/2015GB005096.

公募

- A03-5-5) *Suzuki, S., Kataoka T., Watanabe T., Yamaguchi H., Kuwata A., Kawachi M. (2019), Depth-dependent transcriptomic response of diatoms during spring bloom in the western subarctic Pacific Ocean. *Scientific Report* 9, 14559. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51150-82019>

学会発表 (下記は国際学会での基調講演・招待講演、下記含め 7 件)

- A03-5-6) Honda, M. (2019) Goldschmidt Conference 2019, “Importance of Biogenic Opal in the Biological Pump”, Barcelona, Spain, 2019/8/23

A03-6: 水産生物の環境履歴と水産資源変動

雑誌論文(公募班・下記を含め 82 件)

- A03-6-1) Guo C., *S. Ito, N. C. Wegner, L. N. Frank, E. Dorval, K. A. Dickson and D. H. Klinger (2020) Metabolic measurements and parameter estimations for bioenergetics modelling of Pacific Chub Mackerel *Scomber japonicus*, *Fisheries Oceanography*, doi: 10.1111/fog.12465
- A03-6-2) *Nakamura M., Yoneda M., Ishimura T., Shirai K., Tamamura M., Nishida K (2020) Temperature dependency equation for chub mackerel *Scomber japonicus* identified by laboratory rearing experiment and micro-scale analysis. *Marine and Freshwater Research*, <https://doi.org/10.1071/MF19313>
- A03-6-3) Higuchi T., *S. Ito, T. Ishimura, Y. Kamimura, K. Shirai, H. Shindo, K. Nishida, K. Komatsu (2019) Otolith oxygen isotope analysis and temperature history in early life stages of the chub mackerel *Scomber japonicus* in the Kuroshio–Oyashio transition region, *Deep Sea Research II*, 169–170, 104660, doi: 10.1016/j.dsr2.2019.104660
- A03-6-4) *Sakamoto T., K. Komatsu, K. Shirai, T. Higuchi, T. Ishimura, T. Setou, Y. Kamimura, C. Watanabe and A. Kawabata (2019) Combining microvolume isotope analysis and numerical simulation to reproduce fish migration history. *Methods in Ecology and Evolution*, 10, 59-69. doi: 10.1111/2041-210X.13098
- A03-6-5) *Shirai K., K. Kubota, N. Murakami-Sugihara, K. Seike, M. Hakozaiki, K. Tanabe (2018) Stimpson’s hard clam *Mercenaria stimpsoni*, a multi-decadal climate recorder for the northwest Pacific coast. *Marine Environmental Research*, 133, 49-56. doi:10.1016/j.marenvres.2017.10.009
- A03-6-7) *Takahashi M., C. Sassa, K. Nishiuchi and Y. Tsukamoto (2016) Interannual variations in rates of larval growth and development of jack mackerel (*Trachurus japonicus*) in the East China Sea: implications for juvenile survival, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 73, 155-162, 10.1139/cjfax-2015-0077
- 学会発表 (下記を含め国際学会での基調講演・招待講演 8 件、他発表含め 90 件)
- Ito S., 3rd PICES/ICES ECS Conference “Climate, Oceans and Society Challenges & Opportunities”, May 30 – June 2, 2017, Busan, Korea
- Ito S., C. Moloney and E. Curchitser, Our challenges for full food web modelling and future projections, Benguela Symposium “Opportunity Challenge Chage”, 2016/11/17, Cape Town South Africa
- Ito S., E. Curchitser, C. Jang, M. Wang, Challenges and advances in climate projection methodology and their use in projecting ocean futures, International Scientific Conference “Our Common Future under Climate Change”, 2015/07/08, Paris France

項目 A04 : 次世代数値モデルの開発と混合の影響評価

A04-7 : 鉛直混合の素過程の解明とその定式化

雑誌論文(下記を含め 44 件)

A04-7-1) Takahashi A., and *T. Hibiya (2019), Assessment of finescale parameterizations of deep ocean mixing in the presence of geostrophic current shear: Results of microstructure measurements in the Antarctic Circumpolar Current Region, *J. Geophys. Res.*, 124, 135-153, doi:10.1029/2018JC014030.

A04-7-2) Fujiwara, Y., *Y. Yoshikawa, and Y. Matsumura (2018), A wave resolving simulation of Langmuir circulations with a nonhydrostatic free-surface model: Comparison with Craik-Leibovich theory and an alternative Eulerian view of the driving mechanism, *J. Phys. Oceanogr.*, 48, 1691-1708, doi: 10.1175/JPO-D-17-0199.1.

A04-7-3) *Hibiya, T., T. Ijichi, and R. Robertson (2017), The impacts of ocean bottom roughness and tidal flow amplitude on abyssal mixing, *J. Geophys. Res.*, 122, 5645-5651, doi:10.1002/2016JC012564.

A04-7-4) Nagai, T., and *T. Hibiya (2015), Internal tides and associated vertical mixing in the Indonesian Archipelago, *J. Geophys. Res.*, 120, 3373-3390, doi:10.1002/2014JC010592.

A04-7-5) Ijichi, T., and *T. Hibiya (2015), Frequency-based correction of finescale parameterization of turbulent dissipation in the deep ocean, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 32, 1526-1535, doi:10.1175/JTECH-D-15-0031.1.

公募 (下記含め 4 件)

A04-7-6) *Onuki, Y. (2020), Quasi-local method of wave decomposition in a slowly varying medium, *Journal of Fluid Mechanics*, 883, A56, doi:10.1017/jfm.2019.825

A04-7-7) *Onuki, Y., and Y. Tanaka (2019), Instabilities of finite-amplitude internal wave beams, *Geophysical Research Letters*, 46, 7527– 7535, doi:10.1029/2019GL082570

学会発表 (下記は国際学会での基調講演・招待講演、下記含め 145 件)

Hibiya, T.: A new parameterization of tidal mixing enhanced over rough seafloor topography, Ocean Sciences Meeting 2020, February 21, 2020, San Diego Convention Center, San Diego, USA.

Nagai, T., and T. Hibiya: The combined effect of tidal mixing in narrow straits and the Ekman transport on the variability of SST in the southern Indonesian Seas, Ocean Sciences Meeting 2020, February 20, 2020, San Diego Convention Center, San Diego, USA., (Invited).

Fujiwara, Y. and Y. Yoshikawa: Directly simulated wave-current mutual interaction: surface wave modulation intensifies Langmuir Circulations, Ocean Sciences Meeting 2020, February 20, 2020, San Diego Convention Center, San Diego, USA.

Hibiya, T.: A new parameterization of bottom-enhanced tidal mixing over abyssal rough bathymetry, 27th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly, July 10, 2019, Montreal Convention Center, Montreal, Canada.

A04-8 鉛直混合を取り入れた海洋循環・物質循環・気候モデル開発と影響評価

雑誌論文(含む公募、下記を含め 43 件)

A04-8-1) *Watanabe, M., H. Tatebe, T. Suzuki and K. Tachiiri. Control of transient climate response and associated sea level rise by deep-ocean mixing, *Environmental Research Letters*, in press. DOI:10.1088/1748-9326/ab8ca7

A04-8-2) *Tatebe, H., Y. Tanaka, Y. Komuro and H. Hasumi (2018) Impact of deep ocean mixing on the climatic mean state in the Southern Ocean, *Scientific Reports*, 8, 14479. DOI:10.1038/s41598-018-32768-6

A04-8-3) *Tozuka, T., M. F. Cronin, and H. Tomita (2017) Surface frontogenesis by surface heat fluxes in the upstream Kuroshio Extension region. *Scientific Reports*, 7, 10258. DOI:10.1038/s41598-017-10268-3

学会発表 (下記含め 31 件)

A04-8-4) Kawasaki, T., Simulation of the deep and intermediate Pacific meridional overturning circulation, Ocean Sciences Meeting, San Diego (USA), February 21, 2020.

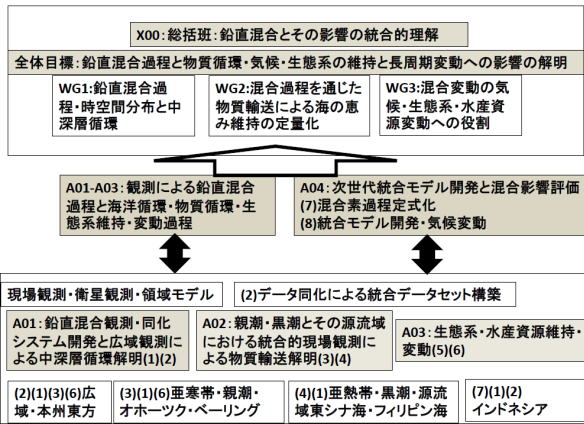
A04-8-5) Tatebe, H., Numerical reevaluation of the tide-induced 18.6-year climate variability over the Pacific using a climate model with an eddy-permitting resolution, Ocean Sciences Meeting, San Diego (USA), February 21, 2020.

A04-8-6) Matsumura, Y., A high-resolution multi-purpose particle tracking framework for coastal areas near Japan, JpGU, Chiba (Japan), May 29, 2019.

A04-8-7) Kawasaki, T., Effect of tide-induced mixing on shallow Pacific Ocean circulation, IAPSO-IAMAS-IAGA Joint Assembly, Cape Town (South Africa), August 31, 2017.

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。



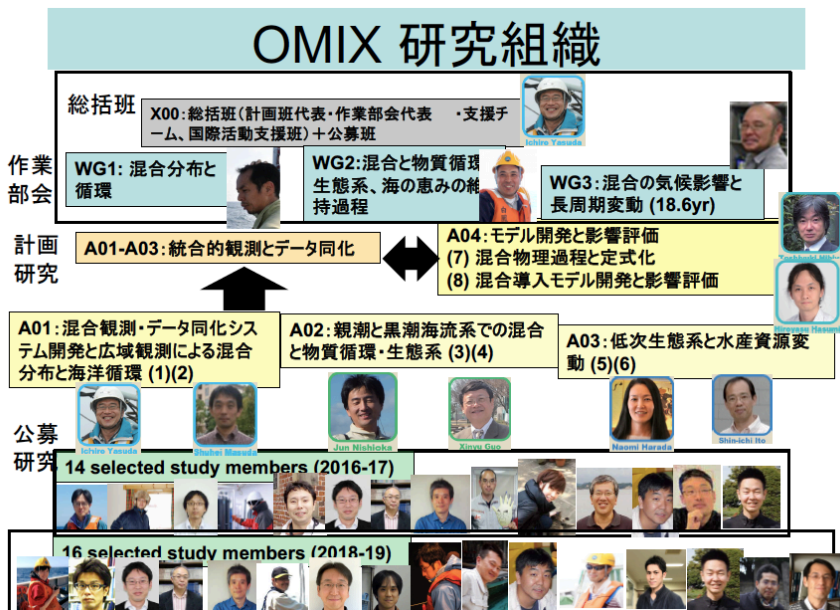
本領域は、統合的現場観測（図下段）とモデリング（図中段右）を両輪として、鉛直混合の実態とその影響を明らかにするために、以下の研究項目 A01-A04 を設定した。鉛直混合観測の空白域となっていた西部北太平洋・黒潮・親潮海域において、A01) 日本で開発・改良が進められている乱流観測手法を活かして広域で鉛直混合強度を実測し、データ同化モデルなどを用いて北太平洋中深層循環の維持機構を明らかにする。A02) 現場観測から、様々な物質で異なる鉛直拡散輸送を求め、源流域からの黒潮や親潮による水平輸送を含めた栄養塩輸送を明らかにする。A03) 現場・係留観測や衛星観測、同位体分析などを駆使して、多様な生態系を作る仕組みと水産生物の

環境履歴・資源変動過程を明らかにする。A04) 鉛直混合過程とその変動を定式化し、観測された事象を再現できる、次世代の数値モデルを観測班と共同で開発し、鉛直混合とその長期変動が、海洋循環・気候・物質循環・生態系とその変動に与える影響を明らかにする。全体目標（図上段2行目）の達成のために、三つの作業部会（図上段3行目）を総括班に設置し、計画班を越えた連携を図る。図両括弧内の数字は計画研究班の通し番号。

有機的な連携体制

全体研究目標である、鉛直混合過程とその変動が海洋循環・物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動に与える影響の解明、を達成し、

計画研究・研究分野・手法の壁を越えた連携を図るために、次の3作業部会（WG）を設置した。各WGリーダーは連携研究者として総括班の構成員となり、領域全体目標の達成に貢献する。（WG1）鉛直混合分布のマッピング・混合強化過程と北太平洋中深層循環の解明（リーダー：吉川裕）、（WG2）栄養塩の輸送と海洋生態系への移行過程とその変動の解明と定量化（リーダー：小畑元）、（WG3）18.6年潮汐振動と関連する長周期気候海洋変動過程と水産資源変動過程の解明（リーダー：建部洋晶）。初年度全体会議では、作業部会を中心に、目標に対する研究レビ



ューを行い日本海洋学会「海の研究」に18編の論文を出版した(<http://omix.aori.u-tokyo.ac.jp/一般の方々へ/>)。2016年度4月に計画研究班・公募班・作業部会合同シンポジウム、2016-2018年度には年8回の作業部会、2018年5月に計画研究班・公募班・作業部会合同シンポジウム、2018-2019年度には少数でのとりまとめ会議を年数回行い、目標達成に向けて体制を作ってきた。2019年度には、日本海洋学会の国際誌である Journal of Oceanography に OMIX 特集号の編集委員会を立ち上げ、2020年度内の刊行を目指して、編集を進めている。また、混合に関わる観測機器を整備し、研究航海における混合観測を実行できるようにするために、総括班に支援チームを置き、観測機器の導入・整備・支援などを行なった。さらに、国際活動支援班を設け、国際共同研究航海を実現し、研究拠点、若手研究者を育成、国際共同研究を通じて、海外の優れた研究成果を取り入れる等国際活動を推進した。

9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況、研究費の使用状況や効果的使用の工夫について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的にかつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

設備経費については、新しい混合観測装置として機器開発の要素が大きい機器（CTD 取り付け型高速水温計観測システム、混合・流速センサ搭載水中グライダー、フロート型乱流計）、及び、本領域で共通に用いられる海洋観測に関連する機器（深海乱流計 VMP6000・小型乱流計 VMP250 など）、総括班に設置した支援チームが、機器の選定・導入から、整備・配布・使用指導などを行なった。CTD 取り付け型高速水温計については、CTD の電源の ON/OFF だけで微細水温構造の観測データが取得できる仕様の機器が開発され、信頼性の高い乱流観測との準同時観測約 400 キャストを元にした精度保証できるデータ解析手法を開発し、2016-2019 年度の4年間に、気象庁凌風丸・啓風丸の年間約 20 航海・約 400 キャスト総計 1600 キャスト、白鳳丸 2016-2019 年度の本領域が中心となって行った KH-16-7, KH-17-3, KH-17-4, KH-17-5 航海の他、インド洋 KH-18-6 航海・南大洋・南極 KH-19-6, KH-20-1 航海などにおいても高速水温計データを取得し、総計 2000 キャストを超えた。混合・流速センサ搭載水中グライダーについては、SeaExplorer 1 台を新規購入し、新青丸 KS-17-5、白鳳丸 KH-17-5、新青丸 KS-19-6・KS-19-19 航海で観測を実施し、観測データの解析手法を検討し、極めて高頻度での観測データの取得が可能となった。また、大気海洋研と東北水研で保有していた水中グライダー Slocum に、本領域で導入した超音波流速計・混合センサを取り付ける方式で、利用できる水中グライダーを増やした。当初計画には無かった設備として、フロートに混合センサを取り付けて深海に至る混合を自動観測するシステムの開発の第一歩として、カナダ Rockland 社から混合センサの提供を受け、鶴見精機の 4000m まで計測できる深海フロートに混合センサを取り付けて、深海の乱流を計測できるかどうか、について OMIX と Rockland 社・鶴見精機の共同開発を行い、新青丸 KS-16-10、白鳳丸 KH-16-7・KH-17-5 でテスト観測を行い、青森県の協力で 2018 年 12 月に青森沖に投入し、4000m あるいは海底までの 16 キャストの観測を経て 2019 年 4 月に新青丸 KS-19-6 で回収に成功した。高速水温計と微細流速シア観測を併用することで、精度良く深海までの観測が可能であることが実証された。現有の乱流計の更新として購入された小型乱流計 VMP250 は、曳航式ウインチシステムの併用で、航走しながら連続キャストができるようになった。また、H30 年度に完全自由落下型の世界最高精度の超深海乱流計 VMP6000 を運営費との合算で購入し、弱乱流に対する高速水温計の測定精度が高いことが実証するなど成果を挙げた。これら混合観測機器のセンサ（微細流速シア及び微細水温センサ）は高価（単価 30-40 万）で極めて壊れやすい消耗品のため、その補充に経費がかかった。総括班導入機器については、基本的に共同利用観測機器として運用してきた。一方、各計画研究班において使用頻度が高い観測機器及び計算・データ保存機器については、各計画班で購入・管理することとした。経費については、基本的に申請時の積み上げに充足率（H27 年度 8 割、H28-31 年度 7 割）をかけ、年度計画と大きくは異ならず、しかし、領域研究を効率的に進められるよう配慮して執行した。ここでは、総括班予算の中で大きな割合を占める共通研究機器及び航海経費について記述する。

H27 年度：円安及び機器の高騰により、新規での超深海乱流計の購入が困難となったため A04-7 班で故障していた機器を修理し、領域内で共通機器として運用した。深海フロートに乱流計を取り付けるフロート型乱流計の新規開発を鶴見精機と RSI 社と共同で実施することができた。CTD 取り付け型乱流計は、高速水温計のみの仕様とすることで大きく単価を抑え、5 式を購入し、また、水温センサの較正を行うための乱流計部品を購入した。様々な観測で広く混合観測を実施できる体制を作ることができた。グライダーに取り付けられる乱流計を当初予定通り導入したほか、H28 年度に当初予定していたグライダーに取り付ける超音波流速計 ADCP を前倒しで導入し、早期に 2 台のグライダーでの観測体制を整備した。○CTD 取り付け型高速水温センサ型乱流計 AFP07 5 式 26,908 千円、○較正用乱流計 VMP500 用フランジタイプ ノーズコーン 一式 853 千円、○A04-7 所有超深海乱流計 VMP5500 を修理 10,800 千円、○フロート型深海乱流計 8,424 千円、○グライダー用増設 ADCP10,206 千円、○モジュール型自律式乱流計測プロファイラー 8,186 千円、○衛星通信型ビーコン 745 千円

H28 : 当初計画に従い、フランス Alseamer 社製の乱流計・ADCP 搭載グライダー SeaExplorer を購入した。
○乱流計・超音波流速計搭載自律型自動昇降観測装置 49,000 千円、○自律式乱流計測プロファイラー MR1000 用 センサーガード 559 千円

H29 : 当初計画していたロシア船航海は、円安及び傭船費用の高騰ほか様々な要因のため、H30 年度に、当初 H29 と H31 年度に積算していた経費をまとめる形で 2 ヶ月の航海を実施することとし、H29 年度には、H30 年度に計画していた機器の購入の一部を前倒しで実施し、H29 における実質的な経費の変更はないこととした。○硝酸計観測装置+バッテリー BOX 一式 7,620 千円、○当初 H30 予定 CTD 取り付け型深海鉛直混合観測装置 1 式+予備センサ部 3 式 11,275 千円、○当初 H30 予定乱流計更新の代用の小型乱流計 VMP250 システム一式 9,600 千円、○生物生産活性測定装置 一式 9,749 千円、○グライダー乱流計用電磁流速計 2 式 2,600 千円、○曳航式ウインチシステム(中古品)2,613 千円

H30 : 当初 H29 と H31 年度に予定していたロシア船航海を合わせて H30 年度に行うこととし、合わせてインドネシア船観測の一部を実施することとした。H31 年度に積算していたロシア船経費を当該年度に前倒しして実施することに変更がある。○ロシア船 98,000 千円 (H30 当初機器経費:35,000 千円+インドネシア 11,000 千円+H31 ロシア船経費 49,000 千円を前倒し+総括班 1,000 千円)、ロシア船観測用小型乱流計 VMP250 用ウインチ 560 千円、H25 年度に購入を予定していたが、高額で断念していた高精度超深海乱流計を付属品無し運営費との合算で購入 VMP6000 27,000 千円

H31 : 当該年度に予定していたロシア船航海は H30 年度に移したため、H31 年度のロシア船経費は無しに変更。○ロシア船経費は H30 に前倒し。水中グライダー SeaExplorer の耐圧・充電容量及び緊急切り離し装置の改良 4,828 千円、VMP6000 用ポンプ式 CTD 一式 3,015 千円

国際活動支援班経費 「海洋混合学の国際展開」を図るため、1)国際共同研究航海、2)国際共同研究・拠点形成・技術研修、3)国際的な研究動向把握、4)成果の発信、を優先順位として各年度で募集し、各年度 10 件前後の課題を旅費を中心に支援した。特に、ロシア船航海、インドネシア船航海、台湾船航海など外国船でしか不可能である航海を成功させるなど貴重な成果を挙げ、極めて有効に活用された。毎年度の国際活動の旅費として活用された他、2018 年度ロシア船によるカムチャッカ・ベーリング海域観測にかかる旅費・諸経費、2018・2019 年度台湾船による台湾東黒潮観測にかかる旅費・諸経費、2019 年度インドネシア船の運航経費 10,000 千円として活用された。

最終年度繰越 2020 年 3 月 11-13 日に予定していた、全体会議・総括班会議が、新型コロナウイルス感染拡大に伴う集会自粛要請によって、延期されたことで、会議関係の旅費その他の経費が、総括班・A01-1・A01-2・A02-3・A02-4・公募班(三寺・山下・吉江・大貫)において、最終年度繰り越しされた。

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

「既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」を選択。

本新学術領域は、海洋鉛直混合、という、その実態がわからなかった重要な要素、を現場観測によって容易に実測できるようになったことで、これまで別々な研究分野で独立に研究され、行き詰っていた懸案の解決に道を開くことができた。特に注目されるのは、「中深層に蓄積された栄養物質が、場所によって4桁も異なる分布をもつ鉛直混合の局在した強混合域で、鉛直に輸送され、それが日本周辺での海のめぐみである豊かな海洋生態系を育てている」という鉛直混合の重要性を、研究分野を超えた連携研究によって、実証的に明らかにできたことである。この成果は、海洋科学と関連する環境科学、に極めて大きなインパクトを与えた。鉛直混合による栄養物質輸送という横串を刺すことで、物理・化学・生物・水産の海洋科学の研究分野を統合して研究を進めることができる素地を作ったことは、海洋科学に対する大きな貢献と評価できる。

本新学術領域を計画するにあたり、真に新しい学術を創出するために、各々の計画研究について、既存研究の延長では無い、世界初となる挑戦的な目標を設定した。A01-1については、高速水温計を通常海洋観測装置に取り付けて容易に深海までの乱流を計測できる手法を確立し、従来に比較して圧倒的に多くの観測を行うこと。A01-2については、乱流データを直接モデルに統合できるシステムを確立し、統合データを提供すること。A02-3では、ロシアとの国際共同観測を実施して、データ空白海域における鉄・栄養物質と乱流観測を行い、北太平洋亜寒帯海域の高い生物生産の理由を明らかにすること。A02-4は、近隣諸国との共同研究航海によって、黒潮での乱流分布を明らかにして、黒潮が貧栄養海域なのか、生物にとって良い環境なのか明らかにすること。A03-5は、亜寒帯海域での長期時系列観測を完遂させて、A02とあわせて高い生物生産を担う仕組みと変動を明らかにすること。A03-6は、魚類耳石の酸素同位体微量分析による水温履歴復元手法を確立して、これまで全く明らかでなかった個体毎の環境・回遊履歴を明らかにして、水産資源変動機構に迫ること。A04-7は、海面から海底までの乱流の素過程を明らかにして定式化するとともに、インドネシア海域での乱流観測を行うこと。A04-8は、潮汐起源の乱流分布と変動を組み込んだ次世代の全球モデルを開発して、太平洋の深層循環と気候影響、18.6年潮汐変動に伴う海洋気候変動を再現するモデルを開発すること。これらの目標は各課題で達成され、公募研究との連携も充実し、極めて強固な基盤と学術成果を挙げることができたと自負している。特に計画していた観測が、100%以上実施できたことは奇跡的とも言える。研究基盤を開発する課題と、学術的な課題と、論文となる成果には当然差があるが、それらを連携させて、まさに新学術領域研究にふさわしい研究展開を行うことができた。

潮汐18.6年周期乱流変動に伴う気候・生態系への影響については、海底からの影響距離など乱流分布の与え方によっても、また、気候モデルの特性や解像度によっても、影響の出方が変化し、観測と整合する変動を再現するモデルの構築することに大変苦労した。そもそも、観測自体についても、木の年輪などを用いて再構成された長期の観測データには影響が現れているが、20世紀以降に観測機器を用いて得られたデータではデータ長が短いために統計的に有意な影響を検出することが難しい。また、18.6年周期の混合の変動を加えない場合でも、約20年周期の変動がモデルの特性として現れることもあり、他の変動要因との切り分けが難しい、など多くの困難があったが、再構成データからの観測された太平洋数10年スケール変動と整合的な変動パターンが出現する比較的高解像度の大気海洋結合モデルを開発できたことは、今後それらのモデルを解析することで、出現メカニズム等多くの発見があるものと今後の研究に期待できる。

これら、海洋の鉛直混合が海洋循環・物質循環・生態系・気候と長周期変動に重要な影響を与えることが明らかとなった。加えて、乱流・化学の素過程が明らかにされる等、本領域で開発された観測手法・データ・モデルを活用・改良して、多くの課題の解決に次世代の若手研究者が取り組める学術的基盤を作ることができた。混合分布の平均・変動・メカニズムとその影響の解明には、観測データおよび研究の蓄積が必要である。今後全球・深層に至る生態系を含む観測システムの整備と統合的研究が望まれる。

11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和2年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

若手研究者・大学院生の研究航海への参加の奨励：領域関係で実施する研究航海は、様々な研究分野・手法を持つ第一線で活躍する研究者が集う場である。若手研究者や大学院生がテーマを持ち乗船、また、最先端の観測・研究活動に触れることで、研究者としての自立や研究活動の視野を大きく広げる機会である。また、研究航海は、若手研究者が活躍できる場であり、シニアの研究者や同年代の研究者から、様々なことが学べる場となっている。これまで、学術研究船白鳳丸・新青丸、実習船おしよろ丸、練習船かごしま丸・長崎丸など、多くの研究者や大学院生が乗船して、関連する研究活動を実施した。

領域若手会を組織し、自主的にサマースクールを運営：40歳未満の若手研究者、学生をメンバーとする「OMIX若手会」を組織し、自主的に、サマースクールを運営した。H28年に支笏湖畔、H29年に別府、H30年熱海、R1年浜名湖において、30名以上の学生を含む若手研究者が分野を超えて集まり、各人の研究発表と議論、シニアの研究者からの混合学の様々な側面の講義が行われた(http://omix.aori.u-tokyo.ac.jp/news_letter/)。若手研究者に発表の機会を設け、様々な研究テーマを理解するのに、十分な時間をとって議論できる場として、大変有益であった。

全体会議などでの発表：全体会議において、若手研究者に研究発表の場を設けてきた。H27-H30年度全体会議ではベストポスター賞を、H28(R1)年度では、国際シンポジウムにおけるポスター発表を設け、多くの若手がポスター発表を行い、海外研究者にも大いにアピールした。

国際活動支援による若手研究者育成：若手研究者が渡航し海外での研究活動を行う、あるいは、海外の研究者を招聘して交流を図る支援を、国際活動支援班で行なった。A02-4班の若手研究者がワシントン大を約1ヶ月訪問し、領域での観測を基に共同研究論文を執筆し、国際共同観測計画を立案した。A03-6班の若手研究者が、ラトガース大学を数回に渡り訪問し、魚類の成長一回遊モデルを高度化した。

総括班からの支援：若手研究者の国内外での研究会への参加など、研究活動の支援として初年度80万円、H28年度以降70万円を計画班に支給し、特に国際活動支援費を使えない学生に対する支援を実施。

若手研究者の受賞状況：

浦川昇吾(気象研究所・研究員) 2018年度日本海洋学会岡田賞, 2018年5月21日

田中雄大(特任研究員) 2016年度日本海洋学会奨励論文賞 2016年3月

樋口富彦(特任研究員) 2016クリタ水・環境科学研究優秀賞 2015日本サンゴ礁学会・川口奨励賞受賞
大貫陽平(D3) 2016年度理学系研究科研究奨励賞(博士)受賞, 2017年3月。

大貫陽平(D3) 日本海洋学会 2016年度秋季大会「若手優秀発表賞」受賞, 2016年9月。

高橋杏(M2) 日本地球惑星科学連合 2016年大会「学生優秀発表賞」受賞, 2016年5月。

大貫陽平(D3) 日本海洋学会 2016年度春季大会「若手優秀発表賞」受賞, 2016年3月。

伊地知敬(D3) 2015年度理学系研究科研究奨励賞(博士)受賞, 2016年3月。

伊地知敬(D3) 2015年度笹川科学研究奨励賞受賞, 2016年3月。

藤原泰(M2) 日本海洋学会 2016年度秋季大会「若手優秀発表賞」受賞, 2016年9月。

藤原泰(M2) 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻「修士論文賞」受賞, 2017年3月。

坂本達也(D1) Best Poster Presentation of AORI-SIO Symposium

坂本達也(D1) Best ECS Presentation Award of ICES/PICES Symposium

若手研究者の就職状況：

田中祐希, 東京大学大学院理学系研究科助教から福井県立大学准教授に昇進 2020年4月

田中雄大, 水産教育・研究機構・東北区水産研究所・任期付研究員 2017年4月、正研究員決定 2020年

大貫陽平, 九州大学応用力学研究所・助教 2017年4月、フランス在外研究 2020年度

高橋 杏, 日本学術振興会特別研究員(DC1) 2017年4月、2020年度ワシントン大学にてPD決定。

藤原 泰, 日本学術振興会特別研究員(DC1) 2017年4月、2020年度 東京大学にて学振PD。

川口悠介, 東京大学大気海洋研究所・助教 2017年5月

李 根淙, 東京大学大気海洋研究所(特任研究員) 2017年5月、韓国海洋研究所・研究員 2020年度

田中 衛, 東京大学大気海洋研究所(特任研究員) 2019年4月、産業技術総合研究所・研究員 2020年

12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

評価体制：大型研究の運営実績があり、親潮源流域など亜寒帯・寒帯海域の海洋・気候を専門とする若土先生、黒潮・熱帯・亜熱帯海洋・気候を専門とする今脇先生、海洋・大気生物地球化学を専門とする植松先生に、全体会議・総括班会議・国際シンポジウムにご出席いただき、研究及び運営について評価とアドバイスをお願いしてきた。

若土正暁(北海道大学・名誉教授・極域海洋学)

本OMIXプロジェクトで最も評価に値することは、「海洋鉛直混合」という、その実態がわからなかった重要な要素を現場観測によって実測し、それに伴う化学物質の動態や生物生産への関わり、さらには気候変動との関わりに至るまでの関係を、主に北太平洋を舞台に明らかにしてきたことである。多方面からの成果が結集した一例をあげれば、中深層に蓄積された栄養物質が、千島・アリューシャン列島周辺や黒潮域周辺における1-4桁も異なる分布をもつ鉛直混合の局在した強混合域で、鉛直に輸送され、それが日本周辺での海のめぐみである豊かな海洋生態系を育てているという事実を、ロシア、中国、インドネシアとの国際共同観測を実施して突き止めたことであろう。これらの成果は、海洋学に於ける、極めて重要な、しかし、これまでの永きにわたって、「未知の研究対象」として、手がつけられない難問；＜海洋における鉛直混合＞の実態把握を可能とする観測手法を自ら考案し、「極めて容易な観測手法」を用いて明らかにしたものである。これまでに得られた成果は、今後の永きにわたって多くの人々の記憶に残るものとなるであろう。この「鉛直混合」という海洋現象は、海洋学を取り巻く、多くの自然現象、特に、気候学、生態学、水産学等に、極めて有効に活用されていくであろうことが期待される。今後、さらなる次世代に於いても、様々な難解な諸課題に遭遇した時の基本的解決策として、有効利用されていくであろう。これから益々の発展が期待される。

今脇資郎(九州大学・名誉教授・海洋物理学)

海洋の鉛直混合は、海水・熱・栄養塩などの鉛直方向の循環を維持する基本的かつ極めて重要な物理過程であるが、これまで観測が困難であるなどの理由でほとんど解明されていなかった。この「新海洋混合学」は、海洋物理学を中心に、生物地球化学、水産海洋学、気候力学などの分野の研究者が連携して、海洋科学の積年の課題に正面から果敢に挑戦し、以下のような特筆すべき成果を得た。

(1) 高速水温計によって深海での弱い鉛直混合を簡便に実測できる方法を確認し、西部北太平洋を中心に多くの現場観測データを取得したほか、海底近くまでの乱流観測を精力的に行った。その結果、黒潮が横切る海山や海嶺などの複雑な海底地形上で、乱流運動エネルギー散逸率が予想以上に大きいことが分かった。

(2) その他にも極めて多くの海洋観測を実施し、混合を含む海洋物理学的データや生物地球化学的データを取得した。特にこれまで重要な海域でありながら海洋観測の乏しかった西部ベーリング海での観測を実施したことを高く評価する。ベーリング海の深層に蓄積された栄養塩とオホーツク海などにもたらされた陸起源の溶存鉄が、海峡などでの鉛直混合によって中・表層に輸送されることにより、西部北太平洋の豊かな海洋生態系が維持されていることを明らかにした。

(3) 黒潮域では、海峡部や海嶺での鉛直混合によって栄養塩が表層に輸送され、生物生産を活発化していることが分かった。さらにマサバなどの耳石の超微量分析手法の開発によって、これらの環境下での仔稚魚の回遊状況が推定できることを示した。

(4) 潮流が引き起こす内部波の砕波に伴う乱流運動エネルギー散逸率の定式化について、深海の海底地形と潮流の相互作用により、風下波が凹凸地形の直上で引き起こす強い“near-field”混合を定式化したほか、“far-field”混合の効果を表すパラメタリゼーションを観測に基づいて改善した。

(5) これらの混合を組み込んだ海洋大循環モデルにより、近年観測されている南大洋・南太平洋での深・底層水の昇温を観測結果に近いレベルで再現したほか、太平洋の深層子午面循環を実測に近い規模で再現し、北太平洋深層水の年齢を示す炭素同位体比 ($\Delta^{14}\text{C}$) について、より観測結果に近い分布を得た。さらに大気モデルを結合して、南極大陸周辺の海水分布の季節変化をより現実に近い形で再現し、グローバルな気候への影響を指摘した。

計画の最初から三つの作業グループ（テーマ：「鉛直混合過程と中深層循環」、「混合過程と海の恵み維持」、「混合変動と気候・生態系・水産資源変動」）を設けて、計画研究の枠にとらわれずに全体目標にストレートに迫る議論を行ったのが、リーダーの活躍もあって、極めて有効であった。また計画研究班が公募研究班との連携を図り、計画研究では見送っていた課題に取り組み、当初計画した以上の成果が挙げられた。若手研究者の育成、国際的な活動やアピール、アウトリーチなどは申し分なく実施された。

今後の課題として、国内・外の研究者を「新海洋混合学」に誘いさらに発展させるため、全体の成果を本格的なレビュー論文にまとめて国際誌に掲載してはどうか。また取得した貴重な観測データは、広く世界中の研究者によって活用されるべきであり、ウェブ上で半恒久的に公開していただきたい。

以上のようにこの領域研究によって海洋の鉛直混合に関する理解は格段に進んだが、海洋大循環モデルで必要とされている乱流エネルギー散逸率は、これまでに観測されている値よりも一桁程度大きいなど、次代の研究者によって解明されるべき重要な課題も残されている。今後のさらなる発展を期待する。

植松光夫（埼玉県環境科学国際センター・総長・東京大学名誉教授・生物地球化学）：

海洋の水の混合という物理場において、化学成分がそれに従って動き、生物の消長が制御されるという、従来の独立した研究分野の垣根を大きく超えた研究プロジェクトである。また、測器や分析法の開発、観測、検証実験、それをもとにしたモデリングという多岐の分野の研究者が連携しなければ達成できない、まさに新しい学術領域「海洋混合学」を確立するプロジェクトとしてふさわしいものである。

その開始時に本プロジェクトの関連する研究の現状把握と課題について、学会誌「海の研究」の総説として関係者以外にも理解が得られるよう共有した。そして多くの物理計測装置を搭載する技術開発や物理、化学、生物のパラメータを含めた時系列観測の確立、海水や耳石などの微量成分や安定同位体測定の開発など初期に不可欠な計画が順調に進展した。

西部北太平洋の縁辺海を中心に海底地形などによって局所的に乱流混合により、微量元素や栄養塩が輸送され、高い生物生産が維持され、生態系を活性化するという物質循環の観点からのアプローチについて、物理、化学、生物の観測により確かめられ、モデルによる定量的な解析により明らかになった。長期にわたる定点時系列観測や、生物地球化学フロートによる広域かつ高い時間分解能の時系列観測は船舶観測では得ることのできない地球環境変動を捉える成果であり、その継続観測には敬意を表する。

世界最高精度の耳石微量酸素同位体分析手法と微小領域の切削技術の画期的な開発は、魚種による成長速度や回遊行動が水温や餌、水塊などの諸条件下で左右されるということの詳細に読み取ることへの成功に導いた。水産科学との連携という新しいダイナミックな繋がりが確立されたと評価する。

観測される 18.6 年周期変動と整合的な PDO を再現する潮汐 18.6 年周期混合変動を取り入れた最新の気候モデルの開発に成功した。また、長期にわたる生態系変動の時系列観測でもその傾向を支持している。これにより気候の長期変動が海洋生態系・水産資源と関係する定量的な評価と予測が期待できる。

三つのワーキンググループによる各計画班と公募班との連携と取り纏めは、班を超えた共通した問題の議論や総括的なストーリーの構築に多大な貢献をした体制だったと評価したい。

若手を含む研究者の受賞は 20 件を超えており、約 30 人の優秀な大学院生や若手研究員が本プロジェクトに取り組んで、立派に育ったといえよう。国内はもちろん、国際的にも、国際シンポジウムの開催や、国際学会において独自のセッションを開き、その存在感を示してきた。また、研究成果は国際一流誌に数多く掲載され、Journal of Oceanography に特集号としてまとめられつつある。

アウトリーチもサイエンスカフェなどの開催やメディアに数多く取り上げられ報道されてきた。総じて、どの計画班も公募班と協働し、本来の目的を達成したばかりではなく、相乗効果により期待以上の成果、進展を示したと評価する。一般啓蒙書の刊行も期待したい。

「海洋混合学(OMIX: Ocean Mixing Processes)」が新しく創設された分野として、国際的にも認知、普及、発展されることを願っている。