

海洋学の 10 年展望 (I)

—日本海洋学会将来構想委員会物理サブグループの議論から—

岡英太郎¹, 磯辺篤彦², 市川香³, 升本順夫⁴, 須賀利雄^{5,4}, 川合義美⁴, 大島慶一郎⁶, 島田浩二⁷, 羽角博康¹, 見延庄士郎⁸, 早稲田卓爾^{9,4}, 岩坂直人¹⁰, 河宮未知生⁴, 伊藤幸彦¹, 久保田雅久¹¹, 中野俊也¹², 日比谷紀之¹³, 寄高博行¹⁴

1 東京大学大気海洋研究所, 2 愛媛大学沿岸環境科学研究センター, 3 九州大学応用力学研究所, 4 独立行政法人海洋研究開発機構, 5 東北大学大学院理学研究科, 6 北海道大学低温科学研究所, 7 東京海洋大学海洋科学部, 8 北海道大学大学院理学研究院, 9 東京大学大学院新領域創成科学研究科, 10 東京海洋大学海洋工学部, 11 東海大学海洋学部, 12 気象庁地球環境・海洋部, 13 東京大学大学院理学研究科, 14 海上保安庁海洋情報部

1. はじめに

海洋は大気の約千倍の貯熱量と大きな熱的慣性を有し、穏やかな地球環境をつくり出している。我が国においては、黒潮による南方からの熱輸送が太平洋側を中心に温暖な気候を形成しているほか、黒潮系の暖水と栄養塩に富む親潮系の水が隣接する本州東方海域は世界有数の漁場となっている。これら海洋および水産資源には、本州南方の黒潮流路変動のように古くから知られる現象をはじめとして、Pacific Decadal Oscillation (PDO)、北太平洋・北米の 50~70 年変動、浮魚類の魚種交替など、様々な時間スケールの変動が存在しているが、エルニーニョ/南方振動 (ENSO) よりも長い、10 年程度以上の時間スケールをもつ長期変動のメカニズムには依然として未解明の点が多い。

海洋はまた、近年の地球温暖化に伴い地球表層圏に貯えられた熱量の 8 割以上を吸収している。貯熱量の増加と気温上昇による氷床融解は沿岸地域を脅かす海面上昇をもたらしているほか、極域海洋への淡水流入による海洋熱塩循環の弱化を通じて気候の急激な変化を引き起こす可能性を有している。海面水温の増加は成層強化を通じて基礎生産や台風の強度などに影響を及ぼすと予測されている。温暖化・酸性化・貧酸素化といった現在進行中の長期変化および上述の長期変動の実態とメカニズムを理解し、将来予測の精度を高める必要がある。資源確保という観点からは、水産資源に加えて自給率わずか 4% のエネルギー資源も我が国にとっての重要課題であり、潮流発電に対する期待も大きい。

このように海洋は気候・水産・防災・エネルギーといった様々な面で人類生存の鍵を握っており、その重要性を鑑み我が国では 2007 年に海洋基本法が制定された。そのような社会的要請の高まりに応える形で海洋学の研究は近年、物理・化学・生物の分野の垣根を越えて学際的に行われるようになっており、その傾向は今後ますます加速するであろう。熱帯を中心に発展してきた

大気海洋相互作用の研究は今や中高緯度でも盛んに行われている。海洋物理学はこのような 21 世紀のホリスティックな海洋学の土台をなしており、その重要性はますます増している。

現代の海洋物理研究の両輪である観測とモデルは今世紀に入り、著しい発展を遂げてきた。まず、Argo フロート観測網の構築により全球海洋表・中層の水温・塩分のラージスケールの変動が季節・海域を問わず捉えられるようになった。Argo に先駆けて海面水温・海面高度を計測してきた観測衛星にも最近海面塩分計が加わり、水温・塩分の両面から物理場の変動を記述することがようやく可能となった。観測船による海底までの高精度横断観測の蓄積は、複数の海盆にまたがる深層昇温傾向を描き出した。一方で最近では、乱流やサブメソスケールの流れといった小規模現象の観測も盛んになりつつある。また、現象のメカニズムを明らかにし、将来予測を行う上で欠かせないモデルも高解像度化・高性能化が進み、中規模現象に満ちた全球の流れの場を現実的に再現するようになった。このような研究手段の発達に伴い、物理場の構造と時間変動の「ありのままの」理解が格段に進んだのが過去 10 年間の大きな流れである。

このような状況の中、わが国が今後 10 年程度の間実施すべき海洋物理の重要課題を選定・整理するため、日本海洋学会将来構想委員会の物理サブグループ (SG) では 2012 年 3 月から 12 月にかけて 5 回の会合を開き、議論を行った。会合では短期目標である 2013 年春の「日本学会会議 大型施設計画・大規模研究計画のマスタープラン」改訂を意識しつつも、そのみに捉われることなく、俯瞰的視点からサイエンスに基づく将来構想を練ってきた。その内容を本報告にまとめる。

会合の議論ではまず、過去 2、30 年間重要性が指摘されてきながら観測が圧倒的に不足している「沿岸」と、それよりも長い時空間スケールを対象とする「気候」を、海洋学の人間社会への貢献という意味も含め、今後の海洋物理研究の 2 本柱と定めた。さらに、「気候」を海域・深度別に、縁辺海・熱帯・中緯度・極域・深層の 5 領域に分け、各領域における研究の方向性を論じた。なお、「気候」については、海洋学会が中心となって取り組めるという意味で、温暖化を含む時間スケール 100 年程度以下の変動を対象とした。本報告の 2~7 節ではこれらの各領域について、

- ・研究を行う重要性
- ・過去 10 年程度の研究のレビュー
- ・今後 10 年程度の研究の方向性
- ・研究遂行のために維持・継続すべき、また新たに整備すべきインフラストラクチャー

をまとめている。各節では、物理研究のみならず、それが化学・生物研究などに与える影響について論じているほか、今後限られた研究予算の中で世界をリードしていくために、日本として重点的に取り組むべきターゲットを積極的に打ち出すようにした。なお、本報告では海域別に議論を紹介しているが、海洋全体を一つの系として理解することが重要であることは言を俟たない。

さらに、2~7 節の全領域に関わる共通課題として、8 節では人間から最もよく見える海洋の部分である「海面」、9 節では最近ようやく変動を大規模に調べるようになった「塩分」の問題を論じた。物理 SG の会合では海面や塩分の他にも全領域に関わる現在の重要テーマとして上述の乱流・サブメソスケール等が挙げられたが、これらについては 2~7 節でも繰り返し言及されているため、あえて 1 つの節として取り上げることはしない。10 節ではマスタープラン改訂に

関連して、各節で挙げられた必要な研究基盤をまとめた。11 節では最近の国際的な動向と其中で日本が果たすべき役割を論じた。

2. 沿岸

物理 SG では、「無流面準拠の地衡流計算ができないほど浅い海」を沿岸海域と定義した。水温・塩分データを海流情報に変換できない以上、沿岸海域における海洋循環は、流速計などを利用して直接測るしかない。しかし、漁業や海運に需要の多い水域を観測で占有することは難しく、現時点で十分な測流データが沿岸海域に蓄積されているわけではない。たとえば、日本海洋データセンター (JODC) が提供する JODC Data On-line Service System で瀬戸内海の測流情報を検索すれば、アーカイブデータの少なさに驚かされるだろう。現代においてなお、我々は、確からしい瀬戸内海の季節別平均流分布図すら描くことができないのである。係留流速計の多数展開は無理にしても、今後は、船舶搭載の ADCP 観測によって、測流データの蓄積が進むかもしれない。しかし、潮流が卓越し、また風に敏感に応答する浅海域の海洋循環には時間変化が大きく、スナップショットの流速分布は、力学過程や物質循環の研究には使いづらい。

一方で、日本の各沿岸海域の水温・塩分分布については、主に県水産試験場による月一度の定線観測によって、すでに平均的な描像が得られている。また、膨大な定線観測データのアーカイブを利用して、年変動や経年変動に関する研究も進められてきた (日本海洋学会沿岸海洋研究部会, 1985, 1990; 柳, 1989; 宇野木, 1993)。このような定線観測の継続が、データの品質維持に重要であることは疑いない。また、船舶による多項目 (物理・化学・生物) データの取得は、平均流分布や物質循環、そして海洋生態系を統合的に扱うべき沿岸海洋研究に必須である。

しかし、沿岸海域での重要な物理過程が持つ時間スケールに比して、月一度の観測間隔は十分とは言えない。測流データの不足に加えて、このような観測密度の時間的な粗さが、沿岸海域の物理過程に対する我々の理解や、数値モデリングの高精度化を阻む一つの要因となってきた。例えば、成層強度は沿岸生態系を支配する重要な因子であるが (Simpson and Sharples, 2012)、おそらくは数日以内に進行する、成層の発達や崩壊の時間発展を密にとらえる観測は、極めて困難である。波浪に伴う海浜流や物質輸送、さらには吹送流や ROFI (Region of Freshwater Influence; Simpson, 1997) には、週以下の時間スケールを持つ気象擾乱に追従して、短周期変動が卓越するだろう (例えば Hsueh, 1988; Whitney and Garvine, 2005)。また、黒潮前線の不安定に起因する急潮は、数日から半月程度の時間スケールを持つ物理過程である (Isobe et al., 2010)。確かに衛星観測は日データを提供するが、マイクロ波による水温観測は、空間解像度が粗すぎて沿岸海域には使えない。一方で熱赤外面像は、しばしば雲域で観測が中断されて、時々刻々と変化する沿岸海域の海況観測には向いていない。このように、現在の観測スキームの中で、我々の捉えられない物理過程が、沿岸海域にはあまりにも多い。物理情報の曖昧さは、沿岸海洋における海洋化学や生物学にも波及してしまう。目先の海は実のところ観測の空白域なのである。

それでも、パフォーマンスの向上著しいコンピュータと、インターネットを介した高密な気象・海象データの提供が、沿岸海域においても高解像度の海洋循環モデリングを可能にしたことは、

最近 10 年間での大きな変革であった（例えば Chang et al., 2009）。しかし、高解像度のモデリングも、現在の観測網の粗さでは精度検証に難があり、依然として沿岸海域の研究は大きく制限されている。ここにおいて、物理 SG における議論では、沿岸海域における物理過程の研究には、沿岸海域に特化した新たな観測技術の開発や観測スキームの構築が必要との結論に至った。高品質の観測データで精度が検証されてこそ、海洋循環モデルも沿岸過程の研究に威力を発揮するだろう。加えてモデルの高度化には、モデル解像度に適合した細密な水深や海上風データの整備も重要であろう。

衛星海面高度計と Argo による海洋観測は、日々の海洋再解析データの提供に道を拓いた (Miyazawa et al., 2008, 2009)。これを利用することで、外洋循環に関する研究は今後大きく進展するだろう。沿岸海域における海洋物理研究の進展のためには、狭領域を解像できる COMPIRA のような新型衛星高度計の開発を強力に支援すべきである。そして、漁業や海運に需要の多い海域でも運用できる、沿岸用のプロファイリングフロートやグライダー観測の技術開発を推進し、これらを活用した新たな観測スキームの設計に着手すべきである。あるいは、周囲を陸に囲まれた沿岸海域では、多数の短波海洋レーダーによる観測網の構築も可能であろう。これらのデータ群を統合的に同化した、格子幅 100 m 以下の超高解像度海洋再解析データにより、わが国の全沿岸海域を網羅する構想を提案する。

沿岸の海洋物理学とは、地先の海で渦の強弱を論じるような、箱庭的な海流情報のコレクションではない。時空間変動が大きな浅海域においてなお、普遍性を求める科学の一分野である。超高解像度の沿岸再解析データが与える「ありのままの」海洋を探求することで、力学過程に対する普遍的な理解は飛躍的に進むことだろう。さらには、再解析データや、これを初期条件とした予報モデルを利用することで、海洋化学や生物学への情報提供といった学術的要請の他に、流木や海難者、あるいは放射性核種などの緊急性を要する漂流予報、漁海況予報、潮汐・潮流発電の効率解析、燃料消費の少ない航路設定など、幅広い社会的要請に対して、沿岸の海洋物理学は力強く応えることができる。

参考文献：

- Chang P.-H., X. Guo, and H. Takeoka (2009): A numerical study of the seasonal circulation in the Seto Inland Sea, Japan, *J. Oceanogr.*, **65**, 721-736.
- Hsueh, Y. (1988): Recent current observations in the eastern Yellow Sea. *J. Geophys. Res.*, **93**(C6), 6875-6884.
- Isobe, A., X. Guo, H. Takeoka (2010): Hindcast and predictability of sporadic Kuroshio-water intrusion (kyucho in the Bungo Channel) into the shelf and coastal waters. *J. Geophys. Res.*, **115**, C04023, doi:10.1029/2009JC005818.
- Miyazawa, Y., T. Kagimoto, X. Guo, H. Sakuma (2008): The Kuroshio large meander formation in 2004 analyzed by an eddy-resolving ocean forecast system. *J. Geophys. Res.*, **113**, C10015, doi:10.1029/2007JC004226.
- Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, K. Komatsu (2009): Water mass variability in the western North Pacific detected in a

15-year eddy resolving ocean reanalysis. *J. Oceanogr.*, **65**, 737-756.

日本海洋学会・沿岸海洋研究部会 (1985): 日本全国沿岸海洋誌. 東海大学出版会, 東京, 1106 pp.

日本海洋学会・沿岸海洋研究部会 (1990): 続・日本全国沿岸海洋誌. 東海大学出版会, 東京, 862 pp.

Simpson, J. H. (1997): Physical processes in the ROFI regime. *J. Mar. Sys.*, **12**, 3-15.

Simpson, J. H. and J. Sharples (2012): Introduction to the physical and biological oceanography of shelf seas. Cambridge University Press, Cambridge, 424 pp.

宇野木早苗 (1993): 沿岸の海洋物理学. 東海大学出版会, 東京, 672 pp.

Whitney, M. M. and R. W. Garvine (2005): Wind influence on a coastal buoyant outflow. *J. Geophys. Res.*, **110**, C03014, doi:10.1029/2003JC002261.

柳哲雄 (1989): 沿岸海洋学. 恒星社厚生閣, 東京, 154 pp.

3. 縁辺海

日本近海の東シナ海・日本海・オホーツク海などは、太平洋の縁部に位置する「縁辺海」である。列島や陸棚斜面などによって大洋から切り離されているため、地形の影響を受けた複雑で時空間スケールの小さな現象が卓越したり、長江やアムール川などの河川水の影響を強く受けたりと、2節の沿岸域と似た性質を有している。その一方で、太平洋と直接接続する比較的広域な海として、中緯度（5節）や極域（6節）の変動と縁辺海の変動は相互に密接に関係している。さらに、日本海固有水など深層（7節）の水塊形成量の長周期変化なども報告されるなど、幅広い海洋物理学的課題が縁辺海には集約している。

近海である縁辺海は、日本の短期気候変動に対して能動的に果たす役割が大きい。例えば、梅雨フロントの位置や強さ、日本海側の冬期の降雪量、北海道での流氷の増減などは、それぞれ東シナ海・日本海・オホーツク海の海面熱フラックスと密接な関係があることが知られている。従って、これらをいかに正確に把握するかが、短期の気候予報には重要となる。一方、長期の気候変動という観点では、縁辺海は大洋に比べて容積が小さいため、一般に気象外力の変化に対する受動的な応答が速い。このため、縁辺海を適切にモニタリングすることで、早期に長期気候変動の兆候を抽出することが可能になると期待される。

さらに、縁辺海は近海漁業の中心的漁場であり、流況を生物・化学的分布とともに把握することが社会的な要請となっている。特に、近年の東アジア域の急速な発展にともない、漂流性の海洋投棄物や汚染物質の移流や、大型クラゲなどの生物種の移動といった環境圧が東シナ海や日本海で問題となっているなど、縁辺海の流況把握は火急の課題である。さらに、黒潮の前線波動や流軸移動による外洋亜表層水の東シナ海への供給や、台風通過時の表層混合による有光層への栄養塩の供給など、物理・生物・化学の各分野が協力して取り組むべき課題がある。

しかしながら、上述したように縁辺海では時空間スケールの小さな現象が卓越するため、スナップショット的な単発の観測では流況をうまく把握できない。このような問題点は沿岸域と同じだが、沿岸域よりもずっと広域で、しかも陸地からも離れている縁辺海では、全域を把握することがより困難である。さらに深刻なことに、縁辺海は複数の国の領海を含むため、観測域に強い

制約がある。近年では、東シナ海の尖閣諸島、日本海の竹島、オホーツク海の北方領土など、複数の国と領有権の主張が交錯する海域での観測が特に難しくなっている。このように、観測的海況把握への現業的な強い要求と、観測の現実的な困難さとの不整合が、縁辺海の最大の特徴であると言える。

逆に、国際協力観測体制が整うと、縁辺海への理解は格段に進んだ。ソビエト連邦の崩壊後に日本海で日・韓・露の国際共同研究（CREAMS）が行われ、はじめて日本海全域の流況や、深層水の形成・分布・経年変化までが記述できるようになった。さらに、オホーツク海での日露共同観測や、東シナ海の流入出口である台湾海峡と対馬海峡での流量モニタリングなど日韓・日台共同観測による成果もあがっている。また、こうした観測値をもとに数値モデルの改良も行われており、ナホトカ号タンカー重油流出事故や、大型クラゲや漂流ゴミの追跡などに利用されてきた。こういった特性を踏まえると、縁辺海における今後の方策として、以下の2項目の遂行が必須である。

まず、継続的で頻繁な現場観測が必要である。これらは、小さな時空間スケールの現象が分離できるほどの頻度で、かつ長周期の気候変動が検出できるように長期間継続しなければならない。可能ならば国際共同観測が望ましいが、少なくとも日本の領海内では、例えば各県の水産試験場や現業官庁が行ってきた定線観測などを今後も長期間にわたり維持し続けることが重要である。加えて、各機関が別々に観測を計画するだけでは時空間的に小さな現象を分離できない可能性があるため、観測線や観測時期を横断的に調整する機関の存在が望まれる。こうした調整機関は、国際調整にも積極的に関与して、限られた観測資源を有効に活用できるよう調整することが望まれる。

一方で、領海による制約を受けにくく、広域観測を繰り返し継続できるリモートセンシングによる観測を充実させることも重要である。近い将来の国家戦略として、例えば琉球列島や北海道の海岸に多数の遠距離海洋レーダを設置することで近海域の表面流を面的に把握したり、生物的な分布観測を可能とする海色観測衛星を充実させたりと、既存の技術で大規模に展開させる予算配置が望まれる。さらに、現在宇宙航空研究開発機構（JAXA）が世界に先駆けて開発している、沿岸・縁辺海での実利用観測を念頭においた新型衛星海面高度計 COMPIRA が利用できれば、高い時間分解能で面的に海面高度を計測することが可能となり、これまで不可能だった縁辺海全域の短期間の流況変動が把握できるようになる。

こうした観測体制の充実こそが、日本近海の縁辺海において、海洋基本法にある日本のガバナンスを明示する手法となる。

4. 熱帯

熱帯海洋は太陽からの放射エネルギーの多くを受けることで海面水温が高く、そのため大気との活発な相互作用を通じて大気海洋システム内に大規模な気候変動モードを励起している。太平洋のエルニーニョ現象に代表されるこのような低緯度気候変動現象は、その周辺域の気候に大きな影響を与えるだけでなく、テレコネクションを通じて中高緯度域の気候にも大きく寄与している。熱帯海洋は、このような気候変動現象の熱源として、またペースメーカーとして重要であ

る。

もともと熱帯域の海洋学は、中緯度域とは異なり東西流が卓越する海流系を記述し、その成因や変動特性を明らかにすることで発展してきた。1970年代から活発になった ENSO の研究では、1980/90年代の TOGA プロジェクト期間を挟んだ時期に太平洋での熱帯観測網が発展し、変動の時空間パターンが得られるようになった。さらに数値モデルの発展期とも相まって、理論、観測、シミュレーションの三位一体となった研究が展開され、エルニーニョ現象に対する我々の理解は深まり、半年から1年程度前からエルニーニョ現象の発展を予測することが可能となってきた。

しかし近年、更なる観測網の充実とモデルの高度化により、ENSO だけではなく、インド洋ダイポールモード現象、大西洋ニーニョや南北モードなど、異なる大洋での気候変動モードの存在とその重要性が指摘されるようになった。また太平洋に関しても、従来の典型的なエルニーニョ現象とは異なり、東西に三極構造を持つ「エルニーニョもどき」が近年頻発するようになっていいる。さらに経年変動のみならず、季節変動や経年変動の長期変動、季節内変動、またそれらの間の相互作用の研究が発展し始めたところである。これらの新たな研究の展開は、長期に渡り継続的に得られている高精度かつ高品質の観測データがあって初めてなし得たものである。今後の発見的な研究、新たな理論や数値モデル結果の検証、予測のための研究等の発展のためにも、現在熱帯域に展開されている TAO/TRITON, PIRATA, RAMA の係留系アレイ、篤志船による XBT/XCTD 観測、潮位計や海面ドリフター、Argo の各ネットワークは、継続、発展すべきものである。もちろん、人工衛星による海面での各種観測データは、現場観測と相補的な役割を担うものであり、今後の継続性確保と時空間規模の細密化は必須である。これまでのわが国における熱帯海洋研究への貢献を踏まえ、観測の強化、シミュレーションの高度化を通じて更なる国際的リーダーシップを発揮することが望まれる。

今後10年程度の研究の方向性を考えれば、大きな柱は熱帯起源の気候変動モードの予測精度向上と予測結果を利用した気候サービスの展開となる。この方向性は、2009年に開かれた第3回世界気候会議(WCC-3)において示され、世界気象機関(WMO)や世界気候研究計画(WCRP)などの国際的な枠組みの中でも推進されることとなっている。そのためには、各大洋に生起する気候変動モード間の相互の関連、異なる時間規模現象間の相互作用、大気と海洋のそれぞれにおける熱帯域と中緯度域との関連性などを明らかにし、それらを1つのシステムとして統一的に扱った予測を試みる必要がある。さらに、温暖化のような気候変化の影響下で、各気候変動モードがどのように変動して行くのか、相互の関連性がどのように変わって行くのか、テレコネクションパターンがどのような影響を受けるのかなどが重要な問題となるであろう。これらの研究を発展させるためには、大洋規模で卓越する気候変動のみならず、赤道循環系、低緯度西岸境界流、赤道不安定波、インドネシア通過流、大規模湧昇域などの様々な現象の理解を深めるとともに、表層混合層過程や中深層での混合過程などの素過程の理解も必須である。そのためには、研究船による高精度観測を軸としたプロセス研究が不可欠であり、戦略的かつ機動的な研究計画の実施のためにも研究船の確保と効率的な運用が求められる。

さらに、熱帯域に見られる大規模な湧昇域は、表層と亜表層間の物質循環にも重要な役割を担っている。そこでの物理環境場と生物地球化学的変動との関連は、今後展開されるべき学際的研究トピックの1つとして国際的にも注目されている。定量的な議論を行うためには、これまでの

物理関連諸量に加え、係留系や Argo などの既存の観測プラットフォームを利用した生物地球化学的観測を充実させる必要があり、技術開発の進展も望まれる。

一方、季節から数年程度の気候変動予測は、その結果を社会経済活動へと結びつける段階に入っている。社会科学的ニーズを満たすために地球化学的成果を利活用するには、双方からの歩み寄りに根ざした学際的な連携が強く求められる。

5. 中緯度

中緯度海洋は、黒潮・親潮などの強い西岸境界流と内部領域の弱い流れから成る亜熱帯循環および亜寒帯循環で特徴づけられる。この循環に対応した、東西に非対称なボウル状の主密度躍層が海盆スケールの成層構造を特徴づけている。これらの循環や成層構造を支配する基本的な力学は 1980 年代までにある程度理論化されていた (e.g., Rhines and Young, 1982; Luyten et al., 1983)。現実の海を観測し、理論と比較すること (e.g., Talley, 1988; Hautala and Roemmich, 1994) や、数値モデルによって再現すること (e.g., England, 1993; Yamanaka et al., 1998) が、20 世紀終盤の海洋物理学の主要な課題であった。同時に、海洋の熱・物質輸送の定量化とそれを担うプロセスの理解を目指す研究が、気候システムにおける海洋の役割の解明のために行われてきた (e.g., Bryden and Imawaki, 2001)。現実の海は、地衡流計算や流速計、ドリフター等による流速・流量や、水温、塩分、渦位などの極小・極大層で特徴づけられる水塊の形成・分布によって記述され、それらの変動も議論された (e.g., Hanawa and Talley, 2001; Yasuda, 2004)。気象庁が 1960 年代から維持してきた世界に例のない長期定線観測は、循環や水塊の変動の理解に大いに貢献した (e.g., Suga et al., 1989; Qiu and Joyce, 1992)。世界海洋循環実験 (WOCE) によって、1990 年代に実施された組織的な全球海洋の観測は、海洋の記述にとって画期的なものだった (e.g., King et al., 2001)。しかし、現実の海の時空間変動性と比べれば、定線観測はもちろん、WOCE の観測ですら、決して十分なものとは言えなかった。この時代には、理想化された海の理論を頼りに、極めて限られた断片的な観測事実を解釈しようとしていたと言ってもいいだろう。数値モデルによる現実の海の再現は、部分的な成功を収め始めてはいたが、限られた観測事実との比較という枠を超えるものではなかった (e.g., Böning and Semtner, 2001)。

21 世紀に入り、衛星による海面高度、海上風、海面水温のデータの整備・蓄積や渦解像海洋大循環モデルの発達・普及、データ同化システムの開発などが進み (e.g., Clark et al., 2009; Cummings et al., 2009)、海域によっては、「現実的な」、渦に満ちた日々の循環場が再現され、ほぼリアルタイムで提供されるようになった (e.g., Hurlburt et al., 2009)。また、Argo によって、海洋内部の情報が時空間的に万遍なく得られるようになった (Freeland et al., 2010)。飛躍的に向上した現実の海とモデルが再現する海の情報とは、理想化された海の理論との比較という従来の枠を大きく飛び越えて、複雑な海洋をありのままに捉える研究を発展させているようにみえる。というより、爆発的に増えた情報量に対して解釈が追いついていないと言った方が正しいかもしれない。北太平洋に関する例を挙げれば、黒潮・黒潮続流・親潮の変動 (e.g., Qiu and Chen, 2005)、モード水や中層水などの水塊形成・分布過程とその変動 (e.g., Oka and Qiu, 2012)、亜熱帯前線の維持・変動メカニズム (e.g., Kobashi and Kubokawa, 2012)、中規模渦による熱・

水塊輸送、乱流鉛直混合、物理過程と物質循環・生態系変動の関係、西岸境界域における大気海洋相互作用など、21世紀の中緯度の海洋物理学研究は様々な方向に発展した。個別の現象に関する理解は大いに進展するとともに、現象理解の精密化・定量化のための課題も次々に生み出されている。必然的に、中緯度海洋全体を統一的、俯瞰的に理解しようとする研究の比率は低下してきたとも言えよう。これは、WOCEに匹敵するような、中緯度を舞台とした海洋物理の大型国際プロジェクトが近年実施されていないこととも無縁ではないだろう。

過去10年の研究の進展に関して特筆すべき点として、Argoの構築がある。気候変動シグナルの検出が可能な精度の水温・塩分プロファイルを全球海洋から万遍無く取得するフロート観測網と強力なデータ管理システムから成るArgoは、海洋の状態の把握はもちろん、さまざまなプロセス研究や、データ同化システムの発展に革命的な変化をもたらした。広域の継続的な塩分観測がArgoによって初めて可能となり、海洋物理の基本パラメータである塩分のデータが水温と同じ時空間カバレッジで得られるようになったことの意義も大きい(9節)。さらに、Argoデータを衛星海面高度データの組み合わせることによって、飛躍的に研究が進んだ。今後の海洋研究にとって、Argoと衛星高度計は不可欠のインフラストラクチャーと言えるだろう。

もう一つ特筆すべきことに、大気海洋相互作用研究の進展がある。かつては中高緯度の海洋は大気から受動的に影響を受けるだけの存在と考えられていたが、再解析データや数値実験などにより、中高緯度の海洋も大気に本質的に重要な影響を与えていることが認識されるようになった(Nakamura et al., 2008; Minobe et al., 2008など)。このため近年では中高緯度における大気海洋相互作用に着目した研究が盛んに行われている。西岸境界流域上では他の領域に比べて気温の長期トレンドが大きいこと(Wu et al., 2012)や、黒潮の大蛇行が低気圧経路を変えて東京に降雪をもたらすこと(Nakamura et al., 2012)、北極域の海氷減少が中高緯度の低気圧経路に変化を生じさせていること(Inoue et al., 2012)が示されるなど、気候に対する中高緯度の海洋の役割が大きいことを示す新たな知見も得られている。中高緯度に関しても熱帯域と同様に、海洋だけで閉じるのではなく、大気も含めた包括的な理解が必要である。そのような研究を日本がリードする取り組みとして、中緯度海洋が大気循環や表層環境の形成・変動に果たす役割の解明を目指す新学術領域研究「中緯度海洋と気候」が、気象と海洋の研究者の連携により、2010年度から走っている。この取り組みを、海洋サイドからも、より一層充実させることが望まれる。

今後10年程度も、個別の現象の理解を精密化・定量化する研究が、観測からもモデルからも、進められるだろうと予想される。その先に、様々な現象に共通する、たとえば乱流混合過程や中規模過程、サブメソスケール過程などの理解の一般化が見えてくる可能性はある。また、物理過程と生物・化学過程の理解を総合化するような研究もある程度進むものと期待される。理解の一般化や総合化は、単なる精密化・定量化を超えた新たな魅力あるサイエンスの創出につながる可能性もある。それらの研究を進めるためには、その前提となる、これまでに構築されてきた各種衛星観測やArgoなどのモニタリングシステムを維持する必要がある。その上で、船舶や係留系、グライダー等による高解像度・高精度の現場観測、COMPIRA、SWOTなど次世代の高解像度衛星海面高度計測とモデリングを組み合わせたプロセス研究を展開する必要がある。ますます高解像度化するモデルの検証のためには、少なくともサブメソスケールを解像する時空間解像度の観測が不可欠であろう。

研究資源が無限にあるなら、現象理解の精密化・定量化と一般化、総合化を追求するような研究を世界中の海で進めればよい。しかし、現実には、それは不可能である。そのような研究を展開する現実的な方法の一つは、重点海域を絞って、研究資源を集中投入することだろう。その際、限られた研究資源を有効に使って、日本の海洋研究コミュニティとして大きな成果を挙げるためには、多くの研究者がそれぞれの興味を持ち寄って貢献でき、かつ、根源的な課題の解決につながり、さらに、社会のニーズに応えるような成果の応用が期待できるような大型プロジェクトを設定することが望まれる。

ここでは、そのような大型プロジェクトの対象海域として、世界の海洋の中でも特徴的な構造といえる黒潮親潮続流域を提案したい。北太平洋亜熱帯・亜寒帯循環の西岸境界流離岸域であるこの海域は、北太平洋の広範囲から海水が集まると同時に、ここに端を発する海水が北太平洋の広域に広がっている。また、海水だけでなく、ロスビー波によって北太平洋の広範囲から力学的擾乱の情報が集まる。まさに北太平洋の要といえる海域である。この海域にはどんな水がどこからどれだけもたらされていて、それがこの海域の水温・塩分分布や、黒潮続流再循環、混合水域などの海洋構造をどのように形作り、海盆規模から中規模、サブメソスケール、微細スケールまでの変動を生み出しているのか。それを、物理的、化学的、生物学的観点から明らかにすることは、この海域に面している我が国の研究者にとって海洋科学的にも、応用面からも重要な課題と言えるだろう。さらに、この海域を中心に据えたプロジェクトは、ここから発した海水の北太平洋の広域へのインパクト、この海域における大気海洋相互作用の大気循環へのインパクトなどもターゲットに含むことで、様々な方向に発展する研究をつなぐ要ともなり得るだろう。PDOなどの気候変動の解明や、海洋の物理環境の変動が物質循環・生態系の変動に及ぼす影響の解明、外洋域の変動が沿岸海洋環境（2節）に及ぼす影響の解明などにもつながると期待される。

- Böning, C.W., and A.J. Semtner (2001), High-resolution modeling of the thermohaline and wind-driven circulation. *Ocean Circulation and Climate*, J. Church et al., Eds., Academic Press, 59-77.
- Bryden, H.L., and S. Imawaki (2001), Ocean heat transport. *Ocean Circulation and Climate*, J. Church et al., Eds., Academic Press, 455-474.
- Clark, C., and the In Situ Observing System Authors, and S. Wilson and the Satellite Observing System Authors (2009), An overview of global observing systems relevant to GODAE. *Oceanography*, **22**, 22-33
- Cummings, J., L. Bertino, P. Brasseur, I. Fukumori, M. Kamachi, M.J. Martin, K. Mogensen, P. Oke, C.E. Testut, J. Verron, and A. Weaver (2009), Ocean data assimilation systems for GODAE. *Oceanography*, **22**, 96-109.
- England, M.H. (1993), Representing the global-scale water masses in ocean general circulation models. *J. Phys. Oceanogr.*, **23**, 1523-1552.
- Freeland, H., Roemmich, D., Garzoli, S., LeTraon, P., Ravichandran, M., Riser, S., Thierry, V., Wijffels, S., Belbéoch, M., Gould, J., Grant, F., Ignazewski, M., King, B., Klein, B., Mork, K., Owens, B., Pouliquen, S., Sterl, A., Suga, T., Suk, M., Sutton, P., Troisi, A., Vélez-Belchi, P.

- and Xu, J. (2010), "Argo - A Decade of Progress" in *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 2)*, Venice, Italy, 21-25 September 2009, Hall, J., Harrison, D.E. & Stammer, D., Eds., ESA Publication WPP-306, doi:10.5270/OceanObs09.cwp.32.
- Hanawa, K., and L.D. Talley (2001), Mode water. *Ocean Circulation and Climate*, J. Church et al., Eds., Academic Press, 373-386.
- Hautala, L.S., and D.H. Roemmich (1994), Is the North Pacific in Sverdrup balance along 24°N? *J. Geophys. Res.*, **99**, 16041-16052.
- Hurlburt, H.E., G.B. Brassington, Y. Drillet, M. Kamachi, M. Benkiran, R. Bourdalle-Badie, E.P. Chassignet, G.A. Jacobs, O. Le Galloudec, J.-M. Lellouche, E.J. Metzger, P.R. Oke, T.F. Pugh, A. Schiller, O.M. Smedstad, B. Tranchant, H. Tsujino, N. Usui, and A.J. Wallcraft (2009), Highresolution global and basin-scale ocean analyses and forecasts. *Oceanography*, **22**, 110–127.
- Inoue, J., M.E. Hori, and K. Takaya (2012), The role of Barents sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian anomaly. *J. Climate*, **25**, 2561-2568.
- King, B.A., E. Firing and T.M. Joyce (2001), Shipboard observations during WOCE. *Ocean Circulation and Climate*, J. Church et al., Eds., Academic Press, 99-122.
- Kobashi, F., and A. Kubokawa (2012), Review on North Pacific Subtropical Countercurrents and Subtropical Fronts: role of mode waters in ocean circulation and climate. *J. Oceanogr.*, **68**, 21-43.
- Luyten, J.R., J. Pedlosky, and H. Stommel, 1983: The ventilated thermocline. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**, 292-309.
- Minobe, S., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, S. -P. Xie, and R.J. Small (2008), Influence of the Gulf Stream on the troposphere. *Nature*, **452**, 206-209.
- Nakamura, H., A. Nishina, and S. Minobe (2012), Response of storm tracks to bimodal Kuroshio path states south of Japan. *J. Climate*, **25**, 7772-7779.
- Nakamura, H., T. Sampe, A. Goto, W. Ohfuchi, and S.-P. Xie (2008), On the importance of midlatitude oceanic frontal zones for the mean state and dominant variability in the tropospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L15709, doi:10.1029/2008GL034010.
- Oka, E, and B. Qiu (2012), Progress of North Pacific mode water research in the past decade. *J. Oceanogr.*, **68**, 5-20.
- Qiu, B., and T.M. Joyce (1992), Interannual variability in the mid- and low-latitude western North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **22**, 1062-1079.
- Qiu, B., and S. Chen (2005), Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre and mesoscale eddies on decadal timescales. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 2090-2103
- Rhines, P.B., and W.R. Young (1982), A theory of the wind-driven circulation. I. Mid-ocean gyre. *J. Mar. Res.*, **40** (Suppl.), 559-596.

- Suga, T., K. Hanawa and Y. Toba (1989), Subtropical Mode Water in the 137°E section. *J Phys. Oceanogr.*, **19**, 1605-1618.
- Talley, L. D. (1988), Potential vorticity distribution in the North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **18**, 89-106.
- Wu, L., W. Cai, L. Zhang, H. Nakamura, A. Timmermann, T. Joyce, M.J. McPhaden, M. Alexander, B. Qiu, M. Visbeck, P. Chang, and B. Giese (2012), Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. *Nature Climate Change*, **2**, 161-166.
- Yamanaka, G., Y. Kitamura and M. Endoh (1998), Formation of North Pacific Intermediate Water in Meteorological Research Institute ocean general circulation model. 1. Subgrid-scale mixing and marginal sea fresh water. *J. Geophys. Res.*, **103**, 30885-30903.
- Yasuda, I. (2004), North Pacific Intermediate Water: Progress in SAGE (SubArctic Gyre Experiment) and related projects. *J. Oceanogr.*, **60**, 385-395.

6. 極域

極域海洋からの重い水の沈み込みにより海洋中深層循環は駆動され、全海洋の底層に広がる南極底層水は全海水の 30-40%を占める(Johnson, 2008)。北太平洋においては、最も重い水がオホーツク海の高海氷生産により作られ、中層(200-800m)に潜り込み、同時に生物生産を決めうる鉄分も輸送される(中層鉄仮説: Nishioka et al., 2007)など、重要な物質循環を伴っている。極域・海氷域は気候変動に対して鋭敏な海域であり、海氷減少など温暖化を加速する地域でもある。また、南極底層水の高温化・低塩化(Aoki et al., 2005; Purkey and Johnson, 2010)や北太平洋の中層水の高温化(Nakanowatari et al., 2007)が明らかになり、中深層循環の弱化的可能性も指摘されている。西南極では、海洋による氷床・棚氷の融解が増加しており(Pritchard, et al., 2012)、これがさらに加速すると、深層循環弱化的だけでなく、他の要因を凌駕する海面水位上昇をもたらすことになる(Rignot et al., 2011)。南大洋が CO₂ のシンクであること(Sigman and Boyle, 2000)を含めて、長い時間スケールの気候変動においては、極域海洋は最重要因子である。一方で、すでに北極海で顕著な海氷減少は、海洋循環の強化(Shimada et al., 2006)やアルベドフィードバック効果を介し急激な気候変動をもたらす可能性を有しており、その定量的な解明が早急に求められる。

このように極域海洋は、海洋大循環、物質循環、そして気候変動にも鍵を握る海域である。しかしながら、海氷の存在により衛星観測(海面高度計など)や Argo のフロート観測が困難な海域でもあり、観測データは中低緯度に比べると圧倒的に少ない。極域海洋の不理解が全球の海洋循環や気候システムの理解を律速しているとも言える。従って、中低緯度海域以上に現場観測が必要とされているが、北極海や南極海の現場観測は一国のみで行えるのではなく、国際連携が不可欠である。以上のことは国際的にも認識され、国際北極科学委員会(IASC)、南極研究科学委員会(SCAR)にて国際連携が推進されている。また近年、欧米諸国以外でも、中国、韓国、南アフリカといった国々が次々と専用の砕氷観測船を建造し、国際的に大きく貢献し始めた。対照的に日本は未だ砕氷観測船を保有するに至っておらず、科学的貢献についての相対的衰退が懸

念される。わが国は、南極観測で使用されている「しらせ」を保有しているが、自衛艦であり国際法上の軍艦である。そのため、沿岸諸国に囲まれた北極海での活動は困難である。また、輸送業務を第一目的としており、2009年に「新しらせ」になってからはCTDアーマードケーブルなどの海洋研究に資する基盤観測設備すら有していない。わが国においても砕氷観測船を保有すべきときに来ている。海洋・大気といった気候変動分野を中心に、関連する北極海航路の利用可能性と航行システム構築に関する工学分野、古環境、固体地球分野などとも連携し、オールジャパンで最大限に有効活用できる砕氷調査船建造を推進することが望ましい。砕氷船を保有する北極海沿岸諸国の主たる観測海域が領海・EEZを中心とした沿岸域に集中しており、海氷減少が進む外洋域の観測調査は減少している。非北極沿岸国ではない日本が砕氷調査船を有し、ニュートラルな立場で権益にとらわれない科学調査を主導することは、今後の北極研究および気候変動研究に対し極めて重要な意味を持つ。今まで日本が先見して研究してきた、海氷激減のコア海域である太平洋側北極海に特化した観測を行えば、海氷激減の原因解明(Shimada et al., 2006)、生態系も含めた影響評価(Yamamoto-Kawai et al., 2009)を世界に先導して進めることになる。また、重要性が認識されたばかりでまだ手つかずの海洋-棚氷相互作用に関わる観測を、太平洋深層水とその変動の源にもなっているロス海や東南極(Fukasawa et al., 2004, Masuda et al., 2010)で集中して行えば、後で述べるモデル・衛星研究と連携することで世界を先導する研究となりうる。

それに加え、海氷域でも観測できる新しい技術(例えば自律型無人潜水機・耐氷プロファイリングフロート, Kikuchi et al., 2007)の開発も進める必要がある。極域観測技術について日本は、利用ファシリティとなる砕氷観測船を有しなかったがために、後れを取っている。しかし、深海探査を中心とした測位技術、音響通信技術等は世界トップレベルであり、世界を先導するポテンシャルは十分有している。日本が極域海洋研究においてまず先導しうるのは衛星観測である。日本が開発したマイクロ波放射計 AMSR は今や海氷研究の生命線となっている(AMSR2 が 2012 年度より運用開始)。このデータにより、毎日全球で高分解能の海氷分布・薄氷域分布・海氷漂流データなどが導出可能であり、これら衛星のアルゴリズム開発においても日本は先導的な研究を行っている(Nihashi et al., 2009)。また、下に示すモデル研究との連携も開始されており、統合することで、世界を先導する研究をさらに発展させることが可能である。海洋学会は、世界に誇りうる衛星観測が強化、継続されるよう、AMSR2 の後継機開発も含めて強く要望していくべきである。

一方で、上記のような観測の発展を加味しても、極域では観測データの急激な増加は望めない。極域海洋は数値モデル研究がより重要な位置を占める海域と言える。近年の計算機資源とモデル開発の大きな進展により、今や数値海洋モデルは観測データを補完するという意味において実用に足る道具となりつつある(Matsumura and Hasumi, 2010)。しかし、極域海洋では、海洋構造や氷厚の季節変動が十分再現されていないなど、現場観測および衛星観測を活用したプロセスの理解、そしてモデル改善やさらなる開発が必要である。モデル開発や計算機資源に関して日本は世界に誇る先導性を持っている。これら数値モデル研究に、現場観測、衛星観測、それらの同化を融合した研究を世界に先駆けて行うことが望まれる。日本は極域海洋分野に関して、観測、衛星、モデル研究者間での交流が極めて活発であり、発展の土壌は整っている。極域海洋は海氷・氷河・棚氷などの雪氷プロセスが複雑に絡みあっており(Hellmer et al., 2012, Tamura et al.,

2012)、それらの相互作用は気候システムの中で未解明のまま残されている要素の一つである。雪氷との相互作用を含めたモデルの開発なども今後取り組むべき課題である。北極海における海水激減や西南極の海洋による氷床後退など、わが国の衛星観測（例えば、AMSR-E、ALOS等）により雪氷域の大きな変化が明らかになった今日、海水分布変化に伴う大気循環場の変化、水位上昇、南極底層水淡水化による深層循環の変化等、科学的にも社会的にも重要となる気候変動の理解・予測に対し、砕氷調査船や既存の耐氷研究船・練習船による現場観測、衛星によるモニター観測、モデル開発の三位一体の体制と、その推進を司る拠点形成が重要となる。

参考文献：

- Aoki, S., S. R. Rintoul, S. Ushio, S. Watanabe and N. L. Bindoff (2005): Freshening of the Adelie Land Bottom Water near 140E. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L23601, doi:10.1029/2005GL024246.
- Fukasawa, M., H. Freeland, R. Perkin, T. Watanabe, H. Uchida and A. Nishina (2004): Bottom water warming in the North Pacific Ocean. *Nature*, **427**, 825-827.
- Johnson, G. C. (2008): Quantifying Antarctic Bottom Water and North Atlantic Deep Water volumes. *J. Geophys. Res.* **113**, C05027, doi:10.1029/2007JC004477.
- Kikuchi T., J. Inoue and D. Langevin (2007): Argo-type profiling float observation under the Arctic multiyear ice. *Deep Sea Research*, **54**, 1675-1686.
- Hellmer, H. H., F. Kauker, R. Timmermann, J. Determann and J. Rae (2012): Twenty-first-century warming of a large Antarctic ice-shelf cavity by a redirected coastal current. *Nature*, **485**, 225-228.
- Masuda, S. et al. (2010): Simulated rapid warming of abyssal North Pacific water. *Science*, **329**, 319-322, doi:10.1126/science.1188703.
- Matsumura, Y. and H. Hasumi (2010): Modeling ice shelf water overflow and bottom water formation in the southern Weddell Sea. *J. Geophys. Res.*, **115**, C10033, doi:10.1029/2009JC005841 (2010).
- Nakanowatari T., K. I. Ohshima, M. Wakatsuchi (2007): Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955-2004. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04602, doi:10.1029/2006GL028243.
- Nihashi, S., K. I. Ohshima, T. Tamura, Y. Fukamachi, and S. Saitoh (2009): Thickness and production of sea ice in the Okhotsk Sea coastal polynyas from AMSR-E. *J. Geophys. Res.*, **114**, C10025, doi:10.1029/2008JC005222.
- Nishioka, J. et al. (2007): Iron supply to the western subarctic Pacific: importance of iron export from the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **112**, C10012, doi:10.1029/2006JC004055.
- Pritchard, H. D., S. R. M. Ligtenberg, H. A. Fricker, D. G. Vaughan, M. R. van den Broeke and L. Padman (2012): Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, **484**, 502-505.
- Purkey, S. G., and G. C. Johnson (2010): Warming of global abyssal and deep Southern Ocean

- waters between the 1990s and 2000s: Contributions to global heat and sea level rise budgets. *J. Climate*, **23**, 6336-6351.
- Rignot, E., I. Velicogna, M. R. van den Broeke, A. Monaghan, and J. T. M. Lenaerts (2011): Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L05503, doi:10.1029/2011GL046583.
- Shimada, K., T. Kamoshida, M. Itoh, S. Nishino, E. Carmack, F. McLaughlin, S. Zimmermann, and A. Proshutinsky (2006): Pacific Ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L08605, doi:10.1029/2005GL025624.
- Sigman, D. M. and E. A., Boyle (2000): Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide. *Nature*, **407**, 859-869.
- Tamura, T., G. D. Williams, A. D. Fraser and K. I. Ohshima (2012): Potential regime shift in decreased sea ice production after the Mertz Glacier calving. *Nature Communications*, **3:826**, 2012.
- Yamamoto - Kawai, M., F. A. McLaughlin, E. C. Carmack, S. Nishino, and K. Shimada (2009): Aragonite Undersaturation in the Arctic Ocean: Effects of ocean acidification and sea ice melt. *Science*, **326**, 1098–1100.

7. 深層

大きな熱容量を持ち大量の溶存物質を保持する海洋深層は気候の安定性や長期・大規模変動を大きく左右する要素であり、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 評価報告書においても深層循環の将来変化が重要なトピックとして扱われている (IPCC, 2007)。

全球規模の深層循環は熱塩循環として駆動され、大陸縁および縁辺海内のごく狭い少数箇所における下降 (深層水形成) と広大な外洋における上昇、およびそれらの間をつなぐ水平流からなる。このうち観測によって流れが直接捉えられているのは、深層水形成領域のうちいくつかについての外洋への高密度水流出 (e.g., Dickson and Brown, 1994) や、深層海盆間の海峡通過流 (e.g., Kawabe et al., 2005) など、ごく限られた部分のみである。全球的な深層循環の経路の把握は主に各種トレーサーの分布に基づいているのが現状であり、不明な部分が未だに多く残されている。深層水形成領域に近い大西洋や南大洋ではクロロフルオロカーボン (CFC) などの人為起源トレーサーが経路と流量の推定に有用であるが (e.g., Orsi et al., 2002)、人為起源トレーサーが未だ到達しない太平洋深層では実態把握が遅れている。特に、北太平洋に流入した深層水が上昇して南に戻る経路については、概容さえ把握できていないのが実情である (e.g., Kawabe and Fujio, 2010)。

気候の温暖化に伴う海洋の変化という観点から、深層水形成領域における水塊の密度低下 (e.g., Aoki et al., 2005) や、外洋における深層水温上昇 (e.g., Fukasawa et al., 2004) などが近年多く報告されている。しかしながら、上述の通り深層循環の実態把握が不足している現状では、外洋における深層の変化がどのような物理に基づいているのかを明らかにすることができず、観測される変化が気候の温暖化とどのような因果関係にあるのかについての確証が得られない。いま

改めて、深層循環の全貌を知るための基礎的な研究を推進する意義があるのではないだろうか。

深層の係留観測結果には大きな流速変動が常に見られるが、従来の空間的にまばらな係留系群ではその変動がどのような物理現象を捉えたものか判断できない(e.g., Yanagimoto et al., 2010)。一方、近年の高解像度モデリングは深層が渦運動に満ち溢れていることを示し、さらにはそうした渦運動が数 cm/s を越える強い平均流を大洋規模で作ることも示唆している(Nakano and Hasumi, 2005)。また、深層水の流量と裏腹の関係にある深層水塊の変質においても、渦運動とそれに伴う非線型過程が重要であることがモデリングによって示されている(Urakawa and Hasumi, 2012)。熱塩循環の力学的理解は、鉛直移流拡散バランスと惑星渦度バランスという、古典的な定常線型力学の枠組みに未だ留まっている。深層循環の理解をさらに発展させるためには、深層の変動性を取り込んだ新たな枠組みが必要である。深層水の上昇をもたらす要因である乱流混合を含めて深層における変動現象を時空間的に詳細に観測し、その観測によって検証されたモデリングと連携することで初めて、そうした新しい深層循環像を描くことが可能になるであろう。

全球規模深層循環は、乱流混合・鉛直対流・メソスケール渦・大規模海流と、ミクロスケールからマクロスケールまでを包括する現象である。その統一的な理解に向けて、異なるスケールを持つプロセス間の相互作用を解き明かす必要がある。全球規模深層循環はまた、特に深層水形成領域における塩分に敏感な現象であることが知られており、気候の淡水循環や氷床との相互作用という観点からの深層循環像を確立する必要もある。深層循環は古海洋・古気候を考える上でも重要な要素だが、現在とは全く異なる深層水形成・深層循環レジームを持つ状態について信頼の議論を行うためにも、そうした理解が欠かせないであろう。日本の海洋研究コミュニティとしては、実態把握が最も遅れている北太平洋を中心として研究を推進することが、地理的な利点を活かす意味でも、国際的な先進性獲得の観点からも、好ましいであろう。

そのためには、高精度観測と高解像度大規模モデリングをますます推進する必要がある。高精度観測の基盤となるのは船舶観測や係留観測であり、これまで観測が不足していた地域に対してそれらを展開することはもちろん必要であるが、船舶・係留観測がカバーできる時空間範囲がきわめて限定されることを前提として、他の機動的な手段による観測やモデリングとの同時展開といった複合的なアプローチが今後は必要であろう。例えば、大規模な時空間構造の把握には大深度型フロートを用い、船舶・係留観測の資源はその中の特徴的な時空間構造を詳細に捉えるために集中的に投入するといったアプローチが考えられる。その際、船舶・係留観測を設計するためには高解像度モデリングの結果を活用することが必須であろう。深層の高解像度モデリングには大きな計算資源が必要であり、深層研究の基盤としては大規模計算資源の確保も重要な要素である。

参考文献：

- Aoki, S., S. R. Rintoul, S. Ushio, S. Watanabe and N. L. Bindoff (2005): Freshening of the Adelie Land Bottom Water near 140E. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L23601, doi:10.1029/2005GL024246.
- Dickson, R. R., and J. Brown (1994): The production of North Atlantic Deep Water: Sources,

- rates and pathways. *J. Geophys. Res.*, **99**, 12,319-12,341.
- Fukasawa, M., H. Freeland, R. Perkin, T. Watanabe, H. Uchida and A. Nishina (2004): Bottom water warming in the North Pacific Ocean. *Nature*, **427**, 825-827.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007 –The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. ed. by S. Solomon, D. Qin and M. Manning, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 996pp,
- Kawabe, M., and S. Fujio (2010): Pacific Ocean circulation based on observation. *J. Oceanogr.*, **66**, 389-403.
- Kawabe, M., D. Yanagimoto, S. Kitagawa and Y. Kuroda (2005): Variations of the deep western boundary current in Wake Island Passage. *Deep-Sea Res. I*, **52**, 1121-1137.
- Nakano, H., and H. Hasumi (2005): A series of zonal jets embedded in the broad zonal flows in the Pacific obtained in eddy-permitting ocean general circulation models. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 474-488.
- Orsi, A. H., W. M. Smethie Jr., and J. L. Bullister (2002): On the total input of Antarctic waters to the deep ocean: a preliminary estimate from chlorofluorocarbon measurements. *J. Geophys. Res.*, **107**, 3122, doi:10.1029/2001JC000976.
- Urakawa, L. S., and H. Hasumi (2012): Eddy-resolving model estimate of the cabbeling effect on the water mass transformation in the Southern Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 1288-1302.
- Yanagimoto, D., M. Kawabe and S. Fujio (2010): Direct velocity measurements of deep circulation southwest of the Shatsky Rise in the western Pacific. *Deep-Sea Res. I*, **57**, 328-337.

8. 海面

2～7節で論じた各海域の循環は海面における熱・淡水・運動量フラックスにより駆動され、その結果形成される海面水温分布を通じて大気循環を駆動している。海面のラージスケールの凹凸は表層循環を反映し、衛星による海面高度計測は現在の海洋物理学に不可欠の存在となっているが、一方で近年の地球温暖化に伴う海面上昇は深刻な社会問題となっている。本節では海面に関わる今後の重要研究課題として、海面上昇、および、海面過程に重要な役割を果たす海洋波の2つを論じる。

8.1 海面上昇

海面上昇は、地球温暖化に伴う海水温の上昇と陸上の氷河・氷床の融解による海水の増加によって生じ、そして将来はその上昇速度を一層速めると推定されている。全球的な海水温の上昇は、海洋表面の水温上昇が高緯度から低緯度にいたる様々な水塊の形成やベンチレーションを通じて海洋中に波及することによる。IPCC第4次報告書では、1980年～1999年を基準とする2090

～2099年の全球平均の海面上昇は18～59 cmと見積もられている。ただしこの推定には氷床の力学的な流動が含まれておらず、その効果が導入されるであろう第5次報告書ではより大きな上昇量となる可能性が高い。従来の研究では、全球平均の水位上昇の同定と原因特定、また特に衛星高度計期間の水位上昇トレンドの空間構造がどのような外力によって生じて来たのかに焦点が当てられてきた。全球平均の海面上昇における最大の不確定性要因は氷河・氷床の減少で、氷床融解は主に海洋によってコントロールされている(Pritchard et al., 2012)。2000年以降南極やグリーンランドの氷床が加速度的に融解していること(Rignot et al., 2011)や、21世紀内に海の変化により南極の巨大棚氷が大崩壊する可能性(Hellmer et al., 2012)を考えると、氷床・海洋相互作用という海洋物理学にも新規なテーマは、海面上昇においても今後の最重要課題の一つとなろう。

今後はWorld Climate Research Programme (WCRP) が掲げる、6つのgrand challengesの1つがSea-Level Rise and Regional Impactsとなっていることで表されるように(11節)、より詳細な地域毎の海面上昇の理解と予測が進められる見込みである。海面上昇は、社会に深刻な影響を与え得る。それらの影響には、満潮水位以下の地域の増加と高潮の頻発、砂浜の流失とそれによる生態系の亡失を含めた多面的な影響、さらに島を失うことによる領海・EEZの著しい縮小などがある。今後の海面変動・変化を合理的に予測し、それを社会に伝えていくことは、我が国の海洋学にとって最も重要な責務の一つであろう。

海面上昇は全球一様に生じるわけではなく、その空間構造は大規模場では表層海流の変化と強い関係がある。表層海流は風によって駆動される効果が大きいため、海面上昇の空間構造は将来の風応力がどのように変化するか大きく依存する。将来的な風の場の変化をその不確定性を含めて推定するには、将来予測およびプロジェクションを行っている気候モデルの出力を解析することが有効である(e.g., Suzuki and Ishii 2011; Sueyoshi and Yasuda 2012)。ただし数値モデルで計算はできても、その妥当性を評価するにはどのように平均場が成立するかの理解が不可欠である。その点ではベンチレーション・サーモクライン理論(Luyten et al., 1983)で基本的な理解が可能な亜熱帯循環以上に、不明な点が多い亜寒帯循環の力学を明らかにすることが重要である。

現在 IPCC に用いられている数値モデルでは、黒潮や親潮などが十分に再現されておらず(Meehl et al. 2007)、現実的な海流の再現にはダウンスケールが不可欠である。さらに、大規模場での海面上昇や海流の変化が明らかになったとしても、社会的に重要な陸岸での海面水位変化がただちに判明するわけではない。特に、黒潮や親潮などの強流が陸岸に近接する場合に、それらの海流よりも岸側の水位がどのように決定されるのかは将来のみならず現在についても明らかではない。これは、陸岸では潮位の長期観測がなされているものの、そこから沖合にいたる海面水位の連続的な観測を行う手法が未開発であって、水位観測の空白域となっているためである。当然、沿岸域の数値モデルが水位を正しく再現できるかどうかの検証も不可能である。さらに温暖化に伴う水位上昇だけでなく、数年から数十年の時間スケールでは、ENSO や PDO などの様々な気候モードが大きく影響し(e.g., Sasaki et al. 2008; Behera and Yamagata 2010)、また数時間の高水位で生じ得る高潮災害などについては海洋渦および台風や低気圧という様々な要因が重要な役割を果たす。したがって我が国の陸岸での海面上昇問題は、全球平均の海面上昇に加えて、熱帯からのテレコネクションおよび中緯度大気海洋システムに起因する大気循環変動がどのように、中緯度の亜熱帯・亜寒帯循環を含む海洋循環を変化させ、それがどう黒潮・親潮などの岸近

くを流れる海流を変え、縁辺海および沿岸域の海況、さらに短期の海洋・気象擾乱の性質変化も含めて実際の陸岸の水位にどう影響するのかという非常に総合的な問題である。

したがって、陸岸における海面水位変化とそれに重なる変動の理解と将来予測のためには、気候モデルのさらなる改善と高解像度化、複数気候モデル結果に基づく海洋領域モデルおよび大気海洋結合領域モデルによるダウンスケーリング、様々な要因との関係を明らかにする数値実験やデータ解析、既存の潮位計観測ネットワークおよび Argo 観測網の維持、そして上記の観測空白域を埋めるために、陸岸付近まで観測可能な次世代高度計衛星である COMPIRA および新しい現場観測手法の開発とそれによる観測の実施、そのデータ収集解析体制の確立が不可欠である。さらに、前述（2 節）の沿岸域に関する格子幅 100m 程度の超高解像度の沿岸再解析データと、その基盤となる沿岸域に特化したプロファイリングフロートやグライダーの開発、HF レーダーの展開などをも、総合的に用いることで、今後大きな影響をもたらすことが予想される気候変化が、海面上昇および他の経路を通じてどのように我が国陸岸およびその周辺域に影響をもたらすかの予測を行うことが期待される。これらの活動や技術開発を通じて、海洋学は日本のそして世界の社会に貢献することができるであろう。

参考文献：

- Behera, S., and T. Yamagata, 2010: Imprint of the El Nino Modoki on decadal sea level changes. *Geophys. Res. Lett.*, 37, doi: 10.1029/2010GL045936.
- Hellmer, H. H., F. Kauker, R. Timmermann, J. Determann and J. Rae (2012): Twenty-first-century warming of a large Antarctic ice-shelf cavity by a redirected coastal current. *Nature*, 485, 225-228.
- Meehl, G.A., et al., 2007: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., et. al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Luyten, J., J. Pedlosky, and H. M. Stommel, 1983: The ventilated thermocline. *J. Phys. Oceanogr.*, 13, 292-309.
- Pritchard, H. D., S. R. M. Ligtenberg, H. A. Fricker, D. G. Vaughan, M. R. van den Broeke and L. Padman (2012): Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, 484, 502-505.
- Rignot, E., I. Velicogna, M. R. van den Broeke, A. Monaghan, and J. T. M. Lenaerts (2011): Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L05503, doi:10.1029/2011GL046583.
- Sasaki, Y. N., S. Minobe, N. Schneider, T. Kagimoto, M. Nonaka, and H. Sasaki, 2008: Decadal sea level variability in the South Pacific in a global eddy-resolving ocean model hindcast. *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 1731-1747.
- Sueyoshi M. and T. Yasuda, 2012: Inter-model variability of projected sea level changes in the western North Pacific in CMIP3 coupled climate models. *J. Oceanogr.*, 68, 533-543.

Suzuki T., and M. Ishii, 2011: Regional distribution of sea level changes resulting from enhanced greenhouse warming in the Model for Interdisciplinary Research on Climate version 3.2., *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2010GL045693.

8.2 海洋波

海洋波はその生成過程から風波 (wind wave) と呼ばれるが、近年は局所的な風の影響を受ける風浪 (wind sea) と遠方から伝搬するうねり (swell) に分けて表現される。沿岸海域では、うねりによる質量輸送と砕波に伴う運動量輸送から、海浜流が形成される (2 節)。浅海域での海浜流や高潮による海浜地形の変形による、生態系の破壊、島の喪失による領海・EEZ の縮小は、回避すべき喫緊の課題である。一方、大水深において海洋波は、大気接地境界層や海洋表層混合層における乱流形成に重要な役割を果たす。熱、運動量、CO₂ などの大気海洋間フラックスは、海洋波による機械的混合により促進される。しかし、海洋波自体が風により生成され、海流の影響を受けるので、大気・海洋・波浪は本来分けて考えられるものではない。そのような観点から、縁辺海、熱帯、中緯度 (3~5 節) の大気海洋相互作用における海洋波の能動的な関与の重要性を改めて考える必要がある。また、多くのリモートセンシング計測において、海洋波の果たす役割は明確である。衛星海面高度計 (有義波高・海上風)、衛星散乱計 (海上風)、短波海洋レーダー (海流・有義波高) など、海洋波の電磁波散乱特性を利用する計測機器の精度向上のためには、海洋波の新しい知見が必須である。

過去 10 年間の研究成果は、従来の海洋波の描像を書き換えようとしている。外洋に突発的に発生するといわれるフリーク波の研究を通して明らかとなったのは、複雑な気象条件下で波浪スペクトルが絶えず平均的描像からずれ、波浪場が豊かに変化している状況こそが自然ということである。また、海洋表層での乱流形成について興味深い研究の進展があった。海洋波と背景乱流との相互作用や、波の運動そのものによる乱流遷移の可能性が室内実験や観測から指摘され、海洋波に起因する乱流形成が混合層厚さ程度まで深く浸透する可能性が指摘された。さらに、今世紀に入り、16m を超える有義波高や 30m を超える巨大波が観測されている。このような歴史的な計測が計測技術の向上に起因するものなのか、長期的な変動・変化を示唆するものなのかは明らかでないが、長期観測データからも気候変動や長期トレンドの兆候は見えてきている。一方、強いハリケーンや台風の発生頻度が増えている可能性も指摘されている。強風下における海面フラックスについて大きな修正が施されたが、それは、波浪による海面粗度の変化、しぶきの影響、強い湧昇による海面水温の変動など、局所的な大気・海洋・波浪相互作用の複雑さを示唆している。実用面では、波力発電の実用化が喫緊な課題であり、波力パワーの資源量推定のために、新しい計測やシミュレーションが行われ、沿岸域における波浪・海流相互作用など、興味深い知見が得られるようになってきた。そうした、局所的な波浪の特性は、船用レーダーによるリモートセンシング (WAMOS など) や GPS 波浪観測など波浪計測技術の向上に伴い、直接計測できるようになってきている。

このように近年、大気海洋結合過程における海洋波の能動的な役割が見直され、気候モデルや領域結合モデルに積極的に海洋波が取り入れられるようになってきたが、大胆なパラメタリゼー

ションに依存せざるを得ず、物理過程の定量化には改善の余地が多く残っている。そうした中で、波浪の基礎理論の見直しにつながるような古くて新しい研究課題がいくつもある。波浪の粒子運動に伴う乱流遷移は、ポテンシャル理論による波動解そのものの限界を示唆しており、今後は、第三代波浪モデルの根幹をなす 4 波共鳴や安定性理論に基づく風波生成機構を見直す研究が必要である。海洋波と海流の相互作用は Stokes Coriolis 項、Vortex Force 項や TKE Stokes Production 項として海流モデルに取り入れられるが、砕波を伴うような海洋波における流体粒子のラグランジュ的な運動をストークスドリフトの足し合わせで表現することは疑問であり、海洋波の本質的な非線形性や粘性の効果を考慮する研究が必要である。

こうした研究課題の解決のためには、まず現場観測の充実が必要である。海上の安全、気候変動、台風予測などに応用される海洋波の情報は数値計算に依存しており、衛星海面高度計による有義波高計測は波の進行方向に関する情報を含まない。GPS を利用した簡便な波浪計測が実現した今、漂流型波浪ブイの大規模な展開が望まれるが、Argo・ドリフターの複合利用による波浪計測も考えられる。合成開口レーダー、船用レーダー、沿岸レーダーなどリモートセンシング技術による観測の充実も期待される。シミュレーションについては、位相解像モデルを波浪予測に利用することが現実化することを期待する。そのモデルは大気・海洋との結合過程を直接解き、海面フラックスを直接推定する。これまでの知見、新たに得られる知見が集約された第 4 世代波浪モデルの構築が今後 10 年で進展することを期待する。

9. 塩分

塩分は水温とともに海水密度、ひいては海洋循環を決定する、海洋物理学の最も基本的なパラメータである。塩分の密度に対する寄与は低温域で大きいため、高緯度海洋の物理構造およびそこを出発点とする中・深層循環に対しては特に塩分の変動が重要となる。また、沿岸域、季節海水域、熱帯降雨帯では表層塩分が淡水供給で極端に下がるため、密度成層への塩分の寄与が大きく、表層塩分は大気海洋相互作用にも関与することになる。さらに、海面付近の塩分分布は淡水フラックスを強く反映するため、水平移流の小さい海域の表層塩分を淡水フラックスの推定精度向上や水循環研究に用いたいという期待も大きい。

しかしながら、20 世紀の間、塩分の観測データはその測定の難しさゆえ、水温データに比べて圧倒的に不足し、海洋の物理変動は主に水温によって記述されてきた。それでも、WOCE Hydrographic Program の測線データと歴史的データの比較から各大洋の亜熱帯と亜寒帯の塩分コントラストの強化が示され、水循環の強化が示唆されてきた (e.g., Wong et al., 1999; Curry et al., 2003) ほか、熱帯域を中心に係留ブイや篤志観測船などにより塩分の時系列観測が数少ないながらも行われ、季節・経年変動やバリエイヤーの挙動などが調べられてきた (e.g., Delcroix and Henin, 1991; Delcroix and McPhaden, 2002)。そのようなデータ不足の状況が 2000 年に開始された Argo 観測網構築により一変し、全球の大多数の海域において表・中層塩分の季節・経年変動を調べることが可能となった (e.g., Ren and Riser, 2009; Dong et al., 2009; Ren et al., 2011)。また、Argo データと歴史データの比較からも全球水循環の強化が示唆された (e.g., Hosoda et al., 2009; Roemmich and Gilson, 2009)。さらに 2009 年には欧州の MIRAS/SMOS、2011 年

には米国の Aquarius/SAC-D という海面塩分センサーを搭載した衛星が相次いで打ち上げられ、海面塩分が面的にモニターされ始めている (e.g. Lee et al., 2012; Nyadjro et al., 2012)。2014 年以降には全球降水観測 (GPM) 計画の衛星が打ち上げられ、熱帯のみならず全球で高精度の降水観測が実現する見込みである。このように過去 10 年間で塩分研究を取り巻く環境は劇的に改善し、ようやく水温・塩分の両面から物理変動を記述し、そのメカニズムを探ることが可能となった。また、全球水循環に対する海洋の役割解明に向けた研究の素地が整った。

今後 10 年間で、これまで主に水温を用いて記述されてきた海洋物理変動が水温・塩分の両面から再構築されるであろう。とりわけ、北太平洋亜寒帯域のように塩分が密度躍層を形成している海域においては、白紙に近い状態からのスタートであり、物理構造の変動だけでなく、それが表層への栄養塩供給といった生物地球化学過程に与える影響の研究にも大きな進展が期待される。熱帯域や亜熱帯域においても、表層循環や大気海洋相互作用に果たす塩分の役割を定量化する必要がある。各海域において Argo・衛星観測に基づきラージスケールの表層塩分変動を調べるとともに、時空間スケールの小さい現象を対象としたプロセス研究を船舶やグライダー等を用いた現場観測と高解像度モデルにより行い、水循環研究の発展につなげることが望ましい。そのような取り組みが最近、北大西洋亜熱帯の塩分極大域においては米国の SPURS (Salinity Processes in the Upper Ocean Regional Study; <http://spurs.jpl.nasa.gov/SPURS/>) プロジェクトのもと、始められている。我が国においても太平洋を主な対象とした表層塩分過程の大型研究を実施することを提案する。

そのような塩分研究のためには、これまでの Argo・衛星・係留ブイ・篤志観測船による広域観測網とプロセス研究を行うための大型研究船・大型計算機の継続・発展が必要である。船舶によるプロセス観測を補完するために、グライダーの活用も促進すべきであろう。なお、北太平洋の塩分研究を行う上で重要海域である東カムチャツカ海流・親潮域やオホーツク海では排他的経済水域の問題で観測が難しいため、国際協力体制の構築や海面塩分衛星の高緯度域への発展が望まれる。さらに長期的には、深層循環およびその出発点である極域における塩分変動を明らかにするために、Argo や衛星観測の極域への展開や現在開発中の大深度型フロートの全球展開が目標となる。

参考文献：

- Curry, R., R. R. Dickson and I. Yashayaev, 2003. A change in the fresh water balance of the Atlantic over the past four decades. *Nature*, 426, 826-829.
- Delcroix, T., and C. Hénin (1991), Seasonal and interannual variations of sea - surface salinity in the tropical Pacific ocean, *J. Geophys. Res.*, 96, 22,135-22,150.
- Delcroix, T., and M. J. McPhaden (2002), Interannual sea surface salinity and temperature changes in the western Pacific warm pool during 1992-2000, *J. Geophys. Res.*, 107, doi:10.1029/2001JC000862.
- Dong, S., S. L. Garzoli, and M. Baringer (2009), An assessment of the seasonal mixed layer salinity budget in the Southern Ocean, *J. Geophys. Res.*, 114, C12001, doi:10.1029/2008JC005258.

- Hosoda, S., T. Suga, N. Shikama, and K. Mizuno (2009), Global surface layer salinity change detected by ARGO and its implication for hydrological cycle intensification, *J. Oceanogr.*, 65, 579–586.
- Lee, T., G. Lagerloef, M. M. Gierach, H.-Y. Kao, S. Yueh, and K. Dohan (2012), Aquarius reveals salinity structure of tropical instability waves, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L12610, doi:10.1029/2012GL052232.
- Nyadjro, E. S., B. Subrahmanyam, V. S. N. Murty, and J. F. Shriver (2012), The role of salinity on the dynamics of the Arabian Sea mini warm pool, *J. Geophys. Res.*, 117, C09002, doi:10.1029/2012JC007978.
- Ren, L., and S. C. Riser (2009), Seasonal salt budget in the northeast Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, 114, C12004, doi:10.1029/2009JC005307.
- Ren, L., K. Speer, and E. P. Chassignet (2011). The Mixed Layer Salinity Budget and Sea Ice in the Southern Ocean, *J. Geophys. Res.*, 116, C08031, doi:10.1029/2010JC006634.
- Roemmich, D., and J. Gilson (2009), The 2004–2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo Program, *Prog. Oceanogr.*, 82, 81–100.
- Wong, A. P. S., N. L. Bindoff, and J. A. Church (1999), Large - scale freshening of intermediate waters in the Pacific and Indian Oceans, *Nature*, 400, 440–443.

10. 必要とされる研究基盤

2～9 節では今後 10 年程度の研究の方向性とその遂行のために必要な研究基盤を論じた。各海域で必要とされる研究基盤には共通点も多いため、本節において、維持・発展すべき既存の研究基盤と、それらを基礎として構築すべき新たな研究基盤に分けて整理したい。

まず、現業官庁や各県の水産試験場による定線観測は我が国周辺の沿岸・縁辺海・中緯度海域の物理環境およびそれが化学・生物環境に与える影響を探るうえで重要な役割を果たしており、今後も継続されるべきものであるが、国内・国際的な調整のもと、より効率的な運用および観測海域の拡大が望まれる (2,3,5 節)。また、我々にとっては海洋全体を一つの系として理解することが最も重要であり (1 節)、全球海洋を網羅する Argo・衛星・篤志観測船・潮位計・海面ドリフターによる観測網 (3～9 節)、および熱帯を中心とする係留ブイネットワーク (4,9 節) は今後も不可欠の存在であることから、我が国として今後も国際観測体制への協力を続ける必要がある。さらに、自動観測が特に物理分野では発達した現代においても、大型研究船を用いたプロセス観測 (4～7, 9 節) は依然重要である。現在、物理観測に用いられている大型研究船は主に白鳳丸と「みらい」の 2 隻であり、これらは今後さらに高機能化を図ったうえで代船を行う必要がある。特に白鳳丸は海洋コミュニティが 100%ボトムアップの研究に使える研究船であり、耐用年数に近づいていることから、早急に代船に向けた動きが必要である。代船にあたり、物理分野としては、これまで用いられてきた CTD や係留系等に加えてグライダーや乱流計といった新たな測器が使いやすいこと、また、近年の中高緯度における大気海洋相互作用研究の高まり (5 節) を受け

て、最低でも海面熱・運動量フラックスの導出が可能となる気象測器を標準装備し、さらにラジオゾンデ自動放球装置や雲観測用のレーダー・ライダー等の高度な設備を搭載していることが望ましい。

以上の研究基盤の維持・継続を前提として、本報告書では以下の新たな研究基盤の構築を提案する。まず、観測が絶対的に不足している沿岸域の流れをモニターするために、漁業と共存できるような沿岸用のプロファイリングフロートやグライダーを開発し、全国の沿岸海域に展開する(2,8節)。また、沿岸に多数の海洋短波レーダーを設置し、沿岸海域およびオホーツク海・日本海・東シナ海の表面流を面的に測定する(2,3,8節)。これらのデータ群を統合的に同化した超高解像度海洋再解析データにより、漁業等に重要な沿岸海域および縁辺海の力学的な理解を飛躍的に向上させる。衛星観測に関しては、JAXAが現在開発中の新型衛星海面高度計COMPIRAが実用化されれば、沿岸域のみならず縁辺海や外洋においても、現在より1オーダー分解能の高い、近年の超高解像度海洋大循環モデルのアウトプットとも比較可能な観測が可能となり、サブメソスケール現象等の理解に威力を発揮することが期待される(2,3,5,8節)。Argo計画のもと大量展開されてきたプロファイリングフロートについては、学際的研究の推進のために小型の化学・生物センターの開発(化学・生物SG報告書参照)やそれを搭載したフロートの展開が期待されるほか(4,5節)、極域・深層循環研究の発展のために耐氷フロート(6節)や大深度型フロート(7節)の発展が望まれる。なお、耐氷・大深度型フロートは現在日本国内で開発が行われているが、一般型のフロートについても将来の発展のために国内メーカーにより生産されていることが望ましい。次世代型測器として世界中で運用が急増しているグライダー(5,9節)は時空間スケールの細かい観測を可能にし、プロセス研究に威力を発揮することが大いに期待されるが、諸外国と異なり沿岸に漁網が張り巡らされた我が国で使用するには投入・回収に船舶を用いざるを得ないなど、ハードルが高い。さらに、その複数のグライダーで編隊を組んだ観測などの効果的運用には高い技術と豊富な経験が必要であり、個別の機関による小規模な運用は効率が悪い。特定の研究機関にグライダーを数十台整備し、全国の研究者がプロポーザルを書いて使うといった形の共同利用システムの導入が望まれる。最後に、今後気候変動・変化を探る上で世界的に重要海域となるであろう極域海洋の理解促進のために、諸外国に続き我が国においても砕氷観測船を新たに建造することが強く望まれる。(6節)

さらに、本報告書のいずれの節でもモデリング研究の活用が提言されているように、今後の海洋学の発展のためにはモデリングの研究基盤整備も強く意識する必要がある。モデリング研究基盤はソフトウェアとしてのモデル(数値計算プログラム)とハードウェアとしての計算機からなる。ソフトウェアの面からは、数値計算手法の高度化やパラメタリゼーションの精緻化などに伴い、大規模グループによらないモデル開発は困難になりつつある。世界的な状況を見ると、モデル開発は少数のモデリングセンターに集約されてきており、先進国であってすら国内に独自モデルの開発基盤を有しない場合も現れている。日本国内では、いくつかの小規模グループが独自モデルを開発しているが、海外で開発されたモデルを利用する研究者も多く、後者の割合は増えつつあると見受けられる。小規模なモデル開発グループが淘汰される世界的な流れからすると、このままでは国内のモデル開発基盤が遠からず消滅することも危惧される。観測とモデリングの融合研究が今後進展する中で、先端的なモデル開発が先端的あるいは発見的な研究成果に直結する

ことを考えると、この状況を放置するのは得策でないであろう。日本国内に大規模なモデリングセンターを設置して研究者のみならず技術者を安定的に確保することが理想であるが、それが実現できないまでも、現在は個人的努力で開発を行っているモデル開発グループの連携を図って統一的なモデルを開発するための公式な枠組みを整えるとともに、国内研究者が積極的にそのユーザとなるような体制を構築することが望まれる。国内ユーザを意識する上では、モデルの開発ターゲットを明確にする必要もあるだろう。モデルには海域や現象を問わずに適用できるという汎用性が必要なのは当然であるが、汎用性を意識するあまりに漠然としたモデル開発になってしまつては国際的な競争力を削ぐことにもなる。大規模モデル開発グループが実現されてもなお限られる資源を有効活用するためには、一芸に秀でたモデルを開発するという観点も重要である。ハードウェアの面からは、かつての地球シミュレータの場合のように海洋研究に大きな資源が割り当てられることを前提とした先端的スーパーコンピュータの開発は今後望めないと思われるが、その一方で、現在の地球シミュレータがそうであるように、割り当て資源が大きければ必ずしも先端的なスーパーコンピュータでなくても先端的な海洋研究を実現できる。我々に必要な計算資源をどのような形で確保するかについて、海洋研究コミュニティ全体としての展望や戦略が必要である。また、今後のスーパーコンピュータ開発ではデータ転送速度より演算速度が重視される傾向にあり、演算の際に多くのデータ転送を必要とする流体計算では性能を十分に発揮できなくなつてきている。海洋（を含む気候ないし環境）研究コミュニティがスーパーコンピュータの主要ユーザのひとつであることは歴然たる事実であり、スーパーコンピュータ開発の方向性に我々のニーズを反映させるよう働きかける努力が今後も必要とされる。

最後に、限られた国家予算の中で今後海洋学をさらに発展させていくためには、研究資源の有効活用のためにできるだけ共有化を図っていく必要がある。本報告書では大型研究船・砕氷観測船の代船・建造を提案したが、沿岸観測用の小型船舶も減少傾向にあり、今後練習船を共同利用にするなどのネットワークづくりを検討する必要がある（その一環として、本将来構想委員会では2012年11月に「海洋研究における大学練習船の利用促進について」と題した提言を文部科学省海洋開発分科会に提出した）。モデリングに関しても、上述のようにソフトウェアの面では国内共有基盤という観点からの開発体制の確立が望まれ、ハードウェアの面では計算資源の確保や計算機開発の方向性に関して組織的に必要性を訴え続けることが求められる。そのためには、国内海洋研究コミュニティの共通認識として、モデル開発・研究における重要ターゲットと、そのターゲットに関してどのような形で観測・モデリング間の融合を図ることができるかを明確しておく必要がある。また、観測・モデルの両面で得られたデータの共有化を図ることも重要である。これまでに得られた観測・モデルデータの中で一般公開されずに埋もれているものや品質管理されていないものを発掘し、アクセスしやすい形で流通させるためのデータ情報システムの構築が喫緊の課題である。また、新たな観測・モデル・同化システム構築の際には、そのようなデータ流通システムを含めて考えることが重要である。それらのシステムに、地球科学関連データのみならず、それらの応用利用の可能な分野における諸データを蓄積し、連携させることによって、幅広い研究を効率的に推進することが可能になると同時に、気候サービスとしての機能の充実をはかることも可能となるであろう。

1 1. 国際対応

今日の海洋物理学に関係する世界的なプログラムは、UNESCO/IOC, WMO, UNEP, そして ICSU のもとで運営されている（本節の略称に対応する正式名称については表 1 を参照のこと）。また北太平洋では、PICES が年々その存在感を増している。これらのプログラムと関連プロジェクトの概観を、図 1 に示す。この中で特に海洋物理研究と関係が深いのは、研究からオペレーショナルな利用までの広範なニーズに応える観測システムの構築と維持を担う GOOS, 様々なキャンペーン型の観測プロジェクトを束ねた海洋モデルもまとめる WCRP/CLIVAR、データ同化を行う GODAE などである。WCRP を中心とする気候研究の解説は、中島(2011)でもなされている。

WCRP とその傘下のプログラムは、現在再編が進んでいる。2013 年からの新しい WCRP では、CLIVAR, GEWEX, SPARC の 3 つのプロジェクトが、それぞれ海洋、陸、成層圏を担当するとともに、対流圏についてはいずれも関わり、さらに雪氷圏を CliC がリードするという体制となる。当初計画では 2013 年に終了(sunset)であった CLIVAR も、現在の案では略称は CLIVAR のままだが正式名称と体制を変更したうえで、継続する予定である。CLIVAR は気候システム全般については守備範囲をやや縮小し、そのため CLIVAR の中で相対的に海洋の重みが増す。たとえば、気候モデルおよび季節から経年予測のワーキンググループは、WCRP 直轄となり(それぞれ WGCM, WGSIP), CLIVAR の下には海洋数値モデル開発のワーキンググループ(WGOMD)が残る。

WCRP は、気候研究の中でよく焦点が絞られ、5-10 年に格段の進展が見込まれる研究対象を、Grand Challenges として掲げている。2012 年 12 月に更新された草案では、次の 6 つがあげられている(WCRP 2012)。

1. Regional Climate Information
2. Sea-Level Rise and Regional Impacts
3. Cryosphere in a Changing Climate
4. Clouds, Circulation and Climate Sensitivity
5. Changes in Water Availability
6. Science Underpinning the Prediction and Attribution of Extreme Events

これらの Grand Challenges の中で海洋に関わる部分をそれぞれの white paper にもとづいて概観すれば、海面上昇(2 番)で海洋を幅広く扱っているほか、地域的気候情報(1 番)の十年予測で海洋の初期化とそれに関連して海洋観測の重要性が、雪氷圏(3 番)での海氷が、そして水資源(5 番)で塩分に触れられている。

また、CLIVAR は以下の 5 つの research challenges の案を現在示している (Visbeck and Hurrell, 2012)。

1. Intraseasonal, seasonal and interannual variability and predictability of monsoon systems
2. Decadal variability and predictability of ocean and climate variability
3. Trends, nonlinearities and extreme events
4. Marine biophysical interactions and dynamics of upwelling systems

5. Dynamics of regional sea level variability

このうち最初の3つは第一期の CLIVAR の3本柱同様に時間スケールで分けし、それに新たな香りを加えたものと言える。したがって、目新しいのは4番の物理生物相互作用と、5番の海面上昇である。当然この海面上昇は、WCRP の Grand Challenge の2番への貢献を意図したものであろう。また、従来は純粋に物理気候の研究プロジェクトであった CLIVAR が4番で物理生物相互作用を取り上げているということは、CLIVAR が IMBER との協力を模索しているという動きとともに、今後ますます物理・化学・生物の垣根を越えた学祭複合領域が重要になるであろうことを強く示唆している。さらにこれらの新項目は、CLIVAR の海洋に関する守備範囲が、地理的に著しく拡大することを意味している。従来の CLIVAR では大気海洋相互作用に焦点が当てられ、そのために海洋は大気への強いフィードバックが見込まれる熱帯が重点的に扱われていた。しかし、これらの新たな Research Challenges では中高緯度も熱帯同様に、あるいはそれ以上に重要となる。したがって、我が国周辺領域の研究でも、従来よりも格段に CLIVAR に貢献することができる。これは我が国が CLIVAR を活用するなら、非常に重要な点である。

観測システムについては、2009年に開催された OceanObs'09において、全球海洋の物理、化学、生物パラメータを、外洋から沿岸まで、継続的に観測し、研究や、様々なサービスに活用することを通じて社会に役立てることの重要性が認識され(OceanObs'09)、国際的な協力のもとに、学際的な全球海洋観測網の構築を進めるための体制づくりが進んでいる。具体的な動きとして、GOOSの観測対象を従来の物理的な気候パラメータから、化学、生物パラメータにまで拡張するための、GOOS 統治システムの改編が進行中である。分野横断的な観測システムの構築のための「共通言語」として、essential ocean variables (EOVs) という概念を導入し、GOOS Steering Committee (GCS) が GOOS 全体を統括する。GCS の下に置かれる物理、化学、生物の各分野の観測パネルが、観測システムコンポーネントの構築・維持の推進、調整等を担う。気候のための海洋観測の構築・維持をサポートするために GOOS、GCOS、WCRP をスポンサーとして活動してきた OOPC を物理観測パネルとし、炭素循環のモニタリング・研究のための観測の調整を担ってきた IOCCP を発展させて化学観測パネルとして、生物・生態系を含む沿岸域の観測網の構築について議論してきた PICO をベースに生物観測パネルを構成する方向で調整が進められている。

我が国は、1960年代から、水産試験研究機関による沿岸・沖合定線や、気象庁や海上保安庁による外洋域の定線など、物理・化学・生物パラメータを継続的に観測する体制を維持してきた。これは、いま国際的に進みつつある動きを、数十年前から先取りしていたものと見ることができる。しかし、それらの観測の多くは、現在、縮小傾向にあり、世界の動きとは逆行している。また、GOOSの再編に組織的に、省庁や官学の枠を超えて対応する体制が我が国にはないため、世界の動きをリードできるだけの長年にわたる実績と経験・能力をもちながら、それを活かすことができないばかりか、むしろ取り残される可能性すらある。機関や分野を横断して、我が国における持続的海洋観測の調整と長期的な計画を立案する体制の構築が望まれる。

我が国の海洋学が今後国際的に貢献しプレゼンスを確保するには、国際プログラム・プロジェクトをリードし活用することが、特に我が国の経済規模が従って研究予算も世界の中で相対的に縮小していくことを考えれば、従来以上に必要であろう。しかしこれまで我が国では諸外国に比

べて、国際プログラム・プロジェクトでリーダーシップを取るという動機付けは弱かったと思われる。これは我が国では、ある研究が国際プログラム・プロジェクトによって裏書・支持されても、その実現にさほどつながらないことが大きな要因であろう。つまり国際プロジェクト・プログラムに何をすべきかを掲げることと、実際に何ができるかの間にギャップが大きい。国際的には、例えば米国では複数の研究費配分機関が協力して米国 CLIVAR のミッションを支えているというように、国際プログラムの裏書がその研究の実現可能性を高めるというメカニズムが働いている。今後我が国が国際プログラムをリードし活用するには、コミュニティ内部での議論を経た上で、国際プログラムの趨勢とそれが日本社会の利益になることを、研究費配分機関や政府に説明して研究の実現に結びつける努力を行うことも重要であろう。

参考文献：

Visbeck M. and J. Hurrell, 2012: Strategy and evolution of CLIVAR: Towards a science agenda and implementation strategy (発表資料),

<http://www.clivar.org/sites/default/files/ATLANTIC/activities/2527/Clivar-AIP2012-MV.pdf>

中島 映至, 2011: 世界気候研究計画 (WCRP) の現状と気候研究の方向性. 天気, 58, 48–50.

WCRP, 2012: WCRP grand challenges. <http://www.wcrp-climate.org/grandcha.shtml>

1 2. おわりに

本報告書では、今後 10 年程度の間に日本の海洋学が進むべき方向性を、物理分野を中心に論じた。本報告書および化学・生物 SG 報告書 (神田ほか, 2013; 浜崎ほか, 2013) の中で繰り返し述べられているように、今後は物理・化学・生物の分野を横断する研究がますます重要となる。さらに、海洋と大気、陸域の相互作用を解明し地球の気候システムを包括的に理解するためには、気象や雪氷、陸水、地質等のコミュニティとの広範な連携も不可欠である。今後、分野間交流の機会を大学院教育も含め、さらに強化していくことが必要であろう。

本報告書では主としてサイエンスの面から将来構想を論じたが、物理 SG の 5 回の会合では、将来のサイエンスを担う人材育成の重要性も議論された。本報告書で提案されたような研究を実行する過程で測器開発や拠点形成が行われ、それに伴う雇用創出が新たな研究者の参入を促進し、海洋コミュニティの発展へとつながるのが理想の流れである。人材育成に関しては同じ海洋学会の教育問題研究会やブレークスルー研究会においても以前から議論されてきており、今後将来構想委員会としてもこれらの研究会と連携しながら議論を深めていきたい。

このほか、物理 SG 会合では海洋学会全体として社会へのアピールがもっと必要であるということが指摘された。我々がサイエンスに取り組み、その結果を関連学会や社会が必要とするようになるのが、次の 10 年間に我々が目指すべき理想の姿である。これを実現するためには、海洋学会と社会の橋渡しとなるインターフェースの存在が不可欠であり、そのための人材育成も重要であろう。

参考文献：

神田穰太ほか (2013) : 海洋学の 10 年展望 (Ⅱ) -日本海洋学会将来構想委員会化学サブグループの議論から-. 海の研究.

浜崎恒二, 石坂丞二, 齊藤宏明, 杉崎宏哉, 鈴木光次, 高橋一生, 千葉早苗, 津田敦 (2013) : 海洋学の 10 年展望 (Ⅲ) -日本海洋学会将来構想委員会生物サブグループの議論から-. 海の研究.

投稿前原稿

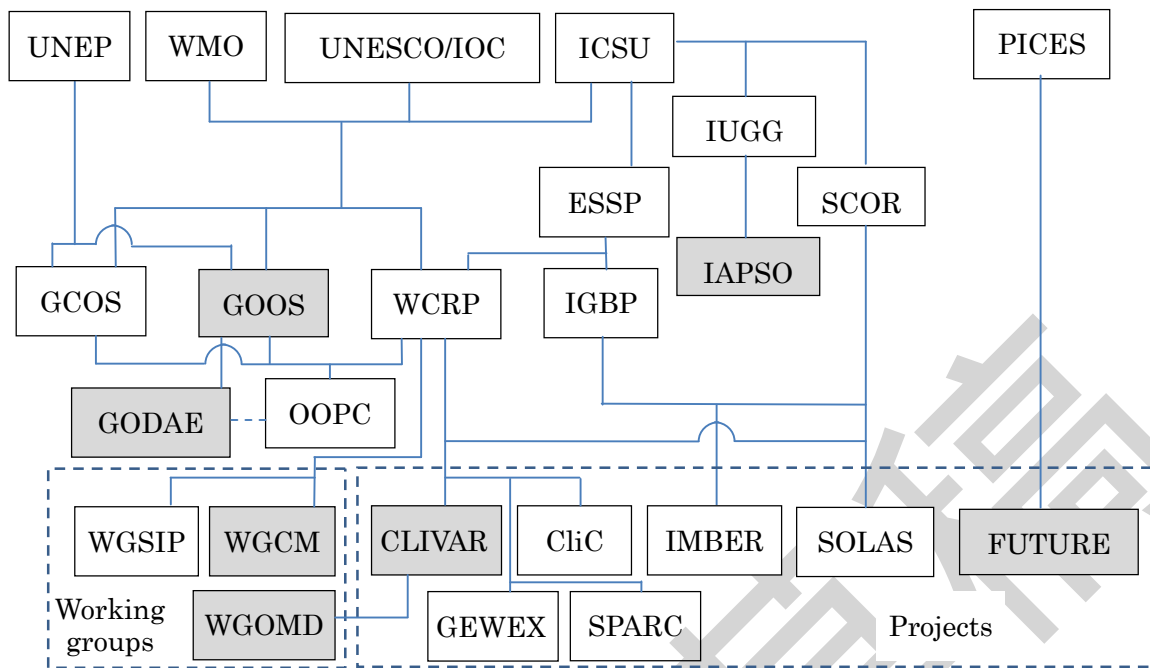


図1. 現状における、海洋学（物理分野）に関係する、国際プログラム・プロジェクト群. 主要な関係を線で結び、特に海洋の物理分野に関連が深いものに、陰影を付けている. 略称に対応する正式名称は表1を参照のこと.

表 1. 国際プログラム・プロジェクトの正式名称

CliC:	Climate and Cryosphere
CLIVAR:	Climate Variability and Predictability
FUTURE:	Forecasting and Understanding Trends, Uncertainty and Responses of North Pacific Marine Ecosystems
ESSP:	Earth System Science Partnership
GEWEX:	Global Energy and Water Cycle Experiment
GODAE:	Global Ocean Data Assimilation Experiment
GCOS:	Global Climate Observing System
GOOS:	Global Ocean Observing System
IAPSO:	International Association for the Physical Sciences of the Oceans
ICSU:	International Council for Science
IGBP:	International Geosphere-Biosphere Programme
IOC:	Intergovernmental Oceanographic Commission
IOCCP:	International Ocean Carbon Coordination Project
IMBER:	Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research
IUGG:	The International Union of Geodesy and Geophysics
OOPC:	Ocean Observations Panel for Climate
PICES:	North Pacific Marine Science Organization
PICO:	Panel for Integrated Coastal Observation
SCOR:	Scientific Committee on Oceanic Research
SOLAS:	Surface Ocean - Lower Atmosphere Study
SPARC:	Stratospheric Processes and their Role in Climate
UNESCO:	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNEP:	United Nations Environment Programme
WMO:	World Meteorological Organization
WGCM:	Working Group on Coupled Modelling
WGOMD:	Working Group on Ocean Model Development
WGSIP:	Working Group on Seasonal to Interannual Prediction