

要旨

北極海の海氷は近年急激に減少しており、「北極海からいつ海水がなくなるのか？」に人々の関心が集まりつつある。北極海の海水減少は新たな商業航路の開拓や日本の寒冬とも関わりがあり、科学分野だけでなく、社会経済的にも話題となる現象となっている。本テーマでは下記リストに挙げた **Questions** を取り上げ、現状と今後の課題について執筆を行った。まず海水減少メカニズムとして、海水運動による力学的要因と生成・融解による熱力学的要因について記述し、それに続いて海水減少が気候と海洋に及ぼす影響について論じる構成になっている。

- Q1: 風のパターンや海氷の流動性の変化は海水減少を促進するか？
- Q2: 海氷の熱的減少はどのように進むのか？
- Q3: 海水減少が雲や低気圧に及ぼす影響は？
- Q4: 海水減少が海洋内部に及ぼす影響は？

風のパターンや海氷の流動性の変化は、海水減少と密接な関係があるので、将来の気候下で現れやすい北極域の気圧配置や大気－海氷－海洋間の運動の伝達効率は、長期的に把握すべき情報のひとつである。また、海水減少の全体像を海水自身の動きやすさ、融けやすさや、地球温暖化に伴う気温・海水温の上昇だけで説明することは困難であり、海流や気象の変化が海面での熱のバランスに及ぼす影響など、多様な相互作用も含めて定量的に明らかにしていく必要がある。

北極海環境に関する学術研究、特に現場観測は一国のみで行えるものではなく、国際連携が不可欠であ

る。北極海の太平洋側における現場観測に関して日本は既に多くの実績があるが、当該海域において国際的に貢献し続けるためには、結氷期間を含めた総合的観測を行い、データ空白を埋めることが最大の課題と言える。非欧米諸国が独自の砕氷観測船を建造/運航する中で、日本の科学的貢献を維持・強化するための工夫が必要である。マイクロ波放射計に代表される人工衛星による観測研究は、北極から地理的に離れた日本が北極研究で主導的な役割を果たせる分野である。また、数値シミュレーションを行うモデルの改良が進めば、大気－海氷－海洋間相互作用や、複数の海域間を横断する海水の輸送などを含めてより定量的な情報を提供することが可能になる。このような取り組みで得られる知見は、物理環境だけでなく、海洋生態系の理解にもつながる。

10年以上の長期にわたる取り組みでは、海氷直下から海洋中層までを含めた海洋熱輸送、そして雲や低気圧を介した大気－海氷－海洋間相互作用について、プロセスの理解と定量化を目指す。海氷自身の特性に関しては、表面融解水(メルトポンド)の形成過程と氷盤同士の衝突過程を詳細に明らかにする。これらの現場観測には砕氷船の運用が必須であり、天候に左右されないマイクロ波衛星観測も欠かせない。また個々の氷盤や高密度水沈降を陽に扱える海水海洋結合モデルを構築し、北極航路に関する信頼性の高い情報を船舶に提供できるようにする。

まえがき

一般に「海氷」とは海水が凍ったものであり、陸上に降り積もった雪の塊が海洋に流れ出た「冰山」とは起源が異なる。いまから数十年まで、北極海の殆どの海域は一年を通じて海氷で覆われていたが、海氷が夏に融け切る「季節海氷域」が北極海で広がっていることが近年の観測から明らかになっている(図5)。例えば、2012年は夏季の海氷面積が冬季の約20%まで減少しており、この夏の面積は1990年代平均の約半分まで減少していることから、季節海氷化がかなり進行していると言える。「北極海から海氷が消失する日が来るのか？」に社

会的な関心が集まりつつあり、様々な手法を用いて予測がなされている。先行研究からは、2020～2040年頃には夏季に海氷が消失するという見積もりが出されているが(Overland and Wang, 2013)、このような予測でよく参照されるCMIP5¹⁸でも数値シミュレーションの結果にばらつきが大きく、将来予測で想定される社会経済シナリオ自体にも多くの不確定要素を含むことは認識しておく必要がある(テーマB参照)。

これに関連して、船舶が北極航路(ロシア側の北東航路およびカナダ側の北西航路)を安全に航行するため

¹⁸ CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5、全球気候モデル間比較プロジェクト

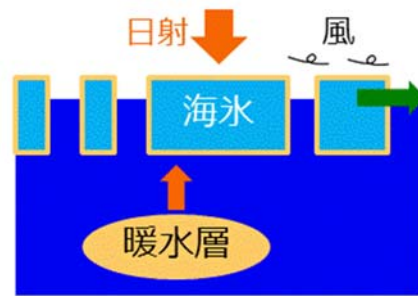
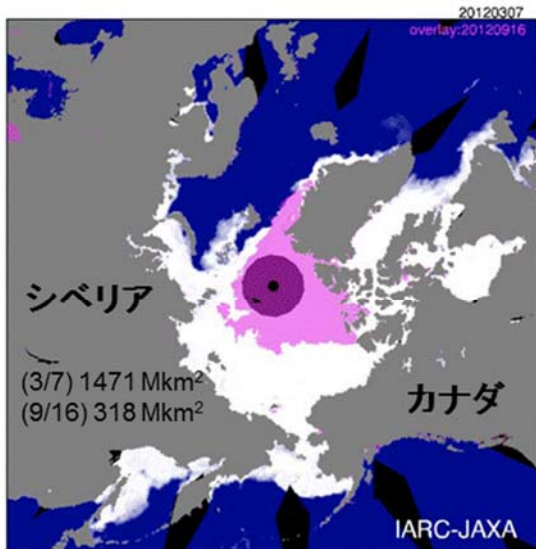


図5 (左)IARC-JAXA 海水モニターで提供されている人工衛星で捉えられた北極海の海水分布。2012年夏季(紫)は冬季(白)の20%まで面積減少。
(上)海水変動の模式図。海水は海水が冷やされることで生成され、日射や海洋からの熱供給により融解する。また風を受けて絶えず動いており、多くは大西洋側に流出する。

には、数日先の短期予測と数ヵ月先の中期予測により、航路上の海水状況を高精度に予測し、その情報を船舶に提供することが必要である。そのためには、急激に変わりつつある北極海の海水減少メカニズムを解明し、得られた知見を取り入れた海水予測システムを構築することが重要である。船舶が航行する北極航路上で海水の存在する日数が激減すれば、低気圧や波浪の影響も懸念事項となるため、高精度な気象・海況予測も求めら

れる。近年、日本を含む中緯度帯で例年よりも寒冷な冬に見舞われる年が頻発している。それに関連して、北極海の海水減少の影響を示唆する解析結果が国内外の研究者によって示され、日本の気候に対してはバレンツ海の海水の多寡が影響していることが指摘されている。このように北極海の海水変動は科学分野だけでなく、日本の社会経済的にも話題となっている。

Q1: 風のパターンや海水の流動性の変化は海水減少を促進するか？

一般に海水の運動は風による駆動力と内部応力(氷盤同士の衝突時に働く抵抗力)に支配される。1990年代前半は、北極振動(テーマ5参照)で説明されるような北極海上の風のパターンの変化により、北極海から大西洋側への海水流出量が増加した。2000年代後半からは海面気圧の双極パターン(北極海のカナダ側での気圧上昇およびシベリア側での気圧低下)出現により、同様の傾向が見られている。平年に比べて冬季は反時計回り、夏季は時計回りの風のパターンが北極海内部で強くなると、いずれも海水流出を促進するという季節間のコントラストは興味深い。また、非一様な風が吹いている海域や沿岸域では、氷盤同士が衝突することで海水が動きにくい、海水が近年脆弱化(海水が薄くなることなどによる強度の低下)していることで風に対する海水の流動性が高まる海域が広がっている(Rampal et al., 2011)。このような海域では、海水下の海流および海洋熱輸送が強化されることも報告されている(海洋熱と海水減少の関係については Q2 を参照

のこと)。風と海水の流動性の関係性については、Wind Factor(風速に対する直下の海水流速の比率)などの指標を利用して定量化が試みられているが、大気-海水-海洋間の運動の伝達効率が海水の厚さや形状などにどう依存するかも含めて、起きているプロセスをより詳細に明らかにすることが、海水減少の力学的要因を理解する上でも重要である。

北極海全域を俯瞰してみると、これまでは極縦断流(Transpolar Drift)によってカナダ多島海北部に海水が蓄積することで夏でも融け切らない多年氷域が形成され、風に対する海水海洋の応答が比較的小さいシステムになっていた。しかし、近年のペースで薄氷化が進むと多くの海域で海水が流れやすくなるため、熱力学的な生成から周辺海域に流出するまでの「滞留時間」が短縮されるであろう。このことは逆に、厚い海水の形成が起きにくくなる結果にもなる(正のフィードバック)。このような風と海水運動の関係性を広範囲でモニタリングできたのは、IABP¹⁹に代表される氷盤設置

¹⁹ IABP: International Arctic Buoy Programme、国際北極海ブイ観測プロジェクト

型ブイの展開による海面気圧と海氷漂流速度の広域データ取得である。ただし、海氷脆弱化は氷盤へのブイ設置を困難にするという側面もあるため、現在の情報量を維持するには、代替手段を準備しておく必要がある。日本も国際連携の中でこのような現場観測に携わるとともに、衛星やモデルも駆使した多角的な視点で力学プロセスを明らかにしていくべきであり、その下地は整っている。広範囲かつ定量的な議論を行うには、海氷モデルが強力なツールとなるが、水平解像度が個々の氷盤と同じ空間スケールまで高まる場合には、海氷力学に関する表現方法を再評価することが必要と

なる。また、データ同化手法を利用して大気－海氷－海洋間の摩擦係数(運動の伝わりやすさの指標)を精度良く見積もるといったモデル改良アプローチも考えられる。

10～20 年後には、1) 全球気候モデリング研究と連携しながら、将来気候下で現れやすい北極域の気圧配置を推定すること、2) 海氷特性への依存性を把握した上で大気－海氷－海洋間の運動伝達に関する情報を広範囲で瞬時に得ること、3) 海氷運動の時空間変化を加味した海氷分布の応答を数日から数十年のタイムスケールで予測していくこと、を目指す。

Q2: 海氷の熱的減少はどのように進むのか？

北極海の長期的な海氷減少傾向は、夏季の融解量増加や冬季の結氷量低下といった熱力学的要因に依るところが大きい。近年、北半球高緯度帯における冬季の低気圧経路が北に移動していることが指摘されているが、このことはユーラシア大陸の降雪量の減少および北極海氷上の降雪量の増加をもたらす。海氷上の積雪は、海氷より熱伝導率が低いため冬季の海氷生成を抑制する働きがある一方で(断熱効果)、アルベド(太陽光の反射率)が海氷表面より高いため、夏季には海氷融解を抑制する働きもある。海氷上での降雪開始時期や積雪深の変化に伴い、海氷の成長がどう影響を受けるかは、今後注目すべきプロセスのひとつである。メルトポンド(夏季の海氷融解により海氷表面で形成される水溜まり)は、アルベドが低いため海氷融解を促進する働きをする。これら海氷特性の変化が大気－海氷－海

洋間の熱や運動の伝達に及ぼす影響は古くから研究されてきたが、その複雑さゆえに依然として定量化が困難である(気候モデルを用いた定量化への取り組みについては、テーマ 1 参照)。

北極域の温暖化に伴って、中緯度からの水と熱の輸送量が増加し、北極海上の降雪量は増加傾向にあると考えられるが、降雪量の増減予測・検証も取り組むべき課題のひとつと言える(水循環についてはテーマ 4 参照)。海氷減少に対する海洋側の熱源としては、中緯度からの暖水流入が挙げられる(図 6)。ベーリング海峡から流入する太平洋起源水は、チャクチ海の大陸棚上で日射吸収により昇温した後、カナダ海盆域の数十 m 深に貫入する。輸送された海洋熱の一部は、翌年以降の海氷生成・融解にも影響すると考えられている。また、フラム海峡やバレンツ海から流入する大西洋起源水はユ

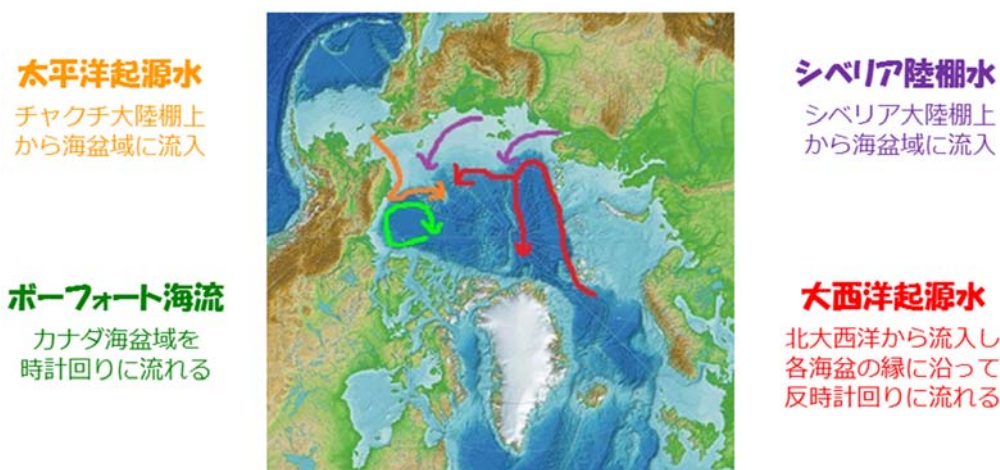


図 6 北極の主要な海流

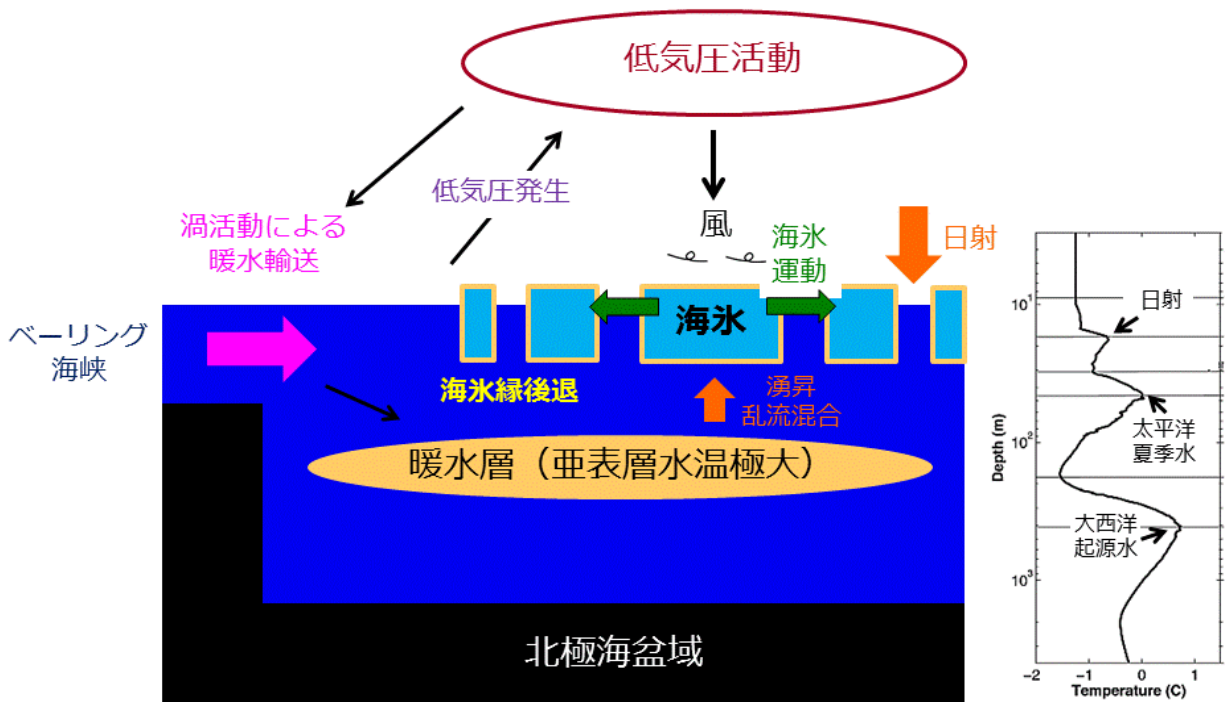


図 7 北極海で想定される大気-海氷-海洋間フィードバックの例。カナダ海盆域には熱源の異なる 3 つの水温極大層が存在し、様々なプロセスを経て海水に作用する。右図はカナダ海盆域で観測された鉛直水温分布 [Jackson et al., 2010]。

ーラシア海盆側の貯熱量および海水分布に直接的な影響を及ぼす。大西洋水は数十年スケールで北極海盆域の広範囲を流れるが、カナダ海盆側では太平洋水より深い約 400 m を中心に位置するため、直上の海水に対する相対的影響は小さい。

海水の熱的減少の全体像を、海氷自身の特性や地球温暖化に伴う気温・海水温の上昇だけで説明することは困難であり、局所的な相互作用を含むフィードバックシステムを明らかにしていく必要がある。北極海の複雑な熱力学のプロセスとしては、まず海氷-海洋アルベド・フィードバックが挙げられる(図 7)。これは海氷と海洋のアルベドの違いから、何らかの作用で海氷域に開水面(氷盤と氷盤の間に露出する海面)が出現すると、日射が海洋表層により多く吸収され、海氷の側面・底面融解を促進、もしくは結氷を抑制し、さらに海氷面積が減少するというものである。

また、海洋表層の水温上昇は、氷縁域での低気圧を活発化させ、海氷上への暖気流入をもたらす。さらに、海氷上の低気圧が海氷の発散運動(氷盤同士が離れる向きの動き)を促進することも開水面の拡大に繋がる。このような低気圧を介した海氷減少フィードバックも重要なプロセスとなる。開水面の拡大は風による海洋の慣性振動(地球の自転によって数十~数百 km スケールで

回転する運動)や内部波(風波や潮汐などにより発生する海洋内部を伝搬する波)の発生も促す。海氷運動が激しくなることは、海水下における乱流混合を生み出し、海洋表層における鉛直方向の熱の移動を活発化させる。特に海水が激減している太平洋側北極海の表層 100 m には、日射と太平洋夏季水をそれぞれ熱源とするふたつの暖水層が存在するため、乱流混合に伴う海洋熱の解放が海氷融解促進・結氷抑制に寄与し、さらに海水が減少するというフィードバックシステムも考えられる。加えて、北極海の太平洋側の沿岸域では、海洋中層に存在するもうひとつの熱源である大西洋水の湧昇に伴う海洋表層への熱輸送も指摘されている。

以上の熱力学のプロセス群は複合的に関与しており、また、熱源である日射や中緯度からの海水流入に起因する北極海内部の貯熱量分布には、大きな経年変動が存在する (Jackson et al., 2010)。この複雑な海氷減少システムを理解するには、大気-海氷-海洋の三者の熱バランスの変動を同時かつ定量的に把握する必要がある。熱的特性において不均一性が極めて大きい海水域の理解には、局所的な観測だけでは限界があるので、広範囲をカバーできる人工衛星データを組み合わせた研究も有用である。

Q3: 海水減少が雲や低気圧に及ぼす影響は？

海面の露出は大気への大きな熱源となる。海氷に覆われていた場所に特有であった夏季の雲の形状が、海洋からの加熱に伴い層雲から層積雲へと変化することが観測事実から明らかとなってきた。これは、海洋からの熱供給に伴う対流の強化を意味する。雲底高度が高まることによって、大気から海洋への熱放射が減少することが見込まれるが、北極域の温暖化に伴う水蒸気増加によって下向き熱放射が増加する効果と相殺関係にあるため、雲が鉛直熱輸送に及ぼす定量的な寄与という点では依然として不確定性が大きい。一方、層雲が層積雲に変化することによる雲量の減少は海面への日射を増加させるものの、海面付近の乱流で海面が冷却されることが元々の要因であるため、正味の熱収支がどの程度変化しているかは、雲粒を陽に²⁰表現するような数値モデルによって定量的に評価する必要がある。そもそも雲量の増減に関しては、現場観測、衛星観測、再解析の各データセット間や、着目する時空間スケールによって傾向が異なることに留意すべきである

このような雲構造変化は単独の現象ではなく、低気圧活動によって引き起こされることも観測事実から示されてきた (Inoue and Hori, 2011)。例えば、海面水温と海水表面温度の水平温度勾配が強い高緯度の海氷

縁では、低気圧が急激に発達することがある。この温帯低気圧に似た構造は、南側の暖気を北へ、海氷域の寒気を南へ引き出す効果があり、前線通過後には冬の日本海上で発達する筋状雲と同様の雲降水システムが形成される。これらの雲は、大気と海洋の熱交換の結果でもあり、夏季に蓄積された海洋熱が、秋から冬にかけて効率よく大気へ放出されていることを示唆する。これは、冬の北極域における温暖化増幅に寄与する現象のひとつであろう。

秋から冬にかけての雲量増加は、旧ソ連のラジオゾンデデータからも示されているが、冬の雲の現場観測自体が困難であるため、その詳細には未解明な部分が多い。雲の鉛直構造に関して、CALIPSO²¹や CloudSatによる衛星観測データは蓄積されているが、冬季氷上現場観測のデータは依然として不足している。ちなみに低気圧経路の北上は、北極海上の降水(降雪)量増加をもたらす、海氷生成にもフィードバックされる。近年はNCEP²²-CFRS²³等の大気海洋結合再解析データが利用可能であり、大気と海洋の結合系に着目して解析していくこともひとつの方向性として挙げられる。北極海の海水減少の日本周辺の気候への影響についてはテーマ5を参照のこと。

Q4: 海水減少が海洋内部に及ぼす影響は？

海氷は、大気-海洋間の運動・熱・水・物質の交換を遮る役割をする。まず運動に関しては、開水面よりも海氷の表面の方が風から受ける力が大きいので、海氷は海流を強める効果を持つ一方で、氷盤同士が衝突するような海域では、海氷が動きにくくなるために海流が弱められるというプロセスも存在する。このような風によって駆動される海氷運動およびその直下の海流の強さは個々の氷盤の形状や流向に依存する。大気から海洋への運動の伝達は海洋表層の鉛直混合をもたらす、海氷下部への熱供給とも関連があるので、この力学過程を精密に調べるのが重要である。

また、海氷の生成・融解に伴う熱と水の交換を定量化することが、季節海氷化する北極海においてますます

重要になる。海氷融解の効果だけ考えると、淡水供給および日射により海洋表層は密度の低い水で覆われるので、成層(海水の鉛直密度勾配による安定な層構造)が強化され、鉛直方向の混合が起こりにくくなる。ただし、夏季の海水減少により開水面が広がる、冬季の海面冷却による海氷生成量が増えるので、北極海盆域の100~500 m深を占める大陸棚起源の高密度水(水温が低いか塩分が高いことで密度が高い海水)の形成が、活発化することも考えられる。その結果、北極海中層は、寒冷化・高酸素化する可能性がある。海洋中の酸素濃度は物質循環や生態系と密接な関係がある(テーマ3、テーマ9参照)。

季節海氷化に伴って、大気-海洋間の運動・熱・水

²⁰ モデリングの分野ではある過程(変数の時間変化)をモデル方程式の中で直接、明示的に書き表すことを「陽に」と表現することが多い。

²¹ CALIPSO: Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations、雲・エアロゾル衛星観測網

²² NCEP: National Centers for Environmental Prediction、米国環境予測センター

²³ CFRS: Climate Forecast System Reanalysis、気候変動予測システム再解析

の交換を合わせた影響がどうなるか、カナダ海盆域を時計周りに流れるボーフォート海流が近年強化されている事例も参考になる (McPhee, 2013)。特に、循環南端では西向きの海流と大陸棚側の東向きの海流の間に大きな水平流速差を形成し、同時に直径数十 km の渦が生成される。活発な渦活動は陸棚—海盆間輸送(水深の浅い大陸棚と水深の深い海盆域の間の海水交換)を促進する役割がある。このような渦による海水交換を定量化するには、局所的なモニタリングと高解像度モデルによる数値実験が有効である。

一般に海洋の鉛直混合は、高密度水の沈み込みによる対流混合と内部波などによって駆動される乱流混合に分けられる。内部波による乱流混合が初冬に起これば、海洋熱輸送を介して結氷開始時期を変える一因にもなる。内部波の発生頻度や強度は、海水密度の鉛直分布に支配されるので、この分布の季節～経年変動を明らかにすることは海氷減少の影響評価にとって有用な情報となる。また、不思議な現象として、北極海の大陸棚縁から海盆中央部にかけて水平方向に 1000 km 近い拡がりを持つ水温と塩分が一樣な極薄い層(厚さ数 m)が 200～300 m 深で観測されている。二重拡散(海水中において塩分よりも水温の方が速く混ざる現象)が形成要因のひとつとして指摘されているが、水平方向への拡大プロセス、詳しい分布や出現頻度については未解明な点が多い。このような海洋微細現象と海氷減少の関係を見出すことも、海洋物理学の進展につながる。

現在の気候下では、塩分の低い太平洋起源の海水と塩分の高い大西洋起源の海水による密度差に河川水の効果も加わって、塩分分布が北極海洋循環を支配している。仮に太平洋起源水の高塩分化、または、大西洋起源水の低塩分化が各々の上流域で起これば、鉛直対流強化により太平洋水と大西洋水の混合水塊が点

在する状態になり得る。これらの鉛直混合が重要になる状態を数値モデルで陽に再現するには、1 km 以下の水平解像度が必要なので、計算資源的制約を勘案すると、まずは既存の対流スキームの精査や個々のプロセスにターゲットを絞ったモデリングから始めるべきである。将来予測の観点では、温暖化気候下で海洋表層への蓄熱が進むことで、水温主導の密度分布が支配的な熱駆動循環になる可能性を議論することにも意義がある。

上述したような海洋の物理的変化は、北極海の物質循環、生態系とも密接な関わりがある。海洋循環の強化により、河川水、海氷融解水、大陸棚起源の海水の影響が及ぶ空間スケールが拡大すれば、海盆域での動植物プランクトンによる生物生産量の増大につながり、物質循環が加速する。また、海氷面積の減少やそれに伴う鉛直混合の活発化は、大気—海洋間のガス交換を促進する一方で、海氷融解による海洋表層への淡水供給は、ガス交換を妨げる結果ともなる。結氷に伴う海洋から大気へのガス放出も事例報告があるが、季節海氷域が拡大することで北極海が二酸化炭素の吸収源と放出源のどちら側にシフトするかについては不確定性が大きい。日本ではオホーツク海を共通の対象フィールドとして、物理から生態系までを含めた分野間連携が積極的に行われてきた。そのノウハウを生かして、北極海においても物質循環システムの鍵となる領域とプロセスを陸棚—海盆間輸送、渦、湧昇流といった物理的側面と、河川、海岸浸食、海底永久凍土融解からの有機物供給といった生物地球化学的側面の双方から抽出し、船舶・衛星観測・モデリング等を駆使してそれらを定量的に精査することで、世界のモデルケースともなり得るであろう。物質循環・生態系の詳細についてはテーマ 3 およびテーマ 9 を参照のこと。

10～20 年後を見据えた戦略

a. 国際的動向と日本の役割、今後の国際連携の在り方

北極海に関する学術研究、特に現場観測は、一国のみで行えるものではなく、国際連携が不可欠であることは IASC²⁴でも強く認識されている。近年は中国、韓国、南アフリカなど非欧米諸国が独自の砕氷観測船を建造

する中で、日本の科学的貢献を維持・強化するための工夫が必要である。砕氷船を保有する北極海沿岸諸国の主たる観測海域は領海・排他的経済水域を中心とした沿岸に集中しており、非北極沿岸国である日本が中立な立場で権益に捉われない科学調査を主導することは、今後の北極環境研究に対して重要な意味を持つ。

²⁴ IASC: International Arctic Science Committee、国際北極科学委員会

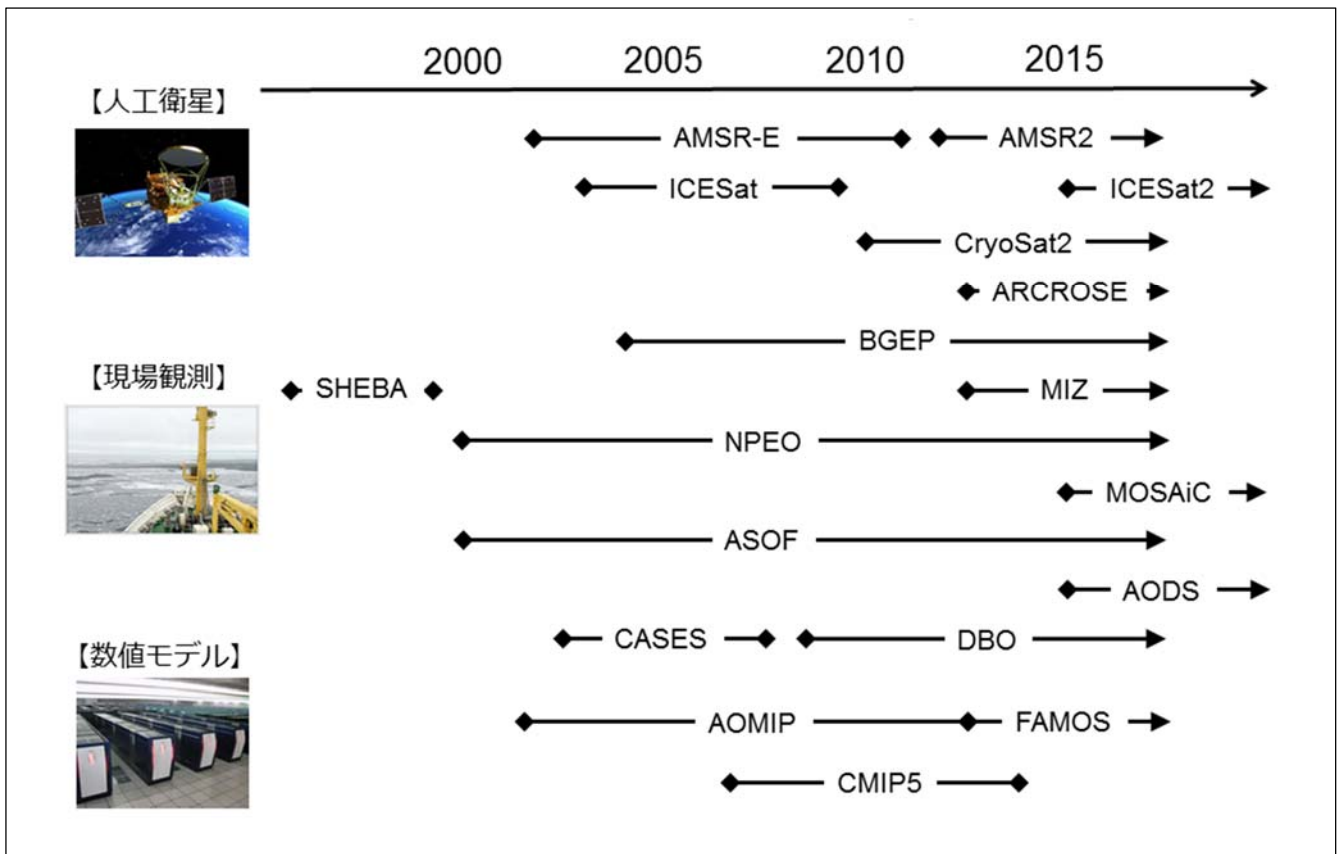


図8 北極海研究に関する代表的な国際プロジェクト。“→”は終了時期未定。

また、日本は衛星観測やモデル開発において世界に誇る先導性を持っている。これら現場観測・衛星・モデル研究者間での交流も活発であり、三位一体の体制とその推進を司る拠点形成がなされれば世界に先駆ける成果が期待できる。

北極海を対象とした国際観測プロジェクトを年代別に俯瞰すると(図8)、まず大気-海氷-海洋間の熱収支に関する通年観測 SHEBA²⁵が1990年代後半に実施された。熱収支に関する通年規模の観測は他に例がないため、15年経った現在でも最新の観測や数値モデルの比較対象として SHEBA の結果が引用されている。2000年代に入ると、太平洋側では CASES²⁶、BGEP²⁷、DBO²⁸、大西洋側では NPEO²⁹、ASOF³⁰な

ど大小様々なプロジェクトが展開され、日本からも JAMSTEC(海洋研究開発機構)、北海道大学、東京海洋大学、国立極地研究所を中心に積極的に参画してきた。今後10年以内には IASC プログラムとして、MOSAiC³¹、AODS³²が予定されており、日本も計画立案および実際のフィールド観測に関わっていくことが望まれる。大気側ではラジオゾンデによる同時観測 ARCROSE³³がいままさに進行中であり、日本が主導的な役割を担っている。衛星観測においては、JAXA が主導する GCOM-W³⁴に、日本の極域研究者の多くが関わっている。取得された海氷データは世界的に活用されており、マイクロ波放射計の長期的な運用に向けた取り組みを継続すべきである。モデリング研究は必ず

²⁵ SHEBA: Surface Heat Budget of the Arctic Ocean、北極海表面熱収支観測プロジェクト

²⁶ CASES: Canadian Arctic Shelf Exchange Study、カナダ側北極海における陸棚-海盆間輸送研究

²⁷ BGEP: Beaufort Gyre Exploration Project、ボーフォート循環観測プロジェクト

²⁸ DBO: Distributed Biogeochemical Observatory、太平洋側北極海における生物地球化学観測

²⁹ NPEO: North Pole Environmental Observatory、北極点環境観測プロジェクト

³⁰ ASOF: Arctic-Subarctic Ocean Fluxes、北極-亜北極間海洋輸送観測プロジェクト

³¹ MOSAiC: Multidisciplinary Drifting Observatory for the Study of Arctic Climate、学際的漂流観測網

³² AODS: Arctic Ocean Drift Study、北極海漂流観測研究プロジェクト

³³ ARCROSE: Arctic Research Collaboration for Radiosonde Observing System Experiment、ゾンデ観測網

³⁴ GCOM-W: Global Change Observation Mission-Water、水循環変動観測衛星

しも国際連携を前提としないが、2000年代に始まった相互比較プロジェクト AOMIP³⁵は既存の北極海モデルに共通して見られる問題点を同定し、再現性を向上させるための貴重な情報交換の場となっており、その後継となる FAMOS³⁶の年次会合にも日本から複数名が参加している。人的交流の場としては、ART³⁷が次世代を担う若手研究者の分野間連携を推進しており、日本からも複数名が参加している。これらの国際的な枠組みは新たな共同研究のきっかけにもなるので、有効に活用していくべきである。

b. 衛星観測

現場観測が容易ではない北極海の海氷域をモニタリングするために、人工衛星による観測は極めて有用である。地球観測用の衛星搭載センサには様々なものがある。中でもマイクロ波放射計は、日射や気象条件の影響を殆ど受けずに極域全体を毎日観測できることから、数十年に渡って海氷研究で中心的な役割を果たしてきた。現在の主力センサは日本国産のマイクロ波放射計 AMSR2³⁸である。AMSR2 は米国の SSM/I³⁹に対しピクセル密度にして4倍以上の空間解像度を持ち、データの有用性を大きく向上させた。今や AMSR は海氷の現況モニタリングや変動研究において生命線であり、その観測を間断なく継続させることは国際的な責任でもある。具体的には AMSR2 の想定耐用年数を考えると、後継を遅くとも 2020/21 年までに打ち上げることが最重要である。また、より詳細な氷縁のモニタリングや細かいスケールの海氷変動の解析を可能にするために、マイクロ波放射計の高解像度化を目指した開発を継続すべきである。

海氷全体量の把握と生成・融解量の見積りのためには海氷厚データの取得も不可欠である。これまでも衛星で捉えられる海氷表面状態から海氷厚を推定する研究がなされているが、多年氷域で十分な精度を得ることは難しい。海氷タイプに依存しないデータ取得のためには海氷表面の高さを計測する方法が有用である。米国

航空宇宙局 NASA と欧州宇宙機関 ESA では、それぞれレーザーおよびレーダー高度計を搭載する ICESat⁴⁰(初代:2003~2009年、後継機:2016年~)と CryoSat(初代:2005年打上げ失敗、後継機:2010年~)を運用している。これらの高度計からは海氷表面だけでなく、海面高度の情報も得られる。海面高度から導かれる海洋循環の空間分布と強度は、北極海の水平熱輸送を左右するため、海氷変動要因の理解と将来予測において重要な観測項目である。しかし、その精度、解像度、観測頻度はまだ十分でない。今後日本においても海氷表面高度や海面高度を広範囲かつ高解像度で通年計測できる高度計の開発および複数小型衛星の打ち上げ等も視野に入れるべきである。

MODIS⁴¹、LANDSAT⁴²等の可視・赤外域センサや PALSAR⁴³、RadarSat 等の合成開口レーダーによる観測も有用である。日本は地球観測衛星技術と衛星データを用いた海氷海洋研究の双方で世界最高レベルの技術と実績を有しているにも関わらず、それらのデータは北極研究に十分に利用されているとは言い難い。今後は積極的にこれらのセンサのデータを利用していくべきであり、そのためにはデータを利用しやすい環境を整備すること、衛星データ利用者の裾野を広げることが必要である。人工衛星による観測研究は北極から地理的に離れた我が国が北極研究で主導的な役割を果たせる分野である。日本の北極研究をさらに進展させるため、既存センサの最大限の利用・新規センサの開発・人材育成・研究組織の確立を行う必要がある。

c. 現場観測

太平洋側北極海での現場観測において、日本には既に多くの実績があるが、現状の設備では海氷融解期以外の観測が困難である。当該海域において国際的に貢献し続けるためには、海氷に覆われる期間を含めた総合的観測を行い、季節変動と経年変動の両面からデータ空白を埋めることが最大の課題と言える。海氷が急激に減少する今だからこそ、海氷周辺の現地調査を集

³⁵ AOMIP: Arctic Ocean Model Intercomparison Project、北極海モデル間比較プロジェクト

³⁶ FAMOS: Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis、北極海モデル観測統合フォーラム

³⁷ ART: Arctic in Rapid Transition、IASC 主導の若手研究推進プロジェクト

³⁸ AMSR2: Advanced Microwave Scanning Radiometer 2、改良型高性能マイクロ波放射計

³⁹ SSM/I: Special Sensor Microwave Imager、衛星搭載型マイクロ波放射計

⁴⁰ ICESat: Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite、氷・雲・標高観測衛星

⁴¹ MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer、中分解能撮像分光放射計

⁴² LANDSAT: Land Remote Sensing Satellite、陸域観測衛星

⁴³ PALSAR: Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar、合成開口レーダー

中的に行い、熱収支観測に例えると、SHEBAに代わる新しい北極研究のスタンダードを提示することが重要である。そのためには結氷期および海氷域の現場観測に耐え得る観測設備(砕氷船や無人観測ステーション)の導入が必要不可欠である。砕氷船についての詳細は、「9章 研究基盤の整備」の章を参照のこと。

海氷観測に関しては、時間方向にはIPS⁴⁴による係留観測、空間方向にはAUV⁴⁵や耐氷プロファイリングフロートによるデータ取得が重要である。さらに、ADCP⁴⁶による海氷厚の計測が実用化されれば、飛躍的なデータ量増加が期待できる。個々の氷盤スケールの海氷観測は海氷モデルの精緻化にも寄与する。しかし、これらの体制を構築・維持するには、海外の研究機関と連携を図りながら、ノウハウを持った人材を育成することが欠かせない。海氷上の雲・降水システムや、積雪過程の把握も海氷変動メカニズムの理解のために重要である。氷上積雪の経年変化を捉える観測手法としてはIce Mass Balance ブイが有効だが、展開個数が限定されているために空間代表性という意味で難がある。一方、現在利用可能な再解析データにはNCEP-CFSRのように氷上の積雪深が出力されているものもあり、長期トレンド解析に資するかを観測データで検証しておくことも重要である。気象レーダーによる降水システムの把握とともに、現場の積雪および海氷厚の時間変化を捉えるためには、SHEBA的な集中観測も望まれる。NSIDC⁴⁷によるOperation IceBridge ミッションでは、ICESat とICESat-2 のギャップを埋める一環として、2009年以降、ヘリコプターに搭載した電磁誘導式氷厚計を用いて、北極海の太平洋側において春先の氷厚・積雪観測を不定期に行っている。

日本は、これまでJAMSTECの海洋地球研究船「みらい」を主な基盤として、海氷消失域での大気海洋観測を10年以上継続しているが、特にオリジナリティがあるのはラジオゾンデ観測である。ラジオゾンデ観測の自動放球装置は少人数で高頻度の観測が可能である。2013年には「みらい」北極航海初の二週間定点観測期間中に、ニューオルスン、アラート、ユーレカなど陸上現業ステーションの協力の下で北極海を網羅するラジオ

ゾンデ同時観測が実現された。その実現においてドイツやカナダの国際協力が得られたのは、事前にIASC大気作業部会にて観測の重要性・先見性を表明したところが大きく、アメリカやロシアも理解を示していた。「みらい」が主たる船舶として観測網を拡充したこの試みはARCROSEと名付けられ、北極域の天気予報や中緯度域への影響評価を含めた新規性のある研究に発展しつつある。これは世界気象機関が提案しているPPP⁴⁸にも合致した取り組みであり、それを日本発で始動したことは特筆すべきことである。さらにこの活動は2018～2019年に計画されているMOSAicの予備調査としても認識されており、近未来の北極研究の根幹をなすことは間違いない。

d. 数値モデリング

気候モデルによる地球温暖化予測実験では、世界のどの結果も近年の急激な海氷減少および氷厚分布の変化を十分に予測できていないという問題を抱えている。その要因は多岐にわたるが(テーマB参照)、ここでは北極海内部で起きているプロセスの理解といった目的において、海氷・海洋モデルをどのように改良すべきかについていくつか紹介する。

海氷モデルに関しては、1970年代に開発されたSemtner型の熱力学やHibler型の力学の表現方法が現在まで継承されている。そのうち熱力学過程においては、積雪やメルトポンドを含めた海氷上アルベドの精緻化がひとつの鍵になる。特に、海氷融解期におけるアルベドの時間変化は多年海氷域と季節海氷域で異なることが報告されており、このような海域間の違いまで十分に表現できることが望ましい。メルトポンドそのものの時間変化を計算するモデルも開発されているが、直接的に表現するか、アルベドの変化として間接的に扱うかについては、検証データの有無や計算に要する時間に応じてその都度見極めるべきである。力学過程においては、例えば10 km以下の氷盤スケールで局所的に生じているプロセスが十分に考慮されていない。従来の内部応力レオロジー(氷盤衝突に伴う力学エネルギーの変化を表現したものは、水平解像度が数十kmの

⁴⁴ IPS: Ice Profiling Sonar、超音波氷厚計

⁴⁵ AUV: Autonomous Underwater Vehicle、自律型無人潜水機

⁴⁶ ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler、音響式流向流速計

⁴⁷ NSIDC: National Snow and Ice Data Center、米国雪氷データセンター

⁴⁸ PPP: Polar Prediction Project、極域予測プロジェクト

海氷モデルを念頭に開発されているが、計算機性能の向上に伴って数 km まで高解像度化したモデルに対して同じ表現方法を適用できるかは、再検証する必要がある。季節海氷化が進むと、風波によって海氷が破碎され、氷盤が小さくなるという「波－海氷相互作用」も重要になってくる。大気－海氷－海洋間の運動の伝達という観点では、海氷の厚さやメルトポンドの状態まで反映することができればより精度が上がると考えられる。

一方、北極海を主対象にした海洋モデリングは、世界的にもまだ発展途上であり、例えば、水平解像度が 20 km 程度のモデルでは、冬季陸棚水(冬季に大陸棚上で形成される密度の高い海水)の海盆域への輸送を十分に表現できていないという問題が、共通認識となっている。北極海では、中・低緯度海洋に比べて小さい空間スケールの物理現象と複雑な海底地形が海盆スケールの海洋循環をも支配しているという特徴から、現実の水温・塩分分布を忠実に再現するには、水平解像度を数 km まで高める必要がある。これらの制約は最先端の大型計算機資源を十分に確保できれば解消に近づくことが期待されるが、モデルの表現方法や実験設定を新たに整える必要も出てくる。北極海の包括的な理解のためには、海洋中規模渦・内部波・鉛直対流による海水混合にも着目すべきである。特に水平 100 m スケールの鉛直対流混合は、世界最高峰の計算機資源を駆使しても北極海全域で陽に解像できるレベルではない。高解像度化が実現したとしても、海氷生成に伴う高密度水の沈み込みや海水混合の精緻化には、新たなアプローチが必要になる。理想的な実験設定で得られた知見などを生かして、既存のモデルで使用されている鉛直対流の表現方法を改良することが必要である。

大気モデルでは、WRF⁴⁹のような領域気象モデルを北極海の各海域で実装できるように整備し、氷縁域での大気－海氷－海洋間相互作用を含めた気象の時空間変動を明らかにしていくことがひとつの方向性として挙げられる。いずれにせよ数値モデルの改良には観測データの取得が不可欠であるが、現場観測だけでなく、日本の実績が高く評価されている衛星観測データも次世代モデルの開発に有用であろう。上述した素過程の解明の他、大気境界条件に使用する再解析データの高精度化やモデルの性能評価手法の確立にも力を注ぐ必要がある。

るが、これらの詳細はテーマ B、C を参照のこと。

まとめ

日本は太平洋側北極海において、既に多くの観測実績を残している。この海域は、北極海の中で最も早いペースで季節海氷化が進み、現在では夏季に大部分の海氷が消失する状況にある。「みらい」による北極航海では、約 15 年に渡りチャクチ海の大陸棚およびカナダ海盆域を中心とした大気海洋観測を実施してきた。特に、北太平洋から流入する海水の熱量を把握するための係留系観測や海洋の鉛直熱輸送を見積もる乱流計観測を継続的に行っている。同時に詳細な気象観測を実施することで、大気による海面冷却の効果や低気圧の発生メカニズム、雲底高度の変化など下層大気についても多くの知見を得ている。近年では、北海道大学の練習船「おしよ丸」もベーリング海からチャクチ大陸棚にかけての海洋観測を実施している。これらの点から、太平洋側北極海での大気・海洋に関するデータ収集能力と観測ノウハウに関しては、日本に一日の長があり、国際的にも高い評価を受けている。

現在北極海は全域が季節海氷化する傾向にあり、日本が多くの観測実績を得ている太平洋側北極海はそのモデルケースとなり得る。ゆえに今後も当該海域を重点観測対象と位置付け、継続的な総合観測を実施していくべきである。カナダ、中国、韓国の砕氷船は、北極海中央部を縦断的に観測する傾向にある一方で、氷縁域・季節海氷域に特化した観測例は相対的に少ない。ちなみに米国では Marginal Ice Zone プロジェクトにおいて、ボーフォート海氷縁域の集中観測に着手している。また、ICESCAPE⁵⁰プロジェクトでは、チャクチ海の高氷融解期の観測を行い、海水下での大規模な植物プランクトンの生産活動の発見など画期的な成果を挙げている。このような不定期観測が今後も継続するのかは定かでないが、ひとつの参考材料になるであろう。また、北極海では厳しい気象条件などの制約により冬季の船舶観測が殆ど行われていないが、暖水流入域などを狙った集中観測を行い、係留系による時系列データなどと融合することで少しでも多くの情報を得ることができれば国際的にも大きく貢献できるだろう。

観測だけで得ることが困難な時空間変動の仕組みを

⁴⁹ WRF: Weather Research and Forecasting Model、局地気象予測モデル

⁵⁰ ICESCAPE: Impacts of Climate change on the Eco-Systems and Chemistry of the Arctic Pacific Environment、気候変動に伴う太平洋側北極海での生物地球化学的影響の評価

記述・理解するには、数値モデリングが有用であるが、北極海モデリングの現状を鑑みるに、今後 10 年程度では、海洋熱の海氷への寄与、冬季陸棚水の海盆域への流入過程、氷縁域での雲と低気圧の形成過程を定量的に明らかにすべきである。南北両極域に端を発する全球規模の海洋深層循環は、乱流混合・鉛直対流・中規模渦・大規模海流とマイ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北極海を含む領域モデルで解き明かしていく。

北極海の海氷変動要因に関して、大気・海洋それぞれの寄与については様々なプロセス研究が繰り返されてきたが、大気－海氷－海洋間相互作用については、未解明の点が多い重要な研究テーマである。例えば、渦生成の頻度やそれに伴う海洋熱輸送は風の向きや速さに依存することが推察されるが、海洋熱の変化が海氷縁後退を通じて北極海全域スケールの大気循環にどのように作用するかといったフィードバックプロセスについては今後優先的に取り組むべき研究課題のひとつとして挙げられる。それに関連して、これまで海氷分布の季節予報を行う場合には特徴的な風の分布を仮定したり、あるいは複数の風を与えて平均的な結果を議論することが多かったが、海氷海洋の変化が大気にどう影響するかを定量的に理解することで季節予報精度の向上につながる。上記の解決に向けたひとつのアプローチとして、北極領域気候モデルの構築および改良が挙げられる(テーマ B も参照)。このような取り組みは既に米国モンレーの Naval Postgraduate School などが主導して始められているが、幅広い時空間スケールに対応するにはまだ課題も多い。北極研究に限らず、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おり、大気・海洋・陸面・氷床などの各要素モデルは既に保有している。それらをいかに整合的に結合させるかを議論する時期に来ている。

極域研究を進展させるには、観測とモデルを融合させることが戦略的にも重要だと考えられるが、これに関しては観測値とモデル結果を比較するだけでなく、データ同化を介した様々なアプローチが有用となる。中低緯度域では、漂流ブイによるアルゴデータ等を最大限活

用し、既に研究手法としてデータ同化が認識されているが、北極域では海氷下の情報が比較的少ないことや数値モデルによる海洋の再現性がまだ十分でないなどの事情により、既存の同化例は海氷密度や一部の大陸棚上の海洋流速に限られている。

しかし、10～20 年先の長期構想を考える際には、自動観測装置の普及による観測網の充実や、モデルの高解像度化に伴う海洋循環の再現性向上が期待されるので、北極海においてもデータ同化を利用した研究を現実的なプロジェクトとして見据えておくべきであろう。データ同化システム自体は特に海域に依存しないものであるが、極域では海氷下の情報をいかに取得するかが鍵になる。例えば、冬季は海氷下を自動昇降し、夏季の海氷縁後退後は海面まで測定できるような測器が開発できれば、中低緯度域に劣らない精度でデータ同化結果を提供でき、様々な時空間スケールでの研究基盤となるであろう。データ同化は、他にもモデルパラメータ(モデルの定式化に用いる経験的な係数)の最適値推定や予報変数の初期値作成にも有用とされている。既に日本近海で運用されている JCOPE⁵¹や JADE⁵²のような短期予測システムを将来的に北極海でも構築できれば、北極航路に関する船舶への情報提供なども可能になり、社会経済への貢献度も増すことが期待される。データ同化の詳細についてはテーマ C を参照のこと。

⁵¹ JCOPE: Japan Coastal Ocean Predictability Experiment、日本近海変動予測システム

⁵² JADE: Japan Sea Data Assimilation Experiment、日本海海況予測システム

北極環境研究の長期構想

発行: 北極環境研究コンソーシアム
(JCAR, Japan Consortium for Arctic Environmental Research)
2014年9月

連絡先: 北極環境研究コンソーシアム事務局
〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3
国立極地研究所 内

E-mail: jcar-office@nipr.ac.jp

ホームページ <http://www.jcar.org/>

北極環境研究の長期構想

目次

巻頭言	i
1章 報告書で目指すこと	2
2章 背景と内容	3
3章 北極環境の現在までと近い将来に起こりうる変化	4
4章 北極環境研究の歴史	7
5章 「現在進行中の地球温暖化に伴う北極の急激な環境変化を解き明かす」研究テーマ	9
テーマ1：地球温暖化の北極域増幅	9
Q1：下層から上層の大気における水平・鉛直熱輸送は、北極温暖化増幅にどう影響するか？	10
Q2：陸域積雪・凍土・植生・氷床の役割は重要か？	12
Q3：季節変動をもつ海洋の熱蓄積と海氷アルベドの役割はどの程度か？	14
Q4：雲とエアロゾルがもつ役割を定量化できるか？	16
Q5：北極温暖化増幅はなぜ起こっているのか？ その予測と不確実性はどれほどか？ 北極域における放射強制力とフィードバック・プロセスはどう変化するのか？	17
テーマ2：海氷減少のメカニズムと影響	19
Q1：風のパターンや海氷の流動性の変化は海氷減少を促進するか？	20
Q2：海氷の熱的減少はどのように進むのか？	21
Q3：海氷減少が雲や低気圧に及ぼす影響は？	23
Q4：海氷減少が海洋内部に及ぼす影響は？	23
10～20年後を見据えた戦略	24
テーマ3：物質循環と生態系変化	30
Q1：大気中の温室効果気体やエアロゾルなどの濃度はどう変化するか？	31
Q2：陸域生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？	34
Q3：陸から海への物質輸送の定量的解明には何が必要か？	36
Q4：海洋生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？	38
テーマ4：氷床・氷河、凍土、降積雪、水循環	42
Q1：氷床・氷河の変化は加速するか？	42
Q2：永久凍土の変化は気候変動とどう連鎖するのか？	46
Q3：北極域の降積雪はどう変化しているか？	48
Q4：環北極陸域の水文過程はどう変化するか？	50
テーマ5：北極・全球相互作用	53
Q1：＜大気の影響について＞ 北極振動などの大気変動は強まるか弱まるか？	54
Q2：＜海洋の影響について＞ 大西洋・太平洋間の海水循環は強まるか？ 深層水形成は減るか？ 中緯度海洋大循環は変わるか？	56

Q3 : <陸域の役割について> 植生と凍土の変化による炭素収支や物質循環への影響は？ 積雪と植生の変動による広域エネルギー水循環への影響は？	58
Q4 : <超高層大気の役割について> 極域超高層大気が下層大気・超高層大気全球変動に 及ぼす影響は？	60
Q5 : <多圏相互作用について> 超高層大気、大気、陸面積雪と植生、海洋のどれを經由 する影響が大きいのか？	61
テーマ 6 : 古環境から探る北極環境の将来	64
Q1 : 過去の北極温暖化増幅は現在とどれほど異なり、その要因は何か？	66
Q2 : 過去のグリーンランド及び大陸の氷床はどう変動し、その要因は何か？ 気候変動 との関係と海面水位への寄与は？	68
Q3 : 過去の北極海の環境はどのようなものであったか。とくに海氷と生物生産について	70
Q4 : 過去の北極陸域環境は現在とどれほど異なり、大気組成や気候とどう関係したのか？ ...	72
Q5 : 過去の北極において、数年～数百年スケールにおける自然変動の強度や時空間 パターンは現在と異なっていたか？そのメカニズムは何か？	74
【ボックス 1】古環境プロキシや年代推定手法の開発と解釈	76
テーマ 7 : 北極環境変化の社会への影響	77
Q1 : 地球温暖化も含めた気候変動による影響は？	78
Q2 : 地球温暖化に起因する陸域環境の変化による影響は？	82
Q3 : 地球温暖化に起因する海洋環境の変化による影響	83
Q4 : 太陽活動と北極超高層大気の影響	85
Q5 : 北極圏人間社会の対応	86
6 章 「生物多様性を中心とする環境変化を解き明かす」研究テーマ	89
テーマ 8 : 陸域生態系と生物多様性への影響	89
Q1 : 人為的な要因で起こる環境変動は北極陸域生態系にどのような影響を及ぼすか？	90
Q2 : 生物多様性はどのような影響を受けるか？	93
【ボックス 2】生物多様性とは？	93
【ボックス 3】学名の不一致問題	94
Q3 : 北極陸域生態系の変化が動物や気候に与える影響はどうなるか？	95
【ボックス 4】トナカイの生息変化	95
【ボックス 5】水鳥のモニタリング	96
テーマ 9 : 海洋生態系と生物多様性への影響	97
Q1 : 陸域・大気物質は北極海の生態系・多様性に大きな影響を与えるのか？	98
Q2 : 北極海の生物は物質をどのように輸送・変質しているのか？	99
Q3 : 北極海食物連鎖と生態系変化・多様性はどうか関係しているか？	101
【ボックス 6】表層-底層生態系のカップリング	102
【ボックス 7】バイオロジカル・ホットスポット	102
Q4 : 成層化、脱窒、および海洋酸性化は北極海の生態系・多様性にどのような影響を 及ぼすのか？	103
7 章 「北極環境研究の広範な重要課題」研究テーマ	105
テーマ 10 : ジオスペース環境	105
Q1 : ジオスペースからの超高層大気や、より下層の大気への影響は？	107

Q2: 超高層大気が下層・中層大気に与える影響は？	108
Q3: 下層・中層大気変動が超高層大気に与える影響は？	110
Q4: 超高層大気を通した極域から中低緯度へのエネルギー流入は？	112
テーマ 11: 表層環境変動と固体地球の相互作用	114
Q1: 現在活動する北極海海嶺熱水系と海洋環境との相互作用は？	115
Q2: 氷床変動に伴い固体地球はどのように変形してきたか？	117
Q3: 北極海が形成されていく過程で、大気-氷床-海洋の相互作用がどのように変化 していったか？	119
Q4: 数千万年～数十億年といった時間スケールでの地球表層環境変動に北極海と周辺 大陸の発達過程はどのように影響を与えたか？	121
テーマ 12: 永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解	124
【ボックス 8】 永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解	127
Q1: 北極圏の永久凍土はどのような広がりと深さをもって存在しているのか？	128
Q2: 永久凍土を構成する物質はどのような分布を持ち、どの程度の不均一性があるか？	129
Q3: 永久凍土はどのような様態・規模で昇温・融解するのか？	130
Q4: 永久凍土-大気-積雪-植生サブシステムはいかなる構造と挙動の特性をもつのか？	133
8章 「環境研究のブレークスルーを可能にする手法の展開」 テーマ	136
テーマ A: 持続するシームレスなモニタリング	136
海洋圏モニタリング	137
雪氷圏モニタリング	140
【ボックス 9】 氷河質量収支の観測	142
大気圏モニタリング	143
陸域圏モニタリング	145
テーマ B: 複合分野をつなぐ地球システムモデリング	148
Q1: 地球システムモデルについて開発課題は何か？	149
Q2: 大気モデルについての開発課題は何か？	153
Q3: 海洋・海氷モデルについての開発課題は何か？	154
Q4: 陸面・雪氷モデルについての開発課題は何か？	158
テーマ C: モニタリングとモデリングをつなぐデータ同化	160
北極圏におけるデータ同化研究の現状	161
【ボックス 10】 データ同化技術の解説	162
データ同化を北極環境研究に展開する方針	164
北極圏データ同化研究の実現に向けた環境整備	169
9章 研究基盤の整備	173
砕氷観測船	173
衛星観測	175
航空機	177
海外の研究・観測拠点	178
データおよびサンプルのアーカイブシステム	181
人材育成	183
研究推進体制	185

	分野別研究機器等	187
10 章	長期にわたる方向性と取り組み体制のまとめ.....	195
11 章	資料	198
	引用文献.....	198
	執筆者等一覧.....	209