

地球温暖化は人間社会や生態系に大きな影響を与える今世紀の環境変化であり、社会の関心が高いため、それに関わるテーマをあげる。鍵となるプロセスを取り上

げ、北極環境を構成する諸要素の間のフィードバックを解明する。生態系の変化から地球温暖化へのフィードバックにも注目する。

### テーマ 1: 地球温暖化の北極域増幅

#### 要旨

北極域では、大気、海洋、雪氷、陸面、生態系等の各要素が複雑に絡み合い、様々なフィードバック効果が働く結果、他の地域より急激な気温上昇になる。「北極温暖化増幅」として知られている現象である。しかし、個々の要素からの定量的な寄与や、物理過程に関する理解は未だ不十分である。そこで、以下の 5 つの Questions に関してそれらの重要性和現状、及び今後の長期研究戦略を提案した。

- 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？
- Q2: 陸域積雪・凍土・植生・氷床の役割は重要か？
- 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？
- Q4: 雲とエアロゾルがもつ役割を定量化できるか？
- 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？

Q1 は大気循環に関する記述で、中緯度からの熱輸送の影響と超高層大気の役割に分け、下層から上層の大気における水平・鉛直熱輸送が北極気温増幅にどう影響するかという点について考察した。Q2 は陸域積雪、凍土、植生、氷床に関するもので、水循環変化を伴う積雪、凍土、氷床の変化と土壌、植生が大気におよぼ

す影響について考えた。Q3 は、季節変動をもつ海洋の熱蓄積と海氷アルベドが北極域増幅に与える役割について述べた。Q4 は、北極温暖化増幅において最も不確実性が高いと考えられる雲とエアロゾルがもつ定量的役割について考察した。最後に、全体のまとめとして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について扱い、定量的評価の研究の現状と課題を考察した。それぞれの Question では、プロセス観測、長期モニタリング、プロセスモデル、気候モデリングの立場から検討を行った。

10年以上の長期にわたる取り組みは、北極域を中心としたエネルギー輸送に焦点を当て、超高層、雲・エアロゾル、積雪、海氷、そして海洋中層までの各要素間の相互作用を解明していく。そのための手段である地球システムモデルを開発・利用するには、様々な分野のモデラーの協力のみならず、モデル検証に用いるデータの計画的取得が必要である。我が国の貢献として、超高層から海氷に至る衛星観測の拡充を図るため、センサ開発と衛星打ち上げを継続するよう担当機関に働きかける。もうひとつの鍵となる海洋の現場観測については、定期的な実施できる体制を維持しなければならない。

#### まえがき

現在北極域で起こっている気候変化は、その地域だけでなく、遠く離れた地域の自然環境や経済活動などにも直接・間接的に影響を及ぼすと考えられる。その根本的原因は、温室効果気体の増加による温暖化であると考えられるが、北極域では中低緯度域に比べ、気温の上昇幅が大きく、増幅効果をもっていることが分かっている(北極温暖化増幅)。しかし、北極域での温暖化増幅のメカニズムは単純ではなく大気、海洋、雪氷、陸

面、生態系の様々な要素が複雑に絡み合っているため、我々はそれらの相互作用の結果を観測している。

図 3 は、北極域における各要素間の影響の方向とフィードバックを示したものである。各矢印の大きさに関する現在の我々の知見は、それほど正確なものではなく、「仮説」というレベルのものも含まれている。中心にある「温暖化」が進行すると、海氷の減少、雪氷の融解、大気循環の変化、雲やエアロゾルの変化などが起こり、高

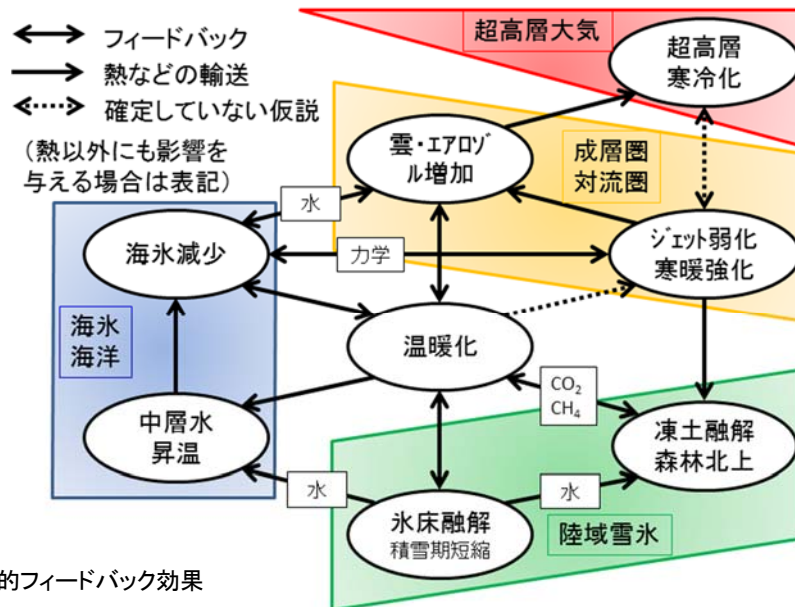


図3 北極域各要素間の潜在的フィードバック効果

いアルベドの雪氷面が相対的に黒い地表面や海面で置き換わることにより、さらに、地表付近の加熱(温暖化)が進行する。また、凍土が融解すると更なる温室効果気体の排出が進む。しかし、一方で海氷が減少し開水面が拡大すると海洋から大気への水蒸気の供給によって雲量が増加し、海氷の更なる融解を変化させる効果もある。このような様々なフィードバック効果の結果、北極域では温暖化は増幅されているということが、観測や数値モデルによる研究から分かってきたが、個々の要素からの定量的な寄与や、物理過程に関する理解は未だ不十分である。

温暖化に伴う環境変化とその結果生じる人間社会への影響を正確に評価し、適切な対策を早急に講じるために、図3に示した各要素やそれらの間で起こっている現象を理解することが強く求められている。そこで本章では代表的な構成要素である大気、海洋、陸域における Question として、大気中の熱輸送、陸域・氷床の水循環変化と植生変化、海氷と海洋について考察し、さらに最も不確定性の大きな雲とエアロゾルの各フィードバック・プロセス、そして、それらのまとめとして北極温暖化増幅はなぜ起こっているのかという Question を設定し、現状分析と長期研究戦略を考える。

### 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？

#### Q1a: 中緯度からの熱輸送の影響

##### (1) 研究の現状

地球温暖化の中、北極域には多くの変化が現れている。衛星観測による継続的なデータが存在するここ 30 年間で、北極海を覆う海氷面積、積雪域面積は大きく減少し、北極圏の広範囲で、地上気温、地温、海洋上層の水温も昇温傾向を示している。さらに、北極圏陸域を覆っている永久凍土の融解による温室効果気体であるメタンの放出、北極海に注ぐ河川流量の増加、グリーンランド氷床の融解、氷河・氷帽の縮小、積雪面積・期間の減少、北極上空のオゾン量の減少、大気中二酸化炭素増加による海洋酸性化の進行など様々な異変が

起こっている。現実の北極気候変化は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 報告書で報告されている多くの気候モデルの予測よりも早く進行していると考えられる。

北極域の温暖化とその増幅については、海氷面積の減少によるアイス・アルベド・フィードバック<sup>14</sup>の効果や極向きエネルギー輸送の増加、ブラックカーボンに伴うアルベドの変化などさまざまな要因が提唱されている (Graversen et al., 2008 など)。この中で極向きエネルギー輸送に関しては、Oort (1971)がレーウィンゾンデデータを用いて季節変動を、Trenberth and Stepaniak (2003)が再解析データを用いて、季節変

<sup>14</sup> アイス・アルベド・フィードバック: 雪氷面のアルベドが植生や土壌面のアルベドよりも大幅に高いことから、寒冷化(温暖化)して雪氷面が増大(減少)するとアルベドが増大(減少)して地表面に吸収される日射が減少(増大)し、寒冷化(温暖化)がさらに進行する、という正のフィードバック。

動、年々変動を示すとともに乾燥静的エネルギー、潜熱、運動エネルギーの各成分の寄与を、定常成分と擾乱成分について示している。Hwang et al. (2011) は第 3 次結合モデル相互比較プロジェクト CMIP3 の複数モデル結果を用いて、極域の気温上昇に伴い北極域で極向きエネルギー輸送が減少していることを示している。現状では、エネルギー輸送(熱輸送)を直接取り扱った研究は少なく、北極域の現況を記述する多数の研究とは十分にリンクしているとは言えない。

## (2) 今後の研究

北極でなぜ温暖化が強化されるのか、また、その根底にあるメカニズム、全球気候変動との関係を明らかにするためには、個別のプロセスの理解だけではなく、北極の気候システム全体がどのように働いているのか、その中で大気によるエネルギー輸送に着目し、どのように関わっているかを理解する必要がある。そこで北極大気を 1 つのボックスにとらえ、中緯度との間でどのように熱、水蒸気、物質を交換しているのか、またそこにどのように大気力学が関わっているのかを理解することが重要であると同時に、強い温暖化を引き起こすようなフィードバック・プロセスの同定とその理解が必須である。その中で、(1) 中緯度との熱、水蒸気、物質交換、(2) フィードバック・プロセス、(3) 中間圏、成層圏から境界層にいたる北極大気における鉛直方向の結合という 3 点について、包括的に研究を進めていく必要性がある。

この急変している北極圏気候変化の根底にあるプロセスを解く鍵が、その変動・変化の時空間的特徴のなかにあると考えられる。特に 1990 年代に入って海氷面積の減少、地上気温の上昇など、さまざまな変化が顕在化していることは周知の事実である。さらに、北半球寒冷域において、現在進行中の温暖化と同様に急激な地上気温の昇温が 20 世紀前半、1920 年代～1940 年代に起きていた事実は、海氷のアイス・アルベド・フィードバックに代表される急激な気候変化を引き起こすプロセスが、北極圏気候システムに内在することを示唆する。また、北極圏における温暖化は空間的に非一様なパターンを持つ傾向にあり、特に 20 世紀前半はユーラシアセクターの温暖化が明瞭であった。元来、北極海の他の海域に比べてバレンツ海から東シベリア沿岸にかけて海氷の季節・経年変動が大きく、中でもバレンツ海、カラ海周辺は北半球でも最も大気海洋間の熱交換が大きい海域の一つである。

さらに、北極域大西洋セクターは、大気・海洋における極域と中緯度域の熱・水循環の窓口として機能しており、その変動は北大西洋振動(NAO)・北極振動(AO)に代表される大気循環場の変動に強く支配されている。一方、バレンツ海、カラ海の海水変動は大気海洋間の熱交換を通じて、大気の遠隔応答を介して極東の冬季モンスーンの変動に影響を与えていることが明らかになりつつある。このような事実から、特に北極大西洋～ユーラシアセクターの水平・鉛直熱輸送を定量的に見積もることが、北極温暖化増幅を理解する上で重要と考えられる。また、このような北極の急激な気候変動とその空間的非一様性に対して、エアロゾル・雲プロセスにともなう放射強制力やフィードバックメカニズムの水平・鉛直熱輸送への潜在的な寄与が考えられており、北極の気候変動という観点からの総合的な評価を行なっていく必要がある。

## Q1b: 超高層大気役割は何か

### (1) 研究の現状

二酸化炭素増加に伴う下層大気温暖化に対して、中層・超高層大気では寒冷化が起きているが、大気密度の小さいこの領域では、この変化がより顕著に表れることが知られている。二酸化炭素濃度増加に伴う中間圏の寒冷化や、メタンの増加に伴う中間圏界面付近での水蒸気の増加により、中間圏界面の夏季極域に発生する夜光雲の発生頻度は、近年増加傾向にあると報告されている。さらに、従来は夜光雲がみられなかった中緯度域でも観測報告がなされている。また、超高層大気では、低軌道衛星の軌道データを用いた大気密度の経年変化から、超高層大気の寒冷化に伴う大気収縮により、大気密度が急激に減少しているとの報告もある。このように、中間圏や超高層大気の寒冷化を定量的に理解することは、下層大気温暖化の程度を理解することにつながるといえる。下層大気環境を映し出す鏡としての超高層大気の役割を認識し、中間圏や超高層大気の中期・長期変動についても詳しく調べるのが強く望まれる。しかし、夜光雲の観測、超高層大気の大気密度の観測共に、中期・長期的な変動を議論するためのデータの絶対量が不足しているため、不確実性も多く含まれている。

対流圏起源のプラネタリー波が成層圏に伝播し、成層圏大気大循環を変化させ、それがさらに対流圏大気大循環に影響を及ぼすことが明らかになりつつある

(例えば、Baldwin and Dunkerton, 1999)。また、中間圏や熱圏では、対流圏起源の各種大気波動が、東西平均東西風や子午面循環の形成に大きく寄与していることが知られている。しかし、対流圏起源の各種波動により引き起こされた中間圏や熱圏での大気大循環が、逆に、大気上下結合過程を通じて、対流圏に影響を及ぼすかどうかについてはよく解っていない。温暖化により、対流圏での大気大循環は大きく変調することが知られているが、これに伴って、中層大気や超高層大気に鉛直伝播する大気波動も変調することが推測される。温暖化による対流圏起源の大気波動の変調により、中層大気の東西平均東西風や子午面循環がどの程度影響を受けるのか、また、この変化がさらに対流圏に影響を及ぼす可能性はあるかどうかについては、ほとんどわかっていないのが現状である。

成層圏でのオゾン変動は、成層圏プラネタリー波の活動度と密接に関連している。しかし、成層圏プラネタリー波は、温暖化に伴い大きく変化すると考えられている。さらに、冬季から春季にかけてのオゾン破壊の光化学反応過程は、関連する各種の大気微量成分濃度変化や下部成層圏の温度などとも密接に関連しているため、予測は非常に難しい。例えば、2011年の春には、北極でもオゾンホールが発生したが、この現象が、二酸

化炭素濃度増加に伴う成層圏の寒冷化によるものなのか、今後のオゾンホールの発生頻度は増加するのか、といったことはまだよく解っていないのが現状である(例えば、Manney et al., 2011)。

## (2) 今後の研究

北極域での超高層大気と中層大気のグローバル観測ネットワークの構築や、衛星観測が重要である。また、中緯度域の観測との比較や南極域での観測との比較など多角的に行うことにより、総合的な理解が生まれる。中層・超高層大気の寒冷化の影響をより定量的に明らかにするには、大気大循環モデルによる数値シミュレーションが不可欠である。そのためには、中層大気や超高層大気を含む大気大循環モデルの高精度化が課題である。特に、中層・超高層大気が下層大気におよぼす影響を調べるには、数値モデルの上端高度を変更したシミュレーションを各種実行し、比較解析することが大変有効である。また、地球温暖化に伴うオゾン減少を正確に予測するには、光化学反応過程を含んだ高精度の化学気候モデルが必要である。

注) テーマ5のQ4、テーマ10のQ2、テーマ10のQ3も参照のこと

## Q2: 陸域積雪・凍土・植生・氷床の役割は重要か？

### Q2a: 水循環変化を伴う積雪・凍土・氷床の変化

#### (1) 研究の現状

地球温暖化の北極域増幅に関する陸上の雪氷、凍土および氷床のフィードバック・プロセスについては、まずそれぞれの要素が持つ特徴の把握、変化プロセスの追跡、そして影響の理解と再現研究が進められている。多点の観測データと衛星データによる連続・広域情報がもとになっており、積雪域の熱収支解析から、雪氷のアルベド・フィードバックによって進む春の融解促進とその後の地表や大気への熱の移動も解析やモデル計算が行われている。しかし、水循環に関係する融解の開始や融解水の動きについては不確定なものも多く、観測による熱伝導や融解水の移動など基本プロセスの理解やモニター観測点の展開や維持が必要である。

北半球高緯度では、春の積雪面積が減少していることが報告されている(Derkson and Brown, 2012)。し

かし、冬季の降水量自体は減っていないことから、春の融雪と流出が早まることが原因と考えられる。積雪域のアルベド・フィードバックが起こるのは日射が増える春であり、また水循環についても春の融雪が重要である。4月以降、北半球高緯度の融解域が高緯度側に急速に北上する。融解の進行、含水率増加と積雪粒径の増加によるアルベド低下が起こることは衛星でも観測されている。日射が最大になる6月には陸上の積雪域はほぼ消失しており、アイス・アルベド・フィードバックの舞台は北極海の海水に移る。この時期の陸域では、融雪水の地中への浸透と河川への流出、また地温上昇が始まる。近年の春の積雪面積の減少は積雪開始・終了の季節サイクルの変調、アルベドの影響時期のシフトを起こすと予想できる。

永久凍土域では、地温上昇が観測されているものの凍土の融解には至っていないと報告されている。季節融解を起こす永久凍土表層の活動層では夏季の気温

だけでなく、積雪が抑制する冬季の地表面冷却や、春の融雪が促進する土壌水分量の増加にも影響を受ける。冬季の温度条件と積雪による凍土融解促進について観測が必要である。衛星 GRACE による重力観測から、北極圏陸域での質量減少が観測され、氷床や氷河・氷帽の縮小、永久凍土から融解水が流出していると推定されている。

グリーンランド氷床では、2012 年夏にはグリーンランド氷床表面全域で融解が観測された。氷床表面の融雪域や融解池の拡大、また、表面で繁殖する微生物は、いずれも表面のアルベドを低下させ、融解を促進する。半球的な気温上昇だけでなく、氷床周辺のシノプティックな気象による暖気流入や、水蒸気増加による大気放射加熱などの融解促進プロセスも報告されている。氷床表面での不純物による反射率低下には森林火災の影響も検出されている。周辺海域の水温上昇も氷床末端部の不安定性を増大させ、氷河後退を加速させると考えられている。一方で氷床からの融解水は海洋循環にも影響を与えると予測され、影響を検出すべく氷床および海洋の共同調査が試みられている。

## (2) 今後の研究

雪氷によるアルベド・フィードバックに関わる観測情報源として、衛星観測は重要な広域観測手法であり、アイス・アルベド・フィードバックの解析に重要な、降雪の確認、積雪期間、アルベド変化の観測の情報取得が期待できる。衛星による積雪被覆と融解域の把握には高精度の技術が開発されつつある。しかし、積雪水量の測定について地域・時期ごとの精度確認や改良が必要である。(テーマ A 参照)

積雪予測モデルについても、まず降水／降雪の予測精度の向上、次に融雪予測の不確定性を少なくすることが望まれる。降水観測ミッション衛星 GPM の観測域は北緯 65 度以南に限られるが、フェアバンクスやヤクーツクなどこの観測域にある地上での降雪識別及び強度観測と合わせて、モデルによる降雪予測に必要な基礎情報を得ることが期待される。また、北極海に至る大河川の上流域は GPM の観測域に含まれている。ただし、衛星による降雪量の推定誤差は大きいと、現地観測との較正は今後も重要である。

水循環に関わる凍土融解、河川流量(氾濫)のモニタリングには長期観測体制の整備が必要である。データ

蓄積に時間がかかるため、代表的な地域で早期に観測を開始することが望まれる。これら積雪や凍土の長期継続観測に関しては、北極圏の各国や国際観測ネットワーク活動に依存するが、代表的な観測域における拠点設置や集中観測などは国際的な提携活動として推進すべきである。

積雪表面アルベド変化をもたらす不純物、微生物、粒径の観測では、多点サンプルの分析や、積雪ピットやコアの分析による過去の変動研究が有効である。そのための精度の高い分析手法開発やモニター体制の充実が必要とされる。不純物分布の地域性・時間変動が予想されるが、輸送・沈着過程についてモデルを用いた研究が望まれる。

グリーンランド氷床では、融解水がムーラン等を通じて氷床底面に流れ、氷床の底面滑りの加速により動的不安定性が増大し、さらに氷床質量減少を加速する可能性がある。融解水の滞留や再凍結は周辺海域の海洋循環や結氷にも影響を与える。氷床の融解と流出を定量的に捉え、大気と氷床と海洋の関わりを調べていくことが今後望まれる。

## Q2b: 土壌・植生が大気におよぼす影響

### (1) 研究の現状と問題点

一般に、植物は気温、降水量、日射量、大気中の二酸化炭素濃度などの外的な環境条件の影響を受けてその分布が定まる。特に、北極域では気温による影響が最も支配的であり、比較的温暖な低緯度側には亜寒帯林が、比較的寒冷な高緯度側にはツンドラ植生が形成されている。過去の温暖な時代や寒冷な時代に、植生の分布が当時の気候を反映して現在と異なっていたことは地質学的証拠から知られている。現在進行している温暖化に伴って起きていると考えられる植生分布の変化を正しく把握することが重要な課題となっている。

最近の過去 20 年程度の時間スケールでは、北半球高緯度の植生の増加トレンドが衛星観測から検出されている(Tucker et al., 2001)。また、空間的なスケールは異なるが、50 年程度の過去の写真風景と現在の同じ場所を比較することで、北極域陸上での植生の増加は検出されており、温暖化に対応して陸域生態系が応答していると考えられる。植生の増加はアルベドの低下を促し、太陽光の吸収を増加させることで、北極域の温暖化を増幅するというメカニズムがモデルシミュレーション

によって示されている。また、北極域は積雪域でもあるので、植生によるアルベド低下は春先の融雪を促進し、さらなる非線形な温暖化増幅が起きうる(O'ishi and Abe-Ouchi, 2011)。また、北極域で直接温暖化を増幅するわけではないが、温暖化による凍土層の融解によってこれまでに凍土層に蓄積されていた有機炭素の大気中への放出が起きる可能性も指摘されている(テーマ1Q2a およびテーマ3 参照)。そのため、北極域全体での植生変化を精度よく把握することが重要である。

しかし、地上観測点は限られており、モデル化されたプロセスがどの程度現実の北極域全体の植生変化を表現しているかは検証が困難であるため、今後どの程度の植生変化と温暖化増幅が北極域全体で起こるかは不確実性がある。また、永久凍土融解による植生変化と有機炭素放出も同様に推定は困難である。

## (2) 今後の研究

北極域の植生変化とその気候への影響に関連する個別のプロセスについては、定性的には明らかになりつ

つある。今後 20 年程度の時間スケールでは、これまでに観測された植生の変化傾向がより顕著になることが予想される。既存のモニタリングを継続し今後期待される 20 年分の知見を加味して、さらに長期的な将来における植生変化の推定と極域増幅への寄与の定量化を実現すべく、地上観測、衛星観測、モデル研究の 3 者がより緊密に協力する体制が必要である。協力の必要性は十数年以上前から言われており、研究者の地道な努力によって前進してきている。だが、この問題については画期的な改善をもたらす名案が出ることは期待できず、今後も努力を続けるのが最も近道と考えられる。衛星データを用いたモデル・データ同化や、広域の観測点整備とデータ統合によって、地上観測、衛星観測、モデル 3 者の相互比較と検証が可能となれば、森林帯の北上やツンドラの融解と湿地化を再現するモデルによる将来予測や、数百年先の森林分布の推定等の高精度化に繋がる。このような協力体制の試みは既に始まっており、今後の発展が期待される。

## 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？

地球温暖化が進行して北極域も昇温するのは当然として、他の地域に比べ温度上昇が高い理由は、アイス・アルベド・フィードバックだと言われてきた。その他、図 4 を参照しながら、海洋に関係するプロセスの効果を解き明かし、できるだけ定量化する方向性を提示する。

### a. 研究の現状

#### (1) 海氷アルベドと表層海洋の役割を定量的に求める (テーマ 2 参照)

旧来より言われてきたことは、海氷のアルベドが海水より高く、海氷が減少することで太陽放射が海洋により多く吸収される現象である(Perovich et al., 2007)。しかし、このフィードバックは直接には夏季に限られ、蓄積された熱の一部が秋季に鉛直混合で下方に輸送され、開水部から大気へ放出される。海洋の蓄積熱で越年する割合の把握が重要である。また、海氷の体積が減ることで負の熱蓄積が前年より減少しているか、翌夏の開水面が増えるかも鍵となる。大気への蓄積も定量化する必要はあるが、観測の難しい海洋中層と海氷厚の変化を

把握することが必須となる。

広くなった開氷部から出た水蒸気によって秋季の降水量が増えるなら、積雪はアルベドを高めるが、その一方で海氷を通る熱伝導を減らすので、降雪および積雪の融解と再結氷も考慮して、熱的效果を定量化する必要がある。夏季のメルトポンドがアルベドと熱伝導に及ぼす効果は、水深が重要になるが、衛星データによる見積りに依存することになる。

海氷が減少すると、融解・結氷の季節変動も大きくなる。SHEBA<sup>15</sup>で示されたように、融解による低塩分水が表層に留まる海域が多いものの、海氷域の縁辺や、陸棚などの地形による湧昇が起きる一部海域では、鉛直混合が増大することで、夏季の熱を下方に運ぶ効果も考慮する必要がある。

#### (2) 大気との相互作用が持つ役割 (テーマ 2 参照)

海氷減少は、秋季になると大気の総観規模擾乱と雲形成を促進することで、海洋から大気への熱輸送を強めるが、同時に雲から下方への長波放射のため、大気

<sup>15</sup> SHEBA: Surface Heat Budget of the Arctic Ocean. 1990 年代に主として米国の資金で運営された北極海(大気も含めて)の北極海表面熱収支観測プロジェクト。カナダの砕氷船に伴われた氷上観測拠点を 1 年間続けたことでも知られている。

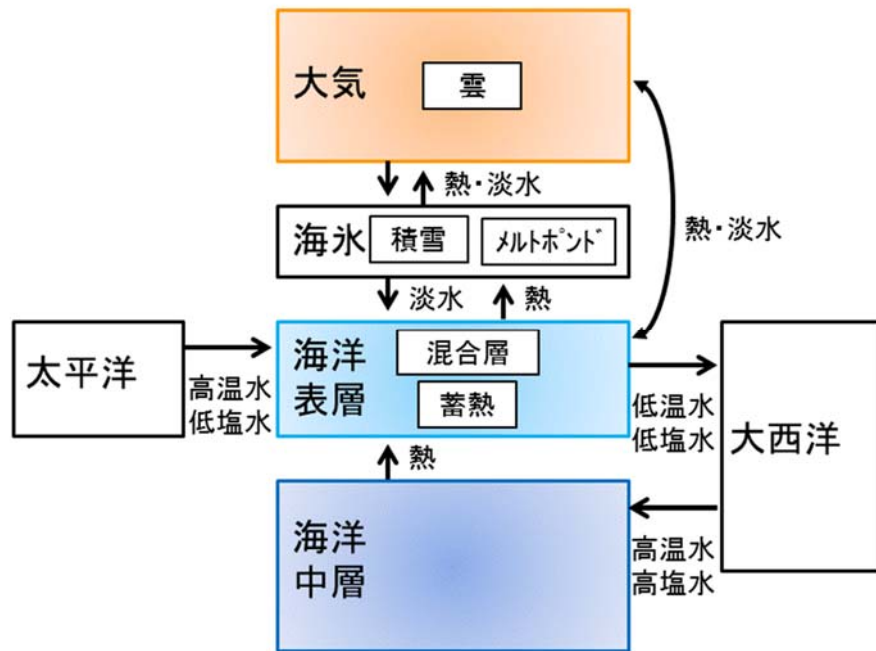


図4 海洋を軸とする地球温暖化の北極域増幅メカニズム

が海氷海洋に熱を供給することになる。この相互作用は、正のフィードバックであるが、実際に進行していることを確認すると共に、定量的な推定を試みる必要があり、その成果に基づいて大気と海氷海洋との結合係が生み出す北極域増幅効果として見積もりを行うことが重要である。

### (3)隣接する海域からの流入が持つ役割（テーマ 5 参照）

太平洋からは、ベーリング海峡を通じて夏季に高温海水が流入し、海氷を減少させる大きな熱的役割を果たしている。その結果として、アイス・アルベド・フィードバックにつながる。また、冬季混合層以深にも貯熱する分は越年し、春季夏季に海氷を融解する効果を持つ。もし太平洋水の流入が温暖化によって増えるならば、このプロセスは北極域増幅に加えられる。特に、流入は大気変動のパターン(双極モード)に影響されるので、このパターンが温暖化によって増幅するか否かが、北極域増幅を見積もる際には鍵となる。

### (4)中層・深層を含むプロセスの解明と役割の把握（テーマ 5 参照）

大西洋から流入する高温高塩分の海水は、北極海中層を巡回し一部が大西洋に戻る。バレンツ海で結氷の影響を十分に受けると熱的效果は小さくなり、また、あ

まり結氷しないと北極海表面層と混合しやすくなる。結氷量が減ったため塩分が低下し、鉛直混合が局所的に活発化した場合、大西洋水から表面層への熱輸送も増大する。このプロセスが顕著になると、大西洋水の熱輸送の一部を表面層への熱の水平的輸送として考慮すべき系に変貌する可能性がある。

現在までは、表面層から深層に及ぶ混合や海水移動は非常に弱いですが、海氷が減少し水平方向の不均一性が増大すると、部分的に鉛直混合や海水移動が起きる可能性がある。この場合、深層に貯熱される効果は100年スケールで継続する。

### b. 今後の研究

海氷が減少していく表面層については、海氷厚の経年変動、および大気、中層との熱交換のモニタリングが必須である。中層については、太平洋水、大西洋水の移動と拡散、さらには、より深い層までおよぶ混合の長期にわたるモニタリングが重要である。特に、中深層流速パターンの変化を見るには、化学トレーサーの利用も考える。海面の状態として重要なメルトポンド、そして雲高の変化を高精度で押さえるには、衛星観測が有効である。

また、データ同化とエネルギー解析を利用して、北極海表面層と中深層との相互作用に関する重要プロセスを特定することを試みる。

#### Q4: 雲とエアロゾルがもつ役割を定量化できるか？

##### a. 研究の重要性と現状

北極気候における雲とエアロゾルの役割は、きわめて重要である。これまでの研究は、観測が不十分で、個々のプロセス研究が中心の定性的な理解であったため、複雑に相互作用する研究課題の理解は十分に進んでいない。中低緯度との関係、両極間の相違や極域独自の問題など、様々な分野の相互作用について、考えていく必要がある。雲は、放射効果を通じて気候形成に役割を果たす(Curry et al., 1996)。雲は、太陽放射を遮ることで地表面を冷却する方向に働き、また、大気からの長波放射を増加させることで地表面を加熱する方向に働く。両者は相殺する方向ではあるが、極域では太陽の出ない季節が長いこと、雪氷面上であることから、前者より、後者がより支配的である。雲は、下向き長波放射によって温暖化増幅をもたらすフィードバック効果を持つ。エアロゾルの放射を通じた直接効果としては、北極域では散乱性のエアロゾルの冷却効果は雪氷面上ではあまり大きく寄与しないが、ブラックカーボン(黒色炭素エアロゾル)等の吸収性のエアロゾルの温める効果は増幅されて現れる。エアロゾルは、雲核、雲形成、氷晶核としての効果など雲を通じた間接効果による気候影響をはじめ、雪氷面アルベドの変化に寄与するなど、様々な影響をもち、それらの定量的な理解が必要である。

北極域では、雲の存在の不確実性ゆえに、その影響は計り知れない。特に雲の鉛直構造についての精度ある観測がなされていない。北極域では、海氷との関わりでも雲は重要である。雲の存在が、海氷の成長・融解に影響するし、また、海氷の有無が雲の状態や存在に影響するという、雲と海氷の相互作用が考えられる。雲のフィードバックは極域気候モデルにおいて、最も不確実な要素の一つである。雲の核となるエアロゾルは、自然・人為起源による生成・輸送過程、光吸収過程、雲凝結過程など極域変動の異なったスケール間での統合的理解が必要である。例えば、ブラックカーボンに関する分布形態、輸送過程、湿性沈着過程の評価、気候変動への寄与の評価は、大気のみならず、海洋や雪氷との相互作用においても重要である。従って、雲とエアロゾ

ルの働きに関する観測的研究が強く求められている。雲の放射効果を規定するものとして、雲の相、すなわち、どのような粒子からなっているか、氷粒子や水滴の量、サイズ分布、鉛直分布、エアロゾルの生成、成長、除去過程、吸湿特性等を明らかにしなければならない。北極域では、氷粒子と水滴が併存する混合相雲が多いと言われている。雲相の問題とともに、雲そのものの存在、雲量を明らかにすることが求められている。これまでにわかっていることとしては、衛星の観測から、春、夏の雲量は増加してきていることが示されている。

##### b. 今後の研究

地上観測では、従来は目視で雲を観測してきたが、これをリモートセンシング機器による観測に置き換え、雲の巨視的分布と微物理特性の把握により、長期的に定量化した測定を行うことが必要である。スバル諸島のニーオルスンに設置した雲レーダーは、北極での雲観測の重要な手段で、国際的な活用も期待されている。また、衛星からの観測においても、従来の可視、赤外のパッシブな観測を極域雪氷圏に用いるのは困難が多かった。新しいライダーや雲レーダーによるアクティブな観測の導入、そして航空機や係留気球などによる直接観測での検証、アクティブとパッシブを併用した観測手法を確立する必要がある。その一つとして、わが国の宇宙航空研究開発機構 JAXA が、欧州宇宙機関 ESA と協力して 2016 年に打ち上げ予定の EarthCARE 衛星<sup>16</sup>の利用が期待される。これらの結果を、気候モデルにおける雲の再現の高精度化に反映させていくことが重要である。

近年の海氷減少に伴う雲の変化が注目される。衛星観測からは、海氷域面積が減少したことに伴い、実際に雲量が増加していることが示され(Liu et al., 2012)、開水面からの蒸発によって雲が増加し、夏季以外では、雲からの下向き長波放射によってさらに海氷が減るといふ正のフィードバックが働くとも考えられる。そのため、雲-放射と海氷(海面)の相互作用の理解が、北極域の気候変動の予測に重要である。これらのエアロゾル・雲の変化に伴う気候変化を統合的に理解するには、気候モ

<sup>16</sup> EarthCARE 衛星: Earth Cloud, Aerosol and Radiation Experiment。研究基盤の整備(衛星)参照。雲、エアロゾルの鉛直分布およびその放射影響を測定するため、雲レーダー、ライダー、放射計、画像センサを搭載した衛星。



デルが不可欠である。エアロゾルと水雲の相互作用を陽に<sup>17</sup>表現した気候モデルの研究はこれまでに進展があったが、極域は氷雲の比率が非常に高く、現状の世界の主要な気候モデルすべてにおいて、エアロゾルと氷晶核の相互作用の表現は未だに不十分である。今後新たに得られる観測データを参照しながら、より適切なエアロゾル・氷晶相互作用を気候モデルで表現でき

るように努力すべきである。その前提として、氷晶核となるポテンシャルを持っているダストやブラックカーボンの極域での分布を、定量的に気候モデルで再現する必要がある。この観点から、極域でのグリッドサイズが低中緯度と大きく異なってしまう Gaussian 格子のモデルではなく、全球一様格子のモデルを用いることも有効な計画である(テーマ B 参照)。

## Q5: 北極温暖化増幅はなぜ起きているのか？ 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？

### a. 研究の重要性

北極域の気候変動を理解し予測するには、人間活動による二酸化炭素の排出やエアロゾルの放出などを通じた放射強制力がどのように変化し、気候システムがそれに応答することによって温暖化を増幅したり抑制したりするフィードバック効果がどのように働き変化していくかが鍵となる。Q1~Q4 にあるように、北極温暖化増幅のメカニズムについて、さまざまなプロセスの寄与が指摘されている。プロセス間の相互作用を理解し、個々の寄与を系統的かつ定量的に調べることで全体の理解にとって重要である。

### b. 研究の現状

これまでの研究では、考慮あるいは十分定量化されていない放射強制力やフィードバック・プロセスがある。たとえば、不確実性の大きい放射強制力の代表例として光吸収性エアロゾルが挙げられる。ブラックカーボン等光吸収性エアロゾルが雪氷面に沈着するとアルベド低下が起これ、雪氷面温度の上昇や雪氷融解が加速される正のフィードバック効果が働く。アルベド低下量は第一に光吸収性エアロゾル濃度に依存するが、同じエアロゾル濃度でも、積雪粒径が大きいほどアルベド低下量は大きくなる。グリーンランドの氷床コア解析から、産業革命以降のブラックカーボン濃度が還元されていて、1900 年代前半にピークが記録され、その後、1800 年代のレベルまで低下したことが知られている。温暖化に伴う積雪粒径の増加や消耗域の拡大は、光吸収性エアロゾルや雪氷微生物によるアルベド低下をもたらし、正のフィードバックを加速させると考えられる。

植生分布の変化や成層圏以高の大気変動の影響に

ついても、特に将来予測を行う気候モデルにおいて十分考慮されていないのが現状である(Q1~Q2 参照)。北極域の雲フィードバックもまた、非常に不確実性が大きい(Q4 参照)。当然、これらの相互作用についてもよくわかっていない。

気候モデル実験においては、個々の物理プロセスの北極温暖化増幅への寄与が系統的に調べられてきた。マルチモデルについてはエネルギー収支に基づく比較的簡易な解析が、少数のモデルについては詳細な解析が行われてきた(Yoshimori et al., 2014)。その結果、北極域のフィードバック・プロセスは強い季節性を持ち、夏の海氷減少によるアルベド・フィードバックを通じて海洋表層に吸収された太陽放射エネルギーが秋から冬にかけて放出され、また、下層雲の温室効果により北極域の温暖化が増幅されることが示されている。したがって、海洋の熱吸収プロセス、大気海洋の熱交換を決める対流圏下層の逆転層や安定度、下層雲の応答特性などが重要であることが示唆されている。しかし、いずれの研究も理想的なシナリオ下でのモデル実験結果であり、観測との直接的な比較がなされていない。

温暖化予測の不確かさを低減するための一つの方法として、マルチモデルにおいて現在気候の再現性の良し悪しと、将来予測のばらつきの間に関係性を見つけ、観測データにより将来予測幅を制約する方法がある。よく知られたものに、現在の季節変化を利用して、観測された春のアルベド・フィードバックの大きさから、将来の北極域陸上のアルベド・フィードバックの大きさを推定した例がある(Hall and Qu, 2006)。同様に、気候モデルの信頼性や将来予測を評価するには、遠い過去に実際に起きた北極温暖化増幅を利用する方法も考え

<sup>17</sup> 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。

られるが、これについてはテーマ 6 の Q1 で言及する。

### c. 今後の研究

すでに、光吸収性エアロゾル濃度や積雪粒径の関数として変化する「積雪アルベド物理的モデル」を組み込んだ地球システムモデルによる気候予測や感度実験が始まっている。例えば、光吸収性エアロゾルの輸送・沈着過程と積雪アルベドの物理的モデルを組み込んだ地球システムモデルによる春季亜寒帯における数値実験では、大気中における炭素質エアロゾルによる地表面日射量の低下効果、暗化(dimming)は、それらエアロゾル沈着による積雪アルベド低下効果、暗色化(darkening)よりも小さいと見積もられている。このようなモデル開発を今後も進める必要がある。さらに、現在ではまだ考慮されていない雪氷微生物によるアルベド低下効果も現地観測に基づきモデル化し、それによるフィードバックを見積もる必要がある。

数値モデルにおける極域の海氷や雲の季節変化など、基礎的な再現性向上の課題が残されている。地表面でのエネルギー収支と雲の効果の定量化が課題であり、観測とモデルの連携による評価が必須である。また、Q3 で触れたように、海氷減少と大気の総観規模擾乱、雲形成プロセスの理解とそれによる寄与の定量化も重要である。さらに、海氷減少のほか低緯度からの熱・水の輸送量変化の効果も含め、雲変化の要因を検証することが重要である。

現実には起きている北極温暖化増幅を理解するには、個々のプロセスの寄与を気候モデル実験だけでなく、データ同化された再解析データにおいて特定することが有効と考えられる。また、データ同化された結合モデルを高度化し、北極温暖化増幅研究への適用が長期の発展として重要である。さらに、日々の現象と定量化された相対的寄与(たとえば、総観規模擾乱による雲形成と雲の放射効果が北極温暖化増幅で果たす役割)を結び付けて、一連の物理プロセスをシステム応答の中で理解することが重要である。その基礎となる個々の要素を理解するには、当然、長期に継続した観測データの果たす役割が非常に大きい。

植生分布の変化やそれともなう鉱物性ダスト放出の変化、その他の光吸収エアロゾルの効果など今後大きく変化していくであろう要素は少なくない。こうしたこれまであまり考慮されてこなかった要素やプロセスを導入

し、その応答特性の不確かさを観測データを利用して低減するには、地球システムモデルの開発・精緻化・利用が不可欠である。

地球システムモデルについてはテーマ B で主に言及するが、将来予測ではこうしたモデルが中心的役割を果たすであろう。テーマ 6 で言及するように、過去に起きた北極温暖化増幅を利用して気候システム応答を制約するには、考えられる全ての要素が入った地球システムモデルが有効である。また、Q1 で述べたように成層圏以高の効果を検討するには、成層圏における十分な解像度やモデル上端の高度化も検討していく必要がある。上下層大気から雲放射や海氷から海洋成層まで、大気海洋を統合したエネルギー収支プロセスを総合的に検証し、現在の恒常的なバイアスを抑えた(データ同化に頼らない)自立した地球システムモデルの確立が究極的には不可欠である。