# 環オホーツク地域における気候変動・環境変動のモデリングと予測可能性の研究

研究代表者 三寺史夫 (北海道大学・低温科学研究所)

研究分担者:

西岡純・中村知裕 (北海道大学・低温科学研究所)

山口一・木村詞明・藤崎歩 (東京大学・新領域創成科学研究科)

中村尚 (東京大学・理学研究科)

浮田甚朗・本田明治 (新潟大学・自然環境科学科)

立花義裕 (三重大学・生物資源学研究科)

東屋知範・小埜恒夫 (水産総合研究センター・北海道区水産研究所)

津旨大輔・三角和弘・芳村毅・坪野考樹 (電力中央研究所)

小守信正・吉田聡・田口文明・木田新一郎 (JAMSTEC・地球シミュレータセンター)

高谷幸太郎・笹井義一・小木雅世 (JAMSTEC・地球環境変動領域)

### 1. 研究目的

近年、地球温暖化にともないシベリア高気圧の弱化が顕著になってきており、オホーツク海においてはそれが海氷面積の減少として鋭敏に現れつつある。しかしながら、温暖化のような長期気候変動がもたらす環オホーツク地域への影響の定量的な評価・予測を実現するには、未解明の問題が多く残っている。このような特徴を持つ環オホーツク地域の気候変動・環境変動予測を実現するために以下の研究課題に取り組んだ。

- 環オホーツク地域の領域気候モデル構築に向けた大気ー海洋・海氷ー陸域結合プロセス
- 気候変動、環境変動に関わる、物理過程、化学過程、生物過程のパラメータリゼーション
- 環オホーツク地域における海洋・海氷の短期変動現象(数日から季節スケール)および長期変動現象(数年から数十年スケール)のモデリングと予測可能性

これらの研究課題を、現在環オホーツク観測研究センターにおいて作成されつつある環オホーツク圏領域気候モデルを中心に、学際的な研究者間の共同研究を誘発することにより推進した。

### 2. 環オホーツク圏領域気候モデル

領域気候モデルの大気・陸面コンポーネントには国際太平洋研究センター(IPRC)の領域気候モデルを、海洋・海氷コンポーネントには東京大学気候システム研究センター(CCSR)で開発されたiced COCO3.4を用いた。 IPRC領域気候モデルは、雲の再現で優れた結果を出しているモデルで、雲微物理、放射、積雲パラメタリゼーション、乱流クロージャーなどが組み込まれている。海洋モデルは、トレーサの移流には保存性の良いスキーム (UTOPIAやQUICKEST)が用いられている。海氷は、力学的には弾・粘塑性体で、熱力学的には熱の蓄積を無視するモデルである。また積雪とその熱・水フラックスへの効果も考慮されている。

今年度は領域気候モデルを用いて下層雲のオホーツク海高気圧形成過程に与える影響について調べた。まずモデルの妥当性を見るために JRA25のデータとモデルの結果を2003年7月平均値で比較したところ、モデルでも JRA25と同様オホーツク海高気圧が形成されており、よい再現ができていた。モデルにおける下

層雲は7月1日から16日にかけてオホーツク海上で広く発生しており、その期間はほとんど下層雲で覆われていた。さらにオホーツク海高気圧もほぼ定在的に存在しており、下層雲とオホーツク海高気圧が同時に現れていた。雲に起因する熱的効果(長波放射、短波放射、凝結加熱)を見たところ、下層雲が発生している場所で長波放射による強い冷却効果を示していた。これは下層雲頂における放射冷却であり、この効果によりオホーツク海上の薄い寒気層が形成される。

この放射冷却がオホーツク海高気圧の形成に影響を与えうるかどうかを調べるために、モデル内で計算される雲量を標準ランの10分の1に人為的に減らした比較実験 Less-Cld ランを行った。放射過程における下層雲量を減らしたことによって下層雲にともなう放射冷却もほぼ消失し、Less-Cld ランの大気下層気温の方が約4度 Cほど上昇するという結果を得た。オホーツク海高気圧がほぼ定在していた7月1日-16日までの期間で平均した地表面気圧(図1)を比較したところ、Less-Cld ランの地表面気圧におよそ3hPa ほどの低下が見られた。これは下層雲の放射冷却を抑えることで大気下層が暖かくなり、地表面気圧が低くなったと考えられる。オホーツク海高気圧とともに発生する下層雲は従属的に発生するだけでなく、オホーツク海高気圧を更に強める働きがあることが示された。

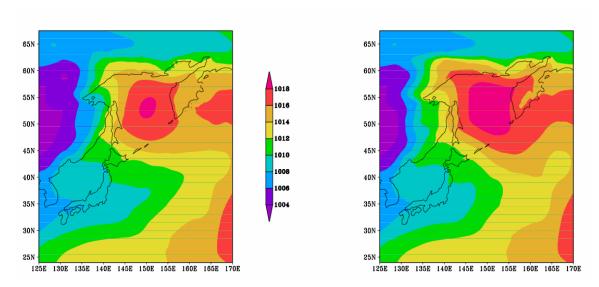


図1. 下層雲のオホーツク海高気圧に対する影響に関する数値実験。左: 人為的に雲量を1/10に減らした場合 (Less-Cld 実験)。右:標準実験。

#### 3. 海洋-海氷-物質循環結合実験

前節のように領域気候モデル実験を進めるとともに、海洋コンポーネント単独でオホーツク海から西部北太平洋亜寒帯循環域における鉄循環モデル構築を目指した研究も行った。鉄は、海水の流れに乗って運ばれるとともに、生物化学過程によっても変化し除去されるため、その循環をモデル化するには、海水の流れを表現する海洋大循環モデルと生物化学過程を表現する鉄モデルを結合させる必要がある。今年度は、鉄循環のモデリングの前段階として、物質輸送モデルの性能検証のためにCFCシミュレーションを行った。

モデル領域はオホーツク海と西部北太平洋亜寒帯域で、解像度は水平格子が東西、南北ともに 0.5°、 鉛直は 51 レベルである。本モデルには潮汐効果が入っていないため、千島列島域の潮汐混合効果は鉛直 拡散係数を大きくすることによってその効果を組み込んだ。その結果、モデルはオホーツク海、北太平 洋域における CFC の循環・分布を正しく表現できることを確認した。

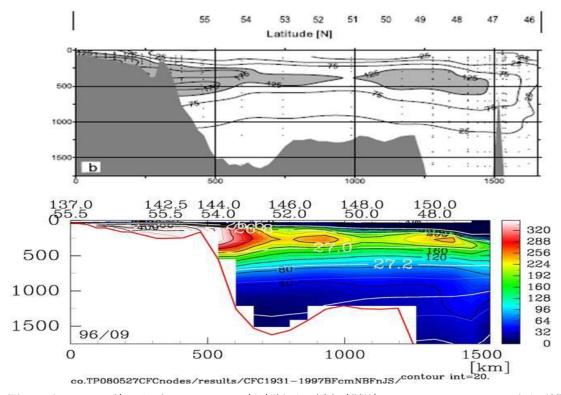


図 2. オホーツク海における  $\Delta$  pCFC の鉛直断面。(上)観測(Yamamoto et al., 2004 より引用)、(下)シミュレーション。 左手がオホーツク海北西陸棚で、右手が太平洋である。  $\Delta$  pCFC に関しては、本文参照のこと。

図 2 は、オホーツク海の南北観測線の各点の pCFC12 から太平洋のある一点の pCFC12 を引いた、 $\Delta$  pCFC12 の断面図である。 pCFC は

#### pCFC=「CFC 濃度] /「溶解度]

で定義される量で、新しいほど値が大きく、その海水が大気から離れてどのくらい経つかの目安になる。 従って、2点の pCFC の差( $\Delta$ pCFC)を計算すれば、どちらの水が新しい(より最近大気に接した)かを分析できる。観測、モデルとも数百 m の中層に極大を持っており、オホーツクの中層が太平洋の中層に比べて新しく、モデルにおいて北西陸棚域における海氷生成に伴う海水の潜り込みが正しく表現されていることがわかる。

図3は中層における  $\Delta$  pCFC12 の分布である。基準に用いた太平洋の点は、カムチャツカ半島先端近くの海域で、×で示した。オホーツク海内と、その下流にかけて値が大きくなっており、新しい海水であることを表す。オホーツク海の北西陸棚域で特に値が大きく、それがサハリンに沿って南下している様子から北西陸棚域で海水が大気に接している様子が見て取れる。

従来のシミュレーションでは北太平洋の CFC 分布が浅すぎ、物質循環が正しく表現されないことが問題となっていた。オホーツク海 3 次元循環構造を正しく再現することにより、この問題の解決にも寄与することが明らかとなった。現在、このモデルを基盤に鉄化学・生態系モデルを結合させているところである。

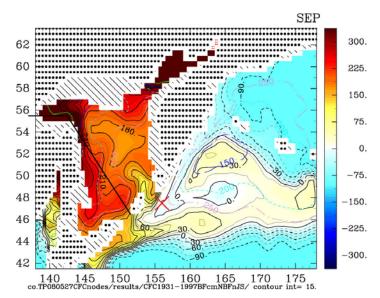


図3. 中層における  $\Delta$  pCFC。北西陸棚からブッソルに伸びる線分は図3で Yamamoto et al. (2004) の観測線断面との比較に用いたライン。カムチャツカ半島の先端付近の×が  $\Delta$  pCFC 計算に用いた太平洋の基準点。

## 4. 全球海洋物質循環・生態系モデルによる鉄循環の検討

さらに、鉄循環とその生態系への影響を、電力中央研究所が進めている全球モデルを用いて検討してきた。今年度は水平解像度約 $1^\circ$ の海洋大循環モデルに、海洋生態系モデル (BEC モデル) を結合して計算を行い、海洋の $CO_2$ 吸収に関わる再現性を確認した。BEC モデルは年平均の海洋の $CO_2$  吸収量を従来のモデルと同程度に再現した。さらに、BEC モデルは大増殖を起こすタイプのプランクトンを陽に扱うため、表層の $CO_2$ 分圧の季節変化の再現性がより向上した。

BEC モデルにより再現された北太平洋中層の溶存鉄濃度は、西部で東部と比べ濃度が高く、東経 165°の断面上に二つの濃度極大をもち、観測から知られる溶存鉄濃度分布の特徴と一致する。風成塵と堆積物、それぞれからの鉄供給のみを与えた実験から、風成塵に加え堆積物起源の鉄を考慮することで、前述の特徴が良く再現され、堆積物起源の鉄が北太平洋北西部へ輸送されているという観測に基づく仮説が支持された(図 4)。

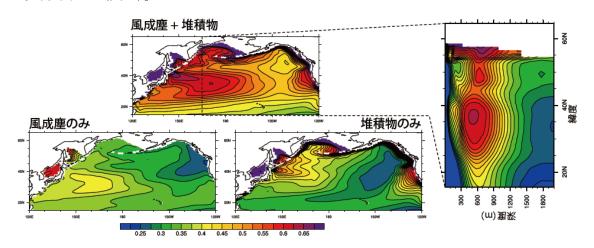


図4. 海洋表層の鉄濃度分布(nmol/L)、上図は風成塵と堆積物起源(右図は鉛直断面図)、下図(左)は風成塵のみ、下図(右)は堆積物のみ。

北太平洋北西部の一次生産量は、風成塵と堆積物、それぞれからの鉄供給のみを与えた実験で同程度であり、この海域の一次生産に対する堆積物起源の鉄の重要性が示された。さらに、堆積物起源の鉄は北大西洋、赤道太平洋、南大洋、インド洋でも一次生産への影響が見られ、全球の CO2 吸収量の予測に対する重要性が示唆された。

## 5. 高解像海氷-海洋結合実験

前年度までに開発した海氷・海洋結合モデルの高解像度計算(東京大学新領域 藤崎・山口)により、オホーツク海における海氷海洋熱交換について調査した。比較的暖かい北太平洋海水の流入により海氷海洋熱フラックスFbが増大し、海氷成長期である $2\cdot3$ 月でも局所的に1ヶ月0.3m以上の融解が起こっていた(図5a)。冬季での海氷融解量は、総海氷生産量の34%にもなっている。そして、Fbは融解を通じて氷縁位置を決定していた。海氷底面と海洋表層の温度差dTは氷縁に近づくにつれ増大するため、主にdTが大きなFbに寄与していると考えられる。最も融解が活発だった北部陸棚端や南部氷縁域では海氷に覆われていても100W/ $m^2$ 以上の熱が海洋から奪われていた(図5b)。一般に海氷に覆われると海洋表層は大気冷却から断熱されるが、100W/ $m^2$ という値は開放海面における大気冷却に匹敵するものである。Fbはその計測の難しさから一定とするような単純なモデルが採用されている例も多い。本モデル結果はそのような単純なモデルを用いると冬季の海氷融解に伴う熱交換を正しく考慮できなくなる問題を示している。融解が顕著な場所では海洋表層からの熱吸収だけでなく海氷融解に伴う淡水供給が連続的に起こっている。これらは海洋の成層状態にも影響し、中層水の形成、塩分輸送にも寄与する。冬季の海氷融解の影響はこれまで殆ど注目されてこなかった。本研究により示された新たな課題といえる。

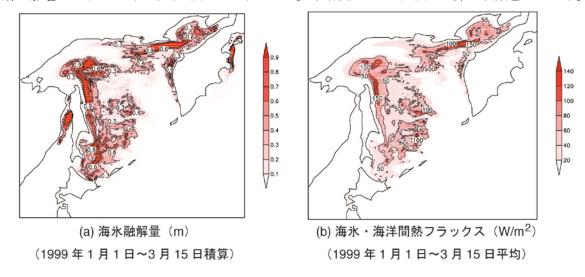


図5. 高解像度海洋海氷結合モデルによる海氷融解量、および海洋海氷間の熱交換。

次に、海氷・海洋・生態系の結合計算を行った。生態系が海氷・海洋の変動に与える影響は少ないと考えられるため、海氷・海洋結合計算により得られる物理場の時系列計算結果を用いて、海氷・海洋生態系計算を行った。この計算はまだ試計算であるため、海氷モデルとしては計算の速いDMDFモデル、海洋モデルとしては計算コードが単純で理解し易いMECモデルで計算した。駆動力としてはNCEP/NCARの月別気候値(大気再解析データ)を用いた。また、水平方向解像度は25kmの中解像度モデルになっている。海氷・海洋生態系モデルは、オホーツク海北海道沿岸用に考案された西らのモデル

を殆どそのまま用いて、オホーツク海全域の計算を行った。図6に、3月のアイスアルジーと海洋表層植物プランクトン量の分布を示す。アイスアルジー、表層植物プランクトンともに氷縁近くで増加しており、いわゆるアイス・エッジ・ブルームが再現されている。しかし、アイスアルジーの量は表層植物プランクトンの量に比べて桁違いに小さく、少なくともこの計算の限りでは、アイス・エッジ・ブルームは海氷融解による海洋構造の変化に起因することが示された。しかしこの計算はまだ試計算であり、更なる検討を要する。本研究の段階では、オホーツク海の本格的な海氷・海洋生態系計算に世界で始めて成功したことが、特筆すべき成果である。

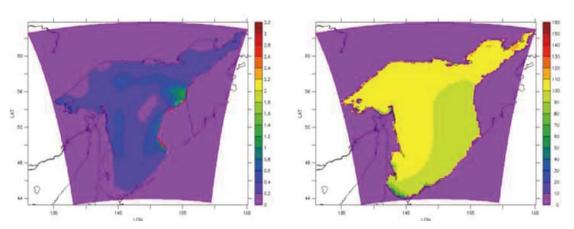


図 6. オホーツク海生態系モデルの計算結果 (3月)。左:アイスアルジー、右:海洋表層 植物プランクトン  $[mgC/m^3]$ 

### 6. 冬季親潮前線付近のサブメソスケール過程と表層への栄養塩供給

親潮域の高い基礎生産を支えるには亜表層で豊富な栄養塩や鉄が表層へ輸送される過程、とりわけ冬季に発達した混合層への取り込みが重要であると考えられている。こうした栄養物質輸送メカニズムの一つとして、亜熱帯水の亜寒帯水上への流入と冬季の冷却とによる混合層の発達が働いていることが、2008年冬季の観測と簡単な浮力収支モデルから示された。このメカニズムは親潮域で頻繁に生じていると考えられる一方、過去にはフロント付近で亜表層から栄養物質が湧昇しているという、鉛直混合だけでは説明しにくく、むしろ混合層内の傾圧不安定のような3次元的過程も働いている可能性を示唆している観測もある。

そこで、前線付近における栄養物質の鉛直輸送過程のより良い理解とモデルのさらなる高精度化を目指し、北海道区水産研究所との共同研究で今回は前線付近の集中観測を冬季親潮域において行った。観測は水産総合研究センター調査船「北光丸」HK0901 航海において実施した。2009年1月26-29日に暖水塊周辺で行われたCTDによる集中観測(図7南側の集中観測)の内、ここでは暖水塊南側のフロントにおける観測結果に注目する。

観測海域の北東側には暖水塊が存在し、その縁において混合層内でポテンシャル密度のフロントが蛇行している様子が捉えられた(図8a)。フロントに沿うような断面では(図8a中の破線上)、蛇行に伴う等密度面の昇降が見られ(図8b)、フロントを横切る断面では(図8a中の実線上)、等密度面の傾きが見られた。これらの特徴は過去の数値実験に見られる混合層傾圧不安定の特徴とよく似ている。混合層傾圧不安定が最大成長率を持つ波長を見積もるとおよそ 15km 程度となり、観測された蛇行または昇

降の波長と同程度である。混合層傾圧不安定の成長率を見積もると、フロントに沿って時間スケール(成 長率の逆数)が半日から2日程度となり、混合層傾圧不安定の可能性が高い。

この蛇行の南西側には数珠玉上に低温・低塩・高栄養塩の水塊が存在し、等密度面の上昇に伴い栄養 塩が湧昇している様子も捉えられた。さらに、混合層傾圧不安定に伴い亜熱帯水と亜寒帯水が上下に重 なるので、その後に冷却された際に冬季混合層が発達し、亜表層の海水を表層に取り込みやすくなる。

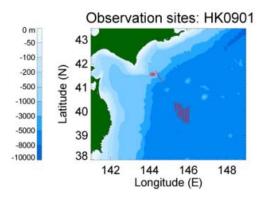


図7. 測点の位置。ここは40°N、147°E付近の結果を示す。

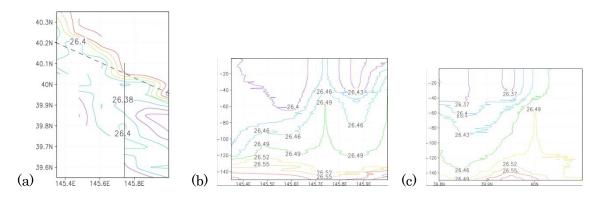


図8. ポテンシャル密度 $(\sigma_{\theta})$ 。(a) 50m 深、(b) (a)中の破線上における鉛直断面、(c) (a)中の実線上における鉛直断面

### 7. ワークショップおよび今後の取り組み

特別共同研究への参加者間での情報交換や新たな共同研究を触発するためのワークショップを 2010 年3月4日、5日の2日間にわたり開催した。50名以上の参加があり、熱のこもった議論が続いた。

1日目は主に海洋海氷モデルや物質循環・生態系、2日目は気候変動に注目した話題提供が行われた。オホーツク海はユーラシア大陸と北太平洋に挟まれているため、海陸間の熱的コントラストが冬季・夏季とも極端に大きい。このため、冬季の大規模な季節海氷形成、および夏季のオホーツク海高気圧と下層雲の発生、という特徴的な季節性がある。さらに、南北にも北極と熱帯・亜熱帯からの影響が交錯する地域でもある。このため、オホーツク海は冷たい海にもかかわらず大気循環に対して能動的に作用することが可能であるとともに、温暖化のような地球規模の強制にも大きく応答する地域である。このような変動が海洋循環を通して物質循環や海洋生態系にも影響する。本共同研究により、学際的なボトムアップ型の研究コミュニティが形成されたことは重要な成果であり、今後も研究集会等を通して環オホーツク研究に取り組んでいくことで一致した。