

10-NA17

環オホーツク圏を中心とした大気・海洋シミュレーション

中村知裕 (北海道大学)

概要

環オホーツク圏では、周辺海域の基礎生産ひいては炭素循環や水産資源にも影響するオホーツク海起源の海洋熱塩循環や物質循環、北日本の気候に影響を与える夏季の下層雲やオホーツク海高気圧のように、科学的に興味深くかつ社会的に重要な気候・環境の形成さらにはそれらの長期変動が生じている。本研究では、こうした現象のより良い理解と数値シミュレーションによる再現性向上に向け、環オホーツク圏の以下の現象—(a) オホーツク海を起源とする栄養物質循環および熱塩循環の経年変動、(b) 潮汐による鉛直混合過程、(c) オホーツク海周辺の下層雲—to注目して数値シミュレーション研究を行うと同時に、使用する数値モデルの高速化チューニングを行った。

1. 研究の目的と意義

環オホーツク圏（オホーツク海とその周辺地域）は、季節変動や気候変動に顕著な特徴を持ち、日本とりわけ北日本の気候に大きな影響を与えている。例えば夏季には、オホーツク海周辺では下層雲（高度の低い雲）や霧が頻繁に形成される[e.g., Wang, 1985; Tachibana et al., 2008; Tokinaga and Xie, 2009]。下層雲は、日射を遮り赤外線を放射することで大気－海洋間あるいは大気－陸面間の熱・水フラックスに大きく影響する。その結果、下層雲の下では気温が低下し、これが顕著になると農作物の不作の原因となる。一方冬季には、シベリア東部は北半球の寒極（気温の最も低い地域）となり、そこから吹き出す寒気によりオホーツク海では大規模な海水生成が起こる[e.g., Ohshima et al., 2003]。

オホーツク海における海水生成は北海道沿岸の気候や産業に影響するだけでなく、北太平洋ほぼ全域の海洋中層循環に影響を与えている。海水生成の際には、海水が結氷点まで冷却される上に、海水が凍る際に不純物として塩が排出されるため、高密度の海水が生成される。生成された高密度水はオホーツク海そして北太平洋の中層に広がっていく。この高密度水生成および千島列島域で生じている潮汐による鉛直混合により、オホーツク海起源の熱塩循環（密度差に由来する、鉛直方向の輸送で特徴付けられる海洋循環）が駆動される[e.g., Kitani, 1973; Talley, 1991; Nakamura et

al., 2006; Matsuda et al., 2009]。この熱塩循環に伴い、大気に接していた海水が海洋中層に潜り込むので、大気中の酸素、温室効果気体（二酸化炭素など）、フロンといった様々な気体がオホーツク海から北太平洋中層に取り込まれ、それら物質の循環に影響する[e.g., Warner et al., 1998; Yamamoto-Kawai et al., 2004; Uchimoto et al., 2011 (in press)]。

環オホーツク圏はまた、世界最大規模の基礎生産（海洋植物プランクトン増殖）で知られている。高い基礎生産は、食物連鎖を通し豊富な水産資源の基礎となるとともに、二酸化炭素の海洋内貯留など炭素循環にも重要な役割を果たす。この高い基礎生産を支える上で、上述の熱塩循環によりアムール川から運ばれて来た「鉄」が重要であることが最近の研究から分かってきた[Nishioka et al., 2007]。すなわち、鉄は2価と3価のイオンを持つことから光合成等における電子伝達に使われているが、海水には極めて溶けにくいいため多くの海域、特に亜寒帯域において基礎生産を律速している。例外的に環オホーツク圏では、熱塩循環に伴う鉄供給のおかげで鉄律速がかかりづらく、このことが水産資源の豊さに繋がっている。

環オホーツク圏におけるこれらの現象は、数年から数十年規模の大きな変動を持つのに加えて、シベリアを中心に顕著な温暖化が進行している。温暖化の特に著しい地域では、平均して10年間に2℃のペースで冬季の気温が上昇している。温暖化

に伴うようにオホーツク海の海氷面積も減少傾向にあることから、上述のオホーツク海起源の熱塩循環が弱まっていく可能性が危惧されている[Nakanowatari et al., 2007]。

このように、環オホーツク圏では科学的に興味深くかつ社会的に重要な気候・環境の形成およびそれらの長期変動が生じており、これらのより良い理解と数値シミュレーションによる再現・予測が求められている。そこで研究代表者を含むグループでは、環オホーツク圏の気候および環境変動のより良い理解のために、環オホーツク圏を対象とした大気・海洋の数値シミュレーションを行っている。本研究ではその一環として、(1) 数値モデルの高速化および、(2) 環オホーツク圏の気候・環境に重要な以下の現象—(a) 海洋の栄養物質循環およびオホーツク海を起源とする熱塩循環とその変動、(b) 潮汐による鉛直混合過程、(c) オホーツク海周辺の下層雲—について数値シミュレーション研究を行った。

現在の気候・環境のシミュレーションとそれらの形成・変動メカニズム解明は、地球温暖化に伴う環オホーツク圏の変化の理解および信頼性の高い予測の必要条件である。中でも、環オホーツク圏では近年表層の栄養物質そして基礎生産が減少傾向にあり、温暖化がその主な原因ではないかと示唆されている。もしこの示唆が正しければ、温暖化が進むと基礎生産がさらに減少し、ひいては水産資源・炭素循環も大きく影響を受けることから、先行きが懸念されている。本研究の成果は、こうした変動の要因解明と予測の基礎となると期待される。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した大学名：

北海道大学

(2) 共同研究分野：

超大規模数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など：

本共同研究により、数値モデルの高速化チュ

ーニングにおいて多大な貢献を戴いた。さらに、北海道大学情報基盤センターのスーパーコンピュータを使用することで、数値シミュレーションとその結果の解析を円滑に且つ高速に実施できた。

3. 研究成果の詳細

ここでは現在までの研究成果を申請時の研究計画に沿って項目毎に記載していく。

(1) 数値モデルの高速化：

環オホーツク圏を対象として構築した大気海洋結合モデルにおいて、計算時間の8割以上を占めていた大気コンポーネントモデルについて北海道大学情報基盤センターの HITACHI SR11000 用に高速化チューニングを行った。中でも放射スキームと積雲対流スキームに時間を要していることが予備調査から分かったので、これら物理スキームと呼ばれる部分を中心に高速化した。大気モデルは IPRC-RegCM [Wang, et al., 2003] を使用させて戴いている。具体的には、不適当な自動並列化の抑止、スレッドローカル化、SMP 並列の強制等のチューニングを行った。その結果、物理部分は 7.25 倍高速化し、全体でも 3.25 倍の高速化が得られた。高速化チューニングした大気モデルは、下記(c)の大気シミュレーションにも使用されている。

(2) 環オホーツク圏の気候・環境に重要な以下の現象についての数値シミュレーション研究：

(a) 海洋の栄養物質循環とオホーツク海を起源とする熱塩循環：

熱塩循環の気候学的平均場については、研究代表者を含むグループは申込の段階で千島列島域での潮汐による鉛直混合が多大な影響を与えていることとそのメカニズムを示し、この鉛直混合を考慮することで、観測に近いオホーツク海の熱塩循環の再現に成功していた[Nakamura et al., 2006; Matsuda et al., 2009]。さらに熱塩循環に伴う物質循環についても、フロンの海洋内分布を再現することに成功していた[図 1: Uchimoto et al.,

2011 (J. Geophys. Res. in press)]. フロンは、大気から海洋に取り込まれる気体であり且つ海洋

内で生物化学的過程の影響を受けないため、海洋循環、特に熱塩循環の再現性の良い指標である。

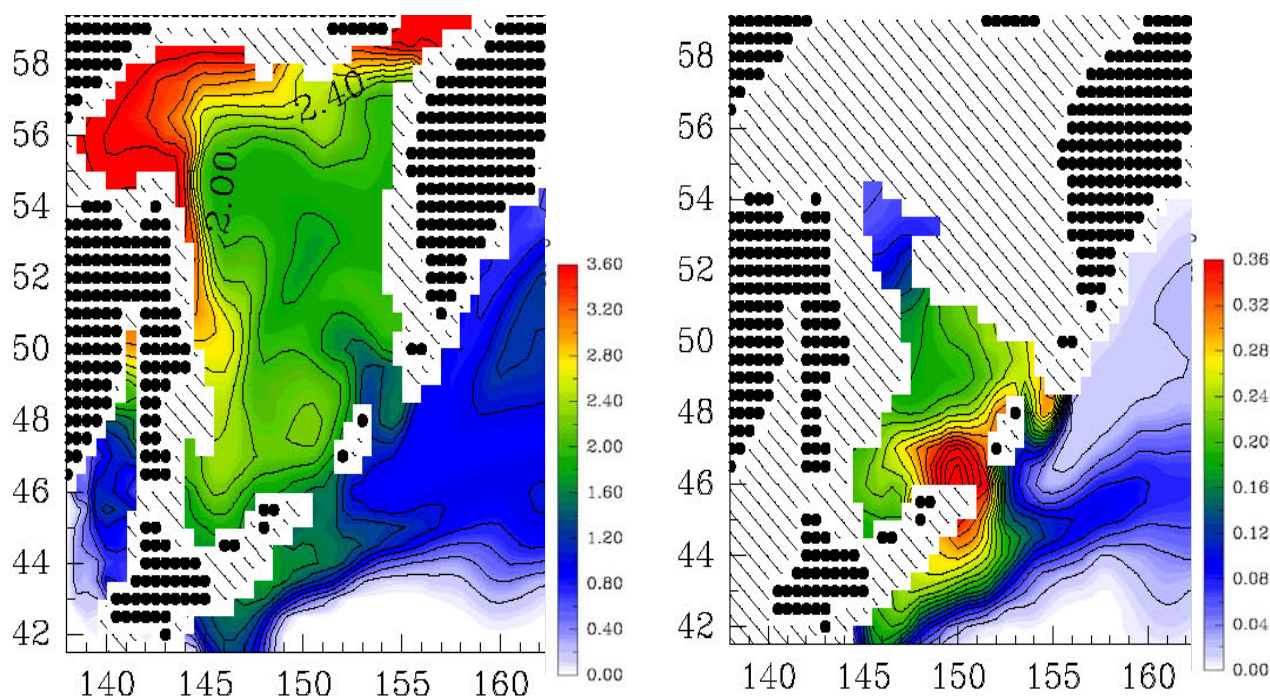


図1: シミュレーションの結果得られた中層フロン濃度の分布。(左) ポテンシャル密度 $26.8\sigma_0$ 面上 (中層上部)、(右) ポテンシャル密度 $27.4\sigma_0$ 面上 (中層下部)。Uchimoto et al., 2011 (J. Geophys. Res. in press) より。

これらの成果を踏まえ、本研究では(a-i)鉄化学モデルの構築とその海洋大循環モデルへの組み込み、および(a-ii)熱塩循環変動のシミュレーションを行った。

(a-i) 鉄化学モデルの構築とその海洋大循環モデルへの組み込み：

1 節の研究目的で述べたように、環オホーツク圏の海洋内栄養物質循環を理解するには、主要栄養塩（リン、窒素、ケイ素）に加えて、海中では微量にしか存在しない鉄の循環が重要になる。そこで、主要栄養塩をリンで代表させた鉄化学モデルを Parekh et al. [2005] および 干場 [2007] に基づき構築し、これを海洋大循環モデルに組み込んだ。海洋内の鉄循環は、(1)鉄の物理化学的過程（錯体生成、粒子態の沈降、スキャベンジング、再無機化など）、(2)生物に関する過程（植物プランクトンへの取り込み、プランクトンからの排出、プランクトン死骸の沈降とその再無機化など）、お

よび(3)海水の流動に伴う移流拡散過程にしたがって生じる。今回構築したモデルは最初の鉄特有の物理化学過程と生物過程のうち重要な部分を抽出しモデル化しており、最後の海水流動に伴う過程は海洋大循環モデルの結果を用いる。なお海洋への鉄の供給は主に、黄砂などの風送塵、海底からの湧出・巻き上げ、および河川からの流入により生じ、これらは外的にもしくはパラメタ化して与えられる。

第1段階として鉄化学モデルを単体で構築し、鉛直1次元海洋モデルに組み込んでテストした。このテストでは駆動力として、風送塵を模した海面での鉄フラックス、生物過程のための太陽光入射、および海水流動を表す鉛直拡散と湧昇、これらを理想化して与えた。得られた結果（図2）は干場 [2007] の結果と誤差の範囲で一致した。

第2段階として、構築した鉄化学モデルを海洋大循環モデルに組み込み、環オホーツク圏における数値シミュレーションを行う。海洋大循環モデ

ルは、東京大学大気海洋研究所で開発された COCO を使用させて載いている。現在、組み込みと初期テストが完了し、現実的な気候学的平均場の計算に取りかかる所である。

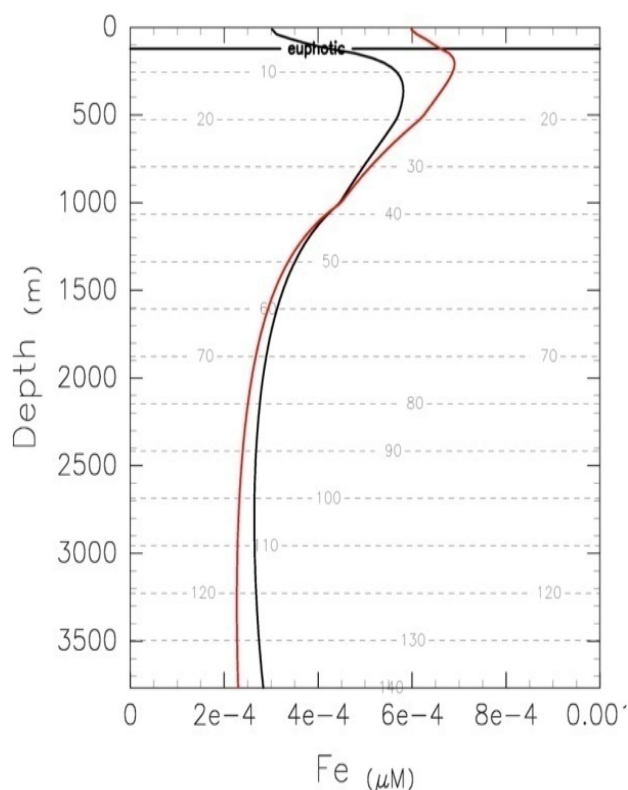


図2：鉛直1次元モデルで計算した鉄濃度の鉛直分布。海面での太陽光入射が、 30 W/m^2 （赤線）と 300 W/m^2 （黒線）の場合。

(a-ii) 熱塩循環変動のシミュレーション

物質循環の経年変動シミュレーションの前段階として、オホーツク海を起源とする熱塩循環の変動についてシミュレーション実験を行った。ただし、オホーツク海の風応力については1978年以降の気候学的平均場を使用した。シミュレーションの結果、観測から示されたオホーツク海中層の昇温化傾向を概ね再現できた（図3）。シミュレーション結果の解析から、中層の昇温化の主な原因として、(1)海面での熱フラックスの変動により、冬季に生成される高密度の海水が変動すること、(2)北太平洋亜寒帯の風応力変動に伴い、比較的暖かい北太平洋の海水がオホーツク海に流入する量が変動することという2つのメカニズムが示された。

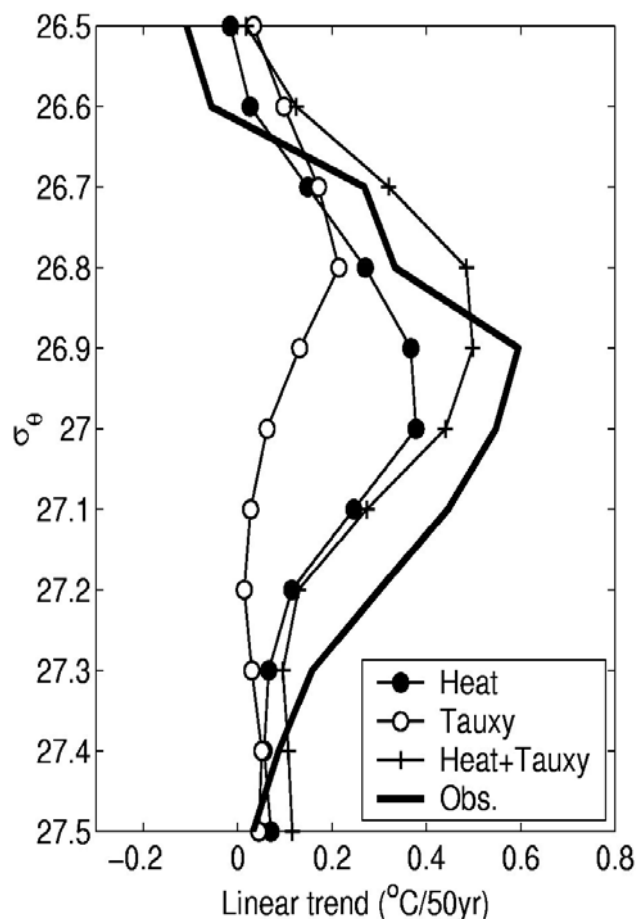


図3：オホーツク海千島海盆における年平均ポテンシャル水温の線形トレンドの鉛直分布（縦軸はポテンシャル密度）。太線が観測、黒丸は熱フラックスのみ変動させたケース、白丸は風応力のみ変動させたケース、十字が両方の和。

(b) 潮汐による鉛直混合過程：

環オホーツク圏では潮汐による鉛直混合が非常に強く、熱・塩・栄養物質の鉛直輸送を介して熱塩循環および物質循環に重要な役割を果たしている。申請者らの用いた海洋大循環モデルでは潮汐による鉛直混合を理想化して与えることで考慮しているが、その改良に向けての第1歩として、超高分解能鉛直2次元海洋モデルを用いて鉛直混合過程のシミュレーションを行い、観測結果と似た場を得た。

潮汐による鉛直混合は主に内部重力波の生成とその碎波によると考えられている。千島列島の海峡部は山脈の鞍部となっており、潮流が通る際、流れは山脈を登り駆け下る。海の内部では通常、

低密度の軽い水が高密度の重い水の上に位置しているため、潮流により持ち上げられた海水は周囲より重く、押し下げられた海水は周囲より軽い。このため浮力が働いて海水を元の深さに戻そうとし、その結果、海洋内部に浮力（重力）を復元力とした波（内部重力波）が生成される（図 4a）。

潮流による持ち上げ押し下げが十分大きくなると、波は大振幅となり、海岸に打ち寄せる波のように砕波する（図 4b）。砕波は密度不安定やケルビン－ヘルムホルツ不安定を伴い激しい混合を引き起こす。加えて、境界層の剥離とそれに伴う渦生成も混合に寄与する可能性が新たに示唆された。

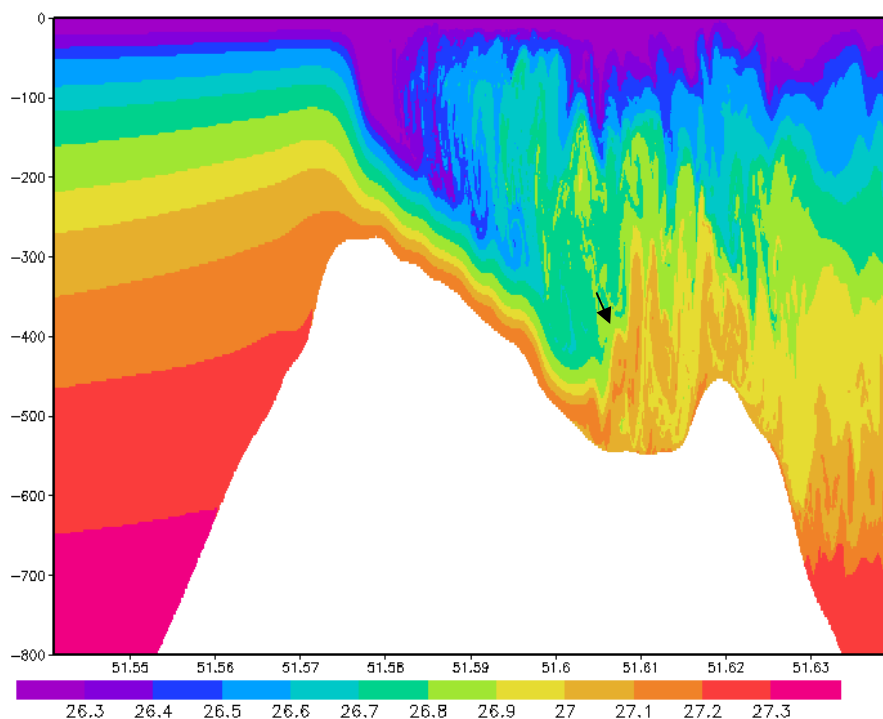
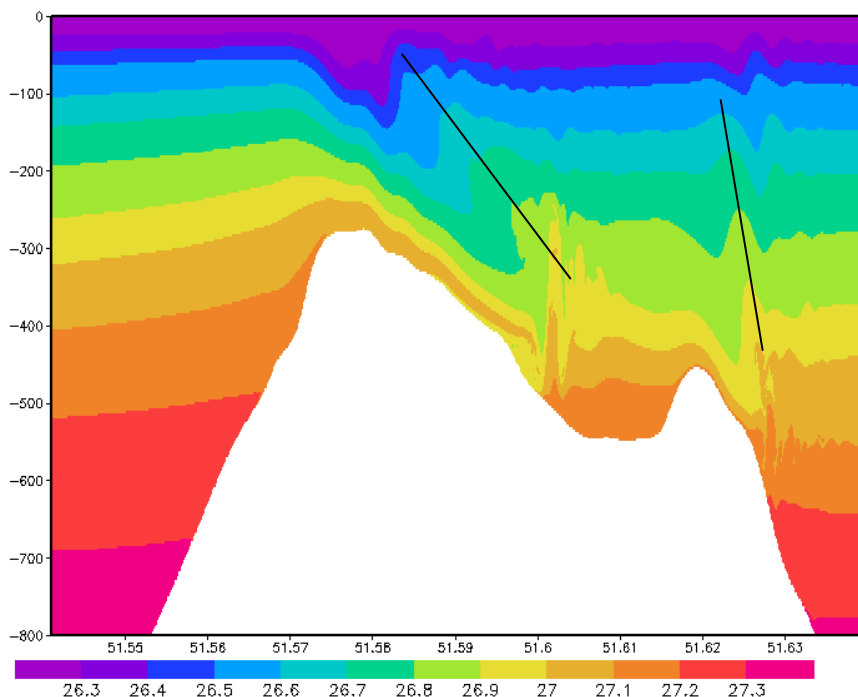


図 4: ポテンシャル密度の鉛直断面図。暖色が高密度、白抜きは海底地形を表す。初期に水平一様な密度分布を与え、時間的に正弦

関数で振動する潮流で駆動した。潮流の初期条件は流速0で右向き加速度が最大とした。(a:上) 0.174周期後(右向き流が加速中)、(b:下) 0.302周期後(右向き流が減速中)。実線は内部重力波、矢印は渦の位置を示す。

(c) オホーツク海周辺の下層雲：

先ず、夏季の下層雲について数値シミュレーションを行った。衛星観測および再解析データを解析すると、オホーツク海高気圧が発達したとき下層雲が多い傾向にあった。そこで、オホーツク海高気圧の発達した2003年に注目した。この年の7月前半はオホーツク海高気圧が発達し、顕著な下層雲が見られた(図5)。シミュレーション結果の

解析により、オホーツク海上での海面熱フラックスによる大気下層の冷却と湿潤化が下層雲形成に重要な役割を果たすこと、そのため気塊のオホーツク海上での滞留時間が下層雲形成の要因の一つであること、下層雲が形成されると雲頂での放射冷却により下層雲の下で気温が下がり、大気海洋間の熱フラックスが大きく変化すること等が示された。

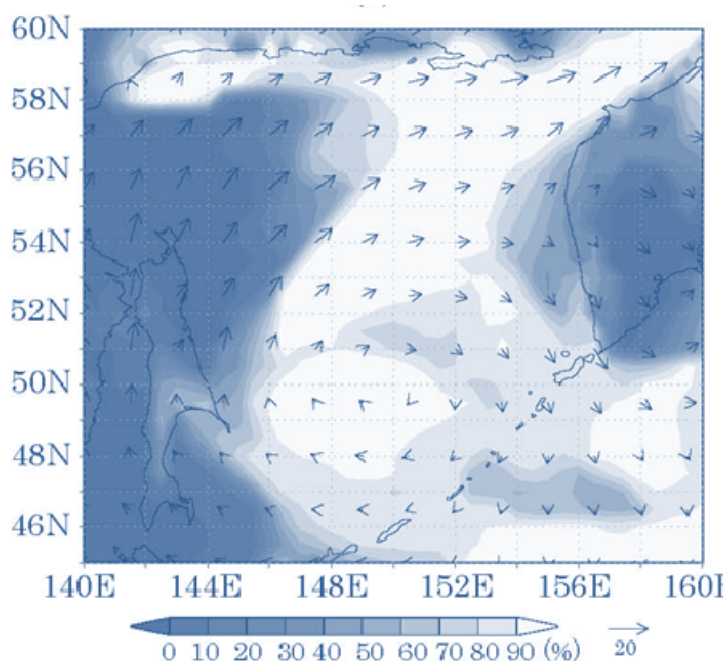


図5：2003年7月1日(日平均)の下層雲雲量(影)と水平風(矢印)の分布。モデル3層目の値。

4. これまでの進捗状況と今後の展望

課題申請時に設定した目標の7割程度は既に終了し、残りも順調に進捗している。本共同研究の成果を踏まえ、来年度以降も環オホーツク圏の大気・海洋シミュレーション研究を進めていきたい。以下、具体的項目毎に進捗状況と今後の展望を記

す(詳細は3で記載済みなので省略する)。

- (1) 数値モデルの高速化：今年度計画の内容は終了した。今後の計画は現時点では未定である。
- (2) 環オホーツク圏の気候・環境の以下の現象についての数値シミュレーション研究：

(a) 海洋の栄養物質循環とオホーツク海を起源

とする熱塩循環の変動

(a-i) 鉄化学モデル：鉄化学モデル構築とテスト、および大循環モデルへの組み込みは終了した。今年度の計画内容は、残る現実的設定のテストで終了する。来年度以降、鉄化学モデルのパラメタ・テスト等を行い鉄・リン分布の再現性向上とメカニズムの理解を目指す。

(a-ii) 熱塩循環変動シミュレーション：シミュレーション実験を実施し比較的良好な結果を得た。現在、論文投稿準備中。以上で今年度の計画内容は完了した。来年度以降、より高分解能での実験を試みたい。

(b) 潮汐による鉛直混合過程

超高分解能海洋モデルによるシミュレーションを行い、現在、論文投稿準備中である。以上で今年度の計画内容は完了した。来年度以降はパラメタ化改良に向けた理論化を進めるため、より理想化された条件下での数値実験を行いたい。

(c) オホーツク海周辺の下層雲

(c-i) 夏季の下層雲：オホーツク海高気圧の発達した2003年夏季の数値シミュレーションを実施し比較的良好な再現性を得た。現在、論文投稿中。以上で今年度の計画内容は完了した。来年度以降さらに、オホーツク海高気圧が発達しなかった他の年について検討したい。

(c-ii) 冬季の寒気吹出しに伴う海洋上のバンド状雲：現在テスト中。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文（投稿中のものは「投稿中」と明記）

Koseki, S., T. Nakamura, H. Mitsudera, Y. Wang: Modeling low-level clouds over the Okhotsk Sea in summer: Cloud formation and its effects on the Okhotsk high. J. Geophys. Res. (投稿中)

(2) 国際会議プロシーディングス

なし

(3) 国際会議発表

Nakamura, T., Y. Kawasaki, T. Kono, and T. Awaji: Large-Amplitude Internal Waves Observed in the Kruzenshtern Strait of the Kuril Island Chain and Possible Water Transport and Mixing. 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 22 - 25 (24, OS43C-03) June, 2010, Taipei.

Nakamura, T., T. Toyoda, Y. Ishikawa, and T. Awaji: Effects of Mass Source/Sink at the Western Boundary on the Wind-Driven Gyres: Implications for the Ventilation of the North Pacific Intermediate Layer through Convection in the Okhotsk Sea and Tidal Mixing at the Kuril Straits. 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 22 - 25 (22, OS24A-04) June, 2010, Taipei.

Nakanowatari, T., K. Uchimoto, T. Nakamura, H. Mitsudera, K. I. Ohshima: Decadal to pentadecadal variability of intermediate water temperature in the Sea of Okhotsk: An ice-ocean coupled model simulation. 2010 AGU Fall Meeting, 13-17, December, 2010, Moscone Convention Center, San Francisco, California, USA.

(4) 国内会議発表

中村知裕、内本圭亮：オホーツク海物質循環モデリング。潮汐混合とオホーツク海・ベーリング海の物理・化学・生物過程：白鳳丸 KH09-4 航海・おしよろ丸・クロモフ 2006/2007 シンセシス，2010年11月30日 - 12月1日，東京大学大気海洋研究所，柏。

中村知裕：アムチトカ海峡で観測された大振幅内部波とグローバル評価。潮汐混合とオホーツク海・ベーリング海の物理・化学・生物過程：白鳳丸 KH09-4 航海・おしよろ丸・クロモフ 2006/2007 シンセシス，2010年11月30日 - 12月1日，東京大学大気海洋研究所，柏。

中村知裕、豊田隆寛、石川洋一、淡路敏之、三

寺史夫：西岸境界における海水の流入流出が
風成循環に与える影響－オホーツク海と千島
列島を念頭において－. 2010年度日本海洋学
会秋季大会, 2010年9月6-10日, 東京農業
大学 オホーツクキャンパス.

中野渡拓也、三寺史夫、中村知裕、内本圭亮、
大島慶一郎：中解像度海洋・海氷結合モデル
による北太平洋中層のシミュレーション.
2010年度日本海洋学会秋季大会, 2010年9月
6-10日(7日ポスター), 東京農業大学 オ
ホーツクキャンパス.

中村知裕：オホーツク海を起源とする熱塩循環
の概略説明. 2010年度日本海洋学会秋季大会,
2010年9月6-10日(シンポジウムD: オホ
ーツク海を起源とする熱塩・物質循環システ
ムとその変動), 東京農業大学 オホーツク
キャンパス.

中野渡拓也、三寺史夫、中村知裕、内本圭亮、
大島慶一郎：オホーツク海中層水温の10-50
年規模変動：海氷・海洋結合モデルシミュレ
ーション. 2010年度日本海洋学会秋季大会,
2010年9月6-10日(シンポジウムD: オホ
ーツク海を起源とする熱塩・物質循環システ
ムとその変動), 東京農業大学 オホーツクキ
ャンパス.

(5) その他(特許, プレス発表, 著書等)

なし