

12-NA13

## 環オホーツク圏の海洋・大気シミュレーション

中村知裕（北海道大学）

**概要** 環オホーツク圏では、オホーツク海起源の海洋熱塩循環・潮汐混合・栄養物質（特に鉄）循環に伴い、世界でも最大規模の基礎生産が生じ、豊富な水産資源や炭素循環に影響している。また、夏季の下層雲やオホーツク海高気圧の形成等を介して北日本の気候に影響を与えている。最近ではこれらに長期変動が生じていることも明らかになってきた。本研究では、こうした現象の理解と数値モデルによる再現性の向上に向け、環オホーツク圏の海洋・大気シミュレーションと使用する数値モデルの高速化チューニングを行う。本年度は、先ず(I)計算機科学分野の課題として、海洋非静水圧モデルの高速化チューニングを行った。次に(II)環オホーツク圏大気・海洋シミュレーションとして、(a)海洋内鉄循環の季節変動シミュレーションと経年変動シミュレーションの準備、(b)潮汐・内部重力波による鉛直混合過程の2次元および3次元数値実験、(c)オホーツク海高気圧と夏季下層雲の高分解能シミュレーションを行った。

### 1. 研究の目的と意義

#### 研究の目的

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。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 [中村・古閑, 2010; Koseki et al., 2012]。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氷生成が起こる。

オホーツク海における海氷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。海氷生成の際には、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る。

また、千島列島域のように海底地形上を強い潮流が流れる海域では、内部重力波の生成と砕波により激しい鉛直混合が生じる [Nakamura et al.,

2000; 2010]。これらの高密度水生成と千島列島域での潮汐鉛直混合により、オホーツク海起源の熱塩循環（密度差に由来し、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 [Nakamura et al., 2006]。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 [Uchimoto et al., 2011; 2009]。

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、顕著

な数年から数十年規模の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°C 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水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; Matsuda et al., 2009]。

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。そこで代表者らのグループでは、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海洋および大気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、環オホーツク圏の気候・環境に重要な 3 つの現象—(a) オホーツク海を起源とする栄養物質循環と熱塩循環、(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う。加えて、これらシミュレーションの効率化と大規模化に向けて、大型計算機更新後の新システムへの移植と新システムでの高速化チューニングを検討する。

## 研究の意義

現在気候・現在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重要な基礎となる。

対象とする環オホーツク圏は上述のように日本にとって重要な地域である。しかしながら、大半がロシア領ないしロシア経済水域に含まれているため、大気・海洋・陸面全てにおいて公開されている観測データが限られている。また、基礎生産に重要な鉄は、海水中に比べ観測船内の方が遙かに量が多いため観測には特殊な技術を要するので断片的知識しか得られていない。そのため環オホーツク圏の気候・環境研究には、数値シミュレーションとそれに基づくメカニズム解明、そして解明されたメカニズムに基づく数値シミュレーションの改良が欠かせない。

## 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と研究体制

北海道大学。

研究体制は以下の通り。

- ・中村知裕：海洋と大気のシミュレーションおよびプログラムの高速化
- ・大宮学：プログラムの高速化
- ・三寺史夫：海洋シミュレーション
- ・中野渡拓也 (PD)：海洋物質循環・熱塩循環シミュレーション
- ・古関俊也 (PD)：大気下層雲シミュレーション
- ・阿部祥子 (DC3)：海洋混合過程シミュレーション
- ・伊藤薫 (MC2)：海洋混合過程シミュレーション

### (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、計算科学の専門家と共同研究を行えたことが当共同研究ならではの事項の第一である。このことは、数値モデルの高速化および、北海道大学情報基盤センターの大型計算機システム更新後の新システムへの移行、新システムでの高速化チューニングで特に顕著であった。また、北海道大学情報基盤センターの大型計算機システムを使用させて戴くことで、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

### (3) 当公募型共同研究ならではの事項など

実施できるのも当共同研究の利点である。加えて、JHPCN シンポジウムにおいて他分野の計算科学に関する専門家と交流し、その研究発表を拝聴できることは、当共同研究以外では滅多に得られない機会であった。

$dn*(:, :, k0)$  と  $dn*(:, :, k1)$  を交互に作業領域として使用する。この変更により、キャッシュでのデータ再利用性が大幅に向上しデータアクセスが高

### 3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

#### (1) 研究成果の詳細について

##### (I) 計算機科学分野での検討課題

本課題では、大気モデルの高速化を前年度まで行い成果を得た。そこで本年度は、海洋シミュレーションに用いるプログラムに対して大型計算機システム(SR16000/M1)

用の高速化チューニングを検討した。当初は鉄循環シミュレーションに用いているモデルを検討する予定だったが、結果の解析を踏まえて幾つか改良を施したことで、計算負荷の大きさを考慮し、本年度は海洋内鉛直混合過程のシミュレーションに用いる 3 次元海洋非静水圧モデルについて検討することにした。鉄循環シミュレーションのモデルは機会があれば来年度以降に行いたい。

検討した 3 次元海洋非静水圧モデルは、既に MPI 並列化されている。そこで、各プロセスでの性能向上を図るため、(i) キャッシュを優先したチューニングおよび(ii) K ループ (最外ループ) での SMP 並列化を検討した。

元のコードには図 1a の例のように、先ず空間 3 次元配列  $dn*(:, :, :)$  を  $i, j, k$  の 3 重ループで計算し、次にこの  $dn*$  を用いて  $f*(:, :, :)$  を別の  $i, j, k$  ループで計算している箇所がある。

キャッシュをより有効に利用するため、これらのループを最外ループである  $k$  ループについてまとめ、 $dn*$  は  $f*$  の計算に必要な部分だけ計算・保持する (図 1b)。この場合は、

#### オリジナル

```

DO k=0, ksize+1
DO j=0, jsize+1
DO i=0, isize+1
  dnx(i,j,k) = mask(i,j,k)*mask(i+1,j,k) * n_x(i,j,k) * (a(i+1,j,k)-a(i,j,k))*idz(i,j)
  dny(i,j,k) = mask(i,j,k)*mask(i,j+1,k) * n_y(i,j,k) * (a(i,j+1,k)-a(i,j,k))*idy(i,j)
  dnz(i,j,k) = mask(i,j,k)*mask(i,j,k+1) * n_z(i,j,k) * (a(i,j,k+1)-a(i,j,k))*idz(k)
END DO
END DO
END DO
.
.
DO k=0, ksize
DO j=1, jsize
DO i=1, isize
  fz(i,j,k) = fz(i,j,k) - mask(i,j,k)*mask(i,j,k+1) &
    * ( (k1(i,j,k)+k1(i,j,k+1))*0.5D0 * (a(i,j,k+1)-a(i,j,k))*idz(k) &
      + (k2(i,j,k)+k2(i,j,k+1))*0.5D0 * n_z(i,j,k) * (dnz(i,j,k) &
        + (dnx(i-1,j,k)+dny(i,j,k)+dny(i-1,j,k+1)+dny(i,j,k+1))*0.25D0 &
          + (dny(i,j-1,k)+dny(i,j,k)+dny(i,j-1,k+1)+dny(i,j,k+1))*0.25D0))
END DO
END DO
END DO

```

#### キャッシュ優先チューニング

```

DO k=1, ksize
tmp=k0
k0=k1
k1=tmp
DO j=0, jsize+1
DO i=0, isize+1
  dnx(i,j,k1) = mask(i,j,k+1)*mask(i+1,j,k+1) * n_x(i,j,k+1) * (a(i+1,j,k+1)-a(i,j,k+1))*idz(i,j)
  dny(i,j,k1) = mask(i,j,k+1)*mask(i,j+1,k+1) * n_y(i,j,k+1) * (a(i,j+1,k+1)-a(i,j,k+1))*idy(i,j)
  dnz(i,j,k1) = mask(i,j,k) * mask(i,j,k+1) * n_z(i,j,k) * (a(i,j,k+1) - a(i,j,k)) * idz(k)
END DO
END DO
.
.
DO j=1, jsize
DO i=1, isize
  fz(i,j,k) = fz(i,j,k) - mask(i,j,k)*mask(i,j,k+1) &
    * ( (kappa1(i,j,k)+kappa1(i,j,k+1))*0.5D0 * (a(i,j,k+1)-a(i,j,k))*idz(k) &
      + (kappa2(i,j,k)+kappa2(i,j,k+1))*0.5D0 * n_z(i,j,k) * (dnz(i,j,k1) &
        + (dnx(i-1,j,k0)+dny(i,j,k0)+dny(i-1,j,k1)+dny(i,j,k1))*0.25D0 &
          + (dny(i,j-1,k0)+dny(i,j,k0)+dny(i,j-1,k1)+dny(i,j,k1))*0.25D0))
END DO
END DO
END DO

```

#### 加えて、KループでSMP並列化

```

DO nn=0,np-1
DO k=ks(nn),ke(nn)
k0=mod(k,2)
k1=mod(k+1,2)
DO j=0, jsize+1
DO i=0, isize+1
  dnx(i,j,k1) = mask(i,j,k+1)*mask(i+1,j,k+1) * n_x(i,j,k+1) * (a(i+1,j,k+1)-a(i,j,k+1))*idz(i,j)
  dny(i,j,k1) = mask(i,j,k+1)*mask(i,j+1,k+1) * n_y(i,j,k+1) * (a(i,j+1,k+1)-a(i,j,k+1))*idy(i,j)
  dnz(i,j,k1) = mask(i,j,k) * mask(i,j,k+1) * n_z(i,j,k) * (a(i,j,k+1) - a(i,j,k)) * idz(k)
END DO
END DO
IF(k==ks(nn)) CYCLE
.
.
DO j=1, jsize
DO i=1, isize
  fz(i,j,k) = fz(i,j,k) - mask(i,j,k)*mask(i,j,k+1) &
    * ( (kappa1(i,j,k)+kappa1(i,j,k+1))*0.5D0 * (a(i,j,k+1)-a(i,j,k))*idz(k) &
      + (kappa2(i,j,k)+kappa2(i,j,k+1))*0.5D0 * n_z(i,j,k) * (dnz(i,j,k1) &
        + (dnx(i-1,j,k0)+dny(i,j,k0)+dny(i-1,j,k1)+dny(i,j,k1))*0.25D0 &
          + (dny(i,j-1,k0)+dny(i,j,k0)+dny(i,j-1,k1)+dny(i,j,k1))*0.25D0))
END DO
END DO
END DO

```

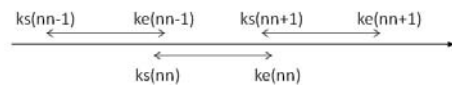


図 1 : 上から、(a)オリジナルコードの例、(b)キャッシュ優先チューニングの例、(c) K ループでの SMP 並列化の例。

速化された。

ただ、この方法では k ループに依存があると判断され、自動並列化が効かない(場合がある)。そこで、k ループでの SMP 並列化を検討する。具体的には図 1c のように、k ループをスレッド数に応じて陽に分割する。ここで示した例の場合、 $dn^*$ が k ループ(スレッド)間で 1 つ分重複して計算することになるが、k 方向の格子数が十分大きければその比率は小さくなり高速化される。

以上に加えて、演算負荷バランスの悪い D0 ループ 2 カ所でコンパイラ指示文を用いて、k ループと j ループの 1 重化を行った。これにより、一つは 15.0 秒→6.5 秒、もう一つは 28.5 秒→6.4 秒と大幅に計算時間が短縮された。

## (II) 環オホーツク圏海洋・大気シミュレーション

(a) オホーツク海を起源とする栄養物質循環と熱塩循環

環オホーツク圏の栄養物質循環を特徴付ける鉄と主要栄養塩であるリンに注目してシミュレーションを行う。前年度までに、鉄化学モデルを構築して熱塩循環を概ね良好に再現している海洋大循環モデルに組み込み、気候学的季節変動場について鉄化学モデルのパラメタ・テスト等を実施した。本年度はこの成果を基に、鉄循環の解析および経年変動シミュレーションを行った。

まず、鉄化学モデルに幾つか改良を施した。その内最も大きいものとして、混合に伴う植物プランクトンの鉛直移動を間接的に考慮するため、混合層内で光強度を鉛直平均して与えるよう変更した。これにより、生物基礎生産の季節変動をより良く再現されるようになった。

次に、海洋混合層内における鉄収支

解析を行った。鉄のソースは、沿岸・陸棚域では亜表層からの海水取込(エントレインメント)が大きく、外洋では水平輸送の寄与が大きい(図 2)。水平輸送は、陸棚近くではエントレインメントにより供給された鉄が渦拡散で沖に広がるのが重要

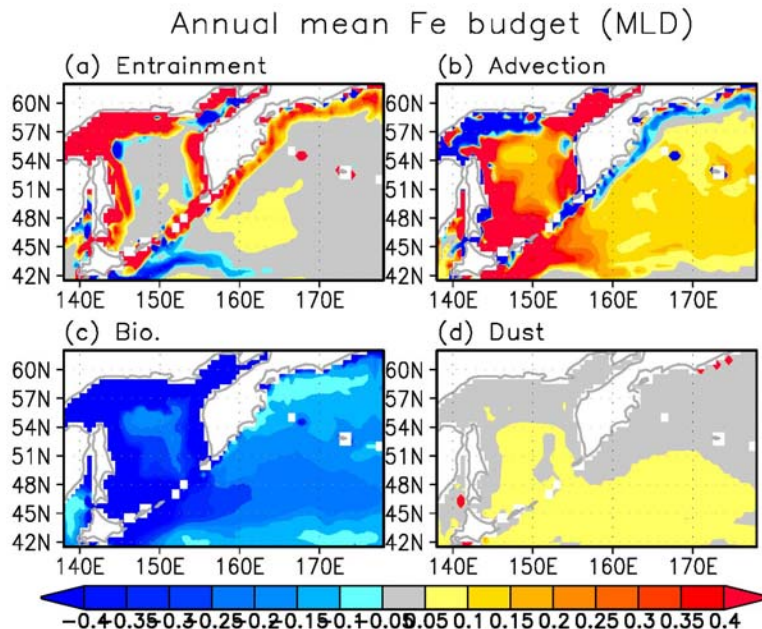


図 2: 海洋(海面)混合層内の鉄収支(年平均)。(a)亜表層から混合層内への取込、(b)水平輸送、(c)生物内への取込、(d)風送ダストの寄与。

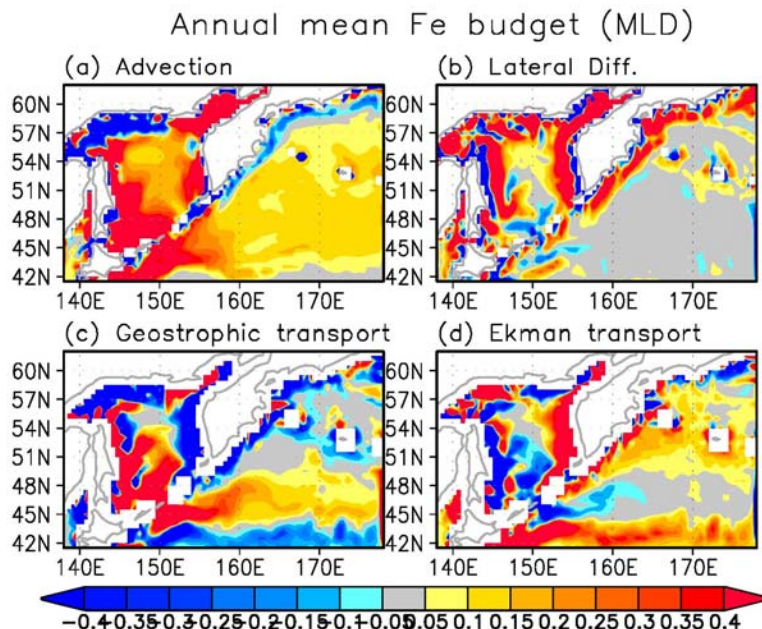


図 3: 海洋(海面)混合層内の鉄収支(年平均)のうち、水平輸送によるものの内訳。(a)トータル、(b)渦拡散、(c)地衡流による輸送、(d)エクマン輸送。

である(図 2a, 図 3b)。こうして沖に出て来た鉄は、さらに海流(地衡流)でオホーツク海南部から北太平洋へ運ばれる(図 3c)。そしてさらに偏西風のため生じている南向きのエクマン輸送により、海流の弱い場所へ運ばれる(図 3d)。

エクマン輸送や西岸境界流は偏西風の強い冬季に大きい。このため、海域によっては、エクマン輸送および西岸境界流が冬季に混合層の鉄濃度を増加させる主要因となっている可能性が示唆された(図 4)。従来は、鉄は生物内への取込により減少し、冬季混合層の発達によるエントレインメントで補充されると考えられていた。水平輸送の重要性も認識されてはいたが、それは表層下で地衡流と渦拡散により生じると考えられていた。その点で、今回の収支解析は鉄循環に新たな知見をもたらしている。

経年変動実験については駆動に必要なデータの収集と作成が完了し、計算を開始した。

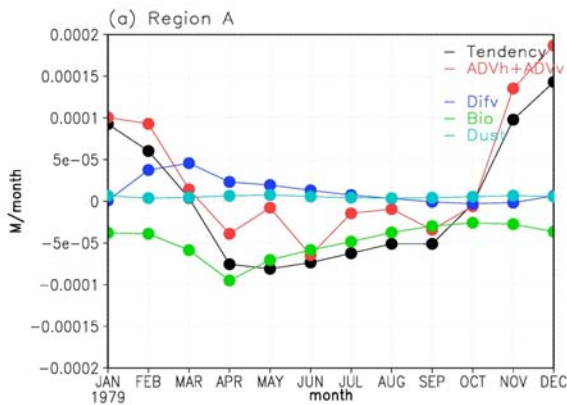


図 4: 海洋(海面)混合層内の鉄収支の季節変動。黒: 時間変化率、赤: 水平輸送、青: エントレインメント、緑: 生物への取込、水色: 風送ダスト。

#### (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(混合)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。本研究で用いている海洋大循環モデルではその効果を簡単なパラメタ化により考慮しているが、同時に非静水圧海洋モデルによる鉛直混合過程シミュレーションを行い、その理解とパラメタ化の向上を図っている。本年度は、前年度

に引き続き理想的な状況に置ける鉛直 2 次元数値実験を行うと共に、新たに 3 次元数値実験を開始した。

鉛直 2 次元実験では、対流と力学的不安定により海水混合が促進される様子をシミュレーションした。図 5 に、最初対流が生じ(上図)、その後図 5 下のように力学的不安定を合わさって海水混合が大規模に生じる様子を示す。

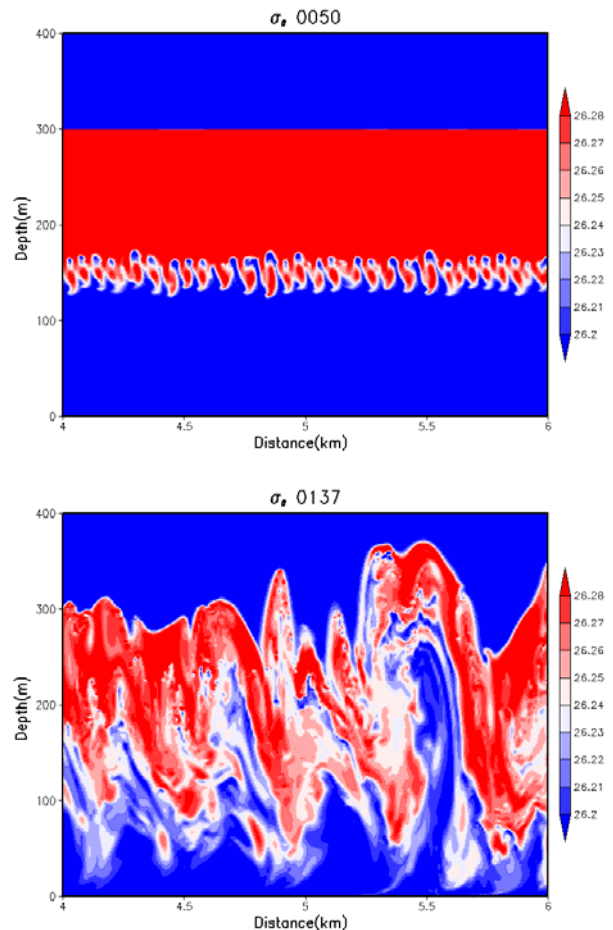


図 5: 海水混合の理想的状況下の数値実験。図は密度を示す。(上)対流が生じ、(下)力学的不安定と合わさって激しい混合が生じる様子。

3 次元実験は潮流(潮汐に伴う流れ)により生成された内部重力波が、背景場の変化により屈折ないし散乱する過程を対象にした。図 6 に屈折ないし散乱により波数が増加する様子を示す。こうした波数変化は、内部重力波から乱流へのエネルギー変換を容易にすることで、海水混合に寄与する。

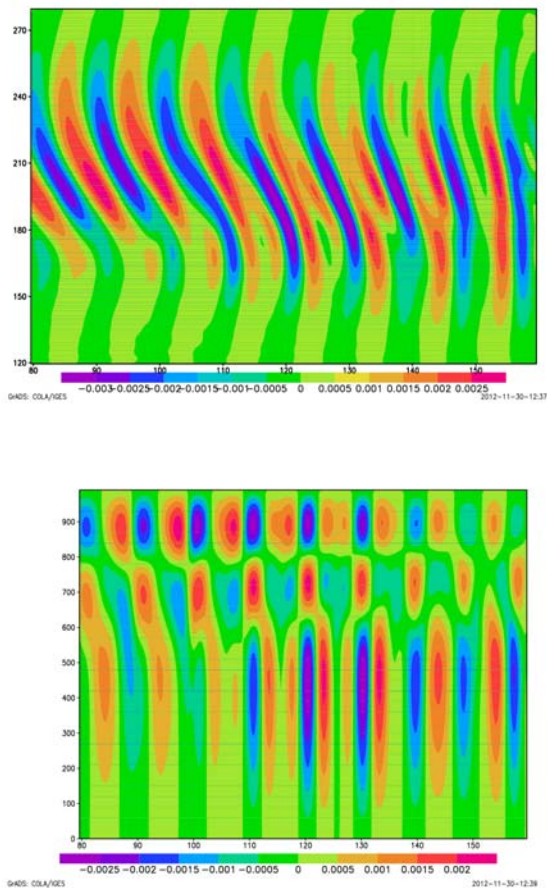


図 6：内部重力波の屈折・散乱のシミュレーション。図は鉛直流速を示す。(上) 水平断面、(下) 鉛直断面。

(c) オホーツク海周辺の下層雲

夏季の下層雲に注目し、領域大気気候モデルシミュレーションを行った。本年度は、前年度に行った水平 2 方向での領域分割による MPI 並列と新大型計算機システム (SR16000/M1) での高速化チューニングを活かし、高分解能シミュレーションを行った。

図 7 にシミュレーションで得られた雲の 3 次元分布を示す。シミュレーション期間はオホーツク海高気圧および下層雲が発達し冷夏となった 2003 年の 6/15-7/31 で、水平格子サイズは経度方向  $1/10^\circ$ 、緯度方向  $1/16^\circ$  で、鉛直方向には 75 層 (下部対流圏に 50 層) とした。このような分解能での長期シミュレーションにより、層雲の空間構造や海面水温の空間変動の効果などを調べることが出来る。

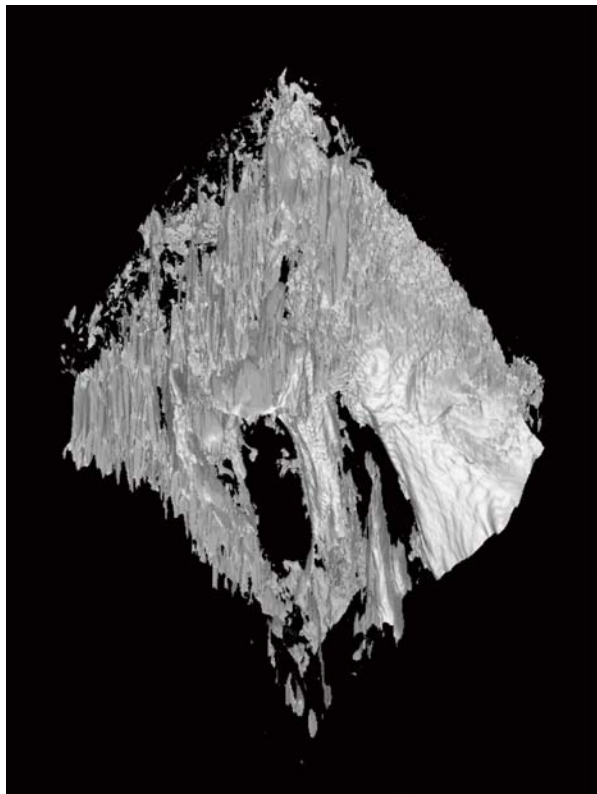
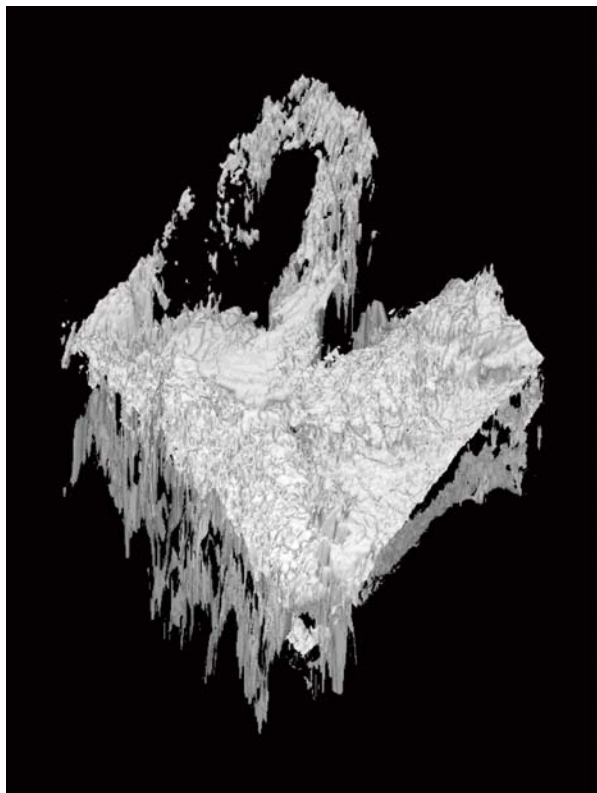


図 7：2003 年 7 月 6 日、オホーツク海周辺の雲の分布。札幌方面より見た図。(左) 雲の上側、(右) 雲の下側。

(2) 当初計画の達成状況について

(I) 計算科学分野での検討課題の進捗状況は 9 割

5 分程度である。未達成の 5 分は、k ループでの smp 並列の効果についての定量的評価である。これは最終成果報告会までに実施し報告する予定である。

(II) 環オホーツク圏海洋・大気シミュレーションの課題(II-a) オホーツク海を起源とする栄養物質循環と熱塩循環については、本年度は、鉄の季節変動と収支解析およびそれらに基づくマイナーな改良を優先した。予定していた経年変動実験は準備が完了し計算を開始した。後者については予定より少し遅れているが、トータルでは予定より進んでいる。(II-b) 潮汐による鉛直混合過程については、計画していた実験が全て終了した。査読付国際学術誌へも論文を投稿し受理・印刷された。(II-c) オホーツク海周辺の下層雲については、今年度計画していた計算は終了した。結果の詳細な解析は来年度以降に行う。

全体として、(II-a)で実施の順番を入れ替えたものの、当初計画はほぼ達成できたと判断している。

#### 4. 今後の展望

(I) 計算科学分野での検討課題：今年度の高速化チューニングが終われば海洋非静水圧 3 次元モデルについては、高速化チューニングの余地がほぼなくなる。そこで来年度以降は、鉄循環シミュレーションに用いるモデルの高速化を図りたい。

(II) 環オホーツク圏海洋・大気シミュレーション  
(II-a) オホーツク海を起源とする栄養物質循環と熱塩循環：今年度に計算を開始した経年実験について、本計算と結果の解析を来年度以降に予定している。加えて、来年度以降は、高分解能でのシミュレーションを目指し、先ず熱塩循環を高分解能で行っていききたい。

(II-b) 潮汐による鉛直混合過程：来年度以降は、3 次元実験を中心に実験を行うと同時に結果の解析を進めていきたい。

(II-c) オホーツク海周辺の下層雲：これまで夏季に注目してきたので、来年度以降は冬季に降雪をもたらす帯状雲（筋雲の太く安定したもの）に

についてもシミュレーションを行いたい。

#### 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）

Abe, S. and T. Nakamura: Processes of Breaking of Large-Amplitude Unsteady Lee Waves Leading to Turbulence. *Journal of Geophysical Research*, 118, 316-331, doi: 10.1029/2012JC008160.

中村知裕, 古関俊也, 三寺史夫, 2012: オホーツク海における大気海洋相互作用：夏季の下層雲－海面水温フィードバック. *沿岸海洋研究*, 第 50 巻, 第 1 号, 71-72.

内本圭亮, 中村知裕, 西岡純, 三寺史夫, 三角和弘, 津旨大輔：2012. オホーツク海の鉄循環シミュレーション. *月刊海洋*, 通巻 501 号, Vol. 44, No. 9, 504-510.

三角和弘, 津旨大輔, 吉田義勝, 内本圭亮, 中村知裕, 西岡純, 三寺史夫：2012. 北太平洋北西部における堆積物起源の鉄の輸送過程－数値モデルによる考察－. *月刊海洋*, 通巻 501 号, Vol. 44, No. 9, 496-503.

中野渡拓也, 中村知裕, 内本圭亮, 三寺史夫, 大島慶一郎, 羽角博康：2012. 近年の地球温暖化に伴うオホーツク海中層水温の昇温メカニズム. *月刊海洋*, 通巻 501 号, Vol. 44, No. 8, 466-472.

阿部祥子, 中村知裕：2012. 大振幅風下波の碎波に伴う鉛直混合. *月刊海洋*, 通巻 501 号, Vol. 44, No. 7, 385-391.

上原裕樹, Andrey A. Kruts, 三寺史夫, 中村知裕, Yuri N. Volkov, 小埜恒夫：2012. Okhotsk 海の経年変動に及ぼす Bering 海の影響. *月刊海洋*, 通巻 501 号, Vol. 44, No. 7, 416-421.

##### (2) 国際会議プロシーディングス

##### (3) 国際会議発表

Nakamura, T.：Recent findings of the Japanese oceanographic studies in the Sea of Okhotsk. The Japan-Russia 2-nd Workshop on Cooperation on the Preservation of the

Ecosystem in the neighboring areas of Japan and Russia, Feb. 15, 2013, Pacific Institute of Geography of Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, Vladivostok, Russia.

T. Nakamura, S. Koseki, H. Mitsudera. Response of summertime low-level clouds in the Okhotsk Sea to oceanic meso-scale SST variability. Japan Geosciences Union Meeting 2012. May 20-25 (23), 2012 Makuhari Messe, Chiba.

Y. R. Yakkala, T. Nakamura, H. Mitsudera. Numerical simulation of a snow cloud band over the Sea of Okhotsk. Japan Geosciences Union Meeting 2012. May 20-25 (23), 2012 Makuhari Messe, Chiba.

H. Uehara, A. A. Kruts, T. Nakamura, H. Mitsudera. Does (surface) salinity in the Bering Sea change (intermediate-layer) temperature in the Okhotsk Sea? Japan Geosciences Union Meeting 2012. May 20-25 (23), 2012 Makuhari Messe, Chiba.

#### (4) 国内会議発表

中村知裕: アリューシャン・千島での潮流・混合観測と今後の課題. 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「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」, 2013 年 3 月 8 日、東京大学大気海洋研究所、柏.

中野渡拓也, 内本圭亮, 中村知裕, 西岡純, 三寺史夫. 西部亜寒帯域の表層鉄の季節変動に関する数値シミュレーション. 2013 年度 日本海洋学会 春季大会, 2012 年 3 月 21-25 日, 東京海洋大学, 東京.

#### (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

三寺史夫・内本圭亮・中村知裕・西岡純・三角和弘・津旨大輔: オホーツク海および親潮域における物質循環のモデリング: 第 4 章 オホーツクの生態系とその保全, 北海道大学出版会, , 35-45 (2013).