

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「マルチスケール・マルチフィジックス現象  
の統合シミュレーション」  
研究課題「海洋循環のスケール間相互作用と  
大規模変動」

## 研究終了報告書

研究期間 平成18年10月～平成24年3月

研究代表者:羽角 博康  
(東京大学 大気海洋研究所、准教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本研究の目的は、現在の海洋の状態を司る物理プロセスのモデリングによる把握と、その理解に基づく効率的な海洋変動モデリング手法の開発である。特に、気候の中・長期変動や大規模変動において重要となる、海洋の中・深層循環をターゲットとした。

海洋の中・深層循環の起源は深層対流と呼ばれる数日・数 km 以下のスケールの現象である一方、その結果となる全球規模中・深層循環は数千年・数万 km のスケールを持つ。そして、それらの間をつなぐものは、水平 10 km スケールの渦運動や境界流、幅 100 km・長さ数千 km スケールの海流など、幅広い時間・空間スケールに渡る様々なプロセスである。海洋中・深層循環の変動を正しくシミュレートするには、これら多スケールに渡る様々な現象とそれらの相互作用を正しくモデルで表現することが求められる。この部分を取り扱うために、サブテーマ①「中・深層循環マルチスケールモデリング」を設定した。研究期間の前期には、深層水形成領域となる縁辺海ごとおよび大洋ごとのシミュレーションを通してそれらの内部における循環形成プロセスを明らかにした。その中でも特に縁辺海およびそこでの深層水形成のモデリングにおいては、サブテーマ②で得られた成果を活用した。後期には、縁辺海―大洋間などの大きなレンジに渡るスケール間相互作用を対象とした海洋循環シミュレーションを行い、海洋の局所規模現象と大規模変動の関連を明らかにした。このシミュレーションにおいては、サブテーマ③で開発された手法を活用した。

海洋中・深層水形成は主に高緯度の縁辺海で生じており、対流を駆動する海水の高密度化は海水生成時の塩分排出を主要因とする場合が多い。より広範囲の高緯度海洋や全球規模海洋の循環に対しても、海面の熱・淡水・運動量収支を大きくコントロールする要素として海水の影響は重要である。したがって、海洋中・深層循環のシミュレーションにおいては、様々なスケールにおける海水―海洋相互作用を正しくモデリングすることも求められる。この部分を取り扱うために、サブテーマ②「海水―海洋相互作用モデリング」を設定した。このサブテーマにおいては、人工衛星観測データの解析によって海水の生成・融解量を高い空間解像度で記述し、モデリングの検証材料や境界条件として利用できるデータセットを作成した。また、その中で新たに発見された顕著な高密度水形成領域に関して、現場観測とサブテーマ③で開発された数値モデルによるシミュレーションを融合させた研究を実施し、その領域における高密度水形成・流出過程に関する定量的理解が得られた。

海洋中・深層循環がコントロールする中・長期気候変動には、10 年スケールから 1000 年スケールまで様々なものが存在する。それらを限られた計算機資源の中でシミュレートするにあたっては、対象とする現象の時間スケールに応じた効率のよいモデリング手法が必要とされる。対象とする現象・時間スケールごとの効率的かつ効果的なモデリング手法を確立するために様々な要素の取捨選択を行うためには、中・深層循環をコントロールする様々なスケールのプロセスとそれらの間の相互作用を正しく理解する必要がある。サブテーマ①の成果として得られた成果に基づいてその手法確立を行うために、サブテーマ③「マルチタイムスケール海洋変動モデリング」を設定した。その成果として、多段階双方向ネストによる海洋シミュレーションシステムを開発した。

### (2) 顕著な成果

#### 1. 海洋変動モデリング手法の開発(ソフトウェア開発)

概要: 全地球規模海洋循環の変動と局所規模の海洋現象の間の相互作用を適切かつ効率的に表現することができる数値シミュレーションシステム(多段階双方向ネスト海洋モデル)を開発した。

#### 2. 南極メルツ氷河舌崩壊が海洋深層循環に及ぼす影響の評価(論文)

概要: 南極メルツ氷河舌近傍における局所的な海洋深層水形成は全地球規模の海洋深層循環の起点のひとつであるが、そのメルツ氷河舌が 2010 年 2 月に崩壊し、深層水形成環境が激変した。このイベントの全地球規模海洋循環に対する影響を数値シミュレーションにより評価した(Kusahara et al., 2011, Nature Communications)。

### 3. 南極周囲における新たな深層水形成領域の発見(論文)

概要:南極周囲の海洋では冬季の結氷に伴って高密度の深層水が形成され、それが全地球規模の深層循環の起点になっている。この現象は極めて局在化されており、これまでに南極沿岸の数箇所で生じることが特定されていたが、人工衛星データに基づく結氷量解析によって新たな深層水形成領域を見出した(Tamura et al., 2008, Geophysical Research Letters)。

## § 2. 研究構想

### (1) 当初の研究構想

本研究の目的は、現在の海洋の状態を司る物理プロセスのモデリングによる把握と、その理解に基づく効率的な海洋変動モデリング手法の開発である。特に、気候の中・長期変動や大規模変動において重要となる、海洋の中・深層循環をターゲットとする。

この目的を達成するために本研究では、①中・深層循環マルチスケールモデリング、②海水ー海洋相互作用モデリング、③マルチタイムスケール海洋変動モデリングの3サブテーマを設定する。①は本研究の中核をなすもので、局所的な中・深層水形成から全球規模の中・深層循環に至るまでの様々なプロセスとその相互作用を、モデリングを通して明らかにする。②は①において考慮すべき重要な素過程のひとつであり、既存の海水モデルのパラメータを最新の観測的知見に基づいて再評価することから始め、対象とするスケールごとの海水モデル開発・改良を行う。③では①の結果を応用して、対象とする時間スケールに関する海洋変動について、それを効率的かつ効果的にモデリングするための手法開発を行う。

研究の進行に関しては、研究期間5年半を前期3年半と後期2年に分ける。前期では、深層水形成領域・縁辺海・大洋・全球という空間スケール別のシミュレーションを実施してそれぞれの空間スケールにおける現象・循環をコントロールする物理プロセスの特性を明らかにするとともに、深層水形成において重要な海水過程のモデル高度化を実施する。その理解に基づき、後期2年では海洋の局所規模現象と全地球規模変動の関連を取り扱いながら、それらのスケール間の相互作用を適切かつ効率よく表現できる海洋シミュレーションシステムを開発する。

### (2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

とくになし。

## § 3 研究実施体制

### (1) 「循環モデリング」グループ

#### ① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
田中 幸夫	海洋研究開発機構 地球環境変動領域	チームリーダー	H18.10～
津川 元彦	海洋研究開発機構 地球環境変動領域	主任研究員	H18.10～
小室 芳樹	海洋研究開発機構 地球環境変動領域	研究員	H18.10～
鈴木 立郎	海洋研究開発機構 地球環境変動領域	研究員	H18.10～
齋藤 冬樹	海洋研究開発機構 地球環境変動領域	研究員	H18.10～
黒木 聖夫	海洋研究開発機構 地球環境変動領域	ポスドク研究員	H20.4～H21.3
黒木 聖夫	海洋研究開発機構 地球環境変動領域	特任研究員	H22.4～
坂本 天	海洋研究開発機構 地球環境変動領域	特任研究員	H22.4～
建部 洋晶	海洋研究開発機構 地球環境変動領域	研究員	H22.4～

#### ② 研究項目

- ・縁辺海から大洋までの各スケール別およびスケール間相互作用モデリングの実施
- ・高解像度モデルを用いた海洋変動モデリングの実施
- ・棚氷ー海洋相互作用モデル開発

(2)「海氷モデリング」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
大島 慶一郎	北海道大学 低温科学研究所	教授	H18.10～
中村 知裕	北海道大学 低温科学研究所	講師	H18.10～
深町 康	北海道大学 低温科学研究所	准教授	H18.10～
豊田 威信	北海道大学 低温科学研究所	助教	H18.10～
田村 岳史	北海道大学 低温科学研究所	博士研究員	H19.4～H22.2
草原 和弥	北海道大学 低温科学研究所	博士研究員	H19.4～H19.7
中野渡 拓也	北海道大学 低温科学研究所	博士研究員	H20.10～

② 研究項目

- ・海氷モデル・パラメタリゼーション開発
- ・海氷域モデリングの実施

(3)「変動モデリング」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
羽角 博康	東京大学 大気海洋研究所	准教授	H18.10～
阿部 彩子	東京大学 大気海洋研究所	准教授	H18.10～
岡 顕	東京大学 気候システム研究センター	特任研究員	H20.4～H22.3
岡 顕	東京大学 大気海洋研究所	講師	H22.4～
安田 一郎	東京大学 大気海洋研究所	教授	H18.10～
伊藤 幸彦	東京大学 大気海洋研究所	准教授	H18.10～
黒木 聖夫	東京大学 気候システム研究センター	特任研究員	H19.4～H20.3
草原 和弥	東京大学 大気海洋研究所	特任研究員	H19.8～
笹島 雄一郎	東京大学 大気海洋研究所	特任研究員	H19.10～H22.12
渡邊 英嗣	東京大学 気候システム研究センター	特任研究員	H19.4～H20.3
松村 義正	東京大学 大気海洋研究所	特任研究員	H20.4～H23.3
川崎 高雄	東京大学 大気海洋研究所	特任研究員	H20.4～
浦川 昇吾	東京大学 気候システム研究センター	D2	H21.4～H22.3

② 研究項目

- ・海洋モデル開発
- ・変動モデリングの手法開発と実験実施
- ・観測データに基づく実験結果検証
- ・高並列チューニング

## §4 研究実施内容及び成果

### 4.1 中・深層循環マルチスケールモデリング(海洋研究開発機構 田中グループ)

#### (1)研究実施内容及び成果

海洋の中・深層循環の起源は深層対流と呼ばれる数日・数km以下のスケールの現象である一方、その結果となる全球規模中・深層循環は数千年・数万kmのスケールを持つ。そして、それらの間をつなぐものは、水平10kmスケールの渦運動や境界流、幅100km・長さ数千kmスケールの海流など、幅広い時間・空間スケールに渡る様々なプロセスである。海洋中・深層循環の変動を正しくシミュレートするには、これら多スケールに渡る様々な現象とそれらの相互作用を正しくモデルで表現することが求められる。この部分を取り扱うために、サブテーマ①「中・深層循環マルチスケールモデリング」を設定した。研究期間の前期には、深層水形成領域とな

る縁辺海ごとおよび大洋ごとのシミュレーションを通してそれらの内部における循環形成プロセスを明らかにした。後期には、縁辺海ー大洋間などの大きなレンジに渡るスケール間相互作用を対象とした海洋循環シミュレーションを行い、海洋の局所規模現象と大規模変動の関連を明らかにした。

#### 4.1.1 ラブラドル海

北大西洋の北縁に位置するラブラドル海は、北大西洋深層水の形成領域である。この深層水形成は全海洋を巡る深層循環の起点のひとつであり、その循環が輸送する熱量は大西洋地域を中心とした気候に大きな影響を及ぼしている。このラブラドル海での深層水形成を起点とする深層循環は気候の温暖化の中で顕著に弱まることが予測されており、気候変動という観点からの関心が高い対象でもある。

ラブラドル海で深層水形成が生じる主たる原因は、冬季に北米大陸から吹き出す寒気によって海面が強く冷却されることにある。この冷却はラブラドル海全域に及ぶものだが、深層対流と呼ばれる高密度化された海水の海面から深層への沈降は、ラブラドル半島沖のごく限られた領域でしか生じていないことが観測によって知られている。深層対流が生じる場所を決める大きな要因は、風によって駆動されるラブラドル海内の反時計回り循環がラブラドル海深層に存在する比較的高密度の海水を持ち上げ、その効果が海盆中央部ほど強いことによる。この作用によって、同じ強さの海面冷却が与えられたとしても、海盆中央部ほど深層対流が生じやすい状況が作られている。しかしながら、実際に深層対流が頻繁に生じている場所はラブラドル半島側に顕著にずれている。これは、グリーンランドに沿って流れる強海流を起源とする水平スケール 10 km 程度の渦が海盆中央部に向けて比較的低密度の海水を輸送するためだと考えられている。実際、人工衛星観測などにより、グリーンランド沿岸からラブラドル海中央部に向けて多数の渦が輸送されていることが確認されている。グリーンランド沿岸を流れる強海流は、より沿岸側の西グリーンランド海流とより外洋側のアーミンガー海流からなり、前者は北極海を起源とする低温低塩分水、後者はメキシコ湾流を起源とする高温高塩分水と、特徴に大きな違いがある。このどちらを起源とする渦であっても、ラブラドル海中央部に輸送されれば深層対流を抑制する効果を持つ。しかし、実際にどちらを起源とする渦が深層対流の抑制にどの程度効いているのかについては、まだ決着がついていない。

この問題に対しては、本研究にやや先行するシミュレーション研究が海外で行われている。その結果では、主としてアーミンガー海流を起源とする高温水の輸送が深層対流を抑制するのだが、一方でラブラドル海中央部にかけての広い領域で深層対流が生じてしまうという欠点が見られる。すなわち、そのシミュレーションで表現された高温水の輸送だけでは、ラブラドル海中央部の深層対流を抑制しきれないという結果とも解釈できる。そのシミュレーションで不足していると考えられる点としては、ラブラドル海内部の解像度が足りないために渦の挙動が十分に再現されないこと、もしくは西グリーンランド海流およびアーミンガー海流の上流部分の表現が不十分であるために、渦が輸送する海水が十分に低密度でないことが挙げられる。

本研究では、ラブラドル海内部を高い解像度で表現しながら、全体としては比較的低い計算コストでグリーンランド沿岸流の上流部分までを十分に表現できるような座標系・格子系を設定し、この問題に取り組んだ。その結果、深層対流が生ずる領域を含めて、様々な面で従来よりも高い再現性を持つラブラドル海シミュレーションを実現することができた。これにより、ラブラドル海中央部での深層対流の抑制において、低塩分の西グリーンランド海流を起源とする渦が高塩分のアーミンガー海流を起源とする渦と同程度に重要であることが示された(図 1.1)。

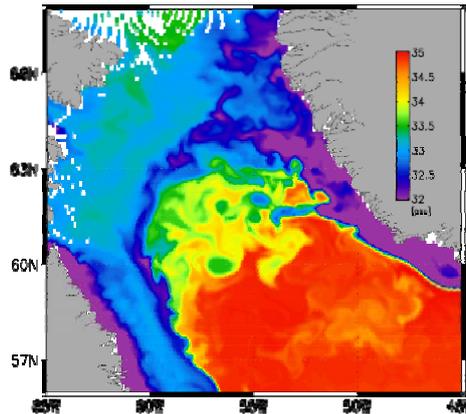


図 1.1: ラブラドル海シミュレーション結果における海面塩分分布の瞬間値。グリーンランド(右上)沿岸に沿って流入する低塩分水が渦によって海盆中央部に輸送されている。

#### 4.1.2 オホーツク海

太平洋深層の大部分は北大西洋北縁もしくは南極沿岸で形成される深層水で占められており、太平洋およびそれに隣接する縁辺海には顕著な深層水形成が存在しないことが知られている。しかし、北太平洋 1,000 m 深付近の中層には顕著に低塩分の海水が存在し、その分布の様相から、その起源がオホーツク海にあると考えられている。すなわち、北太平洋中層には、オホーツク海での中層水形成を起源とする中層循環が存在すると考えられる。この循環はオホーツク海から低塩分水を輸送することとどまらず、ロシア沿岸から流入する各種栄養物質を輸送することによって、北太平洋亜寒帯域における高生物生産を支えている可能性が指摘されている。しかしながらその実態は明らかになっておらず、今のところ有力な仮説にとどまる。

北太平洋中層水の起源は、オホーツク海北西沿岸における高密度水形成にあると考えられている。オホーツク海は冬季にユーラシア大陸から吹き込む寒気によって結氷するが、同時にその風によって北西沿岸域の海水は沿岸から引き剥がされる。海水は大気海洋間の断熱材として機能するため、ひとたび結氷した海面からは厳冬期でもあまり熱が奪われないが、このオホーツク海北西沿岸域のような状況(沿岸ポリニヤ)の下では冬季に活発に海水が生成し続ける。海水が持つ塩分の大部分は結氷時に海水に取り込まれないため、海水生成は高塩分水の排出を伴い、高密度水の形成につながる。この高密度水の形成過程を定量的に把握することが、北太平洋中層循環を理解する第一歩であるが、沿岸ポリニヤは幅数 km 程度という極めて局在化した現象であるため、たとえ比較的狭い縁辺海であるラブラドル海であっても、従来のモデリングではその過程が十分に表現されることがなかった。

本研究では、従来のモデリング研究と比べて格段に高い解像度でオホーツク海全体を表現しつつ、沿岸ポリニヤが生じる北西沿岸部ではさらなる高解像度を実現するような座標系・格子系を設定したシミュレーションを実施することにより、オホーツク海における高密度水形成を定量的に把握した。北西沿岸部における海水生産量分布は本 CREST チーム内の海水モデリンググループが行った人工衛星データ解析の結果とよく一致し(図 1.2, 2.7)、また、海盆全体の海水分布の様相や海洋内部の構造の再現性に関しても、従来のモデリング結果に比べて格段に改善されている。また、河川水流入量や千島列島近傍の混合係数など、高密度水形成に影響を及ぼすいくつかの要因に関するパラメータ感度実験を行い、重要なプロセスの同定を行った。

#### 4.1.3 東南極域

南極周囲は北大西洋北縁域とともに顕著な深層水形成領域として知られている。南極周囲における深層水形成領域に関しては、ウェッデル海とロス海におけるものが主要なものとして従来から認識されてきたが、近年は東南極域(経度が東経で表される南極域)の重要性が指摘されてきている。南極周囲の深層水形成で重要な要素は、冬季の結氷に伴う高塩分水排出によ

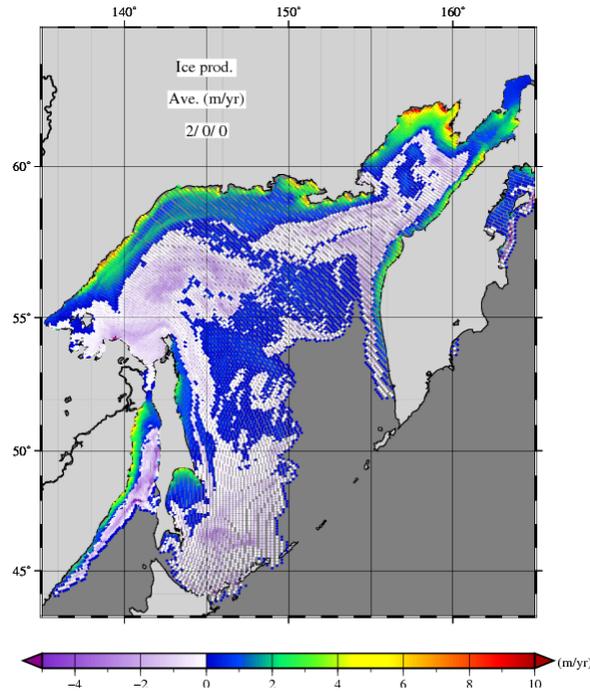


図 1.2: オホーツク海シミュレーション結果における年間海氷生産量。

る海水高密度化である。本CRESTチーム内の海氷モデリンググループが行った人工衛星データ解析から示される通り(図 1.2)、東南極域の沿岸には極めて高い海氷生産量を示す領域が点在している。これらの領域は 4.1.2 で述べた沿岸ポリニヤに相当する。南極大陸縁では東風が卓越し、南極大陸から沖側に突き出た地形が存在すると、その風下側に沿岸ポリニヤが形成される。沿岸ポリニヤでは高密度水が形成されることは間違いないが、その高密度水は必ずしも外洋の深層を占める深層水につながるとは限らない。南極域は現場観測が特に困難であるため、沿岸ポリニヤの存在など人工衛星による情報を除いては、観測によって得られる情報が極めて少ない。南極周囲における深層水形成およびそれを始点とする深層循環の研究に関してはシミュレーションに大いに活用すべきであるが、東南極域をターゲットした大規模な数値モデリング研究はこれまでほとんど行われてこなかった。

本研究では、東南極域全体を数 km の水平格子で覆いつつ、特に顕著な海氷生成を示すメルツ氷河舌領域(図 1.3 中の Mertz-Ninnis)をさらに高解像度で表現する座標系・格子系を設定し、メルツ氷河舌領域における深層水形成に関するシミュレーションを実施した。海氷生産量の再現性は全体的に良く(図 1.3)、少なくとも高密度水形成までに関しては現実性の高いシミュレーションが保証されている。

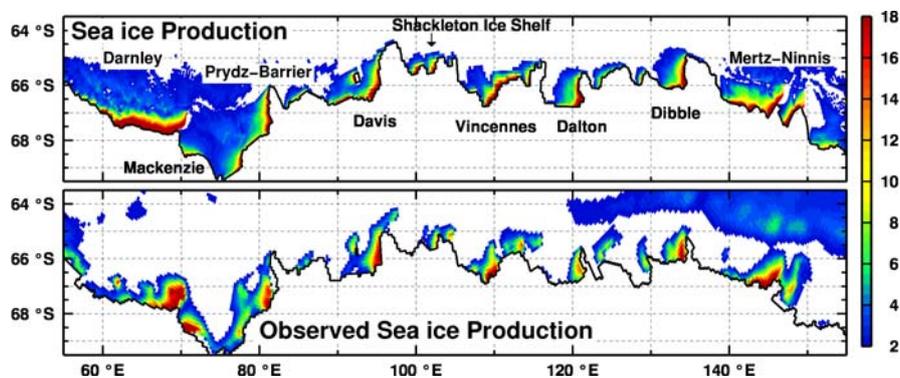


図 1.3: (上) 東南極域シミュレーション結果および(下)人工衛星データ解析による年間海氷生産量。

シミュレーション結果のメルツ氷河舌領域においては、外洋の深層水につながる高密度水の大陸棚域からの流出が表現されている(図 1.4 左下)。これに対応する領域の大陸棚縁では夏季に実施された海洋観測データが存在し、シミュレーション結果はそれによく一致している。冬季の観測データは存在せず、これまで深層水の流出過程は不明であったが、このシミュレーション結果からその実態を明らかにすることができた。高密度水形成が冬季に限定された季節的な現象であることは既によく知られているが、その季節的なオン・オフによって大陸棚上の流れ場も季節的に大きく変動することや、冬季に生成された高密度水は翌年を待たずに全て外洋に排出されることが明らかになった。

メルツ氷河舌領域の高密度水形成の原因となっているのはメルツ氷河舌(図 1.4 中の MGT)という沖側に突き出た地形的特徴のもとで維持される沿岸ポリニヤの存在であるが、このメルツ氷河舌は陸ではなく南極大陸上の氷床が海上にせり出した氷河であり、海底まで達しない氷河が浮いた状態で存在している。深層水形成にとって重要な役割を果たすこのメルツ氷河舌が根元から折れるというイベントが 2010 年 2 月に発生した。折れた氷河舌は冰山として外洋に流出し、その結果メルツ氷河舌領域の深層水形成環境は劇的に変化したものと考えられる。このメルツ氷河舌崩壊が深層水形成に及ぼす影響を評価するためのシミュレーションを実施したところ、高海氷生産領域の消失(図 1.4 右上)によってこの領域での深層水形成はほぼ無くなり(図 1.4 右下)、それによって長期的には太平洋に流入する南極周囲起源の深層水が大きく現象する可能性が示された。近年の観測によって北太平洋の最深部が昇温していることが示されており、気候の温暖化との関連性が取りざたされているが、メルツ氷河舌崩壊はその変化を上回る影響を北太平洋に及ぼす可能性も示された。

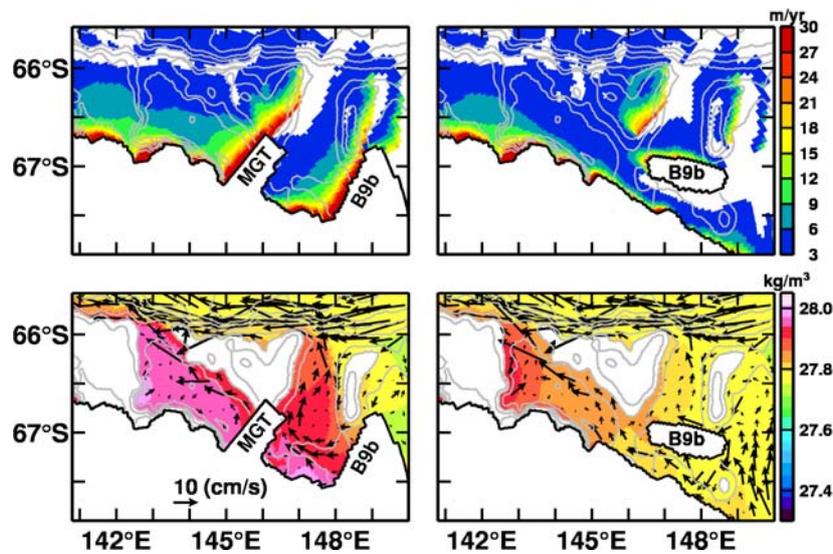


図 1.4: 東南極域シミュレーション結果におけるメルツ氷河舌領域の(上)年間海氷生産量と(下)海底直上海水密度・速度。(左)メルツ氷河舌崩壊前、(右)崩壊後。

#### 4.1.4 南大洋

南極周極流は南極大陸の周りを東向きに流れる海流で、大陸に遮られないことが大きな特徴である。また、太平洋、大西洋、インド洋間を結ぶ海流であり、地球全体の気候を決定する上で大きな役割を果たしている。この海流中には海洋渦が多く存在し、その振舞が人工衛星等で詳細に観測されている。この海洋渦は数十 km 程度の大きさであるが、数千 km スケールの南極周極流の循環に大きな影響を与えていると考えられている。しかしながら、この海洋渦と周極流との相互作用は空間スケールが大きく異なることに起因して、十分に分かっているとは言えない。ここでは最先端の海洋モデルを用いて、計算領域を南極周極流が表現できる程大きく、またグリッド幅は海洋渦が表現できる程度に細かくとることによって、大規模シミュレーションを実施し、

南極周極流と海洋渦の相互作用を研究した。その結果、塩分極小層で特徴づけられる南極中層水の形成が、低塩分の海水が海洋渦によって下方に輸送されることによって形成されていることが明らかになった。

先端的な海洋モデルCOCOを用いて南極周極流の大規模なシミュレーションを実施した。計算領域は南緯 20 度から南緯 75 度までの南極周極流を全てカバーする領域、またグリッド幅は海洋渦の効果を表現するために、経度方向に 1/8 度、緯度方向に 1/12 度の約 8 km幅を採用した。この水平解像度により海洋渦を解像することが可能である。鉛直層数は 85 層を採用した。計算領域全体のグリッド総数は  $4320 \times 360 \times 85 = 132,192,000$  の大規模計算シミュレーションになる。時間積分の為の初期条件は、静止海洋において観測値の年平均温度・塩分分布をモデルに緩和することによって作成した。外力としての風応力、熱、淡水フラックスは観測値から計算された。この外力によってモデルを 50 年間時間積分し、最後の 3 年間の計算結果を解析した。

海洋渦に起因する時空間スケールが比較的小さい変動がより時空間スケールの大きな海流に及ぼす効果は、渦誘導速度という概念によって定量化することができる。渦を解像する大規模計算が困難であること、および渦誘導速度の定式化がこれまで不十分であったことに起因して、この渦誘導速度をシミュレーション結果から計算した例はあまり多くない。ここでは新たな解析手法を確立した上で十分な量のシミュレーションデータを確保することにより、渦誘導速度をシミュレーション結果から正確に計算した。その結果、ブラジル・マルビナス海流合流域で海洋渦に起因する強い下降流が存在し、これが南極中層水の低塩分水の水塊を形成していることがわかった。

海洋渦の活動を端的に表す海面水位の変動について、シミュレーション結果から計算したものと人工衛星観測データに基づくものを図 1.5 に示す。人工衛星観測に基づく海面水位変動は、南極周極流に沿って大きな値を示している。特にマルビナス海流とブラジル海流の合流域であるアルゼンチン海盆、アガラス海流が南極周極流と合流するアフリカ南端海域で大きな値を示している。シミュレーションによる値は、観測値に比較して全体的に強めになっているが、変動の空間分布は人工衛星観測と非常に良く一致していることが分かる。図 1.6 には観測データに基づいて作成された空間密度勾配が急峻な線（フロント）と、シミュレーションで得られた海面の速度分布を示した。強い流れとフロント位置がほぼ一致していることが分かる。これらのことから、このシミュレーション結果は観測されている海流を細部まで良く再現していると考えられることができる。

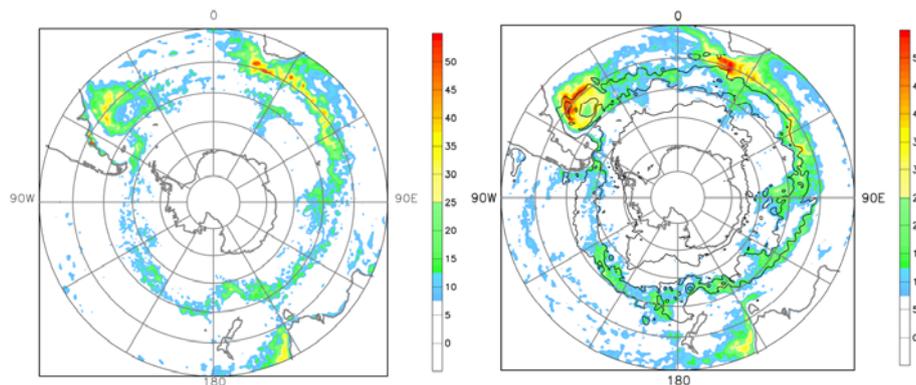


図 1.5: (左)シミュレーションによって得られた海面水位変動(cm)。黒線は流線関数を表している。(右)衛星観測データに基づく海面水位変動の分布。

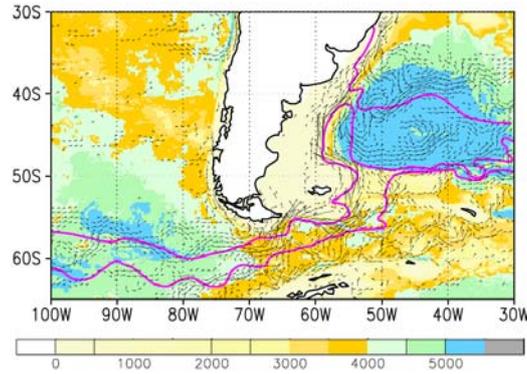


図 1.6: ブラジル・マルビナス海流合流域の海面速度分布。一番長い矢印は 1.1 m/s を表す。海底深度は色で表されている(単位: m)。ピンク線は、南から観測データに基づいた寒帯、亜南極、亜熱帯の frontline を表している。

このシミュレーション結果を用いて、前述した渦輸送速度を計算した(図 1.7)。南アメリカ東岸大陸棚沿いに、渦誘導速度によって強い下降流が形成されている。すなわち、このブラジル・マルビナス海流の合流域で発生している強い渦の輸送効果は、海水を下向きに輸送している。

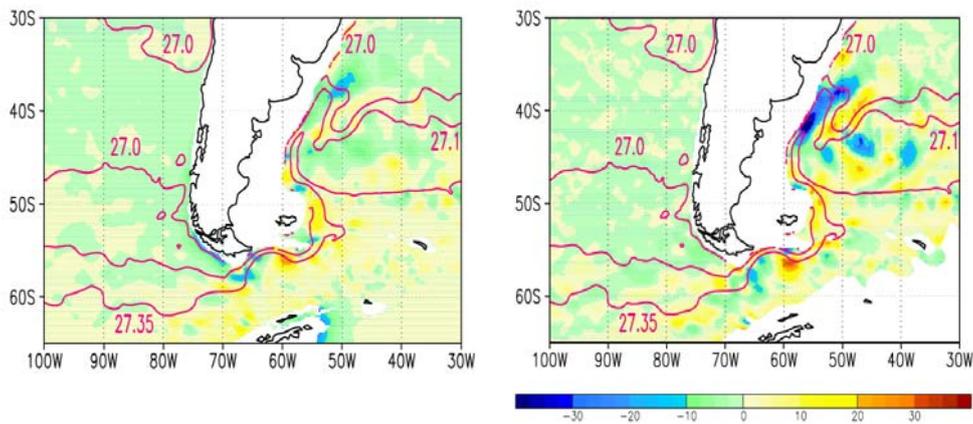


図 1.7: (左)シミュレーション結果から計算された時間平均速度の分布(単位:  $10^{-6}$  m/s)。(右)渦輸送速度を加えた鉛直速度分布(単位:  $10^{-6}$  m/s)。

図 1.8 に深度 650 m での水平塩分分布および西経 30 度での塩分分布の鉛直断面を示す。低塩分水が密度 27.0 から 27.35 の間に見られ、また、最も低い塩分の水が密度 27.1 の線に沿っていることがわかる。これらの塩分分布は、南極中層水の特徴づけるものである。図 1.7 より、下降流が強い領域を密度線 27.1 が通過している。また図 1.8 より低塩分水は密度 27.1 に沿って下方に輸送されている。これらのことより、この低塩分水が渦誘導速度によって下方に輸送されていること分かる。つまり南極中層水は、ブラジル・マルビナス合流域での海洋渦によって、低塩分水が下方に輸送されることによって形成されていることが分かった。

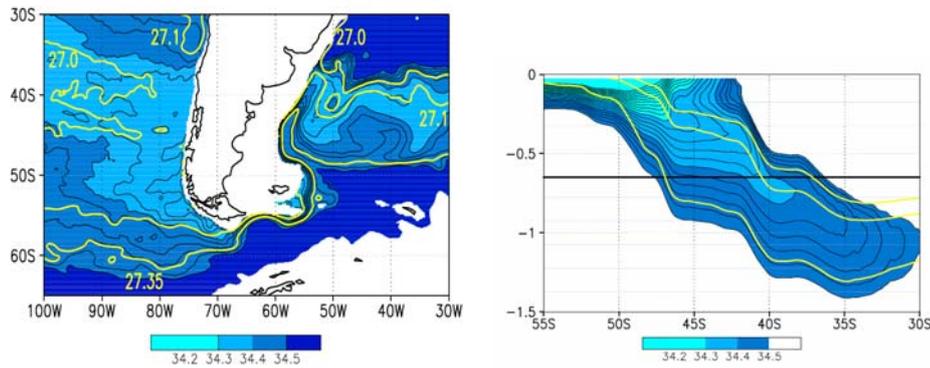


図 1.8: (左)水深 650 m における塩分濃度分布。(右)西経 30 度における鉛直断面塩分濃度分布。縦軸の深さの単位は km で黒線は 600 m 深を示している。等高線の間隔は 0.02 psu で、黄色線は南から北に向けて、密度面 27.35, 27.1, 27.0 を表している。

本研究では、長さスケールが数十 km 程度である海洋の渦が、長さスケールが数千 km にわたる海洋の大循環に与える影響を、渦を解像する海洋モデルを用いて解析した。その結果、空間スケールが数十 km、時間スケールが数ヶ月の渦が、ブラジル海流とマルビナス海流が合流する領域において、空間スケールが数千 km、時間スケールが数十年の南極中層水の形成に主要な役割を果たしていることを明らかにした。この渦の輸送過程と南極中層水形成メカニズムについては、今まで数値モデルの研究や数値モデルと観測結果の組み合わせた研究などがあるが、現実的な地形でのメカニズムの解明はできていなかった。この研究は、時空間スケールが異なる渦の活動と海洋循環の相互作用が南極中層水の形成に本質的に重要な役割を果たしており、それがブラジル・マルビナス海流合流域で主に起こっている現象であることを、初めて示したものである。

#### 4.1.5 深層循環経路

海洋の中層から深層にかけての循環である熱塩循環は地球規模の気候変動を支配しており、この循環を正確に理解することは気候変動研究には欠かせない。北大西洋北縁を起点とするこの循環は数千年の時間をかけて再び北大西洋に戻ってくるが、この戻り経路としてインド洋からアフリカ南端を経由して大西洋に戻る「暖水経路」と、南アメリカ大陸と南極大陸に挟まれたドレーク海峡を経由して大西洋に戻る「冷水経路」が提唱されている。この両方の経路ともに、海洋渦がその流量の決定に重要な役割を果たしていると考えられているが、その海水輸送のメカニズムは良く分かっていない。本研究では、この「暖水経路」の海水輸送メカニズムに重要な役割を果たす低気圧性渦のナタール・パルスについて、その生成・発達メカニズムを解明した。

アフリカ大陸南東を流れるアガラス海流中に現れるナタール・パルスは、インド洋から大西洋に海水を輸送するアガラス・リングの生成機構に深く関わっており、「暖水経路」の流量を決める大事な現象である。ここでは新規に開発した立方体格子海洋モデルを用いて、全球海洋シミュレーションを実施した。ナタール・パルスを解像する為にアフリカ南東部に多くのグリッドを配置し、他の領域の解像度は比較的粗くした。この結果、全球平均で約 40 km のグリッド幅であるものの、一番細かいグリッド幅は 10 km 以下になった。鉛直方向には 43 グリッドを用い、海底地形は 2 分間隔の世界海洋地形 (ETOPO2) から生成した。海面熱・淡水フラックスは観測値から計算したものをを用いた。また観測から得られた年平均温度・塩分分布を基にシミュレーションの初期値を作成し、その時間発展を計算した。積分時間は 5 年間で、最後の 2 年間の結果を解析した。

図 1.9 に計算されたアフリカ南端領域の海面高度と海面速度を示す。南アフリカ大陸東岸に沿って流れるアガラス海流、この海流が南極周極流と合流して東向きに反転して流れるアガラス反流、アガラス海流から大西洋に流入するアガラス・リング等が良く再現されている。またモザ

ンビーク海峡の連結した高気圧性渦、マダガスカル島の南端の複数の高気圧性渦も良く再現されている。図1.9の矢印で示された小さな低気圧性渦がナタール・パルスである。このナタール・パルスはモザンビーク海峡を起源とする高気圧性の渦を沖合にとまっている。

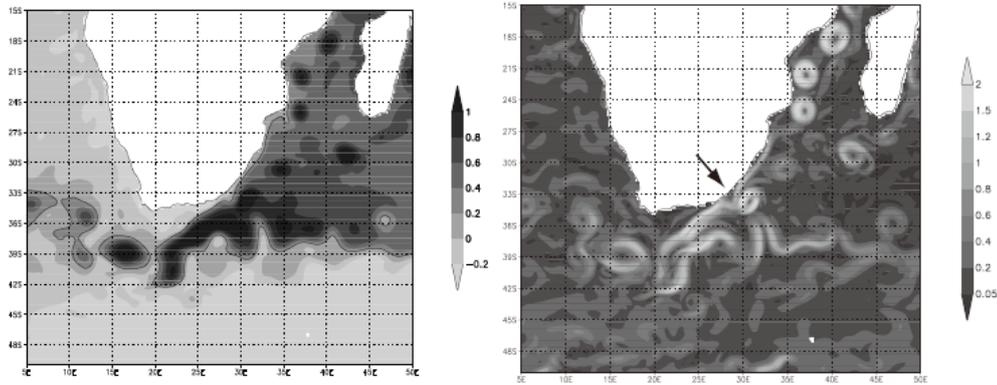


図 1.9: アフリカ南端部の(左)海面高度分布(m)と、(右)海面速度分布(m/s)。右図の矢印で示したところにナタール・パルスがある。

このナタール・パルスの生成・発達メカニズムを調べる為に、エネルギー変換過程を解析した。海洋のエネルギー変換過程には、大規模平均運動エネルギーが渦エネルギーに変換されるバトロピック(BT)・エネルギー変換と大規模平均位置エネルギーが渦エネルギーに変換されるバロクリック(BC)・エネルギー変換がある。この二つのエネルギー変換率の量的関係を調べることによってナタール・パルスのエネルギー源を解析した。図 1.10 にナタール・パルスが存在する領域でのエネルギー変換率の鉛直構造と時間発展を示した。エネルギー変換は 800 m より浅い場所で起こっており、BCエネルギー変換率に比べて、BTエネルギー変換率が支配的である。また、BTエネルギーが渦エネルギーに変換されてナタール・パルスが時間発展していく様子が明らかになっている。つまり、このナタール・パルスは大規模平均運動エネルギーがエネルギー源になって生成されていることが分かる。これは、世界の海洋渦のエネルギー源がほとんど大規模平均位置エネルギーの変換によって作られていることと大きく異なる点である。

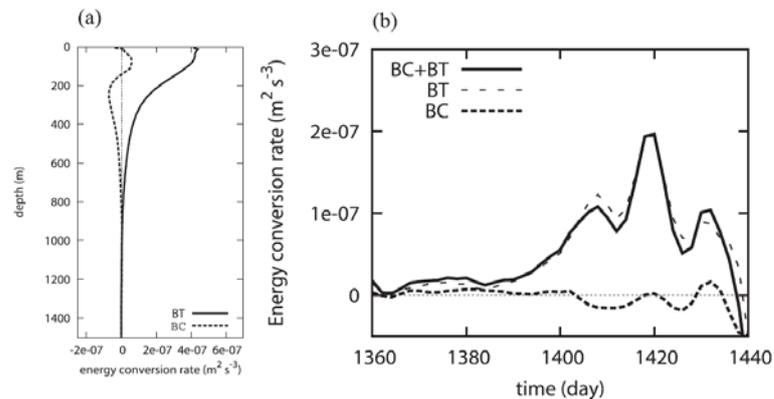


図 1.10: (a)ナタール・パルス領域でのエネルギー変換率の鉛直分布。(b)ナタール・パルス領域でのエネルギー変換率の時間発展。

次にナタール・パルス生成・発達メカニズムを解析する為に、東経 27 度から 33 度、南緯 34 度から 29 度の範囲に存在するナタール湾での渦位の時間発展を解析した(図 1.11)。その結果以下の様にナタール・パルスの渦位が時間発展することが分かった。まず①モザンビーク渦がナタール湾に到着したときに岸から低気圧性の渦位が注入される。②この低気圧性の渦位はアガラス海流によって南方に移流される。③この低気圧性の渦位が鉛直方向に引き伸ばさ

れてナタール・パルスが生成される。④岸から低気圧性渦位の注入が続きナタール・パルスが成長していく。この成長過程は、ナタール湾での平坦な海底地形がナタール・パルスを成長させるという、過去に提唱されたメカニズムとは異なる。そこでナタール湾の平坦な海底地形を、平坦でない海底地形の換えたシミュレーションを実施した。その結果ナタール湾の海底地形はナタール・パルスの成長に影響を与えないことが明らかになった。

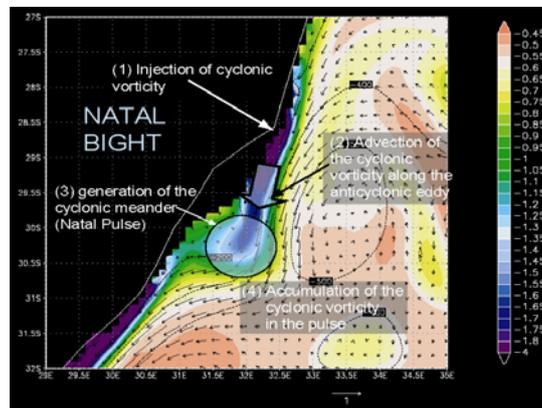


図 1.11: 等高値はナタール湾での渦位分布 ( $10^{-6}$  /m/s)を表す。矢印は速度場(m/s)。

本研究では、アガラス海流中に発生するナタール・パルスの発生と成長メカニズムを、現実的なシミュレーションを通して解明した。このナタール・パルスは「暖水経路」の輸送過程であるアガラス・リングの生成に主要な役割を果たす。これまでもアガラス海流のシミュレーションは多くあるが、ナタール・パルスを再現したものは少ない。ナタール・パルスを再現するには、アガラス海流を十分な解像度で再現すると同時に、モザンビーク渦も再現する必要があるからである。過去にはナタール・パルスの再現を報告した研究も存在するが、その発生、成長機構については解析していない。この研究は、ナタール・パルスの発生から成長に至る過程の物理的メカニズムを明らかにした初めての研究である。

#### (2)研究成果の今後期待される効果

本サブテーマは海洋物理学の基礎研究という色彩が強い。その意味においては、本研究のノウハウをもって同様のモデリング研究を他の海域に適用することで、科学的に意義の高い成果を引き続き挙げることが可能と考える。特に、海氷域の現象に関しては、海氷モデリンググループとの間のモデリング観測融合研究の展開によって、世界的に見ても先端的なモデリング手法を確立することができている。この確立されたモデリング手法の直接の適用先として、全世界で最も理解が遅れた氷海域である北極海が挙げられる。平成 23 年 11 月に開始された「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス (GRENE) 事業」の北極気候変動分野において、本 CREST チームの体制を引き継いだ課題が採択された。この GRENE 事業の戦略目標のひとつとして「北極海航路の利用可能性評価につながる海氷分布の将来予測」が挙げられており、我々の課題はこの戦略目標に貢献するものとして、研究・開発を進める予定である。

一方、本サブテーマで明らかにされた科学的成果は、本 CREST 課題の最終プロダクトと言える海洋変動モデリングシステムを構築する基礎を成している。後述する通り、この海洋変動モデリングシステムは、今後様々な形で実用的に応用されることが期待される。

### 4.2 海氷－海洋相互作用モデリング(北海道大学 大島グループ)

#### (1)研究実施内容及び成果

海洋の大規模な中深層循環は、重い水が沈み込み、それが徐々に湧き上がってくるという密度(熱塩)循環である。重い水が生成されるのが極域・海氷域の海であり、海氷生成の際に

はき出される高塩分水(ブライン)が重い水の生成源になっている。海氷生産量は中深層循環とその変動を決める最重要な因子にも関わらず、それを捉える現場観測が極めて困難であることから、変動はもとよりその平均的な量・分布さえも今までよくわかっていなかった。海洋大循環モデルにおいても、海氷生産量は海氷域での熱塩フラックス境界条件を与えることになるので、これがわからないことは海氷域での適切な境界条件・検証データがないことに相当する。実際に従来のほとんどのモデルでは、南極海域での表層からの重い水の潜り込みは、本来あるべき沿岸ポリニヤからではなく深い外洋域で生じており、正しく熱塩循環が表現されているとは言えない。

本サブテーマでは、まず衛星データと大気客観解析データから海氷生産量を見積もるアルゴリズムを開発し、南大洋、北極海、オホーツク海において、海氷生産量と海氷域での熱塩フラックスのデータセットを作成した。そして、これらのデータセットを比較・検証データとして、南大洋やオホーツク海において、海洋海氷結合モデルによる高密度水形成や熱塩循環の研究を行った。また、海洋モデルに対しては、これら海氷域の熱塩フラックスデータを用いることで、海氷モデルを入れなくても海氷生成による高密度水形成や中深層循環を取り入れることができ、そのようなモデル研究を、南大洋を対象として行った。

#### 4.2.1 南大洋での海氷生産量・熱塩フラックスのマッピングとモデル研究への利用

海氷生成およびその移動・融解は一連のプロセスとして熱塩を再分配する効果があり、それが海洋の熱塩バランスや熱塩循環を決める最重要な因子となる。南大洋においても、これらのプロセスの定量的な研究は行われていなかった。

より正確な海氷生産と熱塩フラックスの見積もりのためには、海氷厚の情報が非常に重要である。本サブテーマでは、衛星マイクロ波放射計 SSM/I データを用いて薄氷域の氷厚を検出して、ECMWF・NCEP データを使用して熱収支計算を行い、大気への熱損失から、(それが主に海氷生成に使われるとの仮定の下)、海氷生産量の見積りを行ってきた。このように、結氷期では薄氷の厚さを検出できると熱フラックスを見積もることができ、さらに上記の仮定の下、熱損失から海氷生産に伴う塩フラックスを見積もることができる。一方、海氷融解のプロセスは不均一であり、特に融解する海氷の厚さがわからないことから、海氷融解の見積りは海氷生産の見積りよりも難しい。海氷の移流の効果も含めた上で、海氷密接度の日変化を見て、海氷生成と融解による塩フラックスが全南大洋において、結氷期と融解期を含む年間サイクルでバランスしていることを仮定し、融解期における塩フラックスを、熱収支計算・海氷密接度・海氷移流の組み合わせから評価することを試みた。本研究は、全南大洋において、初めて海氷生産量及び熱塩フラックスのデータセット(一日ごと)を示すものである。

図 2.1 は、ERA-interim データを用いて 1992-2007 年の期間で計算した、南大洋における年積算海氷生産量の空間分布を示している。海氷生産のほとんどが沿岸ポリニヤで行われていることや南極底層水の主生成域であるロス海(図 2.1 下部)のポリニヤで最大の海氷生産量があることなどがよく表現されている。当マッピングからは、ケープダンレー沖のポリニヤ(図 2.1 右上部)が、第 2 の海氷生産量海域であることがはじめて明らかになり、未知の南極底層水の生成海域の可能性が示唆され、次節での観測とモデルの融合研究を促すことになった。

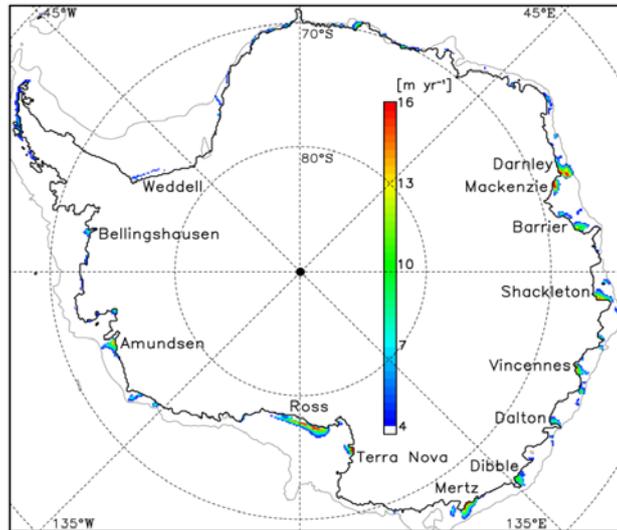


図 2.1: ERA-interim データを用いて計算した、年間累積海氷生産量マッピング (1992-2007 年平均)。細線は水深 1000m を示す。

図 2.2 は、ERA-interim データを用いて 1992-2007 年の期間で計算した、南大洋における年平均の熱塩フラックスの空間分布を示している。本研究では、熱収支の正の値は、海氷又は海が大気から熱を得ている場合を示すこととする。熱(塩)フラックスの分布は、海氷生産量の高い沿岸ポリニヤ域において負(正)、沖において正(負)という強いコントラストを持っている。図 2.2a における沿岸ポリニヤと一年氷域との熱損失のコントラストは、沿岸ポリニヤが大気に対する大きな熱損失のホットスポットになっていることを示しており、大気モデルに対してもより高精度で現実的な境界条件を与えることになる。図 2.2b に示されている海氷生成・融解に伴う塩分フラックスは、ECMWF や NCEP から得られる年積算の(降水-蒸発)に対して、1 オーダー大きなインパクトを持っている。

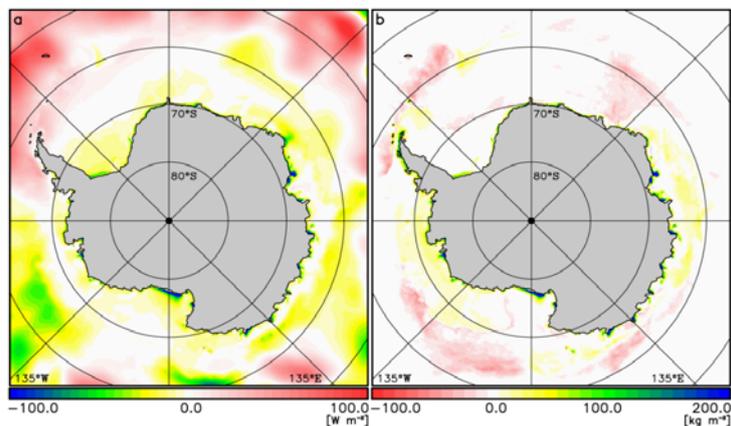


図 2.2: ERA-interim データを用いて計算した、(a) 年平均熱フラックスと (b) 年間累積塩フラックスの空間分布 (1992-2007 年平均)。下向き(大気から海洋へ)の熱フラックスを正、海氷から海洋への塩分供給を正とする。

これらのデータセットは、当研究グループにおいて、海氷・海洋結合モデルの検証データとして使用されているだけでなく、他の研究者にも、棚氷・海洋結合モデルの境界条件データとして、あるいは、高密度水形成メカニズムのアセスメントデータとして使われている。

#### 4.2.2 ケープダンレー沖での南極底層水の観測と非静水圧モデルによる再現

南極沿岸のポリニヤでは、高海氷生産によって高密度水が生成される。この高密度水が周りの水塊と比べて十分重くなると、高密度水は大陸斜面を下って底層まで沈み込み、南極底層水が形成され、全世界の底層に拡がっていく。世界の海水の約半分は南極底層水起源であると見積もられている。南極底層水は、ロス海・ウェッデル海・アデリーランド沖が3大生成域とされてきたが、底層のフロン分布などから、東南極にもそのソースがあることが示唆されている。しかし、それがどこであるかはわかっていなかった。上記 2.1 の海氷生産量のマッピングから、昭和基地東方1200kmに出現する巨大なケープダンレーポリニヤ沖がロス海に次ぐ第2の海氷生産域であることが示唆された(図 2.1, 2.3)。当グループは、ここが未知(第4)の底層水生成域ではないかと推測し、係留観測を中心とする集中観測を行った。その結果、予想通りここが未知の南極底層水生成域であることをつきとめた。海洋観測からは、南極底層水の生成を示唆する顕著な低温・高酸素水が底層に見られ、1年間の係留観測からは、海氷生産が盛んになった直後に低温高密度水の潜り込みが生じ、冬季には底層水の厚さは300m以上にもなっていることが明らかになった。

図 2.4 の1段目と3段目は、(重い水の通り道と予想した)峡谷沿いの係留点底層での、(上)ポテンシャル水温と(下)谷沿い方向の流速の時系列である。低温・高密度の水の到来する時

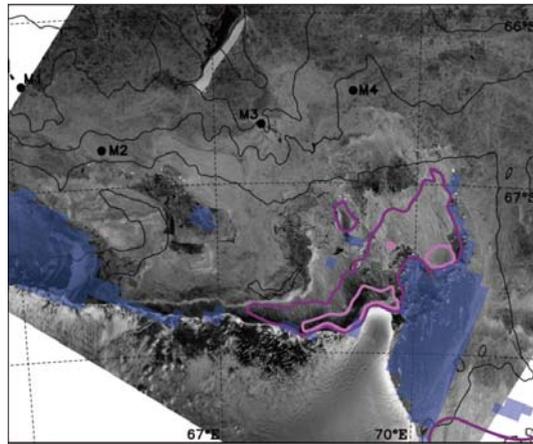


図 2.3: 南極ケープダンレー沖の合成開口レーダ画像(2008年8月15日)に AMSR による年間海氷生産量(薄紫が 5m 以上、濃紫が 10m 以上)を重ね合わせたもの。青色は AMSR より検知された fast ice(冰山舌)。黒丸は係留観測点。

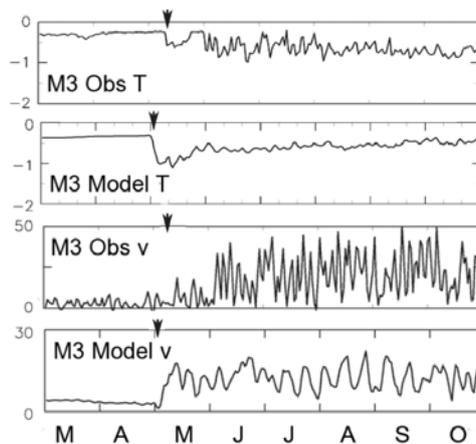


図 2.4: ケープダンレー沖の峡谷底層(M3: 位置は図 2.3・2.5 を参照)における、(上段より)ポテンシャル水温の観測結果とモデル結果、下降流速の観測結果とモデル結果の時系列(2008年5月-2008年10月)。

期に対応して峡谷を下る流れが一気に強くなる。さらに詳しく見ると、低温・高密度の水がほぼ4日周期で間歇的に到来し、それに合わせて0.4m/sにも及ぶ峡谷を下る下降流が生じていることもわかる。これらのデータは底層水の挙動を直接捉えることができた稀な観測データであり、また地球流体力学的にも興味深い材料を提示している。

しかし、係留系や断面観測で得られる結果のみから、ここでの南極底層水の流路、流量、沈み込みのメカニズムなど全容をとらえることは難しい。一方で、このサイトは、底層水形成に対する絶好の現場・衛星観測とモデルの融合研究を行いうる対象となる。本CREST課題内の変動モデリンググループによって開発された高速3次元非静力学モデルを適用するのに最も好都合な対象である。そこで、このモデルを用いて、ケープダンレー沖における高海氷生産によって南極底層水が形成される過程を再現し、その力学機構を明らかにするためのモデル研究を行った。モデルの解像度は $1/20^\circ \times 1/80^\circ$ 、鉛直方向10m、340層である。モデルは、衛星マイクロ波放射計 AMSR-E と熱収支計算から求められた海氷生産量から算出した2008年3-10月平均の塩分フラックスを表面で8カ月間与えることで駆動した。さらに海氷生産量が約1m/月以上の所では海面の水温は-1.8度、トレーサー濃度を1に緩和する。

図2.5は、鉛直積分した海氷生成起源水のトレーサー濃度の分布を示す。高海氷生産によってできる高密度水が斜面を下りながら、三つの峡谷に沿って沈み込み、南極底層水となりうる重い水が形成・流出する様子が再現された。現実的な設定で高海氷生成により南極底層水が形成されるまでの過程を初めてモデルで再現した研究である。モデルにおいても、観測結果とほぼ同一時期に低温・高密度の水塊が到来し、それ以降より低温・高密度の水塊が下降流を伴って周期的に到来する(図2.4)。モデルの結果は観測に比べ、流速値が小さく周期も長いという違いはあるが、現実をある程度再現していると考えられる。

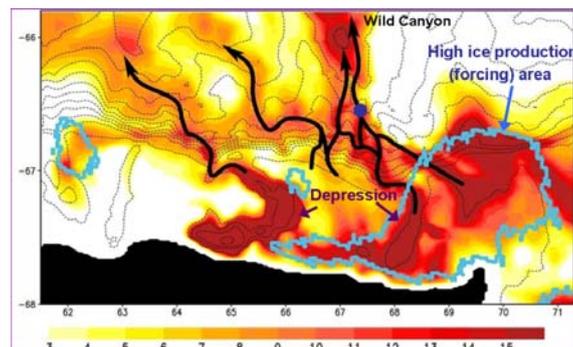


図 2.5: 鉛直積分した海氷生成起源水のトレーサー濃度の 30-270 日間の平均。矢印は高密度水の主な流路を示す。細線コンタ、細点線コンタは地形を示す。太線のコンタは AMSR-E より海氷生産量が 1m/月 以上の場所に対応する。青丸は係留点 M3 を示す。

以上のモデル研究により、観測ではごく断片的にしか捉えられない南極底層水形成の全容を推定することが可能となった。このモデル研究から、①陸棚上の窪地の存在が効果的に高密度の水を作ること、②傾圧不安定により作られた下層に高密度水を伴う低気圧性渦は、斜面に流出することでより順圧的な渦となること、③この渦が谷に沿って沈み込みながら地形性ロスビー波的に伝播し、周期的な底層水の流出が起こること、などが示された。特に周期的な底層水の流出に関わる部分は、観測をよく再現するものであり、また他の海域でも見られる「南極底層水の周期的流出現象」に対して初めて力学機構を提示した研究にもなっている。2011年2月、日本南極観測隊によって行われたケープダンレー沖での係留系アレイ観測の設置点はこのモデル結果を参考にして決められた。モデル研究が観測にもフィードバックされたよい例といえる。

#### 4.2.3 北極海の海氷生産量マッピング

北極海の大陸棚に広がる沿岸ポリニヤでの高い海氷生産は、低温高塩水の形成に重要な

役割を果たしており、北極海の塩分躍層の維持につながっている。この塩分躍層の広がりは翌夏や翌冬の海氷の広がりに影響を与えうる。また、沿岸ポリニヤでの高い海氷生産は、北極海の深層に届く高密度水の沈み込みを作りうるとの指摘もある。しかし、現場観測が極めて難しい海域であるため、海氷生産に関して定量的には明らかになっていない。本研究では、北極海において SSM/I データを用いて全北極海に適用しうる薄氷厚アルゴリズムを開発し、海氷生産量の空間分布および各沿岸ポリニヤでの海氷生産量の経年変動を明らかにした。北極沿岸ポリニヤが位置する大陸棚域は水深が比較的浅く、本研究の計算では、水深 500m 以浅の領域でのみ海氷生産が起こるとしている。

図 2.6 は NCEP2 データを用いて計算し、1992~2007 年で平均した、年間累積海氷生産量の空間分布である。海氷生産の高い領域は主要な北極沿岸ポリニヤに集中している。ノースウォーター(NOW)ポリニヤ・NEW ポリニヤ・チャクチポリニヤや、ノヴァヤゼムニヤ・フランツヨーゼフランド・スバルバードの海岸で、海氷生産の高い領域が存在する。NOW ポリニヤでは北極海で最も高い海氷生産率が示された。この海氷生産の高いポリニヤの形成は、北極海からバフィン湾への海氷の流入を妨げている南ナレ海峡のアイスブリッジ・南向きの風・北極海からの南向きの海流によっておこっている。このマッピングは表面熱損失および表面塩分フラックスの分布にも置き換えられる。年積算海氷生産 1 m は、約  $110 \text{ W m}^{-2}$  の熱フラックス、 $21.6 \text{ Kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  の塩分フラックスに相当する。主要沿岸ポリニヤでの海氷生産の年変動からは、北極全体でのコヒーレントな変動は見られなかった。主要沿岸ポリニヤのほとんどの例において、海氷生産の年変動はポリニヤ面積のそれと良い相関を示しており、気象要素(気温)との相関に比べてずっと高い相関となる。

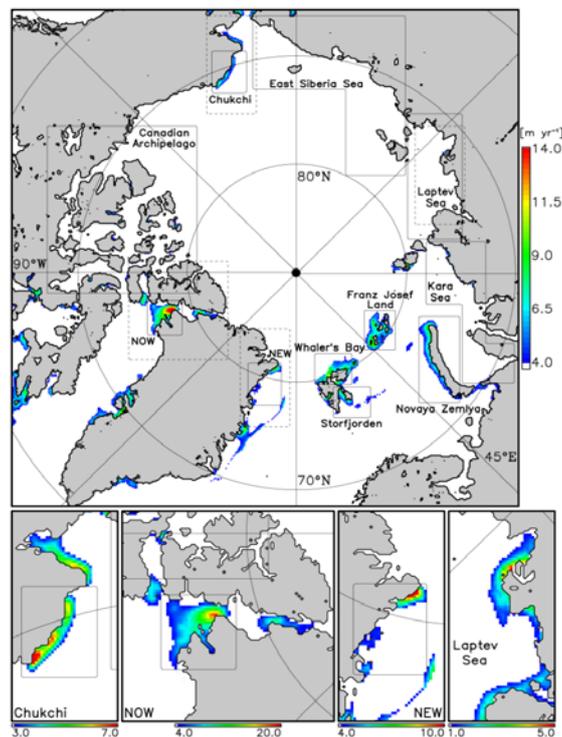


図 2.6: NCEP2 データを用いて計算した、年間累積海氷生産量マッピング(1992-2007 年平均)。

過去の海氷生産量の研究はリージョナルな研究であり、本研究は初めて全北極海での海氷生産量のマッピングを示し、北極沿岸ポリニヤの季節・年変動を示した研究である。本研究は今まで明らかになっていなかった海氷域での熱塩フラックスを与えるものであり、大気や海洋モデルの境界条件や海氷結合モデルの検証データとしても利用が可能である。上記の海氷生産量を境界条件データとして用いて北極チャクチ海での高密度水形成を数値モデル上で再現し、

過去の係留観測データとの比較から海氷生産量データ・数値モデル双方の妥当性を確かめた研究例が既に存在する。

#### 4.2.4 オホーツク海での海氷生産量・熱塩フラックスのマッピング

オホーツク海の北西陸棚ポリニヤにおいて生成される高密度陸棚水は、北太平洋では最も重い水であり、それが中層(300–800m)まで潜り込み、北太平洋スケールでの鉛直(中層)循環を作っている。従って、大気からの酸素や二酸化炭素などの物質が北太平洋中層へ直接潜り込むことができる唯一の海域といえる。また、植物プランクトンにとって必須の微量元素である鉄の供給源としてオホーツク海からの潜り込みが重要であることが近年注目されている。

オホーツク海においては、上記南極海や北極海での研究で使用された SSM/I より分解能が倍の衛星マイクロ波放射計 AMSR-E を用いて、高精度の海氷生産量のマッピングを行った(図 2.7)。その結果、北西陸棚域の沿岸ポリニヤでは年間 10m に及ぶ生産量があり、世界でも最も海氷生産量の大きい海域の一つであることが示唆された。この高海氷生産によって、北太平洋中層水の源になる高密度陸棚水が年間 0.3–0.4 (Sv) 生成されると見積もられた。さらに、AMSR-E データとの比較から、SSM/I による過去 20 年間の海氷生産量の見積もりも行った。これらから海氷生産量を決める気象要因を明らかにし、気象要素から精度よく海氷生産量を推定しうる関係式を導出し、オホーツク海の沿岸ポリニヤでは過去 35 年で海氷生産量が 10–15% 減少していることが示された。一方、過去に蓄積された海洋データの塩分プロファイルから海氷厚と量を推定する試みを行い、オホーツク海では過去 30–40 年で、海氷量が 25–40% 減少していることが示唆された。海氷減少の原因は、オホーツク海の風上が温暖化に敏感であり、そこでの気温が過去 50 年間で 2 度程度上昇したことによると推定される。以上の結果とデータは、次節で述べる海氷・海洋結合モデルの研究テーマと比較・検証データを与えることになる。

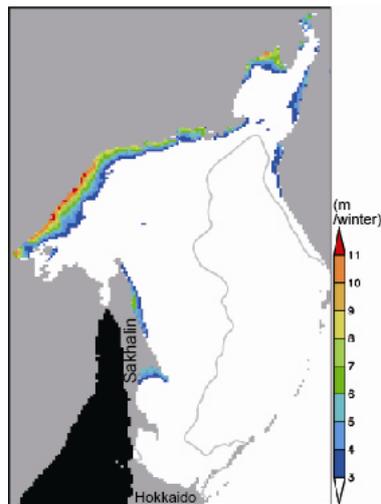


図 2.7: オホーツク海での年間累積海氷生産量マッピング(2002–2005 年平均)。

オホーツク海においても、南大洋と同様な手法を用いて海氷生成・融解に伴う熱塩フラックスの見積もりを行った。ここでは、89GHz の AMSR-E データから面相関法で求めた海氷漂流ベクトルも用いて海氷の移流効果をより高精度に取り入れている(南大洋の場合は、地衡風速から漂流ベクトルと求めている)。年平均の表面熱収支の気候値(図 2.8a)からは、オホーツク海北部(沿岸ポリニヤ域)で負、南部で正のパターンが示される。これは、海氷や東樺太海流によって負の熱(潜熱)が北から南に運ばれることを示唆する。年間積算した塩分収支の気候値(図 2.8b)からは、北部の沿岸ポリニヤ域で正、南部で負のパターンが示される。これは、北部で結氷した海氷が南部に運ばれて融解していることを示唆し、熱収支から示された、負の熱(潜熱)が北から南に運ばれていることに対応する。オホーツク海の中東部(氷縁域)の熱収支負、塩分収支負の海域は、太平洋からの暖流水による移流効果及び融解によることが示唆される。

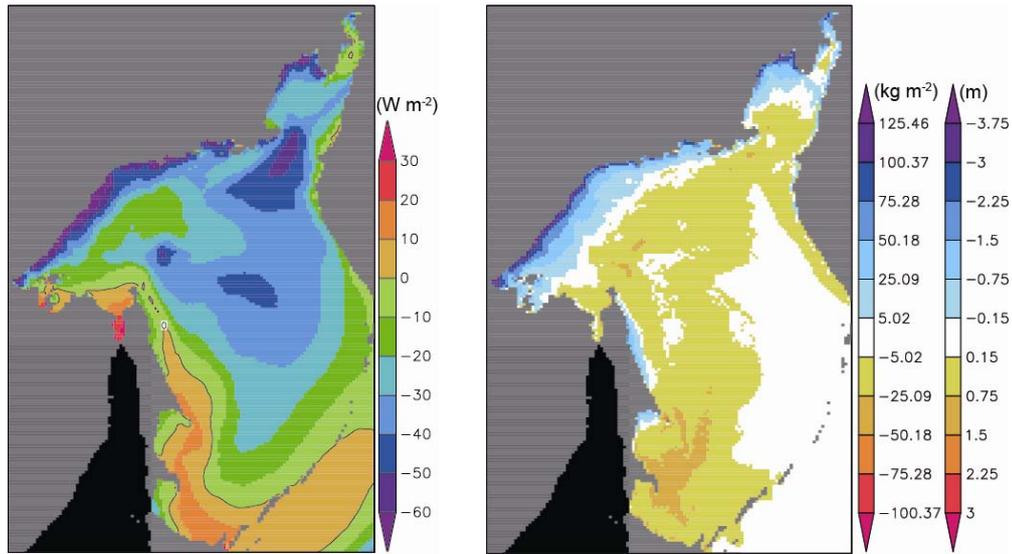


図 2.8: (a)年平均した正味の表面熱収支の気候値(2003-2010 年)。下向き(大気から海洋へ)の熱フラックスを正とする。コンター間隔は  $10 \text{ W m}^{-2}$ 。(b)年間積算した塩収支の気候値(2003-2010 年)。海氷から海洋への塩分供給を正、淡水供給を負とする。右端のスケールは淡水供給(水の厚さに換算:m)に換算したものの。

#### 4.2.5 オホーツク海での海氷・海洋結合モデルによる温暖化実験

前節に述べたように、オホーツク海風上での温暖化により、この 50 年で海氷生産量が減少し、低温の重い水の生成量も減少したことが示唆された。さらに、これによって北太平洋規模での鉛直(中層)循環も弱まっていることも示唆されている。本研究は、オホーツク海を起点とする北太平洋規模の中層循環を再現しうる海氷・海洋モデルによって、オホーツク海及び北太平洋の中層水・中層循環の温暖化に対する応答を再現し、そのメカニズムを明らかにすることを目的とする。本モデルは、いわゆる中解像度の格子間隔であるため、オホーツク海で卓越するメソスケール渦やクリル海峡におけるシルと強烈な潮流との相互作用による水塊混合を陽に取り扱うことができない。これらの効果はサブグリッドスケールのパラメタリゼーションで表現されている。沿岸ポリニヤでの海氷生成・高密度水生成過程、北太平洋との海水交換過程、潮流混合過程の影響を考慮したモデル実験によって、過去 50 年間のオホーツク海中層水の温暖化をある程度定量性をもって再現することができた。

図 2.9 は、オホーツク海中層水の代表的な密度帯  $26.8 \sigma_\theta$  の温位分布のシミュレーション結果と観測データとの比較である。モデルは、オホーツク海北西陸棚における  $0^\circ\text{C}$  以下の高密度陸棚水やオホーツク海の東半分における高温、高塩の特徴が見られ、海氷生産に伴うブライン排出や太平洋からの流入水による影響を再現している。

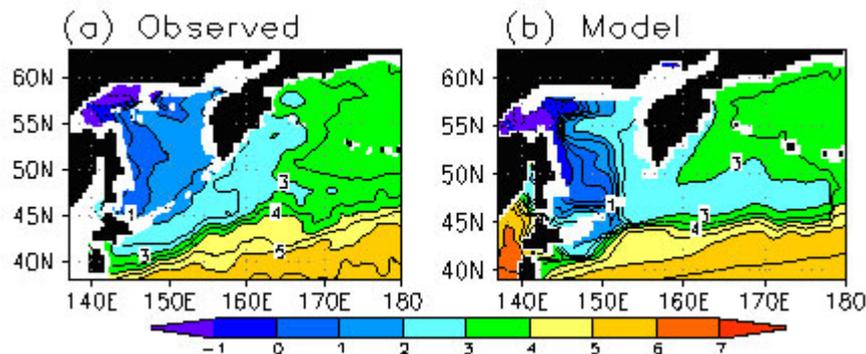


図 2.9: 等密度面  $26.8 \sigma_\theta$  面のポテンシャル水温の気候値。(a)が観測データ、(b)がシミュレーション。

図 2.10a と図 2.10b は、主な大気強制(熱と風)によってシミュレーションされたオホーツク海中層の水温トレンドを示している。観測データに基づいたオホーツク海中層水のトレンドと比較すると、モデルはオホーツク海に観測される昇温トレンドの大きさ及び空間パターンをよく再現している。最も昇温トレンドが大きい密度帯は、 $26.9\text{--}27.0\sigma_\theta$  で、この密度帯での昇温トレンドの大きさは、 $0.71^\circ\text{C}/50\text{yr}$  であり、観測のトレンドの大きさ( $0.60^\circ\text{C}/50\text{yr}$ )とほぼ一致する。一方で、北太平洋亜寒帯西部では、観測データに見られるような昇温化が再現されなかった。この違いに関する説明は今後の課題である。

図 2.10c と図 2.10d は、シミュレーションされたオホーツク海中層水の昇温トレンドに対する、大気の熱的強制と風応力によって駆動される海洋循環場の変化の寄与を示す。オホーツク海の昇温トレンドのおよそ 7 割が、大気の熱的強制の変動によってもたらされることがわかった。この昇温トレンドの特徴は、オホーツク海西部で著しく、オホーツク海南部のクリル海峡から北太平洋にまで及ぶ。子午面流線関数による解析や感度実験によって、この昇温トレンドは、オホーツク海北西陸棚で形成される海水生産量の減少に伴う熱塩循環の弱化に関係していることがわかった。一方、大気の風応力も、オホーツク海の昇温トレンドに寄与することが明らかになった。風応力の影響は、昇温トレンドのおよそ 3 割であり、オホーツク海東部から中央部の昇温化に寄与する。この昇温プロセスは、亜寒帯循環が強まることによって、北太平洋起源の暖かい海水の流入量が増加することに関係していることがわかった。

従来、オホーツク海の中層水の温暖化は、オホーツク海の風上の気温の上昇に伴う海水生産量の減少の影響が提案されていた。今回の数値モデル実験はその仮説を支持するものとなっている。今後も地球温暖化が進むことが懸念されており、オホーツク海の熱塩循環がますます弱化的ことが予想される。本研究で行った数値実験は、過去数十年間のオホーツク海中層水の長期変動をよく再現しており、オホーツク海の将来予測を行う上での基礎資料として活用されることが期待される。

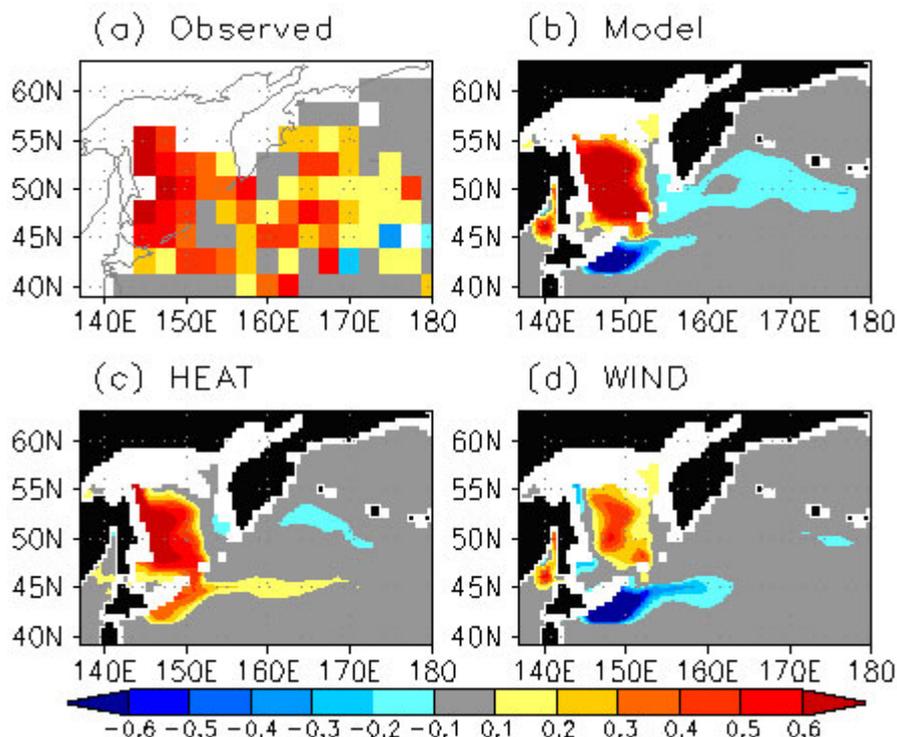


図 2.10: 等密度面  $26.9\sigma_\theta$  面の(a)観測データ、(b)シミュレーションされたポテンシャル水温のトレンド( $^\circ\text{C}/50\text{yr}$ )。 (c)と(d)はそれぞれ大気の熱的強制と風応力の変動成分によってシミュレーションされたもの。

#### 4.2.6 研究成果の位置づけ

本サブテーマの最大の成果は、観測とモデルの融合研究によって、海洋熱塩循環においても海氷海洋モデリングにおいても最も理解が不十分であった、海氷生成による高密度水生成とその中深層への潜り込みを、定量性を持ってモデルで再現する道を切り開いたことである。そもそも、どこでどのくらい海氷生産があるか自体がよくわかっていなかったものを、本サブテーマグループによって明らかにされたことがブレイクスルーをもたらした。加えて、サブテーマ③によって海氷生成や高密度水の潜り込みを再現するモデルが開発され、観測成果とのインタラクションを通してモデルが高精度化された。海氷海洋相互作用の鍵をなす海氷生産量という物理量を介してモデルと観測をリンクさせて研究を進めたことで定量性に足るモデリングを達成できた。典型的な成果としては、人工衛星観測からの海氷生産量を外力として、新規開発された高速非静力学モデルを用い、南極ケープダンレー沖で観測された高密度水の潜り込みと南極底層水の形成を再現し、その力学機構を明らかにした研究が挙げられる。現実的な設定で高海氷生成により南極底層水が形成されるまでの過程を初めてモデルで再現した研究である。

海氷生成や高密度生成に関しては、今までの研究はリージョナルな研究がほとんどであったが、本研究では半球・全球スケールで研究を行ったことも他の研究グループにはない成果となっている。本サブテーマで作成された海氷生産量と海氷域熱塩フラックスのデータセットは、本研究グループに留まらず、全世界のモデル研究者に供されるべきデータセットであり、web サイトで公開されており、海外も含む研究者によって活用されつつある。

#### (2)研究成果の今後期待される効果

全海洋の中で、極域・海氷域は観測とモデリングが結びついた研究が最も難しかった海域である。これは、これらの海域では他海域に比べ極端に観測データが少ないこと、特に海氷過程に関わるデータが希少であることに加え、海氷過程のモデリングが海洋のモデリングよりはるかに難しいことによる。海氷は、その生成において塩分を排出し重い水を作りそれが潜り込むことで海洋中深層(熱塩)循環に本質的な影響を及ぼす。従って、海氷海洋相互作用モデリングにおいても、海氷生産とそれに伴う中深層水形成を正しく表現することが最重要な課題となる。本サブテーマでは、衛星薄氷厚アルゴリズムの開発によって世界で初めて全球の海氷生産量マッピングに成功したことで、海氷海洋結合モデルの再現性の評価に最重要なデータセットを整えることができた。これによって、世界に先駆けて、観測と融合した海氷海洋相互作用モデリングを行うことができ、南大洋やオホーツク海での中層水形成やその変動までも議論できるモデリングが可能となった。本課題では南大洋とオホーツク海を中心に観測モデル融合研究を行ってきたが、今後は気候変動(温暖化)の影響が最も顕著に現れている北極海においても同様な融合研究が進展することが期待され、すでに本課題グループを中心に融合研究が始まりつつある。

本サブテーマで作成された海氷生産量と海氷域熱塩フラックスデータは、全世界の海氷海洋モデリング研究者が必要としているデータでもあり、海外からも多くの問い合わせがある。これらのデータセットは整備されたものから web 上

<http://www.od.lowtem.hokudai.ac.jp/polar-seaflux/>

に公表されている。現在は、SSM/I による南極海の海氷生産量・熱塩フラックスデータ(図 2.1-2)と、AMSR によるオホーツク海のデータセット(図 2.7-9)を公表しているが、他の海域やデータセットも表 1 にあるスケジュールで公表予定である。一部の公表は、本課題終了後になるが、2013 年 3 月までには、すべての海域のデータを完成させ公表する予定である。データ形式については、モデル検証に使用しやすいような CMIP などのグリッドデータにも変換する予定である。すでに国外も含む研究者により、モデルや観測の比較・検証データ・外力データとして使用され、このデータセットをモデルの外力に用いて Ph-D を取得した例もある。上記のデータセットは第 1 バージョンであり、衛星薄氷厚アルゴリズムに関しては現場観測からの検証が十分とはいえない。現在、南極海及び北極海の沿岸ポリニヤ(薄氷域)において係留観測を実施中であり、これらの高精度データ海氷・海洋を比較・検証データとすることで、アルゴリズムを高精度化する予定である。これによって精度の高いバージョンアップしたデータセットに更新することが期

待される。なお、当研究グループの AMSR 薄氷厚アルゴリズムは JAXA の Research product の認定を受けており、2011 年度中に打ち上げられる AMSR2 によりさらに精度よいデータセットを今後作成できる見込みである。

表 2.1: 海氷生産量と熱塩フラックスデータセットの公表スケジュール

		海氷生産量	熱塩フラックス
南極海	SSM/I	公表済	公表済
	AMSR	2012 年	2012 年
北極海	SSM/I	2011 年 12 月	2011 年 12 月
	AMSR	2012 年	2013 年
オホーツク海	SSM/I	2012 年	2012 年
	AMSR	公表済	公表済

本サブテーマ研究が契機となり、昭和基地東方 1200km にあるケープダンレー沖が南極海第 2 の海氷生産海域であることが示され、ここが未知の南極底層水生成域であることが示唆された。この海域が「しらせ」が通る海域であることから、日本南極観測隊の一般研究観測「未知の南極底層水と海氷生産量の直接観測」が提案・採択された。本研究課題も日本南極観測とリンクさせながら進められてきた。昭和基地の近くに南極底層水生成域があることがわかったことで、今まで全く行われてこなかった南極底層水研究が、今後の日本南極観測の重要課題の一つになると考えられる。本課題の研究成果がその火付け役を果たしたと言える。

#### 4.3 マルチタイムスケール海洋変動モデリング(東京大学 羽角グループ)

##### (1)研究実施内容及び成果

本課題が主たるターゲットとする海洋の中・深層循環が変動する時間スケールは、循環全体については数十年(中層)から数千年(深層)という長期に及ぶが、循環をコントロールする渦プロセスや循環の起点となる深層水形成については数日から数十日という短期である。それらを限られた計算機資源の中でシミュレートするにあたっては、単一のモデルで全てを扱うのではなく、対象とする現象の時間スケールに応じた効率のよいモデリング手法が必要とされる。本サブテーマでは、研究期間の前期には時間スケール別に海洋変動現象のシミュレーションを実施し、その結果の検証・評価を通して、効率的モデリング手法の開発に向けた課題を抽出した。その結果と他 2 グループにより得られた成果に基づき、研究期間の後期には、縁辺海や沿岸域における局所規模海洋現象と大洋規模循環の相互作用を適切に表現しながら数十年以上の長期海洋変動を効率的にシミュレートするためのモデリング手法、および深層水形成過程に関わる短期海洋変動を詳細にシミュレートするためのモデリング手法の開発を行った。

##### 4.3.1 海洋中層変動を通した局所規模海洋変動による大規模気候変動のコントロール

気候には様々な時間スケールを持つ準周期的な内部変動(太陽放射や人為起源二酸化炭素など、外部条件の変動によらない自励的な気候変動)が存在する。数年程度の周期を持つ気候変動としてはエルニーニョ南方振動(ENSO)が最も顕著である。エルニーニョとは太平洋赤道域の海面水温が通常よりも顕著に高くなる現象を指し、逆にその領域の水温が通常よりも顕著に低くなるラニーニャ現象と対になって、数年程度の時間スケールを持つ準周期的な変動性を示す。さらに、この太平洋赤道域の水温変動と呼応して、例えばエルニーニョ時には日本で冷夏が生じやすいなど、全地球規模的な気候変動が認められる。一方、十年から数十年の準周期性を持つ気候変動の存在も知られており、その中で最も顕著なもののひとつとして太平洋十年規模振動(PDO)が挙げられる。これは、北太平洋中央部の海面水温が通常よりも高い(低い)時期にはその東側を取り囲む外周部で海面水温が通常よりも低く(高く)なるという空

間的な変動パターンが準周期的に繰り返されるものであり、それに伴って黒潮等の海流や太平洋上の気圧配置なども変動する。ENSO や PDO をはじめとして、こうした数年以上の時間スケールを持つ大規模な気候変動においては、海洋の役割が本質的に重要である。

一方、十年程度の周期性を持つ気候変動の中には、外部的な要因を持つと考えられるものも存在する。その顕著な例は 18.6 年周期の気候変動であり、太平洋亜寒帯域を中心とした海洋構造や環太平洋域の気象現象(降水量等)において、様々な面で有為な 18.6 年の周期性が認められている。18.6 年という明確な周期性からして、この原因となるものは潮汐に存在する 18.6 年周期以外に考えられない。潮汐は太陽や月による引力が海水に作用する結果であり、半日および一日周期の変動が卓越するが、地球および月の公転軌道の性質のためにより長期の変動性も生じる。18.6 年周期は白道面(月の公転軌道面)の黄道面(地球の公転軌道面)に対する傾きが 18.6 年周期で振動することによるものであり、その影響は主に一日周期潮汐の振幅が増減するという形で現れる。この潮汐変動が気候変動を引き起こす過程には海洋変動が介在しているはずであるが、18.6 年周期気候変動の存在が 30 年以上前から知られていたにも関わらず、その海洋変動がどのようなものであるかは明らかにされていなかった。本研究では、大気海洋系の数値シミュレーションを通して、この 18.6 年周期気候変動の原因が太平洋北西縁における局所的な海洋混合現象にあることを明らかにした。

北太平洋中層には顕著な低塩分水が存在しており、それはオホーツク海で冬季の結氷によって形成された中層水が千島列島の海峡から流れ出て北太平洋中層を循環した結果である(4.1.2 参照)。一般に海峡を通した海水交換には海峡における海水混合が重要な役割を果たすことが知られており、千島列島の場合には潮汐を原因とする海水混合が重要である。潮汐振幅の 18.6 年周期での増減の幅は場所によって異なり、緯度 45 度で最大の約 15 % に達するが、これはおよそ千島列島の緯度に相当する。すなわち、千島列島の海峡を通した北太平洋とオホーツク海の間海水交換は潮汐 18.6 年変動の影響を最も受けやすく、その影響は北太平洋中層の変動としてより大規模な海洋変動につながる可能性を持っている。その影響を確認するために、千島列島付近での海水混合の係数を時間的に一定とした場合と、18.6 年周期で±15 % 変動させた場合の 2 通りの大気海洋シミュレーションを行った。北太平洋域における海面水温変動の主要な空間パターンを主成分解析で抽出したところ、いずれのケースにおいても ENSO に対応する空間パターンが変動性の最も大きな部分を説明するものであった(図 3.1)。その変動時系列のパワースペクトルを見ると、千島列島付近の海水混合係数を変動させたケースにおいてのみ、統計的に有為な約 20 年周期の変動成分が認められた(図 3.1)。北太平洋中層の海洋構造変動を追跡したところ、千島列島付近における海水混合の強弱のシグナルは太平洋西端に沿って赤道向きに伝播し、さらに赤道上を東向きに輸送されることによって、エルニーニョ/ラニーニャによる水温シグナルが最も顕著に現れる東部赤道太平洋に数年かけて到達することが示された(図 3.2)。

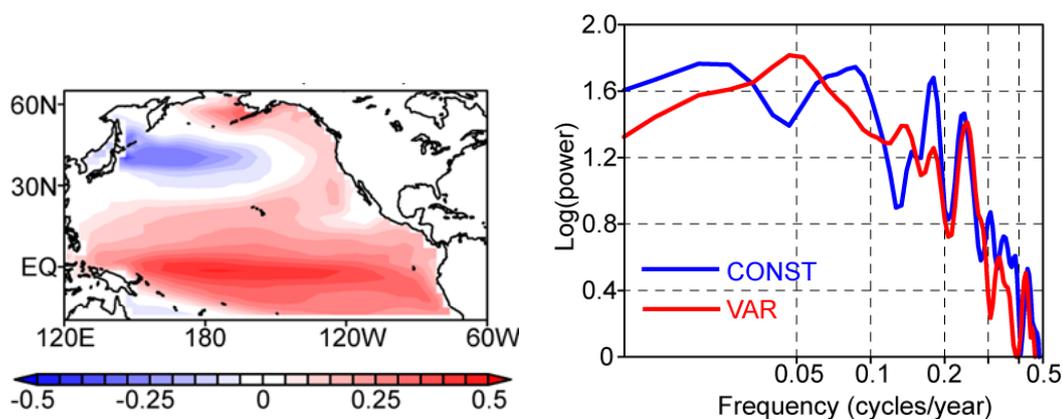


図 3.1: (左)年平均海面水温の主成分解析による第 1 モードの空間パターン(千島列島の海水混合係数を変動させたケースのみを示すが、変動させないケースもほぼ同じ)。(右)その変動時系列のパワースペクトル。青線は混合係数を変動させない場合、赤線は変動させた場合。

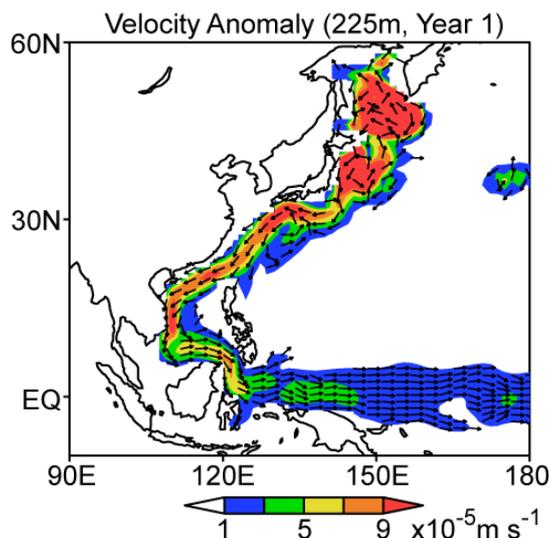


図 3.2: 千島列島での海水混合が最大となった 1 年後における、亜表層での流速変化(矢印は流向のみを示し、大きさを色で示す)。

このシミュレーション結果により、千島列島沿いという極めて局所的な領域における海洋変動が、全太平洋という大規模な海洋および気候変動をコントロールするメカニズムが明らかにされた。

#### 4.3.2 長期大規模海洋変動に関する効率的モデリング手法の開発

水平数十 km 程度の大きさである海洋渦は、数千 km スケールの全球海洋循環に大きな影響を与えていると考えられている。高精度で気候変動シミュレーションを実施するには、この海洋渦を解像できる程の細かさで全球海洋を計算する必要があるが、これは現在の大規模並列計算機であっても非常に長い計算時間が必要で現実的でない。そこで現在の全球気候変動シミュレーションにおいては、この海洋渦を近似的に模擬した方程式を用いて計算することが一般的であるが、この近似方程式の導入が気候変動予測の精度を下げる一因になっている。幸いなことに海洋渦が存在する領域は偏っているので、全球の解像度を高めることなく、海洋渦活動が活発な領域のみの解像度を高めることによって、海洋渦の効果を高精度で取り込んだ全球気候変動シミュレーションを実施することができる。ここでは必要な領域のみの解像度を高くし、その他の領域は低い解像度のままで計算することが可能な双方向ネスト海洋モデルを開発した。この双方向全球ネスト海洋モデルを用いることによって、海洋渦の効果を高精度で取り込んだ全球海洋シミュレーションを現実的な計算速度で実施することが可能になった。

海洋モデル COCO を基に、海水モデルまで含んだ全球双方向ネスト海洋モデルを開発した。海洋モデル COCO の並列計算機上での実行においては、計算領域を複数の計算領域に分割し、それぞれの計算領域を同時に複数の演算装置で計算し、1タイムステップ毎に境界データを相互に通信することによって時間発展方程式を解く。ここでは、この並列計算機能を発展させることによって、双方向ネスト機能を導入した。すなわち、低解像度モデルである外モデルと高解像度モデルである内モデルにそれぞれ別の演算装置を複数割り当てて計算を実行し、境界データを通信する際、外モデルは高解像度の内モデルの境界条件になるように補間したデータを内モデルに渡し、内モデルは外モデルを駆動するための外モデルのグリッド上で平均化したデータを渡す。これにより外モデルが内モデルの境界条件を与えとともに、内モデルの計算結果でも外モデルを駆動することができる。ここで開発した全球ネスト海洋モデルでは、この双方向ネスト機能に加えて、計算性能効率を高める為のスタガード時間積分法、北極点の座標特異点を避ける為の三極座標系等も新規に導入した。この全球ネスト海洋モデルを用いて、日本近傍を高解像度化した全球海洋シミュレーションを実施した。

図 3.3 に開発した全球ネスト海洋モデルのグリッド配置を示す。外モデルである全球海洋モデルの座標系には、北極点にグリッドが集中し計算効率が低下するのを避けるために、座標系の特異点をユーラシア大陸と北アメリカ大陸上に移動させた三極座標系を導入した。赤線で囲

まれた領域が内モデルで、日本近傍の海洋渦を解像する為に、この領域の水平解像度を約 10 km にした。この全球ネスト海洋モデルによって計算された海面高度の分布を同じく図 3.3 に示す。白線が内モデルと外モデルの境界を表す。内モデル領域では、渦活動が現実的に表

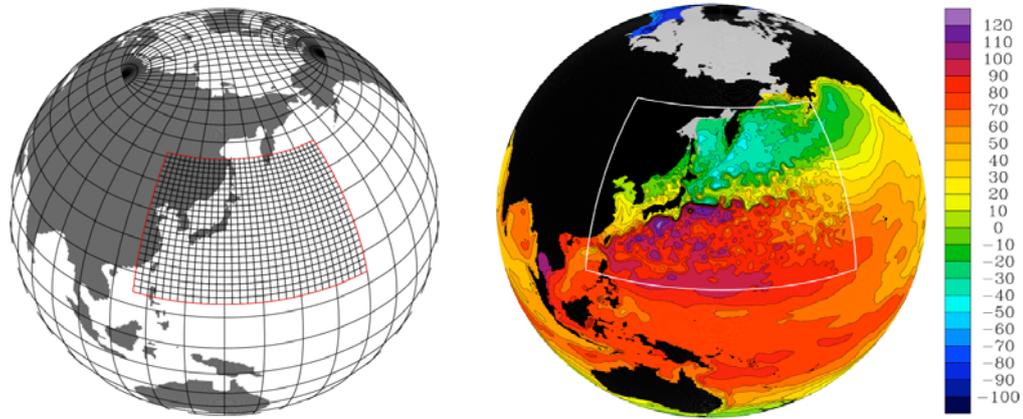


図 3.3: (左) 全球ネスト海洋モデルの格子配置。日本近傍の格子間隔は約 10 km、それ以外は約 50 km。20 グリッド毎の格子を示した。(右) 全球海洋ネストモデルで計算された海面高度(単位は cm)。白線で囲まれた領域が高解像度領域。また灰色は海氷を表している。

現されており、黒潮は房総半島沖で本州から離岸している。この離岸位置は、より粗い解像度では、北方にオーバーシュートすることが良く知られており、このシミュレーションが海洋渦を解像することによって黒潮の挙動を正しくシミュレーションしていることが分かる。図中の樺太北部から北極海にかけての灰色は海氷の密接度を表しており、この分布も観測と一致している。

次に、このネスト海洋モデルを用いて、黒潮蛇行のシミュレーションを実施した。この黒潮の流路変動では、海洋渦と西岸境界流が相互作用しており、その生成、発達、消滅過程については、未だに良く分かっていない点が多い。図 3.4a には、黒潮が蛇行していない直進路の期間(30 年から 35 年)の海面高度分布を示した。海面高度分布は海面流速関数とほぼ一致するので、この海面高度分布が黒潮流路を表していると考えても良い。図 3.4b は蛇行期(36 年から 40 年)の海面高度分布である。この期間では低気圧性渦が紀伊半島南部に大きく広がっている。図 3.4c が東経 136 度線(図 3.4a, b 中の点線)に沿った海面水位分布の時間発展を表す。これより、黒潮の直進路と蛇行路は交互に現れて、それぞれの期間は 3 年から 10 年にわたっていることが分かる。この流路変動の時間スケールは、黒潮流路の観測結果と良く一致している。また直進路から蛇行路へ遷移するとき、小規模な蛇行が九州の南東に形成されて、これが東側に進行して蛇行路に発展することも観測と良く一致している。

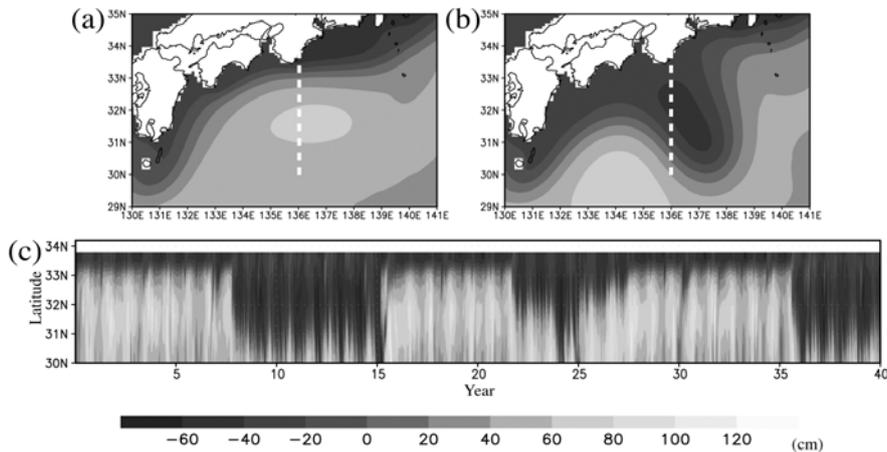


図 3.4: (a) 直進流路時と(b) 蛇行流路時の海面高度分布。(c) 東経 136 度での海面高度の時間変動。

本研究では、スケール間相互作用を研究するための有力な手段となる全球双方向ネスト海洋モデルを開発した。このモデルを用いることにより、小さな空間スケールと大きな空間スケールの相互作用シミュレーションが可能になった。これを用いて、日本近傍を海洋渦が表現できる程度に細かくし、それ以外の領域では大規模な流れを表現できる程度の解像度を用いて、実際の全球海洋シミュレーションを実施した。その結果、黒潮離岸位置などが高精度で再現された。ネスト機能は、今まで主に比較的狭い領域の流れを計算する為に用いられることが多かった。本研究では、気候変動の研究の為に、全球を計算対象にし、必要な領域を高解像度で計算するような海洋モデルを開発した。このようなネストモデルの開発は世界で初めてであり、気候変動研究を推進する上で欠かせないモデルになると考えられる。なお、この開発されたモデルでは、この双方向ネストを多段階に適用することも可能になっており、大洋スケールの現象から沿岸の小湾スケールの現象までを一括して取り扱うことができるシミュレーションシステムとして利用可能である。

#### 4.3.3 短期局所的海洋変動に関する効率的モデリング手法の開発

海洋の循環を記述する方程式系はナビエ-ストークス方程式と熱・溶存物質(塩分)の輸送・拡散方程式を基礎としている。しかし、分子粘性・拡散を直接表現する解像度を海洋という巨大系に対して適用できるわけではない。現状で数値海洋モデルが解像可能な水平スケールは、海洋大循環全体を扱う場合ならば 10 km 程度、深層水形成のような特定の領域における重要プロセスのみを扱う場合でも 100 m 程度が限界である。実際の海洋シミュレーションにおいては、そうした現象のスケールに対応した適切な近似や、解像されない現象を適切にパラメータ化することが必要とされる。

水平 1 km 以下のような微小規模プロセスのシミュレーションに対しては、大規模現象を扱う海洋大循環モデルとは若干異なる定式化に基づく数値モデルを使用する必要がある。大規模スケールを対象にする場合には、運動方程式の鉛直方向成分に対して静水圧近似を適用する。これは、大規模スケールでは海洋が基本的に安定成層(上方ほど低密度)であるため、鉛直方向の運動が抑制されるという事実に基づき、ある点での圧力をそれより上方に存在する海水の重さだけで決めるという近似である。しかしながら、例えば高密度化した海水の沈降を扱う場合にはこの近似は不適切である。静水圧近似を適用しない場合、海水を圧縮性流体として定式化すると音波が表現されることになる。海洋中の音波の代表的速度は 1,500 m/s であり、本来のシミュレーション対象である流れが高々 1 m/s 程度であることに鑑みると、音波を陽に表現することは甚だ非効率的である。そのため、静水圧近似を適用しない数値海洋モデルでは海水を非圧縮性流体として定式化するのが通常であるが、この場合には 3 次元ポワソン方程式を解く必要があり、モデルのパフォーマンスはその計算効率に大きく依存する。海洋シミュレーションの場合には、海底地形という複雑な境界条件への対応や、対象とする領域および格子の縦横比が非常に大きいことなどについて、特別な配慮が必要となる。また、今後のスーパーコンピューティングの方向を念頭に置いた場合には、大規模並列において高スケーラビリティを保証するようなアルゴリズム開発が必須である。本研究ではこの問題に対する解決策として、マルチグリッド法を前処理とする共役勾配法に基づく数値モデルを開発し、高並列環境に対する最適化を行った。

この微小規模海洋現象向けの数値モデルを用いて、南極周囲における高密度水流出過程に関するシミュレーションを実施した。南極沿岸では活発な海氷生成によるブライン排出を起源とする高密度水が深層に沈み込んでおり、これが南極底層水の起源になっている。このような深層水形成は海洋大循環を駆動する要因でもあり、その定量的な理解は地球の気候を論ずる上でも重要である。沿岸で形成された高密度水は、まず沿岸付近の大陸棚上の海底付近に溜まる。これが全世界の海洋の深層を占める高密度水になるまでには、大陸棚上から大陸斜面上へと流出し、大陸斜面上を深層まで下降しなければならない。このような高密度水が重力の作用によって斜面を下る流れのことを重力流と呼ぶが、地球という回転系においてはコリオリ力が作用するため、高密度水は重力流となって斜面を下るというよりも、重力とコリオリ力の斜面に沿う方向の成分がバランスすることによって斜面上の等深度を流れる傾向がある。したがって、

ただ大陸棚上で高密度水が生成されるというだけでは、深層水が形成されるとは言えない。重力流の沈降のためにはコリオリ力と重力の間のバランスを崩す何らかの作用が必要となる。そのバランスを崩す要因としては、海底摩擦の効果、傾圧不安定に伴う渦による輸送効果、斜面上の地形起伏の影響など、様々なものがこれまでに指摘されている。しかし、これまでの研究ではそれらの個々の要素が理論的あるいは理想化設定の数値シミュレーションとして扱われるばかりであり、実際の海洋においてどのプロセスがどの程度働くのかについてはほとんど調べられていない。

本研究では、ウェッデル海における深層水形成の主要な起源となっている大陸棚上のフィルヒナー陥没からの高密度水流出を対象に、現実的設定のもとで高解像度数値シミュレーションを実施した。フィルヒナー陥没から大陸斜面への出口においては、海水や棚氷の影響によって、局所的に継続的な高密度水供給が存在する。流出した棚氷水はコリオリ力の作用のために大陸斜面上をほぼ等深度線に沿って流れるが、西経 36 度付近に存在する小規模な海嶺に当たって進路を北向き(沖向き)に曲げられ、等深度線を横切って沈降することが観測に基づいて知られている。また、この高密度水の沈降においてはサーモバリック効果の働きが重要であることが指摘されてきているが、実際にどの程度の大きさをもってこの効果が沈降に寄与しているのかは明らかでない。本研究では海底地形起伏の影響が他の要素に比べてどの程度重要かについて、またサーモバリック効果が高密度水沈降にとってどの程度重要かについて、定量的に明らかにすることを目的とした。

シミュレーション結果における海底付近の高密度水分布を図 3.5 に示す。フィルヒナー陥没の出口で供給された高密度水は、大陸斜面上をまず西向きに流れ、海嶺にぶつかる場所で手前にある谷線に沿って下降している。こうした全体的な様相に加え、直接観測が存在する場所での水温・塩分分布や流速は観測とよく整合している。高密度水の主要な流路は海嶺の手前を下降するものだが、海嶺の先端を回り込んで等深度線に沿ってさらに西向きに流れる成分も存在する。また、海嶺の先端からは渦が切り離され、これもまた高密度水を沈降させる働きを持つことがわかる。

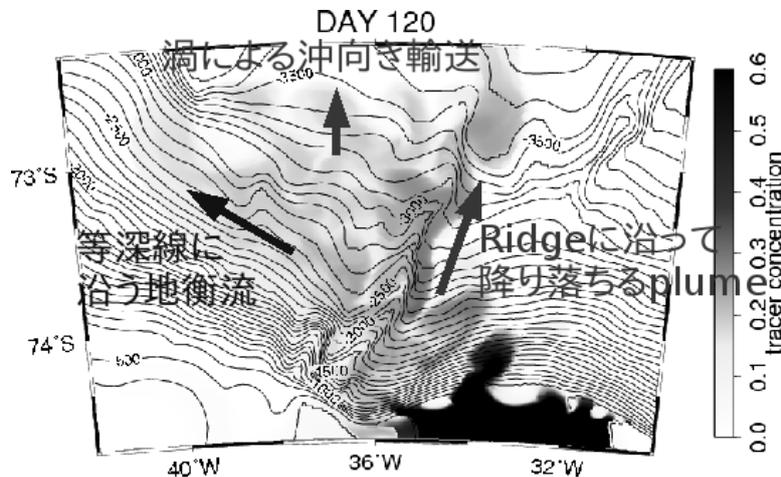


図 3.5: シミュレーション結果における海底付近での高密度水分布。

斜面上において重力とコリオリ力の間のバランスだけを考慮する場合、コリオリパラメータ・斜面の勾配・重力加速度・高密度水の密度・高密度水と周囲水の密度差が等深度線に沿う流速を決める要素だが、等深度線が曲率を持っている場合には遠心力の作用のために流れが等深度線に沿うことができなくなる場合が存在する。すなわち、流れが等深度線に沿うことができるのは、等深度線の曲率半径がある閾値以上である場合に限られ、それよりも小さい正の曲率半径を持つ場合には流れは剥離して外洋側へと向かう。外洋に向かう過程では高密度水層が上下に引き伸ばされることになるため、ポテンシャル渦度保存より高密度水層はコリオリパラメ

ータと同じ符号の渦度を獲得する。フィルヒナー流出における典型的な条件で曲率半径の閾値を見積もるとおよそ 4 km となり、海嶺先端の曲率半径 3-5 km とよく対応する。したがって、図 3.5 に見られた海嶺先端から切離する渦は、このような理由によってできたものだと考えられる。一方、海嶺の手前の部分は曲率が負であり、遠心力は流れを斜面に押し付ける方向に働くため、高密度水の沈降を阻害する要因として働く。その一方で、この部分では等深度線に沿って進むにつれて斜面の勾配が急になっていく。この場合には、バランスの式において、斜面勾配が空間的に変化する影響を表す項が新たに追加されることになる。その結果として、曲率・コリオリパラメータ・斜面勾配それぞれについて等深度線に沿って考えた微分が問題となり、それらの兼ね合いによって沈降が生じるかどうかが決まる。これについてもやはりフィルヒナー流出における典型的な条件で評価したところ、海嶺の手前は確かに高密度水の沈降が生じるべき場所にあたっていた。

海水の密度は水温・塩分・圧力の関数として決まるが、その状態方程式が持つ非線型性に起因したいくつかの特徴的な現象が知られている。サーモバリック効果はそのひとつで、海水の圧縮率が水温に依存することによって現れる効果である。例えば一様な水温の海水の中をそれよりも低温の水が沈降する場合、深くなるにつれて低温水の方が強く圧縮されるため、周囲の水との間の密度差は大きくなっていき、沈降が促進されることになる。フィルヒナー流出についてこの効果を定量的に評価するために、サーモバリック効果を取り除いたシミュレーションを行った。その結果、高密度水の最大到達深度は 3,400 m 程度となり、確かにサーモバリック効果が高密度水沈降において量的に無視できない寄与をしていることが示された。

## (2)研究成果の今後期待される効果

本サブテーマで開発された多段階双方向ネスト海洋モデルは、地球温暖化を中心とした気候・環境変化が海洋を通して人間・社会に及ぼす影響や、逆に人間活動が海洋を通して気候に及ぼす影響を定量的に評価する手法の開発へとつながることが期待される。例えば、海水熱膨張や山岳氷河融解を主要因とする全球的海水位上昇や、海流の変化に伴う局所的な海水位変化の中で、沿岸水位が受ける影響を信頼性高く評価することが可能となり、高潮等の沿岸災害頻度の予測へつなげることが可能となる。逆に、人間活動に伴う局所的な海洋汚染や水資源利用変化(灌漑による河川水流入の減少など)が長期・広範囲にわたって海洋や気候に及ぼす影響を評価する手法にもつながる。また、このモデルは、三陸地域の漁業復興を目的として平成 23 年度に開始された「東北マリンサイエンス研究拠点形成事業」において、沿岸から内湾の循環・生態系モデリングシステムのベースとして使用されることになっている。

一方、同じく本サブテーマで開発された微小規模海洋モデルは、小規模な湾内の循環を精確にシミュレートし、ひいては沿岸地域の水産環境の実態を把握し予測することに応用することが可能である。従来、小規模な湾における循環等は海岸工学の分野で主に取り扱われ、そこでは必ずしも基礎物理法則による裏付けを伴わない経験則や実験式が実用上用いられてきた。しかし、計算機能力の向上のもと、ここで開発されたモデルを応用することにより、そうした経験則等を越える汎用性と信頼性を持った手法が実用に至ることが期待される。このモデルもまた、上述の「東北マリンサイエンス研究拠点形成事業」において、とくに内湾の海洋環境を取り扱うモデリングシステムのベースとして使用される予定である。

## §5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 3 件、国際(欧文)誌 76 件)

1. Tamura, T., K. I. Ohshima, T. Markus, D. J. Cavalieri, S. Nihashi and N. Hirasawa: Estimation of thin ice thickness and detection of fast ice from SSM/I data in the Antarctic Ocean, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **24**, 1757-1772, 2008. (doi:10.1175/JTECH2113.1)
2. Toyota, T., S. Takatsuji, K. Tateyama, K. Naoki and K. I. Ohshima: Properties of sea ice and overlying snow in the southern Sea of Okhotsk, *J. Oceanogr.*, **63**, 393-411, 2007. (doi 不明)

3. Toyota, T., K. I. Ohshima, N. Ebuchi, K. Nakamura and S. Uto: Retrieval of ice thickness distribution in the seasonal ice zone from L-band SAR, Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. (doiなし)
4. Aoki, S., N. Fujii, S. Ushio, Y. Yoshikawa, S. Watanabe, G. Mizuta, Y. Fukamachi and M. Wakatsuchi: Deep western boundary current and southern frontal systems of the Antarctic Circumpolar Current southeast of the Kerguelen Plateau, *J. Geophys. Res.*, **113**, C08038, 2008. (doi:10.1029/2207JC004627)
5. Hasumi, H., I. Yasuda, H. Tatebe and M. Kimoto: Pacific bidecadal climate variability regulated by tidal mixing around the Kuril Islands, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L14601, 2008. (doi:10.1029/2008GL034406)
6. Matsumura, Y., and H. Hasumi: A nonhydrostatic ocean model with an effective Poisson solver, *Ocean Modelling*, **24**, 15-28, 2008. (doi:10.1016/j.ocemod.2008.05.001)
7. Matsumura, M., and H. Hasumi: Brine-driven eddies under sea ice leads and their impact on the Arctic Ocean mixed layer, *J. Phys. Oceanogr.*, **38**, 146-163, 2008. (doi:10.1175/2007JPO3620.1)
8. Nihashi, S., and K. I. Ohshima: Bulk heat transfer coefficient in the ice-upper ocean system in the ice melt season derived from concentration-temperature relationship, *J. Geophys. Res.*, **113**, C06008, 2008. (doi:10.1029/2007JC004127)
9. Ohshima, K. I., and D. Simizu: Particle tracking experiments on a model of the Okhotsk Sea: toward oil spill simulation, *J. Oceanogr.*, **64**, 103-114, 2008. (doi不明)
10. Oka, A., S. Kato and H. Hasumi: Evaluating effect of ballast mineral on deep-ocean nutrient concentration by using an ocean general circulation model, *Global Biogeochem. Cycles*, **22**, GB3004, 2008. (doi:10.1029/2007GB003067)
11. Ono, J., K. I. Ohshima, G. Mizuta, Y. Fukamachi and M. Wakatsuchi: Diurnal coastal-trapped waves on the eastern shelf of Sakhalin in the Sea of Okhotsk and their modification by sea ice, *Cont. Shelf Res.*, **28**, 697-709, 2008. (doi:10.1016/j.csr.2007.11.008)
12. Sakamoto, T. T., and H. Hasumi: Pacific upper ocean response to global warming –climate modeling in an eddying ocean regime–, in *Ocean Modeling in an Eddying Regime*, American Geophysical Union, 265-279, 2008. (doiなし)
13. Suzuki, T., H. Sasaki, N. Nakashiki and H. Nakano: Common success and failure in simulating the Pacific surface currents shared by four high-resolution ocean models, in *Ocean Modeling in an Eddying Regime*, American Geophysical Union, 165-175, 2008. (doiなし)
14. Tamura, T., K. I. Ohshima and S. Nihashi: Mapping of sea ice production for Antarctic coastal polynyas, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, 2008. (doi:10.1029/2007GL032903)
15. Tanaka, Y., and H. Hasumi: Resolution dependence of eddy fluxes, in *Ocean Modeling in an Eddying Regime*, American Geophysical Union, 101-113, 2008. (doiなし)
16. Tanaka, Y., and H. Hasumi: Injection of Antarctic Intermediate Water into the Atlantic subtropical gyre in an eddy resolving ocean model, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L11601, 2008. (doi:10.1029/2007GL032915)
17. Tsugawa, M., Y. Tanaka and T. Matsuno: An ocean general circulation model on a quasi-homogeneous cubic grid, *Ocean Modelling*, **22**, 66-86, 2008. (doi:10.1016/j.ocemod.2008.01.005)
18. 大島慶一郎, 小野純, 清水大輔: オホーツク海における漂流物の粒子追跡モデル実験, 沿岸海洋研究, **45**, 115-124, 2008.

19. Fukamachi, Y., K. Shirasawa, A. M. Polomoshnov, K. I. Ohshima, E. Kalinin, S. Nihashi, H. Melling, G. Mizuta, and M. Wakatsuchi: Direct observations of sea-ice thickness and brine rejection off Sakhalin in the Sea of Okhotsk, *Cont. Shelf Res.*, **29**, 1541-1548, 2009. (doi:10.1016/j.csr.2009.04.005)
20. Ishida, K. and K. I. Ohshima: Ice-band characteristics of the Antarctic seasonal ice zone observed using MOS MESSR images, *Atmosphere-Ocean*, **47**, 169-183, 2009. (doi:10.3137/OC300.2009)
21. Kusahara, K. and K. I. Ohshima: Dynamics of the wind-driven sea level variation around Antarctica, *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 658-674, 2009. (doi:10.1175/2008JPO3982.1)
22. Matsuda J., H. Mitsudera, T. Nakamura, K. Uchimoto, T. Nakanowatari, and N. Ebuchi: Wind and buoyance driven intermediate-layer overturning in the Sea of Okhotsk, *Deep-Sea Res. I*, **56**, 1401-1418, 2009. (doi:10.1016/j.dsr.2009.04.014)
23. 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 North Pacific ventilation through convection in the Okhotsk Sea and tidal mixing at the Kuril Straits. *J. Oceanogr.*, **66**, 41-60, 2010. (doi 不明)
24. Nakamura T. and T. Awaji: Scattering of internal waves with frequency change over rough topography, *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 1574-1594, 2009. (doi:10.1175/2008JPO3795.1)
25. Nihashi, S., K. I. Ohshima, T. Tamura, Y. Fukamachi, and S. Saitoh: Thickness and production of sea ice in the Okhotsk Sea coastal polynyas from AMSR-E, *J. Geophys. Res.*, **114**, C10025, 2009. (doi:10.1029/2008JC005222)
26. Oka, A., H. Hasumi, H. Obata, T. Gamo and Y. Yamanaka: Study on vertical profiles of rare earth elements by using an ocean general circulation model, *Global Biogeoche. Cycles*, **23**, GB4025, 2009. (doi:10.1029/2008GB003353)
27. Toyota, T., K. Nakamura, S. Uto, K.I. Ohshima, and N. Ebuchi: Retrieval of sea ice thickness distribution in the seasonal ice zone from air-borne L-band SAR, *Int. J. Remote Sensing*, **30**, 3171-3189, 2009. (doi 不明)
28. Urakawa, L. S., and H. Hasumi: The energetics of global thermohaline circulation and its wind-enhancement, *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 1715-1728, 2009. (doi:10.1175/2009JPO4073.1)
29. Urakawa, L. S., and H. Hasumi: A remote effect of geothermal heat on the global thermohaline circulation, *J. Geophys. Res.*, **114**, C07016, 2009. (doi:10.1029/2008JC004825)
30. Watanabe, E., and H. Hasumi: Pacific water transport in the western Arctic Ocean simulated by an eddy-resolving coupled sea ice-ocean model, *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 2194-2211, 2009. (doi:10.1175/2009JPO4010.1)
31. Fukamachi, Y., S. R. Rintoul, J. A. Church, S. Aoki, S. Sokolov, M. Rosenberg and M. Wakatsuchi: Strong export of Antarctic Bottom Water east of the Kerguelen Plateau, *Nature Geoscience*, **3**, 327-331, 2010. (doi:10.1038/ngeo842)
32. Fukamachi, Y., K. I. Ohshima, N. Ebuchi, T. Bando, K. Ono and M. Sano: Volume transport in the Soya Strait during 2006-2008, *J. Oceanogr.*, **66**, 685-696, 2010. (doi:10.1007/s10872-010-0056-2)
33. Kawaguchi, Y., S. Nihashi, H. Mitsudera and K. I. Ohshima: Formation mechanism of huge coastal polynyas and its application to Okhotsk Northwestern Polynya, *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 2451-2465, 2010. (doi:10.1175/2010JPO4304.1)
34. Kawasaki, T., and H. Hasumi: Role of localized mixing around the Kuril Straits in the Pacific thermohaline circulation, *J. Geophys. Res.*, **115**, C11002, 2010. (doi:10.1029/2010JC006130)
35. Kusahara, K., H. Hasumi and T. Tamura: Modeling sea ice production and

- dense shelf water formation at coastal polynyas around East Antarctica, *J. Geophys. Res.*, **115**(10), C10006, 2010. (doi:10.1029/2010JC006133)
36. Nakamura T., Y. Isoda, H. Mitsudera, S. Takagi and M. Nagasawa: Breaking of unsteady lee waves generated by diurnal tides, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L04602, 2010. (doi:10.1029/2009GL041456)
  37. Matsumura, Y., and H. Hasumi: Modeling ice shelf water overflow and bottom water formation in the southern Weddell Sea, *J. Geophys. Res.*, **115**, C10033, 2010. (doi:10.1029/2009JC005841)
  38. 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, *Cont. Shelf Res.*, **30**, 598-607, 2010. (doi:10.1016/j.csr.2009.07.010, 2010)
  39. Nakanowatari T., K. I. Ohshima and S. Nagai: What determines the maximum sea ice extent in the Sea of Okhotsk? Importance of ocean thermal condition from the Pacific, *J. Geophys. Res.*, **115**, C12031, 2010. (doi:10.1029/2009JC006070)
  40. Nomura, D., H. Yoshikawa-Inoue, T. Toyota and K. Shirasawa: Effects of snow, snow-melting and re-freezing processes on air-sea ice CO<sub>2</sub> flux, *J. Glaciol.*, **56**, 262-270, 2010. (doi:10.3189/002214310791968548)
  41. Nomura, D., J. Nishioka, M. A. Granskog, A. Krell, S. Matoba, T. Toyota, H. Hattori and K. Shirasawa: Nutrient distributions associated with snow and sediment-laden layers in sea ice of the southern Sea of Okhotsk, *Marine Chem.*, **119**, 1-8, 2010. (doi:10.1016/j.marchem.2009.11.005)
  42. Ohshima K. I., T. Nakanowatari, S. Riser and M. Wakatsuchi: Seasonal variation in the in- and outflow of the Okhotsk Sea with the North Pacific, *Deep-Sea Res. II*, **57**, 1247-1256, 2010. (doi:10.1016/j.dsr2.2009.12.012)
  43. Ono, J. and K. I. Ohshima: Numerical model studies on the generation and dissipation of the diurnal coastal-trapped waves over the Sakhalin shelf in the Sea of Okhotsk, *Cont. Shelf Res.*, **30**, 588-597, 2010. (doi:10.1016/j.csr.2009.06.006)
  44. Rintoul, S. R., K. Speer, M. Sparrow, M. Meredith, E. Hoffmann, E. Fahrbach, C. Summerhayes, A. Worby, M. England, R. Bellerby, S. Speich, D. Costa, J. Hall, M. Hindell, G. Hosie, K. Stansfield, Y. Fukamachi, T. de Bruin, A. Naveira Garabato, K. Alberson, V. Ryabinin, H. C. Shin and S. Gladyshev: Southern Ocean Observing Systems (SOOS): Rationale and Strategy for Sustained Observations of the Southern Ocean, Proceedings of OceanObs '09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 2), ESA Publication WPP-306, 2010.
  45. Sasajima, Y., H. Hasumi and T. Nakamura: A sensitivity study of the dense shelf water formation in the Okhotsk Sea, *J. Geophys. Res.*, **115**, C11007, 2010. (doi:10.1029/2009JC005697)
  46. Tatabe, H., and H. Hasumi: Formation mechanism of the Pacific equatorial thermocline revealed by a general circulation model with a high accuracy tracer advection scheme, *Ocean Modelling*, **35**, 245-252, 2010. (doi:10.1016/j.ocemod.2010.07.011)
  47. Tsugawa, M., and H. Hasumi: Generation and growth mechanism of the Natal Pulse, *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 1597-1612, 2010. (doi:10.1175/2010JPO4347.1)
  48. Urakawa, L. S., and H. Hasumi: Role of parameterized eddies in the energy budget of the global thermohaline circulation: cabbeling versus restratification, *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 1894-1901, 2010. (doi:10.1175/2010JPO4361.1)
  49. Williams, G. D., S. Aoki, S. S. Jacobs, S. R. Rintoul, T. Tamura and N. Bindoff: Antarctic Bottom Water from the Adelie and George V Land coast, East Antarctica (140-149E). *J. Geophys. Res.*, **115**, C04027, 2010.

- (doi:10.1029/2009JC005812)
50. 中野渡拓也, 三寺史夫, 本井達夫, 大島慶一郎, 石川一郎: 渦解像海洋大循環モデルで再現される北太平洋中層水の 50 年規模の低温化, *海と空*, **85**, 141-150, 2010. (doi なし)
  51. Fukamachi, Y., K. I. Ohshima, Y. Mukai, G. Mizuta and M. Wakatsuchi: Sea-ice drift characteristics revealed by measurement of acoustic Doppler current profiler and ice-profiling sonar off Hokkaido in the Sea of Okhotsk, *Annals Glaciol.*, **52**, 1-8, 2011. (doi 不明)
  52. Kusahara, K., H. Hasumi and G. D. Williams: Impact of the Mertz Glacier Tongue calving on dense water formation and export, *Nature Communications*, **2**, 159, 2011. (doi: 10.1038/ncomms1156)
  53. Kusahara, K., H. Hasumi and G. D. Williams: Dense shelf water formation and brine-driven circulation in the Adelie And George V Land region, *Ocean Modelling*, **37**, 122-138, 2011. (doi: 10.1016/j.ocemod.2011.01.008)
  54. Nihashi, S., N. Ebuchi, Y. Fukamachi, and S. Takahashi: Characteristics of sea ice in the Okhotsk coastal polynyas revealed from satellites, ice-profiling sonar, and digital camera observations, *Annals Glaciol.*, **52**, 133-139, 2011. (doi 不明)
  55. Tamura, T., K. I. Ohshima, S. Nihashi and H. Hasumi: Estimation of surface heat/salt fluxes associated with sea ice growth/melt in the Southern Ocean, *Scientific Online Letter on the Atmosphere*, **7**, 17-20, 2011. (doi:10.2151/sola.2011-005)
  56. Toyota, T., S. Ono, K. Cho and K. I. Ohshima: Retrieval of sea ice thickness distribution in the Sea of Okhotsk from ALOS/PALSAR backscatter data, *Annals Glaciol.*, **52**, 177-184, 2011. (doi 不明)
  57. Uchimoto, K., T. Nakamura, J. Nishioka, H. Mitsudera, M. Yamamoto-Kawai, K. Misumi and D. Tsumune: Simulations of chlorofluorocarbons in and around the Sea of Okhotsk: Effects of tidal mixing and brine rejection on the ventilation, *J. Geophys. Res.*, **116**, C02034, 2011. (doi:10.1029/2010JC006487)
  58. Williams, G. D., M. Hindell, M-N Houssais, T. Tamura, and I. C. Field: Upper ocean stratification and sea ice growth rates during the summer-fall transition, as revealed by Elephant seal foraging in the Adelie Depression, East Antarctica, *Ocean Science Discussions*, **7**, 1-40, 2011. (doi:10.5194/osd-7-1-2010)
  59. Kawaguchi, Y., T. Tamura, S. Nishino, T. Kikuchi, M. Itoh, and H. Mitsudera: Numerical study of winter water formation in the Chukchi Sea: Roles and impacts of coastal polynyas, *J. Geophys. Res.*, **116**, C07025, 2011. (doi:10.1029/2010JC006606)
  60. Nihashi, S., K. I. Ohshima, and H. Nakasato: Sea-ice retreat in the Sea of Okhotsk and the ice-ocean albedo-feedback effect on it, *J. Oceanogr.*, **67**, 2011. (doi:10.1007/s10872-011-0056-x)
  61. Tamura, T., and K. I. Ohshima: Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas. *Journal of Geophysical Research*, **116**, C07030, 2011. (doi:10.1029/2010JC006586)
  62. Toyota, T., C. Haas, and T. Tamura: Size distribution and shape properties of relatively small sea ice floes in the Antarctic marginal ice zone in late winter, *Deep-Sea Res. II*, **58**, 1182-1193, 2011, (doi:10.1016/j.dsr2.2010.10.034)
  63. Toyota, T., R. Massom, K. Tateyama, T. Tamura, and A. Fraser: Properties of snow overlying the sea ice off East Antarctica in late winter, 2007. *Deep-Sea Res. II*, **58**, 1137-1148, 2011. (doi:10.1016/j.dsr2.2010.12.002)
  64. Williams, G. D., A. J. S. Meiners, A. Poole, P. Mathiot, T. Tamura, and A. Klocker: Late winter oceanography off the Sabrina and BANZARE coast (117-128E), East Antarctica. *Deep-Sea Res. II*, **58**, 1194-1210, 2011. (doi:10.1016/j.dsr2.2010.10.035)

65. Matsumura, Y., and H. Hasumi: Dynamics of cross-isobath dense water transport induced by slope topography, *J. Phys. Oceanogr.*, **41**, 2402-2416, 2011. (doi:10.1175/JPO-D-10-05014.1)
66. Yamaguchi, H., K. I. Ohshima and N. Nakazawa: Numerical prediction of spilled oil behavior in the Sea of Okhotsk under sea ice conditions, *Offshore Technology Conference*, OTC22123, 2011. (doi:10.4043/22123-MS)
67. Toyota, T., S. Ono, K. Cho, and K. I. Ohshima: Retrieval of sea ice thickness distribution in the Sea of Okhotsk from ALOS/PALSAR backscatter data, *Annals of Glaciology*, **52** 177-184, 2011. (doi 不明)
68. 田村岳史, 清水大輔, 牛尾収輝, 大島慶一郎: 日本南極地域観測隊の夏期行動中における海水分布情報の提供システム, *南極資料*, **55**, 260-268, 2011. (doi なし)
69. Nakayama, Y., K. I. Ohshima, Y. Fukamachi: Enhancement of sea-ice drift due to the dynamical interaction between sea ice and a coastal ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 179-192, 2012. (doi:10.1175/JPO-D-11-018.1)
70. Petrich C., H. Eicken, J. Zhang, J. Krieger, Y. Fukamachi, K. I. Ohshima: Coastal landfast sea ice decay and breakup in northern Alaska: Key processes and seasonal prediction, *Journal of Geophysical Research*, **117**, C02003, 2012. (doi:10.1029/2011JC007339)
71. Ishii, H., and T. Toyota: Temporal evolution of the structural properties of seasonal sea ice during the early melt season, *Journal of Glaciology*, **58**, 23-37, 2012. (doi 不明)
72. Tamura, T., G. D. Williams, A. D. Fraser, and K. I. Ohshima: Potential regime shift in decreased sea ice production after the Mertz Glacier calving, *Nature Communications*, **in press**.
73. Iwamoto, K., K. I. Ohshima, T. Tamura, and S. Nihashi: Estimation of thin ice thickness from AMSR-E data in the Chukchi Sea, *International Journal of Remote Sensing*, **in press**.
74. Nihashi, S., K. I. Ohshima, and N. Kimura: Creation of a heat and salt flux dataset associated with sea-ice production and melting in the Sea of Okhotsk, *Journal of Climate*, **in press**.
75. Komuro Y., T. Suzuki, T. T. Sakamoto, H. Hasumi, M. Ishii, M. Watanabe, T. Nozawa, T. Yokohata, T. Nishimura, K. Ogochi, S. Emori and M. Kimoto: Sea-ice in twentieth-century simulations by new MIROC coupled models: a comparison between models with high resolution and with ice thickness distribution. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **in press**.
76. Sakamoto, T. T., Y. Komuro, T. Nishimura, M. Ishii, H. Tatebe, H. Shiogama, A. Hasegawa, T. Toyoda, M. Mori, T. Suzuki, Y. Imada, T. Nozawa, K. Takata, T. Mochizuki, K. Ogochi, S. Emori, H. Hasumi and M. Kimoto: MIROC4h – a new high-resolution atmosphere-ocean coupled general circulation model, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **in press**.
77. Tatebe, H., M. Ishii, T. Mochizuki, Y. Chikamoto, T. T. Sakamoto, Y. Komuro, M. Mori, S. Yasunaka, M. Watanabe, K. Ogochi, T. Suzuki, T. Nishimura and M. Kimoto: Initialization of the climate model MIROC for decadal prediction with hydrographic data assimilation, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **in press**.
78. Oka, A., H. Hasumi and A. Abe-Ouchi: The thermal threshold of the Atlantic meridional overturning circulation and its control by wind stress forcing during glacial climate, *Geophysical Research Letters*, **in press**.
79. Urakawa, L. S., and H. Hasumi: Eddy-resolving model estimate of the cabbeling effect on the water mass transformation in the Southern Ocean, *Journal of Physical Oceanography*, **in press**.

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. Hecht, M. H., and H. Hasumi, Ocean Modeling in an Eddy Regime, American Geophysical Union, Washington, D.C., 409 pp, 2008.
2. 大島慶一郎: 温暖化で変わるオホーツク海ー弱まる北太平洋へのポンプの働きー, 北海道大学広報誌 リテラポプリ, **34**, 34-35, 2008.
3. 大島慶一郎, 中野渡拓也, 若土正暁: 温暖化によるオホーツク海及び北太平洋のオーバーターン弱化, 月刊地球, **30-3**, 127-133, 2008.
4. 中村知裕: 潮汐過程がオホーツク海・北太平洋間の海水交換に果たす役割, 海の研究, **17**, 133-146, 2008.
5. 中村知裕: 千島列島付近での潮汐・混合のモデル研究ーなぜ大きな混合?, 月刊海洋号外, **50**, 18-27, 2008.
6. 大島慶一郎, 小野純, 小野数也, 勝又勝郎: オホーツク海の潮流の観測, 月刊海洋号外, **50**, 28-33, 2008.
7. 羽角博康: 18.6 年周期潮汐の気候への影響に関するモデリング, 月刊号外海洋, **50**, 50-56, 2008.
8. Nakanowatari, T., H. Mitsudera, T. Motoi, K. I. Ohshima, and I. Ishikawa: 50-yr scale change in the intermediate water temperature in the western North Pacific simulated by an eddy resolving sea-ice coupled OGCM. Proceedings of the 4th Workshop on the Okhotsk Sea and Adjacent Areas, PICES Scientific Rep., **36**, 102-106, 2009.
9. Ohshima, K. I., T. Nakanowatari, T. Nakatsuka, J. Nishioka, and M. Wakatsuchi: Changes in the Sea of Okhotsk due to global warming -Weakening pump function to the North Pacific, proceedings of the 4th Workshop on the Okhotsk Sea and Adjacent Areas, PICES Scientific Rep., **36**, 16-20, 2009.
10. Suzuki, T., F. Saito, T. Nishimura and K. Ogochi: Coupling procedures of heat and freshwater fluxes in MIROC version 4, JAMSTEC Rep. Res. Dev., **9**, 1-9, 2009.
11. Toyota, T.: Application of remote sensing to the estimation of sea ice thickness distribution, In "Advances in Geoscience and Remote Sensing", Jedlovec, G. (Ed.), 21-44, In-Teh, ISBN: 978-953-307-005-6, Vienna, Austria, 2009.
12. Toyota, T.: A study on growth processes of sea ice in the southern Sea of Okhotsk, 143 pp., VDM Verlag, ISBN: 978-3-639-19602-3, Saarbrücken, Germany, 2009.
13. 豊田威信: 海氷研究の進展, 雪氷研究の系譜ー北海道の雪氷から世界の雪氷圏までー, (社)日本雪氷学会北海道支部, **77-80**, 2009.
14. 羽角博康, 草原和弥, 松村義正: 海洋循環形成プロセスの高解像度シミュレーション, スーパーコンピューティングニュース, 東京大学情報基盤センター, **11 (Special Issue 2)**, 17-32, 2009.
15. 大島慶一郎: 1.2. オホーツク海と海氷ーその特殊性と重要性ー「朝倉世界地理講座ー大地と人間の物語ー2巻: 東北アジア」朝倉書店, pp10-19, 2009.
16. 大島慶一郎: 環オホーツク海研究の進展, 雪氷研究の系譜ー北海道の雪氷から世界の雪氷圏までー, (社)日本雪氷学会北海道支部, **177-180**, 2009.
17. 羽角博康: 2.6 海洋大循環, 「地球温暖化の事典」, 丸善, 印刷中.
18. 羽角博康: 海洋大循環の連結階層シミュレーション, 「計算力学シミュレーションハンドブック」, 丸善, 21-28, 2009.
19. Ebuchi, E., Y. Fukamachi, and K. I. Ohshima: Propagation of subinertial variations in the Soya Warm Current revealed by HF ocean radars, Proceedings of the 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 3051-3054, 2010.
20. Hasumi, H., H. Tatebe, T. Kawasaki, M. Kurogi and T. T. Sakamoto, Progress of North Pacific modeling over the past decade, *Deep-Sea Res. II.*, **57**, 1188-1200,

2010. (doi:10.1016/j.dsr2.2009.12.008)
21. Ohshima, K. I., T. Nakanowatari, S. Nihashi, J. Nishioka, T. Nakatsuka, and M. Wakatsuchi: Impact of sea ice production and its recent reduction on overturning and material circulation in the Okhotsk Sea and North Pacific. Report on Amur-Okhotsk Project, No. 6, Research Institute for Humanity and Nature, 21-29, 2010.
  22. Yamaguchi, H., Ono J., Ohshima, K. I., Kurokawa, A.: A system for numerical prediction of spilled oil behavior in the Sea of Okhotsk including ice-covered condition, Proceeding of 25th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, 17-24, 2010.
  23. 大島慶一郎, 羽角博康: 総論:南大洋の深層水形成と海氷過程, 月刊海洋, 号外 54, 5-10, 2010.
  24. 大島慶一郎, 深町康, 青木茂, 清水大輔, 田村岳史, 牛尾収輝, 橋田元, 北出裕二郎, 若土正暁: 未知の南極底層水生成域の発見と今後の観測に向けてーケープダンレープロジェクトー, 月刊海洋, 号外 54, 12-20, 2010.
  25. 北出裕二郎, 平野大輔, 大島慶一郎, 深町康: 海鷹丸により観測されたケープダンレー沖の南極底層水と海洋微細構造の特徴, 月刊海洋, 号外 54, 29-36, 2010.
  26. 田村岳史, 大島慶一郎: SSM/I を用いた海氷生産量・熱塩フラックスのグローバルマッピング, 月刊海洋, 号外 54, 37-42, 2010.
  27. 二橋創平, 大島慶一郎: 南極海における AMSR-E データを用いた薄氷厚推定アルゴリズムの開発と海氷生産量の見積もり, 月刊海洋, 号外 54, 43-51, 2010.
  28. 草原和弥, 羽角博康: 南極沿岸ポリニヤのモデリング, 月刊海洋, 号外 54, 52-61, 2010.
  29. 豊田威信: 海氷過程のパラメタリゼーションー海氷と波の相互作用の観点からー, 月刊海洋, 号外 54, 82-93, 2010.
  30. 羽角博康: 深層水形成・循環モデリングのこれから, 月刊海洋, 号外 54, 96-100, 2010.
  31. 小室芳樹: 海洋モデルの解像度が南極の深層水形成過程に与える影響ー低解像度領域モデルを用いた考察ー, 月刊海洋, 号外 54, 101-109, 2010.
  32. 松村義正: Weddell 海での棚氷水の沈降に関するモデリング研究, 月刊海洋, 号外 54, 110-119, 2010.
  33. 田中幸夫: 南大洋モデリングによる渦の役割の研究, 月刊海洋, 号外 54, 129-135, 2010.
  34. 大島慶一郎, 中野渡拓也, S. C. Riser, 若土正暁: オホーツク海・海氷域でのフロート観測, 月刊海洋, 42 (11), 643-653, 2010.
  35. 羽角博康: 海洋物理モデリングから Argo の将来発展への期待, 月刊海洋, 42 (12), 696-701, 2010.
  36. 大島慶一郎: 海洋深層循環を駆動する南極底層水ー未知の底層水生成域を探るー, 自然と科学の情報誌「ミルシル」, 3 (4), 9-11, 2010.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

- ① 招待講演 (国内会議 9 件、国際会議 5 件)
  1. 大島 慶一郎: 温暖化で変わるオホーツク海:弱まる北太平洋へのポンプの働き, 北海道とロシア極東地域の持続可能な開発に向けた環境フォーラム. 北海道大学・北海道, 札幌, 2008 年 6 月 19 日.
  2. 岡頭, 羽角博康, 小畑元, 蒲生俊敬, 山中康裕: 海洋大循環モデルによる希土類元素の再現, 日本地球化学会, 東京, 2008 年 9 月 19 日.
  3. Nakamura, T.: The effects of tidal mixing at the Kuril Straits on North Pacific ventilation, SCOR 50th Anniversary Symposium, Woods Hole (USA), October 19-21, 2008.
  4. 大島慶一郎: 海氷の気候システムに果たす役割に関する研究, 日本気象学会 2008 年

- 度堀内賞記念講演, 日本気象学会, 仙台, 2008年11月20日.
5. 大島 慶一郎: 温暖化で変わるオホーツク海: 海洋物理化学観測の成果と今後の予測, オホーツク生態系保全・日露協力シンポジウム, 外務省・環境省, 札幌, 2009年3月8日.
  6. 大島慶一郎: 「温暖化で変わるオホーツク海、流氷が減ると…」知床世界遺産センター開館記念講演, 環境省, 知床世界遺産センター, 斜里, 2009年4月19日.
  7. 羽角博康: 海洋将来変動の詳細な予測と影響評価に向けて, 日本地球惑星連合大会, 千葉, 2009年5月20日.
  8. Ohshima K. I., T. Nakanowatari, J. Nishioka, T. Nakatsuka, and M. Wakatsuchi: Impact of the sea ice reduction in the Sea of Okhotsk on the North Pacific. Environmental Conservation of the Sea of Okhotsk: Cooperation between Japan, China and Russia, ISTC Japan Workshop, Hokkaido University Sustainability Weeks 2009, Hokkaido University Conference Hall, Sapporo (Japan), November 7-8, 2009.
  9. Tsugawa, M.: Development of a cubic grid ocean general circulation model for parallel computers, CHPC conference, Johannesburg (South Africa), December 9, 2009.
  10. 大島慶一郎: 両極域における海洋-海氷変動と温暖化, 国際極年 2007-2008 シンポジウム- 地球規模の変動現象と極域の役割ー, 日本学術会議, 国立極地研究所, 東京, 2010年3月1日.
  11. 羽角博康: 海洋深層循環における南極域の役割, 日本地球惑星連合大会, 千葉, 2010年5月28日.
  12. 大島慶一郎: オホーツク海の海流に関する最新の知見及びこれらの海流を再現した高精度数値モデルを使つての油流出シミュレーション, Forum on Sakhalin Projects (2010 NOWPAP MERRAC Experts Meeting), Japan Coast Guard, 稚内, 2010年9月5日.
  13. Tsugawa, M.: High-resolution modeling with the Parallel Cubic Grid Ocean General Circulation Model, CAWCR 4th annual workshop, Hobart (Australia), November 9, 2010.
  14. Tatebe, H.: A newly developing climate model: MIROC with a tripolar ocean nested model, Korea-Japan joint workshop on climate system modeling, Ansan (Korea), September 27-28, 2010.
- ② 口頭発表 (国内会議 95件、国際会議 58件)
1. Kitauchi, H., and H. Hasumi: A Labrador Sea modeling studied by a coupled sea ice-ocean circulation model, EGU General Assembly, Vienna (Austria), April 19, 2007.
  2. Tanaka, Y., and H. Hasumi: Study of the meridional overturning structure of the Antarctic Circumpolar Current using an eddy resolved ocean model, IUGG General Assembly, Perugia (Italy), July 3, 2007.
  3. Kitauchi, H., and H. Hasumi: Arctic freshwater impacts on the intermediate water formation in the Labrador Sea, IUGG General Assembly, Perugia (Italy), July 3, 2007.
  4. Hasumi, H., I. Yasuda and H. Tatebe: Pacific Bidecadal variability induced by tidal mixing along the Kuril Islands, IUGG General Assembly, Perugia (Italy), July 5, 2007.
  5. Ohshima, K. I., T. Nakanowatari, M. Wakatsuchi and S. C. Riser: Interannual variability in ventilation of the Okhotsk Sea and North Pacific linked with sea ice production in the Okhotsk Sea, IUGG General Assembly, Perugia (Italy), July 5, 2007.
  6. Kusahara, K., and K. I. Ohshima: Dynamics of the wind-driven sea level

- variation around Antarctica, IUGG General Assembly, Perugia (Italy), July 6, 2007.
7. Tsugawa, M., and H. Hasumi: The Agulhas Current System in a global high-resolution OGCM simulation, IUGG General Assembly, Perugia (Italy), July 6, 2007.
  8. Tamura, T., K. I. Ohshima and S. Nihashi: Mapping of thin sea ice and ice production in the Southern Ocean and Okhotsk Sea, IUGG General Assembly, Perugia (Italy), July 9, 2007.
  9. 渡邊英嗣, 羽角博康: 渦解像北極海モデルを用いた太平洋起源水輸送過程の解析, 日本海洋学会, 那覇, 2007年9月26日.
  10. 三寺史夫, 中村知裕: 環オホーツク圏領域気候モデル, 日本気象学会, 札幌, 2007年10月14日.
  11. 田村岳史, 大島慶一郎, 二橋創平: 南極海における海氷生産量のマッピングと経年変動, 極域気水圏シンポジウム, 東京, 2007年11月21日.
  12. Watanabe, E., and H. Hasumi, Pacific water transport in the Arctic Ocean simulated by an eddy-resolving coupled sea ice-ocean model, Ocean Sciences Meeting, Orlando (USA), March 3, 2008.
  13. Tanaka, Y., and H. Hasumi, A role of mesoscale eddies in the formation of Antarctic Intermediate Water, Ocean Sciences Meeting, Orlando (USA), March 6, 2008.
  14. 中村知裕, 三寺史夫: 環オホーツク圏領域気候モデル, HSSワークショップ, 札幌, 2008年3月19日.
  15. 津川元彦: 立方体格子海洋大循環モデルによって再現された Natal Pulse, 日本海洋学会, 東京, 2008年3月27日.
  16. 大島慶一郎, 中野渡拓也, 二橋創平, 若土正暁, S. C. Riser: 沿岸ポリニヤでの海氷生産量とリンクするオホーツク海中層水の経年変動, 日本海洋学会, 東京, 2008年3月28日.
  17. 深町康, 白澤邦男, 大島慶一郎, A. Polomoshnov, E. Kalinin, 水田元太, 若土正暁: オホーツク海サハリン北部沖における海氷厚の係留観測, 日本海洋学会, 東京, 2008年3月28日.
  18. 田村岳史, 大島慶一郎, 二橋創平: 北極海における海氷生産量マッピング, 日本海洋学会, 東京, 2008年3月28日.
  19. 内本圭亮, 中村知裕, 松田淳二, 西岡純, 三寺史夫: オホーツク海中層循環のモデリングー鉄循環のモデリングを目指してー, 日本海洋学会, 東京, 2008年3月28日.
  20. Mitsudera, H., J. Matsuda, T. Nakamura and K. Uchimoto: Wind- and buoyancy-driven overturning circulation in the Sea of Okhotsk, 5th Asia Oceania Geosciences Society Conference, Busan (Korea), June 16-20, 2008.
  21. Uchimoto, K., T. Nakamura, J. Nishioka, J. Matsuda and H. Mitsudera: Modeling the Intermediate Layer Circulation in the Sea of Okhotsk, 5th Asia Oceania Geosciences Society Conference, Busan (Korea), June 16-20, 2008.
  22. Toyota, T.: Retrieval of ice thickness distribution in the seasonal ice zone from L-band SAR, Workshop on "Monitoring of Antarctic sea ice during IPY", Bern (Switzerland), June 30-July 3, 2008.
  23. Williams, G., S. Aoki, S. Marsland, Y. Fukamachi, B. Galton-Fenzi, S. Rintoul and N. Bindoff: Downslope Mixing of Antarctic Bottom Water from East Antarctic Polynyas, SCAR/IASC IPY Open Science Conference, St. Petersburg (Russia), July 9, 2008.
  24. Tanaka, Y., and H. Hasumi: Injection of Antarctic Intermediate Water into the Atlantic subtropical gyre in an eddy resolving ocean model, Western Pacific Geophysics Meeting, Cairns (Australia), July 29, 2008.
  25. Ohshima. K. I., T. Nakanowatari, T. Nakatsuka, J. Nishioka and M.

- Wakatsuchi: Changes in the Sea of Okhotsk due to global warming? Weakening pump function to the North Pacific?, 4th PICES Workshop on "The Okhotsk Sea and adjacent areas", Abashiri (Japan), August 27-29, 2008.
26. Nakanowatari, T., H. Mitsudera, T. Motoi, K. I. Ohshima and I. Ishikawa: 50-yr scale change in the intermediate water temperature in the western North Pacific simulated by an eddy resolving sea-ice coupled OGCM, 4th PICES Workshop on "The Okhotsk Sea and adjacent areas", Abashiri (Japan), August 27-29, 2008.
  27. Uchimoto, K., T. Nakamura, J. Nishioka and H. Mitsudera: Modeling of the circulation of the intermediate layer in the Sea of Okhotsk, Fourth PICES Workshop on "The Okhotsk Sea and adjacent areas", Abashiri (Japan), August 27-29, 2008.
  28. Sasajima, Y., H. Hasumi and T. Nakamura: Sensitivity experiments on the dense shelf water formation in the Okhotsk Sea, Fourth PICES Workshop on the Okhotsk Sea and Adjacent Areas, Abashiri (Japan), August 27-29, 2008.
  29. 笹島雄一郎, 羽角博康, 中村知裕: オホーツク海における高密度陸棚水形成の感度実験, 日本海洋学会, 呉, 2008年9月25日.
  30. 草原和弥, 羽角博康: 南極沿岸ポリニヤのモデリング, 日本海洋学会, 呉, 2008年9月25日.
  31. 建部洋晶, 羽角博康: 海洋 GCM における赤道水温躍層の再現性と数値拡散, 日本海洋学会, 呉, 2008年9月25日.
  32. 坂本天, 羽角博康: 気候モデルを用いた温暖化実験の太平洋における subtropical and tropical cells の応答ー海洋モデル解像度に対する依存性ー, 日本海洋学会, 呉, 2008年9月25日.
  33. 松村義正, 羽角博康: 南極沿岸での Ice Shelf Water 沈降過程に関する数値実験, 日本海洋学会, 呉, 2008年9月25日.
  34. 豊田威信, 上村治睦, 小野修史, 矢口龍太, 長幸平: PALSAR によるオホーツク海の氷厚分布推定の検証観測, 日本海洋学会, 呉, 2008年9月25日.
  35. 三寺史夫, 松田淳二, 中村知裕, 内本圭亮, 中野渡拓也, 江淵直人: 風の強制と結合したオホーツク海の熱塩循環, 日本海洋学会, 呉, 2008年9月25日.
  36. 中野渡拓也, 三寺史夫, 本井達夫, 大島慶一郎, 石川一郎: 北太平洋西部の中層水に見られる数十年スケールの低温化ー循環境界を横切る輸送量の影響ー, 日本海洋学会, 呉, 2008年9月25日.
  37. 田村岳史, 大島慶一郎: 東南極ケープダーンレーポリニヤの形成・変動機構, 日本海洋学会, 呉, 2008年9月25日.
  38. Speer, K. and Y. Fukamachi: Observations and indices in the Southern Ocean, 3rd CLIVAR/GODAE Meeting on Ocean Synthesis Evaluation, Tokyo (Japan), October 6, 2008.
  39. Ohshima, K. I., and T. Tamura: Studies on sea ice and polynya off the Cape Darnley in East Antarctica, using the ALOS PALSAR and passive microwave data, ALOS PI Symposium 2008, Rhodes (Greece), November 3-7, 2008.
  40. 豊田威信, C. Haas: ウェッデル海水縁域における比較的小さな氷盤の大きさ分布について, 第31回極域気水圏シンポジウム, 東京, 2008年12月2日.
  41. 田村岳史, 大島慶一郎, 二橋創平: 北極海沿岸ポリニヤにおける海水生産量の見積もり, 第31回極域気水圏シンポジウム, 東京, 2008年12月2日.
  42. 草原和弥, 羽角博康: 南極沿岸ポリニヤのモデリング, 第31回極域気水圏シンポジウム, 東京, 2008年12月2日.
  43. Ohshima, K. I., T. Tamura, Y. Fukamachi, and S. Aoki: Sea ice production in the polynya and the associated bottom water formation off the Cape Darnley, East Antarctica. 9th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Melbourne (Australia), February 9-13, 2009.

44. Hasumi, H.: Toward reliable projection and assessment of future ocean changes, Climate 2009 The 11<sup>th</sup> International Specialist Meeting for the Next Generation Models on Climate Change and Sustainability for Advanced High-Performance Computing, Oak Ridge (USA), March 16-18, 2009.
45. 内本圭亮, 中村知裕, 西岡純, 三寺史夫, 川合美千代, 三角和弘, 津旨大輔: 西部北太平洋での CFC シミュレーション, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2009 年 4 月 6 日.
46. 豊田威信, Christian Haas, 田村岳史: 南極氷縁域における比較的小さな氷盤の大きさ分布の特徴, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2009 年 4 月 7 日.
47. 田村岳史, 大島慶一郎, 二橋創平: 南大洋における海氷域熱塩フラックスデータセットの作成, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2009 年 4 月 7 日.
48. 川口悠介, 三寺史夫, 二橋創平, 大島慶一郎: 巨大沿岸ポリニアの形成機構に関する研究, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2009 年 4 月 7 日.
49. 草原和弥, 羽角博康: Adelie Depression における海洋循環場の季節変化ー海氷海洋結合モデルを用いてー, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2009 年 4 月 7 日.
50. 渡邊英嗣, 羽角博康, 溝端浩平, 島田浩二, 齊藤誠一: 渦解像北極海モデルを用いた太平洋起源水の輸送過程の解析 II, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2009 年 4 月 7 日.
51. Mitsudera, H., J. Matsuda, T. Nakamura, K. Uchimoto, T. Nakanowatari, N. Ebuchi: Wind and buoyancy effects on meridional overturning circulation in the Sea of Okhotsk, IAMAS-IAPSO-IACS Joint Assembly, Montreal (Canada), Montreal (Canada), July 19-29, 2009.
52. Tamura, T., K. I. Ohshima, and S. Nihashi: Mapping of sea ice production and surface heat/salt-flux in the polar Oceans, IAMAS-IAPSO-IACS Joint Assembly, Montreal (Canada), Montreal (Canada), July 19-29, 2009.
53. Matsumura, Y., and H. Hasumi: Topographic effects on bottom water formation in the southern Weddell Sea, IAMAS-IAPSO-IACS Joint Assembly, Montreal (Canada), July 19-29, 2009.
54. 深町康, Stephen R. Rintoul, John A. Church, 青木茂, Serguei Sokolov, Mark A. Rosenberg, 若土正暁: 南極海インド洋セクターのケルゲレン海台東側斜面域における南極底層水流量の時間変動, 日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009 年 9 月 26 日.
55. 中野渡拓也, 三寺史夫, 中村知裕, 内本圭亮, 大島慶一郎: オホーツク海および亜寒帯西部における中層水の昇温トレンドの原因, 日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009 年 9 月 26 日.
56. 草原和弥, 羽角博康: Adelie Depression における海洋循環場の季節変化 II, 日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009 年 9 月 26 日.
57. 川崎高雄, 羽角博康: 千島列島周囲に局在化した鉛直混合が引き起こす太平洋熱塩循環, 日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009 年 9 月 28 日.
58. 坂本天, 羽角博康, 鈴木立郎: 全球渦許容海洋大循環モデルを用いた経年変動実験における北大西洋深層水流量の 10 年スケール変動, 日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009 年 9 月 28 日.
59. 二橋創平, 中里春香, 大島慶一郎: オホーツク海の海氷後退と海水ー海洋アルベドフィードバック, 日本海洋学秋季大会, 京都, 2009 年 9 月 28 日.
60. 笹島雄一郎, 羽角博康, 中村知裕: 海洋ー海氷結合モデルで見られたオホーツク海沖合での海氷生産について, 日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009 年 9 月 28 日.
61. 内本圭亮, 中村知裕, 西岡純, 三寺史夫, 川合美千代, 三角和弘, 津旨大輔: オホーツク海における CFC の取り込み: ブライン排出と千島列島域潮汐混合の影響, 日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009 年 9 月 28 日.
62. Uchimoto, K., T. Nakamura, J. Nishioka, H. Mitsudera, M. Yamamoto-Kawai, K. Misumi, and D. Tsumune: A simulation of chlorofluorocarbons in the Sea of Okhotsk, PICES 2009 Annual Meeting, Jeju (Korea), October 23- November 1,

- 2009.
63. Ohshima, K. I., and T. Tamura: Studies on sea ice and polynya off the Cape Darnley Antarctica, using ALOS-PALSAR and other satellite data, 3rd ALOS Joint PI Symposium, Hawaii (USA), November 9-13, 2009.
  64. 豊田威信, Christian Haas, 田村岳史: 晩冬期南極氷縁域における氷盤分布の特徴, 極域気水圏シンポジウム, 東京, 2009年11月17日.
  65. 大島慶一郎, 深町康, 青木茂, 清水大輔, 田村岳史, 北出裕二郎, 平野大輔, 牛尾収輝, 橋田元, 吉川久幸, 中岡慎一郎: ケープダンレープロジェクトー新たに発見された南極底層水とそれに関わる海氷生産の直接観測, 極域気水圏シンポジウム, 東京, 2009年11月17日.
  66. 深町康, 大島慶一郎, 青木茂, 北出裕二郎, 田村岳史: 係留観測による南極海ケープダンレー沖における南極底層水の変動について, 極域気水圏シンポジウム, 東京, 2009年11月17日.
  67. 二橋創平, 大島慶一郎, 木村詞明: AMSR-E データを用いたオホーツク海の熱塩フラックスデータセットの作成, 極域気水圏シンポジウム, 東京, 2009年11月17日.
  68. 宮野なつみ, 大島慶一郎, 二橋創平, 田村岳史: 南極ケープダンレーポリニヤにおける AMSR-E 薄氷厚アルゴリズムの開発と海氷生産量の見積り, 極域気水圏シンポジウム, 東京, 2009年11月17日.
  69. 田村岳史, 大島慶一郎, Robert A. Massom: 東南極ケープダンレーポリニヤの形成・変動メカニズム, 極域気水圏シンポジウム, 東京, 2009年11月17日.
  70. 北出裕二郎, 平野大輔, 大島慶一郎, 深町康: 海鷹丸によりダンレー沖で観測された深底層水の特性と海洋微細構造, 極域気水圏シンポジウム, 東京, 2009年11月17日.
  71. 草原和弥, 羽角博康, G. D. Williams: Mertz Glacier Tongue 流出が高密度水塊形成に与える影響, 極域気水圏シンポジウム, 東京, 2009年11月17日.
  72. 岩本勉之, 田村岳史, 大島慶一郎, 二橋 創平: AMSR-E を用いた北極海の熱フラックスと海氷生産量分布の見積り, 日本気象学会, アクロス福岡, 福岡, 2009年11月26日.
  73. Oka, A., H. Hasumi, H. Obata, T. Gamo and Y. Yamanaka (2009): Simulation of rare earth elements with an ocean general circulation model, *GEOTRACES Data-Model Synergy*, Paris (France), December 9, 2009.
  74. 大島慶一郎, 牛尾収輝, 橋田元, 青木茂, 深町康, 豊田威信, 清水大輔, 二橋創平, 田村岳史, 小野数也, 榎本浩之, 館山一孝: 南極巨大沿岸ポリニヤにおける係留系等による海氷高精度観測, 第3回南極観測シンポジウム, 東京, 2009年12月10日.
  75. Tsugawa, M., and H. Hasumi: Generation and Growth Mechanism of the Natal Pulse, Ocean Science Meeting 2010, Portland (USA), February 24, 2010.
  76. Ohshima, K. I., T. Tamura, S. Nishishi, K. Iwamoto, D. Simizu, Y. Fukamachi: Global Mapping of sea ice production and heat/salt flux in ice-covered regions, using satellite passive microwave data. US CLIVAR/SeaFlux Workshop, Surface Fluxes: Challenges for High Latitudes, Center Green, NCAR, Boulder (USA), March 18, 2010.
  77. 大島慶一郎, 深町康, 青木茂, 清水大輔, 田村岳史, 若土正暁, 北出裕二郎, 平野大輔, 牛尾収輝, 橋田元, 吉川久幸, 中岡慎一郎: 新たに発見された南極底層水とそれに関わる海氷生産の直接観測ーケープダンレープロジェクトー, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2010年3月29日.
  78. 深町康, 大島慶一郎, 青木茂, 北出裕二郎, 田村岳史, 若土正暁: 係留観測による南極海ケープダンレー沖における南極底層水について, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2010年3月29日.
  79. 北出裕二郎, 平野大輔, 大島慶一郎, 深町康: ケープダンレー沖で観測された南極底層水の特性と分布, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2010年3月29日.

80. 橋田元, 中岡慎一郎, 吉川久幸, 大島慶一郎, 中澤高清, 青木周司, 石丸隆, 小達恒夫, 福地光男: 東南極ケープダンレー沖における南極底層水形成に関わる溶存無機炭酸の特徴的な分布について, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2010年3月29日.
81. 宮野なつみ, 田村岳史, 二橋創平, 大島慶一郎: 南極ケープダンレーポリニヤにおける海水生産量の見積り, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2010年3月29日.
82. 嶋田啓資, 青木茂, 大島慶一郎: オーストラリアー南極海盆におけるアデリーランド底層水の低塩分化・低密度化, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2010年3月29日.
83. 大島慶一郎, 中野渡拓哉, S. C. Ricer, 若土正暁: オホーツク海・海氷域でのフロート観測, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2010年3月30日.
84. 草原和弥, 羽角博康: Adelie Depression と Mertz Depression における高密度陸棚水の形成～Mertz Glacier Tongue が消失した場合～, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2010年3月30日.
85. 岡頭, 羽角博康, 阿部彩子: 氷期における大西洋深層循環のシミュレーション, 日本海洋学会春季大会, 東京, 2010年3月30日.
86. 深町康, 大島慶一郎, 江淵直人, 坂東忠男, 小野数也, 佐野稔: 2006年から2008年にかけての宗谷海峡における流量, 研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」, 札幌, 2010年7月12日.
87. 小野純, 大島慶一郎, 内本圭亮, 三寺史夫, 山口一: オホーツク海における三次元・高解像度モデルを用いた流出油の漂流・拡散シミュレーション, 研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」, 札幌, 2010年7月12日.
88. 川崎高雄, 羽角博康: ラブラドル海における深層対流と中規模渦のモデリング, 日本海洋学会秋季大会, 網走, 2010年9月7日.
89. 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ーオホーツク海と千島列島を念頭においてー, 日本海洋学会秋季大会, 網走, 2010年9月8日.
90. 石井大樹, 豊田威信: 融解初期における海氷の構造特性の変化, 日本海洋学会秋季大会, 網走, 2010年9月9日.
91. 中山佳洋, 大島慶一郎, 深町康: 海氷と沿岸海洋の相互作用による海氷漂流強化機構, 日本海洋学会秋季大会, 網走, 2010年9月9日.
92. 二橋創平, 大島慶一郎, 木村詞明: オホーツク海の熱塩フラックスデータセットの作成とそれを用いたブルーミング過程の推察, 日本海洋学会秋季大会, 網走, 2010年9月9日.
93. 清水大輔, 小野純, 大島慶一郎, 内本圭亮, 三寺史夫: オホーツク海における海氷の粒子追跡実験(その2), 日本海洋学会秋季大会, 網走, 2010年9月9日.
94. 江淵直人, 深町康, 大島慶一郎: 宗谷暖流の流速の短周期変動の downstream への伝播, 日本海洋学会秋季大会, 網走, 2010年9月9日.
95. 大島慶一郎, 中野渡拓也, 深町康, 若土正暁, 二橋創平, S. C. Riser: オホーツク海の海氷が水塊形成・熱塩収支及びその変動に与えるインパクト, 日本海洋学会秋季大会, 網走, 2010年9月10日.
96. 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, 日本海洋学会秋季大会, 網走, 2010年9月10日.
97. 大島慶一郎, 深町康, 牛尾収輝, 橋田元, 青木茂, 清水大輔, 小野数也: 海氷厚・南極底層水の係留系観測ー温暖化で氷厚・底層水は変化しているか?ー, 南極観測シンポジウム, 東京, 2010年9月15日.
98. 嶋田啓資, 青木茂, 大島慶一郎: オーストラリアー南極海盆におけるアデリーランド底層水の変質, 極域気水圏シンポジウム, 東京, 2010年11月30日.
99. 二橋創平, 大島慶一郎: AMSR-E データを用いた南極海の薄氷厚推定アルゴリズムの開発, 日本海洋学会春季大会, 柏, 2011年3月23日. (震災により大会中止のため、

講演要旨集による発表に代替)

100. 柏瀬陽彦, 大島慶一郎, 二橋創平: オホーツク海における海氷生産量の長期変動に関する研究, 日本海洋学会春季大会, 柏, 2011年3月23日. (震災により大会中止のため、講演要旨集による発表に代替)
101. 中山佳洋, 大島慶一郎, 松村義正, 羽角博康, 深町康: ケープダンレー沖における南極底層水の形成と流動に関する数値的研究, 日本海洋学会春季大会, 柏, 2011年3月24日. (震災により大会中止のため、講演要旨集による発表に代替)
102. 平池友梨, 浦川昇吾, 田中幸夫, 羽角博康: 渦解像度モデルによる太平洋SAMW/AIWのサブダクション, 日本海洋学会春季大会, 柏, 2011年3月23日. (震災により大会中止のため、講演要旨集による発表に代替)
103. 建部洋晶, 黒木聖夫, 鈴木立郎, 田中幸夫, 羽角博康: 日本近海海洋ネストモデルを組み込んだ気候モデルの開発, 日本海洋学会春季大会, 柏, 2011年3月24日. (震災により大会中止のため、講演要旨集による発表に代替)
104. 黒木聖夫, 羽角博康, 田中幸夫: 双方向ネストモデルを用いた黒潮流路変動の研究, 日本海洋学会春季大会, 柏, 2011年3月25日. (震災により大会中止のため、講演要旨集による発表に代替)
105. Kurogi, M., H. Hasumi and Y. Tanaka, Kuroshio path variation studied by a nested-grid OGCM, International Symposium on “Climate Change Effects on Fish and Fisheries: Forecasting Impacts, Assessing Ecosystem Responses, and Evaluating Management Strategies”, Sendai (Japan), April 27, 2010.
106. Nakamura, T., Y. Isoda, H. Mitsudera, S. Takagi, M. Nagasawa, and S. Abe: Direct Observation of a Breaking Unsteady Lee Wave Generated by Diurnal Tides and an Estimate of its Global Occurrence, EGU General Assembly 2010, Vienna (Austria), May 6, 2010.
107. Ohshima, K. I. and S. C. Riser: Mapping and interannual variations of sea-ice thickness in the Okhotsk Sea inferred from ocean salinity profile in spring, IGS International Symposium on Sea Ice in the Physical and Biogeochemical System, Tromso (Norway), June 1, 2010.
108. Tamura, T., K. I. Ohshima, and S. Nihashi: Global mapping of sea ice production and surface heat/salt-flux in the sea ice region, IGS International Symposium on Sea Ice in the Physical and Biogeochemical System, Tromso (Norway), June 2, 2010.
109. Ohshima, K. I.: Japanese SASSI activities, SASSI Workshop, Oslo (Norway), June 7, 2010.
110. Toyota, T.: Retrieval of ice thickness in the seasonal ice zone with L-band SAR, ISSI workshop on Assessing Antarctic sea ice using Envisat ASAR, CryoSat-2 and others: Onwards from IPY'07, Bern (Switzerland), June 8, 2010.
111. Fukamachi, Y., K. I. Ohshima, S. Aoki, Y. Kitade, T. Tamura, and M. Wakatsuchi: Antarctic Bottom Water revealed by mooring measurements off Cape Darnley, Antarctica, International Polar Year Oslo Science Conference, Oslo (Norway), June 9, 2010.
112. 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, Taipei (Taiwan), June 22, 2010.
113. 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, Taipei (Taiwan), June 24, 2010.
114. Nakanowatari, T., K. I. Ohshima, and S. Nagai: What determines the

- maximum sea ice extent in the Sea of Okhotsk? Importance of ocean thermal condition from the Pacific, International symposium on snow, ice and humanity in a changing climate, Sapporo (Japan), June, 25, 2010.
115. Tamura, T., K. I. Ohshima, S. Nihashi, and H. Hasumi: Estimation of surface heat/salt fluxes associated with sea ice growth/melt in the Southern Ocean, Australia - New Zealand Climate Forum 2010, Hobart (Australia), October 15, 2010.
  116. Ohshima, K. I., S. Nihashi, T. Tamura, and Y. Fukamachi: Polynya formation and sea ice production off Cape Darnley Antarctica, revealed by ALOS PALSAR and AMSR-E data, 4th ALOS Joint PI Symposium, Tokyo (Japan), November 15, 2010.
  117. Toyota, T. and C. Haas: Retrieval of the thickness distribution of sub-Arctic and Arctic sea ice using ALOS/PALSAR, The 4<sup>th</sup> Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science, Tokyo (Japan), November 16, 2010.
  118. Ohshima, K. I., S. Nihashi, K. Iwamoto, and T. Tamura: Development of sea ice thickness and concentration algorithm in thin ice regions, Joint PI Workshop of Global Environmental Observation Mission, Tokyo (Japan), December 7, 2010.
  119. Nakanowatari T., T. Nakamura, K. Uchimoto, H. Mitsudera and K. I. Ohshima: Warming trend in the Okhotsk Sea Intermediate Water in an ice-ocean coupled model, International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu (Japan), February 22, 2010.
  120. Kashiwase H., K. I. Ohshima and S. Nihashi: Long-term variations in sea ice production in the Okhotsk Sea, International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu (Japan), February 23, 2010.
  121. Ohshima, K. I., S. Nihashi, and T. Tamura: Value-added sea-ice product from passive microwave data by Hokkaido University, Japan, Satellite-derived Sea Ice Products Community Workshop, Maryland (USA), March 16, 2011.
  122. Tatebe, H., M. Kurogi, T. Suzuki, Y. Tanaka, H. Hasumi, M. Ishii, and M. Kimoto: Long-term modulations of mesoscale eddies activities in the Kuroshio-Oyashio confluence zone represented in a high-resolution coupled model, and further model development toward better predictions. EGU General Assembly, Vienna (Austria), April 7, 2011.
  123. Ohshima, K. I. (ILTS, Hokkaido Univ.), S. C. Riser (University of Washington): Ocean salinity profiles teach us thinning and volume decrease of the Okhotsk sea-ice cover, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), June 30, 2011.
  124. Kurogi M., H. Hasumi, Y. Tanaka, Development of a nested-grid general circulation model for parallel computers. International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics, Barcelona (Spain), May 20, 2011.
  125. Hiraike, Y., Y. Tanaka and H. Hasumi: Subduction of Pacific Subantarctic Mode Water and Antarctic Intermediate Water in an eddy-resolving model, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), July 1, 2011.
  126. Oka, A., A. Abe-Ouchi and H. Hasumi: Two different modes of the Atlantic meridional overturning circulation corresponding to stadial and interstadial periods in glacial climate, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), July 1, 2011.
  127. Tamura, T., and K. I. Ohshima: Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), July 1, 2011.
  128. Kawaguchi, Y., T. Tamura, S. Nishino, T. Kikuchi, M. Itoh, and H. Mitsudera: Numerical study of winter water formation in the Chukchi Sea in the Arctic Ocean, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), July 2, 2011.
  129. Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, Y. Nakayama, T. Tamura, S. Nihashi, Y. Kitade,

- Y. Matsumura, H. Hasumi, S. Aoki, and M. Wakatsuchi: Formation of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley with huge sea ice production, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), July 2, 2011.
130. Kawasaki, T., and H. Hasumi: A modeling study of mesoscale eddies and deep convection in the Labrador Sea, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), July 2, 2011.
131. Yasuda, I., Y. Tanaka, S. Osafune, H. Hasumi and H. Tatebe: Impact of 18.6-year period tidal cycle on ocean and climate, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), July 2, 2011.
132. Tamura, T., K. I. Ohshima, S. Nihashi and H. Hasumi: Estimation of surface heat/salt fluxes associated with sea ice growth/melt in the Southern Ocean, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), July 3, 2011.
133. 内本圭亮, 中村知裕, 西岡純, 三寺史夫, 三角和宏, 津旨大輔: オホーツク海における鉄移送モデリングの試み, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月29日.
134. 黒木聖夫, 羽角博康, 田中幸夫: 双方向ネストモデルを用いた黒潮流路変動の研究, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月27日.
135. 建部洋晶, 黒木聖夫, 坂本天, 鈴木立郎, 田中幸夫, 羽角博康, 望月崇, 石井正好, 木本昌秀: 高解像度気候モデルによる黒潮続流十年規模変動と結合ネストモデルの開発, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月27日.
136. 鈴木立郎, 石井正好: 水塊の密度変化を伴う近年の海面水位分布の変化, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月28日.
137. 青木茂, 金田麻理子, 矢吹崇, 永延幹男, 田村岳史, 大島慶一郎: ロス海の塩分低下にみられる南極氷床融解の影響, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月29日.
138. 嶋田啓資, 大島慶一郎, 青木茂: 地形による異方性を考慮した南大洋格子化データセットの作成, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月29日.
139. 深町康, 清水大輔, 大島慶一郎, 小野数也, 田村岳史, 青木茂, 牛尾収輝, 橋田元: 南極海ケープダンレーポリニヤにおける海水・海洋の係留観測, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月29日.
140. 中野渡拓也, 大島慶一郎: オホーツク海沿岸水位に見られるコヒーレントな変動, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月29日.
141. 松田淳二, 笹島雄一郎, 三寺史夫, 中村知裕, 羽角博康: 高解像度太平洋オホーツク海海洋-海水モデルの構築, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月29日.
142. 柏瀬陽彦, 大島慶一郎, 二橋創平: オホーツク海における海水生産量の長期変動と中層水の変動との関係, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月29日.
143. 平池友梨, 田中幸夫, 羽角博康: 渦解像モデルによる太平洋 AAIW のサブダクション, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月29日.
144. 草原和弥, 羽角博康: 南極棚氷融解のモデリング, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月29日.
145. 深町康, 清水大輔, 大島慶一郎, 小野数也, 田村岳史, 青木茂, 牛尾収輝, 橋田元: 南極海ケープダンレーポリニヤにおける海水・海洋の係留観測, 第2回極域科学シンポジウム, 立川, 2011年11月17日.
146. 中村知裕: 千島列島域における順圧潮流による小規模渦生成, 低温研共同研究集会「北太平洋の生物地球化学過程に果たす環オホーツク圏の海洋循環・物質循環の役割」, 札幌, 2011年12月5日.
147. 松田淳二, 笹島雄一郎, 三寺史夫, 中村知裕, 羽角博康: オホーツク海・北太平洋熱塩循環モデリング, 低温研共同研究集会「北太平洋の生物地球化学過程に果たす環オホーツク圏の海洋循環・物質循環の役割」, 札幌, 2011年12月6日.
148. 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: 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, 低温研共同研究集会「北太平洋の生物地球化学過程に果たす環オホーツク圏の海洋循環・物質循環の役割」, 札幌,

2011年12月6日.

149. Matsuda, J., Y. Sasajima, H. Mitsudera, T. Nakamura and H. Hasumi: Modeling of thermo-haline circulation of the Sea of Okhotsk and North Pacific, International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu (Japan), February 21, 2012.
150. 深町康, 清水大輔, 大島慶一郎, 小野数也, 田村岳史, 青木茂, 北出裕二郎, 平野大輔, 牛尾収輝, 橋田元: ケープダンレープロジェクト~第4の南極底層水起源域の同定, 日本海洋学会春季大会, つくば, 2012年3月26日.
151. 田村岳史, Guy D. Williams, Alex D. Fraser, 大島慶一郎: メルツ氷舌崩壊による海氷生産量のレジームシフト, 日本海洋学会春季大会, つくば, 2012年3月27日.
152. 草原和弥, 羽角博康: 気温上昇に対する棚氷融解の応答とその海洋への影響, 日本海洋学会春季大会, つくば, 2012年3月27日.
153. 松田淳二, 笹島雄一郎, 三寺史夫, 中村知裕, 羽角博康: 高解像度太平洋・オホーツク海モデルの開発, 日本海洋学会春季大会, つくば, 2012年3月28日.

③ ポスター発表 (国内会議 13件、国際会議 39件)

1. Tsugawa, M., and H. Hasumi, An application of a cubic-grid OGCM to a study of the role of the Agulhas Current system in the thermohaline circulation, EGU General Assembly, Vienna (Austria), April 19, 2007.
2. 松村義正, 羽角博康: 海洋非静力学モデルを用いた深層水形成機構の再現実験, 日本海洋学会, 那覇, 2007年9月26日.
3. 浦川昇吾, 羽角博康: 海底熱源に対する熱塩循環のエネルギー的応答, 日本海洋学会, 那覇, 2007年9月27日.
4. Matsumura, Y., and H. Hasumi, Topographic effects on dense gravity currents, Ocean Sciences Meeting, Orlando (USA), March 3, 2008.
5. Tsugawa, M., and H. Hasumi, A simulation study on the Agulhas Current system and the Indo-Atlantic interbasin exchange, Ocean Sciences Meeting, Orlando (USA), March 3, 2008.
6. Kurogi, M., and H. Hasumi: Effects of the wind stress field and stratification on the Kuroshio path variation studied by a nested grid OGCM, Ocean Sciences Meeting, Orlando (USA), March 5, 2008.
7. Oka, A., H. Hasumi, H. Obata, T. Gamo and Y. Yamanaka: Evaluating effect of ballast mineral on deep-ocean nutrient concentration by using an ocean general circulation model, IMBER IMBiZO, Miami (USA), November 9-13, 2008.
8. 豊田威信, C. Haas, M. Nicolaus, Z. Li, 青木茂: 晩冬季のウェッデル海北西部海氷上の積雪の特性について, 第31回極域気水圏シンポジウム, 東京, 2008年12月3日.
9. Suzuki, T., T. T. Sakamoto, Y. Komuro and H. Hasumi: Eddy permitting simulation of the global ocean model COCO4.3 driven by the CORE interannual forcing, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco (USA), December 17, 2008.
10. Kusahara, K., and H. Hasumi: Numerical modeling of coastal polynyas in East Antarctica, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco (USA), December 15-19, 2008.
11. Oka, A., H. Hasumi and A. Abe-Ouchi: Simulation of the Atlantic deep circulation at the Last Glacial Maximum, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco (USA), December 15-19, 2008.
12. Tanaka, Y., and H. Hasumi: The temporal residual-mean velocity in the Southern Ocean evaluated using output of an eddy resolving ocean model, EGU General Assembly, Vienna (Austria), April 23, 2009.
13. Oka, A., A. Abe-Ouchi and H. Hasumi: Importance of a control state for

- simulating the Atlantic meridional overturning circulation at the LGM, EGU General Assembly, Vienna (Austria), April 23, 2009.
14. Tanaka, Y., and H. Hasumi: The temporal residual-mean velocity in the Southern Ocean evaluated using output of an eddy resolving ocean model, Workshop on Ocean Mesoscale Eddies, Exeter (UK), April 28, 2009.
  15. Sakamoto, T. T., H. Hasumi and T. Suzuki: Variability of the Atlantic meridional overturning circulation induced by wind stress in an eddy-permitting OGCM simulation, IAMAS-IAPSO-IACS Joint Assembly, Montreal (Canada), July 19-29, 2009.
  16. Sasajima, Y., H. Hasumi and T. Nakamura: A sensitivity study on dense shelf water formation in the Okhotsk Sea, IAMAS-IAPSO-IACS Joint Assembly, Montreal (Canada), July 19-29, 2009.
  17. Nakanowatari, T., and K. I. Ohshima: Changes in the Sea of Okhotsk due to global warming – Weakening pump function to the North Pacific –, ILTS International Symposium "Frontier of Low Temperature Science", Sapporo (Japan), November 9, 2009.
  18. Tamura, T., K. I. Ohshima, and S. Nihashi: Mapping of sea ice production in the Southern Ocean, ILTS International Symposium "Frontier of Low Temperature Science", Sapporo (Japan), November 9, 2009.
  19. Fukamachi, Y., K. I. Ohshima, S. Aoki, D. Simizu, T. Tamura, Y. Kitade, D. Hirano, S. Ushio, and G. Hashida: Direct observations of newly-found Antarctic Bottom Water and the associated sea-ice production - Cape Darnley Project -, ILTS International Symposium "Frontier of Low Temperature Science", Sapporo (Japan), November 9, 2009.
  20. Toyota, T., C. Haas, and T. Tamura: Size distribution of sea ice floes in the Antarctic marginal ice zones in late winter, ILTS International Symposium "Frontier of Low Temperature Science", Sapporo (Japan), November 9, 2009.
  21. 石井大樹, 豊田威信: 融解初期における海氷の構造特性の変化, 極域気水圏シンポジウム, 東京, 2009年11月17日.
  22. 大島慶一郎, 深町康, 青木茂, 清水大輔, 田村岳史, 小野数也, 牛尾収輝, 橋田元, 吉川久幸, 北出裕二郎, 平野大輔: 係留系による、未知の南極底層水と海氷生産量・厚さの直接観測, 第3回南極観測シンポジウム, 東京, 2009年12月10日.
  23. Ohshima, K. I., S. Nihashi, K. Iwamoto, T. Tamura, T. Toyota: Development of ice thickness and concentration algorithm in thin sea ice region GCOM PI Workshop, JAXA, Tokyo (Japan), January 13, 2010.
  24. Urakawa, L. S., and H. Hasumi: The role of the Southern Ocean in the energetics of the global thermohaline circulation, *Ocean Sciences Meeting*, Portland (USA), February 22-26, 2010.
  25. Matsumura, Y., and H. Hasumi: Topographic effect on bottom water formation in the Southern Weddell Sea, *Ocean Sciences Meeting*, Portland (USA), February 22-26, 2010.
  26. Kawasaki, T., and H. Hasumi: Role of locally enhanced vertical mixing around the Kuril Straits in the Pacific thermohaline circulation, *Ocean Sciences Meeting, Portland (USA)*, February 22-26, 2010.
  27. Kushara, K., and H. Hasumi: Numerical modeling of ocean in the Adelie Depression, East Antarctica, *Ocean Sciences Meeting*, Portland (USA), February 22-26, 2010.
  28. Nihashi, S., K. I. Ohshima, N. Kiumura: Creation of heat/salt flux data set in the Okhotsk Sea using AMSR-E sea ice data, US CLIVAR/SeaFlux Workshop, Surface Fluxes: Challenges for High Latitudes, Center Green, NCAR, Boulder (USA), March 17, 2010.
  29. Nakamura, T.: Scattering of Internal Waves with Frequency Change over

- Rough Topography, EGU General Assembly 2010, Vienna (Austria), May 7, 2010.
30. Nakamura, T., Y. Isoda, H. Mitsudera, S. Takagi, M. Nagasawa, and S. Abe: Direct Observation of a Breaking Unsteady Lee Wave Generated by Diurnal Tides and an Estimate of its Global Occurrence, EGU General Assembly 2010, Vienna (Austria), May 7, 2010.
  31. Toyota, T., S. Ono, K. Cho, and K. I. Ohshima: Retrieval of sea ice thickness distribution in the Sea of Okhotsk from ALOS/PALSAR backscatter data, International Glaciological Society symposium on sea ice in the physical and biogeochemical system, Tromso (Norway), June 1, 2010.
  32. Tamura, T., K. I. Ohshima, T. Toyota, K. Tateyama, R. A. Massom, and A. P. Worby: Heli-borne observation of sea ice with AMSR-E sensor in the Southern Ocean and the Sea of Okhotsk, IGS International Symposium on Sea Ice in the Physical and Biogeochemical System, Tromso (Norway), June 1, 2010.
  33. Toyota, T., C. Haas, and T. Tamura: Floe size distribution of relatively small sea ice in the Antarctic marginal ice zone in late winter, International Glaciological Society symposium on sea ice in the physical and biogeochemical system, Tromso (Norway), June 3, 2010.
  34. Kawaguchi, Y., T. Tamura, T. Kikuchi, and M. Itoh: Numerical study of Pacific Winter Water formation in Chukchi Sea using SSM/I thin-ice algorithm: Roles of Alaskan coastal polynya, International Polar Year Oslo Science Conference, Oslo (Norway), June 10, 2010.
  35. Fukamachi, Y., K. I. Ohshima, Y. Mukai, G. Mizuta, and M. Wakatsuchi: Sea-ice drift characteristics revealed by measurement of acoustic Doppler current profiler and ice-profiling sonar off Hokkaido in the Sea of Okhotsk, International Glaciological Society, Sapporo (Japan), June 21-25, 2010.
  36. 中野渡拓也, 三寺史夫, 中村知裕, 内本圭亮, 大島慶一郎: 中解像度海氷・海洋結合モデルによる北太平洋中層のシミュレーション, 日本海洋学会秋季大会, 網走, 2010年9月8日.
  37. 豊田威信, Robert Massom, 舘山一孝, 田村岳史, Alexander Fraser: 晩冬季の東南極海海氷上における観測から推測される snow ice 形成の一過程, 極域気水圏シンポジウム, 東京, 2010年11月30日.
  38. Iwamoto, K., K. I. Ohshima, T. Tamura, and S. Nihashi: Mapping of sea ice production in the Arctic Ocean using AMSR-E thin ice algorithm, Second International Symposium on the Arctic Research, Tokyo (Japan), December 8, 2010.
  39. 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, AGU fall meeting, San Francisco (USA), December 13, 2010.
  40. Kurogi, M., H. Hasumi and Y. Tanaka, Effects of Stratification on the Kuroshio Path Variation Studied by a Nested-Grid OGCM, AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), December 14, 2010.
  41. Tsugawa, M., and H. Hasumi: The origin of the water of the Agulhas Rings, IUGG General Assembly, Melbourne, Australia, June 29, 2011.
  42. Komuro, Y., T. Suzuki, M. Ishii, M. Watanabe, T. Yokohata, T. Ogura, H. Hasumi, S. Emori, and M. Kimoto: Arctic sea-ice decline simulated in an atmosphere-ice-ocean coupled model MIROC5, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), July 1, 2011.
  43. Matsumura, Y., and H. Hasumi: High-resolution modeling on the Antarctic Bottom Water formation, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), July 1, 2011.

44. Urakawa, L. S., and H. Hasumi: Cabbeling effect on the water mass transformation in the Southern Ocean, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), July 1, 2011.
45. Kusahara, K., H. Hasumi and G. D. Williams: Assessing impacts of the Mertz Glacier Tongue calving on dense shelf water formation and export, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), 3 July 2011.
46. Williams, G., T. Tamura, K. Kusahara, B. Galton-Fenzi, and B. Legresy: Long-term freshening of Adelie Depression Dense Shelf Water, IUGG General Assembly, Melbourne (Australia), July 2, 2011.
47. 豊田威信, Haas Christian: 衛星 L-band SAR を用いた氷厚分布推定の可能性について, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011 年 9 月 27 日~29 日.
48. 田中祐希, 安田一郎, 羽角博康, 建部洋晶: 潮汐 18.6 年周期振動が北太平洋の気候変動に及ぼす影響に関する数値モデリング, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011 年 9 月 27 日~29 日.
49. Toyota, T., I.J. Smith, A.J. Gough, P.J. Langhorne, R.D. Frew, G.H. Leonard, R.J. Van Hale, A.R. Mahoney, T.G. Haskell: Oxygen-isotope fractionation during the freezing of seawater, 第 2 回極域科学シンポジウム, 立川, 2011 年 11 月 15 日.
50. Graham, J. A., K. J. Heywood, C. P. Chavanne, and T. Tamura: Seasonal cycle of temperature and salinity across the Antarctic continental shelf and slope in the southeastern Weddell Sea, AGU Ocean Sciences Meeting, Salt Lake City (USA), February 21, 2012.
51. 豊田威信, I.J. Smith, A.J. Gough, P.J. Langhorne, R.D. Frew, G.H. Leonard, R.J. Van Hale, A.R. Mahoney, T.G. Haskell: 海氷生成に伴う酸素安定同位体分別係数について, 日本海洋学会春季大会, つくば, 2012 年 3 月 27 日.
52. 浦川昇吾, 羽角博康: 水塊変質率計算における数値拡散の効果の診断手法とその拡散係数に対する依存性, 日本海洋学会春季大会, つくば, 2012 年 3 月 27 日.

(4)知財出願

- ①国内出願 (0 件)
- ②海外出願 (0 件)
- ③その他の知的財産権  
なし

(5)受賞・報道等

- ①受賞
  - 2008 年度日本気象学会堀内賞(大島慶一郎:海氷の気候システムに果たす役割に関する研究)
  - 2011 年度日本海洋学会賞(安田一郎:北太平洋中層水の形成・輸送・変質過程に関する研究)
  - 2011 年度日本海洋学会岡田賞(伊藤幸彦:海洋生態系に関わる黒潮・親潮海域の水塊と変動に関する研究)
- ②マスコミ(新聞・TV等)報道
  - オホーツク流氷 最大面積正確予測 温暖化研究に活用も, 毎日新聞, 2008 年 4 月 22 日.
  - 海の循環「エンジン」一端 南極沖に深層流, 毎日新聞, 2010 年 5 月 11 日(朝刊).
  - オホーツク流氷予測真っ二つ, 朝日新聞, 2012 年 1 月 9 日.
- ③その他  
なし

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

- 海水生産量および海面熱塩フラックスデータセットを公開中
  - <http://wwwod.lowtem.hokudai.ac.jp/polar-seaflux/>
- 開発された海洋シミュレーションシステムを、東日本大震災復興プロジェクトである「東北マリンサイエンス研究拠点形成事業」に活用

②社会還元的な展開活動

とくになし

§ 6 研究期間中の主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H19.1.11-12	ワークショップ「海洋中・深層循環のモデリング」	神奈川県箱根町	46	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 本CREST課題の開始に当たり、目論見を多くの人に聞いてもらい、意見・批判を聴取する</li> <li>- 様々な海洋モデリンググループに現状を紹介してもらい、国内の海洋モデリングに関する将来展望を議論するとともに、今後の連携を図る</li> <li>- 観測・データ解析研究者とモデリング研究者の意見交換を行い、両者の連携の道を探る</li> </ul>
H19.1.26	The 4th Cray HPC Conference	日本未来科学館(東京都)	(不明)	<p>計算機メーカーCrayが主催するハイパフォーマンスコンピューティングに関する講演会において、次世代スーパーコンピューティングのもとでの気候変動予測シミュレーションの将来展望について講演</p>
H19.8.9-10	理数系教員指導力向上研修	東京大学柏キャンパス	約 20	<p>千葉県中学・高校理科教員を対象に、「大気・海洋の観測・シミュレーションデータから見る気候の状態と変動」と題して、スーパーコンピュータを用いた気候研究について実習指導</p>
H19.11.29	東京大学気候システム研究センター・伊藤忠商事株式会社 一般公開講座 2007「二酸化炭素のゆくえ—気候系と二酸化炭素—」	東京大学本郷キャンパス	約 800 名	<p>研究代表者が所属する機関の一般向け講演会において、本CREST課題がターゲットとする海洋の中・深層循環と海洋による二酸化炭素吸収の関係について講演</p>
H21.7.6-8	ワークショップ「海氷生成とそれに伴う高密度水・底層水形成過程：今後の南大洋の観測とモデリングへ向けて」	札幌市	約 40	<p>本CREST課題が主催し、南大洋での海氷生成・底層水形成・それらのモデリングを中心テーマに、最新の成果と今後の研究への自由な議論を若手研究者が中心となって行ったワークショップ。意図していた観測研究とモデル研究の有機的なインタラクションが深まったワークショップでもある。</p>
H21.12.17	島根県立益田高等学校スーパーサイエンスハイスクール研修	東京大学柏キャンパス	約 30	<p>スーパーサイエンスハイスクールに指定されている島根県立益田高等学校の生徒を対象に、気候の数値シミュレーションについて紹介</p>

H21.7.14	東京大学海洋アライアンスシンポジウム「海の現在と明日」	東京大学本郷キャンパス	約 300	東京大学の組織横断型研究機構である海洋アライアンスが主催するシンポジウムにおいて、気候変動における海洋の役割とその数値シミュレーションについて、一般向けに講演
H22.8.9	海洋研究開発機構地球環境シリーズ講演会「コンピュータが描く未来の地球」	国際連合大学	約 200	海洋研究開発機構が主催する一般向け講演会において、「見えない海の今と将来を見せる海洋シミュレーション」と題して、海洋シミュレーション研究の現状と将来展望を紹介
H22.12.16	島根県立益田高等学校スーパーサイエンスハイスクール研修	東京大学柏キャンパス	約 30	スーパーサイエンスハイスクールに指定されている島根県立益田高等学校の生徒を対象に、気候の数値シミュレーションについて紹介
H23.7.13	埼玉県理科教員研修「先端科学技術に触れる理科研修会」	東京大学本郷キャンパス	15	埼玉県高校理科教員を対象に、スーパーコンピュータを用いた最先端の科学研究を紹介
H23.11.22-23	国際ワークショップ「極域海洋モデリング」	東京大学本郷キャンパス	約 40	本 CREST 課題の主たるターゲット領域である極域海洋の諸現象のモデリングについて、南極研究が盛んなオーストラリアの 5 研究機関から10名の研究者を招き、本 CREST 担当者を中心とした日本からの参加者とともに、研究の現状・観測研究との融合・今後の展望について発表・議論を行う。
H24.3.15-16	ワークショップ「極域海洋研究の現状と今後」	静岡県熱海市	約 30	極域海洋に関する物理学的研究に焦点をあて、モデリング研究者と観測研究者の間で、およびシニアな研究者と若手研究者の間で、研究の現状認識を共有し、今後の発展の方向を議論する。
H24.3.17	スーパーコンピュータ「京」を知る集い	札幌市	約 200	計算科学研究機構が主催する一般向け講演会において、最先端コンピュータがもたらす海洋学の展望について講演

## § 7 結び

本研究応募時には、戦略的創造研究推進事業への応募動機として、「モデリング研究と観測研究のより有機的な連携の模索」と「次世代モデル開発を担う若手研究者の養成」を記していた。前者は本研究に観測を中心とするグループを組み入れてモデリンググループとの人材交換を図りつつ、後者は必ずしも直結する研究を行ってこなかった学位取得直後の若手を積極的にポスドクとして採用しながら、一定の成果が上がったと考えている。その成功には、本事業の研究費配分や変更に関する制度的柔軟性に負うところが大きいと感じており、本事業には今後ともそうした良さを持ったものであり続けてもらいたいと期待する。

本 CREST 課題終了後も、研究成果と研究体制の大部分を引き継いで、本年度後半から新たな研究プロジェクトが進行する予定である。本 CREST 課題は研究代表者を始め参加者一同にとって、予想を超えて大きくかつ好ましい研究上の転機となったと感じている。本 CREST 課題の成果そのものも十分に上がったものと自負しているが、その先への大きな発展も得られたという意味において、個人的には本 CREST 課題は大成功であったと思う。