

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 海洋循環のスケール間相互作用と大規模変動

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）：

研究代表者

羽角 博康（東京大学大気海洋研究所 准教授）

主たる共同研究者

田中 幸夫（（独）海洋研究開発機構地球環境変動領域 チームリーダー）

大島 慶一郎（北海道大学低温科学研究所 教授）

3. 研究実施概要

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。そこで、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。

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。そこで、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。

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。そこで、サブテーマ①で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。

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「海水－海洋相互作用モデリング」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「マルチタイムスケール海洋変動モデリング」で開発された手法を活用した。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。

また、サブテーマ②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。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果（論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む）

本研究は、海洋における中・深層循環、海氷—海洋相互作用および時間スケールの海洋変動のモデリング手法を開発するものである。しかし、このモデリング手法の大部分は、研究期間の前半ではほぼ終了し、後半のほとんどはその実証に費やされた。モデリング手法自体にはそれほど新奇性はないと考えられるが、適用するモデルが極めて大規模でかつ実証（観測）がそれほど容易ではないという点では評価に値する。具体的には、現在の海洋状態を司る物理プロセスのモデリング手法の開発を行い、長期に渡って安定して精度よくシミュレーションできる数値シミュレーションシステムを開発できたが、このことは評価に値する。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一つである。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が、実証研究では、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。この成果は、今後の海洋深層循環の現象解明に貢献するものと思われる。このように、観測とシミュレーションを融合させた海洋変動モデリング、予測で大きな成果を上げている。

上記の研究内容を本研究領域の趣旨に照らして見ると、モデル化および実証ということでは、大きな成果が得られてはいるが、手法の先進性・新奇性という観点では、大きな成果が得られたということではできない。特に、マルチフィジックスの視点が不足していたように思われる。

当初計画では想定されていなかった新たな展開として、海洋モデリングにおける重要な微小プロセス（非静水圧現象、拡散、粘性抵抗等）を扱うモデリング技術（超高並列等）の開発がある。「京」用のアプリケーションが開発されており、今後の海洋シミュレーションの高速化や精度向上に資するものと期待される。しかし、この「京」用のモデル化という新たな展開は、望ましいことではあるが、微小規模海洋変動への適用はこれからであり、現時点では成果が得られたとまではいえない。ただ、大震災復興へ向けての海洋循環評価という適用の場があるので、今後に期待したい。

外部発表に関しては、70 編近い論文が国際誌に掲載されており、口頭発表も国内会議 96 件、国際会議 62 件と多数行われている。しかしながら、国際会議における招待講演の数が国内会議 9 件、国際会議 5 件とやや少ない。ただ、研究計画の後半に多くの注目すべき成果が得られていることから、今後、招待講演は増加するものと思われる。

研究の進め方については、研究代表者は各グループの研究の進捗状況を十分に把握し、各グループの成果を他のグループの研究に反映させており、グループ間の連携は十分に図られている。特にモデル研究グループと観測研究グループの連携により、海氷研究において多くの成果が得られている。さらに、モデリング研究と観測研究の連携を緊密にするために、グループ間で若手研究者の交流を図ったこと、また、それを通じて若手研究者を育成したことは評価できる。

##### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

本研究領域の研究分野であるマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションへの貢献という点では、手法・モデル化等に関して先進性や新奇性があまり認められないので、成果は標準的ということである。しかしながら、モデルの実証として行った観測と本手法によるシミュレーションでは大きな成果を上げていると考える。特に、自ら開発した「海洋変動モデリング手法」に基づき、「南極メルツ氷河舌崩壊が海洋深層循環に及ぼす影響」を評価するとともに、南氷洋での深層水形成の観測を通して「南極周囲における新たな深層水形成領域」を発見したことは、この分野（海洋・環境）の成果として科学的インパクトは非常に大きいものがあったと思われる。

今後、研究成果のさらなる展開が期待できるかについては、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変化の影響を定量的に評価する手法の基礎となるものであり、今後さらに、沿岸海域における環境変化の予測に貢献するものと期待される。長期間にわたる海洋変動のシミュレーションを行う場合、双方向ネスティッドグリッドモデルは、限られた計算機資源環境のみで実施が可能であることから、得られたプロセス研究の成果のパラメタリゼーションを図るなど、モデル研究コミュニティへの貢献についても、検討を行っていただきたい。また、今後も、山中チームとの緊密なコラボレーションに期待する。

戦略目標に向けての貢献、成果の社会的なインパクトの見通しとしては、本研究により開発された海洋循環モデルは、非常に実用的なコードであり、その成果の実際の応用には期待できるものがある。一方、手法やモデル化に関しては、成果は標準的であり、その意味でおおむね期待できるという程度である。ただし、実際の場合への応用ということでは、本研究領域の他のテーマ（海洋生態系将来予測：山中チーム）でも本コードが使用されているように、成果の社会的なインパクトは期待できる場所である。

特記すべき事項としては、本研究の成果により、北極域研究プロジェクトおよび東北マリンサイエンス拠点への参加が予定されていることが挙げられ、その成果が期待される。

#### 4-3. 総合的評価

本研究は、マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションという研究領域の趣旨から見ると、研究手法にはそれほど先進性はないが、適用分野のモデル化は大規模かつ実的なものを対象にして行われており、高く評価できる。一方、本研究の適用対象である海洋・環境分野から見ると、本研究は新たな知見をもたらしたという意味で、大きな貢献をしたと評価できる。また、開発した海洋循環モデルは実用的なコードであり、実用的という観点では、社会的なインパクトは大きいものがあると考えられる。今後は、実際の場合での更なる応用に期待したい。

海洋プロセスモデリング手法の開発を行い、多段階シミュレーション手法の開発に成功し、長期に渡って安定して精度よくシミュレーションできたことは、高く評価できる。また、極域小領域のシミュレーションによる予測から、係留観測を企画実施し、最終的には新規プロジェクトに発展している。ここでは、新たに得られた観測データに、開発したシミュレーションシステムを適用して、その有効性を示すなど、国際的にも存在感を示す成果を出すことができた。これは、シミュレーション単独ではなく観測と組み合わせることで知見や結論を導くという、理想的な計算科学技術研究の姿を示したものであり、今後の発展が期待される。今後、北極域研究プロジェクトおよび東北マリンサイエンス拠点への参加が予定されており、活躍が大いに期待される。

このように、プロジェクト全体の成果と将来の可能性は評価できるが、何が特色であるかを明確にし、シミュレーション手法の開発に対する具体的貢献が明確にされればさらに良かった。またマルチフィジックスの視点がさらに強化されれば良かったように思われる。