

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月28日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740319

研究課題名（和文） 人工衛星観測データを用いた実験的氷海変動予測システムの開発

研究課題名（英文） Development of an Experimental Sea-ice Prediction System using Satellite Observations

研究代表者

小守 信正（KOMORI NOBUMASA）

独立行政法人海洋研究開発機構・地球シミュレータセンター・チームリーダー

研究者番号：80359223

研究成果の概要（和文）：アンサンブル大気再解析データを外力とした多メンバーの海洋氷海結合シミュレーションを実施し、アンサンブルスプレッド（メンバー間のばらつき具合）の季節変動が氷海密度と氷海厚では大きく異なることを見出した。また、全球を対象とした大気海洋氷海結合モデルに大気観測データを同化するシステムを開発し、同化結果には氷海を介した大気と海洋の相互作用の影響が見られることを示した。

研究成果の概要（英文）：We carried out 63-member coupled ocean–sea-ice simulations forced by outputs from atmospheric ensemble reanalysis, and found that seasonal variations of the ensemble spreads are quite different between sea-ice concentration and thickness. We also developed an atmospheric data assimilation system using a global coupled atmosphere–ocean–sea-ice model, and showed some signatures of atmosphere–ocean interaction via sea ice in the analysis fields.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 2011年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2012年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 1,800,000 | 540,000 | 2,340,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：海洋物理・陸水学、極地、人工衛星、地球変動予測、氷海、データ同化、海洋氷海結合モデル、大気海洋結合モデル

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化に伴う（と考えられる）北極海の氷海面積減少が注目を集めているが、実際の生成・融解量を推定しその予測を行うためには、面積に加えて厚さの情報を加味した体積として考える必要がある。また、氷海の漂流などの力学過程を考える場合、当然ながら、氷海厚が異なれば海上風や表層流に対する応答は異

なったものとなる。さらに、氷海やその上に積もった雪は、大気と海洋の間の断熱材として働くため、氷海厚の違いは熱力学過程を通じて大気と海洋の循環場にも影響を与える。

数十年間に及ぶ人工衛星観測データの蓄積がある氷海密度（氷海が存在する面積的な割合）とは異なり、広範囲に渡る氷海厚の観測データは、潜水艦を用いた数例があるのみであった。最近になり、アメリカ航空宇宙局(NASA)の人

工衛星 ICESat (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite)が打ち上げられ、また、打ち上げに失敗した欧州宇宙機関(ESA)の人工衛星 CryoSatの後継機 CryoSat-2も2010年2月に打ち上げが予定されていることから、数年後には人工衛星による海水厚の観測データが広く流通することが期待される。

ただし、厳密には、これらの人工衛星が計測するものは海水厚そのものではない。得られるデータは、海水と積雪を合わせて海面から突き出ている高さ(freeboard)であり、別に得られた海水密度や積雪深の情報を利用して間接的に海水厚を推定している。このように異なる種類の観測データを使用する場合、それぞれの物理量のプロダクトを作成するよりも、観測データを数値モデルによる予測結果へ融合するデータ同化を行い、力学的・熱力学的に整合性のある統合的なプロダクトを作成する方が精度が向上すると期待される。

しかしながら、海水の熱力学過程は相変化を伴うため、その数値モデルのアルゴリズムは条件分岐が頻出し、非線形性が非常に強い。それゆえ、四次元変分法によるデータ同化で 사용되는随伴モデルの厳密な導出は困難である。また、海洋と海水の間での熱・淡水の移動を伴うことから、両者を結合系として一体的に取り扱う必要がある。さらに、海水温は結氷温度以下には下がり、海水厚や積雪深は負値をとらないため、一般的なデータ同化手法で 사용되는『誤差がガウス分布に従う』という仮定は適用できない。これらの理由により、海水データの同化手法開発は、観測数の不十分さとも相まって、いまだにチャレンジングな研究課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者のこれまでの海水モデル研究およびデータ同化研究の経験を融合し、北極海を対象海域として、海水密度・海水厚や海面水温・海面高度などの人工衛星観測データを用いた実験的氷海変動予測システム(Experimental Sea-ice Prediction System using Satellite Observations: ESPreSSO)を開発する。また、開発したシステムを使い、数年分の実験的なものではあるが、力学的・熱力学的に整合性のある海水および海洋表層の統合データセットを構築する。データ同化手法としては、近年注目を集めているアンサンブル手法を適用することにより、四次元変分法を適用する場合の随伴モデル導出の困難さを回避する。

まず、理想化された実験を通じて、十分な精度を確保するために必要なアンサンブルメンバー数や、メンバー間のばらつき(スプレッド)が発達する時間スケール、データ同化を行う最適な頻度に関する知見を得るとともに、海水厚のデータを同化することが、海水漂流速度や海洋表層の水温・流速場など、他の物理量の再現性に与え

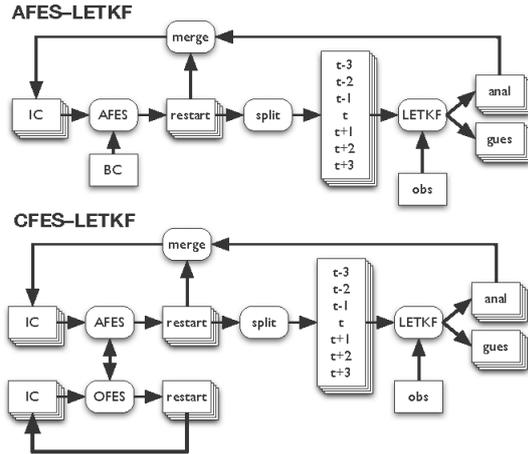


図1 解析・予報サイクルのフローチャート。(上)AFES-LETKF、(下)CFES-LETKF。

る影響を明らかにする。次に、実際に過去の場を再現する実験により、試験的なデータセットを構築し、システムの性能や海洋海水結合系の潜在的予測可能性を定量的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 海洋海水結合モデルの改良

データ同化の成否は、観測データの質・量のみならず、使用する数値モデルの性能にも大きく左右されるため、まず、海洋海水結合モデル OFES (Ocean General Circulation Model for the Earth Simulator)の改良やパラメータの最適化を重点的に行った。モデルの解像度は、データ同化にアンサンブル手法を用いることを考慮し、水平が経度方向・緯度方向ともに $1/2^\circ$ (約 50 km)、鉛直には 54 レベルとした。

(2) 海洋解氷結合系の多メンバーアンサンブルシミュレーション

海洋海水結合系におけるアンサンブルスプレッドの特性を確認するため、大気大循環モデル AFES (Atmospheric General Circulation Model for the Earth Simulator)を用いたアンサンブル大気再解析 ALERA2 の結果を外力として OFES を駆動するアンサンブルシミュレーションを実施した。

(3) 大気海洋海水結合アンサンブルデータ同化システムの開発

実験的氷海変動予測システム ESPreSSO の開発に当たり、当初は海洋海水結合モデル OFES を使用する予定であったが、詳しく検討した結果、海水および海洋表層におけるアンサンブルスプレッドを十分大きくするためには、大気海洋海水結合モデル CFES (Coupled Atmosphere-Ocean Model for the Earth Simulator)を使用する方がより適切であることが判明した。そこで計画をやや変更し、CFES を用いた大気

海洋海水結合アンサンブルデータ同化システム CFES-LETKF を構築した。これは、大気の観測データを同化し大気の変数のみを修正するものであり、AFES を用いたデータ同化システム AFES-LETKF の拡張版となる。AFES-LETKF では境界条件として与えていた海面水温や海水分布が、CFES-LETKF では内部的な予報変数となる点が大きな違いである(図 1)。CFES の海洋部分の設定は上記の OFES と同様とし、また大気部分の解像度は、ALERA2 と同様に、水平が T119(約 100 km)で鉛直は 48 層とした。

4. 研究成果

(1) 海洋海水結合モデルの改良

まず、OFES を全球的な海洋海水結合シミュレーションのための標準的な外力データセットである CORE (Common Ocean-ice Reference Experiments)データに対応させ、1948 年から 2007 年までの経年変動外力によるシミュレーションを実施した。

OFES の基となった MOM3 (Modular Ocean Model ver. 3)には、短波透過スキームに関して 2 つの問題がある: (一)自由海面に伴う鉛直第 1 層の厚さの時空間変動が考慮されていない、(二)短波が海底をも透過する。どちらの問題も人工的な熱の source/sink を引き起こし得るため、OFES を用いてその影響を評価した。

第一の問題は、海面高度が正(負)の海域で最大振幅が 10 W m^{-2} を超える人工的な熱の sink (source) を作り出し(図 2 上)、年平均海面水温を最大で 0.3°C 低下(上昇)させる。この海面水温の変化は全球平均蒸発量の減少をもたらし、その結果として海面高度が上昇するため、人工的な熱の sink を増大させる。淡水フラックスで駆動される海洋シミュレーションの場合、積分開始から数年経つと、この正のフィードバックが第一の問題を増幅させるようになる。

第二の問題によって引き起こされる人工的な熱の sink は 50 W m^{-2} に達し(図 2 下)、海面水温を 1°C 以上も低下させる。しかしながら、この問題の影響は沿岸の浅海域に限定され、また正のフィードバックも存在しない。

MOM の最新版(ver. 4)ではこの問題は解決されているものの、MOM3 は未だに世界中で広く使用されているため、結果を解析するには注意が必要である。

(2) 海洋解氷結合系の多メンバーアンサンブルシミュレーション

上述の経年変動シミュレーションの外力を、2008 年 1 月 1 日以降は CORE から ALERA2 のアンサンブル平均に変更して計算を延長した。さらに、2008 年 6 月 2 日および 12 月 3 日を初期値として、ALERA2 の 63 メンバー全てを外力としたアンサンブルシミュレーション(以下では EnOFES と略記)を実施した。

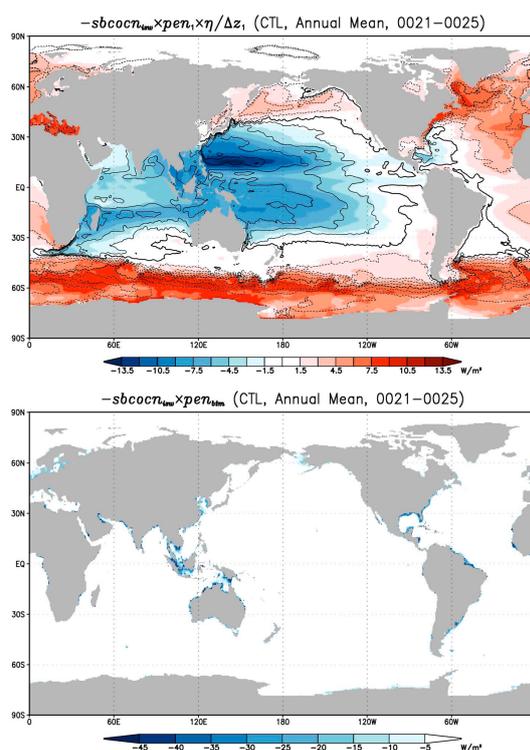


図 2 短波透過スキームの問題に起因する人工的な熱の source/sink の推定値 [W m^{-2}]。 (上) 第一の問題、(下) 第二の問題。Komori et al. (2012)より引用。

海水密度度のスプレッドは融解期に増大した後、結氷期になると減少に転じ氷縁域のみが大きいのに対し、海水厚のスプレッドは結氷期になっても減少せず、融解期の『記憶』を維持することがわかった(図 3)。これは、適切なデータ同化を行うことにより、海水密度度よりも海水厚の方が予測可能性は高くなり得ることを示唆している。また、冬半球の方が大気擾乱は活発でそのスプレッドも大きいにも関わらず、海面水温のスプレッドは夏半球の方がより大きくなるなど、海洋混合層の厚さ(海洋表層の熱容量)の違いを反映した南北非対称な構造が見出された。

(3) 大気海洋海水結合アンサンブルデータ同化システムの開発

まず、CFES を用いた全球シミュレーションの結果を解析した。北半球海水密度度の年々変動には、オホーツク海・ノルディック海とベーリング海・ラブラドル海で逆相関となる『双極構造』が明瞭に見られた。これは、近年、人工衛星観測から見出された空間構造と非常によく対応しており、CFES は現実的な海水変動を再現するポテンシャルを有することが確認された。

次に、CFES-LETKF を用い、6 時間毎の解析・予報サイクルを 2008 年 8 月 1 日から 9 月 30 日まで繰り返す実験を行った。大気部分の初期値は ALERA2 の解析値を使用した。以下では結果を CLERA-A と呼ぶ。

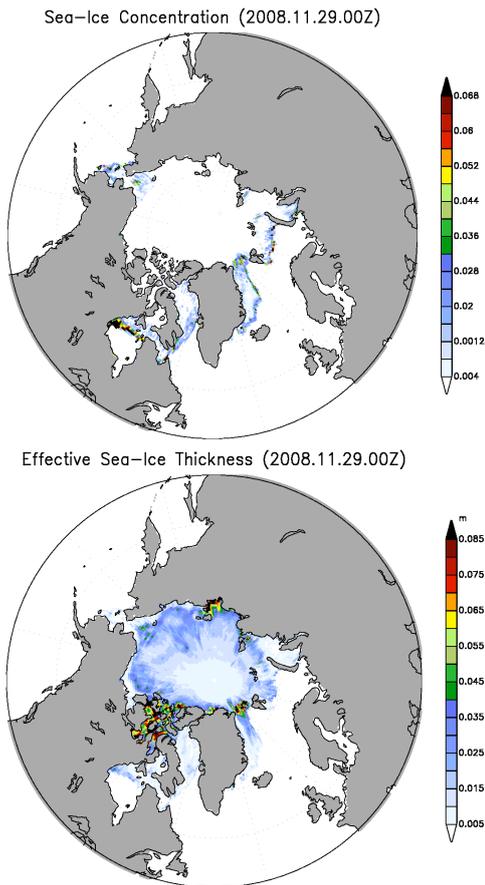


図3 2008年11月29日におけるアンサンブルスプレッド。(上)海氷密接度、(下)海氷厚。

海面水温で見ると、ALERA2では境界条件として与えているためスプレッドが0であるのに対し、CLERA-Aでは海洋モデルの変動を反映して、赤道域や中緯度西岸境界流域などでスプレッドが大きくなっている。一方、CLERA-Aで潜熱フラックスのスプレッドが大きい海域は、必ずしも海面水温のそれとは対応しておらず、境界条件だけではない相互作用の影響を示唆している。また、対流圏下層の気温や比湿についても、CLERA-Aの方がALERA2よりもスプレッドが増大しており、過小評価の改善による解析精度の向上が期待される。

海氷域に目を転じ、EnOFESとCLERA-Aの海洋部分を比較すると、海氷密接度のアンサンブル平均はCLERA-Aの方が小さく、海氷下の水温スプレッドはCLERA-Aの方が大きい傾向が見られた。一方、ALERA2とCLERA-Aの大気部分を比較すると、海氷上の気温スプレッドはCLERA-Aの方が小さい傾向が見られた。これは、海氷密接度が低下したことにより海氷を介さない大気と海洋の結合が強まり、海洋は大気擾乱の影響を受けやすくなるのに対し、大気は下部境界に占める(海氷に比して熱容量が大きい)海洋の割合が増え擾乱の発達が抑えられたためであると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① N. Komori, B. Taguchi, A. Yamazaki, T. Enomoto, and T. Miyoshi, Ensemble simulations of the global coupled ocean-sea-ice system, Proceedings of the 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 査読無, 2013, pp. 196-199.
- ② 小守信正, 榎本剛, 三好建正, 田口文明, 全球大気海洋結合モデルを用いたアンサンブルデータ同化システムの開発, 京都大学防災研究所一般研究集会『週間及び1ヶ月予報における顕著現象の予測可能性』講演要旨集, 査読無, 2012, pp. 51-54.
<http://www.dpac.dpri.kyoto-u.ac.jp/workshop/2012/proceedings/komori.pdf>
- ③ N. Komori, B. Taguchi, and H. Sasaki, The effective use of shortwave penetration below the ocean surface in a MOM3-based ocean general circulation model, JAMSTEC Report of Research and Development, 査読有, Vol. 15, 2012, pp. 35-46.
DOI: 10.5918/jamstecr.15.35
- ④ 大淵濟, 小守信正, 田口文明, 吉田聡, 大気・海洋結合大循環モデル CFES の紹介, ながれ, 査読無, 30巻, 5号, 2011年, pp. 369-375.
<http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?dd=assets/files/download/noauth/nagare/30-5/30-5tokushu2.pdf>
- ⑤ N. Komori, T. Enomoto, B. Taguchi, A. Kawanano-Yoshida, H. Sasaki, M. Nonaka, Y. Sasaki, M. Honda, K. Takaya, A. Ishida, Y. Masumoto, W. Ohfuchi, and H. Nakamura, CFES: Coupled GCM for the Earth Simulator—Current status and future directions, Report of the International Workshop on Development of Atmosphere-Ocean Coupled Models towards Improvement of Long-range Forecast, 査読無, 2011, pp. 58-60.
http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/library/JMA2010WS_Summary.pdf

[学会発表] (計17件)

- ① N. Komori, Development of an ensemble-based data assimilation system with a coupled atmosphere-ocean GCM, AICS International Workshop on Data Assimilation, 2013年2月27日, 理化学研究所計算科学研究機構(神戸市中央区).
- ② N. Komori, Ensemble simulations of the global coupled ocean-sea-ice system, 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2013年2月18日, 紋別市文化会館

- (北海道紋別市).
- ③ N. Komori, Development of an ensemble-based data assimilation system with a coupled atmosphere–ocean GCM, 5th OFES International Workshop, 2013年1月25日, 国際海洋環境情報センター(沖縄県名護市).
 - ④ 小守信正, 全球大気海洋結合モデルを用いたアンサンブルデータ同化システムの開発, 京都大学防災研究所一般研究集会『週間及び1ヶ月予報における顕著現象の予測可能性』, 2012年11月20日, 京都大学防災研究所(京都府宇治市).
 - ⑤ 小守信正, 大気海洋結合アンサンブルデータ同化システム CFES–LETKF の開発, 2012年度日本海洋学会秋季大会, 2012年9月15日, 東海大学清水校舎(静岡市清水区).
 - ⑥ N. Komori, Development of an ensemble-based data assimilation system with a coupled atmosphere–ocean GCM, International Workshop on Coupled Model Data Assimilation, 2012年9月11日, University of Reading (Reading, U.K.).
 - ⑦ T. Enomoto, Atmospheric data assimilation with a coupled atmosphere–ocean model, AOGS–AGU (WPGM) Joint Assembly, 2012年8月13日, Resorts World Convention Centre (Sentosa, Singapore).
 - ⑧ N. Komori, Development of CFES–LETKF ensemble data assimilation system, 4th WCRP International Conference on Reanalyses, 2012年5月9日, Crowne Plaza (Silver Spring, Maryland, U.S.A.).
 - ⑨ 小守信正, 大気海洋結合アンサンブルデータ同化システム CFES–LETKF の開発, 第2回データ同化ワークショップ, 2012年1月13日, 海洋研究開発機構横浜研究所(横浜市金沢区).
 - ⑩ N. Komori, Development of CFES–LETKF ensemble data assimilation system, 4th OFES International Workshop, 2011年12月1日, University of Hawaii at Manoa (Honolulu, Hawaii, U.S.A.).
 - ⑪ 小守信正, 大気海洋結合アンサンブルデータ同化システム CFES–LETKF の開発, 日本気象学会 2011年度秋季大会, 2011年11月16日, 名古屋大学東山キャンパス(名古屋市千種区).
 - ⑫ 榎本剛, CFES–LETKF の開発, 第8回「異常気象と長期変動」研究集会, 2011年11月9日, 京都大学宇治キャンパス(京都府宇治市).
 - ⑬ 小守信正, MOM3 を基にした海洋大循環モデルにおける短波透過の取扱い, 2011年度日本海洋学会秋季大会, 2011年9月28日, 九州大学春日キャンパス(福岡県春日市).
 - ⑭ T. Enomoto, ALERA2: AFES–LETKF en-

semble reanalysis 2(招待講演), AOGS 8th Annual Meeting, 2011年8月9日, Taipei International Convention Center (Taipei, Taiwan).

- ⑮ 小守信正, 実験的海水変動予測システム ESPreSSO の構築に向けて, 国立極地研究所『北半球寒冷域の急激な雪氷圏変動』研究集会, 2011年2月18日, 斜里コンベンションハウス(北海道斜里郡斜里町).
- ⑯ N. Komori, CFES: Coupled GCM for the Earth Simulator—Current status and future directions, International Workshop on Development of Atmosphere–Ocean Coupled Models towards Improvement of Long-range Forecast, 2010年12月10日, 気象庁(東京都千代田区).
- ⑰ J. Ukita, Northern Hemisphere sea-ice: Summer trend and winter seesaw, 2nd International Symposium on the Arctic Research, 2010年12月7日, 一橋記念講堂(東京都千代田区).

[図書] (計1件)

- ① T. Enomoto, T. Miyoshi, Q. Moteki, J. Inoue, M. Hattori, A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, and S. Yamane, Observing-system research and ensemble data assimilation at JAMSTEC, Springer, Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II), S. K. Park and L. Xu (eds.), 2013, Chap. 21, pp. 509–526.
DOI: 10.1007/978-3-642-35088-7_21

[その他]

ホームページ等
<http://www.jamstec.go.jp/esc/research/oreda/people/komori.ja.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小守 信正 (KOMORI NOBUMASA)
 独立行政法人海洋研究開発機構・地球シミュレータセンター・チームリーダー
 研究者番号: 80359223

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

浮田 甚郎 (UKITA JINRO)
 新潟大学・自然科学系・教授
 研究者番号: 80272459

榎本 剛 (ENOMOTO TAKESHI)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号：10358765
猪上 淳 (INOUE JUN)
国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号：00421884