

CFES-LETKF の開発

榎本 剛 (京大防災研/地球シミュレータ), 小守信正 (地球シミュレータ),
三好建正 (メリーランド大), 田口文明 (地球シミュレータ)

要旨

アンサンブル大気同化システムにおける大気大循環モデルを大気海洋結合モデルに置き換えた, CLEDAS を開発した. 大気大循環モデルを用いた場合, 陸面の状態はメンバー毎に異なるが, 海面の状態は外部ファイルから与えられるため全メンバーで同一である. 大気海洋結合モデルを用いれば, 海面の状態は海洋大循環モデルで予報され, 過小評価であると考えられる大気下層におけるアンサンブルスプレッドが増大することが期待される. 本稿では, CLEDAS の概要について紹介し, 全球大気観測データを同化する際, 大気大循環モデルを用いた場合と大気海洋結合モデルを用いた場合とを比較した実験の初期結果について報告する.

1 はじめに

気候シミュレーションにおいて, 大気海洋相互作用は重要な過程のひとつであり, 大気海洋結合モデルが広く利用されている. 再解析においても, 米国環境予測センター (NCEP) は大気海洋結合モデル CFS を用いたデータセット CFSRR (CFS Reanalysis and Reforecast) を作成した (Saha et al., 2010). CFSRR において, データ同化には 3 次元変分法を大気と海洋それぞれに適用しているが, 予報には大気海洋結合モデルが用いられている. この再解析では, 大気大循環モデルを用いて作成された過去の再解析と比較して, 西太平洋における海面水温と降水との時間的な相関が改善されている. これまでの再解析では海面水温と降水量との同時相関が正となっているが, CFSRR では観測される弱い負の相関を再現している. また海面水温の正偏差の極大が降水に 7 日程度先行することや, 降水による海面の冷却が降水量の極大から 5 日程度遅延することも, 大気海洋結合モデルを用いると再現される. 一方, 領域大気モデル WRF を用いた同化実験において, Kunii and Miyoshi (submitted) は, 海面水温に擾乱を与えると短期の予報精度が向上することを示した. これらの先行研究は, 大気観測データの同化においても, 大気海洋結合モデルを用いることにより解析精度が向上する可能性を示唆している.

アンサンブルカルマンフィルタによる初期擾

乱は, アンサンブルスプレッドが小さいことが知られている. モデルの自由度に比較してアンサンブル数が少ないサンプリングの問題もその原因の一つであるが, 地表面の約 7 割を占める海面の状態がどのアンサンブルメンバーでも共通であることも影響していると考えられる. 陸面の状態は, 大気大循環モデルの陸面過程で, または結合された陸面モデルで, 診断ないしは予報されている. そのため, もともと同じ陸面の状態でも, 陸面に接する大気の状態がそれぞれのメンバーで異なれば, 陸面の状態にばらつきが生じる. これに対し, 海面の状態は海面水温及び海氷密接度が外部ファイルからどのメンバーにも共通して与えられるため, ばらつきは皆無である. 海面に接する大気の状態が異なれば海面フラックスは異なるものの, 海面の状態が同一であるため海洋上の大気下層のアンサンブルスプレッドは陸上よりも過小評価されている可能性が高い. 大気海洋結合モデルを用いれば, メンバー毎に海面の状態がばらつくので, 大気下層のアンサンブルスプレッドの過小評価が大きく緩和されることが期待される.

我々はこれまでアンサンブル大気同化システム ALEDAS (Miyoshi and Yamane, 2007; Miyoshi et al., 2007a) を改良し, ALEDAS2 を構築した. 本研究では, ALEDAS2 における大気大循環モデルを大気海洋結合モデルに置き換えた, 全球大気観測データのアンサンブル同化システム CLEDAS を地球シミュレータ上で開発した. こ

のシステムの概要を第2節に示す。第3節では、このシステムによる同化実験の初期結果を示し、大気大循環モデルを用いた場合と比較する。第4節では、まとめと今後の計画について記す。

2 アンサンブルデータ同化システム

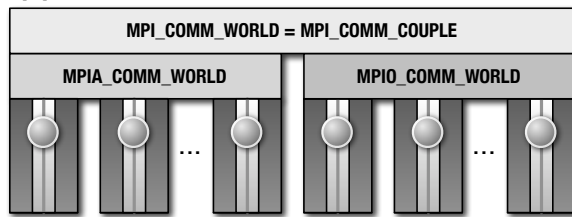
CLEDAS は、予報モデルとして用いる大気海洋結合モデルとアンサンブル同化コードから構成されている。以下、それぞれの概要とこれらを組合せた予報解析サイクルについて述べる。

2.1 大気海洋結合モデル

予報モデルとして、地球シミュレータ用大気海洋結合モデル CFES である (Komori et al., 2008) を用いた。CFES の大気部分は大気大循環モデル AFES (Numaguti et al., 1997; Ohfuchi et al., 2004; Enomoto et al., 2008) で、海洋部分は海洋大循環モデル OFES (Pacanowski and Griffies, 2000; Masumoto et al., 2004) である。AFES の物理過程には、放射 mstrnX (Sekiguchi and Nakajima, 2008), 積雲対流 (Emanuel, 1991; Emanuel and Živković-Rothman, 1999; Peng et al., 2004) が用いられている。ALEDAS に用いた AFES からの改良点として、乱流凝結 (Kuwano-Yoshida et al., 2010), 陸面過程 MATSIRO (Takata et al., 2003) を新たに採用したことが挙げられる。OFES には、海水モデル (Komori et al., 2005) が結合されている。本研究で用いた CFES の解像度は、大気 T119 L48 (水平約 1 度, 鉛直 48 層), 海洋 0.5 度 54 層である。

解像度やその他の設定は Taguchi et al. (2012) と同一であるが、アンサンブルで実行するために必要な改良を施している。通常の CFES (図 1a) では、AFES のコミュニケーター MPIA_COMM_WORLD と OFES のコミュニケーター MPIIO_COMM_WORLD とをつなぐコミュニケーター MPI_COMM_COUPLE が最上位であり MPI_COMM_WORLD と等価である。これに対し、アンサンブルに対応した CFES (図 1b) では、全メンバーをつなぐコミュニケーター MPI_COMM_WORLD が MPI_COMM_COUPLE の上位に配置されている。ただし、各メンバーは完全に独立であり、通信は行わない。

(a) CFES



(b) EnCFES

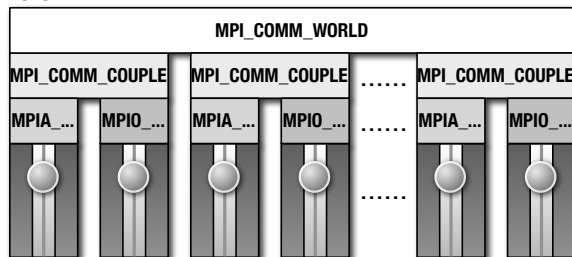


図 1. (a) CFES 及び (b) アンサンブルに対応した CFES における MPI コミュニケーターの概念図。

2.2 アンサンブル・カルマンフィルタ

同化コードとして、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) (Hunt et al., 2007; Miyoshi and Yamane, 2007) を用いた。予報誤差の過小評価を回避するため、全球一様な係数を掛ける共分散膨張 (multiplicative inflation) を用いている。スプレッド膨張率は、実験的アンサンブル再解析 ALERA (Miyoshi et al., 2007a) を作成したときと同じ 0.1 である。共分散の局所化には、新たに距離による局所化 (Miyoshi et al., 2007b) を採用した。

2.3 予報解析サイクル

図 2 に CLEDAS のデータフロー図を示す。AFES 及び OFES の各メンバーは初期値 IC から 9 時間予報を行い、解析時刻 (初期時刻から 6 時間後) $t \pm 3$ 時間の 1 時間毎の予報をひとつの restart に出力する。AFES の restart は 1 時間毎の予報 7 ファイルに分割 (split) し、LETKF に入力する。LETKF は 1 時間毎の観測を同化して、解析時刻 t の解析値 anal と予報値 gues を出力する。gues は restart に含まれているものと同じものである。anal は restart に含まれる解析時刻の予報値を置き換え、その他の情報と統合され (merge), 初期値 IC を作成する。OFES は、6 時

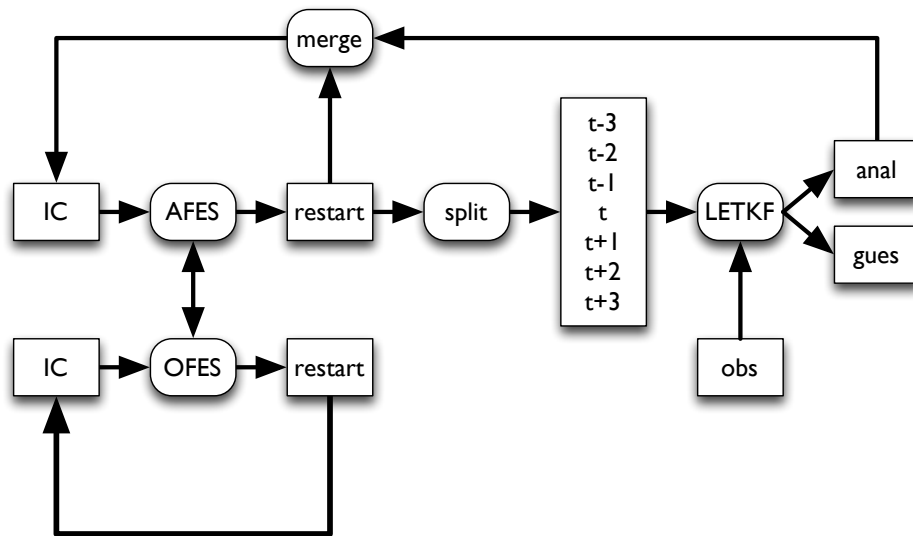


図 2. 大気海洋結合モデルを用いたアンサンブル同化システム CLEDAS のデータフロー. 長方形はデータ, 角丸長方形は処理を表す.

間予報値を初期値とする.

3 同化実験

構築したアンサンブル同化システムの動作を確認するため, 同化実験を行った. 本節では, 実験の設定と結果について述べる.

3.1 実験設定

アンサンブルメンバーの数 (アンサンブルサイズ) は 40 で, そのうちの一つはアンサンブル平均から予報するコントロールランである. 地球シミュレータの各ノードにそれぞれ 4 メンバーずつ割当て, 10 ノード使用した.

全球大気観測データは, NCEP が編纂した PREPBUFR を米国大気科学連合 (UCAR) から取得して利用した. 解析に要する計算時間節約のため, 以下の通り一部の観測データを間引いた. ラジオゾンデデータ (ADPUPA) は, 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 10 hPa 面のデータのみ利用した. 航空機データ (AIRCFT) や衛星リトリーバルデータ (SATWND, SPSSMI, QKSWND) は 4 つおきに, ウィンドプロファイラーは 3 層おき (St-James and Laroch, 2005) に間引いた.

大気の初期値は, 第 2.1 節に述べた AFES と LETKF からなる ALEDAS 2 を用いて作成した.

2008 年 1 月 1 日 06 UTC から PREPBUFR の同化を開始し, 2008 年 8 月 1 日のアンサンブル平均解析値及び 63 メンバー中最初の 39 メンバーを同化実験の初期値とした. 海洋の初期値は, 第 2.1 節に述べた OFES を用いて作成した. OFES に経年変動する強制データ CORE. v2 (Large and Yeager, 2009) を与えて, 1948 年から 2007 年まで積分し, 1966 年以降各年の 8 月 1 日 0 UTC でのスナップショットを初期値とした.

大気海洋結合効果を確認するために, CLEDAS を用いた同化実験 (CLERA-A) の他に, ALEDAS 2 を用いて同じ大気の初期値からの参照実験 (ALERA2) を行った. ただし海面の境界条件として, 米国海洋大気局 (NOAA) が作成した日別 1/4° OISST version 2 (Reynolds et al., 2007) に含まれる海面水温及び海水密度を用いた.

同化実験の期間は, CLERA-A, ALERA2 とともに 9 月 10 日 0 UTC まで 40 日間である.

3.2 初期結果

図 3 に 9 月 10 日 0 UTC における地表面温度のアンサンブルスプレッドを示す. ALERA2 では海面水温を与えているので当然スプレッドは 0 であるが, CLERA-A では赤道太平洋東部, 黒潮続流域, メキシコ湾流, 南極周極流付近にばらつきが見られる. このばらつきは, 海洋は様々な年の 8 月 1 日を初期時刻としたので, 同化実

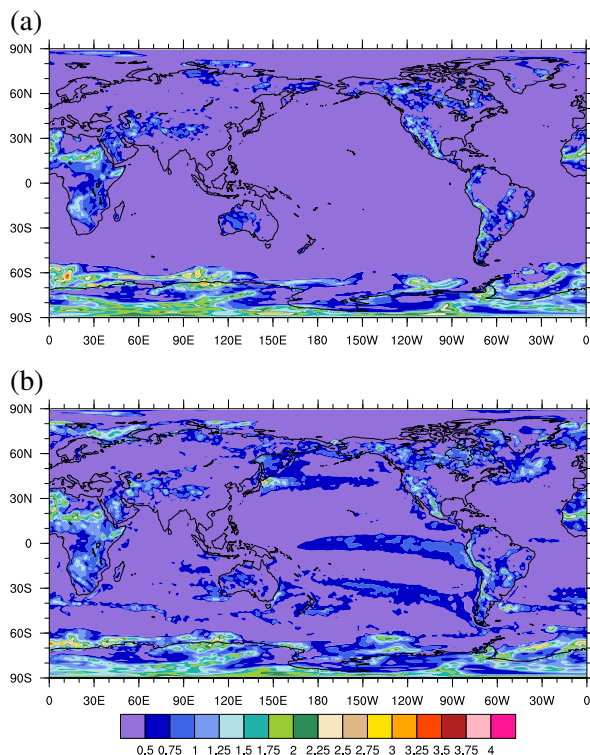


図3. 2008年9月10日における地表面温度のアンサンブルスプレッド (K). (a) ALERA2, (b) CLERA-A.

験当初よりは小さいが年々変動を示す成分が強く残っているものと思われる。

一方、潜熱フラックスの解析アンサンブルスプレッド (図4) は風速にも依存するため、必ずしも海面水温の年々変動には対応していない。例えば、赤道東太平洋ではばらつきが大きい領域が地表面温度と重なっているが、インド洋や大西洋の赤道域では地表面温度のばらつきはCLERA-Aでも小さい。この領域では、ALERA2でも潜熱フラックスのばらつきがあり、CLERA-Aではこれが強調されている。西太平洋には、台風 Sinlaku に対応して局所的に潜熱フラックスが大きい領域がある。ここでも、CLERA-Aの方がばらつきが大きくなっている。なお、潜熱フラックスのアンサンブル平均解析値にはALERA2もCLERA-Aも大きな差は認められない (図略)。

気温と比湿の子午面平均 (図5) を見ると、CLERA-Aの方が赤道域から中緯度にかけて対流圏下層で解析アンサンブルスプレッドが大きい。これは、対流活動により下部境界の情報が鉛直に運ばれたためであると考えられる。

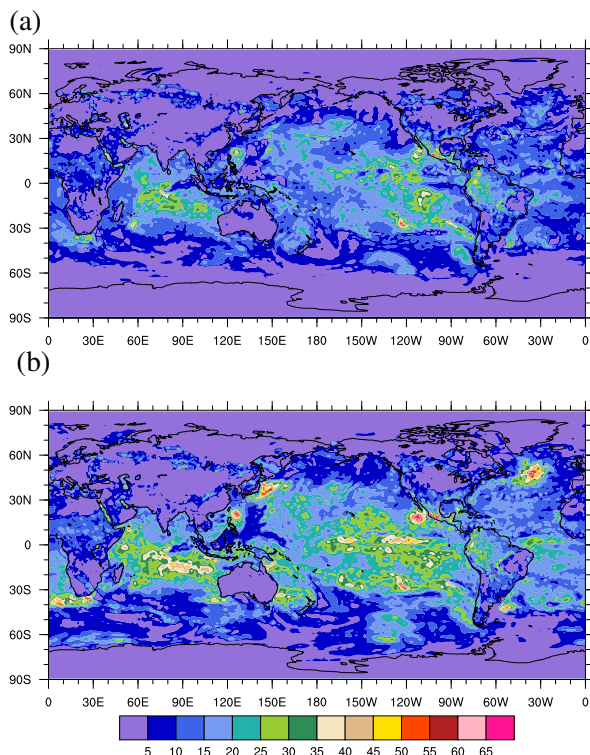


図4. 2008年9月10日における潜熱フラックスのアンサンブルスプレッド (Wm^{-2}). (a) ALERA2, (b) CLERA-A.

4 まとめと今後の計画

大気大循環モデルを大気海洋結合モデルに置き換えた、アンサンブル同化システムを開発した。このシステムを用いて40日間の全球大気観測データの同化実験を行い、従来の大気大循環モデルを用いた結果と比較した。海洋の初期条件の年々変動の影響は残るものの、大気海洋結合モデルを用いた方が大気大循環モデルを用いる場合に比べて、熱帯低気圧等大気擾乱が活発な領域で潜熱フラックスのばらつきが大きくなる傾向が認められた。下部境界条件の影響は赤道から中緯度で対流圏下層に広がっていた。

今後は、この実験を延長して大気や海洋の様子について調べる予定である。年々変動による海洋のばらつきは、どのくらいの期間の慣性を持つのか。逆に、単一の海洋の初期値から実験を開始した場合にどのくらいの期間でばらつくのか。海洋表層のスピンアップに要する時間で、海洋の初期値の与え方が異なる二つの実験はどちらも落ち着くものと思われるが、時間スケールは海域により異なる可能性がある。両

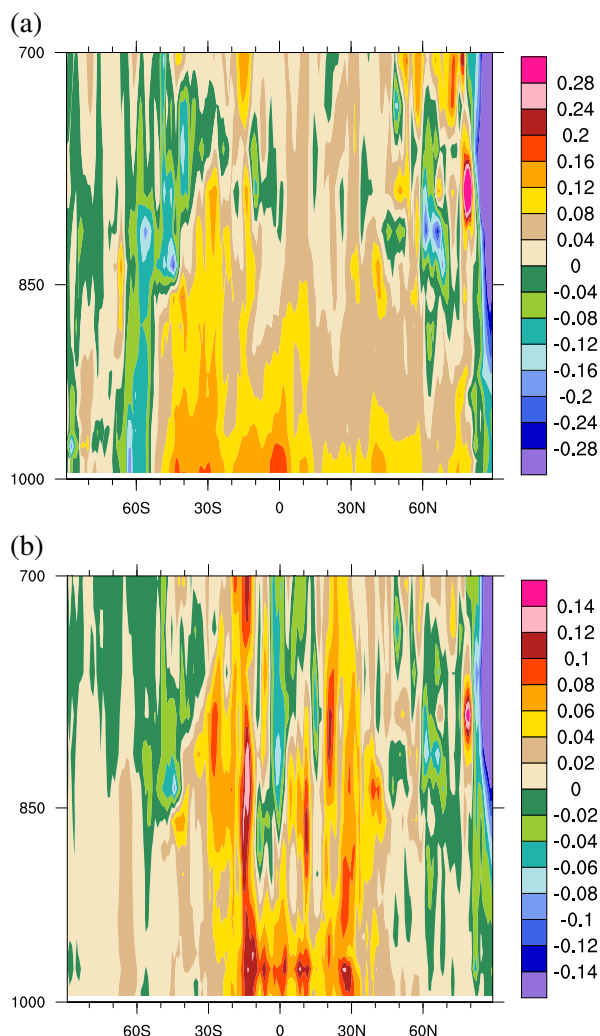


図 5. 2008 年 9 月 10 日における (a) 気温 (K) 及び比湿 (g kg^{-1}) (b) の解析アンサンブルスプレッド (CLERA-A–ALERA2) の子午面平均の差. 鉛直座標は気圧 (hPa).

者は時間が経つと類似した平均とばらつきを持つのかということは、必ずしも自明ではない。大気海洋結合モデルを用いたときに Saha et al. (2010) が指摘するような改善の効果は見られるか、海洋のばらつきが得られたときに Kunii and Miyoshi (2012) が指摘しているように大気の解析が改善するのかということについても詳細に調査する必要がある。

上記のような追加実験や調査から、大気海洋結合現象の基本的な性質に関する新たな知見が得られると考えられる。そのような知見を踏まえて、海洋データの同化や、大気海洋結合同化に挑戦していきたい。

謝辞

海洋研究開発機構の支援により、地球シミュレータを利用した。解析と作図には、NCAR command language (NCL) を使用した。

参考文献

Emanuel, K. A., 1991: A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 2313–2329.

Emanuel, K. A. and M. Živković-Rothman, 1999: Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1766–1782.

Enomoto, T., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, and W. Ohfuchi, 2008: Description of AFES 2: Improvements for high-resolution and coupled simulations. *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, K. Hamilton and W. Ohfuchi, Eds., Springer New York, chap. 5, 77–97, doi:10.1007/978-0-387-49791-4_5.

Hunt, B., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local transform Kalman filter. *Physica D*, **230**, 112–126.

Komori, N., A. Kuwano-Yoshida, T. Enomoto, H. Sasaki, and W. Ohfuchi, 2008: High-resolution simulation of the global coupled atmosphere-ocean system: Description and preliminary outcomes of CFES (CGCM for the Earth Simulator). *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, K. Hamilton and W. Ohfuchi, Eds., Springer New York, chap. 14, 241–260, doi: 10.1007/978-0-387-49791-4_14.

Komori, N., K. Takahashi, K. Komine, T. Motoi, X. Zhang, and G. Sagawa, 2005: Description of sea-ice component of coupled ocean–sea-ice model for the Earth Simulator (OIFES). *J. Earth Simulator*, **4**, 31–45.

Kunii, M. and T. Miyoshi: Including uncer-

- tainties of sea surface temperature in an ensemble Kalman filter: a case study of Typhoon Sinlaku. *Wea. Forecasting*, submitted.
- Kuwano-Yoshida, A., T. Enomoto, and W. Ohfuchi, 2010: An improved statistical cloud scheme for climate simulations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, doi:10.1002/qj.660.
- Large, W. G. and S. G. Yeager, 2009: The global climatology of an interannually varying air–sea flux data set. *Clim. Dynam.*, **33**, 341–364, doi: 10.1007/s00382-008-0441-3.
- Masumoto, Y., et al., 2004: A fifty-year eddy-resolving simulation of the World Ocean — preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator)—. *J. Earth Simulator*, **1**, 35–56.
- Miyoshi, T. and S. Yamane, 2007: Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3841–3861.
- Miyoshi, T., S. Yamane, and T. Enomoto, 2007a: The AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis: ALERA. *SOLA*, **3**, 45–48, doi: 10.2151/sola.2007-012.
- Miyoshi, T., S. Yamane, and T. Enomoto, 2007b: Localizing the error covariance by physical distances within a local ensemble transform Kalman filter (LETKF). *SOLA*, **3**, 89–92, doi: 10.2151/sola.2007-023.
- Numaguti, A., M. Takahashi, T. Nakajima, and A. Sumi, 1997: Description of CCSR/NIES atmospheric general circulation model. *Study on the climate system and mass transport by a climate model*, National Institute for Environmental Studies, CGER'S supercomputer monograph report, Vol. 3, 1–48.
- Ohfuchi, W., et al., 2004: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator—preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator)—. *J. Earth Simulator*, **1**, 8–34.
- Pacanowski, R. C. and S. M. Griffies, 2000: The MOM 3.0 manual. Tech. rep., NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, 680 pp., Princeton, NJ, USA.
- Peng, S. M., J. A. Ridout, and T. F. Hogan, 2004: Recent modifications of the Emanuel convective scheme in the Navy operational global atmospheric prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1254–1268.
- Reynolds, R. W., L. Chunying, T. M. Smith, D. B. Chelton, M. G. Schlax, and K. S. Casey, 2007: Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, **20**, 5473–5496.
- Saha, S., et al., 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1015–1057, doi: 10.1175/2010BAMS3001.1.
- Sekiguchi, M. and T. Nakajima, 2008: A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **109**, 2779–2793, doi: 10.1016/j.jqsrt.2008.07.013.
- St-James, J. S. and S. Laroch, 2005: Assimilation of wind profiler data in the Canadian Meteorological Centre's analysis systems. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**, 1181–1194.
- Taguchi, B., H. Nakamura, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, K. Takaya, and A. Goto, 2012: Seasonal evolutions of atmospheric response to decadal SST anomalies in the North Pacific subarctic frontal zone: observations and a coupled model simulation. *J. Climate*, **25**, 111–139, doi:10.1175/JCLI-D-11-00046.1.
- Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe, 2003: Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and Planetary Change*, **38**, 209–222.