一報告—

4次元変分法による大気海洋結合再解析データ作成のための 周辺システムの構築と応用展開

日吉 善久^{1a*}, 石川 洋一¹, 西川 史朗¹, 増田 周平², 五十嵐 弘道¹, 佐々木 祐二¹

海洋研究開発機構,地球情報研究センターは,季節から経年に亘る全球規模の気候変動を再現するために大気海洋結 合四次元変分法データ同化システム(以下,CDAシステム)を開発し,2010年以降を対象に、3ヶ月間の同化ウィンド ウを設定した大気・海洋環境再現実験を実施し,継続的に再解析データ及び再解析データを利用したアンサンブル3年 予測データを作成している.我々は、データ同化システムの運用及び再解析データ作成をより効率化するために、CDA 計算環境の改善と合わせて再解析データ作成サポートシステムを開発し導入している.再解析データ作成サポートシス テムは、クーロンプロセスを用いたCDAシステム入力用観測データの完全自動収集、それらの品質管理を含む自動前処 理、同化・アンサンブル予測実験結果と観測データを融合した可視化処理による結果確認、評価の視覚化、効率化を実 現している.今回開発した再解析データ作成サポートシステムを利用して、再解析データとアンサンブル3年予測デー タの評価を行ない両データによる太平洋・インド洋熱帯域の海況の再現性・予測性が高いことを確認した.また、再解 析データ及び予測結果を確認、評価する際に再解析データ作成サポートシステムが有用であることも確認した.

キーワード:四次元変分法,データ同化,再解析データ,自動収集,可視化

2013年10月7日受領;2013年12月2日改訂稿受理;2013年12月6日受理

1 独立行政法人海洋研究開発機構 地球情報研究センター

2 独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境変動領域

現所属

a 独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト

*代表執筆者:

日吉 善久
独立行政法人海洋研究開発機構 地球情報研究センター
〒 236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25
045-778-5344
hiyoshiy@jamstec.go.jp

著作権:独立行政法人海洋研究開発機構

-Report-

Production support system for 4D-VAR data assimilation

Yoshihisa Hiyoshi^{1a*}, Yoichi Ishikawa¹, Shiro Nishikawa¹, Shuhei Masuda², Hiromichi Igarashi¹, and Yuji Sasaki¹

To reproduce the dynamical states of global climate on seasonal and inter-annual scales, a four-dimensional variational (4D-VAR) data assimilation system with a coupled ocean-atmosphere global model has been successfully developed in Data Research Center for Marine-Earth Sciences (DrC), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). Our 4D-VAR coupled data assimilation (CDA) system with a three-month assimilation window runs routinely in every three months since January 2010 and generates sets of reanalysis data and ensemble three-year climate prediction data.

To realize further efficient production of reanalysis data sets, DrC develops a production support system for synthesizing reanalysis data. It comprises the three subsystems for (a) automated observational data acquisition with a "cron" process, (b) quality control and data processing, and (c) synthetic visualization of observational and reanalysis data.

With the support system, we evaluate performance of the sets of the three-month reanalysis and three-year ensemble prediction data. The majority of the data sets hold higher reproducibility in the three-month assimilation periods and predictability in the first one-year ensemble prediction periods over the tropical ocean states in the Pacific and Indian oceans. The support system, in particular, for synthetic visualization plays a crucial role to evaluate the reanalysis and prediction data.

Keywords: data assimilation, 4D-VAR, CDA, reanalysis data, visualization

Received 7 October 2013; Revised 2 December 2013; Accepted 6 December 2013

- 1 Data Research Center for Marine-Earth Sciences (DrC), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
- 2 Research Institute for Global Change (RIGC), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

Present affiliation

a Earthquake and Tsunami Research Project for Disaster Prevention, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

*Corresponding author:

Yoshihisa Hiyoshi

Data Research Center for Marine-Earth Sciences (DrC), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-0001, JAPAN

Tel.+81-45-778-5344

hiyoshiy@jamstec.go.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

海洋研究開発機構,地球情報研究センターでは,季節から経年に亘る全球規模の気候変動を再現するために,大気・海洋観測データと全球大気海洋結合モデルとを融合した大気海洋結合四次元変分法データ同化システム(Sugiura et al., 2008)(以下,CDAシステム)を開発・運用している.CDAシステムによって作成された全球大気・海洋結合四次元変分法同化プロダクト(以下,再解析データ)の更新・改良を継続し,それを初期値とする季節予測から経年予測実験を3か月ごとに実施し,その精度改善のための研究(西川他2012a; Nishikawa et al., 2012b;西川他2012c; Nishikawa et al., 2012b;西川他2012c; Nishikawa et al., 2012b;西川他2012c; Nishikawa et al., 2013).

本報告では、まず2章で地球情報研究センターに於いて 3か月毎に定常的に作成されている再解析データについ て紹介する.次に、3章では、地球情報研究センターが、 再解析データセットを効率的に作成するために導入し た再解析データ作成サポートシステムとその効果について 詳述する.更に4章では,再解析データセットを詳細検討 した例について解説する.最後に,現在開発が進んでい る,大気・海洋・低次生態系を対象とした多圏統合データ 同化システムについて紹介するとともに,多圏統合デー タ同化システムに於いても再解析データ作成サポートシ ステムが有用であることを述べる.

2. 再解析データの作成

地球情報研究センターでは、CDAシステムを用いて 2010年以降を対象に、入手可能な大気・海洋データを取 得し、3ヶ月間の同化ウィンドウを設定した大気・海洋環 境再現実験を継続して実施している(図1).

CDAシステムによる同化計算(以下,「同化計算」)では、結合モデルの時間発展が同化期間の観測値に近づくように4次元変分法により繰り返し同化計算を行い、海洋初期値と海面バルク修正係数を最適化する(Sugiura et al., 2008). バルク修正係数は、水平2次元の分布を持った時刻(各旬)毎に独立した値として最適化されている. その最適化した海洋初期値とバルク修正係数を用いて、各



Fig. 1. Schematic of the experimental configurations in 2011 and 2012. Four dimensional Variational (4D-VAR) data assimilations are sequentially performed with three-month assimilation window in every three months (in thick red lines). Green dashed line indicates an initial condition of a three-month assimilation comes from the optimized result at the final time slot of the previous assimilation. Eleven-member forward predictions (in blue dashed line) run for three years just after the three-month assimilation.

図1. データ同化期間(3か月:赤実線)とその後の予測期間(2年9ヶ月:水色点線)を示す模式図. 黄緑点線は、同化期間最終旬の結果を、次期同化期間の同化初期値に引き継ぐことを示す.

同化期間における再解析データセットを作成している.

同化する観測データとして、海洋表面はOISSTデータ、 海洋内部はArgoフロートデータ、大気はNCEPによる PREPBUFRデータセット(東西,南北風速,気温,比湿)、 及びSSM/ISスカラー風速とNCEP-1再解析データセット の風向データとを合成したベクトル風データを用いた(観 測データの詳細は本項目3.2.1.を参照)(Nishikawa et al., 2012b).

また,季節予報実験として,CDAシステムによって最 適化された海洋初期値及びバルク修正係数と,同化開始 日から前後5日分(計11日分)の大気初期値とを使った 11メンバーのアンサンブル予測実験を,同化期間を含め た3年間分行っている(図1).

3. 再解析データ作成サポートシステム

このような再解析データセットを準定常的に作成する ためには、4次元変分法同化計算コードとその計算環境だ けでなく、その周辺環境をも充実させる必要がある。特 に、同化計算が読み込む観測データは、近年質の向上に 伴ってデータ量が増大しており、その収集及び品質管理 を含むデータ変換処理の効率化・省力化への要求レベル は高い.また、計算結果の確認・評価を効率的に行なう ため、同化・アンサンブル予測実験結果を選択的に簡易 表示する可視化処理環境を整備することも求められてい る.そこで我々は、このようなデータ収集、データ変換、 可視化の3種類の処理を極力オペレータの介在なしに実 施し、再解析データ作成・確認・評価の効率化、省力化を 達成する再解析データ作成サポートシステムを開発した.

3.1 再解析データ作成サポートシステムの構成

再解析データ作成サポートシステムは、観測データ自動 収集システム(図2.(a): System for automated observational data acquisition), 観測データ前処理・投入システム(図 2.(b): System for quality control and data processing), 計 算結果可視化システム(図2.(c): System for synthetic visualization of observational and reanalysis data)の3つの サブシステムから構成される.

観測データ自動収集システムは、インターネット上の 各種観測データ公開サイトから、観測期間・観測データ 種類を指定し、極力オペレータの介在なしにそれらを定 期的に自動収集し、保存する.

観測データ前処理・投入システムは、CDAシステムの 要求に合わせて収集済み観測データの統計処理・品質管 理・フォーマット変換等の前処理を行ない,前処理済み 観測データを作成する.更に,前処理済み観測データを 同化計算コードが読み込める位置に移動(投入)する.

計算結果可視化システムは,同化・アンサンブル予測 実験結果及び比較用の前処理済み観測データ等を予め選 択した項目について簡易表示し,同化・アンサンブル予 測実験の確認・評価を行なう.

何れのサブシステムに於いても効率化・省力化が強く 意識されている. 観測データ自動収集システムでは cron プロセス(Linux OS上で稼働する,ジョブを定期的に実 行するデーモンプロセス)によって時刻と連動した処理 が自動的に行なわれ,データ収集過程にオペレータは介 在しない. また, 観測データ前処理・投入システム,及



Fig. 2. Block diagram of our 4D-VAR CDA (Coupled Data Assimilation) system. The support system for synthesizing reanalysis data comprises the three subsystems; (a) system for automated observational data acquisition, (b) system for quality control and data processing, and (c) system for synthetic visualization of observational and reanalysis data.

図2. CDAシステムの全体構成図.(a) 観測データ自動収集システム,(b) 観測データ前処理・投入システム,(c) 計算結果可視化システムで,再解析デー タ作成サポートシステムを構成する.赤破線で囲まれたブロックは,地球シミュレータ2上で四次元変分法データ同化計算を実行する. び計算結果可視化システムに於いても、予め定めたパラ メータ等を記載したコントロールファイルと各処理を記 載したシェルスクリプトとを組み合わせることで、自動 化処理を実現する.また、各処理のプロセスをシェルス クリプトによりモジュール化し、モジュールの追加・削 除・交換を可能とすることで、システムの拡張性を確保 している.

3.2 観測データ自動取集システム

3.2.1 収集する観測データ

再解析データ作成サポートシステムが現在収集してい る大気観測データ・海洋観測データは、以下7種類の観 測データである.

(1) 大気観測データ (PREPBUFR format)

大気観測データとして、NCEP(National Centers for Environmental Prediction)が収集した全球大気観測 $\vec{\tau} - \phi$ NCEP ADP Global Upper Air and Surface Weather Observations (PREPBUFR format) を収集す る. これらのPREPBUFR formatデータは、NCEPに よって実施される様々なデータ同化に利用する目的 で収集され、品質管理等のデータ処理が行われてい る. 収集した観測データの観測プラットフォームは 多岐に亘り、15種類(海上ブイ,航空機,衛星搭載) 散乱計等)のカテゴリーに分類され報告されている. 観測要素としては、気温(T)、気圧(P)、高度(Z)、 比湿 (Q),海面温度 (SST),海面気圧 (SLP),風速 (U, V) である. 観測時間間隔は1時間から12時間ま でである.現在,1997年5月から現在までのデータ が6時間毎データに編集され、2日遅れ程度の準リア ルタイムで公開されている.

取得サイト:

(http://rda.ucar.edu/datasets/ds337.0)

(2) 海上風ベクトルデータ (QuikSCAT)

QuikSCAT データは、QuikSCAT 衛星ミッションに 搭載されたマイクロ波散乱計(Active microwave scatterometer)が観測した散乱強度データを、海上 ベクトル風に変換したデータである。QuikSCAT衛 星ミッションは、1999年8月から2009年10月まで (2009年11月衛星ミッションの停止)のデータを提 供している。我々が収集するデータは、25kmグリッ ド平均、日平均海上風ベクトル観測データである。 既にQuikSCAT衛星ミッションは終了しており、今 後別の衛星で観測されている同様の海上風ベクトル 観測データ収集へと移行する予定である。 取得サイト:

- (3) 海上風スカラーデータ (SSM/IS)
 - SSM/IS データは、DMSP (Defense Meteorological Satellite Program)衛星に搭載されたマイクロ波放射計 (SSM/IS: Special Sensor Microwave Imager/Sounder) が観測した放射強度データを海上風速に変換した海上風速スカラー観測データである。我々が収集する データは、DMSP衛星(f16, f17)上のSSM/I及び SSM/ISによる10m海上風速の25kmグリッド平均、日平均観測データである。データ更新は、1日遅れ の準リアルタイムで行われている。取得サイト:

(ftp://ftp.remss.com/ssmi/{f16,f17}/bmaps_v{06,07})

(4) 海上風ベクトル再解析データ (NCEP reanalysis-1 daily average data)
 NCEP/NCAR再解析データから, T62 (約210 km) グリッド平均, 日平均, 10 m海上ベクトル風再解析データを収集する. データ更新は, 週に1回行なわれる.取得サイト:

(ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/ncep.reanalysis. dailyavgs/surface_gauss)

- (5) 海面水温データ (OISST)
 - 我々が収集する海面水温データは, NOAAが収集した
 現場観測及び衛星観測海表面温度(SST: Sea Surface
 Temperature)データに対し,最適内挿法(OI: Optimal
 Interpolation)を適用したデータである。1°×1°グリッド,1週間平均データであり,更新は約4日遅れの準
 リアルタイムで行なわれる。
 取得サイト:

(ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/cmb/sst/oisst_v2)

 (6) 海洋水温塩分データ(real-time Argo) 我々が収集する海洋水温塩分データは、Argoフロー トが観測した水深約2000mまでの全球温度・塩分プ ロファイルのリアルタイムデータである。およそ緯 度・経度3°毎に1プロファイルのデータを、ほぼリ アルタイムに取得できる。 取得サイト:

(http://ftp2.jamstec.go.jp/pub/Argo/ifremer/latest_data)(7) 海面高度偏差データ (NRT-MSLA)

我々が収集する海面高度偏差データは, AVISO
(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite
Oceanographic data)が提供する準リアルタイム海面
高度偏差マップデータ(NRT-MSLA: Near Real Time
Map of Sea Level Anomalies)である. 複数の衛星
(Jason-1, Jason-2, Envisat, Cryosat-2等)からの観測
データを統合した, 2種類の空間解像度(1/3°×1/3°
グリッド,及び1°×1°グリッド)を持つ海面高度偏

⁽ftp://ftp.remss.com/qscat/bmaps_v04)

差マップとそのマッピング誤差とを収集する.デー タの更新は1日遅れ程度の準リアルタイムである. 取得サイト:

(ftp://ftp.aviso.oceanobs.com/global/nrt/msla/merged/{h,err})

3.2.2 観測データ収集の自動化

以上のように、CDAシステム入力用観測データは、大 気・海洋に跨る多種類の観測要素、多様なデータ特性(異 なる空間解像度,取得時間間隔,データ品質等)を有し、 結果として大量のデータとなる.また、様々な公開サイ トから異なる時間間隔で公開され、更に、公開後も予告 なしに修正・更新されることがある.

このような観測データを収集するには、各観測データ の公開間隔に合わせて各公開サイトにアクセスし、目的 の観測データを選択し、同化計算期間のデータを収集す る必要がある.更に、公開済み観測データの修正に対応 するため、短い間隔で定期的に各公開サイトの各観測デー タにアクセスし、修正データの有無を確認・収集する必 要がある.従って、常に最新の観測データを収集・準備 するには煩雑な手続きを頻繁に繰り返す必要があり、オ ペレータにとって大変な負担となっている.

そこで,我々はオペレータの負担を最小限とするため に,観測データ収集手続きを自動化する観測データ自動 収集システムを考案した.

観測データ自動収集システム(図3)は、Linux OS上で 稼働するcron プロセス(図3.(a):ジョブを定期的に実行 するデーモンプロセス)により、予め定めた時間間隔で、 以下2つのジョブをオペレータの介在なしに実行する.

(1) スケジューラ(図3.(c)):該当する公開サイト(図
 2.(f)) にアクセスし収集可能な観測データファイルの収集リスト(図3.(d))を作る;

(2) ダウンローダ (図3. (e)): 収集リストを参照し相 当する観測データファイルを公開サイトから収集する.

Cronプロセスに起動されたスケジューラは、まず観測 データの更新頻度に合わせてデータ毎に定めたスケジュー ル表(図3.(b))(例えば、毎週日曜日にOISSTデータ更 新の確認、月曜日にPREPBUFRの更新を確認等と指定) を参照する.スケジューラは現在の曜日とスケジュール 表内の指定曜日とが一致していれば、相当する公開サイ トにアクセスし収集リストを作成する.

ダウンローダは,決められた時間間隔(例えば5分間 に1回)で起動し,収集リストに候補となるファイル名が ある場合,そのファイルを順次ダウンロードする.ダウ ンロードと共に収集リストからファイル名を削除するが, ダウンロードに失敗すれば収集リストにファイル名を追 加し,収集リストが空になるまで,指定回数だけダウン



Fig. 3. System flow diagram for automated observational data acquisition. The blocks ((a)-(g)) represent the major components in the acquisition system. Thin blue lines connecting blocks indicate requests from one block to the next or data flows between the connecting blocks. The numerals (1.-8.) show the step-by-step procedure of acquiring open-access observational data through the system for automated observational data acquisition.

図3. 観測データ自動収集システムの構成図. (a) クーロンプロセス. (b) スケジュール表. (c) スケジューラ. (d) 収集リスト. (e) ダウンローダ. (f) インターネット上の観測データ配布サイト. (g) データ保存用のハードディスク. 実線は指示とデータのやり取りを示す. 1.-8. は、クーロンプロセスがスケジューラに指示を出し、最終的に、必要なファイルをハードディスクに格納するまでの手続きを段階的に示す.

ロードを繰り返す. ダウンロードされた観測データファ イルは, 観測データ毎に作られたディレトクトリ(図3. (g))に格納される. また, 一連の手続きは全てログファ イルに記録される.

このような自動収集システムを導入することで,観測 データ毎に公開サイトに異なる頻度でアクセスし観測デー タを取得するプロセスは,すべて自動化される.オペレー タの役割は,システムの監視と,システム動作不良時の対 応へと縮小される.更に,観測データ毎に公開サイトの 場所,収集リスト作成スケジュールを指定できるため,容 易に収集データを変更・追加できる拡張性が確保される.

3.3 観測データ前処理・投入システム

観測データ自動収集システムが収集した7種類の観測 データ(3.2.1(1)-(7))は、データ毎に異なるデータ特 性(空間分布・取得時間間隔・データ品質・データフォー マット等)を持っている.

一方、CDAシステムへの入力観測データは、同化計算 設定に応じて予め定められたデータ特性が要求される. 大気観測データに関しては、T42ガウスグリッド、レイ ヤー数24、時間は旬平均である.海洋観測データに関し ては、海洋内部では1°×1°グリッド、レイヤー数45、時 間平均は月平均であり、海洋表層のSSTデータに関して は、空間1°×1°グリッド、旬平均である.従って、観測 データ毎に異なるデータ特性を、同化計算に要求される データ特性へと変換する前処理過程が必要となる.

尚,我々のターゲットは季節から経年変動であり,旬 以上の時間スケールを持つ平均場を修正することがシス テムの目的である.上述の前処理は,本システムでは制 御できない短周期成分を観測情報から予め抜くことも意 図されている (e.g., Sugiura et al., 2008).

収集済み観測データは多種(観測要素)・多様(データ 特性)・大量(データ取得間隔・期間)であり、その各々 に対し大量の前処理を行なうこととなる.また、その前 処理自体も各データ特性を順次変換していく極めて煩雑 な処理となる.

そこでわれわれは、このような、多種類・大量・多段 階に及ぶデータ特性の変換処理手続きを効率化、省力化 した観測データ前処理・投入システムを開発した。

3.3.1 観測データ前処理・投入システムの構成

観測データ前処理・投入手続きは,

- (1) 圧縮された収集済み観測データファイルの解凍
- (2) 解凍したバイナリデータから必要な観測要素の抽出
- (3) 同化計算用グリッド、レイヤーへの内挿
- (4) 割り付けられたデータの時間平均化

- (5) 各グリッド,各レイヤーにおける統計値(観測値平
 均,観測数,観測値の標準偏差σ)の算出
- (6) 品質管理:各レイヤーにおける観測値の3σ検定(観 測値平均±3σの範囲に入る観測値を採用)
- (7)入力形式に合わせた品質管理済み観測データの統合(8)品質管理済み観測データの移動(投入処理).

からなる.

このような (1)-(8) の手続きを自動収集済みの各観測 データに適用することになる.

このような一連の手続きをより効率化. 省力化する ために、まず8個の手続き一つ一つをプログラムとシェ ルスクリプトを組み合わせた一つのモジュールとする. 従って、1種類の観測データ処理は(1)-(8)のモジュー ルを連ねた処理フローとなる. 我々の場合, 実際に同 化で利用している OISST. SSM/IS + NCEP reanalysis-1. PREPBUFR, Argo データに対応する4つの処理フローが できる. 実際は4つの処理フローすべてで(1)-(8)の全 モジュールを使っているわけではない. OISSTでは (1). (2), (4), (7), (8) の5個のモジュールを, SSM/IS + NCEP reanalysis-1 では(6) 品質管理モジュール以外 の7つのモジュールを使い、PREPBUFRでは(1)-(8) の全モジュールを使って処理を行っている。尚, Argo データ(水温,塩分)に関しては、自動収集している 3.2.1 (6) real-time Argo データに加えて、海洋研究開発 機構,海洋環境変動プログラム戦略的海洋監視研究チーム (http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo_web/argo/index.html) から独自の品質管理を行なった Argo データの提供を受 けている. この提供を受けた Argo データに対して (3)-(8) のモジュールによる処理フローを実行し、観測デー タとして採用している.

そして、この4種類のデータに対する処理フローを一つ のコントロールスクリプトで制御する.この結果、コン トロールスクリプトを起動する1回の手続きで、効率的に 4種類の観測データに対する前処理・投入手続きを実行す ることができる.また、一つ一つの処理をモジュール化 することで、異なる観測データの処理フロー間で同機能 の処理がある場合、処理モジュールを共用し開発運用の 効率化が図れる.また、処理フローへの新たなモジュー ルの追加、削除によるシステムの柔軟性、拡張性を確保 している.

現在,本観測データ自動収集,前処理・投入システム の柔軟性,拡張性を生かし,新たな海洋の温度・塩分プ ロファイルデータを自動的に追加収集・前処理するシス テムを開発している.開発中のシステムでは,5種類の温 度・塩分プロファイルデータ(海洋環境変動プログラム提 供のArgoデータ, 3.2.1 (6) real-time Argoデータ,同一サ イトから収集できるdelayed-time Argoデータ,船舶, ブ イ観測から得られるreal-time GTSPP (Global Temperature and Salinity Profile Project)データ,delayed-time GTSPP データ)を想定し,それらを自動収集し,前処理を実施 する.特に前処理では,ある期間・空間に重複するプロ ファイルが存在する場合,どのプロファイルを優先的に 選択するかを決める方法を含めて,システム開発を行っ ている.

3.4 計算結果可視化システム

同化・アンサンブル予測実験終了後,計算が適切に遂行 されているかを確認する必要がある.また,事前に想定 した期間・領域における大気・海洋現象が同化によって どのように再現されているのかの評価も行ないたい.最 も迅速且つ効果的に同化・アンサンブル予測実験の確認・ 評価を行なうには、同化・アンサンブル予測実験結果及 び大気・海洋現象に関するいくつかの代表的インデック スを選択的、且つ簡便に可視化、閲覧できることが望ま しい.

しかし、同化・アンサンブル予測実験結果は大気・海 洋の各出力要素が各グリッド、レイヤーについて一定時 間間隔で繰り返し出力され、その出力結果は多種・大量 となる.また、代表的な気象海洋インデックスのいくつ かは、同化結果に対して2次的な計算処理を伴う(例え ば、海洋混合層深度).広範な利用者を想定すれば、多種 類の大気・海洋現象に関する代表的なインデックスを準 備しておくことが望ましい.また、そのようなインデッ クスを広く利用者に可視化・閲覧可能とするには、ネッ トワーク上で簡単に利用できる可視化表示システムが欠 かせない.



Fig. 4. Procedure ((a)-(e)) of generating synthetic images of the 4D-VAR and ensemble forward prediction results with the observational data (panels (f), (g), and (h)). Panel (f) presents the time-series plots (colored thin lines) of Nino 3.4 SST ensemble predictions in the first one year out of the three-year predictions. Colored dots mark the empirical values of Nino 3.4 SST before six months and after three month periods from the starting date. Panel (g) illustrates a Hovmoeller diagram of the 10 m-height zonal wind speed (U10) along the equator in the three-year prediction (Jan. 2011 to Dec. 2013). Panel (h) patches the five sub-panels: (1) spatial distribution of SST first guess field from January to March in 2011; (2) that of assimilation field; (3) that of the difference between (1) and (2); (4) that of OISST observations; (5) that of the difference between (2) and (4).

図4. 計算結果可視化システムを利用した計算結果可視化の手続き.(a)可視化コンテンツ作成システム,(b)可視化用 web サーバ,(c)可視化コンテンツ 作成システムによる可視化ファイルの自動配置,(d)可視化ファイルリストの自動生成,(e)ユーザによる可視化ファイルの選択を示す.(f)-(g)は選択 結果の可視化表示:(f)観測データとアンサンブル予測結果の時系列可視化表示,(g)赤道における10m風速(u10)の3年予報値によるホフメラーダイア グラム(経度・時間断面),(h)海表面水温(SST)の同化初期値,同化結果,観測値,各々との差の可視化表示.

3.4.1 計算結果可視化システムの構成

このような同化結果に対する要求を満たすために,計算 結果可視化システム(図4)を作成した.この可視化シス テムは,同化・アンサンブル予測実験結果から可視化ファ イル(pngおよびeps形式)を作成・配置するコンテンツ作 成システム(図3.(a):System for synthetic visualization of observational and reanalysis data)と,作成されたファ イルを閲覧するための可視化Webサーバ(図3.(b):Web server for visualization)と,から構成される.また,計算 結果可視化システム全体は、コントロールスクリプトに より制御され、オペレータの介在を最小限とする仕様と なっている.

可視化コンテンツ作成システムは、予め定めた同化結 果及び気象海洋インデックスに対し、大気海洋分野で広 く利用されている表示・解析プログラムGrADSのスクリ プト機能を利用し、可視化ファイルを作成する.同化結 果に対して2次的な計算処理を伴いGrADSだけでは処理 できないインデックスは、別にインデックス作成プログ ラムにより計算し、計算結果をGrADSに読み込ませて、 可視化ファイルを作成する。尚、同化結果に対して2次 的な計算処理を伴う大気海洋インデックスとして.現状 では(1)海洋混合層深度分布,(2)海洋全球20℃等水 温面深度分布, (3) 26.8 σ等密度面深度分布, (4) 子午 面循環 (NA-MOC: North Atlantic Meridional Overturning Circulation), (5) インドネシア通過流量, (6) ドレーク海 峡通過流量, (7) 大気速度ポテンシャル, (8) PDO (Pacific Decadal Oscillation:太平洋10年規模振動) インデックス. を可視化ファイルとして出力する仕様となっている. ま た、計算処理部分がインデックスごとにモジュール化さ れているので、新たな大気海洋インデックスを追加する 拡張性も確保されている.

また,可視化コンテンツ作成システムは,作成した可 視化ファイルを可視化用Webサーバに自動的に配置する (図4.(c)).更に,可視化ファイルの配置に基づいて,各 可視化ファイルをブラウザーから閲覧可能とする可視化 ファイルリスト(htmlファイル)を作成する(図4.(d)).

その結果、利用者はブラウザーを使って可視化Webサーバにアクセスし、サーバ上の可視化ファイルリストから可視化ファイルを選択し(図4.(e))、選択した可視化ファ イルを容易に閲覧、確認できる。更に、選択した可視化 ファイル(eps形式)を手元にダウンロードできる。図 4.(f)は、Nino3.4領域におけるSST予測計算の時系列プ ロットである。色つきドットが旬毎の観測データ、細実 線がアンサンブルメンバー各々の時系列、太点線がアン サンブル時系列平均を示している。横軸は0が同化開始 時、全体で6か月前から12か月後までの時系列を示して いる.図4.(g)は、赤道全周における10m高、東西方向 (u)風速3年予測のホフメラーダイアグラムである.表示 期間は2011年1月から2013年12月までの3年分を表示し ている.図4.(h)は、SSTの初期値、同化結果、観測値、 及び各々との差をプロットしている.表示機能は各々が モジュール化されており、このような分割パネル表示の 各々のパネルを入れ替えることも極めて容易に行える.

その結果,利用者は計算結果の確認・科学的な検討,更 なる詳細計算の立案等を,可視化表示を通してこれまで より容易に開始できる.

4. 再解析データセットの応用

4.1 再解析データセットを利用したアンサンブル予測実験 本章では,計算結果可視化システムを利用して,再解 析データセット及び予測実験結果を検討した例について 解説する.

図5は、2011年4月(上段:(a),(b),(c))及び6月(下 段:(d),(e),(f))の再解析データセットおける全球海 表面水温(SST)の,同化結果,観測データ(OISST),同 化結果と観測値との差,をプロットしたものである(西 川他,2012a).図5から海面表層では、季節によっては中 高緯度で最大2℃程度の差(図5.(f))がみられることも あるものの,再解析データと観測値との相関が高く,海 況の再現性が高いことが分かる.可視化システムにより, このような再解析データの再現性チェックを速やかに行 うことが可能になり,また,観測との偏差は,効率的な 再現性向上のための有用な情報となる.

更に、3つの同化期間(2011年1-3月,2011年4-6月, 2011年7-9月)における再解析データを初期値及び境界 条件とした、アンサンブル3年季節予報実験の結果を図6 に示す(西川他,2012aを一部改訂).図6の左側列((a), (b),(c))が熱帯太平洋におけるNino 3.4 index を示し、 右側列((d),(e),(f))がインド洋熱帯領域におけるDMI (Dipole Mode Index)を示す.図6(a),(d)が同化期間 2011年1月から3月まで,図6(b),(e)が2011年4月か ら6月まで,図6(c),(f)が7月から9月まで計算した結 果である.図6の各枠内のオレンジ色,水色の矩形は3か 月同化期間を示し,図全体で同化開始から1年分の時系 列をプロットしている.黄緑色丸印は旬毎の観測データ を示し,赤色実線はアンサンブル予測計算時系列平均を 示す.他の実線はアンサンブル予測計算の11メンバーを 示す.

この図6から、季節予報実験に於いて、熱帯海域にお ける表層のインデックス(Nino3.4 index 及びDMI)に対 し予報性が高いことが分かる.特にNino3.4 indexは,予 測のやや難しいケースがあるものの(図6.(a)),それ以 外では半年から1年程度の予測期間において,アンサン ブル予測と観測値との一致が良い(図6.(b),(c)).公 開されているエルニーニョ監視速報(例えば気象庁公開 の監視速報)と比較すると,海域ごとの再現性に差異は あるものの,図6.(b),(c)の時期には概ね同程度の予 報精度が確立されている.可視化システムを用いること で,このような重要で代表的な気候インデックスを半自 動的に出すことができ,観測データ自動収集,前処理・ 投入システムと組み合わせることで効率的・ルーチン的 な気候変動予測が可能となる.

4.2 計算結果可視化システムの有用性

特にここで示した2種類の図(図5と図6)は、計算結 果可視化システムの解説図(図4)の図4(h)と図4.(f) に対応している.これまでは、オペレータがデータをダ ウンロードし手動で描画を行なっていた.しかし、計算 結果可視化システムの導入によって効率よくこのような 図を作成することが可能となった.このことは、計算結 果可視化システムが同化結果および季節予報結果の確認、 評価、科学的な検討に直接利用できる有用性を示してい る.また、計算結果可視化システムがモジュール構造を 持ち、ブラウザーによりWebサーバ上のファイルを閲覧 できる仕様であることから,更なる検討のための表示追加 や,ネットワーク上に分散した可視化ファイルを即時的・ 対話的に表示検討できる柔軟性,拡充性も期待できる.

この計算結果可視化システムの同化,予報結果の確認, 評価,検討に対する高い有用性は,計算結果可視化シス テムがwebサーバを介した同化・予測データ公開用ツー ルのエンジンとして利用できる,汎用性,発展性を持っ ていることを示している.

現在,地球情報研究センターでは,現状のCDAシステ ムを更に発展させ、大気海洋物理環境モデルと低次生態 系モデルとを融合した大気・海洋・低次生態系4次元変分 法同化モデルを開発している. そこでは、これまでの大 気海洋観測データに留まらず新たな衛星観測データや大 気,海洋化学系データ等多種多様な入力用観測データを 扱うこととなる. また. 同化計算も多段階のグリッドシ ステム、インクリメンタル四次元同化法(Ishikawa et al., 2013) などの新手法の導入などで複雑化し、より多様、大 量の出力結果となることが予想される.従って、入力用 観測データの収集、前処理、同化結果の確認、評価、検討 には、これまで以上に自動化・効率化が求められる. ま た、同化・予測結果は広く公開され実利用データとしての 有用性を期待される、その状況では、われわれが開発し てきた再解析データ作成サポートシステムが有用なツー ルとなることが期待できる.



Fig. 5. Spatial distribution of SST in April and June, 2011. (a) Assimilated SST field, (b) observed OISST, and (c) difference between (a) and (b) in April 2011. Panels (d), (e), and (f) are the same as (a), (b), and (c), but in June 2011 (modified from Nishikawa et al., 2012a).

図5. 海表面温度 (SST)の同化結果, 観測データ (OISST), 同化結果と観測との差異 (西川他, 2012aを改訂).上段 ((a), (b), (c))は, 2011年4月, 下段 ((d), (e), (f))は, 2011年6月の結果を示す.

5. まとめ

海洋研究開発機構,地球情報研究センターでは,CDA システムを用いて2010年以降を対象に、3ヶ月間の同化 ウィンドウを設定した大気・海洋環境再現実験を実施し, 継続的に再解析データセットを作成している。

再解析データ作成サポートシステムは,再解析データ の作成を効率化・省力化するため,3つのサブシステム; 観測データ自動収集システム,観測データ前処理・投入 システム,計算結果可視化システム,から構成される. 観測データ自動収集システム及び観測データ前処理・投 入システムは, cronプロセスの利用,処理プロセスのモ ジュール化を通して大気・海洋観測データの自動収集,観 測データの前処理(品質管理も含む)を効率化した.ま た,計算結果可視化システムは,利用者がブラウザーを 使って簡便に同化結果と代表的な大気海洋インデックス の確認,評価が行なえる手段を提供した. 再解析データの精度向上と実利用上の有用性を確認す るために,再解析データと再解析データを利用したアン サンブル3年予測実験結果の評価を行なった.その結果, 海面表層 (SST)の再現性,及び熱帯海域におけるイン デックス (Nino3.4及びDMI)の再現性・予測性が高いこ とを確認した.

また,再解析データ及び予測結果を確認,評価する際 に計算結果可視化システムが有用であることがわかった. 同システムは,webサーバーへの図の自動配置を行うな ど,ネットワーク親和性が高いと考えられる.本論文で 紹介したような,データセットの収集,前処理および可 視化機能は近年,データセットの多様化,大量化が著し いことを考えると,本報告で対象とするデータ同化シス テムの運用や再解析データの作成だけでなく,地球環境 変動研究全般に共通する課題の解決に有効であることが 予想され,さらなる改良をすすめることにより汎用的な ツールとして利用可能である.



Fig. 6. Nino 3.4 index and Dipole Mode index of the eleven-ensemble prediction experiments in the three different periods: three years from January in 2011, those from April in 2011 and those from July in 2011 (modified from Nishikawa et al., 2012a). Green dots denote the observed indices. Colored rectangles cover the three-month assimilation windows. Each assimilation experiment provides optimized initial and boundary conditions to the following 11-ensemble forward predictions (colored thin lines). Red solid line represents average time series of the 11-ensemble predictions.

図6. アンサンブル予報実験における Nino3.4 Index (左列:(a),(b),(c)) と DMI(右列:(d),(e),(f))の12か月間の時系列表示(西川他,2012aを改 訂). 緑丸印が旬毎の観測値から求めた各インデックス,色つきの細実線が各アンサンブルメンバーのインデックス時系列,赤太線がアンサンブル平均時系 列,色付き矩形が3か月同化期間を示す.同化期間を3か月毎にずらした3ケースを示す.この3か月同化によって最適化された海洋初期値,バルク係数を 使ってアンサンブル予測実験を行なった.

謝辞

本報告で紹介したシステムは、文部科学省からの受託 研究「地球環境情報統融合プログラム (DIAS-2)」,「気 候変動適応研究推進プログラム (RECCA)」及び環境省 による「平成25年度東日本大震災に伴う洋上漂流物に係 わる緊急海洋表層環境モニタリング調査業務」の一部と して開発を行ないました。

再解析データ作成サポートシステムの構築に当たり多 くのご協力いただきました,株式会社ヴィジブルインフォ メーションセンター,黒澤 直弘氏,林圭佐氏,松浦康孝 氏,に感謝いたします.また,2名の匿名査読者からの多 数の建設的な意見により,当初の原稿を改善することが できました.記してお礼を申し上げます.

参考文献

- Igarashi, H., T. Awaji, T. Ichii, M. Sakai, Y. Ishikawa, S. Masuda, H. Nishikawa, Y. Hiyoshi, Y. Sasaki, and S. Saitoh (2012), Diagnosis of the possible link between interannual variation of neon flying squid abundance in the North Pacific and the recent climate regime shift in 1998/99 by using 4DVAR ocean data assimilation product. North Pacific Marine Science Organization (PICES) -2012 meeting, Hiroshima, Japan, Oct. 19, 2012.
- Ishikawa, Y., T. Awaji, T. In, S. Nakada, Y. Hiyoshi, Y. Sasaki, and T. Wakamatsu (2013), Development of an incremental 4D-VAR system for ocean model downscaling, 2nd GODAE Ocean View Coastal Oceans and Shelf Seas Task Team (COSS-TT) International Coordination Workshop, Lecce, Italy, Feb. 4–7, 2013.
- Nishikawa, H., H. Igarashi, Y. Ishikawa, M. Sakai, Y. Kato, M. Ebina, N. Usui, M. Kamachi, and T. Awaji (2013), Impact of paralarvae and juveniles feeding environment on the neon flying squid winter-spring cohort stock. (submitted)
- 西川史朗,石川洋一,増田周平,五十嵐弘道,日吉善久,佐々 木祐二,西川悠,望月崇,細田滋毅,佐藤佳奈子,淡路 敏之(2012a),4次元変分法大気海洋結合データ同化 システムを用いた2010-2011年同化・予測実験とArgo データの利用.2012年度日本海洋学会春季大会,筑波 大学第2エリア,つくば,2012年3月26-30日.
- Nishikawa, S., Y. Ishikawa, S. Masuda, H. Igarashi, Y. Hiyoshi, Y. Sasaki, H. Nishikawa, T. Mochizuki, S. Hosoda, K. Sato, and T. Awaji, (2012b), Development of a global 4D-VAR data assimilation and forecast system focusing on climate variability in the North Pacific and use of Argo profiling data: Experiment of 2010–2011. 2nd International Symposium: Effects of Climate Change on

the World's Oceans, 13-20 May 2012, Yeosu, Korea.

- 西川史朗,石川洋一,増田周平,五十嵐弘道,日吉善久,佐々 木祐二,西川悠,望月崇,若松剛,細田滋毅,佐藤佳奈 子,淡路敏之(2012c),4次元変分法大気海洋結合デー 夕同化システムを用いた2010-2011年同化・予測実験 とArgoデータの利用(II).2012年度日本海洋学会秋 季大会,東海大学清水校舎,静岡,2012年9月13-17日.
- Nishikawa, S., Y. Ishikawa, S. Masuda, T. Wakamatsu, T. Mochizuki, H. Igarashi, Y. Hiyoshi, Y. Sasaki, H. Nishikawa, S. Hosoda, K. Sato, and T. Awaji, (2012.d), Experiments of ocean state estimation and forecast in 2010–2011 using K7 global 4D-VAR coupled data assimilation system and effects of Argo data. 4th Argo Science Workshop, 27–29 September 2012, Venice, Italy.
- Sugiura, N., T. Awaji, S. Masuda, T. Mochizuki, T. Toyoda, T. Miyama, H. Igarashi, and Y. Ishikawa (2008), Development of a four-dimensional variational coupled data assimilation system for enhanced analysis and prediction of seasonal to interannual climate variations, J. Geophys. Res., 113, C10017, doi:10.1029/2008JC004741.