

## TOPIC

# 古気候分野におけるデータ同化利用

岡崎 淳史 (弘前大学)

### はじめに

データ同化は力学系理論と統計理論に基づきシミュレーションと観測データを融合する学際的科学である。データ同化は天気予報とともに発展してきたが、最近では古気候の詳細な復元にも応用され始めている。既存の手法では不可能だった大気・陸面・海洋の様々な物理量の三次元分布を欠損なく復元する技術として、同分野において大きな注目を集めている。本稿では、発展著しい古気候データ同化研究についてレビューを試みる。

### 古気候データ同化における観測

古気候復元の対象となるのは、温度計などの測器観測が十分にならない年代である。それでは古気候データ同化における観測とは何だろうか。答えは、気候の代替指標（プロキシ）である。代表的なものとしては、樹木年輪や、氷河や氷床から採取されたアイスコアの酸素同位体比などが挙げられる。図1にプロキシの分布および地点数を示す。最も観測が多い20世紀後半でもその数は全球で4000点程度であり、時代を遡るごとに少なくなる。さらに、その多くは陸上に分布しており、空間的にも偏在している。古気候データ同化が対象とする過去千年を見た場合、プロキシの時間解像度は年程度である。時空間的に偏在する時間平均情報をもつ観測とシミュレーションを融合し、過去の状態を推定するのが古気候同化の特徴であると言える。

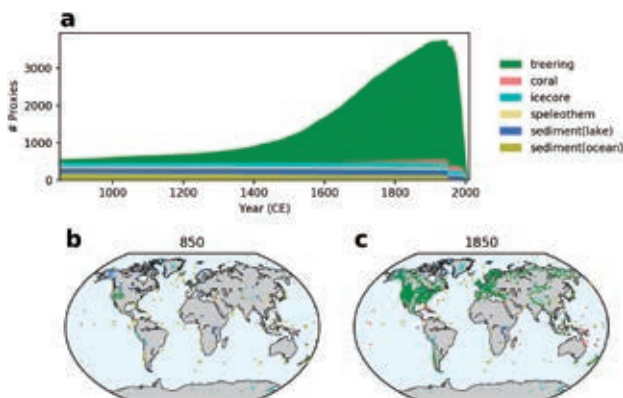


図1 a. 年毎の観測数、b. c. 西暦850年、1850年における観測空間分布。

### 古気候データ同化の歴史

2000年にvon Storchが過去千年の復元向けに提案したのが古気候データ同化の始まりである。その後2000年代から2010年代半ばまで細々ながら研究が進められてきた。研究を牽引してきたのは、ワシントン大学Greg Hakimや、ルーヴァン・カトリック大学Hugues Goosseらである。前者はアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)、後者は粒子フィルタを基礎とした手法の開拓を進めた。当初はどちらもオンライン同化が主流であった。

ここで、オンライン同化とは、モデルによる予報と観測を融合し、

モデル初期値を推定するものを指す。この作業を解析と呼び、得られた推定値は解析値と呼ばれる。予報と解析を繰り返し行うことで、過去の観測情報が時間方向に伝播していき、積み重なることで精度が高くなると期待される。通常データ同化といえばオンライン同化を指す。数値天気予報に用いられるのもオンライン同化である。この対概念として、オフライン同化がある。オフライン同化は、解析値を用いずに予報を行う。つまり、予報は観測によって何ら拘束されないフリーランと同値である。予報に用いられないことから、解析はモデル初期値のように一時刻の状態を表すものである必要はなく、時間平均的な状態とすることも可能である。

通常オフライン同化の精度はオンライン同化より悪いことが期待されるが、大気モデルを用いる場合には、オフライン同化であっても精度よく古気候を復元できることがEnKFを用いて示された(Huntley and Hakim, 2010; Bhend et al., 2011)。続けてSteiger et al. (2014) が、アンサンブルを必要としない、さらに計算コストが低いオフライン同化手法を提案した。この手法では、既存の一本のシミュレーションだけから古気候の復元が可能となる。これにより同分野への参入の障壁が下がり現在の古気候同化の一大ブームが引き起こされている。以下では現在の研究の基礎となっているこの手法(以下SH14)についてその概要を説明する。

### Steiger et al. (2014) が提案する同化手法

SH14はEnKFを基礎として開発された手法である。EnKFに必要なのは、背景値( $\mathbf{x}^b$ )、観測( $\mathbf{y}^o$ )、観測演算子( $\mathcal{H}$ )、観測誤差共分散( $\mathbf{R}$ )である。EnKFの場合、アンサンブルであることを強調して背景値を背景アンサンブルと呼ぶこともある。これらを以下の式により結びつけることで解析値を得る。

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{K}[\mathbf{y}^o - \mathcal{H}(\mathbf{x}^b)]$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

ここで、 $\mathbf{H}$ は線形化した観測演算子である。SH14で扱う変数(背景値、解析値、観測値)は全て時間平均値である。観測の時間解像度に合わせて、月平均値や季節平均値、あるいは数十年平均値が用いられることもあるが、ここでは多くの研究で共通に用いられる方法に合わせて、全て年平均値であるとして話を進める。

### 背景アンサンブル

背景アンサンブルは、数値天気予報でいうところの予報であり、観測とシミュレーションを融合する前の推定値である。背景アンサンブルは、尤もらしい状態を集めたものであればどんなものでも構わない。SH14では、背景アンサンブルは単一の長期ラン(例えば過去千年をカバーするような過去再現実験)により構成される。長期ランを、初期値や境界条件を少しずつ変えて得られるアンサンブルと同等とみなし、各年のシミュレーションを1メンバーとして扱う。これはつまり、気候学的な集合からランダムにメンバーを抽出していることに相当する。SH14では、どの年を復元する際にも同じ背景

アンサンブルを用いる。復元する年の情報が何もない場合には、妥当な扱いであるとともに、気候が安定していた過去千年を対象とするからこそ許される設計であるだろう。

#### 観測演算子、観測誤差共分散行列

観測演算子とは、モデル状態変数を観測相当量に変換する装置である。測器観測とプロキシの双方が存在する時代について両者の線形回帰式を作成し、これを観測演算子とすることが多い。線形回帰した際の残差の二乗が観測誤差として用いられる。測器観測としては、HadCRUT (Morice et al., 2020) などの格子化された地表気温データが用いられるのが一般的である。

#### 古気候データ同化の成果

Steiger et al. (2014) は、既存の気候場復元手法に比べて、データ同化を用いた復元手法の方が精度が高いことを示した。精度高く復元された気候場が長期間に渡って得られるようになったことで様々な現象の理解が飛躍的に進んでいる。特に、過去の温暖期・寒冷期や大飢饉をもたらした早魃など特徴的なイベントの要因分析や (e.g., Goosse et al., 2012; Steiger et al., 2019; Bronnimann et al., 2022)、現在進行中の温暖化の特異性の描写 (e.g., Briner et al., 2020; Dalaiden et al., 2022) などの分野で顕著な成果があがっている。

データ同化は過去千年にとどまらず、さらに遠い昔の気候復元にも用いられている。Tierney et al. (2019) はデータ同化を用いて最終氷期 (LGM) の気候を復元し、これを元に平衡気候感度の不確実性を低減することに成功している。Osman et al. (2021) は、LGMから現代まで過去 2 万年にわたる気候場をこれまでにない彩度で連続的に復元してみせた。いずれの研究もトップジャーナルに掲載されており、このことから、データ同化を用いた気候復元研究のインパクトの大きさが窺えるだろう。

#### 今後の展望

前述の通り、現在はオフライン同化を用いた古気候復元が主流である。これは観測頻度に比べて大気の予測可能性が遥かに短いことが理由である (前者は一年に一度、後者は 2 週間程度)。このため、仮に同化により誤差の小さい正確な初期値が得られたとしても、大気のカオス性により次の観測を同化する時には、真値から大きく外れた予報になってしまうことを意味する。つまり、初期値を解析する意味がないのである。

一方で、気候システムに目を転ずれば、その予測可能性は優に一年を超えるものが存在する。さらに、観測についても月ごとに値が得られるような高時間分解能を有するプロキシも多数存在する。これらのことは、オンライン同化によりオフライン同化を上回る精度で古気候復元が可能であることを示唆する。しかし、オンライン同化とオフライン同化を比較したこれまでの研究は、オンライン同化の優位性を示さなかった (e.g., Matsikaris et al., 2015; Acevedo et al., 2017)。これに対して、Okazaki et al. (2021) は、観測間隔が予測可能時間よりも短い場合には、オフライン同化よりもオンライン同化の方が高精度で復元できることを示し、既往研究には予測可能性という視点が抜けていたことを指摘した (図2)。

オンライン同化による古気候復元を実現するにあたり最大の課題は計算量である。オンライン同化は海洋のメモリが長いことに依存しているため大気海洋結合モデルを用いる必要がある。一般に大気海洋結合モデルは計算負荷が高いが、これを用いて千年に渡ってアンサンブル実験を行うのは、非現実的な計算量が必要になる。また結合系のデータ同化自体にも困難な点が多いことにも留意が必要である (e.g., de Rosnay et al., 2022)。計算機の性能が年々発達していることを考慮すれば、今後オンライン同化の方向に進んでいくことは間違いないが、実現には時間がかかることが予想される。

これに対して、Perkins and Hakim (2017; 2021) は、気候システムのうちゆっくりと変動する部分だけを抜き出してこれを予測する線形モデル (LIM; Linear Inverse Model) を構成し、オンライン同化を適用することで、オフライン同化に比べて観測が少ない年代の復元精度や、低周波成分の再現性が向上することを示した。今後は、機械学習などにより作成されたより高度なエミュレータを用いたオンライン同化が進むことが期待される。

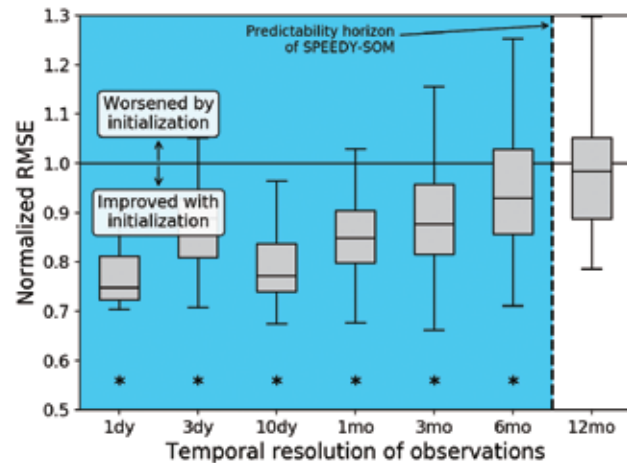


図2 簡易気候モデルを用いた場合の理想化実験による、オフライン同化に対するオンライン同化の誤差を示す。値が1より小さい場合、オンライン同化がすぐれている。米印は両者の差が統計的に有意であることを表す ( $p < 0.05$ )。横軸は同化する観測の時間分解度。

#### 参考文献

Acevedo et al. (2017) <https://cp.copernicus.org/articles/13/545/2017/>  
Bhend et al. (2011) <https://cp.copernicus.org/articles/8/963/2012/>  
Briner et al. (2020) <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2742-6>.  
Bronnimann et al. (2022) <https://www.nature.com/articles/s41561-019-0402-y>  
Dalaiden et al. (2022) <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022GL099543>  
de Rosnay et al. (2022) <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.4330>  
Goosse et al. (2012) <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-012-1297-0>  
Huntley and Hakim (2010) <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167278906004647>  
Matsikaris et al. (2015) <https://cp.copernicus.org/articles/11/81/2015/>  
Morice et al. (2020) <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JD032361>  
Okazaki et al. (2021) <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020JD034214>  
Osman et al. (2021) <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03984-4>  
Perkins and Hakim (2017) <https://cp.copernicus.org/articles/13/421/2017/>  
Perkins and Hakim (2021) <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020PA003959>  
Steiger et al. (2014) <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/27/1/jcli-d-12-00693.1.xml>  
Steiger et al. (2019) <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aax0087>  
Tierney et al. (2020) <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2617-x>  
von Storch (2000) <http://www.hvonnstorch.de/klima/pdf/DATUN-2000.pdf>

## 議事抄録

省略した議題の議事録はHP参照：<https://www.metsoc.jp/tohoku/council/council.html>

### 2022年度 日本気象学会東北支部第2回理事会

日時：2023年3月23日(木) 10時00分～11時00分 (Web開催)

#### 議題2. 2022年度事業報告

- 1) 東北支部だより発行  
・95号と96号については、Topicに加え、気象研究会、気象講演会の報告等、読み応えのある内容となっている。
- 2) 東北支部気象講演会  
・今年度は岩手県での開催となった。講演者の一人が都合により収録対応となり、後日HPで収録内容が公開されている。今年度も会場とオンラインのハイブリッド形式で開催・配信し、多数の方にご参加いただいた。アンケートの結果、ハイブリッド形式での開催に対して継続の要望が非常に多かった。
- 3) 東北支部気象研究会  
・昨年度と同様、会場とオンラインのハイブリッド形式で開催し、Zoomによるオンライン配信を実施した。

#### 議題3. 2023年度事業計画案

- 3) 東北支部気象講演会  
・来年度は秋田県で開催予定となる。
- 4) 東北支部気象研究会  
・例年、気象台と合同で開催しているが、秋季大会が仙台で開催される年には支部研究会は休止としている。今年度は、支部研究会は休止で、発表したい場合は大会のほうでお願いしたい。
- 5) サイエンスカフェ東北  
・コロナ禍で休止していたが、今年度は開催の方向で考えている。

#### 議題6. 2023年度予算案

- ・来年度は、本部交付金 (一般交付金と普及啓発活動への助成) は予定通り支出される見込み。

### 2023年度 日本気象学会東北支部第1回理事会

日時：2023年7月4日(火) 16時00分～17時00分 (対面及びWeb開催)

#### 議題1. 欠員理事等の補充

- 4月1日付人事異動により、理事2名、会計監査1名、幹事1名が欠員と

なったため、支部規則及び支部細則の規定に基づき、理事会の推薦によって、理事2名、会計監査1名、幹事については2名を補充することが承認された。

- (理事の補充)  
仙台管区気象台 立原 秀一 氏の後任として、仙台管区気象台 細見 卓也 氏を補充する。
- 盛岡地方気象台 中舘 明 氏の後任として、秋田地方気象台 山本 佳緒里 氏を補充する。
- (会計監査の補充)  
仙台管区気象台 島津 勝也 氏の後任として、仙台管区気象台 齊藤 重隆 氏を補充する。
- (幹事の補充)  
仙台管区気象台 洲上 隆雄 氏の後任として、仙台管区気象台 中川 憲一 氏と仙台管区気象台 楠本 絵莉子 氏を補充する。

なお、幹事については、仙台管区気象台で1名増員の3名となり、東北大学2名と合わせて5名の体制となる。支部規則で第13条で、「…幹事 (3～4名) を置くことができる」とされているが、より融通がきくように、「(3～4名)」は削除して、「…幹事を置くことができる。」と改正することが承認された。

#### 議題3. 2022年度事業報告および会計報告

- 2) 2022年度会計報告  
2022年度はコロナ禍による支部活動の縮小ということで本部からの交付金が無く、結果2023年度への繰越金は20,081円となった。

#### 議題5. 2023年度事業計画案および予算案

- 1) 2023年度事業計画案
- ③支部気象講演会  
今年度の開催方法は、開催者の負担の問題で、現地開催のみでwebを用いたハイブリッド形式とはしない方向で考えている。
- ⑥気象サイエンスカフェ東北  
募集人員については、部屋のスペースの関係上、20名となった。対象者については、中高生から募集するより、小学生を入れた方が集客が良いという会場関係者からのアドバイスを受け、小学4年生以上成人までとした。
- ⑥日本気象学会小倉奨励賞の推薦  
教育活動関係の方を中心に、対象となる方がいれば推薦についてご協力願う。

#### 議題6. その他

- 1) 2023年度秋季大会実行委員会委員の補充  
委員について、東北大学から4名の方が補充された。交代4名を含め計8名が今年度からの参加となっており、大会に向け準備を進めている。

## おしらせ

### 日本気象学会東北支部気象講演会のご案内

- 日 時 令和5年11月18日(土) 13時30分
- 会 場 秋田県社会福祉会館 大会議室 (10F) 秋田市旭北栄町1-5
- テ ー マ 秋田県の農業の未来と相次ぐ大雨災害から地球温暖化を理解する  
講演1 「地球温暖化と秋田県の農業・水資源」  
講師：増本 隆夫 氏 (公立大学法人 秋田県立大学 生物資源科学部 アグリビジネス学科 教授)  
講演2 「集中豪雨と線状降水帯」  
講師：廣川 康隆 氏 (気象庁 気象研究所 台風・災害気象研究部 第二研究室 主任研究官)
- 入 場 料 無料  
事前申込による登録制とします。  
問合せ先：日本気象学会東北支部事務局 (仙台管区気象台内) 蒔苗  
TEL 022-290-5712 FAX 022-297-5615  
E-mail : tohoku-admin@tohoku.metsoc.jp

※今回の気象講演会は「秋田県の農業の未来と相次ぐ大雨災害から地球温暖化を理解する」をテーマとする予定です。聴講申込方法、後援機関等が確定しましたら、気象学会東北支部ホームページ (<https://www.metsoc.jp/tohoku/>) および東北支部の個人会員登録電子メールアドレス宛メールによりお知らせします。



## 第11回気象サイエンスカフェ東北の開催について

日本気象学会東北支部では、今年度は、日本気象予報士会東北支部、せんだい環境学習館「たまきさんサロン」との共催で、気象サイエンスカフェ東北を開催いたします。この催しは、一般の方とテーブルを囲み、専門の人を交え、ざっくばらんに議論したり、意見を交換したりします。

日本気象学会東北支部の皆様にも、ぜひご参加頂けますよう、お願いいたします。

- 日時 令和5年12月2日(土) (13:30～15:30)
- 会場 せんだい環境学習館「たまきさんサロン」  
仙台市青葉区荒巻字青葉468-1 (東北大学大学院 環境科学研究科棟1階)
- テーマ 地球温暖化のいま～もっと知ってほしい温暖化の問題～  
話題提供者：仙台管区気象台気象防災部地域防災推進課 中川憲一地球温暖化情報官
- 入場料 無料
- 募集人数 20名 ※会場スペース等考慮し人数制限しています。
- 対象者 小学4年以上成人まで
- 申込締切 11月18日(土) 必着

共催：日本気象学会東北支部、日本気象予報士会東北支部、せんだい環境学習館「たまきさんサロン」

※参加いただくにあたり、「せんだい環境学習館 たまきさんサロン」宛に事前申し込みが必要です。(スタッフとして参加される方は事前申込不要です。)

メール、FAX、はがきでお申込みができます。

必要事項(講座タイトル(「第11回気象サイエンスカフェ東北」)・日時・氏名・住所・連絡先)をご記入の上、下記までお送りください。応募多数の場合は抽選となります。

メール：tamaki3salon@city.sendai.jp FAX番号：022-393-5038

郵送先：〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1

せんだい環境学習館たまきさんサロン宛

ホームページ：https://www.tamaki3.jp/

## 事務局からのお知らせ

### ●支部気象研究会の休止について

東北支部気象研究会は、秋季大会が開催される今年は開催しないこととなりましたので、お知らせします。

### ●支部だよりのホームページ掲載とメールでのお知らせについて

気象学会東北支部では、支部だより発行の際に、各会員に発送するとともに支部ホームページ (<https://www.metsoc.jp/tohoku/letters/letter.html>) に掲載しておりました。

支部だより第85号以降は、これまでと同様に各会員に発送し、支部ホームページに掲載するとともに、気象学会に登録いただいた電子メールアドレスにも支部メーリングリストを使用して、内容のタイトルを記した発行のお知らせをお送りしていますので、ご了解のほどお願いします。

### ●個人会員の電子メールアドレス登録のお願い

気象学会では、登録のあった電子メールアドレスを積極的に活用し、学会活動の推進を図っております。

東北支部では今後、支部だより発行、支部からのご案内を電子メールで配信してまいりますので、まだ登録されていない会員の方は、会員氏名・番号、電子メールアドレスをご登録いただくようお願いします。

登録は、住所変更届と同様に、気象学会本部ページの「入会案内・日本気象学会会員について」ページ(トップページ上のバナー「入会のご案内」をクリック)において「会員登録情報の変更」の画面に入り (<https://www.metsoc.jp/membership-2/update>)、必要事項を記入・確認の上、送信ボタンを押して完了です。

ご不明な点がありましたら事務局へお尋ねください。

### 日本気象学会東北支部事務局

〒983-0842 仙台市宮城野区五輪1-3-15 仙台第3合同庁舎(仙台管区気象台気象防災部地域防災推進課内) 蒔苗

(電話) 022-290-5712 (FAX) 022-297-5615 (メール) tohoku-admin@tohoku.metsoc.jp

## 編集後記

今号のTOPIC、古気候データ同化というホットな最先端研究の話題でした。この夏は異常な暑さでしたが、LGMの頃の東北の気候はどうだったのかなあ? と思いを馳せました。(S. S.)