

第3章 データ同化*

3.1 データ同化概要

数値予報モデルを実行するためには、初めに3次元空間のすべての格子点で、初期時刻の気温、風、水蒸気量などの大気の状態（初期値という）を与える必要がある。不規則に分布した観測データから、事前に定めた規則に従い、すべての格子点での大気の状態を求める過程を客観解析¹と言い、得られた状態を解析値という。

気象観測は、さまざまな場所や時刻で行われている（第2章参照）が、現在の数値予報モデルの格子点数と比較すれば数は少なく、観測データの分布も不均一であるため、観測データだけから数値予報モデル（第4章参照）に適した初期値が得られるわけではない。この欠点を補うために、直近の数値予報モデルによる予測値を基に観測データで修正し、もっともらしい解析値を求める（図1.7.1）。ここで、基となる予測値を「第一推定値」と言う。この解析値を求めるプロセスを「データ同化」と呼ぶが、今日では客観解析にデータ同化手法が用いられることから、データ同化と客観解析はほぼ同義語として扱われている。

データ同化では、観測値を単純に解析値とするのではなく、観測値と第一推定値の双方に重みをつけて内挿して解析値を求めることになる。解析値が観測値側に寄るかそれとも第一推定値側に寄るかは、データ同化を実行する際にそれぞれの値の持つ誤差の統計的性質として与えられる「観測誤差」と「背景誤差」（第一推定値の誤差）の設定²によって決まることになる（図

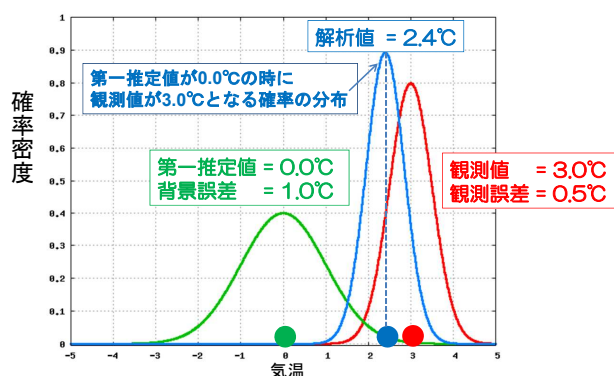


図 3.1.1 データ同化の例。第一推定値、観測値、解析値の確率密度関数を示す。背景誤差 1.0 °C の第一推定値 0.0 °C に観測誤差 0.5 °C の観測値 3.0 °C を同化した時には解析値は 2.4 °C となる。

* 本田 有機、藤田 匡、計盛 正博、室井 ちあし、佐藤 芳昭（気候情報課）

¹ 観測値を基に人が天気図を書くことを「主観解析」と呼ぶ。

² ここでいう「誤差」は、統計的に得られる誤差の大きさの期待値のことである。

3.1.1)。観測誤差が背景誤差より小さい場合は解析値は観測データ側に寄り、逆に観測誤差が大きい場合は解析値は第一推定値側に寄ることになる。図 3.1.1 の例を拡張し、より具体的に示したものが図 3.1.2 である。気温の客観解析として、陸上で第一推定値より高い観測を同化することで、暖域がより北方にまで広がる解析結果となっている。

解析値には、数値予報モデルで扱うことができない時空間スケールの成分が含まれていたり、力学的にバランスしていない成分が含まれていることがある。このため、事前にこれらの成分を解析場から取り除いて数値予報モデルの初期値を準備する。この作業を「初期値化」という。後述する 4 次元変分法のような数値予報モデルを活用した高度なデータ同化手法では、前述の不要な成分は解析値からほぼ除かれているため、初期値化を施す必要がなく、ほぼ「解析値＝初期値」となっている。

データ同化手法、つまり初期値の精度が数値予報精度に与える影響が大きいことが、とりわけ短期予報・週間天気予報の範囲では強く認識されている。このため、各国の気象機関において、より精度の良い解析値を得るための高度化への取組みが進められてきた。気象庁においても、2001 年に全球解析に 3 次元変分法を導入したことをはじめとして、2000 年代に現業数値予報システムで用いるデータ同化手法を最適内挿法から変分法へと移行した（竹内 2002; 石川・小泉 2002）（各データ同化手法については次節を参照）。後述のように変分法では、観測で得られる物理量が、風、気温、水蒸気量といった数値予報モデルが必要とする物理量と一致しない場合にも、観測値を直接同化することが可能となる。先進的なリモートセンシング技術を応用した観測により、膨大な量の情報が取得可能となり、この観測を数値予報において活用することは極めて重要である。変分法によるデータ同化システムは、リモートセンシングによる観測をはじめとする多様な観測を利用する基盤となっている。

データ同化により作成される解析値は予報モデルの初期値として利用されるほか、観測データのない領域や要素についても、均一で使いやすい形式で提供されることから、実況値の代替として、検証・評価・監視などにも幅広く利用されている。一方、上述のように、第一推定値、観測値ともに誤差を持つ量であり、結果として得られる解析値にも必ず誤差が含まれている。したがってその利用にあたっては、これが常に真の値であると受け取ることのないよう十分留意する必要がある。

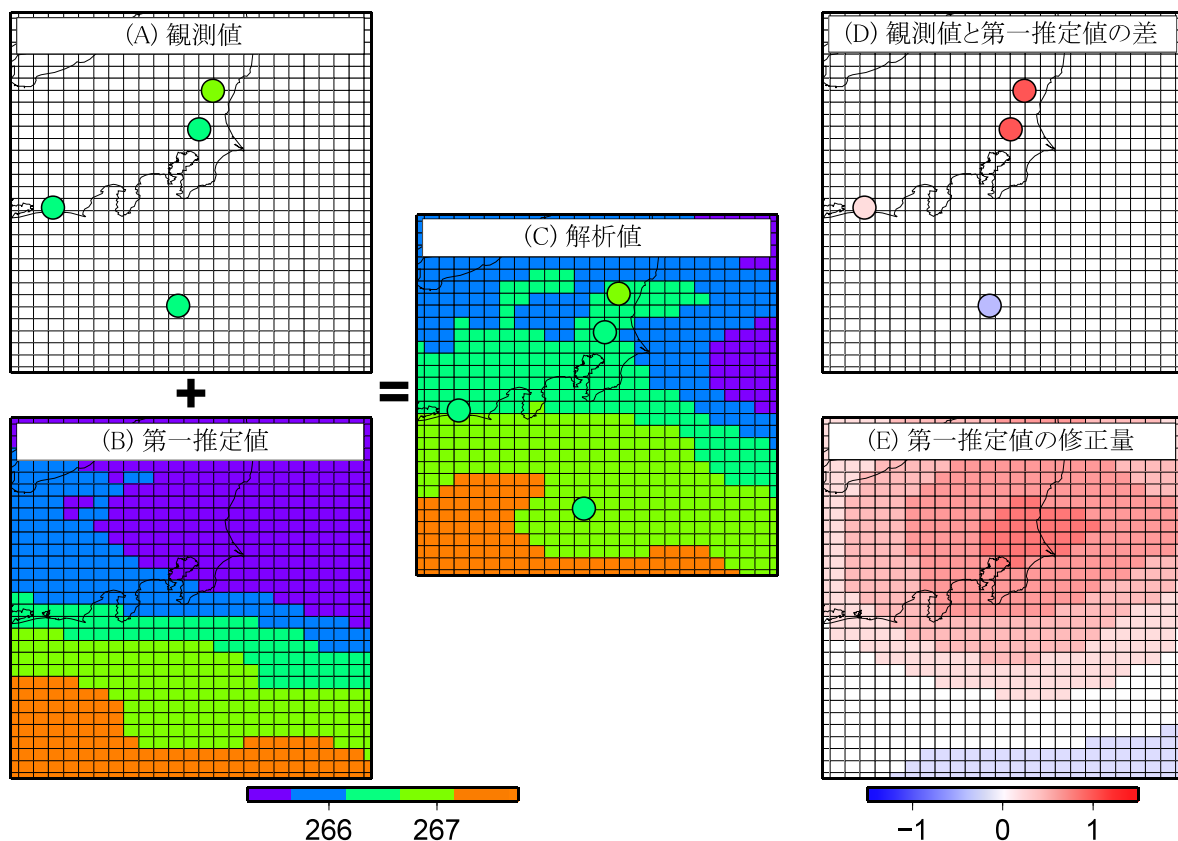


図 3.1.2 データ同化の例。A:観測値 (4 点の○)、B:第一推定値 (格子)、C:第一推定値 B を、観測値 A を踏まえて修正して得られた解析値 (○は観測値)、D:観測値と第一推定値の差 (A-B)、E:第一推定値の修正量 (解析インクリメント)(C-B)。

3.2 データ同化手法

ここではデータ同化手法について、気象庁で採用されている手法を中心に簡単に解説する。

3.2.1 4次元変分法

「4次元変分法」は、数値予報モデルを活用して、空間的・時間的に広範囲かつ様々な種類の観測データを同化する手法である(露木 1997, 2002)。

大気現象は3次元空間(東西・南北・高さ方向)に存在し、時々刻々と移り変わっている。解析時刻の観測データだけでなく、その前後の一定時間内に観測されたデータも活用することで、時間発展を含めた大気現象の実態をとらえることにより、精度の高い解析値を得ることが可能となっている。

4次元変分法の概念図を図 3.2.1 に示す。4次元変分法を用いたデータ同化では、数値予報モデルを繰り返し実行して少しずつ第一推定値を修正することにより、第一推定値と観測値の両方に最も近い数値予報モデルによる時間発展の結果をもって最適な解析値とする。最適であるかどうかの指標には「評価関数」を用いる。評価関数は、解析対象としている値(解析変数)が第一推定値や観測値からどのくらい離れているかを、背景誤差と観測誤差に応じて重み付けしたものとして定

義され、簡単に書けば以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \text{評価関数} &= \frac{(\text{解析変数} - \text{第一推定値})^2}{2 \times (\text{背景誤差})^2} \\ &+ \frac{(\text{解析変数} - \text{観測値})^2}{2 \times (\text{観測誤差})^2} \end{aligned}$$

評価関数の値が一番小さいものが最適な値とみなされる。最初に解析値のたたき台として第一推定値を用いて数値予報モデルを実行し、あらかじめ設定された時間範囲内にある全ての観測からその予報がどの程度離れているかを評価関数で判断する。なお、この時間範囲を「同化ウィンドウ(同化窓)」という。次に、数値予報モデルを考慮して、評価関数をより小さくするにはどのような修正を解析値に与えればよいかを探索する。そして、そのような修正を加えた解析値を初期値として再び数値予報モデルを実行する、という繰り返し計算になる。これ以上繰り返しても評価関数の値が小さくならないと判断されたところで終了³となり、その時に保持している値が最終的に解析値として出力される。数値予報モデルを繰り返し実行することになるためその計算量は膨大であり、計算量を減らすために、第一推定値を求めるモデル(アウトターモデル)の解像度よりも、繰り返し計算で使われるモデル(インナー

³ 現業数値予報システムでは、初期時刻から一定時間内に予測結果を提供する必要があるため、繰り返し計算の回数に上限を設け、上限に達した場合には最適解の探索を打ち切る。

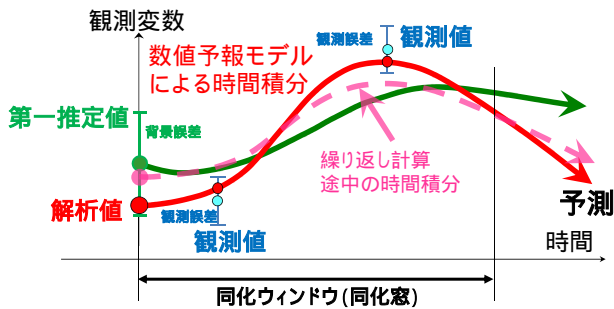


図 3.2.1 4次元変分法の概念図。第一推定値を初期値とした予測値（緑）に対して、観測値に近づくように少し第一推定値を修正した初期値からの予測値（桃色の破線）。評価関数（本文参照）がこれ以上小さくならないと判断された解析値からの予測値（赤）。

モデル) の解像度を落として計算するという手法が用いられる。

4次元変分法は、精度の良い初期値が必要である全球解析やメソ解析で用いられている。

3.2.2 3次元変分法

4次元変分法では、空間の3次元に時間の1次元を加えた4次元で解析を行うが、「3次元変分法」では大気状態の時間変化は考慮せずに、様々な観測が解析時刻に得られたと仮定して、その時刻の大気場を解析する。評価関数を用いて繰り返し計算により解析値を求める点は4次元変分法と同様だが、数値予報モデルを実行しないため、その計算量が少ない。その反面、大気場の力学的な時間変化が考慮されないため、必ずしも力学的にバランスのとれた解析値が得られない欠点がある（図 3.2.2）。つまり、この解析値を初期値として数値予報モデルを実行した場合、4次元変分法で解析した初期値から実行した場合と比べて予測精度が落ちる。

3次元変分法は、より迅速な処理が求められる局地解析と毎時大気解析で用いられている。

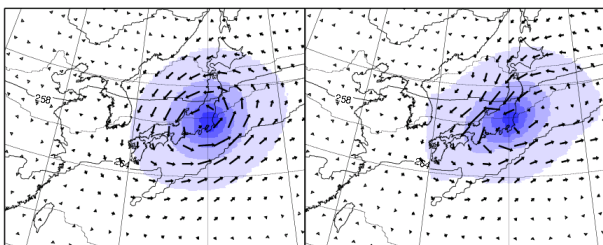


図 3.2.2 気温の一点観測をそれぞれ3次元変分法（左）と4次元変分法（右）を用いて解析した場合の第一推定値の修正量（解析インクリメント）。矢羽は風のインクリメント、カラーコンターは気温のインクリメント、等値線は気温の解析場である。3次元変分法ではインクリメントは基本的には等方、一方4次元変分法では気温の等値線に沿った変形したインクリメントとなる。

3.2.3 最適内挿法

「最適内挿法」は、変分法よりも前に主流だったデータ同化手法である。この手法では、観測データの第一推定値からのずれを、観測誤差や予報誤差の統計情報を考慮して第一推定値の格子に内挿し、第一推定値を修正する。この処理に使用される観測は、モデルで扱われる気温や風、湿度などの物理量の観測でなければならない。このため、衛星リモートセンシングで得られる放射輝度温度などの観測は、直接は利用できず、これらを利用するためには何らかの手法でモデル物理量に事前に変換する必要がある。変換することで観測が持つ本来の情報が一部失われる、もしくは劣化する。このことは、大量の衛星観測データを利用する今日の客観解析では大きな制約となる。また、3次元変分法同様、数値予報モデルを用いておらず、大気場の力学的な時間変化が考慮されていない。このため、近年の大気データ同化ではほとんど用いられなくなった。

最適内挿法は、力学的なバランスを重視しない地上解析や積雪解析などにおいては現在も使用されている。

3.2.4 アンサンブルカルマンフィルタ

「アンサンブルカルマンフィルタ」は、アンサンブル予報のメンバーから予報誤差を見積もり、解析誤差（解析値の誤差）が最小となるように最適解を求めるデータ同化手法である。解析値を初期値として用いる場合、初期値には解析誤差で表される程度の不確か性があるが、アンサンブルカルマンフィルタは、解析値と同時に、解析誤差を反映した初期摂動が得られ、これを用いて次のアンサンブル予報を行う、データ同化システムとアンサンブル予報システムを融合したサイクルとなっている（三好 2006）。変分法データ同化システムでは、過去の一定期間のデータから統計的に計算した予報誤差（「気候学的背景誤差」）を用いているが、本手法では気象場に合った予報誤差を利用する点が優れている。また、4次元変分法の繰り返し計算で利用するインナーモデルが不要であることも、開発コストを抑えるという点で大きな利点である。一方、基本的に線形理論に基づいているので、非線形性が強くカオス的な振る舞いをする大気の解析には向いていないなどの指摘もある。

アンサンブルカルマンフィルタの効率的な実装である「局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF)」(Hunt et al. 2007) が、次世代の現業データ同化手法の候補の一つである。LETKF は、全球アンサンブル予報システム (GEPS) の初期値摂動を作成するために利用されている。

3.2.5 ハイブリッドデータ同化

基本的な変分法データ同化では、気候学的背景誤差のみを用いているが、これにアンサンブル予報から見積もられる予報誤差を組み込み、予報誤差の扱いを拡

張ることが出来る(藤田 2010; 幾田 2014)。従来の高度な変分法データ同化システムをベースに、アンサンブルカルマンフィルタの利点でもあったアンサンブル予報から見積もられる予報誤差を利用することで、解析値の精度の向上が期待出来る。これを「ハイブリッドデータ同化」といい、次世代の現業データ同化システムの候補の一つである。また、アンサンブル予報と変分法を組み合わせた様々な手法が考案されており、今後の研究に期待される(横田 2017)。

3.3 気象庁のデータ同化

ここでは、気象庁で現業的に実施されているデータ同化の概略を述べる。気象庁のデータ同化システムの仕様については、第 A.1 節を参照願いたい。

3.3.1 全球解析

全球解析は地球大気全体の解析であり、大気の解析手法には 4 次元変分法を用いている(門脇 2005; 西嶋・室井 2006)が、大気解析で解析されない地上の気温や風などの地上解析には最適内挿法を利用している。

第 1.7 節でも述べたとおり、予報モデルに初期値を提供するための「全球速報解析」と、観測データの待ち受け時間を長く確保して解析予報サイクルとしての精度を重視した「全球サイクル解析」の 2 種類の運用が行われている。

速報解析による解析値は全球モデル、全球アンサンブル予報の初期値に使われる。地上解析値は、数値予報モデルの初期値としては用いない⁴。

3.3.2 メソ解析

メソ解析は日本を中心とする東アジア領域の大気解析である。全球解析と同様、大気の解析手法には 4 次元変分法を用いている(本田・澤田 2008, 2009)が、大気解析で解析されない地上の解析には最適内挿法を利用している。解析値はメソモデルの初期値に使われる。地上解析値は数値予報モデルの初期値としては用いられない。

全球速報解析よりも観測データの待ち受け時間は短く設定されているが、解析雨量、レーダー反射強度や GNSS 可降水量データなど、全球解析では利用されていない観測データが同化されている(石川 2010; 幾田 2011)。また、衛星輝度温度データの直接同化も 2010 年より行っている(計盛 2011)。

3.3.3 局地解析

局地解析は日本列島を覆う東アジア領域の大気解析であり、解析手法としては、3 次元変分法と予報を 1 時間毎に繰り返す手法を用いている(永戸ほか 2012; 幾田

2015)。その解析値は局地モデルの初期値に使われる。

速報性を重視していることから観測データの待ち受け時間は 30 分に設定している。全球解析やメソ解析では利用されていないアメダスデータを同化することにより、特に大気下層の解析精度向上を図っている。2017 年からは晴天域の衛星輝度温度データと土壌水分量データの同化も開始した(幾田 2017)。

3.3.4 毎時大気解析

日本を中心とする東アジア領域の大気解析であり、その解析手法には 3 次元変分法が利用されている(藤田 2007, 2008; 原・工藤 2017)。この解析は速やかに実況監視資料を提供することを目的としており、予報モデルの初期値としては利用されない。

迅速性をより重視するため、観測データの待ち受け時間は 20 分と、局地解析の 30 分よりもさらに短く設定している。さらに実況監視資料という毎時大気解析の利用目的を重視し、観測誤差を小さく設定することで、解析値が観測値に近い値となるようにしている。

3.3.5 その他のデータ同化

全球アンサンブル予報システムの大気摂動手法の一つとして LETKF が導入されている(山口 2017; 太田・堀田 2016)。但し、アンサンブルメンバーの初期値としては、全球速報解析による解析値をベースにしており、LETKF でアンサンブル予報用の初期値は作成していない。

海面水温解析によって海面水温の解析値が作成される(栗原ほか 2006)。その解析値は全球モデルをはじめとする各種数値予報モデルの下部境界条件として用いられる。

積雪解析(全球モデル用は積雪深解析、メソモデル用は積雪域解析)によって、積雪深あるいは積雪域の解析値が作成される(中村 2009)。その解析値は各数値予報モデルの地表面状態として用いられる。利用される観測データは、地上観測(SYNOP)であるが、国内のアメダスや米国の極軌道衛星 DMSP による観測も一部では用いられる。

このほか、海洋データ同化によって海洋の解析値が作成されており、季節予報モデルの海洋の初期値として使われる(石崎ほか 2009)。

3.4 各解析で用いられる観測データ

表 3.4.1 に各解析で実際に同化されている観測と観測要素を示す(2018 年 10 月現在)。地上リモートセンシングや衛星観測はその多くがモデルの物理量ではなく、観測量がその観測要素で直接同化されている。なお、各観測の詳細については第 2 章を参照されたい。

⁴ 実況監視を目的に、観測データに寄せた解析を行っており、数値予報モデルの初期値としては最適なものとはなっていない。

表 3.4.1 気象庁のデータ同化システムで利用される観測要素 (2018 年 10 月現在)

		全球解析	メソ解析	局地解析	毎時大気解析
直接観測	地上観測	気圧 (地上解析のみで利用: 気温、風、湿度)		気圧、気温、風、湿度	
	地上自動観測			気温、風	
	海上観測	気圧 (地上解析のみで利用: 気温、風、湿度)		気圧	
	航空機観測	気温、風			
	高層観測	気圧、気温、風、湿度			
地上 リモート センシング	ウインドプロファイラ	風			
	ドップラーレーダー		ドップラー速度		
			反射強度(*1)		
	解析雨量		降水量		
	地上GNSS(*2)	遅延量	可降水量		
疑似観測	台風ボーガス	気圧、風			
	大気追跡風	風			
静止衛星	晴天放射輝度温度	放射輝度			
低軌道 衛星	極域大気追跡風	風			
	マイクロ波サウンダ	放射輝度			
	赤外サウンダ	放射輝度			
	マイクロ波イメージャ	放射輝度	放射輝度、降水量	放射輝度	
				土壌水分量	
	マイクロ波散乱計	風			
				土壌水分量	
	GNSS掩蔽観測	屈折角	屈折率		
衛星搭載レーダー		反射強度(*1)			
合成衛星画像	LEO GEO(*3)大気追跡風	風			

(*1) 湿度を推定して同化 (*2) GNSSは全球測位衛星システム (*3) LEOGEOは低軌道衛星(LEO)と静止気象衛星(GEO)の合成プロダクト

3.5 データ同化の将来

数値予報におけるデータ同化は、観測データの持つ情報を数値予報モデルの初期値に適切に反映させる重要な過程である。初期値の精度向上を通して数値予報の精度を向上させるために、データ同化技術の高度化に努めていく必要がある。

スーパーコンピュータの性能が飛躍的に向上したことを受けて、数値予報モデルの解像度も高くなっている。精度の高い詳細な初期値を得るためには、解析時点での大気の状態や第一推定値としても使う予測値の精度を一層考慮して行くことが求められる。このためにも、現業数値予報システムへハイブリッドデータ同化を導入していく必要がある。

また、リモートセンシング技術の向上に伴い、利用出来る観測データの量も近年飛躍的に増え、「観測ビッグデータ」の時代を迎えている。観測データからより多くの情報を引き出すためのデータ同化の技術開発に取り組む必要がある。

上記の開発を通して、初期値で顕著現象をしっかり捉え、的確に予測できるように数値予報の精度向上に努める必要がある。実況からナウキャスト、数値予報へとシームレスにつなげ、防災気象情報の高度化に努めたい。

参考文献

幾田泰醇, 2011: メソ解析におけるレーダー反射強度データの同化. 平成 23 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 9-12.
 幾田泰醇, 2014: asuca 変分法データ同化システム. 数

値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 91-97.
 幾田泰醇, 2015: 局地解析の更新と改良. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 2-8.
 幾田泰醇, 2017: 局地数値予報システムにおける新規観測データの利用開始及び同化手法の高度化. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 82-85.
 石川宜広, 2010: 地上 GPS データのメソ解析での利用. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 54-60.
 石川宜広, 小泉耕, 2002: メソ 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 48 号, 気象庁予報部, 37-59.
 石崎士郎, 曾我太三, 碓氷典久, 藤井陽介, 辻野博之, 石川一郎, 吉岡典哉, 倉賀野連, 蒲地政文, 2009: MOVE/MRI.COM の概要と現業システムの構築. 測候時報, 76, 特別号, S1-S15.
 永戸久喜, 藤田匡, 原旅人, 2012: 局地モデルの本運用. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72-86.
 太田洋一郎, 堀田大介, 2016: 週間アンサンブル予報システムにおける LETKF の開発. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 66-76.
 計盛正博, 2011: メソ解析における衛星観測輝度温度データの同化. 平成 23 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 3-8.
 門脇隆志, 2005: 全球 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 100-105.
 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計、衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, 73, 特別号, S1-S18.
 竹内義明, 2002: 全球 3 次元変分法. 数値予報課報告・

- 別冊第 48 号, 気象庁予報部, 17–36.
- 露木義, 1997: 変分法によるデータ同化. 数値予報課報告・別冊第 43 号, 気象庁予報部, 102–165.
- 露木義, 2002: 変分法によるデータ同化の基礎. 数値予報課報告・別冊第 48 号, 気象庁予報部, 1–16.
- 中村貴, 2009: 全球積雪深解析. 数値予報課報告・別冊第 55 号, 気象庁予報部, 11–14.
- 西嶋信, 室井ちあし, 2006: データ同化システムの概要. 平成 18 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 11–13.
- 原旅人, 工藤淳, 2017: 毎時大気解析の変更. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 61–65.
- 藤田匡, 2007: 毎時大気解析の高度化. 平成 19 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 98–101.
- 藤田匡, 2008: 毎時大気解析の改良. 平成 20 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 58–61.
- 藤田匡, 2010: 流れに依存する背景誤差. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 73–83.
- 本田有機, 澤田謙, 2008: 非静力学メソ 4 次元変分法. 平成 20 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 48–52.
- 本田有機, 澤田謙, 2009: 非静力学メソ 4 次元変分法の現業化. 平成 21 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 65–71.
- 三好建正, 2006: アンサンブル・カルマンフィルタ～データ同化との融合～. 数値予報課報告・別冊第 52 号, 気象庁予報部, 80–99.
- 山口春季, 2017: 全球アンサンブル予報システムの導入. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 35–41.
- 横田祥, 2017: 4DEnVar (4次元アンサンブル変分法). 天気, **64**, 43–46.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient Data Assimilation for Spatiotemporal Chaos: a Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Physica D*, **230**, 112–126.