

第3章 データ同化

3.1 データ同化概要¹

「データ同化」とは、観測値と第一推定値を用いて、整合のとれた、ある時刻の大気状態を表す物理量の分布（これを「解析値」という）を求めることである。求まった解析値は数値予報モデル（第4章参照）の初期値として使用される。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一般的にはまばらであり、観測データの分布も不均一であるため、数値予報モデルに適した初期値がそのまま得られるわけではない。これらのデータを用いて、数値予報モデルに利用可能な、空間的・時間的により均一な形式の初期値が、ある一定の計算手法を用いて作成される。図3.1.1にデータ同化の模式図を示す。人の主観が入らないという意味で、「客観解析」と呼ぶこともある。これに対して、観測値から人の手で天気図を書くことを「主観解析」と呼ぶ。

観測データの数や種類には限りがある。最近のスーパーコンピュータの性能向上とともに数値予報モデルが高分解能化し、貴重な観測データから有効な情報を引き出すという過程はより重要性を増している。前述の通り観測値だけでは、十分精度の高い解析ができない。このため、前の初期時刻の予報結果を第一推定値として用い、これを修正するということが行われる。このデータ同化の際に、予報値だけでなく観測値にも誤差があると考えられるため、観測値を単純に解析値と置き換えるのではなく、観測値と第一推定値との間に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。観測誤差が背景誤差より小さく設定されれば、解析値は観測データ側に寄り、逆に観測誤差が大きく設定されれば、解析値は第一推定値側に寄ることになる。図3.1.1の模式図をより具体的に示したのが図3.1.2である。

データ同化手法として、以前は簡便な手法が用いられていた。しかし近年ではデータ同化の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るようになったため、より精度の良い解析値が得られる高度な手法が用いられるようになってきた。観測で得られる物理量と数値予報モデルが必要とする風、気温、

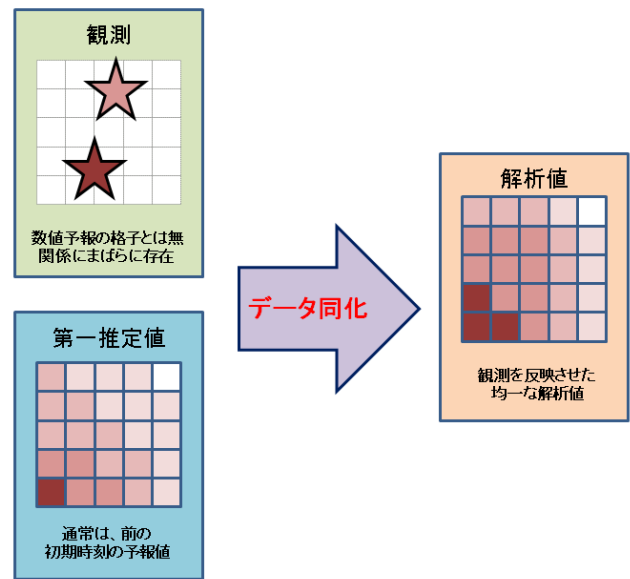


図 3.1.1 データ同化の模式図

水蒸気量といった物理量とは、特にリモートセンシング技術を応用した観測では必ずしも対応しておらず、従来は数値予報モデルが必要とする物理量にいったん変換することにより同化を行ってきた。しかしながら高度な手法を採用することで観測された物理量を直接同化することが可能となり、これにより多くの種類の観測が利用できるようになってきた。

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（第1章参照）。解析値は観測値そのものではなく、第一推定値をもとに様々な過程を通じて観測値をなるべく適切に反映させたものであり、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、これが常に真の値と受け取るのではなく、観測データの持つ誤差や第一推定値の特性などに十分留意する必要がある。

3.2 データ同化手法

データ同化は、数少ない観測データからできるだけ多くの情報を取り出して適切に解析値に反映させようという過程である。可能な限り観測データの数は多いことが望ましいが、一方で現象の時間・空間スケールと予測可能性（第1.4節）を考慮すれば、空間分解能の高い解析・予測ほど迅速に処理する必要がある。したがって、利用目的や求められる迅速

¹ 第3章 室井 ちあし、佐藤 芳昭

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。

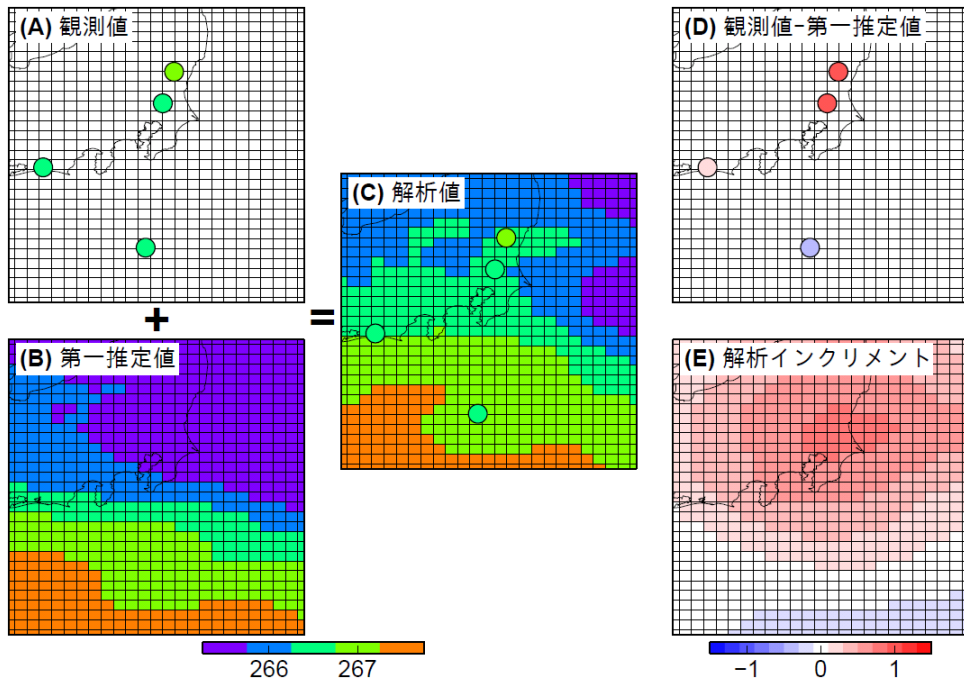


図 3.1.2 データ同化の詳細な説明図。A:観測値 (4点の○)、B:第一推定値 (格子)、C:第一推定値 Bを、観測値 Aを踏まえて修正して得られた解析値 (○は観測値)、D:観測値と第一推定値の差(A-B)、E:第一推定値の修正量(解析インクリメント) (C-B)。

性に応じて、いくつかのデータ同化手法が用いられる。

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

3.2.1 4次元変分法

「4次元変分法」は、数値予報モデルで用いられている物理法則を活用して、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; 露木 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。3次元空間の様々な地点、またいろいろな時刻において観測されるデータを活用することにより、大気の状態を空間3次元+時間の4次元的にとらえることによって、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次元変分法の考え方とおおまかな処理の流れをそれぞれ図3.2.1と図3.2.2に示す。4次元変分法を用いたデータ同化では、数値予報モデルを実行して少しずつ解析値を修正させることにより、第一推定値と観測値との間でもっともバランスのとれた最適な解析値を探すという求め方を行う。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、現在の解析値が第一推定値や観測値からどのくらい離れているかを、定量的に示す数値で、小さいほどより適しているとみなす。最初に解析値のた

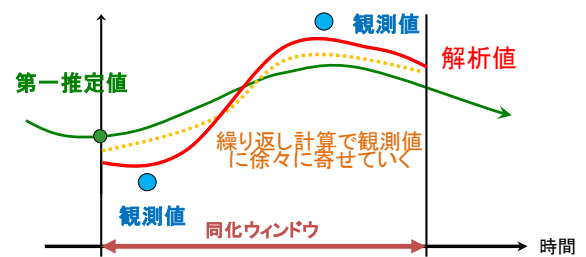


図 3.2.1 4次元変分法の考え方

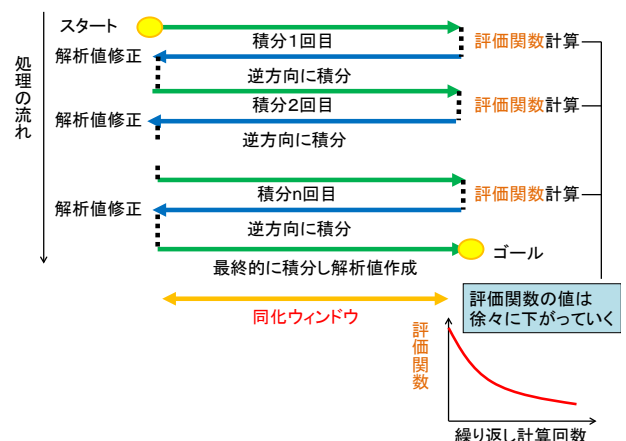


図 3.2.2 4次元変分法の処理の流れ

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」という。次に、数値予報モデルを逆方向に実行して、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で、再び数値予報モデルを実行、という繰り返し計算になる。これ以上繰り返し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、あるいは一定以上の回数繰り返し計算が行われたところで終了となり、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。

3.2.2 3次元変分法

4次元変分法では、空間の3次元に時間軸の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と言う欠点がある。

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。

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解析手法である。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。その際に誤差が増大する懸念があるため、大量の衛星観測データが得られる今日では大きな制約である。

現業の大気データの同化ではほとんど用いられなくなったが、力学的なバランスを重視しない地上解析や積雪解析、海面水温解析などにおいては使用されている。

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について述べる。表3.3.1に気象庁のデータ同化についてまとめる。なお観測データ打ち切り時間とは、解析時刻から実際にデータ同化処理を開始するまでの時間である。一般に観測データは多ければ多いほど解析値の精度は良いことから、なるべく打ち切り時間を長く取ることが望ましい。しかし、迅速に処理をしてプロダクトを提供する必要がある場合は、打ち切り時間が短く設定されている。

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、データ打ち切り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。

表 3.3.1 気象庁の主なデータ同化（2012年10月末現在）

	全球解析	メソ解析	局地解析
データ同化手法	4次元変分法	4次元変分法	3次元変分法
解像度	TL959（約20km） 60層	5km 50層	5km 50層
インナーモデルの解像度	TL319（約55km） 60層	15km 50層	—
解析時刻	00, 06, 12, 18 UTC	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC
同化ウィンドウ	各解析時刻の3時間前から3時間後まで	各解析時刻の3時間前から解析時刻まで	—
第一推定値	解析時刻の6時間前を初期値とする全球モデル予報値	解析時刻の3時間前を初期値とするメソモデル予報値	解析時刻の3時間前を初期値とするメソモデル予報値
観測データ打ち切り時間	速報解析：2時間20分 サイクル解析： 11時間50分(00,12UTC) 7時間50分(06,18UTC)	50分	30分

速報解析による解析値は全球モデル、週間アンサンブル予報、台風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られない。

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り、全球解析と同様、大気解析手法には4次元変分法を用いている（本田・澤田 2008; 本田・澤田 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打ち切り時間は短く設定されているが、レーダー反射強度やGNSS可降水量データ（第2章参照）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）。また最近では、衛星データの利用も輝度温度データを直接同化するなど徐々に

に充実している（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（本研修テキスト第2部第2.1節参照）。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データ打ち切り時間は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。

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; 藤田 2008）。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

表 3.4.1 気象庁のデータ同化で同化される観測要素（2012年4月現在）

	種 別	従来型観測 (モデル変数)				その他の観測				
		気 圧	気 温	風	湿 度	可 降 水 量	降 水 量	ド ッ プ ラ ー 速 度	放 射 輝 度	屈 折 率
直接観測	地上観測	GM	GML	GML						
	地上自動観測		LQ	LQ						
	海上観測	GM	GM	GM						
	航空機観測		GMLQ	GMLQ						
	高層観測	GM	GM	GM	GM					
	高層風観測	GM		GM						
地上 リモート センシング	ウインドプロファイラ			GMLQ						
	ドップラー速度							MLQ		
	解析雨量						M			
	3次元レーダー反射強度				M					
	地上GNSS					ML				
疑似観測	台風ポーガス	GM		GM						
静止衛星	大気追跡風			GMQ						
	晴天放射輝度温度								GM	
低軌道 衛星	極域大気追跡風			G						
	マイクロ波サウンダ								GM	
	赤外サウンダ									
	マイクロ波イメージャ						M		GM	
	マイクロ波散乱計			G						
	GNSS掩蔽観測									G

G:全球解析; M:メソ解析; L:局地解析; Q:毎時大気解析; 青字:地上解析で利用

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、観測データ打ち切り時間は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

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DMSP衛星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。

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(2012年4月現在)。「従来型観測」はモデル物理量の観測を、「その他の観測」はそうでないものを示している。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。

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処理であり、この技術が極めて重要である。またこれからもリモートセンシング技術を応用した地球観測が幅広く行われることから、データ同化技術の研究開発は今後一層盛んになると予想される。

またこれまで主に、気象や海洋分野で盛んに取り組みられてきたデータ同化は、数値シミュレーション技術の発展により他の様々な分野でも注目されつつある。分野を超えた技術協力・連携も今後進むであろう。

データ同化の大きな課題は、背景誤差をどのように設定するかということである。現在は過去のある期間の予報モデルの誤差を蓄積・統計処理し、それを背景誤差として利用している。本来は一様でなく

流れに依存し、場所や時間によって異なると考えるのが自然である。これを合理的に求めるために、「アンサンブルカルマンフィルター」(三好・本田 2007)という手法が注目されているほか、従来の4次元変分法と新しい手法との両方の長所を組み合わせ、日々の大気状態を反映した背景誤差を用いることで大気力学バランスを考慮する「ハイブリッド同化」も開発が行われており、今後もデータ同化技術は大きく発展すると考えられる。

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.
- 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.
- 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: 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**, S1-S18.
- 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, 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.
- 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.
- 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, 本田有機, 2007: 気象学におけるデータ同化. 天気, **34**, 15-19.