

VCA を用いた気象場の初期値決定に関する研究

Determination technique of the initial data for flow fields by using VCA

- 吉村 慶一, 大阪大学大学院, 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1, E-mail:yoshimura@moon.env.eng.osaka-u.ac.jp
近藤 明, 大阪大学大学院, 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1, E-mail:kondo@env.eng.osaka-u.ac.jp
加賀 昭和, 大阪大学大学院, 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1, E-mail:kaga@env.eng.osaka-u.ac.jp
山口 克人, 大阪大学大学院, 〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1, E-mail:yamaguti@ga.eng.osaka-u.ac.jp

Keiichi YOSHIMURA, Dept. of Environmental Eng., Osaka Univ., Yamada-Oka 2-1, Suita, 565-0871, JAPAN

Akira KONDO, Dept. of Environmental Eng., Osaka Univ., Yamada-Oka 2-1, Suita, 565-0871, JAPAN

Akikazu KAGA, Dept. of Environmental Eng., Osaka Univ., Yamadaoka 2-1, Suita, 565-0871, JAPAN

Katsuhito YAMAGUCHI, Dept. of Global Archit., Osaka Univ., Yamadaoka 2-1, Suita, 565-0871, JAPAN

In order to establish the concentration forecast system of air pollution substances, it is required to predict flow fields with sufficient accuracy. For that purpose, it is important to set up the initial value of flow fields pertinently. We will use VCA technique of taking the simulation in observation values, in order to set up the suitable initial value of flow fields. We applied VCA technique to 2-dimensional land-and-sea breeze model and verified the effect of this technique. The calculation values using this technique were close to observation values. Therefore, it will be expected that this technique will be useful for 3-dimensional model.

1. 序論

大気汚染物質の濃度予報システムを確立するためには、気象場を精度良く予測することが必要である。そのためには、計算予測開始時の気象の適切な初期値設定を行うことが重要である。著者らは、計算時に観測値を取り込むデータ同化法の1つであるVCA(Variational Continuous Assimilation)法¹を用いて、気象場の初期値を設定することとした。この手法により、計算値と観測値の双方の利点を取り入れ、気象場の精度改善を目指す。

本研究では、3次元気象場予測モデルに対してVCA法を適用するにあたり、あらかじめVCA法適用に際して問題となる点を把握するために、2次元海陸風モデルに対してVCA法を適用を試みた。

2. VCA 法

2.1 データ同化法

2.1.1 データ同化法の目的

モデルの精度改善を図るためには、モデルの改良と観測データの利用という2通りのアプローチが考えられる。モデルを改良すれば、それだけ精度が良くなることが期待できる。しかし、モデルは何らかの仮定の上に成立しているため、モデルの改良による精度の向上には限界があるといえる。また、モデルにより現象を正確に表現することができないのは、モデルが仮定の上に成り立っていることだけが原因ではない。メッシュの分解能に限界があること、初期条件及び境界条件の適切な設定が困難であること、パラメータの適切な設定が困難であること、差分近似により誤差が生じること、数値誤差が生じることなど、様々な原因がある。このため、モデルを改良することのみによって精度を改善させることは極めて困難である。

そこで、本研究では、シミュレーションに観測値を用いることにより、モデルの精度を向上させる手法を採用する。シミュレーションに観測データを用いる手法を一般的にデータ同化法と呼ぶ。

近年、観測技術が向上し、その精度が非常に向上しており、また、観測データそのものも増加している。また、通信インフラの向上に伴い、大量のデータを短時間で送信する環境が整いつつあること、情報公開の流れにより、入手可能な観測データも増加していることなどから、データ同化法を採用するための環境がますます充実すると考えられる。

観測データにより、現実のデータが得られるが、観測データは時間的・空間的に欠落が多く、そのままでは予測に用いることができないデータである。また、シミュレーションでは、時間的・空間的に欠落のないデータを得ることはできるが、実際の現象を表現することは困難である。これらの双方の利点を活かし、時間的・空間的に欠落のない、かつ現実に近いデータをシミュレーションによって得ることがデータ同化法の目的である。

2.1.2 データ同化法の種類

データ同化法としては、様々な種類の方法が提案されている。代表的なものとして、以下に3種類の方法を挙げる。

● ナッジング

ナッジングはモデルの予報値と観測値との差をニュートン緩和法で補正する方法で、最も適用が容易なデータ同化法である。しかし、ナッジングを用いる際には、モデルの整合性を大きく乱さない程度に観測値の投入を制御する、ナッジング係数を設定する必要がある。ナッジング係数が大きすぎると、観測地付近での観測値とモデルの一致性は向上するが、現実的な現象を表現することができない。逆にナッジング係数が小さすぎると、観測値を取り入れた効果は少なくなり、計算値を観測値に近づけることができなくなる。また、空間領域を制御するための空間的重み係数の設定も困難である。つまり、適用は容易であるが、係数の設定に対する自由度が大きいため、その設定値により計算結果に差異が生じる方法である。

● Kalman Filter

Kalman Filterはモデルの計算値と観測値の違いの原因を蓄積しておき、それを同化する直前に利用して、データのない場をも修正する方法である。Kalman Filterではモデルを前方に積分するに従って計算値と観測値の差の原因を示す情報が蓄積されるので、同化を行う度に修正幅が小さくなることが期待される。Kalman Filterは線形モデルにしか適用できないので、これを非線形モデルに適用できるように拡張したものがExtended Kalman Filter(EKF)である。しかし、モデルに対して完全にEKFを実行するためには、誤差の共分散行列を計算する必要があり、コンピュータコストの面から適用が困難である。

• 変分法

変分法とは、汎関数に停留値を与えるような関数の形及びそのときの汎関数の値を決める問題である。データ同化法における変分法には、大きく分けて3次元変分法と4次元変分法の2種類がある。空間的及び時間的な観測データ分布を考慮するものを4次元変分法、空間的分布は考慮するが時間的分布は考慮しないものを3次元変分法という。データ同化法における変分法では、汎関数には観測値と計算値の差の平方和を与え、観測値と計算値の差の平方和を最小とする方法が一般的であるが、関数の形は目的に応じて異なる。

4次元変分法は、初期条件を修正する方法、境界条件を修正する方法、パラメータを修正する方法、モデルそのものを修正する方法の4通りに分類できる。このうち、adjoint法は最も一般的な方法で、初期条件を修正する方法である。本研究で用いるVCA(Variational Continuous Assimilation)法はadjoint法を改良したもので、モデルそのものを修正する手法であり、4次元変分法に含まれる。

2.2 VCA法の目的

ナッジングは適用は容易であるが、係数の設定に自由度があるためその設定方法が難しい。また、Kalman Filterを適用するためには、膨大なコンピュータ資源が必要になる。このことから、本研究では変分法を用いることとし、観測値の時間的分布を含めた4次元変分法を用いることとした。

4次元変分法には、初期条件を修正する方法、境界条件を修正する方法、パラメータを修正する方法、モデルそのものを修正する方法の4通りがある。本研究で行う流れ場シミュレーションでは、初期条件と境界条件に気象庁が配信するGPV(Grid Point Value)データを用いているため、初期条件及び境界条件はある程度妥当な値が得られている。また、モデルの誤差はパラメータのみによるものでもない。モデルが仮定の上で成立していること、メッシュの分解能に限界があること、差分近似により誤差が生じること、数値誤差が生じることなど、様々な原因がある。そこで、本研究ではモデルそのものを修正する4次元変分法であるVCA法を適用することとした。

2.3 VCA法の概要

VCA法では、計算タイムステップごとにモデルに対する補正項を付け加える。観測値と計算値の差の平方和を最小とするような補正項を求め、モデルの補正を行う方法である。補正項により、モデルが包含するあらゆる誤差を補正することができる。

4次元変分法では、関数の最適化を行うために繰り返し計算を行う必要がある。汎関数の停留値を求めるために、より効率よく停留値を探索するためには、汎関数の勾配を求めることが必要となる。VCA法では、汎関数の勾配は非常に単純な式で導出されているので、汎関数の勾配の導出が容易である。

また、VCA法では、観測データが時間的に周期的である必要がなく、同化時の最終タイムステップに観測データが存在しさえすればよい。このため、観測データを全て利用することが可能であり、多くの観測データをモデルに取り込むことも容易である。

2.4 VCA法の理論式

VCA法は、観測データを用いてモデルそのものを修正する手法で、adjoint法を改良したものである。

p を観測ステップとし、 P 回観測値が存在するとき、観測時間ステップ t_p での観測値ベクトルを $\tilde{\Psi}^p$ 、計算値ベクトルを Ψ^p とする。このとき、次式で表現される関数 I を定義する。ただし、 $()^T$ は転置行列を表す。

$$I = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P (\Psi^p - \tilde{\Psi}^p)^T (\Psi^p - \tilde{\Psi}^p) \quad (1)$$

n を計算ステップとすると、計算時間ステップ t_n における計算値ベクトル Ψ^n は、1つ前の計算時間ステップの

計算値ベクトル Ψ^{n-1} によって表されるので、モデルは(2)式のように表現できる。

$$\Psi^n = A^n \Psi^{n-1} \quad (2)$$

各計算時間ステップにおいて、(2)式に補正項を加え、(3)式のように補正する。 λ^n は時刻によって決定される行列であり、 ϕ は空間によって決定するベクトルである。

$$\Psi^n = A^n \Psi^{n-1} + \lambda^n \phi \quad (3)$$

VCA法では、(1)式で表される I を最小とするような補正係数 ϕ を決定し、モデルの補正を行う。

3. 2次元海陸風モデルへのVCA法の適用

3.1 はじめに

VCA法では、繰り返し計算を行わなければならないため、計算に多くの時間が必要となる。また、モデルが複雑になればなるほど、その分VCA法の適用も複雑になる。VCA法を適用するためには、まずVCA法の適用に際してどのような点に注意するべきであるかを把握するとともに、VCA法を適用することにより、計算領域において正しく補正されているかを確かめる必要がある。これらのことを行うためには、3次元の複雑なモデルを用いるよりも、2次元のより単純なモデルを用いる方が適している。そこで、3次元気象場予測モデルへのVCA法適用の前段階として、2次元海陸風モデルに対してVCA法を適用することとした。

3.2 計算条件

計算領域は、Fig.1に示すように、大阪府近辺を想定した南北方向に垂直な2次元面である。東西方向に約115km、鉛直方向に5kmの領域で、東西方向は20の均等メッシュに、鉛直方向は地表面付近でメッシュが細くなる15層のメッシュに分割した。領域の西側半分は海面、東側半分は陸面とし、シミュレーションを行った。計算対象日は晴れた夏の日を想定し、午前8時から48時間とした。また、拡散係数は水平、鉛直方向とも一定とした。

観測地は陸上の5地点に仮想的に設定し、観測値は1時間ごとに存在するとした。観測データには、1998年8月7日の午前8時から8月9日の午前8時までの48時間分の大阪府の常時観測データを用いた。

λ は単位行列に設定し、(3)式の補正は風速 u 成分のみとした。

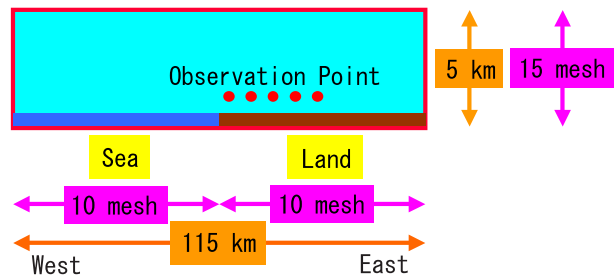


Fig. 1: Calculated area of 2-dimensional model

3.3 計算結果

Fig.2に最も西側の観測点における風速 u 成分の計算開始24時間後から計算終了時刻までの経時変化を示す。Obs.は観測点での観測値、NormalはVCA法を適用しない通常の計算値、VCAはVCA法適用後の計算値をそれぞれ示す。Fig.2より、VCA法を適用することにより、計算値は観測値に近づくことが示された。

Fig.3に u についての補正係数 ϕ_u の空間分布を示す。補正係数 ϕ_u は領域においてどの程度 u について補正がなされたかを示している。Fig.3では、 ϕ_u は領域全体に広がっている。このことから、VCA法では、観測地付近だけでなく、領域全体を補正することができるということが確認できた。

計算領域内における RSM 地上データが存在する位置を Fig.4 に、RSM 上層データが存在する位置を Fig.5 にそれぞれ示す。

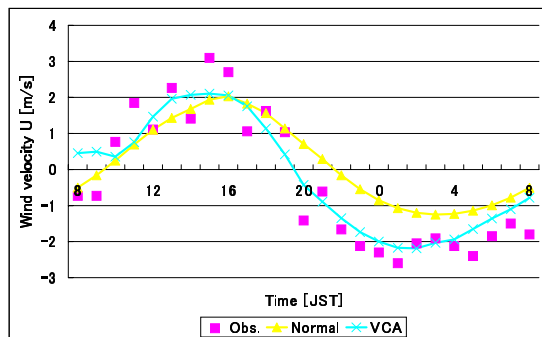


Fig. 2: Diurnal variations of wind component u

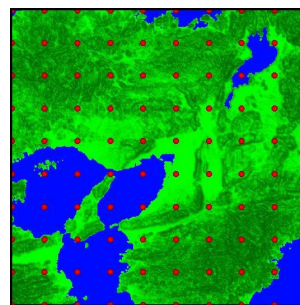


Fig. 4: Points of GPV ground data

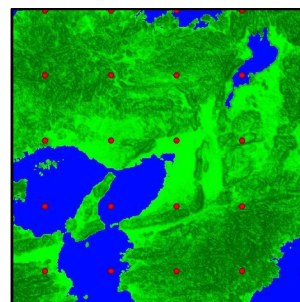


Fig. 5: Points of GPV upper layer data

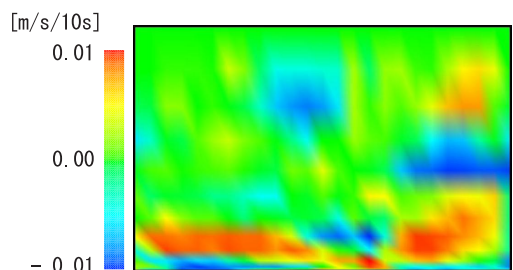


Fig. 3: ϕ_u fields

3.4 まとめ

2次元海陸風モデルに VCA 法を適用し、VCA 法により、計算値を観測値に近づけることができることを確認した。また、VCA 法では、観測地付近だけでなく、領域全体を補正することができるということが示された。

4. 3次元気象場予測モデルへの VCA 法の適用

4.1 はじめに

2次元海陸風モデルにより、VCA 法で計算値を観測値に近づけることが可能であること、及び領域全体の補正を行うことができることを示すことができた。本研究では、3次元気象場予測モデルの精度向上が目的である。2次元海陸風モデルへの適用をふまえて、3次元気象場予測モデルに対して VCA 法の適用を試みた。

4.2 GPV データ

GPV(Grid Point Value) データとは気象庁が領域モデル(RSM)を用いて9時及び21時の気象条件を初期値として算出したものである。GPVはRSM地上データ及びRSM上層データに2分されており、地上データは1時間毎の風ベクトル(u 成分、 v 成分)、気温、相対湿度、1時間降水量、数値予報雲量、気圧で構成されており、上層データは950,925,850,700,500hPa面の各面について3時間毎のジオポテンシャル高度、風ベクトル(u 成分、 v 成分)、気温、相対湿度、鉛直速度で構成されている。ここでGPV地上データの気圧は海面更正気圧(hPa)であるので以下の式を用いて地表面高度での気圧に変更した。

$$h = \frac{R}{G} T_m \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \quad (4)$$

h : 高度差、 p_1 : 下の高度の気圧、 p_2 : 上の高度の気圧、 T_m : 平均温度[K]、 R : 乾燥空気気体定数 ($287.05[m^2 \cdot K^{-1} \cdot s^{-2}]$)、 G : 重力の加速度 ($9.80665[m \cdot s^{-2}]$)、 \ln : 自然対数
ただし、気温減率を100mについて0.5Kとして海面高さの気温を求め平均気温を算出した。

4.3 計算条件

計算領域は Fig.6 に示す東経134度15分~136度30分、北緯33度48分~35度36分で囲まれた東西180km、南北180kmの領域であり、45メッシュ×45メッシュに分割して計算を行っている。鉛直方向は計算領域の上面の高さを5000mとし、地表面付近でメッシュ間隔が細くなる15層の不均衡メッシュを用いた。

初期条件は風速についてはGPVを空間内挿した値を用い、温位については海面高さでの地表面温位を298K、温位勾配を0.005K/mとし、湿度については2000m以下を50%、2000m以上を20%とした。境界条件は風速については3時間毎のGPVを時間内挿した値を用い、温位、比湿については勾配が0となるように設定した。計算日時は1998年8月4日の午前9時から翌日午前9時までの24時間とした。流れ場予測モデルに用いた式は、Kondo²と同様である。

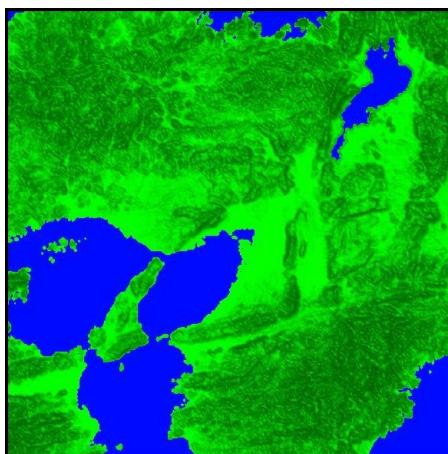


Fig. 6: Calculated area of 3-dimensional model

観測データには常時観測データと GPV データを用いた。GPV データは観測データではないが、観測データに準じるものとした。計算領域内における常時観測局の位置を Fig.7 に示す。

λ は単位行列に設定し、(3) 式の補正は風速 u, v 成分のみとし、常時観測データの風向および風速を風速 u 成分、風速 v 成分に分解した。

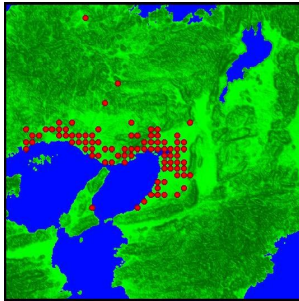


Fig. 7: Observation points

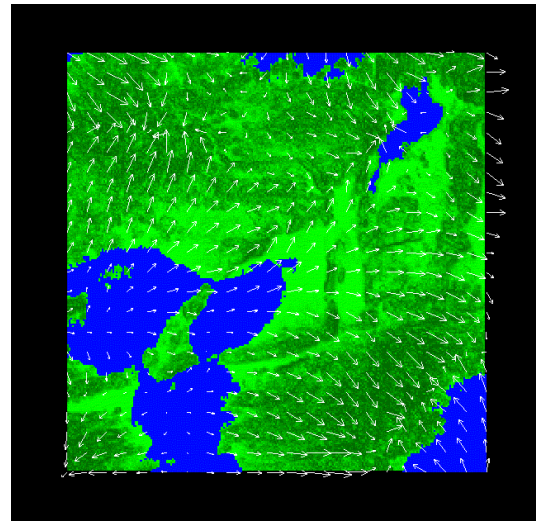


Fig. 10: Flow fields by non-VCA

4.4 計算結果

Fig.8 に観測点における風速 u 成分の経時変化を、Fig.9 に観測点における風速 v 成分の経時変化をそれぞれ示す。Obs. は観測点での観測値、Normal は VCA 法を適用しない通常の計算値、VCA は VCA 法適用後の計算値をそれぞれ示す。3 次元気象場予測モデルにおいても、2 次元海陸風モデルと同様に、計算結果を観測値に近づけることに成功した。

また、Fig.10 に通常計算時の 12 時の風場を、Fig.11 に VCA 法適用時の 12 時の風場をそれぞれ示す。

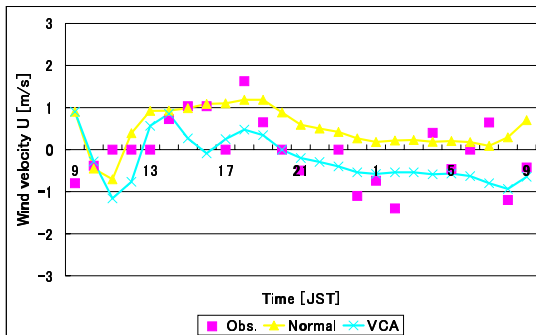


Fig. 8: Diurnal variations of wind component u

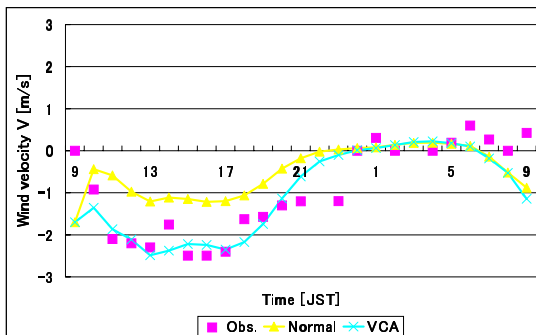


Fig. 9: Diurnal variations of wind component v

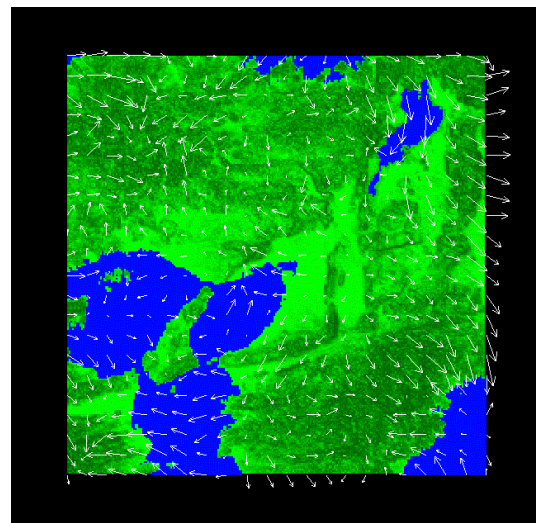


Fig. 11: Flow fields by VCA

4.5 まとめ

3 次元気象場予測モデルに GPV データ及び常時観測データを用いて VCA 法を適用した。VCA 法により、気象場シミュレーションの精度を向上させることに成功した。

5. 結論

VCA 法を用いて、計算時に観測データを取り込むことにより、2 次元海陸風モデルの予測精度を改善することができ、VCA 法では、一部の観測値から、領域全体を補正することができることが確認された。3 次元気象場予測モデルにおいても、VCA 法により、気象場シミュレーションの精度を向上させることに成功した。VCA 法を適用した計算結果を初期値として気象場シミュレーションを行えば、気象場予測精度の向上が期待できる。

参考文献

1. John C. Derber, "A Variational Continuous Assimilation Technique", Monthly Weather Review 117(1989), pp.2437-2446
2. A.Kondo,K.Yamaguchi and H.K.AHN, "Simulation of Climatic Effects by Construction of Reclaimed Island in Pusan,Korea", Atmos.Environ. 30(1996), pp.2437-2448