

鉛直1次元同化モデルによる パラメータ評価の試み

STUDY ON PARAMETER ESTIMATION
BY ONE-DIMENSIONAL DATA ASSIMILATION MODEL

坂井伸一¹

Shin'ichi SAKAI

¹ 正会員 工修 (財)電力中央研究所 環境科学部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

A variational data assimilation using the adjoint equations is applied into a one-dimensional oceanic Ekman layer model to estimate some physical parameters of the ocean model. At first, the effects of the computational conditions such as data intervals in time and space, and initial values of control variables to the model results were investigated through the identical twin experiments in which the pseudo observation data generated by the oceanic model were used. Next, the in-situ current data measured in the sea off Fukushima were assimilated into the model. The results showed the vertical eddy viscosity coefficients were in order of $10^{-3}(m^2/s)$ and the surface wind drag coefficient was about 1.0×10^{-3} .

Key Words : data assimilation, adjoint equation, parameter estimation, vertical eddy viscosity coefficient, wind drag coefficient

1. はじめに

1980年代後半から人工衛星により全球規模の海面水温、風速、および海面高度などの観測データが整備されるようになり、近年海洋分野においてもデータ同化の研究が盛んになっている。しかし、研究の対象はほとんどが全球規模の大循環モデルであり、沿岸モデルを対象とした研究例はあまり見られない。その理由として、沿岸部では衛星データの活用が困難なこと、および沿岸部では地形効果が大きく、また様々な時空間スケールの現象が混在するためモデルの構築が難しいといった点が挙げられる。ただし、沿岸部においても船舶やブイ等の海上観測が継続して実施されている海域や、比較的広範囲の集中観測が実施されているケースもあり、データ同化に相応しいデータが無いわけではない。また、近年我が国でも海洋レーダの開発が進み¹⁾、沿岸部においてもリモートセンシングにより広域表層流速の連続観測が流速計と同程度の精度で可能となってきた^{2),3)}。

同化手法に関しては、これまでは海洋モデル自身の計算負荷が大きいこともあり、ナッジングなど簡易な手法を用いた研究が主であった。しかし、緩和項によって計算値を観測値に収斂させるナッジングなどではモデル内部の物理量が保存されず、また観測値やモデルの誤差などを評価できないといった問題点がある。近年、随伴方程式を用いた変分法(アジョイント法)やカルマン・フィルターなど高度な同化手法を用いた研究も行われ始めている⁴⁾。これらの手法は、海洋モデルの力学を満たしながら観測値との誤差を最小にできるといった利点はあるが、膨大な記憶容量と計算負荷を要するため、実用的な海洋モデルに適用された研究はほとんど見られない。また、データ同化においては、予報モデルに重要な初期場の最適解を推定することが研究の主目的とされているが、数値モデルにおける物理パラメータを推定することも可能である⁵⁾。特に工学的に重要な沿岸モデルにおいて、海面の抵抗係数や海底摩擦係数、渦動粘性係数などは重要なパラメータであ

り、いずれも解析結果に大きな影響を及ぼす。しかし、これらのパラメータについては、現地海域における実態調査が困難なため現状でも不明な点が多く、データ同化によるパラメータ評価は有用と考えられる。

本研究は、アジョイント法による沿岸物理パラメータの評価を行うに当たり、まず簡単な鉛直1次元非定常エクマン流モデルを例にとり、同化モデルの基本特性についての検討を行い、その結果を元に実海域データの同化を実施した結果について述べる。まず第2章において、本同化モデルの基礎式および解析手順について述べる。第3章では、双対実験 (Identical Twin Experiment) により、ガウスの決定定数 (スケーリング係数)、制御変数の初期値、観測データの時空間的な同化間隔などの諸条件が解の収束性に及ぼす影響について検討した結果について述べる。同化計算におけるこれら諸条件の設定方法および解析結果への影響については未だ不明な点が多く、実データの同化を行う前にモデルの基本特性を把握しておくことは重要と考えられる。なお、双対実験とはある条件のもとで計算した結果 (コントロール・ラン) を仮想観測データとみなして同化に用いる数値実験のことである。第4章では、福島沖において春季に観測した3層の流速計データ、および短波海洋 (HF) レーダによる表層の流速データを用いた実データの同化実験を実施し、物理パラメータを推定した結果について述べる。最後に第5章において、本研究の成果をとりまとめる。なお、エクマン流モデルでは移流効果を考慮できないが、対象海域が直線上の海岸と大陸棚からなる外洋性の強い海域で地形効果が小さいこと、また観測時期が春季であり鉛直密度効果が小さいことなどから、ある程度妥当な結果が得られるものと考えた。

2. 鉛直1次元同化モデル

(1) 基礎方程式

本研究では、力学モデルとして以下の鉛直1次元非定常エクマン流モデルと境界条件を用いた。

$$\frac{\partial u'}{\partial t'} - v' = \frac{\partial}{\partial z'} \left(A'_Z \frac{\partial u'}{\partial z'} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v'}{\partial t'} + u' = \frac{\partial}{\partial z'} \left(A'_Z \frac{\partial v'}{\partial z'} \right) \quad (2)$$

$$A'_Z \frac{\partial u'}{\partial z'} = C'_D u'_a \sqrt{(u'^2_a + v'^2_a)} \quad (z' = 0) \quad (3)$$

$$A'_Z \frac{\partial v'}{\partial z'} = C'_D v'_a \sqrt{(u'^2_a + v'^2_a)} \quad (z' = 0) \quad (4)$$

$$A'_Z \frac{\partial u'}{\partial z'} = \gamma'_b u' \sqrt{(u'^2 + v'^2)} \quad (z' = -\frac{H}{D}) \quad (5)$$

$$A'_Z \frac{\partial v'}{\partial z'} = \gamma'_b v' \sqrt{(u'^2 + v'^2)} \quad (z' = -\frac{H}{D}) \quad (6)$$

上記基礎式は、後述の最適化において収束効率を上げるため、Yu and O'Brien⁵⁾ にならい、以下の代表量によって無次元化してある。

$$\begin{aligned} t' &= \frac{t}{T_f}, & u' &= \frac{u}{U}, & v' &= \frac{v}{U}, \\ z' &= \frac{z}{D}, & A'_Z &= \frac{A_Z}{\rho_w}, & C'_D &= \frac{C_D}{\rho_w}, \\ \gamma'_b &= \frac{\gamma_b}{s_b}, & u'_a &= \frac{u_a}{U_a}, & v'_a &= \frac{v_a}{U_a} \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} T_f &= \frac{1}{f}, & U &= \left(\frac{\rho_a}{\rho_w} s_c \right) \frac{U_a^2}{\sqrt{s_a f}}, \\ D &= \left(\frac{s_a}{f} \right)^{1/2}, & s_b &= \frac{s_a}{UD}, \end{aligned}$$

であり、 u 、 v 、は水平流速成分、 f はコリオリのパラメータ、 A_Z は鉛直渦動粘性係数、 ρ_w は海水の密度、 ρ_a は大気密度、 C_D は海面抵抗係数、 u_a 、 v_a は海上風の水平成分、 γ_b は海底摩擦係数、 U_a 、 s_a 、 s_c は適当な基準値である。以降、無次元化記号'は省略する。

次に、 u 、 v 、 A_Z 、 C_D 、 γ_b 、および流速の初期値 u_0 、 v_0 を制御変数とする以下の評価関数を考える。

$$\begin{aligned} \mathcal{J}(u, v, u_0, v_0, A_Z, C_D, \gamma_b) = & \\ & \frac{1}{2} K_u \int_t \int_z (u - \hat{u})^2 d\zeta d\tau + \frac{1}{2} K_v \int_t \int_z (v - \hat{v})^2 d\zeta d\tau \\ & + \frac{1}{2} K_{u0} T \int_z (u_0 - \tilde{u}_0)^2 d\zeta + \frac{1}{2} K_{v0} T \int_z (v_0 - \tilde{v}_0)^2 d\zeta \\ & + \frac{1}{2} K_a T \int_z (A_Z - \tilde{A}_Z)^2 d\zeta + \frac{1}{2} K_c TH (C_D - \tilde{C}_D)^2 \\ & + \frac{1}{2} K_b TH (\gamma_b - \tilde{\gamma}_b)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\hat{u}$ 、 $\hat{v}$ は観測値、 $\tilde{u}_0$ 、 $\tilde{v}_0$ 、 $\tilde{A}_Z$ 、 $\tilde{C}_D$ 、 $\tilde{\gamma}_b$ はモデル・パラメータの推定値、 K_u 、 K_v 、 K_{u0} 、 K_{v0} 、 K_a 、 K_c 、 K_b はガウスの決定定数⁶⁾、 T と H は全積分時間および積分距離の無次元パラメータである。

このとき、(7) 式に対して、(1) 式と (2) 式を拘束条件とするラグランジュ関数は、

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = \mathcal{J} & \\ & + \int_t \int_z \left\{ \lambda_u, \frac{\partial u}{\partial t} - v - \frac{\partial}{\partial z} \left(A_Z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} d\zeta d\tau \\ & + \int_t \int_z \left\{ \lambda_v, \frac{\partial v}{\partial t} + u - \frac{\partial}{\partial z} \left(A_Z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} d\zeta d\tau \end{aligned} \quad (8)$$

となる。ただし、 λ_u 、 λ_v はラグランジュの未定定数で、 $\{, \}$ は内積を表す。このときラグランジュ関数が最小値を持つための必要条件 $\partial \mathcal{L} / \partial u = \partial \mathcal{L} / \partial v = 0$ より、以下の随伴方程式が得られる⁷⁾。

$$\frac{\partial \lambda_u}{\partial t} - \lambda_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_Z \frac{\partial \lambda_u}{\partial z} \right) = K_u (u - \hat{u}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \lambda_v}{\partial t} + \lambda_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_Z \frac{\partial \lambda_v}{\partial z} \right) = K_v (v - \hat{v}) \quad (10)$$

随伴方程式を導出する際、部分積分時に以下の境界条件を用いた⁴⁾。

$$\frac{\partial \lambda_u}{\partial z} = \lambda_u = 0 \quad \text{at} \quad z = 0, -\frac{H}{D} \quad (11)$$

$$\lambda_u = 0 \quad \text{at} \quad t = 0, T \quad (12)$$

同じく、ラグランジュ関数が最小値を持つための必要条件 $\partial \mathcal{L} / \partial u_0 = 0$ などから、各制御変数に対する評価関数の勾配を求めると以下ようになる。

$$\frac{\partial \mathcal{J}}{\partial u_0} = \int_z \left\{ \frac{\partial \lambda_u}{\partial t} - \lambda_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial \lambda_u}{\partial z} \right) \right\} \Big|_{t=0} d\zeta \quad (13)$$

$$\frac{\partial \mathcal{J}}{\partial v_0} = \int_z \left\{ \frac{\partial \lambda_v}{\partial t} + \lambda_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial \lambda_v}{\partial z} \right) \right\} \Big|_{t=0} d\zeta \quad (14)$$

$$\frac{\partial \mathcal{J}}{\partial A_z} = - \int_t \int_z \left(\frac{\partial \lambda_u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \lambda_v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial z} \right) d\zeta d\tau \quad (15)$$

$$\frac{\partial \mathcal{J}}{\partial C_D} = \int_t \left(\lambda_u u_a \sqrt{(u_a^2 + v_a^2)} + \lambda_v v_a \sqrt{(u_a^2 + v_a^2)} \right) \Big|_{z=0} d\tau \quad (16)$$

$$\frac{\partial \mathcal{J}}{\partial \gamma_b} = - \int_t \left(\lambda_u u \sqrt{(u^2 + v^2)} + \lambda_v v \sqrt{(u^2 + v^2)} \right) \Big|_{z=-\frac{H}{B}} d\tau \quad (17)$$

(2) 解析手順

前節で求めた随伴方程式を用いることによって、通常の変分法ではすべての制御変数を少しずつ変化させて求めなくてはならない評価関数の勾配が、時間順・逆方向に1回計算するだけで効率的に求められる。アジョイント法によるパラメータ更新の手順をまとめると、以下ようになる。

- 1) ある初期値に対して(1)式、(2)式を時間の順方向に数値積分する。
- 2) 随伴方程式(9)、(10)を時間に関して逆方向に数値積分する。
- 3) (13)式、(14)式、(15)式、(16)式、および(17)式に手順1)と2)で求めた u 、 v 、 λ_u 、 λ_v を代入して、各制御変数に対する評価関数の勾配を計算する。
- 4) 上記3)で求めた制御変数に対する評価関数の勾配を降下法に適用して、各パラメータを更新する。
- 5) 各反復計算毎に初回の勾配ベクトルや評価関数の値と比較して収束判定を行い、収束するまで計算を繰り返す。

なお、(9)式、(10)式を直接離散化すると解の精度が悪くなるため、離散化した力学モデルから随伴方程式の離散化形を算出する必要がある⁴⁾。本研究では、降下法として Shanno and Phua⁸⁾ による共役勾配法を用いた。

3. 双対実験結果

以下の代表値を用いて双対実験を行った。

$$\begin{aligned} T &= 30(\text{days}), & H &= 25(\text{m}), \\ \Delta t &= 150(\text{sec}), & \Delta z &= 1(\text{m}), \\ \rho_w &= 1.026 \times 10^3(\text{kg/m}^3), & \rho_a &= 1.2(\text{kg/m}^3), \\ f &= 8.84 \times 10^{-5}(\text{s}^{-1}), & U_a &= 5.0(\text{m/s}), \\ s_a &= 4.0 \times 10^{-3}(\text{m}^2/\text{s}), & s_c &= 1.2 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

なお、外力である風は周期1日、振幅南北5.0m/s 東西2.0m/sのサイクリックな場を設定した。また、ガウスの決定定数は、評価関数の各項に対する重み係数であり、観測誤差分散に基づき設定することが望ましい。しかし、観測データに対して誤差分散を精度良く求めることは困難であり、実際の計算では評価関数の各項のオーダー評価などに基づいて一定値を与えることが多い。Panchang and O'Brien⁹⁾は、反復計算過程における収束率を基準にガウスの決定定数を変化させる手法を採用している。しかし、この方法では制御変数が多くなってくると計算が煩雑になるため、本研究では反復計算を通じて一定値を与える方法を採用し、その値を任意の範囲で変化させて計算を実施し、最適な設定値を見積もった。

(1) 制御変数の初期値の影響

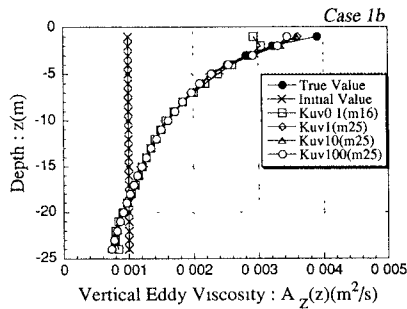
まず、鉛直渦動粘性係数のみを制御変数とした同化モデルに対して、ガウスの決定定数、および制御変数の初期値が解の収束性に及ぼす影響について検討した。表1に計算ケースを示す。ガウスの決定定数 K_u 、 K_v (以降 K_{uv})は同値として任意の範囲で変化させた。

表1 計算ケース (初期値の影響)

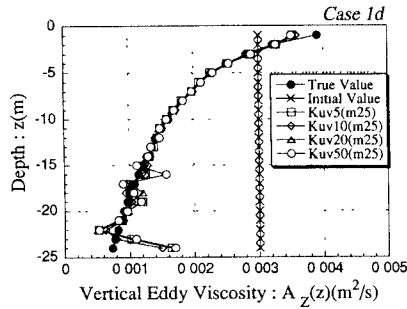
Case	Initial Value	Gauss Precision Moduli	
	$A_z(\text{m}^2/\text{s})$	K_u, K_v	K_a
Case 1a	3.0×10^{-4}	0.1, 1, 10, 100	1
Case 1b	1.0×10^{-3}	0.1, 1, 10, 100	1
Case 1c	2.0×10^{-3}	1, 10, 100, 1000	1
Case 1d	3.0×10^{-3}	5, 10, 20, 50	1

図1(a)、(b)にCase 1b、Case 1dの鉛直渦動粘性係数の推定値と真値、および初期値を示す。なお、反復回数は最大25回と制御変数と同じ数にし、図中の凡例には各ケースので実際に計算できた反復回数をm25などのように記した。図1(a)より、 A_z の推定値は $K_{uv}=0.1$ で表層の精度がやや悪い以外はいずれも真値と良く一致しており、Case 1aについても同様の傾向を示した。一方、図1(b)より、初期値を大きくしたCase 1dでは、 K_{uv} に関わらず下層で A_z の誤差が大きくなっており、 K_{uv} の値を少し変化させるだけで計算が不安定になりやすい傾向を示した。Case 1cに関しては、本ケースの K_{uv} の範囲内では、いずれも良い結果を示した。

以上の結果、制御変数の初期値は真値より大きく設定しすぎると計算が不安定で推定誤差が大きくなるため、初期値は過去の知見などを元に出来るだけ妥当な値にする必要があることが分かった。



(a) Case 1b



(b) Case 1d

図1 鉛直渦動粘性係数の推定結果

(2) 同化時空間間隔の影響

前節と同じく A_z のみを制御変数とする同化モデルに対して、観測データの時空間的な同化間隔が解の収束性に及ぼす影響について考察した。表2のCase 2は同化データの時間間隔を変化させたケース、Case 3はデータの空間間隔を変化させたケースである。図2にCase 2の全ケースの最終的な A_z の推定値を示す。図2より、同化時間間隔が21600秒(6時間)以上になると、推定誤差が大きくなり収束性も悪くなっている。これより、外力が24時間周期であることを考えると、実際の観測データを同化する場合、データの時間密度は外力の代表的な時間変動スケールに対して、少なくとも1/5倍程度以下の短い時間間隔のデータを用いる必要があると判断できる。

一方、同化データの空間的な間隔を変化させたCase 3a ~ Case 3eに対する A_z の最終的な推定値の分布を図3に示す。図3より、2m間隔で同化したCase 3a、表層から5m間隔で同化したCase 3bは良好な結果を示しているが、1mないし4m以深を5m間隔で同化したCase 3c、Case 3dは推定誤差が大きいたことが分かる。表層のみを同化したCase 3eは、上層の結果は良いが、中～下層で誤差が大きくなることが分かる。また、Case 3cに対して、線形に内・外挿して観測データを補間したCase 3fと表層を加えたCase 3gは、結果が改善された。ただし、内・外挿の際に生じる誤差の影響のためかCase 3fよりCase 3gの方が良い結果となった。

以上より、外力として風を考慮するモデルでは、表層データを同化することが重要であることが分かった。また、線形内挿などによってデータを補間して同化する場合、内挿誤差により不適切な解へと収束する可能性があるため注意が必要である。この点、海底設置タ

イプのADCPデータは、データ観測期間は限定されるものの時空間分解能が高いため、本同化モデルには適したデータと言えよう。

表2 計算ケース(同化時空間間隔の影響)

Case	Int. Value	Precision Modul			Observation Interval	
	$A_z(m^2/s)$	K_u, K_v	K_ω	$\Delta t(sec)$	$\Delta z(m)$	
Case 2a	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	600	1	
Case 2b	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	3600	1	
Case 2c	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	10800	1	
Case 2d	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	21600	1	
Case 2e	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	43200	1	
Case 2f	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	86400	1	
Case 3a	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	150	2	
Case 3b	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	150	5(0,-5,-10,-15,-20m)	
Case 3c	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	150	5(-1,-6,-11,-16,-21m)	
Case 3d	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	150	5(-4,-9,-14,-19,-24m)	
Case 3e	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	150	Only Surface(0m)	
Case 3f	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	150	Interpolation of Case 3c	
Case 3g	$1.0 \times 10^{-3}(m^2/s)$	10	1	150	Case 3c & Surface(0m)	

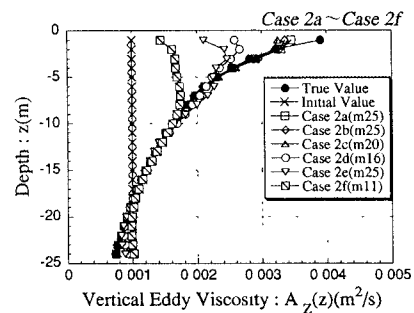


図2 鉛直渦動粘性係数の推定結果 (Case 2)

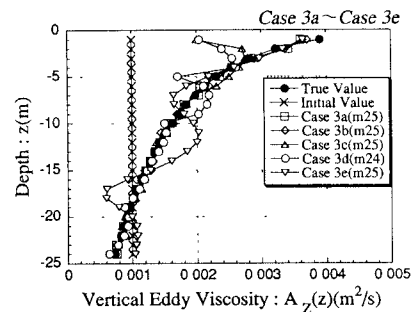


図3 鉛直渦動粘性係数の推定結果 (Case 3)

(3) 同化期間の影響

制御変数として A_z の他に、流速の初期値 u_0, v_0 を加えて同化実験を実施した(表3のCase 4)。Case 4a、Case 4bでは $K_{u0} = K_{v0} = 0.001$ で良好な解が得られたが、その他は推定精度が悪くなった。Case 4と同様のモデルに対して、同化期間を変えて、その影響について検討した(Case 5)。その結果、同化期間が1日以下の場合にやや底面付近で A_z の推定精度が悪くなるが、ほぼ全ケースで良好な結果となり、半日以上であれば同化期間の影響は小さいことが確認された。

次に、制御変数として海面抵抗係数 C_D を加えた場合(Case 6)、 C_D と海底摩擦係数 γ_b を加えた場合(Case 7)の同化実験を行った。Case 6aは $K_c = 0.1, 1$ で海底付近でやや誤差があるがほぼ良好な結果となり、 $K_c = 10$ の場合は大きく真値からずれた。Case 6aより真値に

表 3 計算ケース (制御変数の数と同化期間の影響)

Case	Initial Value			Gauss Precision Moduli			Obs. Term T(days)	Remarks
	UV ₀ (m/s)	C _d	γ _b	K _{u0} , K _{v0}	K _c	K _b		
Case 4a	5.0×10 ⁻²	1.2×10 ⁻³	2.6×10 ⁻³	0.001, 0.01, 0.1	0	0	30	Initial Value of A _z : 1.0×10 ⁻³ (m ² /s)
Case 4b	1.0×10 ⁻¹	1.2×10 ⁻³	2.6×10 ⁻³	0.001, 0.01, 0.1	0	0	30	
Case 5a	5.0×10 ⁻²	1.2×10 ⁻³	2.6×10 ⁻³	0.001	0	0	15	
Case 5b	5.0×10 ⁻²	1.2×10 ⁻³	2.6×10 ⁻³	0.001	0	0	10	
Case 5c	5.0×10 ⁻²	1.2×10 ⁻³	2.6×10 ⁻³	0.001	0	0	5	
Case 5d	5.0×10 ⁻²	1.2×10 ⁻³	2.6×10 ⁻³	0.001	0	0	1	Other Precision Moduli : K _u = K _v = 10, K _a = 1
Case 5e	5.0×10 ⁻²	1.2×10 ⁻³	2.6×10 ⁻³	0.001	0	0	0.5	
Case 6a	5.0×10 ⁻²	5.0×10 ⁻⁴	2.6×10 ⁻³	0.001	0.1, 1, 10	0	30	
Case 6b	5.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻³	2.6×10 ⁻³	0.001	0.1, 1, 10	0	30	
Case 7a	5.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	0.001	1	0.1, 1, 10	30	
Case 7b	5.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻³	2.0×10 ⁻³	0.001	1	0.1, 1, 10	30	

近い C_D の初期値を与えた Case 6b では、 $K_c = 1, 10$ で良い結果となったが、 $K_c = 0.1$ でやや誤差が大きくなった。Case 7a の各パラメータの推定分布を図 4(a) ~ (c) に示す。図 4 より、解析結果はガウスの決定定数の影響を強く受け、 $K_b = 1$ の場合は良好な結果であることが分かる。これらの結果から、 A_Z と違う性質の制御変数を考慮すると、同化結果はガウスの決定定数に対する依存性が大きくなり、またガウスの決定定数は制御変数の初期値にも依存することが確認された。

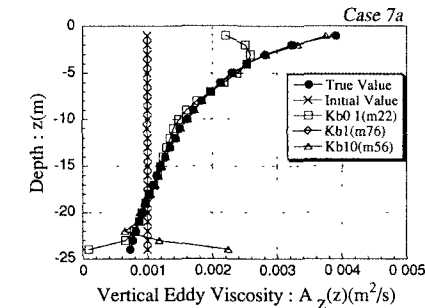
4. 実観測データの同化実験結果

1993 年 3 月に福島県沖合い約 4km、水深約 25m の地点において、インペラー流速計により 15 分間隔で観測した流速データ (-2m、-5m、-10m 層)、および同時に HF レーダ観測によって得られた 2 時間間隔の流速計データを用いて同化実験を実施した。前章の Case 3 の検討結果で明らかのように、上層のみのデータを同化した場合、本モデルでは下層の推定精度が悪くなる。そこで、モデル水深を 12m、それ以深は Free-Slip 条件にして海底摩擦を考慮しないモデルを用いて計算を実施した。また、計算の安定性を考え、コリオリ項の離散化には陰解法を用いた。

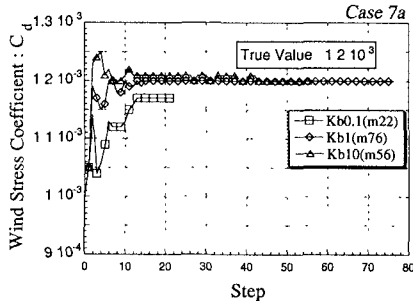
表 4 に計算ケースを示す (case 8)。同化期間は平均 5.0m/s 程度の北風が継続して卓越していた 3 月 28 日 ~ 29 日の 2 日間とした。制御変数の初期値は、 $u_0, v_0 = 5.0 \times 10^{-2} (m/s)$ 、 $A_Z = 1.0 \times 10^{-3} (m^2/s)$ 、 $C_D = 1.0 \times 10^{-3}$ とし、ガウスの決定定数は、前章の結果を参考に、 $K_u = 0.1, K_v = 0.0001, K_a = K_c = 1, K_{u0} = K_{v0} = 0.0001$ と設定した。

表 4 計算ケース (実データの同化)

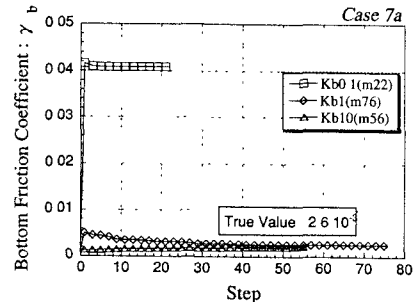
Case	Obs. Data
Case 8a	HF Radar(-1m)
Case 8b	C.M.(-2, -5, -10m)
Case 8c	HF Radar(-1m) & C.M.(-2m)
Case 8d	HF Radar(-1m) & C.M.(-2, -5, -10m)
Case 8e	Interpolation of Case 10d



(a) 鉛直渦動粘性係数



(b) 海面抵抗係数

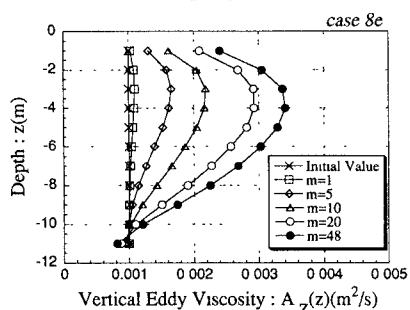


(c) 海底摩擦係数

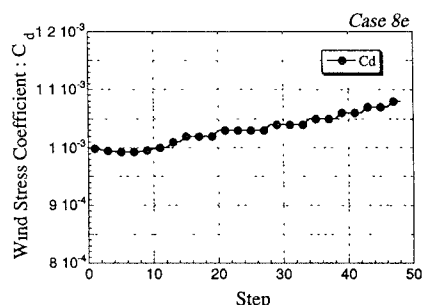
図 4 Case 7a のパラメータ推定結果

図 5(a) ~ (c) に Case 8e の A_Z の推定値、 C_D の推定値、および収束判定条件である勾配ベクトルと評価関数のノルム ($|g|/|g_0|, J/J_0$) の結果を示す。 A_Z および C_D の値は、これまでの現地観測結果などから推定されている値と同程度となっており、 A_Z については水深 4m 付近で最大となった。収束率については、双対実験に比べ $10^2 \sim 10^3$ 程度悪いが、反復回数 20 回目くらいではほぼ収束している。ただし、評価関数の各項についてみると、収束した時点においても流速の観測値からのずれに関する項が他の項より 10~100 倍程度大きく、これは本モデルではエクマン流しか取り扱えないため現地海域の流動場を十分に再現できていないと考えられる。今回得られた解析結果については、今

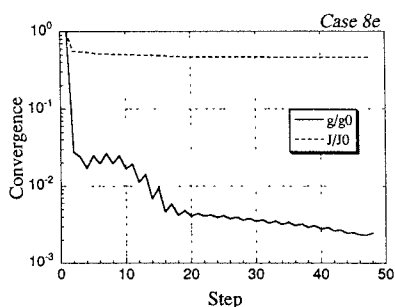
後、より現実的なモデルを用いた同化計算などを通じて、その妥当性について検討する必要がある。



(a) 鉛直渦動粘性係数の推定結果



(b) 海面抵抗係数の推定結果



(c) $|g|/|g_0|$ と J/J_0 の変化

図5 実データの同化結果 (Case 8e)

5. まとめ

鉛直1次元非定常エクマン流モデルを対象としたアジョイント法によるデータ同化モデルにより、物理パラメータの推定を試みた。双対実験の結果以下の点が明らかになった。

- 1) 制御変数が増えると、解析結果は同化計算開始時の制御変数の初期値の影響を強く受けるため、初期値は過去の知見や観測結果などを元により良い値に設定することが重要である。
- 2) 同化データの時間間隔は、力学モデルの外力成分の代表時間に対して、1/5倍程度以下の短いデータを用いる必要がある。
- 3) 風を外力とする同化モデルの場合、同化データとしては特に表層のデータが重要である。
- 4) データの同化期間は、本モデルの場合、外力の代表時間スケール程度以上であればよいことが分かった。

- 5) 違う特性のパラメータを制御変数にすると、同化結果はガウスの決定定数に強く依存した。

また、現地観測データによる同化実験の結果、以下のことが確認された。

- 1) 推定した A_z と C_D の値は、それぞれ $1.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3} (m^2/s)$ 、 1.1×10^{-3} となり、過去の観測結果などとはほぼ同程度となった。
- 2) 評価関数における流速の誤差成分が大きく、これは本1次元モデルの適用性の限界によるものと考えられる。

今後は、海底設置による ADCP などサンプリングの時空間分解能が密な観測データを本モデルに同化してパラメータ評価を実施するとともに、より現実的な沿岸モデルに対して同化モデルを構築し、物理パラメータの推定・評価を行っていく予定である。

謝辞：最後に、アジョイント法の解析手順について、地球フロンティア研究システムの宮澤泰正氏にアドバイスをいただいた。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 井口俊夫, 梅原俊彦, 大野裕一, 野崎憲朗 (1989) : 電波と光リモートセンシング-衛星および地上観測その1-, 通信総合研究所季報, 35(176), 387-397.
- 2) 坂井伸一, 水鳥雅文, 黒岩博司, 灘井章嗣 (1994) : 2台の短波海洋レーダによる福島沖の流動観測, 水工学論文集, 38, 789-794.
- 3) 坂井伸一, 水鳥雅文, 服部孝之, 杉山陽一 (1998) : VHFレーダによる伊勢湾湾奥の表層流動観測, 海岸工学論文集, 45 1266-1270.
- 4) Schröter, J., U. Seiler and M. Wenzel (1993) : Variational assimilation of Geosat data into an eddy-resolving model of the Gulf stream extension area, *J. Phys. Oceanogr.*, 23, 925-953.
- 5) Yu, L. and J. J. O'Brien (1991) : Variational estimation of the wind stress drag coefficient and the oceanic eddy viscosity profile, *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 709-719.
- 6) Panchang, V. G. and J. J. O'Brien (1988) : On the determination of hydraulic model parameters using the adjoint state formulation, *Modeling Marine System*, I, CRC Press, 5-18.
- 7) Thacker, W. C. and R. B. Long (1988) : Fitting dynamics to data, *J. Geophys. Res.*, 93, C2, 1227-1240.
- 8) Shanno, D. F. and K. H. Phua (1980) : Remark on algorithm 500-a variable method subroutine for unconstrained nonlinear minimization, *ACM Trans. on Mathematical Software*, 6, 618-622.

(1998.9.30受付)