

アンサンブルカルマンフィルターを用いた リアルタイム流況予測モデルの開発

田中昌宏*・Ghada El Serafy**
Herman Gerritsen***・安達貴浩****

沿岸における数時間から 1 日程度先の流況予測の精度を向上するため、現地のリアルタイムモニタリングデータを、非線形現象に適用可能なアンサンブルカルマンフィルター (EnKF) を用いて同化し、その結果を初期条件として将来を予測するモデルを開発した。河川水や吹送流の影響を強く受け複雑な流況を呈する大阪湾湾奥を対象海域としてモデルの検証を行った結果、データ同化に関しては、カルマン利得行列を定常と仮定したモデル (SSKF) で大幅な計算精度の向上が確認でき、同化結果を初期条件とする予測においても精度改善が確認できた。

1. はじめに

海上工事における濁り管理や赤潮発生などの水質管理において、当日から翌日程度の高精度な流況予測 (海の天気予報) が可能となれば、その対策に非常に有益な情報を与えることができる。筆者らの一部は、大阪湾湾奥海域を対象に海上工事の濁り管理を目的とした流れ予測システムを開発し、試験的に実工事に適用した (稲垣ら, 2003)。このシステムでは、潮汐、河川流量、風向・風速の予測値を用いた 3 次元流動シミュレーションを実施し、毎日午前 11 時に翌日の朝 6 時～17 時までの毎時の流向・流速を鉛直 3 層 (表層, 中層, 底層) で予報した。しかし、風向・風速などの予測外力を入力し、決定論的に力学的基礎式を時間積分するモデル (決定論モデル) では、自ずと予測精度に限界があり、さらなる予測精度向上が求められた。本研究では、現地のリアルタイムモニタリングデータを、非線形現象に適用可能なアンサンブルカルマンフィルター (EnKF) を用いて同化し、その結果を初期条件として将来を予測するモデルを開発し、現地データによる検証を行った。

2. 既往の研究

カルマンフィルター (KF) は雑音に乱された観測値から信号あるいは未知パラメータを推定する手法で (Kalman, 1960)、幅広い分野で適用されており、海洋の分野でも広く研究されている。例えば、Hayakawa ら (1995) は線形化された浅水流方程式に KF を導入し、基礎方程式の従属変数 (水位, 流速) を状態変数とした検討を行っている。Kiri ら (2004) は Hayakawa らの研究を発展させ、浅水流モデルに KF を導入することの物理的意味を明らかにした。

元々カルマンフィルターは線形なシステムを対象としているが、非線形システムにも拡張され (“拡張カルマンフィルター (EKF)”), 多くの成功を収めているものの、モデルが煩雑化する欠点がある。これに対し、最近強い非線形システムでも汎用的に適用できる EnKF が提案され (Evenson, 1994)、幾つかの適用が試みられている。EnKF では、誤差の推定にモンテカルロ法を用い、時間積分に既存の決定論モデル (非線形) をそのまま用いることができる大きな利点があり、極めて汎用性の高い手法である。筆者の一人 (El Serafy and Mynett, 2004) はライン川の洪水予測システムへ EnKF を適用し、EKF と比較検討すると共に、その実用性の高さを確認している。Manda ら (2005) は海洋の混合層モデル (鉛直 1 次元) のデータ同化手法として、EnKF とそれより計算負荷の少ない手法として “ナッジング” を比較検討し、ナッジングでも EnKF と同等の精度を有することを示した。さらに EnKF では誤差の確率分布を正規分布と仮定していることを問題視し、これに替わるものとして SIR (The Sampling-Importance Resampling) フィルターの適用を検討している (Manda ら, 2003)。一方沿岸域においては、海洋レーダによる表層流速データを 3 次元流動モデルに同化し、流動の内部構造を明らかにする研究が進められている。石塚ら (2000) は大阪湾において VHF レーダを用い、データ同化手法としてナッジングと “ブレンディング” を適用し、ブレンディングの方が適していることを示した。

このように、海洋の分野でも計測器の発達に伴ってデータ同化に関する研究が盛んに行われるようになってきている。本研究はさらに一歩進め、3 次元流動モデルへの EnKF の適用及びそれをベースにした流れ予測モデルの開発を試みた。上記したライン川のモデルと Manda らのモデルは 1 次元モデルであり、Evenson のモデルはポテンシャル渦度と流れ関数を従属変数とするモデルであるのに対し、本研究では密度変化を含めた 3 次元モデルである。

* 正会員 工博 鹿島建設(株)技術研究所
** PhD デルフト水理研究所
*** PhD デルフト水理研究所
**** 正会員 博(工) 鹿島建設(株)技術研究所

3. 対象海域及び観測データ

本研究で対象とした海域は図-1に示す大阪湾湾奥海域である。この領域は、埋立地が複雑に入り組む領域である上に、湾奥であるために相対的に潮流が弱く、替わって淀川、大和川等からの淡水流入及び吹送流の影響を強く受けるために非常に複雑な流況を呈する海域である。

KFの適用に当たっては、流況に関する複数定点・鉛直多層の連続観測データが必要である。本論文では図-1(b)に示す5点・鉛直4層の流向・流速、水温、塩分の連続観測データ(2002年2月13日~28日)(大阪湾広域臨海環境整備センター, 2002)を使用した。図中には工事海域が示されているが、本データは工事開始以前に測定されたデータである。

4. リアルタイム流況予測モデル

(1) 決定論モデル

決定論モデルはDELFT3D-FLOW・鹿島モデル(Delft Hydraulics, 2004)を使用した(以下, "FLOW")。本モデルは、鉛直方向に静水圧近似を仮定した三次元流動モデルで、水平方向に直交曲線座標、鉛直方向に σ 座標を用いている。

計算格子は、大阪沖埋立処分場護岸工事の工事管理を目的とした日々の流れ予測を想定し、工事海域周辺を詳細に且つ計算時間を出来る限り短くするため、図-1に示すように、工事海域周辺と大阪湾全体の2つの領域に分け、One-wayのネスティングで両者を接続した。本モデルの計算格子は、稲垣ら(2003)の格子を平面的にさらに細かくし、鉛直方向も5層から10層に増やした。

境界条件である潮汐条件、塩分、風及び河川流量等の与え方は稲垣ら(2003)と同じである。なお、海水の密度は塩分のみ関数とし、水温は考慮していない。

(2) アンサンブルカルマンフィルター (EnKF)

EnKFの詳細についてはEvenson(1994)及びEl Serafy(2003)に従っており、ここでは、モデルの構成をフローチャートで図-2に示す。本モデルのシステム状態方程式は上記の決定論モデルFLOWであり、状態変数は水平流速2成分と塩分とした。計算の流れは、まず初期条件として、各状態変数の平均値と誤差分散行列の初期推定値を与える。実測データが得られ、カルマンフィルターによる同定を行うステップを k とし、所定の終了ステップ K まで繰り返す。各ステップのシステム誤差の推定はモンテカルロ法を適用し、各状態変数に対し、正規乱数により S 個のメンバーからなる集合を発生させる。決定論モデルの積分時間ステップは、通常同化のステップの時間間隔より短いため、その時間まで決定論モデルの時間積分を継続する。実測データが得られ

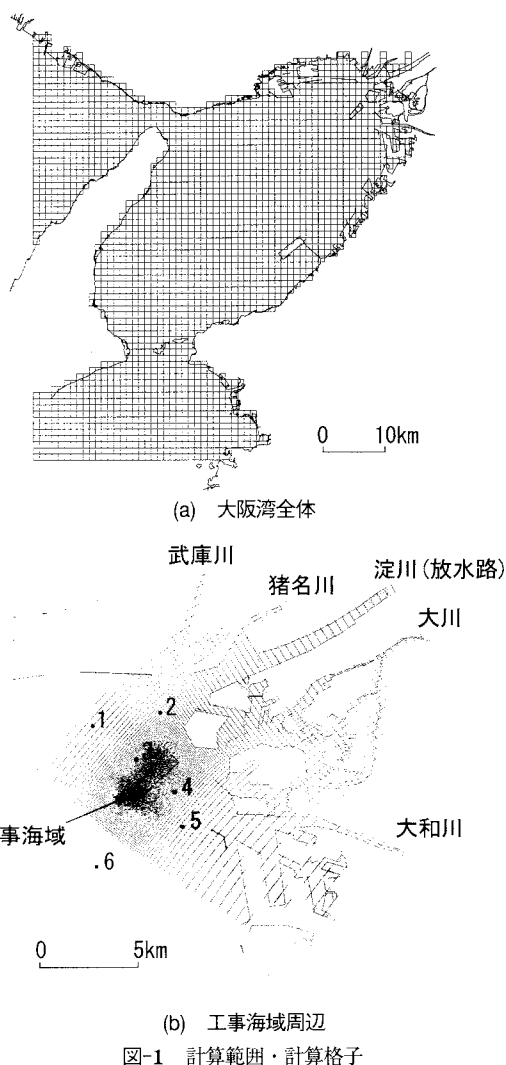


図-1 計算範囲・計算格子

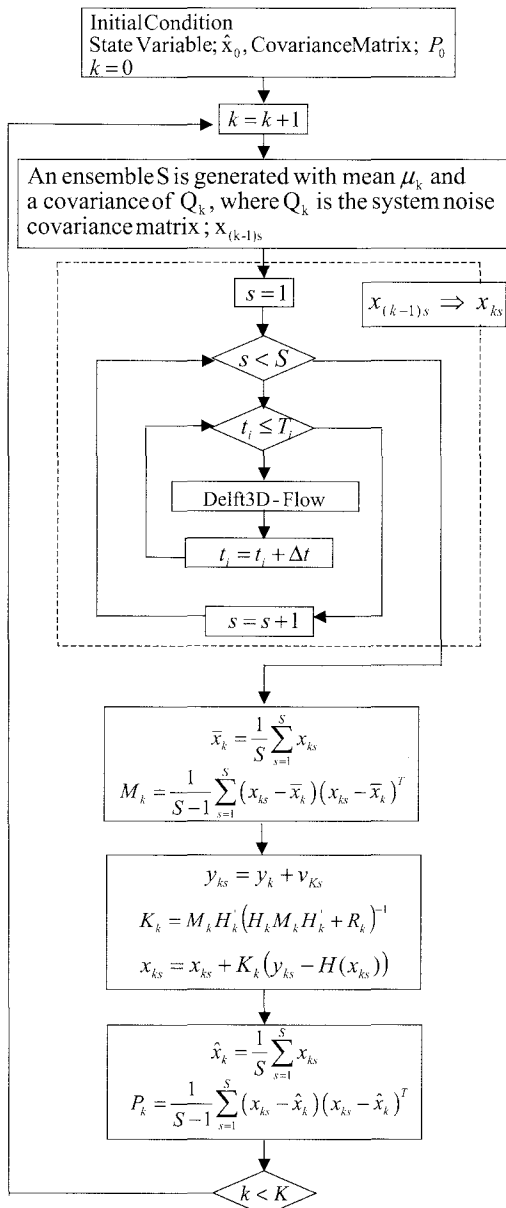
る時間ステップにおいて、カルマン利得行列を計算し、状態変数の平均及び誤差分散行列の推定を行う(同化)。

なお、本モデルでは状態変数の集合のメンバー数は、El Serafy and Mynett(2004)の結果を参考に30とした。

(3) モデルの単純化及び日々の流れ予測システム

EnKFは汎用性に優れている反面、計算時間が膨大となる欠点があり、毎日の予測には問題がある。そこで、日々の予測システムでは、EnKFによって求められたカルマン利得行列を定常と仮定して一定値で与える定常カルマンフィルター(SSKF)の適用性を検討した。

具体的な日々の流れ予測を行う場合には、予測計算の時間的制約の他に、現地モニタリングデータ(携帯電話等によるデータ転送)、外力である風、河川流量データ(インターネットからのダウンロード)の取得及び入力データへの変換のための作業時間の制約がある。原理的にはこれらをすべて自動化することが可能であるが、現在



x_{ks} ; ensemble member, Q_k ; the system noise covariance matrix, M_k , P_k ; the error covariance matrices of the estimate, R_k ; the measurement noise covariance matrix, K_k ; Kalman gain, H_k ; the measurement matrix, y_k ; measured data, v_{ks} ; measurement errors.

図-2 EnKFを用いたモデルのフロー

のところ現実的ではない。そこで、ここではSSKFを用いた予測システムを次のように運用するケースを想定する。

- ①予測配信は1日に1～2回とする。
- ②前回予測配信から、現予測配信の時刻より予測作業の所要時間を差し引いた時刻までの現地モニタリングデー

タを取得し、その期間に対しSSKFを用いたデータ同化を行う。

③②の最終時刻の計算結果を初期条件として、決定論モデルによる予測計算を行う。

以上のように本予測システムでは、予測計算の初期条件を最新の現地モニタリングデータに同化して与え、その後の予測を決定論モデルによる通常のシミュレーションで行う。なお、実測データは図-1(b)に示す6点で得られているが、工事開始後の実際のモニタリングを想定し、同化を行う点は工事海域を挟むSt.3とSt.4の2点とした。

5. モデルの検証

(1) モデルの安定性の確認

本モデルでは、同化によって与えられる初期条件は、決定論モデルにとっては擾乱が与えられることを意味する。そこで、その“擾乱”が決定論モデルに与える時間的影響を確認した。

擾乱として塩分に変化を与えた。空間分布形は図-3に示すように、水平、鉛直方向いずれも正規分布とし、標準偏差を東西1.9 km、南北1.7 km、鉛直は σ 座標1層の厚さとした。中心位置は、St.3の中層（第5層）とし、 $\Delta S = 1.0$ を与えた。

2月15日0時にこの擾乱を与えた場合の第5層における塩分の時系列をオリジナルの計算と共に図-4に示す。擾乱は発散することなく、時間と共に減衰し、安定な解が得られることが分かる。次に影響の時間スケールを見ると、擾乱発生の中層でも3～4日程度でその影響は消え、明確な影響は1日程度で減衰することがわかる。当然のこととしてこの影響は擾乱の中心点から離れるほど早く減衰する。

(2) 同化及び予測精度の検証

SSKF同化及び同化+予測の状況を見るために、一例

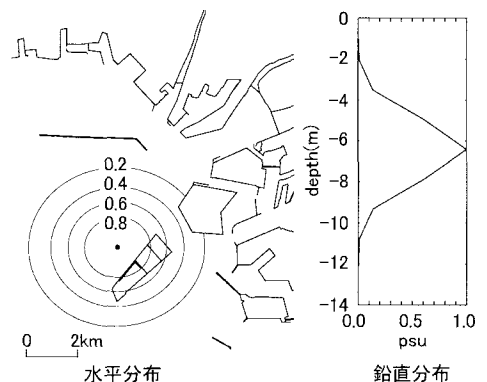


図-3 擾乱の分布（塩分）

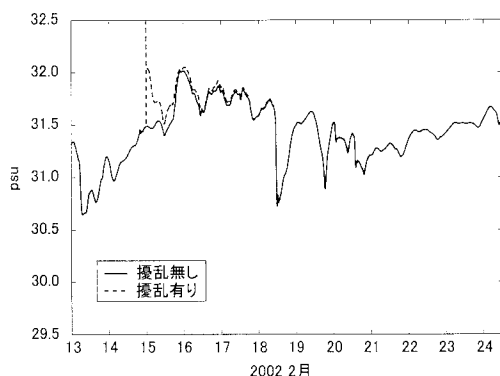


図-4 擾乱を与えた場合の応答 (塩分第5層)

として、2月13日0時～19日0時までの期間をSSKFにより1時間毎に同化し、その後を決定論モデルによる予測計算とした結果を図-5に示す。図は上段から表層(水面下1m)の塩分、流速東西成分及び南北成分の時系列(2月16日～20日)を示しており、実測、決定論モデル、SSKFによる同化(2月19日0時まで)、及び19日0時まで同化+その後の決定論モデルによる予測の結果を示している。まず、SSKFによる同化結果は良好であり、カルマン利得行列の定常仮定が妥当であることが分かる。次に同化+予測の結果は、決定論モデルのみより明らかに予測精度が改善されており(特に塩分と流速南北成分)、本手法の有効性が確認できた。ただし、当然のこととして、同化+予測の結果は時間と共に決定論モデルの結果に漸近し、同化による予測精度改善の有効時間は概ね1日以内であった。

次にモデルの同化及び予測計算の精度を定量化するため、実測値との誤差を計算した。流速については、ベクトルの差の絶対値を誤差とした。SSKFによる同化については、観測全期間(2月13日～28日)に亘って、1時間毎に同化した結果を評価した。同化+予測については、同化計算は1時間毎に行い、6時間おきに同化結果を初期条件とした予測計算結果を評価した。図-6に一例として、図-5と同区間・同位置の塩分の時系列を示す。誤差の評価結果を表-1にまとめた。流速については、絶対値が小さい場合には誤差評価の精度が悪くなるため、絶対値が5 cm/s以上を対象とした。表中には、SSKFによる同化が計算精度改善にどの程度有効かを定量的にみるために、誤差の減少率を示した。

まず、決定論モデル、SSKF同化及び同化+予測のいずれにおいても、塩分、流速共に表層から底層に向かって誤差が小さくなっていることがわかる。これは表層では、吹送流と密度流の流速成分が卓越するため、風と河川流量データの精度が直接影響することと、密度成層の変動が複雑なために誤差が大きく、一方底層では、潮流

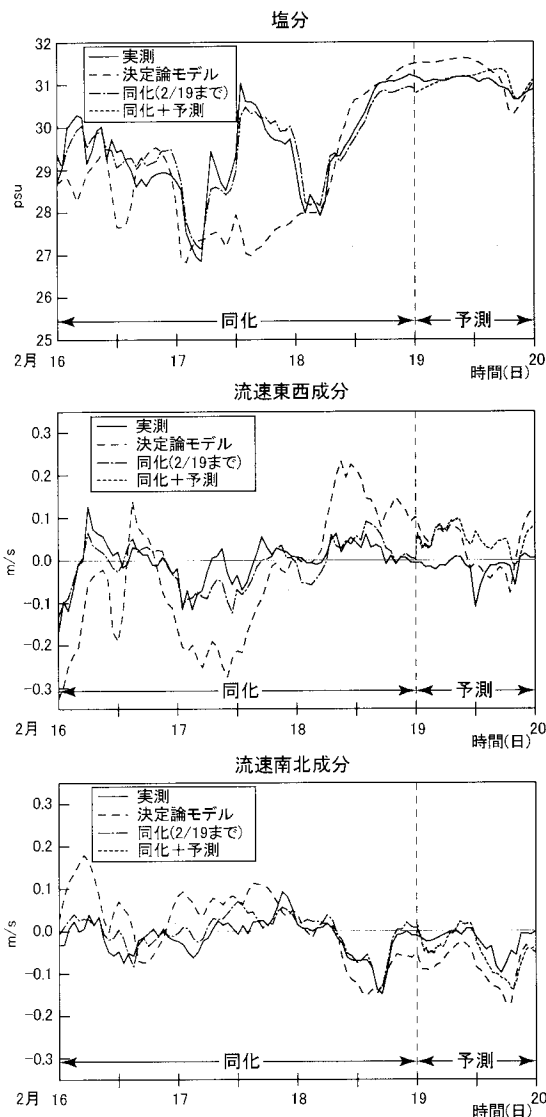


図-5 計算結果の一例

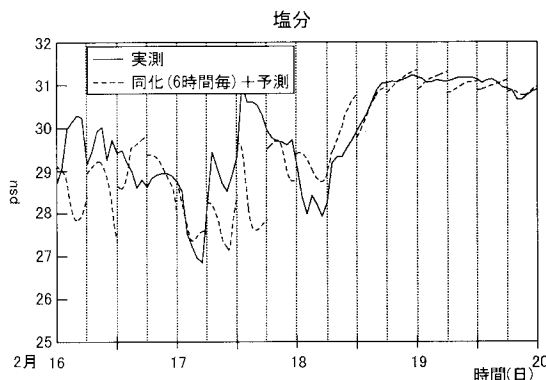


図-6 同化(6時間毎)+予測結果の一例

表-1 モデルの誤差評価結果 (単位: %)

流速ベクトル絶対値 (5 cm/s 以上)		水面下 1 m		水面下 3 m		水面下 6 m		海底上 1 m	
		St.3	St.4	St.3	St.4	St.3	St.4	St.3	St.4
誤差 (実測-計算) / 実測	①決定論モデル	144.4	131.5	103.7	107.0	89.7	100.8	67.3	82.1
	②同化(全期間)	43.1	47.0	64.6	35.3	38.0	33.3	27.5	32.8
	③同化(6時間毎)+予測	127.6	120.0	94.0	87.5	75.8	84.3	59.5	71.4
誤差減少率	(①-②)/①	70.1	64.2	37.7	67.0	57.6	66.9	59.1	60.1
	(①-③)/①	11.6	8.8	9.3	18.2	15.5	16.4	11.6	13.1

塩 分		水面下 1 m		水面下 3 m		水面下 6 m		海底上 1 m	
		St.3	St.4	St.3	St.4	St.3	St.4	St.3	St.4
誤差 (実測-計算) / 実測	①決定論モデル	4.4	3.5	2.0	1.4	1.3	0.6	0.5	0.7
	②同化(全期間)	1.1	1.0	1.4	0.5	0.9	0.3	0.1	0.1
	③同化(6時間毎)+予測	3.2	2.6	1.8	1.1	1.0	0.6	0.3	0.3
誤差減少率	(①-②)/①	75.5	72.2	29.6	65.8	30.0	59.8	82.2	85.9
	(①-③)/①	26.3	26.0	9.0	27.1	22.6	6.6	50.3	49.3

成分が卓越するため誤差が小さくなったと考えられる。

次に、誤差減少率、つまり同化による計算精度の改善の程度は、全域 SSKF 同化の場合、塩分は30%~80%、流速は35%~70%の改善となった。同化+予測については、塩分は数%~50%、流速は数%~十数%の改善であった。鉛直方向の特性を見ると、塩分、流速共に相対的に中層(水面下 3 m と 3 m)の減少率が低くなっている。これは、密度躍層で塩分と共に流向が大きく変化するため、密度躍層の位置の計算精度が大きく影響しているためと考えられる。

6. おわりに

本研究では、沿岸における数時間から1日程度先の流況予測の精度を向上するため、現地のリアルタイムモニタリングデータを、非線形現象に適用可能なアンサンブルカルマンフィルター(EnKF)を用いて同化し、その結果を初期条件として将来を予測するモデルを開発した。河川水や吹送流の影響を強く受け複雑な流況を呈する大阪湾湾奥を対象海域としてモデルの検証を行った結果、データ同化に関しては、カルマン利得行列を定常と仮定したモデル(SSKF)で大幅な計算精度の向上が確認でき、同化結果を初期条件とする予測においても精度改善が確認できた。

参 考 文 献

- 石塚正秀・松田真人・中辻啓二(2000): 海洋レーダによる表層流速データの3次元流動計算への同化に関する研究, 水工学論文集, 第44巻, pp. 1167-1172.
 稲垣 聡・田中昌宏・奈良靖・齋藤勲雄・日野勝(2003): 日々の

工事管理を目的とした流れ・濁り予測システム, 海洋開発論文集, 第19巻, pp. 767-772.

大阪湾広域臨海環境整備センター: 新人工島建設事業に係る環境監視事前調査業務(その3)報告書, 2002

Delft Hydraulics: DELFT3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.23, 2004.

El Serafy, G. Y. (2003): Comparison of EKF and EnKF in Sobek River, Report of Delft Hydraulics, p27.

El Serafy, G. Y. and A. E. Mynett (2004): Comparison of EKF and EnKF in Sobek River: Case study Maxau-Ijssel, 6th International Conference on Hydroinformatics-Liong, Phoon and Babovic (eds), PDF.

Evensen, G. (1994): Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics, J. Geophysical Research, Vol.99, No. C5, pp. 10143-10162.

Hayakawa, Y., T. Takagi and M. Kawahara (1995): Tidal flow analysis using Kalman filter, J. the Institute of Science and Engineering, Chuo Univ., pp. 71-82.

Kalman, R.E. (1960): A new approach to linear filtering and prediction problems, Trans. ASME, J. Basic Engineering, Vol. 82, pp. 35-45.

Kiri, H., K. Takaki, H. Tanji and T. Nakaya (2004): Application of Kalman filter to finite element model of shallow flow analysis, Shallow Flows - Jirka and Uijtewaal (eds), Selected papers of the International Symposium on Shallow Flows, 2003, pp. 609-614.

Manda, A., N. Hirose and T. Yanagi (2003): Application of a nonlinear and non-Gaussian sequential estimation method for an ocean mixed layer model, Engineering Science Reports, Kyushu Univ., Vol.25, No.2, pp. 285-289.

Manda, A., N. Hirose and T. Yanagi (2005): Feasible method for the assimilation of satellite-derived SST with an ocean circulation model, J. Atmospheric Ocean Technology, in press.