

大阪湾湾奥を対象とした流況予報システムの精度向上に関する研究

田中昌宏¹・安達貴浩²・Ghada EL Serafy³・Herman Gerritsen⁴

大阪湾湾奥海域を対象に、リアルタイムモニタリングデータを定常カルマンフィルタで同化し、その先を予測する流況予報システムの精度向上を図った。ネスティングを用いた旧モデルの問題を解決するため、大阪湾全体を一つの領域とするモデルに再構築し、定常カルマン利得行列の再計算を行った。モデルの検証のため、成層期の高精度な連続観測データを新たに取得すると共に、これまで観測が困難であった工事海域内で GPS プイを用いた観測を実施した。検証計算から、データ同化およびデータ同化後の予測計算による精度向上が確認できた。プイによる観測についても表層の計算メッシュを細かくすることにより計算精度の高さを確認できた。

1. はじめに

沿岸環境の保全・修復のために環境モニタリングの重要性が改めて認識され、定期的な水質計測に加え、固定点での自動計測や海洋レーダーによるリアルタイムモニタリングが実施され始めている。しかし、これらは過去或いは現在の状況を把握する手法であり、赤潮、青潮や油の流出などの環境被害を起こす現象あるいは海上工事の環境管理については、将来予測（海の天気予報）が必要となる。

「海の天気予報」は海外では欧米を中心に実際に運用され始めて、我が国でも、例えば、野見湾において上野ら (2005) は水質予報システムを構築し、陸田ら (2005) は広島湾において、音響トモグラフィのデータを同化し、流況予測精度の向上を検討している。

著者らは海上工事の環境管理を目的として大阪湾湾奥海域を対象に、風や河川流量などの外力の予測値を入力して流れと濁りを予測するシステム（決定論モデル）を開発・運用し（稲垣ら, 2003）、さらにそれを発展させ現地のモニタリングデータをカルマンフィルタ（KF）を用いて同化し、その先を予測するシステムを開発した（OBFS-Ver.1:Osaka Bay Forecasting System, 田中ら, 2005; EL Serafy et al., 2005）。本研究では、システムの予測精度をさらに向上させるため、モデルの改良を行うと共に新たな現地観測データを用いて精度検証を行った。

2. リアルタイム流況予報システム

(1) システムの構成

本研究の流況予報システムは、基本的に天気予報のシステムと同様であり、対象海域の流況をリアルタイム取得するモニタリングシステムと、そのデータを同化し、

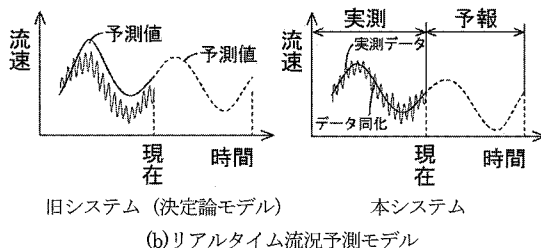
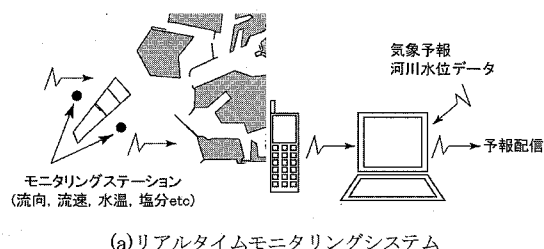


図-1 リアルタイム予報システムの概念図

力学方程式に基づく決定論モデルにより将来予測を行う予測モデルから成る（図-1）。リアルタイムモニタリングシステムは、対象海域にモニター点を設け、水位、流向・流速、水温、塩分などを自動計測し、携帯電話などを使ってデータ伝送を行うシステムである。流況予測モデルは、流況モニタリングデータを所定の期間過去に遡ってデータ同化し、その結果を初期条件として決定論モデルにより予測計算を行う。本研究では、決定論モデルに DELFT3D-FLOW (Delft Hydraulics, 2003) を使用し、同化手法には、決定論モデルを変更せずに、非線形系の同化が可能なアンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）を採用した。ただし、予報システムは数時間から1日程度の予測を実現するため、計算負荷を減らす必要があり、予測計算はカルマン利得行列の定常性を仮定した定常カルマンフィルタ（SSKF）を適用している。

なお、著者らのこれまでの研究では、リアルタイムモニタリングシステムを含むシステムまでは至っておらず、データは過去に取得されたデータをリアルタイムデータ

1 フェロー 工博 鹿島建設(株)技術研究所
2 正会員 博(工) 鹿児島大学工学部海洋土木工学科
3 PhD デルフト水理研究所
4 PhD デルフト水理研究所

に見立てた検討を行っている。ただし、リアルタイムモニタリングシステム自体は既に運用されている例が増えており、予測モデルとの合体は容易であると考えられる。

(2) SSKF による同化および予測手法の概要

SSKF の基礎方程式は下記である。

状態方程式：

$$X(n+1/n) = \Phi(X(n/n)) + Bu(n+1) \dots\dots\dots (1)$$

観測方程式：

$$z(n+1) = HX(n+1) \dots\dots\dots (2)$$

カルマンフィルター：

$$\begin{aligned} X(n+1/n+1) \\ = X(n+1/n) + K_{ss}[z(n+1) - HX(n+1/n)] \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 X ；状態変数ベクトル、 Φ ；変換行列、 Bu ；外力ベクトル、 z ；観測ベクトル、 H ；観測行列、 K_{ss} ；定常カルマン利得行列、 n ；時間ステップで、括弧内の前記が時間更新ステップ、後記が観測更新ステップを示す。

(1) 式は DELFT3D-FLOW に対応した決定論モデルである。状態変数は、OBFS-Ver.1 では水平流速 2 成分と塩分のみであったが、本研究では、これに水位および水温を加えた。 K_{ss} は EnKF を用いた計算から最適値が求められる。

なお、KF によるデータ同化は、観測点のみで行われるのではなく、観測点と周辺領域の相関状態を示す "Kalman gain support" (Ten Brummelhuis, 1998) によって、観測点以外の計算メッシュの状態変数も修正される。

(3) 予測モデルの改良

著者ら (2005) が最初に開発したシステム (OBFS-Ver.1) は、計算領域を大阪湾全体と湾奥海域に分け (図-2 参照)、One-way のネスティングで接続し、データ同化は湾奥海域を対象とした。このモデルは、所定の時間内に、対象海域を細かいメッシュで計算できるメリットがあるが、問題点として湾奥海域の開境界が同化を行うモニタリング点に近く、KF による同化の効果が境界条件による影響によって短時間に限られる問題があった。

そこで本研究では、ネスティングを使わず、しかも所定の時間内で、高精度な計算を実現するため、まず計算メッシュの再構築を行った。再構築した計算メッシュを図-3 に示す。曲線座標系により、工事海域周辺を細かく、対象海域を離れるにしたがってメッシュが粗くなるようにしており、計算精度と計算時間の両立を図った。メッシュサイズは、工事海域周辺の最小メッシュでおよそ $120\text{ m} \times 140\text{ m}$ 程度で、開境界近くで最大 $660\text{ m} \times 1350\text{ m}$ 程度である。鉛直方向には σ 座標で等間隔に 10 層とした。

この決定論モデルに EnKF を適用し K_{ss} の最適値を求めた。この際、同化は Station2 と 3 のみとし、Station1 は検証データとして使用することとした。

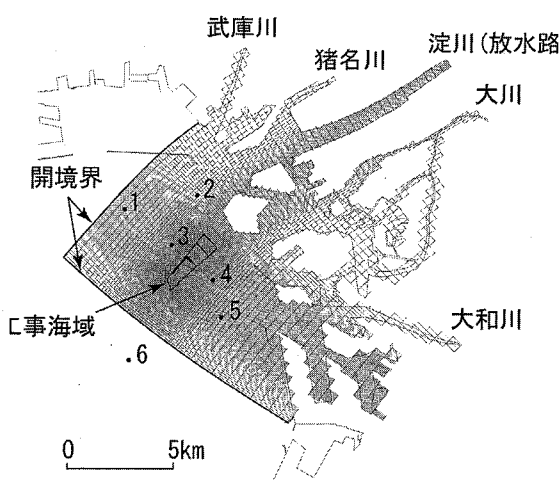


図-2 OBFS-Ver.1 の湾奥海域の計算メッシュおよび 2002 年 2 月の計測点位置

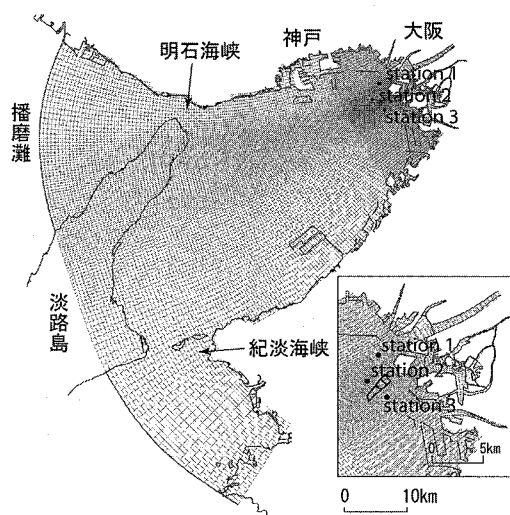


図-3 本研究の計算メッシュおよび連続計測点の位置

3. 現地観測

OBFS-Ver.1 では、大阪沖埋立て処分場護岸工事の工事海域外における、工事開始前の冬季の連続観測データ (2002 年 2 月 13 日～28 日) を使用した。今回は工事開始後の成層期を含む期間のデータを取得するため、図-3 に示す工事海域周辺の 3 点における観測データを (財) 災害科学研究所から提供頂いた。さらに工事海域内においては著者らが観測を行った。

工事海域外の連続観測は、2004 年 9 月～11 月まで図-3 に示す 3 点で、ADCP を海底設置し、水温・塩分計は係留系で (St.1 と 2 のみ)、水面下 1 m、3 m 及び 5 m と海底上 1 m で観測したものである。

工事海域内の観測は、上記の観測期間と重なる期間を

含め観測を行ったが、サンドコンパクション船等に ADCP 等の計測器を設置して行ったため、船の喫水が深い等の理由により、表層流速の計測精度に問題があった。そこで工事海域内については、時期は異なるが、別途小型 GPS ブイ (中辻ら, 2004) を使用した表層流速の計測を実施した。観測は 2006 年 1 月 17 日～19 日に行い、GPS ブイの投入・回収を約 30 分おきに行い、軌跡を計測した。GPS ブイは本体長: 約 60 cm (喫水: 約 40 cm), 外径: 12 cm, アンテナ長: 約 30 cm, 空中重量 5 kg である。

4. 結果および考察

(1) 工事海域外の実測との比較

まず、本研究で再構築した決定論モデルとネスティングを用い工事期域周辺のメッシュサイズがより細かい旧モデル (OBFS-Ver. 1, 最小 70 m × 70 m 程度) との比較を行った。その結果、全般的に本モデルは旧モデルと同等か、状況によって精度の向上が確認できた。

次に SSKF によるデータ同化の効果を確認する。図-4 に一例として、St. 2 の表層 (第 2 層) における流速水平成分の時系列を決定論モデルのみによる計算結果と共に示す。この際データ同化は 1 時間おきに行った。これを見ると、データ同化により大幅な精度向上が達成されていることが確認できる。さらにデータ同化が周辺海域の予測精度をどの程度改善しているかをみるために、直接同化を行っていない St. 1 の表層における流速水平成分の時系列を図-5 に示す。同化を適用した結果は、概ね実測と決定論モデルのみの結果の中間的な値を示し

ており、直接同化を行っている点のような明瞭な精度向上はないが、周辺の予測精度も確実に向上していることがわかる。

これらの結果を定量的に評価するために、実測値との誤差 (流速ベクトルの差の絶対値) を計算した。結果を表-1 に示す。なお、流速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。また表中には、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。結果を見ると、直接同化を行っている St. 2 と St. 3 では誤差が 30 %～60 %改善され、直接同化を行わない St. 1 で数 %～15 %程度の改善となった。鉛直方向の特性は、OBFS-Ver. 1 (田中ら, 2005) と同様に風や河川流量のデータ精度の影響を受ける表層よりも、相対的に潮流成分が卓越する底層の方が精度が高い。

次に同化を行った後の予測計算の精度検証を行った。図-6 は、10 月 1 日 0 時まで同化を 1 時間毎に行い、その後 48 時間の予測計算 (決定論モデル) の結果を示す。このケースの場合、同化による改善は明瞭ではないが、同化+予測は、実測と決定論モデルのみによる計算の中間的な値をとっており、それが時間的に 24 時間以後は決定論モデルのみの計算と変わらなくなるものの、12 時間程度までは同化の効果が確認できる。そこで、同化を 6 時間おきに行った予測計算の精度を上記と同様に評価した結果を表-1 に示す。結果を見ると、同化後 (6 時間間隔) に予測を行うことにより、数 %～最大 35 %程度の予測精度の向上が達成された。

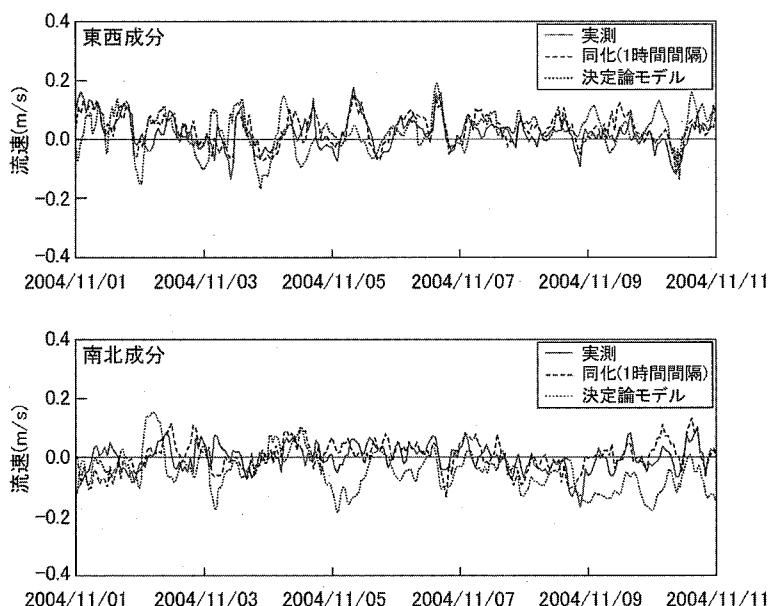


図-4 直接データ同化を行っているモニタリング点での流速の実測値と計算値の一例 (St.2 表層 第2層)

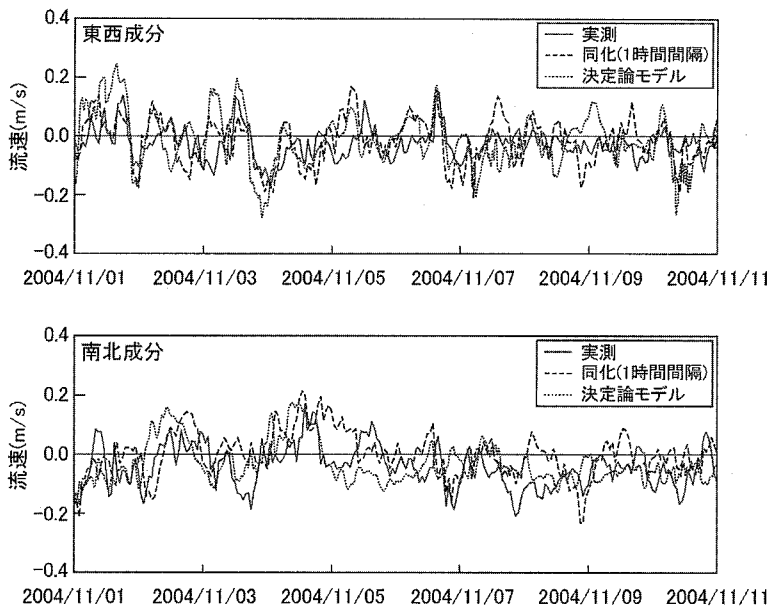


図-5 直接データ同化を行っていないモニタリング点での流速の実測と計算値の一例 (St.1 表層 第2層)

(2) 工事海域内での GPS ブイによる実測との比較

上記のように工事海域外では、本システムにより予測精度の向上が確認できた。次に工事海域内での予測精度を GPS ブイによる観測結果で検証する。ただし、この観測は工事海域外の観測と同時にできなかったため、予測計算は決定論モデルによるものである。また比較のために決定論モデルは、本モデルに加え、工事海域の計算メッシュがより細かいネスティングを用いた旧モデル(田中ら, 2005)でも計算を行った。さらにブイは喫水が約 40 cm であり、水面極表層の流速を表していると考えられる。そこで、計算モデルも表層のメッシュ間隔を細かく、不等間隔とする検討も行った。不等間隔では、最表層を水深の 1% とし、下層に行くに従って徐々に層厚を増し、層数は 10 層で等間隔の場合と同じにした。

図-7 にブイの軌跡の実測の一例を示す。この日は終日風速 5~7 m/s 程度の北~北東の風が吹いており、ブイが概ね南西方向に移動していることから、表層の流れは主に吹送流に支配されていたと考えられる。図-8 に計算結果の一例を実測と共に示す。計算結果を見ると、モデルがブイの軌跡を良好に予測していることがわかる。そこで、予測結果を定量的に評価するために、実測と計算の流向偏差および流速絶対値比を計算した。ここで実測値は、投入地点から回収地点までの間の軌跡から平均流向・流速を算出し(投入から 1 分間は除く)、計算値は投入地点での対応する期間の平均流向・流速を算出した。表-2 に結果をまとめた。表には、鉛直メッシュの分割方法および風データの与え方を予測および現場の実測値によるケースの違いを示している。結果は、まず旧モ

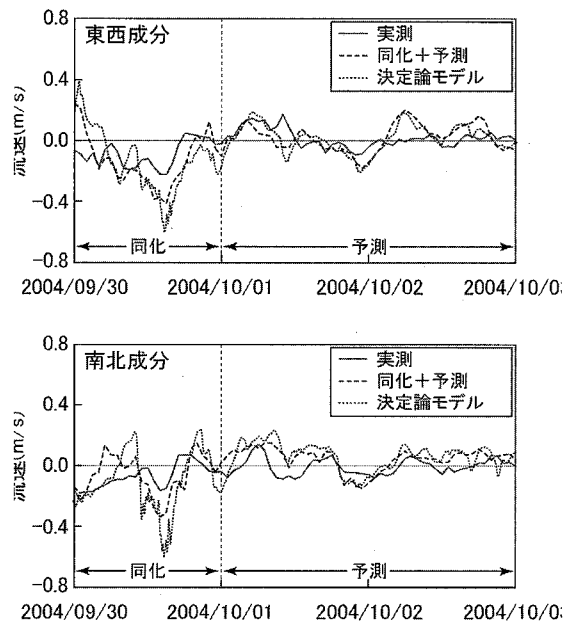


図-6 同化後の予測計算結果の一例 (St.2 表層 第2層)

デルの方が精度が良く、これは旧モデルの方がメッシュが細かいためにシルトフェンスなどの影響を適切に評価できているためと考えられる。特に流速絶対値が表層の鉛直メッシュを細かくすることにより大きく精度が向上している。これは、ブイが吹送流の極表層の流れに追隨しているためと考えられる。本モデルについては、鉛直メッシュの表層を細かくすることにより、流向については改善が見られないものの、流速絶対値は実測により近

表-1 モデルの誤差評価結果 (単位: %)

流速ベクトル絶対値 (5cm/s 以上)		layer 2			layer 4			layer 7			layer 10		
		St.2	St.3	St.1	St.2	St.3	St.1	St.2	St.3	St.1	St.2	St.3	St.1
誤差 (実測-計算) / 実測	①決定論モデル	12.5	117	116	98	101	115	81	72	90	82	103	79
	②同化 (全期間)	80	84	114	59	65	110	48	46	84	44	42	71
	③同化 (6時間毎) + 予測	110	113	116	87	96	108	68	62	76	71	67	77
誤差減少率	(①-②)/①	36.0	28.2	1.7	39.8	35.6	4.3	40.7	36.1	6.7	46.3	59.2	10.1
	(①-③)/①	12.0	3.4	0.0	11.2	5.0	6.1	16.0	13.9	15.6	13.4	35.0	2.5

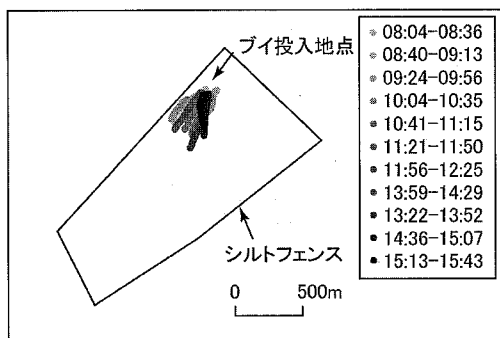


図-7 GPS ブイの軌跡の一例 (2006年1月19日)

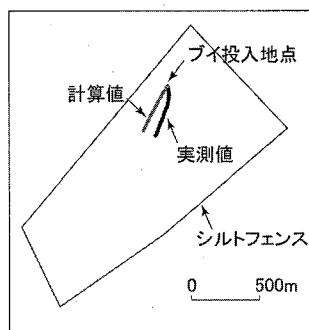
図-8 GPS ブイの軌跡の計算との比較の一例
(2006年1月19日 13:22-13:42)

表-2 GPS ブイによる実測と計算の比較

モデル	風	鉛直メッシュ	流向偏差 (度)	流速絶対値比 (実測/計算)
旧モデル	予測	等間隔	18.1	3.0
	予測	不等間隔	18.3	1.1
	現場	不等間隔	16.0	1.2
本モデル	予測	等間隔	25.3	1.8
	現場	不等間隔	27.7	1.1
			29.0	0.9

くなっている。以上から両モデル共に表層のメッシュ間隔を細かく不等間隔とすること計算精度が向上することが確認された。また風データについては、風の予測値でも流れの予測精度は十分許容範囲であるが、現場の実測

値を与えることにより、さらに改善されることがわかる。これは、より精度の高い外力を与えることにより計算精度が向上することを示しており、モデルのポテンシャルの高さを示す結果である。

5. おわりに

大阪湾湾奥海域を対象に、リアルタイムモニタリングデータを定常カルマンフィルターで同化し、その先を予測するリアルタイム流況予報システムの精度向上を図った。成層期の高精度な連続観測データを用いて精度検証を行い、データ同化による大幅な精度向上と同化後の予測制度の向上を確認した。さらに、これまで観測が困難であった工事海域内についても、GPS ブイによる観測結果と比較し、表層の計算メッシュを細かくすることにより計算精度の高さを確認できた。

謝辞：GPS ブイは大阪大学西田助教授から借用させて頂くと共に使用法をご指導頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 稲垣 聡・田中昌宏・奈良 靖・齋藤敷雄・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.
- 上野成三・織田幸伸・中山哲蔵 (2005) : 野見湾における観測システムと数値モデルを統合した水質予測システムの開発, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1296-1300.
- 田中昌宏・G. EL Serafy・H. Gerritsen・安達貴浩 (2005) : アンサンブルカルマンフィルターを用いた流況予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 321-325.
- 中辻啓二・西田修三・清水隆夫・坂井伸一・松山昌史・坪野考樹・森信人 (2004) : 浮遊物の挙動予測に向けた海洋レーダーの適用性評価, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1436-1440.
- 陸田秀実・伊澤 亮・土井康明・金子 新 (2005) : 沿岸音響トモグラフィによるデータ同化を利用した広島湾の流況解析, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 326-330.
- Delft Hydraulics (2003) : DELFT3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.23.
- EL Serafy, G. Y. (2003) : Comparison of EKF and EnKF in Sobek River, Report of Delft Hydraulics, p. 27.
- EL Serafy, G. Y., H. Gerritsen, A.E. Mynett and M. Tanaka (2005) : Improvement of Stratified Flow Forecasts in the Osaka Bay Using Steady State Kalman Filter, Proc. 31 st IAHR Congress, Seoul, pp. 795-804.
- Ten Brummelhuis, P. G. J. (1998) : Introduction to Kalman filtering, Research Report, Delft hydraulics, p.26.