

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 4 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05786

研究課題名(和文) 潮流発電のポイント選定を見据えたフィルタ理論FEMによる高精度流況推定技術の解明

研究課題名(英文) High accurate flow field estimation analysis based on the Kalman filter FEM for selection of tidal stream power generator locations

研究代表者

倉橋 貴彦 (Kurahashi, Takahiko)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00467945

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、潮流発電のポイント選定に対する流れ場の推定精度を向上させるために、カルマンフィルタFEMによる流れ場の推定解析に関する検討を行った。支配方程式としては浅水長波方程式を用い、空間および時間方向に対する離散化には、ガラーキン法とセレクトティブ・ランピング法を用いた。検討結果を踏まえて、実際の湾に対する計算モデルにおいて、流れ場の推定解析を行い、発電ポテンシャルの算定を行った。また、非線形項を含むシステム方程式に対する流れ場推定解析のため、アンサンブルカルマンフィルタFEMに関する検討も行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, a shallow water flow field estimation analysis, based on the Kalman filter FEM, for locating the optimal positions for tidal stream power generation systems was carried out. In this flow field analysis, the shallow water equation is used as the governing equation. The Galerkin and the selective lumping methods are employed as discretization techniques in space and time, respectively. The Kalman filter theory is applied to estimate the flow field. As a numerical example, we carry out a flow estimation analysis for practical bay model. The high estimation accuracy of the flow field estimation based on the Kalman filter FEM is confirmed by comparison with conventional FEM. The electric power generation potential is also computed using the estimated flow field. In addition, numerical experiments using the ensemble Kalman filter FEM was also carried out for the application to the numerical model using the non-linear shallow water equation.

研究分野：機械工学・流体工学

キーワード：数値流体力学 有限要素法 潮流発電

1. 研究開始当初の背景

カルマンフィルタは1960年代にKalmanとBucyにより開発された観測値に基づく対象領域における状態推定理論である。現在においては、線形方程式を対象としているカルマンフィルタ理論を非線形方程式に展開した拡張カルマンフィルタ理論やカルマンフィルタで用いる推定誤差の共分散行列の規模を小さくしたモデルに対して状態量推定計算を行うアンサンブルカルマンフィルタ理論がある。

カルマンフィルタに関する研究例としては、非定常振動問題の制御計算に用いられる例や、定常問題における未知パラメータを求める問題に関する適用例があり、未知パラメータは時間進展しないものとし、システム方程式を未知パラメータにより表し、非定常問題にカルマンフィルタ理論を展開して得られた式の時間ステップを未知パラメータの更新回数に置き換えることで、未知パラメータの同定計算を行うことができる。非定常振動問題の制御計算は、一次元モデルを対象とした研究例が多いが、未知パラメータの同定問題では空間モデルは二次元モデル等、空間に拡がりを持つモデルに対する適用例が多く、空間における状態量分布を表す離散化方程式の誘導においては、メッシュレス法や、境界要素法を用いる研究が行われている。また、有限要素法を用いたモデルでは、空間的に拡がりを持ち、時間進展する問題に対する適用例もある。他にも潮流予測にカルマンフィルタを適用した例もある、実際には、潮流予測等は、境界条件を仮定し、数値解析を行うことで、流況計算が行われるが、数点の流速や水位の観測情報より海洋や湾内の潮流予測が適切に行うことができれば、干満の差を利用する潮汐発電では、干満差の著しい地点を予測することも可能であり、また湾内の流れを利用した潮流発電では、流れの激しい箇所を特定することも可能であると考えられる。

2. 研究の目的

カルマンフィルタの特徴は、誤差を含んだ数点の観測情報からシステム方程式を下に、解析対象領域の状態量を推定することができる点である。従来から行われている順解析に加え、時系列の観測値を考慮し、解析対象領域内の状態量分布を得ることができることから、通常の数値解析法に比べて観測値を考慮できることから実際の現象により近い数値解析結果を得ることが期待できる。そこで本検討では、東京湾の解析モデルを対象とし、カルマンフィルタ FEM による流れ場の推定解析を行うとともに、潮流発電ポテンシャルの算定に関する検討を行った。

3. 研究の方法

本検討では、浅水長波方程式を状態方程式として適用する。状態方程式を FEM により

離散化し、離散化した方程式をカルマンフィルタにおけるシステム方程式として利用する。カルマンフィルタ FEM による解析の流れは以下のとおりである。

[カルマンフィルタ FEM による解析の流れ]

1. 計算条件の入力
2. 推定誤差共分散行列の計算
3. カルマンゲイン行列の計算
4. 予測誤差共分散行列の計算
5. 推定値の計算
6. 最適推定値の計算
7. 時間ステップを更新し、ステップ 2 へ戻る。

上記の推定計算によって得られた流れ場より発電量 P を以下の式(1)により計算する。

$$P = 0.5\rho A\eta v^3 \quad (1)$$

式(1)において、 ρ は密度、 A は発電機の羽による投影面積、 η は発電効率、 v は各地点における流速の値を示す。本検討では、流速 v は全時間により積分し、また解析対象領域内の最大の P の値の値によって、 P の値を除いた発電ポテンシャルを整理することとした。

カルマンフィルタでは、線形の浅水長波方程式、アンサンブルカルマンフィルタでは非線形の浅水長波方程式を適用する。まず、カルマンフィルタにおける観測点配置に関する検討を行い、その後東京湾における発電ポテンシャルの算定に関する検討を行う。また、アンサンブルカルマンフィルタにおける検討では、多数の初期条件(サンプル)を用意し検討を行う必要があることから、サンプル数による流れ場の推定精度に関する検討を行う。

4. 研究成果

4. 1 カルマンフィルタ FEM による観測点配置に関する検討

図 1 に示す直線の開水路モデルにおいて、流れ場の推定解析を行った。計算条件を表 1 に示す。左端より解析時間全体により 1 周期となる正弦波を水位変動量に対する境界条件として与え、図 2 に示す観測点における値を観測値として用いて、流れ場の推定精度に関する検討を行った。(カルマンフィルタで用いる観測値には、正規乱数によるノイズを加えたものを使用する。)

代表的な結果として、図 2 に示す Case1-a, Case1-b, Case4-a, Case4-b の結果を図 3~6 に示す。このカルマンフィルタ FEM による流れ場の推定解析では境界条件は与えずに観測値のみによる検討を行っている。Case1 は水路内に等間隔に観測点を設定したものであり、Case4 は流れの下流側のみを設定したものである。また、a は x,y 方向の流速および水位変動量の観測値を用いたケース、また b は水位変動量のみを観測値を用いたケース

である。結果として、流れの上流側に観測点を設定しない場合においては、上流側の水位の推定が困難になることがわかった。また、a, b による観測変数 (x,y 方向流速および水位変動量) を変えた検討では、どちらのケースにおいても、大きな差は得られない結果となった。

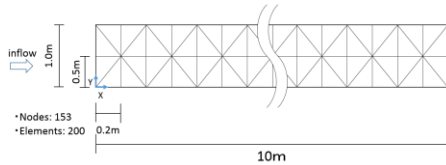


Fig.1 Numerical model and finite element mesh

Tab.1 Computational conditions

時間増分量 Δt , s.	1.0×10^{-3}
ステップ数	2000
節点数	153
要素数	200
重力加速度 g , m/s^2	9.8
ランピングパラメータ e	0.8
同化後の誤差共分散の初期値 $P_{(t_0)}^0$	1.0
最適推定値の初期値 $\phi_{(t_0)}^0$	0
収束判定定数 ϵ	10^{-2}

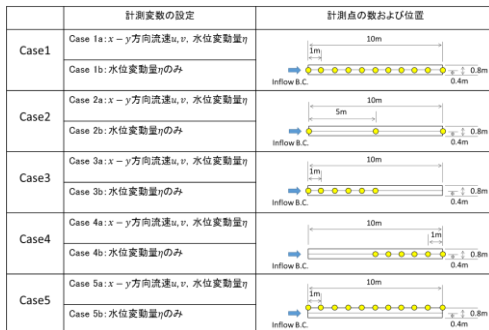


Fig.2 Numerical test conditions

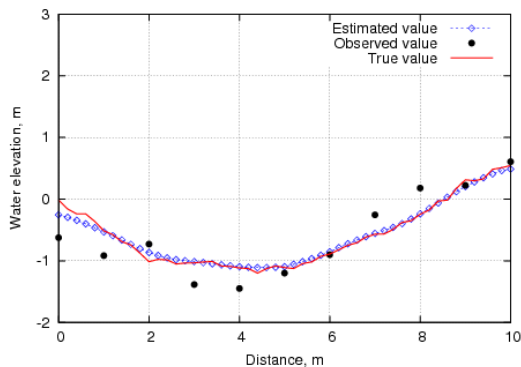


Fig.3 Distribution of water elevation at T=2.0sec in Case1-a.

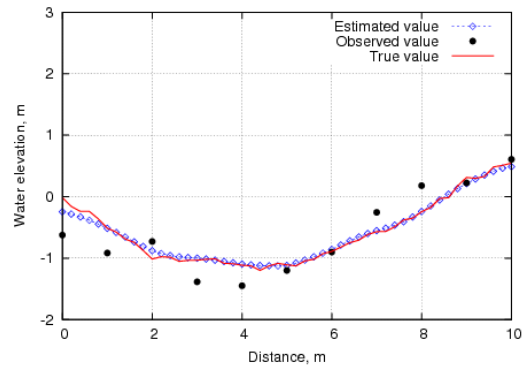


Fig.4 Distribution of water elevation at T=2.0sec in Case1-b.

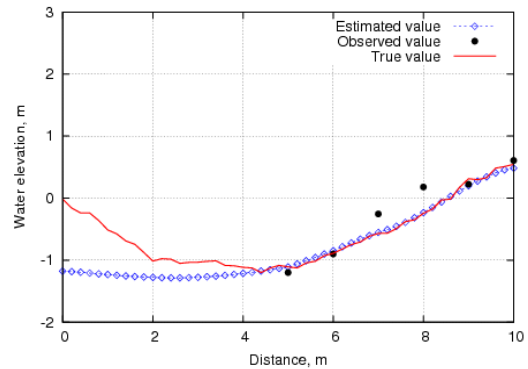


Fig.5 Distribution of water elevation at T=2.0sec in Case4-a.

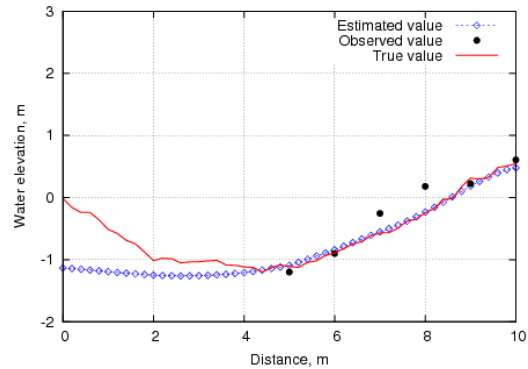


Fig.6 Distribution of water elevation at T=2.0sec in Case4-b.

4. 2 東京湾モデルに対する潮流発電ポテンシャルの算定

次に、東京湾モデルを用いて潮流発電ポテンシャルの算定に関する検討を行った。潮流発電ポテンシャルについては、本報告書の3章を参照することとする。検討に用いた有限要素解析のモデル図を図7に示す。東京(晴海)と、千葉、横浜の3地点における水位の観測値および、流入境界からは、主要4分潮による水位変動量の境界条件を与えて流れ場の推定解析を行った。

結果として、図8に示す流れ場が得られ、

流れを適切に再現できることがわかった。また、従来の FEM と本検討で用いているカルマンフィルタ FEM による解析結果を横須賀における水位の観測値と比較をした (図 9, 10)。結果として、カルマンフィルタ FEM を用いた場合は、従来の FEM に比べて観測水位と良好な一致を示すことが確認できた。また、カルマンフィルタ FEM による流れ場の推定結果を用いた発電ポテンシャルの算定結果を図 11 に示す。結果として、富津岬近傍において、発電ポテンシャルが最大となる地点があることがわかった。

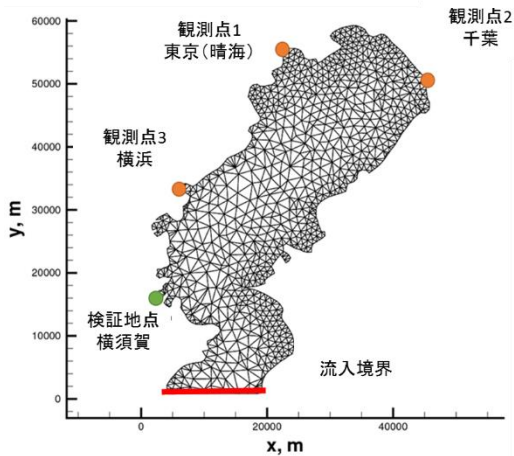


Fig.7 Finite element mesh in Tokyo bay model.

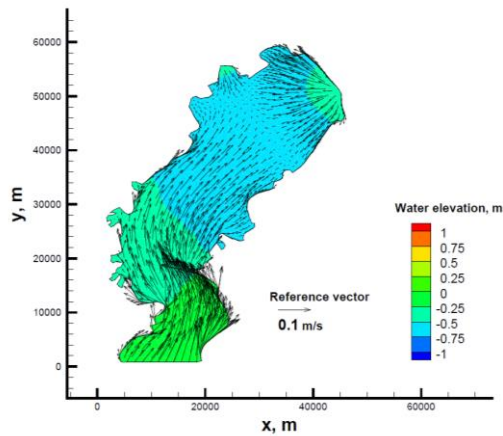


Fig.8 Flow field estimation result at T=40.0 hours in Tokyo bay model.

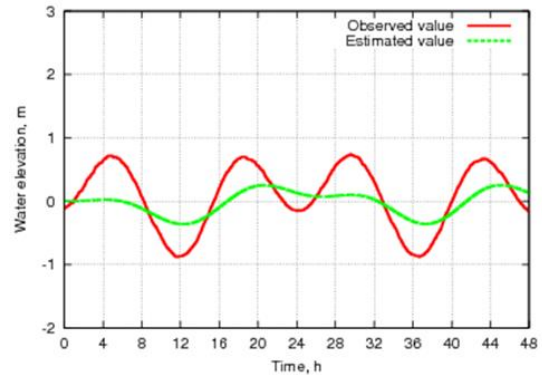


Fig.9 Comparison of observed and estimated values at Yokosuka in conventional FEM.

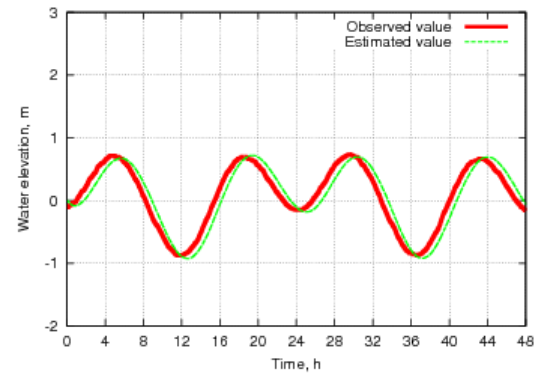


Fig.10 Comparison of observed and estimated values at Yokosuka in Kalman filter FEM.

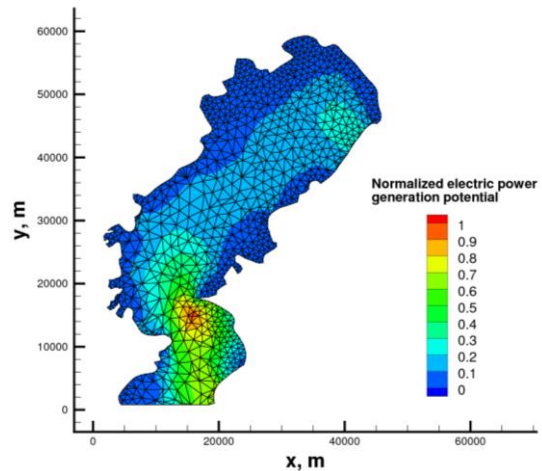


Fig.11 Distribution of normalized electric power generation potential.

4. 3 研究により得られた知見の整理

本研究により得られた知見を以下に整理する。

・4. 1節では、開水路モデルを用いたカルマンフィルタ FEM による流れ場推定の解析において、観測点配置に関する検討結果を示した。結果として、境界条件を設定しない場合、上流側の流れ場が適切に得られないことを確認できた。

・4. 2節では、東京湾のモデルを対象として、流れ場の推定解析を行い発電ポテンシャルの算定結果を示した。検討結果より、従来の FEM とカルマンフィルタ FEM による解析を行ったところ、カルマンフィルタ FEM を用いることにより横須賀における観測点において、観測値と概ね一致する結果を確認できた。また本研究に追加し、将来的検討としてアンサンブルカルマンフィルタに関する検討も実施した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- (1) 倉橋 貴彦, 吉荒 太一, 衛藤 俊彦, 波動水槽による水位計測値を用いた水槽内における流れ場の推定解析ー カルマンフィルタ理論を用いた有限要素解析による流れ場の推定アルゴリズムの紹介ー, 長岡工業高等専門学校紀要, Vol.51, pp.1-9, 2015.
- (2) 倉橋 貴彦, 吉荒 太一, 小林 泰秀, カルマンフィルタ有限要素法による浅水域における流れ場の推定精度の検証 (計測変数・計測点の数および位置が推定精度に与える影響), 日本機械学会論文集, 第 82 巻, 第 835 号 pp.1-19, 2016.
- (3) 倉橋 貴彦, 野上 雅人, 今井 伸哉, 吉荒 太一, 衛藤 俊彦, 波動水槽内の浅水流再現シミュレーションー SUPG 法による解析結果と水位計測値の比較ー, 長岡工業高等専門学校紀要, Vol.52, pp.21-27, 2016.
- (4) T.Kurahashi, T.Yoshiara, Y.Kobayashi and N.Yamada, Flow field estimation analysis based on the Kalman filter FEM for selection of tidal stream power generator locations, Journal of Fluid Science and Technology(JSME), Vol.12, No.1, pp.1-10, 2017.
- (5) T.Kurahashi, K.Saito and M.Nogami, Application of the ensemble Kalman filter FEM for estimation of flow field in shallow water regions, JSIAM Letters, Vol.10, pp.1-4, 2018.

[学会発表] (計 12 件)

- (1) 倉橋 貴彦, 小林 泰秀, 吉荒 太一, カルマンフィルタ FEM による流況推定解析に関する研究, 日本応用数理学会 2015 年度 年会, pp.1-2, 2015.
- (2) 吉荒 太一, 倉橋 貴彦, 小林 泰秀, カルマンフィルタ有限要素法による流れ場の推定解析における計測点配置に関する検討, 日本機械学会北陸信越支部 第 53 期総会・講演会講演論文集, pp.1-2, 2016.
- (3) T.Yoshiara, T.Kurahashi, Y.Kobayashi and T.Eto, Flow field estimation in open channel based on Kalman filter finite element method, ECCOMAS2016, pp.1-12, 2016.
- (4) 吉荒 太一, 倉橋 貴彦, 小林 泰秀, カルマンフィルタ FEM による浅水域の流れ場推定結果に対する境界条件の影響, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp.1-2, 2016.
- (5) 倉橋 貴彦, 吉荒 太一, 小林 泰秀, カルマンフィルタ FEM に基づく流況推定解析に対する数値実験, 日本応用数理学会数理設計 第 18 回研究集会, 2016.
- (6) 吉荒 太一, 倉橋 貴彦, 小林 泰秀, 山田 昇, 東京湾の流れ解析に対するカルマンフィルタ FEM の適用, 日本応用数理学会第 2 回学生研究発表会, 2017.
- (7) 吉荒 太一, 倉橋 貴彦, 小林 泰秀, 山田 昇, 東京湾における潮流発電ポテンシャル算定に対するカルマンフィルタ FEM の適用, 日本機械学会北陸信越支部 第 54 期総会・講演会講演論文集, pp.1-2, 2017.
- (8) 倉橋 貴彦, 水位計測値を使用した流れ解析による潮流発電ポテンシャル分布の算定, ISLife (鹿児島県 長島町 ポスター発表), 2017.
- (9) T.Kurahashi, T.Yoshiara, Y.Kobayashi and N.Yamada, Optimal estimation of tidal flow based on Kalman filter FEM using time history of water elevation , 12th WCSMO, pp.1-6, 2017.
- (10) 倉橋 貴彦, 齋藤 浄, 野上 雅人, 浅水域における流れ場の推定に対するアンサンブルカルマンフィルタ FEM の適用, 日本応用数理学会年会 2017, pp.1-2, 2017.
- (11) 倉橋 貴彦, 齋藤 浄, 野上 雅人, アンサンブルカルマンフィルタ FEM に基づく浅水域における流れ場の推定, 日本機械学会第 30 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp.1-2, 2017.
- (12) 齋藤 浄, 倉橋 貴彦, アンサンブルカルマンフィルタ FEM による浅水域の流れ場推定解析, 日本機械学会北陸信越支部 第 55 期総会・講演会講演論文集, pp.1-2, 2018.

〔図書〕（計1件）

- (1) T.Kurahashi, T.Yoshiara, Y.Kobayashi,
Estimation of shallow water flow based on
Kalman filter FEM, Perusal of the Finite
Element Method, chapter5, pp.115-133,
InTech, 2016.

〔その他〕

ホームページ等

[http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~kurahashi/freewe
b/index.html](http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~kurahashi/freewe
b/index.html)

6. 研究組織

(1)

研究代表者 倉橋貴彦 (KURAHASHI TAKAHIKO)

長岡技術科学大学・機械創造工学専攻・准教授

研究者番号：00467945

(2)

連携研究者 小林 泰秀 (YASUHIDE
KOBAYASHI)

長岡技術科学大学・機械創造工学専攻・准教授

研究者番号：50272860