

東京湾における風系の時空間変動特性の実態と 湾内海水流動への影響について

灘岡和夫*・二瓶泰雄**・吉野忠和***

1. はじめに

風応力を駆動力とする吹送流は、潮流や密度流と共に、東京湾のような閉鎖性の強い水域での海水流動を支配する要素の一つとなっている。最近では、湾内流動を解明するために、これらの要素を全て含んだ数値計算が盛んに行われているが、従来の数値計算では、多くの場合、一様定常風を仮定して求められた風応力を与えており、風の時空間変動性は考慮されていない。

そこで、本研究では、風系の時空間変動特性を把握し、その海水流動への影響を解析することを目的とした。具体的には、1) 地方自治体の細密気象データを用いて東京湾上及びその周辺における風系の実態解析を行い、2) そこで得られた疎な観測点上の風データを、流動計算用の格子上に空間補間を施し、3) さらに、そこで得られた補間風データに基づく湾内流動数値計算を行うことにより、風系の時空間変動特性が海水流動へ及ぼす影響を明らかにすることを試みた。なお、風応力の時間変動性が閉鎖性水域内流動へ及ぼす効果に関する検討は、灘岡ら(1996, 1997)により詳細に行われているので、本論文では、特に、風系の空間的変動性に着目して、それが海水流動に与える影響について検討した結果を以下に示す。

2. 風系の時空間変動性に関する実態解析

まず、東京湾上及びその周辺における風系の時空間変動特性を明らかにするために、1995年度の東京湾周辺の地方自治体の地上細密気象データと東京湾内における5地点での測定データを用いて、風系の実態解析を行うことを試みた。その結果、出現頻度が高い、以下に示すような特徴的な4つの風系パターンが見い出された。

(1) 発散風系型

この風系は、図-1(a)に示しているように、湾奥において、湾内から周辺の陸に向かって発散するようなパ

ターンである。このパターンは、海陸の温度差が大きくなる夏期に出現頻度が高くなるため、一般風としての南風に、局地的な海風モードが重なることにより出現しているものと考えられる。実際、この風系パターンは、海風の発達と共にその空間構造がより明確になっていき、昼過ぎに最も顕著になる。風系の平均的な継続時間は7時間程度である。

(2) 収束風系型

この風系は、図-1(b)に示すように、東京湾からの海風と千葉県太平洋側からの海風が、湾奥部に向かって収束する形の空間パターンである。これは、発散風系型と同様に夏期においてよく見られるが、出現頻度は発散風系型の1/3程度である。また、この風系の継続時間は7時間程度であり、夕方にピークが現われることが多い。また、この風系の時間変化過程は、二つの方向からの海風の相対的な強さに大きく依存しており、東京湾上の風系が比較的短時間で大きく変化する場合も見受けられた。

(3) 一様風系型

一般的に海陸の温度差が少ない冬期において、風速レベルが高いときには、図-1(c)に示すようなほぼ一様な方向に吹く風系が卓越する。ただし、各点での風向は空間的にほぼ一様であるものの、風速レベルは地表粗度等の影響で必ずしも同じにはならず、ある程度の空間的な非一様性を示す。この風系は、冬期における北からの季節風が卓越する場合などでは、数日にわたって同風向に連風することもあるが、1週間以上の長期間にわたって連風することは稀で、むしろ、頻繁に全体的な風向が変化することがこの風系の大きな特徴となっている。

(4) フロント型

この風系は、図-1(d)右図中の千葉県側に見られるような明確なフロント構造が出現しているものであり、収束風系型や一様風系型における湾内の卓越風向が大きく変化する過程などにおいてしばしば見られ、その出現頻度は冬期においてやや高くなっている。この図中には、連続した2時間の風系パターンが示されているが、2月5日24時の時点で全体的に南西風が卓越していたところに、北西風のフロント部が進入し、湾上においては短時間の間に卓越風向が急変していることが分かる。この

* 正会員 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻

** 正会員 修(工) 東京工業大学助手 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻

*** 学生会員 学 士 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻修士課程

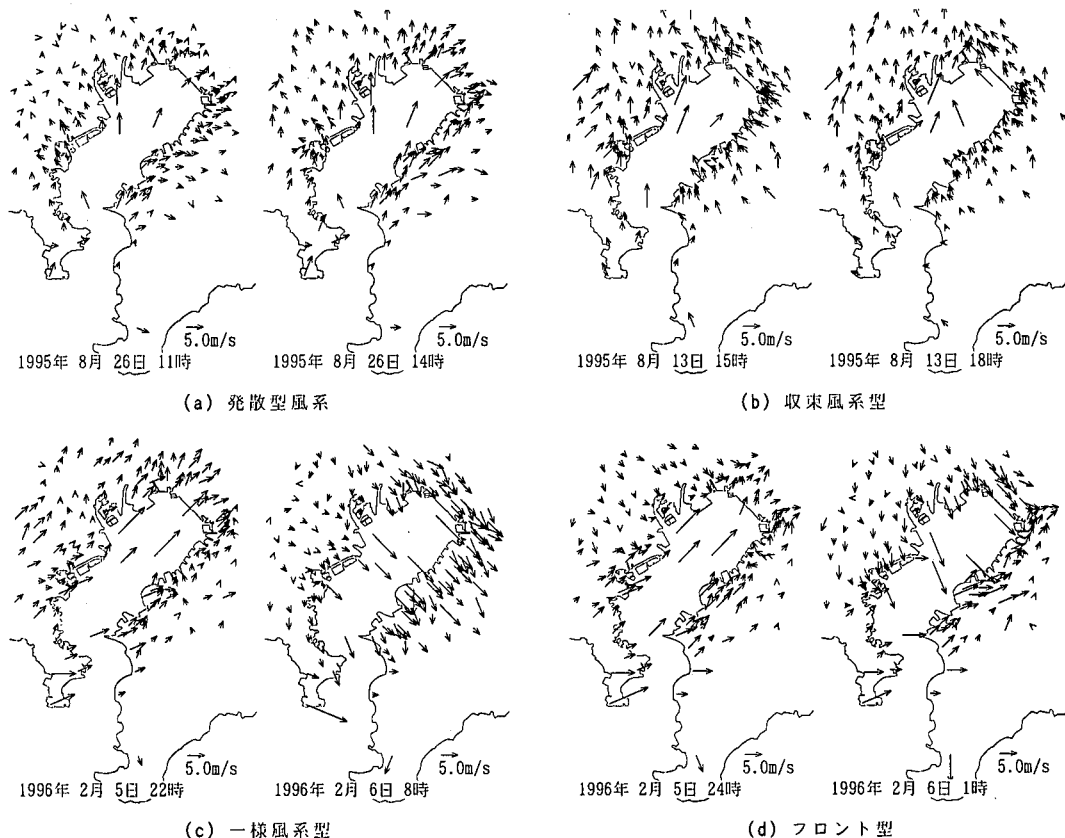


図-1 東京湾及びその周辺における特徴的な風系パターン

ようなことから、フロント型を有する風系の継続時間は、上記の3つの風系と比較して相対的に短くなっている。なお、このフロント風系型は、収束風系型と異なり、フロント形成位置が限定されておらず、また、その湾上でのフロントが存在する時間も短くなっている。

以上のように、東京湾周辺の風系パターンは、単純に一律な空間分布をしていることは稀であり、空間的な非一様性を有した風系が特徴的に出現し、しかも、そのパターンが時間的にダイナミックに変化する。

3. 風データに対する空間的補間法

上述のような顕著な時空間変動性を有する風系場のもとで海水流動計算を行う際には、空間的に疎な風の観測データから、流動計算で使用する格子点上に、何らかの形で風応力を与える必要が生じる。以下では、そのための合理的な補間方法について述べる。

ここで用いた風データの測定点は、海上の測点が陸上と比べて圧倒的に少ないことから、平面的な空間補間を単純に行ってしまうと、大きな粗度変化に起因して急激な風速変化が生じ得る海陸境界部においては、その急激な変化が補間によってならされてしまうことになる。そ

こで、ここでは以下のように考えて風速場の平面補間を行った。一般に、海陸境界部での風速場の急変は、地表面粗度の違いに起因した風速の大きさの急変として現われ、風向はあまり大きく変化しない。しかも、粗度の違いによる風速の変化は地表面近傍に顕著に現われ、逆に接地層上端あたりでは、粗度の違いの効果は小さくなる。そこで、平面補間を行う対象を地表近くの風速場ではなく、接地層上端レベルでの風速場とすれば、上述のような補間によって風速場を必要以上にならしてしまう問題は解消されるはずである。

具体的には、地表付近での風の観測データとその場所での粗度から、対数則により地上100 mでの値に風速値を変換し、これに対して平面補間を行った後、それから再び地表データに戻すことによって、格子点上の風データを設定した。なお、対数則において用いる粗度に関しては、国土数値情報から得られる15種類に分類された土地利用データから与え、具体的には、建物用地1.0 m、森林0.65 m、海水域0.001 mなどの粗度を用いた。

地上100 mの高さに変換された風データに対する平面的な空間補間は以下のように行った。まず、平面内で疎らに存在する測定データを仮想荷重法(日野, 1975)

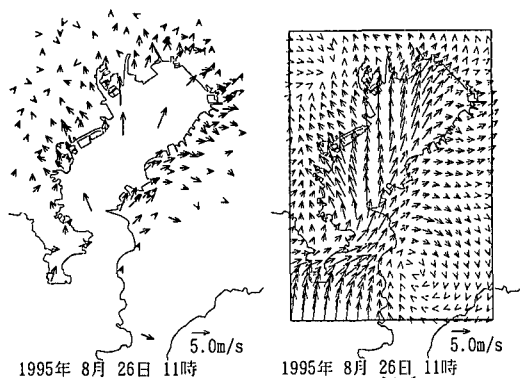


図-2 風データの補間結果の一例

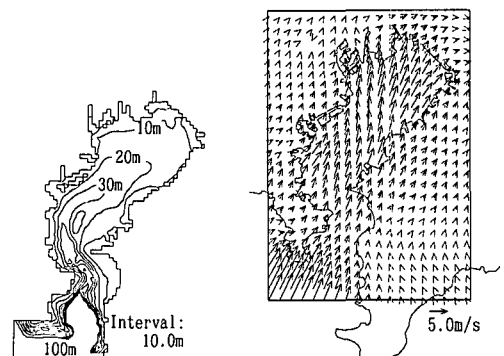


図-3 水深コンター

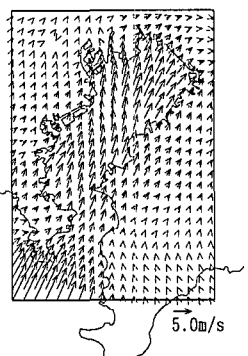
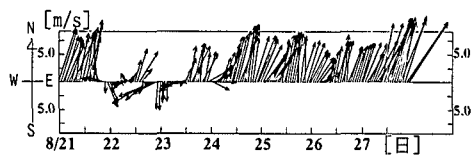
図-4 風データの空間分布
(1週間平均, 空間変動有り)

図-5 風データの時間変化 (空間変動無し)

を用いて平面格子点上に内挿する。ここで得られた平面データを用いて、各点ごとに、再度対数則を用いることにより、3次元格子点上の風向・風速データを得ることができるが、この内挿データは、当然のことながら、質量保存則を満たしているとは限らない。そこで、MASCON法 (Sasaki, 1958) を用いることにより、仮想荷重法から得られた風の3次元データに対して質量保存則を満足するような補正を行った。なお、MASCON法の際に必要な境界条件については、地表面上においては不透過条件を、その他の境界に関しては開放条件としている。最終的に、流動計算用に必要な風データは高度10mにおけるものであるが、その高さにおける実測データと補間後の風速分布の一例を図-2に示す。この図より、補間後の風速パターンが実測データと良好に一致していることが分かる。

4. 時空間変動風応力場における閉鎖性水域内流動の数値計算

(1) 数値シミュレーションの概要

ここでは、静水圧・Boussinesq近似を仮定した3次元のNS方程式と連続式を基礎式として、水平、鉛直渦粘性係数をそれぞれ、Smagorinsky型モデル、レベル2.5の乱流クロージャモデルを用いて算定する、 σ -座標系を導入したモデル (POM: Princeton Ocean Model, Blumberg & Mellor, 1983) を使用した。計算領域は、東京湾を覆う南北72 km、東西52 kmの領域であり、水平方向の格子間隔は1 km $\times$ 1 km、鉛直方向の分割を20層としている。水深データは、日本海洋データセンターのデータベースに基づいて与えており、図-3にそのコンター図を示す。境界条件としては、表面上では風応力を、底面上では底面摩擦力を与えており、閉境界ではno-slip条件を適用し、開境界となる東京湾南側では水位変動を0に固定し、流速に関しては開放条件を用いた。

計算対象期間としては、風系の時空間変動特性が海水流動に及ぼす影響を見るために、風系の実態解析から得られた図-1(a)のような発散風系型が卓越している1995年8月21日~27日の1週間とした。さらに、ここでは、空間変動性の効果をよりわかりやすい形で抽出するために、補間された風データをそのまま用いたケース (以下、「空間変動有り」と)、東京湾上の湾奥部4地点の平均データによって、空間的に一様で時間変動のみの風応力として作用させたケース (以下、「空間変動無し」) の2つの風応力条件のもとでの計算を行った。この空間変動無しの風の時系列データを示している図-5を見れば明らかのように、この期間では、全体的に南風が卓越している。また、空間変動有りのケースで用いる風データを、計算期間一週間にわたって平均した結果を図-4に示す。これから、この期間では、明確な発散風系型が現れていることが分かる。なお、流れの駆動力としては、水表面上に作用する風応力のみを与え、密度は時空間的に一様で、潮汐は考慮せずに計算を行った。

(2) 平均流動パターン

まず、全体的な流動特性を把握するために、両ケースにおける水深平均された平均流速ベクトルを図-6に示す。ここでの平均は、計算期間1週間にわたる時間平均を意味している。これらを見ると、空間変動有りのケースでは、湾奥部に時計周りの、湾中央部に反時計周りの明確な循環流が生じていることがわかる。それに対して、空間変動無しのケースでは、水深の浅い千葉県側では北上する流れが、水深が深い領域では、南下する流れが生じており、湾奥部に二つの循環流構造が存在している。このように、風応力の空間変動性の有無により、平均流

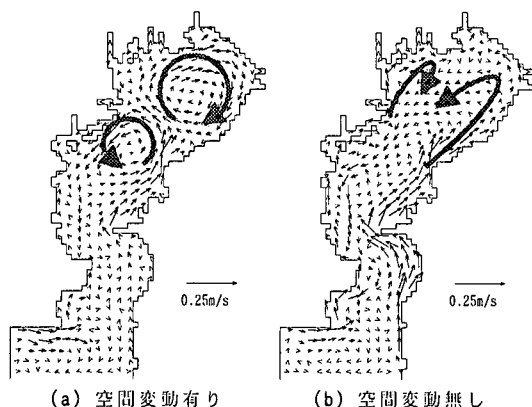


図-6 水深平均された1週間平均流速ベクトル

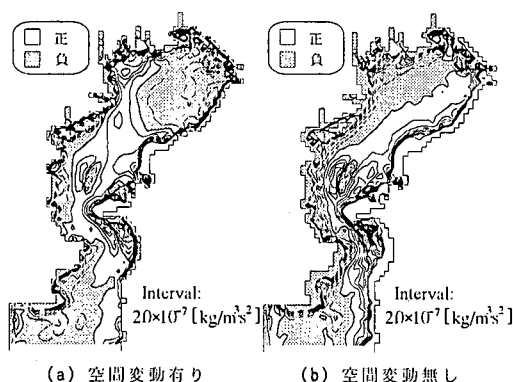
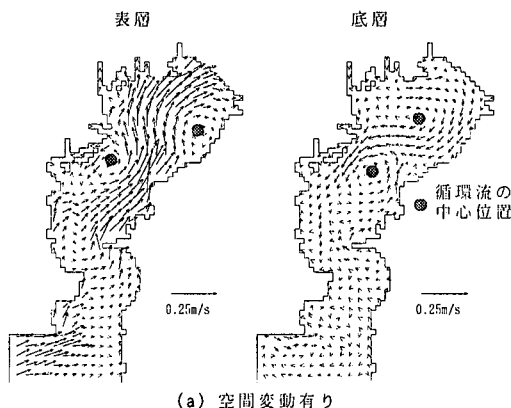
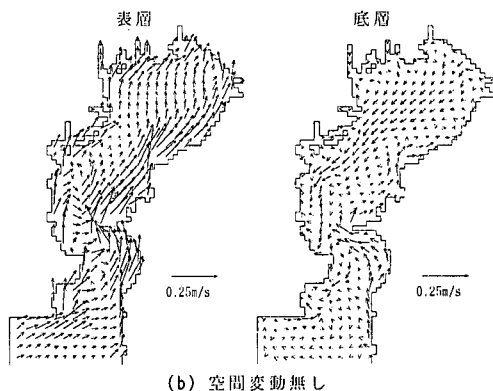


図-7 水深効果を加味した風応力のトルク項



(a) 空間変動有り



(b) 空間変動無し

図-8 各層での流動パターン

動パターンに大きな違いが現れることが分かる。

このような流動パターンの違いの原因を明らかにするために、循環流の発生に密接に関係している、水深効果を加味した風応力のトルク構造を見てみる。水深平均された風応力によるトルク項 T は、以下のように表される。

$$T = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right) + \left(\tau_y \frac{\partial h^{-1}}{\partial x} - \tau_x \frac{\partial h^{-1}}{\partial y} \right) \quad \cdots (1)$$

ここで、 x, y : 東西, 南北方向, τ : 水表面に作用する風応力, h : 水深を表しており、また、ここでは水位変動の効果は小さいものとして無視している。この式中の第一項は風応力の空間変動に起因する項で、第二項は水深変化に起因した項であることから、空間変動有りのケースでは、二つの項による効果が作用するのに対して、空間変動無しのケースでは、トルク項としては第二項しか寄与しないことになる。図-7に示されている風応力のトルク項の空間コンターを見ると、空間変動有りのケースでは、湾奥部において、風応力の空間変動性に起因した正と負のトルクの空間構造が現れているのに対して、空間変動無しのケースでは、水深分布に対応する形で正負のトルク構造が形成されていることが分かる。これらの

トルク構造は、図-6に示した平均的な循環流パターンと良好に対応しており、風応力の空間変動性の違いにより、トルクの空間構造が大きく変化して、平均流動パターンの違いを引き起こしているものと考えられる。

さらに、各ケースにおける流動構造を詳細に比較するために、表層と底層における平均流速ベクトルを図-8に示す。まず、空間変動有りのケースでは、表層、底層ともに、水深平均された流動パターンと同様な二つの明確な循環流構造が見られるが、そこでの循環流の中心位置(図中丸印)が、表層では海陸境界部近傍であるのに対して、底層では境界部から離れていることが分かる。また、空間変動無しのケースでは、表層では、全体的に北上する流れが卓越しているのに対して、底層では、水深の浅い領域においては北上する流れが、深い領域では、南下する流れが、それぞれ支配的になっている。このような特徴は、計算期間にわたる卓越風向と水深分布との関係によって理解することができる(長島, 1982)。

(3) ラグランジュ的な中立粒子の移流混合特性

次に、風応力の空間変動性が及ぼすラグランジュ的な移流混合特性の違いについて検討するために、中立粒子をラグランジュ的に移流追跡することを試みた。中立粒子は、計算初期に、富津岬以北のほぼ全領域に1 km 間隔

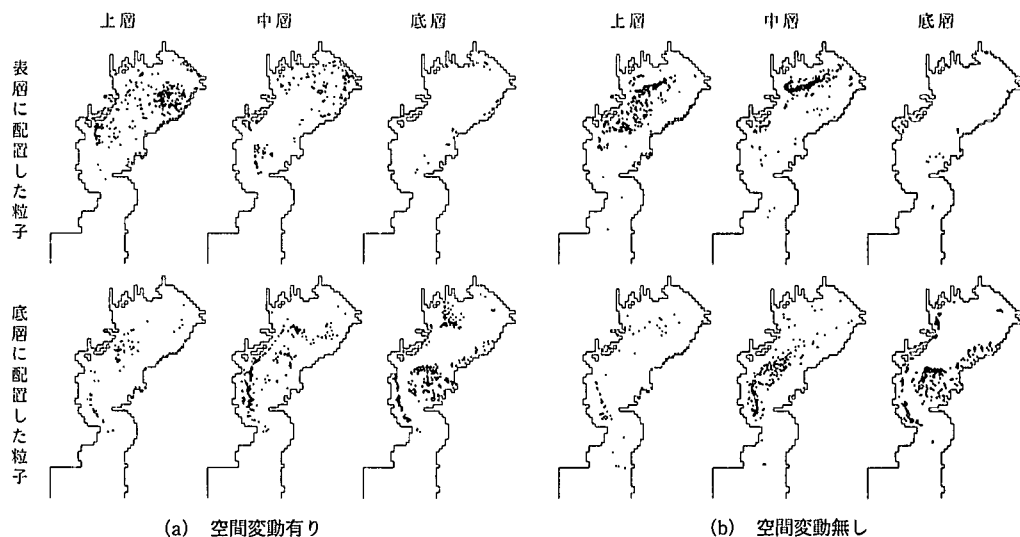


図-9 中立粒子のラグランジュ的挙動 (1週間後)

で合計 654 個配置した。また、鉛直位置の違いによる粒子挙動の変化を見るために、ここでは、表層(σ 座標における 1 層目)と底層(同 18 層目)の 2 層に粒子を初期配置した。

図-9 は、表層、底層に初期配置された中立粒子の計算開始一週間後の空間分布を表しており、鉛直混合特性も見られるように、中立粒子の鉛直位置の違いにより、上層(第 1~5 層)、中層(第 6~15 層)、底層(第 16~20 層)と分けたものを示している。これらを見てみると、中立粒子の分布パターンは、風応力の空間変動性により、水平的にも鉛直的にも大きく異なる移流混合特性を示しており、全体的には、空間変動有りのケースの方が大きく拡散している様子が見られる。特に、鉛直方向の移流特性に着目してみると、空間変動無しの場合では、湾奥部で沈降し、湾中央部で上昇している粒子の移流特性が見られるのに対して、空間変動有りのケースでは、湾奥部の半時計回りの低気圧性の循環流が存在する位置で上昇している。これらのことから、風応力の空間変動性の効果により、平均流動パターンにのみならず、物質輸送に直接的に関わる中立粒子のラグランジュ的な移流混合特性にも大きな違いが現れることが分かる。

5. 結 論

本研究では、地方自治体の細密気象データ等の解析により、東京湾における風系が時空間的に有意な非一様性を有することを明らかにするとともに、海水流動計算を

通じて、風応力の時空間変動の効果が、そのトルク構造の違いを介して、海水流動パターンや中立粒子の移流混合特性に大きな影響を与えることを示した。

謝辞：本研究に用いた風の測定データは、東京都環境保全局大気保全部、千葉県大気保全課、神奈川県環境保全センター、東京都港湾局港湾整備部、千葉港湾事務所、運輸省京浜港工事事務所、東京湾横断道路(株)、京葉シーバース(株)より提供を受けた。また、東京湾の流動計算を遂行する際に、東京工業大学日向博文氏、内山雄介氏にご協力を得た。ここに記して謝意を表します。なお、本研究の一部は、(財)鉄鋼業環境保全技術開発基金による環境研究助成を受けて行われたものである。

参 考 文 献

- 長島秀樹 (1982): 傾いた底を持つ水道の吹送流, 理化学研究報告, 第 58 巻 (2), pp. 23-27.
- 灘岡和夫・八木 宏・日向博文・二瓶泰雄・栗原 礼 (1996): 閉鎖性水域内流動特性に及ぼす外力の時間変動性の効果, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 391-395.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・栗原 礼・八木 宏・日向博文 (1997): 時間変動風応力のもとでの閉鎖性水域内のマルチセル構造の形成, ながれ (投稿中).
- 日野幹雄 (1975): 近似計算法としての仮想法の提案と解説, 東工大土木工学科研究報告, No. 18, pp. 89-96.
- Blumberg, A. F., and G. L. Mellor. (1983): Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight, J. Geophys. Res., Vol. 88, pp. 4579-4592.
- Sasaki, Y. (1958): An objective analysis based on the variational method, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 36, pp. 77-88.