

東京湾における季節特性を考慮した 湾内流動の再現計算

NUMERICAL SIMULATION ON FLOW FIELD CONSIDERING SEASONAL CHARACTERISTICS IN TOKYO BAY

五十嵐学¹・中山恵介²

Manabu IGARASHI and Keisuke NAKAYAMA

¹正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部海洋環境研究室 交流研究員
(東亜建設工業(株)) (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部海洋環境研究室 主任研究官
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

This study describes typical mass transports in spring, summer, autumn and winter in Tokyo Bay by using a non-hydrostatic model, MEL3D. Some typical salinity and water temperature distributions in each season obtained from field observation were used in the numerical computation. Furthermore, spatial distributions of wind over Tokyo Bay evaluated using nine meteorological observation stations were applied in the computation as boundary conditions. To investigate mass transport, neutral particle tracking simulations were carried out by putting particles along near the coastal line by about 4 km. As the results, especially in summer, it was demonstrated that the characteristic of the neutral particle transport in Tokyo Bay is strongly affected by the vertical current of circulation around the western coast in the head of Tokyo Bay.

Key Words : *spatial distribution of wind, non-hydrostatic model, neutral particle, vertical current of circulation, Tokyo Bay*

1. はじめに

干潟には多種多様な生物が生息し、水質浄化機能など海洋環境にとって様々な便益をもたらすことから、その必要性が再認識されており、東京湾においても人工干潟造成にむけた議論、研究が進められている。

そのような干潟域に生息する底生生物の多くは、卵からふ化した後、浮遊幼生として内湾域を回遊し、その後干潟域に定着することが知られている。このことから、浮遊幼生がどこで発生し、どのような経路を辿って干潟に定着するのか、つまり干潟間のネットワークを明らかにすることができれば、人工干潟の造成位置を決定する際の判断材料になり得ると考えられる。

しかしながら、それには精密な移流拡散予測が必要となり、内湾域の水流動を大きく支配する潮流、密度流そして吸送流等の再現性を高めなければならない。特に吹送流は、これまでの研究において各季節における物質輸送、流動を再現及び解析する際、風の場合に各季節の平均

風向及び風速を空間的に一様に与えて計算していることが多く、流動の高精度な再現性という点で疑問が残る。一方で、複数の観測点における風データを空間的に内挿して時空間変動を与えることにより、高精度な流れ場の再現が期待できるが、この方法では計算期間内の流動を再現しているに過ぎない。そのため、各季節を代表する風データによる流動の再現のためには、時々刻々変化する時空間風データを解析して、どのように各季節を代表する風データを与えるかが大きな問題であると言える。

そこで本研究では、季節を代表するような湾内流動を出来るだけ高精度に再現することを目的として、「残差成分」と「変動成分」という2つの風成分を足し合わせることで、季節の風特性を抽出しつつ時間変動も考慮出来る、風の空間分布推算モデルを構築して風の場合を推定・検証し、それを3次元非静水圧モデル(MEL3D)(Nakayama¹⁾, Nakayamaら²⁾, 中山ら³⁾)に外力として与えて湾内流動を再現する。さらに、各季節において中立粒子の挙動をラグランジュ的に追跡し、各季節における代表的な物質輸送機構の解明を試みる。

2. 東京湾における風の空間分布の推定

風の残差成分，変動成分を求めるにあたり，東京湾周辺におけるアメダス観測点の風データを使用した．風向・風速観測点は三浦・横浜（神奈川県），羽田・東京・新木場（東京都），船橋・千葉・木更津・館山（千葉県）の計9地点である（図-1）．

残差成分の推定にあたっては，いかに精度良く内挿を施して風の空間分布を求めるかが重要であり，変動成分の推定には季節を代表する風の周期特性などの抽出が課題となる．本章では，これらの検討方法について述べる．

(1) 風の残差成分を用いた空間分布

a) 風データの内挿方法

2002年7月～2003年6月の間にアメダスの観測点において記録された1時間毎の時系列データに対して，本研究では風の残差成分を対象としているので，日周期以下の周期の短い変動成分を取り除く為に25時間移動平均を施した．この風データを用いて，観測点毎に夏(2002年7月)，秋(2002年10月)，冬(2003年1月)，春(2003年4月)における東西方向，南北方向の時間平均風ベクトルを算出した．

次に，その平均風ベクトルを(1)式に示すような距離依存の重み付き平均により空間的に内挿した．

$$u_i = \sum_{k=1}^N U_k e^{-d_{i,k}/p} / \sum_{k=1}^N e^{-d_{i,k}/p} \quad (1)$$

ここで， u_i ：格子*i*における推算風ベクトル， U_k ：アメダス観測点*k*における風ベクトル， $d_{i,k}$ ：格子*i*とアメダス観測点*k*との距離， N ：アメダス観測点の数， p ：相関距離である．

(1)式では，相関距離*p*によって格子*i*における推算風ベクトル u_i が大きく変動するため，このパラメータの決定方法が重要になる．この決定方法に付いては次節で述べる．

b) 内挿方法の検証

風データの内挿に用いた(1)式の再現性を検証するために，アメダス観測点における実風速と推算風速との間で相関解析を行い，前節で述べた推算風速に大きな影響を与える相関距離*p*を決定した．推算風速を求める際には，検証対象地点を除いた計8地点によって検証対象地点の風速を推算している．

本検証の対象観測点は，東京湾湾奥部の流動に大きな影響を及ぼしていると考えられる湾奥周辺の海岸線に沿ったアメダス観測点5地点（横浜，羽田，新木場，千葉，木更津）とし，2002年7月から2003年6月の間に観測された時系列風データを使用した．

相関距離*p*の決定方法としては，その値を変化させ，風速に関する相関係数（図-2）と回帰直線の傾きと切片（図-3）とを求め，相関の良い相関距離*p*を採用することとしている．

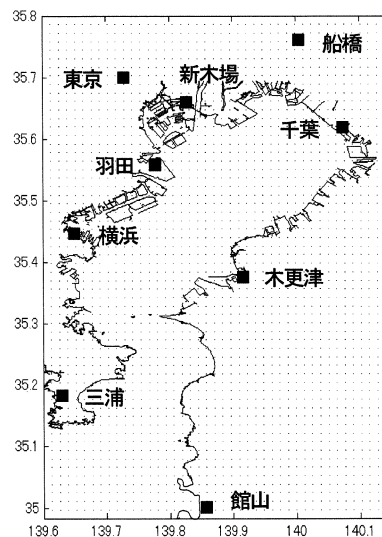


図-1 東京湾周辺におけるアメダス風向・風速観測点

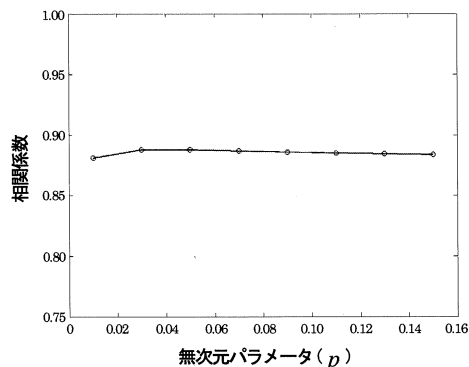


図-2 相関距離別相関係数（木更津）

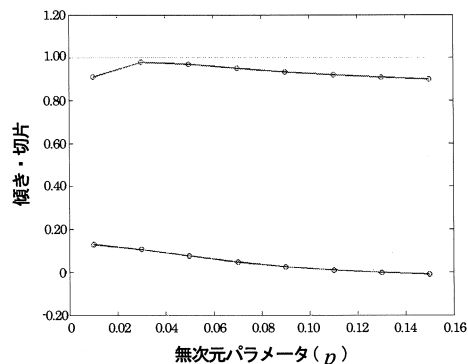


図-3 相関距離別傾き(上)及び切片(下)（新木場）

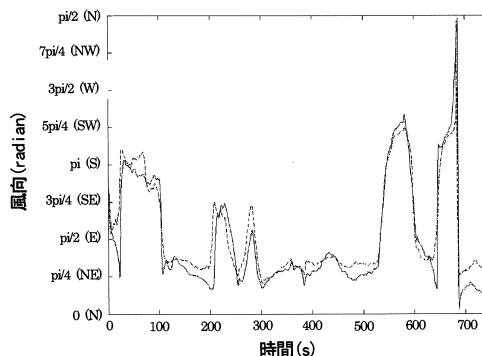


図-4 実風向(実線)と推算風向(破線)の時系列データ（千葉）

相関係数の値は0.88~0.97と、検証対象地点全てにおいて非常に強い正の相関が見られた。また、各検証対象地点において、相関距離 p の変化による相関係数の変動幅は0.01~0.03と非常に小さく、どの値を選ぶかは難しいが、回帰直線の傾きに関して相関距離 p の変化によって明確なピークを持つ地点は図-3に示した新木場のみであったため、ここではそのピーク時の相関距離 p の値0.03を考慮するものとした。

なお、回帰直線の傾きは0.37~1.23、切片は0.11~1.17と、各検証対象地点で大きなばらつきが見られた。この要因としては、特に傾きが小さかった千葉(0.37)と羽田(0.65)では、実際の風速が他地点と比較して大きいにも関わらず、他地点の影響を受けて推算風速が小さくなっていると考えられる。

続いて、風向についても検証を行った。図-4に千葉の夏季(2002年7月)における実風向と推算風向の時系列データを示す。これによると、先程の風速の検証において、実風速と推算風速の誤差が他の検証対象観測点に比べて最も大きかった千葉でも、風向に関しては補間データが実現現象を良好に再現している。この傾向は他の検証対象観測点及び他の季節においても同様に見られた。

以上の検証から、(1)式による推算風速の再現性についてはまだ課題が残るものの、各格子間の相対風速を求めるという方針であれば、今回補間した風の空間分布は利用可能だと言える。推算風向に関しては、実風向をよく再現できており、(1)式を用いた風データの内挿の精度は高いと言える。

c) 風の場の季節特性

図-5(a)~(d)に東京湾上における季節毎の風ベクトル分布図を示す。これは、アメダス観測点の風データに対して25時間移動平均を施し、さらにそのデータを季節毎に平均したものである。これによると、夏のケースでは南寄りの風が、冬のケースでは北寄りの風が卓越しているのに対し、秋のケース及び春のケースではそれぞれ北寄りの風及び南寄りの風が分布しているものの、夏のケース及び冬のケースと比較して風速が小さいことが分かる。これは、夏季及び冬季には同一風向からの風の割合が多いのに対して、秋季及び春季には北寄りの風と南寄りの風が交互に変動して吹くため、それらが互いに打ち消しあってこのような残差として現れたと考えられる。

(2) 風の変動成分の推定

風の変動成分の推定にあたっては、海上における実際の風に近い変動成分を得るために、東京湾のアメダス風データのうち比較的内陸部にある船橋と東京の2観測点を除いた7観測点のデータを用いた。これらを各時系列において平均し、風の東西、南北成分を求め、FFTにより回転スペクトルの解析を行った。

a) 楕円軌道を決定するパラメータ

本研究において、季節を代表する風の楕円軌道の概念図を図-6に示す。 A は楕円の長軸にあたり、風速のパワースペクトルにより求まる。 $C_{R\sigma}$ は回転係数と呼ばれる風の周期性を決める-1から1の間で変動するパラメータで、この値が1に近いほど円に近くなり、1では完

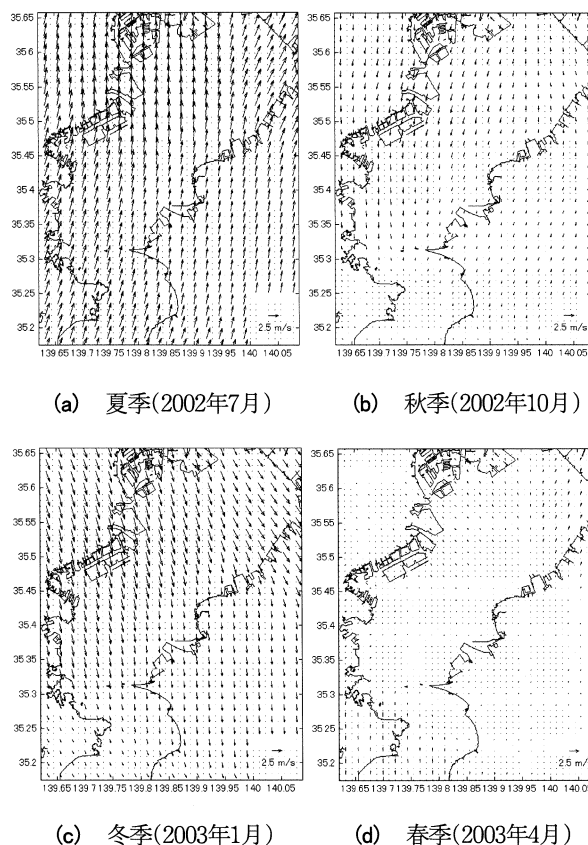


図-5 季節毎の風ベクトル分布図

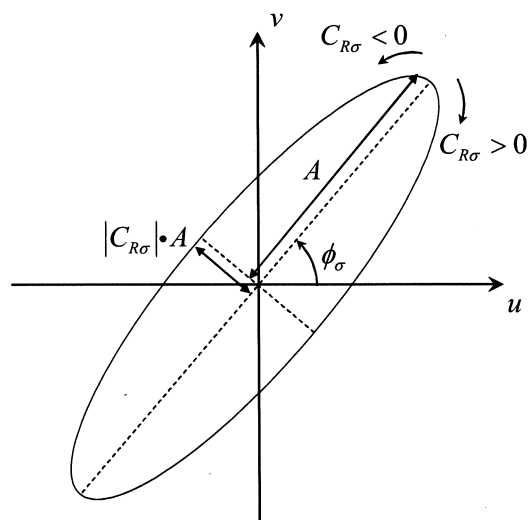


図-6 風の楕円軌道概念図

全な円軌道を描き、0では直線の軌道を描くことになる。このことから、長軸に回転係数の絶対値を乗じることでより短軸が求まる。また、 $C_{R\sigma} > 0$ の場合は時計回り、 $C_{R\sigma} < 0$ の場合は反時計回りの運動となる。 ϕ_0 は平均的な長軸方向を示し、 u 軸に対する回転角度である。

図-6には含まれていないが、平均長軸方向の安定度というパラメータも存在し、0から1の間の値をとる。この値が1に近いほど楕円長軸方向は有意と言える。

b) パラメータの決定方法

まず、スペクトルピークを求める。図-7は夏季における回転スペクトルである。これによると、全スペクトルのピークが周波数0.041~0.042(1/hour)に現れており、周期に変換して23.81~24.39(hour)とほぼ日周期であることが分かった。このことから、楕円軌道の周期は1日とした。

次に、楕円軌道を決定する各パラメータを求めるために、図-8に示すような各周波数に対するパラメータのグラフを用いてスペクトルピークにおける値を読み取った。季節毎にまとめた結果を表-1に示す。各季節とも安定度が高く、平均長軸方向は有意と言える。

3. 風の季節特性を考慮した数値計算

(1) 数値計算概要

本計算には、3次元非静水圧モデル(MEL3D)を用いており、計算期間はそれぞれの季節において1週間としている。計算領域は、南北方向60km、東西方向45kmで、水平方向1km×1km、鉛直方向1m間隔格子とし、最大水深は50mとした。潮汐は、開境界において半日周期のM2分潮を振幅0.37mとして与えている。

風の分布は、各季節における残差成分と楕円軌道を描く変動成分とを足し合わせたものを与えた。なお、今回使用した風データは陸上で観測されたものであり、実際の海上における絶対風速と大きく異なることが予想される。そこで、本計算では過去に筆者らが行った、アクアラインにおいて観測された風データと、アメダスの風データを用いた空間分布との相関解析の結果を踏まえ、先程求めた風の分布に調整係数として2を乗じている。

水温と塩分は、中山ら⁴⁾によって観測及びモデル化されたデータを用い、夏季(2002年7月29日)、秋季(2002年10月24日)、冬季(2003年1月30日)、春季(2003年3月19日)の季節毎に空間分布として与えた。なお、水温・塩分は時間経過によって値が変動しないものとしている。

(2) 流れ場の再現

図-9に、水深6mにおける季節毎の平均流速ベクトル分布を示す。湾奥部において、夏季には明瞭な、春季には流速が小さい時計回りの循環流がどちらも東京港寄りに形成されていた。秋季と冬季では明瞭な循環流は見られなかったが、それに近い時計回りの流れは見られた。富津岬の北側においては、夏季以外の季節で時計回りの循環流が形成され、夏季には他の季節よりもやや北側で反時計回りの循環流が確認できた。

(3) 中立粒子の挙動

ここでは、季節毎の流れ場において、中立粒子の挙動を明らかにするために、それをラグランジュ的に追跡することを試みた。

図-10に中立粒子の初期配置を示す。この中立粒子は底生生物の浮遊幼生を想定し、湾口付近から湾奥沿岸にかけて計300個配置した。なお、本研究では中立粒子の挙動計算結果を動画データ化し、目視により粒子の追跡

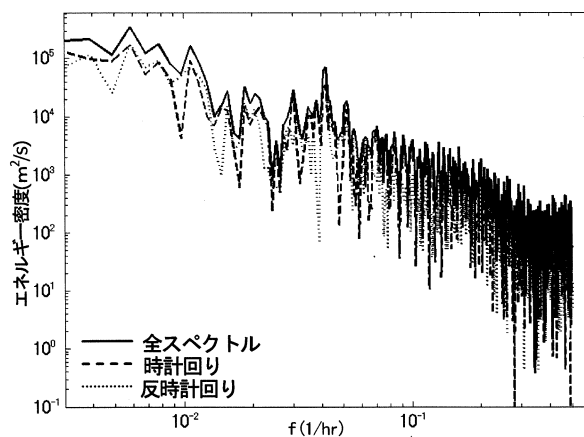


図-7 回転スペクトル

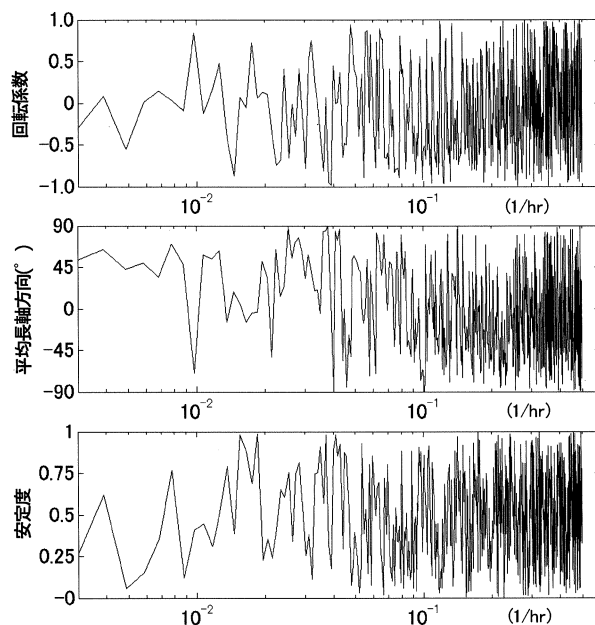


図-8 回転係数(上)、平均長軸方向(中)、安定度(下)

表-1 季節毎のパラメータ

	パワーピーク (1/hr)	長軸 (m/s)	回転係数	平均長軸方向 (°)	安定度
夏	0.042	2.0462	0.0112	74.31	0.8537
秋	0.041	2.0181	-0.4527	85.12	0.8788
冬	0.042	2.9332	-0.0808	83.71	0.9728
春	0.041	2.6398	0.4939	82.74	0.8417

を試みたため配置できる粒子の数が限られ、試行錯誤により中立粒子の数を決定した。また、夏季の東京湾では底層が広い範囲で貧酸素状態となる(例えば、風呂田⁵⁾)ことを考慮し、アサリの浮遊幼生の調査を行った粕谷ら⁶⁾にならって、中立粒子の水平分布を見る鉛直位置を水深0~4m(上層)、4~8m(中層)、8~12m(下層)の3層とした。なお、実現象では中立粒子は干潟から湾内に流出することを考慮して水深0mにのみ配置し、中立粒子の拡散計算にはランダムウォークモデルを用いた。

図-11に計算開始から1週間経過後の各季節及び各層における中立粒子分布を示し、その挙動特性について述べる。ここで、例えば二枚貝類の浮遊期間は1週間から4週間である(波部ら⁷⁾)が、本計算では中性粒子の挙動がほぼ平衡状態に達した1週間を計算期間とした。

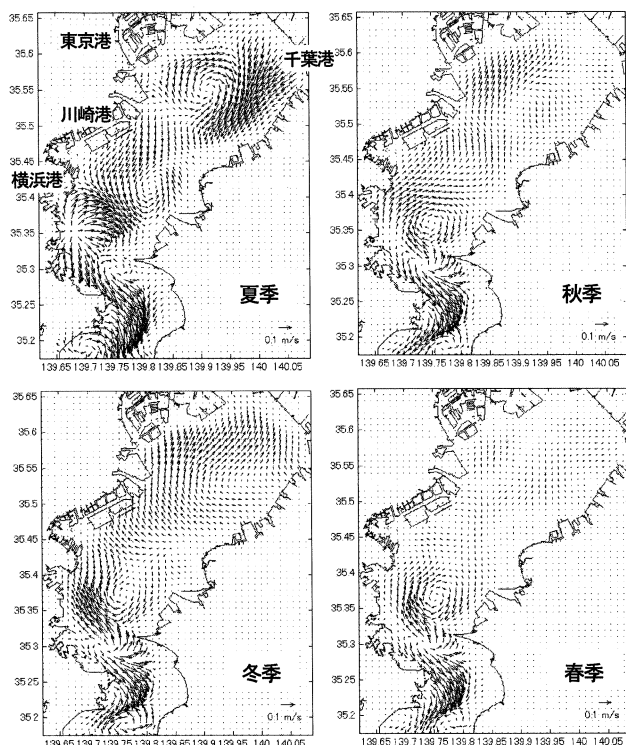


図-9 平均流速ベクトル分布図（水深6m）

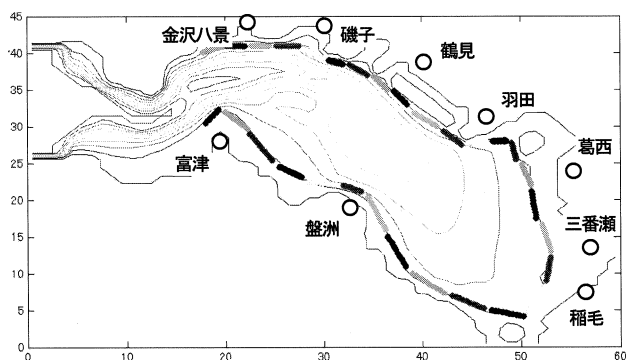


図-10 中立粒子初期配置図

a) 夏季

上層においては東岸に中立粒子が見られるが、これらは東岸沖に配置したものである。また、金沢八景沖～磯子沖に少数の粒子が確認できるが、これらはこの付近の粒子が一度沖に出た後、再び戻ってきたものだった。これは、金沢八景沖で湧昇し、富津北側へ移流し沈降する鉛直循環流によるものであり、上層から下層にかけて卓越していた。

中層において湾奥部の盤洲沖～羽田沖にかけて見られる中立粒子は、羽田沖～浦安沖のそれが集積し塊となって小刻みな時計回りの回転を伴い移流し、その一部は湾奥以南から移流してきたものも含まれていた。

下層においても中層と同様な場所に粒子の集積が見られるが、これは千葉港付近の中立粒子が羽田沖に移流し、その後そこに留まったものと、川崎港・横浜港付近の粒子が移流してきたものだった。

夏季の傾向で特に顕著だったこととして、1つ目に湾

奥西岸の滞筋付近（羽田沖）における鉛直循環流が挙げられる。この領域では、鉛直流の影響を受けて中立粒子が上層と下層を行き来しながら移流する様子が見られた。夏季の場合、南寄りの風が卓越し、コリオリの力が働くことによって西岸から東岸に向かう流れ（地衡流）が発生する。また、湾奥西岸は岸沖方向に急激に水深が深くなっていて海底勾配が大きいので、湧昇流の流速も大きくなる。このことから、夏季は鉛直方向と水平方向の流れが組み合わさった非常に複雑な流れ場と言える。

2つ目に、湾奥に配置した中立粒子が湾奥の時計回りの循環流によって集積され、それが塊のまま湾奥の盤洲沖に向かう様子が見られた点である。粕谷ら⁶⁾は現地観測によって、日向ら⁸⁾は再現計算によって夏季におけるアサリの浮遊幼生が盤洲沖に集積することを明らかにしており、観測及び計算の対象年は異なるものの（粕谷ら⁶⁾及び日向ら⁸⁾は2001年）、本計算でも同様な結果が得られた。

b) 秋季

上層および中層において、千葉港沖に中立粒子の集積が見られるが、これは羽田沖からと東京港～稲毛沖からという2通りの時計回りの循環流によって移流していた。

中層・下層では、金沢八景沖から富津沖へ、そして鶴見沖から盤洲沖へという共通した中立粒子の挙動が見られた。さらに下層においては、鶴見以北の中立粒子が千葉港付近にまで移流する様子が確認された。

秋季の傾向として、湾奥部で夏季に見られたような時計回りの循環流に近い流れが見られ、それによって中立粒子が集積して移流していく様子が確認できたが、流れの速度は遅く、夏季よりも湾奥寄りで大回りする流れであった。また、鉛直流も見られたが、夏季よりも顕著な流れではなかった。

c) 冬季

中層において、千葉港付近に見られた中立粒子は葛西沖から移流してきたものであり、下層において湾奥に見られる中立粒子は、羽田沖～三番瀬から循環流の影響を受けて移流してきたものだった。しかし、いずれの移流速度も秋季より小さかった。

冬季の傾向としては、中立粒子の鉛直下向きへの移流速度が他の季節と比較して大きく、元の配置場所から少し岸沖方向に移流しただけで沿岸浅海域の海底面に到達、もしくは下層以深に移流するものがほとんどだった。

d) 春季

中層・下層ともに、富津沖に中立粒子が集積している領域が見られた。これは、磯子・金沢八景沖から移流してきており、上層から中層、そして下層へと、次第に沈降しつつ移流していることが確認できた。中層では鶴見沖から盤洲南側への粒子の移流も見られた。

春季の傾向として、湾奥では鉛直下向きの移流速度が大きいなど、冬季と類似した傾向を示しつつも、下層においては複数箇所から直線的に中立粒子が移流していく様子が見られるなど、特徴的な挙動を示していた。

以上、各季節における中立粒子の挙動特性を明らかにした。いずれの季節においても中立粒子は各層における残差流とほぼ同じ挙動を示し、それに加えて、夏季には鉛直流に大きく影響を受けていた。

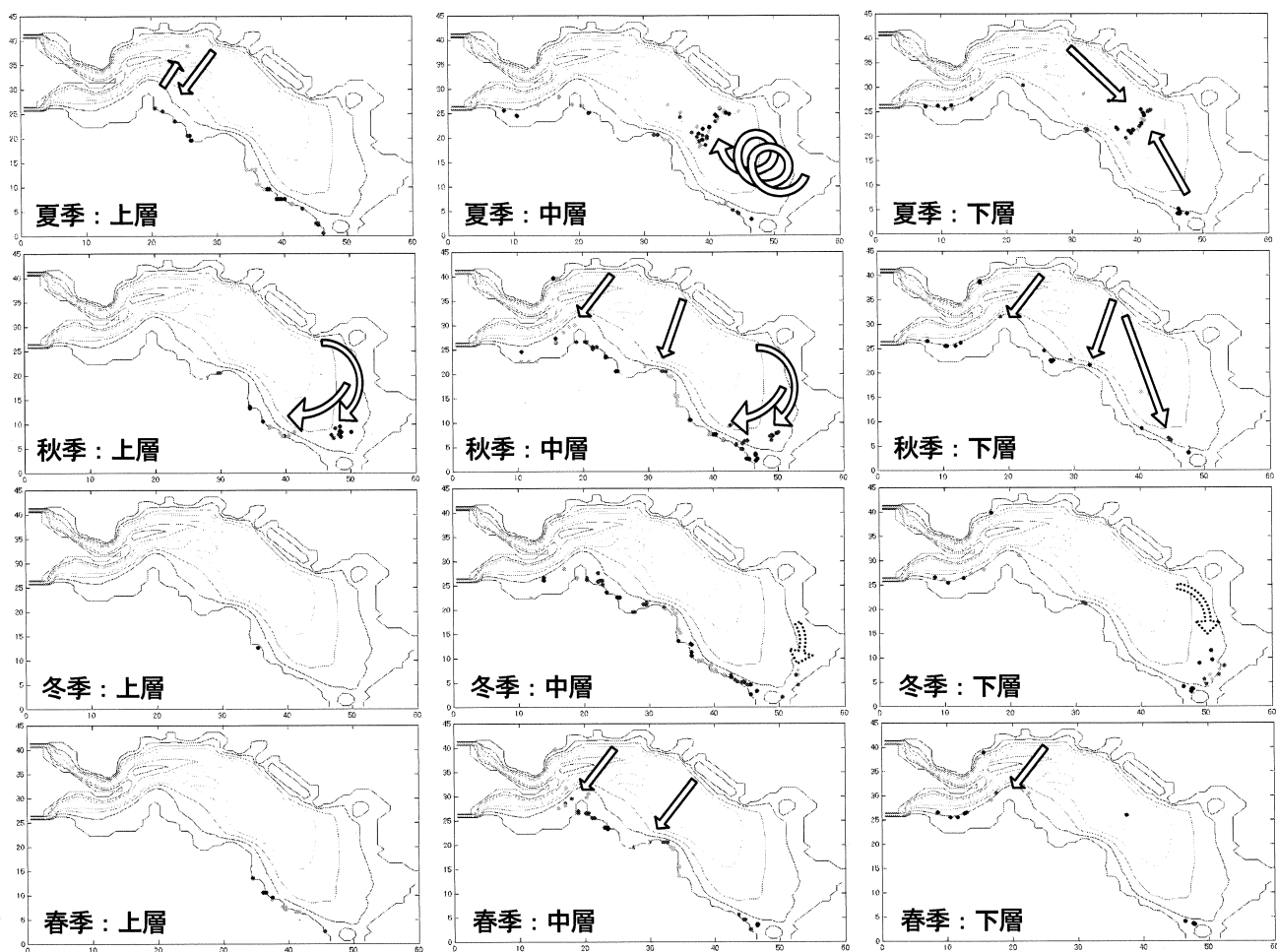


図-11 中立粒子分布図

4. おわりに

本研究では、まず東京湾周辺のアメダス風データを用いて、各季節における東京湾上の風を、空間分布を考慮した風の残差成分と空間に一樣な時間変動成分という2つの視点から推定・検討した。

次にその風の間を外力として3次元非静水圧モデル(MEL3D)に与えることによって東京湾の流れ場を再現し、各季節を代表する流れ場における中立粒子の挙動特性を明らかにした。以下に主要な結論を述べる。

- 1) 「残差成分」と「変動成分」を考慮した風の空間分布推算モデルを構築し、風の分布を推定・検証した。
「残差成分」について相関解析を行った結果、推算風速については課題が残るものの、相対風速の利用であれば適用可能であり、推算風向については実現象をよく再現していた。また、「変動成分」については、スペクトル解析により季節を代表する風を楕円軌道で表した。このような風の空間分布推算モデルを構築し、東京湾における風の季節特性を明らかにした。
- 2) 再現した季節を代表する風の空間分布を外力として3次元非静水圧モデル(MEL3D)に与えて湾内流動を再現し、各季節における中立粒子の挙動特性を明らかにした。その結果、特に夏季における中立粒子の挙動は、湾奥西岸の滞筋付近や金沢八景沖に見られた鉛直循環流に大きな影響を受けていることを明らかにした。

参考文献

- 1) Nakayama K.: Comparisons of using CIP, compact and CIP-CSL2 schemes for internal solitary waves, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.51, pp.179-219, 2006.
- 2) Nakayama K, T. Okada and M. Nomura: Mechanism responsible for fortnightly modulations in estuary circulation in Tokyo Bay, *Estuarine Coast and Shelf Science*, Vol.64, pp.459-466, 2005.
- 3) 中山恵介, Jorg Imberger: 斜面に連続的に作用する内部界面の理論解の適用性の検討, 土木学会論文集, No. 789, pp. 59-72, 2005.
- 4) 中山恵介, 清木荘一郎, 石川忠晴, Alex S. J. Wyatt: 東京湾湾口部におけるフロント形成過程の究明, 水工学論文集, 第49巻, pp. 1291-1296, 2005.
- 5) 風呂田利夫: 東京湾における貧酸素水の底生・付着動物群集に与える影響について, 沿岸海洋研究ノート, 第25巻, pp. 104-113, 1988.
- 6) 粕谷智之, 浜口昌巳, 古川恵太, 日向博文: 夏季東京湾におけるアサリ浮遊幼生の出現密度の時空間変動, 国土技術政策総合研究所研究報告, 第8号, pp. 1-13, 2003.
- 7) 波部忠重, 奥谷喬司, 西脇三郎: 軟体動物学概説 下巻, サイエンス社, 1999.
- 8) 日向博文, 戸簾幸嗣: 東京湾におけるアサリ幼生の移流過程の数値計算, 水産総合研究センター研究報告, 2004.