

横浜川崎地区京浜運河における 流動・水質の現地調査

FIELD SURVEY ON CURRENTS AND WATER QUALITY IN SOUTHERN PART OF KEIHIN CANAL

田中陽二¹・鈴木高二朗²・下迫健一郎³・白井一洋⁴・福島正明⁴

Yoji TANAKA, Kojiro SUZUKI, Kenichiro SHIMOSAKO,
Kazuhiro SHIRAI, and Masaaki FUKUSHIMA

¹正会員 博(環境) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0831 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 修(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (同上)

³正会員 博(工) 関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所 (〒221-0053神奈川県横浜市橋本町2-1-4)

⁴非会員 関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所 (同上)

Southern part of Keihin Canal in Tokyo bay is highly urbanized. In this area, anoxic water has been observed in summer. However, information of the water quality and velocity field is not clear. In order to clarify the environment in Keihin Canal, water qualities were measured every 2 weeks at fixed points in and outside of Keihin Canal. Results of this study were as follows. 1) Baroclinic flows paralleled to the canal were influenced by the wind. So, water of the bottom layer in Keihin Canal also exchanges with Tokyo Bay by wind driven currents. 2) Phytoplankton blooms had occurred in only Keihin Canal from June to July. 3) It was considered the relation between dissolution of the anoxic water and some stratification indexes. The threshold of anoxic water of the Brunt-Väisälä frequency and the density difference was 0.069(1/s) and 3.37, respectively.

Key Words : Keihin Canal, Tokyo Bay, water quality, anoxic water, velocity field

1. はじめに

沿岸域の水質環境において、底層の貧酸素化は周囲の生態系に多大な悪影響を及ぼしている。その実態の解明は重要で、かつ今後も取り組むべき課題である。特に、東京湾湾奥や千葉周辺の浚渫窪地での貧酸素水塊の形成は大規模であり、青潮の発生原因とも絡めて、その発生メカニズムが明らかになりつつある¹⁾。また、東京湾西岸に位置する京浜運河も、閉鎖性の高い海域であるため貧酸素水塊が形成されており²⁾、東京湾にも影響を与えている可能性が指摘されている³⁾。しかし、横浜川崎地区の京浜運河の水質・流動特性は十分に調査されておらず、その解明が望まれている。ここでは横浜川崎地区京浜運河の流動および水質特性を明らかにすることを目的とした。

なお、広義としての京浜運河は東京港と横浜港を結ぶ運河の総称であり、多摩川をはさんで北側と南側に分けられる。本研究では多摩川より南側の京浜運河を取扱い、以下の議論で単に「京浜運河」と記述する場合は横浜川崎地区の京浜運河を表す。同様に「東京湾」とは京浜運河を除いた東京湾を表す。

2. 観測方法

(1) 定期観測

春期から冬期にかけての京浜運河における水質を把握するため、京浜運河内に34カ所の観測点を設けて定点観測を実施した(図-1)。観測は2008年5月～2009年3月にかけて、1ヵ月に2回程度の頻度で行った。観測装置として多項目水質計(JFEアレック社AAQ1183)を用いて、塩分・水温・溶存酸素(以下、DO)などの鉛直プロファイルを取得した。その他、京浜運河と東京湾内との水質の比較を行うため、東京湾内にも観測点を設けた。

(2) 流動観測

京浜運河内の流動特性を把握するため、ADCPを用いて流動観測を実施した。調査航路を図-1に示す。観測は2008年6月18日(大潮)に、下げ潮時(7:00～9:00)と上げ潮時(13:00～14:50)でそれぞれ1回行った。

なお、定期観測と集中多点観測は、横浜港湾空港技術調査事務所の環境調査船により行われた。

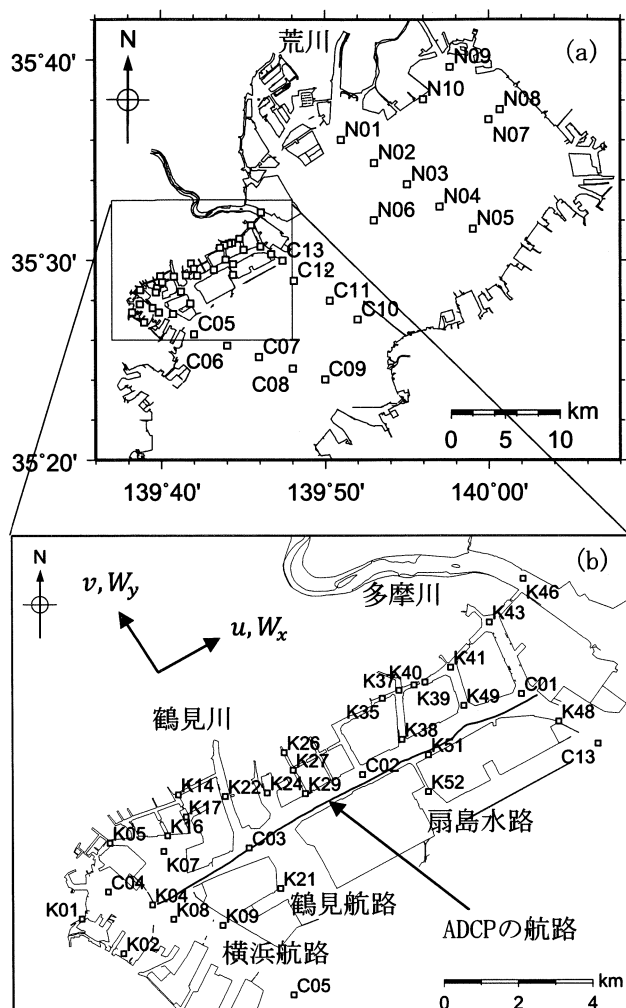


図-1 東京湾と京浜運河内の定期観測地点と ADCP の航路

3. 観測結果

(1) 水質の時系列変化

京浜運河内と、東京湾の湾央部・湾奥部における水質の時系列変化を図-2に示す。底層の貧酸素水塊（D0が2mg/L以下）の割合は京浜運河、東京湾ともに5月末から増え始めた（図-2(c)）。その後、京浜運河では7月中旬以降から全体の50%が貧酸素化した。東京湾では京浜運河より早く貧酸素化が進行し、6月初旬には全体の50%が貧酸素状態となった。貧酸素化が解消し始めた時期は9月末で、京浜運河・東京湾ともにほぼ同時期であった。

なお、東京湾では10月中旬に一時的に底層のD0が増え、80%以上の地点で貧酸素化が解消された。このときは底層で比較的高い塩分が観測されたため、D0の高い外洋系水塊が流入したと考えられる。ただし、これは一時的な現象であって、10月の下旬には再び貧酸素状態の地点が増えた。

表層のクロロフィル-a濃度は、5月中旬から6月初旬まで京浜運河と東京湾は20 μ g/L前後で推移した（図-2(b)）。その後、6月中旬から7月下旬までの

期間で、京浜運河のクロロフィル-a濃度は非常に高い状態が続いた。東京湾では、その期間は10~20 μ g/L程度と比較的低い状態であったことから、対象的な結果となっていた。

(2) 流動構造

6月に行ったADCPによる流動観測結果を図-3, 4に示す（測定航路と流速方向は図-1(b)を参照）。 u' , v' は観測された流速値から鉛直方向の平均流速値を差し引いたものであり、流れの傾圧流成分に相当する⁴⁾。また、流動観測時の潮位（横浜新港）と、風速（羽田）⁵⁾の時系列変化を図-5に示す。

航路に直交する v' は水平・鉛直方向ともに複雑な分布をしていた（図-3(b)）。一方、航路に平行な u' は、表層と底層で西向き、中層で東向きの流れが表れていた（図-3(a)）。 u' の分布と密度成層との関係は明瞭ではなかったが、おおむね水深5mと9mに流向の反転層が見られ、3層構造となっていた。

上げ潮時においては、 u' の分布は下げ潮時ほど明瞭でないものの、表・中層ではおおむね東向きの流れが多く、底層では西向きの流れが卓越した2層構造となっていた（図-4）。上げ潮時の v' は下げ潮時と同様に複雑な分布となっていた（図省略）。

表層の u' は同方向風速成分の W_x にほぼ対応して流れており、特に北東風が卓越していた引き潮時にはそれが顕著であった。そのため、吹送流の影響を強く受けていたと考えられる。すなわち、航路に平行な風が卓越した場合は、中層や底層でも表層の補償流が発生し、観測結果はそれを反映した流れ場となっていたと考えられる。今回の観測時では、底層で東京湾から流入する流れとなっており、表層と底層では u' の大きさがほぼ同じであった。したがって、吹送流による東京湾との海水交換が、底層でも活発に行われていることが明らかとなった。

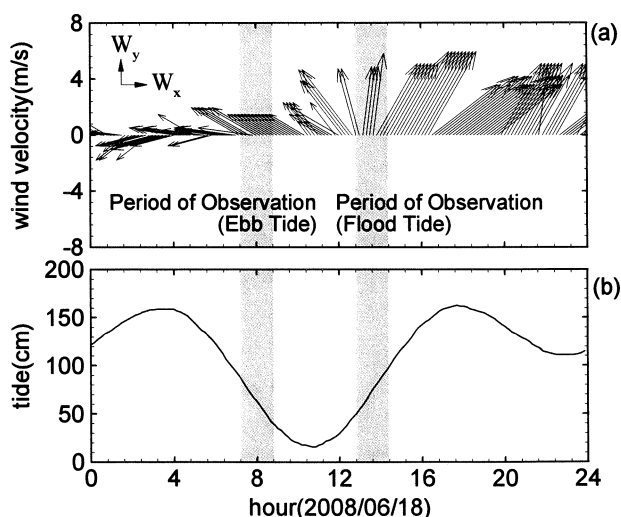


図-5 流動観測時の潮位（横浜新港）と風速（羽田）⁵⁾の時系列変化

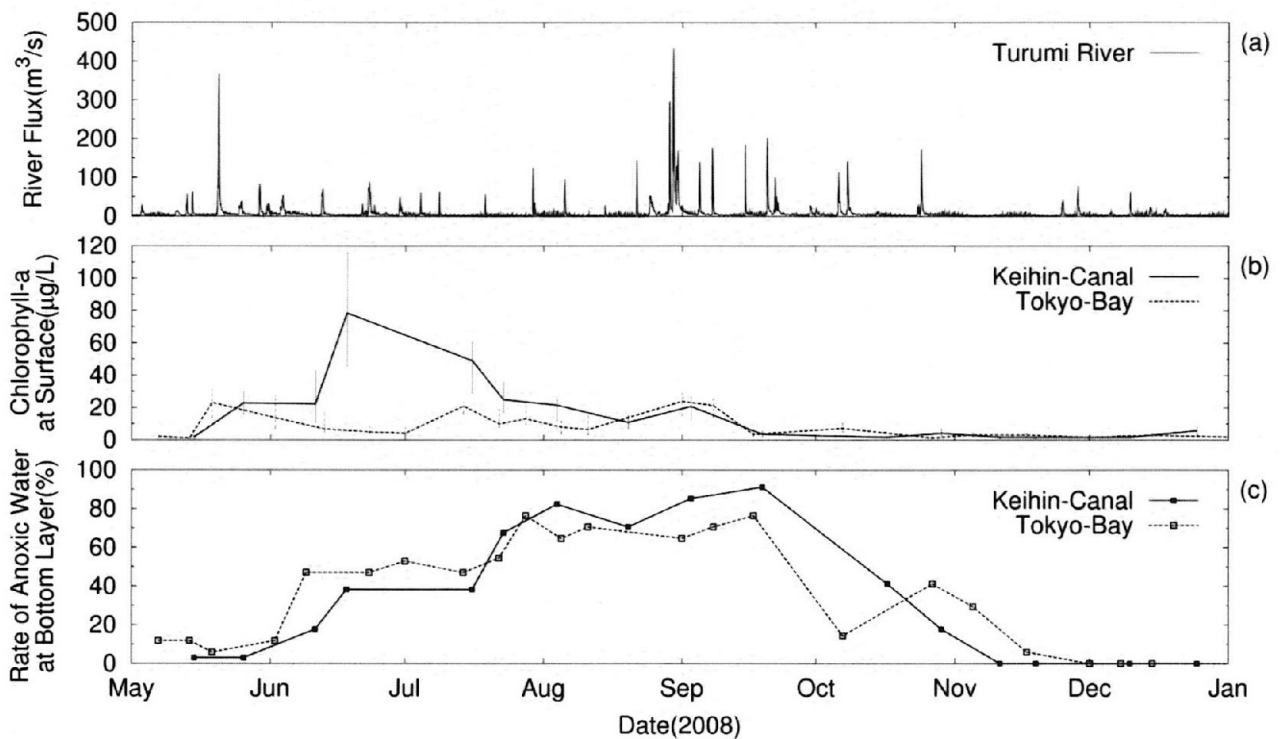


図-2 京浜運河と東京湾における水質変化および鶴見川の流量；(a) 鶴見川の流量，(b) 表層のクロロフィル a の中央値（エラーバーは第 1 および第 3 四分位値），(c) 底層が貧酸素化している地点（ $D0 \leq 2\text{mg/L}$ ）の割合

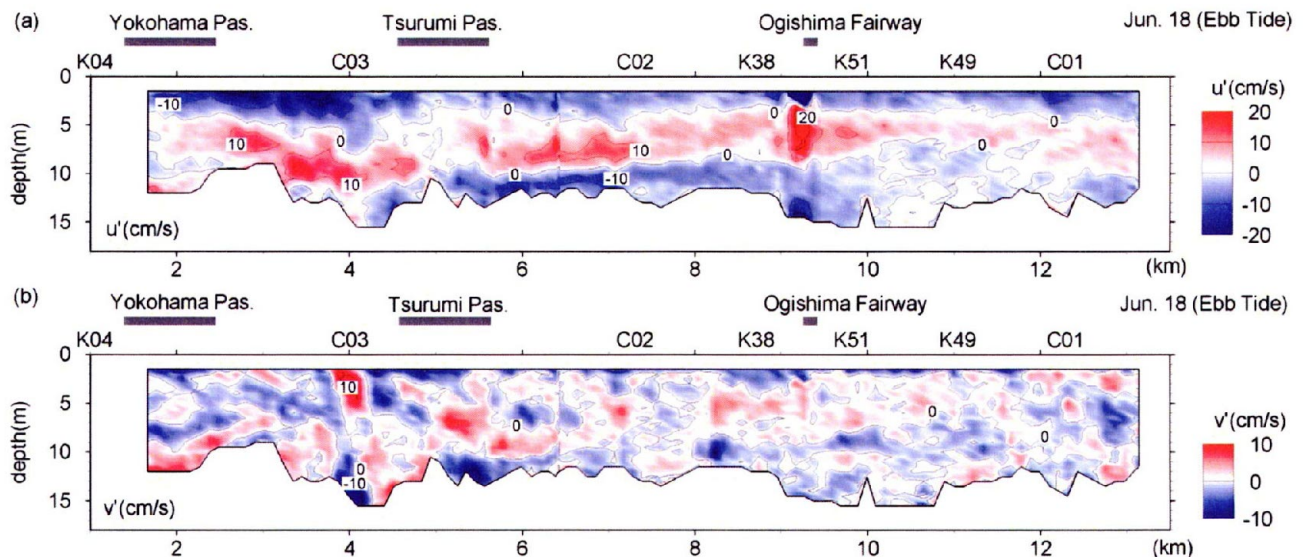


図-3 京浜運河における引き潮時の傾圧流成分の横断面分布；(a) u' （川崎方向が正），(b) v' （北西方向が正）

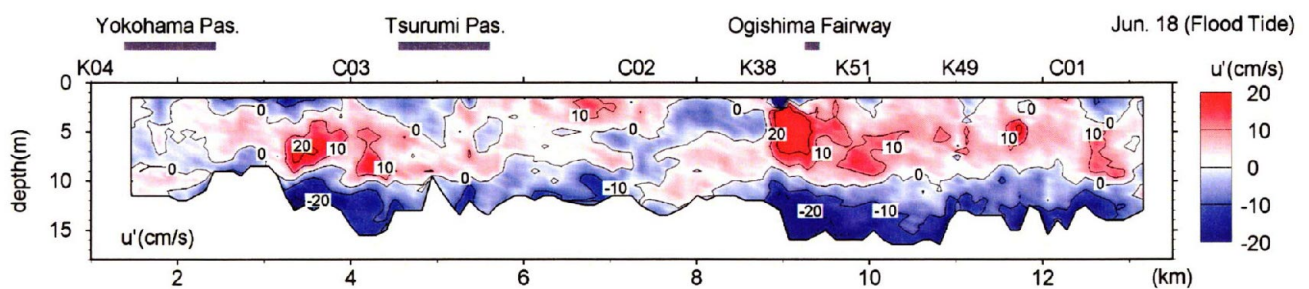


図-4 京浜運河における上げ潮時の傾圧流成分 u' （川崎方向が正）の横断面分布（正值は白色）

4. 解析と考察

(1) 京浜運河内のブルーム発生要因

6月中旬から7月下旬の期間において、京浜運河内で高濃度のクロロフィル-a が観測された（図-2(b)）。これは、東京湾湾奥部と比較しても非常に高い値となっていた。京浜運河でブルームが発生した原因として、栄養塩環境あるいは成層構造が東京湾湾奥部と異なっていたことが考えられる。以下では京浜運河と東京湾湾奥の両者について比較を行う。

a) 栄養塩環境の検討

東京湾ではリンまたはケイ素が植物プランクトン増殖の制限因子となることが鯉洸ら⁶⁾によって指摘されている。よって、ブルームの発生があった京浜運河で、リンまたはケイ素が東京湾よりも多く存在していた可能性が考えられる。

京浜運河の横浜航路にある C05 と、東京湾湾奥部の栄養塩変動を図-6 に示す。京浜運河（C05）でのみ、6月に高濃度のクロロフィル-a が観測されていた。しかし、DIP（溶存無機態リン）に関しては、C05 と比較して荒川河口域である N01 は非常に高濃度の値が観測されているが、他の地点においては京浜運河と同程度の DIP であった。ケイ素についても同様の結果が得られた。したがって、京浜運河の栄養塩環境は東京湾湾奥部と比較して特異な状況ではなく、ブルーム発生と栄養塩環境の差についての関連性は見られなかった。

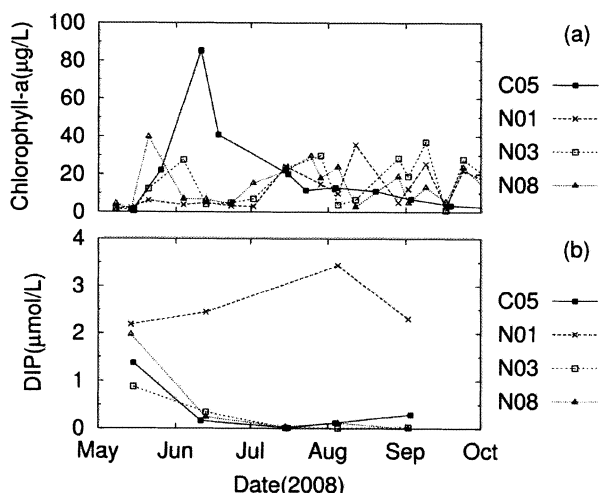


図-6 表層における水質の時系列変化；(a)クロロフィル-a 濃度、(b)溶存無機態リン濃度

b) 成層構造の検討

水柱での植物プランクトンの光合成と呼吸を考えたとき、上層混合層中の光合成と呼吸が釣り合う深度を臨界深度とよぶ。その臨界深度よりも成層深度が浅くなった場合には混合層内で光合成量が上回るため、ブルームが発生しやすくなる⁷⁾。したがって、入射する光強度が同じでも、成層構造によってブルームが発生した可能性が考えられる。

図-7に6月中旬における京浜運河と東京湾湾奥の

水質鉛直プロファイルと比較した例を示す。C04とN03は両者ともに明確な成層は形成されておらず、ほぼ同等の密度構造となっていた。しかしながら、C04は表層のクロロフィル-a濃度が80 μg/Lを超える値であったが、N03では5 μg/L程度であった。他の地点でも同様の結果であり、ブルーム発生の有無と臨界深度の関連性は見られなかった。

c) 考察

今回の観測では、京浜運河でブルームが発生した理由を特定するまでには至らなかった。今後、大量発生した植物プランクトン種の特定など、発生要因のより詳細な検討を行うことが課題として挙げられる。

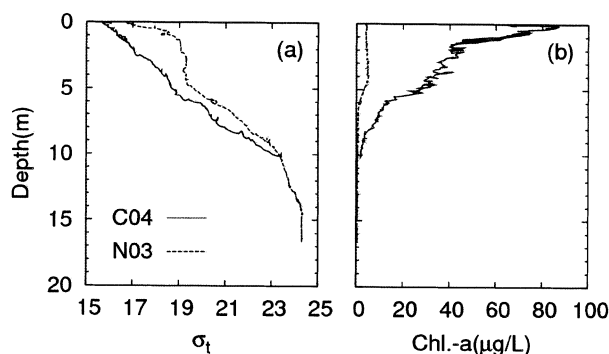


図-7 京浜運河（C04, 6/18）と東京湾湾奥（N03, 6/16）の水質鉛直プロファイル

(2) 貧酸素水塊の解消と成層強度の定量的把握

底層の貧酸素水塊は、水中および底泥のデトリタスによる酸素消費と、密度成層の発達による表層からの酸素供給の遮断という二つの要因が重なって発生することが知られている⁸⁾。貧酸素水塊は、表層水温の低下に伴う成層強度の減衰によって解消する。一方、成層強度を示す指標としてはブラント・バイサラ周波数（Brunt-Väisälä Frequency）や、表層と底層の密度差が考えられる。そこで、これらの成層強度の指標と貧酸素水塊の解消関係を定量的に調べることを試みた。

a) 成層強度指標の計算方法

ブラント・バイサラ周波数 N (1/s) は次式で定義される⁹⁾。

$$N = \sqrt{\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho(z)}{\partial z}} \approx \sqrt{\frac{g}{\rho_0} \frac{\rho(z_t) - \rho(z_b)}{z_t - z_b}} \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度 (m/s^2)、 ρ_0 は標準密度 (kg/m^3)、 $\rho(z)$ は高さ z の密度 (kg/m^3) である。 z は鉛直下向きを正とし、 $z_t > z_b$ とする。

(1)式では密度の差分を取る場所に応じて値が変化するため、ここでは各観測点で表層を基準として最大となる $N_{\max}$ を考える。ただし、表層付近の観測値は不安定であるため、 z_t は水深 1m の位置に取り、 z_b は水深 3m 以深とした。したがって、 N は z_b のみの関数となり、 z_b を変化させたときに最大値を

とる N をその地点の N_{max} とする。例として、2008年6月18日のC03における密度分布と、 N_{max} を図-8に示す。この場合では、 $z_b = 4.35$ (m) のとき、 $N_{max} = 0.091$ (1/s) となった。

表層と底層の密度差 $\delta\sigma_t$ は、表層に水深1mのデータ、底層に最深部から0.5m上部のデータを使用して、求めることにした。図-8の例では、 $\delta\sigma_t = 8.17$ となる。

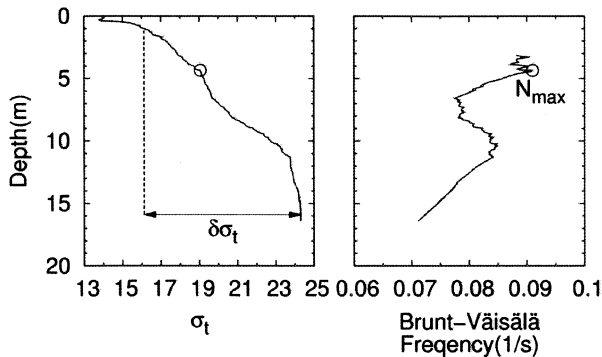
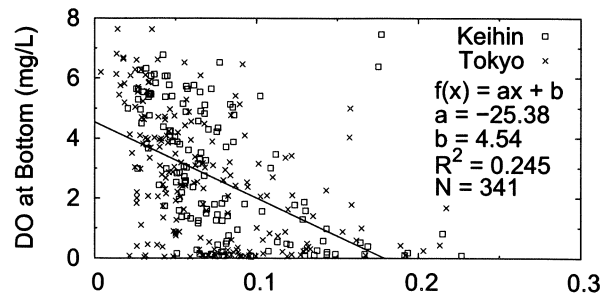


図-8 密度分布とブラント・バイサラ振動数の例 (2008年6月18日のC03)

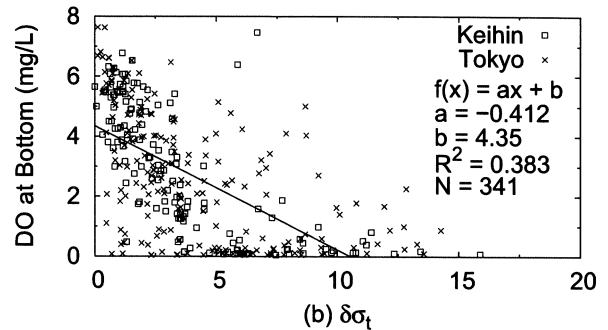
b) 成層強度指標と貧酸素水塊の解消

以上のようにして求めた成層強度指標と底層 DO の解消過程を図-9に示す。9月下旬頃から京浜運河・東京湾ともに底層の貧酸素水塊が解消していくが、それに対応してブラント・バイサラ周波数や密度差が低下していた。これより、貧酸素水塊の解消が成層強度指標で説明できることが示唆される。

貧酸素水塊の解消時期となる9～11月のデータか



(a) Brunt-Väisälä Frequency(1/s)



(b) $\delta\sigma_t$

図-10 京浜運河と東京湾における9～11月のデータを用いた成層強度指標と底層DOの関係; (a) ブラント・バイサラ振動数 N_{max} , (b) 表層と底層の密度差 $\delta\sigma_t$

ら作成された、成層強度指標と底層 DO の散布図を図-10に示す。 N_{max} および $\delta\sigma_t$ と、底層 DO は、ともに反比例の関係となっており、京浜運河と東京湾での差は見られなかった。ただし、線形近似式の R^2 値は0.5以下であり、底層のDOを説明することは困難であった。これは、上述したように、貧酸素水塊は酸素消費と密度成層効果が合わさることで発生

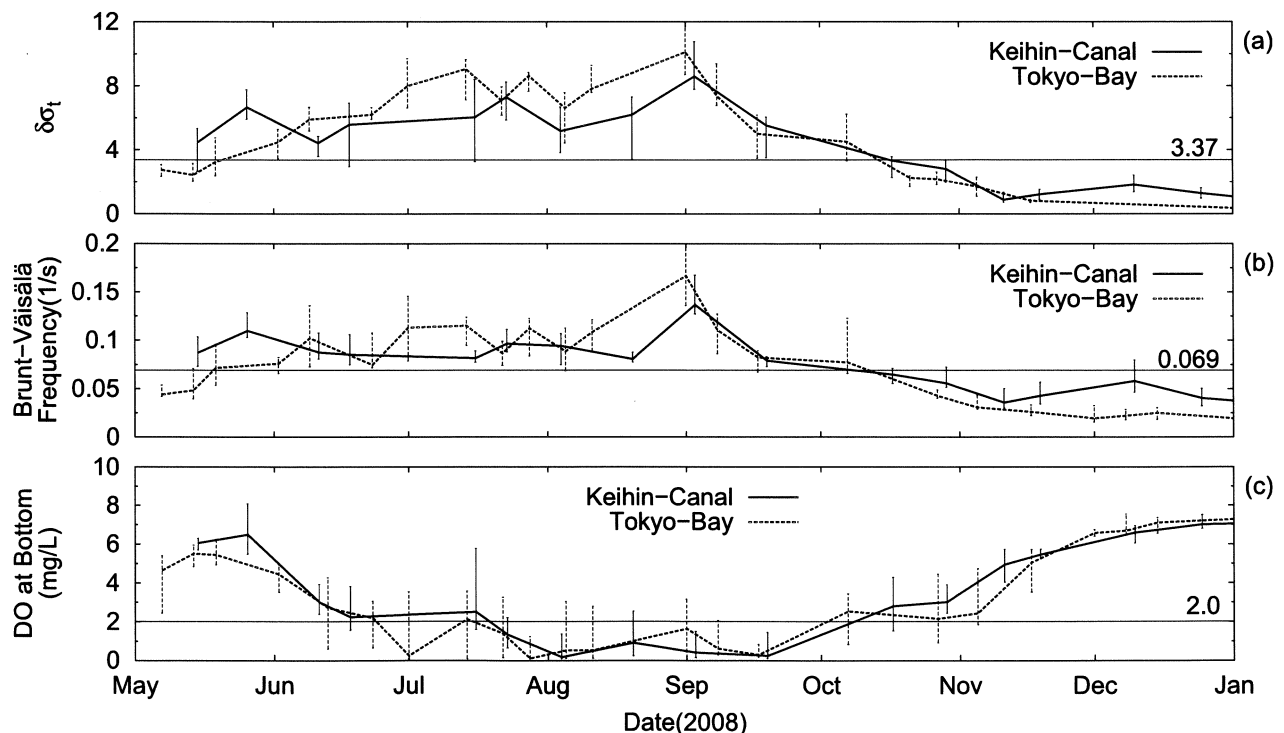


図-9 京浜運河と東京湾における水質統計値 (中央値と第1, 3四分位値) の時系列変化; (a) 表層と底層の密度差 $\delta\sigma_t$, (b) ブラント・バイサラ振動数 N_{max} , (c) 底層のDO

するため、成層強度だけでは底層の D0 を表現できないことが原因の一つと考えられる。酸素消費に関しては不明な点が多いため、成層強度指数を貧酸素水塊解消の判定基準にのみ用いることを検討した。

ブラント・バイサラ振動数 N_{max} がある閾値以下なら貧酸素水塊は解消し、それ以外は継続するという判断基準を考える。9~11月のデータを用いて、最適な閾値を求めた(図-11)。その結果、 $N_{max} = 0.069$ のとき、判定の適合率は75.7%となった。同様にして、密度差 $\delta\sigma_t$ についても最適な閾値を求めると、 $\delta\sigma_t = 3.37$ のとき、適合率は82.4%となった。これらの値は季節変化のグラフ(図-9)から判断しても、適当な閾値になっている。

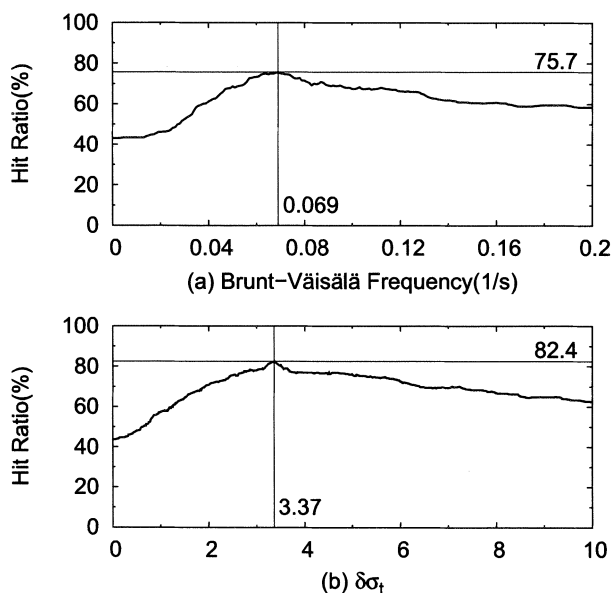


図-11 成層強度指標に対する底層の貧酸素水塊解消の判定適合率; (a)ブラント・バイサラ振動数 N_{max} を用いた場合、(b)表層と底層の密度差 $\delta\sigma_t$ を用いた場合

c) 考察

ブラント・バイサラ振動数あるいは表底層の密度差という成層強度指標のみを用いて、貧酸素水塊の解消過程を検討した。その結果、貧酸素水塊の解消について、両指標は東京湾湾奥部と京浜運河で使用できることが確認された。東京湾以外の海域における適用可能性については、今後の課題として挙げられる。

なお、水温や塩分などのデータも利用して多変量解析を行えば、貧酸素水塊解消の判定をより高い適合率で説明することが可能であろう。しかし、複雑な多項式になると、それぞれの項が持つ物理的意味の解釈が困難となってしまう恐れもある。今回の指標は、成層強度の低下によって底層の貧酸素水塊が解消されることを意味し、これは水理現象として妥当な解釈である。加えて、両指標ともに75%以上の適合率を有しており、貧酸素水塊解消の簡易な指標として使用可能と考えられる。

5. まとめ

本研究では横浜川崎地区の京浜運河を対象として水質の現地調査を実施し、京浜運河および東京湾内の地点について春期から冬期にわたり水質の定点観測データを得た。加えて、京浜運河でADCPによる流動観測も実施した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 京浜運河における航路と平行な傾圧流成分は海上風の影響を強く受ける吹送流構造が形成されていた。中・底層においても吹送流によって東京湾との海水交換が行われていることが明らかとなった。
- 2) 6月から7月にかけて京浜運河内で、東京湾湾奥では見られなかった植物プランクトンのブルームが発生していた。京浜運河と東京湾湾奥について、栄養塩環境および成層構造の比較を行ったが、明確な差は得られなかった。
- 3) 貧酸素水塊の解消過程を成層強度指標による定量的な把握を行った。貧酸素水塊が解消する閾値として、ブラント・バイサラ振動数では0.069(1/s)、表底層の密度差では3.37という値が得られた。判定の適合率は、ブラント・バイサラ振動数では75%、表底層の密度差では82%であり、簡易的な指標となり得ることが示された。

謝辞：前横浜港湾空港技術調査事務所の諸星様、松坂様、有路様には現地観測にご協力頂きました。港湾空港技術研究所の西村特別研究員には水質分析を手伝って頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐々木淳：東京湾湾奥水塊の湧昇現象と青潮への影響，海岸工学論文集，第44巻，pp.1101-1105，1997。
- 2) 佐々木淳，角田篤：横浜港における底質環境特性に関する現地調査，海洋開発論文集，第23巻，pp.1147-1152，2007。
- 3) 有路隆一，田中陽二，諸星一信，松坂省一，鈴木高二朗：横浜川崎地区京浜運河における水質の現状調査，海洋開発論文集，第24巻，pp.627-632，2008。
- 4) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，p.356，1993。
- 5) 気象庁：過去の気象データ検索，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>，web。
- 6) 鯉淵幸生，小倉久子，安藤晴夫，五明美智男，佐々木淳，磯部雅彦：東京湾湾奥部における栄養塩の周年変動に関する現地観測，海岸工学論文集，第47巻，pp.1066-1070，2000。
- 7) Sverdrup, H. U.: On conditions for the vernal blooming of phytoplankton, *J. Cons. Cons. Int. Explor. Mer.*, 18, pp.287-295.
- 8) 有田正光編：水圏の環境，東京電機大学出版局，pp.292-294，1998。
- 9) Turner, J. S.: *Bouyancy effects in fluids*, Cambridge university press, p.11, 1973.