

東京湾奥における底層DOに対する 風および河川流入の影響評価

ESTIMATION OF CONTRIBUTION OF WIND AND RIVER EFFECT ON DO CONCENTRATION IN TOKYO BAY

中山恵介¹・佐藤千鶴²・古川恵太³

Keisuke NAKAYAMA, Chizuru SATO and Keita FURUKAWA

¹正会員 工博 北見工業大学 教授 (〒090-8507 北見市公園町1 6 5 番地)

²正会員 水修 株式会社東京久栄 (〒333-0866 埼玉県川口市芝6906-10)

³正会員 工博 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

A conceptual DO model was developed to investigate the influence of wind and rain on the dissolved oxygen concentration around the head of Tokyo Bay. Since the DO concentration in the lower layer around the bay head has been revealed to be predominantly controlled by estuarine circulation, the effect of rain and wind on estuarine circulation was included in the conceptual DO model. The conceptual DO model, thus, consists of the following five components. (1) DO consumption at sea bottom; (2) Estuarine circulation due to stratification; (3) Change in estuarine circulation due to wind; (4) Change in estuarine circulation due to inflow from rivers; and (5) Sweep effect due to strong wind. To clarify the effect of inflow from rivers, it is needed to estimate river discharge from rainfall intensity in terms of runoff model. In this study, we decided to use a linear storage function model so that it enables us to evaluate the influence of rain on DO concentration around the bay head theoretically. Partitioning triangle method was introduced, which makes us understand the contribution of each component easily. And also, the significance of river discharge effect was revealed on the recovery of the DO concentration.

Key Words : DO concentration, intrusion, sea-water exchange, anoxic water, sill, enclosed bay, conceptual model

1. はじめに

閉鎖性内湾や湖沼において、強い日射、特に閉鎖性の強い湾において顕著である淡水の流入により夏季に成層が発達し、鉛直方向のスカラー量の交換が抑制される。その結果、底層に堆積した有機物などにより溶存酸素が消費され、底層周辺の下層を中心として貧酸素水塊が発生する。貧酸素水塊の発生は、そこに生息する生物、植物に大きなダメージを与えることがあるため、どのように貧酸素水塊が発生し、如何に風などの外力により輸送されるかを知ることは重要である^{1) 2) 3)}。

閉鎖性の強い湾の代表的な例として、日本の3大湾の一つである東京湾を挙げることができる。東京湾では、これまでの湾周辺の陸域における開発、沿岸域における埋め立てなどの影響により、生態系が大きな影響を受け

ており、これまでに与えられた陸域からの栄養塩の負荷が、湾央、湾奥の底層における有機物の堆積を増大させてきた¹⁾。

そのため、夏季における東京湾の湾央から湾奥にかけて、成層の強化にともない、底層での有機物の分解による酸素消費によって底層に貧酸素水塊が発生する。上述の通り、貧酸素水塊の発生は、東京湾における生態系、水質環境に大きな影響を及ぼしていることから、どのようなメカニズムで底層の溶存酸素 (DO) 濃度が変化しているかを把握することは重要である。一口に東京湾の底層のDO濃度と言っても、湾奥と湾央に注目しただけでもその変化の様子は大きく異なり、その変化に影響を及ぼすと思われる要因も異なることが予想される。そのため、東京湾における貧酸素水塊を検討するためには、少なくとも、湾奥、湾央のDO濃度の再現を行うことができるモ

デルが望まれる。

一般的に、東京湾では湾内外の水がエスチュアリー循環により卓越して交換されていることが知られているため^{4) 5) 6) 7)}、D0濃度の高い水塊を底層に供給するエスチュアリー循環は、底層におけるD0濃度に大きな影響を与えていることが予想される。通常、夏季におけるエスチュアリー循環での湾内水の湾外水との交換は30日程度であり、河川出水が生じると交換がより促進される。そのため、河川出水がD0濃度を大きく回復する可能性があり、河川出水などのイベントによるD0濃度の変化を理解する必要があると言える。

そこで本研究では、この仮定を確認するために3次元生態系モデルによりその再現性が確認されているD0濃度の概念モデルを用いて、風、河川流量の東京湾奥底層のD0濃度の変化への影響を評価することを目的とする。

2. 流量の再現について

本研究の主たる目的は、河川流量と風による東京湾奥底層におけるD0濃度への影響評価である。それ故、河川流量と風の出来る限り詳細なデータの入手が必要である。しかし一般的に風のデータに比較して、流量のデータは精度が低く、入手できるデータの時間間隔より長い場合が多い。一方、流量データに比較して、降雨強度データは風のデータと同様な密度で手に入ることが多い。そこで本研究では、概念モデルを用いたD0濃度の統計的な理論解析を可能とするため、非常に簡単なモデルを用いて降雨強度データから河川流量を推定することとした⁸⁾。D0濃度の概念モデルと結合し易くするため、線形化された貯留関数モデルを用いた。

$$\frac{dS}{dt} = A_s R - q \quad (1)$$

$$q = B_s S \quad (2)$$

ここで、 S : 比貯留量 [$mm \text{ hr}^{-1}$]、 t : 時間 [hr]、 A_s : 0.6、 R : 降雨強度 [$mm \text{ hr}^{-1}$]、 q : 比流量 [$mm \text{ hr}^{-1}$]、 B_s : 0.018、である。

3. D0濃度の概念モデル

東京湾奥のボックス平均D0濃度と貧酸素水塊の発生には、強い相関関係があることが過去の研究⁹⁾から明らかにされている。そこで、その研究を参考にし、新たな項を導入し、東京湾奥のボックス平均D0濃度の再現を試みた。モデルで考慮された効果は、以下の5つである。そのうち、最後の効果は本論文で導入されたものである。

- (1) 底層における酸素消費;
- (2) 成層効果起因のエスチュアリー循環によるD0濃度の

湾外からの供給;

- (3) 風起因のエスチュアリー循環によるD0濃度の湾外からの供給;

- (4) 河川流量起因のエスチュアリー循環によるD0濃度の湾外からの供給;

- (5) 強風による底層D0濃度の回復。

植物プランクトンによる酸素消費は、底層において影響を及ぼさないことが3次元計算により確認されているので省略した。また、風のスペクトル解析から、6日周期での変動成分が卓越していることが確認された。これは、風による影響を考慮することの重要性を示しているものと考えられる。

$$\begin{aligned} \frac{dDO}{dt} = & (A_{DO} + X_{DO} \text{wind} + C_{DO} q + Y_{DO})(8 - DO) - Z_{DO} \\ & \begin{cases} DO < 0 & Z_{DO} = 0 \\ DO \geq 0 & Z_{DO} = E_{DO} \end{cases} \quad (3) \\ & \begin{cases} DO < 0 \ \& \ \text{wind} < 0 & X_{DO} = 0 \\ \text{elsewhere} & X_{DO} = B_{DO} \end{cases} \\ & \begin{cases} \text{wind} < -10 [m \ s^{-1}] & Y_{DO} = D_{DO} \\ \text{elsewhere} & Y_{DO} = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

ここで、 DO : ボックス平均D0濃度 [$mg \text{ l}^{-1}$]、 A_{DO} : 成層効果起因のエスチュアリー循環によるD0濃度変化係数 [hr^{-1}]、 B_{DO} : 風起因のエスチュアリー循環によるD0濃度変化係数 [$s \text{ m}^{-1} \text{ hr}^{-1}$]、 C_{DO} : 河川流量起因のエスチュアリー循環によるD0濃度変化係数 [mm^{-1}]、 D_{DO} : 強風による底層D0濃度の回復係数 [hr^{-1}]、 E_{DO} : $0.0100 [mg \text{ l}^{-1} \text{ hr}^{-1}]$ 、である。

それぞれの係数の決定方法については、佐藤らの論文⁹⁾を参照願いたい。

$$A_{DO} = \frac{1}{30 \times 24} \quad (4)$$

$$C_{DO} = 0.0045 \quad (5)$$

効果(4)および(5)で示される風に関する係数は、概念モデルがボックス平均D0濃度を最もよく再現できるように決定された。その結果、 B_{DO} と D_{DO} は $0.0008 [s \text{ m}^{-1} \text{ hr}^{-1}]$ と $0.0694 [hr^{-1}]$ 、と決定された。

再現計算結果は、Fig 1に示される通り、大変良好であった。詳細は参考文献⁹⁾に記載されているので省略するが、本研究で提案しているD0濃度の概念モデルで再現されているボックス平均D0濃度は、3次元生態系モデルELCOM&CAEDYM¹⁰⁾により再現されたものであり、定点で行われた実測値と非常によい一致を示したことを記しておく。東京湾奥のD0濃度の変化の大きな特徴として、Fig 1に示されるとおり、成層が一般的に強くなる夏季においてD0濃度が最低となるわけでないという点が挙げられる。これは、本研究で対象としている風や河川流量の効果によるものが大きい。例として、Fig 2に6月中旬と7月下旬における東京湾奥底層でのD0濃度の分布図を示す。明らかに、6月18日の底層D0濃度が7月27日のものよりも全体的に低く、貧酸素化している領域が広いこと

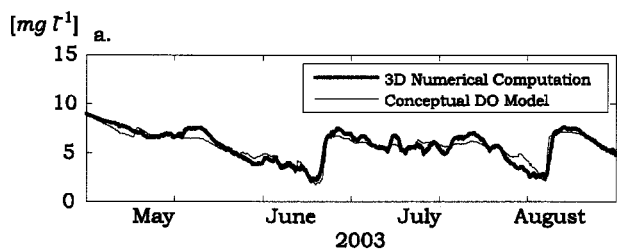


Fig. 1(a) Box average DO concentration from three-dimensional numerical computation and conceptual DO model.

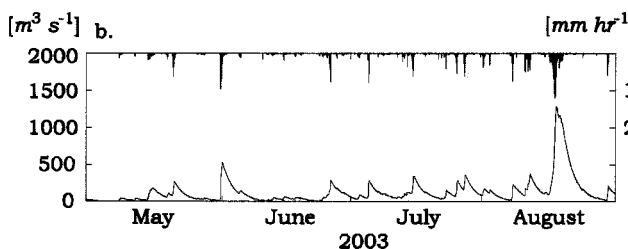


Fig. 1(b) Hydrograph.

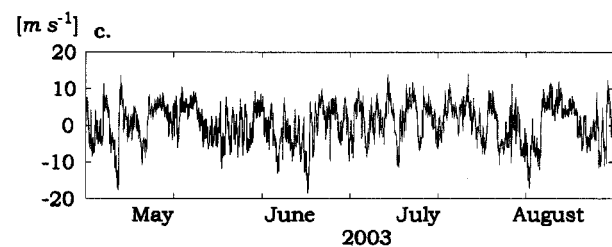


Fig. 1(c) Wind along longitudinal direction of Tokyo Bay. Northeast wind is positive.

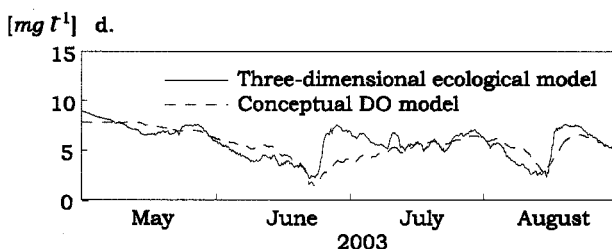


Fig. 1(d) Box average DO concentration from three-dimensional numerical computation and conceptual DO model excluding the effect of the 5th component.

が分かる。

効果(5)を考慮することにより、参考文献⁸⁾でみられたような急激なDO濃度の回復による不一致が改善された(Fig 1 aとFig 1 dの比較から)。強風によるDO濃度の回復は、頻度は多くないが、発生すると非常に大きな影響をおよぼし、特にDO濃度回復後、河川流量の増大、風によるエスチュアリー循環の強化などが重なると、DO濃度が回復したまま推移する傾向にあることから、DO濃度の管理を行ううえで重要な現象であることが分かった。

DO濃度の概念モデルが、底層のボックス平均DO濃度を高精度に再現できることが確認されたので、その結果を利用して、各要因がどの程度の影響力を持っているかを

(b) 27th of July

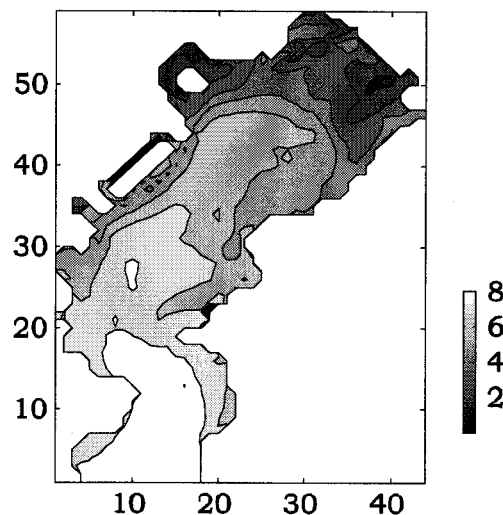


Figure 2 (a) The calculated DO (mg/l) concentration at sea bottom on 18th of June.

(a) 18th of June

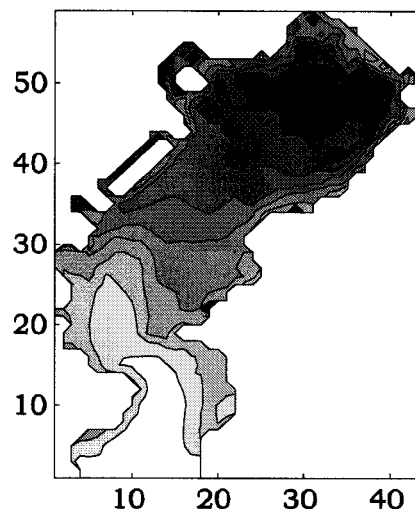


Fig. 2(b) The calculated DO (mg/l) concentration at sea bottom on 27th of July.

検討した。その際、式(3)における各項の貢献度を利用し、式(6)から式(9)で示される値を計算した。それぞれ、効果(2)から効果(5)に対応する。

$$R_A = |A_{DO}| / TL_{DO} \quad (6)$$

$$R_B = |X_{DO} wind| / TL_{DO} \quad (7)$$

$$R_C = |C_{DO} q| / TL_{DO} \quad (8)$$

$$R_D = |D_{DO}| / TL_{DO} \quad (9)$$

$$TL_{DO} = |A_{DO}| + |X_{DO} wind| + |C_{DO} q| + |D_{DO}| \quad (10)$$

それぞれの効果を時系列で示すと、Fig 3のように描

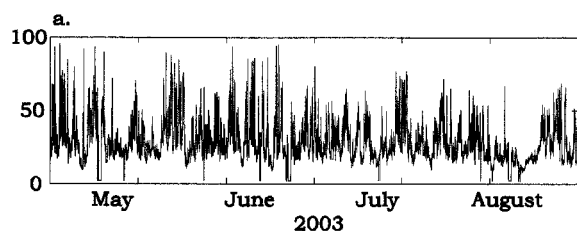


Fig. 3(a) Efficiency of estuarine circulation due to stratification

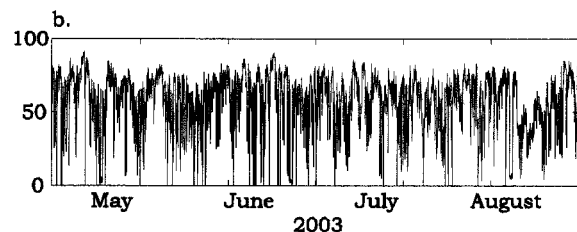


Fig. 3(b) Efficiency of change in estuarine circulation due to wind

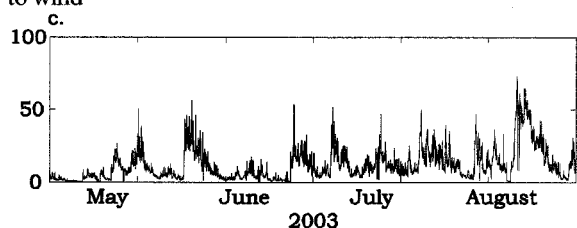


Fig. 3(c) Efficiency of change in estuarine circulation due to inflow from rivers

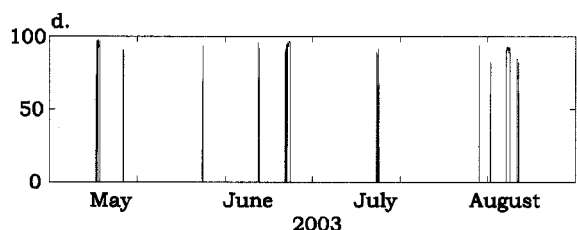


Fig. 3(d) Efficiency of sweep effect due to strong wind.

かれる。各効果の寄与度の平均値と分散を計算すると、成層起因が平均24%と分散18%、風起因が平均48%と分散28%、河川起因が平均9%と分散11%、強風起因が平均2%と分散14%、であった。強風によるD0濃度回復は急激であり、その変化率も大きい。そこで本研究では、トライアングルパーティショニングの手法を適用するために、強風の効果については無視し、その他の効果について長期的な視野に立って検討を行うこととした。

4. トライアングルパーティショニングによる洪水イベント評価

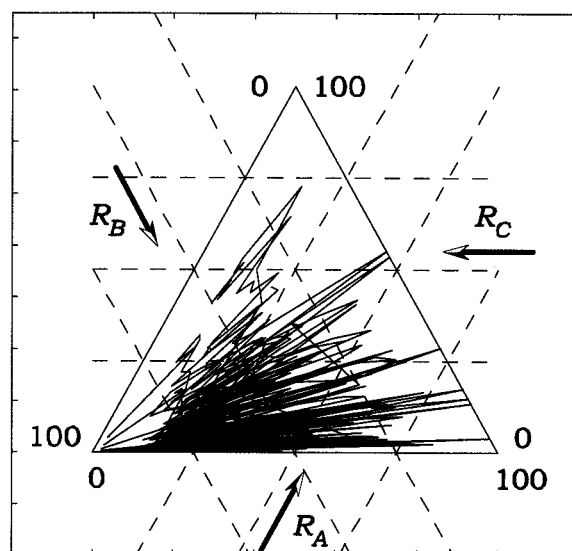


Fig. 4 Efficiency of each component from May to August, 2003.

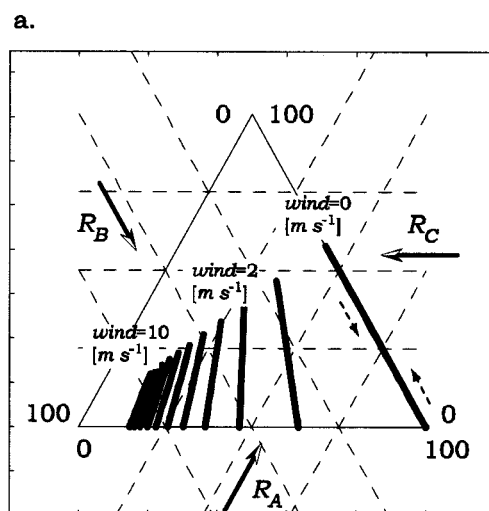


Fig. 5(a) Efficiency of each component through the change in wind speed.

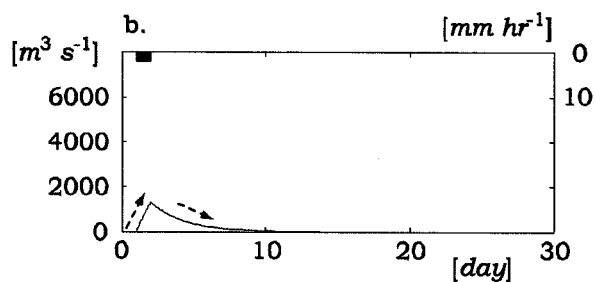


Fig. 5(b) Hydrograph for a single storm event. Total rainfall intensity is 50 mm and rainfall period is 24 hrs.

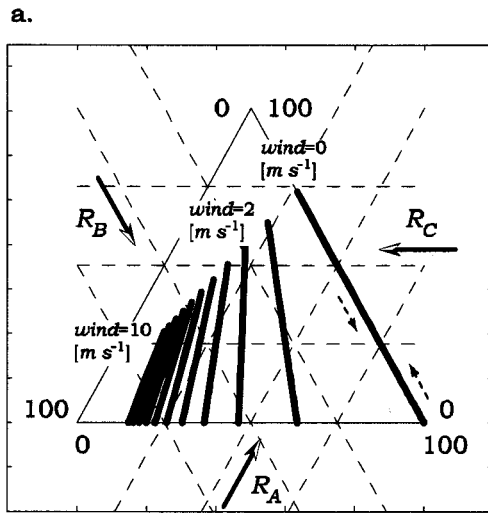


Fig. 6(a) Efficiency of each component through the change in wind speed.

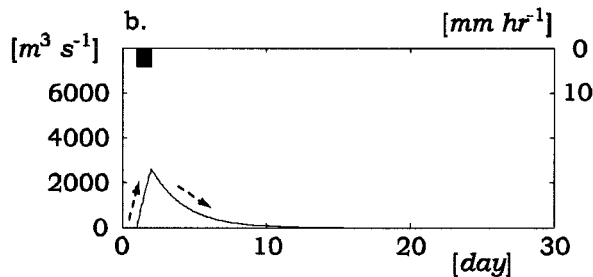


Fig. 6(b) Hydrograph for a single storm event. Total rainfall intensity is 100 mm and rainfall period is 24 hrs.

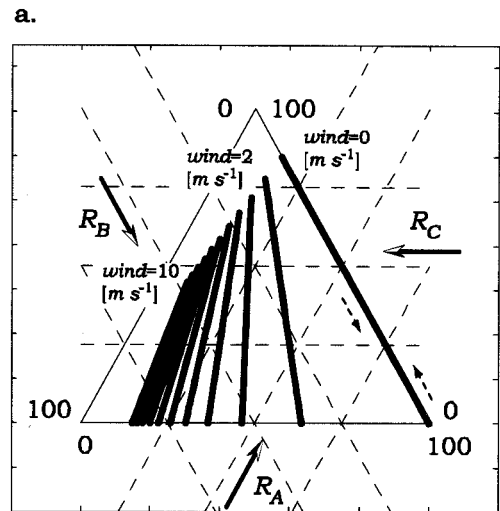


Fig. 7(a) Efficiency of each component through the change in wind speed.

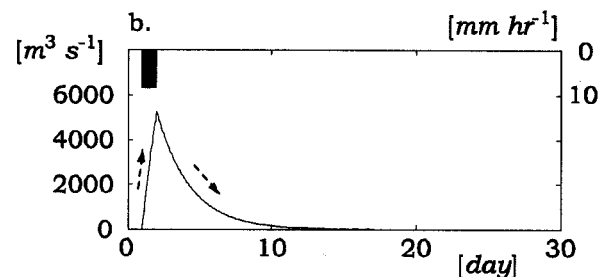


Fig. 7(b) Hydrograph for a single storm event. Total rainfall intensity is 200 mm and rainfall period is 24 hrs.

まず、計算対象とした期間における各効果の寄与度をトライアングルパーティショニングの手法に則ってプロットした (Fig 4)。前節で示されたとおり、長期的に見て明らかに風による効果が、他の効果に比較して大きいことが分かる。また、風による効果は短周期での変化が激しいため、三角形の左下を支点として同心線上で激しく変動していることが分かる。このように、トライアングルパーティショニングの手法を用いることにより、長期的なデータでも一見して幾つかの特性を知ることが出来、その有用性が伺える。

Fig 4からも分かる通り、風による影響は短周期での変動成分が大きく、イベントとして長期的に影響を及ぼしている現象は河川出水であると言える。そこで本研究では、河川出水のイベント毎にどのように寄与度が変化するか調査することとした。成層効果によるエスチュアリー循環は一定値で与えられるので、トライアングルパーティショニングで考慮すべき変数は、風速と流量であると言える。そこで風速を0m/sから10m/sまで1m/s毎に変化させ、各降雨パターンに対する寄与度の変化を調べた。降雨イベントは、降雨継続時間は24時間で固定し、総降雨量を50mm、100mm、200mmと変えた3種類

を与えた (Fig 5, Fig 6, Fig 7)。

総雨量50mmを与えた場合、風速がゼロであると、降雨開始直後は成層による通常のエスチュアリー循環による交換が卓越するためその効果は100%であるが、徐々に河川流量による影響が増し、最大で約60%にまで寄与度が增大していることが分かる (Fig 5)。一方、風速が10m/sである場合、流量がピークを迎えても河川出水の影響は15%程度であり、風の影響は90%から75%へと変化するのみであることが分かる。

総降雨量100mmのケースをみると、風速0m/sにおいて流量ピークで75%、風速10m/sで30%となっており、総降雨量が増大することで、予想通り河川流量の寄与度が増していることが分かる (Fig 6)。総降雨量100mm程度であれば、数日かけて与えられる可能性が高く、その場合、若干ピーク流量は小さくなるが、同様に河川流量の寄与度が大きくなることが推測される。多少過大な評価であるが、総降雨量が200mmであるとすると河川出水の影響は大きく、風速が10m/sで吹き続けたとしても河川出水の寄与度が50%近くまで増大することが分かる (Fig 7)。

本研究では、風速が一定値である場合を仮定して議論を進めてきた。しかし、Fig 4でも示されたとおり、風

速は短周期での変動幅が大きく、長周期の成分を取り出すと数m/s程度の風の成分しか残らない。そのことを考慮すると、総雨量50mm程度での河川出水が与えられたとしても、その影響は大きく、東京湾の底層のD0濃度の回復に大きな寄与を及ぼしていると言える。

5. おわりに

東京湾の底層におけるD0濃度を再現するための概念モデルを提案し、そのモデルを用いて風、河川流量のD0濃度回復への寄与度を検討し、以下の結果を得ることができた。

- (1) これまでに開発された概念モデルに強風によるD0濃度回復の効果を考慮することにより、非常によい再現性を得ることが出来た。これにより、強風によるD0濃度回復機構の重要性が確認された。
- (2) 成層、風、河川流量、強風の影響をそれぞれ調査した結果、長期的に見ると風による寄与度が最も大きいことが分かった。
- (3) トライアングルパーティショニングの手法を導入することにより、一目で成層、風、河川流量の影響を把握することが可能となった。
- (4) 河川出水イベントに注目して解析を行った結果、イベント時における河川出水の影響は大きく、長期的に大きな影響を及ぼす風に比較しても同等程度になることが分かった。

参考文献

- 1) Wolanski E. (Ed.), The Environment in Asia Pacific Harbors, Springer, 515p., 2005.
- 2) 西田有佑, 中山恵介, 石川忠晴, 東京湾奥における出水時の河川水挙動に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.793-798, 2006.
- 3) 五十嵐学, 中山恵介, 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, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.829-834, 2006.
- 4) 宇野木早苗, 岸野元彰: 東京湾の平均的海況と海水交流, 理化学研究所海洋物理学研究室技術報告, Vol. 1, pp. 1 -89, 1977a.
- 5) 宇野木早苗, 岸野元彰: 大局的に見た内湾の海水交流, 海岸工学講演会論文集, Vol. 24, pp. 486 - 490, 1977b.
- 6) 宇野木早苗, 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版, 672p., 1993.
- 7) 岡田知也, 高尾敏幸, 中山恵介, 古川恵太, 都市化に伴う東京湾の海水の滞留時間の変化, 土木学会論文集, accepted, 2006.
- 8) Satoh C., K. Nakayama, Y. Yamashiki, T. Kanesashi and K. Miyazawa, Development of a conceptual model for dissolved oxygen concentrations considering flood event effects in Tokyo Bay, Annual Journal of Hydraulic Engineering-JSCE, Vol. 51, pp.1385-1390, 2007.
- 9) Hodges, B. R., Estuary, lake and coastal ocean model (ELCOM): user manual, University of Western Australia, Centre for Water Research Reference WP 1386 BH, 2000.
- 10) Hodges, B.R., J. Imberger, A. Saggio and K. B. Winters, Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake, Limnology and Oceanography, 45(7), pp.1603-1620, 2000.