

東京湾の湾奥底層DO濃度に対する 強風イベントの統計的解析

STATISTICAL ANALYSIS OF STRONG WIND EFFECT ON DO CONCENTRATION IN TOKYO BAY

中山恵介¹・中尾隆志¹・Murugesu Sivapalan²・武村圭史朗³・

佐藤千鶴⁴・古川恵太⁵

Keisuke NAKAYAMA, Takashi NAKAO, Keishirou TAKEMURA,
Chizuru SATO and Keita FURUKAWA

¹正会員 博(工) 北見工業大学工学部 土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

²非会員 Ph.D University of Illinois Departments of Geography and of Civil & Environmental Engineering
(220 Davenport Hall, MC-150, 607 South Mathews Avenue Urbana, Illinois, IL 61801, USA)

³学生会員 北見工業大学 土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

⁴正会員 水修 東京久栄株式会社 (〒333-0866 川口市芝6906-10)

⁵正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 海洋環境研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

This paper describes contribution of strong wind events on Dissolved oxygen (DO) concentrations in Tokyo Bay by statistical analysis. Tokyo Bay is a typical enclosed bay in Japan whose water quality has been deteriorated. For example, the occurrence of anoxic water in the bay head adjacent to the seabed is frequent. Since estuarine circulation dominates DO concentration and a strong wind event is revealed to enhance recovering processes of DO concentration, this study aims to understand statistical characteristics of strong wind events on DO concentration in Tokyo Bay. Strong wind period, interval and intensity were tested as indicator of strong wind events' statistics. As a result, pdf analysis has potential in the evaluation of the recovery processes of DO concentration around the head of Tokyo Bay. Strong wind events were also revealed to appear from May to August dominantly.

Key Words: dissolved oxygen, estuarine circulation, wind, inflow, river, seawater exchange

1. はじめに

一般的に、閉鎖性内湾では、強い日射、淡水の流入により成層が発達し、鉛直方向の物質輸送が抑制される。つまり、底層の堆積物により溶存酸素が消費され、その周辺を中心として貧酸素水塊が発生し易くなる。その結果、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り、貧酸素水塊が如何に風などの外力により輸送されるかを知ることが重要である¹⁾。

東京湾では、これまでの周辺地域の開発により、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栄養塩等の負荷が、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⁾。その結果発生する貧酸素水塊は、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濃度(DO濃度)が変化しているかを把握することは重要である。そこで本研究では、特に貧酸素水塊の発生が顕著である東京湾の湾奥をターゲットとする。

東京湾の湾奥底層におけるDO濃度に関する研究として、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ことが挙げられる^{2) 3) 4)}。そのため、DO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DO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。また、風による効果も同様であり、エスチュアリー循環を促進したり、抑制したりする。これまでの研究で、河川水や風が湾奥の底層DO濃度にもたらす影響が

検討されており、その中でも、強風による効果がDO濃度回復に重要な役割を果たしていることが示されている^{5) 6)}。

そこで本研究では、強風がどのような頻度で発生し、どのように底層のDO濃度に影響を与えているかを評価するために、強風に関する統計解析を行い、その影響を評価することを目的とする。

2. 東京湾における強風のDO濃度に対する影響

過去の研究により、東京湾の湾奥底層におけるDO濃度は、概念モデルにより良好に再現できることが示されている⁶⁾。Fig. 1はその再現例の一例を示している。(a)は東京湾奥の低層部のDO平均値の再現結果を示しており、(b)、(c)にそれぞれこの期間に東京湾に注ぎ込む全河川流入量と気象庁(東京)で観測された湾軸の北東方向を正とした風速変化を示している。その際に用いられた概念モデルでは、エスチュアリー循環が風や河川流入により影響を受けるものとし、具体的には、以下の5つの項目が考慮されている。

- 底層における酸素消費;
- 成層効果起因のエスチュアリー循環によるDO濃度の湾外からの供給;
- 風起因のエスチュアリー循環によるDO濃度の湾外からの供給;
- 河川流量起因のエスチュアリー循環によるDO濃度の湾外からの供給;
- 強風による底層DO濃度の回復。

$$\frac{dDO}{dt} = (A_{DO} + X_{DO}wind + C_{DO}q + Y_{DO})(8 - DO) - Z_{DO} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} DO < 0 \quad Z_{DO} = 0 \\ DO \geq 0 \quad Z_{DO} = E_{DO} \\ DO < 0 \text{ \& } wind < 0 \quad X_{DO} = 0 \\ \text{elsewhere} \quad X_{DO} = B_{DO} \\ wind < -10 [m s^{-1}] \quad Y_{DO} = D_{DO} \\ \text{elsewhere} \quad Y_{DO} = 0 \end{array} \right\}$$

ここで、 DO : ボックス平均DO濃度 [$mg l^{-1}$], A_{DO} : 成層効果起因のエスチュアリー循環によるDO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DO濃度変化係数 [$s m^{-1} hr^{-1}$], C_{DO} : 河川流量起因のエスチュアリー循環によるDO濃度変化係数 [mm^{-1}], D_{DO} : 強風による底層DO濃度の回復係数 [hr^{-1}], E_{DO} : $0.0100 [mg l^{-1} hr^{-1}]$, である。それぞれの係数の決定方法については、過去の論文を参照いただきたい⁶⁾。

この計算結果から、北東成分の風を正とした場合、北東の風と河川流入によりエスチュアリー循環が促進されていることが明らかにされた。特に、6月と8月の南西成分の強風(○ in Fig. 1)がDO濃度を大きく回復させていることが示されており、DO濃度の変化によって、強風が非常に重要な役割を果たしていることが確認された。

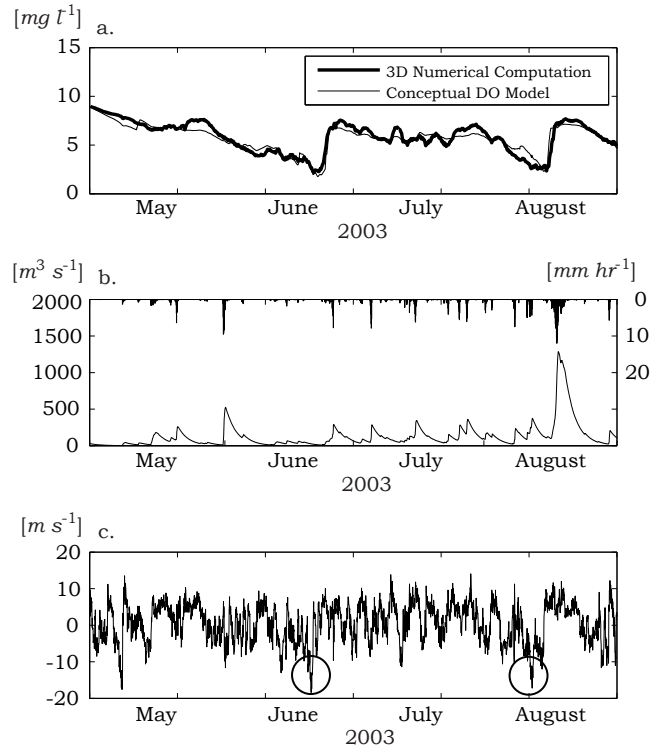


Fig. 1 From May to August, 2003. (a) Box average DO concentration from three-dimensional numerical computation by ELCOM&CAEDYM and conceptual DO model. (b) Hydrograph. (c) Wind along longitudinal direction of Tokyo Bay. Northeast wind is positive.

3. 強風イベントに関する確率密度関数

本章では、前章で示されたDO濃度回復に重要な役割を果たす強風の影響を、1991年から2004年までの14年分、1時間間隔での風のデータを利用して検討した。エスチュアリー循環を促進する方向の風を正、抑制する方向の風を負として表示すると、負の風、つまり南東の風が多く吹いていたことが分かる(Fig. 2)。このことから、強風によりDO濃度が回復する頻度は比較的多かったのではないかと推測される。

強風の閾値は $-10 m/s$ であることが過去の研究⁶⁾により明らかにされているので、その値を利用して、式(2)で定義する風のエネルギーが $100 m^2/s^2$ 以上である場合を抽出した(Fig. 3)。風のエネルギーを用いたのは保存料として取り扱い今後の解析に生かすためである。

$$KE_w = wind^2 \quad (2)$$

ここで、 KE_w : 風の運動エネルギー, $wind$: 湾軸方向風速(北東の風を正とする), である。

強風イベントの発生を統計的に処理するために、本研究ではイベント継続時間 t_w 、イベント発生間隔 t_b 、イベント平均強度 KE_w をFig. 4のように定義した^{7) 8)}。その結果、14年間でのイベント発生回数は、884であることが分かった。平均すると、1年間に60

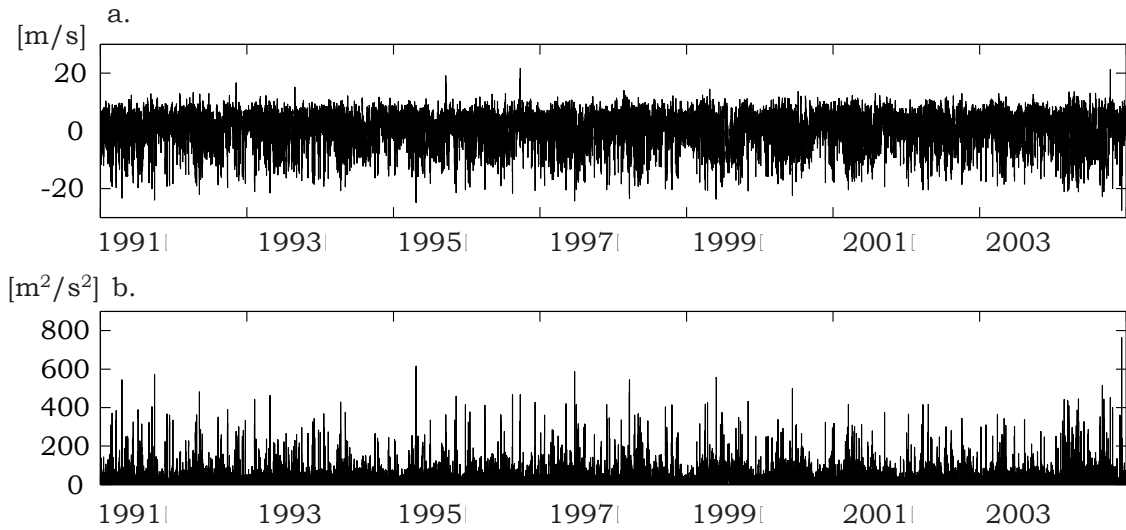


Fig. 2 From 1991 to 2004. (a) Wind along longitudinal direction of Tokyo Bay. Northeast wind is positive. (b) Kinetic energy of wind, which is defined using squared wind.

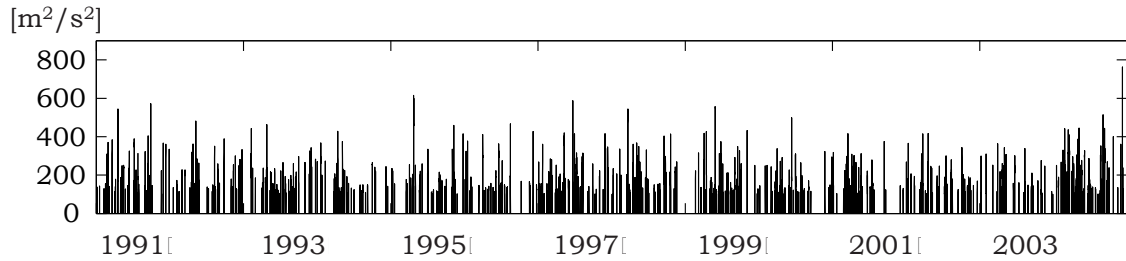


Fig. 3 Wind whose kinetic energy is more than $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ from 1991 to 2004.

同程度の強風イベントが発生していることになる。

理論的な考察を可能とするため、そして基礎的な情報を得るために、イベント継続時間 t_w 、イベント発生間隔 t_b 、イベント平均強度 KE_w に関する確率密度関数 (pdf) を計算し、ヒストグラムを作成するため階級幅を乗じると **Fig. 5** のようになる。ヒストグラム作成の際には、Sturges の式 (3) を用いて階級の個数を決定した。

$$n = 1 + 3.32 \log_{10} N \quad (3)$$

ここで、 N : データ総個数、 n : 階級の個数、である。

式 (3) から、階級の個数はおよそ 18 であることが分かるので、イベント発生間隔 t_b 、イベント平均強度 KE_w に関しては階級数 18 を用いることとした。イベント継続時間 t_w に関しては、1 時間単位であること、最大継続時間が 24 時間程度であったことから、階級を 1 時間間隔で区切って与えることとした。

イベント継続時間 t_w について、平均値が 7.4 hr、偏差が 8.5 hr であったことから、指数分布を用いて pdf を再現することとした。その結果、pdf からヒストグラムを求める式 (4) を得た。

$$f_w(t_w) = N \Delta s \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{t_w}{\lambda}\right) \quad (4)$$

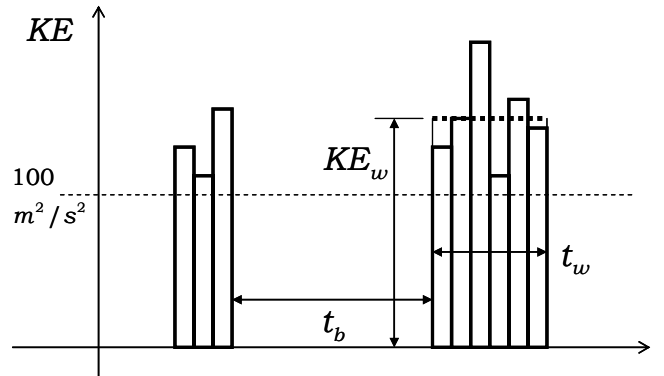


Fig. 4 Definition of strong wind period, t_w , strong wind interval, t_b , and strong wind intensity, KE_w .

ここで、 Δs : 階級幅、 $\lambda = 7.93 \text{ hr}$ 、である。

イベント発生間隔 t_b については、平均値が 140 hr、偏差が 218 hr と大きく異なっていたため指数分布を利用することが不適當であった。そこで、理論解析し易い関数として、式 (5) で示されるガンマ分布を利用することとした。

$$f_b(t_b) = N \Delta s \frac{v(v t_b)^{k-1}}{\Gamma(k)} \exp(-v t_b) \quad (5)$$

ここで、 $k = 0.4$ 、 $v = 0.00286 \text{ 1/hr}$ 、である。

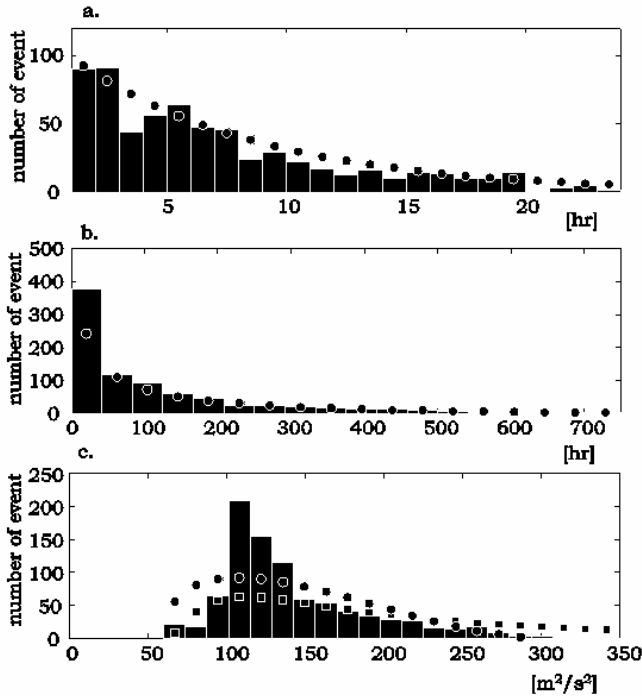


Fig. 5 Histogram for (a) t_w , (b) t_b , and (c) KE_w .

Circles and squares indicate theoretical solutions by using Eqs. (4) to (7).

最後に、イベント平均強度 KE_w に関して、Fig. 5 から分かるとおり、ある範囲において最大値を持つ pdf であることから、式(6)で示されるベータ分布 (式(6) : ○ in Fig. 5) および積率法により得られた 3 母数対数正規分布 (式(7) : ■ in Fig. 5) を用いることとした。

$$f_{KE}(KE_m) = N\Delta s \frac{(KE_m - a)^{q-1} (b - KE_m)^{r-1}}{B(q, r) (b - a)^{q+r-1}} \quad (6)$$

$$f'_{KE}(KE_m) = \frac{N\Delta s}{(KE_m - a)\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right] \quad (7)$$

ここで、 $a = 60$ hr, $b = 300$ hr, $q = 1.44$, $r = 2.78$, $y = \log(KE_w - a)$, σ_y^2 : y の分散, μ_y : y の平均, である。

式(4)から式(7)で示される理論式は、それぞれの pdf から得られるヒストグラムをおおむね良好に再現しているものであることが確認された (Fig. 5)。

4. 強風イベントに対する統計的解析

(1) pdfに関する理論解の適用性の検討

強風イベントに関する指標、イベント継続時間 t_w 、イベント発生間隔 t_b 、イベント平均強度 KE_w 、それぞれがどのような関係を持っているかを検討するために、それぞれの指標間の相関を計算した (Fig. 6)。その結果、 t_w と t_b 、 t_b と KE_w 、 t_w と KE_w 、それぞれの相関係数は、0.043, 0.47, 0.11 と得られた。つまり、各々の指標の相関はほぼなく、それぞれが

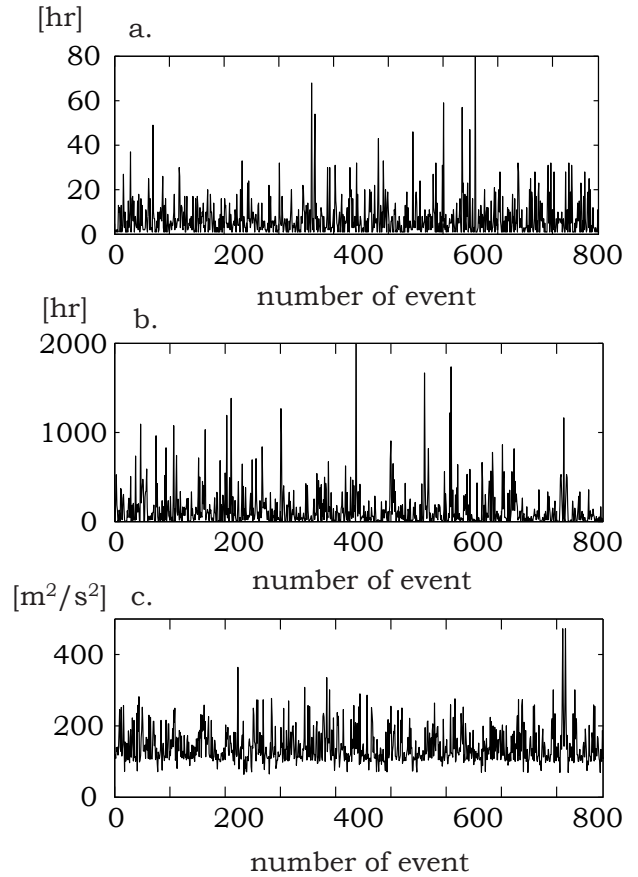


Fig. 6 (a) Strong wind period. (b) Strong wind interval. (c) Strong wind intensity; mean of kinetic energy for strong wind event.

独立であると考えられることが分かった。

それぞれの指標が相関を持たないことが示されたので、各指標を個別に取り扱っても問題ないと考えられる。そこで、強風イベント発生に最も重要であると考えられるイベント継続時間 t_w のみを考慮した DO 濃度回復に関する検討を行った。初期 DO 濃度、 $DO_{initial}$ 、からのイベント継続時間 t_w における DO 濃度の回復、 ΔDO 、は式(1)から式(8)で示されることが分かる。

$$\Delta DO = \left\{ \begin{aligned} &DO_{initial} - 8 + \frac{Z_{DO}}{A + Y_{DO}} \exp[-(A + Y_{DO})t_w] \\ &+ 8 - \frac{Z_{DO}}{A + Y_{DO}} - DO_{initial} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$A = A_{DO} + X_{DO}wind + C_{DO}q$$

ここで、 $B_{DO} : 0.0694 [hr^{-1}]$, である。

DO 濃度回復量に関する pdf は、式(8)と式(4)を利用し、式(9)の通り理論的に得られる。

$$f_{\Delta DO}(\Delta DO) = f_{t_w}(t_w) \frac{1}{A + Y_{DO}} \times \frac{-1}{-\Delta DO + \left(-8 + \frac{Z_{DO}}{A + Y_{DO}} + DO_{initial} \right)} \quad (9)$$

基礎的な検討を行うために、 t_w 以外の変数を一定値として取り扱うこととし、風や河川流入による

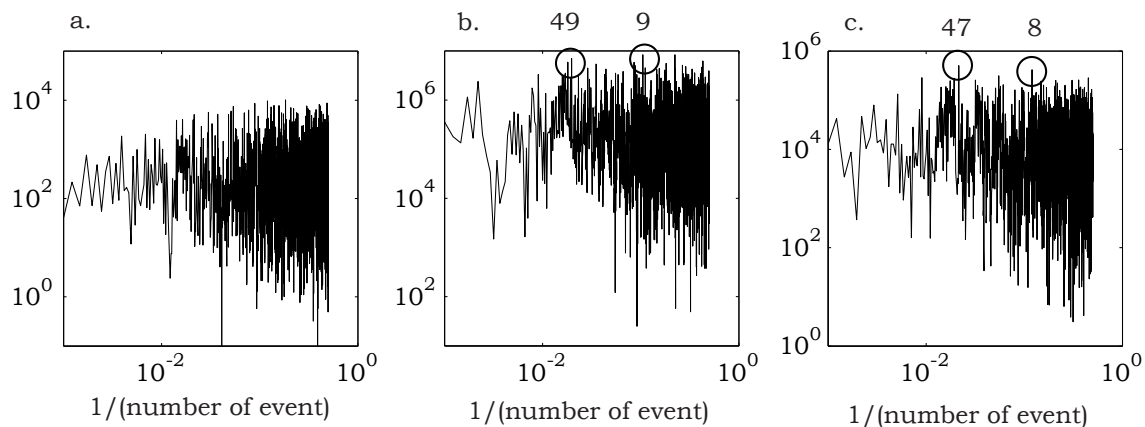


Fig. 8 (a) Spectrum of strong wind period. (b) Spectrum of strong wind interval. (c) Spectrum of mean kinetic energy for strong wind events.

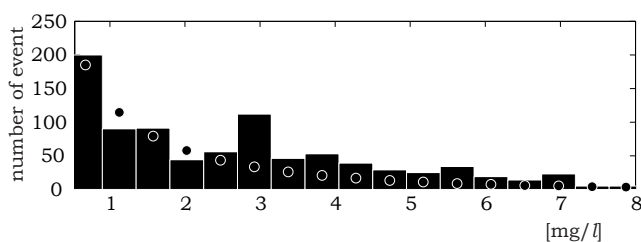


Fig. 7 Histogram for ΔDO .

Circles indicate theoretical solutions by using Eq. (9).

エスチュアリー循環への影響を無視し、初期DO濃度を水質環境の観点から考えると最悪の状態である $0 [mg\ l^{-1}]$ とすると、式(8)から得られるヒストグラムおよび式(9)による理論値は**Fig. 7**に示される通りのものとなる。式(8)で風のみを考慮したDO濃度の理論解は実測値をよく再現できており(式(9)：○ in **Fig. 7**)、本研究で得られたpdfを用いたヒストグラムによる検討が有効である可能性が得られた。

(2) イベント発生間隔に関する検討

続いて、それぞれの指標に対するスペクトルを計算した(**Fig. 8**)。イベント継続時間 t_w に関しては明確なスペクトルピークを見出すことが出来なかった。一方、イベント発生間隔 t_b に関しては、49イベント周期、9イベント周期が卓越していたことが示された。同様に、イベント平均強度 KE_w に関しては、47イベント周期、8イベント周期がそれぞれ卓越していた。

DO濃度を検討する際、強風の効果がどのような間隔でDO濃度を回復させる可能性があるかを知ることが、水質管理上、重要な情報をもたらす。そこで、実際のイベント発生間隔 $t_b + t_w$ を各強風イベント毎に累計し、その傾向を検討した(**Fig. 9**)。上述の49イベント周期での変動が卓越していることを示すように、約50イベント毎の周期的な変化が存在していることが分かる。また、14年での強風イベント

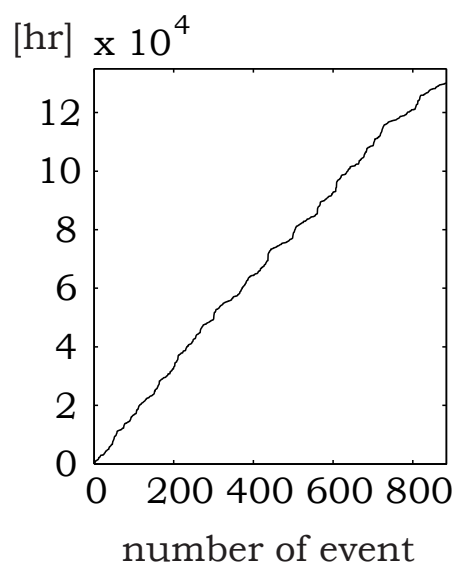


Fig. 9 Cumulative time of $t_b + t_w$.

数が884であったことから、1つの強風イベントは平均139時間間隔で発生していたことが示された。

イベント数50毎の周期的な変化がどのような性質を有するかを検討するために、累計時間からトレンドを取り除いた成分のみを計算した(**Fig. 10**)。イベント数50の周期がはっきりと確認でき、その振幅は最大約3000 hr程度であり、その波形はイベント数10程度で急激に立ち上がり、その後徐々に減少してゆくという傾向があることが分かった。つまり、 $139 + 3000/10 = 439$ 時間/1イベント程度が10イベント程度継続し、その後、 $139 - 3000/40 = 64$ 時間/1イベント程度が40イベント続くという現象が現れ易いことが分かった。

さらに、東京湾の湾奥底層でのDO濃度の値が問題となる5月から9月までの期間に注目するために、各年における5月から9月までの期間を四角で囲った(**Fig. 10**)。その結果、夏季は強風イベントが発生しやすい期間であり、イベント平均個数34、平均イベ

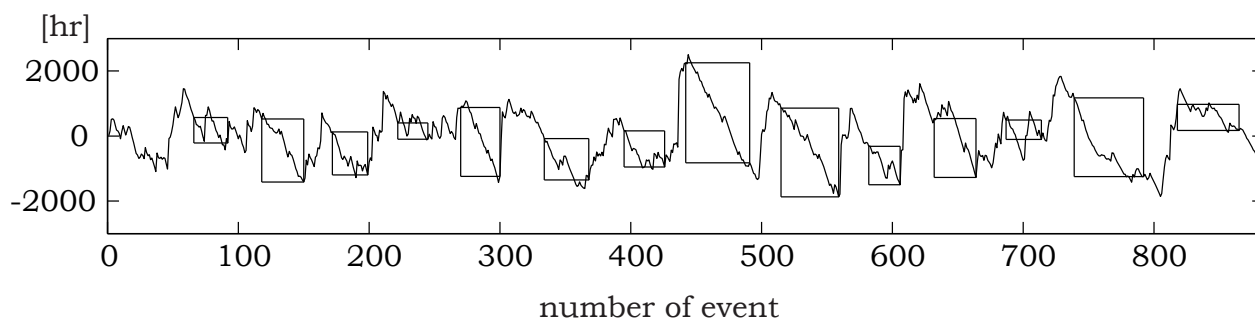


Fig. 10 Cumulative time of $t_b + t_w$ excluding trend.

ント発生間隔108時間であることが分かった。つまり、夏季にはかなりの頻度で強風が発生しており、DO濃度が回復し易い傾向にあることが分かった。

しかし実際には、イベント継続時間が短い場合には、強風の効果が十分に現れず、DO濃度がそれほど回復しない場合が存在する。式(8)を用い、単純のため、風や河川流入によるエスチュアリー循環への影響を無視し、初期DO濃度を0 [$mg\ l^{-1}$]とすると、貧酸素水塊非発生の基準とされる3 [$mg\ l^{-1}$]まで回復するには、 t_w は最低約7時間必要であることが分かる。そのため、今後、概念モデルによる有効イベント継続時間の解析と、その結果を受けた強風イベント解析を行ってゆきたい。

5. おわりに

東京湾の湾奥底層におけるDO濃度に大きな影響を与える強風の効果について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 強風の解析のために、イベント継続時間 t_w 、イベント発生間隔 t_b 、イベント平均強度 KE_w の利用を提案し、それぞれのpdf形状を得た。
- (2) t_w 、 t_b 、 KE_w それぞれの組み合わせについて全ての組み合わせにおいて相関が小さく、それぞれが独立であることが分かった。
- (3) DO度回復に関するpdfを実測値より計算し、理論解との比較を行った結果、両者は良好に一致した。これにより、DO濃度回復に関する概念モデルによる理論的な考察の可能性・妥当性が示された。
- (4) t_w 、 t_b 、 KE_w に関してスペクトルを調べた結果 t_b 、 KE_w は49イベント毎および約10程度のイベント数周期で変動していることが分かった。

(5) 実際のイベント発生間隔 $t_b + t_w$ から、強風イベントは夏に発生しやすく、その発生間隔はおおよそ108時間であり、平均の139時間よりも短いことが分かった。この発生間隔が108時間である要因については今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) Wolanski E. (Ed.): The Environment in Asia Pacific Harbors, Springer, 515p., 2005.
- 2) 田中昌弘, 稲垣聡: 生態系モデルを用いた東京湾夏季の水質シミュレーション, 海洋開発論文集, 第13巻, pp.261-266, 1997.
- 3) 佐々木淳, 石井雅樹, 磯部雅彦: 内湾における高解像流動モデルの開発と東京湾における長期再現計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.406-410, 1998.
- 4) 鈴木雅晴, 三村信男, 塚田光博: 3次元生態系・水質モデルによる東京湾の水質改善予測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.1011-1015, 1999.
- 5) Satoh C., K. Nakayama, Y. Yamashiki, T. Kanasashi and K. Miyazawa: Influence of flood on Dissolved Oxygen in Tokyo Bay, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol. 51, pp.199-204, 2007.
- 6) 中山恵介, 佐藤千鶴, 古川恵太: 東京湾における低層DOに対する風および河川流入の影響評価, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.633-638, 2007.
- 7) Robinson J. S., M. Sivapalan: Temporal scales and hydrological regimes: Implications for flood frequency scaling, *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 12, pp.2981-2999, 1997.
- 8) Sivapalan M., G. Bloschl, R. Merz and D. Gutknecht: Linking flood frequency to long-term water balance: Incorporating effects of seasonality, *Water Resources Research*, Vol. 41, W06012, doi:10.1029/2004WR003439, 2005.

(2007. 9. 30受付)