東京湾奥部における夏期の底層DO濃度変動と波浪擾乱との関係

Dynamic change of near bottom dissolved oxygen in summer with wind wave disturbance at the inner Tokyo Bay

中川康之¹・灘岡和夫²・八木 宏³・斎藤 衛⁴
小川浩史⁵・有路隆一⁶・米山治男⁷・白井一洋⁸

Yasuyuki NAKAGAWA, Kazuo NADAOKA, Hiroshi YAGI, Mamoru SAITOH, Hiroshi OGAWA
Ryuichi ARIJI, Haruo YONEYAMA and Kazuhiro SHIRAI

Field observations of water quality in the summer of 2010 reveal that the wind wave is one of key factors for temporary recovery of near bed dissolved oxygen (DO) concentration from hypoxic state in the inner Tokyo bay. The observation was a part of monitoring campaign to elucidate the behavior of the hypoxic water in the area. Basic parameters of water quality such as dissolved oxygen, salinity, temperature and turbidity were measured by a mooring system for 3 month from July through September in 2010. Physical parameters were also obtained for current profile by a bottom mounted ADCPs and for wind waves by an ultrasonic wave gauge respectively. DO concentration measured at 50 cm above the bottom intermittently increased especially after relatively higher wave events. The data also shows that the DO concentration near the bed is highly correlated with suspended sediment concentrations.

1. はじめに

内湾や湖沼等の閉鎖性水域で生じる貧酸素水塊の形成は、水生生物の生息環境を劣化させることから、水域環境改善の評価において、特に底層での溶存酸素 (DO) がモニタリング指標のひとつとして重要となりつつある。本研究の対象海域である東京湾内においても、夏期になると湾奥の底層付近を中心に貧酸素水塊が顕著となる。その一方で、湾口からの外界水の侵入 (たとえば、藤原ら, 2000) や、海上風による吹送流 (上野ら, 1993, 八木ら, 2008) などの影響により、貧酸素水塊の移動が生じることが知られている。このような貧酸素水塊の移動をはじめとする湾内水の動的挙動は、恒常的な貧酸素状態にあるとされる夏期においてもDOの時空間的な変

図-1 観測対象海域

動をもたらし、底性生物等の生息環境に大きな影響をもたらすものと考えられる。

著者らは東京湾奥部羽田沖での貧酸素水塊の挙動特性の把握を目的としたモニタリング調査を実施してきており、本研究では2010年の夏期に実施された定点連続観測結果を基に、当該海域におけるDOの変動特性について検討した。特に貧酸素期において、底層部にまで及ぶDOの一時的な回復現象が時折生じることに注目し、DO変動と風や波浪等の外力作用との関係について考察した。

2. 現地観測の概要

観測対象となる海域は、図-1に示す東京湾奥部北西部の、多摩川河口および羽田空港の沖合であり、本論文で主な解析対象となる連続観測データは、同図中の●地点にお

1	正会員	工修	(独法) 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究チームリーダー
2	フェロー	工博	東京工業大学大学院 情報理工学研究科 情報環境学専攻 教授
3	正会員	博(工)	(独法) 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 水産基盤グループ長
4		工修	(株) 五洋建設
5		博(農)	東京大学大気海洋研究所准教授
6	正会員	博(工)	国土交通省 関東地方整備局 東京空港事務所 (前・港湾空港技術研究所 沿岸土砂管理研究チーム 研究官)
7	正会員	博(工)	(独法) 港湾空港技術研究所 海洋研究領域 海洋利用研究チームリーダー (前・国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 所長)
8			(独法) 港湾空港技術研究所 新技術研究開発領域 主任研究官 (前・国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 環境課長)

図-2 定点連続観測における計測器設置概要図

いて2010年7月中旬から10月中旬の約3ヶ月間にわたって測定されたものである。定点連続観測における、計測機器の設置概況を図-2に示す。水温、塩分、DO、濁度等の水質計測では、メモリー式計測器（JFEアドバンテック、Compact-CTW、同DOW、同CLW）を係留および海底設置して10分間隔で測定記録した。また流況観測および波浪観測のためADCPと超音波式波高計も海底設置して、10分毎の流況と毎正時前後10分間（計20分間）の波高計測を行った。なお、生物付着による測定結果への影響を防ぐため、係留系のセンサーについては1週間に2回の頻度で船上より、また海底設置機器については1週間に1回の頻度でダイバー作業により清掃・点検を行った。一方、図-1中に示したStn.1～5（Stn.2は定点観測点と共通）では、6月下旬から8月下旬にかけて4～5日に一回の頻度で、多項目水質計（JFEアドバンテック社製・AAQ）による水温、塩分およびDO等の水質測定を含む定期水質調査が行われた。

3. 観測結果および考察

(1) 観測期間中の水温、塩分、DOの変化

水質変動の概況として、水温・塩分・ σ_t およびDOの鉛直分布の時系列変化を図-3に示す。（水深50cm層での水温・塩分計測においては、長期間の欠測が生じたため、ここでは水深3.6m層以下のデータによる解析結果を示す。）全体的には、密度躍層が発達する7月～9月上旬には底層付近を中心に貧酸素の状態が支配的となり、9月下旬以降に成層の解消とともに海水の高密度化とDO回復が見られる。しかしながら、7月～9月上旬においても、時折海底付近までDOの上昇（図中▽印）が生じる場合がある。本論文では、このような貧酸素期にみられる、一時的なDO回復現象に注目し、その変動特性を風や波浪等の外力との関係により考察した。なお観測期間中の降雨として、9月8日に時間雨量30mmを記録しているものの、7月から8月にかけては同10mm以下の降雨が2回（7月28日および8月9日）見られた程度である。

(2) 海上風と躍層界面の変動

東京湾奥部でのDO変動については、湾内の貧酸素水塊を含めた大局的な海水の流動現象と密接な関係があり（例えば、藤原ら、2000）、特に近年、八木ら（2008）は現地観測および数値シミュレーションの結果を通じて、同湾奥部の貧酸素水塊の挙動が、湾口部からの外洋水の侵入に加えて、海上風によって発達する吹送流にも強く影響を受けていることを指摘している。すなわち密度躍層の発達した湾央から湾奥部の海底付近に貧酸素水塊が存在する場合、湾口から（東京湾の場合は南から）の風が連吹すると、湾奥部では吹き寄せに伴う密度界面の低

図-3 観測期間中の (a) 塩分、(b) 水温、(c) stおよび (d) DOの変化

図-4 成層期における (a) DO (25時間移動平均), (b) σ_t (25時間移動平均), (c) 風速 (24時間移動平均), (d) 有義波高, (e) 有義波周期, および (f) 波浪到達水深および密度海面 ($\sigma_t=20$)

下が生じ, 比較的DOの豊富な上層水 (高温・低塩分) が下層に供給され, 湾奥部での貧酸素が解消されることになる。

そこでまず, 成層の発達がみられた観測期間の密度分布の変動と風況との対応, さらにその間のDO変動との関係について調べた。図-4には7月20日から約1ヶ月間における, DO (同図 (a)) および密度 (同図 (b)) の観測結果 (25時間移動平均) を羽田でのアメダスデータによる風 (同図 (c)) や波浪 (同図 (d), (e)) の時系列変化と並べて示している。同図の最下段 (同図 (f)) に示した密度界面の水深 (ここでは $\sigma_t=20$ の水深) の変化をみると, 南風 (北向き成分が正) が卓越する時期 (図中, 矢印①~③) には, 密度界面の低下がみられると同時に, 水塊内のDOの上昇 (同図 (a)) もみてとれる。特に中層部 (水面下7.2m層: 図中青線) では上層部 (水面下3.6m層: 図中黒線) と同程度にまでDOの回復が生じており, 南風の有無が湾奥部のDO変動に大きく影響していることがわかる。なお, 参考までに単純な矩形形状の湾の奥部での風による密度界面の低下量を算定 (たとえば和田, 2007) すると, 湾全長40kmとして風速10m/sの風が一様に吹き続けた場合, 観測結果にみられる上下層での密度差を考慮すると, 約7m程度の界面低下とな

図-5 貧酸素一時的解消の際の定点観測点周辺でのDO分布の変化

り, 観測結果とほぼ同程度となる。

一方, これら南風卓越時における海底近傍 (底面上50cm) でのDOの変化に注目すると, 比較的密度界面の低下が小さかった期間②においては, 底面近傍でのDO上昇はほとんど見られない。これに対し, 期間①および③では5mg/l程度 (瞬時値: 図-4 (a) 中赤点) まで一時的に上昇しており, また定点観測点の周辺海域においても底層まで顕著なDOの回復が見られている (図-5)。このような底面近傍までDOの回復がみられた両期間においては, いずれも海上風 (南風) の増大と共に波高および

周期の顕著な増大がみられる (図-4 (d) (e)). 波浪の発達時に底層のDOが回復する現象は, 2008年に実施した本観測点での連続観測結果 (八木ら, 2010) においてもみられている. 以下では, 貧酸素期に発生する風や波浪による水塊構造やDO変動への影響について調べた.

(3) 強風 (風波発達) 時における水塊の鉛直混合

底層DOの回復が見られた期間①や③においては, 密度界面の降下と同時に各層間の密度差が小さくなる (図-4 (b)), すなわち鉛直混合が進行する傾向がみられる. 混合強度の程度を表す指標として次式による上下層間での相対的な密度差を求め, まずは風との関係 (期間①) について示したものが図-6 (a) である.

$$\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここでは, 上層密度 (ρ_1) および下層密度 (ρ_2) には, 水面下3.6mおよび底面上0.5mで測定された水温・塩分の結果から求めた密度をそれぞれ用いている. 図-6 (a) によると風速の増大とともに, 密度差が小さくなる (混合が強化される) 負の相関関係が見られ, 特に風速が10m/sを越えると, 風速の上昇がわずかであるにもかかわらず, 鉛直混合は急速に進んでいることがわかる.

一方, 波浪発達に伴う水塊運動の水深方向の影響範囲の目安として, 深海波の条件を考慮した波浪影響の到達深さを次式により求めた.

$$h' = 0.5gT_{1/3}^2 / (2\pi) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに, $T_{1/3}$: 有義波周期, g : 重力加速度である. 観測期間中の波浪到達深の時系列変化 (図-4 (f)) をみると, 有義波周期が4s近くなる期間①や③では, 波浪の影響は水深10m以上にまで達している. また, 図-6 (b) には期間①における風速と波の影響到達深との関係を示す. 上述した風と相対密度差の関係 (図-6 (a)) と照らし合わせると, 風速が10m/s程度を超える頃に見られる相対密度差の減少時において, 波浪到達水深も同時に深くなっており, 波浪の発達が水塊の鉛直混合に関与していることが示唆される.

なお, 波浪が鉛直混合に関与する機構としては, 砕波による界面での乱れエネルギーの生成 (例えば森ら, 2010) のほかに, 水塊中での軌道流速に起因するレイノルズ応力による鉛直混合の強化 (例えばQiao et al., 2004) など考えられる. これらの効果の定量的な評価は今後の課題としたい.

(4) 海底直上での波浪擾乱と底層DO変動の関係

波浪発達期 (図-4中, 期間①および③) には, 有義波周期の波に対する影響到達深は10m程度であるものの, 有義波周期よりも長い周期成分の風波も同時に存在する. このため, 波浪運動による海水の動きが海底面まで

図-6 貧酸素一時的解消期 (期間①) における (a) 風速と上下層間での相対密度差の関係および (b) 風速と波浪到達水深との関係

図-7 波浪発達時 (2010年7月29日16時) における底面直上の流速波形とパワースペクトル

十分到達していることが, 底面上約50cmで測定された電磁流速計の波形記録により確認することができる (図-7). そこで, 海底に到達する波浪擾乱の強度と底層DOの変動の対応関係について調べた. ここでは海底面近傍での変動流速の程度を示す指標として, 周期帯3~8秒を対象とした風波成分と, 30~300秒を対象とした長周期成分の振動流速振幅 (U_w) を流速パワースペクトル密度関数 ($S(f)$) から次式によりそれぞれ求めた.

$$U_w = \sqrt{u_{rms}^2 + v_{rms}^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに,

$$u_{rms} = \sqrt{u^2} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S_{uu}(f) df}, \quad v_{rms} = \sqrt{v^2} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S_{vv}(f) df} \quad \dots\dots\dots (4)$$

図-8 底面上50cmでの水質および流速変動との対応

DO回復がみられた期間①における1時間おきの流速振幅とDOの観測結果を示したものが図-8である。これを見ると、底面における風波成分の流速振幅がピークに達した後に、ようやく底層DOの上昇が生じていることがわかる。このような波浪擾乱に対する底層DO上昇のタイムラグは、期間③の波浪発達期にも同様にみられる。この要因については現時点では未解明であり、上層からの供給速度や、それまで貧酸素状態にあった底層でのDO消費なども考慮して検討する必要がある。なお、図-8の表示期間における各測定層の水温・塩分の関係(図-9)をみると、底層でのT-S関係はDOの上昇とともに、より上層のT-S関係に近づく傾向にある。このことから、ここで示した底層DOの上昇は、水塊の鉛直混合によるものと考えられる。

一方、DO回復期間の中にも、DOの一時的低下が見られ(図-8中矢印部)、長周期変動あるいは平均流速の増大時およびSS濃度の上昇時期に対応することから、底泥の巻き上げ等に起因する懸濁物による酸素消費への影響が示唆される。

4. おわりに

東京湾奥北西部の海域を対象として、夏期の水質変動特性の解明を目的とした定点連続観測を行い、貧酸素期におけるDOをはじめとする水質変化に対する、風や波浪の発達との関係について検討した。これまでに指摘されている南風による湾奥部での密度界面の低下に伴うDOの回復現象に加えて、波浪の発達時における鉛直混

図-9 期間①におけるT-Sダイアグラム(黒：水面下3.6m, 青：同7.2m, 緑：同10.6m, 赤：底面上0.5m)

合の強化とともに特に底層DOの顕著な回復が生じることを観測データにより示した。今後は、波浪発達の鉛直混合現象への関与について、鉛直拡散過程への波浪の効果の取り込み(Qiaoら, 2004, 森ら, 2010)に関する検討のほか、底層付近でみられる長周期変動を含めた流動現象とDOやSS濃度変動との関係性の解明についても検討を進める予定である。

謝辞：本調査は国土交通省主催の羽田周辺水域環境調査研究委員会(委員長：風呂田利夫東邦大学理学部教授)での活動の一部をとりまとめたものである。当委員会における委員諸氏との議論において、有益な助言等を頂いたことを付記し謝意を表する。また、現地調査の実施に際して、定点連続観測の設置・点検等の現地作業では三洋テクノマリン(株)に協力を得たことを付記する。

参考文献

- 上野成三・灘岡和夫・勝井秀博・大谷英夫(1993):密度成層期の東京湾で発生する密度・流動・水質場の急変現象と内部波に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 246-250.
- 藤原建紀・高橋鉄哉・山田佳昭・兼子昭夫(2000):東京湾の貧酸素水塊に外洋の海況変動が及ぼす影響, 海の研究, Vol.9, No.6, pp. 303-313.
- 森 信人・鈴木崇之・木原直人(2010):海洋表層鉛直混合におよぼす風応力と波浪の影響, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp. 311-315.
- 八木 宏・灘岡和夫・斉藤 衛(2010):羽田周辺水域環境調査研究の取り組み～調査研究の中間成果報告～, 羽田周辺水域調査研究委員会, pp87-89.
- 八木 宏・T. Pokavanich・安井 進・灘岡和夫・有路隆一・松坂省一・鈴木信昭・諸星一信・小田遼子・二瓶泰雄(200):東京湾湾口部の湧昇現象に伴う湾内貧酸素水塊の中層化とその解消過程, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 1081-1805.
- 和田 明(2007):海洋環境水理学, 丸善(株), 329p.
- Qiao, F., Y. Yuan, Y. Yang, Q. Zheng and C. Xia (2004): Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model, Geophys. Res. Lett., 31, L11303, doi: 10.1029/2004GL019824