東京湾奥の貧酸素化に及ぼす時計回り循環流の影響について

Effect of the Clockwise Circulation on the Hypoxia at the Head of Tokyo Bay

鈴木高二朗¹・磯部雅彦²・米山治男³・中村由行⁴

Kojiro SUZUKI, Masahiko ISOBE, Haruo YONEYAMA and Yoshiyuki NAKAMURA

In order to clarify the effect of wind and fresh water discharge on the hypoxia inside Tokyo Bay, we investigated the sea surface residual current measured by the HF radar data. Numerical simulation which solves non-hydrostatic 3-D flow and multiple ecosystem was also conducted. At the sea surface of the head of Tokyo Bay, a clockwise circulation appears due to south wind from spring to autumn. The clockwise circulation piles up the fresh water from river which causes the growth of stratification and hypoxia at sea bottom. South wind stirs the sea surface and bottom water and causes the low density bottom water which promotes the intrusion of high density water and strengthens the hypoxia.

1. はじめに

都市化に伴う淡水流入量の増加および海域面積の減少により、近年、東京湾では海水交換量が増大し夏季の海水交換日数は30年前と比較して32%も減少していると言われている(岡田ら, 2007)。このように淡水流入の増加は海水交換を活発にすることで東京湾の水質を改善するものと考えられる。しかし一方で、淡水流入は低塩分水塊を海表面に広げて密度成層を強め、底層の貧酸素化を強め、東京湾の水環境を悪くしている可能性がある。

また夏季の東京湾では、南西風によって重力循環と海水交換が低下し、さらに湾奥の時計回り循環(藤原ら, 1994)によって低塩分水塊が湾奥に滞留することで、貧酸素水塊が発生しやすい可能性もある。

そこで本研究では、淡水流入の増加と夏季の東京湾に特徴的な南西風が、東京湾奥の流れと底層の貧酸素水塊の発達に及ぼす影響を調べることを目的として、HFレーダーの長期観測データの解析と数値計算によって湾表層の流れの特徴と水質の変化を調べることにした。

2. HFレーダーで観測された湾表層流速の特徴

(1) 解析方法

関東地方整備局は2005年11月から図-1に示す3基地局でHFレーダーによる東京湾表層の観測を開始し、そのデータを公開している(東京湾環境情報センター, <http://www.tbci.go.jp/>)。本研究では2006年から2009年のHFレーダーによる観測データを用いて東京湾表層の残差流の特徴を調べた。残差流は観測データから調和解析(主要8分潮)で得た天文潮成分を差し引いて求めた。

図-1 観測地点、気象台、アメダスの位置と計算格子

(2) 湾奥の時計回り循環と湾軸風速

図-2はHFレーダーのデータから求めた2008年の月平均残差流である。春から秋にかけて湾奥に時計回り循環流が発生している。春と秋の循環流は湾奥の西側に発生するのに対し、夏季の循環流は大きく、その中心は湾の東側に発生する傾向にある。

図-3は2006～2009年の時計回り循環流の中心の位置(図-3(a))と北東-南西方向を軸とする風速(以後、湾軸風速)との関係(図-3(b))である。循環流の中心は緯度35.56°の線上に発生し、その位置は南西風が強いほど東京湾の東側に発生することが分かった。

3. 時計回り循環と湾内水質の再現計算

(1) 計算方法と計算条件

夏季の風と淡水流入が湾内の貧酸素化に及ぼす影響を

1 正会員 修(工) 国土交通省横浜港湾空港技術調査事務所長
2 フェロー 工博 東京大学教授
3 正会員 博(工) (独)港空研 海洋研究領域
4 正会員 工博 (独)港空研 研究主監

図-2 HFレーダーによる湾表層の月平均残差流（2008年）と時計回り循環

図-3 月平均湾軸風速と表層時計回り循環の中心の位置

調べるため、流れと水質の再現計算を行った。用いた計算モデルは非静水圧3次元流動モデルと生態系モデルを組み合わせたモデル（田中ら，2011）であり、表-1に計算条件を記した。風速はまず、千葉、江戸川臨海、羽田、横浜、木更津、第二海堡のデータを近藤（2000）に従って高度300mの風に換算した後、海上10m風速に戻した。その後、重み関数で補間して各格子の計算条件とした。

(2) 時計回り循環流と水質の再現計算

図-4は表層（0m）と水深6m，10mでの2008年1月と7

表-1 計算条件

解析期間	2007年1月1日～2008年12月31日	
水平格子	2km	
鉛直格子	34層 格子中心は 3, 0.5, -0.5, -1.5, -2.5, -3.5, -4.5, -6, -8, -10, -12, -14, -16, -18, -20, -22, -24, -26, -28, -30, -32, -34, -36, -38.5, -42.5, -47.5, -52.5, -57.5, -62.5, -67.5, -72.5, -77.5, -82.5, -90(m)	
拡散係数	水平SGSモデル, 鉛直(中村ら,1989)	
無反射条件	日野の無反射条件	
初期条件	全セルで水温10℃, 塩分31PSU, 流速ゼロ	
湾口境界	水質	塩分水温は横浜技調S4データ 栄養塩は田中ら(2011)から推定
	水位	館山の主要8分潮
	流速	勾配ゼロ
河川境界	国交省水文水質データベースから江戸川, 荒川, 中川, 多摩川, 鶴見川, 隅田川の流量水温を推定, 塩分はゼロ, 栄養塩は坂井ら(2008), 環境省(2010)から算定	
気象条件	風向風速	3.(1)を参照
	気温, 日射, 降水, 気圧	は東京気象台のデータ

月の月平均残差流の計算結果である。図-2のHFレーダーの観測結果と同様に1月は湾口に向かうような流れが再現され、7月には湾奥の時計回り循環流が再現された。

この循環流は水深6mにも見られるが、その中心は表層0mよりも南側に位置している。一方、水深10mの湾奥では表層と逆向きの流れがあり、湾の東側に北へ向かう流れが見られた。

なお、灘岡ら（1997）が指摘したのと同様に風の空間分布のない様な風を与えた場合（図-5）では、表層0mでは循環流が発生せず、表層流速の再現には風の空間変動が不可欠ことが示された。一方、水深6mでは風の

図-4 数値モデルによる時計回り循環の再現

図-5 風の空間分布を与えなかった場合の計算結果

空間分布が無い場合でも、規模が小さいものの時計回り循環が見られた。藤原ら（1994）は閉鎖性内湾の時計回り循環（高気圧性渦）の発生に重力循環にともなう湧昇と風の影響、さらに自己励起性があることを指摘したが、ここで得た結果は表層6m付近までは重力循環と風などが影響しているのに対し、表層0mでは風の空間的な変動が大きく寄与していることを示している。ここでは図示しないが、夏季の月平均風速は南西風が卓越し、湾の西側が東側より強かった。この風分布が表層水塊にせん断力を与え、時計回り循環を起こしているものと考えられる。

図-6は横浜技調の観測船による2008年のN3地点の観測結果と計算結果の比較である。冬季の底層水温とDO

図-6 N3地点の2008年の各種水質の再現計算結果

および6、7月の底層DOの再現性が若干悪いものの、その他はおおむね観測結果を再現している。その他、N1、N5、N8、C7、C9、S4地点でも良好な再現結果を得た。

4. 淡水流入と風を変化させた場合の底層DOの応答

ここでは3章の再現計算を基本ケースとし、荒川の淡水流入量と南西風を大きくした計算を実施する。これらの計算結果の差を求めることで、東京湾の水質に与える淡水流入と風の影響を調べることにした。

(1) 荒川の淡水流入量を増加させた場合

図-7は荒川の淡水流入量を7月の1ヶ月間40m³/s増加させた場合の表層と底層の塩分、クロロフィルa、DOの基本ケースからの差分であり、7月の月平均である。なお、過去30年の月平均淡水流入量の標準偏差は50m³/sである。

低塩分水塊が時計回り循環にそって移動し、湾の北岸の表層塩分が低下し、クロロフィルaとDOは増加した。また、底層DOは全般に低下し、特に表層で低塩分化した場所での低下量が大きかった。なお、浦安から幕張周辺の岸に近い場所の底層では、水深が浅く表層の水質と似た性質を持つため一次生産の増加でDOが高くなった。

図-8はその後、淡水流入の増加をやめた後の8月の月平均である。表層の低塩分水塊は時計回り循環にそって湾の東側へ移動し、底層DOの低下箇所もそれとともな

って東側へ移動した。底層DOの低下量は7月よりも強くなり、月平均の最大で0.27mg/lの低下となった。このように7月に与えた淡水流入の増加による湾内の水質の変化は、振動しながら最終的に9月いっぱい続いた。

このように湾奥で淡水流入が増加すると、時計回り循環によって低塩分水塊が湾奥に拡がり、密度成層の強化と栄養塩の増加によって一次生産が増加し、底層DOの低下に結びつくことが分かった。

(2) 流量のみを増加させた場合

(1)のケースでは、荒川の栄養塩濃度を基本ケースと同じとしたため、底層DOの低下が栄養塩負荷量の増加によるものか、密度成層の強化によるものが明確ではない。そこで式(1)を用い、基本ケースとトータル栄養塩負荷が同じになるようにして流量を40m³/s増加させた。

$$C' = Q \times C / (Q + 40) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 C は基本ケースの濃度、 C' はトータルの栄養塩負荷が基本ケースと同じようになるように算定した栄養塩濃度、 Q は基本ケースの荒川の流量である。

図-7 7月の淡水流入量を増加させた場合の7月の水質の変化

図-8 7月の淡水流入量を増加させた場合の8月の水質の変化

図-9 基本ケースと7月の淡水流入量のみを増やした場合

図-9はこのときの表層と底層の塩分、クロロフィル a 、DOの基本ケースからの差分である。底層の塩分低下量は(1)と同じである。表層クロロフィル a とDOは増加しているが、その増加量は(1)のケースより小さい。一方、7月の底層DOの低下量は(1)ほどではないものの、8月の低下量は(1)のケースと同程度だった。このように時計回り循環が卓越する時季の淡水流入の増加は、湾奥の密度成層を強化させ、底層DOを低下させることが分かった。なお、8月は表層の一次生産とDOが基本ケースよりも低下した。富津岬周辺の湾口部の底層DOが低下しているのは、水深が浅く表層と似た性質を持つためである。

(3) 南西風を強くした場合

次に、基本ケースの風の空間分布に対して7月の1ヶ月間、南西風成分を湾全体に一律に0.1m/s増加させて計算した。なお、過去15年の風の標準偏差は1.5m/sである。

図-10はこのときの表層と底層の塩分、クロロフィル a 、DOの基本ケースからの差分である。

Nakayama et al. (2010) が指摘するように、南西風が強くなると表層と底層の海水が混合し、7月の塩分は表層で高く底層で低くなった。特に湾奥底層は低塩分水塊が南西風によって押し込められ、塩分低下量が多い。底層DOはこのような混合と密度成層の縮小により増加した。

しかし、8月(図-11)になるとこの関係は逆転し、混合で低塩・低密度となった底層に、高塩・高密度水塊が進入して成層が発達しやすくなり、DOが基本ケースより低下するという結果となった。

5. 考察とまとめ

海水交換は、南西風によって低下し、淡水流入によって増加する(鈴木ら, 2012)。海水交換は水質を良くするものと一般に考えられることから、淡水流入の増加で底層

図-10 7月の南西風を大きくした場合の7月の水質の変化

図-11 7月の南西風を大きくした場合の8月の水質の変化

DOが低下し、南西風によって上昇するという本研究の結果は一見、相反している。この相反する関係は時計回り循環で湾奥と湾口の流れが大きく異なることに起因する。

すなわち“淡水流入”は湾央湾口においては海水交換の増加をもたらすが、夏季の湾奥では時計回り循環の影響で栄養塩の滞留と密度成層の強化をもたらす、湾奥底層のDOを低下させている。二瓶ら(2009)は大規模出水後に大量の有機物が湾奥に堆積し、底層DOが低下することを示したが、このような大規模出水後の貧酸素水塊の発達にも時計回り循環が影響している可能性が高い。

一方、“南西風”は一時的に湾奥底層のDOを上昇させるが、その後の高密度水塊の進入と底層DOの低下を促す。“南西風”は湾口での海水交換も低下させることから、長期的に見ると悪影響をもたらしている可能性がある。

ただし、夏季には外洋水が頻繁に底層に進入すること(八木ら, 2008)や、南西風連吹時の底層DOの上昇が貧

酸素状態での底質からの栄養塩溶出を抑制することも考えられるため、南西風についてはさらに検討が必要である。

本研究の結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) HFレーダーによる湾表層流速を調べたところ、春から秋にかけて湾奥に時計回り循環が発生していた。循環流の中心は緯度35.56°の線上に発生し、その位置は南西風が強いほど千葉側に移動することが分かった。
- (2) 生態系モデルによって2008年の東京湾の流況水質を再現した後、荒川の淡水流入量を増加させる計算を実施した。淡水は表層を時計回りに移動し、東京湾奥の密度成層を発達させ、底層DOを低下させることが分かった。
- (3) 夏季の南西風を増加させて計算を実施したところ、底層DOは一旦上昇するが、その後、南西風が吹き止むと反転してDOが低下することが明らかとなった。

参考文献

- 岡田知也・高尾敏幸・中山恵介・古川恵太(2007):東京湾における淡水流入量および海水の滞留時間の長期変化,土木学会論文集B, Vol.63, No.1, pp. 67-72.
- 環境省(2010):平成21年度豊かな沿岸環境回復のための閉鎖性海域水環境保全中長期ビジョンの策定に向けた対策効果検討調査委託業務報告書, 283p.
- 近藤純正(2000):地表面に近い大気科学, 東京大出版会, 324p.
- 坂井文子・二瓶泰雄・江原圭介・白田美穂・重田京助・大塚慧(2008):江戸川・荒川・多摩川・中川における出水時栄養塩・COD負荷特性, 水工学論文集, Vol. 52, pp. 1117-1122.
- 鈴木高二朗・磯部雅彦・米山治男(2012):東京湾の海水交換に及ぼす風と淡水流入量の影響について, 土木学会論文集B2(海岸工学), 印刷中.
- 田中陽二・中村由行・鈴木高二朗・井上徹教・西村洋子(2011):微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築, 港空研報告, 第50巻, 第2号, pp. 4-68.
- 中村由行・西田克司・早川典生・西村 肇(1989):沿岸海域における鉛直拡散係数の推定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 809-813.
- 灘岡和夫・二瓶康雄・吉野忠和(1997):東京湾における風系の時空間変動特性の実態と湾内海水流動への影響について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 396-400.
- 二瓶泰雄・滝岡健太郎・坂井文子・重田京助(2009):大規模出水が東京湾の水質に及ぼす影響, 土木学会論文集B2(海岸工学), pp. 1016-1020.
- 藤原建紀・澤田好史・中辻啓二・倉本茂樹(1994):大阪湾東部上層水の交換時間と流動特性-内湾奥部にみられる高気圧性渦, 沿岸海洋研究ノート, 第31巻, 第2号, pp. 227-238.
- 八木 宏・Tanuspong Pokavanich・安井 進・灘岡和夫ら, 他6名(2008):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.1081-1085.
- K. Nakayama, M. Sivapalan, C. Sato and K. Furukawa(2010): Stochastic characterization of the onset of and recovery from hypoxia in Tokyo Bay, Water Res., Vol.46, W12532, 15p.