

連続観測装置で捉えた東京湾における青潮時の貧酸素水塊の挙動[†]

森岡裕詞*

Behavior of hypoxic water in Tokyo Bay under the coastal upwelling condition determined by continuous observation systems[†]

Hiroshi MORIOKA*

Abstract

The behavior of hypoxic water under coastal upwelling condition in Tokyo Bay in September, 2012 was clarified by the observation results using the continuous monitoring systems. On 20 th September 2012, northeast winds blow up (6 m/s in average), and drove vertical circulation. During this term, the upwelling of hypoxic bottom water which called as 'Aoshio' occurred in northeast coast of Tokyo Bay because of the wind-driven circulation. In this case, 'Aoshio' continued for nine days. At the end of 'Aoshio' term, bottom hypoxia water was disappeared because of the upwelling and advection of oxygen rich bottom water from the southern area of Tokyo Bay. Under the vertical circulation condition, bottom water can reach from central area of the bay to northern coast within 4 to 7 days. These continuous monitoring systems are useful to observe sudden events such as 'Aoshio' because of their high performance for quick observation.

1 諸言

現代の東京湾の湾奥部においては、夏季を中心として溶存酸素 (Dissolved Oxygen : DO) の低下した貧酸素水塊が形成されることが、多くの調査報告・文献に報告されている。東京湾では北よりの風が卓越して吹き続けると、この貧酸素水塊が沿岸域で湧昇して、海水が青白色や青緑色に変化する青潮とよばれる現象を引き起こす。ほぼ無酸素となった貧酸素水塊が海面付近まで湧昇すると、貧酸素水塊に含まれている硫化水素が酸化されてコロイド状の硫黄が形成される。このコロイド状の硫黄が太陽光を散乱するため、海水が青白

色や青緑色を呈すると考えられている。東京湾では千葉県沿岸部を中心に、2001年から2012年においても年2回から6回程度発生している(東京湾再生推進会議, 2013)。

気象の面から見た東京湾における青潮の発生条件については渡辺・木幡(1995)によってまとめられており、①沿岸部の底層に貧酸素水塊(DO < 3 mg/L)が存在すること②北偏風が48時間以上連吹すること、③気温が日平均気温にして4℃以上低下すること、または平均風速が9 m/s以上であること、の3条件が述べられている。

一方、東京湾の青潮時の貧酸素水塊の挙動につ

[†] Received September 19, 2014; Accepted November 13, 2014

* 環境調査課 Environmental and Oceanographic Research Division

いては、観測やモデルによる数値シミュレーションを利用した研究がいくつかあるが（渡辺・他，1998；鯉淵・磯部，2005；福岡・他，2005），実際に青潮が発生した際に複数の測点において流動環境や水質の変化を連続して観測した例は少ない。

2012年9月に、東京湾の東京都から千葉県沿岸において、発生期間・海域ともに大規模な青潮が発生した（千葉県水産総合研究センター・他，2012）。千葉県環境研究センターのまとめた千葉県内における2008年から2011年までの青潮発生状況では、平均持続時間は約4日であり、長くとも発生から7日間程度で解消していたが（飯村・他，2009，2010，2011，2012），この青潮は9月23日に発生し10月1日に解消が確認されるまでの9日間に、東京湾内の養老川以北の千葉県沿岸の他、東京都の葛西臨海公園や隅田川河口など東京湾北部沿岸の一帯で発生したことが確認されている（飯村・他，2013）。特に東京都内での青潮発生は、2004年以来8年ぶりであり、隅田川で確認されたのは初めてであった。（東京都環境局自然環境部，2014）。この青潮の発生に伴い、アサリやホンビノスガイの斃死が報告されている。海上保安庁は2003年に、千葉港の沖合約5 kmに位置する千葉灯標で多項目水質計、超音波式流速計および風向風速計による連続観測装置を設置し、欠測を挟みながらもこれまで計測を続けている。2010年には、国土交通省関東地方整備局によって、東京湾アクアラインの川崎人工島などに千葉灯標と同様の連続観測装置が設置され、東京湾奥における水環境のモニタリング体制が強化されている。

本報告の目的は、これらの連続観測装置の観測結果から、2012年に生じた大規模な青潮時に貧酸素水塊がどのような挙動を示していたのか、明らかにすることである。

2 観測と解析

2.1 連続観測装置の位置

連続観測装置は、東京湾の湾中央部から湾奥部

にかけて、北から浦安沖（緯度35度28分24秒 経度139度56分30秒 水深約5 m）、千葉港波浪観測塔（緯度35度36分39秒 経度140度01分24秒 水深約8 m）、千葉灯標（北緯35度34分5秒，東経140度02分45秒 水深約12 m）、千葉港口第一灯標（緯度35度32分13秒 経度139度57分15秒 水深約19 m）、川崎人工島（緯度35度29分25秒 経度139度50分2秒 水深約32 m）の5点に設置されている（Fig. 1）。

2.2 観測方法

2.2.1 水質観測

千葉灯標に海上保安庁が設置した連続観測装置で観測している水質の項目は水深・水温・塩分・DO・濁度であるが、このうち水温・DOのデータを使用した。データの測定は1時間おきに行われており、千葉灯標の場合は自動昇降装置によって、毎正時に多項目水質計（JFEアドバンテック社製AAQ1182）が海面から海底上1 mまでを1 mおきに観測している。

また、浦安沖、千葉港波浪観測塔、千葉港口第一灯標、川崎人工島に国土交通省関東地方整備局が設置した連続観測装置においても水深・水温・塩分・DO・濁度の観測を行っている。これらの関東地方整備局の設置した連続観測装置のうち、

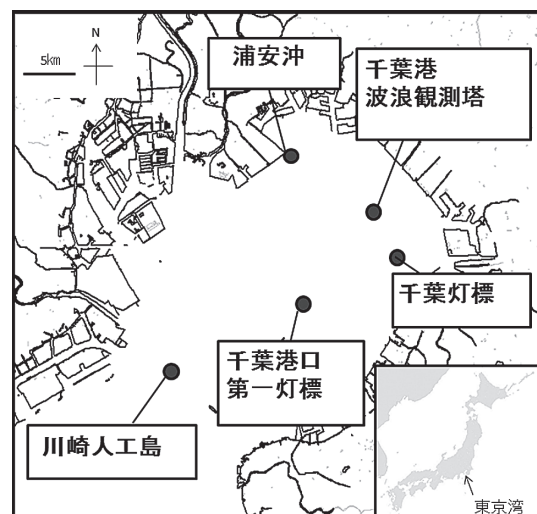


Fig. 1. Location of the continuous observation stations in Tokyo Bay.

図1. 東京湾の連続観測点の位置。

千葉港口第一灯標を除く3箇所は千葉灯標同様に自動昇降装置と多項目水質計（YSI ナノテック社製 6600V2-4M）による1 m 毎の観測を1時間おきに実施している。千葉港口第一灯標については、水深0.5 m, 10 m, 18.6 mの3箇所に多項目水質計（YSI ナノテック社製 6600V2-4M）が設置され、1時間毎の観測を実施している。

2.2.2 海潮流

海潮流の観測データは、浦安沖、千葉港波浪観測塔、川崎人工島の連続観測点において、海底に設置した超音波ドップラー流速計（SonTek 社製 1.5 MHz）を用いて観測されたものを使用した。観測の時間間隔は1時間毎であり、直上0.5 mから海面付近までを鉛直方向1 m 毎に観測している。

2.2.3 気象データ

気象の観測データとして、浦安沖と川崎人工島の連続観測点に設置されている風向風速計（クリマテック社製 C-HPT）のデータを使用した。風向風速の測定間隔は15分毎となっており、風向・風速は直前1分の平均値である。

2.3 観測値の取得期間・処理

国土交通省関東地方整備局の設置した連続観測装置で観測されたデータは、インターネットサイトである東京湾環境情報センター（<http://www.tebeic.go.jp>）を経由して入手した。風・海潮流・水質のいずれの観測値についても2012年9月20日から2012年9月29日にかけてのデータを取得した。

水質と海潮流の観測値については、深度毎に上層（表面～水深1 m）と中層（全水深の2分の1に対して前後1 m）、下層（海底から海底上1 m）の3層に分割し、解析へ供した。また、海潮流のうち南北成分を抽出し、25時間移動平均処理から南北方向残差流を算出した。浦安沖の風のデータについても、南北成分を抽出し、海潮流データの南北方向残差流との比較を行った。

3 結果

3.1 風

2012年9月20日から9月29日の川崎人工島と浦安沖で観測された風の変化をFig. 2に示す。当初、南よりの風が吹き続けていたものが9月20日の午後から北よりの風が吹き始め、21日、23日、24日の一部の時間帯を除き、9月29日の日中まで約8日間にわたって北偏風が連吹していた。9月20日から29日にかけての北偏風期間中の平均風速は浦安沖で6.5 m/s、川崎人工島で5.7 m/sであった。

3.2 海潮流

9月21日から9月29日までの浦安沖と川崎人工島の海潮流の変化をFig. 3に示す。いずれの連続観測点においても、潮汐によると考えられる半日周期の流れの変化が認められた。観測された流速は大半が20 cm/s未満であり、観測された最も速い流速は、浦安沖で61 cm/s、川崎人工島の64 cm/sであった。9月23日頃が小潮、30日頃が大潮にそれぞれ相当するが、期間後半に向けて流れが強まるような傾向は明瞭ではなかった。浦安沖では、全ての層において南向きの流れが卓越する際に流速が強まる傾向が見て取れるが、川崎人工島ではこのような傾向は認められなかった。南北残差流成分としては、上層では南向きの流れが卓越し、下層では北向きの流れが卓越していた（Fig. 4）。川崎人工島の下層の南北方向残差流は、強弱を示すものの、常に北向きに流れていた。上層・下層の南北方向残差流の変動傾向は、浦安沖と川崎人工島の間でよく似たパターンを示していた。

上記期間中の上層平均残差流の南北成分は、浦安沖で5.5 cm/s、千葉港波浪観測塔で6.8 cm/s、川崎人工島で2.7 cm/sであった。一方、下層の残差流南北成分の平均流速は浦安沖で1.2 cm/s、千葉港波浪観測塔で4.1 cm/s、川崎人工島で7.5 cm/sであった。

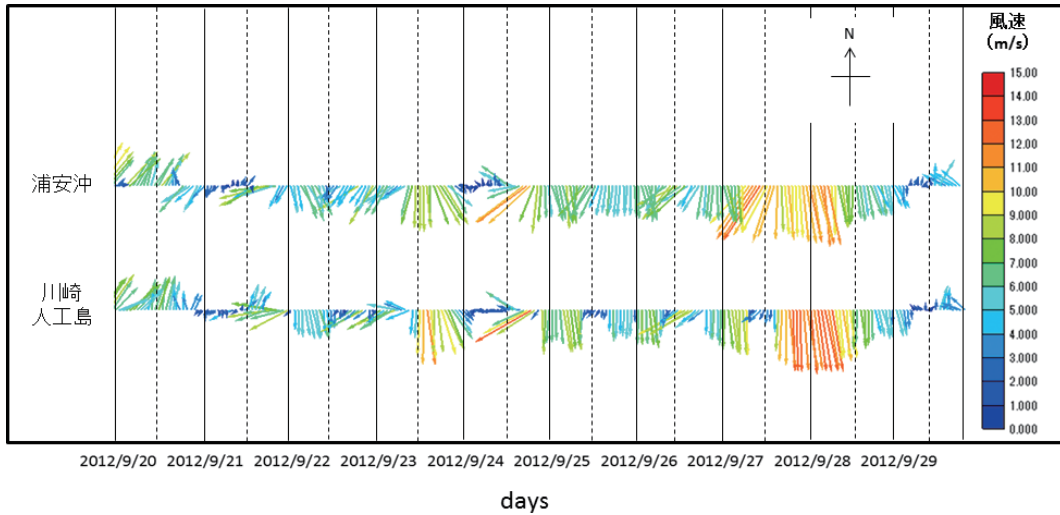


Fig. 2. Stick diagrams for wind in Urayasuoki (upper) and Kawasaki artificial isle (lower) between 20th and 29th September, 2012. Color of vector reveals magnitude of wind speed. Black solid lines and black dashed lines on X axis reveal 0 o'clock and 12 o'clock, respectively.

図 2. 2012 年 9 月 20 日～29 日の間の浦安沖と川崎人工島における風のスティックダイアグラム。カラースケールは風速を、矢印の向きは風の吹下方向を示す。X 軸上の実線は 0 時、破線は 12 時を示す。

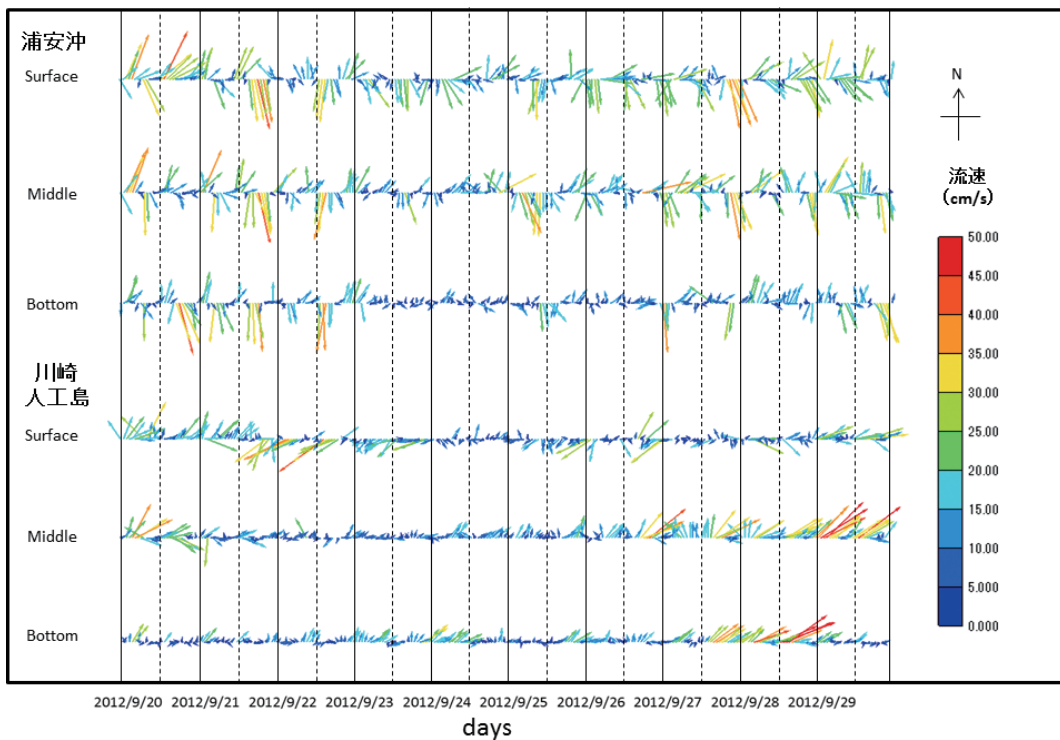


Fig. 3. Stick diagrams for tidal current in Urayasuoki (upper) and Kawasaki artificial isle (lower) between 20th and 29th September, 2013. Color of vector reveals magnitude of wind speed. Black solid lines and black dashed lines on X axis reveal 0 o'clock and 12 o'clock, respectively.

図 3. 2012 年 9 月 20 日～29 日の間の浦安沖と川崎人工島における潮流のスティックダイアグラム。カラースケールは流速を、矢印の向きは風の吹下方向を示す。X 軸上の実線は 0 時、破線は 12 時を示す。

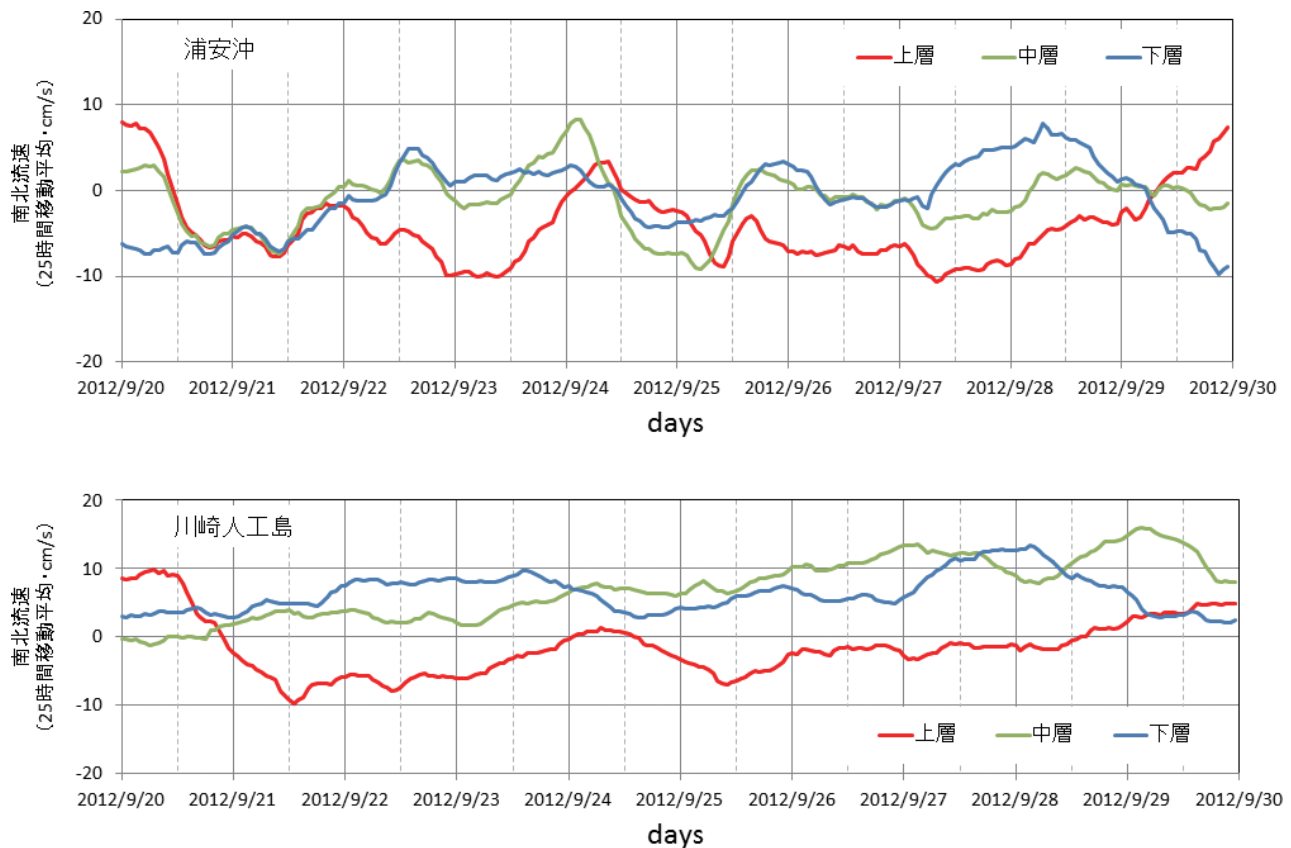


Fig. 4. Time Series for north-south composition of residual currents in Urayasuoki and Kawasaki artificial isle between 20th and 29th September, 2012. Red, green and blue line reveals surface, middle and bottom layers, respectively. Black solid line and black dashed line on X axis reveals 0 o'clock and 12 o'clock, respectively.

図 4. 2012 年 9 月 20 日～ 29 日間の浦安沖と川崎人工島における 25 時間移動平均値による南北方向残差流速。赤線は上層，緑線は中層，青線は下層を表す。X 軸上の実線は 0 時，破線は 12 時を示す。

3.3 水質

9 月 20 日から 29 日までの期間における，各連続観測点の水温，DO の変化を Fig. 5 に示す。上層水温は北偏風の吹き始めた 9 月 20 日午前中はいずれの観測点においても 27℃ 以上あったものが，9 月 28 日には 24℃ を下回るまで低下していた。地理的に比較すると 9 月 20 日においては，北に位置する測点ほど上層水温が高い傾向があったが，9 月 28 日には南の測点ほど水温が高い傾向に変化している。

下層水温についても 9 月 20 日から 29 日にかけて低下する傾向がみられた。浦安沖から千葉灯標にかけては 9 月 20 日の時点では下層水温が 27℃ 以上であるが，21 日から 22 日にかけて 24℃ 台にまで低下している。その後，いずれの観測点も 23-24℃ 台の水温で推移していたが 9 月 26 日から

28 日にかけて再び急速な水温低下が生じ，22℃ を下回るようになっていた。千葉港口第一灯標と川崎人工島では 9 月 20 日の時点ですでに 24℃ を下回り，22℃ 台で推移していたのが 9 月 24 日ごろまで続き，その後急速に 21℃ 未満へ低下する変化が見られた。

上層 DO については，9 月 23 日から 28 日の浦安沖，9 月 24 日の千葉港波浪観測塔，9 月 27 日の千葉灯標において，極度に低下する (1 mg/L 未満) 現象が認められ，下層の貧酸素水塊が上層まで上昇する青潮現象が発生していたことを裏付けるデータが得られた (Fig. 5)。特に，最も沿岸に位置する浦安沖の連続観測点では 9 月 23 日 16 時から 9 月 25 日 22 時まで連続して上層から下層まで DO が 1 mg/L を下回った。その後は 9 月 28 日にかけて間歇的に上層 DO の低下する現象が

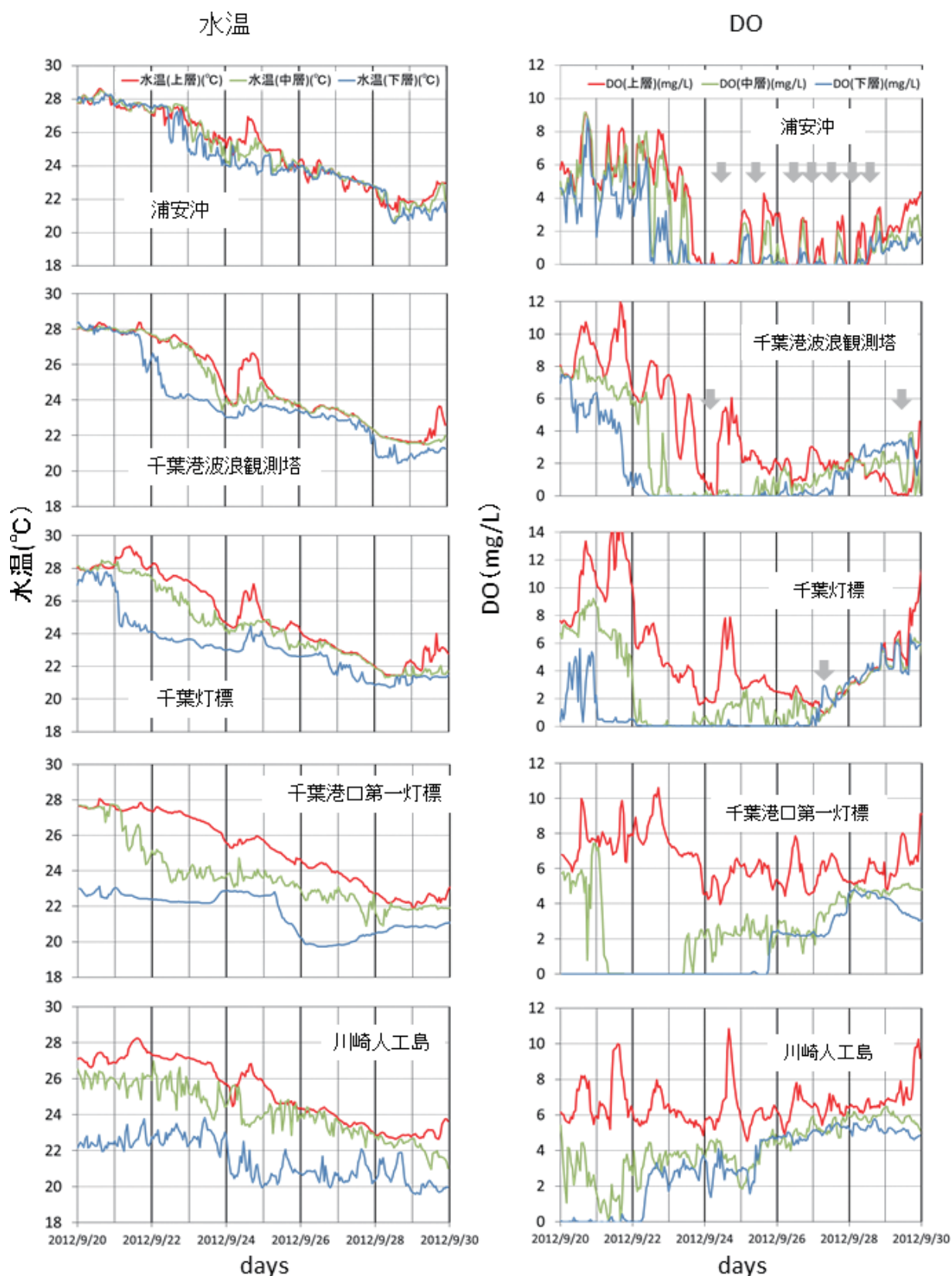


Fig. 5. Time Series of water temperature and dissolved oxygen (DO) in each station between 20th and 29th September, 2012. Red, green and blue line reveals surface, middle and bottom layers, respectively. Black solid lines on X axis reveal 0 o'clock. Gray arrow reveals the time when surface DO is lower than 1 mg/L.

図5. 各連続観測点における水温・DOの経時変化。赤線は上層、緑線は中層、青線は下層を表す。X軸上の実線は毎日0時を示す。灰色の矢印は、上層DOが1mg/L未満にまで低下した時を示す。

捉えられていた (Fig. 5). この他の連続観測点では、これほど長時間に及ぶ DO の低下は認められず、千葉港口第一灯標と川崎人工島においては、1 mg/L を下回るような顕著な上層の DO 低下は認められなかった。

下層 DO に着目すると川崎人工島と千葉港口第一灯標については、9月22日はともにほぼ0 mg/Lを示していたが、それぞれ9月23日と9月25日以降には2mg/Lを上回るようになった。

また、千葉灯標と千葉港波浪観測塔においては、それぞれ9月27日以降と9月28日以降に下層 DO が上層 DO を上回る現象が認められ、浦安沖においても9月28日にごく短い期間ではあるが下層 DO が上層 DO を上回る様子が見られた。

4. 考察

4.1 風と海潮流

浦安沖における25時間移動平均による南北方向残差流と風の南北成分を比較したところ、上層で正相関、下層で逆相関の関係が得られ (Fig. 6)、風によって残差流が駆動されていると考えられる。下層の残差流成分が風と逆相関を示すのは、まず岸から離れる方向に吹く風によって上層の流れが沖向きへ変化し、それを補償する形で鉛直循環が形成されるためであると考えられる。既往研究においても、離岸風による鉛直循環流の形成と青潮の発生の関係が指摘されている (大坪・村岡, 1988) ことから、今回のケースにおいても、過去の青潮と同様に風によって生じた鉛直循環流にともなって貧酸素水塊が湧昇したことが青潮の原因であると考えられる。北偏風の期間後半で、上層水温が南の観測点ほど高くなる傾向を示したことも、北部沿岸で下層水が湧昇したことを示唆している。

北偏風期間前後の南寄りの風が吹いていた期間において、浦安沖での下層南北方向残差流は南向きであったのに対して、川崎人工島では、常に残差流は北向きであった。これには川崎人工島の水深が浦安沖より深いため、成層強度が浦安沖より高いことと、河川水流入に伴うエスチュアリー循

環が関連していると考えられる。

4.2 貧酸素水塊の挙動

浦安沖では各連続観測点中、もっとも長時間にわたって上層 DO が低下していたが、9月23日から28日にかけて上層 DO が1 mg/L 未満に低下していた時間帯は、上層に北向きの流れが卓越していた (Fig. 7)。北向きの流れは上げ潮に相当するため、浦安付近では上げ潮に伴って沖合から貧酸素水塊が輸送され、青潮が生じるとともに、下げ潮になると三番瀬など近くの浅瀬からわずかに DO の回復した水が流れ込むことが明らかとなった。

上層で1 mg/Lを下回る DO を記録した地点は、浦安沖、千葉港波浪観測塔、千葉灯標の3地点であり、千葉港口第一灯標と川崎人工島では、4 mg/Lを下回る上層 DO の低下は認められなかった (Fig. 5)。今回、青潮発生が認められた海岸からの距離が比較的近い (< 10 km) 浦安沖、千葉港波浪観測塔、千葉灯標の3点における上層 DO の低下は、湧昇した貧酸素水塊が直接影響を及ぼしたためと考えられる。一方で、青潮発生範囲からやや距離のある (> 10 km) 千葉港口第一灯標と川崎人工島では上層 DO の顕著な低下は見られなかった。北偏風の期間中、浦安沖から川崎人工島にいたるまで上層の残差流は南向きに流れていたため、東京湾の北東岸付近で湧昇した下層水は、その後、南へ輸送されていったと推察されるが、湧昇した貧酸素水塊は沿岸から数 km の範囲を超えて沖合へ輸送される過程で、上中層の高 DO 水との混合や大気からの酸素供給を受け、消滅していったと考えられる。

川崎人工島と千葉港口第一灯標における下層 DO の回復は、南に位置する川崎人工島のほうが早期に生じていた。このことは、北向きの下層残差流にともなって南から高 DO 水が下層に侵入してきたことを示唆している。また、千葉灯標と千葉港波浪観測塔、浦安沖では、北偏風期間の末期にあたる9月27日から29日に下層 DO が上層 DO より高くなる現象が認められたが、こちらも

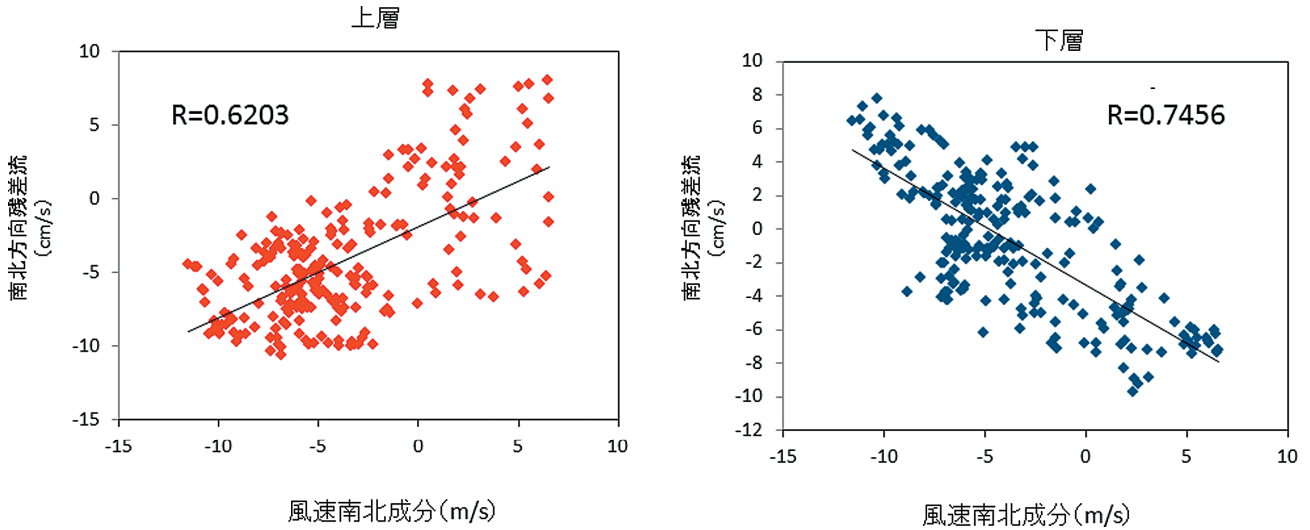


Fig. 6. Relationship between north-south component of residual current and north-south component of wind in Urayasuoki. Red and blue plots reveal surface and bottom layer, respectively.

図 6. 浦安沖における南北方向残差流と風速南北成分の関係. 赤いプロットは上層を, 青いプロットは下層の観測値を示す.

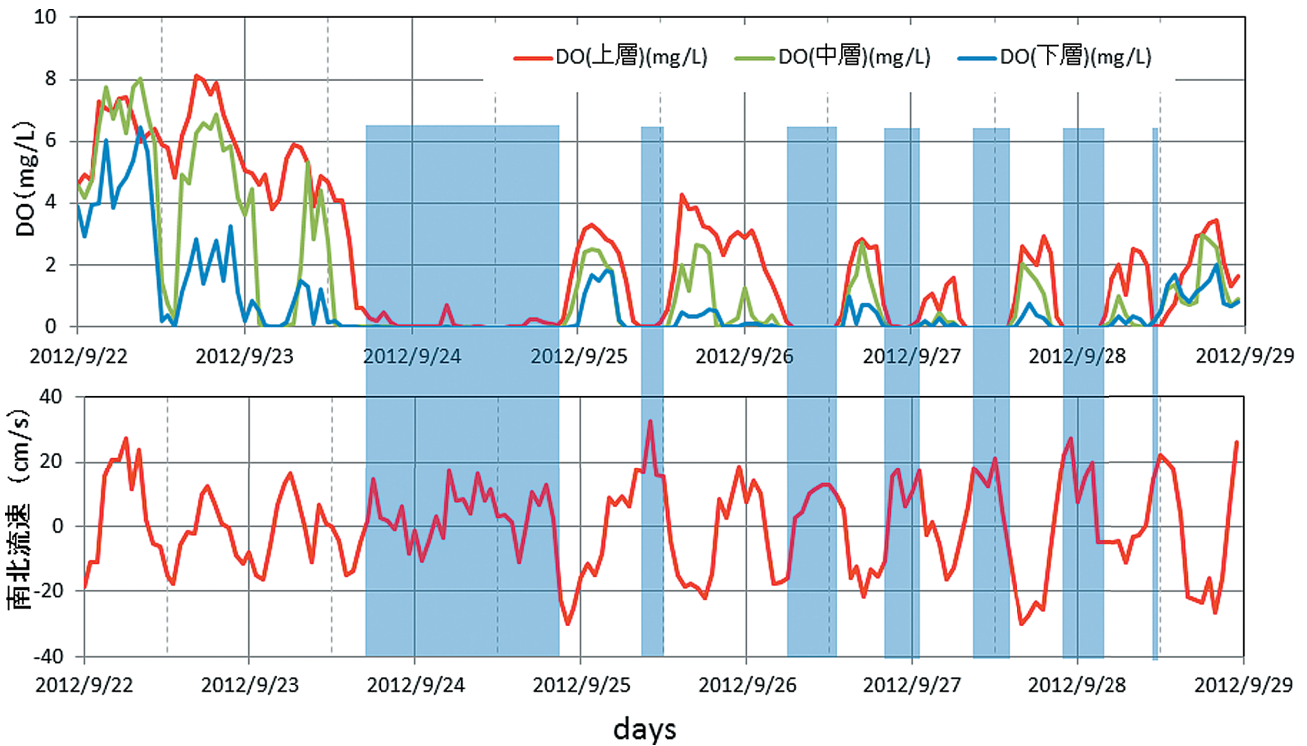


Fig. 7. Time series for water temperature (upper) and north-south component of sea current in Urayasuoki (lower) between 22th and 28th September, 2012. Red, green and blue line reveals surface, middle and bottom layer, respectively. Black solid line and black dashed line on X axis reveals 0 o'clock and 12 o'clock, respectively.

図 7. 浦安沖における各層の水温時系列変化 (上段) と上層の海潮流南北成分の時系列変化 (下段). 赤線は上層, 緑線は中層, 青線は下層を表す. X 軸上の実線は 0 時, 破線は 12 時を示す.

下層から高 DO 水が進入してきた結果と考えられる。このことから、今回のケースにおける青潮の消滅過程は、風・波浪による擾乱によって海面から酸素が供給されたのではなく、鉛直循環流によって湾の南側から高 DO 水が輸送されたことによるものと考えられる。9月28日の浦安沖では、下層に北向きの残差流が残っているにも関わらず DO が回復する傾向を見せている。このことから、9月20日以前にあった貧酸素水塊は、9月28日ごろまでには鉛直循環によってその大部分が上層まで湧昇するとともに、下層からは低水温・高 DO の水塊が流入し、東京湾全域において貧酸素状態が解消したものと推察された。

千葉灯標から浦安沖にかけては 26°C 未満への下層水温の低下と下層 DO の低下が同期していたこと、全観測点で、下層 DO の回復とともに下層水温が 22°C 未満へ低下したことから、今回のケースでは 22–25°C 台の水温を持つ水塊が貧酸素化していたことが推察された。また、下層水温の時系列データから、22°C 未満の水塊が各観測点に到達した時期を比較すると、川崎人工島から浦安沖に達するまで9月24日から28日までの約4日を要すると推定された。また、下層 DO の回復時期から高 DO 水の到達時期を比較すると、同地点間の移動には9月22日から28日まで約7日を要すると推定された。川崎人工島と浦安沖の観測点間の距離は約19kmであるが、この距離を上記の時間で通過したとすると、水塊移流の速度は 3.1–6.1 cm/s と推測される。この移流速度は下層の南北方向残差流の観測結果 (1.2–7.5 cm/s) と一致することから、今回のケースのような 6 m/s 前後の北偏風の連吹によって鉛直循環流が発生した場合、4日から7日で川崎沖から浦安沖まで水塊が輸送されるような循環が形成されることが明らかとなった。渡辺・木幡 (1995) は東京湾で青潮が発生する条件の一つに、沿岸域における貧酸素水塊の存在が必須であるとしたが、今回取り上げたケースのように4日から7日を超えて北偏風が平均 6 m/s 以上吹き続ける場合には、千葉県沿岸付近に貧酸素水塊が存在せずとも、沖合に貧

酸素水塊が存在すれば千葉県沿岸で青潮が発生する可能性を示している。

今回、灯浮標等に設置する連続観測装置の観測結果から貧酸素水塊の挙動が詳細に明らかになった。これらの連続観測装置は常時観測という性質上、青潮をはじめとする突発的なイベントに対する即応観測能力に長けており、貧酸素水塊の面的な挙動把握に非常に有効な手段であるといえる。今後、連続観測装置の増設が進むことがあれば、貧酸素水塊の消長が、より詳細に明らかになることが期待される。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、海上保安庁海洋情報部環境調査課の寄高博行氏には、貴重なアドバイスをいただきました。また、難波江靖氏をはじめとし、環境調査課の方々には連続観測装置の設置とメンテナンスにおいて多大なご尽力をいただきました。国土交通省関東地方整備局の松坂省一氏と松森孝弘氏には、連続観測装置の仕様についてご教示いただきました。匿名の査読者の意見によって本稿は改善されました。ここに深く感謝の意を表します。

文 献

- 東京湾再生推進会議 (2013) 東京湾再生のための行動計画 (第一期) 期末評価報告書, 東京湾再生推進会議, 東京.
- 渡辺正孝・木幡邦男 (1995) 内湾の環境保全. 赤潮の発生機構と青潮の生成環境. 環境科学会誌, (4), 449-460.
- 渡辺正孝・天野邦彦・石川裕二・木幡邦雄 (1998). 秋期の東京湾奥部における風による成層破壊と底層の無酸素水塊の湧昇過程. 土木学会論文集, (VII-9), 13-19.
- 鯉淵幸生・磯辺雅彦 (2005) 2004年の東京湾西岸における青潮の発生要因. 海岸工学論文集, 第52巻, 896-900.
- 福岡一平・北原宏一・和田明・川永充人・賀上裕二・高野泰隆 (2005) 東京湾奥部における青

- 潮現象の現地観測結果について. 海洋調査技術, 17 (1), 13-24.
- 飯村晃・小林広茂・小倉久子 (2009) 東京湾の青潮発生状況(2008). 千葉県環境研究センター年報, 千葉県環境研究センター, 千葉.
- 飯村晃・小林広茂・小倉久子 (2010) 東京湾の青潮発生状況(2009). 千葉県環境研究センター年報, 千葉県環境研究センター, 千葉.
- 飯村晃・小林広茂・小倉久子 (2011) 東京湾の青潮発生状況(2010). 千葉県環境研究センター年報, 千葉県環境研究センター, 千葉.
- 飯村晃・横山智子・小林広茂 (2012) 東京湾の青潮発生状況(2011). 千葉県環境研究センター年報, 千葉県環境研究センター, 千葉.
- 飯村晃・横山智子・小林広茂 (2013) 東京湾の青潮発生状況(2012). 千葉県環境研究センター年報, 千葉県環境研究センター, 千葉.
- 千葉県水産総合研究センター・千葉県農林水産技術会議・神奈川県水産技術センター・内湾底引き網研究会連合会 (2012) 貧酸素水塊速報, <https://www.pref.chiba.lg.jp/lab-suisan/suisan/suisan/suikaisokuhou/>
- 東京都環境局自然環境部 (2014) 環境資料第 25076 号 平成 24 年度東京湾調査結果報告書, 東京都環境局自然環境部, 東京.
- 大坪国順・村岡浩爾 (1988) 青潮発生の物理メカニズムに関する一考察. 第 22 回水質汚濁学会講演集, 193-194.

要 旨

2012 年 9 月に東京湾北部沿岸において大規模な青潮が発生した. この時の青潮を引き起こした貧酸素水塊の挙動を, 東京湾の海上に設置されている連続観測装置の観測データから明らかにした. 2012 年 9 月 20 日より北偏風の連吹が始まり, 上層で南向き, 下層で北向きの流れが生じ, 下層に分布していた貧酸素水塊が湧昇したことがわかった. また, このような大規模青潮時の下層の貧酸素状態の解消要因は, 波浪擾乱等による上層からの酸素供給ではなく, 貧酸素水塊の湧昇とと

もに南から高 DO・低水温の水塊が流入したためであった. 風速 6 m 程度の北偏風により生じる東京湾の鉛直循環条件下では, 下層水は 4-7 日程度で川崎沖から浦安沖まで輸送されることが明らかとなった.

連続観測装置は高い即応観測能力を有することから, 青潮のような突発性のイベントに対して, 水質と流動環境との比較観測を行うには非常に有効な観測手段であるといえる.