

大阪湾で発生した青潮の現地調査

FIELD OBSERVATIONS OF BLUE TIDE IN THE HEAD OF OSAKA BAY

藤原隆一¹・小竹康夫¹・上田悦子²・知振佐苗²

Ryuichi FUJIWARA, Yasuo KOTAKE, Etsuko UEDA Sanae Chiburi

¹正会員 博(工) 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

²東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

Blue tide is a symbolic phenomenon showing water pollution. While water quality of Osaka Bay is rather bad, occurrence of blue tide has not been reported in the bay. It has been observed that a color of sea surface changed milky green and smelling like hydrogen sulfide in the head of Osaka Bay in 2004. Blue tide has been occurred when strong winds about 10m/s speed was blowing continuously in the landward side. The present study shows results of field observations investigating water quality and generated area of the blue tide and discusses the mechanism of upwelling of anoxic bottom water.

Key Words : blue tide, field observation, Osaka Bay, water pollution

1. 序文

2004年7月30日から7月31日および8月28日から8月29日の2回にわたり、湾奥部の海域において、海面が白濁し硫化水素臭がする青潮と考えられる現象が発生した。これまで大阪湾における青潮の発生はあまり注目されてこなかったが、最近では中辻ら^{1,2)}は湾奥部では2002年、2003年に発生したことが現地調査で確認されている。

青潮は水質汚濁を象徴する現象であり、大規模に発生するとその場に生息する魚介類がへい死するなど、漁業関係者にとっては重大な問題を引き起こす。青潮の発生機構は既往の多くの研究によって明らかとなってきたおり、最近では流動モデルと生態系モデルを結びつけた手法によって、青潮の発生をシミュレーションにより再現することが可能になりつつある(例えば、佐々木ら³⁾、渡辺ら⁴⁾)。予測手法についても佐々木ら⁵⁾は、過去の青潮解析事例および流動モデルを利用することにより、青潮の発生日時、海域等を現地モニタリングなしに簡便に行う方法を提案している。

大阪湾においても水質汚濁に関する関心は高く、2004年8月2日には、土木学会関西支部の共同研究グループ(都市型塩性湿地の合理的創出法)が夏季の貧酸素水塊の空間分布を明らかにする目的で大阪湾内の沿岸域25箇所において、水温・塩分・DOの鉛直分布の一斉同時測定を実施した。これに歩調を合わせて大阪府および兵庫県等による水質調査および生物調査が実施された。また、

貧酸素水塊の形成機構を明らかにしようとする試みも行われている(山根ら⁶⁾)。

大阪湾における青潮の発生機構の解明や発生予測を行うには、数値モデルと現地観測を連関させて進めることが重要となる。本研究では青潮発生時の実態を把握することを目的に実施した現地観測の結果を報告するとともに、青潮発生の機構を既往の研究成果から考察する。

2. 調査

(1) 観測期間

現地観測は、海面が黄色みの強い緑色に見えた2004年7月23日に開始し、1回目の青潮が発生した7月30日から7月31日および台風通過後の8月2日の計4日(期間Ⅰ)および2回目の発生が認められた2004年8月23日から9月30日(期間Ⅱ)に実施した。それ以降は10月に月2回、11月から2005年3月までは月1回の測定を実施した(期間Ⅲ)。

(2) 観測場所

観測地点は大阪湾の最奥部に位置する鳴尾浜であり(図-1 参照)、水質調査を行ったポイントを図-2 に示す。水質調査ポイント付近の平均的な海底高は-5.5m、また潮位はH. W. L. +1.65mおよびL. W. L. +0.05mである。

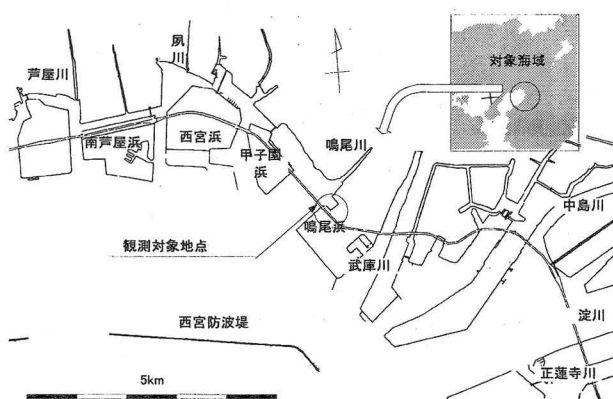


図-1 対象海域および周辺図

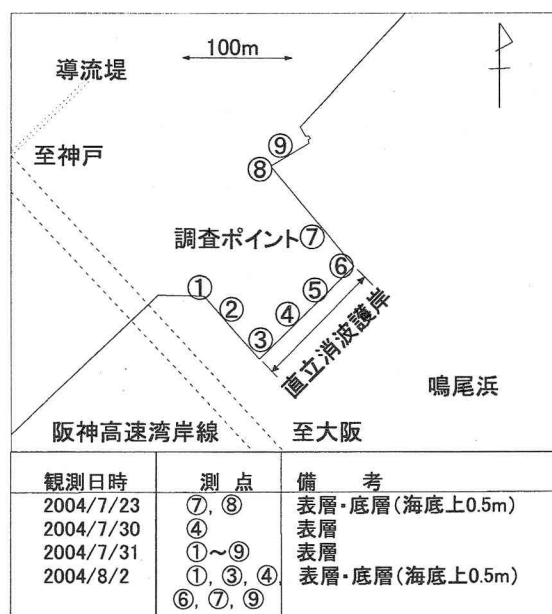


図-2 水質調査地点

(3) 観測方法

a) 期間Ⅰ（1回目発生時）

この期間の観測は、どのようなことが発生しているのかを捉えることが重要と考えて以下の項目を実施した。

- 1) 目視観察による海面の状況把握、臭気
- 2) 海面の色による発生範囲の把握
- 3) 水質調査（図-2 参照）

7月23日および8月2日の採水はバンドン式採水器にて表層および海底上0.5mの2箇所で実施し、7月30日および7月31日には表層のみバケツで採水を行った。採水した海水は、DO、pHおよび塩分を測定した（F55：ホリバ製作所）。なお、7月23日には、同じ測点において、現地でのDO測定も実施した（U10：ホリバ製作所）。

b) 期間Ⅱ（2回目発生時）

図-2 中のポイント④において、DO、水温および塩分を海面から海底上50cmまで50cm間隔で定時測定した（毎日9時、U-10：ホリバ製作所）。さらに、水温に関しては、同じポイントに、小型メモリ水温計（アレック電子）を2台設置し、10分間隔で連続測定を実施した。設

置高は海底上0.5mおよび3.5mの位置とした。

c) 期間Ⅲ

10月に2回、11月から2005年3月までは月1回の測定を実施した。

(4) 聞き取り調査

1回目および2回目の青潮発生後に大阪湾内で作業している大阪湾内の港湾工事従事者（神戸港から岬町までの範囲）を対象に、海面の色や臭気に関して聞き取り調査を実施した。

3. 調査結果

(1) 発生日の状況（期間Ⅰ：2004年7月30日）

海面は白濁し、硫化水素臭が漂っていた。また、海面では、この時期よく見られるボラやスズキが海面上跳ねる光景は影を潜め、海底付近に生息しているマアナゴやマゴチ、また、普段は目に付かないガザミやマダコが海面付近を遊泳していた。また、種類は明らかでないが、小魚が海面付近を遊泳するものの、その中には浮遊物のシート上で横たわる魚も見られた。これらの状況を写真-1 に示す。時間の経過とともに、へい死する魚が見られるようになった。

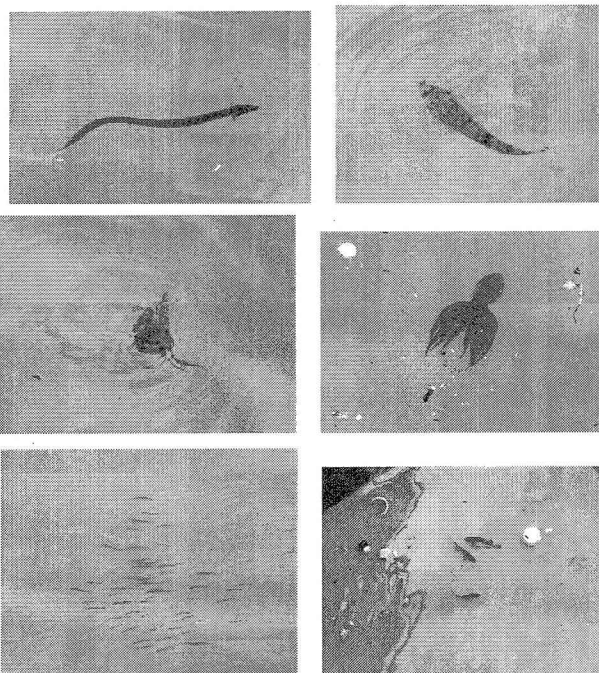


写真-1 海面に出てきた魚介類（2004年7月30日）

写真-2 は、水質調査地点から西北方向に位置する甲子園浜方面を撮影したもので、海岸付近の海面が帯状に白濁し、その沖側では黒みがかった色となるが、写真下部に近い部分（鳴尾浜に近い部分）では再び白濁していることが分かる。中間の黒みがかかって見える部分は鳴尾川河口の延長上に当たっている。白濁した部分は、実際にはエメラルドグリーンに見えた。

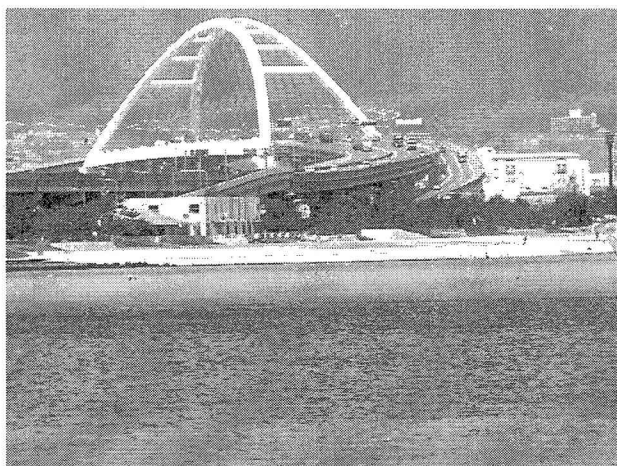


写真-2 青潮発生時の海面状況

写真-3 は、写真-2 とは反対方向の鳴尾浜を挟んで南東側に位置する武庫川河口付近の状況を撮影したものである。写真下部の海面は白濁し、黒く見える部分は武庫川からの流入水の部分である。武庫川の流入水と青潮によって白濁した海域の境界は目視で区分することが可能であったが、ここから東側の海域に白濁した部分は見られなかった。



写真-3 青潮発生時の海面状況

(3) 観測結果

a) 期間 I

青潮が発生した海域では明らかに海面の色の違いが認められた。そこで、7月30日に踏査による目視観察で青潮の発生範囲を確認した。その結果、東側および西側の境界はそれぞれ鳴尾浜および南芦屋浜付近となっていた。また、鳴尾浜の南西側岸壁前面においては青潮の発生は見られなかったが、南西端のコーナー部では岸側からの白濁した海水が回り込んで拡散していた。後日実施した湾内の聞き取り調査によって、西宮防波堤の沖側、神戸港、大阪港および泉南方面では海面の色に変化が見られなかったことと目視観察の結果を併せると、青潮が発生した範囲は、図-3 に示す破線で囲んだ西宮防波堤より岸側の沿岸域であったと推定される。

次に、水質の調査結果を図-4 に示す。青潮が発生した7月30日および7月31日における表層でのDOは、それぞれ2.71 mg/Lおよび2.14 mg/L（全測点の平均値）となり、発生前後（7月23日および8月2日）のそれらと比べて小さいことが明らかである。7月23日の11:00のDOは、表層および底層でそれぞれ3.68mg/Lおよび0.87mg/Lと青潮発生時の状況に近い値を示すが、このときの海面は普段の赤みがかった色とは異なり、黄色みがかかった緑色であったことから、青潮に近い状態にあったと考えられる。た

だし、風波が入ってきたことを契機に、13:30には海面はこの時期に通常見られる赤茶色に戻り、DOも表層および底層でそれぞれ10.04 mg/Lおよび1.87 mg/Lまで上昇した。8月2日は7月31日から8月1日にかけて四国から中国地方を横断した台風第10号（T0410）の接近に伴う波浪作用後に当たるが、DOは表層および底層でそれぞれ7.61 mg/L および4.23 mg/L（全測点の平均値）であり、表層のみならず底層の溶存酸素も増加している様子がうかがえる。

青潮発生前後のpHは、表層および底層でそれぞれ8.07-8.47および7.77-8.02となっており、表層で約0.4大きい。一方、青潮発生時の表層におけるpHは7.57-7.67であり、青潮発生前後における底層のそれに比べても小さくなっている。

青潮発生前後における塩分は、表層および底層でそれぞれ2.50%-2.58%および2.88%-2.98%となっていた。青潮発生時における塩分は、表層で3.03%-3.16%であり、通常底層で測定される程度となった。

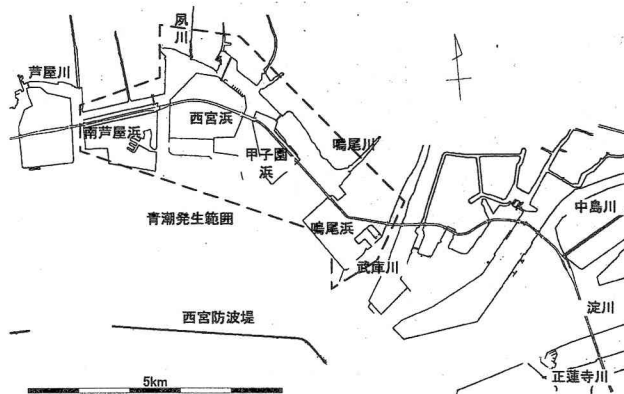


図-3 目視観察および聞き取り調査による青潮発生範囲

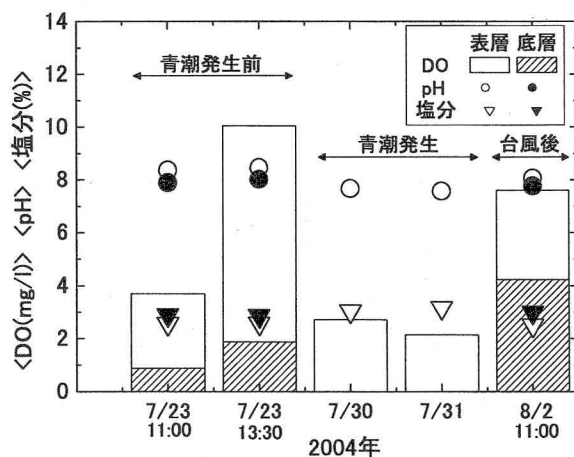


図-4 青潮発生時およびその前後における水質の変化

b) 期間 II

図-2 中の測点④で連続測定された水温の経時変化を図-5 に示す。青潮発生前は、海水が成層化しているため、海底上0.5mの水温は3.5mのそれより約1℃低い。青潮が発生した8月28日-8月29日の期間は、海底上3.5mの水温が急激に低下し、海底上0.5mのそれとほぼ同じに

なった。これは、底層の水塊が湧昇していると理解することができ、目視観察による青潮発生を裏付けるものといえる。青潮が終息した8月29日の後半からは、水温は急激に上昇するが、特に海底上3.5mにおける水温上昇が大きく、水温に差が生じるようになった。8月31日には青潮発生時とは逆に海底上0.5mの水温が上昇し、海底上3.5mのそれに近づくが、これは台風接近に伴う波浪による攪乱の結果と考えられる。

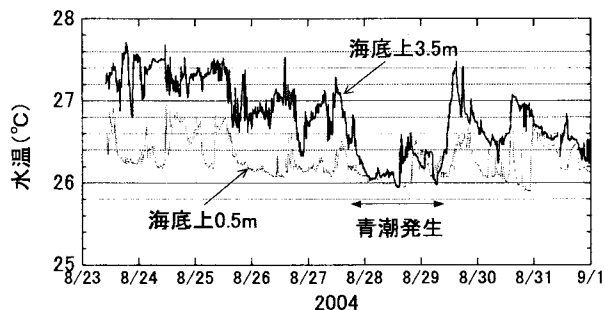


図-5 青潮発生時およびその前後における水温の変化

c) 期間Ⅲ

この期間は、水温が低下する期間であり、一般に青潮が発生しにくい時期と考えられている。図-6 に期間中におけるDO飽和度、水温および塩分の鉛直分布を示す。貧酸素水塊の指標となるDO飽和度に注目すると、10月13日および10月28日において海底上4.0mから6.0mまでほとんど0%という状況が発生しており、この時期にも青潮の発生する可能性が十分にあることがわかる。実際、10月20日には台風第23号 (T0423) の接近に伴い、青潮の発生時と同じく海面が青白く見える現象が発生したが、高波浪の影響で水質調査を行うことができず、河川の増水に伴う濁りであったのか、貧酸素水塊が湧昇していたのかについて定量的に評価することができなかった。

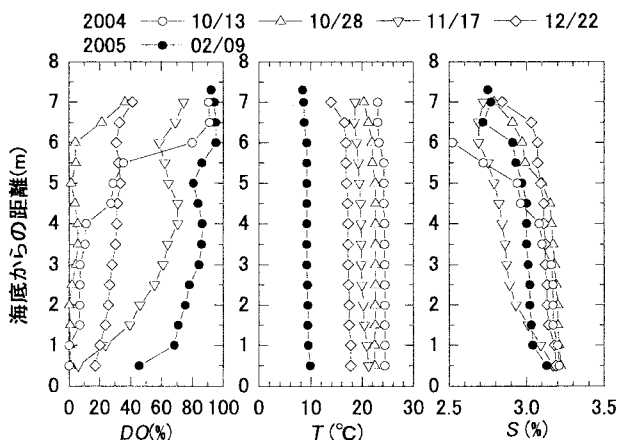


図-6 期間Ⅲにおける水質の変化

4. 考察

(1) 青潮の発生機構

青潮の発生は底層の貧酸素水塊が湧昇することで発生する。東京湾奥における底層水の湧昇機構は、最近の研究によれば、北風系の連吹による千葉側での湧昇と、風

が弱まった後の内部ケルビン波による船橋側への湧昇域の伝播であると考えられている(宇野木⁷⁾、松山ら⁸⁾、中辻ら⁹⁾)。佐々木¹⁰⁾は、これらの数値モデルは実際の気象・海象条件に基づくものではないことから、実現象をできる限り忠実に再現する数値モデルを用いて、青潮の発生規模の支配要因を明らかにするとともに、北風系が連吹している最中に青潮が発生する現象も再現した。

図-7 および図-8 は、青潮の発生した2004年7月-8月の気象データで、近接する神戸測候所における観測結果である。

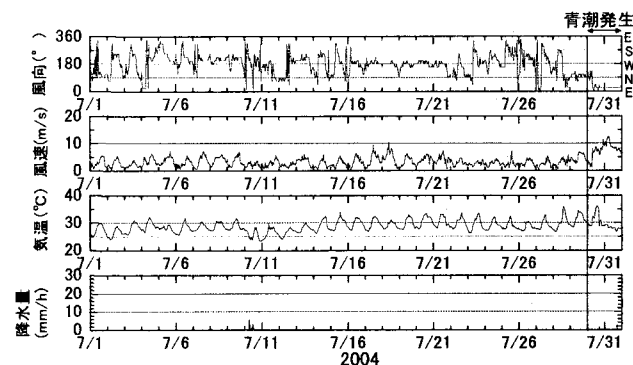


図-7 2004年7月の気象データ・神戸
(気象庁HPよりデータ入手)

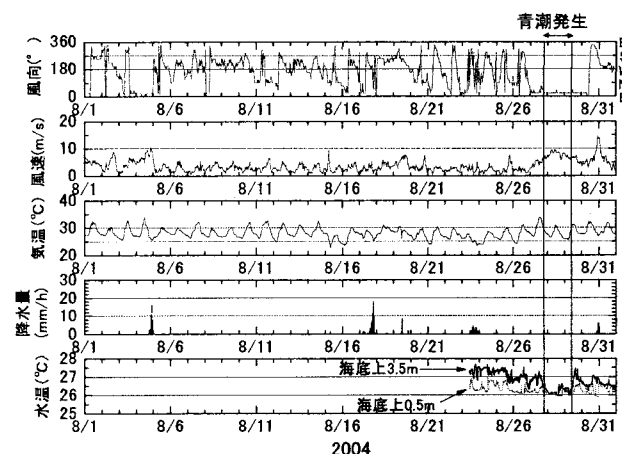


図-8 2004年8月の気象データ・神戸
(気象庁HPよりデータ入手)

青潮発生期間における風向、風速に着目すると、いずれの場合も風速も10m/s程度の東北東からの風が連吹していたことがわかる。青潮の発生はこの風が連吹している間のみ発生していること、また青潮発生海域の水深は10m未満と浅いことから、吹送密度流により底層水が湧昇したのではないかと推測される。前出の中辻らによると、2003年に発生した青潮は台風0315号 (T0315) による強い北寄りの風に伴い湾奥部の北側沿いに発生し、勾配の緩い甲子園浜や御前浜だけでなく、旧西宮港のような鉛直護岸前面でも発生したとされている。中辻らは風向の変化などの諸条件によって発生する海域が移動することを指摘しており、2003年と2004年の発生場所の違いは、風向の違いに対応していることが考えられる

(2) 水質の鉛直分布

期間Ⅰおよび期間Ⅱともに、青潮が終息した後は、台風接近に伴って風向きが西から南に変化し、対象海域には高波浪が来襲した。そこで、期間Ⅱにおける青潮発生前後の水質（DO飽和度、水温、塩分）を調べることで、貧酸素水塊の発達および消長過程を明らかにすることを試みた（図-9 参照）。貧酸素水塊の挙動に直結するDO飽和度に着目すると、8月23日から発生日前日の8月27日までは、海底付近の貧酸素水塊が海面に向かって発達する状況が顕著である。8月27日には青潮発生の兆しとして、調査地点近傍に係留中の作業船が巻き上げる底層水が海面付近で白濁する状況を目視観察によって確認した。青潮終息後の8月31日には台風第16号（T0416）の接近に伴い、高波浪による攪乱が起こった。DO飽和度の時間変化を追うと、攪乱によってDO飽和度が全水深にわたり高まる様子および再度貧酸素水塊が海底上4m付近まで底層に形成されているのがわかる。一旦高波浪などによって攪乱されても、底層では比較的短時間の内に貧酸素水塊が形成されるようである。

密度に支配的な水温および塩分（2.5%以下のデータは表示されていない）に着目すると、表層には河川水の影響と思われる塩分の低い層が1m-2mあり、その下には塩分が変化する躍層部分、さらに塩分が3.2%程度の底層水のほぼ3層構造を形成していると考えられる。

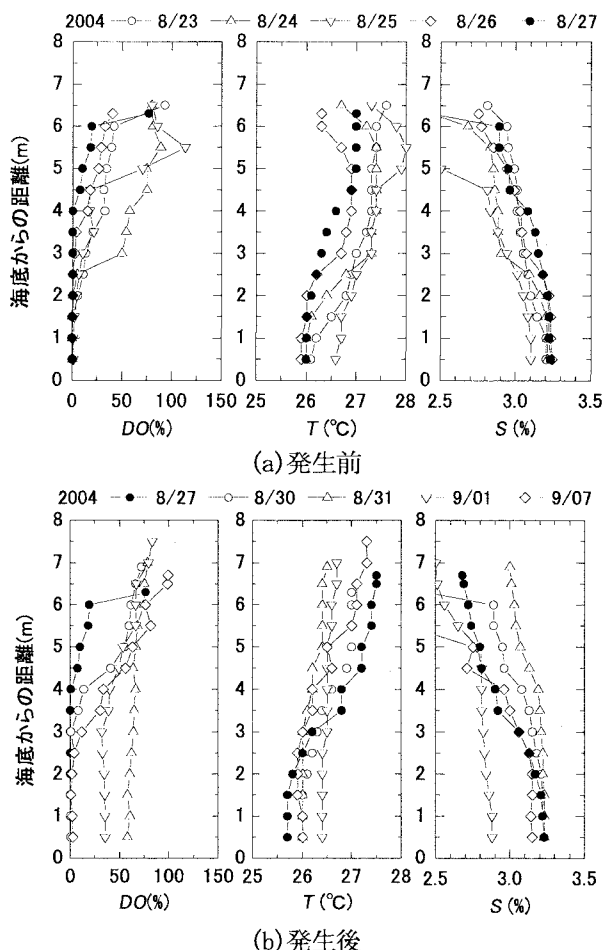


図-9 青潮発生前後の水質変化(期間Ⅱ)

(3) 2004年10月21日の青潮発生の可能性

青潮発生の可能性があった2004年10月の気象データによると（図-10 参照），10月21日の風向は、東北東から北に変化しており、一定方向から吹き続けたのではないことがわかる。また、降水量を見るとかなり雨が降っていたことなど、期間Ⅰおよび期間Ⅱにおいて青潮が発生したときは気象状況が異なる場所が見られる。ただし、風向きは変化しているものの青潮発生時の風向に近く、また10m/sを越えるような強風として長時間作用していること、またこの前後では図-6 に示したように貧酸素水塊が海底上4m-6mまで形成されていたことなどから、青潮の発生条件がかなり整っていたことも事実である。前述したように、水質調査など定量評価が行えなかったことから、青潮が発生していた可能性が高いという推測にとどまらざるを得ない。

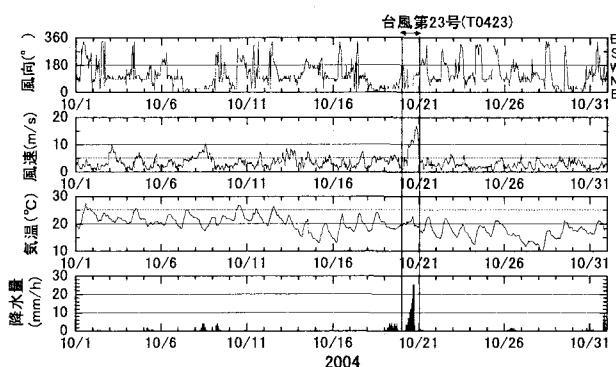


図-10 2004年10月の気象データ・神戸
(気象庁HPよりデータ入手)

(4) 台風の経路

山根ら¹¹⁾が実施した長期観測データのクラスター分析によると、この海域では戦前より既に水質が悪化しており、透明度、COD、夏季底層のDO飽和度などは現在の水質レベルと大きく違わなかったとの報告がある。それに従えば、最近になって青潮の発生が報告されるようになったのはなぜであろうか。水質汚染を引き起こす原因としては、栄養塩の陸域からの流入、内部生産および底質からの溶出等が挙げられる。韓ら¹²⁾は、覆砂の栄養塩濃度を0とした数値シミュレーションによって水質改善効果が得られることを示している。水質レベルでは長期的な変化は小さかったとしても、底質には有機物が継続的に堆積することで、貧酸素水塊が形成されやすい環境となった可能性が考えられる。一方、貧酸素水塊が形成されても、これを湧昇させる機構がなければ青潮は発生しない。図-11および図-12は青潮発生時の台風の進路を示したものであるが、台風来襲時の季節としてこれまでの経路と異なり、紀伊半島沖から四国沖を北西に進んだ後、台風第10号（T0410）ではそのまま四国に上陸、また台風第16号（T0416）は九州南部まで進んだ後北東に向きを変え九州地方から中国地方を縦断している。このため、紀伊半島沖から四国沖を北西に進んでいる間、対象海域では東北東からの強風が長時間吹き続けることと

なった。台風が従来あまり見られなかった経路を通過したことで、青潮が発生しやすい風が生じたことが一因となっている可能性を指摘したい。

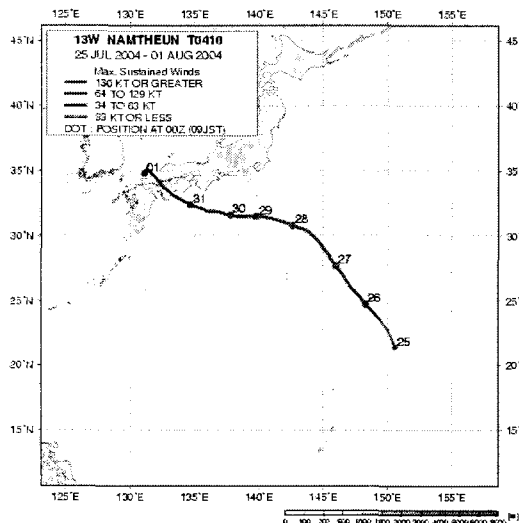


図-11 台風第10号 (T0410) の経路図
(TRMM台風データベースより引用)

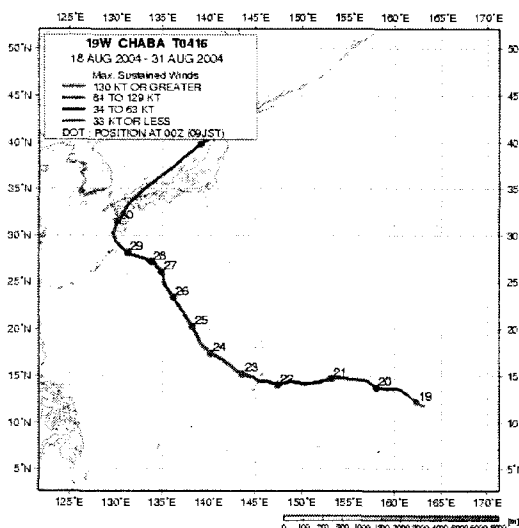


図-12 台風第16号 (T0416) の経路図
(TRMM台風データベースより引用)

4. まとめ

本研究では、大阪湾で発生した青潮の実態調査を行い、大阪湾奥において青潮が発生したことを確認するとともに、青潮発生前後における水質の変化を定量的にとらえることに成功した。また、青潮は、風速10m/s程度の陸からの風が連吹中に発生し、発生海域の水深が10m未満

と浅いことから、吹送密度流により底層水が湧昇した可能性を指摘した。

2005年度も引き続き現地調査を実施し、青潮発生時の実態調査を継続するとともに、現地を再現することが可能な数値シミュレーションモデルの開発を進めることが今後の課題である。

謝辞：TRMM台風データベース (Ver. 1.2) は、宇宙航研究開発機構地球観測利用推進センターにおいて作成されており、同センターより提供を受けました。

参考文献

- 1) 入江政安・中辻啓二・西田修三・湯浅啓二：湾奥部停滞性水域の貧酸素水塊の挙動に及ぼす風応力の影響，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，II-312，2003
- 2) 西村和幸・入江政安・西田修三・中辻啓二・中道正人：尼崎西宮芦屋港における貧酸素水塊の湧昇に関する連続調査，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，2-161，2004.
- 3) 佐々木 淳・石井雅樹・磯部雅彦：内湾における高解像度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，No.45，pp.406-410，1998.
- 4) 渡辺正孝・天野邦彦・石川裕二・木幡邦男：秋期の東京湾奥部における風による成層破壊と無酸素水塊の湧昇過程，土木学会論文集，No.608/VII-9，pp.13-29，1998.
- 5) 佐々木 淳・磯部雅彦・藤本英樹：東京湾における青潮簡易予測手法の開発，海岸工学論文集，No.46，pp.1006-1010，1999.
- 6) 山根伸之・寺口貴康・中辻啓二：閉鎖性内湾の貧酸素水塊の形成機構に関する研究，海岸工学論文集，No.45，pp.961-965，1998.
- 7) 宇野木早苗：東京湾の湧昇と青潮，日本海洋学会秋季要旨集，pp.156-157,1990.
- 8) 松山優治・当麻一良・大脇 厚：東京湾の湧昇に関する数値実験，沿岸海洋研究ノート，Vol.28，No.1，pp.63-74，1990.
- 9) 中辻啓二・尹 鐘星・湯浅泰三・村岡浩爾：東京湾における吹送密度流と青潮発生機構との関連性，海岸工学論文集，No.42，pp.1066-1070，1995.
- 10) 佐々木 淳：東京湾奥水塊の湧昇現象と青潮への影響，海岸工学論文集，No.44，pp.1101-1105，1997.
- 11) 山根伸之・寺口貴康・中辻啓二・村岡浩爾：長期観測データのクラスター分析による大阪湾の水質分布特性，海岸工学論文集，No.44，pp.1106-1110，1998.
- 12) 韓 銅珍・山本行高・中辻啓二：大阪湾の覆砂・浚渫による水質・底質の改善効果の検討，海岸工学論文集，No.48，pp.1281-1285，2001.