

観測結果から見た大阪湾で発生した青潮の特性

A Study on the Occurrence and the Range of the Blue Tide in the Head of Osaka Bay Based on Field Observations

藤原隆一¹

Ryuichi FUJIWARA

The blue tide began to occur every year after 2002 in the head of Osaka Bay. It is important to investigate an occurrence of the blue tide in the field. Therefore occurrences of the blue tide and these range were confirmed by visual observation and hearing investigation after 2005. In a result, occurrences of the blue tide counted up to 11. While, temporal and spatial variations of water temperature, salinity and DO were simultaneously investigated to clarify the mechanism of the blue tide. The analysis of observed seawater suggested that an occurrence and a range of the blue tide were closely related to a stratified intensity defined as a vertical gradient of density of seawater and oxygen depression.

1. 緒言

大阪湾における青潮は、入江ら（2003）が報告した2002年頃から発生が確認され始め、それ以降、規模の大小は別にして毎年発生が確認されるようになった。例えば、西村ら（2004）によれば、2002年には少なくとも3回、2003年には1回の青潮発生が確認されたと報告されている。藤原ら（2005）は、2004年に発生した比較的規模の大きかった青潮について現地調査を行っている。なお、2004年より毎年8月上旬に実施される大阪湾再生一斉調査によると、底層DOは水深15m以浅特に港湾域においてはいずれの年も2mg/L以下と極度の貧酸素状態となっている（近畿地方整備局HP）。

本研究では、大阪湾の最奥部に位置する海域において2005年より実施された水温、光子束密度およびDOの連続観測（継続中）ならびに水温、塩分およびDOの鉛直分布の定時観測に基づき、青潮発生時の水質変化を連続的に捉えることで青潮の実態を把握することを目的の一つとした。また、青潮の発生範囲をできる限り正確に把握することも重要と考えられたので、青潮発生直後から湾内での聞き取り調査を実施した。それらの観測結果をもとに、気象条件や成層強度が青潮の発生や発生規模に及ぼす影響について考察した。

2. 観測方法

観測対象地点は、図-1に示すよう大阪湾の最奥部に位置する海域であり、自社岸壁を利用して連続観測および定時観測を実施した。連続観測の方法は先の報告（藤原、

2009）と同じであるが、このときに示された計測器の配置状況を示す図に誤りがあったため、修正した結果を図-2に改めて示す。計測にはJFEアドバンテック社製の超小型メモリ水温計・照度計・深度計（MDS-MkVシリーズ）



図-1 観測地点

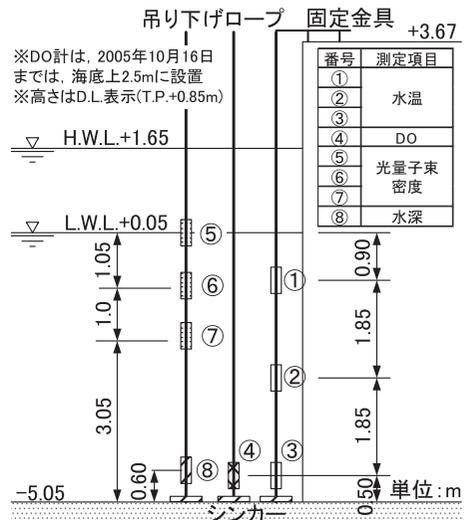


図-2 連続観測における計測機器の配置

1 正会員 博(工) 東洋建設(株) 鳴尾研究所 副所長兼水城環境研究室長

表-1 大阪湾で発生が確認された青潮とそのときの気象条件

	青潮発生日	風向・風速 (m/s)			台風の影響	発生海域	備考
		日平均		最大風速			
		風速	風向				
1	2002/6/25	4.0	8.6	東北東	なし	御前浜から甲子園浜	入江ら(2003)
2	2002/8/20*	3.0	7.4	北	0213号		
	2002/9/19*	2.7	4.6	東北東	なし		
3	2002/10/21	3.2	8.0	北	なし		
4	2003/9/21-9/22	2.1	6.8	北北西	0315号	御前浜～甲子園浜, 旧西宮港	西村ら(2004)
5	2004/7/30	6.3	11.4	東北東	0410号	南芦屋浜から鳴尾浜	藤原ら(2005)
6	2004/8/28	8.1	11.1	東	0416号	鳴尾浜から甲子園浜	著者の観測による
7	2005/6/6	2.7	5.4	西	なし	鳴尾浜岸壁・放水口前付近	
8	2005/7/25-7/26	5.2	11.3	北北西	0507号	鳴尾浜	
9	2005/8/25	5.6	9.4	東北東	0511号	鳴尾浜, 尼崎港, 岸和田漁港	
10	2005/9/5-9/6	4.4	8.0	東北東	0514号	尼崎港, 甲子園浜, 鳴尾川, 浜寺から助松の間の水路	
11	2005/9/24-9/25	6.3	9.5	北北西	0517号	西宮港から甲子園浜	
12	2006/8/8	6.2	10.8	東北東	0607号	鳴尾浜	
13	2006/8/17	5.9	8.1	東北東	0610号	未確認	
14	2006/9/13	2.6	6.2	北北東	なし	鳴尾浜	
15	2007/10/9-10/10	4.2	8.1	東北東	0715号	鳴尾浜	
16	2008/9/19	8.3	14.2	北東	0813号	鳴尾浜から甲子園浜沖, 岸和田付近	
17	2009/8/31	3.8	8.0	北北西	0911号	鳴尾浜から甲子園浜	

※ 底層水の湧昇のみの可能性あり

および小型メモリDO計 (COMPACT-DOW) を使い、毎正時から10分間隔で連続測定を行った。メモリに蓄積されたデータは定期的に回収した。また、定時観測は、連続観測地点の直近で実施した。毎朝9時に水温、塩分およびDOを0.5m間隔で測定し (ホリバ製作所製の水質計U10)、鉛直分布構造が把握できるようにした。

青潮の発生は、目視による海面色の変化、水温・DOの鉛直分布および硫黄臭の有無等から総合的に判断した。また、青潮の発生時には、発生直後から大阪湾内の港湾関係者を対象に聞き取り調査を実施し、できる限り正確に発生範囲を把握することに努めた。

また、それぞれの観測期間は以下のものである。連続観測は2005年7月12日から開始し、現在も継続中である。定時観測の場合、2005年6月1日から2009年3月31日までの約4年間であるが、休日および祭日、また台風の来襲に伴う高波浪時には欠測している。

なお、本論文で用いた気象データは、気象庁のホームページ内の気象統計情報に示された神戸のデータを引用した。

3. 観測結果

(1) 青潮の発生

観測期間を含め、これまでに大阪湾で発生が確認された青潮の事例の一覧を表-1に示す。表中には、発生期間

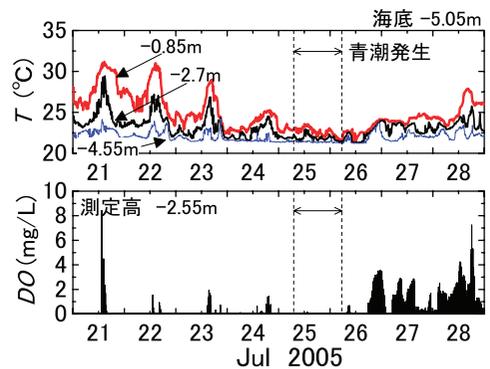


図-3 水温およびDOの経時変化の例 (1)

中の風向・風速、台風の影響の有無を併せて示すとともに、観測地点以外でも青潮の発生が確認された事例に網掛けを付した。なお、2002年の青潮発生回数は、西村ら(2004)によれば少なくとも3回とされていることから明確に青潮と確認できない2002年8月20日および9月19日を併せて1回とした。著者の観測では2004年以降に13回の青潮発生が確認され、2002年および2003年を併せた発生の総数は17回となった。これらの内、台風接近による陸から海に向かう強風の連吹時に発生した回数13回であった。一方、台風の影響がなく日平均風速が3m/s未満(2002年9月19日, 2005年6月6日, 2006年9月13日, 最大風速: 4.6m/s-6.3m/s)のときにも青潮は発生した。

(2) 青潮発生時の水質の変化

図-3は、成層期における青潮発生前後の水温、DOの時系列の典型的な事例を示したものである。

このときのDOの測定高は中層 (-2.55m) であった。青潮発生前の2005年7月21日-7月23日の期間では表層 (-0.85m), 中層 (-2.7m) および底層 (-4.55m) で明確な水温差があり成層化している様子がうかがえる。青潮発生日の前日 (7月24日) には表層および中層の水温は底層のそれとほぼ同じまで低下し、中層のDOはほぼゼロとなっている。青潮の終わった7月27日以降では中層のDOが回復しているが、再び鉛直方向の水温差が大きくなり始めている。

次に、同じ成層期ではあるが、青潮発生前の表層、中層および底層の水温差が相対的に小さいときの事例を図-4に示す。このときもDOの測定高は中層 (-2.55m) であった。この場合は、先の事例と比べて青潮前後の中層付近のDOが比較的大きいことから、成層の度合いが弱く相対的に鉛直混合しやすい状況であったと推察される。

図-5は、青潮発生前の表層、中層および底層の水温差がさらに小さいときの事例である。このときのDOの測定高は底層 (-4.55m) であることに留意されたい、このような青潮の発生は夏期の終わりに発生し、終息後は秋期の混合期に移行する場合が多い。

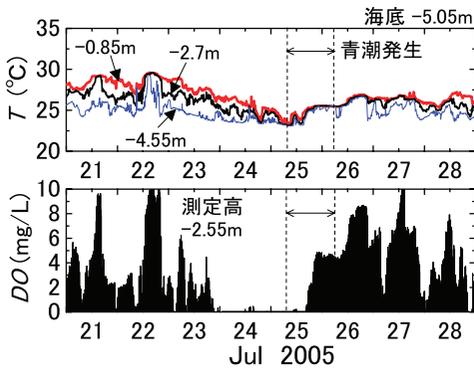


図-4 水温およびDOの経時変化の例 (2)

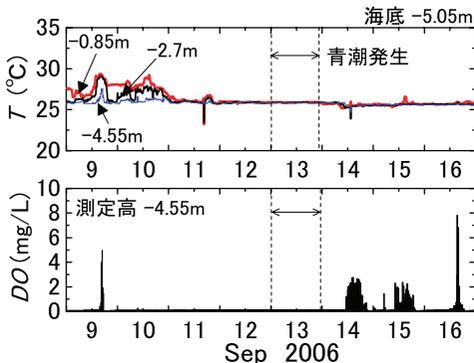


図-5 水温およびDOの経時変化の例 (3)

4. 考察

(1) 青潮の発生と風の影響

図-6は、2002年から2009年の期間において発生した青潮 (丸印：台風の影響による場合は塗りつぶし) とその期間の日平均風速を示したものである。青潮の発生は日平均風速が4-5m/s以上のときに多く、外力が大きいために発生しやすいことが分かる。ただし、前述のように台風の影響による陸からの強風の場合がほとんどであり、風速だけでなく風向が重要である。金澤ら (2009) は、2005年の青潮の再現計算を行い、大阪湾奥部では離岸風の連吹によって表層水が移動し、それに伴い貧酸素の底層水が湧昇することを示している。

図-7は、2005年における青潮の発生期間と1時間ごとの風向・風速ベクトルの関係を示す。また、図中の×印は青潮の発生は確認されていないが気象条件等から判断すると発生していた可能性が高い期間を示す。青潮発

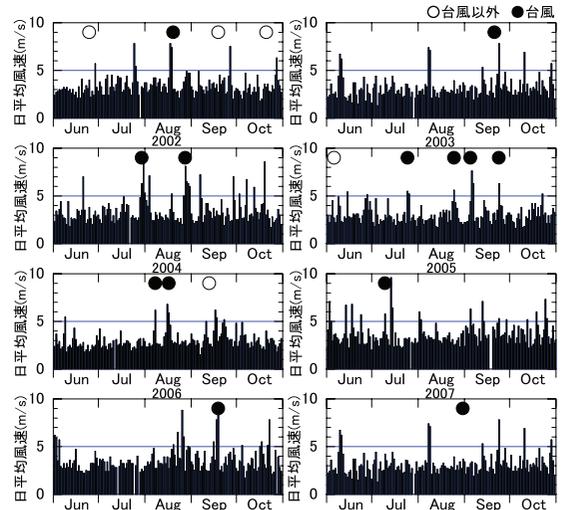


図-6 日平均風速と青潮発生時の関係

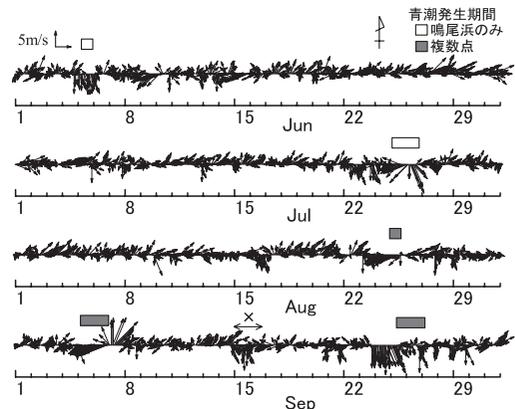


図-7 青潮発生時の風向・風速ベクトル (2005年)

生期間の風向に着目すると、確かに東から北寄りとなっており、発生期間中は陸からの風が継続していたことが分かる。

図-8には2006年について同様に整理した結果を示す。2006年は3回の青潮発生があったがいずれも小規模であった。発生期間中の風向は2005年と同じく東から北寄りである。

図-9は2007年について同様に整理した結果である。2007年の青潮発生は1回のみであり小規模であった。また、観測期間中で最も遅い発生であった。ただし、風向・風速ベクトルからは少なくとも3回は発生の可能性があったと考えられる。

青潮発生の有無および規模を、風向・風速ベクトルの特性だけから説明することは難しく、入江ら(2003)は、地形や躍層水深、また風向による湧昇の空間スケールが青潮発生に影響する可能性を指摘している。

(2) 成層化の影響

これまでの考察から、青潮の発生および規模には風の影響だけでなく、成層の程度が寄与している可能性が考えられる。そこで、成層強度の指標となる鉛直方向の密

度勾配 ρ' について検討することとした。 ρ' は次式のように下層の密度が大きいときに正となるように定義した。

$$\rho' = \frac{\rho_i - \rho_{i+1}}{\Delta h} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 ρ_i ：海底から数えて*i*番目の測点の密度(kg/m³)、 Δh ：*i*番目および*i+1*番目の測点の距離(m)である。海水の密度 ρ は、定時観測で測定した水温および塩分からクヌーツセン式により算出した。

図-10は、2005年における密度勾配 ρ' および密度算出に用いた水温・塩分、および貧酸素化の程度を示すDOの時空間変化を表す。図中には青潮の発生時を丸印で示してあるが、発生箇所が複数の場合には塗りつぶし、青潮の規模が判別できるようにした。また、前出の図-7～図-9に示した青潮が発生する可能性の高かった期間を×印で示した。

ρ' に着目すると、6月には水深全域で密度勾配が小さいが、7月上旬から中旬にかけては中層以上で大きくなっている。その後、 ρ' は再度小さくなるが、9月中旬に全水深で大きくなっている。また、DOに着目すると、青潮が発生したときには表層付近まで貧酸素化している場合が多い。

次に、青潮の発生規模に着目すると、台風の影響で外力が大きく ρ' が小さいとき(0511号, 0516号, 0517号)には規模が大きく、逆に外力が同程度でも ρ' が大きいとき(0507号)には規模が小さい傾向が見て取れる。また、 ρ' が小さいときには外力が小さくとも小規模の青潮が発生し、逆に ρ' が大きいときには青潮が発生していないことも分かる。

図-10および図-11に示す2006年および2007年の結果からも同様の状況が確認できる。一方、青潮が発生しなかった条件では、貧酸素化があまり進んでいなかったことが影響したと考えられる事例も見られる(2006年8月24日-25日、9月22日、2007年9月13日-9月14日・9月24

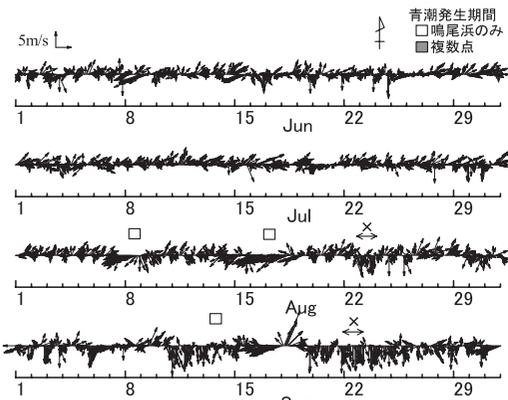


図-8 青潮発生時の風向・風速ベクトル(2006年)

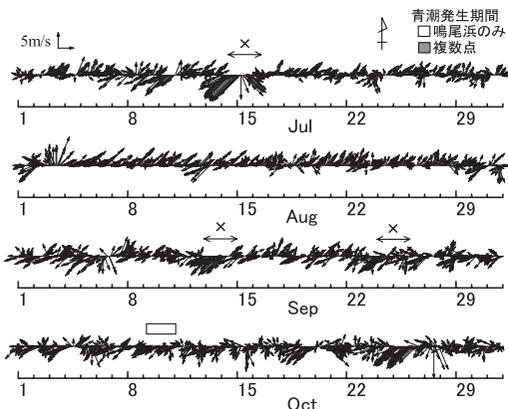


図-9 青潮発生時の風向・風速ベクトル(2007年)

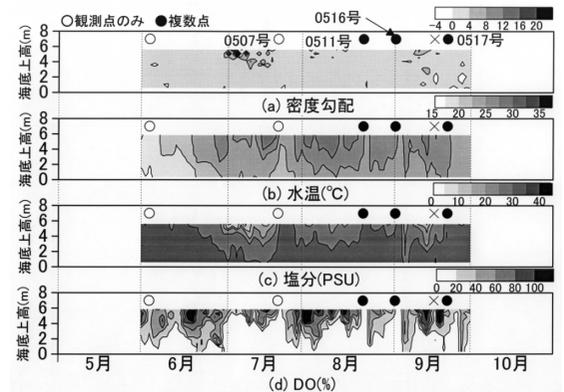


図-10 密度勾配の時空間変化(2005年)

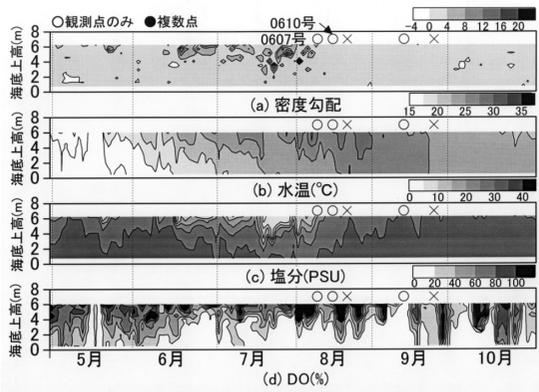


図-11 密度勾配の時空間変化 (2006年)

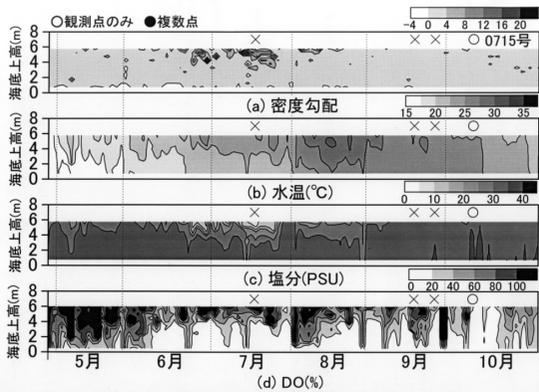


図-12 密度勾配の時空間変化 (2007年)

表-2 青潮の発生・規模と風, 成層の程度および貧酸素化の関係

(a) 青潮発生

青潮発生日	風向・風速(m/s)			台風の影響	成層の程度	貧酸素化
	日平均	最大風速				
	風速	風速	風向			
1	2002/6/25	4.0	8.6	東北東	なし	
2	2002/8/20*	3.0	7.4	北	0213号	
	2002/9/19*	2.7	4.6	東北東	なし	
3	2002/10/21	3.2	8.0	北	なし	
4	2003/9/21-	2.1	6.8	北北西	0315号	
5	2004/7/30	6.3	11.4	東北東	0410号	
6	2004/8/28	8.1	11.1	東	0416号	
7	2005/6/6	2.7	5.4	西	なし	弱
8	2005/7/25-	5.2	11.3	北北西	0507号	強
9	2005/8/25	5.6	9.4	東北東	0511号	弱
10	2005/9/5-9/6	4.4	8.0	東北東	0514号	弱
11	2005/9/24-	6.3	9.5	北北西	0517号	弱
12	2006/8/8	6.2	10.8	東北東	0607号	強
13	2006/8/17	5.9	8.1	東北東	0610号	強
14	2006/9/13	2.6	6.2	北北東	なし	弱
15	2007/10/9-	4.2	8.1	東北東	0715号	弱
16	2008/9/19	8.3	14.2	北東	0813号	
17	2009/8/31	3.8	8.0	北北西	0911号	

* 複数箇所発生

(b) 青潮発生なし

青潮発生日	風向・風速(m/s)			台風の影響	密度勾配	貧酸素化
	日平均	最大風速				
	風速	風速	風向			
1	2005/9/15	3.8	8.1	北北西	なし	強
2	2006/8/23	3.8	7.6	北	なし	弱
3	2006/9/22	4.8	8.7	北北西	なし	弱
4	2007/7/15	6.4	12.2	北東	0704号	強
5	2007/9/13-9/14	7.1	9.6	東北東	なし	弱
6	2007/9/23-9/24	5.3	7.5	北東	なし	弱

謝辞：青潮発生時の聞き取り調査にご協力いただいた関係各位、特に土木学会関西支部・21世紀の魅力的な都市型渚空間の創出に関する調査研究委員会（当時）の各位および国土交通省・山野智志氏（当時、近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所）には、この場をお借りして深甚の謝意を表す。

参考文献

入江政安・中辻啓二・西田修三・湯浅啓二（2003）：湾奥部停滞性水域の貧酸素水塊の挙動に関する風応力の影響，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，II-312。
 金澤 剛・藤原隆一・鯉淵幸生・磯部雅彦（2009）：大阪湾奥部における青潮の再現計算，海岸工学論文集，第56巻，pp.1066-1070。
 西村和幸・入江政安・西田修三・中辻啓二・中道正人（2004）：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。
 藤原隆一・小竹康夫・上田悦子・知振佐苗（2005）：大阪湾で発生した青潮の現地調査，海洋開発論文集，第21巻，pp.361-366。
 藤原隆一（2009）：連続観測記録を用いた大阪湾奥の光環境に関する一考察，海岸工学論文集，第56巻，pp.1241-1245。
 近畿地方整備局HP：http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/suishin/suishitutyosa/index.html

日-25日)。

そこで、青潮発生日の成層の程度および貧酸素化との関係を調べた(表-2参照)。成層の程度は密度勾配の等高線の混み具合によって定性的に判断した。貧酸素化は無酸素となる領域が水深の半分を超える場合を強と評価した。これらの関係を見ると例外はあるものの、成層の程度が弱く、貧酸素化が強い場合に複数箇所が発生した事例が多く、総合的には青潮の発生とその規模は、成層の程度および貧酸素化と極めて密接に関連していることが示唆される。

5. 結語

大阪湾奥で発生している青潮の特性について、現地観測の結果から考察した結果を以下にまとめて示す。

- 1) 青潮は海域の貧酸素化が強まった時期に陸風が連吹したときに発生しやすい。
- 2) 青潮の発生とその規模は、外力(風向・風速)の特性に加え、海域における成層および貧酸素化の程度と密接に関連していることが示唆された。

今後は、密度の鉛直分布の構造を詳細に調べるなど、青潮の発生機構をより詳細に検討することが望まれる。