

# 大阪湾東部海域における酸素と二酸化炭素の分布, およびそれらがサルエビ成体の生残に及ぼす影響

## Distributions of Dissolved Oxygen and Carbon Dioxide in Eastern Osaka Bay and their Effects on the Survival of Adult Southern Rough Shrimp, *Trachysalambria curvirostris*

安井 裕\*・矢持 進\*\*

Yutaka YASUI and Susumu YAMOCHI

**要旨:** 高水温時の大阪湾東部海域底層について酸素とCO<sub>2</sub>濃度の分布状況を調べるとともに, 貧酸素・高CO<sub>2</sub>濃度がサルエビの生残に及ぼす影響について実験的に検討した. 現地調査の結果, 大阪湾東部海域におけるDOとCO<sub>2</sub>の分布には明瞭な負の対応関係が見られ, 貧酸素化の進んだ地点では高いCO<sub>2</sub>濃度を示すことがわかった. サルエビ成体の25°Cにおける24時間半数致死酸素飽和度(24h-LC<sub>50</sub>)は17% (1.1mg-O<sub>2</sub>/l) であり, 一部の海域ではこの24h-LC<sub>50</sub>を下回っていた. また, 24時間の実験期間ではサルエビ成体のへい死に及ぼす高CO<sub>2</sub>濃度(1300ppm)の影響は確認されなかった.

### 1. はじめに

近年, 大気中の二酸化炭素 (以下 CO<sub>2</sub>) 濃度は1年間に約 2ppm のペースで上昇し続けており, それに伴う気候の変動や環境破壊が危惧されている. この大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の増加を少しでも軽減しようと, CO<sub>2</sub>を海洋へ隔離させる手法等が検討されている<sup>1)</sup>.

一方, 海水中の CO<sub>2</sub> 濃度であるが, こちらについても大気中 CO<sub>2</sub> 濃度と同様に増加傾向にあり, 近藤ら<sup>2)</sup>は, 太平洋東部赤道域における海洋表層の CO<sub>2</sub> 濃度の増加速度が 1.64ppm/year であると推算している. 海水中 CO<sub>2</sub> 濃度は海域差が大きく, 瀬戸内海表層では 230-670ppm<sup>3)</sup>, ドイツ湾表層で 200-550ppm<sup>4)</sup>と幅広い値が観測されている.

ただ, 大気中の CO<sub>2</sub> 濃度に比べて海域については観測例が少なく, 特に富栄養な閉鎖性海域の海水中の CO<sub>2</sub> 動態については十分に分かっていない. また, 海水中の CO<sub>2</sub> は高濃度になると, 呼吸への悪影響を通じて生物に悪影響を及ぼすということが考えられる.

大阪湾は水産資源が豊富であると同時に, 富栄養化の進んだ海域である. 海水の過栄養化は赤潮の発生要因となり, それに伴って大量の植物プランクトンの死滅後に海底へ堆積し, 有機物分解に伴って酸素が消費されるために海水中の酸素は不足状態になる. 特に, 高水温時の大阪湾東部海域では貧酸素化が著しく, そのために数多くの底生魚介類が負の影響を受けている可能性があるとの

\* 非会員 日立造船 (株) エンジニアリング本部, \*\* 正会員 大阪市立大学大学院 都市系専攻

報告が有山ら<sup>5)</sup>によってされている。

そこで、本研究では高水温期の大阪湾東部海域底層における  $O_2$  と  $CO_2$  濃度の分布状況、ならびにこれらが底生魚介類の生存に及ぼす影響を現地観測と室内実験により検討した。

## 2. 海水中の $O_2$ および $CO_2$ について

海水中の  $O_2$  および  $CO_2$  を変化させる要因について図1に示す。大気と海表面の間では、 $O_2$  あるいは  $CO_2$  が濃度の高い方から低い方へ溶け込む、もしくは放出するといった現象が存在している。この現象は、それぞれの気体の濃度差と風速や波といった物理的条件によって決定される。また、海水中の  $O_2$  および  $CO_2$  は動植物の活動によっても変化し、光合成では  $CO_2$  を消費して  $O_2$  を生成し、呼吸によって  $O_2$  を消費して  $CO_2$  を生成する。一方、微生物による有機物の分解方法として、好氣的分解と嫌氣的分解が存在する。好氣的分解は  $O_2$  分子を使用して有機物を分解することで、結果として  $O_2$  を消費し、 $CO_2$  を生成する。嫌氣的分解とは、酸素が少ない嫌氣的な環境において、 $O_2$  分子を使用せず、硝酸や硫酸塩など他の酸化物を用いて有機物を分解することである。この場合、 $CO_2$  は生成されるが、 $O_2$  は消費されず、代わりに用いた酸化物の還元物質が生成される。還元物質による化学的反応とは、嫌氣的分解などによって発生した還元物質が  $O_2$  分子により酸化されることで、結果として  $O_2$  を消費する形となる。炭酸塩の形成および溶解は、サンゴなどによる石灰の形成もしくはその溶解を意味し、 $CO_2$  は影響を受けるが、 $O_2$  は変化しない。

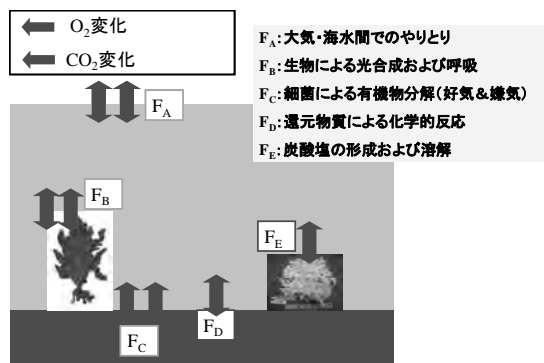


図1 海水中の  $O_2$  および  $CO_2$  を変化させる要因

## 3. 現地調査

### 3.1 調査概要

現地調査は2009年7月から10月および2010年6月から9月に毎月1回、計8回行った。調査地点は図2に示す13定点で、各点において採水器(LIGO社製、5023-A型)を用いて海底から50cm上の水を採取した。調査日および調査項目についてまとめたものを表1に示す。全炭酸濃度は  $CO_2$  などの炭酸物質の総量を表すものであり、海水中において  $CO_2$  と深く関わりがある。

全炭酸濃度は海水に強酸を加えて炭酸物質を追い出し、その追い出された  $CO_2$  ガスの量を非散乱型赤外線ガス分析計(Licor社製、LI-820型)で計測することにより求めた。DO濃度はウィンクラー法に基づいて分析した。観測した水温、塩分、pH、全炭酸濃度から、Dicksonら<sup>6)</sup>の方法に基づいて海水中の  $CO_2$  濃度を算出した。

表1 調査日および調査項目

	調査日		調査項目
2009年	7月21日	8月17日	水温・塩分・DO
	9月14日	10月19日	
2010年	6月21日	7月21日	全炭酸濃度・pH
	8月23日	9月21日	



図2 大阪湾東部沿岸海域調査地点

### 3.2 調査結果および考察

2009年8月における底層水の溶存酸素(Dissolved Oxygen, 以下DO)およびCO<sub>2</sub>の水平分布を代表例として図3に示す。底層のDO濃度は、岬沖において最大値である5.1mg/l (DO飽和度約74%)を示し、神戸港付近で低く、0.4mg/l (DO飽和度約5%)を示していた。柳<sup>7)</sup>に倣い、DO濃度3.6mg/l以下を貧酸素、0.36mg/l以下を無酸素とすると、大阪湾湾奥部の広い海域で貧酸素水塊が発生しており、場所によっては無酸素といえるほどDO濃度の低下した海域が存在していたと言える。CO<sub>2</sub>濃度は、神戸港付近において最大値となる1.1mg/lを示し、岬沖では最小値となる0.4mg/lを示していた。

底層DOとCO<sub>2</sub>の水平分布を比べると、CO<sub>2</sub>濃度が高い地点ではDO濃度は低く、CO<sub>2</sub>濃度が低い地点ではDO濃度は高くなっていった。両者には相関係数 $r=-0.95$ という高い負の相関が見られた。DOとCO<sub>2</sub>に高い負の相関があるということは、それだけ光合成および呼吸(F<sub>B</sub>)、有機物分解(F<sub>C</sub>)といった生物活動による影響が強いと考えられる。夏季の大阪湾東部沿岸海域の海底付近では、プランクトン現存量が低いために光合成や呼

吸の影響は少ないと考えられる。藤井ら<sup>8)</sup>は、大阪湾北部沿岸域においてpHおよびDO、塩分の連続観測を行い、全アルカリ度およびpCO<sub>2</sub>を算出している。その結果、海底付近における低DOおよび高CO<sub>2</sub>を確認しており、これは、有機物の呼吸分解(F<sub>C</sub>)によって水中の酸素消費およびCO<sub>2</sub>生成が進んだためとしている。これらのことから、底層水中のDOとCO<sub>2</sub>濃度は、生物活動の中でも特に有機物分解による影響を強く受けていると推察される。

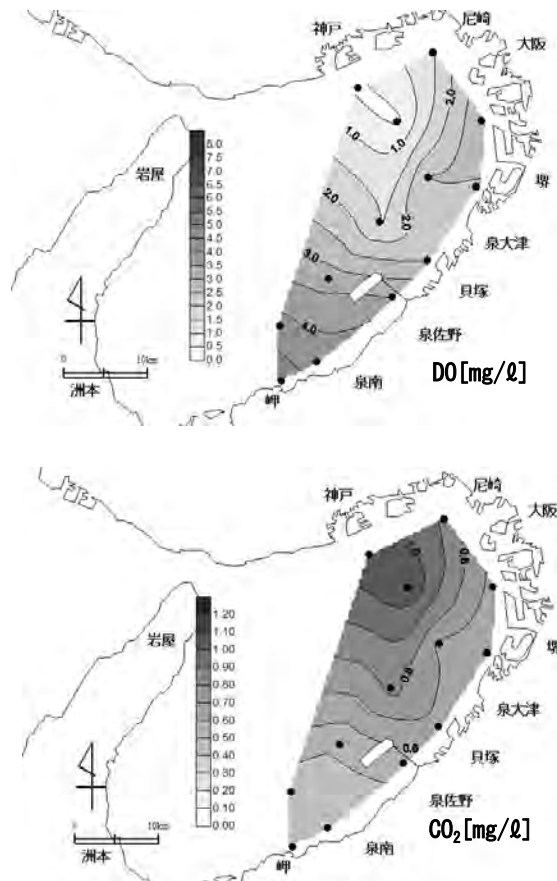


図3 2009年8月における底層DOとCO<sub>2</sub>の水平分布

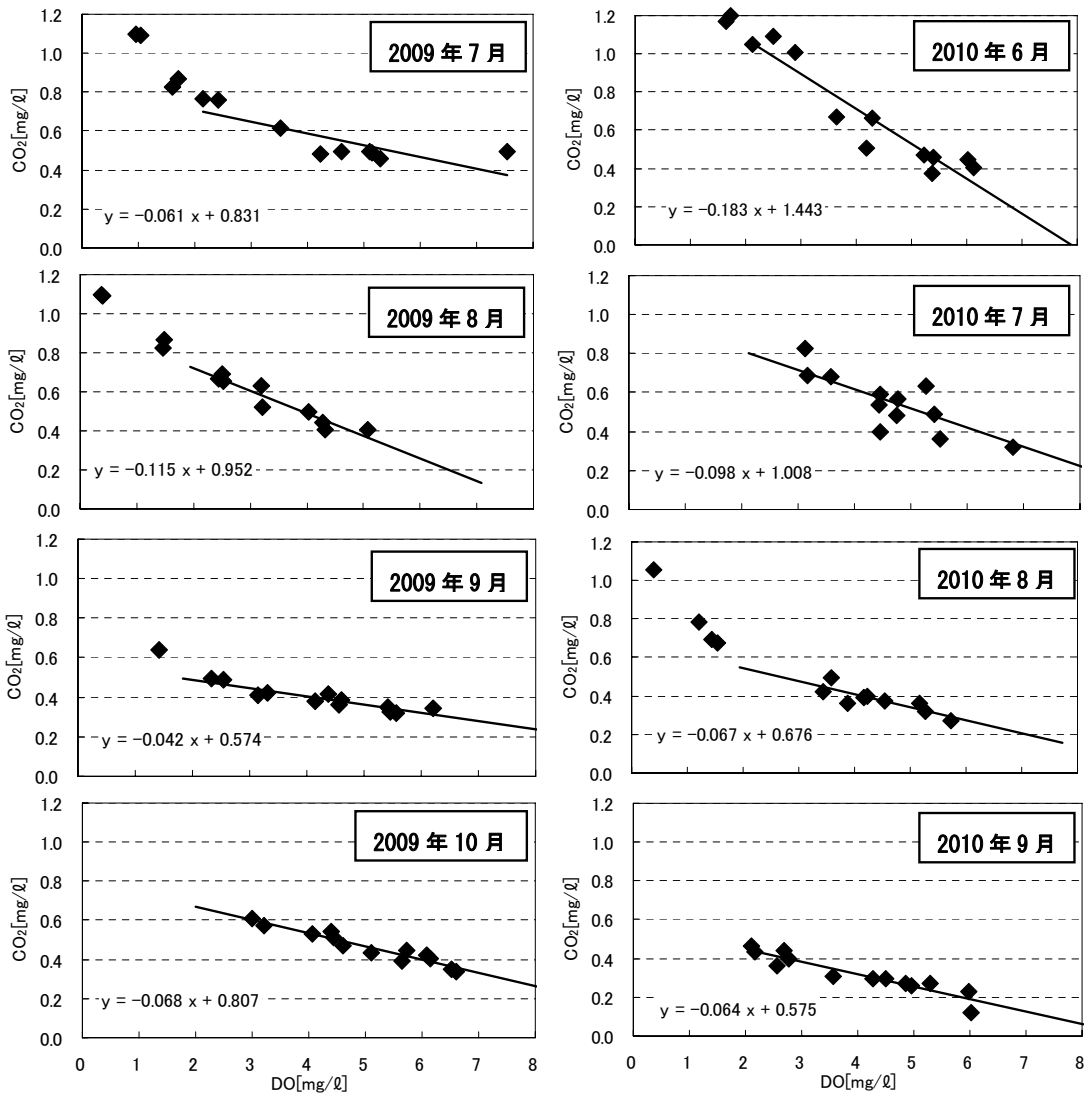


図4 2009年と2010年高水温期の大阪湾東部海域底層におけるDOとCO<sub>2</sub>の関係

全 8 回の調査における底層 DO と CO<sub>2</sub> の関係を表したものを図 4 に示す。これを見ると、秋季(9, 10 月)の 3 回の調査結果から得られる回帰直線の傾きは夏季(6~8 月)のものに比べて類似していることが分かる。しかし、夏季では DO 濃度が低くなると CO<sub>2</sub> 濃度が直線から外れ、上方に乖離する傾向があることが分かる。この一因として、有機物の嫌氣的分解の影響が考えられる。Guy ら<sup>9)</sup>は、ニューカレドニアにおいて堆積物を未攪乱のまま採取し、それをを用いて溶出実験を行っている。その際、好氣的条件と嫌氣的条件下での、有機物分解による O<sub>2</sub> 消費速度と CO<sub>2</sub> 生成速度を求めている。その結果、好氣的分解に起因すると考えられる O<sub>2</sub> 消費量 : CO<sub>2</sub> 生成量の比に対し、嫌氣的条件下での実験では CO<sub>2</sub> 生成量が多くなったことを確認している。O<sub>2</sub> は好氣的分解においてのみ消費されるが、CO<sub>2</sub> は好氣のおよび嫌氣的分解の全ての過程において最終生産物となる。そのため、嫌氣的分解が行われることによって CO<sub>2</sub> 生成量が O<sub>2</sub> 消費量を上回ったと考えられる。また、入江ら<sup>10)</sup>は大阪湾東部海域の堆積物間隙水中の硫化物イオン濃度を調べ、その濃度が堆積物表層から下層へ向かうにつれて減少していることから、硫酸還元による嫌氣的分解の存在を指摘している。

嫌氣的分解によって発生した還元物質が全てすみやかに酸化されているのであれば、DO と CO<sub>2</sub> の直線的な関係はくずれないと予想される。しかし、発生した還元物質が堆積物中に蓄積されつつある状態では、嫌氣的分解によって CO<sub>2</sub> が生成されるが、DO は消費されず、代わりに還元物質が酸化されるのを待つ形で一時的に堆積物中に蓄積される。このため、夏季(6~8 月)に極度に貧酸素化した地点においては嫌氣的分解の影響によって CO<sub>2</sub> 濃度が高くなったと考えられる。

## 4. 室内実験

### 4.1 実験概要

実験は 2010 年 7 月中旬から 8 月中旬にかけて行った。まず DO 濃度のみを変化させて生物の貧酸素耐性を明らかにした。これとは別に、貧酸素状態の海水に CO<sub>2</sub> を添加した実験を行い、貧酸素のみの時と生存率に差があるかを調べることにより、二酸化炭素の生物への影響を検討した。室内実験の概要および条件を表 2 に示す。供試生物は、サルエビ(*Trachysalambria curvirostris*)を用いた。サルエビは大阪湾を代表する水産資源であり、かつ主要漁場は大阪湾東部の泉佐野~堺市沖である。これらのことから、大阪湾の主要底生甲殻類であるサルエビは例年、夏季に湾東部海域に発達する貧酸素・高 CO<sub>2</sub> の影響を受ける恐れが強いと考えられる<sup>11)</sup>。実験は流水式で行い、実験時間は 24 時間、水温は夏季を想定して 25±1℃ に設定した。DO 飽和度は 10, 15, 20, 25% の 4 段階、CO<sub>2</sub> 濃度は 450, 1300ppm の 2 段階で計 8 パターンについて行った。なお、CO<sub>2</sub> 濃度 450ppm とは CO<sub>2</sub> を調節せずに実験を行った時の供試海水の CO<sub>2</sub> 濃度である。

実験装置の模式図を図 5 に示す。海水中の CO<sub>2</sub> 濃度を連続測定し、濃度を調節することは困難である。また、海水中の CO<sub>2</sub> 濃度の変化は pH の変化による寄与が大きく、全炭酸濃度による影響は微小であることから、pH を制御することにより、海水の CO<sub>2</sub> を間接的に調節することとした。100l タンク内に設置した DO 計(東亜電波工業社製、DO-25A 型)および pH 計(東亜 DKK 社製、HM-30R 型)からの出力を受けた多機能記録計(東亜電波工業社製、INR-9021 型)および電磁弁により、タンクへの窒素ガスおよび CO<sub>2</sub> ガスの注入量の調節を行い、所定の DO 濃度および pH を保持した。呼吸室には容量 1l の広口ビンに基質として洗浄した標準砂を敷いたものを用いた。こ

れを実験区 5 区, 対照区 1 区 (DO 飽和度 100%, CO<sub>2</sub> 濃度 450ppm) の計 6 区分用意し, それぞれにサルエビ成体を各 1 尾ずつ収容した. 実験開始前に DO 飽和度 100%, CO<sub>2</sub> 濃度 450ppm の海水で 4 時間の馴致を行い, その後, 実験開始から 24 時間後までのサルエビの動態を観察することで, 貧酸素および高 CO<sub>2</sub> による影響を調べた. 対照区のサルエビが死亡した実験が 2 回あったが, その場合は再度実験を行った. なお, 実験後に供試海水の全炭酸を測定し, CO<sub>2</sub> 濃度を算出した.

表 2 サルエビ成体実験の概要

試供生物	サルエビ
体長	5.8-9.2cm
体重	1.6-8.1g
実験期間	24時間
設定水温	25±1℃
設定DO濃度	10,15,20,25(=約0.7,1.0,1.3,1.7mg/l)
設定CO <sub>2</sub> 濃度	450,1300ppm(=約0.6,1.6mg/l)

表 3 各実験におけるサルエビの体長・体重と死亡率

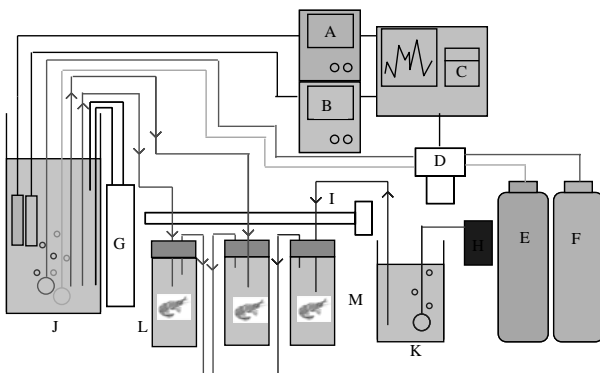
海水			サルエビ			
CO <sub>2</sub> [ppm]	DO [mg/l]	DO [mg/l]	体長 [cm]	体重 [g]	死亡率 [%]	体数 [個]
450 (375-485)	0.6	0.7	7.68-8.54	3.2-6.2	100	5
		1.0	7.02-7.93	4.4-6.5	80	5
		1.3	5.78-6.44	1.7-2.7	0	5
		1.7	6.25-7.57	2.9-4.5	0	5
1300 (1291-1297)	1.6	0.7	8.61-9.23	6.4-7.9	100	5
		1.0	6.72-7.54	3.8-5.2	60	5
		1.3	6.44-7.56	2.7-4.4	20	5
		1.7	7.03-9.04	3.4-8.1	20	5

### 4.2 実験結果および考察

計 8 回の実験終了時における死亡率, および供試生物の体長と体重を表 3 に示す. まず, CO<sub>2</sub> は調節せず(450ppm)に DO のみを低下させた実験では, DO 飽和度が 20 および 25%の時は全個体が生存したが, 15%になると 24 時間後の死亡率が 80%, また 10%では死亡率が 100%となった. これらの結果から最小二乗法を用いて算出した 24 時間半数致死 DO 値 (24h-LC<sub>50</sub>) は, 16%(1.1mg/l)となった.

矢持ら<sup>12)</sup>は大阪湾谷川港で水揚げされたサルエビを用いて同様の貧酸素耐性実験を行っている. それによると, 実験開始 24 時間後の死亡率は DO 飽和度 16-19%では 50%, DO 濃度 24-30%では 0%であり, 本実験結果とよく似ていることが分かる. このことから, 本実験により得られた 24 時間半数致死 DO 値は妥当な値といえる. 今回実験で得られたサルエビ成体の 24 時間半数致死 DO 濃度は約 16%(1.1mg/l)であり, 2010 年 8 月の底層水 DO の水平分布を見ると, 堺泉北港沖において, この値を下回っていた. よって, この海域では貧酸素のためサルエビが 24 時間以上棲息するのは困難であったと思われる.

次に, DO の低下に高 CO<sub>2</sub> を添加した実験では, DO 飽和度が 20 および 25%の時は死亡率が 20%



A	pH計	H	エアープンプ
B	DO濃度計	I	ローラーポンプ
C	多機能記録計	J	貧酸素海水用100ℓタンク
D	電磁弁	K	酸素飽和海水用20ℓタンク
E	窒素ガスポンペ	L	呼吸室(実験区)
F	CO <sub>2</sub> ガス(99%)ポンペ	M	呼吸室(対照区)
G	海水循環装置		

図 5 サルエビ実験装置の模式図

であったが，15%になると 24 時間後の死亡率が 60%，10%では死亡率が 100%に上昇した．そして高 CO<sub>2</sub>(1300ppm)時における 24 時間半数致死 DO 値は，17%(1.1mg/l)となった．このように，CO<sub>2</sub>濃度 450ppm での 24 時間半数致死 DO 値と 1300ppm でのそれとの間にはほとんど違いが見られなかった．

本実験において，CO<sub>2</sub>濃度 1300ppm ではサルエビ成体の貧酸素耐性に与える影響は確認できなかったが，それよりも低い CO<sub>2</sub>濃度によって海洋生物の棲息に影響を与えたとの報告がある．Kurihara ら<sup>13)</sup>は CO<sub>2</sub>濃度 1000ppm 期間 30 週間の暴露実験においてイソスジエビ(*Palaemon pacificus*)の生存率の低下を，また白山<sup>14)</sup>は CO<sub>2</sub>濃度 600ppm 期間 16 週間の実験においてマガキガイ(*Strombus luhuanus*)およびバフンウニ(*Hemicentrotus puicherrimus*)，ナガウニ(*Echinometra mathaei*)の成長率の低下を報告している．しかし，これらの実験はいずれも，本実験よりも暴露時間が長期に渡っている．Victoria ら<sup>14)</sup>によると，生物は高 CO<sub>2</sub>環境になると代謝を低下させ，環境が良くなるまで耐えるという方法をとる．この代謝を低下させるという方法は，一時的な高 CO<sub>2</sub>環境には有効であるが，慢性的な高 CO<sub>2</sub>には有効でないとしている．このことを考慮すると，今回実験を行った CO<sub>2</sub>濃度で，さらに長時間の暴露実験が必要と思われる．

## 5 まとめ

大阪湾東部沿岸海域において，DO および CO<sub>2</sub>に関する現地調査を行った．その結果，大阪湾における DO と CO<sub>2</sub>濃度には高い負の相関が見られ，生物活動による影響の大きさが伺えた．また，貧酸素化が進んだ海域においては，生物による好気および嫌氣的分解のためか，高濃度の CO<sub>2</sub>が存在していた．

サルエビ成体について貧酸素耐性実験および貧酸素・高二酸化炭素暴露実験をおこなった．その結果，サルエビの 24 時間半数致死 DO 濃度は約 16%(1.1mg/l)であることが分かった．また，約 1.6mg/l(1300ppm)の CO<sub>2</sub>濃度が，24 時間のうちにサルエビ成体の生存に与える影響は確認されなかった．

## 謝辞

最後に，本研究を行うにあたり多大な助力を賜った大阪府環境農林水産総合研究所の中嶋昌紀主任研究員，現地調査を手伝っていただいた大阪市立大学大学院工学研究科環境水域工学研究室のみなさまに感謝の意を表します．

## 引用・参考文献

- 1) 中村倫明，和田明，長谷川和幸，落合実：日本近海での CO<sub>2</sub>海洋隔離における濃度予測及び生物影響，水工学論文集，第 51 巻，pp.1475-1480，2007．
- 2) 近藤文義，塚本修，渡邊修一：太平洋東部赤道海域における二酸化炭素分圧の増加速度，OKAYAMA University Earth Science Reports, Vol.11, No.1, p.15-22, 2004．
- 3) Ohtaki, E., E. Yamashita, F. Fujiwara: Carbon Dioxide in Surface Seawaters of the Seto Inland Sea, Japan, Journal of Oceanography Vol.49, pp.295-303, 1993．
- 4) Brasse, S., M. Nellen, R. Seifert, and W. Michaelis: The carbon dioxide system in the Elbe estuary, Biogeochemistry, Vol.59, p.25-40, 2002．
- 5) 有山啓之，矢持進，佐野雅基：大阪湾奥部における大型底生動物の動態について II．主要種の個体数・分布・体長組成の季節変化，沿岸海洋研究，第 35 巻，第 1 号，p.83-91, 1997．

- 6) Dickson, A.G. & Goyet, C.: Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in seawater, version 2, DOE, ORNL/CDIAC 74, 1994.
- 7) 柳哲雄：貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響, 海の研究, 13(5), p.451-460, 2004.
- 8) 藤井智康, 駒井幸雄, 藤原建紀：大阪湾沿岸域の二酸化炭素の挙動, 土木学会論文集 B, 2011.
- 9) Guy, B., J. Clavier, and C. Garrigue: Oxygen and carbon dioxide fluxes at the watersediment interface of a tropical lagoon, *Marine Ecology*, vol.107, pp.185-193, 1994.
- 10) 入江政安, 西田修三, 寺中恭介, 辻陽平, 平澤充成, 藤原敏晴, 中筋みゆき：硫化水素の発生・溶出に着目した水底質モデルによる貧酸素水塊の動態解析, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.1, p.1066-1070, 2010.
- 11) 日下部敬之：大阪湾におけるサルエビの成長と成熟, 大阪府立水産試験場研究報告第10号, p59-69, 1997
- 12) 矢持進・佐野雅基：大阪湾谷川港における溶存酸素濃度の変動とサルエビのへい死について, 水産海洋研究, 第56巻, 第1号, p.1-12, 1992.
- 13) Kurihara, H., M. Matsui, H. Furukawa, M. Hayashi, and A. Ishimatsu: Long-term effects of predicted future seawater CO<sub>2</sub> conditions on the survival and growth of marine shrimp *Palaemon pacificus*, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 367(1), pp.41-46, 2008.
- 14) 白山義久：ベントスに対する CO<sub>2</sub> の影響, 月刊海洋, Vol.33, No.11, p.791-796, 2001.
- 15) Fabry, V., Seibel, B., Feely, R.A., and Orr, J.C.: Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes, *Journal of marine science*. 65, pp.414-432, 2006.

## 著者紹介

### 安井 裕 (非会員)

日立造船株式会社 (大阪市住之江区南港北 1-7-89), 平成 23 年 3 月大阪市立大学大学院工学研究科前期博士課程修了, 同年 4 月入社.

E-mail: yasui\_yu@hitachizosen.co.jp

### 矢持 進 (正会員)

大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 (大阪市住吉区杉本 3-3-138), 教授.

E-mail: yamochi@urban.eng.osaka-cu.ac.jp



## Distributions of Dissolved Oxygen and Carbon Dioxide in Eastern Osaka Bay and their Effects on the Survival of Adult Southern Rough Shrimp, *Trachysalambria curvirostris*

Yutaka YASUI and Susumu YAMOCHI

**ABSTRACT:** We investigated distributions of oxygen and carbon dioxide in the bottom waters of the eastern part of Osaka Bay in high temperature seasons of 2009 and 2010. Indoor experiments were also conducted to examine the effect of hypoxia and high CO<sub>2</sub> concentration on the survival of southern rough shrimp. CO<sub>2</sub> concentrations of the bottom water increased with decreasing dissolved oxygen and concentrations of dissolved oxygen clearly showed an inverse correlation with those of CO<sub>2</sub>. Indoor experiments revealed that the 24-hour median lethal concentration of dissolved oxygen was 1.1mg/l (17% in saturation) at 25°C for adult southern rough shrimp. No marked difference was observed on the mortality of southern rough shrimp between a combination of high CO<sub>2</sub> (1300ppm) with low dissolved oxygen and a combination of normal CO<sub>2</sub> (450ppm) with low dissolved oxygen.

**KEYWORDS:** *Dissolved oxygen, Carbon dioxide, Eastern Osaka Bay, Survival rate of southern rough shrimp*