

ガザミ (*Portunus trituberculatus*), クルマエビ (*Marsupenaeus japonicus*) およびヨシエビ (*Metapenaeus ensis*) の浮遊幼生に及ぼす貧酸素水の影響

山田 智^{1†}, 蒲原 聡¹, 曾根亮太¹, 堀口敏宏², 鈴木輝明³

Effects of hypoxic water on planktonic larvae of swimming crab (*Portunus trituberculatus*), kuruma prawn (*Marsupenaeus japonicus*) and greasyback shrimp (*Metapenaeus ensis*)

Satoshi YAMADA^{1†}, Satoru KAMOHARA¹, Ryota SONE¹, Toshihiro HORIGUCHI² and Teruaki SUZUKI³

We carried out laboratory experiments about adverse effects of hypoxic water on planktonic larvae of swimming crab, kuruma prawn and greasyback shrimp which are important target species in commercial fisheries. For the experiments, flow-through exposure systems with low dissolved oxygen (DO) concentrations were used; six different DO concentration groups (at least about 0.1 mg·l⁻¹ to a maximum of about 6 mg·l⁻¹) were tested for larvae and juveniles of each species, which were produced at the Aichi fish farming center. The larvae and juveniles exposed to various DO concentrations were observed for their death or survival under a stereomicroscope and their lethality were evaluated by LC₅ (5% lethal concentration) calculated from logistic curves expressing relationship between the average DO concentration and the mortality every 24 h. Estimated LC₅ values ranged from 1.53 to 3.68 mg·l⁻¹, from 2.79 to 3.90 mg·l⁻¹, and from 1.28 to 3.22 mg·l⁻¹ for swimming crab (from zoea to juvenile), kuruma prawn (from nauplius to juvenile) and greasyback shrimp (from protozoea to juvenile), respectively. These results suggest that DO concentration of 4 mg·l⁻¹ or at least 3 mg·l⁻¹ is necessary to conserve populations of these 3 species.

Key words: hypoxic water, flow-through exposure system, planktonic larvae, swimming crab, kuruma prawn, greasyback shrimp

はじめに

内湾域の水質環境改善を目的として既に30年間余りにわたって水質総量規制が導入されているが、東京湾、伊勢湾等の本邦の主要な内湾域では依然として夏季に深刻な貧酸素水塊の発達がみられ、生物生息や漁業生産に悪影響を与え続けている(黒田・藤田, 2006; Kodama and Horiguchi, 2011; 曾根ら, 2013; 鈴木, 2013)。実際、夏季に貧酸素水塊が大きく発達する伊勢・三河湾では底曳き網漁の主要対象種のえび類、かれい類、シャコ、貝類等は1980年代をピークに漁獲量は減少したまま低迷が続いている(石田・青山, 2012)。この問題に対処するため環境省は平成22年3

月に“閉鎖性海域中長期ビジョン”(http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=15178&hou_id=12192)を策定し、平成25年度中に底層の溶存酸素量を透明度とともに新たな環境基準に設定する作業を現在進めている。

底棲性の魚介類はその生活史初期の段階で浮遊幼生期を持つものが多く、これらの浮遊幼生期はその後の親の年級群の大きさを決定する重要な時期であり、生活史の中で低酸素等の環境ストレス因子に対する耐性が最も低いと考えられている(“閉鎖性海域中長期ビジョン”; Baker and Mann 1992; Tankersley and Wieber 2000; Kodama et al. 2006)。したがって、環境基準値の導出に際しては、低酸素耐性が

2013年10月4日受付, 2014年1月28日受理

¹ 愛知県水産試験場

Aichi Fisheries Research Institute, 97 Wakamiya, Miyacho, Gamagori, Aichi 443-0021, Japan

² 国立環境研究所

National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan

³ 名城大学大学院総合学術研究所

Graduate School of Environmental and Human Sciences, Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan

† E-mail: satoshi_5_yamada@pref.aichi.lg.jp

Table 1. Number of individuals used for the present study.

Animals	Stage	BL or CL (mm)	No. of specimens per capsule average (range)	Observed number per each concentration of oxygen average (range)
Swimming crab	1st zoea	0.50–0.53*	13 (6–32)	27 (18–52)
	Megalopa	2.00*	13 (8–16)	26 (19–30)
	Juvenile ⁺	5.11****	30	30 (30)
Kuruma prawn	5th nauplius	0.42–0.45**	38 (18–51)	80 (69–88) (24h) 145 (91–184) (48h)
	3rd zoea	2.14–2.30**	42 (23–66)	85 (63–114)
	Juvenile ⁺⁺	14.00****	2	16 (15–16)
Greasyback shrimp	2nd nauplius	0.26***	39 (19–48)	78 (65–87)
	2nd protozoea	1.42***	20 (12–28)	40 (25–62)
	2nd mysis	2.78***	10 (8–12)	19 (9–22)
	Postlarva aged 5 days	3.37****	5 (5–6)	15 (15–16)
	Juvenile ⁺⁺⁺	5.60****	5 (5–8)	15 (15–18)

BL: body length (kuruma prawn and greasyback shrimp), CL: carapace length (swimming crab).

⁺2nd instar, ⁺⁺postlarva aged 25 days ⁺⁺⁺postlarva aged 19 days

*Yatsuzuka and Sakai (1982), **Hudinaga (1942), ***Ronquillo and Saisho (1993), ****measured

低く、かつ、その種個体群の年級群強度に与える影響が大きい生活史初期段階の個体の低酸素耐性データに基づいて算出されるべきであろう。しかし、環境基準に向けた目標値検討に際し、低溶存酸素量の底棲生物に与える影響、特にそれらの生活史の初期段階についての信頼できる科学的知見は限られている (Widdows et al., 1989; Baker and Mann, 1992; 姜ら, 1993; 姜・松田, 1993; Tankersley and Wieber, 2000; Kodama et al., 2006; 蒲原ら, 2012, 2013)。

そこで本研究では、本邦内湾域での重要魚介類であり、産卵期が貧酸素水塊の発達する夏期である、ガザミ (*Portunus trituberculatus*)、クルマエビ (*Marsupenaeus japonicus*) およびヨシエビ (*Metapenaeus ensis*) の浮遊幼生期と稚ガニ・稚エビ期について室内実験を実施し、これらの種の初期生活史段階の低酸素耐性を調べ、各幼生段階について適正な酸素濃度について検討した。

材料と方法

ガザミ、クルマエビおよびヨシエビの幼生は愛知県栽培漁業センターで種苗生産された各発育段階の幼生あるいは稚ガニ・稚エビを、同センターから愛知県水産試験場へ搬入し、実験に供した。カニ・エビの具体的な発育段階は、ガザミでは第1期ゾエア、メガロバ期および第2期稚ガニであり、クルマエビでは第5期ノープリウス、第3期ゾエアおよび稚エビ (ポストラバ25日, P25) であり、ヨシエビでは第2期ノープリウス、第2期プロトゾエア、第2期ミシス、第5期ポストラバおよび稚エビ (ポストラバ19日, P19) であった (Table 1)。

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。幼生あるいは稚ガニ・稚エビは搬入約2時間後にカプセルへ収容し、カプセルを実験水槽に収容して実験を開始した。カプセルは直径40 mmの塩化ビニール製パイプとソケットを組み合わせて、両端に50 μ m, 280 μ m および700 μ m のプランクトンネットを張ったものを使用し、カプセルへの収容尾数およびネットの網目は幼生の大きさにより調整した (Table 1)。稚ガニについては共食いを防ぐため、12×12 mm に仕切られた格子の底面に700 μ m ネットを張った容器の各区画に1尾ずつを収容し、同じものを被せて実験に使用した。

実験では200 l タンク2個に精密ろ過海水を満たし、一方は空気を曝気し、100%飽和海水とした。他方には窒素ガスを曝気し、酸素濃度0.5 mg·l⁻¹以下に調整した (低酸素水)。両者を定量ポンプ (EYELA社製 MP-1000) で実験水槽 (容量5 l) へそれぞれ注水し、各実験区の水は酸素飽和水と低酸素水の合計流量を一定にし、両者の混合割合 (0–5.5) を変えることにより異なった酸素濃度区を6区作成した。合計流量は毎分19.8 ml, 21.0 ml および23.8 ml の3段階で行い、1日における実験水槽の換水率はそれぞれ5.7回転, 6.0回転および6.9回転であった。また、実験水温は各種の愛知県栽培漁業センターでの飼育水温に合わせ、ガザミおよびクルマエビは24°C, ヨシエビでは28°Cに設定した。水温はウォーターバス方式で加温・冷却装置で調温した。実験時間はガザミの場合、ゾエアおよびメガロバのステージ滞留期間が4日以上あるため、72時間 (メガロバは96時間) の実験とした。それに対し、クルマエビおよびヨシエビはノープリウス期が1–2日およびゾエア (プロ

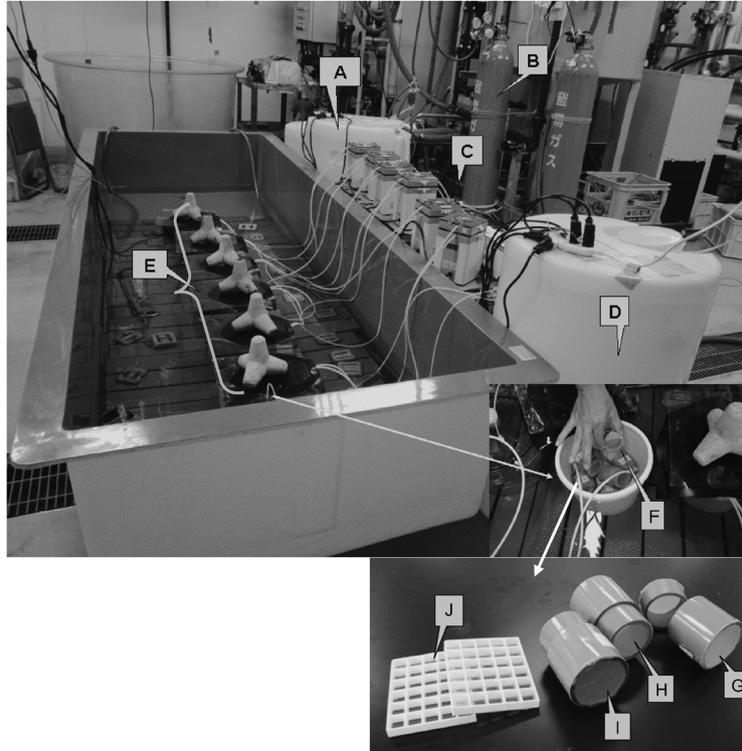


Figure 1. Photograph of the experiment apparatus (flow-through exposure systems). A: tank for oxygen-deficient sea water; B: N₂ gas; C: peristaltic pump; D: tank for oxygen-saturated sea water; E: experiment tank; F: capsules to contain examined animals; G–I: various capsules; G: 50 μm mesh, H: 280 μm mesh, I: 700 μm mesh; J: cages for juvenile swimming crab, 12×12 mm, 700 μm mesh.

トゾエア) 期が3–4日と短いため、ヨシエビノープリウス期およびプロトゾエア期は24時間、それ以外は48時間とした。また、ポストラバおよび稚エビ期の実験はこれら初期幼生の実験時間(48時間)に統一した。

実験は午後2–3時に開始し、酸素濃度は溶存酸素計(東亜ディーケーケー社製 DO-31P, YSI社製 ProODO)を用いて測定した。測定時刻はガザミの場合、その日の午後5時、翌朝9時の2回、クルマエビおよびヨシエビはこれらに加え幼生等を取り上げる直前の翌日午後1時の合計3回とした。24時間ごとの酸素濃度にはこれらの平均値を用い、24–96時間の実験期間ごとの酸素濃度は24時間ごとの酸素濃度の平均値を用いた(Table 2)。各実験水槽から幼生等を24時間ごとに取り上げ(最長96時間)、直ちに実体顕微鏡観察により生死別に計数した。生死判定は、動きがなく生死判別が困難な幼生については柄付き針で突いて反応がないものを死亡、少しでも反応したものを生存とした。溶存酸素濃度(24時間ごとの平均値)と斃死率の関係に最小二乗法によりロジスティック曲線を当てはめ(蒲原ら, 2013)、得られた式から24–96時間後の5%致死濃度(LC₅)を求めた。ここでLC₅₀でなくLC₅を採用したのは、“閉鎖性海域中長期ビジョン”の中でDOの環境基準化に関して提示されている魚介類の生息域の確保のためには、底層

DO低下による生息個体数の減少が起こらないことが重要であり、急性毒性の観点から感受性の高い個体の生存までは考慮しない5%致死濃度(LC₅)が妥当と考えられたためである。

結果

酸素耐性試験

①ガザミ

各実験の実験区ごとの酸素濃度および生残率をFig. 2に示した。ゾエア期では、溶存酸素濃度が2.70 mg·l⁻¹以上の実験区では、24時間後の生残率が80%以上、72時間後でも70%以上であった。それに対し、溶存酸素1.62 mg·l⁻¹以下では24時間後に6.3%以下、48時間後には生残しなかった。メガロパ期では24時間後に1.33 mg·l⁻¹以下で全滅し、48時間後には2.80 mg·l⁻¹で50%を下回った。稚ガニ期では24時間後に1.79 mg·l⁻¹で30%を下回り、1.51 mg·l⁻¹以下では生存できなかった。48時間後には2.76 mg·l⁻¹以下の区ではほぼ全滅した。

②クルマエビ

同様にクルマエビの結果をFig. 3に示した。ノープリウス期では24時間および48時間後に2.27 mg·l⁻¹以上の区では生残率が70%以上であったが、1.79 mg·l⁻¹で50%以下で

Table 2. Concentrations of dissolved oxygen in experimental groups.

Animale	Stage	Exp. tank	DO (mg·l ⁻¹)				
			24 h	48 h	72 h	96 h	Avg
Swimming crab	Zoea	①	0.70 (0.58–0.81)	0.47 (0.46–0.48)	0.51 (0.45–0.57)	—	0.56±0.12
		②	0.69 (0.49–0.89)	0.76 (0.74–0.78)	0.65 (0.64–0.65)	—	0.70±0.06
		③	1.43 (1.22–1.63)	1.79 (1.73–1.84)	1.65 (1.53–1.77)	—	1.62±0.18
		④	2.89 (2.72–3.06)	2.51 (2.48–2.53)	2.71 (2.66–2.76)	—	2.70±0.19
		⑤	4.05 (3.94–4.15)	3.96 (3.88–4.03)	3.94 (3.88–4.00)	—	3.98±0.06
		⑥	5.46 (5.25–5.66)	5.25 (5.22–5.28)	5.29 (5.26–5.32)	—	5.33±0.11
	Megalopa	①	0.38 (0.15–0.60)	0.25 (0.10–0.40)	0.30 (0.30)	0.40 (0.40)	0.33±0.07
		②	1.23 (0.96–1.50)	1.10 (1.00–1.20)	1.50 (1.50)	1.50 (1.30–1.70)	1.33±0.20
		③	2.64 (2.47–2.80)	2.40 (2.20–2.60)	2.40 (2.20–2.60)	2.35 (2.10–2.60)	2.45±0.13
		④	3.14 (2.97–3.30)	2.70 (2.60–2.80)	2.70 (2.70)	2.65 (2.60–2.70)	2.80±0.23
		⑤	4.31 (4.30–4.32)	4.15 (4.10–4.20)	4.20 (4.20)	4.30 (4.20–4.40)	4.24±0.08
		⑥	5.63 (5.30–5.95)	5.45 (5.10–5.80)	5.05 (4.70–5.40)	4.45 (4.20–4.70)	5.14±0.52
	Juvenile	①	0.28 (0.05–0.50)	0.05 (0.00–0.10)	0.05 (0.00–0.10)	0.13±0.06 (0.10–0.20)	0.13±0.11
		②	1.42 (0.73–2.10)	0.65 (0.60–0.70)	0.75 (0.60–0.90)	1.20±0.10 (1.10–1.30)	1.00±0.36
		③	1.93 (1.45–2.40)	0.85 (0.70–1.00)	1.20 (0.90–1.50)	2.07±0.32 (1.70–2.30)	1.51±0.58
		④	2.13 (1.65–2.60)	1.50 (1.00–2.00)	1.35 (1.00–1.70)	2.17±0.15 (2.00–2.30)	1.79±0.42
		⑤	3.30 (2.80–3.80)	2.35 (2.10–2.60)	2.25 (2.10–2.40)	3.13±0.46 (2.60–3.40)	2.76±0.54
		⑥	5.06 (4.42–5.70)	4.60 (4.40–4.80)	4.80 (4.60–5.00)	5.57±0.21 (5.40–5.80)	5.01±0.42
Kuruma prawn	Nauplius	①	1.24±0.01 (1.23–1.24)	1.21 (1.08–1.33)	—	—	1.22
		②	1.74±0.15 (1.59–1.89)	1.85 (1.76–1.93)	—	—	1.79
		③	2.30±0.04 (2.25–2.33)	2.23 (2.23)	—	—	2.27
		④	3.94±0.93 (3.40–5.02)	3.83 (3.47–4.19)	—	—	3.89
		⑤	3.76±0.08 (3.68–3.83)	3.62 (3.57–3.66)	—	—	3.69
		⑥	4.68±0.05 (4.64–4.74)	4.80 (4.79–4.81)	—	—	4.74
	Zoea	①	0.61 (0.45–0.77)	0.37 (0.31–0.42)	—	—	0.49
		②	1.39 (1.28–1.49)	1.16 (1.15–1.17)	—	—	1.27
		③	2.02 (1.98–2.05)	1.79 (1.68–1.89)	—	—	1.90
		④	3.09 (2.97–3.20)	2.87 (2.81–2.93)	—	—	2.98
		⑤	3.56 (3.51–3.61)	3.15 (3.10–3.20)	—	—	3.36
		⑥	4.46 (4.39–4.53)	4.12 (4.06–4.17)	—	—	4.29
Juvenile	①	1.20±0.46 (0.88–1.73)	0.98±0.05 (0.93–1.02)	—	—	1.09	
	②	1.96±0.62 (1.43–2.64)	1.44±0.12 (1.33–1.57)	—	—	1.70	
	③	3.35±0.20 (3.14–3.53)	2.71±0.20 (2.55–2.94)	—	—	3.03	
	④	3.90±0.40 (3.52–4.32)	2.20±0.91 (1.57–3.25)	—	—	3.05	
	⑤	5.05±0.21 (4.82–5.23)	4.24±0.40 (3.95–4.69)	—	—	4.64	
	⑥	5.45±0.40 (5.11–5.89)	4.42±0.49 (4.09–4.98)	—	—	4.93	

あった。ゾエア期では24–48時間後で2.98 mg·l⁻¹以上の区で生残率が88%以上であったが、1.90 mg·l⁻¹の区で50%、1.27 mg·l⁻¹以下の区で全滅した。稚エビ期の実験区では、24時間後で、3.03 mg·l⁻¹以上の区で生残率が80%以上、1.70 mg·l⁻¹以下ではほぼ全滅した。48時間後では4.64 mg·l⁻¹以上で生残率が80%だが、3.03–3.05 mg·l⁻¹で約50%になった。

③ヨシエビ

ヨシエビの結果をFig. 4に示した。ノープリウス期では24時間後の結果を見ると、すべての実験区でほぼすべてが生

残し(93.8%以上)、最低の濃度区で1.11 mg·l⁻¹であった。プロトゾエア期についても24時間後の結果で、2.36 mg·l⁻¹ですべて生残し、1.43 mg·l⁻¹以下で全滅した。ミスリス期については2.05 mg·l⁻¹以上では24時間後はほぼすべて生存し、48時間後では2.05 mg·l⁻¹で78%以上が生残したが、1.44 mg·l⁻¹以下では24時間後に全滅した。ポストラバ期では24および48時間後に3.00 mg·l⁻¹以上ではほぼすべて生存し、1.58 mg·l⁻¹以下では全滅した。稚エビ期では24–48時間後に1.56 mg·l⁻¹以上ですべて生存し、0.85 mg·l⁻¹で全滅した。

Table 2. Concentrations of dissolved oxygen in experimental groups. (Continued)

Animale	Stage	Exp. tank	DO (mg·l ⁻¹)				
			24h	48h	72h	96h	Avg
	Nauplius	①	1.11±0.33 (0.83–1.47)	—	—	—	—
		②	1.73±0.45 (1.31–2.21)	—	—	—	—
		③	3.01±0.56 (2.45–3.57)	—	—	—	—
		④	3.45±0.78 (2.73–4.28)	—	—	—	—
		⑤	4.10±0.82 (3.33–4.97)	—	—	—	—
		⑥	4.29±0.99 (3.43–5.37)	—	—	—	—
	Protopzoa	①	0.51±0.25 (0.37–0.80)	—	—	—	—
		②	0.74±0.48 (0.44–1.30)	—	—	—	—
		③	1.43±0.58 (0.97–2.08)	—	—	—	—
		④	2.36±0.14 (2.23–2.50)	—	—	—	—
		⑤	4.45±0.47 (4.04–4.96)	—	—	—	—
		⑥	5.42±0.63 (4.84–6.09)	—	—	—	—
Greasyback shrimp	Mysis	①	0.98±0.34 (0.78–1.37)	0.90±0.13 (0.76–1.02)	—	—	0.94
		②	1.58±0.46 (1.24–2.10)	1.29±0.21 (1.10–1.52)	—	—	1.44
		③	2.02±0.42 (1.73–2.50)	2.09±0.52 (1.59–2.63)	—	—	2.05
		④	3.43±0.36 (3.12–3.83)	3.07±0.10 (2.96–3.14)	—	—	3.25
		⑤	3.42±0.40 (3.16–3.88)	3.46±0.42 (2.97–3.71)	—	—	3.44
		⑥	5.39±0.25 (5.18–5.66)	4.80±0.24 (4.62–5.08)	—	—	5.10
	Postlarva	①	0.82±0.29 (0.65–1.16)	0.50±0.06 (0.45–0.57)	—	—	0.66
		②	1.46±0.35 (1.19–1.85)	1.09±0.09 (1.03–1.19)	—	—	1.28
		③	1.82±0.22 (1.68–2.07)	1.34±0.27 (1.18–1.65)	—	—	1.58
		④	3.30±0.32 (3.06–3.66)	2.69±0.25 (2.46–2.96)	—	—	3.00
		⑤	3.51±0.42 (3.26–4.00)	3.05±0.09 (2.97–3.15)	—	—	3.28
		⑥	5.14±0.37 (4.83–5.55)	4.57±0.13 (4.48–4.72)	—	—	4.85
	Juvenile	①	1.04±0.20 (0.84–1.24)	0.66±0.15 (0.56–0.83)	—	—	0.85
		②	1.87±0.32 (1.56–2.19)	1.25±0.26 (1.04–1.54)	—	—	1.56
		③	2.71±0.32 (2.38–3.02)	2.39±0.04 (2.34–2.42)	—	—	2.55
		④	3.60±0.13 (3.46–3.63)	2.71±0.47 (2.41–3.25)	—	—	3.16
		⑤	4.29±0.36 (3.95–4.66)	3.41±0.27 (3.23–3.72)	—	—	3.85
		⑥	5.67±0.15 (5.52–5.81)	5.17±0.18 (5.05–5.38)	—	—	5.42

DO values show mean±SD, range (min–max).

LC₅

Figure 5に24時間後の酸素濃度と斃死率のロジスティック曲線を示した。同様にして得られた48時間以降の値も含めて実験期間24–96時間のLC₅をTable 3に示した。

ガザミでは24時間後のLC₅がゾエア期では1.53 mg·l⁻¹、メガロバ期および稚ガニ期が3.08–3.68 mg·l⁻¹であり、初期幼生のゾエア期で最も低酸素耐性が高かった。また、時間が経つにつれ特に稚ガニ期でLC₅の値が上昇し、低酸素耐性が低くなった。

クルマエビの24時間後のLC₅はゾエア期が2.79 mg·l⁻¹に対し、ノープリウス期および稚エビ期で3.08–3.90 mg·l⁻¹と高く、低酸素耐性が低かった。48時間後のLC₅はノープリウス期と稚エビ期で上昇する傾向が見られ、ゾエア期では変化しなかった。クルマエビではゾエア期の低酸素耐

性が他より高い結果が得られた。

ヨシエビは24時間後のLC₅がノープリウス期はすべての実験区でほぼすべてが生残したため(最低1.11 mg·l⁻¹)、LC₅は1.11 mg·l⁻¹未満である。ゾエア期は1.76 mg·l⁻¹と低く、ミシス期およびポストラーバ期では2.02および3.22 mg·l⁻¹と高くなるが稚エビ期で1.28 mg·l⁻¹と低下した。この様にヨシエビではノープリウス期および稚エビ期で低酸素耐性の高い結果が得られた。

考 察

今回の実験で、ガザミはゾエア期が最も低酸素耐性が高く(24 h, LC₅: 1.53 mg·l⁻¹)、メガロバ期および稚ガニ期(24 h, LC₅: 3.08–3.68 mg·l⁻¹)と成長するにつれて低酸素耐性が低くなった。姜ら(1993)はガザミのゾエア期、メガロバ

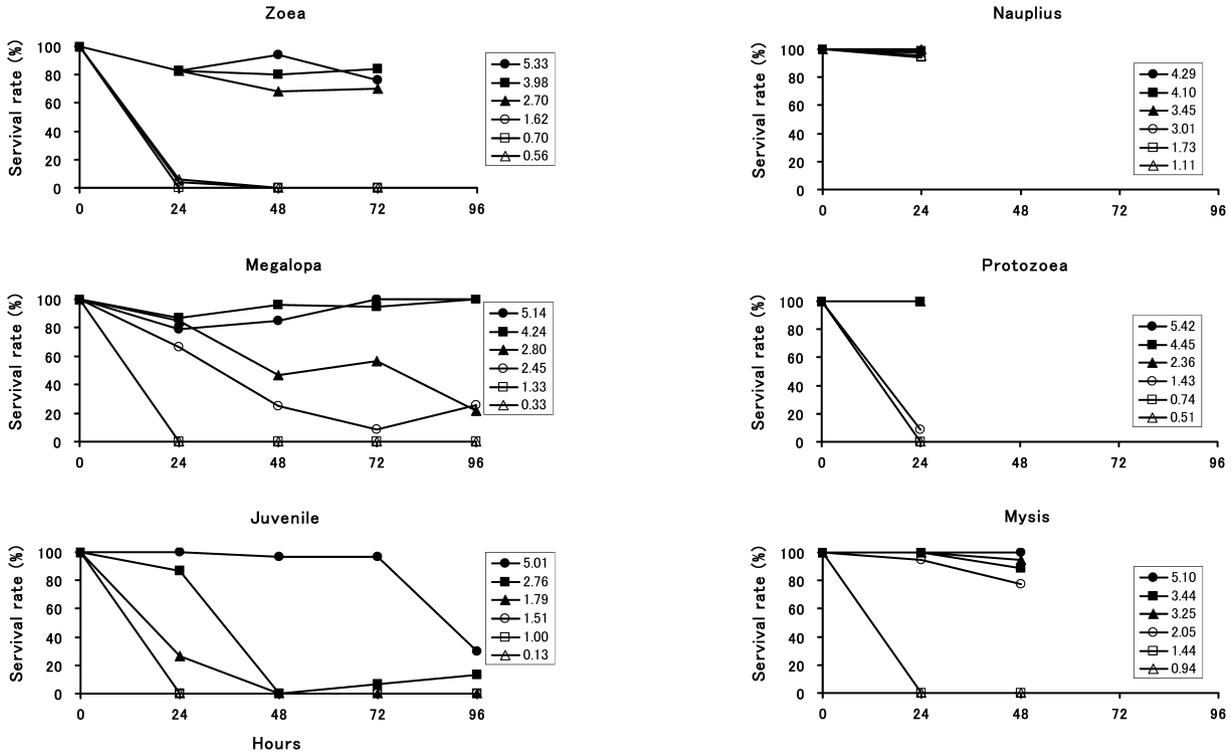


Figure 2. Survival rates of each stage of swimming crab from 24 to 96 h in 6 different concentrations of dissolved oxygen ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

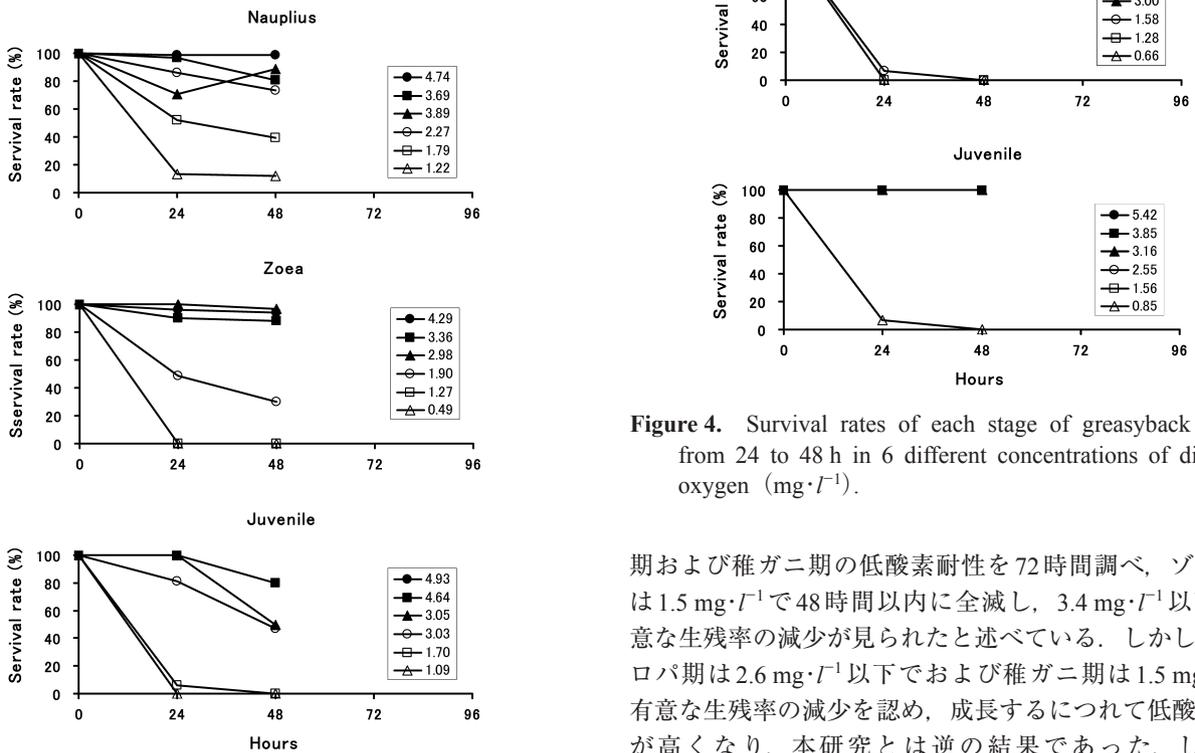


Figure 3. Survival rates of each stage of kuruma prawn from 24 to 48 h in 6 different concentrations of dissolved oxygen ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

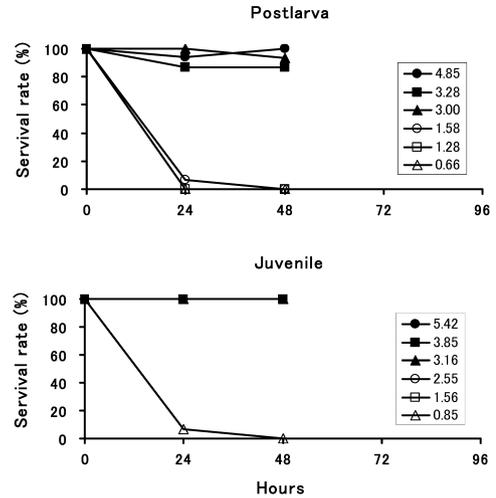


Figure 4. Survival rates of each stage of greasyback shrimp from 24 to 48 h in 6 different concentrations of dissolved oxygen ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

期および稚ガニ期の低酸素耐性を72時間調べ、ゾエア期は $1.5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ で48時間以内に全滅し、 $3.4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下で有意な生残率の減少が見られたと述べている。しかし、メガロパ期は $2.6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下でおよび稚ガニ期は $1.5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ で有意な生残率の減少を認め、成長するにつれて低酸素耐性が高くなり、本研究とは逆の結果であった。しかし、Tankersley and Wieber (2000) はガザミと近縁な北米産のアオガニ (*Callinectes sapidus*) のメガロパ期および変態直後の第1期稚ガニで実験を行い、酸素飽和度20%以下では

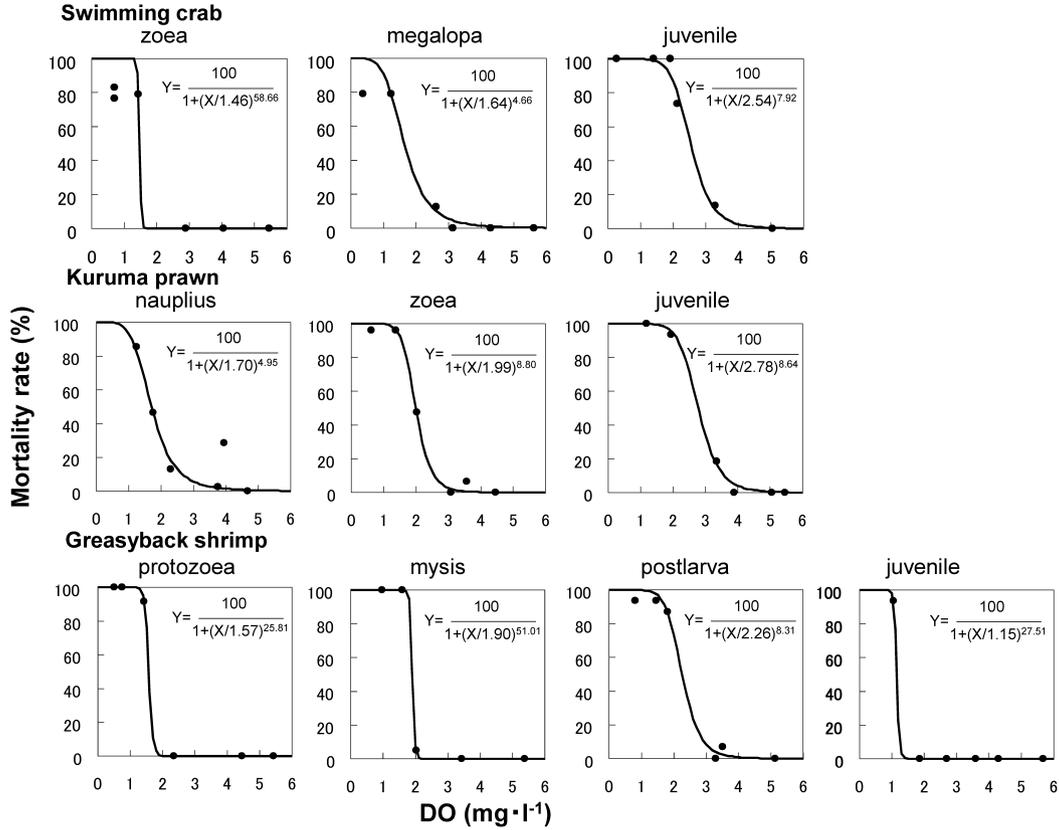


Figure 5. Logistic curves of mortalities in examined groups after 24 h with different dissolved oxygen concentrations for larvae and juveniles of swimming crab, kuruma prawn and greasyback shrimp.

Table 3. Estimated values of 5% lethal concentration (LC₅) of dissolved oxygen (mg·l⁻¹) for larvae and juveniles of swimming crab, kuruma prawn and greasyback shrimp.

Animale	Stage	LC ₅			
		24 h	48 h	72 h	96 h
Swimming Crab	1st zoea	1.53	2.99	1.79	—
	Megalopa	3.08	3.76	3.04	4.27
	Juvenile ⁺	3.68	3.53	3.76	—
Kuruma Prawn	5th nauplius	3.08	4.15	—	—
	3rd zoea	2.79	2.81	—	—
	Juvenile ⁺⁺	3.90	4.53	—	—
Greasyback Shrimp	2nd nauplius	<1.11	—	—	—
	2nd protozoa	1.76	—	—	—
	2nd mysis	2.02	2.44	—	—
	Postlarva aged 5 days	3.22	2.99	—	—
	Juvenile ⁺⁺⁺	1.28	0.80	—	—

⁺2nd instar, ⁺⁺postlarva aged 25 days, ⁺⁺⁺postlarva aged 19 days

50%致死時間は第1期稚ガニよりメガロパ期幼生の方が長いことを示し、形態や生理条件が急激に変化する時期には一時的に低酸素耐性が減少すると述べている。今回のガザ

ミ稚ガニ期はメガロパ期から稚ガニ1期になってから3日目の第2期稚ガニであり、低酸素耐性が低いのは、変態から時間の経っていないことが原因かもしれない。また、

ヨシエビでも同様にノープリウス期が $1.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ で24時間後にほぼすべてが生残し、非常に低酸素耐性が高く、プロトゾエア期、ミス期およびポストラーバ期 (P5, ふ化13日) の24時間 LC_5 が $1.76, 2.02$ および $3.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ と成長が進むにつれ、低酸素耐性が低くなったが、稚エビ期 (P19, 27日) では LC_5 が $1.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ と再びノープリウス期に匹敵する耐性を示した。ノープリウス期は短期間の内に脱皮を繰り返すため単位体重当たりの酸素消費速度は他の幼生期に比べて非常に高いが、体重が極めて少なく (卵より少ない)、1個体当たりの酸素消費速度は他の幼生期に比べてかなり少ない (Chu and Ovsianico-Koulikowsky 1994; Chu and Wong 1996)。このことがノープリウス期の低酸素耐性を高くしている可能性がある。Chu and Ovsianico-Koulikowsky (1994) はプロトゾエアからポストラーバ初期 (ポストラーバ3日, P3) は単位体重当たりおよび1個体当たりの酸素消費速度は成長段階が上がるにつれて大きくなったが、ポストラーバ9日 (P9) はP3に比べて飢餓状態の酸素消費速度が小さく、これはP9が浮遊期から底生期へ移行し、飢餓状態は海底であり動かないためであると述べている。このことが本研究での稚エビ (P19) の低酸素耐性が再び高くなる理由と考えられる。また、ヨシエビ幼生はポストラーバ期以外でガザミおよびクルマエビに比べて低酸素耐性が高く、この耐性の差は、おそらくヨシエビの生息域が湾奥の汽水域の砂泥底であり (Yamochi et al., 1995; 片山ら, 2001)、他の2種との生息域の違いによる可能性がある。

姜・松田 (1993) は、ガザミの稚ガニに変態後2週間以上飼育したものとヨシエビの稚エビに変態後3週間以上飼育したものをを用い、低酸素耐性を調べているが、こちらは無酸素環境 ($0.20\text{--}0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) でガザミの生存日数が1.5日 (36時間) およびヨシエビの生存日数は1.3日 (32時間) であり、明らかに今回の実験のガザミ稚ガニ期およびヨシエビ稚エビ期の低酸素耐性より高い。このことから、さらに成長するにつれ、低酸素耐性は高まると考えられる。一方、Yamochi et al. (1995) はヨシエビ、クルマエビおよびガザミの稚エビ・稚ガニ期で低酸素耐性実験を行い、24時間 LC_{50} をヨシエビ： $0.50\text{--}0.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、クルマエビ： $1.00\text{--}1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ およびガザミ： $0.63\text{--}0.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ と報告している。この実験に使用した稚エビ・稚ガニ期は、ヨシエビで体長 $25\text{--}48 \text{ mm}$ 、ガザミの甲幅 $47\text{--}68 \text{ mm}$ (本実験の稚ガニ甲幅は 7.93 mm) およびクルマエビ $27\text{--}50 \text{ mm}$ と3種とも本実験に使用した個体 (Table 1) よりかなり成長が進んでいた。したがって、稚エビ・稚ガニは成体に比べて低酸素耐性が低く (Erikson and Baden, 1997; Rosas et al., 1999)、成長するにつれて低酸素耐性が高くなることが示唆される。

浮遊幼生期は形態的に成体とは異なっており、生活史の中で低酸素耐性が最も低い時期と考えられる。これらの浮遊幼生が実際の海域での貧酸素水塊から受ける悪影響とし

ては以下のように考えられている。例えばガザミおよびシャコの浮遊幼生は昼間中底層に留まり、夜間表層に移動すると言う日周鉛直移動を行う (千田, 1967; 姜ら, 1993; Kodama et al., 2006)。その結果、貧酸素水塊が底層で発達する夏期には、これらの浮遊幼生は底層で生存できなくなり、昼間でも底層に移動せずに終日表層に留まる。そのため、捕食の危険や餌料を巡る競争にさらされ、着底間際の浮遊幼生では着底出来ずに浮遊期間を延長すること等により、生残率が著しく低下する可能性が高い (中田, 1986; Baker and Mann, 1992; Tankersley and Wieber, 2000; Kodama et al., 2006)。Rothlisberg (1982) はクルマエビ科のノープリウス期からポストラーバ期までの日周鉛直移動を調べ、昼間底層に夜間表層に分布するパターンを見だし、この傾向は成長が進んだ発育段階ほど顕著に現れ、この日周鉛直移動のパターンはその場の流れを利用し、沖合の産卵場から沿岸の生育場へと移動するためとしている。この場合も底層に貧酸素水塊が形成され、幼生が底層に分布できなくなれば、幼生が無事に沿岸域の生育場にたどり着けず、無効分散となってしまうであろう。

本研究で求めた LC_5 を統計学的に意味のある数値とするには斃死率5%前後にさらに多くの実測値が必要であるが、本研究から、実験に用いた各種の初期生活史段階の中で最も低酸素耐性が低い LC_5 (24時間) を抽出すると、ガザミおよびクルマエビで約 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (稚ガニ・稚エビ期) およびヨシエビで約 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (ポストラーバ期) 程度であった。以上のことから、これらの水産上重要な甲殻類の再生産の場を確保する海域の溶存酸素濃度は $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、少なくとも $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上が有効であると推測される。

謝 辞

本実験の実施には両備てい園記念財団評議員小嶋光浩氏に多大なる協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。また、供試生物の入手に便宜を図って頂いた愛知県水産振興基金栽培漁業部 (愛知県栽培漁業センター) の向井良吉部長、河根三雄生産課長、水藤勝喜主査、小椋友介技師、柘植朝太郎技師に感謝する。本研究は独立行政法人国立環境研究所委託業務「平成25年度甲殻類の初期生活史段階に及ぼす貧酸素水塊の影響評価」において実施された。

引用文献

- Baker, S. M. and R. Mann (1992) Effects of hypoxia and anoxia on larval settlement, juvenile growth, and juvenile survival of the Oyster *Crassostrea virginica*. *Biol. Bull.*, **182**, 265–269.
- Chu, K. H. and N. N. Ovsianico-Koulikowsky (1994) Ontogenetic changes in metabolic activity and biochemical composition in the shrimp, *Metapenaeus ensis*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **183**, 11–26.
- Chu, K. H., C. C. Sze and C. K. Wong (1996) Swimming behaviour during the larval development of the shrimp *Metapenaeus ensis* (De Haan, 1844) (Decapoda, Penaeidae). *Crustaceana*, **69**, 368–378.
- Eriksson, S. P. and S. P. Baden (1997) Behavior and tolerance to hypoxia

- in juvenile Norway lobster (*Nephrops norvegicus*) of different ages. *Mar. Biol.*, **128**, 49–54.
- 石田基雄・青山高士 (2012) 伊勢・三河湾における水質変化と漁獲量変動について. *海洋と生物*, **34**, 149–157.
- 蒲原 聡・和久光靖・山田 智 (2012) アサリ浮遊幼生の貧酸素耐性. *愛知水試研報*, **17**, 27–30.
- 蒲原 聡・山田 智・曾根亮太・堀口敏宏・鈴木輝明 (2013) 貧酸素水塊がアサリ浮遊幼生の遊泳停止と沈降後のへい死に及ぼす影響. *水産海洋研究*, **77**, 282–289.
- 姜 柱賛・松田 治 (1993) 有用甲殻類3種の無酸素と硫化水素に対する耐性. *J. Fac. Appl. Biol. Sci. Hiroshima Univ.*, **32**, 71–78.
- 姜 柱賛・松田 治・山本民次 (1993) 広島湾の貧酸素と硫化水素がガザミ幼生の初期発達段階に及ぼす影響. *J. Fac. Appl. Biol. Sci. Hiroshima Univ.*, **32**, 61–70.
- 片山幸恵・中川 清・中川浩一・池浦 繁・江藤拓也 (2001) 豊前海における幼ヨシエビの生態について. *福岡水海技セ研報*, **11**, 11–16.
- Hudinaga, M. (1942) Reproduction, development and rearing of *Penaeus japonicus* Bate. *Japan. J. Zool.*, **10**, 305–393.
- Kodama, K. and T. Horiguchi (2011) Effects of hypoxia on benthic organisms in Tokyo Bay, Japan: A review. *Mar. Poll. Bull.*, **63**, 215–220.
- Kodama, K., T. Horiguchi, G. Kume, S. Nagayama, T. Shimizu, H. Shirai-shi, M. Morita and M. Shimizu (2006) Effects of hypoxia on early life history of the stomatopod *Oratosquilla oratoria* in a coastal sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **324**, 197–206.
- 黒田信郎・藤田弘一 (2006) 伊勢湾と三河湾の貧酸素水塊の短期変動及び長期変動の比較. *愛知水試研報*, **12**, 5–12.
- 中田尚宏 (1986) 東京湾におけるシャコ幼生の分布について. *神水試研報*, **7**, 17–22.
- Ronquillo, J. D. and T. Saisho (1993) Early developmental stages of greasyback shrimp, *Metapenaeus ensis* (de Haan, 1844) (Crustacea, Decapoda, Penaeidae). *J. Plankton Res.*, **15**, 1177–1206.
- Rosas, C., E. Martinez, G. Gaziola, R. Brito, A. Sanchez and L. A. Soto (1999) The effect of dissolved oxygen and salinity on oxygen consumption, ammonia excretion and osmotic pressure of *Marsupenaeus setiferus* (Linnaeus) juveniles. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **234**, 41–57.
- Rothlisberg, P. C. (1982) Vertical migration and its effect on dispersal of Penaeid shrimp larvae in the Gulf of Carpentaria, Australia. *Fish. Bull.*, **80**, 541–554.
- 千田哲資 (1967) 瀬戸内海におけるシャコ幼生の出現と垂直分布. *日水誌*, **33**, 508–512.
- 曾根亮太・蒲原 聡・山田 智・二ノ方圭介 (2013) 2012年夏季の三河湾における貧酸素水塊に対する底生性魚介類の分布及び1986年調査との比較. *愛知水試研報*, **18**, 21–32.
- 鈴木輝明 (2013) 三河湾再生の実現に向けて. *River Policy Network*, **10**, 27–31.
- Tankersley, R. A. and M. G. Wieber (2000) Physiological responses of postlarval and juvenile blue crabs *Callinectes sapidus* to hypoxia and anoxia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **194**, 179–191.
- Widdows, J., R. I. E. Newell and R. Mann (1989) Effects of hypoxia and anoxia on survival, energy metabolism, and feeding of Oyster larvae (*Crassostrea virginica*, Gmelin). *Biol. Bull.*, **177**, 154–166.
- Yamochi, S., H. Ariyama and M. Sano (1995) Occurrence and hypoxic tolerance of the juvenile *Metapenaeus ensis* at the mouth of the Yodo River, Osaka. *Fish. Sci.*, **61**, 391–395.
- Yatsuzuka, K. and K. Sakai (1982) The larvae and juvenile crabs of Japanese Portunidae (Crustacea, Brachyura). II. *Portunus (Portunus) trituberculatus* (MIERS). *Rep. Usa mar. biol. Inst.*, **4**, 9–26.