

大阪湾湾奥域の環境特性と大型底生動物群集の時系列変化

矢持 進* ・小田一紀** ・柳川竜一***
山根和夫**** ・田代孝行***** ・新瀬幾恵*****

1. はじめに

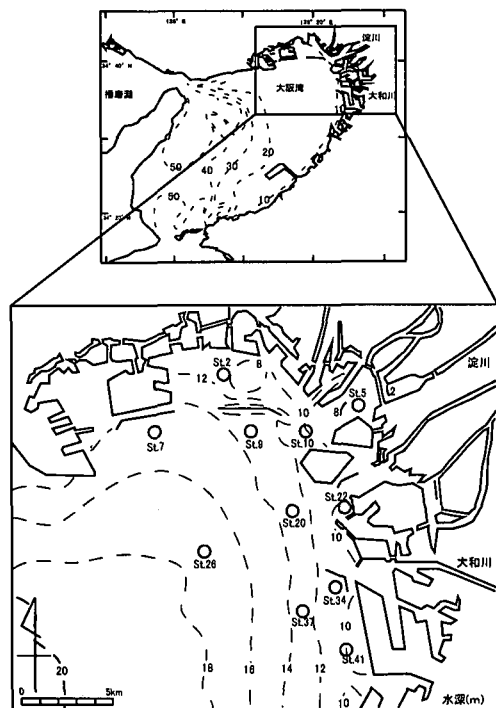
大阪湾湾奥域に位置する淀川河口をはじめとして、汽水域は生物生産に富み、多様な環境機能を提供する場であった。だが、高度経済成長期以降の沿岸海域の埋立や沿岸陸域の開発によって社会および都市基盤が整備され、我々の生活が物質的に豊かになった反面、人間を含む生物の生存にとって必要不可欠な「環境圏」の機能低下を招いてしまった。大阪湾についても閉鎖的な地形特性と湾内への汚濁負荷量の増大によって富栄養化が進行し、透明度の低下や赤潮の発生が社会問題となっている。そして、春季には魚類・甲殻類をはじめとした海洋生物が多種・多数生息するものの、夏季には海底近くの貧酸素化によって生物相が貧困になるなど生態系の破壊が一層進んできているため、その原因の究明と保全・修復のための技術的手法を見いだす研究が急務となっている。

本研究では、環境劣化が顕著である夏季の大阪湾湾奥域に的を絞り、詳細な現地調査の結果を基に、貧酸素化が生物群集の構造に及ぼす影響過程を検討するとともに、種多様度や類似度などの統計解析手法を用いて大型底生動物を保全するための酸素濃度について考察を加えた。

2. 調査概要および解析手法

2.1 調査の方法

大阪湾湾奥域にあたる兵庫県西宮市地先から大阪府泉大津市で囲まれた海域(約 170 km²) 内の 11 定点(図一1)を対象に、1999 年 4 月下旬から 10 月下旬にかけて海底上 0.5 m 層の溶存酸素を 1~13 日間ごとに計 42 回、溶存酸素計(YSI 社製, 59 型)を用いて測定した。また、大型底生動物(メガベントス)についても同じく 11 定線で 5~24 日間ごとに計 14 回、3 mm 目のカバーネットを



た。

$$I = \frac{2c}{2ab - (a+b)c} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $a, b: \alpha, \beta$ それぞれ共通する種類数
 $c: \text{地点 } \alpha, \beta \text{に共通する種類数}$

$$I(A_1 \dots A_m: B_1 \dots B_n) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(A_i B_j) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $A_i: \text{群集 } A \text{中の } i \text{ 地点 } B_j: \text{群集 } B \text{中の } j \text{ 地点}$

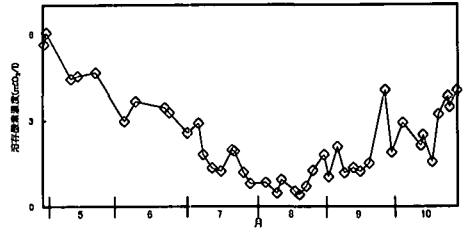
$$H' = - \sum_i \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} \dots\dots\dots (3)$$

ここで $N: \text{総個体数 } n: \text{ある種類の個体数}$

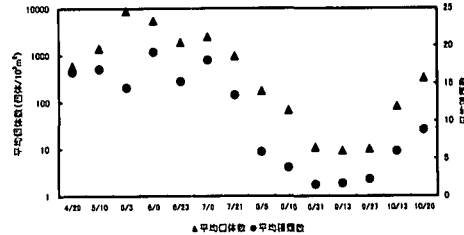
3. 結果及び考察

3.1 種類数および個体数の推移

図一2は、底層水の平均溶存酸素濃度の変化を、図一3は、大型底生動物の平均個体数および種類数の推移を表している。なお、この場合の溶存酸素濃度の平均値は各定線が代表する海域面積の違いを加味して湾奥域を11のブロックに分け、面積的な重みをつけた平均溶存酸素濃度として表した。また表一には、各調査日毎に採取個体数が多かった大型底生動物上位3種を示した。底層水の溶存酸素濃度は4月29日時点で6.1 mlO₂/lであったが漸減し、その後8月20日には0.42 mlO₂/lで最も低くなった。そしてこの後再び増加し、10月29日には4.0 mlO₂/lまで回復した。図一2から酸素濃度の日間増減率を推定すると、4月29日から8月20日の間は約0.046 mlO₂/l・日の速度で酸素が減少し、8月20日から10月29日は0.038 mlO₂/l・日の速度で回復したことになる。種類数と個体数については、4月26日から7月6日の間は平均種類数が18種前後で推移し、平均個体数は600～8800 個体/10³m²で推移しているが、その後急激な減少が見られ8月31日には平均種類数は1.5種類、平均個体数も3.0 個体/10³m²とほぼ無生物状態となった。なお、種類数と個体数の急激な低下が起こったと考えられる7月7日から8月5日の酸素濃度は0.81-1.98 mlO₂/lであり、このことから2 mlO₂/lを切ると両者が低下すると考えられた。一方、9月下旬以降の酸素濃度の増加に対応して、10月には平均種類数が6種、平均個体数も83 個体/10³m²とやや生物相が回復する傾向がみられた。ただ、この場合でも生物相の回復は貧酸素化の影響がある7月下旬から8月上旬頃の水準と同程度であった。7月から8月にかけて特に優占する底生動物はハゼ類、ヨシエビ、シャコ、ヒモムシ目、ユムシ綱、クシノハクモヒトデなどとシズクガイであるが(表一1)、このうちシズクガイは酸素濃度が0.9 mlO₂/l程度であっても、それが間欠的であるならば十分耐える能力を有するとされ



図一2 底層水の溶存酸素濃度の変化
(1999年4月28日～10月29日)



図一3 大型底生動物の平均種類数・個体数の推移
(1999年4月29日～10月26日)

表一1 調査日別個体数優占上位3種

年月日	生物種		
	1	2	3
1999年 4月29日	ハタタテメリ	スジハゼ	マコガレイ
5月10日	ケブカエンコウガニ	キセウタガイ	フタホシシガニ
6月3日	スジハゼ	ケブカエンコウガニ	ハタタテメリ
6月8日	アカハゼ	ケブカエンコウガニ	シャコ
6月23日	アカハゼ	スジハゼ	シャコ
7月6日	シズクガイ	スジハゼ	シャコ
7月21日	スジハゼ	シャコ	アカハゼ
8月5日	シャコ	ヨシエビ	クシノハクモヒトデ
8月18日	ヒモムシ目	ユムシ綱	シャコ
8月31日	ヒモムシ目	シャコ	ユムシ綱
9月13日	ヒモムシ目	シャコ	ユムシ綱
9月27日	サルエビ	ヒモムシ目	スベスベエビ
10月13日	スベスベエビ	サルエビ	ユムシ綱
10月26日	スベスベエビ	サルエビ	シャコ

※シズクガイは大型底生動物ではないが、個体数順位が1位であるため記載した

る二枚貝であり(玉井, 1993), ヨシエビは25°Cにおける半数致死酸素濃度が0.35-0.60 mlO₂/l以下(Yamochi et al., 1995), 同じくシャコは酸素濃度が0.75 mlO₂/lや0.50 mlO₂/lでも約半数が24時間後も生存するなど貧酸素に強い動物である(矢持ら, 未発表)。以上のことから大阪湾湾奥域では初夏から盛夏にかけて酸素濃度が低下するに伴い、徐々に貧酸素に弱い動物が逃避したり、死亡して個体群密度が低下し、結果的に貧酸素耐性に優れた特定の生物種のみが分布するようになるといえる。

3.2 類似度指数の推移

図一4に類似マトリックスから作成された樹形図と、それから特徴づけられる大阪湾湾奥域での各大型底生動物群集の分布状況を示す。また、表一2にはその時の各群集の主要構成種を記載した。図一4と表一2から、春季は

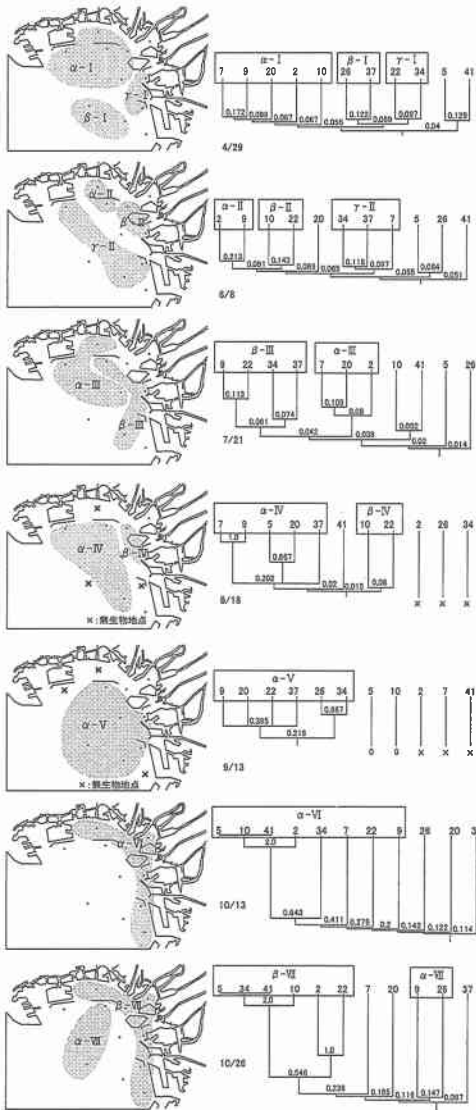


図-4 大型底生動物群集と樹形図の変遷

特有のカニ類、エビ類や魚類をそれぞれ主要種とし、比較的多種多様な種個体群から構成される複数の大型底生動物群集の存在することがわかる。群集は、その後夏季に移り変わる過程で、その数が3つから2つへと減少し、各群集の面積増加が認められた。そして8月から9月には、大型底生動物が極めて貧困で、群集を構成する生物種が数種類以下であるという特徴を持ったクラスターが対象海域の大部分を覆うようになり、無生物あるいは出現種が1種類といった海域も現れた。ただ、酸素濃度がやや回復する10月中下旬には無生物海域が消滅したり、種組成が異なる複数の群集が見られた。このように、大阪湾湾奥域では貧酸素化の進行とともに、種構成におい

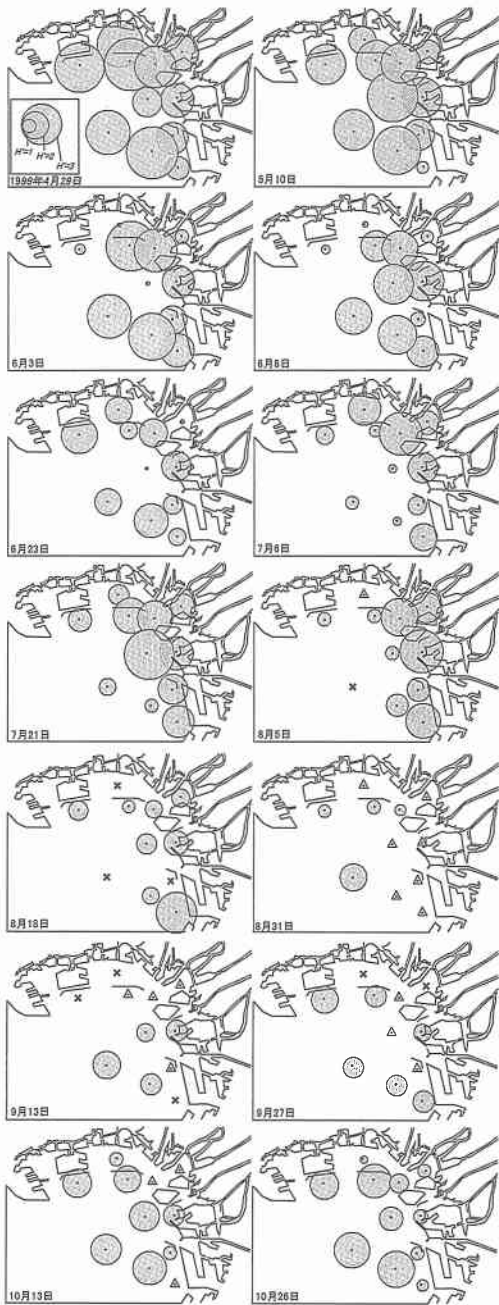
表-2 各群集の主要種

年月日	群集 No.	主 要 種
1999年 4月29日	α-I	イボイチョウガニ, フタホシシガニ
	β-I	アカエビ, アカウオ
	γ-I	フタホシシガニ
6月8日	α-II	イボイチョウガニ
	β-II	特になし, 生物相が貧困
	γ-II	カニ類
7月21日	α-III	特になし, 生物相が貧困
	β-III	テナガテツボウエビ, イトヒキハゼ
8月18日	α-IV	ヒモムシ目
	β-IV	シャコ, スジハゼ
9月13日	α-V	ヒモムシ目
10月13日	α-VI	スベスベエビ
10月26日	α-VII	テナガゴブシガニ
	β-VII	スベスベエビ, サルエビ

て特徴のある独立した大型底生動物群集の数が減少し、貧酸素化が著しい盛夏は無生物域や特定の生物から構成される極めて単純な群集になるが、海水の鉛直循環が再開される秋季には群集の数もやや増加することが分かった。

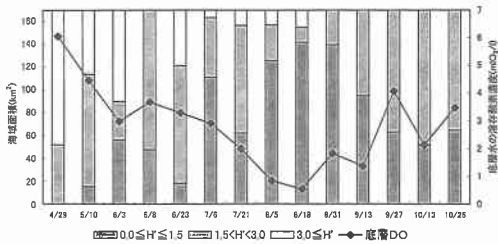
3.3 種多様度指数の推移

種多様度の季節変化を図-5に示す。この図において円の大きさは多様度の高さを表し、また、△は種多様度指数が0であり（出現種類数が1）、×は無生物であることをそれぞれ示している。なお、平均多様度を計算するにおいて、出現種類数が0と1の海域は指数を0として計算した。図から4月下旬から5月は平均種多様度指数が2.65から2.96と大きく、比較的生物相が豊富である。また、6月前半も大阪湾や堺泉北港地先を中心に多様な生物相が残っているが、7月に入ると沖合域の多様度が小さくなり、調査した全定線における種多様度の平均値が7月21日は2.12に減少した。そして、8月上旬には無生物海域（定線26）と出現種類が1種の海域（定線2）がそれぞれ確認された。このような生物相の貧困な海域は、その面積に増減があるものの10月13日まで続いた。特に8月下旬から9月中旬までについては、調査した海域の64%が無生物か出現種類が1種と底生動物相が極めて貧困であった。海域的には西宮防波堤内の生物相劣化が著しく、その期間は約70日に及んでいる。大型底生動物相の回復は、9月下旬から10月上旬にかけて沖合海域から始まり、10月下旬には4月調査時の約1/2まで平均種多様度が回復した。この晩夏から秋季における沖合域での生物相の回復にはエスチュアリー循環に基づく大阪湾中南部底層水の進入（山根ら, 1998）と底層酸素環境の改善、ならびに大型底生動物幼若個体の補給や移動（風呂田, 1991）と定着・成長が関与していると推察される。そして沖合域で大型底生動物相が改善された後、より沿岸に近い港湾海域での回復が起こると考えられた。



図一五 種多様度の推移

底層水の溶存酸素濃度と大型底生動物の多様性を検討するため、各調査日の各調査定線ごとに多様度指数を、 $H' \geq 3.0$ (生物相が比較的豊富)、 $1.5 < H' < 3.0$ (中程度の生物多様性)、 $0.0 \leq H' \leq 1.5$ (生物相が貧困) に分けるとともに、それぞれの領域の海域面積を求めて底層水の溶存酸素濃度と比較してみた (図一六)。この図から夏季の底層における溶存酸素濃度の減少に対応して、多様度



図一六 多様度別海域面積と溶存酸素濃度の推移

の低い海域面積の増大することは明らかで、4月の時点では多様度指数 1.5 以下の海域は存在しなかったが、8月下旬にはこの生物相の貧困な海域が調査対象海域全体の 80% 強にあたる約 140 km² にまで広がっていた。生物相が比較的豊富である $H' \geq 3.0$ の海域面積は酸素濃度が 3.0-3.3 mlO₂/l を下回った後に激減し (例えば 6 月 2 日: 2.97 mlO₂/l, 6 月 23 日: 3.28 mlO₂/l), 8 月下旬になると全く存在しなくなった。7 月上旬から 8 月末の底層水の酸素濃度は 0.42-2.91 mlO₂/l であり、とりわけ多様度の高い海域が全く消失し、多様度指数 1.5 以下の海域面積が最高値に達する 8 月下旬については、8 月 18 日から 23 日の酸素濃度が 0.42-0.72 mlO₂/l と 1.0 mlO₂/l を下回る値に低下していた。一方、多様度の回復については、多様度指数 3.0 以上の海域が出現しないことなどから 10 月下旬においても充分とは言えないが、8 月末以降 10 月中下旬にかけて大型底生動物相の貧弱な海域が着実に減少した。この間は底層水の溶存酸素濃度が 1.1-4.0 mlO₂/l であり、酸素濃度が 1.0 mlO₂/l を下回ることがなかった。我が国の温帯域において、富栄養な閉鎖性内湾に分布する底生動物が貧酸素により逃避や死亡などの影響を受ける濃度については、1.0 mlO₂/l (森ら, 1973), 1.4 mlO₂/l 前後 (風呂田, 1991; 有山ら, 1997; 今林, 1998; 古谷, 1999) ならびに 2.0 mlO₂/l (小林, 1993) などの数値が報告されている。Diaz ら (1995) は貧酸素が底生動物群集に及ぼす影響について欧米での研究成果をとりまとめ、底生動物の死亡は 1 mlO₂/l で見られ、さらにその大量への死が 0.5 mlO₂/l から始まると述べているが、この値は上記の数値よりやや低い。この違いはおそらく研究対象となった欧米の内湾の水温が我が国のそれより低いことに一因すると考えられる。ところで、柳 (1989) は正常な底生動物の分布が危うくなるのは 2.5 mlO₂/l 以下としており、さらに玉井 (1990) は大阪湾での観測結果と室内実験などから、ほぼ正常な底生動物群集の維持には周年 3.0 mlO₂/l 以上の酸素濃度が望ましく、2.0 mlO₂/l 以下では汚染指標種といえども生活史を完結できないと述べている。一方、矢持ら (1998) は大阪湾産底生魚類の貧酸素耐性や呼吸頻度に関する

実験結果を用いて、浅海域の酸素環境としては1日以上継続して $1.6 \text{ mlO}_2/\text{l}$ を下回ることがなく、夏季の月平均として $2.6 \text{ mlO}_2/\text{l}$ 以上に保持することが望ましいと報告している。ただ、これらの研究の多くにおいて、詳細かつ継続的な底生動物群集の変遷と底層水の酸素濃度の追跡を行う必要があると述べられている。

本野外調査では1999年4月末から10月末の期間に11定点で底層水の酸素濃度が計42回測定され、また14回にわたって大型底生動物が採取された。そして得られた結果を解析したところ、大型底生動物群集の多様性が劣化し始める酸素濃度はおおよそ $3 \text{ mlO}_2/\text{l}$ であり、約 $2 \text{ mlO}_2/\text{l}$ で種類数と個体数の低下が顕著になり、さらに約 $1 \text{ mlO}_2/\text{l}$ で群集が壊滅的な打撃を受け、無生物あるいはそれに近い状況になることが明らかとなった。

4. ま と め

大阪湾湾奥域底層の酸素濃度の変化と大型底生動物の群集構造の移り変わりを明らかにするため詳細な現地調査を行ない、その結果について統計解析を行った。

(1) 1999年4月下旬～10月下旬に行った調査から、春季(4月～5月)は十分な酸素濃度を保持し、比較的多様な大型底生動物がみられるが、8月中旬は酸素濃度が $0.42 \text{ mlO}_2/\text{l}$ に低下した後、8月末には平均種類数が1.5種類、平均個体数が $3.0 \text{ 個体}/10^3 \text{ m}^2$ となり、生物の生息が困難な環境となった。一方、9月下旬以降の酸素濃度の増加に対応して、10月にはやや生物相の回復する傾向がみられた。ただ、この場合でも種類数と個体数は貧酸素化の影響がある7月下旬から8月上旬頃と同程度であった。

(2) Mountfordの類似度指数を用いてクラスター分析を行ったところ、春季に特徴的な複数の大型底生動物群集は夏季になると一つになり、群集の単一化が起こるが、秋季に再び群集の複数化が確認された。

(3) 種多様度指数の時系列変化から、春季は $H' = 2.96$ と生物相が豊かであるが、酸素濃度の減少に対応してこの値も減少した。そして8月下旬には $H' = 0.43$ となり、湾奥域の約8割強がほぼ無生物化した海域となった。本

野外観測結果より、貧酸素が底生生物群集の多様性の劣化を引き起こす酸素濃度は約 $3 \text{ mlO}_2/\text{l}$ 、壊滅的な打撃を及ぼす酸素濃度は $1 \text{ mlO}_2/\text{l}$ であったため、富栄養な閉鎖性内湾において夏季の底層水の酸素濃度として大型底生動物を保全するために保持すべき濃度は $3 \text{ mlO}_2/\text{l}$ であると考えられた。

参 考 文 献

- 有山啓之・矢持 進・佐野雅基 (1997): 大阪湾奥部の大型底生動物の動態について 2. 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, pp. 83-91.
- 今林博道 (1998): 貧酸素下のベントスの生残戦略, 月刊海洋, 第30巻, pp. 125-132.
- 木元新作 (1976): 動物群集研究法 I - 多様性と種類組成 -, 共立出版, pp. 54-151.
- 小林良則 (1993): 東京湾における低酸素水域の分布と小型底びき網の漁獲量の関係, 神水試研報, 第14巻, pp. 27-39.
- 玉井恭一 (1990): 海面養殖と養魚場環境, 恒星社厚生閣, pp. 69-78.
- 玉井恭一 (1992): シズクガイの貧酸素耐性, 日本水産学会誌, 第59巻, pp. 615-620.
- 古谷純一 (1999): 東京湾奥部において底生生物が受ける貧酸素の影響, 月刊海洋 東京湾の海洋環境-貧酸素水塊一, pp. 504-514.
- 風呂田利夫 (1991): 東京湾内湾底生動物の生き残りと繁栄, 沿岸海洋研究ノート, 第28巻, pp. 160-169.
- 森 勇・徳永武雄・桑岡亦好・藤木哲夫 (1973): 大村湾の底層貧酸素水と底生有用水族の分布, 日本水産学会誌, 第39巻, pp. 753-758.
- 柳 哲雄 (1989): シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ, 沿岸海洋研究ノート, 第26巻, pp. 141-145.
- 山根伸之・寺口貴康・中辻啓二 (1998): 大阪湾湾奥部のエスチュアリー一循環と栄養塩収支, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1061-1065.
- 矢持 進・有山啓之・佐野雅基 (1998): 大阪湾湾奥沿岸域の環境修復一堺泉北港干潟造成予定地周辺の水質・底質ならびに底生動物相とマコガレイの貧酸素に対する応答一, 海の研究, 第7巻, pp. 293-303.
- Diaz, R. J. and R. Rosenberg (1995): Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna, Oceanography and marine biology: an annual review, Vol. 33, pp. 245-303.
- 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., Vol. 61, pp. 391-395.