

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No.643 Mar. 1989

ヨツバネスピオの貧酸素耐性と内湾海底における夏期  
無生物域の発生条件

細川恭史  
堀江毅

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	3
2. 閉鎖性内湾の底生生物相の特徴 .....	3
2.1 内湾における底生生物の分布 .....	3
2.2 大阪湾奥における底生生物の分布と季節変化 .....	4
2.3 東京湾奥における底生生物の分布と季節変化 .....	10
2.4 ヨツバネスピオの分布上の特徴 .....	11
3. ヨツバネスピオの貧酸素耐性 .....	13
3.1 ヨツバネスピオの生活史と生態的な特徴 .....	13
3.2 底生生物の貧酸素耐性に対する既応の研究 .....	13
3.3 ヨツバネスピオの貧酸素耐性実験 .....	14
3.4 ヨツバネスピオのリン摂取速度測定実験 .....	25
3.5 ヨツバネスピオの体組成・体長・乾重量 .....	32
3.6 ヨツバネスピオの摂食と貧酸素耐性のまとめ .....	36
4. おわりに .....	37
参 考 文 献 .....	38
記 号 一 覧 .....	38
省略記号一覧 .....	39

**Tolerance of *Paraprionospio* sp. to Low  
DO Concentration and Condition on  
Summer Defaunation due to Oxygen Depletion  
in Inner Bay**

**Yasushi HOSOKAWA\***

**Takeshi HORIE\*\***

**Synopsis**

The growth of the temporal defaunation on the bottom sediment often occurs in eutrophic inner bays during oxygen depletion period in summer. *Paraprionospio* sp., A-type is selected as a typical species, which is well known as an organic pollution indicator and a dominant polychaeta in most eutrophic bays. Its physiological tolerance to low oxygen concentration is examined to get the dose-response relationship curve. At 20°C, the respiration rate starts decreasing when D.O. concentration becomes below 3 mg/l. But high survivorship is observed for the low oxygen condition. The tolerance limit is estimated as a function of exposure time like "D.O. concentration below 2 mg/l maintained for more than 2 days." Reduced substances on the bottom surface under anaerobic condition might be more toxic rather than oxygen depletion itself in bottom water.

**Key Words :** *Paraprionospio* sp., oxygen depletion bio-assay, phosphorus consumption, defaunation,

---

\* chief of Coastal Disaster Prevention Laboratory, Hydraulic Engineering Division  
\*\* chief of Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

# ヨツバナスピオの貧酸素耐性と内湾海底における夏期無生物域の発生条件

細川 恭史\*

堀江 毅\*\*

## 要 旨

富栄養化した内湾湾奥では、夏期の成層の発達とともに、しばしば底層水の貧酸素化が見られる。酸素の欠乏により、海底面上の生息動物が死滅し、無生物域となる事がある。劣悪な条件下で卓越して生息する底生動物ヨツバナスピオ(A型) (*Paraprionospio* sp. A type)を選び、この貧酸素に対する生理応答を調べた。

ヨツバナスピオは、酸素濃度が3 mg/lを下まわると、呼吸速度を低下させ活性を落とす。しかし、1 mg/l以下の低酸素条件でも即死はせず、1日間から数日間は生き延びることがわかった。また、ヨツバナスピオの餌の摂食活動の酸素濃度依在性は明確には把握できなかった。酸素が豊富な20℃の条件では、有機物の摂食・代謝を通じ、湿重量1gあたり毎時0.04~0.1mgのCODを分解・除去しているが、死滅すると湿重量1gあたり約3gのCOD負荷となる事がわかった。

ヨツバナスピオの夏期の死滅は、単に酸素欠乏による窒息死よりも同時に底泥中から生成される嫌気性毒物による影響が大きい可能性がある。

キーワード：ヨツバナスピオ、貧酸素化、生物検定、リン代謝、無生物域

## 1. はじめに

富栄養化の進行した閉鎖性内湾では、夏期においては底質が腐敗し場所によっては微生物類を除いて生物の生息が見られなくなることもある。本論では内湾腐敗底泥に最後まで生息し生き残っているヨツバナスピオをとりあげ、この生物種の生理特性と環境変化に対する応答性を調べている。

港湾の水質の維持は、市民が港湾で過ごす時間が増えるにつれてますます重要な課題となっている。特に、内湾湾奥では、背後都市からの汚染負荷により水質・底質の悪化がより進行しているが、一方では、背後都市市民のやすらぎの場としての水際線の確保が強く要請されてきている。海運・水産業・スポーツ・アメニティ供給などの多目的な利用の場として水際線を活用する時には、利用目的に適した水質の確保が不可欠なものとなる。内湾湾奥での無生物域の解消のため、覆砂・浚渫等の土木的手段を含めて対策が早急に検討される必要がある。本

研究は、対策検討のための基礎的知見を得るために実施された。

## 2. 閉鎖性内湾の底生生物相の特徴

### 2.1 内湾における底生生物の分布

陸水域でも海水域でも、水底に住む生物を総称して底生生物と言う。水中を浮遊する浮遊生物をプランクトンと称し、遊泳生物をネクトンと称するように、底生生物もベントスと称せられる。ベントスは、汀線付近の潮間帯から外洋の深海底まで、底面もしくは水と固体との界面のあるところには広く存在している。大きさや生活が著しく異なる細菌類は除外して扱われることが多いが、植物も動物も底生生物としてまとめられている。光合成をするため、植物の存在は浅海域に限られ、深海では動物がほとんどである。生物の1個体の大きさも種々あり、分類に用いられるふるいの目でいくつかに分けられる。通常1mm目のふるい上に残るものをマクロベントスとし、0.5mm~0.04mm目を通過する微少なものをミク

\* 水工部 沿岸防災研究室長

\*\* 海洋水理部 海水浄化研究室長

ロベントス、両者の中間の大きさをメイオベントスと称して区別している。また、底面での生活のしかたによって表生生物と内生生物とに分けられる。表生生物は底面の表面上で生活するもので、カキやフジツボまたワカメのように表面に付着しているもの、エビやヒトデのように表面を移動するもの、流れ藻や流木などの浮遊物の表面付近に住んでいるカニや貝などに分けられる。一方、内生生物は、アサリなどの二枚貝やゴカイなどの多毛類が主たるもので海底面下の砂や泥の中に埋まって生活している生物である。底生生物のうち動物は、有機物を餌として捕食するが、海底面に沈積した微少有機物粒子や浮遊粒子を体中で河過し分別して捕食する河過食性のものの他に、少し大きな有機体や植物体をかじるものや他の底生生物を捕食するものなどがある。卵から成体までの体の成長段階に応じて、食性を変化させる種も多い。

自然界の底生生物は、互いに無関係・無秩序に生活しているのではなく、一定の種類が特定の環境に寄り集まり相互に影響しあっているひとまとまりの集合体をなして生活している。集合体内には、いくつかの生物種が一定の割合で存在し群集（コミュニティ）などとよばれている。群集内で卓越した個体数を有する生物種は優占種とよばれる。優占種や構成生物種の構成割合は、水深・塩分・水温・底質粒径・流速などにより変化し、類似した条件下では類似の群集型や構成になっている。水深の影響を強く受ける生物相では、水深レベルごとに類似の群集型を示し、群集型が水平に分布するようになる。群集内の種の構成や個体数は、場所や餌のとりあいや、他生物による捕食など、生物種間の相互の影響にも左右される。同時に、群集内の種の多様さや構成は、群集が存在している場所の環境条件によっても左右される。水温・塩分などの環境が厳しかったり、特異であると、そこに適応して生存できる生物種は限定され、群集内の種は特定の少種に限られるようになる。生息場所の汚染につれても種の多様さが減少するようになる。群集内の種の多様さを数値で定量的に表示し、場の環境条件や汚染物質濃度とつぎ合わせる試みがなされており、多様度の指数や表示方法にもいくつかの式が提示されている。

内湾での群集型は、水深と底質粒径とによって大きく区分されることが多い。これは、流入河川水や潮汐の影響で水深に従って水温・塩分・栄養塩濃度等の勾配があること、閉鎖的な海域から外洋へ開かれた海域まで波や流れに差異があり水の運動の差異により底質粒径や沈積有機粒子（餌料となる）の量などが変化すること、などの理由によるものと思われる。比較的外洋性が高い砂質底には、エビ・カニなどの甲殻類が多く、一方閉鎖的で

内湾性が高い泥質底には、ゴカイなどの多毛類や二枚貝が優占する。更に内湾湾奥部の海水の流動の少ない海底では泥分が卓越し、環流の中心や地形的な凹地では微細粒の沈積が促進され微細泥質底となっている。こうした海域では、薄質小型の二枚貝シズクガイ (*Theora*) や頭部に4対の羽根状のえらを有したヨツバネスピオ (*Prionospio*) などが優占することが多い。内湾性の強度（閉鎖性の強さ、底質の微細さ、塩分の低さなどで表わされる性質）という観点から1940年代ごろのわが国内湾の底生生物群集の群集型を分類した例<sup>1)</sup>を表-1に示す。内湾性は、弱内湾性、中内湾性、強内湾性の3つに区分けされている。強内湾性の分類中に、すでに *Prionospio* 群集や *Theora* 群集型の湾が見られる。

二枚貝なども含めて底生生物の多くは、水中に卵や精子を放出したり卵囊に包んで産卵するが、卵からふ化した幼生は水中を浮遊する。浮遊幼生は、水の動きに運ばれ渦流の中心部や離岸流頭などで沈積するため、こうした場所に高密度に幼生や幼稚体が生息することが報告<sup>2),3)</sup>されている。また、浮遊幼生は自己にとって好適な基質に接触するまで浮遊を続けようとするため、狭い範囲の好適場所に着底が集中することもある。従来、好適基質とは粒径によるものと思われていたが、むしろ砂や泥粒子表面の微生物相に反応するとも言われ、好都合な環境条件に特有な生物相や化学物質を選択しているものとも思われる。着底した幼稚体や幼生は、他の生物に捕食されたり十分に成長できなかつたりして急激に個体数が減少する。これを初期減耗とよぶ。着底地の環境条件が良好であれば初期減耗の率が低下し、その種の成体個体数をふやすことになる。こうした成長過程も、群集型を形成する要因となる。

## 2.2 大阪湾奥における底生生物の分布と季節変化

大阪湾は、西端を明石海峡、南に紀淡海峡に囲まれ、海域面積 1,400 km<sup>2</sup>、水容積 380 億 m<sup>3</sup>、平均水深 27 m の富栄養化の進んだ内湾である。海域面積の約 2/3 は水深 20 m 以上の海域で、紀淡海峡付近では水深 60 m を越す。図-1 に大阪湾の水深コンター図を示す。底質は、湾奥部から湾中央にかけて泥質であり、湾中央から流速のはいい海峡部にかけて砂質となっている。粒径の細い底質ほど、有機物含有量が高くなるが、海底表層（泥深 5 cm まで）の強熱減量と COD の分布<sup>4)</sup>を 図-2,3 に示す。強熱減量で 10% 以上、COD 濃度で 30 mg/g 以上の湾奥部ではほぼ泥質と考えられる。湾奥淀川などからの栄養塩の流入により、湾奥部では夏期に活発な有機物生産が行なわれている。生産された有機物は静穏な海域を徐々に沈降し底面に堆積する。また、淀川などの流入河川

表-1 我が国の内湾における各種のベントス群集型<sup>1)</sup>

弱内湾性群集	<p>好砂底生群集 (福岡湾湾口部)  <i>Molgula-Caprella</i> 群集 (的矢湾王湾部, 福岡湾湾口部, 七尾湾北湾, 同南湾湾口部, 由良湾湾口部)  <i>Corella-Ampelisca</i> 群集 (東京湾南部)  <i>Ampelisca</i> 群集 (多数の内湾の浅部, とくに砂底ないし砂混底)  <i>Cypridina</i> 群集 (諸磯油壺湾口)  <i>Ophiopholis</i> 群集 (東京湾)  <i>Lygdamis</i> 群集 (大阪湾の由良瀬戸と明石瀬戸, 鹿兒島-桜島瀬戸)  <i>Sclerocheilus</i> 群集 (伊勢湾口の深部)</p>
中内湾性群集	<p><i>Maldane</i> 群集 (田辺湾王湾部)  <i>Terebellides</i> 群集 (別府湾の一部)  <i>Terebellides-Maldane</i> 群集 (的矢湾水道部, 英虞湾湾口部, 五ヶ所湾)  <i>Cirratulus</i> 群集 (諸磯油壺湾湾央部)  <i>Cylichna</i> 群集 (七尾湾南湾)  <i>Pinnixa</i> 群集 (伊勢湾の浅底部, 七尾湾および東京湾の一部)  <i>Bechelia</i> 群集 (大阪湾の一部)</p>
強内湾性群集	<p><i>Telepsavus</i> 群集 (大阪湾奥部)  <i>Prionospio</i> 群集 (伊勢湾湾央部, 東京湾湾央部, 別府湾)  <i>Lucinoma</i> 群集 (別府湾湾央部)  <i>Theora</i> 群集 (山川港)  <i>Theora-Ampelisca</i> 群集 (伊勢湾湾奥部, 松永湾)  <i>Theora-Paphia</i> 群集 (五ヶ所湾奥)  <i>Theora-Sternaspis</i> 群集 (諸磯油壺湾の一部)  <i>Cerithium</i> 群集 (田辺湾支湾部, 勝浦湾の一部)  <i>Cardium-Dentalium</i> 群集 (英虞湾)  <i>Brachydontes</i> 群集 (的矢湾の伊雑浦区, 松永湾, 浦戸湾, 笠岡湾の一部)  <i>Brachydontes-Theora</i> 群集 (福岡湾の博多港区, 七尾湾の西部, 中ノ海)  <i>Brachydontes-Macoma</i> 群集 (松永湾)  <i>Tellina</i> 群集 (浦内湾および鹿兒島湾奥部)</p>
<p><i>Ampelisca</i> スガメソコエビ類, <i>Bechelia</i> 無足なまこ類の1種, <i>Brachydontes</i> [= <i>Musculus senhausia</i>] ホトトギス, <i>Caprella</i> われから類, <i>Cardium</i> [= <i>Fulvia hungerfordi</i>] チゴトリガイ, <i>Cerithium</i> [= <i>Proclava pfefferi</i>] ヒメカニモリ, <i>Cirratulus</i> ミズヒキゴカイ類, <i>Corella</i> [<i>japonica</i>] ドロボヤ, <i>Cylichna</i> [<i>yamakawai</i> = <i>Cylichnatys angusta</i>] カミスジカイコガイダマシ, <i>Cypridina</i> [<i>hilgendorffii</i>] ウミホタル, <i>Dentalium</i> [<i>octangulatum</i>] ヤカドツノガイ, <i>Lucinoma</i> [<i>annulata</i>] ツキガイモドキ, <i>Lygdamis</i> [<i>giardi</i>] ハナカンムリゴカイ, <i>Macoma</i> [<i>incongrua</i>] ヒメシラトリ, <i>Maldane</i> タケフシゴカイ類, <i>Molgula</i> ほやの1種, <i>Ophiopholis</i> [<i>mirabilis</i>] マダラクモヒトデ, <i>Paphia</i> [<i>undulata</i>] イヨスグレ, <i>Pinnixa</i> [<i>rathbani</i>] ラスパンマメガニ, <i>Prionospio</i> [<i>pinnata</i>] ヨツバナネスピオ, <i>Sclerocheilus</i> 多毛類の1種, <i>Sternaspis</i> [<i>scutata</i>] ダルマゴカイ, <i>Tellina</i> [<i>juvenilis</i>] ユウシオガイ, <i>Terebellides</i> [<i>stroemii</i>] タマガシフサゴカイ, <i>Telepsavus</i> [<i>costarum</i>] アンビキツバサゴカイ, <i>Theora</i> [<i>lubrica</i>] シズクガイ。</p>	

の河床にも有機微細粒子が沈積するが、河床の有機粒子は高水時に海域沖合へと流される。こうして、湾奥部は、微細有機物粒子に富む底質となっている。

有機質底泥は、夏期の昇温時に分解反応が進行し直上水の酸素を消費する。大阪湾の海底上1mの深さの夏期の溶存酸素(DO)濃度分布を測定した値<sup>4)</sup>を図-4に示す。この分布図は、4ヶ年の夏期の測定値を平均したもので、平均的な分布の状況がわかる。神戸と泉佐野を結

ぶ水深20m以浅部では、2mg/lを切る低濃度となっている。特に、神戸~大和川河口より湾奥では1mg/lを下まわる貧酸素状況であることがわかる。一方、湾奥表層ではこの時期8mg/l以上の高濃度を示し、過飽和となることもある。同じ地点でも、夏期には表層と底層とで大きな濃度差がある。

DO濃度は季節変動が大きい。西宮沖(水深-15m)の海底上1m位置での周年変化測定例を図-5,6に示す。

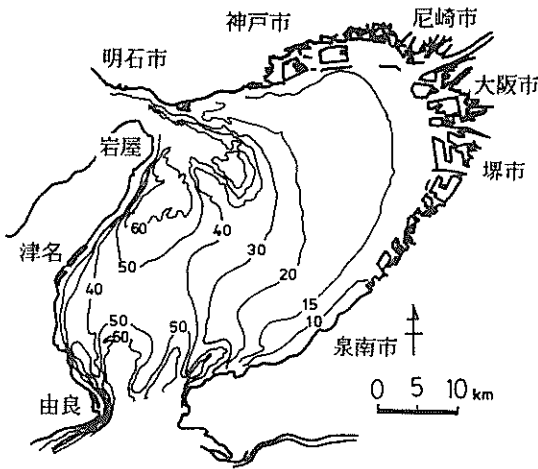


図-1 大阪湾の水深 (単位:m)

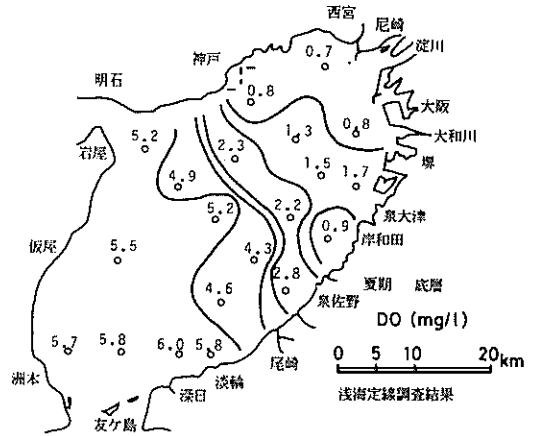


図-4 大阪湾の夏期底層水中のDO分布  
(単位:mg/l)  
— 昭和52~54, 56年の4ヶ年の海底上1m  
での測定値の平均 —

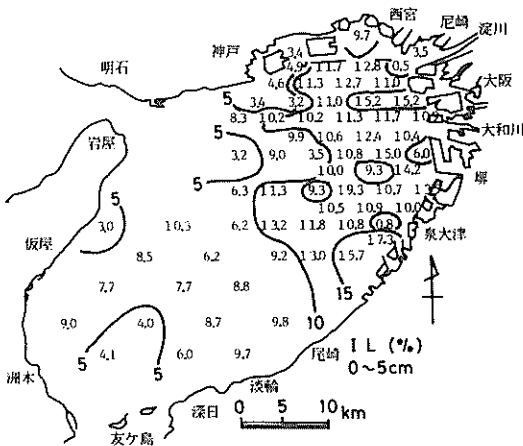


図-2 大阪湾の表層底質の強熱減量分布 (単位:%)

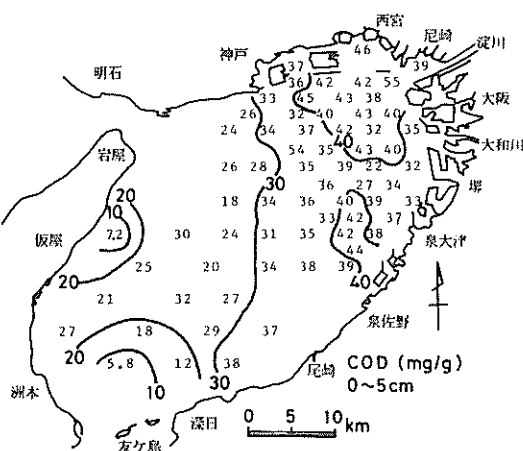


図-3 大阪湾の表層底質のCOD分布 (単位:mg/g)

図-6の水温変化と比較すると、水温の上昇に伴い春から夏にかけてDOが下降している。夏期の貧酸素化が明確に見てとれる。10月から5月にかけてはDOが回復し、3mg/lを越え、特に冬期には飽和に近い8mg/lまで上昇している。この位置での塩分濃度は30~32%程度とやや高い。図-5の変化は、富栄養化湾の典型的な季節変化である。

大阪湾におけるこのような底質・水質環境下の生物生産の特徴として城<sup>9)</sup>は、以下の3点を挙げている。

- ① 海域内での植物プランクトンの光合成作用による有機物の基礎生産が高い。同時に基礎生産の変動が大きい。
- ② 基礎生産と二次生産(植物プランクトンを摂食して増加する動物プランクトンの生産)の比であらわされる生態効率が低い。動物プランクトンによる植物プランクトンの捕食などにより上位の動物へ転換される割合が低いことを意味し、大量に生産された植物プランクトンが未利用のまま沈降・分解してゆくことになる。
- ③ 底生生物の現存量が少ない。特に10m以深の湾東部から湾中央にかけての泥底質海域で、夏期の生息密度が湿重量で5g/m<sup>2</sup>以下となる。この部分の海域面積は、湾全体の7割程度を占めるが、底生生物の現存量では2割弱程度にすぎない。湾内の底生生物は、砂礫質で流れの早い海峡周辺部と、波により泥質化が抑制されている泉南沿岸(10m以浅部を中心としている)とに多く存在している。

底生生物についての城の考察の基礎となった玉井<sup>8)</sup>によれば、1976, 77年の調査の結果湾内を6区域に分け



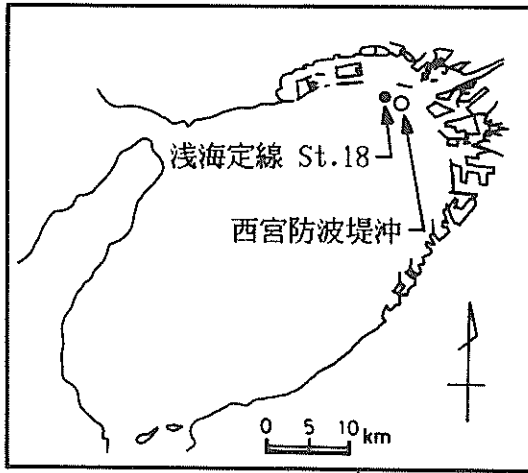
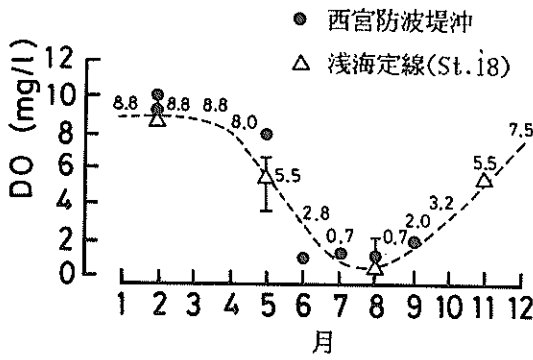


図-5 大阪湾湾奥西宮防波堤沖付近での底層水DOの季節変化

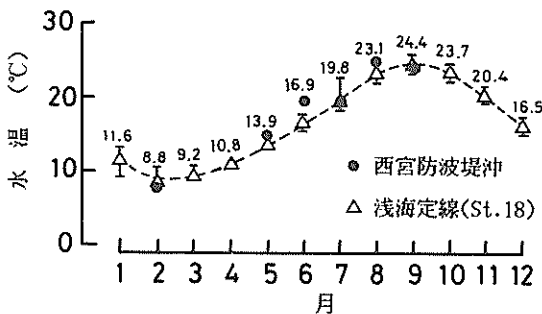


図-6 大阪湾湾奥西宮防波堤沖付近での底層水温の季節変化

ている。ベントス群集は、A；水深10m以深20m以浅の泥底域、B；水深10m以浅の泥底域で東部沿岸でやや粗い粒径、C；水深20m以深の泥底域、D；明石海峡付近の砂礫底、E；友ヶ島海峡付近の砂礫底、F；海峡外の

紀伊水道の泥底域の6つに区分され、それぞれ特徴ある分布を示している。特に湾奥部のA区では、多毛類の比率が8割を越し、他の動物はほとんどみられない。生物量は貧しく、湿重量で夏に3g/m<sup>2</sup>、冬に2g/m<sup>2</sup>程度、個体数でも数百個体/m<sup>2</sup>程度である。最も岸に近いB区では、A区よりも10倍程度の湿重量が見られ、個体数も夏に4,000個体/m<sup>2</sup>、冬に2,000個体/m<sup>2</sup>とかなり大きい。しかし、生息種は限定され、湿重量の85%は多毛類である。なかでもヨツバナスピオ (*Paraprionospio pinnata* と分類されている)、ギボシソメが優占している。C区は、A区とD・E区にはさまれ、両者の中間的様相を示している。D・E区は夏期に甲殻類を含む多種多様のベントスが現存量を上昇させ、湿重量で40~50g/m<sup>2</sup>、個体数で2,000個体/m<sup>2</sup>程度になるが、冬期には半減している。水深の浅いB区と、深いC区にはさまれたA区でベントスの種も量も貧困な理由として、この区での夏期の底層貧酸素水塊の影響を指摘している。湾全体では、ベントスは夏期に約2万3千トン、冬期に約1万5千トンの現存量があると見積もられている。

城<sup>5)</sup>の検討にも示されているように、大阪湾での底生生物の分布は、水深で代表される底質粒径もしくは有機物含有率に大きく依存していることがわかる。また、多毛類のうち、スピオ科・ギボシソメ科などが卓越している。

昭和57年度、58年度に湾奥部を中心に第三港湾建設局により底生生物の調査が実施されている。調査はスミス・マッキンタイア型採泥器による採泥後、1mm目と0.5mm目のふるいによりふるいわけ、マクロベントス、メイオベントスの種と個体数・湿重量を分離し測定している。調査は、昭和57年6月、7~8月、10~11月、昭和58年1月、9月、昭和59年1月の6回にわたって実施されている。

測定結果によれば、マクロベントスの個体数の9割以上が多毛類で占められ、そのうちヨツバナスピオ (*Paraprionospio* sp. A型) が過半数を占めていた。メイオベントスも多毛類が8割以上を占め、*Prionospio cirrifera* が優占していた。卓越種のヨツバナスピオの個体数密度の湾内分布を、6回の観測ごとに見てゆくと、図-7のようになる。玉井らが指摘したように、岸に沿って高密度域が見られ、沖に出ると急激する様子がわかる。ただし、高密度域 (玉井らの区分によるB区) と低密度域 (A区) との境界は、必ずしもいつも同じ水深に沿っているとは限らず、昭和57年の夏期では岸に近く寄り、冬期には沖合に出される。昭和58年の10月と昭和59年1月とでは境界がほぼ同じで昭和58年1月の分布と似



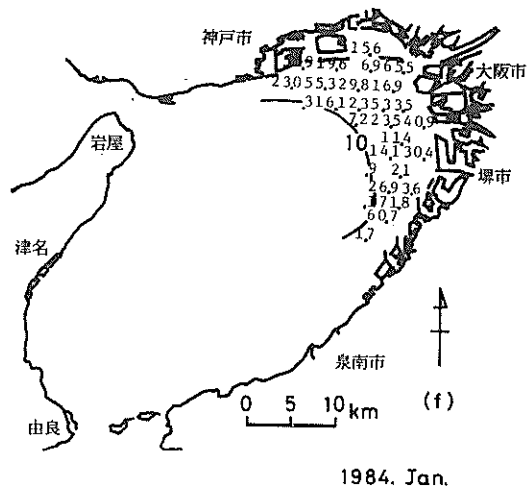
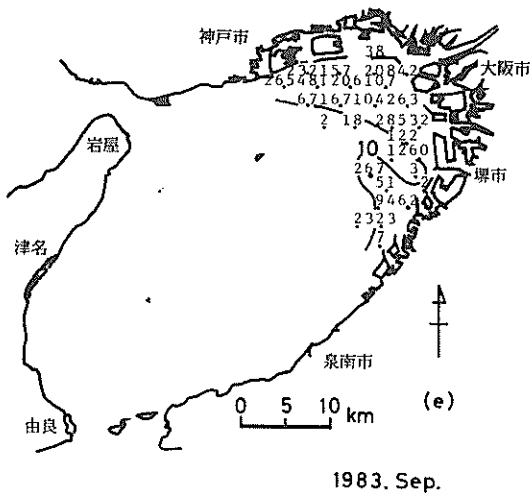
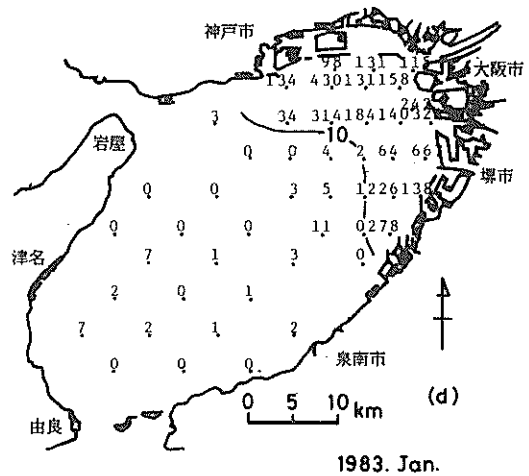
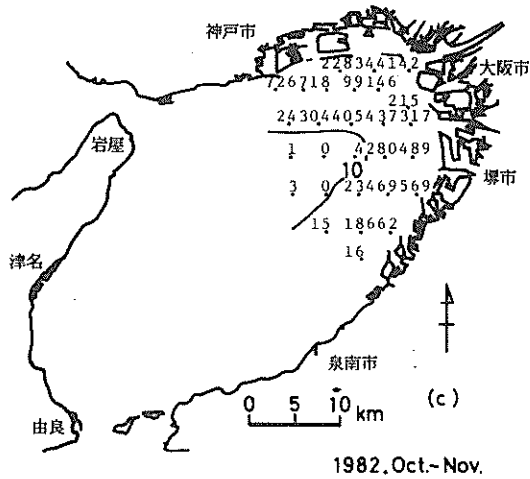
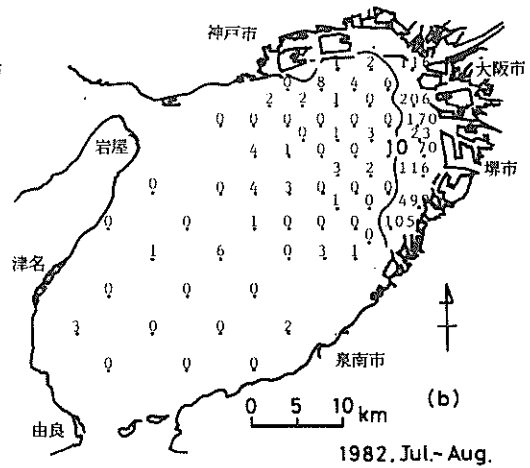
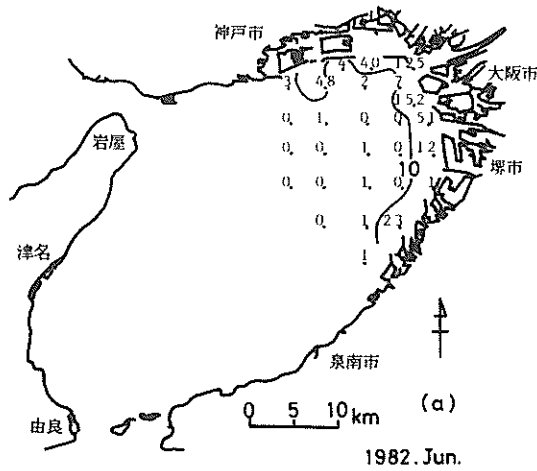


図-7 大阪湾のヨツバナスピオA型個体数密度分布 (単位: 個体/0.1 m<sup>2</sup>) —上段左 昭和57年6月, 上段右 昭和57年7~8月, 中段左 昭和57年10~11月, 中段右 昭和58年1月, 下段左 昭和58年9月, 下段右 昭和59年1月の調査—

ている。境界線の変動は、ヨツバネスピオの生活史や季節的な生殖生理の変動に起因するものか水質環境などの変動（底層貧酸化が冬期に回復すること）によるものかこれのみでは判断はつかない。図-5に示す西宮沖測定

点に近い位置に、底生生物の測定点が設けられている。測定点の水深は10mをやや超す。そこでこの測定点のマクロベントスの個体数の変化を図-8のように示す。図-8には、昭和57年度調査分について湿重量

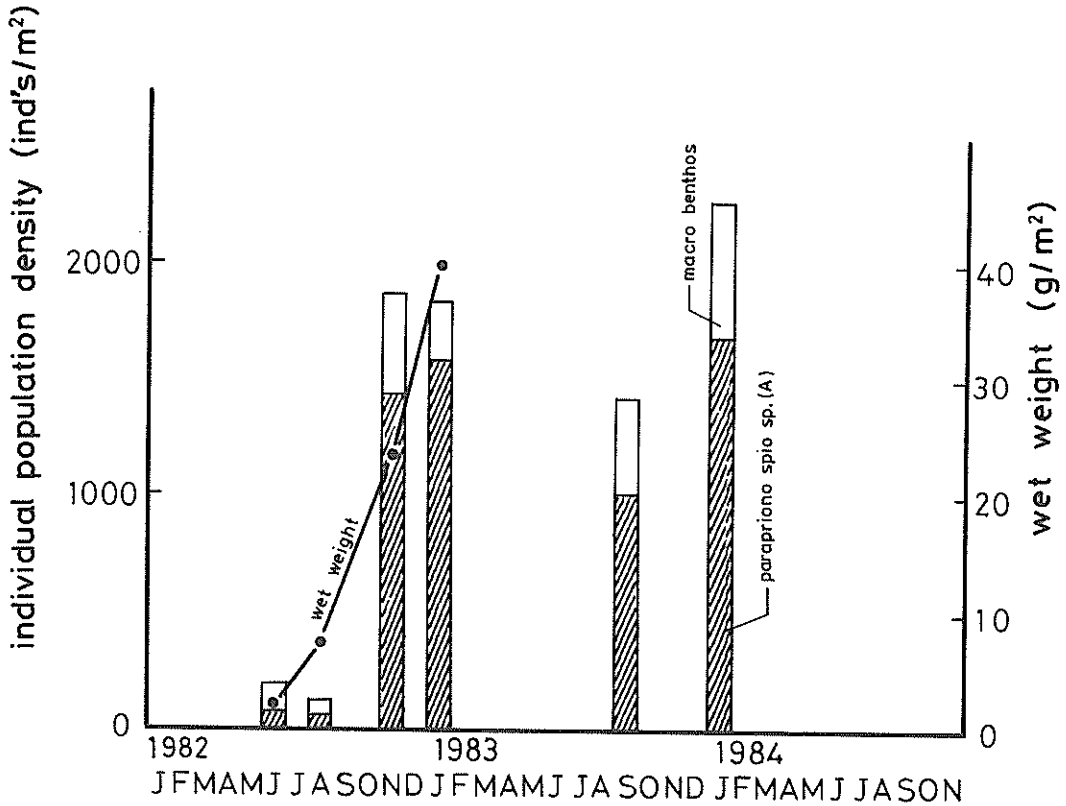


図-8 大阪湾西宮防波堤沖でのマクロベントスの個体数密度と湿重量の変化 個体数の棒グラフのうち、斜線部はヨツバネスピオ(A型)の個体数を示す。

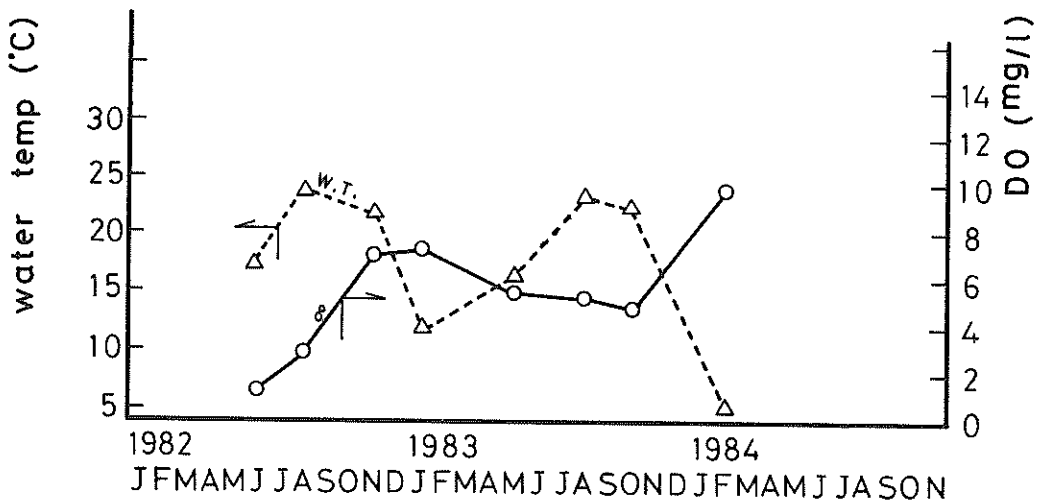


図-9 大阪湾西宮防波堤沖での底面上2mの下層水水量(WT)と溶存酸素濃度(DO)の変化



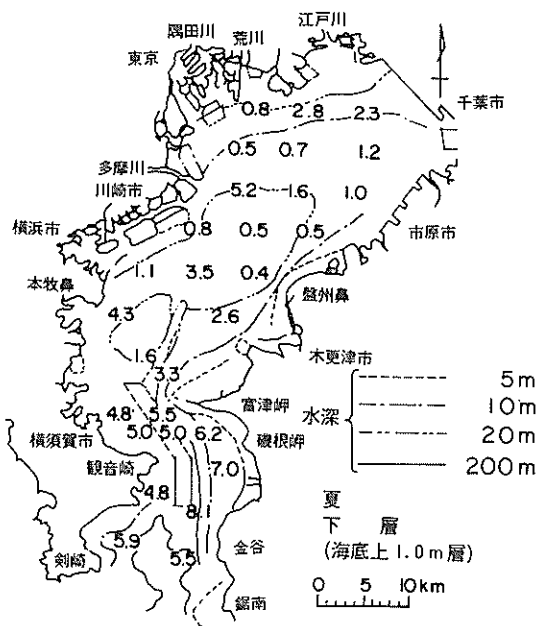


図-12 東京湾の夏期底層水中のDO分布  
(単位: mg/l)  
— 昭和54年8月の海底上1mでの測定値 —  
— 図中の曲線は等水深を結んだ線。

め、流れ、波、水質などで南北に環境の変化が大きく、このため各種の底生生物相が分布している。風呂田<sup>9)</sup>は、東京湾の底生生物を、水深の浅い部分から順に概説している。潮間帯付近では、干潟でアサリ、シオフキが護岸部ではムラサキガイが高密度に生息している。潮下帯ではインギンチャク類やムラサキガイ・ホトトギスガイが豊かである。水深5mから沖合になると夏期に無生物域となり、底生生物が認められない海域が広く存在する。この無生物域の周辺の沿岸部では数種の限られたベントスのみが生存し、それらはヨツバネスピオ(A型)、シズクガイなどである。ヨツバネスピオは、2,000個体/m<sup>2</sup>程度となることもある。また、夏期の成層期に無生物域となった海域でも、10月以降の混合期には生物が回復することも多い。一方、湾口部の砂質底では、湿重量300g/m<sup>2</sup>以上の大きな現存量を示すこともある。1mmふりいで区分けできるようなマクロベントスの他に、更に大型のシャコなどの大型甲殻類も徐々に湾内で見られるようになってきている。底生生物相が比較的単調であることも一つの要因となって、東京湾では外国からの移入種の定着が多いことも大きな特徴とされている。ムラサキガイやアメリカフジツボなどの付着動物は、潮間帯から潮下帯にかけて優占している場所が多い。風呂田がとりまとめた夏期の無底生動物域の変遷図を引用すると、

図-13のようになる。異なる研究者の研究・調査例をまとめたものであるが、羽田・千葉・姉ヶ崎の沖合で水深10m以深を中心に発生していることがうかがえる。また、いずれの年も7月~10月の間に多く発生していることがわかる。

また、堀越<sup>10)</sup>は、昭和46年のマクロベントスの湿重量分布の観測結果より、夏・冬のマクロベントス分布の変化をまとめている。これによると、夏(8月)には、羽田沖水深20m地点で極めて低く(0.1g/m<sup>2</sup>以下)なり、川崎~姉ヶ崎を結ぶ線より湾奥では貧困な底生生物相となっている。冬(11~12月)には、千葉・船橋沿岸の10m以浅部でやや増加するが、湾奥部での生物量の増加はわずかであり、羽田沖を中心に湿重量1g/m<sup>2</sup>以下の海域が広く存在している。一方、湾口から中の瀬にかけては、外洋水の潮通しの良さ・粒径の粗さなどのために、高い生物量が年間維持されている。生物の貧しい羽田沖水深20m付近の地点で、昭和52年9月から約1年間毎月生物量を観測した結果をも同時に検討している。これによると、夏期(2月末~9月下旬)にはしばしば無生物域となり、冬期でも生物量はあまりあがらず、年平均湿重量で2g/m<sup>2</sup>程度にとどまる。この観測点では、ヨツバネスピオが優占し、生物が採取される10月から2月にかけては生息生物量の過半を占めることがしばしば認められた。以上の検討をふまえて、堀越は、無生物域の発生は夏季の躍層の形成とこれに伴う低層の貧酸化が原因であるとしている。また、躍層の形成が水深10m付近であることから、水深10m以深での無生物域の発生を説明しようとしている。羽田沖での生物相の貧困さは、1940年代より認められている現象であり、人為的な汚染負荷よりも地形的な影響によりこの海域に有機粒子が沈積しやすいためだろうとしている。

東京湾の底生生物分布の特徴をまとめると、次のようになる。

東京湾の底生生物相は、特に湾奥で通年的に貧しく、湾奥部と湾口部との中間地域では季節変動があり、冬期に生物量を回復する。中間地域は、川崎~姉ヶ崎を結ぶ線と、観音崎~富津を結ぶ線とに囲まれた地域で、多毛類の他、シズクガイなどの小型二枚貝などが見られる。湾奥部、中間部を通じてヨツバネスピオは、重要な種となっている。

#### 2.4 ヨツバネスピオの分布上の特徴

大阪湾・東京湾の底生生物の分布を比べると、底生生物の貧困な地域がいずれも水深10m~30mの間にあることがわかる。また、水深10mより浅くなると、底質の粒度は細かく有機質に富むものの却って生物量を増やして

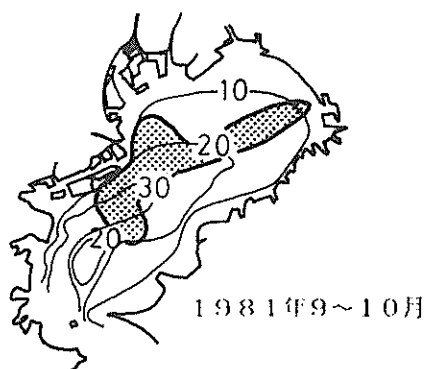
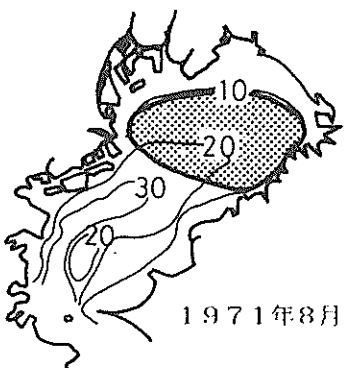
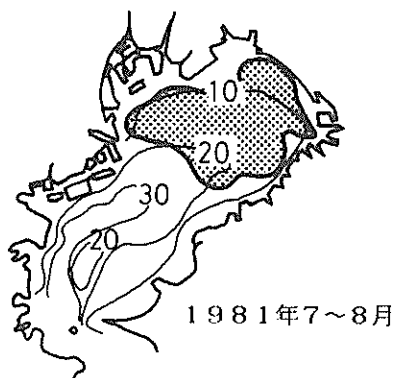
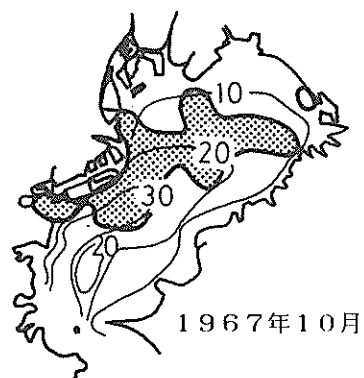
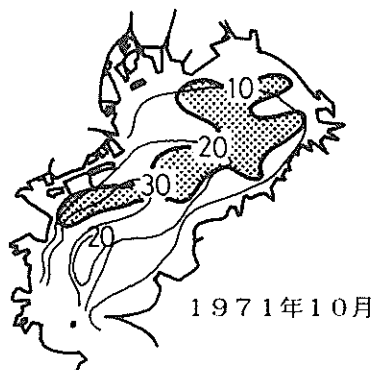
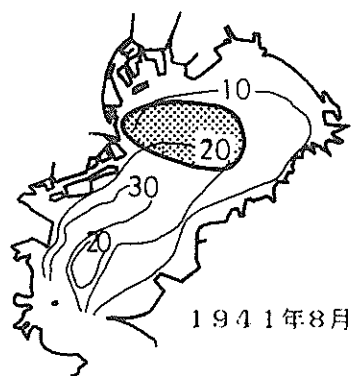


図-13 東京湾の無底生動物域の変遷<sup>9)</sup> — 図中のハッチ部が無底生動物域、点線は等水深線。

いる傾向もわかがる。また、湾口部の水深の深い区域には、高塩な外洋水の流入の影響も受け比較的多様な生物相が見られることになる。水深10m、30mといった区分や境界は、年により季節により沖に出たり岸側に戻ったりすることがあるようで必ずしも決定的な値ではなさそうである。生物量の季節的な変化は、年により場所により変わるが、一般に春先に大きくなり成層の発達とともに激減し、秋～冬に徐々に回復するようである。

底生生物の貧困な地域やその周辺部では多毛類が卓越し、両湾ともヨツバネスピオが重要種となっていることがわかる。他の底生生物が死滅してゆくなかで生きのびていく能力があること、また環境条件がやや回復するといち早くまい戻って定着し増殖する能力があることなどが、この種が優占している理由として考えられる。底生生物相の貧困さが、図-8,9で見たように、夏の成層と底層貧酸素化とに関連づけて考えられていることから、前者の能力としては、貧酸素状態下での耐性が問題となる。また後者の能力としては、生殖や増殖の機構や生活史が問題となる。類似の分布を示すものにイトゴカイ科の *Capitella capitata*、小型二枚貝のうちシズクガイ *Theora lata*、ヤチヨノハナガイ *Raeta nostalis* 等があり、いずれも有機物含量の高い内湾泥質に特徴的な底生生物として知られている。底質の有機物汚染や内湾性の強さを指し示す指標生物などとも呼ばれている<sup>11)</sup>。類似の生態を有し、環境の変化に対し似たような反応を示すために、分布上の特徴も似てくるものと思われる。

### 3. ヨツバネスピオの貧酸素耐性

#### 3.1 ヨツバネスピオの生活史と生態的な特徴

環形動物門多毛類のスピオ科に属するヨツバネスピオ (*Paraprionospio* sp.) は、4タイプあることが知られており、このうち有機汚染底質中によく出現し指標生物とされているものは4タイプのうちA型とよばれるものである。東京湾、大阪湾に出現するヨツバネスピオは、ほとんどA型のものである。4対のえらを有し、えらには羽状の小突起が密生している。体色は赤白色でふし(体節)があり、剛毛を有し伸縮する。通常底泥中に埋没し、頭部とえらのみを直上水中に出している。体長は成体で5~6mmから40mm程度となる。

大阪湾のヨツバネスピオA型の成長について調べた玉井<sup>12)</sup>の報告によると、6月下旬から約2ヶ月間の産卵期を有している。産卵された後に幼体となり、約1ヶ月の浮遊期をすごす。7月下旬から9月上旬に着底し、10月ごろまで成長する。着底後約1ヶ月で抱卵・抱精するようになるものもある。冬期の休止期を経て春以降再び成

長を続け、夏期の放卵・放精後死亡するとしている。寿命は約1年とみられる。一方、京都府久美浜湾での調査例<sup>13)</sup>では、7月から12月に新規に着底し群集に加入するものが見られ、10~11月が加入の盛期であったとしている。さらに生殖質が通年成体内に存在し、産卵はかなり長期間にわたると予想されている。10~11月の新規加入個体は翌年3月には一世代前の大型個体と同様の大きさにまで成長しており、概ね5ヶ月程度で成熟個体になると考えられる。有機汚染底質に対する指標生物として有名なイトゴカイ (*Capitella capitata*) は、体長20mmに満たない小型多毛類で生活環は1~2ヶ月と短く周年にわたって繁殖を行う<sup>14)</sup>とされている。このイトゴカイに対しヨツバネスピオは、生活環は半年~1年とやや長く繁殖も春から秋にかけてのようであるが、いずれの種も他の底生生物に比して短い生活史と活発な繁殖とにより特徴づけられる。

ヨツバネスピオ個体の生息条件については、あまり知見が得られていない。西日本における分布から、ヨツバネスピオ(A型)は20m以浅、特に10mより浅い海域に高密度に生息し、生息底質は砂質から泥質<sup>15)</sup>とされている。ヨツバネスピオ個体の生理的耐性を室内培養実験から検討した上野ら<sup>16)</sup>の報告によると、生存に適した塩分濃度は30~40%の比較的狭い範囲に限られている。温度に対する耐性も比較的弱く、生存は3~20℃の範囲であり高温には弱いようである。溶存酸素に対する耐性の検討はほとんど見当たらない。

#### 3.2 底生生物の貧酸素耐性に対する既応の研究

底生生物の生存の条件として酸素濃度は、有用二枚貝を中心にして調べられている<sup>17)</sup>。生息上の適正値は、生息上の限界値よりも範囲が狭く、またこれらの濃度値は水温・塩分など他の環境条件によっても左右されるといわれている。いくつかの二枚貝・甲殻類などについての成体の生息環境条件を表-2に例示する。生息に好適な溶存酸素濃度は、おおむね6mg/l以上であり、生存できる下限の濃度は、甲殻類で4mg/l、軟体類で2mg/l程度とみられる。アサリは他に比して貧酸素耐性があるようである。表には、海域環境基準に示されている値もかかげてある。

多毛類の生存の条件としての貧酸素耐性の検討例は少ない。上野ら<sup>16)</sup>は多毛類の適正な生息とは、一定の生理活性の維持と考えた。酸素濃度を減少しても生理活性に変化が起きない範囲(独立域)のうち最も底い濃度値(独立域の下限値)、更に濃度を減少させると生理活性が徐々に影響を受けてゆき、濃度に依存する範囲のうち最も低い濃度値(依存域の下限値)、更に濃度を下げて窒息

表-2 底生動物成体の溶存酸素に関する生息環境条件<sup>17)</sup>

(単位: mg/l)\*

類	種名	学名	生息域の標準値または 実験上の適正值	生息域の限界値または 実験上の限界値
軟体類	アサリ	<i>Ruditapes philippinarum</i>		1.4 ~
	アカガイ	<i>Scapharca broughtonii</i>	6 ~	2 ~
	マガキ	<i>Cyssostrea gigas</i>	6.1 ~ 8.6	2.1 ~ 8.6
	イセエビ	<i>Panulirus japonicus</i>		3.6 ~
	ガザミ	<i>Portunus trituberculatus</i>		4.3 ~
	クルマエビ	<i>Penaeus japonicus</i>	5.7 ~	3.6 ~

(\*原著のml/l 単位を mg/l に変換している。)

指定類型	A	B	C
海域環境基準値 (DO)	7.5 mg/l 以上	5 mg/l 以上	2 mg/l 以上

表-3 多毛類の貧酸素耐性を示す溶存酸素濃度<sup>16)</sup>

(単位: mg/l)\*

種	独立域の下限值	依存域の下限值	即死域の上限值
<i>Capitela capitata</i>	3	1.4	1
<i>Diopatra bilobata</i>	3.4	1.7	0.6

(\*上野らの実験値を mg/l 単位に換算した。)

死(即死)となる範囲のうち最も高い濃度値(即死域の上限值)などを調べている。ここで、生理活性とは単位湿重量あたりの酸素消費量を指標に選んでいる。動物の酸素消費の速度は呼吸速度とも呼ばれ、体内でのエネルギー代謝の速度(活性)を示すものと考えられる。上野らは、有機汚染指標種のイトゴカイ(*C. capitata*)と有機汚染の低い海域に見られる多毛類 *Diopatra bilobata* とを用い、15.5℃でこれらの溶存酸素濃度値を求めている。結果を表-3に示す。有機汚染指標のイトゴカイは、独立域の下限值と比較すると貧酸素耐性が高いが、即死域の上限值では耐性がより小さいこととなる。ここで、依存域下限と即死域上限との関係や、即死判断の方法などは不詳である。イトゴカイに対する貧酸素耐性は、非汚染域に生息する多毛類とあまり変わらないとの類似の結果はいくつかの実験例からも指摘されていた。その後、培養実験に抗生物質を添加した滅菌海水を使用すると、無酸素条件下でも1週間飼育できたり、0.8 mg/l という低濃度条件下でも半数が死滅するまで35日かかる例などが知られ<sup>14)</sup>た。有機汚染指標種のイトゴカイの貧酸素条件下の生理的適応性が実証されるようになり、嫌気条件下での特殊な代謝系の保有と無酸素呼吸の

能力も示されるに至っている。上野らの実験では、低酸素濃度での実験が貧酸素に対する耐性ではなく、低酸素濃度下での嫌気性細菌類の活性に起因して生産される他の物質や毒性などが大きく影響してしまった可能性が高い。イトゴカイの呼吸生理の検討には、こうした点への配慮が必要である。一方、自然界での分布や生存域の検討には、なるべく自然に近い状況での耐性の実験も意味がある。自然界、特に底泥表面付近では嫌気性細菌類の活性が高く、低酸素濃度条件下での35日間の生存はほとんどあり得ないからである。覆砂や浚渫などによる底質の改良も、様々な生物相互作用を介して、底生生物の分布や存在量に影響をもたらすものと思われる。ある程度自然界の複雑さを組み込んだマイクロコズム実験的なアプローチや現地スケールの実験が有効であろう。

ヨツバナスピオに関する貧酸素耐性を検討した例は見当らない。

### 3.3 ヨツバナスピオの貧酸素耐性実験

#### 3.3.1 生物を用いた水質の致死性試験の考え方

生物の反応を用いて水質を評価しようとする試験方法は、バイオアッセイ(bio-assay)と総称され、AGP試験、BOD試験などもその1例として扱われる。ここでは、



酸素濃度の低下により多毛類がどう生存するのかの生物試験方法について考えてみる。

バイオアッセイの中心的な試験は、有毒物質の生物に対する致死量を把握する試験である。有毒物質としては農薬、重金属、有機塩素系化合物などであり対象生物は細菌・バクテリアから魚、大型動物まで様々である。こうした試験には、生物が個体差を有していることを前提に確率的な取り扱いと解析が必要となる。即ち、有毒物質の環境中の濃度が、ある濃度を少しでも越えたと全数が一度に死亡するといった事象はあまり見られない。通常は、弱い個体から徐々に死亡してゆき強い個体は高い濃度負荷でないと死亡しない。横軸に有毒物質濃度などの刺激値 (DOES) の対数をとり、縦軸にその刺激値までに死亡した累積個体の割合をプロットすると、図-14 に示すシグモイド曲線となる事が多い。この曲線の微分をとると、刺激値の各区間で死亡する個体数分布が得られ、対数正規分布に似た曲線となる。生体の毒物等刺激に対する反応は、低濃度でにぶく (なかなか反応しない) また高濃度でも濃度変化に対してにぶい (反応し尽して

しまう)。シグモイド曲線の低濃度部分や高濃度部分ではこのにぶさのため傾きが小さくなり、代表刺激値を読みとる際には誤差が大きくなりやすい。生体の反応を代表する状況としては、半数の個体が反応する (死亡する) 状況が普通選ばれる<sup>18)</sup>。これは、シグモイド曲線の傾きが大きく、この状況 (50%致死) を与える刺激値が把握しやすいからでもある。

陸上動物に対する毒の致死量は、経口もしくは注射や照射などによる投与量で表示され、これを Lethal Dose (LD) と呼ぶ。一方、水生動物では、周辺水中の毒物の濃度で表示する方が便利のため、Lethal Concentration (LC) として表示し、50%致死濃度を LC<sub>50</sub> などと記す。TLM (Mediam Tolerance Limit) との表記も LC<sub>50</sub> とはほぼ同義である。

毒に対する生体の反応には、時間の効果が大きい。ゆっくりと長期にわたってさらされていることによる毒性や、この作用を有する物質を慢性毒と称する。一方、短期的な曝露による毒性や毒物を急性毒と称する。同一の物質でも濃度によって急性毒として作用することも慢性毒として作用することもある。急性毒物質でも、1日間の曝露と2日間の曝露とでは LC<sub>50</sub> は異なることも多く、急性毒の毒性の表示に際しては曝露時間を併記して、24時間 LC<sub>50</sub>、96時間 LC<sub>50</sub> などと表記する。

水生生物のうち魚類に対する急性毒試験が JIS<sup>19)</sup> に定められている。概要は、一定の大きさの健全な魚を、種々の濃度の有毒物質を含む水中に一定時間入れて飼育し、この曝露時間中に供試魚の50%が生存する有毒物質濃度を内挿により求めるというものである。くり返し再現できること、誰が実施しても同じ結果になることなどの点から手順が定められている。魚類以外の生物に対しても、JIS法が準用されることが多いが、水中共存物質の配慮や、毒物以外の環境条件 (水温・塩分・照度など) の選定と良好さの維持などに注意が必要である。また、生物の毒性への反応の判断 (死亡の判定など) にも工夫が必要となる。

各濃度段階毎に生物を投入し、一定時間後に得られた反応 (例えば死亡率) を、対数~正規確率紙上にプロットする。より簡単には片対数上にプロットし、死亡率50%前後の測得データより LC<sub>50</sub> を読みとることとなる。

1濃度段階に対し投入する供試生物個体数は、JISでは10匹と指示している。海産動物の卵発生過程等を用いる生物検定法では、ウニ・カイの卵に対し200個程度、フジボ幼生・ワムシなどの小動物に対し50~100匹程度とし、3回くり返すこととしているもの<sup>20)</sup>もある。底生生物を利用した例では、アサリに対する工場廃水の影響

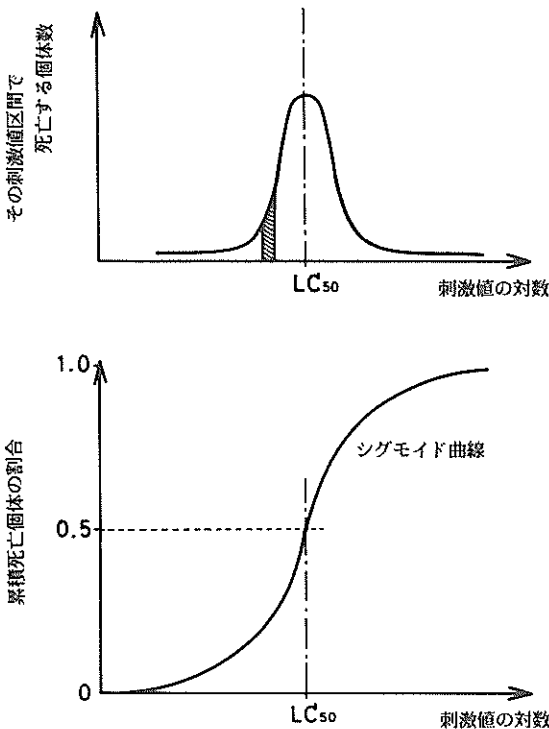


図-14 刺激 (DOES) と生体の反応 (RESPONSE) との通常見られる関係 — 刺激値の対数に対し、その値までで死亡した累積個体の割合を示すシグモイド曲線図および、その値区間で死亡する個体数を示す対数正規分布図 —

を、各濃度段階毎にそれぞれ10個体ずつ投入した実験<sup>20)</sup>がある。生物検定実験を開始するまでの前処理・予備飼育期間中に、特に弱い個体や生理条件の異なる個体が含まれないように気を付ければ10個体程度の投入でも大きな誤差を与えないようである。

### 3.3.2 実験方法

ヨツバナスピオを用いて、貧酸素に対する耐性実験を行なった。以下にその方法を述べる。実験は大きく2つに分かれ、貧酸素下での生存の様子を調べる生存率実験と、貧酸素下での活性の低下の様子を呼吸速度の変化として調べる呼吸速度実験とから成り立っている。いずれも一定の環境条件を維持しながら、生存数(死亡数)や呼吸速度をモニターするというものである。

#### (1) 生存率実験 (RUN-1, 2, 3)

密閉したガラス製飼育容器内にヨツバナスピオを投入し長期飼育し、その期間の生存率を求めた。実験は昭和61年12月のRUN-1と昭和63年3月のRUN-2, RUN-3の3回実施した。

##### a) 供試個体の調整

昭和61年の実験(RUN-1)に対しては、神奈川県横浜港鶴見川河口付近において採泥し、実験室に持帰った。大型ポリエチレン容器に海水とともに入れ、海水には空気を曝気して1週間程度飼育した。実験開始前にヨツバナスピオ含有泥を集め、海水を加えてけん濁させながら先を広げたコマゴメピペットでヨツバナスピオを選別し、海水を満した別の容器に移し入れた。ヨツバナスピオ単一種に分別後、0.5 mm ふるい通過の現地微細泥を投餌し曝気を施しながらしばらく飼育している。実験開始前に個体のサイズや運動状況を見ながら更に再選別した。供試個体は、実験時の排糞を抑えるため供試前の24時間は無投餌で清澄海水中にて飼育した。

昭和62年3月の実験(RUN-2, RUN-3)には、川崎港浮島沖の多摩川河口より採泥し、同様に分別して用いた。

RUN-1では、個体サイズを大型と小型とで分けつけて実験しているが、選別準備できた個体数に限度があり、必ずしもサイズの統一はとれてない。サイズを記録する

ために、飼育容器ごとに投入個体の総湿重量を秤量してある。秤量は、個体に損傷を与えないように次の方法で行なった。下に汚紙を敷いた上にサランネットを置き、サランネット上に供試個体を載せた。汚紙により水を吸い取り後、ネットごと重量を秤量し、後でネットのみの重量を差し引いて、供試個体の湿重量とした。

##### b) 供試海水

昭和61年末のRUN-1に用いた海水は、横浜港金沢漁港において表層水を採水し用いている。冷暗所に保存しておき、使用に際してはグラスファイバーフィルター(Whattman, GF/C, 孔径約1 $\mu$ m)にて濾過している。昭和63年3月のRUN-2, 3に用いる海水は、採泥と同じ地点で同時に採水したものを用いている。同様の孔径フィルターで濾過して使用している。

海水中の嫌気性細菌類の作用を抑制するため、RUN-2の一部、RUN-3では、供試海水に抗生物質(ストレプトマイシン)を、硫酸塩として0.5 mg/lの濃度となるように添加してある。採水・採泥の場所などを表-4にまとめて示す。

##### c) 飼育容器・装置

密栓できる600 ml容のガラス製三角フラスコを飼育容器とした。恒温室内に用意した水槽内に浸け込んで水封し、飼育容器内の水温・溶存酸素濃度(DO)が変化しないようにした。飼育容器に入れる海水は、予め窒素ガスと空気ガスを曝気させ、DO濃度を所定の濃度に調整したものを分取した。

昭和63年3月の実験では、飼育容器をRUN-2に対して600 ml、RUN-3に対して6 lのものをそれぞれ用いた。

容器内のヨツバナスピオの生死は、容器を下からのぞける倒立顕微鏡( $\times 20 \sim \times 40$ )で観察している。飼育期間中のヨツバナスピオは、おおむね容器底にかたまっており、倒立顕微鏡によりえらの動きや生体の活性などよく見てとることができた。ただし、6 lの容器を用いたRUN-3では、肉眼での観察を主体にした。実験終了時には、すべての容器を開き空気曝気後に改めて生死を確認している。

表-4 生残率実験供試試料の採取場所

RUN	採泥時	採泥場所	採水場所	塩分濃度
RUN-1	昭和61年12月	鶴見川河口	金沢漁港	—
RUN-2	昭和63年3月	多摩川河口	多摩川河口	31.4 %
RUN-3	昭和63年3月	多摩川河口	多摩川河口	30.8 %

d) 実験条件

水温、飼育期間、光の照射条件、1つの飼育容器に対する投入ヨツバネスピオの個体数、およびDO濃度の条件は、表-5に示すとおりである。容器間のばらつきに対処するため、RUN-2を除いて同一条件の飼育容器を複数個ずつ同時に実験した。RUN-1は、個体サイズを大型と小型と区別しているため、各DO濃度段階毎に、大型個体用容器2個、小型個体用容器2個の計4個の容器を用いた。RUN-2では、同一水温、同一DOに対して、抗生物質の添加してある容器1個、無添加容器1個を用いた。RUN-3では、すべての容器に抗生物質を添加し、同一水温同一DOに対して4個の容器を用いた。4日目に2個の容器の封を開き水質の分析を行なうとともに空気曝気を施し生死を確認した。終了時まで飼育を続けた容器数は、同一条件に対し2個とした。いずれの実験でも、飼育期間の途中で全個体が死亡した容器は、その時点で飼育を終了させている。

e) 実験手順

各飼育容器に、所定のDO濃度に調整した河過海水を満たす。別途、注入海水を分取しウインクラ法にてDO濃度を測定する。供試個体を定められた個数ずつ容器に静かに投入後、直ちに密封し水槽内に沈める。毎日定時に、各容器ごとの生死の個体数を観察する。最終日には、各容器から採水しDO濃度を測定するとともに残余の飼育海水に空気を曝気しDO条件を改善後、個体の生死を確認している。

(2) 呼吸速度実験 (RUN-4)

密閉したガラス製飼育容器内にヨツバネスピオを投入し、一定時間中に減少したDO濃度からDO消費量を算定した。一方、投入したヨツバネスピオの湿重量を別途測定し、単位重量あたりのDO消費速度を呼吸速度として求める。実験は昭和61年12月に実施した。

a) 供試個体の調整

生残率実験のRUN-1と同じ採泥サンプルより同時に

調整した個体を用いている。RUN-1と同じ方法で個体の湿重量を各容器毎に測定した。

b) 供試海水

生残率実験のRUN-1と同じ採水サンプルより同時に調整した海水を用いている。

c) 飼育容器・装置

内容積約300mlの細口ガラスビンを用い、ゴム栓で密封してある。ゴム栓を通してガラス管が容器内に差し込まれており、飼育開始時と終了時の容器水が、空気と混合することなくサイフォンで採水できるようにしてある。装置の概念図を図-15に示す。

d) 実験条件

飼育条件と実験ケースとを表-6に示す。飼育期間は

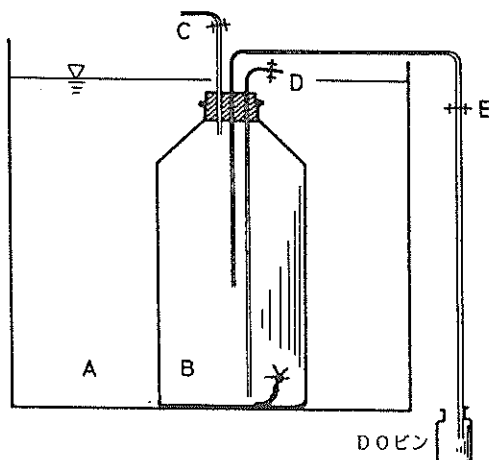


図-15 ヨツバネスピオ呼吸速度実験飼育装置

水量45ℓの亚克力水槽A内に沈め水封する。DO調整海水を用意し、Cを閉じEを開きDより続けて注水する。容器B内の海水が入れ換わったら続けてDより注入しながら静かにDOピンに越流水を分取する。これを開始時のDO濃度としE、Dを閉じ飼育を開始する。終了時は、Cを開きEより静かに採水し、終了時DO濃度とする。

表-5 生残率実験の飼育条件と実験ケース

RUN#	実施時	飼育条件					実験ケース			備考
		飼育容器の容量 (ml)	水温 (°C)	光	期間 (日間)	容器毎の投入個体数	DO濃度段階 (mg/l)	段階数	同一条件下の容器個数	
RUN-1	S 62.12	600	20	暗	3	10	1, 1.5, 2, 2.5, 3	/ 5	2	大型個体と小型個体とを区別
RUN-1	S 63. 3	600	20, 25	暗	7	5	1, 飽和	/ 2	1	抗生物質添加と無添加との比較
RUN-3	S 63. 3	6,000	20, 25	暗	10	10	1, 2, 3, 飽和	/ 4	4	全て抗生物質添加

24時間とし、飼育期間中のDOの低下による呼吸の変化の影響を小さくしようとした。また、個体を全く投入しない容器を対照容器（ブランク）として用意し、同時に実験を行なった。対照容器中のDOの低下は、海水中の含有有機物のバクテリアによる分解などに起因する。海水のみのDO低下分を控除すれば、ヨツバネスピオの呼吸量が求められる。DO濃度は、1.5, 2, 4mg/lと飽和濃度の計4段階に設定してある。容器相互のばらつきに対処するため、同一条件の容器を2個ずつ用意し同時に飼育した。ただし、各DO濃度毎に用意した対照容器は1個である。

e) 実験手法

ヨツバネスピオを投入しDO調整海水に入れ換えた後、ウインクラ法により各容器ごとに開始時DO濃度を測

定する。所定の時間経過後容器を取り出し、静かに内容水を採水し終了時DO濃度をウインクラ法により測定する。DOの消費が呼吸のみによることを確認するために、死亡個体の有無を各容器ごとに確認する。

3.3.3 実験結果

(1) 生残率実験

RUN-1の実験は、DO濃度5段階について大型個体と小型個体を区別して飼育しており、計10の条件について実験している。各条件ごとに2個の飼育容器を用い同時に飼育しているので、容器の数は総計20個となる。各容器ごとに、1日ごとの死亡個体数や活性を観察しており、その結果を表-7に示す。表-7には、10個体の湿重量の側定値から求めた1個体あたりの平均湿重量（生体重量）および、生残率実験開始時と72時間後の終了時

表-6 呼吸速度実験の飼育条件と実験ケース

RUN#	実施時	飼育条件					実験ケース		備考
		飼育容器の容量 (ml)	水温 (°C)	光	期間 (時間)	容器毎の投入個体数	DO濃度段階 / 段階数 (mg/l)	同一条件下の容器個数	
RUN-4	S61.12	300	20	暗	24	10	1.5, 2, 4, 飽和 / 4	2 対照は1	海水のみ封入の対照容器をDO段階毎に用意

表-7 生残率実験 RUN-1 の結果 (水温: 20°C)

容器	ケース		平均湿重量	DO濃度測定値 (mg/l)		ヨツバネスピオの活性観察							
	設定目標DO濃度	個体		開始時	終了時	開始時	24時間後		48時間後		72時間後		
						投入数	活性	生残数	活性	生残数	活性	生残数	
1	1mg/l	大型	3	0.90	0.40	10	運動活発	10	やや衰弱	7	衰弱	1	
2		大型	3	0.94	0.37	10	運動小	10	"	8	"	2	
3		小型	1	0.92	0.58	10	"	10	"	9	"	1	
4		小型	2	0.89	0.59	10	運動活発	10	"	6	"	1	
5	1.5mg/l	大型	6	1.71	0.99	10	運動小	10	やや衰弱, 吻突出	10	衰弱	3	
6		大型	4	1.82	1.15	10	"	10	やや衰弱	10	"	1	
7		小型	1	1.76	1.45	10	運動小	10	全数死亡	0	—	0	
8		小型	2	1.79	1.48	10	やや衰弱	10	やや衰弱	8	衰弱	1	
9	2.0mg/l	大型	8	2.00	1.30	10	運動活発	10	運動活発, 1個体自切	9	衰弱	4	
10		大型	6	2.07	1.39	10	"	10	運動活発	10	"	7	
11		小型	4	2.03	1.66	10	2個体弱る	10	やや衰弱	8	"	4	
12		小型	4	2.05	1.75	10	運動活発	10	"	9	"	9	
13	2.5mg/l	大型	10	2.24	1.57	10	運動活発	10	運動活発	10	運動活発	10	
14		大型	8	2.30	1.64	10	"	10	"	10	"	9	
15		小型	4	2.21	1.90	10	"	10	"	9	"	9	
16		小型	4	2.37	1.82	10	"	10	"	10	"	10	
17	3.0mg/l	大型	11	2.83	1.81	10	運動活発	10	運動活発	10	運動活発	10	
18		大型	9	2.82	1.83	10	"	10	"	10	"	10	
19		小型	5	2.78	2.03	10	"	10	"	1個体衰弱	10	"	9
20		小型	4	2.81	2.04	10	"	10	"	10	"	8	

のDO濃度が同時に示されている。

個体の平均重量をみると、小型として選び出された場合には、1~5mg、大型として選び出された個体では3~11mgと幅がある。特に、DO 1mg/lの飼育容器4個に投入された個体はいずれも小型のものであったと判断される。1つの容器に投入される10個体のサイズは極力そろえてある。また、72時間後のDO濃度は、最も低い濃度で0.4mg/l程度である。ウィンクラー法の分析によることから、無酸素となってしまっていないと思われる。しかし、低濃度(1mg/l)のケースでは、終了時に開栓すると硫化物臭もしくは腐敗臭が感じられた。72時間後の生残個体数は、同一条件下の2個の容器間で1~2個体の差であり、容器相互の差は小さい。ただし、初期設定DO濃度2.0mg/lについては、大型個体(平均湿重量6mg以上)で3個体の差、小型個体(平均湿重量4mg以下)で5個体の差となっており、容器間のばらつきがやや大きい。

RUN-2は、2種の水温につきDO濃度2段階につき、それぞれ抗生物質の添加・無添加を比較している。飼育容器は、計8個となっている。生残個体数の7日間の変化を、表-8に示す。表中には、7日目に各容器ごとに内容水中の硫化物含有量の測定結果もかかげてある。開始時のDO濃度も表中に記してあるが、7日目終了時にはDO濃度を測定していない。

RUN-3は、2種の水温につきDO濃度4段階につき各4個ずつの飼育容器、計32個で飼育を行なっている。10日間の飼育期間中のヨツパネスピオの生残個体数を表-9に示す。また、水温、DO濃度、硫化物濃度、pHの変化と、投入個体の平均湿重量を表-10に示す。個体の平均湿重量は、どの容器も20mg程度で、大きさが大きくかつそろっていることがわかる。飼育期間中の水温の変化は、18.9~19.3℃、21.8~23.5℃とほぼ安定して

いた。DO濃度は、20℃・DO 1mg/lのケースで10日目に2.1mg/lという高い値が測定されており、この容器の当初のDO濃度値が飽和に近かったのではないかと疑わせる。この容器の個体の生残率は、同じ条件下の他の3容器に比しても著しく高い。このケースを除いては、おおむね容器間相互の差はあまり大きくはなっていない。

## (2) 呼吸速度実験

呼吸速度実験(RUN-4)は、DO濃度4段階に対して個体のサイズを大・小に2分類して計8ケースについて実施している。各ケースとも同一条件の容器を同時に2個ずつ実験に供している他、各DO濃度段階ごとに1容器ずつを対照実験用に使用している。対照容器にはヨツパネスピオを投入していない。合計20個の飼育容器についての結果を、表-11に示す。表には、実験時の条件として測定した、供試個体の平均湿重量、各容器の容量も、呼吸によるDO濃度変化とともに示してある。ヨツパネスピオを投入しない容器においても、DOの減少が測定されており、これは海水中の有機物の分解作用に起因する。ヨツパネスピオの正味の呼吸量としては、供試容器中の酸素消費量から対照容器中の酸素消費量を差し引いた値を用いている。微生物起因の酸素消費量は、DO濃度に依存することもあるため、各DO濃度段階ごとに上記の補正を実施している。正味の呼吸量を、投入個体の総湿重量で除し、更に飼育時間(24時間)で除せば、湿重量あたりの呼吸速度が算定できる。正味の呼吸量、呼吸速度の算定値も表にかかげてある。ただし、対照容器の補正を行うと正味の呼吸量が負となる場合は、呼吸量を0(ゼロ)としてある。対照容器が各DO濃度段階に対して1個であるため、対照実験自体のばらつきが補正できずにいるためであると思われる。また、ウィンクラー法によるDO濃度の検出限界は0.1mg/l程度であるため、開始時と終了時との差が0.2mg/lを下まわる時

表-8 生残率実験RUN-2の結果

#	ケース			DO濃度測定値 (mg/l)		硫化物濃度* (mg/l)	生残個体数の観察							
	水温	目標DO濃度	抗生物質添加	開始時	終了時	終了時	開始時	1日後	2日後	3日後	4日後	5日後	6日後	7日後
1	20℃	飽和	無添加	7.7	-	<0.02	5	5	5	5	5	5	5	5
2			添加	7.2	-	<0.02	5	5	5	5	5	5	5	5
3		1mg/l	無添加	0.8	-	0.31	5	5	5	5	3	2	0	-
4			添加	0.9	-	0.42	5	5	5	4	3	3	3	1
5	25℃	飽和	無添加	7.7	-	<0.02	5	5	5	5	5	5	5	5
6			添加	7.2	-	<0.02	5	5	5	5	5	5	5	5
7		1mg/l	無添加	0.8	-	1.02	5	5	5	3	0	-	-	-
8			添加	0.9	-	0.90	5	5	5	4	0	-	-	-

\* 硫化物濃度 < 0.02 は、検出限界の0.02mg/lより低い濃度値を意味する。

表-9 生残率実験 RUN-3 の結果 (生残個体数の変化)

#	ケース 水温	目標 DO濃度	DO濃度測定値 (mg/l)		開始時 投入数	生 残 個 体 数									
			開始時	終了時**		1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目	9日目	10日目
1	20℃	1mg/l	0.5	2.1*	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
2				0.2	10	10	10	9	4	欠	0				
3				0.3	10	10	10	10	10						
4				0.3	10	10	10	10	9						
5		2mg/l	1.8	0.3	10	10	10	10	10	10	6	3	1	1	1
6				0.6	10	10	10	10	10	8	7	4	2	1	
7				0.5	10	10	10	10	10						
8				0.4	10	10	10	10	10						
9		3mg/l	3.0	0.4	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
10				0.4	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
11				2.1	10	10	10	10	10						
12				1.7	10	10	10	10	10						
13		飽和	8.2	2.3	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
14				2.0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
15				5.6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
16				5.3	10	10	10	10	10	9					
17	25℃	1mg/l	0.9	0.1	10	10	10	10	9	5	3	0			
18				0.2	10	10	10	10	8	2	1	0			
19				0.3	10	10	10	10	7						
20				0.3	10	10	10	10	5						
21		2mg/l	1.4	0.4	10	10	10	10	10	10	7	0			
22				0.2	10	10	10	10	10	10	6	1	0		
23				0.4	10	10	10	10	9						
24				0.4	10	10	10	10	10						
25		3mg/l	2.4	0.2	10	10	10	10	10	10	10	3	0		
26				0.2	10	10	10	10	10	10	10	10	5	1	
27				0.5	10	10	10	10	10						
28				0.6	10	10	10	10	10						
29		飽和	7.1	0.9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
30				1.1	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
31				3.5	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
32				3.4	10	10	10	10	10	10					

\*\*終了時とは、生残個体数の記入がある最後の日を意味する。

\* この容器は、終了時のDO濃度から考えて、開始時のDO濃度は飽和(8.2mg/l)のケースと同じ程度の濃度であったと推定される。

の速度算定値の誤差は大きい。

### 3.3.4 貧酸素耐性の検討

#### (1) 生残率の検討

RUN-1は、72時間の生残率を調べた実験である。ヨツパネスピオは、1mg/lを切る低DO濃度下でも24時間は生残しており1個体の死亡も見られない。48時間後に、2.5mg/l以下のケースで死亡個体が見られ特に1mg/lのケースでは1~4個体が死亡している。72時間後には、どの濃度段階でも死亡が見られ2.0mg/l以下では、過半数が死亡する容器が見られた。

DO濃度1mg/lを例に、生残個体数の経時変化を図示すると、図-16のようになる。2日間以後急激な死滅

が生起している様子がうかがえる。個体の活性も2日目以降衰弱が増していることが表-7に示されている観察の結果からわかる。この理由として、① 1日間程度は生理的貧酸素耐性がある、② 容器内DO濃度が呼吸によりある限界値まで低下してはじめて死亡する、③ DO濃度以外の要因が2日目以降に効いてきてそれにより死亡する、などが考えられる。②の限界値は、開始時に0.9mg/lのDOでも24時間後の生残が見られている事から、この濃度以下である筈であるが、一方、終了時DOを見ると50%以上が死亡した容器では1.3~1.7mg/lのDOが残っているものもあり、明確な閾値(しきい値)としては考えにくい。また、③の要因として他の毒物や

表-10 生残率実験 RUN-3 の結果 (実験条件と水質の変化)

#	ケース 水温	目標 DO濃度	平均 湿重量 (mg)	開始時				終了時								
				水温 (°C)	DO (mg/l)	硫化物 (mg/l)	pH	終了日	水温 (°C)	DO (mg/l)	硫化物 (mg/l)	pH				
1	20°C	1mg/l	20	19.2	0.5	<0.02	8.0	10	19.3	2.1	<0.02	8.0				
2			22					7					19.3	0.2	<0.02	8.0
3			16					4					19.3	0.3	<0.02	8.3
4			21					4					19.3	0.3	<0.02	8.3
5		2mg/l	27	19.2	1.8	<0.02	8.0	10	19.3	0.3	0.07	8.1				
6			20					10					19.3	0.6	0.03	8.1
7			19					4					19.3	0.5	<0.02	8.2
8			18					4					19.3	0.4	<0.02	8.2
9		3mg/l	26	19.2	3.0	<0.02	8.0	10	18.9	0.4	<0.02	8.0				
10			17					10					19.0	0.4	<0.02	8.0
11			15					4					19.0	2.1	<0.02	8.2
12			21					4					19.0	1.7	<0.02	8.3
13		飽和	22	19.2	8.2	<0.02	8.0	10	19.0	2.3	<0.02	7.4				
14			13					10					19.0	2.0	<0.02	7.3
15			21					4					19.0	5.6	<0.02	7.7
16			20					4					19.0	5.3	<0.02	7.7
17	25°C	1mg/l	13	23.5	0.9	<0.02	8.0	7	22.8	0.1	0.05	8.1				
18			21					7					21.8	0.2	0.05	8.1
19			18					4					23.4	0.3	<0.02	8.0
20			18					4					23.4	0.3	<0.02	8.0
21		2mg/l	13	23.5	1.4	<0.02	7.9	7	23.5	0.4	<0.02	8.0				
22			20					9					23.3	0.2	<0.02	8.0
23			20					4					23.5	0.4	<0.02	7.8
24			19					4					23.5	0.4	<0.02	7.8
25		3mg/l	15	23.5	2.4	<0.02	7.9	9	22.2	0.2	0.06	7.9				
26			18					10					23.3	0.2	<0.02	7.9
27			14					4					22.4	0.5	<0.02	7.8
28			17					4					22.5	0.6	<0.02	7.8
29		飽和	20	23.5	7.1	<0.02	8.0	10	23.1	0.9	<0.02	7.5				
30			18					10					23.2	1.1	<0.02	7.6
31			19					4					22.5	3.5	<0.02	7.6
32			20					4					22.5	3.4	<0.02	7.6

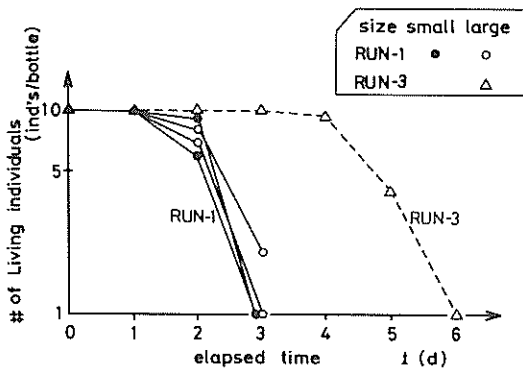


図-16 ヨツバネスピオの死滅過程 水温 20°C, 当初 DO 1mg/l で10個体ずつ飼育した時の生残個数の経時変化

阻害物などを考えたとしても、生残個体数はDO濃度の低下につれて低下する傾向が明瞭であり、毒物や阻害物の発生や影響は容器中のDO濃度と関係づけられていると思われる。

一定DO濃度を維持しながらの飼育ではないため、投入したヨツバネスピオの呼吸や海水中の有機物分解などにより、飼育容器内のDO濃度は毎日少しずつ減少している。死亡個体は容器中に残され、飼育途中に容器から除去されていない。このため、死亡個体の腐敗による酸素消費も考えられる。ここでは、①飼育期間が短い、②死亡個体も、大半は死後おおむね24時間程度の経過であり腐敗はあまり進行していない、などから、開始時と終了時との両DO濃度値より途中の濃度を内挿できるとみ



表-11 呼吸速度実験 RUN-4 の結果

(水温: 20 °C)

#	ケース		個体の平均湿重量 (mg)	投入個数	DO 濃度測定値			飼育容器容積 (ml)	容器内 DO 減量 (mg)	正味の呼吸量 (mg)	呼吸速度 mg/g·h
	目標 DO 濃度	個体サイズ			開始時	終了時	減少濃度				
1	1.5 mg/l	対照	—	0	1.74	1.42	0.32	315	0.101	—	—
2		大型	14	10	2.46	1.08	1.38	315	0.435	0.334	0.099
3		大型	12	10	1.75	0.86	0.89	315	0.280	0.180	0.062
4		小型	5	10	2.21	1.22	0.99	310	0.307	0.208	0.173
5		小型	6	10	2.36	1.35	1.01	315	0.318	0.217	0.151
6	2 mg/l	対照	—	0	1.15	0.97	(0.18)*	325	0.059	—	—
7		大型	10	10	1.08	0.96	(0.12)*	315	0.038	0	0
8		大型	10	10	1.23	0.82	0.41	332	0.136	0.076	0.032
9		小型	3	10	1.16	1.11	(0.05)*	325	0.016	0	0
10		小型	5	10	1.23	1.01	0.22	315	0.069	0.013	0.011
11	4 mg/l	対照	—	0	4.10	4.11	-0.01	297	-0.003	—	—
12		大型	16	10	4.10	1.68	2.42	299	0.724	0.724	0.188
13		大型	15	10	4.10	1.25	2.85	305	0.869	0.869	0.241
14		小型	10	10	4.10	0.69	3.41	303	1.033	1.033	0.431
15		小型	13	10	4.08	0.38	3.70	300	1.110	1.110	0.356
16	飽和	対照	—	0	7.75	6.22	1.53	325	0.497	—	—
17		大型	13	10	7.70	4.68	3.02	335	1.012	0.499	0.160
18		大型	10	10	7.65	4.50	3.15	330	1.040	0.535	0.223
19		小型	3	10	7.71	5.31	2.40	320	0.768	0.278	0.387
20		小型	3	10	7.67	5.35	2.32	320	0.742	0.253	0.351

(\* 濃度差 0.2 mg/l を下回る値のデータは、分析限界に近く誤差が大きい。)

なした。内挿により求めた各容器の48時間後のDO濃度と生残率、実測値による72時間後のDO濃度と生残率をそれぞれプロットすると、図-17のようになる。図には、個体の平均湿重量が5mg以上の大型個体を投入した容器と5mg以下の小型個体の容器とを区別してプロットしてある。時間の経過とともに生残率が低下し、プロットした点は下へと降りてきていることが判る。大型個体と小型個体の差はわずかであるが、大型個体の方が同じ濃度ではやや生残率が高いことがわかる。

72時間後の死亡率(死亡率=1-生残率)を正規確率紙にプロットし、72時間LC<sub>50</sub>を求めてみる。図-18より、1.3~1.7mg/l程度の値となる。

RUN-2では、抗生物質の添加の有無による生残率の差を比較しようとした。表-8の結果から比較してみる。当初に充分なDOを含んでいる容器では、終了時にも全数生残しており硫化物の生成もほとんど認められない。20°C、25°Cいずれの温度でもこの事が認められる。従って、DOが充分存在する時には、抗生物質の添加による生残結果の差は生じていない。抗生物質自体の毒性も問題とならない。

低いDO濃度の場合について比較する。水温に拘わらず、2~3日目から死亡個体が観察されはじめている。

25°Cでは添加・無添加とも4日目に全数死滅している。20°Cでは無添加ケースで6日目に全数死亡しているが、添加ケースで4日目以後の生残率は無添加ケースよりやや良い。全数死滅時に測定した硫化物濃度は、いずれの場合でも高い濃度で認められた。硫化物の生成は、25°Cで20°Cより高いものの、抗生物質添加の有無による差は小さい。

以上の結果より、ここで用いた濃度の抗生物質投与は、ヨツバネスピオの生残や硫化物生成にはほとんど影響を与えていないと言える。ただし、低DO条件で長期間飼育した時には、わずかながら生残率の向上傾向もうかがえる。

RUN-3では、すべての容器に抗生物質がRUN-2と同濃度で添加されている。RUN-3の結果を、まずRUN-2と比較し、飼育条件の差異を検討する。表-10には、各容器に終了日とその時の硫化物濃度が示されている。0.03mg/lを超えた容器が4個あるが、いずれも表-8の低DO時に検出された硫化物濃度より1オーダー低い値である。表-10のDO濃度は、4日目に開封した容器でもすでに0.5mg/lを下まわっており、最終日の10日目にかけて低いDO濃度で経過していったことがわかる。つまり、RUN-3は、DO濃度ではRUN-1,2と

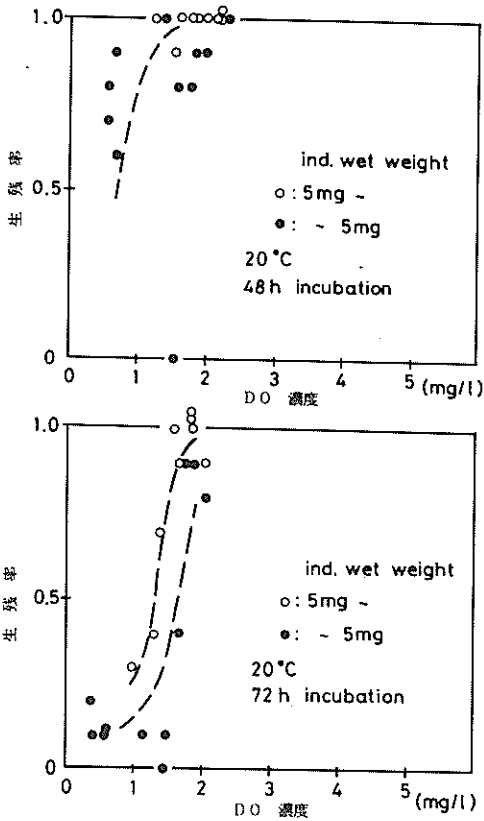


図-17 ヨツパネスピオの貧酸素に対する生残率  
上段は20°Cで48時間経過した時、下段は72時間経過した時の生残率をDO濃度に対しプロットしてある。平均湿重量5mg以上の個体と5mg以下の個体とで区別してプロットしてある。

同程度の低さとなっているものの、生成硫化物の濃度はRUN-2に比して著しく低い条件であった。生成硫化物の低濃度は、海水中の含有有機物濃度の低さに起因していると思われる。

表-9の生残結果のうち、水温20°C DO 1mg/lのケースについて生残個体の経時変化を図-16にプロットしてある。同図の中のRUN-1での結果に比して、生残率の向上が著しい。同じ水温・DO条件のRUN-2の結果を表-8の#4容器から読み取ると、RUN-3の#2~#4の結果とよく似ている。いずれも3~4日目から死亡が見られ6~7日目にはほとんど死滅している。DOが飽和の場合は、RUN-2,3とも全数生残している。水温25°C DO 1mg/lではRUN-3の方がRUN-2より生残率が高い。死滅過程を比べると、結局、RUN-2,3は、RUN-1より永く生き延びる傾向が特に低DO濃度で顕著であることがわかる。

生残率が高くデータとしてはあまり適当ではないが、

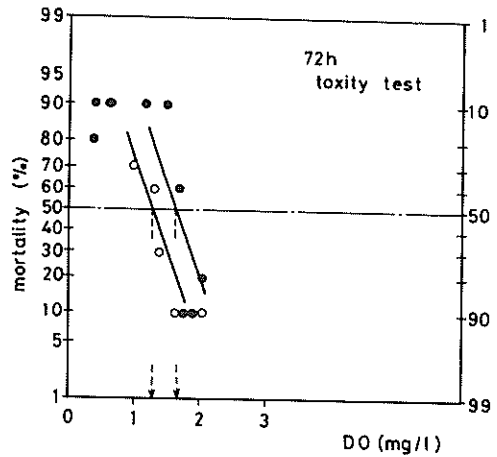


図-18 ヨツパネスピオの72時間LC<sub>50</sub>の算定図(20°C)

RUN-3の結果より96時間LC<sub>50</sub>を求めてみる。20°C、25°Cのいずれに対しても、DO 0.3mg/l以下と推定される。240時間LC<sub>50</sub>は、終了時DOが狭い範囲にまとまり、推定が困難であった。いずれにしる、RUN-1の72時間LC<sub>50</sub>に比して低い値となり、永く生き延びる傾向がLC<sub>50</sub>の値でも示されている。

RUN-1とRUN-3とで生残率が著しく異なる理由を、実験条件等を比較して検討してみる。表-4, 5を見ると、実験条件としての主たる相異点は、①供試個体・海水の採取場所・時間、②供試個体のサイズ(湿重量)、③飼育容器の容積、④抗生物質の添加の有無、である。RUN-2の結果では、④の差異に起因する生残率への影響は小さかった。RUN-2とRUN-3を比較する。③の差異に起因する影響は、低DO濃度時に見られ、大きな容器の方が生残率がやや高かったが、RUN-1とRUN-3との差を説明できるほどではない。①, ②の理由による差の可能性が高い。抗生物質の添加の効果が、海水含有有機物濃度に左右されるのであれば、容器の容積をRUN-3と同じにしてRUN-2の実験を試みる必要がある。①と④の相乗効果の可能性も捨てられない。

表-10を見ると、開始時のDO濃度が2~6倍程ちがっていても終了時には0.2~0.5mg/lの範囲に収束している。分析上の理由で値が似てきたものとは考えにくい。DO低下につれてDOの減少も遅くなっていると思われる。低DO濃度下でのヨツパネスピオの酸素消費(呼吸)も遅くなっていると予想される。

#### (2) 呼吸速度の検討

個体の体内有機物の酸化により活動のエネルギーを得るというエネルギー代謝の速度は、呼吸速度で示される。

生存や活動のエネルギーは個体が大きく活動の激しいほど大量に必要とされる。そこで、呼吸量 (R) と個体重 (w) との間には、次の関係<sup>21)</sup>をあてはめる事が多い。

$$R = a \cdot w^b \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、a, bは個体に依存する定数で、aは水温などの環境条件にも依存している。個体の重量が増加すると個体の呼吸量も増加するのでbは0 (ゼロ) より大きい。bが1より小さいと、単位重量あたりの呼吸量 (R/w) 即ち呼吸速度は、成長につれて小さくなる。

表-11を見ると、同じDO条件下では、小型の個体の方が呼吸速度が大きい。酸素濃度の高いケース (容器# 16 ~ # 20) で見ると、大型個体の容器では0.5 mg/24 hの呼吸量であり、小型個体の容器の2倍程度のDO消費が見られたが、体重比が3~4倍あるため、湿重量あたりの呼吸速度としては、大型個体で小型個体の1/2程度の値となっている。小型個体 (5 mg以下) では、体重あたりのエネルギー代謝がより活発であると思われる。個体のサイズによる呼吸速度の差は、同一のDO濃度条件下の値を比較することにより検討できる。表-11では、開始時のDO濃度が類似の4グループにまとめられている。このうち2 mg/lのケースは、開始時と終了時の濃度差が小さく誤差がやや大きい。他の3グループの結果、および海水中有機物が少ないRUN-3のうち、表-10の# 15, 16の容器の結果について、平均個体湿重量と呼吸速度との関係をプロットすると図-19のようになる。図-19は、横軸に平均個体湿重量、縦軸に呼吸速度のそれぞれ対数をとってある。図中の点のうち、終了時DO濃度が4 mg/lを上まわり高いDOが維持されていたグループ (開始時の設定DO濃度が、7.7および8.2 mg/l) 6点について、湿重量 (w) と呼吸速度 (R/w) との回帰式を求めると、次式となる。

$$\ln (R/w) = -0.6552 - 0.3489 \cdot \ln (w) \quad \dots (2)$$

$$(r = -.888)$$

または、

$$R = 0.519 \cdot w^{0.651} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで  $\ln (x)$  は x の自然対数、r は相関係数。

図-19からは、どのようなDO条件でも式(1)が成立するかどうか不明であり、式(1)の定数 a, b がDO濃度にどう依存するのかは読みとれない。

そこで、なるべく湿重量 (w) をそろえて、DO濃度と呼吸速度との関係を調べてみることにする。個体のサイズで、湿重量 10 mg を基準に大型個体と小型個体とに分けてみる。DO濃度が高い時の呼吸速度は、大型個体で

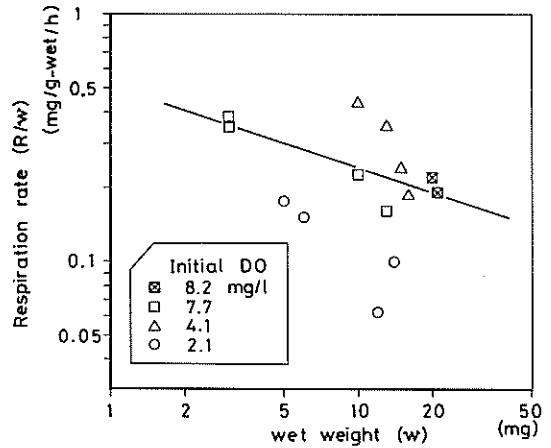


図-19 ヨツバネスピオの呼吸速度と個体湿重量との関係 (図中の直線は、開始時設定DO濃度 7.7, 8.2 mg/l の6データに対する回帰直線)

湿重量あたり 0.2~0.24 mg/(g・h) となり小型個体で同じく 0.24~0.35 mg/(g・h) となることが図-19より読みとれる。各サイズ群内での呼吸速度値の差は、湿重量あたり高々 0.1 mg/(g・h) である。次いで、横軸に実験開始時DO濃度、縦軸に呼吸速度をとり、個体サイズを区別してプロットすると図-20のようになる。表-11の#8, 10の容器のデータも加えてプロットしてある。

図-20を見ると、DO濃度が高い時は図-19から読みとれる呼吸速度となっており、DO濃度が減少していてもDO 4 mg/lまではこの値が維持されている。呼吸速度は、このDO範囲ではDO濃度に依存しない。DO濃度が3 mg/lを切ると呼吸速度も徐々に減少する。

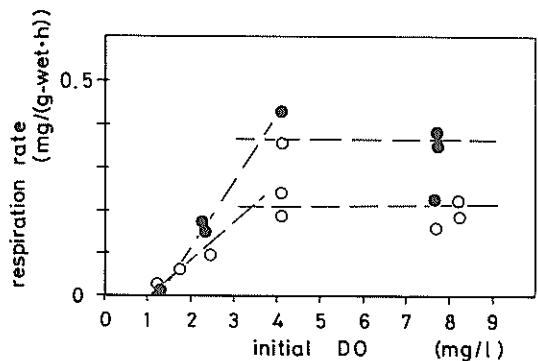


図-20 ヨツバネスピオの呼吸速度とDO濃度との関係 湿重量 10 mg を超える大型個体は白丸、10 mg 以下の小型個体は黒丸で示してある。図中の線は、目測による。

DO 1 mg/l 付近では、ほとんどわずかの呼吸しか行っていないことがわかる。DO 濃度に依存して呼吸速度が減少する区間は、DO 濃度で 3.5 ~ 4 mg/l 程度より 1 mg/l 程度までである。DO 1 mg/l 以下での呼吸については、RUN-4 の実験データからは不明である。

DO 濃度に対する呼吸速度の依存性は、図-20 で把握できた。より詳しい検討のためには、飼育期間中の DO 濃度が一定に保てるような装置を用いるなどの工夫が必要であろう。

### 3.4 ヨツバネスピオのリン摂取速度測定実験

#### 3.4.1 動物の餌料摂取と物質の代謝

ヨツバネスピオは、低酸素濃度時には呼吸速度を下げエネルギーの代謝をへらすことが実験によりわかってきた。エネルギーの代謝は、摂取し体内に吸収同化した餌料の一部を消費して行なわれる。そこで、低酸素濃度時に、ヨツバネスピオの餌料の摂取の速度がどのように変わるのか飼育実験を行なってみた。まず、餌料の摂取と代謝との関係について概観する。

底生生物のうち、動物は光合成により有機物を自ら作り出すことができないので、海域中の有機物を摂取して生活している。摂取した有機物の行方を追ってみると、一部は糞として有機物のまま排泄される。一方、体内に吸収された有機物は、自分の運動や生活のために分解消費（エネルギー代謝）される。その結果生成された分解無機物の体外分泌も行なわれている。更に、自己の体として同化され体重となったり卵となったりもする。また、脱皮や体の一部の脱落などに使われる場合もある。これらの関係は簡単な次式で表わされる<sup>21)</sup>。

$$C = G + U + F \quad \dots\dots (4)$$

ここで、C；摂食量、G；生物体として同化保持されたもので体物質の増加と生殖質の生産量の和、U；生活の活動の中で熱や仕事として使われ、体外へ分泌放出された量で生殖物質を含まない量、F；糞粒として排泄された不消化物、となる。

消化管を通じ一度は体内にとり込まれた量を総同化量 A とし、また体内にとり込まれ生物体としてつくられた量を純同化量 P とし、それぞれ次式で定義する場合もある。

$$A = C - F \quad \dots\dots (5)$$

$$P = G + U \quad \dots\dots (6)$$

未消化のまま糞として排出される割合 F/C は、餌により個体の生理状態により変化するが、貝類では、2 割程度<sup>22)</sup>であることが多い。浮遊有機物を海水ごと口にと

り込み、えらにより分別し粒状物のみを摂食する河過食性の貝などでは、分別に際し一部の粒状物を摂食することなく擬糞として排出することもある。擬糞は一度も体内に入っていないことになる。底生生物の体外分泌については測定例が少ない。底生生物では捕食量 C の大部分は代謝 (U) として生息維持のために使われるとされている。有機物を消費してエネルギーを取り出す代謝活動には、通常、酸素の消費を伴う。代謝活動が活発なほど、酸素の消費も大きくなる。呼吸により体内に取り込んだ酸素は、分泌物や糞に含まれて排出されることはなく、体の一部として同化される量もほとんどない。呼吸による酸素消費は、ほぼすべて代謝活動に用いられていると考えて良い。有機物の収支から検討される代謝活動量 U は、酸素の収支からは呼吸量 R に対応している。

餌として摂取した有機物の行方としては、生活環に比して短い期間では、同化 G、代謝分泌 U、排糞 F などが主要なものとなる。これに対して、寿命程度の期間やそれ以上の期間では、放卵放精といった生殖物放出量や脱皮殻量なども大きな割合を占めてくる。

摂食量 C の測定方法としては、一般に次の方法がある。

- ① 水槽飼育下で既知量の投餌を行ない、一定時間後の残存餌料を測りその差から求める方法。
- ② 個体の消化管内容を定量し、別途実験室内で消化管内平均滞留時間を求めその比から求める方法。
- ③ 河過食性の底生生物に対しては、①の変法として、餌料を懸濁させた懸濁液を与え、懸濁濃度の時間的減少により求める方法。この場合、摂取されずに排出される擬糞に対する考慮が必要となる。
- ④ 底泥表面の沈積粒子を摂食する底生生物に対しては、放射性同位元素でラベルした餌料を用いて測定する方法。

また、泥を大量に摂食し、含有有機物を取り込みほぼ同量の泥を排糞する生物に対しては、摂取した泥と排出した泥の有機物含量の差と排糞速度から求める方法。カニなどでは巢の周辺に砂団子の数量などで排糞速度が定量できる。

#### 3.4.2 ヨツバネスピオの摂食量測定方法の検討

ヨツバネスピオは、底泥表面の沈積粒子（デトライト）を摂食する食性であるが、個体重量が小さいこともあり、摂餌量は少量である。3.4.1 に示した方法のうち、③は食性が異なり適用できない、また個体のサイズから②は適用が困難である。①では、投餌量に比して摂餌量が小さい、排糞物と投餌物の区別がしづらいなどから、長期的な実験には不向きようである。④のうち、排糞物重量と糞含有有機物の測定は可能であり、摂餌量の一部を構成している排糞量 F は把握できる。このように、

摂餌量Cの直接測定はむずかしい。

そこで、式(4)の関係を利用し、排糞量F、同化量G、代謝分泌量Uをそれぞれ別途測定し、これらの和をもって摂食量Cを推定することとする。各量をそれぞれ独立に測定することから、各量とも個体の単位湿重量あたりの速度値で表示し、供試個体の差や測定時間の差に対処する。各速度値は、エネルギーの単位(カロリーとかジュール)で表示しても良いが、ここでは分析上の都合もあり、栄養物質の1つであるリンの量で測定・表示することとした。リンは、有機態のリンとして摂食される。未消化の有機態リンは排糞される。消化・吸収された有機態リンの一部は体へと同化され、一部は代謝作用で分解される。分解され無機化されたリンは体外分泌される。代謝分泌量Uは代謝の活性を表わし、代謝の活性は通常(好気呼吸の場合)は酸素の消費を伴う。従って、代謝量Uの測定値は、酸素の呼吸量Rを適切な当量比を用いてリンの分解量へと換算した値と等しくなる。

$$U = \alpha \cdot R \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $\alpha$ は酸素の呼吸量Rから、リンの分解・代謝分泌量Uへの換算係数。 $\alpha$ の値は、代謝に用いられる有機物の組成と分解反応式がわかれば求められる。同様に、リンと炭素、窒素など他の栄養塩との当量比やCODとの換算比も、反応にあずかる有機物の組成がわかれば推定できる。このため、ヨツバネスピオ個体の組成なども測定することとした。

### 3.4.3 排糞速度測定実験 (RUN-5)

#### (1) 実験方法

糞粒がよく観察できる飼育装置を作り、海水・底泥とともに供試個体を投入し、更に飼料を与えた。一定期間の飼育後、糞粒のみをピペットにて回収し分解した。

#### a) 供試個体の調整

3.3.2 (1)の a) に述べた、昭和61年の実験 (RUN-1) に同じである。

#### b) 供試海水の調整

3.3.2 (1)の b) に述べた、昭和61年の実験 (RUN-1) に同じである。

#### c) 供試底泥と餌料の調整

底泥は、ヨツバネスピオを採取した横浜港鶴見川河口付近で同時に採泥し、0.5 mm 目のふるいを通過させ異物を除去した。冷凍保存し、必要に応じ解凍して実験に供している。

投与餌料は、プランクトンネットを用いて汙過採集し、捕集物を沈澱・濃縮した。東京湾奥品川のお台場公園付近で採取し、沈澱物は *Skeletonema costatum* などの珪藻類を多く含む植物プランクトンが優占していた。

#### d) 飼育容器・装置

厚さ1 mmの透明アクリル板を、縦10 cm×横15 cmに切り2枚向かい合わせて2 mmの間隔になるように三辺にまちを入れて水密にはり合わせる。上辺のみが開放されている扁平で深いポケット状の容器となる。この容器に下から2/3ほど前処理した底泥をつめ、水深23 cmのガラス製水槽に沈めている。水槽内には、予めN<sub>2</sub>ガスと空気とで溶存酸素濃度を調整した海水が満たしてある。水槽は、恒温室に静置し、飼育期間中の水温を一定に保っている。装置の概念図を図-21に示す。

#### e) 実験条件

設定した条件を、表-12に示す。DOの条件は、呼吸速

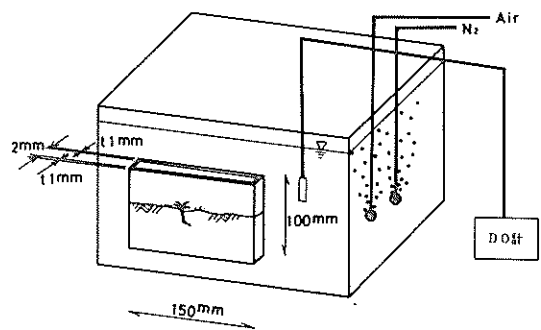


図-21 ヨツバネスピオ排糞速度実験 飼育装置

表-12 排糞速度実験の飼育条件と実験ケース

RUN# 実施時	飼育条件				実験ケース		備考
	水温(°C)	光	期間(時間)	容器毎の投入個体数	DO濃度段階 / 段階数 (mg/l)	同一条件下の容器数	
RUN-5 S62.1	20	暗	72	10	2, 4, 飽和 / 3	2	大型個体と小型個体とを区別

度実験の結果などを考慮し、2 mg/l 以上の3段階とした。1つのアクリル製ポケット状容器に、大きさをそろえて10個体ずつヨツバネスピオを投入した。容器は12個用意し、各DO段階毎に、大型個体用に2個、小型個体用に2個ずつ用いた。

#### f) 実験手順

プランクトン濃縮液4mlを餌料として各ポケット状容器にピペットで投与する。大型個体と小型個体とにピペット法で分別後、各DO濃度毎にわけて湿重量を測定する。湿重量の測定法は、3.3.2(1)のa)に準じている。湿重量の測定後、各ポケット状容器に個体を静かに投入する。20℃恒温暗状態で72時間飼育後、ポケット状容器を横から観察しながら糞をピペット吸引し取り出す。共存泥の吸引がさけられないため、別の容器に糞を沈降させ、再度ピペット吸引しゆるく洗浄している。集めた糞につき、総湿重量、乾重量、含有有機リン量、含有無機リン量を測定している。一方、終了時の個体について、生残個体数および生残個体湿重量を測定している。また、飼育開始時の投与餌料と供試底泥については、別途含有リン量を分析している。リンの分析は、海洋観測指針<sup>28)</sup>に示す方法に準じて、総リンと無機態リンを分析している。

#### (2) 実験結果

供試底泥および投与餌料のリンの含有量を表-13に示す。ここで、有機態リン(O-P)は、総リン(T-P)と無機態リン(I-P)との差として求めている。また、表中には、T-Pに対するO-Pの比も同時に示してある。

終了時の生残個体の分析結果を表-14に示す。同一条件で2つの容器で同時に飼育しており、すべての個体が生残していれば表中の個体数は20となる。湿重量と個体数で除して平均湿重量を求めると、大型として区分されていても10mg/個体を超えているのは、DO 2mg/lに対する個体のみであり、小型として区分されていても飽和状態に対する個体では5mg/個体を超えていたことがわかる。また、生残率は必ずしも低DO濃度で低下しているわけではなく、最も低い生残率は飽和濃度時の小型個体に対して生起している。

終了時に採取した糞の分析結果を表-15に示す。糞として排泄されたT-P量は、52μg以下であり、これは投餌有機物量(投餌O-P量)86μgを下まわっており、この実験が、餌料を食べ尽してしまう前に終了していることがわかる。T-Pに対するO-Pの比も同時に示してある。

#### (3) 排糞速度の検討

ヨツバネスピオの糞は、団子状にかたまっており、排出された団子をピペットで採り出すことができる。一方、

表-13 排糞速度実験RUN-5の供試底泥・投与餌料分析結果

形態 試料	T-P	I-P	O-P	O-P/T-P	餌料として 投与O-P総量*
供試底泥	647 mg/kg	401 mg/kg	246 mg/kg	0.38	—
投与餌料	62.3 mg/l	40.7 mg/l	21.6 mg/l	0.35	0.086 mg

(\* 餌料液 4ml を各容器に投与している。)

表-14 排糞速度実験RUN-5の個体サイズと生残結果

DO濃度	個体サイズ	生残個体数	湿重量 (g)	個体あたりの 平均湿重量 (mg)	生残率
飽和状態	大型	18	0.14	8	0.90
	小型	8	0.05	6	0.40
4 mg/l	大型	9	0.07	8	0.45
	小型	15	0.07	5	0.75
2 mg/l	大型	12	0.14	12	0.60
	小型	13	0.05	4	0.65

プランクトン濃縮液を投与し、餌として摂食させたが、①共存底泥中の有機物を摂食する可能性があり、その際、摂食した底泥量の測定が困難であること、②プランクトン濃縮液は摂食以外の要因（分解・沈降など）で有機物量を変化させるとともに残留プランクトン液量（食べ残した餌の量）のみを体外分泌や糞とより別けて取り出すことが困難であり、投与餌料のうちどれだけが摂食されたかの測定が困難であること、の2点からヨツパネスピオの口に入った餌の量の測定はできない。

表-15に示された排出リン量などをもとに、とりあえず単位時間単位湿重量あたりの排糞速度を求めることを考えよう。72時間の飼育期間中に排泄された糞量は表中に示されている。この糞の排泄にあずかった個体数は、飼育開始時と終了時とで異なっている。生残率は、設定したDO濃度条件や個体サイズによって統一的な傾向が見られなかった。従って、個体の死亡は、ピペットによ

るふるい分けや事前の湿重量測定時などに損傷を受けたこと、などの偶発的な理由によるものも考えられる。損傷個体の生存期間やその間の排糞活動については、不明である。ここでは、死亡個体の状況などから損傷個体の死亡は早い時期に生じし、排糞量は専ら最終日までの生残個体によってもたらされたとして排糞速度を算定する。結果を表-16に示す。もし、死亡個体も排糞量に寄与しているとすると、表中の値は本来の排糞速度に比して過大な値となる。特に飽和状態の小型個体、4mg/lの大型個体の2ケースは、生残率が低く(0.4~0.45)排糞速度値としては誤差が大きい。

表-16を見ると、糞重量の排泄速度は乾重量で3~10mg/(g・h)と3倍程度の開きがある。しかし、総リン(T-P)の排糞速度では、湿重量1gあたり毎時5~9μgであり、生残率の低く誤差の大きな恐れのある2ケースを除けば、ほぼ5μg/(g・h)となる。有機態リン

表-15 排糞速度実験RUN-5の排糞重量・排糞リン量分析結果

DO濃度	個体サイズ	排出糞重量		排出リン量			O-P/T-P	T-P/乾重量	O-P/乾重量
		湿重量	乾重量	T-P	O-P	I-P			
		mg	mg	μg	μg	μg			
飽和状態	大型	466.6	25.0	52.4	19.9	32.5	0.38	0.0021	0.0008
	小型	559.7	39.6	30.9	15.4	15.5	0.50	0.0008	0.0004
4mg/l	大型	587.3	33.1	33.3	12.8	20.5	0.38	0.0010	0.0004
	小型	521.9	28.6	26.6	8.4	18.2	0.32	0.0009	0.0003
2mg/l	大型	585.7	63.4	48.5	22.2	26.3	0.46	0.0008	0.0004
	小型	493.2	28.3	18.0	10.8	7.2	0.60	0.0006	0.0004

表-16 排糞速度の算定（湿重量1gあたりの毎時の量）

DO濃度	個体サイズ (平均湿重量)	排糞速度			
		糞湿重量 mg/(g・h)	糞乾重量 mg/(g・h)	T-P μg/(g・h)	O-P μg/(g・h)
飽和濃度	8 mg	46	2.5	5.2	3.2
	6*	155	11.0	8.6	4.3
4 mg/l	8*	117	6.6	6.6	4.1
	5	104	5.7	5.3	3.6
2 mg/l	12	58	6.3	4.8	2.6
	4	137	7.9	5.0	2.0

(\* 誤差の大きいと思われる実験ケース)



でも同様に2~4 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ となる。

実験上の誤差が大きい恐れがあるため、DO濃度による排糞速度の変化については判断しにくい。O-Pの排糞速度が低DO時にやや低い値となっているが、他のDO濃度での値に比して特に著しく低いとは言えない。同様に、個体のサイズによる排糞速度の変化についても、判断しにくい。

排泄された糞のO-P/T-P比は、表-15によると0.3~0.6である。底泥、投与餌料のO-P/T-P比は、おおむね0.4であり、O-P/T-Pのバランスはよく似ており、O-Pの減少はあまり顕著ではない。単位乾重量あたりのT-P、O-Pの含有率は、底泥の場合表-13で与えられており、単位(mg/kg)を直すと各々0.0006、0.0002となる。排泄された糞は、これより高いリン含有率を示し、摂食は主に投与されたプランクトン濃縮液であったことが確認できる。プランクトン濃縮液の乾重量あたりのリン含有率は、測定されていない。

### 3.4.4 同化成長速度測定実験(RUN-6)

#### (1) 実験方法

投餌しながら比較的長期にわたってヨツバネスピオを飼育し、ヨツバネスピオの体重の増加を測定する。増加量より、自己の体へと同化される同化速度を求める。

#### a) 供試個体、海水、底泥、餌料の調整

3.4.3 排糞速度測定実験と同じ。

#### b) 飼育容器・装置

比較的長期の飼育となるため、径約30cm程度の丸型水槽を用い、前処理した底泥を約2cmの深さに敷きつ

め海水を水深20cmほど満たした。N<sub>2</sub>ガスと空気によりDOを調整できるようにし、更に水面からの酸素の出入りを少なくするためプラスチックの落としブタをしてある。この丸型水槽を恒温室内にならべて飼育に用いた。

#### c) 実験条件

設定したDO濃度は、3.4.3 排糞速度測定実験と同じである。1つの飼育容器に30個体ずつヨツバネスピオを投入し、14日間にわたって飼育している。投餌は開始時と7日目との2回に分けて各々1m<sup>3</sup>ずつ実施している。設定条件を表-17に示す。

#### d) 実験手順

所定のDO濃度に調整後、予め湿重量を測定しておいたヨツバネスピオ30個体を静かに投入する。餌料(プランクトン濃縮液)1m<sup>3</sup>を投入後フタをし、恒温室内に静置する。毎日1回、DO計にて容器内DO濃度を確認し、必要に応じてN<sub>2</sub>ガスもしくは空気により所定のDO濃度に調整する。7日目に餌料1m<sup>3</sup>を再投与する。14日目に生残ヨツバネスピオをピペットにより別け採り、湿重量を測定する。湿重量とリン量との関係を調べるため、開始時に飼育個体以外に類似の大きさ分布の個体を用い、体組成成分(炭素、窒素、リンの含有率)を分析する。餌料のリン含有量も分析する。

#### (2) 実験結果

ヨツバネスピオの体組成を表-18に示す。また、餌料の含有リンの分析結果を表-19に示す。餌料として各容器に投与されていた有機態リン量は、0.047mgと算定される。体組成のうちリンの占める割合は乾重量あたり

表-17 同化速度実験の飼育条件と実験ケース

RUN#	実施時	飼育条件				実験ケース	
		水温(°C)	光	期間(日間)	容器毎個体数	DO濃度段階 / 段階数	同一条件下の容器個数
RUN-6	S62.1	20	暗	14	30	2,4,飽和 / 3	1

開始時と7日目に同量ずつ投餌

表-18 ヨツバネスピオの乾重量あたりの組成(RUN-6)

(単位:乾重量あたり mg/g)

構成成分	炭素	窒素	リン	水分	湿重量 / 乾重量比
組成	357.2	90.3	9.08	82%	5.6

表-19 同化速度実験 RUN-6 の投与餌料分析結果

形態 試料	T-P	I-P	O-P	O-P/T-P	餌料として 投与O-P総量*
	投与餌料	64.5 mg/l	40.8 mg/l	23.7 mg/l	

(\* 餌料 1 ml ずつ 2 回, 計 2 ml を投与している。)

9.08 mg/g であるから、投与餌料 (0.047 mg のリン) すべてが同化されたとすると、約 5 mg ( $0.047 \div 9.08 \times 1,000$ ) の乾重量の増加となる。湿重量としては、乾重量の 5.6 倍の 30 mg 程度の増加に相当する。糞や呼吸として使用されるものを考慮し、個体の同化のみに 2~3 割程度利用されると仮定すれば投餌量は体重の増加 6~10 mg を支える量に相当する。1 個体としては 0.2 mg ~ 0.3 mg の体重増に相当する。

開始時と終了時のヨツバネスピオの湿重量を生残個体数とともに表-20 に示す。14 日間の飼育による湿重量の変化は、生残個体が開始時の 5~8 割となっていることもあり減少している。総湿重量の増加量の算定ができないので、生残個体の体重分布が開始時の分布と同じだと仮定し (大きい個体のみが死亡したり、小さい個体のみが死亡したりはしていないという仮定)、個体あたりの平均湿重量を比べてみる。やはり 14 日後の値が減少している。これは、開始時の湿重量測定値が過大であったか、終了時の測定値が過小であったかのいずれかの理由によると思われる。開始時に、別途類似の大きさの 137 個体の湿重量を十分な水切り後に測定しており、その結果では平均湿重量 0.0022 g (2.2 mg) を得ている。表-20 の開始時の平均湿重量は、この 4 倍程度の値となっている。湿重量測定時に個体の損傷を避けるべく配慮したため、水分を十分に除去しなかったためだと思われる。投餌量より考えた湿重量の増加期待量に比して、開始時湿重量

の測定誤差は大きく、この結果からは同化速度の算定は困難である。

(3) 同化成長速度の推定

表-20 の測得値から同化の速度の算定は困難であるが、この実験の周辺データも含めて、大略の速度を推定してみる。推定は次の 2 方法に依った。

① 表-20 の開始時の平均湿重量を、別途測定した 137 個体の類似のサイズ分布の平均湿重量値で置き換えて推定する方法。

② ヨツバネスピオについて調べられた生育期間と、幼生と最小成熟個体との体重差から成熟するまでの同化速度を推定する方法。

ヨツバネスピオの成長に関する研究例は、生活史を調べる観点から、体節数や剛毛数の変化の記述に重点が置かれ湿重量による測定例がほとんどない。上記のような粗い推定でも、意味があると思われる。

第一の方法によると、14 日間における平均湿重量の増加は 0.8~2 mg となる。湿重量の増加を、体成分のうちリン (T-P) の増加に換算すると、表-18 の組成割合を用い、1~3  $\mu$ g となる。開始時と終了時の湿重量の平均値で除し、更に 14 日間 (336 時間) で除して、単位湿重量あたり 1 時間毎の増加速度を求めると、1~3  $\mu$ g/(g·h) となる。

第二の方法で考える。横山<sup>13)</sup> の剛毛節数の観察によると、10~11 月に新規に着底した幼生が翌年 3 月には

表-20 同化速度実験 RUN-6 の湿重量の増加測定結果

指標	開始時			14 日間飼育後		
	個体数	総湿重量 g	個体あたり平均湿重量 g	個体数	総湿重量 g	個体あたり平均湿重量 g
DO 濃度条件						
飽和濃度	30	0.28	0.009	24	0.08	0.003
4 mg/l	30	0.24	0.008	23	0.10	0.004
2 mg/l	30	0.23	0.008	15	0.07	0.004

一世代前の個体とほぼ同様の剛毛節数にまで成長しているとき、成熟個体までの期間は概ね5ヶ月と見られる。幼生の重量は成熟個体の重量に比して小さく無視できる。成熟個体のうち、成熟したての重量として、実験に用いたヨツバネスピオのうち小型のものをを用いると、湿重量は1~2mgとなる。5ヶ月(150日)間でこの重量まで成長したとして0.5~1 $\mu$ g/(g $\cdot$ h)程度のPの同化速度となる。第一の方法で求めた値の1/3程度となっている。

### 3.4.5 分泌排泄速度測定実験 (RUN-7)

#### (1) 実験方法

海水・底泥とともに供試個体を投入し、更に餌料を与えた。飼育期間中毎日海水を少量採水し、含有リン濃度を測定する。

#### a) 供試個体、海水、底泥、餌料の調整

排糞速度実験について3.4.3(1)に記したと同じ方法による。

#### b) 飼育容器・装置

径10cm、深さ40cmの円筒形アクリル容器を用い、底泥を1cm程度敷いた上に海水を3.3l程度上載した。DO濃度は毎日DO計にて測定し、必要に応じてN<sub>2</sub>ガスと空気とを用い所定の濃度に調整した。恒温室内に容器を静置し、水温を一定に保った。採水は底泥上10cmの位置より泥粒子を混入させぬように、サイフォン式により実施した。

#### c) 実験条件

設定したDO濃度条件、水温条件は、排糞速度実験と同じである。各容器には、サイズを揃えて大型個体もし

くは小型個体を30個体ずつ投入してある。また、底泥のみの対照容器を各DO濃度段階毎に用意し、溶出による濃度変化に対処した。従って、DO濃度段階毎に、大型個体用、小型個体用、対照用の3ケの容器を用いた。実験条件を表-21に示す。

#### d) 実験手順

N<sub>2</sub>ガスと空気とでDO濃度を調整後、各容器に所定の個体を湿重量測定後静かに投入し、更に餌料1mlをすべての容器に投与する。静置状態で5日間飼育し、その間毎日海水を採水しリン含有濃度を分析する。また、毎日DO濃度を確認し、必要に応じてDO濃度を調整し所定濃度に近づける。最終日に生残個体を調べ湿重量を測定する。

#### (2) 実験結果

投餌量を餌料成分の分析結果とともに表-22に示す。投餌量は、30個体が5日間に摂食する量としてはやや不足しているが、餌料自体が水質変化に及ぼす影響も大きく、これ以上の量の投餌はむずかしい。

5日目の生残個体と湿重量とを表-23に示す。飽和状態の大型個体、DO 2mg/lの大型個体の2ケースを除いて生残率が悪い。底面積あたりの個体数密度が高かったことも原因であろう。飼育期間中に死亡した個体は、死後少しずつ分解されて海水中にリンを放出する。分泌量に比して分解による放出量が大きいと、分泌速度は算定できない。

そこで、生残率の高い2ケースと各対照容器とのみについて、5日間のリンの濃度変化を示すと、表-24のよ

表-21 分泌速度実験の飼育条件と実験ケース

RUN# 実施時	飼 育 条 件				実 験 ケ ー ス		備 考
	水温 (°C)	光	期間 (日間)	同一条件下 投入個体数	DO濃度段階 / 段階数 (mg/l)	同一条件下 の容器個数	
RUN-7 S62.1	20	暗	5	30	2,4,飽和 / 3	1	個体を投与しない対照用容器を同時に設置

表-22 分泌速度実験 RUN-7 の投与餌料分析結果

形態 試料	T-P	I-P	O-P	O-P/T-P	餌料として 投与O-P総量*
投与餌料	64.6 mg/l	41.2 mg/l	23.4 mg/l	0.36	0.023mg

\* 開始時に1ml投与している。

表-23 分泌速度実験 RUN-7 の最終日生残個体と湿重量分析結果

DO濃度条件	個体サイズ	生残個体数	生残率	湿重量 (g)	個体あたりの 平均湿重量 (mg)
飽和状態	大型	26	0.87	0.36	14
	小型	6	0.20	0.02	3
4 mg/l	大型	8	0.27	0.04	5
	小型	9	0.30	0.03	3
2 mg/l	大型	25	0.83	0.20	8
	小型	2	0.07	0.01	5

表-24 分泌速度実験 RUN-7 の容器内リン濃度の変化

(単位:  $\mu\text{g/l}$ )

DO濃度条件	個体サイズ	リンの分画	飼育日数					
			0	1	2	3	4	5
飽和状態	大型	T-P	74	94	105	121	150	161
		PO <sub>4</sub> -P	53	66	78	99	130	141
	対照	T-P	68	89	97	117	125	138
		PO <sub>4</sub> -P	53	58	68	77	83	95
2 mg/l	大型	T-P	61	62	86	108	158	188
		PO <sub>4</sub> -P	47	52	72	96	150	179
	対照	T-P	70	74	89	109	168	202
		PO <sub>4</sub> -P	58	62	66	72	124	151

うになる。ここでは示していないが、生残率の低い容器では、総リン(T-P)とリン酸態リン(PO<sub>4</sub>-P)の濃度差が徐々に増加し、死亡個体からの有機態リンの放出がうかがえる。表-24に示した2ケースでは、いずれもT-P、PO<sub>4</sub>-Pの増加が見られる。濃度の増加は、対照容器よりも個体を投入した容器で大きい。

### (3) 代謝分泌速度の検討

濃度変化の分析結果と、分析時の容器内の海水容積から、各容器内の海水中に存在するリンの量が算定できる。また、濃度分析用に採水した海水中のリンの量も、採水量(0.23l/日)から算定でき、容器外へ持ち出された量が各日ごとに求まる。持ち出し量の補正を加えると、海水中のリン量の毎日の増加が算出される。こうして算出されたリン量を飼育日数に対してプロットすると、図-22のようになる。DO 2 mg/l 条件の測定値は、4日目にいずれの値も大きめになっており、分析上のトラブルの可能性が有る。それ以外の値は、時間経過とともに直線的に増加している。DO飽和条件の値については5日

間、DO 2 mg/l 条件の値については3日目までのリン量を用い、回帰式を求めると傾きがリンの増加速度となる。回帰式の相関係数とともに結果を表-25に示す。ヨツバネスピオを投入していない対照容器での増加速度を差し引けば、分泌に起因する増加速度が求まる。更に、生残していた個体の総湿重量で除して、分泌速度とする。湿重量1gあたり毎時3~7 $\mu\text{g}$ のPO<sub>4</sub>-Pが分泌されていることになる。分泌速度のDO依存性は、検討できない。また、ヨツバネスピオが底面上を動くこと(バイオターベーション)に起因する溶出促進効果については、低DO濃度時に大きいと思われるがここでは区別できていない。

### 3.5 ヨツバネスピオの体組成・体長・乾重量

#### 3.5.1 組成を調べる理由

ヨツバネスピオの湿重量の測定は、体表面に付着した水滴の除去が完全には行なえないため、過大になる傾向が見られた。特に、飼育実験開始時には、個体への損傷を避けるために水滴の除去や個体の移動に手間がかかる

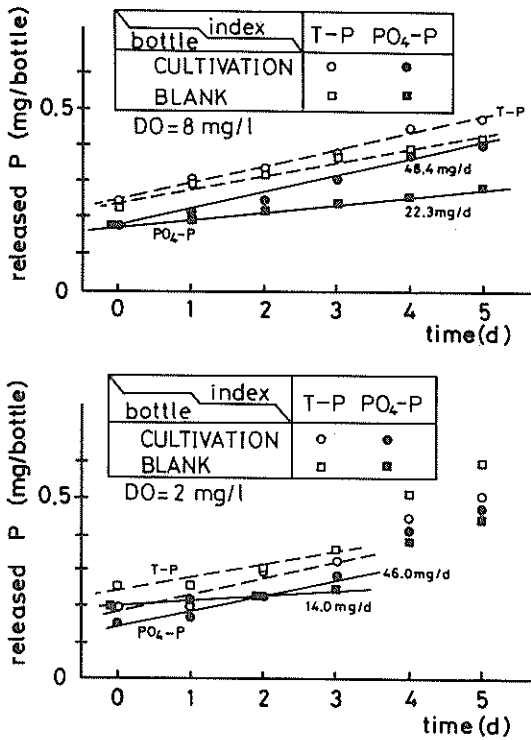


図-22 ヨツパネスピオの分泌によるリン量の増加  
上図は、DO 8mg/l、下図はDO 2mg/lの条件。水温は、いずれも 20C°。実線は、PO<sub>4</sub>-Pの増加量の回帰直線を示す。数値は直線の傾き、すなわちリンの増加速度。

ようになる。そこで、外見からわかる特徴から湿重量を推定する可能性を検討してみる。外見の特徴として、最も容易に判定できる体長を選んだ。

また、3.3、3.4では、酸素の吸収やリンの吸収・排出を測定しているが、炭素・窒素等の物質が同時に吸収・消費されている。生物の物質代謝には、炭素・窒素などの量として表示されることが多く、これらの結果と比較する上でも、リン1gの吸収が炭素・窒素の何グラム

の吸収に相当するののかについての割合を知る必要がある。この割合は、各作用や餌料、個体の生活状況などにより異なるようであり、ある条件下では他の物質に比べて炭素をよく消費する等の事象が生じている。しかし、長期的平均的な吸収・同化・代謝での割合はほぼ一定で体成分の割合に近いと思われる。従って、体を構成している主要構成物の組成も調べることにする。

### 3.5.2 測定方法

体長は、1mmメッシュの筋を入れてあるガラス板上に個体をのぼし、実体顕微鏡下で目測している。また、湿重量は、サランネット上にのせた個体をネットごと紙上に載せ充分水滴を除去した後化学天秤にて秤量している。その後、個体をアルミ箔容器に入れ、乾燥器で80℃24時間乾燥させ放冷後乾重量を秤量している。この方法で35個体のヨツパネスピオの体長、湿重量、乾重量を測定している。個体の移動や処理中に多少の損傷を与えているが、結果には影響を与えていない。

また、別途に、個体を大きさを揃えて3~21個体のグループにわけ、炭素・窒素・リンの体組成を測定している。炭素はCHNコーダー、窒素はCHNコーダーとケルダール分解による方法との両者、リンは酸分解後海洋観測指針による方法でそれぞれ分析している。また、組成の分析前に、上記方法と同様に湿重量、乾重量を求めるとともに、供試個体の35mm写真より体長を読みとっている。大きさ別に5クラスに分け、各クラスについて組成を求めているが、同一クラス内でもある程度のサイズのばらつきは避けられない。

### 3.5.3 測定結果

35個体についての体長、湿重量、乾重量の測定結果を図-26に示す。サイズは小型から大型まで広く分布しているが、最後の2個体は、特に大きいものであった。

体組成の分析結果を表-27に示す。表中には、表-18で測定した分析値も再掲してある。CHNコーダーの分析には、3個体を混合して必要試料量を確保しているが、

表-25 分泌速度の算定(湿重量1gあたりの毎時の量)

飼育条件	個体サイズ	平均湿重量	分析対象期間	リン増加速度	分泌による増加速度	個体の分泌速度	回帰式の相関係数
飽和状態	大型 対照	mg	5日間 (n=6)	mg/d	} 26.1	3.0	.991 .997
		—		22.3			
2 mg/l	大型 対照	8	3日間 (n=4)	46.0	} 32.0	6.7	.972 .997
		—		14.0			

表-26 ヨツバナスピオの体長, 湿重量, 乾重量の測定結果

#	体長 mm	湿重量 mg	乾重量 mg
1	10.0	10.1	1.6
2	10.0	9.7	1.4
3	11.0	6.3	0.7
4	14.0	6.6	0.5
5	14.0	4.0	0.2
6	14.5	6.2	1.0
7	14.5	10.3	1.7
8	15.0	5.7	0.5
9	15.0	5.9	0.9
10	15.5	7.8	1.1
11	15.5	7.3	0.7
12	16.0	6.6	1.1
13	16.0	8.2	0.8
14	16.5	6.3	0.4
15	16.5	6.1	1.0
16	18.0	6.5	1.3
17	19.0	6.7	0.7
18	19.5	7.0	1.0
19	19.5	16.1	2.0
20	19.5	9.4	1.4
21	20.0	11.1	1.3
22	20.5	10.8	1.3
23	20.5	16.3	1.7
24	21.0	11.0	1.8
25	21.0	6.5	1.4
26	21.0	6.4	0.8
27	21.5	10.2	1.7
28	22.0	7.1	1.1
29	22.0	11.1	1.7
30	22.0	12.4	1.7
31	22.5	14.3	2.2
32	22.5	9.4	1.3
33	26.0	14.0	2.2
34	41.0	55.3	11.7
35	46.0	73.5	14.3
平均	19.4	12.0	1.9
最大	10.0	4.0	0.2
最小	46.0	73.5	14.3

他の分析法では, 精度を確保するため乾重量で 10 ~ 60 mg となるように 10 ~ 20 個体を混合して用いている。体長の欄に示した値は, これらの個体の体長の範囲である。測定値は, 1 個体あたりの平均乾重量の順にならべてある。5 クラスに分け, 炭素, 窒素 (CHN コーダー法), 窒素 (ケルダール分解法), リンともに 5 個ずつの測定値を得ている。ただし, クラス分けは, 各成分分析に対して同一にならず, リンの分析結果は大型の個体と小型の個体で多く, 中間の個体の結果がない等の不揃はある。湿重量は, 乾重量に対する割合で示している。乾重

量の精度は 4 桁あるが, 湿重量の精度は低く湿重 / 乾重比は 2 桁の値を示した。

#### 3.5.4 ヨツバナスピオの体長, 組成の特徴

表-27 の結果より, 体長 (L) と湿重量 (WW), 乾重量 (DW) の関係を検討する。表中のデータのうち, 特に大型の 2 個体を除き 33 個体について回帰式を求めると次式となる。

$$WW = 1.521 * L^{0.597} \quad (r = 0.420) \dots\dots (8)$$

$$DW = 0.0760 * L^{0.990} \quad (r = 0.417) \dots\dots (9)$$

ここで r は, 相関係数である。体長との関係は, かなりばらついており, 体の幅に差異があることがわかる。外見のうち, 体長のみから湿重量を推定することは, 誤差が大きいくことがわかる。

一方, 湿重量と乾重量との関係は, 1 次回帰式で次式のようになる。

$$DW = -0.0304 + 0.1404 WW \quad (r = 0.834) \dots\dots (10)$$

また, 33 個体のうちから更に湿重量 15 mg 以上の 2 個体を除き 3.3, 3.4 の実験に用いた範囲の 31 個体について回帰式を求めると, 次式となる。

$$DW = -0.2643 + 0.1712 WW \quad (r = 0.880) \dots\dots (11)$$

3.3 もしくは 3.4 で求めている乾重 / 湿重比や表-28 の乾重 / 湿重比 (5.8) に非常に近い傾き ( $1/5.8 = 0.17$ ) となっていることがわかる。この体型の範囲では, 乾重量 / 湿重量をほぼ一定として良いことがわかる。水分の含有率は 83 % となる。

乾重量あたりの体組成を比較する。表-27 の結果をみると, 炭素の組成は 420 ~ 450 mg/g であり, 個体が大きいとやや大きくなるようであるが, 組成は安定しているといえる。窒素の組成は 70 ~ 110 mg/g であり, 炭素よりもやや幅があるが, おおむね一定である。ケルダール分解法は, CHN コーダーによる値よりもここではわずかに大き目の値を与えるようである。一方, リンは 0.5 ~ 3 mg/g とかなり変動している。

同化実験の際に求めた値 (CHN コーダーによる) は, 炭素でやや小さいものの窒素に対してはよく似た値である。リンは, かなり大きな値となっている。また, 中田ら<sup>24)</sup> が三河湾で採取したヨツバナスピオ (A 型) を CHN コーダーで分析した値は, ここでの値に比して炭素, 窒素ともに 1/2 程度と小さく, リンは似た値となっている。採取場所や時期によって組成比が異なってくる可能性もあるらしい。

表-27 ヨツバネスピオの炭素、窒素、リンの体組成

	供試個体 平均乾重量	乾重量1gに対する各成分量				湿重/乾重量×体長	
		炭素	窒素*	リン	水分		
昭和62年1月 同化実験**	mg —	mg/g 357.2	mg/g 90.3	mg/g 9.08	mg/g 820	5.6	mm
昭和62年12月 体組成分析	3.86		(85.6)			5.9	20~27
	3.63			1.10		5.7	14~18
	3.40			2.80		5.9	20~27
	3.28	449.0	107.0			6.1	14~23
	3.21			0.45		5.6	11~15
	3.05		(103.4)			5.9	13~26
	2.88	442.4	88.0			5.9	14~22
	2.72	432.1	71.3			7.4	14~17
	2.50	436.5	87.0			6.7	7~18
	2.37		(112.4)			5.8	8~19
	1.89			1.47		5.3	6~7
	1.71	424.6	74.8			5.8	7~14
	1.63		(88.6)			5.8	7~11
	1.49			0.59		5.7	13~20
1.25		(87.0)			5.3	8~10	
昭和62年分析値 平均		436.9	85.9 (91.4)	1.28		5.8	6~27
三河湾での 採取個体 <sup>24)</sup>	—	243	40	1.6			

\* 窒素の分析法；（ ）内に示した値はケルダール分解法による。その他はCHNコーダによる。

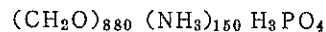
\*\* 表-18の値と同じ。

5個ずつの値を平均すると、乾重量1gあたり、炭素440mg、窒素86mg、リン1.3mg、その他470mgとなる。C/N比で5.1、N/P比で67.1となる。一般に、海域中のプランクトンを主体とした懸濁物質は、よく似た組成比を示し、重量比でC/N=5.7、N/P=7.2などとされている。炭素と窒素の比(C/N)では、ヨツバネスピオの分析値はこれと極めて近い値となっている。窒素とリンの比(N/P)では、分析結果はかなり高くリンが少ないことを示している。沈積粒子(デトライタス)を摂食するものの、ヨツバネスピオの体組成は懸濁粒子の組成比とやや異なるらしく、特にリンについての差異が大きいようである。摂食した有機粒子から消化・吸収する割合が、炭素・窒素に比してリンでは異なる可能性がある。

炭素、窒素、リンの重量比から原子比を求めると、

$$\frac{440}{12} : \frac{86}{14} : \frac{1.3}{31}$$

となり、簡単には、880 : 150 : 1となる。これよりヨツバネスピオの示性式を書くと、例えば次式のようになる。



ここで、炭素は炭水化物( $\text{CH}_2\text{O}$ )として、窒素は蛋白質やアンモニア( $\text{NH}_3$ )として、リンはリン酸( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )として、それぞれ同化されているとした。表-27とは別に、同化実験に用いた個体の体組成比が表-18に示してある。表-18によれば、炭素、窒素、リンの原子比は102 : 22 : 1と算定される。この比は、プランクトン等の懸濁物質の比(106 : 16 : 1)と近い値となっている。

代謝に用いられる体内有機物の組成は、ヨツバネスピオ個体の組成とは異なる可能性があり、ここでは式(7)の当量比 $\alpha$ は、リンに対しては求めることができない。リンの代謝分泌量と呼吸量との換算値による比較は、かなりむずかしく誤差も大きい。



### 3.6 ヨツバネスピオの摂食と貧酸素耐性のまとめ

#### 3.6.1 ヨツバネスピオの摂食速度の評価

ヨツバネスピオの摂食速度Cを直接測定することが難しいため、同化速度G、代謝分泌速度U、排糞速度Fの和として求めることを試みた。この3者について、個別に飼育実験を実施し、リンの収支を分析し速度を求めている。結果は、3.4に示した。これら3者の速度値を、DO濃度条件別にならべてまとめると表-28のようになる。ここで、表中には個体の平均湿重量10mg以上のケースを大型個体を用いた測定値、10mg未満のケースを小型個体を用いた測定値とし、区別してかかげてある。3.4の各実験の解析において誤差が大きいとされたデータは除いてあるが、代謝分泌速度実験と排糞速度実験とでは測得値の精度が異なり、また同化速度は荒い推定値であるなど、3者の精度の統一ははかられていない。

表-28では、U、F、Gの3者の和を、摂食速度Cの欄に示している。同化速度Gが、DO濃度条件や個体サイズごとには示すことができず、摂食速度Cはすべてのケースに対して1つの大略値が得られているにすぎない。摂食速度CのDO濃度依存性などは不明である。

摂食速度に対する構成3者の寄与を比べてみる。同化速度Gは、他の2者に比してやや小さいことがわかる。排糞速度Fの摂食速度Cに対する割合などについては、Cの精度が荒く大きな幅を有した値となってしまう。

#### 3.6.2 ヨツバネスピオの貧酸素耐性の評価

貧酸素条件での、同化、排糞、分泌といった作用の変化は確認できなかった。しかし、生理活性の1つとして呼吸速度の変化は、把握できた。

豊富な酸素濃度下では、呼吸速度は酸素濃度に依存せず独立している。独立域は、DO 3.5mg/l付近を下限としている。この濃度より下まわると、呼吸速度は酸素濃度に影響され、濃度が低下するにつれて速度も低下す

る。影響域は、DO 3.5mg/l ~ 1mg/l程度の範囲である。それより更に濃度が低下すると、呼吸速度はきわめて小さくなり、ほとんど酸素を消費しなくなる。しかし、この場合でもすぐには窒息死に至らない。

生理活性が低下すると、やがては死亡個体が観察されるようになる。低酸素濃度下での死亡の様子を把握できた。自然海水中では、1日間程度の貧酸素条件飼育では死亡が起こらない。2日間から死亡個体が見られ、72時間LC<sub>50</sub>は1.3 ~ 1.7mg/lとなる。この濃度では、3日後に半数が死亡することとなる。一方、自然海水に抗生物質を混入し、やや大きな容器で飼育すると、DO 0.3mg/l程度でも半数死亡するのに4日間程度かかるようになる。極めて低い酸素濃度でも、他の条件が良いとかなり永く生残することもある。水温は、25℃で20℃よりも死亡が速い。

夏期の貧酸素化した底層水に対するヨツバネスピオの耐性については、ここでの室内実験からのみでは検討しにくい。塩分・水温の条件の他、水中や底泥中の共存物(特に硫化物や嫌気性細菌・バクテリア等の生育阻害物)などについても、自然の海底と似た条件で実験することが望ましく、底泥と海水とを含んで一部を隔離して取り出し観察するなどの手法(マイクロゾム実験、攪乱実験)が必要となろう。ここでの知見のみで推定すると、DO 2mg/l以下の状況が2日間以上続くと生存が危くなるようである。また、条件が良いと更に永く生残することから、貧酸素条件下に底泥で生成される嫌気性毒物(硫化物)の影響が大きいと思われる。

#### 3.6.3 ヨツバネスピオを生残させる事環境上の意味

ヨツバネスピオの環境上の役割としては、底泥の攪乱(バイオターベーション)とそれに伴う底泥の酸化、デトライタスの除去・分解と上位の捕食者への餌などが指摘

表-28 ヨツバネスピオの摂食速度の算定

(単位:  $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ )

DO濃度条件	個体サイズ	代謝速度 U	排糞速度 F	同化速度 G	摂食速度 C = U + F + G
飽和状態	大型	3.0	—	0 ~ 1 ~ 3	5 ~ 13
	小型	—	3.2		
4 mg/l	大型	—	—		
	小型	—	3.6		
2 mg/l	大型	—	2.6		
	小型	6.7	2.0		

個体サイズ：個体湿重量10mg以上のケースを大型とし、それ未満を小型としている。

される。ここでは、ヨツバナスピオの生息により、底泥上の有機物がどれだけ除かれていることになるのかおおよその値を推算してみる。式(7)の $\alpha$ 値が求められていないので、いくつかの仮定の上の推算値である。

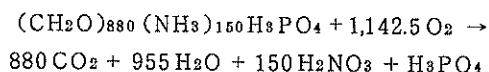
ヨツバナスピオの体表面を境界として有機炭素の出入を考える。消化吸収された有機炭素は、一部は体として同化され、一部は分解され二酸化炭素として排出される。炭素の酸化分解は次式で示され、好気分解時の $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{O}_2$ 比0.77などを参考に吸収酸素の8割が炭素の酸化に使われるとすれば、有機炭素0.3g ( $12 \div 32 \times 0.8$ )の分解に相当する。



ヨツバナスピオは主にデトライタスを摂食する。デトライタスの源である植物プランクトンでは、含有炭素1gがCOD0.6gに相当するという測定例<sup>25)</sup>がある。デトライタスのCOD/炭素比もこれと等しいとすると、酸素1gの吸収はデトライタスの有機炭素300mgの摂食・分解、即ちCOD200mg ( $300 \times 0.6$ )の分解に相当する。

ところで、高い酸素濃度時のヨツバナスピオの吸収速度は、湿重量あたり毎時0.2~0.4mgであった。これは湿重量1gあたり毎時0.04~0.1mgのCODの分解に相当する。湿重量10mg程度の個体が1m<sup>2</sup>に100個体という希薄な密度で生残していると、1日で1~2mg/m<sup>2</sup>の粒状CODが呼吸・代謝により分解されている事になる。

一方、これらの個体がすべて死亡したとする。表-27などから、湿重量/乾重量比は5.8、有機炭素/乾重量比は0.44である。死亡により湿重量1gあたり76mg ( $0.44 \div 5.8 \times 1,000$ )の有機炭素が新たなCOD源として環境中に負荷されることになる。ヨツバナスピオの有機体組成は、 $3.5.4$ で $(\text{CH}_2\text{O})_{880}(\text{NH}_3)_{150}\text{H}_3\text{PO}_4$ との示性式が示されている。CO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub><sup>-2</sup>、PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>に酸化されるとすると、反応は次式のように示される。



体の組成中の炭素1gが分解するのに必要な酸素量は、3.5g ( $1,142.5 \div 32 \div (12 \times 880) = 3.5$ )となる。この割合を用いれば、有機炭素76mgは2,660mgの酸素要求量に相当する。理論的酸素要求量がCODに等しいとすると、ヨツバナスピオの湿重量1gは、約3gのCODに相当する。死亡個体のCODを直接測定した例はない。

ヨツバナスピオを死亡させずに生残させるという事は、

生態系上も重要であると同時に、個体の活動に起因する有機物の浄化作用を維持する点でも無視できないことがわかる。

#### 4. おわりに

富栄養化した内湾湾奥では、夏期の成層の発達とともにしばしば貧酸素水塊が低層に発生し、底生動物が死滅し無生物域となる。これの原因と対策を考えるために、環境条件が悪化した海底面に卓越する底生動物ヨツバナスピオ(A型)を選び出し、その生理と死滅とを検討した。

ヨツバナスピオは酸素濃度が3mg/lを下まわると、活性が落ち呼吸速度を低下させる。しかし、1mg/l以下の低酸素濃度条件下でも即死せず、1日間程度から数日間生き延びる。

ヨツバナスピオの摂食活動の酸素濃度依存性は、明確には把握できなかった。しかし、摂食と代謝を通じ、湿重量1gあたり毎時0.04~0.1mg程度のCODを分解していると推定される。死滅すると、湿重量1gあたり3g程度のCOD負荷源となる。

飼育実験より、ヨツバナスピオの死滅条件は、単に酸素濃度の低さではなく、貧酸素濃度の経続時間への考慮が必要であることがわかった。夏期の無生物域の発生条件としては、『酸素濃度2mg/l以下の情況が2日間経続すること』といった条件が想定される。この条件は、漁民の間で経験的に知られている条件<sup>27)</sup>と近い。貧酸素化に伴う嫌気性毒物(硫化物など)の底泥中での生成も、無生物域の発生を引き起こし、回復を遅延させる原因となる可能性が示された。

以上の知見から、無生物域の発生を抑え少くともヨツバナスピオだけは生残できるようにする対策として、底層の酸素濃度の向上と底泥の浄化との組み合わせが効果的であると思われる。

本研究は、関係港湾建設局の協力を得て、実施された。ヨツバナスピオの同定・選別・飼育実験の実施には、新日本気象海洋(株)北森良之介博士、山本一生氏の手をわずらわせた。また成果の一部は、非常に簡易なモデルによる無生物域発生の確率予則の試みとともに、土木学会第一回環境システムシンポジウム(1988)にて発表<sup>26)</sup>した。発表論文に対し、広島大学今林博道助教授、九州大学菊地泰二教授より親切なコメントをいただいた。また、データ解析には、当所海域環境研究室所有のデータ解析装置(TEAC PS-9000)を利用した。とりまとめと図面製作には、海水浄化研究室三好英一研究官に尽力いただいた。関係した方々に対し、ここに深く感謝いたします。

(昭和63年11月30日受付)

## 参考文献

- 1) 宮地伝三郎・増井哲夫・波部忠重；内湾度と内湾の生物群集型に就いて，京都大学生理生態業績3号，pp. 1～20，(1944)
- 堀越増興・菊池泰二；ベントス，海洋科学基礎講座5，東海大学出版会，219 p. (1976)より重引
- 2) 杉本隆生；浮遊卵稚子の輸送拡散と沿岸海洋構造，水産土木，第12巻第1号，pp. 1～8，(1975)
- 3) Orton, J. H.: Some interrelations between bivalve spatfalls, hydrography and fisheries, *Nature*, Vol. 140 No. 3542, pp. 505～506, (1937) など
- 4) 堀江 毅；内湾域における水質の分布とその予測—大阪湾を事例として—，昭和60年度港湾技術研究所講演会講演集，pp. 59～118，(1985)
- 5) 城 久；大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産におよぼす影響について，大阪府水産試験場研究報告，第7号，pp. 1～174，(1986)
- 6) 玉井恭一・永田樹三；大阪湾底生生物底質調査，昭和52年度関西国際空港漁業環境影響調査報告(環境生物編)，日本水産資源保護協会，pp. 179～213，(1978)を，前出5)より重引。
- 7) 今林博道；底生動物群集に及ぼす貧酸素水塊の影響，日本水産学会誌，第49巻，pp. 7～15，(1983)
- 8) 堀江 毅；海域の物質循環過程のモデル化と浄化効果の予測手法について，港湾技術研究所報告，第26巻第4号，pp. 57～123 (1987)
- 9) 風呂田 利夫；第9章東京湾IV生物，日本海洋学会沿岸海洋研究部会編；日本全国沿岸海洋誌，東海大学出版会，pp. 373～387，(1985)
- 10) 堀越増興；ベントスの指標性と地域生態系，堀部純男編；環境科学としての海洋学3，東京大学出版会，pp. 284～297，(1979)
- 11) 北森良之助；環境指標としての底生動物(2)，日本生態学会環境問題専門委員会編；環境と生物指標2—水界編—，共立出版株式会社，pp. 265～273，(1975)
- 12) 玉井恭一；大阪湾におけるスピオ科の多毛類 *Paraprionospio* sp. (A型) 個体群の季節変動と成長，日本水産学会誌，第48巻第3号，(1982)
- 13) 横山 寿；久美浜湾における *Paraprionospio* sp. の生活史(予報)，ベントス研究会誌，第23号，(1982)
- 14) 堤 裕昭；イトゴカイ (*Capitella capitata*) の有機物汚染域への適応，海洋科学，第19巻第2号，pp. 106～111，(1987)
- 15) 玉井恭一；西日本周辺海域に生息する *Paraprionospio* 属(多毛類；スピオ科) 4 type の形態的特徴と分布について，南洋海区水産研究所研究報告書，第13巻，pp. 41～58，(1981)
- 16) 上野信平・山本護太郎；*Capitella capitata* ならびに *Paraprionospio pinnata* の生理的耐生について，ベントス研究会誌，第23号，pp. 60～68，(1982)
- 17) 沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針編集委員会編；沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針 昭和59年度版，全国沿岸漁業振興開発協会，pp. 293～348，(1985)
- 18) 日本水産資源保護協会編；新編水質汚濁調査指針，恒屋社厚生閣，pp. 377～381，(1980)
- 19) 日本工業規格；工場排水試験方法 JIS K 0102，日本規格協会，pp. 233～236，(1986)
- 20) 小林直正；水汚染の生物検定，サイエンティスト社，209 p. (1985)
- 21) 新崎敏盛・堀越増興・菊池泰二；海洋科学基礎講座5 海藻・ベントス，東海大学出版会，pp. 241～270，(1976)
- 22) 細川恭史；水質環境改善のための生態活動の利用について，昭和63年度港湾技術研究所講演会講演集，pp. 1～40，(1988)
- 23) 気象庁；海洋観測指針，日本気象協会，428 p.，(1985)
- 24) 中田喜三郎・中根 徹；三河湾における懸濁態有機物，プランクトン，マクロベントスの化学組成と環境水中の栄養素比，公害資源研究所彙報，第16巻第1号，pp. 45～58，(1986)
- 25) 堀江 毅・細川恭史・三好英一；海水のAGP試験法とその適用，港湾技術研究所報告，第17巻第2号，pp. 49～80，(1978)
- 26) 細川恭史・堀江 毅；海域の貧酸素化による無生物底泥の発生の条件について，土木学会環境システム研究 Vol. 16，pp. 168～172，(1988)
- 27) 大野一敏・敏夫；東京湾で魚を追う，草思社，255 p. (1986)

## 記号一覧

- A : 生物の総同化量。式(5)で定義される。  
a : 生物の呼吸量と体重との関係を示す式(1)中の比例定数。水温、DOなど環境依存性を示す。  
b : 生物の呼吸量と体重との関係を示す式(1)中のべき定数。

- C : 生物の摂食量。式(4)で定義される。
- DW : 生物を乾燥させた時の乾重量。
- F : 生物の未消化排糞量。
- L : ヨツバナエスビオの体長。
- n : サンプル数。
- P : 生物の純同化量。式(6)で定義される。
- R : 生物の呼吸量。
- r : 相関係数。
- U : 生物の体外分泌量。
- WW : 生物の生存した状況での湿重量。
- w : 生物の体重。湿重量。
- $\alpha$  : 酸素の消費量 (R) をリンの代謝量 (U) に換算する係数。

### 省略記号一覧

- C : 炭素 (Carbon)
- COD : 化学的酸素要求量 (Chemical Oxygen Demand)
- DO : 溶存酸素, 溶存酸素濃度 (Dissolved Oxygen)
- I-P : 無機リン (Inorganic Phosphorus)
- LC<sub>50</sub> : 半数致死濃度 (half Lethal Concentration)
- N : 窒素 (Nitrogen)
- O-P : 有機態リン (Organic Phosphorus)
- P : リン (Phosphorus)
- PO<sub>4</sub>-P : リン酸態リン (Phosphate Phosphorus)
- T-P : 総リン (Total Phosphorus)

港 湾 技 研 資 料 No.643

1 9 8 9 ・ 3

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 東洋堂 飛ばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.