

## 底質の酸素消費速度に基づく適正養殖基準の決定法

武岡 英隆\*・大森 浩二\*\*

### Methods of Determining the Limit of Suitable Fish Culture Based on the Oxygen Consumption Rate by the Sediment

Hidetaka TAKEOKA and Koji OMORI

#### Abstract

During the recent development of mariculture, many fish culture grounds have been suffering from serious organic pollution due to over-culturing, and a suitable counter measure is of urgent necessity to preserve the marine environment. Omori *et al.* (1994) presented a new concept to determine the limit of organic loading to the bottom using the oxygen consumption rate by sediment as an indicator of the activity of benthic ecosystem. This paper proposes two methods of determining the limit of fish culture to preserve the marine environment: a sediment respiration rate (SRR) method and a sediment sulphide concentration (SSC) method. The former is a direct application of their concept and the latter is a modified method using the sulphide concentration which is easier to be measured than the oxygen consumption rate. Methods of determining the ability of oxygen supply to the bottom layer are also proposed, which is necessary to apply the both SRR and SSC methods.

#### 1. まえがき

海面養殖漁業は近年著しい発展を遂げ、水産業の中でも重要な位置を占めるに至っている。しかし、魚類養殖では餌として与えた有機物の数割が成魚として回収されるのみで、残りは残餌や排泄物として漁場に負荷されるため、富栄養化による漁場の荒廃など様々の問題を引き起こしている。こうした漁場の汚染に対する対策としてこれまで種々の方法が考えられてきた。それらの中には、汚染した底質を直接的に改善しようとするものがある。例えば、底質を砂などで覆う覆砂や覆土、底質の分解を促進しようとする曝気、海底耕運、石灰散布等がそれである。しかしこれらの効果は持続的なものではなく、これらによって一時的には底質が改善されたとしても、従前の養殖が続けられる限りはいずれ同様の汚染が引き起こされるであろう。従ってこれらの方法は、漁場の適正な養殖許容量が把握さ

れ適正化の対策が取られた上で、速やかに漁場を改善させるための措置として行われるべきである。一方これらとは別に、漁場の流動等を制御して漁場の養殖許容量を増大させようとするものもある。漁場の海水交換能力を増大させようとする作溜や水路開削、下層への酸素供給能力を高めようとする潮汐ダム(木村ほか, 1993a, 1993b)等である。また、このような物理的な方法ではなく、底生生物の導入によって底質の分解能力を向上させようとする方法(堤・門谷, 1993, CHAREONPANICH *et al.*, 1994)も最近では考えられている。しかし、これらの方法によって漁場の能力が向上したとしても、適正な養殖許容量が把握できなければこれを越える養殖によって漁場の悪化を招く可能性は高い。従って、どのような対策を講じるにせよ、まず抜本的に必要なことは、漁場の持つ適正な養殖の許容量を明らかにすることである。

養殖の許容量を決めるためには、何を目標として許容量を決めるのかという目的とそれに応じた指標が必要である。例えば、井上(1977)や平田・門脇(1990)は養殖魚の呼吸のための溶存酸素を指標とする考え方を示し、楠田(1990)は魚病の感染を抑制することを

1995年12月4日受理

\* 愛媛大学工学部 Faculty of Engineering, Ehime University, Bunkyo 3, Matsuyama 790, Japan

\*\* 愛媛大学理学部 Faculty of Science, Ehime University, Bunkyo 2-5, Matsuyama 790, Japan

目標とした生簀内の収容密度を示している。また、底生生物への影響を抑えるために、玉井(1990)は底層の溶存酸素を、また畑(1990)は底質の硫化物濃度を指標として用いることを提案している。これらが目標としていることはいずれも養殖の管理に必要なことである。しかし、これからの養殖漁業の備えるべき最も重要な要件の一つは、漁場の悪化を防ぎ、将来にわたって養殖の可能な漁場を維持していくことであると思われる。最近、養殖関係者の間でもこのような養殖漁場の「持続性」を目標とした新しい養殖の基準作りが強く求められている。しかし、養殖漁場の持続性とは何か、それをどのようにして判断するか等についての考え方はまだ確立されていない。この問題は養殖漁場に限らず海洋環境全体の持続性ともつながる極めて大きなテーマであり、その答えを得ることは容易ではない。また、何らかの環境指標で持続性を評価する考え方が確立されたとしても、持続性を直接的に判断するためには、畑(1990)も述べているように、ある時点での環境指標の絶対値のみではなくその指標が経年的にどのように変化しているかを把握する必要がある。このことは様々に条件の異なる多くの漁場のそれぞれで長時間の調査を必要とすることになり、現実的には難しい。このように、現段階では「持続性」を適正養殖基準の直接の目標とすることは非常に難しい。そこで、漁場環境の持続性は、養殖によって負荷された有機物が分解し、自然の生態系に組み込まれていく「物質循環」の状態と関係が深いと考え、物質循環の状態を診断して養殖許容量を決めるという方法を代替案とすることが考えられる。このような方法を作成することもまた難しい問題であるが、最近、大森(1990)、OMORI *et al.* (1994)が、底質の酸素消費速度(厳密にはその変化)を指標として物質循環の状況を診断し、魚類養殖の許容量を決めるという考え方を示している。しかし後述のように、この考え方を実際に適用し、あるいは多くの漁場に一般化するためにはいくつかの現実的な問題を整理しなければならない。本研究の目的は、これらの問題点を整理し、底質の酸素消費速度を指標とする養殖の許容量の決定方法の基本構造を作成することである。

## 2. 底質の酸素消費速度を指標とする養殖適正基準の決定法 (SRR法)

### 2.1 基本的考え方

まず、OMORI *et al.* (1994) による、養殖場の底質

の酸素消費速度を基準とする養殖の適正基準の考え方について概説する。

海底には底生生物が生息しており、これらは主に表層から沈降してくる有機物を餌としているため、この有機物が増えると底生生物も増える。従って、養殖による残餌や糞などの有機物の放出は海底へ沈降する有機物を増やし、結果的に養殖は底生生物も増加させることになる。これらの底生生物は呼吸により酸素を消費する。また、沈降した残餌・糞や底生生物の排泄物は細菌により好氣的に分解され、酸素を消費する。底生生物の生活活動は、底質の生物攪乱等によって細菌の分解活性を間接的に高め、酸素消費速度をさらに増加させる。このため海底への残餌や糞の沈降量が増えると海底での酸素消費速度は増える。しかし、有機物の沈降量が増えすぎると海底の酸素濃度が低下して、細菌による好氣的有機物分解は嫌氣的分解に移行する。この段階に至ると、低酸化と、嫌氣的分解により生成する毒性物質である硫化物の増加により、生物の生存には不適当な状態となって生物量は減少する。これらの結果、海底での酸素消費速度は減少することになる。以上より、海底の酸素消費速度はFig. 1のように残餌や糞の沈降量が増えるといったんは増え、これが更に増えると減っていくことになり、あるところで最大値を示すであろう。この最大値を示す状態までは、有機物負荷の増加によって細菌も含めた生物生産が増加する状態であるから、生態系の物質循環がおおむね正常に行われているものと考えられる。従って、この酸素消費速度の最大値に対応する有機物負荷を養殖による有機物負荷の限度とし、それ以下を適正な養殖とするのが OMORI *et al.* (1994) の考え方である。

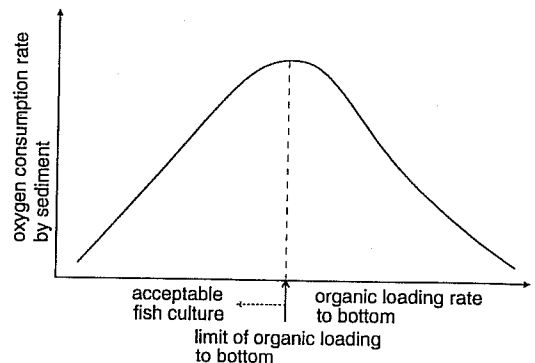


Fig. 1. Relation between the oxygen consumption rate by sediment and organic loading rate to the bottom.

ただし、このような考え方は既に述べたように漁場の持続性を直接の目標としたものではないため、有機物負荷をこの限度内に抑えることが漁場の持続性を厳密に保証するものであるかどうかは今のところ明確ではない。例えば、負荷された有機物が全て分解されるとすれば酸素消費速度は有機物負荷量の増加に対して直線的に増加しなければならず、分解できない有機物が生じ始めると酸素消費速度の増加率が減少し、これらの関係が上に凸の曲線になり始めると考えられる。したがって、酸素消費速度が最大となる状態では既に分解できない有機物負荷が生じていることになる。このため、負荷された有機物が全て分解されることが漁場の持続性の条件とするならば、有機物負荷量の限度は酸素消費速度が最大となる状態より小さく設定されなければならない。しかし、負荷された有機物を全て分解することが漁場の持続性にとって必要であるかどうか自体、現段階では明確ではない。したがって、漁場の持続性とは何を意味し、その維持には何が必要かについては今後広範な議論が展開される必要があり、ここに示す方法と漁場の持続性の関係についても今後詳しい研究が必要である。

## 2.2 適正養殖基準の決定方法

上記のような漁場海底での酸素消費速度を指標とする適正養殖基準の決定法について考えてみよう。以下、この方法をSRR (sediment respiration rate) 法と呼ぶことにする。

いまある一つの漁場での適正放養量(放養量の限度)を知りたいとする。上記の考え方をそのまま適用した適正放養量の決定法は、その漁場で放養量を様々に変化させた(すなわち海底への残餌や糞の沈降量を様々に変化させた)実験を行い、それぞれの場合について底質の酸素消費速度を測定し、その結果からFig. 1のような図を描くことである。しかし、放養量を一つの漁場で変化させること自体が困難であるうえ、一つの放養量に対して底質の状態が定常に達するまでの時間は非常に長くなると考えられ、Fig. 1のような図を描くに十分な数の実験を行うことはほとんど不可能であろう。SRR法の基本原理自体は非常に単純であるが、これを実際の漁場に適用する際の最大の問題はこの点である。このためにSRR法はもう少し複雑にならざるを得ず、適用方法の作成という作業が必要となるのである。

このように一つの漁場で放養量を変えて実験するこ

とは難しいので、物理的な条件がほぼ同じで放養量(放養密度)の異なるいくつかの漁場を選び、海底で酸素消費速度を測定するという方法が考えられる。この場合、選ばれる漁場は水平地形や大きさ、水深、流動などがほぼ同じであるのが理想的であるが、この条件は以下のようにある程度緩和できる。

底質での酸素消費の問題に関わる基本的な要因は、海底の単位面積当たりへの有機物の沈降量( $Q_b$ )と、同じ単位面積当たりへの酸素の供給能力(OS, 供給速度ではないことに注意)の2つであると考えられる。この2つの他、水温もこの問題に関わる可能性があるが、漁場による下層水温の差はあまり大きくないものと考えてここでは考慮しないことにする。もし今後の検討によって水温の影響が無視できないことが明らかになれば、以下に述べる漁場の類型化をOSのみでなく水温によっても行うことが必要になる。Fig. 1は、これらの2つの要因のうちOSを一定とし、 $Q_b$ を変化させた場合の底質の酸素消費速度の変化であると解釈することができる。このことから、複数の漁場での測定からFig. 1を描くためには次の3つの条件が必要である。

- ①これらの漁場でのOSがほぼ同じである。
- ②これらの漁場での $Q_b$ の値が十分広範囲に広がっている。
- ③放養量(あるいは残餌・糞の放出量)と $Q_b$ が量的に関係づけられる。

以下、この①と③について詳しく考えてみる。

Fig. 2のように、面積 $A$ 、下層の厚さ $h$ の漁場を考える。 $C_b$ を漁場下層の酸素濃度、 $C_m$ を漁場周辺の下層の酸素濃度、 $C_m$ を生簀が設置されている漁場表層の酸素濃度とし、 $E_v$ を漁場の表層と下層の海水交換速度、 $E_h$ を漁場の下層と周辺の下層の海水交換速度とすると、漁場の下層の単位面積当たりへの酸素の供給速度 $F$ は、

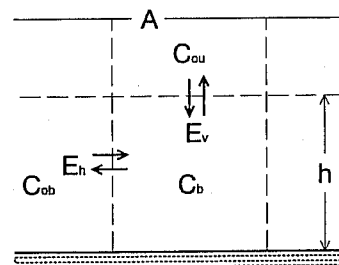


Fig. 2. Model of fish culture ground.

$$F = \{E_h(C_{ob} - C_b) + E_v(C_{ov} - C_v)\} / A \quad (1)$$

となる。下層であるので、光合成による酸素の生産は無視している。この酸素供給速度 $F$ は、1つの漁場でも $Q_b$ が変化すると $C_b$ が変化するため一定ではない。上記の底質の酸素消費に関わる基本要件の1つが酸素の供給速度 $F$ ではなく供給能力 $OS$ であるのはこのためである。(1)からは、 $OS$ そのものを定式化するのは難しいが、夏季の成層期においては漁場表層からの鉛直的な酸素供給が周辺の下層からの水平的な酸素供給に比べて無視できるとすれば、

$$F = E_h(C_{ob} - C_b) / A \quad (2)$$

となり、この式で変化しない物理的な部分 $E_h/A$ を $OS$ の定量的表現とすることができる。この $OS$ はさらに漁場の下層の海水交換時間 $T$ を用いると、

$$T = Ah / E_h \quad (3)$$

なので、

$$OS = E_h / A = h / T \quad (4)$$

となる。従って、各漁場で $OS$ が一定であるためには面積や水深などが同じであることは必ずしも必要ではない。

次に上記の③における放養量と $Q_b$ の関係について考えてみよう。養殖によって放出される残餌・糞などの有機物の濃度は、それらが海底に到達するまでの間に、分解と水平的な海水交換による漁場外への流出とによって減少する。しかし、残餌や糞は比較的大型の粒子で分解速度は小さいものと考えられる。例えば武岡ほか(1988)のモデルによる計算では、分解により失われる有機物量は漁場外への流出量の2割程度である。したがって、ここでは簡単のために沈降する間の有機物濃度の減少には水平的な海水交換のみが関わるものとし、分解は考慮に入れないこととする。さらに、漁場外の残餌や糞の濃度は無視できるものとする。いま、厚さ $h$ の下層の上端が生簀の底面であるとし、ここを通しての有機物の流量を $Q_0$ とする。この有機物が鉛直方向には拡散することなく沈降するとし、沈降速度を $w$ とすれば、海底に到達するまでの時間は $h/w$ であるので、この間の海水交換による有機物濃度の減少を考慮すると海底への有機物負荷量 $Q_b$ は、

$$Q_b = Q_0 \exp(-h/wT) \quad (5)$$

となる。(5)は、 $Q_b$ が残餌・糞の放出量 $Q_0$ と $h/T$ によって関係づけられることを示している。従って、 $OS$ が一定の漁場を選べば、(4)よりこれらの漁場では $h/T$ は一定であり、 $w$ には漁場による変化はないと考えれば、 $Q_b$ は $Q_0$ と一定の比率で結ばれることになる。

以上より、底質の酸素消費速度を指標とする養殖の適正基準の決定法(SRR法)は次のようにまとめられる。まず、対象とするすべての漁場での海水交換速度を調査し、(4)より各漁場の $OS$ を求める。次にその中から $OS$ がほぼ同じ漁場を選ぶ。ただし、海水交換速度はそれほど高精度では求められないことを考慮すれば、 $OS$ の値は何段階かに類型化し、各漁場を類型に分類するのが実用的であろう。次に、これらのうちの一つの類型に属する漁場の中から放養密度の異なる漁場を選び、各漁場の海底で底質の酸素消費速度を測定する。この結果をFig. 1のようにプロットするわけであるが、(5)で示されたように $Q_b$ と $Q_0$ は比例するのでこの場合の横軸は $Q_b$ ではなく $Q_0$ で差し支えない。さらに、放養密度と $Q_0$ の間に一定の比例関係があれば、横軸は放養密度そのものでよいことになる。この結果、酸素消費速度のピークが得られれば、そのピークに対応する放養密度の値がその類型での適正な放養密度の限度ということになる。この値は、同じ類型に属する底質の酸素消費速度を測定した以外の漁場にも適用できる。こうした作業を各類型について行うことで、すべての漁場についての適正放養密度の限度が得られることになる。

### 3. 底泥の硫化物を指標とする適正養殖基準の決定法(SSC法)

SRR法は、2.1の基礎理論にほぼ沿った適正養殖基準の決定法である。これに対し大森(1990)は、この基礎理論を踏まえた上で底質の硫化物濃度を実用的な指標とする適正養殖基準の決定法を提案している。これは、底質の酸素消費速度は測定が難しいため、多くの漁場に適用するには直接的な指標としては不適當ではないかとの考えに基づくものである。以下この方法をSSC(sediment sulphide concentration)法と呼ぶ。

一般に底質の硫化物濃度は、海底への有機物負荷の増加に伴って増加する。従って、硫化物濃度と酸素消費速度の間にも、Fig. 3のように、ある硫化物濃度に対して酸素消費速度が最大となるような関係がある。従って、あらかじめいくつかの漁場で底質の酸素消費

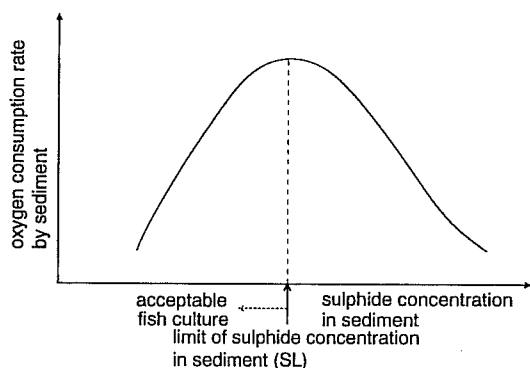


Fig. 3. Relation between the oxygen consumption rate by sediment and the sulphide concentration in sediment.

速度と硫化物濃度の調査を行って、酸素消費速度の最大値に対応する硫化物濃度（すなわち養殖が適正であるための硫化物濃度の限界値。以下SLとする）を求め、他の漁場では硫化物濃度のみを調査し、SLとの大小関係によって養殖が適正に行われているかどうかを判断しようというのが大森（1990）の提案している方法である。さらに、もし有機物負荷量と硫化物濃度の関係がわかっているならば、対象とする漁場の硫化物濃度とSLの関係から、その漁場での現在の放養密度と適正放養密度の関係が得られる。

大森（1991）は、この方法を宇和島市の遊子の漁場に適用してSLの値として0.05~0.07mg/gという値を得た。また、熊本県水産振興課（1993）はこの方法を天草および不知火海沿岸の養殖場に適用し、SLの値として0.14mg/gという値を得ている。さらに、愛媛県水産試験場（1995）が宇和島市の下波湾で行った調査の結果からは、SLとして0.3~0.4mg/g程度の値が得られている。

この方法は、得られたSLの値がどの漁場にも適用可能なものであれば極めて有効な方法である。SRR法では、各漁場の海水交換速度の調査と代表的な漁場での酸素消費速度の調査が必要であるのに対し、この方法では最初に酸素消費速度と硫化物濃度の調査を行ってSLを求めれば、他の漁場では硫化物濃度のみを調査すればよいことになるからである。しかしながら、上記の3つのSLの値は調査海域によってかなり異なる。

このように上記のSLの値が異なる理由の1つとして考えられるのは、調査方法の違いである。底質中の硫化物濃度は海底面からの深さによってかなり異なる

が、大森が遊子の漁場で行った調査では、底質のごく表層部のみを採取して測定しているのに対し、熊本県と愛媛県の調査では表層の1 cm程度の資料から測定しており、この違いがSLの違いの原因となった可能性がある。また、酸素消費速度の測定には底質のみでなく直下の下層水中の酸素消費も含まれてしまうが、この水柱の厚さの違いもSLの違いを生じさせる可能性がある。

このような技術的な問題以外の、しかもより根本的な問題は、SLの値がもともと漁場によって異なる可能性があることである。この可能性について、OMORI *et al.*（1994）は、鉛直1次元の数値モデルによる検討を行った。その結果によれば、SLは、鉛直拡散係数（鉛直の海水交換）と水温に依存して変化する。これらのうち水温については2.2の場合と同様の理由で考慮から除外するとすれば、残るのは鉛直の海水交換である。この要因は上層からの酸素の供給速度を規定することによってSLに影響しているものと考えられる。従って、このモデルには含まれていない水平的な酸素供給も考慮に入れるとすれば、2.2で定義したと同じOSが漁場によるSLの違いを規定する基本的要因であることになる。しかしながら、このモデルはほぼ定性的に近いモデルであり、SLに対するOSの影響の大きさなどは現段階では明確でない。従って、SLが漁場によって異なるのかどうか、異なるとすればどのような要因でどの程度異なるのか等については、より詳しいモデルや手法を標準化した調査によって明らかにされる必要がある。

以上のように、SLが漁場によって異なるかどうかはまだ十分には明かでないが、もしモデルの検討結果から推定されるようにSLがOSに依存して変化するのであれば、SRR法と同様にOSによる漁場の類型化が必要となる。従って各漁場の適正養殖基準の決定のためには、各漁場のOSの決定とその結果による漁場の類型への分類、各類型での代表的な漁場での底質の酸素消費速度の測定といったSRR法と同様の作業に加え、硫化物濃度の測定も必要となり、SRR法よりむしろ作業量は増えることになる。しかし、硫化物濃度を指標とする方法には実用的には大きな利点がある。SRR法では各漁場の放養密度の値が必要であるが、この値は正確にはわからない場合が多い。しかし、OSが同じ漁場では放養密度が大きいほど硫化物濃度も大きくなるので、Fig. 1の横軸の放養密度を硫化物濃度で代用したFig. 3を描くことが実用的には便利である。

以上より、SLがOSに依存して変化することを前提とした場合のSSC法は、次のようにまとめられる。まず、SRR法と同様に対象とするすべての漁場での海水交換速度を調査し、(4)より各漁場のOSを求める。また、すべての漁場の海底で底質の硫化物濃度を測定する。次に得られたOSの値を何段階かに類型化し、各漁場を類型に分類する。次に、これらのうちの一つの類型に属する漁場の中から硫化物濃度の異なる漁場を選び、各漁場の海底で底質の酸素消費速度を測定する。この結果をFig. 3のように硫化物濃度に対してプロットし、酸素消費速度のピークが得られれば、そのピークに対応する硫化物濃度がその類型でのSLということになる。さらに、海底への有機物負荷量と硫化物濃度の関係が定量的にわかっているならば、硫化物濃度がSLを越える漁場で、現状よりどれだけの率で放養密度を削減すればよいか分かる。こうした作業を各類型について行うことで、すべての漁場についてのSLがわかり、過剰な養殖を行っている漁場での適正化に必要な放養密度の削減率もわかる。

#### 4. 漁場下層への酸素供給能力 (OS) の決定法

以上に述べたようにSRR法ではOSによる漁場の類型化が必要である。またSSC法でもOSによる類型化が必要である可能性が高い。従って、各漁場のOSを求める方法が必要になる。(4)式で示されるように、OSはおおむね漁場の水深と海水交換速度によって決まる。水深は容易に求められるので問題は海水交換速度を求める方法ということになる。以下では、漁場の海水交換速度を求める方法について述べる。ただし、海水交換を決める要因は地形や流れの特性によって複雑多岐にわたるため、ここではかなり簡略化した大筋のみを述べるにとどめる。

まず、漁場と地形の関係をFig. 4のA~Cのように分類する。Aは湾内の全体にほぼ一様に養殖生質が分布していて、湾全体を1つの漁場と見なせるような場合である。このような場合には湾内と湾外の海水交換速度が問題になる。また、Bは同じような湾でも湾内

の一部にのみ漁場がある場合である。この場合には湾内外の海水交換ではなく、漁場内と漁場外の海水交換を問題にする必要がある。Cは解放的な沿岸に漁場がある場合であるが、必ずしも外海に面している必要はなく、Bの湾が漁場に比べて非常に大きくなったものと考えてもよい。この場合も漁場と漁場外の海水交換を問題にする必要がある。

Fig. 4のAの場合に適用できる可能性のある方法としては、武岡(1989)が貧酸素水塊の発生のしやすさの計算のために作成した式がある。これは、湾の面積や湾口幅、潮差、水深等をパラメータとして湾内外の海水交換速度や湾内の表層と下層の海水交換速度を定式化したもので、式(2)によって簡略化した酸素供給速度に対応する式(4)のOSでなく、(1)の形に近い酸素供給速度に対応するOSを求めるものである。この方法で、Aのタイプの漁場の類型化が可能と思われるが、実際にはこのような漁場はあまり多くないと思われる。

Fig. 4のBとCの場合には、地形要素のみからOSを求めることは本質的に不可能であり、流動に関する情報が必要である。従って、ここでは各漁場で流動の調査が行われることを前提として、流動から海水交換速度(海水交換時間)を求める方法の概略を述べる。一般に沿岸の海での流れは、半日ないし1日周期で振動する潮流と1日程度の時間ではほぼ一定に流れると見なせる残差流とに分けられる。もし流れが残差流のみであれば、この残差流の流速を $u_r$ 、流れの方向の漁場のスケールを $L$ とすると、漁場の海水交換時間は $L/2u_r$ から容易に求められる。(注:直感的には $L/u_r$ が海水交換時間になりそう思われ、この値を海水交換時間とすることも可能であるが、この値は概念的には平均通過時間に相当する。一方ここで示した $L/2u_r$ は漁場の海水の平均滞留時間である。ここでは、漁場全体から放出された残餌や糞の漁場内での滞留を問題にするので、後者の方が都合がよい。これらの概念の詳細については武岡(1981)、TAKEOKA(1984)を参照されたい。)しかし、実際には潮流と残差流が混在するため、問題は複雑である。この場合には、潮流による物質輸送効果を拡散係数化して考え、潮流による拡散と残差流によって漁場の海水交換が起こると考える。武岡(1981)によれば、漁場の海水の漁場内の平均滞留時間(すなわち海水交換時間) $T$ は次のようになる。

$$T = (1/2U + 1/U^2 - 1/U^3 + e^{-U}/U^3)(L^2/K_n) \quad (6)$$

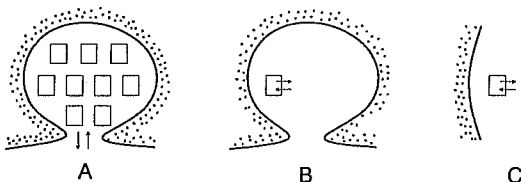


Fig. 4. Classification of the fish culture grounds.

ここで、 $U=uL/K_h$ である。 $K_h$ は潮流による水平拡散係数であり、潮流の振幅 $u$ と潮流の周期 $t_m$ より、

$$K_h = \beta u^2 t_m / 2\pi \quad (7)$$

によって求められる。 $\beta$ は0.1~0.2程度の定数である。以上より、各漁場の流動調査を行って卓越する潮流の振幅 $u$ と残差流速 $u_r$ を求めれば、漁場の海水交換速度 $T$ が得られ、OSも得られることになる。

以上は恒常的な潮流と残差流から海水交換速度を求める方法であるが、外洋に面したあるいは外洋に近い海域では、突発的に外洋から水塊が流入する現象が発生することがある。このような現象は急潮と呼ばれ、豊後水道東岸の宇和海では急潮が湾の海水交換に大きな影響を持つことが知られている。このような現象による海水交換は、上記の方法とは別に考慮する必要がある。

### 5. 現場での調査例

以上に述べたような方法に厳密に従った現地での調査例はまだないが、底質の酸素消費速度と硫化物濃度の関係を調査した例としては、3章に述べたように大森(1991)、熊本県水産振興課(1993)、愛媛県水産試験場(1995)がある。これらの中で、愛媛県の調査には興味深い結果が含まれているので以下に紹介する。

Fig. 5は豊後水道東岸の下波湾における養殖漁場の配置と愛媛県水産試験場による調査の定点である。これら調査定点のうち、魚類養殖場の定点を中心として、1994年12月と1995年3月に底質の酸素消費速度の測定と酸揮発性硫化物濃度(AVS)の測定が行われた。酸素消費速度は、底質表面に設置したベルジャー内部の酸素濃度の設置後4時間の時間変化から求められた。また、AVSはエクマンバージによって採取した底質の表層泥1cmについて、検知管法で測定された。得ら

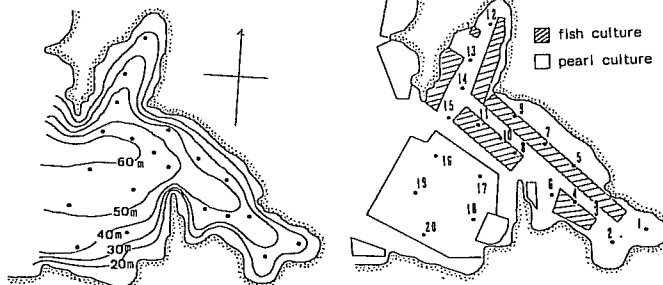


Fig. 5. Map of Shitaba Bay showing observation stations and fish and pearl culture grounds (after Ehime Prefectural Fisheries Experimental Station (1995)).

れた酸素消費速度とAVSの関係をFig. 6に示す。図中の数字は測点番号である。この測定は1点での調査に時間を要するため測点数は少なく、また各測点でのOSについても検討されていないが、0.3~0.4mg/gのAVSに対して酸素消費速度のピークがあることが伺われる。

一方 Fig. 7は、測点7, 10, 13の平均のAVSの1991

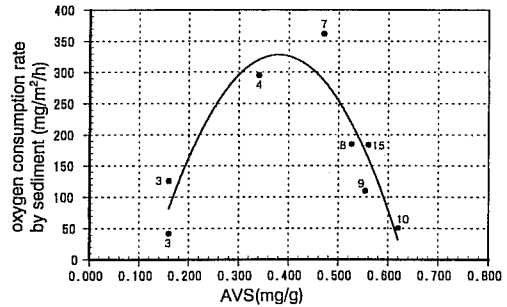


Fig. 6. Relation between the oxygen consumption rate by sediment and AVS in the sediment at the observation stations in Shitaba Bay (after Ehime Prefectural Fisheries Experimental Station (1995)).

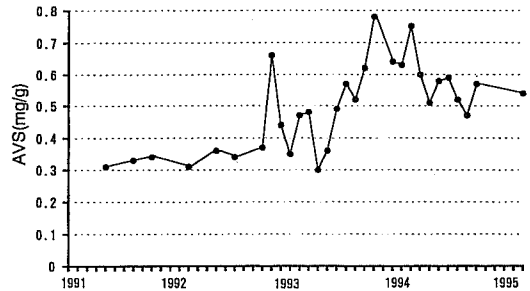


Fig. 7. Time change in the average AVS of the surface sediments at Stns. 7, 10 and 13 in Shitaba Bay (after Ehime Prefectural Fisheries Experimental Station (1995)).

年から約4年間の変化である。図のように、AVSは1991年半ばからの1.5年間は0.3~0.4mg/gの範囲で漸増しているが、それ以後は急激に増加して一時はそれ以前の2倍程度に達し、その後はやや安定して若干の低下傾向を見せているが過去の値には回復していない。この間の下波漁協の餌料の販売量や養殖魚の出荷量も漸増しているが(愛媛県水産試験場, 1995), 1992年末からのAVSの増加率はこれをはるかに越えている。愛媛県水産試験場(1995)は、このAVSの急激な増加の原因について2つの可能性を示している。第1は、養殖量の拡大によって漁場への有機物負荷が漸増するうち、1992年末に浄化能力の限界を越えたということである。第2は、下波漁協で販売される餌料のうちモイストペレット等の配合飼料の割合が1992年以降大きくなったことから、餌料の質的变化が底質の悪化を招いたということである(ただし、モイストペレット等は残餌を減らして底質の悪化を防ぐことを目的の一つとして用いられるので、このことが原因である可能性は低いと考えられている)。そのほかにも、夏季の豊後水道東岸一帯では急潮が湾の海水交換に重要な役割を果たしている(武岡, 1990)、急潮の発生状況の経年変動による湾の海水交換の経年変動がAVSの変動の原因になっている可能性もある。しかし、著者らが行っている豊後水道での長期水温観測によれば、1993年夏季には急潮が比較的強く、1994年夏季には弱いことがわかっており、Fig. 7ではこれらから期待される傾向とは逆に海水交換のよい1993年夏季にはAVSが増加し、海水交換の悪い1994年夏季には減少している。従って、急潮の経年変動はFig. 7のAVSの経年変動とは無関係であると考えられる。

以上のことより、Fig. 7のAVSの増加の原因としてはいまのところ上記の第1の可能性が高いと思われる。あるいはそれ以外に原因があるかもしれないが、仮に第1の可能性が原因であるとすれば、1992年末までのAVSの値とFig. 6に示される酸素消費速度の最大に対応するAVSの値がほぼ一致することから、これらの結果は底質の酸素消費速度を指標として養殖の許容量を決める方法の実効性を示唆するものと考えられる。しかしながら、上記のようにここでのAVSの限界値にはOSの違いが考慮されていないなどの問題点があり、この方法の実効性を確かめるためには今後さらに綿密な調査研究が必要である。

## 6. あとがき

本稿では、底質の酸素消費速度を指標として養殖の許容量を決める方法を実用化するための問題点を整理し、具体的なSRR法とSSC法の2つの方法を提案した。さらに、これらの方法の適用の際に必要な漁場の下層への酸素供給能力を求める方法の概略を示した。これらは、基礎とする酸素消費速度のピークに関する考え方やOSに対するSLの依存性等についての仮説に基づいている。これらの妥当性や、この方法が漁場の持続性とどのように関連するかについては、今後の研究の深化によって十分に明らかにされる必要がある。また、本研究では方法の基本構成を作成することを目的としたため、底質の酸素消費に水温が関係しないことや、下層への酸素供給が主に水平輸送によること等のいくつかの仮定によって問題を簡略化した。これらの仮定の妥当性も今後の調査、研究を要する課題であり、仮定が妥当でなければ漁場の類型化等がより複雑になることも考えられるが、これらについては実用的な精度の問題も十分考慮しながら検討する必要がある。

近年の養殖漁業の発展は、水産の世界のみならず人類史にとっても大きな出来事の一つであり、その中で持続的な養殖を目指すということは、養殖漁業の今後の方向性を決める極めて大きなテーマである。従って、この問題に関連した研究は今後一層発展する必要があるが、本稿がそれらの研究のたたき台となり、漁場環境の保全に何らかの寄与をすることができれば幸いである。

最後に本研究をまとめるにあたり貴重な討論をしていただいた愛媛大学工学部柳哲雄教授に深く感謝します。

## 参考文献

- CHAREONPANICH, C., H. TSUTSUMI and S. MONTANI (1994) Efficiency of the deposition of organic matter, loaded on the sediment, as a result of the biological activity of *Capitella* sp. I. Marine Pollution Bulletin, 28, 314-318.
- 愛媛県水産試験場(1995) 平成6年度魚類養殖対策調査委託事業報告書。
- 畑幸彦(1990) 堆積物。海面養殖と養魚場環境。日本水産学会(編), 恒星社厚生閣, 東京, 51-68。
- 平田八郎・門脇秀策(1990) 酸素収支。海面養殖と養魚場環境。日本水産学会(編), 恒星社厚生閣, 東京, 28-38。
- 井上裕雄(1977) 養殖場環境の管理。浅海養殖と自家汚染。日本水産学会(編), 恒星社厚生閣, 東京, 88-108。
- 木村晴保・李炯来・伴道一・宗景志治(1993a) 内湾の貧酸素化防止のための潮汐ダムの開発に関する研究(1)-0



底質の酸素消費速度に基づく適正養殖基準の決定法

- PT及びTPT(a)の導水管導水量の推算法. 水産工学, 30, 23-28.
- 木村晴保・李炯来・伴道一・宗景志治 (1993b) 内湾の貧酸素化防止のための潮汐ゲムの開発に関する研究(2)—TPT(b)の導水量の推算法. 水産工学, 30, 107-111.
- 熊本県水産振興課 (1993) 平成4年度魚類養殖場環境調査報告書.
- 楠田理一 (1990) 魚病. 海面養殖と養魚場環境. 日本水産学会 (編), 恒星社厚生閣, 東京, 79-88.
- 大森浩二 (1990) 養殖漁場における有機物負荷制限値の推定方法について. 平成元年度宇和島湾浅海養殖漁場環境調査報告書, 遊子漁業協同組合, 50-56.
- 大森浩二 (1991) 海底における有機物分解と養殖漁場汚染. 平成2年度宇和島湾浅海養殖漁場環境調査報告書, 遊子漁業協同組合, 1-10.
- OMORI, K., T. HIRANO and H. TAKEOKA (1994) The limitations to organic loading on a bottom of a coastal ecosystem. Marine Pollution Bulletin, 28, 73-80.
- 武岡英隆 (1981) 海水交換と物質輸送の概念について. 愛媛大学紀要第3部工学, 9-4, 287-298.
- TAKEOKA, H. (1984) Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. Continental Shelf Research, 3, 311-326.
- 武岡英隆 (1989) 貧酸素水塊の物理モデル. 沿岸海洋研究ノート, 26, 101-108.
- 武岡英隆 (1990) 養殖漁場としての宇和海の物理環境. 水産海洋研究, 54, 9-18.
- 武岡英隆・橋本俊也・柳哲雄 (1988) ハマチ養殖場の物質循環モデル. 水産海洋研究会報, 52, 213-220.
- 玉井恭一 (1990) 底生生物. 海面養殖と養魚場環境. 日本水産学会 (編), 恒星社厚生閣, 東京, 69-78.
- 堤裕昭・門谷茂 (1993) 魚類養殖場直下に堆積したヘドロ (有機汚泥) のイトゴカイによる浄化の試み. 日本水産学会誌, 59, 1343-1347.