

マイクロバブル技術によるカキ養殖効果

EFFECT OF MICRO-BUBBLE TECHNIQUE ON OYSTER CULTIVATION

大成博文¹・前田邦男²・松尾克美³・山原康嗣⁴・渡辺勝利⁵・石川並木⁶

Hirofumi ONARI, Kunio MAEDA, Katsumi MATSUO, Yasushi YAMAHARA,
Katsutoshi WATANABE and Namiki ISHIKAWA

¹正会員 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科 (〒745-8585 徳山市久米高城3538)

²正会員 中電技術コンサルタント(株)企画部長 企画部 (〒745-8585 広島市南区出汐13-5)

³正会員 中電技術コンサルタント(株)総括課長 環境調査本部 (〒745-8585 広島市南区出汐13-5)

⁴正会員 中電技術コンサルタント(株)主任 環境調査本部 (〒745-8585 広島市南区出汐13-5)

⁵正会員 工博 徳山工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒745-8585 徳山市久米高城3538)

⁶正会員 (株)エコブレーン研究員 西部本部 (〒745-8585 徳山市久米)

New techniques for oyster cultivation at Hiroshima bay are investigated using sea water micro-bubbles. The present results indicate some new aspects that the device of sea water micro-bubble generated about 5l/min air discharge, under the water depth of 10-15m. By generating micro-bubbles, the salinity of sea water in the surface layer increased about 13% and the water temperature decreased about 2°C in the oyster farm in summer. Finally, the oysters which had been named "Waka" about thirty years ago were restored to the original state by using sea water micro-bubble technique. "Waka oyster" grew up rapidly for about a half year and had a rich constituent of glycogen.

Key Words : Micro-bubble, Oyster cultivation, Water purification, *Heterocapsa circularisquama*, Fishery

1. はじめに

わが国では、長い間、閉鎖水域における水質汚濁の環境基準を達成できない状況が続いているが、問題はそれだけに留まらず、環境基準達成域においても、生物の死滅や減少が少なくない地域に発生している。その基本的理由は、数々の汚濁付加要因が増加するなかで、それらを根本的に改善する技術が出現していないことにある。

たとえば、全国の海域では、数十億円から数百億円の規模で水産量の減少や漁場の劣化が毎年出現している。

具体的には、97年、98年において、広島湾では、「ヘテロカプサ」と呼ばれる新種の赤潮が発生し、養殖カキだけでも40億円を越える被害が出ている。愛媛県では、3年前の真珠出荷額が385億円にも達していたのが、99年以降では、30数億円に激減している。低迷の原因は、国産のアコヤガイの成長劣化、さらには大量斃死を招くことにある。同様のことは、北海道A湾におけるホタテ漁、三重県B湾、鹿児島県C島の真珠漁などにおいても出現

している。

このように、全国各地の海域では深刻な漁業不振の状況が拡大している。この背景には、海の汚れ、漁場の疲弊、従来予想もできなかった新しい難問題などの出現がある。

これらの深刻な水産養殖問題の困難を解決することを可能とする新技術の開発が切に望まれている。この技術的課題は、高性能で小型、省エネ、安価という条件を備えることはもちろんのこと、とくに、①海域の溶存酸素濃度の改善を広い領域で実現すること、②本来の自然状態を復元させ、水生生物の活性化を可能にすることが求められている。

著者らは、マイクロバブル発生装置を開発し、これまでにさまざまな水質浄化の実験を行い、いくつかの重要な成果を示してきた^{1)~4)}。

そこで、これらの成果と上記の深刻な状況を踏まえ、広島湾におけるカキ養殖にマイクロバブル技術を適用し、その水域の水質浄化と養殖カキの成長促進に関する実験を試みた。

2. 広島カキの生産状況とヘテロカプサ赤潮

(1) 広島カキの生産状況

わが国は、世界のなかでも有数のカキ生産国である。1995年のF A Oの資料によれば、日本は中国に次いで2番目、その後に、韓国、フランス、アメリカと続き、これらが5大生産国となっている。国内のカキ生産においては広島県が第1位で約6割を占め、次に宮城県、岡山県と続くが、それぞれ、1割以下に留まっている。

図-1に、広島県におけるカキ生産量、生産額、筏台数の経年変化を示す。これより、生産量と生産額が1994年から年々減少しつづけ、最近是最盛期の6割程度まで落ち込んでいる。一方、筏の台数には大きな変化が無く横ばい状態を示していることから、漁場の養殖能力の低下が指摘される。

また、カキ養殖に関する経営体数は、1998年度で473となっているが、現在でも実際のカキ養殖業者数は減少傾向にあり、98年のヘテロカプサ赤潮による被害も加わって、創業以来460年も営々と続いてきた広島カキ養殖業の存続が可能かどうかのぎりぎりの状況まで追い込まれている。

(2) ヘテロカプサ赤潮

赤潮とは、「海水中での微小な生物（主に植物プランクトン）が異常に増殖して、そのために海水の色が変わる現象を総称したもの」とされている。近年の赤潮は、富栄養化された海域で頻繁に発生し、養殖魚や貝の大量斃死など、大きな被害を与えるために深刻な社会問題となっている。90年代に入って、渦鞭毛藻の一種であるヘテロカプサ・サーキュラリスカーマ（*Heterocapsa circularisquama*、以下「ヘテロカプサ」と略称する）が西日本の各地で多大な赤潮被害を発生させてきた。本赤潮生物は、1988年に高知県の浦の内湾で最初に赤潮として発見されている。その後、89年に福岡県博多湾でアサリの被害、続いて三重県英虞湾でも92、94、96年と発生し、アコヤガイに大きな被害をもたらした。広島湾では、95年に宮島西の大野瀬戸で約3億3千万円、そして98年に約40億円を越える被害を出している。このヘテロカプサ赤潮が発生した海域では、被害を受けるのは主に二枚貝や巻き貝などの軟体動物のみであり、魚類、またはエビ・カニなどの甲殻類を直接斃死させることはないと言われている⁵⁾。

さて、もうひとつの重要問題は、ヘテロカプサ赤潮の大量発生とその死滅に伴って発生する「酸欠」である。実際、98年のヘテロカプサ赤潮の発生時（最高で20,000～40,000個/mlの固体数が検出されている）に、江田島湾のカキ筏では、水深2mまでは半数以上のカキが生きており、それ以下では、ほとんどのカキが死滅していたことが確認されている。この水深2mまでのカキ斃死にヘテ

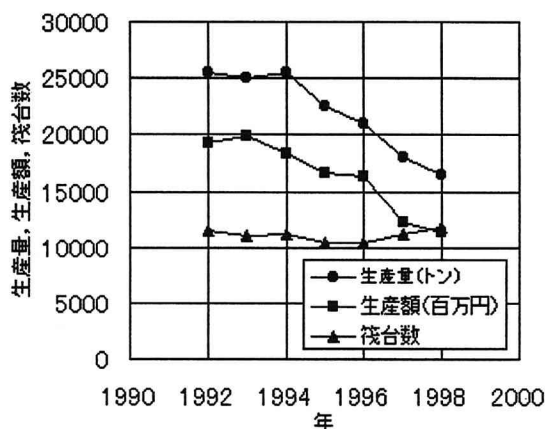


図-1 広島カキの生産量、生産額、筏数

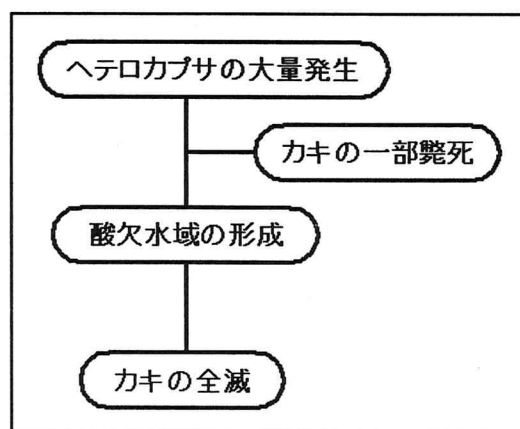


図-2 カキの斃死過程



図-3 カキ用マイクロバブル発生装置

ロカプサ赤潮が、また、2m以深におけるカキの斃死には酸欠が主として関係していたと推測される。

以上を概念的にまとめて図-2に示す。また、ヘテロカプサ赤潮対策として次の4つが指摘される。

- ①ヘテロカプサ赤潮の発生防止
- ②発生したヘテロカプサ赤潮の除去対策
- ③酸欠改善
- ④カキの体力増強

3. カキ用マイクロバブル発生装置

上記③と④の対策を考慮して、カキ用マイクロバブル発生装置が開発された。また、①と②についてのマイクロバブルの有効性は未確認のままであり、その有効性を検証するには、ヘテロカプサ赤潮の出現を待つしかなかった。

(1) カキ養殖の問題点

カキ養殖の現状には、上記のヘテロカプサ赤潮の問題のほかに、次の8点が指摘されている。

①成長が不良となり、養殖期間が長くなった。1975年までは、1年ものの「若（ワカ）」が養殖されていたが、現在は2年ものがほとんどとなっている。

②漁場の老化、底質の悪化により、夏場に貧酸素水塊が発生するようになった。

③海面の埋め立てが進み、漁場が狭くなった。潮流が変化した。

④カキ採苗の不調が1年ごとに起こるようになった。

⑤身入りが遅く、早期出荷ができない。

⑥養殖年数が長くなり、斃死率が増加した。

⑦韓国産の輸入や出荷時期が集中し、販売価格が安い。

⑧剥き身作業労働力の不足

(2) 現場の要請と技術的問題点

図-4. 3に、カキ用マイクロバブル発生装置の概略を示す。本システムの設計の際に、カキ業者から要請されたことは、次の4点であった。

①装置を小型化し、カキ筏の吊り手同士の間（約40cm）に入り、装置がカキに引っかからないようにする。

②駆動には水中ポンプを用い、筏の任意の地点まで簡単に持ち運びを可能とした（カキ業者は、カキ筏を10～20所有しており、ひとつのカキ筏でマイクロバブルを与えた後に、次のカキ筏に運搬して使用可能とする）。

③任意の深さ（水深10～12mまで）に装置を設置可能とする。

④電源は200Vを用いる。

カキ筏の大きさは、縦23m、横11m程度であり、通常は、これらがいくつか連結されて設置されている。このカキ筏2つ分に対して、マイクロバブル発生装置5セットを設置することを基本とした。この場合、1セットとは、水中ポンプ1台とマイクロバブル発生装置（M2-Lカキ用）2機を基本としている。つまり、カキ筏の一定の広さに対して、どの程度のマイクロバブルを発生させればよいかが明らかになることが第1の課題であった。

そこで、現地実験を行いながら、潮流の程度によってなるが、およそ直径20mの範囲でマイクロバブルが広がることを確認した。水中ポンプはチタン製で、出力は750W、揚程12m、流量0.13m³/mの仕様を採用した。これ

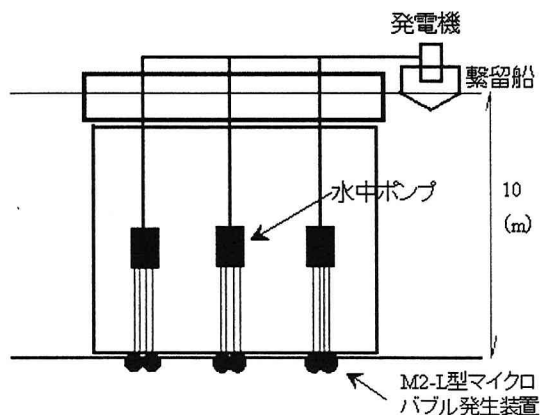


図-4 カキ用MB装置のシステム

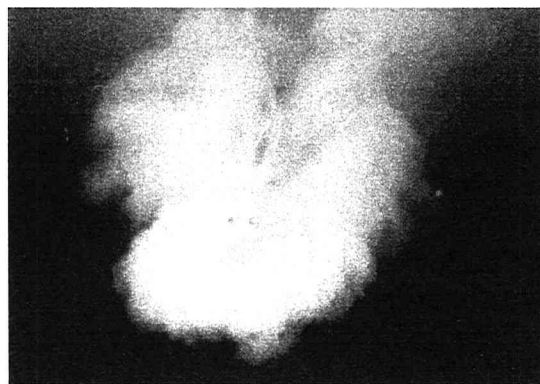


図-5 マイクロバブルの発生した瞬間

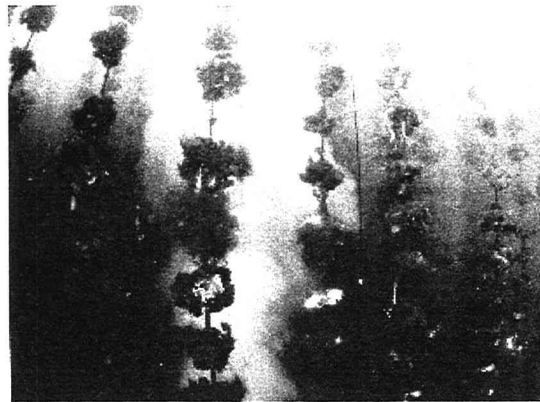


図-6 マイクロバブルの発生状況

は、赤潮発生時のことも想定して、マイクロバブルを大量に発生させることを優先したことによるものであった。

第2の課題は、水深10～12m程度の深さにおいてマイクロバブルを十分に発生させ得るかであった。マイクロバブル発生装置は、ポンプで運転する際に空気を自吸することを特徴としているが、本システムでは、5,6mの深さまでの自吸が可能となった。しかし、要請された設置水深は10mであることから、小型コンプレッサーを使用することでそれを達成した。使用したコンプレッサーは、圧力0.7kgf/cm²、流量40l/分であり、これ1台でマイクロバブル発生装置5セットの同時使用が可能となった。

図-4に、これらの装置システムの概略を示す。

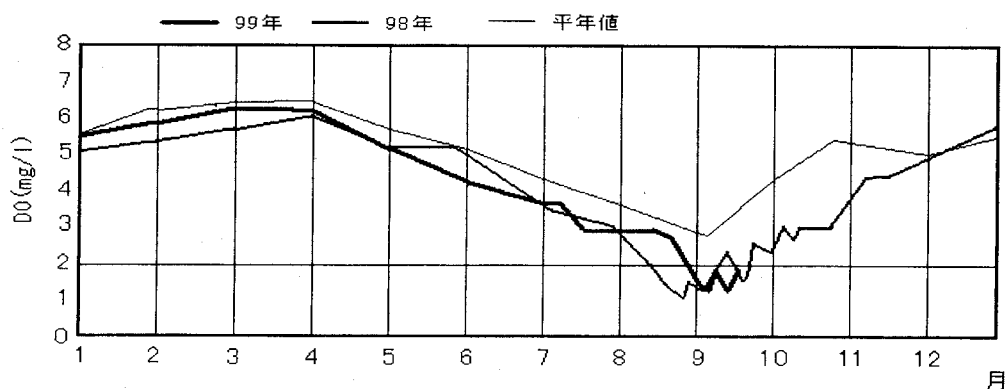


図-7 広島湾北部海域の溶存酸素量 (10m層) (財) 広島市水産振興協会, 「カキ養殖情報」より

4. マイクロバブルのカキ養殖効果

(1) マイクロバブルの発生状況

図-5に、海水中(水深5m付近)でマイクロバブル発生装置から発生しているマイクロバブルの様子を示す。白く煙状に写っているのがマイクロバブルであり、本マイクロバブルは、高圧下であるほど、その径は小さくなり、海水への溶解がより容易となる。

常圧下で海水マイクロバブルを発生させた場合、その気泡径の最頻値は10 μ m程度であり、その大部分は5~30 μ mの範囲に分布する⁶⁾。これが高圧下では、より微細化する。このような規模のマイクロバブルは、自然界に存在するマイクロバブル⁷⁾と比較すると、その大きさで約1/10、発生量で約120倍に相当することから、通常の場合、自然界には存在しないと考えられる。

図-6に、カキ筏下の吊り手付近で発生するマイクロバブルの様子を示す。写真中央部付近に写っているのは、水中ポンプであり、その周囲で水面に向かって上昇しているのがマイクロバブルである。このマイクロバブルの挙動から、カキ筏内でゆっくりとした鉛直方向の3次元的な流動が観察された。

(2) 広島湾における貧酸素化

図-7に、広島湾北部海域における溶存酸素濃度(DO)の平均値を示す。まず、溶存酸素濃度の平年値では、3,4月に最も高い値を示すが、夏に向かって徐々に低下し、9月には最低濃度を示す。また、9月を過ぎると、溶存酸素濃度がやや回復している。この場合、7月~9月において、溶存酸素濃度が4mg/lを下まわると生物の生育が停止し、危険が発生すると言われていることから、この3ヶ月間における溶存酸素濃度の極端な低下が基本的な問題として指摘される。

ヘテロカプサ赤潮が発生した98年においては、1月から長期にわたって平年値を下まわり、6月に入って第1危険値である4mg/l以下となっている。また8月に入って溶存酸素濃度が急激に低下し、生物の斃死が起こる2mg/l

(第2危険値)よりもさらに低下している。この酸欠状態が約1ヶ月続いた後に、ヘテロカプサ赤潮が大量に発生した。このように、溶存酸素濃度が第2危険値に対して、どのような値を示すが、ヘテロカプサ赤潮の発生を予測する重要な指標となり得る。

さて、99年は、7月まで98年とまったく同じ傾向をたどったことから、8月、9月にヘテロカプサ赤潮の発生が予測されたが、実際には8月に入って98年の値と大きく差異が生じた。これは、この時期に降雨が度々あり、その度に低温化と溶存酸素濃度の改善が図られたことに起因している。

ところが、8月下旬になって、溶存酸素濃度は急下降し、第2危険値よりも低下し、98年と同じ状況に陥る危険性が予測された。しかし、幸いにも、赤潮発生には至らず、この傾向は、9月24日の台風19号襲来まで続いた。そして結果的には、この襲来で溶存酸素濃度が回復に転じるようになった。

しかし、一方で、この台風のために多くのカキ筏が破損し、沈没した。また、台風直後には、上述の江田島湾他でヘテロカプサ赤潮が大量発生したが、それはごく短期的な発生に留まり、さらに「ヘテロカプサ赤潮発生情報」によってカキ筏を機敏に移動させたことによって、大きな被害を受ける事態が回避された。

以上の状況を踏まえると、広島湾では、夏場に溶存酸素濃度が危険値を下回る状況が慢性的に形成され、状況によっては、ヘテロカプサ赤潮の大量発生、大規模な酸欠水域の形成など、カキの大量斃死に至る危険性を常に有しているように思われる。

(3) マイクロバブルによる貧酸素濃度改善効果

水域に酸欠現象が発生するとカキはたちまち大量斃死するが、貧酸素状態でもカキの成長促進が著しく阻害される。

そこで、広島県江田島湾の実験筏にマイクロバブル発生装置を設置し、溶存酸素濃度の改善に関する実験を行った。

図-8に、99年7月25日における水温、塩分量、溶存酸素濃度の計測結果を示す。水温は、水深3m～10mの範囲で勾配を有している。また、塩分量は、5m～15mの範囲で表層や深層と比して低い値を示している。さらに溶存酸素濃度については、水深0m～5mの範囲で、筏中央と端部では約1mg/lほど中央部で低い値を示している。これは、カキ筏中央部でカキが盛んに溶存酸素を消費したことによる差異が生じたためと考えられる。

これらの状態は、マイクロバブルを注入する前のことであり、注入138分後には、1.5mg/l以上の増加が認められる。この増分は、とくに水深5m～10mの範囲で顕著となり、この増分領域は、上述の水温成層形成領域および低塩分領域と重なり、流体の混合がより発生しにくくなっているためにマイクロバブルが滞留しやすくなっていることと関係している。なお、マイクロバブル発生装置は水深10m地点に設置されているが、10～15mの範囲においても溶存酸素濃度の増分が認められることも注目される。

図-9には、99年8月6日の溶存酸素濃度の観測結果が示されている。これは7月25日における観測と同じ筏における観測値であるが、それと比較すると、溶存酸素濃度の値は明らかに悪化していて、とくに水深5m～10mの領域で顕著な低減を示し、第1危険値の4mg/l付近の値を示している。

ところが、この状態でマイクロバブルを連続して供給すると、60分後に約1.5mg/l、さらに97分後には3mg/lも増加している。

江田島湾では、水深5m以下で溶存酸素が極端に減少する傾向があるが、本マイクロバブルは、その貧酸素水域である水深5m～10mの範囲で滞留することから、カキ筏の吊り手下層（5m～10m）のカキに対して非常に有効な酸素供給が可能になったと考えられる。なお今後の問題として、6～7月の稚貝成長期においては、10mの吊手を2重に半分にして5mの範囲で吊り下げる、通称「松葉吊り」を採用しながらマイクロバブルを供給することが重要と思われる。

次に、図-10にマイクロバブル発生前後における水深ごとの場所別水温分布を示す。この図から、筏中央における供給前後の水温を比較すると、発生後162分の表層0～5m付近において、水温が最大で2℃低下しており、夏場の高水温に対してマイクロバブルの供給は、同時に低温化をも実現できるという結果を示している。この低温化は、夏場において、高温化でカキの体力が弱ることを防ぐことから、重要な効果と考えられる。

図-11に、水深ごとの筏の外と、マイクロバブル供給後の筏中央における塩分濃度を示す。この図から、筏の外と供給162後の筏中央における塩分濃度を比較すると、表層より3～7m付近においても塩分濃度が増加している。最も増加の大きい水深5m地点においては、表層の塩分濃度に対して13%ほど増加している。この高塩分化も、

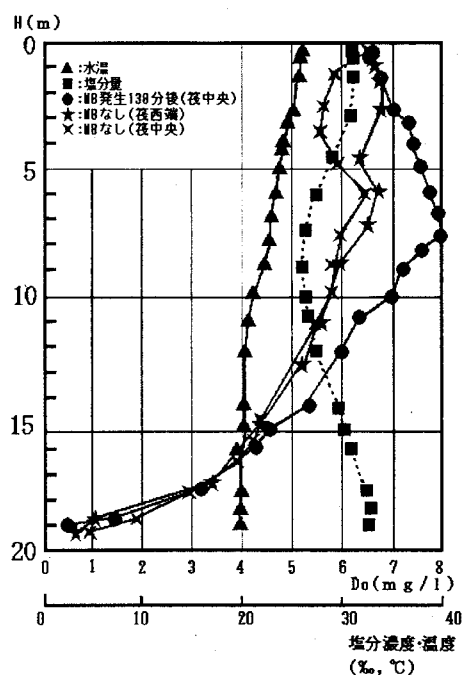


図-8 水温、塩分濃度、溶存酸素濃度

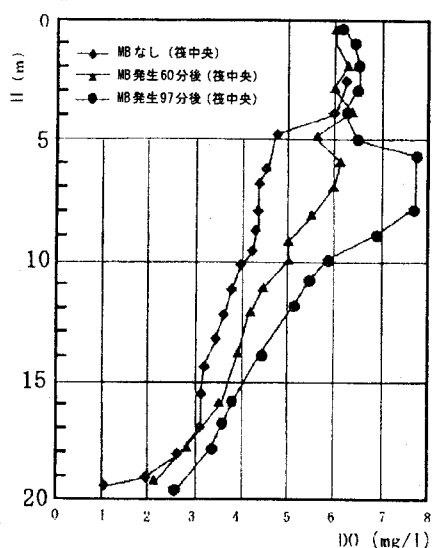


図-9 溶存酸素濃度の変化

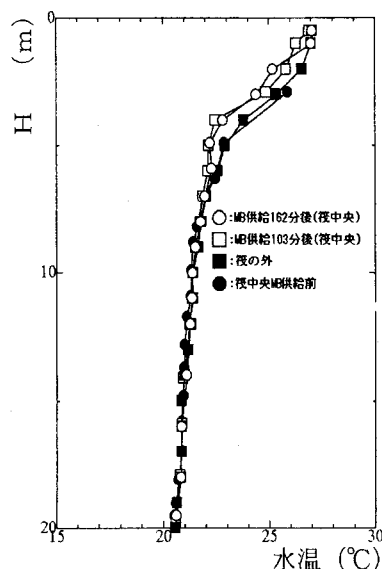


図-10 水温分布の変化

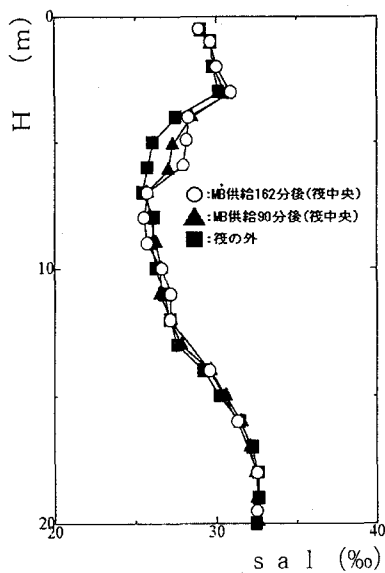


図-11 塩分量の変化

カキの体力弱化防止、成長促進に好影響を与える重要因子と考えられる。

(3) マイクロバブルによるカキの成長促進

広島湾における「若（ワカ）」養殖は、1968年以降不可能となり、2年ものの「イキス」や「フルセ」漁が主流となっているが、それは、カキの味を下げるとともに、経費や赤潮に遭う確率も2倍となってしまうことから、決して好ましい状況ではなかった。

ところで、99年夏は、ヘテロカプサ赤潮の出現が想定され、カキの通し換え後の稚貝段階からマイクロバブルの綿密な供給がなされた。結果的に、この供給が功を奏し、9月末には、約30年ぶりに、「幻のカキ」とさえ言われていた「若（ワカ）」の復活が予測されるようになった。図-12に、その頃の若カキの写真を示す。

このカキは、6月に通し換え後、丸3ヶ月を経過しており、殻長は約8cmにまで成長し、じつに通常のカキにおける成長率の約2.5倍化を示している。また、この成長曲線に関するデータは文献6)で詳しく報告されている。

5. おわりに

1999年において、広島湾の養殖カキをヘテロカプサ赤潮から守るために、マイクロバブルの実験的適用が検討された。結果的に、ヘテロカプサ赤潮の大量発生とそれに伴って発生する大規模酸欠現象は発生せず、そのマイクロバブル効果は、30年ぶりの「若（ワカ）」復活という劇的な成長として現れた。

その理由としては、①溶存酸素濃度の大幅な改善、②夏場における海面表層の低温化、③同じく、海面表層の高塩分化、さらには、④カキ筏水域において、ゆっくりでかつ大規模な3次元の循環流が形成され、それが、好



図-12 成長した若（ワカ）ガキ
(江田島湾, 1999年, 9月22日)

条件の漁場づくりに寄与したように思われる。また、マイクロバブルをカキに供給した時に、最初に観察したことは、カキが通常の2倍も大きく口を開けたことである。その後、この開口は、植物性プランクトンの取込み量の増大や血流促進に関係する挙動であることが明らかとなった。

さらに、これに関連して、マイクロバブルには、単に、溶存酸素濃度を高めるのみならず、カキの生理活性にも有効であるという注目すべき解明も進められている。

今後は、マイクロバブルの物理化学的、水理学的、生物生理学的、生態学的究明などが総合的になされる必要があるように思われる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、文部科学省科学研究補助金（基盤研究（B）（2）、課題番号：11450385）の支援を得た。また本研究の成果は、1999年6月27日と12月14日のNHKニュース7で全国放映され、少なくない関係者の関心を集めた。両ご支援に対し、深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 大成博文：マイクロバブル発生技術と水環境蘇生，高等専門学校教育と研究，3，4，12-20，1998。
- 2) 大成博文：マイクロバブル発生技術による広閉鎖水域の水質浄化，混相流，11，3，263-266，1997。
- 3) 大成博文他：マイクロバブルの高機能性と水質浄化，資源処理技術，46，4，52-58，1999。
- 4) 道奥康治他：マイクロバブル・エアレータによる貯水池の水質浄化実験，水工学論文集，44，1119-1124，2000。
- 5) 松山幸彦：二枚貝に被害を与えるHeterocapsa赤潮について，南西海ブロック情報，35，40-50，1998。
- 6) 大成博文：マイクロバブル発生技術による閉鎖水域の水質浄化と水環境蘇生に関する研究，文部省科学研究補助金（基盤研究（B）（2）研究成果報告書，2000。

(2001. 10. 1受付)