広島湾カキ養殖場における水理特性

誌名	瀬戸内海区水産研究所研究報告
ISSN	13448579
著者名	川西,澄 菊池,伸哉 内田,卓志 松山,幸彦 余越,正一郎
発行元	水産庁瀬戸内海区水産研究所
巻/号	1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 39-43
発行年月	1999年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

AgriKnowledge

瀬戸内水研報（Bull. Fish. Environ. Inland Sea), No. 1: 39–43（1999）

広島湾カキ養殖場における水理特性

川西　澄[*1]・菊池　伸哉[*1,2]・内田　卓志[*3]
松山　幸彦[*3]・余越正一郎[*1]

Hydraulic Features in an Oyster Culture Ground of Hiroshima Bay

Kiyosi Kawanisi[*1], Shinya Kikuchi[*1,2], Takuji Uchida[*3],
Yukihiko Matsuyama[*3], and Syouichiro Yokosi[*1]

Abstract Water currents were measured in an oyster culture ground of Hiroshima Bay in June and October 1997 using a Doppler velocimeter and an acoustic Doppler current profiler. The minimum velocity of the current under the oyster raft occurred at the mid-layer of hanging oysters and the value was measured less than 1 cm/sec regardless of tidal level. The mean velocity increased remarkably with approaching the edge of oyster – hanging layer. Vertical profile of current velocity was simulated using a mathematical model. The simulated profile was in good agreement with that obtained by the measurement. Turbulence energy increased at the edge of oyster – hanging layer. On the other hand, relative intensity of turbulence energy was found to increase inner part of oyster – hanging layer. It is concluded that water current was considerably prevented by the presence of oyster rafts.

Key words: oyster culture, turbulence energy, velocity distribution

カキ養殖は広島県の重要な産業の一つであり，日本のカキ養殖生産量の約60%が広島産で占められている。広島湾のカキ養殖は400年もの長い歴史の中で発展してきた。特に広島湾奥部は，太田川から流れ込む豊富な栄養塩により好漁場となっており，カキ養殖場が集中している。一方，広島湾は閉鎖性の強い海域で，特に湾奥は海水交換の少ない地形となっているため，貧酸素水塊や赤潮が発生しやすい。貧酸素水塊や赤潮はカキ養殖に大きな被害をもたらし（木村 1974），近年の生産量は減少傾向にある（中国四国農政局広島統計情報事務所 1996)。

カキ生産量の向上のためにはカキの排泄作用，濾過水量等カキの生理生態を理解し，海域の生産能力にあった養殖を行なう必要があり，これまでに多くの研究がなされている（楠木 1970, 1977, 1981, Shumway and Koehn 1982, Gerdes 1983)。

数種類ある養殖方法のうち，広島湾で行なわれている筏式養殖は海面に浮かべた筏から海面下約 10 m までカキを吊して養殖する方法で，海域を立体的に利用でき，最も生産性の高い方法である。しかし，吊り下げられたカキが水質だけでなく海水流動にも大きな影響を与え，これが逆にカキの生物生産に影響している。これまでに，カキ養殖が海域に与える影響に関して行なわれた研究は，生物学的な視点からのものがほとんどで（例えば楠木 1981），物理学的な考察を行なったものは少ない（楠木他 1974)。

本研究は，これまで殆ど測定されることのなかったカキ筏内の流速を調査し，カキ養殖場における流速分布を考察した。

1999年 2 月26日受理（Accepted on February 26, 1999）
瀬戸内海区水産研究所業績 A 第 3 号（Contribution No. A 3 from National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea）
*1 川西　澄・菊池伸哉・余越正一郎：広島大学工学部　〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1（K. Kawanisi, S. Kikuchi, and S. Yokosi: Faculty of Engineering, Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8527, Japan）
*2 菊池伸哉：（現在）戸田建設株式会社　〒550-0005 大阪市西区西本町1-13-47（S. Kikuchi: TODA corporation, 1-13-47, Nishihonmachi, Nishiku, Oosaka, Oosaka 550-0005, Japan）
*3 内田卓志・松山幸彦：瀬戸内海区水産研究所　〒739-0452 広島県佐伯郡大野町丸石2-17-5（T. Uchida and Y. Matsuyama: National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, 2-17-5 Maruishi, Ohno, Saeki, Hiroshima 739-0452, Japan）

方　　法

広島湾のカキ筏は竹製で，発泡スチロールのブイによって浮かべられており，筏の大きさは，長さ20 m，幅10 m である（川西他 1998）。筏8台を一連としてワイヤーで等間隔で一列につなぎ，その両端をコンクリート製のアンカーで固定してある。

カキが垂下されている水深は表層から10 m～20 m までの位置である。垂下位置の上端は基本的には海面であるが，夏季においては表層の高い水温と，ホヤ，ムラサキイガイ等付着生物の付着を防ぐために海面下5 m から垂下されている。

現地観測を行なったカキ養殖場は，厳島西沿岸に位置する御床浦漁場である（Fig. 1）。カキ養殖場内には約600台の筏が陸地と平行に設置され，基本的に筏8台を一連として平行に50 m 間隔で配置されている。

流向・流速，水温及び塩分の観測は1997年6月5日及び10月21～22日の2回，それぞれ Fig. 1 に示す地点で行なった。6月は大潮，10月は中潮であった。カキ垂下連の位置は，6月は海面下5 m～12 m，10月は0 m～7 m であった。筏内部の流速を超音波ドップラー流速計（Nortek 社製 Nortek-ADV）（以下 ADV と略記），筏外を超音波ドップラープロファイラー（Nortek 社製 Nortek-ADP）（以下 ADP と略記）を用いて測定した。筏内部の流速は，ADV を筏の中央部に吊し，これをウインチで上下させて測定した。測定点は，6月は2 m から14 m までを2 m 間隔で，10月は2 m，7 m，12 m 及び底面の4層とした。ADP は筏端から水平距離で10 m 離れた地点の海底に設置した。水温及び塩分はマルチ水質測定器（YSI 社 Model 6820）を用いて測定した。

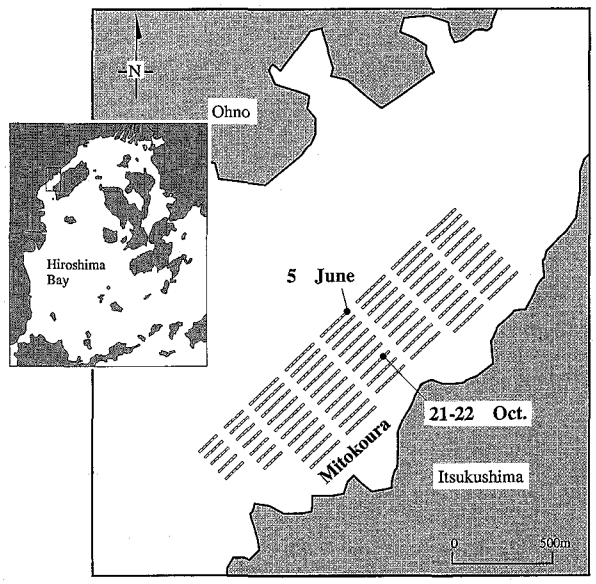


Fig. 1. Map showing the points where oceanographic procedures were conducted.

結果及び考察

カキが海面下5～12 m に垂下されていた6月と，0～7 m に垂下されていた10月の水理環境を比較・検討した。

Fig. 2 に6月及び10月における海水密度鉛直分布の経時変化を示す。ただし，観測方法が異なるため，6月は海水面，10月は海底面を基準として表している。6月の水温は表層で高く底層で低い。塩分は逆に表層で低く底層で高くなっている。このため，水温と塩分から算出した密度（σt）分布は，強い成層状態を示している。10月の水温，塩分は鉛直的にほぼ一様となっており，夏季の成層が崩壊し，混合が進行した状態になっていることがわかる。

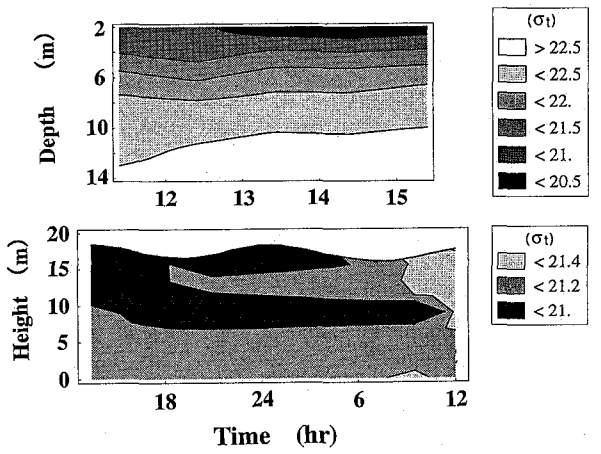


Fig. 2. Temporal variations of sigma-t profiles on 5 June (upper) and 21 Oct. (lower) in 1997.

カキ養殖場の流れを大まかに把握するため，10月の ADP による水平流速ベクトルの変化を Fig. 3 に示す。ADP はカキ筏端から10 m 離れた位置に設置したため，筏内に比較してカキによる流速の減少は僅かであったが，カキ垂下の影響による流速変化がみられる。流速ベクトルのほとんどが上げ潮で北東，下げ潮で南西方向であり，筏列の並びと平行の流れになっている。このことから，御床浦カキ養殖場内の流れは往復流の状態といえる。また，カキの垂下されていた表層付近では流速が小さくなっている。

潮流ベクトルの変化と残差流の向きを知るために，10月のデータから潮流楕円を作成した（Fig. 4）。表層（水深2 m）における流向はほぼカキ筏に沿っており，潮流楕円の短軸は極めて短くなっている。底層（水深14 m）における潮流楕円は楕円の短軸が比較的長く，表層ほど扁平ではない。これは，表層付近ではカキ垂下連の影響によって，流れが筏に沿っているのに対し，カキ垂下層の下にある底層付近では，垂下連の影響が小さいためと

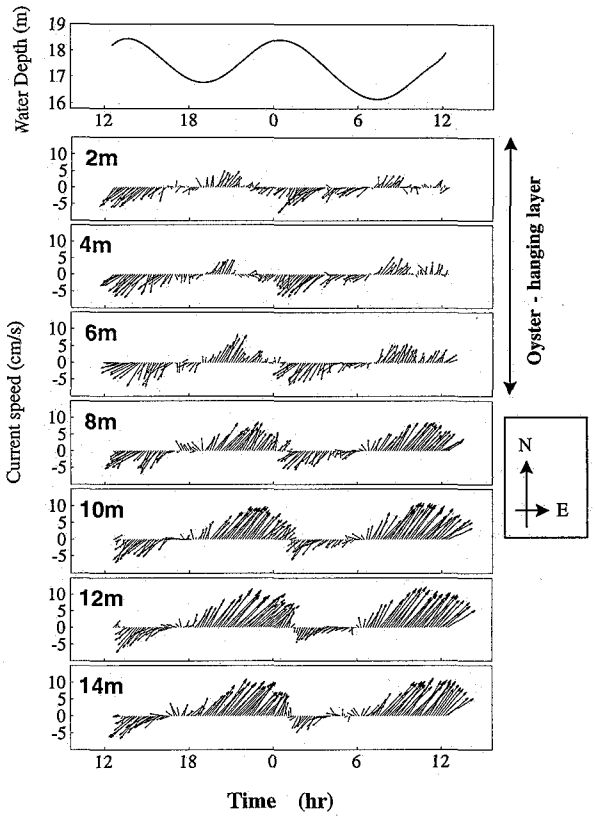


Fig. 3. Tidal change and vector plots of horizontal current measured with ADP for seven depths on 21～22 October, 1997. Currents are averaged every 10 minutes. The depths of 2, 4 and 6 m correspond with the oyster – hanging layer.

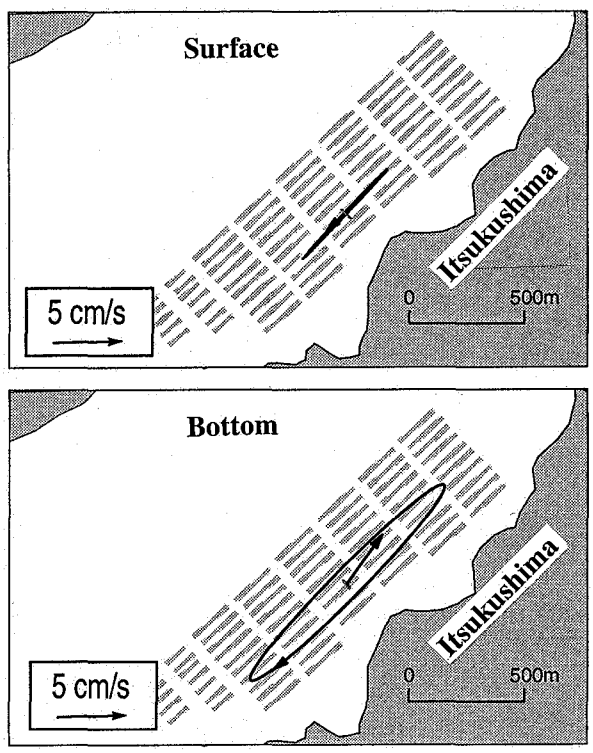


Fig. 4. Tidal ellipses at the surface and the bottom on 21～22 October 1997.

考えられる。また，観測期間が短いので断言はできないが，残差流は表層で南西，底層で北東方向に流れていると思われる。この流れは，河川水が流入している内湾で一般にみられる重力循環流であると考えられる。すなわち，広島湾では湾奥に流入している太田川のために，湾奥に向かって塩分が減少し，海水の密度も減少している。このため，底層では静水圧が湾奥に向かって低下している。この水平方向の圧力勾配は水深とともに大きくなるため，底層で湾奥に向かう残差流が発生し，表層では水面勾配によって逆方向の残差流が生じると考えられる。

カキの存在によってカキ筏内の海水流動は強く妨げられていると考えられる。Fig. 5 に示すとおり，6月と10月の筏内の5分間平均流速は，カキ垂下層内で極めて小さくなっており，垂下層中心部で1 cm/s 程度である。この値は潮時によらずほぼ一定であった。これに対してカキの存在しない6月の底層と表層，10月の底層での流速は，垂下層内最小流速の約10倍程度になっている。

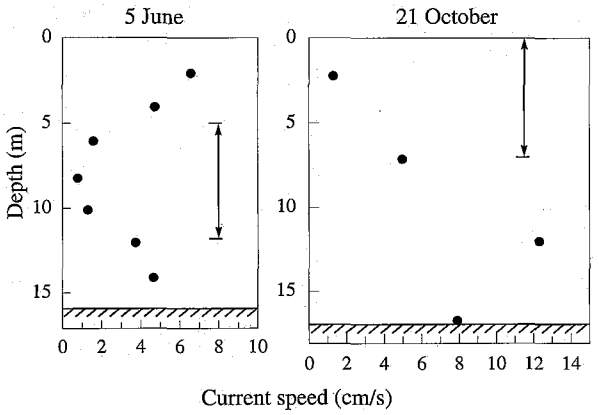


Fig. 5. Vertical profiles of horizontal current measured with ADV in the oyster raft. Arrows indicate oyster – hanging layer, and the stout bars show the sea bottom.

ここで定常・一次元流れを考えると，運動方程式は

$$d\tau/dz=\gamma u^2+dp/dx \qquad (1)$$

となる。ここに，z：鉛直方向の座標，x：流れ方向の座標，τ：レイノルズ剪断応力，u：平均流速，p：圧力，γ：抗力係数（C_D），垂下カキ殻の直径（D）及び垂下カキ連の間隔（S）から $\gamma=1/2C_DD/S^2$ で求められる値，である。以下の式では(1)式中の流れ方向の圧力勾配項は境界面（z=0）の流速軸と摩擦速度を使って置き換えた。

清水他（1991）による直立性植生[*1] の場合と同様に，カキ垂下層内のレイノルズ剪断応力（τ）が垂下層内部に向かって指数関数的な減衰を示すと仮定すると，カキ

[*1] 清水（1991）は開水路に竹ひごを配置して直立性植生とし，この植生内の流れを解析している。

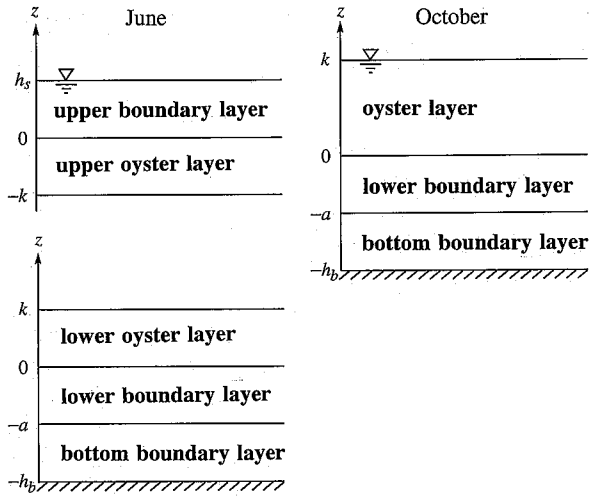


Fig. 6. Separations of current profile.
Vertical profile of current velocity was simulated using the parameters indicated here. Origins are put on the end of oyster layers. Oyster layer in June is separated into upper and lower oyster layers. h_s: position of upper end of upper boundary layer (seawater surface), $-k$: position of lower end of upper oyster layer. k: position of upper end of lower oyster layer in June, and that of upper end of oyster layer in October. $-a$: position of the lower end of lower boundary layer. h_b: position of sea bottom.

筏設置位置における平均流速（u）の鉛直分布は以下のように表される。養殖場の鉛直断面を Fig. 6 に示すように，カキ垂下層（oyster layer），これに接する境界層（boundary layer）及び底面境界層（bottom boundary layer）に分け，さらに6月は，カキ垂下層を中央から上部と下部に分けて考える。

カキ垂下層上部に形成される境界層（$0 \leqq z \leqq h$）：

$$u = (u_*/\kappa) \ln [1 + \kappa z/l_0] + u_0 \quad (2)$$

カキ垂下層の上部層（$-k \leqq z \leqq 0$）：

$$u = [\alpha/\gamma \cdot u_*^2 \{\exp(\alpha z) - 1\} + u_0^2]^{1/2} \quad (3)$$

カキ垂下層の下部層（$0 \leqq z \leqq k$）：

$$u = [-\alpha/\gamma \cdot u_*^2 \{-\exp(-\alpha z) + 1\} + u_0^2]^{1/2} \quad (4)$$

カキ垂下層下部に形成される境界層（$-a \leqq z \leqq 0$）：

$$u = (u_*/\kappa) \ln [1 - \kappa z/l_0] + u_0 \quad (5)$$

底面境界層（$-h \leqq z \leqq -a$）

$$u = (u_*/\kappa) \ln \{(z+h)/z_0\} \quad (6)$$

ここで，α：カキ垂下層内におけるレイノルズ剪断応力の減衰係数，u_0：垂下層端（$z=0$）での流速，κ：カルマン定数，u_*：垂下層端での摩擦速度，k：6月は垂下層の厚さの 1/2，10月は垂下層の厚さ，l_0：垂下層端での混合距離，a：垂下層下部に形成される境界層厚さ，h_s：垂下層上端から海面までの距離，h_b：垂下層下端から海底までの距離，z_0：海底面の粗度長さである。10月の流速分布は，カキ垂下層内（$0 \leqq z \leqq k$）では(4)式で，カキ垂下層下部に形成される境界層（$-a \leqq z \leqq 0$）では(5)式で，底面境界層（$-h \leqq z \leqq -a$）では(6)式でそれぞれ表される。

Fig. 7 は6月と10月における筏内流速の鉛直分布の観測値と上式から得られた理論値を比較したものである。u_0 には観測データの補間値を用い，α, u_*, l_0 は最小自乗法により，観測データから決定した。なお，C_D として円柱の値を用い，カキ付着塊の直径と，垂下連の間隔から，$\gamma = 0.4$ とした。観測値と理論値は良く一致し，カキ垂下層内の流速の鉛直分布は6月の場合，垂下層中央部から垂下層端に向かって増加し，10月では表層から垂下層底に向かって増加していることが明らかである。

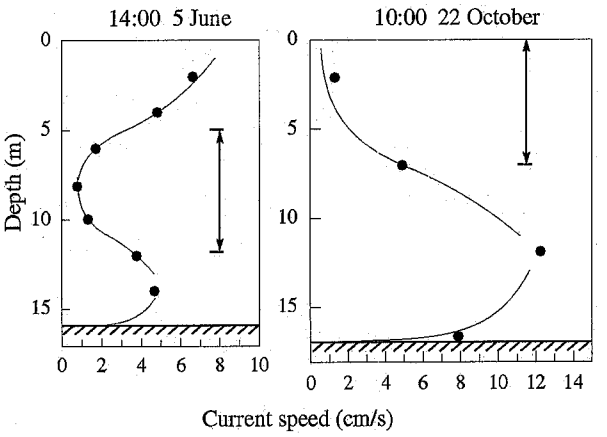


Fig. 7. Horizontal currents measured with ADV (closed circles) and theoretical current profiles (lines) in the oyster raft. Arrows indicate oyster – hanging layer, and the stout bars show sea bottom.

このようにカキが垂下されている領域では流速が非常に小さくなっているが，この領域とカキがない領域との間には強い流速勾配が生じ，その結果，強い乱流が発生していることが考えられる。この点を明らかにするため，筏内の乱れエネルギー $q^2/2$ と相対乱れ強度 $(q^2/2)^{1/2}/u$ を求めた（Fig. 8）。乱れエネルギーは，垂下層端で大きくなる傾向がある。垂下層端における乱れエネルギーは沿岸域の底面乱流境界層における値（鷲見 1981）と同等の大きさである。また，平均流速に相対的な乱れ強度はカキ垂下層内部で大きくなっている。

このように本研究によって，カキ筏内部では海水の流れがかなりの程度妨げられることが明らかとなった。また，観測値と理論値が良く一致していることから，潮流速の時間変化が少なく，疑似定常と見なせる時間帯では，

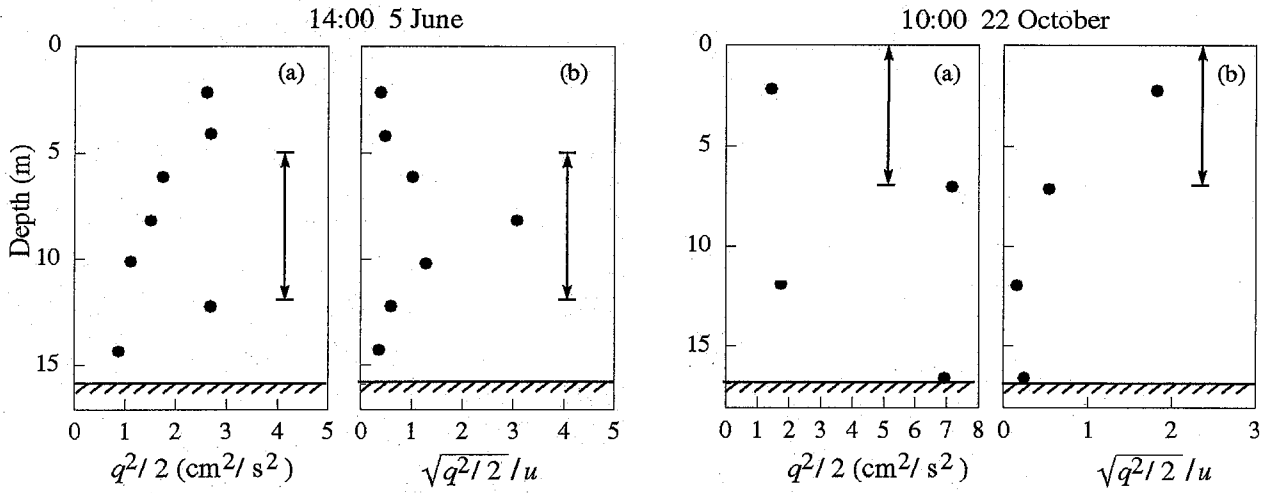


Fig. 8. Vertical profiles of turbulence energy (a) and relative intensity (b) in the oyster raft. Arrows indicate oyster – hanging layer, and the stout bars show sea bottom.

カキ垂下連による流速変化を予測することが可能と思われる。カキ養殖場はカキ排泄物等の蓄積により，老化が進行すると考えられるが（楠木 1981），海水交換の停滞が一層漁場の老化を進めることが懸念される。今後海水流動の面から望ましいカキ養殖形態について考察する必要がある。

要　　約

1. カキ筏内の流速はカキの垂下によって減少し，最低流速は潮汐に関係なく 1 cm/s 程度であるのに対して，カキが垂下されていない水深の流速は，大潮の最大流速時で約 10 cm/s 前後である。カキ筏内の流速は，垂下層位置が中層の場合は垂下層中央部から垂下層端に向かって増加し，垂下層位置が上層のときは海面から垂下層底に向かって増加する。
2. カキ筏内部の乱れエネルギーは，カキ垂下端で大きくなる傾向がある。平均流速に対する相対的な乱れ強度はカキ垂下層内部で大きく，沿岸域の底面乱流境界層における値と同等の大きさを示す。
3. カキ筏内部では海水の流動がかなりの程度抑制されるため，カキの排泄物等が溜まりやすく，漁場老化の一因となっていることが懸念される。今後筏内の潮通し等海水流動の面から養殖形態を考える必要がある。

謝　　辞

観測にご協力頂いた，水産庁瀬戸内海区水産研究所後藤幹夫技官並びに，大野町漁業協同組合　寺西正義氏と廣畑 裕一郎氏に感謝します。

文　　献

中国四国農政局広島統計情報事務所，1996. 平成 7 年広島県漁業の動き，31 pp.

Gerdes, D., 1983. The Pacific oyster *Crassostrea gigas*. Part II. Oxygen consumption of larvae and adults. *Aquaculture*, **31**, 221–231.

川西　澄・菊池伸哉・内田卓志・松山幸彦，1998. カキ養殖場における流動と水質．沿岸海洋研究，**36**, 69–75.

木村知博，1974. 広島湾北部水域における養殖カキの育成と貧酸素水塊の出現の関係について．水産増殖，**44**, 27–33.

楠木　豊，1970. カキ及び付着生物の排泄物量について．水産増殖，**18**, 45–51.

楠木　豊・下中元信・柳谷弘道・大久保忠・西本和也，1974. カキ養殖筏設置による潮流の変化について．広島県水試報，**5**, 17–21.

楠木　豊，1977. マガキの濾過水量の測定法について．日水誌，**43**, 1069–1076.

楠木　豊，1981. カキ養殖場における漁場老化に関する基礎的研究．広島県水試報，**11**, 1–93.

Shumway, S. E. and R. K. Koehn, 1982. Oxygen consumption in the American oyster *Crassostrea virginica*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **9**, 59–68.

清水義彦・辻本哲朗・中川博次・北村忠紀，1991. 直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究．土木学会論文集，**438**, 31–40.

鷲見栄一，1981. 浅海域の海底境界層と物質の動き．沿岸海洋研究，**18**, 88–99.