

閉鎖性海域での微細気泡による水質改善効果の数値解析

田中 陽二* ・磯部雅彦** ・鯉渕幸生***
五明美智男**** ・大野嘉典*****

貧酸素水塊を解消する方法として注目されている微細気泡の現地適用性を検討するため、閉鎖性海域において現地実験を行った。その結果、密度躍層を破壊せずに底層へ効果的に酸素を送り込むことが確認された。微細気泡噴流の流れ場を解析するために、新しく2次元均質流モデルを開発した。本モデルを用いた計算より、微細気泡を含む噴流の上昇・それに伴う連行および底層での鉛直混合などの現象が起きていることを把握した。また、気泡の浮力効果による流動場・水質場へ影響評価を行った。

1. はじめに

日本各地の閉鎖性海域において底層での貧酸素化が多発している。貧酸素水塊は底泥から栄養塩を溶出させ、ときには青潮を引き起こし、生物環境に多大な悪影響を及ぼす。この貧酸素化に対する根本的な解決は海域内の富栄養化現象を解消することであるが、多くの場合、長期的な努力あるいは巨額の費用が必要なために実現は容易ではない。そのため、貧酸素水塊を直接解消できる方法として微細気泡技術が注目されている。微細気泡の直径は数～数百 μm であるため、気泡の上昇速度が他の曝気方法と比べて極めて遅い。これにより高酸素水塊を直接底層に送ることができ、貧酸素状態を改善する効果が期待できる。特に、浅渚窪地への適用や養殖への利用など、部分的に改善することでも大きな成果をあげることが期待できる事例に適している。

微細気泡を用いた効果的な水質改善方法を提案するためには、現地実験、および数値解析による予測・評価が必要である。微細気泡を海域に適用した例として、大成ら (2002) のカキ養殖への適用、鯉渕ら (2004) の窪地海域への現地実験がある。数値解析を行った例として、佐々木ら (2003) の気泡の浮力効果を見逃して準三次元モデルの生成項に組み込んだモデル、田中ら (2004) の BOX モデルがある。しかしながら、浮力のある密度噴流を取り扱うモデルとしては不十分であることが考えられる。

本研究では閉鎖性海域への現地実験を行うとともに、微細気泡を含む流れの数値解析モデルを新たに開発することを目的とし、観測結果と計算結果の比較・検討を行

った。

2. 現地観測の概要

微細気泡を用いた現地実験を2004年8月に千葉県南袖の泊地奥部で行った。微細気泡発生装置を岸壁の角から約2m離れた底面に設置した(図-1)。微細気泡装置は円弧形のタンクに16基設置して放射状に気泡を放出している。水中ポンプを岸壁の角に設置して、そこから吸入した海水を使って微細気泡を発生させる。微細気泡装置は有限会社多久和のマイクロクリーンを使用した。微細気泡装置への空気量と流量は地上でコントロールできるようにしている。水質計測にはアレック電子株式会社のAAQ1183を用い、岸壁角から45度方向に0m, 3m, 5m, 7.5m, 10m離れた地点で観測を行った(図-2)。

3. 観測結果と考察

実験は2種類行い、ポンプの送水量を同じにして、微細気泡の送気量を変化させた。実験条件を表-1に示す。Case 1と2は別々の日に実験を行っている。それぞれ

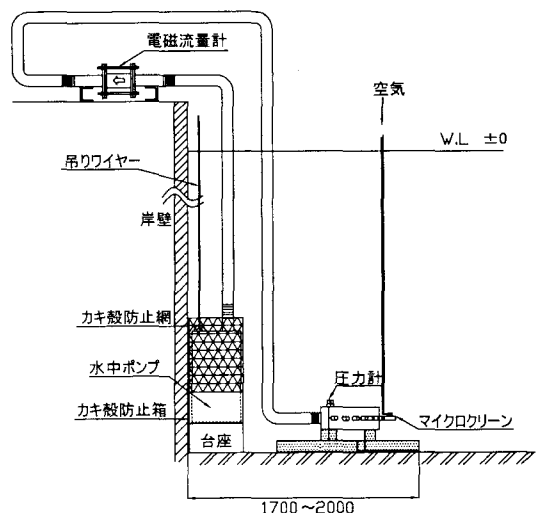


図-1 装置配置断面図

* 学生会員 修(工) 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻
** フェロー 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻
*** 正会員 博(工) 東京大学講師 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻
**** 正会員 博(工) 東亜建設工業(株)技術研究開発センター
***** 正会員 学(工) 東亜建設工業(株)技術研究開発センター

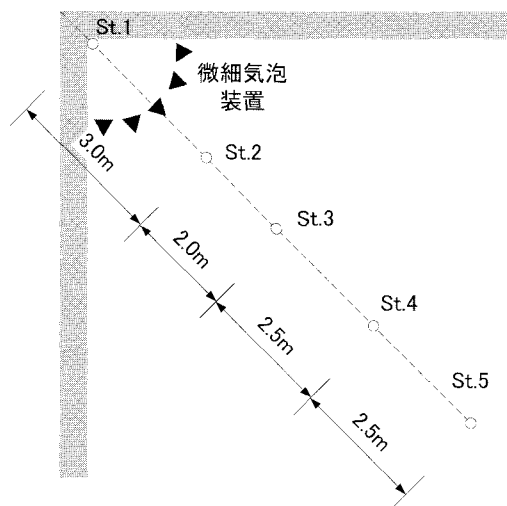


図-2 計測地点

表-1 実験条件

	Case 1	Case 2
全送水量 (m^3/s)	1.9×10^{-2}	1.9×10^{-2}
全送気量 (m^3/s)	5.3×10^{-4}	8.0×10^{-4}

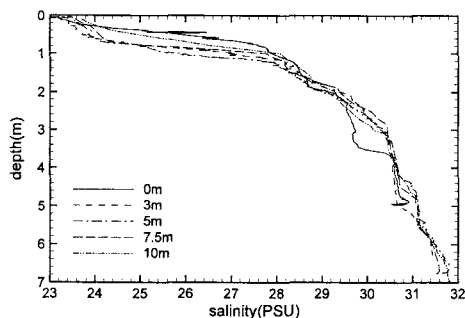


図-3 装置稼働前の塩分プロファイル (Case 1)

のケースについての観測結果を以下に示す。

(1) Case 1 (送気量 $5.3 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$)

装置稼働前の地点ごとの塩分プロファイルを図-3に示す。図より、水深が深くなるにつれ塩分濃度が上がっており、特に水深1m付近で強い躍層が形成されている。地点ごとによる差異は少ない。

次に、装置稼働前と、稼働30分後のDO分布を図-4、5に示す。装置稼働前は底層付近でDOが2 mg/l以下の貧酸素水塊が形成されている。貧酸素水塊は底面に沿うように形成されていることから、底泥からの酸素消費があることが予想される。このようなDO分布は富栄養化した海域でよく見られる。図-5より、底層において $x = 0 \text{m}$ から4mまでの貧酸素水塊が3~4 mg/lと

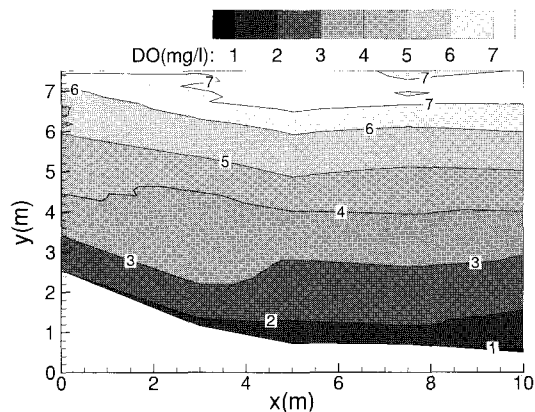


図-4 装置稼働前のDO分布 (Case 1)

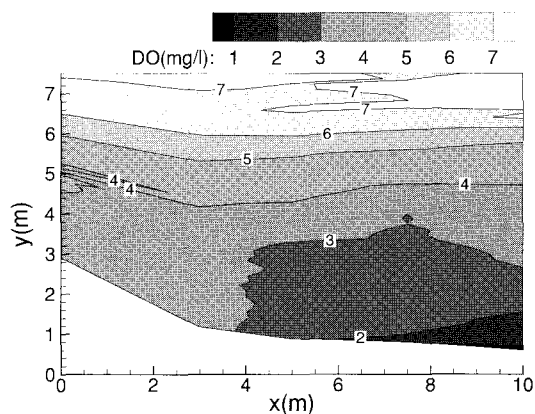


図-5 装置稼働30分後のDO分布 (Case 1)

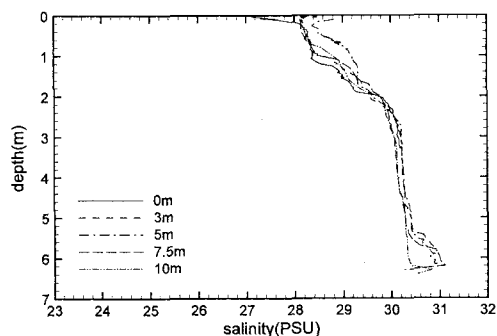


図-6 装置稼働前の密度躍層の状況 (Case 2)

改善されている。さらに、上層・中層においては稼働前の状況からの変化が比較的少なくなっていることから、底層のみに効果的に酸素が供給されていることがわかる。

(2) Case 2 (送気量 $8.0 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$)

装置稼働前の塩分プロファイルを図-6に示す。水深2m付近までは深くなるにつれて塩分が増加しているが、それより下層では、ほぼ鉛直一様となっている。鉛直方

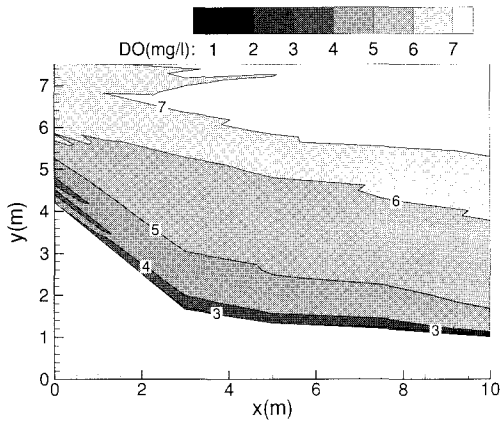


図-7 装置稼働前の DO 分布 (Case 2)

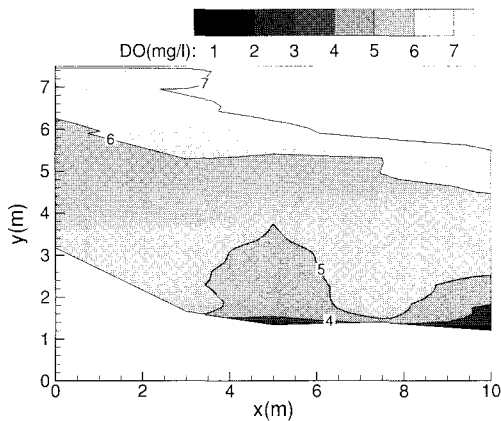


図-8 装置稼働30分後の DO 分布 (Case 2)

向に一様になっている部分は水平方向の差もない。

装置稼働前と、稼働30分後の DO 分布を図-7, 8 に示す。Case 1 と同様に $y = 4$ m 程度まで底層の DO が上昇している。また水深 2 m 付近でコンターラインが水平になっている。これは微細気泡水塊が密度躍層まで達して広がっているためと考えられる。Case 2 は Case 1 よりも送気量が多く躍層も弱い⁶⁾が、表層付近での DO の変化は少なく、この場合でも躍層を壊すことはなかった。

4. 数値解析モデルの概要

(1) 基礎方程式

微細気泡は極めて小さいため、発生する個数も大変少くなる。送気量 $3.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ でバブルの粒径が $20 \mu\text{m}$ とすると、1 秒間に約 80 億個発生することになる。よって、工学的な知見から必要なデータを取得する場合は、平均化された方程式を用いることが計算コストの点から見て望ましい。また、微細気泡の上昇速度が小さいために気泡の流速は液相の流速とほとんど同じである。

以上のことを踏まえて、本研究では微細気泡流れを均質流モデルで取り扱うことにする。すなわち、微細気泡の流動は液相に従い、混合流体は密度の浮力効果によって上昇していくものとする。また、微細気泡の圧縮性は無視できると仮定し、非圧縮性流体として取り扱う。さらに、計算を容易にするために 2 次元モデルとする。乱流モデルには $k-\varepsilon$ モデルを用いる。基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_j}{\partial x_j} = & p_k - \rho \varepsilon \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_j}{\partial x_j} = & (C_{\varepsilon 1} p_k - \rho C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} + \mu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial \rho \phi u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$P = p + \frac{2}{3} \rho k \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$P_k = \mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 ρ : 混合流体の密度、 u_i : 流速ベクトル、 p : 圧力、 g_i : 重力加速度ベクトル、 μ : 分子粘性係数、 μ_T : 渦粘性係数、 k : 乱流エネルギー、 ε : 乱流エネルギー散逸率、 ϕ : 溶存酸素濃度、 Γ : 渦拡散係数、 P_k : 乱れエネルギーの生成項である、モデル定数は標準型 $k-\varepsilon$ モデルの値を用いる ($C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$) である。 μ_T , Γ に関しては、以下に示す浮力効果を考慮した細田ら (2000) のモデルを用いる。

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{1}{1 + 0.2B} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\Gamma = \frac{1}{Pr_t} \frac{1}{1 + 0.24B} \mu_T \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$B = \frac{g_y}{\rho} \left(\frac{k}{\varepsilon} \right)^2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 y : 鉛直方向座標 (上向きに正)、 $Pr_t = 1/1.6$ 、 B : 成層強度を表す無次元パラメータである。

(2) 計算手法

方程式の離散化は有限体積法を用いて行い、速度場の計算は密度変化を考慮した SIMPLER 法で行った。空間に対しての離散化は 2 次精度中心差分、ただし連続式 (1) の移流項に関しては安定化させるために風上差分を用いている。時間に対しての離散化は 2 次精度陰解法である 3 点解法で行った。

自由表面は固定し、スリップ条件とする。壁境界はノンスリップ条件とし、開境界は速度勾配がゼロの条件を与えた。

微細気泡による酸素溶解に関して、せん断装置内での瞬間的な酸素溶解が支配的であり、水中に放出された微細気泡による酸素溶解は小さいとの指摘がなされている (佐々木ら, 2003)。本研究で使用した微細気泡装置を用いて室内実験による酸素溶解実験を行ったところ、佐々木らと同様に水中に浮遊する気泡からの酸素溶解効果は小さいことがわかった。よって、装置から噴出する水塊の DO を一定とし、気泡からの溶出は考えないものとする。

(3) 計算条件

計算は実験結果を再現すること、および微細気泡による浮力の影響を評価することを目的として行う。酸素の供給は与えるが気泡は発生させない Case A と、酸素の供給と気泡を両方与える Case B の計算を行う (表-2)。Case B が現地実験の Case 1 に対応している。送水量と Case B の送気量は微細気泡装置 1 基あたりの値を用いている。初期条件として、DO は Case 1 の観測結果から補間した値を用い、密度は $x = 5 \text{ m}$ 地点のプロファイルを水平方向に一律に与えている。

微細気泡装置から噴出する水塊の密度は、次式のように、ポンプがある $x = 0 \text{ m}$ の底層水の密度から、生成される気泡の分を差し引いて求める。

$$\rho_{out} = \rho_{pump} \cdot \left(1 - \frac{Q_a}{Q_w + Q_a} \right) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 ρ_{out} ：噴出する水塊の密度、 ρ_{pump} ：ポンプが吸い込む水塊の密度、 Q ：噴出される流量 (添え字の a は気相、 w は液相を表す) である。

表-2 計算条件

	Case A	Case B
送気量 (m^3/s)	0	3.3×10^{-5}
共通する条件		
水平格子幅と格子数	0.50 (m) $\times$ 30	
鉛直格子幅と格子数	0.25 (m) $\times$ 30	
時間ステップ (s)	1.0	
送水量 (m^3/s)	1.87×10^{-2}	
噴出水塊の DO (mg/l)	5.0	

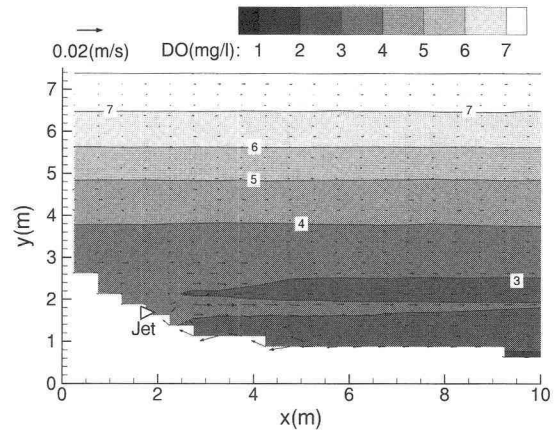


図-9 計算開始30分後の DO・流速分布 (Case A)

5. 計算結果と考察

各実験ケースについて結果の図示と考察を行う。

(1) Case A (微細気泡の密度を考慮しない)

計算開始から30分後の DO と流速分布を図-9 に示す。密度噴流は上下層からの水塊を連行し、噴出口からやや上の位置で水平方向に貫入している。また、噴流を補償する流れが発生し、 $x = 2 \text{ m}$ までの底面の DO が上昇している。しかし、鉛直方向の流速は小さく、上下層の混合は噴出口付近に限られ、 $y = 3 \text{ m}$ 以上の DO はほとんど変化していない。

(2) Case B (微細気泡の密度を考慮する)

Case A と同様に Case B の DO と流速分布を図-10 に示す。密度が軽いために微細気泡発生装置から噴出後、すぐに上昇する流れが発生する。また、浮力分のエネルギーが加わるために Case A よりも流速が大きくなっている。微細気泡水塊は $y = 3.5 \text{ m}$ 付近まで上昇し、周辺の水塊を連行しながら水平方向へ広がっていく。

上昇流を補償する流れは主に底層で起こっているため、噴出口へ向かう強い流速が底層で発生している。流速が速いために乱れも大きくなっており、鉛直方向の混合も進んでいる。Case B は実験結果と比較して DO の影響範囲が薄く広がっている。

(3) 観測結果との密度プロファイル比較

$x = 5 \text{ m}$ における計算結果と観測結果との比較を図-11 に示す。実験開始から30分後までの観測値から $y = 4 \text{ m}$ より下層で混合が進み、ほぼ鉛直一様となっている。また、 $y = 6 \text{ m}$ 付近で新たに強い密度躍層が形成されている。Case A と B の鉛直プロファイルは、観測値の開始時と30分後のプロファイルの中間的な分布になっており、観測結果と概ね一致している。

Case A, B の分布は特に底層で異なっており、Case B

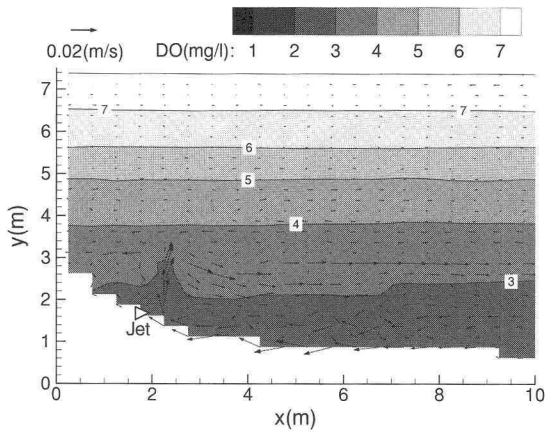
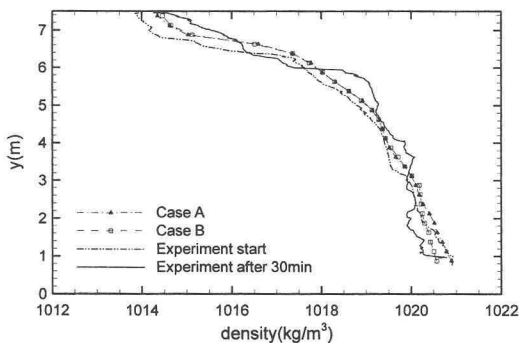


図-10 計算開始30分後の DO 分布 (Case B)

図-11 $x=5\text{ m}$ における密度プロファイルの比較

の方が、底層での鉛直混合が大きいため観測結果に近い分布となっている。上層においても、Case Bの方がAよりも再現性が良い。これは気泡の浮力によって起こる上昇流が底層での鉛直混合を発生させるだけでなく、上層においても気泡の浮力の影響が無視できないことを示唆している。

6. ま と め

本研究では微細気泡装置の現地海域への適用を行った。次に、微細気泡を含む密度噴流の流動予測として2次元の数値計算モデルを新たに開発した。主な成果を以下に挙げる。

- ・閉鎖性海域において微細気泡装置を用いた水質改善効果を計測した。
- ・微細気泡を均質流モデルとして扱い、浮力効果を取り入れた流動モデルを開発した。
- ・本モデルを現地海域に適用し、浮力効果による影響を定量的に把握した。

今後の予測精度向上として、離散化精度の向上・モデルの3次元化・気相と液相の速度差を考慮したモデルへの拡張などが考えられる。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費基盤研究S(課題番号14102026)の補助によるものである。

参 考 文 献

- 佐々木淳・小出摩耶子・長田正行・柴山知也・磯部雅彦(2003)：東京湾三番瀬における微細気泡発生装置を用いた青潮水改善効果の数値的検討，海岸工学論文集，50巻，pp. 981-985。
- 鯉渕幸生・磯部雅彦・佐々木淳・藤田昌史・五明美智男・栗原明夫・田中真史・Mohammad Islam・鈴木俊之(2004)：貧酸素水改善に向けた現地微細気泡実験，海岸工学論文集，51巻，pp. 1156-1160。
- 田中真史・佐々木淳・柴山知也・磯部雅彦(2004)：窪地海域を対象とした微細気泡エアレーションによる貧酸素水改善効果の解析，海岸工学論文集，51巻，pp. 1161-1165。
- 大成博文・前田邦男・松尾克美・山原康嗣・渡辺勝利・石川並木(2002)：マイクロバブル技術によるカキ養殖効果，水工学論文集，46巻，pp. 1163-1168。
- 細田尚・細見知彦(2000)：琵琶湖水温鉛直分布の年間変化解析に関する簡易モデル，日本流体力学会年会講演論文集，7巻，pp. 611-612。
- 片岡勲(1991)：気液二相流のモデリングと基礎方程式，混相流，5巻，1号，pp. 3-21。