

人工湧昇流発生漁場造成の研究

今村 均*・友田啓二郎**・鈴木達雄***・細野成一****

1. 研究の目的

自然の湧昇流発生海域では経験的あるいは既存の調査から湧昇海域が好漁場となっていることはよく知られている(續ら, 1986)。そこで, 沿岸漁場造成の一環として, 下層の豊かで未利用な栄養塩類を植物プランクトンの増殖可能な有光層へ供給し, 基礎生産力を高めることによって魚介類の生産を促すことが考えられている。例えば, 潮流エネルギーを利用した人工構造物によるもの(大竹ら, 1991)や, 浚渫土砂マウンドによる地形変化の湧昇現象(和田ら, 1988)などがある。これまでの調査研究では, 小規模に造成した事例での物理的な効果や, 短期的調査のため海域年変動を含んだうえでの水質, 生物効果についての報告である(柳ら, 1990a, b)。そこで, より大規模に造成した場合で, かつ, 長期的な観測結果から, 湧昇海域での物理, 水質, 生物, および漁業生産にまで及ぶ湧昇効果とその効果範囲を解明する。

2. 調査海域と湧昇流発生構造物

愛媛県宇和海の日振島と御五神島の海域に, 図-1に示す海底勾配が西方に2.6%, 東方に10%の斜面が広がっている海底丘(水深約50m)がある。この海域では大潮流速45 cm/sec, 夏季透明度が14 m, 成層強度の指標(柳, 1989)である $\log 10(H/U^3)$ は, 構造物設置後に3.0(H :水深(m), U :構造物設置後の M_2 潮流振幅(m/sec))となる海域である。そこに, 湧昇流発生構造物として, 図-2に示すような複列衝立タイプの構造物を配置した。この構造物の湧昇流発生原理は, 流れの上流側のS型や箱型の補助衝立によって発生する縦渦, 横渦が流下し, 後方の2基の中央衝立に衝突して, 間欠的に上昇性の渦となり, 底層の栄養塩類を有光層へ供給する。また, 潮流の反転時にも効果が発現するように補助衝立を中央衝立の下流側にも設置している。この中央衝立2基, 前後の補助衝立2基を1組とする構造物によって湧昇流が発生する。また, 構造物の配置は, 水理模型実験より

最も効率的に湧昇機能を発揮するように, 構造物の設置向きを, この海域で最も卓越している M_2 潮流楕円の主軸方向(北から24.3°東)に一致させている。また, 構造物の規模は, 高さが水深の約2割の10mで, 総延長距離

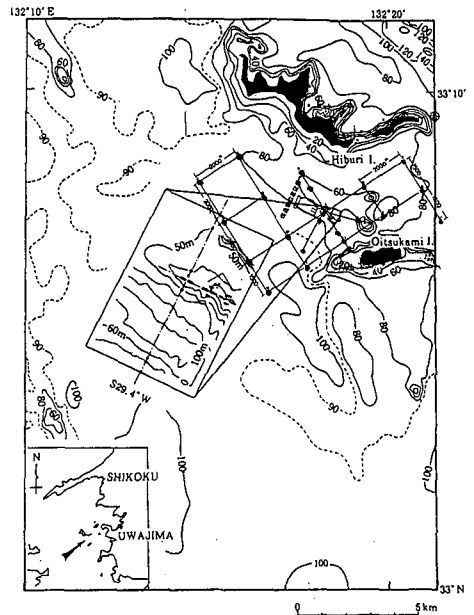


図-1 調査海域と調査地点

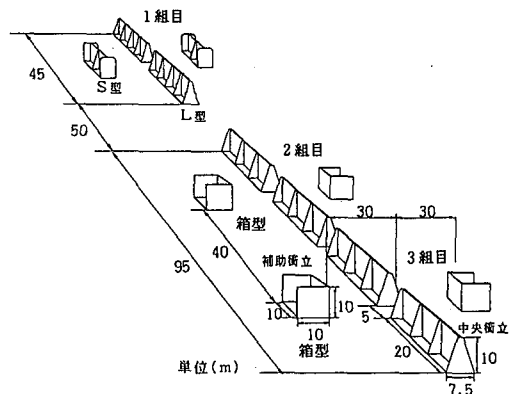


図-2 湧昇流発生構造物

* 正会員 五洋建設(株) 第一技術部
 ** 東和科学(株) 調査設計部
 *** 正会員 (株)間組 土木統括本部
 **** 正会員 (株)大林組 エンジニアリング本部

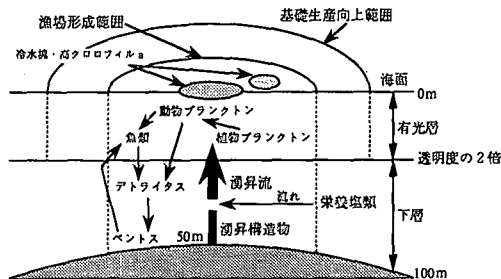


図-3 湧昇効果の発現過程

が約 150 m (3 組) の規模である。なお、設置は 1 組目が 1987 年 10 月、2 組目が 1992 年 6 月、3 組目が 1994 年 7 月の 3 回に分けて実施された。

3. 現地調査概要

現地調査のフレームは、構造物の設置による効果を解明するため、時間的、空間的な比較対照を設けた。つまり、構造物の設置前・後の比較と、対照地点 (RP) と効果発現海域との比較 (図-1 に調査地点を示す) である。

調査項目は、図-3 に示す湧昇効果の過程に従って、物理項目として、構造物近傍での潮流観測 (15 日間連続) と 3 次元ドップラー流速計により、構造物から発生する湧昇流量を測定した。

水質項目は、透明度、水温、塩分、栄養塩類 (T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, T-P, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$)、クロロフィル a について、また、生物項目は、植物・動物プランクトン、クロロフィル a、ベントスである。これらの項目について構造物周辺の広域的範囲 (約 8 km $\times$ 5 km 周囲) を、上 (-5 m)・中 (-20 m)・下 (B+5 m) 層を、湧昇効果の顕著化する夏季の大潮・小潮時に調査した。さらに、調査船にてサンプリングするため、全観測に数時間を経過するので、観測による時間誤差を除去し、かつ、直接的に広域現象を把握するため、リモートセンシング (航空機による MSS, 10 km $\times$ 8.5 km 周囲、全観測時間 20 分) により、表層での水温とクロロフィル a の分布を調査した。

漁場形成と漁獲生産については標本船調査 (30 $\times$ 24 km 2 周辺海域を 2 km メッシュで海域分割し、平均 7 隻の調査船が 3 ヶ年間、延べ 5402 回出漁) を実施した。

4. 調査結果と考察

(1) 湧昇流の発生量

柳ら (1990a, b) によると、1 組目の構造物設置前後の潮流観測から、この海域の M_2 潮流流速が 2 割増加し、鉛直乱れは 6 割増加したことを報告している。また、1 組目の構造物が設置された後の 1989 年 5 月の大潮時 (水平流速が 0.3 m/sec 程度で構造物に対して約 30 $^\circ$ 方向から

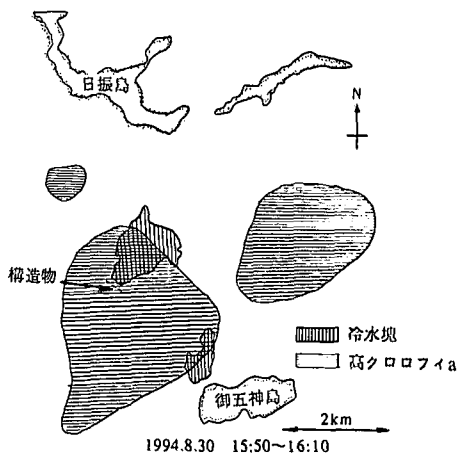


図-4 リモートセンシング解析結果

の流れ) に、ドップラー式流速計を用いて構造物周辺 (幅 200 m $\times$ 流軸方向 500 m $\times$ 6 層) での上昇流況を実測した結果 (大竹ら, 1991), 構造物直上 (水深 31~36 m 層) からの湧昇流量は幅 50 m, 流下方向 100 m の範囲で、少なくとも 0.02 m/sec 以上の上昇流速が実測された。このことから 1 組の構造物によって発生する湧昇流量は約 100 m 3 /sec であった。一方、水理模型実験による染料拡散実験 (マリノフォーラム 21, 1992) からは、1 組みの構造物による下層から有光層内への湧昇流量は、約 122 m 3 /sec (下層厚 20 m $\times$ 湧昇幅 20.4 m $\times$ 水平流速 0.3 m/sec, 流向が構造物に対して 0 $^\circ$ 方向) と見積もられた。

これより、現地調査では流向による減少影響、上昇流速を過少に評価したこと、密度成層の影響 (今村ら, 1991) から、模型実験より湧昇流量が少ない結果となったと考えられるが、両結果から複列タイプの構造物は、構造物延長 m 当りに換算すると、約 2.0~2.4 m 3 /sec 程度と考えられる。

(2) 水質・栄養塩類への効果

3 組の全構造物が全て設置された 1994 年 8 月 30 日の小潮期 (北流 0.2 m/sec 時) の、リモートセンシング調査の解析結果を図-4 に示す。これより、観測当時の北流に乗って構造物北側に約 1 km 2 の冷水塊、また、南側の御五神島北側にも南流時のなごりと考えられる冷水塊が観測された。また、クロロフィル a に関しては、構造物周辺海域およびその東・北方に約 4 km 2 のパッチ状の高濃度の分布が観測された。

a) 経年変化

栄養塩類については豊後水道の海域変動の影響を補正するため、対照地点 (RP) を 1 とする指数値で整理した。なお、RP でのデータが得られていない構造物設置前の 1987 年は、総地点の平均値を 1 とした。比較対照データは各地点の表・中層を用い、各調査年のデータは、大潮・

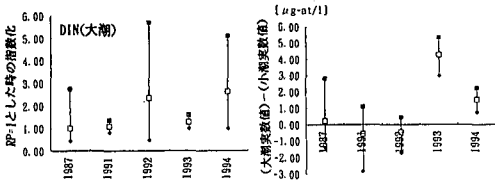


図-5 栄養塩 (DIN) の経年変化例

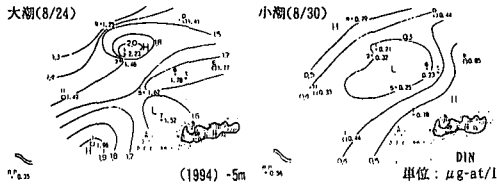


図-6 栄養塩 (DIN) の空間変化

小潮期に分けて整理した。その結果、設置前後(1994年/1987年)の大潮・小潮期の各増分はDINで2.63倍(図-5)、 PO_4-P で1.05倍、 SiO_2-Si で1.52倍、 SiO_2-Si では1.51倍、0.69倍であった。次に、構造物の設置により、流速に比例した量の湧昇流が発生することを考慮すれば、設置前後では大潮・小潮の環境差が増大すると考えられる。そこで、設置前後の実測値の大潮・小潮差の経年変化をみると(図-5)、いずれの栄養塩も事後で差が大きくなっている。

b) 空間変化

空間変化は広域的に調査された1993年、1994年のデータから、両年ともに、また、表・中層とも共通して大潮期には構造物からシフトした位置を中心に同心円上に中央が高くなり、逆に、小潮期は外側が高く中央が低いという傾向をなす(図-6)。これは、大潮期は流速が速くその結果、多量の底層水由来の栄養塩類が供給され、逆に、小潮期には湧昇量が少なく、少量の栄養塩類しか供給されないため、植物プランクトンに取り込まれてしまっていると考えられる。

(3) 基礎生産・生物量への効果

生物量はRPデータがないため、実数値で比較した。

a) 経年変化

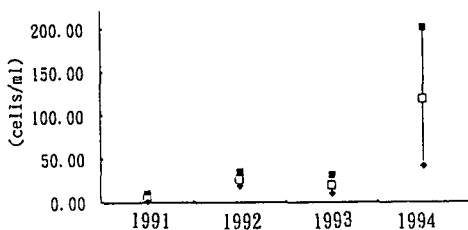


図-7 植物プランクトン経年変化

植物プランクトン細胞数は小潮では7.5倍(上層)、25倍(中層)(図-7)の増加となった。動物プランクトンの個体数では、大潮期に2.6倍、小潮期に2.3倍の増加となった。また、ベントスでは、個体数は0.11倍と減少し、湿重量が2.5倍と増加し、経年的に大型種(エビ、カニ類)に変化している。

b) 空間変化

広域的に調査した1994年のクロロフィルa調査結果では、大潮・小潮とも構造物周辺にピークを持ち、値は大潮期の方が小潮期に比べて数倍高かった。このことから、大潮期においては植物プランクトンの積極的な栄養塩の取り込みが行なわれ、それでも大潮期に栄養塩が高いのは、植物プランクトンの取り込み速度より、栄養塩の供給速度がまわっていることが推測される。

動物プランクトンの昼間の分布は、大潮期は構造物周辺では起伏が少なく、御五神島付近には集積域がみられた。一方、小潮期は分布の起伏が大きく、構造物東側にピークがみられる。また、夜間の分布では、大潮期は昼間と同様、分布に大きな起伏は見られず、小潮期は構造物周辺で大きなピークがみられる。こうしたことから、大潮期は動物プランクトンが移流され、滞留域は島陰に限られるが、小潮期には、広い範囲にパッチ状の集積域を形成すると考えられる。また、夜間では、この傾向が顕著で、構造物周辺への集積が著しい。

(4) 漁場形成・漁獲生産効果

標本船調査は1992年6月の2組目の構造物が設置された直後の7月から開始したが、同年7～8月期の出漁記録には事業海域周辺(日振島・御五神島の海域)での

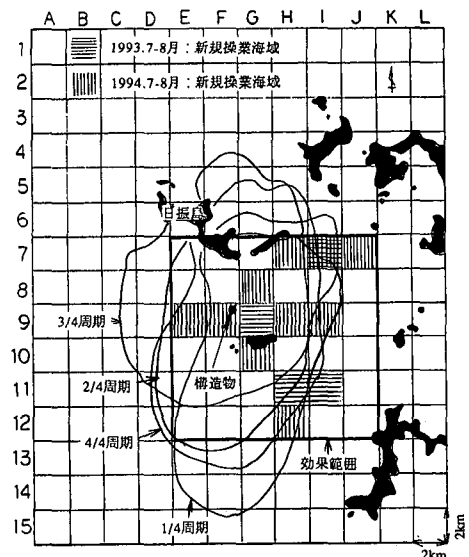


図-8 標本船調査による操業状況と数値計算結果

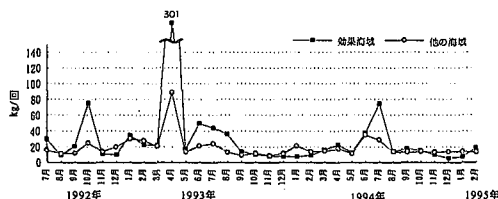


図-9 CPUEの経時変化

操業実績がなく、また、地元漁業者からも、従来からの海域では、操業実績がほとんどないとのことなので、事業効果の発現する前の対照資料として1992年7～8月期を適用した。

1992年(1組目設置後)、1993年(2組目設置後)、1994年(3組目設置後)の7～8月期の出漁記録を比較すると、図-8に示すように、1組目では出漁記録がないが、設置基数の増加によって、漁場として新規に利用されている海域が構造物の南側、北東側に広がって分布している。人工湧昇流の効果は、長期的には残差流方向である構造物の南東側海域、また、短期的には潮流楕円の主軸方向の北東、南西海域で発現されると考えると、こうした新規に操業のめられた海域は、理論上の人工湧昇流の効果方向と重なる。したがって、漁場形成上の効果は東西12 km、南北12 kmの144 km²の範囲と考えられる。

出漁1回当たりの漁獲量(CPUE)についての効果海域内とその他の海域を図-9に示す。効果海域外の平均が19.35 kg/回なのに対して、効果海域では33.36 kg/回と約1.7倍の漁獲量となっている。特に、湧昇効果が顕著に発現していると考えられる夏季に限った比較をすると、効果海域外では17.01 kg/回なのに対して、効果海域では42.14 kg/回と約2.5倍の漁獲量が得られている。さらに経年的にみると、効果海域外では、1994年/1992年が1.45なのに対して、効果海域では2.10と大きく、明かに構造物設置による漁獲効果が見られる。また、夏季のCPUEを整理すると、海域変動を考慮した結果、効果海域では約3割(8 kg)の漁獲増加が見られ、出漁回数は66回/2ヶ月である。なお、調査した標本船は平均7隻で、当該海域への全漁船に対する抽出率は2.2%であることから、全漁船が標本船と同様に操業すると、総出漁回数は3,000回となり、1回当たり8 kgの漁獲増大であることから、24 ton/2ヶ月の漁獲量の増加となる。

また、効果海域における主要魚種は、本調査全体では、合計72 tonの漁獲が記録された。その魚種構成は、ハマチ(13.7 ton)、メバル(10 ton)、イサキ(8 ton)、マアジ、ウマズラハギ(各5 ton)、アジ類(4 ton)である。効果海域の夏季に限り、1992年に比べ1994年に増えた主要魚種は、イサキ、イセエビ、カンパチ、スズメダイ、スルメイカ、ウマズラハギ、メバルである。また、夏季

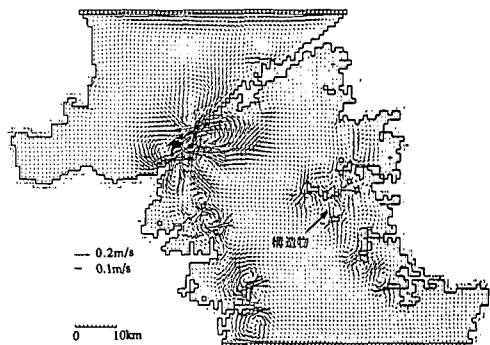


図-10 残流計算結果

以外ではハマチ(1993年4月)が増えていた。

5. 数値計算による効果予測と評価

単層モデルによる計算結果が有光層内の流況を再現すれば、湧昇流発生構造物によって発生する湧昇流量を与えることによって、栄養塩とこれを取り込み増殖する植物プランクトンの拡散計算を行なえる。なお、拡散計算は窒素を指標とし、窒素・植物プランクトンをコンパートメントとする生態系モデル(マリノフォーラム 21, 1992)を含むものである。

(1) 流れの検証

当該海域では夏季に密度成層が2～3層存在するため、2次元単層モデルではこうした層毎の流況は考慮されない。そこで、事業効果範囲への影響が大きい夏季の残差流について現地観測結果および密度を考慮した3次元モデルによる計算結果と比較して、概ね妥当になっているか評価する。比較した残差流は、現地観測結果(柳ら, 1990a, b)から南東流で15 cm/sec程度(水深30 m)であった。また、診断モデル(藤原ら, 1995)による計算結果では、上層(水深0～30 m)の構造物上の残差流は南東流で7 cm/sec、中層(水深30～50 m)南南東で10 cm/secであった。一方、本モデルでは構造物上の残差流(図-10)は南流で9.6 cm/secであった。よって、流向がやや西にふれているが構造物の南方向へ長期的な効果が発現するという基本的な傾向は再現できると考え、前述4.(1)の湧昇流量(3組分)を流速に応じて変化させて与えた。

(2) 窒素・植物プランクトンの検証

現地観測値との比較検証には構造物3組みが全て設置してある1994年の底層窒素の濃度(5,000 $\mu\text{g-at/m}^3$)を用いて計算を実施した。その結果、窒素、植物プランクトンとも計算結果と観測結果の相関係数は0.74となり、 T 検定の結果5%の危険率で有意であった。よって、計算結果は観測結果と整合する。

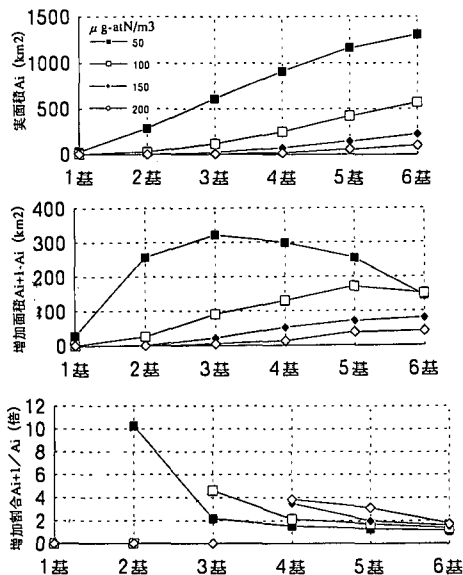


図-11 構造物規模と効果範囲の関係

(3) 効果範囲と増加植物プランクトン量

当該海域の底層の窒素濃度は、年により大きく変動している。特に、調査時の状況からみると、平均的な気象状況であった1991年、1992年と、異常降雨、異常渇水年であった1993年、1994年は大きく異なるため、平年的な底層窒素濃度として $10,000 \mu\text{g-at/m}^3$ を用いて計算（初期バックグランド濃度は $0 \mu\text{g-at/m}^3$ ）した結果、植物プランクトン（窒素換算）の増加濃度は、湧昇中心部で $160 \mu\text{g-atN/m}^3$ 程度となり、標本船調査による新規操業の見られた海域の包絡範囲 144 km^2 と一致する濃度を探すと、 $100 \mu\text{g-atN/m}^3$ の等濃度線（図-8）であり、最大で約南へ 13 km 、北へ 12 km 、東西へ 10 km の広がりを示した。このことは、人工湧昇流の効果が漁業生産上に発現する範囲が、植物プランクトン量を指標にした場合、バックグランドの上乗せ量として約 $100 \mu\text{g-atN/m}^3$ 以上を示す。

(4) 湧昇規模対効果

栄養塩類の供給量と植物プランクトン増殖速度・拡散速度の関係から、当該海域ではある程度の供給量がないと拡散速度が増殖速度に対して相対的に大きく、植物プランクトンが有効に集積、増殖しないことが考えられる。そこで、湧昇流量（構造物規模）と植物プランクトン増加量（ $100 \mu\text{g-atN/m}^3$ 以上の海域面積）の関係を求めると、図-11に示すように、当該海域では湧昇流量の増加によって各濃度の海域面積は増加するが、増加割合で見ると、最低で3組み（平均湧昇流量 $278 \text{ m}^3/\text{sec}$ ）、効率的には4組み（平均湧昇流量 $371 \text{ m}^3/\text{sec}$ ）の規模が適切と

なる。

6. まとめ

①構造物から発生する湧昇流量は水理模型実験と現地観測結果から、流速 0.3 m/sec 時には $2.0 \sim 2.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ （構造物延長 m 当り）であった。②現地観測やリモセン解析から水温、クロロフィル a の湧昇現象が観測され、栄養塩類濃度や植物・動物プランクトンの細胞数、個体数は構造物の設置前後の比較や、設置規模の増大によって増加が観測された。③標本船調査による新たな漁場形成が見られた海域や、数値計算による有光層内での植物プランクトンの増殖効果から効果範囲は約 $10 \text{ km} \sim 12 \text{ km}$ 四方海域と算定された。④漁獲増加量については、標本船調査からの結果から、少なくとも夏季の2ヶ月間で約 20 ton 以上である。

以上から、これまで理論的に考えられていた人工湧昇流発生漁場造成が実海域で定量的な効果として実証された。

最後に、本研究をまとめるにあたっては、(社)マリノフォーラム 21「大規模人工湧昇流発生技術の開発研究会」(昭和63年～平成2年度)、「人工湧昇流発生技術パイロット事業研究会」(平成3年～平成6年度)、愛媛県「湧昇流漁業開発事業」の各関係者方に貴重な資料やデータの提供、およびご指導等を頂いたことに深謝致します。

参考文献

- 今村均・藤原正幸・大竹臣哉・明田定満 (1991): 海底構造物による密度界面の上昇・混合過程に関する研究 (2), 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 841-845.
- 大竹臣哉・今村均・山本春樹・近藤浩右 (1991): 人工湧昇流構造物周辺の環境調査, 水産生物生息場造成ならびに沿岸開発に関する日米シンポジウム (JUS 91), 講演集, pp. 156-161.
- (社)マリノフォーラム 21 (1992): 平成3年度人工湧昇流発生パイロット事業報告書, pp. 3.1-3.72.
- 續辰之介・中尾 徹 (1986): 天然湧昇流の海洋環境特性について, 水産土木, Vol. 22, No. 2, pp. 85-95.
- 藤原正幸・河地利彦 (1995): 診断モデルによる8月の豊後水道における残差流シミュレーション, 海岸工学論文集, 第42回, pp. 396-400.
- 柳 哲雄 (1989): 沿岸海洋学一海の中でのものはどう動くか, 恒星社厚生閣, pp. 154.
- 柳 哲雄・中嶋昌紀 (1990a): 人工湧昇流発生構造物による海況変化, 水産海洋研究, 第54巻, 第1号, pp. 1-8.
- 柳 哲雄・中嶋昌紀 (1990b): 人工湧昇流発生構造物の魚礁効果, 水産海洋研究, 第54巻, 第3号, pp. 249-254.
- 柳 哲雄・中嶋昌紀・大竹臣哉・近藤浩右 (1991): 魚礁としての人工湧昇流発生構造物, 水産工学, Vol. 27, No. 1, pp. 73-77.
- 和田耕造・中嶋 靖・梅沢信敏・武内智行・桑原伸司 (1988): 浚渫土砂により形成されたマウンドの湧昇流発生機構とその魚礁効果, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 772-776.