

大水深海域における湧昇流発生構造物の開発

DEVELOPMENT OF A NEW TYPE ARTIFICIAL UPWELLING GENERATING STRUCTURES IN DEEP SEA

仲座 栄三*・津嘉山正光*・砂川恵輝**

Eizo NAKAZA, Seikoh TSUKAYAMA, Keiki SUNAGAWA

A new type artificial structure, in order to upwell the cold and eutrophic water from the sea bottom to the surface in deep sea, has been developed. Recently, some types of artificial upwelling generating structures have been proposed. Those structures can be seen as one of the coastal structures which are based on the sea bottom.

The proposed new structure is a kind of the big mooring artificial wall in the intermediate depth of deep sea. It can make more significant upwelling flows around the structure in comparison With other types proposed last. And it aims to be constructed in very deep sea for its structural characteristics.

KEYWORDS: upwelling generating structure, upwelling, Numerical simulation, Navier-Stokes's equation

1. はじめに

ほんの十年前までは、日本各地で、しかも非常に近海で良質のマグロ類が沢山採れた。最近では、マグロ漁場も漁港から数百Kmも離れるようになってきている。このような状況下、造り・育てる漁法も盛んに実施されるようになり、漁礁設置などによる新たな漁場形成が各地で行われている。例えば、沖縄地方では、数年前から海洋上に人工浮漁礁（パヤオなどと呼ばれる）が設置されるようになって来ている。明確なメカニズムは分かっているものの、この人工構造物の設置は、マグロなどに対する集魚効果が非常に高いことが指摘されている。しかし、そのパヤオの設置位置も、海岸からの距離が年々離れ、数年前に水深100～200mであったのが、現在では1000m以上を越えるようになって来ている。

新たな漁場形成の一環としては様々な手法が提案されている。例えば、養殖漁場の適地や天然の磯根資源の乏しいリアス式海岸など急峻な海底地形の海岸では「人工海底」の開発・実施が行われている（岡本ら、1992）。これは、比較的深く、光の届かない海底に、コンクリート構造物や鋼製構造物などによってフラットな面を造り、それを係留方式もしくは支柱方式で中層に設置することにより、光の届く一種の人工海底を造り上げようとするものである。また、人工湧昇流構造物の開発・設置試験なども最近盛んに行われるようになってきている（例えば、上北ら（1986）、今村ら（1991）、浅枝ら（1990, 1991）、池田ら（1992）、鈴木ら（1992））。実験的には、構造物設置により、底層の流れに上昇流を発生させ得ることが示されており、より強い上昇流を発生させる工夫も主として構造物の形状を変える事などによって行われている。これらの構造物はその殆どが海底設置型（いわゆる潜堤）のものである。そのため、施工上の問題などから、従来の人工湧昇流発生構造物は比較的浅海域（例えば、潜水作業の制約からは数十メートル程度の水深）を対象とするものとして考えられる。こうした人工構造物の設置は、上記のパヤオの設置位置などを考えると極浅海域を対象としたものと言わざるを得ない。また、富栄養塩を含む冷水を湧昇させるためには、少なくとも百メートル規模の深海を考えなければならない。

本研究は、より現実的な問題である大水深を対象とした新たな人工湧昇流発生構造物の提案を行うと共に、その構造物周辺の流れ特性について数値流体力学的に検討したものである。

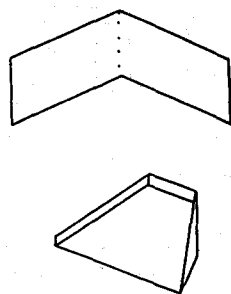
2. 新たな人工湧昇流発生構造物の提案

—— 従来の構造物との違い ——

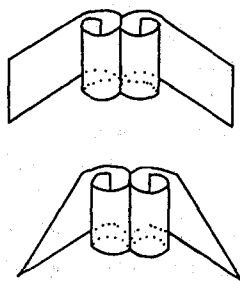
従来より人工湧昇流発生構造物（装置）は様々なタイプが提案されている。その代表的な例を図-1に示す。図示のとおり、これまで提案されている構造物の殆どが海底設置型のものである。海底にマウンドを建設し、

* 正会員 琉球大学工学部土木工学科（〒903-01, 沖縄県西原町千原1番地）

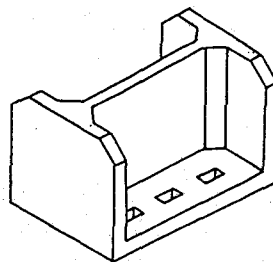
** 正会員 海岸環境調査研究所



浅枝らのモデル

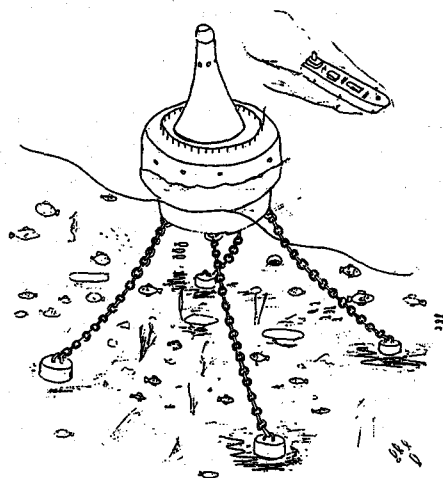


池田らのモデル



上北・浅岡・森井・大竹らのモデル

図一 従来の湧昇流発生構造物



図二 浮き漁礁（パヤオ）の設置概念図

その上にケーソンタイプの構造物を設置するような方法（防波堤と同じイメージ）をとるものである。その構造物に対して様々な形状が提案されているのは、構造物の形状を変えることによって、より大きな（強い）上昇流を発生させようとする意図によるものである。提案されている構造物周りの流れ特性解明は、主として室内実験結果に基づくものであり、形状による湧昇流の違いはさほど大差ないように思える。

いずれにしても、これまで提案されている構造物は、上述したように、潜堤のイメージで海底に設置されるものであり、基本的には人力（例えば、潜水夫）による作業を伴うようなものとして考えられる。また、海底設置型となっているため、水表面まで底水層を持ち上げるにはかなりの高さを有する構造物でなければならない。転倒などに対する安定性の制約から、（構造物高さと同様、構造物幅とはほぼ比例関係にあるため、）構造物高さも自ずと制限を受けるようになる。すなわち、従来の湧昇流発生構造物は、比較的浅海域を対象としたものと言わざるを得ない。

図二に、沖縄地方で用いられているパヤオ（浮き漁礁）による漁場形成の概念図を示す。図示のとおり、パヤオとは直径が数mの円筒形の“浮き”を水深数百～数千mの海域に係留したものである。はじめに述べたとおり、このパヤオによる集漁効果のメカニズムについては現在のところ不明な点が多い。しかし、その集漁効果は大きく、一時期は、パヤオに群がるマグロ漁をめぐって、設置した漁協所属の者と他県の漁船所属の者とのトラブルが相次いだ。ここで、注目すべきは、このパヤオの設置地点の水深も数年前数百mであったのが、最近では数千mとなって来たことである。

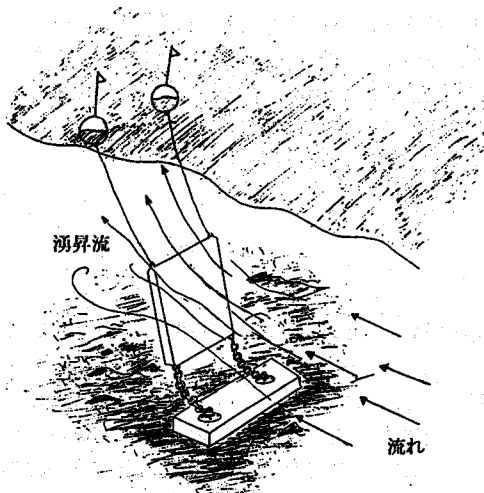


図-3 新しい湧昇流発生構造物の概念図

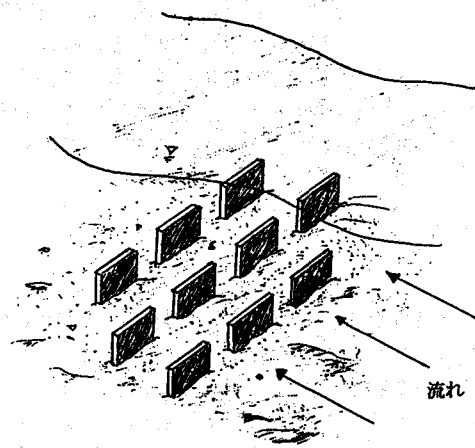


図-4 大規模な湧昇流を発生させる為に設置された板群

新しい湧昇流発生構造物の提案——マンタ構想——

本研究で提案する湧昇流発生構造物の概念図を図-3に示す。ここに提案する湧昇流発生構造物は、海底に設置するようなものでなく、これまで日本で培われてきた造船技術を生かし、板状の構造物を海中に沈め（立て）て、それを海底方向にはアンカーで係留し、さらにブイ等で吊すタイプのものである。この場合、数百m以上の大水深でも設置可能（先に示したバヤオなどの場合を考えても）であり、しかも比較的経済的と言える。また、構造物高さや、流れを遮る方向の構造物幅もかなり大きくできる。湧昇流に対する効果を上げる為には、これらの構造を基本として形状を変えたり、補助装置をつけたりすることも勿論可能である。また、流体力の軽減に関しては、板に適当な面積の穴を明けることも考えられる。ここで提案する構造物には、ある意味では先に説明した一種の人工海底としての機能も合わせ持たせることも可能である。

5mにも達する翼を広げ、大海を回遊する“マンタ（エイの一種）”のわき腹の方に、それをあたかも大樹の陰とするかのごとく、小魚が群れる姿に例えたのがここで言う“マンタ構想”である。その概念図を図-4に示す。先に示した構造物を数Kmにも亘り、かつ数百メートルの幅で千鳥状に配置し、大規模な湧昇流を発生させようとする構想である。

3. 数値計算手法

ここで提案するような構造物周りの流れ特性を歪なしの水槽実験で再現することは、現在のところ非常に困難である。例えできたとしても、水槽の規模の関係上、模型縮尺として非常に大きなものを用いることになり、モデル自体が非常に小さく、またその周りに生じる流れの特性も極めて小さなものとなることが予想され、測定の際、その特性を見逃す恐れが十分ある。このような理由などからここでは、数値流体力学的に検討することとした。最近の数値流体力学に関する研究の進展は目ざましく、その妥当性は様々な問題で検証されている。

本研究では、流れは二次元乱流としている。従って、流れの基礎式は、以下に示すNavier-Stokesの運動方程式と連続の方程式が基本となる。

$$\frac{Du}{Dt} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial}{\partial x} (K_x) \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (K_y) \frac{\partial u}{\partial y} \right) + F_{Dx} \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial}{\partial x} (K_x) \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (K_y) \frac{\partial v}{\partial y} \right) + F_{Dy} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここで、 u 及び v はそれぞれ x 方向及び y 方向の流速成分、 p は圧力、 K_x 及び K_y はそれぞれ x 方向及び y 方向の乱流拡散係数、 F_x 及び F_y は体積力を示す。また、 F_{Dx} 及び F_{Dy} は、構造物が及ぼす流体力である。

数値計算では、上式を差分法を用いて数値計算することにしたが、実際の数値計算では連続の方程式を直接解くのではなく、これらの3式からPoisson方程式を導きそれを解いている。また、基礎式の差分の際、時間微分項の差分には前進差分を用い、空間微分に関しては基本的には中央差分を用いることとし、非線形項の差分には数値計算の安定化を図る目的から河村・桑原らの高精度風上差分を用いることとした。数値計算コードの基本的なフォームは、1987年当時、東京工業大学土木工学科日野幹雄研究室で日野・神田・岸らが開発したものを用いている。そのため、より厳密には、上記の基礎式を一般座標系に変換したものを数値計算している。

富栄養塩の拡散現象に関しては、基礎式として次式で示すFickの拡散方程式を用いた。

$$\frac{DC}{Dt} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right) \quad (4)$$

ここで、Cは栄養塩の濃度を示す。物質拡散係数と運動量の拡散係数とは厳密には異なるものと考えられるが、ここでは同じものとしている。

湧昇流発生構造物としては、図-4に示すようなものを想定している。また、吊り下げられる板としては、流体力を軽減するために穿孔を施してあるものとする。そうすると、流体力学的には構造物の存在は、流れに対して一種の大粗度（あるいは、多孔質中の流れに対する抵抗）と見なせる。この場合、湧昇流発生構造物が流体に及ぼす抵抗は、流体抵抗となる板の面積密度 C_s (m^2/m^3)を導入することにより次式で与えられる（このような考え方は、植生が大気の流れに及ぼす影響を取り扱った神田(1992)らの考え方に習った）。

$$F_D = \rho C_d C_s u^2 \quad (5)$$

ここで、 F_D は構造物が流れに及ぼす流体力、 ρ は流体密度、 C_d は抵抗係数、 C_s は板の面積密度 (m^2/m^3)、 u は流速である。

計算の対象としては、水深100mに長さ30m及び50mの板を千鳥配置とし、幅10mとした場合を想定した。また、面積密度 C_s の値は $30\text{m}^2/\text{m}^3$ とし、抵抗係数の値は $C_d=1.0$ とした。

4. 数値計算結果及び考察

図-5は、構造物を設置しない状態での流れのベクトル図である。主流速は、左側境界上で水深方向に一樣な値 $u=1.0\text{m/s}$ を与えた。計算結果は図示のとおり、流れは流下方向に境界層の発達を伴う一樣流を形成している。以下、構造物を設置した場合の湧昇流の効果は、この流れ場を基本とする。

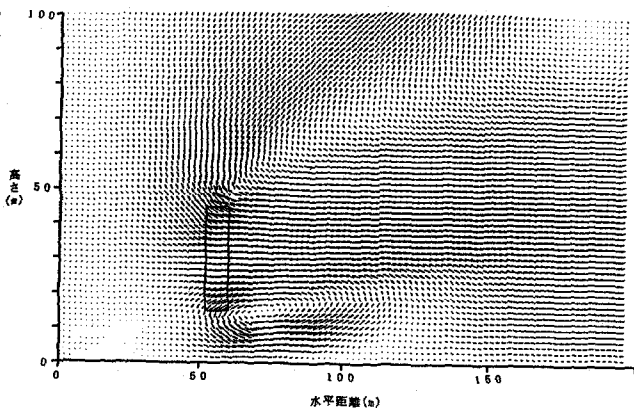
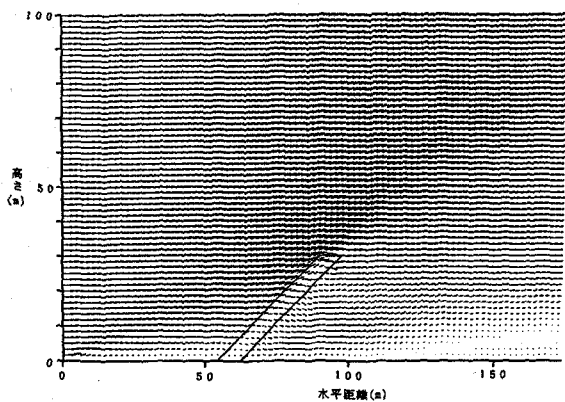
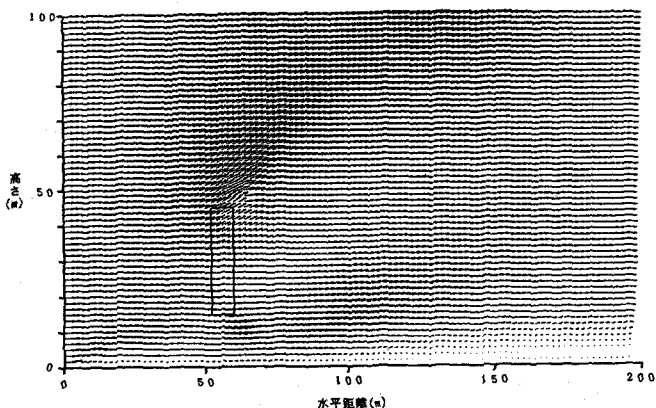
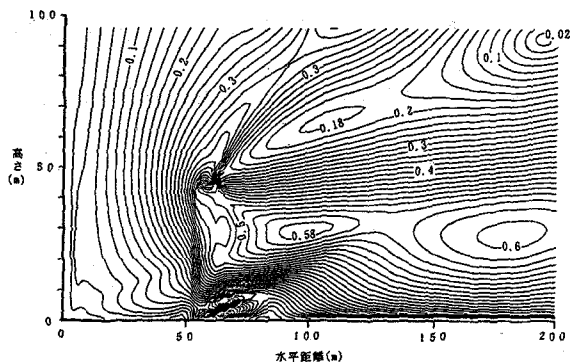
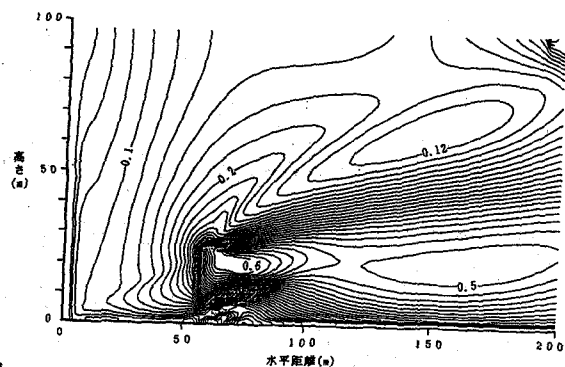
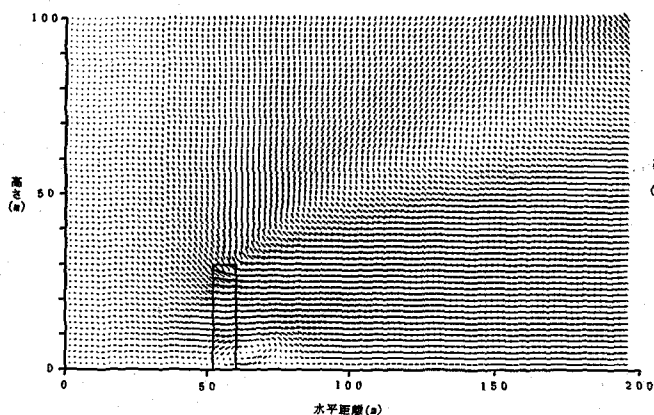
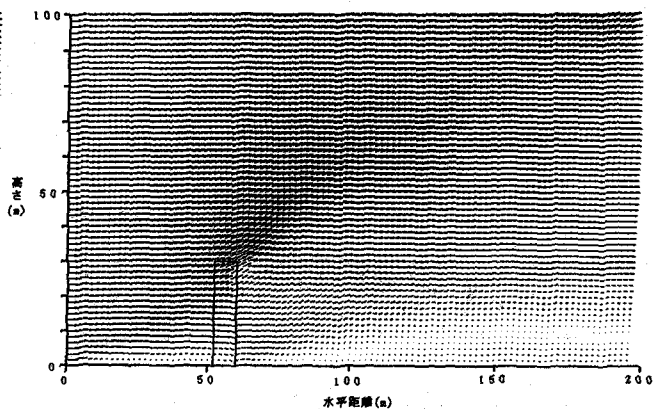
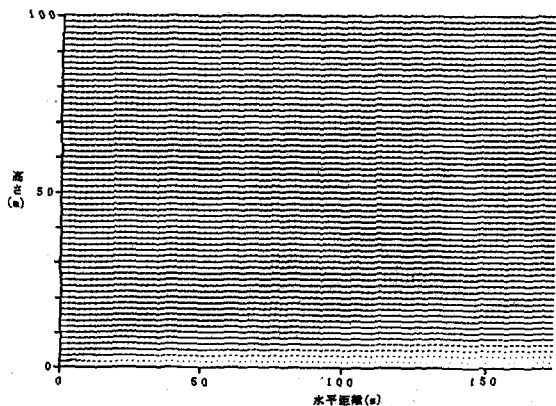
図-6は、上流部の境界から50m離れた位置に高さ30mの構造物（板群）を設置した場合の流れの計算結果である。図示のとおり、構造物設置により、ゆるやかな湧昇流が構造物前面から生じている。図-7は、構造物を設置した場合の流れ場から図-6に示す基本場の流速を差し引いた後の流速成分（以下、このことを構造物設置による流れの“乱れ成分”と呼ぶ）である。また、図-8は、この流速の乱れ成分の強さをコンター表示したものである。これらの図で示すとおり、構造物が流れに及ぼす影響は、海底から100m上方にも達している。図-9は、構造物の高さを50mとした場合の乱れ成分の強さを示している。この場合、水表面付近の乱れの強さは、最大で主流速の40%にも達している。

図-10は、構造物を海底から15m上方で吊り下げた状態で設置した場合の流速場のベクトル図である。流れは、板群の上端と下端で大きく方向を変えられており、この場合も有意な湧昇流が認められる。図-11は、基本場の流速を差し引いた乱れのベクトル図であり、板群の下端で残差流の循環が認められる。この場合、乱れ成分は板下端の底層を攪拌し、より多くの富栄養塩の流体塊を水表面まで湧昇させる可能性を有する。図-12は、板を斜めに設置した場合である。この場合、主流が板に沿って緩やかに上昇する効果をも期待したが、計算結果は図-6に示す結果と大差ない。

図-13は、上流境界位置の栄養塩の供給を想定して、濃度1の点源を設けた場合の濃度の拡散計算結果である。この場合の流れ場は図-5に対応する。濃度の分布は、流下方向に行くにつれて流れ場の境界層の発達と共に、上方に拡散している。図-14は、図-6に示す流れ場での拡散である。図示のとおり、構造物設置によって、濃度は急激に上層へと拡散しており、この構造物設置が底層水の拡散に大きな効果を有していることが分かる。

5. おわりに

本研究では、新たな湧昇流発生構造物の提案を行うと共に、その効果を数値流体力学的に検討した。数値計算結果は、提案する構造物がかなりの強さの湧昇流を発生させることを示唆している。しかしながら、数値計算中にパラメーターとして用いた板群の密度が実際の構造物設置でどの程度の規模の板配置に相当するのか、あるいは密度成層を有する流れ場に対してどうなるのか？ などの多くの検討課題も残している。



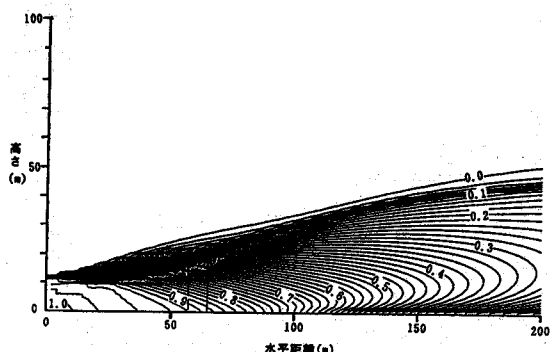


図-1 3 栄養塩の拡散シミュレーション

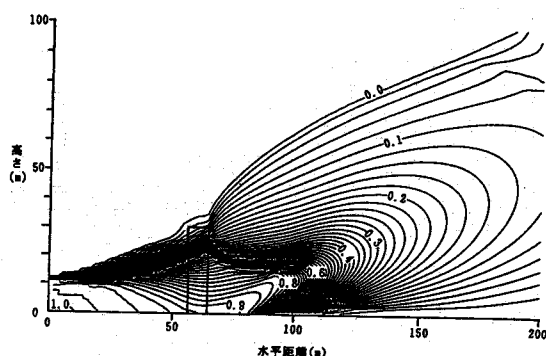


図-1 4 栄養塩の拡散シミュレーション

謝辞

本研究における数値計算を行うにあたり、東京工業大学・日野幹雄教授（現：中央大学）、神田学助手（現：山梨大学講師）には計算コードの提供など多大なご指導を頂いた。また、当時卒論生であった岡田登志郎・山路功祐君の両氏には、数値計算の実行などで多大な協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

池田駿介・武若聡・二瓶泰雄・秋山信義(1992)：各種構造物による湧昇流の発生に関する研究，海岸工学論文集，第39巻，PP.896-900。

鈴木達雄・本田陽一(1992)：3次元物体背後に発生する湧昇流に関する研究，海岸，海岸工学論文集，第39巻，PP.901-905。

上北従男・浅岡邦一・森井伸正・大竹臣哉(1986)：湧昇流発生構造物の開発に関わる実験的研究，第33回海岸工学講演会論文集，PP.342-346。

明田定満・今村均・大竹臣哉・有富範伊(1991)：海底構造物による密度海面の上昇・混合過程に関する実験的研究，海岸工学論文集，第36巻，PP.841-845。

浅枝隆・基阿弥喜嗣・吉田一男(1991)：V字型構造物による鉛直循環流と成層中での効率，海洋開発論文集，Vol.7，PP.387-392。

岡本峰雄・和泉正憲・遠藤良雄(1992)：潜降浮上型人工海底の実用化研究-I・II，海洋科学技術センター試験研究報告，第28号，PP.57-85。