

湧昇流発生構造物（人工海底山脈）の湧昇特性 に関する研究

東京電力（株）	正会員	山田 有一
”	”	笠井 靖浩
（株） 間組	”	沖 政和
”	”	大橋 敏行
”	”	木下 献一

1. まえがき

天然湧昇流により深層の栄養塩が太陽光の届く海面付近に運ばれ、植物プランクトンの増殖が活発となること
によって好漁場が形成されている例は、カリフォルニア沖、ペルー～チリ沖などに見られ、世界の全海洋面積の
0.1%にすぎない湧昇流発生海域で、世界の総漁獲量の約半分が生産されていることは有名である。最近では漁業
生産性の低い海域に、人工的に湧昇流を発生させる構造物を置き、新しい漁場を造成する研究が産・学・官の協
力のもとに取り組まれている。著者らは、湧昇流発生施設の1つの案として人工海底山脈構想を提案し、研究を
進めている。人工海底山脈構想とは、平坦で生産性の低い水深100m程度の海底に、高さ35m・底部幅80m・底部長
200m程度の四角錐台状の山を100m程度の間隔で数km断続させ、深層の栄養塩を自然の流れを利用して有光層に湧
昇させようという構想で、天然礁規模の好漁場を創出しようというものである。この人工海底山脈を構築する材
料として、石炭火力発電所から発生する石炭灰に注目し、これまでに研究成果として、石炭灰硬化体が有害物を
溶出しない¹⁾こと、生物付着がコンクリートと比較しても遜色ない²⁾こと、良好な強度特性および耐久性を持つ
こと²⁾を確認している。また同時に、深層水には栄養塩が豊富に含まれ、この深層水で植物プランクトンを培養
すればその増殖効果が高いことも実験的に確認している。

一方、人工湧昇流発生構造物の形状と湧昇流の到達高
さについては、これまでいくつかの水槽実験結果³⁾⁴⁾が
報告されているが、これらは密度差をもたない単層の流
れ場の中での実験結果である。

そこで今回は、まず密度成層流を二次元水路内に発生
させ、次に人工海底山脈により、表層水より密度の大き
い深層水が湧昇し、混合・拡散する現象を把握するこ
とを目的として、人工海底山脈の規模、流速、表層水と深
層水の密度差をパラメータとした実験を行った。また、
数値解析として、2次元のポテンシャル流れとナビエス
トークス流れの定常移流拡散解析を行い、数値解析の適
用性について検討した。

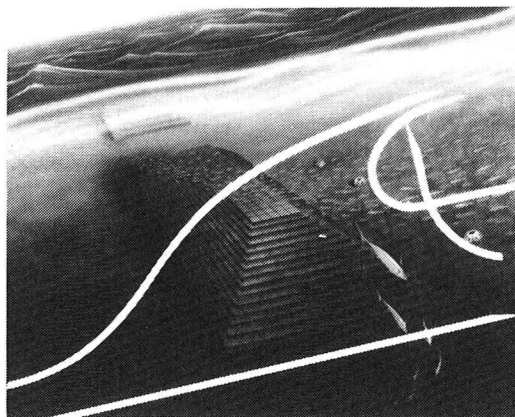


図 - 1 人工海底山脈構想図

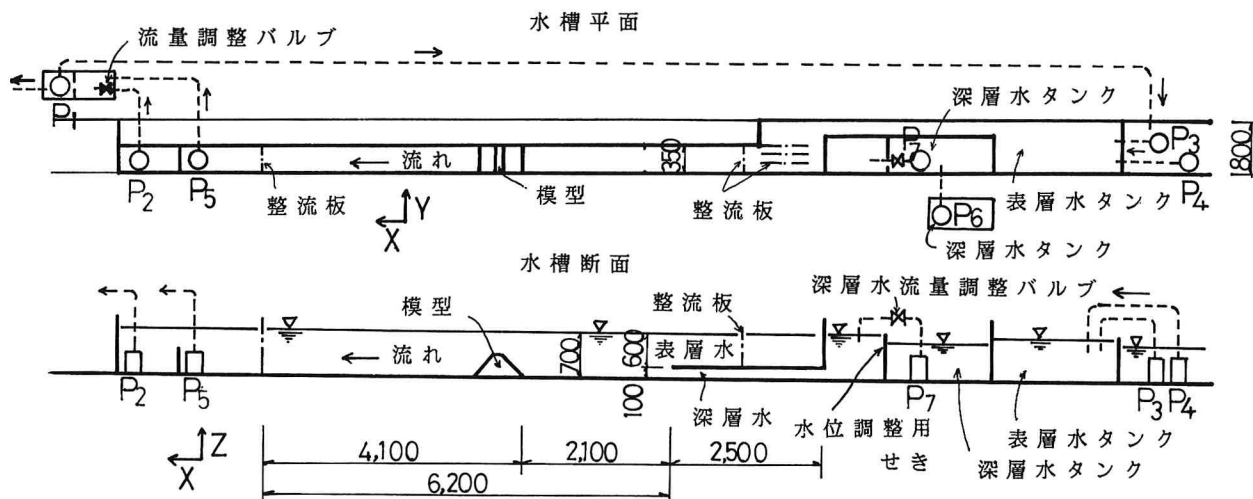


図 - 2 実験水路

2. 水理模型実験

2. 1 実験内容

(1) 水槽諸元

全長 50m, 幅0.8m, 高さ1.5mの鋼製水路の一区間を図-2に示すように幅35cm, 高さ90cmに改造したものを実験水槽とした。

(2) 密度成層流の発生方法

密度成層流の発生方法については, 過去に実施例がほとんどないため, 今回は, 表層水(水道水, 層厚60cm)と深層水(塩水に可視化のためのトレーサーとしてメチレンブルーを塩水1ℓ当り0.3g混入, 層厚10cm)を各々同一の速度で流すため, 以下に示す方法を採用した。

① 図-2に示すポンプ P_2 (流速8.0および10.0m/secの場合は P_5 を併用)により, 水路内の水を排除し, 同量の水を上流側より供給することで, 水路内に流れを発生させる。

排水する流量のチェックには流量監視用三角せきを用い, 所定の流量となるように流量調節バルブで調節を行う。

② 表層水(水道水)の供給は, ポンプ P_3 (流速8.0および10.0m/secの場合は P_4 を併用)で行い, 水槽内の水位と表層水の流量の調節は, 水位調節用せき(2.5cmごとに高さを変えられる)の高さを調節することにより行う。

③ 深層水(塩水)は, 水槽横の深層水タンク(容量1m³)で所定の密度になるよう食塩を混合し, ポンプ P_6 , P_7 で供給する。深層水の流速の調節は, 深層水タンク内の水位調節せき(2.5cmごとに高さを変えられる。)の高さと, 深層水流量調節バルブを調整することにより行う。

④ 表層水の流入口付近には, 水路横断方向(Y方向)の流速分布を均一にするため整流板を設けた。

⑤ 模型設置位置より50cm上流のA断面(図-3参照)において, 模型を設置しない時の表層水, 深層水の代表流速を測定し, 両者がほぼ等しく, きれいな成層流が出来ることを確認した後, 実験を行った。

(3) 計測

計測項目および計測機器を, 表-1に示す。また流速計, 電導度計の計測位置と画像処理用写真撮影範囲を図-3に示す。

① 流速

流速は, 電磁流速計2台を用いて測定した。そのうち1台はX方向の流速を測定するもので, 模型の上流側のA断面(図-3参照)に設置し, 模型の上流側の流速分布を測定した。もう一台の流速計は, X方向とZ方向の流速を同時に測定できるもので, 模型の下流側のB断面, D断面において, 模型によって乱された後の水粒子の運動状況を把握することを目的として設置した。なお, 電磁流速計の精度上の制約から, 流速分布の測定は, 表層水, 深層水とも水道水を用いた単層流で行った。

② 塩水濃度

塩水濃度は, 電導度計4台を用いて, 模型の下流側4断面(B, H, I, J断面)で測定した。電導度計により, 塩水の電導度(単位: S(Ω⁻¹・m²)/cm)を測定し, あらかじめ較正した曲線にもとづき, 塩水濃度(単位 ppm)に換算した。

③ 写真撮影

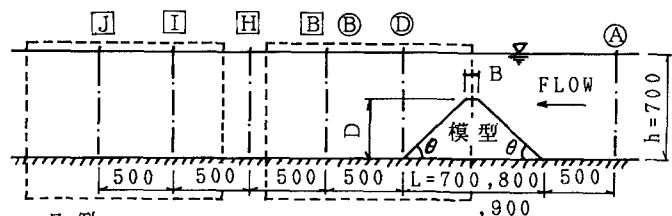
メチレンブルーによって可視化された流れの現象を記録するために, 図-3に示すように海底山脈模型の下流側2箇所において写真撮影を行った。撮影には35mmカメラを2台用意し, 一定の時間間隔で2箇所を同時に撮影した。

④ 画像処理

本研究では, 画像処理手法を用いた湧昇効果評価の可能性を探ることを目的として, 実験で得られた写真の一部に対し以下に述べる手順で画像処理を行った。

表-1 計測項目および計測機器

	計測項目	測点数	計測機器
①	流速	3断面(模型上流1, 下流2 × 5深度(Z=5, 20, 35, 50, 65cm))	電磁流速計2台
②	塩水濃度	模型下流側4断面 × 4深度(Z=5, 25, 45, 65cm) 深層水タンク 表層水タンク	電導度計4台
③	混合・拡散状況	2画面	カメラ, ビデオカメラ 画像処理システム
④	水温	水槽内	温度計



凡例

- A: X方向流速計 B H I J: 電導度計
 B D: X, Z方向流速計 [---]: 写真撮影範囲

図-3 計測位置と写真撮影範囲

- 1) 写真を高解像度のカラービデオカメラ（水平解像度 750本）を用いて画像処理に入力し、さらにこの画像を光ディスク装置に記録・保存する。
- 2) R (RED), G (GREEN)、B (BLUE)の各画像の輝度分布を調べ、流れの部分で最も輝度分布の変化率が大きい、すなわち最も輝度特性が特徴的な画像を選択する。今回は、Gの画像を選択した。
- 3) Gの画像の輝度分布を基にして8段階の輝度レベルを設定し、Gの画像を色分けする。

(4) 相似則

人工海底山脈の設置対象となる海域の水深は50~150m程度である。今回の実験では、実海域の水深を70m と仮定した。縮尺は、フルード則に基づき、長さを1/100、流速を1/10とした。

(5) 模型条件

模型の形状は、人工海底山脈をある程度模擬でき、しかも単純な形状である等脚台形とした。模型の高さは、実験水槽の水深(70cm)の1/2 すなわちD=35cm を標準高さ(LM模型)とし、5cm 高いものをLL模型、5cm 低いものをLS模型とした。模型の諸元を表-2 に示す。

(6) 流速条件

日本近海の平均的な流速を参考に2,4,6,8,10cm/sec (実海域では20~100cm/secに相当)とした。

(7) 密度条件

日本近海の深層水と表層水の密度差を参考に1/1000 を標準とした。さらに密度差が湧昇に及ぼす影響を把握するため密度差 0, 1/500, 1/250についても実験を行った。

2. 2 実験結果および考察

(1) 流速分布

LM模型、流速4cm /sec の時の模型周辺での平均流速ベクトルを図-4 に示す。

模型の上流側の流速分布は、深層水の流速が表層水の流速より若干小さいが、実海域においても海底の摩擦などの影響で深層水の流速は表層水より小さいため、ほぼ妥当な流速分布である。

模型の下流側の流速分布は、模型によって通水断面積が減少されるため流速が増加する領域と、模型によって生ずるはく離渦が通過する領域と、微流速で模型に向かう流れの領域にわけられる。

(2) 人工海底山脈の規模・形状と深層水最大到達高さの関係

各実験ケースにおいて5秒間隔で撮影した10枚の写真から着色された深層水の到達高さの平均値を図-3 の ㉑, ㉒, ㉓ 断面についてそれぞれ求め、その最大値を深層水最大到達高さ(Zu)と定義した。深層水最大到達高さZuおよび模型の高さDを水深hで無次元化した図-5によればD/h が大きくなる程、Zu/hも大きくなるのがわかる。

(3) 流速と深層水最大到達高さの関係

深層水最大到達高さZuを模型の高さDで無次元化した値を縦軸に、流速を横軸に整理したものが図-6である。これより流速が大きい程Zu/Dは大きくなるのがわかる。

(4) 密度差と深層水到達高さの関係

表層水と深層水の密度差を0,1/1000,1/500,1/250と

表-2 模型の諸元

形式	D (cm)	B (cm)	L (cm)	θ (°)
LS	30	10	70	45
LM	35	10	80	45
LL	40	10	90	45

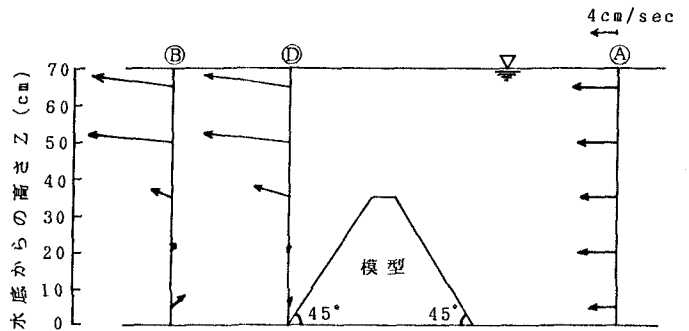
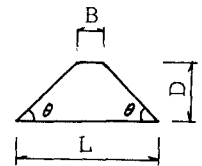


図-4 平均ベクトル図 (LM模型, 流速4cm/sec)

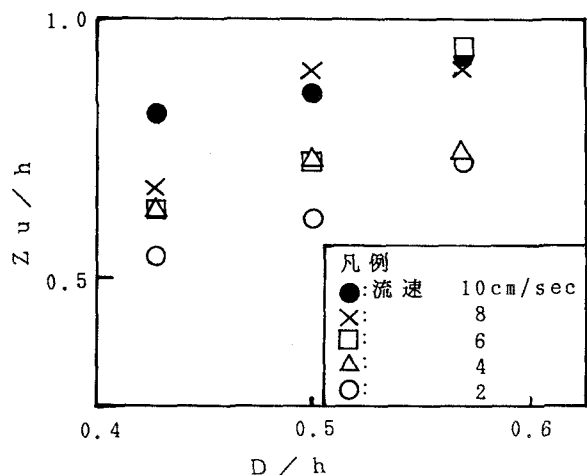


図-5 人工海底山脈の規模と深層水最大到達高さの関係

変化させると、模型の上流側では、密度差が大きいほど、深層水が停滞しやすい。模型を越えた後の密度差ごとの深層水の到達高さについて撮影した写真より求めたもの（**[I]**断面は撮影範囲外であるので他のデータから補完した）を図-7に示す。この図によると密度差が小さいほど、深層水の到達高さは大きい。密度差が1/250の場合では、模型を越流した深層水は、そのまま模型の斜面に沿って下降し、水底に滞留するため、密度差1/1000の時に見られたような渦による表層水との混合は見られない。密度差1/500の場合模型の近傍では、1/1000の場合と同じように渦による表層水との混合が見られ、到達高さも1/1000の場合とほぼ等しいが、模型から下流側に離れるに従い、密度差により徐々に深層水が沈降していく傾向が見られる。

よって今回の実験からは、密度差が深層水の到達高さを維持する距離に及ぼす影響は大きいことがわかる。

(5) 深層水到達高さとの有光層の関係

一般に、光合成は表層では強光阻害によって低下するので、最大光合成は海表面よりも深い所にみられ、それ以深では光合成は深さとともに減少し、ある深さになるとみかけ上光合成は行われなくなる。この深さは補償深度(Compensation depth)と呼ばれ、Aruga and Monsi⁶⁾によれば以下の関係式で推定される。

$$\text{補償深度(m)} = \text{透明度(m)} \times 2.67$$

対象とする日本近海の透明度の平均値は10~15m⁵⁾であり、その時の補償深度は26.7~40mとなる。

ここでは補償深度以浅を有光層とし30m(模型実験では30cm)と考えた。

図-8に示す深層水到達高さの測定結果によれば、LS模型における流速2cm/secの場合除き、すべての実験ケース(14ケース)で深層水最大到達高さ(**[B]**, **[I]**, **[J]**)のうちの最大値は、有光層内に達している。さらにLS模型でV=2cm/sec, 4cm/sec, LM模型で流速2cm/secの場合を除き、すべての実験ケース(12ケース)で**[B]**, **[I]**, **[J]**断面とも深層水到達高さは有光層内に達している。従って今回の実験により、深層水を人工海底山脈により有光層内に導くことが可能であることが確認された。

(6) 画像処理手法の適用性

1例として、LM模型でV=10cm/secの時の電導度計による塩水濃度測定結果と写真から求めた深層水平平均到達高さを図-9に示す。

深層水の到達範囲という観点から見ると深層水の中の塩分濃度を測定した結果と、深層水に混入した色素を撮影した結果とは比較的良く一致することがわかる。他の実験ケースにおいても両者は比較的一致するため、密度成層流の混合・拡散による深層水の拡がりを、写真により評価することは可能であると思われる。

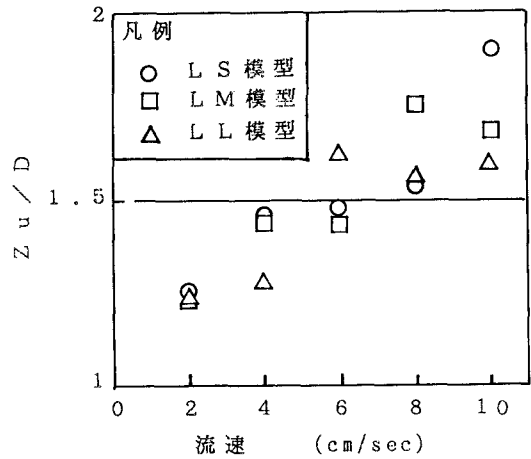


図-6 流速と深層水最大到達高さの関係

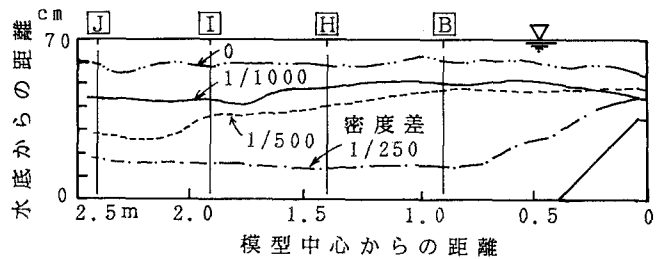


図-7 密度差と深層水到達高さの関係

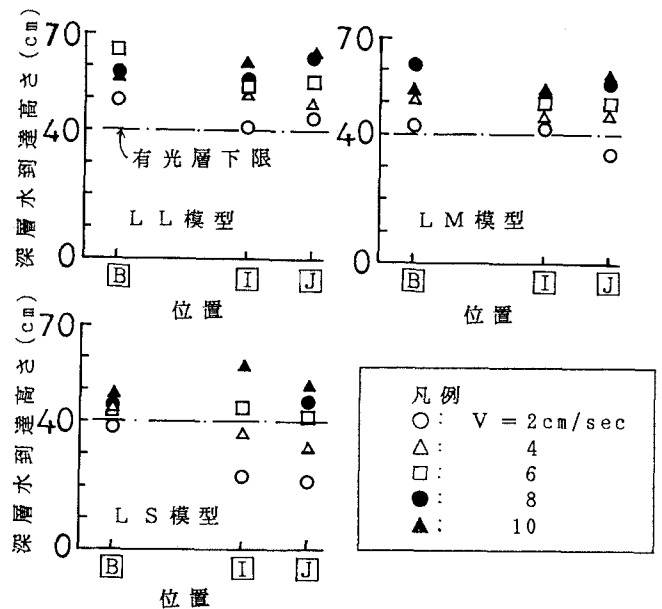


図-8 **[B]**, **[I]**, **[J]**断面における深層水到達高さ

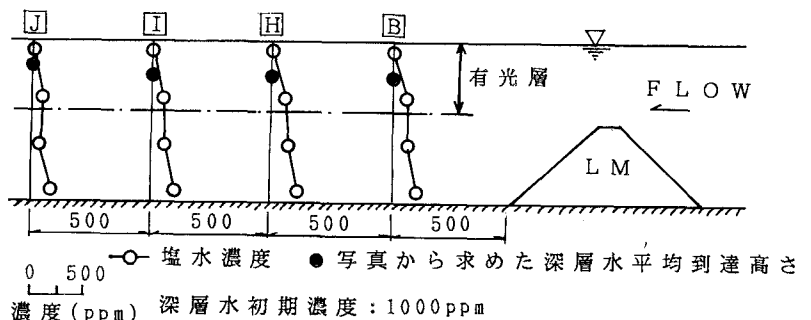


図-9 塩水濃度測定結果(LM模型, V=10cm/secの場合)

3. 数値解析

人工海底山脈により新しい漁場を計画・造成するためには、実験と合わせて造成する山脈の適正な形状・配置を数値解析的に評価する必要がある。

このため、人工海底山脈による海底付近の流れの変化、栄養塩の移流・拡散状況をコンピュータシミュレーションするプログラムの開発を行っている。以下に、現在開発中のプログラムの全機能のうち、前記の実験モデルをシミュレーションするのに必要な定常流れ場における非圧縮性流体の解析手法に限定して、その概略を述べ、かつ解析結果の一部を紹介することとする。

3. 1 数値解析手法

定常ナビエ・ストークス流れの基本式は次式で与えられる。

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad \text{式 (1)}$$

ここで、 ρ は密度、 u は流速、 f_i は物体力、 p は圧力、 μ は粘性を表す。さらに上式を解くために、つぎのペナルティー方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\varepsilon p \quad \text{式 (2)}$$

を導入する。ただし、 ε はペナルティー定数である。つぎに、式 (1)、(2) を有限要素定式とするため、ここではその基礎として、式 (1) に重み \hat{w}_i 、式 (2) に重み \hat{q} を乗じ、領域全体について積分したガラーキン形式を考えることとする。

まず、有限要素補間として

$$\begin{aligned} \{u\} &= [N^u]\{u^e\} \\ p &= [N^p]\{p^e\} \\ \{\hat{w}\} &= [N^w]\{\hat{w}^e\} \\ \{\hat{q}\} &= [N^q]\{\hat{q}^e\} \end{aligned} \quad \text{式 (3)}$$

を考え、速度 $\{u\}$ と重み $\{\hat{w}\}$ に対し、それぞれ異なる補間関数を用いるペトロフ・ガラーキン有限要素法を採用し、補間関数 $[N^w]$ には上流スキームを導入した。このようにして、式 (1)、(2) に対する最終的な有限要素方程式を次式で与える。

$$([k_A^{uu}] + [k_D^{uu}])\{u^e\} - [k^{up}]\{p^e\} = \{f^e\} \quad \text{式 (4)}$$

$$[k^{pu}]\{u^e\} = -\varepsilon [k^{pp}]\{p^e\} \quad \text{式 (5)}$$

ここで下付きの添字 A は、移流項 (非線形)、 D は粘性項によるものである。式 (5) を $\{p^e\}$ について解き、その結果を式 (4) に代入することにより次の有限要素支配方程式を得る。

$$[k]\{u^e\} = \{f^e\} \quad \text{式 (6)}$$

ただし、

$$[k] = ([k_A^{uu}] + [k_D^{uu}] + \frac{1}{\varepsilon} [k^{up}][k^{pp}]^{-1}[k^{pu}])$$

一方、移流拡散の基本式は、

$$u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j}) \quad \text{式 (7)}$$

で得られる。ただし、 u_i は式 (6) で定められた速度場、 c は質量 (未知数)、 k_{ij} は拡散係数である。

式 (6) と同様にして、ペトロフ・ガラーキン定式を用いると、次の有限要素支配方程式が得られる。

$$([k_A] + [k_D])\{c\} = \{F\} \quad \text{式 (8)}$$

3. 2 数値解析結果および考察

ここでは図-4に示した実験ケース(LM模型, 流速4cm/sec)についての解析結果の一例を示すこととする。

図-10は上記で述べたナビエストークス流れ場での移流拡散解析結果と実験値を塩水濃度の分布で比較したものである。解析結果は、漁場造成上問題となる表層部に近い範囲において実験値をほぼ説明しているものと判断されるものの、深部においては、解析値が高い濃度を示している。これは、実験が完全に定常状態でないこと、解析プログラムが現在のところ自由水面等の環境条件を扱えないなどの問題によるものと思われる。

図-11は、定常ポテンシャル流れ場における移流拡散解析結果を参考として示したものである。この解析結果は模型に近い範囲において実験値と大きな差を生じているものの、十分離れた下流部において全体的に実験値をほぼ説明しているように思われる。

以上の結果から、山脈の形状・規模・配置等を設計するためには山脈近傍の複雑な流れを表現できるナビエストークス流れ場での解析が必要である。しかしながら、漁場として計画される広い海域全体での湧昇効果をマクロ的に評価するためには、ポテンシャル流れのような簡単な手法により効果的かつ経済的に解析することも重要と考える。現在開発中のプログラムは、これらの手法を計画・設計の各段階で目的に応じて使い分けられるよう配慮している。

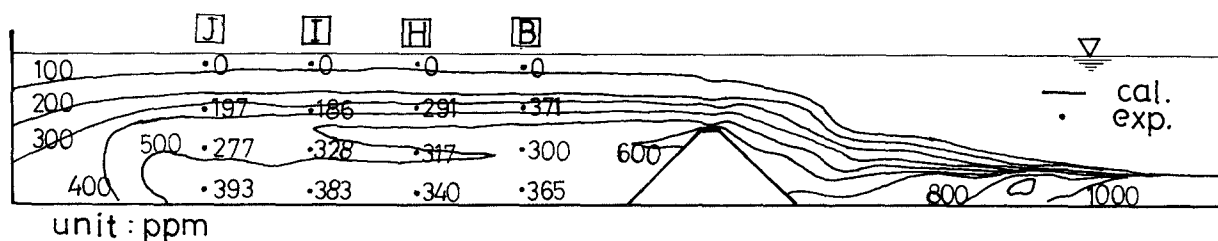


図-10 ナビエストークス流れ場における移流拡散解析結果と実験値との比較

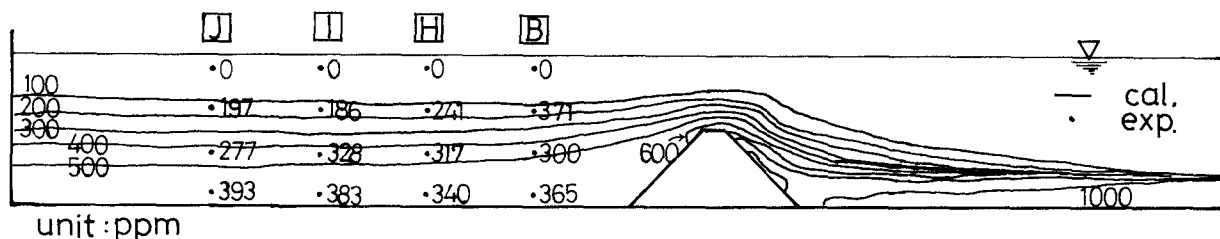


図-11 定常ポテンシャル流れ場における移流拡散解析結果と実験値との比較

4. あとがき

人工海底山脈により栄養塩を多く含む深層水が湧昇し、混合・拡散する現象を把握するために、二次元水槽において密度成層流を用いた実験を行った。さらに人工海底山脈の効果を効率的かつ経済的に把握することを目的として行っている数値解析プログラム開発のうちのいくつかの手法について、実験値への適用性を検討した。

本研究はまだ緒についたばかりで以下に示すように今後検討すべき課題が残されている。

- ① さらに湧昇効果を高める人工海底山脈の形状・配置の検討。
- ② 実海域における海水密度分布, 流向・流速分布などの長期的なデータの収集。
- ③ 数値解析結果を実海域の現象に近づけるための, 自由水面等の境界条件の取扱い, 内部波の考慮等。

最後に、本研究の実施にあたり御指導, 御協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 新素材に関する開発研究-石炭灰硬化体に関する開発研究-報告書, (社)マリノフォーラム21 漁場施設開発研究会 新素材開発研究グループ, 1988
- 2) 鈴木, 門馬, 谷口: 石炭灰混合体の人工魚礁材料としての適用性, 棚間組研究年報, pp.333~334, 1987
- 3) 上北, 浅岡, 森井, 大竹: 湧昇流発生構造物の開発に係わる実験的研究, 第33回海岸工学講演会論文集, pp.342~346, 1986
- 4) 細野, 佐久田, 高木, 川島: 人工湧昇流発生構造物による新漁場の造成, 第8回海洋工学シンポジウム, pp.201~208, 1988
- 5) 海洋環境図, 海洋資料センター編集, 日本水路協会, 1975
- 6) ARUGA, Y. and MONSI, M: Chlorophyll amount as an indicator of matter productivity in bio-communities, Plant & Cell physiol., 4, pp.29-39, 1963