

人工海底山脈による湧昇栄養塩量の非定常数値解析

栗原明夫¹・佐々木洋之²・中川良文³
青野利夫⁴・岡安章夫⁵

人工海底山脈による湧昇効果について、恒流および潮汐流を考慮した往復流による数値計算を実施した。また、定常流による計算も実施して往復流による結果との比較を行った。湧昇効果は、栄養塩のフラックス量である湧昇栄養塩量を定義して評価を行った。往復流による湧昇栄養塩量の計算値は、定常流と比較して約 1.4 倍程度大きくなった。これは、往復流における転流前の流況や栄養塩濃度分布の履歴および渦の発達過程などの影響と考えられる。また湧昇栄養塩量は山脈の流軸方向投影面積に比例して増大し、ブロックや石材による築造を想定した範囲では、斜面勾配の影響は小さかった。

1. はじめに

近年沿岸域においては、自然地形に代わる湧昇流発生構造物として人工海底山脈を造成する事業が各地で展開されている。これは、人工海底山脈により誘起される流れにより、底層に存在する豊富な栄養塩を有光層に供給することで基礎生産力の増大を計るものである。

人工海底山脈の形状と規模は、湧昇流の数値シミュレーション結果を基に定められる（例えば、マリノフォーラム 21, 2001）。数値解析による人工湧昇流の効果に関する研究として、3 次元の水理模型実験により検証を行った今村ら（1991）や、実際の人工マウンド構造物周辺の現地調査結果の再現計算を行った本田ら（2004）の研究がある。これらの研究における数値解析では定常流を対象としており、潮汐による往復流の効果は検討されていない。往復流による湧昇効果についての研究は、辻本ら（1995）によるものがあるが、現地を対象とした研究は少ないのが現状である。

これまでの事例では、数値シミュレーションにより湧昇効果を評価する場合、現地の最大流速や平均流速などをを用いた一方向定常流による検討が行われているが、現地の複雑な流況を考慮すれば、少なくとも潮汐による往復流の効果は反映させる必要があると考えられる。そこで本研究では、長崎県西部海域を対象に、現地調査から得られた恒流および潮汐流を考慮した往復流による 3 次元非定常流れ場の数値解析を実施した。また、往復流の上潮時平均流速を用いた定常流による数値解析も行い、湧昇流の特性について往復流の場合との比較を行った。人工海底山脈の形状および規模と、数値解析により算定される湧昇栄養塩量の関係について定量的な評価を行った。

2. 計算方法

(1) 基礎方程式

人工海底山脈による湧昇流の数値解析の支配方程式には、3 次元 Navier-Stokes 方程式を用い、乱流モデルとして κ - ε モデル（例えば、Rodi, 1993）を用いた。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots (i, j = 1 \sim 3) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho g_i \beta (T - T_0) \dots\dots\dots (i, j = 1 \sim 3) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho C_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} K \frac{\partial T}{\partial x_j} \dots\dots\dots (i, j = 1 \sim 3) \quad (3)$$

ここで、 u_i : x_i 方向流速、 ρ : 密度、 μ : 粘性係数、 g_i : 加速度、 β : 体膨張率、 $T(T_0)$: 流体の（基準）温度、 C_p : 定圧比熱、 K : 熱伝導率である。

(2) 計算領域

図-1 に計算領域を示す。計算領域は流軸方向を 3,000 m、水深を 85 m とした。解析領域幅については、領域幅を変化させた場合の側方境界の影響について定常流による事前計算を行い、後述する湧昇栄養塩量に及ぼす側方境界の影響が小さくなる領域幅として、人工海底山脈底面幅の 3 倍を設定した。また人工海底山脈は解析領域

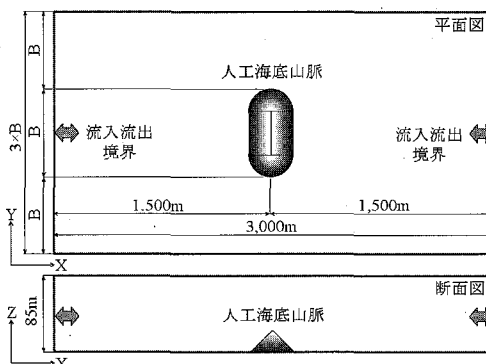


図-1 計算領域

1 正会員 修(工) (株)ドラムエンジニアリング設計部
2 正会員 修(工) (社)水産土木建設技術センター調査研究部
3 フェロー (社)水産土木建設技術センター研究開発部長
4 正会員 工博 (株)ドラムエンジニアリング設計部, 課長
5 正会員 工博 東京海洋大学教授海洋科学部海洋環境学科

の中央に設置した。

側方境界および水面はフリースリップ境界とし、底面はノースリップ境界とした。図-1における左右端には流入流出境界として流速条件を設定し、水温、栄養塩濃度の流入条件を設定した。

(3) 流入流出境界条件の設定

a) 境界流速の設定

流速の境界条件は、現地調査における調解析結果に基づいて設定した。流入および流出境界で与える流速条件には、潮汐の主軸方向の潮流成分と恒流成分の和として式(4)のように定め、両境界では同位相の条件を設定した。

$$U_B = (M_2 + S_2) \sin(2\pi t/T) + U_S \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 U_B : 境界での流速、 U_S : 恒流流速、 M_2 , S_2 : M_2 , S_2 分潮の流速振幅、 T : 潮汐の周期 (12 時間) である。潮流成分は鉛直方向に様とし、恒流成分は現地調査結果における潮流の主軸方向成分を設定し、表層で 0.104 m/s、底層で 0 m/s となるよう線形に変化させた。

図-2 に表層、底層において設定した境界流速の 1 周期間の経時変化を示す。数値計算では 3 周期間の計算を行い、流況の安定を考慮して 3 周期目を評価対象とした。また定常流の場合は往復流の上潮時の平均流速を用いた。

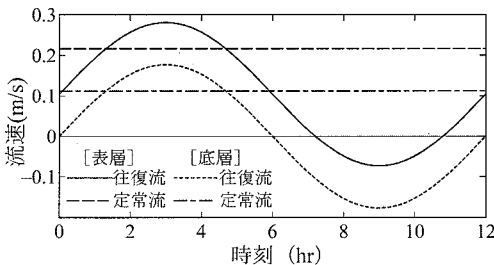


図-2 境界流速の設定

b) 水温 (密度) 分布の設定

数値計算においては、密度分布を水温分布に置き換えて解析を行った。図-3 に流入条件に設定した水温の鉛直分布を示す。塩分、水温の現地観測結果から密度分布を算定し、密度分布を一定塩分 (平均値) のもとで海水の状態方程式 (気象庁, 1999) により水温分布に換算した。水温分布については、成層強度の異なる夏期、秋期の 2 種類の検討を行った。また、水温および後述する栄養塩濃度分布の初期条件については、流入条件と同一の分布を設定した。

c) 栄養塩 ($T-N$) 濃度分布の設定

図-4 に、栄養塩 ($T-N$) 濃度の鉛直分布の設定値を示す。栄養塩濃度分布は、 $T-N$ 濃度の現地調査結果を基に、-40 m 以浅は一定値とし、-40 m 以深は直線的に増加するようにモデル化した。栄養塩濃度分布につい

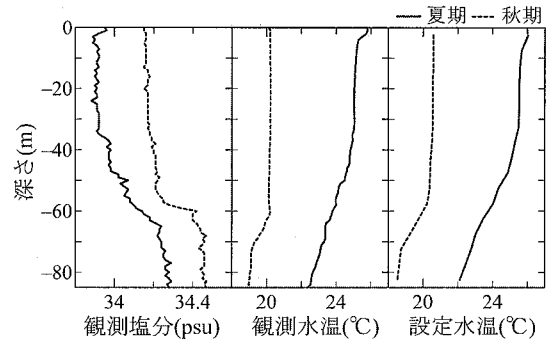


図-3 水温分布の設定

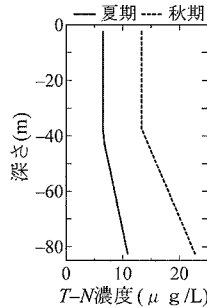


図-4 $T-N$ 濃度分布の設定

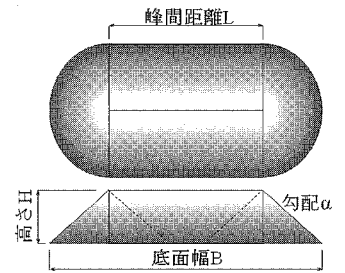


図-5 人工海底山脈の基本形状の設定

表-1 計算ケース

ケース	人工海底山脈形状				流況	密度、 栄養塩
	H(m)	L(m)	B(m)	α		
Case1	15	75	135	1/2.0	往復流	夏期 秋期
Case2	17	85	153			
Case3	20	80	160			
Case4	15	150	225	1/2.5	往復流 定常流	
Case5	15	75	150			
Case6	17	102	187			
Case7	20	100	200			

ても夏期、秋期の 2 種類の検討を行った。秋期の $T-N$ 濃度は夏期と比較して全体的に 2 倍程度大きくなっている。

(4) 計算ケース

図-5 に人工海底山脈の基本形状、表-1 に計算ケースを示す。湧昇流に対する山脈の規模および形状の効果を検討する目的で、高さ、峰間距離、斜面勾配を変化させて計算を行った。斜面勾配については、ブロック (1.6 m 角)、石材 (1 t) の直投による山脈の築造を想定し、施工可能な範囲で最大の勾配を設定した。また、往復流と定常流の比較のために 3 種類の形状について定常流の計算も行った。

3. 湧昇効果の評価方法

(1) 補償深度の設定

人工海底山脈による湧昇効果は、補償深度以浅で増加する栄養塩量により評価を行った。補償深度の設定については、図-6に示す現地観測におけるクロロフィル *a* (Chl-*a*) 濃度の値が急激に減少する深度として -45 m を設定した。また、このときの現地海域の透明度は 22 m 程度であり、一般に補償深度は透明度の 2~3 倍 (例えば、有田, 1999) とされていることから、補償深度の設定値は妥当であると考えられる。

(2) 湧昇栄養塩量の算定

人工海底山脈による湧昇効果は、補償深度以浅の栄養塩濃度差 (検査断面での濃度-流入濃度) と、後述する検査断面における平均流速、検査断面積との積のフラックス量として式(5)に定める湧昇栄養塩量を算定することによって評価を行った。

$$N_u = (\bar{C}_n - \bar{C}_{n0}) \cdot \bar{U} \cdot A \cdots \cdots (5)$$

ここで、 N_u : 湧昇栄養塩量 (g/s), $\bar{C}_n$: 検査断面における平均栄養塩濃度 (g/m³), $\bar{C}_{n0}$: 流入境界検査断面における平均栄養塩濃度 (g/m³), $\bar{U}$: 流軸方向の検査断面平均流速 (m/s), A : 検査断面積 (m²) である。

(3) 検査断面の設定

図-7に検査断面の設定を示す。検査断面は、流軸と垂直方向の補償深度以浅に、流入流出境界から 100 m 間隔にそれぞれ 5 断面設定した。湧昇栄養塩量の評価には、計算値の安定のために 5 断面の平均値を用い、人工海底山脈に対して常に下流側となるよう、上潮時は 1,000~1,400 m, 下潮時は -1,000~-1,400 m の検査断面の値を用いた。

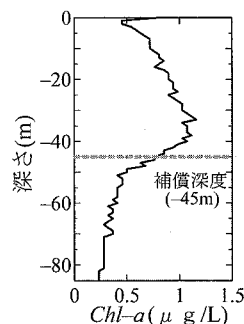


図-6 Chl-*a* 観測値と補償深度の設定

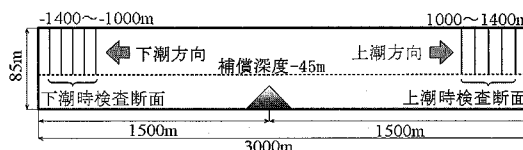


図-7 検査断面の設定

4. 計算結果

(1) 往復流の場合の計算結果

図-8に、人工海底山脈中央断面における往復流の場合 (Case5, 夏期) の流速、 $T-N$ 濃度、渦度 (ω_y) について山脈周辺での計算結果を示す。

上潮流速最強時においては、山脈右側の後流域で渦度が大きく $T-N$ 濃度にも変動が認められ、上下層の混合が起きていることがわかる。また、流速分布からは明確な剥離渦は見られない。また転流時には、転流前に山脈右側の後流域に形成された水平渦の影響により、

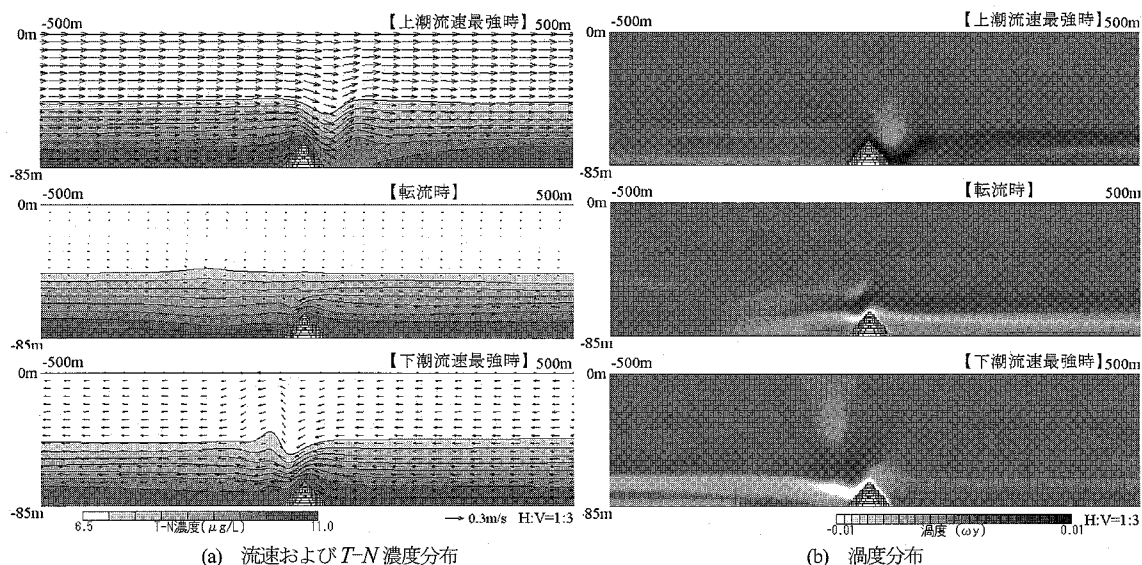


図-8 人工海底山脈中央断面における往復流の計算結果 (Case5, 夏期)

$Z = -60$ m から底層付近にかけて戻り流れが存在している。下潮流速最強時では、山脈左側後流域の中層から上層にかけて鉛直上向きの流れが存在している。下潮時の境界流速に恒流成分を設定しており、上層よりも底層のほうが流速が大きいためと考えられる。この流れにより、山脈左側後流域の $Z = -40$ m 付近の $T-N$ 濃度が高くなっている箇所が認められる。

(2) 湧昇栄養塩量の経時変化特性

図-9 に、Case5 の夏期における往復流の湧昇栄養塩量の1周期間の経時変化を、流入境界検査断面における平均流速とともに示す。恒流流速の存在により上潮時のほうが絶対流速が大きくなるため、上潮時の湧昇栄養塩量も大きくなっている。また、上潮時、下潮時とも流速が最大となる前に湧昇栄養塩量が最大となることがわかる。これは、転流前に混合された水塊が再び山脈を通過することで栄養塩濃度が増大していくが、流入境界から初期条件と同一の水温、栄養塩分布の水が流入するため、ある程度時間が経過すると転流前の影響が小さくなるためと考えられる。

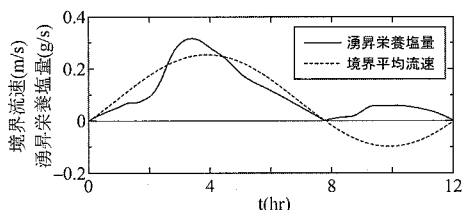


図-9 湧昇栄養塩量の経時変化特性 (Case5, 夏期)

(3) 往復流と定常流の流況の比較

図-10 に定常流の場合と、往復流の場合で境界流入流速が定常流と等しくなる時間(加速時, 減速時)における, 人工海底山脈付近の流況, 栄養塩濃度分布の比較を示す。

上潮加速時には、減速時および定常流の場合と比較して、断面図左端付近の山脈上流側の底層付近に、転流前の影響と考えられる流速の大きい箇所が見られる。また、山脈右側後流域の上昇流も若干大きくなっており、 $Z = -40$ m 付近の栄養塩にも比較的大きな混合が見られる。しかし $Z = -80$ m における平面図からは、山脈右側後流域の渦の規模が上潮加速時、定常流と比較してやや小さく、底層での栄養塩濃度の混合は比較的小さいことがわかる。

往復流の上潮減速時では、断面図左端付近の流速、栄養塩濃度分布は概ね定常流と等しくなるが、 $Z = -80$ m における平面図では、山脈右側後流域の渦の規模は定常流、往復流加速時よりも大きく、底層の栄養塩の混合が促進されていることがわかる。

図-11 に、山脈中央断面における往復流と定常流の水

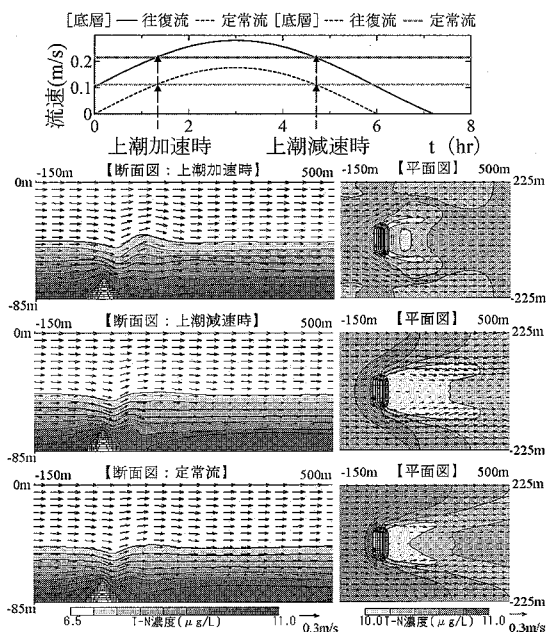


図-10 往復流と定常流の比較 (Case5, 夏期)

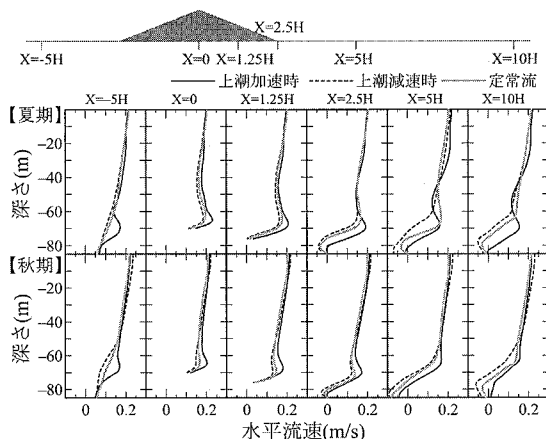


図-11 山脈周辺の水平流速鉛直分布 (Case5, 夏期, 秋期)

平流速鉛直分布の比較を、密度分布の異なる夏期、秋期について示す。この図からも前述の上潮加速時、上潮減速時および定常流の流況に明確な差異があることがわかる。また秋期では $X=-5\text{ H}$ の $Z=-70\text{ m}$ 付近において、上潮加速時の流速が大きくなる傾向は夏期と同程度であるが、 $X=5\text{ H}$, 10 H における $Z=-70\text{ m}$ 付近の上潮加速時、減速時および定常流の流速分布は夏期ほどの違いは認められない。このことから、成層強度が強い場合のほうが、往復流と定常流の流況の違いが大きく現れるものと考えられる。

(4) 往復流と定常流の湧昇栄養塩量の比較

図-12 に、往復流と定常流の湧昇栄養塩量の比較を示

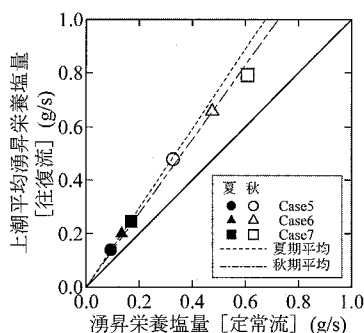


図-12 往復流と定常流の湧昇栄養塩量の比較 ($\alpha=1:2.5$)

す。往復流の湧昇栄養塩量は上潮時の平均値を示しており、定常流については流況が安定して湧昇栄養塩量が一定の値に収束した時のものを適用した。

往復流による湧昇栄養塩量は、全ケースで定常流を上回り平均で約 1.4 倍程度大きい。前述した転流前の流況や栄養塩濃度分布の履歴、および山脈背後に形成される渦の発達過程などの影響により、往復流のほうが混合が促進され湧昇栄養塩量が大きくなるものと考えられる。

また密度分布の異なる夏期と秋期では、定常流に対する往復流の湧昇栄養塩量の比率は、夏期で約 1.48 倍、秋期で約 1.38 倍と、若干夏期の往復流による結果が大きくなった。これは、図-11 に示した夏期と秋期の流況の違いの影響と考えられ、夏期、秋期の 2 ケースのみの検討ではあるが、成層強度が強いほうが往復流の効果が大きくなることが示唆される。

(5) 人工海底山脈形状と往復流の湧昇栄養塩量

図-13 に、往復流による 1 周期間の平均湧昇栄養塩量の計算結果と、人工海底山脈の流軸方向投影面積の関係を示す。湧昇栄養塩量は、夏期、秋期ともに流軸方向投影面積にともない直線的に増加していることがわかる。投影面積に対する平均湧昇栄養塩量の増加率は、夏期よりも秋期のほうが若干大きい傾向が認められる。また、山脈の斜面勾配の影響については、1/2.0 と 1/2.5 で湧昇栄養塩量に有意な差は認められない。ブロックまたは石材の直投により造成可能な斜面勾配を考慮して斜面勾配の影響を検討したが、今回の条件では湧昇栄養塩量に差が生じるほどの影響はないことがわかった。

5. ま と め

人工海底山脈による栄養塩の湧昇効果について、現地の潮汐流を考慮した往復流による数値計算を行い、従来行われていた定常流による計算結果との比較を行った。以下に主要な結果を示す。

- ① 往復流の平均湧昇栄養塩量と、平均流速を用いた定常流の湧昇栄養塩量では、往復流のほうが約 1.4 倍程

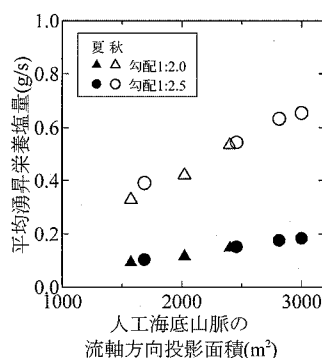


図-13 湧昇栄養塩量 (往復流) と山脈投影面積の関係

度大きく計算され、成層強度が強い場合のほうが往復流の効果が大きい傾向がある。

- ② 往復流と定常流の計算結果の違いは、転流前の流況や栄養塩濃度分布の履歴および人工海底山脈背後に形成される渦の発達過程などの影響と考えられる。
- ③ 往復流による湧昇栄養塩量は、人工海底山脈の流軸方向投影面積に比例して増大する。ブロックまたは石材による山脈の築造を想定した範囲では勾配の影響は小さい。また、成層強度が弱いほうが山脈投影面積に対する湧昇栄養塩量の増加率が大きい傾向がある。

今後は、実際に設置された人工海底山脈周辺での現地調査を実施し、今回の数値解析手法の妥当性の検証を行う予定である。

謝辞：今回の検討は長崎県による「平成 17 年度長崎県西部地区広域漁場（特定）整備工事」の一環として設置された、湧昇流効果解析についての検討会における成果をもとに取りまとめたものである。（独法）水産総合研究センター、西海区水産研究所の高柳部長、水産工学研究所の中山室長の両委員および各関係者の方々には貴重なご指導を頂いたことに感謝いたします。

参 考 文 献

- 有田正光編著(1999)：水圏の環境。東京電気大学出版局、p. 22。
- 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海面の上昇・混合過程に関する研究 (2)，海岸工学論文集，第 38 巻，pp. 841-845。
- 気象庁編(1999)：海洋観測指針 (第 1 部)，(財) 気象業務支援センター，pp. 167-176。
- 辻本剛三・道奥康治・西出浩明・坂本 格・久野悟志(1995)：海底構造物による均質及び密度成層化された振動流場の流況について，海岸工学論文集，第 42 巻，pp. 1056-1060。
- 本田陽一・関木道政・鈴木達雄(2004)：人工マウンド構造物による鉛直混合現象の観測と混合量の試算，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 1151-1155。
- (社) マリノフォーラム 21(2001)：マウンド漁場造成事業に係わる技術資料，pp. I-22-I-24。
- Rodi, W. (1993)：Turbulence Models and Their Application in Hydraulics, IAHR。