

海洋深層水の発電所冷却水利用後の沿岸放流拡散特性 に関する検討

田中 昌宏* ・ 岸 靖之** ・ 池田 知司***
高月 邦夫**** ・ 乾 悦郎*****

深層水を発電所冷却水に利用後沿岸に放流した場合の環境影響を評価するため、数値シミュレーションによる検討を行った。従来型の発電所では排水は季節によらず温排水となって拡がるが、深層水の場合には、海域環境（場所、季節）の状況に応じて排水性状が変化し、日本海の場合には年間を通じて温排水ではなく重密度排水となり、水温変化範囲は放水口近傍に限られる。深層水が多く含む栄養塩の拡散特性を物質の希釈率として評価した結果、拡散面積は排水性状、沿岸の流れの強さ及び密度成層の強さに支配されることが明らかとなった。特に日本海の成層期には、放流水は地球自転の効果も受け沿岸に沿って中層に広く拡がる特性を示す。

1. はじめに

海洋深層水は安定した低温性、高栄養塩特性から、これまで薬品、化粧品、食品など様々な産業分野で利用され（取水規模： $10^3 \sim 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$ ）、今後も更なる有効利用が期待されている。近年になり深層水の低温性による発電効率向上の観点からの火力発電所冷却水への利用、あるいは高栄養特性を利用した海藻の成長促進への利用等の検討が進められている。こうした利用の場合の取水流量は現状の十～百倍と大規模取水になるため、沿岸放水時の環境影響や有効な磯焼け対策立案のために、その拡散特性を詳細に検討する必要がある。従来の発電所冷却水放水時には必ず温（軽密度）排水になるのに対し、深層水を利用した場合には陸上で利用形態（温度上昇）と沿岸の水温、塩分の季節変化により、排水性状が異なり、様々な拡散特性を示すと考えられる。

そこで、本研究では海洋深層水を大規模取水した場合の沿岸放流特性について、太平洋岸と日本海岸の季節変化を含めた拡散特性を明らかにするため、数値シミュレーションによる検討を行った。

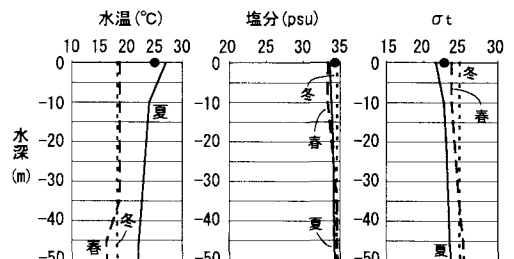
なお、本研究は 1999～2003 年度に実施した NEDO 共同研究「エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発」の一環として行ったものである。この共同研究では、本研究で対象とした沿岸放流の他に、放流水の拡散を促進する目的で水中放流した場合の検討も行っている（長谷部ら, 2002）。

2. 対象海域の環境

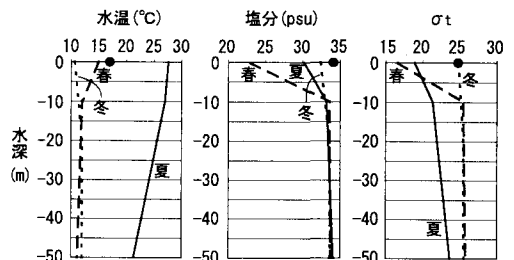
対象海域は深層水の取水が行われている地点として、太平洋岸では高知県高岡地区、日本海岸では富山県滑川地区を対象とした。表-1 にそれぞれの地点で取水されている深層水の水温と塩分を示す。両地点で塩分に大き

表-1 深層水の水温、塩分

	水温 (°C)	塩分 (psu)
太平洋 (高岡)	10	34.3
日本海 (滑川)	2	34.1



(a) 太平洋 (高知県高岡沖)



(b) 日本海 (富山県滑川沖)

図-1 対象海域の水温、塩分及び密度
●は深層水放流時の値。

な差はないが、水温には 8°C の差がある。なお、栄養塩濃度は、高岡のデータで $\text{PO}_4\text{-P}$ が 0.059 mgP/l , $\text{NO}_3\text{-N}$ が 0.3361 mgN/l で、それぞれ夏期の表層水濃度の約 20 倍と 60 倍である。

図-1 は両海域での水温、塩分及び密度の夏、冬、春の平均的な鉛直分布を示している。また、図中の黒丸は深層水を取水し、発電所冷却水として利用したことによって水温が 15°C 上昇した排水の状態を示している。この図からわかるように、従来型の発電所では沿岸水を取水す

* 正会員 工博 鹿島建設(株)技術研究所
** 正会員 工修 (株)関西総合環境センター技術開発部
*** 農博 (株)関西総合環境センター技術開発部
**** (株)東京久米環境創出部
***** 芙蓉海洋開発(株)環境センター

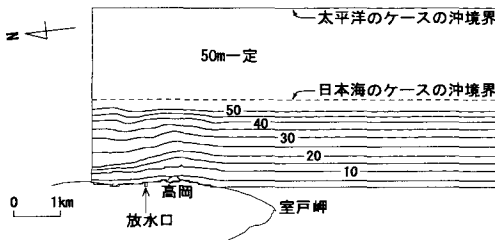


図-2 計算に用いた海底地形 (水深単位: m)

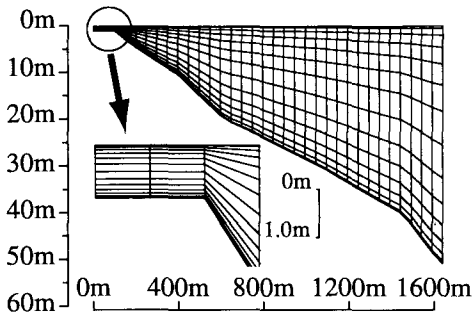


図-3 鉛直計算メッシュ (放流口断面)

るために必ず軽密度排水となるのに対し、深層水を利用した場合は、地点及び季節毎に排水性状が異なることが特徴である。

四国の太平洋岸は黒潮の影響が支配的な典型的な開放性海域で、高岡地区は黒潮の反流域に当たり、通常南流が卓越している。筆者らのグループ (日本海洋開発産業協会, 2000) の観測によると南流の平均流速は 0.5 m/s であった。一方滑川地区は富山湾東部に位置しているが、閉鎖性は低い海域であり、対馬暖流の他に特に春先の雪解け時期には河川水の影響を受ける。したがって流れの強さは季節毎に大きく変化するものの流向は概ね北流であり、高岡地区同様、陸を右に見て流れる海域である (日本海洋学会, 1985)。

3. 計算の方法

(1) 計算モデル

モデルは DELFT3D・鹿島モデル (Delft Hydraulics, 1999) を使用した。本モデルは、鉛直方向に静水圧近似を仮定した三次元流動モデルで、水平方向に直交曲線座標、鉛直方向に σ 座標を用いている。海水の密度は塩分と水温の関数とし、それぞれの輸送方程式を連立して解いている。本研究では、深層水に多く含まれる栄養塩の拡散特性を明らかにするため、物質濃度の輸送方程式を解き (保存物質として)、希釈率を評価した。ここで希釈率は、放水口で単位濃度を設定し、拡散後の海域各地点における濃度の逆数とした。

今回対象とした高岡地区の海底地形は勾配が $1/25$ 程度と急であり、海域が成層している場合には、通常の σ 座標を用いたモデルでは数値的な鉛直混合が問題となる。本モデルでは、この問題を解決するため「クリープ補正」(Stelling and Kester, 1994) を用いると共に鉛直方向の渦動粘性係数及び拡散係数の評価には $k-\epsilon$ モデルを用い、高精度な計算を可能にしている。

(2) 計算領域及び計算メッシュ

上記の様に対象海域は開放性の海域であり、流れは沿岸に沿って一方向に流れている。また両海域とも放流口周辺の海底地形は急勾配で沿岸方向にほぼ一様となっている。そこで、両海域の拡散特性を比較しやすくするために、海底地形は高岡地区のデータを用いることとした。検討に用いた計算領域及び地形を図-2に示す。後で示すように放流水は 10 m 以浅で拡散するため、計算は水深 50 m までとし、それより深い領域は 50 m で一定とした。また流速を 0.1 m/s と遅くした場合には拡散範囲が大きくなったため、仮想的な計算領域を南へ直線的に延長した (沿岸方向計算領域: 8.7 km)。また、日本海の春と夏の計算では密度成層が強く (鉛直密度勾配が大きいため)、計算が不安定になるため、岸沖方向の計算領域を約半分とした (岸沖方向計算領域: 太平洋- 3.8 km , 日本海- 1.85 km)。

計算メッシュは、水平方向に $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 、鉛直方向には 14 層とした。鉛直方向のメッシュ分割は、軽密度排水、重密度排水どちらも拡散状況を高精度に計算するため、図-3に示すように水面及び海面近くで座標の間隔が細くなるように設定した。

(3) 計算条件

拡散特性のパラメータとして、放流量、陸上利用 (発電所冷却水等) による水温上昇、海域の成層状態、沿岸流速を考え、計算条件を表-2の様に設定した。ここで季節の違いは海域の水温、塩分及び成層状態の違いを意味しており、図-1に示した鉛直分布を設定した。沿岸流速は高岡地区で計測された 0.5 m/s では拡散が非常に速いため、比較検討のために 0.1 m/s も設定した。水平方向の拡散係数は、沿岸流速が 0.5 m/s の場合 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ 、 0.1 m/s の場合 $5 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

境界条件は以下のように設定した。図-2に示したように計算領域は、海岸線に接する以外の3つの境界は開境界となっている。さらに対象海域特に日本海側の場合には成層が強い季節があり、境界条件の設定に注意を要する。実際には成層を維持するような力学バランスで流動場が決まっているため、そのバランスに近い状況を再現できるように境界条件及び計算のセットアップを行う必要がある。

まず開水路流の圧力伝播 (水位変動) の特性から上流

表-2 計算条件及び拡散面積 (計算結果)

場の条件			放流条件		密度条件		面積 (m ²)	
場所	季節	沿岸流速 (m/s)	放流量 (万 m ³ /日)	水温上昇 (°C)	排水性状	密度成層	1°C以上変化域	100 倍希釈範囲
太平洋	夏	0.5	10	10	重	成層	2,500	11,250
太平洋	冬	0.5	10	10	微軽	一樣	0	13,750
太平洋	夏	0.5	10	15	重	成層	0	11,250
太平洋	冬	0.5	10	15	軽	一樣	2,500	13,750
太平洋	冬	0.1	10	15	軽	一樣	6,282	1,942,348
太平洋	夏	0.5	100	10	重	成層	8,750	241,250
太平洋	冬	0.5	100	10	微軽	一樣	3,750	342,500
太平洋	夏	0.5	100	15	重	成層	5,000	265,000
太平洋	冬	0.5	100	15	軽	一樣	27,500	400,000
太平洋	春	0.5	100	15	軽	成層	13,820	464,856
太平洋	夏	0.1	100	15	重	成層	6,282	8,224,197
太平洋	冬	0.1	100	15	軽	一樣	1,645,845	14,036,164
太平洋	春	0.1	100	15	軽	成層	1,148,322	15,609,139
日本海	夏	0.1	100	15	重	成層	30,153	6,090,881
日本海	冬	0.1	100	15	微重	ほぼ一樣	153,277	6,070,779
日本海	春	0.1	100	15	重	成層	5,025	8,018,152

側 (北側) を流速境界, 下流側 (南側) を水位境界とした。下流側の水位境界では地衡流平衡が成り立つとして, 次式から岸沖方向の水位勾配を求め, 沖側水位をゼロとして, 岸に向かって線形分布を与えた。

$$fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \dots\dots\dots (1)$$

ここに, f : コリオリパラメータ, u : 流速, g : 重力加速度, η : 水位, y : u と直角方向の座標。沖側境界は太平洋側の計算では水位境界として僅かに沿岸方向に勾配を与えることにより安定な計算結果が得られたが, 成層がきつい日本海側の場合には水位境界では計算が不安定になったため, 不透透境界とし水位はフリーとした。

計算は次の手順で行った。まず, 海域の成層層を設定した流速で定常状態になる場を作る必要がある。そこで, 深層水の放流を与える前に, 上記の境界条件で定常状態に達するまで計算を行った。今回の計算では定常に達するまでに 6 日間の計算が必要であった。その後, 深層水を所定の放流条件で与え (表-2 参照), 24 時間計算した。

4. 計算結果及び考察

(1) 水温及び希釈率の拡散計算結果

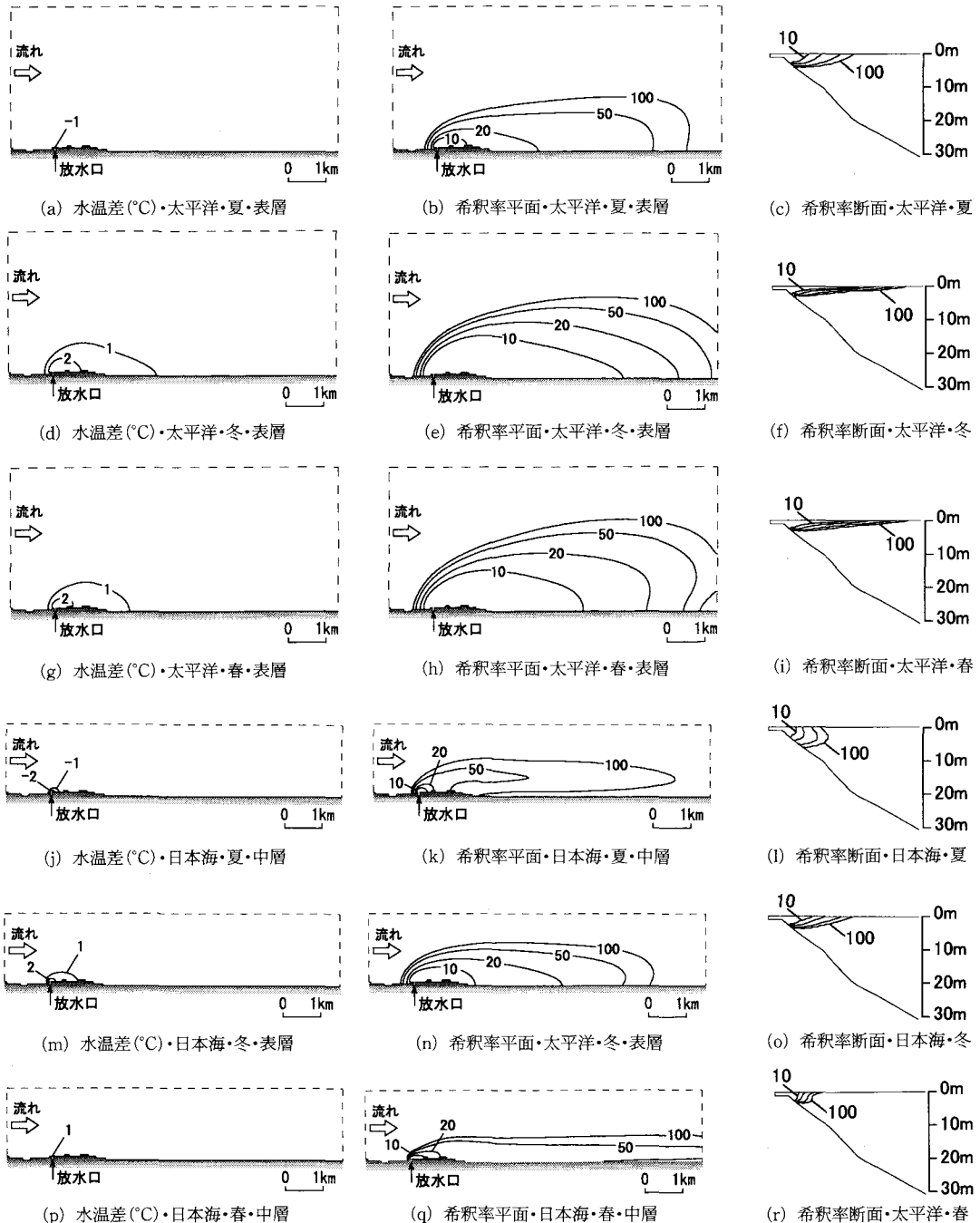
計算結果から, 水温変化については温排水の影響範囲の基準である 1°C 以上変化域, 栄養塩拡散の指標としては物質濃度の百倍希釈率, について水平拡散面積を表-2 にまとめた。ここで拡散面積は最大拡散域の投影面積である。また, 例として放流量 100 万 m³/日, 沿岸流速 0.1 m/s の計算結果を図-4 に示す。

全般的特性として, 容易に予想されるように, 排水条件が軽密度の場合が重密度に比べ拡散面積が大きくなっ

ており, また, 沿岸流速が速いほど拡散面積が狭くなっている。水温 1°C 以上の変化域と百倍希釈率の面積を比較すると, 後者が前者に比べ 1 オーダ以上大きく, 太平洋における冬及び春の沿岸流速が 0.1 m/s を除いて水温変化の影響範囲は放水口近傍に限られることがわかる。これは従来型の沿岸取水の発電所では, どの季節でも必ず温排水となって水温影響範囲はある範囲に拡がるのに対して, 深層水を利用した場合の大きな特徴である。物質濃度の百倍希釈率の太平洋と日本海を比較すると, 日本海では年間を通じて軽密度排水にならないため, 太平洋に比べ拡散面積が小さい。

そこで, 日本海の拡散特性について詳しく検討する。日本海では図-4 に見られるように, 重密度排水のために最大拡散域は表層ではなく, 密度差に応じて混合しながらある水深に貫入する。この場合の拡散特性は海域の成層状態に大きく依存し, 成層がきつい春においては, 成層によって鉛直混合が抑制されるために水平拡散面積が広がっている。さらに日本海側の夏と春に共通した大きな特徴は, 拡散域が沿岸にへばり付くように沿岸方向に長く拡散することである。密度成層のきつい春はこの特性がより顕著に現れている。これは地球自転の効果が現れているためと考えられる。つまり, 北半球において岸を右に見て流れがある場合には, 沿岸下降流 (Downwelling) が生じるため, 沿岸から放流された流体塊は, 岸に沿って下方へ流されようとする。こうした効果が影響するかどうかは次式で示される内部変形半径に相当するスケール (λ) で見る事ができる (宇野木, 1993)。

$$\lambda = \frac{NH}{f} \dots\dots\dots (2)$$


 図—4 水温差, 希釈率の計算結果 (放流量百万 $\text{m}^3/\text{日}$, 沿岸流速 0.1 m/s)

ここに, N ; プルント・バイサラ振動数 (3) 式 (ρ ; 密度, z ; 鉛直座標), H ; 水深である.

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{dp}{dz}} \dots \dots \dots (3)$$

(2), (3) 式に日本海側の条件を入力すると (水深 $H=5 \text{ m}$ として), 夏の場合約 3.4 km , 春の場合約 6.4 km と

なり, 現在検討している水平スケールと同オーダーであり, 上記した日本海側の特徴は地球自転の効果が影響した現象と考えられる. さらに, 排水が重密度であることが拡散域が沿岸にへばりつくことの基本的な条件と考えられる.

日本海側の深層水の拡散が沿岸にへばり付くように長

くなる特性をもつことは、藻場造成などの肥沃化への利用に有利な特性と考えられる。

(2) 拡散特性の支配パラメータ

上記したように、深層水を発電所冷却水に利用した後沿岸に放流した場合の拡散特性は、主に放水時の排水性状(軽密度 or 重密度)、流れの流速及び海域の密度成層によって支配されることがわかる。そこで、これらの条件を表すパラメータを考え、拡散特性を支配するパラメータについて検討した。

まず排水性状を表すパラメータとして放流口での諸元を用いた放流リチャードソン数 R_{i0} を考える。

$$R_{i0} = \frac{\varepsilon g d}{u^2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ε : 放流水の表層水に対する相対密度差、 g : 重力加速度、 d : 放流口高さ、 u : 放流流速、 ε が負の場合は、軽密度排水、正の場合は重密度排水となる。

次に、海域の拡散を支配するパラメータとして、海域の流速と海域の密度成層の度合いを示すパラメータを考える。前者としては、海域流速 V と放流流速 u の比 (V/u) を考える。後者としては、ブルント・パイサラ振動数 N を考える。

図-5 は、放流量が 100 万 $\text{m}^3/\text{日}$ の場合について、横軸に R_{i0} をとり、縦軸に 100 倍希釈率の面積を放流口断面積で無次元化し、流速比を乗じた量をとっている。これより、重密度排水の場合は、放流状態に関係なく拡散面積は沿岸流速の二乗に反比例する。一方、軽密度排水の場合には、拡散面積は R_{i0} 数の絶対値に比例する。

図-6 は、密度成層の影響をみるために、成層しているケースのみを対象に、放水流量は 10 万 $\text{m}^3/\text{日}$ と 100 万 $\text{m}^3/\text{日}$ 両方を含めて、縦軸に成層度のパラメータであるブルント・パイサラ振動数の 2 乗を入れたパラメータで整理したものである。 R_{i0} が非常に小さいケースを除いて、ひとつの指数関係で表現できることがわかる。

上記二つの関係について一般的な関係式を求めるためには、今後さらなる検討が必要と考えられるが、深層水の拡散を支配するパラメータとして、放流リチャードソン数 R_{i0} 、流速比 (V/u) 及び海域の密度成層強度を示すブルント・パイサラ振動数 N が重要であることがわかる。

5. おわりに

本研究では海洋深層水を大規模取水した場合の沿岸放流時の拡散特性について数値シミュレーションによる検討を行った。結果を以下にまとめる。

- ・放流水の排水性状は海域、季節によって変化し、放流後の海域での拡散特性は、排水性状、海域の流れの強さと成層度に支配される。

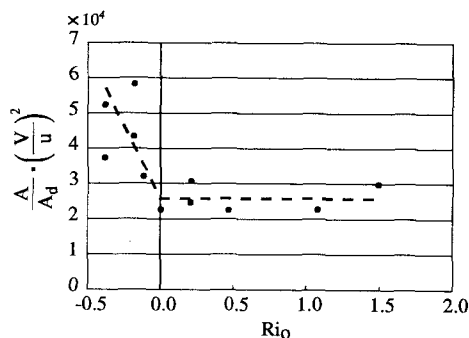


図-5 拡散面積 (A) と R_{i0} 数、相対流速 (V/u) の関係 (放流量 100 万 $\text{m}^3/\text{日}$ のみ)

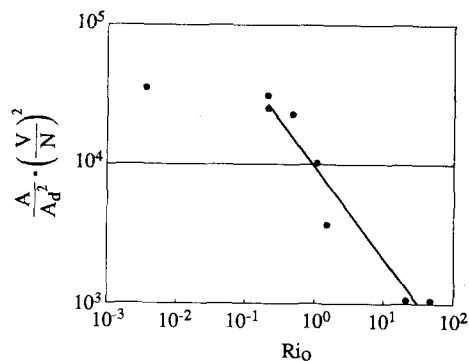


図-6 拡散面積 (A) と R_{i0} 数、密度成層度 (N) の関係 (成層時のみ)

- ・水温影響は、従来型の発電所では必ず温排水となっておりある範囲に広がるのに対し、深層水の場合には季節によって排水性状が異なるため、年平均すると影響範囲は従来型に較べ狭くなる。
- ・日本海の場合には年間を通して重密度排水となり、放流水は、成層期 (冬以外) には地球自転の影響も受け、沿岸に沿って中間層に広く拡散する特徴を示す。

参考文献

- 宇野木早苗 (1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版, p. 672.
- 日本海洋学会編 (1985): 日本全国沿岸海洋誌, 第 25 章 富山湾, 東海大学出版会, pp. 981-1016.
- 日本海洋開発協会 (2000): 平成 11 年度「エネルギー使用合理化 海洋資源活用システム開発」成果報告書, 第 III 編, pp. 365-623.
- 長谷部雅伸・大山 巧・平山彰彦・高月邦夫・池田知司 (2002): 沿岸海域環境の季節変動に伴う深層水放流時の拡散形態の変化, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 971-975.
- Delft Hydraulics (1999): DELFT3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.05.
- Stelling, G. S. and J. A. T. H. M. van Kester (1994): On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep slopes, Int. J. Numerical Method in Fluids, Vol. 18, pp. 915-935.