

# 大水深海域での湧昇流構造物に作用する潮流力と波力について

## Fluid Forces Exerted by Tidal Currents and Waves on Submerged Upwelling Structures in the Deep Sea

木田英之<sup>1</sup>・井内国光<sup>2</sup>・中村孝幸<sup>2</sup>・出口一郎<sup>3</sup>・古木 宏<sup>4</sup>・境 大輔<sup>4</sup>

Hideyuki KIDA, Kunimitsu INOUCHI, Takayuki NAKAMURA, Ichiro DEGUCHI  
Hiroshi KOGI and Daisuke SAKAI

This study mainly deals with characteristics of hydrodynamic forces on upwelling structures constructed on the sea floor with comparatively deep depth, say about 200m. Two different configurations of upwelling structures, typically a vertical plate model and a V-shaped plate model in the horizontal plane, were used as a practical model. The numerical analysis based upon CFD was applied to examine the effectiveness of upwelling structures and fluid forces in a quasi-steady flow such as a tidal current. Experimental verifications for such a numerical study were also carried out. The importance of wave actions on the upwelling structure was further examined theoretically for the stability analysis and structural design.

### 1. はじめに

近年、水深200m程度の大陸棚を対象にして、底設構造物の設置により海底付近の栄養塩類を有光層まで湧昇させ、海域の基礎生産力を増強しようとする試みが進められつつある(例えば橋本・浜崎, 2007)。水産庁で押し進められているフロンティア漁場整備事業は、日本近海での漁場の開発を目的に、経済的かつ確実な湧昇流の発生が期待できる新規構造体が必要とされている。このような構造物は、人工海底山脈と称され、大陸棚(水深200m)海域での深層水を海面付近まで湧昇させることを目標としている。

既に著者ら(木田ら, 2008, 2009)は、大水深海域でも経済的な建設が可能になると考えられる、直立壁構造の湧昇流構造体を対象にして、湧昇流の生成効果が得られる構造形状を数値流体力学に基づく解析法と水理模型実験により検討してきた。その結果、平面形状がV字型構造の堤体は、I字型やX字型の平面形状のそれより湧昇流の生成効果に優れることなどを明らかにした。このようなV字型堤体の優位性は、浅枝ら(1990)や池田ら(1992)によっても指摘されている。

本研究では、比較的高い湧昇効果が認められた、V字型の平面形状を有する湧昇流構造体を中心にして、潮流などの準定常流による流体力の特性を3次元流れの数値シミュレーションおよび定常流を用いた水理模型実験により明らかにする。この際、流体力係数に及ぼす模型の

縮尺効果などについても考察する。一方、現場海域では、潮流のみならず波の作用も受けることから、作用波力の特性を理論的に検討すると共に潮流力との比較から想定すべき設計外力について考察する。

### 2. 数値解析法と湧昇効果に関する従来成果(木田ら, 2009)の概要

#### (1) 数値解析法

流れ場の数値シミュレーションは、DHIで開発された3次元非定常流体解析モデルであるMIKE3 (DHI, 2005)を用いた。今回の解析では、静水圧近似は使用せず、Boussinesq近似を用いた。また乱流モデルは、 $k-\epsilon$ 型2方程式モデルを用い、その場合の数値定数は一般的に推奨されている値を準用した。このモデルでは塩分や水温による流体密度の空間変化も考慮できるが、今回は密度を一定としたときの結果のみを示す。

数値解析のための離散法には、空間、時間共に差分法を採用し、解析領域の水平方向のメッシュ分割( $\Delta x, \Delta y$ )は、図-1に示すように4層のNested Hydro-Dynamic

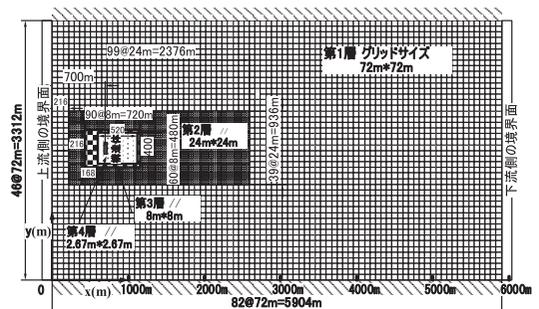


図-1 解析領域の水平面内におけるメッシュ分割

|        |    |                  |
|--------|----|------------------|
| 1 正会員  | 工修 | 日鉄トピーブリッジ(株)     |
| 2 正会員  | 工博 | 愛媛大学大学院准教授理工学研究科 |
| 3 正会員  | 工博 | 大阪大学大学院教授工学研究科   |
| 4 学生会員 |    | 大阪大学大学院工学研究科     |

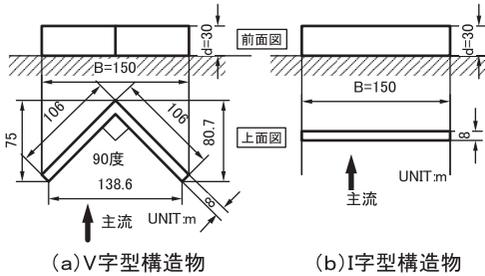


図-2 湧昇流構造物

moduleを用いた。具体的には、構造体のまわりで最も小さな $\Delta x = \Delta y = 2.67\text{m}$ を用い、遠ざかると粗くして、順次、8m, 24m, 72mとした。この際、鉛直方向のメッシュ分割( $\Delta z$ )は、共通して4mと一定にした。また、時間ステップは1sとした。

解析領域は長さ5,904m, 幅3,312m, 水深200mの水路であり、水路の中央部、 $x=750\text{m}$ ,  $y=1,700\text{m}$ を中心とする位置に図-2に示す2種類の構造体をそれぞれ設置した場合の流況について数値実験を行った。湧昇効果に及ぼす構造体の寸法を検討するため、高さdと左右幅Bを各種に変化させているが、以下の流体力の検討では図-2に示す諸元の構造体を基準にして、主に左右幅を増減したときの影響を紹介する。

流れ場の境界条件については構造体の左側境界が流入口であり、ここでは流速を設定した。右側境界の流出口では水位を設定して、計算期間中にわたり一定水位となるようにした。海底では nonslip 条件を設定し、海底摩擦を考慮して粗度長を0.05mとした。側面はスリップ条件、上面は自由水面とした。

流入口での主流速は、現地の観測データを参照して、主に0.3m/sとしたが、安定性の検討も行えるように、より大きな0.7m/sについても対象とした。初期条件は、すべての解析領域で流速0の静止流体としているが、流入口で流速を急に上げるとショック波が発生する。このことを避けるため、20分間はウォームアップ時間とし、線形的に主流速まで増加させるようにした。

(2) 数値シミュレーションによる湧昇効果の概要

初期状態において底面から厚さ12mの領域に無次元濃度1の物質を敷き詰め、また左右の境界でも同様の濃度値を解析時間中与え、これをトレーサー物質として可視化することで湧昇流の発生の状況を考察した。このときトレーサー物質の移動は移流項のみを考慮して、渦度拡散係数は0とした。

図-3および図-4にI字型およびV字型堤体の3時間経過後の低層トレーサー物質の濃度分布を示す。このとき、構造体などの諸元は図-2に示すもので、主流速は0.3m/sとしてある。トレーサー物質は海底上12mで濃度が1から0に

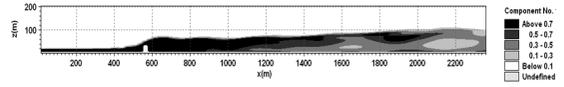


図-3 底層トレーサの湧昇状況; I字型堤体 (U=0.3m/s)

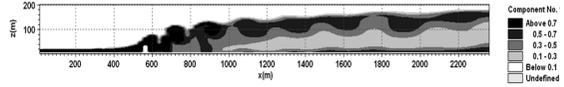


図-4 底層トレーサの湧昇状況; V字型堤体 (U=0.3m/s)

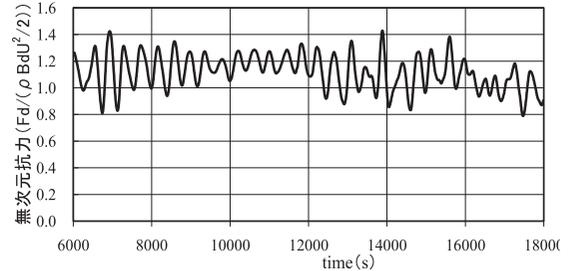


図-5 V字型堤体に作用する抗力 (U=0.7m/s, B=150m, d=30m)

階段状に変化するよう与えているので、その分布の変化から巻き上がりの状態をみる事ができる。これらの図はx軸に平行なx-z軸断面 ( $y=1716\text{m}$ ) で切った鉛直断面図で示している。

両図の比較から、V字型の巻き上げ性能は優秀であることや、周期的な濃度変動が顕著に現れることなどが確認できる。さらに堤体より下流側へ6B (=900m) の位置を検査面として、そこでの等濃度線 $c=0.1$ の海底面からの高さを巻き上げ高さ $h_v$ と定義すると、I字型およびV字型の $h_v$ はそれぞれ95mと167mでV字型は1.7倍の上昇高さを示すことなどが判明している。そして、このようにV字型堤体が湧昇効果に優れることは実験的にも確認されており、その詳細については、前報告(木田ら, 2009)を参照していただきたい。

3. 作用流体力

(1) 流体力係数

図-5は、上記の数値シミュレーション結果に基づき求めたV字型堤体への抗力の算定結果の代表例を示す。図中には、湧昇流れの定常状態が現れる100分以降の結果について示す。図中で抗力 $F_d$ は、動圧 $\rho U^2/2$ と堤体の流れ方向への射影面積 $Bd$ の積で除した無次元抗力として示す傾向にあり、これはV字型堤体を過ぎる流れにおいて図-4に見られるように渦列が形成されることによるものと考えられる。

図-6は、図-5に示すような抗力の時系列波形から、時間平均を求め、平均抗力係数 $C_d$ をI字型およびV字型堤体の両者について示す。横軸には、構造体の横幅と高さ

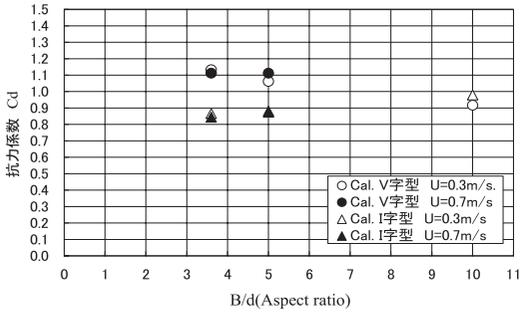


図-6 V字型およびI字型堤体の横幅・高さ比による抗力係数Cdの変化 (B=108~300m, d=30m)

の比であるB/d (aspect ratio) を示す。

この図より、B/dが4~5程度ではV字型堤体の抗力係数がI字型堤体のそれより大きくなることや、さらに扁平な構造体になると、両堤体で抗力係数に差異が見られなくなるなどが分かる。また、抗力係数に及ぼす主流速の影響は、0.7m/sまでと比較的遅い流速に対してはほとんど見られない。風荷重を想定した設計指針(土木学会編, 1973)によると、I字型堤体と類似した一辺を地に接した平板の抗力係数の推奨値は1.2である。ただし、B/dによる補正係数も提示されており、B/dが8以下では補正係数0.6~0.7を乗じることとされている。すなわち、上記のI字型堤体のCdは0.7~0.85程度が推奨値となり、風荷重を想定した結果と数値シミュレーションに基づく算定結果とはほぼ一致することが分かる。なお、今回の算定でのレイノルズ数は、堤体高さdを代表長に採ると、ほぼ $10^7 \sim 2 \times 10^7$ の範囲にあり、いわゆる限界レイノルズ数を越えた流れと推定される。

(2) 流体力の分布

図-7, 8は、それぞれI字型およびV字型堤体の没水表面で、上下流の表裏の関係位置での動圧の差 $\Delta p$ の空間分布をコンター図にて示す。すなわち、このコンター図を参照することで、構造体に作用する局部流体力の分布を

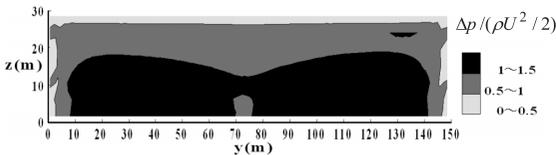


図-7 I字型堤体の前後壁の圧力差(差圧 $\Delta p$ )のコンター図 (速度水頭分の動圧で無次元化, B/d=5, U=0.7m/s)

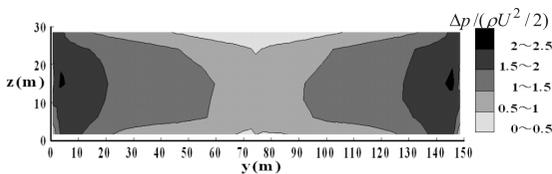


図-8 V字型堤体の前後壁の圧力差(差圧 $\Delta p$ )のコンター図 (速度水頭分の動圧で無次元化, B/d=5, U=0.7m/s)

知ることができる。

これらの図から、I字型堤体では、堤体下部に潜り込む馬蹄形渦のような流れが現れるためか、前後壁の圧力差は構造体の下半分で大きく、上半分と左右端では小さくなる傾向にある。一方、V字型堤体の前後壁の圧力差は、流速が大きくなるV字の収束部で低く、両翼に広がるほど高くなるなど、構造体による差異が見られる。そして、このような差異は、V字型堤体がI字型堤体より湧昇流が生じやすいことと密接に関係しているものと推測される。

4. 実験装置および実験方法

(1) 実験水槽

実験に用いた水槽は、図-9に示す上流端に整流板を設けた幅1.5m、深さ1.1m、長さ22.7mの2次元循環式開水路である。この水路は、長手方向の両端部を除き、鋼製板により上下に分離されており、上部水路の両端部付近に設置されたプロペラモータ2機を駆動することで、一方向流が発生できるようにしてある。このプロペラモータはプロペラの回転数を無段階で調整でき、最大0.6m/sの流速を発生させることができる。構造物は上部水路でそのほぼ中央部に設置した。このとき主流速は、電磁流速計を模型堤体の上流側ほぼ1mの位置と模型の真上でその上端と水面との中間点の2カ所に設置して計測した。

(2) 模型堤体および面圧計の配置

模型堤体には、やはりI字型およびV字型堤体の2種類を用いた。図-10は、代表例としてV字型堤体の模型の水路への設置状況とその片側の構成板に取り付けた面圧計の配置状況を示す。想定した模型の縮尺は、1/333である。面圧計には、三計エンジニアリング社製の直径10mmの超小型圧力センサーを計20台用いて、構成板の裏表で一対となるように設置して局部的な流体力の分布が測定できるようにした。

また、I字型堤体の模型についても、同様に計20台の面圧計を設置した。そして、模型堤体に作用する流体力

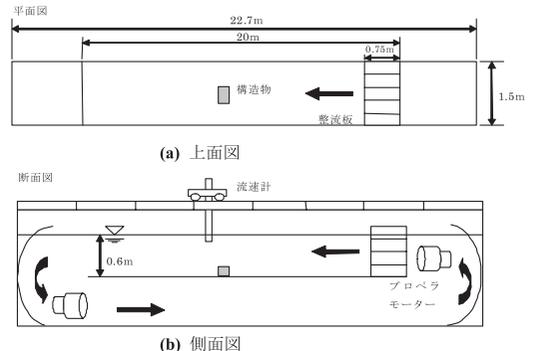


図-9 実験に用いた上下回流式の開水路

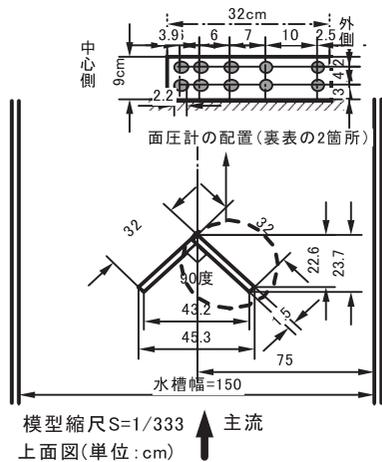


図-10 V字型模型と面圧計の配置 (B/d=5)

表-1 実験条件と現地換算量

| 模型(水深60cm) |          | 現地換算量(水深200m) |          |
|------------|----------|---------------|----------|
| U(cm/s)    | Re数      | U(m/s)        | Re数      |
| 13.1       | 9.10E+03 | 2.4           | 5.54E+07 |
| 16.3       | 1.13E+04 | 3.0           | 6.86E+07 |
| 20.8       | 1.44E+04 | 3.8           | 8.75E+07 |
| 25.1       | 1.74E+04 | 4.6           | 1.06E+08 |
| 28.4       | 1.97E+04 | 5.2           | 1.20E+08 |

は、構成板の裏表の差圧を求めた後に、面圧計が代表する面積を乗じて加算することで近似的に求めた。

(3) 実験条件

実験で用いた水理条件は、原則的に現地量をフルードの相似則により模型化した条件とした。ただし、予備実験の段階で、上記した現地を想定した数値シミュレーションに用いた流速(例えば現地で0.7m/s)を想定した模型実験では、水流による動圧の変化が圧力センサーの測定精度を下回り、正確な測定が難しいことが判明した。このため、模型の主流速としては、表-1に示すように、現地量を大幅に上回る値を用いて、抗力係数の同定という観点から検討を進めた。表中には、想定した流速条件下でのレイノルズ数(Re数;堤体高さdが代表長)についても併せ示してあるが、現地量は模型量の6000倍程度と非常に大きな相違があることに注意する必要がある。

5. 潮流力の実験結果

図-11は、I字型およびV字型の模型堤体の抗力係数CdをRe数の変化で示す。この図から、先に示した図-6の算定結果と同様に、V字型堤体のCdがI字型のそれよりも大きくなるのが分かる。ただし、両模型のCdは、現地を想定した場合に比較して、0.2~0.3程度増加することが認められる。この理由としては、やはり模型と原型の

レイノルズ数の相違による流況の相違が挙げられ、特に構造体の背後域での剥離流れの挙動の相違によるものと推定される。

このことを検証するため、本研究では、模型スケールのV字型堤体を対象にして、数値シミュレーションを実施してみた。この算定では、上記の2で紹介した数値算定の諸条件を長さのスケールで1/333に縮尺したものを概略的に使用して、離散化条件などは同一に保持した。例えば、構造体の寸法は、1/333に縮小してあるが、没水表面を表すメッシュ数は前出の現地想定の場合と同じにしてある。

この数値シミュレーションに基づくV字型模型堤体の抗力係数の算定結果を図-11中に併せ示す。このときの算定結果と実験結果との対応は良好であり、現地を想定した算定結果との相違はやはり模型と原型のレイノルズ数の相違によるものと判定される。今後、模型と原型の構造体まわりの流れの相違の検討など、さらに詳細な検討を進めていきたい。

図-12は、図-8の実験結果に対応するもので、V字型堤体の右翼に沿って裏表に配置した面圧計による差圧の分布の実験結果を示す。差圧Δpは、速度水頭に対応する動圧で無次元化してある。この図から、差圧Δpは、図-8の算定結果と同様に、V字の中心から外側に向かって増加する傾向にあり、両者の傾向はほぼ一致することが確認できる。

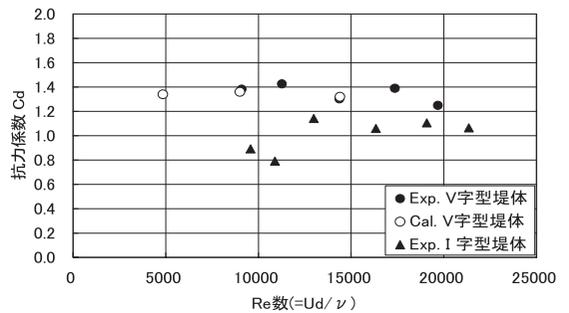


図-11 各堤体の抗力係数 (B/d=5)

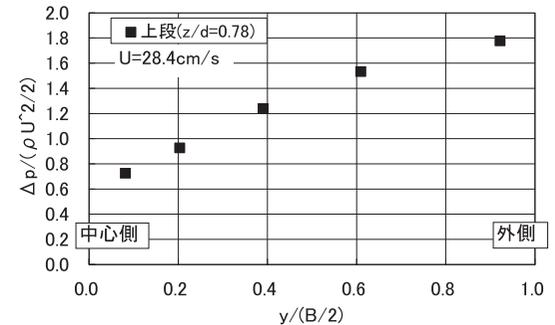


図-12 V字型堤体の右翼に沿う前後壁の圧力差の分布 (U=28.4cm/s, B/d=5, 上段側)

6. 作用波力の推定と潮流力との関係

湧昇流構造物は、大波浪の作用を受けやすい外海域に設置されるのが一般であり、ここでは、V字型とI字型堤体を対象にして、3次元グリーン関数法 (Garrison, 1978) による波力の算定を各種の設置水深の条件を採用して行ってみた。

図-13は、設置水深200mの時の水平波力の算定結果を無次元波力強度で示す。構造体は、図-2に示すものである。この図から、長周期の条件になると波力強度が増大することや、波力の空間的な位相差がほとんどないI字型堤体で波力強度が大きくなるのが分かる。

図-14は、湧昇効果に優れるV字型堤体の水平波力を各

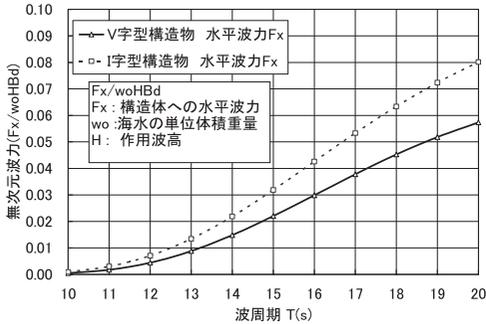


図-13 各堤体の水平波力強度 (B/d=5, d=30m, h=200m, 直角入射)

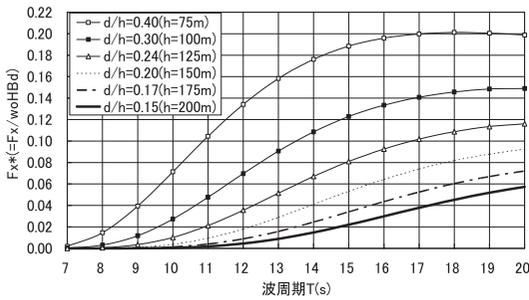


図-14 V字型堤体に作用する水平波力Fxの設置水深と波周期による変化 (d=30m, B=150m, 直角入射)

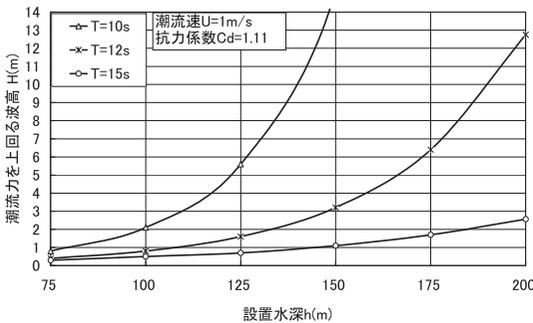


図-15 各設置水深で水平波力が潮流力を上回る波高条件 (d=30m, B=150m, U=1m/s, Cd=1.11)

設置水深および波周期の条件に対して示す。この図より、作用波の周期Tが10s~20sのうねり性の波に対しては、設置水深hが150mより浅くなると、水平波力は急激に増加する傾向にあることが分かる。

図-15は、各設置水深において水平波力が潮流力を上回るための波高値をうねり性の波周期 (T=10,12,15s) に対して示す。このとき、想定した潮流速はU=1m/sである。また、抗力係数は、図-6の結果を参照してCd=1.11と仮定した。この図より、T=15sの条件では、設置水深が200m程度と比較的深くても、潮流力を上回る限界波高は2.5m程度とかなり低く、設計外力として波力も重要になることが確認できる。

7. 結語

- (1) 現地を想定したV字型堤体の抗力係数Cdの算定値は1.1程度であり、I字型堤体のそれより大きくなる。
- (2) 模型スケールでのV字型堤体のCdの算定値は、縮尺効果によるものか原型のそれよりも2割程度大きくなることや実験によるCdの測定値とほぼ一致する。
- (3) V字型とI字型の湧昇流構造体に作用する波力は、長周期の条件になるほど波力強度が増大することや、波力の空間的な位相差が少ないI字型堤体で波力強度が大きくなる。
- (4) 湧昇流構造体に作用する波力は、設置水深が200m程度と比較的深い場合でも、うねり性の波が作用する海域では、潮流力を上回る波力が作用する可能性が高く、安定性を検討する際に注意する必要がある。

参考文献

浅枝 隆・中井正則・玉井信行・堀川清司 (1990) : V字形構造物による上昇流, 土木学会論文集, 423/II-14号, pp.83-90.  
 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実験的研究, 海岸工学論文集, 39巻, pp.896-900.  
 木田英之・井内国光・中村孝幸 (2008) : 3次元数値シミュレーションに基づく大水深海域での湧昇流生成構造物の開発, 海洋開発論文集, 24巻, pp.399-404.  
 木田英之・井内国光・中村孝幸・出口一郎 (2009) : 大水深海域での直立壁構造物による湧昇流, 海洋開発論文集, 25巻, pp.1377-1382.  
 土木学会編 (1973) : 海洋鋼構造物設計指針 (案) 解説, pp.16-19.  
 橋本 牧・浜崎宏正 (2007) : 沖合大水深海域を対象とした漁場整備の推進について, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.1-5.  
 DHI(2005): MIKE 3, Coastal Hydraulics and Oceanography Hydrodynamic Module Scientific Documentation, Danish Hydraulic Institute (DHI).  
 Garrison, C. J.(1978): Hydrodynamic loading of large offshore structures - Three dimensional source distribution methods. In Numerical Methods in Offshore Engineering, John Wiley, pp.97-140.