

3次元数値波動水槽CADMAS-SURF/3Dへの 造波ソースの導入とその妥当性

Introduction of Wave Generation Source to 3D Numerical Wave Tank “CADMAS-SURF/3D” and Its Validity

山野貴司¹・有川太郎²・川崎浩司³・小竹康夫⁴・秋山 実⁵

Takashi YAMANO, Taro ARIKAWA, Koji KAWASAKI, Yasuo KOTAKE and Minoru AKIYAMA

The purpose of the present study is to newly propose a numerical wave tank by introducing a wave generation source into a CADMAS-SURF/3D and verify the validity of the numerical wave tank. The numerical experiments with the change of the coefficient α , which is related to the strength and extensity of wave generation source, revealed that the most appropriate waves are able to be generated in the case of $\alpha=2$. The applicability of the proposed numerical wave tank was confirmed by applying it to oblique wave generation problems and comparing the numerical results with the results of the laboratory experiment on wave deformation under Tsunami action.

1. はじめに

近年、水理現象を高精度に再現できる数値波動水槽の開発は目覚しく、従来の断面2次元計算に加えて、実用的な3次元プログラムとして、これまで牛島ら(2008)の3次元自由水面流れによる数値解法、川崎ら(2007)の3次元固気液多相乱流数値モデル、後藤ら(2009)の圧力勾配モデルを有するCMPS法、渡部ら(2007)のLarge Eddy SimulationとStochasticモデルを連成したモデル、廉ら(2008)の体積力型埋め込み境界法等数々の手法が提案されている。しかし、高精度計算が可能な反面、計算時間が膨大になるといった課題も存在する。本研究で対象とするVOF法を用いた数値波動水槽CADMAS-SURFの断面2次元計算用プログラム(CADMAS-SURF/2D、以後C-S/2Dと呼ぶ)は、海岸構造物の耐波設計に役立てるまでの数値モデルを開発することを目的として組織された「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会(2001)」で開発され、構造物からの反射波が存在する波浪場を効率よく計算することを目的として、造波ソース(Brorsen・Larsen, 1987)による造波方法が採用されている。一方、3次元的な現象である斜め造波や多方向波にこの手法を拡張するためには、湧き出しの拡がりに依存する係数の取扱い等の課題が存在する。

そこで本研究では、3次元数値波動水槽CADMAS-SURF/3D(以後C-S/3Dと呼ぶ)(有川ら, 2007)に造波ソースを導入し、パラメタスタディによる結果から推奨される係数を求める。そして、斜め造波の性能確認計算および平面水槽実験結果との比較検討計算により、計算手法の妥当性を検証した。

2. 基礎方程式

C-S/3Dの基礎方程式には、3次元非圧縮粘性流体を対象とした連続方程式およびNavier-Stokes方程式をポラースモデルに基づいて拡張した式(1)~(4)を採用している。

・連続式

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_\rho \dots\dots\dots (1)$$

・Navier-Stokes 方程式

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v u}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u v}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v v}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w v}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - \gamma_v D_y v - R_y + \gamma_v S_v \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

1 正会員 修(工) 東洋建設株式会社 総合技術研究所 鳴尾研究所
2 正会員 博(工) 独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部
3 正会員 博(工) 名古屋大学准教授大学院工学研究所 社会基盤工学専攻
4 正会員 博(工) 東洋建設株式会社 総合技術研究所 鳴尾研究所
5 修(理) みずほ情報総研株式会社

$$\begin{aligned} & \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v w}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \gamma_v D_z w - R_z + \gamma_v S_w - \frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho} \dots (4) \end{aligned}$$

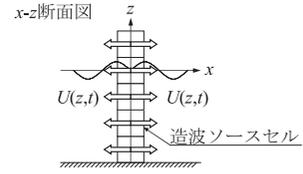


図-1 係数 α の設定 ($\alpha=2$)

ここで、 t ：時間、 u, v, w ： x, y, z 方向の流速成分、 ρ ：基準密度、 ρ^* ：浮力を考慮する密度、 p ：圧力、 v_e ：分子動粘性係数 ν と渦動粘性係数 ν_t の和、 g ：重力加速度、 γ_v ：空隙率、 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ ： x, y, z 方向の面積透過率、 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ は慣性力に関連した係数（数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会，2001）である。また、 D_x, D_y, D_z はエネルギー減衰帯の係数、 R_x, R_y, R_z は多孔質体からの抵抗力、 S_p, S_u, S_v, S_w は後述する造波ソースのためのソース項である。

3. 造波ソースの導入

(1) 基礎方程式内のソース項

指定したセルの中心位置 $(x, y) = (x_s, y_s)$ に造波のためのソースを設定する。造波ソースは流速や水位を直接指定する方法ではないため、構造物や斜面等からの反射波を通過させることが可能である。以下では式(1)～(4)のソース項を示す。

$$S_p = q(z, t) \dots (5)$$

$$S_u = uq(z, t) \dots (6)$$

$$S_v = vq(z, t) \dots (7)$$

$$S_w = wq(z, t) + \frac{\nu}{3} \frac{\partial q(z, t)}{\partial z} \dots (8)$$

ここで、 $q(z, t)$ は $(x, y) = (x_s, y_s)$ での格子間隔を $\Delta x_s, \Delta y_s$ として次式で表される。

・ x 方向に造波させる場合

$$q(z, t) = \frac{\alpha U(z, t)}{\Delta x_s} \dots (9)$$

・ y 方向に造波させる場合

$$q(z, t) = \frac{\alpha U(z, t)}{\Delta y_s} \dots (10)$$

$q(z, t)$ は x - y 平面上の造波ソース位置 $(x, y) = (x_s, y_s)$ でのみ造波方向によって式 (9), (10) の値を持ち、それ以外では0である。式中の $U(z, t)$ は造波用流速であり、係数 α は湧き出しの拡がる方向に依存する係数で、図-1に示すように、2次元の計算では波が水平方向 x 軸の正負方向に進行することから一般に $\alpha=2$ としている（岩田ら，1995）。3次元計算では水平面内（ x 軸、 y 軸）に波が拡がるため、 α の適正な設定の検討が必要である。

(2) 係数 α の検討

3次元計算では、造波ソースを任意の位置に配置する

ことが可能であるが、ここでは問題を単純化したケースとして、造波ソースを一列に配置した場合を考える。この時、隣り合う造波ソースセルにおいて、相対する流速が同じ大きさで逆向きに発生することが想定される。その結果互いの流速が打ち消し合うこととなり、湧き出しの拡がる方向は造波方向の正負2方向のみを考慮すればよいと仮定される。そこで、係数 α を変化させ、理論値との比較により α の推奨値を評価するとともに、C-S/2Dとの比較により推奨値の妥当性を検討した。

a) 係数 α の違いによる比較

C-S/3Dにおいて、 α の値による検討に使用した計算条件を表-1に示す。また、計算領域を図-2に示す。造波ソースは y 方向に一列配置とし、波は x 方向に伝播することとした。図中には y 方向中心位置 ($y/L=5.0$) での2.0L間隔の測点Pt.1, Pt.2, Pt.3を記している。検討対象とする係数 α については、造波ソースセルのすべての境界に流速を与えることを考えた場合の $\alpha=4$ と、隣接する造波ソースセルの相対する流速が打ち消し合うことを想定した $\alpha=2$ を基準とし、 $\alpha=1\sim 4$ で0.5間隔の全7ケースを対象とした。

図-3に、 $\alpha=2$ の場合におけるPt.1～Pt.3の水位時系列を示す。 $\alpha=2$ の場合の波は良好に伝播されていることが確認でき、各測点の水位変動もよく一致している。図-4に、Pt.1における係数 α と平均波高の関係を示す。平均波高は、造波開始から波が安定したと見られる $t/T=12.0\sim$

表-1 計算条件 (α の検討)

波高 H (m)	0.1	
周期 T (s)	2.0	
波長 L (m)	5.21	
水深 h (m)	1.0	
水平格子 Δx (m)	0.40	$\Delta x/L=1/13$
水平格子 Δy (m)	0.40	$\Delta y/L=1/13$
鉛直格子 Δz (m)	0.04	$\Delta z/h=1/25$
時間間隔 dt (s)	AUTO	
計算時間	40.0s	20.0T
領域長	10.0L×10.0L	
造波ソース幅	$y=10.0L$	一列配置
減衰帯幅	1.0L	
係数 α	1～4	0.5間隔

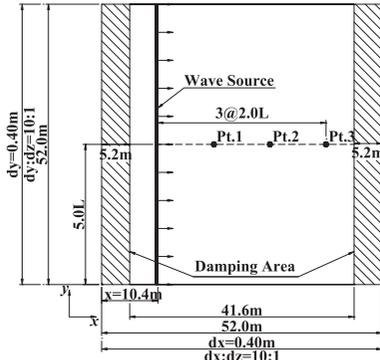


図-2 計算領域 (α の検討)

20.0の1波毎の波高の平均値とした。図より、 α の値に応じて平均波高が高くなる様子が分かり、 $\alpha=2$ の場合に設定波高 $H=0.1m$ とよく合っている。なお、 $\alpha=4$ の場合は水位変動が大きく、計算が発散した。図-5に $\alpha=2$ の場合の平均波高分布の比較を示す。平面的に見ても全体的に $\alpha=2$ は精度がよいことが分かる。これらの結果から、この波浪条件においては $\alpha=2$ が妥当な値であると判断された。なお、 $\alpha=2$ において造波位置から離れるにつれて徐々に波高が減少しているのは、計算領域と有効造波領域の問題が考えられる。

図-6に $\alpha=2$ において、水面付近 ($z/H=10.0$)、 x - y 平面の造波ソース付近 ($y/L=5.0$ 付近) の位置での波の峰が通過する際の流速ベクトル図を示す。図中の数値は y 方向流速を表している。図より、造波ソースセルから水平正負2方向 ($\pm x$ 方向) に同じ大きさで x 方向流速が発生している様子がわかる。また、ベクトルの向きは x 方向に対して平行であり、各セルにおいて y 方向流速はほぼ0である。造波ソースセルにおいても、隣り合うセル同士で y 方向の流速は発生していないことが確認され、この結果から、相対する y 方向流速が打ち消し合うことにより流速が発生していないことが確認された。

b) 2次元との比較による検討

次に、係数 α を2と設定した場合のC-S/2Dとの比較を行った。C-S/2Dの計算条件を表-2に示し、計算領域の断面図を図-7に示す。波浪条件は波形勾配 $H/L=0.01 \sim 0.04$ とし、周期、水深を一定として波高を変化させた。また、C-S/3Dは表-1の計算条件で計算を行った。

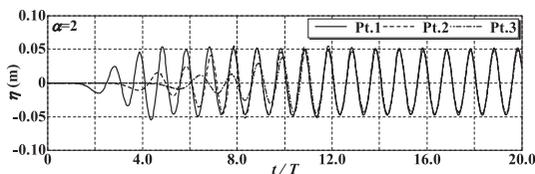


図-3 水位時系列 ($\alpha=2$)

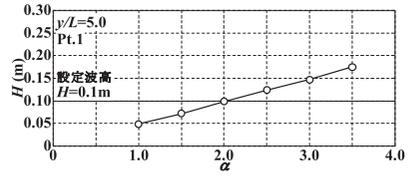


図-4 係数 α と平均波高の関係

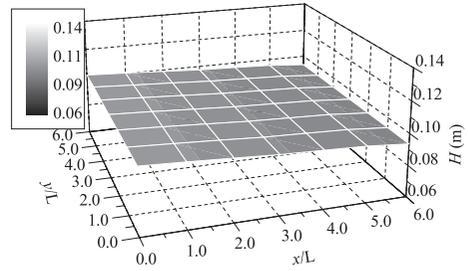


図-5 平均波高分布 (x - y 平面)

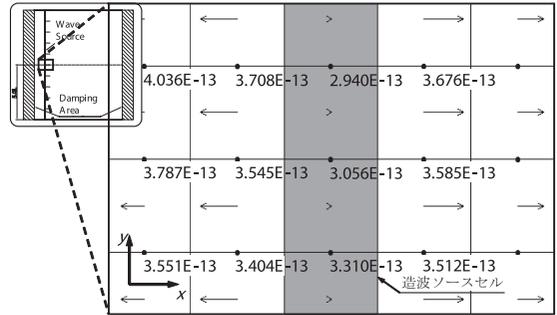


図-6 流速ベクトル

図-8に $x/L=5.0$ (C-S/3Dにおいては $y/L=5.0$) の位置における波形勾配 $H/L=0.01 \sim 0.04$ の平均波高の比較を示す。いずれの H/L においてもよく一致している。

これらの検討により、係数 α は2が妥当であると判断

表-2 計算条件 (2Dと3Dの比較)

波高 H (m)	0.052	$H/L=0.01$
	0.104	$H/L=0.02$
	0.156	$H/L=0.03$
	0.208	$H/L=0.04$
周期 T (s)	2.0	
波長 L (m)	5.21	
水深 h (m)	1.0	
水平格子 dx (m)	0.08	$\Delta x/L=1/65$
鉛直格子 dz (m)	0.02	$\Delta z/h=1/50$
時間間隔 dt (s)	AUTO	
計算時間	40.0s	20.0T
領域長	9.0L	
減衰帯幅	1.0L	

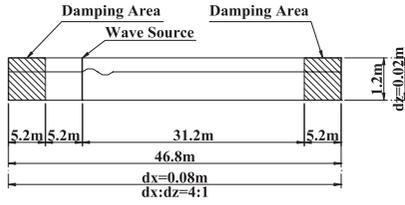


図-7 計算領域 (C-S/2D)

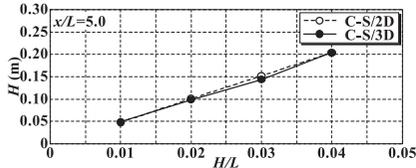


図-8 平均波高

された。なお、造波ソースが端部を有する場合の端部での α の設定については今後の課題である。

4. 斜め造波の性能確認

造波ソースを用いた斜め造波の性能確認計算を行った。計算条件は表-3に示す通りである。また計算領域を図-9に示す。造波ソースセルの配置をL字型とし、その幅は x, y 方向ともに $5.0L$ とした。図中には造波ソースの角部より対角線上 $\sqrt{2}L$ 間隔の測点Pt.1~Pt.6を記している。波の入射角度は、 x 方向を 0° として $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の3ケースとし、係数 α は2とした。また、波向きと各造波ソースセルの相対位置の関係から位相差を求め、その位相差を考慮した流速 U を与えることにより、斜め造波を行った。なお、造波ソースの角部(x 方向と y 方向の造波ソースが交差する部分)は、造波ソースセルを設定し

表-3 計算条件 (斜め造波の検討)

波高 H (m)	0.1	
周期 T (s)	2.0	
波長 L (m)	5.21	
水深 h (m)	1.0	
入射角 θ (deg.)	30.0 45.0 60.0	斜め造波 斜め造波 斜め造波
水平格子 dx (m)	0.40	$\Delta x/L=1/13$
水平格子 dy (m)	0.40	$\Delta y/L=1/13$
鉛直格子 dz (m)	0.04	$\Delta z/h=1/25$
時間間隔 dt (s)	AUTO	
計算時間	40.0s	20 T
領域長	10L×10L	
造波ソース幅	$x=5L, y=5L$	L字型配置
減衰帯幅	1.0L	
係数 α	2	

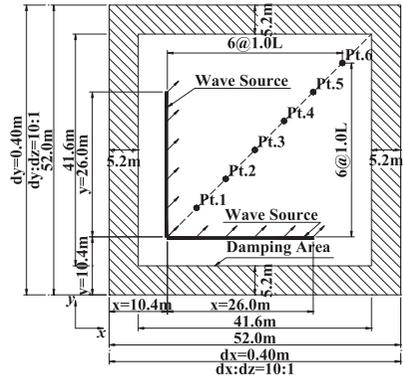


図-9 計算領域 (斜め造波の検討)

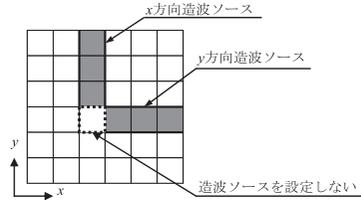


図-10 造波ソース角部の処理

ないこととした (図-10参照)。

図-11に各入射角における平均波高を示す。各測点の平均波高は全体的には概ね良好である。ただし、Pt.6の位置において、入射角 30° および 60° の場合には平均波高が若干高く、 45° の場合には低くなっている。これは、造波ソース幅を $5.0L$ と設定したことにより、 x, y 各方向において造波ソースの幅に対して外側となる位置では所定の波が発生しないことが考えられ、この計算条件での有効造波領域は $5.0L \times 5.0L$ 程度の矩形領域と考えるのが妥当である。有効造波領域は造波ソース幅やその配置位置に依存することが考えられ、これらの検討については今後の課題である。

次に、 $(x/L, y/L)=(1.0, 1.0) \sim (5.0, 5.0)$ の矩形範囲内での $1.0L$ 毎の格子点における水面付近での x, y 方向流速の関係を図-12に示す。図中の実線は各入射角における最小二乗直線を示し、その他の直線はそれぞれの波向きを表す直線である。それぞれの入射角における流速の向き

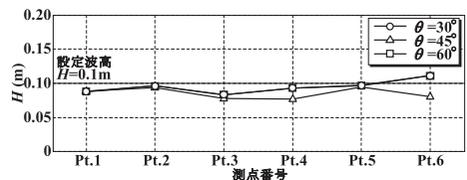


図-11 平均波高

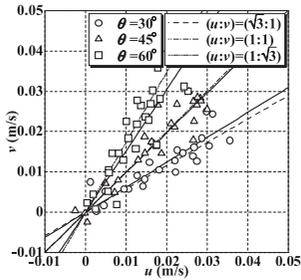


図-12 x方向流速とy方向流速の関係

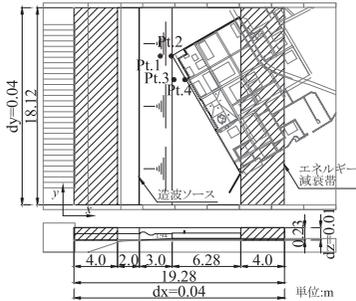


図-13 実験模型配置と計算領域

は概ね良好な一致を示しており、設定通りの入射角で造波できていることが確認された。

5. 実務適用可能性の検討

水理実験との比較により造波ソースの有用性を確認するため、擬似津波による平面水槽模型実験(小竹ら, 2007)の再現計算を行った。図-13に実験の模型配置と再現計算領域を示す。実験の擬似津波は周期20秒の規則波を用いており、計算では入力波形として模型沖側のモニタ波高計で測定された水位の時間変動データのうち、静水状態からの第1波を用いた。

図-14に、各測点での水位変動の比較を示す。いずれも津波の到達から最大水位までの水位上昇は極めて再現性が良好である。ただし、水位の低下時に位相のずれが確認された。これは、模型背後の境界および側方境界からの反射波による影響が考えられる(嶋原ら, 2009)。本計算では、模型背後に幅4mのエネルギー減衰帯を設定し、側方はスリップ不透過条件のみである。これらの境界条件を適切に設定することで再現精度が向上することが考えられるが、今後の課題である。

6. 結論

本研究では、斜め造波や多方向波の造波が可能となる造波ソースを3次元数値波動水槽CADMAS-SURF/3Dに導入し、造波の湧き出しの拡がりに依存する係数 α の検討を行い、 $\alpha=2$ が妥当な数値であることがわかった。ま

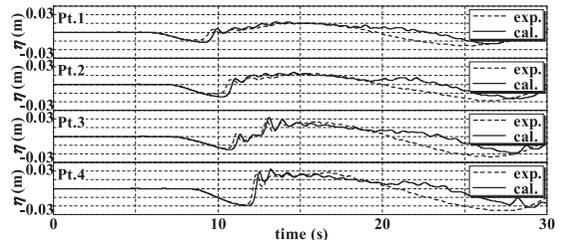


図-14 水位変動比較

た、斜め造波および平面水槽実験の再現計算を行い、計算結果の妥当性を確認した。

なお、造波ソースの端部の取扱いや、造波ソースの配置方法等による有効造波領域の検討については今後の課題である。

謝辞：本研究におけるCADMAS-SURF/3Dにおいては、数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会(事務局：(財)沿岸技術研究センター)の活動の一環として得られた結果を取り纏めたものであり、関係各位に謝意を表します。

参考文献

有川太郎・山野貴司・秋山 実 (2007)：数値波動水槽における碎波変形計算の高精度化, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 71-75.
 岩田好一郎・川崎浩司・金 度三 (1995)：水中構造物による碎波の数値解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 781-785.
 牛島 省・福谷 彰・牧野統師 (2008)：3次元自由水面流中の接触を伴う任意形状体運動に対する数値解法, 土木学会論文集B, Vol.64No.2, pp. 128-138.
 川崎浩司・袴田充哉 (2007)：3次元固気液多相乱流数値モデルDOLPHIN-3Dの開発と波作用下での漂流物の動的解析, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 31-35.
 小竹康夫・荒木進歩・松村章子 (2007)：構造物の平面配置が沿岸部での津波挙動に与える影響について, 海洋開発論文集, 第23巻, pp. 105-110.
 後藤仁志・Khayyer Abbas・五十里洋行・堀 智恵実 (2009)：領域分割の最適化による3次元CMPS法の並列計算効率の改善, 海岸工学論文集, 第56巻, pp. 41-45.
 嶋原良典・小竹康夫・岩瀬浩之・藤間功司 (2009)：実務的手法による津波波力の評価－直立構造物に作用する波力の数値計算－, 地震工学論文集, 第30巻, pp. 905-913.
 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会 (2001)：数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー, No.12, 296p.
 廉 慶善・中村友昭・宇佐美敦裕・水谷法美 (2008)：流体・構造連成解析による漂流コンテナの衝突力の算定に関する研究, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 281-285.
 渡部靖憲・宮木康裕・猿渡重由未・田中康文・大塚淳一・佐伯 浩 (2007)：LES-Stochastic Two-Way Modelと波動境界層内の混相乱流, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 36-40.
 Brorsen, M. and J. Larsen (1987)：Source generation of non-linear gravity waves with boundary integral equation method, Coastal Eng., Vol.11, pp. 93-113.