

# 数値波動水槽と構造物変形計算との連成計算手法に関する研究

## Development of Numerical Wave Tank Coupled with Structure Analysis Based on FEM

有川太郎<sup>1</sup>・浜口一博<sup>2</sup>・北川和士<sup>3</sup>・鈴木智憲<sup>4</sup>

Taro ARIKAWA, Kazuhiro HAMAGUCHI, Kazushi KITAGAWA and Tomonori SUZUKI

This report describes development of the numerical wave tank, called CADMAS-SURF/3D, coupled with the structure analysis based on FEM. The objective of this research is to clarify the stability of this numerical system. In this system, FEM receives the pressure from CADMAS, on the other hand CADMAS uses the porosity changed from displacements of structures. At first, wave paddle model was tried for confirming the stability of variation of porosity. The results of numerical waves were good agreement with the results of experiments. Then, coupling model was tested by using the wall and sea wall model. Through these results, the stability of this numerical system was verified.

### 1. はじめに

港湾構造物の設計基準の変更により、自由度の高い設計が可能となる一方で、その自由度に対応するために、より高度な設計ツールが必要となる。その要求を満たすツールの一つの候補が数値水槽であり、これまでも多くの研究がなされ、実務への適用もなされつつある。そのようななか、構造物の破壊・変形をより精度よく予測するためには、波の状況だけでなく構造物の物性や状態が重要なのは言うまでもない。

そのため、近年では固液もしくは、固気液モデルが多数提案されている。考え方としては大きく分けると2つあり、統一した式を用いた方法（たとえば、粒子法（Abbas and 後藤, 2008））と異なる方程式を連成させる方法（陸田ら, 2008）である。FEMと流体解析の連成計算に関する研究としては、橋本ら（2006）があり、流れのなかの連成解析を行っている。

有川・山野（2008）は、数値水槽CADMAS-SURF/3Dの開発を行い、その実務性は2次元モデル（沿岸センター, 2001）で証明されている。そこで本研究では、CADMAS-SURF/3DとFEMによる構造物の変形解析手法との連成手法の提案を行い、その安定性について検討する。

### 2. 基礎方程式および連成計算の方法

流体側は、非圧縮の3次元Navier-Stokesによる数値波動水槽（CADMAS-SURF/3D）を用いている。詳細な流体計算スキームは有川・山野（2008）などに詳しい。

#### (1) 基礎方程式

##### a) 流体側（CADMAS-SURF/3D）

流体側では構造格子を用いるものの、セルを完全に埋めない障害物は空隙率により表現する。その空隙率が時間的に変化する。連続式ならびに運動方程式は式（1）、（2）のようになる。違いをわかりやすく表現するため、面透過率・慣性力係数を1.0、造波ソース項、粘性項、エネルギー減衰項、抗力項を無視すると、

$$\frac{\partial \gamma_v}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_j v_j}{\partial x_j} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \gamma_v g_i \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $v_i$ は*i*方向の流速、 $t$ は時間、 $p$ は圧力、 $\rho$ は密度、 $g_i$ は*i*方向の重力加速度、 $i, j$ は3成分とする。これをSMAC法により解く。

##### b) 構造側（FEM/3D）

構造物（RC、岩盤、土質など）に動的外力が作用する場合の運動方程式を、応力テンソルを用いて表すと次式のような平衡方程式で表現される。

$$\rho_s \frac{\partial^2 u_{ij}}{\partial t^2} = \sigma_{ij,j} + \rho_s \ddot{a} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\sigma_{ij}$ は応力テンソル、 $\rho_s$ は質量密度、 $\ddot{a}$ は外力加速度、 $u_{ij}$ は変位である。それに対して適切な境界条件を用い、仮想変位により運動方程式を導くと、

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f_s \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで、 $M$ は構造物の質量行列、 $C$ は減衰行列、 $K$ は構造物の剛性行列、 $f_s$ は構造物に作用する外力ベクトル、 $u, \dot{u}, \ddot{u}$ は構造物の変位、速度、加速度である。そのうえで、有限要素法を用いて離散化する。構造物の構形式などは、本論文の議論には影響を与えないため、詳細については紙面の関係から省略する。時間発展には、Newmark  $\beta$ 法を用いた。

1 正会員 博(工) (独) 港湾空港技術研究所  
2 (株) 計算力学研究センター  
3 (株) 計算力学研究センター  
4 (独) 港湾空港技術研究所

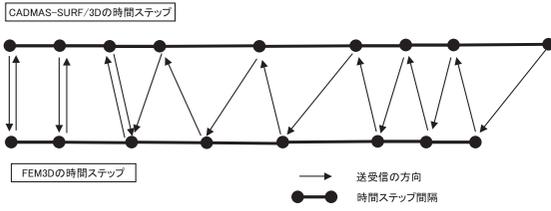


図-1 CADMAS-SURF/3DとFEM/3Dの送受信のタイミング

(2) 連成計算の方法

双方連成計算では、CADMAS-SURF/3DからFEM/3Dへは圧力を、FEM/3DからCADMAS-SURF/3Dへは空隙率を送信し、それぞれ受け取った値を処理して計算ステップを進めるものとする。

CADMAS-SURF/3DとFEM/3Dの計算時間間隔は物理的な現象に依存して個々に独立した計算時間間隔にする必要がある。このため、両者の送受信のタイミングは、相手の時刻が自分の時刻と同じか先に進んだ状態までは受信のみを行い、同じか先に進んだ時点で自分の現時刻での状態を補間し、次のステップの計算を行うようにした。ステップを進めても相手の時刻より先に進むまでは送信のみを行い、次のステップに進む(図-1参照)。FEM/3D側への力の受け渡しは、構造物の表面中心点における流体セルを検索し、そのセルの圧力を用いFEM表面を構成する節点力の評価とした。

(3) スパイクノイズ対策

本計算手法を用いて流体と構造物の連成計算を行った際、流体側の計算でセルが流体セル→障害物セル、または障害物セル→流体セルと変化する場合や、流体セル内の空隙率が急激に変化する場合には、大きなスパイク状の圧力が発生する場合がある。

この原因は、連続式(1)と運動方程式(2)から導かれるポアソン方程式のなかに $\partial \gamma_v / \partial t$ が含まれることにあると考えられる。

そこで、時間ステップごとにセル中に含まれる構造物の体積を正確に表現すること、および、ステップごとのサブグループで空隙率の変化量を平均化することとした。具体的には構造物の体積について、構造物要素は、6面体、5面体、4面体が混在するものとし、6面体は12個の4面体、5面体は8個の4面体に分割し、任意の4面体が単位格子内に含まれる割合を計算した。

3. 造波板モデルにおける検証

本章では、CADMAS-SURF/3D単体での構造障害物の変位処理の妥当性について検証する。ピストン型造波板により水平方向の動きを、フラップ型造波板により斜め方向の動きにおける安定性を確認する。

(1) ピストン型造波板を用いた孤立波の造波

a) 水槽諸元

水槽は、幅0.05m、高さ0.3m、全長10mの数値水槽であり、水深を0.1mとした。数値水槽の格子間隔については、岸沖(x)方向 $d_x=0.01m$ 、沿岸(y)方向 $d_y=0.01m$ 、鉛直(z)方向 $d_z=0.005m$ とした。

基本物性値は、水の密度 $1000.0kg/m^3$ 、重力加速度 $9.8m/s^2$ とした。造波板は、x方向幅0.03m、y方向幅0.05m、z方向高さ0.3mの直方体とし、 $t=0$ の時、 $x=4.00\sim 4.03m$ に初期位置を設定した。

総計算時間は15秒、時間刻み幅について上限を $1.0 \times 10^{-2}$ 、下限を $10 \times 10^{-6}$ とし、ポアラス下限を $1.0 \times 10^{-2}$ とした。水路端は減衰帯を設けた固定境界とした。

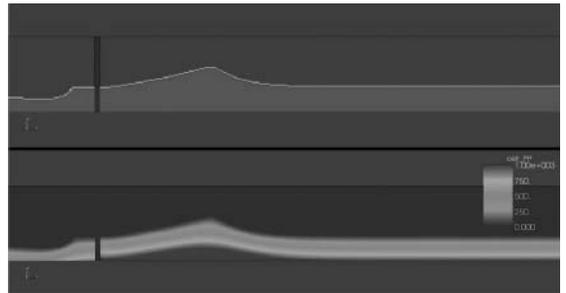
b) 造波板の変位

舟久保ら(2001)では、孤立波の安定限界について、実験とLonguet-Higgins and Fenton(1974)の理論との比較を行っている。ここでは、その実験で使用された造波板の変位を使用し、造波板のx方向変位 $d(t)$ を式(5)で定義した。ここに、 $A$ は0.25mである。変位時間 $t_0$ を1.2、1.5、2.0、2.5sのそれぞれ4ケースについて計算を行った。

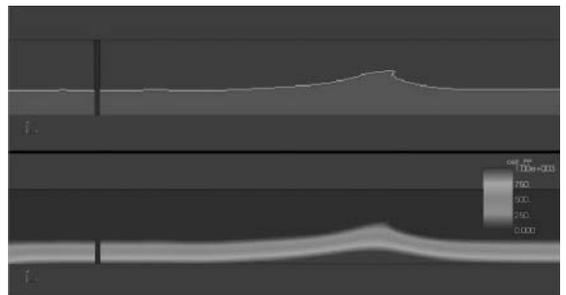
$$d(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \tanh \left\{ 2\pi \left( \frac{t}{t_0} - \frac{1}{2} \right) \right\} + \frac{A}{2} \tanh \pi & (0 \leq t \leq t_0) \\ A \tanh \pi & (t \geq t_0) \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

c) 計算結果および考察

図-2から図-5にそれぞれのケースでの伝搬の様子を示



a) t=1.0s時 (上図: 水位, 下図: 圧力)



b) t=1.5s時 (上図: 水位, 下図: 圧力)

図-2 ケース  $t_0=1.2$

す。  $t_0$  が 1.2s のケースでは、崩れ波砕波が生じたが (図-2 b) 参照), 他のケースでは、安定に波が造波されるのを確認した。舟久保ら (2001) の実験結果では、水深等が同様の条件において、  $t_0$  が 1.2s のケースでは安定で、  $t_0$  が 1.1s のケースでは波高減衰が生じるとの報告があるものの、孤立波の安定性は壁面摩擦等の境界条件の影響も大きく、若干の差により違いが生じたものと考えられる。

図-6は、Longuet-Higgins and Fenton (1974) により得られた無次元振幅と無次元波速との関係と、数値水槽から得られた結果とを比較したものである。舟久保ら (2001) は、孤立波の対称性が達成された8及び9mでの速度及び振幅の平均を採用したが、ここでは造波板から一番遠い4及び5mでの値を採用した。これをみると、  $t_0$  が 2.5s のケースが若干理論値から外れているものの、  $t_0$  が 1.2s のケースは明らかに理論値を外れており、砕波しても不思議ではないことがわかる。

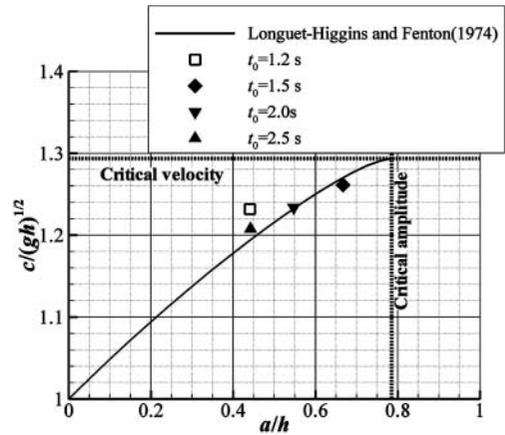


図-6 無次元振幅と無次元速度との関係

よって、本手法により水平方向の動きに対して妥当な結果が得られることがわかった。

(2) フラップ型

a) 水槽諸元

水槽は幅0.5m, 高さ5.0m, 長さ50mとし、水深は2.5mとした。格子間隔はx方向格子幅  $d_x=0.1m$ , y方向格子幅  $d_y=0.1m$ , z方向格子幅  $d_z=0.1m$ とした。時間刻み幅の上限を  $1.0 \times 10^{-2}$ , 下限を  $1.0 \times 10^{-6}$ , ポーラス下限は  $1.0 \times 10^{-2}$  とし、水路端は減衰帯を設けた固定境界とした。

b) 造波板

造波板の形状は、x方向幅1.0m, y方向幅0.5m, z方向高さ4.0mの直方体とし、  $x=40.0 \sim 41.0m$  に造波板の初期座標を設定した。変位は、障害中心位置  $x=40.5m$  を回転中心に、周期8.007s, 振れ角30度で制御した。

c) 結果

図-7に造波板の動きにもなって造波される波の様子を示す。時刻0.5s, 2.0s, 5.0sおよび12.0sのときの様子である。いずれにおいても、造波板の前において極端に大きな圧力は生じておらず、安定的に計算が進行していることがわかる。

4. 微小変形する構造物との連成計算

ここでは、CADMAS-SURF/3Dと構造解析プログラムFEM3Dの双方向連成計算結果を示す。

(1) 単純平板

a) 水槽、波浪および平板諸元

3. (2) 節で用いた水槽と平板を用いて、平板に波力が作用した際の挙動を確認する。波浪に関しては、波高1.0m, 周期8.007sとした。壁面の物性値は、ヤング率  $2.30 \times 10^{10} N/m^2$ , ポアソン比0.0, 単位体積重量  $2400.0 kg/m^3$  とし、底面全方向及び側面のy方向を拘束する。ポーラスの下限値を  $1.0 \times 10^{-2}$  とした。



図-3 ケース  $t_0=1.5$  (t=2.0s時) (上図：水位, 下図：圧力)

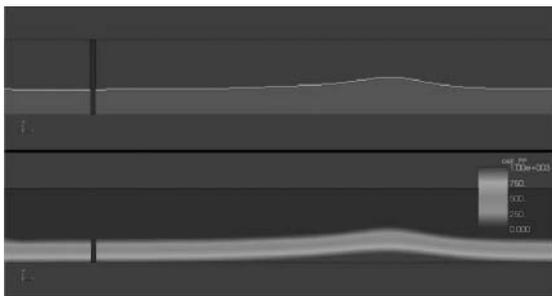


図-4 ケース  $t_0=2.0$  (t=2.0s時) (上図：水位, 下図：圧力)

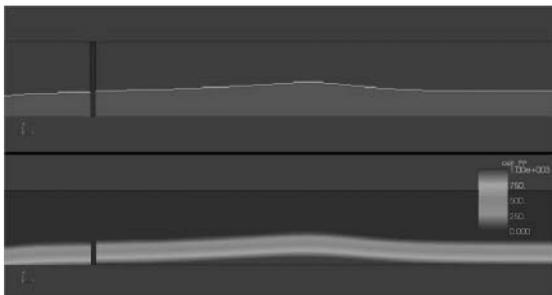


図-5 ケース  $t_0=2.5$  (t=2.0s時) (上図：水位, 下図：圧力)



a) T=2.0s 時 (上図：水位，下図：圧力)



b) T=5.0s 時 (上図：水位，下図：圧力)



c) T=12.0s 時 (上図：水位，下図：圧力)

図-7 フラップ型造波板を用いた造波

**b) 計算結果**

まず、波が平板に作用している様子を造波開始から12秒後、14秒後、16秒後を図-8に示す。これみると安定に計算していることがわかる。図-9は、そのときの壁体のたわみであり、波の作用により変形し、波が引くと元に戻っている様子がわかる。なお、図では、変形量を100倍にして示している。図-10は、板の中央点 (ID=538) およ

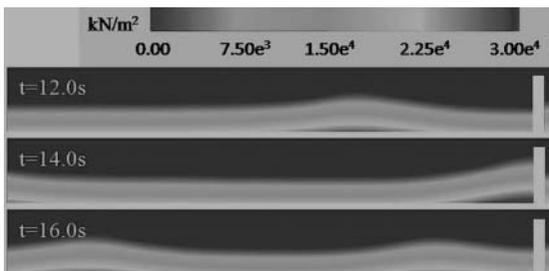


図-8 波の伝搬による壁体前の波圧

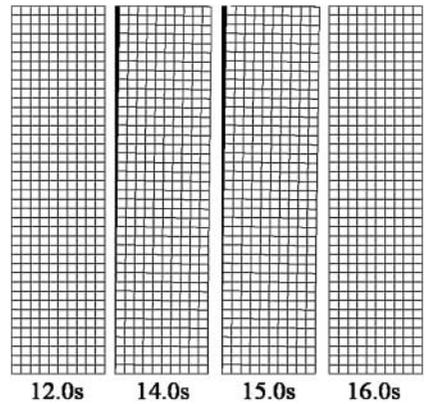


図-9 t=12.0s～16.0sの壁面のたわみの変化 (黒い部分が初期状態)

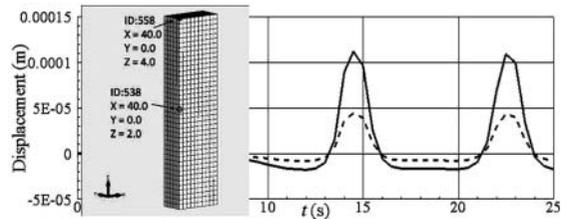


図-10 接点における変位の時系列

び上端点 (ID=558) における岸沖方向の変位の時系列である。この場合では、中央点では上端変位の約半分になっており、かつ周期的になっており、波力によりたわんでいる様子がわかる。

**(2) 護岸**

**a) 水槽および護岸模型の諸元**

護岸モデルは、図-11に示すように、岸沖 (x) 方向に85m、高さ (z) 方向に15m、奥行き (y) 方向に16mの水槽内に図-12の護岸モデルを設置した。格子幅は $\Delta x=0.5m$ 、 $\Delta y=3.2m$ 、 $\Delta z=0.2m$ とした。本論文では、構造側の計算精度は議論の対象ではないが、護岸を構成しているコンクリート、碎石などの物性は、一般的な値を使用した (たとえば、コンクリートでは、密度 $2300kg/m^3$ 、ポアソン比0.2、ヤング率 $2.5 \times 10^{10}$ )。波浪条件は、水深3.76m、波高1.5m、周期8.007sとした。護岸の拘束条件としては、底面全方向及び側面y方向を拘束とした。

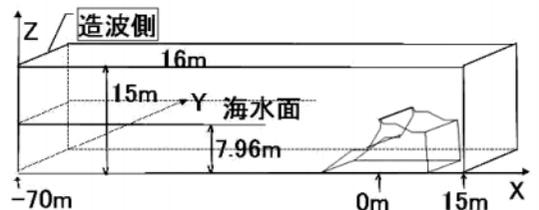


図-11 護岸模型計算用の水槽諸元

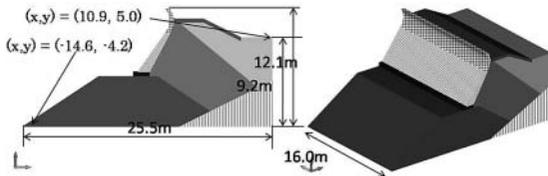


図-12 護岸の諸元

b) 結果

図-13は、護岸に作用する波浪とその圧力の空間分布である。計算が安定して行われていることがわかる。

図-14は、 $t=16.0s$ 時における波力および静水状態を足した変形を、初期地形と比較したものである。変形量は100倍にして表示している。1次の固有変形モードが卓越していることがわかる。図-15には、天端と根固め位置での変形量の時系列を示しているが、波浪による振動現象が生じていることがわかる。よって、定性的には、本手法により安定した計算が可能であることを確認した。

5. まとめ

数値波動水槽 (CADMAS-SURF/3D) とFEMを用いた固

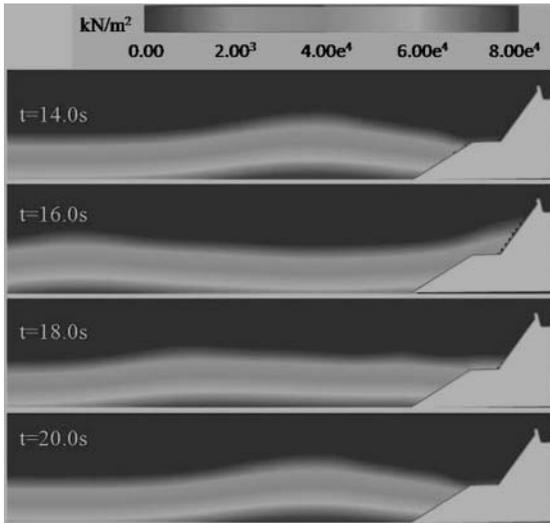


図-13 波浪の作用している様子 (圧力表示)

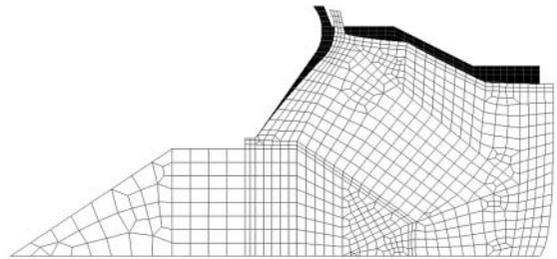


図-14  $t=16.0s$ 時の初期 (黒) との形状比較

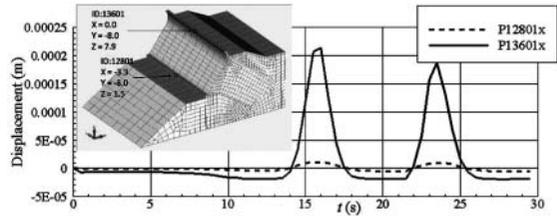


図-15 各点における変形量の時系列

体変形計算との連成手法を構築し、モデル地形に適用することでその妥当性を検証した。その結果、定性的には安定して計算することが可能であることを確認した。今後は、実験結果等との定量的な比較を行う。

参考文献

有川太郎・山野貴司 (2008) : 数値波動水槽を用いた衝撃波圧に関する大規模計算, 海岸工学論文集, 第55巻 (1), pp. 26-30.

Khayyer Abbas・後藤仁志 (2008) : 粒子法における圧力攪乱低減のためのCMPS-HS法の提案, 海岸工学論文集, 第55巻 (1), pp. 16-20.

数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会 (2002) : 海域施設の耐波設計に適用できる数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発と将来展望, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp.1-17.

睦田秀実・新蔵慶昭・土井康明 (2008) : 衝撃波圧作用下における固体流体連成解析法と構造物の動的応答特性, 海岸工学論文集, 第55巻 (1), pp.31-35.

舟久保悠子・皆川大輔・大塚一路・渡辺慎介・辻英一・及川正行 (2001) : 大振幅浅水孤立波の不安定, 数理解析研究所講究録, 1231巻, pp. 1-8.

M. S. Longuet-Higgins and J. D. Fenton (1974) : On the Mass, Momentum, Energy and Circulation of a Solitary Wave. II, Proc. R. Soc. Lond.A, Vol.340, pp. 471-493.