複数構造体の連成運動を考慮した フラップゲートの段波応答に関する数値解析

NUMERICAL ANALYSIS FOR RESPONSE OF FLAP-GATE AGAINST BORE-TYPE
TSUNAMIS CONSIDERING INTERACTION OF MULTIPLE STRUCTURES' MOTIONS

木村雄一郎¹・柳 浩敏²・森西晃嗣³・森 信人⁴・間瀬 肇⁴

Yuichiro KIMURA, Hiroto YANAGI, Koji MORINISHI,
Nobuhito MORI and Hajime MASE

¹正会員 工修 日立造船株式会社 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

²日立造船株式会社 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

³工博 京都工芸繊維大学 機械システム工学科 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

⁴正会員 工博 京都大学防災研究所 沿岸災害研究分野 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

A flap-gate breakwater is a new type structure for coastal disaster reduction against tsunamis and storm surges. The flap-gate usually lies down on the bottom of sea and rises up as a seawall with its buoyancy when tsunamis or storm surges occur. In past studies, capabilities of the flap-gate against tsunamis have been confirmed by hydraulic model experiences, and the characteristics of the gate motion against waves and sine-type tsunamis have been clarified by numerical simulations considering fluid-structure interaction. The present study improves the numerical simulation model so as to consider momentary flap-gate motions against bore-type tsunamis and interaction between the gate and a fluid resistance plate controlling rapid motions of the gate. As a result, good agreement is obtained between numerical simulations and model experiments.

Key Words : flap-gate, tsunami, numerical analysis, over grid method, level set method, multiple structures' interaction

1. はじめに

南海、東南海および東海地震津波に代表される大規模地震津波の発生リスクの高まりを背景に、著者らは、フラップゲート式可動防波堤（以下、フラップゲートと呼称）の開発を進めている。フラップゲートは、図-1に示すように、扉体、函体およびテンションロッドを主要な部材として構成される可動式の防災施設である。扉体は、所定の幅で分割され、一端を回転支承として函体に連結し、他端に与えた浮力を利用して水面まで浮上し港口を閉鎖する。浮力によって水面まで浮上した扉体は、津波あるいは高潮によって生じる港外水位上昇により、所定の高さまで起立し連続した止水壁をなす。テンションロッドは、上部テンションロッドおよび下部テンションロッドの2つの部材からなり、起立した扉体に作用する水圧荷重を支持するとともに、対をなす下部テンションロッド間に設置した流体抵抗板が、

扉体の急激な起立動作を抑制する。

フラップゲートは、従来の津波・高潮防災施設とは異なり、通常海底に倒伏しているため、海水の交換を妨げず景観への影響も小さい。また、フラップゲートの扉体は、海底に設置された水平軸を回転中心として起伏するため、港口の径間に対する制限がない。さらに、フラップゲートは、従来の防災施設と比較して、建設費用ならびに維持管理費用の大幅な削減が可能であり、多くの利点を有している。

これまで、実験的な研究^{1),2)}によってフラップゲートの防災施設としての有用性が検証されるとともに、解析的な研究^{3),4)}を通してフラップゲートの流体特性の多くが明らかにされてきた。前述のように、フラップゲートは、抵抗板の流体抵抗を利用することにより、扉体の起立速度を抑制し、段波性の津波などによる衝撃波圧を低減する機能を有している。しかしながら、この流体特性は、模型実験により確認されているものの、これまで解析的な検証

はなされておらず、そのメカニズムの詳細については未解明な部分もあった。

そこで、本研究では、①段波津波を対象とした衝撃的な波圧の評価、ならびに、②扉体および抵抗板の2つの構造体の連成運動を考慮した流体特性の検証を行うことを目的として、数値解析モデルの高度化を行った。連成解析モデルの構築には、重合格子法⁵⁾およびレベルセット法⁶⁾を使用し、解析モデルの精度検証には従来の水理模型実験の結果を使用した。以下、模型実験、数値解析モデル、解析結果の考察について記す。

図-1 フラップゲート式可動防波堤の側面図

2. 水理模型実験

水理模型実験は、ピストン式造波装置を備えた長さ50 m、幅1 mの2次元造波水槽を用い、縮尺1/30²⁾および1/48¹⁾の2種類の実験模型を使用して実施した。実験では、造波板のストロークおよび動作時間を変化させることで数通りの孤立波を造波し、水槽内に構築した傾斜面上でそれらの孤立波を砕波させることにより、模擬的な段波性津波を作成した。双方の模型実験における実験装置全体の概略を図-2に示す。実験では、抵抗板を設置していないフラップゲート、抵抗板を設置したフラップゲートに加え、扉体を90度に固定した鉛直壁についても実験の対象とした。実験模型は、水深13 mの実海域を対象とした実機を模型化したものであり、実機の扉体一門の高さは22 m、対応する1/30縮尺模型の扉体高さは72 cm、1/48縮尺模型の扉体高さは46 cmに相当する。1/30縮尺模型実験に使用したフラップゲートの写真を写真-1に示す。

段波性の津波は、引波によって水位が低下した際に生じるものとし、各実験における水深は、1/30縮尺実験では22.8 cm（実機換算水深：7 m）、1/48縮尺模型実験では10 cmおよび20 cm（実機換算水深：4.8 mおよび9.6 m）として設定した。各実験において作成された、段波性津波の最大振幅および段波波高の一例を表-1に示す。

3. 数値解析モデル

(1) 重合格子法

重合格子法とは、図-3のように主格子中に補助格子を重ねて配置することで数値解析を行う手法で

図-2 実験装置の概略図

写真-1 フラップゲート実験模型（左：沖側）

表-1 実験で使用した段波の最大振幅と段波波高

模型縮尺	水深 h [cm]	最大振幅 H_{max} [cm]	段波波高 ζ [cm]
1/30	22.8	24.8	9.7
		22.6	12.1
		6.9	4.4
1/48	10	7.3	5.3
		8.6	6.1
		9.9	6.8
		16.1	4.7
	20	13.7	5.9
		12.9	7.1
		11.6	7.2

ある。主格子では、構造物と重なる格子点およびその近傍の格子点は非計算格子‘■’（以下、HOLEと呼称）として扱われ、その他の格子点において物理量の計算が行われる。補助格子における最外周部の境界‘○’には主格子から物理量が内挿され、補助格子領域における計算が行われた後、主格子におけるHOLE点周囲の格子‘□’に物理量が戻される。HOLEは、物体から数周目の補助格子における周方向（物体に沿う方向）の曲線をHOLE境界としたときに、その内部に含まれる主格子点をさす。内挿には、以下に示す二次元の線形内挿を用いる。

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ q_p \end{bmatrix} = (1-X)(1-Y) \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ q_A \end{bmatrix} + X(1-Y) \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ q_B \end{bmatrix} + XY \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ q_C \end{bmatrix} + (1-X)Y \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ q_D \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、添え字 A, B, C および D は主格子点 P を内包する補助格子上のセルの各頂点を表し（図-3左下の拡大図参照）、 x, y は座標、 q は物理量をそれぞれ表す。式(1)の上2式を用いて X, Y を求め、それらを3つ目の式に代入することで、主格子点 P に内挿される物理量 q_P が求められる。補助格子の最外周の境界についても同様の方法により算定され、主格子から補助格子へ物理量が内挿される。

図-3 重合格子法概念図

(2) レベルセット法

レベルセット法は、異なる相の相界面を追跡することを目的とする界面捕捉法の1つであり、相界面より液相側が正、気相側が負となるような垂直距離関数（レベルセット関数）を用いて相界面を捕捉する。レベルセット関数 f は相界面に有限な厚さ α を持たせることができ、密度や粘性係数のように相界面で急激に変化するものでも、その界面の厚さに応じて値を分布させ、比較的安定した計算を行うことができる。密度および粘性係数は、以下の式を用いて各計算セルに付与される。

$$\rho = \begin{cases} \rho_w & f \geq \alpha \\ \rho_a & f \leq -\alpha \\ \tilde{\rho} + \Delta\rho \sin(\pi f / 2\alpha) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2a)$$

$$\mu = \begin{cases} \mu_w & f \geq \alpha \\ \mu_a & f \leq -\alpha \\ \tilde{\mu} + \Delta\mu \sin(\pi f / 2\alpha) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2b)$$

ここで、 ρ_w, ρ_a は液相と気相の密度、 μ_w, μ_a は液相と気相の粘性係数、 $\sim$ （チルダ）は両者の平均値、 Δ は両者の差の1/2をそれぞれ示す。

(3) 数値計算法

本研究では、非圧縮性流体を対象としている。また、非圧縮性流体の計算手法として擬似圧縮性法を使用するため、非圧縮性ナビエ・ストークス方程式に擬似時間微分項を加えた擬似圧縮性ナビエ・ストークス方程式を支配方程式として使用する（式(3a)～(3c)参照）。擬似時間に対する定常解が得られたとき擬似時間微分項は0となり、この方程式は非圧縮性ナビエ・ストークス方程式と等しくなる。

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + f_x \quad (3b)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + f_y \quad (3c)$$

ここで、 p は圧力、 u は x 方向の流速、 v は y 方向の流速、 t は実時間、 τ は擬似時間、 Re はレイノルズ数、 f_x は x 方向に生じる外力、 f_y は y 方向に生じる外力をそれぞれ表すものである。

空間微分項の離散化は、2次精度風上差分を用いて行った。また、実時間に対する積分には、2次精度の後退差分法を使用した。

重合格子法、レベルセット法および数値計算法の詳細については、著者らの論文^{5),6)}を参考にされたい。

(4) 複数構造体の連成

抵抗板は、扉体本体と同様、補助格子を用いて作成した。モデル化を簡易にするため、抵抗板の比重は1とし、計算の安定性を高めるために、抵抗板の厚さは実験模型よりもやや厚く設定した。

抵抗板のモデル化は、次に示すようなアルゴリズムを追加することで行った。まず、下部テンションロッドの設置位置に、テンションロッドと函体との係留点を中心として回転できる2つ目の補助格子を配置し、その補助格子を用いて実験の条件と合うように抵抗板を形成した。抵抗板に作用するモーメントは、抵抗板表面に作用する流体力に回転軸からの距離を乗じ、それを抵抗板の全周にわたって積分することで算出される。次に、前記モーメントを上部テンションロッドと扉体本体との接合点に作用する荷重として換算した上で、扉体本体に直接作用する流体力と合わせ、扉体に作用する外力として運動方程式に追加する。流体力によって抵抗板に直接作用するモーメント M_F は、以下の式により、扉体と上部テンションロッドとの接合点に作用するモーメント M_P として換算される。

$$M_P = \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} M_F \quad (4)$$

ここで、 θ_1 は下部テンションロッドと上部テンションロッドのなす角、 θ_2 は上部テンションロッドと扉体のなす角、 l_1 は下部テンションロッドの長さ、 l_2 は扉体回転軸からロッドとの接合点までの長さを示す。

運動方程式から得られた扉体変位量をもとに抵抗板の変位量を幾何学的に算出し、補助格子とともに抵抗板を回転変位させる。これらのフローを所定の収束条件が満たされるまで内部反復計算することで、

扉体と抵抗板の連成運動を考慮した適正な変位量が算出される。

主格子および扉体と抵抗板とを構成する補助格子の模式図を図-4に示す。図-4は、実機換算値で水深を13 mとした際の、水面まで浮上した扉体と抵抗板との位置関係を示すものである。図-4では、双方の補助格子が重なっている。補助格子上の最外周の格子点は、主格子から物理量が内挿されるため、補助格子同士の重なりは、数値計算上、問題とはならない。ただし、補助格子の内挿点が主格子上のHOLE点と重なった場合、HOLE点上では数値計算が行われないため、物理量を得ることができない。よって、図-5のように、構造体と重なる補助格子を新たなHOLE点として設定し、物理量は、さらにその周囲の格子点から内挿されるよう改良した。しかし、補助格子で構成される構造体同士が極端に接近した場合、物理量を得るための内挿点なくなる。格子サイズを小さくすることで、このような問題を回避することも可能ではあるが、ここでは、構造体同士が接近しすぎない条件、つまり、水位が比較的高い条件の下で数値解析を実施することとした。

図-4 主格子と補助格子の位置関係

図-5 補助格子同士が接近した場合の取り扱い

(5) 解析条件

数値解析は、27.6 mの2次元数値波動水路上に、1/30縮尺のフラップゲートの扉体部、あるいは扉体と抵抗板の双方を模擬する補助格子を配置して行った。主格子における格子数は、水平方向440グリッド、鉛直方向65グリッドとし、フラップゲート設置位置の周囲については計算格子を密に配置した。主格子における最小の格子間隔は20 mmである。また、扉体を表す補助格子は、扉体の長手方向74グリッド、扉体の厚さ方向29グリッドとして作成し、扉体部分

を60グリッド×5グリッドの格子により形成した。また、抵抗板を表す補助格子については、長手方向57グリッド、厚さ方向23グリッドとして作成し、29グリッド×3グリッドの格子により抵抗板を形成した。扉体および抵抗板を形成する補助格子の格子間隔は、それぞれ12 mmおよび9.6 mmである。また、扉体を90度で固定した鉛直壁についても、数値計算の対象とした。

数値解析では、段波波高の調整を容易にするため、水柱崩壊により段波性津波を作成した。水柱の作成には、数値波動水路の沖側を不透透境界、岸側を透過境界とした上で、フラップゲートの沖側に所定の長さおよび高さの水塊を配置し、計算開始とともにそれらを崩壊させた。解析における水深の条件、設定した水柱の容積ならびに発生した段波の諸量を表-2に示す。ただし、前述のように、抵抗板を導入した解析モデルでは補助格子同士の接近を防ぐため、水深が比較的高い条件、具体的には水深42.4 cmおよび48.9 cmの条件のみを対象とした。

表-2 段波の作成条件と発生した段波の諸量

実機			数値解析 (1/30縮尺)				ζ/h
水深 h [m]	段波波高 ζ [m]	最大振幅 H_{max} [m]	水深 h [m]	水柱容積 V [m ³ /m]	段波波高 ζ [cm]	最大振幅 H_{max} [cm]	
5	1.39	1.83	16.3	0.587	4.5	6.0	0.278
	1.82	2.40		0.782	5.9	7.8	0.364
	2.22	2.98		0.978	7.2	9.7	0.443
	2.65	3.45		1.174	8.7	11.2	0.531
	3.05	3.52		1.369	9.9	11.5	0.609
	3.56	3.58		1.565	11.6	11.7	0.711
	3.92	4.00		1.760	12.8	13.0	0.783
	4.25	4.35		1.956	13.9	14.2	0.850
7	1.27	1.79	22.8	0.438	4.1	5.8	0.181
	1.88	2.73		0.657	6.1	8.9	0.269
	2.44	3.68		0.876	8.0	12.0	0.349
	3.08	4.40		1.095	10.0	14.3	0.440
	3.71	4.14		1.314	12.1	13.5	0.530
	4.24	4.69		1.533	13.8	15.3	0.606
	4.84	5.09		1.753	15.8	16.6	0.692
	5.42	5.56		1.972	17.7	18.1	0.774
9	0.86	1.15	29.3	0.211	2.8	3.7	0.096
	1.63	2.37		0.422	5.3	7.7	0.181
	2.38	3.68		0.634	7.7	12.0	0.264
	3.14	5.01		0.845	10.2	16.3	0.348
	4.01	4.70		1.056	13.1	15.3	0.445
	4.73	5.29		1.267	15.4	17.2	0.526
	5.51	5.93		1.479	18.0	19.3	0.613
	6.27	6.60		1.690	20.4	21.5	0.697
11	0.79	1.04	35.9	0.161	2.6	3.4	0.071
	1.49	2.16		0.323	4.9	7.0	0.136
	2.17	3.33		0.484	7.1	10.8	0.197
	2.91	4.58		0.645	9.5	14.9	0.264
	3.56	5.85		0.807	11.6	19.1	0.324
	4.39	6.13		0.968	14.3	20.0	0.399
	5.11	6.17		1.130	16.7	20.1	0.465
	5.85	7.10		1.291	19.1	23.1	0.532
13	0.54	0.74	42.4	0.102	1.8	2.4	0.042
	1.28	1.73		0.203	4.2	5.7	0.099
	1.83	2.64		0.305	6.0	8.6	0.141
	2.39	3.58		0.407	7.8	11.7	0.184
	2.94	4.54		0.509	9.6	14.8	0.226
	3.49	5.57		0.610	11.4	18.1	0.268
	3.99	6.54		0.712	13.0	21.3	0.307
	4.52	7.54		0.814	14.7	24.6	0.348
15	0.71	1.00	48.9	0.088	2.3	3.3	0.048
	1.28	2.04		0.176	4.2	6.6	0.085
	2.01	3.06		0.264	6.5	10.0	0.134
	2.61	4.17		0.352	8.5	13.6	0.174
	3.27	5.33		0.440	10.7	17.4	0.218
	3.82	6.52		0.528	12.5	21.3	0.255
	4.45	7.71		0.616	14.5	25.1	0.297
	5.08	9.00		0.704	16.5	29.3	0.338

4. 解析結果に対する考察

(1) 港内外水位と扉体角度の時間変化

水深 $h = 42.4$ cm の条件において，抵抗板を導入しないフラップゲートに段波津波を作用させた際の港外水位，港内水位および扉体角度の時間変化を図-7，図-8および図-9に示す．図-7および図-8より，段波波高が高いケースほど，扉体の起立によって港内に生じる発生波が大きいことがわかる．しかしながら，フラップゲートは到来する段波の大部分を遮蔽しており，十分な防災効果が確認できる．また，抵抗板を導入したケースであっても，港内に生じる発生波の波高に顕著な差はみられなかった．これらの傾向は，実験結果とも概ね一致するものであった．

図-7 港外水位の時間変化の一例

図-8 港内水位の時間変化の一例

図-9 扉体角度の時間変化の一例

(2) 抵抗板に作用する流体力

$h = 42.4$ cm, $\zeta h = 0.141$ の条件の下での解析結果について，抵抗板に直接作用する流体力，および段波流速と抵抗板の相対速度より算出した抗力の時間変化を図-10に示す．ここで算出した抗力は，抵抗板に作用する流体力の大きさの目安となるものである．図-10より，抵抗板に作用する流体力は，扉体角度が86度以下の領域では，相対流速より推測される抗力と比較して小さく，その後，双方の大小が逆転している．そこで，テンションロッドを介して扉体に

作用するモーメントを，上部テンションロッドと下部テンションロッドのなす角度の関数を用いて，式(5)のように補正を行った．

$$M_p' = M_p \cdot \sin^{-1} \theta \quad (5)$$

M_p' は，テンションロッドが扉体に及ぼす補正後のモーメントを示す．補正前および補正後における，テンションロッドに生じる軸力の時間変化を図-11に示す．補正により，軸力のピーク値がカットされ，その立ち上がりの傾きが緩和されているのが確認できる．また，図-10に示した流体力は，振動しながら増加する様子がみられるが，これは，抵抗板の裏面に生じた微小な擾乱によるものである．

図-10 抵抗板が扉体に及ぼす作用力の時間変化

図-11 補正前および補正後のテンションロッド軸力

(3) 段波波圧の鉛直分布

$h = 42.4$ cmでの解析結果について，抵抗板を導入しないフラップゲートおよび抵抗板を導入したフラップゲートの，扉体に作用する最大波圧の鉛直分布を図-12に示す．図-12より，抵抗板を導入することにより，扉体に作用する波圧が1/2～1/3に軽減できていることがわかる．この軽減率は，模型実験による結果と概ね一致するものであった．

(a) 抵抗板なし (b) 抵抗板あり

図-12 扉体に作用する最大波圧の鉛直分布の比較

図-13 無次元化した最大波圧の鉛直分布

図-13に、鉛直壁、抵抗板を導入しないフラップゲートあるいは抵抗板を導入したフラップゲートに段波津波を作用させた際の、無次元化した最大波圧の鉛直分布を示す。図中、横軸は比重量 ρg および段波波高 z で無次元化した波圧、縦軸は段波波高 z で無次元化した水面からの高さを示すものである。また、各図には、水理模型実験の結果に加え、谷本ら⁷⁾あるいは池野ら⁸⁾が提案する実験式も追加した。

図-13(a)より、鉛直壁に作用する波圧の解析結果は、従来の実験式上にはほぼ分布しており、静水面 ($z/\zeta = 0$) よりやや上方で大きくなる波圧についても、水理模型実験の結果とよく一致した。抵抗板を導入しないフラップゲートに生じる段波波圧は、実験結果および解析結果ともに図中の広い範囲に分布しているが、解析結果は、実験結果の範囲を概ね包括しているといえる。図-13(c)より、抵抗板を導入したことで、扉体に作用する波圧は、鉛直壁に作用する波圧と同程度にまで軽減されていることが確認できる。また、抵抗板が、扉体に直接作用する段波の流れを遮ることにより、扉体下方に生じる波圧が大きく低減されている様子がわかる。フラップゲートの扉体の運動は、関節部を持ったテンションロッドが直線状に伸びきった際に急停止し、その際に衝撃的な波圧が作用する。抵抗板を導入したことで、その流体抵抗により、静止直前の扉体を持つ角速度が抑制され、角速度の低減率に応じて衝撃波圧も軽減されることが、本数値解析を通して確認できた。

5. おわりに

本研究では、重合格子法を用いてフラップゲートの扉体および抵抗板の連成運動を取扱い、レベルセット法により構築した自由水面を用いて段波津波の伝播、さらにフラップゲートへの段波の作用を再現計算した。衝撃的な波圧、ならびに角速度の変化が非常に大きい扉体運動を伴う段波津波に対しても、本解析手法が有効であることが確認され、抵抗板の流体特性が明らかにされた。また、解析結果は、水理模型実験の結果、ならびに従来の実験式とも良好

に一致した。本研究を通して、数値解析の有効性が確認されたことにより、今後、フラップゲートの実機設計の際には、実験ケースの簡略、あるいは省略が可能となり、経済的な設計を行うことができる。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究（代表：間瀬 肇，研究課題名：津波リアルタイム予測とフラップゲートによる津波被害防止・軽減）による。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 白井秀治，藤田 孝，木村雄一郎，山口映二，仲保京一：フラップ式可動ゲートの津波低減性能に関する模型実験，海洋開発論文集，第22巻，pp.577-582，2006。
- 2) 木村雄一郎，新里英幸，仲保京一，安田誠宏，間瀬肇：フラップゲート式可動防波堤の波浪応答特性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第56巻，pp.806-810，2009。
- 3) 木村雄一郎，柳 浩敏，森西晃嗣，森 信人，安田誠宏，間瀬 肇：フラップゲート型構造物の流体連成解析モデルの構築とその精度検証，海洋開発論文集，第26巻，pp.237-242，2010。
- 4) 木村雄一郎，柳 浩敏，森西晃嗣，森 信人，安田誠宏，間瀬 肇：重合格子法を用いた流体-構造物連成モデルによるフラップゲートの波浪応答解析，土木学会論文集B2（海岸工学），第66巻，pp.811-815，2010。
- 5) 小幡正規，中尾年雄，里深信行，森西晃嗣：重合格子法による二次元バタフライ弁モデルの数値計算，日本機械学会論文集（B編），第59巻，562号，pp.220-226，1993。
- 6) 和田好隆，森西晃嗣，松野謙一：レベルセット関数法を用いた気泡の結合及び分離シミュレーション，第19回数値流体力学シンポジウム，B5-5，2005。
- 7) 谷本勝利，鶴谷広一，中野 晋：1983年日本海中部地震における津波力と埋立護岸の被災原因の検討，海岸工学論文集，第31巻，pp.257-261，1984。
- 8) 池野正明，森 信人，田中寛好：砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第48巻，pp.846-850，2001。