

橋梁に作用する津波波力評価に対するVOF法に基づく 数値計算法の適用性検討

A study on the Applicability of Numerical Analysis based on VOF method to the Estimation of Tsunami Wave Force acting on a Bridge

米山 望¹・直田 梓²

Nozomu YONEYAMA and Azusa NAOTA

When the Tohoku Earthquake occurred in March 11, 2011, the associated tsunami washed away a number of bridges. This resulted in difficulties such as transport disorder to rescue and recovery operations. Therefore it is necessary to estimate tsunami force acting on a bridge. In this study, we applied the three-dimensional numerical analysis based on VOF method to two hydraulic experiments, each with a different type of bridge model. The results of the calculation are compared with those of the experiments in regard to the horizontal and vertical forces. As a result, the method well simulated each time series variation of tsunami force acting on the bridge beam.

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、地震に伴って発生した津波により青森県から千葉県にかけての太平洋側沿岸部で家屋等の被害に加え、湾港、道路、鉄道等の社会基盤構造物が多数被災した。構造物被害の中でも橋梁が被災し使用不能となった場合、代替路を近くに確保できないことが多く迂回ルートが長くなるため、避難・救助等の緊急活動や迅速な復旧活動の大きな妨げとなる。阪神・淡路大震災（1995年）以降、橋の耐震補強が進められてきた一方で、橋梁構造物の橋桁は河川の計画高水位より上に設置するため水による外力を想定しておらず、津波来襲時の橋梁の安全性評価はなされていなかった。今回の東日本大震災では河川を遡上した津波により橋桁が流出するという被害が多数報告されている。陸上輸送において重要な交通基盤の要素である橋梁が地震・津波災害時にその機能を保持するためには津波外力を考慮した設計が必要であり、橋梁構造物に作用する津波波力の評価、またその津波波力によって発生する橋梁被害を予測することは重要な課題である。

インド洋大津波（2004年）での橋梁被害の発生以降、橋桁に作用する津波波力に関する研究が水理模型実験および数値解析により行われている。片岡ら（2006）は橋桁の縮尺模型を用いた水理実験によって、橋梁の津波安全性評価を行う際の波力について検討しており、橋桁に作用する水平波力は直立壁に作用する波圧の実験値に基づく波力算定式により安全側の評価ができることを確認

している。荒木ら（2010）は橋桁模型を用いて桁下高を変えた実験を行い、橋桁に作用する波圧と水平および鉛直波力の特性を検討している。庄司ら（2009a, 2009b）は河口付近の津波を想定した場合と、河川を遡上する津波を想定した場合について橋桁が横移動する際の閾値となる水平波力を評価している。また、桁下高と津波波力の関係性について検討を行い、桁下高の違いにより橋桁に作用する津波波力のメカニズムに相違が生じることを明らかにしている。中尾ら（2009）は長方形断面および溝型断面の模型を用いて橋桁の周囲の流況を調べるとともに流体力の測定を行っている。衝突する波の波高を変えた実験を行い、橋桁模型を越波するときの流体力は越波しないときの流体力に比べて大きいことを明らかにし、また支点に作用するモーメントについても評価を行っている。

数値解析の観点からは鳴原ら（2009, 2010）がスマトラ島北西部を対象とした2004年インド洋津波の平面二次元計算を実施し、地形条件の違いによる橋梁の被災状況の違いを明らかにしている。また、鉛直波力は水平波力と同程度とした上で簡易的に橋桁の滑動に対する評価も行っている。五十里ら（2007）は桁橋の被災過程について桁橋を平板として扱った粒子法によるシミュレーションを行っている。流木の衝突力および欄干の影響についても検討を行い、その衝突力は流体力よりも大きく、欄干の存在により流木の衝突域が広がることから被災可能性が高まることを示している。

東日本大震災では、橋桁の落橋・流出や橋脚の破壊・流出、盛土の崩壊・流出といった様々な橋梁被害が発生した。橋桁の被害に関しては、橋によって被害状況が異なるものの、橋台部のサイドブロックにほとんど損傷が

1 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所
2 学生会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

ないケースがあることや、沓座固定用アンカーボルトが上方向に引抜かれ、上流側に傾いていることなどから橋桁の浮き上がりと回転移動が推測されている。しかし、鉛直方向に作用する力のメカニズムについては評価手法が確立しておらず、橋梁被災のメカニズム解明のためには今後さらに詳細な作用波力の分析を行う必要がある。

橋梁被災のメカニズム解明を行うためには、三次元数値解析が有効であると考えられる。著者らはこれまでにVOF法を用いた三次元数値解析手法によって北海道南西沖地震津波の奥尻島における津波遡上現象の再現をしている(米山ら, 2001)。また、津波により物体が移動・回転する挙動の解析手法を構築し、津波波力によるフラップゲート式可動防波堤の動きを適切に解析できることを示している(米山ら, 2011)。しかし、橋桁のように静水面の上部に構造物があるという条件に適用した例がない。流体中にある物体と異なり、上部にある場合には、津波の衝突力を強く受けることが予想され、橋桁の流出を解析する前に、まず、その波力の再現精度を検証する必要がある。

そこで本研究では、橋桁が固定された条件で行われている既往の水理模型実験の再現計算を行い、橋桁に作用する津波波力の実験結果と解析で得られた結果を比較した。

2. 解析手法の概要

数値解析手法は米山らが北海道南西沖地震津波の奥尻島における津波挙動を適切に再現した三次元津波流動解析法(米山, 2001)を用いた。詳細は文献に記載されているため、ここではその概要のみを簡単に示す。

基礎方程式は以下のようなものである。

・連続式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

・運動方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \overline{u_i u_j} \quad \dots\dots\dots (2)$$

・流体充填率の移流方程式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 u ：流速の各方向成分、 G_i ：単位体積あたりの外力、 p ：圧力、 ρ ：流体密度、 ν ：動粘性係数、 F ：計算セルの流体充填率(=セル内の流体体積/セル内の空隙体積)、 $\bar{}$ ：レイノルズ平均量、 $\overline{}$ ：レイノルズ平均量からの変動量である。また、式(2)中のレイノルズ応力 $-\overline{u_i u_j}$ を求めるため、以下の乱流評価式を用いた。

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 k ：乱流エネルギー、 ε ：乱流エネルギー散逸率、 ν_t ：渦動粘性係数であり、式(4)～式(7)中の定数は $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 、 $C_{\varepsilon 1}=1.45$ 、 $C_{\varepsilon 2}=1.92$ 、 $C_\mu=0.09$ とした。

以上の基礎方程式を直交座標系上で離散化してSIMPLE法(Patankarら, 1972)に基づいて解析した。各物理量の定義点は、流速のみを計算セルの境界面中央、その他の物理量を計算セルの中央で定義するスタッガード配置とし、離散化は時間について前進差分、移流項は三次精度風上差分、その他は中央差分とした。底面や側面境界条件は流速、乱流量ともフリースリップとした。

また、式(3)はドナアクセプタ法を用いて計算した。これに関して、流体体積を保存するためのいくつかの工夫を行っている(米山, 1998)。

3. 解析手法の適用性検討

(1) 長方形断面の橋桁模型への適用

荒木ら(2010)は単純化した橋桁模型として長方形断面の水平板を用いた水理模型実験を行っている。実験は川幅20m程度の小河川を想定し、長さ41.0m、幅0.7mの断面二次元水路を用い、津波の河川遡上を模擬した。

図-1にその概要を示す。水路内には勾配1/40の固定床が設置されており、固定床から0.24mの位置に橋桁模型を設置し、水路端の造波機により孤立波状の波を発生させ、模型上面に取り付けた片持ち梁式の波力計および模型の周囲に取り付けた波圧計(計測点を図-2に示す)により波力と波圧を測定している。

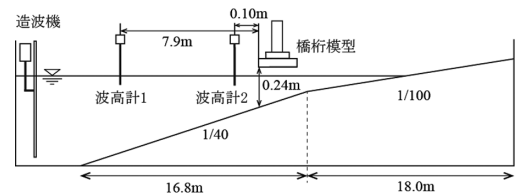


図-1 実験装置の概要

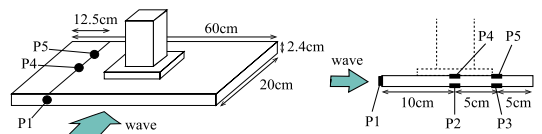


図-2 波圧の計測点

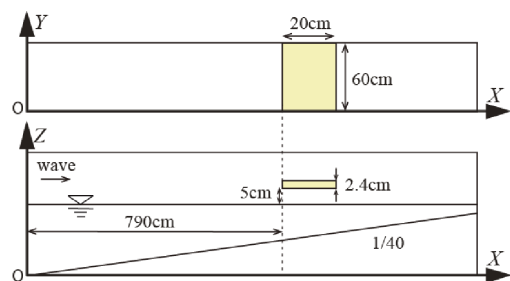


図-3 解析領域の概要

解析領域は斜面勾配が1/40の範囲で図-1に示した波高計1より岸側とした。水路と橋桁模型の隙間および模型上面に取り付けられた波力計は無視し、橋桁を平板として扱った。図-3に解析領域の概要を示す。X軸方向の格子間隔は0.025～0.05mの間で変化させ、橋桁近傍では0.025mとした。Z軸方向のメッシュ間隔は0.006～0.0125mの間で変化させ、橋桁近傍では0.006mとした。Y軸方向は一定で0.15mとした。

初期水位は桁下高0.05mとした。入射境界には、波高計1(図-1参照)の水位変動の測定値を用いて水位を設定し、水位変化を満たすような断面平均流速を計算し、その値を境界の流速として設定した。

図-4は桁前0.1mの地点での水位変動を実験結果(波高計2)と比較したグラフである。津波が橋桁に衝突する前後(7～8秒)の波形が一致していることが確認できる。

図-5は、P1、P2、P4における波圧を実験結果と比較したグラフである。沖側計測点(P1)および底面計測点(P2)では、解析結果が実験結果を十分な精度で再現していることがわかる。また、上面計測点(P4)では、解析結果が実験結果より小さな値となった。これは、上面に乗り上げる水量が正確に予測できていないためと考えられる。ただし、波圧の時間変化の傾向は一致している。

図-6は、分力計により計測された鉛直波力を解析結果と比較したグラフである。解析結果に変動はあるものの、7.4秒までは十分な精度で予測できている。また、それ以降で解析値が実験値より大きな値を示しているが、これは、図-5(c)と同様に、上面に乗り上げる水量が実験と一致しなかったことによる。

(2) 溝型断面の橋桁模型への適用

片岡ら(2006)は溝形断面の橋桁模型を用いて水理模型実験を行い、橋桁に作用する津波波力の測定を行っている。実験は長さ140m、幅2mの水路を用いて行われた。図-7にその概要を示す。水路内には海域と陸域を想定した勾配1/20と勾配1/100の固定床が設置されており、固

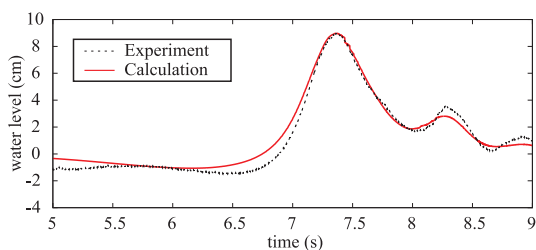
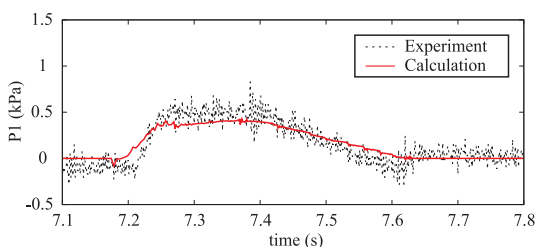
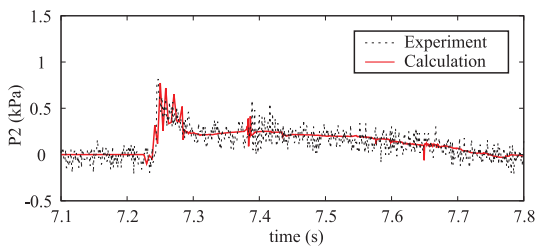


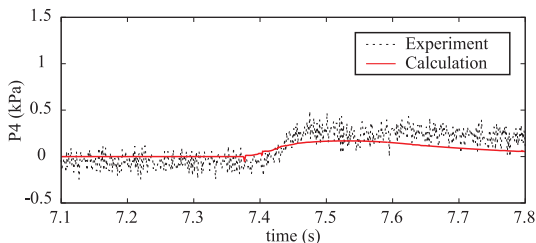
図-4 水位の比較



(a) 沖側の面に作用する波圧 (P1)



(b) 下面に作用する波圧 (P2)



(c) 上面に作用する波力 (P4)

図-5 波圧の比較

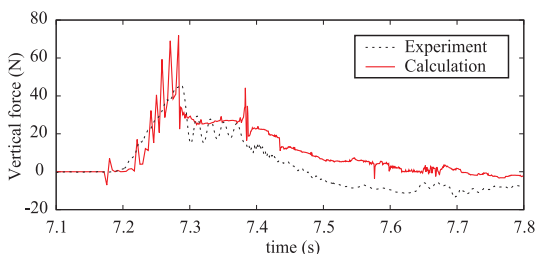


図-6 鉛直波力の比較

定床から0.35mの位置に橋桁模型を設置した。橋桁模型の奥行きは水路幅と同じであり、波力を計測する対象は水路中央の0.5mの部分とした。水路端の造波機によって

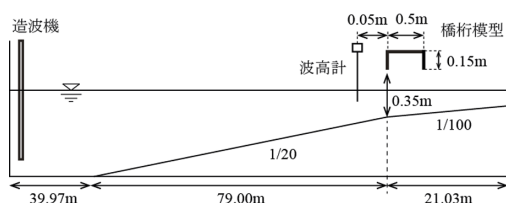


図-7 実験装置の概要

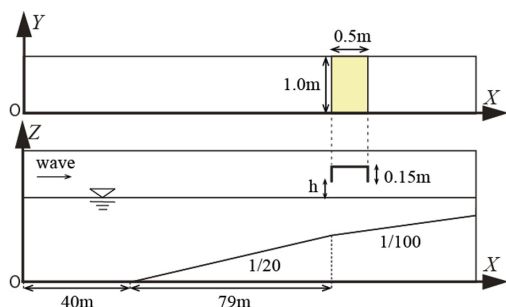


図-8 解析領域の概要

発生させる孤立波の周期（水位が静水深から上昇し再び静水深付近に戻るまで）は10秒で、孤立波の初期波高および桁下高を変えた複数の条件で実験を行っている。そして、それぞれのケースにおいて分力計で橋桁模型に作用する水平波力と鉛直波力を測定したほか、橋桁模型から0.05m沖側の位置に設置した容量式波高計により水位変動を測定した。本研究では、詳細な実験結果が得られている孤立波の初期波高0.4mのケースについて再現計算を行った。

図-8に解析領域の概要を示す。X軸方向の格子間隔は0.05～0.5mの間で変化させ橋桁近傍では0.05mとした。Z軸方向のメッシュ間隔は0.025～0.05mの間で変化させ橋桁近傍では0.025mとした。Y軸方向の格子間隔は0.25mで一定とした。鋼製の橋桁模型の厚さは無視した。

初期水位は桁下高（ $=h$ ）が0.075, 0.125, 0.175, 0.225mとなる水位を設定し、沖側境界から波高0.40m、周期10秒の孤立波の波形を与えた。

桁下高 $h=0.175$ mの解析で得られた橋桁周辺の流れの様子と圧力分布を図-9に示す。計算開始後28.46秒ほどで津波が橋桁の沖側垂直面外側に衝突し、28.63秒では、溝形断面内部に入り込んだ流れによって岸側垂直面内側および水平面内側に高い波圧が作用する様子が分かる。

図-10に桁下高 $h=0.175$ mのケースでの波力の実験結果と解析結果の比較を示す。図-10(a)から橋桁沖側垂直面および岸側垂直面に津波が衝突した時刻に大きな波力が作用する様子など水平波力の時間変化の傾向を良く再現できていると言える。

また、図-10(b)から実験では解析より0.1秒ほど早く

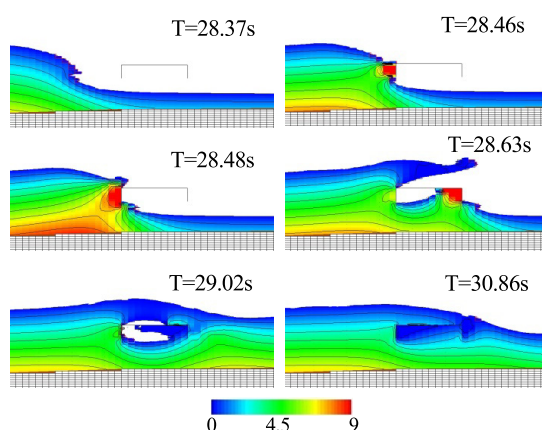
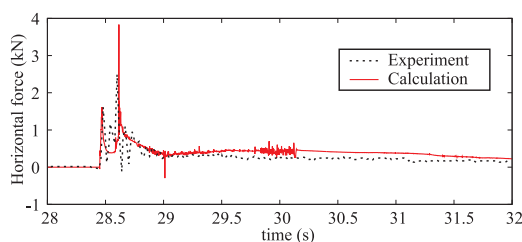
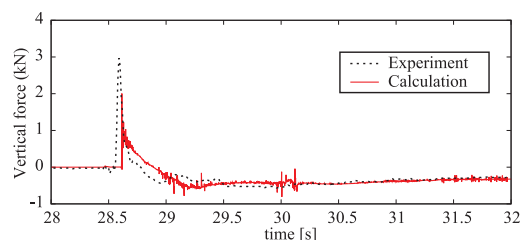


図-9 水面形状の変化と圧力分布（単位：kPa）



(a) 水平方向

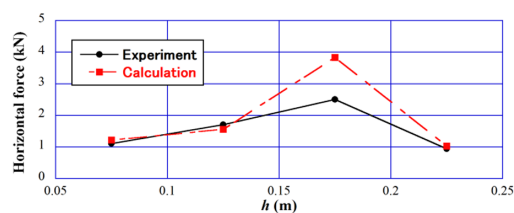


(b) 鉛直方向

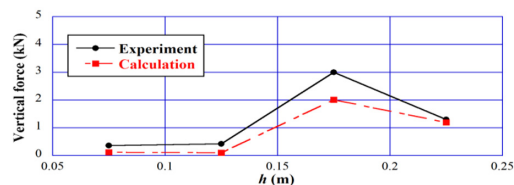
図-10 波力の比較

鉛直力が発生している。これは、解析では津波が溝型内側の岸側隅に到達するまで鉛直力が発生しないが、実験ではそれ以前に溝型内側の水平面に到達しているためと考えられる。一方、前節の長方形断面では橋を乗り上げる水量が十分一致しなかったが、図-10(b)の29秒以降の値が一致していることから、溝型模型では乗り上げた水量を適切に評価できていることがわかる。また、最大値については、水平波力については過大評価、鉛直波力については過小評価となっている。これについて検討するため、桁下高を変化させた他のケースについても最大値を比較した。その結果を図-11に示す。

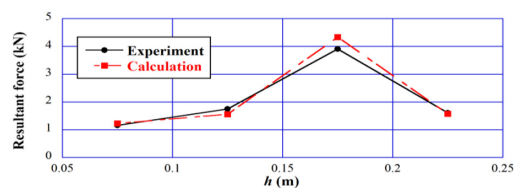
図-11(a)および(b)から桁下高 $h=0.175$ mのケース以外は最大波力がよく一致すること、桁下高 $h=0.175$ mのケースが他のケースに比べ大きな値を示すことなど桁下高 h の変化に対する最大波力の定性的な変化は解析でき



(a) 最大水平波力



(b) 最大鉛直波力



(c) 最大水平波力と最大鉛直波力の合力

図-11 桁下高 h を変化させた場合の最大波力の変化

ていることがわかる。また図-11(c)は最大水平波力および最大鉛直波力をそれぞれの発生時間を無視して合力を計算したものである。この合力が桁下高 $h=0.175\text{m}$ のケースを含め実験結果とよく一致することから、衝突する水塊の運動量を適切に解析できている可能性を指摘できる。

4. おわりに

VOF法に基づく三次元数値解析法を橋梁に作用する津波波力の予測に適用した結果、以下のことがわかった。

- ・長方形断面の橋桁模型に適用した結果、沖側面、下面における波圧は、実験結果を適切に再現した。また、上面の波圧は、変化の傾向は一致したが、解析は実験より小さな値を示した。
- ・溝型断面の橋桁模型に適用した結果、桁下高 $h=0.175\text{m}$ のケースについて水平および鉛直波力の変化傾向が一致した。最大値は水平波力は過大評価、鉛直波力は過小評価となったが、桁下高 $h=0.175\text{m}$ のケース以外は水平、鉛直ともよく一致し、桁下高の変化に対する最大波力の変化は定性的に再現できた。
- ・今回の解析で一部差異が見られた原因として、長方形断面模型の場合は上面に乗り上げる水量、溝型断面模型では、内側への回り込みが十分再現できていないことが考えられる。より高精度に作用波力を再現するた

めには、実験模型の形状を解析形状に厳密に反映させることやより細かい格子間隔の採用などにより流況を高精度に再現する必要がある。

以上のように、本研究の解析法が橋梁に作用する津波波力をおおむね再現できることがわかった。今後は解析精度の向上を図るとともに、橋桁が流出する場合の解析に取り組んでいく予定である。

謝辞：本研究を行うに際し、大阪大学大学院工学研究科准教授 荒木進歩先生に多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 荒木進歩・坂下友里・出口一郎 (2010)：橋桁に作用する水平および鉛直方向津波波力の特性，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 66, No.1, pp. 796-800.
- 五十里洋行・後藤仁志 (2007)：津波氾濫による桁橋被災過程の数値シミュレーション，海岸工学論文集，第54巻，pp. 211-215.
- 片岡正次郎・日下部毅明・長屋和宏 (2006)：津波衝突時に橋桁に作用する波力，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 154-157.
- 鳴原良典・藤間功司・幸左賢二 (2010)：2004年インド洋津波におけるBanda Aceh周辺の橋梁に作用した津波波力の再評価，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 66, No.1, pp. 231-235.
- 鳴原良典・藤間功司・幸左賢二・廣岡明彦・二井伸一・庄司学・宮島昌克・小野祐輔 (2009)：2004年インド洋津波におけるスマトラ島北西部沿岸の被災橋梁に関する数値計算，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 65, No.1, pp. 311-315.
- 庄司学・森山哲雄・平木雄・藤間功司・鳴原良典・笠原健治 (2009)：巻き波砕波段波及び砕け寄せ波砕波段波の作用を受ける橋桁の津波荷重評価，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 65, No.1, pp. 826-830.
- 庄司学・森山哲雄・藤間功司・鳴原良典・笠原健治 (2009)：単径間橋桁に作用する砕波津波の荷重に関する実験的検討，構造工学論文集，第55巻，pp. 460-470.
- 中尾尚史・伊津野和行・小林紘士 (2009)：断面形状の異なる橋桁に作用する津波の流体力に関する実験的研究，地震工学論文集，第30巻，6-0004.
- 米山望 (1998)：自由液面解析コード (FRESH) の開発，日本流体力学会誌「ながれ」第17巻 第3号.
- 米山望・中島健輔・永島弘士 (2011)：巨天津波発生時におけるフラップゲート式可動防波堤の挙動予測手法の開発，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 67, No.2, I_281-I_285.
- 米山望・松山昌史・田中寛好 (2002)：1993年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析，土木学会論文集，No.705/II-59, pp. 139-150.
- Hirt, C.W. and B.D.Nichols (1981)：Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol.39, pp. 201-225.
- Patankar, S.V. and D.B.Spalding (1972)：A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flow, Journal of Heat Mass Transfer, Vol.15, pp. 1787.