

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

Study on Estimation of Collision Force of a Drifted Container
Using Fluid-Structure Interaction Analysis

廉慶善¹・中村友昭²・宇佐美敦浩³・水谷法美⁴

Gyeong-Seon YEOM, Tomoaki NAKAMURA, Atsuhiko USAMI, Norimi MIZUTANI

This study proposes a calculation scheme which enables us to estimate the collision time and force of a container drifted by run-up tsunami. Simulated behaviors of the drifted container by a run-up wave are found to be in good agreement with the laboratory experimental results. A set of these calculated values are used as the initial values of the fluid-structure interaction analysis which simulates the collision of the drifted container. It is confirmed from these simulations that the added mass (water mass at the rear of the container) plays an important role on the collision and predicted collision force and time reached equilibrium state as the model accounts for adequate volume of water in the rear of the drifting container. Moreover, the effect of the added mass on the collision force and time is verified in full scale collision simulation.

1. はじめに

津波災害としては、陸上遡上津波による構造物の損壊や人命の損失などの一次被害が挙げられるが、津波による漂流物が他の構造物などに衝突することにより発生する二次被害も無視できず、その危険性が懸念されている。港湾などでは、貯木場の木材や小型船舶、貨物コンテナ、自動車などが漂流物になり得ると指摘されており、陸上遡上津波によるそれらの漂流挙動や、他の構造物などに衝突する際の力を把握することは被害低減対策を検討する上で必要不可欠であり、多くの検討が始められている(例えば、有川ら, 2007; 安野ら, 2007; 池谷ら, 2006)。

水谷ら(2006)はコンテナを対象に漂流衝突力の算定式を提案するとともに、衝突力はコンテナ背後の水塊による付加質量力の影響を大きく受けること、さらに、この付加質量力は衝突時間に大きく影響されることを示した。衝突時間は被衝突物の剛性に依存するため、漂流衝突力の算定のためには衝突物・被衝突物の剛性も考慮した検討が必要である。しかし、水理模型実験では実験機器の制約や相似則の問題などがあり、その効果を詳細に検討するのは困難である。そこで、著者ら(2007)は非線形衝撃応答解析汎用ソフトLS-DYNA3Dを使用し、衝突物・被衝突物の剛性や変形が衝突力とその作用時間に及ぼす影響を検討した。しかし、この研究では付加質量に相当する直方体水塊をコンテナ背後に付加しただけであり、

変形する遡上波と漂流コンテナを一体的に解いたものではない。そこで本研究では、LS-DYNA3Dを用いた流体・構造連成解析を行い、遡上波とともに漂流するコンテナが構造物に衝突する際の衝突力とその作用時間を検討することとする。ただし、同手法は計算負荷が極めて大きく、衝突前の漂流コンテナ挙動までを解析するには適していない。そこで本研究では、衝突直前までのコンテナの漂流挙動を、VOF法に埋め込み境界法を適用して開発した数値計算手法によりコンテナの漂流速度やコンテナ背後に堰き止められる水塊の量・流速などを算定し、その計算値を初期値とした流体・構造連成解析を行う一連の計算スキームを構築し、コンテナの漂流衝突力の算定法について考究することとする。

2. コンテナの漂流挙動

(1) 水理模型実験

二次元造波水槽(全長30m, 全幅0.7m, 高さ0.9m)にエプロン模型を設け(図-1参照), アクリル製の40ftコンテナ模型(縮尺1/75, 3.2×16.3×3.5cm)をエプロン上(護岸からの距離 $x_c=50$ cm)に配置させ実験を行った。入射波は、ピストン型造波板により生起させた11種類の長周期波(正弦波半周期分, 沖波波高(H)2.1~6.1cm, 造波周期(T)7.5~15.0s)を採用した。なお、予備実験としてエプロン上の遡上波の水位・流速の計測, およびエプロン上方と側方からのビデオ撮影によるコンテナの漂流中の挙

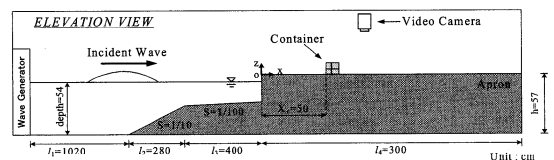


図-1 実験装置の概要

- | | | |
|--------|------|--------------------------------------|
| 1 学生会員 | 工修 | 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 |
| 2 正会員 | 博(工) | 日本学術振興会特別研究員PD 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 |
| 3 正会員 | 修(工) | J R東海コンサルタンツ |
| 4 正会員 | 工博 | 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 |

動の計測を行い、漂流軌跡や漂流速度を求めた。

(2) 数値計算手法

流体と物体の相互作用を取り扱うために、ここでは Yuki ら (2007) の手法を参考に構築した体積力型埋め込み境界 (体積力型 IB) 法を採用した。同手法では物体を各計算格子に占める物体体積率 F_{ob} ($0 \leq F_{ob} \leq 1$) で表し、その体積率を基に物体内部の速度を強制する。流体の速度を v_i 、物体の速度を $v_i^{ob} = u_i^{ob} + e_{ijk} \omega_j^{ob} r_k^{ob}$ (u_i^{ob} : 物体の並進速度; ω_j^{ob} : 物体の角速度; r_k^{ob} : 物体重心からの相対位置ベクトル; e_{ijk} : 置換記号) としたとき体積平均速度を $v_i = (1 - F_{ob})v_i + F_{ob}v_i^{ob}$ と定義すると、MARS に基づく 3 次元数値動浪水槽 (Nakamura ら, 2008) の運動方程式は

$$\left(1 + C_A \frac{1-m}{m}\right) \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial (v_j v_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\hat{\rho}} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g_i + \frac{f_i^s}{\hat{\rho}} + f_i^{ob} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tau_{ij} + 2\hat{\nu} D_{ij}) - R_i + Q_i - \beta_{ij} v_j \quad (1)$$

と修正できる。ただし、 p は圧力、 g_i は重力加速度ベクトル、 $\hat{\rho} = (1 - F_{ob})\{\rho_w + (1 - F)\rho_a\} + F_{ob}\rho_{ob}$ は密度、 ρ_w , ρ_a , ρ_{ob} はそれぞれ水、空気、物体の密度、 $\hat{\nu} = (1 - F_{ob})\{\nu_w + (1 - F)\nu_a\} + F_{ob}\nu_{ob}$ は動粘性係数、 ν_w , ν_a , ν_{ob} はそれぞれ水、空気、物体の動粘性係数、 m は空隙率、 C_A は付加質量係数、 f_i^s は CSF モデルに基づく表面張力、 f_i^{ob} は流体・物体間に作用する相間相互作用力、 τ_{ij} はダイナミック二変数混合モデルに基づく乱流応力、 D_{ij} はひずみ速度、 R_i は透過性材料による抵抗力項、 Q_i は造波ソース項、 β_{ij} は減衰係数行列である。なお、 g_i , f_i^s , τ_{ij} , R_i , Q_i , β_{ij} の詳細は Nakamura ら (2008) を参照されたい。

同式の時間発展計算に SMAC 法を適用すると、Poisson 方程式と SMAC 法の修正段階はそれぞれ

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\gamma^n}{\hat{\rho}^n} \frac{\partial \varphi^{n+1/2}}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial (m v_i^n)}{\partial x_i} - q^{n+1} + \frac{\partial (\gamma^n f_i^{obn})}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$v_i^{n+1} = v_i^n - \gamma^n \frac{\Delta t^{n+1/2}}{m} \left(\frac{1}{\hat{\rho}^n} \frac{\partial \varphi^{n+1/2}}{\partial x_i} - f_i^{obn} \right) \quad (3)$$

と書ける。ここで、 v_i^n は流速の予測値、 $\varphi^{n+1/2} = \varphi^{n+1} - \varphi^n$ 、 $\Delta t^{n+1/2}$ は時間の刻み幅、 q^n は造波位置でのわき出し強さであり、 f_i^{obn} , γ^n はそれぞれ次のようになる。

$$f_i^{obn} = F_{ob}^n \frac{v_i^{obn} - v_i^n}{\gamma^n \Delta t^{n+1/2} / m} \quad (4)$$

$$\gamma^n = \frac{m}{1 + C_A (1-m) / B^n} \quad (5)$$

なお、 B^n の定式化は Nakamura ら (2008) に詳しい。

本モデルでは、物体の位置の更新に際して、まず物体を高粘性流体 ($\nu_{ob} = 1.0 \text{ cm}^2/\text{s}$) と仮定して上記の計算を行い、

MARS による VOF 関数 F の移流計算を行った。その後、物体内部の圧力を用いて作用力を算出する Xiao ら (1997) の手法により物体の並進・回転運動を計算し、最後にそれに基づいて F_{ob} の更新を行った。ただし、Xiao ら (1997) と異なり、物体の並進・回転運動の時間発展には Newmark の β 法を採用した。また、物体の位置からの F_{ob} の計算には、Yuki ら (2007) の tanh 関数による近似を改良して F_{ob} の総和の増減を抑えた。

(3) 結果と考察

まず IB 法を用いた手法によるコンテナの漂流挙動の計算を行い、水理模型実験結果と比較することにより本モデルの妥当性を検証する。ここでは、一例として沖波波高 (H) 5.2 cm、造波周期 (T) 7.5 s の入射波を用いた場合の漂流挙動について論議する。なお、使用したコンテナは満載時を想定した 40 ft コンテナ (77.6 g) である。図-2 に実験結果と計算結果を示す。衝突後 0.1 s に遡上波はコンテナ沖側前面上方に打ち上るとともに、コンテナは漂流を開始すること (図-2(a))、また、0.3 s 後にはコンテナからの反射波により碎波が発生すること (図-2(b)) など、計算結果は実験結果を定性的によく再現している。

コンテナの漂流速度の時間変化・空間変化を図-3 に示す。コンテナが加速していく間の速度変化が概ね再現できていること (図-3(a) 参照) や漂流距離が一定以上になった後、漂流速度がほぼ一定になり、この場合、約 100 cm/s になること (図-3(b) 参照) などから、本計算手法は実験結果を定量的にも良好に再現していると言える

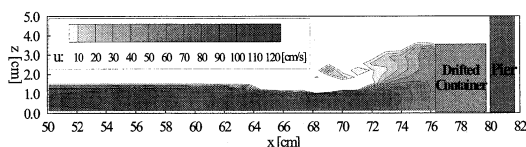


図-4 衝突直前の遡上波の波形ならびに流速分布の一例

一定以上になった後は、コンテナの漂流速度は最大遡上流速 u_m に近くなることも明らかになった。

以上より本計算手法の妥当性が確認でき、次章の流体・構造連成解析の初期値を本モデルにより提供することとした。なお、本モデルにより流体・構造連成解析に使用した衝突直前における遡上波の形状ならびに流速分布の一例を図-4に示す。

3. 漂流衝突力

(1) 水理模型実験

漂流コンテナの衝突力や衝突作用時間を測定するため、被衝突物として、アクリル製受圧板と橋脚などを想定した金属円柱の2種類を用いて水理模型実験を行った。

まず、受圧板への衝突実験について述べる。水理模型実験装置は図-1と同様であり、入射波としては沖波波高(H)5.2cm、造波周期(T)7.5sを採用した。コンテナ模型の質量は衝突力が明確に把握できるように満載を想定したコンテナのほぼ2倍の質量(132.7g)とし、ひずみゲージを貼付した8.3(長さ)×2.4(幅)×0.4cm(厚さ)のアクリル製受圧板により衝突力を測定した(図-5(a)参照)。

一方、金属円柱を対象とした実験では、図-1に示した水理模型実験装置と同様な地形に対し、静水深depth=44.5cm、エプロン高さ $h=47$ cm、 $l_1=887$ cmの三点を変更し行った。模型コンテナの質量は満載条件とし(77.6g)、沖波波高(H)7.0cm、造波周期(T)13.0sの入射波を用いた。実験では図-5(b)に示すように、L型アングルを介して、金属円柱(直径1.5cm)を6分力計と結合させることにより円柱に作用する力を計測した。なお、両実験において、コンテナと被衝突物の設置位置はそれぞれ $x_c=70$ 、 $x_p=80$ cmとした。

(2) 流体・構造連成解析手法

前述の漂流衝突現象を再現するため、非線形衝突応答汎用ソフトLS-DYNA3Dを使用し、解析を行った。本ソフトの検証については廉ら(2007)を参考されたい。

本研究では、ALE手法(LSTC, 2003)に基づく流体・構造連成解析を用いて漂流コンテナと受圧板や円柱間の衝突問題について検討を行う。図-6に、前節で述べた実験条件(図-5)をモデル化した計算領域を示す。図中のコンテナや受圧板、また円柱モデルはシェルのラグランジュ要素で、コンテナ背後の水塊や他の領域のボイドモデルはソリッドのオイラー要素で構成されている。また、図-6(a)の受圧板の上端や図-6(b)のL型アングルの上端は固定されており、アングル同士やアングルと円柱間は衝

撃により同時に動くように結合させた。計算の初期値として用いる水塊の物理量は図-4に例示した値であり、また、受圧板や円柱に衝突する直前のコンテナ漂流速度はそれぞれ40cm/sと58cm/sである。

本研究では、流体・構造連成解析の計算負荷を軽減する目的でIB法を導入したVOF法による計算との結合を行っているが、その計算領域全体で連成解析を行うことは無駄が大きい。よって、事前に本連成解析で対象とする計算領域(遡上波の範囲)を適切に決定し、計算負荷を小さくする必要がある。そこで、遡上波、すなわちコンテナ背後の水塊の範囲を0~15cmの12種類変化させ、それぞれの条件でコンテナの漂流衝突力を計算し、衝突力が収束する最短の計算領域長を求め、計算対象とする水塊の量を決定した。水塊の量(長さ)がコンテナの衝突力や衝突作用時間の計算結果に及ぼす影響を図-7に例示する。同図に示されるように、本条件においては、水塊の長さが6cm以上の場合、衝突力や衝突作用時間は変化しなくなり、このときの水塊長を対象とすれば適切に衝突力が算定できることが明らかとなった。ただし、図-8に示すように、衝突後にも水塊の量による影響が現われるため、それも含めて考慮する必要がある。

(3) 結果と考察

図-4に例示したようなVOF法による漂流計算により得られたコンテナや背後水塊の物理量を入力値とした衝突シミュレーションの様子を図-9に例示する。遡上波が衝突後に上方に打ち上がっている様子やコンテナ側方に回り込む様子など、実験で確認された様子が計算されている。図-10に受圧板や円柱に作用する漂流コンテナの衝突力の実験結果と本モデルの計算結果の比較を示す。実験値と計算値の間には最大衝突力に関して若干の差は見られるものの、衝突力の時間変化は、受圧板と円柱のい

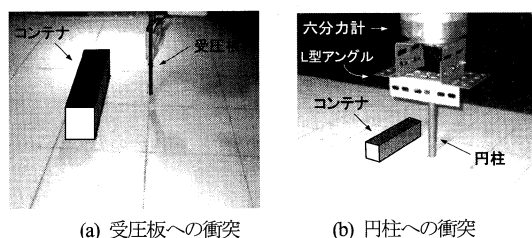


図-5 コンテナと被衝突物の初期配置

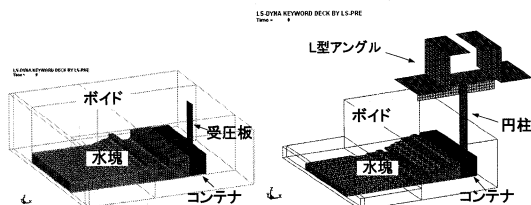


図-6 流体・構造連成計算の計算領域

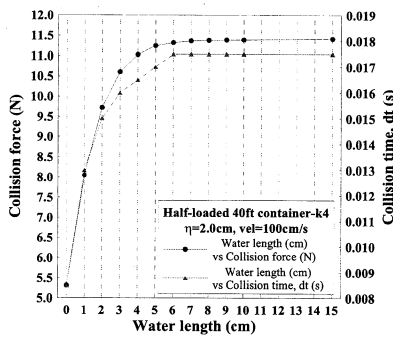


図-7 水塊の長さや衝突力や衝突時間の関係

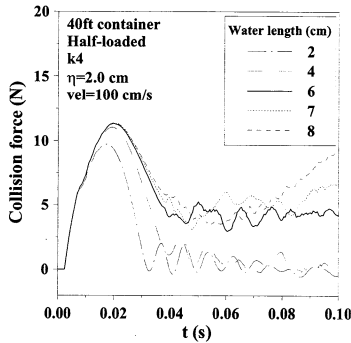


図-8 水塊の長さ変化による衝突力の時間変化

ずれの場合もともに良く一致している。さらに、衝突終了後も遡上波による波力と思われる力がほぼ再現できていることから、本研究で考慮した水塊の量は適切であったと考えられる。

以上のことから、本研究で開発したIB法を導入したVOF法による数値波動水路を用いた漂流計算により得られた物理量を初期値として、LS-DYNA3Dを用いた流体・構造連成解析による漂流コンテナの衝突力を予測する一連の計算手法の妥当性が確認されたといえる。

4. フルスケールのコンテナの衝突作用時間

本章では国際規格のフルスケールコンテナを対象として、衝突作用時間について議論する。図-11に示すよう遡上水位1mの遡上波により漂流した40ft空きコンテナ(コンテナ漂流速度1.57m/s)と津波避難所の橋脚の衝突を想定し、衝突時に作用する水塊の影響を二種類のコンテナの衝突向きに対して検討する。なお、このシミュレーションに関しても前章と同様にALE法が用いられており、コンテナや橋脚はそれぞれ弾塑性体及び剛体として取り扱っている。

図-12は横向きと縦向きに衝突する漂流コンテナの衝突力とコンテナ背面板の変位(進行方向を正)を示している。同図に見られるように、衝突力の時系列には複数のピーク値が存在する場合や、ピーク値が一定時間保持される場合がある。これらの場合、自動車衝突解析で用い

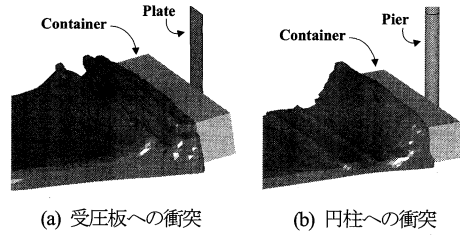
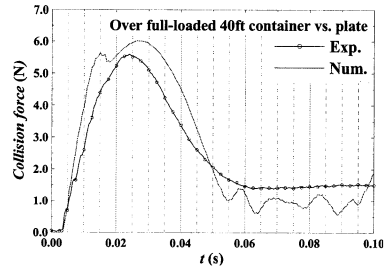
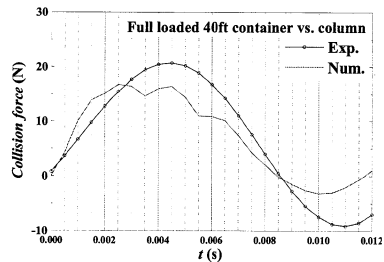


図-9 流体・構造連成解析の一例



(a) 受圧板への衝突



(b) 円柱への衝突

図-10 衝突力の実験値と計算値の比較

られるように、衝突開始から対象とする物体の最後部が最も先端に移動するまでの時間を衝突作用時間と定義することが適切であると判断される。この概念に基づき衝突作用時間を求めると、横向き衝突時の衝突作用時間(dt)は水塊が存在しない場合は16ms、存在する場合は22msであり、また、縦向き衝突時ではそれぞれ12ms、15msになることが判明した。ただし、横向きの衝突では水塊の影響により最大衝突力と衝突作用時間が共に増大しているが、一方、縦向きの衝突では最大衝突力はほぼ変わらず、衝突時間のみが延長している。これは図-11(b)に示すようにコンテナの進行方向長さが長いことにより衝突時の力がコンテナ前方まで一気に伝達されないためであると考えられる。なお、このような現象は水塊が存在しないコンテナのみの縦向き衝突でも現れている。また、図-12(a)において、衝突終了後(0.09s後)にも波力が作用している様子が確認され、同様な現象が図-12(b)においても0.17sから現れることが確認できた。このことから本フルスケールの計算に対しても、採用した水塊の範囲は十分であったと判断できる。

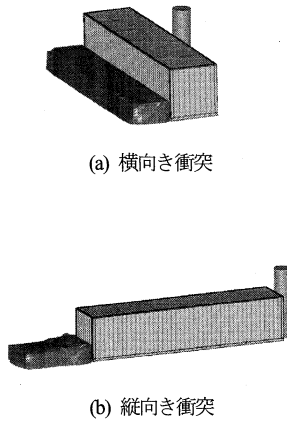


図-11 フルスケールコンテナの衝突

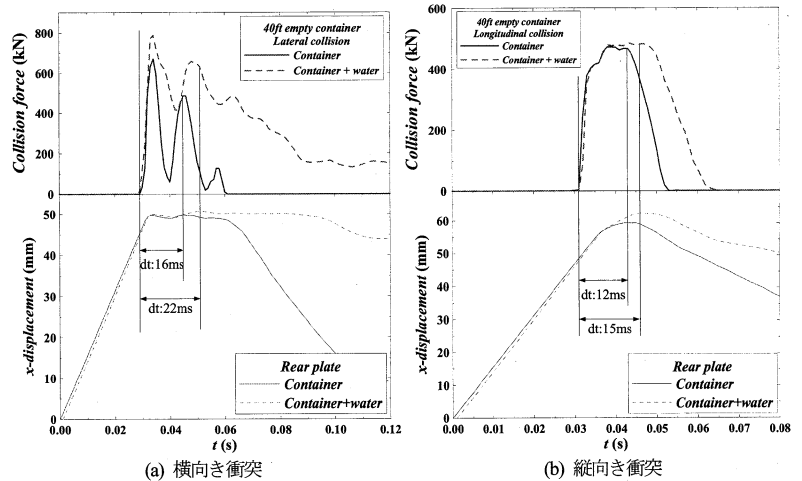


図-12 水塊による衝突時間の変化

5. 結 論

本研究では、遡上津波によるコンテナの漂流挙動ならびに衝突作用時間や衝突力を算定する計算手法について、コンテナの漂流に関してはIB法を導入したVOF法を、コンテナ衝突直前からの衝突解析は流体・構造連成解析に基づいたLS-DYNA3Dを用いる一連の手法を提案し、その妥当性を確認した。また、フルスケールの漂流コンテナの衝突解析を行ってコンテナ背後の付加質量の影響も検討した。本研究で得られた主な結果を以下に要約する。

- 1) 遡上津波による漂流コンテナの挙動を解析するため体積力型IB法を導入したVOF法による数値波動水槽を開発した。水理模型実験結果との比較から本手法の妥当性を検証した。
- 2) 上記の計算手法によるコンテナの漂流計算結果を初期値とし、ALE要素を用いたLS-DYNA3Dによる流体・構造連成解析を行うスキームを提案した。この際、漂流中のコンテナ背後に存在する水塊を全て考慮しなくても、ある程度の長さ以上を考慮すれば衝突力を適切に算定可能であることを示した。
- 3) 本研究で提案した計算スキームにより、実験で得られた受圧板や円柱へのコンテナの衝突現象を適切に計算可能であることを明らかにした。
- 4) フルスケールのコンテナの衝突計算を行い、付加質量が衝突時間や衝突力に影響を及ぼすことを確認した。

本研究は科学研究費補助金(基盤研究(B) 課題番号19360222 代表者 水谷法美)によって行われたもので

ある。また、流体・構造連成解析を行うにあたり、有益な助言を賜った名古屋大学大学院伊藤義人教授ならびに同北根安雄助教に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 有川太郎・大坪大輔・中野史丈・下迫健一郎・石川信隆(2007): 遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.846-850
- 安野浩一郎・西畑 剛・森屋陽一(2007): 津波による漂流物の挙動予測手法に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.866-870
- 池谷毅, 稲垣聡, 朝倉良介, 福山貴子, 藤井直樹, 大森政則, 武田智吉, 柳沢 賢(2006): 津波による漂流物の衝突力の実験と評価方法の提案, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.276-280.
- 水谷法美・白石和睦・宇佐美敦浩・宮島正悟・富田孝史(2006): エプロン上のコンテナへの津波の作用と漂流衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.791-795.
- 廉慶善・水谷法美・白石和睦・宇佐美敦浩・宮島正悟・富田孝史(2007): 陸上遡上津波によるコンテナの漂流挙動と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.851-855.
- LSTC (2003): LS-DYNA3D Keyword User's Manual 970, Livermore Soft Technology Corporation, USA.
- Nakamura, T., Kuramitsu, Y. and Mizutani, N. (2008): Tsunami scour around a square structure, Coastal Eng. J., JSCE, Vol.50, No.2, pp.209-246.
- Xiao, F., Yabe, T., Ito, T. and Tajima, M. (1997): An algorithm for simulating solid objects suspended in stratified flow, Comp. Phys. Com., Elsevier, Vol.102, pp.147-160.
- Yuki, Y., Takeuchi, S. and Kajishima, T. (2007): Efficient immersed boundary method for strong interaction problem of arbitrary shape object with the self-induced flow, J. Fluid Sci. Tech., JSME, Vol.2, No.1, pp.1-11.