

高精度粒子法による河川津波漂流物の数値シミュレーション

NUMERICAL SIMULATIONS OF TSUNAMI DRIFT IN RIVER CHANNELS BY AN IMPROVED PARTICLE METHOD

(独) 土木研究所寒地土木研究所 ○正会員 阿部 孝章 (Takaaki Abe)
 北見工業大学社会環境工学科 正会員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 正会員 伊藤 丹 (Akashi Itoh)

1. はじめに

2004年スマトラ島沖地震及び2011年東北地方太平洋沖地震津波によって、海岸構造物の被災、陸上での津波氾濫流による家屋被災の他に、河川津波による漂流物の輸送とそれに伴う橋梁等の破壊・消失の問題が指摘された¹⁾。北海道のような積雪寒冷地においては12月から4月にかけて、多くの河川で結氷が生じるが、その状態に津波が侵入すると氷が破壊され多量の漂流物となる。東北地方太平洋沖地震による河川津波は北海道でも複数の1級河川で観測され²⁾、多量の氷板漂流、アイスジャム、樋門ゲートへの氷板侵入など、寒冷地特有の課題が顕在化した³⁾。

写真-1に示したのは2011年東北地方太平洋沖地震による津波が輸送したと考えられる、鶴川(北海道太平洋岸) KP.0.8 付近左岸における氷板痕跡である。道内の河川では写真のような巨大氷板が河口部から津波遡上範囲において散見され、もし近海で大地震が生じた場合には更に大きなエネルギーを持って遡上することが想定される。一方で、河川のような水深の浅い領域を遡上する津波の先頭部分では、局所的な水位上昇を伴う波状段波が形成されることが多い。前報⁴⁾で実施された実験的研究により、漂流物輸送速度の時系列変化と、波高計に捉えられた波形が類似していることが指摘された。波状段波が発達した上で河道内の漂流物輸送が生じた場合、漂流物が急激に加速されることが明らかとなった。ところが、そのような漂流特性の物理的なメカニズムはほとんど不明で、直ちに構造物等へ対する作用外力を評価できないのが現状である。

本研究では、高精度粒子法による鉛直2次元場の数値解析モデルを構築し、河川津波による漂流物として氷を主対象とした数値シミュレーションを行った。実験による水位計測結果との比較によって再現性を検証

した後、既往研究では十分に踏み込まれていなかった激しい自由水面変動と漂流物輸送過程のメカニズムについて計算力学的な検討を実施した。

2. 研究手法

(1) 数値解析モデル

遡上津波と漂流氷板の相互作用を直接的に解析するため、激しい自由水面の変動と漂流物の輸送を同時にかつ簡易に解析可能な数値解析手法である粒子法を用いた。基本的な計算手法はKoshizukaら⁵⁾により提案された粒子法の一つであるMPS法を採用した。基礎式は連続式 $D\rho/Dt = 0$ と Navier-Stokes 方程式：

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{K} \quad (1)$$

(\mathbf{u} :流速ベクトル, ρ :流体密度, p :圧力, ν :動粘性係数, \mathbf{K} :外力項) である。

MPS法において不等流場を遡上する津波の波形変化と漂流物輸送を再現するためには、正確な界面の追跡が肝要と考えられた。そこで本研究では標準型MPS法に比して大幅に圧力攪乱を低減可能な高精度MPS法を用いることとした。MPS法の圧力解法の精度向上に関する取り組みは、これまで国内でも複数の研究グループによって多数提案されているが(例えばKhayyerら⁶⁾等)、本研究ではこのうちコードへの実装が比較的容易なCMPS(Corrected-MPS)法⁷⁾スキーム及びMPS-HL-HV(MPS with Higher order Laplacian of pressure, Higher order Laplacian for Viscous forces)法⁸⁾のスキームを用いた。CMPS法のスキームにおいては、標準MPS法で以下のように離散化されるNavier-Stokes方程式の圧力勾配項

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{p_j - \hat{p}_i}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} \mathbf{r}_{ij} w(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad (2)$$

(但し, $\hat{p}_i = \min_{j \in J} (p_i, p_j)$, $J = \{j : w(\mathbf{r}_{ij}) \neq 0\}$) を、次のように anti-symmetric (逆向き等大) な

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{(p_i + p_j) - (\hat{p}_i + \hat{p}_j)}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} \mathbf{r}_{ij} w(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad (3)$$

なる表式に置換する。また、MPS-HL-HV法のスキームにおいては、次式で表されるMPS法のラプラシアンモデル：

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2D_s}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} \phi_{ij} w(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad (4)$$



写真-1 鶴川河口部高水敷に残された長さ5mを超える巨大氷板(2011年3月14日12時頃撮影)

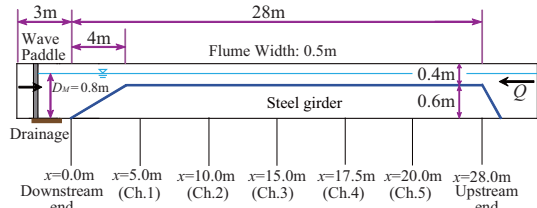


図-1 実験装置の寸法と波高計の設置位置 (側面図)

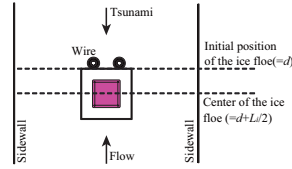
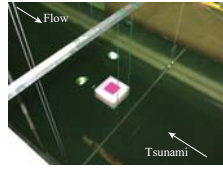


図-2 氷板模型の設置状況の写真と位置関係を示す模式図

を、物理量 ϕ の空間勾配の発散を取るように修正し、

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \nabla \cdot \langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{1}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{3\phi_{ij} r_{ij}}{r_{ij}^3} \quad (5)$$

という表式に置換したものである。但し、 p_i : 粒子 i の圧力、 D_s : 空間次元数、 n_0 : 基準粒子数密度、 r_{ij} : 粒子 j の粒子 i に対する相対位置ベクトル、 w : 重み関数、パラメータ λ は MPS 法のモデル定数: $\lambda = \sum_{j \neq i} (w(|r_{ij}|) |r_{ij}|^2) / \sum_{j \neq i} |r_{ij}|^2$ であり、括弧 $\langle \cdot \rangle_i$ は MPS 法の粒子間相互作用モデルで離散化することを示している。氷板輸送は、PMS (Passively Moving Solid) モデル⁹⁾を用いることで再現し、氷を表す剛体粒子は実験で用いたポリプロピレン板に合わせ比重 0.92 とした。

(2) 水理実験及び数値解析条件

実験では図-1 の水路を用い、縦断的な波形変化を計測するため図中 5 箇所に容量式波高計 (ケネック製) を設置した。本稿ではそれぞれによる計測を Ch.1~Ch.5 と統一して表記することとする。氷板模型を図-2 のように下流側に針金を立てて設置固定し、津波遡上への影響を最小限に抑えつつ、氷板が上流側に輸送される過程を検討の対象とした。氷模型は正方形であり、長さ L_i そして厚さ h_i については、実河川で発生した漂流氷板の寸法計測結果¹⁰⁾を参考に、 $L_i = 6, 9, 12$ cm, $h_i = 1, 2, 4$ cm のそれぞれ 3 通りを設定した。氷板の設置位置 d は 5.0, 10.0, 15.0 m の 3 通りに設定した。更に実験水路の上方にデジタルカメラを設置し、氷板輸送過程の動画撮影を行った。氷板の輸送速度はデジタルカメラにより撮影・収録した連続画像を PTV 解析することで求め、数値解析結果との比較検証を行った。

数値解析については、計算機の制約上、水理実験を再現するために計算領域に配置した粒子径 d_0 は、最も薄い $h_i = 1$ cm の氷板を解像可能な最大値とし、 $d_0 = 1$ cm とした。この時図-1 を再現した領域全体の粒子数は、約 70,000 個である。勾配を変化させた可傾斜台上の津波実験水路を模擬するため、外力項のうち、重力項 g は河床勾配 i に応じ傾斜させて各計算点粒子に与えた。相互作用計算を行うための影響範囲は Khayyer ら⁷⁾による影響半径 r_e の推奨値 $r_e = 2.4d_0$ を用いた。

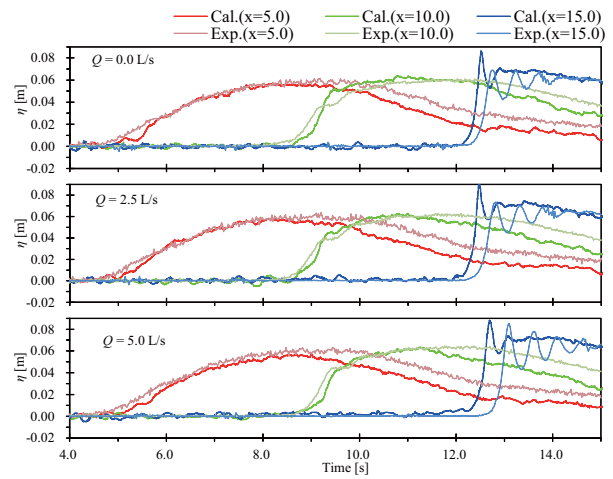


図-3 水理実験における波高計の計測結果 (Exp.) と高精度粒子法による計算結果 (Cal.) の比較

粒子法における計算負荷軽減のため、Boussinesq 方程式系モデルとの連成による造波境界が後藤ら¹¹⁾により提案されているが、この手法では河川流とその下流端での流出の再現に困難が伴う。本研究ではより実態の水路に即した形で、下流端の造波板を模擬するため強制変位を与えることができる剛体粒子を設置して、実験水路に併設された造波機と同じ時間間隔で同変位を与えることで造波を行うという手法を取った。計算領域は図-1 の水路のうち下流端から $X = 20.0$ 地点までを再現し、流入境界から実験の流入流量に応じた個数と速度で計算粒子を流入させた。

実験水路河床には人工芝が貼られている。これを模擬するため Khayyer ら¹²⁾により MPS 法に導入された anti-symmetric な底面摩擦牽引力: $\mathbf{F}_{ij}^D = -\gamma w(|r_{ij}|)(\hat{\mathbf{r}}_{ij} \cdot \mathbf{u}_{ij})\hat{\mathbf{r}}_{ij}$ を用いた (但し $\hat{\mathbf{r}}_{ij} = \mathbf{r}_{ij}/r_{ij}$)。摩擦係数は比較的大きな値 ($\gamma = 1.5$) を用いたが、これは造波前の状態で縦断水位分布が実験とほぼ一致するように設定したものである。以上の計算モデルにおいて、造波時の波高計設置点における水位を算定した。

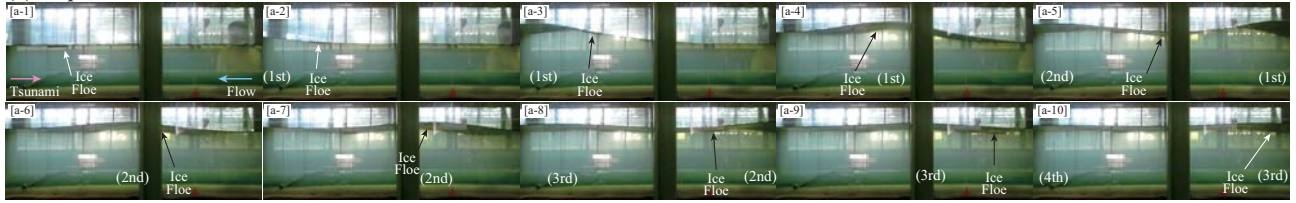
MPS 法を始めとした粒子法における水位あるいは水深の判定は、その Lagrange 的な計算過程の性質のため実施例が少ない。しかし本研究では波状段波の形成過程を詳細に検討するため、可能な限り計算粒子の運動に即した水位判定を行う必要がある。そこで、初期状態 ($t = 0$ s) において、 $r_e = 2.4d_0$ の条件下で 1 つの水表面粒子が有する近傍粒子数 12 を基準として、水位計設置点の前後 r_e の領域で、近傍粒子数が 12 となる粒子の y 座標を平均化した値を水位とみなした。

3. 結果及び考察

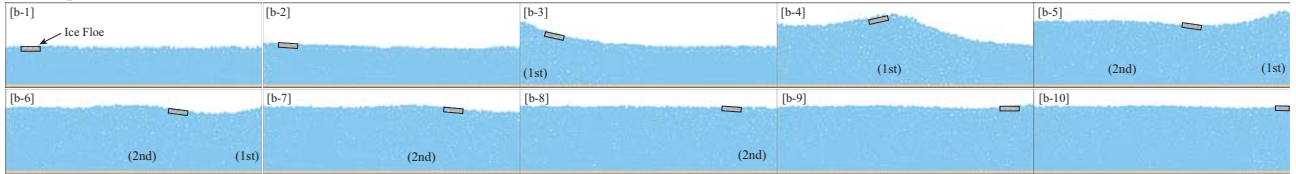
a) 水位計測結果の再現性

ここではまず、粒子法による不等流場を遡上する津波の再現性について検討を行うため、水路内に氷を設置しないケースの実験のシミュレーションを実施した。図-3 に示したのは、本研究で用いた計算手法による、Ch.1~3 地点における波形変化である。いずれの流量

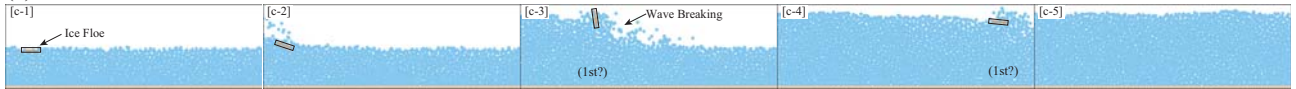
(a) Experiment



(b) Improved MPS (CMPS-HL-HV)



(c) Standard MPS

図-4 遡上津波による氷板輸送過程の実験 (側方からの撮影) と数値解析との定性的な比較 ($L_i = 6 \text{ cm}$, $h_i = 1 \text{ cm}$ のケース)

ケースにおいても, Ch.1 及び Ch.2 地点では水位変動の傾向は良好に再現されている. Ch.2 地点においてはフロントから分散波のでき始めが見られるが, 粒子法による解析結果にも同様の波形がわずかではあるが現れている. しかし Ch.1, 2 のピーク水位後の波形はやや過大評価となった.

しかしながら, 波状段波が明瞭となる Ch.3 では, いずれの流量ケースに対しても計算値は波速を過大に評価していることがわかる. また, 分散波列の形成について見ても実験では 3 から 4 波峰確認できるのに対し, 粒子法において確認できるのは 2 波峰のみで, 実験で観測された波状段波の正確な再現はできていない. 波速が過大となる要因として考えられるのは, 数値解析を鉛直 2 次元空間で行っており, アクリル製の水路側壁の摩擦抵抗を考慮していないことが挙げられる. また, 底面摩擦を考慮する対象となっているのが水路床上の計算粒子から r_e の流体粒子に限られているため, ごく薄い層にしかその効果が現れていない可能性もある. すなわち, 遡上に伴い波状段波が発達し波高が上昇する (水深が大きくなる) につれ, 相対的に底面摩擦の影響は小さくなると考えられる. 初期水位分布を実験値に一致させてから津波を遡上させているものの, 現状ではこのように底面近傍において流速分布を十分に再現し得ていないこと考慮に入れた上で, 以下の考察を行っていく必要がある. 今後は摩擦係数等のパラメータの決定方法なども含め, より議論を深めていく必要があると考えられる.

MPS 法により波状段波の形成を示した既往の研究例はほとんど見られない. 本研究の数値実験により, 不等流場を遡上する河川津波の解析に対しても一定の有効性が示されたと言える.

b) 波状段波に顕著な氷板輸送過程の再現性

次に, 設置位置 $d = 15.0$ として実際に氷板を浮かべた水理実験の数値シミュレーションを実施し, 実験に

おいて側方から撮影した動画のスナップショットと, 計算結果における水面形状と剛体モデルにより再現された氷板の位置の比較を行った (図-4). 比較のため, 高精度スキームを用いない標準型粒子法による同条件の計算結果も示した. 図中の (a) が水理実験における時系列のスナップショット, (b),(c) がそれぞれ対応する高精度粒子法, 標準型粒子法による計算結果である. (a) の写真では, 右側から水路の流れがあり, 左から波状段波の遡上があり氷板輸送が開始する. 実験のスナップショットは 1 段目左から右へ, その後 2 段目左から右へ時系列順に並んでいる. 図中では, 時々刻々の氷板位置を "Ice Floe" と矢印で, 分散波列の第 1, 2 波峰は (1st), (2nd) のようにそれぞれ示した.

実験写真より氷板は波状段波のフロント第 1 波峰のみによって輸送されるのではなく, 水面付近を滑るように第 1 波峰に乗り上げ, 第 1 と第 2 波峰間の波谷に落ち込み, 次の第 2 波峰に乗り上げるといったように, 波峰への乗り上げと波谷への落ち込みを繰り返して輸送される様子が確認された. これは本研究で実施した実験では氷板形状によらず, 共通して確認された現象である.

高精度粒子法による解析結果を同図 (b) に示しているが, 用いた剛体モデルにより, 氷板の第 1 波峰への乗り上げ, 続く波谷への落ち込み, 第 2 波峰への乗り上げが概ね良好に再現されていることがわかる. 前節でも指摘したように計算では第 3 波峰が明瞭な形状で得られていないが, 波状段波フロント直近である第 1, 2 波峰においては計算で概ね良好な結果が得られたと言える. 一方で, 標準型粒子法のスキームを用いた場合 (同図 (c)) は, 水路の $X = 15.0$ に到達する以前にフロントが碎波を起こしており, 波状段波の形成は確認できない. 氷板は碎波フロントと共に急激な遡上を起こしている. 図のように, 碎波と漂流物の激しい干渉を安定的に解析可能であるのは粒子法の一つの利点

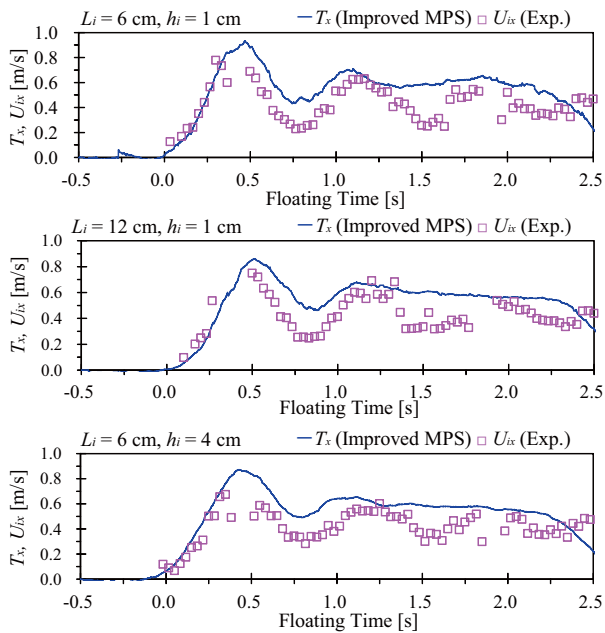


図-5 氷板輸送速度の時系列変化に関する実験結果と計算結果との比較 ($Q = 5.0 \text{ L/s}$ のケース)

である。しかし波高計測結果と実験写真の両者を考慮すると、高精度粒子法により漂流物輸送の再現性が顕著に向上していると言える。高精度粒子法においては、圧力攪乱の低減が達成され津波フロント内部の鉛直流速分布の再現性が向上し、結果として波状段波が形成されたものと推察される。

次に、氷板の漂流挙動に関して数値解析と実験結果との比較を行った。前述の通り、本計算モデルでは波状段波の遡上速度を過大評価してしまっているため、氷板が浮遊し始めてからの経過時間を基準とした比較を行った。図-5に示したのは、氷板浮遊時間と、実験で計測された氷板輸送速度 U_{ix} 、そして数値解析で得られた、剛体としての氷板全体の並進速度ベクトル $T = (T_x, T_y)$ である。 $L_i = 6 \text{ cm}$, $h_i = 1 \text{ cm}$ を最上段に、2段目に $L_i = 12 \text{ cm}$, 3段目に $h_i = 4 \text{ cm}$ のケースを示した。図-3内の $Q = 5.0 \text{ L/s}$ のケースで得られた波形が入射したことに伴い、 T_x は始めに大きく上昇し、減少と増加を交互に繰り返して、徐々に小さくなっていく。また、実験から得られた U_{ix} に比較して、 T_{ix} はピークを始め波形全体が過大評価となった。これは図-3で見られたように Ch.3 の波形が過大評価となっていることに起因していると考えられる。一方で、速度の時間波形の波峰と波谷の時間帯は実験と計算で概ね一致している。

以上の結果から、簡易な弱連成の剛体モデルを用いたにも関わらず、粒子法におけるこの種の激しい界面変動による漂流物輸送への適用性の一端が示されたものとする。より精緻な再現計算の実施のためには、粒子法の計算スキームそのものの高精度化、計算領域の高解像度化の検討に加え、氷と水の界面における相互作用力のモデル化等も必須と考えられる。

4. まとめ

本研究では、河川津波の遡上に伴って生じ得る津波漂流物の挙動を精緻に評価するための鉛直2次元場数値解析モデルを構築した。水理実験の再現計算を実施し、水位計測記録を概ね良好に再現可能であることを示した。更に波状段波の場合に顕著な漂流物の輸送過程を概ね良好に再現可能であることが示された。また、漂流氷板を輸送する波状段波の内部構造と漂流氷板の輸送過程に関する詳細な検討を実施し、実験から示唆された漂流氷板の輸送メカニズムが、数値解析上も再現されることを示した。

本研究では、主に寒冷地河川における漂流氷板を対象としたが、本研究で構築したモデルは、漂流木や船舶など河川津波で発生し得る他の漂流物へも適用可能と考えられる。今後は、本研究で構築した河川津波の数値実験水路を用いた多様な解析を実施して精度向上を図ると共に、実用的な河川津波における漂流物輸送の数値シミュレータとして取りまとめを行っていく予定である。

参考文献

- 1) Yasuda, H., Watanabe, Y., Mitamura, H., Hasegawa, K. and Nawarathna, B.: Report on Asian tsunami ascending the river, and its associated bank erosion and bridge failure in Sri Lanka, Proceedings of the 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, pp. 1231-1236, 2005.
- 2) 阿部孝章, 吉川泰弘, 安田浩保, 平井康幸: 2011年東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波の北海道内における河川遡上, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68(4), pp. I.1525 - I.1530, 2012.
- 3) 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸: 東北地方太平洋沖地震発生時の水位・潮位記録に基づく河川津波の考察, 土木学会北海道支部論文報告集, 第67号, 2012.
- 4) 阿部孝章, 吉川泰弘, 安田浩保, 平井康幸: 波状性津波による河道内の氷板輸送に関する研究, 河川技術論文集, 第17巻, pp. 359-364, 2011.
- 5) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nuclear Science and Engineering*, Vol.123, pp. 421-434, 1996.
- 6) Khayyer, A. and Gotoh, H.: Enhancement of stability and accuracy of the moving particle semi-implicit method, *Journal of Computational Physics*, Vol.230, No.8, pp. 3093-3118, 2011.
- 7) Khayyer, A. and Gotoh, H.: Modified moving particle semi-implicit methods for the prediction of 2D wave impact pressure, *Coastal Engineering*, Vol.56, No.4, pp.419-440, 2009.
- 8) Khayyer, A. and Gotoh, H.: A higher order Laplacian model for enhancement and stabilization of pressure calculation by the MPS method, *Applied Ocean Research*, Vol.32, pp.124-131, 2010.
- 9) Gotoh, H. and Sakai, T.: Key issues in the particle method for computation of wave breaking, *Coastal Engineering*, Vol.53, pp.171-179, 2006.
- 10) 阿部孝章, 吉川泰弘, 平井康幸: 北海道太平洋岸地域で発生した河川津波に伴う漂流氷板の寸法計測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68(2), pp. I.1436-I.1440, 2012.
- 11) 後藤仁志, 五十里洋行, 酒井哲郎, 奥田一弘: 粒子法と Boussinesq モデルのハイブリッド化に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第50巻, pp.1453-1458, 2006.
- 12) Khayyer, A. and Gotoh, H.: On particle-based simulation of a dam break over a wet bed, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.48, No.2, pp.238-249, 2010.