

粒子法による流木群の堰止め過程のLagrange解析

LAGRANGIAN PARTICLE METHOD FOR ANALYSIS OF DAM-UP PROCESS

BY DRIFT TIMBERS

後藤仁志¹・酒井哲郎²・林 稔³

Hitoshi GOTOH, Tetsuo SAKAI and Minoru HAYASHI

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

³学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科土木工学専攻 (同上)

Recently, a potential of the production of drift timbers increases due to the existence of the fallen trees in mountainside caused by a gale of typhoon. Hence, the effect of drift timbers on river structures, such as a bridge, are required to be clarified. Here, the dam-up process of drift timbers at a small bridge in mountain stream are simulated by the MPS method, to which the subroutine for tracking the motion of rigid body is attached as a model of drift timbers. The mass conservation of fluid-timber mixture, the fluid-timber interaction, the inter-timber collision, and the fragmentation and coalescence of fluid including a water surface wave and a splash are well described by the present model. The complicated time-dependent process of the dam-up and resultant overflow at a small bridge are well reproduced.

Key Words: *drift timber, fluid-timber mixture, dam-up, mountain stream, MPS method, rigid body tracking*

1. 緒 言

流木群の橋脚による堰止めとそれに伴う水位上昇は、橋梁を破損させたり、周辺に氾濫を誘発するなど、上流域での河川災害の主要因の一つとなっている。さらに、山腹上部の急傾斜地までが杉・檜等の人工林で覆われ、そこでの森林荒廃が風倒木を増加させることで、流木の生産ポテンシャルは増大している。これに加えて、森林荒廃は、山腹崩壊自体の発生頻度や規模も大きくしている。崩壊土砂とともに一旦は溪流に堆積した立木や風倒木は、その後の豪雨で再流出して流木群となり、河川を流下する。

流木による災害を抑制するには、流木の発生量自体を低下させることが肝要であり、この意味では適切な森林管理が不可欠であることは議論を待たないが、風倒木に覆われ荒廃した森林が多く存在する現状を考えると、流木が混入することにより水流および水理構造物に対してどのような影響が生じるのかを適切に予測することも焦眉の課題と言える。

このような現状にもかかわらず、流木の流動過程のモデル化に関する既往の研究は少なく、氾濫流を

対象にした流木の輸送と氾濫域の家屋群等による流木の堰止めを扱った例として、中川ら^{1, 2)}の研究が見られるのみであろう。中川らは、Euler型の基礎式を用いて解いた流れ場で、個々の流木の運動を独立して扱う（流木間相互作用を無視する）方法でLagrange的に流木を追跡し、流木の拡散域の予測を行う方法を示しており、水理実験との比較によってモデルの妥当性を検証している。彼らの研究は、流れや固体要素の運動追跡のモデルの進歩を積極的に取り入れた流木流動モデルの導入例として示唆に富んでいる。

本稿では、氾濫に至る以前の河道内での現象を対象として、流木群の流下過程における水流との相互作用と橋梁等の河川横断構造物による捕捉・堰止め、水位上昇といった一連の過程を再現することを試みる。具体的には、溪流の小橋梁を通過する流木群を対象として、流木の補足により生じた堰止めが水位上昇を招き、水脈が橋梁の床板を越流するという一連の過程を時間発展的に模擬する。なお、中川ら^{1, 2)}の研究では、平面2次元的な取り扱いが行われたが、本稿で扱う状況では、鉛直2次元場を対象

とする必要がある。本稿で扱う対象を記述するには、(i) 流木による体積排除効果を含む流木と水流の相互作用、(ii) 流木間衝突、(iii) 急変流区間での水面の激しい変化（水面波、飛沫の発生等を含む）、(iv) 橋梁による流木の捕捉機構の表現などについて、適切なモデル化が必要となる。

ところが、従来のEuler的な流れの運動方程式の解法では、水面の激しい変化を精度よく追跡することが容易ではなく、とりわけ飛沫の発生などを伴う複雑な水面形の予測は困難であった。この問題点に対応するため提案されたのが粒子法である。粒子法では計算格子を用いないので、移流項の離散化に伴う数値拡散が生じず、複雑な水面形に対しても高い解像度を確保できる。粒子法の水工学上の諸問題への適用は端緒についたばかりであるが³⁾、著者らは海岸部における碎波の解析^{4, 5)}をはじめとして、幾つかの問題へのMPS法⁶⁾の適用を試みてきた。本稿では、剛体群の運動追跡ルーチンを追加した粒子法（MPS法）によって、複雑な水面の挙動と相互衝突を伴いつつ水流によって輸送される流木群の運動の両者の再現が可能であることを示す。

2. シミュレーションモデルの概要

(1) MPS法の概要

はじめに、MPS法によるNavier-Stokes 式の解法の概要を示す（詳細は、越塚⁷⁾を参照）。MPS法では、計算領域に多数の粒子を配置し、個々の粒子の周囲に設定した影響域内での粒子間相互作用として基礎式を離散化する。

質量保存（連続式）は、質量が変化しない均一粒子の総数を一定に保つことで厳密に満足され、非圧縮条件は、粒子数密度（単位体積あたりの粒子数）を一定値 n_0 に保つことにより満足される。

一方、運動方程式（Navier-Stokes 式）

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

については、移流項、圧力項、粘性項の各々について、粒子周囲の影響域内の他の粒子との相互作用として離散化する。ここに、 $\mathbf{u}$: 流速ベクトル、 p : 圧力、 ρ : 流体の密度、 ν : 渦動粘性係数である。なお、移流項は粒子移動の追跡を通じて計算されるため、複雑な手続きなしに移流項の差分化に起因する数値拡散の問題を回避できる。

粒子 i の圧力項および粘性項は、

$$-\frac{1}{\rho} \langle \nabla p \rangle_i = -\frac{1}{\rho} \frac{D_0}{n_0} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{p_j - p_i}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{w}(|\mathbf{r}_{ij}|) \right\} \quad (2)$$

$$\nu \langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \frac{2\nu D_0}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) w(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad (3)$$

$$\lambda = \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_{ij}|) |\mathbf{r}_{ij}|^2 / \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i \quad (5)$$

のように近傍に存在する粒子との相互作用としてモデル化される（ D_0 : 次元数; $\mathbf{r}_i$: 粒子 i の位置ベクトル）。相互作用を伴う影響範囲は重み関数⁸⁾

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & \text{for } r \leq r_e \\ 0 & \text{for } r > r_e \end{cases} \quad (6)$$

により与えられ（ r : 距離; r_e : 影響半径）、粒子数密度は重み関数を用いて、

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad (7)$$

と定義される。

時間積分過程には2段階法が用いられ、第1段階は、粘性項を与えて粒子の速度（流速）を計算し、粒子の仮位置および仮数密度 n_k^* を算定する陽的なプロセスである。第1段階で更新された場では、質量保存（粒子数密度が一定値 n_0 に一致すること）が満足されていないから、第2段階では圧力項と数密度で記述された質量保存則から誘導される圧力の Poisson 方程式

$$\nabla^2 p_{k+1} = \frac{\rho}{(\Delta t)^2} \frac{n_k^* - n_0}{n_0} \quad (8)$$

を陰的に解いて圧力場を更新し（式中の Δt は計算時間間隔、添字 k は計算ステップ）、流速の修正量を求めて流速場および粒子の位置を修正する。

(2) 流木のための剛体連結モデル

流木は厳密には剛体ではないが、水流の変形抵抗と比較すると近似的に剛体と見なしてよい。ここでは、Koshizukaら⁹⁾が、流体中を自由に移動する剛体（浮体等）の計算に用いたのと同様の方法を用いて、水流中の流木の運動を追跡する。

水粒子と流木構成粒子を区別せず、流木構成粒子間の連結関係も無いものとして、全粒子の運動を計算する。この結果、流木は変形し、流木構成粒子の相対位置に変化が生じる。そこで、以下の方法で流木構成粒子のみに対して座標修正計算を実施し、流木構成粒子の相対位置を変化させないようにする。

流木構成粒子の仮速度と仮座標を用いて、流木 k の時刻 $t + \Delta t$ における重心の位置 $\mathbf{r}_{kg}$ を求め、流木 k の重心の並進速度ベクトル $\mathbf{T}_k$ および重心周りの流木構

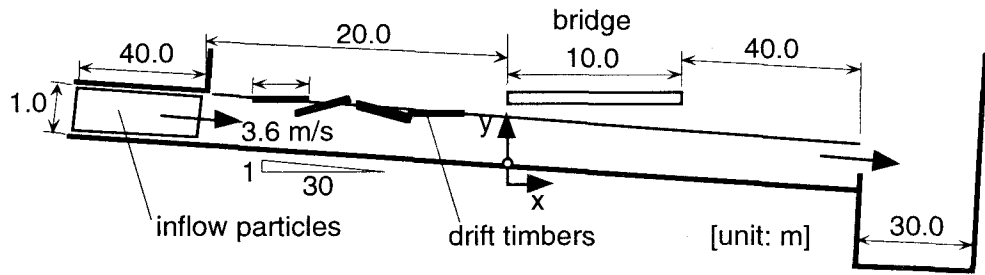


図-1 計算領域

成粒子の角速度ベクトル $\mathbf{R}_k$

$$\mathbf{T}_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{u}_{ki} \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_k = \frac{1}{I_k} \sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{u}_{ki} \times (\mathbf{r}_{ki} - \mathbf{r}_{kg}) \quad (10)$$

$$\mathbf{r}_{kg} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{r}_{ki} ; I_k = \sum_{i=1}^{N_k} |\mathbf{r}_{ki} - \mathbf{r}_{kg}|^2 \quad (11)$$

を算定する．ここに、 I_k ：流木の重心周りの慣性モーメント、 N_k ：流木構成粒子の総数である．並進速度ベクトル、角速度ベクトルを用いて、剛体的挙動を満足するための流木 k の構成粒子 i の移動速度は

$$\tilde{\mathbf{u}}_{ki} = \mathbf{T}_k + (\mathbf{r}_{ki} - \mathbf{r}_{kg}) \times \mathbf{R}_k \quad (12)$$

と記述され、これを用いて構成粒子 i の座標は、

$$\mathbf{r}_{ki}(t + \Delta t) = \mathbf{r}_{ki}(t) + \tilde{\mathbf{u}}_{ki} \Delta t \quad (13)$$

と修正される．

MPS法による粒子の座標の更新が行われる度に、流木構成粒子に対してのみ上記の座標修正を施すことにより、水流中の流木の運動が追跡できる．

(3) 計算領域・計算条件

計算領域を図-1に示す．計算領域の全長は約140m、流水部の初期水深は1.0mで、粒子総数は約20,000個（流体粒子は約15,000個；壁粒子等は約5,000個）である．粒子径は均一で $d=0.1\text{m}$ と設定した．合計4個の流木は、長さ2.0m、幅0.4mで、80個の粒子を上記の方法で剛体連結して構成され、流入境界の直下流で水面直上から投入される．また、流木の比重は、 $\sigma/\rho=0.7$ を標準として（流木構成粒子に関しては、基礎式中の ρ を σ に置き換えて計算）、比較対象として $\sigma/\rho=0.5$ についても検討した．

上流境界は、強制移動壁であり、速度3.6 m/sで流下方向に移動する．強制移動壁は初期状態で流下方向に40.0mの幅を持ち、壁粒子で構成されるが、流入境界を通過する瞬間に壁粒子が水粒子に変化するように特別なフラッグ処理が行われる．この方法によ

り、一定の流量を安定して流入させることが可能となる．下流側境界は自由流出境界であり、下流端に設けた堰を越流した粒子は貯水槽に蓄積される．なお、この水粒子を上流端の強制流入壁の左側に再配列すると循環式の水路を模擬することができるが、今回は短時間の現象が対象であるので、この種の処理は行っていない．

水理条件については、河床勾配1/30、平均流速3.6 m/s、水深1.0 mで、Froude数1.15の射流条件であり、溪流の小橋梁の周辺の局所流を対象としている．また、Manningの粗度係数を逆算すると0.051となり、山地河川の砂礫床の条件にほぼ対応している．なお、流木非投入時の平均水深と橋梁の床板のレベル差は0.1 mと設定した．今回の条件設定では、平均水面と橋梁床板とのクリアランスが0.1 mのところ約3.6 m/sで幅0.4 mの流木が相次いで到達することとなる．一般的には流木は必ずしも集団化しているとは限らないし、平均水面と橋梁床板とのクリアランスが流木幅より大きい場合も少なくないであろう．ここでは、粒子法を基礎とした本モデルの信頼性を示すため、自由水面変化が激しく、流木間衝突さえ生じるような過酷な条件を取って対象とした．

3. 流木の通過過程と流況変化

解析の主対象は、橋梁を通過する流木による局所流況の変化および、閉塞が生じた場合の橋梁周辺の流れ場の変化であるので、計算結果は橋梁周辺のみを対象として、橋梁上流端を中心に流下方向に約16 mの区間について示すこととする．

図-2は、流木の比重が $\sigma/\rho=0.7$ の場合について、流木の通過に伴う橋梁周辺の局所流況の時間的变化を示している．始めに、時刻 $t=1.70\text{ s}$ を見ると、流木の抵抗により、流木の存在域の上流側では水位上昇が生じ、流木の流水障害によって下流側では水位低下が生じることが分かる．時刻 $t=2.20\text{ s}$ には、2本の流木が重なるようにして橋梁床板の上流端に到達するが、前述の水位低下のために床板自体とは衝突せずに（床板下面とは接触するが）、床板の下に潜り込む．時刻 $t=3.20\text{ s}$ 、 3.70 s に後方からの流木が

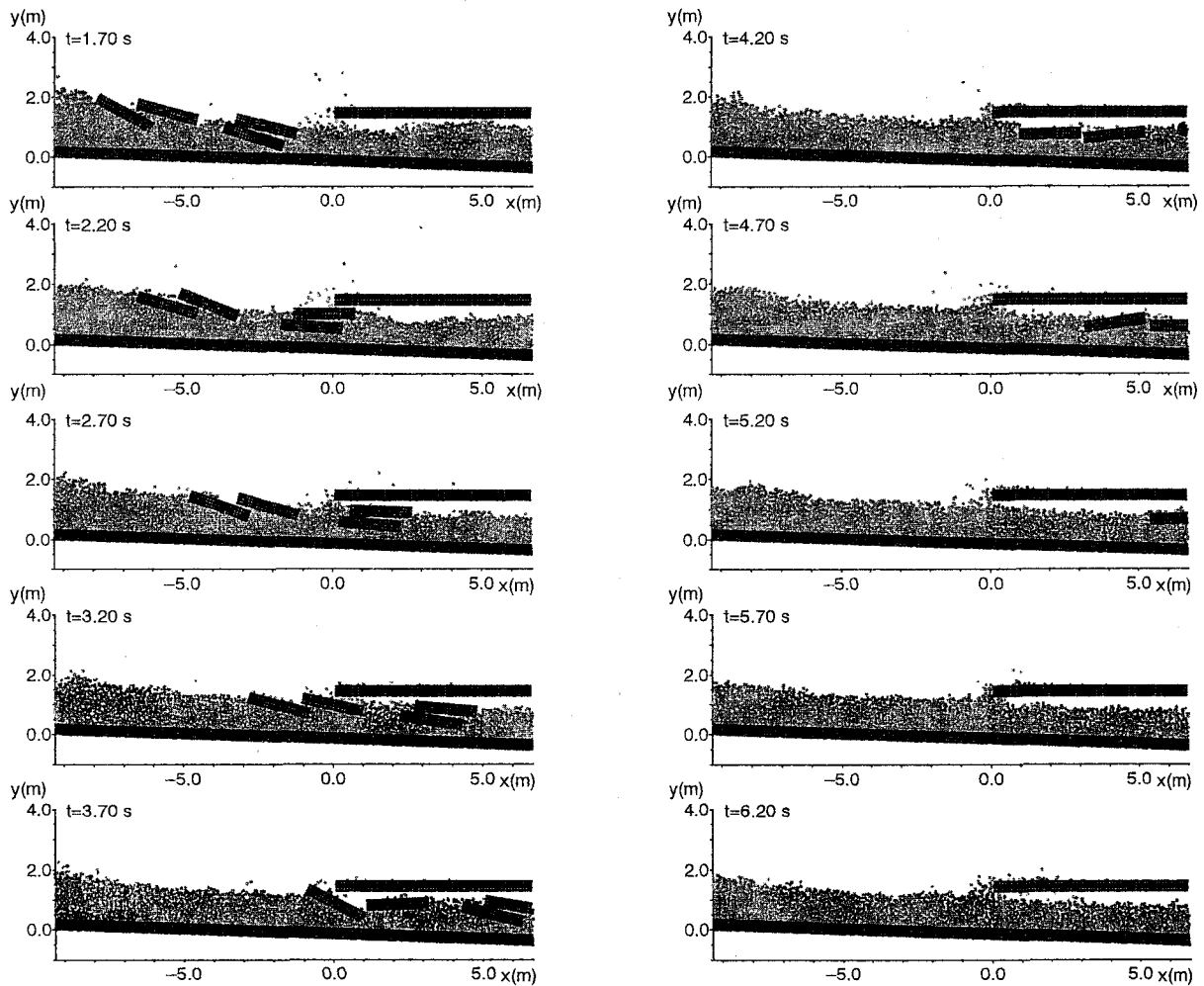


図-2 流木群の橋梁下部通過過程

橋梁端部に到達するが、これらも同様に水位低下の効果で床板下に潜り込む。結局、4本の流木は相次いで橋梁を通過し、流木捕捉による閉塞は、このケースでは生じない。ただし、流木存在域前後で局所的な水面勾配が増加し、流木の通過に伴って橋梁下部での疎通能が一時的に低下するといった特性は、計算結果から読みとれる。また、時刻 $t=4.20\text{--}6.20\text{ s}$ には、流木群の通過以後の水位上昇によって平均水位よりも水位が高くなり、水塊の一部が橋梁床板の上流端に衝突して飛散し、床板上部に落下している様子が見られる。流木群の通過に伴う平均水位の低下の揺れ戻しの現象と解釈できる。

図-3は、図-2において、時刻 $t=2.20\text{ s}$ に重なるようにして橋梁床板の上流端に到達する2本の流木が橋脚に捕捉された場合のその後の橋梁周辺の局所流況の時間的変化を示している。現地調査報告等（例えば、Webで公開されている余笹川流木災害調査報告書：http://www.aeng.tsukuba.ac.jp/wsm_lab/yosagawa/yosagawa.html）によれば、比較的長い流木が2つの橋脚に2点支持された状態で捕捉さ

れ、それを手掛かりに相次いで流木捕捉が生じるといったプロセスが、渓流部の橋梁の流木捕捉機構の主要因と想定される。この状況を完全に表現するには平面的な流木の回転の考慮が必要で、3次元的な取り扱いが避けられず、鉛直2次元場では不十分である。その一方で、現時点での計算機の演算性能上の制約から、3次元計算は現実的ではなく、ここで対象とするのが自由水面の挙動が重要な役割を担う場であることを考えると、計算領域は鉛直2次元場とせざるを得ない。そこで、捕捉機構の詳細の再現はひとまず保留し、捕捉が生じた後の局所流況の変化についてシミュレーションを続行することとした。簡単のため、時刻 $t=2.20\text{ s}$ に橋梁床板の上流端に到達する2本の流木を瞬間的に固体壁（壁粒子）に変換して、計算を継続した。

時刻 $t=2.70\text{ s}$ には流木捕捉による閉塞部の出現に伴い、閉塞部の下流側で極端な水位低下が生じ、上流側では急激な水位上昇と同時に後方からの流木到達による表面水塊の分裂と飛沫の発生が見られる。閉塞部上流の水位上昇は継続し、後方から到達した2

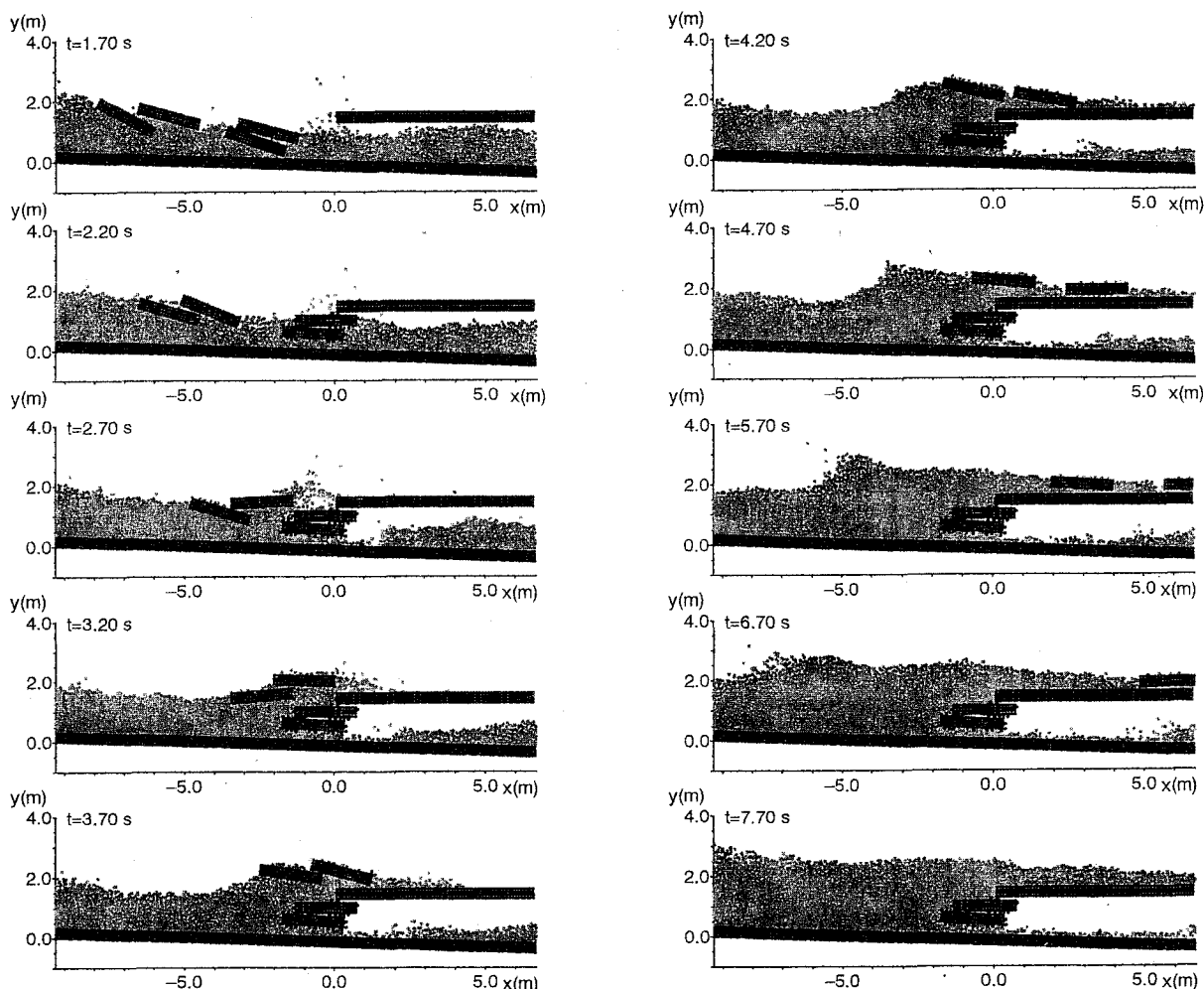


図-3 流木群の捕捉・越流過程

本の流木は越流水脈に運ばれて床板上部を移動する。閉塞部と河床の間隙からは流出が継続するが、供給流量が少ないため橋梁下部の流れの水深は小さく、床板上部を越流する流れが主流部を形成する。後方から到達した2本の流木が床板上部に乗り上げた直後の時刻 $t=4.20$ s 以降に注目すると、閉塞に伴う堰上げ効果による水位上昇が上流に向かって伝播する様子が見られる。

図-4は、図-2と同様の水理条件で、流木の比重を $\sigma/p=0.5$ とした場合について、流木の通過に伴う橋梁周辺の局所流況の時間的変化を示している。比重が小さいことの影響で、図-2と比較して流木が水流の変動で揺動し易くなり、鉛直面内の流木の回転が生じやすくなる傾向が見られる。例えば時刻 $t=2.70$ sには、2番目の流木が深い角度で床板下部に潜り込み、床板上流端付近の全断面を瞬間的に閉塞させ、その影響で下流側では瞬間的な水位低下、上流側では水位上昇が生じ、後方から到達した流木がこれと干渉して床板上部に乗り上げる。同様の瞬間的閉塞は、時刻 $t=5.50$ sにおける4番目の流木によっても生

じている。このように流木の比重の差は、流木の回転運動特性に変化を与え、瞬間的閉塞とそれに伴う床板上部での越流水脈の発生をもたらす。ただし、このケースの解釈には、若干の注意を要する。すなわち、3次元場では、単一流木の鉛直面内の回転だけでは全断面の瞬間的閉塞は生じない。言い換えると、ここで計算されたような閉塞部の形成と破壊の反復は鉛直2次元場特有の解であるということになる。

4. 結 語

本稿では、MPS法に剛体移動モデルを組み込んで、溪流の小橋梁を通過する流木群を対象として、流木の通過過程の流況変化および流木の連鎖的捕捉により生じた堰止めが誘発する水位上昇と橋梁床板の越流という一連の過程を時間発展的に模擬した。平均水面と橋梁床板とのクリアランスが 0.1 m のところに幅 0.4 m の流木が相次いで到達するという過酷な計算条件を取って選択し、粒子法に基づく本モデル

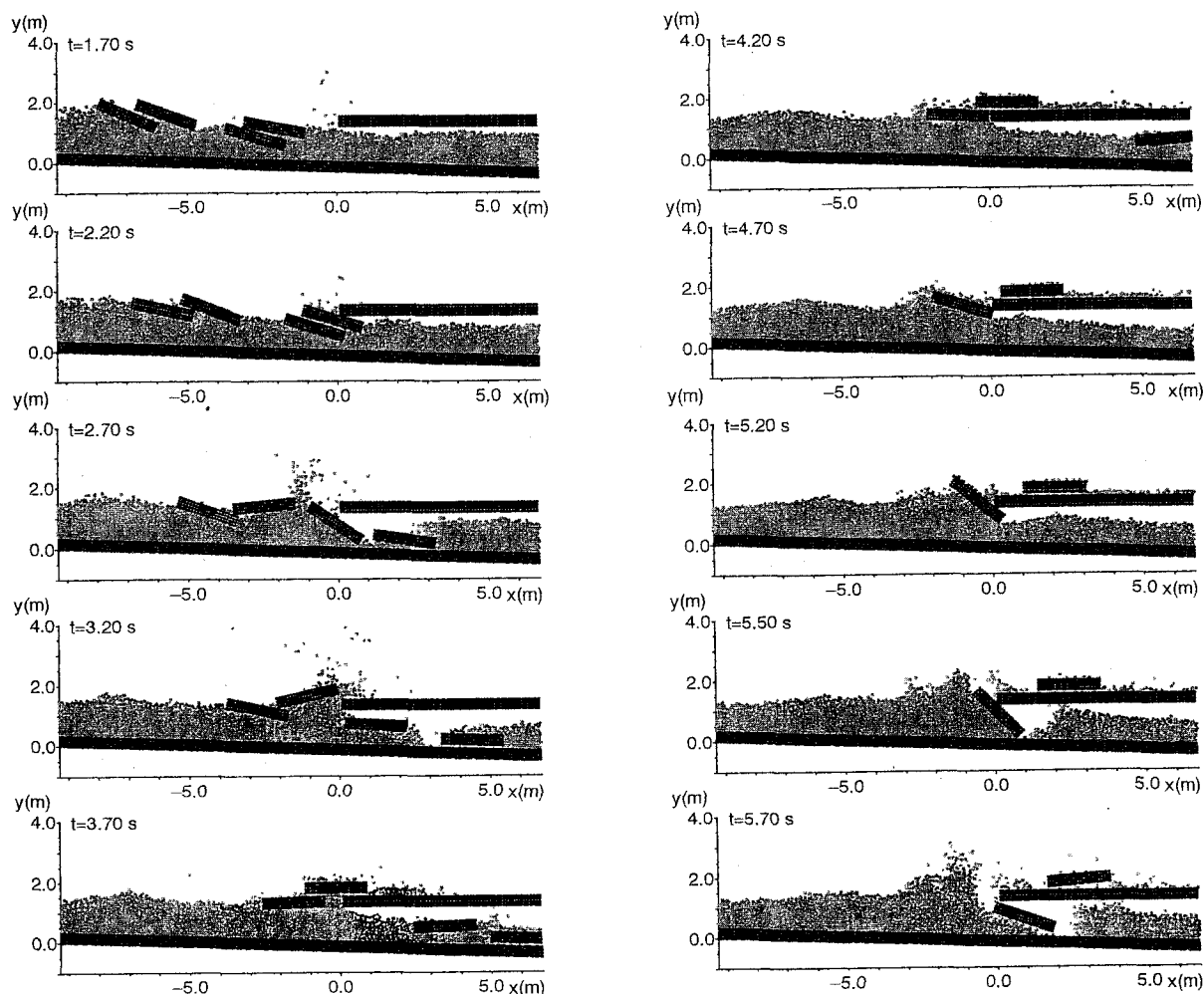


図-4 流木群の通過過程（流木比重の効果）

が、幅広い条件に対して適用性を有することを示した。一連の計算結果からは流木群の通過時に生じる局所的な流れ場の時間的変化についての詳細が得られたが、流木の捕捉自体は模擬できず、さらに比重の軽い流木の際に生じる閉塞部の形成・破壊の頻繁な反復など、鉛直2次元場の解の矛盾点も明らかとなった。これらの問題は、本モデルの3次元拡張により解消される。また本稿では、計算機への負荷の制約から粒子スケール以下の乱れの影響を考慮しない取り扱いとした。Sub-particle scale 乱流モデル付き3次元計算の実行には、計算機の演算速度の向上を今暫く待たねばならない。

参考文献

- 1) 中川 一・高橋 保・池口正晃：洪水氾濫に伴う流木群の拡散に関する研究，水工学論文集，第37巻，pp. 379-384, 1993.
- 2) 中川 一・井上和也・池口正晃・坪野考樹：流木群の流動と堰止めに関する研究，水工学論文集，第38巻，pp. 543-550, 1994.
- 3) 後藤仁志：MPS法の河川・海岸工学的諸問題への適用

の試み，計算工学講演会論文集，Vol. 5，pp. 261-264, 2000.

- 4) 後藤仁志，酒井哲郎，沖 和哉，芝原知樹：粒子法による巻き波型碎波を伴う斜面遡上過程の数値シミュレーション，海岸工学論文集，第45巻，pp.181-185, 1998.
- 5) Gotoh, H. & Sakai, T.: Lagrangian simulation of breaking waves using particle method, *Coastal Eng. Jour., JSCE*, Vol. 41, Nos. 3 & 4, pp.303-326, 1999.
- 6) Koshizuka, S., Tamako, H. and Oka, Y.: A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation, *Computational Fluid Dynamics J.*, Vol. 4, No. 1, pp.29-46, 1995.
- 7) 越塚誠一：数値流体力学，インテリジェントエンジニアリングシリーズ，培風館，p223, 1997.
- 8) 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.
- 9) Koshizuka, S., Nobe, A. and Oka, Y.: Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 26, pp.751-769, 1988.

(2000. 10. 2受付)