

暗渠排水路の氾濫過程のLagrange解析

LAGLANGIAN ANALYSIS OF INUNDATION OF UNDERDRAINAGE CHANNEL

後藤仁志¹・林 稔²・安藤 怜³・酒井哲郎⁴

Hitoshi GOTOH, Minoru HAYASHI, Satoshi ANDOH and Tetsuo SAKAI

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正会員 工修 和歌山県西牟婁振興局建設部治水課 技師 (〒646-8580 田辺市朝日ヶ丘23-1)

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 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴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)

A flood of the underdrain and an inundation into underground space in urban area are ones of the primal targets of urban flood-relief measures. Complicated behavior of a water surface serves as a key on analysis of rapidly varied flow, which characterizes the flow in the underdrain waterway under a heavy rain. Herein, an inundation of underdrain waterway and sewer pipe and resultant motion of cover material are simulated by the MPS method, which is the Lagrangian gridless model of water flow, with a module of passively moving solid. The blown-up manhole cover by water jet and the lift-off of concrete cover materials of underdrain waterway with the increase of water pressure are well simulated.

Key Words: *underdrain, inundation, water surface, MPS method, manhole cover*

1. 緒言

都市域の水路網・下水管路網は、効率的な内水排除を目指して整備されてきたが、複雑な水路・管路ネットワーク故に管理・運用は必ずしも容易ではない。2000年秋の東海豪雨災害は、想定を上回る豪雨に対する内水排除の困難さを再認識させるものであり、水路・管路ネットワークの更なる効率化を目指す再整備や運用ルールの構築といったシステム論的諸課題に対する技術的対応が急務となっている。

水路ネットワークの解析では、個別の水路の疎通能力を既存の抵抗則で簡素化して評価せざるを得ないが、既存の抵抗則の適用が疑問視される急変流区間も局所的には存在し、特に、氾濫を伴うような場合には既存の水理解析の方法論だけでは必ずしも充分ではない。このような局所的急変流の例としては、都市内の下水管路網のマンホール蓋が豪雨時に飛散する事例が多く報告されている。マンホール蓋の飛散後に氾濫水がマンホール周囲に湛水すると、蓋を喪失したマンホールへの転落事故などが危惧される。さらに、過密化した都市での空間の有効利用を目的として、従来は開渠であった側溝等がコンクリート製の蓋材で覆われて暗渠化され、水路上の空

間が歩道等として活用されることも少なくない。東海豪雨の折りにも、氾濫によって蓋が外れた側溝への水防活動中の転落事故により人命が失われ、名古屋市で少なくとも約70個所でマンホール蓋が浮上・飛散したと報告されている(例えば、毎日新聞中部本社HP: <http://maing.co.jp/>)。

都市域の水路網・下水管路網の氾濫を取り扱った研究は、あまり多くない。渡辺ら^{1, 2)}は下水管渠網の水理解析を行い、マンホール蓋の飛散についての水理実験を実施して作用圧力を計測し、その飛散機構を明らかにしている。下水管渠網解析の困難さは、開水路流・管路流・両者間の遷移流の混在状態の取り扱いにあるが、同様の問題は、都市内地下空間への浸水過程にも見られる。大都市域では地下の高度利用が進んでおり、地下街をはじめとする地下空間の防災の一環として、浸水への対応が求められており、浸水予測に関するアプローチが試みられている。高橋ら³⁾および井上ら⁴⁾は平面二次元氾濫モデルを用いて、浸水域を予測する方法を示しており、細田ら⁵⁾は浸水過程で特徴的な管路・開水路遷移流を対象とした解析を行っている。さらに、多田ら⁶⁾は、地下空間への流入条件を適正に推定するために、階段部を下降する流れについての水

理実験を実施している。

このように、都市部の暗渠の氾濫や地下空間への浸水は、都市水害対策の主要対象の一つであり、特に地下空間への浸水に関しては、被害予測のための水理解析が行われてきたが、下水管路や地下通路といった閉鎖的な空間での流れの特徴である管路・開水路遷移流の取り扱いでは水面の複雑な挙動が解析上の鍵となる。また、従来の管路・開水路遷移流の解析では、固定境界壁が用いられ、マンホール蓋や側溝の蓋材など可動境界壁を考慮した氾濫計算には例がない。本研究では特に、蓋材という可動境界壁を有する暗渠水路を対象に、剛体モジュール付きMPS法（後藤ら⁷⁾）によって、氾濫過程を時間発展的に解析する。マンホール蓋の飛散、流量増加に伴う側溝蓋材の浮上と側溝内部への滑落といった現象が、非定常氾濫流の計算によって模擬される。

2. シミュレーションの概要

(1) MPS法

一般に、粒子法では、計算領域に多数の粒子（物理量の定義点＝計算点）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。MPS法は、SPHと並ぶNavier-Stokes式の解法のための代表的手法であり、基礎的な考え方は、越塚⁸⁾によって詳しく解説されている。

質量が変化しない均一粒子の総数を一定に保つことで質量保存（連続式）が厳密に満足され、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、非圧縮条件が満足される。

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。移流項は粒子移動の追跡を通じて計算される。

粒子 i の圧力項および粘性項は、

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

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

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

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

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⁹⁾

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

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方程式を陰的に解いて圧力場を更新し、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) 暗渠蓋材の移動モデル

ここでは、Koshizukaら¹⁰⁾が、打上げ帯に位置する剛体の遡上に伴う移動、および流体中の剛体の沈降過程に適用したのと同様の方法を用いて、水圧増加時の暗渠蓋材の運動を追跡する。

はじめに水粒子と蓋材構成粒子を区別せず、蓋材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、蓋材は変形し、蓋材構成粒子の相対位置に変化が生じる。そこで、以下の方法で蓋材構成粒子のみに対して座標修正計算を実施し、蓋材構成粒子の相対位置を変化させないようにする。

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

$$\mathbf{T}_k = \frac{1}{N_k}\sum_{i=1}^{N_k}\mathbf{u}_{ki} \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_k = \frac{1}{I_k}\sum_{i=1}^{N_k}\mathbf{u}_{ki} \times (\mathbf{r}_{ki} - \mathbf{r}_{kg}) \quad (9)$$

$$\mathbf{r}_{kg} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{r}_{ki} ; I_k = \sum_{i=1}^{N_k} |\mathbf{r}_{ki} - \mathbf{r}_{kg}|^2 \quad (10)$$

を算定する．ここに、 I_k ：蓋材の重心周りの慣性モーメント、 N_k ：蓋材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蓋材 k の構成粒子 i の移動速度は

$$\tilde{\mathbf{u}}_{ki} = \mathbf{T}_k + (\mathbf{r}_{ki} - \mathbf{r}_{kg}) \times \mathbf{R}_k \quad (11)$$

と記述され、これを用いて構成粒子 i の座標は、

$$\mathbf{r}_{ki}(t + \Delta t) = \mathbf{r}_{ki}(t) + \tilde{\mathbf{u}}_{ki} \Delta t \quad (12)$$

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、蓋材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、水流中の蓋材の運動が追跡できる．後藤ら⁷⁾は、同様のモデルを流木群の流送過程に適用したが、流木の場合とは異なり、比重が1より大きい剛体（鉄製のマンホール蓋等）に対しては、慣性効果により蓋材構成粒子の相対位置の変化が大きく、蓋材構成粒子と水粒子の異常接近に伴う計算の不安定化が懸念される．これに対しては、計算時間ステップを小さく設定することで ($\Delta t = 5.0 \times 10^{-4} \text{s}$)、粒子の過剰接近を回避して対応している．

(3) 計算領域・計算条件

ここで対象とする計算領域を図-1および図-2に示す．計算領域は何れも実験室スケールを想定しており、流水部の全長は暗渠排水路の場合で1.2m、マンホールを有する下水管の場合で1.0mとしている．本稿の計算対象は流量急増下の氾濫であるから、水路内の流れは不等流となる．ここでは、計算領域を小さく設定して、計算の負担を軽減するため、これまでの粒子法による開水路流れの計算に導入していた助走区間は設けないこととした．粒子総数は、暗渠排水路の場合で約9,300個（流体粒子約5,000個；壁粒子約4,000個；蓋材240個）、マンホールを有する下水管の場合で約10,700個（流体粒子約6,000個；壁粒子約4,700個；マンホール40個）である．粒子径は均一で $d = 0.01 \text{m}$ と設定した．暗渠排水路の3枚の蓋材（長さ0.2m、幅0.04m）は80個の粒子（比重 $\sigma/\rho = 3.0$ ）を、マンホール（長さ0.1m、幅0.04m）は40個の粒子（比重 $\sigma/\rho = 8.0$ ）を上記の方法で剛体連結して構成され、何れも計算初期には固定壁と接して安定した状態で静止している．

上流境界は、流下方向に2.0mの幅（初期条件）を有する『soluble moving wall（可溶性移動壁）』（Gotoh et al.¹¹⁾）である．soluble moving wallは初期は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

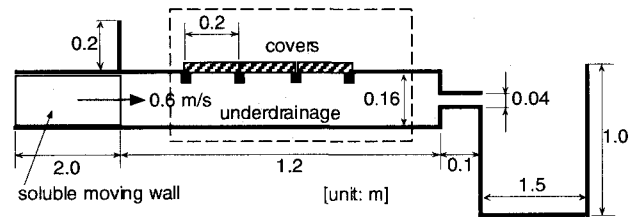


図-1 計算領域（暗渠排水路）

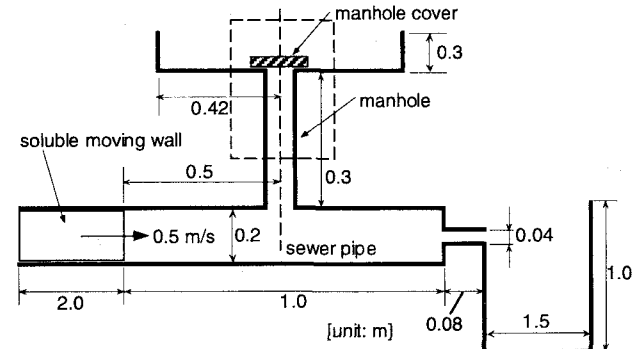


図-2 計算領域（マンホール）

処理を行って、一定の流量を安定して流入させることを可能とした特殊なmoving wallである．下流側境界では断面を急縮させて水路内（あるいは管路内）の急激な水位上昇（あるいは水圧増加）を誘発している．下流端から流出した水粒子は貯水槽に蓄積される．

3. 暗渠排水路の氾濫過程

解析の目標は、暗渠排水路・下水管路の氾濫による蓋材の移動とそれに伴う氾濫水の挙動であるので、以下では、蓋材周辺の流れ場をクローズアップして表示した．

図-3は、暗渠排水路の氾濫に伴う周辺の局所流況の時間的变化を、図-4および図-5は、蓋の重心の位置および重心周りの回転角の時系列を示している．時刻 $t = 0.0 \text{s}$ には水路が満水の状態で上流側から断面平均流速 0.6m/s の強制的流入が開始される．その直後の時刻 $t = 0.10 \text{s}$ には最上流部の蓋が浮上を開始し、反時計回りに回転を続ける．時刻 $t = 0.40 \text{s}$ には蓋の厚さ程度の距離を浮上して下流側の蓋との間に僅かながら隙間が生じている．下流側の2枚の蓋も蓋間で相互に干渉しつつ最上流の蓋に追従して浮上し、時刻 $t = 0.60 \text{s}$ には3枚とも蓋の厚さ程度の距離を浮上した状態となる．蓋の浮上を支える蓋底面の作用水圧は引き続き上昇し、蓋群の上昇も継続するが、（時刻 $t = 0.60 - 0.70 \text{s}$ の最上流部の蓋の動きに見られるように、）蓋間の隙間の増大に伴い水の噴出が生じると局所的な圧力開放が発生して蓋の支持力が瞬間的に低下して蓋が傾き、蓋間の空隙が縮小すると傾き

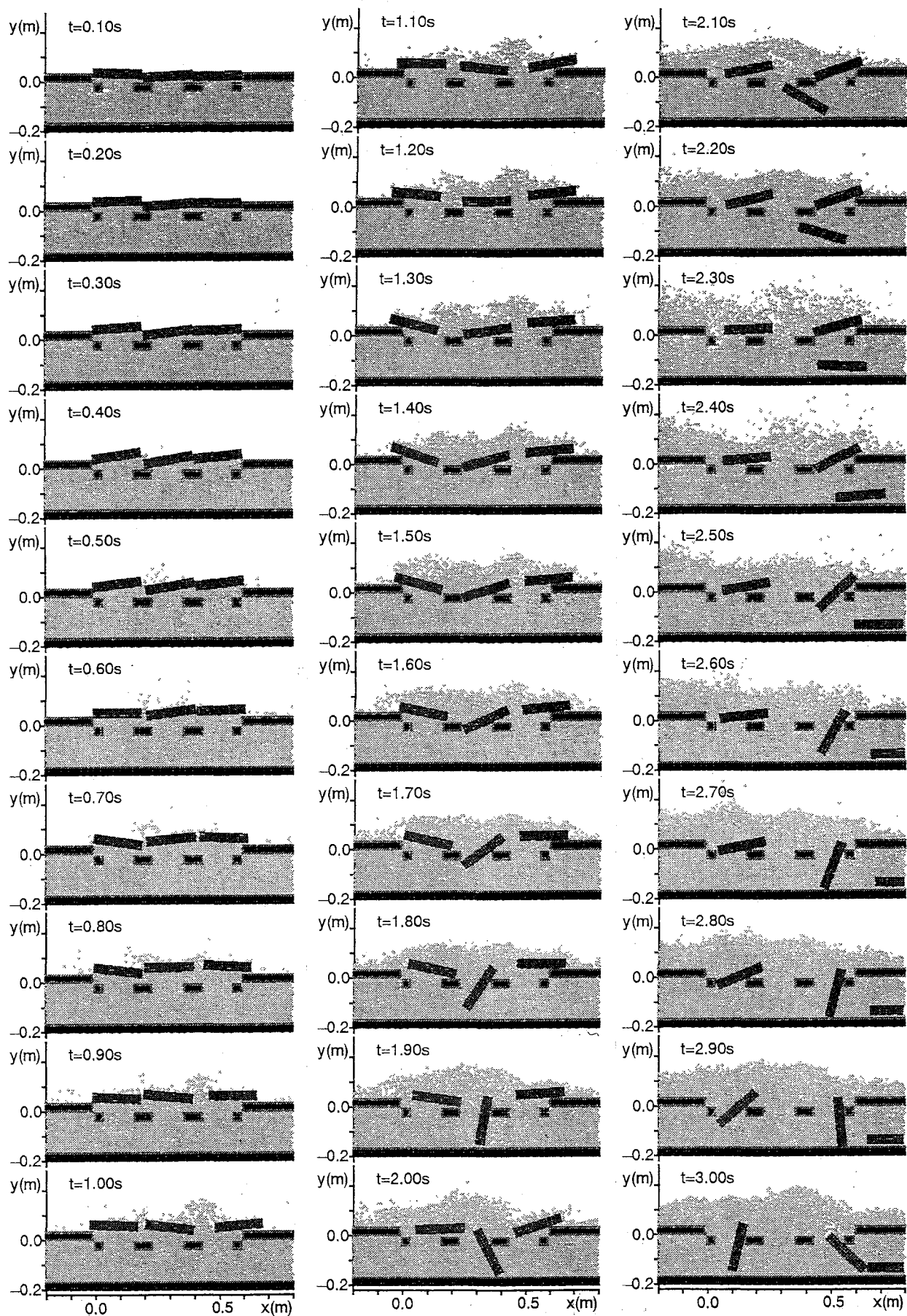


図-3 暗渠排水路の氾濫過程

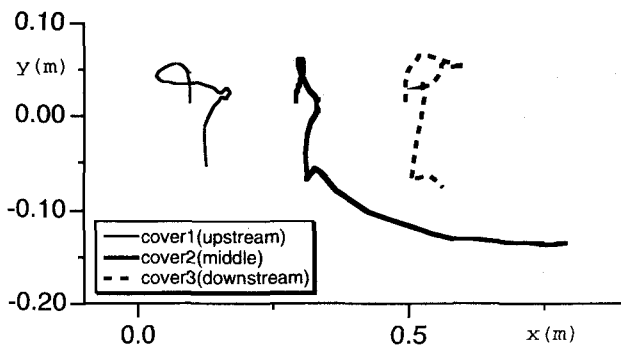


図-4 蓋の重心位置

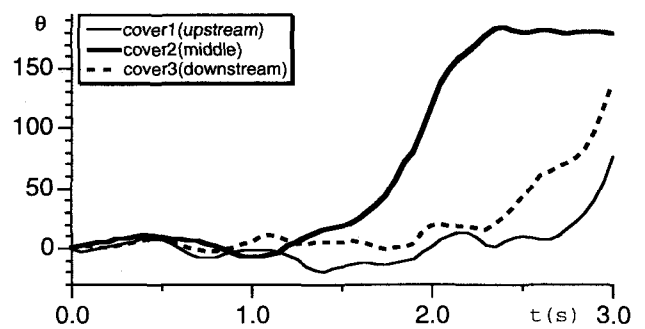


図-5 蓋の回転角

が小さくなる。更なる作用水圧の増大は、最下流部の蓋を下流側に顕著に移動させ（時刻 $t=0.80-1.00$ s）、大規模な水の噴出を生じさせる。この噴出で上流側に押された中央の蓋が最上流の蓋に衝突して2者間の空隙も拡大し、全面的で大規模な水の噴出に至る（時刻 $t=1.10-1.20$ s）。その結果、蓋の支持水圧は急減して、蓋は落下を始めるが、浮上過程で生じた変位のために、支持部材の上に安定して着地できずに水路内に落下する。例えば、時刻 $t=1.30$ s以降の中央の蓋の挙動を見ると、浮上過程で下流側にシフトした蓋は、落下時に上流側の支持部材をかすめて下流側の支持部材を軸に滑りながら反時計回りに回転しつつ水路内に直立に近い状態で落下し（時刻 $t=1.90$ s）、瞬間的に発生する疎通障害の影響で上流側水位が大きく増加する。蓋は更に回転を続けて水路底部に水平に近い角度で着地して（時刻 $t=2.30$ s）、下流に流される。上流側・下流側の蓋材とも、同様の回転運動を伴いつつ水路内に落下する様子が見られる。

なお、ここでの解析結果に基づき現実の暗渠排水路の氾濫を考える際には、3次元性に関する注意が必要である。現実の場合、蓋は側壁上部を切り欠いて支持され、横断方向の支持部材は転落抑制等の補助的な目的で設けられることが多い。このような支持形式を鉛直2次元では表現できないので、ここでは横断方向の支持部材によって蓋を支えている。側壁と横断方向の補助支持部材による3次元的支持がある場合には、奥行き方向の回転により蓋が水路内に滑り落ちることがあったとしても、支持部材に阻まれて水路内への滑落やそれに伴う下流への流出を免れることも少なくないだろう。その場合には、疎通障害が解消されず、先の例の時刻 $t=1.90$ s付近の状態が継続することとなる。言うまでもなく、蓋の挙動をより正確に追跡するには3次元計算が必要となるが、以下のような基本的なプロセスは、鉛直2次元場の解からも読み取れる。

『蓋底面の作用水圧の増加が蓋を押し上げ、蓋の隙間が増大することによる局所的な水圧の急減が蓋の回転運動を誘発し蓋間の隙間を作り出す。その隙

間から水が噴出すると蓋底面の水圧が急減して蓋が傾く。やがて下流端の蓋の顕著な移動をきっかけに大規模な水の噴出が生じて、蓋の支持水圧が低下し、蓋が沈降を始める。蓋は支持部材と衝突するものの、安定な支持部材との再接触ができず、回転を伴いつつ水路底面に没する。』

図-6は、下水管路の氾濫に伴うマンホール蓋の移動と水の噴出過程を示している。豪雨時のマンホール蓋の飛散については、従来から多くの事例が報告されているが、マンホール蓋の移動とそれに伴う水の噴出過程を詳細に示したシミュレーションは見当たらない。蓋の浮上と側方への水の噴出、浮上して不安定化した蓋の傾きと噴出水の偏在化、それに伴う蓋の傾斜の顕在化と蓋の左方への移動、蓋を押し退けた噴出水の鉛直上方への噴上げという一連の過程が示されている。なお、マンホール内の圧縮空気も、蓋飛散の過程に関連しているが、蓋の揺動による圧縮空気の抜け出しの後に水塊が蓋に直接衝突することがきっかけで顕著な蓋の移動（飛散）が生じるとの実験結果が、渡辺²⁾らによって示されている。本稿の結果は、渡辺らが指摘する一連の過程の最終フェイズを再現したものと言える。

4. 結語

本稿では、剛体モジュール付きMPS法よって、蓋材という可動境界壁を有する暗渠水路・下水管路マンホールを対象に、氾濫過程を時間発展的に解析した。流量増加に伴う側溝蓋材の浮上と側溝内部への滑落およびマンホール蓋の飛散と水流の噴出といった現象が、非定常氾濫流の計算によって模擬された。暗渠排水路では鉛直2次元モデル故に蓋の支持方法が制約され、現実の水路の現象を完全には再現してはいないが、浮上過程での蓋の相互干渉の結果生じる隙間からの水の噴出による減圧効果が蓋の沈降に関連していることなど浮上抑制の方策を論じるために有効と思われる現象のディテールが計算された。一方、マンホール蓋の飛散に関しては、ある程

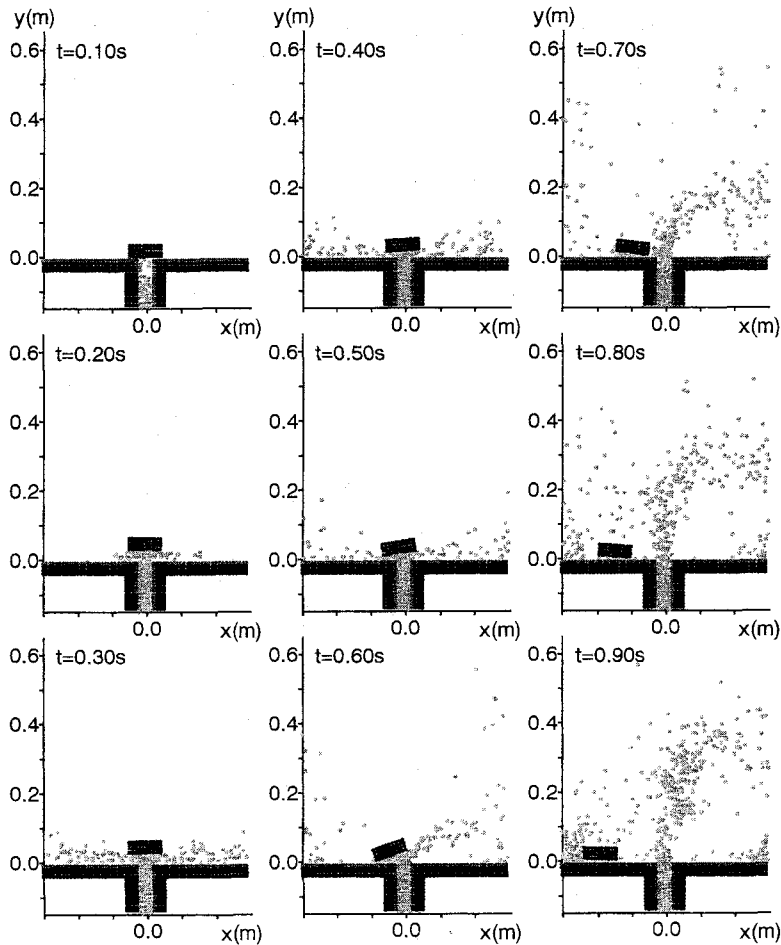


図-6 マンホールの浮上と水流の噴出

度定性的ではあるが、蓋の移動とジェットの出が再現された。今後は、既往の水理実験の再現性を検討し、飛散条件の系統的な検討を進めたい。

なお、本稿で指摘した鉛直2次元モデルの限界の幾つかは、3次元化により容易に解決可能である。数年前に数千の粒子を用いて開始されたMPS法による水理シミュレーションも、パーソナルコンピュータを用いる場合でさえ数万の粒子を対象にできるようになってきた。これから数年後には、解像度面で妥協すれば3次元計算も実行可能となるだろう。

参考文献

- 1) 渡辺政広・神田 徹・岡田将人・神吉和夫：マンホール部に空気塊を封入する下水管渠網の圧力流れ，水工学論文集，第44巻，pp.551-556，2000.
- 2) 渡辺政広・神田 徹・田中祐大・神吉和夫：マンホール蓋飛散の水理解析モデルと水理模型実験，水工学論文集，第45巻，pp.907-912，2001.
- 3) 高橋 保・中川 一・野村 出：洪水氾濫に伴う地下街浸水のシミュレーション，京都大学防災研究所年報，第33号B-2，pp.427-442，1990.
- 4) 井上和也・中川 一・戸田圭一・溝田敏夫：地下空間への氾濫浸水の解析，地下空間シンポジウム論文・報告集，第2巻，土木学会，pp.95-102，1997.
- 5) 細田 尚・井上和也・岩佐義朗：氾濫水の地下空間への侵入過程に係る水理現象について，水工学論文集，第36巻，pp.317-322，1992.
- 6) 多田彰秀・井上啓由・本田洋平・古本勝弘：直階段から地下空間へ流入する流量の評価に関する実験的研究，水工学論文集，第45巻，pp.901-906，2001.
- 7) 後藤仁志・酒井哲郎・林 稔：粒子法による流木群堰止め過程のLagrange解析，水工学論文集，第45巻，pp.919-924，2001.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Gotoh, H., Shibahara, T. and Sakai, T.: Sub-Particle-Scale Turbulence Model for the MPS Method - Lagrangian Flow Model for Hydraulic Engineering-, *Computational Fluid Dynamics Jour.*, Vol.9 No.4, pp.339-347, 2000.

(2001. 10. 1受付)