

浸水時地下街階段登段者の脚部に作用する 流体力評価に関する計算力学的アプローチ

COMPUTATIONAL MECHANICS OF A FORCE ON A HUMAN LEG IN FLOW OVER A UNDERGROUND STAIRCASE IN URBAN FLOOD

後藤仁志¹・五十里洋行²・酒井哲郎³・谷岡弘邦⁴

Hitoshi GOTOH, Hiroyuki IKARI, Tetsuo SAKAI and Hirokuni TANIOKA

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

² 学生会員 工修 京都大学大学院博士後期課程 都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³ フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴ 学生会員 京都大学大学院修士課程 都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

A staircase is a route of refuge from underground space at a flood. The important factor to determine the success or failure of refuge is whether a human can climb safely the stair against down-flow current. A flow in staircase is a high-speed flow on a steep slope, which is characterized by an appearance of fragmentation of water and a splash. In this paper, the particle method, which is particularly effective for analysis of violent flow, is applied to estimate hydrodynamic force acting on a model leg installed on stair. A surface integral of local pressure acting on the model leg is calculated to estimate hydrodynamic force on the model leg. The estimated hydrodynamic force reproduces well results of the previous actual-scale hydraulic experiments. Furthermore, flow-velocity distribution, which was impossible to be measured in hydraulic experiments due to the limitation of function of sensors, is estimated.

Key Words: *staircase, underground space, flood, hydrodynamic force acting on a model leg, particle method, surface integral*

1. はじめに

大都市圏ではヒートアイランド現象に影響された局地的集中豪雨の発生が顕在化しており、下水の雨水排除能力を上回る集中豪雨による内水氾濫への危険は急速に増大しつつある。都市には様々な規模の地下空間が存在するが、本年9月の台風14号による東京杉並区での浸水で見られたような半地下構造の個人住宅、さらにはビルの地下室など、これまでに主として検討対象とされてきた大規模地下街に加えて、小規模地下空間の危険性も明らかとなってきた。小規模地下空間の場合には、階段が唯一のアクセスルートであり、1) 浸水の進行による開扉限界の問題と2) 流水に抵抗した階段の登段限界の問題が避難の可否を決める物理現象と言える。開扉限界につ

いては、ドア全面水位による静水圧と避難者の体力の関係から静的な解析による推定が近似的には可能であるが、登段限界に関しては、急勾配階段状水路内の急変流における脚に対する抗力の推定が必要となり、既存の方法では数理モデルによる推定は極めて困難である。

そこで、本研究では、急勾配階段状水路内の流れの特徴である激しい水面変動の記述に有効な粒子法を導入して、水塊の分裂、飛沫の発生など従来の解析法では再現が困難であった急勾配階段状水路内の流況再現を実施する。さらに、再現された流れ場に脚型モデルを設置し、脚型の表面に作用する圧力分布を表面積分して流体力を推定し、同様の水理条件で実施された石垣ら^{1),2)}の実験と比較して、再現性を確認する。石垣らも述べているように水理実験

からの定量的評価には実物大実験が必要であるが、登段限界付近では被験者の転倒・滑落といった実験中の事故なども危惧され、系統的な検討が必ずしも容易ではない。さらに、大量飛沫発生・気泡混入を伴う急勾配水路上の高速流を対象とした水理実験であることから、既存のセンサーでは流速・圧力の計測が極めて困難であり、脚周囲の流れ場の特性の把握は容易ではない。このような状況故に、水理実験と並ぶ解析ツールの両輪として、数値流体力学的観点からの流体力推定のフレームワークの準備が焦眉である。

2. 粒子法の概要

支配方程式は、Navier-Stokes 式

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

である。ここに、 \mathbf{u} ：流速ベクトル、 p ：圧力、 ρ ：流体の密度、 \mathbf{g} ：重力加速度ベクトル、 ν ：動粘性係数 ($=1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) である。MPS 法³⁾では、計算領域に多数の粒子（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の各項がモデル化される。非圧縮条件は、粒子数密度を一定値 n_0 に保つことにより満足される。

粒子 i の圧力項および粘性項は、

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

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

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

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

と離散化される (D_0 ：次元数、 \mathbf{r}_i ：粒子 i の位置ベクトル、 λ ：モデル定数)。粒子間相互作用の及ぶ範囲（影響球）は、重み関数

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

により規定される (r_e ：影響球半径)。また、粒子数密度は重み関数を用いて、

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

と定義される。

3. 脚モデルの流体力評価

図-1 に石垣ら^{1),2)}が実験で用いた脚型模型とそれと概形を一致させるように粒子を配列した脚モデル

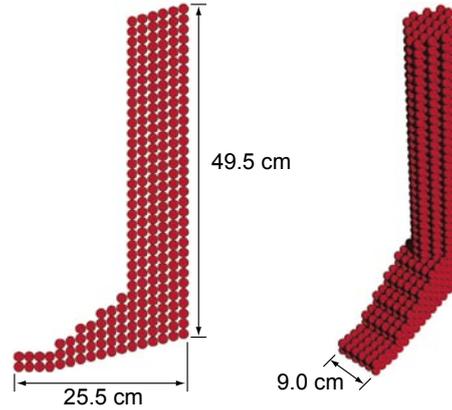


図-1 実験の脚型模型（写真）と粒子による脚モデル

を示す。石垣らは、脚型模型をひざ高（50.0cm）に相当する高さを支点とした天秤の片側に固定し、他端の支持部に配置したロードセルで流体力を計測した。

本研究では、以下に示す方法で流体力を評価する。脚型表面の流体応力として圧力のみを考えると、脚型に作用する力は、

$$\mathbf{F} = -\int_S p \mathbf{n} dA \quad (8)$$

と書ける。ここに、 S ：脚型の水没表面、 \mathbf{n} ：脚型表面の法線方向の単位ベクトル（脚型の外向き正）、 dA は脚型表面の面積要素である。主流方向 (x 方向) の単位ベクトルを $\boldsymbol{\xi}_x$ とすると、脚型に作用する力の主流方向成分 F_x は、

$$F_x = \mathbf{F} \cdot \boldsymbol{\xi}_x = -\int_S p \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\xi}_x dA = -\int_S p n_x dA \quad (9)$$

と書ける。ここに、 n_x ：脚型表面における法線ベクトル \mathbf{n} の x 方向成分である。面積要素として一辺 d_i (粒子径) の正方形領域を想定し、式 (9) を離散化すれば、

$$F_x = -\sum_{i=1}^{N_{leg}} p_i n_{x,i} d_i^2 \quad (10)$$

となる。ここに、 N_{leg} ：脚表面の構成粒子の個数である。粒子 i における脚表面に対する法線方向の算出には、MPS 法の表面張力モデル (Nomura ら⁴⁾) で適用された水表面の法線方向の決定方法を 3 次元に拡張して適用

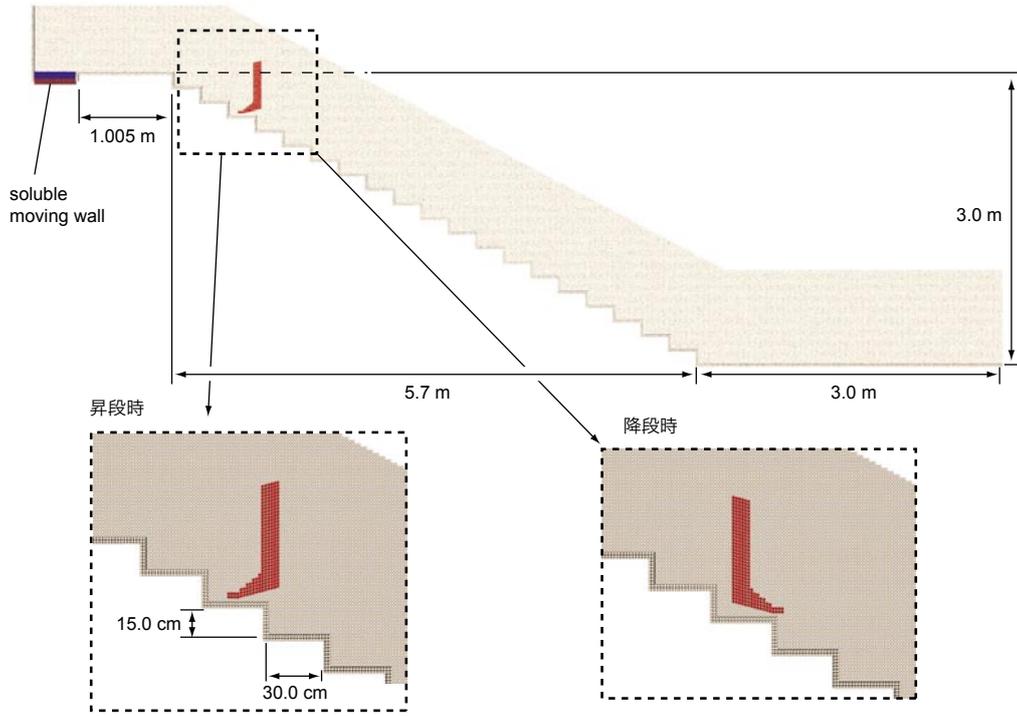


図-2 階段モデル (計算領域)

する。すなわち、粒子 i の周囲 6 点の粒子数密度の勾配を基準にして、法線方向の単位ベクトルを、

$$\mathbf{a}_i = \frac{n_i^{+x} - n_i^{-x}}{2l_0} \mathbf{n}_x + \frac{n_i^{+y} - n_i^{-y}}{2l_0} \mathbf{n}_y + \frac{n_i^{+z} - n_i^{-z}}{2l_0} \mathbf{n}_z \quad (11)$$

$$\mathbf{n}_i = \frac{\mathbf{a}_i}{|\mathbf{a}_i|} = (n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}) \quad (12)$$

と記述する (l_0 : 粒子間距離)。粒子 i の周囲 6 点の粒子数密度は、 $n_i^{\pm x}(\mathbf{r}_i \pm l_0 \mathbf{n}_x)$, $n_i^{\pm y}(\mathbf{r}_i \pm l_0 \mathbf{n}_y)$, $n_i^{\pm z}(\mathbf{r}_i \pm l_0 \mathbf{n}_z)$ である。ただし、ここでの粒子数密度の計算には、top-hat 型の重み関数

$$w_f(r) = \begin{cases} 1 & \text{for } r \leq r_e \\ 0 & \text{for } r > r_e \end{cases} \quad (13)$$

が適用され、脚構成粒子の寄与のみが加算される。重み関数 w_f の影響径については $r_e = 3.1d_i$ とした。

4. 浸水時地下街階段上の脚モデルに作用する流体力

(1) 脚モデルに作用する流体力の再現性

図-2 に本研究で用いた階段モデル (計算領域) を示す。モデル諸元は、石垣ら^{1),2)}の実験モデルとほぼ同様である。階段部は、一段当たり踏み幅 30.0 cm、高さ 15.0 cm、幅員 1.005 m の段が 20 段設置されている。脚型モデルは下から 17 段目の水路中央に設置した。左端の soluble moving wall⁵⁾ (可溶性移動壁) から水路に一定の流量を供給する。流入流量は、石垣らの実験式 ($q = 1.98h_{gl}^{1.621}$) により地上水深 h_{gl} に換算して、 $h_{gl} = 0.2, 0.3, 0.4$ m の 3 段階に設定

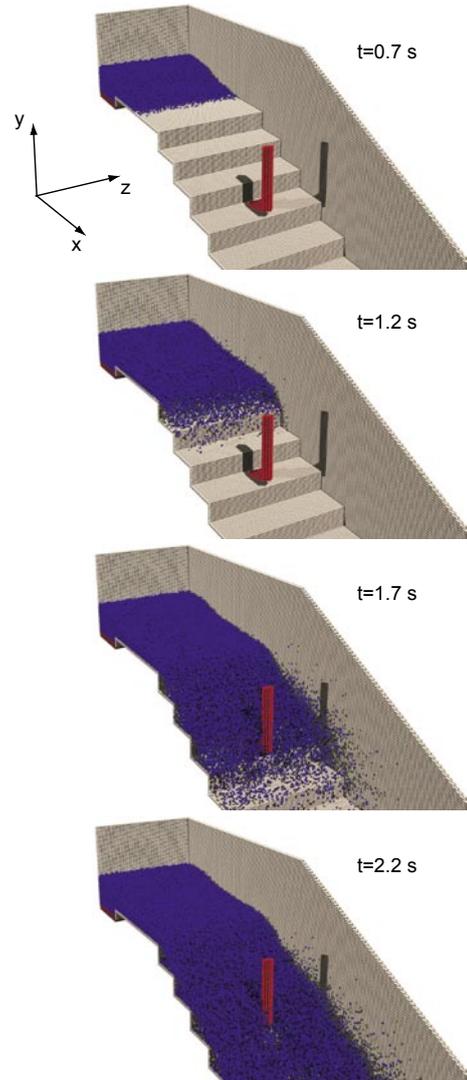


図-3 階段上の流れ ($h_{gl} = 0.2$ m, 昇段時)

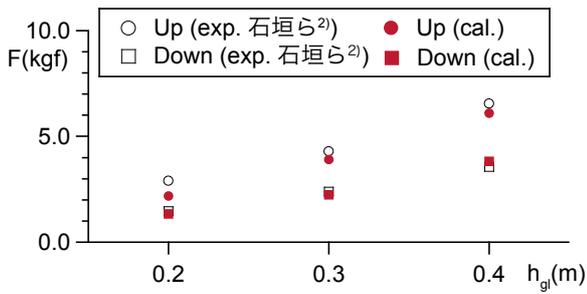


図-4 流体力の比較

し、脚のつま先の方向が昇段と降段について合計6ケースの計算を実施した。下流端の流出境界は自由流出とした。粒子径は0.015 m、総粒子数は、地上水深 $h_{gf}=0.2$ m で約700,000個、 $h_{gf}=0.3$ m で800,000個、そして $h_{gf}=0.4$ m で1,000,000個である。

図-3に計算結果の一例を示す。流入水が脚型模型と衝突し、飛沫を上げながら流下していく様子が分かる。階段の中間部の7~13段目に設けた水表面の観測点における時空間平均流速は、 $h_{gf}=0.2$ m で2.3 m/s、 $h_{gf}=0.3$ m で3.7 m/s、 $h_{gf}=0.4$ m で4.4 m/sであった。石垣らの水理実験では、カラーボールをトレーサーとして撮影されたビデオ画像から流速が算定され、それぞれ $h_{gf}=0.2$ m で2.8 m/s、 $h_{gf}=0.3$ m で4.0 m/s、 $h_{gf}=0.4$ m で4.8 m/sであり、両者は概ね一致している。図-4に、流体力に関して石垣らの水理実験による計測結果²⁾との比較を示す。石垣らの水理実験で計測された流体力は、図-1で示した脚型模型にスニーカーを履かせた状態で踝(くるぶし)の高さに集中荷重が作用すると仮定して算定した値である。計算で得られた流体抗力と実験値との対応は良好であることから、脚型表面の摩擦抵抗(スニーカーの有無に依存すると考えられる)よりも形状抵抗が全抗力に対して支配的であることが示唆される。

(2) 脚周辺における階段上流れの流況

測定結果に見られる昇段時と降段時の流体力の差について、脚周辺の流れ場の流況に基づいて考察する。図-5に、 $h_{gf}=0.4$ mの際の脚周辺における水位分布を示す。水位 h は、virtual bed (各階段のエッジを結んだ線) から水面までの鉛直方向の距離である。水面は、MPS法の標準的自由表面粒子判定条件 ($n_i < \beta n_0$; 定数 $\beta=0.97$) を満足する水粒子を除外した状態で最も高い位置に存在する粒子の座標として推定した。流れ場は昇段・降段ともに射流(昇段: $Fr=2.7$, 降段: $Fr=2.2$; 図-5の破線内の流速および水深の平均値により算定)であり、水面の擾乱は脚より下流にのみ伝播し、脚の後流域に低水位領域が出現する。脚の直下流の衝撃波面(図中の黄色点線の方向)の成す角としてMach角 β_0 を求めると、昇段時 23.4° 、降段時 27.3° であった。

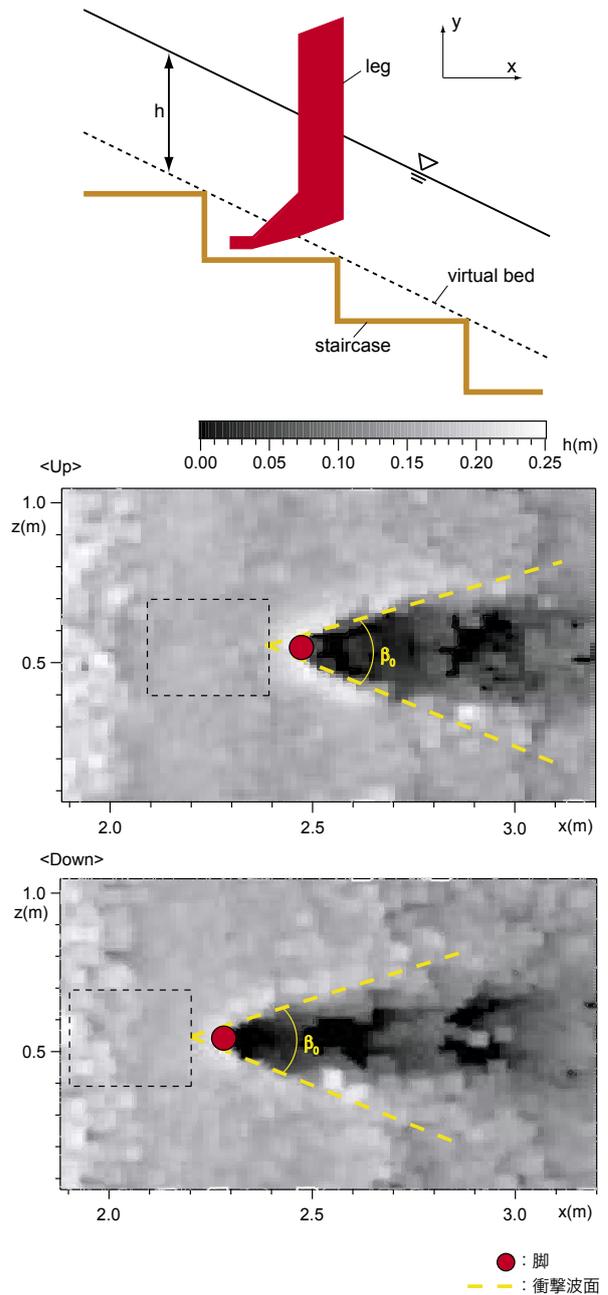


図-5 水位分布

路床が階段状であり、後流域内での水面変動も激しいため、水平床上の高速流で見られるような直線的な衝撃波面が生じないの言うまでもない。脚型モデルへの接近流(脚型の中央線に対して対称に脚型の上流側 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ の領域; 図中の破線)の水深の空間平均値 h_{us} と主流方向流速の空間平均値 V_{us} を用いて

$$\beta_0 = \sin^{-1}(V_{us} / \sqrt{gh_{us}}) \quad (14)$$

からMach角を求めると、昇段時 21.4° 、降段時 27.1° となり、脚部直下流の衝撃波面の成す角から求めた値と概ね良好な一致を示した。

図-6に、水路中央断面における流速ベクトルを示

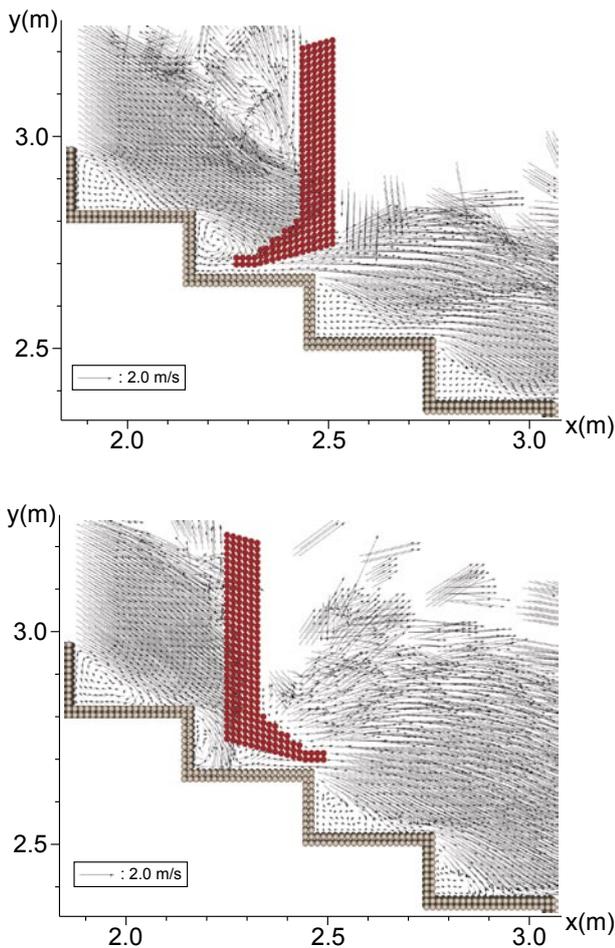


図-6 水路中央断面における流況

す。x軸方向およびy軸方向ともに1.0 cm間隔で設置されたEuler観測点での時間平均値（流れが十分に発達した時刻 $t=3.5$ sを中心とした0.5 s間のインターバル平均）を表示している。両者に共通して、脚モデルを設置した段の一段上の段ではskimming flowの特徴である渦構造⁶⁾が隅角部に現れ、また、昇段時は足の甲、降段時は踵（かかと）と段の垂直な面の間にも更に鮮明な渦構造が見られる。脚より下流では乱れが大きく特徴は明確にはつかめないが、昇段時は脚の存在する段の2段下流側でも先述の隅角部の渦構造が回復していないのに対して、降段時は少なくとも2段下流側には隅角部の渦らしき循環が見られ、回復が速やかなようである。しかし、このことが脚型に作用する流体力の相違とどのように結びつくのかは不明で、少なくとも鉛直断面な流況からは、昇段・降段による流体力の相違の理由は明瞭ではない。

図-7に、踵を横切るレベル $y=2.745$ mでの切断面（ $x-z$ 平面；図中の破線）における流速ベクトルを示す。表示されている流速は、図-6と同様に1.0 cm間隔で設置されたEuler観測点での時間平均値である。昇段時では、脚前面（脚の甲）に衝突した流れは z

軸方向に流向を 90° 変化させる。これにより発生した大規模な外向き（脚から離れる向き）の流れは、脚の下流側端部で剥離流線を外側（脚から離れる側）へ向わせることとなり、後流域が拡大する。一方、降段時では、脚前面（踵）に衝突した流れは脚前面に沿って向きを変えるが、これに誘発される外向きの流れは昇段時と比較して小規模であり、脚の下流端部の剥離流線は内向き（脚の中心軸（x軸方向）に近づく向き）となる。よって後流域は、昇段時と比較して小さくなる。両者にこのような流線の違いが見られたのは、流れが衝突する側の脚の形状が異なるからであり、このことは円柱と角柱の抗力係数の違いからも明らかである。一边を接近流向に直行させて配置された角柱の抗力係数は円柱（直径が角柱の一边と同一）の抗力係数の2倍であることが知られている⁷⁾。複雑な境界条件下での3次元的な流れ場であるので、平面2次元場のみで論じることができないのは明らかではあるが、ここで見られた流況の相違は脚の甲のレベルの各水平断面内で共通したものと考えられ、それらが集積すれば昇段と降段で有意な流体力の差が生じることになるだろう。

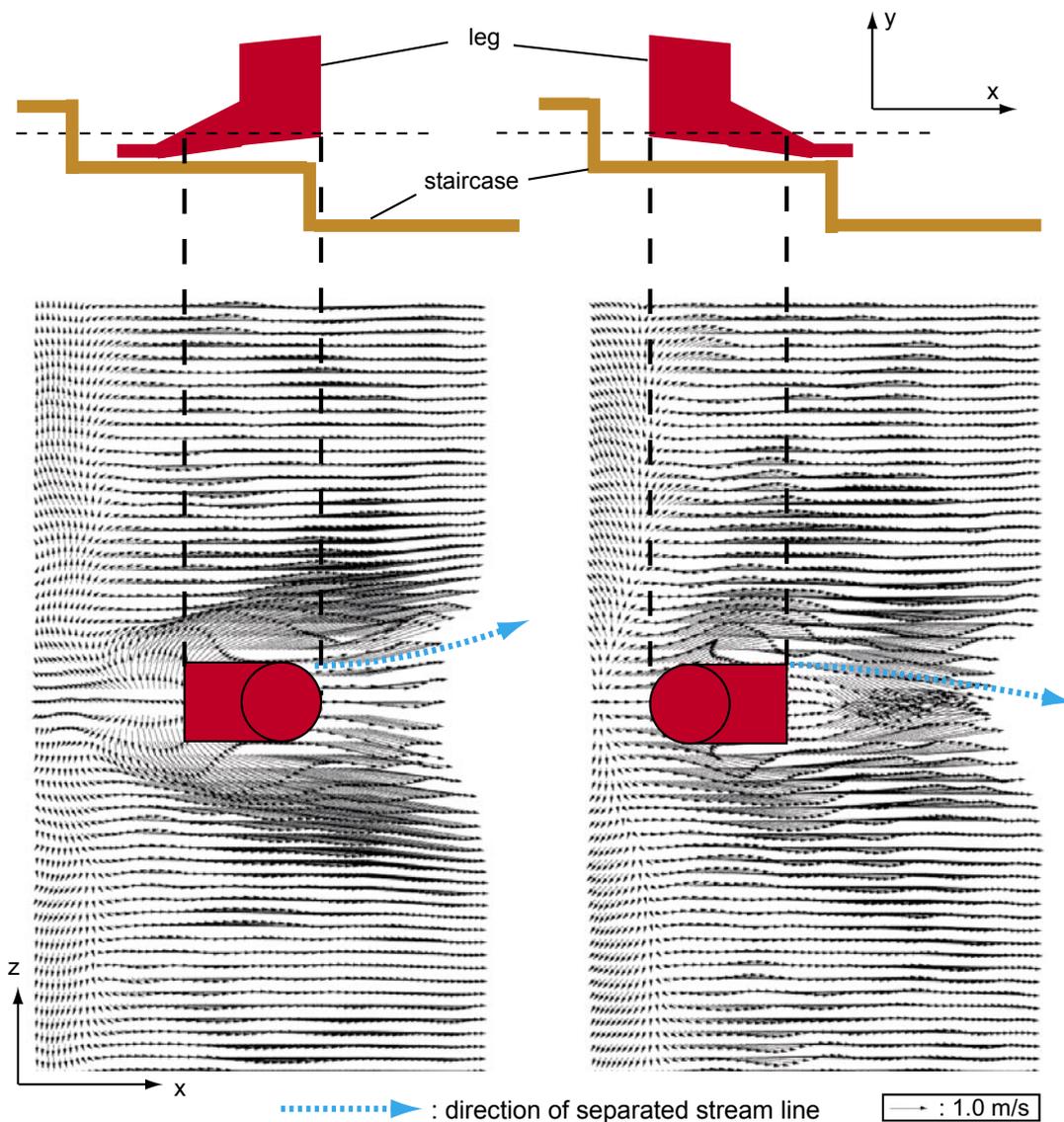
5. おわりに

本研究では、実スケールの階段模型を対象に3D-MPS法を適用して、階段状水路での脚型模型に作用する流体力評価を行い、既往の水理実験で測定された流体力との対応が良好であることを確認した。

脚型模型周辺の流れ場の解析については、少なくとも実験では計測の困難な状況で流速場の把握が可能であるという意味では、解析ツールとしての本手法の有用性の一端は示されたものと考えられる。また、特に人間による登段実験は被験者に対する危険度が高く、事故への危惧も少なくない。その意味でも数値解析での代替が必要と言えるだろう。

本研究で実施した計算では、脚が水路中央に設置された場合に限定されていたが、脚が壁際に存在する場合は偏流が生じて流体力にも大きな相違をもたらすだろう。また、踊り場で接続された折り返し階段における流体力を評価することも実階段における避難限界状態の推定には有用だろう。

謝辞：本研究の遂行にあたり、関西大学工学部都市環境工学科・石垣泰輔教授から貴重な実験データを御提供頂くとともに、計算条件の設定に関して有益な御助言を頂戴した。また、本研究を始めるに際して、京都大学防災研究所・戸田圭一教授から頂戴した地下街氾濫に関する種々のコメントが大変有用であった。ここに記して謝意を表する。



(a) 昇段時

(b) 降段時

図-7 脚近傍の平面流況 ($y=2.745\text{ m}$)

参考文献

- 1) Ishigaki, T., Baba, Y., Toda, K. and Inoue, K.: Experimental study on evacuation from underground space in urban flood, *Pro. XXXI IAHR Congress*, Korea, on CD, 2005.
- 2) 石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川 一・吉田義則・多河英雄: 実物大階段およびドア模型を用いた地下空間からの避難に関する水理実験, 科学研究費補助金基盤研究 (B) 研究成果報告書「都市水害に関する流域治水論的研究」, pp.151-157, 2005.
- 3) Koshizuka, S., Tamako, H. and Oka, Y.: A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation, *Comp. Fluid Dyn. J.*, 4, 29-46, 1995.
- 4) Nomura, K., Koshizuka, S., Oka, Y. and Obata, H.: Numerical Analysis of Droplet Breakup Behavior using Particle Method, *Jour. Nucl. Sci. and Tech.*, 38, No.12, pp.1057-1064, 2001.
- 5) Gotoh, H., Shibahara, T. and Sakai, T.: Sub-particle-scale turbulence model for the MPS method -Lagrangian flow model for hydraulic engineering-, *Comp. Fluid Dyn. J.*, 9-4, pp.339-347, 2001.
- 6) 高橋正行・安田陽一・大津岩夫: 階段状水路における射流のエネルギー損失, *水工学論文集*, 第 48 巻, pp.871-876, 2004.
- 7) 五十嵐保: 長方形柱断面柱まわりの流れ特性 (迎え角 0° の場合), *日本機械学会論文集 B*, 50-460, pp.3185-3192, 1984.

(2005.9.30 受付)