

第II部門

浸水避難シミュレーション改善のための流体力関数の提案

京都大学工学部 学生員 ○澁谷 晃生
 京都大学工学研究科 正会員 原田 英治
 京都大学工学研究科 正会員 後藤 仁志

1 はじめに

これまで、人と流体の相互作用を考慮した浸水域における歩行モデルが開発されてきたが、流体の計算コストが非常に大きく、大規模浸水域でのシミュレーションは実施されていない。そこで本研究では、歩行速度と水深によって決まる流体力関数を提案し、関数の導入による計算効率と再現性への効果について検討した。

2 数値解析手法

2.1 流体解析手法

流れ場の評価にはMPS法に高精度化を適用したMPS-HS-HL-ECS-GC-DS法¹⁾を用いる。

2.2 群集行動シミュレータ

各歩行者挙動の追跡には個別要素法 (Distinct Element Method: DEM) 型の二足歩行モデル²⁾を用いる。以下に人要素*i*についての並進の運動方程式を示す。

$$M_{hi} \frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = \mathbf{F}_{hint} + \mathbf{F}_{aw} + \mathbf{F}_k + \mathbf{F}_{cen} + \mathbf{F}_{li} \quad (1)$$

ここに、 M_{hi} : 人要素*i*の質量, \mathbf{u}_i : 人要素*i*の速度ベクトル, \mathbf{F}_{hint} : 要素間作用力, \mathbf{F}_{aw} : 自律歩行力, \mathbf{F}_k : 追従回避力, \mathbf{F}_{cen} : 向心力, \mathbf{F}_{li} : 流体力である。

流れ場の評価には人要素と流体の相互作用を考慮したDEM-MPS法 (Model3)³⁾を用い、異なる離散化空間で計算された固相と液相は混相粒子の導入により接続される。これにより、人要素に作用する流体力は次式で表される。

$$\mathbf{F}_{li} = \frac{\rho_s \mathbf{u}'_s - \bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}}{\Delta t} \quad (2)$$

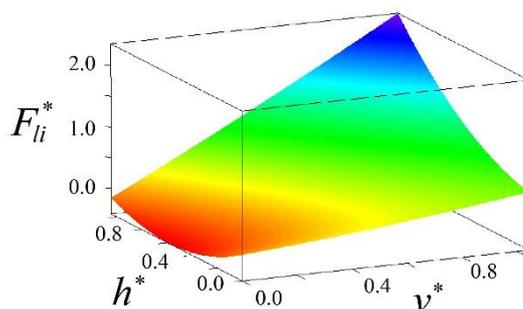
ここに、 ρ_s : 固相粒子密度, \mathbf{u}'_s : 回転を考慮した固相粒子の局所速度, $\bar{\rho}$: 混相体密度, $\bar{\mathbf{u}}$: 混相体速度である。

2.3 流体力関数の提案

DEM-MPS法 (Model3) による流体力評価は計算コストが非常に大きいため、歩行速度と水深のみによって決まる流体

表-1 各項の係数値

$a(1)$	$a(2)$	$a(3)$	$a(4)$	$a(5)$	$a(6)$
3.08	2.52	-4.72	5.89	1.06	1.83
$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-1}$

図-1 $F_{li}^*(v^*, h^*)$ を示す曲面

力関数を提案する。関数を導くために、4m×2mの周期境界領域に人要素一人を配置し、シミュレーションを行った。なお、MPS粒径は5cmである。

シミュレーションの結果より、最小二乗法を用いて、流体力を歩行速度と水深の関数として表したものが次式であり、その曲面を図-1に示す。ここに u_{limit} : 固有平衡速度, h_i : 身長, σ_h : 人要素の密度である。

$$F_{li}^*(v^*, h^*) = a(1) + a(2)v^* + a(3)h^* + a(4)v^*h^* + a(5)v^{*2} + a(6)h^{*2} \quad (3)$$

$$v^* = v/u_{limit} \quad (4)$$

$$h^* = h/h_i \quad (5)$$

$$F_{li}^* = F_{li}/\sigma_h u_{limit}^2 h_i^2 \quad (6)$$

従前のモデルと流体力関数を導入したモデルを用いてそれぞれシミュレーションを実施し、結果を比較する。流体力関数を導入したモデルでは、流体力を進行方向逆向きに与えるものとし、式(1)の \mathbf{F}_{li} を $\mathbf{F}_{li}(v^*, h^*)$ と書き換える。

3 三差路におけるシミュレーション

流れのない直交する三差路において両端から3人が対向し(x軸正方向: No.1,2,3, x軸負方向: No.4,5,6), コーナー

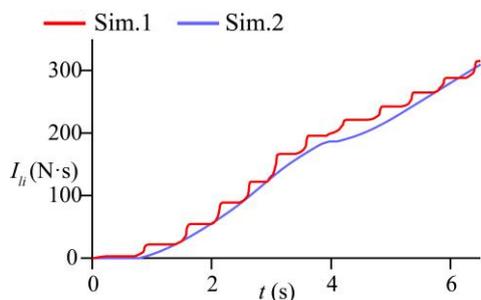


図-2 人要素 No.1 に働く流体力の力積累積値

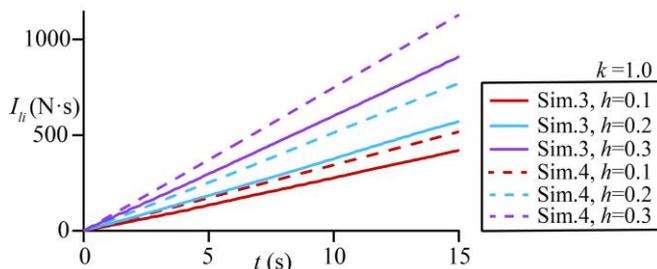


図-4 流体力の力積累積値

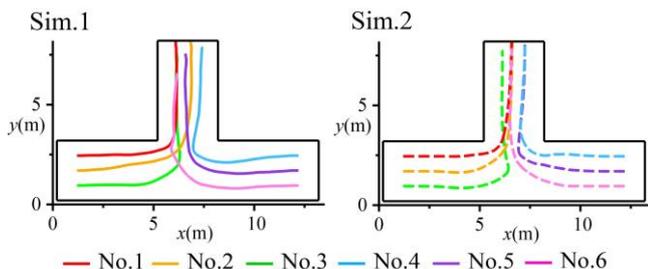


図-3 人要素の歩行軌跡

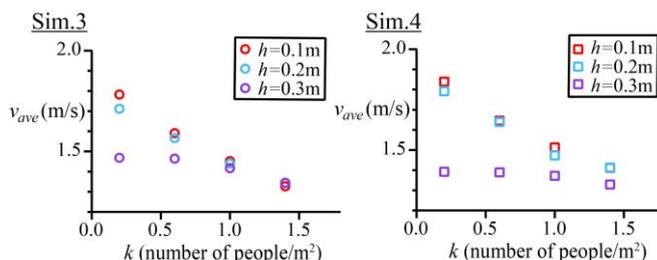


図-5 群集密度と平衡歩行速度の関係

表-2 計算時間

Sim.1	Sim.2
904 min	282 min

を曲進する条件でシミュレーションを実施した。水深は0.20m、MPS粒径は5cmである。また、流体力関数導入前をSim.1、導入後をSim.2と呼称する。

No.1 に働く流体力の力積累積値を図-2 に示すが、良好に再現できており、流体力評価の妥当性は十分である。他の人要素についても同様である。また、歩行軌跡を図-3 に示すが、No.6 を除き大きな差異は見られなかった。No.6 は回避力が逆向きに働いたため、Sim.1 ではコーナーの外側を曲進した。最後に、シミュレーション実施に要した時間を表-2 に示す。流体力関数を導入することで計算効率は約3倍となった。

4 群集シミュレーション

10m×5m の周期境界領域に人要素を不規則に配置し、同一方向に自律歩行力を与え、群集密度 k と水深を変えてシミュレーションを実施した。MPS粒径は5cmである。また、流体力関数導入前をSim.3、導入後をSim.4と呼称する。

代表的なケースにおける、人要素一人あたりに働く流体力の力積累積値を図-4 に示す。どのケースにおいてもSim.4の方が、作用する流体力は大きくなっている。次に、定常状態における歩行速度の平均値を平衡歩行速度とし、群集密度と

の関係を図-5 に示した。両モデルにおいて、群集密度と水深の増加に伴い平衡歩行速度が減少する同様の傾向は見られたが、差異は生じている。流体力や平衡歩行速度に差異が生じたのは、式(3)の流体力関数が人要素一人でのシミュレーション結果から導かれたことに起因する。Sim.3の群集シミュレーションでは、人の歩行によって流体に流れが生じ、他の人要素に作用する流体力が減少する。この効果が式(3)には含まれていないため、結果に差異が生じたと考えられる。最後に、計算時間に関して、Sim.4はSim.3に比べ約1/5~1/7に短縮された。

5 おわりに

本研究では、大規模浸水域避難シミュレーションの実施を目指し、歩行速度と水深のみによって決まる流体力関数を提案した。群集密度の増加に伴う流体力低減を考慮した関数へと改善が必要であるが、計算コストが大幅に短縮されることから、流体力関数の導入は有効である。

参考文献

- 1) 後藤仁志：粒子法—連続体・混相流・粒状体のための計算科学—，森北出版株式会社，289p，2018。
- 2) 藤井琢也：DEM-MPS法を用いた浸水時避難水中歩行モデルの改良，京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻，修士論文，2018。