

個別要素法による地震時の車椅子の 避難行動シミュレーション

瀧本浩一¹・永井健太郎²・三浦房紀³

¹正会員 工博 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

²非会員 山口大学大学院 環境共生工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

³正会員 工博 山口大学大学院教授 環境共生工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

筆者らはこれまで車椅子使用者を対象とし、一般家屋での避難行動を解析、再現するための方法として個別要素法による避難行動シミュレーションモデルの開発を行ってきた。しかし、これまでのモデルでは通路幅が広い場合、避難時間に大きな誤差が生じるなどの問題点があった。そこで、本稿では従来のモデルの問題点の改良とその検証を行った。さらに、一般家屋の壁の一部を変えたり、地震により家具が移動した場合を想定し、シミュレーションを行い、避難時間や移動距離、移動速度の変化について考察したので報告する。

Key Words :Distinct Element Method,Simulation Method, Evacuation, Wheelchair

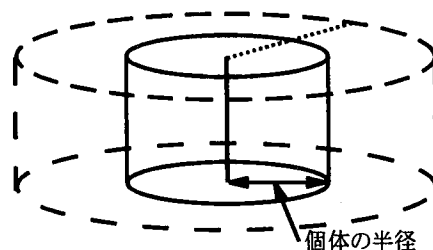
1. はじめに

災害弱者（災害時要援護者）といわれる高齢者・障害者が家屋から、安全かつ迅速に避難できるように手だてを考えておくことは非常に重要である。筆者らはこれまで車椅子使用者を対象に避難行動を解析、再現するための個別要素法（以下 DEM と呼ぶ）による避難行動シミュレーションモデルの開発を行ってきた¹⁾。しかし、これまでのモデルでは通路幅が広い場合、避難時間に大きな誤差が生じるなどの問題点があった。

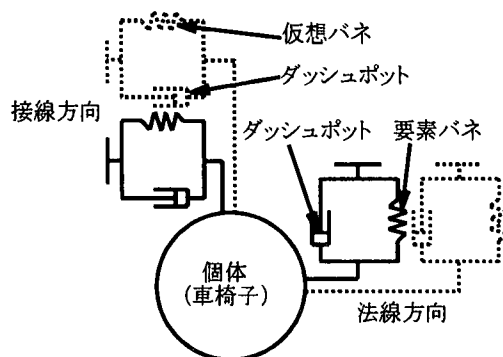
そこで、本稿では従来のモデルの問題点の改良とその検討を行った。さらに、一般家屋の壁の一部を変えるなどして、シミュレーションを行い、避難時間や移動速度の変化について考察を行った。

2. 従来のDEMシミュレーションモデルの問題点と改良

本シミュレーションモデルでは車椅子を図-1 のように接線方向、法線方向の弾性バネとダッシュポットを有する円形要素でモデル化を行い、固体要素についてそれぞれの独立した運動方程式を立ててこれを図2のフローチャートの手順で微小時間ステップごとに計算していく。ここでいう、仮想バネとは Sommer が示した人間の心理上避けたい領域である Personal Space²⁾内を表現するために導入し



(a)車椅子のモデル



(b)要素モデル

図-1 車椅子のモデル化

バネである。なお、モデル化した車椅子のこれらのバネ定数は実験¹⁾により表-1のように決定をした。

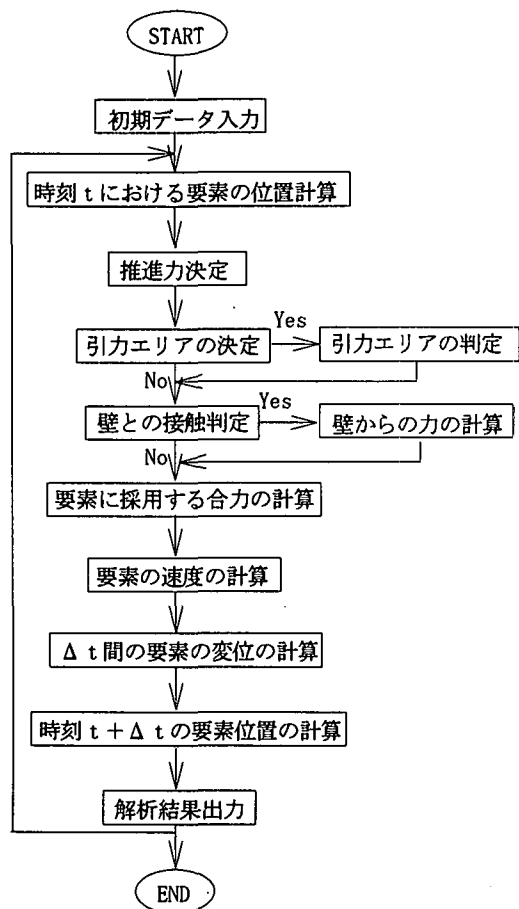


図-2 計算のフロー

$$m\ddot{\mu} + F = 0 \quad (1)$$

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5$$

$$= c\dot{\mu} + k\mu + F_3 + F_4 + F_5 \quad (2)$$

ここに

- m : 要素の質量
 c : 要素の減衰係数
 μ : 要素の変位ベクトル
 F : 要素に働く合力
 k : 要素のバネ定数
 F_1 : 各個体が他の固体との接触によって生じる力
 F_2 : 壁との接触により生じる力
 F_3 : 目標点に向かおうとする前方向推進力
 F_4 : 曲がり角をカーブする時の向心力
 F_5 : カーブ進入前後の加速・減速力

次に、本研究では図-3に示すようなL字型の通路をモデルに基本的な避難行動実験を行い、シミュレーションモデルを作成してきた。しかし、従来のシミュレーションモデルではW1がW2より広い場合、実験とシミュレーションとの避難時間の差が大きかった。これは実際の車椅子は引力作用領域（スムーズに曲がれるように要素に向心力を作用させる領域）に入る前にx軸方向に加速度を持ち、より内側を曲がるのに対して、従来のモデルでは引力作用

表-1 モデル化した車椅子のパネ定数

要素バネ定数（法線方向） k^a (N/m)	20000
要素減衰係数（法線方向） c^a (Ns/m)	1793.3
要素バネ定数（接線方向） k^t (N/m)	1000
要素減衰係数（接線方向） c^t (Ns/m)	89.7
仮想バネ定数（法線方向） $k^{a'}$ (N/m)	260.1
仮想減衰係数（法線方向） $c^{a'}$ (Ns/m)	13.0
仮想バネ定数（接線方向） $k^{t'}$ (N/m)	177.1
仮想減衰係数（接線方向） $c^{t'}$ (Ns/m)	39.5

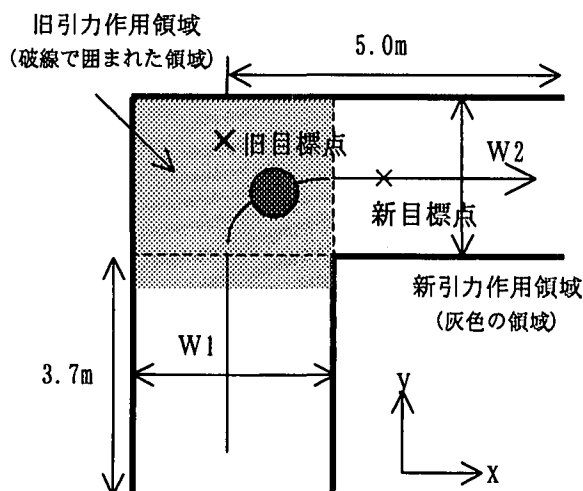


図-3 L字型の通路のモデル

表-2 避難時間と速度の比較

(W1-W2)	(1.0-0.8)		(1.4-0.8)	
	速度 (m/s)	時間(s)	速度 (m/s)	時間(s)
実験結果の平均(a)	0.4	7.5	0.6	5.4
実験の標準偏差(b)	0.1	1.9	0.2	0.5
従来モデル結果(c)	0.4	6.7	0.5	6.7
誤差(c-a)	0	-0.8	-0.1	1.2
改良モデル結果(d)	0.40	6.4	0.5	5.9
誤差(d-a)	0	-1.1	-0.1	0.5

領域に進入して後にx軸方向に加速度を持たせたため、実際の車椅子の軌跡に比べ、より外側を曲がっていた。また、コーナーを曲がる際、シミュレーションでは要素の進行方向を決定する目標点を引力作用領域内に設けていた。これらが避難時間のずれを生じさせたものと考えられる。

そこで、図-3に示すようにW1がW2より広い場合、x軸方向に加速度を持つ地点が入口幅W1に依存すると仮定して、引力作用領域を長さW1の正方形に変更した。さらに、目標点を引力作用領域外に変更するなど実際の軌跡に近づくように改良した。

変更後、改良モデルの妥当性の検討を行うため実際の実験結果¹⁾と比較を行い、各ケースにおける

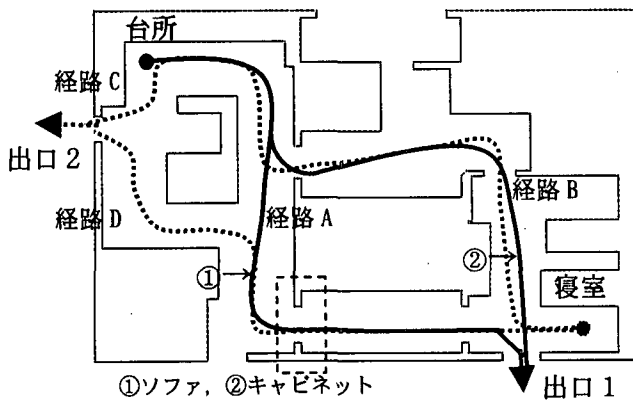


図-4 WTHの避難経路

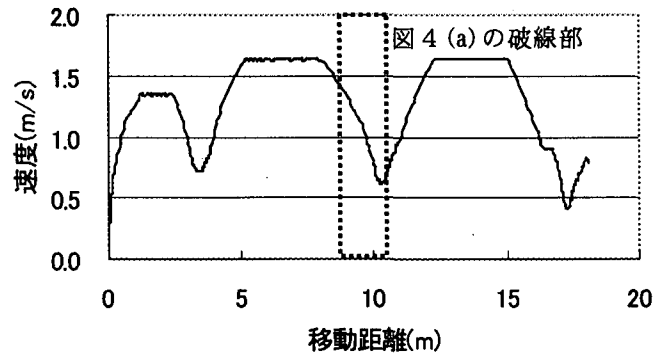
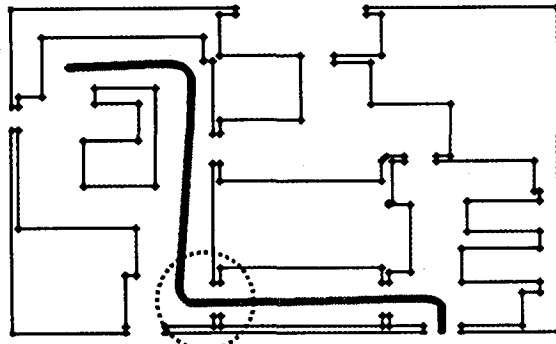
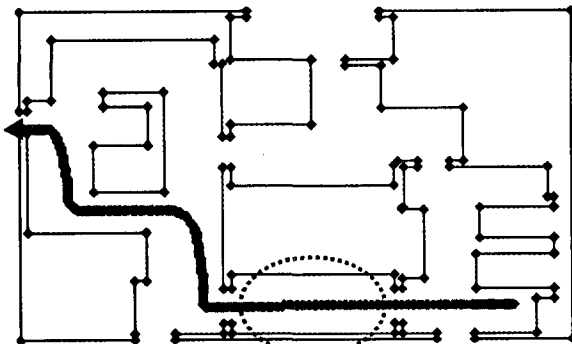


図-6 経路Aにおける速度変化



(a) 経路Aの結果



(b) 経路Dの結果

図-5 シミュレーション結果 (軌跡)

実験結果とシミュレーション結果について避難時間とその時の速度に関して比較したものを表-2に示す。これより $W1=1.4(m)$ 、 $W2=0.8(m)$ の時、避難時間に関して従来のモデルの結果の誤差が大きいのに対し、新モデルでは誤差は標準偏差内におさまっており、改良が妥当であることが分かった。

3. シミュレーション例

改良モデルを介護用モデル住宅であるウェルフェアテクノハウス宇部（以下、WTH）に適用し、避難行動シミュレーションを行い、改良したシミュレーションモデルの検証を行った。シミュレーション

表-3 実験結果とシミュレーション結果

	経路A	経路B	経路C	経路D
実験結果の平均(a)	14.9	15.3	19.7	13.8
実験の標準偏差(b)	1.2	1.6	1.6	1.9
シミュレーション結果(c)	16.0	16.9	21.0	17.7
誤差(c-a)	1.1	1.6	1.3	3.9

を行った4つの避難経路を図-4に示す。避難経路は台所を起点に出口1へ向かう経路AおよびBと寝室を起点とし出口2へ向かう経路CおよびDからなる。シミュレーションの各パラメータは先のL字通路と同じとした。さらに、シミュレーション結果を検証するため、実際の実験結果³⁾との比較を行った。また、家屋内において壁の一部を取り去ったり、地震によって家具が移動したと想定して通路幅を狭めたシミュレーションも併せて行った。

(1) シミュレーションモデルの検証

実験結果と避難時間を比較した結果を表-3にそれぞれ示す。避難の軌跡の一例として経路Aの軌跡を図-5に示す。図-5(a)の破線部分で車椅子が大きくカーブしているが、図-6の速度の変化からも、この箇所は曲がり難いことがわかる。このようにシミュレーションすることにより家屋のどの部分が車椅子の移動に支障きたすか等把握することができる。経路A～Dにおける避難時間の結果を表-3に示す。これより、経路A～Cではシミュレーションが実験結果を良く再現できている。しかしながら、経路Dでは他の経路に比べ実験結果との差が大きい。これは、避難を開始してから最初の直線区間（図-5(b)の破線部分）において長い時間加速し、シミュレーションで設定していた最高速度よりも速い速度で移動した被験者がいたことが原因であるとわかった。

(2) 地震により家具類が移動した場合

地震により、家具等が転倒、移動することで、避難経路を塞ぐと、車椅子の場合、その車幅よりも通路幅が狭くなると、通れなくなる恐れがある。そこで、図-6のように①のソファおよび②のキャビネ

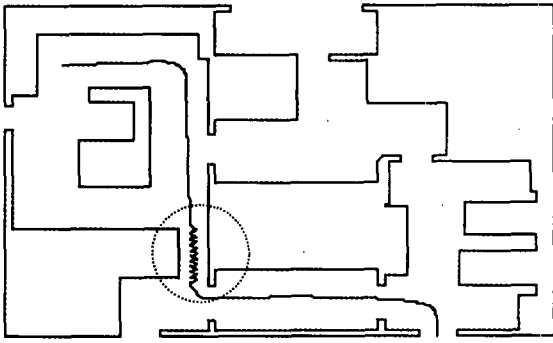


図-7 要素（中心）の軌跡（ソファ移動時）

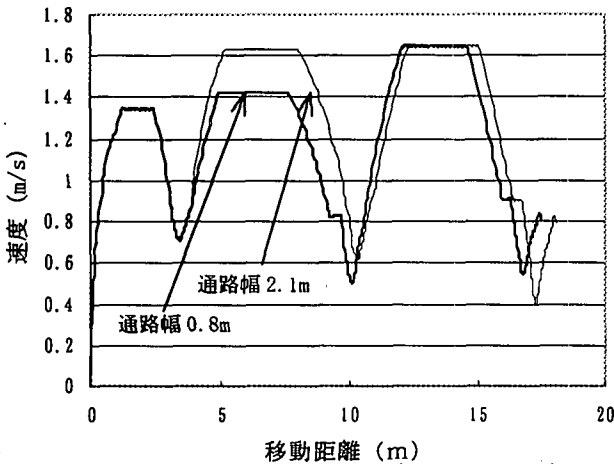


図-8 ソファ移動前後での速度変化の比較

ットが地震により、矢印方向へ 0.5m, 0.7m, 0.9m, 1.0m, 1.1m, 1.3m それぞれ移動し、通路幅を狭めたとして同様のシミュレーションを行った。

結果の一部として経路 A において①ソファが 1.3m 移動し、通路幅が 2.1m から 0.8m へ狭まった場合の軌跡を図-7 に、その際の移動距離と速度の関係を図-8 にそれぞれ示す。図-7 の破線円部分のようにソファと壁との間の軌跡が乱れている。グラフは省略するが、車椅子に作用した力の時刻歴をみると、6 回大きな力が作用している。これらから車椅子がソファと壁に衝突しながら進んで行ったことがわかる。また、図-8 の移動前後での速度の変化をみると、ソファ移動により通路幅が狭まったことで、ソファ手間での加速が十分になされず、さらにソファと壁間の通過中の衝突で速度が低下している。

(3) 壁の一部を取り除いたシミュレーション

今回、シミュレーションの対象としている WTH は車椅子移動を考慮に入れているため、一般家屋より廊下幅は広いが、図-4 の四角破線部分のように部屋を仕切るドア部分で通路幅が狭くなっている。そこで、各経路上にあるこの凸部分の一つまたは複数取り除いてシミュレーションを行い速度変化を考察した。その結果の一部として経路 A で 2 箇所の凸部分をとり除いて得られた軌跡を図-9 に、その時の

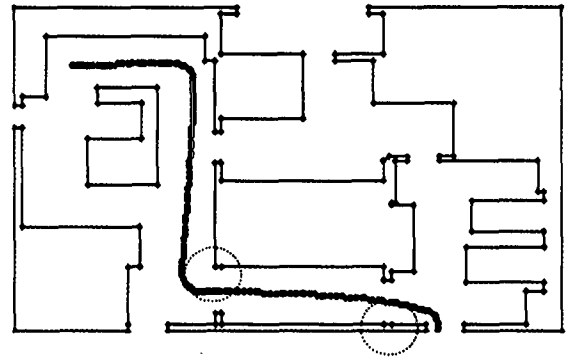


図-9 壁の一部を取り去った時の車椅子の軌跡

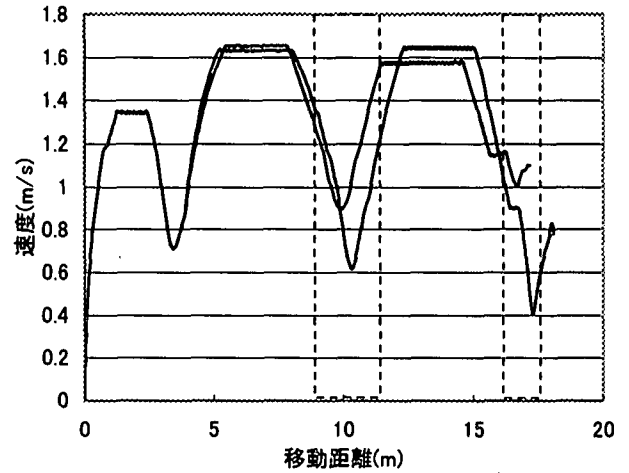


図-10 壁を取り去った後の速度変化

速度変化を図-10 にそれぞれ示す。これらより、コーナー区間（図-9 の破線円部分が図-10 の四角破線部分に対応）で凸のない方が凸のある場合よりも軌跡や加速、減速が滑らかであり、実際の避難時に避難者にかかる負担を軽減できると考えられる。また、避難時間も凸ありの場合が 16.1 秒だったのに対し、凸なしの場合は 13.8 秒とおおいに短縮されている。

4. まとめ

本研究では従来の個別要素法による避難行動シミュレーションモデルの改良とその妥当性の検討、家具の移動や壁の撤去による避難への影響を調べた。

今後は他の避難者との接触や衝突による外力の影響を考慮に入れたシミュレーション等も必要である。

参考文献

- 1) 久保寺正晃：DEMを用いた車椅子による避難行動シミュレーション，山口大学修士論文，1999。
- 2) Sommer, R: Personal Space: The Behavioral Basis of Design, 1972。
- 3) 内山美佐子：個別要素法による車椅子の避難行動シミュレーション，山口大学卒業論文，