

津波避難行動におけるグループ歩行の 同調行動のモデル

熊谷 兼太郎¹・永廣 迪²・小野 憲司³

¹正会員 京都大学防災研究所特定准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: kumagai.kentaro.3e@kyoto-u.ac.jp

²国土交通省東北地方整備局 酒田港湾事務所 (〒998-0061 山形県酒田市光ヶ丘5-20-17)

E-mail: chiro-i82ab@mlit.go.jp

³正会員 京都大学防災研究所特定教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: ono.kenji.5z@kyoto-u.ac.jp

本研究は、津波避難行動におけるグループ歩行の同調行動のモデルを検討した。まず、避難訓練の際に徒歩避難者の人流測定を行い、避難者はグループ歩行と単独歩行に分化し、グループ間で歩行速度に違いがあることが分かった。また、グループ歩行比率は東北地方太平洋沖地震の避難行動より大きく、今回の避難訓練データをそのまま実際の避難に適用するのは課題があることが分かった。次に、同調性を考慮したモデルを提案しグループ歩行の再現計算を行い、グループの形成、グループ間の速度差及びグループ歩行比率を概ね表現するとともに、パラメトリックスタディでは実際の避難行動のグループ歩行比率に近い値となることを示した。ただし、グループの歩行速度の絶対値がやや小さく、歩行速度のモデル化についてより詳細な検討が必要であることが分かった。

Key Words : tsunami evacuation, group walking, evacuee tracking, numerical model, synchronization

1. 序論

国土交通省都市局は2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難実態調査を行い、その結果は「復興調査支援アーカイブ」¹⁾で公開されている。そのうち例えば岩手県釜石市の個人を対象にした調査結果を分析すると、徒歩避難者のうち単独で避難した人の割合は約29%であって、残りの約71%は何らかのグループで避難した人であった。また、宮城県仙台市ではグループで避難した人は48%であった。このように、概ね半数がそれより多くの割合の避難者が、単独歩行ではなくグループ歩行していた。

津波から安全に避難するためには、津波避難シミュレーションを活用した避難計画の事前検討が有用である。冒頭の事実を考慮すると、これまで津波避難シミュレーションにグループ歩行の効果を組込んだものは少ないが、適切にモデル化し組込むことが必要であると考ええる。

ここで、本稿で取り上げる「グループ歩行」の定義を示す。まず、グループ歩行は数人ないし多くても十数人程度までの人々によって構成された小集団の歩行行動であって、歩行者相互の間隔が詰まって自由歩行が出来な

い状態である「混雑」とは異なる。また、津波避難の際には、交差点、避難場所の近傍等を除き、街路上では避難場所へと向かうような人の流れが基本的には一方向的に生じると考える。以上のように考え、本稿で取り上げる「グループ歩行」とは、数人ないし多くても十数人程度までの人々によって構成される小集団の一方向流の歩行行動と定義する。

2. グループ歩行に関する既往の研究

戸川²⁾は、群集流の観測を行うなかでグループ歩行についても調べている。それによると、2人の歩行速度が違っているときは無意識に速度調整が行われ、2人の平均速度かあるいはそれより若干遅い速度に落ち着く。例えば、1.5 m/sと1.3 m/sの歩行者であった場合、1.35～1.4 m/sとなるとしている。3人のときは、個々の歩行速度の平均よりは幾分遅い速度になる。例えば、1.5 m/s, 1.4 m/s, 1.3 m/sの歩行者であった場合、1.35 m/s程度となるとしている。4人以上のときは、最も遅い歩行者に同調

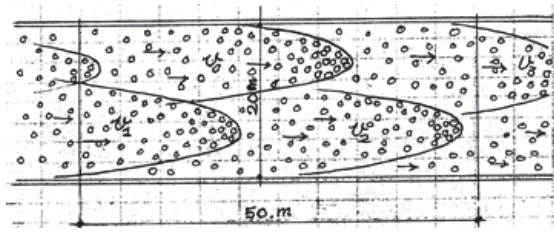


図-1 彗星状集団（戸川²⁾より引用）

するとしている。また、戸川²⁾は幅広の街路で複数のグループが形成され彗星状集団となることを報告している。その構造は、先頭部に核となる遅い歩行者がいて、その付近に同調しやすい歩行者が続き、さらに歩行者が連鎖状に広がるとしている。また、各グループの速度が違うことも指摘している。図-1は、彗星状集団の観測事例のイメージを俯瞰的に示したものであり、長さ50 m、幅20 mの矩形街路において、1,364人の歩行者がいてグループの歩行速度は0.5～0.7 m/sの範囲であったとしている。

間下³⁾は、グループ歩行の歩行速度について商店街における一方向流を対象にした観測結果をもとに、単独歩行はグループ歩行に比べて25%早く、前者が1.009 m/s、後者が0.805 m/sであったと報告している。

中⁴⁾は、交差・対向流動について混雑した駅構内の人流を観測し、縞模様をなすような歩行者のグループ化現象が生じていることを報告している。

以上のように、これまでグループ歩行の観測結果はいくつか報告されているものの事例は少ない。特に、津波避難行動におけるグループ歩行の規模、歩行速度等の観測は皆無であった。ただし、津波は発生頻度が小さいので、実際の津波避難行動の測定は困難であると考えられる。そこで、津波避難行動になるべく近い歩行行動として津波避難訓練の人流測定を行うことを考える。

戸川²⁾は、歩行者が先行する歩行者に追いついたときの行動を表現するための「同調性」と「反発性」の心理を考慮したグループ歩行のモデルを提案している。すなわち、同調性があるときは先行する歩行者の後を追うが、そうではないとき（反発性があるとき）は追い抜くというものである。Crisiani et al.⁶⁾は、グループとその周囲の環境との関係について研究している。それによると、3～4人のグループは、グループ内でお互いに視覚的・言語的に連絡を取りたいという要請に基づいてV字型配置（V-like formation）で歩くとしている。そして、このグループが混雑した環境を通り抜けるとき、視覚的・言語的に連絡を取りたいという要請は後回しになって、その代りにお互いのつながりを保つことに重点が置かれ、川のような形状（river-like configuration）になるとしている。高柳⁷⁾は、鉄道駅における交差・対向流動について分

析し、グループが生じる理由として歩行者が最適速度を保持しようとすることを挙げ、先行する歩行者に対する「追跡相」と「追従相」の二つのプロセスを歩行者が経ることによりグループが形成されるモデルを提案している。また、加藤⁸⁾及び宇野⁹⁾は、家族・仲間という人間関係を紐帯としたグループについて、グループの構成員間に生じる引力を仮定し、かつ、構成員のなかに中心となるリーダーが1人いるモデルを提案している。

こうした考え方のうち、例えば戸川²⁾の同調性の心理を考慮したグループ歩行のモデルは、津波避難行動への適用性については不明であるが、避難者の心理を考慮することが可能でありかつ比較的単純であることから、津波避難行動のグループ歩行へと適用することを考える。

以上の既往の研究をふまえ、本研究の目的は以下のとおりとした。すなわち、津波避難行動になるべく近いと考えられる津波避難訓練の人流測定を行うとともに、津波避難行動におけるグループ歩行の同調行動のモデルを構築することを目的とする。3章は、津波避難訓練の人流測定を行って得た知見を報告する。4章は、津波避難行動におけるグループ歩行の同調行動のモデルについて提案するとともに人流測定で結果の再現計算等を試みた。最後に、5章で結論を述べる。

3. 避難行動の人流測定

(1) 人流測定の手法の検討

人流を測定するため、一般的に用いられている手法を以下に述べる。

a) 赤外線センサ

利用者を感知して作動する自動ドア等に利用されているセンサで、発射部と受光部とを結ぶ直線上を人が通過すると感知する（図-2）。

比較的単純なセンサであり、容易に測定システムの構築が可能であると考えられる。しかし、情報として得られるのは人の通過の有無だけであって、進行方向及び速度は測定できない。また、複数の人が同時に測定線上を通過した場合は人数の正確な測定は困難である。

b) 画像センサ

商業施設の入退場者数の管理、施設内の消費者の回遊行動の調査等において利用されているセンサで、ビデオカメラで撮影した動画の画像解析により人の動きを識別する（図-3）。

人の動きを記録する測定システムとして実用的に用いられている。ただし、測定の対象領域を上空または斜め上空から俯瞰するような場所が必要である。

c) 熱感知センサ

防犯用の自動点灯式ライト、国際空港での検疫等にお

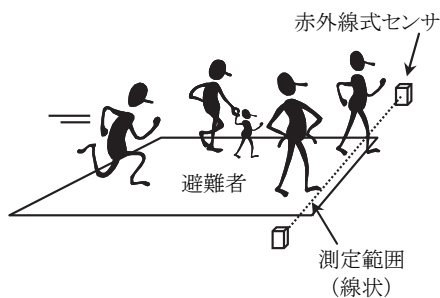


図-2 赤外線センサ

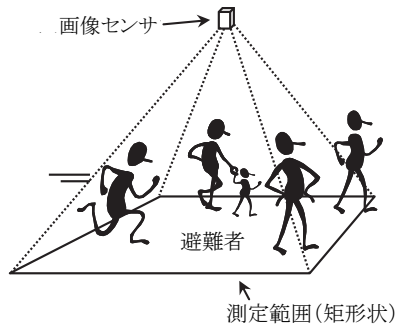


図-3 画像センサ

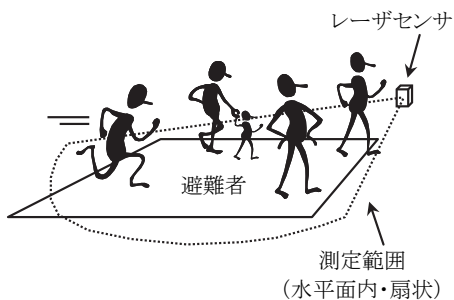


図-4 レーザセンサ

いて利用されているセンサで、物体の表面温度を感知して物体を識別する。

d) レーザセンサ

船舶、産業用機械のための障害物検知等において利用されているセンサである。光源からレーザ光を照射して、反射の有無をもとに障害物の有無と距離を測定する。ある面内に一定の角速度でレーザ光を連続的に照射すれば、扇状の範囲について調べることができる。

帷子ら¹⁰⁾は、レーザセンサを鉄道駅のホーム建屋の梁に取り付けてレーザ光を斜め下方向に照射し、計測断面を通過した人数及び方向を測定している。レーザセンサを使用すると移動方向及び速度が測定可能であり、この手法は参考になる。ただし、レーザ光を斜め下方向に照射しているため、一人の被験者を水平方向に広い範囲で追跡するのは困難である。すなわち、この手法で歩行速度と方向を連続的に精度よく測定するのは難しいと考えられる。

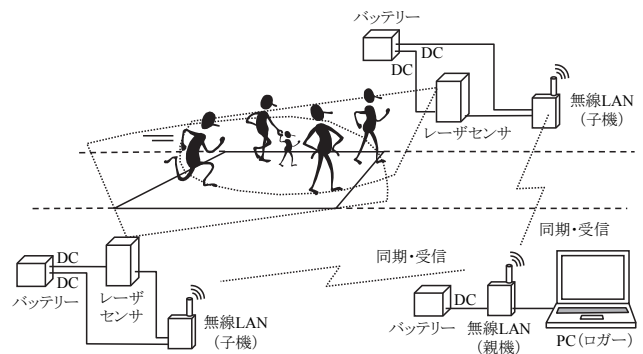


図-5 人流測定システム

表-1 使用した機器の一覧

機器名	メーカー名・製品名
レーザセンサ	北陽電機株式会社・UTM-30LX-EW
データ変換ソフトウェア	北陽電機株式会社・Flow Radar_2 Version 1.2.15.0
PC	パナソニック・CF-AX2
無線LAN(親機)	NEC・Aterm WR8175N (HPモデル)
無線LAN(子機)	NEC・Aterm WL300NE-AG
バッテリー	GSユアサ・YTX12-BS
超音波式距離計	GISupply・Haglof Sweden VERTEX IV
ビデオカメラ	パナソニック・HDC-TM85

レーザセンサは、地上に設置してレーザ光を水平方向に照射することも可能である(図-4)。そこで、本研究では、センサを大人の腰の高さ程度の位置に設置し、水平方向に照射して測定する方法を採用した。

(2) 構築した人流測定システム

大人の腰の高さ程度の位置に設置したレーザ光源から水平方向に一定の角速度でレーザ光を連続的に照射することにより、水平面内で扇状の範囲にある物体を検出することが可能なレーザ測域センサ(以下、単に「レーザセンサ」という。)を用い、複数の徒歩避難者が街路を避難している状況の人流を面的に測定するシステム(以下、単に「人流測定システム」という。)を構築した。

図-5に、人流測定システムの概念図を示す。レーザセンサは原理的には1台でも測定可能である。しかし、レーザ光源からみて視線方向に複数の避難者が重なった場合は死角が出来るため、1システムに2台のレーザセンサを配置し死角を極力小さくした。なお、3台以上のレーザセンサの配置も可能であるが、システムの煩雑化及びコストの増加のデメリットがあるため、1システムについて2台のセンサを標準として考えた。本研究では人に向けて使用し、かつ、被験者が裸眼でセンサを見る可能性があることから、レーザ光の安全性について配慮する必要がある。レーザ光の安全性に係る規格は、米国FDA¹¹⁾、我が国の工業規格¹²⁾等があり、例えば米国FDA

の規格のclass 1相当の安全性を満たしている製品を使用する必要がある。また、レーザ光の到達距離は、幅員の大きな街路でもカバーできる必要がある。以上を考慮し、レーザセンサは北陽電機株式会社製UTM-30LX-EW（FDA class 1、最大測定可能距離が約30 m）を採用した。

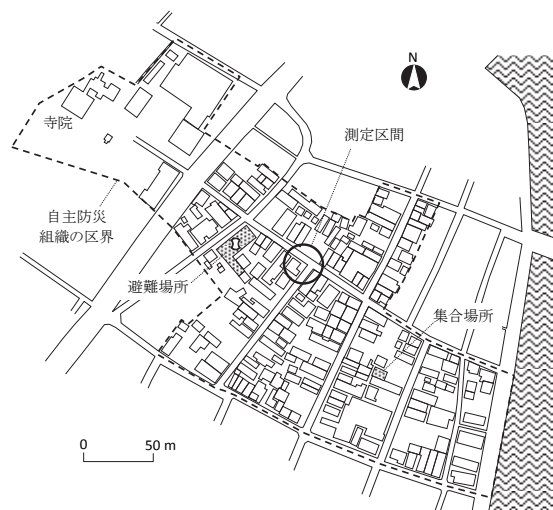
レーザセンサとPC間の通信は無線で行い、街路を通行する避難者に物理的な影響を与えないようにした。使用した通信機器は、屋外利用に適合した2.4 GHz帯の無線LAN機器である。

PCに転送されたデータの座標変換等をリアルタイムで行ってPC内のハードディスクに保存するためのデータ変換ソフトウェアは、北陽電機株式会社製Flow Radar_2 Version 1.2.15.0を利用した。レーザセンサ間の距離のキャリブレーションは超音波式距離計を用いて行った。また、システムに必須ではないものの、測定結果の確認・検証用として、ビデオカメラ1台を設置して撮影する。表-1に、使用した機器の一覧を示す。

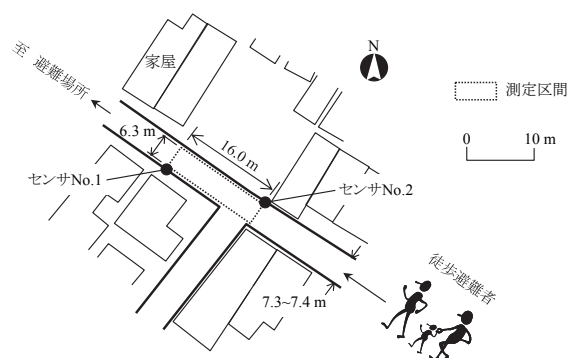
(3) 測定結果

a) 対象地域

対象地域は、南海トラフ地震に伴う津波の浸水が想定



(1) 自主防災組織の区域図



(2) 測定区間周辺の拡大図

図-6 対象地域

されている静岡県下田市の中心市街地である。

測定区間は、対象地域内の自主防災組織の一つである大和区のなかに設けた。図-6(1)に区域図を示す。実線は街路及び建物の輪郭で、破線は同区の区界である。同(2)に、測定区間周辺の拡大図を示す。測定区間の形状は矩形で、街路延長方向の長さ16.0 m、幅6.3 mとした。同区間には、徒歩避難者の歩行速度に影響を与えるような信号、勾配、階段等は無く、平坦で様な街路である。また、通過交通は少なく、後述するとおり測定の際には自動車、バイク、自転車等の車両が徒歩避難者へ及ぼす影響はほとんど無かった。

写真-1は、レーザセンサ等の設置状況である。センサは三脚に固定し地盤から約1mの高さに調整した。

b) 日時及び測定対象者の動き

測定は、2013年12月1日（日）の避難訓練の際に行った。当日は、午前9時に防災放送網のスピーカを通じて避難訓練を開始するとのメッセージが放送された。参加者はそれぞれの所在地からいったん地区内の集合場所に集まって訓練内容の簡単な説明を受けたあと、避難場所に向かって避難していた。

測定区間は、集合場所から避難場所までの途中に設けた（図-6(1)参照）。集合場所から測定区間中心点までの



(1) センサNo.1 (左) 及びPC (右)



(2) センサNo.2 (左) 及びビデオカメラ (右)

写真-1 設置状況



(1) 午前9時10分49秒 (f=0s) 第1群 (先頭) が通過



(2) 午前9時10分59秒 (f=10s)



(3) 午前9時11分09秒 (f=20s)



(4) 午前9時11分19秒 (f=30s) 第2群が通過



(5) 午前9時11分29秒 (f=40s)



(6) 午前9時11分39秒 (f=50s) 第3群 (最後尾) が通過



(7) 午前9時11分49秒 (f=60s)



(8) 午前9時11分59秒 (f=70s)

写真-2 ビデオカメラのスナップショット

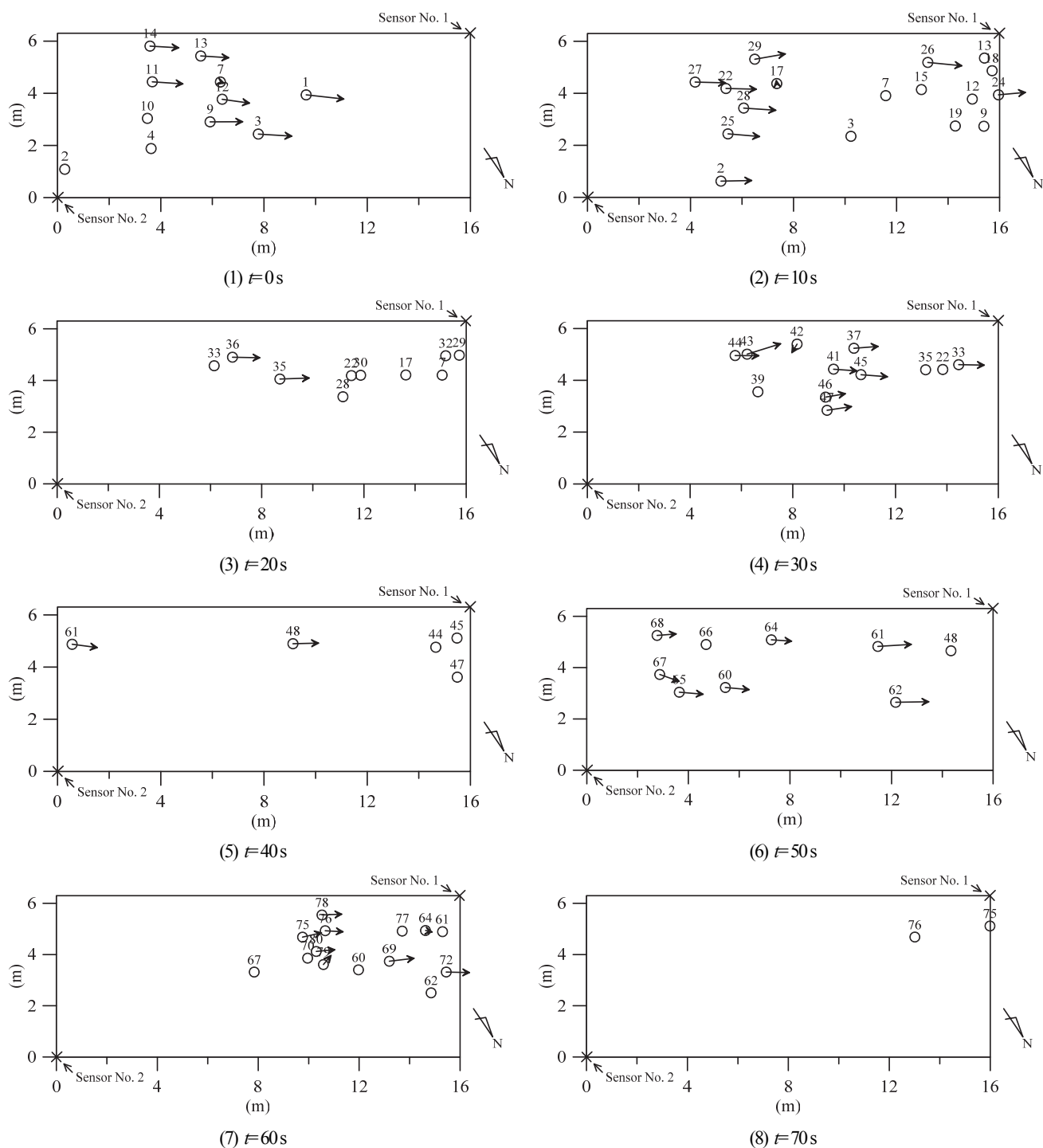


図-7 レーザセンサの測定結果のスナップショット

距離は約135m，測定区間中心点から避難場所までの距離は約40mである。

徒歩避難者は，9時10分～同12分のあいだの約80秒間（測定区間に先頭が入ってから最後尾が通過するまでの時間）に測定区間を通過した．人数は，住民と消防団の計51名であった．この他に自動車2台，バイク1台，自転車1台が通過したが，避難訓練とは無関係の交通であり，かつ，徒歩避難者に及ぼす影響がほとんど無かったため，分析の対象から除外した．

c) 測定結果

写真-2はビデオカメラの撮影データのスナップショットで，午前9時10分49秒（ $t = 0s$ とする．）に測定区間の東端を先頭が通過してから，10秒おきに同9時11分59秒（ $t = 70s$ ）まで切り出したものである．各写真の右下隅にレーザセンサNo. 2が写っていて，避難者は画面左手前から右奥に向かって歩いている．

通過した人は3つのグループを形成していて，グループ間の谷間に数人が単独（一部は2人連れであった．以

下同じ。)で通過していた。具体的には、 $t=0$ sの頃に先頭の第1群(23人)が通過し、 $t=20$ sの頃はグループ間の谷間であって計4人が単独で通過していた。 $t=30$ sの頃に第2群(11人)が通過し、 $t=40$ sの頃には谷間である。そのときに通過したのは1人である。最後に、 $t=50\sim70$ sで最後尾の第3群(12人)が通過した。

3つのグループの人数は合計46人であり、全体の51人に対しグループ歩行比率は約90%であった。ここで、1章で述べた東北地方太平洋沖地震の際のグループ歩行比率は釜石市で約71%、仙台市で同48%であった。すなわち、今回の測定結果は両者に比べて大きくなっている。その原因の一つとして、今回の避難訓練では、避難者はいったん地区内の集合同所に集まったあと避難を開始したので、グループ歩行比率が大きくなったことが考えられる。これは、今回のようないったん地区内の集合同所に集まったあと避難を開始する形式の避難訓練のデータをそのまま実際の避難における歩行行動に適用するのは課題があることを示している。現時点では避難行動におけるグループ歩行の規模や速度に関する適切な資料がないためこのまま利用するが、この点は今後さらに検討する必要がある。なお、実際の避難事例のなかでも釜石市と仙台市とで20%程度の違いが生じているので、例えば別の地震についても事例を収集するなど、実際の避難におけるグループ歩行比率の大きさについても今後さらに検討する必要がある。

$t=0, 10, \dots, 70$ sの各時刻について、測定区間内の人数はそれぞれ11, 12, 4, 11, 1, 11, 9, 0人であった。測定区間の大きさは100.8 m²であり、同区間内に最も多くの人がいた $t=10$ sの時点(12人)であっても、群集密度は0.12人/m²程度であった。Older¹³⁾は、群集密度が0.5人/m²程度までは歩行速度は他者の影響を受けないとしている。従って、今回の人流測定では、街路の幅員等の環境は避難者の歩行速度に影響を与えなかったとみなした。

図-7は、レーザセンサの測定結果のスナップショットで、 $t=0\sim70$ sの間を10秒おきに切り出したものである。図中の白丸がその時刻の避難者の位置を示し、各白丸の上に付された数字は避難者に割り振られた通し番号である。また、白丸中心から伸びている矢印は移動方向を示しており、矢印の先端の位置が1秒後の移動先である。矢印がついていない場合は、1秒後の移動先が追跡出来なかったことを示す。

同(1)、(4)及び(7)では白丸が密に検知されているのに対し、同(3)及び(5)では白丸が疎である。このように、既に述べたグループと谷間の通過と、グループの形状はある程度は検出できているといえる。ただし、人数の再現性はあまり良いとは言えず、例えば写真-2(6)と図-7(6)とを比較すると、実際の人数に比べてレーザセンサで検知された人数の方が少ないようである。この原因の一つは、

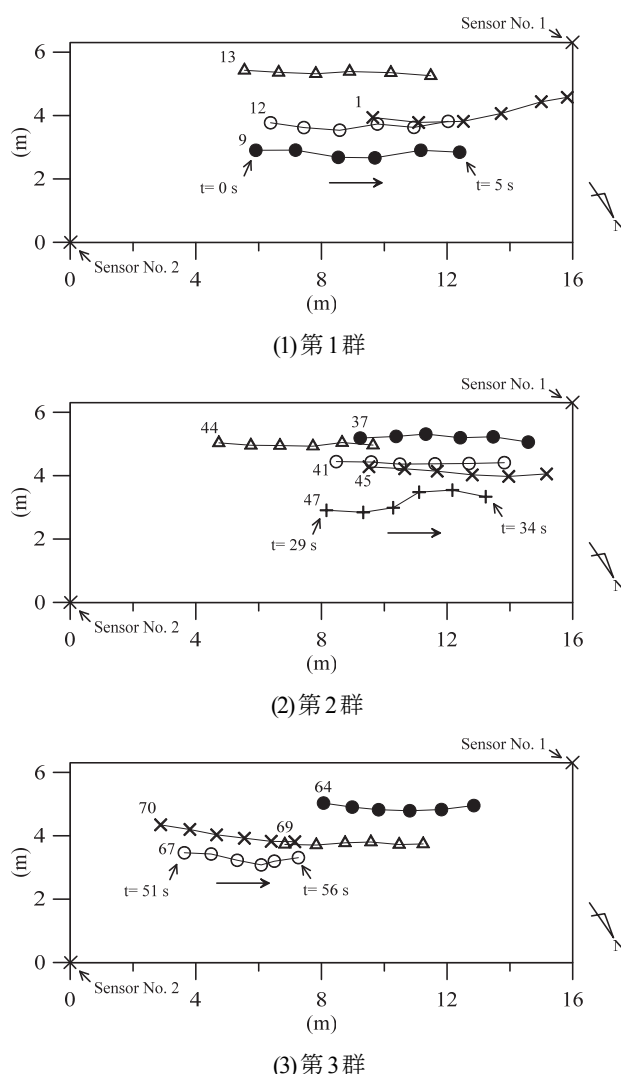


図-8 5秒間の歩行の軌跡

表-2 レーザセンサで測定した歩行速度

ID	分類	歩行速度(m/s)		
		個人	群平均	全体平均
1	第1群	1.258	1.223	1.050
9		1.306		
12		1.141		
13		1.188		
37	第2群	1.075	1.063	
41		1.071		
44		0.985		
45		1.134		
47	第3群	1.048	0.861	
64		0.962		
67		0.739		
69		0.882		
70		0.862		

避難者同士が接近して歩いていて密集度が大きいと検出エラーが生じてしまうことが挙げられる。

また、図-7(2)及び(7)を見ると、矢印がついていない、

すなわち、1秒後の移動先が追跡出来なかった白丸が多く発生していた。この原因の一つは、多数の人がレーザセンサNo. 1のすぐ近くを通過したため、個別に検出できずエラーになったことが考えられる。対処法として、レーザセンサの設置場所を変更する等の工夫が考えられるが、今後の課題である。

図-8は、3つのグループからそれぞれ4～5人を抽出し、5秒間の歩行の軌跡を描いたものである。その結果、5秒間という短時間の観察結果ではあるものの、グループの中での各自の相対的な位置関係はあまり変化していないことが分かった。例えば、第1群の避難者No. 1, 9, 12及び13は、 $t=0$ sでNo. 1を頂点にした雁行型で左から右に動いていくが、 $t=5$ sのときもほとんど形は変わっていなかった。このように、お互いの位置関係を保ったままグループの形を変えずに歩いていたことが分かった。

表-2は、個人の歩行速度を求め、それをもとに各グループの平均歩行速度及び全体の平均歩行速度を求めたものである。グループ間で歩行速度には違いがあり、先頭で通過した第1群が最も速く1.223m/s、第2群は1.063m/s、最後尾の第3群は最も遅く0.861m/sであった。全体の平均歩行速度は1.050m/sであった。

4. グループ歩行のモデル

(1) モデル

図-9に、津波避難行動におけるグループ歩行のシミュレーションのフローを示す。まず、避難者数 n 、65歳以上比率、65歳以上の人と65歳未満の人の平均自由歩行速度、同調パラメータ（この概念については後述する。）の平均値及び乱数の種を任意に与え、条件設定として読み込む。次に、各避難者が65歳以上か65歳未満かの判定、歩行速度の設定、及び同調判定のために用いられる乱数を生成しておく。

避難者によって歩行速度は異なる。筆者らのうちの一人がこれまでにに行った研究¹⁴⁾によれば、65歳以上の人と65歳未満の人とでは平均歩行速度が異なる。そこで、乱数を用いて各避難者を65歳以上か65歳未満かの判定を行ったうえで、設定した平均歩行速度（それぞれ0.96 m/sと1.19 m/s）を分布の平均値 μ_v としたときに標準正規分布に従うとして、歩行速度を乱数を使って与えた。なおその際に $\mu_v+0.25$ (m/s) のときの累積確率が0.99となるように設定した。ただし、この0.25 m/sという値は参照すべき適切な文献値が無かったため、仮定して与えた。

追い越しが生じた際に、追いついた人（またはグループ）がそのまま追い越していくか、あるいは、先行する人（またはグループ）とグループを形成するかを判定するため、戸川⁹⁾を参考に「同調パラメータ」という概念

を提案した。同調パラメータは、0～1の間の数値をとり、グループを形成する確率を示す。すなわち、同調パラメータが0のときは追い越すだけでグループを形成することとはなく、1のときは必ずグループを形成するものとする。本研究では、同調パラメータは平均値 μ_a が0.25であるような標準正規分布に従うとして、乱数を使って各避難者に固有の同調パラメータを与えた。また、その際に $\mu_a+0.3$ のときの累積確率が0.99となるように設定した。ただし、これらの0.25, 0.3という値は参照すべき適切な文献値が無かったため、仮定して与えた。

街路モデルは出発地点から避難場所まで分岐のない単純な直線リンク形状とする。出発地点にまだ出発していない人がいる場合、1秒あたり3人が新たに出発するものとして、避難開始ずみの避難者を定義する。それぞれの避難者を時間ステップ Δt の間だけ速度 v で進める。その

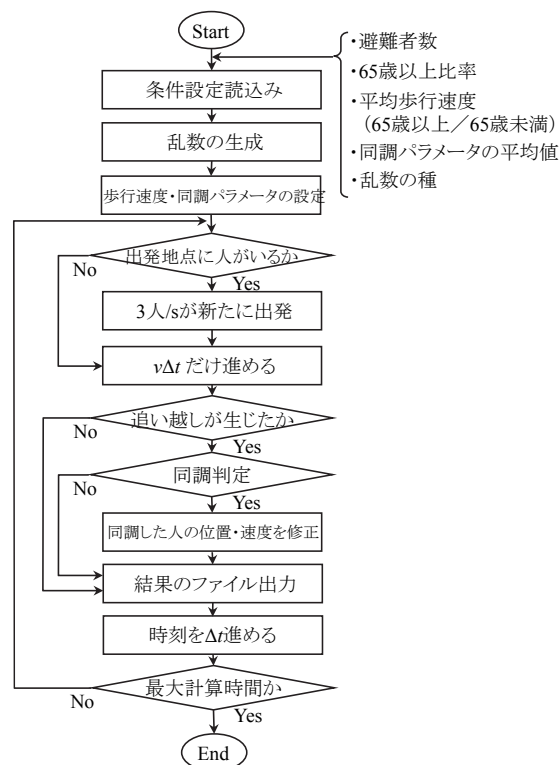


図-9 グループ歩行のシミュレーションのフロー

表-3 検討したケース

	基本ケース	比較ケース
避難者数(n)	51	
避難開始条件	1 sあたり3人ずつ避難を開始	
65歳以上比率	0.33	
平均歩行速度(65歳以上)	0.96 m/s	
平均歩行速度(65歳未満)	1.19 m/s	
平均吸着率	0.25	0.15
最大計算時間(T)	600 s	
時間ステップ(Δt)	1 s	

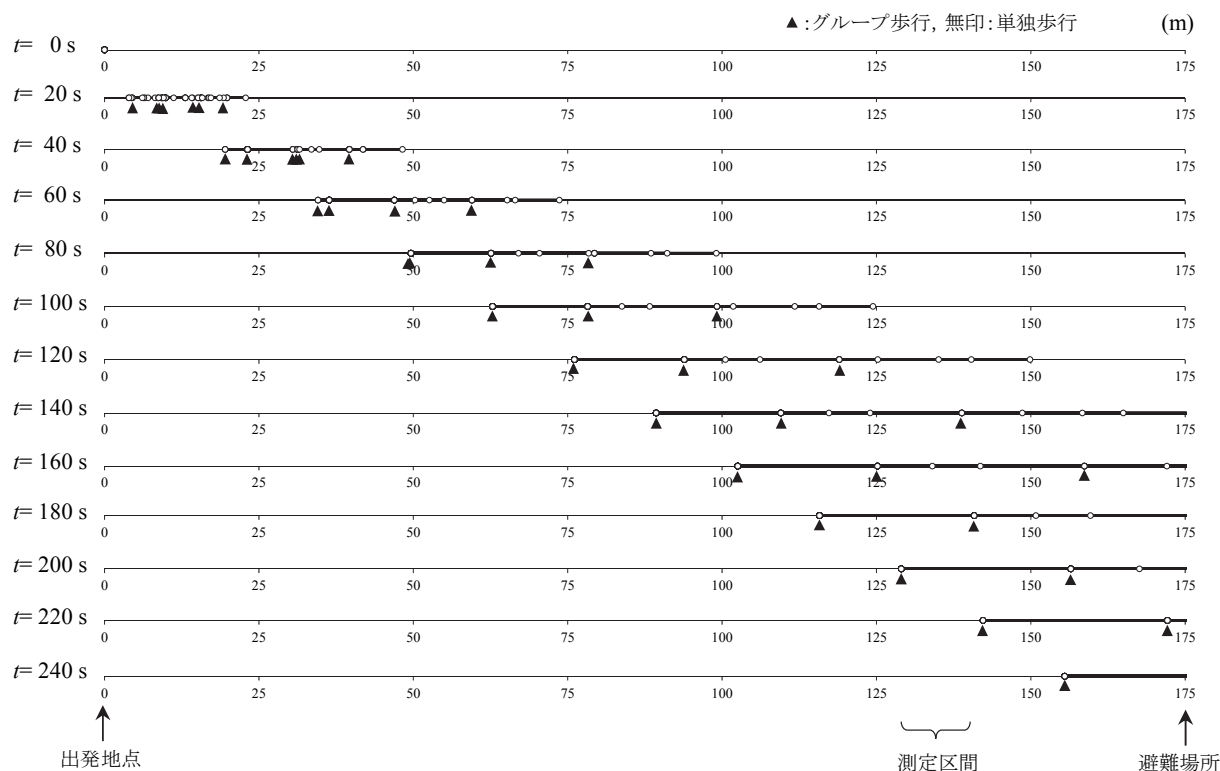


図-10 シミュレーションの結果（基本ケース）

間に、避難者それぞれについて、当該避難者のすぐ前にいる別の避難者に対して追い越しが生じた場合、同調パラメータの大きさに基づいて確率的に同調判定を行う。例えば、同調パラメータが0.25の人が追い越した場合、同調判定のために0～1の間で発生させた乱数が0.25以下の場合は、先行する避難者とグループを形成する。当該避難者の位置と速度は追い越された人と同じ値になるよう修正する。これは、戸川²⁾による「4、5人であると最も遅い歩行者に同調する」との知見を採用したものである（2章参照）。一方、乱数が0.25よりも大きい場合は元の速度を維持したまま、先行する避難者を追い越すとする。

全ての避難者についてこのプロセスを終了した時点で、この時刻における結果として各避難者の位置及び移動速度を出力する。

時刻を Δt だけ進め、設定した最大計算時間 T に達していればシミュレーションを終了する。まだ T に達していなければ、フローに示すとおり繰り返す。

(2) 検討したケース

表-3の2列目に、検討したケース（基本ケース）について示す。避難者数は、3章の人流測定の測定対象者の人数である51人とした。65歳以上比率は、ビデオ画像から判断したところ高齢者が全体の概ね1/3であったので0.33とした。平均歩行速度は、筆者らのうちの一人がこれまでにに行った研究¹⁴⁾により、65歳以上と65歳未満とを

それぞれ0.96 m/sと1.19 m/sとした。同調パラメータの平均値は既述のとおり0.25とした。また、 T は最初の人が避難を始めてから600sまでとし、 Δt は1sとした。

(3) 計算環境と処理時間

計算に用いたPCのプロセッサはIntel Core i7-950（3.06 GHz、8MB L3 Cache）、メモリは9.00GB RAM、オペレーティングシステムはWindows Vista Home Premium 64bitである。プログラミング言語はFortranでありIntel Parallel Studio XE 2015 Composer Edition for FortranをMicrosoft Visual Studio 2010に組み込んだ環境で記述・実行した。今回の避難者数（ $n=51$ ）と最大時間（ $T=600$ s）であれば処理時間は1秒未満の非常に短い時間であった。

なお、標準正規分布の累積分布を算出するサブルーチンは黒瀬¹⁵⁾の書籍に掲載されているプログラム（戸田の近似式）を利用した。

(4) シミュレーションの結果

図-10に、シミュレーションの結果を示す。図の横軸は出発地点から避難場所までの距離（単位：m）である。縦方向には上から順に、計算開始からの時間 $t=0\sim 240$ sの間の20秒おきの各時刻の計算結果を並べている。3章の人流測定の測定区間は、横軸上の127～143 mの範囲に相当する。各時刻の軸上には、白丸印で避難者の位置が描かれている。避難者は、左端から右端に向かって設定された歩行速度で移動していく。そのうち黒三角印が付

与されたものは、2人以上のグループであることを示している。

この結果によれば、測定区間を通過する際には3つのグループが形成されている。また、最も早く測定区間を通過したグループ（第1群）と2番目に通過したグループ（第2群）との間には単独歩行の避難者が存在している。これは、3章の人流測定で実際に観察された事象と整合している。しかし、第2群と最後に通過したグループ（第3群）の間には、図-7(5)で見られたような単独歩行の避難者はおらず、この点については観察された事象は十分に再現出来ていない。また、計算結果では第1群よりも先に進む単独歩行の避難者がいるのに対し、3章の人流測定の結果ではこのような第1群よりも先に進む単独歩行の避難者は観察されなかった。この原因として、人流測定の際は先頭にリーダー役の避難者がいて引率の目印として旗を掲げていたため、それより先行しようとする人の行動が抑制されたことが考えられるが、現時点では十分に検証を加えることが出来ていない。

各グループ（第1群～第3群）の歩行速度は、第2群が測定区間に近づいた段階（ $t=160$ s）でそれぞれ0.992 m/s、0.782 m/s及び0.662 m/sであった。表-3の歩行速度の群平均値と比較すると、計算結果は実測値に比べて約7～8割にとどまっておりますやや小さめになっている。これは、グループになった場合は全て最も遅い歩行者の歩行速度に合わせるという単純なモデルとしたため、全体として小さめの値になった可能性がある。戸川²⁾は、2人連れのときは2人の平均した速度かそれより若干遅い速度となる、としているので、この点は今後検討が必要である。なお、表-3の各群の速度差は、第1群と第2群との差が0.160 m/s、第2群と第3群との差が0.202 m/sである。計算結果はそれぞれ0.210 m/s及び0.120 m/sであったので、各グループ間の速度差についてはある程度表現できている。

また、計算結果によると、全員が測定区間を通過した時点（ $t=220$ s）での各グループ（第1群～第3群）の構成人数はそれぞれ15人、5人、25人であり、単独歩行の人数は6人であった。すなわち、グループ歩行比率は約88%であった。3章の人流測定の結果によれば、各グループの構成人数はそれぞれ23人、11人、12人でグループ歩行比率は約90%であった。従って、各グループの人数構成はやや異なるものの、グループ歩行比率について計算結果と測定結果とはほぼ同じ値となった。

以上より、計算結果は単独歩行者と3つのグループが形成されて各グループ間の速度差がある状況及びグループ歩行比率を概ね表現できている。しかし、グループの歩行速度の絶対値がやや小さく、グループが形成された場合に最も遅い歩行者の歩行速度に合わせているなどのモデルについて検討が必要であることが分かった。

(5) 考察と今後の課題

(4)項の計算では、避難訓練のデータを対象として再現計算を行った。しかし、3章において、今回の避難訓練で得られたグループ歩行比率は東北地方太平洋沖地震の際のグループ歩行比率よりも大きく、今回のような形式の避難訓練のデータをそのまま実際の避難における歩行行動に適用することには課題がある可能性を指摘した。そこで、(1)～(4)項で提案したグループ歩行のシミュレーションについて同調パラメータの平均値を変化させたケース（比較ケース）を試算して、グループ歩行比率が変化するか調べた。表-3の3列目に比較ケースで設定した値について示しており、同調パラメータの平均値は0.15とした。それ以外の条件は同じである。同調パラメータの平均値を小さくすることは、先行する避難者に追いついた場合に同調する心理状態が基本ケースよりも低いことを表現している。そのとき、グループ歩行比率の計算結果は約73%となり、東北地方太平洋沖地震の際の釜石市の事例と概ね近い値となった。ただし、最も早いグループであっても歩行速度が0.838 m/sとなり、試算したのは1ケースのみであるもののグループの歩行速度の絶対値については改善されなかった。

その他、今後の課題と考えられる点を挙げる。グループ形成の契機は、先行する避難者に追いついた場合だけではなく、交通量が多い街路における車両との輻輳、信号待ちに伴う減速・立ち止まり、勾配・階段による歩行速度の低下等も考えられる。3章の避難訓練は交通量が少なく、信号、勾配、階段等がない街路で行われていたため、シミュレーションではこうした現象については考慮しなかった。ただし、交通量が多い、信号、勾配、階段等がある環境について適用する場合は、そうした要因がグループの歩行行動に及ぼす影響も考慮する必要があるため、今後の課題である。

各避難者が追い越した際と同調の有無は、各避難者に与えられた同調パラメータと乱数とを使って確率的に与えているので、同じ設定条件のもとで多数の試算を行ってグループ歩行速度、グループ歩行比率等の平均的な値や変動の大きさについて定量的に把握する必要がある。

また、単独歩行の場合であっても、周辺を歩く人の行動を目視して状況がそれほど切迫していないと判断し、歩行速度を変化させる可能性がある。そのような比較的複雑な情報取得行動や動的な変化については考慮できておらず、今後の課題である。

5. 結論

本研究は、津波避難行動におけるグループ歩行の同調行動のモデルについて検討した。

- ・レーザセンサを用いた人流測定システムを構築するとともに、南海トラフ地震の津波が想定される静岡県下田市において避難訓練の際に徒歩避難者の人流測定を行った。その結果、避難者はグループ歩行と単独歩行とに分化していたこと、グループ間で歩行速度に違いがあることが分かった。ただし、いったん地区内の集合場所に集まったあと避難を開始する形式の避難訓練のデータをそのまま実際の避難における歩行行動に適用するのは課題があること、測定精度の向上が今後必要であること等が分かった。
- ・小集団の一方向流において形成されるグループ歩行に適用するモデルを提案し、数値シミュレーションを行った。その結果、避難訓練で観察された単独歩行者と複数のグループとの形成、グループ間の速度差がある状況及びグループ歩行比率を概ね表現できた。ただし、グループの歩行速度の絶対値がやや小さいとの課題があり、先行する歩行者または先行するグループに追いついて同調する際の歩行速度のモデル化等についてより詳細な検討が必要であることが分かった。

謝辞：人流測定の実施にあたり、下田市市役所市民課防災係及び同建設課の各位には測定のための事前調整等でご理解・ご協力を頂きました。下田市大和区自主防災会の各位には測定の対象地点とすることのご了解を頂き、測定へのご協力も頂きました。国土交通省中部地方整備局清水港湾事務所及び同事務所下田出張所の各位にもご協力を頂きました。なお、人流測定は筆者らの一部が国土交通省国土技術政策総合研究所に在籍していた時期に実施したものです。ご協力頂いた各位と同研究所に感謝の意を表します。また、グループ歩行のモデル検討にあたり、京都大学大学院情報学研究科の中居楓子さんに貴重なご意見を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 復興調査支援アーカイブ事務局：復興調査支援アーカイブ，<http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>，2016年2月28日時点。
- 2) 戸川喜久二：群集流の観測に基づく、避難施設の研究，博士論文，pp. 25-29, 87-89, 東京大学，1963。

- 3) 間下典大，高柳英明，木村謙，林田和人，渡辺仁史：歩行者のグループ構成及び属性が歩行者行動に与える影響に関する研究，日本建築学会大会学術講演概要集（東北），pp. 1077-1078, 2000。
- 4) 中祐一郎：交差流動の構造—鉄道駅における旅客の交錯流動に関する研究（1）—，日本建築学会論文報告集，第258号，pp. 93-102, 1977。
- 5) 戸川喜久二：群衆研究と心理の問題，建築技術，建設省建築研究所，No. 184, pp. 121-126, 1966。
- 6) Cristiani, E., Piccoli, B. and Tosin, A.: *Multiscale Modeling of Pedestrian Dynamics, Modeling, Simulation & Applications Volume 12*, Springer, pp. 47-51, 2014。
- 7) 高柳英明，長山淳一，渡辺仁史：歩行者の最適速度保持行動を考慮した歩行行動モデル—群衆の小集団形成に見られる追跡—追従相転移現象に基づく解析数理—，日本建築学会計画系論文集，第606号，pp. 63-70, 2006。
- 8) 加藤修平，下園武範，岡安章夫：個体行動特性を考慮したハイブリッド型群集津波避難シミュレーション，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 62, No. 1, pp. 1316-1320, 2009。
- 9) 宇野喜之，嶋原康子，岡安章夫：津波人的被災リスク評価のための群集避難シミュレーションの開発，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 71, No. 2, pp. I_1615-I_1620, 2015。
- 10) 帷子京市郎，中村克行，趙卉菁，柴崎亮介：レーザセンサを用いた歩行者通過人数の自動計測手法，FIT2005（第4回情報科学技術フォーラム），社団法人情報処理学会他，No. LT-004, pp. 145-148, 2005。
- 11) U. S. Food and Drug Administration: Laser Products, 21CFR1040.10, Code of Federal Regulations, Title 21, Vol. 8, 1985。
- 12) 日本工業標準調査会：レーザ製品の安全基準，JIS C 6802, 2011。
- 13) Older, S. J.: Movement of pedestrians on footways in shopping streets, *Traffic Engineering and Control*, Vol. 10, pp. 160-163, 1968。
- 14) 熊谷兼太郎：2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動の津波避難シミュレーションによる再現性の検証，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol. 70, No. 5, pp. I_187-196, 2014。
- 15) 黒瀬能幸，松島勇雄，松尾俊彦：Fortran90のためのサブルーチンライブラリ，森北出版，pp. 113-115, 1998。

(2016. 2. 26 受付)

NUMERICAL MODEL OF GROUP WALKING AND SYNCHRONIZATION EFFECT FOR TSUNAMI EVACUEES

Kentaro KUMAGAI, Itaru EHIRO and Kenji ONO

The purposes of this study are to conduct a field survey on behaviour of group walking, and to propose a numerical simulation model for group walking and synchronization effect of tsunami evacuees. A field survey was conducted, and time-series data of group walking for tsunami evacuees were obtained at a tsunami evacuation drill using an evacuee tracking system. It was found that 90 percent of the evacuees walked in groups, and the others walked in a single or in a pair. Although the system needs accuracy enhancement of measurement, it was confirmed that each group was different in speed from the other groups. And it was also found that the group which passed through the measurement area first was the fastest in speed, the last group was the slowest in speed, and the other group was in the middle speed of the first group and the last group. A new model of group walking including a synchronization parameter was proposed, and a numerical simulation was conducted. It was found that the results of the simulation agree with the facts based on the field survey, although there were a few differences between the results of the simulation and the field survey in view of the speed of the group. Several reasons could be considered such as an effect of an evacuation leader at the front of the first group, and an applicability limit of the synchronization parameter model for groups consist of two or three persons.