

レーザセンサを用いた津波避難の人流測定

熊谷 兼太郎¹・永廣 迪²

¹正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部

(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:kumagai-k27n@ysk.nilim.go.jp

²正会員 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@pa.thr.mlit.go.jp

発生頻度は小さいが規模は大きい津波に対し、避難を中心とした対策を行うことになっている。その際の避難計画を立案するには、避難者の流れ（人流）の特性を把握する必要がある。しかし、これまで発災時の人流を詳細に測定できた事例は少ない。そこで、人流を直接的に測定することとした。本研究では、可搬式で屋外での利用が可能な、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、測定精度の向上が今後必要であるが、市街地の街路の延長約20 mの区間を通過する避難者の位置の時系列データを取得できた。また、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。

Key Words: tsunami evacuee tacking, laser range sensor, group behavior, evacuation drill

1. 序論

中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」¹⁾は、想定される最大クラスの津波（発生頻度は小さいが規模が大きい津波）に対し「住民等の避難を軸に（中略）総合的な津波対策」が必要としている。また「概ね5分程度で避難が可能となるようなまちづくり」を目指すべきとしている。このように、国、市町村、施設管理者等に対して津波避難の安全性を向上する対策が求められている。

避難の安全性を高める取組みとしては、避難施設・避難路の整備、防災無線の整備等の「構造物による対策」と、避難訓練の実施、ハザードマップの作成・周知、防災教育の実施等の「構造物によらない対策」とがあるが、それらを組合せた適切な避難計画を立案するためには、避難者の流れ（人流）の特性を把握する必要がある。

しかし、これまで地震・津波の発災時の人流を詳細に測定できた事例は少なく、特に街路上の人流を詳細に測定できた事例は皆無である。例えば、個人携帯端末の位置情報を利用して人流を把握する取組みがあるが²⁾、徒歩避難者の街路上での振る舞いを把握する観点の分析のためにはより詳細な精度が必要である。また、沖ら³⁾は建物内の防犯カメラ画像の分析を行っているが、対象範囲が建物内の空間の一角に限定されている。

市街地の街路上の人流の特性を把握することが出来れば、避難シミュレーションを活用した計画的な避難施設・避難路の整備等により、避難計画の立案に有用であろうと考えられる。また、個人情報端末を活用した避難誘導アプリの開発⁴⁾等が進められている。避難開始を出来る限り早めることは避難安全性を高める上で課題の一つである。将来的には市街地の街路上の人流を常時モニタリングしたうえで、避難者が周囲の人の行動に同調する心理を利用し、災害時には人流の発生状況をリアルタイムに把握し新たな「災害情報」として提供することにより、早期の避難開始を誘発することも考えられる。

このような観点から、市街地の街路上の人流を直接的に測定するシステムの構築が必要である。

2. 既往の検討と本研究の目的

(1) 既往の検討

人流を測定する手法として、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、エスカレーターの運転制御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-1）。

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、通過の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を通過した場合は人数の正確な測定は困難である。

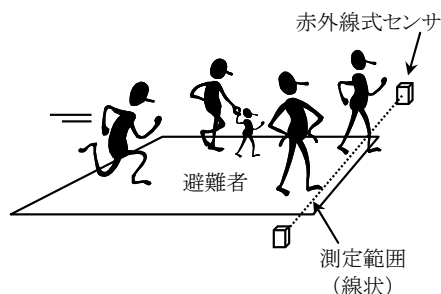


図-1 赤外線センサ

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-2）。

人の動きを記録する測定システムとして建物内を中心に実用的に用いられている。また、ある程度、屋外において試験的に行われている。しかし、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となる。また、将来的に夜間も含めた屋外での常時使用をすることを考えると日中と夜間で照度が大きく変化するので、カメラの露出設定の適正な管理が難しい。こうした点から、適用がやや困難であると考えている。

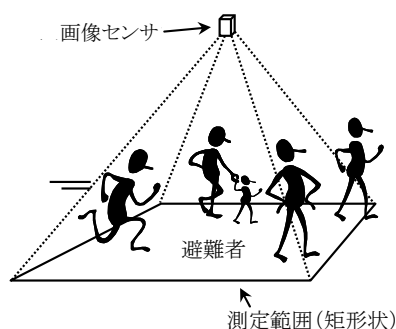


図-2 画像センサ

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。

雨天時を含めた屋外での常時使用をすることを考えると、物体を安定して識別するのは難しく、適用が困難であると考えている。

d) レーザセンサ

産業用自動機械の衝突防止のための障害物の検知、船舶航行時の周辺の障害物の検知等において利用されているセンサである。レーザ光源からある面内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、扇状の範囲について、反射の有無をもとに障害物の有無と発光源からの距離を測定する。

帷子らは、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。また、天井付近にレーザセンサを取り付けているので、歩行者には手が届かない高所にあつて管理が容易である。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、かつ、測定日中と夜間の照度の変化及び天候の影響を受けないので、この手法は参考となる。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、歩行速度と方向を連続的に精度よく測定するには適していない。

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-3）。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することとした。

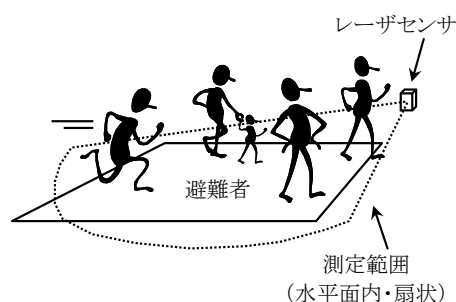


図-3 レーザセンサ

(2) 研究の目的

本研究では、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。）を用いて、多数の徒歩避難者が街路を避難している状況で、人流を面的に測定するシステム（以下、「人流測定システム」という。）を構築することを目的とする。

以下、第3章では、本研究で構築した人流測定システムの構成について述べる。第4章では、避難訓練の際の人流について同システムを用いた試験測定及びその結果について述べる。また、第5章では、結論を述べる。

3. 人流測定システム

図-4に、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ている。なお、3台以上のレーザセンサを配置することも可能であるが、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FDA⁶⁾、我が国の工業規格⁷⁾等がある。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ことが必要である。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。以上の点を考慮し、レーザセンサは北陽電機株式会社製UTM-30LX-EW（最大測定可能距離は約30 m）を採用した。

レーザセンサとPCの間の通信は無線で行うため、屋外利用に適合した2.4 GHz帯の無線LAN機器を使用する。

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。

レーザセンサ及び無線LAN機器は動作のための電力が

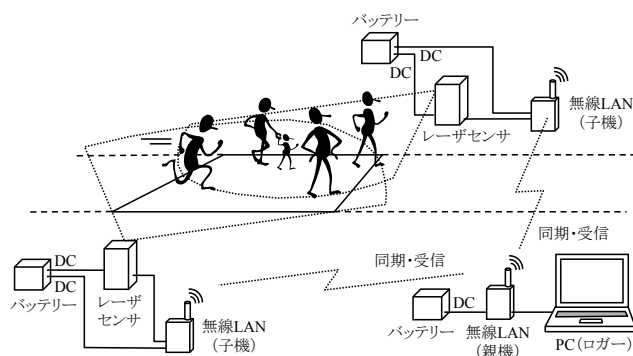


図-4 人流測定システム

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

必要であるので、バッテリーから電力を供給する。

なお、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測定した。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。

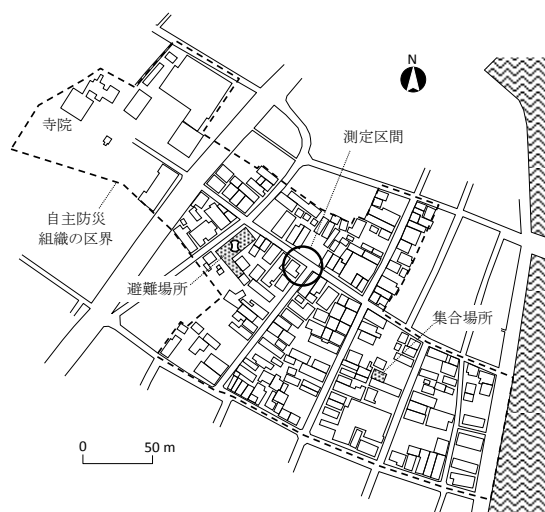
4. 試験測定及びその結果

(1) 対象地域

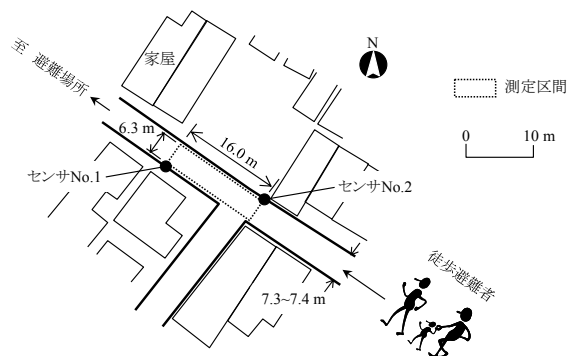
対象地域は、静岡県下田市の中心市街地である。同地域は最大クラスの津波に対して大規模な浸水が予想されることから、避難対策が重要である。

測定区間は、対象地域の一部で、自主防災組織である大和区のなかに設けた。図-5(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。図-5(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とし、街路延長方向160m、幅方向63mとした。

写真-1は、レーザセンサ等の設置状況である。レーザセンサの高さは、三脚を用いて地盤から約1 mの高さになるように調整した。



(1) 自主防災組織の区域図



(2) 測定区間周辺の拡大図

图-5 对象地域



(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

(2) 日時及び測定対象者の動き

試験測定は、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ている（図-5(1)参照）。集合場所から測定区間までの距離は約150m、測定区間から避難場所までの距離は約50m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52名であった。なお、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、これは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いとみなし、分析の対象から除外した。

(3) 測定結果

写真-2はビデオカメラのスナップショットで、午前9時10分49秒（ $t=0$ s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（ $t=70$ s）まで



(1) 午前9時10分49秒 ($t=0$ s) 第1群（先頭）が通過



(2) 午前9時10分59秒 ($t=10$ s)



(3) 午前9時11分09秒 ($t=20$ s)



(4) 午前9時11分19秒 ($t=30$ s) 第2群が通過

写真-2 ビデオカメラのスナップショット



(5) 午前9時11分29秒 ($t=40$ s)



(6) 午前9時11分39秒 ($t=50$ s) 第3群（最後尾）が通過

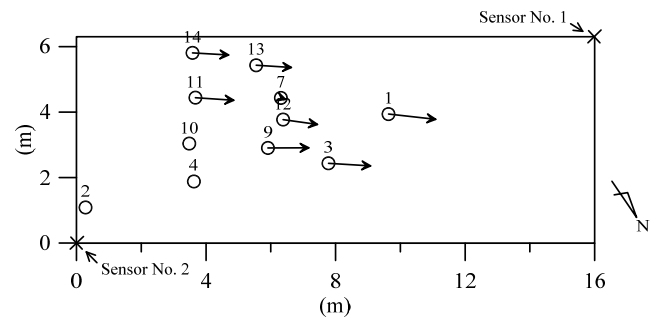


(7) 午前9時11分49秒 ($t=60$ s)

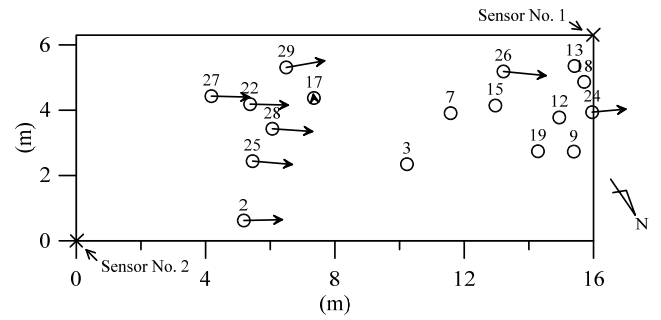


(8) 午前9時11分59秒 ($t=70$ s)

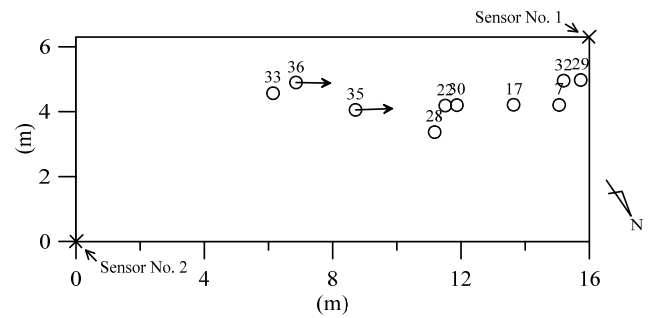
写真-2 ビデオカメラのスナップショット



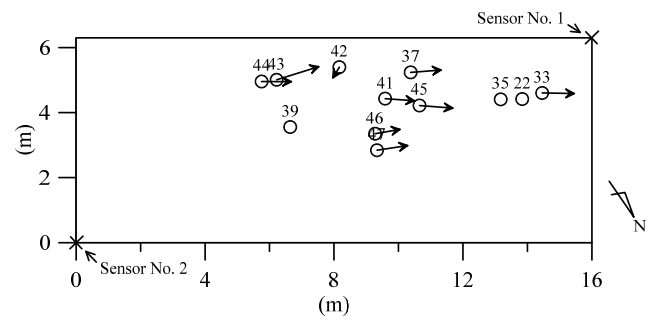
(1) $t=0$ s



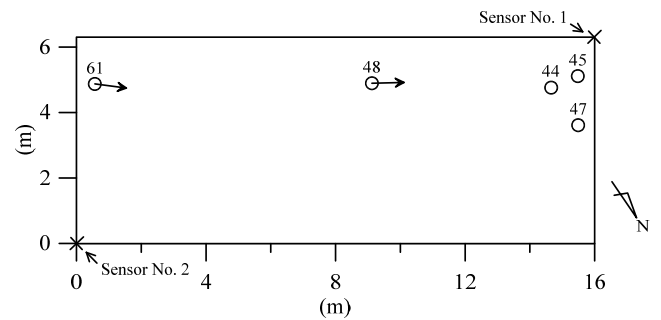
(2) $t=10$ s



(3) $t=20$ s

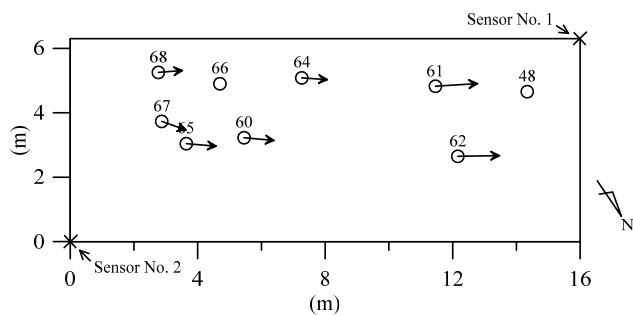


(4) $t=30$ s

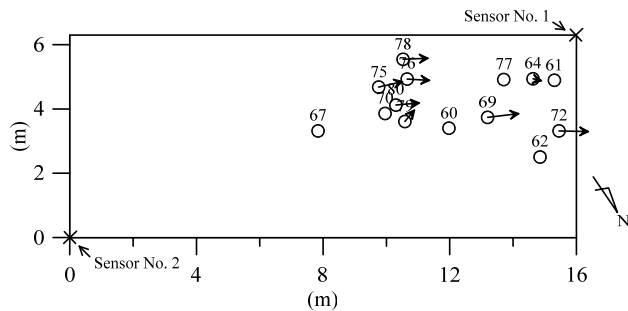


(5) $t=40$ s

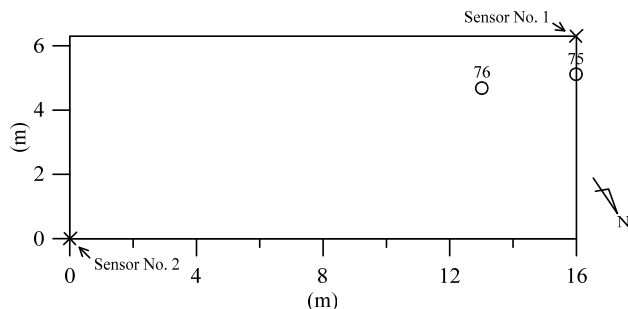
図-6 レーザセンサの測定結果のスナップショット



(6) $t=50$ s

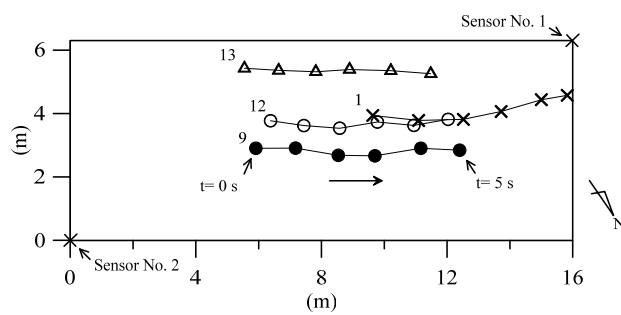


(7) $t=60$ s

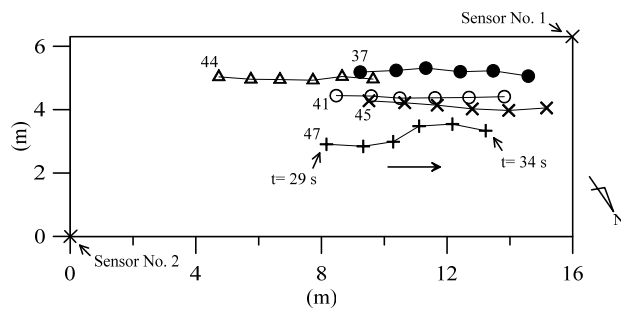


(8) $t=70$ s

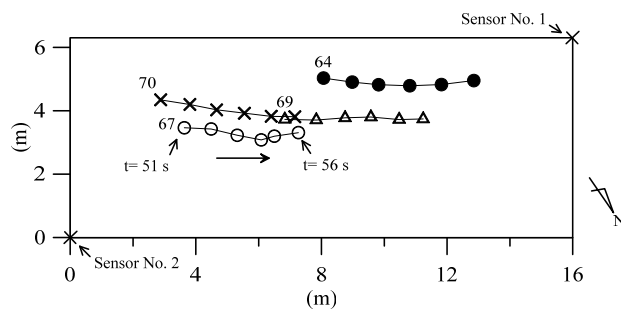
図-6 レーザセンサの測定結果のスナップショット



(1) 第1群



(2) 第2群



(3) 第3群

図-7 5秒間の歩行の軌跡

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つの群れを形成していて、群れと群れの谷間に数人が単独（一部は2人連れであった。以下同じである。）で通過していた。具体的には、 $t=0$ sに先頭の第1群が通過し、 $t=20$ sの頃は群れと群れの谷間であって相互に間隔をおいて数人が単独で通過していた。 $t=30$ sの頃に第2群が通過し、 $t=40$ sの頃は谷間である。最後に、 $t=50\sim70$ sで最後尾の第3群が通過していた。

図-6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、各白丸に付した数字は避難者に割りふった通し番号である。また、白丸から伸びている矢印は、1秒後の移動先を示している。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

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		1.048		
64	第3群	0.962	0.861	
67		0.739		
69		0.882		
70		0.862		

対し、同(3)及び(5)では白丸が疎である。このように、既に述べた群れと谷間の通過と、群れ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-6(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、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-6(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る。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、まだその点の検証は出来ていない。

図-7は、3つの群れからそれぞれ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、群れ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いようである。このように、お互いの位置関係を保ったまま群れの形を変えずに歩いていることが推定される。

表-2は、個人の歩行速度を求め、それをもとに各群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。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) 考察と課題

a) 測定の精度

レーザセンサを用いた人流測定では、群れと谷間の通過と、群れの形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、密集度がある程度以上の場合、センサのすぐ近くを物体が通過した場合等は十分な精度が得られていないので、測定方法の改良が必要である。

b) 群れの形成要因

群れの形成要因として、近親者・関係者が一緒に歩くこと、避難者はそれぞれ歩きやすい速度があるので同じような歩行速度の人が自然に集まること、歩行速度の遅い住民がいた場合は歩行速度を調整して歩くこと等が考えられる。集合場所のスタートはほぼ同時であっても、歩行中に次第に群が形成され、測定区間を通過する際には3つに分化していたと考えられる。

c) 避難訓練と災害時の避難行動との差異

今回の測定では、避難訓練の際の人流を対象にしている。避難訓練と災害時の避難行動とは差異が発生する

可能性がある。避難訓練参加者は所在地からいったん地区内の集合場所に集まったあと、集団で避難場所まで避難しているが、災害時にはめいめいで避難場所に向かうこととなるので避難開始のばらつきが影響する可能性がある。避難訓練の参加人数に比較して災害時の避難者数は多くなるので、混雑・歩行速度の低下等が生じる可能性がある。また、当該地区の住民であっても所用で地区外に出かけていると避難訓練には参加しないが、災害時にはいったん自宅に戻ってから避難を開始する行動が生じる可能性がある。

5. 結論

本研究では、可搬式で屋外での利用が可能な、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、測定精度の向上が今後必要であるが、市街地の街路の延長約20 mの区間を通過する避難者の位置の時系列データを取得できた。また、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。

謝辞：本研究の実施にあたり、下田市市役所市民課防災係およ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ました。また、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港出張所の各位にご協力を頂きました。上の方々をはじめご協力頂いた各位に、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告，44p.，2011年9月28日。
- 2) 足立龍太郎：”人の流れが見える地図”「混雑統計」データが描く都市計画の未来，土木学会誌，Vol. 98，No. 10，pp.22-25，2013。
- 3) 沖祐哉・翠川三郎・藤岡正樹・安達正一・東宏樹：防犯カメラ映像を利用した集客施設での地震時の人間行動の分析，地域安全学会梗概集，No. 33，pp.29-32，2013。
- 4) 廣井悠：スマートフォンによる安否確認・避難誘導アプリの開発，日本災害情報学会第14回研究発表大会予稿集，pp.274-277，2012。
- 5) 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.
- 6) U. S. Food and Drug Administration (FDA): Laser Products, 21CFR1040.10, Code of Federal Regulations, Title 21, Vol. 8, 1985.
- 7) 日本工業標準調査会：レーザ製品の安全基準，JIS C 6802，2011.
- (2014. 4. 25 受付)

TSUNAMI EVACUEE TRACKING WITH LASER RANGE SCANNER

Kentaro KUMAGAI and Itaru EHIRO

The principal measure against a low-frequency and high-consequence tsunami is evacuation. For preparation of a proper tsunami evacuation plan, it is necessary to understand characteristics of a flow of evacuees. There were few examples that measure the characteristics of the flow for the past disasters. In this study, a direct measuring method is adopted for the tsunami evacuee tracking. The tsunami evacuee tracking system is portable and available at the outdoor, and includes the Laser Range Scanners. The system was applied to the pedestrians at the tsunami evacuation drill held in Shimoda City of Shizuoka Prefecture, where the tsunami due to Nankai Trough earthquake is predicted in the near future. Although it is found that the system needs accuracy enhancement of measurement, a series of the horizontal timeline data of the pedestrians is obtained by the measurement. It is also found that evacuees walked through the measurement field, the length of which is 20 m, are put into two categories, such as group walk type and isolated walk type. There were three groups, and the walking speed of the group is different from the walking speed of the other groups.