

I S S N 1 8 8 0 - 0 1 1 4

国総研プロジェクト研究報告第57号

平成 2 9 年 4 月

# 国土技術政策総合研究所 プロジェクト研究報告

PROJECT RESEARCH REPORT of  
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.57

April 2017

港湾地域における津波からの安全性向上に関する研究

Research on Techniques for Improving Port Area Safety from Tsunamis

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management  
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

港湾地域における津波からの安全性向上に関する研究

鈴木 武 (2012 年 9 月～2016 年 8 月)

Research on Techniques for Improving Port Area Safety from Tsunamis

Takeshi SUZUKI (2012.9～2016.8)

概要

東北地方太平洋沖地震津波の経験を踏まえ、中央防災会議において、巨大な津波に対してはハード対策に加え、ソフト対策を強化し、地域の人々をこれまで以上に守っていく方向が示された。また、南海トラフなどでの大規模な津波の発生が懸念されている。発生が避けられない地震津波に対して、施設による対応だけでは安全を確保することが難しい港湾地域において、効果的なソフト対策を見だし、港湾地域の津波への備えを強化していくことが必要である。

短波海洋レーダは、現在、海面の流れを観測するために使われている。その短波海洋レーダ技術を使って津波を広範囲にわたり面的に観測し、分析することを可能にしていくため、短波海洋レーダのデータの取得や処理方法の技術を改良するとともに、短波海洋レーダの津波観測技術の性能を実測データを使いながら擬似的にシミュレートする技術を開発した。

港湾地域で活動している人々が津波発生時に適切に避難行動をとることができるようにしていくための津波避難計画を立案・分析していくため、開発を行ってきた津波避難シミュレーション技術を使った計算結果と実行動との整合性を調べた。また、実際の避難行動を計測・分析し、その結果をもとに津波避難シミュレーション技術を改良した。改良した津波避難シミュレーション技術を使って津波避難計画の検討を試行し、津波避難計画検討に津波避難シミュレーションを使う場合の留意事項を抽出した。

キーワード：短波海洋レーダ，避難シミュレーション，避難計画，津波，港湾地域

Synopsis

After the 2011 Tohoku tsunami, the Central Disaster Prevention Council of Japan announced its intention to strengthen non-facility countermeasures in order to protect locals. There are additional concerns about the occurrence of large-scale tsunamis in Nankai Trough and port areas have difficulty in securing safety by protection facilities alone. Therefore, it is necessary to find effective non-facility measures and strengthen preparations for tsunamis in port areas.

High frequency oceanographical radar is currently being used to observe sea surface flow. To observe and analyze tsunamis in a wide area using high frequency oceanographical radar technology, we improved the technologies of acquiring and processing data on these radar systems. Moreover, we developed a technology to simulate the performance of tsunami observation technology on high frequency oceanographical radar by using measured data in normal conditions.

Aiming to develop and analyze tsunami evacuation plans to ensure that people in port areas can take appropriate evacuation action when a tsunami occurs, we checked the consistency between the actual behavior and the results calculated by the tsunami evacuation simulation technology that we developed. In addition, we measured and analyzed actual evacuation behavior and improved the tsunami evacuation simulation technology based on the results. This improved technology was used to study the tsunami evacuation plan and we obtained observations on using the tsunami evacuation simulation.

プロジェクト参加者

(プロジェクトリーダー)

沿岸海洋・防災研究部長 鈴木武 (2012.9～2016.8)

(プロジェクトメンバー)

沿岸海洋・防災研究部沿岸防災研究室	室長	浅井正 (2012.9～2016.3)
沿岸海洋・防災研究部沿岸防災研究室	主任研究官	熊谷兼太郎 (2012.9～2015.5)
沿岸海洋・防災研究部沿岸域システム研究室	室長	日向博文 (2012.9～2014.3)
沿岸海洋・防災研究部沿岸域システム研究室	室長	松永康司 (2014.4～2015.3)
沿岸海洋・防災研究部沿岸域システム研究室	室長	上島顕司 (2015.4～2016.8)
沿岸海洋・防災研究部沿岸域システム研究室	研究官	片岡智哉 (2012.9～2016.3)
沿岸海洋・防災研究部沿岸域システム研究室	交流研究員	藤良太郎 (2012.9～2013.3)

## 目次

1. はじめに.....	1
1.1 研究の背景と目的.....	1
1.2 研究内容.....	2
1.3 研究体制.....	2
2. 短波海洋レーダによる津波の観測・分析.....	4
2.1 2011年東北地方太平洋沖地震による津波の短波海洋レーダによる検知.....	4
2.2 2011年東北地方太平洋沖地震による津波の動きの面的時系列的把握.....	6
2.3 津波観測用の海洋レーダのシステムの改良.....	11
2.4 短波海洋レーダを利用した津波初期水位のインバージョン.....	13
2.5 仮想津波観測実験に基づく海洋レーダ津波検知距離の検討.....	26
2.6 短波海洋レーダによる観測に影響を与えるノイズ除去技術の開発.....	34
3. 津波避難シミュレーションの改良・活用.....	37
3.1 2011年東北地方太平洋沖地震津波の際の避難状況に対する津波避難シミュレーションの適合性.....	37
3.2 津波避難の開始時間のモデル化.....	48
3.3 避難訓練をもとにした避難行動の観測とその結果の分析.....	58
3.4 津波避難シミュレーションの検討・改良の概要と課題.....	67
3.5 津波避難シミュレーション技術を使用した津波避難検討の事例分析.....	69
4. おわりに.....	70
5. 謝辞.....	71

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景と目的

内閣府に設置された「南海トラフの巨大地震モデル研究会」は発生しうる最大クラスの地震・津波（南海トラフでの巨大地震）として、その規模や強度を推計し、2012年8月に発表した。その中では、津波の最大波高は34m、到達時間が7～20分、浸水面積が最大10万haと推計した<sup>1)</sup>。また中央防災会議はそれらの推計結果を基にそれらによる被害額を推計（2013年3月）し、資産等への被害を97.6～169.5兆円、経済活動への影響を35.1～50.8兆円とした。それらを踏まえて中央防災会議は「南海トラフ巨大地震対策について（最終報告）」を2013年5月にとりまとめ、その中で津波についての基本的な考え方を「津波対策の目標は津波から「命を守る」ことであり、海岸保全施設等の整備・維持を前提として、住民等の避難を軸に、情報伝達体制、避難場所、避難施設、避難路を整備するとともに、最も重要なことは、一人ひとりが主体的に迅速に適切に避難することであり、防災教育、避難訓練、災害時要援護者支援等の総合的な対策を推進する必要がある。」などと整理した。また、海岸保全施設等の整備については「海岸堤防等については、海岸管理者が設定する「発生頻度は比較的高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波」を基本として、環境保全や費用対効果等を考慮しつつその整備が行われるものである。」、「最新の知見に基づいたレベル1の津波に対応できるよう、海岸堤防等について計画を見直し、必要に応じて海岸堤防等の整備を行う必要がある。」などとした<sup>2)</sup>。2011年3月に東北地方太平洋沖地震津波による大規模な被害を経験した日本社会は、中央防災会議の最終報告を重く受け止め、沿岸域における津波に対する耐性をどのように高めていくかについて関心を寄せた。

2004年12月のインド洋大津波、2005年8月のハリケーン・カトリーナによる大きな災害が発生した。それらを受けて国土技術政策総合研究所では「低頻度メガリスク型の沿岸域災害に対する多様な効用を持つ対策の評価に関する研究」を実施し、当該プロジェクト研究の研究報告の原稿を2011年3月に完成させた。それは奇しくも東北地方太平洋沖地震津波の直前であった。

非常に発生確率の低い津波であっても、一度それが発生すれば、津波が来襲する地域に膨大な被害をもたらす。地域の人々の生活や経済に危機的な状況をもたらす。そのような災害を「低頻度メガリスク型沿岸域災害」として対応の考え方を整理した。

それは第一に、「非常に発生確率が低いとはいえ、膨大な被害をもたらす津波については、発生確率が非常に低いという理由だけで対策の検討をしないということをしていない。」、第二に、「巨大な津波に備えるためだからといって、後に効果に見合った対策であったと納得することができないような過剰な対策をしない。」これら二つの政策方針を併せたものを日本版 No Regret Policy とし、巨大津波に対する対策を検討していく際の基底とすべきことを示した<sup>3),4)</sup>。

臨海都市の市街地は、海側を占める港湾地帯の防波堤や海岸保全施設等によって津波に対抗する措置がとられている。それに対して港湾地域では、荷役作業や生産活動を行うなどのための多くの施設や事業所が、港湾背後を守る防潮堤の海側の地域（堤外地）に広く存在し、そこに多くの就業者が働き、多数の来訪者等が訪れる。そうであるにもかかわらず、港湾堤外地は基本的には海岸保全施設で守られていないため、巨大とは言えない津波であっても浸水することになる。また、埋立地が多く液状化が発生しやすいことや土地区画が大きく避難経路を自由にとることが難しい。それらに対し、それらの特殊性を踏まえた避難計画の検討にまでは至っていないのが現状である。2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震及びこれに伴う津波は、東日本の太平洋側に暮らす人々の生活や企業の経済活動に深刻な影響を及ぼしたが、今後も東海・南海・東南海地震等での大規模な地震やこれに伴う津波による被害が予想されており、多くの経済活動が展開されている港湾地域での被害を軽減する対策は重要である。

投資効果が見合う範囲や社会的な妥当性が認められる範囲では、財政制約の範囲内にはなるものの構造物による対策を進めていくことが可能である。しかし、構造物による対策には財政制約や空間利用等の面から一定の限界があり、避難等による対応がどうしても必要になる。そのため、地域の実状に応じて効果的効率的かつ簡易に津波避難を検討できる手法の開発が望まれる。また、2011年3月の東北地方太平洋沖地震津波の際には、国土交通省が設置していた短波海洋レーダによって津波の動きを捉える信

号を取得することに成功したことから、短波海洋レーダによって津波を面的に観測し、その結果を使って津波への対応をより良いものにしていくことに期待が高まった。

そこで本研究では、海面の流れを観測するために使われている短波海洋レーダを使って津波を観測し、分析することを目指して、東北地方太平洋沖地震津波で得られた信号から津波の挙動を面的時系列的に把握・分析し、津波観測に対応するための短波海洋レーダの装置性能、推定・ノイズ除去の方法等の改良を行うとともに、実測信号をもとに擬似的な津波観測信号を生成し、それを使って開発した短波海洋レーダによる津波観測技術の評価することを目的とした。また、港湾地域にいる人々が津波発生時に迅速かつ確かな避難行動をとることができるようにしていくための効果的効率的な津波避難の検討を、港湾管理者等が行うことを支援するため、国土技術政策総合研究所で開発してきた津波避難シミュレーション技術が現実の避難行動を適切に再現しうるのかを確認するとともに、津波避難シミュレーション技術の改善のため、避難行動を調査し、サブモデルを改良する。そして、津波避難シミュレーション技術を活用して津波避難検討を行う場合の留意点を抽出することを目的とした。

## 1.2 研究内容

短波海洋レーダを使った津波観測技術および港湾地域における津波避難シミュレーション技術について、以下に示す項目について調査、分析、考察、とりまとめを行った。

### (1) 短波海洋レーダによる津波の観測・分析

- ・2011年東北地方太平洋沖地震による津波の短波海洋レーダによる検知
- ・2011年東北地方太平洋沖地震による津波の動きの面的時系列的把握
- ・津波観測用の短波海洋レーダのシステムの改良
- ・短波海洋レーダを利用した津波初期水位のインバージョン
- ・仮想津波観測実験に基づく海洋レーダ津波検知距離の検討
- ・短波海洋レーダによる観測に影響を与えるノイズ除去システムの開発

### (2) 津波避難シミュレーションの改良・活用

- ・2011年東北地方太平洋沖地震津波の際の避難状況に対する津波避難シミュレーションの適合性
- ・津波避難の開始時刻のモデル化
- ・避難訓練をもとにした人々の避難行動の観測とその結果の分析
- ・津波避難シミュレーションの検討・改良の概要と課題
- ・津波避難シミュレーションを活用した津波避難計画の計画方法と計画プロセスの例示

## 1.3 研究体制

本研究は、国土技術政策総合研究所沿岸海洋・防災研究部が主体となって実施した。独立行政法人港湾空港技術研究所の成果を活用するとともに、京都大学防災研究所および愛媛大学とは研究情報や意見の交換を行った。国土交通省港湾局や地方整備局とは関連情報や意見の交換を行うとともに、研究成果を提供した。港湾地域の人々には避難行動の現地調査に協力を頂くとともに、研究成果を発信した。地方公共団体には関連情報の提供および現地調査の支援を頂いた。学会や大学の知見を活用するとともに、成果を発信した。

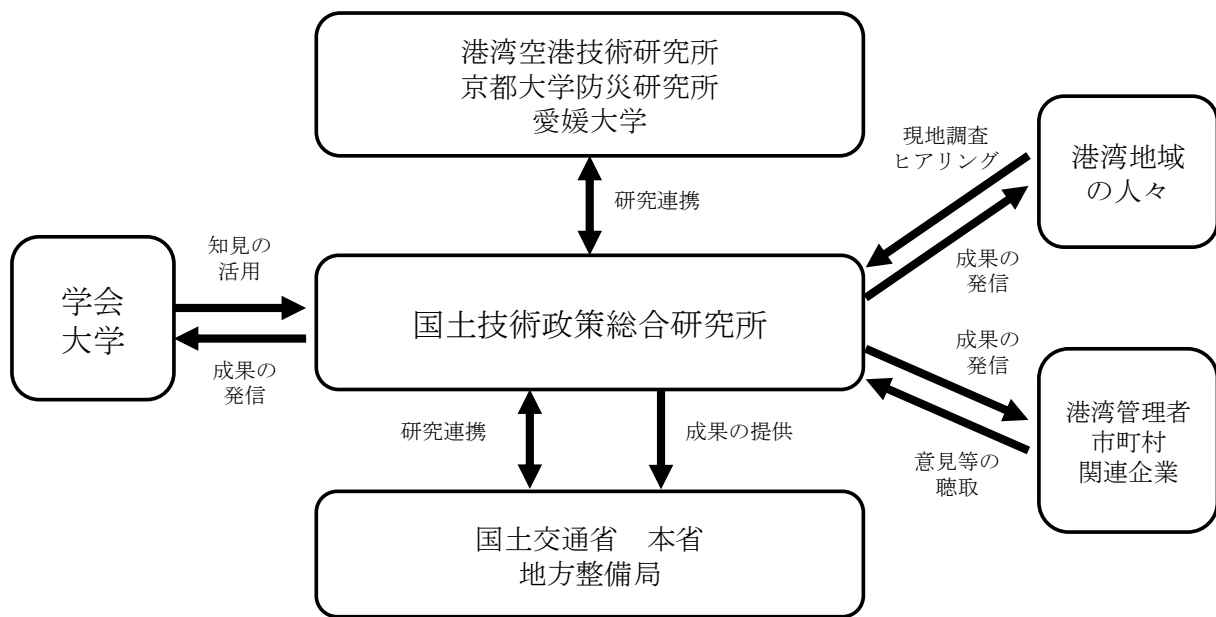


図-1.1 研究の実施体制

参考文献

- 1) 内閣府 (2013) : 南海トラフの巨大地震による津波高・浸水域等 (第二次報告) 及び 被害想定 (第一次報告) について.
- 2) 中央防災会議 (2013) : 南海トラフ巨大地震対策について (最終報告).
- 3) 小田勝也ら (2011) : 低頻度メガリスク型の沿岸域災害に対する多様な効用を持つ対策の評価に関する研究, 国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告, No.34, 164p.
- 4) 鈴木武 (2013) : 沿岸域の津波に対する耐性を高めるための研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.759, pp.3-24.

## 2. 短波海洋レーダによる津波の観測・分析

### 2.1 2011年東北地方太平洋沖地震による津波の短波海洋レーダによる検知

短波海洋レーダ（以下、「海洋レーダ」と呼ぶ。）は、陸上から電波を発射して海表面でブラッグ共鳴散乱した電波を受信することで面的に流速を計測することができる。国土交通省港湾局では、三大湾及び有明海沿岸に海洋レーダを設置し、流況観測、ゴミ回収等に活用している。このうち近畿地方整備局が、紀伊水道の東岸（図-2.1）に設置していた海洋レーダが、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による津波を捉えることに成功した（Hinata et al. (2011), 日向ら (2012)）。海洋レーダのシステム諸元を表-2.1に示す。2011年東北地方太平洋沖地震によって発生した津波は地震からおおよそ1.5時間後の3月11日16:20ごろ、震源から約1000km離れた紀伊水道南側大陸棚斜面に到達した。和歌山南西沖GPS波高計（図-2.1のWA）では最大63cmの波高を記録した。紀伊水道の和歌山下津港海南地区（図-2.1のKA）では、最初の津波到達後、約4.5時間後におおよそ260cmの最大波高を観測した。

和歌山市湊地区に設置された海洋レーダでは、紀伊水道に進入してくる津波と、その後水道内に発生した共振現象を視線方向流速変動として計測することが出来た。その結果、津波第1波から第3波までは進行波としての性格が強いこと、それ以降は水道内に副振動が発達していたことが明らかになった。

図-2.2に示すのは湊局の第6ビーム上の視線方向流速の時系列である。第3波までは沖合ほど流速変動の位相が進んでいる。その後、沖合と岸近くで位相が反対になり、さらにその後、沖合から岸近くまで同位相になっている。これは津波が進行波として水道内に進入した後、徐々に共振現象が発生していく過程をとらえたものである。

これにより Barrick (1979) 以降、多くの研究者によって理論的・数値的に検討されてきた海洋レーダによる津波検知の可能性（例えば、藤井・徳田 (1997), Gurgel ら (2011)）が実証された。

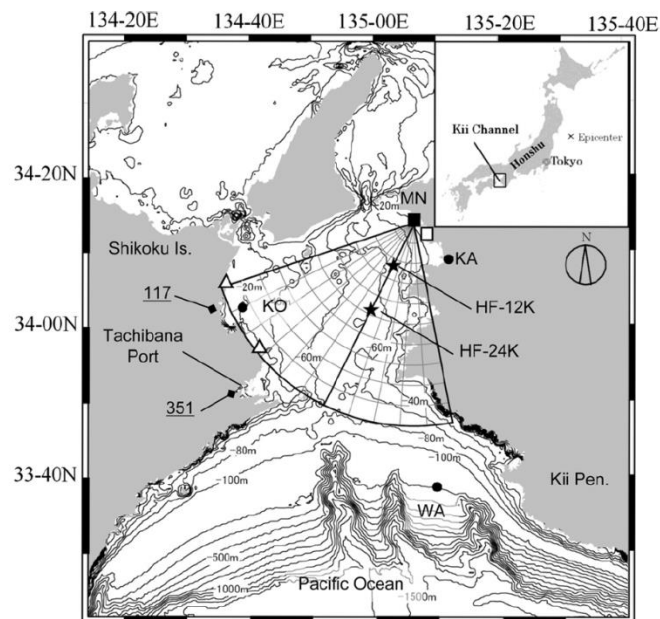


図-2.1 短波海洋レーダ設置位置及び水位計測地点



表-2.1 HF レーダのシステム諸元

Radar type	FMICW (Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave)
Center frequency	24.515 MHz
Sweep bandwidth	100 kHz (24.465–24.565 MHz)
Frequency sweep interval	0.5 s
Maximum transmission power	200 W (peak)
Range resolution	1.5 km
Velocity resolution	$>4.78 \text{ cm s}^{-1}$
Antenna type	1 transmission and 8 receive antennas of 3-element Yagi
Beam forming method	Multi-beam DBF in broadside array
Beam width	$12^\circ$ (3 dB beam width)
Bearing resolution	$\pm 45^\circ$ in steps of $7.5^\circ$

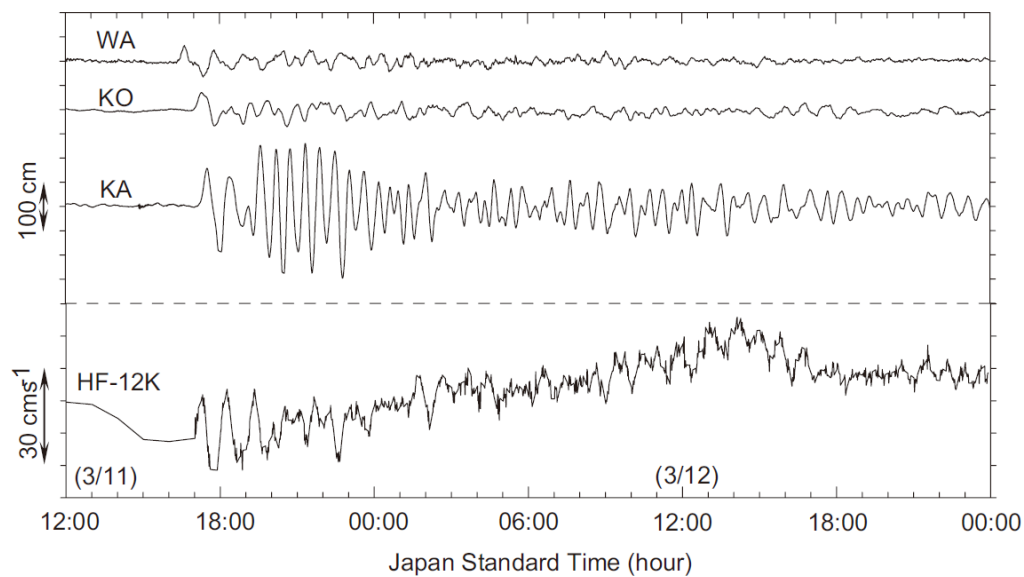


図-2.2 12km 沖合の視線方向流速と海面高さ

参考文献

Hirofumi Hinata, Satoshi Fujii, Keita Furukawa, Tomoya Kataoka, Masafumi Miyata, Takashi Kobayashi, Masahiro Mizutani, Takahiro Kokai, Nobuyoshi Kanatsu (2011): Propagating tsunami wave and subsequent resonant response signals detected by HF radar in Kii Channel, Japan, ECSS.

日向博文・藤良太郎・藤井智史・藤田裕一・花土弘・片岡智哉・水谷雅裕・高橋智幸 (2012) : 紀伊水道における短波海洋レーダを用いた津波・副振動観測, 土木学会論文集 (海岸工学)

Barrick, D. E.(1979): A coastal radar system for tsunami warning, Remote Sensing of Environment, Vol.8, pp.353-358.

藤井智史・徳田正幸 (1997) : 津波・海象監視予測装置, 特許番号第 2721486 号.

Gurgel, K.-W., A. Dzvonkovskaya, T. Pohlmann, T. Schlick E. and Gil (2011): Simulation and detection of tsunami signatures in ocean surface currents measured by HF rader , Ocean Dynamics, DOI: 10.1007/s10236-011-0420-9.

## 2.2 2011年東北地方太平洋沖地震による津波の動きの面的時系列的把握

近畿地方整備局が和歌山下津港雑賀崎に設置している、もう1局の海洋レーダによる視線方向流速データも併せて解析することにより、進行波と副振動により駆動された流速場の空間構造を詳細に解析した。

### (1) 解析データ

近畿地方整備局が和歌山下津港雑賀崎と湊地区に常設している海洋レーダによって、2011年3月11日17:00から3月14日0:00までの間、観測周期15分、サンプリング10分間の観測モードで計測されたデータを解析した。モード切替は電話回線を使用した。ただし、この間、雑賀崎局は頻繁に欠測が発生したため、本節では3月11日17:00から22:38までの観測結果を対象としている。2回分のドップラースペクトルをスタッキングし、1分間隔で視線方向流速を計算した。SN比の低下により視線方向観測距離は通常観測時の50km程度から30km程度へと小さくなっている。解析には、調和解析によって潮流成分を除去したデータを使用し、データ回収および視線方向流速計算を含む全てのデータ解析はオフラインで行った。

沿岸水位データは、国土交通省港湾局(NOWPHAS)、気象庁および国土地理院により計測されたデータを用いた。海洋レーダと同様に1分間隔で再サンプリングし使用した。NOWPHASによる水位データは予め潮汐成分が除去されたものを、その他の水位データについては調和解析によって潮汐成分(主要4分潮)を取り除いた後、解析を行った。バックグラウンドスペクトルの計算(データ数2048)には2011年3月10日0時からのデータを、津波スペクトルの計算には2011年3月11日12時からのデータ(データ数2048)を使用した。なお、全てのスペクトル解析やバンドパスフィルタにはFFTを使用した。

### (2) 結果と考察

水位変動(10~200分周期帯)と視線方向流速(生データ)の時系列を図-2.3に示す。津波は地震発生から約1.5時間後、紀伊水道沖の陸棚斜面に到達した。陸棚斜面上の最大波は30cm程度で第1波通過時に計測された。一方、紀伊水道内では副振動によってより大きな水位変動が継続した。多くの観測地点で第1波到達から数時間後に最大波を記録している。ただし、最大波の発生時刻は地点毎に異なる。例えば、和歌山県和歌山下津港海南地区(KA)では21:30頃に約130cmの最大波を、徳島県小松島港(KOJ)では19:50頃に約70cmの最大波を計測している。また、KOとKOJやKAとWAIのように近接した2地点間で最大波やその計測時刻が大きく異なっている。

この最大波を引き起こした副振動の周期は30~40分(以降、卓越周期帯)と推測される(図-2.4)。平石ら(1997)は入射波(振幅0.5m)に対する2波目以降の増幅率の空間分布を数値実験に基づいて計算した。その結果、水道東岸の湯浅広では16~18分および40~44分周期帯で、西岸の小松島では42~44分周期帯で10倍よりも大きな増幅率となった。今回の卓越周期帯(10~40分)での増幅率はこれらの周期帯での増幅率の1/5~1/3程度であった。そして、彼らはLoomis(1973)の方法を用い42分の周期を持つ副振動モードが存在することを指摘した。

今回観測された卓越周期帯と平石ら(1997)が指摘した増幅率の大きな周期帯の不一致の原因を検討するため、津波波源域でのスペクトルを推定した。具体的には津波スペクトルとバックグラウンドスペクトルの比を計算した(Rabinovich, 1997)。スペクトル比は全ての地点で共通した形状をしており、10~40分に明確なピークが、また50~60分周期帯にもややなめらかなピークが存在している(図-2.4)。また、ここでは示さないが、紀伊水道よりも東方に位置する潮岬、尾鷲沖(GPS波浪計)、御前崎沖(GPS波浪計)や下田港(場所は<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>を参照)における津波発生後の水位変動にもこの卓越周期帯に明確なスペクトルピークが存在していた。これらの水位計測地点の特性から、この共通したスペクトルピークが局所的な地形による共振によって発生したとは考え難い。

さらに、震源域の水平スケールを500km×200kmと仮定し、平均水深を4000mと仮定すると、短軸方向スケール(200km)から決まる第1モードの周期は約34分となる(例えばRabinovich, 1997)。以上より、今回の津波が波源域でこの卓越周期帯により多くのパワーを有していたことが、今回紀伊水道内

で30~40分周期帯の副振動が最も発達した理由と推測される。また、周期帯不一致の他の原因として、平石ら(1997)の数値計算結果の計算領域に対する依存性が考えられる。

続いて副振動モードを求めた。まず、2局の海洋レーダから求めた視線方向流速に対してバンドパスフィルタを用いて30~40分周期帯の変動成分を抽出し、それらを合成して流速ベクトルを計算した。続いて経験的固有関数法(EOF)により流速ベクトルから重複波モードの固有ベクトルを計算した。図-2.5(a)に示す第1モード(EOF)は変動エネルギーの約56%を説明する(EOF2は11%)。レーダ観測範囲中央部には節が存在し、その両側で発散(あるいは収束)する流れのパターンとなっている。

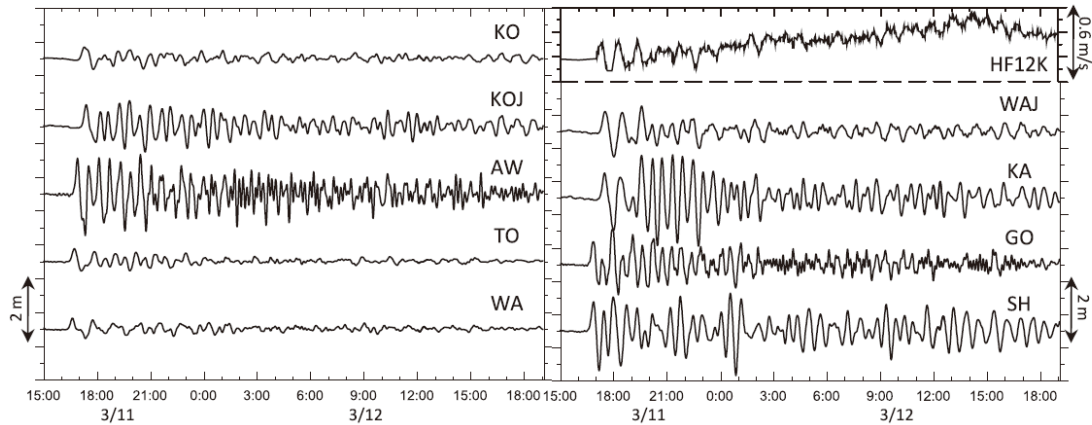


図-2.3 海洋レーダ視線方向流速及び水位変動の時系列

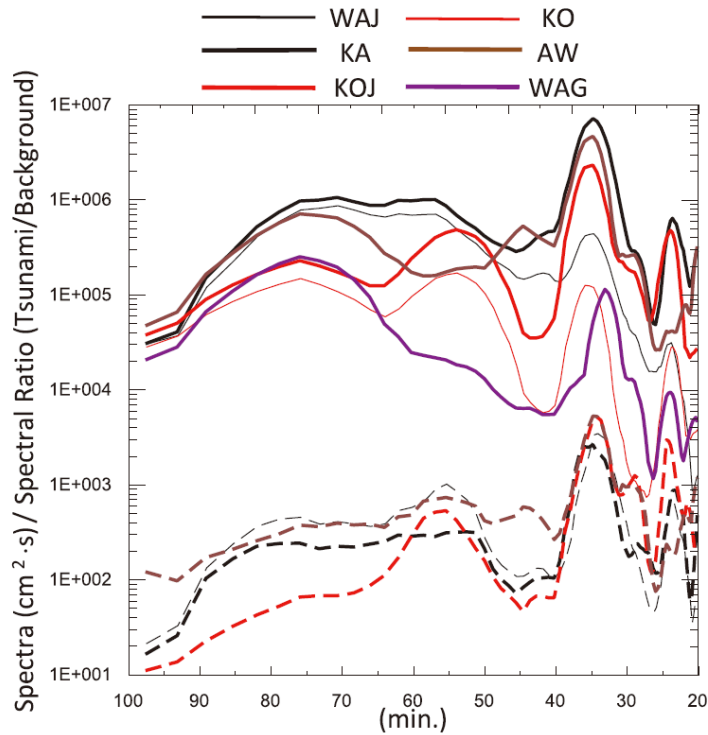


図-2.4 津波観測時の水位変動パワースペクトル(実線)と津波発生前後でのスペクトル比(破線)

この EOF が物理的に存在し得るかどうかを Loomis (1973) の方法を用いて検証した (図-2.5(b), 格子間隔 2000m). その結果, 30~40 分周期帯には 4 つの固有モードが計算され, このうち 34 分の周期を持つ固有モード (速度ポテンシャルと流速ベクトルの相対値) を 図-2.5(b) に示す. EOF とパターンが良く一致していることが分かる. また, 速度ポテンシャル分布は水位変動パターンと見なせるので, 副振動による水位変動は KA と KOJ で相対的に大きく WAI と KO で相対的に小さいこと, さらに KA, WAI と KO, KOJ では水位変動が逆位相になることが推測される. 実際, KA, KOJ では他の 2 点に比べて卓越周期帯の変動エネルギーが大きく (図-2.4), 34 分周期のラグを計算すると KO と KOJ は KA に対してそれぞれ  $145^\circ$  と  $173^\circ$  位相が遅れていた.

以上, これまで水位データと計算から推測されてきた副振動モードを海洋レーダの観測結果から直接求めた.

### (3) 津波進行波による流速及び水位分布

第 1 波から第 3 波の周期を時系列 (図-2.3) から直接見積もると 60~70 分程度である. そこで卓越周期帯よりも周期の長い 40~100 分周期帯の流速変動成分をバンドパスフィルタにより抽出し, 進行波により駆動された流速場を求めた (図-2.6). 岸側では流速ベクトルは等水深線に直行し, 沖側では南北方向の等水深線に沿った形となっている. 沖側ではビーム交差角度が小さく南北方向に計測誤差が生じやすいことに注意が必要である.

海洋レーダで計測された津波流速分布から水位分布を推測できれば津波対策上極めて有益である (例えば泉宮・中島, 2006). そこで, 海洋レーダで計測した第 1 波から第 3 波の流速分布を用いて水位分布を推定した. KO (水深 20m) で観測された第 1 波から第 3 波の波高 (60cm 程度) は水深に比べて十分小さいことから, これらの波を線形長波と仮定し  $V = C\eta/h$  の関係式を用いて流速から水位に変換した. ここに  $V$  は波向き方向の流速成分,  $\eta$  は水位,  $C$  は線形長波の波速,  $h$  は観測地点の水深である. 押し波による最大流速発生時の流向を正の波向きとした. 水位の推定結果を 図-2.7 に示す. 水位時系列を示した 3 地点の水深はそれぞれ A : 64m, B : 61m, C : 33m である. 推定した振幅の大きさは KO とほぼ同程度であり, 岸に位置する KA の約半分である. 第 1 波では沖合の地点ほど位相が進んでいるが 2 波目以降はほぼ同位相となっている. また, C 点での位相は KA に比べて約 15 分程度進んでいる. C と KA 間の線形長波の伝搬時間は平均水深 20m とすれば約 11 分であり推定結果よりも若干短い.

以上, 進行波としての性格が強い第 1 波から第 3 波による水道内の水位変動を推定した.

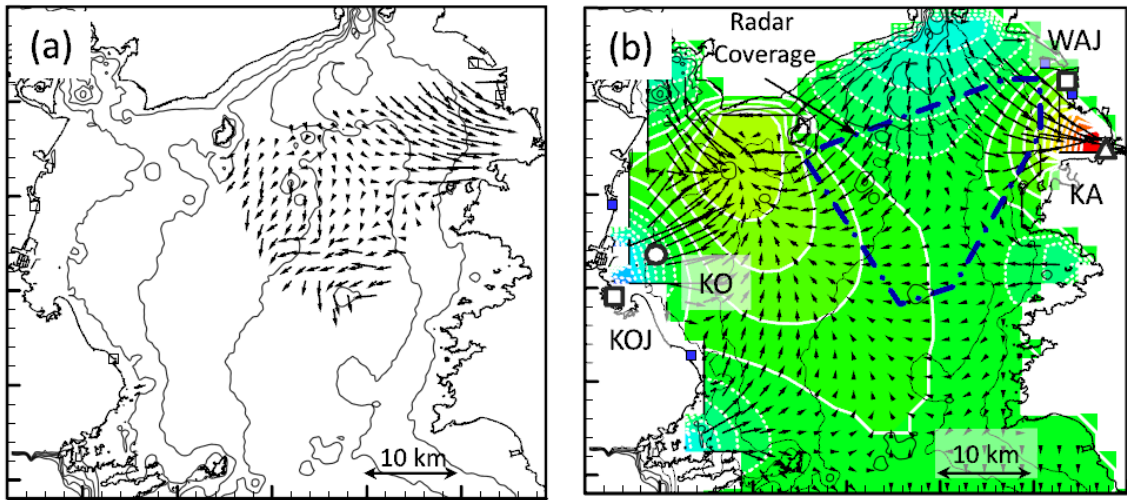


図-2.5 (a) 30-40 分周期流速成分 EDF 第 1 モード, (b) Loomis(1973)の方法で求められた 33.5 分周期の副振動モード

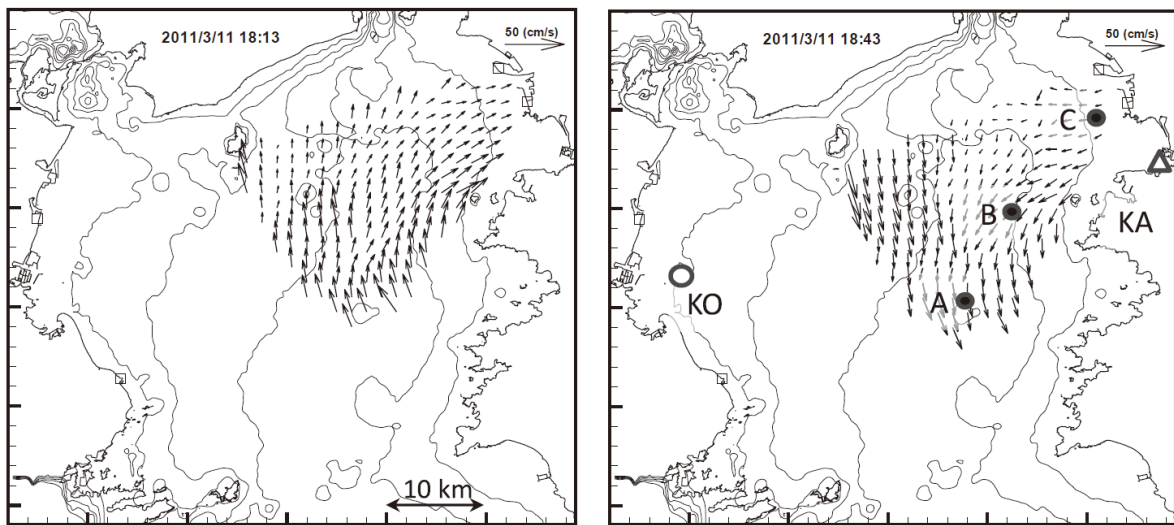


図-2.6 第 2 波による流速場：押波（左），引波（右）

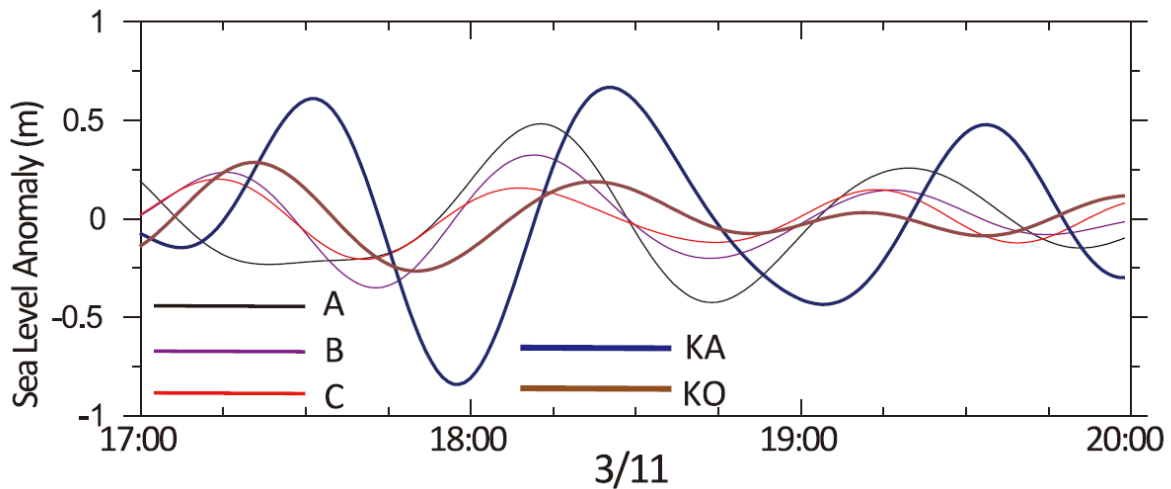


図-2.7 レーダ流速場から推定した水位 (A, B, C) と実測水位 (KA, KO) との比較

#### 参考文献

- 泉宮諄司・中島俊秋 (2006) : 時間平均された海表面流速場を用いた津波のリアルタイム予測, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.246-250.
- 児島正一郎・橋本典明・吉松みゆき (2001) : 海洋短波レーダによる海表面流計測のための新しいドップラースペクトルの算定法, 第 48 回海講論文集, pp.1421-1425.
- 平石哲也・柴木秀之・原崎恵太郎 (1997) : 想定南海地震津波における共振周期特性の重要性について, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.286-290.
- 藤井智史・徳田正幸 (1997) : 津波・海象監視予測装置, 特許番号第 2721486 号.
- 古川恵太 (2012) : 海洋レーダ運用の現状と今後の展開, ITU ジャーナル, Vol.42, No.7, pp.21-25.
- Barrick, D. E. (1979): A coastal radar system for tsunami warning, Remote Sensing of Environment, Vol.8, pp.353-358.
- Gurgel, K.-W., A. Dzvonkovskaya, T. Pohlmann, T. Schlick E. and Gil (2011): Simulation and detection of tsunami signatures in ocean surface currents measured by HF rader, Ocean Dynamics, DOI: 10.1007/s10236-011-0420-9.
- Hinata, H., S. Fujii, K. Furukawa, T. Kataoka, M. Miyata, T. Kobayashi, M. Mizutani, T. Kokai and N. Kanatsu (2011): Propagating tsunami wave and subsequent resonant response signals detected by HF radar in the Kii Channel, Japan, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.95, pp.268-273.
- Lipa, B., D. Barrick, S. Saitoh, Y. Ishikawa, T. Awaji, J. Largier and N. Garfield (2011): Japan tsunami current flows observed by HF radars on two continents. Remote Sensing, Vol.3, pp.1663-1679.
- Loomis, H.G. (1973): A new method for determing normal modes of irregular bodies of water with variable depth, Hawaii Institute of Geophysics reports HIG-73-10 (NOAA-JTRE-86), 27pp.
- Rabinovich, A. B. (1997): Spectral analysis of tsunami waves: Separation of source and topography effects. J. Geophys. Res., Vol.102 (C6), pp.12663-12676.

## 2.3 津波観測用の海洋レーダのシステムの改良

リアルタイムで津波検知を可能とする海洋レーダの技術開発を行うため、津波による海面の動きの迅速なデータの取得、津波成分抽出のためのシステムの改良に取り組んだ。

### (1) 海洋レーダの設置

国総研所有の海洋レーダを和歌山県沿岸（美浜町、白浜町）に設置した。2 局の海洋レーダの設置位置を検討する際には、津波計測及び波浪計測技術の精度向上を図るため、観測範囲内に和歌山県南西沖 GPS 波浪計の設置位置を含有するように留意した。（図-2.8、写真-2.1）。

送信波の中心周波数は 24.515 MHz、周波数掃引幅は 100 kHz、レンジおよび方位方向空間分解能はそれぞれ 1.5 km、7.5° である。

### (2) 連続データの取得

レーダ局では、送受切換型 FMICW（FMICW: Frequency Mdlated Interrupted Continuouse Wave）方式で周波数掃引した電波を送信し、海面の各距離から同時に返ってくる受信信号をフーリエ変換することで距離特性を算出している。流速計測を行なうには、FMICW の周波数掃引 1 回ではドップラ周波数の計測は不可能であり、電波の周波数に対してドップラ周波数偏移が極めて小さいことから、位相変化として検出可能な時間分の時系列データを要する。24.5MHz のレーダでは、4.78cm/s の速度分解能を得るために 128 秒間の観測時間を要している。速度分解能を犠牲にすれば、観測時間を短くすることは可能であるが、今回の観測の結果から波高数 10cm の津波検知のためには、数 cm/s 程度の速度分解能が必要である（水深 1000m、振幅 100cm で流速振幅 10cm/s 程度）。

そのため、津波の観測には速度分解能を保ちつつ、流速計測の高速化と連続化を図る必要がある。そこで、津波および副振動による流速を捉えるために電波を連続的に送信し、1 分毎に表層流速を計算できるようにレーダ・システムを改良した。津波を検知するための最適な観測時間を検討するため、任意の観測時間でドップラースペクトルを計算できるように連続的に A/D データを取得し、外付け HDD に保存するようにした。

また、災害時にも観測を継続できるように無停電電源装置を導入するとともに、これまで使用してきた ISDN 回線に加えて光回線を併用することでデータ転送の高速化、ネットワーク環境の冗長化を図った。

### (3) 津波成分流の抽出システムの開発

津波襲来時に海洋レーダで計測される表面流速には、潮流や吹送流などの背景流と津波成分流が混在するため、計測したデータから津波成分流を抽出することが必要となる。

このため、津波襲来時に計測される海表面の流速（潮流や吹送流などの背景流と津波成分流が混在）から自己回帰モデルを用いて津波成分流を抽出できるシステムを開発した。システムにおいては、海洋レーダによって取得した A/D データを 256 掃引毎に解析して 1 分間隔のドップラースペクトルを計算する。これによる流速分解能は 4.8cm/s となる。また、津波襲来時に海洋レーダで計測される表面流速には、潮流や吹送流などの背景流と津波成分流が混在するため、表面流速に 60 分間の移動平均を施すことで津波成分流を抽出する。

実際に、東北地方太平洋沖地震の津波襲来時に近畿地方整備局所管の海洋レーダ（湊局）で計測された視線方向流速に 60 分間の移動平均を施して、背景流と津波成分流を抽出した結果を図-2.9 に示す。



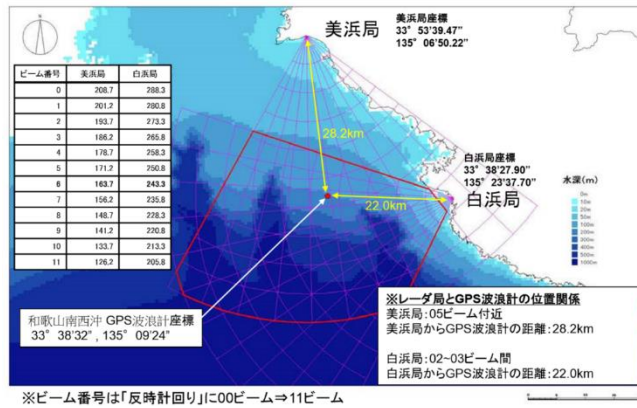


図-2.8 短波海洋レーダの設置位置と観測範囲



写真-2.1 美浜局の設置状況

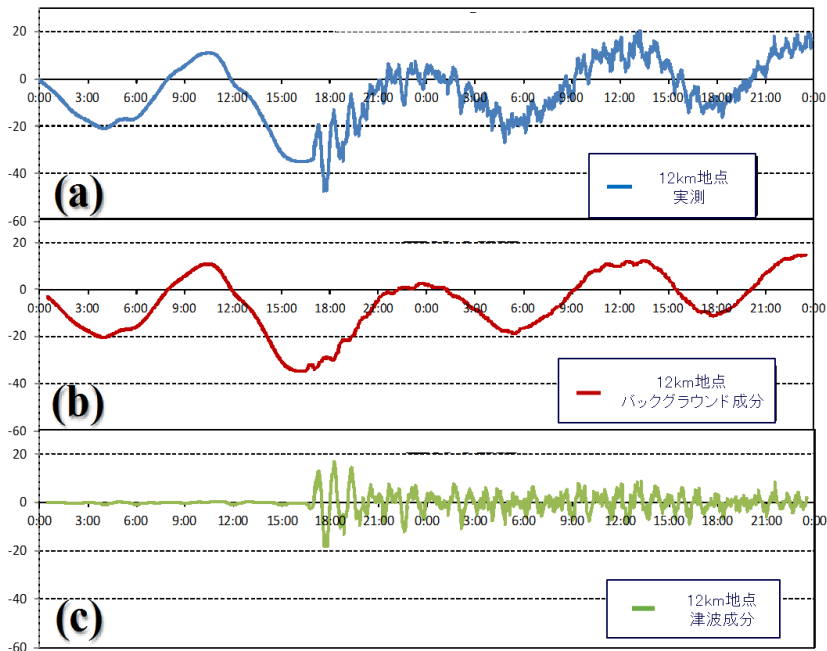


図-2.9 津波流速成分の抽出結果

東北地方太平洋沖地震による津波の襲来時に  
観測された視線方向流速(a), 抽出した背景流速(b), 津波成分流速(c)



## 2.4 短波海洋レーダを利用した津波初期水位のインバージョン

東日本大震災では従来の津波対策が抱える2つの課題が明らかになった。1点目は津波警報の第一報が過小に発表されたことである。このことにより住民の避難行動に支障が生じた可能性がある。現在の津波警報システムは観測された地震波の解析結果に基づき津波の評価を行っている。気象庁マグニチュードは速報性に優れているが、マグニチュード8を超える巨大地震や津波性の地震、不均一性の強い地震では津波を過小に評価してしまう危険性が指摘されている（高橋ら，2007）。2点目は市町村の行政組織そのものが津波による壊滅的な被害を受けたことにより、市町村からの状況報告を頼りにしている各県で激甚被災地の迅速な把握が困難になったことである。このため被災後の救援活動に支障が生じた可能性がある。

将来、発生が予測されている南海トラフの巨大地震（東海・東南海・南海地震の連動）では同様の問題が危惧される。中央防災会議（2013）の検討によれば、地震発生後、愛知県、三重県、徳島県、高知県では最短10分以内、静岡県、和歌山県では最短2分で津波第1波が沿岸に到達すると予測されており、津波避難についての時間的余裕はほとんどない。また、被災範囲は東日本大震災より広域となるので被災状況の把握はさらに困難になると予想される。しかしこうした厳しい状況下にあっても、これら問題の解決のためには津波警報の過小評価を防止する技術や激甚被災地を探索する技術を開発していくことは重要であると考えられる。津波警報の過小評価を防止していくことに関しては、例えばGPS波浪計で観測した水位を基に地震の規模を推定し、気象庁が発表する津波警報が過小となっていないかを評価する研究が進められている（門廻ら，2013）。本研究では海洋レーダを用いて激甚被災地を短期間に一定の精度で探索するための技術開発に繋げていくことを目的に、インバージョン解析による津波波源推定について基礎的な検討を行った。

表-2.2 観測時間と流速分解能（ $f=24.515\text{MHz}$ ，1掃引0.5s）

観測時間 (min)	掃引回数	流速分解能 (cm/s)
1	128	9.56
2	256	4.78
4	512	2.39
8	1024	1.20
17	2048	0.60
34	4096	0.30

海洋レーダは面的に密な流速を観測しGPS波浪計等の水位観測に比べてデータ量の面で優位性がある。また、例えば海洋レーダの特徴である面的な流速場から波峰を抽出しこれを基に波源の広がりや推定できれば、津波波源推定精度の大幅な向上が期待できる。海洋レーダではある一定時間毎（以下、観測時間）の受信波をFFT解析することにより時間平均された海面流速を計算する。ここで、観測精度と観測時間には観測原理上トレードオフの関係がある。観測時間を長くすれば流速分解能（表-2.2）と受信波のSN比は向上する（JSCE，2001）ものの、津波により駆動される流速は数分で大きく変化する可能性があるため、観測時間を長くすれば短時間の流速変動は計算できない。したがって、海洋レーダを用いたインバージョン解析による津波初期水位の推定には適切な観測時間の決定が重要になる。

インバージョン解析により精度の良い津波初期水位が得られれば、現在の津波数値計算技術で激甚被災地を数時間以内に推定することは十分に可能である（例えば、越村ら，2010）。津波数値計算による激甚被災地の推定精度は津波初期水位の推定精度に大きく依存する。そこで、本研究では海洋レーダが観測する流速場を利用して必要な精度で津波初期水位を推定していくための第一歩として、海洋レーダの観測時間がインバージョンの推定精度へ与える影響について検討を行った。

## (1) 海洋レーダを用いた波源の逆推定

### 1) インバージョン解析に関する既往の研究

観測された津波記録を用いたインバージョン解析に関する研究は、解析対象とする未知量の違いに着目すると、断層のすべり量を未知量とする手法と津波初期水位を未知量とする手法の2種類の手法に大別される。

断層のすべり量を未知量とする手法は、もともと断層運動の不均質性を調べることを目的とした手法であり、断層モデルをいくつかの小断層に分割し、各小断層のすべり量を未知量として、断層面上のすべり量分布を推定する（例えば、Satake, 1989；安中ら, 1999）。Satake (1989) は津波の検潮記録を用いて断層面上のすべり量分布を推定した。安中ら (1999) は津波の非線形性を考慮して痕跡高を利用できるインバージョン手法を提案し適用性を検討した。津波初期水位分布は、推定されたすべり量から決定した断層モデルに基づき鉛直地盤変動量を計算することで得られる。

津波初期水位を未知量とする手法は、津波波源域を多数の単位波源に分割し各単位波源の初期変動量を未知量として、直接的に津波初期水位分布を推定する手法である。これまで主に GPS 波浪計や海底津波計、海底設置式波浪計による観測水位を応答関数に用いた研究が行われてきた（例えば、安田ら, 2006, 2007；辰巳ら, 2008；高川ら, 2012；対馬ら, 2012）。これら既往の研究はいずれも津波の線形性を仮定している。安田ら (2006, 2007) は安政南海地震や中央防災会議 (2003) の東海・東南海・南海地震津波を対象にインバージョン解析を行い、和歌山および大阪湾での予測精度を検証した。辰巳ら (2008) は南海トラフ周辺を対象として数値実験を行い、津波波源が震央の周囲に分布するという先験情報を利用することで予測精度を向上させた。高川ら (2012) は東北地方太平洋沖地震の沖合水位観測データから波源の広がり、破壊伝播速度、時空間平滑化係数など波源モデルを規定するハイパーパラメータの検討を行い、波源の時間発展や観測データに含まれる地盤変動の影響補正を行うことで波源の推定精度と津波波形の予測精度を向上させた。対馬ら (2012) は東北地方太平洋沖地震を対象とした数値実験で、現在、文部科学省により計画されている海溝軸から海岸までの広範囲を高密度で覆う緻密な沖合観測網を想定し、波源と観測点の位置関係の違いによる津波予測精度について検討した。

### 2) インバージョン解析の概要

本検討では、津波初期水位を未知量として直接的に津波初期水位分布を推定するインバージョン解析を考える。インバージョンによる津波初期水位の推定は、津波の線形性を仮定した線形重ね合わせの原理に基づくものである。非線形性が無視できるある程度以上の深い海域では、津波波源が発生する津波（観測津波）は、津波波源を単位波源に分割したときに各単位波源が発生する単位津波の線形和として表すことができる。単位津波の線形和と観測津波の残差の二乗和が最小となるように解を求めれば、津波初期水位が決まる。単位津波を事前計算しておけば津波発生時には最小二乗法を解くのみでよい。任意の津波予測地点での津波波形は、その地点での単位津波の線形重ね合わせによりただちに求めることができるため、改めて津波の伝播計算を行う必要はなく、リアルタイムの津波予測に適した手法である。ただし、非線形性の影響が無視できない浅海域での津波波形を予測する場合には、推定された津波初期水位を初期条件として非線形長波理論により津波の伝播計算を行う必要がある。

### 3) 視線方向流速を用いた波源の逆推定

線形長波理論では水位と流速の間に線形の関係が成り立っているので、インバージョンの応答関数として流速を使うことができる。本研究のインバージョン解析は安田ら (2006, 2007) をはじめとした研究で利用されている手法と同様の原理に基づくものである。ただしインバージョンの応答関数として海洋レーダで観測される視線方向流速を用いる。ここで用いる海洋レーダの観測諸元は、視線方向観測範囲 50km、距離分解能 1.5km、方位方向ビーム本数 11 本、方位分解能 7.5 度である。なお、応答関数に流速ベクトルを用いた場合とレーダ視線方向流速を用いた場合のインバージョン解析を行い、津波初期水位および津波波形の推定精度が変わらないことを確認している。

インバージョン解析の流れは次のとおりである。まず津波初期水位を推定する波源域を複数の小領域に分割し単位波源とする。次に各単位波源が単位上昇 (1m) したときの津波伝播を計算しレーダ観測点での流速の時系列 (グリーン関数) をデータとして保存しておく。次に最小二乗法を解き津波初期水位

を求める。最終的に求めた単位津波の回帰係数が初期水位を与える。

(2) 観測時間の影響検討

単純化したモデル地形と波源を用いてインバージョン解析を行い、海洋レーダの観測時間が初期水位および津波波形の推定精度に与える影響を調べた。

1) 線形性の成立条件

インバージョンは線形重ね合わせの原理に基づくため、非線形性が影響しない実験条件の設定が必要である。そこで、まずは線形重ね合わせが成立する条件を確認した。

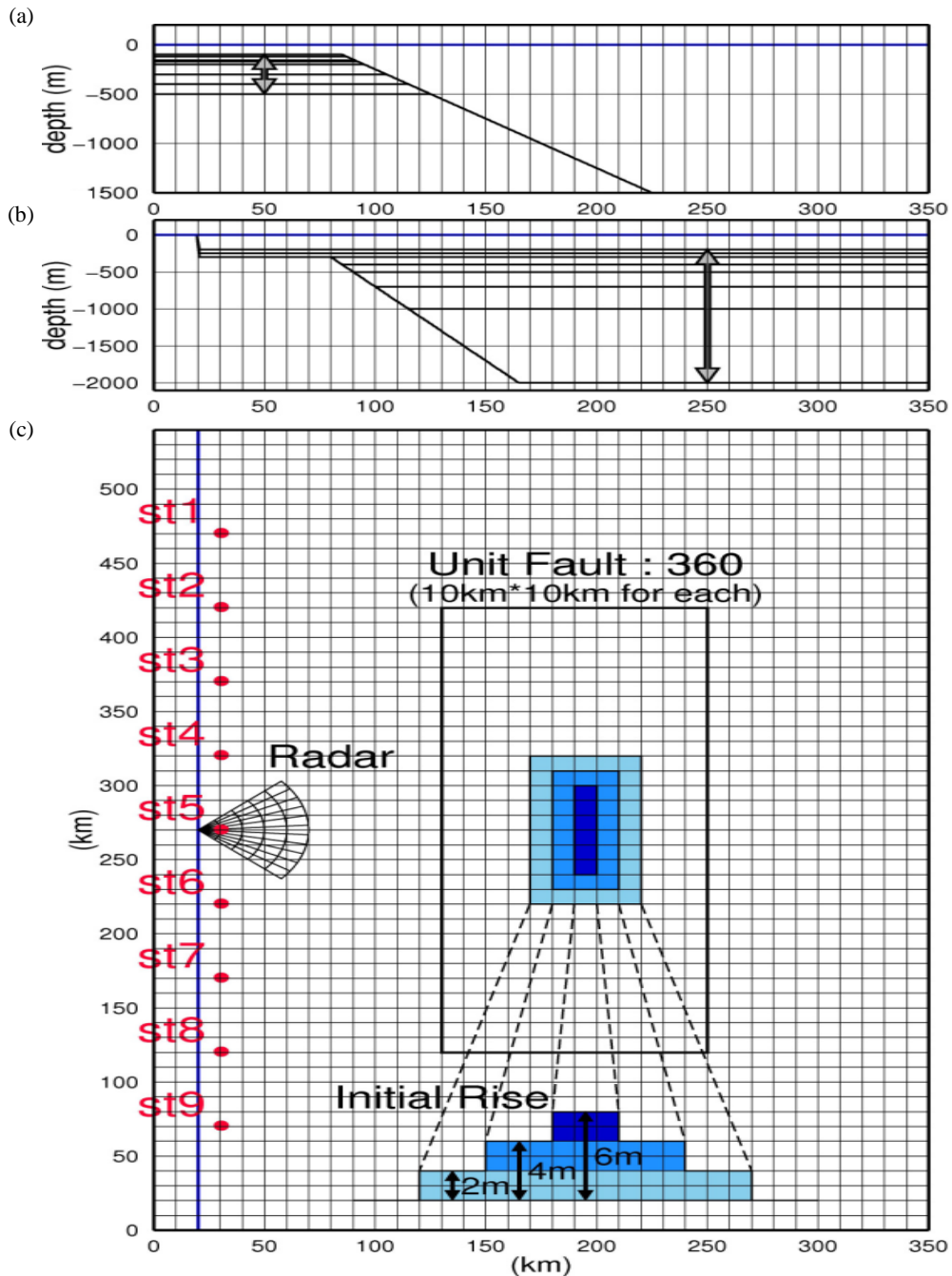


図-2.10 検討モデルの断面.

(a) 断面（線形性の検討），(b) 断面（観測時間の影響検討），(c) 単純地形モデル.

レーダ観測範囲の水深を一定とし、レーダ観測範囲の水深を 100m から 500m の範囲で変化させた単純地形モデルを考え階段状の初期水位分布 (単位波源の大きさ 10km×10km) を与えた (図-2.10(a), (c)). 津波の伝播計算は、空間格子サイズ 1km×1km, 時間間隔 2 秒, 計算時間 2 時間とした. 計算開始から 80 分間の視線方向流速を対象としてインバージョン解析を用い、津波初期水位の空間分布に関する予測精度を表す指標として二乗平均誤差を真値最大値で除した二乗平均誤差比率 (以下, RMSE 比率) を、観測地点における水位時系列の再現性の指標として、分散低減 (Variance Reduction) を行った最小値 (以下, VR) を用いて、インバージョンによる波源の推定精度を評価した.

検証地点 (st1~st9; 図-2.10(c)参照) で得られた津波波形 (2 時間) から計算した VR の最低値を図-2.11(b)に示す. 水深が 200m より浅くなると RMSE 比率とともに VR は急激に悪化する. これは水深が小さい場合、浅水変形により波高が増大し非線形性の影響が表れたためと考えられる. 水深 200m 以下での RMSE 比率, VR の悪化が非線形性の影響によるものかを確認するため、津波波源域での流速を 2 倍, 3 倍としたときの観測点での流速の応答を調べたところ、水深が 200m より小さくなると応答が非線形になっていることが確認された (図-2.12). 津波の非線形性の程度を表す指標である波高水深比は水深 200m で 0.030 である. そこで、ここではインバージョンによる波源推定のための線形性の成立条件の目安として、波高水深比を 0.030 程度とした.

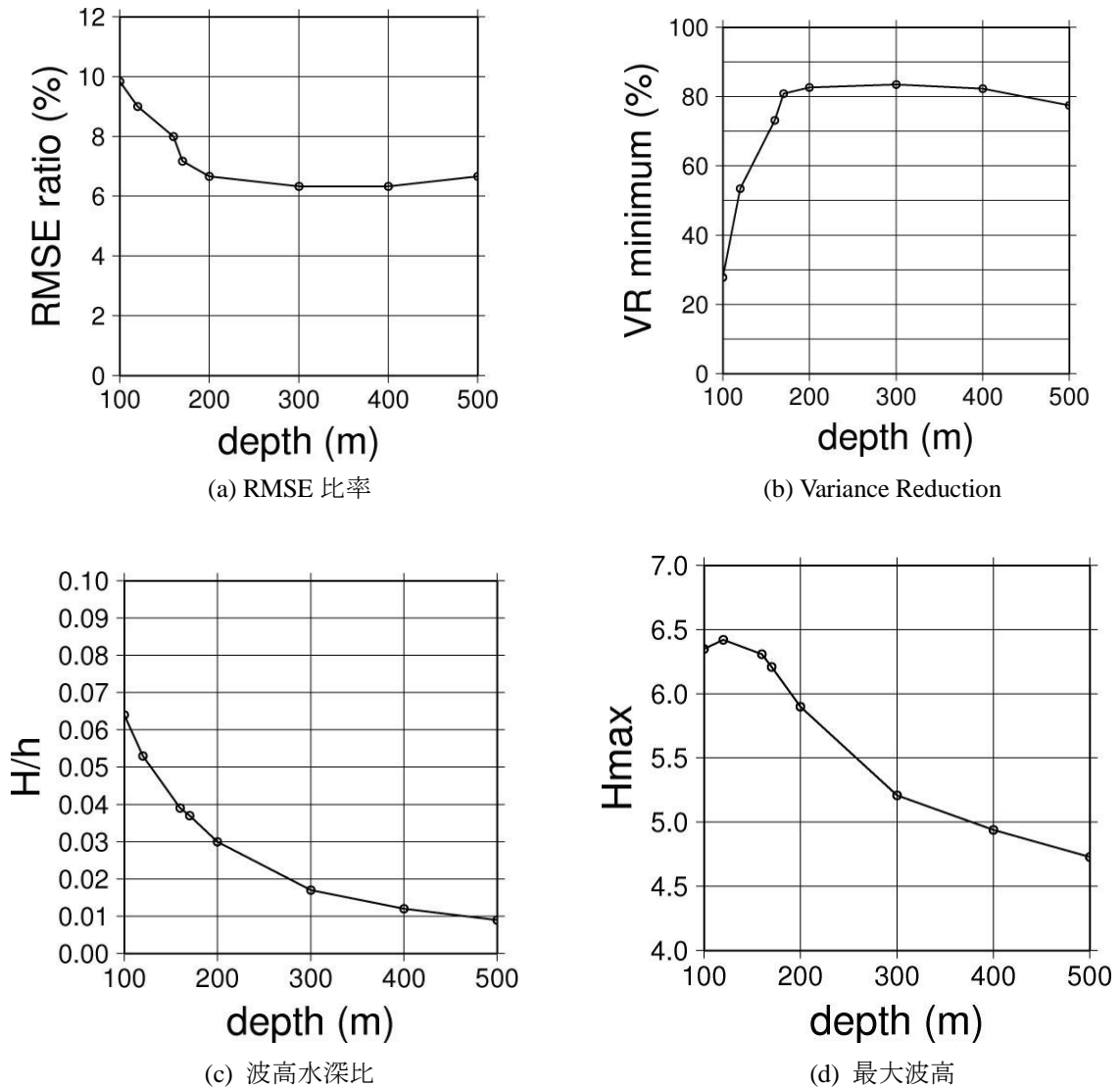


図-2.11 波源水深を変化させた数値実験による推定結果.

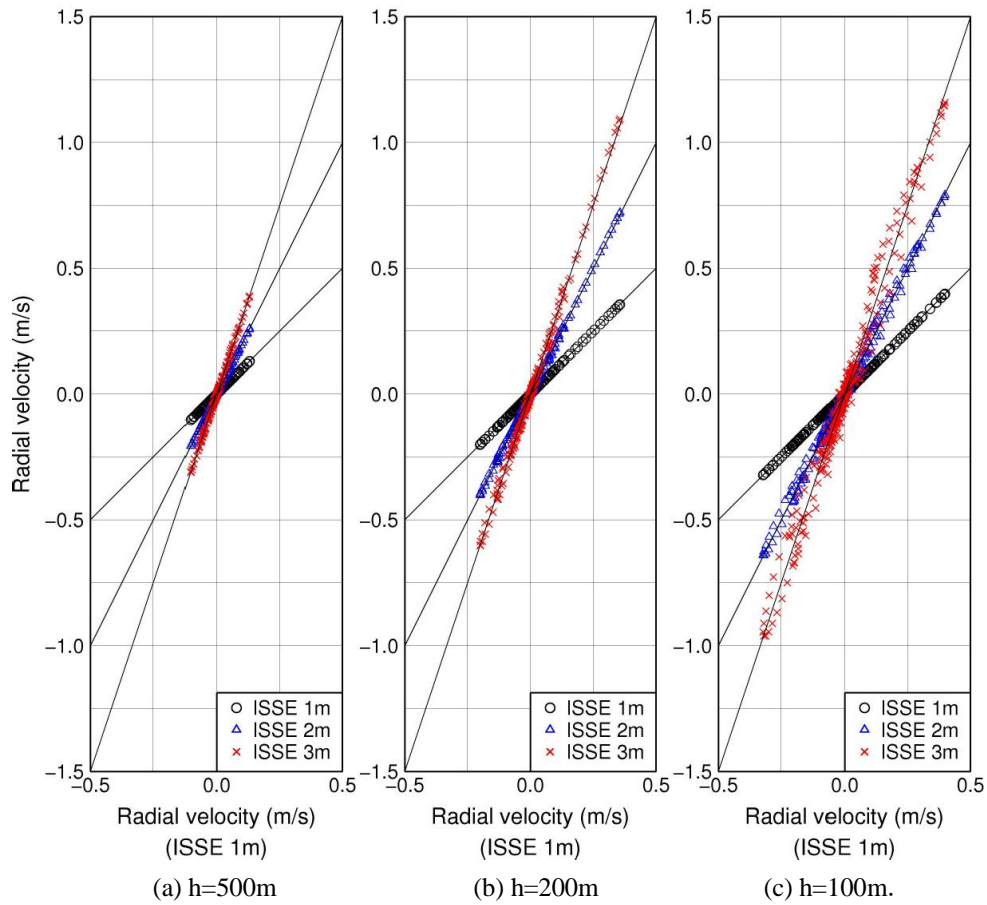


図-2.12 津波波源域の規模と観測点 (st5) での流速の応答関係。  
津波初期水位 (Initial Sea Surface Elevation) を 2 倍, 3 倍としたときの流速の応答関係

表-2.3 検討条件および視線方向最大流速

波源水深 (m)	最大波高 (m)	波高水深比	卓越周期 (min)	視線方向最大流速 (m/s)
200	4.12	0.021	37.6	0.65
250	4.14	0.021	33.7	0.58
300	4.12	0.014	30.7	0.53
400	3.96	0.013	26.6	0.58
500	4.22	0.014	23.8	0.63
700	4.38	0.015	20.1	0.63
1000	5.02	0.017	16.8	0.59
2000	5.54	0.018	11.9	0.68

## 2) 数値計算の実験条件

津波の周期に対して観測時間が十分に短ければ観測時間の影響は相対的に小さくなると考えられる。一方で、観測時間は流速分解能とトレードオフの関係にあり観測時間を短くすると流速分解能は低下する(表-2.2)。また、観測時間が短いとSN比が低下することで、観測精度が悪くなると推定される。

そこで、ここでは津波の卓越周期と観測時間を変えてインバージョン解析を行い推定精度の変化を調べた。津波の卓越周期は波源の水平スケールと水深から以下の様に決まる(例えば, Rabinovich, 1997)。本検討では波源の水平スケール(50km×100km)を固定し水深を変化させることで津波の卓越周期を変化させた(図-2.10(b), (c))。波源短軸方向(50km)に対する第1モードの周期を表-2.3に示す。レーダの観測時間は1分から30分まで1分間隔で設定した。視線方向流速の計算結果をある時間で移動平均した後に1分間隔で出力することで実際のレーダの観測時間と時間分解能を模擬した。

設定したいずれの水深についても、波高水深比は0.030以下を満たしている(表-2.3)。津波の伝播計算は、空間格子サイズ1km×1km, 時間間隔2秒, 計算時間2時間とした。計算開始から80分間(波源水深300m, 400m, 500m, 700m, 1000m, 2000m)もしくは120分間(波源水深200m, 250m)の視線方向流速を出力しインバージョン解析に用いた。

## 3) 結果と考察

インバージョン解析によって計算されたRMSE比率およびVRの評価結果を図-2.13に示す。検証地点(st1~st9)で得られた津波波形(2時間)のVRの最低値が70%以上の場合を○で、70%未満の場合を×で表している。

(流速分解能を考慮しない場合)

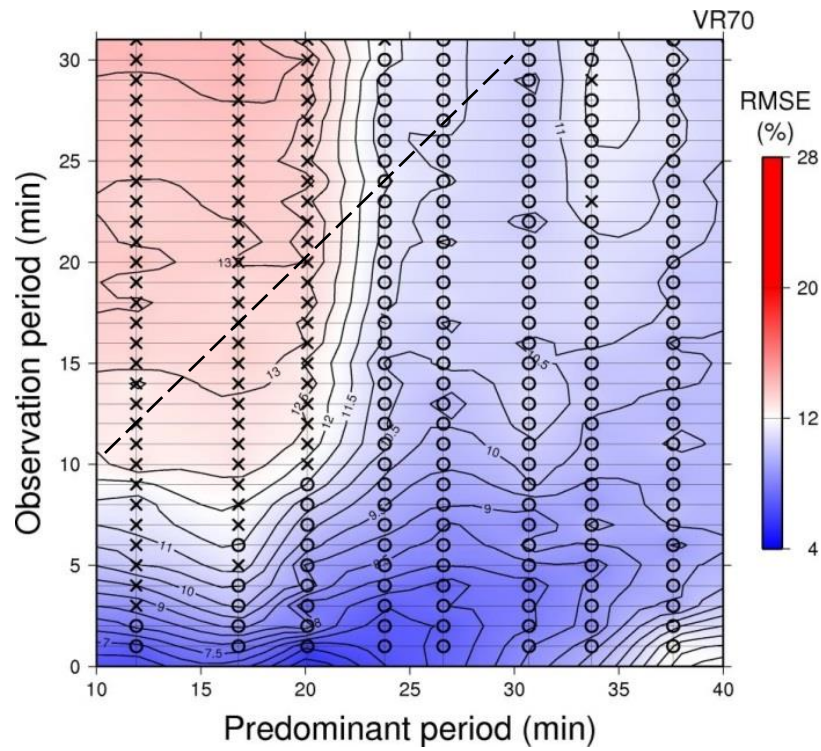
基本的には津波の卓越周期によらず観測時間が短いほどRMSE比率は小さい(図-2.13(a))。本研究ではレーダ観測時間について流速データを時間方向に移動平均することで考慮している。移動平均を行うともとの波形は平滑化されるためインバージョンによる推定誤差が大きくなる。そのため卓越周期に対して観測時間が長くなるほど推定精度は低下すると考えられる。津波の卓越周期が短い(10~20分)と観測時間の増加にともない急激にRMSE比率が上昇するが、ある程度(25~30分)以上の卓越周期では観測時間の影響は小さくなる。

(流速分解能を考慮した場合)

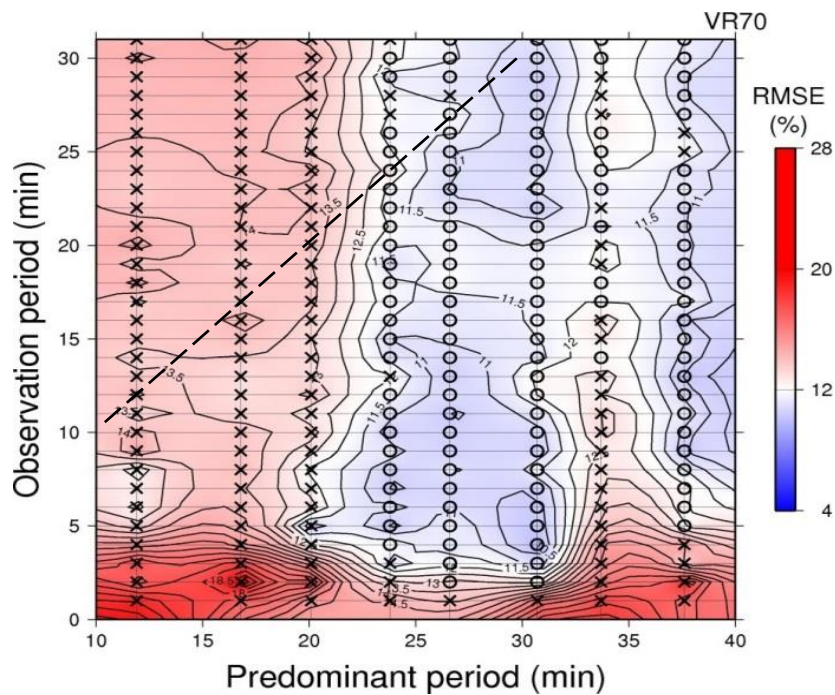
レーダ観測時間が長い場合、津波の卓越周期が長いほどRMSE比率が低くVRが良い傾向は変わらない(図-2.13(b))。しかし、レーダ観測時間が5分より短くなると全ての卓越周期に対してRMSEが急激に上昇している。本実験でのレーダ観測範囲内の最大流速は50cm/s~70cm/s程度(表-2.3)であるのに対し、観測時間2分の場合流速分解能が約5cm/s, 1分では約10cm/sとなる(表-2.2)。観測時間の短縮によるRMSE比率の急激な上昇は、最大流速に対して流速分解能が相対的に大きくなったためと考えられる。

流速分解能の影響は最大流速の大きさにより相対的に決定されると考えられる。今後は、検討条件を変えて最大流速の違いによる流速分解能の影響を整理する必要がある。





(a) 流速分解能非考慮



(b) 流速分解能考慮

図-2.13 推定精度の評価。コンターはRMSE比率(コンター間隔:0.5%)を、○(×)は $VR \geq 70\%$  ( $VR < 70\%$ )である。津波の卓越周期に対して同じ時間長の観測時間(流速移動平均時間)を破線で示した。

### (3) 東北地方太平洋沖地震での検証

東北地方太平洋沖地震をモデルに海洋レーダの視線方向流速を応答関数に用いたインバージョン解析を行い、推定精度の検証を、特に津波卓越周期に対する観測時間の相対的な関係、および観測時間とトレードオフの関係にある流速分解能の影響に着目して検討した。

#### 1) 数値計算の条件

岩手県沖から茨城県沖を含む範囲 (300km×600km) を推定波源域とし、760 個の単位波源に分割した。単位波源の大きさは 15km×15km とした。Fujii ら (2011) による断層モデル (藤井・佐竹 Ver.4.2) から Okada (1992) の手法を用いて津波初期水位を計算し、数値実験に用いる観測津波とした。

なお、ここで使用した藤井・佐竹 Ver.4.2 モデルは、すべての小断層の同時破壊を仮定しており、破壊伝播速度は考慮していない。波源の水平スケールを 500km×200km、平均水深を 4000m と仮定すると短軸方向 (200km) から決まる第 1 モードの津波の周期は約 34 分である (日向ら, 2012)。

津波の伝播計算は、空間格子サイズ 1km×1km、時間間隔 2 秒、計算時間 6 時間とし、インバージョン解析に用いる津波観測点は海洋レーダ 2 局 (岩手県沖、宮城県沖に仮想的に設置) および実際に GPS 波浪計が設置されている 6 地点 (GPS1~GPS6) とした。観測時間は実際の海洋レーダ観測による流速の解析手法 (FFT によるスペクトル解析) を考慮して設定した (表-2.4)

インバージョンに用いる視線方向流速の出力時間は計算開始から 2 時間とした。まず、津波の伝播計算を行い、2 局のレーダ観測範囲で線形性が成立する観測点を確認したところ、波高水深比 0.030 を満たす観測点は 272 点あり (図-2.14)、レーダ観測範囲での最大流速は 5.85m/s であった。

#### 2) 結果と考察

観測津波の初期水位分布の最大値 13.7m に対して推定された津波初期水位分布の RMSE 比率は、観測時間 2 分 (流速分解能 4.78cm/s) で 7.8%、観測時間 34 分 (流速分解能 0.30cm/s) で 7.2% となり、GPS1~6 の水位で推定した場合と同程度であった。この様に RMSE 比率からは有意な差は認められない (図-2.15)。

一方、推定された初期水位をもとに計算した津波波形 (6 時間) の VR は観測時間が短いほど良い (図-2.17)。st1 から GPS5 にかけては特に良い値を示している。st6 から st9 にかけては観測波形に比べ再現波形では短周期成分が発生したために VR は低下した (図-2.16)。インバージョン解析により推定された初期水位は誤差を含むので、st7~st9 のような観測津波の振幅が小さな地点では津波波形の再現性において誤差の影響があらわれやすいと考えられる。

表-2.4 観測時間 (f=24.515MHz, 1 掃引 0.5s)

応答関数	観測時間	出力時間間隔	掃引回数
GPS 水位	-	10 sec	-
レーダ視線方向流速	1 min	1 min	128
	2 min	1 min	256
	4 min	1 min	512
	8 min	1 min	1024
	17 min	1 min	2048
	34 min	1 min	4096



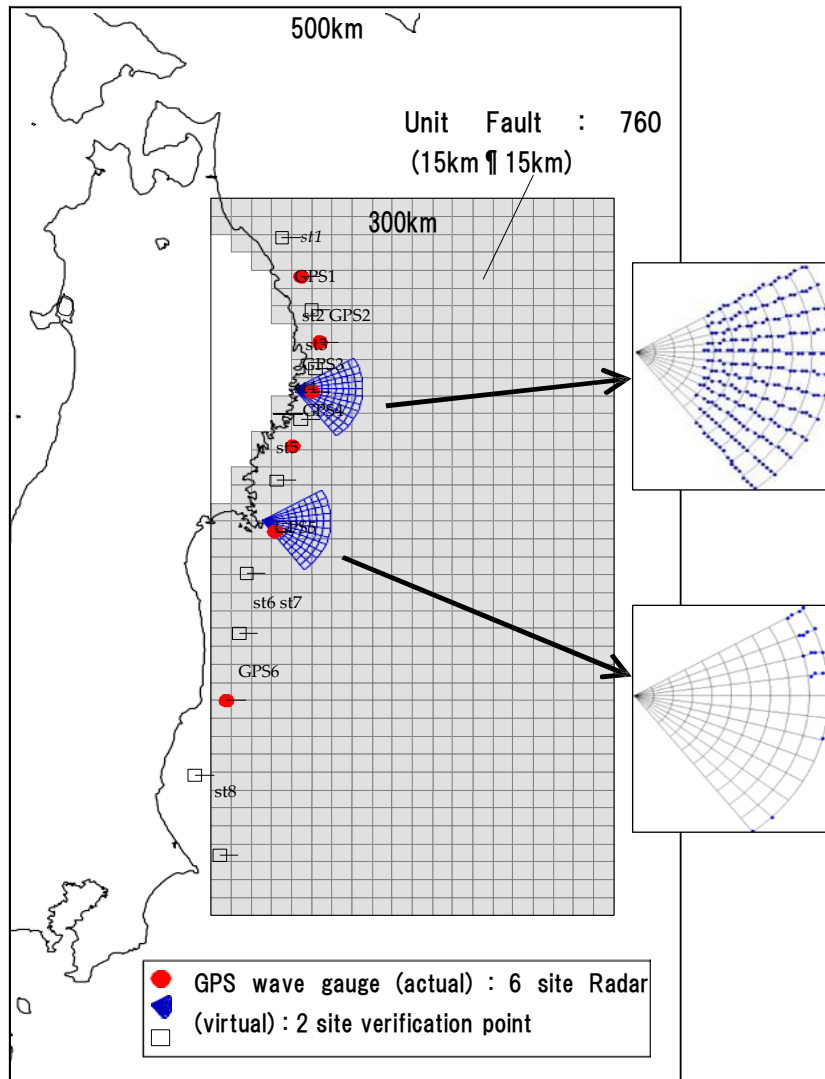


図-2.14 計算範囲およびレーダ観測点

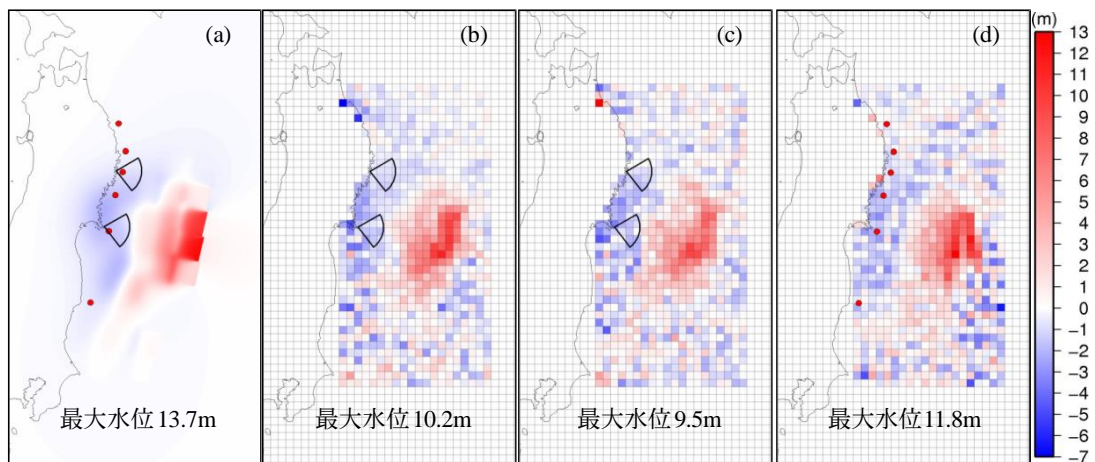


図-2.15 (a) 藤井・佐竹 Ver.4.2 による初期水位分布.  
推定された初期水位分布 : (b) 観測時間 2 分, (c) 観測時間 34 分. (d) GPS1~6.

また、流速分解能を考慮しない場合と推定精度を比較したところ、観測時間によらずすべての検証地点において流速分解能の影響は小さい結果となった(図-2.18)。レーダ観測範囲内の最大流速 5.85m/s に対する最小流速分解能の比率は、観測時間が1分(流速分解能 9.56cm/s)の場合でも2%以下となるため、流速分解能の影響が小さくなったと考えられる。最大流速に応じて適切な観測時間を選択すれば流速分解能の影響を抑えることができる。

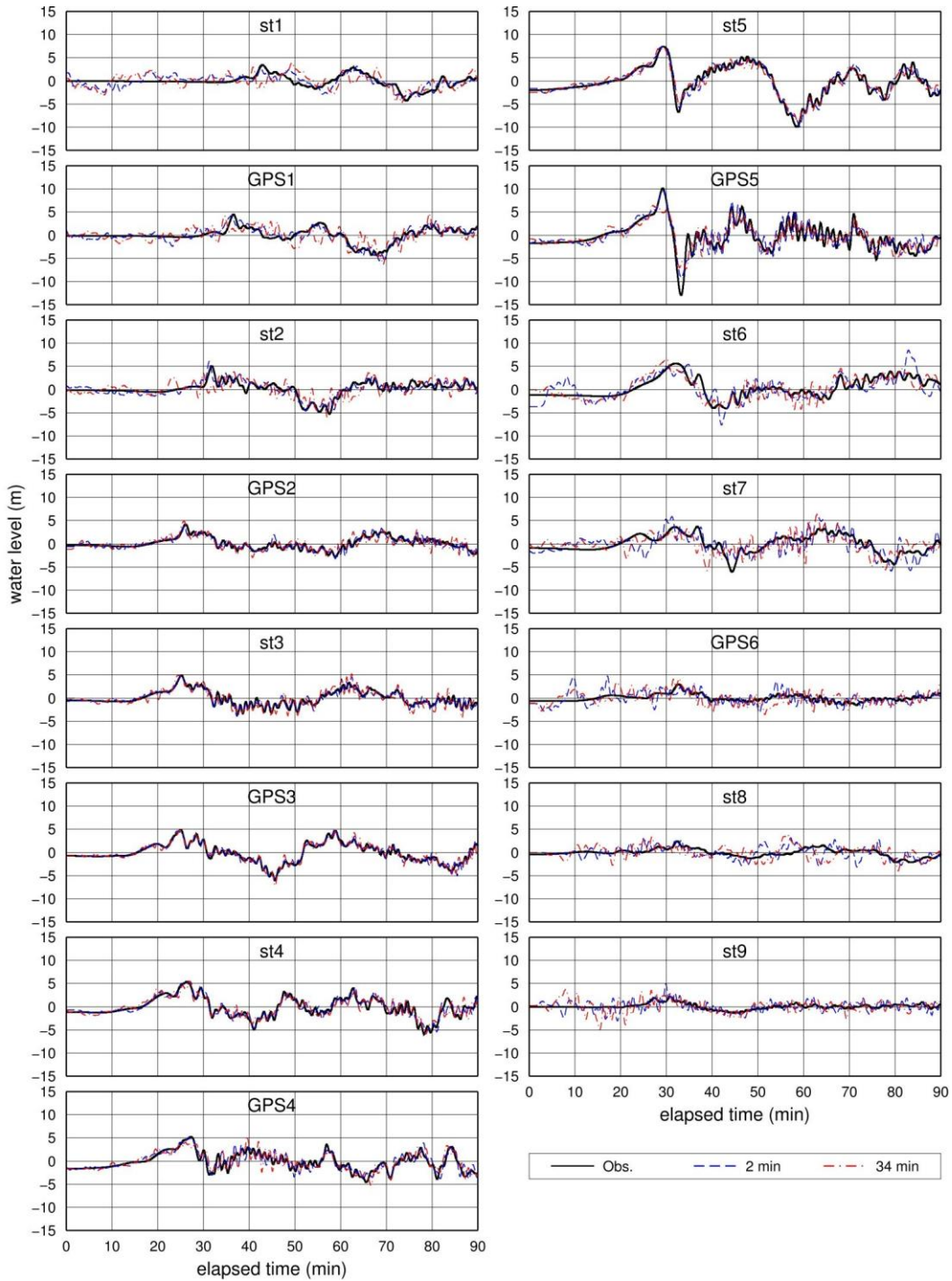


図-2.16 津波波形の比較

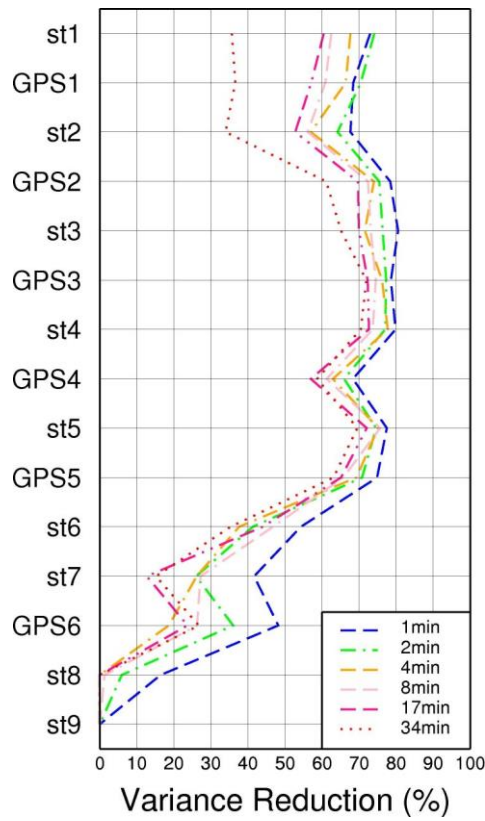


図-2.17 沿岸における VR 分布の観測時間依存性

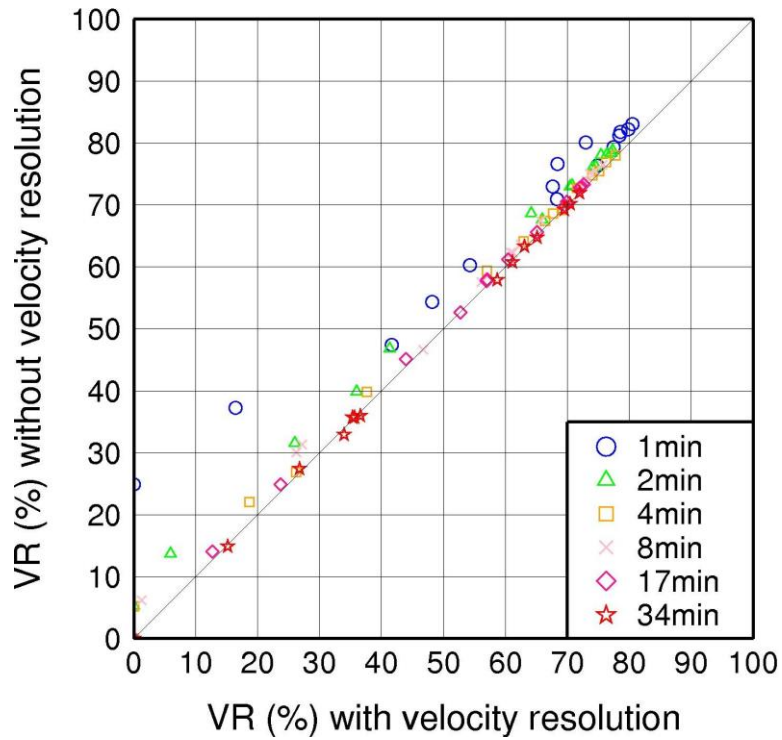


図-2.18 VR 分布の流速分解能依存性

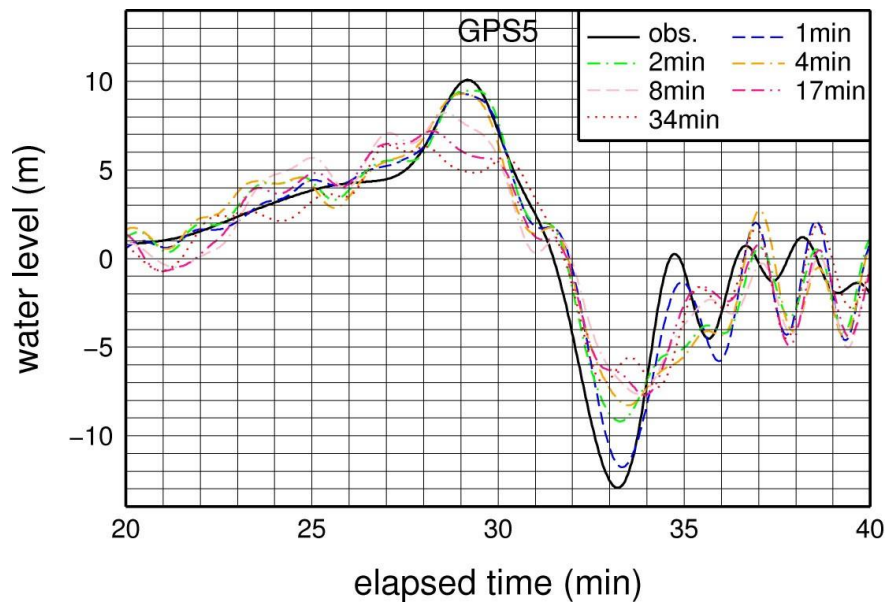


図-2.19 GPS5 地点における最大水位の観測時間依存性

検証地点中で最大の観測津波が計算された GPS5 において、再現された時系列を詳細に見てみると観測時間 34 分のケースでは最大津波高が観測津波（約 10m）の半分程度となっていることが分かった（図-2.16）。GPS5 における観測津波の最大津波高の再現性は観測時間 4 分以下の場合では 90% 以上と非常に良いが、観測時間が 8 分になると 80% 程度以下にまで低下した。これは、観測時間が長くなるにつれ、初期水位の最大値が過小に推定されていることと整合する（図-2.19）。一方で VR の値は 60% ~ 80% と比較的良い値を示している（図-2.17）。この様に観測津波の最大波の再現性を考慮して適切な観測時間を設定する必要がある。津波による最大の浸水被害の多くは最大波によって引き起こされると考えられるため、激甚被災地の探索のためには最大波の到達時刻に対する最大津波水位の再現性が鍵となるからである。

### 3) まとめ

本検討では海洋レーダの視線方向流速を応答関数に用いたインバージョン解析を行い、津波予測精度の検証を、観測時間の影響および観測時間とトレードオフの関係にある流速分解能の影響に着目して検討した。

単純地形モデルによる検討から、インバージョンによる津波初期水位、津波波形の再現性は津波の卓越周期とレーダ観測時間の相対関係で決まることを明らかにした。卓越周期が長くなればレーダ観測時間の影響は相対的に小さくなる。流速分解能の影響を考慮しなければ、卓越周期によらずレーダ観測時間が短いほど津波初期水位、津波波形の再現性は高くなる。実際にはレーダ観測時間と流速分解能がトレードオフの関係にある。流速分解能を考慮すると、観測津波の最大流速に対する流速分解能の相対的な大きさが影響する。

また、東北地方太平洋沖地震をモデルとした数値計算で卓越周期とレーダ観測時間の影響を検証した。観測津波の最大流速に対する最小の流速分解能の比率は 2% 以下であり、初期水位分布、津波波形の再現性は良好であった。しかしながら、観測時間を長くすると観測津波の最大波を過小評価する可能性があることが分かった。激甚被災地の探索を目的とした場合、インバージョンに用いる海洋レーダの最適な観測時間としては、流速分解能、SN 比向上のため観測津波の最大波の再現性が高い範囲でできるだけ長い観測時間を選択することが重要である。

実際の海洋レーダの観測では最大波を観測した後、津波の卓越周期と最大流速を確認してから波源推定に用いる適切な観測時間を設定できれば、津波初期水位推定の精度向上につながる。そのためには、

津波の規模に応じた複数のシナリオについて、レーダ観測時間の影響を整理しておく必要がある。また、観測津波最大波の再現性についても評価していく必要がある。

## 参考文献

- 越村俊一・香月恒介・茂渡悠介 (2010) : GPU コンピューティングによる津波解析の高度化とリアルタイム浸水予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.191-195.
- 門廻充侍・高橋智幸・林能成 (2013) : GPS 波浪計を用いた南海トラフでの津波警報の過少評価の判定指標, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69.
- 高橋心平・高橋智幸・児島正一郎・小沼知弘 (2007) : 後方散乱強度を指標とした遠距離海洋レーダによる津波検知に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, Vol.54, pp.206-210.
- 高川智博・富田孝史 (2012) : 時間発展を考慮した津波波源逆解析と観測点地盤変動量のリアルタイム推定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I\_311-I\_315.
- 辰巳大介・富田孝史 (2008) : 震央位置を利用したインバージョン手法によるリアルタイム津波予測, 港湾空港技術研究所報告書, Vol.47, No.3, pp.55-73.
- 中央防災会議 (2003) : 東南海・南海地震等に関する専門調査会 (第 16 回) 資料, 東南海・南海地震に関する報告 (案) 図表集, pp.1-31.
- 中央防災会議 (2013) : 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ報道発表資料, 資料 1-5, 都府県別市町村別津波到達時間一覧表 (平成 24 年 8 月 29 日発表).
- 対馬弘晃・平田賢治・林豊・前田憲二・尾崎友亮 (2012) : 沖合津波観測点設置の違いが逆解析に基づく近地津波予測の精度に与える影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I\_211-I\_215.
- 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会 (2001) : 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 土木学会, 81p.
- 日向博文・藤良太郎・藤井智史・藤田裕一・花土弘・片岡智哉・水谷雅裕・高橋智幸 (2012) : 紀伊水道における短波海洋レーダを用いた津波・副振動解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I\_196-I\_200.
- 安中正・太田孝平・茂木寛之・吉田郁政・高尾誠・曾良岡宏 (1999) : 浅水変形効果を考慮した津波インバージョン手法に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.46, pp.341-345.
- 安田誠宏・高山知司・川村健太 (2006) : 観測データを用いたグリーン関数重ね合わせ法によるリアルタイム津波波源域推定法, 海岸工学論文集, Vol.53, pp.311-315.
- 安田誠宏・高山知司・川村健太・間瀬肇 (2007) : 沖合観測情報を用いたインバージョン法によるリアルタイム津波予測, 海岸工学論文集, Vol.54, pp.196-200.
- Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M., and Kanazawa, T. (2011): Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, pp.815-820.
- Okada, Y. (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.82, No.2, pp.1018-1040.
- Rabinovich, A. B. (1997): Spectral analysis of tsunami waves: Separation of source and topography effects. *J. Geophys. Res.*, Vol.102 (C6), pp.12663-12676.
- Satake, K. (1989): Inversion of tsunami waveforms for the estimation of heterogeneous fault motion of large submarine earthquakes, *J. Geophys. Res.*, Vol.94, pp.5627-5636.



## 2.5 仮想津波観測実験に基づく海洋レーダ津波検知距離の検討

### (1) 仮想津波観測実験

#### 1) 仮想津波観測データの作成

津波・副振動観測を可能とする海洋レーダのシステム開発を行ったが、その性能検証用の実測データが不足していた。これは津波の発生頻度が著しく低いためである。そこで、本研究では津波数値モデルの計算結果と海洋レーダの実測結果を数値的に合成することで仮想的に津波を観測する手法を開発した。具体的には、数値モデルで計算した津波流速を使い、海洋レーダの観測受信波を変調することによって津波発生時における受信波をシミュレートする。そして、この受信波の周波数解析から視線方向流速を計算し、さらにハイパスフィルターと AR モデルを用いて津波流速の視線方向成分を抽出する。本研究ではこの一連の手続きを仮想津波観測実験と呼ぶ。仮想津波観測実験の利点は、様々な想定津波に対する観測を実際の背景ノイズを考慮した上で模擬できる点である。

本研究では、和歌山県美浜町に設置している海洋レーダの観測受信波を用いて南海トラフ地震を想定した仮想津波観測実験を行い、第4ビーム上における津波第1波の検知距離について計測誤差を含めて検討を行った。実際の津波発生時においては、各観測点において津波第1波を検知し、さらに仮想津波観測実験に基づいて予め計算しておいた推定誤差と併せて津波流速情報を提供することが考えられる。例えば、提供された情報を使って津波波源を逆推定することで激甚被災地特定のために役立てることが可能になる。本研究では、仮想観測津波実験の方法を紹介し実際の観測データを用いたケーススタディについて検討を行う。

#### a) 数値モデルを用いた理想津波受信波の生成

数値モデルの基礎方程式は線形長波方程式と連続式である。計算領域（格子間隔 1km）と津波初期条件を図-2.20 左に示す。地震としては内閣府断層パラメータケースを想定し、地震（津波）発生から 48 時間後まで津波流速を計算し、レーダ観測範囲内（図-2.20 右）のレーダ視線方向流速の時系列を抽出した。

続いて数値計算で得られた視線方向流速成分を使ってレーダ送信波の周波数を変調させることで背景ノイズ影響のない津波発生時の受信波（理想津波受信波）を生成した（図-2.21 左）。

後の解析で利用する流速観測地点における津波第1波の通過時刻については、各地点において数値計算により計算した津波流速の視線方向成分が初めてレーダ流速分解能である  $\pm 4.78\text{cm/s}$  を超えた時刻（以下、津波影響開始時刻）の 60 分後（津波第1波の周期に相当）とした。

#### b) 理想津波受信波と観測受信波の合成

海洋レーダによる観測受信波（図-2.21 中）と a) で生成した理想津波受信波を複素積により合成し、実際の背景ノイズを考慮した津波発生時の受信波を模擬する（図-2.21 右）。ここでは安定的に観測データが取得できた 2014 年 4 月 5 日の海洋レーダ観測受信波と、内閣府ケース 3 地震に対応する理想津波受信波を合成した。なお、津波は 2014 年 4 月 5 日 0 時に発生したと仮定した。

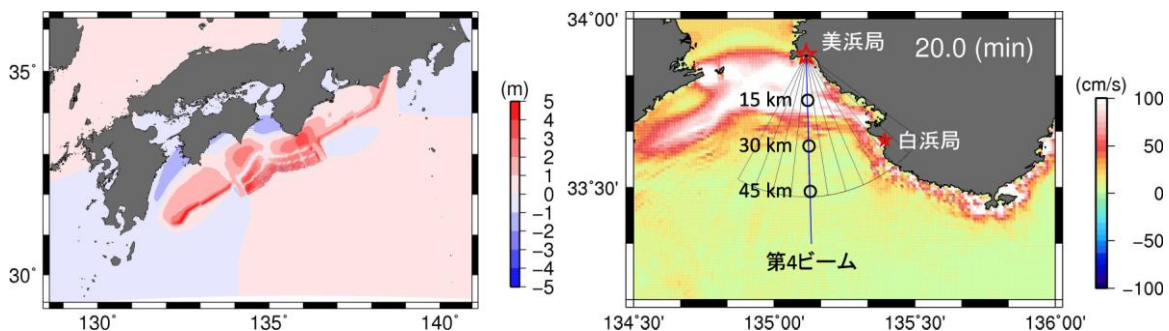


図-2.20 津波数値計算の概要。左：計算領域と津波初期波形（内閣府断層パラメータケース 3 地震を想定）、右：美浜局の観測範囲および流速分布（津波発生 20 分後）。

## 2) 合成受信波を用いた津波流速成分の計算

合成受信波を FFT 解析して得られる視線方向流速に 60 分の移動平均を施し、潮流等の津波よりも長周期の流速成分を計算した。そして、この長周期成分を視線方向流速から差し引くことで津波流速成分を推定した。ここで移動平均時間を 60 分としたのは、津波数値計算から得られた津波第 1 波の周期がおおよそ 60 分だからである。なお、実際の津波観測では予測される津波周期に応じて移動平均時間の幅を設定すれば良い。さらに、本研究では、突発的に発生する流速の観測誤差（レッドノイズ）を 10 分以下の周期帯成分の  $3\sigma$  を閾値として除去した。

ある観測時刻において 60 分の移動平均流速を計算すると、直近 30 分間については長周期成分を求めることができない。そこで、直近 30 分の長周期成分については、それ以前の長周期成分を用いて AR モデルにより予測することとした。AR モデルは、ある観測時刻の長周期成分の流速を 1 時刻前までの過去の流速の線形和として表すものである。AR モデルを用いることで各観測時刻での長周期流速成分をリアルタイムに求めることができ、その結果、津波流速成分についても推定することが可能となる。

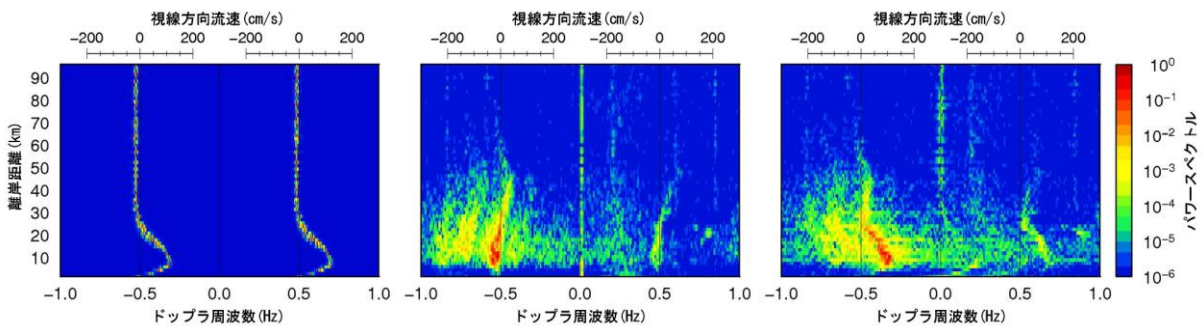


図-2.21 ドップラースペクトルで表示した美浜局の受信波。

左：理想津波受信波（津波発生 20 分後），中：観測受信波（2014/04/05 00:20），右：合成受信波。

## 3) 津波検知距離の検討

本研究では、美浜局の第 4 ビーム（図-2.20 右）上において  $2r$  (km)（以下、相関算出距離）だけ離れた 2 点（以下、相関算出点）で観測された視線方向流速の相互相関係数に着目し津波検知距離を検討した。詳細な方法を以下に示す。

### a) 平常時および津波発生時の視線方向流速相互相関係数の計算

津波発生時の相関係数の計算には、2014 年 4 月 5 日 0 時の前後 3 時間の仮想津波観測データから抽出した津波流速の視線方向成分を用いた。これをもとに相関算出点における 60 分間の相関係数を 1 分毎に計算し、(1) a) で定義した津波第 1 波通過時刻における相関係数を求めた（図-2.22 上の赤破線）。なお、図-2.22 中のある時刻の相関係数は、その時刻から 1 時間前までに観測された 60 個のデータを用いて計算した値である。

これと併せて 2014 年 4 月 4 日 19:30 から 2014 年 4 月 5 日 23:00 の間に美浜局ビーム 4（図-2.20 右）で実際に観測された受信波を使用し、(2) の方法に基づいて平常時の短周期流速成分を計算した。この流速成分を使って相関算出点の 60 分間の視線方向流速の相関係数を 1 分毎に計算し、得られた 1651 個の相関係数を使って平常時の相関係数の頻度分布を作成した（図-2.22 下）。

### b) 津波検知距離の判定

本研究では、a) で計算した津波発生時および平常時における相互相関係数に基づいて各相関算出点における津波第 1 波の検知可能性を検討した。具体的には、津波第 1 波通過時刻の相関係数が、津波を含まない平常時の相関係数の上位 5% に相当する値を超えた場合、相関を算出した 2 地点で津波が検知できたと判断した。ここで、上位 5% としたのは平常時においてごく稀に 0.9 を超える大きな相関が出現しているためである。図-2.22 下に示した例では、津波第 1 波到達時刻の相関係数は 0.89（図中の赤丸）で、平常時の相関係数の上位 5%（0.25）を大きく超えており、2 つの相関算出点（18.0 km, 24.0 km）

では津波第1波を検知できたと判断する。相関算出距離を 1.5 km, 3.0 km, 6.0 km, 12.0 km と変化させ、視線方向の観測点の全ての組み合わせについてこの判定を行い、津波検知距離の相関算出距離に対する依存性について整理した。

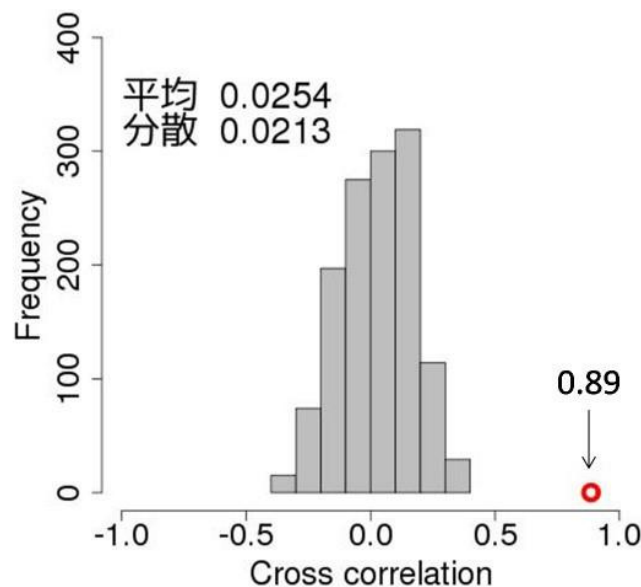
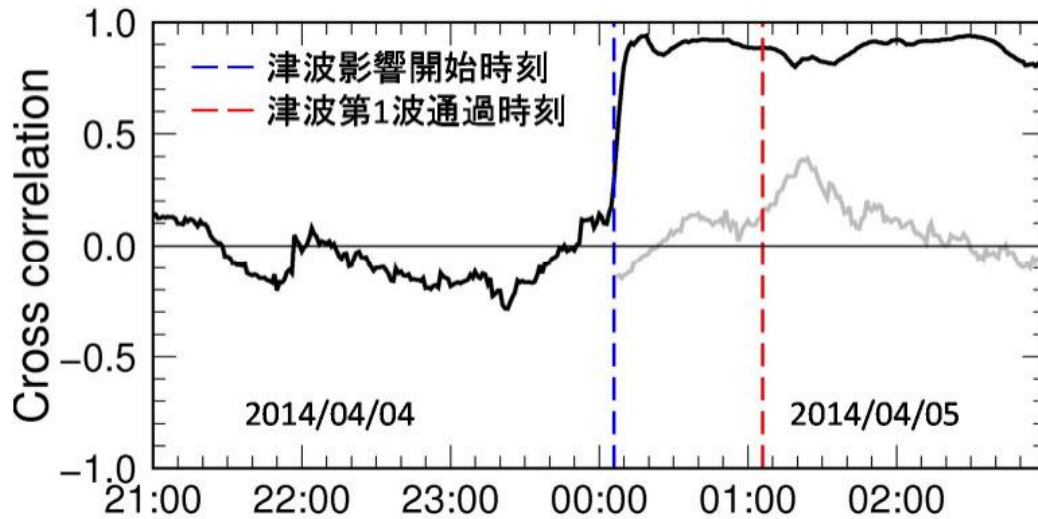


図-2.22 津波検知判定方法. 上：18.0 km～24.0 km 間の相関係数の時間変化（黒実線は津波発生時，灰色実線は平常時）. 津波影響開始時刻は，津波数値計算による流速が初めて $\pm 4.78\text{cm/s}$ （レーダ流速分解能）を超えた時刻（青破線），津波第1波通過時刻（赤破線）はその60分後. 下：平常時（2014/04/04 19:30～2014/04/05 23:00）18.0 km と 24.0 km 間の相互相関係数の頻度分布. 赤丸の位置：津波第1波通過時刻における相関係数の大きさ.



## (2) 津波検知距離の推定結果

### 1) 視線方向流速の時系列

仮想津波観測実験から得られた視線方向流速の時系列(美浜局第4ビーム15 km, 30 km, 45 km地点)を図-2.23に示す。津波第1波の視線方向流速の計測誤差(平均二乗誤差)は、第4ビーム上の全ての観測地点平均で31.8 cm/sであり、15 km, 30 km, 45 kmの各地点でそれぞれ3.9 cm/s, 9.1 cm/s, 8.0 cm/sとなった。7.5 kmから45 kmにかけて誤差が小さくなる傾向が見られた(図-2.26上)。

### 2) 平常時および津波発生時の視線方向流速相互相関係数

視線方向距離19.5 km地点に対して、相関算出距離を1.5 km, 3.0 km, 6.0 km, 12.0 kmとした場合の平常時および津波発生時の相関係数の時間変化を図-2.24に示す。いずれの地点でも、津波影響開始時刻(図中の青破線)を境に急激に相関係数が大きくなっており、津波第1波通過時刻(図中の赤破線)を過ぎた後も大きな値が継続している。この津波による相関係数の変化量は、相関算出距離が大きくなるとわずかに小さくなる傾向が認められた。ただし、相関算出距離が最も大きい12.0 kmの場合でも、津波の影響が現れる前と比べ明らかに相関係数が大きくなっていることがわかる。

平常時の相関係数の頻度分布(図-2.25)を見ると、相関算出距離が最も小さい1.5 kmの場合に平均値と分散が最も大きくなっている。相関算出距離が3.0 km以上では分散は1.5 kmと比べて顕著に小さく、平均値はゼロに近づき1.5 kmの場合と比べて1オーダー小さくなっている。

### 3) 相互相関係数を利用した津波第1波検知距離の推定結果

4通りの相関算出距離(1.5 km, 3.0 km, 6.0 km, 12.0 km)について全ての観測地点間の組み合わせを使って津波第1波の検知可能性の判定を行い、結果を図-2.26下にまとめた。その結果、津波第1波を検知できた最大距離は、相関算出距離1.5 km, 3.0 km, 6.0 km, 12.0 kmでそれぞれ42.0 km, 52.5 km, 54.0 km, 57.0 km, 最大流速は13.1 cm/s, 11.0 cm/s, 10.8 cm/s, 9.8 cm/sとなった。相関算出距離が大きくなるにしたがって最大検知距離も増加した。この検知距離は、2014年4月5日に美浜局で観測した受信波を用い、内閣府断層パラメータケース3地震を想定して検討を行った結果であり、レーダ観測期間や想定津波を変えた場合には検知距離は異なることに注意が必要である。観測期間が異なれば背景ノイズや観測範囲における海面波の方向スペクトルが異なるからであり、想定津波が異なれば観測範囲内における津波流速の視線方向流速成分の大きさが変わるからである。

## (3) 議論

### 1) 津波検知最大距離の相関算出距離依存性

相関係数の比較に基づいて津波検知を判定するためには、平常時の相関係数はできるだけ小さく、反対に津波発生時の相関係数は平常時に比べて十分に大きくなるよう相関算出距離を設定する必要がある。本研究では、60分の移動平均を用いて津波流速成分を含む短周期成分を分離した。したがって、相関算出距離 $2r$ は平常時における60分以下の短周期成分の代表空間スケール( $L_{nor}$ )よりも大きく、かつ津波の空間スケール( $L_{tsu}$ )よりも十分に小さい距離に設定する必要がある。沿岸域において $L_{tsu}$ は数10 kmから100 km程度と考えられるので、最適な相関距離を設定するためには $L_{nor}$ の大きさを見積もれば良い。

ここで平常時における相関係数頻度に関する特徴を改めて確認してみる。平常時の相関係数は算出距離が3.0 kmを超えると相関係数の平均値と分散が急激に小さくなることを示した。つまり平常時では60分以下の周期帯で卓越する物理現象の空間スケールは3.0 kmよりも小さく1.5 km程度であると推測される。したがって、本研究のように津波第1波の周期が60分程度の場合、この海域においては相関算出距離は3.0 km以上に設定すれば良いことになる。

この様に最小算出距離はレーダ観測範囲における短周期成分の代表空間スケールと津波の卓越周期、すなわち津波流速成分を抽出するために用いる移動平均時間に依存する。津波の卓越周期についてはレーダ観測範囲において予想される津波のうち最も大きな周期を考えれば良い。そして、この周期よりも短い周期の流速成分を使って平常時の2地点間の相関係数の頻度分布を予め調べておくことで、他の海域においても最適な相関算出距離を設定できると考えられる。

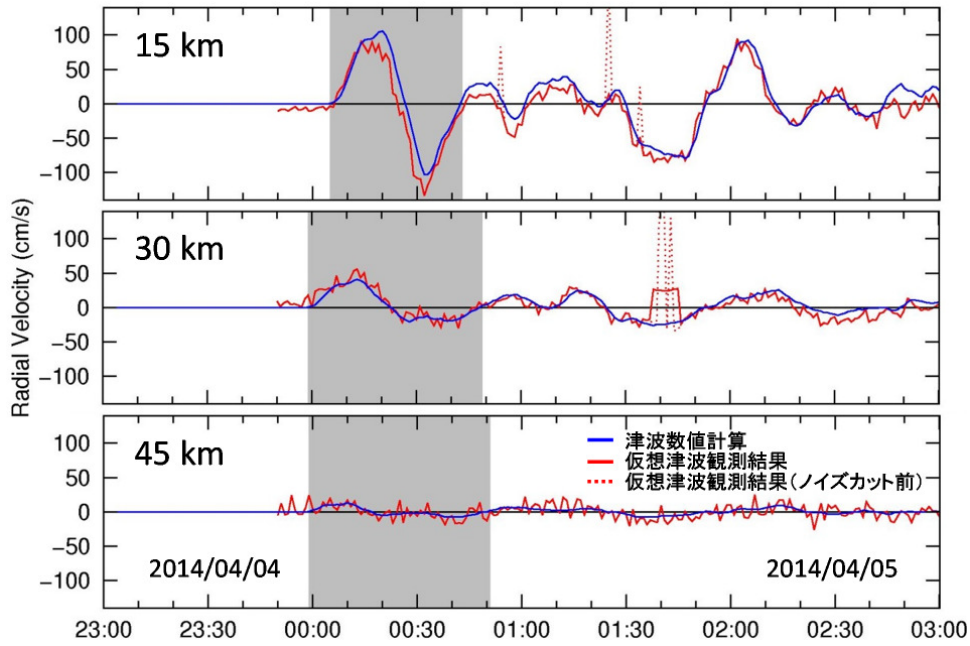


図-2.23 仮想津波観測結果（赤実線）と津波数値計算による真の津波流速（青実線）の比較. 赤点線はノイズカット前. 灰色部分はゼロアップクロスで抽出した津波第1波.

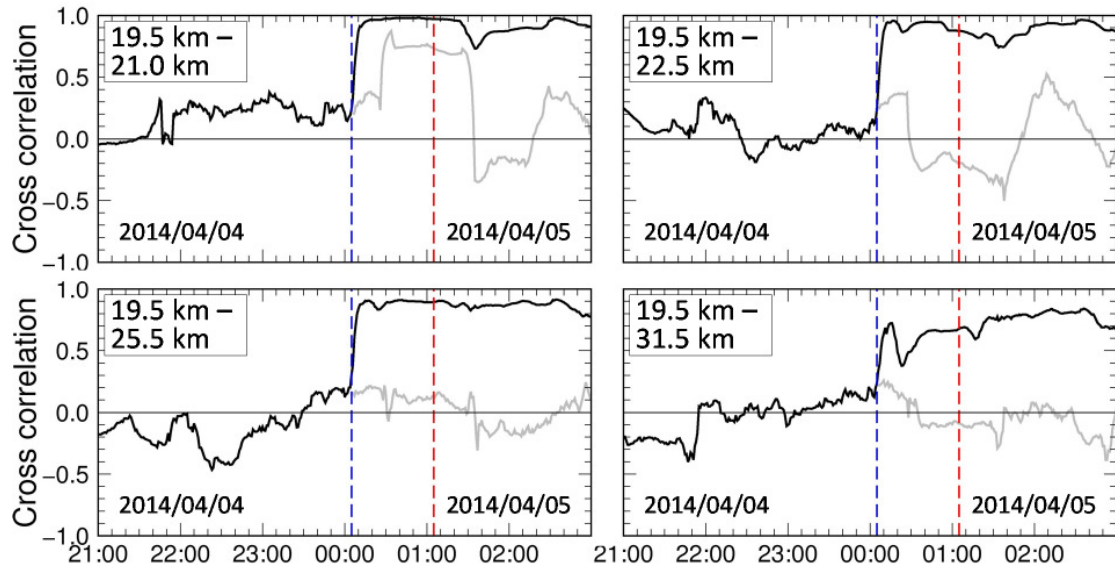


図-2.24 相関算出距離 1.5 km（左上），3.0 km（右上），6.0 km（左下），12.0 km（右下）の 60 分間視線方向流速の相関係数の時間変化（黒実線は津波発生時，灰色実線は平常時）. 青破線：津波影響開始時刻，赤破線：津波第1波通過時刻.

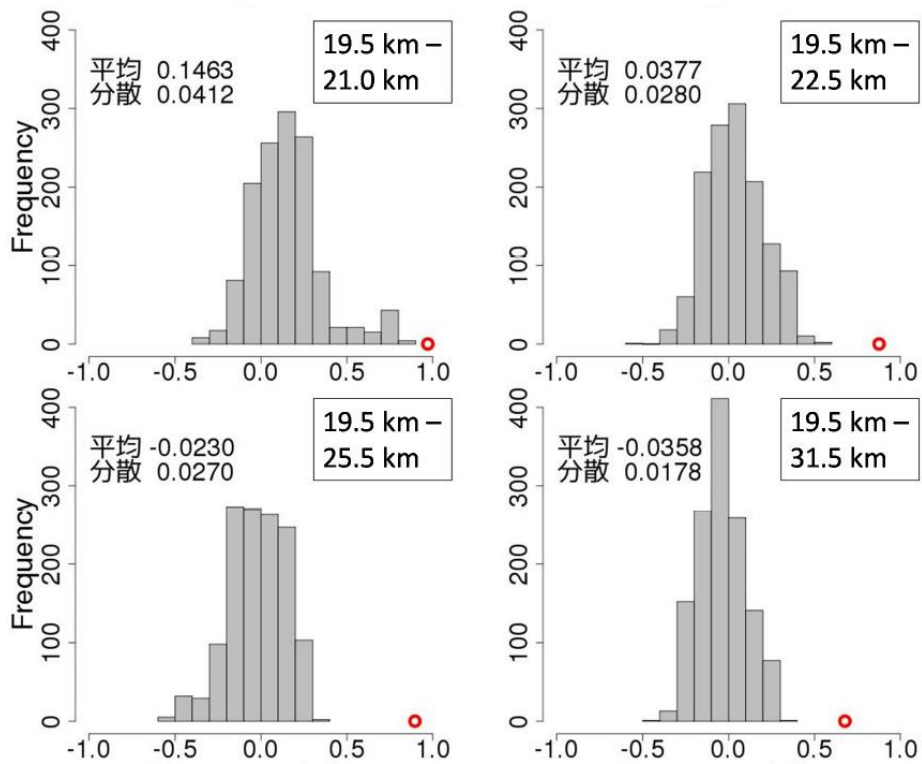


図-2.25 相関算出距離 1.5 km (左上), 3.0 km (右上), 6.0 km (左下), 12.0 km (右下) の平常時における視線方向流速の相関係数の頻度分布. 赤丸の位置: 津波第 1 波通過時刻における相関係数の大きさ.

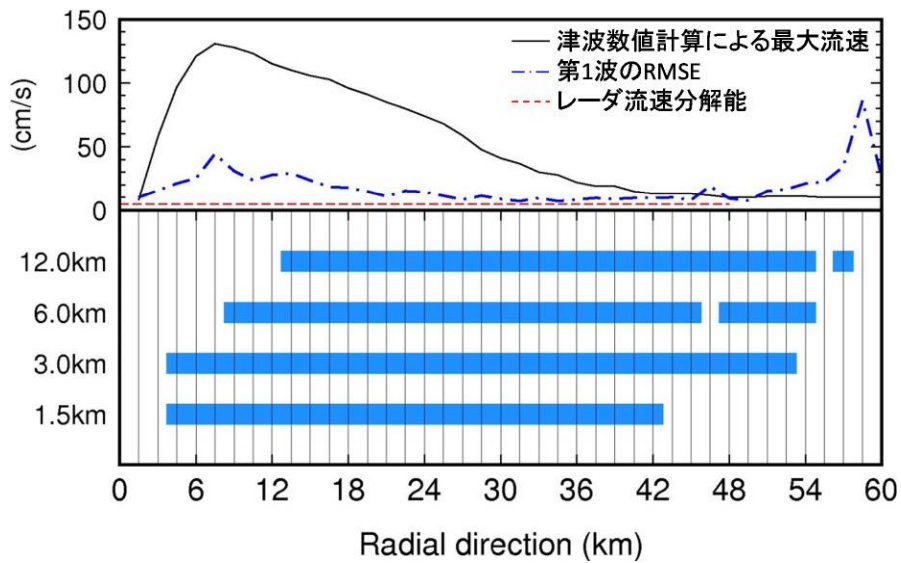


図-2.26 相関算出距離を 1.5 km, 3.0 km, 6.0 km, 12.0 km とした場合の津波第 1 波の検知可能距離 (青ブロック) と津波数値計算による最大流速, 第 1 波の RMSE.

## 2) 津波検知可能性に与える船舶ノイズの影響

津波到達後における相関係数を著しく低下させる要因として航行船舶のノイズ（船舶からの反射波）等の影響があげられる。図-2.27 上に 30.0 km 地点における視線方向流速を示す。2014 年 4 月 5 日 01:40 付近にスパイク状の流速変化（ノイズ）が発生している。このノイズは数分間にわたって出現しており、 $3\sigma$  を閾値とした方法では完全には除去できなかった。このノイズが 2 地点間の相関係数に与える影響を明らかにするために、例として 30.0 km と 31.5 km 地点との相互相関係数の時間変化を図-2.27 中に示す。2014 年 4 月 5 日 01:40 付近に発生したスパイク状のノイズに対応して 2 点間の相関係数が急激に減少していることが分かる。

このスパイク状のノイズの発生原因を調べるために 2014 年 4 月 5 日 01:41 における実際のレーダ受信波を調べた。図-2.27 下に示すのは同時刻におけるビーム 4 受信波のドップラースペクトルである。離岸距離 30.0 km 地点における正のドップラ周波数領域に孤立したピーク（図中丸印）が確認できる。1 次散乱ピークの自動読み取りプログラムはこの孤立したピークを 1 次散乱ピークと認識してしまいこのピーク的位置（ドップラ周波数）から当該距離の視線方向流速を計算していた。ここには示さないが、このピーク的位置（離岸距離）は時間とともにレーダに近づいており、さらにその移動速度が船舶の航行速度程度であったことからこの孤立したピークは船舶からの反射波の影響によるものと考えられた。

このように船舶からの反射波が混入すると、津波到達後であっても急激に相関係数が低下し、通常であれば津波検知が可能な距離であっても津波検知が困難になる可能性がある。2.6 でノイズを除去する手法開発について述べる。

## (4) まとめ

数値モデルで計算した津波流速を使い海洋レーダ（和歌山県美浜町）の観測受信波を変調することによって津波発生時における受信波をシミュレートした。この受信波の周波数解析から視線方向流速を計算し、さらにハイパスフィルターと AR モデルを用いて津波流速視線方向成分を抽出した。そして、第 4 ビーム上に位置する観測点間の視線方向流速短周期成分の相互相関係数が津波通過に伴って有意に上昇した場合にそれらの観測点で津波を検知したと判断した。

内閣府断層パラメータケース 3 地震が 2014 年 4 月 5 日 0:00 に発生したと仮定し検討を行った結果、観測点間の距離（相関算出距離）が 1.5 km, 3.0 km, 6.0 km, 12.0 km の場合、検知距離はそれぞれ 42.0 km, 52.5 km, 54.0 km, 57.0 km となり、検知距離には相関算出距離依存性が認められた。これは、平常時において 60 分以下の短周期成分の代表空間スケールが 1.5 km に近いために、相関算出距離を 1.5 km とした場合、平常時の相関係数が大きくなるためであると考えられた。

相関係数の比較に基づいて津波検知を判定するためには、平常時の相関係数ができるだけ小さく、反対に津波発生時の相関係数は平常時に比べて十分に大きくなる相関算出距離を設定する必要がある。本研究で行ったケーススタディの結果、相関算出距離  $2r$  は、平常時における相関算出時間以下の流れの代表空間スケール ( $L_{nor}$ ) よりも大きく、かつ津波の空間スケール ( $L_{tsu}$ ) よりも十分に小さい距離に設定すれば良いことがわかった。沿岸域では  $L_{tsu}$  は数 10 km から 100 km 程度であり、 $L_{nor}$  については平常時の視線方向 2 地点間の相関係数の頻度分布を予め調べておくことで見積もることができる。

津波検知の条件としては  $L_{nor} < 2r \ll L_{tsu}$  を満たせば良い。60 分より短い周期の津波を対象とした場合においてもここで用いた  $2r$  は上記の関係を満足する。よって、より短い周期（例えば周期 30 分、10 分）の津波についても本手法を用いて検知距離を検討することが可能である。

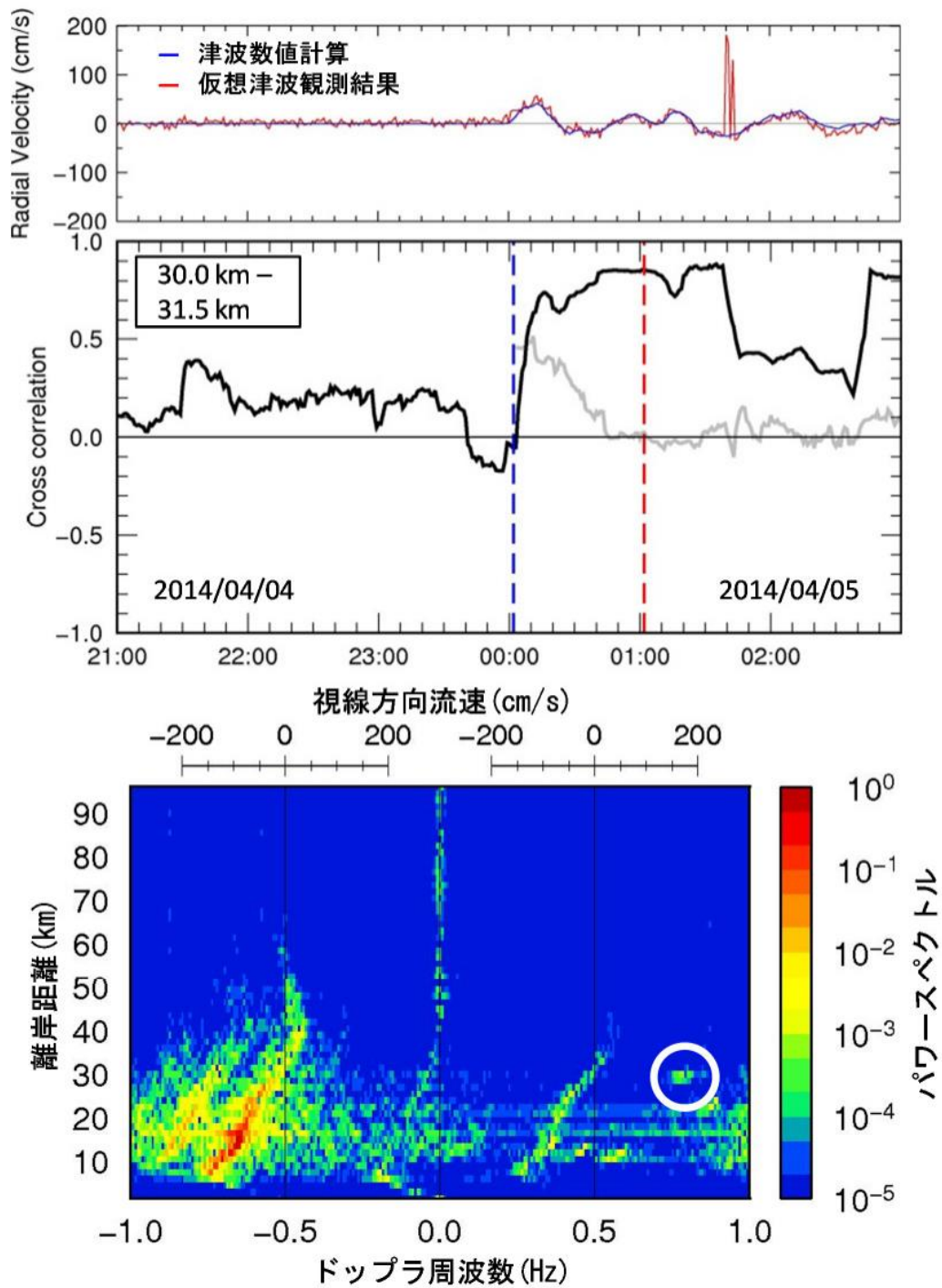


図-2.27 船舶ノイズが視線方向流速および相関係数に与える影響. 上：離岸距離 30.0 km での視線方向流速の時系列. 中：相関係数の時間変化. 下：2014/04/05 01:41 のドップラスペクトル（白丸：航行船舶の反射波）.

参考文献

Hinata, H., Fujii, S., Furukawa, K., Kataoka, T., Miyata, M., Kobayashi, T., Mizutani, M., Kokai, T. and Kanatsu, N.(2011): Propagating tsunami wave and subsequent resonant re, pponse signals detected by HF radar in the Kii

Channel, Japan, Estuar. Coast. Shelf Sci., 95(1), pp.268-273

藤良太郎, 日向博文, 藤井智史, 高橋智幸 (2013): 海洋レーダを利用したインバージョンに対するレーダ観測時間の影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I\_436 C\_440

内閣府 (2011): 南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第一次報告)

Gurgel, K. W., Dzvonkovskaya, A., Pohlmann, T., Schlick, T. and Gill E.(2011): Simulation and detection of tsunami signatures in ocean surface currents measured by HF radar, Ocean Dynamics, 61(10), pp.1495-1507

## 2.6 短波海洋レーダによる観測に影響を与えるノイズ除去技術の開発

### (1) ノイズ除去技術の開発

数十分から数時間程度の周期を持つ津波を海洋レーダで検知するためには, 数分間の A/D データのサンプリングからドップラースペクトルを計算しなければならない. 数分間のサンプリングデータからドップラースペクトルを計算することでノイズに対するシグナルの比 (S/N 比) が低下するため, 海洋レーダで津波を検知する上で, ノイズを軽減して S/N 比を高めることが極めて重要である.

そこで, 津波襲来時にも適用可能な海洋レーダのドップラースペクトルに混入する船舶ノイズ及び航空機ノイズの除去技術を開発した.

2013年10月1日10:52における美浜局レーダの beam06 の 4.5 km 地点 (図-2.28) のドップラースペクトルに船舶ノイズ (図-2.29 (b)中の黒線), 37.5 km 地点 (図-2.28) のスペクトルに航空機ノイズ (図-2.29 (a)の黒線) が含まれていた. 航空機ノイズは正と負の全周波数領域に強い散乱強度が生じるのに対し, 船舶ノイズは正負のいずれかの周波数領域に強い散乱強度が生じる.

通常, 各観測点から受信した IQ 信号を掃引方向にフーリエ変換することで, ドップラースペクトルが計算される. 本研究では, Boisse et al. (1998)が開発した大気レーダに混入する航空機ノイズの除去手法を参考に, 各観測点からの IQ 信号にウェーブレット変換を適用することで航空機ノイズを軽減した後にドップラースペクトルを計算した. その結果, 航空機ノイズを大きく減衰させることに成功した (図-2.29 (a)中の赤線).

また, 船舶ノイズが正と負のいずれかの周波数領域に生じることから, 計算されたドップラースペクトルの正と負の周波数領域のパワーを掛け合わせたところ, 船舶ノイズも効果的に軽減できることがわかった (図-2.29 中の赤線).

### (2) 津波襲来時におけるノイズ除去技術の適用性の検証

開発したノイズ除去技術を津波レーダに実装するにあたり, 津波襲来時に適用可能かを検証する必要がある. しかしながら, 津波発生頻度が著しく低いことから, 実測に基づいて検証することは不可能に近い. そこで, 仮想津波実験手法 (2.5) を用いて, 津波数値計算結果の津波流速から仮想的に津波の IQ 信号を生成して, 海洋レーダで実測された IQ 信号との複素積をとることで, 仮想的に津波襲来時の IQ 信号を作成し, ノイズ除去技術の津波襲来時の適用性について検証した. 津波襲来時の IQ 信号の作成には, 2013年10月1日10:30に内閣府の津波断層モデル (ケース3) 地震が発生したことを想定して実施した津波数値計算結果を用いた.

図-2.30に津波発生後22分後 (同日10:52) におけるレーダ局から50 km 沖合までのドップラースペクトルのノイズ軽減前後の比較を示す. なお, 図-2.30 (b)では船舶ノイズを軽減するために, ドップラースペクトルにおける正負の周波数領域の散乱強度を重ね合わせているため, 片側 (負) の周波数領域のみに描画している. 津波の IQ 信号を合成したことで, レーダ局から5-15 km 付近に大きなドップラースhiftが生じている. beam05-09の30-45 km 付近に航空機ノイズが混入している (図-2.30 (a)) が, ノイズ除去技術を適用することで効果的に軽減できていることが分かる. また, ノイズ軽減前に点在していた船舶ノイズ (例えば, beam06の4.5 km (図-2.29 (b)参照)) も軽減され, 津波によるドップラースhiftがより鮮明になっている.



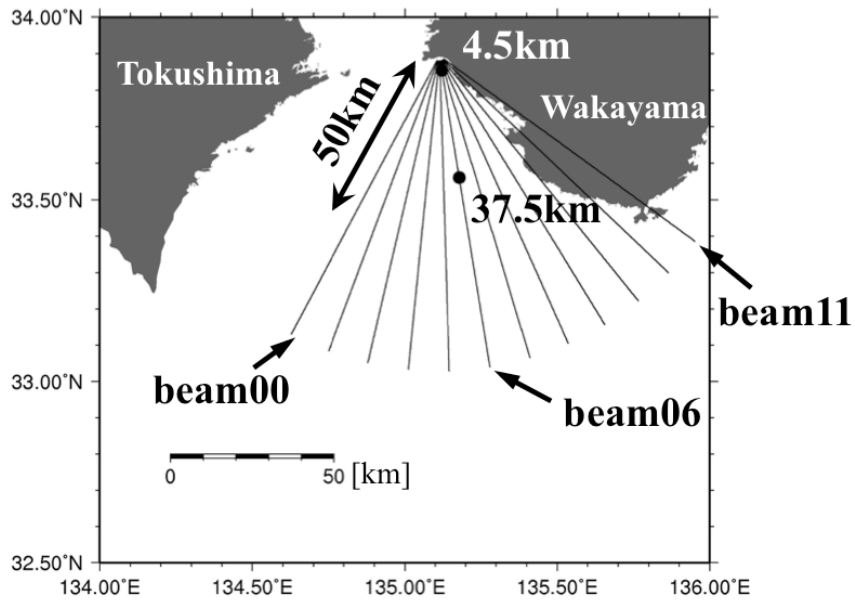


図-2.28 和歌山における海洋レーダのカバー範囲

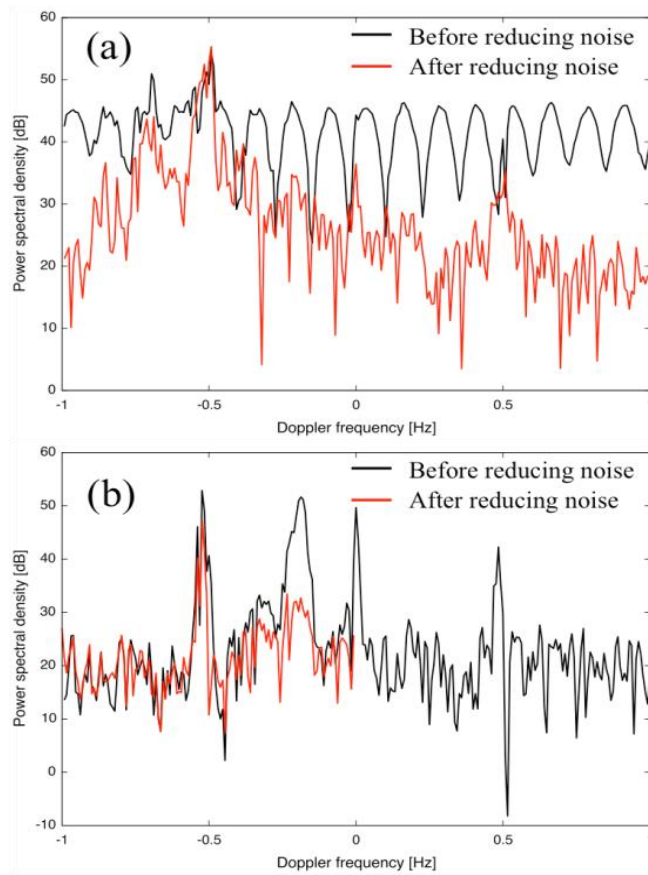


図-2.29 航空機(a)と船舶(b)のノイズを含む／を除去したドップラースペクトル

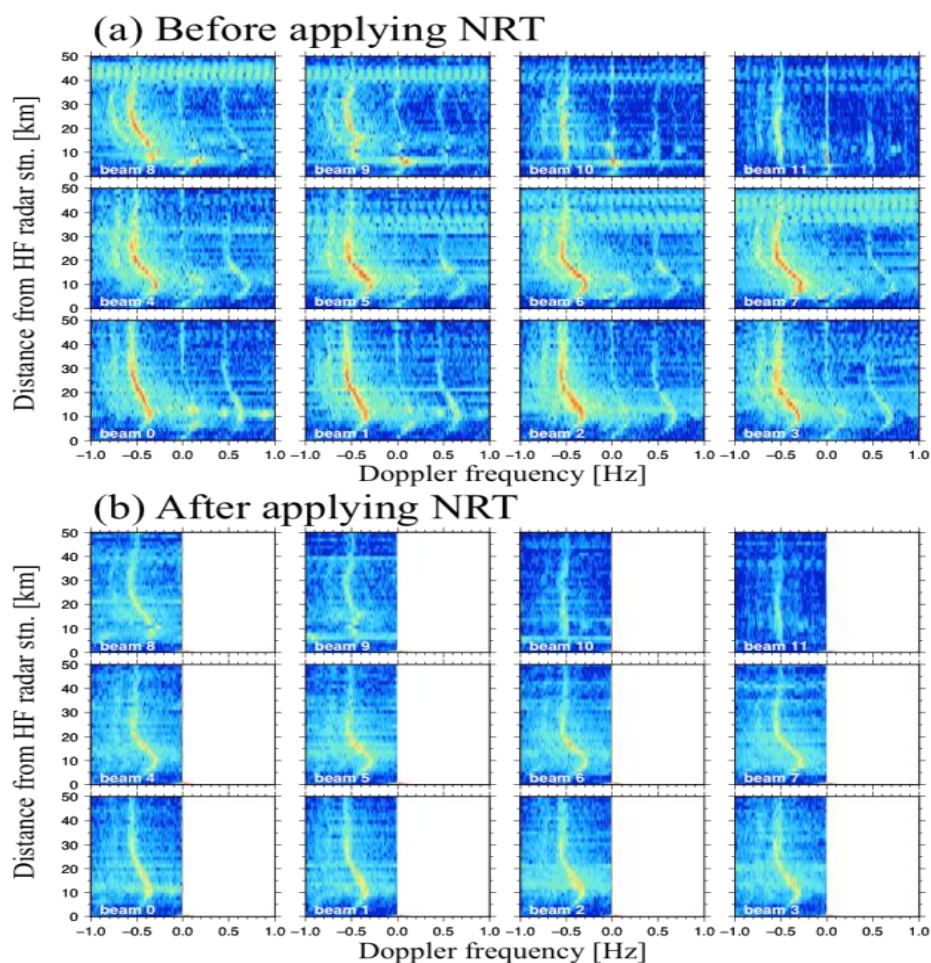


図-2.30 仮想津波信号によるドップラースペクトル

#### 参考文献

- Hinata et al(2011): Propagating tsunami wave and subsequent resonant response signals detected by HF radar in the Kii Channel, Japan, *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 95(1), pp268-273
- Boisse, J. C., Klaus, V. and Aubagnac, J. P.(1998): A wavelet transform technique for removing airplane echoes from ST radar signals, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 16, 334-346
- Gurgel, K. W., Dzvonkovskaya, A., Pohlmann, T., Schlick, T. and Gill, E.(2011): Simulation and detection of tsunami signatures in ocean surface currents measured by HF radar, *Ocean Dynamics*, 61(10), pp1495-1507
- 藤良太郎, 日向博文, 藤井智史, 永松宏, 小笠原勇, 伊藤浩之, 片岡智哉, 高橋智幸 (2015): 仮想津波観測実験に基づく海洋レーダ津波検知距離の検討, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*
- 内閣府 (2012): 南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告)



### 3. 津波避難シミュレーションの改良・活用

#### 3.1 2011年東北地方太平洋沖地震津波の際の避難状況に対する津波避難シミュレーションの適合性

##### (1) 研究の目的

2011年東北地方太平洋沖地震により18,564人の死者・行方不明者が発生し（警察庁<sup>1)</sup>、死因の約9割は溺死であった（同<sup>2)</sup>）。こうした被害を踏まえ、中央防災会議<sup>3)</sup>は、想定される最大クラスの津波に対し「住民等の避難を軸に（中略）総合的な津波対策」が必要であると指摘している。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、自治体、施設管理者等に対して津波避難の安全性を向上する努力が求められている。

適切な対策を計画・実施するためには、対策に伴う効果の評価が必要である。例えば、避難ビルの整備に伴う避難所要時間短縮の効果、防波堤の整備に伴う浸水遅延の効果、避難完了時間を早める施策実施に伴うリスク低減の効果等の評価が考えられる。前者二つは「構造物の整備」、後者は「避難行動の質的变化」が避難安全性に及ぼす効果をそれぞれ評価していると言える。それらの定量的な評価を行う手法の一つとして、津波避難シミュレーションを用いることが考えられる。

ここでは、避難シミュレーションに関する既往の研究のうち主要なものについて、避難開始時間の推定モデル、避難経路の選択モデル及び避難者の歩行モデルという観点で整理して示す。

永川・今村<sup>4)</sup>は、過去の津波避難行動のアンケート結果を統計的に処理することにより、災害情報の伝達経路・種類、地震の発生時間・大きさ、居住場所及び津波経験をパラメータとして避難開始時間を推定する手法を提案している。ただし、属性が同一の地域には一律の値を与える手法であり、避難行動の個人差は考慮されていない。それに対し武田ら<sup>5)</sup>及び早川・今村<sup>6)</sup>は、避難行動の個人差を考慮した手法を研究している。井料ら<sup>7)</sup>は感染症の拡散モデルを参考に避難開始時間をマクロ的に推定する数理モデルを提案している。

竹内・近藤<sup>8)</sup>は、避難者の現在地と海岸の位置関係を基準に避難場所の安全性を判定したうえで、最短直線距離の避難場所を選択する手法を提案している。行木ら<sup>9)</sup>は最短経路検索に加えて避難上のリスクを考慮した経路検索手法について提案し、大江ら<sup>10)</sup>は、線形計画法の一種であるp-メディアン問題（総避難距離最小化問題）モデルを、収容可能人数の制約がある条件付きの避難経路の選択モデルとして適用することを提案している。

歩行速度に影響を及ぼす要因は、年齢、同行者の有無、混雑、逃げ惑い、自動車との交錯、階段などの障害物、疲労等である。最も単純な手法は歩行速度として一定速度を与えるもので、例えば「津波避難ビル等に係るガイドライン」<sup>11)</sup>は避難可能な範囲を推定するための歩行速度の目安として1 m/sの値を示している。歩行速度を変化させたり、避難者同士や周辺環境からの情報取得による行動変化等の比較的複雑な避難者の行動を表現したりするために、マルチエージェントシミュレーション<sup>12)</sup>、個別要素法<sup>13)</sup>、ポテンシャルモデル<sup>14)</sup>、セルオートマトン法<sup>15)</sup>等が用いられている。

ただし、これらの避難シミュレーション結果と実際の避難行動とを比較して再現性の検証を行ったものはこれまでほとんど無く、再現性の検証が課題である。2011年東北地方太平洋沖地震津波については避難行動のアンケートが実施されており、実際の避難行動を比較的詳細に把握できる。そこで、同津波の避難行動について津波避難シミュレーションを行い、その結果と実際の避難行動とを比較することにより再現性を検証することとした。

そこで本項では、2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動について津波避難シミュレーションを行い、その結果と実際の避難行動とを比較することによりシミュレーションの再現性を検証することを目的とする。

##### (2) 東北地方太平洋沖地震津波の避難行動

国土交通省都市局<sup>16)</sup>は、東北地方太平洋沖地震の津波浸水域をリアス式海岸沿岸部（石巻市牡鹿半島以北）と平野部（石巻市平野部以南）との2つに大きく区分して避難状況を整理している。本研究はこの考え方を参考にして、リアス式海岸沿岸部の典型例として、岩手県釜石市中心部のうち甲子川左岸の地

域を抽出した（図-3.1）。

対象地域の大きさは、東西約2.5km、南北約1.5kmの範囲である。対象地域の南側は東西方向に河川が流れるとともに、東側と西側は街並みが途切れそれよりも外側の地区とは離れている。従って、この対象地域は概ね避難行動が均質と考えた。具体的には、海または河川に面した市街地から、標高の比較的高い山のふもとに向かって、概ね一様に北方向へむかう避難行動が生じると予想した。

上述の対象地域を設定した理由を述べる。一般に、行動様式が大きく異なる複数の避難者群が含まれている場合に、それぞれの避難者群の行動結果が重なって一つの結果として現れたものに対する確かな分析を加えることは難しいと考えられる。そこで、避難行動がある程度均質な地域を抽出するよう意図して設定した。

なお、今回の検討ではリアス式海岸沿岸部が対象であり、平野部の避難行動は検討の対象外である。また、徒歩避難者が対象であり、徒歩以外の車、バイク、自転車等による避難行動は検討の対象外である。さらに、生存者へのアンケート結果をもとに避難行動の再現性の検討を行っているため、釜石市全体で死者・行方不明者が1,040人発生したが<sup>17)</sup>（同市の2010年時点の人口39,574人<sup>18)</sup>に対して約3%）そうした不幸にも亡くなったり行方不明となったりした方々の行動は十分な情報がないため考慮されていない。こうした点は留意が必要である。

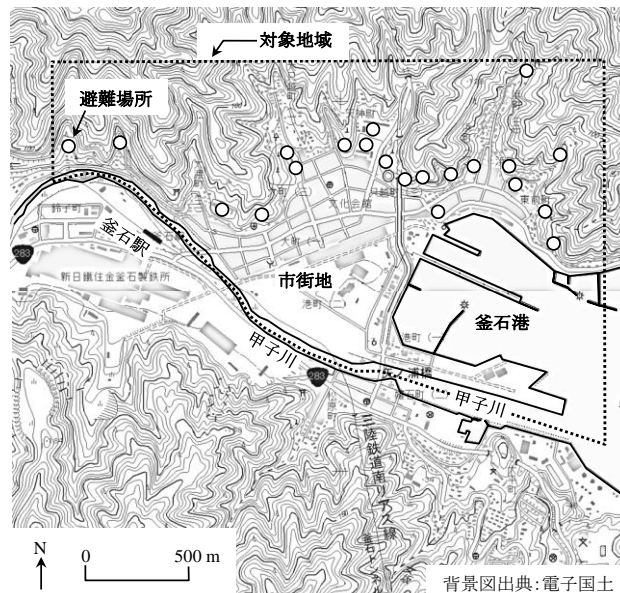


図-3.1 対象地域

2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動について、釜石市では、国土交通省東北地方整備局釜石港湾事務所と釜石市による「津波避難実態アンケート」（以下、釜石港湾事務所・釜石市アンケートという。）<sup>19)</sup>、国土交通省都市局による「津波からの避難実態調査」（以下、国土交通省都市局アンケートという。）<sup>16)</sup>、NPO法人環境防災総合政策研究機構と東洋大学による「津波に関するアンケート」<sup>20)</sup>及び群馬大学と釜石市によるアンケート<sup>21)</sup>という4種類のアンケートが実施されている。このうち、アンケート結果の個票を入手することが出来た釜石港湾事務所・釜石市アンケート及び国土交通省都市局アンケート（釜石市に関する部分のみ）の分析を行った。

#### 1) 釜石港湾事務所・釜石市アンケート<sup>19)</sup>

アンケートの実施時期は2011年5月～6月で、市中心部の公共施設への来訪者、避難場所への避難者、企業の従業員等の431人から回答を回収している。

アンケート回答結果により地震発生時に(2)の対象地域に所在していた178人のうち、徒歩避難を行った122人を抽出した。178人に対する割合、すなわち徒歩避難率は68.5%である。また、対象地域の昼間人口4,700人に対する122人の割合は約2.6%である。

表-3.1の第2列に、この徒歩避難者122人に関する整理結果を示す。「65歳以上比率」（65歳以上の回答者の比率）及び「グループ歩行比率」（2人以上で避難した回答者の比率）はそれぞれ18.0%、84.8%となった。この二つの指標は、後述するシミュレーションにおいて避難者の歩行速度の初期値を与える際に利用している。なお、2010年の国勢調査によれば同市の65歳以上比率は、釜石市全体の値であるが、約34.8%となっている。

徒歩避難者の地震発生から避難開始までの時間は平均14.3分であった。避難所要時間（避難開始から避難場所に到着するまでの時間）は平均6.1分となった。

図-3.2に破線で、避難所要時間と避難完了者比率との関係を示す。ここで、避難完了者比率とは、徒歩避難者の全体人数に対する、当該時間までに避難を完了した人数の比率である。避難完了者比率が0とは避難完了者がいない状態、1とは全員が避難完了した状態を示す。避難所要時間10分程度まで避難完了者比率の勾配は比較的大きく、その後は緩やかになっている。避難完了者が5割を超えるのは避難所要時間5分の時点、避難完了者が8割を超えるのは同10分の時点である。

## 2) 国土交通省都市局アンケート（釜石市分）<sup>16)</sup>

アンケートの実施時期は2011年9月～12月で、青森県から千葉県までの太平洋側に位置する49市町村の10,603人から回答を回収している。

ここでは、国土交通省都市局アンケートのうち入手することができた釜石市の297人の回答結果を使用する。このなかで、避難経路の情報があって地震発生時に対象地域に所在していたことが分かる35人のうち、徒歩避難を行った24人を抽出した。35人に対する24人の割合、すなわち徒歩避難率は68.6%である。また、対象地域の昼間人口4,700人（推定方法は3.1(3)で述べる。）に対する24人の割合は約0.51%である。

表-3.1の第3列に、この徒歩避難者24人に関する整理結果を示す。「65歳以上比率」及び「グループ歩行比率」はそれぞれ52.1%、66.7%となった。釜石港湾事務所・釜石市アンケート1)と国土交通省都市局アンケート2)とを比較すると、2)に比べ1)は65歳以上比率が小さく青壮年層が回答者の多くを占めていることが分かる。

徒歩避難者の地震発生から避難開始までの時間は平均10.8分であった。また、2)の調査では避難経路の詳細な情報がGISデータとして得られているため、それをもとに徒歩避難者の避難距離の平均値及び避難速度（総避難距離を総避難所要時間で除した値）を求めると、それぞれ393 m、0.54 m/sとなった。避難所要時間は平均12.2分となった。

表-3.1 アンケートの対象と整理結果

	釜石港湾事務所・ 釜石市アンケート	国土交通省都市局 アンケート
全体の人数	431人	10,603人
分析対象(A)	178人	35人
徒歩避難者(B)	122人	24人
徒歩避難率(B/A)	68.5%	68.6%
実施時期	2011年5～6月	2011年9～12月
65歳以上比率	18.0%	52.1% <sup>*1</sup>
グループ歩行比率	84.8% <sup>*2</sup>	66.7%
避難開始時間	14.3分後 <sup>*3</sup>	10.8分後
徒歩避難者の避難距離	-	393 m <sup>*4</sup>
徒歩避難速度	-	0.54 m/s <sup>*4</sup>
徒歩避難所要時間	6.1分 <sup>*5</sup>	12.2分 <sup>*4</sup>

\*1 アンケート票選択枝が10歳刻みのため、「60代」の回答のうち半数を65歳以上と仮定。

\*2 不明の40人を除く。 \*3 逃げ遅れ・不明の8人を除く

\*4 24人から到着時刻不明の2人を除いた22人の平均値。

\*5 不明(3名)を除くとともに、地震発生から大規模な浸水が発生するまでの時間が約45分程度であることを考慮して60分超(4名)を除いた。

図-3.2 に一点鎖線で、避難所要時間と避難完了者比率との関係を示す。1)に比べ2)は全体に避難所要時間が長くなっている。避難完了者が5割を超えるのは避難所要時間10分の時点、8割を超えるのは同20分の時点である。

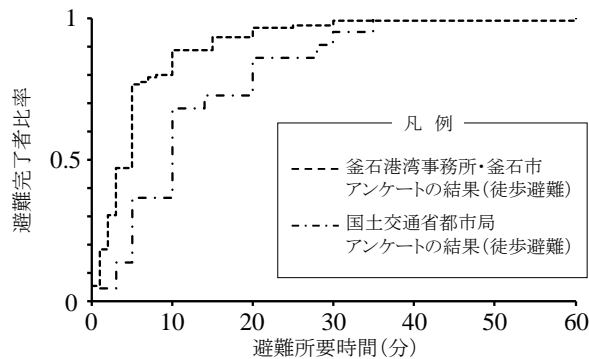


図-3.2 避難所要時間と避難完了者比率の関係

### (3) 津波避難シミュレーション

国土技術政策総合研究所沿岸防災研究室が開発している津波避難シミュレーションシステムであるNILIM-TES Ver. 2.2を用い徒歩避難者のシミュレーションを行った<sup>22)</sup>。同システムは、避難開始時間が任意に設定でき(今回は単純に一斉に避難開始するとした)、避難経路の選択モデルは避難場所の収容可能人数制約付きの最短経路検索を用い、また、避難者の歩行モデルは道路リンク上の避難者密度を考慮して歩行速度が変化することにより避難者が相互に影響を及ぼすことを表現しているという特長を有する。

図-3.3に、同システムのプログラムのフローを示す。プログラムでは、まず建物・街路ネットワークデータ等のデータを読み込み、条件設定ファイルの読み込みを行う。次に、避難場所・経路を避難者ごとに与えるため、汎用的な線形計画問題ソルバーであるLINGO Ver.13 (LINDO Systems Inc.) の入力形式に則った入力ファイルを作成する。このファイルをLINGOに投入し経路の解を得る。避難者を出発地点に配置し、各避難者についてそれぞれ避難経路上の1s後の空間的位置を計算する。街路の群集密度を計算し、歩行速度を修正したあと、交差点を通過していればロスタイムを付与する。避難完了するまで空間的位置を計算する手順以降をループ状に繰り返し、避難完了するまでの避難所要時間を算出・出力する。

対象地域は(2)で述べたリアス式海岸沿岸部の地域で、避難者として約4,700人を分散して配置した。

避難経路選択は、収容可能人数の制約がある条件付きで最寄りの避難場所への最短経路を選択するモデル(条件付きp-メディアン問題モデル)を用いた。

歩行速度は、65歳以上単独歩行、65歳未満単独歩行及びグループ歩行という3区分を設定し、既往の文献<sup>23)</sup>で示されている値を初期値として避難者ごとに与えた。その際、(2)のアンケート結果より得た「高齢者比率」及び「グループ歩行比率」をそれぞれ満たすようにした。

避難開始時刻は一律とし、一斉に避難開始させた。混雑を考慮するため、群集密度と歩行速度の関係をモデル化した。Older<sup>24)</sup>によれば、群集密度が0.5人/m<sup>2</sup>程度までは歩行速度は他者の影響を受けないようである。また、群集密度が3.0人/m<sup>2</sup>程度を超えると、歩行速度は0.2m/s程度と考えてよいようである。そこでOlder<sup>24)</sup>を参考に、群集密度が0.5人/m<sup>2</sup>未満及び3.0人/m<sup>2</sup>以上は歩行速度がそれぞれ自由歩行速度及び0.2m/sで一定、また、群集密度0.5人/m<sup>2</sup>以上3.0人/m<sup>2</sup>未満は、群集密度が大きくなると歩行速度が直線的に低下するモデルである式(3.1)を提案する。

$$\left. \begin{aligned}
 v &= v_0 & (d < 0.5 \text{ 人/m}^2) \\
 v &= v_0 - (v_0 - 0.2)(d - 0.5) / 2.5 & (0.5 \leq d < 3.0 \text{ 人/m}^2) \\
 v &= 0.2 & (3.0 \text{ 人/m}^2 \leq d)
 \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

ここで、 $v$ ：歩行速度 (m/s)、 $v_0$ ：自由歩行速度 (m/s) 及び $d$ ：群集密度 (人/m<sup>2</sup>) である。また自由歩行速度 $v_0$ を65歳以上単独歩行、65歳未満単独歩行及びグループ歩行の3区分についてそれぞれ0.96 m/s、1.19 m/s及び1.13 m/sとした場合の群集密度と歩行速度の関係を示す (図-3.4)。このように、避難者をグループ歩行の有無及び年齢の属性で区分し歩行速度の初期値を与え、群衆密度と歩行速度との関係を定式化したモデルを採用していることは、今回のシミュレーションで用いたNILIM-TES Ver. 2.2の特徴の一つである。

初期位置から避難経路上を避難場所まで向かう避難者の空間的位置は時間ステップ1秒で計算し、各時刻における街路の群集密度を求めた。その際、駐車車両、植栽等を考慮し、標準的な車の幅である1.5 mを街路幅員よりまず差し引いてから、群衆密度を算定した。群集密度が得られたのち、式(3.1)より算定した歩行速度を与えて次の時刻の空間的位置を求めるという手順で、全ての避難者が避難場所に到達するまで計算した。

逃げ惑い、自動車との交錯及び障害物の発生を考慮するため、避難者が交差点を通過するごとに5秒のロスタイムを与えた。ただし、この5秒という値は根拠となる適切な数値が無いため、暫定的に与えたものである。また、疲労の及ぼす影響については、今回の検討では単純化のため考慮していない。

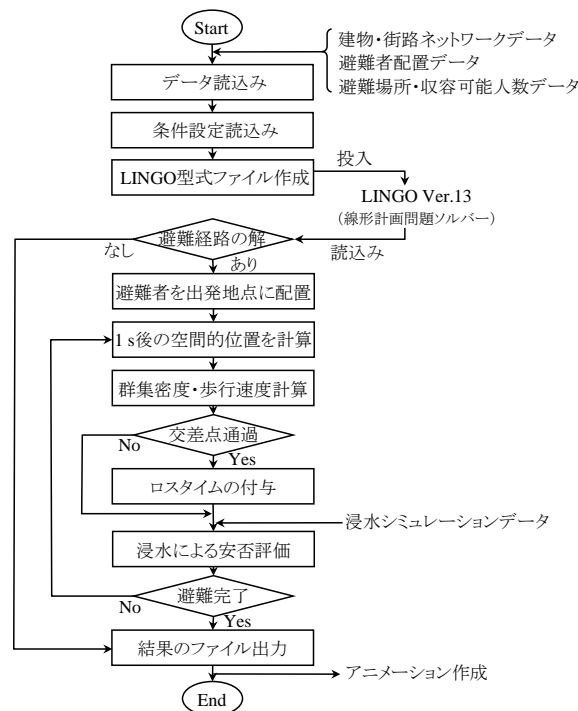


図-3.3 プログラムのフロー

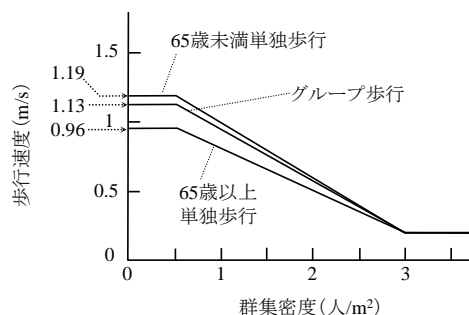


図-3.4 群集密度と歩行速度

ここで、建物・街路ネットワークデータ、避難者配置データ、避難場所・収容可能人数データ及び浸水シミュレーション結果のデータが必要である。以下にその内容を示す。

#### 1) 建物・街路ネットワークデータ

建物・街路ネットワークデータは、建物（平面的な中心位置）、交差点、街路の変曲点、接道点（建物が街路に接続する点）等の平面位置座標を含むデータと、交差点と交差点、建物と接道点等の間の接続関係を表現する街路データから構成される。データは、住宅地図（株式会社ゼンリン、平成22年版）を参考として、汎用的なGISソフトウェアであるArcGIS for Desktop Basic Ver. 10.1（ESRIジャパン株式会社）を用いて建物、交差点、街路の変曲点、接道点等をPC画面上でプロットすることによりそれぞれの位置座標をデータ化して作成した。街路の幅員は、対象地域の平均的な幅員を考慮して一律に6 mとした。さらに、建物、各点の接続関係も入力する。

作成された建物・街路ネットワークデータにおいて、建物数は2,711、街路数は1,094であった。

#### 2) 避難者配置データ

各建物を出発地点として避難者を配置した。地震発生は平日午後の就労時間であったことから、昼間人口を配置する必要がある。そこで、まず対象地域の常住人口を推定したあと、昼間人口を推定した。

2005年度国勢調査100mメッシュデータ（株式会社JPS）をArcGIS for Desktop Basic Ver. 10.1（ESRIジャパン株式会社）を用いて読み込み、対象地域に含まれるメッシュの人口を集計すると、常住人口は4,867人となった。これは2005年度時点の値なので、地震の発生時に近い時点（直近の国勢調査が行われた2010年度）の値に補正する。釜石市全体の人口は2005年に42,987人、2010年に39,574人であり<sup>18)</sup>、同じ時期に市全体の人口と対象地域の人口とが同じ比率で変化したと仮定して、2010年時点の対象地域の常住人口を4,481人と推定した。

総務省<sup>25)</sup>による2010年時点の釜石市全体の常住人口（39,574人）と昼間人口（41,514人）との比を用いて、対象とした地域の昼間人口を約4,700人と推定した。これが、対象とした地域に配置したい総人口である。

約4,700人を各建物に配置する方法を述べる。まず、建物種別を住宅と大規模建物に区分する。地震発生時の在宅状況を調査した中央防災会議の調査結果<sup>26)</sup>によると、岩手県では1～2名が在宅していた場合が72%を占めていて、不在は約1割と少ない（図-3.5）。そこで、住宅には1名または2名を配置した。平均1.5人/棟となるよう、各住宅に割り振ったIDが偶数の建物に1名、奇数の建物に2名を配置した。

つぎに、配置したい総人口（4,700人）から住宅に配置した人数を差し引いて、大規模建物にいる人の総数を算出した。ここで、大規模建物とはホテル、大規模な工場、市役所（関連施設含む）、合同庁舎、郵便局（本局）、学校（幼稚園・保育園を含む）、総合病院及び魚市場である。大規模建物1棟あたりの人数については参考となる適切なデータ（平日昼間に大規模建物に所在する平均的な人数に関する情報）が無かった。そこで、4,700人から住宅に配置した人数を差し引いた、先に述べた値を大規模建物の数で割り、5人単位で切り上げをすることにより、1棟あたり25名と推定した。

以上のようにすると、対象地域に配置した人口の総数は4,715名となった。

#### 3) 避難場所・収容可能人数データ

避難場所は、地震発生前に市が指定していた21箇所とした。平成24年10月25日～26日に、収容可能人数を推定するための現地調査を行った。調査では避難場所の面積を測定し、内閣府<sup>11)</sup>の示す値である1 m<sup>2</sup>あたり一人として収容可能人数を算定し、50人単位で切り上げて与えた。その結果、各避難場所の収容可能人数が得られた。1箇所あたりの収容可能人数は100～1,000人の範囲で、21箇所の合計値は10,050人であった。

#### 4) 浸水シミュレーション結果のデータ

浸水による安否評価を行う際に必要である。ただし、今回の検討では浸水による安否評価は行わず、避難開始から避難場所に到着するまでの避難行動の再現性に着目して検討を行ったため、このデータは利用していない。

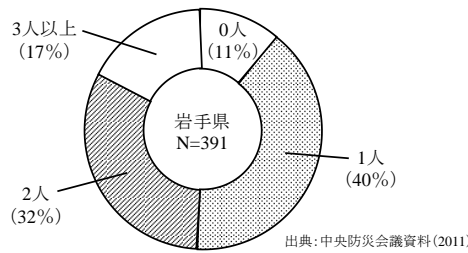


図-3.5 地震発生時に自宅にいた人数<sup>24)</sup>

(2)の二つのアンケート調査結果によると、グループ歩行比率はそれぞれ84.8%、66.7%であった。そこで平均値である76%をグループ歩行比率とした。

次に、歩行速度は「65才以上の年齢から急に遅くなっていく傾向がある」など、65歳を境界とした歩行速度の変化に関する既往の研究<sup>27)</sup>があることから、65歳以上と65歳未満とに区分した。前出のアンケート調査結果によると、65歳以上比率はそれぞれ18.0%、52.1%であった。そこで平均値である35%を65歳以上比率とした。

これをふまえ、避難者のうち76%はグループ歩行として歩行速度の初期値を1.13 m/sとした。残りの24%は65歳以上単独歩行(8%)と65歳未満単独歩行(16%)に割り振り、それぞれ歩行速度を0.96 m/s、1.19 m/sとした。それぞれ設定した歩行速度は既往の研究<sup>23)</sup>によっている。避難者への割り振り方法は、各避難者に無作為に生成した乱数を与え、上述の「グループ歩行」、「65歳以上単独歩行」及び「65歳未満単独歩行」のそれぞれの構成比を満たすように与えた。

なお、表-3.1で徒歩避難者の平均速度を示したが、シミュレーションでこの値は用いていない。この値には調査地の地理的条件が及ぼす影響等が含まれており、そのまま汎用的に適用するには問題が生じる可能性があると考えたためである。それに対し、年齢と歩行速度の関係、グループまたは単独で歩く際の歩行速度は、人間の特性として普遍的と考えられるのでシミュレーションにおいて採用した。シミュレーションの汎用性を高めるために、混雑、逃げ惑い、障害物、疲労等を考慮する必要がある場合は別途モデル化することとしたものである。

計算に用いたPCのプロセッサはIntel Core i7-950 (3.06GHz, 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Visual C# 2010 with Visual Studio 2010及びIntel Visual Fortran Composer XE 2013 SP1を併用した。図-3.3のフローの中で処理時間が最大なのは避難経路の解を得るプロセスであり、避難場所数が21箇所の場合、同プロセスの処理時間は167秒であった。

図-3.6に、シミュレーションより得られた避難所要時間と避難完了者比率との関係を、実際の避難行動のアンケート結果に重ねて示す。アンケート結果は、いずれも図-3.2に示したものの再掲である。シミュレーションで得られた避難完了者の時間的増加を示す曲線は、二つのアンケートのうち対象者に青壮年が占める割合が大きい釜石港湾事務所・釜石市アンケートの結果と概ね近い形状となった。ただし、避難所要時間が10分を超えるような比較的長い距離を避難する部分は、十分に再現できていない。アンケート結果を参考に、長距離を避難する行動の例を挙げると、出発地から直接避難場所に向かわず、数か所を経由してから避難場所に到着した事例があった。また、地震発生時は自宅外に所在していて、いったん自宅に戻ってから避難場所に向かった事例があった。こうした必ずしも最短経路によらない行動はモデル化できていないので、比較的長い距離を避難する部分が十分に再現できていない理由のひとつと考えられる。

以上のように、長距離を避難する行動など再現できていない部分はあるものの、リアス式海岸沿岸部の徒歩避難者の避難行動に津波避難シミュレーションをある程度適用できることが分かった。

図-3.7に、シミュレーションの結果による、避難場所ごとの避難者数、及び、収容可能人数に対する避難者数の比率を示す。それによると、収容可能人数に対する比率は0.08~1.00の範囲である。また、比率



が1.00である，すなわち収容可能人数に達して飽和していたのは21箇所のうち7箇所である．超過した避難者は，最短ではない場所を選択する．このように，初期条件として与えた収容可能人数の値が，計算結果に影響している結果となった．避難場所で実際に収容した人数のデータは筆者は未入手で実態との比較は出来ていない．ただし，国土交通省都市局アンケート<sup>16)</sup>にはアンケート項目の一つとして「当日，津波から最初に避難した場所の立地や設備面で問題と感じたことはありますか。」という問いがあり，対象地域も含めた釜石市全体の回答結果ではあるものの，それに対する回答として「人で溢れて，入りきれなかった」という選択肢を回答者の約7%が選択していた．従って，収容可能人数に達して飽和していた現象がある程度は発生していたと考えている．

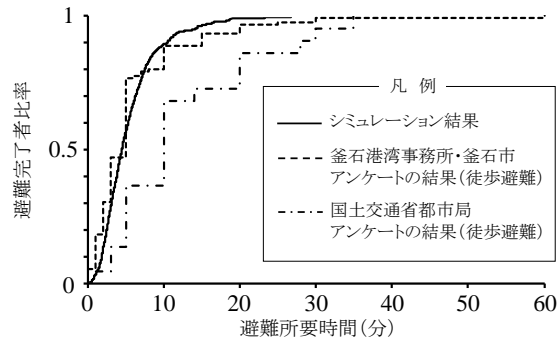


図-3.6 シミュレーション結果と実際の避難行動の比較

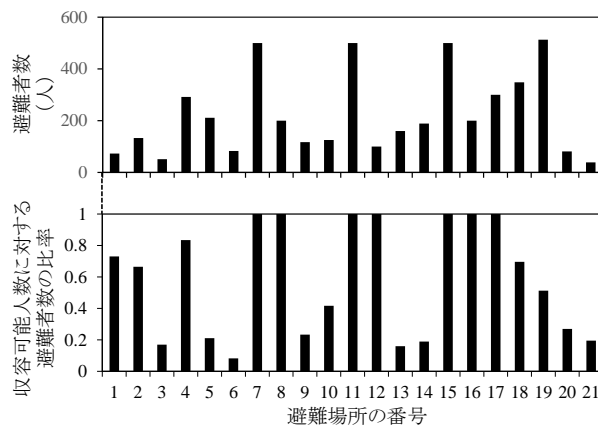


図-3.7 避難者数と収容可能人数に対する比率（計算結果）

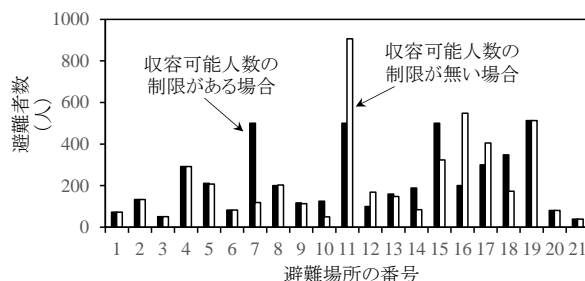


図-3.8 収容可能人数の制限が無い場合との避難者数の比較

図-3.8は，仮に収容可能人数の制限がある場合と無い場合とについてそれぞれ，避難者数の計算結果を比較したものである．制限がある場合に比較して，無い場合は5箇所で避難者数が増加している．

地震発生直後の緊急時には，通常に想定している人数を超過して過密な状態になる現象が発生する可

能性もあり、今回のシミュレーションで採用した内閣府<sup>11)</sup>の1m<sup>2</sup>あたり一人という収容可能人数については、今後の検討が必要である。

設定した条件がシミュレーション結果に及ぼす影響を分析するためパラメトリックスタディを行った。

表-3.2に、パラメトリックスタディのために設定した条件を示す。ケース0は、既述のケースである（以下、「基準ケース」と呼ぶ。）。ケース1及び2は、釜石港湾事務所・釜石市アンケート及び国土交通省都市局アンケートで得られた値をそのまま用い、それぞれ計算したものである。具体的な数値は、同表に記載した。ケース3及び4は、歩行速度がシミュレーション結果に与える影響を検討するため、「津波避難ビル等に係るガイドライン」<sup>14)</sup>が目安として示す1.00 m/sのケースと、文献値（付録の表を参照）のなかから各区分（65歳以上単独歩行、65歳未満単独歩行及びグループ歩行）で最も遅い速度を抽出して与えたものである。また、ケース5及び6は、交差点でのロスタイムなしとした場合と、交差点1箇所あたり10 sとした場合である。

図-3.9に、ケース0、1及び2のシミュレーション結果を示す。同図で示しているとおおり、3つのケースの結果はほぼ重なっており、このパラメトリックスタディで設定した数値の範囲内においては、65歳以上比率、グループ歩行比率を変化させたことによる影響は非常に小さい結果となった。なお、各ケースの計算結果の相違は非常に小さく、ほぼ重なっている状態であるが、ケース1はケース0に対してほぼ同じ線を描く一方、ケース2はケース0に対してわずかに下側になっている部分がある。65歳以上比率、グループ歩行速度の両パラメータが影響を及ぼしにくい原因については、図-3.4において設定した歩行速度の違いが比較的小さいこと、また、例えばケース0とケース1とを比較すると、ケース1はケース0に比べてグループ歩行比率が増加してグループ歩行する（やや遅い）人の比率が増えたものの同時に65歳以上の（最も遅い）人の比率も減少したので結果的に大きな違いとならなかったことが考えられるが、それぞれのパラメータが単体で及ぼす影響等についての詳細な検討は今後の課題である。

図-3.10に、ケース0、3及び4のシミュレーション結果を示す。ケース0のシミュレーション結果より描かれる曲線に対して、ケース4の結果は全体として右側に位置しており、歩行速度を65歳未満単独歩行及びグループ歩行の2区分で遅くしたことの影響が表れている。ケース3の結果は、ケース0とケース4との間に位置している。

図-3.11に、ケース0、5及び6のシミュレーション結果を示す。交差点でのロスタイムなしとしたケース5は、1箇所あたり5 sとしたケース0の曲線に対して全体として左側に位置している。また、1箇所あたり10 sとしたケース6は、ケース0よりも全体として右側に位置している。

以上のパラメトリックスタディでは、基準ケースであるケース0に対し、ケース1～6のシミュレーション結果はある程度のずれが生じるものの、いずれも青壮年が占める割合が大きい釜石港湾事務所・釜石市アンケートの結果に比較的近い形状となった。

表-3.2 パラメトリックスタディで設定した条件

ケース No.	65歳以上比率	グループ歩行比率	単独歩行速度・65歳以上 (m/s)	単独歩行速度・65歳未満 (m/s)	グループ歩行速度 (m/s)	交差点でのロスタイム (s)	備考	参照先
0	0.35	0.76	0.96	1.19	1.13	5	基準ケース	
1	0.18	0.85	-	-	-	-	釜石港湾事務所・釜石市アンケート <sup>19)</sup>	図-3-9
2	0.52	0.67	-	-	-	-	国土交通省都市局アンケート <sup>10)</sup>	
3	-	-	1.00	1.00	1.00	-	内閣府 <sup>11)</sup>	図-3-10
4	-	-	0.68	1.16	0.84	-	文献値のうち最も遅い値	
5	-	-	-	-	-	0	ロスタイムなしの場合	図-3-11
6	-	-	-	-	-	10	ロスタイムが大きい場合	

(注) 数値の記入されていない欄（「-」と表示してある欄）は、ケース0（基準ケース）と同じ数値を設定した。

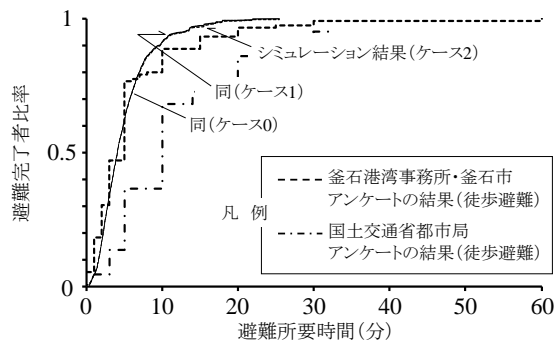


図-3.9 パラメトリックスタディ (ケース 0, 1, 2)

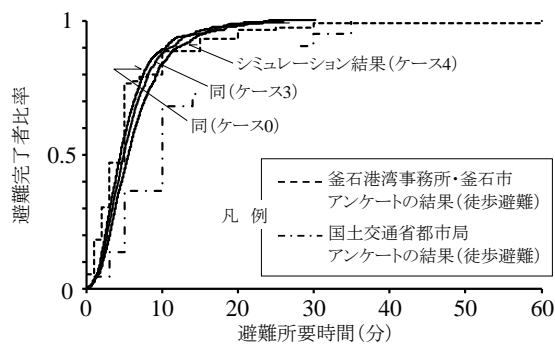


図-3.10 パラメトリックスタディ (ケース 0, 3, 4)

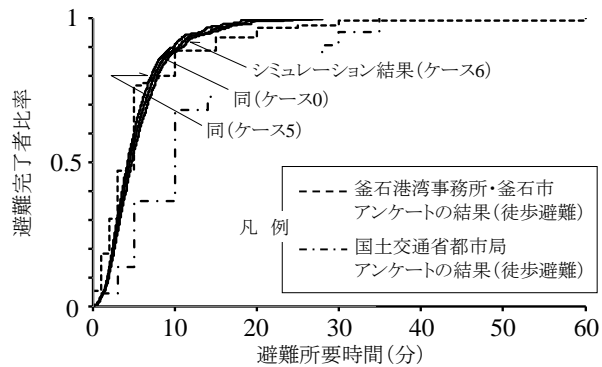


図-3.11 パラメトリックスタディ (ケース 0, 5, 6)

(4) まとめ

本項では、2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動について津波避難シミュレーションを行い、その結果と実際の避難行動とを比較することにより、シミュレーションの再現性を検証した。その結論及び今後の課題は以下のとおりである。

シミュレーションで得られた避難完了者の時間的増加を示す曲線は、二つのアンケートのうち対象者に青壮年が占める割合が大きい釜石港湾事務所・釜石市アンケートの結果と概ね近い形状となっており、高齢者・グループ歩行者の及ぼす影響の詳細な検討や、長距離を避難する行動など再現できていない部分はあるものの、リアス式海岸沿岸部の徒歩避難者の避難行動に津波避難シミュレーションをある程度適用できることが分かった。

また、シミュレーションでは避難場所の選択の結果、21箇所の避難場所のうち7箇所まで収容人数に達して飽和していたことから、最短ではない場所に避難が必要な避難者が発生しており、避難場所の収容可

能人数が計算結果に影響している結果となった。

避難経路は、条件付きで最短経路の避難場所を選択するように、「合理的な」ものとしている。しかし実際の避難行動では、出発地から数か所を経由してから避難場所に到着する等の、必ずしも最短経路によらない「不合理な」行動が生じているので、こうした行動を適切にモデル化することが課題となる。南ら<sup>28), 29)</sup>は、宮古市田老地区において昼と夜のそれぞれの住民の所在位置を詳細に調べ、また、主要な避難路の形状等を詳細に調べ避難場所について決定するような、高解像度で地域を調べて避難場所を決定していくアプローチをとっている。本研究で採用したような最適配置手法に基づいて一定のルールで避難場所を決定していく方法を含め、避難経路選択のモデル構築は、今後も試行錯誤が必要な課題である。

本項ではリアス式海岸沿岸部が対象であり、平野部の避難行動は検討の対象外である。また、徒歩避難者が対象であり、徒歩以外の車避難者等の避難行動は対象外である。国土交通省都市局の調査<sup>16)</sup>によると、リアス式海岸沿岸部に比較して平野部では、避難者全体に占める車避難者の割合が高くなっている。

平野部の避難行動のシミュレーションを実施するためには、車避難者の避難行動のモデル、長距離を避難する徒歩避難者の疲労を考慮したモデル、また、車避難と徒歩避難との混在により発生する現象の適切なモデルについて今後の検討が必要である。

歩行速度に影響を及ぼす要因は、年齢、同行者の有無、混雑、逃げ惑い、自動車との交錯、階段などの障害物、疲労等である。本研究では、年齢及び同行者の有無はそれぞれ避難速度を変化させることで考慮した。混雑は、群集密度を考慮して歩行速度を変化させることで考慮した。ただし、避難開始時間は一律としたので、今後、避難開始時間を個人差によるばらつきを考慮する必要がある。それに対し、逃げ惑い、自動車との交錯及び障害物の発生は、交差点を通過するごとに一定時間のロスタイムを与えることである程度考慮しているものの、非常に単純な仮定である。また、疲労は、本研究においてはシミュレーションの単純化のために考慮していない。この点については今後の検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 警察庁：平成 23 年東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置，広報資料，2p.，2013.4.10.
- 2) 警察庁：東日本大震災と警察，p.14，広報誌焦点，第 281 号，2012.
- 3) 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報告，44p.，2011.9.28.
- 4) 永川賢治，今村文彦：情報伝達・避難開始時間に着目した防災力評価法の提案，津波工学研究報告，東北大学工学部，第 17 号，pp.79-94，2000.
- 5) 武田誠，井上和也，戸田圭一，川池健司：高潮ハザードマップと避難に関する二・三の検討，海岸工学論文集，第 44 巻，pp.356-360，1997.
- 6) 早川哲史，今村文彦：津波発生時における避難行動開始モデルの提案とその適用，自然災害科学，日本自然災害学会，pp.51-66，2002.
- 7) 井料隆雅，辻本晋吾，天野和信：避難タイミング決定行動の数理モデルとその検証，平成 24 年度土木学会重点研究課題シンポジウム，土木学会土木計画学研究委員会・安全問題研究委員会，pp.17-20，2013.3.29.
- 8) 竹内光生，近藤光男：地震津波発生時の避難場所の選定に関する研究－須崎市を事例として－，土木計画学研究・論文集，土木学会，Vol.19，No.2，pp.297-304，2002.
- 9) 行木雅子，金光永煥，門倉博之，浦野義頼：地震災害時において周辺環境及び個人属性を考慮した避難経路の決定手法，日本災害情報学会第 9 回研究発表大会予稿集，pp.75-80，2007.
- 10) 大江悠介，山田裕通，渡邊祐二，熊谷兼太郎：津波避難施設の最適配置のための数理計画モデル生成，日本オペレーションズ・リサーチ学会 2012 年春季研究発表会アブストラクト集，pp.130-131，2012.
- 11) 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会，内閣府政策統括官（防災担当）：津波避難ビル等に係るガイドライン，68p.，2005.
- 12) 堀宗朗，犬飼洋平，小国健二，市村強：地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究，社会技術研究論文集，Vol.3，pp.138-145，2005.
- 13) 清野純史，三浦房紀，瀧本浩一：被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について，土木学会論文集，No.537/I-35，pp.233-244，1996.
- 14) 西畑剛，森屋陽一，田村保，瀧本浩一，三浦房紀：気仙沼地点における津波避難シミュレーション，海洋開発論文集，土木学会，第 21 巻，pp.163-168，2005.
- 15) 白木渡，井面仁志，有友春樹：Live Design のための参加型避難シミュレーションシステムの開発，第 61 回年

- 次学術講演会後援概要集, pp.379-380, 2006.
- 16) 国土交通省都市局:津波避難を想定した避難路, 避難施設の配置及び避難誘導について(改訂版), 79 p., 2012.
  - 17) 釜石市:復旧・復興の歩み 改訂版, p.2, 2014. 1.
  - 18) 釜石市:釜石市統計書(平成23年度版), p. 23, <http://www.city.kamaishi.iwate.jp/index.cfm/10,22134,82,html>, 2013.5.1 時点.
  - 19) 交通政策審議会港湾分科会:参考資料, 第3回防災部会, 資料2, p. 24 及び p. 30, 2011. 7. 6.
  - 20) NPO 法人環境防災総合総合政策研究機構:東北地方・太平洋沖地震, 津波に関するアンケート調査分析速報, <http://www.npo-cemi.com/works/image/2011tohoku/0507tsunamisurvey.pdf>, 2011.5.7.
  - 21) 釜石市:3.11 東日本大震災アンケート調査について, <http://www.city.kamaishi.iwate.jp/index.cfm/6,19757,34,html>, 2012.4.19.
  - 22) 熊谷兼太郎:2011 年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性, 国土技術政策総合研究所資料, No.742, 22p., 2013.
  - 23) 紙野桂人:人のうごきと街のデザイン, 彰国社, pp.128-132, 1980.
  - 24) Older, S. J.: Movement of Pedestrians on Footways in Shopping Streets, *Traffic Engineering and Control*, Vol.10, pp.160-163, 1968.
  - 25) 総務省統計局:都道府県・市区町村別昼間人口, 夜間人口, 昼夜間人口比率, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/index.htm>, 2013.5.1 時点.
  - 26) 中央防災会議:平成23年東日本大震災における避難行動等に関する面接調査(住民)単純集計結果, 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第7回会合, 参考資料1, p.131, 2011.8.16.
  - 27) ジョン・J・フルーイン(長島正充訳):歩行者の空間, 鹿島出版会, p.48, 1974.
  - 28) 南正昭, 中嶋雄介, 安藤昭, 赤谷隆一:避難経路の高低差が津波避難者に与える負荷に関する基礎的研究, 都市計画論文集, 日本都市計画学会, No.40-3, pp.685-690, 2005.
  - 29) 南正昭, 谷本真佑, 安藤昭, 赤谷隆一:住民分布を考慮した津波避難計画の支援に関する研究, 都市計画論文集, 日本都市計画学会, No.41-3, pp.695-700, 2006.
  - 30) 岡田光正, 吉田勝行, 柏原士郎, 辻正矩:建築と都市の人間工学, 鹿島出版会, pp.16-28, 1977.
  - 31) 佐藤方彦:人間工学基準数値数式便覧, 技報堂出版, pp.285-288, 1992.

### 3.2 津波避難の開始時間のモデル化

#### (1) 研究の目的

地震発生から実際に避難行動を開始するまでの経過時間である津波避難開始時間(以下、「避難開始時間」という。)は、一つの地域内でも避難者それぞれで異なる。一斉に避難を開始すると仮定した場合と比較して、避難開始時間にばらつきがある場合は、街路上の渋滞発生の変化、避難所要時間の変化等が生じシミュレーション結果に影響を与える。従って、過去に発生した津波の避難行動の再現、あるいは、今後発生すると予想される津波の避難行動を精度よく推定するためには、適切な避難開始時間を与える必要がある。

井料ら<sup>2)</sup>は、「周囲の人とのコミュニケーションや地元自治体などによる避難の勧誘」及び「災害による危機の直接体感」が避難開始に特に重要と思われると指摘している。また、筆者らは国内外の津波災害の現地調査を実施し(例えば、富田ら<sup>3)</sup>)、避難者からの聞き取りにより、地震の揺れを感じたので自発的に避難した、先に避難を開始した近隣住民に声掛けされたので避難した、津波が迫ってくるのを目撃したので避難した等のいくつかの典型的な避難開始理由によって避難行動が開始されたことを知見として得ている。

そこで、本研究では、避難開始理由によって分類したいくつかの群に基づいて避難開始時間を表現するモデルについて検討することにする。

避難開始時間を推定する既往の研究として主なものを挙げると、以下のとおりである。

永川・今村<sup>4)</sup>は、1983年日本海中部地震、1993年北海道南西沖地震及び1994年北海道東方沖地震の津波避難アンケート結果を統計的手法により分析し、体感した地震の揺れの大きさ、集落の海岸からの距離、地震の発生時刻、津波経験の有無等をパラメータとした避難開始時間の推定手法を提案している。ただし、同一条件の地域には同一の避難開始時間を与える手法である。また、早川・今村<sup>5)</sup>は、上の論文に検討を加え、同一条件の地域でも避難開始時間に個人差を与えるようモデル化を行っている。ただ

し、いずれもアンケート結果を統計的手法により分析するもので、他地域への適用性は不明である。

井料ら<sup>2)</sup>は、感染症の流行を記述するために用いられるSIRモデルを参考に、避難開始時間の数理モデルを提案している。ここでは、災害の体感の程度が避難開始時間に影響すると示唆している。また、2011年東北地方太平洋沖地震の際の岩手県陸前高田市における避難開始に関する調査結果より、地震の体感、誘導・知人からの勧誘及び津波切迫によって避難が開始される場合が多く、一方、警報による避難開始は少ないことを指摘している。ただし、実際の避難開始行動に数理モデルを適用し、その再現性について詳しく検討を行ったものではない。

浦田ら<sup>9)</sup>は、津波、ハリケーン、火砕流等の被災リスクが時間的に増大する災害を想定し、津波を例とした避難開始時刻選択モデルを提案している。ここでは、5分間隔で現在時刻より後の被災リスクを考慮して避難するかしないかを選択する意思決定モデルを構築し、地域別・性別の違いに着目した分析を行っている。

また、Tweedie et al.<sup>7)</sup>は、原子力災害を対象として避難開始時間について指数関数を用いたモデルを紹介している。また、同モデルは米国において原子力災害の発生時の避難計画想定に利用されているとしている。ただし、このモデルでは得られる避難開始時間の分布は、後述する津波の避難行動よりも全体的に遅い値を与える結果となっている。

## (2) 避難開始時間の数理モデル

### ・国土交通省都市局によるヒアリング調査

国土交通省都市局<sup>8)</sup>は、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震について、避難行動を把握するヒアリング調査（訪問して聞き取りをする調査）を同年9～12月に行っている。対象は、青森県から千葉県の太平洋岸（福島第一原子力発電所事故の警戒区域を除く。）の浸水範囲内の居住者である。同調査のサンプル数は10,603人（母集団である被災人口約40万9千人に対し約2.6%）である。市町村人口と性別・年齢構成に基づいたサンプル数の割り当てを行っていることから、地域性及び性別・年齢に関してはある程度代表性を有していると考えられる。そこで、同地震の避難開始時間の事例として参照することにした。

同調査の報告書では、回答者のうち津波到達前に避難を開始した5,524人について、地震発生時刻14時46分から同50分までの最初の4分間を1単位に、以後は5分単位で避難を開始した人の比率がグラフとして示されている。そのうち、地震発生後60分までの部分について、グラフから人数を読み取った。

図-3.12に、このようにして作成した避難開始時間の分布を示す。横軸は地震発生後の経過時間 $t$ （単位：分）、縦軸は5,524人に対する避難開始済みの累積人数の比率（避難開始比率） $R$ をとっている。なお、時刻には幅があるので代表値として中央値を採用した。例えば、最も早い14時46分～同50分の代表値は14時48分（ $t=2$ ）、その次の14時51分～同55分の代表値は14時52分30秒（ $t=6.5$ ）、14時56分～15時00分の代表値は14時57分30秒（ $t=11.5$ ）のようにプロットした。避難開始比率は、地震発生後2分のとき0.167であって、時間の経過とともに増加し、同56.5分のときに0.961に達している。

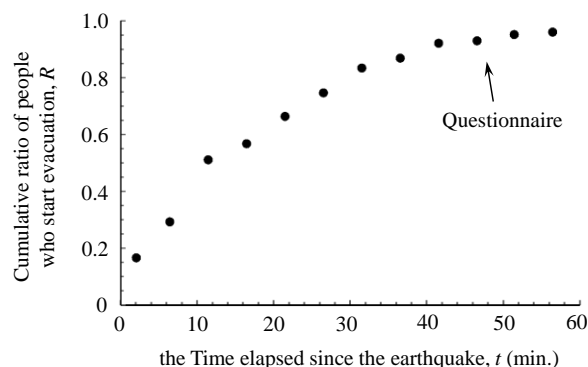


図-3.12 避難開始時間のヒアリング結果

・ロジスティックモデルの適用の検討

人口増加等の社会現象に適用される代表的な数理モデルの一つとして、ロジスティックモデルが挙げられる。同モデルは、ある現象の指標となる物理量の時間変化をある時刻の値（人口増加の例で言えば、現在の人口）及びそれが属している環境の制約条件によって決まる最大値（同じ例で言えば、資源が有限であることから決まる最終的に涵養可能な人口）の非線形な関数として定式化する<sup>9)</sup>。各時刻の物理量は、初期条件が与えられたとき、式(3.2)の非線形微分方程式の解として得られる：

$$R'(t) = kR(t)(A - R(t)) \quad (3.2)$$

ここで、 $R(t)$ は対象とした物理量の時刻 $t$ のときの値、プライムは時間微分、 $A$ は環境の制約条件によって決まる最大値、 $k$ は定数である。

(1)で述べたとおり、典型的な避難開始理由の一つに、先に避難を開始した近隣住民に声掛けされて避難するというものがある。こうした周囲の働きかけの効果を考慮し、ある時刻までに避難開始した人数が多いほど、まだ避難していない人への働きかけがより大きくなると仮定して式(3.2)で定式化を試みる。ここで、時刻 $t$ までに避難を開始した人数が $R(t)$ 、まだ避難していない人数が $A - R(t)$ である。なお、これより後の数値的分析にあたってはWolfram Research, Inc.の数理解析ソフトウェアWolfram Mathematica Ver.10.0を用いた。

図-3.13は、国土交通省都市局によるヒアリング結果についてロジスティックモデルを用いたフィッティングを行ったものである。実線は最小二乗法を用いた場合であるが、ロジスティックモデルの推定結果は、地震発生直後の3点 ( $t = 2, 6.5, 11.5$ ) が成す勾配を追随できていないとともに、 $t = 10 \sim 40$ 程度間の曲線的な変化も追随できていない。なお、推定値とアンケートによる実績値とを比較しRMS誤差を算出したところ、0.034であった。

破線は地震発生直後の3点 ( $t = 2, 6.5, 11.5$ ) を追随するよう推定した場合である。推定方法は、まずヒアリング結果では $R(2) = 0.167$ であったので、式(3.2)で $R(2) = 0.167$ を条件として与えた。次に、式(3.2)の $A$ として、ヒアリング結果のうち最も大きい $t = 56.5$ のときの値 0.961を与えた。最終的に避難を行った人の比率 $A$ は、0.961よりも大きい可能性がある。 $t \rightarrow \infty$ のときの値が不明であるため暫定的に0.961を用いたが、 $A$ の値の設定方法については今後の検討が必要である。このように $R(2) = 0.167$ 及び $A = 0.961$ を与えたうえで、近似曲線が $t = 6.5, 11.5$ の点の近傍を通るように $k$ の値を0.001ずつ変化させ、 $k = 0.180$ とした。しかし、破線は $t = 16.5$ 以降は大きく外れてしまっている。推定値とアンケートによる実績値とを比較しRMS誤差を算出したところ0.088であり、先に述べた最小二乗法を用いた場合の値 (0.034) よりも値は大きくなった。

また、点線は $t$ が大きい方から5点 ( $t = 36.5, 41.5, 46.5, 51.5, 56.5$ ) を追随するよう推定した場合である。推定方法は、上と同様に $R(2) = 0.167$ 及び $A = 0.961$ を与えたうえで、近似曲線が $t = 36.5, 41.5, 46.5, 51.5, 56.5$ の点の近傍を通るように $k$ の値を0.001ずつ変化させ、 $k = 0.115$ とした。しかし、点線は $t = 31.5$ 以前の部分が外れてしまう結果となり、実際の分布を表現できていない。推定値とアンケートによる実績値とを比較しRMS誤差を算出したところ0.120であり、先に述べた最小二乗法を用いた場合の値 (0.034) よりも大きくなった。

このように、破線及び点線のいずれの推定結果もヒアリング結果を良好に再現しているとは言えない結果となり、また実線も地震発生直後やその後の曲線的な変化が十分に追随できていなかった。この原因は、避難開始理由の異なる避難者が混在していることに伴い、ヒアリング結果には複数のモードが重なって複雑な形状を示しているためと考えている。



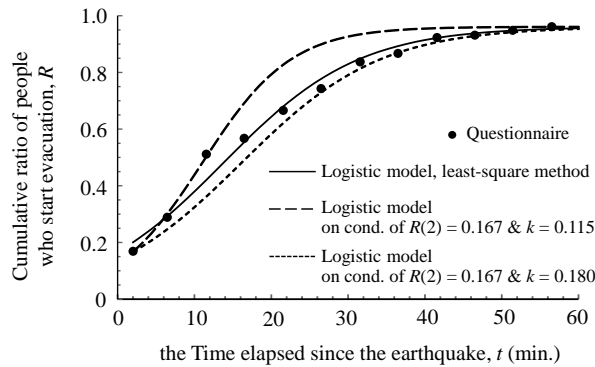


図-3.13 ロジスティックモデルを用いたフィッティング

### 1) 避難開始理由に基づく「分割モデル」の提案

上の検討を参考にすると、 $t = 10$ 前後を境にモードの変化が見られる。更に、 $t = 35 \sim 40$ 前後を境に変化しているようである。そこで、避難開始理由の異なる避難者が3群いて、それぞれの避難開始時間の分布が異なるためこのような変化が発生したと考え、それぞれについて個別にモデルを設定する「分割モデル」を提案する。

第1群は、地震発生直後に避難を行っていることから、周囲からの働きかけが無くても自発的に避難するような人々と考え「自発的避難」群と名付ける。第2群は、周囲からの働きかけを避難の契機にする人々と考え「非自発的避難」群と名付ける。また第3群は、陸上への大規模な津波の浸水が地震発生後概ね30分程度で始まったことを踏まえ、津波の浸水を発見してから避難開始するような人々と考え「津波切迫避難」群と名付ける。

「自発的避難」群及び「津波切迫避難」群はいずれも独立した事象であって他の群の影響を受けない。一方、「非自発的避難」群は自発的避難群及び津波切迫避難群に属する避難者の影響を受ける。

自発的避難群は、周囲からの働きかけが無くても自発的に避難するような人々である。避難開始時間の累積分布曲線を記述するにあたり、正規分布の累積分布関数、べき乗分布の累積分布関数等が考えられる。そのなかで、多数の人が独立に行動した結果を集積したものであること、また、自発的避難者であれば避難開始が極端に遅い人はいないであろうと考えたことから、正規分布の累積分布関数を仮定した。避難開始比率 $R_1$ を式(3.3)で定義する。

$$R_1(t) = \int_0^{(t-\mu)/\sigma} c_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2) dx \quad (3.3)$$

まず、図-3.12の点の分布形状を参考に、10分間でこの群の避難が終了すると仮定した。そこで、 $t = 10 \div 2 = 5$ にピークとなる分布形状とするために $\mu = 5$ とした。

次に、図-3.12の点の分布形状を参考に、この群に属する避難者の全体に対する構成比 ( $a_1$ ) を35%と仮定した。 $a_1$ は $R_1$ の極値 (式(3.3)で $t \rightarrow \infty$ としたときの $R_1$ の値) である。そこで、式(3.3)において $t$ を十分大きくとったときに、 $a_1 \doteq 0.35$ となるように $c_1 = 0.495$ とした。

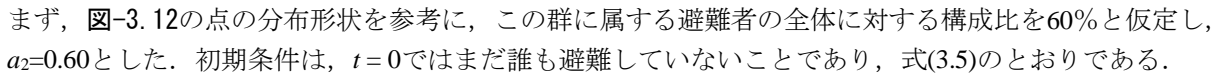
標準偏差 $\sigma$ については、 $\sigma$ の値を大きくすれば、 $R_1$ の累積分布曲線はゼロから $a_1$ まで緩やかに立ち上がる形状となる。それに対し、 $\sigma$ の値を小さくすれば急激に立ち上がる形状となる。Wolfram Mathematicaには入力した数式を解いた結果をグラフで可視化するPlot機能があり、 $R_1$ の累積分布曲線、あるいは後述する $R_2$ 及び $R_3$ の累積分布曲線や、3(4)節で後述する $R_1 + R_2 + R_3$ の累積分布曲線を描画できる。この機能を使って $R_1 + R_2 + R_3$ の累積分布曲線を描画し、図-3.12の点の分布形状にフィットするように、 $\sigma$ の値を0.01ずつ変化させて調整した。ただし、 $R_2$ または $R_3$ を変化させれば $R_1 + R_2 + R_3$ の累積分布曲線の形状も変化してしまうので、 $R_2$ または $R_3$ を変化させた場合は改めて $\sigma$ の値を0.01ずつ変化させて調整した。こうした調整

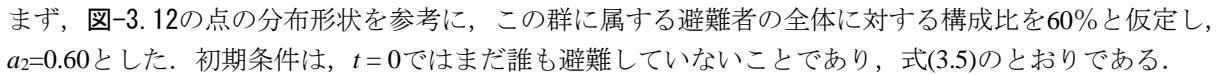
の結果、 $\sigma=3.30$ とした。

非自発的避難群は、周囲の働きかけを契機にすると考え、ロジスティックモデルとした。この群の避難開始比率 $R_2$ の時間的变化 $R_2'(t)$ は式(3.4)で定義する。

$$R_2'(t) = c_2 \{R_1(t) + R_2(t) + R_3(t)\} \cdot (a_2 - R_2(t)) \quad (3.4)$$

$$R_2(0) = 0 \quad (3.5)$$

まず、の点の分布形状を参考に、この群に属する避難者の全体に対する構成比を60%と仮定し、 $a_2=0.60$ とした。初期条件は、 $t=0$ ではまだ誰も避難していないことであり、式(3.5)のとおりである。

次に、定数  $c_2$ については、 $c_2$ の値を小さくすれば、 $R_2$ の累積分布曲線は緩やかに立ち上がる形状となる。それに対し、 $c_2$ の値を大きくすれば急激に立ち上る形状となる。前項と同様にWolfram MathematicaのPlot機能を使って $R_1+R_2+R_3$ の累積分布曲線を描画し、の点の分布形状にフィットするように、 $c_2$ の値を0.001ずつ変化させて調整した。その結果、 $c_2=0.093$ とした。

津波切迫避難群は、適切なモデル化の方法について知見が無いものの、地震発生から浸水開始時間まではゼロで、浸水始時間以降は時間に関して一定速度で増加する単純なモデルを仮定した。すなわち、避難開始比率 $R_3$ の時間的变化 $R_3'(t)$ を式(3.6)で定義する。 $t=0$ から $t=37$ までは $R_3(t)$ はゼロとし、 $t \geq 37$ では $R_3(t)$ は正の定数 $c_3$ で与えた。浸水開始時間以降は時間に関して一定速度で増加するとしたのは、時間経過とともに浸水範囲が基本的には拡大すること、それに伴って津波を目撃する人が増加するであろうと考え、まずは最も単純なモデルとして仮定したものである。ただし、沿岸部には農地等の人口密度が比較的小さい場所と市街地等の人口密度が比較的大きい場所とがあるので、避難が必要になる人の所在場所には偏りがあること、浸水範囲が基本的には拡大するとしたものの厳密には津波の周期を考慮する必要があること等の課題があり、今後の検討が必要である。

$$R_3'(t) = 0 \quad (0 \leq t < 37) \quad (3.6a)$$

$$= c_3 \quad (37 \leq t \leq 60) \quad (3.6b)$$

$$R_3(37) = 0 \quad (2.7)$$

ここで、津波切迫避難の開始時間を37分と設定した理由を述べる。この値は、青森県から千葉県に至る範囲の、大規模な浸水が開始した平均的な時間に相当する。気象庁<sup>10)</sup>は、東北地方太平洋沖地震の津波について、海象観測施設で観測された到達時間をまとめている。表-3.3は、そのうち青森県から千葉県の太平洋岸に所在する観測点を抽出・整理したものである。多くの験潮所が地盤沈下・被災したために観測点の数は十分では無いこと、また、波源からそれぞれの観測点までの距離が大きく異なるので一定値を与えるのは難しいものの、第一波の到達時刻（第一波の到達に伴い観測値が平常潮位からずれ始めた時刻）は青森県から千葉県までの有意なデータのある観測点を単純に平均すると地震発生後約29分であった。また、第一波が押しの場合と引きの場合があるので一定値を与えるのは難しいものの、第一波の山・谷の出現までの時間は同じくデータのある観測点を単純に平均すると約44分であった。本来は、陸上部に大規模な浸水が生じるような押し波を青森県～千葉県の範囲で広範に多数の点で抽出しその平均的な値を求める必要があるが、暫定的な値として、29分と44分という二つの値を参照し、その中間値として37分を設定した。以上より初期条件は $R_3(37)=0$ とした。

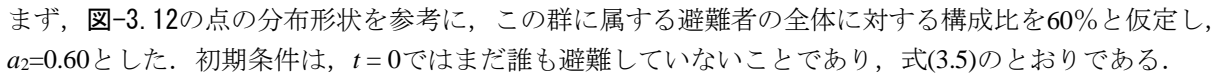
定数  $c_3$ は、Wolfram MathematicaのPlot機能を使って $R_1+R_2+R_3$ の累積分布曲線を描画し、の点の分布形状にフィットするように、 $c_3$ の値を変化させて調整した。その結果、 $c_3=0.001$ とした。

表-3.3 津波の到達時間

No.	観測点名	県	地震発生から第一波到達までの時間(分)	地震発生から第一波の山・谷の出現までの時間(分)	第一波の性状(+:押し、-:引き)	地震発生から最大波出現までの時間(分)	備考
1	むつ市関根浜	青森	44	62	-	210	
2	八戸		35	59	-	131	
3	宮古	岩手	15	27	-	40	*1
4	大船渡		N/A	N/A	-	32	*1
5	釜石		N/A	25	-	35	*1
6	石巻市鮎川	宮城	N/A	N/A	N/A	40	*1
7	いわき市小名浜	福島	22	37	+	53	*1
8	相馬		N/A	46	-	65	*1
9	大洗	茨城	31	41	+	126	*1
10	銚子	千葉	27	52	+	156	*1
平均			29 *2	44 *3			

\*1 地盤沈下の影響により第一波の読み取り値が不正確である可能性がある等の記載がなされているもの。 \*2 N/A(利用可能な値無し)の4点を除く6点の平均。  
\*3 N/Aの2点を除く8点の平均。

## 2) 分割モデルの計算結果

図-3.14に、「自発的避難」、「非自発的避難」及び「津波切迫避難」の避難開始時間の分布について、図-3.12に重ねて描画することによりそれぞれ示す。表-3.4に、モデルのパラメータを一覧として示す。同表の4列目が、各群でパラメータとして提案した値である。すなわち、自発的避難群の全体に対する構成比 ( $a_1$ ) は、 $c_1$ 、 $\mu$ 及び $\sigma$ を用いて式(3.3)の極値 ( $t \rightarrow \infty$ ) として算出されるが、0.35とした。非自発的避難群の全体に対する構成比 ( $a_2$ ) は、0.60とした。また、切迫避難群の全体に対する構成比 ( $a_3$ ) は  $1 - (a_1 + a_2)$  により求められ、0.05となる。

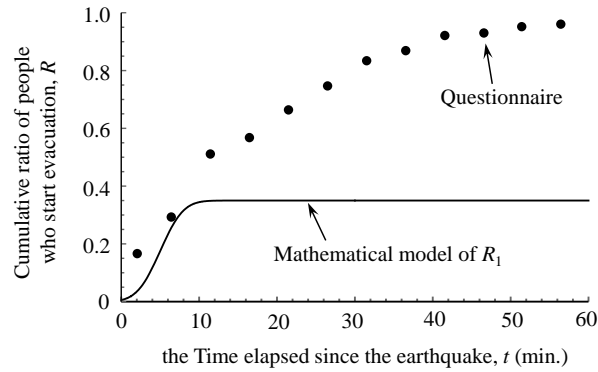
各群の避難行動を式(3.8)のとおり重ね合わせたものがマクロの避難行動である。

$$R(t) = R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) \quad (3.8)$$

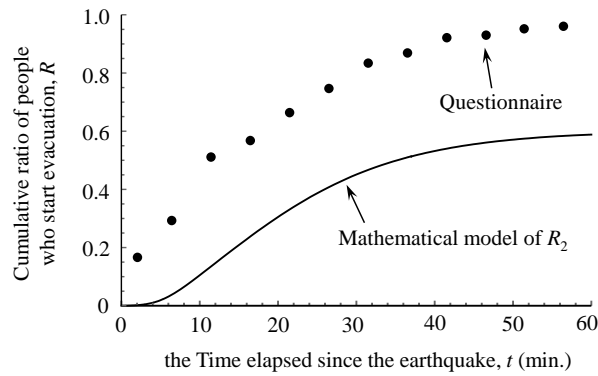
重ね合わせた結果を図-3.15に示す。避難開始理由に基づく分割モデルにより、地震発生直後 ( $t = 2$ ) は推定値から若干のずれが生じているものの、 $t = 5 \sim 40$ 程度までの曲線的な変化と、その前後の時間帯についても概ね追従できている。

推定値とアンケートによる実績値とを比較しRMS誤差を算出したところ、0.045であった。ロジスティックモデルを適用した事例(図-3.13の実線、破線及び点線)のRMS誤差は0.034~0.120の範囲の値であり、それと比べると今回提案した分割モデルのRMS誤差は小さい方に近い値となっていて概ねよい近似を示しているようである。ただし、ロジスティックモデルのうち最小二乗法でフィッティングした事例(図-3.13の実線)のRMS誤差の値(0.034)と比べると、分割モデルのRMS誤差の値(0.045)は若干ではあるが大きくなってしまっている。これは、図-3.13にプロットしているアンケートの実績値のうち  $t = 2$  の点が、分割モデルの線と大きく離れてしまっていることが原因の一つと考えられる。そこで、 $t = 2$  の点を除外してRMS誤差を試算してみた。ロジスティックモデルのうち最小二乗法でフィッティングした事例のRMS誤差は0.034と変わらない。それに対し、分割モデルのRMS誤差は0.022となって改善した。従って、分割モデルについて地震発生直後の避難開始状況の再現についてはより詳細な検討が必要であり、今後の課題である。

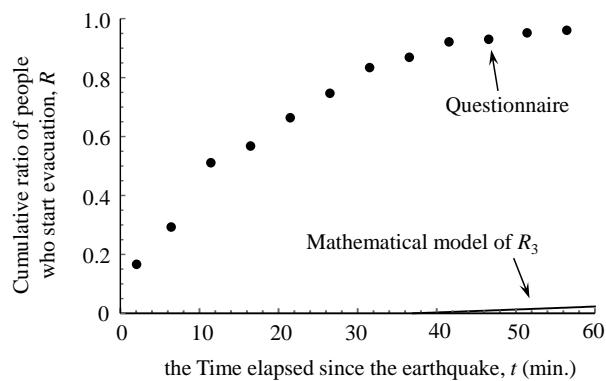
以上から，避難開始直後の避難開始状況についてはより詳細な検討が必要であるものの，2011年東北地方太平洋沖地震の際の避難開始時間についてある程度再現出来ていると考えている。



(1) 自発的避難



(2) 非自発的避難



(3) 津波切迫避難

図-3.14 各群の計算結果

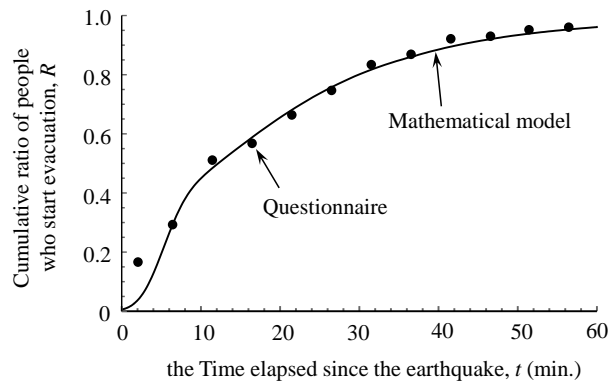


図-3.15 分割モデルの計算結果

表-3.4 モデルのパラメータ

Numerical model for	Parameter	Definition of parameter	Values proposed for		
			Overall area	Kamaishi City	Sendai City
Self-motivated evacuees	$c_1$ ( $a_1$ )	$c_1$ : Variable number $a_1$ : Component ratio of the self-motivated evacuees, calculated using the value of $c_1$ , $\mu$ and $\sigma$	0.495 (0.35)	0.750 (0.53)	0.396 (0.28)
	$\mu$	$=t_1/2$	5		
	$\sigma$	the standard deviation	3.30		
	$t_1$	the Maximum time delay to start evacuation for the self-motivated evacuees	10		
Passive evacuees	$c_2$	Variable number	0.093		
	$a_2$	Component ratio of passive evacuees	0.60	0.45	0.58
Tsunami imminent evacuees	$c_3$	Variable number	0.001		
	$a_3$	$=1-(a_1+a_2)$	0.05	0.02	0.14
	$t_3$	Starting time of inundation	37		

### (3) 考察

これまで、ヒアリング調査の対象地域である青森県から千葉県に至る太平洋岸を一体としてみた平均的な避難性向について、モデル化し分析対象とした。ただし、地域によってその分布形状は異なると考えられるため、式(3.3)、式(3.4)及び式(3.6b)のパラメータ(表-3.4参照)の地域依存性と、それぞれが持つ数値的意味について知見を蓄積する必要があると考えられる。そこで、本章では個別の自治体を対象に検討を加える。

被災地域の市町村のうち津波による浸水被害が過去に比較的多く発生してきた岩手県釜石市及び比較的少なかった宮城県仙台市を対象とする。両市のデータは、ウェブサイト「震災復興調査アーカイブ」<sup>1)</sup>からダウンロードした。なお、同アーカイブは国土交通省都市局の「東日本大震災津波被災市街地復興支援調査」からデータの提供を受け東京大学空間情報科学研究センターが運営しているもので、データソースは文献8)と同じものである。同アーカイブに公開されているデータには、個人を対象にしたヒアリング調査結果と、事業所を対象にしたヒアリング調査結果とがある。そのうち、両市についていず

れも個人を対象にしたデータのみを用いた。また、当該調査は浸水範囲内にいた人が対象である。

釜石市のデータセットには、613件の避難行動データが収録されているが、そのなかから、最初の避難行動（「経路番号」欄の値が1のもの）だけを抽出する。その結果、抽出されたのは301人分の避難開始時間データであった。同様に、仙台市の528件の避難行動データのなかから最初の避難行動だけを抽出し、269人分の避難開始時間データを得た。

図-3.16(1)は、上のようにして得た、釜石市及び仙台市の避難開始時間の分布を図-3.12に重ねて示したものである。釜石市（破線）は、被災地全体（点）の分布に比較して概ね上側に分布しており、避難開始時間が全体的に早かったことが分かる。一方、仙台市（点線）は被災地全体の分布に比較して下側に分布しており、避難開始時間が全体的に遅かったことが分かる。

#### 1) 釜石市

釜石市の避難開始時間の分布は、(2)の結果よりも概ね上側に分布している。そこで単純な仮定として、分割モデルのパラメータのうち各群の構成比（ $a_1$ 、 $a_2$ 及び $a_3$ ）だけが地域によって異なり、残りのパラメータ（ $\mu$ 、 $\sigma$ 、 $t_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 及び $t_3$ ）は変化しないとする。これは非常に単純な仮定で、例えば、非自発的避難群の避難性向を表現するパラメータの一つである $c_2$ が被災地では変化しないことになるが、まずは「各群の構成比」が最も影響の大きいパラメータと考え適用性を検討したものである。

フィッティング手法は、分割モデルの計算結果が図-3.16(1)の破線にあうように $a_1$ と $a_2$ とを試行錯誤的に変化させて与えた。なお、 $a_3$ は $a_1$ 及び $a_2$ が定めれば決まる値（ $a_3=1-a_1-a_2$ ）である。この結果、 $a_1=0.53$ 、 $a_2=0.45$ 及び $a_3=0.02$ となった。

図-3.16(2)に、ヒアリング結果と数理モデルによる計算結果とを重ねて示す。これによれば、 $t=50$ より大きい範囲について勾配に若干の違いはあるものの、釜石市の2011年東北地方太平洋沖地震の際の避難開始時間についてある程度再現出来ていると考えている。また、自発的避難群の構成比は被災地を平均としてみた場合の35%に対して釜石市は53%と高い一方、非自発的避難群は被災地平均の60%に対して釜石市は45%と低いとの推定結果となり、津波による浸水被害が過去に比較的多く発生してきた同市の津波避難に関する防災意識が相対的に高いことを示していると考えられる。

表-3.4の5列目に、設定したパラメータの値を示す。また、推定値とアンケートによる実績値とを比較しRMS誤差を算出したところ、0.056であった。この値は(2)の被災地全体の推定値のRMS誤差の値(0.045)よりやや大きくなっている。原因の一つは、表-3.4のパラメータのうち、今回は基礎的な検討として各群の構成比（ $a_1$ 、 $a_2$ 及び $a_3$ ）だけを変化させ、残りのパラメータは被災地全体の平均的な値を用いたことが考えられる。従って、各群の構成比以外のパラメータの設定手法について、他地域への適用を通じて知見を蓄積する等により、地域特性を適切に反映していくことは今後の課題である。

#### 2) 仙台市

仙台市の避難開始時間の分布は、(2)の結果よりも下側に分布している。前節と同様にフィッティングすることにより、 $a_1=0.28$ 、 $a_2=0.58$ 及び $a_3=0.14$ となった。

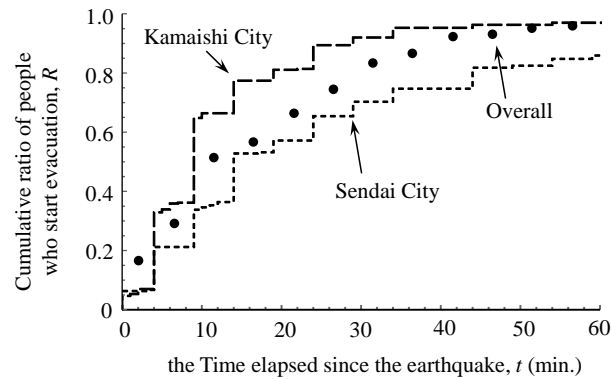
図-3.16(3)に、ヒアリング結果と数理モデルによる計算結果とを重ねて示す。これによれば、 $t=15\sim 20$ 程度の範囲で実際の避難行動（点線）よりも数理モデル（実線）がやや下側にあるものの、仙台市の2011年東北地方太平洋沖地震の際の避難開始時間についてある程度再現出来ていると考えている。また、自発的避難群の構成比は被災地を平均としてみた場合の35%に対して仙台市は28%となる一方、津波切迫避難群は被災地平均の5%に対して仙台市は14%との推定結果となった。

表-3.4の6列目に、設定したパラメータの値を示す。また、推定値とアンケートによる実績値を比較しRMS誤差を算出したところ、0.051であった。この値は(2)の被災地全体の推定値のRMS誤差の値(0.045)よりやや大きくなっている。前節と同様に、原因の一つは、表-3.4のパラメータのうち、今回は基礎的な検討として各群の構成比（ $a_1$ 、 $a_2$ 及び $a_3$ ）だけを変化させ、残りのパラメータは被災地全体の平均的な値を用いたことが考えられる。従って、各群の構成比以外のパラメータの設定手法について、他地域への適用を通じて知見を蓄積する等により、地域特性を適切に反映していくことは今後の課題である。

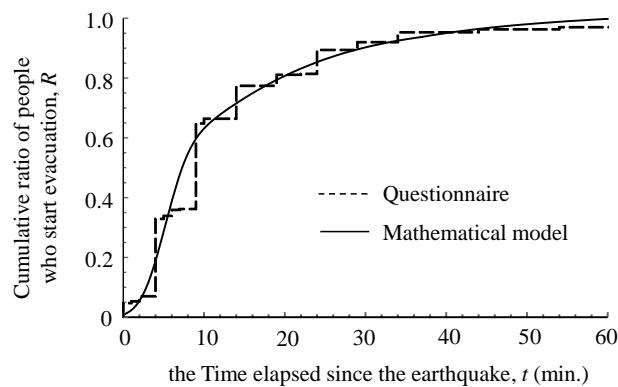
本稿では単純な仮定として、分割モデルのパラメータのうち各群の構成比だけが地域によって異なり、残りのパラメータは変化しないとした。ただし、例えば非自発的避難群の避難性向を表現するパラメー

タの一つの $c_2$ が、2011年東北地方太平洋沖地震の被災地と他地域とでは異なる可能性があるので、津波発生が懸念されている東海・東南海・南海地震津波で影響を受ける地域、我が国以外の地域等も含め、パラメータの値の検討や今回提案した分割モデルの適用範囲について検証が課題である。

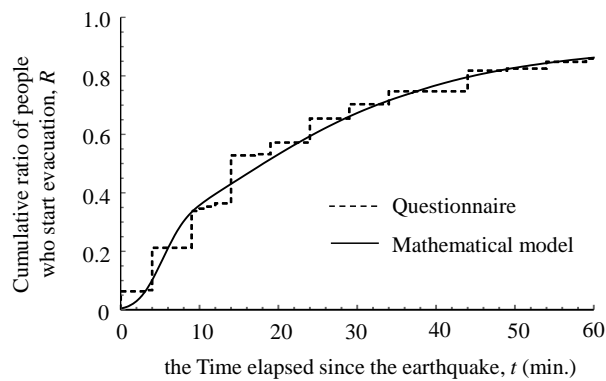
また、避難開始時間のモデルを津波避難シミュレーションに組み込むことによる計算結果への影響について、定量的な効果の把握・検証を行うことが課題である。



(1) 避難開始時間のヒアリング結果



(2) 釜石市の避難開始時間



(3) 仙台市の避難開始時間

図-3.16 個別の自治体を対象にした検討



#### (4) まとめ

本項は、地震時の津波避難行動を再現するような津波避難開始時間の数理モデルを構築した。その結論は以下のとおりである。

- ・避難開始理由によって避難者を「自発的避難」、「非自発的避難」及び「津波切迫避難」の3群に分類し、各群の避難開始時間の数理モデルを与えて重ね合わせることにより、2011年東北地方太平洋沖地震時の避難開始時間の累積分布曲線を再現する「分割モデル」を提案した。ただし、地震発生直後の避難開始状況の再現についてはより詳細な検討が必要である。
- ・岩手県釜石市及び宮城県仙台市を対象に分割モデルを適用し、自発的避難群、非自発的避難群及び津波切迫避難群の構成比を変えることで、各群の構成比以外のパラメータの設定手法についてより詳細な検討が必要ではあるものの、両市の2011年東北地方太平洋沖地震の際の避難開始時間の累積分布曲線をある程度再現できた。
- ・岩手県釜石市の自発的避難群の構成比は被災地平均と比べて高い一方、非自発的避難群の構成比は被災地平均と比べて低い結果となり、津波による浸水被害が過去に比較的多く発生してきた同市の津波避難に関する防災意識が相対的に高いことを示した。

#### 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報告，p.9，2011.9.28.
- 2) 井料隆雅，辻本晋吾，天野和信：避難タイミング決定行動の数理モデルとその検証，平成24年度土木学会重点研究課題シンポジウム・東日本大震災を踏まえた防災計画研究の検証と今後の研究課題，土木学会土木計画学研究委員会・安全問題研究委員会，pp.17-20，2013.3.29.
- 3) 富田孝史，有川太郎，熊谷兼太郎，松富英夫，原田賢治，D. Subandono：2010年Mentawai地震津波の現地被害調査，土木学会論文集B2，Vol.67，No.2，pp.I\_1281-I\_1285，2011.
- 4) 永川賢治，今村文彦：情報伝達・避難開始時間に着目した防災力評価法の提案，津波工学研究報告，第17号，pp.79-94，2000.
- 5) 早川哲史，今村文彦：津波発生時における避難行動開始モデルの提案とその適用，自然災害科学，日本自然災害学会，Vol.21，No.1，pp.51-66，2002.
- 6) 浦田淳司，羽藤英二，植村恵里：将来リスクの動的変化を考慮した逐次型避難開始時刻選択モデル，第33回交通工学研究発表会論文集，CD-ROM，pp.255-259，2013.
- 7) Tweedee, S. W., Rowland, J. W., Walsh, S. J., Rhoten, R. P. and Hagle, P. I.: A methodology for estimating emergency evacuation times, *The Social Science Journal*, Vol.23, No.2, pp.189-204, 1986.
- 8) 国土交通省都市局：津波避難を想定した避難路，避難施設の配置及び避難誘導について（第3版），pp.18-65，2013.4.
- 9) 佐藤總夫：自然の数理と社会の数理I，pp.37-52，日本評論社，1984.
- 10) 気象庁：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震調査報告，気象庁技術報告，第133号，pp.94-99，2012.
- 11) 復興支援調査アーカイブ，<http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>，2015.2.17時点

### 3.3 避難訓練をもとにした避難行動の観測とその結果の分析

#### (1) 研究の目的

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，防災無線施設の整備等の「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、特に市街地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り組みがあるが<sup>2)</sup>、徒歩避難者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<sup>3)</sup>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<sup>4)</sup>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。このような観点から、市街地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。

レーザセンサは、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<sup>5)</sup>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。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。

そこで、本稿では、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。

## (2) 人流測定システム

図-3.17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FDA<sup>6)</sup>、我が国の工業規格<sup>7)</sup>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、道路の幅員が大きくて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必要であるので、バッテリーから電力を供給する。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-3.5に、使用した機器の一覧を示す。

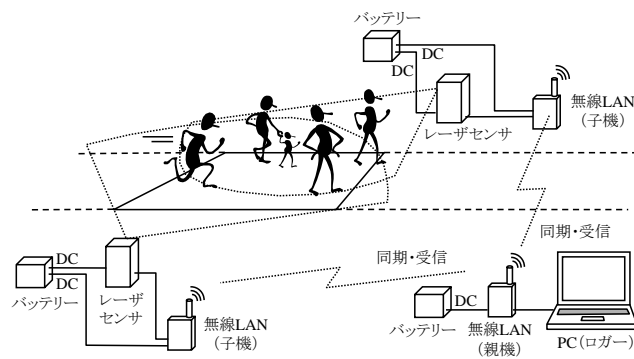


図-3.17 人流測定システム

表-3.5 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

### (3) 試験測定及びその結果

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-3.18 (1)に区域図を示す。実線は道路及び建物の輪郭で、破線は同区の区界である。図-3.18 (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、延長方向16.0 m、幅方向6.3 mとした。

写真-3.1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。

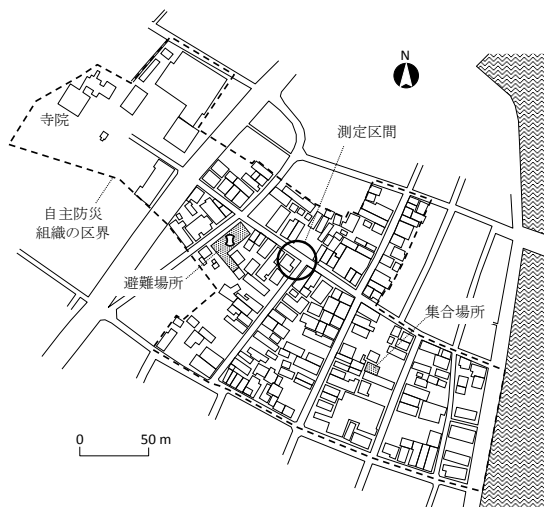
試験測定は、2013年12月1日(日)の避難訓練の際に行った。当日は、午前9時に防災放送網のスピーカを通じて避難訓練を開始するとのお知らせが放送された。参加者はそれぞれの所在地からいったん地区内の集合場所に集まって訓練内容の簡単な説明を受けたあと、避難場所に向かって避難していた。

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-3.18 (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。

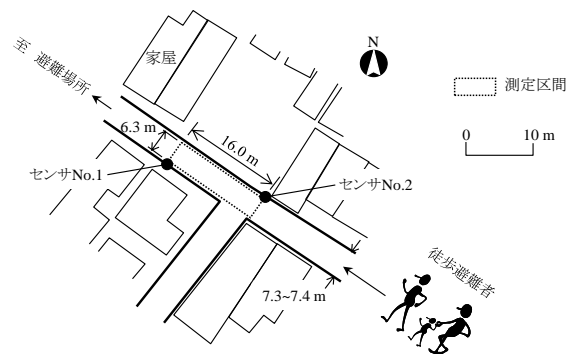
徒歩避難者は、9時10分～同12分のあいだの約80秒間(測定区間に先頭が入ってから最後尾が通過するまでの時間)に測定区間を通過した。

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。

写真-3.2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=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。



(1) 自主防災組織の区域図



(2) 測定区間周辺の拡大図

図-3.18 対象地域



(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-3.1 設置状況

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、 $t = 0s$ に先頭の第1群が通過し、 $t = 20s$ 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。 $t = 30s$ の頃に第2群が通過し、 $t = 40s$ の頃は谷間である。最後に、 $t = 50 \sim 70s$ で最後尾の第3群が通過していた。

図-3.19は、レーザセンサの測定結果のスナップショットで、 $t = 0 \sim 70s$ 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言えず、例えば写真-3.2 (6)と図-3.19 (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。



(1) 午前9時10分49秒 (t = 0s) 第1群 (先頭) が通過



(2) 午前9時10分59秒 (t = 10s)



(3) 午前9時11分09秒 (t = 20s)



(4) 午前9時11分19秒 (t = 30s) 第2群が通過





(5) 午前9時11分29秒 (t = 40s)



(6) 午前9時11分39秒 (t = 50s) 第3群 (最後尾) が通過



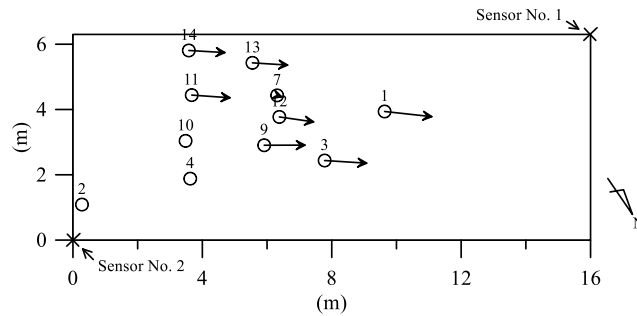
(7) 午前9時11分49秒 (t = 60s)



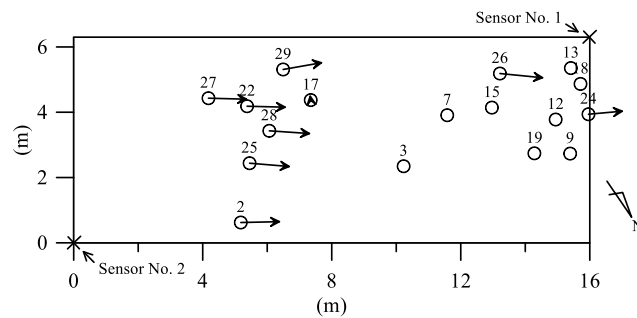
(8) 午前9時11分59秒 (t = 70s)

写真-3.2 ビデオカメラのスナップショット

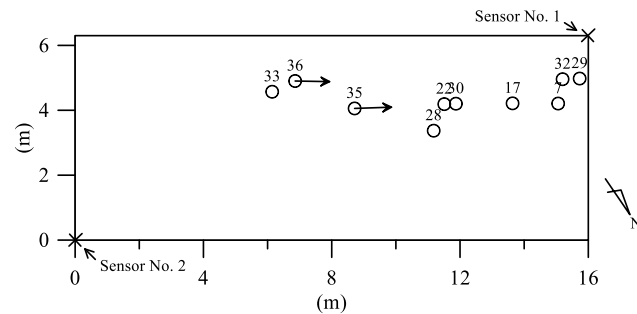
また、図-3.19 (2)及び(7)を見ると、矢印がついていない、すなわち、1秒後の移動先が追跡出来なかった白丸が多く発生している。この原因の一つは、多数の人がレーザセンサNo.1のすぐ近くを通過したため、個別に検出できずエラーになったことが考えられる。対処法として、レーザセンサの設置場所を変更する等の工夫が考えられるが、まだその点の検証は出来ていない。



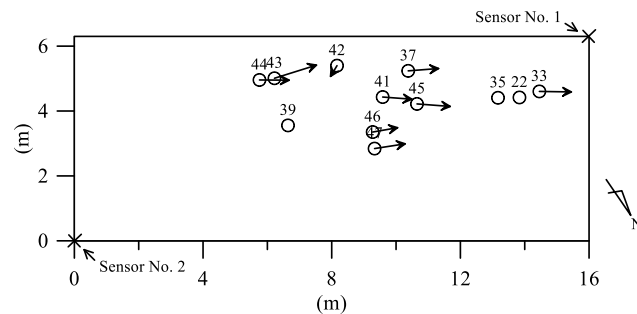
(1)  $t = 0s$



(2)  $t = 10s$

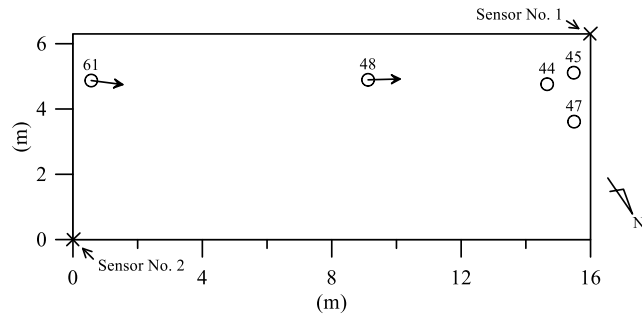


(3)  $t = 20s$

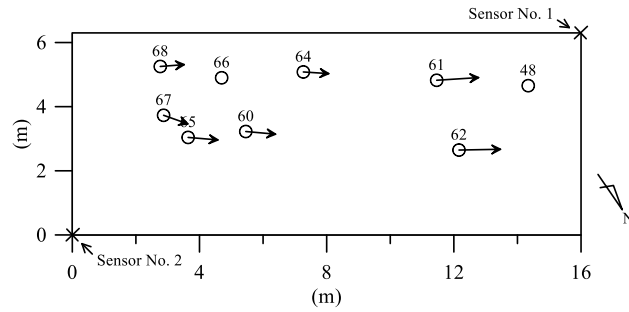


(4)  $t = 30s$

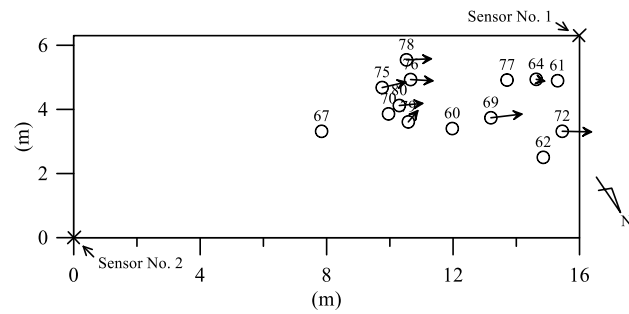




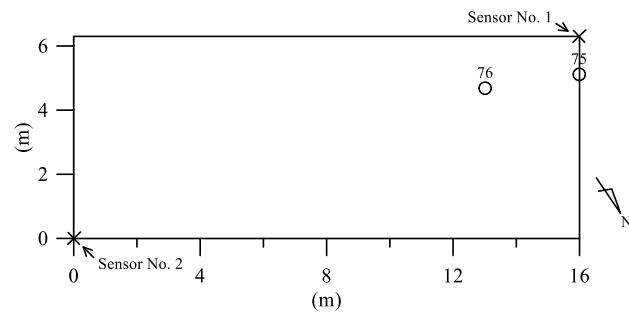
(5)  $t = 40s$



(6)  $t = 50s$



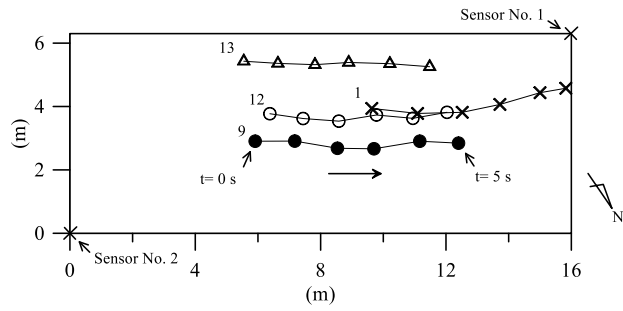
(7)  $t = 60s$



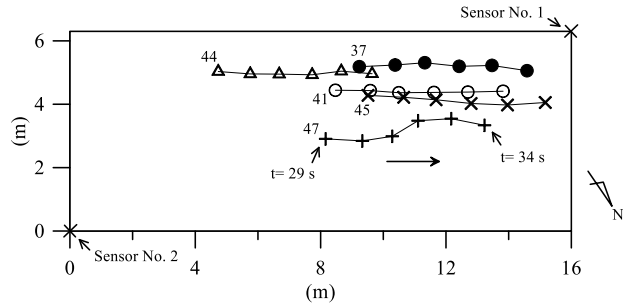
(8)  $t = 70s$

図-3.19 レーザセンサの測定結果のスナップショット

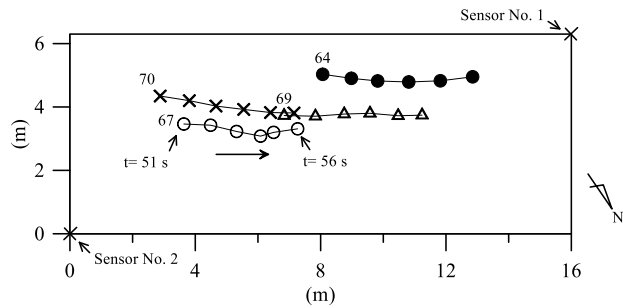
図-3.20は、3つの群れからそれぞれ4~5人を抽出し、5秒間の歩行の軌跡を描いたものである。その結果、群れの中での各自の相対的な位置関係はあまり変化していないことが分かった。例えば、第1群の避難者No.1, 9, 12及び13は、 $t = 0s$ でNo.1を頂点にした雁行型で左から右に動いていくが、 $t = 5s$ のときもほとんど形は変わっていないようである。このように、お互いの位置関係を保ったまま群れの形を変えずに歩いていることが推定される。



(1) 第1群



(2) 第2群



(3) 第3群

図-3.20 5秒間の歩行の軌跡

表-3.6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。

表-3.6 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	第3群	0.861	
64	0.962			
67	0.739			
69	0.882			
70	0.862			

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。

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。

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っ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。

#### (4) まとめ

本項では、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。

#### 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。

### 3.4 津波避難シミュレーションの検討・改良の概要と課題

3.1で述べたとおり、2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動について津波避難シミュレーションを行い、その結果と実際の避難行動とを比較することにより、シミュレーションの再現性を検証する動作分析を行った。

それにより、シミュレーションで得られた避難完了者の時間的増加を示す曲線は、二つのアンケートのうち対象者に青壮年が占める割合が大きい釜石港湾事務所・釜石市アンケートの結果と概ね近い形状となって、高齢者・グループ歩行者の及ぼす影響の詳細な検討や、長距離を避難する行動など再現できていない部分はあるものの、リアス式海岸沿岸部の徒歩避難者の避難行動に津波避難シミュレーションをある程度適用できることが分かった。また、シミュレーションでは避難場所の選択の結果、21箇所 of 避難場所のうち7箇所 with 収容人数に達して飽和していたことから、最短ではない場所に避難が必要な避難

者が発生しており、避難場所の収容可能人数が計算結果に影響している結果となっていた。

シミュレーションの際に、避難経路は、条件付きで最短経路の避難場所を選択するように、「合理的な」ものとしている。しかし実際の避難行動では、出発地から数か所を経由してから避難場所に到着する等の、必ずしも最短経路によらない「不合理な」行動が生じているので、こうした行動を適切にモデル化することが課題となった。既往の検討では、昼と夜のそれぞれの住民の所在位置を詳細に調べ、また、主要な避難路の形状等を詳細に調べ避難場所について決定するような、高解像度で地域を調べて避難場所を決定していくアプローチをとっている。今回採用したような最適配置手法に基づいて一定のルールで避難場所を決定していく方法を含め、避難経路選択のモデル構築は、今後も試行錯誤が必要な課題であることが分かった。

今回行ったシミュレーションでは、リアス式海岸沿岸部が対象であり、平野部の避難行動は検討の対象外である。また、徒歩避難者が対象であり、徒歩以外の車避難者等の避難行動は対象外である。2011年東北地方太平洋沖地震の際には、リアス式海岸沿岸部に比較して平野部では、避難者全体に占める車避難者の割合が高くなっている。平野部の避難行動のシミュレーションを実施するためには、車避難者の避難行動のモデル、長距離を避難する徒歩避難者の疲労を考慮したモデル、また、車避難と徒歩避難との混在により発生する現象の適切なモデルについて今後の検討が必要である。

さらに、歩行速度に影響を及ぼす要因は、年齢、同行者の有無、混雑、逃げ惑い、自動車との交錯、階段などの障害物、疲労等である。本研究では、年齢及び同行者の有無はそれぞれ避難速度を変化させることで考慮した。混雑は、群集密度を考慮して歩行速度を変化させることで考慮した。ただし、避難開始時間は一律としたので、今後、避難開始時間を個人差によるばらつきを考慮する必要がある。それに対し、逃げ惑い、自動車との交錯及び障害物の発生は、交差点を通過するごとに一定時間のロスタイムを与えることである程度考慮しているものの、非常に単純な仮定である。また、疲労は、本研究においてはシミュレーションの単純化のために考慮していない。この点については今後の検討が必要である。

また、3.2で述べたとおり、地震時の津波避難行動を再現するような津波避難開始時間の数理モデルを構築した。その結果、避難開始理由によって避難者を「自発的避難」、「非自発的避難」及び「津波切迫避難」の3群に分類し、各群の避難開始時間の数理モデルを与えて重ね合わせることにより、2011年東北地方太平洋沖地震時の避難開始時間の累積分布曲線を再現する「分割モデル」を提案した。ただし、地震発生直後の避難開始状況の再現についてはより詳細な検討が必要であることが分かった。

岩手県釜石市及び宮城県仙台市を対象に分割モデルを適用し、自発的避難群、非自発的避難群及び津波切迫避難群の構成比を変えることで、各群の構成比以外のパラメータの設定手法についてより詳細な検討が必要ではあるものの、両市の2011年東北地方太平洋沖地震の際の避難開始時間の累積分布曲線がある程度再現できた。岩手県釜石市の自発的避難群の構成比は被災地平均と比べて高い一方、非自発的避難群の構成比は被災地平均と比べて低い結果となり、津波による浸水被害が過去に比較的多く発生してきた同市の津波避難に関する防災意識が相対的に高いことを示すことができた。

上記のように、改良された津波避難シミュレーションは、リアス式海岸沿岸部を想定した環境で動作確認をすることができた。また、津波避難開始時間を詳細に考慮するようなモデルの改良も合わせて行うことができた。現時点ではいまだ課題があり、例えば平野部の避難行動の検証や、徒歩・車避難者の混合した状況のシミュレーション、釜石市・仙台市以外の地域での津波開始時間への適用などのより詳細な検討は課題であり、今後の検討が必要な事項がいくつかあることが今回のプロジェクト研究を通じて分かってきた。ただし、3.3で述べたとおり、津波避難訓練の実際の人の流れをモニタリングすることに実験的に取り組み、シミュレーションの改良を示唆するような点を把握するための試みをスタートすることができた。すなわち、レーザセンサを用いた人流測定システムを構築して、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ところ、市街地の街路の延長約20m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、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などの興味深い測定結果が得られてきている。このような本プロジェクト研究で得られた新たな成果は、今後の津波避難シミュレーションの研究において基礎となる重要な成果であると考えている。

### 3.5 津波避難シミュレーション技術を使用した津波避難検討の事例分析

茨城県では、東日本大震災における教訓や切迫する大規模地震に対応するため、茨城港常陸那珂港区における津波避難計画の策定を平成26年11月より進めることとなった。この津波避難計画の策定にあたっては、港湾地域における就労者や利用者が津波から安全かつ迅速に避難できるよう、多様な関係機関が連携し、港湾の特徴や津波避難に係る課題等を抽出して全体的な対策を検討する必要がある。

このため、常陸那珂港区の立地・利用企業等を含めた関係機関によるワーキンググループ（作業部会）が組織されることとなり、本プロジェクト研究を担当する研究者1名がアドバイザーとして参画することとなった。

ワーキンググループの設置趣旨は、津波避難計画の策定に向けて、港湾の特徴（立地・地理的条件、産業・物流活動、利用者、被災履歴等）や津波避難に係る課題等を抽出し、ハード・ソフト両面からの津波避難対策の方針を検討するにあたり、各関係機関の東日本大震災における被災経験や、独自の津波避難計画等の情報を共有し、総合的かつ適切な津波避難計画を計画することである。そのために、茨城港常陸那珂港区で産業・物流・サービス等の活動を行っている立地・利用企業、港湾振興機関、行政関係者、港湾管理者の防災責任者等を構成員として、ワーキンググループが組織された。

開催状況、主な論点などは以下のとおりであった。

（第1回）平成26年11月19日

- ・津波避難計画の概要について
- ・津波避難計画策定に係るワーキンググループの設置について
- ・関係者へのアンケートの実施について
- ・今後のスケジュールについて

（第2回）平成27年7月17日

- ・津波避難の取組みアンケートの結果について
- ・津波避難シミュレーションの結果について
- ・常陸那珂港区における津波避難計画骨子について
- ・今後のスケジュールについて

（第3回）平成27年12月7日

- ・常陸那珂港区における津波避難計画（案）について
- ・ハザードマップ（案）について

それぞれの会合では2～3時間程度の議論がなされたが、まず、大規模な津波への対策を計画するうえで必要な港湾の特徴の把握（立地・地勢条件、地盤・土質条件、産業・物流活動の特徴、SOLAS 制限区域の分布の特徴、利用者の特徴、避難先の指定状況等の現況の把握）が議論された。このうち、津波避難シミュレーションに関係する主要な項目としては、利用者、すなわち避難者となりうる者の人数と所在位置、属性といった特徴の把握である。また、避難先の指定状況も関連する。次に、津波浸水想定（津波浸水想定図、波源モデル、最大クラスの津波の選定、津波シミュレーションの条件設定、施設の条件設定、建造物の越流破壊の条件の想定、津波影響開始時間の把握、最大遡上高、沖合津波水位分布）について議論が行われた。このうち、津波避難シミュレーションに関係する主要な項目としては、どこまでを避難が必要な範囲として定義するかという観点で必要な津波浸水想定（範囲）の情報、津波影響開始時間、どの程度の高さの避難施設が必要かという水位分布などである。こうした情報をもとに、避難対象地域の設定、地震発生後の一定時間に自治体等により指定されている既存の避難場所に徒歩でむかった場合に津波に巻き込まれる危険性の高い避難困難地域の抽出が行われる。最終的に、津波避難シミュレーションの結果を参考に、緊急避難場所の確保、避難経路の検討、津波情報等の伝達手段の確保、津波避難対策の周知、啓発といった事項が取りまとめられた。

地域によって差異が生じる可能性はあるが、津波避難計画の計画方法と計画プロセスについては、概ね上述のような流れが想定され、その際のどのように津波避難シミュレーションを活用しうるかという点を例として示した。

なお、ワーキンググループにアドバイザーとして参加したことにより、津波避難対策のなかでも港湾の津波避難対策を検討するうえでのポイントとなる事項をいくつか知見として得たので、下に参考として記載しておきたい。

まず、港湾地域は、市町村等の自治体による避難対策の範囲外にある「避難空白地域」である。すなわち、市町村等の自治体では地域防災計画に基づき津波避難計画を策定し対策を講じているが、港湾地域は特に計画が定められていない限り、そうした計画が存在しない避難空白地域である。

計画の基礎となるべき避難対象者の全体像は、把握されていない。そこで、港湾管理者等がアンケートを行うことで把握する必要がある。その際、未提出企業への個別的回収依頼を丹念に行うなど、出来る限り正確に把握する必要がある。

液状化、不等沈下の不陸、SOLAS フェンス等の迂回・速度低下要因を細かく把握する必要がある。例えば、SOLAS フェンスは港湾に特有の施設であるが、敷地の境界に沿って長く張り巡らされ、限られた場所しか出入り口が無い場合、避難者は直線状の最短経路を取ることが出来ず、避難経路の設定にあたって注意が必要になる。

既存の避難計画がある場合はそれを踏まえ、空白を埋めることを重視する必要がある。すなわち、港湾地域には多数の企業等が立地しており、すでにそれぞれの津波避難計画が用意されている場合がある。その際に、屋上に屋を重ねる計画を策定してもその活用は期待できないことから、実用的な計画とするために、空白を埋めることを重視する考え方が必要であった。

避難対象者の把握にあたり、通常時に想定される人員については、例えば来訪者であれば来訪先の企業の責任において避難誘導を行うことが考えられるが、一方で花火大会、音楽イベント等の来訪者も生じると想定される。その場合は、津波避難対策は主催者が実施などの取り決めが必要である。

最後に、簡明な対策案の提示の必要性についてであり、津波避難計画として複雑な対策を伴うものは実現可能性の点から適当ではないと考えられる。例えば、「避難開始時間を5分早める」と「x地区及びy地区に避難場所を1か所ずつ設置する」とにより避難困難地区を解消する計画といった、簡明な対策案の提示が行われると、実施すべき対策が明確に設定され、関係者の認識の共有が容易であり、策定された津波避難計画の実施という次の段階へスムーズに移行することが可能になると考えられる。

#### 4. おわりに

南海トラフ大地震による大規模な大津波の発生のおそれや人々の心に残る 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の記憶などから、大規模な津波に対して沿岸域の耐性を高めていくことに社会は関心を寄せている。予想されている南海トラフ巨大地震による津波は、それまで考えられていた津波を大きく超える大きさのものである。それに対して人々の生命や財産、地域の経済や産業をどのように守っていくのか、千年に一度とも言われる時間スケールに対してどのように時を乗り越えていくのか。そうした問題に対していくつかの視点から具体的な取組を行ったが、ここでの検討の他にも、避難などのソフト的な対策であっても大規模なイベントに備えるためには負担が重くなること、人口減少・少子高齢化が進み、行政組織・財政状況が厳しい中で、それらに対する負担や責任を誰がどのような形で受け持つのが合理的なのかなどの問題があり、答えにたどり着くことが容易ではない。はじめから答えを見通して取組を進めることは困難であるが、想像力を働かせ、様々な可能性を試み、問題解決に向かって一步一步進んでいくことが重要である。

## 5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、研究体制に記載した機関、組織の方々、調査に協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

海洋レーダに係る技術開発については、関西大学高橋智幸教授、琉球大学藤井智史教授に協力を頂きました。2011年東北地方太平洋沖地震津波の際の避難状況に対する津波避難シミュレーションの適合性については、釜石市危機管理監防災危機管理課、同市産業振興部港湾振興課、国土交通省東北地方整備局釜石港湾事務所に資料提供その他の協力を頂きました。津波避難の開始時刻のモデル化については、山口大学人文学部社会学講座人文科学研究科高橋征仁教授に避難者の心理について意見を頂きました。東京大学浦田淳司氏には津波避難開始時間の検討に係る情報や、米国における原子力災害時の避難開始時間の数理モデルについての情報を頂きました。土木計画学委員会の講演会では、多くの方々から意見を頂きました。避難訓練をもとにした避難行動の観測とその結果の分析については、下田市役所市民課防災係および同建設課の方々には測定のための事前調整等で協力を頂きました。下田市大和区自主防災会の方々には測定の実施に協力を頂くとともに、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方々にも協力を頂きました。また、津波避難シミュレーション技術を使用した津波避難の検討については、茨城県土木部港湾課の方々および茨城港常陸那珂港区の関係者の各位に検討の機会を頂きました。その他多くの方々にも協力を頂きました。

心より感謝申し上げます。



---

国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告

PROJECT RESEARCH REPORT of N I L I M

No. 57                  April 2017

編集・発行 © 国土技術政策総合研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1

国土技術政策総合研究所 管理調整部企画調整課