

平成 25 年度

雪国地域独自の津波および雪・地震複合災害  
の被害軽減策と復興モデルの提案

報告書

2014 年 3 月

金沢大学理工研究域・環境デザイン系・講師・池本敏和  
金沢大学理工研究域・環境デザイン系・教授・宮島昌克  
福井工業高等専門学校・環境都市工学科・教授・吉田雅穂  
福井工業大学・工学部・建築生活環境学科・准教授・竹田周平

本書は、（一社）北陸地域づくり協会が公益事業で実施している「北陸地域の活性化に関する研究助成事業」で共同研究を行った[雪国地域独自の津波および雪・地震災害の被害軽減策と復興モデルの提案]の成果をまとめた報告書として、刊行したものです。

2014年3月

一般社団法人 北陸地域づくり協会  
企画部

# 目次

## 序章

1. 研究の概要..... 1
2. 関連する既往の調査及び研究..... 5
3. 本研究の内容..... 7

## 第1章 屋根雪の滑落を考慮した木造住宅の地震応答解析

1. 概説..... 13
2. プログラムの概要..... 13
3. 解析結果と考察..... 21

## 第2章 積雪と津波の複合災害に関する簡易方法を用いた橋梁の流出に関する研究

1. 研究の概要..... 32
2. 津波被害の簡易分析..... 33
3. 簡易式による橋梁損傷度判定と結果..... 36
4. まとめと今後の課題..... 41

## 第3章 複合地震災害の防災ランドマークに関する研究

1. はじめに..... 42
2. 北陸地方における複合地震災害..... 43
3. 防災ランドマークの調査..... 45
4. 複合地震災害に対する防災意識を向上させるためのウェブページの開発..... 53
5. おわりに..... 63

## 第4章 積雪時地震による津波避難シミュレーション

1. はじめに..... 65
2. 津波避難シミュレーションにおける諸条件..... 65
3. 津波避難シミュレーションの結果..... 73
4. 津波避難シミュレーション結果の考察..... 78
5. まとめ..... 82

## 第5章 まとめ

- ..... 83

## 付録

- I 雪壁の剛性評価実験..... 88
- II 屋根雪の落雪実験..... 89
- III 避難時における歩行速度実験..... 90

# 「雪国地域独自の津波および雪・地震複合災害の被害軽減策と復興モデルの提案」

## 序章

### 1. 研究の概要

#### (1) 研究の趣旨, 目的等

わが国の国土において、北海道地方、東北地方、北陸地方などの地域を中心とした約半分（50.7%）もの地域が、豪雪地帯として指定されている（図序-1-1）。このような気候をもつことから、日本各地には遠い昔から雪国特有の伝統や文化、街並み、知恵などが生活の一部として根付いており、それらは今日までも受け継がれている。しかし、高度経済成長期を迎えた戦後以降において、わが国の生活様式や街並みなどはさまざまな点で急速な変貌をとげてきた。そのため、過去の雪による被害とは異なった被害が見られるようになってきた。特に、本年の降雪は秋田県や首都圏を襲い、死者 19 人（2014 年 2 月 18 日現在）と近年類を見ない大雪被害を各地にもたらしている。

また一方で、日本列島は北米プレートとユーラシアプレートの 2 つの大陸プレートにまたがり、さらに太平洋プレート、あるいはフィリピン海プレートの沈み込みによって強く圧縮されている。これらの 4 枚のプレートの衝突部に位置していることから、日本は世界でも有数の地震大国であり、近年においても阪神淡路大震災、新潟県中越地震、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災などの大規模な地震が日本列島の至る場所において発生している。これらの地震は、我々に甚大な被害と多くの教訓を残してきた。そのために地震に関する研究は今日においてめざましい進展を遂げており、多くの研究成果を残している。

しかし、これらの地震の研究は主に無積雪期であることを前提としたものが多く、積雪期の地震の発生は日本各地で発生しているにもかかわらず、未開発の部分が多く、地震防災対策上の盲点であると言える。

2011 年 3 月 12 日に発生した長野県北部地震は、震源の深さおよそ 8km、マグニチュード 6.7 であり、最大震度は長野県下水内郡（しもみのちぐん）栄村において震度 6 強を記録した。この地震は積雪期に発生した大規模地震としては、1994 年の青森県三陸はるか沖地震（M7.5）以来数年ぶりのものであり、大きな被害をもたらした。人的被害は死者 3 名、負傷者 67 名（うち重傷者 1 名、軽傷者 66 名）であり、住宅被害は全壊が 63 棟、半壊が 334 棟、一部損壊が 2068 棟であった。

このように、積雪期における地震防災対策は未だ積極的には取り組まれておらず、地震対策上の盲点となっている。さらに、都市部への人口流入による山村地域の高齢化、過疎化、都市の急速な変遷などの問題も深刻化しているという社会的背景も踏まえ、積雪期の防災対策について考える。

図 序-1-1 豪雪地帯の地域指定図

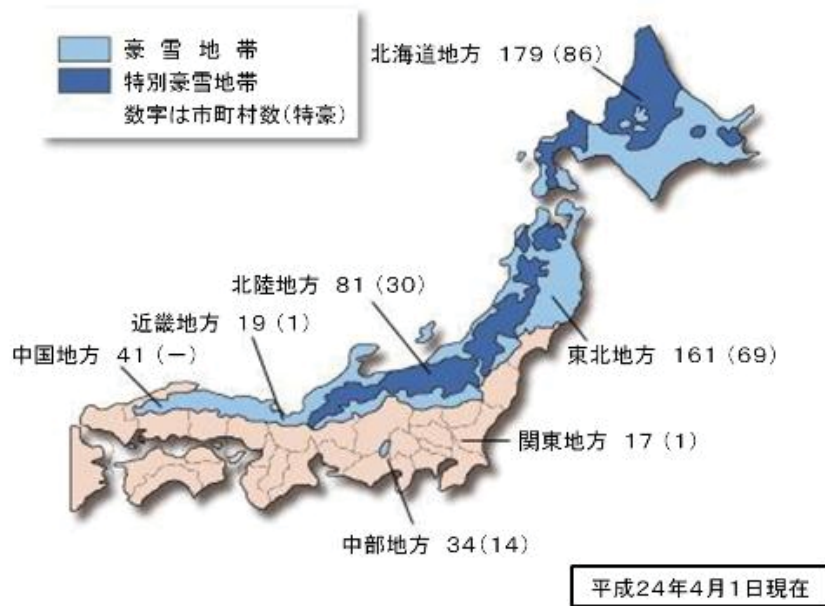


写真 序-1-1 雪の重みで倒壊した建物(北海道夕張市)



積雪期地震の様々な影響の中でも特に、地震が発生した際に、積雪が住宅の挙動にどのような影響を及ぼすか、という点に着目する。雪おろしが行われておらず、屋根上の積雪によって荷重が増大している場合に地震が発生すると、住宅の挙動は大きくなり家屋倒壊などの被害が通常より多く発生すると考えられる。さらに屋根雪は、地震動により屋根上を滑動し始め、その後落下するという事も考えられるが、こういった場合には、住宅の挙動にどのような影響を及ぼすのか明らかではない。このように屋根雪により住宅被害は

大きくなるにもかかわらず、今日の我が国においては、都市部への人口流入により山村などの豪雪地帯の高齢化が進んでおり、豪雪地帯において雪おろしが困難である家屋が存在していることも事実である。このような家屋の被害は人の生死に直接関係しているという点から、積雪期地震の様々な被害の中でも特に、積雪が地震時の住宅挙動に及ぼす影響を解明していくことを目的とした。

ところで、屋根雪がある場合には、荷重が増えるため住宅被害は増大すると考えられるが、家屋の周囲に積雪がある場合においては、家屋周囲の積雪が壁の役割を果たし、家屋の揺れを抑制するように働く、ということが考えられる。実際に、1961年2月2日に新潟県で発生した長岡地震においては、写真序-1-2に示すように、住宅の2階は倒壊しているが1階部分は雪の壁に支えられて倒壊しなかった、という事例がある。

以上のことより、主に上記した2つの現象に焦点を当て、これら2つの現象が同時に発生した場合の地震時の住宅挙動への影響について考える。まず、積雪の剛性を把握するとともに、屋根雪が落下した場合を再現した模型実験を行い、落雪による道路幅員の閉塞幅を把握する。そのため、積雪がある場合に住宅がどのような挙動を示すのかということ、モデル化した住宅で地震応答解析を行いシミュレーションすることで、積雪期における地震時住宅挙動を解明する。

写真 序-1-2 2階部分のみが傾斜した家屋



さらに、輪島市は平成に入ってから1993年の能登半島沖地震や2007年の能登半島地震といった2度の地震被害を経験しており、今や予断を許さない状態である。さらに、輪島市も家屋の全壊確率マップや液状化マップなどのハザードマップを公開しているに留まっておらず、それらのデータを活用した防災対策は行なわれていない。地震による津波被害を低減するには、住民の迅速な避難行動が重要となる。

日本海側は、太平洋側のように明確なプレート境界が形成されていなく、津波を引き起こす原因は海底の活断層によるプレート内の断層運動がほとんどである。本研究で対象と

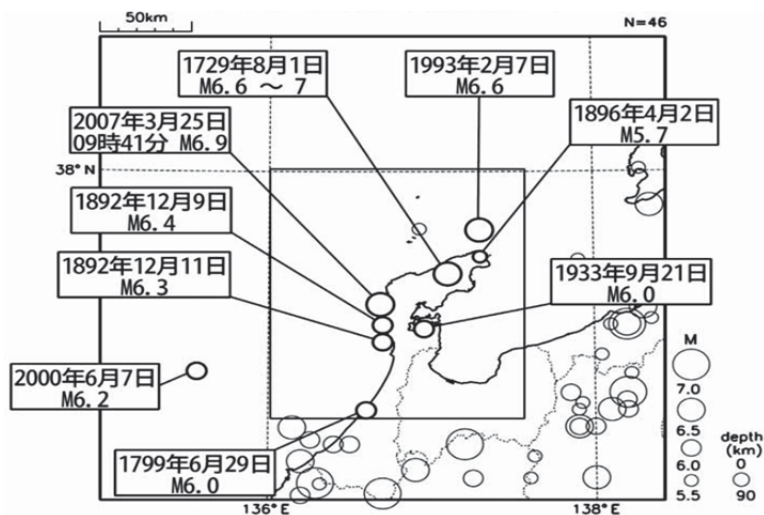
する石川県輪島市では過去に幾度も地震にみまわれてきた。そこで石川県輪島市の地震発生状況を図序-1-2に示す。過去300年間をみると、マグニチュード6以上の地震は10回以上発生している。また1910年から2010年のデータより、毎年のように震度1~4の地震が発生している。

輪島市は国土交通省が示した豪雪地帯に含まれており、石川県災異誌によると、1910年から2010年まで毎年の積算積雪量が2000cm以上である。また、1月から3月まで断続的な積雪がみられる。このことから、輪島市は「雪国地域」と言える。さらに輪島市は、日本海の沿岸部に位置し、地震発生による津波の影響も考えられるため、地震と津波と積雪の複合的な災害が発生する可能性が高い。

一方、輪島市は都市部への人口流入による「超高齢化地域社会」でもある。輪島市の高齢化率は32%であり、日本全体の高齢化率の23%を大きく上回る値となっている。高齢化率が高いこの地域は超高齢化社会特有の問題が考えられる。ところで輪島市の住宅街の特徴として、街路が細く、木造建物が多く密集している地域が多い。避難経路には、積雪期には歩行の困難とされる道や階段などがある。このことから、住宅街の脆弱性が高く、津波から避難することは難しい状況にある。

そこで、輪島市輪島地区における積雪の有無を考慮した効率的な地震津波に対する避難経路について検討する。

図 序-1-2 輪島市における地震発生状況





## 2. 関連する既往の調査及び研究

### (1) 輪島市における津波による被害

「最新版日本被害地震総覧」, 「日本被害津波総覧」, 「加賀藩史料」, 市町村史等の文献を調査し, 23種の津波に関して, 89件の記録を確認した(表序-2-1)。

石川県に影響があったと考えられる津波記録で, 最古は701年の若狭湾での記録であり, 波高が最も高いのは833年の天保の地震による津波であった。この津波については加賀藩史料に輪島市での津波高は五、六間(9~11m)との記述が残されているが, 具体的な被害地区まで分かるような記述はない。地区まで判断できる記録としては, 市内の神社所有の絵図に輪島市本町付近で5.8mと推定できる記述がある。また, 輪島市鳳至町の土蔵に津波の痕跡があり, 5.6mであったとする研究結果もある。このことから, 少なくとも輪島に6m弱の津波があったものと考えられる。

近年見られた輪島市における地震津波では2007年の能登半島沖地震によるものがある。この地震を受け, 気象庁は石川県能登沿岸と石川県加賀沿岸に津波注意報を発表した。地震発生から約1時間強を少し過ぎた頃に珠洲市と金沢港で約20cmの津波を観測した。津波注意報は11時30分頃に全面解除された。この地震による津波被害はほぼ見られなかった。

表 序-2-1 輪島市に影響のあった歴史的地震

西暦(和暦)	地域(名称)	M	主な被害
1729年8月1日 (享保14)	能登・佐渡	6.6~7.0	珠洲郡、鳳至郡で死者5人、家屋全壊・同損壊791棟、輪島村で家屋全壊28棟、能登半島先頭で被害が大きい。
1799年6月29日 (寛政11)	加賀(金沢地震とも呼ばれる)	6.9±1/4	金沢城下で家屋全壊26棟、能美・石川・河北郡で家屋全壊964棟、死者は全体で21人。
1833年12月7日 (天保4)	羽前・羽後・越後・佐渡	7.7	死者47人。
1891年10月28日 (明治24)	(遠尾地震)	8.0	家屋全壊25棟。
1892年12月9日 (明治25)	能登半島	6.4	羽咋郡高浜町・火打谷村で家屋破損あり。松松村末吉で、死者11人、負傷者5人、家屋全壊2棟。(11日にも同程度の地震あり。)
1933年9月21日 (昭和8)	能登半島	6.0	死者3人、負傷者55人、住家全壊2棟。
1944年12月7日 (昭和18)	(南東海地震)	7.9	住家全壊3棟。
1948年6月28日 (昭和23)	(福井地震)	7.1	死者41人、負傷者453人、家屋全壊802棟。
1952年3月7日 (昭和27)	(大宝寺沖地震)	6.5	死者7人、負傷者8人。
1961年8月19日 (昭和36)	(北奥濃地震)	7.0	死者4人、負傷者7人。
2007年3月25日 (平成19)	(平成19年(2007年)能登半島地震) →[地震本部の詳報] →リンク集	6.9	死者1人、負傷者338人、家屋全壊684棟。



(2) 避難速度及び地震・津波避難シミュレーションに関する既往の研究

内閣府は 2005 年に「津波避難ビルなどに係わるガイドライン」(図序-2-1)を公表し、津波が起きた際の避難速度設定を行っている。これが適応できるのはビル内や都会であり、本研究で対象とする輪島市では適応が困難と考えられる。

また、高知県海洋局は「漁村における津波対策基本方針検討会」を設置し、南海地震時に想定される津波からの避難路や避難広場などの施設整備計画基本方針を、漁村地区の上ノ加江をモデルとして検討している。高台や既設の避難場所に向かう避難路の整備計画及び避難誘導計画のためには、現状の道路網における避難経路網を明らかにする必要がある。また、避難経路の第一候補は最短距離経路であるが、地震災害時には道路沿いのブロック塀や古い建物等が倒壊する可能性があるため、必ずしも最短距離経路を通り避難できるとは限らない。そのため、ブロック塀や古い建物等の倒壊による、道路区間が閉塞する危険性を考慮した避難経路網を示す必要がある。

図 序-2-1 津波避難ビル等に係わるガイドライン

歩行速度		出典
通常 歩行 P1	老人単独歩行：1.3m/秒 (平均)	日本建築学会大会学術講演梗概集 別冊 建築計画・農村計画 (1980年) 「障害者を考慮した住宅団地の研究 (その1) 歩行行動から見た障壁の分析」足立啓 (関西大学助手)、小松和郎 (金沢工業大学教授)、荒木兵一郎 (関西大学教授 工博)
	群衆歩行速度：0.88~1.29m/秒 (晴眼者)	日本建築学会大会学術講演梗概集 別冊 建築計画・農村計画 (1980年) 「視覚障害者の安全歩行空間計画に関する研究 (その4) 駅構内における歩行追跡調査」芳村隆史 (関西大学大学院生)、早瀬秀雄 (関西大学大学院生)、荒木兵一郎 (関西大学教授 工博)
	障害者の歩行速度：0.91m/秒 (平均) (車いす利用者の場合)	日本建築学会大会学術講演梗概集 別冊 建築計画・農村計画 (1980年) 「障害者を考慮した住宅団地の研究 (その1) 歩行行動から見た障壁の分析」足立啓 (関西大学助手)、小松和郎 (金沢工業大学教授)、荒木兵一郎 (関西大学教授 工博)
昇降 P2	階段昇降速度 (老人)：0.21m/秒	日本建築学会大会学術講演梗概集 別冊 建築計画・農村計画 (1980年) 「障害者を考慮した住宅団地の研究 (その1) 歩行行動から見た障壁の分析」足立啓 (関西大学助手)、小松和郎 (金沢工業大学教授)、荒木兵一郎 (関西大学教授 工博)

GIS やマルチエージェントシステムなどを用いた避難シミュレーションに関する論文は、土木学会や日本建築学会などで論文としてまとめられている。源らによる「自主防災組織で活用可能な津波避難シミュレーションシステムの開発に関する基礎的研究, 2007」では、一つの町会を対象として自主防災組織で活用可能な津波避難シミュレーションシステムの開発を目的として、各住民の歩行速度並びに家屋倒壊による道路閉塞等を考慮した避難シミュレーションシステムを GIS とペトリネットシステムを用いて構築し、その実用性について研究がなされている。

大沸, 守澤による「都市内滞留者・移動者の多様な状態と属性を考慮した大地震における広域避難行動シミュレーションモデル, 2011」では、大都市を対象として、火災延焼時の避難シミュレーションについてマルチエージェントモデルを用いて広域避難行動におけるリスク評価について研究がなされている。

しかし既往の研究では、研究のために構築した GIS を用いて避難シミュレーションを行っていることや避難速度の設定も仮定値であり、この手法を多くの地方自治体で適用するには、多大な費用と時間の問題点が残る。また避難速度などは既往の研究によって求められた数値を用いており、これらの検証が行われていない点では疑問が残る。

本研究では、避難速度についての計測調査を行うとともに、多くの自治体で構築可能な GIS データを用いた地震・津波シミュレーションの研究を行う。

### 3. 本研究の内容

高齢者のみの世帯である場合、住宅再建のための資金調達も極めて厳しいことから、集落を捨てざるを得ない状況となり、集落は維持できない状況に陥ることとなる。そこで本研究では、雪国の超高齢社会を襲う地震に対する被害軽減を構築し、ならびに復興モデルを提示するだけでなく、同じような問題を抱えている北陸地方の過疎地域に対する地震被害に対する被害軽減、防災教育の向上及び住民の意思を取り入れた復興モデルを示すことを目的とする。ここでは、輪島市輪島地区を対象に検討する。

研究代表者はこれまでに超高齢過疎を考慮した積雪地域の地震被害軽減と復興まちづくりに関する調査研究を行ってきた。このことが、津波で被害を受けた東北地方にも十分あてはまり、地震後に積雪寒冷期を迎えた地域は例年に見られない大雪に襲われた。北陸地方でも過疎市を襲う地震は今後も十分予想できることや積雪寒冷地域に発生する地震の確率が高い。しかしながら、地震災害や超高齢化社会、超過疎化と雪害・津波との複合災害を取り扱った新規的な研究はほとんどないといえる。

本研究で得られる成果は、雪国の過疎高齢社会を襲う地震に対する被害軽減と復興モデルを構築し、雪国地域で発生するあらゆる地震に対する被害軽減、ならびに復興モデルを

提示するだけでなく、同じような問題を抱えている北陸地方の過疎地域に対する地震被害に対する被害軽減と復興モデルを示すことになり、本モデルが今後発生する地震に対する減災への貢献は極めて高いことが期待できる。

### (1) 25年度研究の流れ、スケジュール

#### ①実施スケジュール

過疎地域特有の問題、ならびに過疎地域における地震被害の問題点を抽出し、住民にも説得力のある復興モデル作成、ここで避難所の位置を提案する。雪害・津波と震害が同時に発生する複合災害における被害軽減策について検討を行い、被害軽減モデルと復興モデルを作成し評価を行う。また今後のためには、防災教育のアーカイブ化、視覚的に効果の上がる方策の提案を行う。さらに避難途中で津波が来襲した場合の避難路において最も重要な橋梁の被害予測を行った。これは津波到達後、人々が助かった場合のその後の避難行動に大きな影響を与えるものである。

将来、輪島市輪島地区モデルを例えば、山間地（長岡市山古志地区）に適用することにより、それぞれの地区での活用の利点・欠点を比較できる。

### (2) 調査、研究概要と担当

各章の概略は以下のようなものである。

- ①超高齢社会における雪・地震の複合災害被害の家屋解析および研究の総括（池本敏和）
- ②過去の地震災害の分類・整理・アーカイブ化及び防災教育の向上（吉田雅穂）
- ③津波を含む震害との複合災害における道路閉塞被害軽減策の提案（竹田周平）
- ④超高齢社会における津波・雪・地震複合災害の避難シミュレーション（宮島昌克）

### (3) 共同研究者のプロフィール

金沢大学理工研究域・環境デザイン系・講師・池本 敏和（いけもと としかず）

略歴：

- ・1998年2月 金沢大学工学部助手
- ・2008年4月 金沢大学大学院自然科学研究科助教
- ・2009年から2012年 立命館大学客員研究員
- ・2010年4月 金沢大学大学院理工研究域講師

学位：博士（工学）、一級建築士

専門分野：地震工学（複合災害工学，歴史遺産防災工学）

学会活動：

- ・土木学会，
- ・日本建築学会（災害本委員会委員（北陸支部委員長、役員兼任），

- ・2007年能登半島地震災害調査委員会委員,
- ・2007年新潟県中越沖地震災害調査委員会委員,
- ・2010年学会全国大会委員会委員),
- ・日本建築学会北陸支部講演「避難シミュレーションとリスクコミュニケーション」,
- ・日本雪工学会 (理事, 総務委員会委員),
- ・日本地震工学会,
- ・世界地震工学会議,
- ・構造物の安全性・信頼性に関する世界会議,
- ・世界地盤工学会議,

委員など:

- ・金沢市東山地区保存検討委員会,
- ・金沢市主計町伝統的建造物群保存対策調査専門委員会,
- ・金沢市卯辰山山麓寺院群伝統的建造物保存対策調査専門委員会,
- ・金沢城公園玉泉院丸石垣修築指導委員会委員,
- ・金沢城調査室委員,
- ・石川県近代化遺産総合調査委員,
- ・輪島市門前町黒島地区伝統的建造物保存対策調査専門委員会,
- ・金沢市寺町寺院群伝統的建造物保存対策調査専門委員会,
- ・金沢市防災計画策定委員会,
- ・金沢市歴史遺産保存検討委員会,
- ・主計町防災計画策定委員会,
- ・白山市七ヶ用水施設群委員会,
- ・金沢市文化財審議会,
- ・歴史的用水国際シンポジウム実行委員会委員,
- ・日本雪氷学会大会実行委員,
- ・NPO 法人フードバンク石川 (幹事)

金沢大学理工研究域・環境デザイン系・教授・宮島 昌克 (みやじま まさかつ)

略歴:

- ・1981年3月 金沢大学大学院修士課程 工学研究科建設工学専攻修了
- ・1981年4月 金沢大学助手
- ・1990年9月 米国コーネル大学客員助教授 (1年間)
- ・1992年4月 金沢大学助教授
- ・1996年3月 米国スタンフォード大学招聘研究員 (文部省派遣) (5.5ヶ月)
- ・2000年4月 金沢大学教授

・2008年4月 熊本大学客員教授（1年間）

学位：博士（工学）

専門分野：地震工学（ライフライン地震工学，都市防災工学）

学会・委員など

- ・土木学会2004年（平成16年）イラン・バム地震災害調査団団長
- ・土木学会・日本地震工学会 2006年（平成18年）ジャワ島中部地震災害調査団団長
- ・土木学会・地盤工学会 2007年（平成19年）能登半島地震災害調査団団長
- ・厚生労働省健康局水道課 2007年能登半島地震水道施設被害等現地調査団団長
- ・厚生労働省健康局水道課 2011年東日本大震災水道施設被害等現地調査団団員
- ・国土交通省北陸地方整備局事業評価監視委員会委員
- ・日本水道協会耐震技術検討専門委員会委員
- ・日本水道協会水道施設地震リスク管理検討委員会委員
- ・東京都水道局耐震設計ガイドライン検討委員会委員
- ・石川県防災会議専門委員
- ・石川県津波想定地震検討委員会委員
- ・石川県土木施設災害アドバイザー
- ・金沢市震災対策技術アドバイザー会議委員
- ・白山市防災会議専門委員 他多数

福井工業高等専門学校・環境都市工学科・教授・吉田 雅穂（よしだ まさほ）

地域連携テクノセンター長

略歴：

- ・1988年3月 金沢大学 工学部建設工学科 卒業
- ・1988年4月 福井工業高等専門学校 土木工学科 助手
- ・1994年5月 金沢大学工学部土木建設工学科 客員研究員
- ・1998年1月 福井工業高等専門学校 環境都市工学科 講師
- ・2001年4月 福井工業高等専門学校 環境都市工学科 助教授
- ・2005年3月 米国カリフォルニア大学 サンディエゴ校 客員研究員
- ・2007年4月 早稲田大学 理工学術院総合研究所 客員研究員
- ・2011年4月 福井工業高等専門学校 環境都市工学科 教授
- ・2011年10月 福井大学 大学院工学研究科 非常勤講師

学位：博士（工学）

専門分野：地震防災工学

学会等：土木学会，地盤工学会，日本建築学会，日本地震工学会，日本自然災害学会

社会貢献：

- ・土木学会地震工学委員会 委員
- ・土木学会木材工学委員会 副委員長
- ・福井県木材利用研究会 副会長
- ・福井県ラグビーフットボール協会 書記長

福井工業大学・工学部・建築生活環境学科・准教授・竹田 周平（たけだ しゅうへい）

学位：博士（工学）

専門：構造工学，耐震工学

学会活動：

- ・土木学会会員
- ・構造工学論文集編集小委員会 7. 橋梁制震・免震部門副主査
- ・地域地震防災基準に関する基本問題研究委員会 委員 など

## 参考文献

- 1) 国土交通省: 国土地理院, 防災関連情報 <http://www.gsi.go.jp/bousai.html>
- 2) 地震調査研究推進本部: 地震による被害の軽減を目指して, 土木学会誌 vol. 83, pp. 6-8, 2007. 4
- 3) 宇佐美龍夫, 石井寿, 今村隆正: 最新版日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 2013. 9
- 4) 渡部偉夫: 日本被害津波総覧, 東京大学出版会, 2012. 8
- 5) 石黒文吉: 加賀藩史料第 5 編 侯爵前田家編集部, 金沢歴史資料館, pp. 23-32, 1972. 1
- 6) 石黒文吉: 加賀藩史料第 6 編 侯爵前田家編集部, 金沢歴史資料館, pp. 34-38, 1973. 2
- 7) 内閣府: 津波避難ビル等に係るガイドライン, 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, 2007. 3
- 8) 北海道立北方建築総合事務所: 積雪・寒冷期を考慮した津波避難対策手法の開発に関する研究, 北海道発研究所, 2007. 3
- 9) 高知県海洋局漁港課: 漁村における津波対策基本方針, 高知県海洋局漁港課調査報告書, 2004. 7
- 10) 源貴志, 成行義文, 藤原康寛: 津波避難シミュレーションシステムの開発と地区の避難安全性評価への適用, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2008. 2
- 11) 大佛俊泰: 都市内滞留者・移動者の多様な状態と属性を考慮した大地震における広域避難行動シミュレーションモデル, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, pp. 756-764, 2006. 6
- 12) 輪島市役所: 市政情報 <http://www.city.wajima.ishikawa.jp/>
- 13) LSI Corporation: STA テクノロジー・ショーケース, 2013. 7
- 14) 石川県: 平成 23 年度石川県津波浸水想定調査概要版, pp. 13-24, 2011. 2
- 15) 丸岡直樹: 屋根雪の滑落を考慮した木造住宅の地震応答解析, 平成 24 年度学士学位論文, 2013



# 第1章 屋根雪の滑落を考慮した木造住宅の地震応答解析

## 1. 概説

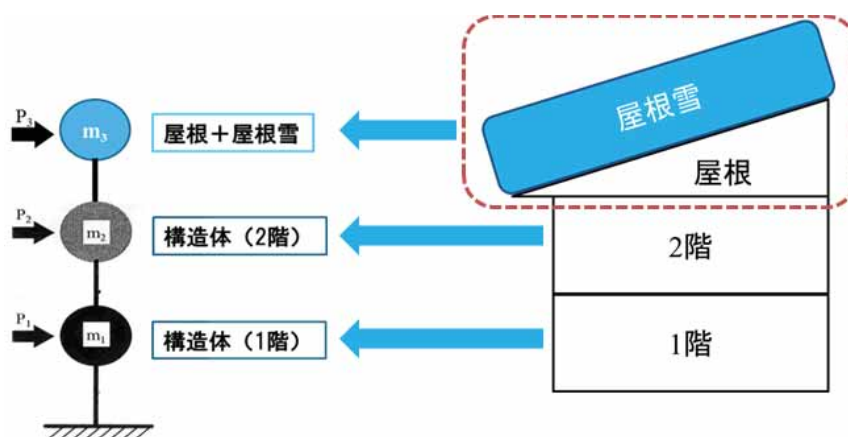
本章では地震波外力が加わらない状態での屋根雪の滑落、つまり自然滑落時の力学的な式を表現した。また屋根雪荷重が載った住宅に地震波外力が加わった場合、加振により屋根雪が滑動をはじめ滑落し、屋根雪荷重が除荷された場合の地震応答の変化を、質点系にモデル化し解析する。

## 2. プログラムの概要

### (1) 3質点系モデル化

本研究における解析では、住宅を質点系にモデル化し解析を行う。対象とする住宅は木造二階建て住宅であるが、ここで問題となるのが屋根雪の滑動・滑落である。屋根雪は、地震波外力が加わったことにより釣り合いが保たれなくなり滑動をはじめ、滑落することにより屋根上の雪の質量が刻々と変化する。このような屋根雪の滑落による荷重の変化を表現するために、木造二階建て住宅を3質点系にモデル化し解析を行うこととした。図1-2-1に3質点系モデルを示す。図1-2-1に示すように、住宅1階部分を質点  $m_1$ 、屋根を除く住宅2階部分を質点  $m_2$ 、屋根雪を含む屋根部分を質点  $m_3$  とする3質点系モデルとし、地震応答解析を行った。

図1-2-1 3質点系モデル化



(2) 対象とする住宅

今回の解析で対象とする住宅は、日本住宅・材木技術センターの木材住宅新工法性能認証に基づく計算書を参考にする。建物の概要を表 1-2-1 に示す。2 階建ての一戸建て住宅であり、1 階の高さは 349cm、2 階の高さは 467cm である。重量は 1 階部分が 40t、屋根を除く 2 階部分が 13t であった。また、対象住宅の平面図、立面図を図 1-2-2 から図 1-2-4 に示す。

表 1-2-1 建物概要

建物階数	2階建	
建物用途	一戸建て住宅	
建物規模	2階建	
工法	在来軸組工法	
基本モジュール	910mm	
軒高	1階	3490.00mm
	2階	6333.00mm
建物最高軒高	6333.00mm	
建物最高高さ	8160.29mm	
土台天端高さ	540.00mm	
床高	1階	72.00mm
	2階	40.00mm

図 1-2-2 対象住宅の 1 階平面図

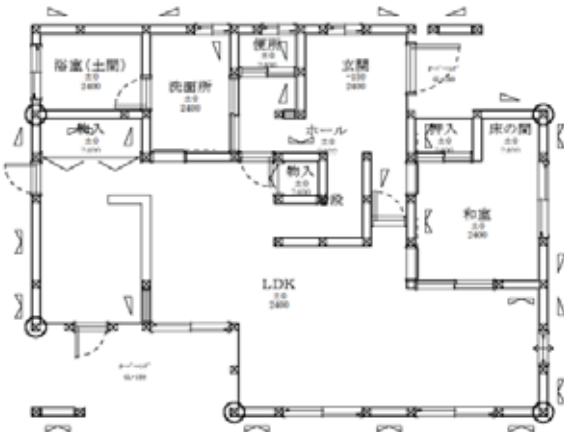


図 1-2-3 対象住宅の 2 階平面図

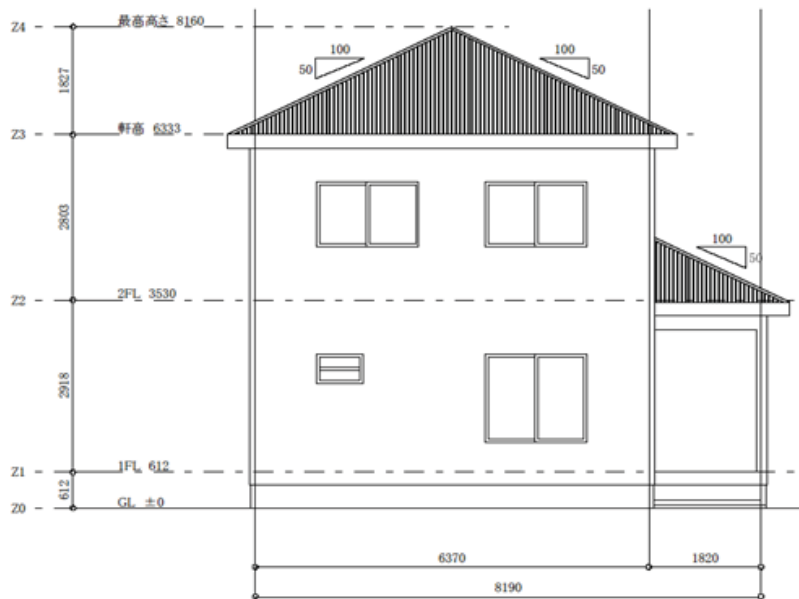
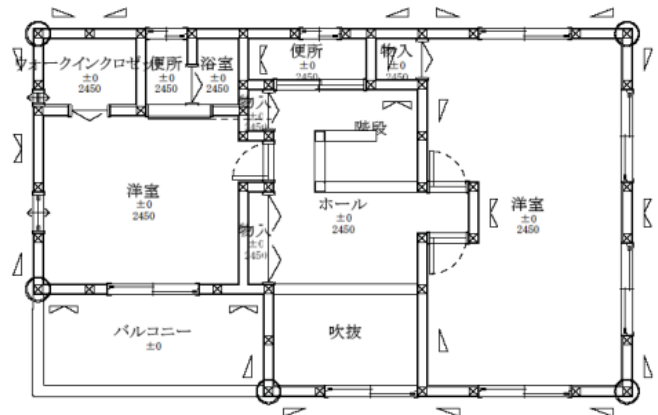
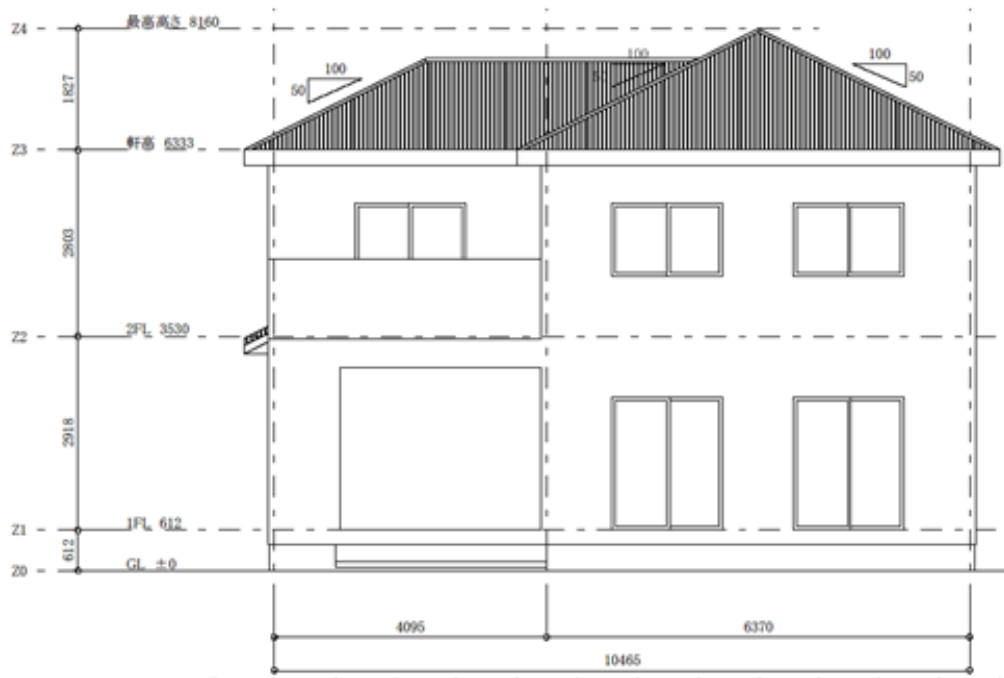


図 1-2-4 対象住宅の南側立面図



### (3) 木造住宅の復元力モデル作成

対象住宅の復元力モデルについては、既往の研究と同様に、日本建築学会構造系論文集の坂本らの論文を参考に耐力壁 1 枚の復元力モデルを足し合わせることで、実大建物の復元力モデルを作成した。耐力壁 1 枚の復元力モデルの作成に使用したデータを表 1-2-2 に示す。また、表中の  $a$ ,  $b$ ,  $c$  は以下の通りである。

①  $a$  は第 1 剛性に対するバイリニア要素の第 1 剛性の割合である。

$$a = K_{b1}/K_1$$

②  $b$  は第 1 剛性に対する第 2 剛性の割合である。

$$b = K_2/K_1$$

③  $c$  は第 1 剛性に対する第 3 剛性の割合である。

$$c = K_3/K_1$$

なお、表 1-2-2 の BR とは軸組み、GB とは石膏ボード、SD とはサイディングをそれぞれ表している。また、1 枚の壁の長さは 910mm とし、それを 1 単位として 1P とした。

今回は、第一折れ点の層間変形角  $\gamma_1$  を  $1/500\text{rad}$  とした。この理由は、木質構造物における荷重変位関係は、明確な損傷が確認できないまま非線形性を示すため適当に決定する必要があるためである。 $\gamma_3$  については、多数の実験データからサイディングは  $3/100\text{rad}$ 、石

石膏ボードは2/100radとした。また、本研究では最大耐力経験後の合成については一定とした。この理由は崩壊時の挙動については考慮しないためである。

これらのデータを基に作成した復元力モデルを図1-2-5から図1-2-8に示す。

表1-2-2 各壁の復元力モデルのパラメータ

	壁幅	筋交仕様	開口状態	a	b	c	第2折点 (mrad)	第3折点 (mrad)	第1剛性 (kN/mrad/m)
軸組み+石膏ボード+サイ ディング(BR+GB+SD)	1P	片筋交	無開口	0.35	0.70	0.10	5.5	30	2.0
	1P	両筋交	無開口	0.30	0.70	0.15	6.0	30	2.1
軸組み+石膏ボード (BR+GB)	1P	片筋交	無開口	0.48	0.62	0.10	5.5	30	1.4
	1P	両筋交	無開口	0.45	0.65	0.15	7.5	30	1.6
石膏ボード(GB)	1P		無開口	0.28	0.75	0.05	3.5	20	2.1

図1-2-5 BR+GB+SDの復元力モデル

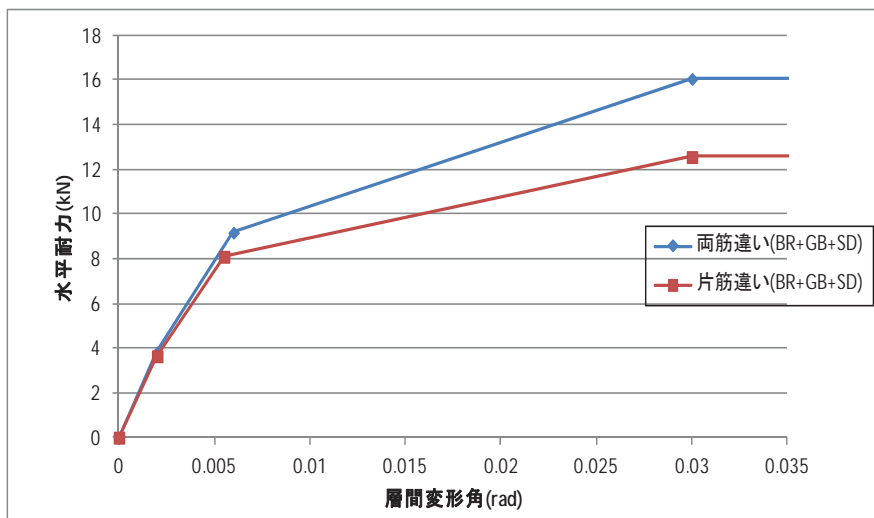


図1-2-6 BR+GBの復元力モデル

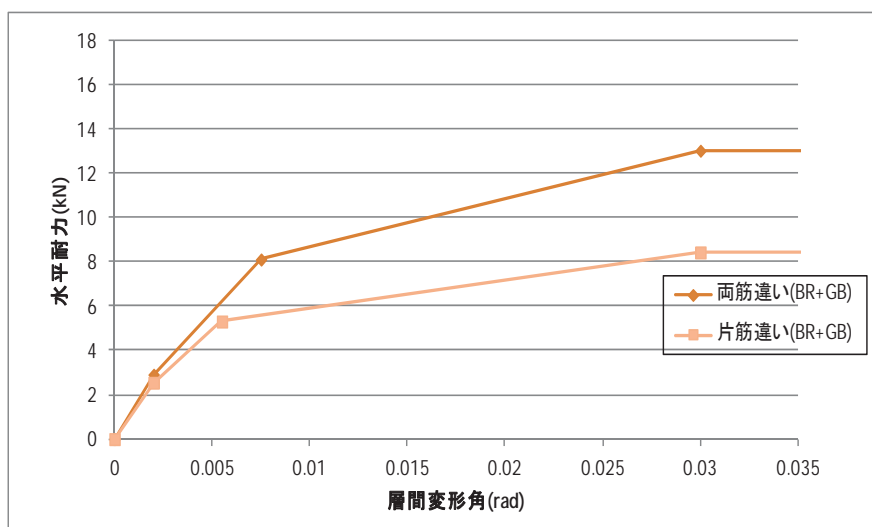


図 1-2-7 GB の復元力モデル

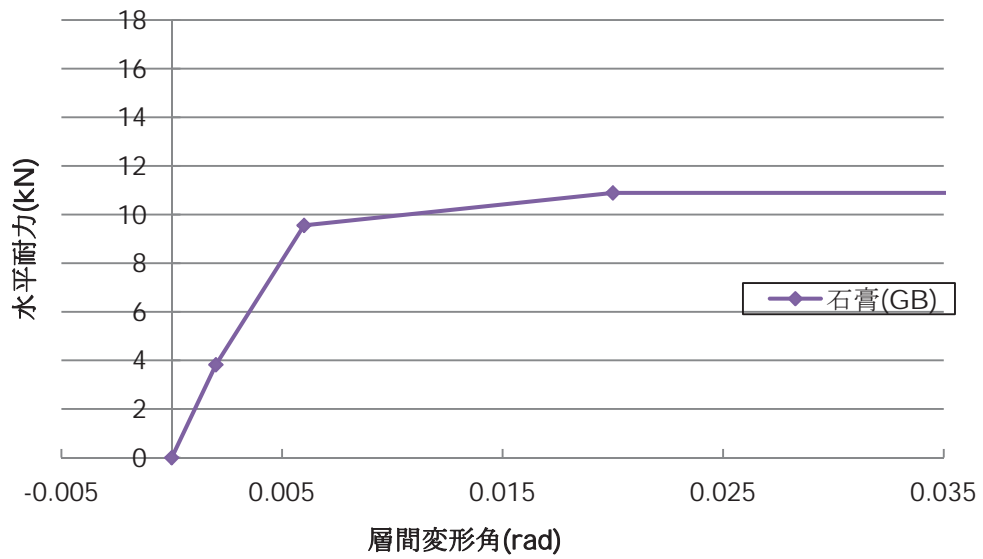
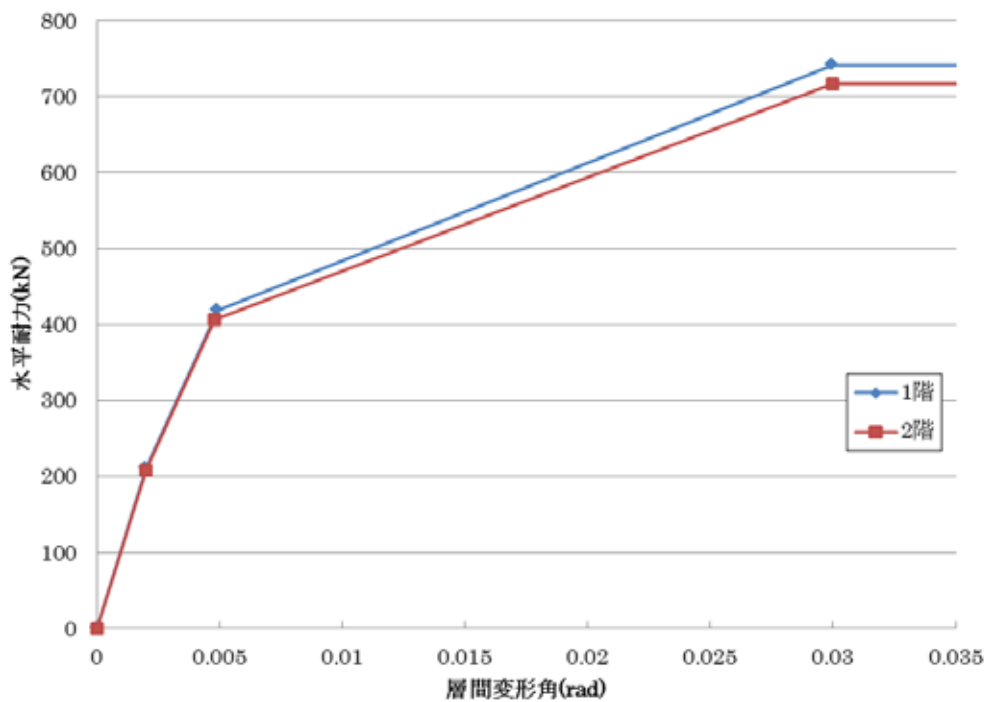


図 1-2-8 建物の復元力モデル



ここで、質点系モデルにおける1階の剛性  $k_1$  と2階の剛性  $k_2$  は以上のように求めることができた。屋根と屋根雪の剛性  $k_3$  については、2階部分と屋根部分を実際の場合において一体的に振動するよう設定する必要がある。一体となり振動するため必要な剛性を設定するために、 $k_3/k_2=1$ 、 $k_3/k_2=5$ 、 $k_3/k_2=10$  と徐々に剛性を上げて2階部分と屋根・屋根雪部分の

応答変位に着目した解析を行った。  $k_3/k_2=1$ ,  $k_3/k_2=5$ ,  $k_3/k_2=10$  のそれぞれの場合の 2 階部分と屋根・屋根雪部分の応答変位を図 1-2-9 から図 1-2-11 に示す。  $k_3/k_2=1$  と  $k_3/k_2=5$  の場合では 2 階と 3 階の変位に差が目立つため十分に一体的な振動であるとは言えないが、  $k_3/k_2=10$  となるよう設定した場合において、 2 階部分と屋根・屋根雪部分の応答変位が十分に一致したといえるため、本解析においては 2 階部分と屋根・屋根雪部分の剛性の比を  $k_3/k_2=10$  とする。

図 1-2-9  $k_3/k_2=1$  の場合の変位

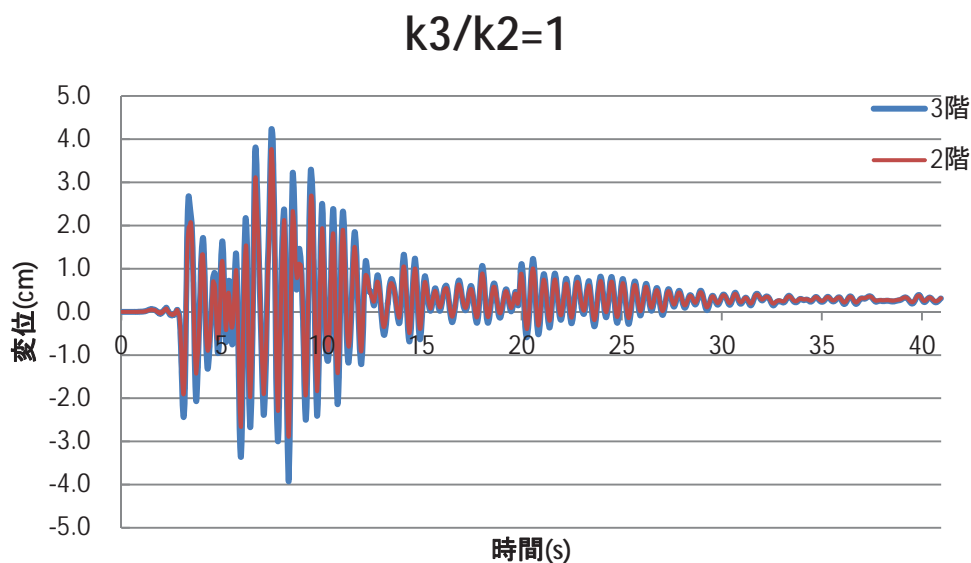


図 1-2-10  $k_3/k_2=5$  の場合の変位

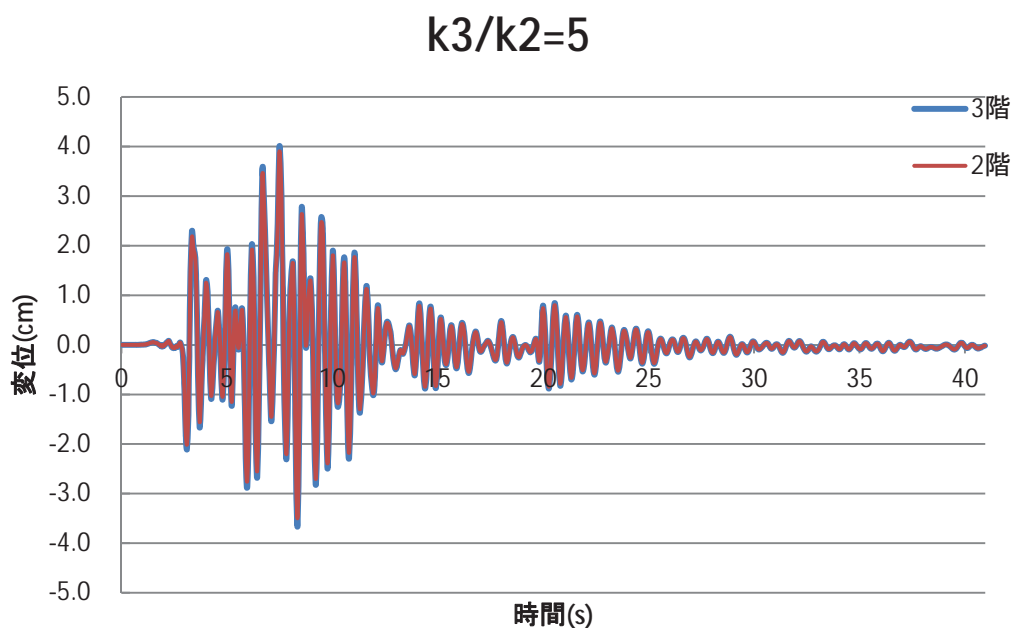
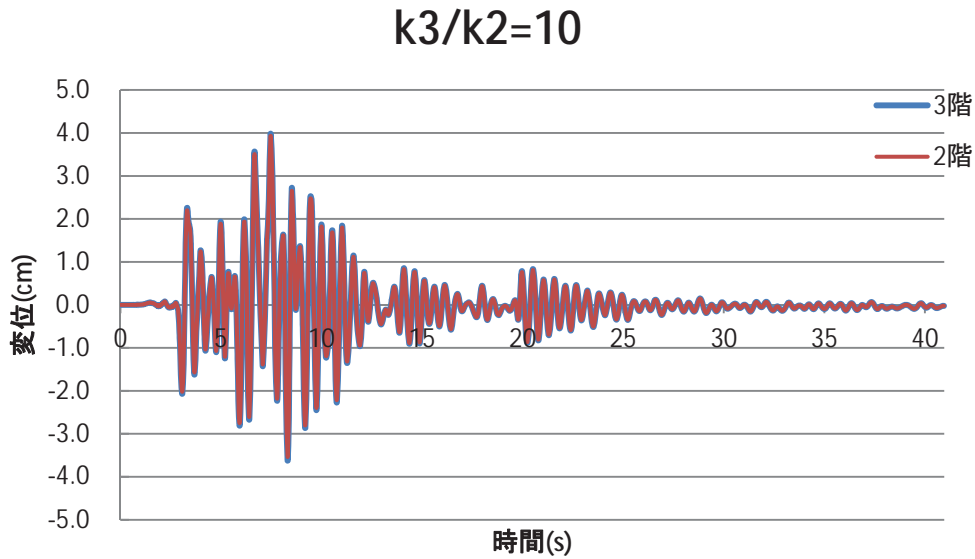


図 1-2-11  $k_3/k_2=10$  の場合の変位



#### (4) 屋根雪と屋根葺材のパラメータ

屋根雪と屋根葺材に関するパラメータを、表 1-2-3、表 1-2-4 に示す。住宅の屋根に積もる雪は、それぞれの地域ごとの気候的特色や、時間経過、温度変化による雪質の変化などによりそれぞれ密度が異なる。その点を考慮し、今回は大きく新雪、しまり雪、ザラメ雪の3種類の雪を考えることとする。新雪は、積もってからまだ間もない雪であり、密度は  $0.1(\text{g}/\text{cm}^3)$  前後と小さく、降雪の結晶系がまだ残っているものをいう。しまり雪とは、次から次へと上に積もった雪の重みで圧縮され堅く締めかためられた雪であり、密度は  $0.3(\text{g}/\text{cm}^3)$  から  $0.4(\text{g}/\text{cm}^3)$  のものが多くみられる。計算上では平均をとり  $0.35(\text{g}/\text{cm}^3)$  として扱うこととする。雪粒は氷の表面で昇華蒸発・凝結を繰り返した結果、丸みを持った  $1\text{mm}$  程度の大きさで、気温が低く雪の多い地方でよく見られる雪である。また、長い間雪がぬれている状態が続き、その雪が再び気温が下がって凍ると、雪粒は急に大きくなりザラメ雪となる。これは主に比較的暖かい地方に多くみられる雪であり、雪粒は  $3\text{mm}$  程度のものが多くみられる。雪の密度は  $0.3(\text{g}/\text{cm}^3)$  から  $0.5(\text{g}/\text{cm}^3)$  であるが、計算上では  $0.4(\text{g}/\text{cm}^3)$  として扱うものとする。

また、屋根に使用する屋根葺材は、それぞれ重さが異なり、一般的に用いられることの多い3種類を考えるものとした。日本建築防災協会発行の「木材住宅の耐震診断と補強方法」に記載されている軽い建物、重い建物、非常に重い建物のそれぞれの仕様例における屋根葺材の単位面積当たりの重量を参考に、軽い屋根として石綿スレート板、重い屋根として棧瓦葺、非常に重い屋根としては土葺瓦屋根を用いるものとした。



表 1-2-3 雪の分類と重量

	雪の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	雪の密度 (t/m <sup>3</sup> )	雪の単位深さ重量 (t/m)
新雪	0.1	0.1	11.84
しまり雪	0.3~0.4	0.3	35.52
ザラメ雪	0.3~0.5	0.4	47.36

表 1-2-4 屋根の分類と重量

	単位荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	W <sub>0</sub> (kN)	屋根の重量 (t)
石綿スレート板	0.95	112.49	11.48
棧瓦葺	1.30	153.93	15.71
土葺瓦屋根	2.40	284.18	29.00

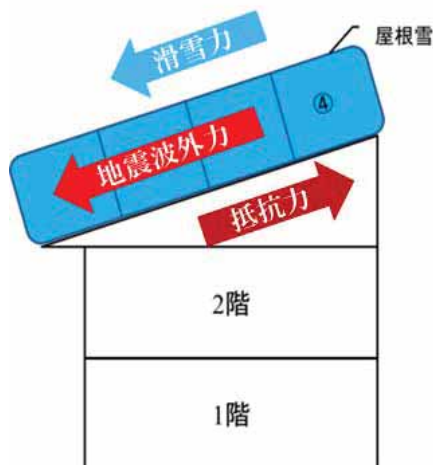
※対象住宅の屋根の総面積は 118.4 (m<sup>2</sup>)として計算

(5) 屋根雪の滑動・滑落に関するプログラム

屋根雪が住宅の地震応答に及ぼす影響として、屋根雪による荷重の増加による応答の変化、または地震波外力による屋根雪の滑動・滑落に伴う応答の変化という点が主に考えられる。

屋根雪の滑動に関しての考え方を模式的に表した図が図 1-2-12 になる。地震が発生する前までは雪の自重による滑雪力と、摩擦力や凍着力といった滑雪抵抗力が釣り合った状態になっている。しかしそこに地震が発生し建物がそれに応じて振動を始めると、質点 m<sub>3</sub>の一部と考えている屋根雪には、質点 m<sub>3</sub>の応答加速度と質量に応じた滑雪力が働くことになり、釣り合いが保たれなくなると屋根雪が滑動を開始する。このような考え方にに基づき、屋根雪を含む屋根部分である質点 m<sub>3</sub>の応答加速度が、プログラム中で設定した加速度の値を上回ると屋根雪が滑りだすという内容のプログラムを作成した。

図 1-2-12 地震波外力による屋根雪滑動の模式図



### 3. 解析結果と考察

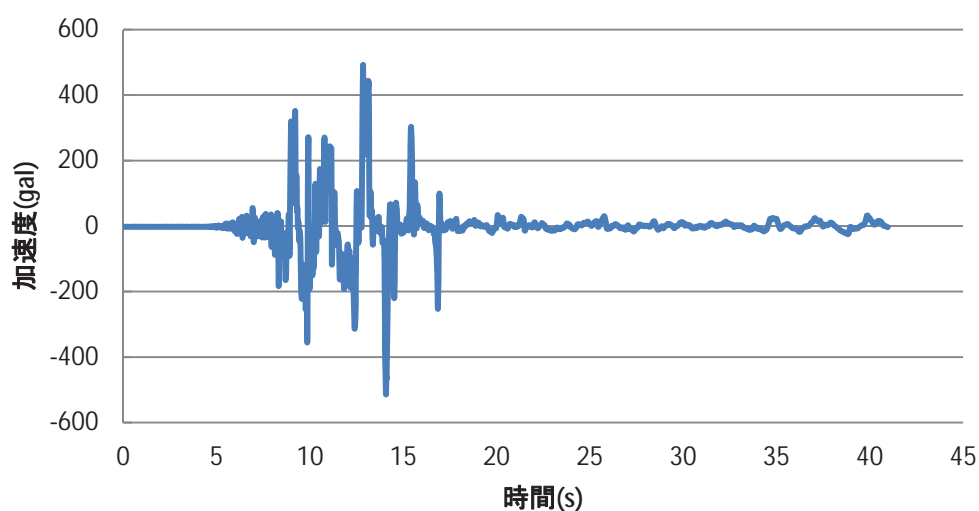
#### (1) 屋根雪荷重を考慮した解析結果

住宅に屋根雪がある場合には屋根雪がない場合に比べ、どの程度応答に差が出るかを明らかにするため、住宅に屋根雪が載っている場合、また屋根雪が載っていない通常の場合についての解析を行った。今回の解析において入力した新潟県中越沖地震の地震波を図 1-3-1 に示す。各パラメータの詳細については表 1-3-1 に示す通りである。解析結果を図 1-3-2 と図 1-3-3 に示す。なお、今回の場合において、屋根雪は滑落することなく、地震動が終了するまで屋根上に載った状態が持続しているものと仮定する。

表 1-3-1 パラメータ詳細

	屋根雪なし	屋根雪あり
入力地震波	新潟県中越沖地震	新潟県中越沖地震
屋根雪の深さ (cm)	0	100
雪質		しまり雪
屋根材	棧瓦葺	棧瓦葺
屋根雪滑落		なし
滑動開始加速度 ( $m/s^2$ )		

図 1-3-1 入力地震波 (新潟県中越沖地震 E-W 方向)



屋根雪のある場合(図 1-3-2)と屋根雪がない場合(図 1-3-3)を比較すると、屋根雪のある場合のほうが、屋根雪のない場合に比べ全体的に応答変位が大きくなるという結果となった。また、屋根雪がない場合では1階と2階の応答変位にあまり大きな差は見られないが、屋根雪があると応答変位は1階が最大でマイナス方向に22cm程度であるのに対し、2階が最大でマイナス方向に約30cmと、2階の応答が顕著に大きくなっていることが読み取れる。

また、屋根雪がない場合、住宅全体の残留変位はあまり見られないが、屋根雪がある場合には1階にはマイナス方向に約13cm、2階にはマイナス方向に約11cmの残留変位が生じている。以上のことより、屋根雪がある場合には住宅の応答は顕著に大きくなり、特にその影響は建物2階部分によくあらわれるといえる。

図 1-3-2 屋根雪のある場合

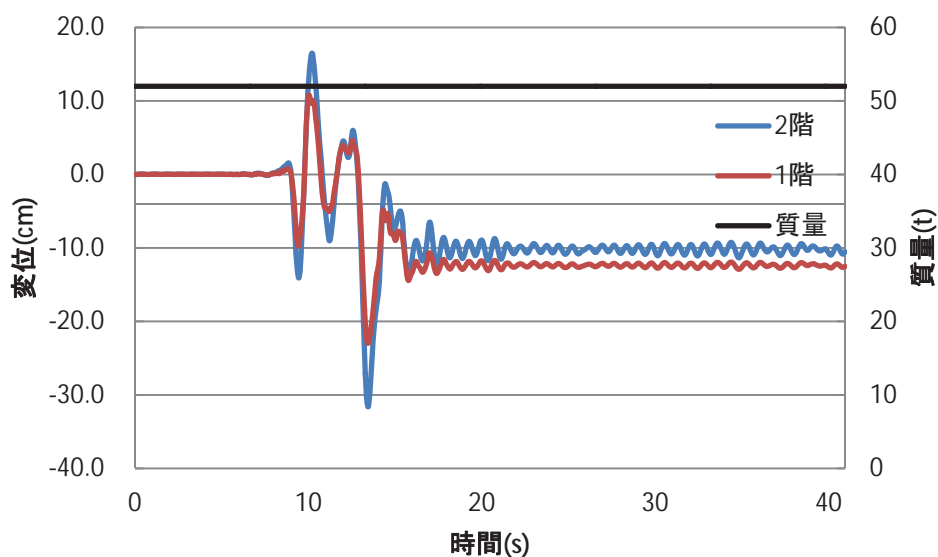
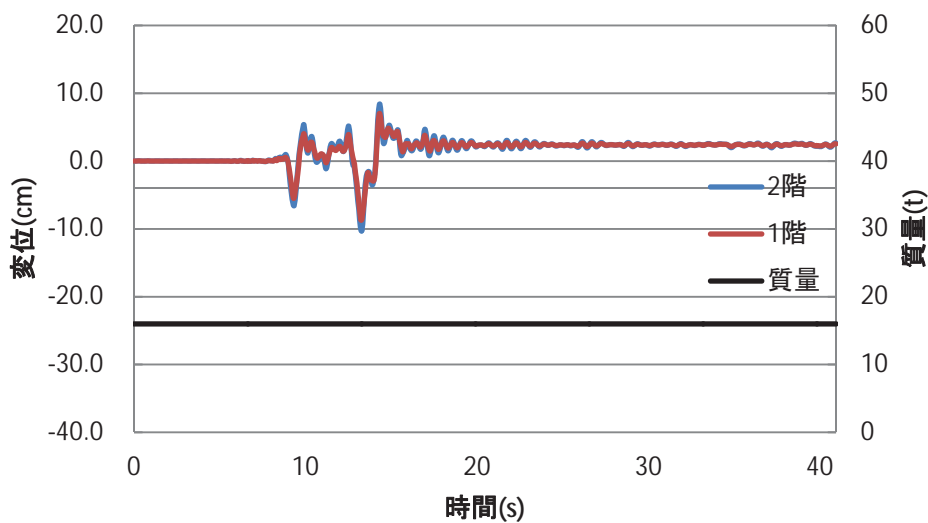


図 1-3-3 屋根雪のない場合



(2) 屋根雪の滑落による影響を考慮した解析結果

住宅に屋根雪が載った状態で地震動が発生すると、その振動により屋根雪の滑落が発生することが考えられる。屋根雪の滑落によって突発的に屋根雪荷重が除荷された場合、住宅の挙動にどのような影響を与えるかということをも明らかにするために、屋根雪の滑落による影響を考慮した解析を行った。屋根雪の滑落についてのプログラムは、図 1-3-4 ように最大で4つの段階に分割することができ、4段階にわたる滑落の場合、屋根雪の滑動が開始した時刻から1秒間隔で屋根雪の質量が4分の1ずつ減少していくという内容になっている。今回は、屋根雪の滑落が1段階の場合、2段階の場合、3段階の場合、4段階の場合についての解析を行った。また、今回の解析パターンにおけるパラメータ詳細を表 1-3-2 に示す。

図 1-3-4 屋根雪の滑落モデル

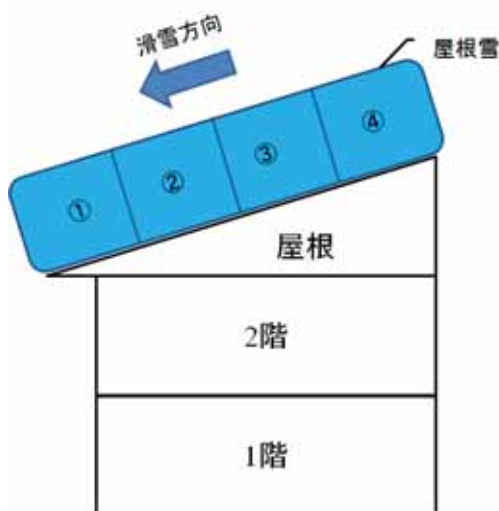


表 1-3-2 屋根雪滑落解析におけるパラメータ

	1段階	2段階	3段階	4段階
入力地震波	新潟県中越 沖地震	新潟県中越 沖地震	新潟県中越 沖地震	新潟県中越 沖地震
屋根雪の深さ(cm)	100	100	100	100
雪質	しまり雪	しまり雪	しまり雪	しまり雪
屋根材	棧瓦葺	棧瓦葺	棧瓦葺	棧瓦葺
滑落	1段階	2段階	3段階	4段階
滑動開始加速度(cm/s <sup>2</sup> )	300	300	300	300

解析結果を図 1-3-5 から図 1-3-8 に示す。それぞれの場合を比較したとき最も特徴的であり差が表れているのは、2 階の残留変位である。1 段階で滑落が発生する場合には残留変位は 5cm 程度であるのに対し、滑落の段階が細かくなるにつれ残留変位は小さくなっていき、4 段階で滑落する場合には約 2cm になっている。また、屋根雪が滑落し質量が変化した瞬間において、その時点において特に変位が大きくなっている様子は見られない。そのため、ここで重要となってくるのは、どのくらいの屋根雪の質量が何秒間持続した状態で振動が続いているか、という点になる。屋根雪の質量が大きい区間内に強い地震動が加わることにより、変位は通常時より増大していることがわかる。つまりこの場合に 4 段階にわたり滑落する場合において 2 階の変位が最も小さくなっているのは、1 段階の場合は 10 秒前後におけるプラス方向の変位の増大のみが発生しているが、4 段階の場合には 14 秒付近のマイナス方向への変位の増大も発生しているため、最終的な残留変位は相殺され小さくなったことが原因であると考えられる。屋根雪の滑落による瞬間的な変位の増大は見られないが、この場合においては地震波の波形の特徴、滑落の持続時間、またその両者の関係が被害の大小を決定する要素となりうると言える。よって、建物被害を軽減するためには短時間で多くの屋根雪を落とすことが有効であり、人的被害を軽減するためには、人が屋内にいる場合には短時間の滑落が、屋外にいる場合には雪の滑落による事故を軽減するため時間をかけた滑落が有効であることが考えられる。

図 1-3-5 屋根雪が滑落する場合(1 段階)

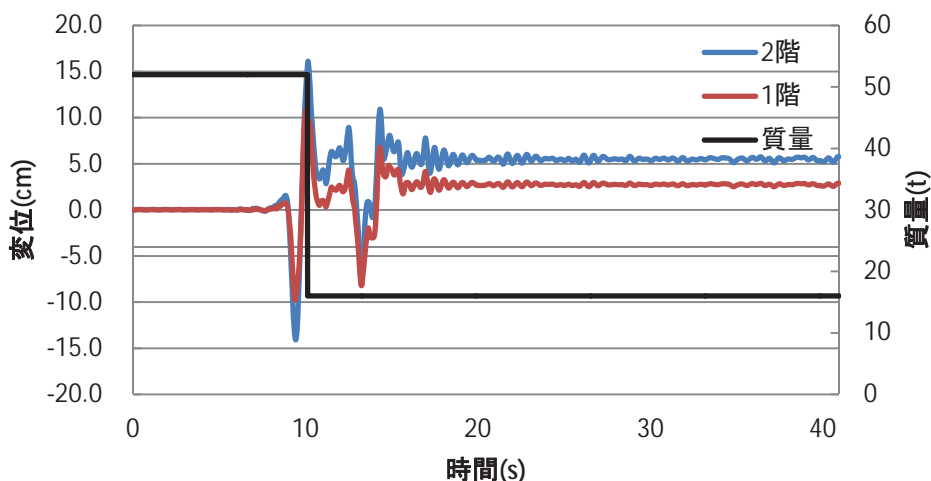


図 1-3-6 屋根雪が滑落する場合(2段階)

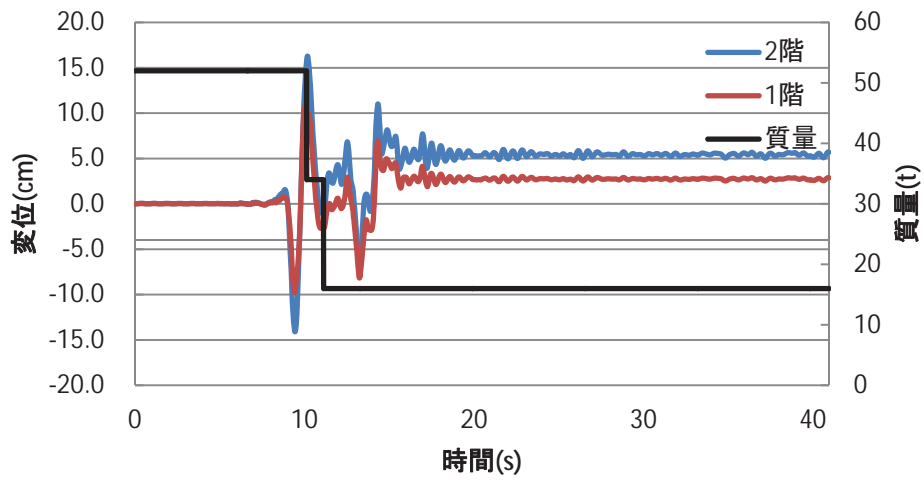


図 1-3-7 屋根雪が滑落する場合(3段階)

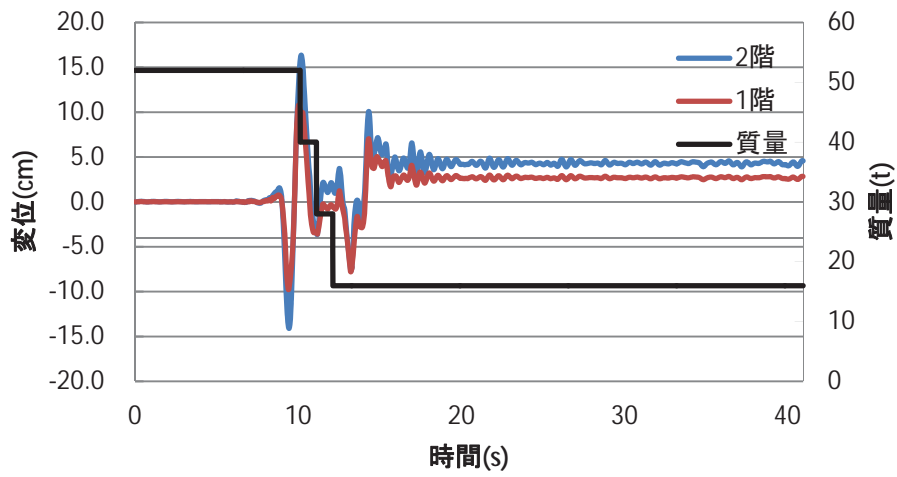
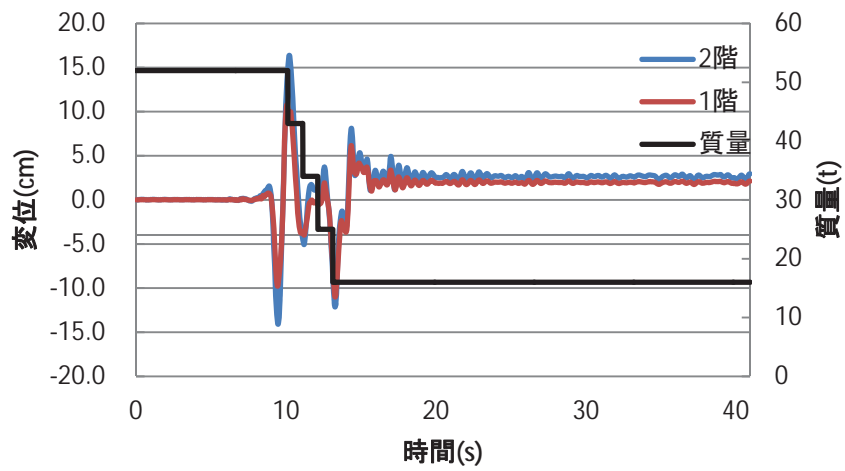


図 1-3-8 屋根雪が滑落する場合(4段階)



(3) 屋根雪の凍着現象を考慮した解析結果

実際の住宅の屋根では、屋根の温度分布はさまざまに変化する。そのため凍着現象も屋根の温度分布に依存しさまざまに発生することが考えられる。このような凍着現象の発生を考慮し、屋根雪が地震動により部分的に滑落することを想定した解析を行った。図 1-3-4 における①部分のみが滑落し、②③④部分は凍着力により滑落しない場合、①②部分のみが滑落し③④部分は凍着力により滑落しない場合、同様に①②③部分のみが滑落する場合、凍着力が発生せず①②③④部分すべて滑落する場合の 4 つのパターンの解析を行った。今回の解析パターンにおけるパラメータの詳細を表 1-3-3 に示す。

表 1-3-3 凍着現象を考慮した解析におけるパラメータ

	①部分滑落	①②部分滑落	①②③部分滑落	①②③④部分滑落
入力地震波	新潟県中越沖地震	新潟県中越沖地震	新潟県中越沖地震	新潟県中越沖地震
屋根雪の深さ (cm)	100	100	100	100
雪質	しまり雪	しまり雪	しまり雪	しまり雪
屋根材	棧瓦葺	棧瓦葺	棧瓦葺	棧瓦葺
滑落	①部分	①②部分	①②③部分	①②③④部分
滑動開始加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	300	300	300	300

解析結果を図 1-3-9 から図 1-3-11 に示す。凍着現象が屋根広域にわたって発生しているような図 1-3-4 のような場合、大きな屋根雪荷重が作用し続けているために最大応答変位、残留変位ともに大きくなり、危険であると言える。滑落が発生する部分が広くなり、滑落する屋根雪の質量が増えるにつれて、屋根上に滞留する雪は少なくなり、応答の増幅の程度も小さくなり安全になる。凍着強度が強くと、またその範囲が広ければ広いほど、屋根雪は屋根上にとどまり続けるために応答は大きくなり危険であると言える。



図 1-3-9 屋根雪の部分的滑落(①部分, 質量 1/4 滑落)

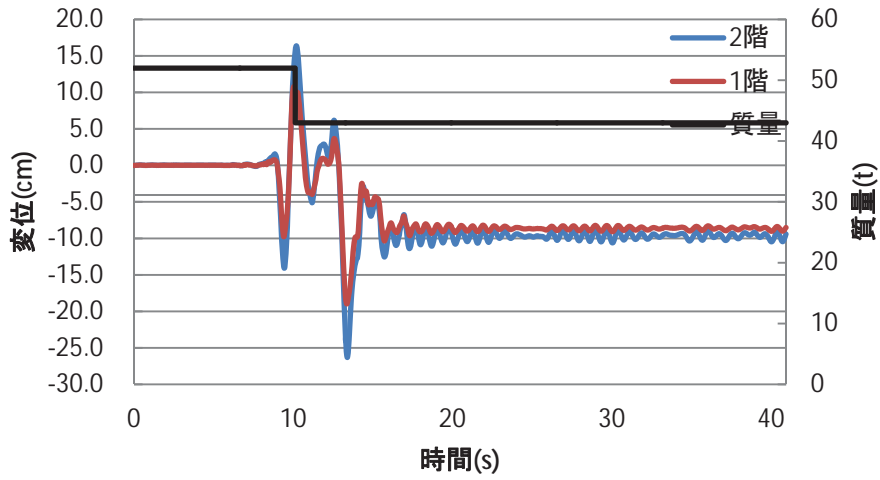


図 1-3-10 屋根雪の部分的滑落(①②部分, 質量 2/4 滑落)

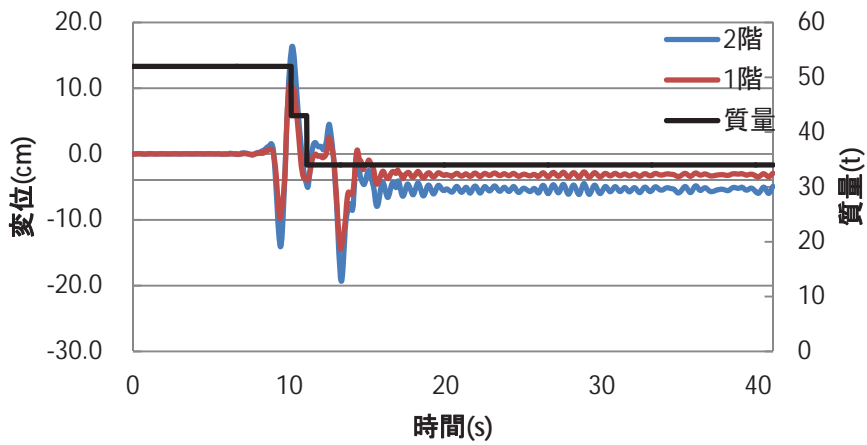


図 1-3-11 屋根雪の部分的滑落(①②③部分, 質量 3/4 滑落)

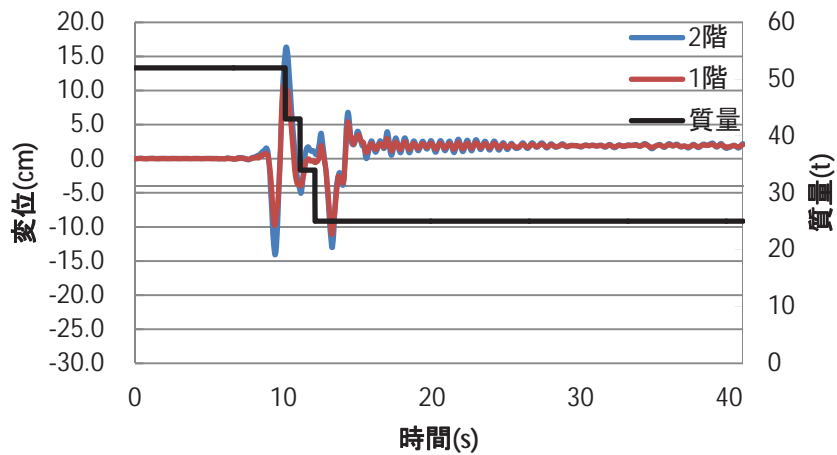
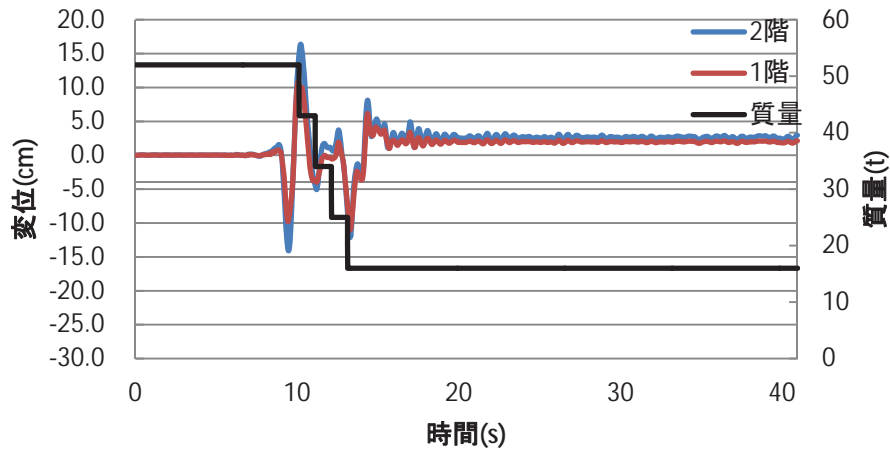


図 1-3-12 屋根雪の部分的滑落(①②③④部分, 質量 4/4 滑落)



(4) 屋根雪の滑落と雪壁の影響を考慮した解析結果

前節までの解析結果から、住宅の屋根上に雪が載っている場合、住宅の変位が通常時より増大することが明らかになった。しかし、住宅の周囲に雪の壁がある場合、この雪の壁が住宅の挙動にどのような影響を与えるのか、また被害は低減されるのかどうかなど、不明な部分が多い。雪の壁が住宅の地震応答に及ぼす影響について明らかにするために、屋根雪の滑落と雪壁の影響を同時に考慮した解析を行った。今回の解析パターンにおけるパラメータを表 1-3-4 に示す。

表 1-3-4 屋根雪滑落と雪壁を考慮した解析におけるパラメータ

	1 段階	2 段階	3 段階	4 段階
入力地震波	新潟県中越 沖地震	新潟県中越 沖地震	新潟県中越 沖地震	新潟県中越 沖地震
屋根雪の深さ (cm)	100	100	100	100
雪質	しまり雪	しまり雪	しまり雪	しまり雪
屋根材	棧瓦葺	棧瓦葺	棧瓦葺	棧瓦葺
滑落	1 段階	2 段階	3 段階	4 段階
滑動開始加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	300	300	300	300
雪壁	あり	あり	あり	あり
雪壁との距離 (cm)	10	10	10	10
壁のバネ定数 k=	1	1	1	1

解析結果を図 1-3-13 から図 1-3-16 に示す。この場合においても、残留変位に着目すると特徴的な結果となっていることが分かる。1 階の応答変位についてみると、どの場合においても雪壁との距離を 10cm としているためにそれ以上の変位は見られず、雪壁の影響により、変位は雪壁がない場合と比べ抑制されていると言える。しかし、屋根雪の滑落の段階が細かくなるにつれ、2 階変位と 1 階の応答変位に差が出てきているということを図より読み取ることができる。そのため残留変位は、雪壁がない場合の滑落の解析結果と比較すると、2 階部分が大きくなっており、1 階部分と比べて差が出ている。これは、1 階部分に大きな変位が生じてても、雪壁により 1 階部分に地震動外力とは別に逆方向の力が加わり、2 階部分は慣性により投げ出される形になり通常より大きな加速度が加わるためと考えられる。1 階部分の変位は雪壁による抑制効果が働き抑えられるが、2 階部分は変位が増大する場合もあるため、層間変形角が大きくなり倒壊する危険性も考えられる。

図 1-3-13 雪壁を考慮した屋根雪滑落(1 段階)

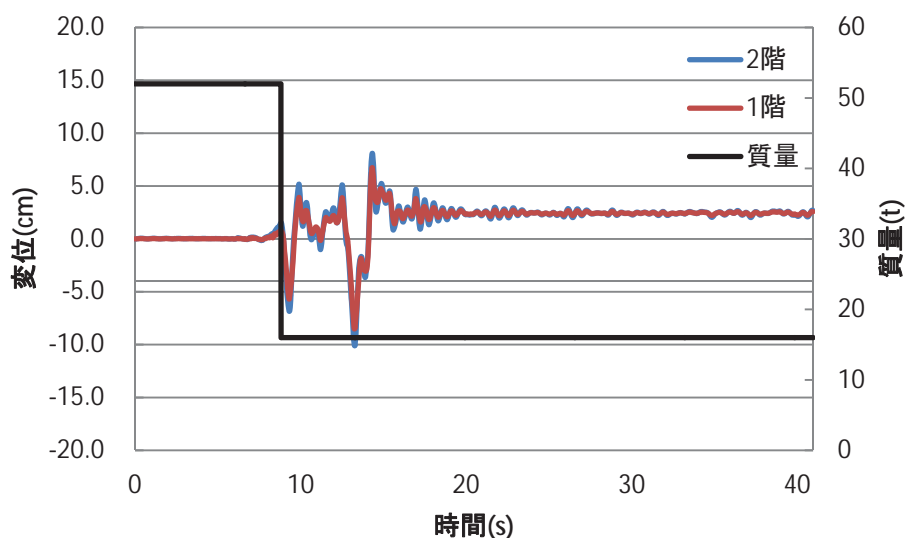


図 1-3-14 雪壁を考慮した屋根雪滑落(2段階)

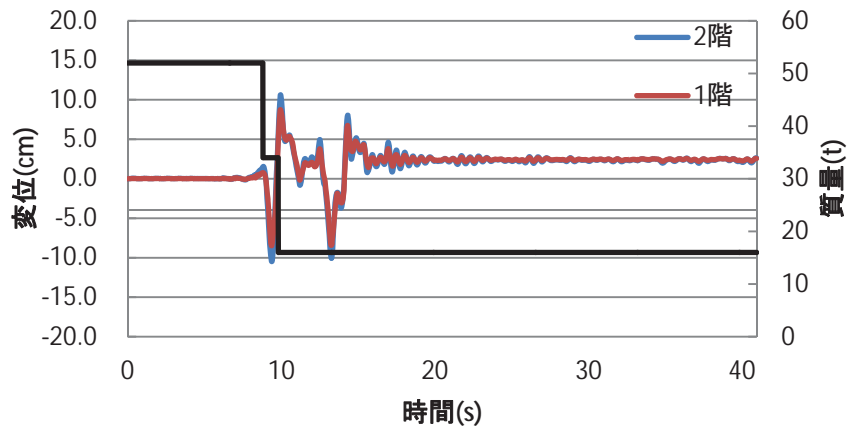


図 1-3-15 雪壁を考慮した屋根雪滑落(3段階)

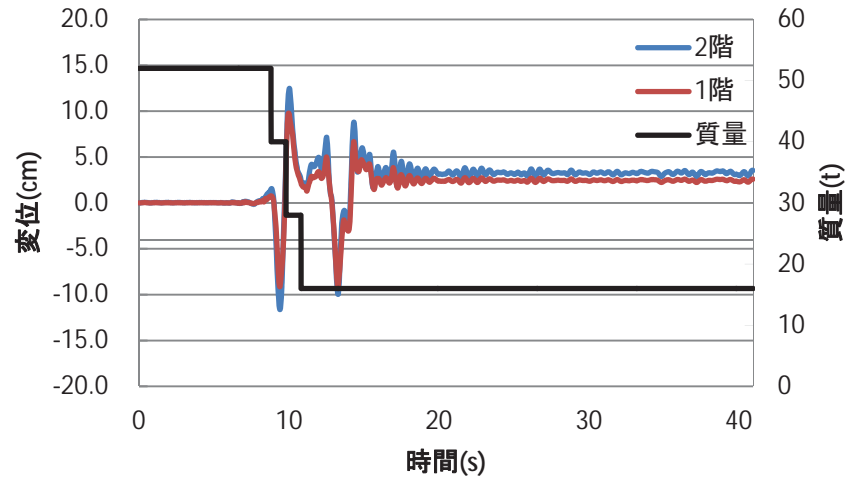
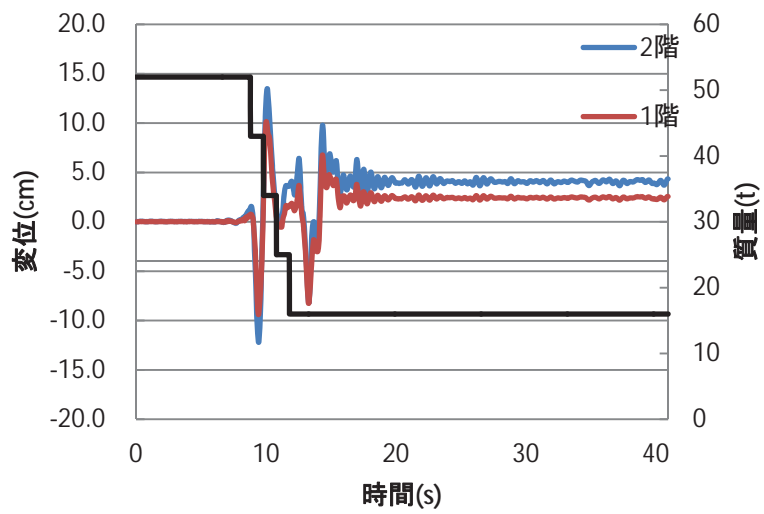


図 1-3-16 雪壁を考慮した屋根雪滑落(4段階)



## 参考文献

- 1) 国土交通省: 国土地理院, 防災関連情報 <http://www.gsi.go.jp/bousai.html>
- 2) 地震調査研究推進本部: 地震による被害の軽減を目指して, 土木学会誌 vol. 83, pp. 6-8, 2007. 4
- 3) 宇佐美龍夫, 石井寿, 今村隆正: 最新版日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 2013. 9
- 4) 渡部偉夫: 日本被害津波総覧, 東京大学出版会, 2012. 8
- 5) 石黒文吉: 加賀藩史料第 5 編 侯爵前田家編集部, 金沢歴史資料館, pp. 23-32, 1972. 1
- 6) 石黒文吉: 加賀藩史料第 6 編 侯爵前田家編集部, 金沢歴史資料館, pp. 34-38, 1973. 2
- 7) 内閣府: 津波避難ビル等に係るガイドライン, 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, 2007. 3
- 8) 北海道立北方建築総合事務所: 積雪・寒冷期を考慮した津波避難対策手法の開発に関する研究, 北海道発研究所, 2007. 3
- 9) 高知県海洋局漁港課: 漁村における津波対策基本方針, 高知県海洋局漁港課調査報告書, 2004. 7
- 10) 源貴志, 成行義文, 藤原康寛: 津波避難シミュレーションシステムの開発と地区の避難安全性評価への適用, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2008. 2
- 11) 大佛俊泰: 都市内滞留者・移動者の多様な状態と属性を考慮した大地震における広域避難行動シミュレーションモデル, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, pp. 756-764, 2006. 6
- 12) 輪島市役所: 市政情報 <http://www.city.wajima.ishikawa.jp/>
- 13) LSI Corporation: STA テクノロジー・ショーケース, 2013. 7
- 14) 石川県: 平成 23 年度石川県津波浸水想定調査概要版, pp. 13-24, 2011. 2
- 15) 丸岡直樹: 屋根雪の滑落を考慮した木造住宅の地震応答解析, 平成 24 年度学士学位論文, 2013

## 第2章 積雪と津波の複合災害に関する簡易手法を用いた橋梁の流出に関する研究

### 1. 研究の概要

#### (1) はじめに

2011年3月11日に三陸沖を震源とするマグニチュード9.0の巨大地震（東北地方太平洋沖地震）が発生した。この地震は国内で観測史上最大の地震であり、海外も含めると1960年のチリ地震(M9.5)、1964年のアラスカ地震(M9.2)、1957年のアリューシャン地震(M9.1)に次いで四番目の規模となった。この地震の発生により、東日本の沿岸に大津波が来襲したことで道路・海岸構造物をはじめとする社会資本施設に甚大な被害をもたらした。例えば橋梁では、上部構造の流出や、流出は免れても防護柵や高欄の損傷、更には橋脚の損傷や流出も認められた。このように、橋梁の上部構造の流出は、橋梁の機能を失うことになり、被災後の人命救助や復旧作業に大きな影響をもたらすことになる。このような観点からしても、耐震設計に加えて、橋梁に対する津波設計が重要であることは言うまでもない。更には南海トラフなどの海溝型巨大地震の発生予測に伴う津波対策が国内では急務である。

しかしながら、橋梁に作用する津波波力や揚力の関係は未だ明らかになっておらず、津波設計の基本的な方針も明確ではないことが指摘される。これは、地震に比較し津波が来襲し被害をもたらす事例が少ないこと、またこれまでの研究事例そのものも少ないことも影響している。これに加え、積雪を有する地域では、路面が凍結している状態・積雪・圧雪の影響も考えられるが、このような津波と積雪の影響を考慮した研究は行われていない。

以上のような背景により、橋梁の上部構造への損傷判定を行うと共に、積雪を考慮した簡易判定を試み、積雪が橋梁上部構造の流出に与える影響について評価した。

#### (2) 本研究の内容と方法

本研究では、これまでに提案されている簡易判定手法<sup>2.1)</sup>に基づき、東北地方太平洋沖地震で被害を受けた橋梁に着目し、損傷度の判定と実被害との関係性を評価した。

実際に津波による損傷分析を行う際は、橋梁に作用する津波形状（孤立波や段波など）やその来襲・遡上する速度、またがれきの含有量や、越流水深、さらには津波の継続時間など、いくつも因子が影響するが、本研究では橋梁に作用する水平力と抵抗力との比率により判定できる $\beta$ 値に着目した。さらには、この簡易判定方法に積雪の影響を考慮する修正簡易判定を試み、積雪を考慮する複合被害パターンと、これまでに分析された結果との比較も実施する。

最後に雪国特有である被害に着目し、新たな被害に関する考察と課題を述べる。

## 2. 津波被害の簡易分析

### (1) 簡易分析の方法

橋梁の津波被害に関する簡易分析については、文献<sup>2.1)</sup>を参考に、著者らの現地調査の結果等を踏まえて試みる。分析方法は、津波水平作用力  $F$ 、橋梁水平抵抗力  $S$  をそれぞれ求め、水平方向の作用力と抵抗力の関係を示す  $\beta$  値により損傷度を判定する。これらの判定式を式 (2.1) ~ 式 (2.5) に示す。なお上部構造の有効鉛直投影面積  $A_n$  は、津波が遡上する際に橋梁側面に衝突する際の受圧面積を示し、橋梁の桁長（橋梁の総幅）に桁と高欄等の柵形状に応じて補正した高さを含めた有効高（橋梁の総高）を乗じて求める。

また、津波の流速について、本来であれば浸水深さと流速の時刻歴変化等を明らかにして設定すべきところではあるが、本研究では文献<sup>2.1)</sup>を参考に  $v=6.0\text{m/s}$  の一定値で検討を試みた。

$$P_H = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 \quad (2.1)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 A_n \quad (2.2)$$

$$C_d = \begin{cases} 2.1 - 0.1 \left( \frac{B}{D} \right) & 1 \leq \frac{B}{D} < 8 \\ 1.3 & 8 \leq \frac{B}{D} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$S = \mu \cdot W \quad (2.4)$$

$$\beta = \frac{S}{F} \quad (2.5)$$

ここに、

津波水平力  $F$  [kN]、抗力係数  $C_d$ 、水の密度  $\rho_w$  ( $1,030\text{kg/m}^3$ )、津波の流速  $v$  ( $6.0\text{m/s}$ )、上部構造の有効鉛直投影面積  $A_n$  [ $\text{m}^2$ ]、橋梁の総幅  $B$  [m]、橋梁の総高  $D$  [m]、摩擦係数  $\mu$  (0.6) 上部構造死荷重重量  $W$  [kN]



続いて、積雪を簡易的に考慮するための修正  $\beta$  値について説明する。これらの修正式を式 (2.6) ～式 (2.8) に示すが、上部構造死荷重に積雪による増加分  $w'$  を加えて水平抵抗力である  $S'$  を求め、積雪・圧雪による受圧面積の増加を  $A_n'$  で再評価することで、修正  $\beta$  値 ( $\beta'$  値) を求める方法と考えた。しかしながら、積雪状態や圧雪状態により上部構造の周囲の流体の流れ場が変化すると考えられるが、今回は簡易分析であることも踏まえ、この  $A_n'$  と  $S'$  のみ修正をする方針とした。なお、積雪荷重については、道路橋の圧雪荷重相当を考慮する。ここでは橋面上に  $q=1.0\text{kN/m}^2$  の荷重を与えて、これに上部構造死荷重重量を加えた値に  $\mu$  を乗じて水平抵抗力を設定する。

また、積雪深さに関する値は、道路橋示方書<sup>2.2)</sup>により与えられている圧雪時の深さである 0.15m と採用する。ここに、津波が上部構造の周囲を流れる場合、橋面上に圧雪された状態でも津波の通過と共に剥がれる場合など、幾何学的な形状変化が考えられる。

しかしながらこの様な事例に関する報告はなく、実験でも再現することが現段階では困難であることを踏まえ、今回の検討では橋の総高にこの圧雪時の深さである 0.15m を単純に加えることで、上部構造の有効鉛直投影面積を試算する方針とした。

$$F' = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 A_n' \quad (2.6)$$

$$S' = \mu \cdot (W + w') \quad (2.7)$$

$$\beta' = \frac{S'}{F'} \quad (2.8)$$

ここに、  
 積雪を考慮した津波水平力  $F'$  [kN]、抗力係数  $C_d$ 、水の密度  $\rho_w$  ( $1,030\text{kg/m}^3$ )、  
 津波の流速  $v$  ( $6.0\text{m/s}$ )、  
 積雪深さを考慮した上部構造の等価有効鉛直投影面積  $A_n'$  [ $\text{m}^2$ ]、摩擦係数  $\mu$   
 (0.6)

上部構造死荷重重量  $W$  [kN]、橋面上に載可された圧雪  $w'$  [kN]

(2) 検討対象橋梁

今回の東日本大震災で被災した橋梁の分析は、文献<sup>2.1)</sup>で示されている 21 橋梁を対象に実施する。表 2-2-1 にこれらの橋梁の名称と種別、また上部構造の桁形式に示す。ここに示す橋梁種別は、道路橋（国道など）と鉄道橋の二つ分類とし、上部構造の桁形式では、一つの橋梁で複数の形状がある場合もまとめて示している。

表 2-2-1 対象橋梁一覧

番号	橋梁名称	橋梁種別	桁形式
1	波板橋	道路橋	単純 PC プレテン T 桁
2	浜田川橋	道路橋	単純 PC ポステン T 桁
3	川原川橋	道路橋	単純 PC 中空ホロー桁
4	沼田跨線橋	道路橋	単純 PC ポステン T 桁
5	下宿橋	道路橋	単純 PCT 桁
6	二十一浜橋	道路橋	単純 PC プレテン T 桁
7	歌津大橋	道路橋	単純 PC プレテン T 桁+ポステン T 桁
8	八幡橋	道路橋	単純 PCI 桁
9	汐見橋	道路橋	単純 PCI 桁
10	小塚橋	道路橋	単純 PCT 桁
11	曙橋	道路橋	単純 PCT 桁
12	津谷川橋りょう	鉄道橋	単純 PCT 桁
13	水尻川橋りょう	鉄道橋	単純 PCI 桁
14	小泉橋りょう	鉄道橋	単純 PCI 桁+PCT 桁+標準下路 PC 桁
15	外尾川橋	道路橋	連続 RC ホロー桁
16	八幡川橋りょう	鉄道橋	単純 RCI 桁+鋼 H 桁
17	気仙大橋	道路橋	連続鋼鈹桁
18	小泉大橋	道路橋	連続鋼鈹桁
19	水尻橋	道路橋	連続鋼 H 桁
20	新相川橋	道路橋	連続鋼箱桁
21	新北上大橋	道路橋	連続鋼下路トラス桁

### 3. 簡易式による橋梁損傷度判定と結果

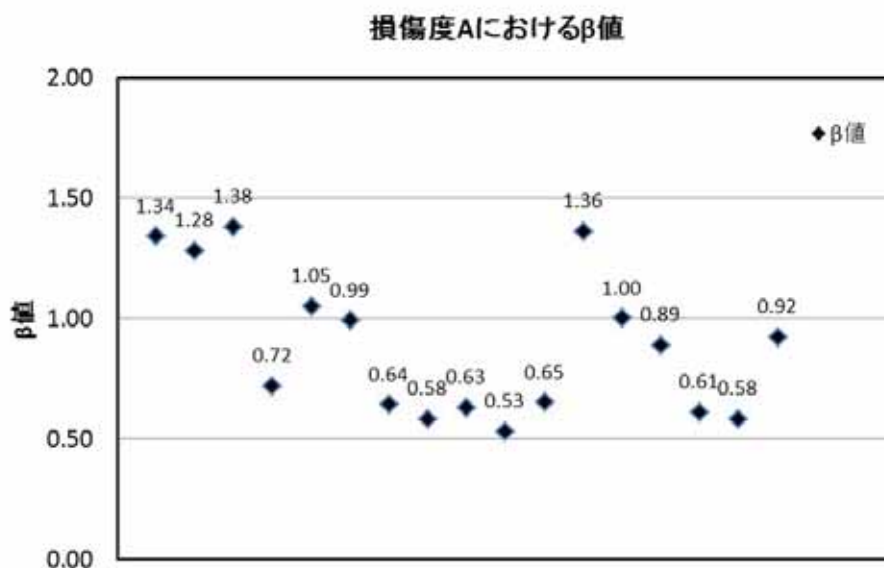
#### (1) 簡易式に基づく損傷を受けた橋梁の損傷判定

東日本大震災で損傷した橋梁の分析結果について示す。今回の検討では、橋梁の使用可否に着目し桁移動の有無により3段階で分類を試みた。損傷度Aは、上部構造が下部構造から完全に分離・流出した場合であり、橋梁のとしての機能を失った状態（使用不可）である。損傷度Bは、上部構造が対象の移動が認められる状態であるが、速度を低下もしくは限定的に使用することのできる状態、また損傷度Cは、橋面上の施設（高欄や防護柵）の部分的な損傷であり使用できる状態と定義した。

図2-3-1に損傷度Aにおける $\beta$ 値を示す。縦軸が式(2.1)～式(2.5)から得られた $\beta$ 値を示している。対象とした橋梁の内訳として、一つの橋梁でいくつかの上部構造形式を有しているものも含めて29タイプが対象となり、その内17タイプが損傷度Aであった。また残りの12タイプは損傷度Cであり、損傷度Bに該当する橋梁はない。

この図より、 $\beta$ 値の最小は0.53(No.16-1:八幡川橋りょう)で、最大値は1.38(No.7-2:歌津大橋)であった。なお平均値は0.89であった。一般的に $\beta$ 値=1.0が流出するか否かの境界と考えられるが、橋梁に作用する浸水深さや、上部構造の上面や下面に作用する波力の影響、また浮力や上揚力の影響により多少の幅が認められていると考えられる。全体として、今回の条件に基づき判定した結果、 $\beta$ 値が概ね1.5以下であると上部構造の流出の可能性が高い。

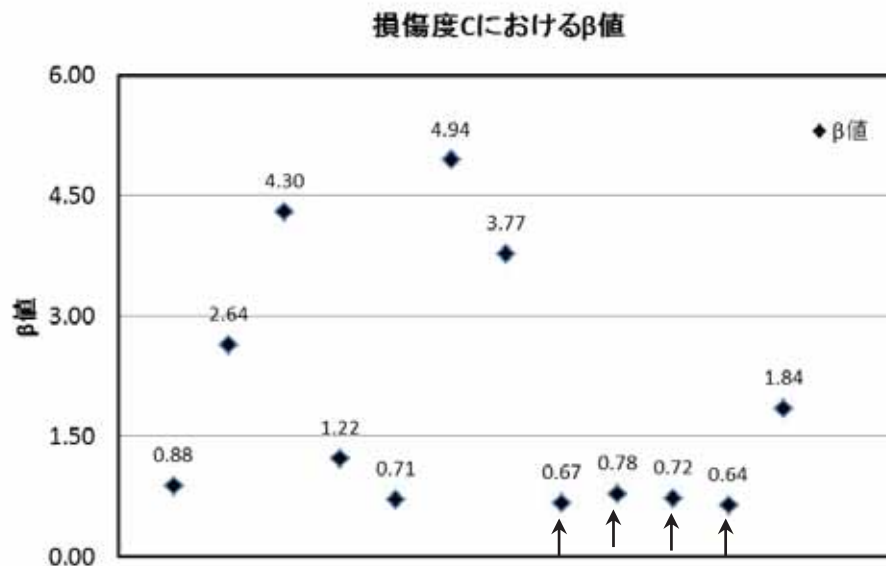
図2-3-1 損傷度Aにおける $\beta$ 値



損傷度 C における  $\beta$  値の結果について説明する。図 2-3-2 にこれらの結果について示すが、最大値が 4.94 (No. 8 : 八幡橋) で最小値が 0.64 (No. 12 : 津谷川橋りょう) と損傷度 A に比較し大きな幅を有している。橋梁の上部構造形式の影響、橋梁への入射される津波形状、また周辺地形の影響を受けることも影響しこの様な幅になったと考えられる。また平均値は 1.93 であった。

以上のことから、平均値が損傷度 A の 0.89 と異なり 1.00 を上回っていることから流出などの被害を免れたものと想定できる。なお、図中に示す 0.88 と 0.71 は道路橋であるが、それ以外の 0.64 から 0.78 の 4 つは鉄道橋 (図中の  $\uparrow$ ) であり、鉄道橋の構造は道路橋に比較して  $\beta$  値が小さい結果となった。これは、流失しやすいことを意味し、著者らの現地調査での結果との相関性が認められる。

図 2-3-2 損傷度 C における  $\beta$  値



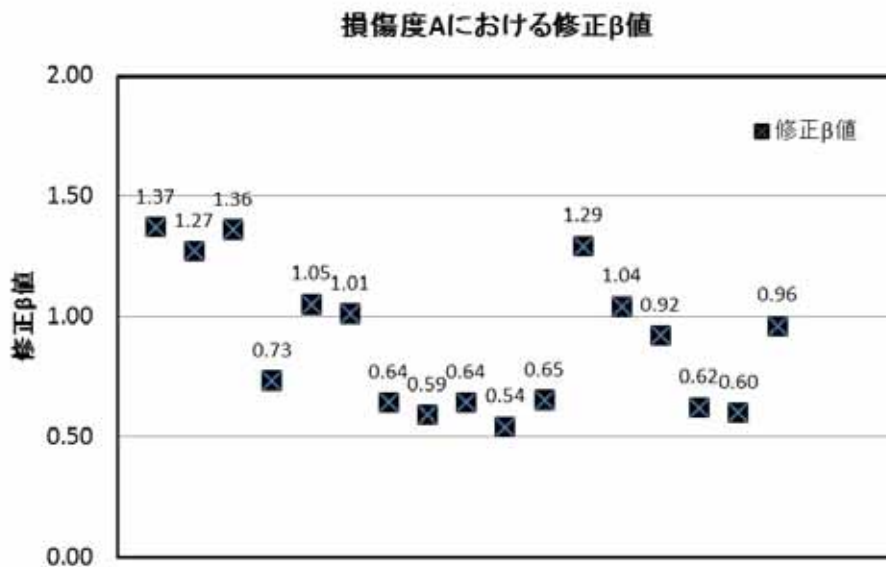
(2) 積雪を考慮した修正簡易式による分析

本研究では、これまで提案されている簡易式を基本に、積雪の影響を考慮した修正簡易式により損傷度分析を試みた。図 2-3-3 に修正簡易式に基づく損傷度 A に該当する橋梁の修正  $\beta$  値の結果を示す。積雪の影響は、橋梁の橋面上に均一に圧雪された状態を想定して分析を行ったが、最小値は 0.54 (No. 16-1: 八幡川橋りょう) であり最大値は 1.37 (No. 4: 沼田跨線橋) となった。なお最大値の橋梁は、歌津大橋から沼田跨線橋に変わった。

積雪を考慮しないケースでの結果と比較すると、最小値が 0.53 から 0.54 と 0.01 と増加し、最大値は 1.38 から 1.37 と 0.01 と減少する結果となった。しかしながら、変化量は共に 0.01 と極めて少なく、積雪を考慮してケースでも  $\beta$  値に大きな変化は認められなかった。平均値に着目すると結果は 0.90 であり、積雪を考慮しないケースと 0.01 の差であった。

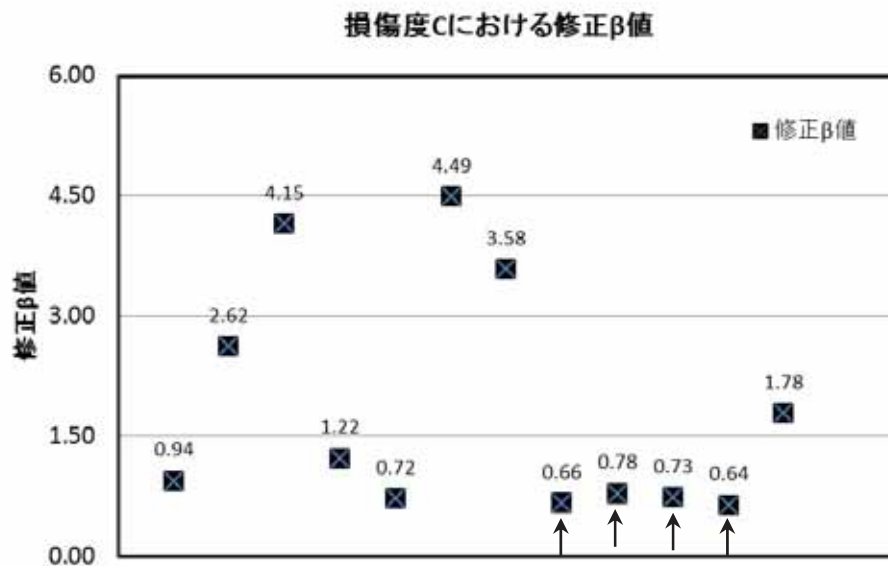
今回の検討では、橋面上の圧雪荷重の増加に対する水平抵抗の増加と、桁側面の受圧面積の増加に伴う水平力の増加の関係が同程度であったことから、大きな変化が認められなかった。また本研究ではわずかではあったが、橋梁の幅員が狭い場合は積雪荷重を考慮すると流出の危険性が少し高まり、また橋梁の幅員が広い場合は、上部構造の流失の危険性が少し低くなる結果を得た。

図 2-3-3 損傷度 A における修正  $\beta$  値



損傷度 C における修正  $\beta$  値の結果について説明する。図 2-3-4 にこれらの結果について示すが、最大値が 4.49 (No. 8 : 八幡橋) で最小値が 0.64 (No. 12 : 津谷川橋りょう) と損傷度 A に比較し大きな幅を有している傾向は同じである。また平均値は 1.96 であった。積雪を考慮しない場合では、最小値が 0.64 と同じであり、最大値は 4.94 から 4.49 と -0.45 (91%) の変化が認められた。しかしながら修正  $\beta$  値が 1.00 を大幅に上回っており、約 10% の減少が認められたものの、橋梁上部構造の流出へ与える影響は小さい。なお、図中に示す 1.00 未満のうち、鉄道橋の 0.64 から 0.78 の 4 つ (図中の  $\uparrow$ ) はほぼ変化が認められなかった。

図 2-3-4 損傷度 C における修正  $\beta$  値



(3) 結果の比較と考察

積雪を考慮しない簡易式に基づく結果と、積雪を考慮した場合における修正簡易式に基づく結果を比較する。表 2-3-1 にこれらの比較結果を示す。表中の橋梁 No に示すアンダーラインの橋梁は鉄道橋を示す。ここに示す差は、 $\beta$  値から修正  $\beta$  値を引くことで求めた値である。

この表より最も大きな変化を示したのは、橋梁番号 8 (八幡橋) の +0.45 であり、最小は橋梁 No1 (波板橋) の -0.06、また変化が認められなかった橋梁は、橋梁 No の 6 (二十一浜橋)、10 (小塚橋)、12 (津谷川橋りょう)、14-2 と 14-5 (小泉橋りょう)、16-2 (八幡川橋りょう) で、全 6 橋中の 4 橋が鉄道橋であった。

表 2-3-1  $\beta$  値と修正  $\beta$  値の比較

橋梁No.	損傷度	$\beta$ 値	修正 $\beta$ 値	差
1	C	0.88	0.94	-0.06
2	C	2.64	2.62	0.02
3	C	4.30	4.15	0.15
4	A	1.34	1.37	-0.03
5	A	1.28	1.27	0.01
6	C	1.22	1.22	0.00
7-1	C	0.71	0.72	-0.01
7-2	A	1.38	1.36	0.02
7-3	A	0.72	0.73	-0.01
8	C	4.94	4.49	0.45
9	C	3.77	3.58	0.19
10	A	1.05	1.05	0.00
11	A	0.99	1.01	-0.02
<u>12</u>	A	0.64	0.64	0.00
<u>13</u>	A	0.58	0.59	-0.01
<u>14-1</u>	C	0.67	0.66	0.01
<u>14-2</u>	C	0.78	0.78	0.00
<u>14-3</u>	A	0.63	0.64	-0.01
<u>14-4</u>	C	0.72	0.73	-0.01
<u>14-5</u>	C	0.64	0.64	0.00
15	C	1.84	1.78	0.06
<u>16-1</u>	A	0.53	0.54	-0.01
<u>16-2</u>	A	0.65	0.65	0.00
<u>16-3</u>	A	1.36	1.29	0.07
17	A	1.00	1.04	-0.04
18	A	0.89	0.92	-0.03
19	A	0.61	0.62	-0.01
20	A	0.58	0.60	-0.02
21	A	0.92	0.96	-0.04

## 4. まとめと今後の課題

### (1) まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震で被災した橋梁 21 橋 (29 ケース) に着目し、 $\beta$  値に基づく簡易損傷判定を行って  $\beta$  値と上部構造流出の関係を明らかにし、更には積雪地域特有の圧雪荷重による橋梁水平抵抗力の変化と積雪深さを考慮した受圧面積の増加に伴う津波水平作用力の増加を考慮した簡易  $\beta$  値による分析を行い、これらの変化について考察を行った。

これらの結果、大きな変化は認められず、積雪 (圧雪) を考慮しても考慮しなくても  $\beta$  値の変化量はわずかであり、上部構造の流出に与える影響は小さい結果を得た。但し、実際には圧雪された路面が津波の影響で薄利し、津波と共にこの圧雪された雪片がどのような影響を与えているかなどの、形状が変化するような幾何学的要素を取り入れて評価していないために、今後は実験や数値解析によりこれらの結果の検証が必要である。

### (2) 今後の課題

本研究では、圧雪された状態を想定して分析を実施した。しかしながら、緯度が高くなると海水上には流氷等を有している場合がある。このような状況では、アイスジャムの様な被害も雪国特有の被害形態であると考えられる。例えば、1894 年 3 月の根室沖地震では、国後島で流氷の伴った津波の遡上により、家屋の倒壊や船の破損が複数認められていること、1923 年 2 月のカムチャッカ地震では、氷魂によって缶詰工場が破損する被害、1952 年の十勝沖地震や 2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震でも道内の河川でアイスジャムの発生が認められている。

このようなアイスジャムの発生は、津波の遡上高さが堤防を越流しなくても、河道が閉塞されること、また橋梁部においてボトルネックとなることで一時的なダムによる水平力の増加に至り、その結果として、水平力の増加により橋梁の上部構造の流出といった被害シナリオも考えられる。以上の様な現象も、雪国特有の被害であり、今後の更なる分析が必要である。

### 参考文献

- 2.1) 地震時保有耐力法に基づく耐震設計法研究小委員会 報告書：(社) 土木学会地震工学委員会・地震時保有耐力法に基づく耐震設計法研究小委員会，pp. III 8-III 14，平成 22 年 2 月。
- 2.2) 道路橋示方書・同解説 I 共通編，(社) 日本道路協会，平成 24 年 3 月。



### 第3章 複合地震災害の防災ランドマークに関する研究

#### 1. はじめに

人々の住む町の風景は日々変化しているが、比較的サイクルの長い災害、例えば地震、津波、大雪などの自然の営みによって時として大きな変化が生じることもある。特に、同時または連続して複数の災害が発生し、それらの影響が複合化することにより事態が深刻となる複合災害は、とても脅威的なものであり、これまでも人々に大きな被害をもたらしてきた。災害直後はその悲惨な風景を目の当たりにして、人々は二度とこれを繰り返すまいと強く感じるが、月日が流れるとともにいつの間にかその風景は日常の風景となり、過去の惨状は人々の心から消え去ってしまう。国や地方自治体、あるいは学校や企業主催の防災に関する啓蒙普及活動が幾度となく実施されているが、それらのもたらす効果は依然として低いのではないだろうか。

地震と雪や津波とが複合した災害は幾度となく発生しているが、これらの災害から得られた教訓がその地域に住む後世の人々の防災意識の向上とその継続にうまく活用されているか、という点においては少なからず疑問が生じる。防災の基本は、住民が自らの命を自分で守るということであり、災害による被害を最小限に抑えるには自主防災意識の向上が必要であると考えている。

これまで吉田研究室では、地域の地震防災や防災教育に関する研究を実施してきており、人々の防災意識を向上させ、さらに継続させていくためには、過去の災害の出来事を言葉として伝えるだけでなく、発生した災害前後の風景の変化を視覚的に訴えて、さらに後世に伝えていくことが重要であると指摘している。

そこで本研究では、北陸地方における複合地震災害に対する防災意識向上のために、まず、過去に発生した複合地震災害を調査し地震概要や被害概要のデータベース化を行った。さらに、実際に災害が発生した現場に行き写真撮影や現地の人からのヒアリング調査を行った。そして、それをもとに発生した被害の防災ランドマークを作成し、過去の災害の教訓を学習し、北陸地域だからこそ起こりうる雪や津波との複合地震災害のリスクを解りやすくイメージできるウェブページの作成を行った。なお、本研究における防災ランドマークとは、過去の災害を視覚的に蘇らせてくれる現在の構造物や町並みの風景と定義している。

## 2. 北陸地方における複合地震災害

北陸地方は、日本のほぼ中央に位置し、自然に恵まれた地域である。しかし、冬期の豪雪など厳しい自然条件下におかれている。本研究では、近年発生した複合地震災害の中から、各県に人的及び物的被害をもたらした代表的災害に注目し、防災ランドマークとなりうる災害の調査を行った。

### (1) 積雪期の地震

#### ①1961年長岡地震

1961年（昭和36年）2月2日に新潟県長岡市付近を震央とするマグニチュード5.2の地震が発生した。この地震の震源深さは0kmで最大震度は新潟県長岡市で震度4を記録した。人的被害として死者5人、負傷者30人、また、建物被害として全壊220棟、半壊465棟、一部損壊804棟で、新潟県長岡市を中心とする大きな被害が発生した。

複合災害としては、当時長岡市は積雪が約2mあり、家屋の2階が損壊しても、1階が雪壁によって支えられ家屋全体は倒壊に至らなかったが、融雪期にこれら1階に損傷を受けた家屋が雪壁の支えを失い倒壊に至るといった被害が発生した。

#### ②1996年奥越地震

1996年（平成8年）2月7日に福井県奥越地方、荒島岳付近を震央とするマグニチュード5.0の地震が発生した。この地震の震源深さは6.9kmで最大震度は九頭竜ダムや真名川ダムで震度5を記録した。被害状況として、大野市役所のガラス42枚破損、壁の亀裂、また、大野保健所のガラス25枚破損、壁の亀裂など建物被害が多かった。

複合災害として、地震直後に中学校や民家の屋根雪が落下した。

#### ③2004年新潟県中越地震

2004年（平成16年）10月23日に新潟県中越地方を震央とするマグニチュード6.8の地震が発生した。この地震の震源深さは約13kmで最大震度は新潟県川口町で震度7を記録した。人的被害として死者68人、負傷者4805人、また、建物被害として全壊3175棟、半壊13810棟、一部損壊105682棟で、新潟県中越地方を中心とする大きな被害が発生した。

複合災害としては、地震後の2005年の1月下旬から2月下旬にかけて記録的な大雪となり、場所によっては4mを超える積雪量となり、地震で傾いたり被害を受けた建物が積雪の重みで倒壊した。新潟県山古志村で6棟など最終的に77棟が雪の重みで倒壊し、そのうち長岡市など6棟で地震との因果関係が認められた。原因としては、連日の大雪でこまめな雪下ろしが出来なかったためである。また、地震により地盤が緩んだところに例年になく大雪が降ったため、雪崩による地震の二次被害が発生した。新潟県長岡市の年間降雪量によれば、2001年に679cmの降雪を記録した後、3m～4mの降雪であったが、2005年には再び699cm

の大雪となったことが記録に残っている。

## (2) 津波を伴う地震

### ①1964年新潟地震

1964年(昭和39年)6月16日に新潟県粟島を震央とするマグニチュード7.5の地震が発生した。この地震の震源深さは約34kmで最大震度は新潟県新潟市、長岡市、宮城県仙台市などで震度5を記録した。人的被害として死者26人、また、建物被害として全壊1960棟、半壊6640棟、家屋浸水棟15298棟で、新潟県、山形県、秋田県を中心とする大きな被害が発生した。

複合災害としては、地震の約15分後から津波が日本海沿岸各地を襲い、新潟市では高さ4mに達した。その他にも佐渡島や島根県隠岐島でも冠水被害が出た。押し波から始まり佐渡両津港では3m、塩谷間で4m、直江津で1~2m、岩船港付近で4mを記録した。津波による浸水被害は、信濃川右岸の山ノ下地区など信濃川流域を中心に広範囲に亘り、特に栗の木川周辺など一部の冠水は1ヶ月にも及んだ。なお、福井県では三国町で26cm、敦賀市で46cmの津波が観測された。

### ②1983年日本海中部地震

1983年(昭和58年)5月26日に秋田県能代市を震央とするマグニチュード7.7の地震が発生した。この地震の震源深さは約14kmで最大震度は秋田県秋田市、青森県むつ市などで震度5を記録した。地震による人的被害として死者4人、負傷者59人、また、津波による人的被害として死者100人、負傷者104人で、合計死者104人、負傷者163人であった。建物被害として全壊934棟、半壊2,115棟、一部損壊3,258棟で秋田県、青森県、山形県を中心に大きな被害が発生した。当時のシステムで津波警報が発令されたのは地震発生後14分後であったことと、日本海側には津波は来ないという俗説が伝わっていたことにより人的被害を大きくした。

複合災害として、到達が最も早かった青森県深浦町では、地震発生約7分後に引き波として到達した。最も波高が高かった場所は青森県つがる市で14.9mを記録した。また、秋田県八峰町では波高14mを記録した。

石川県輪島市では、市内中心部を流れる輪島川河口を高さ1m強ながら凄まじいエネルギーで逆巻いて遡上する激しい波の姿や、河口に隣接する輪島漁港内から逃げ遅れて転覆する小型刺網漁船なども確認されている。また、その沖合50km北に位置する舳倉島には津波警報からわずか5分後に津波が襲来し、海拔わずか11mということもあり、家屋等の被害も甚大であった。小規模だった堤防は役に立たず、小さな漁港は漁網や流入物で接岸できなくなったため、人力中心の復旧となり、完全復旧するには夏までかかった。なお、福井県では三国町で36cm、福井市で69cm、敦賀市で56cmの津波が観測された。

### ③2007年能登半島地震

2007年（平成19年）3月25日に石川県輪島市を震央とするマグニチュード6.9の地震が発生した。この地震の震源深さは約11kmで最大震度は石川県穴水町、輪島市、七尾市などで震度6強を記録した。人的被害として死者1人、負傷者355人、また、建物被害として全壊686棟、半壊1,740棟、一部損壊26,956棟で石川県、北陸地方、信越地方を中心に大きな被害が発生した。地震発生2分後に石川県能登・加賀市に津波注意報が発表された。90分後に珠洲市長橋で最大22cmの津波が観測された。穴水町比良の向洋中学校では、海岸沿いの校舎のため津波を警戒し、閉校式は中止された。また、福井県では津波は観測されなかった。

### ④2007年新潟県中越沖地震

2007年（平成19年）7月16日に新潟県中越地方沖を震央とするマグニチュード6.8の地震が発生した。この地震の震源深さは約17kmで最大震度は新潟県柏崎市、長岡市、刈羽村、長野県飯綱町などで震度6強を記録した。人的被害として死者15人、負傷者4805人、また、建物被害として全壊1319棟、半壊4764棟、一部損壊34659棟で新潟県中越地方、上越、下越地方の一部、長野県北信地方を中心に大きな被害が発生した。地震発生1分後に佐渡島を含む新潟県全域の沿岸に津波注意報が出された。柏崎では約1m、佐渡市小木では27cmの津波が観測された。なお、福井県では津波は観測されなかった。

## 3. 防災ランドマークの調査

2013年12月に石川県輪島市、新潟県長岡市と小千谷市、福井県大野市において防災ランドマークの調査を行った。主な内容としては災害時の写真と同地点で同アングルからの撮影を行い現在の写真と比較するというものである。調査した災害は、積雪期の地震として長岡地震、新潟県中越地震、奥越地震である。また、津波を伴う地震として日本海中部地震を調査した。

### （1）1961年長岡地震

#### ①調査地点

[①] 新潟県長岡市福道町、金内熊吉氏宅（図3-3-1の①）

[②] 新潟県長岡市南新保町、石橋秀治氏宅（図3-3-1の②）

[③] 新潟県長岡市南新保町、関健次氏宅（図3-3-1の③）

#### 〔②〕被害概要

被害を受けた住宅は木造住宅がほとんどで、鉄筋コンクリート造などほかの種類の構造物はわずかであった。2階が倒壊しているものが多く、1階は大傾斜しながらもまわりの雪に支えられ、かろうじて倒壊を免れた例が多かった。大工や、左官など300人が徹夜で傾いた家や倒壊寸前の家の応急復旧作業を行った。

## ②現地調査の結果

〔①〕現在は昔の面影はなく、新しい住宅が建っていることが確認できた。また、ヒアリング調査の結果、32年前に1度建て替えを行い、さらに2年前にも建て替えを行ったことがわかった。

〔②〕現在は昔の面影はなく、新しい住宅が建っていることが確認できた。ヒアリング調査の結果、3人亡くなったことがわかった。

〔③〕現在は昔の面影はなく、新しい住宅が建っていることが確認できた。

## ③教訓

住宅の周りを積雪による雪壁が支えている状態の時に地震が発生しても、住宅が壊れていることに気づかず融雪期に雪壁の支えを失い倒壊するケースもある。したがって、地震が発生した段階で、家が損傷していないかを確認することが大切である。

### (2) 2004年新潟県中越地震

#### ①調査地点

〔①〕新潟県長岡市金町, 紺藤整染興業 (図 3-3-2)

〔②〕新潟県長岡市山古志種芋原, S氏宅 (図 3-3-3)

〔③〕新潟県小千谷市木津, 篠田館 (図 3-3-4)

#### ②被害概要

〔①〕震災当時すでに倒産していて誰もいなかった。地震により少し損傷し、その翌年の大雪で屋根に雪が積もり倒壊した。

〔②〕震災当時は人が住んでおらず空き家だった。地震により少し損傷し、その翌年の大雪で屋根に雪が積もり倒壊した。

〔③〕震災時は旅館として営業していた。震災後は半壊と判定され営業を再開し、住民に浴場を無料開放していたが、翌年1月に浴場の屋根が積雪の重みで崩落し、災害復旧作業に来ていた土木建築会社の作業員2名が死亡した。これにより営業停止となった。

#### ③現地調査の結果

〔①〕2013年秋から市の補助金により撤去作業が行われているが、調査当時は撤去作業途中の段階であった。

〔②〕現在は建設場所と思われる場所には何もなかった。また、住民にヒアリング調査を行ったところ、S氏宅近辺で地震によって倒壊した住宅は1~2軒、雪によって倒壊したものが2軒あったことが明らかになった。

〔③〕ヒアリング調査を行った結果、もともと浴場の基礎自体が弱かったため地震と雪

による影響は少ないことが明らかになった。現在は宿、浴場ともに撤去されていた。

#### ④教訓

地震で弱った建物の屋根上に積雪することによって倒壊建物が増加する。したがって、屋根上の雪下ろしはこまめにすることが大切である。

### (3) 1996年奥越地震

#### ①調査地点

- [①] 福井県大野市天神町, 大野市役所 (図 3-3-5)
- [②] 福井県大野市朝日, 和泉村役場 (図 3-3-6 の⑧)
- [③] 福井県大野市長野, 九頭竜ダム管理支所 (図 3-3-6 の⑨)

#### ②被害概要

- [①] ガラス 42 枚損壊, 壁に亀裂。
- [②] 役場 2 階の机が動いた。縦揺れが起き, 屋根雪が落ちた。
- [③] 建物の被害として, 壁にクラックが生じた。

#### ③現地調査の結果

- [①] 外観の様子は震災時と大きな変化はなかった。
- [②] 建物の外観は大きく変わっていないが, 入口の看板が和泉村役場から, 大野市和泉支所となっていた。
- [③] 元あった場所に建物がなくなっており, 少し移動したところに新しい建物が出来ていた。建物の中に人はいなかったが 1 階にダムの写真など展示物が置いてあることが確認できた。

#### ④教訓

特になし。

### (4) 1983年日本海中部地震

#### ①調査地点

- [①] 石川県輪島市新橋通り, いろは橋 (図 3-3-7)
- [②] 石川県鳳至下町, 輪島港 (図 3-3-8)

#### ②被害概要

- [①] 輪島川河口を高さ 1m 強の津波が市内中心部に向かって遡上した。
- [②] 津波で船が転覆したり, 沿岸にいた人々が津波に襲われた。



### ③現地調査の結果

〔①〕 震災時と比べて大きな風景の変化はなかったが、写真の中で象徴となっているいろは橋は綺麗に赤色に塗装されていた。

〔②〕 現在は新しく船の給油を行う場所や、沿岸の津波を襲った場所の電柱が撤去された跡が確認できた。また、多数の船が停まっていた。

### ④教訓

震源から遠く離れた場所でも被害をもたらす可能性がある。したがって、津波が来ることを想定して、防災訓練を行ったり、避難場所を決めておくことが大切である。

図 3-3-1 〔①〕 金内熊吉氏宅, 〔②〕 石橋秀治氏宅, 〔③〕 関健次氏宅の地図

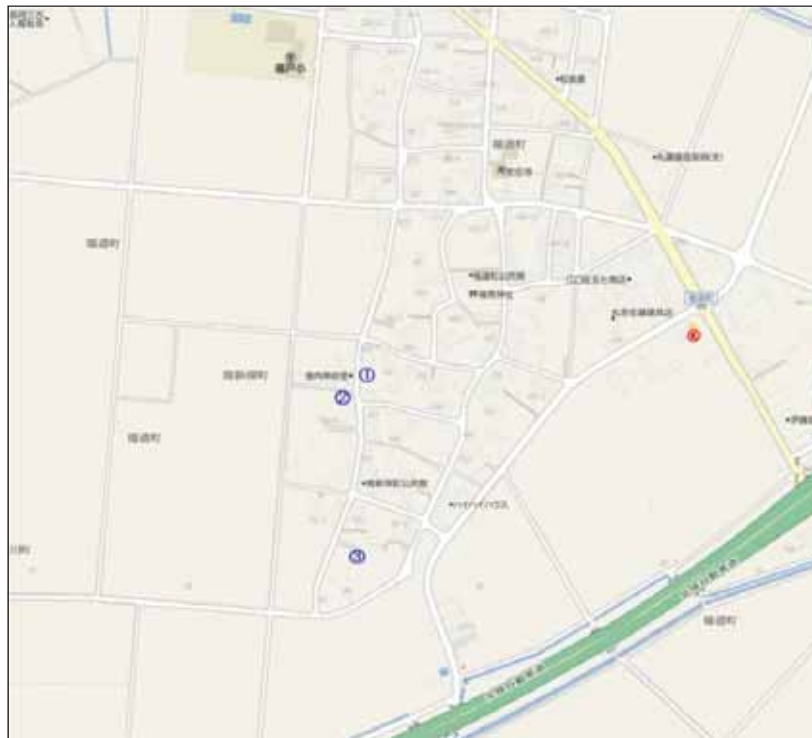


図 3-3-2 [④] 紺藤整染興業の地図



図 3-3-3 [⑤] S氏宅の地図





図 3-3-4 [⑥] 篠田館の地図

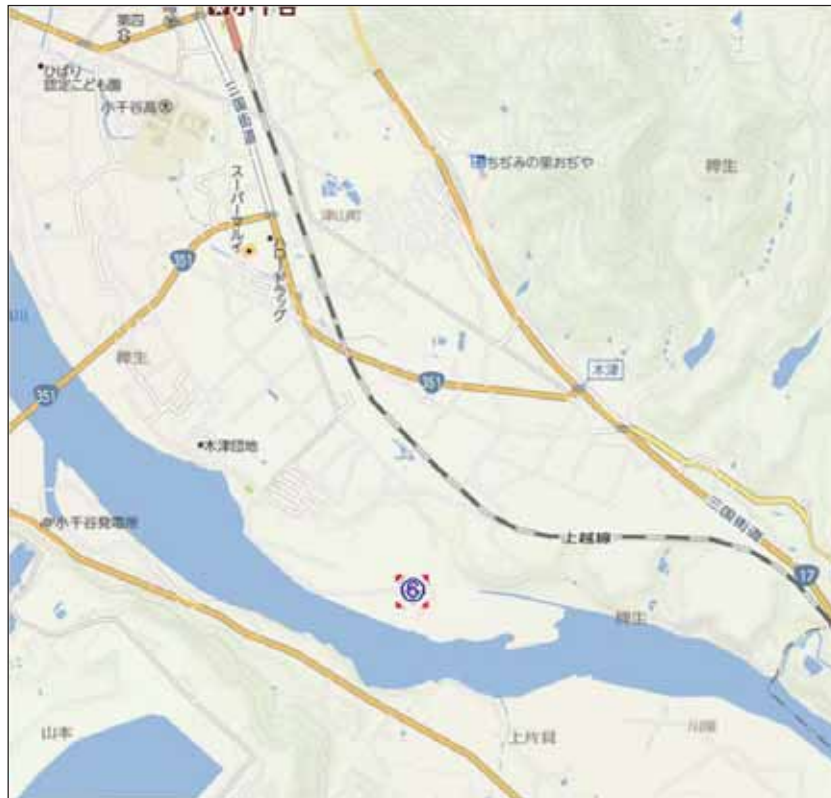


図 3-3-5 [⑦] 大野市役所の地図



図 3-3-6 〔⑧〕和泉村役場, 〔⑨〕九頭竜ダム管理支所の地図



図 3-3-7 〔⑩〕いろは橋の地図



図 3-3-8 〔①〕 輪島港の地図



## 4. 複合地震災害に対する防災意識を向上させるためのウェブページの開発

### (1) ウェブページの概要

現在，過去に災害が発生した場所に住む人は，災害が発生したことは知っているが，具体的にどこでどのような被害だったか，また，その場所は現在どうなっているのか知らない人がたくさんいると考えられる．そこで，利用者が簡単に複合地震災害に関する情報を得ることができ，また，防災ランドマークを利用し，防災意識を向上させることを目的として，一般市民を対象としたウェブページの開発を行った．

ウェブページの利点は，コンピュータを使って多人数に対して同時に多くの情報を提供できる点である．また，利用者が情報に対して能動的にアクセスしようとする点においても，その利用価値は高いと考えられる．

ウェブページ作成に使用したソフトウェアは，ホームページビルダーである．

### (2) コンテンツの内容

#### ① トップページ

複合災害の定義，各コンテンツへのリンク，災害概要のページで使用した写真を掲載した．また，ウェブページ全体を通して上部にメニューバーを設けることにより，トップページや各ページを簡単に移動できる作りになっている．図 3-4-1 にトップページを示す．

#### ② 本サイト概要のページ

本サイトを作った目的や背景を表示したページである．背景として，過去の災害の出来事を言葉として伝えるだけではなく，発生した災害前後の風景の変化を視覚的に訴えて，さらに後世に伝えていくことが重要であると考えた．そこで，北陸地方における複合災害に対する防災意識向上を目的としてウェブページ作成に取り組んだ．図 3-4-2 に本サイト概要のページを示す．

#### ③ 北陸地方で発生した複合災害の概要のページ

災害概要のページでは，災害の規模や被害などを掲載した．災害の項目としては 2 章で示した複合災害 7 つである．災害ごとにリンクを作り，地震概要，被害概要，発生した複合災害，参考にした文献を表にまとめることによって分かりやすく閲覧できるようにした．図 3-4-3 に北陸地方で発生した複合災害の概要のページ，図 3-4-4 に積雪期の地震の中から一例として長岡地震の概要のページを示す．

#### ④北陸地方で発生した複合災害のデータベースのページ

過去の災害を視覚的に蘇らせてくれる現在の構造物や町並みの風景を防災ランドマークと定義し、災害直後の被災写真と現在の無被害の写真とを比較したものを閲覧できるページである。作成した防災ランドマークは、前章で示した複合災害4つについてである。概要のページと同じく、複合災害ごとにリンクを作り、個別に閲覧できるようにした。

昔の写真と現在の写真を比較する手法として、ホームページビルダー内のツールにあるロールオーバーを使った。これを使うことによって、最初にページを見たときに表示されている昔の写真の上にマウスポインタを置くと、現在の写真に切り替わるので、わかりやすく視覚的に変化をとらえることができる。また、より現地の様子を知ってもらうために、災害が発生した場所の写真だけでなくその周辺の現在の写真も掲載した。図3-4-5に昔の写真、図3-4-6に現在の写真を表示した長岡地震のデータベースのページを示す。

#### ⑤防災意識向上のための工夫のページ

図3-4-7に防災意識向上のための工夫のページを示す。このページでは、過去の複合災害の資料や、実際に現地調査を行った結果、また、住民からのヒアリング調査をもとに得た以下に示す防災への知識を掲載した。

##### ●積雪期の地震

- ・地震で弱った建物の屋根上に積雪することによって倒壊建物が増加する。(新潟県中越地震)
- ・消雪パイプや流雪溝が被害を受け、路面上に多量の雪が残り交通渋滞を引き起こし、住民生活に困難をもたらす。(新潟県中越地震)
- ・地震により道路脇の斜面や雪崩予防柵が被害を受け、雪崩の危険性が増す。
- ・雪下ろし作業中に地震に襲われた場合、住民が屋根雪ごと落下し、屋根からの落雪により生き埋めになる可能性がある。
- ・住宅の周りを積雪による雪壁が支えている状態の時に地震がきても、住宅が壊れていることに気づかず融雪期に雪壁の支えを失い倒壊するケースもある。(長岡地震)
- ・雪の密度によっても被害に違いが出る。北陸の雪は特徴として水分を多く含むので湿っていて重い。よって屋根にかかる荷重も大きくなる。



#### ○対策

- ・ 雪下ろしをこまめにする。
- ・ 自力での雪下ろしが困難な人に対して，近所の人たちが手助けをする。
- ・ 普段から住宅の点検をこまめに行う。
- ・ 積雪期に，震災を想定して防災訓練を行う。
- ・ 堆雪スペースを備えた，広幅員道路の整備を行う。
- ・ 雪崩の勢いを弱める減勢工や，雪崩を止めて堆積させる防護工を設置する。

#### ●津波を伴う地震

- ・ 日本海中部地震では，秋田県で発生した津波が遠く離れた石川県輪島市，また，さらに遠い島根県でも観測され，震源から遠く離れた場所でも被害をもたらす可能性がある。

#### ○対策

- ・ 地震情報や津波情報はすぐに確認できるようにしておく。
- ・ 海岸沿いに住んでいる人は，津波警報が出た時にどこに避難するかを決めておく。
- ・ 定期的に防災訓練を行う。

#### ⑥リンク集

平成 13 年度の丹羽，平成 14 年度の高田，平成 15 年度の坂井によって作成された防災ランドマークのウェブページや，平成 16 年度の佐々木による福井地震に関する資料のデジタルアーカイブスのページ，及び，平成 21 年度に佐々木が特別研究で作成したページへのリンク集である。図 3-4-8 にリンク集のページ，図 3-4-9～図 3-4-13 に上記のリンクのページを示す。

図 3-4-1 トップページ



図 3-4-2 本サイト概要のページ







図 3-4-5 昔の写真を表示した長岡地震のデータベースのページ



図 3-4-6 現在の写真を表示した長岡地震のデータベースのページ



図 3-4-7 防災意識向上のための工夫のページ



図 3-4-8 リンク集



図 3-4-9 平成 13 年度の丹羽のページ



図 3-4-10 平成 14 年度の高田のページ



図 3-4-11 平成 15 年度の坂井のページ



図 3-4-12 平成 16 年度の佐々木のページ

福井地震  
FUKUI EARTHQUAKE

- [福井地震の概要](#)  
福井地震の規模や被害等を表示しています。
- [地震関連資料のデータベース](#)  
福井地震に関する資料のデータベース化したものを掲載しています。
- [加藤恒爾氏の体験記](#)  
加藤氏とは、映画館で震災に会い、落ちてきた梁に左腕をはさまれ、自ら岸でその腕を切り落とし、九死に一生の脱出をした方です。その体験記が書かれています。
- [防災ランドマーク](#)  
福井県および北陸地方で発生した災害を取り上げており、災害直後の被災写真と現在の無被害の写真が比較できるようになっています。



図 3-4-13 平成 21 年度の佐々木のページ



## 5. おわりに

本研究では、北陸地方における複合災害に対する防災意識向上のために、ウェブページの作成に取り組んだ。まず、過去に発生した複合災害を調査し地震概要や被害概要のデータベース化を行った。さらに、実際に災害が発生した現場において写真撮影や現地の人からのヒアリング調査を行った。そして、それをもとに発生した被害の防災ランドマークを作成した。これまで、吉田研究室で作成された防災ランドマークは、災害時の写真と現在の写真が並んでいる2枚の画像を表示させたものであった。そこで、新しい風景の変化の見せ方としてホームページビルダーの機能であるオーバーロールを用いた。これにより、災害時の写真の上にマウスポインタを置けば、現在の写真に切り替えることができる。今までの防災ランドマークとは違ったものを作成することができた。また、現地調査や資料から得られた教訓と、その対策も見出すことができた。

今後の課題としては、多くの人に作成したウェブページを実際に利用してもらい、意見などを参考にしながら細かいレイアウトや、データベースの充実を図り、より使いやすいソフトウェアの研究を行っていく必要がある。

### 謝辞

本研究を実施するにあたり、福井工業高等専門学校環境都市工学科5年の玉村航也君の協力を得た。また、現地調査では、石川県輪島市、新潟県長岡市・小千谷市の多くの方々の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

#### 「長岡地震」

- ・福戸公民館：農民の手づくり郷土詩：福戸のあゆみ，福戸公民館，p. 251，1992.

#### 「新潟県中越地震」

- ・恒文社新潟支社：雪国を襲った大地震：新潟県中越地震に学ぶ，恒文社，2005.
- ・長岡雪氷防災研究所：小千谷市ひ生における旅館倒壊関連調査報告書，2005.

#### 「日本海中部地震」

- ・東海大学海洋学部海洋土木工学科：昭和 58 年日本海中部地震写真報告集，pp. 3-4，1984.
- ・NHK：急襲津波災害に備える～北海道南西沖地震の教訓～，1995.

#### 「奥越地震」

- ・福井高専吉田研究室：1996年2月7日福井奥越地震，pp. 1-3，1996.

#### 「新潟地震」

- ・新潟地方気象台：新潟県の地震（津波）災害，

[http://www.jma-net.go.jp/niigata/menu/bousai/seis\\_disaster.shtml](http://www.jma-net.go.jp/niigata/menu/bousai/seis_disaster.shtml)

「能登半島地震」

- ・危機管理監室危機対策課：平成 19 年能登半島地震災害記録誌，2007，  
[http://www.pref.ishikawa.lg.jp/bousai/bousai\\_g/notohanto\\_eq/kirokushi/](http://www.pref.ishikawa.lg.jp/bousai/bousai_g/notohanto_eq/kirokushi/)

「新潟県中越沖地震」

- ・危機管理技術研究センター：平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震被害調査報告，2007，  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0439.htm>

「卒業論文」

- ・高田裕紀代：福井県および北陸地方における防災ランドマークの調査と公開，平成 14 年度福井工業高等専門学校卒業論文，19p.，2002.
- ・坂井美穂：福井県のランドマークを利用した学習教材の開発，平成 15 年度福井工業高等専門学校卒業論文，10p.，2003.
- ・佐々木麻衣：福井地震に関するデジタルアーカイブの作製とウェブページによる情報発信，平成 16 年度福井工業高等専門学校卒業論文，13p.，2004.

## 第4章 積雪時地震による津波避難シミュレーション

### 1. はじめに

東日本大震災を契機として、「発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波」と、「最大クラスの津波に比べれば発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波」の2つを考え、前者の、いわゆるレベル2津波については避難を中心に対策を考えることとなった。日本海側の海岸では冬季に長期にわたって積雪があるところが少なくなく、津波避難を考える場合に積雪が大きな障害の一つになることが容易に想像できる。そこで本章では、1993年能登半島気地震、2007年能登半島地震と、近年大きな地震動を経験しており、日本海に面している輪島市を対象として、津波避難シミュレーションを行い、積雪時と無積雪時の避難の様相の違いについて検討する。

本研究では避難シミュレーションにマルチエージェントシステムを援用し、ソフトウェアとして(株)構造計画研究所のartisoc3.0を使用した。マルチエージェントとは、複数のエージェント(人)から構成されるシステムであり、エージェント自らの価値基準に従って自分の行為を自由に選択できる自律したエージェントが多数共存する環境をいう。本研究では、地震津波発生時の避難行動において避難者をエージェントとして定義し、個人(男女、年齢)や家族、観光客などの属性に行動ルールをそれぞれ与えることで、より現実に近い避難行動を再現することとした。

### 2. 津波避難シミュレーションにおける諸条件

#### (1) 想定地震津波

石川県では、「平成23年度石川県津波浸水想定調査, 2012」<sup>2-1)</sup>より、図4-2-1に示す4つの想定波源を設定し津波解析を行い、最大津波高と津波到達時間を各市町村別に算出している。4つの想定波源から求められる輪島市臨港地域への到達時間

(表4-2-1)を参考にして、最大の津波高となる「日本海東縁部」の数値を用い、津波の到達時間を50分と設定した。なお、「能登半島北方沖」を波源とする津波の到達時間は5分と非常に短く、このような場合についても別途、十分に検討する必要があるが、本研究では積雪時と無積雪時の避難様相の違いに注目することから、到達時間50分のケースを取り上げることとした。

図4-2-1 日本海側における想定波源

「平成23年度石川県津波浸水想定調査, 2012」<sup>2-1)</sup>

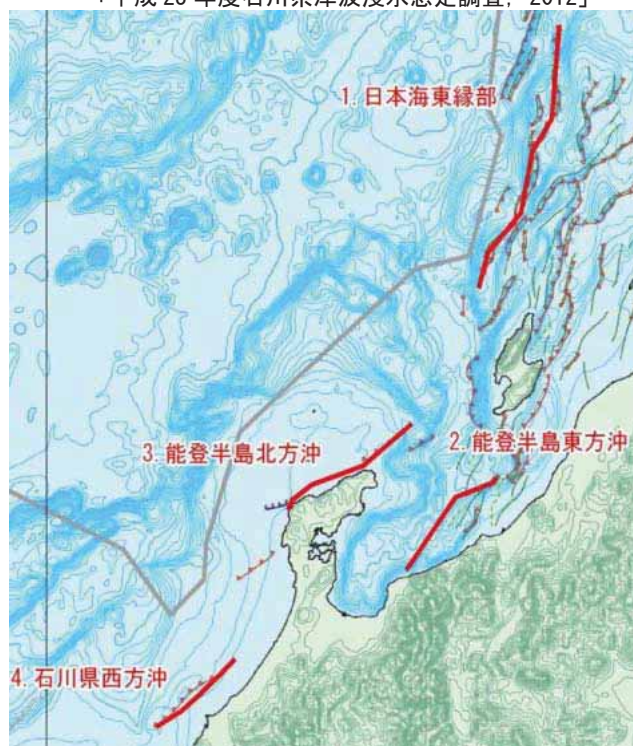




表 4-2-1 輪島市臨港地域における波源緒元と結果概要

「平成 23 年度石川県津波浸水想定調査, 2012」<sup>2-1)</sup>

想定波源	1	2	3	4
	東縁部	東方沖	北方沖	西方沖
最大津波高	7.6m	4.0m	6.3m	2.3m
津波到達時間	50 分	42 分	5 分	53 分
想定モーメント マグニチュード <sup>2)</sup>	7.99	7.58	7.66	7.44
断層長(km)	167	82	95	65
断層幅(km)	17.32	17.32	17.32	17.32
地震モーメント(N-m)	1.22 E+21	2.95 E+20	3.89 E+20	1.82 E+20
すべり量(m)	12.01	5.94	6.76	4.62
傾斜角(度)	60	60	60	60
すべり角(度)	90	90	90	90

## (2) エージェントの設定

### ①輪島市臨港地域におけるエージェント数の設定

輪島市臨港地域の総人口と観光客を足し合わせた人数をエージェント数とする。輪島市輪島地区の総人口は輪島市の平成 23 年度人口集計表より設定した。

#### ○地域住民のエージェント数の設定

輪島市臨港地域を 88 の町会に区分し、総勢 12,338 人、3,776 世帯を各町会の境界の交差点に均等に配置した。但し、平日の昼間人口は明確になっていないことから、表 4-2-2 に示すように、男性(20~60 才)の 50%、女性(20~60 才)の 10%は地区外に勤務している想定とし、総勢 10,412 人とした。

#### ○観光客のエージェント数の設定

輪島市臨港地域の年間観光客数を、平成 24 年度輪島市統計書<sup>2-2)</sup>より 986,000 人、年間宿泊者数を 167,000 人と設定した。日単位の観光客数は不明なため、以下に示すように設定した。

- ・ 平日昼間観光客数 :  $N_h = \frac{\Sigma N_k}{D_1 + D_2 \times k} = 2,063$  人
- ・ 土日祝日観光客数 :  $N_d = N_h \times 2 = 4,126$  人
- ・ 平日宿泊者数 :  $N_{hs} = \frac{\Sigma N_s}{D_1 + D_2 \times k} = 349$  人
- ・ 土日祝日宿泊者数 :  $N_{ds} = N_h \times 2 = 349 \times 2 = 698$  人

ここに、

$\Sigma N_k$ : 年間観光客数 (986,000 人)

$\Sigma N_s$ : 年間宿泊者数 (167,000 人)

$D_1$ : 年間の平日数 (252 日)

$D_2$ : 年間の土日祝日数 (113 日)

$k$ : 平日と土日祝日の比で 2 倍と仮定した。

## ② エージェントの行動設定

エージェントとなる地域住民の避難行動は多種多様かつ複雑であるが、本研究では基礎的研究という観点から避難時の歩行者渋滞状況や避難場所配置混雑度等を把握するために、避難行動をできる限り単純化した。

○避難行動区分：エージェントの避難は、家族避難と個人避難の 2 つに区分した。実際の避難行動は家族避難と個人避難が入り混じっている状態となるが、現時点では家族と個人の比率などについて明確にできていないことから、避難区分は家族避難と個人避難とした。

○避難ルート：地域住民は避難場所の位置を事前に正しく認知しているという条件下で、最短避難ルートを避難する設定とした。最短避難ルートの設定は、GIS 情報から取得した道路情報を基に 3 次元的な距離を算出するダイクストラ法を用いる。また、観光客の行動設定を地域住民と同じ設定とすることは、現実との乖離が大きいことから、観光客は地震後の避難開始時に周辺を見渡し、地域住民の避難者を見つけ次第、地域住民避難者と一緒に避難する行動条件とする。したがって、観光客は地域住民避難者を見つけるまで行動を開始しない設定とした。なお、交差点に差し掛かるエージェントは停止することなく避難行動を続けるとする。また避難者は最も近い避難場所に避難するが、避難場所の収容量を超えた場合や避難場所が使用不可の場合は、現地点の避難場所から最も近い次の避難場所に移動を開始する設定とした。

## ③ エージェントの配置数

個人別避難と家族避難におけるエージェントの配置は以下の表 4-2-2 に示すとおりとする。平日の昼間は、19 歳以下は全て学校に配置し、20-60 歳の男性は 50%を自宅に配置し、残りの 50%は地区外とした。20-60 歳の女性は 90%を自宅に配置し、残りの 10%を地区外とした。その他は最も危険側となるように 100%が自宅に滞在しているとした。また観光客は、朝市や観光施設が多く点在している海沿いの河井町地内の交差点にランダム配置することとした。週末の昼間は朝食時間帯を想定し、全ての地域住民が自宅に滞在している設定とした。

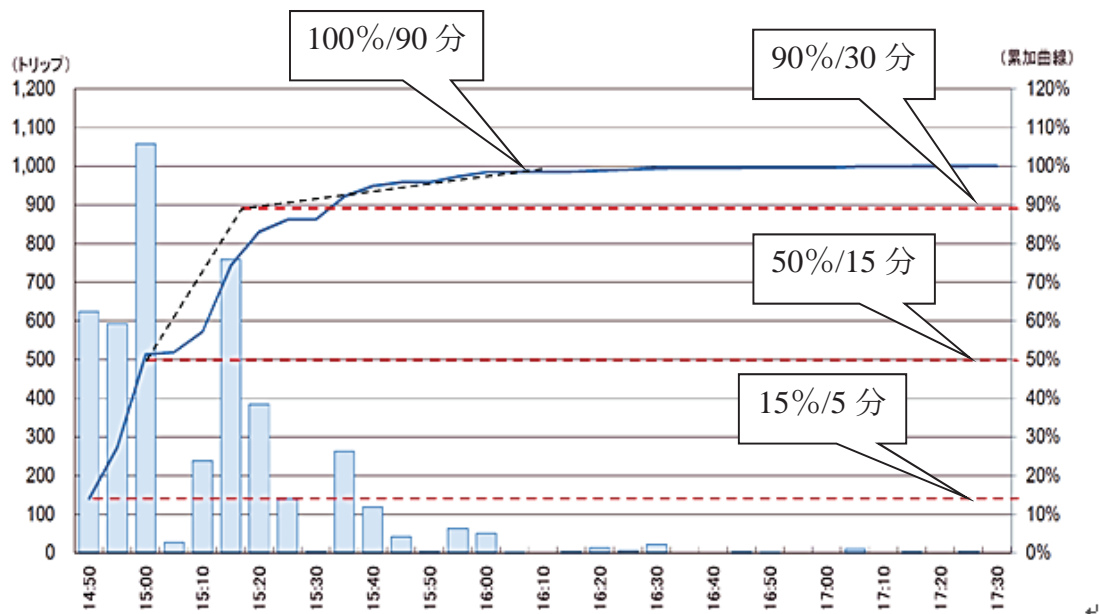
表 4-2-2 避難時のエージェントの配置

	観光客	男 性			女 性		
		～ 19 才	20～60 才	61 才～	～ 19 才	20～60 才	61 才～
平日昼	2063 人	学校	50%	100%	学校	90%	100%
平日夜	349 人	100%	100%	100%	100%	100%	100%
週末昼	4126 人	100%	100%	100%	100%	100%	100%
週末夜	698 人	100%	100%	100%	100%	100%	100%

④避難開始時間の設定

エージェントの避難開始時間を，図 4-2-2 に示す「津波被災市街地復興手法検討調査（とりまとめ），2012」<sup>2-3)</sup>より，東日本大震災の実績を参考として設定した．地震発生後 5 分で 15%の地域住民エージェントが避難を開始し，15 分で 50%，30 分で 90%，90 分で 100%とし，各町会全て同じ配分で避難を開始するという設定を行った．

図 4-2-2 避難開始時間



### ⑤エージェントの避難速度設定

エージェントの具体的な設計項目として避難速度を設定する.

- ・ 冬季以外避難速度

$$V_1 = V_{s1} \times C_1 \times C_2 = 1.14 \sim 1.47 \text{m/s}$$

- ・ 冬季避難速度

$$V_2 = V_{s1} \times C_1 \times C_2 \times C_3 = 0.95 \sim 1.22 \text{m/s}$$

- ・ 冬季以外階段部避難速度

$$V_3 = V_{s2} \times C_1 \times C_2 = 0.36 \text{m/s}$$

- ・ 冬季階段部避難速度

$$V_4 = V_{s2} \times C_1 \times C_2 \times C_3 = 0.30 \text{m/s}$$

以下に設定根拠を示す.

#### ○避難基本速度値： $V_{s1}$

避難基本速度値は別途実施した歩行実験結果図 4-2-3, 4-2-4 を基に設定した. 但し, 家族構成 3~6 人においては, 避難基本速度の実験値に大きな差がないことから, 最低値の 1.43m/s を避難基本速度値とする.

#### ○階段部避難基本速度値： $V_{s2}$

階段部の避難基本速度値は, 「津波対策推進マニュアル検討報告書, 2002」<sup>2-4)</sup>より, 0.5m/s として設定する.

#### ○基本速度値に乗じる係数

避難速度実験では 316m という短い距離で計測実験を繰り返し行っており, ある程度の学習効果があったことや, 実際の避難では長距離の避難も考えられることから, 以下に示す 3 つの係数を乗じることとする.

- ・ 疲労係数： $C_1=0.9$  を考慮する.

「漁村における津波対策基本方針, 2005」<sup>2-5)</sup>より, 疲労係数 (体力的疲労に速度低減の割合を疲労係数として定義) を設定する.

- ・ 現実率： $C_2=0.8$  を考慮する.

「漁村における津波対策基本方針, 2005」<sup>2-5)</sup>より, 現実率 (学習効果による影響や実際に被災した状況による速度低減の割合として定義) を設定する.

- ・ 冬季低減率： $C_3=0.833$  を考慮する.

石川県輪島市は降雪地域であることを勘案し, 「センターレポート通巻第 166 秋号」<sup>2-6)</sup>より冬季における歩行速度の低減率として, 冬季低減率 (冬季における路面状況による速度低減の割合として定義) を設定する. なお, この値は歩行路が圧雪状態での実験結果である.

図 4-2-3 年代別避難基本速度

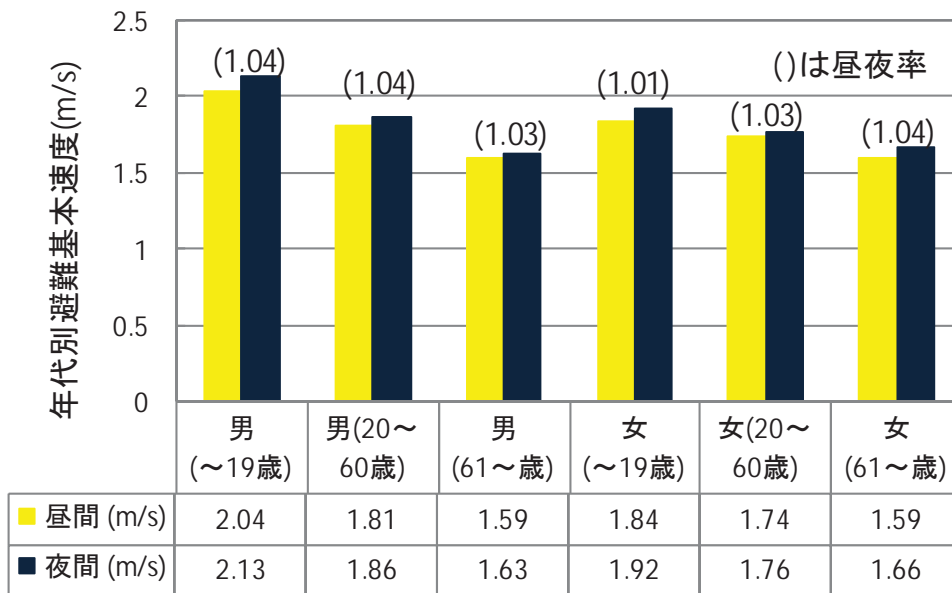
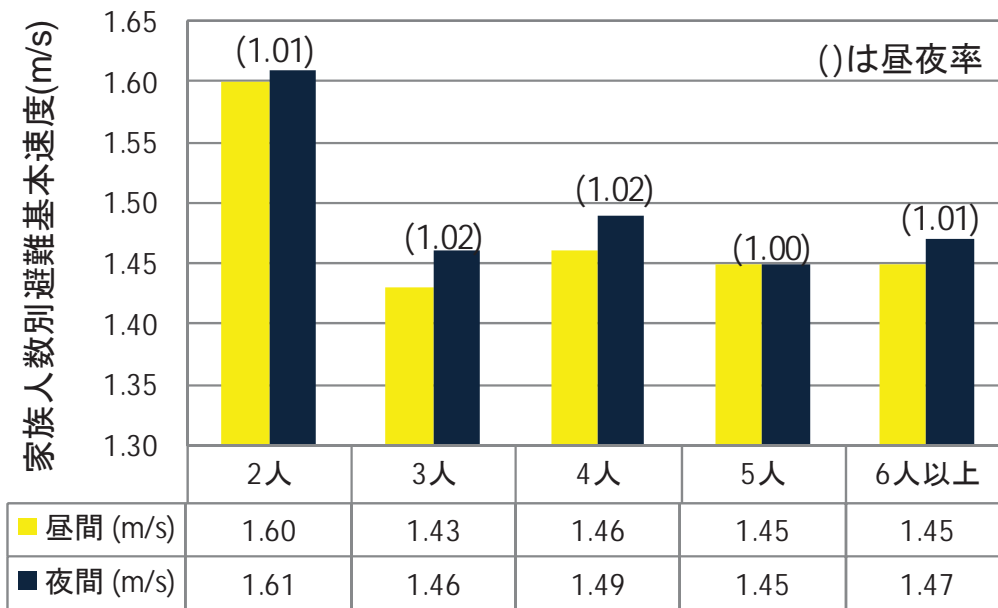


図 4-2-4 家族人数別避難基本速度



## ⑥避難場所の設定

2012年4月に設定された輪島市臨港地域における避難場所とその収容人数を図4-2-5、表4-2-3に示す。高台に位置する避難場所は、番号2、3、9、12、101の5箇所であり、番号9と12は市街地から離れている。また、地域住民にアンケート調査を行ったところ、津波想定浸水エリア内もしくは近接する避難場所番号1、13が避難場所として認知されていない傾向が強いことが確認されたことから、今回は津波想定浸水エリア内もしくは近接している避難場所番号1、13は使用不可として設定した。また、4、8の小学校は週末および夜間は閉門しており、平日昼間は想定浸水エリア内であるため屋内のみ避難可であるが在学生だけで満員になるとし、使用不可と設定する(表4-2-3にて灰色で着色)。

図4-2-5 輪島市臨港地域避難場所一覧

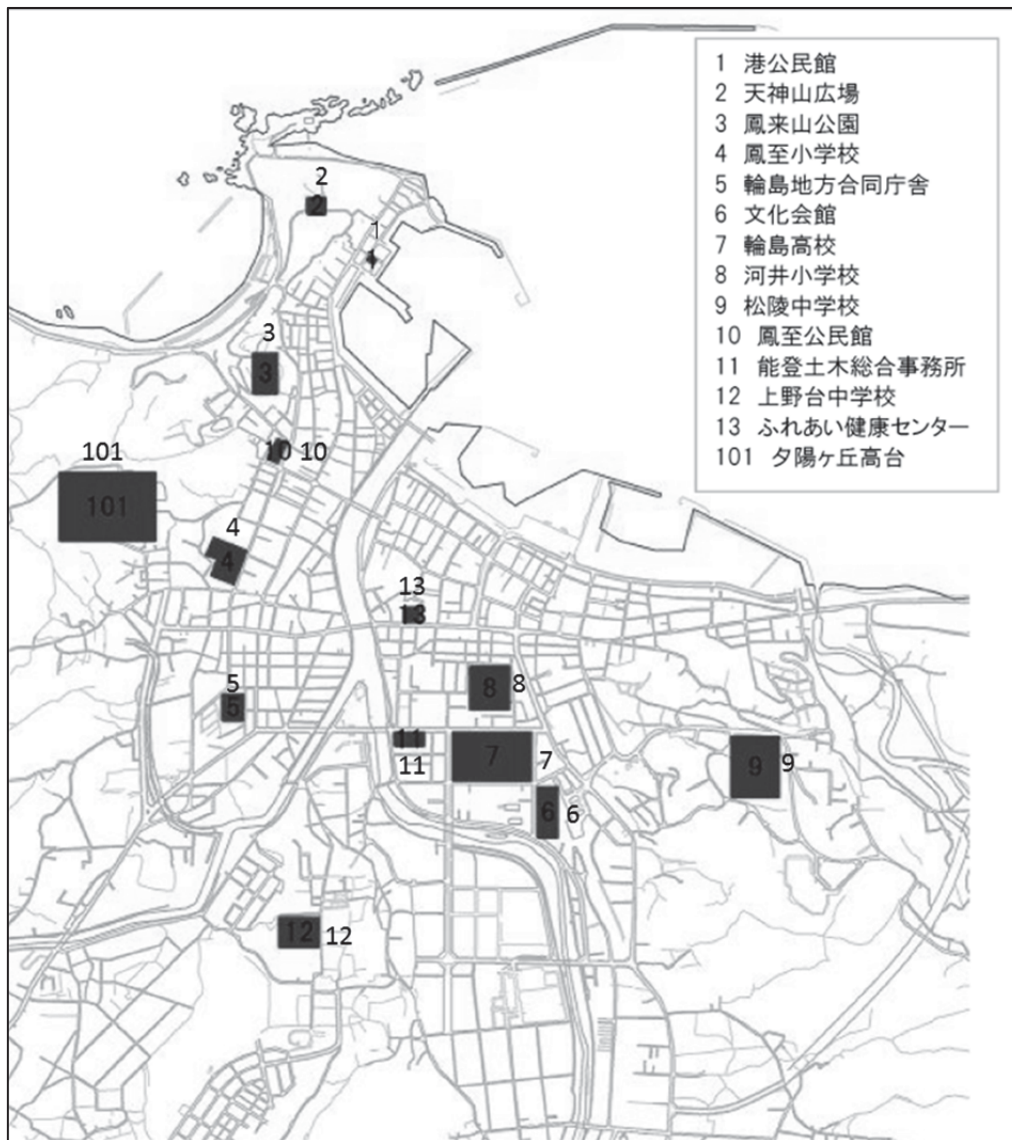


表 4-2-3 避難場所一覧

番号	避難場所	収容人数		使用可否	
		屋内	屋外	昼	夜
1	港 公 民 館	94	0	不可	不可
2	天 神 山 広 場 ( 高 台 )	0	2,094	可	可
3	鳳 来 山 公 園 ( 高 台 )	0	10,123	可	可
4	鳳 至 小 学 校	433	7,283	不可	不可
5	輪 島 地 方 合 同 庁 舎	803	0	可	可
6	文 化 会 館	2,342	0	可	可
7	輪 島 高 校	1,587	8,694	可	可
8	河 井 小 学 校	583	5,084	不可	不可
9	松 陵 中 学 校 ( 高 台 )	568	13,203	可	可
10	鳳 至 公 民 館	562	0	可	可
11	奥 能 登 土 木 総 合 事 務 所	550	0	可	可
12	上 野 台 中 学 校 ( 高 台 )	0	8,078	可	可
13	ふ れ あ い 健 康 セ ン タ ー	32	0	不可	不可
101	夕 陽 ケ 丘 高 台	0	30,000	可	可

### ⑦道路閉塞率の設定

地震時に沿道建築物等の倒壊などにより避難路上に生じた瓦礫による閉塞幅は、「STA テクノロジー・ショーケース 2013」<sup>2-7)</sup>より、以下に示す算式を用いて閉塞幅を算出した。

$$\text{瓦礫幅} : a = 2.32X_1^{0.379} + 0.189X_2^{2.23} + 4.41X_3^{12.0}$$

ここに、

$X_1$ : 建物全壊率

$X_2$ : 平均階層 (延床面積/建築面積)

$X_3$ : 建築密度 (建築面積/宅地面積)

まず、道路リンクに面している家屋 1 軒ごとの瓦礫幅 ( $a_n$ ) と道路リンクに面している家屋 1 軒ごとの幅 ( $b_n$ ) を算出し、以下の式にてノード間の道路リンク単位で平均瓦礫幅を求め、ノード間の既往道路幅 ( $W$ ) から平均瓦礫幅 ( $A$ ) を差し引くこととした。

$$\text{道路リンク単位の平均瓦礫幅} : A = \frac{\sum(a_n \times b_n)}{\sum b_n}$$

ここに、

$a_n$ : 路リンクに面している家屋 1 軒ごとの瓦礫幅

$b_n$ : 道路リンクに面している家屋 1 軒ごとの道路走行方向の長さ

$\sum b_n$ : 道路リンクに面している家屋の道路走行方向の総長さ

## 3. 津波避難シミュレーションの結果

### (1) 避難シミュレーション分析概要

地震津波避難シミュレーションは、個人避難と家族避難に区分し、平日と週末、冬と冬以外の条件のもと、表 4-3-1、表 4-3-2 に示す全 10 ケースを行った。

なお平日夜に関しては、観光客宿泊者数が週末夜よりも少ない点以外は条件が同じであり同傾向の結果が予想されること、そして週末夜よりも悪い結果になるとは考えられないことから今回は除外した。

表 4-3-1 個人避難検討ケース (単位:人)

検討 ケース	条 件		観光客数	地域住民数	合計避難者数
ケース 1	平日昼	冬以外	2,063	10,412	12,475
ケース 2	平日昼	冬	2,063	10,412	12,475
ケース 3	週末夜	冬以外	698	12,338	13,036
ケース 4	週末夜	冬	698	12,338	13,036
ケース 5	週末昼	冬	4,126	12,338	16,464



表 4-3-2 家族避難検討ケース(単位:人)

検討 ケース	条 件		観光 客数	地域 住民数	合計 避難者数
ケース 6	平日昼	冬以外	2,063	10,412	12,475
ケース 7	平日昼	冬	2,063	10,412	12,475
ケース 8	週末夜	冬以外	698	12,338	13,036
ケース 9	週末夜	冬	698	12,338	13,036
ケース 10	週末昼	冬	4,126	12,338	16,464

## (2) 個人避難シミュレーション分析結果

個人避難シミュレーションの結果を図 4-3-1、表 4-3-3 に示す。地震発生 50 分後に、浸水域内に存在する（避難できなかった）エージェントが最も多いのは、ケース 5（週末・昼間・冬）であり、その数は 2,143 人（全体の 13.0%）という結果となった。なお、週末昼間と表記しているが、想定している時間帯は、朝市に多くの観光客が存在し、且つほとんどの住民が自宅に居る午前 8 時である。

50 分後に浸水域内に存在する避難前のエージェントの割合に着目すると、ケース 3（週末・夜間・冬以外）とケース 4（週末・夜間・冬）の値が、若干ではあるが、他の 3 ケースよりも高くなっていることがわかる。これは、ともに夜間という条件であるケース 3 と 4 における観光客数が少なく、これに伴い観光客エージェントが存在する間隔が広くなり、その結果、避難行動をしているエージェントを見つけることが難しくなり、避難を開始できない観光客エージェントが増加するためだと考えられる。

50 分後に避難済みのエージェントの割合に着目する。ケース 1（平日・昼間・冬以外）がケース 2（平日・昼間・冬）の数値よりも高く、ケース 3（週末・夜間・冬以外）がケース 4（週末・夜間・冬）の数値よりも高くなっていることがわかる。この 2 つの比較より、路面状況による避難速度の大きさは、避難済みエージェントの数値に影響を及ぼすといえる。

50 分後に浸水域内に存在する（避難できなかった）エージェントの合計に着目する。合計数、その割合ともに、ケース 1（平日・昼間・冬以外）とケース 2（平日・昼間・冬）が低い。これは、学生のエージェントが避難場所となる学校に始めから居たことが要因と考えられる。また、観光客エージェントの数の相違により避難できなかった合計数は異なるものの、避難できなかったエージェント数の全体数に対する割合は、ケース 4（週末・夜間・冬）とケース 5（週末・昼間・冬）で約 13%であり、避難効率は同程度であったとわかる。上記のとおりケース 4 は避難前の観光客エージェントの割合が高かったこと、なお且つケース 5 は避難中のエージェントの割合が高いことが原因である。

図 4-3-1 ケース別避難済み人数の推移（個人避難）

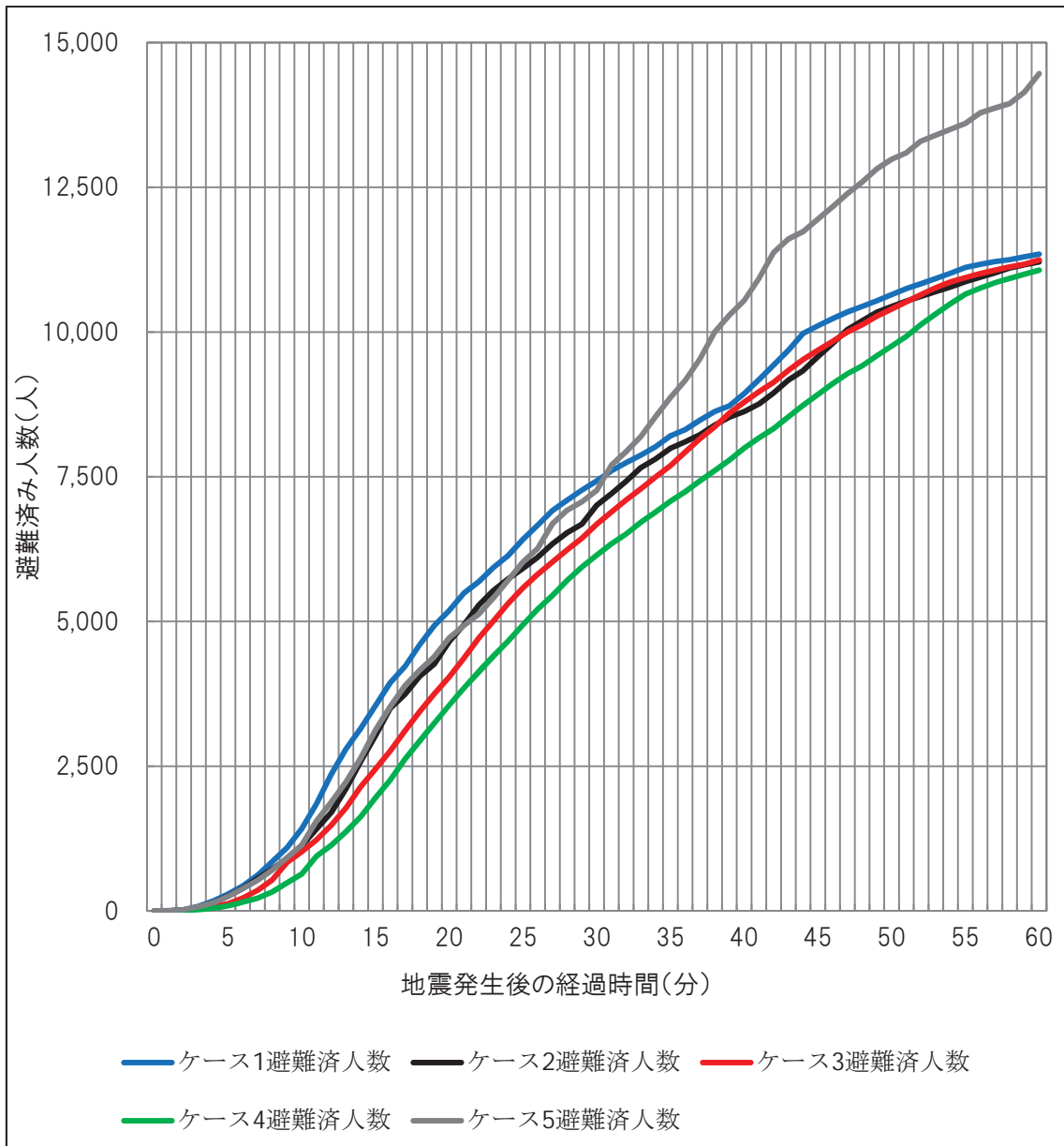


表 4-3-3 個人避難シミュレーション結果

ケース名	避難者数(人)			50分後の避難状況(人)			
	住民数	観光客数	合計	避難済	浸水域内に存在		
					避難前	避難中	合計
ケース1(平日・昼間・冬以外)	10,412	2,063	12,475	10,646 (85.3%)	491 (3.9%)	447 (3.6%)	938 (7.5%)
ケース2(平日・昼間・冬)	10,412	2,063	12,475	10,442 (83.7%)	485 (3.9%)	599 (4.8%)	1,084 (8.7%)
ケース3(週末・夜間・冬以外)	12,338	698	13,036	10,442 (80.1%)	605 (4.6%)	977 (7.5%)	1,582 (12.1%)
ケース4(週末・夜間・冬)	12,338	698	13,036	9,757 (74.8%)	615 (4.7%)	1,093 (8.4%)	1,708 (13.1%)
ケース5(週末・昼間・冬)	12,338	4,126	16,464	12,986 (78.9%)	608 (3.7%)	1,535 (9.3%)	2,143 (13.0%)

※表中()内は避難者数合計に対する割合を表す。

### (3) 家族避難シミュレーション分析結果

家族避難シミュレーションの結果を図 4-3-2, 表 4-3-4 に示す。地震発生 50 分後に、浸水域内に存在する（避難できなかった）エージェントが最も多いのは、ケース 10（週末・昼間・冬）であり、その数は 2,024 人（全体の 12.3%）という結果となった。

また、家族避難におけるケース間の分析結果は、個人避難におけるものと同じ傾向であった。個人避難と家族避難のシミュレーション結果を日時季節同条件同士で比較すると、「週末・昼間・冬の条件」においては、個人避難に比べて、家族避難の方が約 120 人多く避難できる（津波浸水域内に存在するエージェントが 120 人少ない）結果となっている。これは、避難経路に関する知識がない点に加え、個人避難による速度差が大きいことにより、高齢の観光客エージェントがとり残されてしまう問題を、家族避難により解消していることが要因として考えられる。さらに、この条件（週末・昼間・冬）では、全エージェントに対する観光客エージェントの占める割合が特に高いため、影響が大きかったといえる。

一方、「それ以外の条件」下においては、どれも個人避難の方が約 100~160 人多くのエージェントが避難できる結果となった。個人避難では、速度差が大きいため避難速度の小さい高齢者が遠方の避難場所に避難する割合が高くなるという問題が生じるが、早い時間帯における避難済みの割合が家族避難よりもやや高くなるため、若干ではあるが渋滞エリアが狭まり、速度減少する区間を減らすことができると考えられる。よって、あらかじめ避難場所までの最短経路を知っている地域住民エージェントにおいては、若干の差ではあるが個人避難の方がよいといえる。従って、地域住民エージェントの割合が高い「それ以外の条件」下では、個人避難の方がより多くのエージェントが避難できる結果となったと考えられる。

図 4-3-2 ケース別避難済み人数の推移（家族避難）

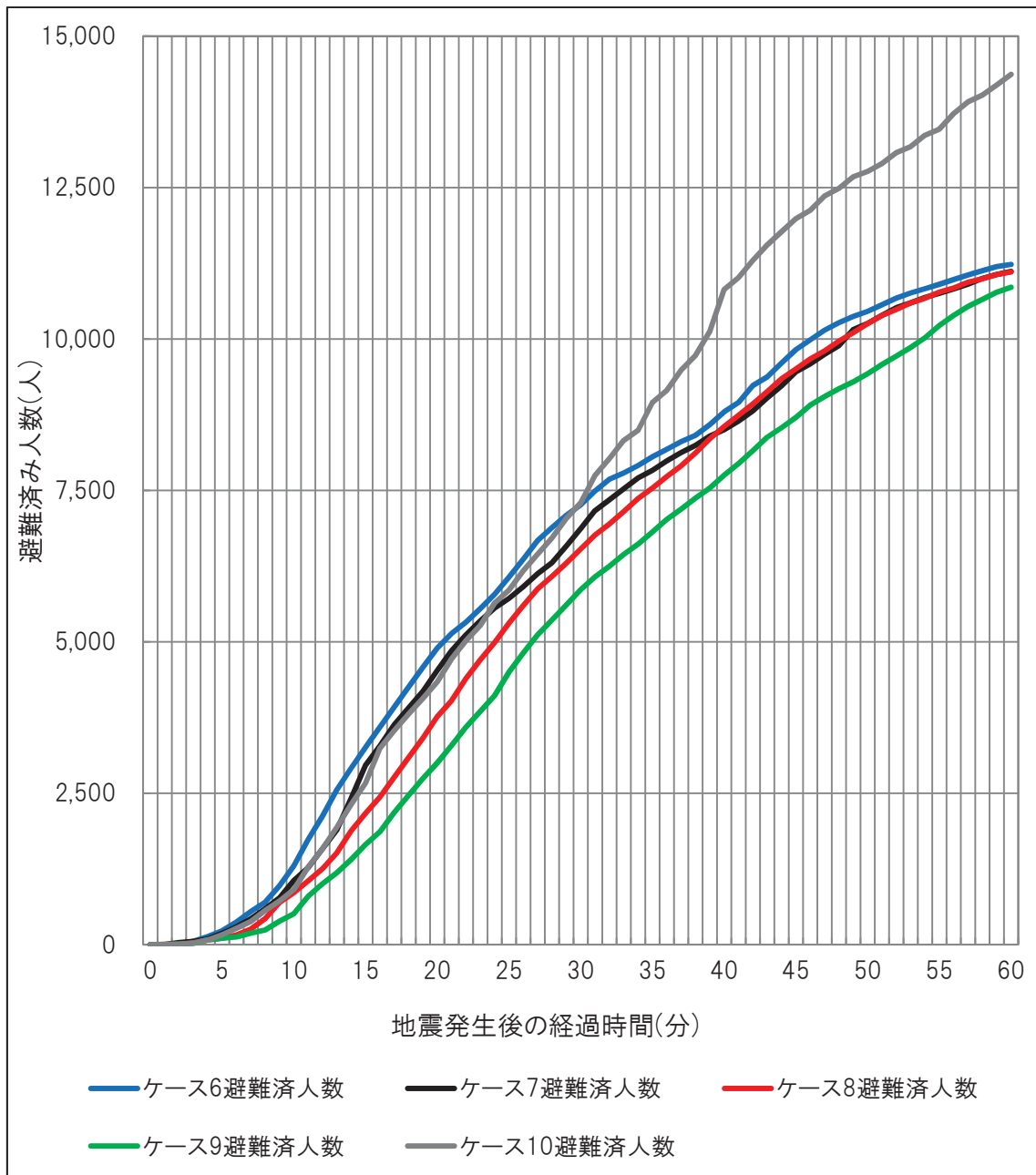


表 4-3-4 家族避難シミュレーション結果

ケース名	避難者数(人)			50分後の避難状況(人)			
	住民数	観光客数	合計	避難済	浸水域内に存在		
					避難前	避難中	合計
ケース6(平日・昼間・冬以外)	10,412	2,063	12,475	10,457 (83.8%)	563 (4.5%)	536 (4.3%)	1,099 (8.8%)
ケース7(平日・昼間・冬)	10,412	2,063	12,475	10,257 (82.2%)	486 (3.9%)	701 (5.6%)	1,187 (9.5%)
ケース8(週末・夜間・冬以外)	12,338	698	13,036	10,254 (78.7%)	601 (4.6%)	1,104 (8.5%)	1,705 (13.1%)
ケース9(週末・夜間・冬)	12,338	698	13,036	9,426 (72.3%)	651 (5.0%)	1,211 (9.3%)	1,862 (14.3%)
ケース10(週末・昼間・冬)	12,338	4,126	16,464	12,766 (77.5%)	585 (3.6%)	1,439 (8.7%)	2,024 (12.3%)

※表中()内は避難者数合計に対する割合を表す。

#### 4. 津波避難シミュレーション結果の考察

##### (1) 個人避難シミュレーション

個人避難シミュレーションを行ったケース 1 からケース 5 の中で、避難対象者数が 16,464 人と最も多く、かつ 50 分後に浸水域内の存在した人数が 2,143 人と最も多かったケース 5 に注目して考察を行う。

##### ①避難人数の内訳

津波浸水エリア内に配置したエージェントで、地震発生 50 分後までに避難を開始していないエージェントは 608 人(3.7%)となった。

ここで、野村らによる「輪島市臨港地域における地震津波災害に対する住民意識と地域防災力向上に関するアンケート調査, 2012」<sup>2-8)</sup>によると、輪島市臨港地域において、地震発生後に避難しないと回答した人の割合は 11%である。しかしこのアンケート調査では、津波浸水エリア内在住のアンケート回答者は全体の 47%であったので、浸水エリア内在住の”避難しない”を回答した割合は 11%よりも低いと予想される。したがって、上記の本シミュレーション結果の 3.7%という数値と近いと考えられ、エージェントは住民の意思と概ね近い行動をとったといえる。

また、津波浸水エリア内における避難中のエージェントは 1,535 人(9.3%)となった。

##### ②避難場所の収容率

各避難場所の収容率推移を図 4-3-3 に示す。高台に避難したエージェント(破線)は 5,384 人(41.5%)、高台以外に避難したエージェント(実線)は 7,602 人(58.5%)となった。高台の合計収容量は 55,988 人と多いことから、収容率としては小さく表現されてしまった。特に夕陽ヶ丘高台の収容量は 30,000 人と多いことから、収容割合は 1.6%と非常に小さく表示されている。

避難傾向を整理すると、近い避難場所に避難することを基本条件として設定したため、市街地にある輪島地方合同庁舎(容量 803 人)は地震発生後 25 分で収容量を超え、鳳至公民館(容量 562 人)は 16 分で収容量を超過した。この 2 箇所に避難できなかったエージェントの殆どが鳳来山公園(容量 10,123 人)に向かっている。そのため、鳳至公民館からの再避難エージェントによる鳳来山公園への流入増加の影響で、地震発生後約 33~38 分において収容率の増加が確認できる。その後、輪島地方合同庁舎からの再避難エージェントが加わったことから渋滞範囲が拡大した為に、収容率の伸びが鈍化したと考えられる。

また、地震発生約 30 分後から天神山広場の収容率の伸びが鈍化しているが、港側から流入する経路の渋滞の程度はそれ以前から著しい変化は見られないので、この渋滞だけが収容率の伸び鈍化に作用したわけではないといえる。鈍化の要因として、港側でない上部分から流入する経路におけるエージェントの流入の減少、つまりその経路を最短経路とするエージェントの多くが避難を完了したためだと考えられる。

## (2) 家族避難シミュレーション

家族避難シミュレーションを行ったケース 6 からケース 10 の中で、避難対象者数が 16,464 人と最も多く、かつ 50 分後に浸水域内の存在した人数が 2,024 人と最も多かったケース 10 に注目して考察を行う。

### ①避難人数の内訳

津波浸水エリア内に配置したエージェントで、地震発生 50 分後までに避難を開始していないエージェントは 585 人(3.6%)、津波浸水エリア内における避難中のエージェントは 1,439 人(8.7%)となった。

### ②避難場所の収容率

各避難場所の収容率推移を図 4-3-4 に示す。基本的な傾向は個人避難と同様である。高台に避難したエージェント(破線)は 5,273 人(41.1%)、高台以外に避難したエージェント(実線)は 7,493 人(58.9%)となった。高台の合計収容量は 55,988 人と多いことから、収容率としては小さく表現されてしまった。特に夕陽ヶ丘高台の収容量は 30,000 人と多いことから、収容割合は 1.6%と非常に小さく表示されている。

避難傾向を整理すると、近い避難場所に避難することを基本条件として設定したため、市街地にある輪島地方合同庁舎(容量 803 人)は地震発生後 29 分で収容量を超え、鳳至公民館(容量 562 人)は 16 分で収容量を超過した。この 2 箇所に避難できなかったエージェントの殆どが鳳来山公園(容量 10,123 人)に向かっている。そのため、鳳至公民館からの再避難エージェントによる鳳来山公園への流入増加の影響で、地震発生後約 34~40 分において収容率の増加が確認できる。その後、輪島地方合同庁舎からの再避難エージェントが加わったことから渋滞範囲が拡大した為に、収容率の伸びが鈍化したと考えられる。

## (3) 積雪時と無積雪時の比較

積雪時と無積雪時の避難の様相を比較する。まず、個人避難では表 4-3-3 に示すように、平日・昼間・冬以外と平日・昼間・冬では 50 分後に浸水域内に存在する人が、それぞれ 938 人と 1,084 人、週末・夜間・冬以外と週末・夜間・冬ではそれぞれ 1,582 人と 1,708 人となっており、積雪を考慮することにより避難できない人が約 1.1 倍となることがわかる。家族難では表 4-3-4 に示すように、平日・昼間・冬以外と平日・昼間・冬では 50 分後に浸水域内に存在する人が、それぞれ 1,099 人と 1,187 人、週末・夜間・冬以外と週末・夜間・冬ではそれぞれ 1,705 人と 1,862 人となっており、積雪を考慮することにより避難できない人は個人避難の場合と同様に約 1.1 倍となることがわかる。

本研究では、積雪時と無積雪時の差異として住民の歩行速度において冬季低減率を導入して、歩行速度に一律 0.833 という係数を乗じている。このことだけでも避難できない人数が 1.1 倍増加することが明らかとなった。冬季低減率は圧雪状態の雪道を歩行する実験から得られた数値であり、積雪時の状況としては比較的良い条件と考えられる。新雪が積もっている場合の歩行速度の考慮や、除雪した堆雪によって道路幅が狭くなっている場合の考慮など、さらに厳しい条件を設定して避難シミュレーションを行うことが必要である。今後の課題としたい。

図 4-3-3 個人避難シミュレーション（ケース 5）の避難場所収容率推移

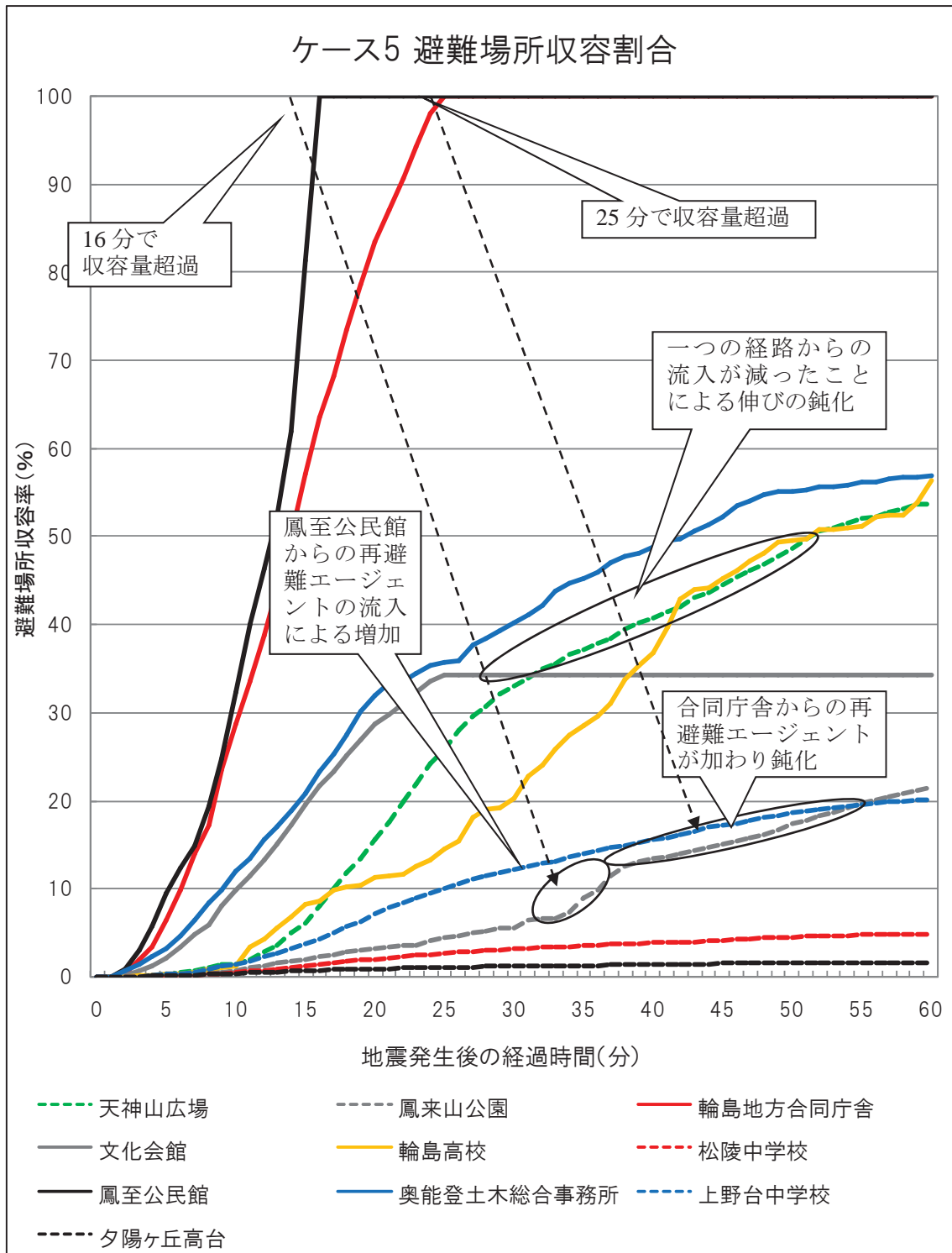
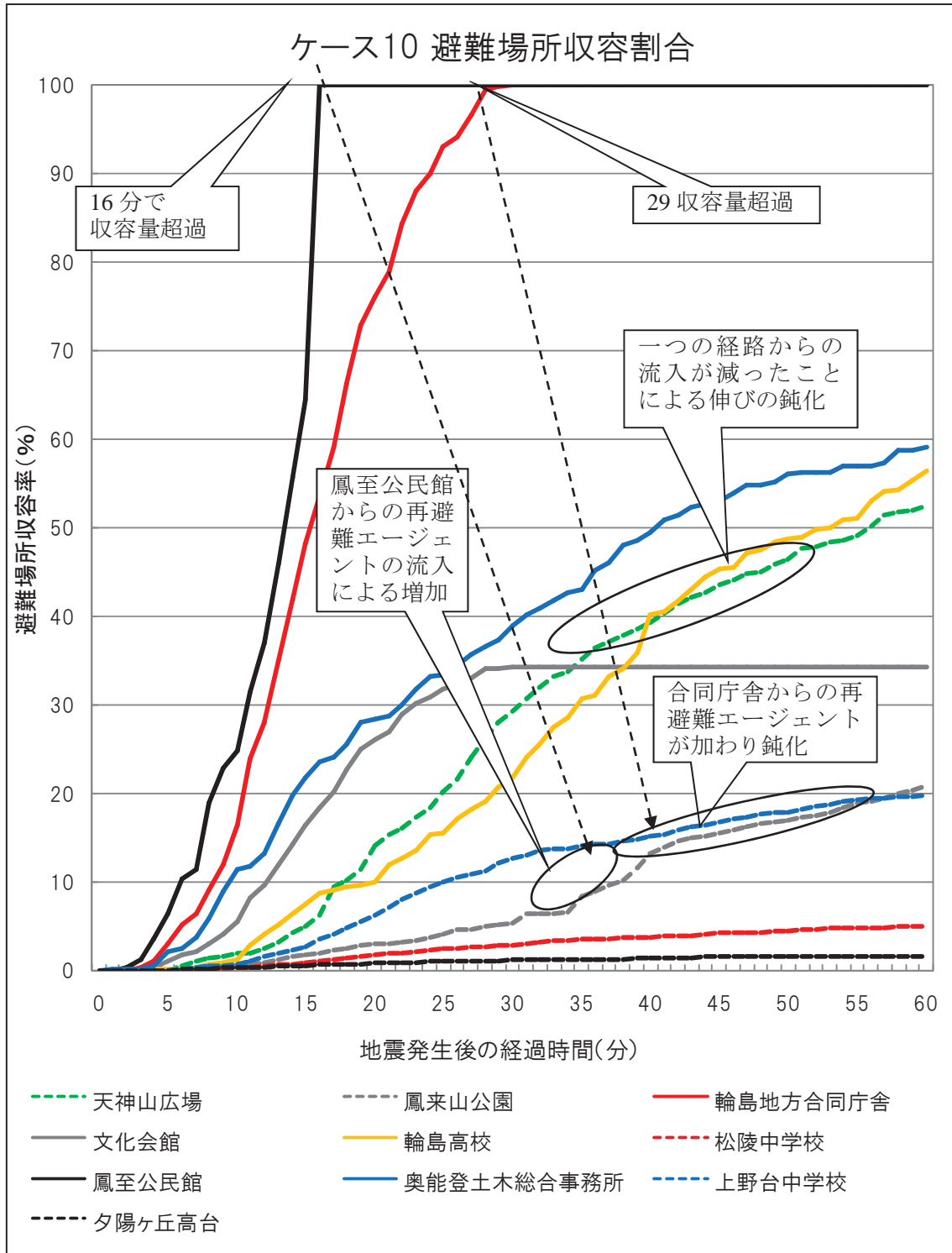




図 4-3-4 家族避難シミュレーション（ケース 10）の避難場所収容率推移





## 5. まとめ

本章では、輪島市臨港地域におけるマルチエージェントシステムを用いた地震津波からの避難シミュレーションを実施し、個人避難と家族避難、平日と週末、積雪時と無積雪時の各種条件のもと、全10ケースについて検討を行うとともに、積雪時と無積雪時の避難様相の際について考察した。得られた主な結論は以下の通りである。

- ・避難シミュレーションによって、渋滞する箇所と現在の避難場所の位置に不均衡性があることが確認できた。
- ・津波避難において最も危険なケースは、路面状況の悪い冬季で、観光客数が多く存在する週末であり、なおかつ殆どの地域住民が自宅に居る昼間である。
- ・観光客数が減少する夜間においては、避難行動をしている地域住民を見つけることが難しくなり、避難を開始できない観光客が増加すると考えられる。
- ・積雪時と無積雪時の差異として住民の歩行速度において冬季逡減率を導入して、歩行速度に一律0.833という係数を乗じて解析を行ったが、避難できない人数が1.1倍増加することが明らかとなった。
- ・本研究で用いた冬季低減率は圧雪状態の雪道を歩行する実験から得られた数値であり、積雪時の状況としては比較的良い条件と考えられる。新雪が積もっている場合の歩行速度の考慮や、除雪した堆雪によって道路幅が狭くなっている場合の考慮など、さらに厳しい条件を設定して避難シミュレーションを行うことが必要である。今後の課題としたい。

## 第4章参考文献

- 2-1) 石川県：平成23年度石川県津波浸水想定調査概要版，pp.13-24，2011.
- 2-2) 輪島市：平成24年度輪島市統計書，2013，  
<http://www.city.wajima.ishikawa.jp/docs/2013030600018/>，2013年4月2日閲覧
- 2-3) 国土交通省都市局：津波被災市街地復興手法検討調査（とりまとめ），p.3-10-3-12，2012.
- 2-4) 津波対策推進マニュアル検討委員会：津波対策マニュアル検討報告書，p.38，2002.
- 2-5) 高知県海洋局漁港課：漁村における津波対策基本方針，pp.5-23，2005.
- 2-6) 北海道建築指導センター：センターレポート通巻第166号秋号，pp.2-5，2008.
- 2-7) 国土交通省国土技術政策総合研究所，STAテクノロジー・ショーケース，p.61，2013.
- 2-8) 野村尚樹，宮島昌克，山岸宣智，藤原朱里：アンケート調査に基づく輪島市臨港地域における地震津波災害に対する住民意識と地域防災力向上に関する基礎的研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.69，No.4，pp.1\_1002-1\_1012，2013.

## 第5章 まとめ

### (1) 屋根雪の滑落と雪壁の影響を考慮した解析

住宅の屋根上に雪が載っている場合、住宅の変位が通常時より増大することが明らかになった。しかし、住宅の周囲に雪の壁がある場合、この雪の壁が住宅の挙動にどのような影響を与えるのか、また被害は低減されるのかどうかなど、不明な部分が多い。雪の壁が住宅の地震応答に及ぼす影響について明らかにするために、屋根雪の滑落と雪壁の影響を同時に考慮した解析を行った。

この場合においても、残留変位に着目すると特徴的な結果となっていることが分かる。1階の応答変位についてみると、どの場合においても雪壁との距離を10cmとしているためにそれ以上の変位は見られず、雪壁の影響により、変位は雪壁がない場合と比べ抑制されていると言える。しかし、屋根雪の滑落の段階が細かくなるにつれ、2階変位と1階の応答変位に差が出てきているということを図より読み取ることができる。そのため残留変位は、雪壁がない場合の滑落の解析結果と比較すると、2階部分が大きくなっており、1階部分と比べて差が出ている。これは、1階部分に大きな変位が生じて、雪壁により1階部分に地震動外力とは別に逆方向の力が加わり、2階部分は慣性により投げ出される形になり通常より大きな加速度が加わるためと考えられる。1階部分の変位は雪壁による抑制効果が働き抑えられるが、2階部分は変位が増大する場合もあるため、層間変形角が大きくなり倒壊する危険性も考えられる。

### (2) 複合地震災害の防災ランドマークに関する研究

本研究では、北陸地方における複合災害に対する防災意識向上のために、ウェブページの作成に取り組んだ。まず、過去に発生した複合災害を調査し地震概要や被害概要のデータベース化を行った。さらに、実際に災害が発生した現場において写真撮影や現地の人からのヒアリング調査を行った。そして、それをもとに発生した被害の防災ランドマークを作成した。これまで、吉田研究室で作成された防災ランドマークは、災害時の写真と現在の写真が並んでいる2枚の画像を表示させたものであった。そこで、新しい風景の変化の見せ方としてホームページビルダーの機能であるオーバーロールを用いた。これにより、災害時の写真の上にマウスポインタを置けば、現在の写真に切り替えることができる。今までの防災ランドマークとは違ったものを作成することができた。また、現地調査や資料から得られた教訓と、その対策も見出すことができた。

今後の課題としては、多くの人に作成したウェブページを実際に利用してもらい、意見などを参考にしながら細かいレイアウトや、データベースの充実を図り、より使いやすいソフトウェアの研究を行っていく必要がある。

### (3) 積雪と津波の複合災害に関する簡易手法を用いた橋梁の流出に関する研究

本研究では、東北地方太平洋沖地震で被災した橋梁 21 橋 (29 ケース) に着目し、 $\beta$  値に基づく簡易損傷判定を行って  $\beta$  値と上部構造流出の関係を明らかにし、更には積雪地域特有の圧雪荷重による橋梁水平抵抗力の変化と積雪深さを考慮した受圧面積の増加に伴う津波水平作用力の増加を考慮した簡易  $\beta$  値による分析を行い、これらの変化について考察を行った。

これらの結果、大きな変化は認められず、積雪 (圧雪) を考慮しても考慮しなくても  $\beta$  値の変化量はわずかであり、上部構造の流出に与える影響は小さい結果を得た。但し、実際には圧雪された路面が津波の影響で薄利し、津波と共にこの圧雪された雪片がどのような影響を与えているかなどの、形状が変化するような幾何学的要素を取り入れて評価していないために、今後は実験や数値解析によりこれらの結果の検証が必要である。

### (4) 積雪時地震による津波避難シミュレーション

津波到達時間の 50 分で最も避難できなかった方が多かったケースにおいて避難できなかった方は 2,024 人 (12.3%) となった。積雪の有無によりケース 6 と 7 を比較したところ、88 人、ケース 8 と 9 を比較したところ、157 人の避難者数の違いが生じた。

避難シミュレーションの結果としては個人避難と家族避難では、若干ではあるが家族避難の方が避難できる結果となったが、その差は僅かであった。家族避難時に避難速度は落ちるがバランス良く避難ができ、個人避難時は避難速度の遅い年配者が、近くの避難所の容量超えに伴い再避難となったことが要因である。

津波浸水エリア内に住んでいる方で、避難開始していない方は 585 人 (4.7%) となり、個人避難シミュレーション結果と同様な結果となった。また、津波浸水エリア内における避難中の方は 1,439 人となり、個人避難シミュレーション結果と同様な結果となった。

### (5) 今後の課題

本研究では、圧雪された状態を想定して分析を実施した。しかしながら、緯度が高くなる と海水上には流氷等を有している場合がある。この様な状況では、アイスジャムの様な被害も雪国特有の被害形態であると考えられる。例えば、1894 年 3 月の根室沖地震では、国後島で流氷の伴った津波の遡上により、家屋の倒壊や船の破損が複数認められていること、1923 年 2 月のカムチャッカ地震では、氷塊によって缶詰工場が破損する被害、1952 年の十勝沖地震や 2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震でも道内の河川でアイスジャムの発生が認められている。

この様なアイスジャムの発生は、津波の遡上高さが堤防を越流しなくても、河道が閉塞されること、また橋梁部においてボトルネックとなることで一時的なダムによる水平力の増加に至り、その結果として、水平力の増加により橋梁の上部構造の流出といった被害シ

ナリオも考えられる。以上の様な現象も、雪国特有の被害であり、今後の更なる分析が必要である。

## (6) 避難改善案

### ①避難開始時間の改善

表 5-1-1 に示すように、避難開始時間を当初設定していた値の 1/2 に短縮して避難開始時間を早めた場合の検証を行う。

表 5-1-1 避難開始時間

避難開始率	当初設定値	改善値
15%	5 分	2.5 分
50%	15 分	7.5 分
90%	30 分	15 分
100%	90 分	45 分

### ②避難所の誘導改善

個人及び家族避難シミュレーション結果より、収容人数を超えた避難所は、輪島地方合同庁舎 (ID5) と鳳至公民館 (ID10) の 2 箇所となり、鳳来山公園に再避難する際に渋滞を起こしていることが確認できたことから、避難者を分散させるように誘導した場合の検証を行う。

当初避難は、最も近い避難所に避難する設定としていた為、海に向かって避難するルートが幾つか存在し、渋滞を発生させていたことを踏まえて、以下に示す 3 つの誘導改善を行う。

輪島地方合同庁舎 (ID5) → 鳳至公民館 (ID10) → 鳳来山公園 (ID3) という避難ルートを輪島地方合同庁舎 (ID5) → 上野台中学校 (ID12) に誘導する計画に改善する。上野台中学校は山側かつ津波想定浸水エリア外に位置する避難所である。

鳳至公民館 (ID10) → 鳳来山公園 (ID3) という避難ルートも同様に鳳至公民館 (ID10) → 夕陽ヶ丘高台 (ID101) に誘導する計画に変更する。

鳳至小学校 (ID4) → 鳳至公民館 (ID10) → 鳳来山公園 (ID3) という避難ルートも同様に鳳至小学校 (ID4) → 夕陽ヶ丘高台 (ID101) に誘導する計画に変更する。

### ③避難所の開設

避難シミュレーションでは、週末の朝方という設定の為、学校施設の中には入ることができない設定としているが、鳳至小学校 (ID4・収容人数 433 人) や河井小学校 (ID8・収容人数 583 人) などの施設内に入ることができるという設定に計画を変更する。対応としては非

常ボタンを押すことでセキュリティーボックスが開き校舎のカギが手に入るという設定とした。

#### ④避難シミュレーションの改善検討結果

避難シミュレーション結果は、避難開始時間を 1/2 に短縮した場合には地震発生後 50 分で全ての方が避難を開始している状況となった。

##### a) 個人避難シミュレーション結果

避難時間を早めた改善案 1 で改善前と比べて約 1,000 人の方が避難することができた。改善案 2 の避難所誘導効果は、改善前と比べて 27 人の方が避難することができたが、その効果は少ないことが確認できた。

改善案 3 の避難所開設効果は、改善案 1 と殆ど変らない結果となった。この要因は、新しく開設した避難所の容量が 1,016 人と少なく、早い時間で容量を超えたため次の避難所への再避難という形になり移動距離が伸びたことが要因であった。

改善案 4 は全ての対策を講じていることから最も避難できなかつた方を少なくすることができ、改善前と比べて、1,250 人の方が避難することができ、最終的には改善前は 13.0% であった被災率が 5.4% まで低減することができた。

##### b) 家族避難シミュレーション結果

個人避難と同様な傾向が確認できたが、避難時間を早めた改善案 1 で改善前と比べて約 730 人の方が避難することができた。

改善案 2 の避難所誘導効果は、改善前と比べて 155 人の方が避難することができたが、その効果は少ないことが確認できた。

改善案 3 の避難所開設効果は、改善案 1 と殆ど変らない結果となった。この要因は、新しく開設した避難所の容量が 1,016 人と少なく、早い時間で容量を超えたため次の避難所への再避難という形になり移動距離が伸びたことが要因であった。

改善案 4 は全ての対策を講じていることから最も避難できなかつた方を少なくすることができ、改善前と比べて、911 人の方が避難することができ、最終的には改善前は 12.3% であった被災率が 6.7% まで低減することができた。

本研究で得られる成果は、雪国の過疎高齢社会を襲う地震に対する被害軽減と復興モデルを構築し、雪国地域で発生するあらゆる地震に対する被害軽減に役立つものである。また同じような問題を抱えている北陸地方の過疎地域に対する地震被害に対する復興モデルを示すことになる。ここでは、以下のような方策が復興モデルの基本となることがわかった。本モデルが今後発生する地震に対する減災への貢献は極めて高いことが期待できる。

#### 復興モデル構築のための方策案

- ・住宅の耐震・耐雪化
- ・防災意識向上と強いまちづくり
- ・積雪期における道路幅員の確保（路地における違法駐車禁止など）
- ・避難場所・避難路の適切な選定・確保と避難誘導方法の策定
- ・円滑な避難行動のための体制整備とルールづくり
- ・地域コミュニティの充実と自助・共助の促進
- ・在住する住民分布の詳細な情報把握

今後は本研究で示された方策案を念頭に置きながら、輪島市輪島地区および山間地における「災害からの被害軽減，避難・避難誘導方法，地域コミュニティの充実」について住民との十分な話し合いと意思疎通を図ることが「強いまちづくり」には不可欠であると考えられる。

## 付録 I 雪壁の剛性評価実験

付写 1-1-1 雪壁反力の実験，加圧ジャッキーと荷重計



付写 1-1-2 雪壁反力の実験，レーザー変位計



付写 1-1-3 雪壁反力の実験全景





## 付録Ⅱ 屋根雪の落雪実験

付写 2-1-1 モデル上の堆雪状況



付写 2-1-2 落雪・振動前の状況



## 付録Ⅲ 避難時における歩行速度実験

### 1. はじめに

効率的な避難経路を作成するために、単独歩行・グループ歩行・年齢別における避難基本速度を計測している。既往の調査においては、倒れたブロック塀や飛散した瓦礫の上を走行した際の速度低減率や昼夜率も算出されている。今回はこれらの論文などで計測されている避難歩行速度に関して、金沢市住民による近似的な避難速度実験を通じ、その妥当性についてまとめる。

### 2. 避難歩行速度計測実験

#### (1) 室内避難実験

「GISを用いたマルチエージェントシステムの活用に関する検討について～輪島市輪島地区の事例を通じて～」において、避難歩行速度実験が行われた。この実験は室内で行われたものであり本研究ではこの数値などとも比較する。

#### ①基本条件

実施日時：2012年11月11日10:00～12:00

実施場所：輪島高等学校体育館

参加者：輪島地区住民37名

付表 3-1-1 参加者構成

年齢構成(才)	男 性	女 性
～12	3人	4人
13～60	10人	7人
61～	6人	7人
合 計	19人	18人

#### ②計測内容

単独歩行による年代別避難基本速度の計測を体育館で行う。1周目116m, 2周目120m, 3周目120m, 全長356mのコースにおいて、スタート～ゴールまでの経過時間を計測し、全長から除して平均速度を算出する。その後、各項目別に速度値を平均し避難基本速度とする。なお、歩行では協力して避難するものとし、疲労による影響を軽減するため、セット間に十分な休憩を確保した。

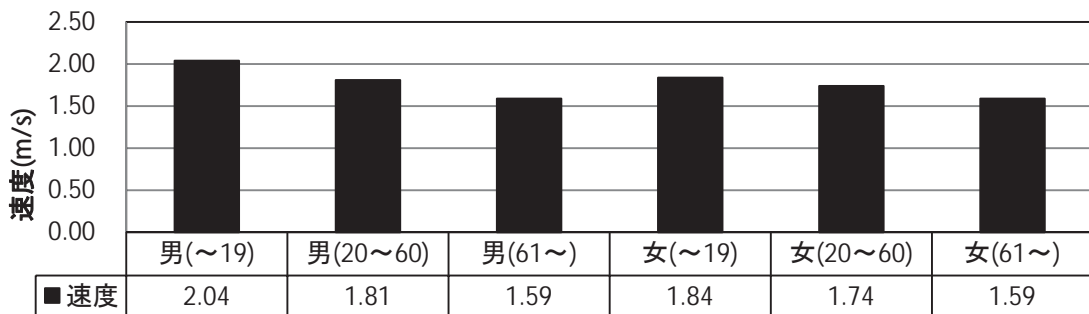
付写 3-1-1 室内歩行速度実験の様子



③計測結果

年代別避難基本速度を付図 3-1-1a に示す。図より、男女ともに年代が上がるほど速度が減少しているが、女性の方が年代間の速度差は小さいことがみてとれる。また、男女別で比較すると 19 歳以下では、0.2m/s の差があるが、61 歳以上では、その差はなくなっている。

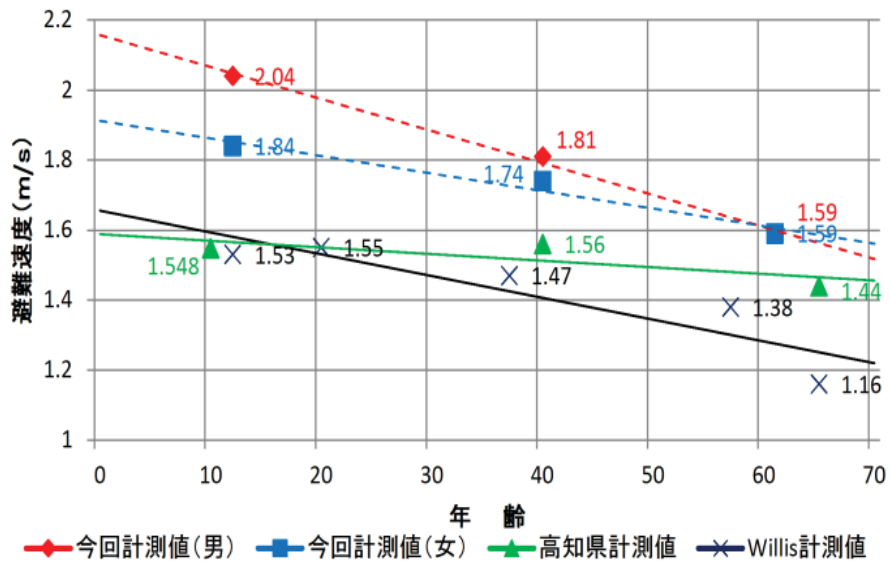
付図 3-1-1a 年代別避難基本速度



この実験の計測値と既往計測値の対比を付図 3-1-1b に示す。避難速度に若干の差はあるが、年齢の上昇とともに速度が低下する傾向は概ね整合しており、その傾きは Willis らの計測値と類似していることが確認できた。しかし、マルチエージェントシステムのエージェントに与える避難基本速度としては、やや整合性が低くさらなる検討が必要であると考えられる。

しかし、津波到達予想時間は、実際に実験で求めた時間を用いる歩行速度は 1.0m/秒(老人自由歩行速度、群集歩行速度、地理不案内者歩行速度等)を目安とするので、今回の値はやや関連する既往の研究などの値と比較して速度は速いものとなった。この要因として、室内での実験であり、気候の影響などがなかったためであると考えられる。

付図 3-1-1 b 避難速度対比



その他に、北海道南西沖地震津波時の年齢階層別平均避難速度（日本建築学会）を以下のように示す。

- ・老人単独歩行：1.1m／秒：俵元吉らによる
- ・ベビーカー(車椅子)を押している人：0.9m／秒：同上
- ・群衆歩行：1.1m～1.2m／秒が限界：東京都市群交通計画委員会 1972
- ・自力のみで行動できにくい人(重病人，身障者等)(水平)：0.8m／秒  
(階段)：0.4m／秒

(2) 無積雪時における避難実験

①基本条件

実施日時：1回目：2013年12月15日(日) 10:00～12:00 冬季無積雪時

2回目：2014年1月11日(土) 10:00～12:00 冬季積雪時

実施場所：金沢大学敷地内 自然科学研究棟

参加者数：金沢市住民 36名

付表 3-2-1 参加者の構成

年齢構成(才)	男 性	女 性
～12	2人	3人
13～60	10人	7人
61～	7人	7人
合 計	19人	17人

輪島市の人口比は、

高齢者(60歳以上) : 中間層(20~60歳) : 子供(~19歳) = 2 : 3 : 1

であり、概ねこの比を満たしていると言える。また、野村氏が行った既往の実験ともほぼ同じである。

## ②計測内容

単独歩行による年代別の避難基本速度と家族避難基本速度の計測を行う。実験は金沢大学・ハードラボ前のコース(付写 3-2-1a)と自然研・図書館前階段(付写 3-2-2b)で行う。1往復 120m のコースを 3 周する全長 360m のコースと階段 40m のコースにおいて、スタート～ゴールまでの経過時間を計測し、全長から除して年代別の平均速度を算出する。その後、各項目別に速度値を平均し、避難基本速度とする。積雪の有無による避難速度の低減率を求めたいので、今回は無積雪時、積雪時の 2 回にわたり実験を行う。

付写 3-2-1a 歩行速度実験の様子(道路)



付写 3-2-2b 歩行速度実験の様子(階段)



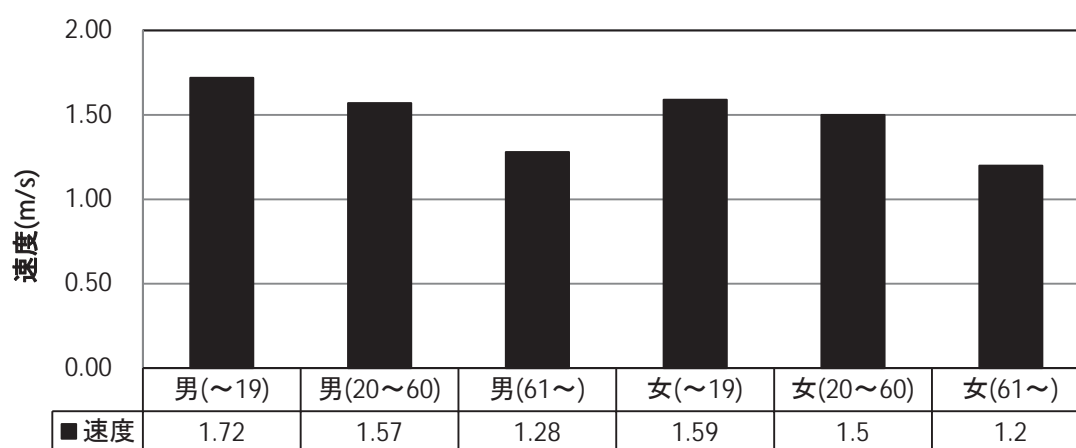
### ③測定結果

天候条件:気温 4℃, 風速 1.2m, 積雪なし

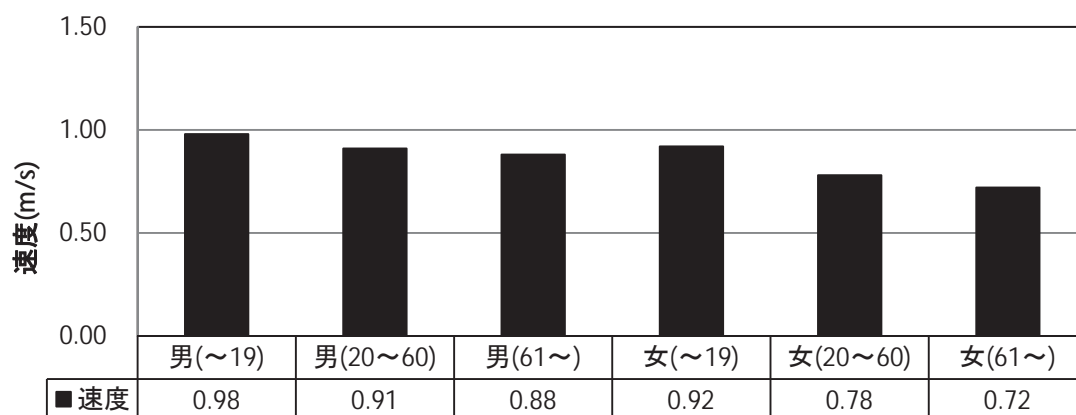
年代別の避難基本速度と家族避難基本速度の結果を道路と階段の2コースに分けて付図3-2-1に示す。当然であるが、男女ともに年代が上がるほど速度が減少している。また、(a)より室内歩行実験と比較して、速度は全体的に遅くなった。その要因として、気温、風など天候の影響があったためと考えられる。(b)より階段での歩行速度は、野村らによる既往の値と比較してやや速くなった。その要因として、階段の勾配が緩いこと、段差が小さいこと、距離が短いことが考えられる。家族避難基本速度の結果を(c)に示す。(a)と比較して全体的に速度は遅くなった。2人と3人で比較して速度の低下がやや見られるが、3人以上になると低下は見られなかった。

付図 3-2-1 避難速度の結果

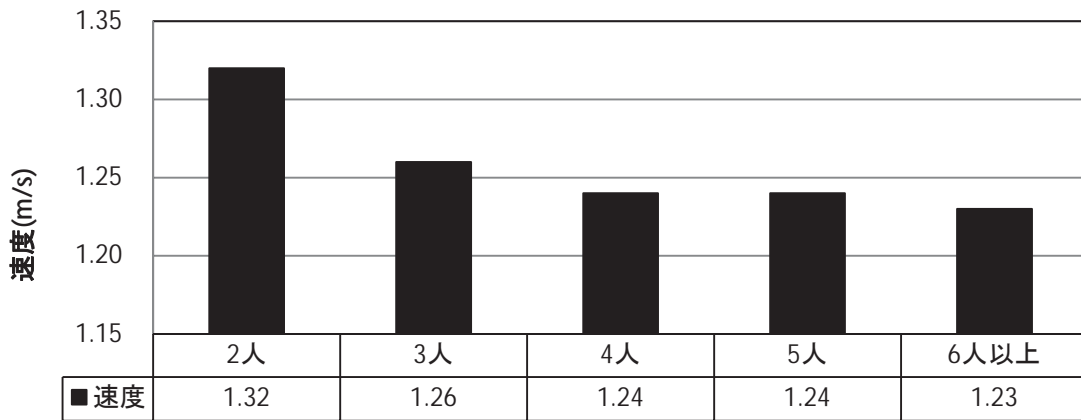
(a) 年代別の避難速度(道路)



(b) 年代別の避難速度(階段)



(c) 家族避難速度(道路)



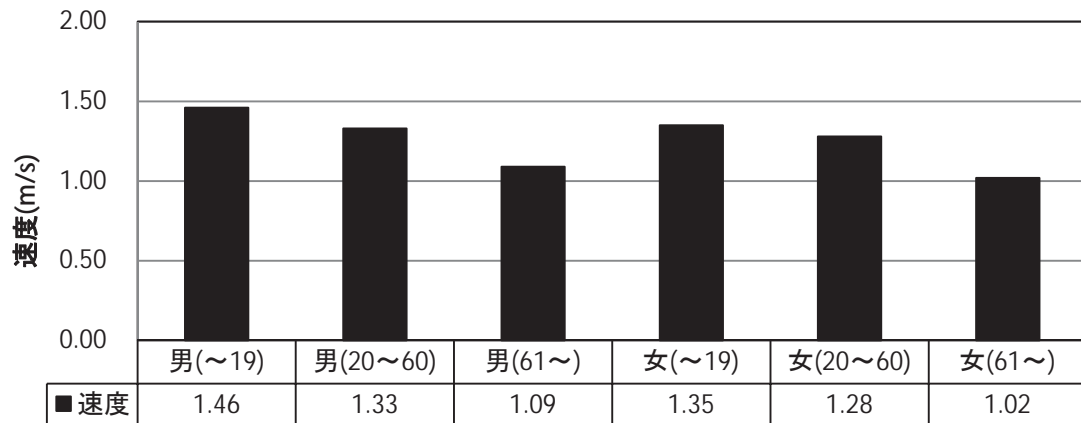
(3) 積雪時における避難実験

天候条件:気温 2℃, 風速 0.8m, 平均積雪深さ 27 c m

年代別の避難基本速度と家族避難基本速度の結果を同様に付図 3-3-1 に示す. 付図 3-3-1(a)は, 図中と同様に男女ともに年代が上がるほど速度が減少している. 付図 3-2-1 と付図 3-3-1 を比較して, (a) (b) (c) 全てにおいて速度は低減している. 年齢や人数の増加による速度低減の割合も概ね付図 3-2-1 の結果と一致している.

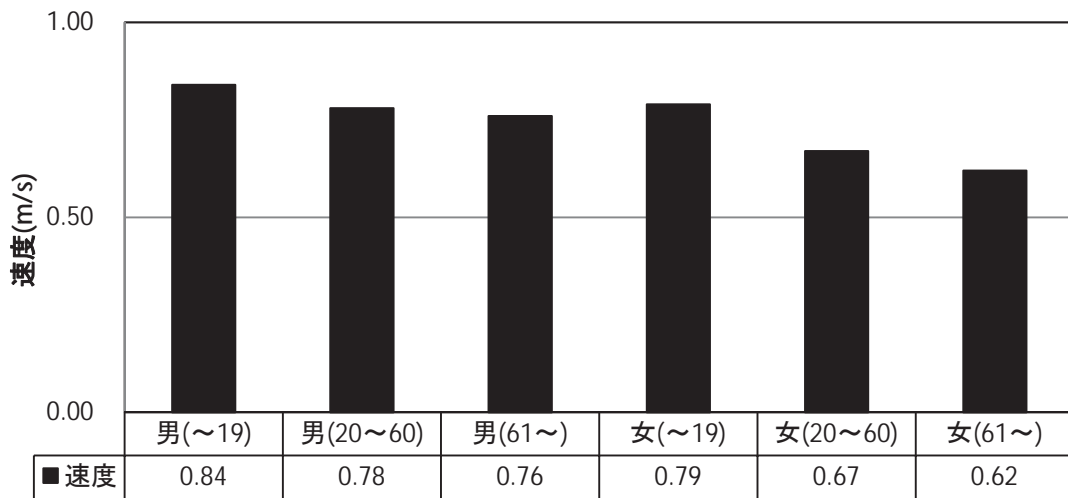
付図 3-3-1 避難速度の結果

(a) 年代別避難基本速度(道路)

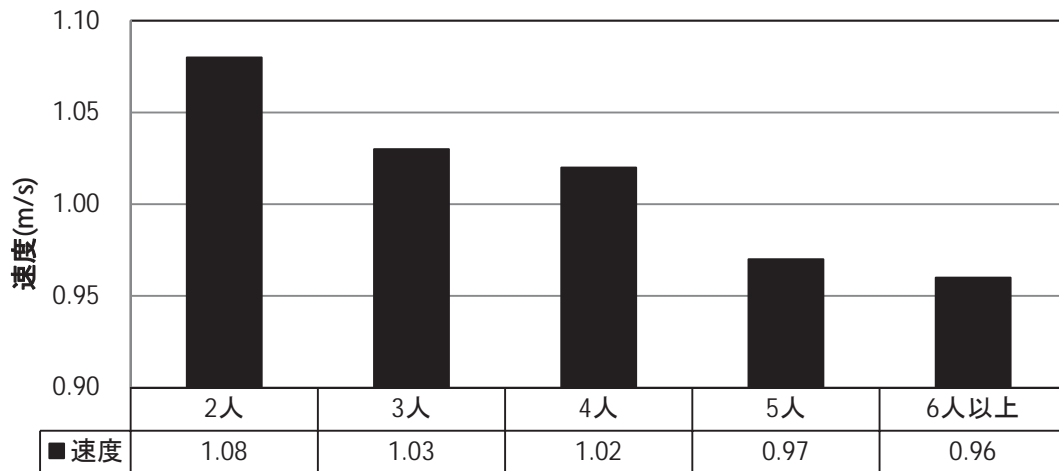




(b) 年代別避難基本速度(階段)



(c) 家族避難基本速度(道路)

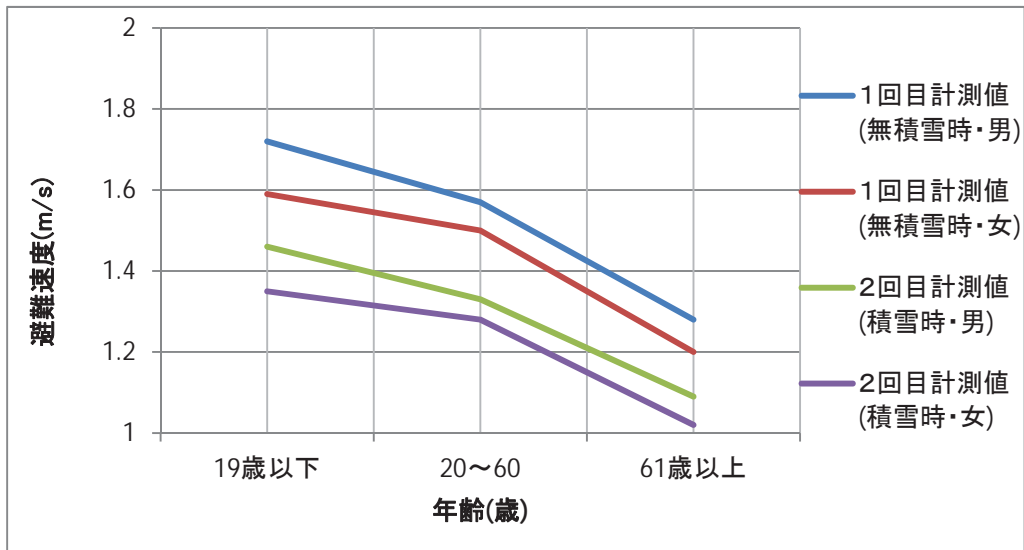


本実験の1回目と2回目計測値の対比を付図 3-3-2 に示す。避難速度に若干の差はあるものの、年齢の上昇とともに速度が低下する傾向は概ね整合し、勾配などは概ね一致している。(e)より、階段コースでは男女差にややばらつきが大きく表れ、61才以上の無積雪時の女性より積雪時の男性の方が避難速度は速かった。

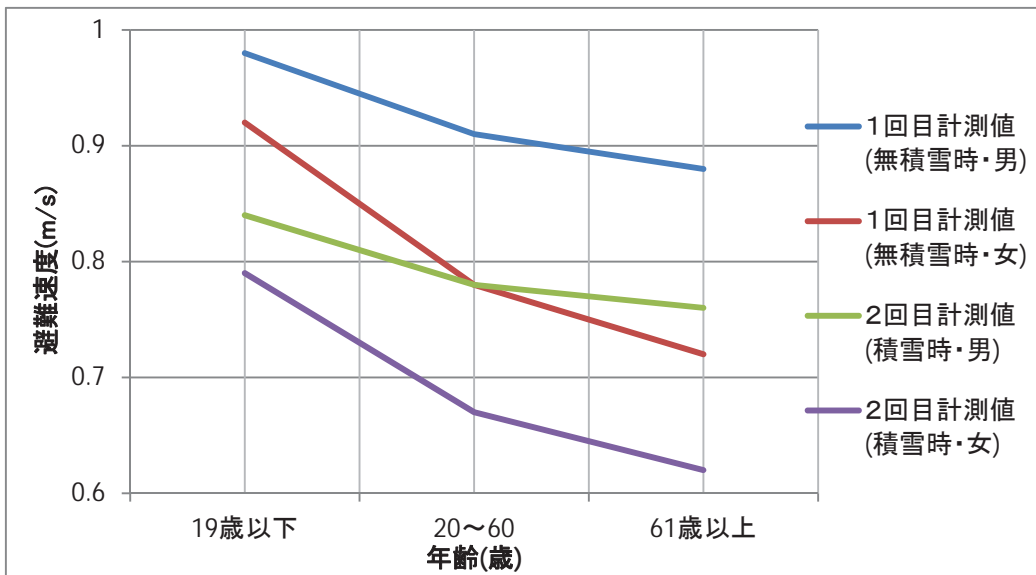
以上より、道路コースでは積雪時の避難速度は無積雪時と比較して85%、階段コースでは86%となった。

付図 3-3-2 計測値の対比

(d) 避難速度対比(道路)



(e) 避難速度対比(階段)



(4) 避難歩行速度に関するアンケート

1回目の実験の際に、アンケートを配布した。それにより、積雪の有無による速度低減の想定について調べ、実際の実験を行ったときの速度低減との比較を行った。

「積雪により避難歩行速度は無積雪時の何%となるか」という質問に対して付図 3-4-1 のようなグラフとなり、無積雪時と比べて積雪時の避難歩行速度は 67.5% となった。実際に行った実験結果では避難速度の対比は 85% 前後であり、想定よりも実際速度低減が少ないことが分かった。この要因としては、前述以外に積雪時には足元がとられやすく歩行

が困難であるため、無積雪時より危機感を持って歩行することが考えられる。

付図 3-4-1 積雪により避難歩行速度は無積雪時の何%となるか

