

科学技術振興費

都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の  
軽減化プロジェクト

総括成果報告書

平成 29 年 3 月

東京大学地震研究所  
京都大学防災研究所  
文部科学省研究開発局

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、平成24年度から平成28年度にわたり、東京大学地震研究所、京都大学防災研究所が実施した「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト」の成果を取りまとめたものです。

科学技術振興費

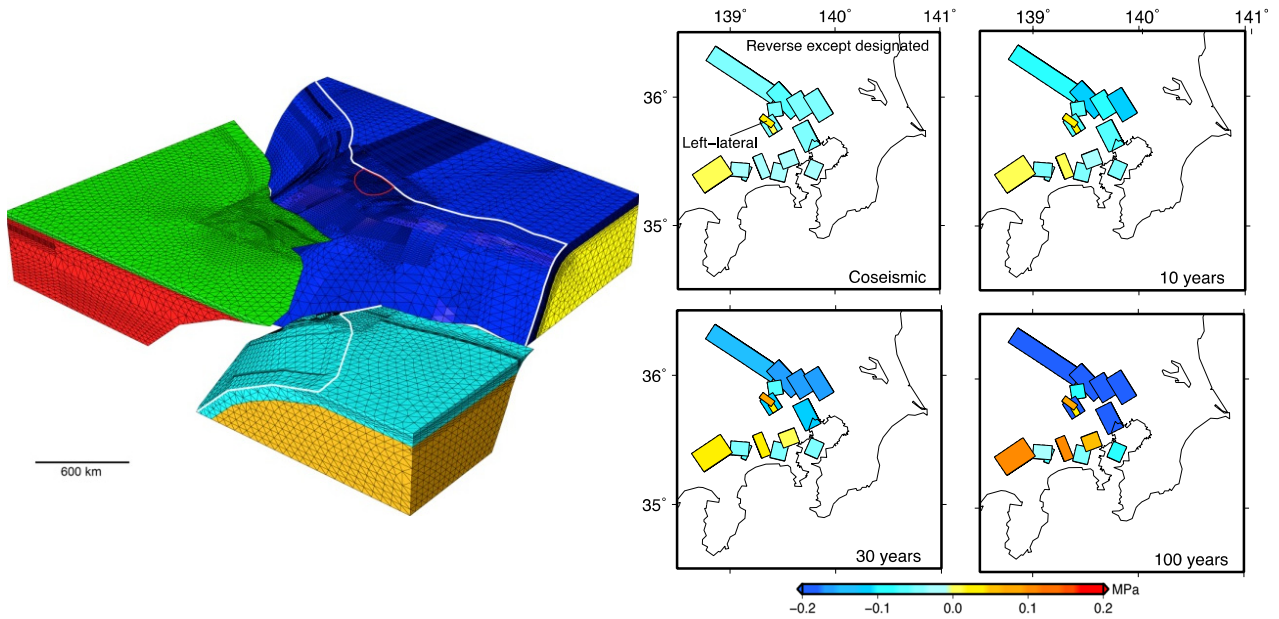
都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の  
軽減化プロジェクト

総括成果報告書

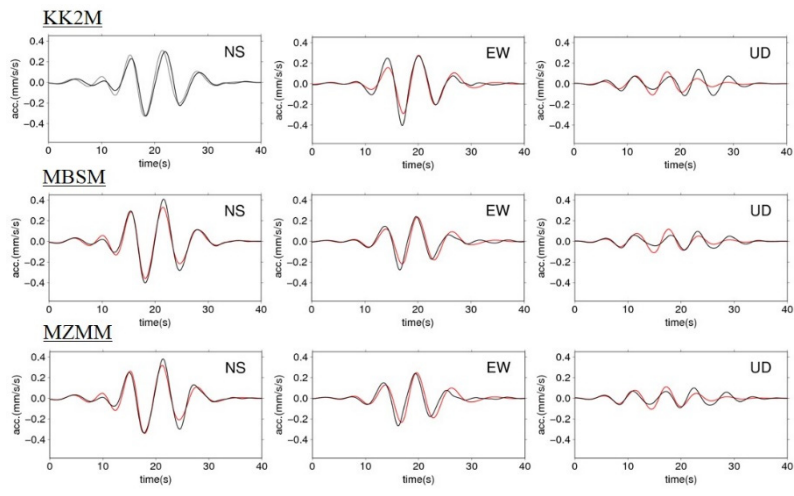
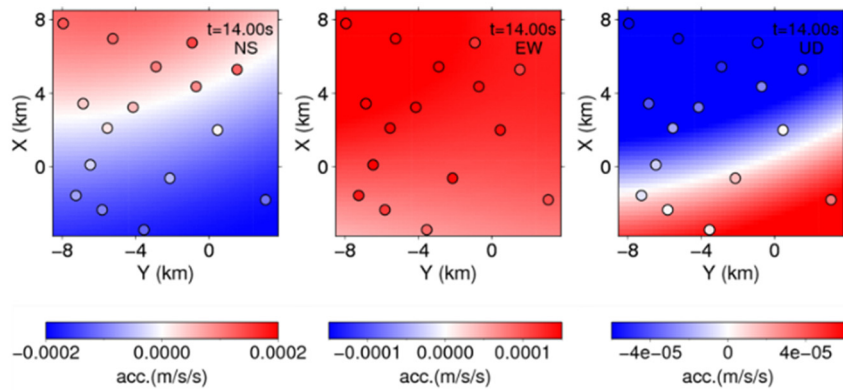
平成 29 年 3 月

東京大学地震研究所  
京都大学防災研究所  
文部科学省研究開発局

# I 首都直下地震の地震ハザード・リスク予測のための調査・研究



東北地方太平洋地震後の関東地方の伏在断層面上のクーロン応力変化



稠密な地震観測網 MeSO-net のデータに基づく地震動イメージング

## Ⅱ 都市機能の維持・回復に関する調査・研究



超高層鉄骨造建物の崩壊実験



鉄筋コンクリート造建物の崩壊実験





## 目 次

グラビア	i
目次	v
研究実施体制	vi
1. 成果の概要	
都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト概要	1
Ⅰ 東日本大震災後の首都圏の大地震とその災害像	3
Ⅱ 都市施設の崩壊余裕度と健全度判定	11
Ⅲ 大規模被害の発生を前提とした災害からの回復力の向上	19
Ⅳ サブプロジェクト相互の連携	27
2. 総括研究報告	
Ⅰ-1-1-1 首都圏主部での地震発生過程の解明	29
Ⅰ-1-1-2 首都圏南西部での地震発生過程の解明	32
Ⅰ-1-1-3 首都圏を含む関東広域の地震発生過程の解明	35
Ⅰ-1-2-1 プレート構造・変形過程と地震発生過程の解明	38
Ⅰ-1-2-2 関東下の構成岩石モデルの構築	41
Ⅰ-1-3 首都圏での中小地震と大地震の発生過程の関係の解明	44
Ⅰ-1-4 首都圏の過去の地震活動に基づく地震活動予測手法の確立	48
Ⅰ-2-1 地震動・地震応答の大規模数値解析法の開発	52
Ⅰ-2-2 大規模数値解析結果の先端可視化技術の開発	58
Ⅱ-1 中高層建物の崩壊余裕度定量化	
Ⅱ-1-1 鉄骨造高層建築物の崩壊余裕度定量化	60
Ⅱ-1-2 RC造建物の崩壊余裕度定量化	65
Ⅱ-2 建物の健全度モニタリング	
Ⅱ-2-1 建物のモニタリング（上部構造）	70
Ⅱ-2-2 建物のモニタリング（地盤）	75
Ⅱ-2-3 建物のモニタリング（連成システム）	82
Ⅱ-3 地盤－基礎－建物連成系の応答評価のための観測	
Ⅱ-3-1 建物連成系の応答評価のための観測	88
Ⅲ-1 災害経験を体系化し利活用を促進する都市減災ジオポータルの開発	93
Ⅲ-2 マイクロメディアサービス（MMS）開発	100
Ⅲ-3 防災リテラシーハブ	108
Ⅲ-4 生活再建支援システムに関する教育・訓練システムの開発	116
Ⅲ-5 シェイクアウト訓練の普及と期待される効果	123



## 研究実施体制

研究代表者：

平田直（東京大学地震研究所）

東京工業大学：廣瀬壮一、盛川仁、山中浩明、坂田弘安、山田哲、ザイネ フッサム エルデイン、石田孝徳、山崎義弘、飯山かほり

### 1. 南関東の地震像の解明

研究テーマ責任者：平田直（東京大学地震研究所）

東京大学地震研究所：小原一成、岩崎貴哉、鷹野澄、佐藤比呂志、佐竹健治、卜部卓、酒井慎一、飯高隆、鶴岡弘、加藤愛太郎、蔵下英司、五十嵐俊博、前田拓人、中川茂樹、石山達也、高波鐵夫、パナヨトプロスヤニス、橋間昭徳、石辺岳男、村岸純、鳴橋竜太郎、中村亮一、五島朋子、横井佐代子、尾形良彦、坂上実、八木健夫、宮川幸治、田中伸一、増田正孝、中島剛、西本太郎、安藤美和子、川北優子

横浜国立大学：石川正弘、市来孝志、本多聡子、坪川祐美子

防災科学技術研究所：木村尚紀、関口渉次、青井真、汐見勝彦、浅野陽一、松原誠、武田哲也、斉藤竜彦、松澤孝紀

神奈川県温泉地学研究所：里村幹夫、和田久、宮岡一樹、竹中潤、本間直樹、本多亮、原田昌武、行竹洋平、道家涼介、安部祐希、吉田明夫、金幸隆、大石真由美、伊東博

### 2. 観測に基づく都市の地震被害評価技術の開発

研究テーマ責任者：堀宗朗（東京大学地震研究所）

東京大学地震研究所：市村強、W ラリス、長尾大道、加納将行、林旭川

慶應義塾大学：小國健二

東京理科大学：佐伯昌之

国土交通省国土技術政策総合研究所：壁谷澤寿一

都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト統括委員会

委員長：前川宏一（東京大学）

委員：平田直（東京大学）、中島正愛、林春男（京都大学）、酒井慎一、加藤愛太郎、中川茂樹（東京大学）、梶原浩一（防災科学技術研究所）、小鹿紀英（小堀鐸二研）、目黒公郎（東京大学）、田村圭子（新潟大学）

首都直下地震の地震ハザード・リスク予測のための調査・研究の運営委員会

委員長：武村雅之（名古屋大学）

委員：平田直、佐藤比呂志、佐竹健治、鶴岡弘、堀宗朗、酒井慎一（東京大学）、宮岡一樹、本多亮（神奈川県温泉地学研究所）、木村尚紀（防災科学技術研究所）、石川正弘（横浜国立大学）、廣瀬壮一（東京工業大学）、箕輪泰夫、村山隆、裏田勝己、小林忠雄（東京都）、阿部隆、宇都木朗、松原正之（横浜市）、本蔵義守（東京工業大学）、西村卓也、水藤尚（国土交通省国土地理院）、土井恵治、吉田康宏、中村浩二（国土交通省気象庁）、笠原敬司（地震予知研究総合振興会）、庄司学（筑波大学）、小鹿紀英（小堀鐸二研）、木村玲欧（兵庫県立大学）

<所属は本プロジェクト実施時>

## 研究実施体制

研究代表者：中島正愛（京都大学防災研究所）

大阪大学：真田靖士

○都市機能の維持・回復のための調査・研究  
運営委員会

横浜国立大学：杉本訓祥

防災科学技術研究所：松森泰造

建築研究所：坂下雅信

委員長：中島正愛（京都大学）

清水建設：白石理人

委員：吹田啓一郎、西山峰広、聲高裕治、阿部雅史、林和宏（京都大学）、飛田潤（名古屋大学）、田村修次（東京工業大学）、楠浩一、酒井慎一（東京大学）、田中聡（常葉大学）、梶原浩一、井上貴仁（防災科学技術研究所）、小鹿紀英、酒向裕司（小堀鐸二研究所）、高橋元美（鹿島建設）、勝俣英雄、増田安彦（大林組）、金子美香、白石理人（清水建設）、長島一郎、船原英樹（大成建設）、東野雅彦、鈴木琢也（竹中工務店）

2-1. 建物のモニタリング（上部構造）研究分科会

分科会主査：飛田潤（名古屋大学）

分科会幹事：白石理人（清水建設）

清水建設：金子美香、岡田敬一、森井雄史、杉本浩一、佐川隆之

京都大学：倉田真宏

防災科学技術研究所：長江拓也

鹿島建設：高橋元美

大林組：中村充

小堀鐸二研究所：酒向裕司

1-1. 鉄骨造高層建物の崩壊余裕度定量化研究分科会

分科会主査：

吹田啓一郎（京都大学、平成23年4月～平成28年6月）

聲高裕治（京都大学、平成28年6月～平成29年3月）

分科会幹事：高橋元美（鹿島建設）

鹿島建設：澤本佳和、久保田淳、清川貴世  
東京大学：伊山潤

防災科学技術研究所：長江拓也、佐々木智大

小堀鐸二研究所：小鹿紀英、鈴木芳隆

清水建設：白石理人

2-2. 建物のモニタリング（地盤）研究分科会

分科会主査：田村修次（東京工業大学）

分科会幹事：長尾俊昌（大成建設）

大成建設：長島一郎、成原弘之、佐藤貢一、船原英樹、柴田景太

東京大学：肥田剛典

京都大学：林和宏

防災科学技術研究所：長江拓也、河又洋介

清水建設：白石理人

小堀鐸二研究所：酒向裕司

1-2. RC造建物の崩壊余裕度定量化研究分科会

分科会主査：西山峰広（京都大学）

分科会幹事：勝俣英雄（大林組）

大林組：増田安彦、米澤健次、中村充、西村勝尚、平柳哲、百野泰樹

2-3. 建物のモニタリング（連成システム）研究分科会

分科会主査：楠浩一（東京大学）

分科会幹事：酒向裕司（小堀鐸二研究所）

小堀鐸二研究所：小鹿紀英、山添正稔、安達直人

広島大学：日比野陽

京都大学：阿部雅史、林和宏

防災科学技術研究所：長江拓也、河又洋介  
横浜国立大学：杉本訓祥  
千葉大学：岡野創  
広島大学：中村尚弘  
国土政策技術総合研究所：柏尚稔  
清水建設：森井雄史  
大成建設：船原英樹  
竹中工務店：鈴木琢也

大学)、北村春幸(東京理科大学)、杉山  
義孝(日本建築設備・昇降機センター)、  
中井正一(千葉大学)、西谷章(早稲田  
大学)、西山功(建築研究所)、福和伸夫  
(名古屋大学)、翠川三郎(東京工業大  
学)

<平成 28 年度現在>

### 3. 地盤-基礎-建物連成系の応答評価

(MeSO-net 観測) 研究分科会

分科会主査：酒井慎一(東京大学)

分科会幹事：鈴木琢也(竹中工務店)

竹中工務店：東野雅彦、小林喜久二、吉田  
治雄

東京大学：堀宗朗、中川茂樹

京都大学：阿部雅史、林和宏

広島大学：中村尚弘

#### モニタリング検討 WG

WG 主査：中島正愛(京都大学)

WG 幹事：林和宏(京都大学)

京都大学：阿部雅史

名古屋大学：飛田潤

東京工業大学：田村修次

東京大学：楠浩一

常葉大学：田中聡

広島大学：中村尚弘

小堀鐸二研究所：小鹿紀英、酒向裕司

鹿島建設：高橋元美

大林組：勝俣英雄、増田安彦

清水建設：金子美香、白石理人

大成建設：長尾俊昌

竹中工務店：鈴木琢也

#### ○都市機能の維持・回復のための調査・研究 研究監視委員会

委員長：緑川光正(北海道大学)

委員：伊藤優(日本設計)、金箱温春(金  
箱構造設計事務所)、壁谷澤寿海(東京

## 研究実施体制

研究代表者：

林 春男（京都大学防災研究所）

### 1. 円滑な応急・復旧対応を支援する災害情報提供手法の開発

#### 1-1. 過去の災害経験の整理・体系化

防災科学技術研究所：鈴木進吾

消防庁消防研究センター：細川直史

関西大学：越山健治

東京大学：廣井 悠

岐阜大学：能島暢呂

筑波大学：庄司 学

千葉大学：丸山喜久

鹿島技術研究所：永田 茂

京都大学：林 春男

#### 1-2. マイクロメディアサービス開発

新潟大学：田村圭子

静岡大学：井ノ口宗成

産業技術総合研究所：野田五十樹、江渡浩一郎、小島一浩、小川祐樹

### 2. 防災リテラシーの育成方策に関する研究

#### 2-1. 総合的地震災害シナリオの構築

政策研究大学院大学：武田文男

関西大学：山崎栄一、永松伸吾

京都大学：牧 紀男、林 春男

名古屋工業大学：渡辺研司

株式会社ミエルカ防災：藤縄幸雄

日本ミクニヤ株式会社：田中秀宜、土門 寛

九州大学：宮崎 毅

アジア太平洋研究所：林 万平

早稲田大学：森平爽一朗

ミュージックセキュリティズ株式会社：赤井厚雄

防衛医科大学校：秋富慎司

#### 2-2. 防災リテラシー向上のためのトレーニングシステム開発

兵庫県立大学：木村玲欧

工学院大学：久田嘉章、村上正浩

鱒沢工学研究所：鱒沢 曜

SOMPO リスケアマネジメント株式会社：新藤 淳

常葉大学：田中 聡、重川希志依、河本尋子

新潟大学：田村圭子

株式会社インターリスク総研：堀江 啓

東京大学：目黒公郎、沼田宗純、郷右近英臣、大原美保

### 3. 全体研究管理

京都大学：林 春男、牧 紀男、周 瑜、村上滋希、陳 燁桜、伍 傑濤、竹口佳孝

千葉大学：山崎文雄

常葉大学：重川希志依

明治大学：中林一樹

東京大学：目黒公郎

新潟大学：田村圭子

政策研究大学院大学：武田文男

関西大学：山崎栄一、永松伸吾

効果的な防災訓練と防災啓発提唱会議：澤野次郎

### 4. 研究推進会議

文部科学省：谷 広太、松室寛治、田中大和、渋谷昌彦

京都大学：林 春男、大橋由季

明治大学：中林一樹

千葉大学：山崎文雄

常葉大学：重川希志依

東京大学：目黒公郎

新潟大学：田村圭子

<所属は本研究プロジェクト実施時>

# 成果の概要

## 都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト概要

### 1. はじめに

我が国の観測史上最大のマグニチュード9を記録した東北地方太平洋沖地震は、広範囲にわたる大きな揺れ、大津波をもたらし、大規模な津波災害をはじめとする未曾有の広域複合災害を引き起こしました。

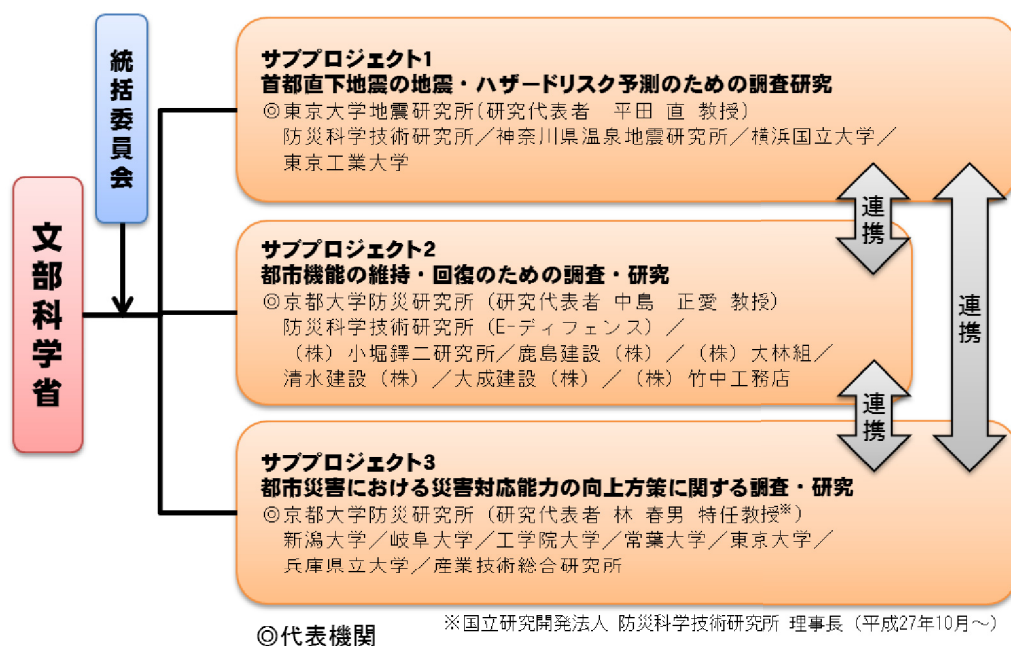
首都圏においては、広域の液状化、交通機関の麻痺による多数の帰宅困難者、電力やライフラインの途絶による事業活動の停止等、都市特有の課題が数多く顕在化しました。

多くの都市機能が集中し、社会経済活動の中核である首都圏は、災害に対する脆弱性を内在しており、予期せぬ大災害へ発展するおそれがあります。そのため、首都圏をはじめとする都市の大地震に対する事前の検証と対策を施しておくことは、これまでも増して重要かつ喫緊の課題です。

文部科学省では、東日本大震災を教訓として、今後予想される首都直下地震や、南海トラフ地震等に対して、都市の災害を可能な限り軽減することを目的に、平成24年度から5カ年間の研究開発プロジェクトとして、「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト」を推進してきました。

### 2. プロジェクトの研究概要

本プロジェクトは、理学・工学・社会科学の3つのサブプロジェクトから構成されており、我が国を代表する研究機関、研究者が従来の枠組みを超えて相互に協力・連携を図りながら研究開発を推進してきました。



- ① **サブプロジェクト1：首都直下地震の地震ハザード・リスク予測のための調査・研究**  
首都圏地震観測網（MeSO-net）による地震観測を継続し、首都圏のより正確な地下構造、地震動（揺れ）、地震像（場所、規模、頻度）を解明するとともに、都市の地震災害の姿を予測するための地震被害評価技術の開発を進めています。
- ② **サブプロジェクト2：都市機能の維持・回復のための調査・研究**  
実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）を活用し、都市機能の維持・回復に資するため、高層ビル等の都市の基盤をなす施設の「完全に崩壊するまでの余裕度の定量化」及び「地震直後の健全度を即時に評価し損傷を同定する仕組みの構築」に関する研究を進めています。
- ③ **サブプロジェクト3：都市災害における災害対応能力の向上方策に関する調査・研究**  
高い災害回復力を持つ社会の実現に寄与するため、円滑な応急・復旧対応を支援する災害情報提供手法の開発及び防災に関する問題解決能力（防災リテラシー）の育成方策に関する研究を進めています。

この5年間の災害を振り返ると、熊本地震をはじめ長野県神城断層地震等、さらに御嶽山、口永良部等の一連の火山活動、伊豆大島等での豪雨・土砂災害、関東・東北豪雨等、様々な自然災害が相次ぎ全国各地に大きな被害をもたらしました。このように自然災害が相次ぐなか、被災市町村をはじめとする実際の災害現場で、研究成果の一部を検証する等社会実装にむけた研究開発も着実に推進してきました。

平成29年度から5か年間の研究開発プロジェクトとして「データプラットフォーム拠点形成事業（防災分野）～首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト～」を政府予算案に計上したところですが、これまでの研究成果を基礎に「IoT、ビッグデータ、AI」といった新たな技術を取り入れ、地震・防災研究の更なる発展に努めます。

### 3. おわりに

最後となりましたが、本プロジェクトの遂行にご尽力頂いた各サブプロジェクトの研究代表者である平田直氏（東京大学地震研究所）、中島正愛氏（京都大学防災研究所）、林春男氏（京都大学防災研究所）に深く感謝いたしますとともに、統括委員会を通じて従来の枠組みを越えた各サブプロジェクトの連携を推進して頂いた前川宏一氏（東京大学大学院工学系研究科）に深く感謝いたします。また、本プロジェクトに参加頂いた研究者の皆様、本プロジェクトの遂行を下支え頂いた関係機関の皆様に深く感謝いたします。

本プロジェクトで得られた新たな知見や研究成果等は、国や地方公共団体、さらには国民の防災・減災対策に積極的に御活用頂き、防災・減災活動の更なる進展の一助になれば幸いです。

文部科学省 研究開発局 地震・防災研究課

## I 東日本大震災後の首都圏の大地震とその災害像

東京大学地震研究所 平田 直

### 1. はじめに

我が国の観測史上最大のマグニチュード9を記録した2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）は、日本列島の広範囲に大きな揺れと大津波をもたらし、未曾有の広域複合災害を引き起こしました。自然現象としての東北沖地震の影響もきわめて大きく、発生から6年後の現在においても関東地方の地震活動に影響が続いています。

サブプロジェクト①「首都直下地震の地震ハザード・リスク予測のための調査・研究」では、（1）災害軽減策の検討のために、東北沖地震以降の首都圏における新たな地震像を解明するとともに、（2）大規模シミュレーション数値解析法を開発し、都市の詳細な地震被害評価技術を開発しました。以下にこの二つの研究テーマについての研究の成果をまとめます。

### 2. 首都圏に被害を及ぼす南関東での地震の新たな姿

東日本大震災を引き起こしたマグニチュード9の超巨大地震、2011年東北沖地震は、自然現象としても首都圏に大きな影響を及ぼしています。本プロジェクトでは、首都圏地震観測網（MeSO-net: Metropolitan Seismic Observation network）の観測データを利用して、首都圏で地震が発生する場所、地震が発生した時の揺れの強さを規定する地下の構造、プレートの詳細な構造と2011年東北沖地震以降に活発化した地震活動との関係を調べました。また、東北沖地震発生後の首都圏での地震活動の特徴を抽出し、東北沖地震の影響を受けた首都圏での地震の起き方を検討しました。一方で、過去に起きた地震の被害を分析して、将来発生する可能性のある首都圏での地震への教訓を得ました。これらの結果から、将来発生が予想される首都直下地震の地震像（地震規模、地震発生頻度、発生場所）を示しました。

#### 2-1. 南関東の地震像の解明

「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト(2007-2011年度)」で設置したMeSO-netを本プロジェクトでも維持し、詳細なプレート構造と首都圏での地震発生過程を解明するための調査・研究を行いました。本プロジェクトでは、特に地震波の伝播時のエネルギー減衰を示すパラメータであるQ値の三次元的な分布を調べました。地表の地震時の揺れは、地震の大きさ、震源から観測点まで波が伝播することで減衰する程度、地表での地盤の強弱によって大小が決まります。



地盤の強弱は、例えば防災科学研究所の地震ハザードステーション (J-SHIS) の「表層地盤増幅度」として、全国を 250m メッシュに区切ってデータベース化されています。一般にかつての海や河川を埋め立てた場所では、地盤が軟らかく揺れやすい場所になっています。これに対して、Q 値の研究は、このうちの「震源から観測点まで波が伝播することで減衰する程度」を調べる研究です。関東地方の地下深部には、2つの海洋プレート (フィリピン海プレートと太平洋プレート) が沈み込んでいることによって、地震波の伝わり方は複雑です。一般に、地下の浅いところに比べて深いところでは、地震波の伝わる速さが大きく、あまりエネルギーが減衰しない性質 (Q 値が大きい) を持っています。しかし、かつて海底の浅部にあった海洋プレートが沈みこむことで、関東地方の深部には速度が遅く Q 値が小さい領域があります。地震の波がそこを通ると大きく減衰し、近くの観測点で遠くの観測点より波の振幅が小さくなることがあります。関東では、千葉県北西部の深さ数十 km で発生した地

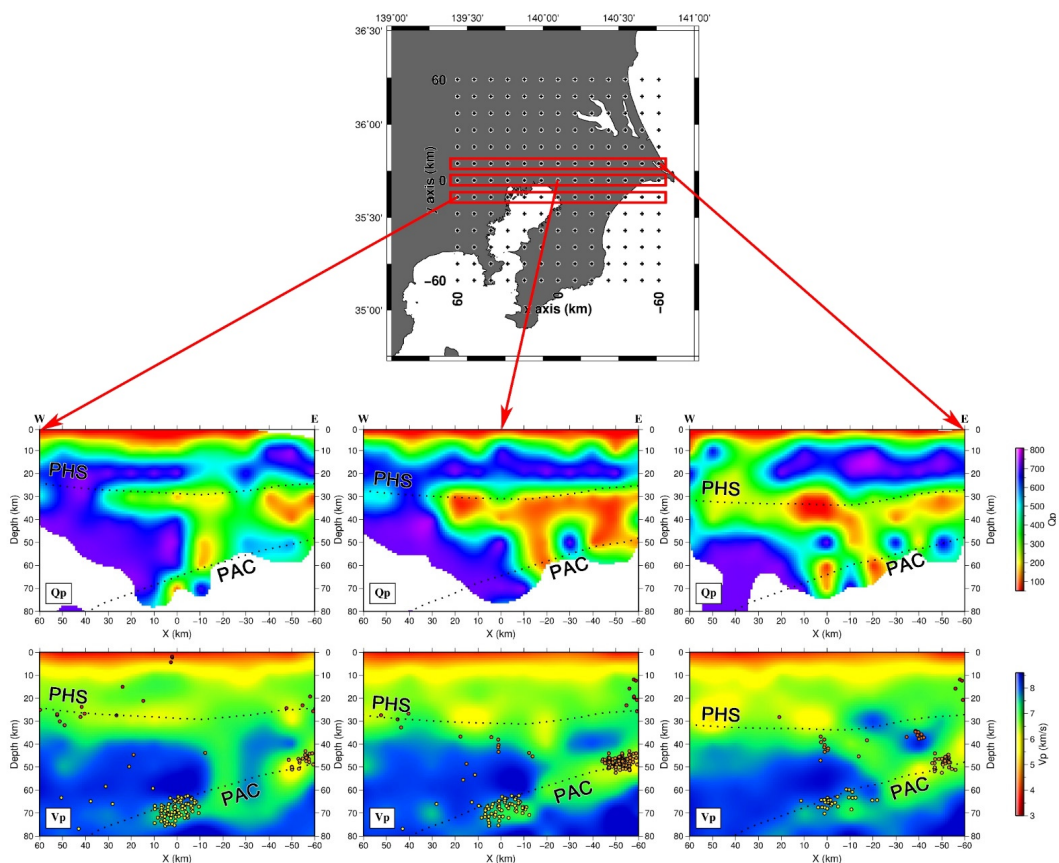


図1 首都圏を東西に横切る3つの断面のP波のQ値 (Qp) と速度 (Vp) 分布。

震の揺れが、千葉市より東京都内で大きくなる場合があります。この現象については、これまで表層地盤の増幅率だけでは説明できず、地震波の伝わる速さと、地下深部の Q 値の分布が水平方向に不均質であることが原因と考えられていました。

本プロジェクトでは、MeSO-net のデータを解析して、首都圏の下の P 波速度、S 波速度、P 波の Q 値 (Qp)、S 波の Q 値 (Qs) の三次元的な分布を求めました。その一例を図 1 に示し

ます。フィリピン海プレートと太平洋プレートに対応する領域では、地球規模のスケールで見ると、高速度、高 Q 値になりますが、関東地方くらいの範囲を MeSO-net データを用いた高分解能画像で見ると、実は海洋プレートの最上部は、低速度、低 Q 値の領域となることが分かります。海洋プレートの最上部には、かつて海底を形成していた海洋地殻があり、この部分は現在の深度における周辺のマントルに比べて低速度、低 Q 値となり、図 1 に示されるように複雑な分布を示します。これは、海洋プレートの沈みこみに伴って、岩石が脱水・吸水変成反応を起こし、水が放出されたり、吸収されたりするためです。東京湾の北部から千葉県北西部の下には、このような低 Q 値、つまり、地震波を減衰させる領域が太平洋プレートの上に煙突状に分布しています。この領域は、太平洋プレートからの脱水作用によって放出された水が上昇している可能性があります。これらの研究の成果によって、千葉県北西部で起きた地震の際に千葉市より東京都内で揺れが大きくなる理由の一つが、この Q 値の分布にあることが明らかになりました。

## 2-2. 2011 年東北地方太平洋沖地震の関東地方への影響

首都圏の伏在活断層とプレート構造について、制御震源探査や自然地震観測に基づいて調査し、地殻とプレートの変形をモデル化しました。このために、活断層等の活構造の調査を行い、既往研究の成果を総合して、首都圏の三次元的な震源断層の総合モデルを構築しました。また、関東地方の地下で予想される岩石の高温・高圧下での弾性波速度を測定し、構成岩石モデルを構築しました。この知見は、「2-1. 南関東の地震像の解明」で得られた地下の 3 次元地震波速度構造、Q 構造の成因を理解するための基礎的な知識となりました。

2011 年東北沖地震の関東地方への影響を評価するためには、地震時の太平洋プレート上面のすべりによる弾性的な変形だけでなく、その後起きる地殻とマントルの粘弾性的な変形を見積もる必要があります。このために、図 2 のような、日本列島全体の弾性・粘弾性構造を作り、地震時のすべりとその後の粘弾性的な変形、震源域周辺の余効すべりをモデル化しました。これを用いて、関東地方の伏在断層におけるクーロン応力の時間変化を調査しました。図 3 にその結果を示します。関東地方の伏在断層の多くは、北東または南西傾斜の低角逆断層です。これらの断層のクーロン応力は負となり、断層運動は抑制されました。しかし、その特徴から外れる断層（横ずれ、高角、北西または南東傾斜など）では、例外的に断層運動を促進するように応力が働くことが判明しました。そして、断層運動の予測のためには、断層の形状とすべり方向を正確に求めることの重要性が改めて明らかになりました。

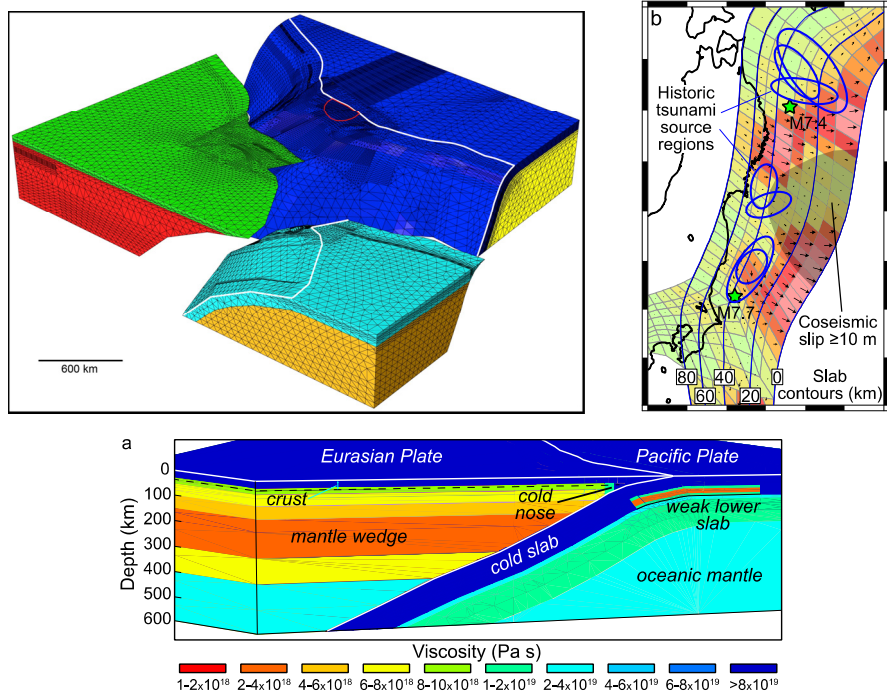


図2 2011年東北地方太平洋沖地震による変形を説明するためのモデル。

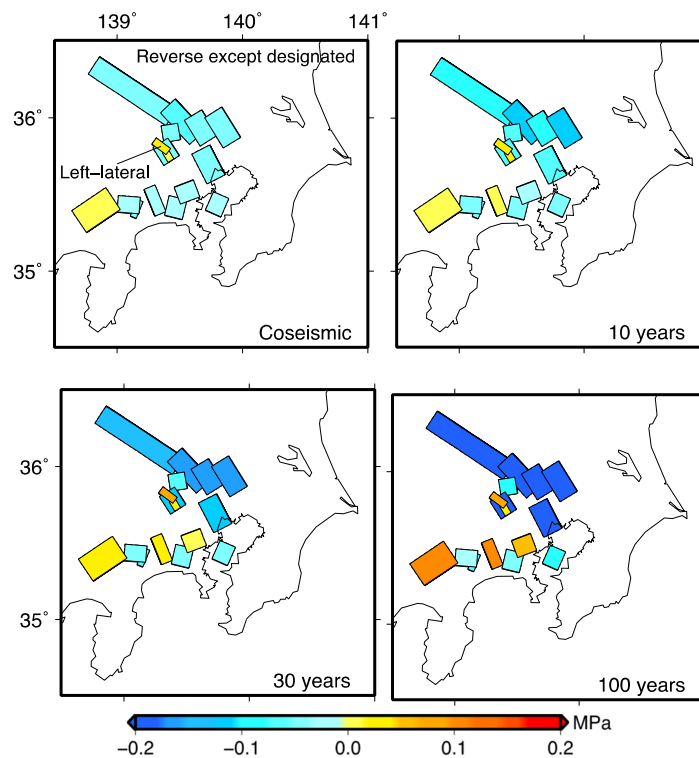


図3 東北沖地震の直後、10年後、30年後、100年後の関東地方の伏在断層上のクーロン応力。カラースケールの黄色-赤色は断層運動を促進する応力、水色-青色は断層運動を抑制する応力を示す。

### 2-3. 首都圏での中小地震と大地震の発生過程における関係性の解明

2011年東北沖地震以降、関東地方では地震活動が活発化しました。この地震活動を含めた関東地方の中小地震の震源を決定して、地震を類型化しました。本プロジェクトで維持・管理されてきた MeSO-net による検測値データを用いて、2008年4月1日～2015年2月9日に発生した2,786個の地震について、発震機構（メカニズム）解を推定し、カタログを作成しました。カタログ化した発震機構解は、稠密に展開された MeSO-net に基づくため、特に首都圏中心部では精度良く決定されています。また、2011年前後の期間を収録していることから、東北沖地震による応力場の時空間的な変化を調査するための貴重なデータになります。このデータを用いた研究の結果、関東地方における地震活動の活発化は、2011年東北沖地震による静的クーロン応力変化で大局的に説明できることが分かりました。

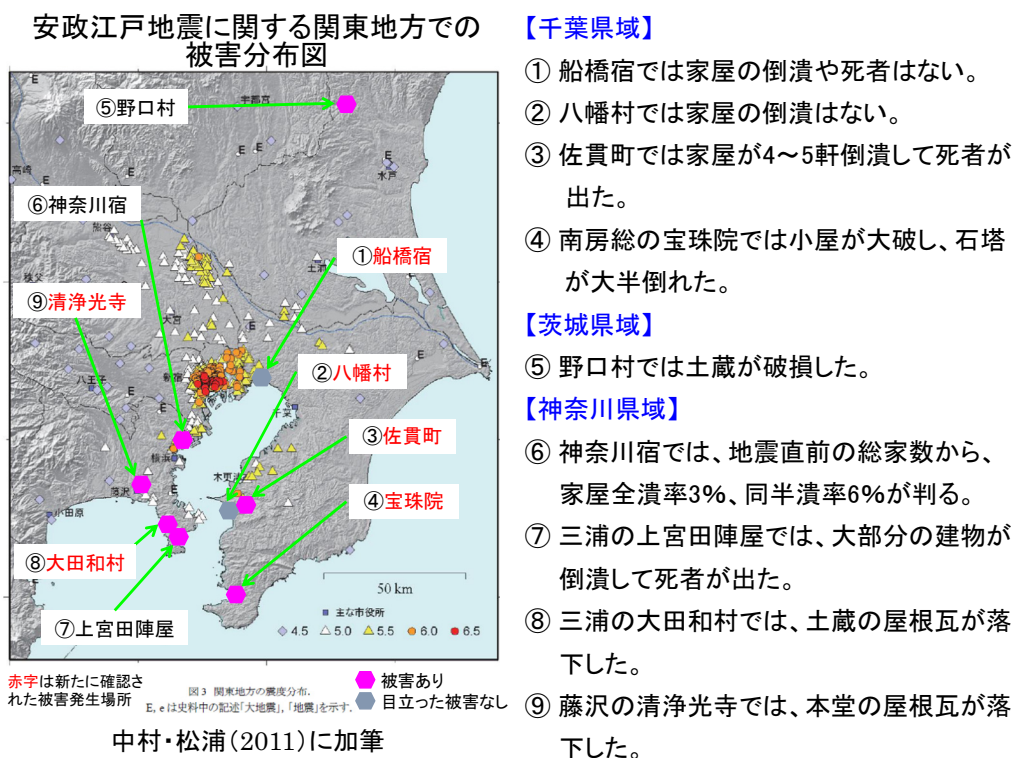


図4 本プロジェクトで明らかになった被害分布（村岸・佐竹, 2015; 村岸・他, 2016）。

関東地方で過去に発生した大地震の繰り返しやその複雑性を理解するには、100年程度に過ぎない近代的な計器観測のみでは不十分です。日本では過去1000年以上にわたって歴史資料が残されており、これらの調査・分析に基づいて、過去の地震で生じた被害の分布や地震像を研究することができます。そこで、1600年以降に関東地方及びその周辺で発生した被害地震を対象として、『新収日本地震史料』などの既刊地震史料集に所収されている史料や、新たに収集した史料をデジタルデータ化し、「1703年元禄関東地震」、「1855年安政江戸地震」、「江戸時代に発生した顕著な被害地震」37地震の3つのデータベースを構築しまし

た。これらの地震史料データベースはプロジェクトの終了後に公開されます。

関東地方では、1855年(安政二年)11月11日に推定マグニチュード7クラスの地震(1855年安政江戸地震)が発生し、江戸市中に大きな被害を及ぼしたことが史料から明らかにされています。計器観測以降でも、関東地方においてはマグニチュード7以上の地震は5つしか観測されていません。そのため、実際に発生した「首都直下地震」の事例の一つとして、1855年安政江戸地震の地震像を解明する研究は重要です。しかし、この地震の震源の深さについては、地表付近という説や、地下100km程度という説があり、どこで発生したかという基本的な事柄は良くわかっていませんでした。そこで本プロジェクトでは、まず、歴史学で用いられている史料から安政江戸地震に関する記述を収集して、その内容を分析しました。次に、地震による被害の発生場所の分布から、そのような被害をもたらす揺れの分布を推定して、地震がどこで発生したかを研究しました。ここで注意すべきは、被害の発生場所が多いということは、たいていの場合は揺れが大きいことを意味しますが、そもそも建造物がなければ被害は発生しません。揺れの広がりや強さを推定するためには、地震発生以前の建造物の分布状況について把握しておく必要があります。また、ある場所で揺れが大きいからといって、その真下で地震が発生したわけではありません。千葉県北西部の地震のように、発生場所(震央)が揺れの分布の中心にないこともあります。つまり、史料記述の歴史学的な精査、当時の建造物や社会の特質の理解、現在の地震学の知識を総合して初めて、1855年安政江戸地震の姿が再現できるのです。ここでは一例として、1855年安政江戸地震の被害に関する歴史学的な研究成果を図4に示します。

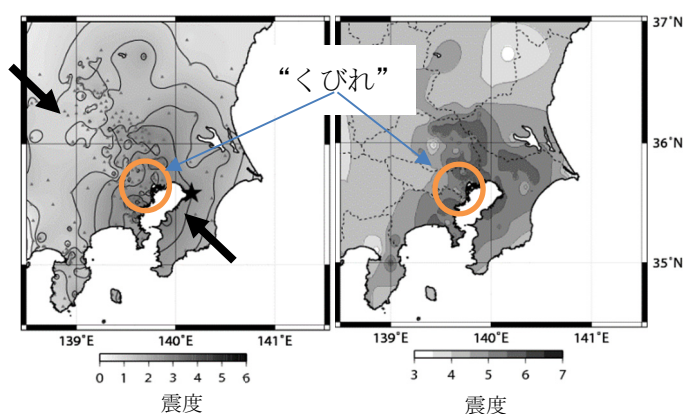


図5 現在の地震と安政江戸地震の震度分布の比較。(a)1999年9月13日の地震(深さ76km)。フィリピン海プレートと太平洋プレート境界付近の地震による震度分布。(b)1855年安政江戸地震の震度分布(中村・他、2007に加筆)。円は“くびれ”を示す。

さて、現在のところ、このような知見に基づいて、1855年安政江戸地震はどこで起きたと考えられているのでしょうか。直接的な手掛かりは、1855年安政江戸地震と同じような揺れの分布を持つ現在の地震を探すことです。一例を、図5に示します。図の左には、1999年9月13日の地震(深さ76km)による揺れの分布を示します。この震度分布の特徴と、安政江戸地震の推定された震度分布の特徴が「似ている」と考えることができました。

当然、この一例のみで、1855年の地震と1999年の地震が同じ場所で起きたとは言いきれません。しかし、このようなデータが蓄積されていくことで安政江戸地震の姿に迫ることができるのです。

本プロジェクトでは、史料記述の検討と、現在の観測データから推定される関東地方の地下のQ構造を総合して、1855年安政江戸地震の発生場所を検討しました。その結果、図6で示したように、安政江戸地震は活断層で起きるような陸のプレートの浅いところで発生した地震でも、太平洋プレートの上面や内部のような深い地震でもなく、フィリピン海プレートの内部か、その上面で発生した地震と考えることができます。

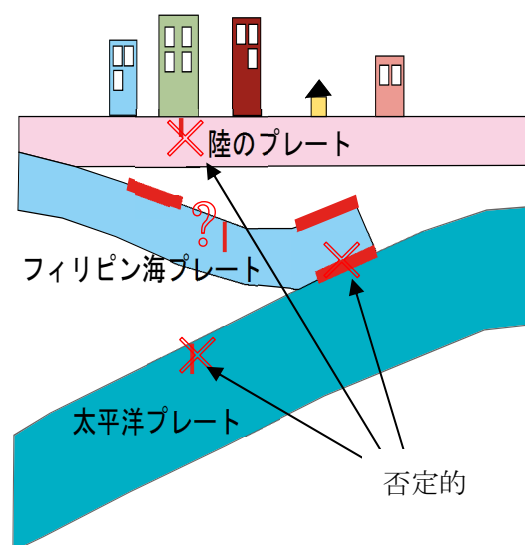


図6 安政江戸地震の震源像。残された可能性は、フィリピン海プレート内あるいは上面。

#### 2-4. 首都圏の過去の地震活動に基づく地震活動予測手法の確立

2011年東北地方太平洋沖地震の影響を定量的に評価し、首都圏の中小地震（マグニチュード4以上）の地震発生確率を三次元的に予測する手法として3D-RIモデルを開発しました。また、この予測結果を統計学的に評価するための手法を構築し、首都圏で発生する地震の予測に適したパラメータを推定しました。さらに、大地震（マグニチュード6以上）を予測する方法として、RIモデルによる二次元空間でのパラメータの決定と複数のRIモデルを組み合わせることで、予測精度の高度化を図れることを示しました。

### 3. 観測に基づく都市の地震被害評価技術の開発

MeSO-netで観測したデータと広域都市モデルを用いて、都市の地盤と構造物の揺れを計算する大規模シミュレーション手法を開発し、都市の地震被害評価技術を開発しました。この手法では、観測と計算の双方のデータを融合させることが重要です。この研究の成果は、災害対応能力を向上させる施策の検討に利用できます。

#### 3-1. 地震動・地震応答の大規模数値解析手法の開発

巨大地震が発生した際の都市の構造物即時被害予測の精度向上は、事前の被害想定の評価や実際に地震が発生した際の二次災害の軽減など、都市部における災害軽減に大きく貢献します。地震発生時における即時の被害推定は、建造物の応答解析を用いて行われるため、建造物が受ける地震動の特徴を知る必要があります。しかし、首都圏の地震観測網は、MeSO-

net でさえも観測点の間隔が平均 5 km程度であるため、すべての建造物が受ける地震波形を得ることはできません。そこで、実際に発生した地震の観測データを用いて、首都圏の 100 棟規模の建造物が受ける地震動を推定するための「地震動イメージング」技術を開発しました (図 7)。

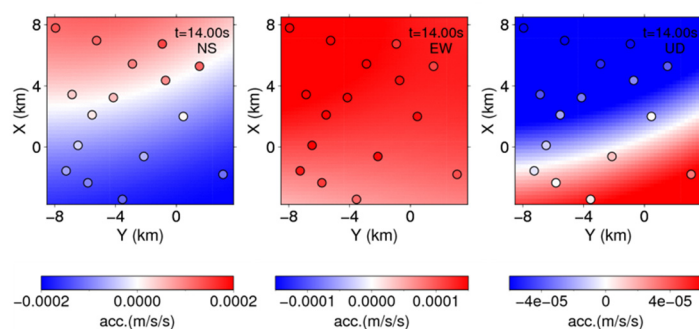


図 7 5-10 秒の長周期地震動のイメージング結果。推定された波動場に観測値 (丸点) を重ねて示してあります。

### 3-2. 大規模数値解析結果の先端可視化技術の開発

地震被害評価は大規模数値解析の計算結果に基づきますが、これには膨大な量の計算結果を効果的に可視化することが必須となります。三次元視とマルチスケールが可能な可視化手法を開発するとともに、応急的な評価に利用可能な高速処理も併せて実現しました。

## 4. まとめ

2011 年東北沖地震の影響を受けた関東地方における地震活動を観測し、その変化の原因について調査・研究しました。その結果、マグニチュード 9 という超巨大地震によって、関東地方に地震時の応力変化と、粘弾性緩和による応力の再配分が進行していることが分かりました。将来どのような首都直下地震が発生するかを理解するために、1855 年安政江戸地震を事例として取り上げました。地震計のない江戸時代に発生した地震の姿に迫るために、史料の収集、精査、現在の地震学の知見との統合を試みました。将来の首都圏で大地震が発生した際に被害を軽減するためには、どのような被害が発生するかを事前に予測して備える必要があります。同時に、発生している被害をリアルタイムで「推定」して、迅速に対応する必要があります。そのための手法の一つを提案しました。

## II 都市施設の崩壊余裕度と健全度判定

京都大学防災研究所 中島 正愛

### 1. はじめに

本サブプロジェクトでは、実大三次元震動破壊実験施設(Eーディフェンス)を効果的に活用し、想定を上回る大地震に対する都市基盤施設の被害推定と、地震後の事業・生活の維持および速やかな都市機能の回復に向けた研究に取り組みました。Eーディフェンスは、旧科学技術庁が兵庫県南部地震における被害を受けて建設した世界最大の振動台です(図1)。重さ1,200tの構造物を震度7の地震動で揺らすことができます。

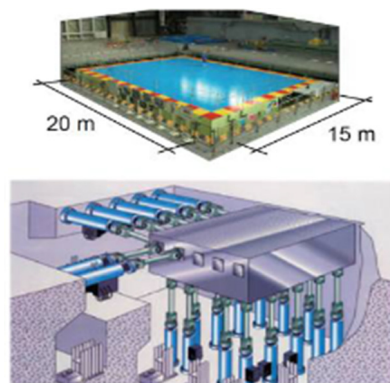


図1 Eーディフェンスの震動台

### 2. 研究の目的と方針

観測史上最大規模の東北地方太平洋沖地震は、未曾有の大被害をもたらしました。震度5強以下の首都圏でも、長時間の長周期の揺れや湾岸域での液状化の発生、高層建物等での什器類の転倒とエレベータ停止、鉄道の運行停止、道路の大渋滞、多数の避難民・帰宅困難者の発生、石油タンクのスロッシング、ライフラインの長期間停止等によって、事業や生活の継続に甚大な支障を来し、大都市がいかに脆弱であるかが浮彫りになりました。

今回の大震災では数多くの教訓が得られましたが、なかでも「想定を上回る地震動に対する対処」、「事業や生活の継続と速やかな回復」は切実です。これらに対する工学的見地からの処方箋として、「高層建物等都市の基盤をなす施設が完全に崩壊するまでの余裕度の定量化」と「都市基盤施設の地震直後の健全度を即時に評価し損傷を同定する仕組みの構築」を達成すべく、本サブプロジェクトを企画しました。

本サブプロジェクトでは、都市施設の中核で生活や事業の基盤となる中高層建物を主な対象とし、大別して3つの研究テーマに取り組みました。各テーマの研究方針は以下の通りで、研究項目の概要と相互の連携関係を図2に示します。

#### (1) 中高層建物の崩壊余裕度定量化

企業の本社機能の多くを占める高層鉄骨造建物や都心のマンションに多用されるRC造建物が、想定を上回る地震動を受けた際の損傷の進展と崩壊までの余裕度を、部分構造物の構造実験、建物全体の大型振動台実験、高度数値解析から明らかにしました。また得られたデータを用いて、揺れの大きさと被害の関係に対する定量的評価法を整備しました。本テーマでは対象とする建物に則して、下記の2つの研究項目について検討を進めました。

(1)-1 鉄骨造高層建物の崩壊余裕度定量化、(1)-2 RC造建物の崩壊余裕度定量化

#### (2) 建物の健全度モニタリング

建物の揺れを検知するセンサ群、センサデータ転送システム、センサデータに基づいて



損傷度合を即時に評価する健全度モニタリングシステムを開発し、それを振動台実験に適用することで、各システムの妥当性を検証しました。

また研究の最終段階では、地盤－基礎－建物連成系を対象とした大型振動台実験によって、有効性を検証しました。本テーマではモニタリングの対象に則して、3つの研究項目について検討を進めました。

(2)-1 建物のモニタリング (上部構造)、(2)-2 建物のモニタリング (地盤)

(2)-3 建物のモニタリング (連成システム)

### (3) 地盤－基礎－建物系の応答評価

地震波が地中深くから表層地盤に伝わり、建物の基礎に到達して建物を揺らすメカニズムの実記録を、地中、表層地盤と建物に配した観測システムから収集し、得られたデータから地盤－基礎－建物連成系の解析技術を向上させ、より高度な連成系応答評価法を整備しました。

また、地中に設置したセンサを用いることで建物健全度モニタリングシステムの高度化を図り、その精度を(2)-3 連成システムの大型震動台実験で検証しました。なお、地震観測については、サブプロジェクト1「首都直下地震の地震ハザード・リスク予測のための調査・研究」で展開されている首都直下地震観測網 MeSO-net とのデータ共有を図っています。

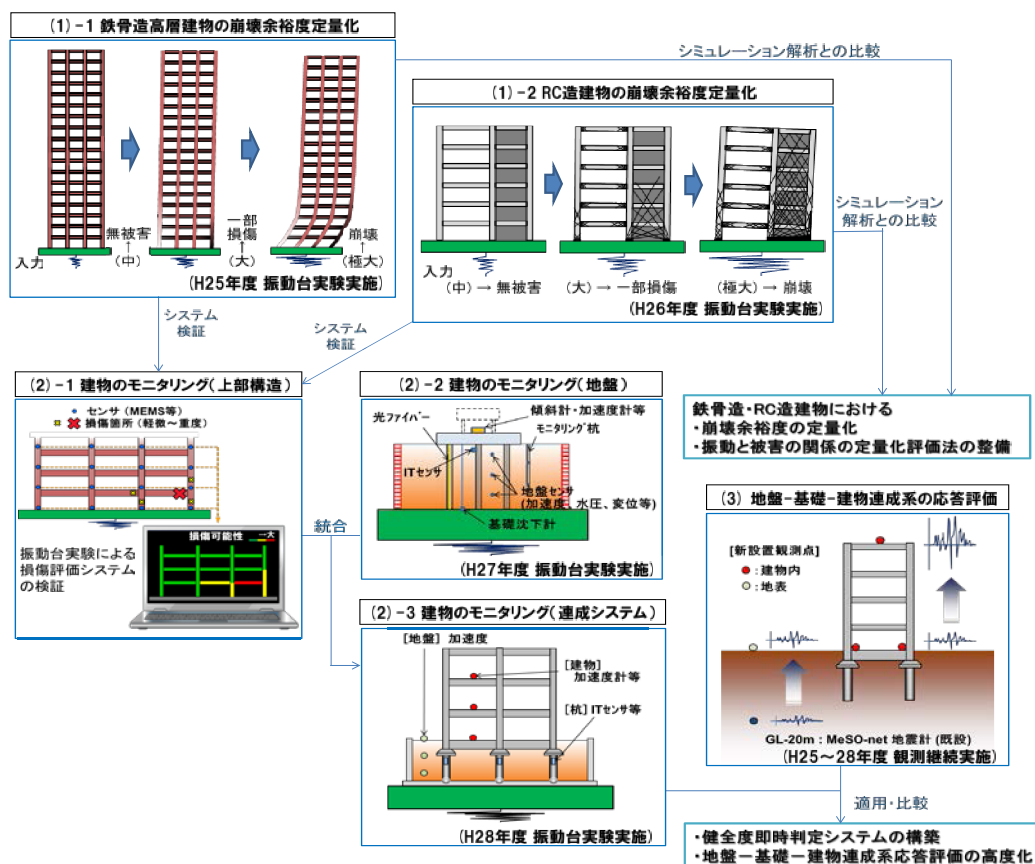


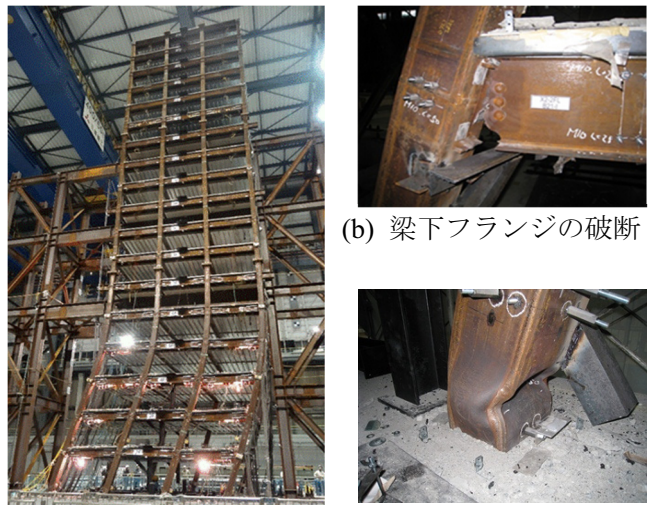
図2 研究項目の概要と相互の連携関係

### 3. 研究成果

#### 3-1. 中高層建物の崩壊余裕度定量化

##### (1) 鉄骨造高層建物の崩壊余裕度定量化

本研究では、都市部における事業の基盤である鉄骨造高層建物を対象として、実物を1/3に縮尺した18階建て試験体による大型振動台実験を行いました。それが、想定を上回る地震動を受けた際の損傷の進展および崩壊に至る過程を明らかにして、崩壊余裕度の定量的評価法を構築することを目指しました。図3に崩壊に至った試験体の写真を示します。



(a) 試験体全景 (b) 梁下フランジの破断 (c) 1階柱脚の局部座屈

図3 E-ディフェンス振動台実験での崩壊挙動

図4は、崩壊余裕度および健全度評価の考え方を示したもので、縦軸は地震力を横軸は建物の変形を表しています。この図において、図3の写真は④の状態に相当しますが、それより前の③が崩壊点です。地震で建物が構造的損傷を受け、耐震安全性の観点で継続使用不可の状態を崩壊点と定義しました。この崩壊点は数値解析に基づき、余震を考慮して層間変形角を指標として算出します。

図5の評価フローに示すように、建物の耐力ピーク後の劣化(図4中における右下がりの負勾配)を考慮した地震前の解析により、建物の荷重と変形の関係、①安全(軽微損傷以下)、②要注意(健全度低下)、③危険(余震により崩壊の危険性あり)の健全度区分、および前述の崩壊点を事前に決定します。

地震発生後には、建物に設置した加速度センサによる健全度モニタリング結果に基づき、応答点(最大応答層間変形角)を評価して、崩壊余裕度の算出と健全度判定を即時に行います。

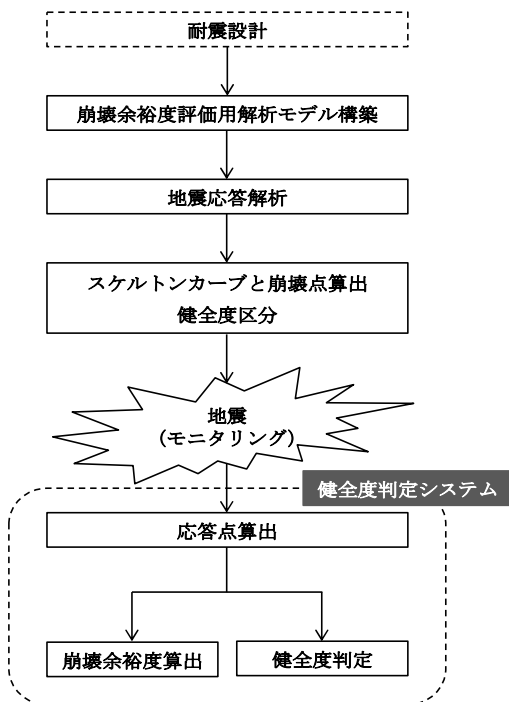


図5 評価フロー

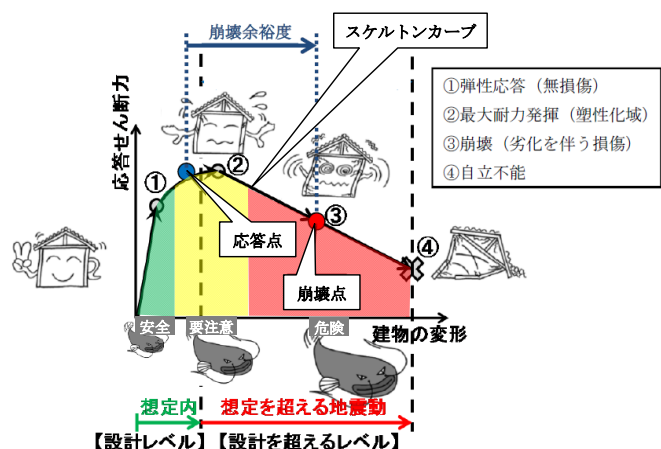


図4 崩壊余裕度評価と健全度判定

## (2) RC 造建物の崩壊余裕度定量化

本研究では、想定を超える地震力を受けた時の鉄筋コンクリート造建物の挙動や地震後の建物の状態を実験および高度数値解析によって調べ、さらに、地震後に建物があとどれくらい余震に耐えるか(崩壊余裕度)を判定する手法を提案しました。E-ディフェンスでの振動台実験では、図6に示す現行の設計基準に準じた6階建てのマンション(耐震壁付きラーメン構造)が直下型地震を受けたことを想定して、試験体が崩壊するまで揺らしました。この振動台実験で得られた結果や、耐震壁などの建物の一部分に着目した要素実験、ならびに高度数値解析(図7)を通じて、崩壊余裕度評価手法を検討、提案しています。

研究では、図8に示すように最大の余震を考慮して、2度の連続した地震動を受けた時に建物の揺れ(応答)が建物固有の「崩壊点」に到達する場合の地震動を、崩壊地震動と定義しています。(図3は振動台実験の試験体を対象にした検討例で、JMA(海洋気象台)神戸波120%入力 が崩壊地震動となりました)。

崩壊余裕度は、経験地震動あるいは設計地震動の強さに対する崩壊地震動の強さの比、として表されます。

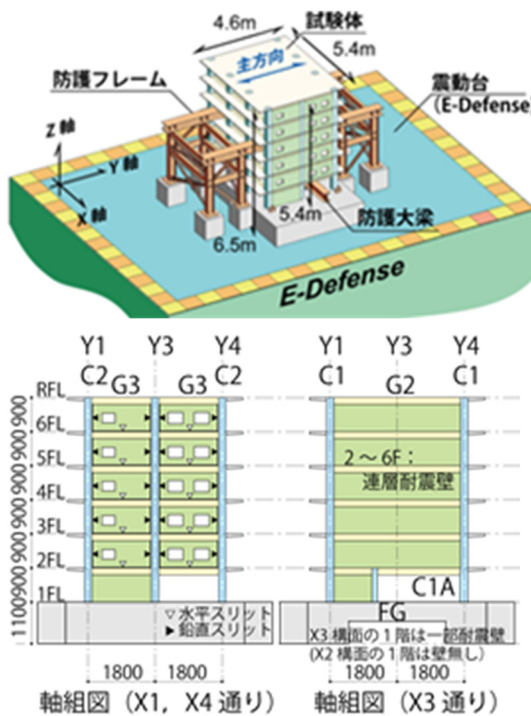


図6 E-ディフェンス実験と試験体

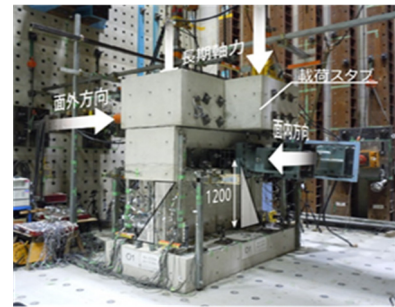
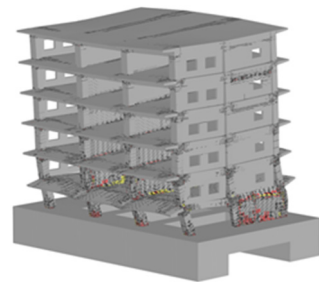


図7 崩壊時の試験体と FEM 解析および耐震壁に着目した実験

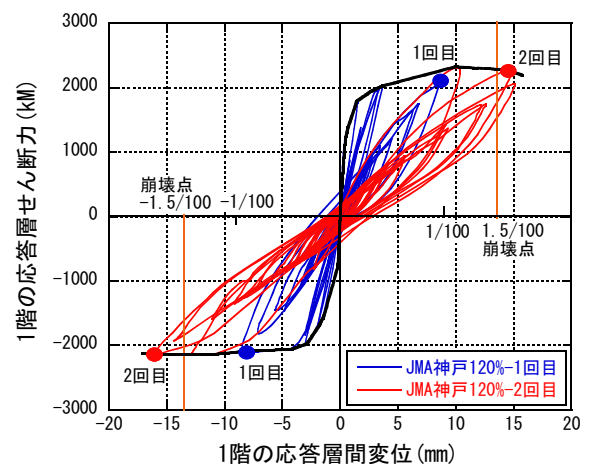


図8 崩壊地震動と建物の応答の例

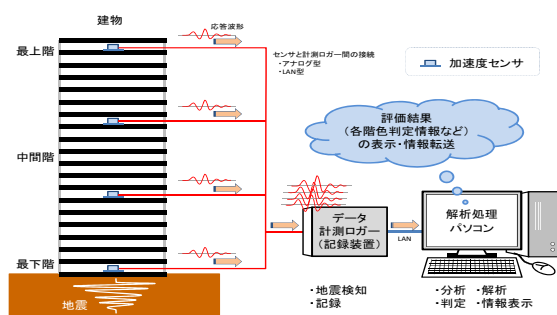
### 3-2. 建物の健全度モニタリング

#### (1) 建物のモニタリング（上部構造）

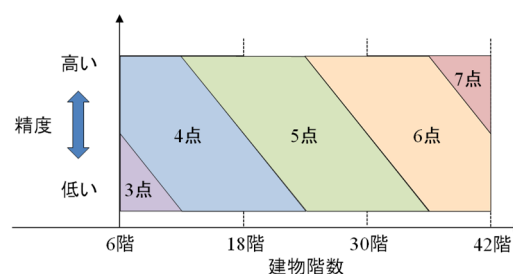
近年、建物管理者には、大地震直後に建物の健全度を適切に把握し、速やかな安全確保と継続使用判断等の意思決定が求められています。本研究では、これを支援する建物の健全度評価法を検討、提案しています。

様々な建物健全度評価手法のうち、ここでは最も実用化に適する方法として、建物内に数台の加速度センサを設置し、地震直後にそのデータを即時に自動処理し、健全度指標として地震時の最大層間変形角などを算出する手法を主に取り上げました(図9(a))。なお、健全度評価法をシステム化し実建物に設置する際は、センサ等の機器の設置場所・方法など様々な点に留意が必要です。また、センサの設置個数や設置階などは、建物の階数や対象とする変形レベル等に応じて、適切に設定する必要があります(図9(b))。本研究では、これらの点についても検討を実施しました。

健全度評価法の検証を目的に、本プロジェクトで実施した、鉄骨造および鉄筋コンクリート造建物のE-ディフェンス振動台実験(3-1項参照)に、健全度評価システムを適用しました。実験では、健全度評価結果が「安全」から「危険」に至る各段階において、評価法が有効に機能することを確認しました(図10)。

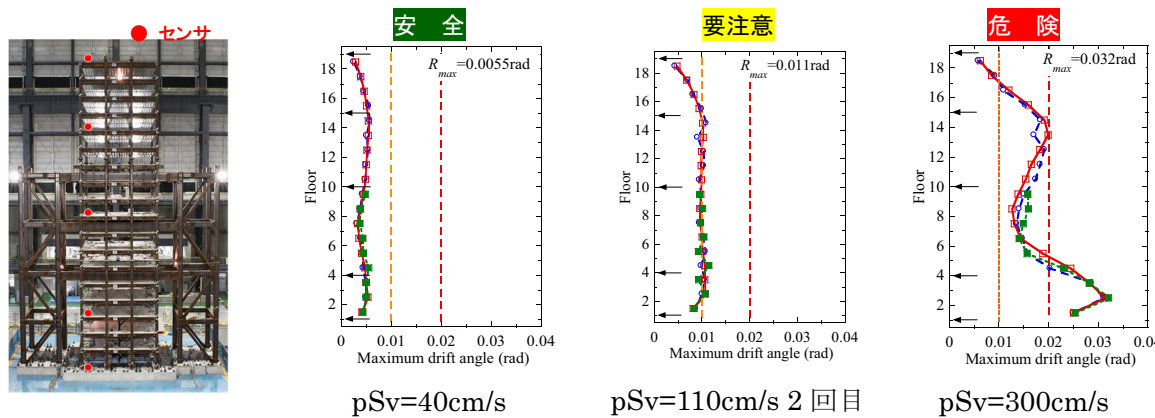


(a) 健全度評価システムの一般的構成



(b) センサ設置数の目安

図9 建物健全度評価システム



(a) センサ配置

(b) 健全度指標（最大層間変形角）と判定結果

図10 鉄骨造18層試験体による振動台実験での検証例

← 観測値(全階センサ利用)      ← 変位計  
 → 推定値(1, 4, 10, 15, R階センサ利用)      ← センサ位置

## (2) 建物のモニタリング（地盤）

大地震後には、出来るだけ早く建物の健全度を適切に把握することが重要ですが、杭基礎などは地中に埋もれているため、調査に多くの時間と費用を要します。そこで、杭の傾きを計測できる傾斜計や、杭のひずみを連続的に測定できる光ファイバなどを用い、杭の健全度を即時判断するモニタリングシステムを開発しました。さらにシステムの精度検証を目的として、E-ディフェンスを活用した振動台実験を実施しました。実験では、モニタリング対象とした地中の鉄筋コンクリート杭の健全度をシステムによって迅速に評価し、その有効性と判定に必要な閾値を確認、設定しました。

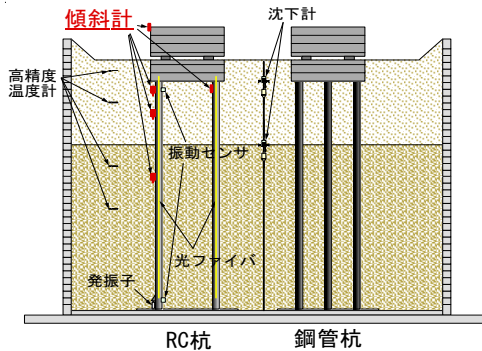


図 11 杭基礎のE-ディフェンス実験



図 12 杭頭部のモルタル圧壊状況

表 1 主な加振ケースの結果概要

日付	入力波	振動台		地表面		ひずみに基づくRC杭頭部の状態	健全度	上部構造傾斜	RC杭傾斜
		加速度 cm/s <sup>2</sup>	計測震度	加速度 cm/s <sup>2</sup>	計測震度				
一日目	告示波 20%	82	4	105	4	ひび割れ発生	A	1/2755	1/2204
	鷹取波 10%	75	4	123	4	ひび割れ発生	A	1/2449	1/1049
二日目	告示波 100%	354	6弱	434	6弱	鉄筋降伏	B	1/7346	1/262
	鷹取波 60%	489	6弱	543	6強	鉄筋降伏	B	<1/10000	1/175
三日目	告示波 100%	352	6弱	482	6弱	鉄筋降伏	B	<1/10000	1/127
	告示波 150%	542	6弱	627	6強	終局 (モルタル剥落)	C	1/711	1/74

表 2 試験体の健全度を適切に判定するために必要な閾値例

対象	センサ	測定データ	健全度判定区分		
			A	B	C
			損傷なしまたは軽微な損傷, 継続使用可能	中程度の損傷, 補修後使用可能	著しい損傷, 使用不可能
杭	傾斜計	残留傾斜角 $R_p$	$R_p < 1/300$	$1/300 \leq R_p < 1/75$	$1/75 \leq R_p$
	光ファイバ	残留ひずみ $\epsilon_R$	$\epsilon_R < 2000$	$2000 \leq \epsilon_R < 4000$	$4000 \leq \epsilon_R$ 光ファイバ破断
構造物	傾斜計	残留傾斜角 $R_f$	$R_f < 1/300$	$1/300 \leq R_f < 1/75$	$1/75 \leq R_f$
総合判定			杭と構造物の残留傾斜角および光ファイバによる残留ひずみのうち、厳しい方の評価結果を採用		

### (3) 建物のモニタリング（連成システム）

東北地方太平洋沖地震では、建物の被害は限定的であったにもかかわらず、基礎が損傷を受けたことにより建物に傾斜あるいは沈下が生じた想定される建物が見られました。建物の健全性をモニタリングするためには、上部構造だけでなく基礎、地盤を含めたモニタリングシステムの構築が必要です。そのため、前述のモニタリングの検証データを得るために、地盤-基礎-建物連成系を対象とした振動実験を行いました。

振動実験に先立ち、杭基礎の耐力と変形性能の把握を目的として、PC杭4本からなるフーチングについて静的載荷実験を行いました。また、振動実験では2段階加振を行いました。1段階目はフーチング上に設置したS梁をフリーにした状態で連成系加振（ステップ1）、2段階目はストッパーによりS梁を土槽と緊結して基礎固定加振（ステップ2）を行い、各加振レベルにおいて貴重なデータを取得し、モニタリングの検証データを蓄積しました。

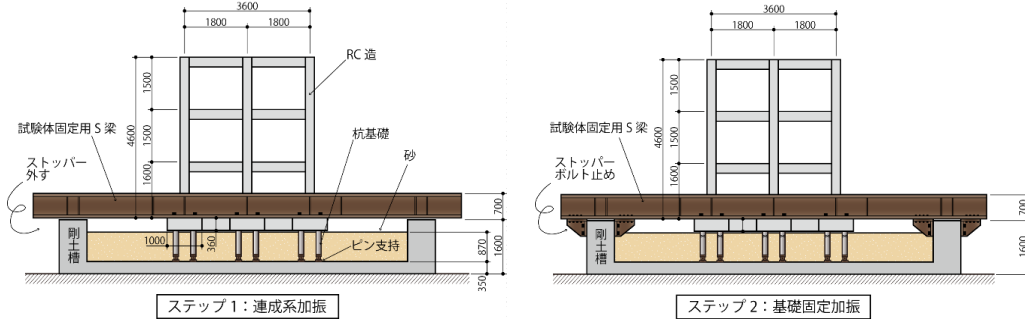


図13 連成のE-ディフェンス実験

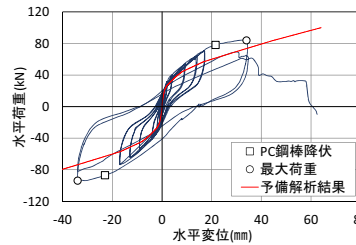
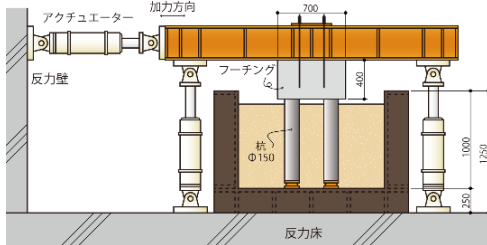


図14 予備実験の試験体概要 図15 杭-地盤系の荷重-変形関係 図16 連成系加振での破壊状況

表3 連成系加振(ステップ1)の損傷状況

波形名	震動台加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	上部構造の層間変形角 (損傷状況)	杭-地盤系の状態
内山波 20%	31	1/9140	弾性
内山波 60%	91	1/2270	弾性~ひび割れ
内山波 100%	180	1/1310	ひび割れ
内山波 200%	410	1/700 (梁端と1F柱脚に曲げひび割れ)	降伏歪、圧壊歪
内山波 300%	680	1/570 (梁端と1F柱脚に曲げひび割れ)	耐力低下、軸力保持喪失

表4 基礎固定加振時の建物の損傷状況

波形名	震動台加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	上部構造の層間変形角 (損傷状況)
内山波 60%	97	1/1290
内山波 100%	180	1/680
内山波 200%	420	1/200 (1F, 2F 梁端降伏)
内山波 300%	690	1/100 (1F~3F 梁端、1F 柱脚降伏)
内山波 400%	960	1/68 (1F~3F 梁端、1F 柱脚降伏)
内山波 500%	1200	1/47 (1F~3F 梁端、1F 柱脚降伏、圧壊)

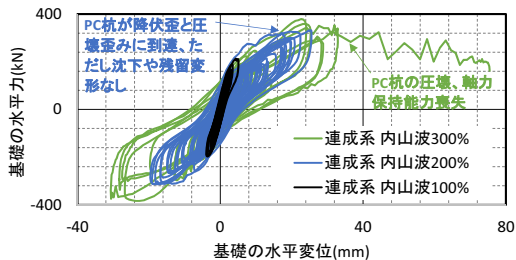


図17 杭-地盤系の荷重-変形関係

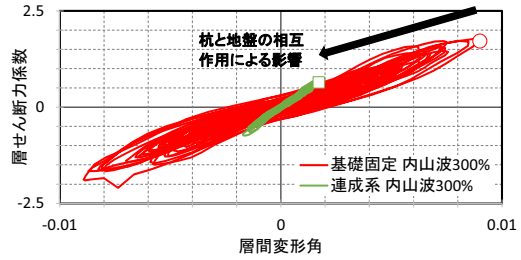


図18 建物の層せん断力-層間変位関係

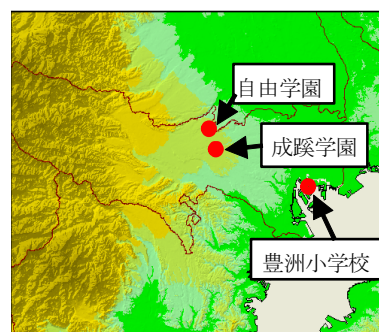
### 3-3. 地盤－基礎－建物系の応答評価

実際の建物の地震応答評価においては、地盤－基礎－建物の連成効果を適切に評価する必要があります。本研究では、地震直後の建物の健全度判定システムへの適用を目的とした、地盤－基礎－建物連成系応答評価手法について整理しています。この評価手法については、地中、表層地盤、建物の基礎部と頂部に配置した地震計から収集した、実建物における地震観測記録によって検証を実施しています（図 19）。

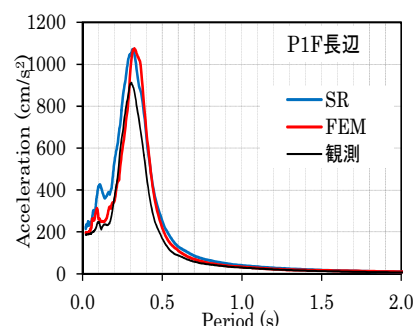
表 5 に想定する評価法適用先と適用範囲をまとめています。本評価手法は、設計時には一般的に時刻歴応答解析を求められない中小規模の建物を対象としており、三次元 FEM 等の高度数値解析技術を有しない技術者が地震後の建物健全度評価を実施する際に、地盤－基礎－建物連成系が評価できるよう、簡便なものとしています。そのため、本手法の精度は、高度な応答解析手法等と比べると、必ずしも高くありません。

図 20 には応答解析手法の概要を示します。解析モデルは、図 20(a)に示すように、建物は質点系でモデル化し地盤との相互作用はスウェーローッキングばねによって評価します。

この地盤ばねは、地震入力による地盤非線形化の影響を考慮しない場合、PS 検層等から得られる初期地盤物性から、日本建築学会が提案する略算式等に基づいて算出することができます。しかし、地震入力が大きくなると、地盤非線形化の影響を考慮する必要があります。本研究では、初期地盤物性から算定される地盤ばねに、影響係数  $\alpha$  を乗じることで地盤非線形化の影響を評価します。この影響係数  $\alpha$  は、図 20(b)に示すように入力地震動のレベルによって変化する算定式を用いて算出します。研究では、基礎種別や地盤種別ごとにこの影響係数  $\alpha$  算定式を示しています。



(a) 地震観測の実施

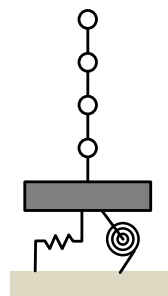


(b) 解析精度の確認

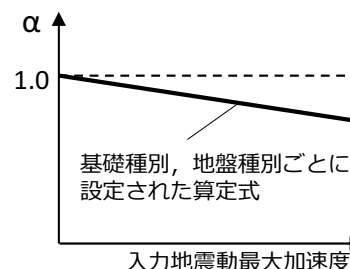
図 19 地震観測システムによる解析技術の検証

表 5 想定する適用先と適用範囲

適用先	地震被災直後の建物の健全性評価, 継続利用の可否判断
使用者	高度な数値解析技術を持っていない構造技術者
適用範囲	中小規模の建物 ・鉄骨造および RC 造 ・直接基礎および杭基礎 ・高さ 60m 以下



(a)SR モデル



(b)  $\alpha$  の算定式イメージ

図 20 地震観測システムによる解析技術の検証

### III 大規模被害の発生を前提とした災害からの回復力の向上

京都大学防災研究所 林 春男

#### 1. はじめに

このプロジェクトは、「都市災害における災害対応能力の向上方策」に関する研究をしています。「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト」の三つあるサブプログラムの一つで、社会科学的な側面を担当しています。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震をきっかけに始まったこのプロジェクトは、大規模な被害の発生が予想されます都市域を襲う地震災害、とりわけ南海トラフ地震や首都直下地震による被害を極小化して、高い災害回復力を持つ都市の実現を目指しています。

具体的には、ICT分野で開発されている新しい要素技術を使い、円滑な応急対応や復旧・復興を支援できる情報処理基盤を作ること、それを活用したさまざまなコンテンツを開発して、自助力・互助力・共助力・公助力を高めることが目標です。

なぜこうした研究が必要かといえば、わが国の現在の防災力では巨大災害を完全に抑止できないからです。それならば、少しでも被害を減らす努力をすること、主要な社会機能には高い事業継続能力を持たせること、それ以外については速やかな復旧・復興を実現させること、これら三つの目標を同時に実現できるように「災害をのりこえる力」を高めること目標にすべきです。この力を災害レジリエンスとよびます。

それから現在行政が防災の主役と考えられがちですが、どう考えても公助力には限界があります。それを補うのが自助・互助・共助であり、その力を高めるために私たち一人ひとりの防災力(=防災リテラシー)を高めることが、災害レジリエンスを高める上で必要だと考えています。

#### 2. 東日本大震災から学ぶべき災害対応におけるインターネットの重要性

東日本大震災で象徴的だったのは、インターネットがマスコミに代わって災害情報の主たる情報源になったことです。この事実を踏まえば、防災分野としてインターネットをもっと上手に使う必要があり、自助・互助・共助・公助を高めるためのインターネットの利活用法の開発が求められています(図1)。

インターネットは21世紀の革命です。マスコミは20世紀の革命であり、それによって「情報接触権」が開放され、誰もが同じ情報

#### 災害対応におけるインターネットの力

- **インターネットがマスコミに入れ替わって災害情報の主たる情報源となる**
  - ・ マスコミの役割の相対的な低下
  - ・ マスコミは“Big Picture”を提供し、デジタルディバイドを埋めるためのメディア
- **インターネットは「情報発信権」の解放**
  - ・ 防災機関は情報発信源の「ひとつ」に過ぎない
  - ・ ソーシャルメディアの台頭：例 Twitter
- **情報システムから情報サービスへのパラダイムシフト**
  - ・ クラウドサービスの普及
  - ・ オープンソースからオープンアクセス
- **G空間情報の果たす役割の増加：GPS+GIS**
  - ・ 脱PC → スマホ・タブレットの普及 (GPS付移動体端末)
  - ・ マッシュアップ

図1 災害対応におけるインターネットの力



に接することができるようになりました。だから、ブロードキャスト (Broadcast) なのです。それまでは特定の者に限られていた情報開示が、大衆化されました。これがマスメディアの大きな功績です。それでも発信する権利は特定の人だけが握っていたので、「第4権力」という言い方をされていました。

しかし、インターネットは「情報発信権」を開放しました。これまで防災機関はマスコミにとって情報源として特別な地位を占めていましたが、だれもが情報を発信できるようになると、防災機関は単なる情報発信源のひとつに過ぎなくなり、特別な地位を失いました。いいかえれば、行政機関が今後どのような情報提供をすべきかを改めて考え直す必要が出てきました。

インターネットの普及とともに、クラウド技術を使うことで情報システムから情報サービスへのパラダイムシフトが起きていることにも着目すべきです。クラウドの世界では、SaaS・PaaS・IaaS という呪文のような言葉があります (図 2)。昔の情報システムでは全部を自前で持っていなければなりませんでした。ハードウェア・OS・アプリケーションの 3 層構造が全て必要でした。クラ

- SaaS—Software as a Service サービスとしてのソフトウェア
- PaaS—Platform as a Service サービスとしてのプラットフォーム
- IaaS—Infrastructure as a Service サービスとしてのインフラストラクチャー

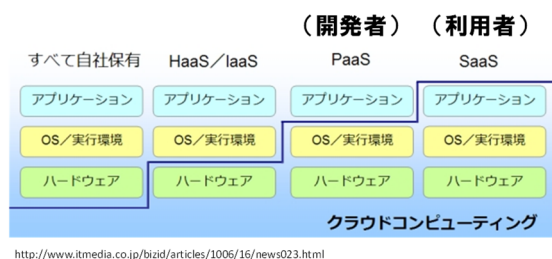


図 2 クラウドコンピューティング

ウドの世界では、ハードウェアだけ借りるのが HaaS/IaaS (Infrastructure as a Service) で、例えば Amazon のディスクスペースを借りる場合です。OS まで使わせてもらうのが PaaS (Platform as a Service) です。アプリケーションまで使わせてもらっているのが SaaS (Software as a Service) です。SaaS の典型が Google の G メールやカレンダーで、利用者はそこに自分のコンテンツを入れるだけです。私たちが目指しているのは、防災分野で SaaS としての情報サービスを提供することです。

インターネットで着目すべき第 3 の点は G 空間情報の普及です。現在世界に約 25 億台あるといわれる ICT 端末の 8 割はスマートフォンです。スマートフォンには GPS が付いており、移動している人たちがその時自分がいる場所で必要となる具体的な詳細情報を出すことが可能になったのです。マスメディアにも地域メディアにもできなかったスマホが持つ新しいこの機能を、どのように活用できるかがこれからの防災の死生を制すると考えるべきです。

### 3. このプロジェクトが目指したもの

このプロジェクトでは、インターネットを情報処理の中心に置いたときの新しい防災情報処理の姿を総合的に検討しています。災害時の行政による支援は決して十分とは言えないわけですから、最後は私たち一人一人の力にかかっています。情報システムではなく情報サービスの時代になった今、自分たちが災害に立ち向かえるだけの能力 (防災リテラシー)

を向上させるためのインターネット活用の可能性を考えました。

それを武器に、来るべき南海トラフ地震や首都直下地震に備えることを念頭において研究を進めました。

今回のプロジェクトを開始する際に気を付けたもう一つのことは、最終年度にどのような成果が出るかを初年度からお約束することです(図3)。従来の研究では、最初の4年間は何をしているのかよく分からず、最後の1年に結果が出るのが通例でした。このプロジェクトでは研究参加者が最終成果物を常に意識するように、初年度からホームページに最終成果物を五つの箱として表示しました。以下、順に紹介します。

## Goal : 本研究が目指すもの

大規模な被害発生が予想される南海トラフ地震及び首都直下地震による被害を最小にとどめ、高い災害回復力を持つ都市の実現を目指す。

→ICT 分野での新しい要素技術を活用して、円滑な応急・復旧対応を支援する災害情報を提供するシステムの構築

→自助・互助・共助・公助力を高めるための防災リテラシーの向上方策の検討

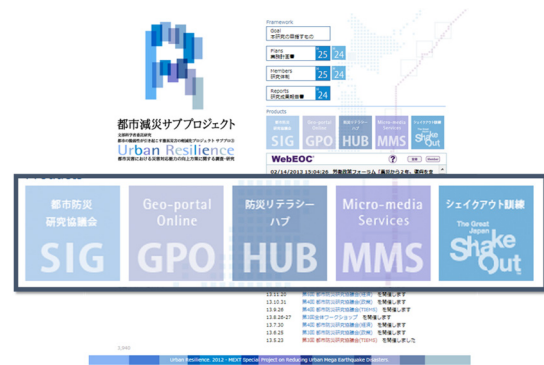


図3 本研究が目指すもの

### 4. SIG : 「都市防災研究協議会」

図3一番左のSIGは「都市防災研究協議会」です(図4)。まだわが国の災害では経験してはいないものの、南海トラフ地震や首都直下地震級の国難ともいえる大規模災害が起こった場合に問題になりうる新しい課題を産官学民が集まって考えることを目的とした研究活動です。「経済」「政策」「危機対応」の3つの分科会を設けました。「経済」分科会では、都市や産業集積地で発生する大規模災害によってもたらされる経済的な影響についてシナリオとして把握することにより、災害対応や復興施策の前提条件を明らかにするとともに民間部門におけるBCPなどで考慮すべき経済的な脆弱性について検討しました。「政策」分科会では、阪神・淡路大震災や東日本大震災等を通じて、巨大災害に対する大都市の脆弱性の克服が重要な課題となっていることを踏まえ、その課題解決に資するため、巨大災害対策法制のあり方について検討しました。

「危機対応」分科会では、巨大災害の災害対応では、行政だけでなく民間も含めて災害対応体制の標準化が行われていることが重要であるという認識にもとづいて、行政・民間を含めた防災担当職員の災害対応能力の向上を目指し、TIEMS 日本支部と共同して、標



図4 都市防災研究協議会

準的な災害対応体制に関する情報共有のプラットフォームの構築について検討しました。

## 5. GPO : 「ジオポータルオンライン (Geo-Portal Online)」

ジオポータルは Web-GIS 上に、地理空間情報をキーにしながら、さまざまな情報を統合するシステムです。そこに各人や各組織が持つコンテンツを登録して、必要に応じて組み合わせることを可能にしています。このプロジェクトでは、研究参加者にジオポータルオンラインを自分の研究成果を公表する手段として使うようお願いしました。同時に、任意の場所で任意の季節や時間で任意の規模の地震を発生させ、その被害を予測する「あなたのまちの直下型地震」というサイトも公開しています (図 5)。

「あなたのまちの直下型地震」では基本的な被害推定の仕方は同じですが、一般利用者向けと、防災担当者向けに分けて情報を提供しています。一般向けでは、自分の好きな場所に、マグニチュード7クラスまでの直下地震を、任意の深さで設定ができます。そのときの揺れはどうなるかから始めて、引き起こされる基本的な被害状況の空間分布と規模を順に学んでいく形をとっています。目的としているのは、地震災害に対する「わがこと意識」の醸成です。自分のいる場所の直下で地震が起きたときに何が起きるのかを、手軽に知っていただくためのものです。防災担当者向けには、入手できるデータをタブ化しました。順に学んでいくことも可能であると同時に、自分が見たいものがはっきりしていれば、そこに直接行ける形式になっています。

2016年熊本地震の震源位置でマグニチュード7.3の地震を10キロの深さで与えた場合の結果を例にすると、震度の分布、建物の倒壊棟数の推定、火災の発生予測、人的被害の発生の予測、道路の閉鎖状況の予測、電力被害、ガス被害、上水道の被害、下水道の被害、といったライフラインの機能停止の状況、それから熊本地域の大企業あるいは中小企業での事業継続の状況、それをさらに製造業と非製造業に分けた形での集計が得られる仕組みになっています。

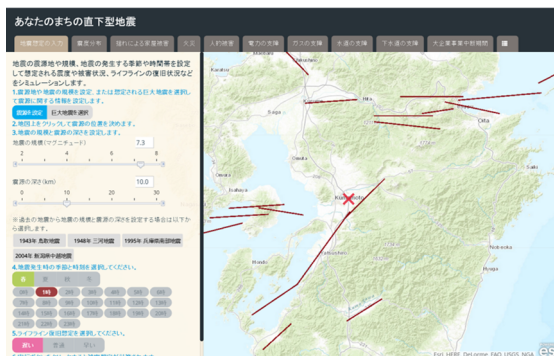
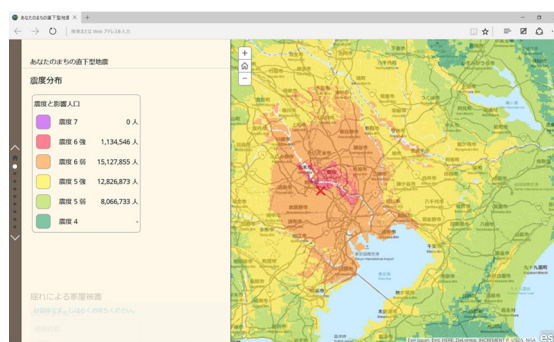
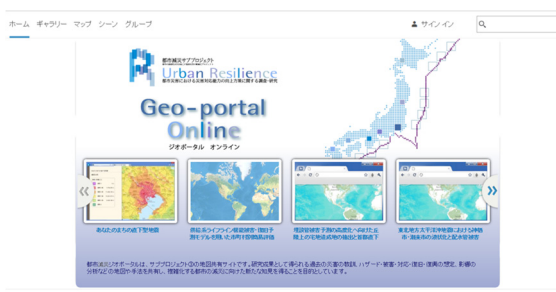


図 5 あなたのまちの直下型地震

## 6. HUB :「防災リテラシーハブ」

HUB は防災リテラシーハブのことで、インターネット上にあるさまざまな防災関連情報を収集・整理するポータルサイトであり、防災情報の統合を考える場の提供を目指しました（図6）。現在3500を超えるウェブサイトが収集され、分類されています。

リテラシーハブのコンテンツは、災害対応に従事する人が使う場合もあれば、一般の人々が被災者として、あるいは応援者として使う場合もあります。災害の度に「まさか自分がこのような目に遭うとは思わなかった」と言う人が今でも大勢います。こうしたことがないように、現在の防災行政サービスのあり方を提供する側も受け取る側も正しく理解し共通の認識を持つことが、防災リテラシーの出発点です。

本来は、平時から防災について理解を深めておくべきだと思いますが、そのような人はほとんどいません。必要になって初めて人は勉強するという実情を考えれば、災害が起きた時にアクセスでき、短時間で理解できる構造にしなければ、いざというときに役立つ仕組みになりません。

防災リテラシーハブのもう一つの重要な機能は、防災に関連する情報を整理するためのメタデータを付与する機能です。防災に関連してさまざまな情報源から発信されるさまざまな情報を有効に利用するためには、情報を整理するために情報が必要です。これをメタデータと呼んでいます。リテラシーハブにはメタデータを簡単に付与する機能を設けました。Design Trend Press (DTP) と名付けています（図7）。あらゆる情報を一カ所に集めるのは現実的ではありません。いろいろな情報がいろいろな場所にあり、それらがどこにあるのかを整理し、データの相互活用が可能になるように管理情報をつける仕組みとしても防災リテラシーハブは利用できます。今後もっとうまく利用していくための技術を開発する必要がありますし、できればこの資産を長く継承したいと思います。

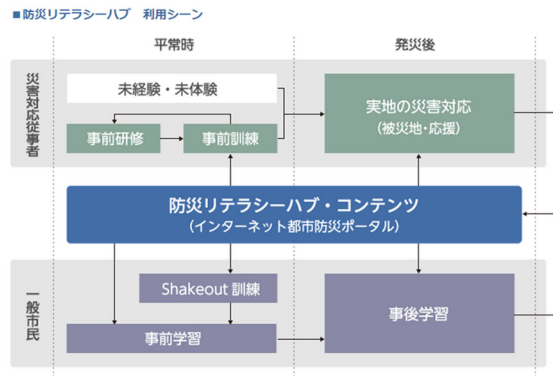


図6 防災リテラシーハブの利用シーン



- ・ 研究参画者は自分の研究成果をインターネット上に開示する
- ・ 開示したことをDTPに投稿し、研究の概要についてタグ付ける

図7 Design Trend Press (DTP)

## 7. MMS : 「マイクロメディアサービス (Micro-media Services)」

マイクロメディアサービスは情報端末の中でもっとも多数を占めるスマートフォンを対象として、それを基盤とした防災情報のあり方を考える課題です。GPS 付の移動端末を使った防災情報の送受信の仕組みのあり方をテーマに考えています。今そこで必要とされる個別情報を受信するレシーバーとしてスマホの利用法を考えるだけでなく、スマホを人間センサーとしてとらえ、その情報発信機能を活用して新しい付加価値を生むことを考えました (図 8)。



図 8 マイクロメディアサービス

## 8. ShakeOut : 「シェイクアウト」

科学的な地震災害シナリオに基づく防災訓練の実施を普及させる目的で、一斉防災訓練、シェイクアウトを広めてきました。地震の揺れでけがをしないことが地震災害からの立ち直りの第一歩です。そのためには揺れが来たら、身を低くして、頭を守って、揺れが収まるまでじっとしている、という小学校で教える安全確保のための基本動作を徹底することです (図 9)。

しかし、大人に同じことができるかという、何十年もやったことがないため、極めて惨めな結果になります。ならば若いも若きも実際にやってみる場を作ろうというのがシェイクアウトです。従来の防災訓練は防災関係機関が一堂に会することが主眼であり、地元住民はにぎやかしのために何十人が招かれるのが実情です。これでは、少しも住民の防災リテラシー向上にはつながりません。

シェイクアウト訓練ができるように



図 9 安全確保行動 1-2-3



図 10 座間市の取り組み

なったのも、インターネットのおかげです。わが国でもっとも上手にシェイクアウトを使っているのは神奈川県座間市だと思います（図 10）。市の防災ボランティアと市役所が連携して、毎年 1 月 23 日のシェイクアウト訓練を年間の防災活動の中に組み込んでくれました。その日に向けて 1 年かけて訓練や講演会を有機的に組み合わせ、みんなが当日を期待していくわけです。その間シェイクアウト参加者は一人一人登録していき、集計結果はインターネットで時々刻々見ることができます。今では 13 万人の人口のうち 5 万人が登録するイベントになりました。行政から頼まれて受け身で参加するのではなく、自らの意志で能動的に参加し、自分たちの創意工夫で頑張ることがシェイクアウトの特徴です。できるだけたくさんの人に参加してもらうために、どこにいてもその時刻一斉に身を低く、頭を守り、じっとしてあげればいいのです。

2012 年に始めたシェイクアウトは、その後順調に参加者が増えて、昨年の年間の参加人数は 650 万人に達しました。この調子で行くと今年は 700 万人に達する勢いです（図 11）。

## 9. 研究成果の社会実装

以上の例が示すように、インターネットは防災分野でいろいろな形で使われています。最後に、研究成果がどのように実際の災害対応に役だったかを、2016 年熊本地震の際の生活再建支援システムの活用を例にご紹介します（図 12）。

生活再建支援システムは首都直下プロジェクト以来ずっと開発を続けてきています。このプロジェクトでは防災リテ

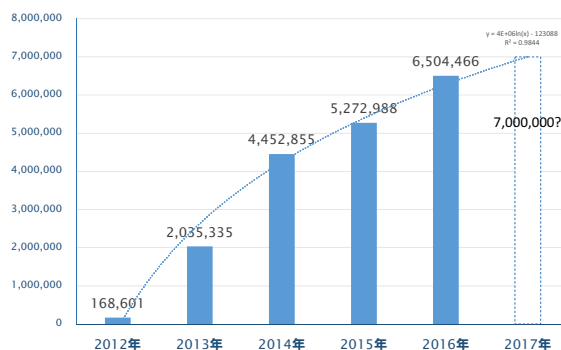


図 11 シェイクアウト参加者数の推移

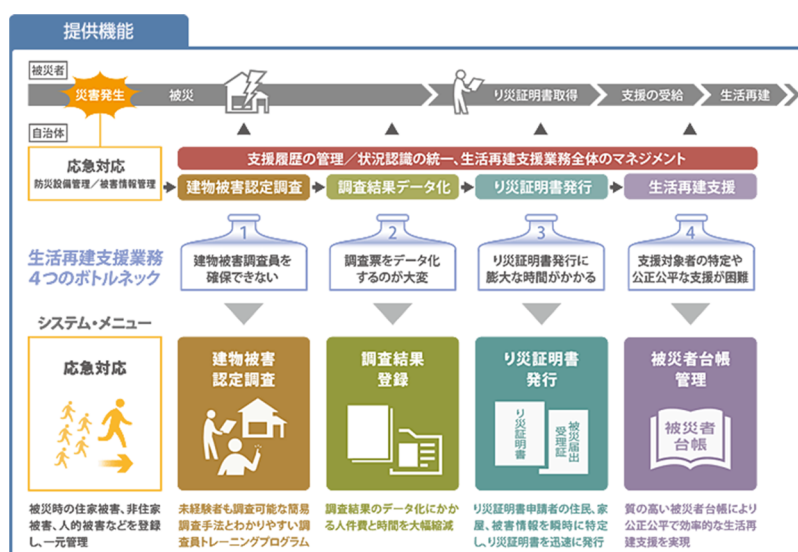


図 12 生活再建支援システム

ラーシーハブの主要コンテンツの一つとして、応援に駆けつけた行政職員を研修するためのプログラムの開発を行ってきました。

災害対策基本法が2015年に一部改正され罹災証明の発給は市町村長の義務、被災者台帳は市町村長が作ることができる規定になり、法的な根拠も明確化されました。それを背景に、たくさんの人を動員した建物被害認定調査の実施、調査結果のデータベース化、罹災証明の発給、それを最初で最大のチャンスにして作成された被災者台帳に基づいて一元的で連携のとれた生活再建の実現、という仕組みを2004年以来継続的に研究し能力の向上を図ってきました。

2016年の熊本地震で被災した19の市町村で共同歩調をとって、クラウドサービスを活用して建物の被害調査、調査結果のデータベース化、罹災証明の発給、被災者台帳による生活再建のための活動を、全国からの応援職員とともに実施するところまで来ています(図13)。

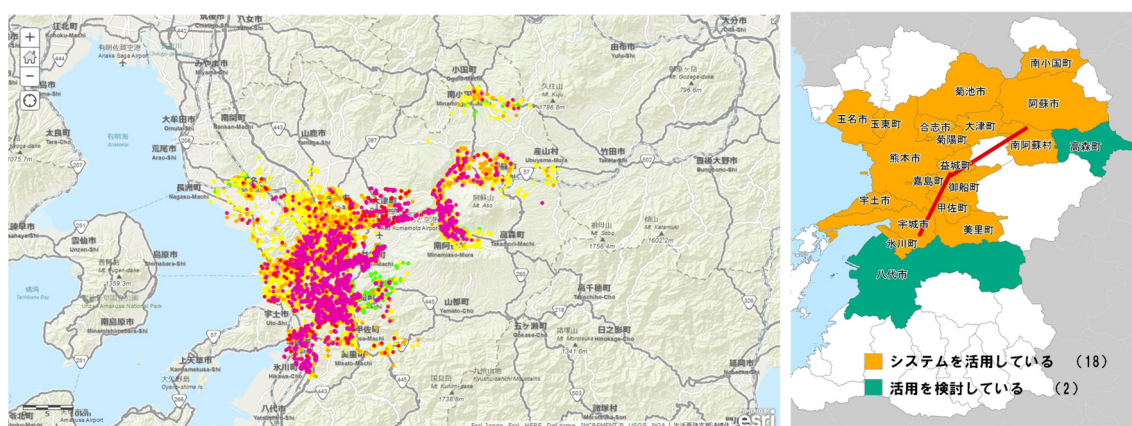


図13 2016年熊本地震での生活再建支援システムの利用実績

## IV サブプロジェクト相互の連携

東京大学地震研究所 酒井 慎一

### 1. はじめに

個々の研究プロジェクトは、その研究分野の最先端を切り開くことを重視したものが多く、異分野間の交流はあまり積極的に進められてきませんでした。この「都市の脆弱性をもたらす激甚災害の軽減化プロジェクト」で目指すものは、災害を減らすことです。地震による災害は、大きな地震によって引き起こされる揺れや地面の変動により、社会に内在する脆弱性が顕在化することで引き起こされます。特に、多くの機能が集中・高度化し、我が国の政治経済活動の中枢を担っている首都圏をはじめ都市部では、災害に対する脆弱性が内在しており、予期せぬ大災害へ拡大するおそれのあることも否めません。災害の軽減という課題には、都市の脆弱性に関連する多岐にわたる問題が相互に関係しながら存在しており複雑な状況です。一つの問題を解決しようとする、新たな別の問題が生じてしまい、一筋縄ではいかないことが多いのです。

そこで、このプロジェクトでは、理学・工学・人文社会科学といった様々な分野の研究者が最新の研究成果を持ち寄って、お互いに連携をとりながら課題に総合的に取り組むことにしました。具体的には、3つのサブプロジェクト相互の協力・連携を図り、研究成果の社会還元への推進に努めるため、サブプロジェクトの研究者等からなる本プロジェクト全体を統括運営する統括委員会を設けて、異分野間の連携を強力に推進しました。

### 2. 建築物設置地震計データの共有

サブプロジェクト①では、首都圏の296地点に地震計（MeSO-net）を設置し、地震発生時の揺れを観測しています。MeSO-netの主な狙いは、首都圏下のどこでどのように地震が起きているのかを明らかにすることです。社会活動による地表付近のノイズをなるべく減らすために、地震計は地下20mに設置されています。

一方、サブプロジェクト②では、建物の崩壊余裕度の検証や迅速な建物被害状況の把握が主な研究目的なので、建物の揺れを理解することが重要になります。これまで多くの研究では、建物に入射する地震波を仮定して建物の構造計算や応答解析に用いていました。しかし、実際に地下を伝播する地震波は、地下構造、地盤や建物の基礎構造など、様々な要因により、仮定した地震波と異なる挙動を示します。ゆえに、ある建物に対して、地盤・建物に入力する地震波と建物の揺れの記録を同時に取得して解析することが必要です。

そこで、地下20mに地震計が設置されているMeSO-net観測点のすぐ近傍にある建築物と地表面に地震計を取り付け、地震波の同時観測を行いました。地下を伝わる地震波は、地下20mの地震計を揺らし、その後、地表に設置された地震計を揺らします。さらに、地表に到達した地震波は、建物を揺らして、1階の地震計、そして最上階を揺らします。このようにして得られた観測データは、地盤－基礎－建物から成る連成系を総合的に捉えた解



析に用いられ、これまでの解析手法の有効性に関する検証に利用しました。また、個別の建物に対して、連成系応答評価法の高度化について新しい知見が得られました。

### 3. 建物被害状況の共有

地震災害の発生直後から、建物管理者には、大地震直後に建物の健全度を適切に把握し、速やかな安全確保と継続使用判断等の意思決定が求められます。サブプロジェクト②では、実大三次元震動破壊実験施設（Eーディフェンス）において実施した、高層鉄骨造建物（高層オフィスビルを模擬）、鉄筋コンクリート造建物（マンション棟の集合住宅）、杭基礎構造、地盤－杭基礎－建物連成系などの振動実験における試験体損壊状況、及びサブプロジェクト②が開発し上記の試験体に配した健全度システムの即時判定結果を、サブプロジェクト③に提供しました。特に建物の損傷に関しては、実際の地震災害と同じように「応急危険度判定」および「被災度区分判定」を試験体に対して適用し、それらの評価とプロジェクトで開発したセンシング技術に基づく建物健全度即時判定の対応関係を共有しました。これらの技術や知見は、地震災害現場における建物の健全度判定精度の向上、広域被害地区における効率的な診断の支援、罹災証明発行の迅速化等に資するものであり、将来広域で利用されることが期待されます。

また、サブプロジェクト①における大規模数値解析に用いる個別建物シミュレーションの高度化に資するべく、サブプロジェクト②で実施した地盤－基礎－建物連成系応答に関するデータや解析結果を提供しました。具体的には、共同運用している MeSO-net 建物観測点のデータに基づいて、実在建物の地震時挙動をシミュレーションで再現できる解析モデルを構築し、その知見をサブプロジェクト①と共有しました。これにより、サブプロジェクト①が進める都市地震被害シミュレーションの高度化を実現しました。

### 4. 先端可視化技術の展開

サブプロジェクト①で開発した、大規模数値解析法による都市地震被害データの先端的な可視化技術を用いて、サブプロジェクト③で得られた火災被害の解析結果を表示しました。火災による被害がどのように広がるのか、この可視化手法を利用して、建物の揺れと火災シミュレーションの延焼動態を重ね合わせて可視化するなど機能を拡張し、災害の軽減に役立つ「被害シナリオの『見える化』」を進めました。

### 5. シェイクアウトに対する科学的な信頼性

サブプロジェクト③では、観測データを社会や住民へ還元する方法の1つとして、「シェイクアウト」（いっせい防災訓練）という場の活用を進めてきました。その際に、サブプロジェクト①で検討が進められてきた新たな地震像を元にしたシェイクアウトを企画したため、「科学的な信頼性の高いシナリオ」の下での防災訓練が可能になりました。

# 総括研究報告

## I-1-1-1 首都圏主部での地震発生過程の解明

平田 直(東京大学地震研究所)

## 1. 研究の目的

首都圏地震観測網(MeSO-net)の観測データによって、首都圏のプレート構造の解明を進め、2011年3月11日以降活発化した地震活動との関係を解明し、将来発生が予想される首都直下地震の地震像(地震規模、地震発生頻度、発生場所)を解明することを目的としました。そのために、首都圏主部、特に、東京湾域、房総半島域などの地震活動に注目し、詳細なプレート構造を解明するための調査研究を行いました。

## 2. MeSO-netによる自然地震観測

MeSO-net(図1)は、文部科学省委託業務「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト(2007年-2011年)」において構築されました(平田・他, 2009<sup>1)</sup>)。この観測網は、296ヶ所の地震観測点からなり、各観測点では約20mのボアホール底に加速度計が設置されています。測定データは孔底でデジタル変換されてから地上部装置へ伝送されています。地表から離れたこと、温度変化の少ない地中で測定したこと、デジタルで伝送したこと等の理由から、都市部における地震観測としては、十分なシグナルを得ることができています。

データは、NTTのフレッツ網を利用して地震研究所まで送信していますが、回線混雑時や回線断の時は自ら判断してメモリにデータを蓄積し、回線が空いてから改めて送信するといった再送機能を有しています。停電時にも稼働できるようにバッテリーを備えているため、24時間365日のほぼすべての連続データが収集でき

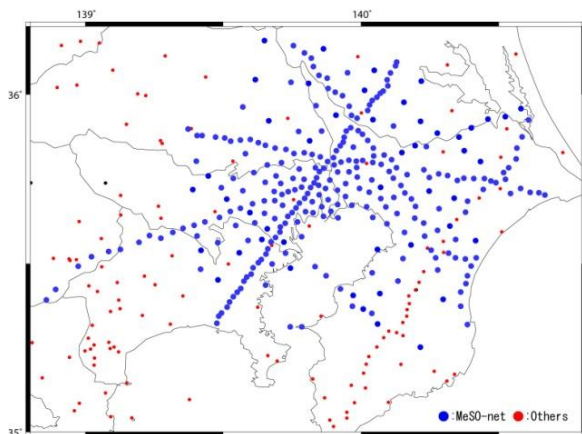


図1 MeSO-net 観測網。296ヶ所の地震計からなります。観測点の間隔は2~5kmで、6本の線状配列とそれを埋めるような面状配列の組み合わせからなります。

ています。東日本大震災時にもすべてのデータが記録されました。

地上部に設置された装置は、地下の地震計の制御部としての機能だけでなく、各装置の動作状況をSNMP(Simple Network Management Protocol)を利用して自動的に監視するシステムを有しています。そのため、少人数での運用が可能となっています。データセンターで収集されたデータは、共同研究を行っている国立研究開発法人防災科学技術研究所(防災科研)および神奈川県温泉地学研究所(温地研)へ送られ、周辺の既存観測点のデータと統合され、高精度処理(震源決定、速度構造トモグラフィ解析、減衰構造トモグラフィ解析)に利用されています。

## 3. データ解析

## 3.1 震源分布

統合されたデータは、一元化処理震源カタログに基づいて切り出され、震源決定が行われました(図2)。首都圏はノイズレベルの高い地域ではありますが、M2以上の規模の地震であれば、十分観測可能でした。

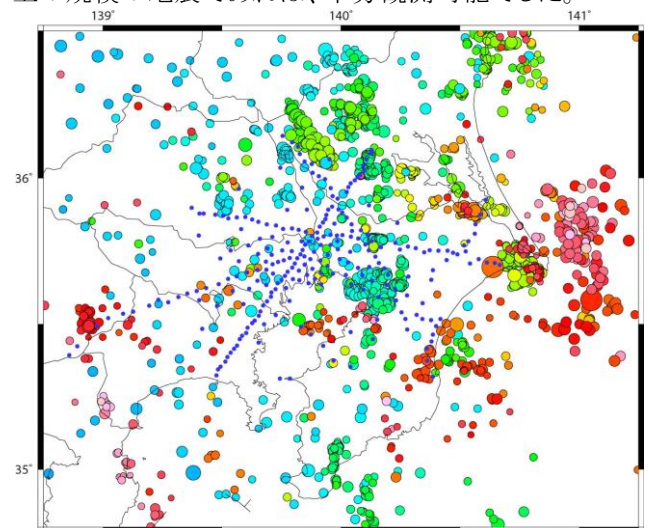


図2 MeSO-net 観測点で決めた震源分布(2012-2017)。M2.5以上。色は深さを表し、暖色ほど浅くなります。

## 3.2 地震波速度構造

解析者による検出データを用いて、二重走時差トモグラフィ法(Zhang and Thurber, 2003<sup>2)</sup>)による走時データインバージョン解析を行い、首都圏の地震波速度構造を推定しました。解析グリッドの水平位置は、東西

方向(X)と南北方向(Y)に平均 10 km 間隔(都心部は 5 km、外周部は 20 km 間隔)、深さ方向(Z)は、深さ 70 km までは 5 km 間隔に、それ以深は 80、90、100、150 km に配置しました。初期速度構造は、防災科研がルーチン処理で用いている構造(鶴川・他, 1984<sup>3)</sup>)です。解析に使用した地震は、2010 年 12 月から 2015 年 3 月までに発生した 1,871 個で、気象庁一元化処理震源カタログのマグニチュード 2.2 以上の地震に相当します。その結果、前プロジェクトで得られた速度構造より空間分解能の良いイメージが得られました(図 3、図 4)。

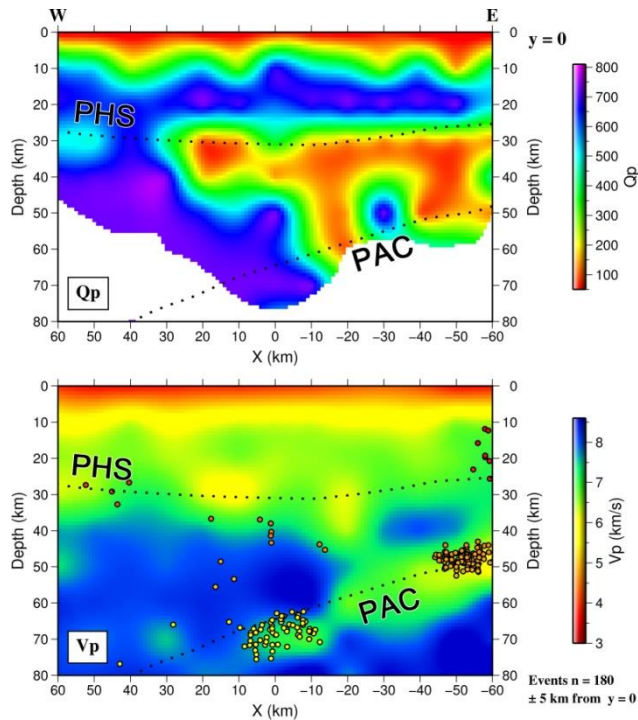


図 3 P 波の速度構造 Vp(下図)と減衰構造 Qp(上図)。北緯 35.7 度での東西断面図。暖色は速度が速く、減衰が大きい領域を表します。丸印は震源、PHS はフィリピン海プレート、PAC は太平洋プレート、をそれぞれ示します。

### 3.3 非弾性定数の 3 次元分布

MeSO-net で観測された波形記録に対して、震源から観測点までの減衰効果を表すパラメータ( $t^*$ )を求め、この $t^*$ を説明する非弾性乗数(Q)の三次元構造を推定しました。Q は地震波が伝播するときに失われるエネルギーの割合の逆数で、Q が大きいと減衰しにくく、Q が小さいと減衰が大きいことを示します。

本研究では Brune (1970)<sup>4)</sup>の震源モデルを用い、観測されたスペクトル $H(f)$ が以下の式(1)(例えば、Boatwright, 1978<sup>5)</sup>)で表わされるとして、 $t^*$ 、 $\Omega_0$ 、 $f_c$ を求めました。

$$H(f) = \frac{\Omega_0 \exp(-\pi f t^*)}{\left(1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2\gamma}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

ここで、 $t^*$ は伝播経路での減衰の影響を表すパラメータ、 $f$ は周波数、 $\Omega_0$ は周波数 $f = 0$ のスペクトル振幅、 $f_c$ はコーナー周波数、 $\gamma$ は震源スペクトルの周波数依存性を決めるパラメータです。本解析では $\gamma = 2$ とし、 $\omega^2$ 震源モデルを用いました。

次に推定された $t^*$ から、減衰パラメータ(Q)の 3 次元的な分布を、P 波と S 波について求めました。この手法は減衰トモグラフィと呼ばれています。これは、減衰トモグラフィと、走時トモグラフィでは、数的にほぼ同じアルゴリズムが用いられるからです(SIMUL2000, Thurber and Eberhart-Phillips, 1999<sup>6)</sup>)。以下に示す解

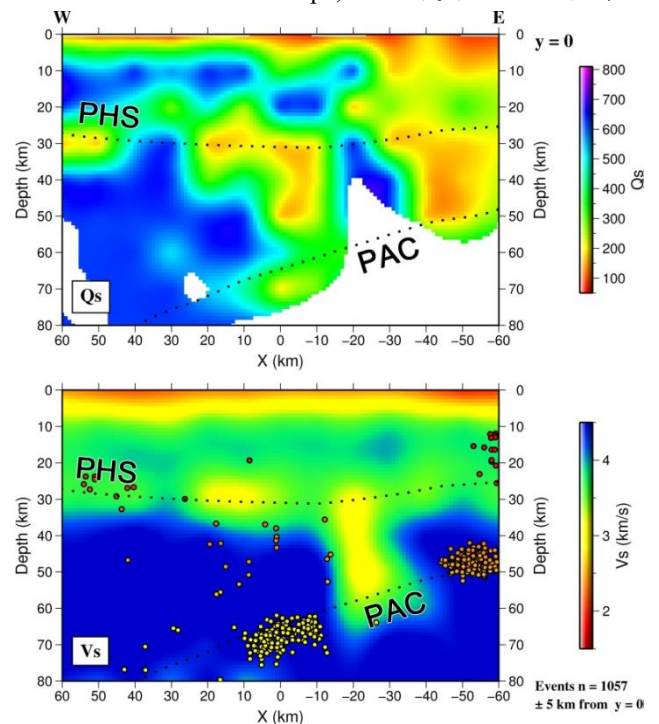


図 4 S 波の速度構造 Vs(下図)と減衰構造 Qs(上図)。北緯 35.7 度での東西断面図。暖色は速度が速く、減衰が大きい領域を表します。丸印は震源、PHS はフィリピン海プレート、PAC は太平洋プレート、をそれぞれ示します。

析では、2008 年 4 月から 2015 年 2 月までに発生した地震の中から、計測震度が 0.5 以上で、高 S/N の記録が多点多で得られているものを 3,174 個選びました。それらの地震に対して、推定された $t^*$ を用いて減衰トモグラフィ解析を行い、P 波と S 波の減衰構造を求めました(図 3、図 4)。得られた減衰構造からは、千葉県西部や東京都東部における深さ 40 km 付近には低 Q 域が存在し、フィリピン海プレート内の太平洋プレートと接合している領域と対応していることがわかります。一般的に古くて冷たいプレートの内部は減衰しにくく、Q 値は高いと考えられていますが、沈み込むフィリピン海プレート内部は周辺に比べて低 Q 域でした。そこは、先行研究で P 波と S 波の地震波速度比( $V_p/V_s$ )が大きいとされていた部分です。この領域が低 Q 値、高  $V_p/V_s$  であることは、太平洋プレートから脱水した水が

フィリピン海プレート内に留まり、プレート内部のカンラン石が蛇紋石へ変質している可能性を示唆しています。

### 3.4 減衰構造を考慮した震度分布

本研究で得られた減衰構造を用いて、首都圏で観測される震度分布の不均質を説明することができました。例えば、フィリピン海プレート内部の地震における震度分布では、震源地直上ではなく、東京都東部での計測震度が大きくなることがあります(図 5)。プレート内の低 Q 域を長く伝播することで、より減衰すると考えれば、定性的にはこの観測事実を説明することが可能です。

歴史地震の場合、震度の大きい所を震央(震源の水平位置)とすることが一般的です。しかし、先のように直上が必ずしも最大震度にならないという観測事実は、被害分布と地表付近の地盤による地震波増幅効果だけを考慮した推定では不十分であることを示しています。地震の揺れは、地盤構造だけでなく、このような地殻やプレートの減衰効果にも影響されるからです。

一方で、観測値だけを利用することで大地震の揺れを推定する試みもなされました。MeSO-net 観測点で、ある地域で発生した地震による計測震度を集め、その震度とマグニチュードの関係式を作ります。この関係式を外挿して、M7 程度の地震の震度を推定してみました。例えば、千葉県北部の深さ 64 km 付近で発生している地震群を用いて計算式を作り、M7.0 の規模に外挿すると図 6 のようになりました。震度が大きくなると予想される地域は、震源地直上ではなく、東京都東部の地域となりました。ただし、観測された地震数は十分ではなく、規模も限られるため、この関係式による見積もりには誤差が大きいと言わざるを得ません。さらなる観測記録の充実が待たれます。

本研究で得られた減衰構造と速度構造を統合して解釈することにより、沈み込むプレートの特性や物性を知ることができます。これらの成果を利用することでより現実的なシミュレーションが可能になり、歴史上の地震から現代の地震まで、様々なタイプの地震による地表での揺れを再現できるようになります。

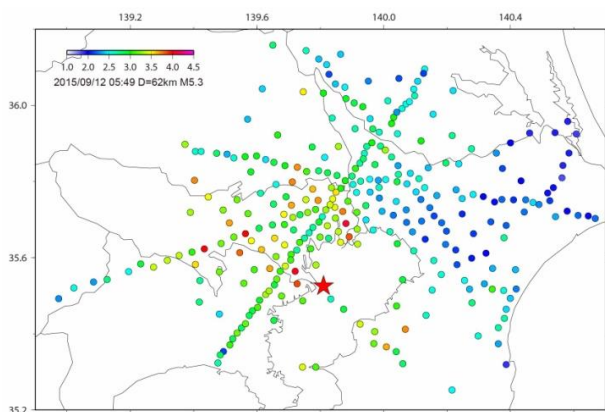


図 5 羽田沖の地震(M5.3)による震度相当値の分布。★は震央。必ずしも震央付近の震度が大きいとは限らず、東京多摩

地区や東京東部で大きな震度が観測されました。

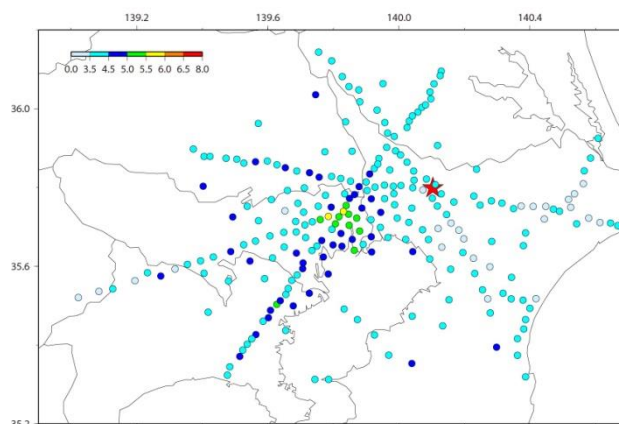


図 6 MeSO-net 観測点の実測値を用いて推定した千葉県北部の地震の震度予想値の分布。★が M7.0 の震源地。震源地直上ではなく、東京都東部で震度が大きくなります。

### 4. おわりに

MeSO-net の観測データを周辺の既存観測データと統合し、震源決定、速度構造解析、減衰構造解析などの解析に用い、首都圏のプレート構造の解明を進めました。プレート構造と 2011 年 3 月 11 日以降活発化した地震活動の関係や、将来発生が予想される首都直下地震の地震像(地震規模、地震発生頻度、発生場所)を明らかにするための基礎的な情報を得ることができました。

### 参考文献

- 1) 平田 直、酒井慎一、佐藤比呂志、佐竹健治、瀨瀨一起、首都直下地震防災・減災特別プロジェクト「首都圏周辺でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等」の概要、東京大学地震研彙報、No. 84、pp. 41-56、2009
- 2) Zhang, H. and Thurber, C.: Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 93, pp. 1875-1889, 2003.
- 3) 鶴川元雄、石田瑞穂、松村正三、笠原敬司: 関東・東海地域地震観測網による震源決定方法について、防災科学技術センター研究速報、Vol. 35, pp. 1-88, 1984.
- 4) Brune, J. N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res. 75, pp. 4997-5009, 1970.
- 5) Boatwright, J.: Detailed spectral analysis of two small New York state earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 68, pp. 1117-1131, 1978.
- 6) Thurber, C., and Eberhart-Phillips, D.: Local earthquake tomography with flexible gridding, Comput. Geosci. 25, pp. 809-818, 1999.

## I-1-1-2 首都圏南西部での地震発生過程の解明

本多 亮(温泉地学研究所)

## 1. 研究の目的

首都圏南西部においては、足柄平野付近を震源とする M7 クラスの地震が繰り返し発生しており、古くから小田原地震と呼ばれてきました。首都圏南西部は、フィリピン海プレートの衝突もしくは沈み込みが、陸域で発生する非常に特異な場所です。小田原地震もプレート運動に関連する地震である可能性は以前から指摘されており、その震源モデルとして、西相模湾断裂モデル<sup>1)</sup>などが提案されてきましたが、その実態は必ずしも明らかではありませんでした。

本プロジェクトにおける温泉地学研究所の役割は、定常的な地震活動に加え、周辺で発生した中小規模の地震や低周波地震などの発震機構解の推定、詳細な震源分布などについての解析を行って、フィリピン海プレートの沈み込み口である相模湾から、本州との衝突帯である丹沢にかけてのプレート構造と地震活動の解明を進めることでした。また、首都圏における地震活動を詳細に観測するために、H19 年度から構築が進められた MeSO-net(首都圏地震観測網)<sup>2)</sup>のうち、首都圏南西部の観測点の一部の維持管理および、観測データを蓄積する役割も担いました。

## 2. 研究の実施内容

## 2.1 MeSO-net の維持管理と観測データの収集

温泉地学研究所は、神奈川県内に設置されている MeSO-net 観測点のうち表1に示した 10 観測点について維持管理を担当し、観測データの送信を行ってきました。MeSO-net は H19 年度より設置・運用が始まっており、機材の老朽化に伴う不具合の発生が懸念されたため、最初の 2 年間で順次観測点の保守点検を実施しました。平成 24 年度は、相模原市立津久井中央小学校、同・青野原小学校、同・青根中学校、横浜市立平戸小学校の観測点について、老朽化したバッテリーを交換し、内部機器(コントローラ、電源制御装置、ルータ、温度センサー、避雷器、AC 端子台等)の動作確認、商用電源確認、電源出力確認、バッテリーの電圧確認を行いました。また、青野原小学校については、観測波形に異常が見られたため、センサーの修理を行い、正常な波形が記録されることを確認しました。残りの 6 観測点は、平成 25 年度に同様の保守点検を実施しました。

平成 26 年度には横浜市立平戸小学校からのデータが 7 月 9 日夕方より受信できなくなる不具合が発生しま

表1. MeSO-net(首都圏地震観測網)のうち、温泉地学研究所が管理する 10 観測点。

所在地	学校名	住所
1	川崎市 有馬小学校	神奈川県川崎市宮前区東有馬 5-12-1
2	横浜市 北方小学校	神奈川県横浜市中区諏訪町 29
3	横浜市 奈良小学校	神奈川県横浜年青葉区奈良町 1541-2
4	座間市 栗原小学校	神奈川県座間市栗原 6-8-1
5	相模原市 根小屋小学校	神奈川県相模原市緑区根小屋 1580
6	相模原市 青根中学校	神奈川県相模原市緑区青根 1926
7	相模原市 青野原小学校	神奈川県相模原市緑区青野原 1250-1
8	相模原市 二本松小学校	神奈川県相模原市緑区二本松 2-9-1
9	相模原市 津久井中央小学校	神奈川県相模原市緑区三ヶ木 39-7
10	横浜市 平戸小学校	神奈川県横浜市戸塚区平戸町 542



写真 1. 平戸小学校でのルータの電源コード交換実施の様子。

したが、NTT への問い合わせにより保安器までの回線は正常であることが判明したため、ルータの電源異常と判断し現地調査を行いました。現地調査の結果、ルータの電源コードおよび SD カードの異常と判明したため、電源コードと SD カードの交換作業を実施して、作業後に正常にデータが送信されていることを確認しました。平成 27 年度 9 月 16 日にも同様の不具合が相模原市立青根中学校の観測点でも発生しましたが、電源コードの交換により復旧しています。

## 2.2 地震発生のメカニズム

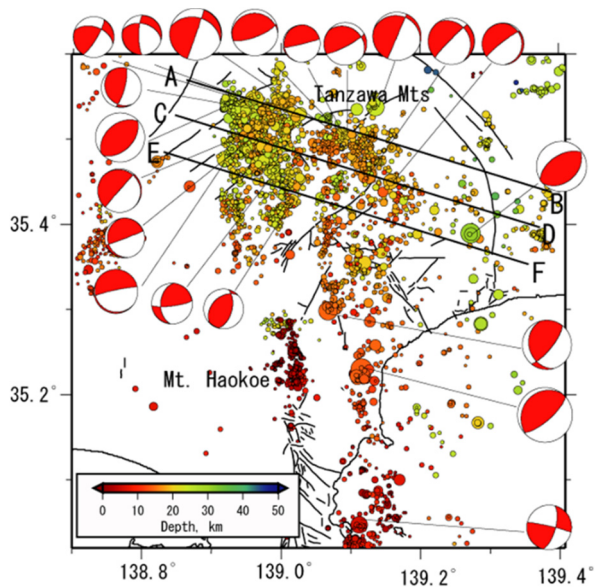


図 1. 首都圏南西部で発生する地震のメカニズム解の分布。

首都圏南西部において、もっとも地震の活動度が高い領域は丹沢山地周辺です。この地域の震源分布を詳しく調べると、東経 139 度付近を境に東西のグループに分かれていることがわかります(図 1)。また地震のメカニズム解も東西のグループで異なり、東側では

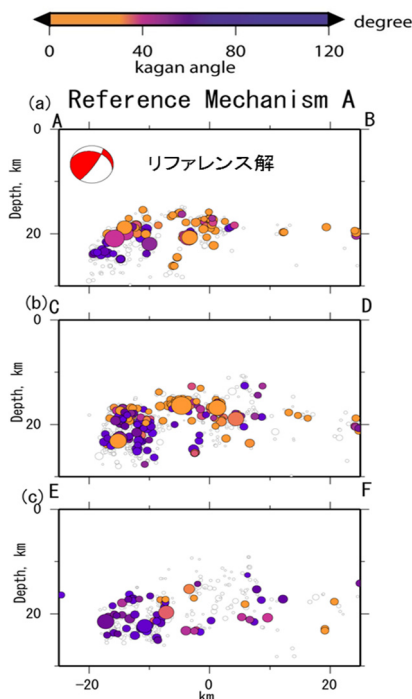


図 2. 図 1 の A-B、C-D、E-F での断面図。オレンジ色の地震ほど、1923 年大正関東地震のメカニズムに近いメカニズム解をもった地震であることを示します。

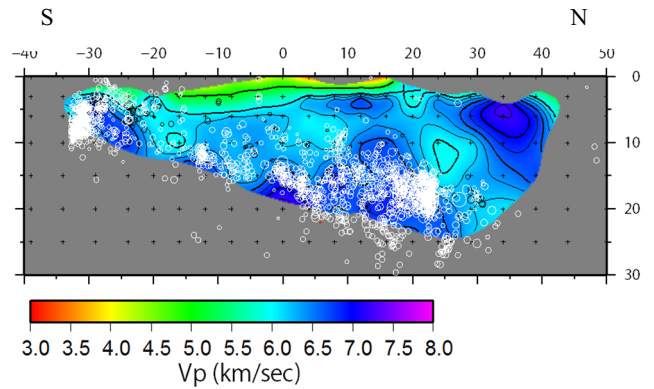


図 3. 丹沢山地から、伊豆半島東部にかけての地震波速度構造。P 波速度が 6.5km/s 程度の付近で多くの地震が発生しています。

1923 年の大正関東地震のメカニズム(北北西-南南東方向に圧縮軸をもつ低角逆断層型)に近い地震が多いのに対して、西側ではさまざまなメカニズム解をもった地震が発生することがわかりました(図 2)。このことから、丹沢地域の東側で発生する地震は、フィリピン海プレートの沈み込みに関係する地震であるのに対して、西側で発生する地震は陸のプレートとの衝突の影響を強く受けていることが考えられます<sup>3)</sup>。温泉地学研究所の地震観測網や MeSO-net の観測データなどを解析して得られた丹沢地域の東側ブロックから伊豆半島にかけての地震波速度構造と震源分布(図 3)をみると、P 波速度が 6.5km/s の付近で多くの地震が発生しています<sup>4)</sup>。また、メカニズム解から応力テンソルインバージョンによって応力場を推定すると、箱根を除いたほぼ全域で逆断層タイプの応力場となっており、この付近が実質的にプレート運動の歪を開放するプレート境界となっていると考えられます。

### 2.3 定常的な地殻変動の検出

図 4 に GNSS の解析から得られた伊豆衝突帯における地殻変動を基にして推定した最大せん断歪および面積歪の分布を示します。使用したデータは 2005 年から 2010 年の 6 年間において GNSS を用いて得られた地殻変動から火山活動やアンテナ交換などの影響を取り除いたもので、定常的な地殻変動を推定したものです。これらの図からは北伊豆断層付近を西端とする幅 20km ほどの shear zone(せん断帯)が形成されていることがわかります。また、首都圏南西部(神奈川県西部地域)は基本的には圧縮場で、地震のメカニズム解から推定した応力場と調和的です。一方で、伊豆半島の川奈崎から真鶴半島付近にかけては、北東-南西方向の引張場となっていることがわかります。

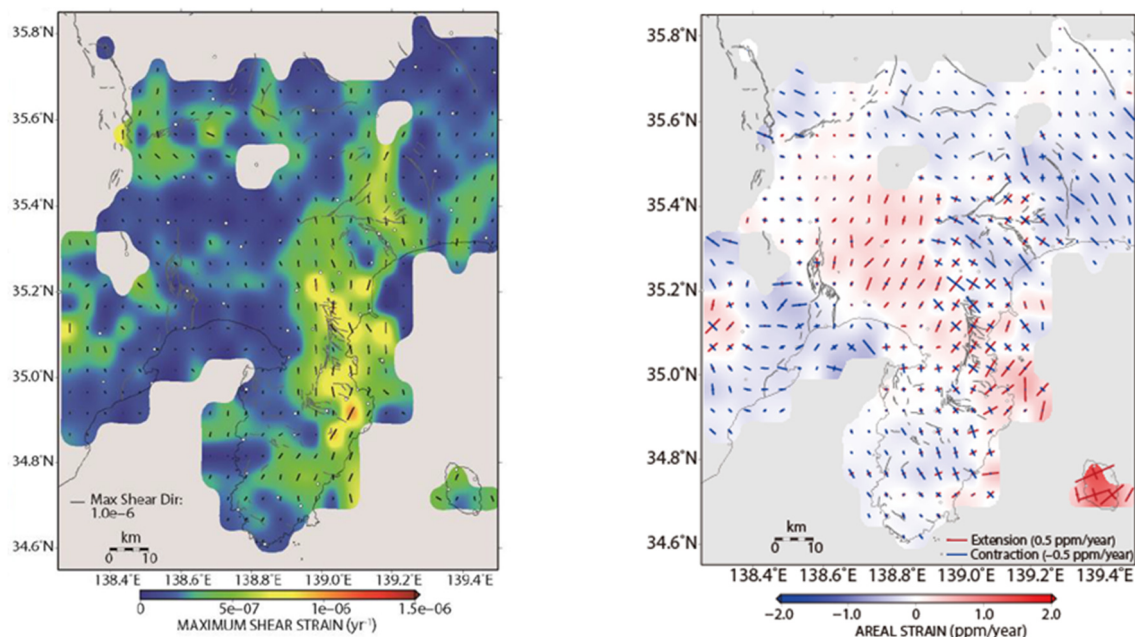


図 4. GNSS データから推定した、定常的な地殻変動による歪場。(左)最大せん断歪と、(右)面積歪。

このような歪場を生み出す原因は、地震のメカニズム解からも推定される、フィリピン海プレートの東西での挙動の違いであろうと考えられます<sup>5)</sup>。フィリピン海プレートを東西二つのブロックに分ける考え方は以前からありましたが、GNSS の解析結果からはその境界は、従来から考えられていた小田原から真鶴付近などよりも西側の、北伊豆断層帯付近に存在するほうがより尤もらしいと考えられます。

## 2.4 まとめ

これまで解析を行ってきた地殻変動、震源メカニズムおよび地震活動などを総括し、首都圏南西部における地震の発生メカニズムについて考察しました。震源メカニズム解を用いた応力インバージョンの結果からは、首都圏南西部は全体的には北西南東方向の圧縮場ですが、箱根火山や伊豆半島東部の引張場 (GNSS 解析) の影響によると考えられる応力比やメカニズム解の分布に乱れがあることが示されました。北伊豆断層よりも東側で発生する地震は、基本的にはプレートの沈み込みに起因するプレート境界型の地震であり、プレート境界は伊豆半島東部から丹沢にかけて連続的な構造を有していると考えられます。西相模湾断裂に相当するような構造は地震波速度構造インバージョンの結果からは発見できませんでしたが、地殻変動の解析結果からはより西側の北伊豆断層付近から北に延びる領域に伊豆半島を東西に分割する境界が存在することが強く示唆されました。

## 参考文献

- 1) Ishibashi K., Seismotectonic modeling of the repeating M 7-class disastrous Odawaraearthquake in the Izu collision zone, central Japan, *Earth Planets Space*, 56, 843–858, 2004.
- 2) 平田 直、酒井慎一、佐藤比呂志、佐竹健治、額 纈一起、首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」サブプロジェクト①「首都圏周辺でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等」の概要、東京大学地震研彙報、No.84、pp.41-56、2009
- 3) Yukutake Y., T. Takeda, R. Honda and A. Yoshida, Seismotectonics in the Tanzawa Mountains area in the Izu-Honshu collision zone of central Japan, as revealed by precisely determined hypocenters and focal mechanisms, *Earth Planets Space*, 64, 269-277, 2012.
- 4) Yukutake Y., R. Honda, M. Harada, R. Arai and M. Matsubara, A magma-hydrothermal system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structures, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2014JB011856, 2015.
- 5) Doke R., M. Harada, K. Miyaoka and M. Satomura, Shear deformation in the northeastern margin of the Izu collision zone, central Japan, inferred from GPS observations, *Tectonophysics*, under review.



## I-1-1-3 首都圏を含む関東広域の地震発生過程の解明

木村尚紀(防災科学技術研究所)

## 1. 研究の目的

本プロジェクトは、首都圏地震観測網(MeSO-net)の観測データによって、首都圏のプレート構造の解明を進め、プレートの詳細な構造と2011年3月11日以降活発化した地震活動の関係を解明し、将来発生が予想される首都直下地震の地震像(地震規模、地震発生頻度、発生場所)を解明することを目的としています。関東地方のプレート構造や地震活動は複雑なため、対象領域にあわせて最適な解析手法を検討することや、様々な時間・空間スケールで調査した結果を比較・検討することで、全体像の理解を深め、信頼性を向上できると期待されます。そこで、参加機関の特性を活かして、研究課題を分担しました。防災科学技術研究所(防災科研)では、MeSO-net 開始以前から、全国で高感度地震観測網(Hi-net)をはじめとした基盤観測網を維持・管理していることから、MeSO-net データと防災科研 Hi-net 等の既存データを統合してデータベースを構築し、関東広域のプレート構造と地震活動の関係を解明し、得られた成果を代表機関である東京大学地震研究所へ提供してプロジェクトの成果取りまとめに協力することを目的としました。

## 2. 研究の実施内容

## 2.1 地震波形統合データベースの構築・保管

東京大学地震研究所の「データ収集・処理・公開センター」で収集された MeSO-net の自然地震観測データを受信し、首都圏内における防災科研 Hi-net をはじめとした既存の地震観測データとの統合処理を行い、地震波形統合データベースを構築・保管しました。

## 2.2 統合データベースを用いた長期・広域の地震活動の解明

## 2.2.1 3次元的な減衰構造

地震波の減衰構造は、周波数に応じて異なることが知られています。t\*を用いた研究では、周波数に依らない減衰構造を推定することになりますが、本研究では、周波数帯域ごとの最大振幅を用いることで、周波数に応じた減衰構造を推定しました。

解析には、防災科研 Hi-net と MeSO-net で得られた地震波形データの速度波形を用いました。MeSO-net の加速度波形は、速度波形に変換しました。代表的な周波数として、2 Hz、5 Hz、10 Hz の波に対する減衰構造を推定しました。そのため、それぞれ 1-3、3-7、

7-15 Hz のバンドパスフィルターを波形に作用させ、その上で P 波の初動から 2 秒以内の最大振幅値をデータとしました。地震の規模 (M) によって破壊過程が異なるため、M についても 0.5 毎に区切りました。

防災科研 Hi-net については、2000 年 10 月から 2012 年 12 月、MeSO-net については、2008~2009 年のデータを主として用いました。M2.5~M2.9 の地震の震源分布を図 1 に示します。地震の総数は 9777 個です。グリッド間隔は水平方向に 0.2 度、深さ方向に 5 km ごとに設定しました。手法は、地震波速度トモグラフィ法の手法<sup>1)</sup>にスムージングを導入した手法<sup>2-4)</sup>について、パラメーターを地震波のスローネスから非弾性常数の逆数  $Q^{-1}$  とし、データを到達時刻(走時)から最大振幅値にすることにより<sup>5)</sup>、周波数に応じた減衰構造を推定しました。スムージングを導入しているため、分解能はグリッド間隔の 2 倍となり、水平方向に 0.4 度(約 40 km)、深さ方向に 10 km となります。

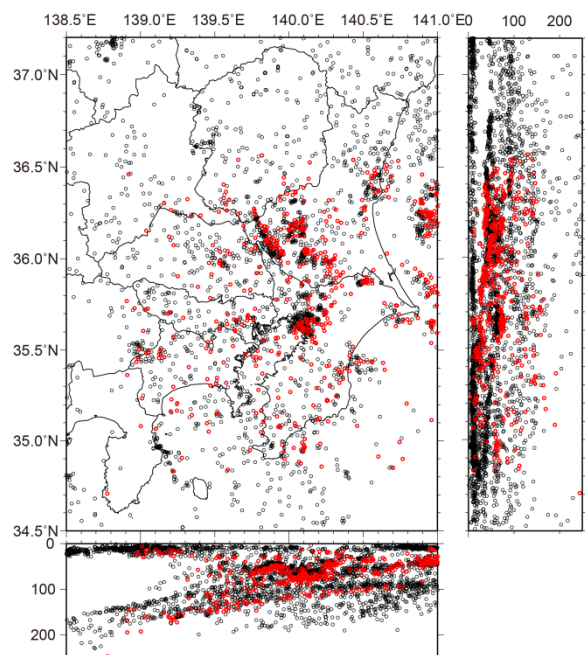


図 1 減衰構造の推定に用いた M2.5~2.9 の震源分布。黒丸は防災科研 Hi-net 等の定常観測網による震源、赤丸は MeSO-net のデータも用いた震源を示します。

周波数 2 Hz、5 Hz、10 Hz の深さ 20~60 km の減衰構造を図 2 に示します。

関東地域では、深さ 30 km に北緯 35.5~36 度にお

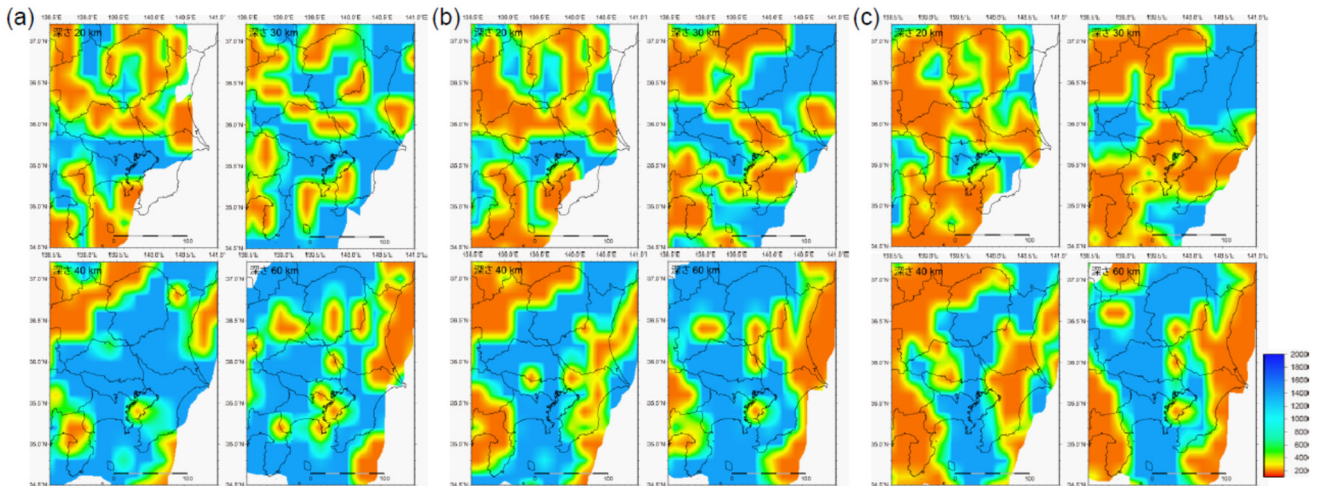


図2 周波数毎の減衰構造の水平分布図。(a) 2 Hz、(b) 5 Hz、および (c) 10 Hz について示します。それぞれ、深さ 20 km (左上)、30 km (右上)、40 km (左下)、および 60 km (右下) の減衰構造です。

いて、東西に延びる顕著な低速度領域が存在することが知られています。2 Hz では、この領域での減衰はそれほど大きくありませんが、周波数が高くなるにつれて、この領域の減衰が大きくなるのが分かります。

深さ 40 km においては、周波数 5 Hz や 10 Hz では、銚子付近で減衰が小さくなっています。この付近は、太平洋プレートが沈み込んでおり、減衰しにくいことを示していると考えられます。

深さ 60 km では、房総半島西部は沈み込む太平洋プレートを反映して減衰の度合いが小さいが、東部では減衰が大きくなっています。沈み込む太平洋プレート内の構造を示していると考えられます。

### 2.2.2 自然地震の後続位相解析

震源から放射された地震波は、地下構造の影響を受けながら観測点まで到達します。伝播経路に速度不連続が存在する場合、反射波や変換波が生成され、後続位相として観測されます。このため、自然地震の後続位相は地下の速度構造について有用な情報を与えてくれます。そこで、本研究では、茨城県南西部から千葉県北西部を対象として後続位相を解析しました。

直達 P 波と S 波の間に、上下動成分に卓越する位相を、複数の MeSO-net 観測点で連続して見出すことができました。関東地方はプレート構造が複雑なため、変換面の候補がいくつか考えられます。そこで、震源の深さによる依存性を調べたところ、震源が浅くなるとともに直達 P 波との走時差が減少することが分かりました(図 3)。この特徴は、震源より上方で S 波から P 波に変換した波(SP 変換波)であることを示しています。

次に、観測された走時を、理論値と比較しました。比較の際は、表層の速度構造の影響を相殺するため、P 波と SP 変換波の走時差を用いました。理論走時の計算は、MeSO-net データの解析結果<sup>6)</sup>に、「地震ハザードステーション」(J-SHIS)<sup>7)</sup>を表層に導入した速度構

造モデルを用い、差分法走時計算プログラム (FAST)<sup>8)</sup>にて行いました。変換面として MeSO-net によるフィリピン海プレート上面<sup>9)</sup>を設定したところ、観測値をほぼ説明でき、フィリピン海プレート上面で変換された波であることが分かりました(図 4)。

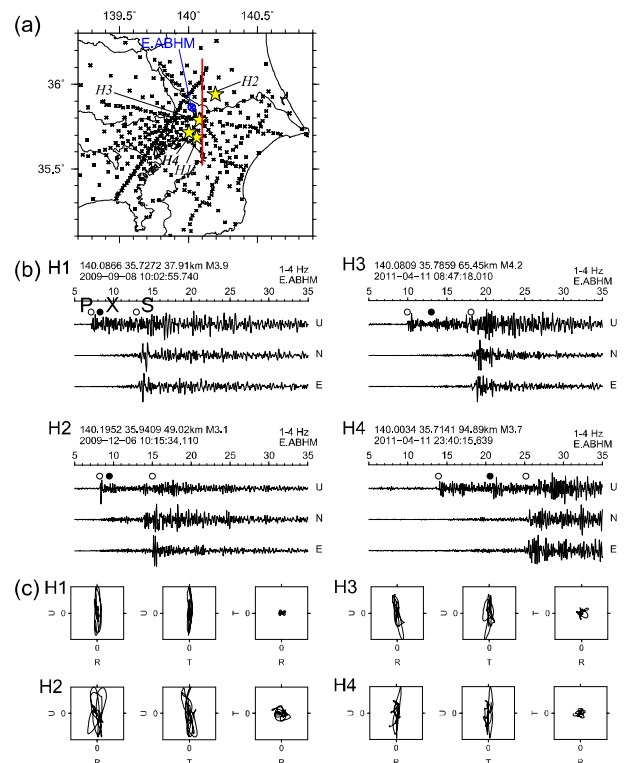


図3 (a) MeSO-net および防災科 Hi-net の観測点をX印で、地震の震央を星印で示します。(b) 千葉県 我孫子高校観測点(E.ABHM)における、地震 H1-H4 の地震波形を示します。1-4Hz のバンドパスフィルターを作用させた後、成分毎に最大振幅で正規化しています。位相 X が SP 変換波に相当します。(c) SP 変換波の到達から 1 秒間の粒子軌跡を示します。

変換点を地震波速度構造と比較すると、フィリピン海プレートの地殻とマントルウェッジが接する領域に分布することが分かりました(図 5)。速度コントラストが大きいため、効率的に地震波が変換されたと考えられます。また、深さ 40 km より深い領域ではプレート境界の地震が多く発生しますが、変換点はこれより浅い、地震のほとんどない領域に位置します。上記の領域では、すでに、空間分解能が 5-10 km 程度の地震波速度構造解析からプレート境界の位置が推定されていますが<sup>9)</sup>、プレート境界からの後続位相を MeSO-net により観測できること、また後続位相の走時解析に基づきより高精度にプレート境界を特定できることが分かりました。

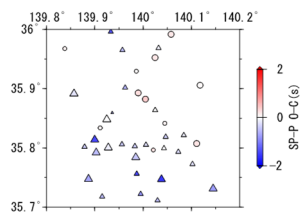


図 4 SP 変換波と直達 P 波の走時差の、観測値と理論値の差(O-C)を、対応する観測点位置に示します(丸:正、三角:負)。シンボルサイズは SP 変換波の SN 比を表し、サイズが大きいほど SN 比が大きいことを表します。

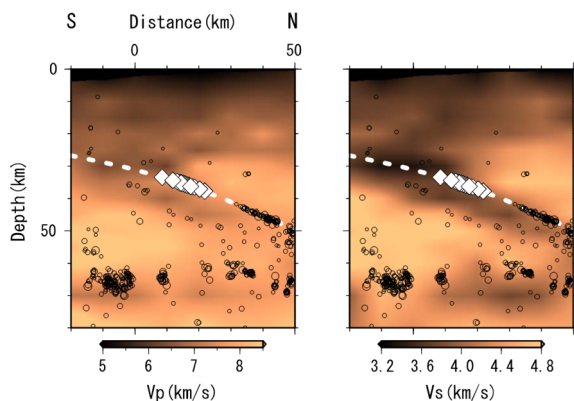


図 5 速度構造<sup>9)</sup>と変換点の関係を示します。断面の位置は、図 3(a)の実線です。白線はフィリピン海プレート上面境界<sup>9)</sup>を、菱形は図 4 に示した観測点に到達した変換波の変換点を示し、震源<sup>9)</sup>を黒丸で重ねて示します。

### 3 まとめ

MeSO-net と防災科研 Hi-net をはじめとした既存の地震観測データを統合し、地震波形統合データベースを構築・保管しました。

関東地方の防災科研 Hi-net および MeSO-net の最大振幅データを使用し、周波数帯域ごとの減衰構造を推定し、沈み込む太平洋プレートの影響と思われる、減衰構造の地域性を明らかにしました。また、茨城県南西部から千葉県北西部において自然地震の後続位相を調査し、SP 変換波を見出し、震源深さ依存性と理論走時解析により、MeSO-net によりこの領域でのプレート境界からの後続位相を観測できること、またプレ-

ト境界の位置を高精度に特定できることを示しました。得られた成果は、東京大学地震研究所へ提供し、プロジェクトの成果取りまとめに協力しました。

### 参考文献

- 1) Zhao, D., Horiuchi, S., Hasegawa, A., Seismic velocity structure of the crust beneath the Japan islands. *Tectonophysics* 212, 289-301, 1992.
- 2) Matsubara, M., Hirata, N., Sato, H., and Sakai, S., Lower crustal fluid distribution in the northeastern Japan arc revealed by high resolution 3D seismic tomography, *Tectonophysics*, 388, 33-45, 2004.
- 3) Matsubara, M., Hayashi, H., Obara, K., and Kasahara, K., Low-velocity oceanic crust at the top of the Philippine Sea and Pacific plates beneath the Kanto region, central Japan, imaged by seismic tomography, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 110, B12304- doi:10.1029/2005JB003673, 2005.
- 4) Matsubara, M., Obara, K., and Kasahara, K., Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, *Tectonophysics*, 454, 86-103, 2008.
- 5) Matsubara, M., Low-Q structure related to partially saturated pores within the reservoir beneath The Geysers area in the northern California, *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, S41A-2172, 2011.
- 6) Nakagawa, S., Kato A., Sakai S., Nanjo K., Panayotopoulos Y., Kurashimo E., Obara K., Kasahara K, Aketagawa T., Kimura H. and Hirata N., Heterogeneous Structure and Seismicity beneath the Tokyo Metropolitan Area, Abstract S41A-2004 presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 13-17 Dec, 2010.
- 7) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 森川信之, 先名重樹, 東宏樹, 大井昌弘, はお憲生, 長谷川信介, 前田宜浩, 岩城麻子, 若松加寿江, 井元政二郎, 奥村俊彦, 松山尚典, 成田章, 東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討, 防災科学技術研究所研究資料 第 379 号, 2012.
- 8) Zelt, C. A. and Barton, P. J., 3D seismic refraction tomography: A comparison of two methods applied to data from the Faeroe Basin, *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, pp. 7187-7210, 1998.
- 9) 平田直, 地震計を用いた自然地震観測によるプレート構造調査, 文部科学省委託研究 首都直下地震防災・減災特別プロジェクト総括成果報告書, pp.7-14, 2012.

## I-1-2-1 プレート構造・変形過程と地震発生過程の解明

佐藤比呂志・石山達也・橋間昭徳(東京大学地震研究所)

## 1. 研究の目的

2011年東北地方太平洋沖地震(東北沖地震)は極めて巨大な地震で、地震に伴う地殻変動は日本列島のみならず朝鮮半島や沿海州までおよびました。こうした巨大地震後の地殻変動は発生後、数十年にわたって継続し、広範な地域の地震活動に影響を及ぼします。東北沖地震の震源域に隣接する関東地方においても、地殻変動や地下の応力状態が大きな影響を受けることは想像に難くありません。日本列島は日本海の拡大期(2500万年前~1500万年前)に大陸から分離して形成されましたが、関東地方は本州の中でも移動距離が大きく、また伊豆-小笠原弧と南関東で衝突し、現在の関東平野下にも多くの断層が形成されました。こうした断層の一部は、平野部に伏在するものも含めて、活断層として分布しています。これらの活断層は東北沖地震後の応力変化で、動き易く(地震が起きやすくなる)のでしょうか。この課題に答えることを我々の研究の目的として、二つの観点から研究を進めました。一つは、東北沖地震後の応力変化を求めるための、広域的な3次元粘弾性有限要素モデルを構築すること、もう一つは首都圏の震源断層のモデル化を行うことです。

巨大地震後の長期間の応力変化は、弾性的に挙動する地殻のみならず、非弾性的な性質をもつマンツルの影響も受けます。1995年の兵庫県南部地震以降、日本列島には多数のGPS観測点が設置され、巨大地震に伴う地殻変動が世界で初めて稠密な観測網で観測されました。本研究ではこうした地殻変動データを用いて3次元の粘弾性数値計算を行い、広域的な粘性構造を求めました。この粘弾性モデルに東北沖地震に伴う変位を与えることで、その後の周辺域の応力変化を求めることが可能になります。こうした応力場において、震源断層それぞれの位置や形状を考慮して断層面上の応力変化(クーロン応力変化)を求めることにより、巨大地震が首都圏下の断層に及ぼす影響を評価することが可能になります。震源断層については、これまで取得した反射法地震探査を再検討するとともに、新たに反射法地震探査を実施し、変動地形学的な検討を加え震源断層モデルを構築しました。この研究によって、首都圏の活断層や震源断層について新たな知見が得られました。

## 2. 関東地方の伏在活断層

首都圏を含む関東平野周辺域には、深谷断層・綾瀬

川断層といった第四紀後期に活動を繰り返してきた活断層が分布しています<sup>1)</sup>。また、このほかにも、上総層群・下総層群および中期更新世以降の海成・河成段丘面の分布・編年に基づいた活構造に関する数多くの研究がされています<sup>2)</sup>。一方、伏在断層の形状や分布などについてはまだ不明な点が多いのが実情です。本研究では、関東平野で行われてきた大深度地殻構造探査の結果<sup>3,4)</sup>に加えて、本プロジェクトを含む近年の成果を加味して、改めて関東平野周辺域の震源断層モデルを再検討しました(図1)。

大都市大震災軽減化特別プロジェクト・北関東測線の深部構造探査の結果<sup>4)</sup>によると、北関東測線が延びる青梅市から春日部市にかけての区間では、地下に半地溝構造がいくつか存在します。これを覆う上総層群と下総層群は緩い背斜を形成していることから、第四紀中期以降に逆断層として繰り返し活動したと考えられます。データの量的不足を補うために2015年に富士見市で実施した反射法地震探査によって、北関東測線と構造的に類似した、反転する半地溝構造が見出されました。これらのデータから、川越市から富士見市にかけてほぼ南北に伸びる、西傾斜の伏在逆断層が存在すると推定されます。反射断面とボーリングコアとの対比によれば、この伏在逆断層の上盤側で上総・下総層群が累積的に変形していると考えられます。また、この伏在断層に沿っては、武蔵野面に東側低下の撓曲崖地形が断続的に分布しており、これらは伏在断層の第四紀後期の変位を示す可能性があります。

同様に、北関東測線中央部では、上総層群相当層が参加する西向きの撓曲構造が認められ、この地下には西傾斜の伏在逆断層が存在すると推定されます。これは再解析した東京都(2003)測線中央部付近に存在する半地溝構造に連続する可能性があります。また、半地溝構造を限り、第四紀に反転して再活動した西傾斜の逆断層は、狭山丘陵の形成に寄与した可能性があります。この断層に沿っては、金子台や武蔵野面に東側低下の撓曲崖地形が断続的に分布しており、これらは伏在断層の第四紀後期の変位を示す可能性があります。

以上の結果と、伏在断層によって形成されたと考えられる変動地形の分布に基づき、関東地域の活断層・活構造についての震源断層モデルを矩形で図示しました(図1)。F11やF12などは、限られた数の反射断面と、断片的な変位の可能性がある地形に基づいて推定し

ており、形状や分布については不確実性が残ります。また、地形面の変位量からは、その多くはいわゆるC級活断層と推定されます。これらの構造は首都圏の近傍に位置し、地震防災上の重要性は極めて高いと言えます。伏在断層の性格を明らかにするためには、今後さらに多くの地下構造断面を取得するとともに、変位地形についてもより詳細な検討を進めることが重要です。

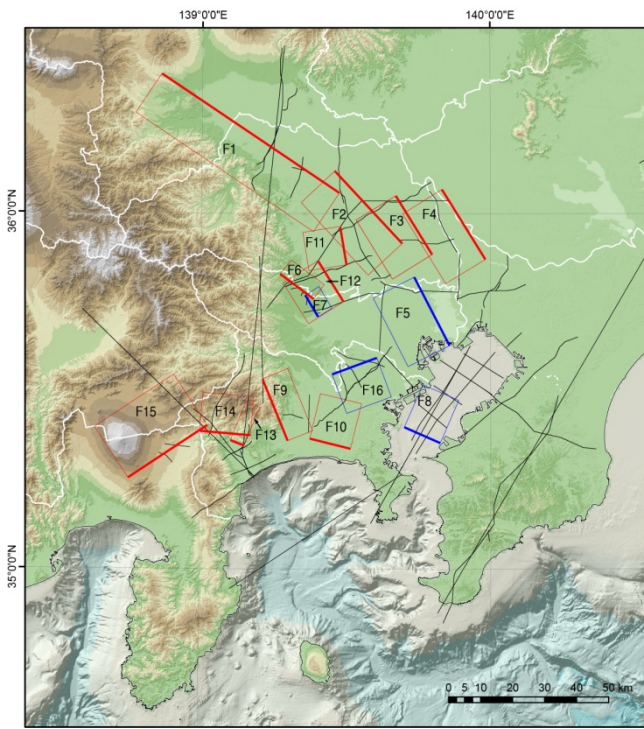


図 1 首都圏に分布する震源断層の矩形モデル。黒線は検討した反射測線の位置を示す。太線は断面面上端位置を示す。赤い矩形は下総層群の堆積期ないしは第四紀後期に活動した可能性のある断層、青色は上総層群を变形させる断層を示す。

### 3. 東北沖地震によるクーロン応力変化

一般に、巨大地震後の地殻変動はアセノスフェアにおける粘弾性流動と本震の延長部で起こる余効すべりによって引き起こされます。したがって、GPS 観測網によってとらえられた東北沖地震後の地殻変動データを解析することによって地下の粘性構造および余効すべりを解明することが可能となります。得られた粘性構造と余効すべり分布を用いれば、粘弾性モデルにより日本列島域の応力変化の予測計算を行うことが可能です。このような目的のために、本研究では日本列島域の現実的なプレート構造(ユーラシア、太平洋、フィリピン海プレート)<sup>5,6,7</sup>とアセノスフェアの粘弾性流動を考慮した三次元有限要素モデル<sup>8,9</sup>を構築しました(図2)。

この有限要素モデルを用いて、東北沖地震による地

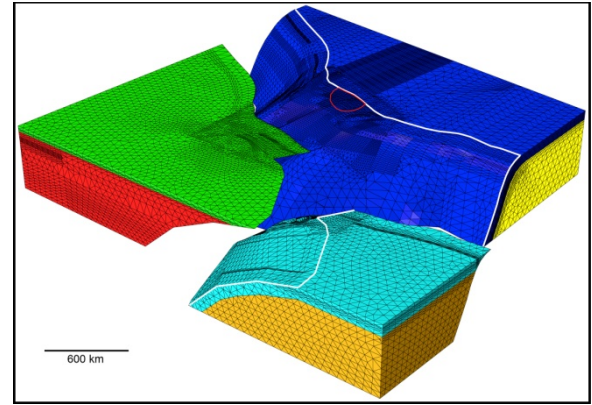


図 2 計算に用いた有限要素モデル。南西上方から眺めた図。ユーラシア(緑-赤)、太平洋(青-黄)、フィリピン海(水色-橙)の各プレートに分けて表示。日本列島はユーラシアプレート上に位置する。

殻変動を説明できる粘性構造と余効すべりを求めました。まず粘性構造は、既存研究による知見<sup>10</sup>をもとに、逐次的に複雑な構造を取り入れて観測変位との残差を最小にするモデルを探索するという方法<sup>9</sup>によって求めました。得られた粘性構造を図3aに示します。地殻変動に大きな影響を与える低粘性の領域は、大陸側の深さ150-300 kmの領域と、太平洋プレートの屈曲している部分の下半部に存在することがわかりました。これらの領域の粘弾性流動により、日本列島の陸域の東向き、海底観測点の西向き、及び太平洋沿岸部の隆起という特徴的な地震後の地殻変動を説明することができます。粘弾性緩和による変位と観測変位の残差からインバージョンを行うことにより余効すべりを得ました(図3b)。これらは本震のすべり分布の南北に別れて分布し、過去の地震発生域に挟まれるようにして存在します。

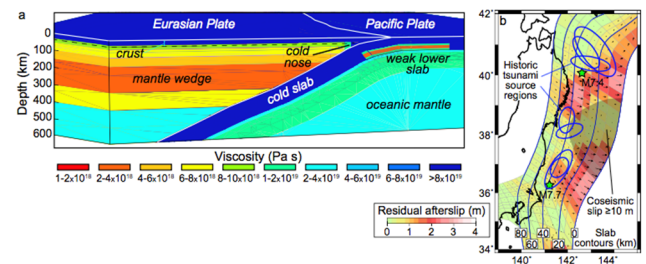


図 3 a) 地下の粘性構造 b) 余効すべり分布。黒い影の領域は東北沖地震の本震すべり分布。青い楕円は過去の地震による津波波源域。

以上で求められた粘性構造と余効すべり分布を用いて、図1で得られた関東地方の伏在断層における断層活動の指標であるクーロン応力変化のモデル計算を行いました。図4にその結果を示します。図1に示したように、関東地方の伏在断層の多くは北東または南西傾斜の低角逆断層です。これらの断層におけるクーロン

応力は負となり断層運動は抑制されるという結果になりました。しかし、その特徴から外れる断層(横ずれ断層:F6、高角傾斜:F6、F7、F9、北西または南東傾斜:F15、F16)では例外的に断層運動を促進するように応力が働くことが明らかになりました。この計算結果は、断層運動の予測のために断層の形状とすべり方向を正確に求めることの必要性を示しています。

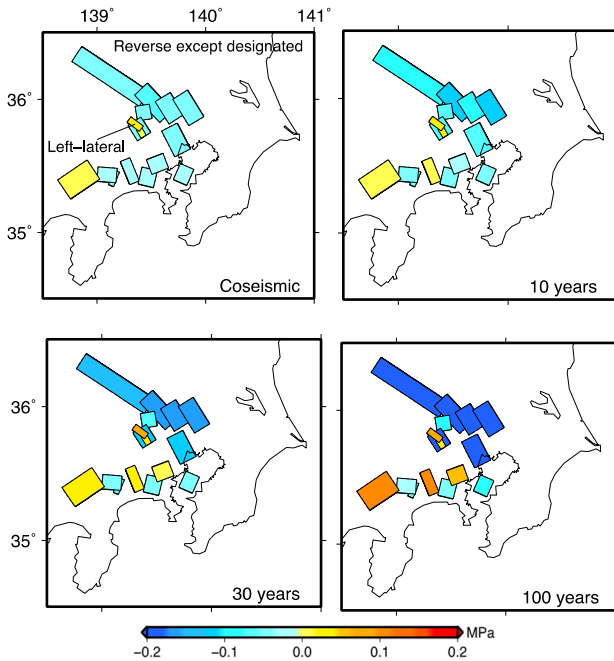


図4 東北沖地震の発生直後、10年後、30年後、100年後の関東地方の伏在断層上のクーロン応力。断層のすべり方向は左横ずれの箱根ヶ崎断層(旧立川断層北部)以外は全て逆断層すべりである。カラースケールの黄色ー赤色は断層運動を促進する応力、水色ー青色は断層運動を抑制する応力を示す。

#### 参考文献

- 1) 活断層研究会, 新編日本の活断層—分布図と資料—, 東京大学出版会, 437pp, 1991.
- 2) 貝塚爽平, 関東の第四紀地殻変動, 地学雑誌, 96, 51-68, 1987.
- 3) Ishiyama, T. et al., Active blind thrusts beneath the Tokyo metropolitan area: Seismic hazards and inversion tectonics, Geophys. Res. Lett., 40, 2608-2612, 2013.

- 4) 佐藤比呂志ほか、首都圏における地下構造探査：堆積平野からプレートまで、日本地質学会関東支部—日本第四紀学会ジョイントシンポジウム講演予稿集, 12-15, 2010.
- 5) Nakajima, J., Hasegawa, A.: Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: Reactivation of subducted fracture zone?, Geophysical Research Letters, Vol.33, pp.L16309, doi:10.1029/2006GL026773, 2006.
- 6) Nakajima, J., Hirose, F., Hasegawa, A.: Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, Journal of Geophysical Research, Vol.114, pp.B08309, doi:10.1029/2008JB006101, 2009.
- 7) Kita, S., Okada, T., Hasegawa, A., Nakajima, J., Matsuzawa, T.: Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, Earth and Planetary Science Letters, Vol.290, pp.415-426, 2010.
- 8) Hashima, A., Becker, T.W., Freed, A.M., Sato, H., Okaya, D.A.: Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku earthquake: influence of 3-D elastic structure around Japan, Earth, Planets and Space, Vol.68, pp.DOI: 10.1186/s40623-016-0535-9, 2016.
- 9) Freed, A.M., Hashima, A., Becker, T.W., Okaya, D.A., Sato, H., Hatanaka, Y.: Resolving depth-dependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-oki, Japan Earthquake, Earth and Planetary Science Letters, Vol.459, pp.279-290, 2017.
- 10) Hirth, G., and D. L. Kohlstedt, Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: A view from the experimentalists, in Inside the Subduction Factory, Geophys. Monogr. Ser., Vol. 138, edited by J. Eiler, pp. 83–105, AGU, Washington, D. C., 2003

## I-1-2-2 関東下の構成岩石モデルの構築

石川正弘(横浜国立大学)

## 1. 研究の目的

首都圏地震観測網による地震波トモグラフィーは、首都圏の陸側プレート、首都圏下に沈み込むフィリピン海プレートと太平洋プレートの地震波速度の分布を捉えています。地震波速度の特徴は地下を構成する岩石の種類や地下深部の流体の分布に対応するものと期待されます。そこで地震波速度を用いて、関東下、特に首都圏下の関東地震震源断層近傍の構成岩石と流体分布の推定を目的としました。

## 2. 構成岩石モデル

## 2.1 岩石の弾性波速度測定

横浜国立大学設置のピストンシリンダー高圧発生装置を用いて、関東山地の四万十帯および丹沢山地の丹沢層群の構成岩石を対象としてP波速度( $V_p$ )、S波速度( $V_s$ )、 $V_p/V_s$ を測定しました。図1は実験結果です。丹沢層群の緑色岩( $V_p/V_s=1.75$ )と比べると四万十帯の砂岩や砂質泥岩の $V_p/V_s$ は1.60~1.65程度と著しく低い特徴を示すことがわかります。低い $V_p/V_s$ は四万十帯における高い石英含有率に起因しています。つまり、四万十帯は低 $V_p/V_s$ 帯として地震波トモグラフィーで捉えることが可能であることを弾性波速度測定実験は示しています。

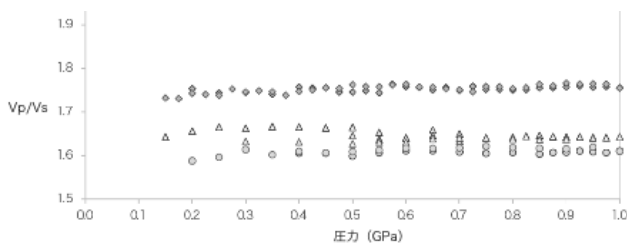


図1  $V_p/V_s$ 測定結果。最大1.0 GPaの高圧条件下・室温で $V_p/V_s$ を測定。シンボルは○が四万十帯の砂岩、△が四万十帯の砂質泥岩、◇が丹沢層群の緑色岩。

## 2.2 関東の陸側プレートの地殻構成

首都圏においては、フィリピン海プレートが陸側プレートに沈み込む一方で、神奈川県西部では伊豆・小笠原弧が本州弧に衝突し、複雑な地殻構造を形成しています(Sato et al, 2005, Arai et al.,2009)。丹沢山地の北側には関東山地が位置しており、三波川帯・秩父帯・四万十帯の各付加体からなります。関東平野下の

基盤はこれらの地質体から構成されると予想されますが、基盤岩石が露出していないために、関東平野部の陸側プレートの地殻構成岩石を直接観察することはできません。そこで、防災科学技術研究所の日本列島下の三次元地震波速度構造(Matsubara and Obara, 2008)を用いて、西南日本から関東における地下の地質体を検討しました。図2は西南日本から関東の地下10 kmにおける $V_p/V_s$ トモグラフィーです。四万十帯や秩父帯の分布域は低 $V_p/V_s$ として、三波川帯は中程度の $V_p/V_s$ として明瞭に認識できます。

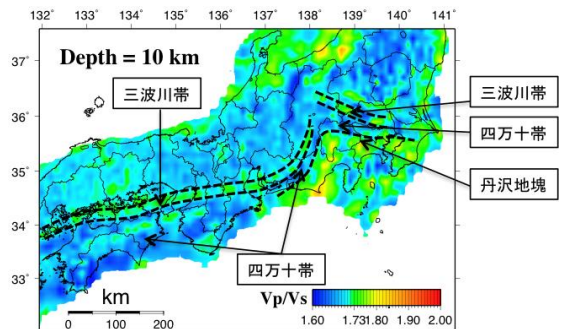


図2 地下10 kmにおける地質分布。

## 2.3 プレート境界上面の構成岩石

本研究では、首都圏地震観測網(MeSO-net)による地震波トモグラフィー(Nakagawa et al., 2010)の速度データを用いてフィリピン海プレートと接する陸側プレートの構成岩石、つまり関東地震震源断層近傍の陸側プレートの構成岩石を推定しました。一般的に島弧の最上部マントルの $V_p$ は7.8 km/s以上です。したがって、 $V_p > 7.8$  km/sの分布域はかんらん岩であると推定しました。東側(千葉県と茨城県の県境下)では約30 km以深でフィリピン海プレートと陸側プレートのマントルが接する一方で、西側(埼玉県下)では約40 km以深でフィリピン海プレートとマントルが接します。相対的に東部ほど陸側プレートの地殻が薄いことが読み取れます。図3には、 $V_p=6.5\sim 7.5$  km/sかつ $V_p/V_s=1.7\sim 1.9$ の分布域を示しました。この分布域は苦鉄質な下部地殻であると推定しました。約20 km以深からフィリピン海プレートと陸側プレート下部地殻(苦鉄質岩)が接することがわかります。図4には、 $V_p < 6.5$  km/sかつ $V_p/V_s=1.7\sim 1.9$ の分布域を示しました。この分布域は珪長質地殻であると推定しました。約20 km以浅でフィリピン海プ

プレートと陸側プレート上部地殻の珪長質岩が接しています。深さ 30 km 前後で西北西から東南東に並ぶスポット状の領域も珪長質地殻であると推定されます。

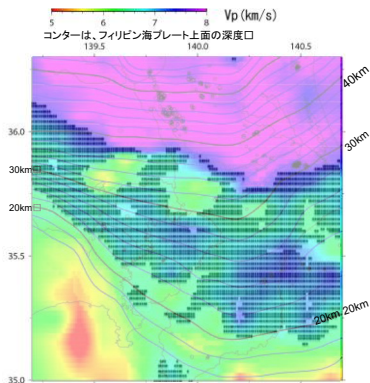


図 3 プレート境界上面 3 km における苦鉄質岩の分布。コンターは、フィリピン海プレート上面の深度。

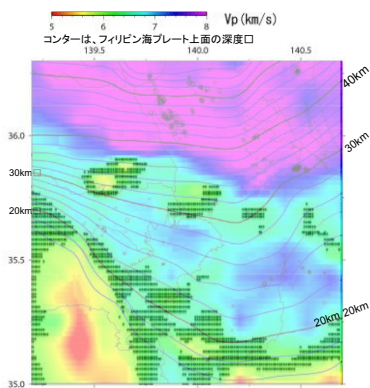


図 4 プレート境界上面 3 km における珪長質岩の分布。コンターは、フィリピン海プレート上面の深度。

## 2.4 プレート境界上部における蛇紋岩の分布

首都圏地震観測網(MeSO-net) による地震波トモグラフィ(Nakagawa et al., 2010)と蛇紋岩の弾性波速度を比較することで、フィリピン海プレート上面から 3 km 上部に位置する蛇紋岩領域の分布を推定しました。蛇紋岩の弾性波速度は、ダンかんらん岩(dunite)-蛇紋岩(lizardite)系列の Vp および Vs データ(Christensen, 2010)を用いました。

図 5 には蛇紋岩化率 25%-75%の領域を示しました。蛇紋岩化率 25%-75%の領域は、陸側プレートの地殻マントル境界に分布するもの(陸側プレートのマントルかんらん岩の蛇紋岩化に伴うもの)と、陸側プレート地殻内部のもの(蛇紋岩が何らかのプロセスで陸側プレート地殻内に取り込まれたもの)に区分されます。房総半島中央部と房総沖において蛇紋岩化域と推定された領域はスロースリップ領域とオーバーラップしており、房

総半島下のプレート境界面で発生するスロースリップ現象はプレート境界面上の蛇紋岩と関連していると考えられます。プレート境界深度 16-18 km 付近(房総沖海底下、房総南部、横須賀)の蛇紋岩化域と陸上の蛇紋岩の分布域は一系列の西北西-東南東の帯状に並んでおり、この蛇紋岩配列は深度 16-18 km 付近から地表までほぼ垂直に分布していると推定されます。

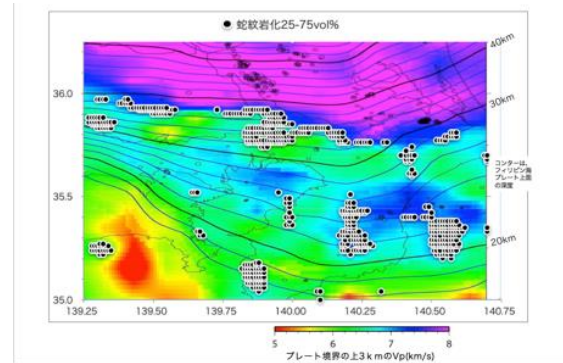


図 5 プレート境界より上部 3 km における蛇紋岩化率 25%-75%の領域(●)。コンターはプレート境界の深さを示す。カラーはプレート境界よりも 3 km 上部の P 波速度を表す。蛇紋岩化領域の判定基準は、ダンかんらん岩-蛇紋岩(lizardite)系列の Vp を満たし、かつ、Vp/Vs 値が±0.05 の範囲内の領域とした。

## 2.5 プレートの構成岩石と流体分布

P 波速度の分布に基づくと、日本海溝から沈み込んだ太平洋プレートの P 波速度が深さ 60 km で約 8 km/s まで急激に上昇する特徴が見られます。沈み込んだ海洋地殻が青色片岩からローソン石エクロジヤイトに相転移したことを反映していると推測されます(図 6)。高 Vp/Vs 異常(>1.9)域がプレートの相転移箇所の直上に分布しており、青色片岩がローソン石エクロジヤイトに相転移する際にプレートから脱水した H<sub>2</sub>O 流体であると推測されます。

図 7 は Vp/Vs の分布から推定した広域的な流体分布です。地殻とマントルを構成する主要な鉱物の Vp/Vs は 1.9 を超えないので、流体分布域の判定基準は、Vp/Vs が 1.9 を超える領域とここでは定義しました。南北に配列する流体分布が深度 45-60 km で認識され、太平洋プレートの海洋地殻の変成脱水反応に由来する水が上昇しているものと解釈されます。また、深度 40-45 km において、東西に配列する流体分布が見られ、フィリピン海プレートの海洋地殻の変成脱水反応に由来する水が上昇しているものと考えられます。

P 波速度の分布に基づくと、相模トラフから沈み込んだフィリピン海プレート伊豆弧前弧地殻の P 波速度が 6.5-7.0 km/s から 7.0-7.5 km/s まで増加する特徴が、深さ 40-45 km において見られます。フィリピン海プレート



として沈み込んだ伊豆弧前弧地殻が緑色片岩からざくろ石角閃岩に相転移したことを反映していると推測されます。さらに、フィリピン海プレート伊豆弧前弧地殻の P 波速度は深さ 50 km で約 8 km/s まで上昇する特徴を示し、深さ 50 km でエクロジヤイトに相転移していると推測されます。

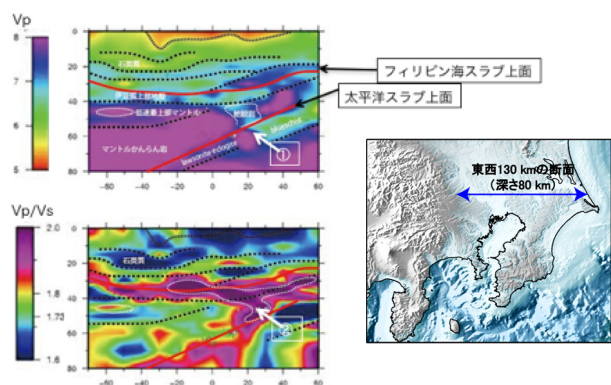


図6 P波速度とVp/Vsの東西方向に沿う深度断面図。日本海溝から沈み込んだ海洋地殻のP波速度が深さ60kmで急激に増加する(①)。高Vp/Vs異常(>1.9)域が分布する(②)。

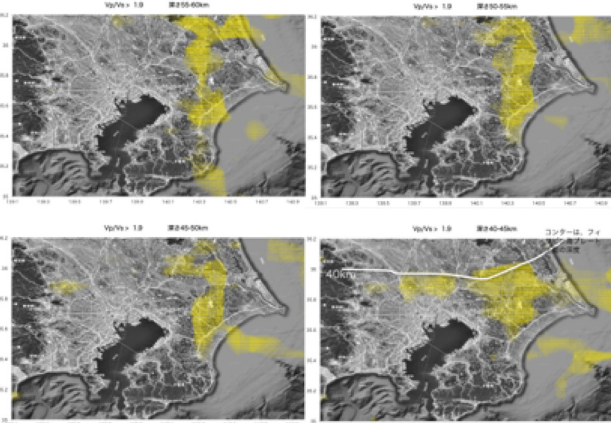


図7 推定される流体(Vp/Vs>1.9)の分布域(黄色)。

### 3. 結論ならびに今後の課題

四万十帯は低いP波速度と著しく低いVp/Vsで特徴付けられることが弾性波速度実験から示されました。

首都圏地震観測網(MeSO-net)による地震波トモグラフィに基づき、フィリピン海プレートと接する陸側プレートの構成岩石(珪長質岩、苦鉄質岩)分布を推測しました。

蛇紋岩化域は、プレート境界深度 32-34 km 付近の陸側プレートの地殻マントル境界に分布するものと、より浅部のプレート境界上の陸側プレート地殻内部のものに区分されました。房総半島中央部と房総沖において蛇紋岩化域と推定された領域はスロースリップ領域と

オーバーラップしており、房総半島下のプレート境界面で発生するスロースリップ現象はプレート境界面上の蛇紋岩分布と関連していると考えられます。

プレート境界深度 16-18 km 付近(房総沖海底下、房総南部、横須賀)に分布する蛇紋岩化領域と陸上の蛇紋岩の分布域が西北西-東南東の帯状に並んでいることが明らかとなりました。この蛇紋岩配列は深度 16-18 km 付近から地表まではほぼ垂直に分布していると推定されます。

太平洋プレートの海洋地殻部分の青色片岩からローソン石エクロジヤイトへの相転移は深さ 60 km で発生しています。

フィリピン海プレートの伊豆弧前弧地殻部分の緑色片岩からざくろ石角閃岩へ相転移は深さ 40-45 km で、また、ざくろ石角閃岩からエクロジヤイトへの相転移は深さ 50 km で発生していると考えられます。

以上のように、関東下、特に首都圏下の関東地震震源断層近傍の構成岩石と流体分布を推定しました。

### 参考文献

- 1) Sato, H., Hirata, N., Koketsu, K., Okaya, D., Abe, S., Kobayashi, R., Matsubara, M., Iwasaki, T., Ito, T., Ikawa, T., Kawanaka, T., Kasahara, K. and Harder, S.: Earthquake Source Fault Beneath Tokyo, Science, Vol.309, pp.462-464, 2005.
- 2) Arai, R., Iwasaki, T., Sato, H., Abe, S. and Hirata, N.: Collision and subduction structure of the Izu-Bonin arc, central Japan, revealed by refraction/wide-angle reflection analysis, Tectonophysics, Vol.475, Issue 3-4, pp.438-453, 2009.
- 3) Matsubara, M., Obara, K. and Kasahara, K.: Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, Tectonophys., Vol.454, pp.86-103, 2008.
- 4) Nakagawa, S., Kato, A., Sakai, S., Nanjo, K., Panayotopoulos, Y., Kurashimo, E., Obara, K., Kasahara, K., Aketagawa, T., Kimura, H. and Hirata, N.: Heterogeneous Structure and Seismicity beneath the Tokyo Metropolitan Area, AGU Fall Meeting Abstracts, 2010.
- 5) Christensen, N. I.: Serpentinites, Peridotites, and Seismology, International Geology Review, Vol.46, pp.795-816, 2004.

## I-1-3 首都圏での中小地震と大地震の発生過程の解明

佐竹健治(東京大学地震研究所)

## 1. 研究の目的

2011年東北地方太平洋沖地震以降、関東地方では地震活動が活発になりました。これらを含めた関東地方の中小地震の震源を決定し、その類型化を図ります。また、南関東で過去に発生した大地震について、古地震・古津波記録すなわち計器観測記録・歴史資料・津波堆積物等の記録を収集し、分析することで、その地震像を明らかにし、新たな時系列モデルを構築します。これらをもとにして中小地震と大地震の発生過程の関係を解明します。

## 2. 研究の実施内容

## 2.1 MeSO-net 検測値を用いた発震機構解の推定

本プロジェクトで維持・管理されてきた首都圏地震観測網(MeSO-net)による検測値データを用いて、2008年4月1日～2015年2月9日に発生した2786個の地震について、発震機構(メカニズム)解を推定し、カタログを作成しました(図1)。カタログ化した発震機構解は、首都圏に展開された稠密観測網に基づくため、特に首都圏中心部では精度良く決定されています。また、2011年前後の期間を収録していることから、東北地方太平洋沖地震による応力場の時空間的な変化を調査するための貴重なデータになるはずです。

## 2.2 明治・大正期の顕著地震の震源・発震機構解

日本における地震の近代計器観測は1870年代半ばに始まり、当時の煤書きの波形記録や検測値、被害記録等が収集・保管されています。本課題では、近年に発生した地震の震源・発震機構解あるいはS-P時間・初動との比較から明治・大正期に発生した顕著地震の震源・発震機構解を推定する手法を構築し、適用しました(石辺・他、2015)。

1922年4月26日に発生した浦賀水道付近の地震の場合、構築した手法によって推定された震源は房総半島南西部の深さ50~60km程度となり、関東下に沈み込んでいるフィリピン海プレート内で発生した地震である可能性が高いことが分かりました。またこの地震について報告されている初動は、近年この領域で発生している引張軸が南西-北東方向を向く正断層型あるいは横ずれ型の地震と調和的であることが分かりました。

本課題で構築した手法は、関東地方のみならず日本全国で発生した地震へ適用可能であるため、今後も調査を継続することで、明治・大正期に発生した顕著地震

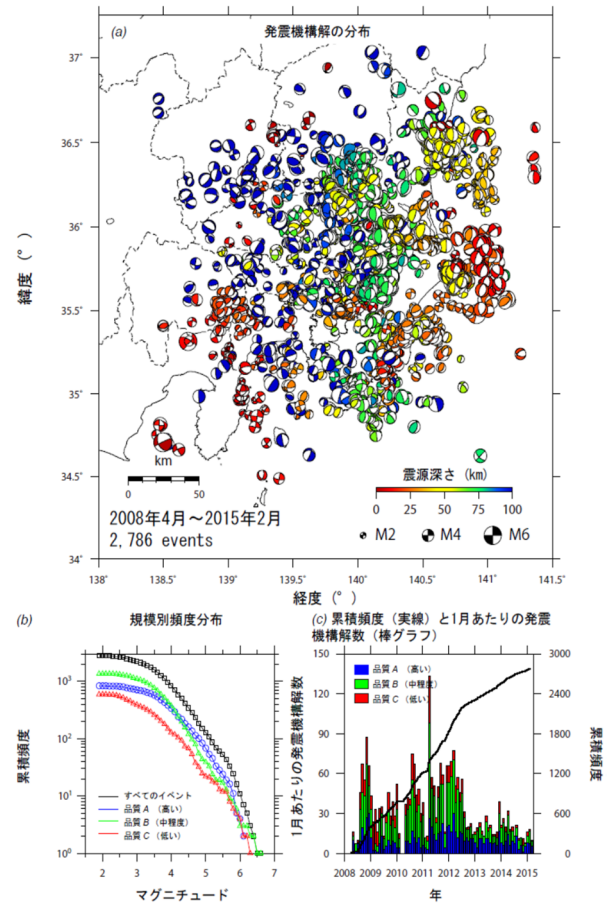


図1 MeSO-net 検測値を用いて決定した発震機構解の分布。

に対する新たなカタログの作成が期待されます。

## 2.3 大地震による応力変化と中小地震の関係

2011年東北地方太平洋沖地震後に、日本各地で地震活動の変化が観測されました。特に関東地方では顕著な地震活動の活発化が観測され、現在も東北地方太平洋沖地震前に比べて活発な地震活動が継続しています。

本課題では、2.1で決定したものを含む豊富な発震機構解を用いることで、東北地方太平洋沖地震とその後の関東における地震活動の活発化との関係について調査しました。その結果、関東地方における地震活動の活発化は、2011年東北地方太平洋沖地震による静的クーロン応力変化で大局的に説明できることが分かりました(Ishibe et al., 2015)。

また、近年に発生した他の 2 つの巨大地震(2004 年スマトラ-アンダマン地震・2010 年チリ・マウレ地震)についても調査しました。2004 年スマトラ-アンダマン地震の場合にも、その応力変化によって発震機構解の分布の時間的変化が説明可能でした。一方で、2010 年チリ・マウレ地震の場合には、明瞭な相関は認められませんでした。これらの結果からは、大地震が発生した後に生じる地震活動変化の予測にクローン応力変化が有効である可能性が示唆されますが、この他にも様々な要因が地震活動変化あるいはその後の大地震の誘発に寄与していることが考えられます。

## 2.4 関東地方の歴史地震史料のデータベース

大地震の繰り返しやその複雑性を理解するには、100 年程度に過ぎない近代計器観測のみでは不十分です。日本では過去 1000 年以上にわたって歴史資料が残されており、これらを調べることによって、過去の地震で生じた被害の分布や地震像を調査することができます。これらの歴史資料を、検索機能を有する電子データベース化することは、今後の歴史地震研究を推進するための基礎資料として非常に重要です。

古代・中世に発生した歴史地震の歴史資料は、「古代・中世地震・噴火史料データベース」(石橋・古代中世地震史料研究会、2011)として電子化されています。近世の歴史資料は膨大なため多くはアナログ媒体のままです。そこで 1600 年以降に南関東及びその周辺で発生した被害地震を対象として『新収日本地震史料』などの史料集所収の史料や、新たに収集した歴史資料をデジタルデータ化し、「1703 年元禄関東地震」、「1855 年安政江戸地震」、「江戸時代に発生した顕著な被害地震」35 地震の 3 種類のデータベースを構築しました。

図 2 は 1703 年元禄関東地震のデータベースの例です。①でキーワードを入力すると、検索結果が②に表示され、②の史料名をクリックすると③のような史料本文が表示されます。その他の 35 の地震も同様に検索ができます。1855 年安政江戸地震に関しては、本プロジェクトで使用した史料のみ掲載し、暫定的に PDF 形式で公開しています。安政江戸地震の史料は膨大であるため、今回はその一部分の公開となりました。

## 2.5 安政江戸地震の震源像の解明

首都圏直下では、1855 年(安政二年)にマグニチュード 7 クラスの地震が発生し、江戸市中に大きな被害を及ぼしたことが歴史資料から明らかにされています。しかし、この地震の深さについては、地表付近という説もあれば、100 km 程度という説もありました。

関東の地下にはフィリピン海プレートや太平洋プレートが潜り込んで、大変複雑な構造となっており、これらの影響により「異常震域」と呼ばれる現象が生じます。すなわち、地震が発生した真上の地域が必ずしも大きな震



図 2 1703 年元禄関東地震のデータベースの例。

度になるとは限りません。地震計が無い時代の地震の発生場所や深さを推定するには、震度分布が有力な手がかりになるのですが、このような現象が邪魔をして、なかなか分かりませんでした。

本課題ではまず史料の収集や解説を行い、次に異常震域の特徴を調べるとともに、地下の三次元的な地震波減衰構造を考慮して震度を理論的に予測し、震源がどこであれば、史料から得られた震度分布の特徴が説明できるかを調べました。検討は東北から関西にかけて(遠地と呼びます)と関東周辺(近地と呼びます)での震度分布について行いました。

史料には、地震が発生して何十年も後に書かれたものや聞き伝えを書いたものなど、その信頼性・確実性は様々です。今回、遠地についての史料を吟味した結果、近畿地方よりも西には有感の記事がないことが新たに判明しました。

日本列島全体の 3 次元減衰構造を用いて、先行研究によるフィリピン海プレート内やフィリピン海プレートと太平洋プレート境界に地震の断層面を仮定し、広域的な震度予測を行ったところ、上記史料の分析から得られた有感域を説明できることが分かりました。つまり、浅い地震でなくても広域の震度分布が説明できることがわかりました。一方、太平洋プレート内の深さ 100 km 程度の地震では、東北地方に比べ、西日本への震度分布の広がりが小さくなり、史料から得られる安政江戸地震の震度分布と一致しませんでした。

近地の震度分布の先行研究(中村・他、2007)では、フィリピン海プレートと太平洋プレート境界付近の地震による震度分布には東京都の中央部で震度が小さくなる「くびれ」(図 3)がみられることが指摘されていました。本プロジェクトで実施した史料調査では、ある人物が他

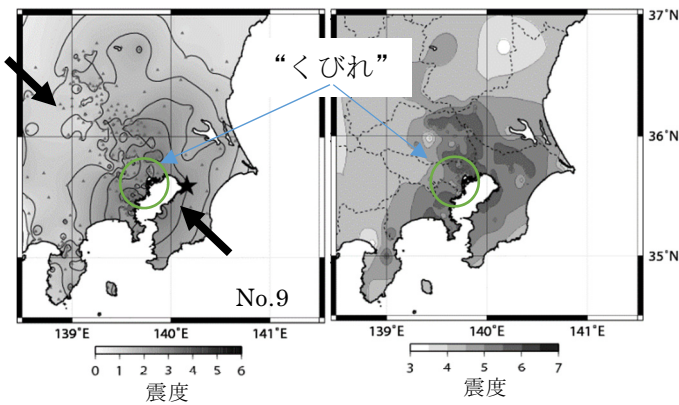


図3 1999年9月13日の地震 (a)と、安政江戸地震の震度分布 (b) (中村・他, 2007に加筆)。円は“くびれ”を示す。

図3 フィリピン海プレートと太平洋プレート境界付近の地震による震度分布(a)と、安政江戸地震の震度分布 (b) (中村・他, 2007に加筆)。円は“くびれ”を示す。

の場所から江戸に移動する間の被害を連続的に記載している記事の分析を行っており、そのうち『公私日記』からは、代田橋(京王線の代田橋駅付近に存在した橋)より西では被害はそれほどでもなかったことがわかり、この地域と“くびれ”が良く対応します。安政江戸地震でも“くびれ”が確かにあることがわかってきました。

一方で、フィリピン海プレートと太平洋プレート境界付近の地震による震度は、東京都よりも神奈川県東部で大きくなり、安政江戸地震が江戸での被害が甚大である特徴とは異なることがわかりました。このことから、フィリピン海プレートと太平洋プレート境界の地震の可能性は低いと考えられます。

“くびれ”の特徴を3次元減衰構造から説明するために、新たに、より詳細な3次元減衰構造を求め、それによる震度予測を実施しました。図4には千葉県北西部の深さ50km(フィリピン海プレート内)を想定した震度分布の予測結果を示しています。東京都都心部のほか、川崎や横浜など神奈川県東部で震度が大きいのに対し、そのすぐ北側の世田谷区より西側で震度がそれほど大きくなっておらず、江戸に被害が集中したこと及び震度分布の“くびれ”が説明できていると考えられます。すなわち、安政江戸地震の近地での震度分布は、フィリピン海プレート内の地震であっても説明できること分かってきました。

以上の検討から推定される安政江戸地震の震源像をまとめたものを図5に示します。

地殻内地震については、先行研究のP-S時間に基づいて推定された深さから否定的であり、今回の3次元減衰構造を考慮した広域震度予測によれば、浅い地震でなくても遠地での有感域が説明できることから、その可能性は低いと考えられます。

太平洋プレート内の深い地震については、広域震度予測によると、東北地方に比べて西日本への震度分布

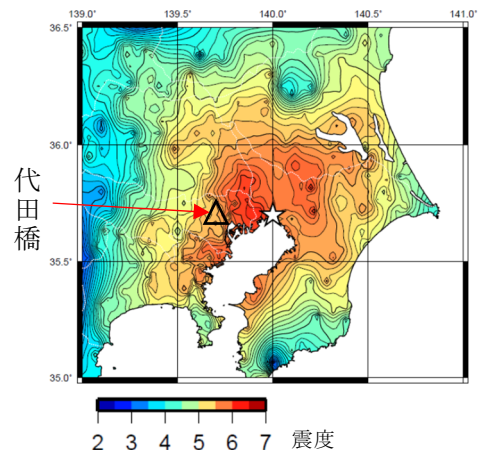


図4 詳細な3次元減衰構造に基づく予測震度の一例。震源の深さ50km(フィリピン海プレート内)、 $M=7.0$ 、 $\Delta\sigma=50$  MPa を仮定しています。

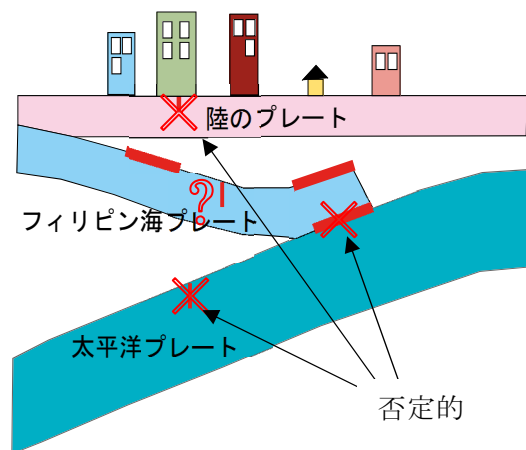


図5 安政江戸地震の震源像。残された可能性として、フィリピン海プレート内あるいはフィリピン海プレートの上面と考えられます。

の広がりが小さくなり、遠地での震度分布と合わないことから、その可能性も低いと考えられます。

フィリピン海プレートと太平洋プレート境界の地震については、近年の地震の震度分布は神奈川県東部で最大となり、安政江戸地震が江戸での被害が甚大である特徴とは異なることから、その可能性が低いと考えられます。

残る可能性としては、フィリピン海プレート内、あるいはフィリピン海プレート上面の地震であり、1855年安政江戸地震の震源はこのいずれかであったと考えられます。

## 2.6 地形・地質調査による関東地震の発生履歴

フィリピン海プレートの沈み込みによる関東地震は、マグニチュード8クラスの地震で、関東地方の広範囲に被害をもたらします。しかしながら、歴史的に知られている関東地震は1923年の大正関東地震と1703年元禄関東地震に限られ、その発生間

隔や多様性を議論するためには十分なデータが集まっているとは言えませんでした。本プロジェクト以前に三浦半島で行われた津波堆積物の調査から、1293（永仁元）年鎌倉大地震が関東地震である可能性が指摘されました（Shimazaki *et al.*, 2011）。本プロジェクトでも、地形・地質学的な調査と歴史資料調査により過去の関東地震の痕跡を調べました。

房総半島では、史料調査からは元禄関東地震による津波の挙動や耕作地への砂入りが明らかになりました（Muragishi, 2016）。千葉県九十九里町では地形・地質学的な調査を行い、過去の地震による津波堆積物と考えられる砂層を発見しました。

また、静岡県伊東市宇佐美の遺跡発掘現場からは、15世紀の砂層堆積物が発見され、これは当初1498（明応七）年東海地震によるものと考えられてきました（藤原・他、2007）。しかし東海地震により伊豆半島東岸に大津波が押し寄せるとは考えにくいこと、さらに歴史資料の再検討から、これまでは1498（明応七）年東海地震の誤記とされてきた1495年（明応四年八月十五日）の地震が関東地震であり、これによる津波堆積物である可能性が示唆されました（金子、2012）。

1293（永仁元）年鎌倉大地震、1495（明応四）年の地震がともに関東地震であった場合、マグニチュード8クラスの関東地震の発生間隔は202年（1293年～1495年）、208年（1495年～1703年元禄関東地震）、220年（1703年～1923年大正関東地震）となり、これまで考えられていた200年～500年に比べて、その発生間隔のばらつきが小さくなります。今後、さらなる検討が必要です。

### 3. まとめ

◆ MeSO-net 検測値を用い2008年4月1日～2015年2月9日の2786個の地震についてMeSO-net検測値に基づく発震機構解のカタログを作成しました。

◆ 明治・大正期の顕著地震について検討し、1922年4月26日に発生した浦賀水道付近の地震はフィリピン海プレート内で発生した地震である可能性が高いことがわかりました。

◆ 2011年東北地方太平洋沖地震後の関東地方における地震活動の活発化は、同地震による静的クーロン応力変化で大局的に説明できることがわかりました。

◆ 1600年以降に南関東及びその周辺で発生した被害地震として「1703年元禄関東地震」、「1855年安政江戸地震」、「江戸時代に発生した顕著な被害地震」35地震の3種類のデータベースを構築しました。安政江戸地震については暫定的にPDF形式での公開となりました。

◆ 1855年の安政江戸地震の震源像を震度分布の特徴を三次元減衰構造にもとづく震度予測から検討し、フィリピン海プレート内あるいはその上面で発生した可能

性が高いことがわかりました。

◆ 地形・地質調査から、1293年、1495年の地震がともに関東地震であった可能性が指摘されました。これらが正しければ、1923年、1703年も含めると、関東地震はほぼ200年毎に規則正しく発生することになります。

### 参考文献

- 1) 藤原治、平川一臣、金子浩之、杉山宏生、静岡県伊東市北部の宇佐美遺跡に見られる津波(?)イベント堆積物、津波工学研究報告、Vol.24、pp.77-83、2007.
- 2) 石橋克彦、古代中世地震史料検討会：[古代・中世]地震・噴火史料データベース、歴史地震、Vol.26、pp.86、2011.
- 3) Ishibe, T., K. Satake, S. Sakai, K. Shimazaki, H. Tsuruoka, Y. Yokota, S. Nakagawa, and N. Hirata, Correlation between Coulomb stress imparted by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and seismicity rate change in Kanto, Japan, *Geophys. J. Int.*, 201, pp.112-134, doi:10.1093/gji/ggv001, 2015.
- 4) 石辺岳男、佐竹健治、村岸純、鶴岡弘、中川茂樹、酒井慎一、平田直、関東地方において計器観測初期に発生した地震の調査のための近年の地震データの収集・整理と1922年浦賀水道付近の地震への予察的適用、歴史地震、30、pp.109-127、2015.
- 5) 金子浩之、宇佐美遺跡検出の津波堆積物と明応四年地震・津波の再評価、伊東の今・昔—伊東市史研究、Vol.10、pp.102-124、2012.
- 6) Muragishi, J., Inflow of sand caused by the 1703 Genroku Kanto tsunami as described in historical documents, *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 51, pp.77-82. 2016.
- 7) 中村亮一、植竹富一、佐竹健治、遠田晋次、宇佐美龍夫、島崎邦彦、渡辺健、関東地域の三次元減衰構造・異常震域とそれに基づく1855年安政江戸地震の震源深さの推定、歴史地震、Vol.22、pp.101-107、2007.
- 8) 中村亮一、植竹富一、引間和人、3次元Q構造を考慮した統計的グリーン関数法による強震動評価、—プレート境界巨大地震の広域強震動予測—日本地震工学論文集、Vol.15、No.7、pp.7\_230-7\_241、2015.
- 9) Shimazaki, K., H. Y. Kim, T. Chiba, and K. Satake, Geological Evidence of Recurrent Great Kanto Earthquakes at the Miura Peninsula, Japan. *J. Geophys. Res.*, 116, B12408, doi:10.1029/2011JB008639, 2011.

## I-1-4 首都圏の過去の地震活動に基づく地震活動予測手法の確立

鶴岡 弘（東京大学地震研究所）

### 1. 研究の目的

本研究では、過去に発生した地震活動から将来の地震活動を予測する統計地震学的手法を発展させた新たな地震活動予測手法を提案することです。そのために首都圏の過去の地震活動に最適化した時空間的に高分解能かつ高精度な地震活動予測アルゴリズムの開発を行います。またそれらのアルゴリズムを評価・検証するための基盤を構築し、地震活動予測の実験を行って、地震活動予測手法の妥当性を検証します。

### 2. 研究の実施内容

#### 2.1 地震活動予測手法を評価・検証するためのプラットフォーム

Collaboratory of the Study for Earthquake Predictability (CSEP) は、2006年アメリカ・カリフォルニアで始まった地震予測可能性を探る学術的国際プロジェクトであり、地震発生予測基準モデルの作成とその性能の向上を目的としています。日本においては、このプロジェクトに2008年より参画し、CSEPにより開発されたソフトウェアを利用して地震発生予測検証実験を実施しています。日本では、地震研究所にテストセンターを置き、1日、3ヶ月、1年、3年のテストクラスと AllJapan, Mainland, Kanto のテスト領域を定義して地震活動予測モデルの評価を行っています。

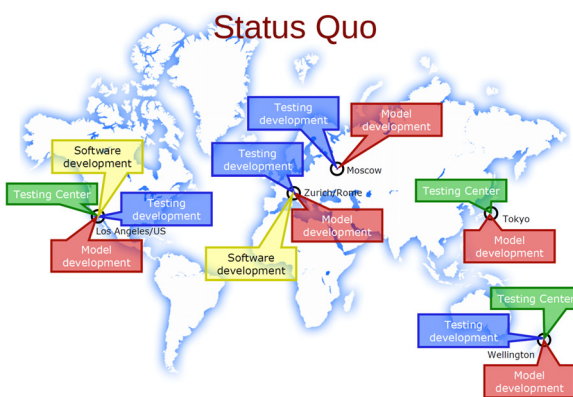


図1 CSEPの活動状況。

CSEPでは、地震の発生はポアソン過程であると考え、予測値と観測値から計算される尤度

$$p(\omega|\lambda) = \frac{\lambda^\omega}{\omega!} e^{-\lambda} \quad (\lambda: \text{予測}, \omega: \text{観測}) \quad \dots (1)$$

を計算し、この値が大きいほどモデルの予測性能(パフ

フォーマンス)が高いとして評価します。実際には、(1)式の対数をとり、

$$L(\omega|\lambda) = \log p(\omega|\lambda) = -\lambda + \omega \log \lambda - \log \omega! \quad \dots (2)$$

(2)式により地震活動予測モデルの評価が行われます。

#### 2.2 関東地域における3次元テスト領域

日本のCSEPにおいて、図2にある関東のテスト領域を設定して評価・検証を実施しています。水平方向は、 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ のセルで、深さ方向には100 kmまでの1層として予測しています。つまり、2次元予測となっています。

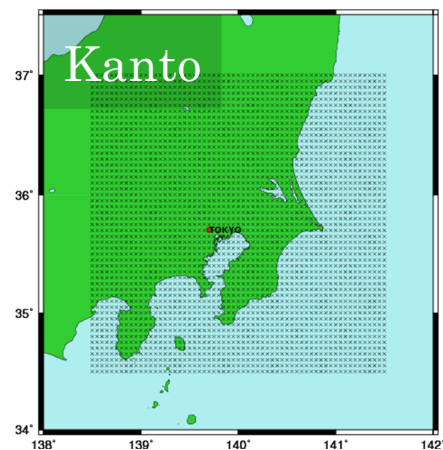


図2 CSEP日本における関東テスト領域。

関東領域は、太平洋プレート及びフィリピン海プレートが沈み込んでいるため、地震活動が複雑であり、地震活動予測モデルは、2次元ではなく、3次元での開発を実施しました。結果として、深さ方向も5 km毎の層を作成して、最終的なテスト領域としました。

#### 2.3 首都圏の地震カタログの性能評価

地震活動予測モデルに入力する地震カタログについては、首都圏をカバーするカタログは複数あり、気象庁一元化震源カタログ、防災科学技術研究所が作成したカタログ<sup>1)</sup>、宇津カタログ<sup>2)</sup>の3つについて検知能力(=コンプリートネスマグニチュード)の時間変化の調査を実施しました。なお、宇津カタログについては、深さがvery shallow, shallow, deepの3区分のみであるため地震の深さ毎の検知能力については調査を実施していません。なお、検知能力については、Maximum curvature法 (Wiemer and Wyss, 2000<sup>3)</sup>) を使用して求

めました。図3にそれぞれのカタログの検知能力について

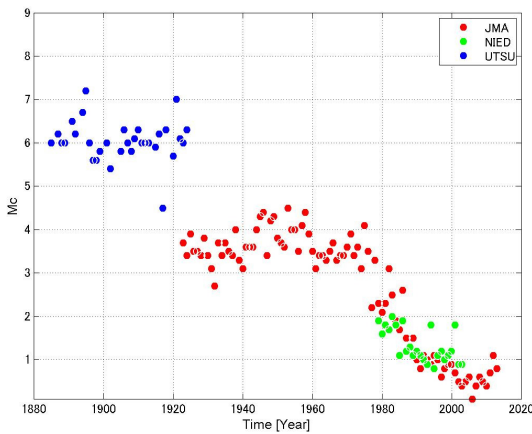


図3 気象庁地震カタログ(JMA)、防災科学技術研究所が作成した地震カタログ(NIED)、宇津カタログ(UTSU)のコンプリートネスマグニチュード。震源の深さは、0 から 100 km。縦軸はコンプリートネスマグニチュード、横軸は時間を示します。

て示しました。

気象庁一元化震源カタログは、1997年10月以降はマグニチュード2以下が十分とれていることがわかりますし、宇津カタログは6以上であればとれていることがわかります。

## 2.4 地震活動予測モデル

地震活動予測モデルは、Relative Intensity モデル(RI モデル)と階層的時空間 ETAS モデルの二つについて開発を行いました。

### (1) 3D RI モデル

RI モデルにおけるパラメータは、学習期間、b 値、学習下限マグニチュード、平滑化半径の4つがあります。学習期間については、2.3 で解析した検知能力の時間変化も考慮する必要があります。

### (2) 階層的時空間 ETAS モデルの3次元化

3次元空間の階層的時空間 ETAS モデルは、任意の時刻  $t$  と位置  $(x, y, z)$  での地震活動度が、過去の地震発生履歴  $H_t$  の関数として、

$$\lambda_{ETAS}(t, x, y, z | H_t) = \mu(x, y, z) + \dots$$

$$\sum_{\{j; t_j < t\}} \frac{K(x_j, y_j, z_j) [(x - x_j, y - y_j, z - z_j) S_j (x - x_j, y - y_j, z - z_j)]^t}{(t - t_j + c)^p} e^{-\alpha(M_j - M_c)} + d \quad (3)$$

の様記述されます。 $\mu(x, y, z)$  は、常時地震活動度 (background seismicity)、 $K(x, y, z)$  は余震生産性 (aftershock productivity) と呼ばれ、これらが位置の関数と考え、各部分領域で特に異なる地震活動度の特徴を定量化します。その上で関東直下の現在の地震活動度および将来の地震活動予測には、東北地方太平洋沖地震によって誘発された活動度が追加されて、

$$\lambda(t, x, y, z | H_t) = \lambda_{ETAS}(t, x, y, z | H_t) + \frac{K_{M9}(x, y, z)}{(t - t_{M9} + c_{M9})^{p_{M9}}} \quad (4)$$

の様東北沖地震の発生時刻  $t_{M9}$  を起点とする大森・宇津型の減衰関数で記述されます。ここで、関東直下の位置  $(x, y, z)$  における東北沖震からの影響度  $K_{M9}(x, y, z)$  の地域性を区別して定量化しました。

## 2.5 事後予測検証実験

3D-RI モデルにおいて、パラメータの最適化を目的として複数ラウンドにわたって、下限のマグニチュードと学習期間のグリッドサーチを実施しました。3ヶ月テストクラスにおいては、2009年11月から21ラウンド、1年テストクラスにおいては、18ラウンドを実施しました。

3M\_1round(2009-11-01-2010-02-01)

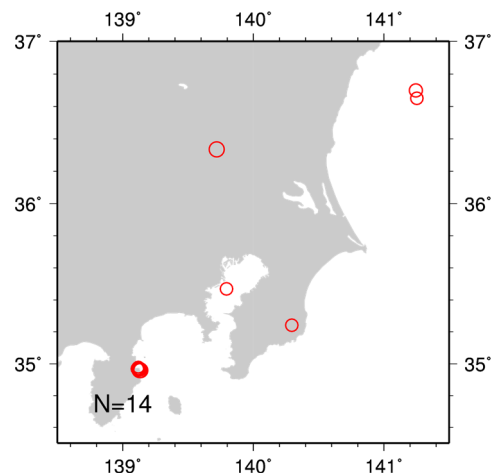
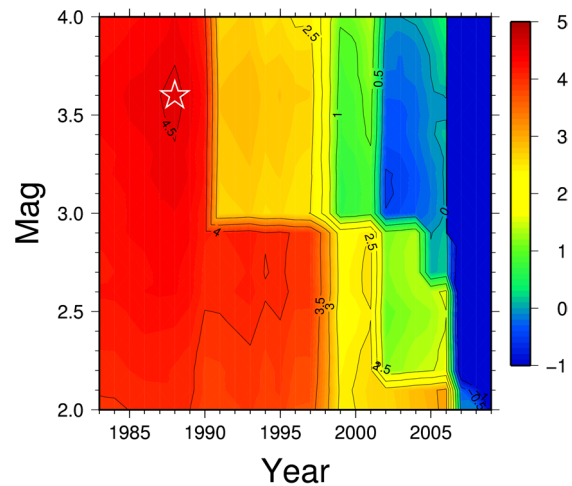


図4 3ヶ月テストクラス第1ラウンドにおける学習開始年と学習下限マグニチュードの探索結果と観測地震の震央図。情報利得の最大値となるパラメータを白の星で示す。

パラメータの最適値は、空間一様分布モデルを基準として地震1個あたりどの程度対数尤度が良くなるかという情報利得を用いて決定しました。最適なパラメータは、

ラウンド毎にすべて変わることがわかりましたが、東北地震後のラウンドにおいては、学習期間の開始は東北地震後にするとよいラウンドが多くなりました。

## 2.6 事前予測検証実験

一部事後予測実験も含まれますが、3ヶ月テストクラスおよび1年テストクラスについて、3D-RIモデルによる事前予測検証実験を行いました。モデルパラメータは、学習期間を期間①:1998年1月1日から2011年1月1日(2011年東北地方太平洋沖地震の前)、期間②:1998年1月1日から予測期間の前日(2011年東北地方太平洋沖地震の前と後)、期間③:2012年1月1日から予測期間の前日(2011年東北地方太平洋沖地震の後)の3ケース、平滑化半径は、7.5 km、10 km、20 km、50 kmの4ケース、下限マグニチュードは2.5以上、b値については、0.9を採用して実験を行いました。評価は、CSEPのテストを3次元化に対応させて行いました。図5に2012年8月から11月のラウンドのSテストの結果を示します。

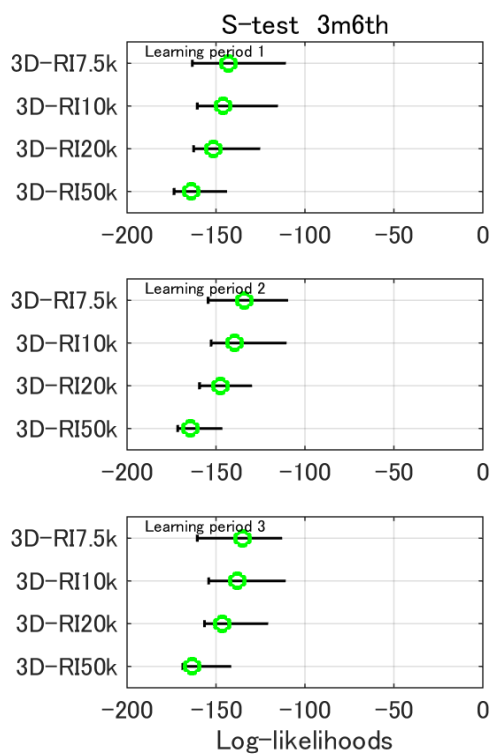


図5 3D-RIモデルにおける3ヶ月第6回予測実験のSテストの検証結果。黒い線は95%信頼区間を示し、この区間の中に丸があればテストにパスしたとする。緑色はテストにパスしたこと、赤色はパスできなかったことを示します。

また、各テストのパス率を3ヶ月テストクラスは表1に1年テストクラスについて表2に示します。

表1 3ヶ月予測実験における各モデルの各テストのパス率

3ヶ月予測	N-test	L-test	S-test	M-test
3D-RIcase1	19.0	15.5	53.6	100
3D-RIcase2	57.1	57.1	98.8	100
3D-RIcase3	23.5	100	95.6	100
OmoriUtsu	90.0	-	-	-

表2 1年予測実験における各モデルの各テストのパス率

1年予測	N-test	L-test	S-test	M-test
3D-RIcase1	40.0	40.0	60.0	100
3D-RIcase2	40.0	55.0	75.0	100
3D-RIcase3	33.3	100	83.3	100
OmoriUtsu	20.0	-	-	-

事前予測検証実験の結果から、平滑化半径は、7.5 km 学習期間は期間②がベストとなることがわかりました。

## 2.7 M6以上の地震活動予測モデルの開発

I-1-3によりコンパイルされた過去に発生した地震の新たな時系列モデルを取り込んで、地震活動予測モデルの改良を行いました。新たな時系列を含む地震カタログから、図6に示される関東の検知能力の時間変化から、赤線よりも大きいマグニチュードの地震を学習データとして、M6以上の予測実験を5回実施しました。その結果を図7に示します。

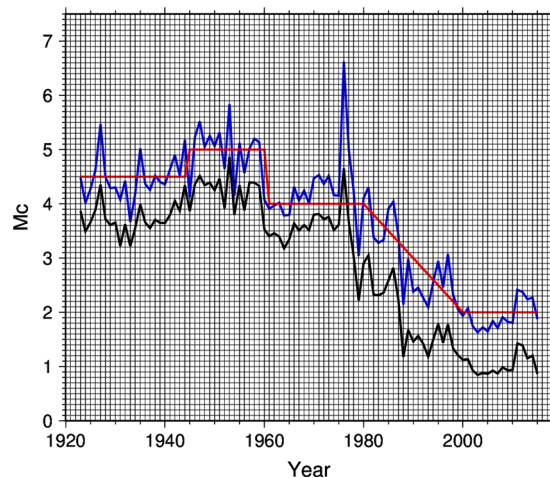


図6 関東地域のコンプリートネスマグニチュードの時間変化。青:計算されたコンプリートネスマグニチュード、赤:設定したコンプリートネスマグニチュード。



図 7 の結果から、平滑化半径は事前予測検証実験と同じ 7.5 km で最適となることがわかりました。また、学習開始年については、1923 年の大正関東地震発生前後において、情報利得値にステップ状の変化が見られますが、そのステップの幅はほんの少しでありますので、I-1-3 による新たな時系列を取り込むことにより安定して予測が可能であることもわかります。

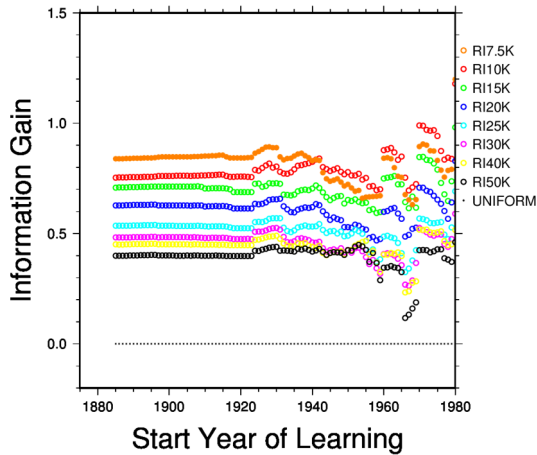


図 7 RI モデルの空間予測に対する情報利得(IG)。横軸は学習データの始まりの年、縦軸は IG を示します。学習データは、図 6 におけるコンプリートネスマグニチュード以上の地震を使用しました。

### 2.8 ハイブリッドモデルとの比較・評価

独立のモデルとして、RI モデルの平滑化半径の異なるモデルのハイブリッド化を検討しました。平滑化半径として 15 km と 30 km の二つのモデルの場合には、単独に比較すると、30 km よりも 15 km のほうがより大きな情報利得値を取ります。なお、平滑化半径の小さい 15 km のモデルは、情報利得値は大きいですが、地震発生数の期待値

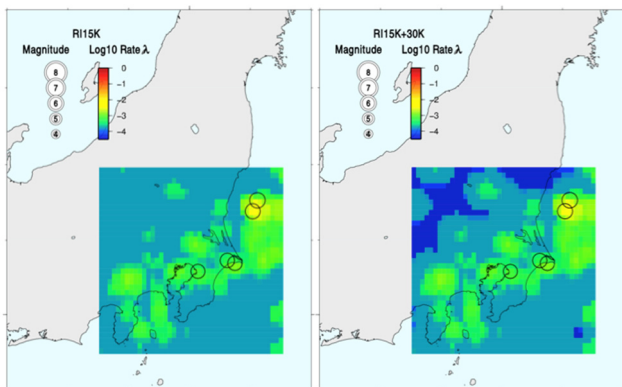


図 8 通常モデルおよびハイブリッドモデルの地震数期待値マップ。左が RI15K モデルで、右が RI15K と 30K のハイブリッドモデル。

の最小値は、30 km のモデルよりも大きくなります。そこで、30 km モデルの期待値が最小となっている領域かつ期待値マップ作成時において学習データが平滑化半径以内になかったセルの期待値をそのまま 15 km のモデルに置き換えることにより、単独の 15 km のモデルよりもさらに情報利得値を高めることができました。情報利得値の実際の向上は、1.559 から 1.615 でした。また、RI15K 単独および RI15K と RI30K のハイブリッドモデルの期待値マップを図 8 に示します。この応用として、速度構造や Q 構造において、期待値を下げるができる領域がわかれば、同様にモデルのパフォーマンスを向上させることが原理的に可能であることもわかりました。

### 3. 結論

首都圏の中小地震（マグニチュード 4 以上）の地震発生確率を 3 次元的に予測する手法として、3D-RI モデルを開発しました。また、3 次元予測モデルによる予測を統計学的に評価する方法を構築し、3D-RI モデルの予測実験を行い、近年の首都圏の地震を予測するのに適したパラメータを決定しました。また、大地震（マグニチュード 6 以上）を予測する方法として RI モデルによる二次元空間でのパラメータの決定と、複数の RI モデルを組み合わせることによって予測の高精度化が図れることを明らかにしました。上記どちらも平滑化半径としては、7.5 km をとるのがよく、学習期間としては、中小地震は東北地方太平洋沖前後の期間、大地震についてはデータをさかのぼれるだけ利用することでパフォーマンスの向上が得られることがわかりました。さらに、ハイブリッドモデルや時空間 ETAS モデルなどの検討も重要であることが言えます。

### 参考文献

- 1) 野口伸一・増子徳道・関東東海地殻活動観測研究グループ：関東・東海地域地震観測網による震源の時空間分布と規模分布について－特別研究「関東・東海地域における地震活動に関する研究」観測成果のまとめ（その5）－，防災科学技術研究所研究資料，第239号，pp.1-71, 2003.
- 2) 宇津徳治：12. 1885年～1925年の日本の地震活動－M6以上の地震および被害地震の再調査－，地震研究所彙報，Vol.54, pp.253-308, 1979.
- 3) Wiemer, S. and Wyss, M.: Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.90, No.4, pp.859-869, 2000.

## I-2-1 地震動・地震応答の大規模数値解析法の開発

堀宗朗(東京大学地震研究所)

## 1. 研究の目的

巨大地震発生時の都市の構造物即時被害予測の精度向上は、応急的な被害評価の他、緊急対応、二次災害軽減などに大きな貢献が期待されます<sup>1)</sup>。地盤と構造物の都市モデルに、地震計ネットワークで観測された地震動を入力し、大規模数値解析をすることで被害予測を行う、という災害被害の推定手法を研究開発します。

## 2. 成果の概要

## 2.1 地震被害評価技術の基盤の実用性の向上

首都圏では、複雑な表層地盤の上に多種多様な構造物が数多く存在しています。このため、首都直下地震の際には複雑かつ大規模な被害が生じる可能性があることが懸念されています。地震被害を軽減するためには、起こりうる被害を知ること、首都直下地震時の首都圏の様態を事前に評価する手法を高精度・高分解能化することが、有効な手段として考えられています。

地震被害評価に関わる技術の高精度・高分解能化を図る上で、京コンピュータのようなスーパーコンピュータを用いた大規模数値解析の活用が考えられます。事前に想定された首都直下地震の地震動や首都直下地震で観測された地震動を、都市空間情報を用いて計算機上に再現した首都圏の都市モデルに入力し、全ての構造物の地震応答解析を行い、首都直下地震による首都圏の被害を評価することにつながるからです。従来の被害評価手法とは異なり、大規模数値解析を用いることで、場所毎に大きく変化する表層地盤構造の影響や構造物毎の特性を考慮して被害を算定し、これをひとつひとつ積み上げて都市全体の被害を評価することで、高精度化・高分解能化を達成します。

工学基盤の上にある表層地盤での地震動増幅は、各種構造物の地震被害を引き起こす主要な要因の一つと考えられています。構造物の固有振動数は 1~10 Hz にあり、10 m のオーダの厚さと 100 m/s のオーダのせん断弾性波速度を持つ表層地盤では、この振動数の地震動成分が数倍にも増幅することがあるためです。この過程は、材料非線形性を持つ地盤の波動方程式を解くことで解析できますが、増幅の度合いは地盤の各層の幾何形状に大きく依存するため、地盤層の幾何形状を十分な精度でモデル化し、かつ、この精緻な解析モデルを計算できる数値解析手法を用いて波動方程式を解く必要があります。

最初に、地盤工学会が管理・運営する『全国電子地盤図』を用いて山手線内の3次元地盤構造モデルを構築しました。この地盤構造モデルは、地盤データの粗密により、実際の地盤の形状や材料特性を完全に忠実に再現するものではありません。しかし、地表地形や層境界が影響する局所的な地震動の増幅を従来にない精度で評価することは可能です。地震被害評価という目的からすると、従来の地盤構造モデルと比較して遥かに精緻かつ高精度なモデルであると考えられます。

幾何形状を十分な精度でモデル化した地盤構造モデルに対し、3次元非線形有限要素法を適用して波動方程式を解き、地盤によって増幅された地表面での地震動を計算します。山手線内 10 × 10 km の領域で、構造物の固有振動数 1~10 Hz の帯域の地震動の数値解析を行うためには、地盤モデルは非常に細かい要素を使う必要があります。実際、上記の 3次元地盤構造モデルの自由度は、1330 億自由度という巨大なもの

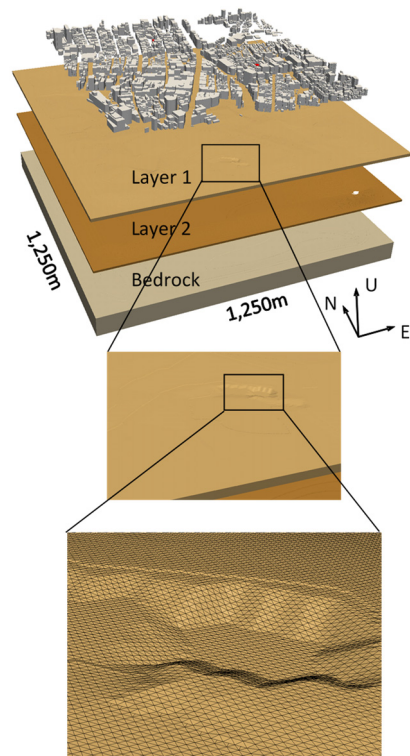


図 1.1 構築された 3 次元地盤構造モデルの一部。地盤は三層から構成。地表は構造物群の都市モデル。

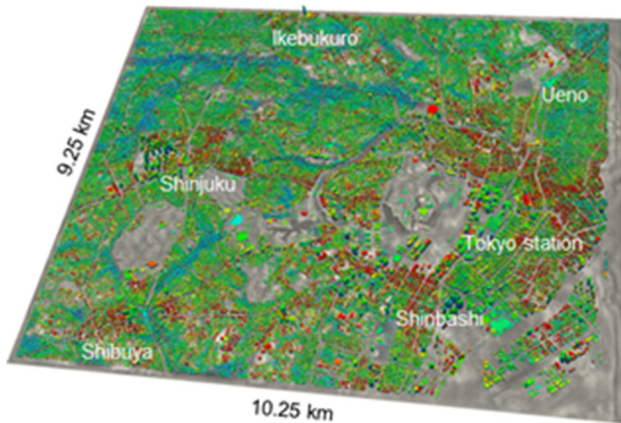


図 1.2 山手線内の約 33 万棟の建物の仮想首都直下地震時の揺れの様子。1330 億自由度の三次元非線形地盤増幅有限要素解析により得られた高分解能地震動を用いて一棟一棟の非線形構造応答解析を行うことで、地盤構造の影響と各建物の性質を反映した複雑な地震時の揺れを想定。詳細は参考文献<sup>1)</sup>参照。

となりました(図 1.1 参照)。京コンピュータ関連のプロジェクトで開発されている世界最先端の 3 次元非線形有限要素解析コードを用いることで、この巨大な自由度を持つ地盤構造モデルに対し、非線形の波動方程式を初めて解くことができました。この結果、高分解能・高精度で増幅された地震動を評価することもできました。この規模・精度・分解能での地震動増幅解析は世界初の成果であり、大規模数値解析の成果を表彰する米国計算機学会のゴードンバル賞の 2015 年度の最終選考に選ばれました。

つぎに、計算された地表面の地震動を用いて構造物の揺れを解析します。山手線内の約 33 万棟の建物一棟一棟に対し、地理空間情報システム等のデータソースを使って解析モデルを構築しました。この解析モデルを使った非線形地震応答解析を行うことで、各建物の揺れを評価しました。仮想首都直下地震に対する、上記の方法で評価した山手線内の都市の地震時の揺れを図 1.2 に示します。

開発中の総合地震シミュレータ(Integrated Earthquake Simulator, IES)は、都市を構成する地盤構造から建物群・各種構造物までの数値解析を行います。IES では地理情報システムや行政データを利用して都市モデルを自動構築します。

同じ構造種別・面積・高さであっても、実際の構造物の特性は多様であることを考えれば、自動構築されるモデルには不確実性が残ります。IES の実用性の向上のために、不確実性に対応した応答の曖昧さを確率的に評価することを試みます。

モンテカルロ法では膨大な計算負荷が必要となるため、計算負荷を大幅に低減する方法を開発しました<sup>2)</sup>。これは点推定と呼ばれ、少数のパラメータによるモデル

を使って確率評価を行います。応答の期待値等が一致するような適切な確率密度関数を別途考案することで、少ないモデルの数値解析で確率的応答評価が可能となりました。

開発した方法を四ツ谷地区(建物棟数約 7400 棟)の地震応答シミュレーションに適用しました。一棟当たり 3 個のパラメータによるモデルでもモンテカルロ法(一棟当たり 5000 個のパラメータ)から得られる各建物の損傷確率を概ね再現できることを示しました<sup>3)</sup>。

自動構築した木造モデルの精度および開発した応答評価手法の検証の一環として、これらを適用した実被害地域の地震応答シミュレーションを行いました。併せて、自治体等で近年広く活用されている建物被害曲線(例えば<sup>2)</sup>)に基づく被害評価手法も同地域に適用し、各手法の結果を比較しました。

対象領域は、東北地方太平洋沖地震により木造家屋に顕著な被害が見られた大崎市古川地区で、建物被害分布と表層地盤構造<sup>3)</sup>が既知の約 1.7 km 四方の区域です。建物の位置・階数・面積は住宅地図データから得ましたが、建築年代情報が入手できなかったため、航空写真 5 枚(1947~2006 年、国土地理院撮影)の目視から各建物の年代を推定しました。JMA 古川で観測された本震記録(NS 成分)を工学的基盤に引き戻し<sup>4)</sup>、これを各建物位置の基盤入力として 1 次元非線形解析から表層加速度時刻歴を求め、これを建物モデルへの入力としました。

被害区分(半壊~全壊)と応答値との対応関係は不明瞭ですが、既往の実験結果やヒアリングに基づき最大層間変形角が 1/50、1/30、1/20 を超過する確率を半壊、大規模半壊、全壊に相当するとしました。推定された被害率を図 1.3 に示します。各手法とも、定性的には実被害が顕著な区域の被害率を高く推定するような傾向が確認でき、適用性が示唆されます。解析対象領域内の被害率を被害棟数に換算した結果を実被害棟数と併せて表 1.1 に示します。実被害が過大評価されて

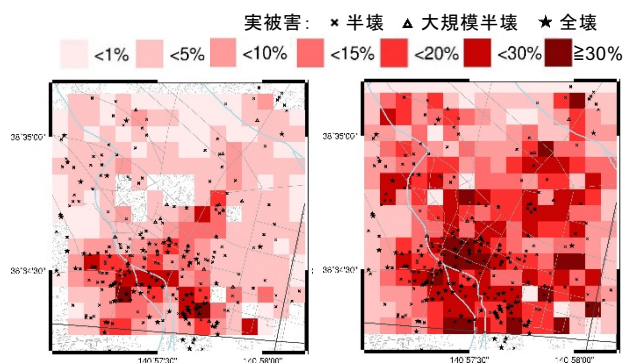


図 1.3 推定された被害率と実被害分布。(左:IES、右:被害曲線に基づく結果)。

表 1.1 解析対象地域内の被害建物棟数(全 4178 棟)。

相当	半壊	大規模半壊	全壊
IES	930	575	275
被害曲線	969	-	670
実被害	190	25	79

いますが、その度合いは IES の方が小さい結果になりました<sup>5)</sup>。解析モデルの設定、評価指標の設定、入力地震動の精度、それぞれに改良の余地はあるものの、これらの実被害地域へ適用結果は、IES を利用した地震被害評価技術の実用性を十分に示すと考えられます。

## 2.2 MeSO-net のデータ処理方法の検討

地震発生時の構造物即時被害推定は構造物の応答解析を通して行われるため、その精度は入力となる地震動をどれだけ正確に推定できるかに依存します。そこで本課題では、関東地方に高密度で設置された MeSO-net により得られた観測波形から、さらに密度の高い首都圏の 100 万オーダの構造物に対する入力地震動を推定する“地震動イメージング”技術の高度化を図ります。

最初に稠密な地震観測網を活かして、lasso やクリギングといった観測データのみを利用したデータ駆動型地震動イメージング手法の開発を行いました<sup>6)</sup>。これらの手法は 10 秒程度より長い周期では比較的有効であるものの、より短い周期の地震動の場合はよい推定結果が得られませんでした。

そこで、新たに地震波が満たすべき波動方程式を物理的拘束条件としつつ、同時に観測波形が定量的に説明可能な地震動を推定するシミュレーション/データ

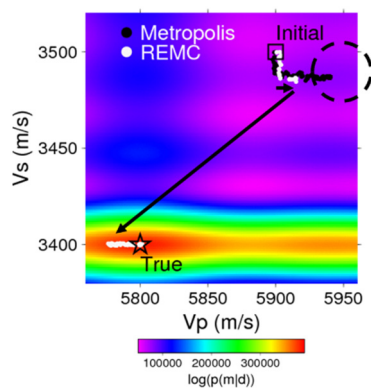


図 2.1 パラメータの事後分布。白丸・黒丸がそれぞれ REMC 法、メトロポリス法による探索結果、黒四角が探索の初期値、星印が真の値。背景はグリッド計算により求めた事後分布の値。

両駆動型イメージング手法を開発しました<sup>7)</sup>。具体的には、波動方程式を解く際に必要となる、地震波速度や層厚といった地下構造に関するパラメータと、震源位置や発震時刻といった震源に関するパラメータを未知変数とし、それらの事後確率密度関数(事後分布)を観測波形に基づきベイズ理論で推定します。このとき、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC 法)の一種であるレプリカ交換モンテカルロ法(REMC 法<sup>8)</sup>)を用いて、パラメータの事後分布からサンプリングを行います。REMC 法は、多峰性のある確率分布においても効率的なサンプリングが可能な手法であることが知られています。

REMC 法を用いた地震動イメージングの有効性を検証するため数値実験を行いました。まず、真の半無限地下構造を仮定して生成した擬似観測波形に対して、REMC 法と一般的な MCMC 法であるメトロポリス法を適用し、パラメータの探索結果を比較しました(図 2.1)。このとき、推定する未知パラメータを P 波速度、S 波速度の 2 種類とし、震源は真の値に固定しました。図 2.1 ではパラメータ数が少ない場合にのみ有効なグリッド計算により求めた事後分布を併せて表示してあります。図 2.1 からは、半無限地下構造を仮定した単純な問題設定においても事後分布が多峰的であること、メトロポリス法では局所解(黒破線で囲まれた領域)にパラメータ探索が収束しているのに対し、REMC 法では真のパラメータ周辺をうまく探索していることがわかります。

さらに、関東地方の地下構造を近似的に表現した三層+半無限の水平成層構造(図 2.2)を用いた場合の数値実験を行い、REMC 法による地震動イメージングが有効であることを確認しました。また、プレートの沈み込みを考慮した詳細な三次元地下構造で生成した擬似データに対して、図 2.2 の水平成層構造を用いて REMC 法で地震動イメージングを行ったところ、構造物の応答解析に重要と考えられる振幅の大きな直達波の再現には一次元の水平成層構造で十分であることを確認しました。

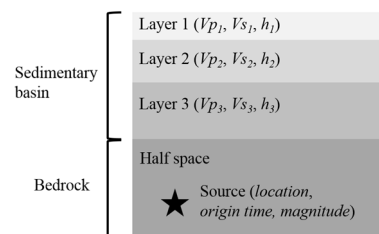


図 2.2 関東地方の地下構造を近似した水平成層構図

次に実際に 2014 年 9 月 16 日に茨城県南部で発生した Mw 5.5 の地震時に MeSO-net で得られた観測波形に対して、REMC 法の基づく地震動イメージング

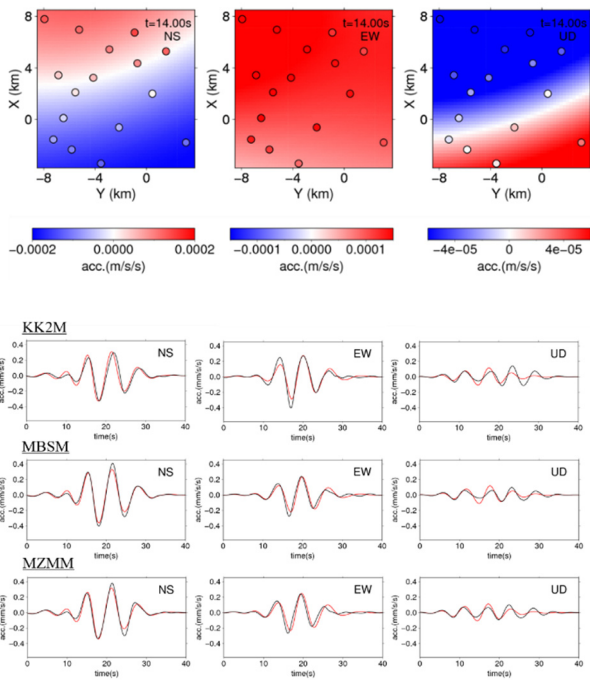


図 2.3 地震動イメージング。(上)発震時刻から 14 秒後の推定波動場に丸印で観測値を重ね表示。(下)5-10 秒の周期帯の観測波形(黒線)と理論波形(赤線)。

を実施しました。イメージングの適用例として、地盤増幅率が大きく 1923 年関東地震時にも大きな被害が報告されている<sup>9)</sup>東京都北東部・千葉県北西部の 12 km 四方を対象地域としました。関東地方の地下構造を図 2.2 のように仮定し、地震計の設置方位<sup>10)</sup>を補正した MeSO-net 加速度波形に REMC 法を適用し、5~10 秒の周期帯の地震動イメージングを行いました。この周期帯は、堆積層から成る関東平野で特に卓越し、かつ高層建築物の固有周期に対応するため、首都機能を持つ関東地方において特に重要です。図 2.3 に地震動イメージング結果を示しますが、観測値と推定値がよい一致を示しています。より短周期の地震動イメージングを行ったところ、およそ 3 秒より長周期の観測波形を再現することに成功しました。

また、構造物の地震動に対する応答の簡易的な評価は速度応答スペクトルを用いて評価することができます。図 2.4 は 1~10 秒の周期帯に対して地震動イメージングを実行し得られた推定波形と、観測波形から計算した速度応答スペクトルを比較したものです。両者は比較的よい一致を示しており、構造物の応答解析という観点からは 1 秒程度より長周期の地震動イメージングが行えると言えます。

構造物は地震動の被害を受けると固有周期が数倍程度長くなるため、一般的な中低層建物から高層建築物に至るあらゆる構造物の大規模被害の推定には、1 秒程度より長周期の地震動評価で十分であることが知

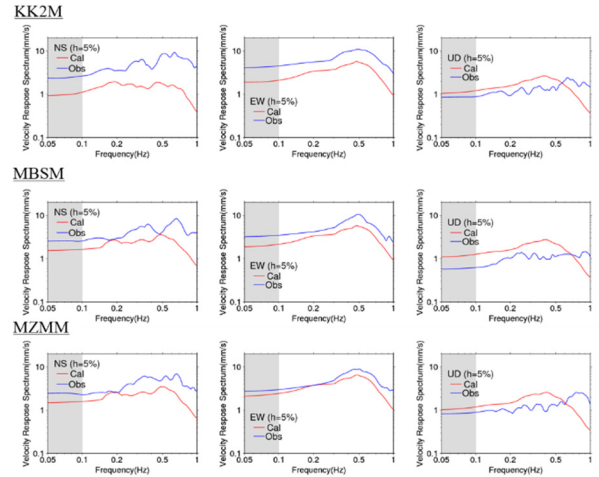


図 2.4 観測波形・理論波形から計算された速度応答スペクトルの比較。黒線が観測、灰色線が理論スペクトル。白色で表示された周波数帯域を対象。

られています<sup>11)</sup>。従って、将来的に本課題で開発した REMC 法による地震動評価手法と、より詳細な構造物応答解析手法を連動させることによって、地震被害の応急評価が可能となり、ひいては都市の二次災害の軽減への貢献が期待されます。

### 2.3 地震被害評価技術の社会基盤構造物への拡張

本研究で開発する地震被害予測手法は、従来の建築建物に加え、交通ネットワーク・ライフライン等の社会基盤構造物にも適用できるよう拡張を図ってきました。拡張には、解析手法と解析モデルの二つが必要です。この内、解析手法は既存の手法を利用することができます。構造形式や材料(鋼・地盤・鉄筋コンクリート)が異なる多岐多様な社会基盤構造物には固有の地震応答解析が必要とされますが、優れた解析手法が開発されており、独自開発の必要はありません。一方、個々の社会基盤構造物に対して、公開されている解析モデルはありません。利用できる都市情報を使って、解析モデルの自動構築を行うことが必要となります。

社会基盤施設の解析モデルの自動構築は、道路橋梁構造物(交通ネットワーク)と埋設管(ライフライン)を対象としました。橋梁構造物は複数の橋脚と橋脚が支える橋桁から構成され、地震応答は橋梁の重さを支える橋脚によって決まります。重い橋桁を支える橋脚の地震応答を正しく解析できる解析モデルを構築することが課題となります。総延長が 100 km にも及ぶ埋設管に対して、被害発生頻度(大きな地震でもキロ当たり 0.1 件以下)を考慮すると、全延長に対して詳細な解析モデルを作ることは効率的ではありません。埋設管全体、被害の発生が懸念される部分、被害発生個所、という階層的な解析モデルを自動構築することが必要です。

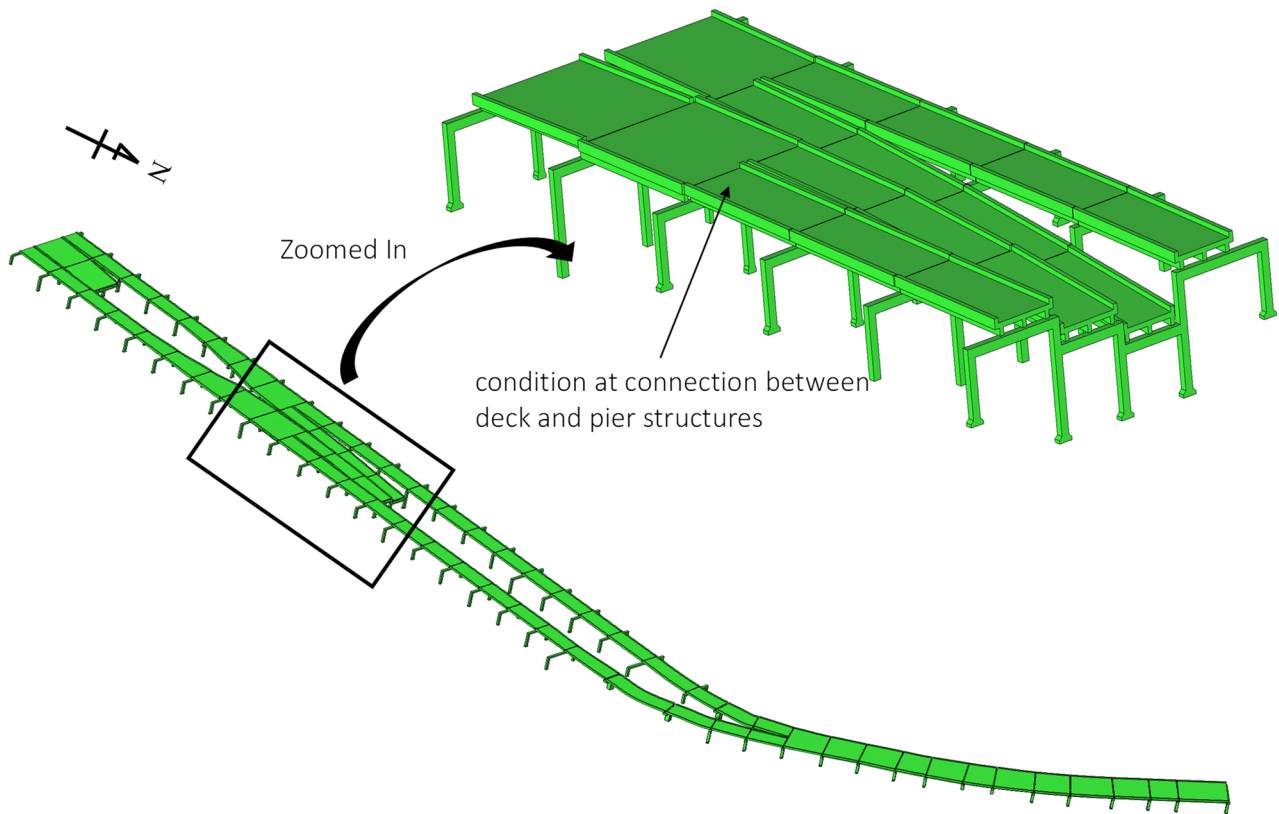


図 3.1 橋梁構造物に対して自動構築されたソリッド要素モデル。橋桁(上部)と橋脚の構造部材から精密なモデルを構築。ソリッド要素モデルを簡略化することで、梁要素モデル・質点系モデルも自動構築可能。

現在、社会基盤構造物の多くは、CAD (Computer Aided Design) によって設計され、構造部材のデジタルデータが利用できます。しかし、数十年前に建設された構造物にはこのようなデジタルデータが利用できません。本研究では、デジタルデータの代わりに設計図面をデジタル化したデータを利用することも行いました。このようなデータから解析モデルを構築する際、材料特性や構造物の詳細部のパラメータを推定することも必要となります。パラメータの推定を含め、解析モデルを合理的に構築するためのさまざまな工夫を行いました。一例として図 3.1 に橋梁構造物に対して自動構築された解析モデルを示します。適切なデータを変換することで、精緻な解析モデル(ソリッド要素モデル)が自動構築できるようになりました。

#### 2.4 個別建物シミュレーションの精度・信頼度についての検討(サブプロジェクト②との連携)

都市全体など広範囲の被害推定を行うためには解析対象領域のモデル生成が必要となりますが、100 万オーダの建物のモデルを手作業で生成することは不可能です。このため、IES では、地理情報システムおよび行政データから S 造、RC 造、木造のモデルを自動構築できるようにしています。推定の要求精度と使用可能な計算資源に応じて非線形 MDOF モデル、材端パネ

モデル、FIBER モデルを選択することもできます。

自動構築された RC 造 MDOF モデルの精度の検証を行いました。RC 中層建物3棟に対し、設計図から手作業で作られた FEM モデル(サブプロ②)の push-over 解析から得られた骨格曲線を有する MDOF モデルを参考解としました。自動構築された MDOF モデルの地震応答解析結果が、参考解と同程度となることを確認しました。

#### 2.5 構造部材の損傷を判定する簡易センサの開発

各家屋・構造物の被災度を簡易に判定するため、小型安価な地震センサを開発することとしました。応急危険度判定の損傷指標である層間変形角に着目し、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 加速度計とジャイロセンサを用いて、層間変形角を計測することを目的としました。

本研究では、MEMS 加速度センサのみならず、ジャイロセンサも採用します。方針としては、センサが傾斜すると、加速度センサの各軸で計測される重力の分力が変化することを利用して残留層間変形角を推定し、ジャイロセンサが出力する角速度を時間積分することでセンサの回転角(経験最大層間変形角に相当)を推定します。

図 5.1 は本研究で開発された 6 軸地震センサの試

作機の1つです。MEMS 加速度計、ジャイロセンサの他にマイクロコントローラ、フラッシュメモリ、電源回路等で構成され、安価で低消費電力となるように設計されています。

1軸振動実験を行い、角速度を積分して層間変形角の時系列を精度よく推定できることを確認しました。また、角度に換算して0.1度以下の精度で残留層間変形角を推定できることが確認されました。

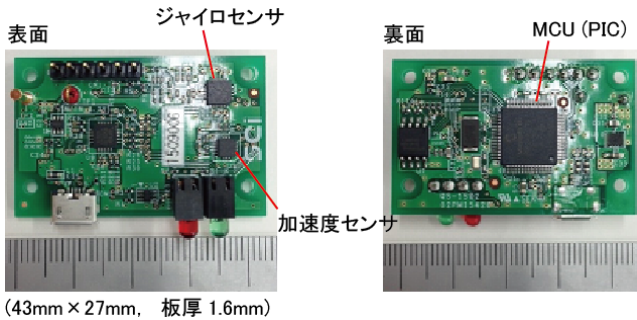


図 5.1 6軸地震センサ。

#### 参考文献

- 1) Ichimura et al., Implicit Nonlinear Wave Simulation with 1.08T DOF and 0.270T Unstructured Finite Elements to Enhance Comprehensive Earthquake Simulation, SC15: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, Article No.4, Gordon Bell Prize finalist.
- 2) Iiyama, K., Hosono, M., Ishida, T., Fujita, K., Yamazaki, Y., Ichimura, T., Wijerathne, L., Morikawa, H., Hori, M., Yamada, S., Sakata, H., Yamanaka, H., and Hirose, S.: Practical method for damage evaluation based on point estimate considering uncertainty of structural properties, Kuala Lumpur (AWAM International Conference of Civil Engineering), 2015.
- 3) 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ: 南海トラフ巨大地震の被害想定について(第一次報告)(平成24年8月29日発表)南海トラフの巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要.
- 4) Goto, H., Mitsunaga, H., Inatani, M., Iiyama, K., and Morikawa, H.: Shallow subsurface structure estimated from dense aftershock records and microtremor observations in Furukawa district, Miyagi, Japan, JPGU, May 23-28., 2016.
- 5) 盛川仁、飯山かほり、後藤浩之: 大崎市古川地区における2011年東北地方太平洋沖地震の本震記録を用いた地震動分布の簡易推定、日本地震学会2016年度秋季大会, 2016.
- 6) 水迫覚信・長尾大道・廣瀬慧・加納将行・堀宗朗: スペースモデリングによる首都圏における地震動分布推定手法の開発、第34回地震工学研究発表会, 2014.
- 7) Kano, M., Nagao, H., Ishikawa, D., Ito, S., Sakai, S., Nakagawa, S. Hori, M. and Hirata, N.: Seismic wavefield imaging based on the replica exchange Monte Carlo method, Geophysical Journal International, Vol. 208, No. 1, pp. 529-545, 2017.
- 8) Hukushima, K. and Nemoto, K.: Exchange Monte Carlo method and application to spin glass simulations, Journal of the Physics Society of Japan, Vol. 65, No. 6, pp. 1604-1608, 1996.
- 9) 諸井孝文・武村雅之: 関東地震(1923年9月1日)による被害要因別死者数の推定、日本地震工学会論文集、第4巻、第4号、2004.
- 10) 加納将行・長尾大道・酒井慎一・中川茂樹・水迫覚信・堀宗朗・平田直・汐見勝彦・本多亮: 首都圏地震観測網(MeSO-net)地震計の設置方位の検証、地震2、68巻、31-44頁、2015.
- 11) 神田和紘・境有紀: 計測震度のフィルタを修正することによって建物被害率と対応させる試み、日本地震工学会論文集、第12巻、第7号、19-37頁、2012.

## I-2-2 大規模数値解析結果の先端可視化技術の開発

廣瀬壮一(東京工業大学 環境・社会理工学院)

### 1. 研究の目的

本研究全体で開発する地震被害評価手法は大規模数値解析の計算結果に基づきますが、この評価手法には膨大な量の計算結果を効率的に可視化することが必須となります。このため、計算結果の3次元視とマルチスケールの可視化を可能とする先端的な可視化技術を開発します。併せて、応急評価にも使えるように高速処理も実現します。得られた都市全体の被害情報をわかりやすく可視化することで、広域の都市全体から地区・街区といった都市の部分まで、評価された地震被害の様相を容易に理解できるようになることが期待されます。

### 2. 成果の概要

#### 2.1 3次元化・高速化

構造物の揺れは、構造物の性質(固さと強さ)に影響されますが、それと同様、構造物を揺らす地盤の地震動にも影響されます。河川の氾濫の結果、都市の地盤は肥沃ではあるものの複雑です。この結果、都市の構造物そのものの多様性に加え、地盤による地震動の増幅が場所場所異なるため、構造物の揺れや大きな揺れが引き起こす被害の空間分布は複雑になります。似通った構造物が隣接していても、被害の有無や程度の差がある、といった極端な例もあります。

本研究で開発している大規模数値計算を使う被害評価手法では、地盤と構造物の両方の物理過程を数値解析するため、高い空間分解能で複雑な被害分布を評価することができます。その代り、得られる数値計算結果は膨大です。高さ方向に延びる構造物の解析モデルを使うため、数値解析結果は3次元的ですし、建物一棟一棟を計算しているため、1mの空間スケールで街区の被害分布を詳細に調べたり、1kmの空間分布で地区全体の被害分布を俯瞰することにも使えます。

3次元的、かつ、密から疎まで様々なスケールで都市の地震被害の計算結果を分析したり、提示したりすることは容易ではありません。しかし、このような分析は適切かつ合理的な防災・減災には必要不可欠です。提示は防災教育や防災意識高揚につながることを期待されます。

大規模数値解析結果の分析・提示のためには、計算結果の可視化が必要です。このため、開発された被害評価手法に適した先端可視化技術の開発を行いま

した。具体的には、従来の被害分布という静止画を作る2次元可視化を超えて、都市全体を俯瞰できる動画を作る3次元可視化の技術です。この3次元可視化には、街区単位で一棟一棟の地震応答を可視化することや、地区全体での構造物群の地震応答を可視化するマルチスケール可視化も含まれます。

街区単位の可視化からは地区単位の可視化、その逆となる地区単位の可視化から街区単位の可視化、というスケールの切り替えは分析には重要です。そもそも3次元可視化では、空間的な被害情報を平面に表示するための計算が必要で、この計算をさらに高速処理することでスケールの切り替えを可能としました。3次元可視化のスケールの切り替えには、都市全体ないし地区単位で可視化する場合には簡便化した都市モデルを、街区単位で可視化する場合には詳細な都市モデルを用います。この結果、可視化の際の計算や表示に

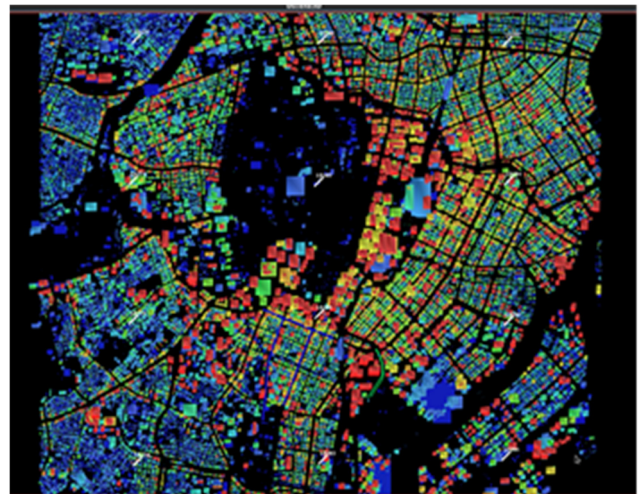


図1 千代田区近傍の地震時の構造物群の揺れを可視化した例。詳細な都市モデルを簡便化した都市モデルがこの可視化に利用。地区レベルで見ると、簡便化された都市モデルを使った可視化で十分であることが確認された。

使用するデータ量を圧縮し、柔軟にスケールを変更して、都市の揺れを可視化することに成功しました(図1、図2参照。詳細は参考文献<sup>1)</sup>参照)。

#### 2.2 サブプロジェクト③との連携

サブプロジェクト③と連携して有用な可視化について検討した結果、地方公共団体など一般ユーザ用の実用的なシステムとすること、及び、火災シミュレーション



などの、地震被害以外の可視化にも対応するシステムを構築することも重要であるとの認識で合意したことから、それらに対応したシステムを開発しました。

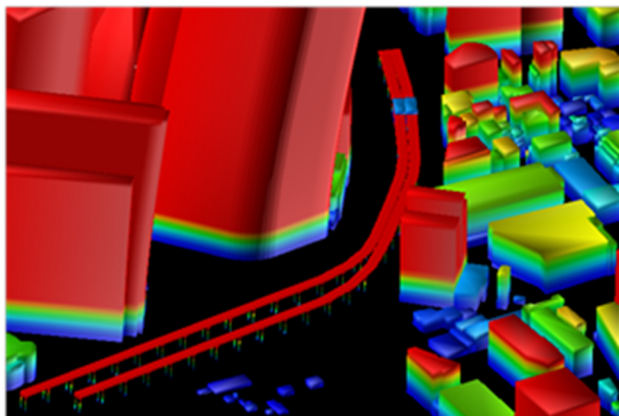


図 2 図 1 の地区レベルの可視化を街区レベルの可視化に変更した例。詳細な都市モデルが使われており、複雑な形状を再現した構造物群の詳細な揺れの可視化が可能。

### 2.2.1 ウィンドウズ版化

2.1 節で示した可視化においては、大規模数値計算による膨大なデータを高速に表示するために、最速の画像処理能力を持つ Linux マシンを用いてシステム開発を行っています。しかし、可視化技術の実用的な活用を考えたときに、実際の可視化システムのユーザとしては行政担当者や住民などが想定されます。そのため、通常は高性能な Linux マシンが利用できる環境は多くないと考えられます。そこで、本研究では、Linux 上で開発された可視化システムを、一般的に普及している Windows マシンにおいても利用できるように、機能の改良を行って可視化システムの可搬性を実現しました。作業に用いた Windows の計算機は、画像処理を担当する GPU プロセッサを搭載していますが、それ以外は市販されているノート PC です。

ノート PC の性能は最速の Linux マシンに比べると劣るため、Linux マシンで開発した機能をすべてノート PC に搭載することはできません。ノート PC 上では、東京 23 区全体表示ではなく、各区単位で構造物群の地震応答を表示できるようにしました。当然ながら、可視化における回転や拡大の機能は残しています。また、Linux マシンと同様、街区単位の可視化から地区単位の可視化、その逆となる地区単位の可視化から街区単位の可視化、というスケールの切り替え機能も保持しています。区単位の可視化では、構造物を矩形で表示し、街区単位の表示のときは、構造物を多角形で表示することによって可視化の効率性を向上させています。Linux マシン用に開発されている高速なレンダリングモジュールを標準のレンダリングモジュールで置き換えているために、表示速度は多少遅くなりますが、構造物の

時系列変位のアニメーションの表示も可能となっています。

### 2.2.2 火災シミュレーションの可視化

地震時においては、構造物の揺れそのものによる被害に加えて、その後の火災による被害も想定しておく必要があります。そのため、火災シミュレーションによる結果を効率よく可視化することが求められています。

本研究で開発した先端可視化技術を用いれば、原理的には構造物毎に得られた、あらゆるシミュレーションデータを可視化することが可能です。しかし、シミュレーションのデータはそれぞれ固有のフォーマットで出力されますので、すべてのシミュレーションの出力データをそのまま使って可視化することはできません。そこで本研究では、火災シミュレーションの出力のフォーマットを分析して、可視化システムの入力データに適合するデータ変換プログラムを開発しました。具体的には、火災シミュレーションから、建物毎の着火時刻と消失時刻を読み込んで、それを建物データと照合した上で、可視化システムで利用可能なデータを作成します。

図 3 は、ある時刻における新宿区の一街区の建物一棟ごとの火災被害状況を可視化したもので、焼失前あるいはシミュレーション対象外を白色、着火～消失までを赤色、焼失以降を黒色で表しています。

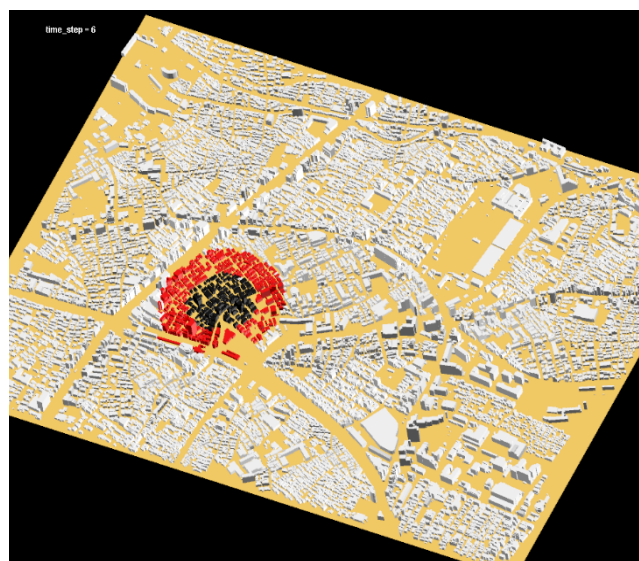


図 3 新宿区の一街区における建物ごとの火災被害状況を可視化した例。

### 参考文献

- 1) Ichimura et al., Implicit Nonlinear Wave Simulation with 1.08T DOF and 0.270T Unstructured Finite Elements to Enhance Comprehensive Earthquake Simulation, SC15: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, Article No.4, Gordon Bell Prize finalist.

## II-1 中高層建物の崩壊余裕度定量化

### II-1-1 鉄骨造高層建築物の崩壊余裕度定量化

高橋元美(鹿島建設)

#### 1. はじめに

未曾有の被害をもたらした 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震は、想定を超える地震に対する対処の重要性を我々に再認識させました。また、繰り返し起こる大規模な余震や長時間にわたる長周期地震動など、これまでとは異なる事象も経験しました。この地震の経験を踏まえた上で、近い将来にも発生が予想される南海トラフを震源域とする巨大地震や首都直下地震に対して、耐震工学的見地からは、建物が崩壊するまでの余裕度の定量化が課題の一つとされます。

現行の耐震設計では、想定地震力に対して必要な耐力と変形能力を建物に付与することで安全性を確保していますが、想定を超える地震力に対する建物の挙動や地震後の建物の状態は明示されません。設計用地震動はあくまで想定であり、実際にはそれを上回る可能性があるという観点、耐震設計の高度化と性能表示の観点から、上記課題を解決する必要があると考えました。

そこで本研究では、都市部における市民の生活や事業の基盤である鉄骨(S)造高層建物を対象として、大型振動台実験(図 1)を行い、損傷の進展と崩壊過程を明らかにして、崩壊余裕度の定量的評価法を構築することを目指しました。

大型振動台実験では、防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)を利用しました。本施設を利用した類似の研究として、実大 4 層 S 造建物の完全崩壊実験<sup>2)</sup>、21 層縮約 4 層 S 造建物の実験<sup>3)</sup>などが挙げられますが、高層建物を対象とし、縮約層を設けず骨組全体形に対して、その崩壊挙動を確認した実験は過去に例がありません。

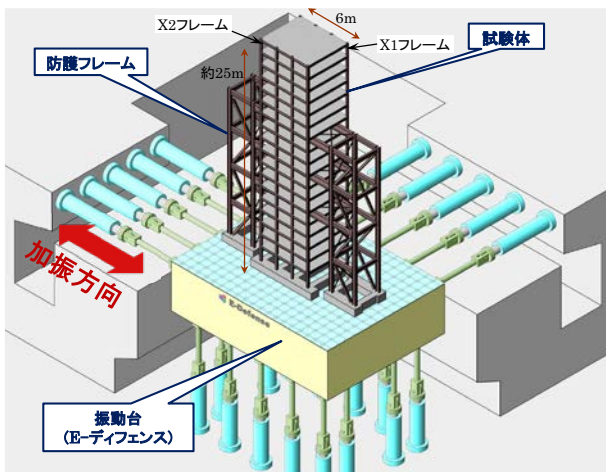


図1 18層S造骨組のE-ディフェンス振動台実験

本研究では、純ラーメン構造によるごく一般的なS造骨組(18層)の崩壊挙動を確認するためE-ディフェンス振動台実験を実施しました。さらに、この実験で得られたデータの分析やシミュレーション解析を通じて、崩壊余裕度評価用解析モデルについて検討して、その評価法を提案します。

#### 2. 振動台実験

実験の基本方針を以下に示します。

- (1) 1980～90年代建設の一般的なS造高層均等ラーメン構造を対象とし、試験体は柱梁耐力比が1.5程度の梁降伏先行型で設計する。
- (2) 入力地震動は南海トラフを震源とする三連動地震を想定した長周期地震動とし、平面骨組の崩壊挙動を把握するため、1方向入力とする。
- (3) 順次加振レベルを上げながら、複数回の加振により試験体の崩壊挙動を確認する。

#### 2.1 試験体

E-ディフェンスの高さ制限(約27m)を考慮して、試験体の縮尺を1/3、層数を18層、高さを約25mとしました。平面形状は入力方向6m(2m×3スパン)、入力直交方向5m(1スパン)の長方形です。梁伏図および軸組図をそれぞれ図2および図3に示します。

柱は1～6階が溶接組立箱形断面でSM490A、それより上層はBCR295としました。大梁および小梁の材質はそれぞれSM490AおよびSS400である。柱梁接合形式は2～7階までを内ダイアフラム形式、それより上層は通しダイアフラム形式としました。

スラブはFc21N/mm<sup>2</sup>のコンクリートとSD295の鉄筋による鉄筋コンクリート造(t=50mm)としました。相似則に基づく調整用の重錘は、小梁下フランジに鋼製プレートを取り付け、コンクリートを充てんしました。単位床面積あたりの地震時重量は7.7kN/m<sup>2</sup>です。

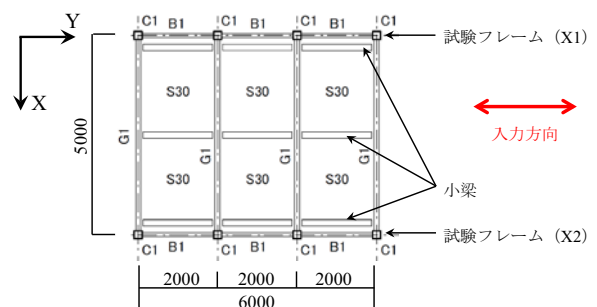


図2 試験体の梁伏

## 2.2 入力地震動

実験に用いる入力地震動は、南海トラフを震源とする東海・南海・南海の三連動を想定した長周期地震動としました。入力地震動の作成方法を以下に示します。

- (1) 図4に示すように5つの震源を仮定し、これら震源に比較的近い都市部として愛知県津島地点について、バラツキを考慮して2100ケースの模擬地震動を作成する<sup>4)</sup>。
- (2) 作成された2100ケースの模擬地震動の速度応答スペクトルの平均を包絡するようにターゲットスペクトルを定める(図5、pSv110cm/s)。
- (3) 位相特性には、継続時間が長く、スペクトル特性が比較的フラットな地震観測記録として、2011年東北地方太平洋沖地震の東京芝小学校におけるMeSO-net観測記録を採用する。

今回の実験の対象となる周期帯(T=1.8:弾性時~3.9秒:崩壊時)を図中に示しました。試験体は加振により塑性化し固有周期が変化しますが、実験上、共振する周期に入力を調整することが困難であることと、平坦なスペクトルではどの周期帯でも共振すると考えられることと、地域特性による特定の周期帯のピークを設けていません。

作成された入力地震動の加速度波形を図6に示します。最大加速度は420gal、継続時間は460秒です。実験で試験体に入力する地震動は、相似則に従い時間軸を $1/\sqrt{3}$ に縮める(継続時間:270秒)とともに、防護フレームの揺れを極力抑えるために、5~6Hzで漸減するLow Passフィルタ処理を施しました。

理を施しました。

## 2.3 実験結果

加振は平成25年12月9日~11日の3日間実施しました。図5に示したpSv110cm/s(長周期平均レベル)の地震動を基準とし、これを係数倍することで、耐震設計レベル、南海トラフ三連動想定長周期レベル、想定超レベルと順次入力を大きくして複数回の加振を行いました。また、試験体を崩壊させるために、E-ディフェンス加振能力の限界に近い、継続時間を半分(135秒)としたpSv420cm/sの地震動もあらかじめ用意し、最終的に試験体の崩壊を確認しました。

実験経過と骨組損傷状況を表1に示します。加振レベルが上がるにつれ、徐々に部材端の塑性化箇所が増え、梁端下フランジの破断開始はpSv220cm/sからでした。さらに加振レベルを上げると、その破断箇所が増え、最終的には1~5階のほぼすべての梁端が破断しました。pSv420cm/sでは、下層階の残留変形が顕著になり、3回目で試験体低層階が大変形し、防護フレーム大梁に着座、崩壊と判定し

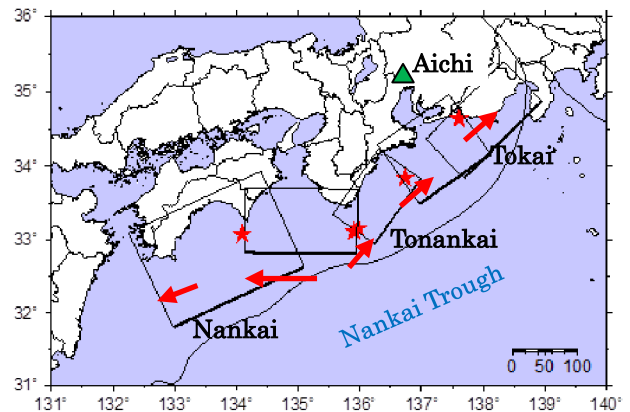


図4 震源仮定と想定サイト

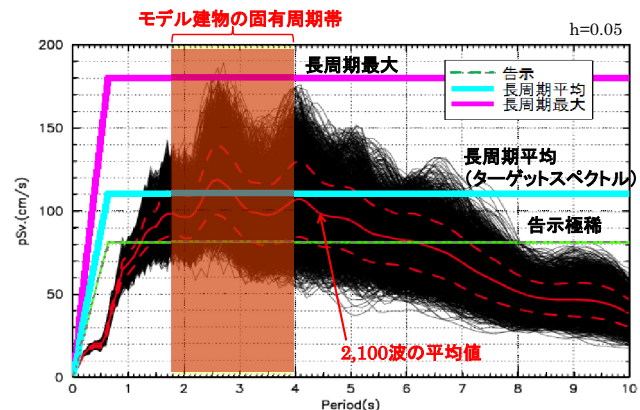


図5 速度応答スペクトルとターゲットスペクトル

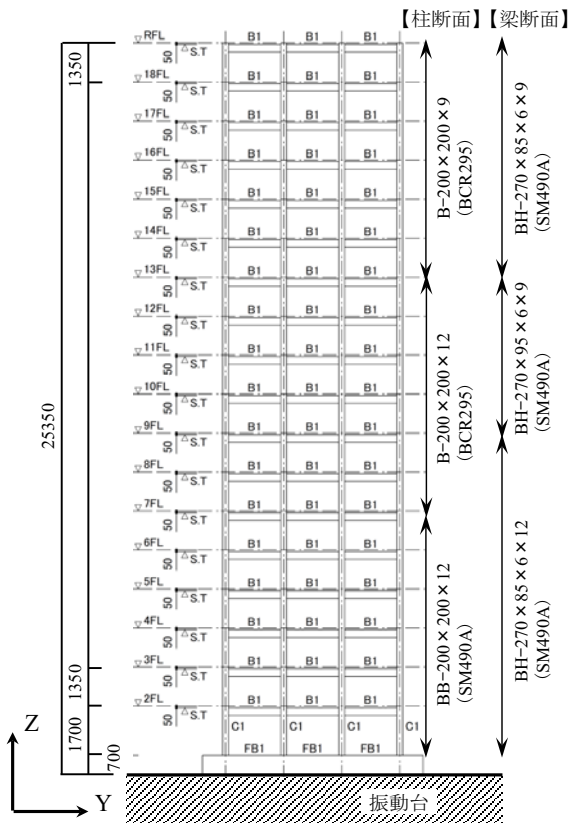


図3 試験体の軸組

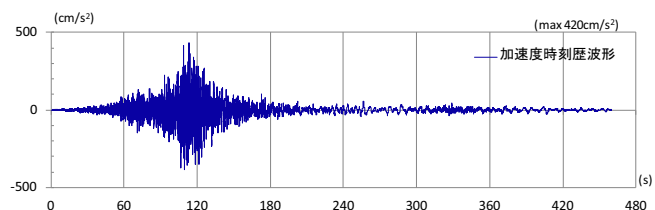


図6 入力地震動の加速度波形(長周期平均)

振動台を停止しました。

最終加振終了後の試験体の状況を写真1に示します。試験体の1～5階が大変形し、最終的に防護フレームに着座し、支えられた。試験体は、下層階の全梁端が破断したことで柱が長柱化、水平変位の増大に伴うPA効果によって、柱が水平力負担能力を喪失し、崩壊に至ったと認められます。

### 3. シミュレーション解析

解析条件を以下に示します。

- ・ 部材レベルでモデル化した平面骨組モデルであり、弾塑性は柱の軸方向と曲げ変形、梁の曲げ変形および接合部パネルのせん断変形に考慮する。
- ・ 梁の履歴特性は、破断前において剛性劣化しないTri-linear型、破断後は応力解放を伴う劣化型(図7)とする。折点は材料試験結果に基づき算定した。スラブ効果による梁曲げ剛性増大率は1.2を仮定し、耐力にはその効果を考慮しない。
- ・ 柱はM-N相関を考慮して、履歴特性は剛性劣化しないBi-linear型とする。
- ・ PA効果は、水平変形による付加せん断力を各層に作用させることで考慮した。
- ・ 剛床を仮定し、1階柱脚は固定とした。
- ・ 質量は床重心位置に集中させた。(各階211kN)
- ・ 入力地震動は、振動台で実際に入力されたものとし、加振スケジュールに従って連続入力した。
- ・ 減衰は、実験時の実測に基づき、1次モード1.15秒に対し0.8%、2次モード0.38秒に対して0.2%とするRayleigh減衰とする。

シミュレーション解析の結果を実験結果と比較して示します。図8は応答最大層間変形角です。pSv220cm/sまでは実験結果と比較的対応しており、大変形のpSv420cm/s\_1回目では、下層階での変形集中は表現できていますが、その値は実験と比べて大きいです。

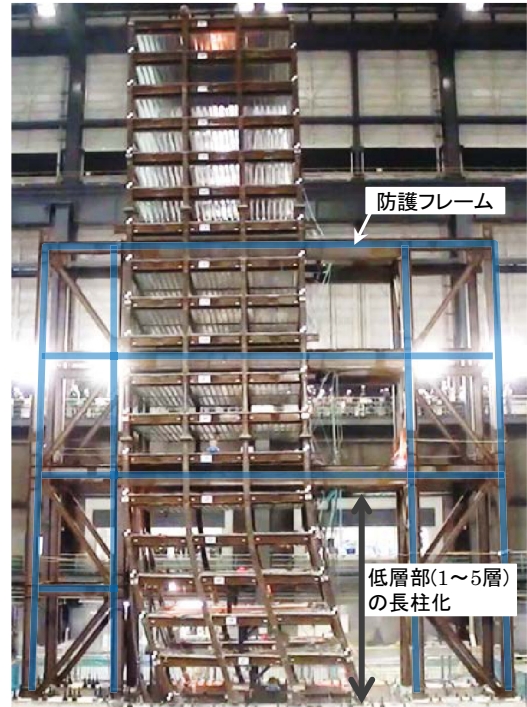


写真1 試験体の最終崩壊状況

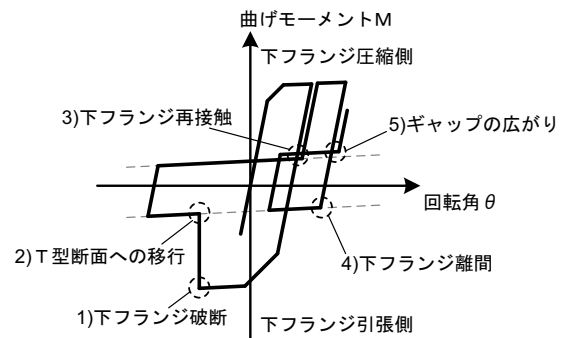
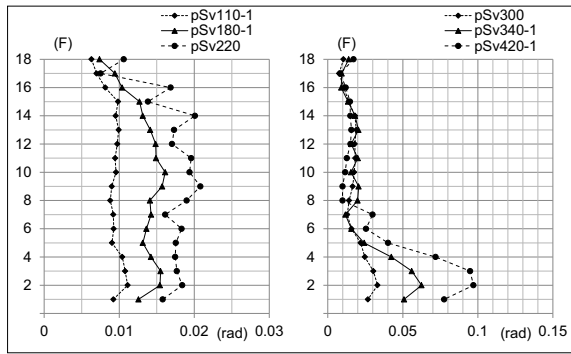


図7 梁の下フランジ破断を考慮した履歴特性

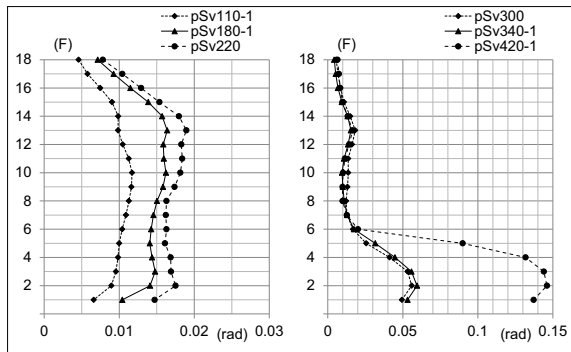
表1 実験経過と骨組損傷状況

日程	加振レベル (pSv h=5%)	地震想定	試験体 頂部変位	試験体最大 層間変形角	試験体の状況(状態変化)
12/9	40cm/s (0.37倍)	設計レベル1	8.5cm	1/170(14F)	弾性挙動(損傷なし)
	81cm/s (0.74倍)	設計レベル2	15.3cm	1/110(3,14F)	梁端塑性化(2~4F)
	110cm/s (基準=1倍)	長周期平均	20.6cm	1/94(14F)	梁端(2~7F)、柱脚(1F)塑性化
12/10	110cm/s (1倍)	長周期平均	21.7cm	1/91(14F)	同上
	180cm/s (1.64倍)	長周期最大級	30.8cm	1/62(11F)	梁端(2~14F)降伏、梁端(2~5F)亀裂の兆候
	180cm/s (1.64倍)	長周期最大級	31.7cm	1/55(11F)	梁端(2~14F)降伏、梁端(2~5F)亀裂発生
12/11	220cm/s (2倍)	長周期想定超	33.0cm	1/53(11F)	梁端(2F)破断
	250cm/s (2.27倍)	長周期想定超	31.6cm	1/45(3F)	梁端(2~3F)破断
	300cm/s (2.73倍)	長周期想定超	37.5cm	1/31(2F)	梁端(2~5F)破断
	340cm/s (3.1倍)	長周期想定超	49.0cm	1/16(2F)	梁端破断上階に進展、柱脚(1F)局部座屈
	340cm/s (3.1倍)	長周期想定超	56.3cm	1/13(2F)	梁端破断上階に進展、柱脚(1F)局部座屈進展
	420cm/s (3.8倍)×3回	長周期想定超	64.7cm 100cm 崩壊	1/10(2F) 1/6(2F) 崩壊	下5層全梁端破断、柱脚(1F)破断、崩壊

※層間変形角について、1~3F:レーザ変位計により計測、4~18F:加速度積分により算定



(a) 実験



(b) 解析

図8 応答最大層間変形角

図9は2階の層せん断力と層間変形角の関係です。層せん断力は実験に比べて多少小さめです。加えてpSv340cm/s\_2回目とpSv420cm/s\_1回目では、残留変形も多少大きめに評価されています。しかし、崩壊直前のpSv420cm/s\_2回目および3回目では、層せん断力、変形ともに良好に実験を追跡できています。

#### 4. 評価法と検証

崩壊余裕度および健全度評価の考え方を図10に示します。地震前において、劣化を考慮した解析により建物のスケルトンカーブ、崩壊点、健全度区分を決定し、地震後には、モニタリング結果に基づき、応答点を特定して、崩壊余裕度の算出と健全度判定を行います。

崩壊は、地震直後において建物が構造的損傷を受け、耐震安全性の観点で継続使用できない状態と定義し、解析に基づき、層間変形角を指標として算出します。

前述シミュレーション解析モデルにより、振動台実験入力予定波を入力とした地震応答解析を実施した。余震を考慮した評価を行うため、余震を本震と同一と仮定して2連続解析を行いました。入力レベルはpSv220、250、300、340、420cm/sの5ケースです。

#### 4.1 スケルトンカーブと崩壊点

解析に基づき、応答変位が大きくなる2階について、すべての入力レベルの2回目の層せん断力と層間変形角の関係(正側)を重ね描き、その包絡線を目安に設定したスケ

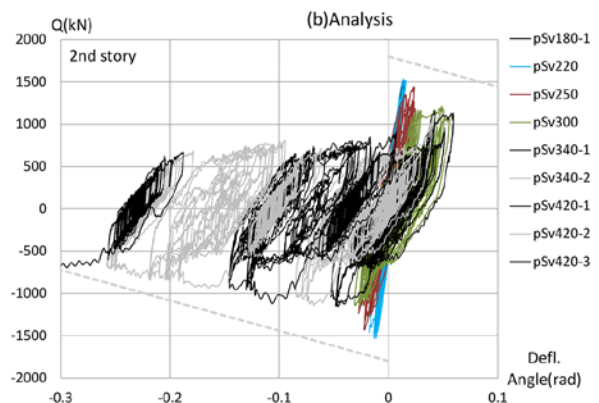
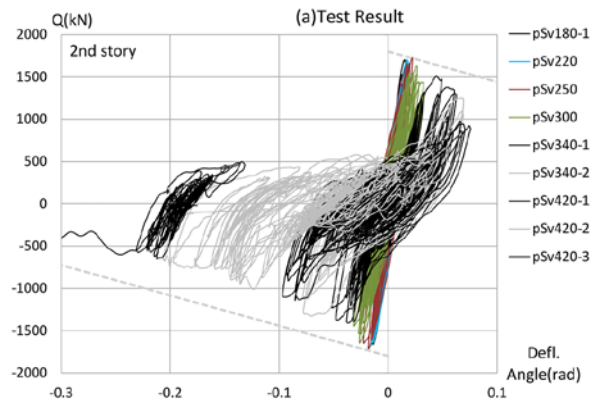


図9 2階の層せん断力-層間変形角関係

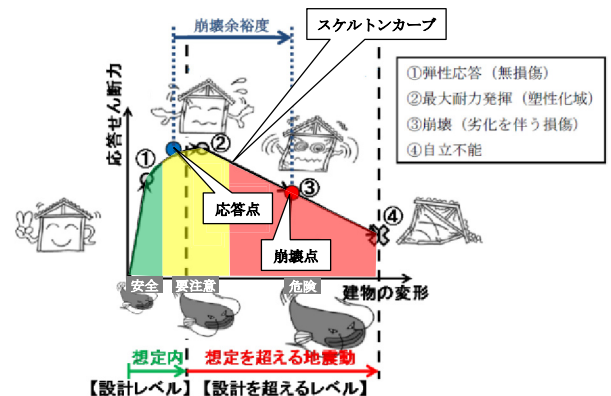


図10 崩壊余裕度および健全度評価の考え方

ルトンカーブが図11の赤実線です。

崩壊点は解析における梁端の破断や骨組剛性の低下の状況から判断して<sup>5)</sup>、pSv340cm/s\_2回目入力後とし、層間変形角 $R=1/25\text{rad}$ (図11の赤丸)としました。

#### 4.2 避難限界と健全度区分

避難限界は余震により崩壊に達する危険性があり、屋外へ避難を要する限界です。pSv340cm/s\_2回目入力後が崩壊点ですので、避難限界はその1回目入力後となり、 $R=1/50\text{rad}$ です(図12の紫丸)。

健全度区分は、①安全(軽微損傷以下)、②要注意(健全度低下)、③危険(余震により崩壊の危険性あり)の3つです。①と②の境界を「避難準備限界」、②と③の境界を「避難限界」と便宜上呼ぶことにします。

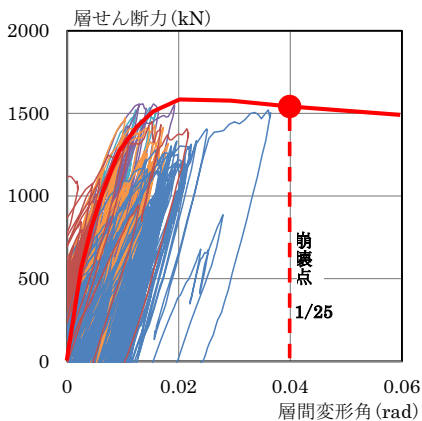


図 11 スケルトンカーブと崩壊点

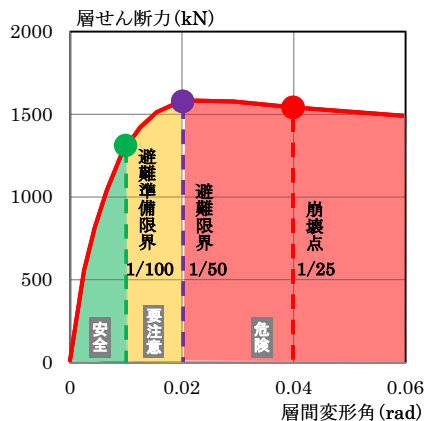


図 12 避難限界と健全度区分

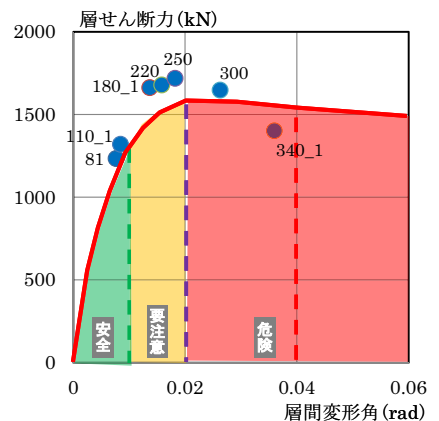


図 13 健全度区分と応答点

①は建物を継続使用できる状態であって、梁端の一部に曲げ降伏が生じる程度の損傷であり、解析に基づき避難準備限界は  $R=1/100\text{rad}$  としました。②は一部の部材に亀裂など劣化を伴う損傷が生じており、専門家による調査を要します。③は余震により崩壊点に達する可能性があります。健全度区分の結果を図 12 に示します。

### 4.3 応答点と崩壊余裕度評価

応答点は、モニタリングにより応答加速度などを計測することにより算出します。図 13 の青丸が実験における応答点です。試験体各階に設置した加速度計により計測した加速度に各階質量を乗じることで層せん断力を算定し、層間変形角は計測値としました。ここでの応答点は層せん断力が最大となる点です。

崩壊余裕度を算出すると、

- ・ pSv180 入力時:  $0.04 \div 0.014 = 2.86$  倍
- ・ pSv300 入力時:  $0.04 \div 0.026 = 1.54$  倍

となります。同じく健全度判定を行うと、

- ・ pSv180 入力時:  $R=1/71\text{rad}$  程度で要注意【黄】
- ・ pSv300 入力時:  $R=1/38\text{rad}$  程度で危険【赤】

となります。

### 5. まとめ

ここで実施した実験により得られたデータは平成 28 年 4 月より、防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターのホームページ上で公開されています。

この実験結果を踏まえ、崩壊の定義、余裕度を定量化するための指標(物理量)、余震に対する安全性を含めた健全度区分について検討しました。崩壊を解析によって評価する場合、倒壊(自立できない状態)まで予測するのは難易度が高く、ここでの崩壊は耐震安全性の観点で継続使用できない状態としました。崩壊余裕度定量化のための指標は、建物ユーザにも比較的わかり易い「変形」とし、現状解析技術の一部拡張して、設計領域超の変形レベルまで再現可能

な解析法を提案しました。健全度区分では、余震の影響を確認する解析を行うことにより、その影響を考慮した区分の設定を試みました。

本評価法の検証を行い、その精度が実用でカバーできる範囲に納まることを確認しました。本評価法が地震直後の意思決定を支援するツールとなることを期待します。

### 謝辞

本報は平成 24～28 年度文部科学省委託研究「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト ②都市機能の維持・回復のための調査研究」の一部です。

### 参考文献

- 1) 若月雄大、吹田啓一郎：20 層鋼構造骨組の倒壊挙動に柱梁耐力比が及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.807-808、2011 年 8 月
- 2) 吹田啓一郎、松岡祐一、山田哲、島田侑子、多田元英、笠井和彦：震動台実験の概要と弾性応答特性—実大 4 層鉄骨造建物の完全崩壊実験 その 1—、日本建築学会構造系論文集、第 635 号、pp.157-166、2009 年 1 月
- 3) 長江拓也、鍾育霖、島田侑、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛、斉藤大樹、北村春幸、福和伸夫、日高桃子：超高層建物の耐震性能を検証する実架構実験システムの構築—E-ディフェンス振動台実験—、日本建築学会構造系論文集、第 640 号、pp.1163-1171、2009 年 6 月
- 4) 国土交通省：超高層建築物等における長周期地震動への対策試案、2010 年 12 月。
- 5) 都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト：建物の崩壊余裕度評価のための技術資料—高層鉄骨造建物編—、2017 年 3 月

II-1-2 RC 造建物の崩壊余裕度定量化

勝俣英雄(大林組)

1. はじめに

近い将来にも発生が予想される南海トラフを震源域とする巨大地震や首都直下地震に対して、都市の災害を可能な限り低減することが望まれます。一方、現行法令下の耐震設計では、想定する地震力に対して必要な耐力と変形能力を建物に付与することで建物の耐震性を確保していますが、想定を超える地震力に対する建物の挙動や地震後の建物の状態は示されていません。さらに、地震後に建物があとどれくらいの余震に耐えるのか判断できないという課題があります。

本研究では、都市に多く存在する中高層集合住宅が直下型地震を受けた場合を想定しています。1995年以降の基準に基づいて設計・施工された6層耐震壁付きラーメン構造によるRC板状建物を、崩壊まで加震する振動台実験をE-ディフェンスにて実施しました。さらに、この実験で得られた結果や、構造要素に対する静的載荷実験、ならびにシミュレーション解析を通じて、崩壊余裕度評価手法について検討し、提案したものです。

2. 対象建物の試設計

本研究の対象とする6層耐震壁付きラーメン構造による板状建物を現行設計基準に基づき試設計を実施しました。試設計建物は、地域係数 $Z=1.0$ 、第2種地盤に建つRC造の共同住宅とし、地上6階、延面積 $1760\text{ m}^2$ としました。骨組形式はX(長辺)方向を3スパンのラーメン構造、Y(短辺)方向を2スパンの耐震壁付ラーメン構造としています。図1に平面図を、図2に軸組図を示します。構造上の特徴は、Y方向は2階以上が戸境壁の②、③通りが耐震壁、妻面の①、④通りがスリットを設けてラーメン構造としています。1階は②通りの壁長さが上階の1/3となり③通りは壁がなくなります。1階の剛性と耐力を確保するために①、④通りの1スパンを

耐震壁としています。

1階において耐震壁の偏心配置があるものの、 $F_{es}=1.0$ となるよう計画しました。

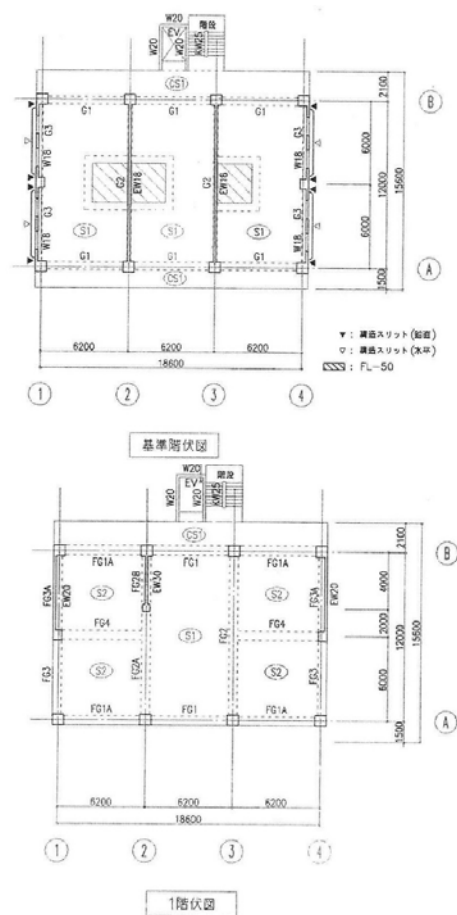


図1 平面図

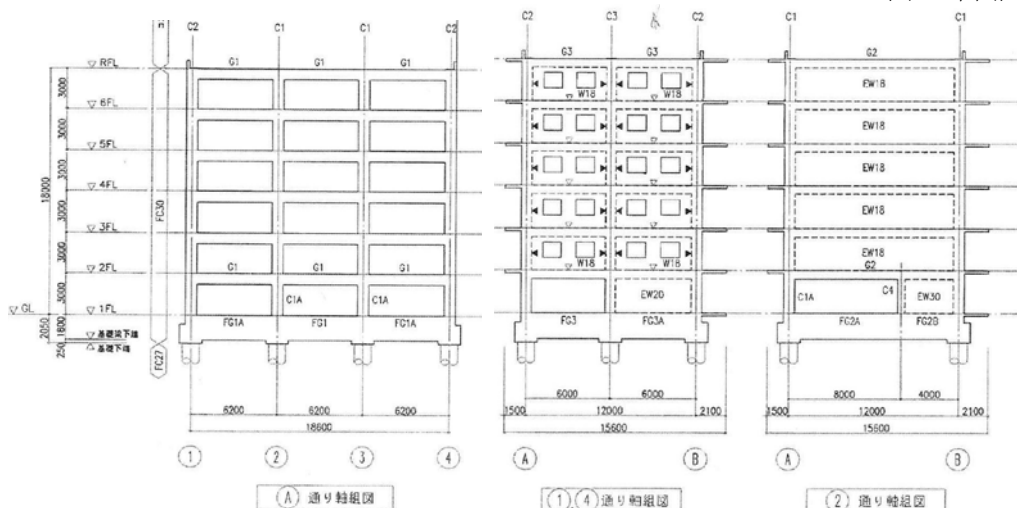


図2 軸組図

構造計算は、保有水平耐力計算のルート3とし、 $A_i$ 、 $R_t$ 、一次固有周期は告示による略算式を用いて算出します。応力解析は柱、はり線を線材置換、耐震壁を壁エレメント置換とし変位法による立体フレームモデルとし、一次設計は弾性剛性による解析、二次設計はひび割れによる剛性低下を考慮した弾塑性解析とします。解析は一貫ソフトを使用し、慣用的な手法を用いて計算しています。

なお Y 方向②、③通り1階の壁が抜ける柱について、軸耐力が圧縮側  $0.55F_c$  以下、引張側  $0.75N_u$  以下、せん断余裕 1.25 倍以上となる断面を別途に検討します。

### 3. 要素実験と大型振動台実験

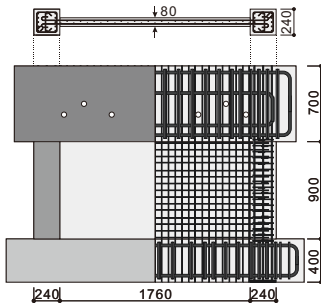
#### 3.1 評価法検証のための部材を対象とした実験

試設計に基づき、大型振動台実験の実施に先立って、試設計建物において、特に構造性能を明確にしておくべき部材について、要素実験を実施しました。実験の対象は、二方向入力を受ける耐震壁と、雑壁付き梁です。

##### (1) 耐震壁の二方向荷重実験<sup>1)</sup>

本実験の目的は、耐震壁の二方向入力時せん断終局強度および変形能力を調べることです。

試験体は同一寸法、配筋の4体とし面外方向の水平変位をパラメータとしました。図3に試験体の配筋状況を、図4に荷重履歴の詳細を示します。本実験により、いずれの試験体についても壁面内方向について、終局時に壁板や側柱の脚部にすべり変形が生じる結果が得られ、この破壊を



(a)試験体配筋図

(b)試験体設置状況

図3 試験体形状(単位:mm)

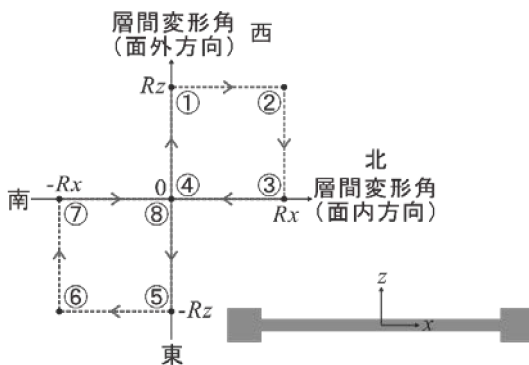


図4 荷重順序および実験変数

考慮した耐震壁の挙動のモデル化を実施しました。後述する振動台実験では同様な破壊モードが生じています。

##### (2) 雑壁付き梁の構造性能<sup>2)</sup>

試設計建物の妻壁構面(2階以上)の構造スリットを有する雑壁付き梁の耐震性能調べることを目的に実験を実施しました。

雑壁と構造スリットの有無をパラメータとする1層1スパンRC柱梁架構の構造実験を実施し、雑壁と三方スリットが架構の耐震性能に与える影響を分析しました。試験体は、試設計建物の梁間方向の端部構面2階から切り出した1/2.5スケールの部分架構であり、試験体は3体としました。試験体配筋図を図5に、試験体設置図を図6に示します。試験体の変動因子は雑壁の有無および雑壁周辺のスリットの有無です。実験の結果、三方スリットを有する雑壁架構の耐力および変形性能と、周辺架構を含む損傷状況が明らかとなり、実験結果を概ね再現可能な解析モデルを提案することができました。また、振動台実験の雑壁も同様の挙動を生じていることが確認できました。

### 3.2 大型振動台実験<sup>3)</sup>

#### (1) 試験体計画

試験体規模は、試設計建物に対して縮尺30%とし、試設計建物を可能な限り忠実に縮小して製作しました。試験体

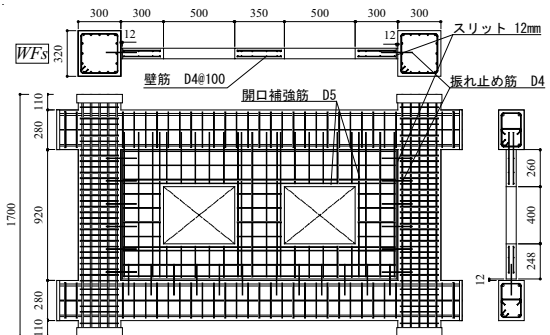


図5 試験体WFs配筋図

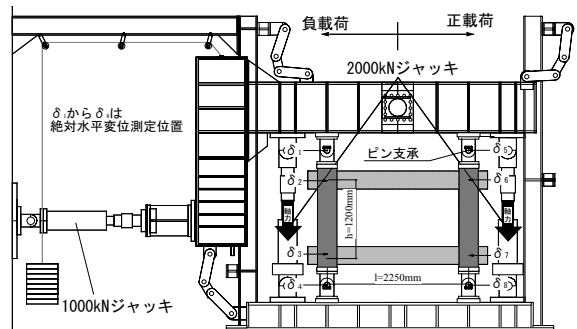


図6 試験体設置図



の全体計画を図 7 に示します。また、試験体の平面図を図 8 に、主要な軸組図を図 9 に示します。張間方向 2 階以上の両妻面は、三方スリットを設けて雑壁とし、内側 2 構面のみ連層耐震壁としました。1 階は、両妻面の 1 スパンのみ壁厚をやや大きくした耐震壁(厚さ 60mm)とするとともに、X3 構面にのみ全スパンの 1/3 程度の長さの耐震壁(厚さ 90mm)を配置し、2 階以上に対して壁量が急減しないように、かつ、剛性率・偏心率は、形状係数  $F_{es}=1.0$  となるよう試設計に準拠しました。

**(2) 入力地震波**

本実験には、都市部の直下地震として記録された大振幅地震動として 1995 年兵庫県南部地震時の観測波(JMA 神戸および JR 鷹取駅の記録)を採用することとしました。JMA 神戸波を基に、振幅を徐々に大きくして損傷の進行を計測・観察します。破壊が進行して試験体が長周期化して JMA 神戸波での崩壊が困難な場合に備えて JR 鷹取駅記録も用

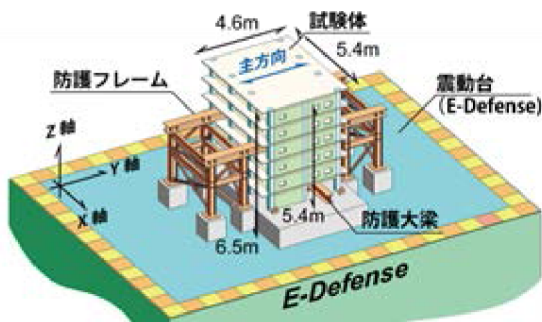


図 7 試験体の全体計画

意しました。なお、JMA 神戸波については、主軸となる成分を主要な加振方向(張間方向)に入力することとした。地震波加振のケース一覧を表 1 に示します。加振実験は 3 日間の間行い、1 日目は弾性から降伏前後、2 日目は最大耐力付近まで、3 日目は最大耐力を確認した後、崩壊に至るまで加振しました。

**(3) 実験結果**

1 日目の JMA 神戸 40%加振までは、弾性からひび割れ発生までのレベルであり、周期の変化を確認しました。同 55%では、一部の柱主筋の降伏が確認されました。同 70%加振では、梁主筋や壁筋に降伏が確認されました。

2 日目の JMA 神戸 100%加振では、X1 構面の 1 階壁において、コンクリートの表面剥落が確認されました。X1 構面の方が、X4 構面より損傷が進んでおり、ねじれにより X1 構面がより大きく変形していたことが推察されました。

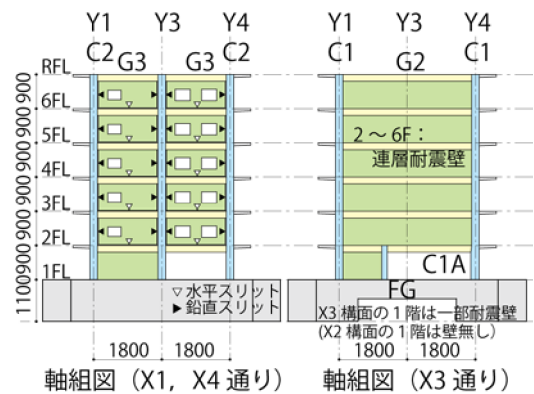


図 9 試験体の軸組図

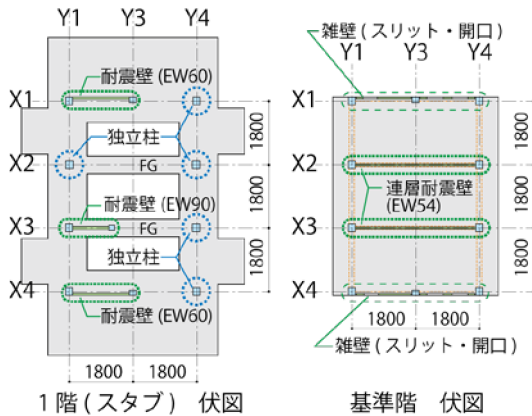
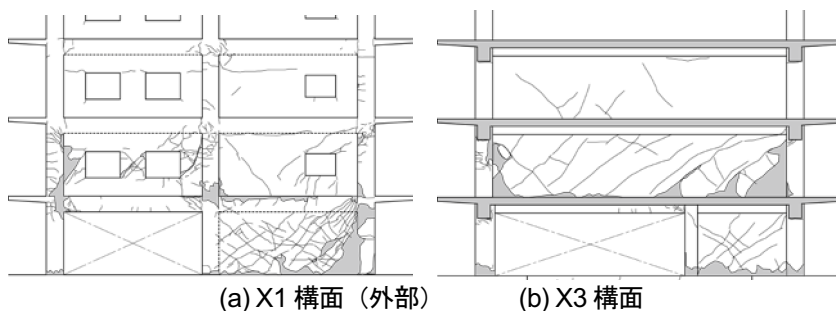


図 8 試験体の平面図

表 1 入力地震動

日付	入力地震波	レベル	方向
2015 01/20	JMA 神戸	10%	X,Y,Z
		40%	X,Y,Z
		55%	X,Y,Z
		70%	X,Y,Z
2015 01/21	JMA 神戸	55%	X,Y,Z
		70%	X,Y,Z
		100%	X,Y,Z
		140%	Y
2015 01/22	JMA 神戸	55%	X,Y,Z
		120%	X,Y,Z
		140%	Y
	JR 鷹取	120%	Y



(a) X1 構面 (外部) (b) X3 構面

図 10 実験後の損傷観察記録



写真 1 実験後の試験体外観

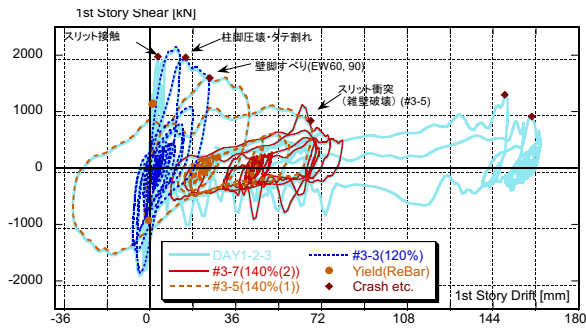


図 11 Y 方向の荷重－変形関係

3 日目の JMA 神戸 120%加振により、ベースシア係数が 1.0 を上回る応答が得られ、試験体は最大耐力を発揮しました。その後、JMA 神戸 140%加振を 2 回繰り返しました。最大応答層せん断力は繰り返しの繰り返しにより低下し、雑壁部のスリットの接触により間柱や雑壁のせん断破壊が生じました。その後は JR 鷹取駅 120%を入力した結果、1 階耐震壁は、いずれも側柱脚部の主筋破断を伴ってせん断破壊しました。2 階耐震壁も著しく損傷し、大きな変形が生じたことにより 3、4 階バルコニー先端が防護フレームに衝突しました。これをもって崩壊に至ったものと判断して実験を終了しました。各部の損傷状況を図 10、写真 1 に示します。

各加振ケースにおける Y 方向の層せん断力～層間変形関係を図 11 に示します。大変形時の加振では、JMA 神戸 140%加振でのスリット部の雑壁と躯体の接触が確認できます。最大耐力を発揮した JMA 神戸 120%加振では 1 層で 1/37 程度の変形を生じ、JMA 神戸 140%2 回目の加振までに最大耐力の 25%程度まで層せん断力は低下しています。

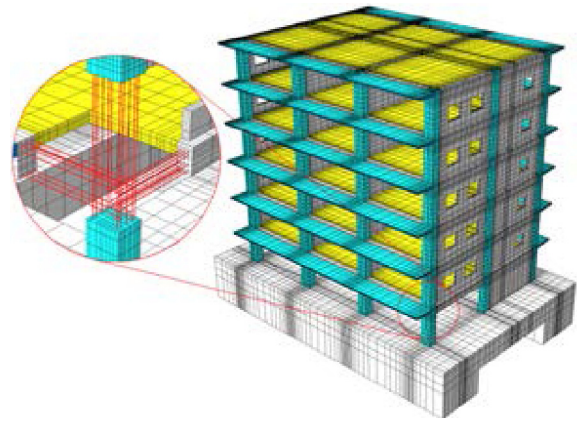
#### 4. 数値解析

本研究では、振動台実験における試験体の挙動をシミュレートすることを目的に 3 通りの手法を用いて数値解析を実施しました。すなわち、FEM による解析、フレームモデルによる解析、質点系モデルによる解析の 3 ケースです。ここでは、FEM 解析を中心に報告します。

##### 4.1 FEM 解析<sup>4)</sup>

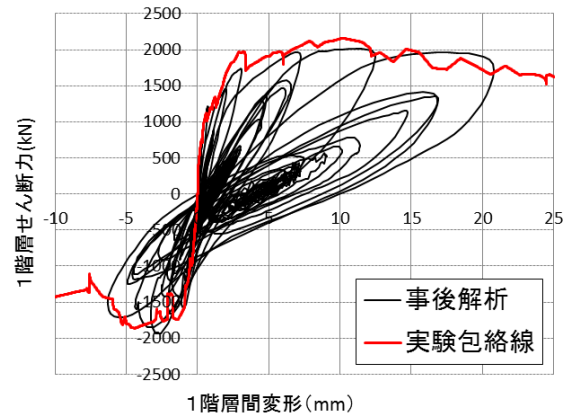
図 12 に各解析モデルを示します。解析コードは大規模高速化非線形解析ソフト「FINAL-GEO」<sup>1)</sup>を用いました。躯体コンクリートのすべてを六面体のソリッド要素でモデル化し、実物の形状を詳細に再現しました。梁・柱の主筋にはトラス要素を用い、鉄筋の付着滑り挙動を考慮しました。柱と梁のせん断補強筋、壁筋、および床スラブ筋は要素の埋込み鉄筋でモデル化しています。解析モデルの詳細や、材料構成則に関しては文献<sup>4)</sup>を参照願います。

図 13 に 1 階層せん断力～1 階層間変位の関係を実験結果と比較して示します。同図より、実験結果における最大せん断力時のプロット点は、解析の骨格曲線上にあり、実験の



総節点数：304,206  
 総自由度数：903,744  
 コンクリート圧縮強度：42.8N/mm<sup>2</sup>  
 コンクリート引張強度：2.16N/mm<sup>2</sup>

図 12 解析モデル(Solid モデル)



(JMA 神戸 120%加振以前の結果)

図 13 実験と解析の比較(層せん断力-層間変形関係)

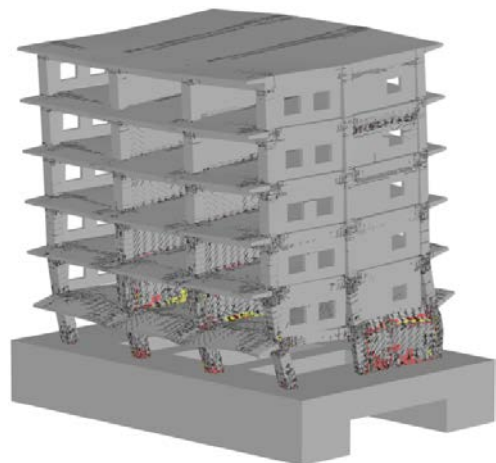


図 14 120%加振の最大変位時の損傷状況

荷重～変位関係と比較しても、概ね実験と解析は良好に対応していることがわかります。また、図 14 に示す試験体の損傷状況は写真 1 との比較においても、解析と実験は概ね一

致し、試験体の挙動を良好な精度で予測できることを確認しました。

## 5. 崩壊余裕度定量化

中低層から高層に至るすべての RC 建物を対象に、「今後どれだけの地震動に耐えられるか」によって崩壊余裕度を示すことを試みました。

### 5.1 崩壊余裕度の定義と評価

崩壊余裕度は「経験した地震動と同じ地震動をもう 1 度余震として経験する」として算定します。すなわち、2 度の連続した地震動で建物の応答が後述する「崩壊点」に到達する場合の地震動を崩壊地震動と定義し、崩壊余裕度は、(崩壊地震動の最大速度 / 設計用地震動あるいは経験地震動の最大速度) の値を用いて表します。

図 15 は、振動台試験体を対象としたフレームモデルの段塑性応答解析による 1 層層せん断力(Q1)と層間変形( $\delta 1$ )の関係を示しています。図中の青線が、JMA 神戸波 120%-1 回目、赤線が 2 回目の入力による Q- $\delta$  関係解析値を示します。また、図中の崩壊点は 3 章の要素実験で提案された計算値です。図のように、2 度の連続した地震動で 1 層が崩壊点に達したので、崩壊地震動は JMA 神戸波 120%とします。

建物の応答と崩壊点は、弾塑性時刻歴応答解析を行って評価します。RC 建物の「崩壊点」は、ある層の複数の主要部材が信頼性の高い技術資料に基づく「終局限界変形」に到達する時の変形とします。

### 5.2 健全度区分判定

建物供用時に経験した地震動に対して、建物の継続使用の可否、避難準備の要否を判定する健全度区分判定では、図 16 に示すように、即時性を重視して応答値を用いて判定します。ここで、健全度区分判定の閾値である「避難限界変位」は設計段階で定めておきます。すなわち、前述の手順に従い、2 回連続した時刻歴応答解析を行い、2 回目の応答が崩壊点に到達する際の、1 回目の応答量を「避難限界変位」と定めます。また、被災状況が無被害もしくは非常に軽微な場合、「安全(軽微損傷以下)」と判定することになります。ここでは、主要鉛直部材の鉄筋が初めて降伏する時点、あるいは残留せん断ひび割れが 0.3mm となる時点に限界点(「健全度低下開始点」と呼ぶ)とし、それ以降は「要注意(健全度低下)」とします。

## 6. まとめ

本研究では、大都市とその周辺に膨大なストックとして存在する中低層板状集合住宅を想定した RC 建物を対象に、E-ディフェンスにおける大型振動台実験と、その部分架構の抵抗機構を明確化するための要素実験を実施しました。それらの結果を通して、対象とする建物の崩壊余裕度評価法を提案しました。本研究の成果が活用されれば、実験の意義は大きいと考えます。

提案する評価法は、今後多くの実験や地震被害調査などを併せて検証データを蓄積し、解析精度を上げることで、実用に供する手法へと発展するものと期待します。

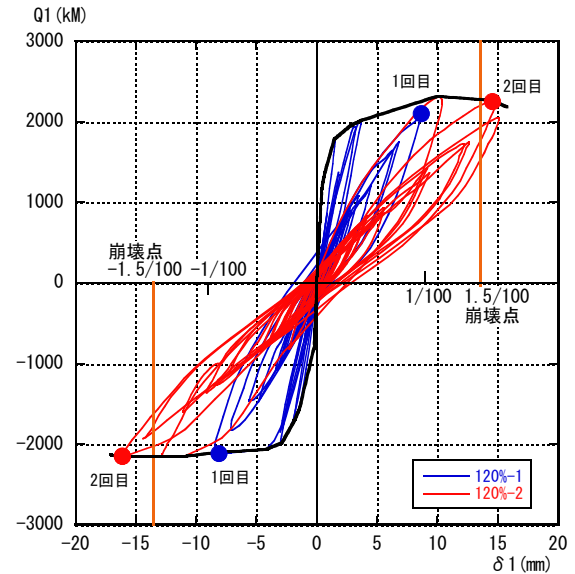


図 15 崩壊地震動計算例

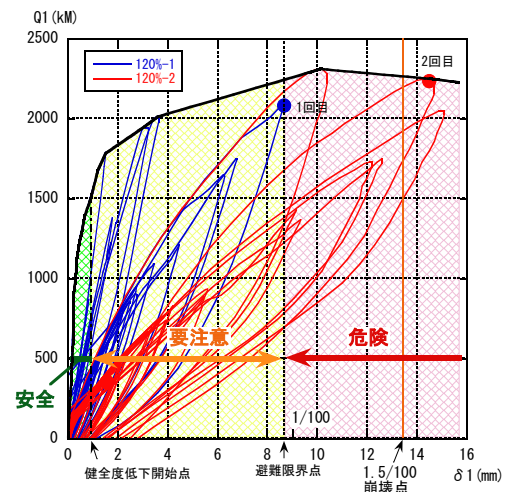


図 16 健全度区分判定の例

## 参考文献

- 1) 西山ほか: 面外水平加力が RC 造耐震壁のせん断性状に与える影響 (実験計画) RC 造建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発 その 1、その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、2014 年 9 月、pp351-354
- 2) 真田ほか: 二次壁を有する単層単スパン RC 架構の構造実験 RC 造建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発 その 3~その 4、日本建築学会大会学術講演梗概集、2014 年 9 月、pp719-722
- 3) 杉本ほか: 縮小 6 層 RC 造耐震壁フレーム建物試験体の振動台実験 RC 造建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発 その 8~その 11、日本建築学会大会学術講演梗概集、2015 年 9 月、pp339-346
- 4) 米澤ほか: 縮小 6 層 RC 造建物試験体の振動台実験に対する非線形 FEM 解析、コンクリート工学年次論文集、2016 年 7 月、

## II-2 建物の健全度モニタリング

### II-2-1 建物のモニタリング(上部構造)

白石理人(清水建設)

#### 1. はじめに

建物が大地震を受ける場合、倒壊など人命に関わる状況を避けるためには耐震性の確保が第一ですが、その後は、建物被災状況の迅速・的確な把握と、それに基づく建物継続使用の可否および避難の必要性の判断が重要となります。2011年の東日本大震災では、首都圏を含む広域で多数の建物が強い地震動を受けたことで、建物が継続使用可能か、それとも避難すべきかの速やかな判断が重要かつ困難であることが認識されました。将来の首都直下地震や南海トラフの地震により、きわめて多数の建物が同時に被災することを想定すれば、専門家による安全確認には膨大な時間を要することは明らかで、建物の耐震性向上とあわせて、被災建物の構造健全度を迅速かつ自動的に評価する技術の、速やかな実用化が期待されています。

本分科会ではこのような背景のもと、地震発生後の主に初動対応における意思決定支援のために、建物に常設したセンサの観測データに基づき、建物の被災状況に関する客観的な情報を提供する技術として、建物の健全度モニタリング(上部構造)の研究開発に取り組みました(表1)。まず、平成24年度には、基本方針の検討とセンシング技術の調査を行い、実用レベルと研究レベルの技術と位置付けられる2種類のモニタリングシステムを開発しました。そして、平成25年度、26年度には、E-ディフェンスで実施された鉄骨造18層試験体、RC造6層試験体の崩壊実験に、同システムを適用しました。さらに、平成27年度、28年度には、得られたデータの詳細な分析による実験結果の検証や、シミュレーション解析などを通じた実用化検討を実施し、それらの結果をモニタリング技術の社会実装に資するべく、技術資料として取りまとめました。

#### 2. モニタリングシステムの開発

##### 2.1 システム開発の基本方針

表2に、平成24年度に開発した2種類のモニタリングシステムの概要と特徴を示します。

レベル1(L1)システムでは、東日本大震災以降の構造モニタリング技術に対する社会的認知の高まりに依

えるべく、システムの実用化と実装を強く意識し、実用レベルの技術の検証を行うことを目的としました。具体的には、コストや信頼性の観点から現時点で最も実用的な手法と思われる、少数の加速度センサから全層応答を推定する手法について、E-ディフェンスの大規模振動台実験での実用性確認を目標としました。

レベル2(L2)システムでは、近年進化が著しいセンシングとその周辺技術を最大限に活用し、将来の構造モニタリング技術の研究開発に繋げるべく、挑戦的研究を行うことを目指しました。本研究ではその一つの例として、従来の並進方向に加え回転方向の振動を計測できる6軸MEMSセンサを備えた多点同期計測システムによるデータ取得と、それを活かした部分構造単位の局所損傷検出手法について、技術的可能性の実証を行うことを目標としました。

##### 2.2 L1 システムの開発

L1システムとして採用した、少数の加速度センサから建物の健全度判定のための各種指標を算出する手法を図1(a)に示します。あらかじめ建物に数台の加速度センサを設置しておき、地震発生時には、センサ設置階の加速度時刻歴波形をトリガ計測します。計測終了後に、その波形データから図1(b)に示すモード合成法により、建物全層の加速度時刻歴波形を推定します<sup>1)</sup>。さらにそこから、建物全層の最大加速度、計測震度(相当値)、最大層間変形角、最大耐力、累積塑性変形倍率といった健全度指標を推定します<sup>2)</sup>。

振動台実験での実証用システムを図1(c)に示します。L1システムが既に実用レベルの技術であることを踏まえ、実績が豊富で高い信頼性を持つ機器を組み合わせることでシステムを構築しました。システムのセンサ部には3成分のサーボ型加速度計を採用しました。データ収録部は、各センサからのアナログ信号を集約、アンチエイリアスフィルタ通過後にAD変換を行い、PC上のソフトウェアで収録・解析を行うシステムとしました。なお、建物1棟に対して必要なセンサ数は数台ですが、振動台実験での応答推定の精度検証を目的に、最大25台のセンサを接続可能な仕様としました。

表1 研究開発のスケジュール

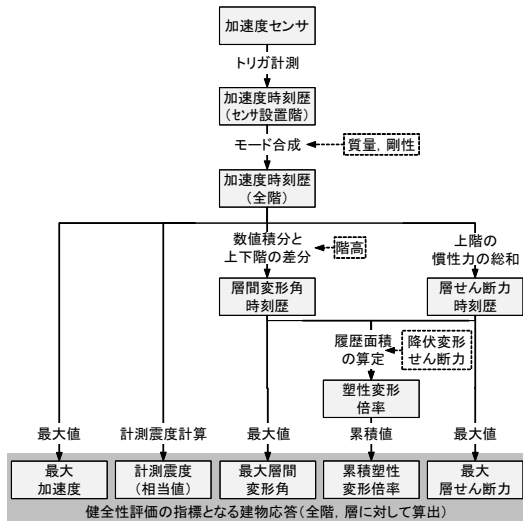
	H24年度	H25年度	H26年度	H27年度	H28年度
システム開発	方針検討 システム構築				
S造実験		システム適用 (実験)	結果の検証	実用化検討	実用化検討
RC造実験			システム適用 (実験)	結果の検証	実用化検討
技術資料				概要検討	取りまとめ

表2 モニタリングシステムの概要

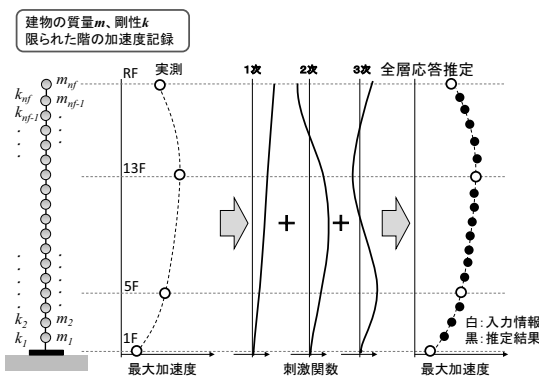
	レベル1 (L1) システム	レベル2 (L2) システム
研究開発の目的	実用レベルの技術の検証	研究レベルの技術の実証
建物の健全度指標	建物各層の最大、累積応答の分布	建物内の局所損傷の分布
健全度指標の算出方法	少数のセンサからモード合成により推定	多数のセンサから部分構造の特性変化により推定
使用センサ	サーボ型加速度計×25台 加速度3成分	MEMS型振動計×204台 加速度3成分 回転角速度3成分

### 2.3 システムの開発

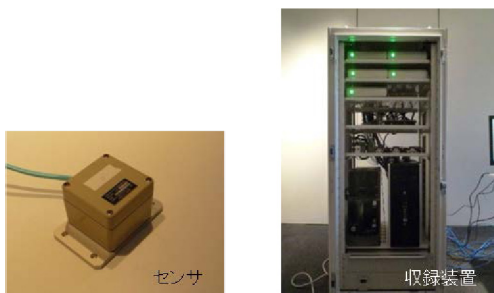
L2システムは、次世代型のセンシング技術の活用を前提に、建物内に多数設置したセンサのデータから、局所的な損傷を検出する手法です<sup>3)</sup>。図2(a)に示すように、建物の全節点(柱梁接合部)に振動センサが設置されている場合に、1つの節点に接続されるフレーム部材(柱、梁)を部分構造として取り扱い、損傷検出を行います。建物全体に設定した部分構造に対して繰返し損傷検出を行うことで、建物内の局所損傷の分布を把握することができます。図2(b)に示す



(a) 健全度指標の算出フロー



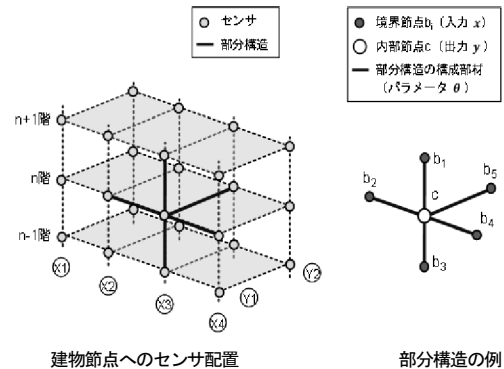
(b) モード合成法



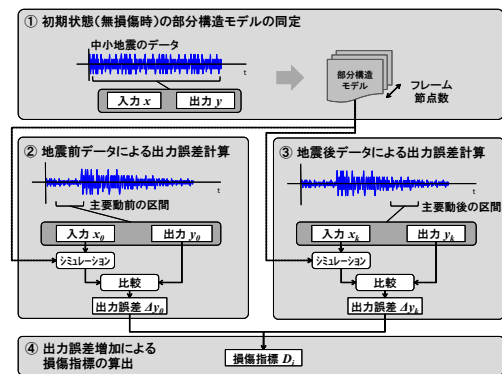
(c) 振動台実験での実証用システム  
図1 レベル1(L1)システム

ように、部分構造内の損傷は、境界節点センサの入力に対する内部節点センサの出力の関係をモデル化し、損傷による変化(出力誤差の増加)を監視することで、検出することができます<sup>4)</sup>。

振動台実験での上記手法の大規模実証を目的の一つとして、今回新たに6軸MEMSセンサを備えた多点同期計測システムを構築しました。図2(c)にシステムの外観を示します。システムのセンサ部には、1台で6軸方向の振動計測(並進3方向の加速度、回転3方向の角速度)が可能なMEMS型振動計を採用しました。データ収録部は、各センサからのデジタル信号を複数の分散型計測装置に収録し、収録後に1台のデータサーバへ集約する階層型の構成とし



(a) 部分構造単位の損傷検出



(b) 出力誤差による損傷検出手法



(c) 振動台実験での実証用システム  
図2 レベル2(L2)システム

ました。振動台実験の試験体規模を考慮し、開発したシステムはセンサ 204 台を装備し、全 1224ch(204 台×6 軸)の同期を取った高速サンプリング計測(500Hz)が可能な性能を持っています。

### 3. 鉄骨造 18 層試験体の振動台実験への適用

#### 3.1 モニタリングシステムの設置とデータ収録

開発したモニタリングシステムを、平成 25 年度に E-ディフェンスで行われた鉄骨造高層建物の崩壊実験<sup>5)</sup>に適用しました(図 3)。試験体は 1980~90 年頃の設計・施工を想定した、鉄骨造 18 層ラーメン構造建物の 1/3 スケールです。

L1 システムのセンサは、試験体の全 19 フロア(1 階~R 階)の隅部分に各 1 台の配置を基本とし、計 25 台をスラブ上に設置しました。L2 システムのセンサは、試験体の全節点(柱梁接合部)に各 1 台の計 152 台(8ヶ所×19 フロア)を配置しました。各センサは各節点の柱脚(R 階のみ柱頭)部の側面に設置しました。

実験では、南海トラフの三連動地震を想定した模擬地震動を用いて、試験体が倒壊するまで振幅レベルを順次大きくした、計 15 回の加振(1 方向加振)が行われると共に、各加振後には小振幅のランダム波による特性把握加振が行われました。モニタリングシステムの L1、L2 システムの全てのセンサでは、ほぼ全ての加振のデータを正常に収録することができました。

#### 3.2 L1 システムの結果

L1 システムの結果の例として、図 4 に加振ケース pSv=300cm/s 時の(a)最大層間変形角、(b)累積塑性変形倍率を示します。ここでは、センサ設置階を 1、5、9、13、R 階の 5 点と仮定して、これらの階のセンサ情報のみから全層の応答を求めた「推定値」を、全階のセンサを使った「観測値」、そして、E-ディフェンス装備の計測システムの変位計、歪ゲージ等のデータによる「実験値」を比較しています。L1 システムによる推定値と、観測値・実験値は良く対応しており、少数の加速度センサのデータから、建物の健全度指標を実用上問題のない精度で推定できることがわかります。また、推定精度はこの例のように試験体の非線形化が大きく進んだ大変形域(1/30rad 程度)でも、さほど悪化しないことも確認できました。

図 4(a)には、建物の健全度を「安全」、「要注意」、「危険」の 3 ランクに判別することを前提に、本プロジェクトの鉄骨造高層建物の崩壊余裕度定量化分科会の研究成果を参照して、参考値として設定した閾値(健全度判定基準)を破線で示しています。この加振ケースでは「危険」判定となりますが、これは試験体の実際の状態と整合する結果であり、L1 システムの実用性が確認されました。

#### 3.3 L2 システムの結果

L2 システムの結果の例として図 5 に、(a)加振ケース

pSv=220cm/s 後、(b)加振ケース pSv=340-2 回目後の、試験体 X1 構面の損傷判定結果を示します。図中の「モニタリング」は L2 システムの結果で、各加振後の特性把握加振データを使った推定値です。「実験計測」は E-ディフェンス装備の変位計、歪ゲージ等のデータから評価した一部の階の梁端下フランジの破断状況です。L2 システムにより損傷と判定された、pSv=220cm/s 時の最下層の両端部の損傷、pSv340-2 時の下層階全体と中間階での損傷は、試験体の梁端フランジの破断状況と良く対応していることがわかります。このように、L2 システムが建物の局所的な損傷の有無と位置を特定できる可能性があることが実証されました。

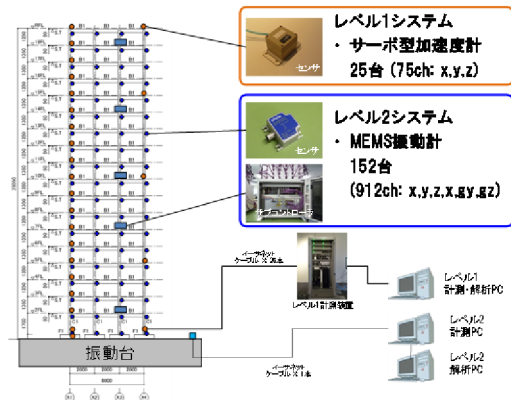


図 3 鉄骨造 18 層試験体の振動台実験への適用

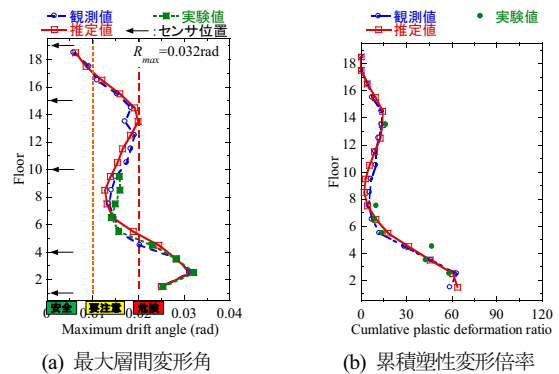
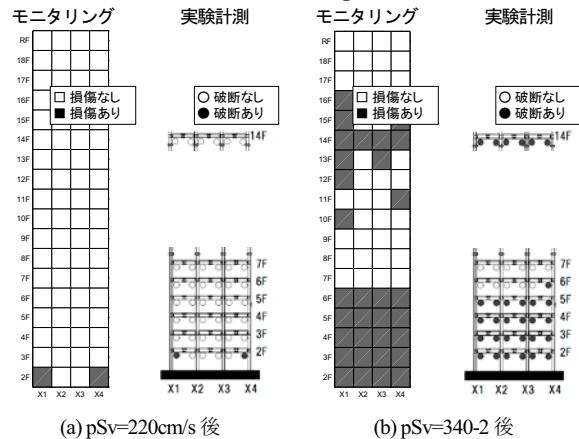


図 4 L1 システムの結果

(S 造実験, 加振ケース pSv=300cm/s)



(a) pSv=220cm/s 後

(b) pSv=340-2 後

図 5 L2 システムの結果(S 造実験, X1 構面)

## 4. RC 造 6 層試験体の振動台実験への適用

### 4.1 モニタリングシステムの設置とデータ収録

開発したモニタリングシステムを、平成 26 年度に E-ディフェンスで行われた RC 造建物の崩壊実験<sup>9)</sup>に適用しました(図 6)。試験体は現行の設計基準に基づく集合住宅を想定した、6 層耐震壁付きラーメン構造建物の 30%スケールです。

L1 システムのセンサは、試験体の 4 つの通りの柱付近に各 1 台の配置を基本とし、計 25 台をスラブ上に設置しました。L2 センサは試験体の全節点(柱梁接合部)の柱脚部に各 1 台の 70 台と、耐震壁面に 72 台、スリット付非構造壁面に 16 台の、計 158 台を設置しました。

実験では、主に 1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸波を用いて、試験体が倒壊するまで振幅レベルを順次大きくした、計 12 回の加振(3 方向加振)が行われると共に、各加振後には小振幅のランダム波による特性把握加振が行われました。モニタリングシステムの L1、L2 システムのほぼ全てのセンサでは、全ての加振のデータを正常に収録することができました。

### 4.2 L1 システムの結果

L1 システムの結果の例として、図 7 に加振ケース#3-3(JMA 神戸波 120%)時の最大層間変形角を示します。(a)短辺方向(耐震壁架構)と、(b)長辺方向(ラーメン架構)の結果であり、センサ設置階を 1、3、R 階の 3 点と仮定して求めた「推定値」を、全階のセンサを使った「観測値」、そして、E-ディフェンス装備の計測システムの変位計による「実験値」と比較しています。同加振時に試験体は耐震壁に脆性的な破壊が生じている状態で、弾性時のモード形状の合成により応答を推定する L1 システムの特性上、(a)短辺方向では、推定値は観測値・実験値との乖離が大きくなっています。これに対し、(b)長辺方向では、両者は良く対応していることがわかります。

図 7 には、S 造実験の場合と同様に、RC 造建物の崩壊余裕度定量化分科会の研究成果を参照し、参考値として設定した健全度判定基準を示しています。この加振ケースでは、短辺方向で「危険」、長辺方向で「要注意」判定となりますが、これは実際の試験体の状態と概ね整合する結果であり、L1 システムが RC 造の中層建物にも適用可能であることが確認できました。

### 4.3 L2 システムの結果

L2 システムの結果の例として図 8 に、(a)加振ケース#1-10(JMA 神戸波 70% 1 回目)後、(b)加振ケース#2-6(JMA 神戸波 100%)後の、特性把握加振データから算出した試験体各部位の損傷指標の大きさを示します。加振レベルの増大に伴い、試験体の下層階で損傷指標が次第に増加して行くことがわかります。比較のために、試験体の目視観察結果に基づき略算法により算出した耐震性能残存率  $R$  と、被災

度区分判定結果も図中に示します。モニタリングによる損傷指標はこの結果とも概ね整合する傾向があることがわかり、L2 システムが RC 造建物に対しても適用できる可能性があることが確認されました。

## 5. 健全度評価法の整備

### 5.1 健全度評価法の概要

本プロジェクトにおける当分科会のこれまでの研究成果を取りまとめ、実建物への適用を図ることを目的に、地震後の建物の健全度評価法を整理し、技術資料として取りまとめました。前述のように、被災建物の健全度を「安全」、「要注意」、「危険」の 3 ランクに分けて判定するとした場合、健全度評価法としては様々な方法が考えられますが、以下の点などが

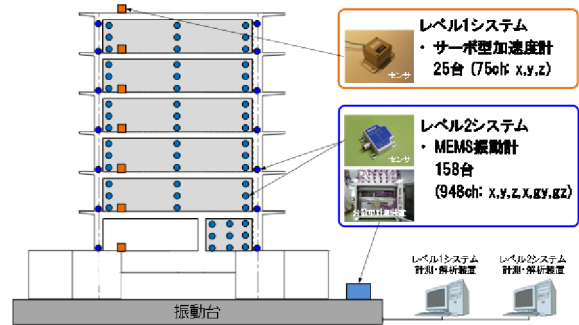


図 6 RC 造 6 層試験体の振動台実験への適用

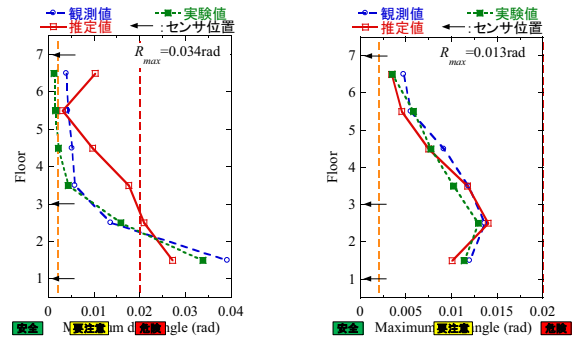


図 7 システムの結果 (RC 造実験, 加振ケース#3-3(JMA 神戸波 120%))

図 7 システムの結果 (RC 造実験, 加振ケース#3-3(JMA 神戸波 120%))

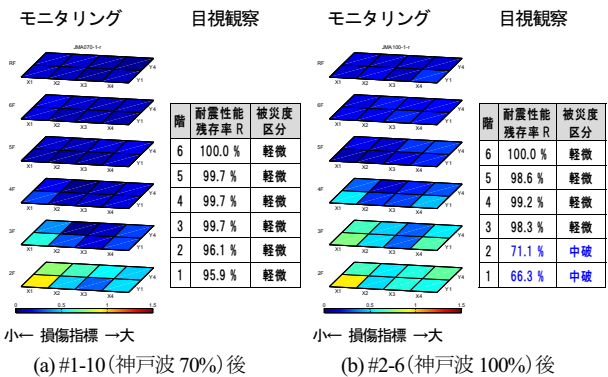


図 8 L2 システムの結果(RC 造実験)

ら L1 システムとして検討してきた手法を採用することとしました。

- 比較的少数の加速度センサを用いることより、現実的なコストで比較的容易に設置可能であること。
- 健全度指標として、層間変形角などの各層応答を用いるため、設計基準などに対応させやすいこと。
- 計測とデータ処理の技術が、現時点で既に実用レベルに達していること。

## 5.2 実建物適用に向けた検討

L1 システムによる健全度指標の算出法を、実際に建物に適用する際には、センサの配置や建物モデルなど、様々な項目を設定する必要があります。ここではシミュレーションによるパラメータスタディの結果に基づき、以下の設定方針を提示しました。

- センサ数は建物階数に応じて、図9を目安に設置することが望ましい。
- センサは1階および屋上階と中間階に設置する。中間階の設置位置は、モード合成法で利用する最高次モードの腹か、単に建物高さ方向に均等な配置とすればよい。
- モード合成法で必要となる、刺激関数(モード形)は建物の設計モデルの質量、剛性の値を使用する。実際はこれと異なる場合も多いが、その影響は限定的である。

なお、健全度指標の算出法と上記設定方針の妥当性は、本プロジェクトのE-ディフェンス実験データによる検証と、対象建物の一般化を図るべく実施した各種高さの建物モデルに対するシミュレーション検討により確認されています。結果の一例として、図10に42階建て建物の、設計用地震動×9波と観測地震動×45波に対する地震応答解析に基づく、最大層間変形角の推定精度(推定値/真値)の分析結果を示します。これはセンサ数を5、6、7点とした場合ですが、図9に基づき6点以上のセンサ設置とすることで、多様な地震動に対して概ね問題のない推定精度が得られていることが確認できます。

## 6. まとめ

本研究では、大地震後の事業や生活の継続と速やかな回復に資するべく、高層ビル等の都市の基盤をなす施設の地震直後の健全度を即時に評価し、損傷を同定するための建物の健全度モニタリング(上部構造)に関する研究開発を行いました。現時点での実用性と、将来の発展性を主眼に、2種類のモニタリングシステムを開発し、E-ディフェンスにおける鉄骨造18層試験体、RC造6層試験体の崩壊実験へ適用、検証を行いました。得られた知見とデータは、建物の健全度評価法として整備されるとともに、今後のモニタリング技術の高度化に向けた研究開発の推進にも貢献することが期待されます。

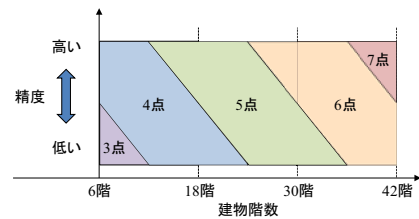


図9 建物階数と設置するセンサ個数の目安

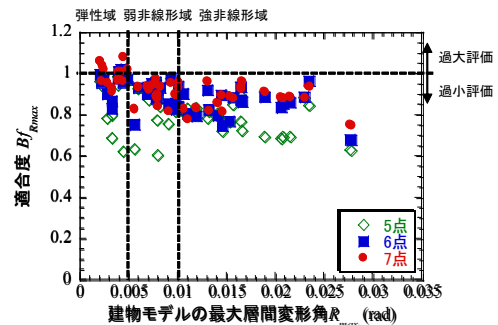


図10 様々な入力地震動に対する最大層間変形角の

推定精度(適合度  $Bf_i = \text{推定値}P_{fi} / \text{真値}O_{fi}$ )

本研究の成果は、構造モニタリング技術の普及展開に資するべく、「建物の健全度評価法のため技術資料—上部構造編—」にまとめられ、一般に公開される予定です。また、E-ディフェンス実験の際に L1、L2 システムで得られた計測データは、防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターのデータ公開システム ASEBI にて公開される予定です。

## 参考文献

- 1) 斎藤: 建物モデルのベイズ更新を用いた地震応答推定と確率的被災度評価, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第683号, pp.61-70, 2013.1
- 2) 森井ほか: 地震直後における建物健全性評価のための限られた階の加速度記録に基づく建物全層応答推定手法—鉄骨造18層試験体の振動台実験結果に基づく検討—, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第730号, pp.2045-2055, 2016.12
- 3) 白石ほか: 部分構造のARXモデルを用いた三次元構造物の局所損傷検出, 日本建築学会技術報告集, 第20巻, 第44号, pp.55~60, 2014.2
- 4) 白石ほか: 構造物の局所損傷により生じる部分構造システムの出力誤差の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第726号, pp.1187~1197, 2016.8
- 5) 小鹿ほか: E-ディフェンス振動台実験の概要—鉄骨造高層建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発(その5)—, 日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集, pp.1237~1238, 2014.9
- 6) 勝俣ほか: 縮小6層RC造耐震壁フレーム建物試験体の振動台実験(計画概要): RC造建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発 その8, 日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集, pp.339~340, 2015.9



## II-2-2 建物のモニタリング(地盤)

船原英樹(大成建設)

### 1. はじめに

地震後の建物の機能維持・回復のためには、できるだけ早い段階で建物の健全度を把握することが重要です。しかし、杭基礎などは地中に埋もれているため、調査に多くの時間と費用を要します。そこで、杭の傾きを計測できる傾斜計や、杭のひずみを連続的に測定できる光ファイバなどを用い、杭の健全度を即時判断するためのモニタリングシステムを構築しました。さらに開発したモニタリングシステムを検証する目的で、実大三次元震動破壊実験施設(Eーディフェンス)を活用した振動実験を実施しました。

### 2. 地盤・基礎の健全度モニタリングシステム

本研究で開発したモニタリングシステムでは、建物基礎の健全度を確認するために、杭や地中にセンサを直接設置します。センサの設置イメージを図1、モニタリングセンサの計測項目を表1に示します。傾斜計では、杭や地下躯体に生じる地震後の傾斜を計測し、杭体の損傷の有無や建物使用に対して有害な基礎傾斜の有無を確認します。光ファイバセンサでは、杭体のひずみを計測し、ひび割れ発生の有無などの損傷状況を直接確認することができます。

従来は、杭や地中にセンサを予め設置していないため、建物の傾斜や沈下を、現地で直接計測する必要がありました。一方、モニタリングシステムを用いると、地上に表れない

地中部での杭損傷などについても検知することができます。さらに遠隔操作によって、建物から離れた場所においても建物の被害状況を地震後即時に知ることができます。そして、得られた計測データを基に健全度判定した結果、建物の継続使用に対して問題があった場合には、掘削等を伴うより詳細な調査をして、補修や取壊しを判断することになります。

### 3. Eーディフェンス実験

#### 3.1 実験概要

本研究で開発したモニタリングシステムの有効性を検証するため、Eーディフェンス震動台を用いて杭基礎構造物を設置した大型せん断土槽(写真1)による振動台実験を実施



写真1 振動台上に設置したせん断土槽

表2 加振ケース

日付	加振波	日付	加振波
1日目	告示JMA神戸NS 10%	3日目	正弦波(T=0.2s) 100cm/s <sup>2</sup>
	告示JMA神戸NS-EW 10%		正弦波(T=0.25s) 100cm/s <sup>2</sup>
	告示JMA神戸NS 20%		正弦波(T=0.3s) 100cm/s <sup>2</sup>
	告示JMA神戸NS-EW 20%		正弦波(T=0.3s) 200cm/s <sup>2</sup>
	告示JMA神戸NS-EW-UD 20%		正弦波(T=0.3s) 400cm/s <sup>2</sup>
2日目	告示八戸NS 20%	告示JMA神戸NS 100%	
	JR鷹取波EW 10%	告示JMA神戸NS 150%	
	告示JMA神戸NS 100%		
	JR鷹取波EW 60%		

※NS-EWは2方向、NS-EW-UDは3方向加振

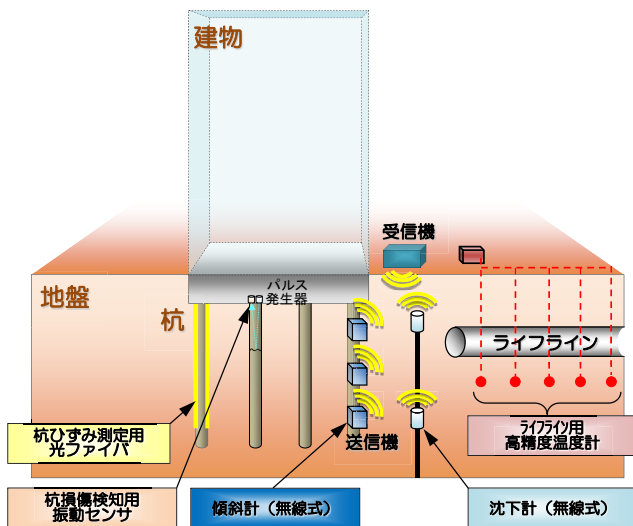


図1 地盤・基礎構造へのセンサ設置イメージ

表1 モニタリングセンサの計測項目

センサ	計測項目
傾斜計	杭・基礎部の傾斜
光ファイバ	杭のひずみ
振動センサ	弾性波探査による杭の損傷検知
沈下計	地盤沈下
高精度温度計	ライフラインからの漏洩

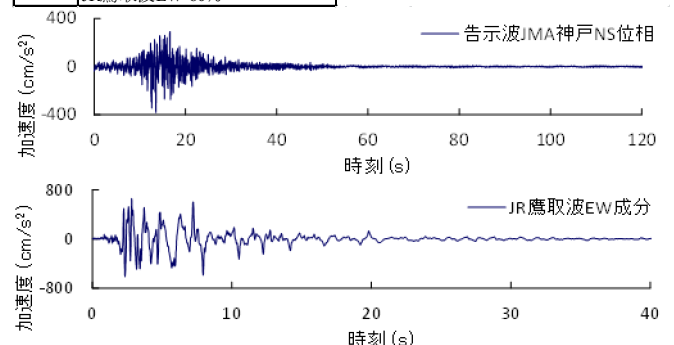


図2 代表的な入力地震動の波形

しました。加振ケースを表に示します。告示波(JMA 神戸位相、八戸位相)と観測波(JR 鷹取波)を加速度振幅を調整して加振しました(図 2)。他に、周期と加速度振幅を変えた正弦波加振も実施しました。1 日目は、杭が損傷しない程度(ひび割れは一部許容)の加振レベルとし、2 日目と 3 日目は、杭が損傷・破壊する加振レベルとしました。

試験体は、2 種類の杭模型を設置した大型せん断土槽(直径 8m、高さ 6.5m)内に 2 種類の砂を投入して作製しました(図 3)。杭模型はそれぞれ、鉄筋モルタル杭(以後 RC 杭)6 本と鋼管杭 9 本の群杭であり、主加振方向に並列に配置しています。モニタリングの対象は RC 杭で、加振によって損傷するように設計しています。一方、鋼管杭は大きな加振でも弾性範囲に留まるように設計しており、杭と地盤の力のやり取りなどを評価し、杭挙動の分析に用いることを主目的としています。本報告では、モニタリングした RC 杭のみを検討対象とします。

建物模型は、鉄製の重錘で上部構造(14t)と基礎(10t)を模擬し、それらを 4 基の積層ゴムで接続して構築しました。基礎の高さは 500mm であり、上端まで地盤に根入れさせています。基礎固定時の上部構造の固有周期は約 0.12s であり、地盤-杭-建物を合わせた連成系の固有周期は約 0.23s でした。

RC 杭の直径は 154mm で、一軸圧縮強度 27.2N/mm<sup>2</sup>の

モルタル、D6(SD345)の主筋 6 本、2mm の硬鋼線(SWC)を 20mm ピッチでらせん状に成形したせん断補強筋を用いて作製しました。鋼管杭には、直径 152.4mm、肉厚 5mm の鋼管(STK400)を用いました。いずれも杭頭は、構造物の基礎に剛接合し、杭先端は土槽底板に置いただけの半固定状態としました。

地盤は、表層 2m を相対密度約 60%の掛津硅砂(乾燥)、深部 4m を相対密度約 80%のアルバニー硅砂(湿潤)で作製しました。地盤の固有周期は約 0.12 秒でした。

モニタリング用のセンサ(写真 2)の配置を図 4 に示します。傾斜計は、MEMS 式とひずみゲージ式の 2 種類を用いました。MEMS 式は RC 杭 1 の 3 深度に設置し、ひずみゲージ式は RC 杭 2~6 の杭頭と上部構造に設置しました。上部構造と基礎を繋ぐ積層ゴムには残留変形がほとんど生じないと考えられることから、上部構造の残留傾斜を基礎の残留傾斜とみなします。光ファイバセンサは、杭表面の 4 方向(東西南北)に初期張力を与えた状態で貼り付け、引張方向だけでなく圧縮方向のひずみも計測できるようにしました。計測は、50mm 区間の平均ひずみを 25mm 間隔で取得し、ひずみのデータが長さ方向に連続的に得られるようにしました<sup>2)</sup>。

モニタリング用のセンサとは別に、振動台実験で一般的に用いられているセンサも設置しました。振動台実験用のセンサ配置を図 4 に示します。加速度計、レーザー変位計、

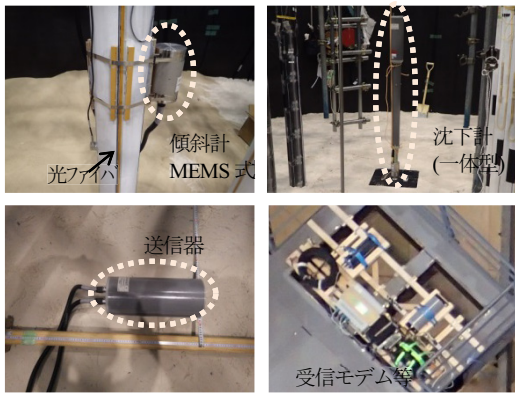


写真 2 モニタリング用のセンサ

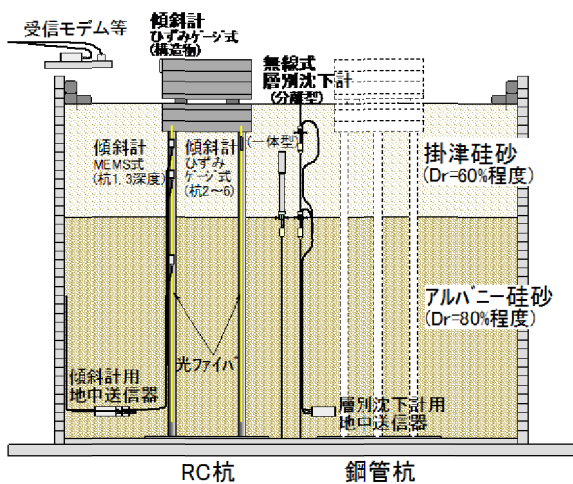
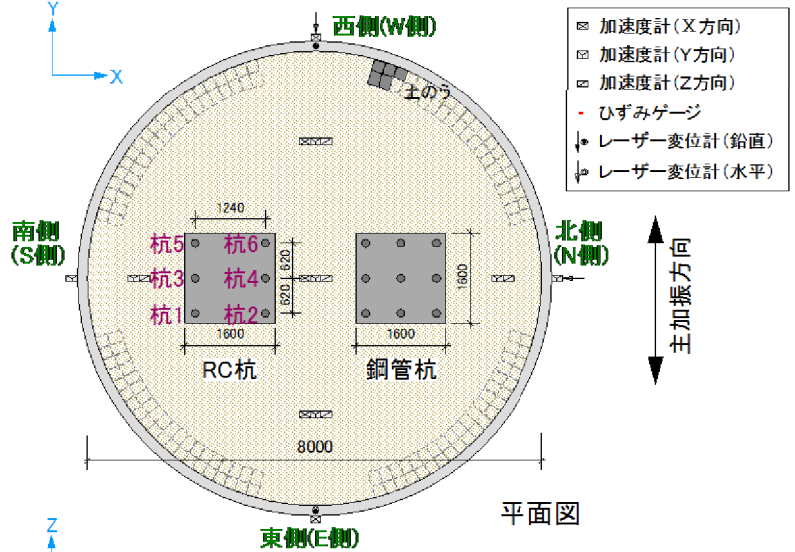


図 3 モニタリング用のセンサ配置

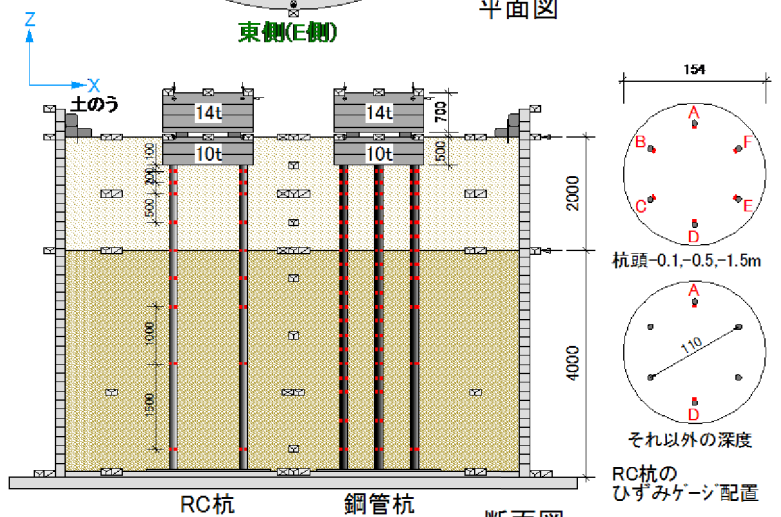


図 4 振動台実験用のセンサ配置

表 3 主な加振ケースと結果概要配置

日付	入力波	振動台		地表面		RC杭の杭頭部の損傷状況	構造物残留傾斜	RC杭残留傾斜
		加速度 cm/s <sup>2</sup>	計測震度	加速度 cm/s <sup>2</sup>	計測震度			
1日目	告示JMA神戸NS 20%	82	4	105	4	ひび割れ発生	1/2755	1/2204
	JR鷹取波EW 10%	75	4	123	4	ひび割れ発生	1/2449	1/1049
2日目	告示JMA神戸NS 100%	354	6弱	434	6弱	鉄筋降伏	1/7346	1/262
	JR鷹取波EW 60%	489	6弱	543	6強	鉄筋降伏	<1/10000	1/175
3日目	告示JMA神戸NS 100%	352	6弱	482	6弱	鉄筋降伏	<1/10000	1/127
	告示JMA神戸NS 150%	542	6弱	627	6強	終局 (モルタル剥落)	1/711	1/74

表 4 杭基礎建物の健全度の評価区分

評価区分	想定される杭の損傷程度と継続使用性
A	損傷なしまたは軽微な損傷。継続使用可能。
B	中程度の損傷。補修後使用可能。
C	著しい損傷。使用不可能。

表 5 評価区分と傾斜角の閾値(振動台実験用の暫定値)

対象	測定データ	評価区分とクライテリア		
		A	B	C
杭	傾斜角 $R_p$	$R_p < 1/100$	$1/100 \leq R_p < 1/25$	$1/25 \leq R_p$
上部構造	傾斜角 $R_f$	$R_f < 1/300$	$1/300 \leq R_f < 1/75$	$1/75 \leq R_f$
総合判定		杭と構造物の傾斜角のうち、厳しい方の評価結果を採用		

ひずみゲージ、土圧計などのセンサを配置し、実験時の動的な挙動を計測しました。

### 3.2 実験結果の概要

代表的な加振ケースについて、振動台と地表面の加速度および計測震度、RC杭の杭頭部の損傷状況、上部構造およびRC杭の残留傾斜角を表3に示します。RC杭の杭頭部の損傷状況は、鉄筋に貼付したひずみゲージのデータに基づいて推測したものです。

1日目の加振では、ひび割れが発生したものの鉄筋は降伏せず、2日目で初めて降伏しました。また、3日目の最終加振において終局状態に相当するモルタルの圧壊を示唆する大きな圧縮ひずみが計測され、段階的に杭損傷を進展させることができました。なお、鋼管杭は弾性領域に留まっていました。

### 3.3 モニタリングシステムによる総合判定結果

モニタリングシステムによる杭基礎建物の健全度判定を各加振終了後に実施しました。光ファイバセンサは計測に一定の時間を要するため、健全度判定には加振後即時に判定可能な傾斜計のみを用いることとしました。健全度の評価区分とクライテリアは、本実験模型に合わせて暫定的に定めた表4、表5の区分と閾値を用いました。

3日目の最終加振である告示波150%入力において、杭頭の残留傾斜角が1/100を超え、評価区分「B」と判定されました。計測データはインターネット上のサーバに蓄積し、そのデータを基に健全度判定を即時行い、判定結果を携帯端末(ノートPC、タブレット、スマートフォン)で閲覧できるようにしました(図5)。

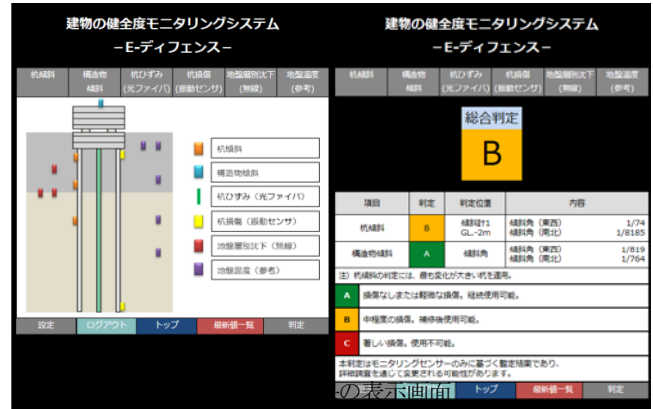


図 5 判定結果の表示画面

### 3.4 杭頭と上部構造の傾斜角

図6に各加振直後に計測した杭頭と上部構造の傾斜角の推移を示します。傾斜角は西側(W側)に傾いたときを正としています。杭頭は、2日目に実施した告示JMA神戸NS位相の100%加振によって西側に傾斜しました。その次のJR鷹取波EW成分の60%加振では逆方向の東側に傾き、3日目の加振では、徐々に西側に傾斜していく様子が確認されました。一方、上部構造の傾斜は杭の傾斜と比較すると非常に小さくなっており、傾斜角が最大となった最終加振後においても1/711でした。構造物の形状が単純で偏心がなかったことや、構造物の常時荷重による杭応力(2.1N/mm<sup>2</sup>程度)がモルタル強度(27.2N/mm<sup>2</sup>)に対して比較的小さかったことなどが理由として考えられます。

以上より、モニタリングセンサがなければ確認できない杭の傾斜を計測することで、上部構造の傾斜からは確認することができなかった杭の損傷を検知することができました。

### 3.5 RC杭の鉄筋ひずみ

#### (1) 加振時の応答

2日目の告示波JMA神戸NS位相(1方向)の100%加振について、構造物慣性力(上部構造と基礎の合計)、杭の軸力(圧縮:正)、鉄筋ひずみ(引張:正、杭1、4、5の杭頭-0.1m)、振動台加速度の時刻歴を図7に示します(ひずみゲージの不具合が比較的少ない杭1、4、5を選定しました)。グラフは、時刻10~25秒の間のみ表示しています。軸力は、ひび割れが発生していないと考えられる深度のひずみゲージの値から算定した変動軸力と、構造物の自重で生じる常時の軸力を足し合わせて求めました。また、鉄筋ひずみのグラフには、鉄筋降伏時のひずみを図示しています。

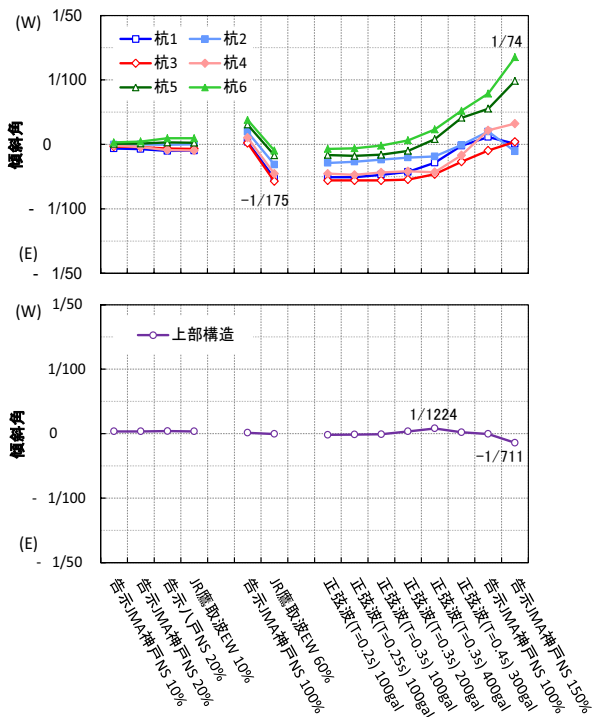


図6 杭頭と構造物の残留傾斜角

構造物慣性力は、最大で 140kN 程度が作用しており、構造物慣性力が大きい時刻で軸力の変動や鉄筋ひずみも大きく生じています。

端杭(杭 1、5)の軸力は、構造物の転倒モーメントに抵抗するために大きく変動しており、引張軸力も生じています。また中杭(杭 4)では軸力の変動が小さいものの、引張側への変動が見受けられます。ひび割れが生じている杭体上部ではモルタルが圧縮のみに抵抗するため、押し込み時よりも引き抜き時の方が軸剛性が小さくなり、押し込みに対しては端杭(片方)のみで、引き抜きに対しては端杭(片方)と中杭の両方で抵抗していると考えられます。

鉄筋ひずみの時刻歴では、圧縮側よりも引張側へひずみの変動量が大きくなっています。圧縮側では鉄筋とモルタルの両方で抵抗しますが、引張側ではひび割れが発生したモルタルが抵抗しなくなるからです。端杭(杭 1、5)では、鉄筋 A、D ともに引張降伏していますが、中杭(杭 4)では鉄筋 D のみが降伏しており、鉄筋 A は弾性域内に留まっています。

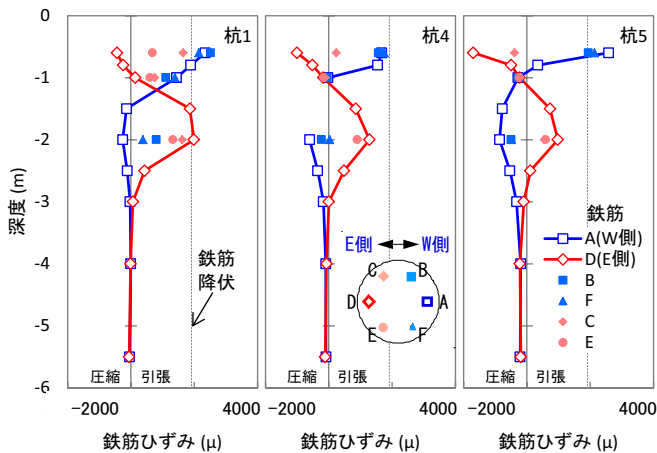


図8 13.62 秒における鉄筋ひずみの深度分布

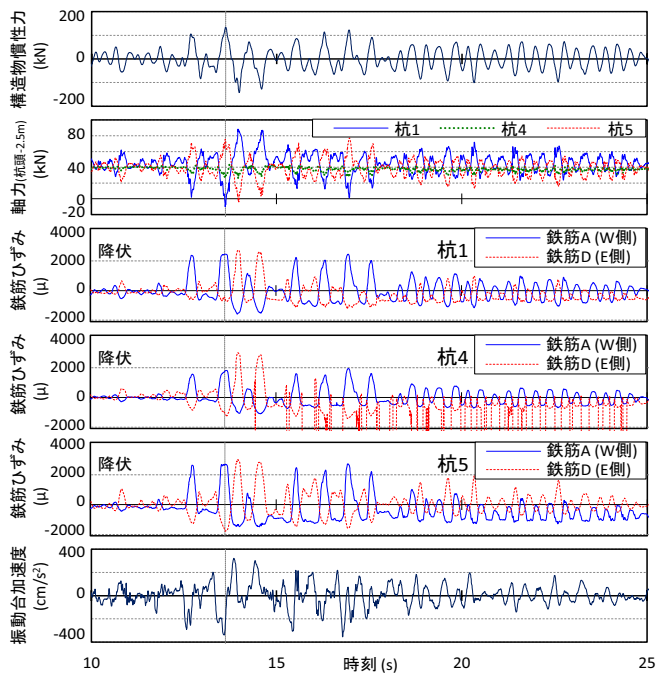


図7 告示波 100%加振時(2日目)の時刻歴波形

ます。また、杭 4 の鉄筋 D は、時刻 15 秒付近から正常に計測できなくなっています。鉄筋に生じた大きなひずみによって、ひずみゲージに剥がれや断線等の不具合があったと考えられます。

構造物慣性力が正側に最大となる時刻(時刻 13.62 秒)の曲率の同時刻分布を図 8 に示します。図には、鉄筋 B、C、E、F のひずみもプロットしています。ただし、杭 4 の鉄筋 E (杭頭-0.1m)と鉄筋 A (杭頭-1m)および杭 5 の鉄筋 E (杭頭-0.1m)については、計測不良のためデータを除外しました。また、構造物と杭に作用する力の概要を図 9 に示しています。

構造物慣性力が W 側に作用しているため、転倒モーメントによって引き抜き力が杭 1 に、押し込み力が杭 5 に作用しており、杭頭部では曲げによる圧縮ひずみが E 側(鉄筋 D)

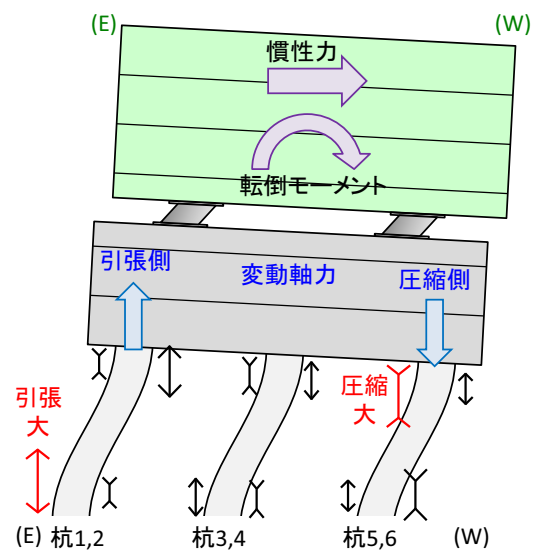


図9 杭・構造物に作用する力の概要

に、引張ひずみが W 側(鉄筋 A)に生じています。杭 1 と杭 5 を比較すると、杭頭の圧縮側(鉄筋 D)では、杭 5 の方がひずみが大きくなっていることが確認できます。杭 5 の E 側では、押し込みによる圧縮ひずみと曲げによる圧縮ひずみの両方が生じていますが、杭 1 の E 側では、曲げによる圧縮ひずみと逆向きに引き抜きによる引張ひずみが生じているからです。また、杭頭-1m 以深の地中部では、曲げの向きが杭頭部に対して逆向きになっているため、杭頭とは逆側の杭 5 の W 側(鉄筋 A)で圧縮ひずみが大きく、杭 1 の E 側(鉄筋 D)で引張ひずみが大きいです。特に、杭 1 では杭頭部だけでなく地中部においても鉄筋降伏が見受けられます。このような杭では、耐震性を検討する際に変動軸力の影響を考慮しなければ、危険側の評価になる可能性がありますと考えられます。

### (2) 加振後のひずみの残留値

光ファイバセンサで計測した杭表面の残留ひずみとひずみゲージで計測した鉄筋の残留ひずみの深度分布を、2 日目と 3 日目に実施した告示 JMA 神戸 NS 位相の 100%加振後と最終加振の 150%加振後について図 10 に示します。

2 日目から 3 日目にかけて、徐々に残留ひずみが増大しており、最終加振後(図 10(c))では、杭 5 の光ファイバが加振によって破断して計測不能になっています。2 日目の加振 図 10(a)では、杭頭部のみに残留ひずみが残っていますが、3 日目の加振後図 10(b)、(c)では地中部においても残留ひずみの増大が確認できます。特に、告示 100%加振(3 日目、図 10(b))の杭 5 では、地中部の残留ひずみが大きくなっており、光ファイバセンサによる計測と鉄筋のひずみゲージによる計測の結果が良く対応していることを確認できます(ただし、光ファイバセンサの方が杭芯から離れた位置のひずみを計測しているため、ひずみゲージよりも大きめの値となっています)。また、西側の杭(杭 5)の方が東側の杭(杭 1)よりも残留ひずみ(曲げひずみ)が大きくなっていることは、杭頭部が西側に傾斜し、その傾斜角が西側の杭ほど大きいことと対応しています。

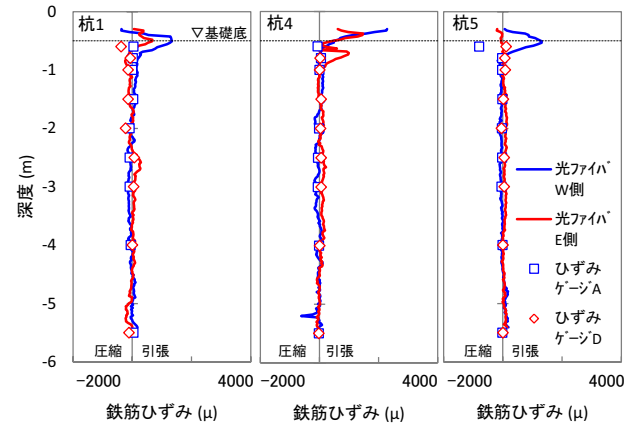
### 3.6 RC 杭の破壊状況の目視確認

実験後、地盤を掘削し RC 杭の状況を目視観察しました。図 11 にひび割れ状況のスケッチを、写真 3 に杭頭部の損傷および地中部のひび割れ状況を示します。構造物が傾斜した方向にある杭の杭頭部でモルタルの圧壊、剥落が顕著に生じていました(本実験結果を適切に判定するために必要なクライテリア(写真 3(a))。加振時に、転倒モーメントによる圧縮と曲げによる圧縮の両方が作用する杭頭部の内側に対応します(図 8)。また、地中部では、写真 3(b))に示すように、端杭の外側(杭 1、2 び東側、杭 5、6 の西側)で大きなひび割れが内側よりも広範囲に多数生じていました。加振時に、転倒モーメントによる引張と曲げによる引張の両方を同時に受けたためと考えられます。なお、杭を確実に損傷させるため、最終加振(告示波 150%加振)直前に RC 杭模型の根入れ部西側の地盤を掘削し、西側の根入れ抵抗のみ

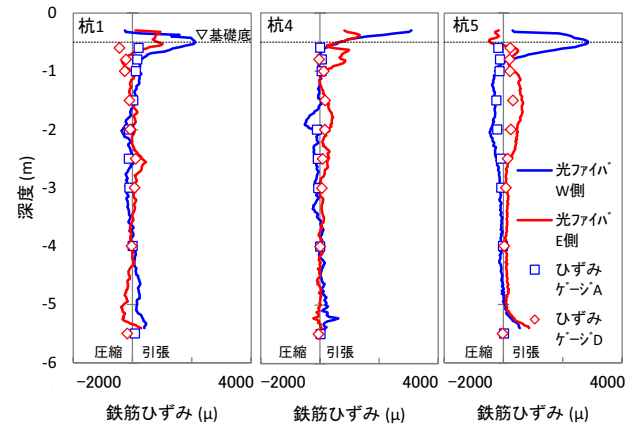
小さくなるようにしました。西側の杭頭において圧壊が顕著であった一要因と考えられます。

### 4. 健全度判定クライテリアの再検討

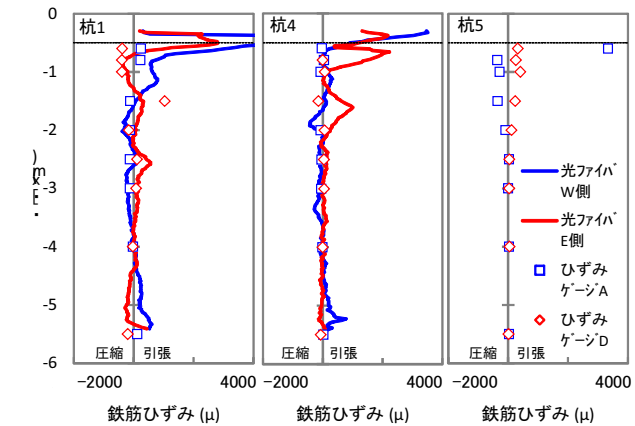
前述したように、実験当日の即時判定では、3 日目の最終加振(告示波 150%加振)によって初めて杭の傾斜が 1/100 を超え、判定結果が A 判定から B 判定に移行しました。



(a) 告示 JMA 神戸 NS 100%加振後(2 日目)



(b) 告示 JMA 神戸 NS 100%加振後(3 日目)



(c) 告示 JMA 神戸 NS 150%加振後(最終加振後)

図 10 抗体表面及び鉄筋の残留ひずみの震度分布

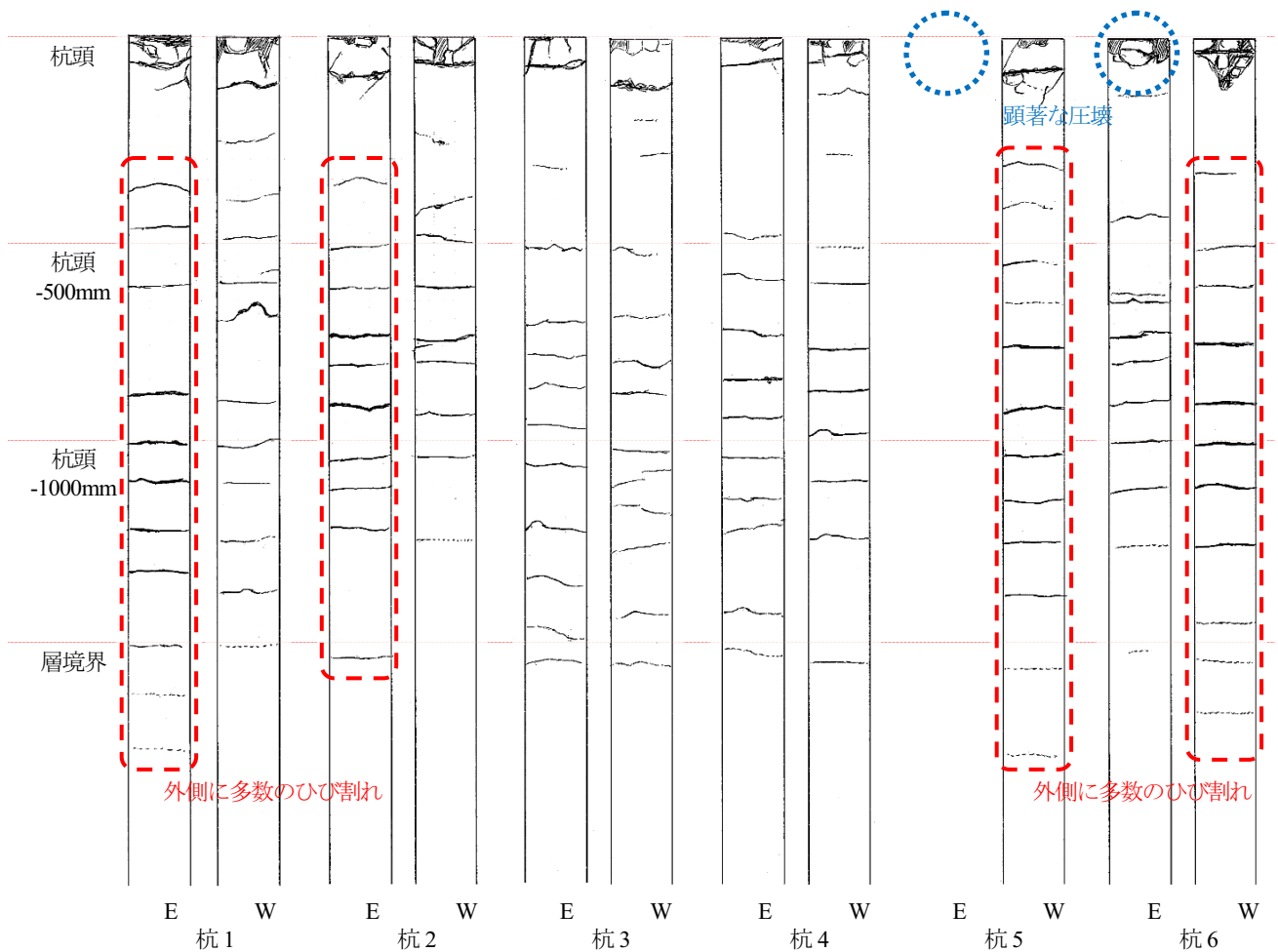


図 11 RC 杭のひび割れのスケッチ



(a) 杭頭損傷状況  
(杭 5 東側)

(b) 地中部ひび割れ状況  
(杭 6 西側)

写真 3 RC 杭の損傷状況

しかし、実験データや実験後の目視観察結果を勘案すると、表 6 に示すように、1 日目は鉄筋が降伏していないので A 判定、1 日目のレベル 2 に相当する告示波 100%加振では鉄筋が降伏したことから B 判定、3 日目の最終加振(告示波 150%加振)では終局曲率を超え、モルタルが剥落していたことから C 判定を下すのが妥当と考えられます。

RC 杭の杭頭の残留傾斜角の推移をみると、2 日目の告示波 100%加振で初めて 1/300 を超え、3 日目の告示波 150%加振で初めて 1/75 を超えていることが分かります。これは、暫定クライテリアにおいて上部構造物の残留傾斜角

として設定していた値に対応しています。したがって、本実験に関しては、構造物に設定していた暫定クライテリアと同じ値を杭の傾斜角のクライテリアとして用いれば、各加振後の RC 杭の健全度を適切に判定できることが分かりました。

一方、実験当日の即時判定には用いなかった光ファイバのデータを見ると、B 判定に相当する 3 日目の告示波 100%加振後において、杭頭部の残留ひずみが  $2000\mu$  を超え、 $4000\mu$  には至っていません(図 10(b))のに対し、C 判定に相当する 3 日目の告示波 150%加振後においては、杭頭部の残留ひずみが  $4000\mu$  を超えたり、杭頭部で破断したりしています(c)。したがって、本実験に関しては、 $2000\mu$  を超えたら B 判定、 $4000\mu$  を超えたり、光ファイバが破断したりしたら C 判定というクライテリアを用いれば、各加振後の RC 杭の健全度を光ファイバのデータに基づいて判定できることが分かりました。本実験の RC 杭で用いた D6 鉄筋の降伏ひずみは約  $1900\mu$  であり、A 判定から B 判定に移行するクライテリア  $2000\mu$  とおおむね対応しています。したがって、使用する主筋の降伏ひずみを A 判定から B 判定に移行するクライテリアとして採用することが選択肢となりうる可能性があります。実験結果と照合して再設定したクライテリアを表 7 に示します。

ただし、これらは本実験の結果のみから導かれたものであり、一般性のあるものではありません。特に、杭の傾斜角

表 6 主な加振後の RC 杭の状態と健全度

日付	入力波	ひずみに基づく RC杭頭部の状態	上部構造傾斜	RC杭傾斜	即時判定	光ファイバひずみ	詳細検討後判定
1日目	告示波20%	ひび割れ発生	1/2755	1/2204	A	—	A
	鷹取波10%	ひび割れ発生	1/2449	1/1049	A	886	A
2日目	告示波100%	鉄筋降伏	1/7346	1/262	A	2283	B
	鷹取波60%	鉄筋降伏	<1/10000	1/175	A	3656	B
3日目	告示波100%	鉄筋降伏	<1/10000	1/127	A	3277	B
	告示波150%	終局 (モルタル剥落)	1/711	1/74	B	4957	C

表 7 本実験結果を適切に判定するために必要なクライテリア

対象	センサ	測定データ	測定データによる評価		
			A	B	C
杭	傾斜計	残留傾斜角 $R_p$	$R_p < 1/300$	$1/300 \leq R_p < 1/75$	$1/75 \leq R_p$
	光ファイバ	残留ひずみ $\epsilon_R$	$\epsilon_R < 2000$	$2000 \leq \epsilon_R < 4000$	$4000 \leq \epsilon_R$ 光ファイバ破断
構造物	傾斜計	残留傾斜角 $R_f$	$R_f < 1/300$	$1/300 \leq R_f < 1/75$	$1/75 \leq R_f$
総合判定			杭と構造物の残留傾斜角および光ファイバによる残留ひずみのうち、厳しい方の評価結果を採用		

を健全度判定の指標とする場合、杭頭の固定条件が半剛接合の場合には杭頭部が回転しやすく、杭頭付近の傾斜が生じやすいため、剛接合の場合とはクライテリアを変える必要が生じると考えられます。また、杭種、杭径や傾斜計の設置深度によっても傾斜角のクライテリアは変わると考えられ、今後のデータの蓄積が必要です。

## 5. まとめ

本研究では、地震直後に、地中に埋もれて目視できない杭などの健全度を把握するためのモニタリングシステムを開発しました。

これらのモニタリング技術と健全度判定システムの妥当性を検証する目的で、E-ディフェンスを用いた振動台実験を平成 27 年度に実施しました。実験では、杭の残留傾斜角を検知し、その変化に基づいて即時に健全度判定結果を示すことができたことから、本システムが有効であることを確かめることができました。

今回の検証実験において、杭の健全度評価における有効性が特に認められたモニタリング項目は、杭の残留傾斜角と光ファイバによる杭の残留ひずみです。一定のクライテリアを超える残留値から杭の損傷を推定できることは分かりましたが、その一方で、杭が損傷していたとしてもそれらの残留値がクライテリアを超えていない可能性も考えられ、残留値のみに基づく判定では必ずしも十分ではありません。今後、地震中の動的な応答値をモニタリングして健全度判定に用いることも有力な選択肢であり、関連する技術開発が望まれます。

## 参考文献

- 1) 佐藤貢一、船原英樹、坂本成弘、藤井俊二：地盤・基礎モニタリングシステムの開発、大成建設技術センター報、第 46 号、58、2013。
- 2) 李哲賢、津田勉、岸田欣増：PPP-BOTDA 測定技術を用いた 10cm 分解能ブリルアン分布計測の実現、電子情報通信学会技術研究報告、OFT2005-16、pp.1-6、2005。

## II-2-3 建物のモニタリング(連成システム)

酒向裕司(小堀鐸二研究所)

## 1. はじめに

東北地方太平洋沖地震では、建物の被害は限定的であったにもかかわらず、基礎が損傷を受けたことによって建物に傾斜あるいは沈下が生じたと想定される建物が見られました。建物の健全性をモニタリングするためには、上部構造だけでなく基礎、地盤を含めたモニタリングシステムの構築が必要です。本分科会では、地盤-基礎-建物連成系を対象とした実験により、モニタリングシステムの検証を行いました。

まず、平成 24 年度は、過去の被害地震資料から基礎に被害が生じたと思われる事例を収集し、損傷部位や損傷形態と地盤条件や建物特性の関係を分析し、実験による確認が必要な要因を抽出しました。連成系実験を行うためのモニタリングすべき項目と方法を絞り込むとともに、実現可能な実験の概念検討を行いました。

平成 25 年度は、収集した被害事例から地震動強さと建物被害の整合性を定量的に検討し、更に建物模型に 1 質点系、模型地盤に 3 次元有限要素法を用いて、上部建物と杭-地盤系の強度等について検討しました。

平成 26 年度は、建物模型の設計を行い、建物 3 次元フレームモデル、地盤 3 次元有限要素法の組合せによる解析的検討を行いました。更に、建物模型の土槽への固定と崩落防止策、模型杭の作製方法など、試験体製作および実験実施に当たり、重要な項目について検討を行いました。また、予備試験計画を立案しました。

平成 27 年度は予備試験として、本試験体の施工実験と杭-地盤系の剛性・強度の確認を目的とした、砂地盤中に 4 本の杭に支持されたフーチングで構成される試験体の静的水平載荷実験を行いました。更に確認された杭-地盤系の剛性・強度に基づき、模型建物の設計を行い、本試験の施工計画を作成しました。

最終年度である平成 28 年度は、施工計画、実験計画に基づき、杭-地盤連成系の損傷実験と、基礎固定の上部建物の損傷実験を実施し、連成系モニタリングの検証データを蓄積しました。更に、地震時における基礎直下の地盤・杭の非線形挙動を再現することにより、杭本体や建物が損傷に至るまでの貴重なデータを取得しました。

## 2. 被害事例に基づく被災要因分析

## 2.1 データベースと被災建物の傾向

1964 年新潟地震から 2011 年東北地方太平洋沖地震までの主要な地震での被害事例を文献調査し、建物の構造、架構形式等の基本情報を抽出したデータベースを作成しました。次に、建物特性と地盤条件および損傷部位の関係について検討しました。建物特性と損傷部位の関係については、サンプルが少数であり、損傷部位との明瞭な相関関係は認

められませんでした。3 階建ての建物に杭基礎が損傷したケースが多い傾向となりました。地盤条件と損傷部位の関係については、表層 N 値の小さい軟弱な後背湿地に位置する建物に、杭基礎の損傷が集中している傾向が確認されました。

この結果を今回の調査対象範囲と総合して考えると、杭基礎が損傷しやすい条件は、(1)RC 造、(2)3 階建て、(3)既製杭(PC 杭,PHC 杭)、(4)表層 N 値の小さい軟弱地盤であることが分かりました。

## 2.2 被災要因分析と連成系実験の意義

中低層 RC 造建物については、1993 年釧路沖地震以来、観測される地震動強さに比較して建物被害が小さいことが指摘されてきました例えば<sup>2)</sup>。1995 年兵庫県南部地震でも、建物強度が既知の建物群について解析的な検討を行うと、実被害と整合性を取るためには強度を約 2 倍にする必要があるとする研究<sup>3)</sup>があります。

解析と実被害の乖離が生ずる理由としては、地盤-構造物の動的相互作用による広義の入力損失が原因であるとする考え方が有力視されています。このような観点から、詳細なケーススタディが行われていますが例えば<sup>4)5)</sup>当該建物と地盤で観測記録が得られていないため原因解明には至っていません。そこで、連成系の振動台実験を行って、動的相互作用が建物の応答低減に及ぼす影響を実証的に確認することが不可欠と考え、建物を簡略に質点系としてモデル化することが多い従来の連成系の振動台実験に対して、今回は建物を骨組みとし、杭-地盤-建物連成系および建物のみ両方について損傷を評価するための実験を行いました。

## 2.3 地震動強さと被災度の乖離

## (1) 検討条件

被害調査報告書等の文献調査を行い、耐力が明示されている建物を対象として、実被害から推定される建物応答と、近傍の地震観測記録から推定される建物応答(相互作用を考慮せず評価)との違い(これを乖離度と呼ぶ)を定量的に評価します。

対象建物数は、1993 年釧路沖地震から 2011 年東北地方太平洋沖地震までの 7 地震、全 21 建物です。検討用地震動は、各建物近傍の地震観測点で得られた記録を用います。観測記録は K-NET、KiK-net、JMA など観測された、一般に公表されている記録をそのまま用いることとし、地盤応答解析による検討対象建物の敷地地盤での地震動評価は行わないこととします。



## (2) 乖離度の評価方法

地震動から推定される建物応答を  $S_a-S_d$  を要求曲線とした等価線形化法から求め、実被害から推定される建物応答との乖離度を以下の2つの方法で評価します。

A: 被災時の変形  $S_d_{obs}$  と耐力スペクトルの交点から等価周期を求め、その周期での要求スペクトル ( $h=0.05$ ) の加速度を  $S_a_{dmnd}$  とし、耐力スペクトルにおける  $S_d_{obs}$  での加速度  $S_a_{cap}$  との比  $S_a_{dmnd}/S_a_{cap}$  で評価する。

B: 耐力スペクトルと要求スペクトル ( $h=0.05$ ) から、建物の履歴減衰を考慮して評価した遷移曲線より変形  $S_d_{cal}$  を求めて、 $S_d_{obs}$  との比  $S_d_{cal}/S_d_{obs}$  で評価する。

被災時の層間変形角は、文献に示されている値を用いますが、文献に示されていない場合は、被災度(軽微、小破、中破、大破)から、RC造耐震性能評価指針<sup>1)</sup>に示されている被災度と変形角の関係を参照し、被災度区分判定基準<sup>2)</sup>を元に表1のように設定します。

表1 被災時の層間変形角の設定

被災度		軽微 (損傷度Ⅰ)	小破 (損傷度Ⅱ)	中破 (損傷度Ⅲ)	大破 (損傷度Ⅳ)	倒塌 (損傷度Ⅴ)
層間変形角	曲げ部材	-	1/200	1/100	1/50	1/40
	せん断部材	-	1/750	1/380	1/250	1/100

## (3) 評価結果

各建物の乖離度と耐力および被災時の層間変形角の関係を図1に示します。耐力および層間変形角ごとにはばらつきはありますが、乖離度は概ね1以上でばらついており、地震動から推定される応答は、実被害から推定される応答を上回る結果となりました。また乖離度Bについては10程度のものがいくつかあります。これは、被災度が軽微のため被災時の層間変形角が0.001程度と評価されているのに対して、地震動から推定される変形は建物の降伏点を超えているためです。

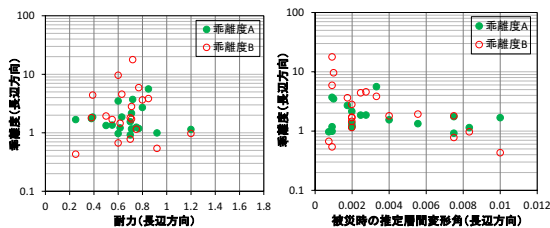


図1 乖離度と耐力および被災時の層間変形角の関係

## 3. 実験模型と実験計画の決定

重力場での地盤実験は、相似則が成立しないため縮尺率は小さい方が望ましいです。また、RC造の縮小模型が作製できるのは通常は縮尺率1/3程度までです。縮尺率を1/3程度とした場合、その建物慣性力に対抗するための地盤はかなり大きくなり、E-ディフェンスの振動台に載せることが困難となります。そこで、土槽側壁は剛として、建物慣性力は模型地盤を介して土槽側壁で支持する計画としました。この計画では、地盤震動は再現できないので、いわゆる慣性力の相互作用のみを再現する実験となります。

これまでにE-ディフェンスで行われた振動台実験<sup>8)</sup>なども

参考にして設定した試験体の概略図をに示します。縮尺率1/2.5の3階建てのRC造杭基礎建物であり、杭は第一反曲点までのモデルとし、先端をピン支持としました。実験は2段階加振を予定しており、1段階目はフーチング上に設置したS梁をフリーにした状態で連成系加振(ステップ1)、2段階目はストッパーによりS梁を土槽と緊結して基礎固定加振(ステップ2)を行う計画としました。

## 4. 3次元FEMによる予備解析

1段階目の連成系加振では、杭の損傷を建物損傷に先行させ、2段階目の基礎固定加振で建物を損傷させます。そこで、3次元FEMにより試験体の予備解析を行い、挙動を予測します。

### 4.1 検討モデル

試験体全体モデルの振動台実験の予備解析を行います。杭は実被害例が多い中空のPC杭とし、実大350φに縮尺率1/2.5を考慮し、製作可能なPC杭として150φとしました。

図3に試験体の解析モデルを示します。

解析領域は、剛土槽内の地盤  $9.2m \times 5.2m \times 1.0m$  としました。上部構造は立体フレームモデルとし、杭-地盤系のモデル化は、予備検討を踏まえて杭径を考慮しないモデルとしました。模型地盤は当初使用予定のアルバニー珪砂による乾燥砂とし、せん断波速度  $V_s$  は拘束圧依存性を考慮しました。フーチング1つに対して、杭はRC杭140φ4本にモデル化しました。入力地震動は告示極稀(乱數位相)の1倍と2倍の2ケースとし、底面と側面固定条件で入力しました。

杭体は長期軸力32.6kNを考慮した曲げ解析に基づき3折線の復元力特性を設定しました。応答解析では、有効スラブ幅をスパンの0.1倍とした場合とスラブ全幅考慮した場合を検討しました。

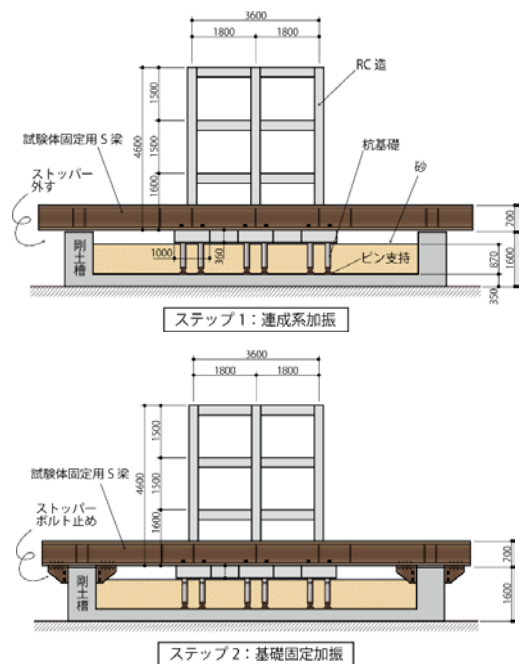


図2 試験体の概略図

非線形特性	上部構造、杭	3折れ線モデル+武田モデル
	地盤	内部摩擦角30° からHDモデルを設定、 hmax=21%
粘性減衰	上部構造の基礎固定時の1次周期に対する瞬間剛性比例型、減衰定数は上部構造h=3%、杭h=1%、地盤h=0.1%	

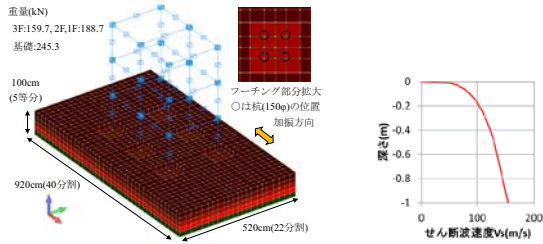


図3 試験体全体モデル

## 4.2 予備解析結果

入力地震動は、設計でよく用いられる告示波の極稀レベルを1倍、2倍して用いました。図4に建物の応答結果を示します。有効スラブ幅0.1倍の場合、基礎固定では、告示極稀1倍の層間変形角は1/150程度、極稀2倍は1/50程度となりました。一方、連成系では極稀1倍、2倍ともに1/185程度に留まりました。スラブ全幅考慮の場合、有効スラブ幅0.1倍に比べて層間変形角は小さいですが、基礎固定と連成系の相対関係は同じです。以上、有効スラブ幅の設定に寄らず連成系の建物応答は基礎固定に比べ低減し、特に極稀2倍において相互作用の影響が明瞭に確認できました。

図5に杭の曲げモーメントと曲率を示します。極稀1倍で杭頭で終局を超え、2倍で塑性化が進んだため、入力に寄らず連成系建物応答はほぼ同じとなりました。

以上、有効スラブ幅の設定によらず、極稀2倍入力では連成系で杭損傷、基礎固定で上部構造損傷となり、目的が達成されることを確認しました。

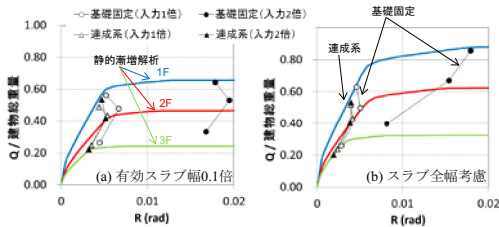


図4 建物の応答

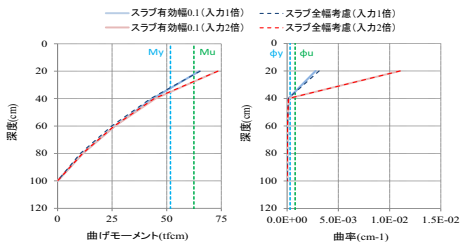


図5 杭の応答

## 5. 杭-地盤系の予備実験

予備実験では、加振実験試験体の一部であるPC杭4本からなるフーチングについて静的載荷実験を行いました。目的は、①部材の試作と試験体の施工実験による製作方法の妥当性確認、②杭基礎の耐力と変形性能の把握と本試

験体の設計への反映、です。

## 5.1 試験体の概要

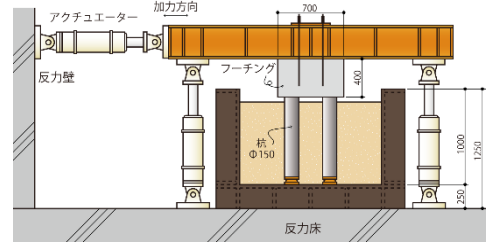


図6 予備実験の試験体概要

図6に試験体を示します。RC底盤と鋼製側壁からなる剛土槽を製作し、土槽内に杭を設置し砂地盤を敷き詰めた後にフーチングを施工しました。模型地盤の高さとフーチングの大きさは本試験体と同寸法とし、杭先端には、第1反曲点までの応力状態を模擬するために、ピン支承をRC底盤に固定しました。実験では、鉛直ジャッキを引き下げることで軸力を載荷し、その状態で水平ジャッキにより静的載荷を行いました。

## 5.2 試験体の製作

縮尺率1/2.5に従うと、PC鋼棒の径は実大 $\phi 7.0\text{mm}$ に対して $\phi 2.8\text{mm}$ となりますが、端部加工の品質確保のため $\phi 5.1\text{mm}$ を用いることとしました。そのため、模型杭の耐力は目標値に対して約2.0倍となりました。

砂は、本実験で実際に使用予定の掛津珪砂(乾燥砂)としました。土槽内全体に敷きならした後、事前の転圧試験に基づき型枠バイブレータにより転圧しました。地盤は、相対密度60.3%、質量密度 $1.47\text{g/cm}^3$ 、バンダーエレメントにより測定したS波速度は層中央で $130\text{m/s}$ となり、目標通りの地盤が製作できました。

実験では、杭周辺地盤の拘束圧の条件を明確にするため、実地盤で地震時の沈下によりフーチング下に隙間が生じている場合を想定し、製作上はフーチングと砂の間に隙間を確保することとしました。そのため砂の上に空気膜を敷き、フーチングの底型枠を設置しました。空気膜は、コンクリート硬化後に撤去しました。

## 5.3 計測計画と加力スケジュール

表2に載荷ステップを示します。変位制御の交番載荷で、各振幅で2サイクル載荷とし、軸力は、本試験体の杭1本当りの長期軸力 $32.6\text{kN}$ (コンクリート実強度 $77\text{N/mm}^2$ に対して軸力比0.04)で一定としました。

表2 載荷ステップ (変位制御)

ステップ	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
変形 $\delta(\text{mm})$	$\pm 0.5$	$\pm 1.0$	$\pm 2.0$	$\pm 4.0$	$\pm 9.0$	$\pm 13.0$	$\pm 17.0$	$\pm 34.0$
変形角R(rad)	$\pm 1/1600$	$\pm 1/800$	$\pm 1/400$	$\pm 1/200$	$\pm 1/100$	$\pm 1/67$	$\pm 1/50$	$\pm 1/25$
損傷状況(予測)		クラック			降伏	終局		

## 5.4 実験結果

### (1) 荷重-変形関係と杭の破壊状況

図7に杭-地盤系の荷重-変形関係を示します。変形角 $R = \pm 1/400$  (水平変形  $\delta = \pm 2.0\text{mm}$ ) の交番荷重までは概ね弾性でしたが、 $R = \pm 1/200$  ( $\delta = \pm 4.0\text{mm}$ ) 以降は徐々に剛性が低下しながら荷重が上昇し、残留変形の小さいS字状の履歴を描きました。 $R = \pm 1/25$  ( $\delta = \pm 34\text{mm}$ ) の正側2回目のピーク付近でやや荷重低下しましたが、その後も安定した状態を維持して負側交番荷重を終えました。

この荷重後に、正方向に単調荷重を続けると、 $R = +1/24$  ( $\delta = +36\text{mm}$ ) 以降、荷重が低下する様子が数回見られ、最終的に  $R = +1/15$  ( $\delta = +58\text{mm}$ ) 付近で荷重低下と共に軸力保持不能となりました。尚、この直前で最大耐力の35%程度に荷重は低下しました。図7には3次元FEMによる予備解析結果を併せて示しました。実験結果に対して最大耐力は3割程度低く、耐力低下が生じた34mmの2回目の骨格に近くなりました。

写真1、写真2に杭の破壊状況を示します。4本とも杭頭部が損傷しました。このうち、NW杭は曲げ破壊、残り3本については曲げ降伏後にせん断破壊に至ったと判断しました。地震で沈下した実建物の杭は、杭頭部で大きな損傷が見られており、実際の杭被害を概ね再現できたと考えられます。

図8に水平力とフーチング鉛直変位の関係を示します。交番荷重中は概ね安定した挙動を示しており、最終的に破壊を生じた  $R = +1/24$  (水平荷重 60kN) において、東側が鉛直方向に最大約17mm沈下し、加力直交の東方向に最大約13mmの残留変位が生じました。

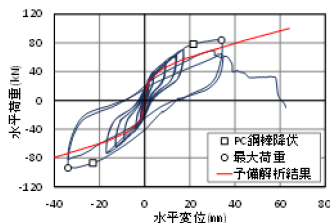


図7 杭-地盤系の荷重-変形関係

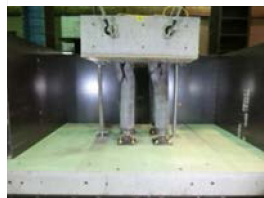


写真1 加力終了後の杭の破壊状況(全体)



写真2 加力終了後の杭の破壊状況(杭頭部)

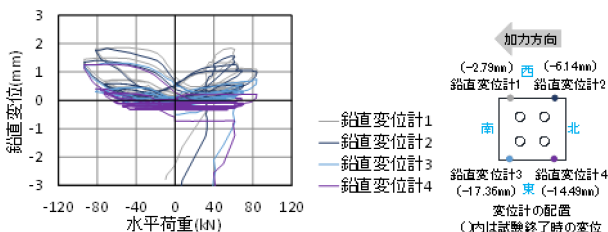


図8 水平荷重とフーチングの鉛直変位

### (2) 杭のひずみ分布

杭の4本の杭の表面に光ファイバを敷設して、BOCDA方式9)によるひずみ計測を行いました。2.0mm以降の各荷重ステップにおける、第一サイクルの正加力時のひずみ分布を図9に示します。2.0mmでは、引張側、圧縮側共に、光ファイバとひずみゲージによるひずみは概ね対応しています。13.0mmではコンクリート表面のひずみゲージは引張側ではほぼ0となっています。これは、ひずみゲージから外れた位置で表面のひび割れが発生したためと考えられます。

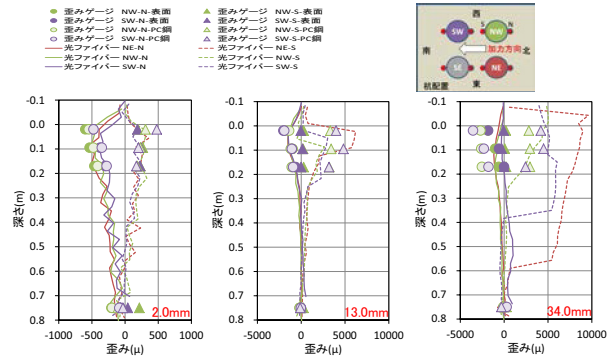


図9 杭のひずみ分布(正側が引張)

## 6. 本試験体の設計

### 6.1 上部構造の設計

前述のように、製作した模型杭の耐力は、目標値に対して約2倍となっているため、上部構造の設計耐力も、ラーメン構造の実建物の平均的な耐力  $CB=0.5$  程度に対して、2倍の  $CB=1.0$  程度を目標に部材断面を設定しました。柱・梁断面を表3に示します。

表3 柱・梁断面リスト

	1F~3F	1F (基礎)	2F	3F	RF	
柱		梁				
主筋	22-D13 (引張 7-D13)	上端筋 4-D13 下端筋 4-D13	5-D10	4-D10	3-D10	
帯筋	4-D6@35	あばら筋 4-D6@50	4-D6@50	同左	3-D6@50	
鉄筋比	3.10% (引張 0.99%)	引張鉄筋比 0.78%	0.69%	0.55%	0.41%	
帯筋比	1.21%	あばら筋比 1.25%	1.41%	同左	1.06%	

### 6.2 本試験体の再検討

予備実験結果を反映したSRモデルによる上部構造の検討を、告示波と地震動の平均的な特性を有する内山らによる距離減衰式<sup>10)</sup>に従う地震動(図10)で実施しました。パラメータはマグニチュード  $M=8.0$ 、深さ  $D=30\text{km}$ 、距離  $X=50\text{km}$  とし、位相特性は乱数位相としました(作成した地震動を内山波と呼びます)。

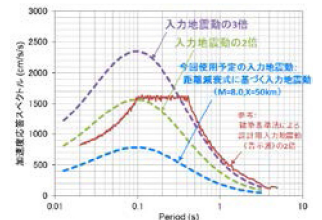


図10 入力地震動の応答スペクトル (相似則考慮)

Sway ばねは、予備実験の杭-地盤系の荷重-変形関係(図 7)に基づいて、HD モデルとして設定しました。更に地盤のばらつきを想定して 1.2 倍とした場合を設定しました。上部構造は平面フレームモデルとし、有効スラブ幅についても検討しました。

告示波と内山波の応答結果を比較した結果、告示極稀 2 倍レベルと内山波 3 倍レベルがほぼ同等の結果となりました。また、地震動の平均的な特性を有する内山波の方が、地盤のばらつきを考慮した場合においても、基礎固定に比べて連成系の応答がやや小さくなり、前述の地震被害に近い状態が再現されると思われます。そのため、内山波を採用することとしました。

また有効スラブ幅によらず、内山波 3 倍入力にて連成系で杭損傷、基礎固定で上部構造損傷となり、目的が達成されることを確認しました。

### 6.3 試験体の概要

施工実験を踏まえて試験体を製作し、図 11 に示す通り、本実験では予備実験とほぼ同じ地盤が製作できました。試験体の全体立面図を図 11 に示します。構造物内部には、錘も兼ねて H 鋼で組み上げた架台を倒壊防止用に設置しました。

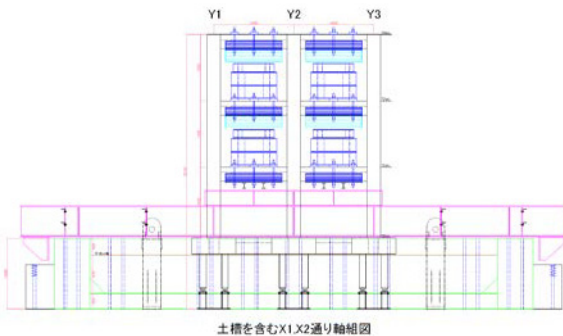


図 11 試験体の全体立面図(長辺方向:加振方向)

### 6.4 実験結果

#### (1) 連成系加振(ステップ 1)

表 4 に各加振レベルでの損傷状況を示します。試験体は杭、建物ともに約 2 倍の強度があるため、入力動も 2 倍程度の入力が実現象と対応すると思われます。

図 12 に最終加振前の内山波 200%と 300%加振での基礎の水平荷重-変位関係を示します。基礎の水平荷重は、各階と基礎の加速度波形に重量を掛けて積算することにより評価しました。この図により、杭の降伏と地盤の非線形性のため、基礎-地盤系の剛性低下が確認できます。

内山波 300%入力では、建物基礎が沈下し S 梁が剛土槽に着座した。図 12 に内山波 400%加振での基礎の水平荷重-変位関係を示します。この図により基礎-地盤系における水平荷重の耐力低下が確認できます。

写真 3 に杭の破壊状況を示します。4 本とも杭頭部が損傷しせん断破壊に至って軸力保持機能を喪失したと考えられます。

表 4 連成系加振(ステップ 1)の損傷状況

波形名	震動台加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	上部構造の層間変形角 (損傷状況)	杭-地盤系の状態
内山波 20%	31	1/9140	弾性
内山波 60%	91	1/2270	弾性~1F 降伏
内山波 100%	180	1/1310	ひび割れ
内山波 200%	410	1/700 (梁端と 1F 柱脚~曲げひび割れ)	降伏歪、圧縮歪
内山波 300%	690	1/570 (梁端と 1F 柱脚~曲げひび割れ)	耐力低下、軸力保持喪失

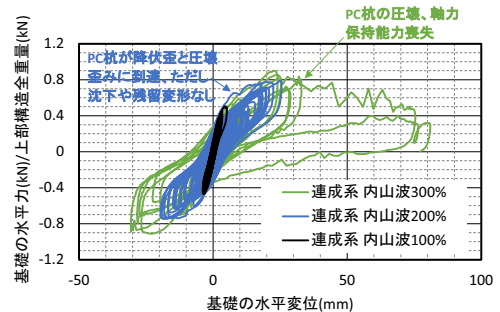


図 12 基礎の水平荷重-水平変位関係 (ステップ 1)



写真3 内山波 300%終了後の杭の損傷状況

#### (2) 基礎固定時加振(ステップ 2)

表 5 に各加振レベルでの損傷状況を示します。

図 13 にステップ 2 での建物の層せん断力-層間変位関係を示します。基礎固定モデルでは内山波 300%入力により、層間変形角  $R=1/47$  程度となり、概ね建物が最大耐力に達したことが確認できました。

図 14 に内山波 300%加振での建物の層せん断力-層間変位関係をステップ 1 と比較して示します。この図より、ステップ 1 の連成系加振では基礎固定時に比べて応答が小さく、相互作用の影響により建物応答が低減していることが確認できました。

表 5 基礎固定加振の損傷状況

波形名	震動台加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	上部構造の層間変形角 (損傷状況)
内山波 60%	97	1/1290
内山波 100%	180	1/680
内山波 200%	420	1/200 (1F, 2F 梁端降伏)
内山波 300%	690	1/100 (1F~3F 梁端、1F 柱脚降伏)
内山波 400%	960	1/68 (1F~3F 梁端、1F 柱脚降伏)
内山波 500%	1200	1/47 (1F~3F 梁端、1F 柱脚降伏、圧壊)

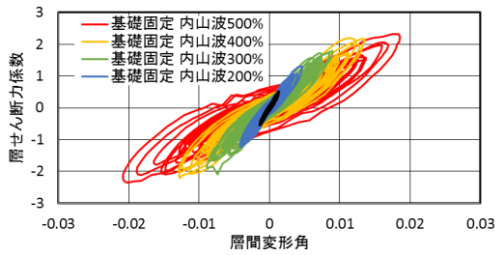


図13 建物の層せん断力-層間変位関係 (ステップ1)

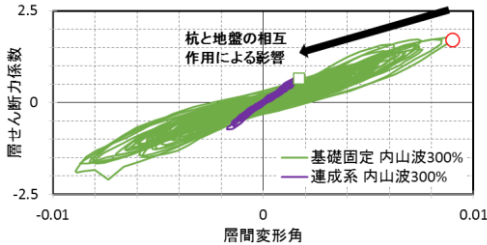


図14 建物の層せん断力-層間変位関係の相互作用効果

## 7. 結論と課題

- 過去の被害地震資料から、基礎に被害が生じた事例を収集し、データベースの分析により、杭基礎被害が生じ易い条件を抽出し、実験の対象とする建物の特性を明らかにしました。更に被害事例に基づく地震動強さと建物被害の定量的検討より、地震動強さと建物被害の乖離度は大きいことを示しました。
- 3階建て建物を想定し、上部構造の概略設計を行い、地盤3次元FEM-上部構造3次元フレームモデルによる解析を行いました。その結果、有効スラブ幅によらず連成系実験で杭損傷、基礎固定実験で上部構造損傷が可能となることを確認しました。
- 予備試験として、剛土槽の砂地盤中にPC杭4本のフーチングを製作し、正負交番の静的載荷を実施しました。杭-地盤系の荷重-変形関係は、変形角  $R=\pm 1/25$  の正側2回目のピーク付近で荷重低下が生じ、交番載荷後の単調載荷  $R=1/15$  で荷重低下し軸力保持不能となりました。損傷観察では、杭頭部の曲げ降伏後のせん断破壊が確認され、実際の杭被害を再現できました。
- 予備実験で得られた杭-地盤系の荷重-変形関係に基づき設計した、PC杭で支持された3階RC造建物の試験体および防護装置を、立案した施工方法に従い施工し、振動台上に設置しました。
- 連成系加振(ステップ1)では、加振レベルを徐々に上げて地盤-杭基礎-建物連成系の実験を行って、杭が破壊し基礎が沈下することにより、S梁が剛土槽に着座して、ステップ1実験を終了させました。
- 基礎固定加振(ステップ2)では、基礎固定時の建物の実験を行いました。加振レベルを徐々に上げて実験を行い、建物の耐力を実験的に確認するとともに、柱と梁の損傷状況を確認することができました。
- 計測により各加振レベルにおいて貴重なデータを取得し、モニタリングの検証データが蓄積できました。

なお、ひずみ計測に用いた光ファイバの技術は、JST 委託研究テーマ「ブリュアン光相関領域反射計測法による振動・歪み・温度分布センサの開発」内にて開発中のものです。

## 参考文献

- 野澤他：AIJ 大会梗概集、pp.75-76、2013.8、
- 壇他：AIJ 構造系論文報告集、454、pp.51-60、1993.12、
- 鈴木他：AIJ 大会梗概集、pp.307-308、2007.8、
- 土方他：AIJ 構造系論文集、631、pp.1519-1527、2008.9、
- 山添他：AIJ 構造系論文集、660、pp.263-272、2011.2、
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説、2004、
- 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針、2002、
- 壁谷澤他：AIJ 構造系論文集、632、pp.1833-1840、2008.10、
- 今井他：AIJ 大会梗概集、pp.1007-1010、2003.9、
- 内山他：AIJ 構造系論文集、606、81-88、2006

## II-3 地盤－基礎－建物連成系の応答評価のための観測

### II-3-1 建物連成系の応答評価のための観測

鈴木琢也(竹中工務店)

#### 1. はじめに

地震時の上部建物の応答評価において、地盤-基礎-建物系の相互作用効果を適切に考慮することは極めて重要です。しかし、強震動が表層地盤を伝わり建物基礎に到達しそれが上部建物を揺らすメカニズムを統一的に理解するための実観測データについては、未だ十分に得られてはいない状況です。

そこで、本研究では、地盤と上部建物に地震計を設置し、実観測によって観測データを蓄積しました。併せて、得られたデータに基づき、連成系に対する応答解析技術を検証するとともに、実用的な連成系応答評価法を整備しました。また、首都圏地震観測網 MeSO-net 観測データの利用拡大を図るため、MeSO-net の GL-20m での観測データを用いた表層地盤構造の推定手法の適用性を、得られた観測データを用いて確認しました。

#### 2. 成蹊学園、自由学園及び豊洲小学校観測点地震観測

##### 2.1 地震観測点及び維持管理状況

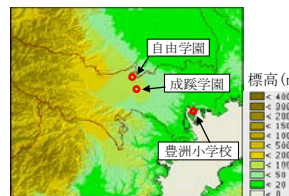
サブプロジェクト①との連携により平成24年度及び平成26年度に、MeSO-net システムと連動する地震観測装置を設置し、観測データを蓄積しました。観測点は成蹊学園、自由学園及び豊洲小学校の3地点です。表1に観測対象建物の概要を、図1に観測点位置を示します。また、図2には設置した地震計写真の一例を示します。地表観測点は450mm角の基礎コンクリート上にアンカーで固定し、鉄板付コンクリート枠で保護しています。外壁及びEPS床に設置した地震計及び外壁に設置した中継器(ブリッジ)は、ステンレス製のカバーを取り付けて装置を保護しています。設置当初は落雷による機器の故障がありましたが、現在は、3観測点とも正常に観測を継続し、観測データを蓄積しています。

##### 2.2 地震観測状況

成蹊学園観測点及び自由学園観測点では、平成25年2月の計測開始から平成28年8月31日までに、両観測点に近い震度観測点(東久留米市本町、武蔵野市緑町、武蔵野市吉祥寺東町)において震度1以上を示した地震の地震数は128個、地震のマグニチュードは3.0~8.1、深さは3~682km、震央距離は5~1434kmでした。建物上部で観測された最大加速度は成蹊学園が186.2cm/s<sup>2</sup>、自由学園が143.2cm/s<sup>2</sup>、地表で観測された最大加速度は成蹊学園が94.0cm/s<sup>2</sup>、自由学園が68.4cm/s<sup>2</sup>でした。また、地表計測震度相当値の最大は成蹊学園が4.0、自由学園が3.9であり、平成27年5月25日の埼玉県北部の地震において計測されました。図3に地震の震央分布を示します。

表1 地震観測を行っている建物

観測点	成蹊学園 中高中央館	自由学園 最高学部棟	豊洲小学校 校舎
構造・基礎形式	RC造 杭基礎	SRC造 直接基礎	RC・一部S造 杭基礎
階数	地上4階 塔屋1階	地上4階	地上4階 塔屋1階
竣工年	1998年	2004年	2000年
地震計設置位置	地表1点 地下ピット2点 塔屋1点	地表1点 1階2点 4階1点	地表1点 1階3点 4階3点



(a) 観測点の位置



(b) 成蹊学園 中高中央館



(c) 自由学園 最高学部棟



(d) 豊洲小学校 校舎

図1 地震観測点



(a) 地表



(b) 頂部

図2 設置した観測装置(成蹊学園)

豊洲小学校観測点では、平成27年2月の計測開始から平成28年8月31日までに、観測点に近い震度観測点(江東区塩浜、江東区青梅、中央区勝どき)において震度1以上を示した地震の地震数は62個、地震のマグニチュードは2.9~8.1、深さは5~682km、震央距離は11~1954kmでした。建物上部で観測された最大加速度は82.6cm/s<sup>2</sup>、地表で観測された最大加速度は63.1cm/s<sup>2</sup>でした。また、地表計測震度相当値の最大は4.4であり、平成27年5月30日の小笠原諸島西方沖の地震で計測されました。なお、本観測システムは連続的に収録しているため、遠地の地震においても、その揺れ初めから最後まで全てを記録することができました。

### 3. 観測記録シミュレーション解析

地震観測装置を設置した各建物について、地盤-基礎-建物の連成を考慮した地震応答解析モデルを作成するとともに、観測された地震時のシミュレーション解析を行い、解析技術の精度検証を行いました。

#### 3.1 解析モデル

解析モデルはいろいろなものが考えられますが、詳細な解析モデルとして、上部構造・下部構造を全て3次元FEMとした解析モデル(図4(a))、および、設計で一般的に用いられている、上部構造を多質点せん断モデル、地盤及び基礎構造をスウェー・ロッキング(SR)ばねとした質点系SRモデル(図4(b))の2種類の解析モデルを各観測点について作成しました。

図5には、地震観測装置を設置した3建物の3次元FEMモデル図を示します。3次元FEMモデルは地盤をソリッド要素、建物を梁要素によってモデル化しています。総要素数は、成蹊学園が約24000要素、自由学園が約17000要素、豊洲小学校が約56000要素となっています。モデル作成には、(株)竹中工務店開発の構造設計システムBRAINを用い、建設時図面に基づいて作成しました。

地盤モデルの剛性は、観測点の地震記録から得られた地盤の伝達特性に基づき同定された物性値を用いています。具体的には、MeSO-netによる地下20m地点の観測記録と、地表面に設置した地震計による観測記録から伝達関数を評価し、遺伝的アルゴリズムを用いた逆解析により地下構造の推定を行っています。

また、大地震時における柱や梁の非線形挙動を考慮するために、3次元FEMモデルにおいては、梁要素には非線形モデルを用いています。また、SRモデル構築のために、建物を質点系に集約する際には、この3次元モデルに水平荷重の増分解析を行って荷重-変形関係を算定し、トリニアアの骨格曲線にフィッティングしたものの各階の非線形特性と

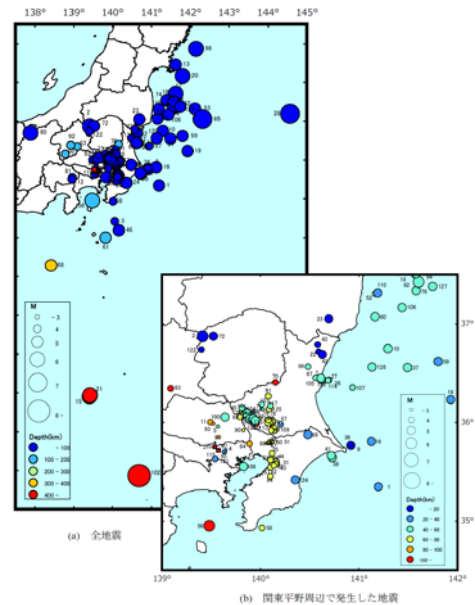


図3 観測地震の震央分布  
(成蹊学園及び自由学園観測点付近で震度1以上)

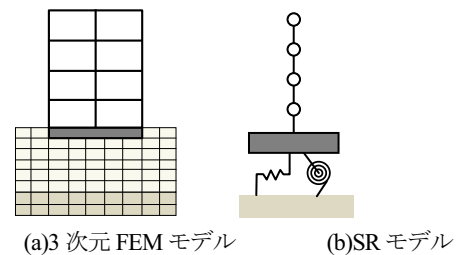


図4 解析モデルのイメージ

して用いています。

表には、作成したモデルの地盤連成1次振動数を示します。表より、3DFEMモデルとSRモデルの振動数は概ね対応していることが確認できました。

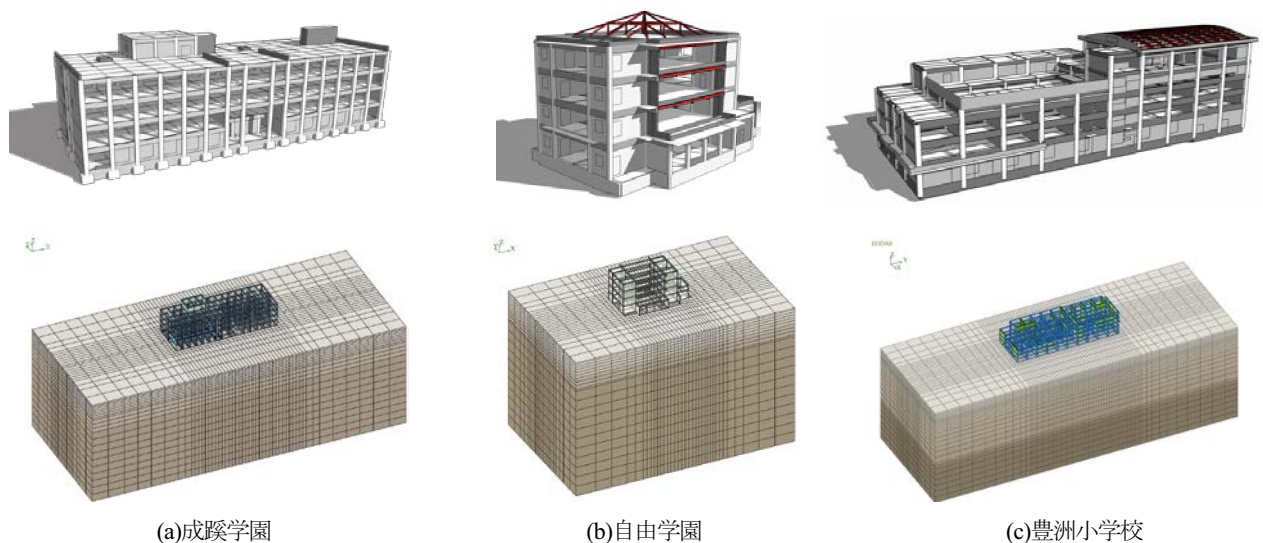


図5 作成した解析モデル

### 3.2 シミュレーション解析結果

ここでは前節で作成した解析モデルを用いた応答評価手法の適用性を検証します。一例として、成蹊学園、自由学園の2地点において、計測震度が最も大きかった平成27年5月25日の埼玉県北部の地震時の建物挙動のシミュレーション結果を示します。表には、当該地震時において各建物で計測された最大加速度および震度を示します。

図6に最大応答加速度分布を、図7に建物頂部の加速度応答スペクトル(h=5%)を示します。図より、3次元FEMモデルによる解析結果、SRモデルによる解析結果のいずれも観測記録と概ね整合しており、応答解析手法の適用性を確認することができました。建物頂部の応答のピーク振動数も概ね対応しており、表2に示した固有振動数も、実建物の特性と概ね対応するものと考えています。

表2 各モデルの並進1次固有振動数(地盤連成)

建物	モデル	長辺方向 (Hz)	短辺方向 (Hz)
成蹊学園	SR	2.99	3.84
	FEM	2.76	2.95
自由学園	SR	4.08	3.48
	FEM	4.05	4.03
豊洲小学校	SR	2.72	2.68
	FEM	2.17	2.17

### 3.3 実用的な応答解析手法の提案

#### (1) 提案する応答解析手法の位置づけ

前節までに、詳細な解析手法である3次元FEMモデルおよび設計で用いられるSRモデルによる地盤-基礎-建物系の応答評価手法が、実測された観測記録を概ね精度よく推定できることが確認されました。一方で、これらの手法は設計に用いられるSRモデルであっても、SHAKEや3次元FEMに関する一定程度の解析技術が必要となります。しかし、応答評価を地震後の大量の建物の健全性評価や、継続利用の可否判断などに迅速に適用することを考えた場合、特殊な解析技術を有さない技術者でも扱うことのできるものとするは有意義です。そこで、本節ではこの解析手法について検討を行いました。

なお、ここで検討する解析手法は、応答評価用の解析モデル構築が迅速かつ簡便であることに主眼を置いているため、その精度は、一般的に設計で使用される応答解析手法に比べ必ずしも高くはありません。解析による応答結果を「設計」に用いる際には、地盤の相互作用効果等を適切に評価する必要があります。提案手法が想定する適用先、適用範囲等を表4にまとめます。

表3 シミュレーションに使用した地震動(2015年5月25日埼玉県北部地震)

観測位置	最大応答加速度(cm/s <sup>2</sup> )及び震度								
	成蹊学園			自由学園			豊洲小学校		
	長辺	短辺	震度	長辺	短辺	震度	長辺	短辺	震度
建物頂部	186	121	4.6	129	134	4.5	44.1	39.2	3.5
1F	45.1	51.1	3.5	51.7	51.3	3.8	26.8	29.5	3.3
GL	103	63.5	4.0	73.6	68.4	3.9	22.2	27.6	3.2
GL-20m	17.3	23.2	2.8	12.5	16.9	2.7	16.7	20.8	2.9

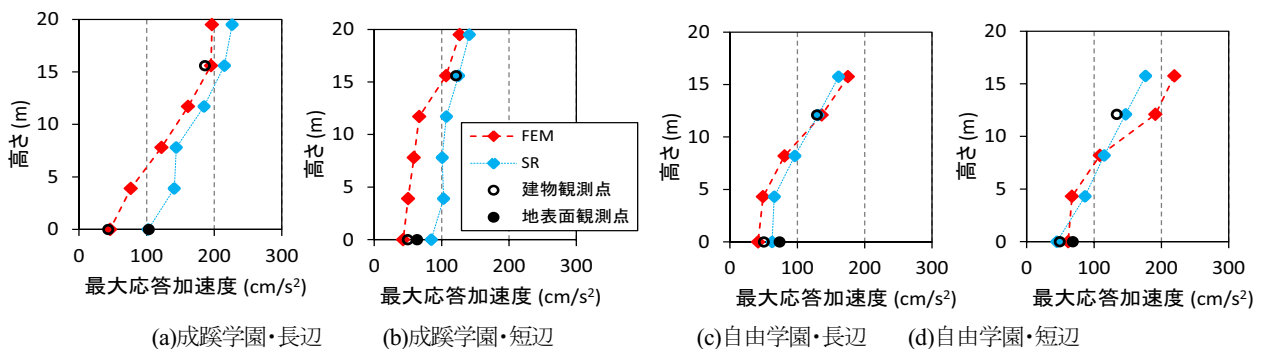


図6 建屋最大加速度応答分布

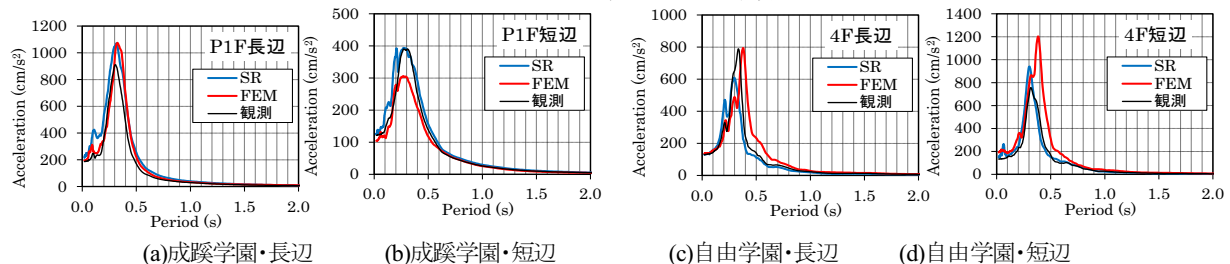


図7 建物頂部加速度応答スペクトル(h=5%)



## (2) 提案する応答評価手法の概要

図8に提案手法の概要を示します。提案手法では、建築学会「建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計」で提案されている評価式を用いて求めた初期地盤物性における地盤ばねに、入力地震動レベルに応じた低減係数を乗じることで、地震時の剛性低下を考慮した地盤ばねを算定します。これにより、精度は落ちるものの、高度な解析技術を有さずとも簡便な地盤ばねの算定が可能になります。

提案手法で使用する低減係数は、基礎種別、地盤種別、入力地震動等を変化させたパラメータスタディから設定した線形式、当該建物の属性や観測された入力地震動に応じて解析実施者が地震後に算出します。なお、この線形式の適用性については詳細法である薄層要素法による地盤ばね(SHAKEによる剛性低下考慮)との応答結果比較を行い、検討の範囲内において、提案手法によって算定した地盤ばねを用いた応答解析結果と概ね良好に対応することを別途確認しています。一例として、図9に「第3種地盤上に建つ杭基礎のS造15階建て建物」の応答解析結果を、本提案手法と、詳細法である薄層要素法と比較した図を示します。提案手法において低減係数 $\alpha$ を考慮することにより、応答結果が薄層要素法とよく対応できるようになることが確認できます。

## (3) 提案手法の適用性の確認

提案した手法を用いた地震観測シミュレーションを実施し、解析手法の適用性を確認しました。図10に最大応答変位分布を、図11に頂部変位時刻歴の解析結果を示します。図に示すように、提案された実用的な応答解析手法は、建物の図面、PS 検層等による地盤の初期物性値および地震時

表4 想定する適用先、使用者、適用範囲

適用先	地震被災後の建物の健全性評価 継続利用の可否判断 など
使用者	SHAKE や薄層要素法、3次元 FEM 解析などの高度な数値解析技術を保有しない一般の構造技術者など
適用範囲	中小規模の建物を対象とする ・構造種別：鉄骨造、RC造。 ・基礎種別は、直接基礎、杭基礎。 ・平面形状は整形な建物。一辺の幅は30m以下。 ・層数は15層以下、階高は60m以下。

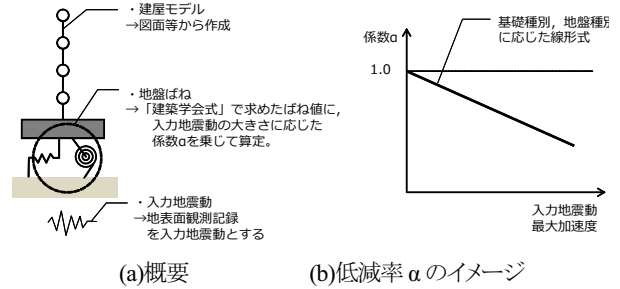


図8 提案する実用的な応答解析手法

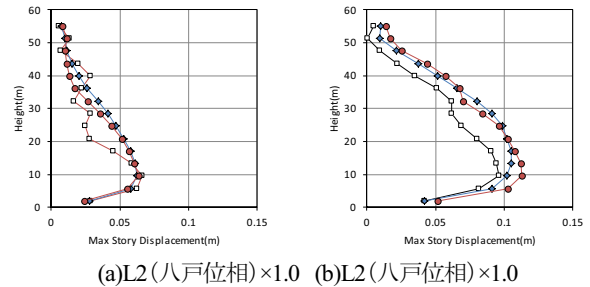


図9 最大層間変形角の比較 (S造15層,3種地盤,杭基礎)

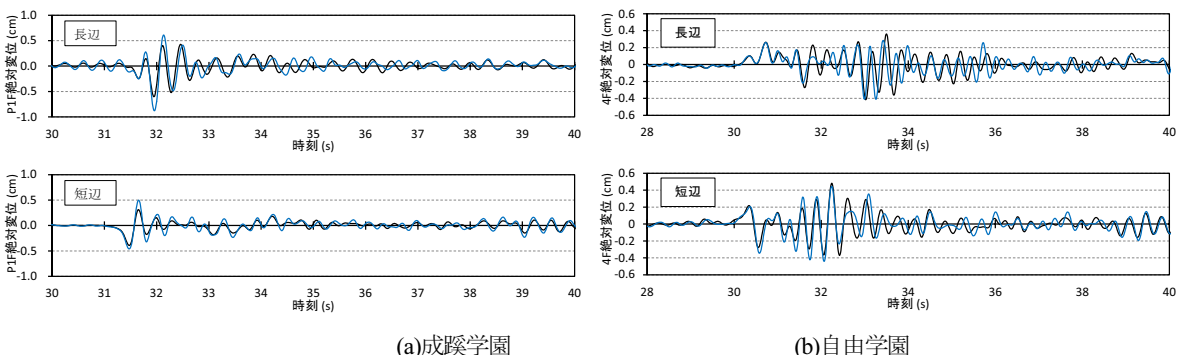
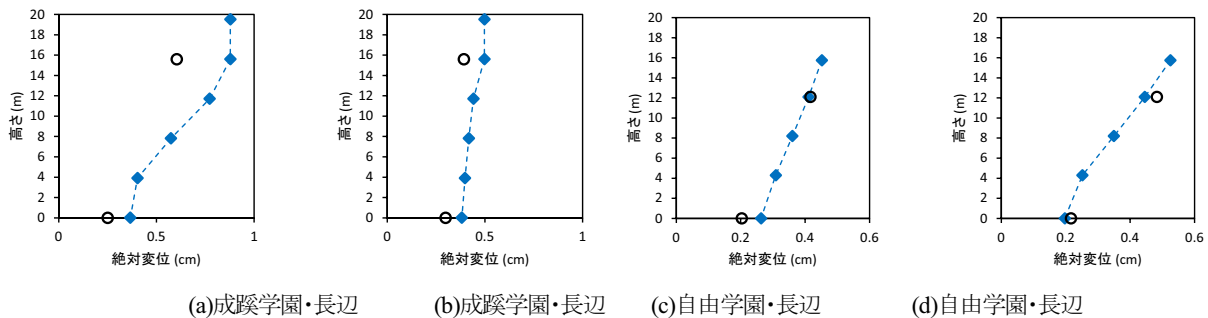


図11 提案手法による最大応答変位の解析結果(観測:黒実線、解析:青実線)

の地表面入力波から応答解析モデルを構築する簡易な手法であるものの、観測記録と比してほぼ同等、もしくは大きめ(安全側)の解析結果を与えることが確認され、提案手法の適用性を確認することができました。

#### 4. 地盤構造推定手法の適用性検討

MeSO-net は首都圏に稠密に配置されており、地震防災・減災を検討する上で従来にない貴重なデータを提供しています。しかし、MeSO-net 観測点の地震計の深さはGL-20mで、かつ地盤調査が実施されていないため、現状では地表面の地震動特性の評価などへの利用が困難な状況です。そこで、MeSO-net 観測記録を利用した地盤構造を推定する方法を整備しました。この手法により、MeSO-net 観測点の地盤構造モデルが容易に構築できます。

##### 4.1 推定方法の概要

ここでは梅田・小林による方法の適用性を検討しました。図12に本方法の概要を示します。本方法では、P波部の水平/上下スペクトル比(H/V スペクトル比)、レシーバー関数(P波部 H/V スペクトル比をフーリエ逆変換したもの)及びコーダ部 H/V スペクトル比の低周波のピーク(または谷)振動数を同時逆解析して地震基盤から地表までの地盤モデルの最適化を行います。P波部 H/V スペクトル比とレシーバー関数の逆解析にはP波入射を仮定し、コーダ部 H/V スペクトル比のピーク(または谷)振動数の逆解析には Rayleigh 波を仮定します。P波部 H/V スペクトル比、レシーバー関数、及びコーダ部 H/V スペクトル比はいずれも水平成分と上下成分の比率に基づく観測量であるため、震源特性は相殺され、地盤構造にのみ依存する量となり、逆解析によって地盤構造モデルの推定が可能になります。

##### 4.2 推定方法の適用性

一例として、成蹊学園観測点および自由学園観測点での地盤構造推定結果およびその適用性確認結果を示します。ここでP波部 H/V とレシーバー関数の評価には観測記録は5個程度を使用しました。P波部 H/V、レシーバー関数およびコーダ部 H/V は、5~10個程度の観測記録を使用すれば安定した性状を示すことを確認しています。

図13にGL~GL-20m間の本逆解析構造モデルと当該地点における観測記録に基づく伝達関数の逆解析から得られた構造モデルの比較を示します。両者は、比較的よい対応を示しています。図14に本逆解析構造モデルから計算されるGL/GL-20mの伝達関数の理論値と観測値の比較を示します。両観測点とも理論値は観測値の特徴を比較的よく再現しており、梅田・小林の方法による地盤構造推定手法がおおむね妥当であることが確認されました。

#### 5. まとめ

本研究では、強震動が表層地盤を伝わり建物基礎に到達しそれが上部建物を揺らすメカニズムに関する実データを取得するために、東京都内の3地点に地盤と上部建物に

地震計を設置するとともに、最大震度4までの地震波形記録を蓄積しました。

併せて、得られたデータに基づき、3次元FEMモデルや薄層要素法によるSRモデル等一般的な連成系に対する応答解析技術や実用的な応答解析法の適用性を検証しました。また、MeSO-net の利用拡大を図るために MeSO-net 観測記録を利用した地盤構造を推定する方法として、地中観測記録から抽出した地盤特性の逆解析により地震基盤から地表までの構造を推定する手法を整備しました。

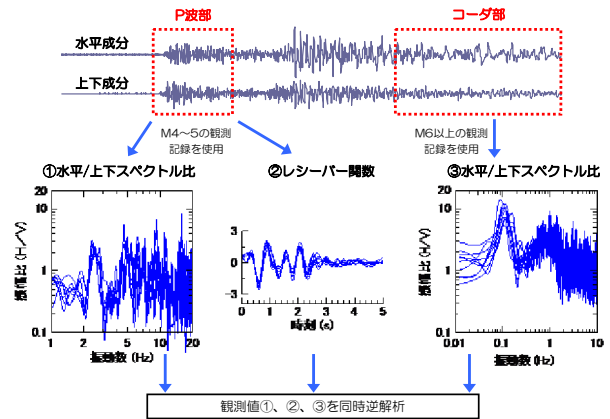


図12 推定方法の概要

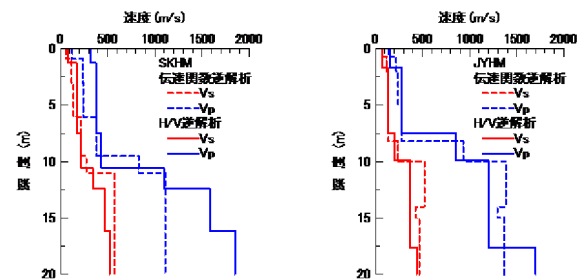


図13 地盤推定結果の比較

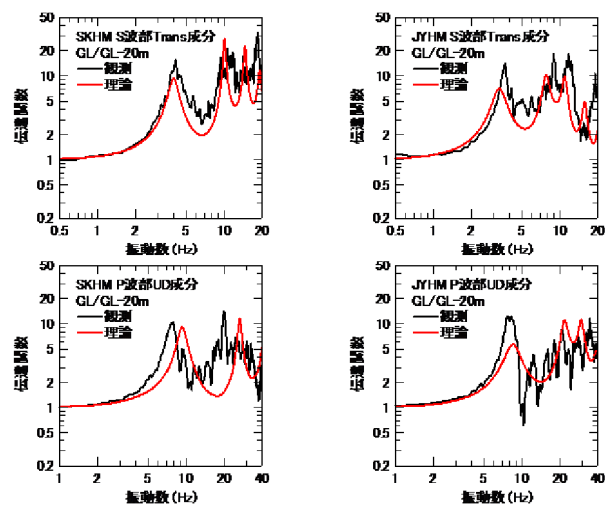


図14 推定された地盤モデルの伝達関数の比較

## III-1 災害経験を体系化し利活用を促進する都市減災ジオポータルの開発

鈴木進吾(防災科学技術研究所)

### 1. 研究の目的

円滑な応急・復旧対応を支援する災害情報提供手法を開発するためには、関係者が状況認識の統一を図るために提供されるべき情報内容の明確化と、情報を必要とする人々にそれを確実に届ける伝達手段の整備の両面が必要となります。

個々の防災担当者および被災者(情報の受け手)が災害対応を行うにあたって、どの時点でどのような情報を必要としたか、あるいは、今後発生する災害についてどのような情報を提供できるかについて、阪神・淡路大震災や東日本大震災などの過去の災害経験の調査・研究を通して明らかにします。

地域特性および地震特性等の基礎情報に加え、震災直後の災害対応から、復旧・復興までを対象として、地震情報、被害状況、火災発生状況、ライフライン被害・復旧状況、交通被害・復旧状況などを検討します。

都市震災における被害の発生過程や問題構造は、複雑かつ多様なものであり、膨大な対策課題に対応する必要があります。このためには、様々な分野を専門とする研究者による共同作業が必要となります。しかしながら、共同作業に必要な成果や空間情報は散逸しており、一覧して状況把握ができる状態になっておらず、過去の災害経験に関するこれまでの研究成果としてのデータや分析推計手法、実務者の持つデータなどを、分野横断的に統合し、諸問題を定量化し、状況認識を統一するための情報基盤が必要となっています。

これを解決するため、過去の災害経験に関わる研究成果は G 空間情報データベースとして整理し、クラウド技術と動的空間情報マッシュアップ技術を利用した自律分散協調型の状況認識統一基盤情報システム、都市減災ジオポータルを構築します。

### 2. 都市減災ジオポータルのアーキテクチャー

過去の災害経験に関わる研究成果を収集し、研究者間での共有を可能にし、また、一般に成果を公開、防災対策や災害対応への活用を促す都市減災ジオポータルの基本概念、アーキテクチャーについて述べます。サブプロジェクトに参加する研究者からの成果の共有を容易にし、またその成果を自由にマッシュアップ可能にし、それを使った成果の公開を容易にするために、都市減災ジオポータルでは、データ層、プラットフォーム層、サービス層からなる多層アーキテクチャーを採用しました。そして、データ層へ研究成果のデータを登録、プラットフォーム層でそれらのデータを処理し、サービス層で特

定の目的に応じてデータを活用し知見を提供するという仕組みとしました。このようにすることで、データ、処理、プレゼンテーションのそれぞれが分離して構築可能となり、必要に応じて柔軟なデータの登録・修正、機能の追加・改修、災害対策・対応場面への活用が可能となりました。この 3 層構造のアーキテクチャーの概念図を図 1 に示します。以下、各層について解説します。



図 1 都市減災ジオポータルのアーキテクチャー

#### 2.1 データ層

データ層は過去の災害経験に関わる研究成果としての地理空間情報データを格納し、提供するレイヤーです。

データの種類によって動的情報と静的情報に分けられます。研究成果や基盤的な地図情報、人口や世帯数、ライフライン等の統計情報、それから今後発生が予想される災害についての想定情報などは頻繁には更新されないことから静的情報となります。一方で、発災時にリアルタイムあるいは準リアルタイムで得られる地震動や雨量・水位等のハザードに関するセンサー情報、災害対応上発生する避難所状況やライフライン状況、道路交通情報、被災者からの SNS を経由した情報などは災害時にダイナミックに変化し、都度取得して生成する情報となり、動的情報に分類されます。

データ層では、これらを1つのデータベースとして、集中管理するというスタイルを取らず、それぞれ分散したシステム上にあるものであるというスタンスを取りました。この理由としては、1つの巨大なデータベースとした場合、データの登録や修正などの柔軟な対応が困難になる可能性があること、データベースのメンテナンスが将来負荷となること、また、データベースにデータを提供せずとも、自前のデータを他者が利用可能になれば事

足りることが挙げられます。

しかしながら、データを分散して提供し、必要に応じて調整して動作させるためには、一般的なプロトコルでそれぞれのデータが提供される必要があります。そこで、1つ1つのデータはサービスとして提供されるようにしました。すなわち、データの利用者がデータを利用したい場合は、データを提供するサービスの API (Application Programming Interface) にリクエストを送信し、サービスがリクエストに応じてデータを利用者に提供するという仕組みとしました。このようにすることで、人がわざわざデータをダウンロードして、自分の使いやすいように変換して、利用するという手間を省き、機械でもデータを扱えるようになりました。

したがって、静的情報は、どこにでも設置できるデータサーバー、あるいはクラウドを利用したデータサーバーに置いておき、データサーバーのサービスがリクエストに応じて利用者にデータを提供します。動的情報は、他のシステムと連携動作して、そのシステムの動的情報を適宜変換して、リクエストに応じて提供するサービスによって提供可能としました。

## 2.2 プラットフォーム層

プラットフォーム層はデータ層のデータを処理し、サービス層に渡す、あるいは逆にサービス層から得られた情報を処理しデータ層に渡すという役割を持ちます。具体的には、カタログ機能、マッシュアップ機能、共有機能、解析機能からなります。

カタログ機能とは、データの管理を行う機能です。データがどのサーバーのどのサービスから提供されているのかを利用者及び機械に伝える機能です。データの作成者はデータをクラウド上にアップロードするか、自前のサーバーでサービスを公開し、そのサービスへアクセスするためのアドレスを、データに関する説明や利用方法、著作権などとともにカタログ機能に登録します。

マッシュアップ機能とは、カタログ機能を介して登録されたデータを、ウェブサイト上の地図上で重ね合わせる機能です。利用者はカタログを参照し、地図上に容易に必要なデータをレイヤーとして重ね合わせます。あるいは、地図上からカタログを検索し、必要なデータを重ね合わせます。データがサービスとして登録され、機械が扱いやすいようになっているため、簡単に重ね合わせを実行することが可能になります。

共有機能とは、カタログ機能を介して登録されたデータを同じジオポータルを利用する他者が利用できるようにする機能です。データはデフォルトで個人利用として登録されるが、必要に応じてグループを作成して、そのグループに共有することができます。またジオポータルを使う全員が利用できるように共有することや、パブリックに公開することもこの共有機能で行われます。

解析機能とは、研究成果として得られたデータの処

理方法や分析方法をモジュール化し、必要に応じて利用可能にしたものです。震度分布を用いて被害を計算する方法があれば、それをサービスとして作成し、震度分布とともにリクエストをサービスに送信すれば、結果としての被害が返されるという仕組みです。

## 2.3 サービス層

サービス層は、プラットフォーム層が提供する機能を組み合わせて、目的に応じて表現方法を変えて利用者がわかりやすく利用できるようにしたものを含む層です。具体的には、地図をわかりやすく読む、ないし成果をわかりやすく提供するもの、実際に利用者が解析を行うもの、利用者が簡単にデータをダウンロードしたりアップロードしたりするものなどを開発しました。

これらについては 6 章で詳述します。

## 3. データの収集とデータ層の開発

本章ではデータ層にあたる部分について詳述します。データ層では静的情報、動的情報について様々なものを収集し、サービスとして利用できるようにし、カタログに登録しました。

### 3.1 基盤データ

それぞれの研究者が共通して利用するようなデータを基盤データとして、様々なものを収集しました。

社会経済活動に関するものとして、人口、世帯数、土地利用、施設、社会基盤情報、商業、工業統計、建物データ、道路データなどを収集しました。

外力の想定に関わるものとしては、南海トラフ地震津波、首都直下地震、主要な活断層の想定情報を収集しました。また、想定に必要な地盤の情報も収集しました。

### 3.2 過去の災害に関わるデータ

過去の災害経験に関わるデータを散逸させないようにするために、東日本大震災について、東北地方太平洋沖地震 EMT (Emergency Mapping Team) が作成した地図を中心に、この災害に関する地図データを収集しました。

### 3.3 研究成果データ

円滑な応急・復旧対応を支援する災害情報提供手法の開発という研究テーマにおいて、過去の災害経験の整理・体系化が担当する研究者らによって行われました。詳しくは 4 章において述べますが、その過程で得られたデータが収集されました。

### 3.4 動的情報

動的情報は災害時にリアルタイムまたは準リアルタイムで情報を集めるものであり、そのためには事前に仕組みを構築しておくことが重要です。

ここでは、災害時に災害対応情報をオンラインでやりとりし災害対応を効率化させるための WebEOC との連携を図りました。災害対応における情報のやり取りは、定型化されていない自然言語でのやり取りが4分の3を占めます。本来はこのようなやり取りを捉え構造化、整理された情報が容易に生成できるようになることが良いと考えられますが、そのような技術は開発途上であるため、残る4分の1である定型化された表データを取り扱うことにしました。WebEOCでは表データをAPIを介して提供する機能が備わっています。これを利用してリアルタイムに表に整理されたデータを地図化するモジュールを作成しました。これにより、災害対応中にはWebEOCを利用して避難者数や資機材などのデータを表形式で入力すれば、自動的に地図に可視化されて状況認識ができるような仕組みが生まれました。

#### 4. 過去の災害経験の整理・体系化

過去の災害経験のデータを収集し、それを解析することによって、知見を導き出し、今後の災害の想定や備え、対策等を検討する研究を行いました。研究は、首都圏以外の大都市圏である近畿圏、中京圏を対象とし、地域に応じた対応の研究を行う研究、そして、ライフラインやインフラというテーマを対象として、過去の災害のデータから被害予測や復旧検討を行う研究が行われました。

##### 4.1 関西圏における次世代復興計画に関する研究

1995年兵庫県南部地震や戦災復興を含む20世紀以降関西地方において、大規模被害を受け広範囲な復興計画を立案・計画した都市事例を整理しました。

戦災復興がもたらした影響については、関西圏の大都市部の土地利用変化状況を分析し、定量的な評価が行われました。また、近畿圏整備計画の歴史的展開と災害復興の関係について、過去の整備計画の変遷を基に分析され、明らかになりました。さらに東北圏広域地方計画を基に、広域計画が災害復興に及ぼした影響の有無と今後果たすべき役割について検証しました。

阪神・淡路大震災や新潟中越地震における事例からは、仮設住宅立地用地の選定がその後の地域再建に影響を及ぼすことが明らかになりました。そこで、東日本大震災の実態を踏まえながら、巨大広域災害に対応する復興計画を策定するための情報として、応急的な災害対応を行う空間である「仮設住宅立地用地」の抽出を行いました。

過去の住宅再建シナリオの分析からは、市町村の住宅再建シナリオを規定する要因として、従前の人口動態、住宅被害特性、仮住まい住宅供給能力、公的住宅供給能力、地域の都市計画事業ポテンシャルが存在することが示されました。

「みなし仮設」については、建築統計と住宅統計調査の結果より利用可能な住宅数を1kmメッシュごとに推定しました。その結果と国の想定、各府県の仮設住宅建設予定地情報を用いて、仮住まい後の住宅過不足と地域間移動量が明らかになりました。これらから、関西圏における応急対策住宅については、①津波被災を逃れる拠点区域への併設との連携方法の計画、②都市部の「みなし仮設」における個々の居住者再建方法の計画、③広域避難を可とする集団的仮住まい計画の必要性が検討されました。これらはGISデータとなりGIS上で検討可能な手順が開発されました。

##### 4.2 中京圏におけるデータの作成収集

中京圏を中心とする災害リスクの蓄積を測るため、特に地価や土地利用に焦点を絞って市街地データが収集されました。

また、中京圏を襲う災害の被害状況が具体的に整理されました。南海トラフ巨大地震が発生した際の火災被害について焦点を絞って整理し、階層ベイズモデルを用いた新たな出火件数予測式を構築しました。これにより、データ欠損にも対応しうる高い精度での出火件数予測が可能となりました。

災害時の人口移動について、特に空き家(賃貸+戸建て)を活用した被災者の空間的移動について整理し、検討しました。疎開状況を記述する数理モデルは、アンケート調査により「もし住まいを失ったらどのような場所に移動するか」という仮想状況的を想定し、数理モデルを用いて中京圏でどのような移動が行われるか、また移動者の距離を最小化するにはどのような疎開戦略が有効かについて、線形計画法を用いて試算しました。

さらに、この人口移動予測シミュレーションを全国版に拡張し、さらに津波と建物倒壊のみならず市街地火災や液状化についても対象となりました。このシミュレーションを実施した結果より、どのような空き家をみなし仮設として考えるかについて、様々な被害ケースにおける検証を行い、大規模災害時の住まいの復興のあり方について普遍的な示唆を得ることができました。

##### 4.3 被災者ニーズを踏まえたライフライン被害・復旧情報の体系化

震災時のレジリエンシー向上を目指して、情報ニーズに見合ったライフライン被害・復旧情報を提供するための検討が行われました。

東日本大震災を中心とした実態調査を行い、関連データを収集・分析しました。また、災害情報の受け手である市民や企業が発災前後に最も必要とするライフライン関係の情報は復旧日(復旧日数)に関する情報であることが確認されました。そこで、想定地震シナリオを対象とした地震発災後の即時的な予測・推定及びライフライン被害・復旧予測を行うためのモデル構築を行

いました。

### (1) ライフライン

供給系ライフライン(電気・上水道・都市ガス)については、東日本大震災における被害・復旧データを収集・整理し、被害と復旧を予測するモデルを構築しました。

仙台市、いわき市、茨城県、千葉県等において東日本大震災におけるライフラインの施設の物理的被害データを収集・整理し、被害率と地震動強さや地盤条件との関係、ライフラインの機能的被害・復旧と地震動強さ等との関係などが定量的に評価されました。

特に、仙台市での上水道管の被害分析からは、丘陵上の宅地造成地に関して被害予測手法の見直しの必要性を指摘しました。また、茨城県鹿行地域の配水管を対象とした研究では、土地造成履歴や地盤のボーリングデータ等に基づき、液状化領域と非液状化領域で発生した被害のメカニズムの考察を行いました。東日本全体の上水道管路被害については、水道事業体ごとに分析され、既往の被害予測手法の精度を再評価するとともに、南海トラフ巨大地震の際の被害予測に向け、埋設管に被害の発生する水道事業体を判別する手法を構築しました。

また、水処理システムの埋設管路の液状化による被害拡大要因を入射波の特性、表層地盤の励振、及び、管路網の耐性の3つの観点から分析・精査し、およそ3秒から4秒の長周期及び長時間の入射波の成分が支配的であることを明らかにしました。茨城県及び千葉県における上下水管路の液状化による被害拡大エリアを対象として、これら3エリアの工学的基盤への入射波を有限差分シミュレーションで再現するとともに、表層地盤の地震応答解析を実施することで、被害拡大の素因を明らかにしました。

全国主要都市を対象に構築された上下水道施設の被害・復旧期間の予測方法は熊本地震に適用され、被害予測精度の検証を行いました。

### (2) 交通系インフラ

交通系インフラについては、まず、高速道路網を対象として、東日本大震災および阪神・淡路大震災におけるデータを収集・整理しました。地震動及び津波作用による施設被害データを併せて収集し、被害率と地震動強さ及び津波作用との関係を定量的に評価しました。特に、橋梁被害については、東日本大震災の被害データに基づき、水面上昇速度等を考慮した上で、浸水高並びに浸水深と落橋被害率の関係を明らかにし、橋梁の被害関数を構築しました。また、橋台周辺盛土部の洗掘・流出被害を取り上げ、水位や越流水深等の津波作用と盛土流出面積の関係を定性的に明らかにしました。これらにより、道路交通インフラの機能支障の定量的な評価を試み、それを踏まえて、道路交通イン

フラの工学的な対津波方策を立案しました。

2011年3月のタクシープローブデータを分析し、車両旅行速度の空間的な分布を系時的に評価しました。また、震度曝露量を用いた復旧予測手法を検討し、平常時の交通量を交通需要とみなして、迂回交通量の発生割合、復旧過程の実態を交通需要の観点から評価しました。

熊本地震を含め、近年の地震時の高速道路の通行止め期間を整理し、復旧期間を予測する数理モデルを改良しました。IC間の震度曝露延長の割合を説明変数とすることによって予測精度が改善されました。

鉄道網については、東日本大震災における被害・復旧の実態把握を行い、運休の有無および運休期間と推定計測震度分布ならびに津波被害との関係を明らかにしました。

### (3) 中京圏・阪神圏・首都圏への展開

中京圏・阪神圏・首都圏への展開に向けて、インベントリや需要分布などのデータ収集を行い、被害・復旧予測モデルの基盤データの整備を行いました。震度分布を想定シナリオとして与えることにより、ライフライン機能被害・復旧予測を任意の単位(市町村・都道府県・ブロック・全国)で集計するとともに、着目地点での影響評価を行うシステムを開発しました。

さらに被害拡大・復旧支障要因としてライフライン拠点・基幹施設の被災を取り上げ、南海トラフ巨大地震を対象とした震度・津波曝露評価を行いました。大規模送水幹線を対象として、平均被害率と被害発生時の復旧所要時間の予測値に基づいて、初期機能的被害とその復旧過程を予測するためのシミュレーション手法を開発しました。モデルの結合により、幹線網と末端網の一体的な被害・復旧予測を可能としました。

モデルを熊本地震に適用した結果、初期停止は整合するものの、復旧期間は過大評価となりました。そこで、復旧所要量が震度曝露人口の規模に依存することに着目して、被災規模に応じて復旧期間を調整するモデルに修正しました。

また、内閣府が公表した南海トラフ巨大地震・首都直下地震に関する上下水道施設の被害規模の定量的評価、復旧作業に必要な復旧人員等に関する検討を行いました。さらに、全国主要都市を対象に構築した上下水道施設データも含めてライフライン被害・復旧期間の予測結果をWeb-GIS上に展開して各種情報とのマッシュアップを行い、都市防災における活用事例の作成に取り組みました。

浸水深と橋梁・盛土の流出被害量の関係をあらわす被害予測式なども用いて、南海トラフ巨大地震津波に曝露される道路網に対して被害推計を試みました。津波時の平面道路被害予測式や橋梁の被害予測式を用いて、南海トラフ巨大地震津波の際の高知市の被害予

測を行いました。さらに、高知市を対象に津波直後の道路ネットワークの機能損失評価を行いました。

さらに、巨大地震の際の広域災害対応を想定し、広域物資拠点の配置状況の適切性をスペースシンタックス理論を用いて定量化しました。具体的には、東北地方太平洋沖地震の際の岩手県を既往事例とし、その結果を南海トラフ地震時の高知県について適用しました。

### 5. プラットフォーム層の開発

都市減災ジオポータルプラットフォーム層は、米国 Esri 社が開発・提供している ArcGIS プラットフォームを利用しました。COTS (Commercial off the shelf) という考え方を用い、テクノロジーはできるだけ現在あるものを利用し、要求に応じてそれらを組み合わせるという方法をとりました。プラットフォームの基本機能を提供する部分を商用のシステムとすることで、防災と直接関係のない情報機能の開発にかかる労力、プラットフォームのメンテナンスや陳腐化しないようにアップデートする継続的开发、利用方法などのサポートなど、プラットフォームを研究終了後にも使い続けていくために必要な事項にかかる労力を削減できるため、目的に沿った、防災用のコンテンツ開発に注力することができました。

図 2 は都市減災ジオポータルのプラットフォームのトップ画面です。上部にはメニューが並んでおり、「マップ」からはマッシュアップ機能に、「マイ コンテンツ」からはカタログ機能にアクセス可能です。



図 2 都市減災ジオポータルのトップ画面

図 3 はカタログ機能であり、この画面からデータやサービスの登録、共有が可能になっています。ユーザーはコンピュータ上のデータをこの画面からジオポータルに送信し、他のレイヤーと重ねられる状態にしたサービスをクラウド上に構築できます。また自前で用意したサービスを登録することができます。図 4 はマッシュアップ機能で、画面右側には拡大縮小や移動が簡単にできるウェブマップ、左側には凡例や、レイヤーの追加などの機能が備えられています。この画面では、ジオポータルにあり、ユ

ーザーにアクセスが許可されているレイヤーを、キーワードや空間で検索し、その結果から複数のデータをマッシュアップし、保存、共有することができます。

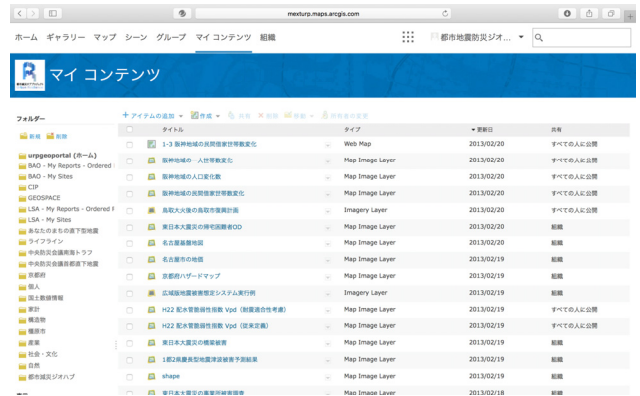


図 3 都市減災ジオポータルのカタログ画面

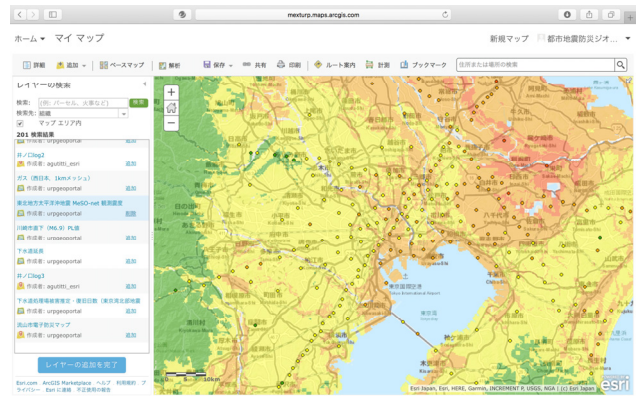


図 4 都市減災ジオポータルのマッシュアップ画面

また、プラットフォーム層の機能として、様々なデータから地理空間解析を行う解析機能を作成しました。この機能は ArcGIS Server のジオプロセッシングサービスを用いて提供しました。具体的には、点震源を想定した場合の震度予測機能、震度から曝露人口を計算する機能、震度から建物被害、火災、人的被害、ライフラインの停止期間、企業の事業中断期間を計算する機能などです。例を挙げると、点震源を想定した場合の震度予測サービスは、震源位置、深さ、マグニチュードなどのパラメーターと共に、サービスにリクエストが送信されると、データサービスにデータのリクエストを送信し、得られたデータと与えられたパラメーターから距離減衰式に基づいて距離計算、レイヤー演算などの GIS 処理を行い、結果として得られる震度分布に震度階毎のカラーリングを施して、画像を返します。これらの仕組みは次章に示すアプリケーションなどで利用されます。

## 6. サービス層の開発

サービス層では、地図をより分かりやすく読む「Story Maps」の整備、データを活用してシミュレーションを行う「あなたのまちの直下型地震」の開発、ジオポータル機能を分かりやすく提供する「都市減災ジオハブ」の構築、ジオポータルにより簡単にデータを登録できる「アップローダー」の開発を行いました。

### 6.1 Story Maps

プラットフォームの整備により、地図データを簡単に公開し、共有することが可能になりましたが、地図だけではどうしても伝えたいことを効果的に伝えられないことがわかりました。そこで、地図を読み解くためのストーリーと合わせてウェブマップを見せる Story Maps を作成しました。

Story Maps の画面を図 5 に示します。画面にはユーザーが自由に拡大縮小などの操作を行えるウェブマップと、ストーリーを伝えるテキストが同時に表示されています。ユーザーはストーリーを Web ページをめくるようにスクロールして読み、ストーリーがスクロールして画面上に現れると、そのストーリーに応じた地図が自動的に表示されるようになっています。

このようにすることによって、公開者が意図した通りに地図を読ませることが可能になります。また利用者は地図を自分で再度分析して、地図が意味するところを知ろうとせずとも、ストーリーを読むことによって迅速かつ簡単に理解することができるようになります。

このような Story Maps を用いて、サブプロジェクトで研究された成果を分かりやすく配信することができました。

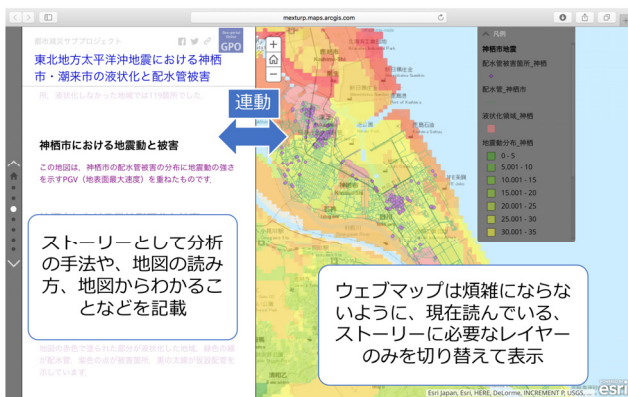


図 5 Story Maps の画面

### 6.2 あなたのまちの直下型地震

プラットフォームに集まったデータを用いて、様々な想定をするウェブアプリケーションを作成しました。研究においてはある一定の地域にデータを絞って、分析手法や想定手法が研究されますが、その手法を全国的に利用できるようにしたいというニーズから、全国的にデータを整備し、それとそれぞれの手法を機能としてプラ

ットフォームに整備し、それらを利用してウェブ上で分析・想定を実行できるウェブアプリケーションとしました。

図 6 にあなたのまちの直下型地震のサイト画面を示します。このサイトも Story Maps を利用して分かりやすい操作を実現しました。



図 6 あなたのまちの直下型地震

図 7 にウェブアプリケーションの設計概念を示します。ウェブアプリケーションはユーザーへインターフェースを提供し、複数のジオプロセッシングサービスを使用して想定作業を実施します。ジオプロセッシングサービスはデータサービスからデータを取得して実行した結果を結果サービスとして一時的にサービスを提供します。これらのサービスを多数連携させて複雑な想定を可能にしています。

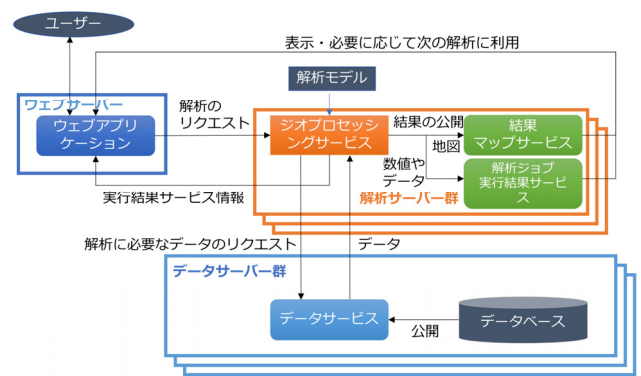


図 7 多数のサービスを連携させたシミュレーターシステムの概念

あなたのまちの直下型地震は、誰でも、どこでも、いつでも想定を実施することができます。個人に必要な時に実施し、情報を得ることができます。繰り返して行くと、パラメーターを変化させた時にどのように結果が変わるのか、あるいはパラメーターが結果にどう影響しているのかを分析することができます。また、防災訓練の際などに想定を実施し、それに基づいて複数人で対応を考えることも可能です。地域の防災計画や企業の事業継続計画を考える上でも、これまでの限られた、与えられた想定だけではなく、様々な想定を行い、地域や施設



周辺の状況を見ることができます。

### 6.3 広域版地震被害想定システム

あなたのまちの直下型地震は、事前に様々な想定を行うウェブアプリケーションですが、緊急時に被害を計算するには手間がかかります。広域版地震被害想定システムは、地震発生時に得られる震源情報、震度情報から即時に被害を推定するシステムです。

地震発生直後の震源情報、震度情報はオンラインで取得され、人口や建物などのデータベースを用いて被害推定が行われます。人的被害や建物被害などが推定され、結果はウェブページで公開されるほか、関係機関へ電子メールなどで通知され、意思決定のための情報となります。さらに、解析結果はジオポータルに登録され、研究者らが他のデータとマッシュアップしたりできるようになりました。

広域版地震被害想定システムは、平成 28 年 4 月の熊本地震をはじめ、実際に発生した地震で精度評価が実施されました。また、サブプロ①の大規模数値解析結果の可視化手法を利用して、建物の揺れと火災シミュレーションの延焼動態を重ね合わせて可視化する機能が開発されました。

### 6.4 都市減災ジオハブ

本サブプロジェクトのとりまとめとして、これまで構築してきた都市減災ジオポータルの研究者の研究成果データ、研究者のストーリーマップ、あなたのまちの直下型地震をアクセスしやすいように公開した都市減災ジオハブを構築しました。都市減災ジオハブは、ArcGIS Open Data を利用して構築した。都市減災ジオハブウェブサイトを図 8 に示します。



図 8 都市減災ジオハブサイト

都市減災ジオハブは、データをキーワードで検索する「キーワード検索」、カテゴリで検索する「カテゴリから探す」、ストーリーマップを閲覧する「ストーリーで見る」、あなたのまちの直下型地震のようなアプリケーションを

実行する「データを使ったアプリ」、データをアップロードする「データを共有する」から構成されます。

都市減災ジオハブは一般に見ることができ、ここにデータを公開するには、都市減災ジオポータルで簡単に共有設定を行うことで公開できます。公開されたデータは、オープンデータとして、スプレッドシートやシェープファイルなどでダウンロードでき、GeoJSON などの API 経由で取得することもできます。研究成果のオープンデータ化によって、より防災対策の研究を促進できると考えられます。

都市減災ジオハブにより、都市減災ジオポータル内に構築してきた様々なコンテンツが一覧して見られるようになりました。都市減災ジオポータルが持つ、調べる(データの検索とマッシュアップ)、学ぶ(ストーリーマップの閲覧)、試す(ウェブアプリケーションの利用)、参加する(データのアップロード)の 4 つの機能が統合され、成果を様々な形で一般公開し、今後の成果普及につながるようにすることができました。

## 7. まとめ

都市減災ジオポータルを中心とする研究により、様々なデータが作成され、また、活用できるようになりました。

東日本大震災や阪神・淡路大震災、熊本地震のデータからは、復旧・復興対応のための知見が得られ、また災害対応に重要なライフラインやインフラの被害及び復旧に関する知見が得られました。

このような過去の災害経験に学ぶ手法がただ開発されたことにとどまらず、他の地域に適用した場合のようになるか、またそれを元に戦略を考えられるように、プラットフォームを介してデータや分析機能が提供されるようになりました。これは、都市で発生する今後の災害に効果的に対応する戦略を検討する上で重要な仕組みとなります。

また、様々な研究者がプラットフォーム上において、データや手法を交換しながら様々な知見を創出する研究体制ができたことは意義深く、研究成果をオープンデータとして、様々な二次利用を促すことによって、様々な分野の知見が連携し、今後都市災害の研究が加速することと考えられます。

さらに、研究者や一般に対して、ただデータを見せるだけではなく、分かりやすく、相手に伝わる情報に変換して公開する取り組みがなされました。これにより単なるデータや情報ではなく、知識や意思決定のための知恵として、より即時に活用される形でのコンテンツの共有化が可能になり、様々な成果普及が加速するものと考えられます。

今後も、引き続きこのようなプラットフォームを開発し、防災研究コミュニティとして研究者らの成果を集め、都市の減災のための様々な知見・サービスを提供できるようにして行くことが望まれます。

## III-2 マイクロメディアサービス(MMS)開発

井ノ口 宗成 (静岡大学)

### 1. 研究の目的

都市の災害にかかわる脆弱性を補完するためには、大量に発生すると予想される被災者に対し、的確かつ適切な情報を与え、自分や家族、組織や地域で自律的な防災行動をとってもらふ必要があります。そのためには、より被災者個人や世帯に特化した災害情報の発信が必須です。なぜなら、これまでの対象や地域をマスで捉えた情報発信は、いざというときの具体的な避難行動を誘発するには効果的でないことが知られているからです。

本研究では、被災者個人や世帯が「居住/活動する地域特性」や「個人特性・生活パターン」によって、防災情報発信するサービスを「マイクロメディアサービス (超狭域防災情報提供サービス、以下 MMS)」と名付け、その創出を目指しました。

### 2. スマホを利用した位置情報記録と行動解明

#### 2.1 マイクロメディアサービス実現のためのスマホのセンシング技術の利用

マイクロメディアサービスを実現する上で、利用者の行動を把握する必要があります。近年では、スマートフォン (以下、スマホ) が普及しています。平成 27 年版の情報白書によれば、平成 26 年末のでは携帯電話・PHS の世帯普及率が 94.6% となり、携帯電話・PHS の内数であるスマホは 64.2% (前年比 1.6 ポイント増) と急速に普及が進んでいるとの報告がありました。この状況をふまえれば、今後もスマホの普及は広がり、各個人がスマホを常時保有する社会が、近い未来に訪れることが想定できます。

スマホには、インターネットにつなぎ情報送受を行うとともに、電話としての機能を保有しますから、マイクによる音声記録、ネットワークによるデータ通信記録が可能です。さらに、様々なセンサーを搭載しており、GPS による位置情報取得、ジャイロ・加速度センサーによる回転速さ・傾き (重力加速度) 検出、カメラによる画像記録、輝度センサーによる明暗検出、近接センサーによる至近距離物体検出など、様々な情報をスマホで収集することが可能です。

本研究では、第一段階として、各個人の行動 (移動) を把握することを目的として、スマホに搭載されている GPS を活用し、それから得られる位置情報を継続的に記録するアプリの設計・開発ならびに収集された位置情報にかかるデータ群からの行動分析を行うこととしました。

### 2.2 スマホの GPS を活用した位置情報の継続記録

各個人の行動履歴を分析するにあたり、スマホに搭載された GPS を活用し、各利用者の位置情報を継続的に記録するアプリの設計・開発を実施しました。本アプリは、利用者の個人情報保護に配慮し、スマホ上でアプリを起動し、記録開始を実施することで、GPS から取得された位置情報がサーバー上にアップロードされる仕組みとしました。サーバーとは、その後の空間解析を可能とするため、本プロジェクトで運用されている GeoPortal と連携が可能となるように、ArcGIS Online の GIS サーバーを対象として、位置情報を GIS のデータとして記録することとしました。

スマホから記録される位置情報は、屋外であれば数メートルの誤差の範囲で場所が特定でき、屋内であっても十数メートルの誤差であったことから、各個人の場所に基づいて情報提供するには、十分な精度を有していることがわかりました。そのため、個人の日々の活動を位置情報の履歴から推察する可能性を見いだせました (図 1)。また、通信環境にも依存しますが、オンライン状態であれば、アプリから確実に位置情報が記録されることを確認するとともに、GPS の機能として位置情報 (緯度・経度) に加えて、高度の情報も取得することが確認できました。しかしながら、高度については、その精度は高くなく、今後の GPS 機能の性能向上を期待する必要性が確認できました。

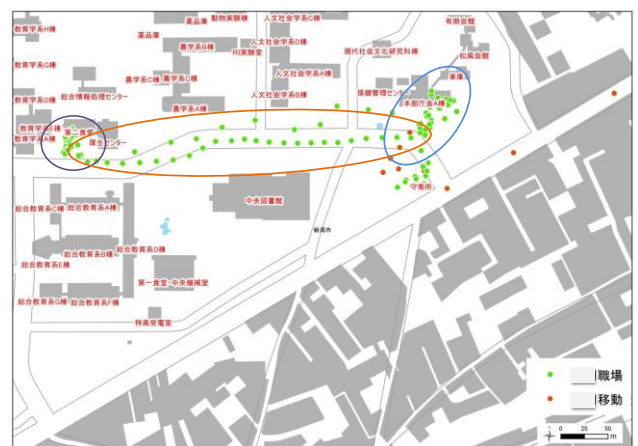


図 1 スマホ利用者の位置情報取得の一例

### 2.3 位置情報の記録に基づく行動プロファイリング

上記のアプリを利用し、長期にわたり位置情報を

継続記録することで、そのデータ群から利用者の行動を把握するとともに、地域に対する親和度を評価できるかについて検討を進めました。図2は、平成26年度において約1年間で記録された位置情報の全体像です。上半期では1分に1回の計測を行なっていましたが、スマホの電力消費および通信環境依存の関係から、下半期では2分に1回の計測を行なっており、計80,918の位置情報の点群を得られました。それぞれの点には、位置情報とともに、記録の日時および高度情報も記録されています。

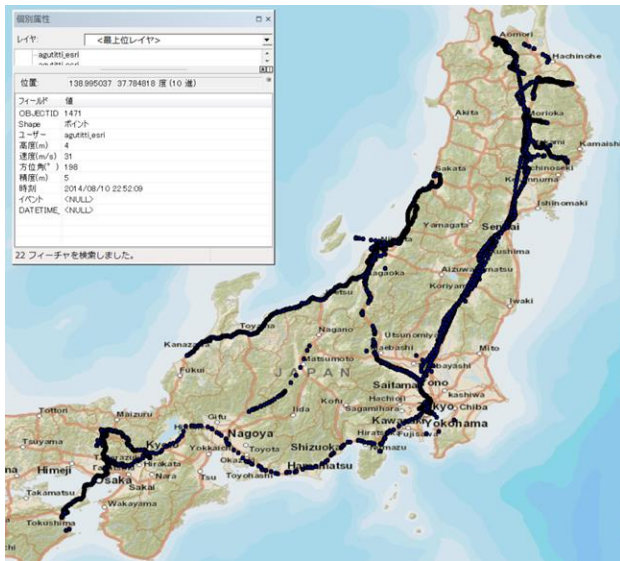


図2 80,918の位置情報の点群の全体像

上記の点群を基に、位置情報が表す地域性を把握し、その利用者がどの地域に対して親和度を有しているかを分析することで、MMSの実装を促進することを目指しました。しかし、各位置情報は、緯度・経度の値のみを保持しているため、その数値からは地域を把握することは困難です。そこで、リバース・ジオコーディングという技術を利用し、緯度・経度から、その値が表す住所を文字情報として取得することとしました。リバース・ジオコーディング技術で得られる住所情報には、位置情報に該当する住所辞書の精度に依存しますが、都道府県・市区町村に加え、町丁目や番地・号情報も含まれます。しかし、番地・号までの詳細情報を取得できたとしても、配信される様々な情報の粒度を考えれば、そこまでの詳細な情報は必要ではありません。地域を表す住所文字として、都道府県レベル・市区町村レベルの2段階で分析しました。

まず、表1は、都道府県レベルでの評価結果です。被験者は21の都道府県に滞在していたことが分かりますが、その度数や積上げ率等を勘案すると、大きく4つに分類ができました。次に、被験者の実際の行動と、本分析結果との紐付け作業を行なうこと

により、表1の左側に示すような、各都道府県と、その地域における生活パターンの意味を関係づけることができました。ここで、もっとも度数の大きいものは、「居所」です。居所は生活の多くの時間を過ごすため、他の都道府県と比較すれば、突出して大きな度数を有しています。次に多い3つの都道府県は被験者が有する継続的なプロジェクト実施地域および被災地対応でした。次の7県は学会や講演・講義といった、被験者の主な仕事に関連する地域性が表れました。その他の地域の多くは、生活・仕事を実施する上で各都道府県に移動する過程で通過した府県であることが明らかとなりました。このように、都道府県情報と行動を紐付けした分析から、度数分布状況を用いればある程度の生活パターンが把握できました。

表1 リバース・ジオコーディングの都道府県別結果

順位	都道府県	度数	積上度数	占有率	積上率
1	新潟県	3,728	3,728	43.93	43.93
2	京都府	1,849	5,577	21.79	65.71
3	岩手県	1,664	7,241	19.61	85.32
4	東京都	647	7,888	7.62	92.94
5	山形県	134	8,022	1.58	94.52
6	徳島県	79	8,101	0.93	95.45
7	埼玉県	77	8,178	0.91	96.36
8	宮城県	56	8,234	0.66	97.02
9	沖縄県	55	8,289	0.65	97.67
10	石川県	47	8,336	0.55	98.22
11	兵庫県	44	8,380	0.52	98.74
12	大阪府	39	8,419	0.46	99.20
13	福島県	24	8,443	0.28	99.48
14	青森県	13	8,456	0.15	99.63
15	愛知県	8	8,464	0.09	99.73
16	群馬県	7	8,471	0.08	99.81
17	栃木県	7	8,478	0.08	99.89
18	静岡県	4	8,482	0.05	99.94
19	神奈川県	3	8,485	0.04	99.98
20	滋賀県	1	8,486	0.01	99.99
21	富山県	1	8,487	0.01	100.00

居所  
 継続的なプロジェクト  
 や被災地対応  
 短期的なプロジェクト  
 (学会・講義・講演等)  
 移動で通過

次に、さらなる詳細分析として、市町村情報を同様に分析しました。その度数分布が表2です。前述の生活パターンと同様にして、分類を実施したところ、市町村単位としたことから、都道府県では下位であったものに含まれる市町村が、上位に現れるというケースも確認されました。さらに、被験者に対して、度数分布状況にあわせて、どの地域に対する「地域性の理解」が高いか・低いかを確認し、それらを適合させました。その結果は表2の左側に示しているとおりです。図3はグラフとして表現したのですが、このグラフが示すように、長期滞在していた市町村の中でも、変曲点が現れています。実際に、被験者にとっては、変曲点よりも前の5地域については、その地域の詳細を熟知しており、細かな地域名と場所が理解可能な部分です。一方で、変曲点以降の地域に対しては、主な場所でしか理解ができていません。これが意味することとしては、「滞在（訪問）した経験がある」ことだけで「地域の情報をどのように入手しても、情報を理解できる」とは言えないということです。当該者ごとの「地域へ

の理解度」を位置情報の記録から明らかにできることが、本事例研究を通して明らかとなりました。これは、今後の MMS における情報配信時に、配信すべき情報の同定や粒度を決定するための基礎研究成果として位置づけられます。

表 2 市町村単位における分析結果

順位	市町村	人数	路上	歩上	歩下	路上
1	新潟市	3,870	3,870	43.24	43.24	99.87
2	盛岡市	1,371	5,041	18.15	59.40	99.88
3	高崎市	1,300	6,340	13.32	74.74	99.89
4	福島市	518	6,981	6.10	80.84	99.71
5	新潟区	503	7,384	5.93	88.77	99.72
6	沼田市	131	7,495	1.54	88.31	99.73
7	長岡市	109	7,804	1.28	89.80	99.74
8	千代田区	86	7,890	1.01	90.81	99.75
9	弘前市	79	7,789	0.93	91.54	99.76
10	秋田市	78	7,448	0.93	92.47	99.78
11	さいたま市	58	7,908	0.68	93.15	99.79
12	取巻市	55	7,881	0.65	93.80	99.80
13	宇治市	46	8,007	0.54	94.34	99.81
14	横浜	43	8,050	0.51	94.85	99.82
15	富中市	38	8,888	0.45	95.30	99.83
16	金沢市	27	8,151	0.32	95.82	99.84
17	神戸市	25	8,140	0.29	95.91	99.85
18	長岡経	23	8,193	0.27	96.18	99.86
19	一宮市	22	8,181	0.26	96.44	99.87
20	高市	22	8,207	0.26	96.70	99.88
21	長岡市	21	8,228	0.25	96.95	99.89
22	宇治市	17	8,245	0.20	97.15	99.90
23	宇治市	16	8,281	0.19	97.34	99.91
24	赤松市	15	8,240	0.18	97.51	99.92
25	宇治市	14	8,250	0.18	97.58	99.93
26	二戸市	13	8,303	0.15	97.83	99.94
27	黒川町	9	8,312	0.11	97.94	99.95
28	宇治市	8	8,321	0.11	98.04	99.96
29	青森市	8	8,328	0.09	98.14	99.97
30	合資区	8	8,337	0.09	98.23	99.98
31	長崎市	8	8,345	0.09	98.32	99.99
32	鎌倉市	1	8,458	0.01	99.87	99.87
33	鎌倉市	1	8,460	0.01	99.88	99.88
34	伊東市	1	8,461	0.01	99.89	99.89
35	鎌倉市	1	8,462	0.01	99.90	99.90
36	鎌倉市	1	8,463	0.01	99.91	99.91
37	鎌倉市	1	8,464	0.01	99.92	99.92
38	鎌倉市	1	8,465	0.01	99.93	99.93
39	鎌倉市	1	8,466	0.01	99.94	99.94
40	鎌倉市	1	8,467	0.01	99.95	99.95
41	鎌倉市	1	8,468	0.01	99.96	99.96
42	鎌倉市	1	8,469	0.01	99.97	99.97
43	鎌倉市	1	8,470	0.01	99.98	99.98
44	鎌倉市	1	8,471	0.01	99.99	99.99
45	鎌倉市	1	8,472	0.01	99.82	99.82
46	鎌倉市	1	8,473	0.01	99.83	99.83
47	鎌倉市	1	8,474	0.01	99.84	99.84
48	鎌倉市	1	8,475	0.01	99.85	99.85
49	鎌倉市	1	8,476	0.01	99.86	99.86
50	鎌倉市	1	8,477	0.01	99.87	99.87
51	鎌倉市	1	8,478	0.01	99.88	99.88
52	鎌倉市	1	8,479	0.01	99.89	99.89
53	鎌倉市	1	8,480	0.01	99.90	99.90
54	鎌倉市	1	8,481	0.01	99.91	99.91
55	鎌倉市	1	8,482	0.01	99.92	99.92
56	鎌倉市	1	8,483	0.01	99.93	99.93
57	鎌倉市	1	8,484	0.01	99.94	99.94
58	鎌倉市	1	8,485	0.01	99.95	99.95
59	鎌倉市	1	8,486	0.01	99.96	99.96
60	鎌倉市	1	8,487	0.01	100.00	100.00

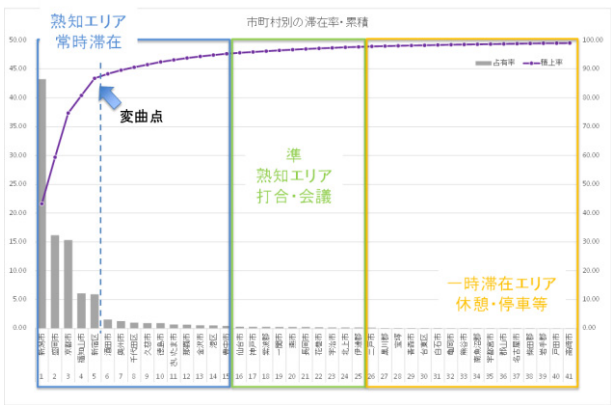


図 3 市町村単位における分析結果のパレート図

### 3. GeoPortal と連携し各種情報を配信する仕組み

#### 3.1 居所に基づくハザード想定情報の配信アプリ

本サブプロジェクトでは、GeoPortal 上に最新の研究成果が GIS データとして記録されています。GeoPortal を活用すれば、様々な場所において、被害推定やライフラインの停止状況の推定を確認することが出来ます。MMS を考えれば、いま、その利用者がいる場所で、どのような被害が想定されるか、どのようなライフラインの停止状況になるのか、ということを知ることが、利用者にとってきめ細やかな情報の配信サービスとなります。事前であれば、災害への備えとして、災害発生直後であれば状況の先読みとして利用することで、個人の防災・減災力の向上が期待できます。

上記の仕組みを実現するために、スマホ上で稼働するアプリの設計・開発を進めました。このアプリでは、スマホに搭載された GPS 機能を利用し、利用者の位置情報に基づいて、その場所と GeoPortal から取得した GIS データとを重ね合わせ、その地

点における情報を抽出し、利用者に配信します。利用者の場所は、時々刻々と変化するわけですから、利用者の移動に追従し、その場所の情報を逐次配信する仕組みとなります。図 4 は、本研究で開発したスマホアプリの情報送受の流れを示しています。

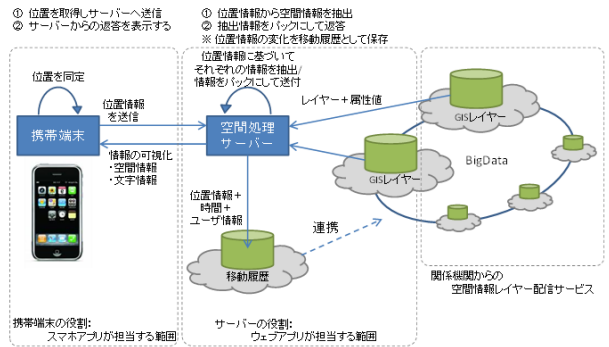


図 4 居所に基づく情報抽出アプリの情報フロー

このアプリでは、利用者は設定画面から、GeoPortal 上で管理される様々なデータから知りたいデータを選択することで、自身専用の情報抽出アプリとして利用が出来ます。図 5 は、上記のアプリを実際に稼働させた際の画面遷移状況を表しています。この事例では、新潟市において津波想定結果を、利用者の移動にともなって、各地点の想定浸水深と最近隣の指定避難所を示しています。これは、設定項目において津波想定結果と指定避難所を事前に指定することで得られた結果です。リアルタイムに情報を抽出し、スマホ上に示すことで技術的に実装しましたが、常時データ通信を必要とするため、通信量が大きくなり、通信事業者に支払う利用料ならびにスマホのバッテリー消費が課題となりました。人が、どの程度移動するごとに、どれほどの精度で情報を必要とするか、について、情報の種類や質によって決定する仕組みが、社会実装時には必要であることが明らかになりました。



図 5 ジオポータルと連携した機能の設計・画面遷移

#### 3.2 平時に利用できる居所に基づく降雨情報配信

前節で示したアプリでは、GeoPortal 上での研究成果の配信に着目したものでした。しかしながら、MMS という概念を社会に普及させるためには、利

ユーザーにとって平時から直面する課題に役立つ情報の配信が欠かせません。そこで、いつでもその場所で必要とする1つの情報として、降雨情報を設定しました。GeoPortal に実装されたデータには、リアルタイム、ならびに、近い将来の降雨情報を取得できるデータは存在しません。この課題を解決するために、民間企業である株式会社 HALEX の協力を得て、HALEX が配信する降雨情報を、MMS アプリで配信できるよう、データ連携を進めました。

前述のように、MMS アプリでは GIS データが配信されれば、その時点の情報を利用者の居場所に基づいて情報を抽出し、提示する仕組みとなっています。MMS アプリを降雨情報配信専用アプリとして改修するのではなく、HALEX のデータを MMS アプリで利用できるよう、データレベルでの連携機能の強化としました。具体的には、図6に示すように、HALEX から提供されたデータ取得のための API (Application Program Interface) を利用し、MMS アプリに配信できるよう WMS 形式に変換する機能を開発しました。WMS とは Web Map Service の略で、インターネットを介して GIS データを配信するための標準形式です。

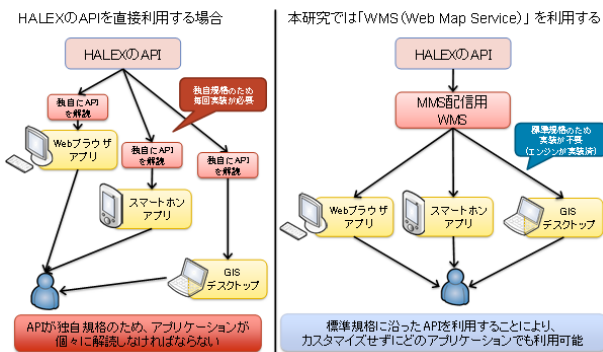


図6 HALEX の API を集約した MMS 配信用 WMS

この機能により、MMS アプリで情報を取得し、可視化すると図7の結果を得ました。これは、HALEX が提供する予測降水量を WMS 形式で受け取り、MMS アプリ上で居場所中心に表示したものです。

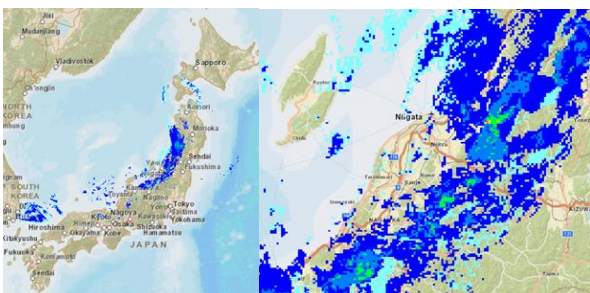


図7 本研究で開発した機能により取得した予測降水量の例 (左: 全国, 右: 新潟)

本報告書を作成時点では、現在と近い将来の雨雲をスマホ上で居場所を中心に確認するアプリは、民間企業によって開発・無料配布されています。本研究を実施時点では、スマホの普及状況や様々なデータ連携の観点から、アプリの配信は途上段階でした。MMS の枠組みを社会に発信するという点では、図7のようなアプリが貢献できたと評価が出来る一方で、社会状況の変化に応じて、重複したアプリとしないよう配慮も必要です。また、MMS の枠組みを社会に定着化させる取り組みとして、住民個人の生活に潜む様々なニーズに対して柔軟に応えられるサービスとして発信することに取り組み必要性が明らかとなりました。

#### 4. 避難を事例とした事前・直後・事後の MMS 活用

##### 4.1 避難行動における3つの局面と解決すべき課題

災害発生時にとって命の安全確保は欠かせません。そのための1つの行動として、避難があげられます。効果的な避難を実現するためには、各個人の状況に合わせて、適切な避難行動を選択し、確実な避難実施が求められます。

災害の発生前には、各個人を取り巻くハザードや地域の状況を理解し、それぞれに適した避難方法・経路を決定し、訓練を重ねる必要があります。予兆現象が確認できる災害(台風や水害など)の場合では、発生の可能性が高まれば事前の避難行動を要し、突発的な災害であれば発災と同時に即時の避難行動を要します。特に、事前の避難行動を実施するためには、ハザードの変化を捉え、理解し、避難判断を行なう必要があります。災害が発生し、被災すると、その後に避難所での仮の生活が始まります。災害の規模にもよりますが、避難所という新しい生活環境の中で、避難所の早期解消やニーズの把握等を実現するためには、必ずしも避難者数だけでなく、避難者の属性と避難者の個別行動を一定の範囲で把握することが必要となります。

避難行動を事例とすると、前述のように3つの局面が存在します。それぞれに情報の役割は異なり、MMS が扱うべき情報の種類・質は異なります。そこで、各局面におけるMMSの役割を整理しました。まず、災害発生前においては、各個人の居場所をスタートとして、近くの避難場所・避難所へ確実に避難できる「避難計画の策定」を支援することが、MMS の役割となります。災害発生の危機が迫る状況では、各個人を取り巻くハザード状況の変化にかかる情報を取得し、各個人に発信し、それぞれの状況を的確に把握させ、避難判断を促す必要があります。災害発生後においては、避難所での生活が始まるとの前提で、避難所という局所的な領域の中で、各個人の生活の営みの流れに合わせて、その状況を

取得・集約し、個人の行動を振り返るとともに、避難所の状況を共有することが、MMS の役割となると考えられます。次節以降、これらの役割を実現するための仕組みの実装について言及します。

#### 4.2 個人の避難計画策定支援ツールの設計・開発

2011 年の東日本大震災以降、津波ハザードの見直しを実施されるとともに、全国で地区防災計画の策定が進められています。この社会事情をふまえ、本研究では第一段階として津波からの避難計画を個人で策定する過程を支援するツールの設計・開発を進めました。ツールの設計にあたっては、平成 26 年度から新潟市が開催している「地域がつくる津波避難計画作成検討会」を参与観察し、住民が津波避難計画を策定する上で必要とする情報の同定ならびに手順を明確化しました。この中で、個人が津波避難経路を選定する際には、「①避難経路を検討する際には危険情報の可視化」「②自身を取り巻く環境にかかる危険情報・検討情報の取捨選択」「③検討結果の他者との共有を通じた、計画自体の多面的な評価と他者の視点の理解」の 3 要素が重要であることが明らかとなりました。図 8 は、この全体フローを表しています。

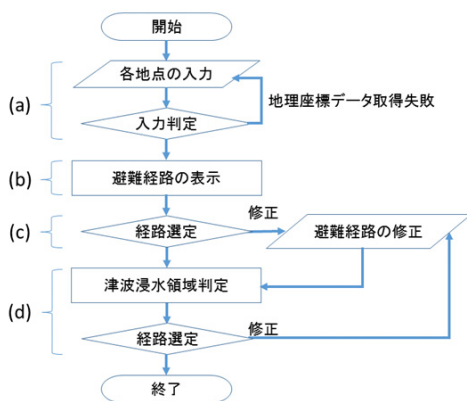


図 8 津波避難計画策定支援ツールの全体フロー

この全体フローにもとづき、MMS アプリで支援できる範囲と機能を同定し、その設計・開発を進めました。これは、利用者が避難開始地点を設定した後、第一避難目標、第二避難目標を設定し、その経路上の地域特性やハザードを考慮しながら、避難経路を変更し、各個人にとって最も合理的な経路を選定していくことから、その流れを効率的に実施できるよう MMS アプリが支援することとしました (図 9)。具体的には、利用者が自身の避難開始地点を設定し、その後、第一避難目標、第二避難目標を設定することで、まずアプリが「最短経路」を検索します。最短経路は、周りの様々な危機を考慮している

わけではありません。津波災害や水害であれば、避難経路が着実に標高の高い地域へ向かっている必要があることから、経路上の標高変化をグラフで可視化します。また、避難経路が津波想定エリアやその他のハザードが襲来するエリアを途中で通ることは避難途中の被災リスクを高めますから、そのような状況になった場合はアラートで表示されます (図 10)。このように、利用者が避難経路を設定した際、アプリが標高変化やハザードリスクを自動的に判定し、利用者に提示します。この結果を踏まえて、利用者は、インタラクティブにアプリから情報を得ながら、最も個人の状況に合致した避難経路を選定します。また、アプリとのインタラクションを通して、各個人を取り巻くハザードや地域特性についての理解も深め、災害に備えます。



図 9 津波避難計画策定支援ツール

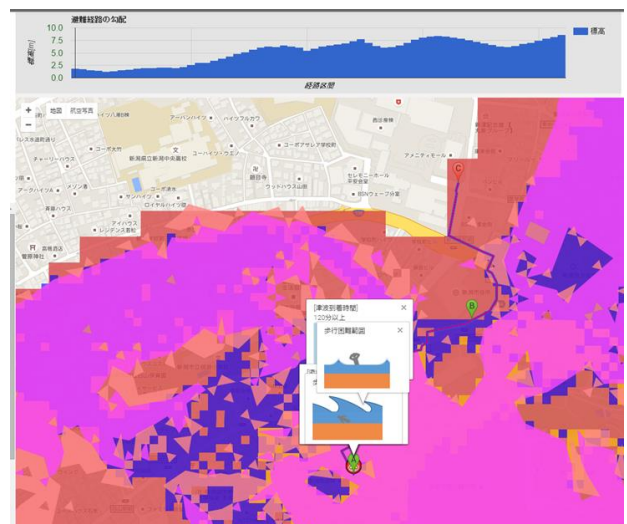


図 10 経路上における危険情報のポップアップ表示

上述のアプリは、インターネットを介して利用者が自由に活用できるようウェブアプリとして実装しました。その後、公開し、多くの方々から活用いただきました。しかしながら、実装した機能のすべてが利用されたわけではなく、使いやすさに課題が

見られました。この課題を解決するために、ストーリーを実装し、アプリから利用者に質問を示し、それに利用者が回答すると、回答内容に応じて避難に対する助言が示され、利用者が一定の手順に従って、アプリを活用できるよう改修を重ねました。また、津波ハザードだけでなく、様々なハザードにも対応できるよう、ハザード情報を GeoPortal から参照し、本アプリで分析できるように、機能の拡充を実施しました。これらのアプリは、現在も公開されており、防災意識の高い個人や地区単位での避難計画策定において活用されています。

#### 4.3 「あなたのまわりの気象情報」アプリの設計・開発

前述のように、災害発生の危機が迫る状況では、各個人において取り巻く環境内に潜むハザードリスクの変化を捉えながら、避難行動実施について判断することが求められます。我が国では、気象変化から災害発生の危険度が高まるにつれて、注意報・警報が発令されます。また、平成 25 年より特別警報が位置づけられ、重大な災害の起こるおそれが著しく高まっている場合に最大級の警戒を呼びかけることとなりました。注意報や警報の発令基準は地域ごとに規定されています。しかし、地域の住民は必ずしもその値を理解しているわけではなく、またその基準値に満たない場合では情報を取得できず、結果として避難行動の遅れが危惧されます。

特別警報に至っては、「数十年に一度」という表現もされ、その規模がどのようなものであるかを即時に理解することも困難です。くわえて、「数十年に一度」の気象状況は、地域によって異なります。そのため、全国で一律に規定できるわけではなく、地域の過去の気象にかかる記録を見返すことにより、はじめて分かるものです。

この状況をふまえ、災害発生の危険度を、個人がその居場所に基づき、より早く把握するための仕組みを「あなたのまわりの気象情報」として設計・開発します。現状として、我が国では全国に 1,642 の気象観測所が設置されており、それぞれで観測されたデータは気象庁のホームページから検索が可能となっています。また、気象庁では「地域気象観測所一覧」として、各気象観測所の位置情報（緯度・経度）を公開しています。これらのデータを活用すれば、各個人の居場所のまわりの気象が、過去の気象観測データを基にして、どのような状況にあるかを示すことが出来ると考えました。具体的には、図 11 に示すような全体設計を行ない、ウェブアプリとして実装し、公開しました。図 11 に示してはいますが、本アプリを実現するにあたり、気象庁が公開するデータを定期的に収集・蓄積するとともに、現在・近い将来の気象状況を、公開 API を活用して

取得し、お互いを比較することによって、気象状況の様相を分析し、利用者に提示することとしました。

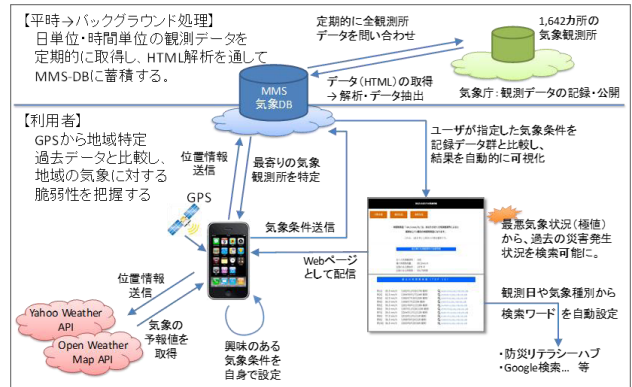


図 11 「あなたのまわりの気象情報」の全体像

上述のウェブアプリを実現するべく、アプリの画面設計ならびに気象庁からのデータ取得・蓄積、ウェブアプリへのデータ配信にかかる機能設計・開発を行ないました。本アプリは携帯端末で利用することを想定しています。上記のウェブアプリにアクセスすると、ウェブアプリでは利用者の端末の位置情報を取得し、利用者に位置を確認します。利用者から位置情報に対する確認が得られた後、最近隣の気象観測所を空間的位相関係から同定します。その後、利用者は、気象状況を入力します。これは、画面において直接入力する方法に加えて、気象にかかる公開された API から自動で現在もしくは近い将来の気象予測データを取得し画面内に貼り付ける方法があります。これらのように利用者が知りたい気象に関する値を入力後、ウェブアプリで調べるよう要求すると、ウェブアプリから図 12 に示すような結果が得られます。この画面では、たとえば降雨量であれば、利用者が指定した時間降雨量は、最近隣の気象観測所の記録から、どの程度の頻度で発生する現象かを文字で提示します。



図 12 「あなたのまわりの気象情報」の実行結果・表示

このアプリを実装したことにより、利用者はまわりの気象状況が、その地域にとってどれほど頻度のある状況であるかを把握できます。すなわち、地域にとって希な状況であれば、これまでにあまり経験のない災害が発生する可能性が高い状況にあると考えられます。この情報をよりどころにして、利用者は気象状況を理解し、避難行動開始の判断が可能となります。

#### 4.4 QRコード付き避難者カードによる避難所内の避難者行動把握アプリの設計・開発

各個人が避難を開始すると、その後、避難所での生活が始まります。避難所では、避難所の混沌とした状況から、避難所内での状況およびニーズ把握が難しいことから、避難所への支援方策について十分な検討が出来ず、効果的な支援が出来ません。この課題を解決するために、避難所内の各個人の行動を把握することで、その行動把握結果を集約し、避難所の状況を把握することとしました。

図 13 は、本研究で開発する避難者行動把握アプリの全体の流れです。このアプリでは、避難者に QR コードが印字された避難者カードを配布し、避難者登録を実施することから利用が始まります。QR コードには、各避難者を認識する ID が含まれており、QR コードを読み取ることで PC や携帯端末に避難者カードをかざすことで、個人専用のメニューが表示され、その中から行動を選択する設計としました。これにより、避難者カードを保有し、避難所内の様々なところでサービスを受けるときにカードをかざすことで、誰が、いつ、どこで、どのようなサービスを受けたかが記録されます。また管理者（運営事務局）側では、その記録を集約することで避難所の状況把握ができ、これをもとにして支援要請を行なうことができます。

このアプリ全体を設計・開発した後、平成 28 年 9 月 24 日（土）に、御前崎災害支援ネットワークが実施した避難所の本部運営訓練に実装し、その有用性を検証しました。アプリは全体として安定的に稼働し、訓練に参加した 56 名分の避難者カードが発行され、避難者の行動が記録されました。多くの災害時要援護者が訓練に参加していましたが、支援者の援助もあり、一定の参加者についての行動が記録され、避難所の状況把握が実現されました。しかし、避難者登録時の入力もれ、行動の記録もれ等もあり、すべてが完全に記録できたわけではありませんでした。これらについては、避難所内の業務や人の流れを改めて分析し、アプリの利用局面や必要な機能の見直しが必要であることが明らかになりました。これについては、今後の課題となっています。

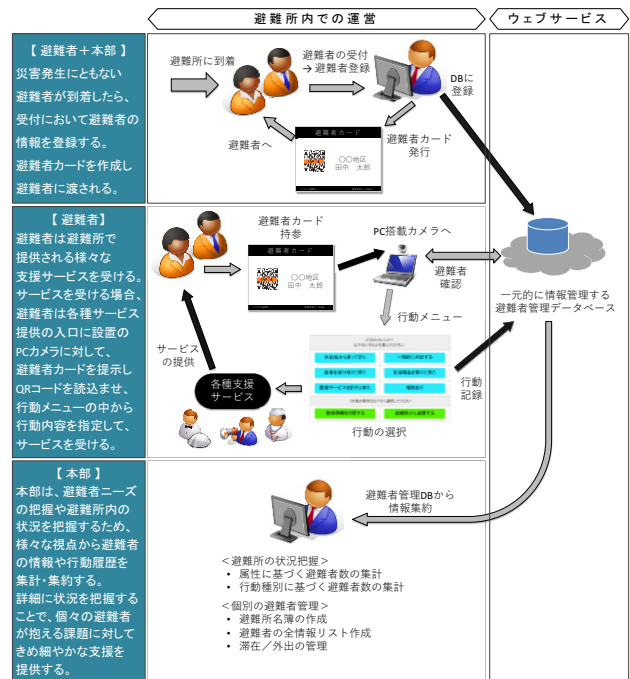


図 13 QRコード付き避難者カードを用いた行動把握アプリの運用の流れ

## 5. MMS の社会普及に向けた取り組み

### 5.1 MMS 研究会を通じた MMDIN の社会実装

本研究を推進するにあたり、様々な MMS にかかる取り組みを社会に発信するとともに、社会実装することを目的として、MMS 研究会を継続的に開催しました。この中で得られた成果は、前述の様々な MMS アプリの実装を含みます。くわえて、MMDIN（狭域防災情報サービス協議会）の確立と社会へのサービス発信があげられます。本節では、この取り組みを報告します。

MMDIN では、災害発生直後の失見当期を極小化することを目的として、災害発生後に収集される空撮画像をもとに、災害前後の被災地を GIS 上で比較することで、災害発生エリアやその状況の把握を実現します。これを被災状況マップとして位置づけました（図 14）。本プロジェクトが始まって以来、様々な災害において、空撮画像を収集し、MMDIN よりウェブサイトを通じて社会発信されました。この成果により、被災状況マップを活用し、被災エリア・被災状況の一次把握が支援され、社会実装が実現されました。また、本研究を通して、空撮画像の収集から社会発信に至るまでの過程を標準的な情報処理手順（SOP：Standard Operating Procedure）として確立されました（図 15）。これを実現する各関係機関も MMDIN の運営に携わっており、発災時の組織体制の連携・確立においても時間コストの削減が期待でき、今後、様々な災害が発生した際において、迅速なサービスの立ち上げが期待できます。



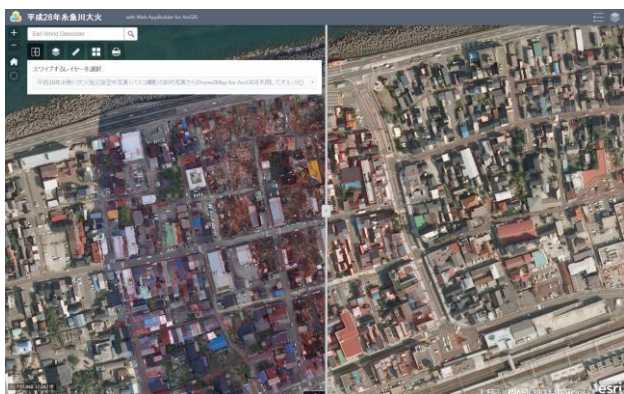


図 14 糸魚川市駅北大火における被災状況マップ

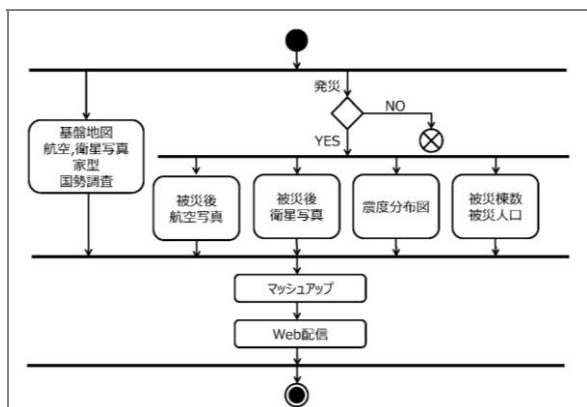


図 15 「被災状況マップ」公開のための SOP

## 5.2 ICT サービスと社会をつなぐ「一日会議」の開催

MMS の社会普及において、社会とのつながりを維持しながら、継続的に活動続ける必要があります。これを実現する上で、研究者だけでは役不足であることから、産官学が連携し、発災時にお互いの強みを活かし、弱みを補完しながら、災害対応に真に役立つ ICT サービスの実装が求められます。

ICT の業界では、様々な立場・視点を融合し、社会の役に立つサービスを生み出す際に、参画型ワークショップの場が利用されています。これを災害時の社会サービスとして考え、参画型ワークショップの場を設け、産官学の様々な立場から ICT に関わる人たちの参加の下で、ICT サービスの役割、ICT サービスへの期待を明らかにする活動を実施しました。この活動を「減災ソフトウェア開発に関する一日会議」として、継続的に実施してきました。

この会議は、過去の災害の被災地において ICT による被災地支援を推進した経験を有する方々からのブリーフィングから始まります。ブリーフィングを受け、課題の整理・解決策の整理を、その場に参加する様々な立場・視点から実施し、共有するという流れになります。年間 3 回程度の頻度で開催し、ICT の役割だけでなく、被災地を支援する体制のあり方、被災地での活動の方法等を議論し、お互いの

目線をそろえることも目的として、一日会議の開催を実施してきました。

とくに最終年度であった平成 28 年度には、「災害発生時には、特に被災自治体との連携や支援体制が情報収集作業の共有体制などについて需要が大きくあり、有事には民間からの情報支援の余地が非常に大きくある」ことが明らかとなりました。その一方で、平時からの連携の難しさ、ハードルの高さという問題が表出化しました。これを ICT の視点から解決する場合、災害情報配信フォーマットの標準化、オープンデータなどを活用したスマホおよび SaaS アプリの構築手法の共有が方策として提案されました。また、救援・支援事例は行政・民間などのレベルの異なる組織間連携を促進する鍵になる可能性があることが示されました。

この活動は、MMS という ICT を活用した防災・減災サービスを社会普及する上では必要となります。社会の状況が変化することもない、MMS で実現すべきサービスも変化します。また、社会側で実現すべき事項も変わりますから、結果として MMS への期待も変わります。すなわち、一日会議のような場を利用しながら、産官学が連携し、MMS の役割・期待を継続的に協議することが、結果として、MMS の社会浸透を推進すると考えられます。ただ、一日会議を運営するには、活動にかかる人的・物的資源、空間資源が必要となります。そのため、いかにして効率的な運用を実現するかについては、今後検討が必要であると考えます。

## 6. まとめと今後の展望

本プロジェクトでは、災害直後において各個人が様々な情報群から個人の行動に必要な情報を抽出し、それらをもとに効果的な災害時行動をとり、防災・減災につなげるべく、MMS の実現を目指しました。MMS の社会実装に必要な要件の解明、MMS を社会実装するための様々なアプリの設計・開発、災害発生後の失見当期を極小化するための仕組みの実装など、多くの成果が得られました。

一方で、MMS の社会普及は未だ発展途上です。様々な MMS にかかるサービスが、今後も多く社会に発信されます。その中で、どのサービスを利活用し、どのような災害時行動をとると意思決定するかは、各個人に依存します。すなわち、今後、各個人が、それぞれに適した MMS を選定し、防災・減災の行動につなげるための知識・態度の育成が欠かせません。近い将来、我が国では南海トラフ巨大地震の発生が想定されています。MMS を社会普及しながらも、MMS を効果的に利活用できる人材育成を含め、今後も継続的な研究と社会実装を推進し、都市の脆弱性の極小化に貢献したいと考えています。

### III-3 防災リテラシーハブ

木村玲欧(兵庫県立大学)

#### 1. 「防災リテラシー」の必要性と現状

21世紀前半の日本では、南海トラフ巨大地震や首都直下地震、地球温暖化にともなう豪雨災害・土砂災害など、日本社会に大規模な被害・影響を与える多数の災害の発生が予想されています。このような災害に対して、ハード対策と呼ばれるような構造物などによる被害抑止策だけでは、すべての被害・影響を防ぎ止めることはできません。そのため、1人1人の人間や組織の災害対応などといった、ソフト対策と呼ばれるような被害軽減策によって、防ぎ止められなかった被害・影響に対して適切に対処しながら、災害に立ち向かい、乗り越えていく必要があります。

このような災害に立ち向かい、乗り越えていくために必要な能力のことを、本論文では「防災リテラシー」と定義します。リテラシーとは、もともと読み書きの能力という意味で、転じてある分野に関する知識や能力を指します。近年、防災リテラシーという単語は、日本でも多く使われるようになり、インターネットで検索しても幾つかのサイトを検出することができます。しかしほとんどのサイトでは「ある特定の災害・防災事象についての『防災リテラシー』」が取りあげられているだけで、網羅的に防災リテラシーを向上させるような内容にはなっていないのが現状です。また、もっと具体的な名称、例えば「防災教育」「防災訓練」をインターネットで検索しても、ある都市の教育・訓練の結果の写真が出てきたり、出典がよくわからない知識の断片が出てきたりと、体系的に「防災教育」「防災訓練」を知ることができない現状があります。

そこで本研究では、一般市民・災害対応従事者の「防災リテラシー」の向上を目指した仕組みづくりを行いました。インターネット上に分散している防災の知恵を収集・作成・発信することができる「防災リテラシーハブ」という仕組みを開発したのです。このシステムによって、インターネット上に分散する様々な防災の知恵を集積したり、検索したり、まとめたり、またメッセージやクイズなどを発信することができます。次章からは、防災リテラシーハブの機能について、開発過程からどのような改善を経て現在に至っているかについて紹介していきます。また防災リテラシーハブを使用した大学生への効果測定についてもあわせて行いました。

#### 2. 「防災リテラシーハブ」の設計・開発

##### 2.1 防災リテラシーハブの概念設計

防災リテラシーハブの「ハブ」という言葉は、活動などの中心、車輪の中心部、軸とスポークの間にある輪の部分のことを表します。コンピューター・ネットワークの集線装置や、中心拠点となるような空港のこともハブといい、様々なものが集まってくる、その拠点となるものがハブです。

このような防災リテラシーのハブとなる概念を考えていくと「インターネット上に分散する防災のコンテンツに関係する資料をどのようにわかりやすく一覧性をもって利用者に表示し、また利用者が必要に応じて検索・絞りこみをすることができるか」という防災のコンテンツに関係する資料の表示・検索・編集・登録機能についての課題を解決する必要が出てきました。そこで研究期間中、何回かの大規模な改訂を経て完成したのが図1のトップ画面です。

##### 2.2 防災リテラシーハブのトップ画面

図1のトップ画面は、googleなどのインターネットの検索エンジンから「防災リテラシーハブ」と入力してもたどり着くことができます。もしくは、<http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/ur/hub/dtp/>を直接入力してください。トップ画面には、投稿された様々な防災・減災の知恵が一覧できるようになっていま



図1 防災リテラシーハブのトップ画面

す。1つの投稿が1つの同じ面積のタイルになって表示されていて、タイルをクリックすると図2のように、リンク先から読み込んだイメージ画像や、投稿者が入力した資料概要を見ることができます。そしてイメージ画像をクリックすることによって、実際にそのページに飛ぶことができます。2017年2月現在、3,500件を超えるコンテンツが投稿されています。

開発当初は、このトップ画面も、個別に発行したアカウント・パスワードを入力しないと見ることができませんでしたが、より多くのユーザーに閲覧してもらう環境が整ったために、閲覧・検索については一般公開をするようになりました。なお、コンテンツの投稿や高度な編集については従来どおり個別のアカウント・パスワードによってログインすることが必要となっています。

表示画面については、実際に利用者に使ってもらうなかでの意見に基づいて、1)縦長のタイル状に表示、および2)横長のタイル状に表示の2種類の表示を可能にしました。これらは「トップ画面の右側の切り替えボタン」を押すことで変更可能です(図3)。「横長タイル」表示にすると1行あたりの文字数が多くなるために説明文章が読みやすく、また同じ高さに2~3コンテンツ程度しか表示されないため(画面の解像度によって異なります)、スクロールをしても目が疲れにくいという利点があります。一方で「縦長タイル」表示にすると1行あたり6~8コンテンツ程度の表示が可能となるために、一覧性があったり全体像がつかみやすかったりするという利点があります。利用者はそれぞれの利点のもとに好きな方を選択することができるようになりました。また当初はタイルの面積(大きさ)がバラバラだったのですが、タイルの面積を揃えることで一覧性を向上させました。

### 2.3 キーワード検索

キーワード検索については、当初は、こちら(防災リテラシーハブの開発者側)がキーワード(例:災害直後の対応、安否確認・避難・避難所・仮設住宅・住宅、火災・消火、こころとからだのケア、ボランティア、ライフライン・インフラ等)をあらかじめ用意していました。そして投稿者が投稿する時に、コンテンツと関係するキーワードの横にあるチェックボックスにチェックして投稿していました。そして防災リテラシーハブの利用者が検索する時には、こちらが用意したキーワード一覧にチェックするかたちでコンテンツを検索するという方法でした。こちらがキーワードを指定したのは、「何も参考にするものがない状態からフリーワードで『キーワード』を入れるとなると、利用者にとって災

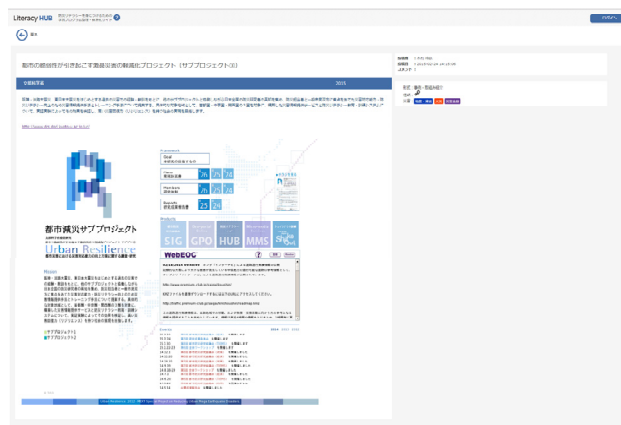


図2 タイルをクリックした後のコンテンツ表示イメージ(投稿者入力の資料概要、リンク先から読み込んだ画像などを見られる)

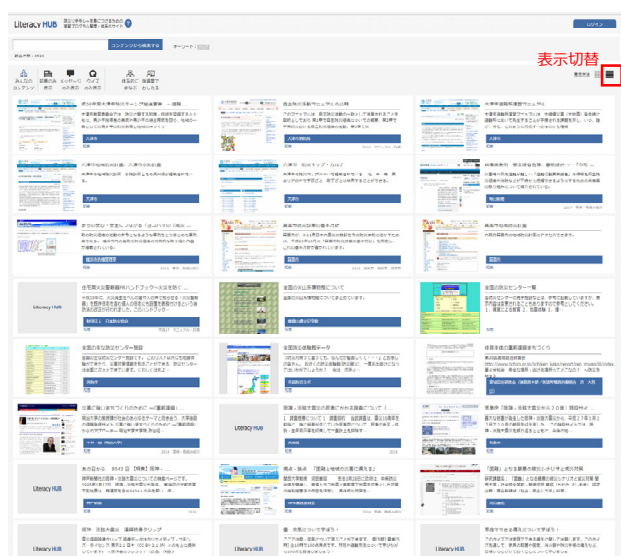


図3 表示切替ボタンによる、縦長から横長への表示切替機能

害・防災のキーワードが思い浮かず入力しにくいかもしれない」という利用者像の想定によるものでした。キーワードは、防災基本計画や地域防災計画(阪神・淡路大震災の被災地である兵庫県や神戸市のもの)などを参考にしながら選定しました。

しかし利用者の意見を聴取する中で「検索時にキーワードの一覧は参考にはなるが、かえって自分の調べたいコンテンツがどのキーワードにあてはまるか考えるのが難しい」「コンテンツを投稿する時に、そのコンテンツがキーワード一覧のどのキーワードに該当しているかいちいち考えながら投稿したりしなくてはならず、繁雑になり時間がかかる」との意見が多くありました。そこで利用者の利用状況をもとに段階を経ながらキーワードの一覧自体を廃止することにしました。現在は、トップ画面の左上に大きく「キーワード検索」機能を作成して、

防災リテラシーハブの説明

防災リテラシーハブ投稿・編集



トップ画面に収集・公開された  
防災知・減災知が表示

1投稿が1タイルになる

図4 ログイン後の防災リテラシーハブのトップ画面

キーワードによる検索をメインに据えることで、より利用者の意図に沿った自由な単語でコンテンツを検索できるようにしました(図1)。キーワード検索によって検索されるデータの範囲は、投稿者の入力した全テキスト情報等としました。キーワード検索では、全角・半角スペースによるand検索も可能にしている他、検索をしたキーワードは右側に表示されて利用者の意のままに検索キーワードを削除することも可能にしました。

### 3. ログイン後の防災リテラシーハブの活用

#### 3.1 投稿機能、バインダー機能

個別のアカウントを取得すると、トップ画面右上のログインボタンからログインできるようになります。ログインをすると、コンテンツを新規に投稿したり、高度な編集をしたりすることができます。図4がログイン後の画面です。トップ画面の右上の「コンテンツを投稿する」をクリックすると、コンテンツの種類(知恵、メッセージ(後述)、クイズ(後述))を選ぶことができ、該当するものを選ぶと投稿画面が現れます。例えば「知恵」を投稿したい場合には、コンテンツのタイトル、参照するURL、コンテンツ区分、資料の概要などを入力した上で、コンテンツを新規投稿することができます(図5)。

また、ログイン後は「みんなのコンテンツ」(図4左上)もしくは「あなたのコンテンツ」(図4左



図5 投稿画面(「知恵」の投稿)

上)をそれぞれクリックすると、コンテンツのすべてと自分が投稿したコンテンツの表示の切り替えをすることができます。また、コンテンツのタイトルの右上に「クリップ」のマークが付くようになり、初期値は灰色になっていますが、このクリップをクリックすると赤色になり、「自分のお気に入りコンテンツ」として印を付けることができます。そして「お気に入りのみ表示」(図4左上)をクリックす

ると、「お気に入りの赤クリップ印をつけたコンテンツ」だけを表示することができます。特にこの「お気に入りのみ表示」の画面については、アカウントごとのユーザーの固有の画面になるために、タイルの位置をドラッグ&ドロップで自由に変えて表示することができます。この変更はログアウトした後、再度ログインした時にもそのまま生かされているようにしました。

さらに「お気に入りの赤クリップ印」をつけたコンテンツについては、トップ画面右上の「コンテンツを編集する」をクリックすることによって、お気に入りのコンテンツを1つのバインダー（フォルダ）にまとめたり、まとめたそのバインダーを、さらに1つのコンテンツとして投稿したりすることができます。例えば、過去の災害における「復興基金」についていくつものコンテンツが投稿されているのですが、それらのコンテンツにお気に入りの印を付けた上で、「コンテンツを編集する」からバインダー化して、そのバインダーを新たな1つのコンテンツとして投稿することができます（図6左）。図6右上に表示されているコンテンツの左端の『復興基金』とは？が、投稿されたバインダーです。このタイルをクリックしてコンテンツを見ると、復興基金についてバインダーでまとめられたコンテンツを見ることができます（図6右下）。このように防災のコンテンツを収集し、それらの情報を分類・整理することで構造化することを「お気に入り機能」は可能にしています。

### 3.2 メッセージ投稿機能

防災リテラシーハブを運用していく中で、「インターネットなどに既に掲載されているコンテンツを収集・発信するだけでなく、自分で作成したコンテンツを手軽に作成・発信したい」という要望が、研究者の人から出てきました。当初は、自分でサイトを作成した上でURLをコンテンツとして投稿するか、もしくは、まとまりのある学術的コンテンツについては、防災リテラシーハブのトップ画面の「体系的にまなぶ」(図4左上)をクリックすると、別途リンク集が出てくるようになっていました。しかしどちらにせよ体系的なサイトを作成するまでに多くの内容・時間・技術が必要となるために、手



図6 「お気に入り」コンテンツのバインダー編集・投稿機能



図7 投稿画面（「メッセージ」の投稿）

軽にメッセージを発信するという要望には応えていませんでした。そこで防災リテラシーハブの機能の中に、メッセージ・画像を手軽に作成・投稿する機能を整備することとなりました。この機能によって防災に関するコンテンツの「中継」(ハブ)機能に加えて、「作成」機能についても防災リテラシーハブが担うことができるようになりました。

ログイン後のトップ画面右上の「コンテンツを投稿する」をクリックすると、図7のようなかたちで、メッセージのタイトル、200字程度のメッセージ（最大300字まで投稿可）、画像（JPEGファイル1枚）を投稿することができます。作成・投稿されたメッセージは防災リテラシーハブのトップ画面に、

他のコンテンツと同じようにタイル表示されます。知恵の投稿は青色のバーで表示されるのに対し、メッセージは緑色のバーで表示されます。メッセージのタイルをクリックした後のメッセージ画面が図8です。投稿されたメッセージと画像を見ることができます。またログイン後のトップ画面(図4)左側には「メッセージのみ表示」のボタンがあり、これを押すと、投稿されたコンテンツの中からメッセージだけを表示することができます。

### 3.3 クイズ作成・投稿機能

防災リテラシーハブを運用していく中で、「防災に関する教育・訓練プログラムを実施するなかで、プログラムで設定した学習目標の達成度や防災リテラシーの向上度を防災リテラシーハブの中で測定したい」という要望が出てきました。

そもそも防災リテラシーハブは、教育学・心理学・教育工学の学習理論である「インストラクショナルデザイン」(Instructional Design: ID)の考え方をもとに設計されています。インストラクショナルデザインとは、学習者の意図的学習を効果的に促進するための訓練・研修の枠組みについて研究する分野であり、「教えることのプロセスに重点を置くのではなく、学習のプロセスを支援することに焦点をあてている」ことが特徴です。IDの中核的研究者であるガニエは、学習目標(学習・訓練プログラム修了時に、学習者が獲得している能力)という概念を重要視し、教育・訓練を行う際には、学習者の学習目標(どのような能力を向上させたいか)を軸にしたプログラムの設計が必要条件であり、プログラム評価は学習者の学習目標の達成度によって評価することができると考えています。

利用者がコンテンツを閲覧することによってどのような防災リテラシーが向上したのかを測定したり、もしくは防災教育・訓練プログラムの実施によって向上した防災リテラシーを測定したりすることができるような機能を盛り込むことは、防災リテラシーハブの開発において必要な機能であり、当初から構想していたものでもありました。

そこで、学習者の学習目標の達成度を測定できるようなクイズを手軽に作成・投稿する機能を整備することになりました。ログイン後のトップ画面の右上「コンテンツを編集する」(図4)から「クイズ投稿」をクリックすると図9のようなかたちで、サイト上でクイズを作成・投稿する画面が出てきます。クイズ全体のタイトル、クイズの説明、出題文・出題図、問い、選択肢、配点を入力することができます。作成・投稿されたクイズは防災リテラシーハブのトップ画面に、他のコンテンツと同じようにタイル表示されます。一般的な投稿は青色のバー、メッ

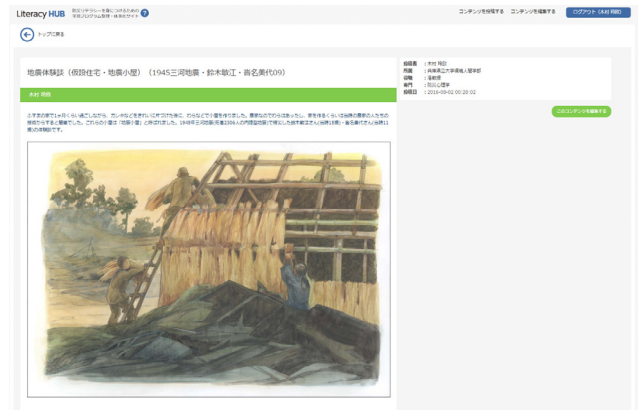


図8 投稿されたメッセージ

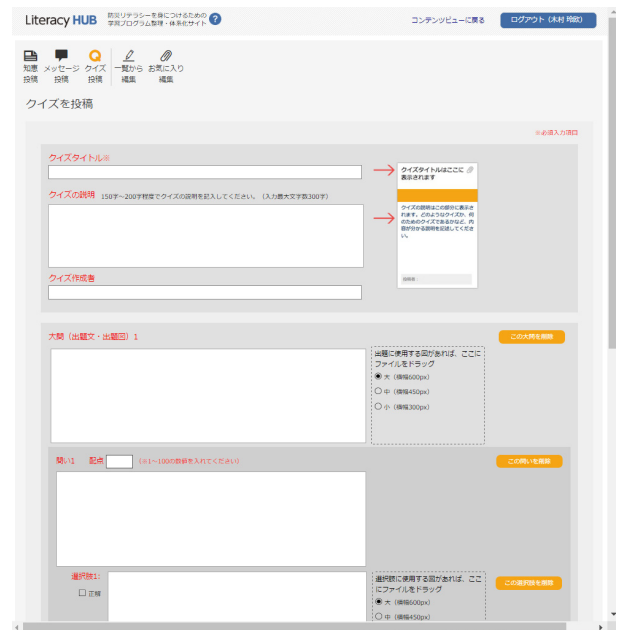


図9 投稿画面(「クイズ」の投稿)



図10 投稿されたクイズを行うことができる

ッセージは緑色のバーで表示されるのに対し、クイズはオレンジ色のバーで表示されます。クイズのタイルをクリックした後のクイズ画面が図10です。クイズのタイトルや説明を見た後で、「クイズを開始」ボタンからクイズを解くことができます。

## 4. 防災リテラシーハブの評価

### 4.1 大学生を対象とした事前事後評価の実施

防災リテラシーハブは、2013年のプロトタイプ  
の運用開始から、各機能の実装を踏まえて、2015  
年8月の新しいトップ画面での本運用に至り、ユー  
ザーからの要望に応じるかたちで修正・改良を続け  
ています。2016年2月時点で3,500件を超えるコン  
テンツが投稿されていて、一般市民、教職員、自治  
体職員へのPRも行っていることもあり、多くの人に  
利用されています。

実装されてから日も浅く、防災リテラシーハブの  
評価は、今後長期的な観点から総合的に行われるべ  
きであるかと思えます。しかし防災リテラシーハブ  
を利用することでユーザーのどのような防災リテ  
ラシーが向上したかを簡易的にでも計測したいと  
思い、大学生に防災リテラシーハブの評価を行って  
もらいました。対象とした大学生は、筆者が勤務す  
る大学の2年生に対して行われる選択科目講義「災  
害情報論」の受講生です。防災リテラシーハブを利用  
する前に、防災リテラシーに関する質問紙に回答  
してもらった上で、防災リテラシーハブを30分間  
以上利用してもらい、利用後に防災リテラシーに関  
する質問紙に回答してもらいました。回答者は防災  
リテラシーハブをはじめて利用する学生でした。質  
問紙には「回答内容は統計的に処理され個人が特定  
されない」ことを明記しました。調査依頼は2016  
年7月上旬に行い7月末までを期限としました。そ  
の結果、102人の学生から回答を得ることができま  
した。

### 4.2 大学生は防災リテラシーハブで何を検索したか

防災リテラシーハブを30分間以上利用してもら  
った上で、事後評価において「防災リテラシーハブ  
のキーワード検索をするときに、どのような文字を  
入力してキーワード検索をしたのか、実際に検索し  
たキーワードを挙げてください。」と尋ねて、検索  
キーワードを挙げてもらいました。その結果、102  
人の回答者において228種類・延べ530個のキー  
ワードが挙がりました。1人あたり平均5.2個で、10  
個以上のキーワードを挙げた回答者も7人、最大で  
18個のキーワードを挙げた回答者もいました。な  
おこの最多回答者が挙げたキーワードは「小学校、  
避難訓練、地震、SNS、地域、防災、避難、高齢者、  
外国人、避難所、経営、台風、危機管理、阪神淡路  
大震災、防災教育、リスク評価、被災地、デマ」で  
した。

多くの回答者が挙げたキーワードをまとめたも  
のが図11です。最も多かったのは地震(N=40)・  
津波(N=33)で、回答者の3割以上が検索するキー  
ワードでした。以下、防災(N=17)、ボランティア

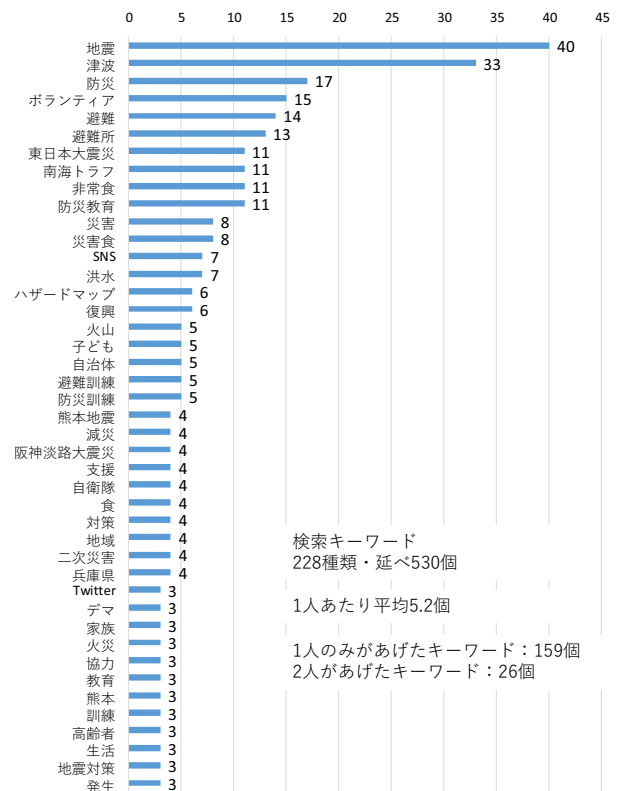


図11 大学生が防災リテラシーハブで  
実際に検索したキーワード

ア(N=15)、避難(N=14)、避難所(N=13)、東日  
本大震災、南海トラフ、非常食、防災教育(ここま  
でN=11)と続きました。一方で、1人のみが挙げ  
たキーワードも159個(キーワード全体228個の  
69.7%)にのびりました。具体例を挙げると、アレ  
ルギー、ため池、ネットワーク、リスク評価、楽し  
い、孤独死、災害対策本部、若者、若者がすべきこ  
と、妊産婦、農村、怖い、落雷、流言、旅行など  
でした。また具体的な地名を挙げた回答者も多く、災  
害に対する興味・関心は個別具体的な事象について  
多岐にわたっていることがわかりました。なお、本  
回答者は大学講義「災害情報論」の受講生であり、  
検索キーワードは講義で取り扱ったものも少なく  
はありませんでした。しかしながら、特に1人のみ  
が挙げた159個のキーワードにおいて、アメニティ、  
アレルギー、ゲーム、ため池、ネットワーク、リス  
ク評価、レスキューフーズ、仮の暮らし、外国人、  
経営、女性、食生活、地震リスク、妊産婦など、約  
半数が当該講義で取り上げていないキーワードで  
した。このことから講義以外のさまざまな災害事象  
に興味のおもむくままに検索していることが考え  
られます。

### 4.3 大学生のどのような防災リテラシーが向上したか 大学生に対して、防災リテラシーハブを使用する

全項目ともに1%水準で有意差あり（対応のあるt検定）  
N=99~101（全数は102だが欠損値があるため）

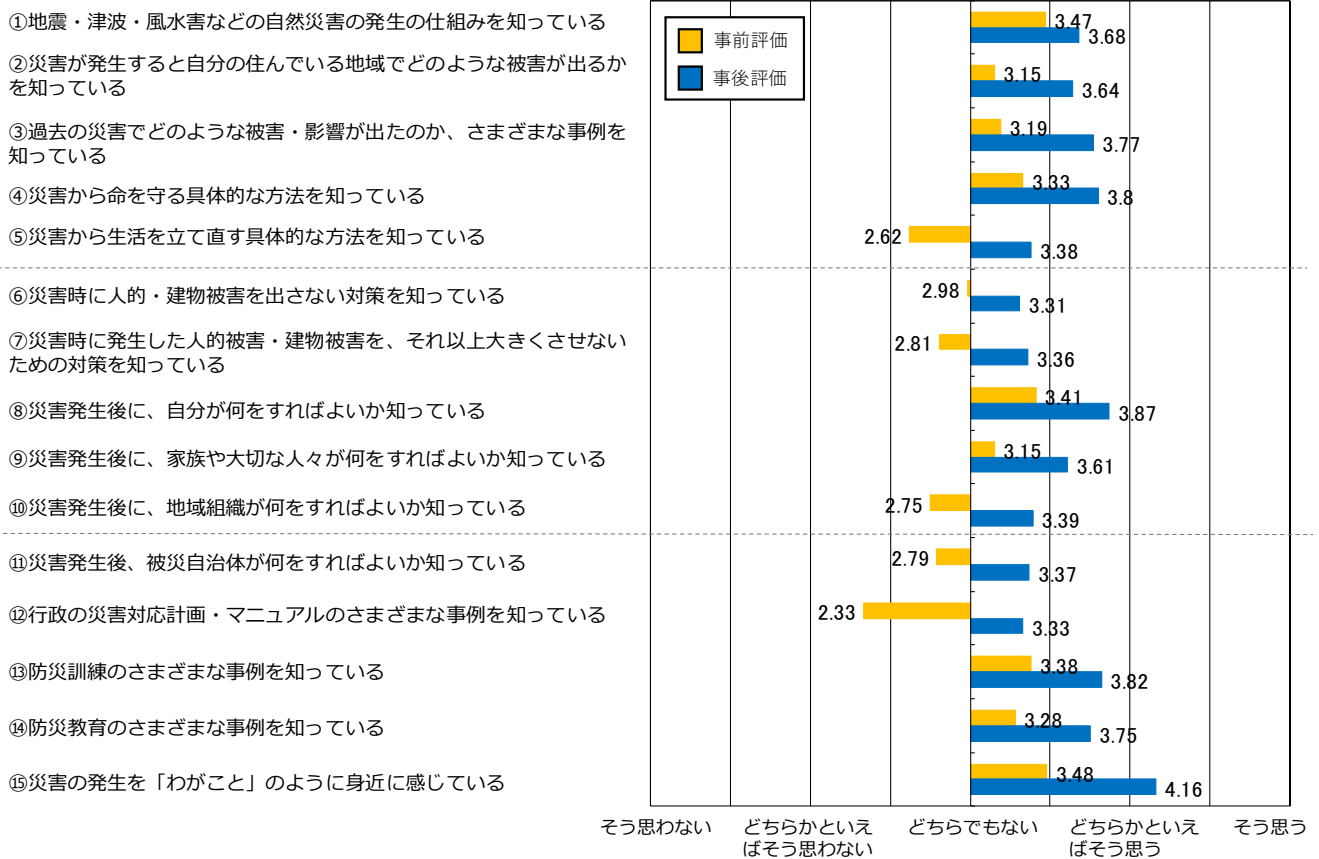


図 12 利用者の防災リテラシー向上の観点からみた防災リテラシーハブの評価

事前と事後に「下記の 15 項目について、それぞれあなたの現状に最もあてはまる番号に○をつけて下さい。」として、防災リテラシーに関する 15 項目について「とてもそう思う(5 点)、どちらかといえばそう思う(4 点)、どちらとも言えない(3 点)、どちらかといえばそう思わない(2 点)、まったくそう思わない(1 点)」で 5 段階評価をしてもらいました。事前と事後の結果についてまとめたものが図 12 です。その結果、事前評価では「どちらかといえばそう思わない」と回答していた 15 項目中 6 項目も含め、全 15 項目すべてにおいて 1%水準で統計的に意味のある数値の上昇が見られました。学習者の評価によって教材の評価とするインストラクショナルデザインの考え方からすると、防災リテラシーハブには一定の効果があることが考えられます。

大きく向上した項目について見ると、行政の災害対応計画・マニュアルのさまざまな事例を知っている（項目 12）、災害から生活を立て直す具体的な方法を知っている（項目 5）、災害の発生を「わがこと」のように身近に感じている（項目 15）、災害発生後に、地域組織が何をすればよいか知っている（項目 10）、過去の災害でどのような被害・影響が

出たのか、さまざまな事例を知っている（項目 3）、災害発生後、被災自治体が何をすればよいか知っている（項目 11）でした。回答者である大学生ではなかなかイメージしにくい、大学生以外の行政や地域組織の対応や、長期的な生活再建の方法や、過去の災害事例などについて、防災リテラシーハブによって知ることができ、最終的に災害への「わがこと意識」が上昇したことが考えられます。

### 5. 今後の展開

本研究では、分散する防災・減災の知恵について一覧性をもって標準的に掲載したり、プロジェクト等の取り組みやメッセージを発信したり、クイズで学習効果を測定できる仕組み「防災リテラシーハブ」を構築しました。また防災リテラシーハブについて、大学生をユーザーとしたシステムの評価について検討しました。

今後は、この「防災リテラシーハブ」という仕組みを、学習・訓練・災害対応場面で広く普及・利用していくことで、防災知の中継・発信機能を担わせていきたいと考えています。またコンテンツは現在 3,500 件を超えますが、すべて人的労力による投稿



であり、コンテンツの質を保持できる一方で、webからの自動取得・分類化などは新しい研究分野での課題として考えることも可能ではないかと考えています。

#### 参考文献

- 1) Kimura, R., Hayashi, H., Suzuki, S., Kobayashi, K., Urabe, K., Inoue, S. and Nishino, T., Systematization and Sharing of Disaster Management Literacy by DMLH, Journal of Disaster Research, Vol.9, No.2, pp.176-187, 2014.
- 2) Gagne, R.M., Wager, W.W., Golas, K.C., and Keller, J.M., Principles of Instructional Design (5th Ed.), Wadsworth Publishing, 2004.
- 3) Kimura, R., Hayashi, H., Kobayashi, K., Nishino, T., Urabe, K. and Inoue, S., Development of a Disaster Management Literacy Hub” for Collecting, Creating, and Transmitting Disaster Management Content to Increase Disaster Management Literacy, Journal of Disaster Research, Vol.12, No.1, pp.42-56, 2017.

### III-4 生活再建支援システムに関する教育・訓練システムの開発

田村 圭子 (新潟大学)

#### 1. 研究の目的

過去の災害知見をもとにした生活再建支援トレーニングプログラムの開発と検証を実施します。防災リテラシーを向上させるためのトレーニングプログラムについて、特に、過去の災害知見・教訓をもとにした生活再建支援トレーニングプログラムについて、標準的な学習理論であるインストラクショナル・デザイン理論を用いながら提案・開発・検証等を行います。

#### 2. 年度別成果

##### 2.1 トレーニングプログラムの基盤構築 (H24 年度)

##### (1)過去の災害知見をもとにした生活再建支援トレーニングプログラムの開発と検証

初年度は過去の災害知見を基にして、トレーニングプログラムの基盤を構築しました(図 1)。防災リテラシーを向上させるためのトレーニングプログラムについて、特に、過去の災害知見・教訓をもとにした生活再建支援トレーニングプログラムについて、標準的な学習理論であるインストラクショナル・デザイン理論を用いながら提案・開発・検証等を実施しました。トレーニングプログラムの前提となる「生活再建支援を目的としたり災証明発給システム」に係わる業務について、行政や組織体での運用が円滑な促進の実現を目指して整備ガイドラインを構築しました。また、トレーニングプログラムの分析のために、生活再建支援を目的としたり災証明発給業務に係わる業務フローを体系的に解明しました。

##### (2)過去の災害知見をもとにした災害時の建物被害調査に関するトレーニングプログラムの研究開発

防災リテラシーを向上させるためのトレーニングプログラムについて、特に、生活再建につながる災害対応業務の核である建物被害調査について、東日本大震災など過去の災害知見・教訓をもとにして調査支援キットを活用したトレーニングプログラムについて、標準的な学習理論であるインストラクショナル・デザイン理論を用いながら、提案・開発等を行いました。

##### 2.2 オペレーションマニュアルの開発 (H25 年度)

生活再建支援システムにおける教育・訓練の実効性を高めるための業務フローの構造化に基づくオペレーショナルマニュアルについて開発・提案しました。



図 1 平成 24 年度研究成果  
トレーニングプログラムの基盤構築



図 2 平成 25 年度研究成果  
オペレーションマニュアルの開発

具体的には、1) H24 宇治市水害における実業務フローを対象としたインタビュー調査 (図 2)、2) 複合災害に対応できるトレーニングプログラムの

精緻化ツールの開発 3) 行政職員による応援体制の必要条件の明確化のための研究成果の防災リテラシーハブ内への統合を目指したプロトタイプの公開、を実施しました。

オペレーションマニュアルは、WBS(Work Breakdown Structure)作成手法を活用し、WBS によって業務を階層化しました。WBS で業務の全体像を把握すると、次の展開が図れます。例えば、それぞれの業務の時間目安を決めるとガントチャートとして業務の見える化を図ることができ、また、個々の業務を遂行するために必要な要素を書き足していくことで、業務の具体化を図ることができます。更に、業務を行う担当者を抽出することで、業務の対応時期に応じた組織図を作成することができます。加えて、業務の流れに基づき情報共有・状況把握を行う視点から整理し、各種様式を検討することも可能となります。非常時において発生する業務は、定まった期間に明確な成果が求められる業務であり、プロジェクト業務と捉えることができます。プロジェクト業務を管理するための「知識や技術」が役立ちます。この考え方にに基づき、WBS を作成することで、①業務の全体像を把握することができます、②業務の進め方を把握することができます、③業務の行程を管理することができます。



図3 平成25年 伊豆大島土砂災害におけるオペレーションマニュアルの実装

平成25年度は、特に伊豆大島で大規模な土砂災害が発生し、オペレーションマニュアルの実装が実現しました。東京都職員、区市町村職員が研究成果であるWBSを活用し、住家被害認定調査、調査結果の読み込み、罹災証明書の発行、生活再建支援相談窓口業務に取り組みました(図3)。

WBSによるオペレーショナルマニュアルが整備されていたことで、①都庁による事前研修、②現地における研修、において、標準的な業務手順を応援職員に教えることができました、②応援職員が同じ業務手順を共有していることで、現場では統一的な業務手順で業務が実現され、混乱がありませんでした、③生活再建支援業務の一連の流れ(住家被害認定調査、調査結果の登録・精査、罹災証明書の発行、生活再建相談窓口業務)を実装できました、等の効果がありました。

この実装の結果をふまえ、年度の後半では、WBSのさらなる精査を実施し、オペレーショナルマニュアルを充実させました。

### 2.3 マネジメントマニュアルの開発(H26年度)

東京都と協働で区市町村職員に対し、研修プログラムの実証のために、生活再建支援業務に係るマネジメント研修をシリーズで実施しました。研修の中で、生活再建支援業務マネジメントマニュアルを構築するための時間を設け、学んだ研修内容をマネジメント業務に落とし込むための手法開発を実証しました。その成果を体系化・精査し「生活再建支援業務マネジメントマニュアル」として完成させました(図4)。

プロジェクトマネジメント活動が成功する条件の一つに、顧客が満足する状態で完了することが挙げられます。災害時に被災者が満足することはありえません。したがって、これは被災者の「納得度」ということで見れば、生活再建支援業務にも当てはまる見方となります。この「納得度」を形成するためには、サービスマネジメントの視点が必要になる。サービスの基本的特徴の一つには結果と過程の等価的重要性(過程が評価される)というものがあります。これは、サービスを受ける過程で、どのように扱われたかという住民の実感によるものです。単に業務としてとらえるのではなく、被災者からの要件にできるだけ応え、品質の高いサービスの計画・開発・提供・維持に必要なプロセスを構築するのです。サービスの計画を構築し、実際の業務を実施し、検証するためWBSに基づくマネジメントマニュアルを構築しました(図5)。

例えば、顧客納得を実現するために空間設計を行うためのWBS作成のポイントは、①顧客の安全性に配慮する、②業務フローに沿う、③人の滞留時間

と量に配慮する、④り災証明書 が今後どのように具体的な生活再建支援につながるかを見せる、ことであり、その方針に従って作成し、応援職員を含めた人員全体のマネジメントを念頭にマニュアル作成に取り組みました。



図4 平成26年度成果  
マネジメントマニュアルの実装

### WBS例(2014年研修終了時)



図5 平成26年度成果  
マネジメントマニュアルを構成する WBS 例

平成26年度には、平成26年8月豪雨が発生し、マネジメントマニュアルの福知山市における実装が実現しました(図6)。福知山市では、京都府職員、市町村職員を中心に多くの応援職員が業務を実施しました。外務応援が入ることで、業務マネジメントは重要度を増しました。また、日々入れ替わる応援職員の研修マネジメントも課題となりました。また、業務に携わる人員が増えたことで調査機材等の資機材の管理も課題となりました。

また、事務局による調査進捗マネジメントにおいては、各班の業務実施のスピードとそのデータ制度のマネジメントに時間コストを要しました。これらの課題をふまえ、マネジメントマニュアルの充実を



図6 平成26年度成果  
平成26年8月豪雨・福知山市における実装

図りました。

### 2.4 広域災害に対応した生活再建支援(H27年度)

自治体間を超えた総合的な被災者生活再建支援の実現のために、岩手県をフィールドとした「生活再建支援システムの共同運用ガイドラインの要件化定義(広域災害を含む)」に取り組みました(図7)。また、岩手県総合防災訓練をフィールドとして、県内広域避難者を視野に入れた研修・訓練のプログラム構築と実装に取り組みました。生活再建支援業務訓練には、研修を受けた市町村職員が業務実施側、市民、自主防災組織、消防団等の地域組織、知事、総務部長、保健福祉部長など岩手県幹部が「被災者役」として、訓練行いました(図8)。

広域災害に備え、自治体間を超える情報共有のための、総合的な被災者生活再建支援実現を目指して、生活再建支援システムの共同運用ガイドラインの要件化定義を実施しました。具体的には、ガイドラインとして整備すべき事項を①先進自治体で作成したガイドライン、その過程での課題等の収集、②マネジメントマニュアル(H26成果)を活用し、東京都区市町村職員による参画型要件定義の場を設定、成果の収集を行い、要件の整理と基礎固めを行いました。

- ・ 避難者より基本情報を聞き取り、登録することで「避難者としての個票」を起こすことができる。
- ・ また、「被災元の自治体」を記録することにより、当該の被災元自治体に対して、情報共有依頼をかけることができる。

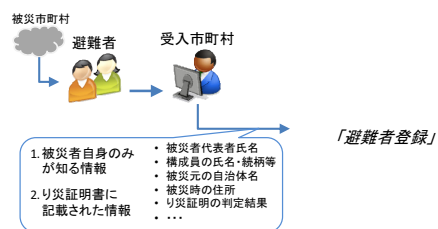


図7 広域避難者(受入被災者)を登録する



図8 岩手県総合防災訓練（生活再建支援訓練）のための事前研修（2015年7月7日）

## 2.5 e-learning コンテンツの開発（H28年度）

### (1)概要

「生活再建支援業務マニュアル・ガイドラン・研修プログラム」構築成果を活用し、Web型 e-learning 技術を援用し、教材開発手順の標準化を実施した。被害認定調査・調査結果のデータ化・罹災証明書の発行等の生活再建支援業務の一連の流れに沿って、e-learning シナリオ作成、音声化ソフトの活用、コンテンツのカテゴリー化（法律、業務、マネジメント、災害事例等）を実施した。東京都職員研修でこれらのコンテンツを実装し、評価を得ました。

### (2)e-learning 教材コンテンツの必要性

平成28年4月に発生した熊本地震において、東京都と協働し、生活再建支援業務における研究支援活動を実施しました。具体的には、熊本県に対し、複数市町村が被災している現状を受け「統一基準に基づく生活再建の実現」を目指すことを提案、熊本県から正式要請を得て「被災者台帳・生活再建支援システムの提供と技術支援」を行いました。その中の「全体マネジメント支援」とし、本研究の成果である研修プログラムの提供・実施を実現しました（図9）。研修には、被災自治体職員、県職員、国の職員を含む応援職員が受講しました。研修を計画した際には、災害の発生を受け、業務繁多な職員が、研修会場である県庁・周辺施設（いずれも熊本市内）にどのくらい集まるのか懸念を感じていましたが、いざ実施してみると、少ない研修でも80名、多い研修では200名近い職員が受講し、生活再建支援業務における研修ニーズの高いことが証明されました。

熊本地震における研修プログラムにおいては、本研究の開発・実装フィールドである東京都で開発した研修プログラムを提供・実施すると共に、過去の被



図9 生活再建支援システムに関する教育・訓練プログラムの提供（平成28年熊本地震）

災自治体で生活再建支援業務を実際に行った経験のある職員に登壇・ビデオ出演・スカイプを通じた遠隔地における講義を実施し、好評を得ました。

熊本地震においては、研修プログラムの提供と共にニーズに押され、受講できなかった職員に対して、現場の対応フェーズにあわせて、対応職員が必要となる情報を、ウェブを介して、研修コンテンツを共有・発信した。最高で90件/日のアクセスがあり、現場ニーズの高さがうかがえました（図10）。

一方で、研修をうけることができなかった職員からは、災害対応の合間に、研修会場に行かなくとも自席で受講できるコンテンツの開発へのニーズが多く聞かれました。本年度の本研究が目指した e-learning コンテンツ開発の必要性が実証された形となりました。

また、研修を受けた職員からも、研修内容の確認のために、繰り返し見ることのできるコンテンツがないかとの要望を聞きました。研修を受けた職員ですら、現場対応に追われる中で、研修資料を読み込むことは、災害対応現場ではハードルが高いことがわかりました。より短時間で効率的に学べるコンテンツの開発が必要であることが明らかになりました。さらに「熊本地震の被災特性」や「研修実施時



図 10 研修資料を、ウェブを介して共有・発信  
(平成 28 年熊本地震)



図 11 絵コンテ→編集台本の作成例  
(実装フィールド東京都研修における実際の作成例)

期における被災地の現状」をふまえ、熊本地震特有の情報・学習すべき内容が発生しました。それらを研修後の追加情報として、迅速に複数の自治体の職員に対して、広く効率的に伝える方策が必要となることが明確になりました。例えば、熊本地震特徴である住家における擁壁被害に係る調査方法、等である。e-learning コンテンツ開発においては、追加情報を簡便に作成するという観点を考慮することの重要性が明らかとなったのです。

### 2.5.1 Web 型 e-learning 技術を援用した教材開発手順の標準化

#### (1)教材開発の方針

平成 28 年熊本地震における経験をふまえ、まずは e-learning 教材の開発方針として、「①シンプルな手法を用いる」「②教材の内容についてもシンプルなものとする」をその方針としました。つまり、発災後、被災地の現状をふまえ、修正や追加、場合によっては新たに作成することを視野にいれ、「誰もが簡便に作成でき、作成・修正の手間が最低限となる」「金銭的成本についても最小限ですむ」ことを目標とした。また、広域な被災地においても広範囲に展開が可能となるよう Web 配信可能なものとなることを基本としました。

#### (2)教材開発のためのソフト選択

具体的には、e-learning コンテンツ教材における映像コンテンツ開発には、①テキストの音声化、②映像コンテンツの作成・編集、という技術的には2つのステップを用い、それぞれ、一般的に手に入りやすく、価格も比較的手ごろなものを採用しました。①テキストの音声化には「かんたん！ AITalk® 3」、②映像コンテンツの作成・編集には「Corel VideoStudio X9」を採用しています。

「かんたん！ AITalk 3」については、「ナレーションの一部修正、すぐに差替えたいけどそうそう手軽に差替えはできない」「コンテンツにナレーシ

ョンはつけたいけれど、ナレーター手配の手間やコストがかかる」「中々気軽にナレーションを入れられない」という問題意識のもとで、開発されています。本研究の主旨とも一致する。具体的には、「簡単誰でも操作(「AITalk® 声の職人」はパソコンにテキストを入力するだけで誰でも手軽に簡単に、高品質なナレーション用音声ファイルが作成できる)」「豊富な話者のラインナップ(オケージョンに合わせた話者選択が可能)」という特徴を持っており、本研究の目的に合致しました。「Corel VideoStudio X9」については、動画編集ソフトのスタンダードと評され、最も「とっつきやすい(技術がなくとも活用できる)」と位置付けられているものを選択しています。また、Web での配信について考慮しました。

#### (3)教材開発のための手続き

##### 1)絵コンテ→編集台本の作成

まずは、e-learning 教材の全体像を可視化するために「絵コンテ」を作成する。絵コンテは、映画、アニメ、テレビドラマ、CM、ミュージックビデオなどの映像作品の撮影前に用意されるイラストによる表であり、映像の設計図と言えるものである。ここで用いる「絵コンテ」には、スライド、写真、動画などを配置し、全体構成を議論するためのたたき台としました。そこにナレーション(自動音声読み上げ部分)原稿、サウンドの挿入部分を入力し、編集台本を完成させました(図 11)。

##### 2)編集台本に基づき e-learning 教材を開発

これまでの研究開発の中での経験に基づき、研修の 1 ユニットは 15 分とすることが効率的であることから、e-learning 教材についてもその目安で開発しました。

##### 3) e-learning 教材の視聴

自治体職員研修の中で、実際に e-learning 教材

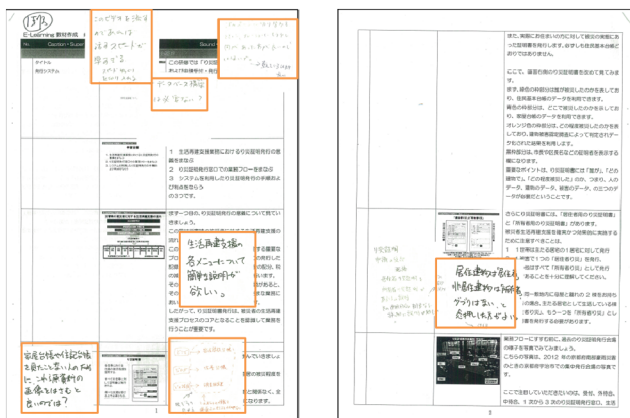


図 12 e-learning 教材の検討 (編集台本に改善案を記述) (実装フィールド東京都研修における実際の作業例)

の視聴の機会を設けました。

#### 4) e-learning 教材の評価・改善案の検討

自治体職員研修の中で、e-learning 教材の視聴の結果をふまえ、自治体職員に対し、教材の改善案を具体的な意見や修正案を付箋紙に書きだす形で、直接編集台本に書き込ませました (図 12)。

### 2.5.2 Web 型 e-learning 技術を援用した教材開発手順の標準化の実施

「平成 28 年度 東京都被災者生活再建支援業務マネジメント研修 (対象：区市町村職員)」を実装かつ実証の場として設定し、既述の「2.5.1 Web 型 e-learning 技術を援用した教材開発手順の標準化」で確立した手順に沿って実施した。第 1 回は被災者生活再建支援業務の全体像、第 7 回は「報告会」であり、実際には、第 2 回～第 6 回において、開発した 5 つの e-learning 教材について、実装・検証を実施した。第 2 回～第 6 回の研修内容は「講師による講義形式としての基礎研修や演習」「e-learning 教材の視聴と改善案の検討」の二部構成で実施しました (図 13)。

### 2.5.3 開発した e-learning 教材の評価

#### (1)教材への評価

本研修プログラムは、昨年度も検証を実施し、参加者の理解が進むよう内容向上を目指してきました。しかし、本年度、研修参加者が、e-learning 教材の評価を実施することで、さらに研修内容において、詳細な検討が進み、新たな意見が導出されました。特に生活再建支援業務における時系列的な流れに沿って、全体的に意見が出されています (図 14)。これは、e-learning 教材を視聴することで、職員が業務を「より現実感をもって」シミュレーション (仮想現実での体験) できた結果であると評価できます。



図 13 平成 28 年度 東京都生活再建支援業務研修の第 2 回概要

プロセス群	カテゴリ	代表的な意見
立ち上げ期	A-1	被災証明発行の様子が分かる写真を提示しながら、非常に重要な調査であることを最初に説明してはどうか
	A-2	初動時の体制図や活動の様子が分かる写真・イラストを提示するとイメージしやすい
	A-3	被害状況を把握するための調査の様子が分かる写真・イラストを提示し、後々の計画策定につながることを説明してはどうか
計画策定期	B-1	災害規模に応じた方針決定が必要であることを説明に加え、決定プロセスがイメージできる映像も追加してはどうか
	B-2	システムを活用しながら調査件数を決定していくプロセスを写真・イラストで提示するとイメージしやすい
	B-3	人的資源は、計画通りに参集できなかった場合を想定しておくことや受け入れ体制の留意点を追加してはどうか
	B-4	物的資源の確保について、調査資機材に加えバックオフィスに必要な資機材の確保も重要であることを説明すべき
	B-5	調査実施環境の整備について、実例写真や参考例を写真・図表で提示するとイメージしやすい
	B-6	地区別には、大きな地図を見ながら調査地区や被害の大きい地区を確認していく様子を動画・写真で示せばよい
	B-7	事務局が事業処理部門 (調査用) の後方支援として機能していることを伝えたい
	B-8	(時間切れで検討できず)
実施期	C-1	広報するための様式や方法をあらかじめ考えておくことが必要であることを示した方がよい
	C-2	問い合わせ対応は写真以外に事務局の体制と具体的な対応事項、スケジュール、作業スペースも示した方がよい
	C-3	研修の実施について、重要性を説明した後に具体的な実施内容 (研修プログラム) や研修事例を紹介してもよい
	C-4	調査の実施は各項目 (情報伝達・インタビュー、現地調査、結果整理、報告など) を丁寧に説明してはどうか
監視・コントロール期	D-1	調査票を精査している写真・イラスト・動画を見せ、手順をフローチャートで示してはどうか
	D-2	調査の進捗管理は手順を写真・イラストで示し、地図上に徐々に調査件数が増加していく様子を見せてはどうか
	D-3	調査結果の一覧表を示し、関連部署に報告している様子を写真・イラストで示すことができるとイメージしやすい
	D-4	情報共有ミーティングにおける主な協議事項を明示する。Q&Aを作成する様子を写真・イラストで示してもよい
	その他	事務局の 1 日の活動の流れを写真・イラスト・動画で示すことができると分かりやすい
	最終期	E-1, 2

図 14 e-learning 教材の評価 (生活言再建支援業務プロジェクトのフェーズに沿った改善意見)

#### (2) e-learning 教材への評価

研修において、様々に意見がでましたが、要約すると以下の 6 点でした (図 15)。

### 2.5.4 e-learning 教材の改善と再評価の検証

「平成 28 年度 東京都被災者生活再建支援業務マネジメント研修 (対象：区市町村職員)」の第 7 回 (報告会) において、これまでの検証の中で職員が出た意見を精査し、「①シンプルな手法を用いる」「②教材の内容についてもシンプルなものとする」という教材開発の方針に沿って、再び e-learning 教材を開発し、参加者に視聴してもらい、評価を得ました。

<p>◆スピード</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>しゃべりが早い。早いピッチで情報を投げ込まれるのは難しい。             <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ 自動音声のピッチを研修の度に工夫。研修に最適なピッチとした</li> <li>⇒ ページの切り替りのタイミングなどに配慮した。</li> </ul> </li> <li>声を感じとることに集中してしまう。目がついていない。</li> </ul> <p>◆ビデオ活用のタイミング</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>全体像がみえにくい。最初に研修や説明がないとイメージがわかず、理解しにくい。</li> <li>どういった場面でビデオを使うのかによって作り方が変わる</li> </ul> <p>◆ビジュアル化</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>動きが激しい。絵やイラストが激しい。</li> <li>ドorama 仕立てだと興味を引く (自動車講習会や税の取り立てビデオのイメージ)。</li> <li>⇒ 簡便に、費用を下げずという開発方針に反するため、対応していない</li> </ul>	<p>◆テキストとのバランス</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>テキストが手元で欲しい             <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ 投影画面とテキストをまたいだ資料を用意した。</li> </ul> </li> <li>テキストと映像情報でなくてもよいのでは</li> </ul> <p>◆時間</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>時間はもともと長い (初心者向けではなくプロ向けとして作成してもよい)             <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ 講師が話すのと同時の映像とした。</li> </ul> </li> </ul> <p>◆見る場所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>自分ひとりでのみ見るのはつらい</li> <li>皆で見る場所が必要</li> <li>スマホで見られるようにしてもよい</li> </ul>
--	--

図 15 e-learning 教材の評価 (生活言再建支援業務における e-learning 教材そのものへの改善意見)

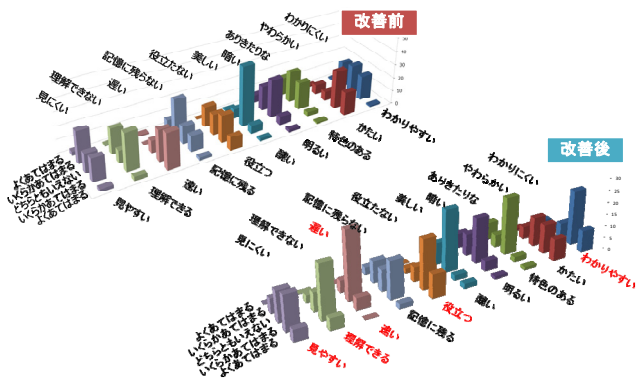


図 16 e-learning 教材の評価 1 (生活再建支援業務における e-learning 教材そのものへの改善意見)

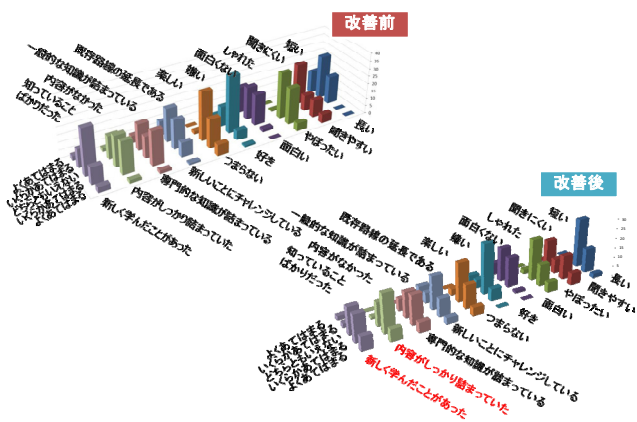


図 17 e-learning 教材の評価 2 (生活再建支援業務における e-learning 教材そのものへの改善意見)

評価結果については「速い(速くもなく遅くもなくなった)」「理解できる」「見やすい」「内容がしっかり詰まっている」「新しく学んだことがあった」について、評価が向上した。一方「面白い」「面白くない」の評価では、ほとんど変化がありませんでした(図 16、17)。

### 3. まとめと今後に向けて

#### 3.1 まとめ

過去の災害知見をもとにした生活再建支援トレーニングプログラムの開発と検証を実施しました。防災リテラシーを向上させるためのトレーニングプログラムについて、特に、過去の災害知見・教訓をもとにした生活再建支援トレーニングプログラムについて、標準的な学習理論であるインストラクショナル・デザイン理論を用いながら提案・開発・検証等を行いました。提案・開発・検証のフィールドは、研究期間を通じて、東京都における区市町村職員向けの生活再建支援業務研修としました。

また、研究期間に発生した災害において、研究成果を実装し、その中で明らかになったことを成果に取り込み、現場で役に立つ研修プログラム構築を目指しました。本研究の成果は、各災害現場において、自治体職員の業務実施に活用されました。

#### 3.2 今後に向けて

今後は、平時においては、本研究成果による犬種プログラムや e-learning 教材を活用し、より受講者のすそ野を広げることに取り組みます。より広範に受講者を増やすことで、平時より生活再建支援業務について、理解し取り組む行政職員を増やします。

#### 参考文献

- 1) 田村 圭子・井ノ口 宗成・濱本 両太・菊地 真司・林 春男, 被災者生活再建支援業務の要件同定を目指した「岩手県被災者台帳」における 7 市町村の業務データ実態解析, 地域安全学会論文集, No.22, pp.67-77, 2014.11. 2004
- 2) Munenari INOBUCHI, Keiko TAMURA, Haruo HAYASHI, Development of "WBS Manager" to Design Disaster Response Plan, 電子情報通信学会, IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E98-A, No.08, 1674-1675, 2015.8.



### III-5 シェイクアウト訓練の普及と期待される効果

澤野次郎(災害救援ボランティア推進委員会)

#### 1. 研究の目的

この研究は、本プロジェクトの Mission にもとづき、一般市民向けの地震災害対応能力、とりわけ自助力向上のためのトレーニング手法を開発することを目的とし、具体的にはシェイクアウト訓練(以下、本稿では **ShakeOut** ではなくカタカナにて表記する)の日本での普及と期待される効果について報告します。

#### 2. シェイクアウト訓練とは

##### 2.1 シェイクアウト訓練の始まり

- (1) シェイクアウト訓練とは、2008 年より米国南カリフォルニア地震センターの研究者等が開発し、カリフォルニア州で始まった地震防災訓練の名称です。
- (2) シェイクアウトは造語であり、その意味は「地震の揺れから身を守ること」であり、具体的には安全行動の 1-2-3、Drop, Cover, Hold on(まず低く、頭を守り、動かない)を表しています(図 1)。



図 1 安全行動の 1-2-3 のイラスト

- (3) 訓練の具体的な内容は、科学的根拠にもとづく地震シナリオにもとづき、主催者が訓練日時を決定しインターネット等で事前登録と学習をよびかけ、訓練日時の合図(時報等)に呼応していっせいに安全行動 1-2-3 を行うことです。

米国では毎年 10 月第 3 木曜日の月日と同じ時刻、2016 年の場合は、10 月 20 日 10 時 20 分に実施することが決められていて、2016 年(以下暦年を意味する)は、全米で 2120 万人が参加しています。

##### 2.2 日本の始まりと普及の到達点

- (1) 日本におけるシェイクアウトは、米国シェイクアウト本部事務局の了解のもとに、林春男氏が 2011 年 10 月によびかけ、推進母体である「効果的な防災訓練と防災啓発提唱会議」が 2012 年 1 月に結成されたことにより始まります。
- (2) 安全行動 1-2-3 は、日本においては小中学校の地

震防災訓練としてすでに普及し、定着している安全行動であり、米国のシェイクアウトでは、この行動を参考にしたと考えられます。

- (3) 日本におけるシェイクアウトは、地方自治体等の防災訓練として防災の日、津波防災の日、防災とボランティアの日、東日本大震災の日等の災害に関係する日を中心に実施されていて、2012 年の開始から年々参加者を増やし、2016 年には日本事務局が認定基準にもとづき公式認定している訓練参加者数は約 650 万人に到達しています(図 2)。

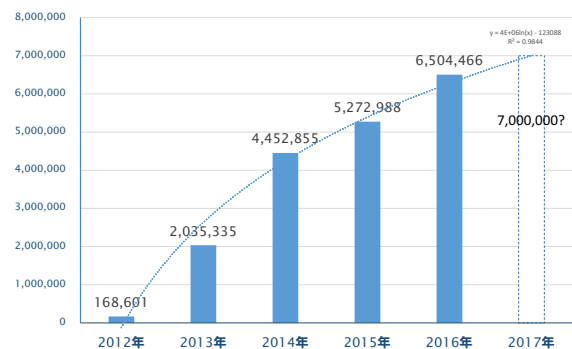


図 2 シェイクアウト訓練の日本参加者数推移

- (4) 実施団体としては都道府県では、北海道、神奈川県、富山県、石川県、愛知県、岐阜県、奈良県、広島県、香川県、愛媛県、熊本県、宮崎県、市町村では盛岡市、水戸市、千葉市、京都市、神戸市等が参加しています。)

なお、日本の訓練ではシェイクアウト訓練をスタート訓練とし、その後に様々訓練を追加して行うことをプラスワン訓練として推奨しています。

##### 2.3 シェイクアウト訓練の普及の経緯

- (1) 日本最初のシェイクアウト訓練は 2012 年 3 月 9 日に東京・千代田区で実施され、約 2 万 5 千人が参加し、大きな注目を集めました。政府の総合防災訓練大綱で地方公共団体等における地震災害等対応訓練の実施事項例に、2012 年度より掲載されることになりました。
- (2) 都道府県最初のシェイクアウト訓練は、2012 年 8 月 30 日に北海道において実施されました。
- (3) 参加者数の大幅増加の契機となったのは、2013 年より人口 900 万人の神奈川県が参加したことです。

2016年でみると参加者約160万人は全体の4分の1を占めています。

- (4) 訓練の質を高めるとい点では神奈川県座間市でのボランティア団体との協働事業方式があり、年間計画のロードマップにもとづきキックオフで講演会等を行い、昼間人口約10万人の過半数にあたる53,115人(2017)が参加する実績を築いています。
- (5) 阪神・淡路大震災20年の2015年1月15日に神戸市においても訓練が実施され、人気アイドルグループAKB48のユニットもボランティアで訓練に参加したことにより市内はもとより、全国的にも大きな話題となりました。
- (6) 2015年3月14日の第3回国連世界防災会議パブリックフォーラム「レジリエントな社会構築と防災教育・地域防災力の向上を目指して」で、米国本部よりマーク・ベンセン事務局長を招いて、シェイクアウト訓練の説明と日本における報告を行いました(図3)。



図3 国連世界防災会議防災教育交流国際フォーラム案内

- (7) 2016年11月4日の内閣府(防災担当)、消防庁、気象庁の緊急地震速報訓練においては、政府との連携も実現し、緊急地震速報シェイクアウトを実施しました。

### 3. シェイクアウト訓練に期待される効果

#### 3.1 地震災害における負傷者減少

- (1) 東京都の首都直下地震の被害想定では、地震の揺れによる最大の被害ケースでは死者数は約5,600人で、負傷者数は約129,900人です。地震の揺れによる被害において負傷者対策、負傷者をいかに減らすかの対策が必要です。負傷者を減らすためには建物の耐震化、家具の固定とともに、地震の揺れから身を守るための安全行動の徹底も大切です。<sup>2)</sup>
- (2) 気象庁調査(2012)によれば、緊急地震速報がなった時に予めとる行動を決めている人は12.5%と少数に止まっています。実際の時にも緊急地震速報を見聞きした経験がある人でも何の行動もとれなかった人が28.4%となっています。<sup>3)</sup>

- (3) 地震災害は地震の揺れによる災害であり、地震発生時に揺れから身を守ることは自助の基本です。シェイクアウト訓練は、このことを多くの人に自覚させ、安全行動を取ることを習慣化させることで負傷者を減らす効果が期待されています。

#### 3.2 少子高齢化に対応した防災訓練の創出

- (1) 防災白書平成28年版では、「少子高齢化時代における防災」が特集されています。このなかで防災に関心がある人が防災に取り組まない理由として、「時間がない」「コストがかかる」「機会がない」「情報がない」が多くの理由と分析されていて、少子高齢化に対応するためには「一般の人々が身近なところでより簡単に防災に取り組めるようにすることが重要である」と指摘しています。<sup>4)</sup>
- (2) シェイクアウト訓練は、「時間がいらぬ」「コストがかからない」「機会は誰にでもある」「情報は身近な携帯端末等で得られる」ので、防災に関心がある人々が防災に取り組むきっかけを与えることができる今日的な防災訓練のあり方でもあります。
- (3) 事実、昼間人口数の過半数以上がシェイクアウト訓練に参加させることができた神奈川県座間市では、今まで防災に取り組まなかった層が取り組むようになる変化が生まれています。とりわけ市内のすべての幼稚園、保育園、小中学校、高校が訓練に参加することで、防災の次の担い手も育てていることは少子化時代にとっても大切な取り組みとなっています。<sup>5)</sup>

### 4. シェイクアウト訓練の今後の課題

シェイクアウト訓練では、事前教育や訓練報告等においてICTが利活用されること、SNSによる報告や参加が期待されましたが、取り組みが不十分です。また地域的にも、東日本大震災の被災地域での実施が少ない等の偏りがあります。今後、企業等の協力を含めて資金を確保しながら課題を克服し、数年後には参加者1千万人以上を達成し、少子高齢化に対応した今日的な防災訓練を発展させ、都市減災に貢献します。

#### 参考文献

- 1) シェイクアウト訓練ホームページ  
<<http://www.shakeout.jp>> (アクセス日:2017/2/15)
- 2) 東京都、首都直下地震等による東京の被害想定(平成24年4月18日)、2012
- 3) 気象庁、緊急地震速報の利活用状況調査結果(平成24年12月14日)、2012
- 4) 内閣府、防災白書平成28年版
- 5) 座間市・ざま災害ボランティアネットワーク、いっせい防災行動訓練2016実施報告書