

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

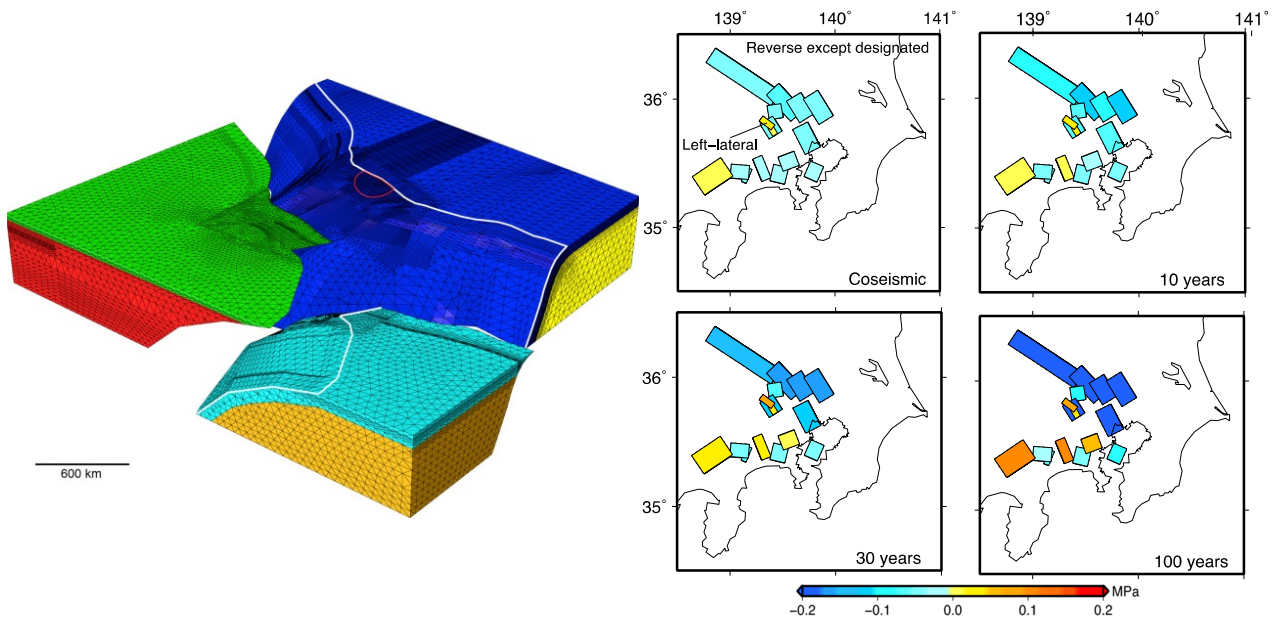
都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の
軽減化プロジェクト

総括成果報告書

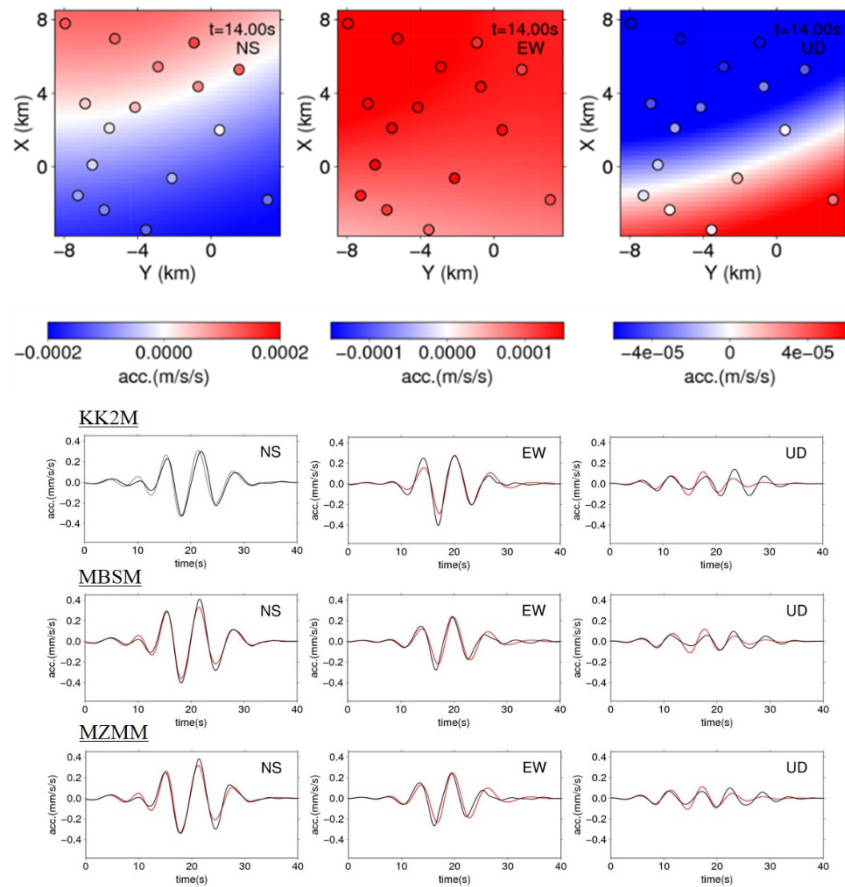
平成 29 年 3 月

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



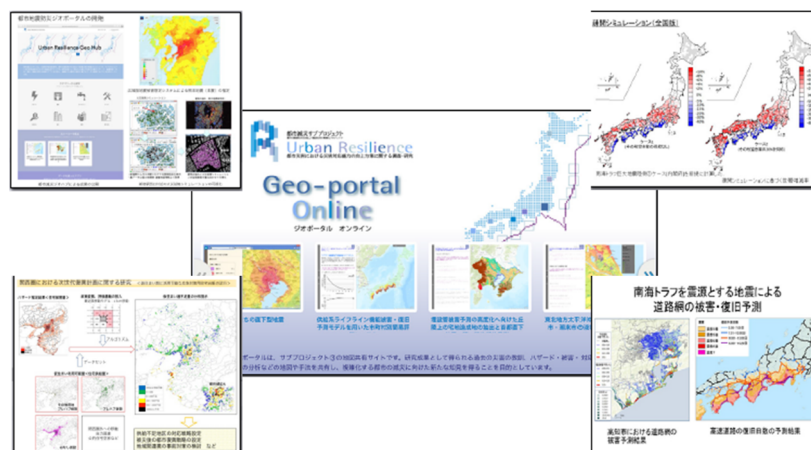
鉄筋コンクリート造建物の崩壊実験

Ⅲ 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

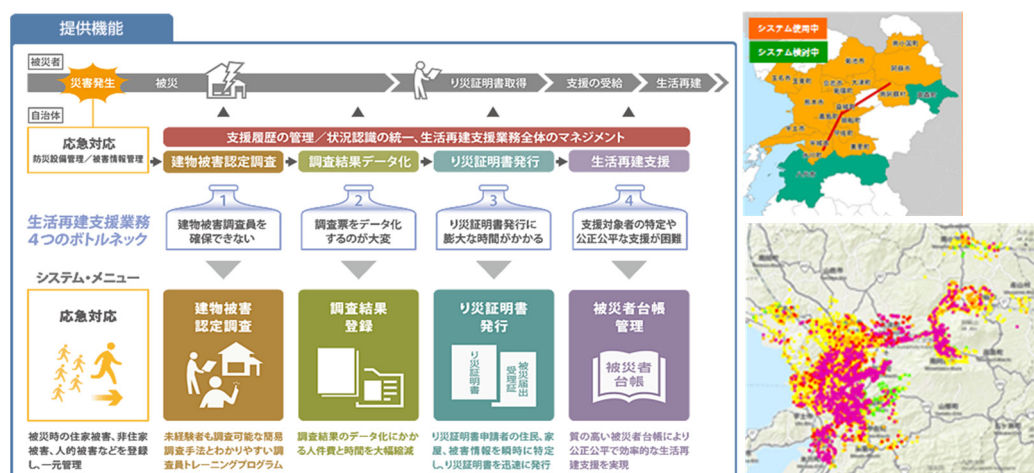


- ・ 研究参画者は自分の研究成果をインターネット上に開示する
- ・ 開示したことをDTPに投稿し、研究の概要についてタグ付けする

防災・減災に関する情報統合のための防災リテラシーハブの構築



地理空間情報を手がかりとする情報統合のための都市地震災害ジオポータルオンライン



被災者生活再建支援システムの高度化と2016年熊本地震被災19市町村での実装

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、ト部卓、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）

○都市機能の維持・回復のための調査・研究
運営委員会

委員長：中島正愛（京都大学）

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）

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

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

大阪大学：真田靖士

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

清水建設：白石理人

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

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

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：森平爽一郎

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。

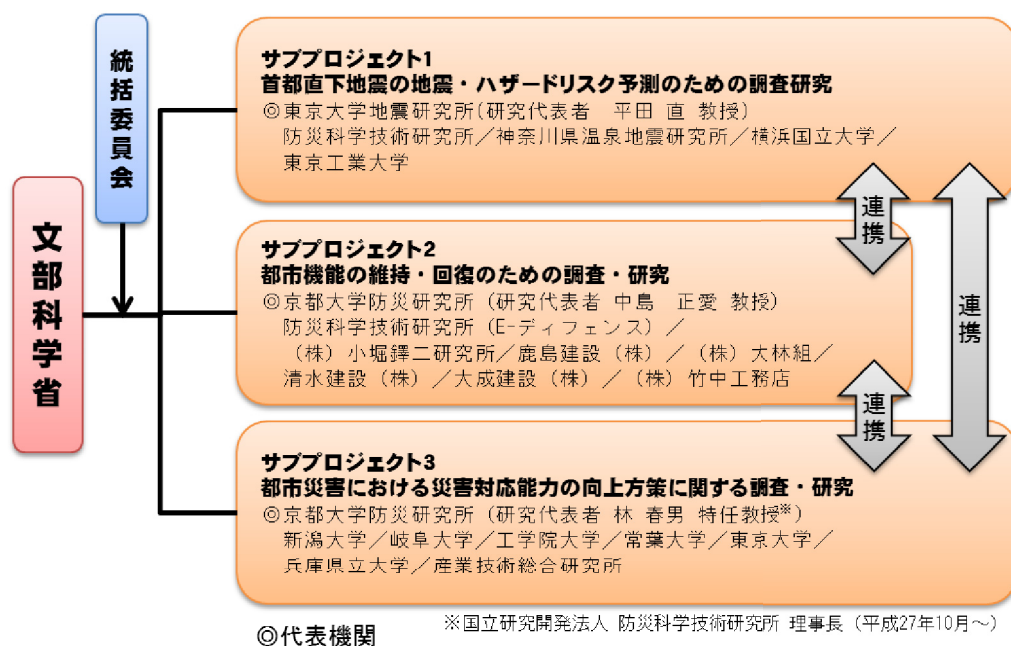
首都圏においては、広域の液状化、交通機関の麻痺による多数の帰宅困難者、電力やライフラインの途絶による事業活動の停止等、都市特有の課題が数多く顕在化しました。

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も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

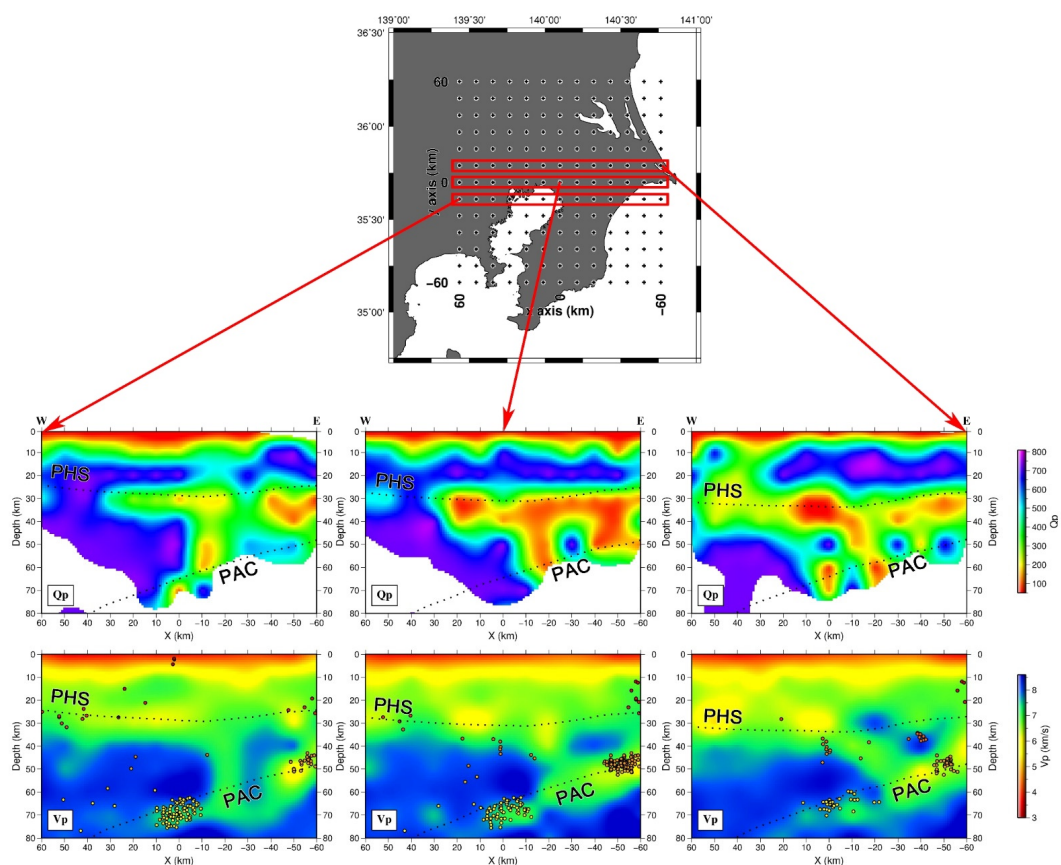


図1 首都圏を東西に横切る3つの断面のP波のQ値 (Qp) と速さ (Vp) 分布。

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、その後に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。

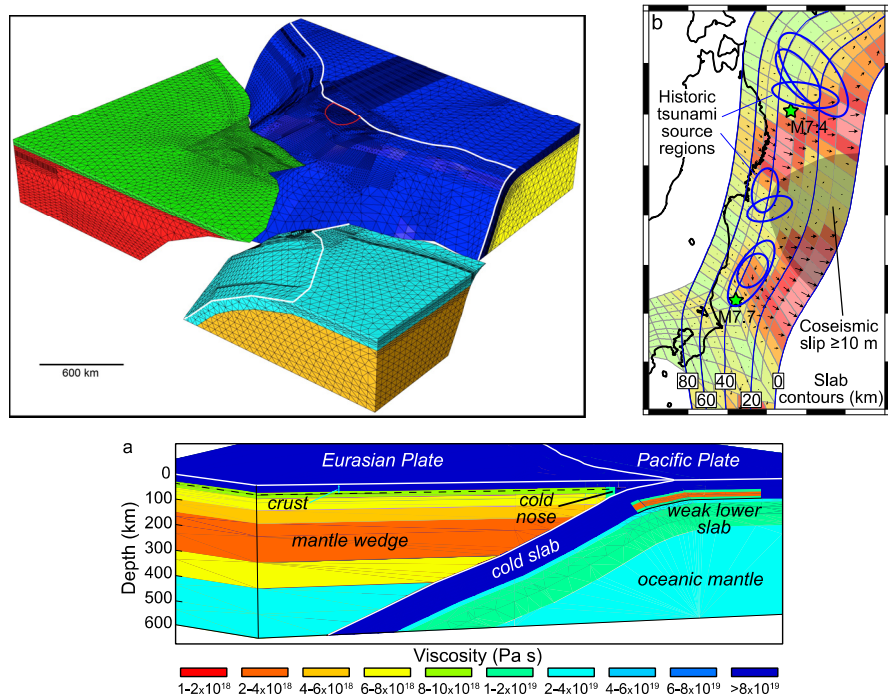


図2 2011年東北地方太平洋沖地震による変形を説明するためのモデル。

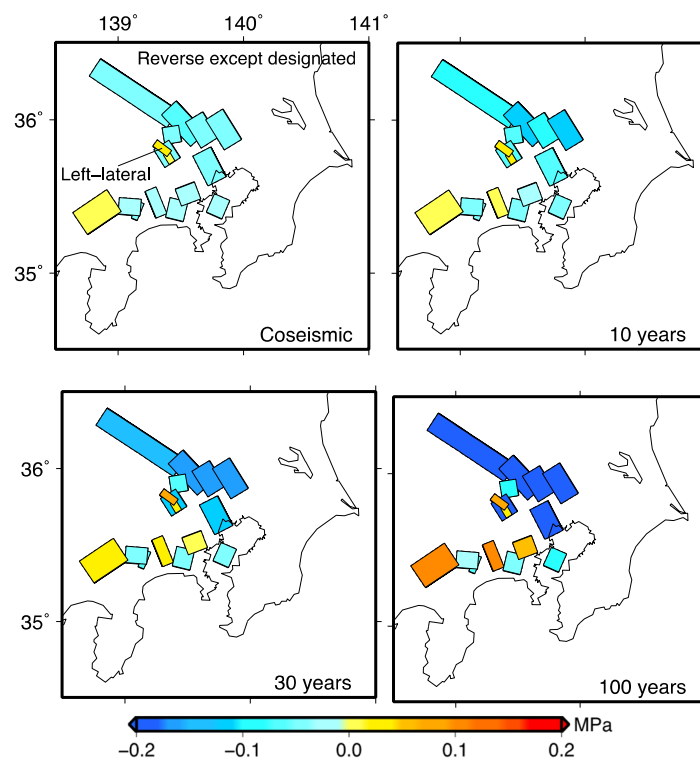


図3 東北沖地震の直後、10年後、30年後、100年後の関東地方の伏在断層上のクーロン応力。カラスケールの黄色ー赤色は断層運動を促進する応力、水色ー青色は断層運動を抑制する応力を示す。

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。

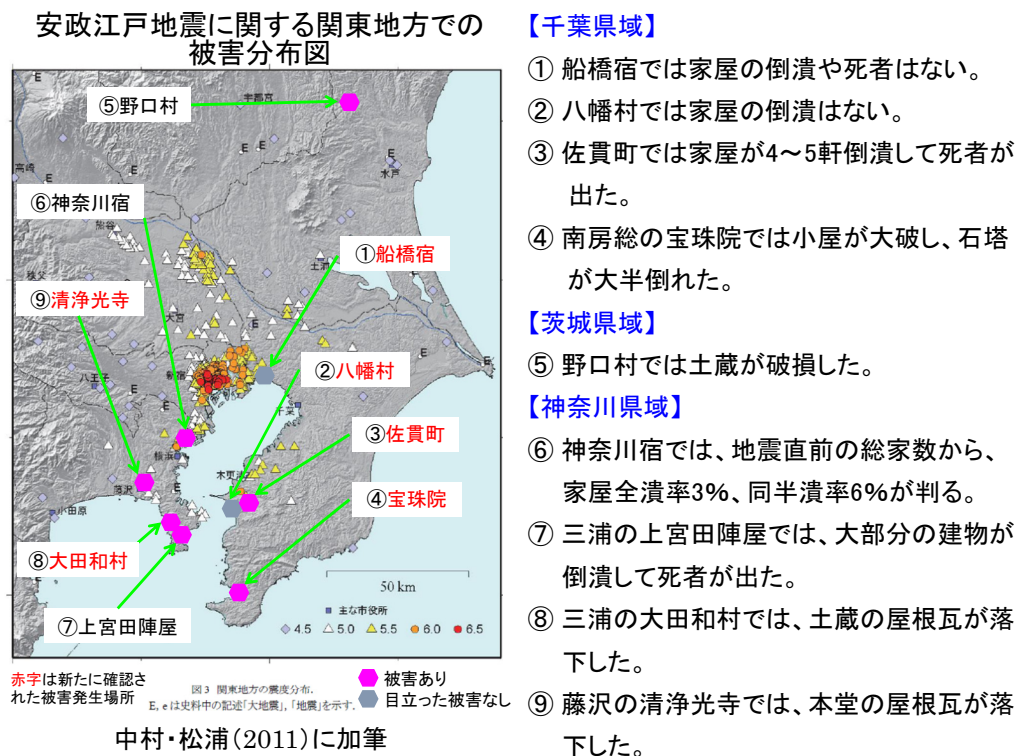


図4 本プロジェクトで明らかになった被害分布（村岸・佐竹, 2015; 村岸・他, 2016）。

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 100 km 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。揺れの広がりや大き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。

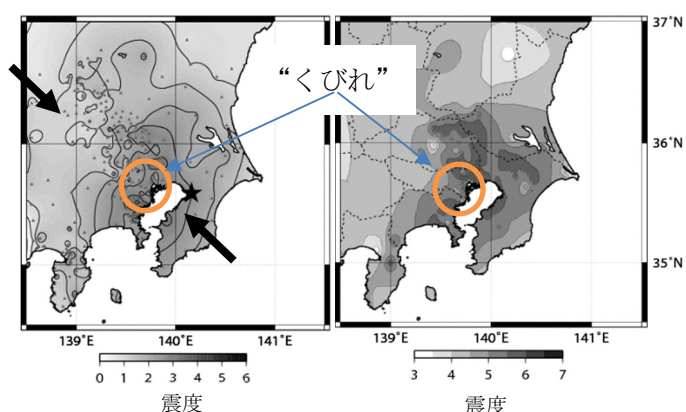
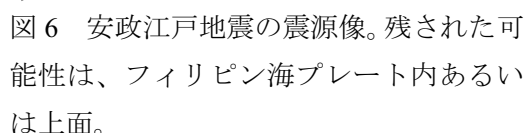


図 5 現在の地震と安政江戸地震の震度分布の比較。
(a) 1999 年 9 月 13 日の地震（深さ 76 km）。フィリピン海プレートと太平洋プレート境界付近の地震による震度分布。(b) 1855 年安政江戸地震の震度分布（中村・他、2007 に加筆）。円は“くびれ”を示す。

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 76 km）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。

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。



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により、予測精度の高度化が図れることを示しました。

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。

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、建造物を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）。

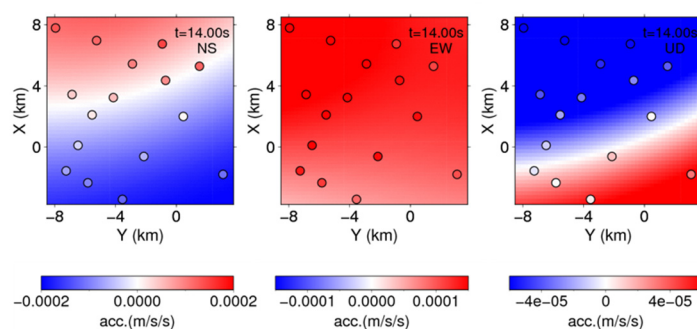


図 7 5-10 秒の長周期地震動のイメージング結果。推定された波動場に観測値（丸点）を重ねて示してあります。

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。

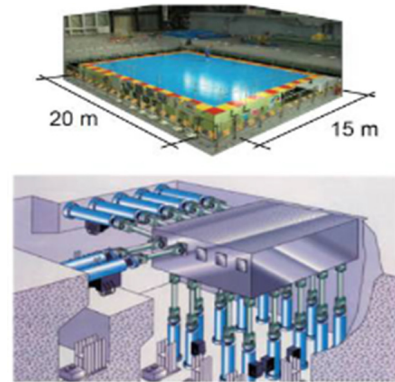


図1 Eーディフェンスの震動台

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。

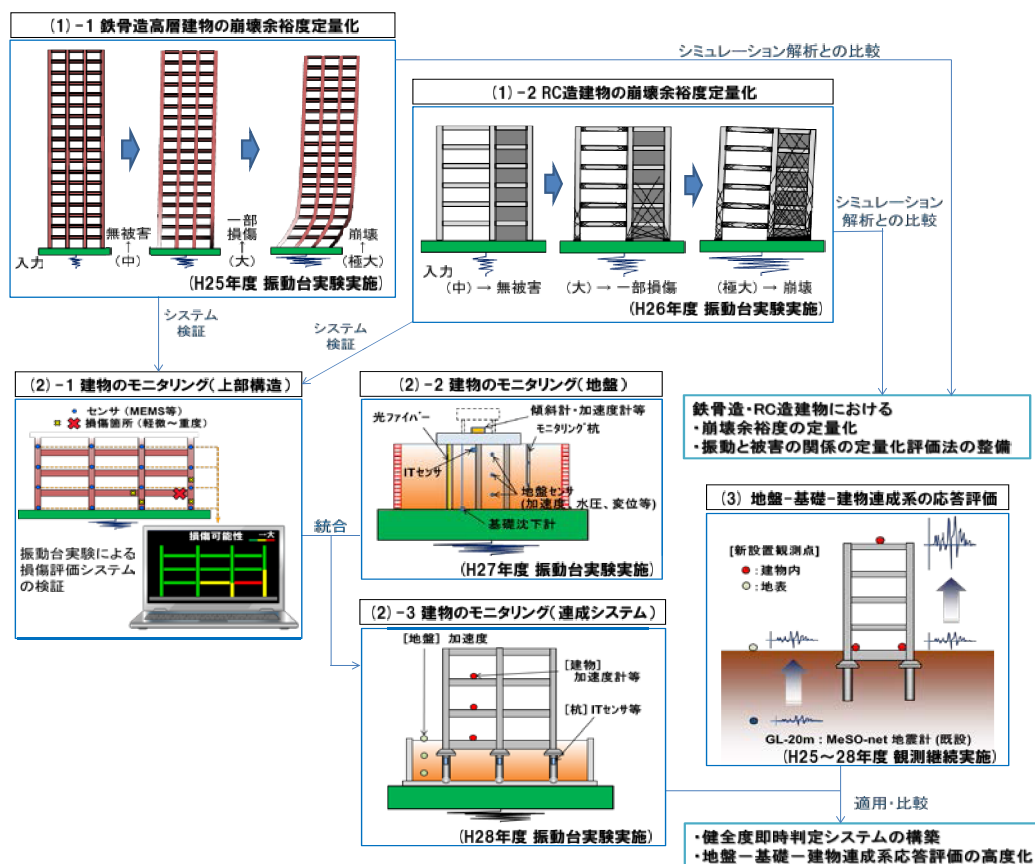


図2 研究項目の概要と相互の連携関係

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。

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行います。

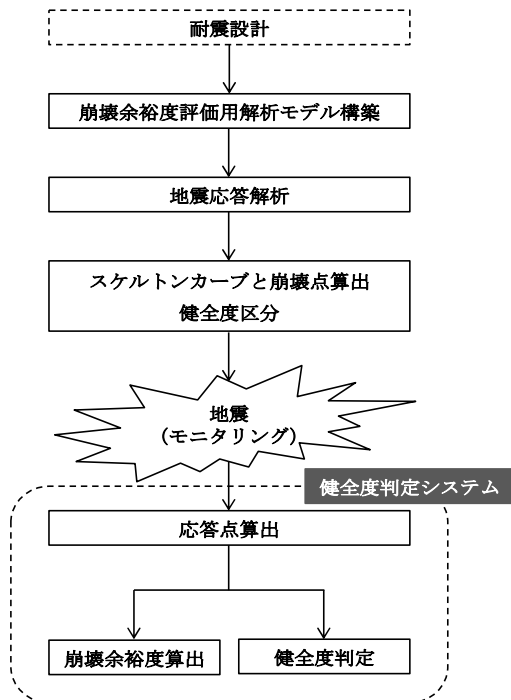


図5 評価フロー

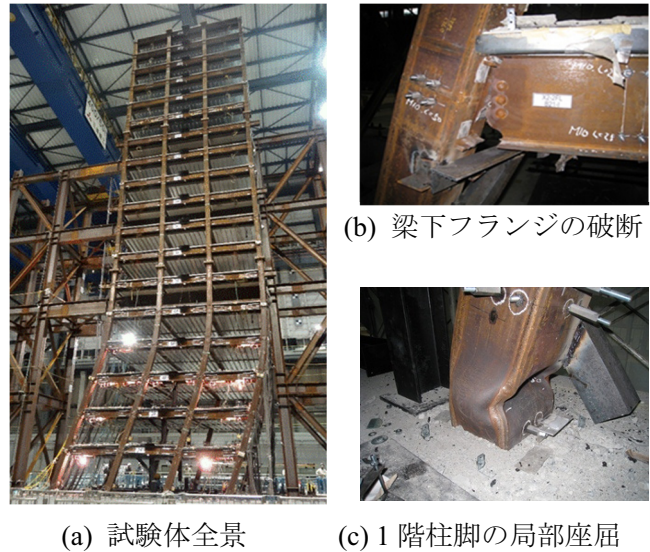


図3 E-ディフェンス振動台実験での崩壊挙動

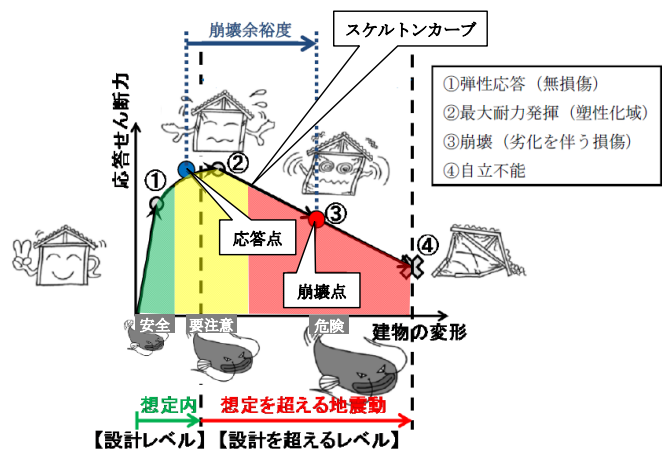


図4 崩壊余裕度評価と健全度判定

(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の余震に耐えうるか(崩壊余裕度)を判定する手法を提案しました。Eー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。

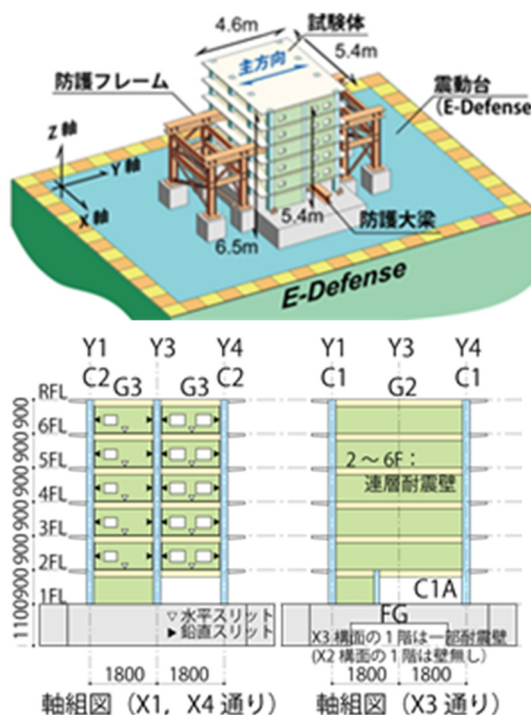


図6 Eーディフェンス実験と試験体

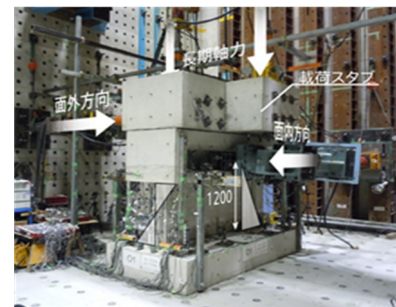
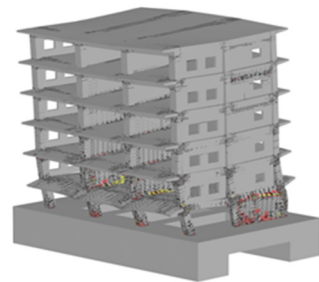


図7 崩壊時の試験体と FEM 解析および耐震壁に着目した実験

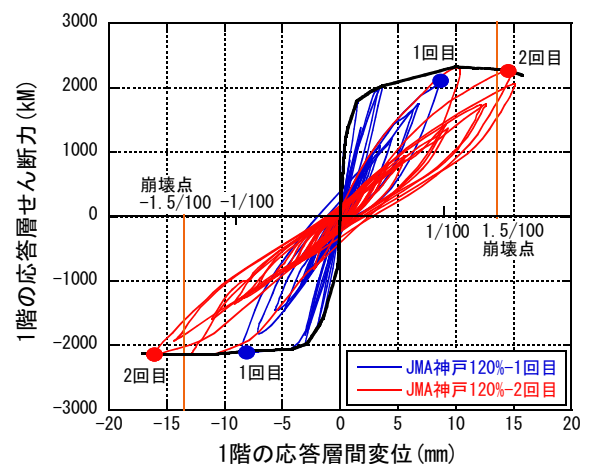


図8 崩壊地震動と建物の応答の例

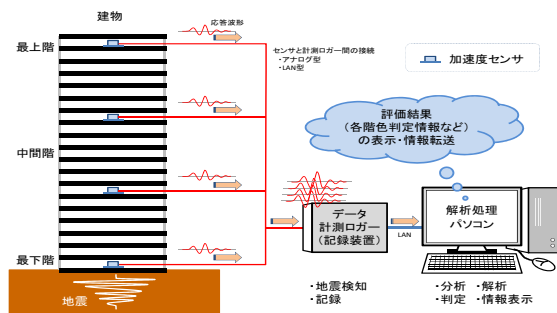
3-2. 建物の健全度モニタリング

(1) 建物のモニタリング（上部構造）

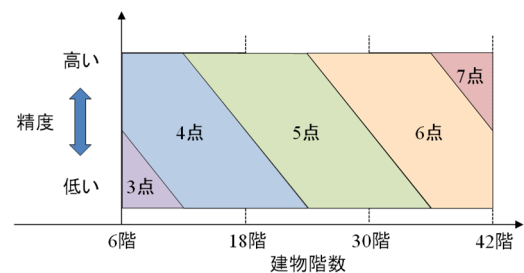
近年、建物管理者には、大地震直後に建物の健全度を適切に把握し、速やかな安全確保と継続使用判断等の意思決定が求められています。本研究では、これを支援する建物の健全度評価法を検討、提案しています。

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)。

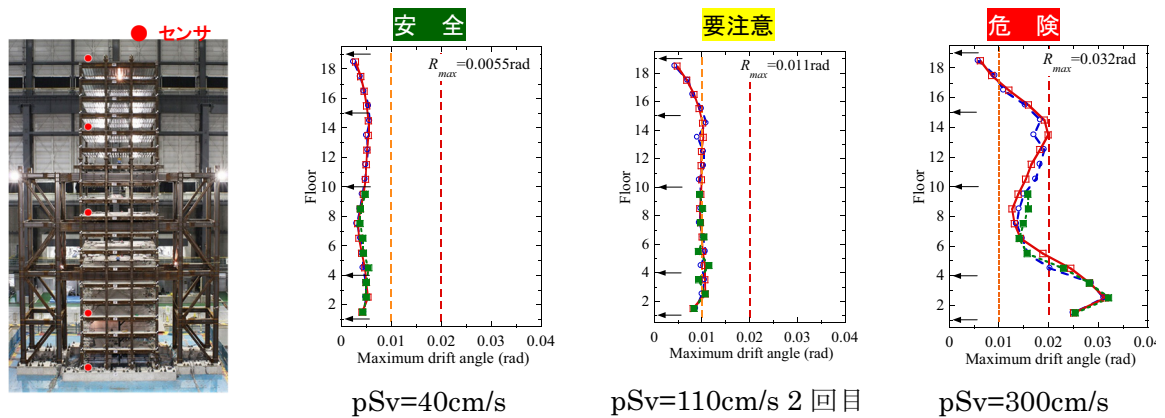


(a) 健全度評価システムの一般的構成



(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)
 → 推定値(1, 4, 10, 15, R階センサ利用)
 ● 変位計
 ○ 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。

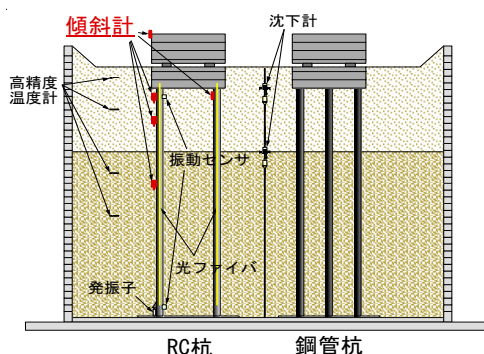


図 11 杭基礎のE-ディフェンス実験



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 ²	計測 震度	加速度 cm/s ²	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 ϵ_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。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。

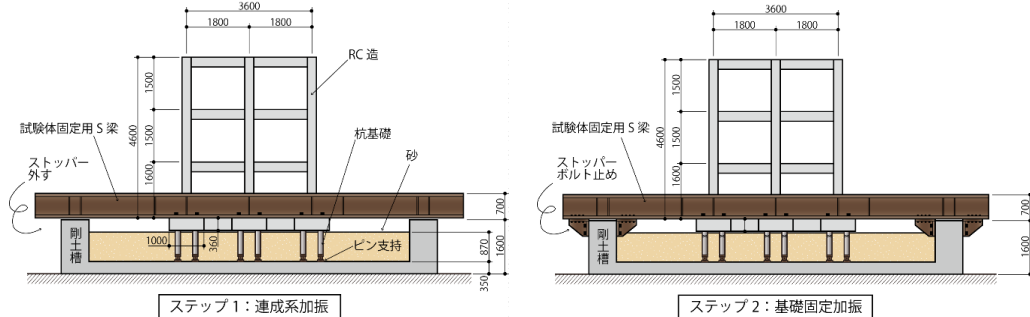


図 13 連成の E-ディフェンス実験

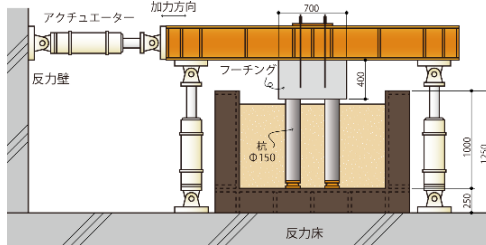


図 14 予備実験の試験体概要

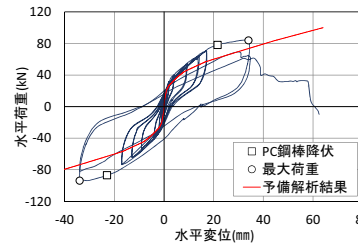


図 15 杭-地盤系の荷重-変形関係



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 ²)	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、圧縮歪
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

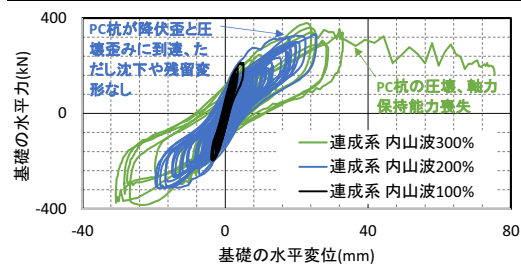


図 17 杭-地盤系の荷重-変形関係

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 ²)	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)

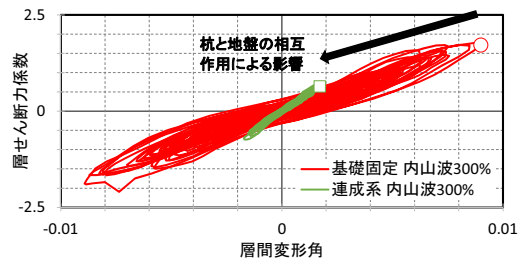


図 18 建物の層せん断力-層間変位関係

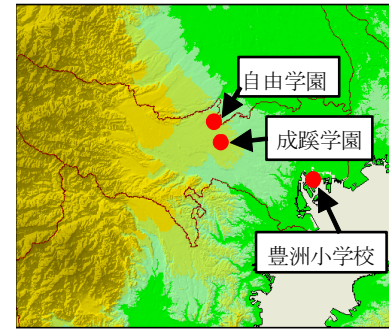
3-3. 地盤－基礎－建物系の応答評価

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）。

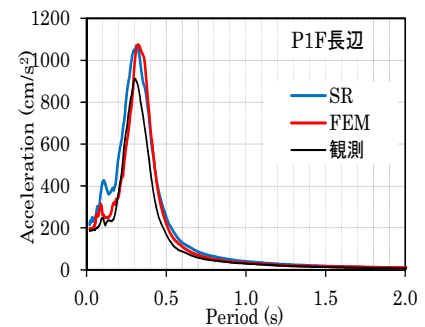
表 5 に想定する評価法適用先と適用範囲をまとめています。本評価手法は、設計時には一般的に時刻歴応答解析を求められない中小規模の建物を対象としており、三次元 FEM 等の高度数値解析技術を有しない技術者が地震後の建物健全度評価を実施する際に、地盤－基礎－建物連成系が評価できるよう、簡便なものとしています。そのため、本手法の精度は、高度な応答解析手法等と比べると、必ずしも高くありません。

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ロ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 α 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 α 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 α 算定式を示しています。



(a) 地震観測の実施

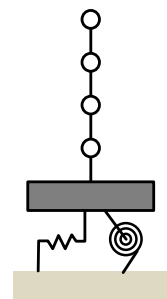


(b) 解析精度の確認

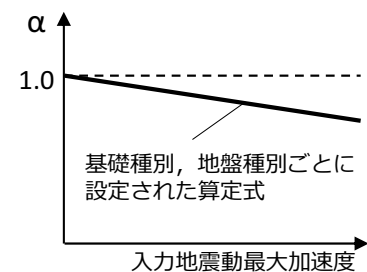
図 19 地震観測システムによる解析技術の検証

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) α 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

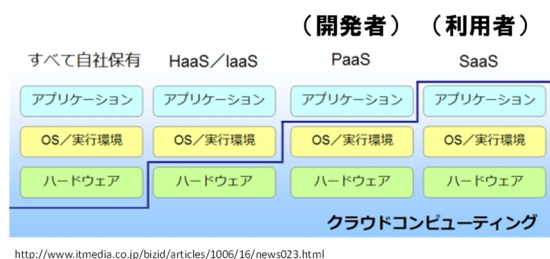


図2 クラウドコンピューティング

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ためのシステムの構築

→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

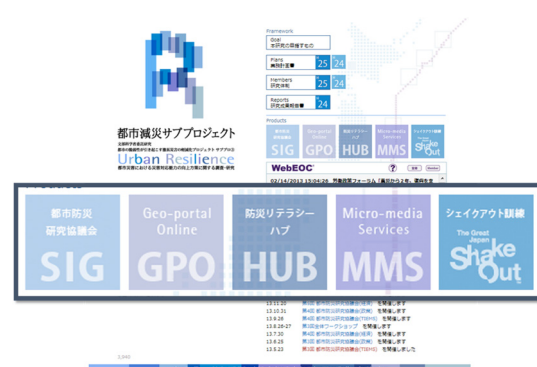


図3 本研究が目指すもの

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のもとついで、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. GP0 : 「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まって、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。

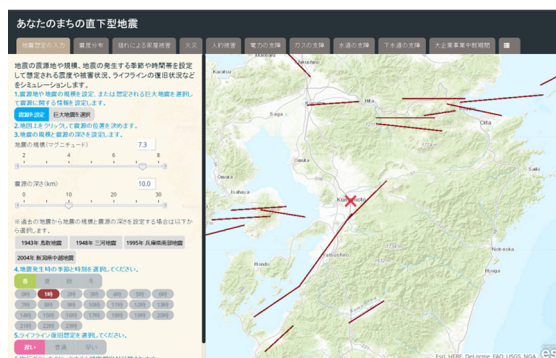
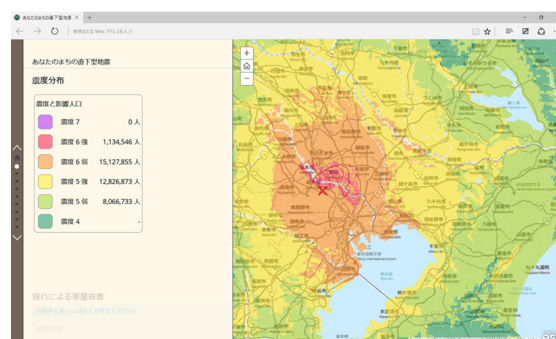
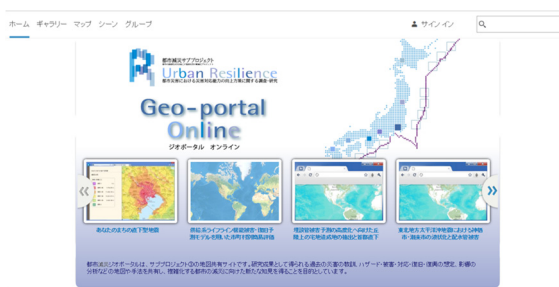


図 5 あなたのまちの直下型地震

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。

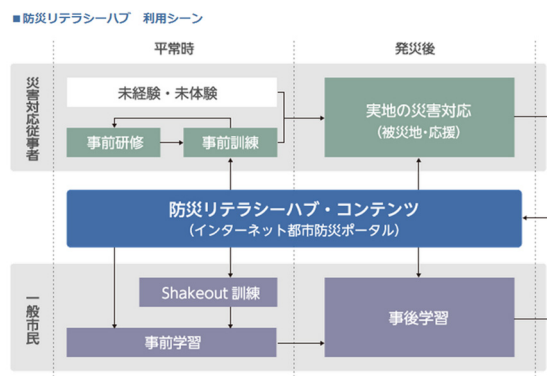


図 6 防災リテラシーハブの利用シーン



- ・ 研究参加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利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と、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。ならば老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

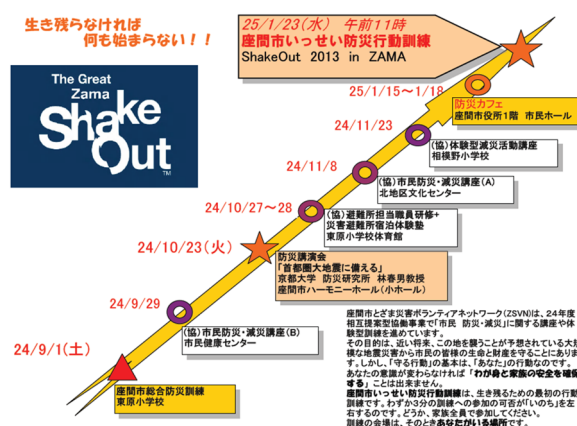


図10 座間市の取り組み

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

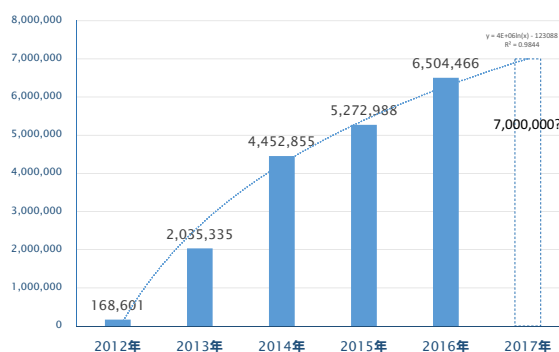


図 11 シェイクアウト参加者数の推移

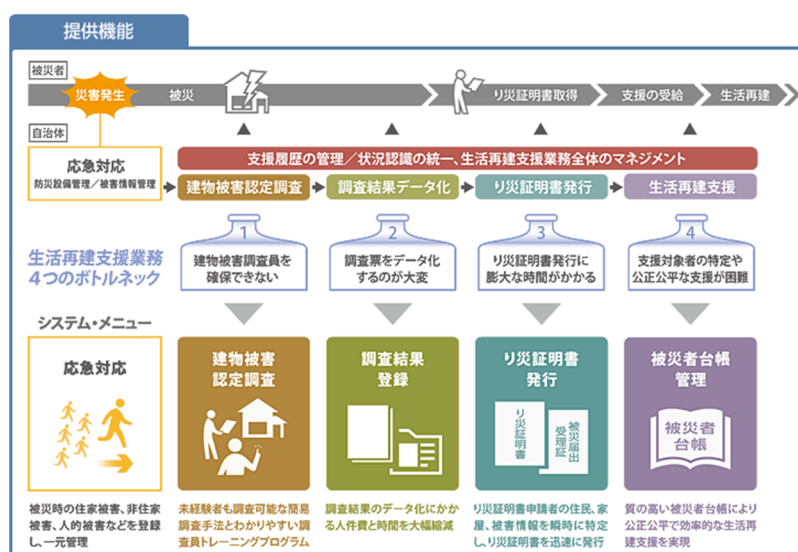


図 12 生活再建支援システム

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)。

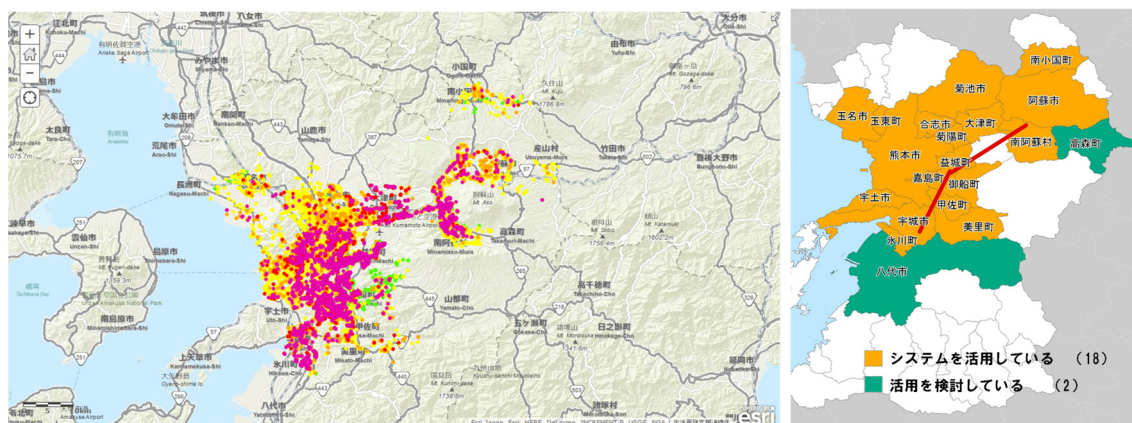


図 13 2016 年熊本地震での生活再建支援システムの利用実績

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から、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 20 m 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 20 m 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。