

特集 多様化する災害へのレジリエンス

Resilience to Diversifying Disasters

Summary

The Great Hanshin-Awaji Earthquake and the Tokyo subway sarin attack in 1995 marked a major turning point in Japan's approach to disaster prevention and crisis management. The 2011 Great East Japan Earthquake highlighted the importance of preparing for "unexpected disasters," leading to the formulation of the National Resilience Basic Plan in 2014. In recent years, various risks have become apparent, including the intensification of disasters due to climate change, COVID-19, and geopolitical risks.

Current society has entered an era of unprecedented uncertainty, characterized by difficult future predictions, rapid pace of change, and the simultaneous existence of multiple risks. Focusing on natural disasters, modern society is surrounded by natural disaster risks of unprecedented scale, including the Nankai Trough megathrust earthquake predicted to occur with high probability within the next few decades, the eruption of Mount Fuji which has not erupted for approximately 300 years since the Hōei eruption, and the intensification of natural disasters accompanying climate change. In addition to this, risks surrounding modern society are becoming increasingly diverse, including the manifestation of human-caused disaster risks such as cyber attacks and terrorism, and social structural vulnerabilities due to entering a super-aged society. In an era of uncertainty, not only "response based on prediction" but also resilient response capabilities that "can respond even when the unexpected occurs" are required. For this purpose, it is essential that government, local authorities, companies, local communities, and individuals fulfill their respective roles and responsibilities while mutually cooperating and collaborating in response to disasters. In particular, companies, which are the cornerstone of socioeconomic activities, are strongly required to formulate and implement BCP (Business Continuity Plan) that can minimize damage and continue and rapidly restore critical operations.

The mission of buildings is to support people's lives and society's future through space and structure, and the minimum functions that need to be secured are safety, functionality, and habitability. When companies continue business operations during disasters through BCP, the building functions required in the immediate response phase after a disaster are primarily safety and functionality, while habitability becomes necessary from the recovery phase onward. Therefore, this special issue introduces recent research and development related to building safety and functionality, which are the missions of buildings in an era requiring resilient response. Disaster risks are reported by broadly categorizing them into preliminary assessment technologies and countermeasure technologies. For preliminary assessment technologies, recent research cases targeting earthquakes, floods, volcanic eruptions, and crime are reported. For countermeasure technologies, recent research cases targeting earthquakes, floods, fires, and water outages are reported.

Keywords: resilience to disasters, Business Continuity Plan, disaster prediction technology,
disaster countermeasure technology

1 はじめに Introduction

吉澤 瞳博 Mutsuhiro Yoshizawa^{*1}

レジリエンス（resilience）とは復元力、回復力、弾力（しなやかさ）と訳される言葉で、困難や脅威に直面している状況に対して「うまく適応できる能力」「うまく適応していく過程」「適応した結果」を意味する。社会科学（心理的レジリエンスなど）や自然科学（気候レジリエンスなど）の分野で使われており、近年は危機管理の分野でも使われている。日本の防災や危機管理の考え方方に大きな転換をもたらした1995年から今年で30年になるが、この30年を振り返ると、日本社会は様々な災害に瀕し、その都度立ち上がってきた。

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、「大規模地震＝東海地震」というそれまでの想定を覆し、都市直下で発生する大地震の脅威が現実のものとなった。同年3月20日に発生した地下鉄サリン事件は、公共交通機関をターゲットとした化学兵器による無差別テロで、高度経済成長期以降の「平和で安全な日本」という自己認識を根底から覆した。1995年は自然災害（地震）と人為災害（化学テロ）がわずか2か月の間に発生し、「災害＝自然災害」という従来の認識から、多様なリスクへの備えが必要であることを日本社会に強く印象づけた。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、広範囲に建物被害や道路・鉄道・港湾・電力網の寸断が発生した。地震・津波・原子力災害が複合的に発生し、企業のサプライチェーンや事業継続にも深刻な影響を与えた。この地震は日本社会に「想定外の災害」にどう備えるかという課題を突きつけ、災害に対して強靭性のある社会の構築を加速させる契機となり、2014年の国土強靭化（ナショナル・レジリエンス）基本計画¹⁾の決定に至った。災害対応の分野でレジリエンスという言葉が広く使われるようになったのは、この頃からである。

気候変動による災害の激甚化も顕在化しており、2000年代に入ってから全国各地で頻発する大規模な浸水被害は、2017年以降毎年発生している。特に2018年西日本豪雨や2019年東日本台風（台風19号）では広範囲に河川氾濫が発生し、洪水を河川周辺で構造的にコントロールする従来の治水では対応しきれない被害が発生した。これを受けて、国土交通省は2020年以降、流域全体で水害対策を行う「流域治水」への政策転換²⁾を本格化している。また、2020年初頭からの新型コロナウイルス感染症によるパンデミック、2022年からのロシア・ウクライナ紛争で顕在化した地政学リスクなど、30年前には想定をしていなかったリスクが顕在化した。

現代社会は、将来の予測が困難で、変化のスピードが速く、複数のリスクが同時に存在するような社会状況となっており、これまでにない不確実性の時代に突入しているといえる。自然災害に目を向けると、今後数十年以内に高い確率で発生が予測されている南海トラフ巨大地震や、宝永噴火以来、約300年噴火のない富士山の噴火、さらには気候変動に伴う自然災害の激甚化など、近年経験していない規模の自然災害リスクに現代社会は取り囲まれている。これに加えて、サイバー攻撃やテロといった人為災害リスクの顕在化や、超高齢社会に突入したことによる社会構造の脆弱性など、現代社会を取り巻くリスクはますます多様化している。不確実性の時代においては、「予測に基づく対応」だけでなく、「想定外が起きたときも対応できる」レジリエントな対応力が求められている。そのためには、災害に対し、政府・自治体・企業・地域コミュニティ・個人が、それぞれの役割と責任を果たしながら、相互に連携・協働することが不可欠である。特に、社会経済活動の要である企業には、被害を最小限に抑え、重要業務を継続・迅速に復旧できるBCP（Business Continuity Plan：事業継続計画）の策定と実践が強く求められている³⁾。

建物の使命は人々の暮らしと社会の未来を空間と構造で支えることであり、そこで最低限確保が必要な機能は、安全性（Safety）、機能性（Functionality）と居住性（Habitability）である。BCPにより企業が災害時に事業継続をする場合に必要とされる建物の機能は、被災直後の応急段階に優先となる機能は安全性と機能性であり、居住性は復旧段階以降に必要となる。そこで、本特集では「多様化する災害へのレジリエンス」と題し、レジリエントな対応が求められる時代における建物の使命である建物の安全性、機能性に関する研究開発を紹介する。Table 1に本特集で取り上げたトピックスを示す。災害リスクに対して、事前評価技術と対策技術とに大別して報告する。2章の事前評価技術では地震、水害、火山噴火、犯罪を対象とし、3章の対策技術では地震、（間接的に）水害、火災、断水を対象とした。自然災害に対する研究開発は地震・火災に関するものの実績が多く、多様化している災害に対して着手段階や未対応のものもある。そのため、対策技術と事前評価とで対象となる災害が一対一に対応していないが、多様化する災害への対応に向けた最新の取組みの紹介としてご容赦頂きたい。またTable 1ではそれぞれの技術が対応する機能の分野に印を付けた。以降、災害リスク毎にそれぞれの技術について簡単に述べる。

*1 技術研究所 主席研究員 博士(工学) Senior Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

Table 1 本特集におけるトピックスとその主たる機能
Topics in this special feature and their primary functions

| 章 | 節 | タイトル | 災害事象 | 安全性 | 機能性 | 居住性 |
|--------|-----|------------------------------|-------|-----|-----|-----|
| 事前評価技術 | 2.1 | 確率論的地震ハザードマップによる複数拠点の立地評価 | 地震 | ○ | | |
| | 2.2 | 南海トラフ地震での続発地震を考慮した建物リスク評価 | 地震 | ○ | | |
| | 2.3 | 地震応答解析結果の深層学習による建物損傷評価 | 地震 | ○ | | |
| | 2.4 | 流域レジリエンスの向上に資する生態系サービス評価事例 | 水害 | | ○ | |
| | 2.5 | 富士山噴火による建築物の降灰リスクに関する評価 | 噴火 | ○ | ○ | |
| | 2.6 | 商業施設における犯罪不安感の評価 | 犯罪 | ○ | ○ | |
| 対策技術 | 3.1 | 鋼纖維補強による高強度RC柱の損傷抑制技術 | 地震 | ○ | | |
| | 3.2 | 長周期・長時間地震動に有効な耐疲労FMS合金制振ダンパー | 地震 | ○ | | |
| | 3.3 | 施設を継続利用しながら施工可能な天井落下防止対策 | 地震 | ○ | | |
| | 3.4 | 木質材料を用いた鉄骨造・RC造の耐震性能向上技術 | 地震・水害 | ○ | | ○ |
| | 3.5 | 出火場所に応じて進入禁止を表示する誘導灯 | 火災 | ○ | ○ | |
| | 3.6 | 災害時に利用可能な水洗トイレシステム | その他 | | ○ | ○ |

地震リスクに関しては、事前評価技術は1995年に総理府に設置された（現在は文部科学省に設置）政府の特別機関である地震調査研究推進本部⁴⁾が公開している情報を利活用した研究を報告し、対策技術は兵庫県南部地震以降に強化された建築物の耐震性能を担保する構造部材等の最近の技術を報告する。

地震調査研究推進本部は、地震に関する調査研究を政府として総合的・計画的に推進し、その成果を国民に還元し、地震防災対策の強化と被害の軽減に資することを目的として発足しており、その成果として全国強震観測網（K-NET, KiK-NET）や全国地震動予測地図（地震ハザードステーション J-SHIS）が公開されている。これらの公開データの利活用として建物の地震リスク評価手法を2.1節～2.2節に、建物の構造健全度の推定について2.3節に紹介する。

地震力に対する建物の耐震基準はこれまでに発生した大地震によって強化され続けており、1995年兵庫県南部地震の際に震源近傍で観測された貴重な記録を踏まえ、設計用入力地震動の告示波⁵⁾が2000年に設定された。3.1節では、設計用入力地震動の極めて稀に発生する地震動（レベル2地震動）が作用した場合でも、高層RC造建物を支える高強度RC柱に脆性的な爆破破壊せずに、レベル2地震動後も機能維持するレジリエンス性の高い鋼纖維補強コンクリート柱を紹介する。2003年十勝沖地震での石油タンクの被害で注目された長周期地震動は、2011年東北地方太平洋沖地震でも長周期・長時間継続地震動が観測された。そこで、告示波がカバーしていない長周期帯を考慮するために、2015年に基整促波⁶⁾が設定された。長周期・長時間地震動に対しても超高層建物の揺れを低減する対策として、3.2節では疲労耐久性に優れたFMS合金ダンパーを紹介する。また、2011年東北地方太平洋沖地震では体育館などの大規模空間の天井落下被害が多発したため、2013年の建築基準法告示改正⁷⁾において、特定天井に対して天井脱落対策が義務化された。3.3節では既存建物の特定天井の落下防止措置を適用する場合に、施設を継続利用しながら施工が可能な工法を紹介する。

水害リスクに関しては、建築物に対して間接的に水害リスクを低減する技術を報告する。前述したが、気候変動に伴う自然災害の激甚化、特に水害の広域化に対して、国交省は流域治水による対応に方針を変えている。流域での保水性能を高める一つの方策として、上流域の森林整備の促進が挙げられるが、竹中工務店は都市部の建物の木造化・木質化により木材の需要を高め、日本の森林・林業・地域を活性化させる循環型の仕組み「森林グランドサイン」を提唱し、森林整備の促進を進めている。森林整備により森林の雨水の浸透・貯留機能が高まり、土砂流出や洪水のリスクが軽減され、流域治水に効果を發揮することが期待されている。2.4節では多摩川流域を対象とした上流地域と中下流地域の生態系サービスのポテンシャルを可視化し、上中下流域での連携の必要性を評価した事例を示した。また3.4節では、建築物での木材使用量を拡大し、森林整備をより促進するために、RC造や鉄骨造建物の耐震壁として木材を組み合わせる工法を紹介する。

火山噴火による降灰リスクに関しては、2.5節で富士山噴火を対象とし、富士山ハザードマップ検討委員会が公開している噴火可能性マップ⁸⁾を基に、降灰が建築物に与える影響の具体的な洗い出し、および降灰を受ける拠点での事業継続対策の事例を報告する。

人為災害リスクについては、地震や水害などのようにハザードマップが整備されていなかったが、2016年の官民データ活用推進基本法が施行されてから、各県警察がオープンデータとして犯罪発生情報を公開⁹⁾している。ただ

しそのデータを可視化した犯罪発生マップの認知度はあまり高くはなく、また表示方法は自治体ごとに異なっており、犯罪発生リスクを定量的に感じることが難しい。当社では警察庁による犯罪認知件数データの分析を継続して行っており、国内の犯罪認知件数が減少傾向にあることを把握している。一方で犯罪に対する不安感にはあまり変化がないことに注目して、商業施設における犯罪不安感を検討した事例を2.6節で報告する。

加えて、今回の特集では災害発生後の状況に合わせて機能する新しい建物の技術として、3.5節には火災発生時に建物内での火災状況に応じて避難不可能となった避難経路に進入禁止を表示する誘導灯の開発について、3.6節には大規模災害により上水道と下水道の機能が復旧しない場合でも利用可能な水洗トイレシステムの開発について報告する。ともに災害発生後の状況に合わせて機能することでレジリエントな建物に資する技術である。

参考文献

- 1) 内閣官房：国土強靭化基本計画 －強くて、しなやかなニッポンへ－，平成26年6月3日，
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/kk-honbun-h240603.pdf, (参照2025-10-10)
- 2) 国土交通省：「流域治水プロジェクト」，令和3年3月，
https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki_pro/index.html, (参照2025-10-10)
- 3) 内閣府 防災担当：事業継続ガイドライン 第一版 －わが国企業の減災と災害対応の向上のために－，平成17年8月1日，
<https://www.bousai.go.jp/kyoiku/kigyou/keizoku/pdf/guideline01.pdf>, (参照2025-10-10)
- 4) 地震調査研究推進本部：「地震調査研究推進本部とは」，
<https://www.jishin.go.jp/about/introduction/>, (参照2025-10-10)
- 5) 建設省：超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件，建設省告示第1461号，平成12年5月
- 6) 国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について，2016年，
https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_fr_000080.html, (参照2025-10-10)
- 7) 国土交通省：特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法を定める件，国土交通省告示第771号，平成25年8月
- 8) 内閣府：富士山ハザードマップ検討委員会報告書，2004年6月，
https://www.bousai.go.jp/kazan/fuji_map/pdf/report_200406.pdf, (参照2025-10-10)
- 9) 警察庁：「犯罪オープンデータ リンク集」，
<https://www.npa.go.jp/toukei/seianki/hanzaiopendatalink.html>, (参照2025-10-10)

2 事前評価技術

Pre-evaluation Technology

2.1 確率論的地震ハザードマップによる複数拠点の立地評価

Location Assessment of Multiple Sites with Probabilistic Seismic Hazard Maps

大渕 正博 Masahiro Ohbuchi^{*2}

東日本大震災以降、地震に対するレジリエンス対策として、本社ビルなど主要拠点が被災した場合を想定し、その代替機能を有する災害拠点の重要性が高まっている。災害拠点は主要拠点と同時に被災するリスクをできるだけ抑制すべきであり、主要拠点からできるだけ離れた位置に建設することが望ましい。しかし、自社拠点が集中する地域や、あるいは重要な営業エリアを有する地域など、その企業の重点地域内に主要拠点がある場合もあり、そのため重点地域に対する地震後対応を目的とした災害拠点を新設する際に建設候補地が主要拠点に近いエリアに限定される場合もある。このような場合、主要拠点までの距離が近いほどアクセス性は良いが、一方で同時に被災する可能性が高まるため、両者を比較しながら災害拠点の立地を選定しなければならない。しかし、従来の確率論的地震ハザードマップ^{例えば¹⁾}

では複数の拠点が同時に被災する地震リスクを確率として定量的に評価できないという課題があった。そこで、災害拠点建築物の立地検討を主な目的として、複数拠点が同時に被災する可能性や、あるいは逆に少なくとも1拠点が被災を免れる可能性を確率として定量的に評価し、その結果を地図化した「条件付き地震ハザードマップ」を開発した^{2), 3)}。本節では、「条件付き地震ハザードマップ」を活用した災害拠点の立地検討事例を紹介する。

2.1.1 複数拠点を同時に考慮可能な条件付き地震ハザードマップ

従来の確率論的地震ハザードマップ^{例えば¹⁾}

では地震を特定することなくあらゆる地震の可能性を考慮に入れて評価するため、関東平野、大阪平野全体が同色で塗りつぶされる傾向があり、災害拠点が主要拠点と同時に被災しにくいエリアの検討が困難であった。それに対し、新たに開発した条件付き地震ハザードマップでは、複数の建築物を考慮した地震ハザードの定量的な評価が可能となった。本稿においては地方自治体（東京都および愛知県）を対象とした活用事例を紹介するが、本評価技術は民間企業が所有する建物に対しても適用可能であり、例えば既存の工場と同時に被災する地震リスクが小さいエリアを新工場の建設候補地として選定することが可能となる。

2.1.2 条件付き地震ハザードマップの活用事例

条件付き地震ハザードマップの活用事例として、東京都と愛知県それぞれに新たな防災拠点を建設する事を仮定した事例を紹介する。東京都の事例では既存の災害拠点として東京都庁および立川地域防災センターが指定されていることを踏まえ、それら既存の2拠点と新たに建設する1拠点のうち、少なくとも1拠点が震度6弱未満となる可能性を機能継続確率と定義した。Fig. 1には機能継続確率を指標とした条件付き地震ハザードマップを示す。なお、既存拠点の位置は逆三角印で示す。Fig. 2に示すJ-SHISによる東京都周辺における確率論的地震ハザードマップとFig. 1に示す条件付き地震ハザードマップを比較すると、Fig. 2では東京都の大半が同一色であり、同時に被災する地震リスクの低い地域の選定が困難であるが、Fig. 1では既存拠点から離れるほど機能継続確率が高い事が確認できる。東京都の西側の地域では非常に高い機能継続確率となっているが、これらの地域は山間部であるためアクセ

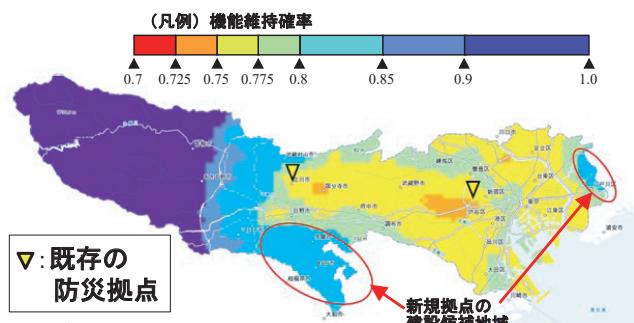


Fig. 1 機能維持確率を指標とした条件付き地震ハザードマップによる東京都の災害拠点の立地検討

Location Study of Disaster Response Centers in Tokyo Prefecture with Conditional Seismic Hazard Maps of Functional Continuity Probability



Fig. 2 従来の東京周辺での地震ハザードマップ¹⁾に加筆
Conventional seismic hazard map around Tokyo

*2 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

ス性の観点から災害拠点の建設地としては適していないと判断される。アクセス性と機能維持確率の高さの両方を踏まえ、東京都東縁に位置する江戸川区・葛飾区や東京都南西に位置する町田市周辺が建設候補地として挙げられる。災害拠点の建設候補地となる地域をFig. 1およびFig. 2内に示すが、Fig. 2では東京都東縁に位置する江戸川区・葛飾区は選定されないことがわかる。

もう1つの事例として愛知県に対する検討事例を紹介する。愛知県庁と計画中の愛知県基幹的広域防災拠点を既存の2拠点とした。東京都の事例と同様に、既存2拠点と新たに建設する1拠点のうち、少なくとも1拠点が震度6弱未満となる可能性を機能継続確率として評価した。Fig. 3には機能継続確率を指標とした条件付き地震ハザードマップを示し、また既存拠点を逆三角印で示す。Fig. 3において愛知県北東部の地域において機能継続確率が特に高くなっているが、これらの地域は山間部であるためアクセス性の観点から名古屋市などへの支援を行う災害拠点の建設地としては適していないと判断される。アクセス性と機能維持確率の高さの両方を踏まえると、愛知県北部の大山村、東南部の豊田市・岡崎市などの地域が新たな拠点の建設候補と判断することができる。

上記の事例のように、複数の拠点を対象とし、かつ事業継続計画（BCP）を発動させる震度を条件とした条件付き地震ハザードマップを活用することで、新たな災害拠点の建設候補地のより合理的な選定が可能となる。

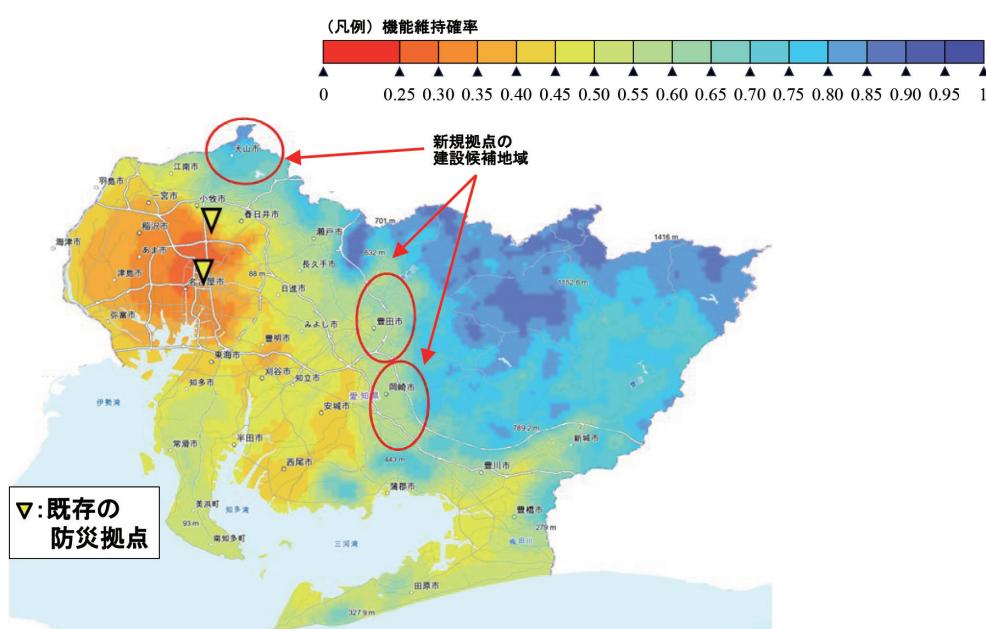


Fig. 3 機能継続確率を指標とした条件付き地震ハザードマップによる愛知県の災害拠点の立地検討
Location Study of Disaster Response Centers in Aichi Prefecture with Conditional Seismic Hazard Maps of Functional Continuity Probability

2.1.3 まとめ

従来の確率論的地震ハザードマップでは複数拠点を対象とした機能維持確率を評価できず、そのため災害拠点の立地を検討する場合に主要拠点と同時に被災するリスクが低い地域を検討することができなかった。そこで、複数の拠点を同時に考慮できる「条件付き地震ハザードマップ」を開発し、その検討事例として地方自治体の災害拠点を仮定した立地検討事例を紹介した。ここでは自治体を対象とした仮想的な検討事例を紹介したが、例えば工場や発電所などの民間企業の施設を対象として、既存の施設と同時に被災する地震リスクの低い地域を定量的に評価することができ、その評価結果に基づいて新たな施設の建設候補地を検討する事が可能となる。

また、ここでは震度6弱以上を対象とした事例を紹介したが、各企業のBCPにおいて想定している震度を前提条件とした地震ハザードマップを地図化する事も可能であり、BCPを検討する上で様々な活用方法が可能である。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：「地震ハザードステーション（J-SHIS）」, <https://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 2) 大渕正博, 藤井中, 吉澤睦博, 佐藤吉之, 井上修作：「災害拠点建築物の立地検討を目的とした条件付き地震ハザードマップの提案」, 日本地震工学会論文集, 第25巻, 第1号 (特集号), pp.132-141, 2025年1月
- 3) 大渕正博, 藤井中, 吉澤睦博, 佐藤吉之, 井上修作, 尾崎文宣, 森保宏：「条件付き地震ハザードマップに関する検討（その1）～（その2）」, 日本建築学会大会梗概集, 構造I, pp.1-4, 2024年8月

2.2 南海トラフ地震での続発地震を考慮した建物リスク評価

The Building Risk Assessment Considering Successive Occurrence of Nankai Trough Earthquake

藤井 中 Ataru Fujii^{*3}

南海トラフ地震は内閣府により防災対策推進基本計画対策を公表¹⁾されるなど、地震に対するレジリエンスを考えるにあたり、発生時の被害が最も懸念される地震の一つである。この南海トラフでは、1854年に発生した安政東海地震の約32時間後に安政南海地震や、1944年に発生した昭和東南海地震の2年後に1946年の昭和南海地震のようにマグニチュード8クラスの大地震が時間差を置いて発生した事例がある事から、時間差で巨大地震が続発する場合の被害想定も公表²⁾されている。また、「地震ハザードステーション（J-SHIS）」³⁾で公開されている全国地震動予測地図⁴⁾（以下、『予測地図』）でも、南海トラフの地震は複数の領域が連動して1つの地震として発生する場合と2つの地震が短期間に続発する場合が想定されている。このうち、1つの地震が発生した場合の計測震度の期待値等は予測地図で図示されているが、2つの地震が続発した場合は図示されていない。また、2つの地震が短時間で続発した場合は、1回目の地震の損傷により耐震性能が低下し復旧していない状態で2回目の地震に対する損傷評価する必要がある。ここでは、南海トラフ地震の建物リスク評価について、2つの地震が続発した想定も含めた様々なパターンによる評価結果を紹介する。

2.2.1 リスク評価の概要

南海トラフ地震の震源位置⁴⁾をFig. 1、発生パターンと重み付け⁴⁾をTable 1にそれぞれ示す。その他のハザード評価の条件は予測地図作成に準拠した。ただし、最大速度のばらつきは計算過程の都合から司・翠川（1999）⁵⁾による一定値（対数標準偏差0.53）とする。また、最大速度を計算する際のモーメントマグニチュード（Mw）は予測地図の考え方従い、Mw8.3で頭打ちとした。

建物被害率関数P_dは、式（1）で示した林ら（2000）⁶⁾による構造耐震指標Is値に基づく設定（Table 2）とし、損失率のばらつきも林らによるベータ分布を用いる（倒壊の場合は損失率1に固定）。

$$P_d = \phi\left(\left(\ln(x) - \ln\left(\frac{V_0 \cdot Is}{0.4}\right)\right)/0.6\right) \quad (1)$$

ここで、 ϕ は標準正規分布の累積確率分布関数、 x は最大速度、 V_0 はTable 2で示した各損傷区分に対する速度のクライテリア（中央値）、 Is は構造耐震指標Is値である。

建物の（初期）Is値は耐震性がやや低い0.4、標準的な耐震性0.6、耐震性がやや高い0.8の3ケースを想定する。地震発生パターンで2つの地震が続発する場合は1回目の地震の後で建物が復旧していない状態で2回目の地震は発生すると仮定する。2つの地震が続発する時の建物リスク評価フローをFig. 2に示す。2回目の地震によるリスク評価は、RC造建築物の被災度区分判定⁷⁾で示されている耐震性能残存率Rの考え方を参考に、1回目の地震後のリスク評価で得られる損失率から、被災後の構造耐震指標のIs値をFig. 3のように低減した。2回の地震による損失率のうち、大きい方を2つの続発地震による損失率とする。また、2つの地震発生順序はそれぞれ同じ確率とし、建物評価地点は静岡の県庁所在地とする。

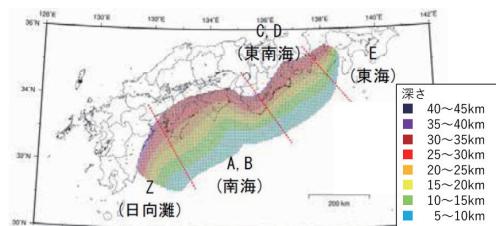


Fig. 1 南海トラフ地震の震源位置（文献3）を一部編集)
Location of the epicenter of Nankai trough earthquake

Table 1 南海トラフ地震の発生パターン³⁾
Occurrence patterns of Nankai trough earthquake

| パターン | 震源域（網かけ部分）と発生順序 | | | 重み | Mw ^{*1} | 深さ ^{*2} |
|--------|-----------------|------|-----|-------|------------------|------------------|
| | 日向灘 | 南海 | 東南海 | | | |
| i-1 | | | | 1/80 | 8.8 | (1) |
| i-2 | | | | 1/80 | 9.0 | (2) |
| i-3 | | | | 1/80 | 9.0 | (3) |
| i-4 | | | | 1/80 | 9.1 | (4) |
| i-5 | | | | 13/80 | 8.7 | (1) |
| i-6 | | | | 13/80 | 8.9 | (3) |
| i-7 | | | | 1/80 | 8.8 | (1) |
| i-8 | | | | 1/80 | 9.0 | (3) |
| i-9 | | | | 1/40 | 8.7 | (1) |
| i-10 | | | | 1/40 | 8.9 | (3) |
| i-11 | | | | 1/20 | 8.4 | (5) |
| ii-1-1 | (2)後 | (1)先 | | 1/40 | (1)8.3 (2)8.7 | (1) |
| ii-1-2 | (1)先 | (2)後 | | 1/40 | (1)8.7 (2)8.3 | (1) |
| ii-2-1 | (2)後 | (1)先 | | 13/80 | (1)8.3 (2)8.5 | (1) |
| ii-2-2 | (1)先 | (2)後 | | 13/80 | (1)8.5 (2)8.3 | (1) |
| ii-3-1 | (2)後 | (1)先 | | 1/80 | (1)8.2 (2)8.7 | (1) |
| ii-3-2 | (1)先 | (2)後 | | 1/80 | (1)8.7 (2)8.2 | (1) |
| ii-4-1 | (2)後 | (1)先 | | 1/20 | (1)8.2 (2)8.5 | (1) |
| ii-4-2 | (1)先 | (2)後 | | 1/20 | (1)8.5 (2)8.2 | (1) |

*1 距離減衰式による速度算出時には、Mwは8.3で頭打ち

*2 ①：深さ10～25km程度 ②：深さ10～40km程度

③：深さ0～25km程度 ④：深さ0～40km程度

⑤：深さ0～10km

Table 2 損傷区分とクライテリアの設定⁴⁾
Damage classification and criteria setting

| | 軽微 | 小破 | 中破 | 大破 | 倒壊 |
|------------|----|-----|-----|-----|------|
| 損失率 | 5% | 10% | 20% | 30% | 100% |
| 中央値 (cm/s) | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 |

*3 技術研究所 主任研究員 博士(数理科学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Math. Sci.

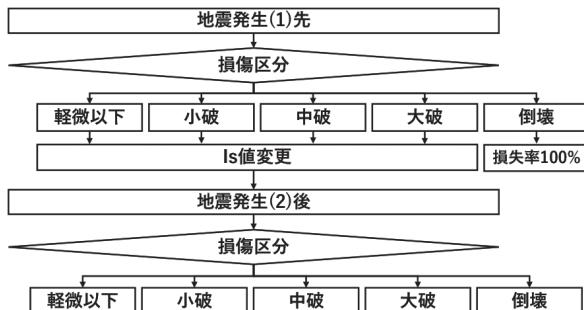


Fig. 2 2地震続発時の損失評価フロー
Loss assessment flow when two earthquakes occur in succession

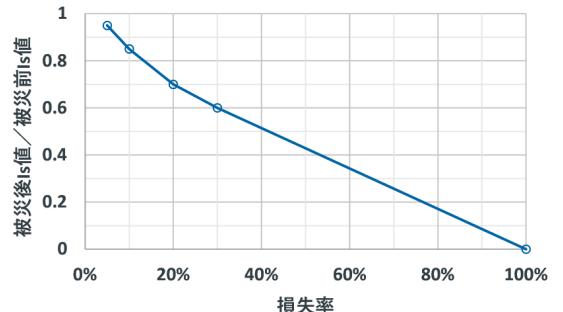


Fig. 3 2回目の地震のIs値設定
Setting the Is value for the second earthquake

2.2.2 損失評価と考察

Table 1に示す重み付けにより平均した損失率と超過確率分布の関係をFig. 4に示す。耐震性がやや低いIs = 0.4の場合では損失率100%になる確率は20%弱、損失率5%の超過確率が0.5とほぼ半分となった。標準的な耐震性のIs = 0.6の場合では損失率100%になる確率は8%弱、損失率33%あまりで超過確率が0.1となった。耐震性がやや高いIs = 0.8の場合では損失率100%になる確率は4%、損失率20%弱で超過確率が0.1となった。

1つの地震による発生パターンi-1とi-1の震源が2つに分かれて地震が続発する発生パターンii-1-1とii-1-2の場合 (Is = 0.4) をFig. 4 (B) に図示する。続発する発生パターンii-1-1とii-1-2の超過確率は1つの地震発生パターンi-1の超過確率を下回っており、1回目の地震により耐震性能が低下した影響が大きい。特に対象地点の静岡に近い震源である東南海・東海が後に発生するパターンii-1-2では倒壊となる確率が高くなっている。

2.2.3 まとめ

南海トラフ地震発生の多様性を考慮した建物リスクを評価した。重み付け平均による損失率では、静岡は耐震性が低い場合は損失率5%を超過する確率が0.5になるなど、強靭性が必要である事を確認した。今回のような1回目の地震の損傷により耐震性能が低下し復旧していない状態を考慮した2回目の地震に対する損傷評価は、2つの続発地震の震源に近い、例えば三重県や和歌山県の沿岸部の建物評価ではさらに有効であると考えられる。

参考文献

- 内閣府：南海トラフ地震防災対策, <https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/>, (参照 2025-09-18)
- 内閣府：南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ報告書説明資料, p.5, https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg_02/pdf/nankai_setumei.pdf, (参照 2025-09-18)
- 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>, (参照 2025-09-18)
- 藤原広行ら：東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良, 防災科学技術研究所研究資料 No.399, 2015年12月
- 司宏俊ら：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No.523, 1999年9月, pp.63-70.
- 林康裕ら：耐震診断結果を利用した既存RC造建築物の地震リスク表示, 地域安全学会論文集 No.2, 2000年11月, pp.235-242.
- (財)日本建築防災協会：2015年改訂版 再使用の可能性を判定し、復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2016年3月

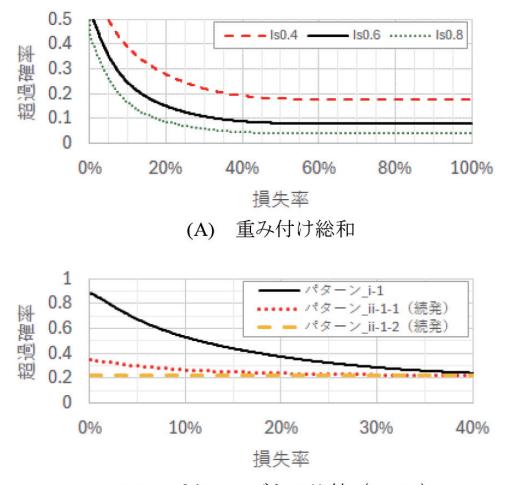


Fig. 4 南海トラフ地震の損失率の超過確率分布
Excess probability distribution of loss rate for Nankai trough earthquake

2.3 地震応答解析結果の深層学習による建物損傷評価

Building Damage Assessment Using Deep Learning Based on Seismic Response Analysis Results

青井 淳 Atsushi Aoi^{*4}

大地震時、施設管理者は帰宅困難者の受け入れや建物継続使用の判断を行うため、地震直後に迅速な施設の安全確認と復旧対応が必要となる。この復旧力の観点での建物レジリエンスを向上させるため、地震後の建物健全性評価のニーズが近年高まっている。従来の評価手法では、建物内に複数設置された地震計から得られる加速度データの分析から最大層間変形角や固有振動数、モード形状等の指標を求め、閾値と比較して建物各階の損傷度評価を行うものが一般的である。それらは設定した条件下や想定した地震動レベルの範囲においては有効であるものの、損傷度を評価するための指標およびその適切な閾値の設定は容易ではなく、建物の経年変化や余震時、想定外の大地震時など設定条件と異なる状況下において正確な建物損傷評価を行うことは難しい。そこで、深層学習を用いて加速度データから直接建物損傷度を推定することで建物損傷評価の高度化および精度向上が図れないと考え、研究開発に取り組んでいる^{1), 2)}。本節では、深層学習による建物損傷評価法のコンセプトと精度検証を行った事例について紹介する。

2.3.1 深層学習による建物損傷評価法

建物損傷評価への深層学習の適用イメージをFig. 1に示す。深層学習により建物損傷評価モデルを構築するためには大量のデータセットが必要となるが、対象建物における実観測記録および損傷調査結果のデータについて十分な量を確保するのは困難である。また、対象が新築、建築中の建物であれば当然ながらデータの取得自体が不可能となる。そこでまず事前準備として、設計時の解析モデルを用いて多数回の地震応答解析を行うことにより、応答加速度と建物損傷（塑性率等で定義）のデータセットを作成し、それを基に教師あり学習を行うことで建物損傷を評価する深層学習モデルを構築する。ただし、解析モデルの精度や実建物強度の不確定性、設計上の安全率を見込んだ解析モデルを前提としていること等を踏まえ、ここで構築するモデルはあくまで初期モデルとみなし、運用しながら地震時の観測記録および建物調査結果を反映させて学習済モデルを更新し、実建物に近づけていく仕組みを設けることが重要となる。この一連のフローを実現出来れば、建物の状況変化に対応して評価精度を確保できる建物損傷評価が可能になると考える。

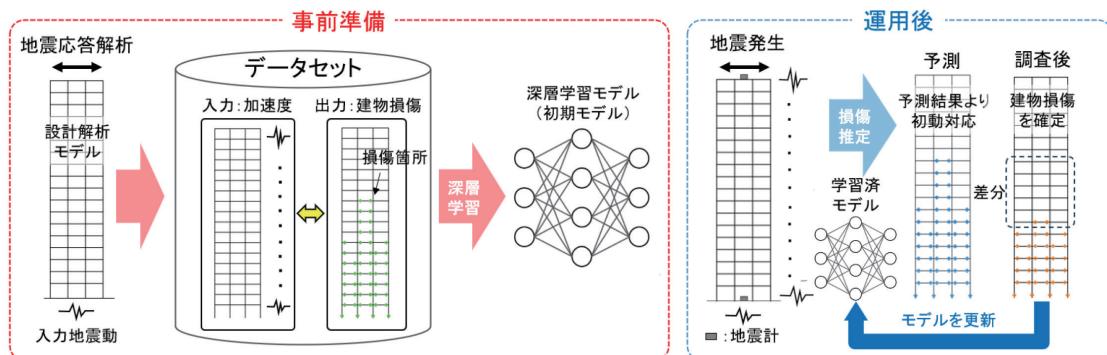


Fig. 1 建物損傷評価への深層学習法の適用イメージ
Image of applying machine learning to building damage assessment

2.3.2 評価精度の検証

本項では、事前準備の初期モデル構築における検討として、深層学習モデルの精度検証を行った事例について紹介する。既往の研究^{3), 4)}にて実施された鉄骨造18層建物の振動実験における試験体（実大の1/3スケール）を基に作成した18層の質点系建物モデルを検討対象とした。建物モデルの復元力特性と振動特性をFig. 2に示す。復元力特性はトリリニアモデルで、第一折点＝降伏点としており、1次固有周期は1.12秒である。教師データ作成のための地震応答解析に用いる入力地震動は、1995～2016年の間に震度5強以上を観測した主要な地震記録456波の水平2方向ベクトル和最大方向の一方向入力とした。試験体の縮尺に合わせ、地震動の時間軸は $1/\sqrt{3}$ に縮めた。地震動の振幅レベルを最大速度115cm/sで基準化したものを100%とし、5～100%まで5%刻みで振幅レベルを変動させ、456×20の合計9,120ケースの地震応答解析を行った。入力地震動含む19階分の加速度時刻歴からフーリエ振幅スペクトルを算出し、建物の1～3次の固有周期を含む0.5Hz～5.2Hzの帯域のフーリエ振幅値を教師データの入力とした。判定対象とする各層の損傷度は層塑性率 μ （層間変形角/降伏点）の最大値に基づき、D1 ($\mu < 1.0$)、D2 ($1.0 \leq$

*4 技術研究所 研究主任 Senior Researcher, Research & Development Institute

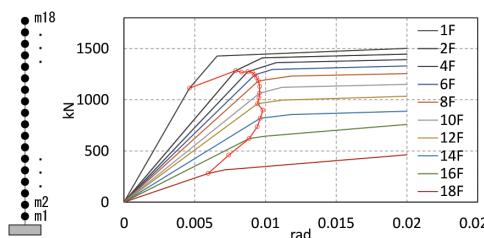


Fig. 2 建物モデルの復元力特性・振動特性
Building model specifications

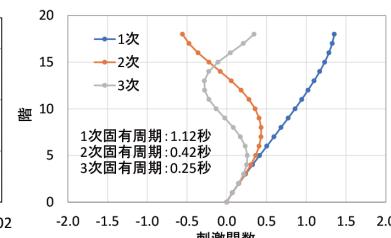


Fig. 3 損傷度の頻度分布
Frequency distribution of damage

$\mu < 2.0$), D3 ($2.0 \leq \mu$) の3段階で設定した。9,120ケースの地震応答解析における各層の損傷度の分布をFig. 3に示す。D1のケースが半分以上を占めており、D2, D3の数が少ない偏りのあるデータセットとなる。深層学習のネットワークモデルは畳み込みニューラルネットワーク(CNN)のモデルとした。ネットワーク構造とハイパーパラメータをTable 1に示す。9,120ケースの教師データは訓練データ・検証用データそれぞれ地震波単位で388波：68波に振り分けた。

対象建物の屋上と建物基礎の2か所に地震計が設置される想定で、2か所の加速度記録よりモード解析を用いて補間して求めた中間階加速度のフーリエ加速度振幅を教師データとして学習を行い、検証用データ1,360ケースに対し損傷評価を実施した(a)。また、比較用の従来手法相当として、補間した加速度の積分変位時刻歴から算出した最大層間変形角および層塑性率 μ から損傷評価を行った(b)。各層の損傷度D1～D3の推定結果と正解値から評価精度指標として算出した各層のF1値を(a), (b)で比較したものをFig. 4に示す。D1, D2のF1値は(a), (b)共に高い値を示しているが、教師データの大半が無被害のD1で偏りのあるデータセットであったため、塑性域を超えるか否かの判定に関してはむしろ(b)の方が高い精度を示した。しかし、D3の評価に関しては、弾性を前提とした(b)の手法は予測値がD2に留まるケースが多くなっていた。一方で(a)はD3のケースが比較的多い層においてはD3として評価が出来ており、深層学習により非線形性の強い領域の損傷度も推定できる可能性を示した。今後、より効率的な学習データの作成方法や損傷評価精度の向上、建物運用後のモデル更新手法に関する研究開発を進め、建物のレジリエンス向上に貢献していく。

謝辞

本研究は電気通信大学 橋山研究室との共同研究で実施しました。共同研究関係者各位に厚く御礼申し上げます。また、防災科学技術研究所(K-NET, KiK-net), 気象庁, 鉄道総合技術研究所, 大阪ガス, NTTファシリティーズの強震記録データと, E-Defense 実験データアーカイブ(ASEBI)のデータを使用させて頂きました。

参考文献

- 青井淳, ガンバトニヤムマー, 恒川裕史, 上林厚志, 吉澤睦博, 橋山智訓: 少数の加速度センサを想定した深層学習による建物損傷推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.363-364, 2024年7月
- ガンバトニヤムマー, 青井淳, 橋山智訓, 恒川裕史, 吉澤睦博, 上林厚志: 地震応答解析に基いたディープラーニング建物損傷度推定法および大型振動台実験結果を用いた検証, 日本地震工学論文集, 25巻, 3号, pp.3_1-3_19, 2025年2月
- 久保田淳, 高橋元美, 鈴木芳隆, 澤本佳和, 聖高裕治, 伊山潤, 長江拓也: 鉄骨造18層骨組を対象とした振動台実験における長周期地震動による骨組崩壊挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第83巻, 第746号, pp.625-635, 2018年4月
- 国立研究開発法人防災科学技術研究所「E-Defense実験データアーカイブ(ASEBI)」<https://doi.org/10.17598/nied.0020>より課題名「鉄骨造高層建物の崩壊余裕度の定量化」

Table 1 学習モデル概要
Deep neural network architecture

| model | VGG | |
|-----------------|--|--------|
| batch size | 512 | |
| epoch | 120 | |
| learning rate | 0.005 | |
| momentum | 0.85 | |
| wd | 0.00001 | |
| input data size | 19 × 1792 | |
| architecture | Block | Layers |
| Conv 1 | Convolution 3 × 3, 64 ch Relu MaxPooling 2 × 2 | |
| Conv 2 | Convolution 3 × 3, 128 ch Relu MaxPooling 2 × 2 | |
| Conv 3 | Convolution 3 × 3, 256 ch Relu Convolution 3 × 3, 256 ch Relu MaxPooling 2 × 2 | |
| FC 1 | Flatten FullyConnected 1024 ch Relu Dropout 0.5 | |
| FC 2 | FullyConnected 1024 ch Relu Dropout 0.5 | |
| Output | FullyConnected 54 ch Softmax | |

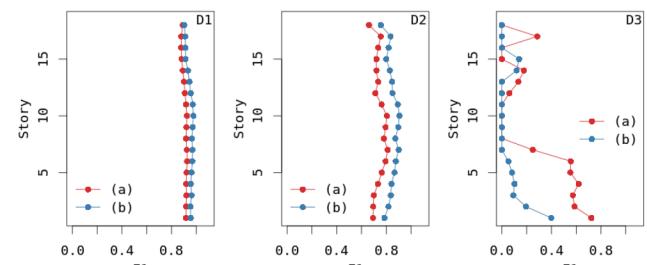


Fig. 4 評価指標(F1値)の比較
Comparison of metric (F1-score)

2.4 流域治水の取組みを促進する生態系サービス評価事例

Ecosystem Service Assessment Case Study: Implementing the “River Basin Disaster Resilience and Sustainability by All” Initiative

向井 一洋 Kazuhiro Mukai^{*5}

近年、国内においては気候変動に伴い頻発・激甚化する水害に対して、流域治水の考え方に基づき、従来の河川管理者が主体となった対策のみではなく、集水域から氾濫域にかけてあらゆる関係者が一体となった治水への取り組みが進められているが、上流の集水域では森林整備に大きな課題がある。国内の森林のうち、40.8%(10,200,000ha)が人工林で、そのうち林齢が50年を超える人工林面積は50%を超えており。人工林は戦後に住宅需要を見込んで急激に増加したが、現代では増えすぎた人工林が適切に管理されないまま放置される事例が多数見られる。我々の暮らしは、生物多様性を基盤とする生態系から得られる恩恵によって支えられており、これらの恩恵は生態系サービスと呼ばれている。管理の行き届かない人工林では、下層植生の荒廃により、水源の涵養・洪水の抑制、生物多様性の保全、炭素吸収などの森林が發揮する生態系サービスが失われ、流域全体のレジリエンスが低下することが懸念されている。

上流域の農林地が適切に管理され生態系サービスが保たれるためには、下流域の大都市が享受する便益に応じて費用を負担する生態系サービス支払い等の仕組みを活用し、上下流自治体の連携を図る必要がある。竹中工務店と東京大学が2022年から2024年において実施した社会連携講座「サステナブルなまちの創生」では、大都市と郊外中小都市が連携した持続可能なまちづくりに向けて、サーキュラータウンのコンセプトを検討し、大都市の上流域に位置するサーキュラータウンは平時より下流域の大都市との共助関係によって成り立つことを示した。具体的には、サーキュラータウンの農林地が大都市住民の農林業体験の場として開かれ、上流域の中小郊外都市との二地域居住などにより平時より関係を維持することで、地域の農林地の管理が促進され、上流域の生態系サービスが保たれる。一方で、地震や洪水等により下流域の大都市が被災した際には、サーキュラータウンから生存物資の供給が行われることで、流域連携によって地域全体のレジリエンスが高まることが期待される¹⁾。本報告では、流域全体のレジリエンスを高める上下流連携を検討するための基礎データとして、東京都を対象とした生態系サービス評価（炭素貯留量、ハビタット（生息・生育地）の質、雨水流出抑制量の主要な3種に限定）を試行した事例について報告する。

2.4.1 東京都を対象とした生態系サービス評価事例

1) 評価手法

東京都（多摩川流域）を対象として、上中下流域の自治体が享受している主要な生態系サービス炭素貯留量、ハビタットの質、雨水流出抑制量の評価を行った。炭素貯留量およびハビタットの質については、GISベースの生態系サービス評価ツールInVEST v3.14.1を用いた。雨水流出抑制量については、ArcGISの空間解析ツールを用い、降雨量の平年値と土地利用毎の流出係数を用いて試算を行った。土地利用データは5mメッシュのラスターデータに変換して評価に用いた。Table 1にはInVESTの分析に用いたパラメータを整理した。

2) 評価対象範囲と流域区分

本報告では、東京都の自治体をFig. 1に示す上・中・下流域に区分し、生態系サービスの分布を評価した。八王子市、青梅市、あきる野市、日の出町、檜原村、奥多摩町の6市町村を上流域、23区部を下流域とし、それ以外を中流域に区分した。

3) 生態系サービス評価結果

Fig. 2に本検討に用いた土地利用分布のデータの一例を示す。上流域は面積の70%近くを森林が占め、下流域に向けて市街地の面積が占める割合が高まっている。Fig. 3に過去3回の調査（第1回調査1991～1992年実施、第2回調査2006～2007年実施、第3回2016～2017年実施）に基づく上流域と下流域の土地利用面積の比較結果を示す。

Table 1 InVESTパラメーター一覧
Parameter settings for InVEST

| 土地利用区分 | 炭素貯留量 | | | | ハビタットの質 | | |
|-----------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|----------------|--------------------|----------------|
| | C _{above} | C _{below} | C _{soil} | C _{dead} | H _j | d _{r max} | w _r |
| 市街地 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 |
| 公園・運動場等 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | - | - |
| 未利用地等 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - |
| 道路・鉄道・港湾等 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 |
| 田 | 0 | 0 | 71.38 | 0 | 0.8 | - | - |
| 畑 | 0 | 0 | 82.22 | 0 | 0.4 | - | - |
| 樹園地 | 0 | 0 | 82.22 | 0 | 0.4 | - | - |
| 採草放牧地 | 0 | 0 | 82.22 | 0 | 0.5 | - | - |
| 水面・河川・水路 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | - | - |
| 原野 | 0 | 0 | 82.22 | 0 | 0.9 | - | - |
| 森林 | 137.9 | 34.70 | 55.50 | 9.50 | 1 | - | - |

C_{above}：地上部貯留量、C_{below}：地下部貯留量、C_{soil}：土壤貯留量、C_{dead}：枯死分貯留量、

H_j：土地利用区分jにおける生息適正度、

d_{r max}：脅威要因rの影響半径、

w_r：脅威要因rが存在するグリッドの干渉強度の重みづけ

*5 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

過去3回の調査における土地利用の変化として、上流域では森林が減少し、下流域では、市街地面積の増加に伴い、森林や田畠の減少が確認された。

Fig. 4, 5に、今回対象とした3つの生態系サービスの評価結果を示す。いずれのサービスも森林が多く賦存する多摩川上流部（多摩・奥多摩）にて生態系サービスの発揮量が大きく、それらが下流の生活を支えていると考えられた。

2.4.2 まとめ

本報告では、東京都を対象とし、複数年の土地利用データから、土地利用の変化による生態系サービス発揮量の変化を把握することを試みた。本報告で用いた土地利用データ等はオープンデータとして入手可能であり、自治体等が施策検討の際に生態系サービスをモニタリングする手法として活用が期待できる。人々が都市と地方を行き来しながら、地域固有の文化を育むサーキュラータウンのビジョンを、社会実装に向けて推進するためには多様なステークホルダーの協業が必要不可欠である。本報告で用いた生態系サービス評価は、流域連携に向けた意思決定支援ツールとして活用が想定される。下流域の自治体が、上流域の森林や農地が発揮する生態系サービスから享受する便益に応じて、森林整備等に係る費用を負担することが可能となれば、水源の涵養・洪水の抑制機能や被災時の生存物資供給機能の維持に繋がり、その結果として流域全体のレジリエンス向上が期待される。

謝辞

本研究は、東京大学との社会連携講座「サステナブルなまちの創出」によって実施した。ここに謝意を表す。

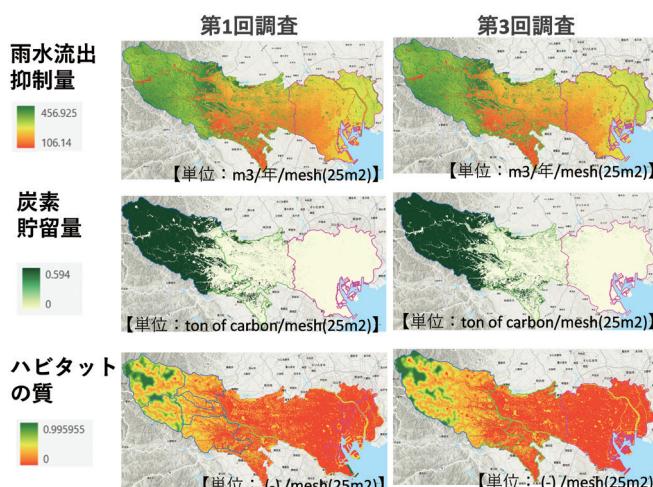


Fig. 4 生態系サービス評価結果
Ecosystem services assessment results



Fig. 1 東京都自治体の上中下流域の区分

Upper, middle and lower basin classification of Tokyo

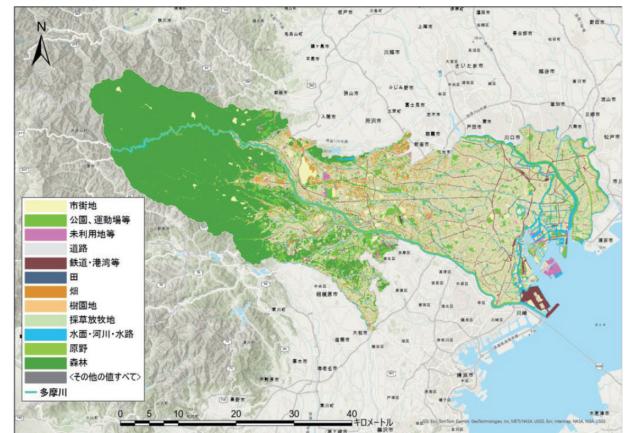


Fig. 2 土地利用/土地被覆分布図 (第3回調査)

Land use distribution map

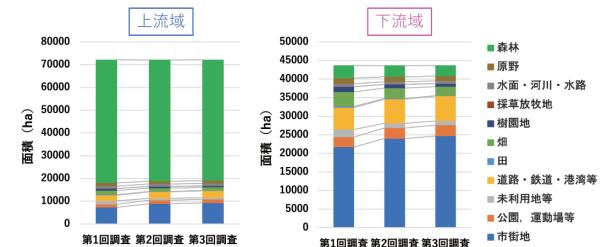


Fig. 3 上・下流域の土地利用/土地被覆面積の比較

Comparison of land use area in upper, middle and lower basin

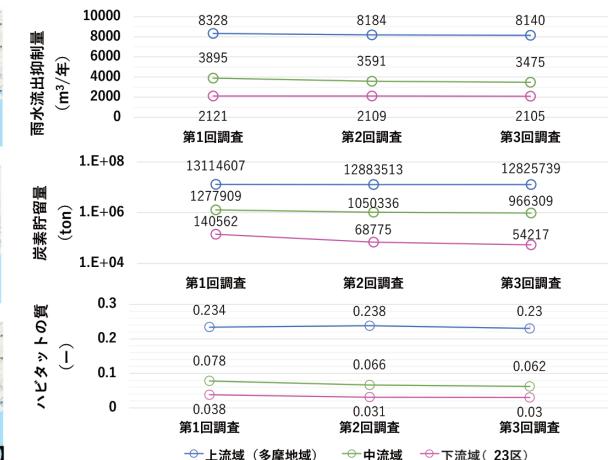


Fig. 5 生態系サービスの変化

Temporal change in ecosystem services

参考文献

- 大槻知史：農村の「いつも」と都市の「もしも」をつなぐ事前連携、農村計画学会誌、37 (4), pp.348-353, 2019年

2.5 富士山噴火による建築物の降灰リスクに関する評価

Assessment of Ashfall Risk to Buildings from Mt.Fuji Eruption

牟田 恵美 Emi Muta^{*6} 平本 佳祐 Keisuke Hiramoto^{*7} 曽根 孝行 Takayuki Sone^{*8}

富士山は火山調査研究推進本部が指定する111の活火山の1つであり、記録に残る西暦781～1707年の間に10回の噴火を繰り返してきた。1707年の宝永噴火以降300年以上沈黙を続けており、近年、その噴火が危惧されている。もし宝永噴火規模の大噴火が発生すれば、溶岩流・火碎流・噴石などにより近傍に大きな被害をもたらすほか、偏西風等によって運ばれた火山灰による関東地域への影響も懸念される。内閣府は首都圏における広域降灰対策ガイドライン¹⁾において、首都圏一帯に大量の降灰が生じた場合の建築物やライフライン、交通網など多岐にわたる長期的な影響を想定した。その一方で、近代都市が火山灰による被害を受けた事例はほとんどなく、その詳細な被害や具体的な対策について不明な点が多い。このような背景より、当社では建築物におけるレジリエンスの視点から火山灰の影響と対策の検討を進めている。本節では、建築物の安全性に大きく関わる屋根面などへの積灰による積載荷重（以下、積灰荷重）に対する構造安全性、火山灰による建築物への影響および事業継続に向けた対策について、それぞれ報告する。

2.5.1 積灰荷重の影響度指標を用いた構造安全性の検討

内閣府は、富士山噴火による降灰可能性マップを公開している²⁾。マップは、宝永噴火と同様な大規模噴火が発生した場合を想定し、降灰シミュレーションにより関東における月別の降灰分布を評価した後、それらを重ねあわせて求めた各地点での最大降灰量を示したものである。公開されているマップの降灰厚さ区分は2, 10, 30, 50cmに設定されている。これに対し当社は、積灰荷重の影響評価を精緻に行うため、降灰可能性マップの降灰厚さ区分の細分化を大規模噴火（宝永噴火規模）、中規模噴火（噴出物総量2億m³（宝永噴火規模の2/7））の2ケースについて行った³⁾（Fig. 1）。

更に、積灰荷重が建築物の構造安全性に与える影響を定量的に確認するため、構造設計で用いる積雪荷重に対する積灰荷重の比率を表した積灰積雪比マップを作成した³⁾（Fig. 2）。積雪荷重は、特定行政庁が指定する垂直積雪量の値に、多雪地域の割増を考慮しない単位重量20N/m²/cmを乗じて算出した。積灰荷重は、Fig. 1の降灰厚さに降水による湿潤状態を考慮した火山灰の単位重量167N/m²/cmを乗じて算出した。過去の関東の豪雪被害より、建築基準法に基づく積雪荷重の約1.1～1.9倍となる荷重で体育館などの大スパン屋根架構が崩壊した事例が確認されている。特に、大規模噴火時においては積灰積雪比が2を超える地域は広範囲に及んでいるため、屋根積載荷重の影響を受けやすい工場や体育館など大スパンの屋根架構を持つ建築物においては、建築物の設計段階における積灰荷重の考慮や屋根架構に対する検討が重要となる。積灰荷重の検討結果を踏まえて対策を講じる際は、架構の補強に加え、迅速な除灰などソフト面からの対策も有効と考えられる。

2.5.2 火山灰による建築物への影響および事業継続に向けた対策の検討

富士山噴火では首都圏に広く降灰する可能性がある。火山灰の影響は、その積灰荷重が構造安全性に及ぼすリスクの低いエリアであっても建築物やインフラなどに多くの影響を及ぼすことが想定される。特に経済活動の中心である東京都内のオフィスビルでは事業継続への影響の把握と対策が重要となる。そのため、既存中層オフィスビルに対する被害および事業継続に向けた対策を検討した⁴⁾。火山灰による建築物に対する主な影響としては、軽量な

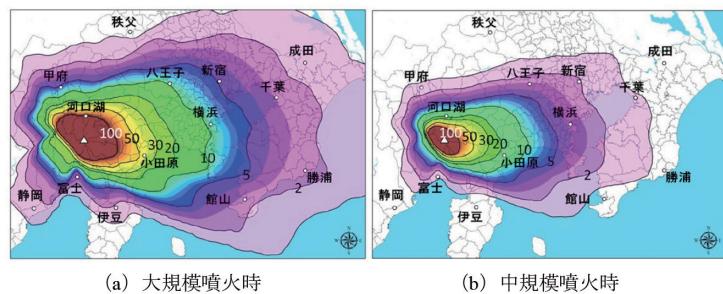


Fig. 1 噴火規模ごとの降灰可能性マップ (当社作成) (単位cm)
Ash deposition probability maps for various eruption scales

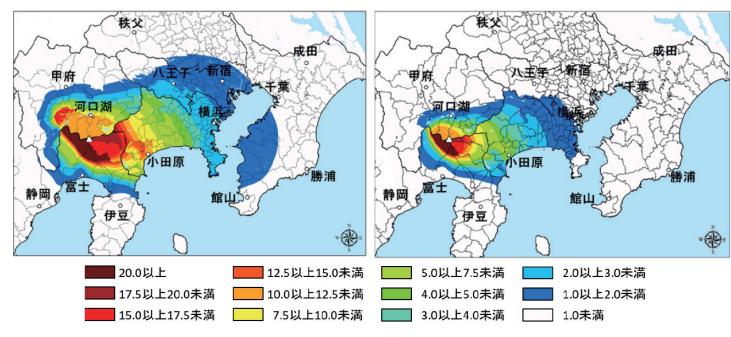


Fig. 2 噴火規模ごとの積灰積雪比の分布マップ
Ash-to-Snow ratio map for various eruption scales

*6 エンジニアリング本部 レジリエンスソリューション推進室 専任課長 Associate Manager, Resilience Solutions Division, Engineering Department

*7 エンジニアリング本部 レジリエンスソリューション推進室 Resilience Solutions Division, Engineering Department

*8 技術研究所 建設・環境基盤研究部 構造・施工法グループ長 Group Leader, Research & Development Institute

屋根や庇の損傷、樋の閉塞に伴う漏水、屋外設備の停止や故障、建物内への灰の流入による人体や機器への影響などのリスクが確認された (Fig. 3)。特に、建築物の機能維持に重要な設備機器への影響をTable 1に示す。受変電設備では火山灰の侵入による短絡、非常用発電機ではフィルタ目詰まりによる能力低下、更には非常用発電機の停止や損傷、冷却塔では冷却水への灰混入による故障が想定された。有効な対策としては火山灰の侵入を防ぐためのフィルタ設置、必要な吸気能力を確保するためのチャンバーボックスの設置となる。一方、狭隘な屋上に多くの設備機器を設置している既存建築物の多くは、フィルタやチャンバーの設置スペース確保が難しい。火山灰対策を実施せずに降灰時にこれら機器の稼働を継続した場合、機器に損傷を与え、復旧に多くの時間とコストを要すると想定される。さらには、建築物以外でもTable 2に示す降灰による各種交通、物流、電気などのライフライン、人体への影響も想定される。交通障害による従業員の出退勤の難しさ、ライフラインの途絶なども相まって、建築物の一時閉鎖も想定される。

このような検討結果を踏まえ、既存の中層本社オフィスビルにおける事業継続対策を検討した一例をTable 3に示す。本検討では、比較的容易な短期的な対策、改修工事などを伴う中長期的な対策の2つに分類した。短期対策は、「人命の安全確保」として積灰による危険個所への立ち入り禁止や出退勤の制限、「業務継続」として最大の降灰に至る前に代替オフィス等での業務継続への切換え、「復旧」として噴火終息後の施設の復旧負荷軽減のための設備機器の養生や交換用の空調フィルタなどの備品準備とした。中長期対策は、地震時同様に災害対策本部等の重要諸室を稼働させるために、「人命の安全確保」として積灰による危険個所の改修、建物内の事業継続に向けた電力設備の改修とした。このほかにも、降灰状況に応じた施設の閉鎖・再開の意思決定のタイミングについて、気象庁の火山灰予測情報等を踏まえた適切な対応が望まれる。

2.5.3 今後の火山防災について

本研究に着手して以降、富士山噴火を未知なる重大リスクと認識する企業や団体の増加を受けて、当社は2024年に富士山噴火に関心のある企業に対し、本研究成果を活用した座学による火山防災セミナーを火山防災の専門家と開催した。参加者へのアンケート調査では、火山災害の対策について、「情報収集中、今後対策を検討する予定」と回答した企業が最も多かった⁵⁾。今後も関連する研究開発を幅広く進め、噴火降灰リスクの低減に寄与していきたい。

参考文献

- 内閣府（防災担当）：首都圏における広域降灰対策ガイドライン、2025年3月
- 内閣府：富士山ハザードマップ検討委員会報告書、2004年6月
- 荻野ら：「富士山噴火による降灰が荷重として建築物に与える影響」、日本建築学会大会、2015年9月
- 芝崎ら：「富士山大規模噴火時の降灰による建築物被害と対策の評価」、地域安全学会梗概集、No.55、pp.102-105、2024年11月
- 牟田ら：「富士山噴火を想定した火山防災に関する企業ニーズ調査」、日本建築学会大会、2025年8月

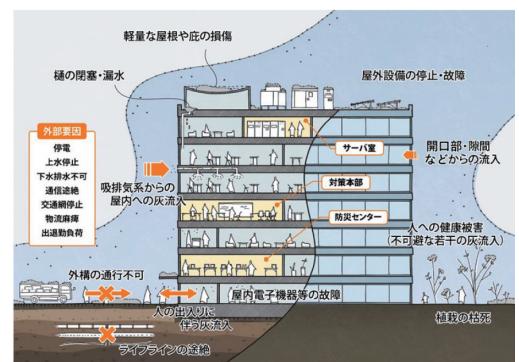


Fig. 3 火山灰による建築物への影響
Impact of ash on buildings

Table 1 火山灰による設備機器への影響
Impact of ash on building equipment

| 機器 名称 | 受変電設備 | 非常用発電機 | 冷却塔 |
|-----------------------|--|-------------------------------|--------------|
| 想定 被害 | | | |
| 【停電】 ・灰侵入による短絡の可能性 | 【能力低下、停電】 ・フィルタの目詰まりによる冷却不全や停止、機器損傷 | 【空調機能低下、停止】 ・冷却水への灰混入による故障 | |
| 対策 | ・灰の侵入対策と冷却を両立する工夫 | ・フィルタチャンバー設置 | ・フィルタチャンバー設置 |

Table 2 火山灰による社会への影響¹⁾
Societal impact of ash

| 対象 | 影響 |
|--------|--|
| 道路 | ・乾燥時10cm以上、降雨時3cm以上の積灰で二輪駆動車（2WD車）が通行不能 ・交通需要の増加による渋滞発生 |
| 鉄道 | ・信号、電気設備等への影響で微量積灰（0.5mm）で地上路線の運行停止 ・地下路線でも交通需要の増加や、地上施設への積灰による運行への影響 |
| 航空 | ・降灰中の運航不可等 |
| 物流（物資） | ・店舗での食料・飲料水等の枯渇 ・トラック等が運行不能の場合、生活物資の入手が困難化 |
| 電力 | ・3mm以上の積灰で降雨が重なると停電の可能性 ・数cm以上積灰で発電所の吸気フィルタ交換頻度増加等による発電量の低下 |
| 通信 | ・基地局のアンテナへの火山灰付着による通信障害 |
| 上水道 | ・原水水質の悪化などにより水質基準を超過するおそれ |
| 下水道 | ・火山灰が下水道に大量に流入すると管路閉塞の可能性 ・沈砂池の処理能力低下により下水道の利用制限の可能性 |
| 人体への影響 | ・除灰作業時の落下事故 ・火山灰が眼に入ることで角膜への影響、呼吸器等への影響 |

Table 3 既存中層本社ビルにおける事業継続対策の検討例
Case study of Business Continuity Planning for an existing mid-rise corporate headquarters building

| 対策 | 短期対策 | 中長期対策 |
|------|---|---|
| 方針 | ・人命安全を確保し業務は代替オフィスに移転 ・施設の復旧負荷軽減 | ・地震と同様に重要室のみ（対策本部等）稼働を目指す |
| 人命安全 | ・運用で安全確保（危険個所立入禁止、出勤制限） ・防護具を準備 | ・安全性詳細確認後に危険個所を改修 ・防護具を準備 |
| 業務継続 | 【比較的軽微な降灰（数mm）時】 ・準備した備品で清掃し、重要室のみ稼働 【最大の降灰時】 ・代替オフィスやリモートによる業務移転 ・建物は閉鎖しセキュリティ対応のみ | 【比較的軽微な降灰（数mm）時】 ・準備した備品で清掃し、重要室のみ稼働 【最大の降灰】 ・電力設備の改修（受変電設備、非常用発電機） ・備蓄燃料枯渇後は代替オフィスやリモートによる業務移転 |
| 復旧 | ・備品の事前準備 ・設備カバー（シート） ・空調フィルタ（再開時用） ・事後清掃の用品 | ・備品の事前準備 ・専用設備カバーの作成 ・空調フィルタ（再開時用） ・事後清掃の用品 |

2.6 商業施設における犯罪不安感の評価

Evaluation of Fear of Crime at Shopping Centers

近藤 正芳 Masayoshi Kondo*9

企業活動や日常生活において、自然災害のみならず犯罪をはじめとした人為的災害でも、発生すると経営や生活の質が大幅に低下する。レジリエンスの観点からは犯罪など人為的災害に対する備えも必要である。

警察庁の犯罪統計書¹⁾によると、刑法犯認知件数は2002年に約285万件でピークとなった後に19年間一貫して減少を続け、2021年には最少となる約57万件でピーク時の1/5以下となった(Fig. 1¹⁾)。人口当たりにすると、認知件数がピークとなった2002年には45人に1人、最少となった2021年には220人に1人が何らかの犯罪に遭遇したことになる。2022年以降は若干増加しており、今後、このまま認知件数が約60万件で推移するのか、増加傾向になるのかは注視する必要がある。

認知件数減少は主に窃盗犯の減少によるものである。その要因として、防犯カメラの性能向上と普及による設置数の増加、ICカード等による入退管理システムの普及、自動車盗難防止装置等の普及によるものと考えられる。2002年の「防犯性能の高い建物部品」の制定、2003年の「ピッキング防止法」施行、2005年の「住宅性能表示制度」における「防犯に関すること」の追加など、制度面での取り組みの効果も考えられる。一方でFig. 2¹⁾に示す通り、暴行・傷害などの粗暴犯や、詐欺・横領など知能犯の認知件数は侵入盗と比較して大きな変化はない。

2.6.1 体感治安・犯罪不安感の実態

刑法犯認知件数が減少し続けていたにもかかわらず、内閣府の「治安に関する世論調査」²⁾では、「ここ10年間で日本の治安はよくなつたと思いますか、それとも、悪くなつたと思いますか」の問い合わせに対して過半数の54.5%が「悪くなつたと思う」「どちらかといえば悪くなつたと思う」と回答している(Fig. 3³⁾)。経年で「よくなつたと思う」が増加しているものの、他の調査³⁾でも同様に治安が悪化しているとの回答が多い。警察庁の「犯罪情勢」⁴⁾では、体感治安を悪化させた犯罪として、無差別殺傷、特殊詐欺、児童虐待、サイバー犯罪が50%を超えており、特殊詐欺、児童虐待、サイバー犯罪については増加傾向を示している。

2.6.2 商業施設における犯罪不安感

刑法犯認知件数は長年減少傾向にあったが、筆者らの研究で、商業施設の開業によって刑法犯認知件数が増加し、特に、大型の施設、郊外の立地、周辺に駅がない施設の場合、認知件数を増加させる効果が大きいことがわかった⁵⁾。これらのことから、商業施設の利用者は施設に対してどのような不安を感じているのか、をアンケートで調査した。商業施設における不安の有無を性別・年代別に集計した結果⁶⁾、性別では女性の方が不安を感じる傾向があり、年代別では年齢が若いほど不安を感じる傾

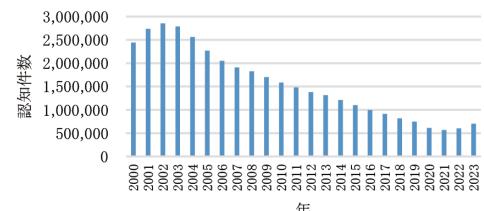


Fig. 1 刑法犯認知件数の推移
Crime cases known to police trend

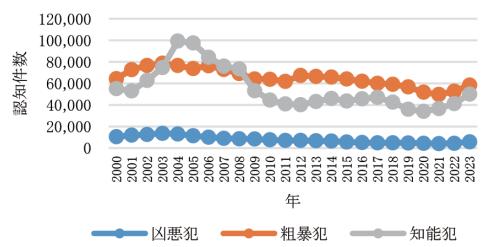


Fig. 2 窃盗犯を除く認知件数の推移
Crime cases trend (exclude larceny offenses)

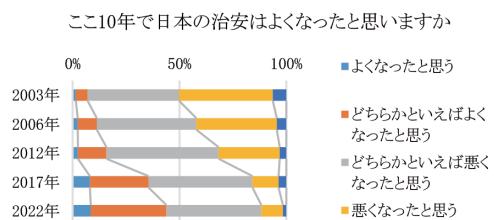


Fig. 3 犯罪不安感の推移
Fear of crime trend

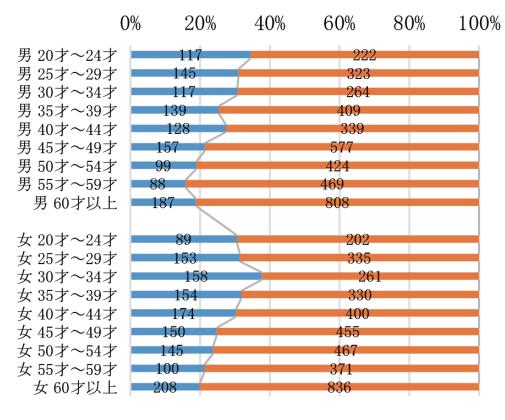


Fig. 4 商業施設 性別・年代別 不安の有無
Shopping center customers' fear

*9 技術研究所 主席研究員 Senior Chief Researcher, Research & Development Institute

向があった (Fig. 4)。特に20~44歳の女性で「不安がある」と回答した割合が統計的に有意であり、20~44歳の女性の特徴として未就学児や小学生と商業施設に行く割合が多かった。さらに、商業施設においてどのような不安があるか、を質問した結果⁸⁾、回答者の約65%が「不審者がいそう」を挙げ、商業施設における不安感の主な理由として不審者の存在が大きいことが確認された (Fig. 5)。利用者が不審者と感じる特徴として、服装や髪形などの外見的な特徴よりも、行動面での特徴により強く不安を感じる傾向が見られ、つきまといや接触など積極的な迷惑行為が多く挙げられた (Fig. 6)。また、利用者が施設側に求める不審者対策として、警察官、警備員、施設スタッフによる人的な対応を期待していると推察される (Fig. 7)。

2.6.3 利用者の不安感

国内の刑法犯認知件数は継続して減少したが、体感治安は良くなつておらず、犯罪不安感は減少していない。また、商業施設の開業に伴つて犯罪が増加するため、商業施設において感じる不安感のアンケート調査を実施した。アンケート結果の考察から、商業施設における不安感に対処するためには、未就学児・小学生と一緒に行く女性に配慮する必要があり、施設側による人的な対処により迷惑行為に適切に対応することが求められると考えられる。

参考文献

- 1) 警察庁：犯罪統計書
- 2) 内閣府：治安に関する世論調査、2022年3月
- 3) 日工組社会安全研究財団：犯罪に対する不安感等に関する調査研究—第6回調査報告書—、2019年3月
- 4) 警察庁：令和4年の犯罪情勢
- 5) 近藤正芳 他：商業施設開業の刑法犯認知件数変化への影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、pp.663-664、2022年9月
- 6) 近藤正芳 他：商業施設における利用者の不安感アンケート調査分析、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp.1321-1322、2023年9月
- 7) 近藤正芳 他：商業施設内の場所による不安感の違いと理由の考察－商業施設における利用者の不安感アンケート調査分析（その2）－、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.483-484、2024年8月
- 8) 近藤正芳 他：商業施設での不安感における不審者像の考察－商業施設における利用者の不安感アンケート調査分析（その3）－、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.499-500、2025年9月

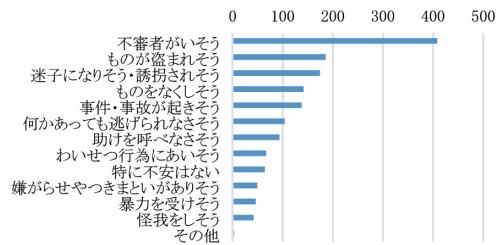


Fig. 5 商業施設にどのような不安があるか
What kind of fear about shopping center

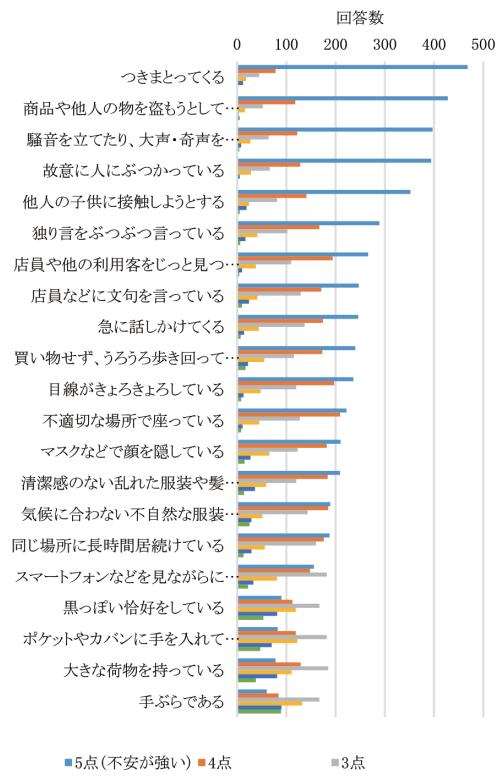


Fig. 6 不審者と感じる度合い（5段階）
Level of feeling that someone is a suspicious person

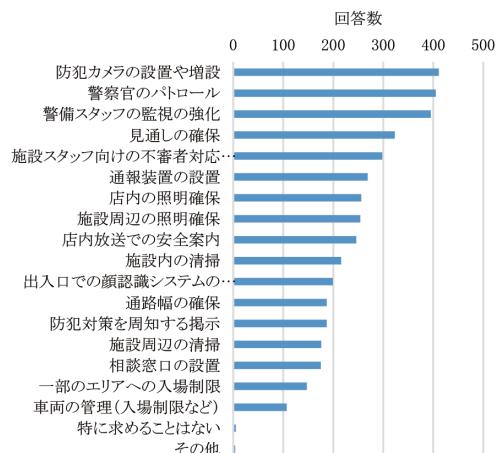


Fig. 7 不審者対策として施設に求めること
What is required of shopping center against suspicious persons

3 対策技術

Countermeasure Technology

3.1 鋼纖維補強による高強度RC柱の損傷抑制技術

Damage Mitigation Technology for High-Strength Reinforced Concrete Columns using Steel Fiber

掛 悟史 Satoshi Kake^{*10}

鉄筋コンクリート（RC）建造物の高層化を目的として、1980年代にNew RC総プロ¹⁾においてFc100クラスの高強度コンクリートに関する様々な研究が行われた。近年さらにFc150を超えるような超高強度コンクリートの研究開発が行われ、超高層RC建造物の下層階など軸力が高い柱に採用された事例もいくつか挙げられる²⁾。

高強度コンクリートはその名の通り圧縮強度が高く、普通コンクリートと比較してより大きな荷重に抵抗することができる特長を持つ。その反面、圧縮強度に到達した際に蓄積したエネルギーを急激に解放するため、脆性的な爆裂的破壊を生じる。特に高強度コンクリートを使用したRC柱の研究では、軸力比が比較的大きな柱部材において曲げ終局強度に到達した際に、帶筋で拘束されていないかぶりコンクリートの破壊がより脆的になり、かぶりコンクリートの飛散・剥落が広範囲で発生することが報告されている。

この高強度RC柱のかぶりコンクリートの飛散・剥落を防止し、レベル2地震後も機能維持する高いレジリエンス性能や構造性能をさらに向上させるため、コンクリートに鋼纖維を混入した鋼纖維補強コンクリート（SFRC：Steel Fiber Reinforced Concrete）を用いた高強度SFRC柱の研究開発^{3), 4)}を行ってきた。本節では、このSFRC柱の構造性能および損傷抑制効果について述べる。

3.1.1 実験概要

Fig. 1に試験体形状および配筋詳細を示し、Table 1に試験体諸元を示す。試験体は実大の約1/4スケールとした柱部材2体であり、想定破壊モードは曲げ圧縮破壊先行型とした。両試験体ともに試験体形状および配筋は同一条件とし、鋼纖維の有無を実験パラメータとした。コンクリート強度は実験時の目標強度が $f'_c = 120\text{N/mm}^2$ 程度となるように配合を決定した。加力は建研式載荷装置で行い、逆対称曲げモーメント載荷を行った。長期軸力を想定した軸力比 $\eta = 0.20$ に相当する軸力を試験体上部の鉛直ジャッキにより導入した後、水平ジャッキによる水平載荷を開始した。その後、試験体の軸力は、試験体に生じる曲げモーメントが柱部材の曲げ終局強度計算値（NZS式⁵⁾）に達した際に最大軸力（圧縮側 $0.55BDf'_c$ および引張側 $-0.9a_gf_y$ ）に到達するように鉛直ジャッキにて制御した。

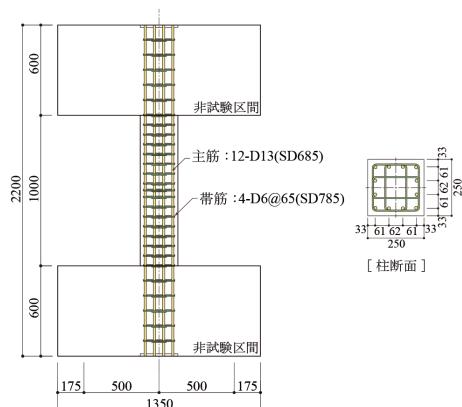


Fig. 1 試験体形状および配筋詳細
Configurations and bar arrangement of specimen

Table 1 試験体諸元
Characteristics of specimen

| 試験体名 | F100-0.55 | F110-0.55 |
|---|--|-----------|
| 鋼纖維混入量 | — | 1.0Vol.% |
| 断面 $B \times D$ [mm] | 250 × 250 | |
| 内法寸法 : ℓ [mm] | 1,000mm (せん断スパン比2.0) | |
| コンクリート強度 f'_c [N/mm ²] | 122.4 | 114.8 |
| 主筋 | 12-D13 (SD685), $p_g = 2.43\%$ | |
| 帯筋 | 4-D6@65 (SD785), $p_w = 0.76\%$ | |
| 軸力比 | $-0.9a_gf_y \sim 0.20BDf'_c \sim 0.55BDf'_c$ | |

a_g : 柱主筋全断面積, f_y : 主筋降伏点 (材料強度)

3.1.2 実験結果

Fig. 2に各試験体の曲げモーメント-部材角関係曲線および最終破壊状況を示す。図中にはACIストレスブロック法⁵⁾およびNZS式⁶⁾より求めた曲げ終局モーメント計算値を併せて示す。鋼纖維を混入していないF100-0.55試験体では、 $R = 7.5 \times 10^{-3}\text{rad}$ の載荷サイクルにおいて、柱主筋の圧縮降伏が確認され、柱頭柱脚部のコンクリートの圧壊およびかぶりコンクリートの剥落が確認された。その後、かぶりコンクリートの剥落範囲が拡大するに従い耐力が低下した。鋼纖維を1.0Vol.%混入したF110-0.55試験体では、 $R = 7.5 \times 10^{-3}\text{rad}$ の載荷サイクルにおいて、柱主筋の圧縮降伏および

*10 技術研究所 研究主任 Senior Researcher, Research & Development Institute

柱頭柱脚部のコンクリートの圧壊が確認されたが、圧壊による損傷はF100-0.55試験体と比較して軽微であった。

Table 2に各試験体の圧縮軸力下での最大耐力とACIストレスブロック法による曲げ終局モーメント計算値との比較を示し、Table 3に限界変形角（最大耐力の80%耐力時の部材角）の実験結果一覧を示す。試験体の最大耐力（実験値）はP-Δ効果を補正した後の値を示している。Table 2よりF110-0.55試験体では、F100-0.55試験体と比較して最大耐力が約13%上昇することが確認された。また限界変形角については、F110-0.55試験体ではF100-0.55試験体と比較して変形性能が約91%向上することが確認された。鋼纖維をコンクリート内に混入することにより柱部材の構造性能（耐力および変形性能）が向上する効果が確認された。

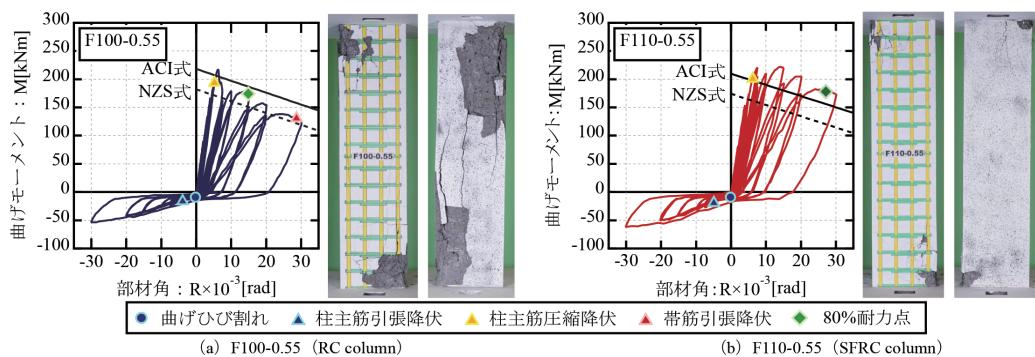


Fig. 2 曲げモーメント - 部材角関係曲線および最終破壊状況
Moment - drift angle relationship and damage of specimen

Table 2 最大耐力と計算値との比較
Comparison of experimental and calculated maximum strength

| 試験体名 | 実験値 M_{exp} [kNm] | 計算値 (ACI式) M_{cal} [kNm] | M_{exp}/M_{cal} | F100-0.55に 対する比率 |
|-----------|------------------------|-------------------------------|-------------------|---------------------|
| F100-0.55 | 230.6 | 218.3 | 1.05 | 1.00 |
| F110-0.55 | 250.6 | 209.9 | 1.19 | 1.13 |

Fig. 3に各試験体の $R=7.5$ および 15×10^{-3} rad時の試験体裏面の最大主ひずみ分布を示す。試験体の最大主ひずみは画像相関法による光学式全視野3次元変位・ひずみ計測システムを使用して算出した。F100-0.55試験体では、かぶりコンクリートの剥落および最大主ひずみが2.0%以上の領域が高さ方向は柱端部から内法高さの約1/3程度まであり、幅方向は柱せいの約1/2程度であることが確認された。一方、F110-0.55試験体では最大主ひずみが2.0%以上の領域が、高さ方向が柱端部から内法高さの約1/4以下となり、幅方向は柱せいの約1/4程度であり、損傷範囲が低減されていることが確認された。鋼纖維をコンクリート内に混入することにより地震時の損傷が抑制され、レジリエンス性を高める効果があることが確認された。

参考文献

- 国土開発技術センター：「建設省総合技術開発プロジェクト 鉄筋コンクリート建築物の超軽量・超高層化技術の開発研究成果報告書H.5.3」，1993年
- 上田忠男，阿部洋，山下真吾，大津勝也：「最高階数59階の超高層集合住宅の設計と施工」，コンクリート工学，第45巻，第3号，pp.39-44，2007年3月
- 石川裕次，小倉史崇，麻生直木，掛悟史，太田義弘：「高強度SFRC柱の曲げ性能に関する実験的研究 その1～その2」，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.305-308，2018年9月
- 掛悟史，小林楓子，田邊裕介，高津比呂人：「高強度SFRC柱のせん断性能に関する研究」，コンクリート工学年次論文集，第44巻，第2号，pp.325-330，2022年7月
- American Concrete Institute：「Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary」，2019年
- Standard Association of New Zealand：「Concrete Design Standard, NZS3101」，2011年

Table 3 限界変形角の比
Comparison of limit drift angle

| 試験体名 | 限界変形角 $R_{80} \times 10^{-3}$ [rad] | F100-0.55に 対する比率 |
|-----------|--|---------------------|
| F100-0.55 | 14.9 | 1.00 |
| F110-0.55 | 28.6 | 1.91 |

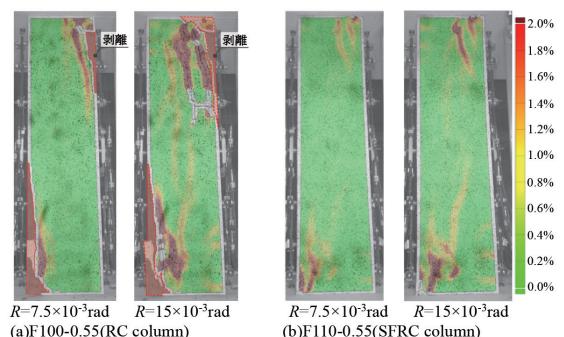


Fig. 3 最大主ひずみ分布
Distribution of maximum principal strain of specimen

3.2 長周期・長時間地震動に有効な耐疲労FMS合金制振ダンパー

Fatigue-Resistant FMS Alloy Seismic Dampers for Long-Period and Long-Duration Ground Motion

井上 泰彦 Yasuhiko Inoue^{*11}

1995年に発生した阪神・淡路大震災以降、特に超高層建物においては制振ダンパーに優先的に地震エネルギーを吸収させることで建物の揺れを低減し、主要構造部材（柱・梁）の損傷を最低限に留める制振構造が普及してきた。近年、発生が懸念されている海溝型巨大地震や長周期・長時間地震動、多数回にわたる余震に対するレジリエンスを高めるために十分な耐疲労性能を確保できる鋼材系制振ダンパーの実現が求められている。このため、既存鋼材と比較して疲労耐久性を約10倍に高めたFe-Mn-Si系合金（以下、FMS合金と呼ぶ）を創出し、それを用いたせん断パネル型制振ダンパーを開発・適用した¹⁾。その後、適用範囲の拡大のためにFMS合金の大型化・低コスト化および部材設計自由度の向上を目指し、「合金製造プロセスの改善」および「溶接技術の確立」に取り組み、汎用性が高いプレースタイプのFMS合金制振ダンパーを開発した。本論では、新たに開発したダンパーの詳細とその適用事例について紹介する。

3.2.1 FMS合金の概要

著者らは、鉄系形状記憶合金として注目されていたFe-Mn-Si系合金が温度だけでなく応力の繰返しにおいても可逆性の高いマルテンサイト変態により優れた疲労寿命を有することに着目し、化学成分を最適化することにより疲労寿命をさらに向上させたFMS合金（公称化学組成：Fe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si（重量%））を開発した。FMS合金は、鋼材と比較して同一のひずみ振幅に対して約10倍の疲労寿命を有することが特徴である。Fig. 1にFMS合金の低サイクル疲労特性を他鋼材と比較して示す²⁾。一般的な鋼材の同一ひずみ条件に対する疲労寿命は鋼材種に因らずほぼ一定であるが、FMS合金は幅広いひずみ領域において疲労寿命に優れることが分かる。また、工業的製造手法である連続铸造プロセスによるFMS合金の製造条件を確立し、高品質な大型圧延材が製造可能となった。加えて、プロジェクト展開を通じて製造実績を積み重ね、安定した製造品質と力学特性が得られる事を示し、2022年には指定建築材料として国土交通大臣認定（認定番号MSTL-0584）を取得し、制振材料としての応用範囲が拡大された³⁾。

3.2.2 開発ダンパーの構成と評価

1) FMS合金座屈拘束プレース

FMS合金の大型・長尺材を大量生産できる工業的製造手法と鋼材との異種金属溶接技術の確立により、芯材変形部断面を平鋼形状としたFMS合金座屈拘束プレースを開発した。Fig. 2に開発ダンパーの構成を示す。本ダンパーは、FMS合金の疲労特性を最大限に活かすことを目的に、芯材変形部に疲労寿命を低減させる要因となる溶接を含まない平鋼断面とした。端部接合部はFMS合金と建築構造用鋼材SN490Bのリブプレートをすみ肉溶接して十字断面を形成し、これを鋼管とモルタルで座屈拘束して部材化した。

本プレースの性能評価として、後述する初適用建物の設計条件を考慮した実機サイズ試験体を用いた疲労試験を紹介する。試験体は、想定最大ひずみ振幅±0.5%において、約2,600kNを負担する断面（325mmW×22mmT=7,150mm²）、芯材長さ7,000mm、塑性化部長さ3,000mmとして設計した。

試験は大型加力装置の使用制限により、既存鋼材ダンパーの疲労寿命の約2倍となる繰返し数1,000サイクルを上限としたひずみ振幅±0.5%による定振幅低サイクル疲労試験とした。試験条件として加力時の偏芯（偏芯量：芯材長さの1/150）の有無をパラメータとして2試験体を加力した。Fig. 3に試験開始時における±0.5%までの漸増ひずみ載荷とひずみ量が±0.5%に到達後の初期10サイクルの荷重-ひずみ関係（正側：引張、負側：圧縮）を示す。

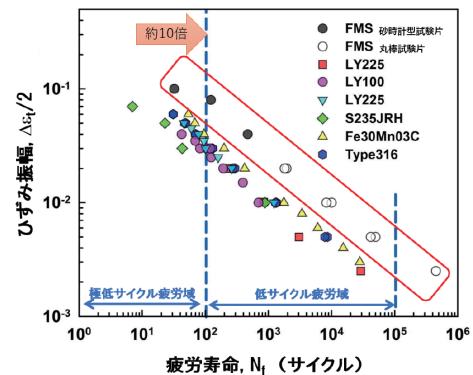


Fig. 1 FMS合金の低サイクル疲労特性²⁾
Low-cycle fatigue properties of FMS alloy

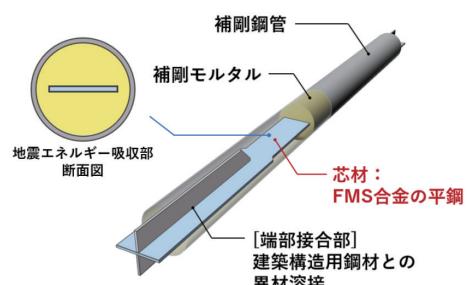


Fig. 2 FMS合金座屈拘束プレースの構成
Configuration of the FMS alloy buckling restrained brace

*11 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

荷重-ひずみ関係は、偏芯の有無によらず安定しており、初期10サイクルにおける履歴特性に大きな変化は見られない。また、Fig. 4にひずみ振幅 $\pm 0.5\%$ の繰返し変形における最大・最小ピーク荷重の推移を示す。2試験体とも繰返し中、不連続な荷重低下は見られず、未破壊で1,000サイクルに達した。以上により、偏芯の有無に因らずプレースとして優れた疲労耐久性と共に発生荷重の安定性及び座屈拘束の有用性が確認できた。

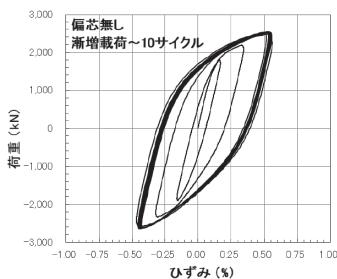


Fig. 3 荷重-ひずみ関係
Load-strain relationships

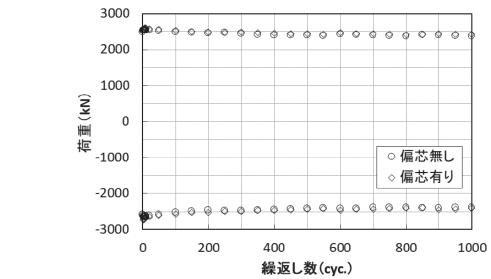
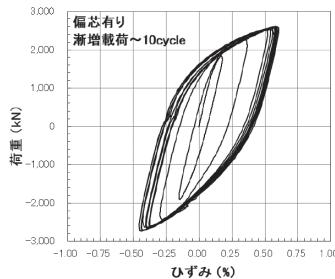


Fig. 4 最大・最小ピーク荷重の推移
Evolution of the cycle load with the number of cycles

2) 高耐力型FMS合金座屈拘束プレース

前節で紹介したFMS合金座屈拘束プレースに加えて、超高層建物に汎用的に求められる荷重容量に対応し、技術の適用範囲を拡大するため、FMS合金の同材溶接技術を確立し、芯材変形部を溶接組立により十字断面として負担荷重を増加させた高耐力型FMS合金座屈拘束プレースを開発した。Fig. 5に開発ダンパーの構成を示す。本ダンパーは、FMS合金による主芯材および副芯材を開発溶接材料にて十字形断面とすることで、優れた疲労耐久性と大きな負担荷重の両立を実現している。十字断面の溶接は、疲労き裂起点となりうる酸化物低減を目的に、MIG溶接による断続すみ肉溶接とした。さらに、断続溶接ビード止端のひずみ集中を低減し、疲労き裂発生・進展を抑制のため、ビード止端をグラインダー処理仕様とした。十字断面は、初適用建物の設計を考慮して降伏軸力2,500kN以上、ひずみ振幅 $\pm 1.5\%$ の繰返し変形時に負担荷重4,000kN以上を有する十字断面($W = 235\text{mm}$, $t = 22\text{mm}$, $A = 9,856\text{mm}^2$)を実機サイズとして設計した。

本プレースの性能評価として、実機ダンパーの降伏軸力を約1/3倍とした小型試験体を用いた疲労試験を紹介する。小型試験体は、降伏軸力838kN ($\sigma_y = 270\text{N/mm}^2$, 十字断面 ($W = 105\text{mm}$, $t = 16\text{mm}$, $A = 3,104\text{mm}^2$)), 塑性化部長さ790mm, 芯材全長2,540mmと設定した。座屈拘束については、実機ダンパーと同等の構成とした。試験は、最大荷重容量2,000kNの一軸動的アクチュエータを用いて、ひずみ振幅 $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$ の3条件における定ひずみ振幅低サイクル疲労試験とした。Photo 1に試験実施状況を示す。加力条件は振動数0.286Hz (周期3.5s), 正弦波加力とした。Fig. 6に各試験において得られた最大・最小ピーク荷重の推移 (正側: 引張, 負側: 圧縮) を示す。各ひずみ振幅条件による引張荷重と圧縮荷重の差は小さく、著しい硬化も見られず、安定した発生荷重を有することを確認できた。

また、塑性化部長さが長いほど拘束材との摩擦や幾何学的非線形による付加曲げにより、塑性化部のひずみ分布の不均一化や局所的なひずみ集中が生じて疲労性能が低下する懸念があつたため、大型試験体を用いた疲労試験も実施している⁴⁾。大型試験体は、実機ダンパーの約70%の十字断面、塑性化部長さ2,484mmに設計し、小型試験体の1.9倍の塑性化部細長比とした。この大型疲労試験体を用いたひずみ振幅 $\pm 1.5\%$ における低サイクル疲労試験により、塑性化部長さを増すことによる疲労性能の低下がないことを確認している。

Fig. 7に小型試験体と大型試験体を用いた性能評価試験により得られた全ひずみ振幅 $\Delta\varepsilon_t$ と疲労寿命 N_f の関係を、

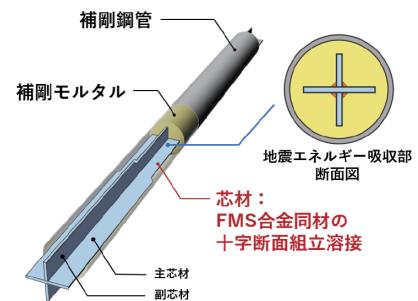


Fig. 5 高耐力型FMS合金座屈拘束プレースの構成
Configuration of the high-strength type FMS alloy buckling restrained brace



Photo 1 試験実施状況
Test status

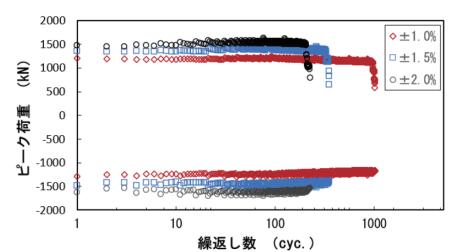


Fig. 6 最大・最小ピーク荷重の推移
Evolution of the cycle load with the number of cycles

一般鋼材（LY100, LY225, SN400B）を芯材に用いた各種変形断面（平鋼, 円形, 十字形, H形）の座屈拘束プレース部材の疲労曲線⁵⁾とあわせて示す。ここで、開発ダンパー試験体の疲労寿命 N_f は、引張ピーク荷重が最大引張ピーク荷重の80%を下回った回数と定義した。開発ダンパーは、一般鋼材ダンパーと比べて極めて優れた疲労耐久性を有することが確認できる。

3.2.3 適用事例の紹介

1) FMS合金座屈拘束プレース

FMS合金座屈拘束プレースは、Fig. 8に示す愛知県国際展示場（2019年竣工）の西棟展示ホールに適用した。適用建物は、100mの大スパン構造物であり、外周部にしか耐震要素が配置できない。一方、建築地が南海トラフ地震の震源に近い地域でもあり、長周期・長時間地震動および余震を多数回経験する可能性があり、災害後の事業継続性、耐震余裕度の確保に課題があった。そこで、本プレースを集中配置し、耐疲労性能余裕度の確保により、地震後もダンパー性能の維持を図ることで、“安全と地震後の建物性能に対する安心”も提供できる建物の実現を目指した。

2) 高耐力型FMS合金座屈拘束プレース

高耐力型FMS合金座屈拘束プレースは、Fig. 9に示す中日ビル（2023年竣工）およびザ・ランドマーク名古屋栄（2026年竣工予定）に適用した。これらの建物は、栄エリアを代表する超高層制振建物であり、複数回の長周期・長時間地震動や大規模地震を受けても事業継続することを目的に、オイルダンパー、粘弾性ダンパー等とともに、地震時の変形が大きい箇所に本制振ダンパーを配置した。また、高耐力化によりダンパー本数を低減でき、設計自由度の向上にも貢献した。

3.2.4まとめ

長周期・長時間地震動対策に有効な耐疲労FMS合金制振ダンパーとして、新たに汎用性が高いプレースタイプの部材バリエーションを拡充し、適用展開を進めている。これらにより、本技術は建物のレジリエンスを大幅に高めることで、地震後の事業継続性を確保できる安全で信頼性の高い構造システムの実現に貢献した。最後に、FMS合金および本技術は、竹中工務店、物質・材料研究機構、淡路マテリアの3者共同研究開発成果であり、開発技術の活用展開を進めるために建築分野に加え土木、他産業分野への応用も目指している。

参考文献

- 1) T. Sawaguchi, T. Maruyama, H. Otsuka, A. Kushibe, Y. Inoue and K. Tsuzaki: Design Concept and Applications of Fe-Mn-Si-based Alloys –from Shape-Memory to Seismic Response Control, Materials Transactions, 57, pp.283-293, 2016.
- 2) I. Nikulin, N. Nagashima, F. Yoshinaka and T. Sawaguchi: Superior fatigue life of Fe-15Mn-1Cr-8Ni-4Si seismic damping alloy subjected to extremely high strain amplitudes, Materials Letters, 230, pp.257-260, 2018.
- 3) Y. Chiba, H. Otsuka, S. Amano, J. Inutsuka, Y. Iwasaki, Y. Inoue, S. Motomura, A. Kushibe, T. Sawaguchi and T. Nakamura: Development of Manufacturing Technology for Fe-Mn-Si Alloys with Excellent Low-Cycle Fatigue Properties and Application to Seismic Dampers for Buildings, Materials Transactions, 65, pp.1583-1587, 2024.
- 4) 大須賀史朗, 河登健太郎, 櫛部淳道, 井上泰彦, 本村達, 石田高義, 鶴ヶ野翔平, 梅村建次：高耐力Fe-Mn-Si系合金制振プレースの開発 その3大型試験体による低サイクル疲労試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.943-944, 2020年.
- 5) 一般社団法人日本建築学会「鋼構造制振設計指針」(2014年)

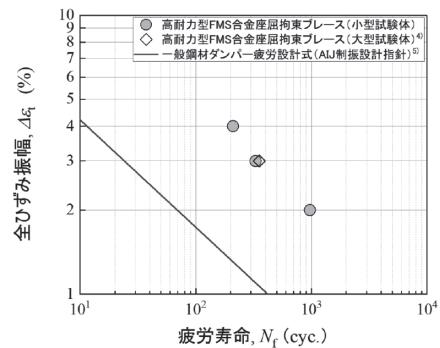


Fig. 7 低サイクル疲労特性
Low-cycle fatigue characteristics

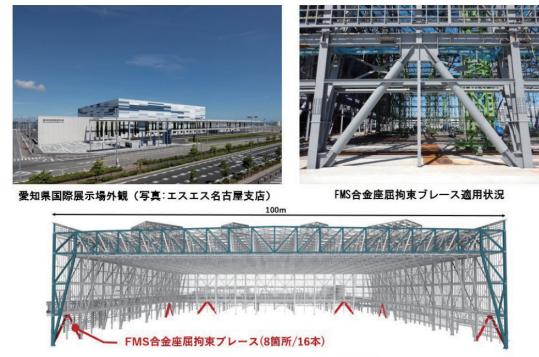


Fig. 8 愛知県国際展示場
Aichi Sky Expo



Fig. 9 中日ビル, ザ・ランドマーク名古屋栄
Chunichi Building and The Landmark Nagoya Sakae

3.3 施設を継続利用しながら施工可能な天井落下防止対策

Ceiling Collapse Prevention Technology Allowing Continuous Facility Operations During Construction

佐藤 恭章 Yasuaki Sato^{*12}

阪神淡路大震災以降、耐震性が向上してきた建物の主要構造体に比べて、天井・内外壁・設備機器といった非構造体の耐震性の課題は取り残されてきた。この課題は、2011年の東日本大震災で各地に起きた非構造体の甚大な被害によって露呈し、特に大面積で落下した天井は、人命を危機にさらし、避難経路・空間を阻害し、建物・都市の機能を停止させた。この経験から2013年の建築基準法告示改正で、新築の特定天井（日常的に人が利用する場所の吊り天井で高さ6m超、面積200m²超、質量2kg/m²超のもの）には「建築物における天井脱落対策に係る基準」が、既存の天井には「落下防止措置等の適用」が制定された。こうした一連の事象は、非構造体の耐震性を考えることが建物のレジリエンス向上に必要であることを広く認知させたが、既存天井の落下防止措置は、天井を覆うネットやワイヤーが天井の意匠を損ねる傾向にあり、工事に必要な仮設足場により施設の継続利用が妨げられるため、工事費用の確保が困難になる例が多く、対策の普及が遅れている（国内の劇場・音楽堂では約2割が対策未実施、約2割が不明¹⁾）。次の大地震に備えて建築・都市のレジリエンス向上を図るためにも、既存天井の落下防止措置の普及を加速させる必要がある。

3.3.1 タフティングサポート構法の概要

典型的な落下防止措置は、Table 1に示した従来構法のように、ネットやワイヤーで天井面を室内側から覆うため、最低でも部分的な足場を組む必要がある。これに対して、当社で開発した「タフティングサポート構法」(Table 1の右)は、天井裏内から天井面に直径30mm程度の孔をあけ、天井面を挟み込む金物（Table 1、以下タフティング金物と呼ぶ）を設置し、その金物を新設の支持部材で吊る方法である。地震時に、天井面が既存の下地材から落下した場合には、新設のタフティング金物によって再度支持されることで、床までの天井面落下防止を図る。本構法では、主にキャットウォークなどを利用した天井裏での施工になるため、仮設足場を必要とせず（工事費の削減）、安定した夜間工事を展開でき、施設を継続利用できる（継続利用による施主の収入確保）。また、タフティング金物は天井面にある間隔で点配置されるため、ネットやワイヤーに比べて既存の意匠性を損ねる心配が少ない（意匠性の維持）。こうした複数の利点を有した本構法を実現させるため、実験や解析を用いて設計法を構築する必要があった。以下にこれらの検討事例を示す。

3.3.2 天井面の面外特性の評価

落下した天井をタフティング金物が支持する際、金物間で天井面は面外にたわむ。したがって、天井面の面外に対する力学的特性を定量的に捉えるための検討を行った。

1) 天井のボード材の材料特性

まず、一般的に天井のボード材は脆性材料であるため、ボード材が損傷しないことを把握することは重要だが、基本的な材料特性でさえ定量的に整理されていることは稀である。したがって、ボード材の曲げ試験（Fig. 1）で基本

Table 1 タフティングサポート構法の利点
Benefits of the tufting support construction

| | 従来構法 | タフティングサポート構法 |
|-------|-----------------------------|------------------------------|
| 概要 | 落下防止ネットを設置 天井損傷時の天井落下を防止 | タフティング金物を設置 天井損傷時の天井落下を防止 |
| 足場 | 部分設置 | 不要 |
| 施設利用 | △ (部分残置) | ○ |
| 工事費 | × (足場の架け払い) | ○ |
| 安全性 | × (高所 上向き作業) | ○ (高所 下向き作業) |
| 美観 | × | ○ |
| 施工概念図 | | |

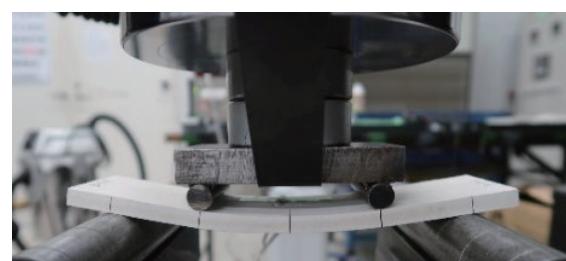


Fig. 1 曲げ試験の様子
Bending test

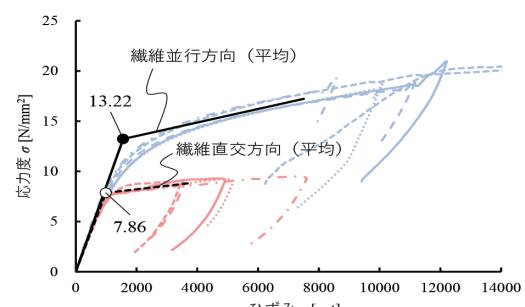


Fig. 2 応力度一ひずみ関係図
Stress-strain curve

*12 技術研究所 研究主任 博士(工学) Senior Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

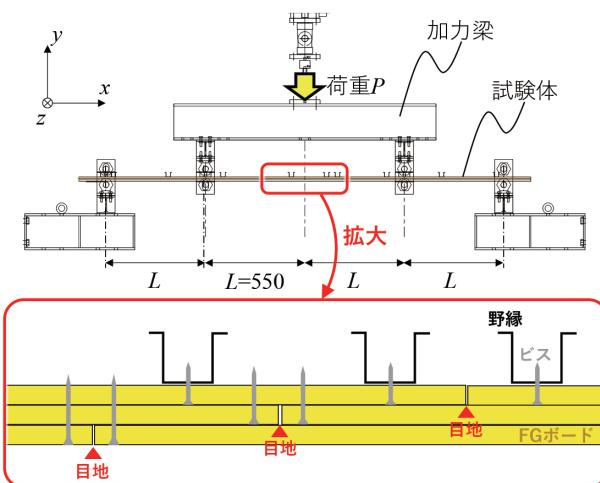


Fig. 3 天井面の4点曲げ試験の概要
Concept of 4-point bending test for ceiling surface

的物性を把握した。紙面の都合上、ホールや劇場などの意匠性ある天井面の仕上げに使用される「繊維混入石膏板（以下、FGボード）」の試験結果をFig. 2に例示した。Fig. 2の黒実線および黒点線はボードの繊維並行方向と繊維直交方向の各平均値を示す。FGボードの降伏応力度（Fig. 2の●, ○印）が異なつておる、異方性が認められる。構造設計時には繊維直交方向の降伏応力度（○印）を基準強度として用いることが想定される。

2) 天井面の面外耐力

一般的に、音楽ホールや劇場など音響性能が要求される空間では、天井のボード材を3~5層に複数重ねて構成されることが多く、ボード材同士の継目が存在するため、天井面が面外の曲げモーメントを受ける際には、ボード材の継目で力の伝達が不連続になると想像される。こうした天井面の力学的特性もこれまで定量的に整理されてきていない。したがつて、天井面に面外曲げモーメントが作用した際の構造力学的な評価を可能にするために、天井面の面外方向の4点曲げ試験を実施した（Fig. 3）。試験体は、ビス及び接着材で3枚重ねられたFGボードが全てFig. 3に示した全体座標系x軸に繊維方向が向くよう配置され、野縁の材軸が全体座標系z軸に向いて作ったものと全体座標系x軸に向いて作ったものの2種を作成した。本報告では、紙面の都合上、前者の種類の試験体の結果を取り上げる。なお、試験体に比べて質量が大きい加力梁とそれに取付いた治具の自重をキャンセルするために、滑車を用いたカウンターウェイトシステムを利用した。試験体は最終的に、Fig. 4に示したようにFGボードの継目でビスの頭抜けが生じた。FGボードの継目の力学モデルをFig. 5のように考えた場合、引張試験で得られるビスの引抜き強度 T_{sc} から天井面の耐力 P_T は次式のように導出される。

$$P_T = (2 \cdot T_{sc} \cdot n \cdot e_s) / L \quad (1)$$

ここで、 n ：引張りを受けるビス本数、 e_s ：目地からビスまでの距離（Fig. 3参照）である。算定された P_T を天井面の4点曲げ試験で得られた荷重変位関係図と比較したもののがFig. 6である。Fig. 6の一点鎖線が算定した P_T 、点線はFGボード3枚を重ね梁とみなして求められる弾性剛性、実線は点線にカウンターウェイトシステムが持つ摩擦力を考慮した理論値である。理論的に求められた結果は試験結果とよく対応しており、FGボードが3



Fig. 4 天井面の崩壊の様子
Collapse of ceiling surface

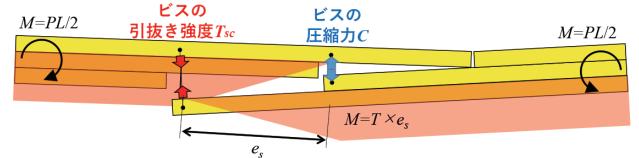


Fig. 5 ボード材の継目における力学モデル
Mechanical model of board joint

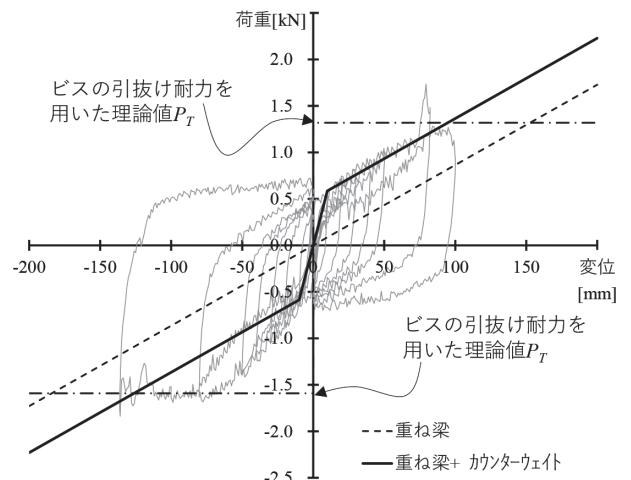


Fig. 6 荷重変位関係図
Force-displacement curve

枚積層された天井面を重ね梁で扱い、式(1)を用いることで、天井面の剛性および耐力を概ね評価できると考えられる。

3) 天井落下衝撃力の評価

最後に、タフティング金物で落下した天井を支える際に受ける衝撃力を評価するため、本構法を施した約3m×3mの天井を意図的に落下させる試験を行った(Fig. 6)。天井面の落下は、天井下地材と天井面(野縁を含む)の間に配置された電磁石ホルダーの通電により制御される仕組みである。試験体は特定天井で想定される天井面の勾配がないフラットなものと勾配があるもの(40度)の2種類を用意した。タフティング金物が落下した天井面を支える際に衝撃力が発生するが、その衝撃力 P_{dy} は文献²⁾から引用した次式で求められることが考えられる。

$$P_{dy} = mg(1 + \sqrt{1 + 2hk/mg}) \quad (2)$$

ここで、 h : 落下距離、 m : 吊材1本あたりの負担重量、 g : 重力加速度、 k : 吊材の軸剛性である。ただし、吊材の軸剛性 k の考え方について注意が必要である。実際のタフティング金物を吊る吊材はワイヤーの上下端にフープが存在するため、Fig. 8の3つの状態で考え、吊材の引張特性は釣合状態における接線剛性 k を2次勾配としたバイリニア型として考える必要がある。また、この吊材の接線剛性 k は引張試験によって得る必要がある。算定された P_{dy} をFig. 9で天井落下衝撃試験と比較する。ワイヤーそのものの軸剛性を k に適用した場合を点線、Fig. 8で示したフープを含めた接線剛性を k に適用した場合を実線で示している。後者の結果(実線)が、落下衝撃試験で得られた吊材の衝撃力(○印群、衝撃力をモニタリングされた吊材6本をL-1~L-6で示す)付近に位置しており、試験結果を概ね内包する結果となった。一部、実線を上回る試験結果があるため、この状況を鑑みて設計時の安全率を設定することが望ましいと考えられる(詳細は参考文献³⁾を参照されたい)。

3.3.3 適用事例

本構法の設計施工指針は、一般社団法人構造調査コンサルティング協会の性能証明(STREC-C021号)を取得し、都内の某劇場天井に適用された。その工事では天井の意匠性を損ねることなく、施設利用を継続したまま工事を遂行することができ、従来構法と比較して施工費を約60%削減した。今後は、多様な仕様の天井にも適用できるよう開発を続けて「人命の保護、被災後の建物機能維持、安全な避難空間」の提供範囲を拡大させ、建物・都市のレジリエンス向上へのさらなる貢献を目指す。

参考文献

- 1) 文化庁「令和4年度劇場・音楽堂等の活動状況に関する調査報告書」公益社団法人全国公立文化施設協会、令和5年3月
- 2) 一般社団法人建築性能基準推進協会: 建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説、設計例5、平成25年10月版
- 3) 小山賢太郎、川嶋浩太ら: 天井落下防止対策構法と性能確認試験 その1~4、日本建築学会大会学術講演梗概集DVD、構造I、pp.883-890、2023年7月

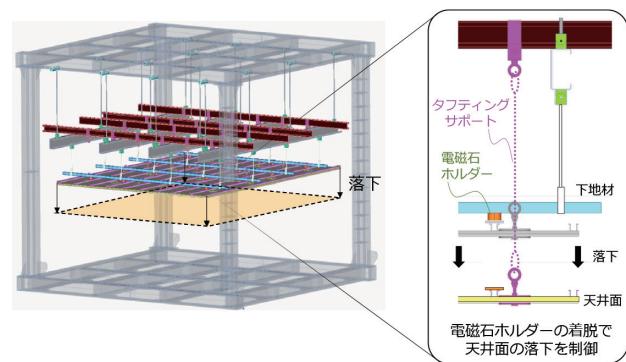


Fig. 7 天井落下試験の概要
Concept of falling test of ceiling

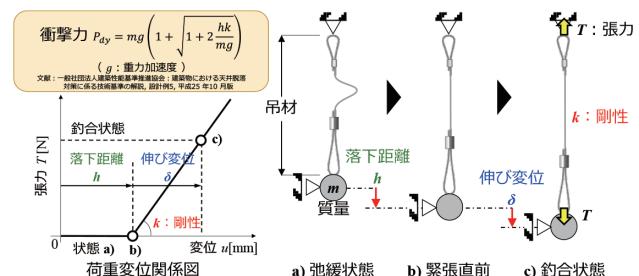


Fig. 8 吊材の引張特性の概念
Tensile property of tensile wire

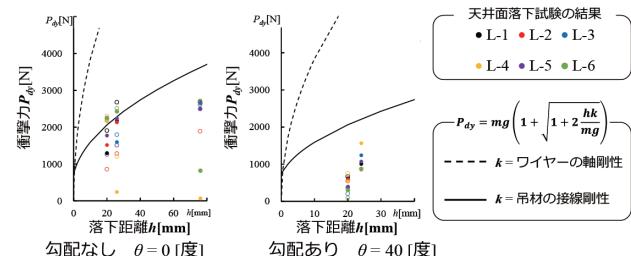


Fig. 9 吊材の衝撃力
Impact force of tensile wire

3.4 木質材料を用いた鉄骨造・RC造の耐震性能向上技術

Seismic Performance Enhancement Technologies for Steel and Reinforced Concrete Structures Using Timber Materials

栗原 嵩明 Takaaki Kurihara^{*13} 金澤 和寿美 Kazumi Kanazawa^{*14} 梁田 真史 Masafumi Yanada^{*13}

近年建築分野において、脱炭素社会を目指す動きを背景として、より大型の建築物に木材を活用する技術が注目を集めている。木材は、樹木が光合成によりCO₂を吸収し固定化した結果得られる材料であり、建築に利用することで建物の供用期間にわたり炭素を固定することが可能である。さらに国産材を利用により、国内林業の活性化と健全な森林環境の維持につながる。これにより森林が本来持つ土壌保全や水源涵養といった機能の改善が期待され、水害や土砂災害の軽減、ひいては国土全体のレジリエンス向上に寄与できると考えられる。

大規模建築物への木材利用を進めるうえで、仕上げ部材として利用する方法は内装制限に留意する必要があるものの比較的適用が容易であるが、構造部材として利用したほうが木材使用量を増やしやすいことから、木材を構造部材として利用するための研究開発が活発である。その中で主要構造部を木造化した耐火木造技術の開発は複数の企業や研究機関で進められており、当社でも「燃エンウッド」¹⁾を開発し、実施適用が進められている。

一方で、さらなる木材使用量の拡大を目指すために、主要構造部が鉄骨造やRC造建物と組み合わせて木材を用いる技術の開発を目指すこととなった。こうして鉄骨造・RC造建物に対する木質材料による耐震性能向上技術として開発されたのが「KiPLUS WALL（キプラスウォール）」シリーズである。これらの技術は変形性能が高く大変形時にも耐力を發揮できることから、建物のレジリエンス向上に寄与する技術であると言える。

3.4.1 技術概要

「KiPLUS WALL」には、鉄骨造に適用できる「KiPLUS WALL for S」とRC造に適用できる「KiPLUS WALL for RC」がある。いずれもCLT（Cross Laminated Timber, 直交集成板）を、新築のRC造および鉄骨造建物において地震や風による水平力に抵抗する役割を担う耐震壁として使用する技術である。本技術では木材は建物の長期荷重を負担しない設計とし、耐火性能は要求されないメリットがある。また適用した建物は混構造になるため、設計は必然的に保有水平耐力計算ルートとなる。このため、この架構における構造特性係数Dsの算定が必要である。

Fig. 1にこれらの架構の構成図を示す。

「KiPLUS WALL for S」は、CLTパネルと鉄骨梁をせん断金物で接合し、CLT両側にタイバーを配置する。地震時にはせん断金物でせん断力を伝達するとともに、CLTの圧縮ストラットとタイバーによってトラスを形成することで変動軸力を処理する機構としている。

「KiPLUS WALL for RC」は、上下辺を凹凸形状（コッター）に加工したCLTパネルをRC骨組に組み込んで一体化する。上下辺のコッターがRC骨組みと嵌合することで、接合金物を用いることなくCLTとコンクリートの支圧によってせん断力を伝達可能な機構としている。コッターの形状は、斜面に垂直な分力によって生ずる摩擦力によって、接触面の滑りが生じないような角度となっている。

3.4.2 構造性能の検証

構造性能の検証として行った実験²⁻⁵⁾の一部を紹介する。

鉄骨造に適用するKiPLUS WALL for Sについては、試験体は実大の1/2縮尺で、柱スパン3,600mmの鉄骨フレームにCLTパネル（S60-5-5, 厚さ105mm）が鋼板挿入ドリフトピン接合を介して接合し、パネル両端にタイバー（厚さ9mm, 幅100mm）を鉄骨梁とボルト接合した。実験のパラメータはCLTの枚数及び幅である。CLT幅1,000mm, 中央に1枚配置したケースの実験の状況をPhoto 1に、実験結果の荷重-変形関係をFig. 2に示す。いずれのケースにおいても層間変形角1/200radまではほぼ弾塑性的な挙動を示し、最終

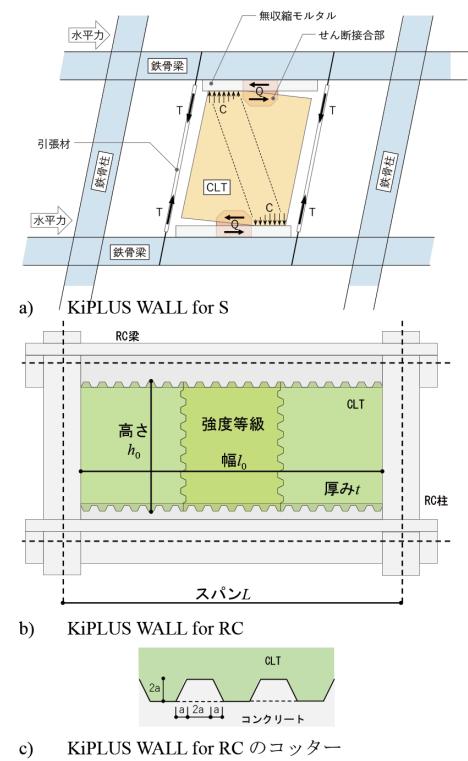


Fig. 1 KiPLUS WALLの構成
KiPLUS WALL

*13 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute
*14 技術研究所 研究主任 Senior Researcher, Research & Development Institute

的にCLTはせん断破壊または圧縮破壊した。CLTの破壊は1/71radから1/50rad以上と比較的大変形時に生じており変形性能が高い耐震要素であることが確認された。

RC造に適用するKiPLUS WALL for RCについては、試験体は1/3縮尺でRCフレームにCLTパネル（ラミナ厚さ10mm）を設置した。RCフレームとCLT及びCLT間の接合部は前掲のコッター形状とした。実験パラメータは、CLTの層構成、柱スパンと分割枚数である。CLTにS60-5-5、厚さ50mm、柱スパンを2,160mmとし壁を3枚のパネルに分割したケースの実験状況をPhoto 2に、荷重-変形角関係をFig. 3に示す。RC側の主筋降伏が1/125rad～1/100rad程度で生じたことに対し、最大耐力を示した1/66以降においてCLTのコッター部付近にひび割れが生じた。最大耐力の発現以後も耐力の低下は少なく、こちらも変形性能に富んだ架構であることが確認された。



Photo 1 KiPLUS WALL for S
実験状況
Test of KiPLUS
WALL for S

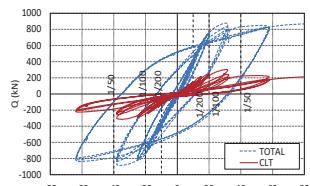


Fig. 2 荷重-変形角関係 (S)
Load-Displacement curve (S)



Photo 2 KiPLUS WALL for RC
実験状況
Test of KiPLUS WALL
for RC

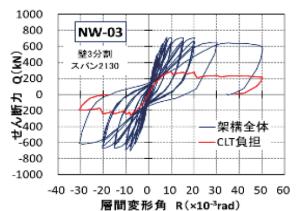


Fig. 3 荷重-変形角関係 (RC)
Load-Displacement
curve (RC)

3.4.3 適用事例

KiPLUS WALL for Sは、兵庫県林業会館（2019年、5階、Photo 3）、タクマビル新館（2020年、6階、Photo 4）などで適用され、KiPLUS WALL for RCは、プラウド神田駿河台（2019年、14階、Photo 5）、FOREST GATEWAY CHUO（2021年、6階）などで採用されている。本技術は、木材への耐火被覆は不要であり内装制限のかからないエリアでは木材を現しで使用することが可能であるため、意匠的にも特徴のある空間が実現されている。



Photo 3 兵庫県林業会館



Photo 4 タクマビル新館



Photo 5 プラウド神田駿河台

3.4.4 まとめ

本節では建築物において木質材料を使用する意義と、その事例として木質材料を用いた鉄骨造・RC造の耐震性能向上技術について紹介した。当社の提唱する「森林グランドサイクル」は、森林資源と地域経済の好循環を実現し、持続可能な社会を目指す取り組みである。木材活用は脱炭素や地域経済の文脈で語られることが多いが、レジリエンス向上の側面も持つ。さらなる木材需要を喚起すべく今後一層の木造技術の革新を進める必要がある。

参考文献

- 1) 木村秀樹, 他: 大規模木造建築の開発, 竹中技術研究報告, No.70, pp.3-27, 2014年
- 2) 福本晃治, 他: CLT+鉄骨ハイブリッド構造システムに関する研究 (その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (構造Ⅲ), pp.645-648, 2019年8月
- 3) 福本晃治, 他: CLT+鉄骨ハイブリッド構造システムに関する研究 (その3~5), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (構造Ⅲ), pp.357-362, 2020年8月
- 4) 安並 卓嗣, 他: CLTを用いたRC架構の耐震壁の構造性能 その1, 2, 日本建築学会学術講演梗概集 (中国), pp.613-616, 2017年8月
- 5) 麻生 直木, 他: CLTを用いたRC架構の耐震壁の構造性能 その3, 4, 日本建築学会学術講演梗概集 (東北), pp.13-16, 2018年9月

3.5 出火場所に応じて進入禁止を表示する誘導灯

Emergency Exit Sign Displaying Entry Prohibition According to Fire Location

長岡 勉 Tsutomu Nagaoka^{*15} 今西 美音子 Mineko Imanishi^{*16}

大規模な建物で火災が発生した際には、当然、多くの在館者が避難する。その際に目印となるのが、避難誘導灯である。避難誘導灯の人型のピクトグラムは1982年に我が国で考案され、1987年にISO6309（現行ISO7010）として承認されており、国際的に広く使われている¹⁾。不特定多数の人が利用する建物や、地下・無窓階・11階以上の階では誘導灯等の設置が消防法令（施行令第26条他）により義務付けられており、避難階段の出入り口などに設置される避難口誘導灯や、矢印により避難の方向を示す通路誘導灯などが、避難経路を明確にするために設置されている。

誘導灯の表示面は平成12年消防庁告示第2号により、そのピクトグラムの形状や色、輝度などが詳細に決められている。一方で、誘導灯は変化のない静的なものであり、刻一刻と変化する火災状況に対応していない。万一、避難階段やその先の避難経路が火災の煙や熱により避難不可能となった場合に、危険な経路に避難者を誘導してしまうという課題があり、特に、不特定多数が利用する施設では、後から来る避難者に押され、引き返すことが困難となるため避難階段に進入する前に対策を講じるべきである。そこで今回、火災感知器と連動して誘導灯に×印を表示することで動的に避難誘導するシステムを開発した。

3.5.1 出火場所に応じて進入禁止を表示する誘導灯システムの構成

先の通り誘導灯の表示面のデザインは詳細に規定されており、その表示面に×印などの異物を組み込むとこれに抵触する。そこで、誘導灯の表示面には手を加えず、標準の誘導灯にFig. 1に示すカバーを被せ、そこに×印を表示する構造とした。カバーは透明アクリルの導光板として、光を拡散する加工を×型に設けることにより、導光板の上端から有色のLED光を照射すると×印が表示される仕組みとした。これにより、常時は標準の誘導灯と変わらず、LED光を照射するとその表面に×印を表示することが可能になった（Photo 1）。また、通路誘導灯については、左右2方向の矢印が表示されているものがあるが、導光板を2枚重ねて2つの矢印に任意に×印が表示できる仕組みとした（Photo 2）。

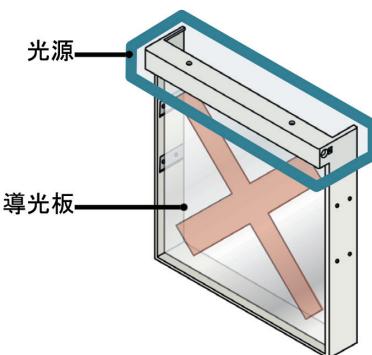


Fig. 1 导光板のカバー
Light guide plate cover



Photo 1 避難口誘導灯
Emergency exit sign



Photo 2 通路誘導灯
Exit passage light

Fig. 2に示すように避難階段の先の避難経路で火災が発生するなど避難階段が利用できなくなつた場合に、当該避難階段を利用することは極めて危険である。そこで、避難階段やその先の避難経路が利用できない場合には、誘導灯に×を表示できるよう、火災感知器と連動したシステムとした。

3.5.2 適用例

2022年にオープンしたポートメッセなごや第1展示館（Photo 3）に本システムを我が国で初めて適用した。この施設は日本最大級の規模で、大

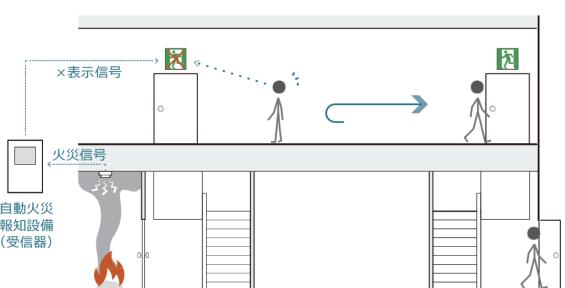


Fig. 2 出火場所に応じて進入禁止を表示する誘導灯システムの概念
Concept of emergency exit sign displaying entry prohibition according to fire location

*15 技術研究所 主席研究員 博士(工学) Senior Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

*16 技術研究所 研究主任 博士(人間科学) Senior Researcher, Research & Development Institute, Dr. Human Sciences

型展示会からコンサートまで様々なイベントが開催される。この内で2階コンコースからの避難先の階段の出口が、イベント利用が計画され火災の可能性のある1階コンコースに接続しており、1階コンコースで火災が発生した際は当該階段を使用しないように、階段の入口に×印が表示できる避難口誘導灯を設置した（Photo 4）。なお、2階コンコースは2方向以上の避難計画がなされており、当該階段を使用しない場合に避難者は容易に別の避難経路を選択でき、危険を伴う場合には当該階段の使用を防止できる。このように不特定多数が利用し、避難経路が多数ある施設において、出火場所に応じて安全な避難経路に誘導する本システムは極めて有効だと考えられる。

なお、本システムの適用に当たっては、当該防火対象物に対して消防設備システム評価を2020年11月に取得し、消防長の同意を得て設置した。

3.5.3 被験者実験による効果の確認

開発した誘導灯の効果を確認するため被験者実験を実施した。実験はFig 3に示す会議室前廊下の扉Aの上部に×印を表示できる避難口誘導灯を設置した。なお、この廊下の両端の扉のデザインはほぼ同じである（Photo 5）。被験者は20～34歳、35～49歳、50～64歳の男女各1名の6名を1グループとし、5グループ計30名とした。

Table 1に示すように、実験条件は扉A側誘導灯の×印の有無（点灯、消灯、点滅）、誘導灯本体の点灯条件（通常点灯、バッテリーポート（輝度が低い））の組み合わせで4条件とした。条件2は基本となるもので2グループ12名に対して実験を行い、それ以外は各1グループ6名に対して実験を行った。実験は、Fig. 3の2C会議室にて被験者1名が軽作業を行っている時に非常放送が流れ、避難開始し、廊下に出た際に、被験者の判断でA扉またはB扉のいずれかに避難を行った。

Table 1に示すように、条件1では、6人中5人がA扉に避難した。×印が点灯していない条件なので、距離が近いA扉に避難することは自然な行動である。一方で、×印が点灯している条件2では12人中10人、条件3では6人中6人、点滅している条件4では6人中4人と、多くの被験者が距離の遠いB扉に避難した。×印により避難方向が明確に反転しており、×印の表示は行動パターンに明らかに影響を与えることが確認できた。

なお、本被験者実験は一般社団法人人間生活工学研究センターの人間生活工学実験倫理審査にて承認を受けている。

3.5.4 色覚障害者対応

我が国の色覚障害者は日本人では男性の5%、女性の0.2%と言われており²⁾、特に赤色を識別できない方が多く、×印を赤色LED光で表示した場合に折角の情報が伝達できず、安全格差が生じる。これを避けるべく、赤と青の2色のLED光を混色させ、紫の×印とした。青みが強い紫とすると、通常色覚の避難者に危険であるというメッセージ



Photo 3 ポートメッセなごや第1展示館の外観
Exterior view of Port Messe Nagoya



Photo 4 出火場所に応じて進入禁止を表示する誘導灯の設置状況
Installation status of emergency exit sign displaying entry prohibition according to fire location



Photo 5 被験者実験の場所（正面が扉A）
Subject experiment site (door A at the front)

Table 1 実験条件と実験結果
Experimental conditions and results

| 条件No. | 実験条件 | | | 実験結果 避難方向 A扉：B扉 |
|-------|------|------|------|-----------------------|
| | ×印 | 誘導灯 | 被験者数 | |
| 1 | 消灯 | 通常点灯 | 6名 | 5名：1名 |
| 2 | 点灯 | 通常点灯 | 12名 | 2名：10名 |
| 3 | 点灯 | 低輝度 | 6名 | 0名：6名 |
| 4 | 点滅 | 通常点灯 | 6名 | 2名：4名 |

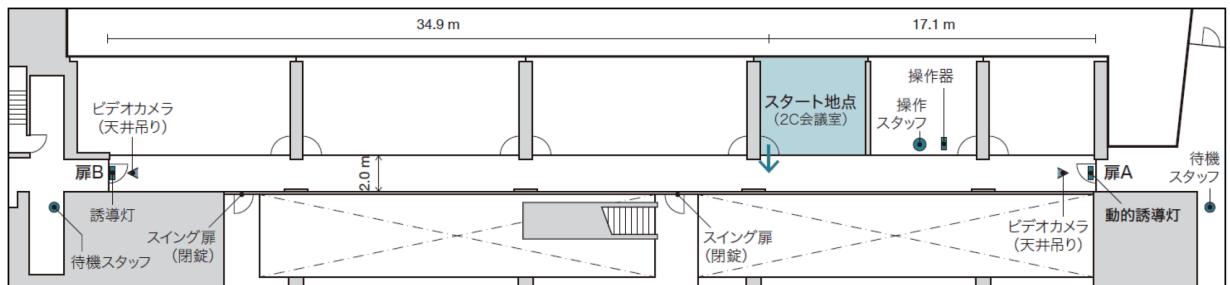


Fig. 3 被験者実験場所の平面図
Floor plan of subject experiment site

ジが伝わりにくくなるため赤紫を採用した。この配色において特定非営利活動法人カラーユニバーサルデザイン機構（CUDO：Color Universal Design Organization）から、色覚の個人差を問わず、より多くの人に見やすいカラーユニバーサルデザインに配慮して作られたものであるとの認証を取得している（Photo 6）。

3.5.5まとめ

火災時に火災の影響を受けている避難経路に避難すると大規模災害に繋がる恐れがあり、これを防止するため、今回、新たな避難誘導システムを開発し、被験者実験によりその有効性を確認した。なお、本技術は当社、ホーチキ株式会社、東芝ライテック株式会社の3社で共同研究開発した。

参考文献

- 1) 神忠久：誘導灯の歴史「黎明期から現在まで」、照明工業会報 pp17-23、2015年3月
- 2) 公益社団法人日本眼科医会：色覚異常を正しく理解するために、2008年4月

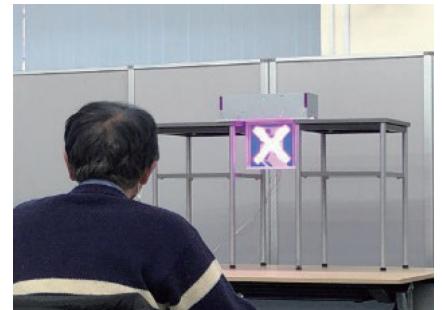


Photo 6 CUD認証評価の様子
Scene of CUD certification

3.6 災害時に利用可能な水洗トイレシステム

Self-sustaining Flush Toilet System in Case of Disaster Using Reclaimed Water Facility

山崎 祐二 Yuji Yamazaki^{*17}

過去の大地震では広範囲で停電、断水、下水管路や下水処理場の破損等の被害が生じ、東日本大震災では全被災地域の停電の80%復旧に3日、断水の80%復旧に20日を要し¹⁾、被災した下水処理場16か所では復旧までに3か月以上を要した²⁾。このことから、災害時に使用不能となるトイレ機能への備えは、電気と比べて長期間の対応を見込む必要がある。現状、被災時のトイレ機能への備えは仮設トイレが主流だが、衛生状態の悪化などQOLが著しく低下する。建物設備でのBCP対応例として、給水では受水槽の容量増大、膜処理による飲料水供給などが、雑用水では雨水・井水の利用が、排水側ではマンホールトイレや緊急時用排水槽の採用事例等がある。しかし、ひとたび下水管が破損すると洗浄用水を確保してもトイレが使用できない、緊急時用排水槽は被災の長期化に対応できないなど課題が残っている。以上のことから、レジリエンスやQOL向上に繋がる災害時に利用可能な水洗トイレシステムへの期待が高まっている。

3.6.1 中水設備を活用したクローズドループ水洗トイレ

事業系建物では、平時用に中水処理設備を導入し、厨房排水や雑排水を処理してトイレ洗浄水に再生利用している事例がある。このような建物では平時に汚水は下水道に放流されるが、災害時に中水処理設備を汚水処理に転用することで、処理水をトイレ洗浄水として建物内で循環するクローズドシステム³⁾を構築できる可能性がある。クローズドループ水洗トイレシステムの概略図をFig. 1に示す。

3.6.2 クローズドループ水洗トイレシステムの検証

膜分離槽（容量100L）を持つ中水試験装置で2人・日に相当するし尿+洗浄水（87.4L/日）を6週間に亘り連続処理するクローズドループ水洗トイレシステムの検証試験を行い、運転の長期安定性、処理水質及び処理水着色状況を確認した。また、処理水の外観を改善するためオゾン脱色試験を併せて実施した（Fig. 2）。装置で使用する膜分離槽の種汚泥は既設の給食センターの中水設備より採取した。投入原水は、仮設トイレに収集したし尿にトイレットペーパー、本装置の膜処理水を汚水の発生原単位^{4), 5)}を基に混合し調整した。

3.6.3 検証結果

試験開始後、段階的に投入量を増加させて目標処理量（87.4L/日）と有機物負荷量（COD（化学的酸素要求量）容積負荷）に到達した（Fig. 3）。pHは、し尿中アンモニアの硝化反応に伴う硝酸性窒素の生成により徐々に低下したが、アルカリによるpH調整で適正範囲に維持できた（Fig. 4）。処理水の電気伝導度（塩化物イオン等のし尿由来の塩類蓄積の指標）は時間経過とともに上昇したが、水処理の阻害を起す値⁶⁾からは大幅に低い水準であった。また、有機物による汚れの指標であるBOD（生物化学的酸素要求量）分解率は試験を通してほぼ98%以上で推移し、腐敗に繋がる易分解性の有機物はほぼ完全に処理されていた（Fig. 5）。また、分離膜の差圧は-12kPa以下で推移し、膜の閉塞は見られなかった。処理水の外観は、濁りは無いものの運転日数経過とともに処理水は褐色に変化した（Photo 1）。槽内汚泥濃度（MLSS）

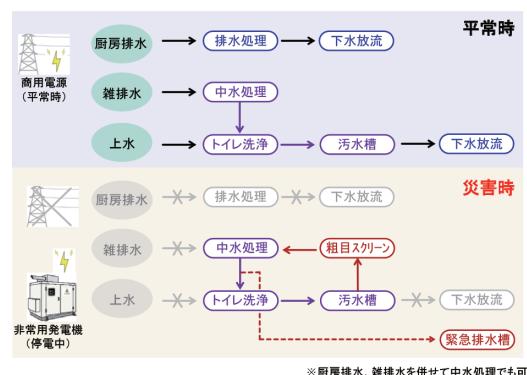


Fig. 1 クローズドループ水洗トイレシステムの概略
Overview of closed-loop flush toilet system

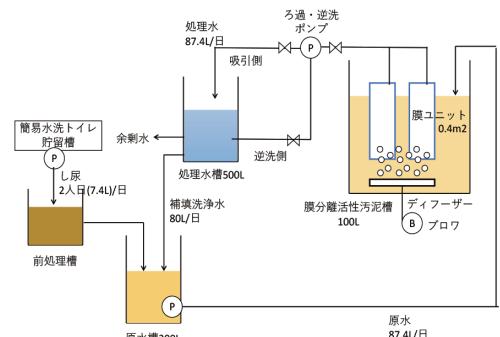


Fig. 2 汚水のクローズド処理試験装置
Equipment of closed wastewater treatment test

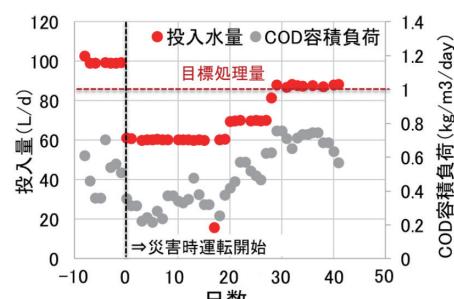


Fig. 3 投入水量とCOD（化学的酸素要求量）容積負荷の推移
Input water volume and COD load

*17 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

は初期のわずかな減少を除き同水準で推移し、期間中の汚泥引抜は不要であった（データ不掲載）。

処理水の建築物環境衛生管理基準（雑用水）の達成状況をTable 1に示す。遊離残留塩素濃度は通常の2倍量の塩素剤添加により基準以上に維持でき、pHはアルカリ剤添加により基準内に維持可能であることが分かった。臭気は試験期間を通して無臭、大腸菌は試験期間を通して不検出を維持した。外観は時間とともに着色が見られたため、6週間の運転後の処理水を用いてオゾン曝気による脱色試験を行ったところ、色度はオゾン曝気時間に比例して減少し、16分の曝気でほぼ透明な処理水が得られることを確認した（Fig. 6）。

以上より、本実証試験を通して中水処理槽1m³あたり20人日（156回/日）に相当するし尿を6週間に亘って安定的に処理し、建築物環境衛生管理基準（雑用水）を満たすトイレ洗浄水を得ることができるクローズドループ水洗トイレシステムを確立することができた。

3.6.4 まとめ

本システムは災害発生後の状況に合わせて機能することできリエントな建物に資する技術であり、平常時の除害設備のランニングコスト増加が無く最小限の追加費用にて災害時の水洗トイレ機能が維持可能であることが特長である。今後、官庁舎や病院、本社ビルなど重要拠点施設におけるBCP機能の向上や、災害時の衛生環境、QOLの向上に寄与することが期待される。

参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会：東日本大震災におけるライフライン復旧概況（時系列編），pp.639-640，2011年
- 2) 国土交通省水道部：下水処理施設の被害及び復旧状況について，2011年
- 3) 山崎祐二，加藤利崇，奥野智久：バイオガス設備と中水設備を活用した災害時に利用可能な自立型水洗トイレシステムの検討，レジリエント建築シンポジウム，2020年
- 4) 中西弘：し尿処理の進展，水質汚濁研究，Vol.14，No.11，pp.766-771，1991年
- 5) 東京都水道局：平成27年度一般家庭水使用目的別実態調査，2015年
- 6) 佐藤孝彦，高木恆弥：活性汚泥に対する塩化ナトリウムおよび海水の影響について，下水道協会誌，Vol.4，No.37，pp.14-20，1967年

Table 1 建築物環境衛生管理基準（雑用水）の達成状況
Achievement of building environmental health management standards (miscellaneous water)

| 項目 | 水質基準 | 結果 |
|--------|----------|-------------------------|
| 遊離残留塩素 | 0.1ppm以上 | ○ 平常時の3~4倍程度の次亜塩素酸の添加必要 |
| pH | 5.8~8.6 | ○ pH調整剤で維持可能 |
| 臭気 | 異常でないこと | ○ 試験を通じ無臭 |
| 外観 | ほとんど無色透明 | ○ オゾンで脱色可能 |
| 大腸菌 | 検出されないこと | ○ 試験を通して不検出 |

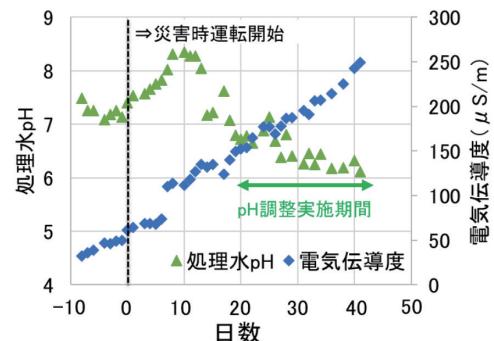


Fig. 4 処理水pHと電気伝導度の推移
Change in pH and electrical conductivity of treated water

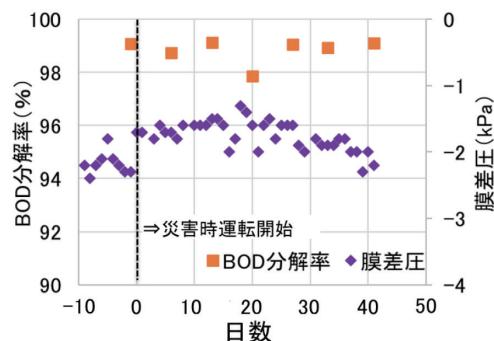


Fig. 5 処理水のBOD（生物化学的酸素要求量）分解率と膜差圧の推移
BOD degradation rate and transmembrane pressure of treated water

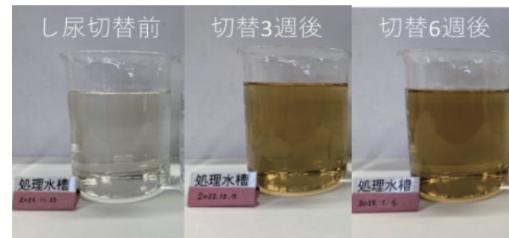


Photo 1 継続運転による処理水外観の変化
Appearance of treated water due to continued operation

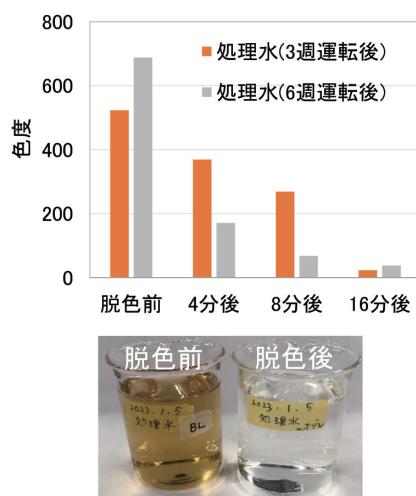


Fig. 6 オゾン脱色による色度および外観の変化
Chromaticity and appearance due to ozone treatment

4 おわりに Conclusion

吉澤 瞳博 Mutsuhiro Yoshizawa^{*18}

頻発する豪雨災害や震度6強を超える内陸直下の大地震の発生、そして新型コロナウイルス感染症によるパンデミックなど、様々な災害の発生を実感している中、南海トラフ地震や富士山噴火などの大規模自然災害の発生も危惧される社会背景を踏まえ、「多様化する災害に対するレジリエンス」と題し、ここ数年に発表された当社の関連する分野の研究成果を取りまとめた。

内閣府による南海トラフ巨大地震の被害想定は2025年7月に見直され、被災範囲もより広域化し、経済損失は東日本大震災の損失の約40倍以上と予測されている。このような大規模自然災害による損失の軽減に向けて、国は2014年に閣議決定された国土強靭化基本計画により、国民の生命、財産、経済活動を守り、社会全体としてのレジリエンス（回復力）を高める政策を推進している。また企業は事業継続計画（BCP）を策定し、災害時により実効性のあるBCPとなるように努めている。国や自治体が進める国土強靭化と企業が進めるBCPとでは、それぞれ異なる主体が推進する活動であるが、共通の目的である「災害に強いレジリエントな社会の構築」において、密接に関係する。国土強靭化は、民間企業の事業継続を支える社会インフラの機能維持を提供し、民間企業は事業継続により地域の経済活動を回すことで、災害に強く持続可能な社会の実現が可能となる。

今回紹介した技術は、基本的に建物単位での被災後の対応力を向上させるための事前評価や対策技術であり、企業のBCPを支援する技術である。近年は想定外の事象にも対応できるよう、災害の種類に関係なく共通の対応手順や体制を整備するオールハザード型BCPの策定が推奨されている。その一方で、災害が発生した場合の損失を減らすためには災害事象を特定したうえで建物などのハード面での対策が必要である。より実効性の高いBCPを策定・運用するために、オールハザード型BCPへの改良とともに、本特集で紹介した技術が損失を減らす一助になれば幸いである。

*18 技術研究所 主席研究員 博士(工学) Senior Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.