

# 「災害レジリエンス向上のための社会的期待発見研究」共同研究成果報告書

## 1. 研究課題名

「20年後に求められる都市レジリエンスと防災技術革新の特定：  
中高層建築物に着目した自然科学と社会科学の歴史的探究」

## 2. 基本情報

提案者（代表者）

氏名	大津山 堅介
所属	国立大学法人東京大学 先端科学技術研究センター
所属先住所	東京都目黒区駒場 4-6-1
電話番号	03-5841-6274
メールアドレス	<a href="mailto:otsuyama@city.t.u-tokyo.ac.jp">otsuyama@city.t.u-tokyo.ac.jp</a>

共同研究者

氏名	山下 拓三
所属	国立研究開発法人防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門
所属先住所	茨城県つくば市天王台 3-1
電話番号	029-863-7273
メールアドレス	<a href="mailto:tyamashi@bosai.go.jp">tyamashi@bosai.go.jp</a>

共同研究者

氏名	廣井 悠
所属	国立大学法人東京大学大学院 工学系研究科都市工学専攻
所属先住所	東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 14号館 9階 910号室
電話番号	03-5841-6274
メールアドレス	<a href="mailto:hiroi@city.t.u-tokyo.ac.jp">hiroi@city.t.u-tokyo.ac.jp</a>

共同研究者

氏名	堀内 敏彦
所属	国立研究開発法人防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門
所属先住所	兵庫県三木市志染町三津田西亀屋 1501-21
電話番号	0794-85-8211
メールアドレス	<a href="mailto:thori@bosai.go.jp">thori@bosai.go.jp</a>

## 共同研究者

氏名	西 峻汰
所属	国立研究開発法人防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門
所属先住所	兵庫県三木市志染町三津田西亀屋 1501-21
電話番号	0794-85-8211
メールアドレス	<a href="mailto:nishi.r@bosai.go.jp">nishi.r@bosai.go.jp</a>

### **3. 本研究を通じて発見した社会的期待の概要**

建築物に着目した自然科学と社会科学の歴史的探究」と題し、戸建住宅に比べ複雑でかつ復旧復興時の合意形成がより困難な共同住宅（マンション）に着目し、日米の住宅制度の変遷や建築技術、情報技術の定性的歴史研究として整理した。

本研究課題を通じて発見した社会的期待は、次世代の性能評価・性能維持評価（動的）手法の必要性が挙げられる。既往研究では、建物ヘルスマモニタリングの提案や海外のレビュー論文による BIM によるヘルスマモニタリングとメンテナンスの重要性は指摘されているものの、管理や組合運営などソフト・マネジメント内容を含めたヘルスマモニタリングの提案は未だ見られない。

そこで本研究課題では、建物の構造性能だけではなく管理情報というソフトデータを掛け合わせた「平時の住まいのヘルスマモニタリング」の必要性を指摘し、このヘルスマモニタリングが未来の都市における社会的期待と言える。その実現に向けた防災技術革新として、センシング技術による耐震性能の把握、さらには不可視部分のテラレーメイド化された地震リスク評価シミュレーションでの補完が求められる。

### **4. 研究成果の詳細**

#### **4.1 分析のフレームワーク**

##### **4.1.1 目的**

本研究が対象としているのは都市の防災・減災を考えるうえで重要な中高層住宅であり、これに関連する 20 年後の将来にて期待される技術を提示し、今後の研究開発の方向性を示すことを目指す。将来への指針を見出すため、本研究の対象領域である建築関連分野で受容された技術、すなわち、社会で必要とされた技術がどのように創成されたかを分析する。まず、新技術が社会に受容されるフレームワークの仮説を提示し、実証する。そのうえで、そのフレームワークを適用する際の留意点も整理する。

##### **4.1.2 仮説の設定**

まず、技術の社会的受容という観点から、クレイトン・クリステンセンが著書「イノベーションのジレンマ 増補改訂版」<sup>1)</sup>、および、「イノベーションへの解」<sup>2)</sup>で示した産業界におけるイノベーションの分析について整理する。

<sup>1)</sup>クレイトン・クリステンセン、(伊豆原弓訳)、イノベーションのジレンマ 増補改訂版、2001、翔泳社

<sup>2)</sup>クレイトン・クリステンセン、マイケル・レイナー、(櫻井祐子訳)、イノベーションへの解、2003、翔泳社

クリステンセンは、産業界の観察から三種のイノベーションがあることを示した。一つめは顧客のニーズにこたえるために製品供給者において技術開発が進展する「持続的イノベーション」である。技術レベルに関する顧客ニーズの上昇に比して製品の技術レベルの上昇は早く、いずれ製品技術レベルが顧客ニーズを追い越すという状況が発生する。この状況に至ると、顧客は技術レベル上昇に対して追加の支出をしなくなり、その製品はコモディティ化し収益性が悪化する。二つめは「ローエンド型破壊的イノベーション」と呼ぶものである。従来製品とは異なる技術思想による製品が、当初は従来製品とは異なる顧客ニーズを満たすことである限られた特定の市場に受け入れられるものの、持続的イノベーションで評価される技術レベルが顧客ニーズを満たさず主要な市場では受け入れられない。しかし、製品の進化により技術レベルが主要市場の顧客ニーズにこたえるようになると需要が一気に拡大し既存製品との置き換わりが発生する。さらに、三つめは「新市場型破壊的イノベーション」である。もともと顧客のニーズに応える製品がなく競合製品により構成される市場自体がない領域に、従来にはない技術思想による製品が提供され新たな市場が創生される。以上の分析は製品と市場の関係に関するものではあるが、都市のレジリエンスに関わる技術の進展と社会の受容も、新たな技術の社会的受容であるため、類似したプロセスであると考えられる。

本研究の構想は、自然・社会環境を背景にしたあるべき社会へのニーズと、技術革新を背景にした都市レジリエンスに関する取り組み方針を対比させて、将来期待される技術を示すことである(図1)。ここでは、それぞれの象限、特に、「あるべき社会」と「都市レジリエンス」の連関について、前述のクリステンセンの示した三種のイノベーションを参照し、次の仮説を設定する。

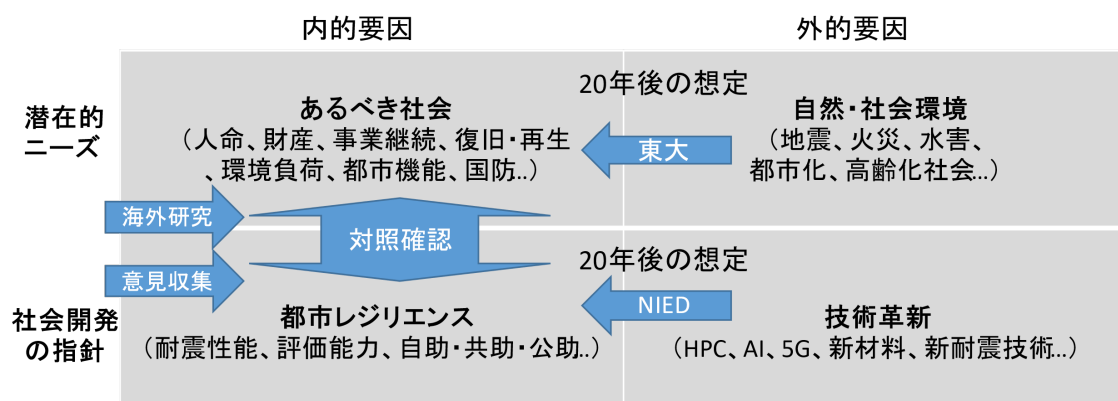


図1 本研究のスコープ

- 「仮説1」：社会的要求が技術革新を要求するケースであり、技術課題が技術革新を牽引する。「持続的」イノベーションに相当する。
  - 「仮説2」：すでに別の分野で創出されていた技術が新たな評価軸で導入されるケースであり、社会的要求が、結果として導入された開発済み革新技術で解決される。「ローエンド型破壊」イノベーションに相当する。
  - 「仮説3」：革新技術により新たな製品・サービスが創出され、それを社会が受容し、社会変化が生じる。「新市場型破壊」イノベーションに相当する。
- 以上を都市レジリエンスの4つ象限に記載して図2に示す。



になった。日本最初の高層ビルといわれる霞が関ビルが建設された 1960 年代は、計算機シミュレーションが実用化され時期と重なり、その利用により高層ビル設計を可能とすることができた。「仮説 3」の例は、免震建物である。橋脚防振技術として積層ゴム製造・活用技術が蓄積され、大地震対応の建築物へのトライアルも進められた。阪神・淡路大震災で免震建物の有効性が示されたことが免震構造への社会的受容が進み、高性能建物技術の一つとして免震システム技術が確立されていった。

#### 4.1.3 仮説の立証方法

##### (1)分析対象

前節で示した仮説が本研究で対象とする建築分野で成立するかを以下の方法で検討する。建築分野における技術開発を網羅する文献として「日本の近代・現代を支えた建築：建築技術 100 選」<sup>4)</sup>を使用する。本書に記載された技術項目の仮説 1～3 による整理を試み、帰納的に仮説の成立性を評価する。なお、この書籍は建築基準法の前身となる「市街地建築物法」が制定されてから 2019 年で 100 年となるのを記念し、(一財)日本建築センターが企画を担当し、委員会方式で日本の建築の流れで重要な 100 のキーワードを選定したうえで、各項目の専門家が見開き 2 頁で技術の内容、経緯、現状などを含め解説を加えたものである。仮説の立証という目的に、本書が適していると考えた理由は、学界・産業界の公平な視点で網羅的に技術がリストアップされていること、および、技術に関する経緯、社会的影響等がコンパクトにまとめられていること、である。なお、「技術」という書名ではあるものの、建築史的に重要なイベント（例えば、東京オリンピック、大阪万博など）や分野（学校建築、庁舎建築など）の説明も含まれており、100 件すべてが仮説の適用可否の検討対象である技術項目とは限らない。

##### (2)検証方法

仮説立証は次の方法によった。各項目が、2 節に記載した 3 つの仮説に当てはまるかを検討し、仮説 1：社会的背景→社会的要求→創出された技術革新、仮説 2：社会的背景→社会的要求→活用された革新技術、仮説 3：技術革新→サービス・製品→社会変化、の形で整理した。なお、「革新技術」には法的な整備も含めた。建築に関しては、新たな技術が創出されても法的に認められないと普及しないが、逆に、法的に認められればその範囲で最適化を図るための技術が進展することがあるからである。

なお、本書には上記の仮説 1～3 に分類されず社会的要求のみを記載した項目もあり、これは別途リスト化した。例えば、「ユニバーサルデザイン」などである。また、3 つの仮説の複数に当てはまるものも存在する。仮説 1 で創出された技術革新が、仮説 3 でさらなる社会変化を産み出すという場合がある。後述するように「鉄骨造」がその一例である。

#### 4.1.4 仮説の立証と適用の留意点

文献 4)に記載された項目を分類した結果を表 1 に示す。仮説 1 には 26 件、仮説 2 には 15 件、仮説 3 には 14 件が分類された（6 件は仮説 1 から仮説 3 に移行したものとし、仮説 1 と仮説 3 にダブルカウントしている）。以下、いくつか、具体的事例を紹介する。

<sup>4)</sup> 日本の近代・現代を支えた建築－建築技術 100 選－，2019，日本建築センター

表1 「建築技術100選」に記載された項目

	仮説1	仮説2	仮説3	社会的要求	分類外 (用語の説明など)
I 住宅	公営住宅・公団住宅、民間アパート、超高層マンション、寒地住宅、スケルトン・インフィル住宅	郊外住宅地、同潤会アパート、炭鉱住宅	分譲マンション、公庫仕様書、工業化住宅、プレカット	住宅性能表示制度	団地、ニュータウン、コーポラティブハウス、コレクティブハウス、高齢者住宅、パイロットプロジェクト
II 一般建築	地下街	ウォーターフロント開発	ペDESTリアンデッキ、公開空地		学校建築、公共文化施設、庁舎建築、モダニズム建築、沖縄型建築、宗教建築・祈念施設、タワー、東京オリンピック、大阪万博、駅ビル、アーケード、都心再開発、ショッピングモール、繁華街、コンベンション施設、テーマパーク
III 各種構造	コンクリートブロック造、鉄骨造、鉄骨鉄筋コンクリート造、鉄筋コンクリート造、耐震設計法、シェル・空間構造、膜構造建築、開閉式ドーム、ツーバイフォー構造、防火構造、耐火木造建築、大規模木造	制振、耐震改修、超高層ビル、鋼管構造、木造住宅の耐震化、伝統木造の構造解析	コンクリートブロック造、鉄骨造、鉄骨鉄筋コンクリート造、鉄筋コンクリート造、耐震設計法、免震構造、超高層ビル		
IV 建築生産・設備	PCa コンクリート・PC、建材のリユース・リサイクル、ALC、ガス給湯器、換気扇、ステンレス流し台、防火設備、エレベーター	場所打ちコンクリート、CAD・BIM、カーテンウォール、屋根防水、断熱・省エネ	浴室ユニット	労働安全対策、インテリアジェントビル	代用資材・竹筋コンクリート、打ち放しコンクリート仕上げ、基礎・地盤改良、外装タイル、アルミサッシ、ガラス建築、合板・新建材、洋風便器、浄化槽、電気設備・照明器具、地域冷暖房、サステナブル建築
V 政策・地域計画				歴史的建築物の保存・再生、まちなみの保全、リノベーション・コンバージョン、ユニバーサルデザイン、建築基準の性能規定化	復興小学校、防火建築帯、スラムクリアランス、密集市街地対策、地域型住宅、植民地建築、容積率規制

(1) 仮説1

公営住宅・公団住宅：「食寝分離」「隔離就寝」を原則とした合理的な住生活の実現を目指したものである。戦後の住宅難を背景に、中堅勤労者への公共住宅の提供を進めるにあたって、京都大・西山を中心に共同住宅における「標準設計」の開発と改善が進展した。

鉄骨造：高度経済成長による建築着工面積の増加に伴い、施工性がよく耐震性にもすぐれた構法が求められた。その一つが鉄骨造であったが、H型鋼、リベット・ボルト・溶接などの接合技術の発展などの各種の技術開発により普及が促進された。

## (2) 仮説 2

超高層ビル：都心部の土地活用の効率化が求められる中、建築物の高さ制限が撤廃され、100メートルを超える超高層建物も可能となった。当時進展していた、柔構造理論、数値解析、設備・材料・施工技術の活用などにより、地震多発、台風襲来地域として初めての超高層ビル（高さ100m超）が実現した。建築物の高さ制限撤廃が建設の端緒であることから、建築の領域では制度の革新も重要であることを示す事例でもある。

制振：建築基準法は人の命を守ることを主眼にしているが、さらに、大地震後にも使用継続を可能とする建物への社会的要求があり、弾性骨組みにエネルギー吸収部材を組み合わせ、取り換え可能な部材にエネルギー吸収を負担させる建設方法が活用されることとなった。

## (3) 仮説 3

免震構造：建物と基礎の間でエネルギーを吸収し上部構造の地震被害を軽減するものである。建物・基礎間に設置される積層ゴムの開発・製造・大型化により免震建物建設が試みられていたが、兵庫県南部地震で有効性が認められ、普及が促進された。

鉄骨造：高強度鋼、超高力ボルトなどの技術の開発・普及が進むことにより、超高層建物の建設が実現した。これにより、都市機能の集約の進展などの社会変化がもたらされた。

分譲マンション：1962年制定の「建物区分所有等に関する法律」に基づき集合住宅の区分所有が可能となり供給されるようになった。これにより、鉄筋コンクリート造の中高層共同住宅の分譲が進み、中高層住宅が普及発展したが、改修・建替などの新たな課題が生まれている。本事例も、制度の革新の重要性を示している。

ここに事例を示したように、一定数の「技術」を仮説にしたがって整理することができ、仮説による技術革新の説明が有効であることが確認できた。前節の分析方法の説明でも示したように、「革新技術」には、法的な整備も含めている。建築に関しては、新たな技術は法的に認められないと普及できないが、逆に、法的に認められればその範囲で最適化するあめの技術が進展するからである。このような側面のイノベーションの分析も、建築分野では重要であることが確認できた。

整理した技術項目には、日本住宅公団（現・UR都市機構）が、技術開発・導入を先導した事例が複数ある（浴室ユニット、スケルトン・インフィル住宅、ガス給湯器、ステンレス流し台など）。戦後の住宅不足対策を国が主導したためと考えられる。20年後の技術進展を考えるうえで、同様な事象が、別の領域・別の主体により生じる可能性の検討が必要である。UR都市機構・集合住宅歴史館でヒアリングを実施したが、次のような状況にあるとのことであった<sup>5)</sup>。

高度経済成長のもと、4大都市圏での住宅供給の要請を背景とし、また、戦火による住宅火災の経験から、もえない・やけない鉄筋コンクリートが求められた。しかし、UR都市機構は組織替えにより住宅分譲事業から撤退し、また、賃貸住宅についても現有住宅の建替のみを対象とし、住宅新築からは撤退することとなった。これに沿い、UR都市機構における新築向け技術開発の役割は終わり、建築研究所（建研）、国土交通省・国土技術政策総合研究所（国総研）と研究内容で重複する部分もあった研究部門が廃止された。現在、国レベルでは、国交省傘下の研究所が技術開発を担うが、規

<sup>5)</sup> UR都市機構集合住宅歴史館における増重主査へのヒアリング，2022/12/05

則制定が主眼となっている。

前述のように規則の改変が技術革新，および，社会変化をもたらすこともあるため，20年後に求められる技術の検討では，国による規制の変化に関しても視野に入れる必要がある。

文献 4)に記載された 100 の技術のうち「社会的要求」と捉えられるものが 8 項目ある（表 1）。これらは，求められる社会変化の一つの視点であり，次章で述べる先端技術と融合することで，今後，どのような技術革新が誘起されるかを検討ができると考えられる。

社会的要求と合致しない技術はレベルが高くても社会に受容されないことに留意が必要である。例えば，スケルトン-インフィル工法がある（UR 都市機構・集合住宅歴史館でのヒアリングによる<sup>5)</sup>）。構造（スケルトン）と内装（インフィル）を分離して建設する発想の住戸であり，住居への要請の変化に対し内装のみを改築して柔軟に対応するというコンセプトであった。柱・梁のみで耐震性を満たした広い空間を確保したうえで，配管の集約，板状の電気配線の開発などで実現された。従来タイプの住宅に比べ，長期的なライフサイクルコストでは競争力があると考えられるが，初期コストが高く普及していない。これは，開発技術が社会的要求にマッチしなかった事例である。



## 4.2 将来のイノベーションの基礎となる技術と将来展望

### 4.2.1 目的

前章で述べた仮説では、社会的要求に合致した技術が社会に受容される（仮説 2 のように、結果的に受容されたものも含む）。そこで、本研究でカバーする 20 年後にイノベーションに活用される技術の想定を試みる。

### 4.2.2 方法

#### (1)分析対象

ここで、検討対象としたのは「世界を変える 100 の技術」（2022 年版<sup>6)</sup>、2023 年版<sup>7)</sup> という書籍である。日経 BP 社がほぼ毎年発行している先端技術を紹介する書籍であり、入手できた 2022 年版と 2023 年版を使用した。一般書ではあるが、幅広い技術を取り扱っており、将来技術の分析という目的に合致すると判断した。本書は、日経 BP の各種技術領域に特化した媒体の編集長および日経 BP のシンクタンク・総合研究所のラボ所長が 100 件を選び、各項目の紹介・解説を記者・研究員が分担執筆（1 項目あたり、2～6 ページ）したものである。技術成熟度も評価している（低：研究段階、中：プロトタイプ、高：実用化）。両書ともそれぞれ 100 件の技術を紹介しているが、重なる項目が 35 件ある（内容で判断）。したがって、2 冊で 165 件の技術が紹介されている。各年度のテーマが設定されており、2022 年版は「ディープな技術」、2023 年版は「融合」となっている。紹介技術が「世界を変える」時期は明記されていないが、「技術期待度ランキング」として 2030 年における期待技術のアンケート調査が実施されていることから、約 10 年後を想定していると思われる。したがって、本研究がカバーする 20 年後よりやや短いスパンとなっている。

#### (2)分析方法

まず、各技術の説明から共通するキーワードを見出してカテゴライズし、全体的なトレンドを把握する。次に、200 件(重複を除くと 165 件)の紹介技術から本研究で対象とする「中高層住宅」に関連するものを次の 2 つの分類で選択し整理する

1. 中高層住宅の計画・設計・建設・使用・撤去に直接的に関わる技術
2. 中高層住宅の計画・設計・建設・使用・撤去を支える汎用的技術

また、参考文献(6)(7)の整理に加え、本研究推進にあたって実施した国内外の研究者のヒアリング結果も含めて分析する。

### 4.2.3 将来技術の分析

#### (1)技術トレンド

表 2 に参考文献 6), 7)で紹介されている技術に関するキーワードを整理して示す。これらを踏まえると、大きな技術のトレンドは、以下と考えられる。

「フィジカル空間をセンシングで把握・データ化し、インターネット空間で画像をはじめとするデータを AI 処理することで有用な知見を獲得し、人間のウェルビーイング向上や地球温暖化に向けた CO<sub>2</sub> 削減を実現する」

<sup>6)</sup> 日経 BP 編，日経テクノロジー展望 2022 世界を変える 100 の技術，2021，日経 BP

<sup>7)</sup> 日経 BP 編，日経テクノロジー展望 2023 世界を変える 100 の技術，2022，日経 BP

表2 「世界を変える100の技術」の項目の分類

項目	2022年版	2023年版	重複	合計	
サイバー	AI	17	15	7	25
	画像	9	12	4	17
	Internet	24	12	5	31
フィジカル	センサー	14	18	5	27
	CO2	21	13	9	25
	人間	26	32	11	47

(2)中高層建物に関わる技術

表3に中高層建物に関わる技術を示す。直接的技術として19件がある。これをVirtual/Real、個別/都市の2軸で整理を試みた(図3)。Realでは個別から都市まで分布しているが、地球温暖化対応・CO<sub>2</sub>削減に向けた技術が中心である。Virtualでは都市全体を様々な視点で捉える技術が進展しつつあることが分かる。

表3 中高層建築物に関連する技術

分類	2022年版	2023年版	件数
直接	エネルギーハーベスティング, ベータボルタ電池, <u>ペロブスカイト太陽電池</u> , <u>住宅/衣服センシング</u> , <u>デジタルツイン</u> , <u>3次元都市モデル</u> , <u>ローカル5G</u> , <u>リバヴィリティ(住みやすさ)指標</u> , <u>太陽光で自家発電する歩道</u> , <u>二酸化炭素を減らせるコンクリート</u> , <u>自己治癒コンクリート</u> , <u>木材・ペットボトルによるアスファルト舗装</u> , <u>自己治癒型アスファルト舗装</u>	<u>ペロブスカイト太陽電池</u> , <u>IoT住宅</u> , <u>防災デジタルツイン</u> , <u>都市OS</u> , <u>グリーンコンクリート</u> , <u>ソフトロボット</u> , <u>低軌道周回衛星</u> , <u>パーティクル設計</u> , <u>リファイニング建築</u> , <u>重機自動化</u> , <u>アダプティブ・バルク・サーチ</u> , <u>分割DNN</u>	19
間接	<u>VRによる認知症教育</u> , <u>量子コンピュータークラウド</u> , <u>誤り耐性量子コンピューター</u> , <u>自然言語処理</u> , <u>AIチップ</u> , <u>AIによるノーコード開発</u> , <u>レトロフィットIoT</u> , <u>UWB</u> , <u>NFT(非代替性トークン)</u> , <u>ハッピーテック</u> , <u>ピープルアナリティクス</u> , <u>スマートロック</u> , <u>空間共有コンテンツ視聴</u> , <u>アンビエント・インテリジェンス</u> , <u>マテリアルズインフォマティクス</u> , <u>匿名化技術</u> , <u>分散型ID</u> , <u>Trusted Web</u> , <u>ドローン規制緩和</u> , <u>合成開口レーダー</u>	<u>ARフィットネス</u> , <u>量子コンピューター</u> , <u>量子誤り訂正</u> , <u>AIつぶやき</u> , <u>文書読解AI</u> , <u>ピープルアナリティクス</u> , <u>映像を使った遠隔検査</u> , <u>マテリアルズインフォマティクス</u> , <u>ドローン配送</u> , <u>Web3</u> , <u>ポリュメトリックキャプチャービデオ</u> , <u>遠隔操作式の人型重機</u> , <u>人間デジタルツイン</u> , <u>キャッシュレス</u> , <u>CPSM(Cloud Security Posture Management)</u>	26

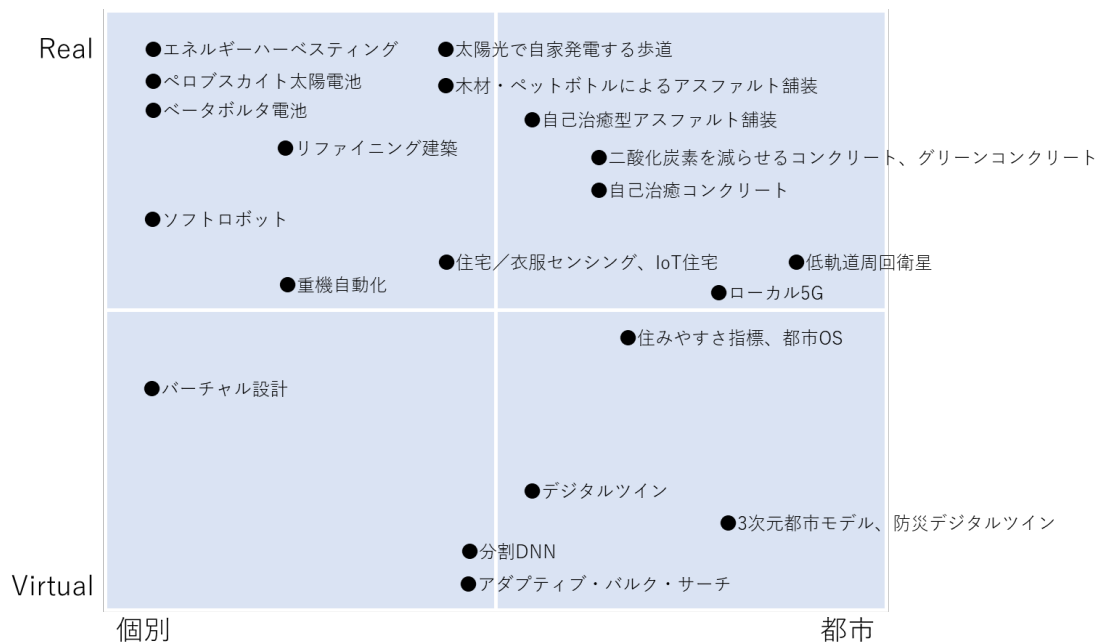


図3 中高層建築物に直接的に関連する技術のマッピング

また、基盤技術として関わる汎用技術は26件ある。これをVirtual/Real、および、ライフサイクル(設計・計画/建設/運用)の2軸で整理を試みた(図4)。設計・計画ではAIや量子計算などの新しい計算技術・環境の活用、建設では空間情報のセンシングと理解、運用では使用する人を理解することの支援技術の進展が期待される。

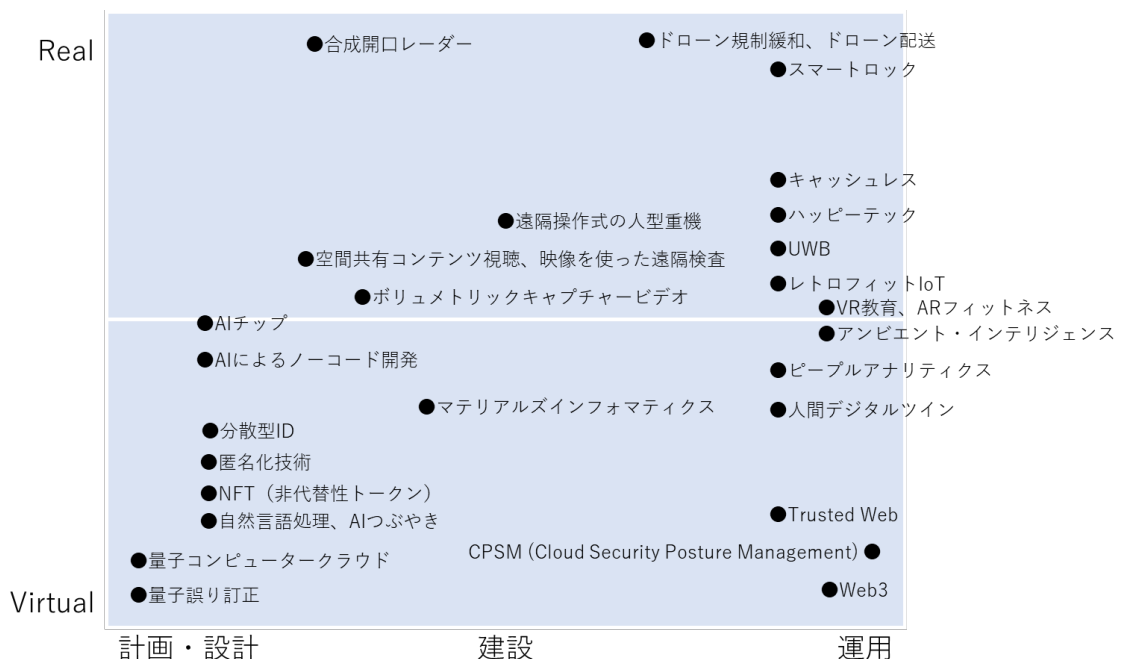


図4 中高層建築物に間接的に関連する技術のマッピング

#### 4.2.4 技術動向

参考文献(6)(7)から、SDGsに集約して表現されている人間のウェルビーイング向上

や地球温暖化に向けた CO<sub>2</sub> 削減を実現する要求が続くと想定できる。これは、中高層建物の分野においても、同様と考えられる。表 3 並びに図 3~4 で整理したキーワードからは想定されるのは以下の通りである。建物ライフサイクル(設計・計画/建設/運用)の効率化と最適化のために、デジタル空間におけるシミュレーションや AI を活用し、建築構造物、さらには、都市のデジタル化 (CAD/BIM, デジタルツイン) が図られることとなる。また、建築基準法の命を守るという目的から発展し、ユニバーサルデザイン、建築基準の性能規程化、インテリジェントビルなど、人間による建物の活用に重点をおいた技術が進展すると考えられる。ウェルビーイング向上の観点から、災害レジリエンス向上が必要であり、上記の「建築基準の性能規程化」が注目に値する。性能規定化の導入には、性能を的確に社会的、経済的な効果として評価できるツールが不可欠である。これはサイバー空間の活用が必要であり、AI 技術の進展も期待される。さらに、性能規定化を受容する社会システム (制度) の導入も必要となる。

#### 4.2.5 ヒアリングの整理

本研究推進にあたって実施した国内外の研究者のヒアリング結果を、前節の分析を踏まえて整理する。

米国 SimCenter<sup>8)</sup>では、PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) によって開発された Performance Based Engineering を発展させて Zig-Saw piece コンセプトを提唱し、シミュレーションの枠組みを開発している<sup>9)</sup>。この枠組みは、Open source, Multi-Fidelity, Multi-Hazard がコンセプトであり、FEMA-P58<sup>10)</sup>のコンセプトをベースにしているが、SimCenter の PELICUN は、マルチハザード対象であるため、地震災害を対象にした FEMA-P58 の範囲を超えた部分も含まれている。なお、HAZUS は簡易的な FEMA-P58 の位置づけである。PELICUN はカリフォルニアが対象として開発されているが、日本向けにアジャストすることは可能であり、また、方法論は転用可能と考えられる。このプロジェクトの最終ゴールは都市をレジリエントに変容させることであり、10-20 年を見据えて実行する必要がある。非常にロングスパンで価値評価することが必要となり、開発のマネジメントが難しい。さらに、その評価ツールについては、正しい予測がなされるというユーザーからの信頼を獲得することが大切である。その検証プロセスが V&V である。なお、防災科研の E-ディフェンスも V&V のための実験データ蓄積に貢献しており<sup>11)</sup>、その充実が求められる。

米国における実験地震工学の拠点である USCD LHPOST6<sup>12)</sup>では、実験研究の主眼を、要素 (components)ではなく、system level behavior の観察による damage observation を目指している<sup>13)</sup>。すなわち、材料、要素レベルは単体実験で確認し、そのうえで、システムを振動台加振実験で検証する。実験結果を拡張して計算し、設計基準化まで展開する。研究課題としては、地震で壊れないことも重要であるが、さらに、復旧に時間、費用がかからない構造を次の課題として考えている。なお、数値シミュレーションについては、過去に実施したブラインドテストで、100%近いばらつきが出たこともあり、

<sup>8)</sup> G. G. Deierlein et al., "A Cloud-Enabled Application Framework for Simulating Regional-Scale Impacts of Natural Hazards on the Built Environment," *Front. Built Environ.* Vol.6, Article No.558706, doi:10.3389/fbuil.2020.558706, 2020.

<sup>9)</sup> UC Berkeley, SimCenter における Dr. Adam Zsarnoczay へのヒアリング, 2022/9/13

<sup>10)</sup> FEMA P-58, Development of Next Generation Performance-Based Seismic Design Procedures for New and Existing Buildings, FEMA, <https://femap58.atcouncil.org/>

<sup>11)</sup> T. Horiuchi et al., "Contributions of E-Defense Shaking Table to Earthquake Engineering and its Future," *Journal of Disaster Research* Vol.17 No.6, doi:10.20965/jdr.2022.p0985, 2022.

<sup>12)</sup> L. Van Den Einde et al., "NHERI@UC San Diego 6-DOF large high-performance outdoor shake table facility," *Front. Built Environ.*, Vol.6, Article No.580333, doi: 10.3389/fbuil.2020.580333, 2020.

<sup>13)</sup> USCD LHPOST6 における Prof. Joel Conte へのヒアリング, 2022/9/16

やるべきことはまだ残されているとの認識である。これらを踏まえ、理論的な情報提供を政策立案者に提供することが地震工学の目指す方向性と考えている。

ツールの確立によるリスクの評価に加え、その結果の住民への伝達とアクションへの発展が課題であることが指摘された<sup>14)</sup>。サンフランシスコ近傍の都市 Alameda Island は SimCenter と共同研究を実施している<sup>8)</sup>。Alameda Island では、リスクの住民への伝達方法について課題意識を持っており、解決策がないリスクについては伝えないという方針であった。ただし、住民は知る権利をもっており、例えば、海面上昇は、地震と違い非常にゆっくり進行しているので感知しにくいが対応は可能であり、きちんと伝える努力をしている。合わせてソリューションのオプションを示すことも大切だとの見解である。この情報伝達により住民が自分事のように感じることも大切であると捉えている。

中高層住宅の一つのアプリケーションである共同住宅における地震災害について、Prof. Robert B. Olshansky (イリノイ大学名誉教授) のノースリッジ地震を対象にした研究がある<sup>15)</sup>。ノースリッジ付近は、もともとは農場地帯であったが、都市化が進み、数エーカーの区画に建設されたアパート (60 年代建設の木造 2 階建など) が地震で被害を受けた (住宅用建物の倒壊は 1 棟のみ)。賃貸であったため、住民の流動性が高く、別の場所に移転する住民が多数にのぼった。そのため、住民不在のスペースができ治安悪化を招いた。行政がこれらを「ゴーストタウン」と指定し管理した。コストの要素を鑑み、行政は無利子の融資プログラムを実行し、主に修理費用に充てられ、比較的素早い復興を成し遂げることができた。これらの意思決定には、住民合意が必要であった。神戸地震の際にも、様々な地域で住民の合意形成が課題となった。例えば、被災したマンションにおいて一部の区分所有者は当該マンションに住んでおらず、その所有者への合意取り付けが問題になった。

#### 4.2.6 将来展望

以上を踏まえ、20 年後を見据えた技術課題として、次のような視点の検討を進める。社会的要求の観点から住民ウェルビーイングが不可欠であり、中高層建築物で構成される共同住宅 (分譲マンションなど) のレジリエンスの課題を明らかにする。図 1 における「自然・社会環境」を踏まえた「あるべき社会」を示し、「仮説 2」のイノベーションをもたらす「技術革新」と「都市レジリエンス」を想定する (4.3 節)。

技術の進展からは、将来技術のトレンドとして明らかとなった、シミュレーションツールの高精度化と検証、フィジカルとサイバーへの連結、AI の活用等について、中高層建物への展開について検討する。これらによって可能となる「仮説 3」のイノベーションについても議論する (4.4 節)。

社会と技術の融合の観点からは、「あるべき社会」と「都市レジリエンス」の連関として、建築基準の性能規定化の環境整備と社会展開について検討し、「あるべき社会」を実現する「仮説 1」のイノベーションに必要な将来技術を明確にする (4.5 節)。

<sup>14)</sup> Alameda Island 市訪問における Danielle Mieler 氏へのヒアリング, 2022/9/12

<sup>15)</sup> Prof. Robert B. Olshansky へのヒアリング, 2022/9/12

### 4.3 なぜ共同住宅なのか：レビュー研究を踏まえた研究課題の探索

#### 4.3.1 日本国内における共同住宅の現状

本研究課題ではなぜ共同住宅（以下、マンション）を対象とするのか。まず図 5 に日本国内における戸建・共同住宅の戸数の変遷を示す。1978 年（昭和 53 年）以降の変遷では、戸建住宅が緩やかな増加がみられる一方、共同住宅は過去 40 年間で 2.93 倍（戸数）の増加となり、近い将来には共同住宅戸数が上回る可能性がある。他方で、共同住宅の割合は全国一律に高いわけではなく、首都圏などの都市部における共同住宅戸数の割合が高く（図 6）、特に東京都では 7 割が共同住宅の居住であると言われ、都市部での主流化傾向がみられる。

また共同住宅の築年数に目を向けると、2021 年現在における築 40 年超の共同住宅は約 115.6 万戸あり、全マンションストック総数の約 17% を占める。なお 20 年後の 2041 年頃には約 3.7 倍にあたる 425.4 万戸に達すると見込まれる<sup>16)</sup>。以上の基礎的なデータからも、近い将来には共同住宅が戸数で戸建住宅を凌駕する可能性があり、特に都市部での住宅の主流化が見込まれる。しかしながら、40 年超という高経年マンションも著しく増加するため、マンションの安心安全分野に関する科学技術のニーズが更に高まることが推察される。

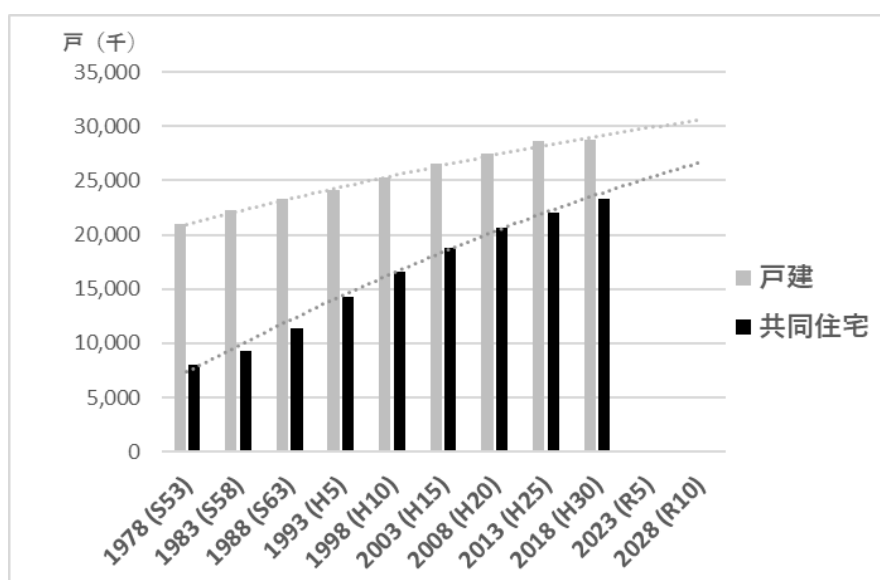


図 5 戸建・共同住宅の戸数の変遷（住宅・土地統計調査を基に筆者ら作成）  
※統計調査では「共同住宅」であり店舗併用を含む

<sup>16)</sup> 国土交通省，マンションに関する統計・データ等，2022

[https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku\\_house\\_tk5\\_000058.html](https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_tk5_000058.html)（最終閲覧 2023/5/28）

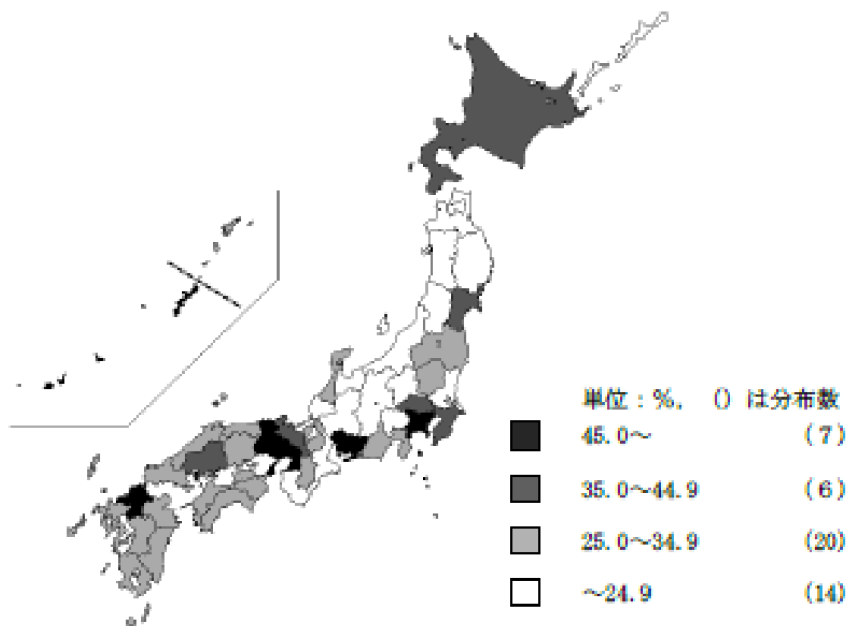


図6 共同住宅戸数の割合  
総務省統計局「平成30年住宅・土地統計調査結果の概要」参照

#### 4.3.2 日米の住宅政策の変遷

図7に日米の住宅政策の比較年表を示す。図の見方として、横軸に法律の制定年や自然災害の発生年を記載し、同横軸の上側に日本の変遷を、下側に米国の変遷を記載している。なお、同年表における自然災害は、本研究課題に沿い地震・津波のみを取り上げ、台風や洪水、土砂災害などの気象系災害は含めていない。また米国を比較対象とする理由は、日本と同様に地震多発国であり1994年に発生したノースリッジ地震や阪神淡路大震災など同時期に都市型地震を経験するなど、類似点も見られることから対象として選択した。

図7を見比べると、日米ともに第二次世界大戦前から、日本における市街地建築物法や米国における連邦住宅法など、住宅に関する法規制の萌芽が見られ、大戦後に米国では同法の改正、日本では建築基準法として発展的な変更を遂げているのが分かる。

この比較年表で特に着目すべき点として、90年代以降の動きである。米国では、1994年のノースリッジ地震以降、大きな地震による被害が見受けられず住宅政策に関しても大きな変化は見られない。一方で、日本では1995年の阪神淡路大震災の影響もあり、被災区分所有建物の再建等に関する特別措置法（以下、被災マンション法）や、マンションの建替え等の円滑化に関する法律（以下、円滑化法）、建物の区分所有等に関する法律（以下、区分所有法）の改正など、マンションに対する災害関連の立法や法改正の動きが多く見られた。その後、東日本大震災や熊本地震を経て、被災マンション法、円滑化法の改正がみられるが、これはより被災後のマンションの解体と売却などの合意形成が実現しやすい方向へと改正されていくこととなった。



図7 日米の住宅政策の比較年表  
 (自治体国際化協会<sup>17)</sup>, HUD<sup>18)</sup>, 小野田ら<sup>19)</sup>, 日本建築センター<sup>4)</sup>を基に筆者ら作成)

<sup>17)</sup> 自治体国際化協会, 米国の住宅政策, 2006. <https://www.clair.or.jp/j/forum/pub/docs/292.pdf>

<sup>18)</sup> The United States Department of Housing and Urban Development (HUD), *HUD at 50*. U.S. Department of Housing and Urban Development, 2015.

<sup>19)</sup> 小野田泰明, 近代以降の集合住宅, *新建築* 91(13), 8-11, 2016.



#### 4.3.2 熊本地震のマンション被災の状況

次に、マンション関連の法改正の契機ともなった熊本地震におけるマンションの被災状況を概観する。熊本市では、該当の 17 団地を含む 40 団地が罹災証明により全壊の判定を受けたことを把握しており、2022 年現在のこれらの被災マンションは、建替決定が 4 団地であり、解体の決定が 10 団地、修繕復旧を選択した団地が 26 棟となった<sup>20)</sup>。既往研究<sup>21)</sup>を参照し、表 4 に熊本地震における共同住宅の全壊認定がなされ、かつ詳細情報が得られた 17 団地の一覧を示す。なお、対象となるマンションでは複数の棟を有するマンションが見られるため、ここでは一群のマンションの単位として「団地」を用いる。この 17 の団地では、築年数が最も浅いもので 19 年であり、最も長いもので 42 年であった。なお平均築年数は 29.25 年であった。このことから新耐震で設計建築されたマンションであっても全壊の判定が示されたことが分かる。

また国では、被災マンションに対する「被災住宅の応急修理制度」や「公費解体」の支援メニューがあるが、熊本市でも独自の対応として、「熊本市被災マンションに対するアドバイザー派遣事業補助金」や、「熊本市被災マンション再生検討費補助金」、さらには「熊本市被災マンション建替え支援補助金」、「熊本市被災マンション解体支援補助金」など、国の支援期限までに合意形成が間に合わなかったマンションにも支援ができる体制を整えた<sup>21)</sup>。既往研究<sup>22)</sup>でも指摘されているように、区分所有法・被災マンション法に基づく管理規約・集会など、戸建よりも厳密な合意形成が必要となるため、被災後を見据えた合意形成ツールの検討は重要な研究課題であると言える。

表 4 熊本地震における共同住宅の被災と全壊一覧

#	戸数	築年数	構造種別	階数	特徴	敷地被害	再建/売却
1	78	29	RC	11	ピロティ・EPJ	亀裂	
2	45	42	SRC	10	ピロティ	沈下	敷地売却予定
3			RC	3			
4	15	37	RC	3			
5	20	16	RC	9			
6	53	22	RC	8			
7	35	29	RC	5		沈下	
8	89	24	RC	10	ピロティ・EPJ	沈下	
9	35	27	RC	7	EPJ	陥没・隆起	
10	37	25	SRC	11	ピロティ		被災マンション法・再建
11	66	20	RC	10		陥没/隆起/沈下	
12	41	42	RC	7	ピロティ		
13	100	36	RC	3-5		隆起/沈下	建替え決議済み
14	45	25	SRC	14	ピロティ	沈下	
15	20	37	RC	4		陥没/隆起/沈下	
16		38	RC	4			
17	119	19	SRC/RC	13	ピロティ		
平均	53.5	29.25		8.06			

友清<sup>21)</sup>に筆者加筆；※詳細判明分の 17 件のみ。#13 のみ複数棟

<sup>20)</sup> 熊本市, 熊本市マンション管理適正化推進計画, 2022.

[https://www.city.kumamoto.jp/hpKiji/pub/detail.aspx?c\\_id=5&id=41303&e\\_id=6](https://www.city.kumamoto.jp/hpKiji/pub/detail.aspx?c_id=5&id=41303&e_id=6) (最終閲覧 2023/5/28)

<sup>21)</sup> 友清衣利子, 熊本地震による被災マンションの概要, マンション学会誌 59, pp.4-9, 2018.

<sup>22)</sup> 久保依子・田中昌樹, マンションがとりうる選択肢—総意に向けた実務上の課題整理—, マンション学会誌 59, pp.44-51, 2018.

#### 4.3.3 論文レビューから見えた研究動向とギャップ

マンションに関する査読論文を整理するため、既往研究の整理を行った(表5)。本稿では、建築学会や都市計画学会、マンション学会などの関連する査読論文のみを取り上げ、45篇を対象とした。収集した査読論文を①阪神大震災以降の90年代後半と2000代、②東日本大震災発生後、③熊本地震発生後・現代という3つの区分に整理した。以下、各フェーズの詳細を列記する。

##### ①阪神大震災以降の90年代後半と2000年代

共同住宅の建設ブームが始まった1960年代から約30年が経過した90年代後半は、分譲マンション建替えと合意形成が主要なテーマとなっている。例えば、米野<sup>23)</sup>は、分譲マンションの建替えに際し、居住水準と費用負担はトレードオフであることを前提として建替え選択肢を推定した。建替え時の費用負担を1000万以下、1000～2000万、2000万以上の三つに類型し、この三類型をさらに敷地面積・戸数・住戸面積・分譲単価でクラスター分析をおこない、最終的に6つの選択肢を提供した。結果として、余剰容積のある物件の建替え可能性が高い一方、既存不適格の場合は費用負担が増加することを指摘した。また阪神淡路大震災の影響から、マンションの建替えの事例研究も見られ、平田<sup>24)</sup>は阪神淡路大震災における甚大な被害を受けた地域内の分譲マンション721件を対象にアンケートを実施し、164件を回収(被災後10か月目)した。結果として、既に建物除去を実施したマンションが約3割見られた一方で、放置が13%という結果も得られた。また、分譲マンション所有者の42%が住み続けたいと答えた半面で借家人の54%が住み替えたいとの回答を得た。

##### ②東日本大震災発生後

2011年の東日本大震災発生後の既往研究では、主に生活の継続・不動産市場・取引価格への影響が論じられている。これは東北の被災地では仙台などの都市部を除き戸建住宅が主な被災を受けたのに対し、津波や地震の影響が限定的だった東京都区部などの都市への影響を測る研究が多くなったことが理由であると推察される。平田ら<sup>25)</sup>は、タワマンと呼ばれる都内高層マンションの8階以上の居住者にアンケート調査(765回答)を実施し、20階以上の居住者の水・食料の備蓄が多い傾向があること、トイレの備蓄はどの階層でも少ないこと、インフラ被害・停止日数を過小評価していること、自宅での滞在が多数であることを指摘した。また、田島・井上<sup>26)</sup>は、液状化被害の遭った浦安市を対象とし、液状化被災のありとなしを対照的に分析し、差分の差分分析を実施した。結果として、取引価格を被説明変数とした重回帰分析では、埋め立て地の方が非埋め立て地よりも1000万ほど高く取引価格されたことが示唆された。金・北後<sup>27)</sup>は、仙台市内の

<sup>23)</sup> 米野史健, 分譲マンションの建替における事業計画内容の推定—東京都区部における民間供給物件の典型例を対象として—, 日本都市計画学会研究論文集 571, pp.44-51, 1998.

<sup>24)</sup> 平田陽子, 分譲マンションの被災と復興—分譲マンションの復興住宅ニーズ, 都市住宅学 14, pp.57-60, 1996.

<sup>25)</sup> 平田京子ら, 大地震時における高層集合住宅居住者の自宅滞在型避難生活に関する研究—東京23区を対象とした調査に基づく発災後の対応可能性—, 日本建築学会計画系論文集 78 692, pp.44-51, 2013.

<sup>26)</sup> 田島夏与・井上茉奈, 東日本大震災が浦安市における中古集合住宅の取引価格に与えた影響: 「差の差」戦略を用いた計量経済分析, 都市住宅学 95, pp.65-70, 2016.

<sup>27)</sup> 金秀蘭・北後明彦, 集合住宅における地震発生後の居住者の生活継続を規定する要因に関する研究—東北地方太平洋沖地震時の仙台市内の分譲集合住宅の対応事例分析—, 日本建築学会計画系論文集 81, 721, pp.541-541, 2016.

分譲住宅管理組合にアンケート調査（81件）を実施し、被害別にみた避難では、半壊、大規模半壊でも一部の人のみが避難し、3割近くは避難していないことを明らかにした。また、避難理由は余震の怖さやインフラの問題であった。被災後の状況として、マンション建物の安全点検やライフラインの把握などは8割近くが実施したのに対し、マンション内での対策本部の設置や炊き出しは20-30%と低かった。主体としては管理員・管理組合が担う役割が多い一方、炊き出しは住民の参加が見られ、管理体制と管理主体の重要性を指摘した。

### ③熊本地震発生後・現在

熊本地震発生後のフェーズでは、築年数の浅いマンションの全壊も少なくなかったことから、復旧復興の合意形成支援や高経年マンションの課題などの研究が目立つ。また、2020年代に入ると超高層住宅（タワマン）の立地に関する研究や管理組合の形骸化・分譲マンションの賃貸化が指摘されている。齊藤<sup>28)</sup>は、築35年以上を高経年マンションと定義（国内マンション平均寿命が42.8で建替決議までの平均7.4年を引いた35年）した上で、管理不全かどうかを外観目視による定性的に評価し、不全（D判定）評価のマンションではアンケートが回収されずA評価は7割の回収となるなど二極化された結果を示した。D判定のマンションでは、小規模な自主管理や賃貸化したものなど、長期修繕計画や積立金がないことが共通している。また、分譲マンションの初期設定（修繕積立金額の設定、長期修繕計画、規約など）の重要性を指摘し、米国カルフォルニア州におけるパブリックレポートシステムのような行政介入やフランスの修繕カルネ制度のような管理体制評価の市場への接続を提案している。また福井<sup>29)</sup>は、円滑化法の改正（2016年）によって耐震性に問題のあるマンションの区分所有関係の解消と敷地売却が認められたものの、2020年4月現在でもマンション建替えは254件（約2万戸）に留まった。その理由として、合意形成に係る調整コストなどを含む「取引費用」の低減が課題であると指摘した。

表5 マンションに関する査読論文対象の変遷

年代	内容	既往研究
90年代～ 2000年代	分譲マンション建替えと合意形成、災害公営住宅	大西, 1995; 平田, 1996; 米野, 1998; 長谷川, 1999; 齊藤ら, 1999; 木内・河中, 2002; 徳尾野・杉山, 2003; 塩崎, 2009
東日本 大震災後	生活の継続・不動産市場・取引価格への影響	吉森ら, 2011; 小松, 2012; 村田ら, 2013; 佐々木, 2015; 村田, 2015; 田島・井上, 2016; 金・北後, 2016; 佐藤ら, 2016; 石塚・横井, 2017
熊本地震後・ 現在	復旧復興の合意形成支援・評価手法の構築・超高層住宅（タワマン）の立地・高度利用・管理組合・管理組合の形骸化・分譲マンションの賃貸化	齊藤, 2016; 長谷川, 2016; 村田・山田, 2016; 劉冬晴ら, 2016; マンション学会誌の特集号（15篇）, 2018; 井本・糸井川, 2019; 齊藤, 2019; 坂場ら, 2020; 深谷ら, 2021; 坂場ら, 2021; 坂場・矢代, 2022; 大沢, 2022; 木村ら, 2022; 福田, 2022

※冗長になるため、本文で参照した文献のみ脚注にて既往研究を明示

以上の既往研究の整理を踏まえ、既往研究の多寡を概念図として図8に整理した。図8は、横軸に旧耐震と新耐震、縦軸に分譲/商用か賃貸か、高さの軸に超高層か低層かを区分し整理した。既往研究では、区分所有者を有する分譲マンションに関する研

<sup>28)</sup> 齊藤広子, 高経年化した分譲マンションの管理上の課題と対応, 日本不動産学会誌 33(1), pp.35-39, 2019.

<sup>29)</sup> 福井秀夫, マンションの負の資産化は防げるか, 日本不動産学会誌 34(3), pp.80-92, 2020.

究は多くの蓄積がみられるものの、賃借人やワンオーナーが有する賃貸物件や雑居ビルに関する既往研究は少ない。特に旧耐震の雑居ビルや賃貸マンションの研究はほとんどみられないため、高経年分譲マンションの増加のように、高経年賃貸マンションや高経年雑居ビルも発生しうることから、今後の研究ニーズが高まると考えられる。分譲マンションの賃貸化・管理の形骸化による課題に対応するため、2022年より「マンションの管理の適正化の推進に関する法律（以下、管理適正化法）」が施行され、マンションの管理が行き届いている物件を自治体が認定し、情報公開をする制度が開始された。

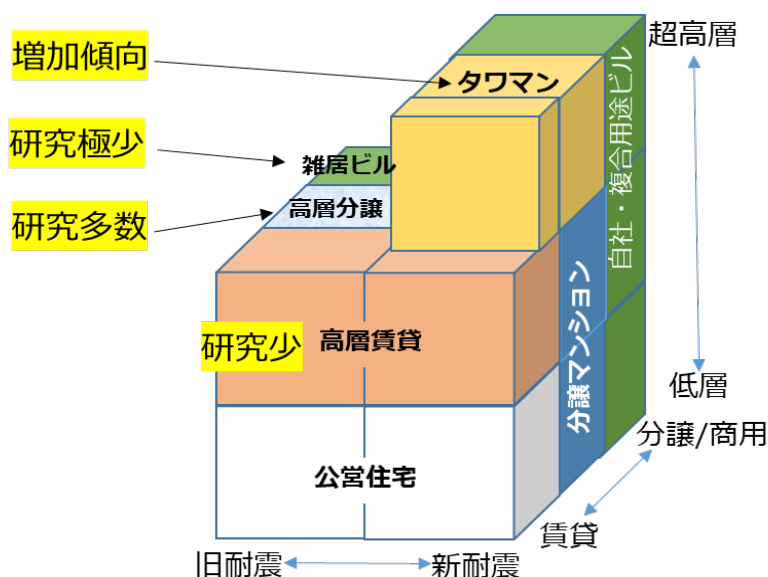


図8 集合住宅論文レビューによる研究対象の定性的類型  
(筆者ら作成)

#### 4.3.4 共同住宅における合意形成と管理組合における情報公開

既往研究のレビューによって得られた成果は、高経年マンションの増加に伴う健全なマンション管理とその情報開示にあると言える。上述のように、適正化法によって健全な管理をしているマンションを公開する流れは、市場評価へと接続させる下地作りとも言える。本設では、日米のマンション管理組合の情報開示の事例比較によって、現在の日本の課題を明らかにする。

表6にマンションの情報開示を先進的に進めている兵庫県神戸市と米国ハワイ州における情報公開の内容を示す。神戸市では、阪神淡路大震災の経験を経て、「住宅の安全性の向上と維持管理の適正化の重要性」<sup>30)</sup>を認識したため、2000年より神戸市住まいの安心支援センターを設置し、情報公開等を含めた住まいの支援を展開している。神戸市における情報公開では、マンションの所在地や管理組名、総戸数、築年など基礎情報だけではなく、賃貸化率、管理費（月額）、修繕工事履歴、地域組織への加入（自治会・町内会など）を明示し、どのような管理体制で運営されているかがわかるような内容となっている。同様に、米国ハワイ州でも基礎情報や管理体制に関する情報開示が見られるが、該当立地の自然災害危険度の明示や過去2年間の組合の紛争や調停など、日本では見られない項目も見受けられる。

<sup>30)</sup> 神戸市住まいの安心支援センター、すまいるネットについて、<https://www.smilenet.kobe-rma.or.jp/about/>  
(最終閲覧 2023/5/29)

両国の情報開示に含まれていない重要な内容として、マンションの建物性能が挙げられる。神戸市の情報開示では、耐震診断の実施の有無が項目に含まれているものの、現状では実施の有無のみであり、Is 値（構造耐震指標）などの定量的な評価指標までは明示されていない。現代の分譲マンション購入者にとっては、新築または新耐震で建築されたマンションの耐震性は無批判に問題ないと受け止められているが、上述の熊本地震のように、繰り返される地震に因る耐震性能維持は不明であり、現状では区分所有者・管理組合にとって耐震性能を知る術がないと言える。

表 6 日米の管理組合等の情報公開

開示項目	神戸市マンション管理の適正化の推進に関する要綱（神戸市）	米国ハワイ州
基礎情報	物件名所在地，管理組合名，総戸数，棟数，土地の権利，階数，構造，竣工年月，空き住戸，賃貸化住戸	物件名所在地，地図，総戸数，棟数，階数，ペット飼育の可否
管理組合	管理形態・管理規約，管理費，総会の開催，金融機関からの借入，滞納者へのルール，財務状況書類の整備	管理形態・管理会社，所有者居住率，管理費（最低額と最高額），過去2年間の増額，組合全体の滞納費，過去2年及び将来の一時金，
リスク	防災マニュアル，防災用品の備蓄，防災訓練の定期的実施，浸水対策	地域の災害危険度（ゾーン）
人員構成	理事長・副理事長，書記，会計，役員	理事長・副理事長，書記，会計，役員
修繕関係	修繕履歴の管理，長期修繕計画，耐震診断の実施，法定点検の実施，大規模な修繕工事の実績・予定，設計図書	長期修繕計画とその毎年の見直し，修繕費用の一時金徴収経験，積立金の預け先，公認会計士による会計検査の有無，修繕積立金の徴収状況
その他	コミュニティ活動（地域組織への加入，マンション内でのコミュニティ活動）	過去2年の組合の紛争や調停，ウェブページの更新状況，規約などの告知の有無，パブリックレポート等

（既往研究<sup>31)</sup>並びに「神戸市マンション管理の適正化の推進に関する要綱」を参照し，筆者作成）

<sup>31)</sup> 齊藤広子，マンション管理が市場で評価されるための課題と制度設計に向けて，都市住宅学 93, pp.131-138, 2016.

#### 4.4 鉄筋コンクリート(RC)構造物の非線形有限要素法(FEM)による耐震解析技術

中高層集合住宅の多くは鉄筋コンクリート造の構造形式であることから、本節では RC 構造物の耐震解析技術を検討対象とする。一般的に普及している質点系モデルや骨組モデルの解析では、それぞれ各階の応答や部材のマクロな応答を予測できるが、部材の詳細な（局所的な）応答や損傷は予測できない。FEM では部材を例えば 6 面体メッシュで分割してモデル化することで部材の詳細な応答や損傷を計算できる。現状では、構造物の被害リスクは、マクロな応答値と被害の関係を被害関数としてモデル化して算出している。しかし、この被害関数は個々の建物の状況と必ずしも対応しているとは言えず、数値解析により直接的に各々の部材の被害状況を予測した上で被害コストを計算することが望まれる。そのような計算を実現するためには、非線形 FEM による耐震解析技術の普及が望まれる。そこでまずは非線形 FEM による RC 構造物の耐震解析技術の発展の歴史について把握する。続いて、現状の数値解析技術の研究開発状況を基に解決すべき課題を提示した上で 20 年後に実現可能性のある技術を予測する。

##### 4.4.1 RC 構造物の FEM による耐震解析技術の発展の歴史と現状の把握

本節では、2022 年度日本建築学会大会構造部門（RC 構造）パネルディスカッション「FEM はどこまで進んだか？-最新の情報紹介と今後の展開-」の資料を参照して、非線形 FEM による RC 構造物の耐震解析技術の発展の歴史と現状について整理する。

###### 4.4.1.1 発展の歴史

本 PD では、RC 構造物の有限要素解析（以下、RCFEM）の発展の歴史について発表がなされている。この発表内容に係り、次節以降の検討において重要と考えられる点を表 7 に示し、以下に概説する。

表 7 鉄筋コンクリート構造物の非線形有限要素法(FEM)による耐震解析技術

年代	内容
60-80 年代	非線形挙動のモデル化の基礎理論の形成 組織的活動が活発化（国際会議、国際コンペ等）
90 年代	コンクリートの破壊力学に関する研究の著しい発展と FEM への適用 共通試験および共通解析（再現性と課題の把握）
2000 年代 以降	<u>実務利用に向けた取組</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 共通解析の実施と Web データベースでの公開</li> <li>・ 利用のためのガイドライン</li> </ul> <u>RC 構造の諸問題に対する応用の取組</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ポストピーク挙動解析</li> <li>・ 部材の損傷度評価</li> </ul>
最近の 状況	防災科研で開発している数値震動台 産業競争力懇談会からの大型建設物に対するシミュレーション技術の高度化の要請 実務における BIM の普及の促進

1960 年代から 1980 年代の萌芽期において、1960 年代に RC 構造物の有限要素解析（以下、RCFEM）の研究がはじまり、1970 年代～1980 年代にかけて付着作用モデル、ひび割れ面のせん断伝達モデル、ひび割れコンクリートの圧縮劣化といった非線形挙動のモデル化の基礎理論が形成されていった。また、1980 年代になると組織的活動が活発化し、RCFEM に関する世界で最初の国際会議、RC 部材の挙動予測に関する国際コンペが開催された。1985 年に開催された第 1 回日米セミナーにおいては、破壊力学

を導入した RCFEM の研究事例が紹介されてその後の新しい研究の方向性が示される形となった。

1990 年代の発展期においては、コンクリートの破壊力学に関する研究の著しい発展とそれの RCFEM への適用が重要な点として述べられている。この時期に開催された AIJ 大会の PD においては①実験的研究との関係、②実務設計への有効活用の方法、③ RCFEM の教育方法についての課題が提示されている。またこの時期には、JCI や AIJ において部材の共通試験および共通解析が実施されており、実験の挙動を追跡できることの確認や、破壊現象を解析する場合の要素寸法依存性等の問題点の把握がなされている。

2000 年代以降の成熟期においては、コンピューターの高性能化や汎用 FEM の普及により時間やコストの制約が緩和されて、RCFEM による試行錯誤が可能となった点の重要性を指摘した上で実務利用に向けた取組と RC 構造の諸問題に対する RCFEM の応用の取組について述べられている。

実務利用に向けた取組については、AIJ の委員会で共通解析を実施して Web データベースでの公開が行われ、その成果報告書に市販ソフトウェアの適用性について各ソフトウェアの解析例や問題点と対策がまとめられた。また、JCI ではコンクリート構造物への非線形有限要素法利用のためのガイドラインの作成を目指した活動が行われ、その成果として非線形 FEM の利用における基礎的な事項や留意事項をまとめた報告書が刊行されている。

RC 構造の諸問題に対する RCFEM の応用の取組については、RCFEM による非線形解析の発展により、最大荷重を超えたポストピーク領域の詳細な破壊性状を予測し、それによる損失やその発生確率を定量的に評価する必要性が高まるとの予想を基に、JCI の委員会において RC 構造物のポストピーク挙動解析の取組がなされた。このために実施された曲げ圧縮破壊する梁の共通解析では、局所理論と非局所理論の比較が行われ、ポストピーク後の挙動を対象とする場合には、非局所理論の適用について検討する必要があることが指摘された。また、RCFEM から得られる材料レベルの情報を活用して部材の損傷度を評価する試みについても述べられている。

本発表のまとめでは、近年の状況として、防災科研で開発している数値震動台（Eーディフェンス実験データを活用して開発している非線形有限要素解析プログラム）の開発、産業競争力懇親会からの大型建設物に対するシミュレーション技術の高度化の要請、および、実務における BIM（Building Information Technology）の普及が進んでいることに触れて、RCFEM の応用の流れが急速に進むことを予想している。

最後に、1991 年の AIJ の PD で提示された 3 つの課題は現在においても重要な課題であるとして、以下の必要性について述べている。

#### ① 実験的研究との関係

これまでに蓄積されてきた共通試験体等を集約したデータベースを再構築するとともに、最新の試験データベースから試験体を選定するなどして、データベースを拡充する必要がある。

#### ② 実務設計への有効利用の方法

現行設計法の枠組の中で有効利用の方法を検討するだけでなく、RCFEM の利用を前提とした設計の枠組みについても検討し、そこで必要とされる解析技術と解析精度を明確にして、RCFEM の研究にフィードバックすることが必要

#### ③ RCFEM の教育方法

可能な限り①のデータベースを広く公開し、研究者だけでなく、設計実務者や大学院生などが試行錯誤しながら RCFEM の技術を高める練習の場が整備されることが望ましい。

#### 4.4.1.2 現状の把握

本 PD では、過去 20 年間の RC 造部材を対象とした FEM 解析に関する論文 768 例を対象とした統計調査に関する発表がなされた。そのまとめにおいて、解析の活用用途としては多くが実験結果のシミュレーションとしての活用となっているが、一方で精度の高いシミュレーションを活かして部材内部性状の把握やパラメトリックスタディへ展開する論文例が増えていることが述べられている。また、本 PD では大阪府吹田市千里万博公園内の博物館「NIFREL」に採用されたウェブ・ウォール構造の実設計に FEM を活用した事例紹介の発表もなされた。

本 PD に関することではないが、筆者らは、社会的期待発見研究の活動において、国際的な動向の把握のために米国 NHERI の実験施設 LHPOHST(Large High-Performance Outdoor Shake Table)を訪問し、Joel Conte 教授とディスクカッションを行っている。その際にプレキャスト建物の実験事例の紹介があり、数値解析と併せて耐震設計手法開発をしているとの発言があった。これらの状況から、今後、RC の耐震解析技術は実験の再現のみならず技術開発や設計手法の検証に加えて実設計への活用が進むと考えられる。

#### 4.4.2 現状の取組に基づく 20 年後の技術的状況の予測

前節で述べたように、RCFEM による耐震解析技術は、1960 年代～80 年代の萌芽期、1990 年代の発展期、2000 年代の成熟期を経て、実務への普及が進むことが予想される。ここでは、まずそのために解決すべき課題について整理したうえで、現状の数値解析技術やその周辺技術の開発状況を踏まえて 20 年後の技術の達成状況を予測する。

##### 4.4.2.1 解決すべき課題

###### モデル化の課題

RCFEM では、対象構造物を 4 面体や 6 面体等のメッシュで分割して解析モデルを作成することになる。RC はコンクリートと鉄筋からなる複合材料であり、鉄筋の配置を考慮してメッシュを自動的に生成する技術は未確立である。そのため、現状では、構造物の解析モデルの作成には多大な労力を要する。

###### 計算時間の課題

FEM により建物をモデル化するとその計算規模は数百万～数億自由度となり、高性能な計算機の環境が必要であり、計算時間も数週間から数ヶ月要することになる。

###### コンクリート材料構成則の課題

前節で述べられたように、ポストピーク後の挙動について要素の寸法依存性等により非局所化理論の導入の必要性が指摘されており、引き続きの研究開発が必要となる。

###### 信頼性に関する課題

数値解析による信頼性の確保は実務に利用していく上で重要となる。そのためには、一つに数値解析の品質を保証するための検証と妥当性確認 (Verification & Validation; V&V) 手法の確立が必要となる。もう一つは、適切に数値解析を使うための技術者の教育が必要となる。

#### 4.4.3 現状の数値解析技術や周辺技術の状況を踏まえた将来予測

###### モデル化の課題

筆者が開発している数値震動台では、メッシュ分割の操作なしに建物情報の入力のみによってコンクリートを 6 面体要素で鉄筋を線材要素でメッシュ分割して解析モデルを作成するソフトウェア (E-Modeler) を開発している。図 9 に E-Modeler で作成し



た RC 建物の解析メッシュを示す。現状の適用範囲は E-ディフェンスで実施された実験の整形な RC 構造物の試験体であるが、今後様々な種類の部材や通り芯が直交しない非整形なプランの建物にも適用可能となるように開発を進める。この技術の確立は 10 年以内と想定している。

#### 計算時間の課題

近年の機械学習の技術の発展は著しい。数値解析の研究分野においても機械学習との連携手法の開発が進められている。サロゲートモデルは元の数値解析に遜色ない精度で計算を高速に実行可能な代理モデルのことであり、このサロゲートモデルの構築に機械学習を利用する研究が活発化している。筆者も図 10 に示すように詳細 FEM のサロゲートモデル開発に着手しており、RCFEM の地震応答解析への適用を目指している。5 年以内にプロトタイプを完成し、10 年以内には実用化されることを見込んでいる。

#### コンクリート材料構成則の課題

コンクリートの非線形構成則において、最大耐力に到達するまでの挙動については、比較的高い精度で予測できるようになってきており、三軸応力下の材料構成則を用いた地震応答解析も可能になりつつある。筆者もコンクリート材料の弾塑性損傷構成則を開発し、図 11 に示すように、10 層 RC 建物の E-ディフェンス実験の再現解析を行い中規模の被害を再現している。現在、大規模の RC 構造物の被害再現に向けて構成則の高度化を進めている。一方、耐力低下域を含む破壊までの挙動については、まだ十分な信頼性を得られていない面がある。筆者はポストピーク後の挙動についてその必要性が指摘されている非局所化理論の導入に関して、二国間交流事業により、インド工科大学ハイデラバード校と共同研究を実施している。コンクリート材料構成則に関する課題については、研究的要素が強く不確実性が高いため見通しを示すことは難しいが、その時の最善の手法について精度を確認しながら実務利用を進めていくことになると想定される。

#### 信頼性に関する課題

数値解析の妥当性確認のためには実現象の再現性を確認するために様々な種類の部材実験や構造物の震動台実験のデータに容易にアクセスして活用するための公開データベースの構築が必要である。その際に当該実験の関係者でなくても適切にデータを活用するための実験のメタ情報の整備が必要である。E-ディフェンス実験については、E-ディフェンス実験データアーカイブ (ASEBI) で実験情報、試験体情報とともに実験データを公開している。しかし、メタ情報のデータフォーマットは標準化されていないため、利便性には課題がある。数値震動台では 1000ch 規模の実験データとの多点比較のための処理プログラム (E-Validator) を開発している。実験のメタ情報を入力することでセンサー位置での応答の比較やセンサー値から計算された工学的特徴量の比較を自動化している。筆者らは、ASEBI 側でデータセンサー Web-API を開発センサー情報のデータ標準化を行うことが、利用者が自身のコンピューターで E-Validator を利用して、容易に数値解析結果と E-ディフェンス実験結果の比較ができることを目指している。大学や学協会等の協力を得てオールジャパンでの取組が必要となるが、10 年で RC の部材実験および建物実験データを用いた妥当性確認のための環境整備が進むと考えられる。

技術者の育成については、前述のようにガイドラインの作成や資格制度の検討も必要と考えられる。筆者は大学や実務者の教育に RCFEM のオープンソースプログラムを活用するべきだと考えている。数値震動台は、現在オープンソース化の準備を進めている。オープンソースコードに加えて理論マニュアル、プログラムマニュアル、チュートリアル、研究で実施された解析データを公開することで学生、研究者、実務者へ

の RCFEM の教育素材を提供したいと考えている。

なお、建築学会では「建築物の性能を保証する数値解析技術と資格制度に関する特別調査委員会」（2021年4月～2023年3月）で本課題に関連する調査が行われており、今後、学会と協力した取組を進めたいと考えている。

以上の信頼性に関する課題については、多くの関係機関と協調しながら、取組の試行や環境の整備から制度設計など多岐にわたる活動が必要となると考えられ、20年スパンの活動になると予想される。

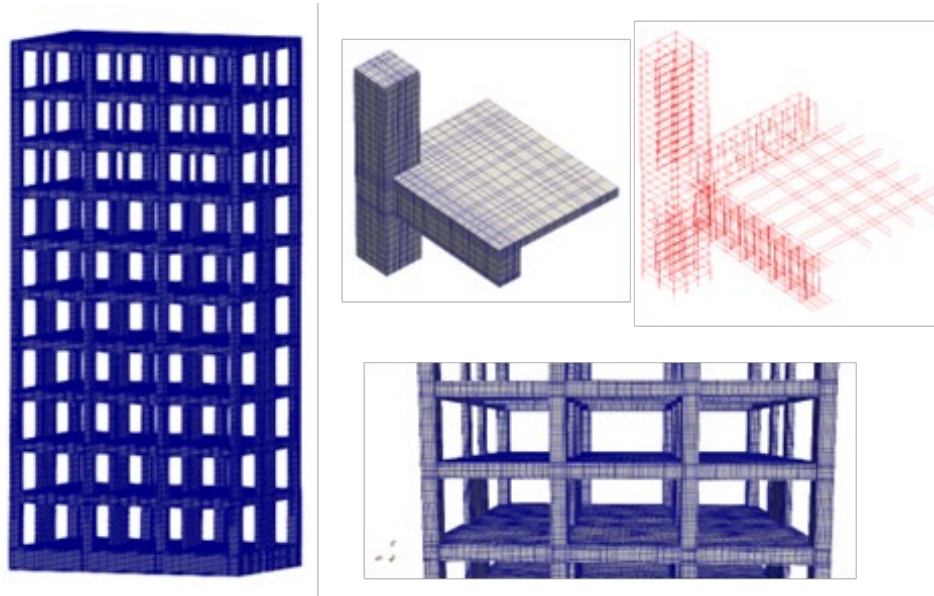


図9 E-Modelerにより作成したRC建物の解析メッシュ  
(筆者ら作成)

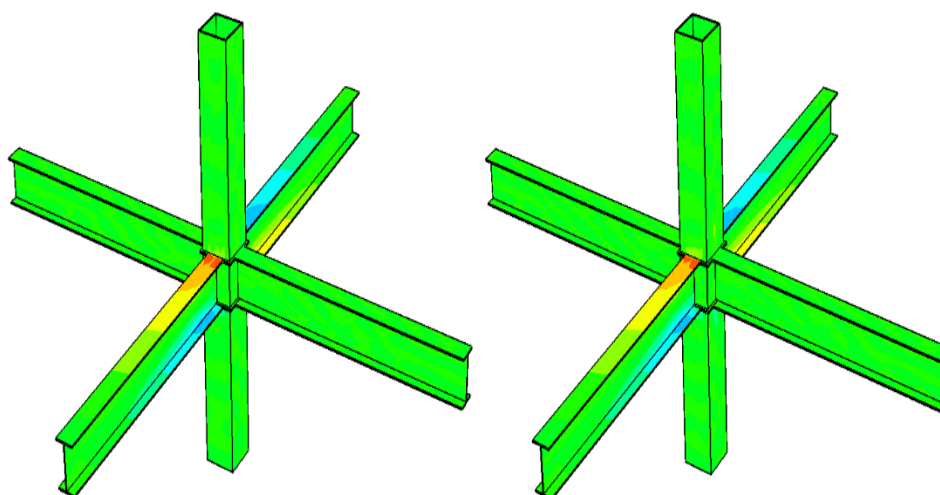


図10 左：FEMの結果計算時間約20分  
右：サロゲートモデルの結果計算時間1秒未満  
(筆者ら作成)

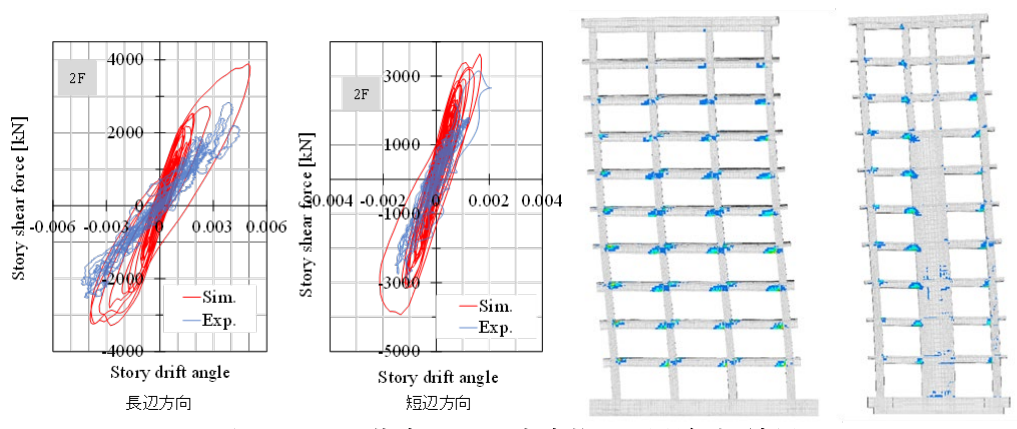


図 11 10 階建て RC 造建物の再現解析結果  
 (左：層間変形角層せん断力関係；右：クラックひずみのコンター) (筆者ら作成)

#### 4.5 BIMを活用した性能評価・性能維持評価の可能性

近年、想定を大きく上回る地震動の発生や複数回にわたる大地震など、設計時の想定を大きく超える地震の発生が懸念されている。これに対して、建物の耐震性能を向上させることが望ましいが、建設費の増加により建築主の理解を得ることは容易ではない。性能設計では、地震動強度または超過確率を一方の軸に、損傷度を他方の軸に取って、図の対角線方向にスライドさせることにより耐震性能を表すという方法が採られてきた。しかし、そこで用いられる損傷度は小破・中破・大破というような構造的な観点から規定された損傷度であるため、適正な性能水準を内生的に決定できないという問題点を抱えている<sup>32)</sup>。そこで、建物の損傷や修復コストといった経済的損失の観点から建物の耐震性能を評価するという指摘<sup>33)</sup>がある。経済的損失の観点から耐震性能を検討した既往研究<sup>34),35)</sup>は多く、現在日本建築学会小委員会において取り組まれている<sup>36)</sup>。一方、米国においては1994年ノースリッジ地震において、構造上および非構造上の甚大な被害を受け、長期間にわたって使用できなくなり、修復に莫大な費用がかかった背景から、性能規定型設計の研究を取りまとめる形で、2012年に FEMA-P58: Development of Next Generation Performance-Based Seismic Design Procedures for New and Existing Buildings (新築および既存建築物のための新世代性能規定型耐震設計手法)<sup>10)</sup>が公開され、現在も更新が続けられている。この手法は構造骨組の損傷のみならず、非構造部材の損傷や人的被害、機能回復までのダウンタイムに伴う経済的損失等までも考慮した総合的な性能を修復コストとして評価することを目指すものである。特徴的であるのは地震動や応答値、損傷の程度などが確率論的に扱われるという点である。本論文においては、米国で取り組まれている FEMA P-58 手法を歴史的観点から分析、考察するとともに、今後(20年後)の日本の耐震設計手法について一考察を述べる。

##### 4.5.1 性能評価手法

###### 4.5.1.1 確率論的的性能評価法とは<sup>10)</sup>

現在の建築基準法は、地震などの設計で想定された災害が発生した際に、生命を守るための安全性を守ることを主な目的としている。つまり、設計想定レベルの地震が発生した場合、設計された建物は、建物の居住者の生命喪失や生命を脅かす負傷を防ぐという目標を達成することができるが、構造的、非構造的に甚大な被害を受ける可能性がある。特に、1994年ノースリッジ地震や兵庫県南部地震において、構造上および非構造上の甚大な被害を受け、長期間にわたって使用できなくなり、修復に莫大な費用がかかった。このように、1980年代と1990年代にカリフォルニア州やその他の場所で頻繁に発生した地震により、性能を基準とする性能基準耐震設計に対する需要が生まれた。

性能基準耐震設計 (Performance-Based Seismic Design) とは、将来の地震によって発

<sup>32)</sup> 岡野創・梅田尚子・貞許美和, 地震時の建物被害と経済的損失, 日本建築学会大会(北陸)構造部門(振動)PD資料 プレート境界地震による大振幅地震動の予測と耐震設計, pp.43-48, 2019.

<sup>33)</sup> 伊山潤・谷翼・岩田善裕・貞許美和・岡野創, 鋼構造の部材フラジリティを考慮した損傷およびコスト評価手法, 日本建築学会 大地震時耐震性能評価委員会, :大振幅地震動に対する耐震性能評価—実験データに基づく建築物の損傷予測:部材フラジリティと修復コストのDB化を目指して—, シンポジウム資料, 2021.

<sup>34)</sup> 諏訪仁・関松太郎, 兵庫県南部地震における建物の補修費用に関する統計的評価, 構造工学論文集. B (50B), 149-154, 2004.

<sup>35)</sup> 恒川裕史・宇佐美徹・中山信雄, 三次元弾塑性応答解析を用いた地震予想最大損失率に基づく性能設計の鋼構造物への適用, 日本建築学会技術報告集, Vol.19, No.43, pp.843-848, 2013.

<sup>36)</sup> 岡野創, 糸井達哉・伊山潤・白井和貴・長江拓也, 大地震動に対する建物の損傷・損失予測, 日本建築学会大会(北海道), 構造部門研究議会資料 PD, pp.48-74, 2022.

生しうる人命，居住性，経済的損失のリスクを現実的かつ確実に理解した上で，建物の設計・施工を可能にする概念である。PBSDは，建築物に影響を与える可能性のある地震の範囲を考慮し，様々な種類の損失を経験する確率を決定するために，建築物の設計の評価に基づいている。これにより，建築物の所有者が，その建築物に対して希望する性能目標を選択することができる。多くの建物の所有者とテナントは，技術者に建物の評価を依頼し，予想される性能を把握し，建物を建てるのが可能となる。

そのような背景の中，米国の PEER は性能基準耐震設計 (PBSD) の実装のために，性能に基づく耐震工学のための手法とツールの開発を試みている。Performance-based earthquake engineering (PBEE)とは，建物設計時において長期荷重や短期荷重に対して，所有者・利用者・社会のニーズに応えた性能を持つ建物の設計施工・評価を意味する。PBEEは，建築コストだけでなくライフサイクルを考慮した合理的な意思決定を発注者とともにを行うために，性能を定量的に予測・評価できることが前提となっている。これまでのところ，PEER は性能評価方法に焦点を当て，地震発生モデル化から，損失額や死傷者数といった地震による影響の評価まで，性能予測プロセスに含まれるあらゆる重要な不確実性の影響を十分に考慮した上で，性能評価を行っている。現在の実務では，地震の強さをハザードレベルで決定論的に記述し，構造物の決定論的モデルを開発し，階高などの応答パラメータを決定論的に予測し，設計の妥当性を判断するために決定論的限界値（例えば，階高 $\leq 0.02$ ）と比較する。PEER の手法は，確率的性能評価という複雑なプロセスの個々の部分について，提案している。まずは，性能基準耐震設計 (PBSD) における主流となっている PBEE という手法について着目する。

#### 4.5.1.2 PBEE の手法

PBEE の性能評価手法を図 12<sup>10)</sup>に示す。図 12 ではハザードアナリシス(危険性の定量化)の 4 つの段階を設けている。下記の式は，地震ハザードを起点に⇒建物地震応答解析⇒(建物を構成するすべての)部材損傷度⇒性能評価値の順で積分を重ねることで，建物性能値の超過確率を評価できる性能評価体系であり，スタンフォード大学の故 Cornell 教授と故 Krawinkler 教授により，2000 年に提唱された<sup>37)</sup>。具体的手順は，Hazard analysis：地震の頻度や強度，地震による影響を表す地震動の定量化。Structural analysis：損失，ダウンタイム，崩壊，犠牲者評価に必要な応答量の定量化。Damage analysis：建物応答パラメータとの関係性による損傷状態の定量化。Loss/downtime Analysis：損失，ダウンタイム，死傷者の評価および所有者と社会への影響。の 4 段階から構成される。この手順による結果を判断するための変数を確率論的に定量化する。これらの変数は，DV (Decision Variables.)と呼ばれる。例えば，損失額，ダウンタイムの長さ，死傷者の数などである。目的としては，包括的建物システムつまり地盤・基礎・建物構造，および非構造等がわかっており，地震入力，構造反応，損傷，修理費用，営業停止時間 (ダウンタイム)，および崩壊の確率を定量化できる十分な情報がある場合に，これらの DV を計算することでありこの結果を予想犠牲者の数と関連付ける必要がある。この際に，評価プロセスにおいて重要なことは，すべての重要な不確実性を考慮した上で，意思決定者にとって最も関心のある意思決定変数を特定し，定量化することである。

<sup>37)</sup> FEMA P-58-1, Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1 - Methodology, Second Edition, FEMA, 2019.

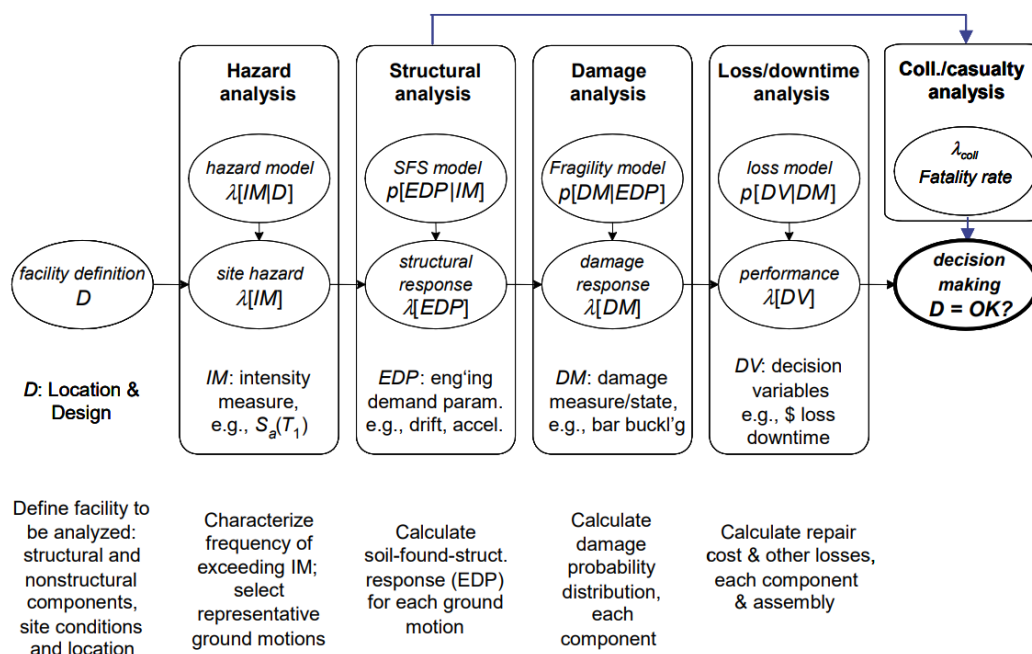


図 12 FEMA P-58 にて提案される性能評価手法<sup>10)</sup>

#### 4.5.2 性能設計手法の開発の背景—米国と日本の比較—

耐震設計において性能設計が近年注目を浴びている背景として、1989 年米国ロスマブリータ地震や 1994 年ノースリッジ地震、1995 年兵庫県南部地震など、大都市を襲った地震とそれに付随する膨大な被害が挙げられる。日本を含め国際的に耐震設計においては、大地震に対して人命保護を第一に考え、多少の構造的損傷は許容しつつ、構造物の崩壊は防止することを基本としている。一方で、これらの地震においては、人命保護という目標が達成されたが、損傷が甚大になると、取り壊しも含めた補修に要する費用が甚大で、耐震設計について建物所有者が疑問を持つようになった<sup>38)</sup>。本節では、日本と米国それぞれにおいて、設計思想や法律・社会的背景などの観点からの変遷について比較していく。

##### 4.5.2.1 日本の耐震設計の変遷<sup>38), 39)</sup>

図 13 に日本における耐震設計法と過去に発生した地震を並列に並べた年表を示す。我が国における耐震設計の概念は、1916 年の佐野利器博士による設計用震度の概念の発表である。1919 年には市街地建築物法が制定され、内藤多仲博士による鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)造と耐震壁の提案がされた。1923 年、関東大地震により RC 造 8 階建の内外ビルなどが崩壊し、RC 耐震壁を配置するラーメン構造が一般化した。その翌年、市街地建築物法施工細則に水平震度が規定された。1925 年には日本建築学会「構造強度計算基準」が発表され、架構主体は鉄骨または RC 造として、震度による計算法の提案がされ、耐震構造設計法の方針が決められた。

1948 年の福井地震は、耐震構造設計への再出発の契機となった。大和デパートの崩壊や、煙突の崩壊などの RC 造構造物の崩壊は、RC 構造の耐震化への一步となった。1950 年建築基準法制定されたが、福井地震による被害を考慮した改革は間に合わず、

<sup>38)</sup> 「性能規定型耐震設計—現状と課題— 日本地震工学会 性能規定型耐震設計法に関する研究委員会編

<sup>39)</sup> 谷資信, 建築構造設計法の変遷と今後方向, コンクリート工学 特集 コンクリート構造設計法の動向- (総論) -, vol 19, No.7, 1981.

思想的には終局強度を目指すものではあるが、許容応力度設計法という基本の変化はなかった。

1959年、武藤清博士を中心とする超高層建築の研究が開始され、動的設計法の実用化が進み、1964年建築基準法の容積制施行により、超高層建物が建設可能となる。1968年十勝沖地震には、RC造建物の主として短柱の脆性的せん断破壊が顕著にみられた。これを受け、建築学会では耐震設計法の見直しが行われ、せん断破壊を先行させない靱性を確保する設計法へと移行した。同年、超高層建築物の第一号として霞が関ビルが誕生し、高層建築に対する動的設計法が定着してきた。

1972年から5年間続けられた建設省の新耐震設計法に関する総合研究プロジェクトにより、1977年「新耐震設計法案」として発表され、1980年に施行令改正公布となった。この新耐震設計法とは、中小地震に対しては無被害(弾性範囲)であるために許容応力度設計法を適用し、大地震に対しては建物を崩壊させないための保有水平耐力の検討を行う。設計用標準せん断力係数として、中地震時に対しては0.2以上、大地震時に対しては1.0以上とし、大地震時には人生に応じた保有水平耐力の設定を行い、脆性的破壊を防ぐ。このように、1981年の新耐震設計法の施行により、建物の構造設計は大きく転向した。今までは地震に対して建物の強度を高めて地震力に抵抗した基準型耐震設計(強度型設計)から、許容応力度設計に加え、大地震時の崩壊を防ぐための保有水平耐力の検討、つまり建物の変形能力を考慮した靱性型設計へと移行した。

それと同時期に、性能に対する世界的な潮流が起きていた。性能規定化の流れは国際標準化機(ISO)規格の制定等、我が国を取り巻く国際情勢とともに密接に関係している。政府調達協定に関しては、GATT(関税と貿易に関する一般協定)東京ラウンド多角的貿易国賞において、物品を対象とする「政府調達に関する協定」が1981年に発効している。その後、物品からサービス分野までを対象とする改定が行われ、1966年にWTO(世界貿易機関)協定に収録された新協定を発効している。政府調達に関する協定第6条には、第1項において、「機関の定める技術仕様であって、品質、性能、安全、寸法等の調達される商品もしくはサービスの特性、記号、専門用語、包装、証票及びラベル又は生産工程及び生産方法について規定したもの並びに機関の定める適合性評価手続きに関わる要件は、国際貿易に対する不必要な障害をもたらすことを目的として又はこれをもたらす効果を有するものとして、立案され、制定されまた適用されてはならない」と規定されている。また、第2項では、「機関は、技術仕様については、適当な場合には、(a)デザイン又は記述的に示された特性によりも性能に着目して、また、(b)国際規格が存在するときは当該国際規格、国際規格が存在しないときは国際強制規格、認められた国内任意規格又は建築基準に基づいて定める」とされている。すなわち、広範囲の技術標準に関して、国際規格との整合と同時に、性能に着目した技術仕様とすることが求められており、これが性能規定化の大きな潮流となった。

このような潮流の中、耐震設計において性能設計が近年注目を浴びている背景として、1995年兵庫県南部地震など大都市を襲った地震とそれに付随する膨大な被害である。1995年兵庫県南部地震において、1981年の改正後の耐震基準(いわゆる新耐震)によって設計された建築物に目立った被害が少なかった一方で、構造的損傷は許容しつつ構造物の崩壊を防ぎ、大地震に対して人命を保護するという目標は達成された。一方で、病院施設などでは、建物が倒壊を免れても建物内の医療機器等、室内設備が大きな被害を受けると人的・物的被害が拡大する。したがって、耐震設計では復旧中の機能損失やこれが他に与える影響、取り壊し等の費用も考慮することが求められる。人的保護だけでなく、構造物の損傷に付随する各種のコストや影響も考慮に入れた上で設計する重要性が指摘された。性能規定型耐震設計法の提案にかかわる原型の1つは、米国のVision2000にある。日本においては、1995年～1997年にわたって建設省

(当時)が実施した総合開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」が初期の提案としては代表的である。その後、1998年6月の建築基準法改正を契機に性能設計が導入され1999年6月には「住宅の品質確保の促進等に関する法律」が成立した。これらにより建築物の性能が表示され、評価される時代(性能規定型耐震設計)となった。以上のように、日本の耐震設計は地震被害を教訓に、建築基準法を更新しつつ、米国を中心とした世界の潮流に影響を受けながら発達してきた。





図 13 日本における地震年表と建築基準法の変遷

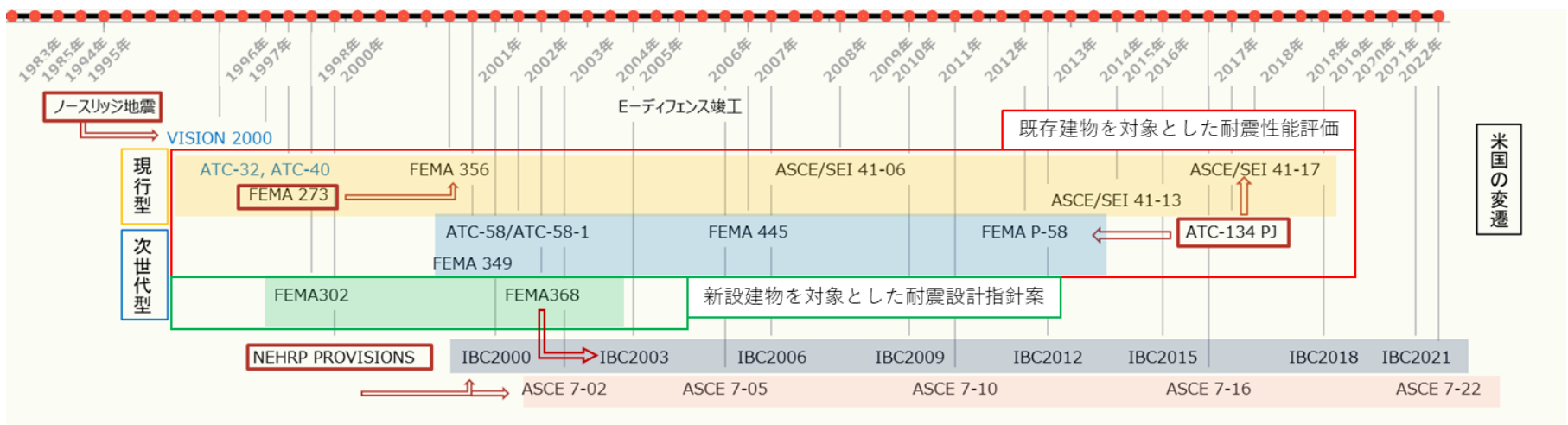


図 14 米国における耐震設計手法の変遷

#### 4.5.2.2 米国の性能設計の変遷

図 14 に米国における耐震設計手法の変遷を示す。米国においても、広範囲の技術標準に関して、国際規格との整合と同時に、性能に着目した技術仕様とすることが求められており、これが性能規定化の大きな潮流の影響を受けた。米国は、州や自治体に独自の建築基準の制定を認めるといった地方重視型の建築基準体系を有している。多数ある建築基準を統一する動きや性能設計基準の作成が試みられてきた。その 1 つとして、耐震設計法に関して性能を基礎とするカリフォルニア構造技術協会(SEAOC)による Vision2000 により提案された地震力のレベルに応じた性能目標は性能設計の典型としてよく用いられる。しかし、これは耐震性能、すなわち地震力に対する建築物の挙動を明確にした耐震技術の枠組みを作ろうというもので、目標とする耐震性能は明確にするが、耐震設計法自体は仕様規定でも構わないという考え方であり、性能規定型耐震設計を目指す先駆けとなったと考えられる。これ以後は、性能設計、PBSD の実装に向けた米国の取り組みを組織の成立とともに整理していく。

米国では、1980 年代半ばより人命が失われる危険性や居住性が失われる機関等を具体的かつ定量的に設計しようという性能設計に注目した。こうしたニーズは特に既存建築物の耐震補強に携わってきた技術者の中から生まれた<sup>38)</sup>。同時期の 1980 年代半ばに、TC(Applied Technical Council)が各種タイプの建物の耐震補強費用の確率的評価を ATC-13 として刊行した<sup>40)</sup>。さらに、応用技術評議会(ATC)は、国立科学財団(NSF)および FEMA との契約の下で、ATC-14(ATC, 1987 年)、ATC-22(ATC, 1989 年)、および FEMA-178(ATC, 1992)を刊行し、一般的な建物タイプに重大な脆弱性の存在を特定することにより、既存の建物における人命安全上の危険の評価に焦点を当てた<sup>41)</sup>。一方で、耐震補強法に関するガイドラインがなかったため、FEMA は ATC、米国土木学会(ASCE)、建物耐震安全協議会(BSSC)に委託して、耐震改修設計ガイドラインを作成する共同作業を行った。この取り組みの一環として、ATC-33 プロジェクトは、建物の耐震改修のための EMA-273/274 を 1997 年に刊行した。これは、耐震評価指針とは異なり、建物の安全性が損なわれていない軽微な損傷の状態である Immediate Occupancy から、Collapse Prevention, incipient collapse の状態のように、建物所有者・発注者が選択した任意の地震強度に対して、これらのパフォーマンスレベルのいずれかを満たす設計を許可している。

1980 年代と 1990 年代にカリフォルニア州やその他の場所で頻繁に発生した地震により、性能ベースの耐震工学ツールに対する需要が生まれた。多くの建物の所有者・発注者は、技術者に建物の評価を依頼し、想定される建物性能を説明する。この時、人命の安全はこれらの利害関係者の関心事でありつつも、修理費用や事業中断時間などが含まれていた。修理費用と事業中断時間の大きさを知ることによって、所有者はこれらの地震の影響を最小限に抑えることを目的とした建物性能の向上を求めた。そこで、FEMA 273/274 は更新され、ASCE 31(ASCE, 2003 年)および ASCE 41(ASCE, 2006 年)規格として ASCE によって公開された。また、FEMA273 は、既存建物を対象にしており、改修のための耐震性能評価と耐震改修手法の確立を目的としてハザードレベルを設定し、各レベルにおける維持すべき建物の耐震性能を定め、それを設計目標とする性能規定型設計手法を採用している。その後 ASCE (American Society of Civil Engineers)も加わり FEMA273 の改訂版である FEMA356 が 2000 年に発表された。

一方で、1990 年代後半に、新築建物に対して同様の性能を基準とした設計の必要性

<sup>40)</sup> Applied Technical Council: Earthquake Damage Evaluation Data for California, Report No. ATC-13, 1985.

<sup>41)</sup> ATC-58-2: Probabilistic Performance-based Seismic Assessment and Design Guidelines Ronald O. Hamburger, SE, Senior Principal Simpson Gumpertz & Heger Inc. San Francisco, CA, 2017 SEAOC CONVENTION PROCEEDINGS.

が高まった。FEMA は、カリフォルニア大学バークレー校に地震工学研究センター (EERC) を委託し、次に地震工学研究所 (EERI) は、新しい建物の設計に適用可能な、次世代性能に基づく耐震設計基準(next-generation performance based seismic design criteria)を開発するためのプログラム計画を開始した。2001年、FEMA は ATC と協力協定を結び、新しい性能ベースの耐震設計ガイドラインを2段階で作成した。2010年に FEMA P-58 (ATC, 2012a, 2012b, 2012c) 一連のツールが公開されて完了した第1段階では、技術者が建物の確率を計算するために必要な面倒な計算を実行できるようにするための方法論と付随する電子計算ツールが提供された。2013年に開始された第2段階のプロジェクトの目標は、FEMA P-58の方法論を組み込み、それに基づく設計ツールを提供して、新しい建物の設計と既存の建物の改修を可能にし、修理コストの制限、修理、修繕などの耐震性能基準を満たすことが可能となった。FEMA P-58の方法論では、想定される修復コストと地震被害の修復期間、死傷者数、建物が倒壊される可能性など、建物所有者が関心を持つ項目の評価を確率論的に評価する。2016年に NIST から資金提供を受け、ATC-134 プロジェクトが開始された。これは、米国において性能に基づく設計手法のベンチマークとすることを目的として取り組まれ、普及に向けた動きが活発となっている。

#### 4.5.2.3 今後の性能設計

日本と米国の性能設計の歴史を通して、日本は特に大地震のような自然災害による被害の教訓を踏まえ、耐震設計基準や建築設計手法を更新してきている。一方で、米国は1994年ノースリッジ地震以降大きな地震は発生していないが、その地震被害にて問題となった建物修復費用やダウンタイムといったテーマについては、建物所有者・専門家において建物性能設計という関心として要求が根強く、研究が進められている。いずれにせよ、1980年代に国際情勢として性能規定化の流れが生じ、大地震被害を受けることで、建物の性能設計というキーワードが普及した点は共通している。また、鋼構造を例にみると、鋼構造が普及した20世紀後半、建設量・技術量でも先行した米国を参考に、建築学会の鋼構造設計関連基準・指針類を作成し、建築法体系に採用された<sup>42)</sup>。さらに、2015年に各国が設計基準を作成する際の構造種別を横断する「基本的な考え方」を示す Code for code writers という位置づけにある ISO 2394:2015<sup>43)</sup> (General Principles on Reliability for Structures, 構造物の信頼異性に関する一般原則)の IDT (一致)規格として制定された。その後、JIS A 3305 「建築・土木構造物の信頼性に関する設計の一般原則」<sup>44)</sup>は、2020年に制定されたわが国初の建築・土木構造物の設計の基本となる規格である<sup>45)</sup>。性能設計について国内だけでなく、国際的な潮流としての動きの中、今後米国を中心に議論を重ね、FEMA P-58手法を基調とした非構造部材も含めた性能ベースの性能設計というものが普及していくと考えられる。そこで、本章では、米国と日本の性能設計の歴史的に整理をし、現在性能設計として注目を集めている FEMA P-58 について取り上げた。

<sup>42)</sup> 岡崎太郎, 米国の鋼構造基準の現状, 日本建築学会大会 (北海道) 構造部門 (荷重) PD 資料 JIS A 3305 から見た国内構造基準の課題と荷重規定, pp.13-17, 2022.

<sup>43)</sup> ISO 2394:2015, General Principles on Reliability for Structures, International Organization for Standardization, 2015.

<sup>44)</sup> JIS A 3305:2020, 建築・土木構造物の信頼性に関する設計の一般原則, 日本規格協会, 2020.

<sup>45)</sup> 森保宏, JIS A 3305:2020, 建築・土木構造物の信頼性に関する設計の一般原則」の概要, 日本建築学会大会 (北海道) 構造部門 (荷重) PD 資料 JIS A 3305 から見た国内構造基準の課題と荷重規定, pp.3-7, 2022.

#### 4.5.3 BIMを活用した性能評価・性能維持評価の可能性

近年、大規模な都市モデリングや建物規模での BIM を中心に建築環境の 3D 化の必要性が顕著となっている。一方で、現在の BIM に使用目的は、建設業における建物の設計・施工のような複数の業者が参画する際の情報共有および作業の効率化を図るにとどまっており、まだ BIM が普及しているとは言い難い。また、建物のすべてのプロセス(設計・施工・運用)から見ると、設計・施工という点での時間軸でしか運用できていないというのが現状である。そこで本章では、BIM の背景と現状、現在取り組まれていることを整理し、今後の BIM の在り方や性能設計との関連について考察する。

##### 4.5.3.1 BIM の歴史

BIM とは、Building Information Model の略称であり、コンピューター上に作成した 3 次元の形状情報に加え、部屋名等の名称や仕上げ、材料・部材の使用・コスト情報等、建物の情報を併せ持つ建物情報モデルを構築することである。設計から維持管理に至るまでの建築ライフサイクルのあらゆる工程で BIM モデルを活用することで、建築生産や維持管理の効率化が期待されている。BIM が登場により、建築業界は社会的・物理的な作業環境は、過去 30 年の間に大きな変化をしてきた。具体的には、建築の作業空間はデジタル化され、建築家という職業のコミュニケーション的側面は重要度を増している。

米国において設計や建築のデータをコンピューターで管理するための基礎は、1960 年代前半にすでに作られていた<sup>46)</sup>。1980 年代から 1990 年代にかけて、Building product modelling の基盤が強化された<sup>47)</sup>。1990 年代に入り CAD ベースの 2D データ管理が主流となり、デジタル化された CAD 図面をより高度なデータ管理手法へと進化させる動きが、欧米の建設業界ではここ 10～15 年の間に加速度的に拡大した。BIM(Building Information Modeling)は、AEC 分野の将来のフレームワークのための統合手法として開発された。これにより、設計や建築に関連するすべての情報をデジタル形式で管理した。

BIM が米国において取り上げられたのは、2003 年に連邦調達庁(GSA)が「3D-4D BIM 計画」を発足させ、2007 年から工事発注仕様書において 3 次元 CAD データでの施設情報納品を義務付けたことで、BIM は米国内で一気に普及した。2012 年の北米建築関係者の BIM 活用実態調査では、「BIM の普及率が 7 割に達した」ことが判明した。

一方、日本で本格的な BIM 導入が始まったのは、2009 年である。BIM は 2007 年にアメリカで策定されたガイドラインに基づいて輸入が始まっていたが、その 2 年後にあたる 2009 年に、そのポテンシャルに多くの企業が注目をはじめ、メディアへの露出や関連書籍が販売されたことから、日本国内における「BIM 元年」として知られるようになった。2010 年に官公庁が主導するプロジェクトにおいて、BIM の導入を開始することを国土交通省が発表し、国を挙げての BIM 運用が開始された<sup>48)</sup>。2014 年には官庁営繕事業における BIM 運用に関するガイドラインの策定も行われ、本格的な BIM 運用に向けた動きが始まった<sup>49)</sup>。一方で、日本での BIM の普及率・導入率はあまり芳しくなく、2021 年の国土交通省が発表では 46.2%であった。

<sup>46)</sup> Marko Rajala, Hannu Penttilä, Testing 3D Building Modelling Framework In Building Renovation, eCAADe 24 - session 6: information systems,

<sup>47)</sup> アメリカの BIM の状況について: <https://bim-japan.com/america.html>

<sup>48)</sup> 国土交通省「報道発表資料：官庁営繕事業における BIM 導入プロジェクトの開始について」  
[https://www.mlit.go.jp/report/press/eizen04\\_hh\\_000003.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/eizen04_hh_000003.html)

<sup>49)</sup> 国土交通省「官庁営繕事業における BIM の活用」  
[https://www.mlit.go.jp/gobuild/gobuild\\_tk6\\_000094.html](https://www.mlit.go.jp/gobuild/gobuild_tk6_000094.html)

#### 4.5.3.2 BIMの現状と今後の可能性

ここでは、建物の企画・設計から維持管理までのプロセスにおける BIM の現状と今後の可能性について示す。わが国では、建物のスクラップアンドビルドから、建築ストックの長寿命化と有効活用に焦点が移行しており、建物維持管理の有用性が高まっている<sup>50)</sup>。また、建物維持の観点から維持管理技術者の人で不足が深刻であり、今後、熟練の技術者の現象が予想されるが、経験や知識を必要とする維持管理業務のマニュアル化はほとんど図られていない<sup>51)</sup>。一方で、維持管理業務における BIM 活用により、建物の設計・施工時のみではなく建物管理の精度の向上、効率化を目指す動きがある<sup>52)</sup>。そこで、建物の企画設計から維持管理までのすべてのプロセスにおける BIM を活用し、さらに地震時に観測されたデータを活用し、経年劣化や大地震時には詳細 FEM による被害の推定までを含めた性能設計例を図 15 に示す。

#### 4.5.3.3 企画・設計から竣工

BIM の導入により、かつては限られた情報の中で行われてきた建築生産行為の多くが「見える化」し、認識されやすくなったと同時に、膨大な関連情報管理も可能となる。特に、設計段階における検討事項が充実し、設計変更や手戻りなどの後工程の負荷を低減することが期待されている。現状としては、図 14 に示すように設計施工時に BIM を用いる例が増えている一方で、維持管理にまで焦点を当てた BIM の活用については国土交通省の提案する「建築 BIM の将来像と工程表」において示されているのみである<sup>53)</sup>。

企画から設計段階において、前章にて示した FEMA P-58 手法を用いて建物の構造部材だけでなく非構造部材を含めた想定される地震に対する損傷度および修復コストまでを提示し、発注者と議論することが BIM を活用し可能となる。つまり、設計段階から意匠設計だけでなく、発注者はもちろん構造技術者、施工管理者、専門工事業者を含めた複数の担当者との協働の上、設計が完了することとなる。

具体的には、基本設計・実施設計を通じて明快な納まりがチェック可能であり、合理的な設計・階高・コストを抑えた設計が可能となる。また、鉄骨、サッシなど専門工事者やメーカ等との連携も行い、設計フェーズで明確な確認が可能であると同時に施工段階への連携・活用も行われている<sup>54)</sup>。そのうえ、設計と施工を通じて、BIM は膨大な属性情報を有することになる。そこで、設計・施工時において、作成した工事記録等を BIM と関連し、クラウド上に格納しておくことで、竣工した建物の施工記録をもとに建物の価値を示すことが可能となる。

図 15 の左(所有者・不動産会社)において、BIM により建築情報がデータベース化されることで、LCM・FM に活用しやすくなる。例えば、仕上げや面積情報を清掃などの維持管理計画に連携させ、設備機器や配管・ダクト・照明などは数量積算と同時にメンテナンス計画に転用が可能となる。BIM と LCM・FM の連携について一例を示す<sup>54)</sup>。

<sup>50)</sup> 久保井 大輔, 西谷 早百合, 小池 万里, 河野 匡志, 一ノ瀬 雅之, 鈴木 和幸: ワイブルプロセスによる空調設備機器の故障傾向に関する信頼性解析, 日本建築学会環境系論文集, 第 86 巻, 第 781 号, PP.301-310, 2021.

<sup>51)</sup> 丹羽 涼介, 須藤 美音, 和田 晃, 高草木 明: 大規模研究所の保全業務を対象とした PDCA サイクルに基づく作業プロセス構造分析, 日本建築学会計画系論文集, 第 84 巻, 第 757 号, PP.631-641, 2019.

<sup>52)</sup> 国土交通省: 令和 2 年度 BIM を活用した建築生産・維持管理プロセス円滑化モデル事業 (<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/content/001378488.pdf>)

<sup>53)</sup> 国土交通省: 令和元年度 建築 BIM の将来像と工程表(案)<https://www.mlit.go.jp/common/001305379.pdf>

<sup>54)</sup> 村松弘治, BIM の現況と展望, 電気設備学会誌 Vol.33 No.6, pp 374-379, 2013.

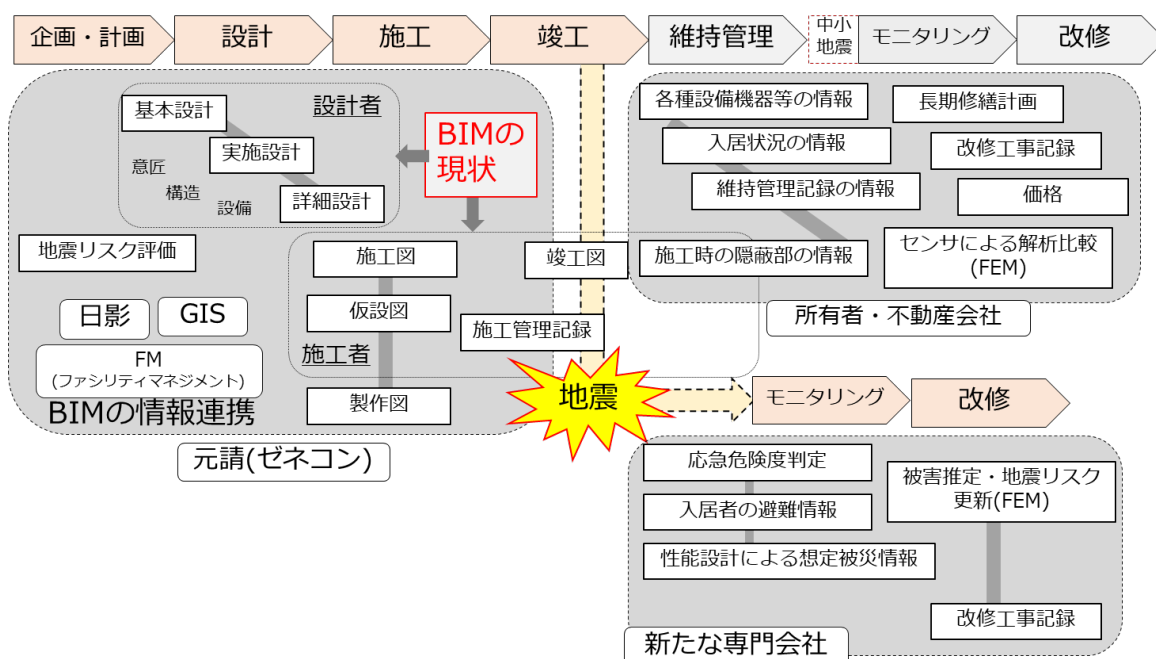


図 15 平時の BIM のライフサイクルマネジメント (LCM) ・  
ファシリティマネジメント (FM)

BIMと LCM・FMの連携概念を(図 16)に示す。意匠、構造、設備 BIM ソフトで生成したモデル及び属性情報を三次元ビューアで統合し、BIM に格納したデータ情報を抽出・連携させることで、維持保全システムを構築する。このシステムにおいては竣工図のほか、建物情報、部材情報、機器情報が閲覧可能であると同時に、点検・修繕履歴や施設利用書などを収納し、適宜レポートとしてアウトプットが可能である。この維持保全システムに加え、既存の施設運営システムを組み合わせることで、土地・建物情報や建物修繕履歴、エネルギー管理などをデータベースとしたビルマネジメント、プロパティマネジメントなどが可能になる。本稿において、着目した点は提案されている BIM と LCM・FM の連携概念に加え、建物にセンサーを内蔵させ、頻発する中小地震を活用し、建物の揺れの特性(動的特性)を評価し、建物の経年劣化・損傷を評価し<sup>55)</sup>、BIM にてデータを公開・共有するという点である。これにより、建物の修繕計画に従いつつも、実際の建物の状態を把握でき、より実情に沿った計画となる。

建物の「コスト」と「価値」のバランスを示すにあたり、上記で提案された建物情報をもとに随時建物の実性能評価結果を公開することで、建物としての不動産価値を明確にそして一元化して管理することができる。

<sup>55)</sup> 梶原浩一, 藤原淳, 岸田明子, 荒井智治, 西 峻汰, 包括的耐震性能評価実験 その 10-37, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, 2023.

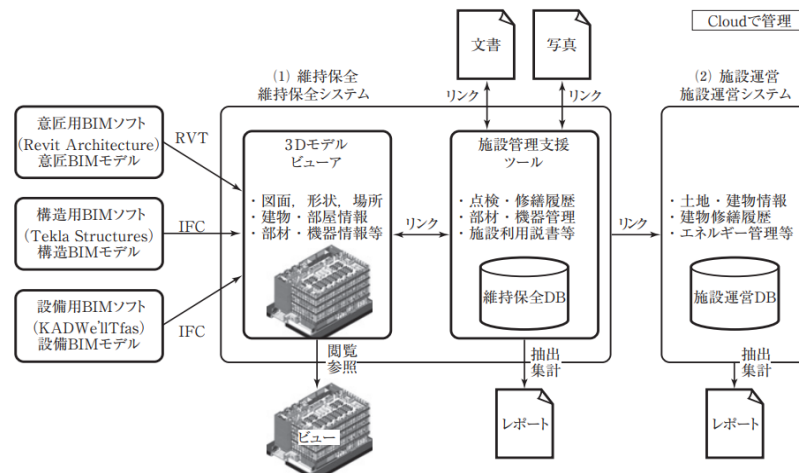


図 16 BIM と LCM・FM の連携概念

#### 4.5.4 BIMにおける大地震後の建物の実耐震性能評価

現在では、大地震後の建物の被害状況の判定には、「被災建築物応急危険度判定」, 「被災度区分判定」, 「罹災証明」の3つがある。応急危険度判定とは、地震直後に余震等による被災建築物の倒壊、部材の落下等から生じる二次災害を防止するため、公共団体が行う外観調査のことである。地震直後に応急危険度判定士にて判定されるが、迅速な判定については課題が多く、被災建築物の瞬時の判断が求められている。これについては、前節にて紹介したLEDセンサ・アラートシステム<sup>55)</sup>によるLED点灯色にて被災建築物の損傷度を判断する一助となる取り組みがあり、これをBIMによる一元化管理による応急危険度判定に要する時間の短縮が期待されている。

また、被災区分度判定とは、応急危険度判定後に被災した建築物の残存耐震性能を把握し、その建築物に引き続き住む、あるいは建築物を継続的に使用するためにどのような補修・補強をしたら良いか専門家による詳細な判定のことであり、日本建築防災協会が発行している「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」に基づいて実施される。これについても迅速な対応が課題となっている。そこに、BIMにて建物の図面・施工時の記録が管理され、LEDセンサ・アラートシステムによるセンサーによる建物の応答記録があることで、FEMによる詳細モデルを作成が可能となり、数値シミュレーションにより、内装材等で見ることができない具体的な建物の損傷部位まで認知が可能となり、具体的な建物の補修方法による耐震性能の向上が判断可能となる。これにより、被災した建築物の被災度区分判定は、現地での専門家による判断だけではなく、数値解析による分析も並行して実施し、すべての建築物の被災度区分判定に要する時間の短縮が期待できる。

最後に、罹災証明は被災者本人が市町村長に申請することによって発行される、建築物の被害程度を証明するものである。被災者生活再建支援法等による被災者への各種の支援施策や税の減免、保険の適用等を被災者が申請するにあたって必要となる。罹災証明においてもBIMによる建物の詳細分析の結果を一助に、市町村長の判断で発行したものをBIM上で管理をすることで、地震保険の適用の際にBIM上の格納されている情報から判断し、迅速な対応の可能性が考えられる。以上のように、本章において、BIMを用いた建築物の設計から運用、災害時の情報管理までの可能性について考察した。

#### 4.6 考察：社会的期待発見

本研究課題が発見した社会的期待を一言でまとめれば、「マンションの管理情報と BIM 情報の統合による平時の住まいのヘルスマonitoringとデジタルツイン」である。4.3 で示したように、マンション管理の情報は法律により開示される流れとなっているが、耐震性能に関する性能の可視化には至っていない。他方で、4.4, 4.5 で示したように、詳細 FEM や BIM の精緻化、並びに BIM の維持管理フェーズでの活用など、情報技術と建築技術・生産管理技法の統合も進む。20 年後未来には、マンション戸数が戸建住宅を凌駕する一方で高経年マンションの増加が見込まれる。そのため、平時の住まいのヘルスマonitoringを担う BIM・詳細 FEM・シミュレーション技術から構成される可視化技術、すなわち共同住宅デジタルツインの発展が必要不可欠と言える。

このような取組は既に展開されているのだろうか。ヘルスマonitoringに関する既往研究を概観すると、濱本<sup>56)</sup>は経年劣化と地震動の影響を「定期・非定期・状態遷移モニタリング」という三つの時系列性能維持モニタリングを提案し、ワイヤレスセンシング等の技術を紹介しているが、概念の提唱に留まる。また、楠<sup>57)</sup>は「建物ヘルスマonitoring」を非構造部材や IoT によるセンシング技術への拡張と位置づけており、同様に Panah & Kioumarsis<sup>58)</sup>はヘルスマonitoringとメンテナンスに関する 270 編を超えるレビュー論文でも非構造部材や IoT によるセンシング技術の提示に留まっている。

以上から、本研究課題が発見した社会的期待：マンションの管理情報と BIM 情報の統合による平時の住まいのヘルスマonitoringとデジタルツインには新規性が見込まれ、今後の研究開発シーズとして更なる具体の研究課題への接続が求められる。

---

<sup>56)</sup> 濱本卓司, 建築物の耐震性能評価のためのモニタリング技術, 計測と制御 46(8), pp.605-611, 2007.

<sup>57)</sup> 楠浩一, 建物の地震観測と構造ヘルスマonitoringについて, 日本地震工学会誌 32, pp.17-20, 2007.  
<https://www.jace.gr.jp/wp-content/uploads/2018/10/kaishi32.pdf>

<sup>58)</sup> Panah, R.S. & Kioumarsis, M, Application of building information model (BIM) in the health monitoring maintenance process: A systematic review, Sensors 21, 837, 2021. <https://doi.org/10.3390/S21030837>



## **5. 発表した成果**

発表済み・該当なし

今後の発表予定

2023年度日本建築学会大会 都市計画部門——パネルディスカッション

タイトル：「次の災害対策・復興を実現するには——新・復興とは——」  
大津山堅介「技術のもたらす新復興」

## **6. 今後の展望**

今後の課題として、デジタルツインに向けた要素技術の全容の提示と優先課題の選定が挙げられる。具体的には、防災科学技術研究所による JST 未来社会創造事業による研究と接続し、上記の課題に加え、機能維持評価のベースラインとなる評価手法の構築を視野に入れ研究を進める。また関連する個別具体の研究課題を以下に列記する。

自然科学側

- 実空間に存在する中高層建物のデジタルツインモデルの構築と更新、データ公開（モニタリング、データ分析、データベース、BIM活用）
- PBSD実装に向けた非構造部材のフラジリティの作成  
性能設計のための非構造部材単体の部材データが不足しており、コストや損傷評価が難しい
- 性能設計の実装に向けたシステムの作成  
FEMAP-58の手法から日本への実装するシステム・ソフトの確立

社会科学側

- 認定制度にて公開されているデータを活用した優良管理の評価手法の構築

学際的アプローチ

- シミュレーション（デジタルツイン）の実行環境の育成  
（ソフトウェア、チュータリング、コンサルテーション、アップデート）
- BIMの建設・土木・不動産業界への普及に向けた設計から竣工後の維持管理までの協同体制やシステムの確立

## **7. その他の活動内容について**

該当なし