

2. 6 発災時の大都市機能の維持

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 「発災時の大都市機能の維持」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東京大学大学院	教授	廣井 悠
国立研究開発法人防災科学技術研究所	研究部門長	中村洋光

(c) 業務の目的

南海トラフ巨大地震は国難ともいえるべき災害であり、このような状況下で東京・名古屋・大阪などの大都市機能を維持することはとりわけ重要である。特に長周期地震動の影響がある首都圏は、政治・経済・報道などを代表とする中枢管理機能が集中しており、例えば高層ビルなどの被害は首都機能維持や国全体としての災害対応そのものに少なくない影響を及ぼすと考えられる。しかしながら、平時に極めて高度かつ複合的に設計されている大都市は、一たび突発的な災害が発生した際、どの程度・こういった形で都市機能が喪失するかは詳らかにされていない。他方で、今後はあらゆるものにセンサが埋め込まれ、モニタリングが可能なスマートシティ時代を迎えることから、即時的予測は技術的に可能となりつつあり、これを災害対応に運用するための社会技術が求められる。具体的には、大規模災害時に都市機能の喪失に至らないための復旧オペレーションを、その災害の特徴を踏まえた形で発災直後に示すことも可能になるものと考えられる。

本研究では、このようなスマートシティ時代における新しい防災対応手法の確立もにらんで、「都市機能の維持」に必要な対策をリアルタイムで抽出するための研究を、首都圏を対象として行う。研究の手順としては、①大都市における災害シナリオをダイナミックに自動生成する仕組みを構築し、②これを基に都市機能を維持するための対応タイムライン作成手法を確立する。このうち災害シナリオの自動生成技術は、分担者責任者が開発している、定性的被害予測技術を用いる。この技術は、これまでの災害教訓から得られる膨大な災害事象の網羅的な因果データベースを機械学習を用いて構築し、それを利用して近い将来に起こりうる災害事象をリアルタイムで抽出するものであり（イベントツリー・タイムラインの形）、本研究プロジェクトではこれを援用して「大都市機能の維持」に焦点を絞った検討を行う。研究の後半では社会への実装を図るが、ここでは2 (g)で開発する地震防災基盤シミュレータによる長周期地震動対策を対象とし、長周期地震動が大きく影響を与える都市機能として、超高層ビル等の被害（エレベータ障害等）に着目して、モデル地域における復旧状況をシミュレーションする手法を開発し、都市機能を守るための大都市圏ならではの復旧オペレーションの検討を実施する。

(d) 5か年の年次実施計画

1) 令和2年度：

『災害シナリオ自動生成』に関する事象因果データベースを拡充した。長周期地震動とエレベータ障害・復旧過程の事例を調べた。

2) 令和3年度：

災害シナリオのダイナミック自動生成技術の検討を行った。エレベータ障害、復旧過程を模擬する手法の検討を行った。

3) 令和4年度：

実災害を対象としたWSに基づく改良シナリオの検討を行った。モデル地域でのエレベータ障害、復旧の試算の検討を行った。

4) 令和5年度：

高層建築物エレベータの詳細復旧オペレーション手法の検討を行った。

5) 令和6年度：

高層建築物エレベータについて、大都市復旧マニュアルの検討を行った。

(e) 令和6年度業務目的

これまでに開発した定性的将来予測システムについて、災害シナリオの自動生成技術に時間や位置情報を追加する技術を追加して、令和6年能登半島地震を対象に機能検証を行う。また、都市機能被害の評価モデルにおいては、建物・エレベータ被害以外に、上記の定性的将来予測システムにおいてCascading効果が極めて大きかった「停電」による影響も付加的に考慮し、南海トラフ地震モデルのみならず、相模トラフ地震における多様な都市機能の被害量を比較する。

(2) 令和6年度の成果

① 災害シナリオ自動生成技術の高度化と実災害での検証

(a) 業務の要約

本業務では、令和5年度までに開発した、新聞記事から災害事象の因果知識及び付随情報を抽出・整理する汎用的なプログラムについて、時空間情報を自動的に紐づけする技術開発を行った。また、令和6年能登半島地震を対象として、上記システムの検証を行った。

(b) 業務の実施方法

本業務は、新聞記事から災害事象の因果知識及び付随情報を抽出・整理する汎用的なプログラムを作成し、それを実災害において検証することで、システムの高度化をはかっている。具体的には、下記の項目を実施した。

- 1) 自然言語処理・人工知能技術を活用した新聞記事からの因果判定・因果抽出における時空間情報の抽出
- 2) 令和6年能登半島地震の新聞記事データを入手し、システムの検証を行う
- 3) システムを用いて令和6年能登半島地震におけるエスカレーションポイントを探索

(c) 業務の成果

今回、高度化をはかったプログラムの全体像は下図のように示される。黄土色のボックスが手作業を必要とする部分であり、これまでのプログラムに比べて大幅な自動化が可能となっている。なお、時空間情報の抽出は令和5年度の業務成果の継続課題として行い、これを高度化させている。

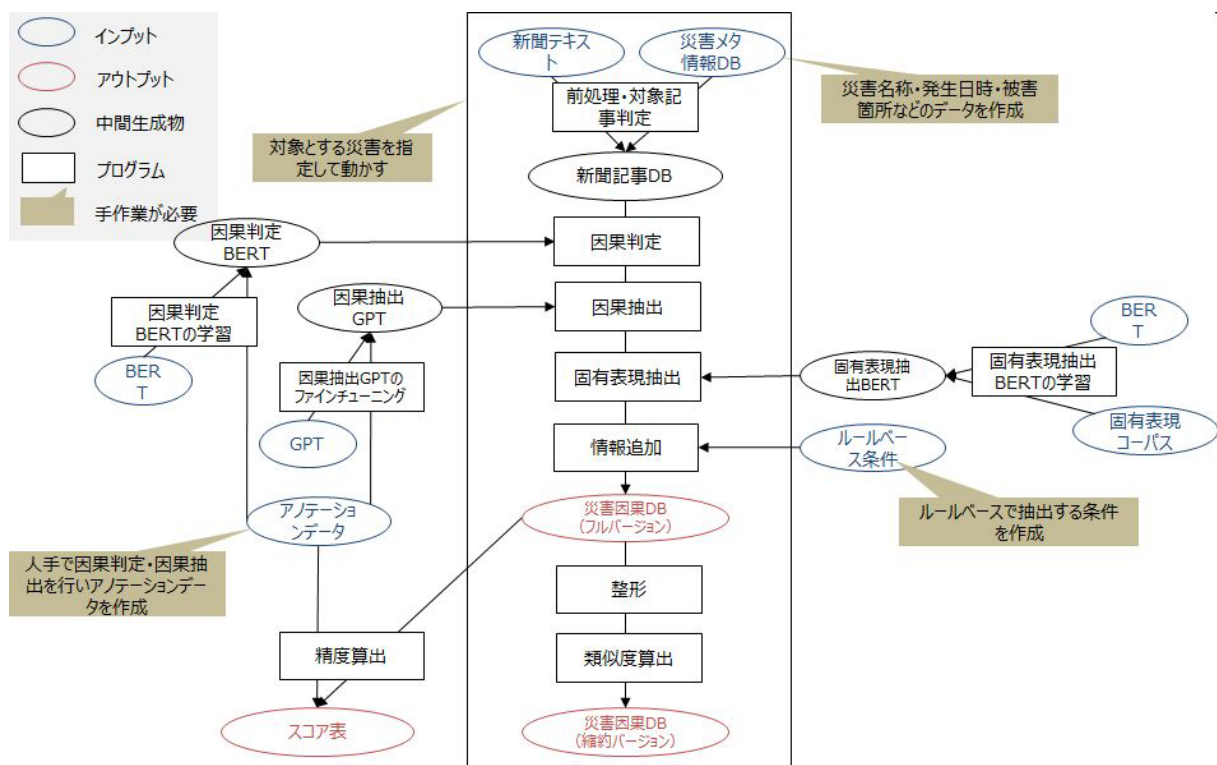


図 2-6-①-1 災害シナリオの自動生成システムの全体像

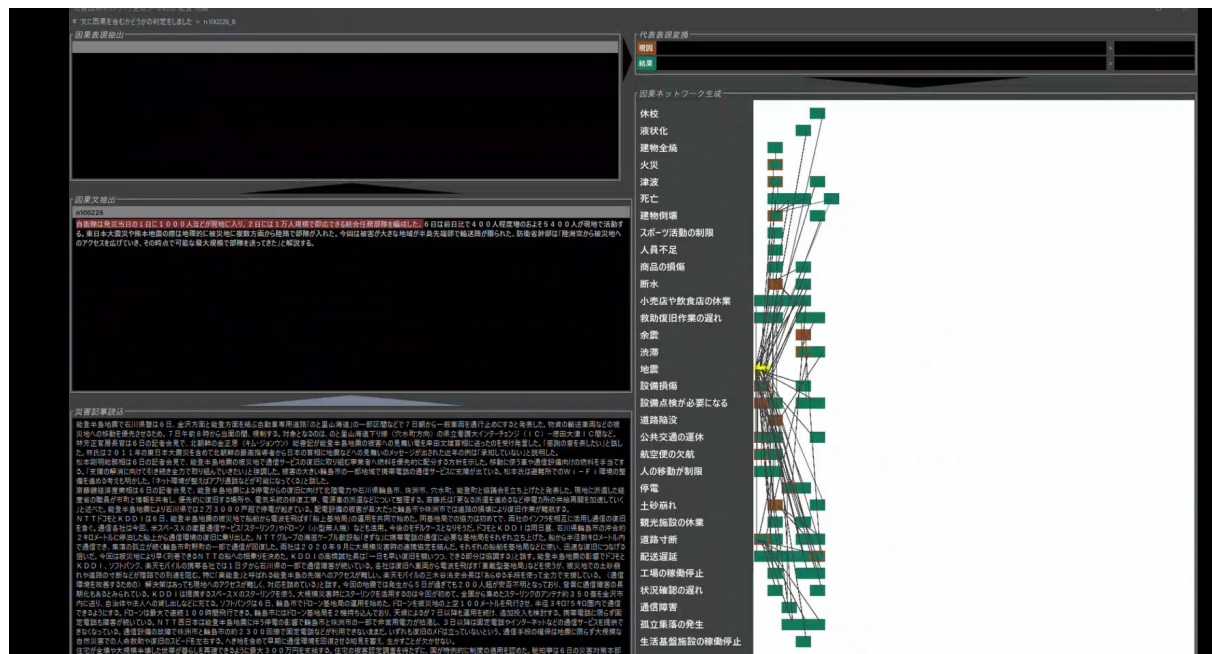


図 2-6-①-2 災害シナリオの自動タイムライン作成（高度化）

(d) 結論ならびに今後の課題

上記のように、本年度は場所や時間を紐づける技術について、災害シナリオの自動生成技術に実装し、令和6年能登半島地震を対象として実装を行った。結果として、阪神・淡路大震災や東日本大震災で分析されたものと異なる、令和6年能登半島地震独特のエスカレーションポイントが抽出された。具体的には、阪神・淡路大震災では工場生産の停止やビルの倒壊、断水、物流の混乱がエスカレーションポイントとなっており、また東日本大震災では同じく被災地の工場生産の停止や被災地外への計画停電を含めた停電などがエスカレーションポイントとなっている反面、能登半島地震では道路寸断と降雪がその後の因果ネットワークに与えた影響が大きいことがわかり、半島地形や冬季かつ積雪地帯という特徴が今回の大きな問題であったことが判明した。このように本作業によって、災害の規模や地域特性で大きく変わる災害固有の因果ネットワークを早期に把握することの実用的意義が明らかとなっている。

(e) 引用文献

坂平文博，廣井悠，2022，新聞記事に基づく災害因果ネットワークにおけるカスケード効果の評価，日本セキュリティ・マネジメント学会第35回全国大会予稿集

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

なし

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

②長周期地震動による都市機能被害の評価モデル高度化

(a) 業務の要約

本課題では、特に長周期地震動による被害を受けやすい超高層ビル等のエレベータ障害に着目し、都市機能を守るために望ましいエレベータ復旧オペレーション方針を検討することを最終目標としている。今年度は、昨年度までに構築した都市機能被害評価モ

デルに、新たな被害要因である電力障害と、昨年度十分に検討されていなかった低層建物の被害考慮できるように評価モデルを高度化した。この評価モデルを用いて、昨年度までに評価した南海トラフ地震の地震動 83 ケースを再評価したことに加え、南海トラフ地震 91 ケースと相模トラフ地震 5 ケースにおける都心 4 区の都市機能被害を評価した。その上で、南海トラフ地震による都市機能被害の特徴を、相模トラフ地震の評価結果との比較から検討した。実施項目・方法は以下の通りである。

(b) 業務の実施方法

- 1) 長周期地震動に係る被害を主な対象としてきた昨年度までの評価モデルに付加的に被害要因を組み込むことで高度化を図った。都市機能に大きな影響を及ぼす被害要因をライフラインと捉え、既往文献からその影響度を整理し、電力障害を追加要因として選定した。その評価手法を文献調査し、被害関数を作成した(1-a)。今年度追加した低層建物の被害は、中央防災会議¹⁾の被害関数を用いてモデル化した。建物の構造種別は、統計情報を参照し、建物の構成の実態に則するように割り当てた(1-b)。
- 2) 東京都心 4 区（千代田区、中央区、港区、新宿区）を対象に、1) で高度化した評価方法によって、南海トラフ地震等の地震動分布に対する都市機能被害の評価を行った。南海トラフ地震は昨年度まで評価してきた 83 ケースに、新たな 91 ケースを追加した。また、相模トラフ沿いの地震による 5 ケースも対象とし、地震動ケースや対象地域、条件ごとの都市機能被害を評価した(2-a)。これらの結果を整理・比較し、南海トラフ地震による首都圏の都市機能被害の特徴や多様性について考察した(2-b)。

(c) 業務の成果

1) 都市機能に影響する被害要因と評価手法の整理

前年度までの評価方法は長周期地震動に係る被害を主な対象としてきた。今年度は短周期成分による被害も評価できるように、被害要因を付加することで評価モデルの高度化を図った。具体的には、電力障害と低層建物の被害評価を追加した。以下にそれぞれの成果の概要を示す。

(1-a) 新たな被害要因「電力障害」の評価

東日本大震災の報告書をテキストマイニングすることで、地震時におけるライフラインの影響度を検証し、電力関連用語の出現数がライフラインの中で 39%以上を占めることから電力が最も影響度が大きいと結論づけた研究²⁾を参考に、本研究の評価モデルに電力障害を付加することとした。

地震による電力障害の評価は、対象地域の電力供給に関する施設とそのネットワークを具体的にモデル化して評価する方法（物理モデルによる方法）と、被害事例の分析に基づく統計モデルを用いる方法（被害統計による方法）の 2 種類に分類できる。具体的なモデルを用いる方法は発電・変電施設や送電施設のモデルや実数が必要となり、本研究においてモデル化は困難であるため、被害統計による方法を採用した。代表的な評価方法として能島ら³⁾の研究が挙げられるが、兵庫県南部地震の町丁目の停電率に対する評価であるため、棟数単位の停電率の計算に準用すると過大評価となる。

そのため、図2-6-②-1のように、東京都の首都直下地震等に対する被害想定⁴⁾に整合するように能島らの被害関数のパラメータを調整した。

また、地震時に建物外部からの電力供給が停止した場合でも、建物の機能維持が可能な電力を供給できる非常用電源が存在すれば、電力障害は発生しないと考えられる。内閣府による企業の事業継続計画や防災対策の実態調査⁵⁾によれば、「非常用電源・通信設備等の準備」を事業継続計画に記載している企業は全体の61.7%である。しかし、一般建物の非常用電源設置状況の調査例は見当たらなかったため、非常用電源の設置率が0、30、60%の3つの場合に対して評価を行い、非常用電源の設置状況が大地震時の都市機能に与える影響を考察することとした。

図2-6-②-2に電力障害の評価フローを示す。電力障害は路上配電設備等の損傷により発生すると考えられるため、電力障害の評価は250mメッシュごととし、周辺メッシュとの関連は考慮せず、各メッシュを独立に評価した。また、低層建物には非常用電源がないことと、非常用電源設置率の大小は用途によらないことを仮定した。

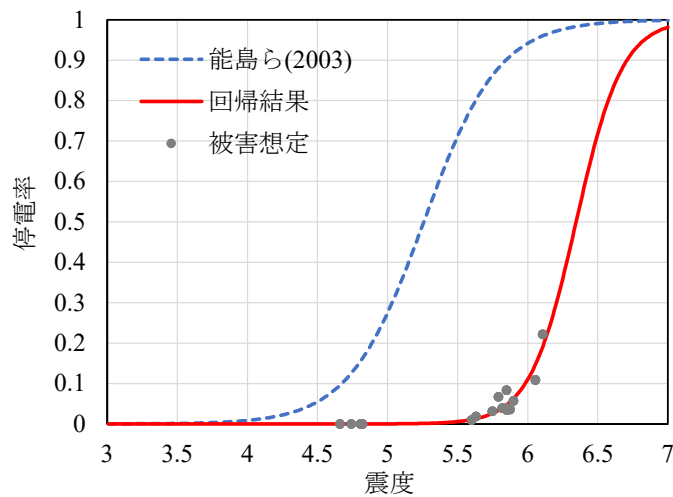


図2-6-②-1 停電率の設定

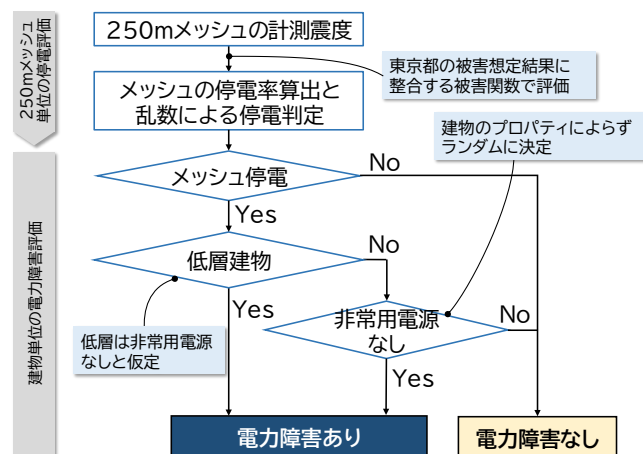


図2-6-②-2 電力障害評価フロー

(1-b) 低層建物の被害評価

低層建物の被害評価には、計測震度を説明変数とした中央防災会議¹⁾の被害関数を用いた。これは建築年代と構造種別（木造、非木造）ごとのパラメータが設定されているが、今回用いる建物データ⁶⁾に構造種別は含まれないため、建物データと統計データに基づき、建物の構造種別を推定して割り当てることとした。表2-6-②-1に、低層建物に占める戸建住宅の割合を示す。千代田区は35.3%と比較的低いが、4区を平均すると58.5%であった。一方、建築着工統計調査⁷⁾から、2011～2022年度に4区で着工した1～3階建て建物の棟数は、図2-6-②-3に示すとおりで、全11101棟のうち、木造は57%、非木造は43%であった。また、東京都の被害想定³⁾における建物棟数の集計結果では、島しょ地域を除いた東京都の建物棟数は、木造が7割、非木造が3割となっており、建築着工統計調査の集計による都心4区の構成比「木造6割、非木造4割」は大きく乖離してしない。

本研究では建物個別の被害ではなく、被害の総量や地理的分布を評価することが目的であることから、以上の考察より、低層建物に占める戸建住宅の割合と、低層建物に占める木造の割合は概ね一致すると判断して、低層の戸建住宅は木造、その他の低層建物は非木造として扱うこととした。

表2-6-②-1 建物データにおける低層建物に占める戸建住宅の割合

	低層建物の棟数	低層の戸建住宅の棟数	戸建住宅率
千代田区	3438	1213	35.3%
中央区	6878	3897	56.7%
港区	14731	8033	54.5%
新宿区	37383	23396	62.6%
合計	62430	36539	58.5%

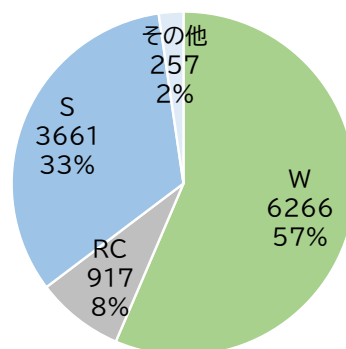


図2-6-②-3 建築着工統計調査における構造種別の集計結果

(1-c) 各建物の機能被害評価

今年度は電力障害の評価を追加したため、「建物被害」「電力障害」「エレベータ障害」の3つの要因の重複が生ずる。3つの要因の組み合わせによって都市機能被害のモードが決定されるよう、図2-6-②-4に示すフローによって、被害の状態とそれに応じた機能喪失率を定義した。Mode 1「建物被害」は、建物の躯体が損傷を受け、

建物を継続利用できない状態であり、機能喪失率を 100%とした。Mode 2「電力障害」は、建物が継続使用できても停電によって都市機能を喪失している状態であり、機能喪失率を 100%とした。Mode 3「エレベータ障害」は、建物も電力も使用できるが、エレベータが使用できないために都市機能を喪失している状態であり、機能喪失率は昨年度設定したエレベータの稼働率に応じた関係(図 2-6-②-4 内右上)で決定した。

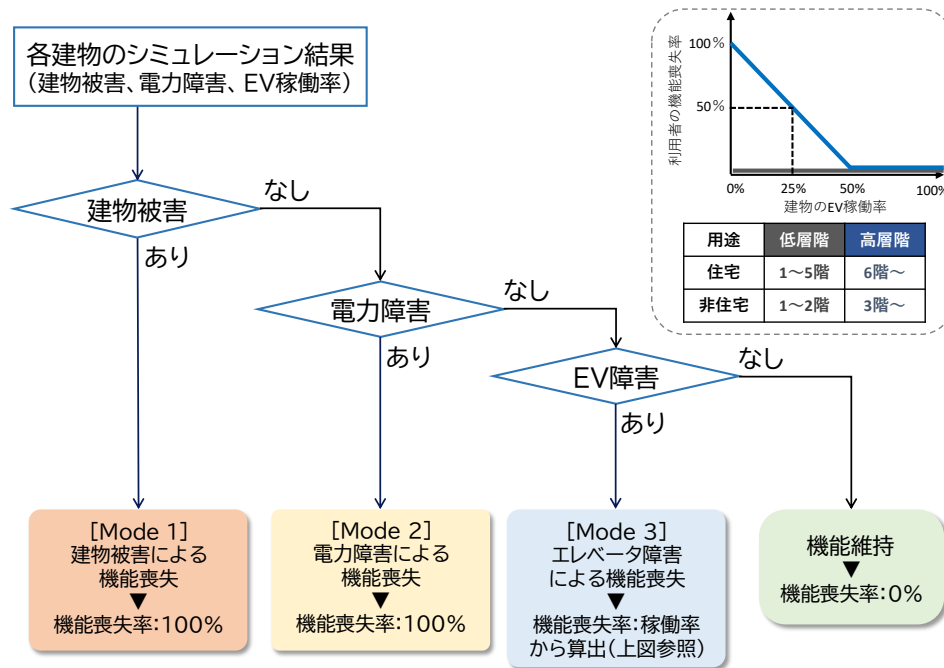


図 2-6-②-4 被害要因を付加した建物の機能被害評価フロー

2) 多様な地震による都市機能被害の評価

1)において高度化した評価モデルを用いて、多様な地震による都市機能被害の評価を行った。(2-a)南海トラフ地震 174 ケースと相模トラフ地震 5 ケースに対する東京都心 4 区(千代田区、中央区、港区、新宿区)の都市機能被害を評価した。地震動分布はサブ課題 2 (g)より提供された。相模トラフ地震は、図 2-6-②-5に示す 3 つのタイプ (Mw7.3、Mw8.0、Mw8.5)を対象とし、それぞれ東京都庁付近の速度応答スペクトルが平均的な地震動を選定した。Mw8.0 と Mw8.5 は平均レベルに加え、ばらつきを考慮して、平均レベルより 1 σ 大きい地震動も評価対象とした。(2-b)評価結果を比較することで、南海トラフ地震による都市機能被害の特徴を考察した。以下に、それぞれの成果の概要を示す。

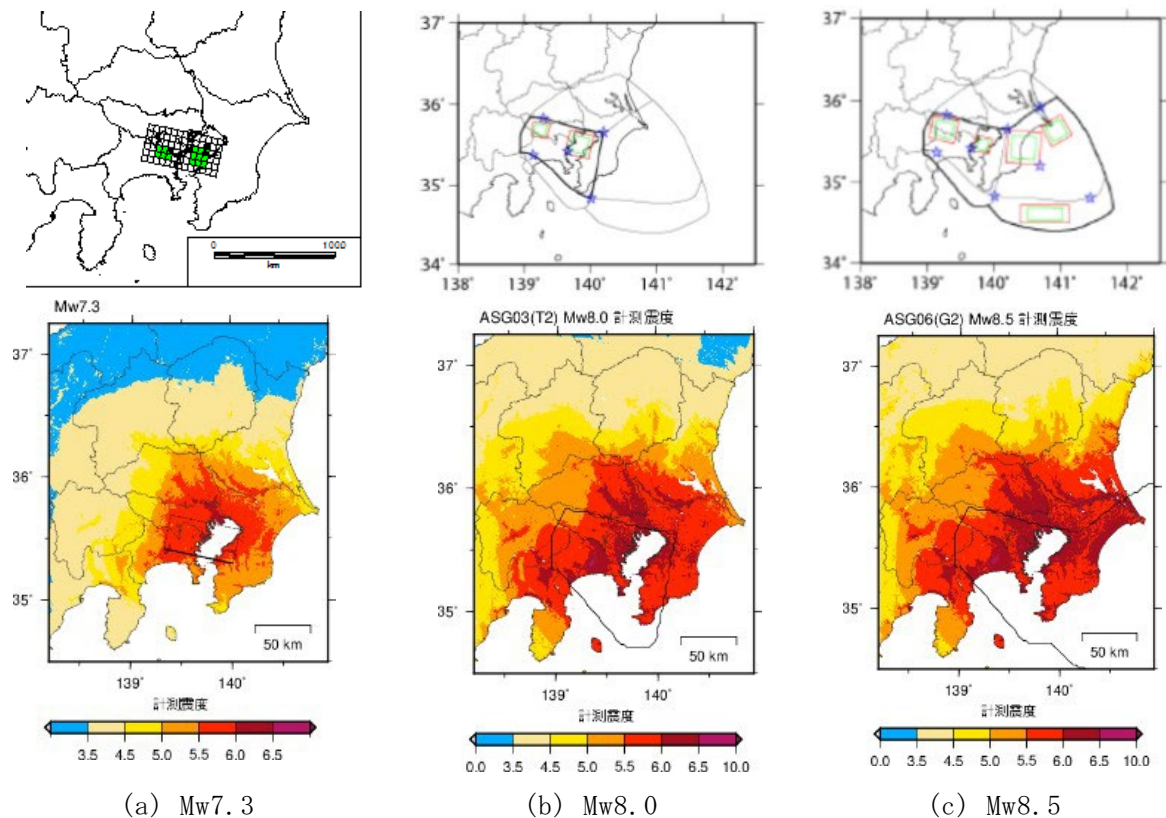
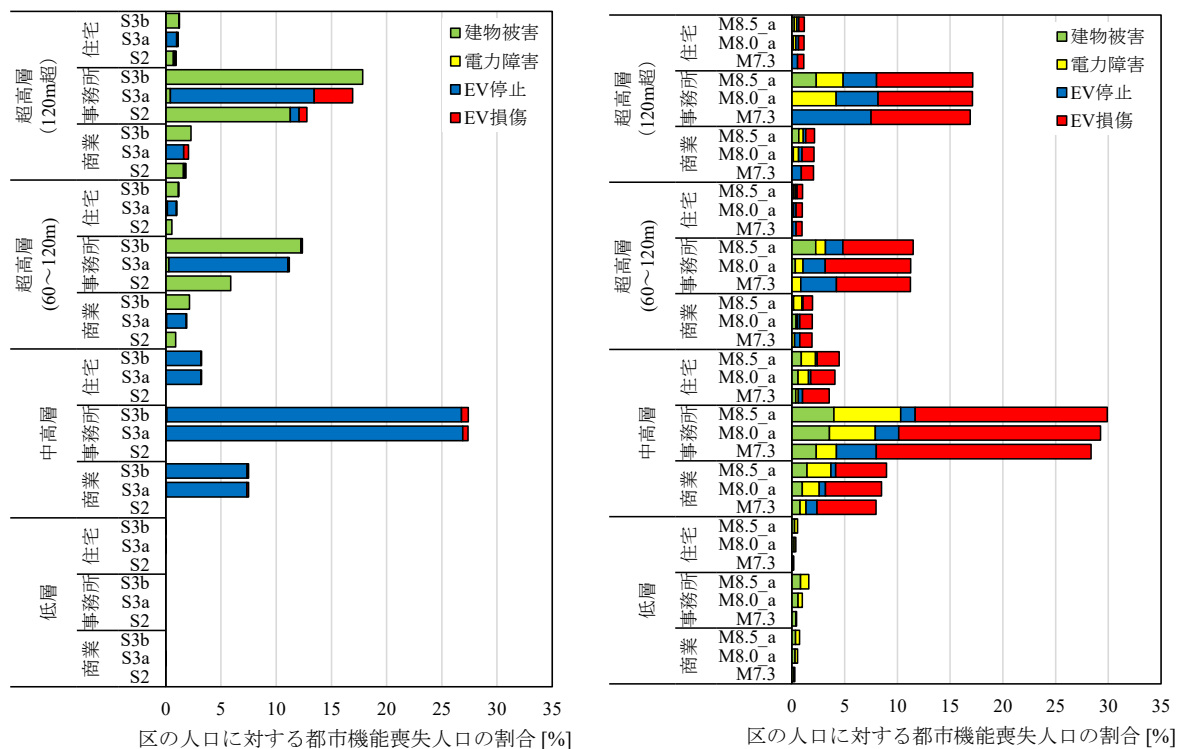


図 2-6-②-5 採用した 3 タイプの相模トラフ地震

(2-a) 南海トラフ地震と相模トラフ地震による都市機能被害の評価

全ケースの評価結果の中から、被害の様相が特徴的な 3 ケース (S2、S3a、S3b と称する。) と、相模トラフ地震の平均 3 ケースに注目し、被害を比較する。S2 は和歌山県沖が破壊開始点となる東側半割れの地震、S3a と S3b は静岡県沖の異なる破壊開始点を持ち、御前崎以東を震源域に含む東側半割れの地震である。図 2-6-②-6 に、非常用電源を考慮しない場合の港区における被害の内訳を示す。ここでは、昨年度定義した指標で、都市機能被害によって平常時の社会生活が送れない人口を表す「都市機能喪失人口」を用いた。集計の際は図 2-6-②-4 に則って被害要因の重複を考慮し、エレベータ障害は台数の比率によって「緊急停止」と「損傷」に分割した。南海トラフ地震では、S2 で超高層の建物被害が多く生じ、S3a で中高層以上のエレベータ停止、S3b で中高層建物のエレベータ停止と超高層の建物被害が顕著に見られた。一方で相模トラフ地震における都市機能喪失人口は、いずれのケースもエレベータの緊急停止によるものは 20%以下で、エレベータ損傷によるものは半数を占めた。また、建物の高さ区分によらず建物被害と電力障害が見られ、地震の規模が大きくなるにつれて都市機能被害が増加した。



(a) 南海トラフ地震の代表 3 ケース (b) 相模トラフ地震の平均 3 ケース
図 2-6-②-6 代表ケースにおける都市機能被害の内訳（港区）

(2-b) 多様な地震による首都圏の都市機能被害の比較・考察

南海トラフ地震 174 ケースと相模トラフ地震 5 ケースに対する東京都心 4 区の都市機能被害評価結果を比較する。被害を表現する指標として、前述の「都市機能喪失人口」に加え、建物数に対する指標「機能喪失棟数」を用いた。機能喪失棟数においても、エレベータの「緊急停止」と「損傷」を区別し、損傷したエレベータが存在する場合は「損傷」、損傷したエレベータが存在せず、緊急停止したエレベータが存在する場合は「緊急停止」として扱った。非常用電源を考慮しない場合の港区の結果を図 2-6-②-7 と図 2-6-②-8 に示す。重複を考慮せずに各被害要因の影響を受ける人口と建物数（それぞれ絶対人口と絶対棟数と称す）も併せて示す。それぞれ被害の総量の昇順で地震動ケースを並び替えている。図 2-6-②-7 の都市機能喪失人口は、南海トラフ地震で最大 70% 程度、相模トラフ地震では 80% 程度であり、超高層の建物被害や、中高層、超高層のエレベータ障害が顕著であった。図 2-6-②-8 の機能喪失棟数は、南海トラフ地震で最大 40% 程度、相模トラフ地震で最大 60% 程度であり、中高層のエレベータ障害が顕著に現れた。指標による被害量を比較すると、通常の社会生活を送れない人数である「都市機能喪失人口」の割合に対して、被害を建物単位で考える「機能喪失棟数」の割合は小さかった。これは、一棟に多くの人口が集中する超高層建物が多く所在する東京都心の地震被害の特徴である。

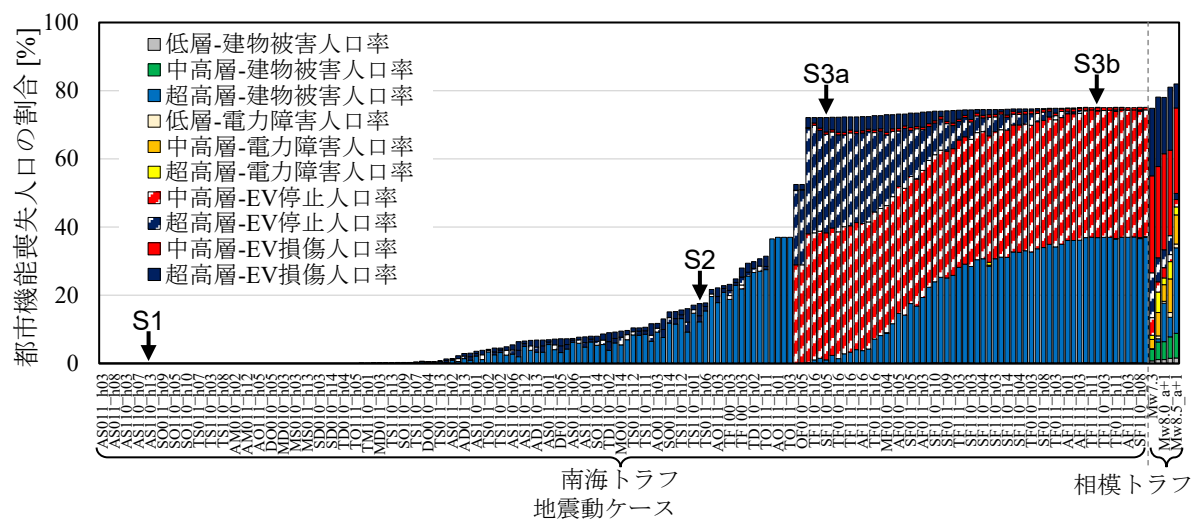
地域差の確認のために、非常用電源を考慮しない場合の各区の評価結果を図 2-6-②-9 に示す。ここでは、前年度扱った南海トラフ地震 83 ケースと相模トラフ地震 5 ケースに対して、千代田区の被害の総量が昇順になるように地震動ケースを並び替え

ている。同図(a)の機能喪失棟数を見ると、南海トラフ地震の御前崎以東が震源域に含まれるAF、DF、MF、SF、TFで始まる地震動ケースではすべてのエレベータで障害が発生し、機能喪失棟数がほぼ同等となっている。この地震動ケースに着目し地域差を見ると、千代田区、中央区、港区、新宿区の順に機能喪失棟数の割合が大きいことが分かった。今回の長周期地震動シミュレーションでは地震動の強さは4区で大きく異ならないため、地域差の原因は建物の構成となる。エレベータ障害を受けない低層建物の割合（千代田区30%、中央区42%、港区56%、新宿区77%）は、御前崎以東が震源域に含まれる場合に機能を維持する建物の割合と対応する。同図(b)の同じケースに着目すると、都市機能喪失人口は千代田区、中央区、港区で70~80%だが、新宿区は相対的に小さく60%程度だった。この理由も同様であり、新宿区は中層以上の建物の割合が他の区に比べて小さく、エレベータ障害が相対的に少ないためだと考えられる。

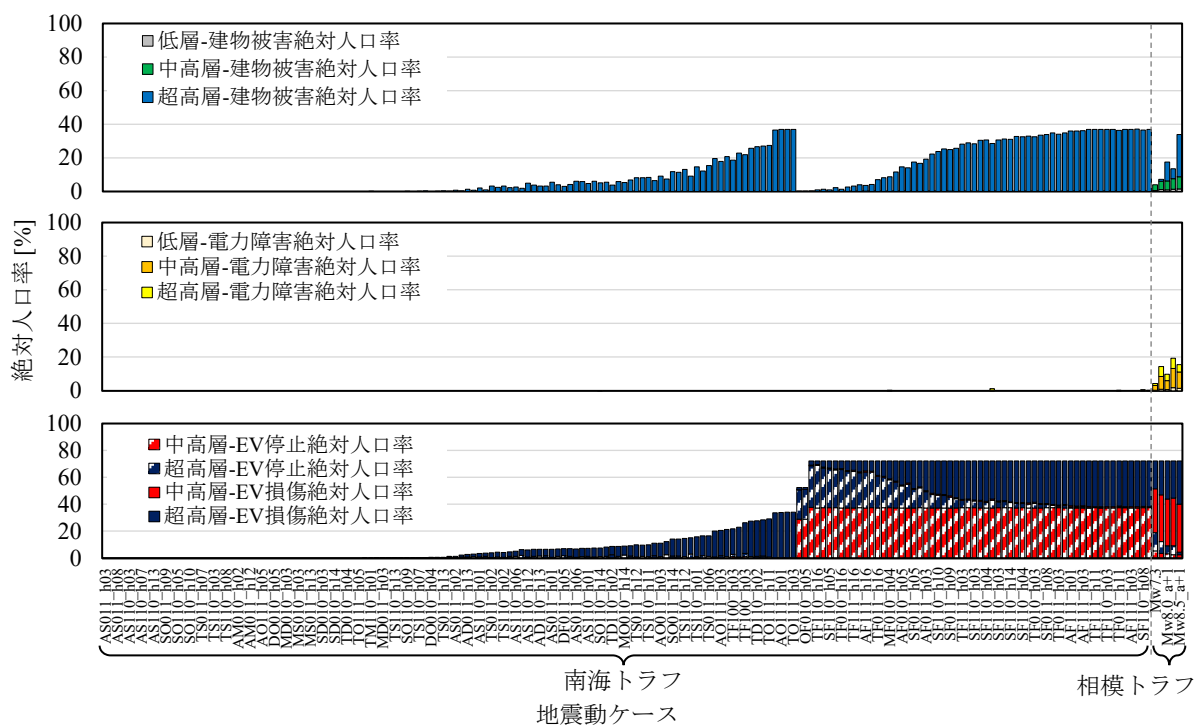
電力障害に関して、南海トラフ地震では、計測震度が最大5程度で電力障害はほぼ生じない結果であった。相模トラフ地震では、図2-6-②-7から分かるように最大で2割程度の人口が電力障害の影響を受ける結果であった。港区における非常用電源の設置率と電力障害絶対人口の割合および都市機能喪失人口の割合の関係を図2-6-②-10に示す。同図(a)より、非常用電源設置率を増加させれば電力障害の影響を受ける人口は軽減し、Mw8.5平均ケースでは非常用電源を60%設置することで電力障害絶対人口が10%低減した。一方で、同図(b)より、非常用電源の設置は都市機能喪失人口の低減には大きな影響を与えず、最大で2%程度の減少であった。これは電力障害よりもエレベータ障害の規模が大きく、電力障害を解消してもエレベータが利用できない状況となるためである。しかし、この評価は地震発生直後に対するもので、エレベータの緊急停止が順次解消されれば、停電率の軽減は都市機能回復に効果があることに留意する必要がある。

以上から、相模トラフ地震との比較に見る南海トラフ地震の特徴は、以下の3点にまとめられる。

- (ア) 相模トラフ地震は、地震動の短周期成分が大きく、長周期成分が大きいケースも存在するため、あらゆる建物区分における建物被害、電力障害、エレベータ障害が発生し、多様な被害が見られる。一方で、南海トラフ地震の被害は長周期成分によって引き起こされるものがほとんどであり、超高層の建物被害、中層以上のエレベータ障害が顕著である。
- (イ) 今回対象とした都心4区で3つの被害要因を考慮した場合、南海トラフ地震であっても、震源の近い相模トラフ地震と都市機能喪失人口が同程度になるケースが存在する。これは、都心で利用人口の多い超高層建物に係る被害が南海トラフ地震で多数発生するためである。
- (ウ) エレベータ障害の人口に着目すると、相模トラフ地震では機器・ロープの故障に起因するものが過半以上であるのに対し、南海トラフ地震は緊急停止によるものがほとんどであった。機器・ロープの故障に比べて、緊急停止は遠隔点検などの復旧技術の導入により復旧所要時間の短縮が期待できるため、南海トラフ地震においては、エレベータ復旧対策の効果が大きいと考えられる。

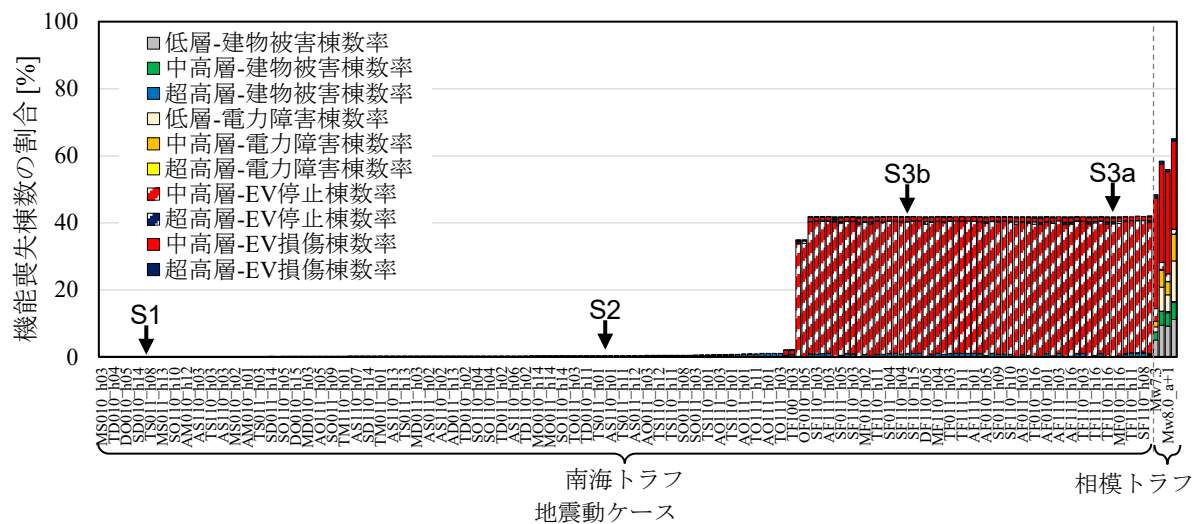


(a) 都市機能喪失人口

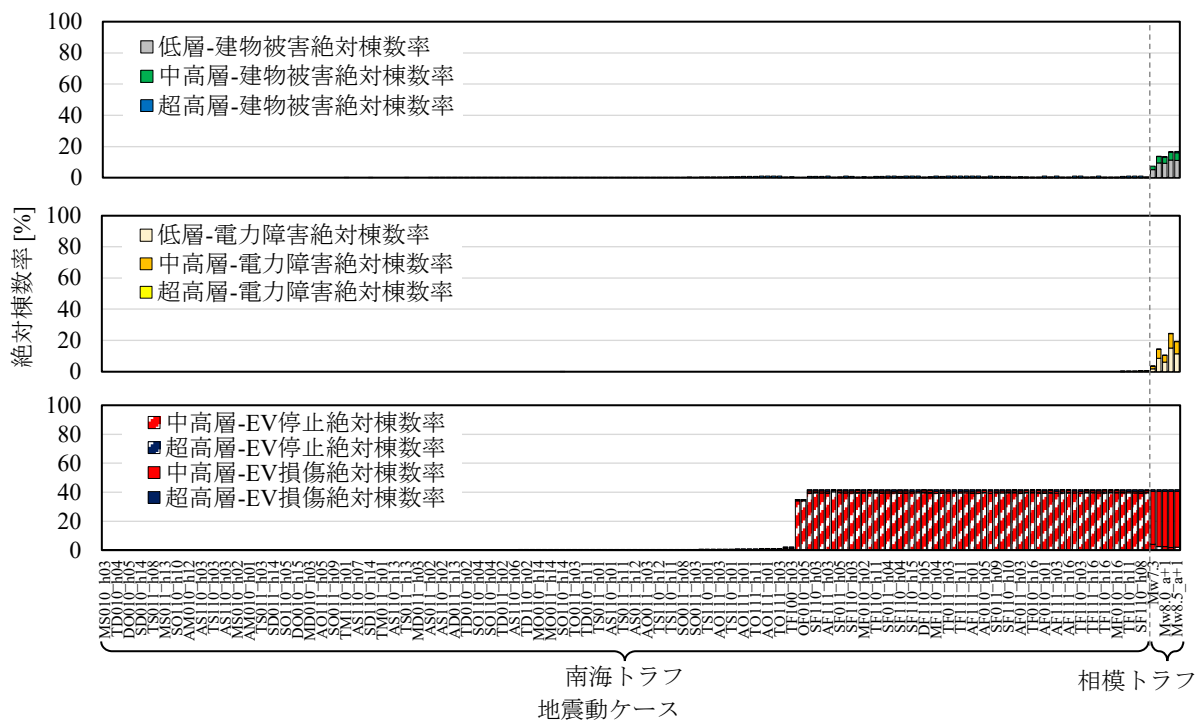


(b) 絶対人口

図 2-6-②-7 地震動による都市機能喪失人口の比較

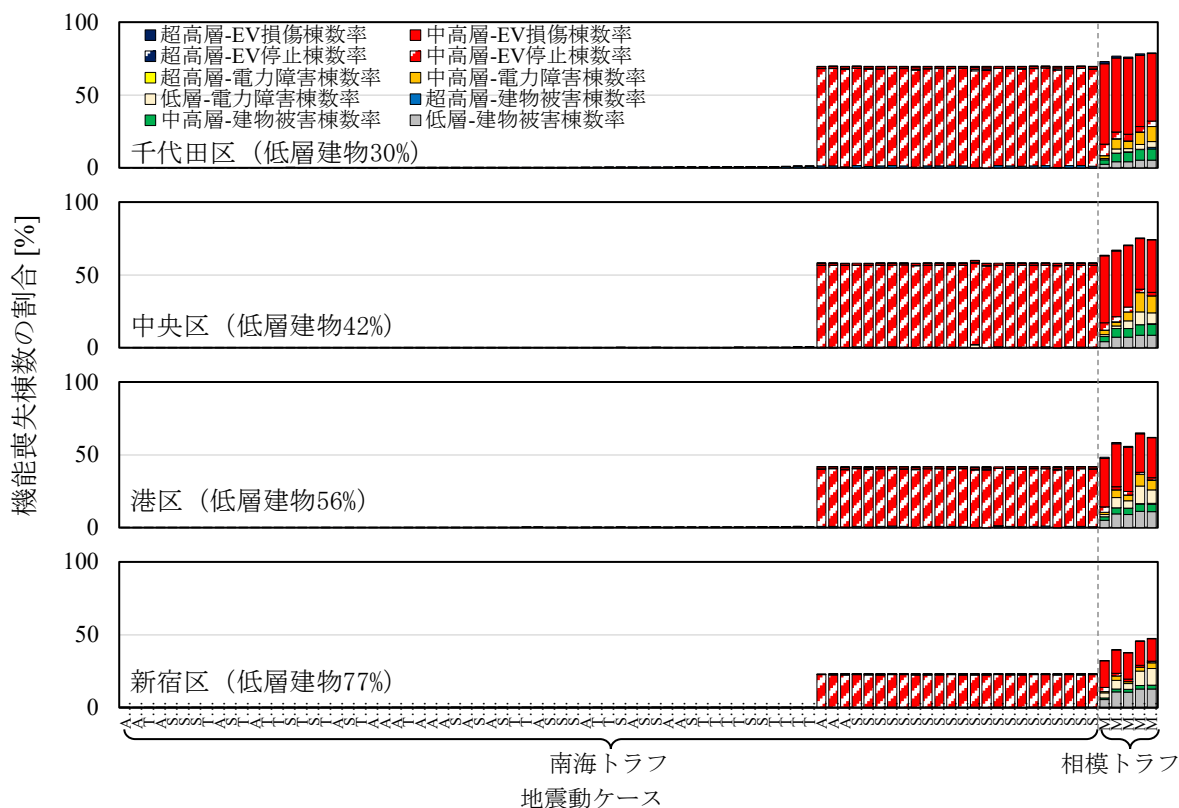


(a) 機能喪失棟数

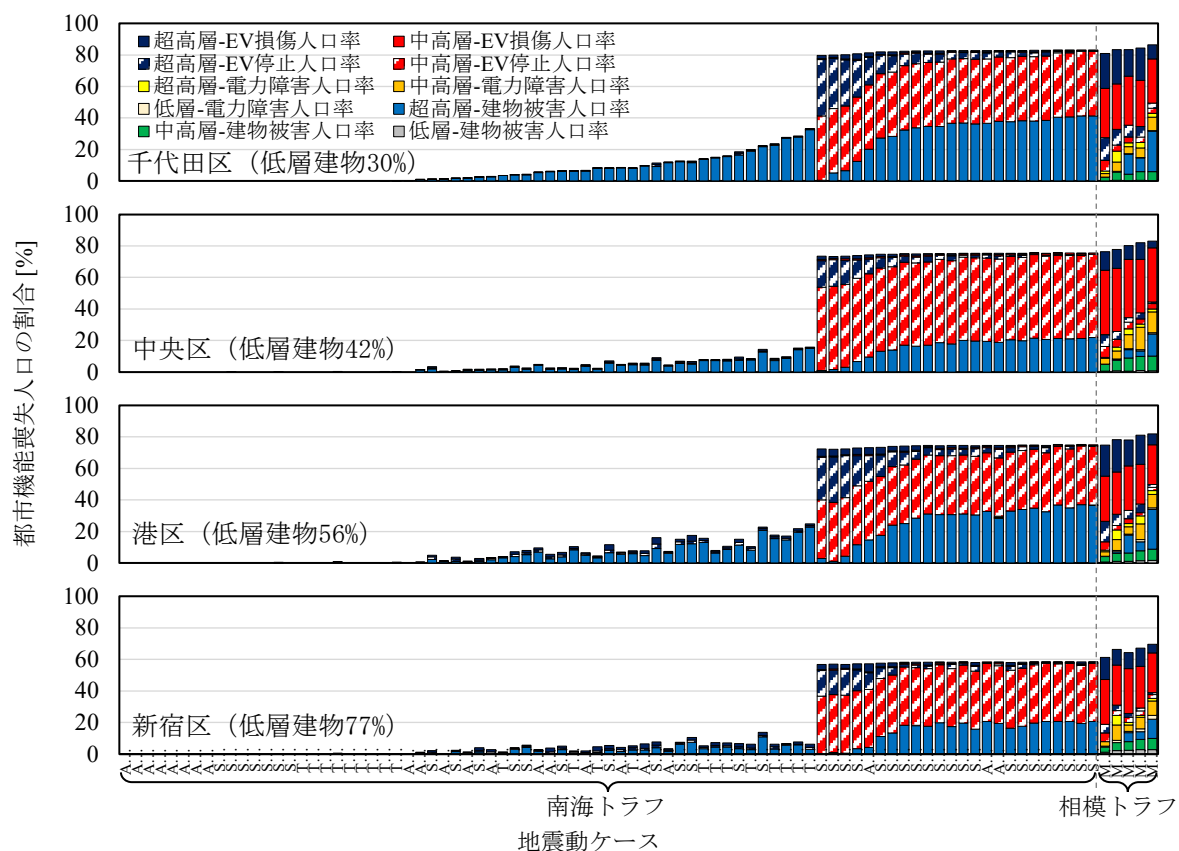


(b) 絶対棟数

図 2-6-②-8 地震動による機能喪失棟数の比較

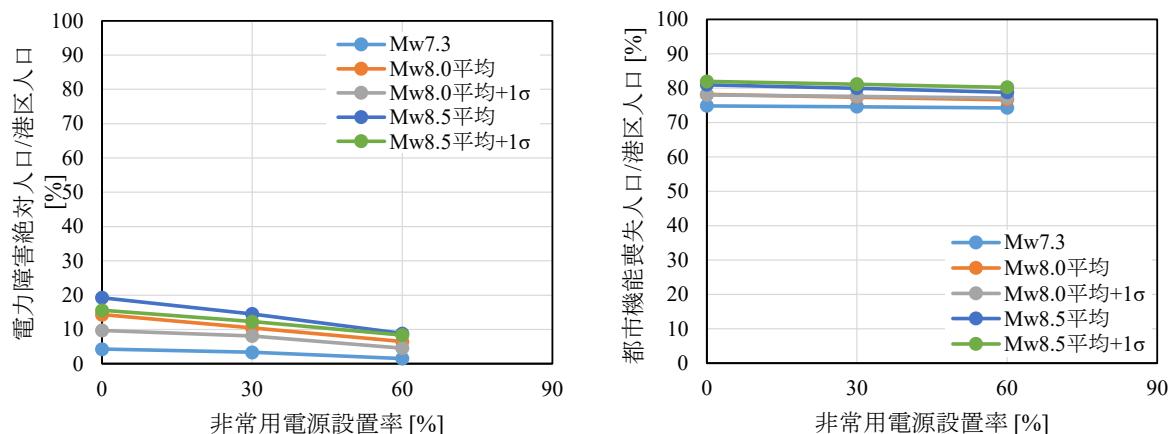


(a) 機能喪失棟数



(b) 都市機能喪失人口

図 2-6-②-9 都市機能被害の地域による比較



(a) 非常用電源設置率と電力障害絶対人口 (b) 非常用電源設置率と都市機能喪失人口
との関係 との関係

図 2-6-②-10 非常用電源設置率が都市機能被害に及ぼす影響

(d) 結論ならびに今後の課題

本研究のまとめと今後の課題を以下に示す。

- 1) 文献調査の結果を踏まえ、昨年度までに作成した評価モデルに電力障害と低層建物の被害を追加し、モデルを高度化した。電力障害の発生率は、能島らの研究³⁾と東京都の首都直下地震の被害想定⁴⁾を参照し、被害関数を作成して評価した。非常用電源の設置率を0、30、60%の3段階で評価し、その影響を検証した。低層建物の被害は戸建住宅を木造、それ以外を非木造として、中央防災会議¹⁾の被害関数によって評価した。
- 2) 1) の評価モデルを用いて、サブ課題2 (g) から提供された南海トラフ地震174ケースと相模トラフ地震5ケースでの都市機能被害を評価し、以下の知見を得た。
 - ・東京都心は、人口が集中する超高層建物が数多く所在することや、エレベータの利用が多いことから、都市機能被害に次のような特徴がある。①「機能喪失棟数」の割合は最大で2～7割程度だが、「都市機能喪失人口」の割合は最大6～8割程度であった。②長周期地震動によりエレベータ障害が多く発生するため、他の3区と比べてエレベータ設置建物が比較的少ないとした新宿区では、都市機能被害が小さい。③非常用電源を設置するなどして電力障害を緩和しても、都心ではエレベータ障害の規模が甚大であるため、地震直後の都市機能被害は軽減されない。
 - ・相模トラフ地震と比較することで、南海トラフ地震による都市機能被害の特徴を3つ挙げた。①地震動の短周期成分も強く多様な被害が見られる相模トラフ地震に対し、南海トラフ地震の被害のほとんどは長周期成分が原因で、超高層の建物被害、中層以上のエレベータ障害が顕著である。②都心4区は超高層建物に係る被害が甚大であるため、南海トラフ地震であっても、震源の近い相模トラフ地震と都市機能喪失人口が同程度になるケースが存在する。③エレベータ障害に着目すると、相模トラフ地震では機器・ロープの故障が半数以上であるのに対し、南海トラフ地震は緊急停止がほとんどであった。機器・ロープの

故障に比べて、緊急停止は遠隔点検などの復旧技術の導入により復旧所要時間の短縮が期待できるため、南海トラフ地震においては、エレベータ復旧対策の効果が大きいと考えられる。

今年度は、相模トラフ地震での評価結果と比較することで、南海トラフ地震における首都圏の都市機能被害の特徴を考察し、超高層建物に係る被害が甚大であることを確認した。しかし、本成果を具体的な防災対策につなげるには、今回の評価モデルに取り入れた3つの被害要因に限定せず、都市機能が被害を受ける状況を網羅的に把握し、被害要因の相互連関性を考慮する必要がある。また、より精緻なモデルを構築するには、都心と近郊住宅地域等との地域的連関性、他の災害が連続して発生する状況（マルチハザード）も考慮するべきであり、本研究は検討の余地がある。

(e) 引用文献

- 1) 中央防災会議：首都直下地震対策検討ワーキンググループ：首都直下地震の被害想定と対策について（最終報告），2013.
- 2) 鉾田泰子：東日本大震災報告書の用語検索によるライフライン相互連関分析，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 72, No. 4, I_926-I_933, 2016.
- 3) 能島暢呂，杉戸真太，鈴木康夫，石川裕，奥村俊彦：震度情報に基づく供給系ライフラインの地震時機能リスクの二段階評価モデル，土木学会論文集，No. 724, I-62, 225-238, 2003.
- 4) 東京都：首都直下地震等による東京の被害想定 報告書，2022.
- 5) 内閣府防災担当：令和5年度 企業の事業継続及び防災の取組に関する実態調査，2024
- 6) ゼンリン：建物ポイントデータ公式ウェブサイト，
<https://www.zenrin.co.jp/product/category/gis/contents/building-point/index.html>（最終閲覧 2025 年 3 月 10 日）
- 7) 国土交通省総合政策局建設経済統計調査室：建築着工統計調査 令和5年計，2024.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

- 1) 学会等における口頭・ポスター発表
なし
- 2) 学会誌・雑誌等における論文掲載
なし

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

- 1) 特許出願
なし
- 2) ソフトウェア開発
なし
- 3) 仕様・標準等の策定
なし