

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	副部門長	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・ど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緻な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う。モデル地域でのエレベータ障害、復旧の試算の検討を行う。

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う。

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う。

(e) 令和3年度業務目的

「都市機能の維持」について、災害復旧戦略を評価できるようにするため、災害シナリオと復旧過程を生成する手法の検討を行う。はじめに令和2年度に引き続き、災害復旧オペレーションの検討に考慮すべき要因を整理する。これらの検証を行いつつ、首都圏を対象として都市機能維持に関する災害シナリオのダイナミック自動生成技術を検討する。サブ課題2(g)と連携し地震動とエレベータ障害の有無を関係づけ、障害の復旧過程を模擬できるアルゴリズムを開発する。

(2) 令和3年度の成果

本報告書では、前半の「災害シナリオのダイナミック自動生成技術の検討」を①、後半の「地震動とエレベータ障害の有無を関係づけ」を②として成果を記述する。

① 災害事象因果データベースの拡充

(a) 業務の要約

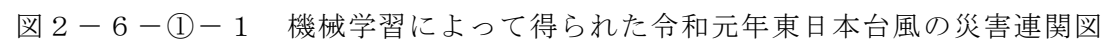
本業務では、機械学習を用いた災害事象因果データベースについて、昨年度に行った阪神・淡路大震災及び東日本大震災に加えて、令和元年東日本台風について因果データベースを拡充し、災害連鎖ネットワークの可視化を試みた。また、これらをベースとしたWebベースの災害シナリオ自動生成技術を構築した。

(b) 業務の実施方法

本業務は、災害シナリオをバックキャスティングから作成する方法のひとつとして、自然言語処理を用いて新聞記事から災害事象とその因果関係を機械的に抽出し、災害連鎖図(cascading disaster network)の作成を試み、災害シナリオ自動生成技術の基盤とすることを目指している。今年度は、その具体的事例として、災害規模の違いを明確化する目的で、令和元年東日本台風東日本大震災について学習モデルを作り、発災から1年間の因果データベースを作成するとともに、災害間の比較を行った。

(c) 業務の成果

ここでは、令和元年東日本台風の発生当日から約1年間（2019年10月7日から2020年9月30日まで）の河北新報における新聞記事・3,159記事を災害因果抽出の対象とした。具体的な方法論については本プロジェクトの令和2年度成果報告書に記載の方法（及び今年度に公刊したジャーナル論文¹⁾に記載の方法）と同様であるが、精度判定には全体の約5%のテストデータを用い、その結果として、利用した新聞記事の文章数59,537センテンスのうち、因果関係がありそうな文章候補が12,802センテンス見つかった（うち、6,406文が手がかり表現による因果文候補、6,396文が継起因果表現による因果文候補）。これを用いて、因果関係を抽出したところ、抽出された因果関係は3,512となった。このなかで、類似度0.7以上のものを抽出した結果が下記の図2-6-①-1になる。昨年度の成果である東日本大震災の因果ツリー（図2-6-①-2）と比較しても、災害の規模が小さいと、因果ツリーの抜き出しが少ないさまが見て取れる。



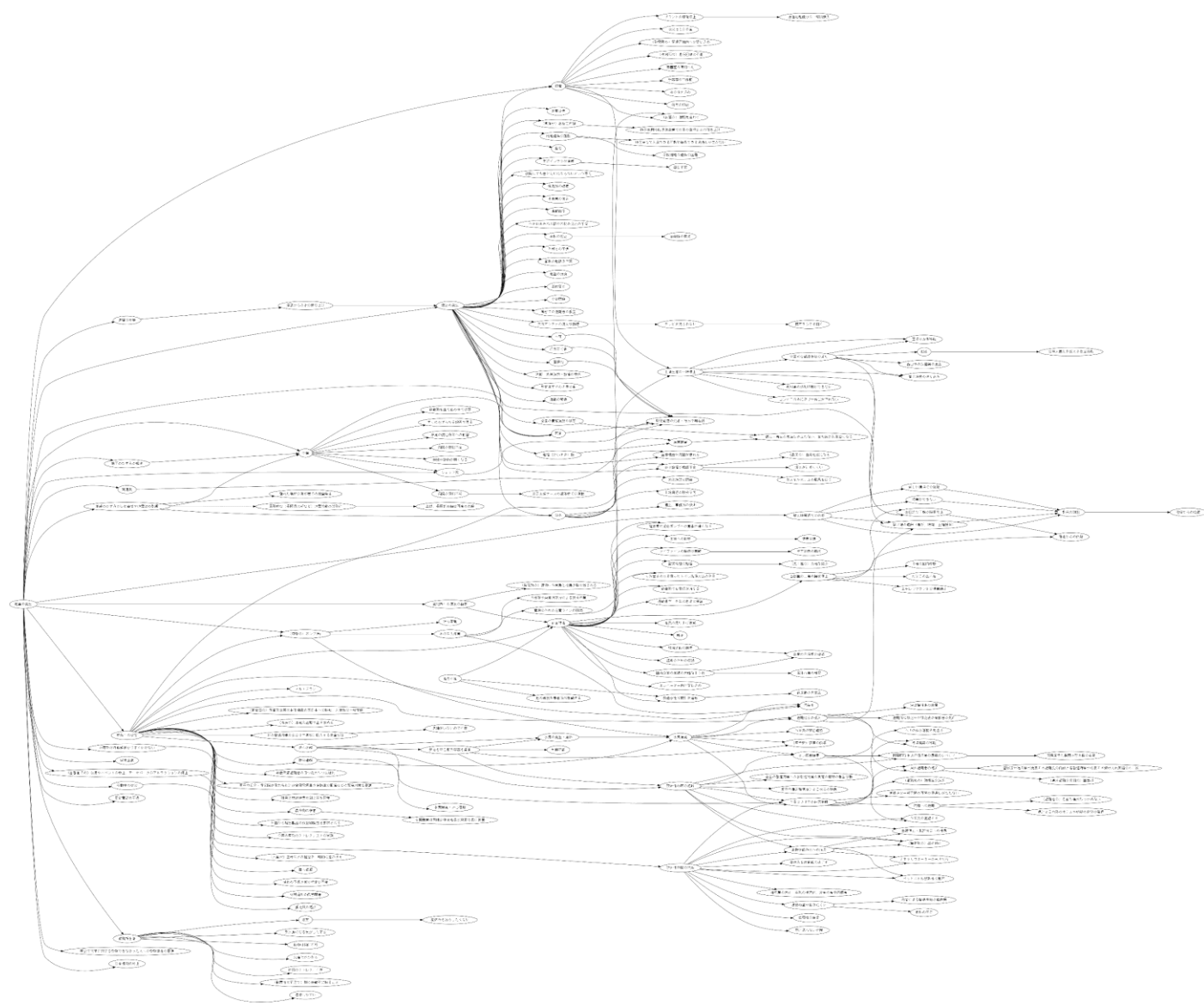


図 2-6-①-2 機械学習によって得られた東日本大震災時の災害連関図（昨年度の本プロジェクト報告書²⁾の再掲）

また、ここでは災害シナリオ自動生成技術のプロトタイプを作成した。下図はその一例である。この Web システムの初期の画面は図 2-6-①-3 のようになる。ここで、「分散表現による類似度」をクリックすると図 2-6-①-4 の画面が出てくる。ここで図 2-6-①-5 のように、「地震」と入力すると、「地震」というキーワードに近い原因部分の結果部分が類似度の高い順に図 2-6-①-6 のように表示される。あとは、その中で「火災」という結果に注目してクリックすると、図 2-6-①-7 のように、「火災」部分をキーワードとする結果部分が表示される仕組みである。しかしながら、このシステムはその都度分散ベクトルを計算することで類似度を計算しているため、表示に計算時間がかかるものになっている。この点の改善も含め、次年度以降はこれを用いたワークショップを行うことで因果データベースの拡充を可能とするツールとして修正を行う予定である。

災害版因果チェーン検索

- 新聞記事より抽出した因果情報から災害因果チェーンを作成するWebアプリケーションです。
- 類似度検索の方法が異なるバージョンが2つあります。どちらかを選択して利用してください。
- 本アプリケーションに関連する研究は以下です。
- Fumihiro Sakahira, U Hiroi, Creating a Disaster Chain Diagram from Japanese Newspaper Articles Using Mechanical Methods, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.5, No.3, 2021 (in press) .
- 廣井悠, 坂平文雄, 機械学習を用いた災害連鎖図の自動作成手法の検討, 日本災害情報学会第22回大会, 東京, 2020年11月.
- Fumihiro Sakahira, U Hiroi, Disaster Relation Diagram Based on a Disaster Causation Database Extracted from Japanese Newspaper Articles, 13th China-Japan International Workshop on Information Technology and Control Applications, Enshi, Hubei, China, Sept. 2020.
- 坂平文雄, 廣井悠, リアルタイム災害連鎖図を作成する方法の検討-新聞記事を用いた因果データベースの拡充-, 日本災害情報学会第21回大会, 高松, 2020年10月.
- 本サイトは東京大学和泉・坂地研究室の「経済因果チェーン検索」を参考にして作成しました。 <https://sites.google.com/socsim.org/izumi-leb/tools/causal-chain-search?authuser=0>
- 詳しい使い方は以下をご覧ください（工事中）。

分散表現による類似度

類義語辞書による類似度

図 2-6-①-3 災害シナリオ自動生成技術のプロトタイプ①



図 2－6－①－4 災害シナリオ自動生成技術のプロトタイプ②

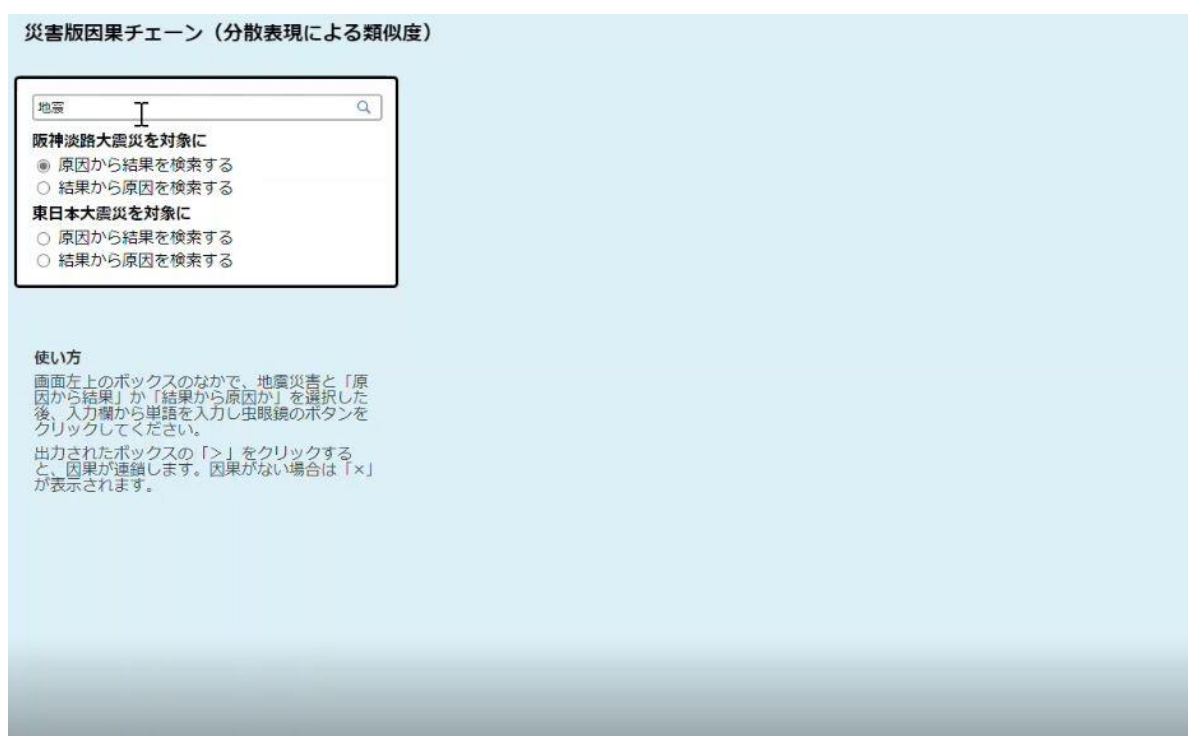


図 2－6－①－5 災害シナリオ自動生成技術のプロトタイプ③

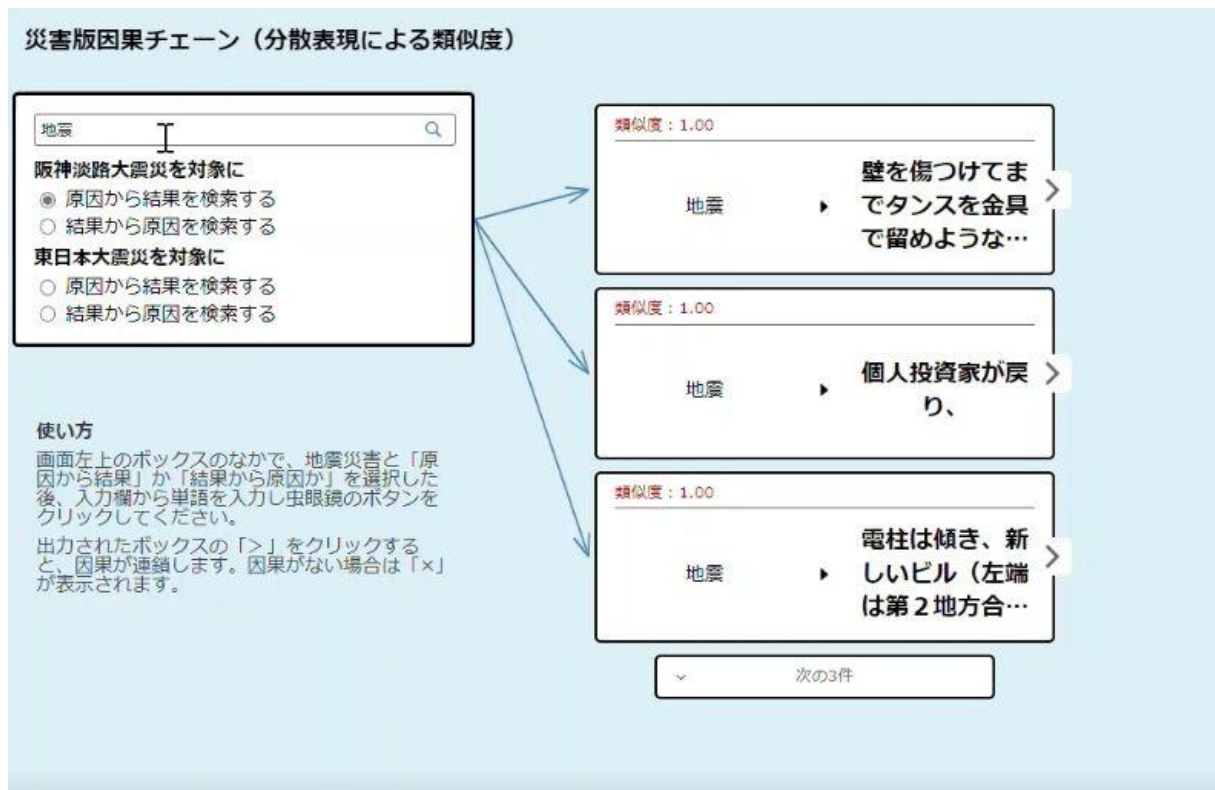


図 2-6-①-6 災害シナリオ自動生成技術のプロトタイプ④

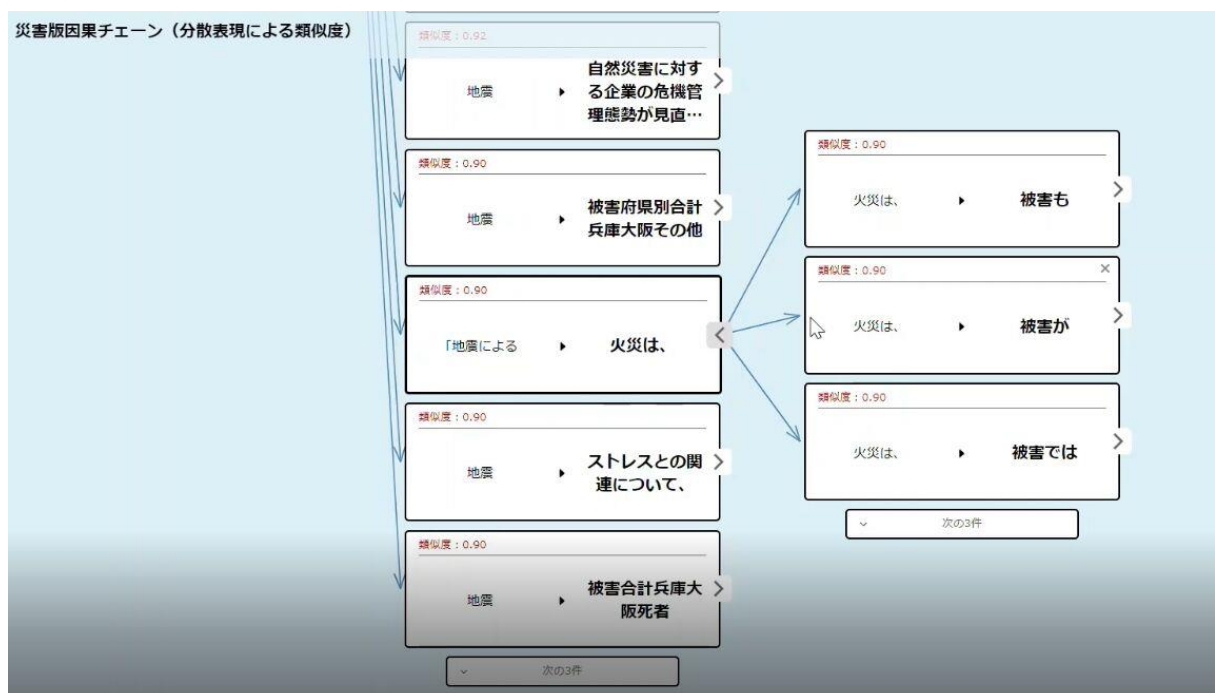


図 2-6-①-7 災害シナリオ自動生成技術のプロトタイプ⑤

(d) 結論ならびに今後の課題

今年度は、河北新報の1年分の新聞記事から、自然言語処理を用いて災害事象の因果関係を機械的に抽出し、東日本台風時の因果データベースを拡充した。これを図2-6-①-1のように図示した結果、昨年度に行った東日本大震災や阪神・淡路大震災よりも単純

な連鎖関係を示し、被害規模によって新聞報道された因果の連鎖は異なることが実証された。また、ここでは災害シナリオ自動生成技術のプロトタイプを作成したが、計算時間の問題など、この技術を実際のワークショップなどに使うにはまだ若干の改善点があることも判明した。

(e) 引用文献

- 1) Sakahira, F. and Hiroi, U. : Designing cascading disaster networks by means of natural language processing, International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 66, 2021.12, Doi: 10.1016/j.ijdrr.2021.102623
- 2) 文部科学省委託事業「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」令和二年度成果報告書, pp.202, 2021.

(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

掲載した論文（発表 題目）	発表者氏 名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表し た時期	国内・ 外の別
Designing cascading disaster networks by means of natural language processing	Fumihiko Sakahira, U Hiroi	International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 66 Doi: 10.1016/j.ijdrr.2021.102623	2021.12	国外

(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高層建築物のエレベータ復旧オペレーション

(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、前年度に実施したエレベータ障害・復旧過程の現状調査に基づいて、地震発生時からエレベータ障害の復旧に至るまでのシミュレーションに必要な各要素に対して理論モデルを構築し、被害規模や災害シナリオを任意

に設定したケーススタディによる事例解析を通して、復旧戦略の良否を判別する評価方法を検討した。また、上記の検討に必要な調査として、過去の震災時の超高層建物のエレベータ障害や建物全体の復旧過程の現状把握を目的としたヒアリング調査を実施した。実施項目・方法は以下の通りである。

(b) 業務の実施方法

1) 首都圏を対象とした長周期地震動によるエレベータ障害とその復旧過程をシミュレーションするための理論モデルの構築については、地震発生時からエレベータ障害の復旧に至るまでのシミュレーションに必要なモデル構成要素として下記の(1-a)から(1-d)を特定し、各要素と全体を通しての評価手法を整理した。

(1-a) 地理的領域・建物群のモデル化

(1-b) 入力地震動と建物被害・エレベータ障害関係のモデル化

(1-c) エレベータ復旧需要供給関係及び復旧コストのモデル化

(1-d) 専門技術者派遣のモデル化

2) 想定される都市機能被害に対して望ましいエレベータ復旧方針を判別するための評価手法の検討については、1) で構築したモデルを用いたシミュレーションで考慮する復旧戦略の諸条件を整理し、復旧が必要な建物間の優先順位を定める優先指標やエレベータの復旧効果・影響度を表現する評価指標を整理した(2-a)。また、プロトタイプ検証と提案評価手法に基づく復旧戦略の傾向分析を目的に、被害規模や災害シナリオを任意に設定した例題ケースを用いて事例解析を行った(2-b)。

3) 上記 1)、2) の検討にあたり、エレベータの管理や災害対応に携わる実務者にヒアリングを行い、過去の震災時の超高層建物のエレベータ障害や建物全体の復旧過程の現状を調査した。

(c) 業務の成果

1) 首都圏を対象とした長周期地震動によるエレベータ障害とその復旧過程をシミュレーションするための理論モデルの構築

広域災害時のエレベータ復旧は、保守点検を担当するエレベータ保守会社が独自の対応指針と基準に基づいて復旧対応を行っている。本課題では、前年度実施したメーカー系エレベータ保守会社へのヒアリング調査結果や収集した関連資料を基に、広域災害時の基本的なエレベータ復旧方針・条件を整理・抽出し、シミュレーションモデルの初期案を作成した。とりわけ、首都圏を対象とした長周期地震動によるエレベータ障害とその復旧過程を、広域災害時の復旧体制下での人的・物的資源及び情報の流れを含めてシミュレーションするため、モデルの構成要素として上記の(1-a)-(1-d)を特定し、各要素の理論モデルの構築方法を検討した。図2-6-②-1にモデル構成要素の復旧シミュレーション全体における位置付けを示し、その評価方法の概要をまとめる。

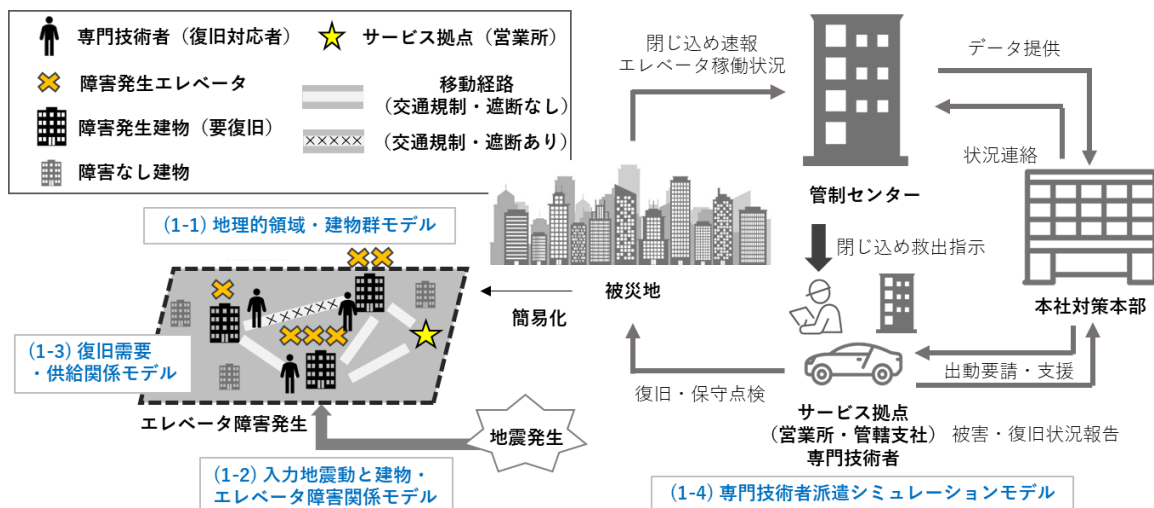


図 2-6-②-1 復旧シミュレーションモデルの構成

(1-a) 地理的領域・建物群のモデル化

構築したプロトタイプでは、専門技術者派遣の拠点となる営業所を復旧シミュレーションの単位とし、対象とする地理的領域内の拠点施設と建物群を、各種属性情報を持つポイントデータとして簡易的に表現する。図 2-6-②-1 左に示す通り、シミュレーションでは、管轄領域内に存在する建物群のうち、エレベータ障害が発生した建物所在地に拠点施設から専門技術者部隊が派遣され、拠点一建物間、建物 2 点間を結ぶ仮想的な移動経路を通るものとして巡回を行う過程を模擬する。各建物に対しては、位置情報に加え、建物用途や構造種別、竣工年代、建物の規模（高さ・延床面積等）等の、建物・エレベータの地震被害や復旧優先度に関係のある基本的な属性を変数として与えることで表現することとし、前年度の調査に基づいて決定した首都圏で長周期地震動被害を考慮すべき地域に対し、評価に必要なデータの収集方法や推定手法を整理した。

(1-b) 入力地震動と建物被害・エレベータ障害関係のモデル化

各建物の敷地に対して評価される地震動強さと(1-a)で設定した属性値に基づき、地震動・建物・エレベータの振動特性を反映して、建物被害とエレベータ障害の有無・モードを評価する手法を検討し、評価に必要なモデルを構築した。検討した評価フローを図 2-6-②-2 に示す。ここでは、エレベータの復旧需要は想定される地震動に対して建物の継続使用が可能であるか否かに依存すると考え、地震動評価→建物被害評価→エレベータ障害評価の順による 3 段階評価を行う。

地震動評価については、本研究事業のサブ課題 2 (g) で開発中の南海トラフ地震による長継続時間・広帯域強震動（長周期地震動を含む）シミュレーションでの研究成果利用を念頭におき、そこで評価される加速度指標（PGA または建物一次固有周期の加速度応答スペクトル $S_a(T)$ ）と長周期地震動に関する指標（速度応答スペクトル $S_v(T)$ ）から、指標と相関の高い建物被害とエレベータ障害をそれぞれ評価する。

建物被害については、過去の長周期地震動に関する研究事業¹⁾での成果を活用し、南海トラフ地震の震源多様性と建物の多様性を考慮した超高層建物の損傷脆弱性

ィ曲線に基づいて、建物の機能維持性能の確保（中破以下）に関して性能判定する方法を整理した。

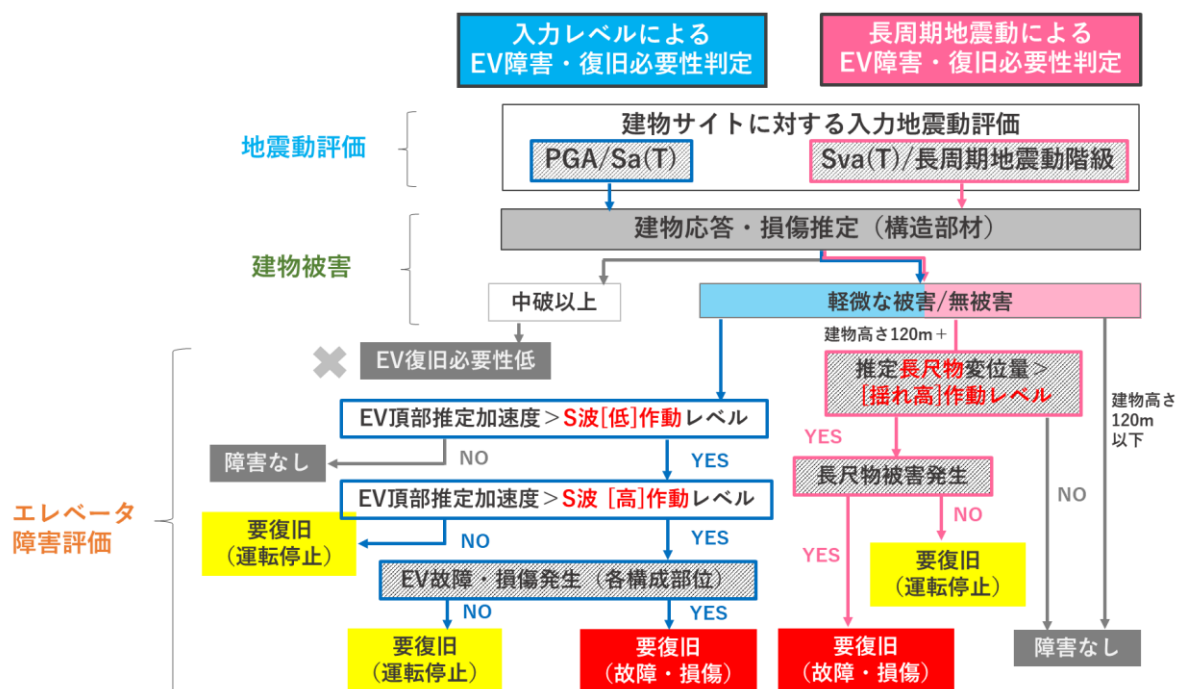
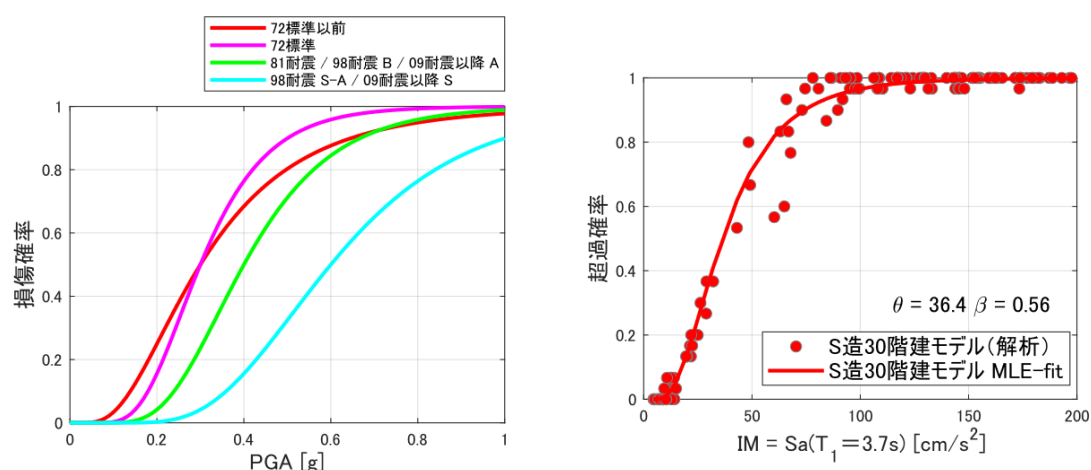


図 2-6-②-2 地震動と建物振動特性を考慮したエレベータ障害の評価フロー

エレベータ障害については、地震動と建物、エレベータの振動特性によって被害が発生しやすい部位や被害モードが異なるため、表 2-6-②-1 に挙げる 4 種類の異なるエレベータ障害をそれぞれの評価基準と指標に従って判定する。具体的には、大きな地震外力（加速度）が建物に作用することによって生じる（地震感知器の作動による）非常停止またはエレベータ機器の損傷と、超高層建物に特有の長尺物（ロープ類）の異常による非常停止または損傷を区別して評価する。大きな加速度が作用して生じる非常停止に関しては、昇降機耐震指針²⁾により定められている各地震感知器（加速度式 P 波・S 波）の設定値を基準に、建物敷地に対して評価された加速度指標をもとに判定が可能である。また、（長尺物を除く）エレベータ機器の損傷に関しては、耐震指針で安全限界耐力として定められている建物基礎部の地震時加速度レベルを基準にして新たに構築したフラジリティモデルを用い、耐震指針の年代・耐震クラス毎に判定する（図 2-6-②-3 (a)）。超高層建物に特有の長尺物（ロープ類）の異常による非常停止または損傷に関しては、超高層建物の地震応答を考慮したエレベータのロープ類の振動解析を階数の異なる建物平面骨組モデル（鉄骨 S 造 30 階建、45 階建、60 階建）を用いて実施し、判定のためのロープ損傷フラジリティモデルを新たに構築した（図 2-6-②-3 (b)）。フラジリティモデルは、損傷を生じさせる地震動強さの中央値□と対数標準偏差□で表される対数正規分布関数で与えられ、南海トラフ地震の多様性を考慮した複数の地震波形を用いた解析結果に基づいて導出した。

表 2-6-②-1 復旧シミュレーションで考慮するエレベータの障害モード

判定に用いる地震動指標	障害の種類	障害モード
加速度指標 (例: PGA または $Sa(T)$)	大きな地震外力の 作用によるエレベータ障害	運転停止 (要復旧)
		故障・損傷 (要復旧)
長周期地震動指標 (例: $Sv(T)$ または 長周期地震動階級)	長周期地震動による エレベータ障害 (建物高さ 120m 超)	運転停止 (要復旧)
		故障・損傷 (要復旧)

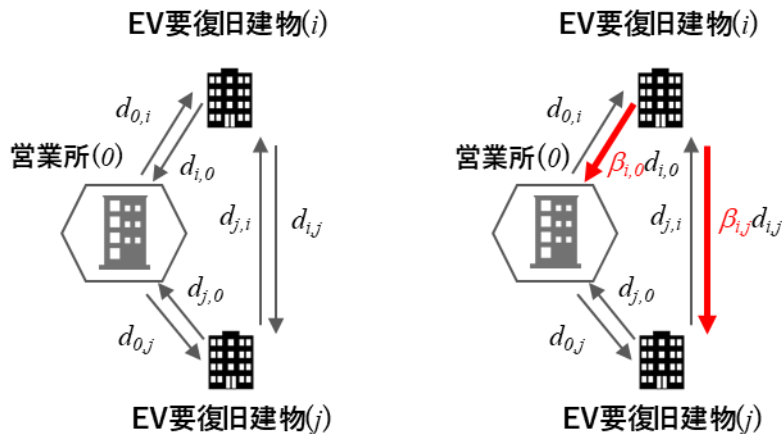


(a) エレベータ機器 (長尺物以外) の損傷フラジリティモデル (b) エレベータ長尺物 (ロープ類) の損傷フラジリティモデル

図 2-6-②-3 エレベータ障害判定に用いるフラジリティモデル

(1-c) エレベータ復旧需要供給関係及び復旧コストのモデル化

エレベータの復旧が必要な建物群に対し、復旧過程のシミュレーションでの制約条件となる復旧需要量と供給量に関する評価手法を整理した。復旧需要量については、(1-b)での個々の建物・エレベータに対する判定結果に基づいて、対象領域内全体で復旧が必要な建物棟数やエレベータ台数の総数を評価する。復旧供給量については、震災時に想定される災害シナリオ下で拠点施設から派遣可能な人的資源 (復旧作業にあたる専門技術者数) に関する条件や制約を特徴づける。これに加え、ここでは個々のエレベータ障害モードに応じた復旧作業や建物間の移動に要する時間等の復旧コストとして評価する。とりわけ、建物間の移動に関しては、移動コスト (距離、時間) を考慮に入れた空間ネットワークとして簡易的に表現し (図 2-6-②-4)、震災時に想定される災害シナリオ (例えば被害による道路封鎖や鉄道の停止、混乱時における交通網の混雑等) を、建物 ij 間の距離 (d_{ij}) や移動時間の変動率 (β_{ij}) 等の適切なパラメータの設定により、専門技術者による巡回を想定災害シナリオに応じて表現できるようモデルを構築した。なお、派遣拠点となる営業所もネットワークモデルに含まれ、図中には添え字 0 で表現している。



(a) 交通規制・遮断の影響なし (b) 交通規制・遮断の影響あり

図 2-6-②-4 派遣拠点と要復旧建物間の空間モデル

(1-d) 専門技術者派遣のモデル化

広域災害時のエレベータ保守会社による復旧体制を参考に、派遣拠点から復旧を必要とする建物に専門技術者が派遣される過程をシミュレーションするモデルを検討した。図 2-6-②-1 右に示す通り、広域災害発生時には、発災直後に対策本部が設置され、専門技術者にサービス拠点（営業所・管轄支社）への出動要請が発令されるなど、早期に初動体制が確立される。復旧作業は、管制センター（被害把握）、対策本部（復旧方針や作業指示）、サービス拠点から派遣される専門技術者（復旧対応）の役割分担と情報共有により、被害状況・規模を迅速に把握し、被災地における閉じ込め救出や停止したエレベータの復旧に取り掛かる。本課題では、このようなエレベータ保守会社による復旧体制を参考に、シミュレーションモデルの動作を下記の通り定めた。

STEP 0： 要復旧建物・エレベータの特定（管制センター）

STEP 1： 建物優先順位の決定と専門技術者部隊の割り当て（指令者—対策本部）

STEP 2： 復旧建物の巡回（復旧対応者—専門技術者部隊）

→作業日ごとに STEP 1-2 を繰り返す。

エレベータの復旧を対象とする場合、地震感知器の設置が法令で義務付けられており、発災後の障害発生状況は管制センターからの遠隔監視によって把握が可能であるため、管制センターの役割である要復旧建物・エレベータの特定（STEP 0）はシミュレーションの条件として上記項目 (1-a)-(1-c) で与えられ、被害把握のための巡回作業は考慮しないものとする。また、指令者である対策本部の役割である復旧方針や作業指示（STEP 1）は、シミュレーションで想定する戦略（項目 2）参照）により定められたルールに基づいて、要復旧建物の優先順位の決定と専門技術者の割り当てを作業日毎に行うことにより表現する。続いて、復旧対応を現場で行う専門技術者部隊は、（STEP 2）で割り当てられた順序に従って、復旧が必要なエレベータが設置されている建物に巡回する。各部隊は作業日ごとに営業所から出発し、割り当てられたエレベータの

復旧を終えてから、営業所に戻り一日の復旧作業を終了する。シミュレーションでは、対象地域内の全てのエレベータの復旧が完了するまでこの動作を繰り返す。

以上(1-a)から(1-d)の評価を行うことにより、地震発生からエレベータ障害の発生、さらには復旧対応までの一連の過程を簡易的に表現できるモデルを構築した。

2) 想定される都市機能被害に対して望ましいエレベータ復旧方針を判別するための評価手法の検討

(2-a) 復旧戦略評価手法の検討

実際の広域災害時の復旧対応での復旧戦略・優先順位に関する意思決定は、ある要因のみ単独で考慮されとは限らず、複数の要因の組み合わせから決定されと考える。そこで、復旧過程をより現実的に即した条件下でシミュレーションし、優先指標による戦略の違いの比較を容易にするため、本課題では(社)日本エレベーター協会により定められている大規模地震発生時のエレベータ復旧の優先事項³⁾を全戦略に共通の条件として考慮する。表2-6-②-2に示す通り、閉じ込めは最優先されるものとして、本年度のプロトタイプでは検討対象外とし、稼働停止したエレベータのみを考慮する。停止したエレベータは、建物機能・用途に応じた優先度クラス(①病院等の医療・福祉施設、②官庁施設や災害対策本部等に指定される公共施設、③高層建物、④一般の建物)の順で復旧が優先され、①～④の同じ優先度クラスの中の順位付けを、異なる復旧優先指標を考慮して戦略を評価する。また、同協会が推奨する「1ビル1台復旧」の原則(全体の早期復旧の観点から、大規模地震発生時には1棟につき1台を復旧させた後、他の建物の復旧に回るという考え³⁾)の適用の是非についても復旧シミュレーションにより検討が可能であるように、優先指標に決定される戦略と組み合わせで任意に選択できるよう、プロトタイプを設計した。

エレベータ復旧シミュレーションでは、これらの条件の組み合わせにより定義される戦略に基づいて、各部隊が対応する個別作業の進捗と所要時間を積み上げて復旧過程を模擬し、復旧進捗度(建物棟数、エレベータ台数)や復旧による影響・効果(アクセスできる建物面積や建物利用人数)、総復旧時間等の指標により定量的に評価する。

表2-6-②-2 大規模地震発生時のエレベータ復旧に関する優先順位
(文献³⁾をもとに作成)

優先順位	対応内容	建物種別	理由等
①	閉じ込め 救出	閉じ込めが発生している建物	閉じ込め救出を最優先
①	停止したエレベータ の復旧	病院等、弱者が利用する建物	けが人等の対応が急増する建物
②		公共性の高い建物	各行政から災害対策本部棟に指定される建物
③		高層住宅 (地上高さ概ね60m以上)	一般の建物と比較し、生活に大きな支障の起こる可能性が高い建物
④		一般の建物	

(2-b) 例題ケースを用いた事例解析

本年度は、次年度に予定されている長周期地震動評価に基づくエレベータ障害と復旧シミュレーションの試算に先立ち、プロトタイプ検証と上記の評価手法に基づく復旧戦略の傾向分析を目的に、被害規模や災害シナリオを任意に設定した例題ケースを用いて事例解析を行った。事例解析で考慮した(1-b)を除く(1-a)から(1-d)の項目に対し、検討ケースの概要を以下にまとめる。

(1-a)に対応する対象地域・建物群の設定を以下の通りとした。復旧シミュレーションの対象地域は、前年度に調査対象とした都心部で超高層建物棟数が多い行政区(港区、千代田区、中央区、新宿区)とした。対象地域の主なエレベータ保守会社の営業所分布を参考に、仮想の営業所拠点を設定し、各建物から最寄りの営業所が復旧に対応するとの仮定の下、営業所一単位規模に相当すると考えられる地理的領域を設定した。ここでは、復旧過程全体を模擬する目的で、エレベータの設置義務に関する条例や基準・指針を参考に、高層建物に加えて中低層も含む階数4階以上の建物を検討対象とし、建物ポイントデータ⁴⁾より地理情報・規模・用途に関する属性を与えた。各建物の設置エレベータ台数は用途に関わらず延床面積 A を基に設定し、エレベータに関する実態調査結果⁵⁾から、小規模建物($A \leq 2,000\text{m}^2$)には1台、中規模建物($A \leq 10,000\text{m}^2$)には2台、大規模建物($A > 10,000\text{m}^2$)には、 $4,000\text{m}^2$ につき1台増加すると仮定した。

(1-c)に対応するエレベータ復旧需要・供給関係の設定については以下の通りとした。エレベータ障害の発生確率は地震動分布によらず対象領域内で一様であるとの仮定のもと、建物数 N_{bdg} から確率 p_d で無作為に抽出された建物 $N_{bdg,d}$ のエレベータ全台に対し復旧が必要であるとし、復旧を必要とするエレベータの全台数 $N_{EV,d}$ を設定した。被害規模の影響を比較するため、被害規模が小、中、大の3ケース($p_d=0.1, 0.5, 1.0$)を設定した。拠点施設から派遣可能な最大専門技術者部隊数 $M_{\max}$ は、建築基準法第8条により月毎の保守点検が「努力義務」として定められている(ただし使用頻度による)ことを根拠に、対象領域内の全エレベータ台数 N_{EV} と1部隊あたりの月毎の保守点検台数の推定量から設定した。通常時の点検及び震災時の復旧歩掛に関しては今後さらなる検討を必要とするが、ここでは、通常時の日毎の点検作業台数 λ を4台/日・部隊、震災時の日毎の復旧作業台数 λ_E を6台/日・部隊と仮定し、作業員の能力や発災からの日数によらず一定、復旧完了日まで全部隊が出動するとした。1台の復旧時間 γ は、実際はエレベータ障害モードに依存するが、ここでは一律 $\gamma=2$ 時間/台と仮定した。各部隊の移動時間は建物間の地理座標から移動速度 $v=5\text{ km/h}$ と仮定して計算した。港区内の1営業所(汐留・品川駅周辺エリア)に対して考慮したケースを例に、復旧需要・供給に関する主な設定条件を表2-6-②-3にまとめる。

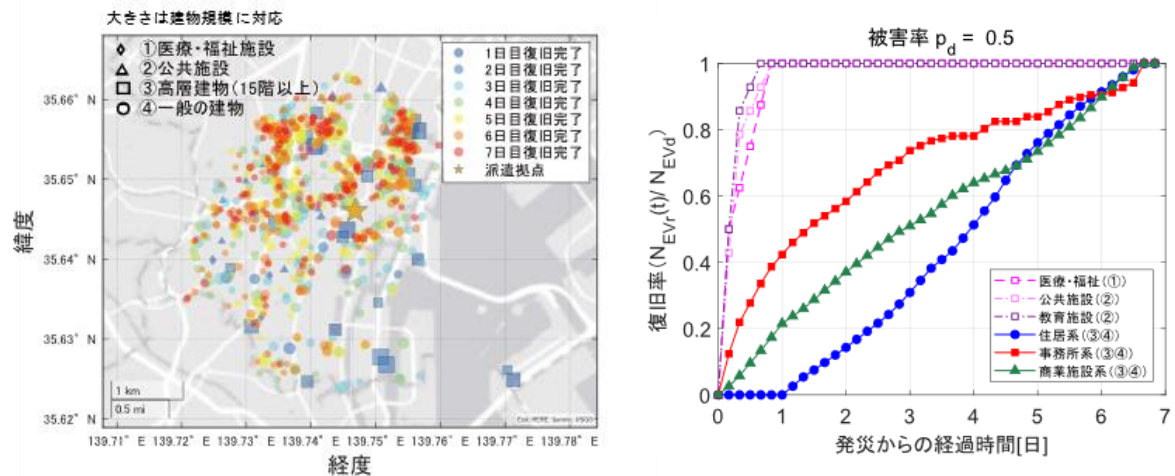
表 2-6-②-3 復旧需要・供給に関する設定

(例題対象地域：汐留・品川駅周辺エリア)

[x,y] 座標	N_{bdg} [棟]	N_{EV} [台]	p_d	$N_{bdg,d}$ [棟]	$N_{EV,d}$ [台]	M_{max} [部隊]	λ_E [台/日]	γ [時間/台]	v [km/h]
[35.65, 139.75]	1551	2964	0.1	90	135	37	6	2	5
			0.5	796	1484				
			1.0	1551	2964				

(1-d) に対応する復旧戦略・専門技術者派遣の設定については、表 2-6-②-2 に示す大規模地震発生時の基本優先順位①～④を考慮し、同じ優先度クラスの中の順位付けを変えた戦略を検討した。考えうる戦略として、ア) エレベータ障害により移動に支障をきたす大きな建物（階高・延床面積等）から復旧する戦略、イ) 利用人数の多い建物から復旧する戦略、ウ) 派遣拠点から近い建物から復旧する戦略を考慮し、優先順位が高い建物内のエレベータから順に、最も早く対応できる部隊を割り当てた。

上記の検討ケースと復旧戦略の組み合わせに対し、復旧シミュレーションを行った。ここでは、部隊数は対象領域の建物数に比例し、戦略によらず同一の投入部隊数と復旧作業台数を設定しているため、復旧完了日は被害規模にほぼ比例して増加し、被害小 ($p_d=0.1$) で 2 日目、中 ($p_d=0.5$) で 7 日目、大 ($p_d=1.0$) で 14 日目となった。例として、上記と同様の港区内の 1 営業所に対し被害率 $p_d=0.5$ を想定したケースに対し、延床面積の大きい建物から復旧する戦略下で実施したシミュレーション結果を図 2-6-②-5 に示す。図 2-6-②-5 (a) の各建物の復旧日数分布からも示唆されるように、例題ケースでは、建物優先度クラス①②に該当する重要施設 (◇, △) は 1 日以内に復旧し、続いて③の高層建物 (□) が 2 日以内に復旧完了する。その後、一般建物 (○) が延床面積の大きい順で徐々に復旧されていき、7 日以内に全エレベータの復旧が完了する。例題地域で優先指標を延床面積とした場合、図 2-6-②-5 (b) の建物用途ごとの復旧率 ($N_{EV,d}$ に対する t 日目の復旧済み EV 台数 $N_{EV,r}(t)$ の比率) を見ると、規模の大きい事務所や商業施設の復旧が早期に対応され、選択した優先指標と建物用途の関係性が顕著に表れる結果となった。他の戦略下でも、例えば派遣拠点からの距離を優先指標とした場合には、建物用途間の復旧率の偏りは小さく、被害率が中～大程度になると移動効率を最大化できる一方で、エレベータ障害により支障が大きい建物の復旧が遅れるなど、被害規模や建物用途・規模に関する地域性、復旧効果と復旧効率の関係から望ましい戦略を選択すべきことが検討ケースから示唆された。



(a) 復旧日数分布

(b) 建物用途ごとの EV 復旧率

図 2-6-②-5 シミュレーション結果

(対象地域：汐留・品川駅周辺エリア、被害規模：中、戦略：延床面積大→小)

3) 震災時の超高層建物のエレベータ障害と復旧過程に関する現状調査

震災時の建物被害・エレベータ障害の復旧に関して建物管理・不動産開発事業を営む業界団体へのヒアリング調査を 1 件実施し、(3-a) 震災時の建物管理・復旧の基本方針・体制、(3-b) 過去の震災によるエレベータ障害事例及び復旧過程、(3-c) 巨大地震に備えた事業継続計画 (BCP) 対応について調査した。得られた知見を項目毎に以下に記す。

(3-a) 震災時の建物管理・復旧の基本方針・体制：震災時の建物管理の現場では、地震が発生し震度 5 強以上を観測した場合、対策本部を設立し、行動指針を決定、建物の安全確認を実施している。安全確認、復旧の優先度としては、①人命安全の確保、②建物の被害・安全性の確認、③建物設備の稼働状況・安全性の確認、という順序で行うことが明らかになった。特に、③の建物設備に関しては、エレベータ障害や水損事故につながりうるスプリンクラー等の水回り設備は比較的優先度が高いことがわかった。

(3-b) 過去の震災によるエレベータ障害事例及び復旧過程：2011 年の東北地方太平洋沖地震では、管理建物 (140 棟程度；そのうち超高層建物クラスは 100 棟以下) では建物安全性に大きく関わる構造被害は見受けられなかった一方で、建物内のエレベータはほぼ停止したことが調査より明らかになった。超高層建物は当日中に復旧したが、中低層ビルでは復旧が翌日に及んだことが明らかになった。

(3-c) 巨大地震に備えた BCP 対応について：東日本大震災以降、BCP に対するテナント企業の関心の高まりから、非常時対応や平常時の防災対策を強化するための取り組みがなされている。エレベータに関しても、既設エレベータの耐震性能向上、「自動診断仮復旧システム」の導入、停電を含むライフラインの供給停止に備えて非常用電源の確保等を行っていることがわかった。

(d) 結論ならびに今後の課題

本業務のまとめと今後の課題を以下に示す。

- 1) 首都圏を対象とした長周期地震動によるエレベータ障害とその復旧過程をシミュレーションするための理論モデルの要件と構成要素を検討し、震災時にエレベータ保守会社1営業所が復旧対応を行う規模に相当する地理的領域に対して、地震発生からエレベータ障害の発生、その復旧過程を模擬するシミュレータのプロトタイプを構築した。とりわけ、地震発生時のエレベータ障害の模擬については、地震動と建物、エレベータの振動特性を反映して、異なるエレベータ障害モードを評価する方法を整理し、損傷判定に用いる評価モデルを新たに構築した。
- 2) 1)でのシミュレーションモデルを用いて、異なる復旧戦略の比較基準となる評価体系を検討した。具体的には、実際の復旧対応で考慮されるべき建物機能・用途に応じた優先度クラスを考慮した上で、建物間の詳細な順位付けを、任意の復旧優先指標により決定して復旧戦略を定義する。与えられた戦略下で各部隊の復旧作業進捗と所要時間を積み上げることで復旧過程を模擬し、復旧進捗度（建物棟数、エレベータ台数）や復旧による影響・効果（アクセスできる建物面積や建物利用人数）、総復旧時間として定量的に評価する手法を検討した。
- 3) 震災時の建物被害・エレベータ障害の復旧に関して建物管理・不動産開発事業を営む業界団体へのヒアリング調査を1件実施した。震災時の建物管理の現場では、震度5強以上を観測した場合、建物の安全確認を実施しており、建物全体の確認・復旧の優先順位に対するエレベータ障害復旧の位置づけが調査より明らかになった。

今後の課題として、長周期地震動シミュレーションによる地震動評価に基づくエレベータ障害の模擬と、詳細な災害シナリオを初期条件とした復旧シミュレーション下での望ましい復旧戦略の検討が挙げられる。また、エレベータ保守会社や建物管理者など、関連業界や現場の実務者へのヒアリング・意見交換を通じて、被災時の現場対応により即したシミュレーションモデルの改良を行う。

(e) 引用文献

- 1) 神田克久，阿部雅史，鈴木芳隆，藤原広行，森川信之，前田宜浩，小鹿紀英，岡野創，加藤研一：「超高層建物応答と相関性のある長周期地震動の揺れの指標の検討」，日本建築学会構造系論文集，Vol. 79，No. 696，pp. 267-274，2014.
- 2) 日本建築設備・昇降機センター：建築基準法及び関連法令 昇降機技術基準の解説 2016年版，2016.
- 3) 日本エレベーター協会：大規模地震発生時のエレベーター早期復旧等に関するご協力をお願い，2015.
https://www.n-elekyo.or.jp/about/pdf/20150225_elesoukifukkyu.pdf (2022.3 現在).
- 4) ゼンリン：<https://www.zenrin.co.jp/> (2022.3 現在).

- 5) 一般社団法人日本ビルディング協会:ビル実態調査(平成25年版)調査結果要旨,
2013. http://www.jboma.or.jp/h24_birujittai/ (2022.3 現在).

(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

発表した成果(発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所(学会等名)	発表した時期	国内・外の別
長周期地震動による超高層建物のエレベータ障害と復旧評価手法の構築に向けた検討(口頭)	鈴木明子、日下彰宏、前田宜浩	2021年度 日本建築学会大会 学術講演梗概集	2021年9月7日	国内

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