

シミュレーションと観測網を融合した 都市の地震被害評価デジタルツイン システム

協力



目次

エグゼクティブサマリー	04
1.0 研究の背景・目的および研究成果の概要	08
2.0 評価対象とシミュレーション手法およびリスク評価指標	12
3.0 シミュレーションと観測を融合した即時的地震被害評価	24
4.0 デジタルツインシステム「SAMRRAi」	32
5.0 まとめ	37

エグゼクティブサマリー シミュレーションと観測 網を融合した 都市の地震被害評価デジ タルツインシステム

世界でも有数の地震大国である我が国は、過去の地震において様々な様相の被害を経験してきました。このような地震による被害の低減・最小化や早期復旧を実現するためには、地震発生直後に都市レベルの広域を対象として、対象領域全体を俯瞰する形で被害の評価を迅速に行う必要があります。本研究では、シミュレーションと地震計観測網を融合し、地震発生時に都市全体の建物被害を即時的に予測できる枠組みを提案しました。図1がそのイメージ図です。

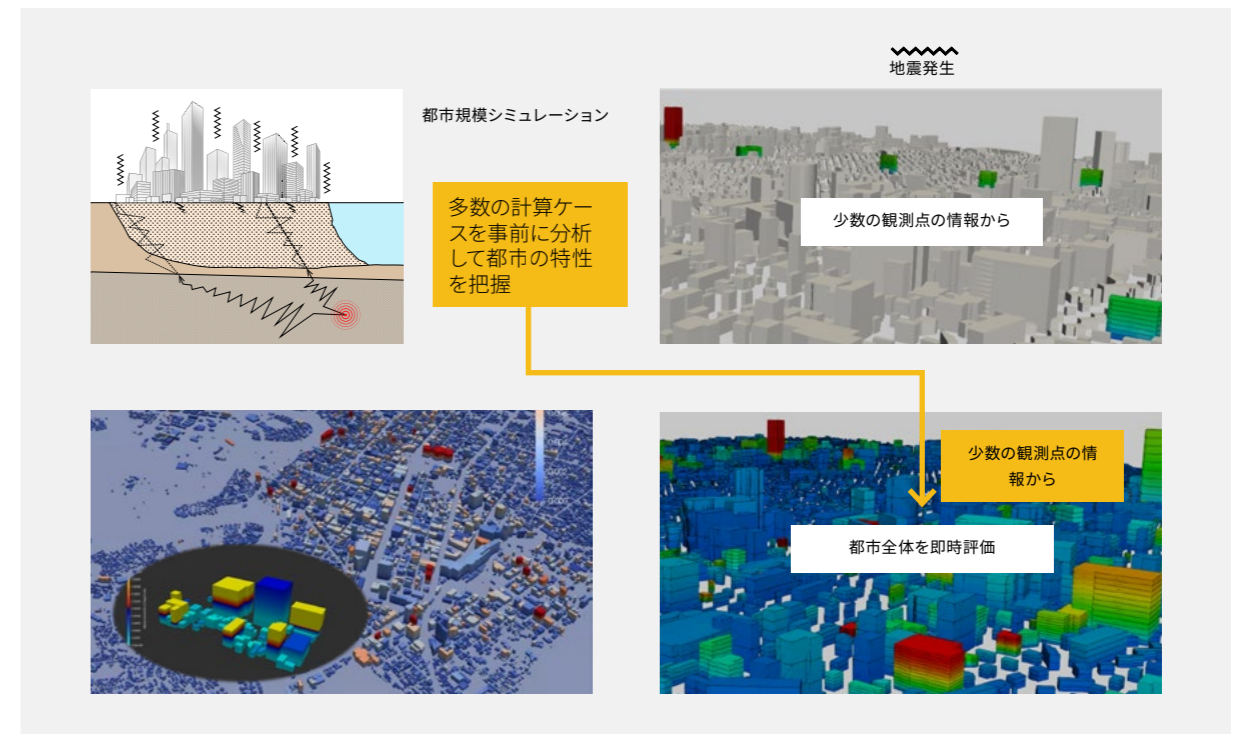


図1 提案する地震被害評価の枠組みのイメージ

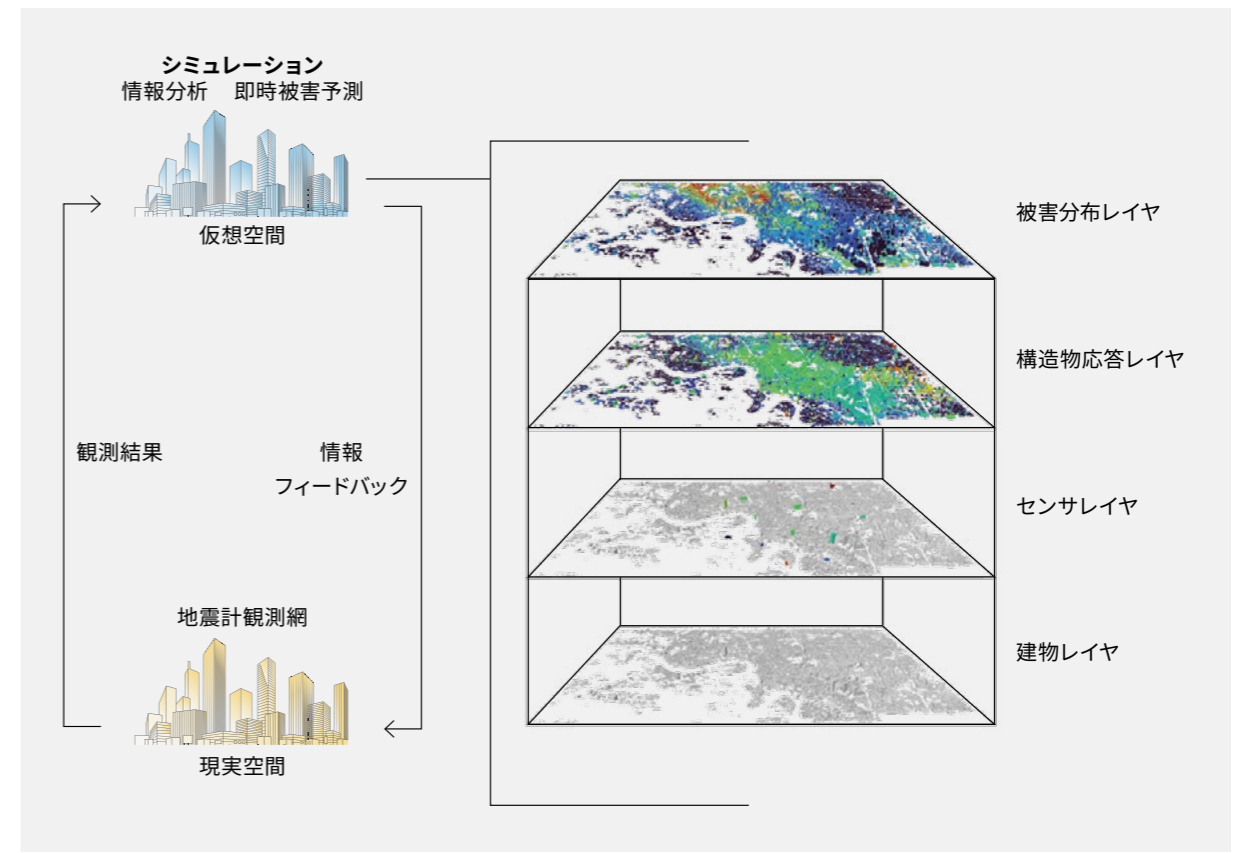


図2 デジタルツインシステムSAMRRAi のイメージ

この枠組みでは、事前（地震発生前）に対象となる都市全体の地震シミュレーションを実施します。断層で発生した地震動が地中を伝わって建物が揺れる様子をシミュレーションによって計算し、被害の程度を数値で表します。このシミュレーションを多数のケースで実施し、その結果を分析することにより、都市の建物被害の空間特性を把握しておきます。実際に地震が発生した際は、この事前に把握しておいた空間特性と、既存の観測網から得られた少数の建物の振動データを組み合わせ、都市全体の地震被害を即時的に評価できます。

上記の評価の枠組みを開発するだけでなく、その技術の社会実装を促進するために、デジタルツインシステムを開発し、そのシステムをSAMRRAi (Seismic Assessment and Monitoring system for Real-time Risk Analysis)と命名しました。「デジタルツイン」とは、図2に示すように、現実空間で得られる情報に基づいて仮想空間（サイバースペース、デジタル空間）の中に現実空間とそっくりな環境（双子）を再現し、目的に応じた仮想空間と現実空間の情報のやり取りを実現する技術を意味します。この研究の中で

は、現実空間から得られる各種データ（建物、地盤、想定断層など）およびリアルタイム観測（地震計観測網）データを仮想空間の中で分析し、被害を即時的に現実空間にフィードバックすることが可能です。

提案した地震被害評価の枠組みとSAMRRAiの有用性を確認するために、宮城県仙台市の一部を対象として、長町-利府断層帯の断層運動に伴う内陸直下型地震を想定した模擬運用を実施しました。図3はシミュレーション結果を可視化した例です。シミュレーション結果から様々なリスク指標を算出可能であり、構造物全体の被害評価だけでなく、天井、内壁、配管、家具、スプリンクラーなどの建物内部にある様々な構成要素の被害についても評価可能なオプションを用意しました。

データがシステム上で確認できる様子を示しています。この時点では地震計が設置されている建物についての情報しかありませんが、提案する評価の枠組みを使うことで、即時的に都市内に存在する全ての建物の被害推定をすることが出来ます。図5はその推定結果を示しています。

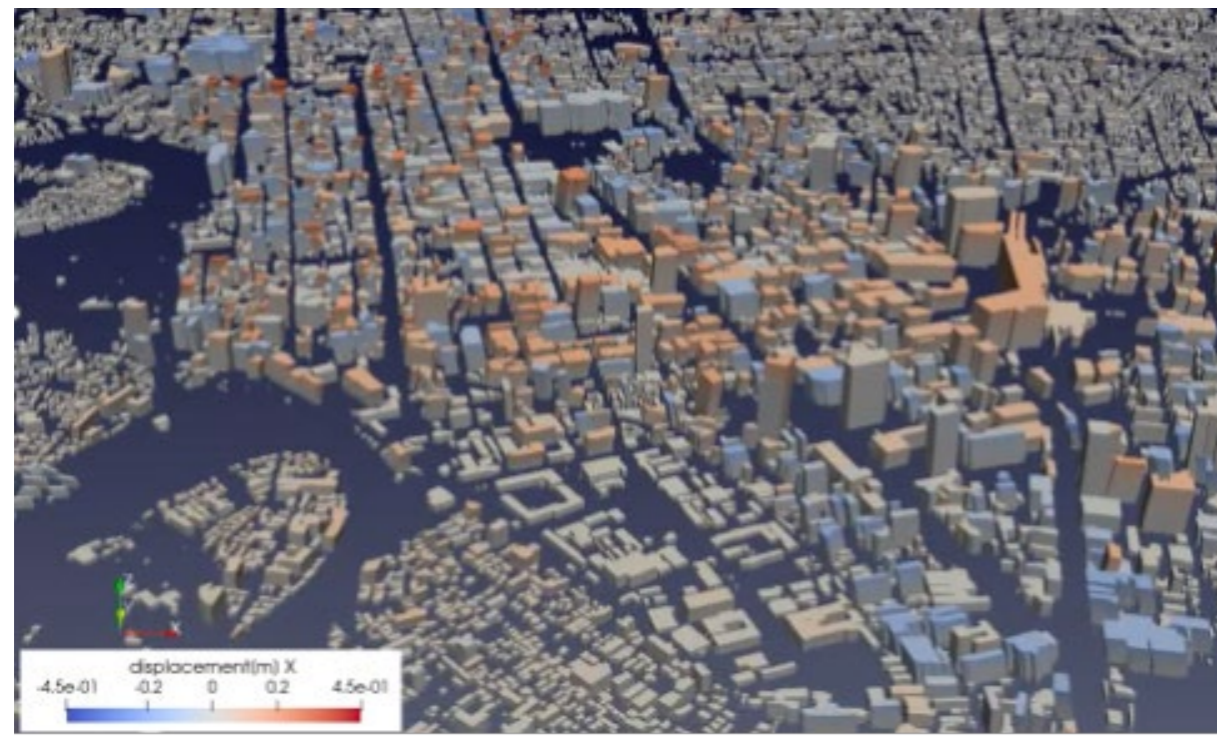


図3 シミュレーション結果の例

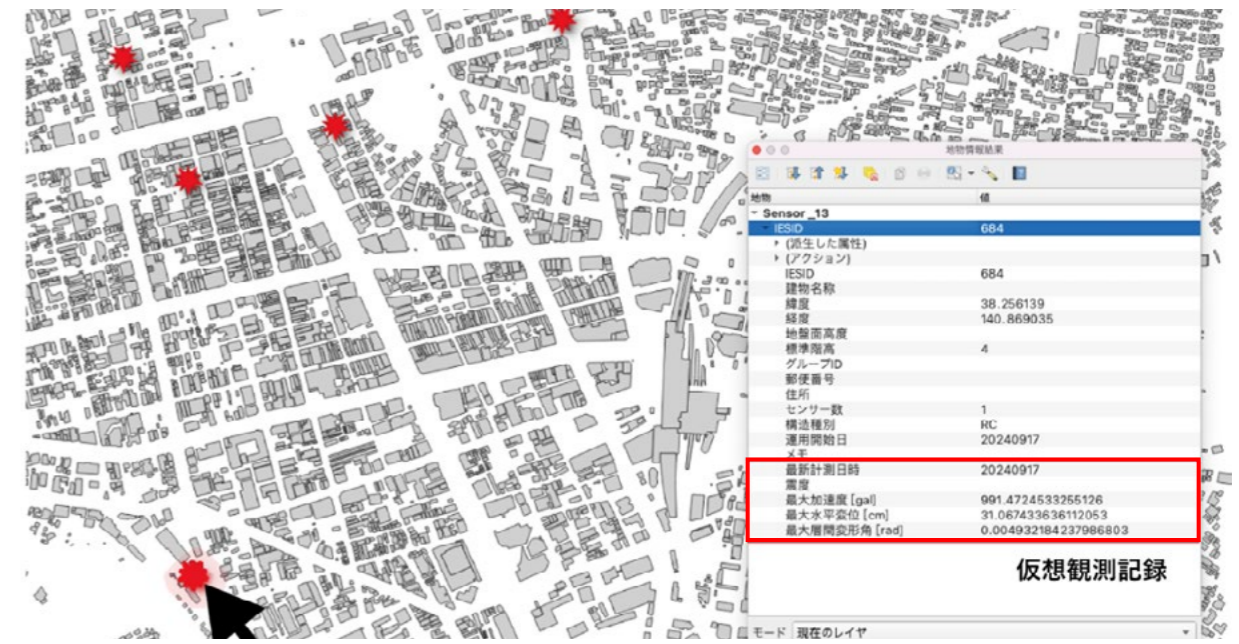


図4 仮想観測点上の観測記録

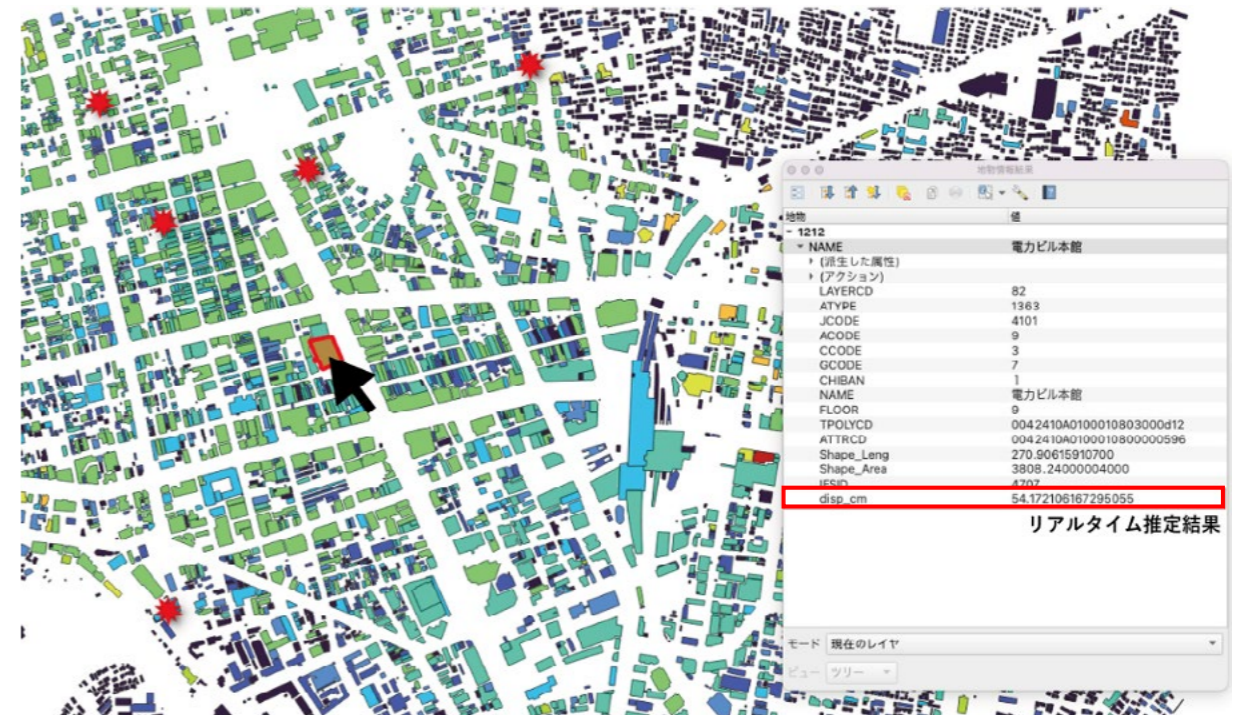


図5 観測点以外の建物のリスク評価指標

1.0 研究の背景・ 目的および研究成果 の概要

本研究は、東北大学災害科学国際研究所の日本工営レジリエントシティ技術実装共同研究部門の成果の一部です。本部門は、東北大学と日本工営株式会社の共同研究部門であり、2022年4月に設置されました。データサイエンス分野における種々の技術を用い、データ駆動型かつ高密度・高精度・高速な防災情報をサイバー空間と実際の空間で融合し、各空間で取得・生成されるデータの相互利用可能なデジタルツインモデルを開発することで、レジリエントシティの構築に寄与する研究を展開しています。



図1 2016年熊本地震の建物被害



図2 2024年能登半島の建物被害

1.1 研究の背景

世界でも有数の地震大国である我が国は、過去の地震において様々な様相の被害を経験してきました。近年では、2016年熊本地震、2018年北海道胆振東部地震、2024年能登半島地震など、特に震度7を記録した内陸直下型地震について、断層近傍の建物や社会基盤設備に甚大な被害（図1,2）が発生し、それに起因したブラックアウトやライフラインの被害、避難生活の長期化、経済活動の停滞などの2次災害も問題となりました。このような地震による被害の低減・最小化や早期復旧を実現するためには、地震発生直後に都市レベルの広域を対象として、対象領域全体を俯瞰する形で被害の評価を迅速に行う必要があります。

近年では、シミュレーション技術や計算機能力が発達し、都市レベルの広域を一気に計算することも出来るようになってきました。しかしながら、シミュレーションには地震特性データ、地盤データ、構造物データなどの様々な入力情報が必要になるとともに、計算には時間を要します。そのため、地震が発生してから入力データを揃えて計算を開始しては、災害対応に必要な情報をスムーズに提供することが出来ません。一方、近年では、観測技術も高度化されています。地震計については、公的な組織が管理・運営するものだけでなく、個別の建物にも設置される事例も増えてきています。地震発生時には、これらの地震計によって地震動が計測され、そのデータに基づい

て建物の被害推定が可能となります。ただし、当然ながら、全ての建物に地震計が設置されているわけではなく、都市全体の被害の様子を推定するには限界があります。ここまでに説明したシミュレーションと観測(地震計)は、これまでは主に個別の分野

でそれぞれ発展してきた技術でした。そこで、本研究では、これらをうまく融合することで、新しい地震被害評価の枠組みを提案しました。また、その枠組みに基づいたシステムのプラットフォームを開発しました。以下では、それらについて紹介します。

1.2 地震被害即時評価の枠組みの提案

シミュレーションと地震計観測網を融合し、地震発生時に都市全体の建物被害を即時的に予測できる枠組みを提案しました。図3がそのイメージ図です。この枠組みでは、事前(地震発生前)に対象となる都市全体に関する地震シミュレーションを実施します。断層から地中を通して地表面まで到達する地震動の伝播と、地表面の振動による全ての建物の揺れをシミュレーションによって計算し、被害の程度を数値で表し

ます。さらにこの計算を多数のケースで実施し、その結果を分析することにより、都市の建物被害の空間特性を把握しておきます。実際に地震が発生した際は、この事前に把握しておいた空間特性と、既存の観測網から得られた少数の建物の振動データを組み合わせ、都市全体の地震被害即時評価が可能となります。

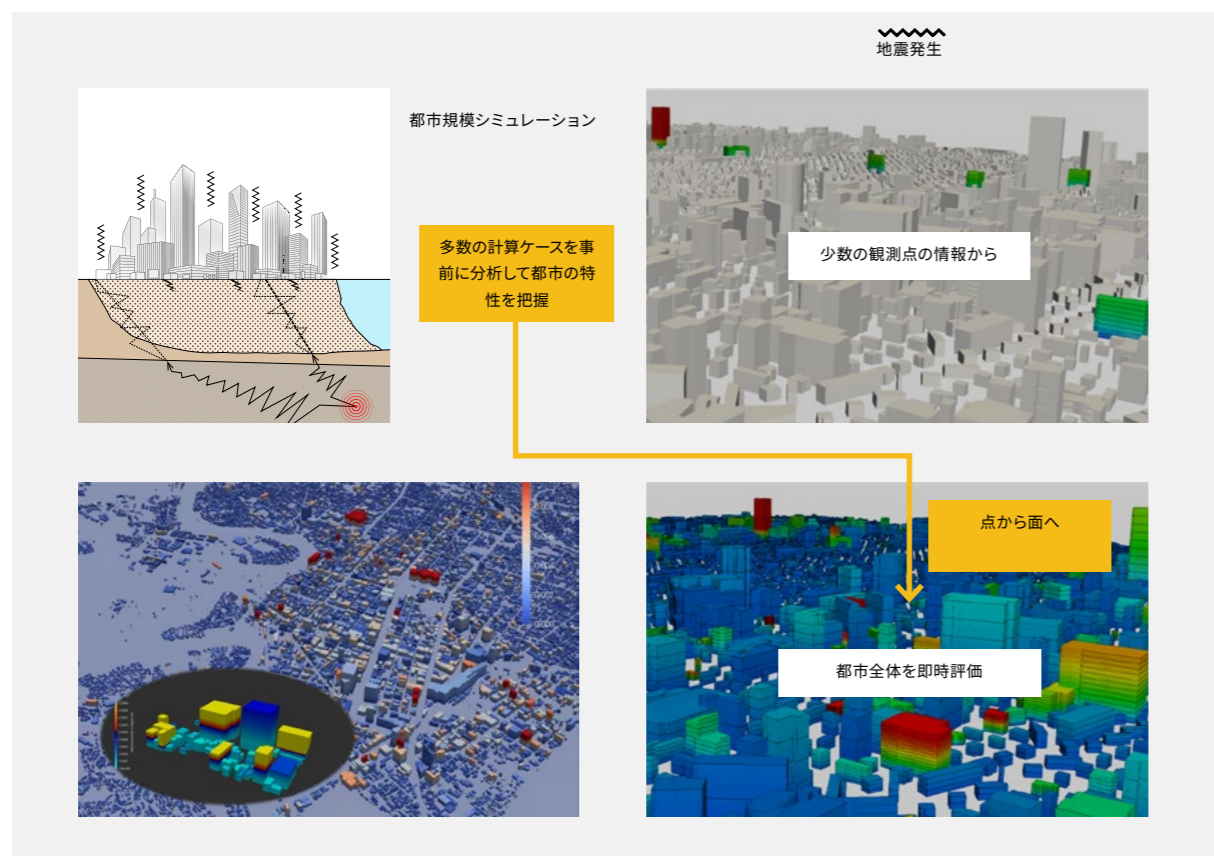


図3 地震被害即時評価のイメージ

1.3 デジタルツインシステムの構築

シミュレーションの入力情報生成と結果の可視化、および先述の地震被害即時評価の枠組みを実装した地震リスク評価のプラットフォームとして、デジタルツインシステムを開発し、そのシステムをSAMRRai (Seismic Assessment and Monitoring system for Real-time Risk Analysis)と命名しました。図4がそのイメージ図です。「デジタルツイン」は、現実空間で得られる情報に基づいて仮想空間(サイバー空間、デジタル空間)の中に現実空間とそっくりな環境(双子)を再現し、目的に応じた仮想空間と現実空間の情報のやり取りを実現する技術を意味します。この研究の中では、現実空間から得られる各種データ(建物、地盤、想定断層など)およびリアルタイム観測(地

震計観測網) データを仮想空間の中で分析し、被害を即時的に現実空間にフィードバックできるデジタルツインシステムとして開発しています。

本研究では、提案する地震被害即時評価の枠組みの有用性を確認するために、実際に存在する都市とそこで発生が懸念されている想定地震を対象として、提案する枠組みがどの程度うまく機能するかを検証しました。また、その対象地域を対象としたSAMRRaiのプロトタイプを構築しました。次章以降では、用いている手法やリスク評価手法の詳細を説明するとともに、検証結果やSAMRRaiのプロトタイプについて説明します。

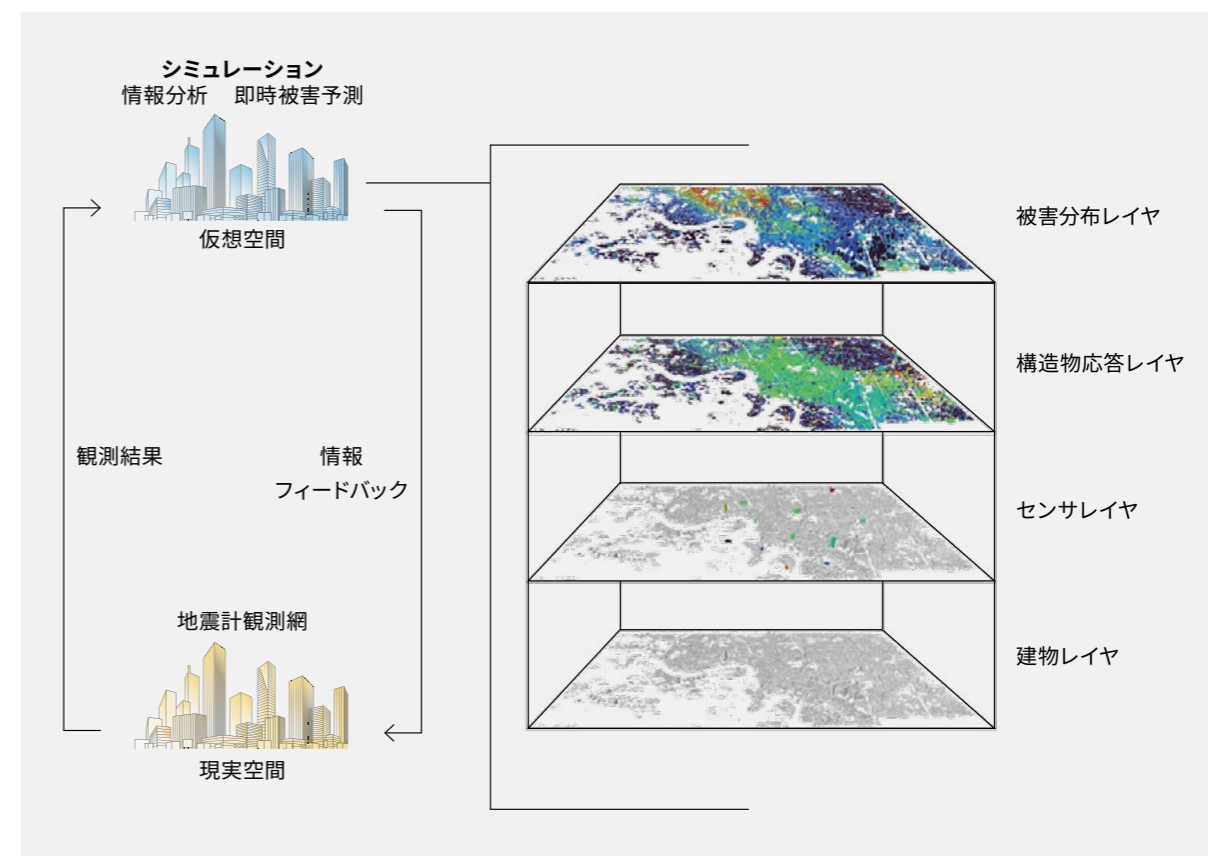


図4 デジタルツインシステムSAMRRai のイメージ

2.0

評価対象とシミュレーション手法およびリスク評価指標

ここでは、評価対象とした都市や想定地震、評価に必要なシミュレーション手法、およびリスク評価指標について説明します。

2.1 対象領域と対象地震断層および地震シナリオ

対象とした想定地震は、長町-利府断層帯の断層運動に伴う内陸直下型地震であり、対象領域は宮城県仙台市青葉区の一部の領域(図5)です。長町-利府断層帯は、仙台平野の西縁に位置する活断層帯であり、西側が東側に対して相対的に隆起する逆断層です。今後30年の間に地震が発生する可能性がやや高いと評価されており、最大で震度7クラスの地震の発生が想定されています。また、仙台市内が断層近傍に位置していることから、大きな被害が想定されている地震です。

先述のように、提案する枠組みでは、事前に複数ケースのシミュレーションを実施する必要があります。異なる地震シナリオ(条件の異なる解析ケース)を考える必要があります。本研究では、J-SHIS1)で公開されて

いる長町-利府断層帯の震源断層の情報をベースに、マグニチュード(Mw)が6.3~7.5の13種類のシナリオを作成しました。図6は、J-SHISで公開されている断層の位置とアスペリティの位置を示しています。アスペリティとは、断層運動の際に断層面上で特に強くずれる固着域のことを意味します。この震源断層のモデルでは、アスペリティが2か所配置されており、第一アスペリティ(赤枠で囲まれた部分)と第二アスペリティ(青枠で囲まれた部分)と呼びます。また、図中の星マークは、断層の破壊が始まる破壊開始点の位置を示しています。マグニチュードを変化させる場合、これらのアスペリティの大きさや位置、および破壊開始点の位置などについても考慮する必要がありますが、それらを考慮して先述の13種類の地震シナリオを作成しました。

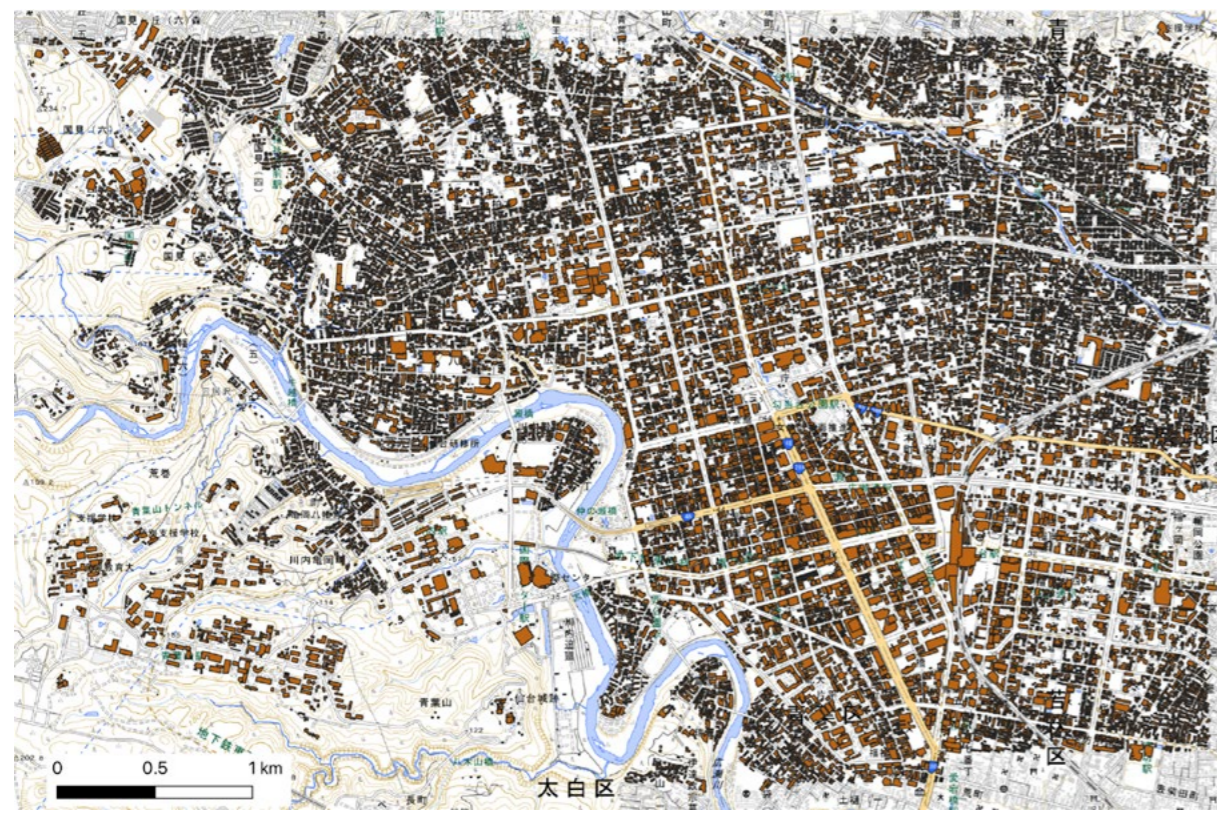


図5 対象領域(仙台市青葉区の一部, 32,334棟)

2.2 シミュレーション手法

ここでは、シミュレーションによって地震による建物被害を表現するための具体的な手順や方法について説明します。図7に示すように、地震動は断層で発生し、工学的基盤(比較的硬いS波速度毎秒300~700mの地層)の中を伝播するとともに、表層地盤(比較的柔らかい地層)を伝播する中で増幅(または減衰)します。その後、地震動が建物に伝わり建物が被害を受けることになります。この一連のプロセスをシミュレーションで表現する必要がありますが、全てを

連続的に1つの手法で表現することは難しいため、工学的基盤中の伝播、表層地盤中の伝播(地盤応答)、建物応答の3つのプロセスを別々の手法で表現しています。なお、先述の13種類の地震シナリオ全てについて同様の計算を行い、対象領域内の全ての建物の地震動による揺れを評価しました。以降では、この3つのシミュレーションのプロセスについて、それぞれ説明します。

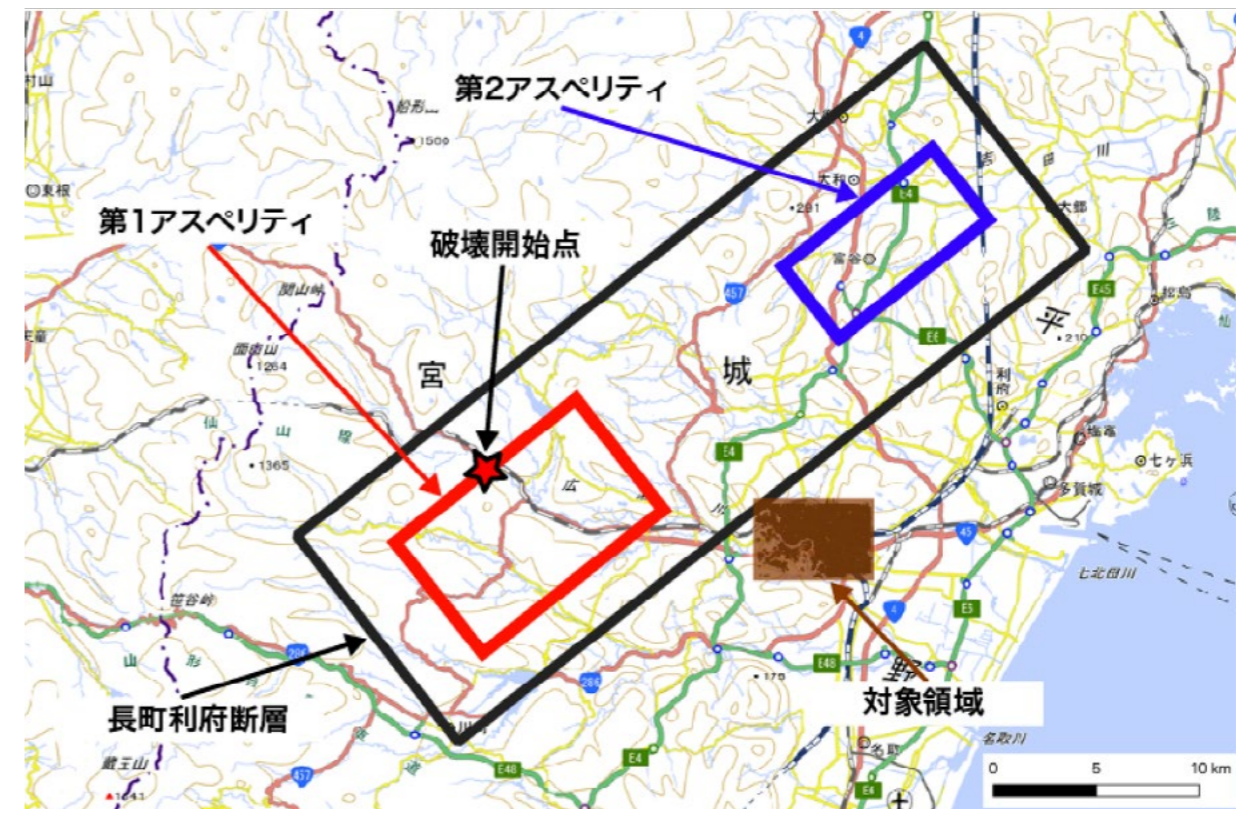


図6 長町-利府断層帯の震源断層モデル1)

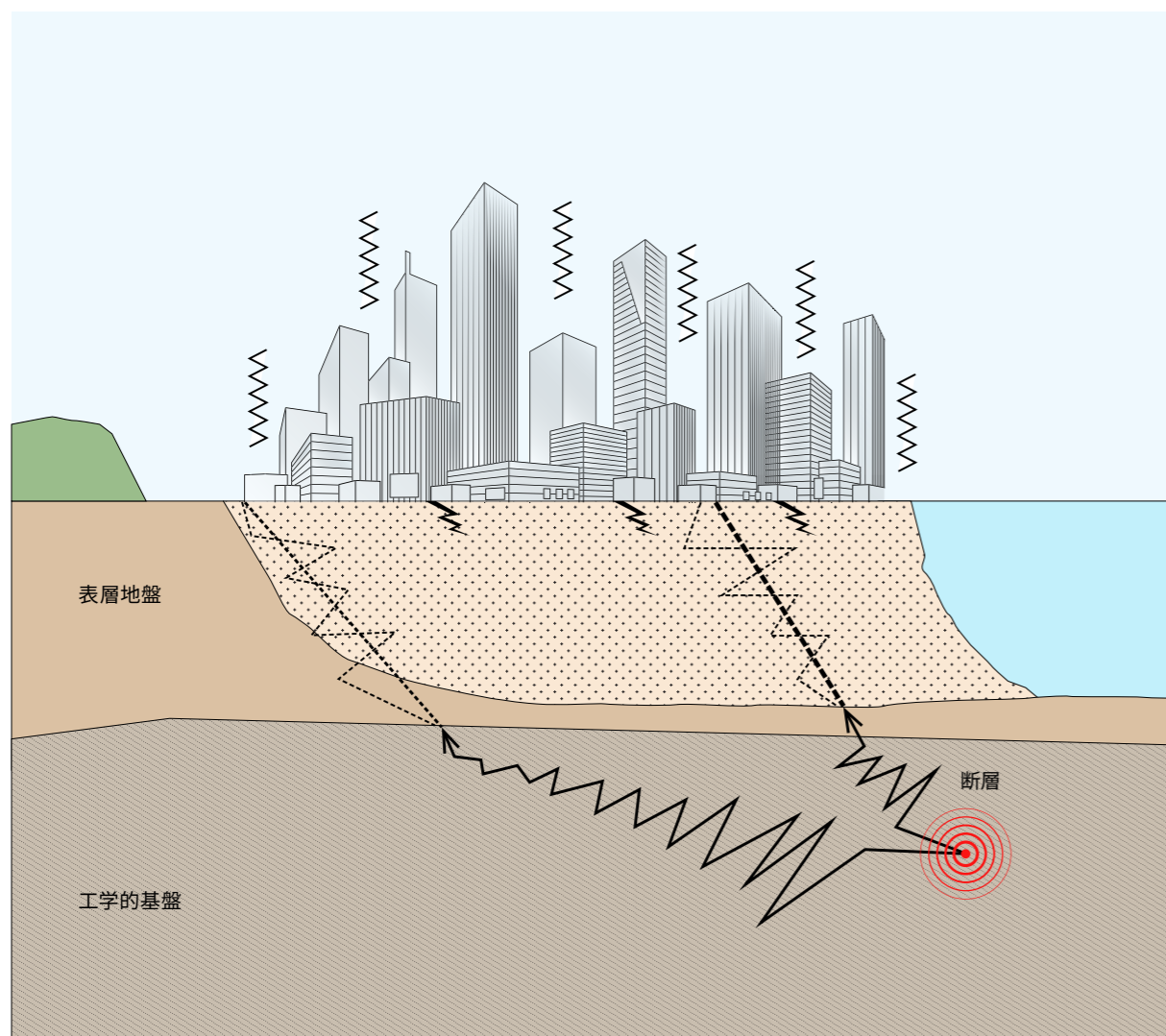


図7 地震動伝播と建物応答のイメージ

2.2.1 工学的基盤中の伝播解析

先述の3つのプロセスのうち、断層運動によって発生した地震動が工学的基盤を伝播し、工学的基盤面（表層地盤と工学的基盤の境界面）に到達するまでの伝播課程の計算について説明します。この計算が可能な手法は、大別して理論的手法、半経験的手法、およびハイブリッド手法がありますが、対象とする長町-利府断層帯に関する過去の地震記録が十分でないことから、半経験的手法である統計的グリーン関数法²⁾³⁾を用いました。統計的グリーン関数法は、統計的手法によって作成された地震動波形をグリーン関数として合成する手法で、観測記録が十分に得られていない地点においても

地震動波形の作成が可能であることが大きな特徴です。具体的には、対象とする断層面を格子状に分割し、その要素断層から発生する要素地震に対して統計的経時特性と位相特性を考慮し、グリーン関数（要素地震の時刻歴波形）を作成する。すべての要素断層のグリーン関数を合成することで、工学的基盤面の任意の場所で地震波を求めることができます。実際の計算には、J-SHISで公開されている統計的グリーン関数法計算プログラム⁴⁾を利用して、各建物の位置に対応する工学的基盤面上のポイントの地震動を評価しました。

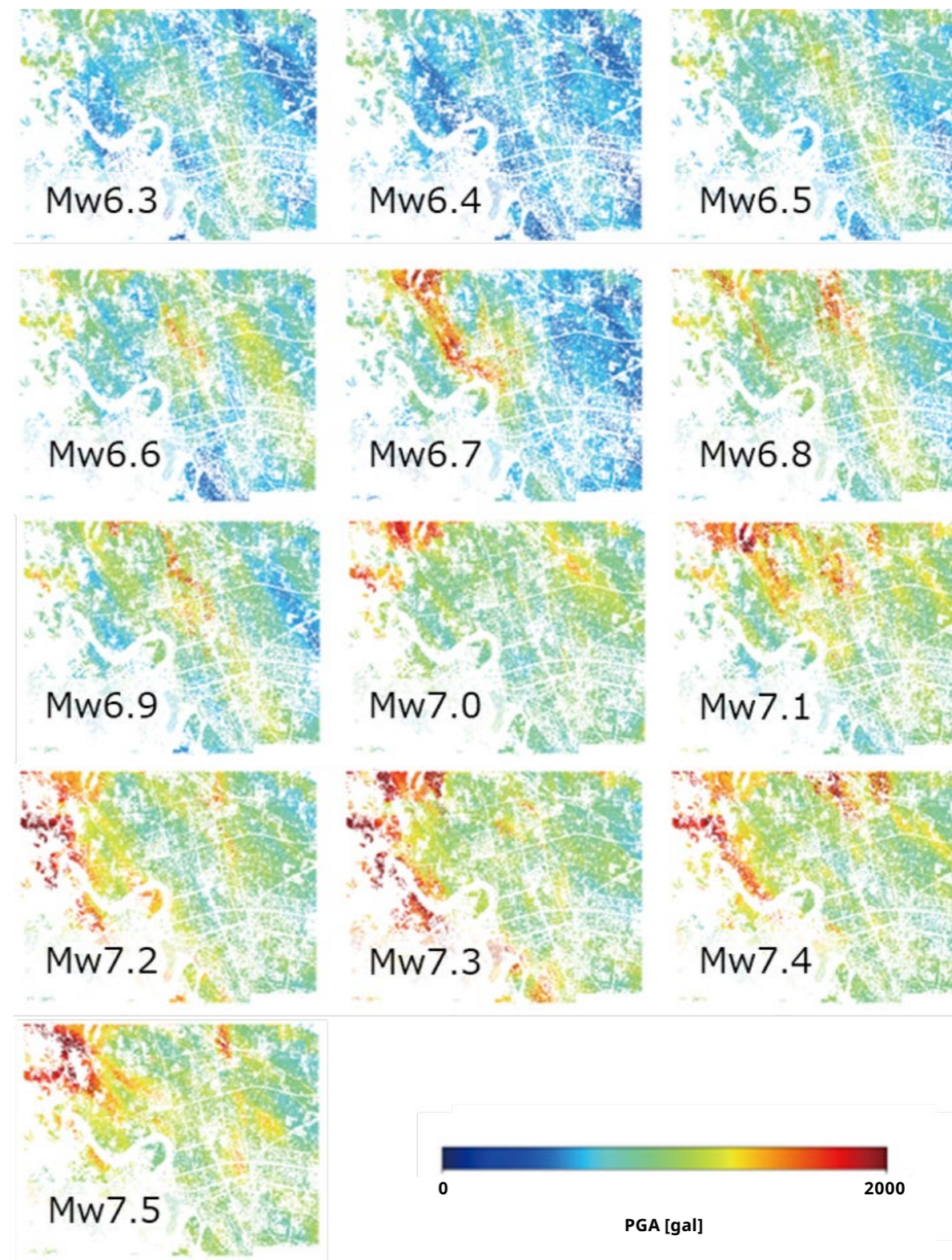


図8 地盤応答解析によって得られた各シナリオの地表面最大加速度分布 (PGA)

2.2.2 地盤応答解析

次に、地震動の地盤応答（表層地盤中の伝播に伴う増幅・減衰）の計算について説明します。この計算には、統合地震シミュレータ (IES: Integrated Earthquake Simulation) 5)の地盤応答解析を利用しました。IESの地盤応答解析では、等価線形化解析を採用しており、各建物直下の工学的基盤面から地表面までの地震動波形の伝播を表現することが可能です。等価線形化解析は、地盤の複雑な挙動を簡易的に解析する手法です。先述のように、各建物直下の工学基盤面での地震動は統計的グリーン関数法によって計算されているため、これを入力情報として表層地盤中の地

震動の伝播と増幅を計算することが可能であり、その結果、地表面での建物がある位置での地震波形を得ることが出来ます。この計算を、地震シナリオ毎に対象領域全ての建物について行います。図8は地盤応答解析によって得られた各シナリオの地表面最大加速度分布 (PGA: Peak Ground Acceleration) の分布図です。これらの図は、加速度の最大値を示しているため、静止画として表現されていますが、実際の計算結果は、全ての建物の位置で時系列データが出力されています。

2.2.3 建物応答解析

地盤応答解析によって得られた建物直下の地表面での地震波形を入力データとして、建物の応答を評価します。この計算には、IESに実装されている建物応答解析の一種である多質点系 (MDOF: Multi Degree of Freedom) モデルを採用しました。図9に示すように、MDOFモデルは建物をバネと質点で構成される串団子のようなモデルとして表現します。建物の階数を質点数、各階の質量を各質点の質量として、構造種別、質点数、質点の質量から各バネの剛性を推定して計算します。構造種別は、RC構造、木造、鉄骨造の3種類があり、各建物の特性に合わせてデータが作られています。図10は、Mw6.9のシナリオの建物応答解析のある時刻の結果を可視化したものです。図中の建物の色は地震動によって発生している建物の変位の大きさを表しています。この図の中では構造物が実際の複雑な形状を有しているように見えますが、可視化

の際にそのような工夫をしているだけで、実際の計算は先述のMDOFモデルによるものです。図11は、各シナリオの建物応答解析の結果に基づいて算出した代表応答変位の分布です。建物の被害を想定する指標は、代表応答変位の他にも、最大加速度や層間変位角、およびSI値などがありますが、どの指標でもシミュレーション結果から算出をすることができます。ここでは仮に、代表応答変位を例に結果を示しています。代表応答変位は、耐カスペクトル法 (CMS: Capacity Spectrum Method) を用いて算出される建物の被害レベルに関係の深い指標ですが、その詳細な説明は後述します。これらの図より、マグニチュードが大きくなるほど建物の被害レベルが高くなること、および、対象地域特有の分布があることが理解できます。



図9 多質点系モデル (MDOF) のイメージ

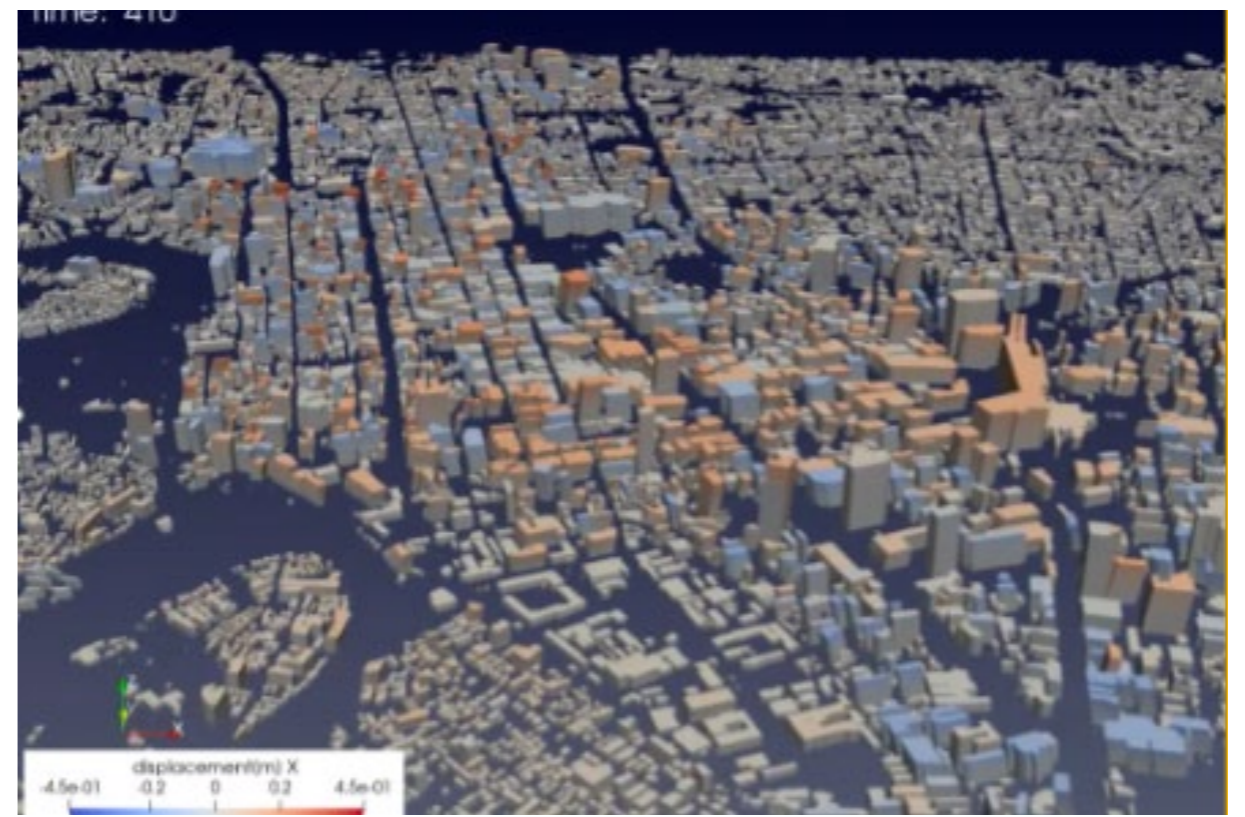


図10 建物応答解析の結果を可視化したスナップショット

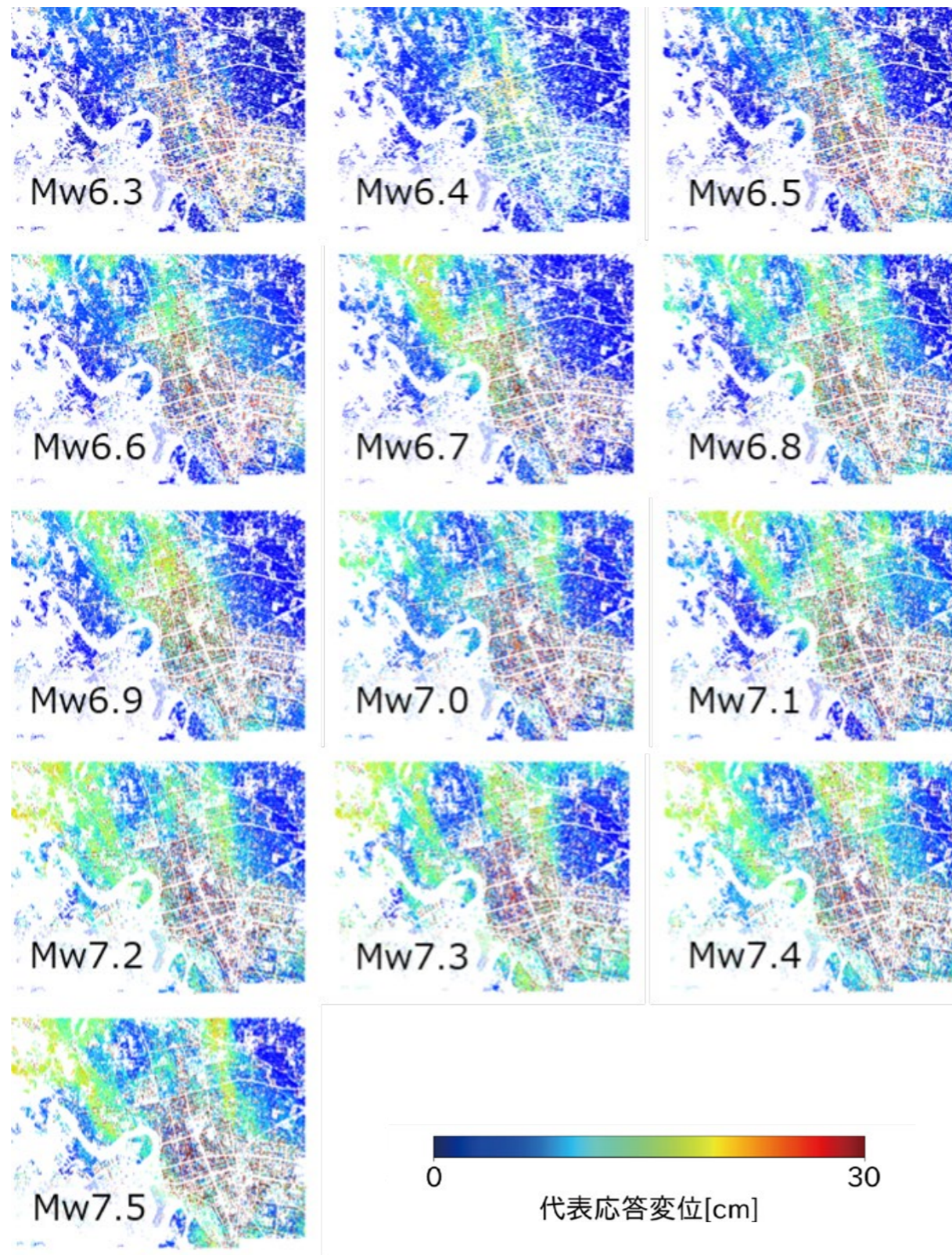


図11 耐力スペクトル法により評価した各シナリオの代表応答変位の分布

2.3 地震リスク評価指標

ここまで、シミュレーション手法について説明してきましたが、その結果を使って表現するリスク評価指標についても説明しておきます。シミュレーション結果には、全てのシナリオの全建物の揺れの時系列データが含まれているため、様々なリスク評価指標を計算することが可能です。地震リスクは、「地震に対してどの程度の被害や損失（リスク）が生じるか」を定量化したものであり、「地震動強さ指標」または「建造物の応答値」に対して、「建物の被害や損失を表すリスク指標」を関連づけることで評価されます。「地震動強さ指標」に着目すると、計測震度、PGAやPGVなどの最大地動、地震

応答スペクトル、SI値などの指標が用いられています。計測震度や最大地動は扱いが簡便である反面、地震動の周期特性が反映されにくいという欠点があります。それに対して、地震応答スペクトルやSI値は、地震動の周期特性を含むため、一般的には建物の被害との相関が良いとされています。しかし、対象とする建造物や非構造部材の種類、被害のレベルによっては他の指標が有効になることもあるため、単純に一つの指標のみで被害を想定することは難しいと考えられます。表は、一般的に建築物の各構成要素の損傷要因とされる建造物応答値をまとめたものです。

構成要素	項目	主な指標 (建造物応答値)
構造体		最大相関変形角, 最大応答加速度
建築非構造部材 (加速度依存型)	屋根, 天井, 家具, 什器等.	最大応答加速度
建築非構造部材 (変位依存型)	外壁, 間仕切り壁, 非耐力壁等.	最大層間変形角
建築設備	配管, スプリンクラー, エレベーター等	最大応答加速度, 最大応答速度

「建物の被害や損失を表すリスク指標」には、閾値によるものとフラジリティ関数によるものがあります。閾値によるリスク評価は、地震動強さ指標または建造物の応答値について、「全壊」や「中破」といった各損傷レベルが発生する閾値を定め、その閾値と観測値とを比較することで決定論的に被害判定を行うものです。一方、フラジリティ関数によるリスク評価は、建物を建

築構造や年代別に区分し、それぞれの区分に対して各損傷レベルが発生する確率を算出するものです。過去の地震記録や実験をもとにした確率論的なリスク評価が可能であり、これをもとにして、物的損失額を評価するPML(Probable Maximum Loss)、建物の操業停止期間を評価するBI (Business Interruption) などの指標を定義して、評価目的に応じて指標が選択されます。例え

ば、PMLは復旧費用の調達や地震損害保険の支払額の算出、BIは事業継続可否の判断材料などに用いられています。本研究のデジタルツインシステムでも、様々な「地震動強さ指標」や「構造物の応答値」を用いて、決定論的および確率論的地震リスク評価の双方を行うことを想定して開発してきました。決定論的リスク評価では、各構成要素に対して最大層間変形角と最大応答加速度の閾値を設定しています。一方、確率論的リスク評価では、耐力スペクトル法（CSM：Capacity Spectrum Method、以降）に関連づけて構築された fragility 関数を用いています。これは、米国連邦緊急事態管理庁（FEMA：Federal Emergency Management Agency）の被害推定システム HAZUS6 で採用されている手法であり、CSMにより得られる構造物の代表応答値を fragility 関数の入力とすることで、構造物、変形依存型非構造部材、および加速度依存型非構造部材の損傷発生確率の推定を行うことができます。同じシミュレー

ション結果から構造物と非構造部材の両方を評価可能であるため、防災・減災をより深く議論するための材料を提供することが出来ます。

図12は決定論的リスク評価の例であり、Mw6.9のシナリオについて、構造物と非構造物（変形依存型と加速度依存型）の被害の様子を示した結果です。この図では、計算されたリスク評価指標の値に基づいて被害レベル（損傷なし、軽微、小破、中破、大破）を分類し、それらの割合を円グラフで示しています。この図より、マグニチュードの増加に伴って緑色で表される「小破」と判定される建物数が増加していることが確認できます。また、構造物に比べて非構造部材の方が大きな被害となる傾向が確認できます。このように、同じ地震でも、評価対象の違いによって結果が異なるため、様々なリスク評価指標で評価できるということは大きな利点となります。

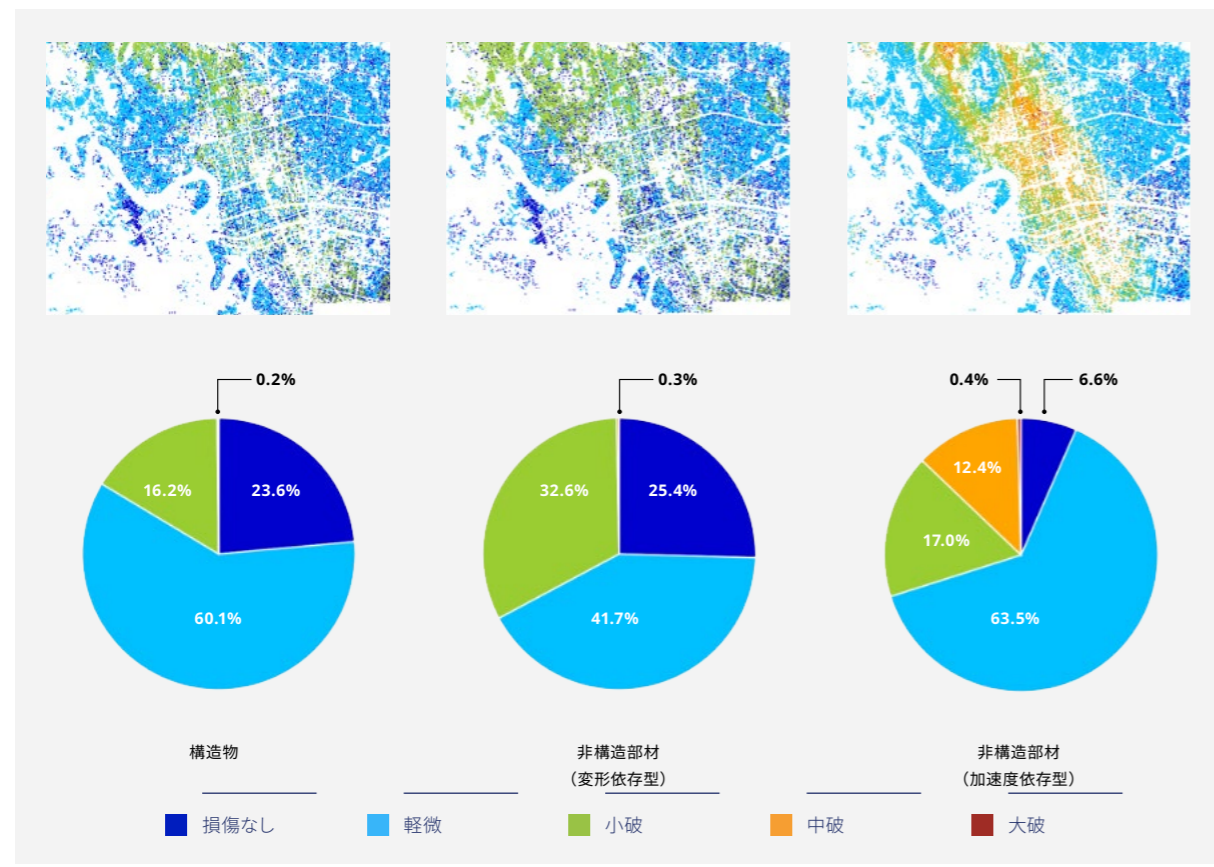


図12 地震による構造物と非構造部材の被害の比較



3.0

シミュレーションと観測を融合した即時的地震被害評価

先述のシミュレーション結果を分析し、事前に重要な情報を抽出しておく、地震発生時に地震計の観測結果が得られた場合、即時的に対象地域の全ての建物の被害を推定することが可能になります。ここでは、なぜそのようなことが可能になるのかを順を追って説明していきます。なお、ここで、シミュレーション結果の取り扱いについて言及をしておきます。これまでも説明してきたように、シミュレーション結果は、各地震シナリオに対して、全ての建物の揺れの時系列データを保持しています。ただし、都市全体の状況を俯瞰視するためには、1つのマップのようなものとして可視化の方が理解しやすいものになります。そのため、リスク評価指標の分布図を即時的に出力できることを目標として構築しました。なお、先述のように指標は複数あり、どの指標でもシミュレーション結果から算出することは可能なのですが、本章ではCSMにより得られる構造物の代表応答変位を例に説明します。

3.1 固有直交分解

まず、提案する枠組みの中で核の技術になっている固有直交分解 (POD: Proper Orthogonal Decomposition) について説明します。PODは、データの特徴抽出や次元削減を目的として使用されることが多く、近年では多くの工学的問題に適用されています。PODでは、複数セットのデータの中に共通のモードが存在すると仮定します。このとき、もとのデータは全てモードの線形和 (係数を掛けて足し算したもの) として表現されます。図13の猫の図を例にしてその理論のイメージを説明します。図の上段には10種類の猫の絵があります。図を構成するピクセルの色の情報は数値化することが出来るので、数値の集合体という意味ではシミュレーション結果の代表応答変位の空間分布と似たデータということになります。その数値の情報を使って猫の図の中にある共有のモード (模様, 分布) を抽出します。どうすれば抽出できるのかについては後述します。抽出した結果、いくつかの共通モードが得られます。これは、元のデータ (10種類の猫の図) の中に共通して存在するモードです。この共有モードは、元のデータに対して強い (寄与度が高い) ものと弱いものがあります。強いものから順に第1モード, 第2モード, 第3モード・・・と呼びます。これらの共通モードに適切な係数 (POD係数, 図中の α) を掛けて足し算することで、元のデータを全て再現することが出来ます。どのデータを再現するかによって、係数の値は異なりますが、使用する共通モードは同じです。つまり、共通モードの情報を持っていれば、元のデータは係数だけを変化させれば再現できることになり、非常に効率的にデータを表現することが可能になります。

さて、上記の説明では共通モードの抽出とPOD係数が得られることを前提に説明しましたが、これらは理論的に得られることが

わかっています。その理論についても、概略的に説明します。まず、共通モードを視覚的に理解するために、図14に示した2次元ベクトルデータ (2つの要素を持つベクトル) のデータ群を考えます。2次元空間上にデータがプロットされていますが、図中の赤と青で示した軸で表現しなおすことで、データを効果的に表現できます。つまり、データの散らばりの度合い (分散) が大きい方向の順に、第1と第2の軸を直交するように定義すれば、その方向を示すベクトル (図中では u_1 と u_2) が共通モードとして抽出されるのです。また、各データはモードに係数を掛けた線形和で表現できるため、モードの強弱をコントロールすることで全てのデータを表現できることとなります。この操作は、主成分分析 (PCA: Principal Component Analysis) を意味しています。

2次元ベクトルデータのままで、先述の猫の図やシミュレーション結果との関係性がわかりにくいので、少し説明を追加します。猫の図の説明でも出てきたように、猫の図やシミュレーション結果は視覚的には色でその特徴や模様を判断することが出来ますが、数字が並んだ数字の集合体と考えることもできます。そのため、あるルール (数字をなぞる方向のルール) を決めてしまえば、図15のように数字の集合体をベクトル化することが出来ます。仮に、1つの図 (解析結果) が n 個の数字で構成されているとすれば、それから作られるベクトルは n 次元ベクトルになります。また、元のデータセットの数 (シナリオ数) の分だけ n 次元ベクトルが存在することになります。先の説明では簡単のため2次元ベクトルで考えましたが、 n 次元ベクトルデータでも同じように主成分分析の理論に基づいて共通モードを抽出することが可能であり、POD係数も理論的に算出可能です。

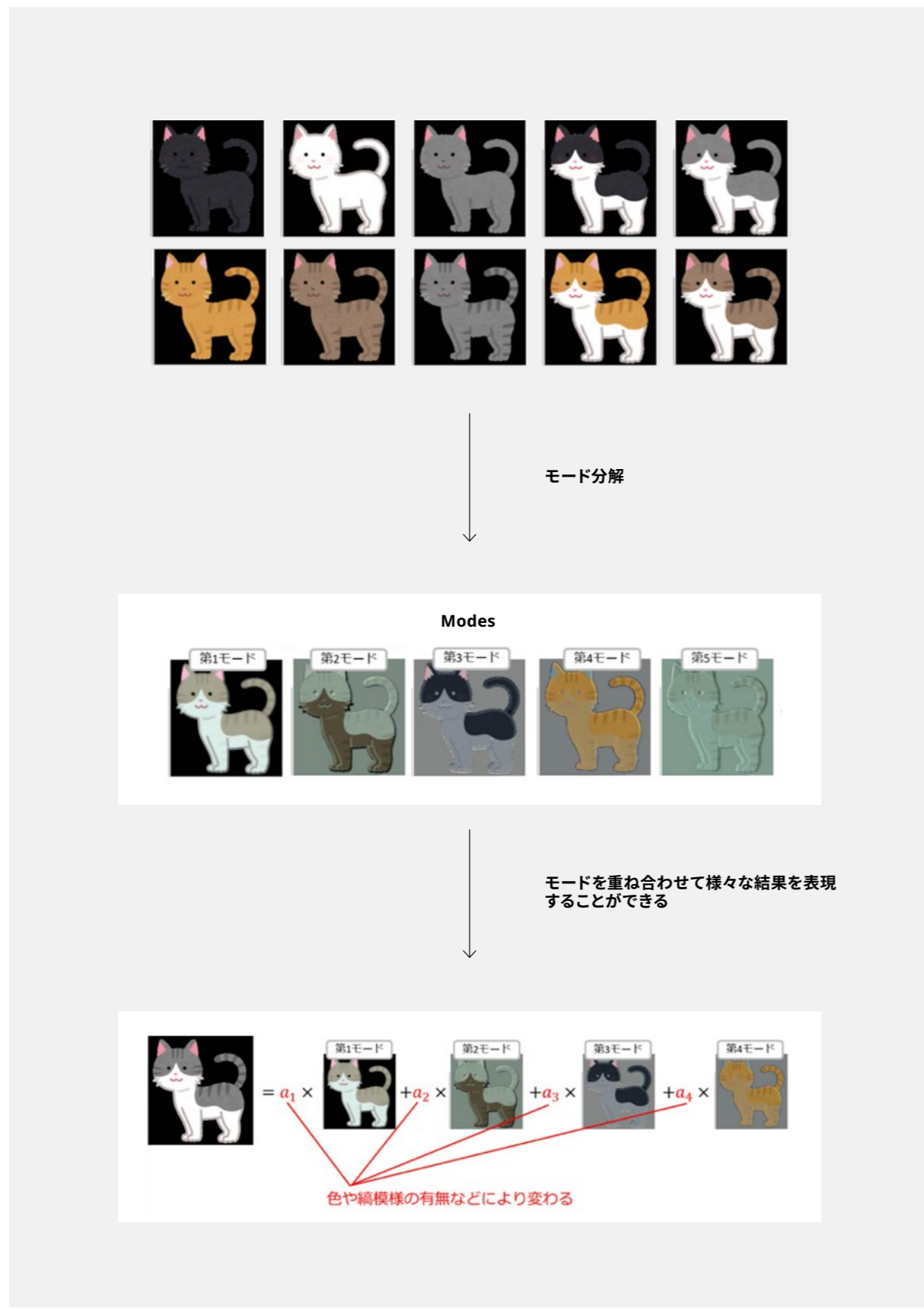


図13 固有直交分解のイメージ

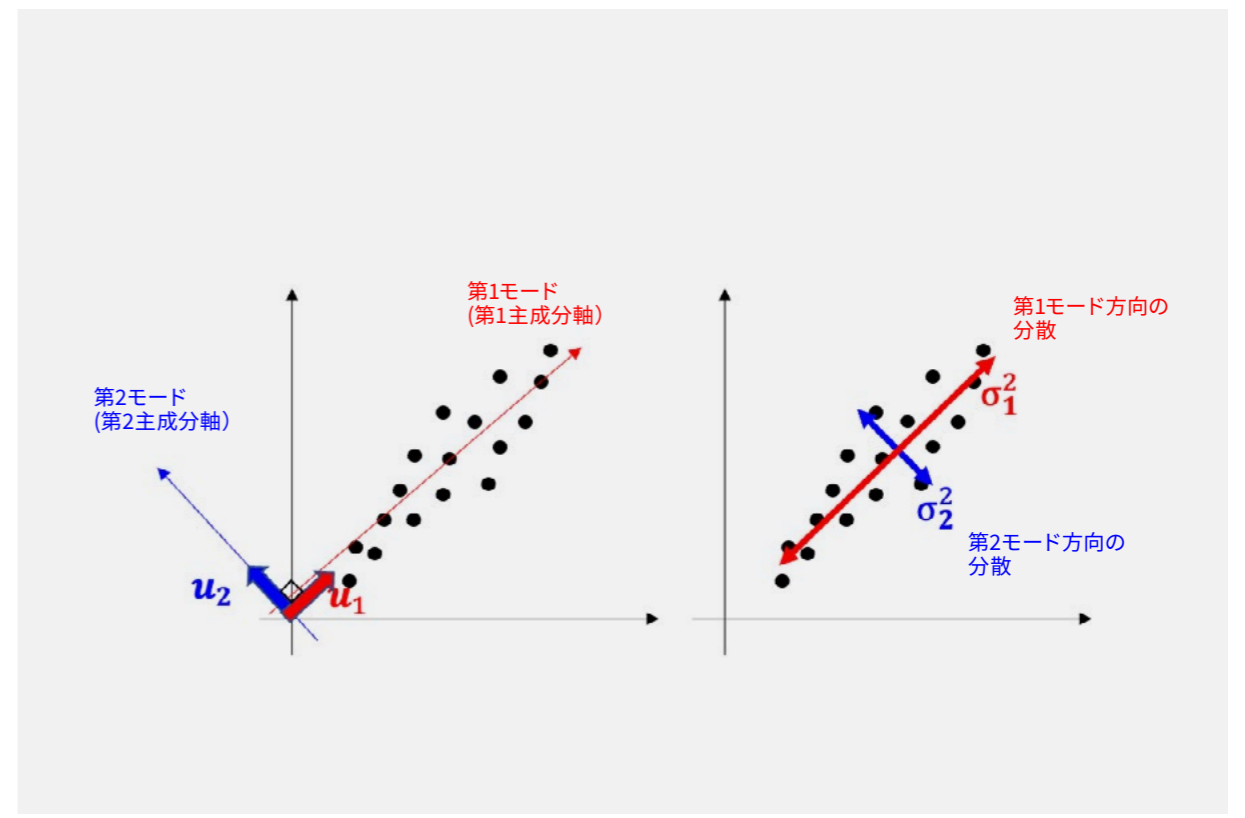


図14 固有直交分解のイメージ

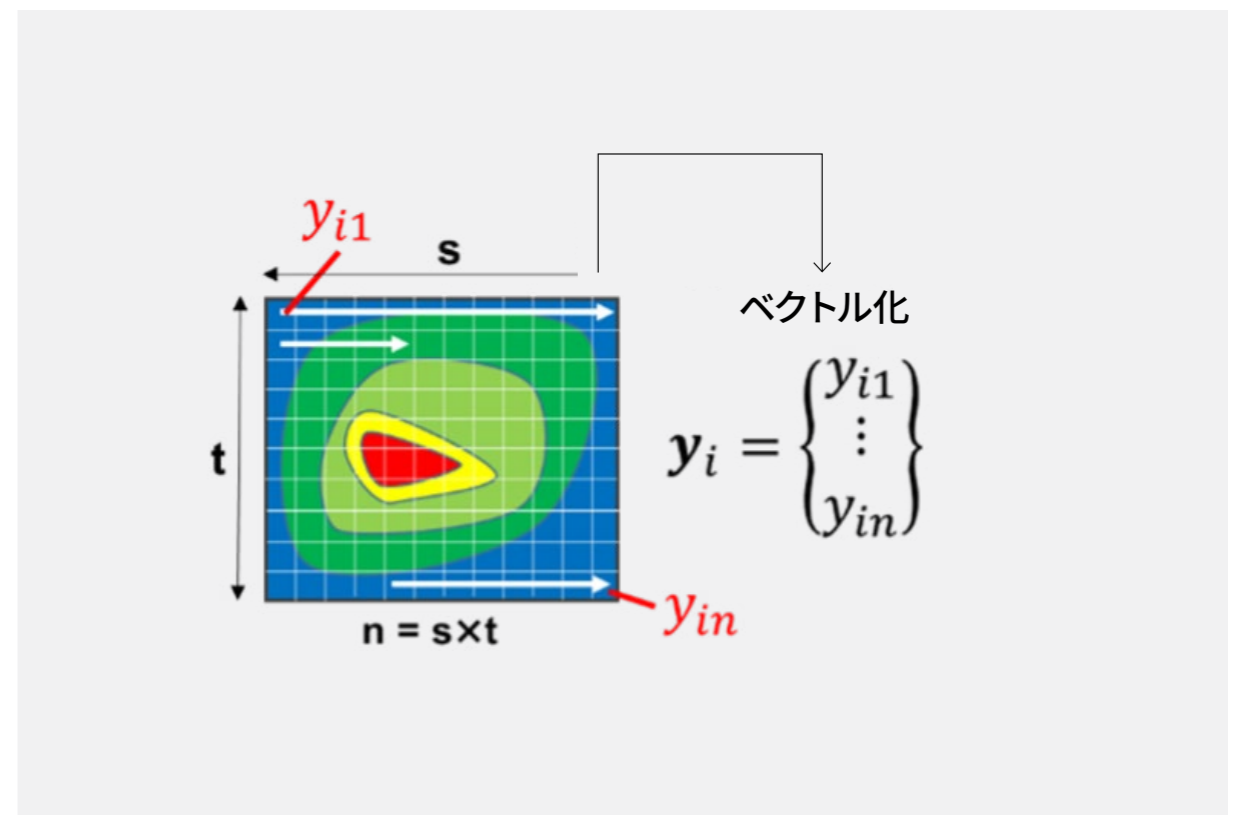


図15 ベクトル化のイメージ

3.2 スパースセンシングと観測点配置最適化

ここまで、元のデータ(シミュレーション結果)からPODを用いて共通モードとPOD係数を算出することが可能であり、それらの情報を使って元のデータを再現することが出来ることを説明しました。次は、ここまでの内容を踏まえて、シミュレーションと観測の融合がどのように実現されるのかについて、その方法を説明していきます。

先述のように、元のデータは共通モードとPOD係数で表現できるのですが、POD係数を自由に变化させれば、元のデータにはないデータも出力することが可能です。シミュレーション結果の代表応答変位を例にとれば、シミュレーションによって出力されている13種類の代表応答変位の分布図ではないデータも作ることが出来ます。また、当然ながら、そのデータには共通モードの特徴が含まれることとなります。実際の地震は、シミュレーションで実施しているシナリオと必ずしも一致するとは限らないため、元のデータ以外のものを作り出せることは好都合です。また、そのデータの中に、シミュレーション結果から抽出された共通モードの特性が含まれることも好都合です。なぜなら、図8や図11のシミュレーション結果を見てわかるように、計算結果には対象地

域特有の空間分布の傾向があり、各シナリオでマグニチュードが変化しても共通のモードがシナリオ間に存在することは明らかだからです。また、実際の地震による建物被害も、それに類似した共通モードが存在するものと考えられます。そのため、シミュレーション結果から抽出した共通モードが実際の地震の建物応答にも適用できると仮定することが出来ます。

実際の地震による建物応答を推定するのにシミュレーション結果から抽出した共通モードが使えるのであれば、実際の地震が発生した場合には、その地震にあった各モードのPOD係数を何かしらの手段で計算することが出来れば、対象領域の中にあるすべての建物の被害を瞬時に推定することが可能になります。このPOD係数をどのように求めるのかという点が、シミュレーションと観測との融合を実現する鍵になっています。本研究では、POD係数を求めるために、スパースセンシングという技術を導入しました。スパースセンシングとは、ある制約により僅かな量の計測データしか得られないときに、事事前に得られている数理モデルを介して本来入手したデータのすべてを推定する手法です。様々な手法が存在します

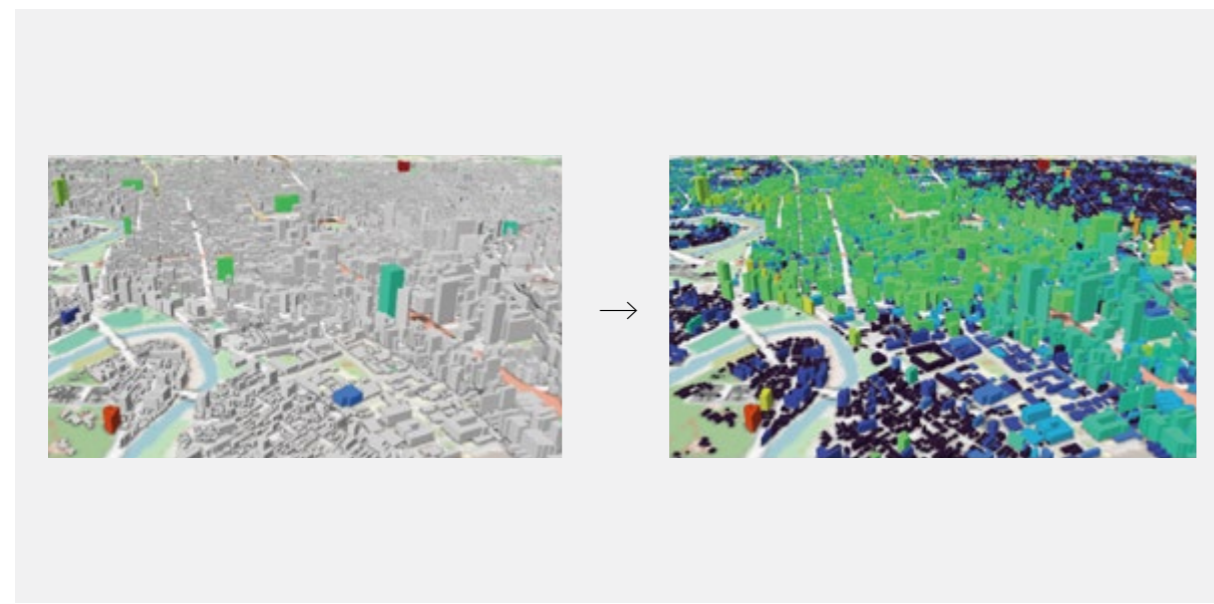


図16 スパースセンシングのイメージ

が、提案する枠組みではPODの共通モードを利用したスパースセンシング技術を導入しました。図15がそのイメージです。図中の左図は一部の建物にしか色が付いていません。これらの建物には地震計が設置されていて、地震が発生すると建物の応答値が得られるとします。通常であれば、地震計が設置されている建物だけの情報になりますが、スパースセンシングの理論によって図中の右図のように対象領域の全ての建物の応答を推定することが可能になります。つまり、共通モードが存在するという仮定の上で、実際に観測された少数の建物の情報から、POD係数を推定するのです。その推定には、線形代数の一般化逆行列の理論を適用すれば可能になるのですが、ここでは詳細な説明は割愛します。

スパースセンシングの理論は、地震計の最適配置の情報も与えてくれます。つまり、対象領域の中にどのように地震計を配置すれば効果的に全ての建物の被害を推定できるのかを教えてください。この計算は、共通モードを使って元のデータを精度よく再現するために地震計の個数と配置の最適解を探索する最適化問題を解くことになり

ます。そのための具体的な計算手順や手法に関する説明は割愛しますが、最適解の探索アルゴリズムが必要になり、そのための手法は様々なものがあります。図16は、シミュレーション結果の代表応答変位分布から計算された地震計の最適配置の結果です。赤丸が地震計の位置を示しており、対象領域の全建物(32,334棟)に対して、地震計を設置すべき建物はわずか13棟であることを意味しています。実際には、9棟でもある程度良い精度で全建物の代表応答変位を推定することが出来ることを確認していますが、9~13棟までは、地震計を設置する建物の数が増えるにつれて少しずつ精度が向上する結果となったため、ここでは13棟の条件の最適配置を示しています。なお、実際には自由に地震計が設置できるわけではないため、既に設置されている最適配置ではない地震計のデータから他の建物の応答を推定する必要があり、その場合は推定精度が低下することになるのですが、理論上はこのような配置が最適であるということが示せることは、対象地域の将来の防災・減災を考える上で貴重な情報になるはずです。



図17 地震計の最適配置(地震計の個数=13)

3.3 提案する枠組みの検証

ここでは、提案する枠組みがどの程度の精度で対象領域全体の建物の被害推定が可能であるのかを検証した結果について説明します。実際の地震の観測データを使えるのであれば、最も効果的な検証になります。しかし、これまでに長町-利府断層帯の断層運動に伴って発生した地震の観測記録はないため、シミュレーション結果のいくつかを疑似的に実地震のデータとして取り扱い、精度検証を行いました。具体的には、マグニチュードが6.5, 6.9, 7.3のシナリオの結果を少数の観測点の情報だけから推定することを試みました。図17がその結果です。

図中の上段は各シナリオのシミュレーション結果から得られた代表応答変位の分布図です。2段目は、シミュレーション結果から図16の最適配置の13点の情報だけ残したものです。実際の地震発生時にも、このように限られた建物の情報のみを得られることとなります。3段目に示した図は、提案する枠組みを使って、2段目の情報だけから全ての建物の代表応答変位を推定した結果です。この結果が1段目の正解レベル（シミュレーション結果）に近ければ精度が良いということになります。これを見てわかるように、推定結果は部分的にシミュレーショ

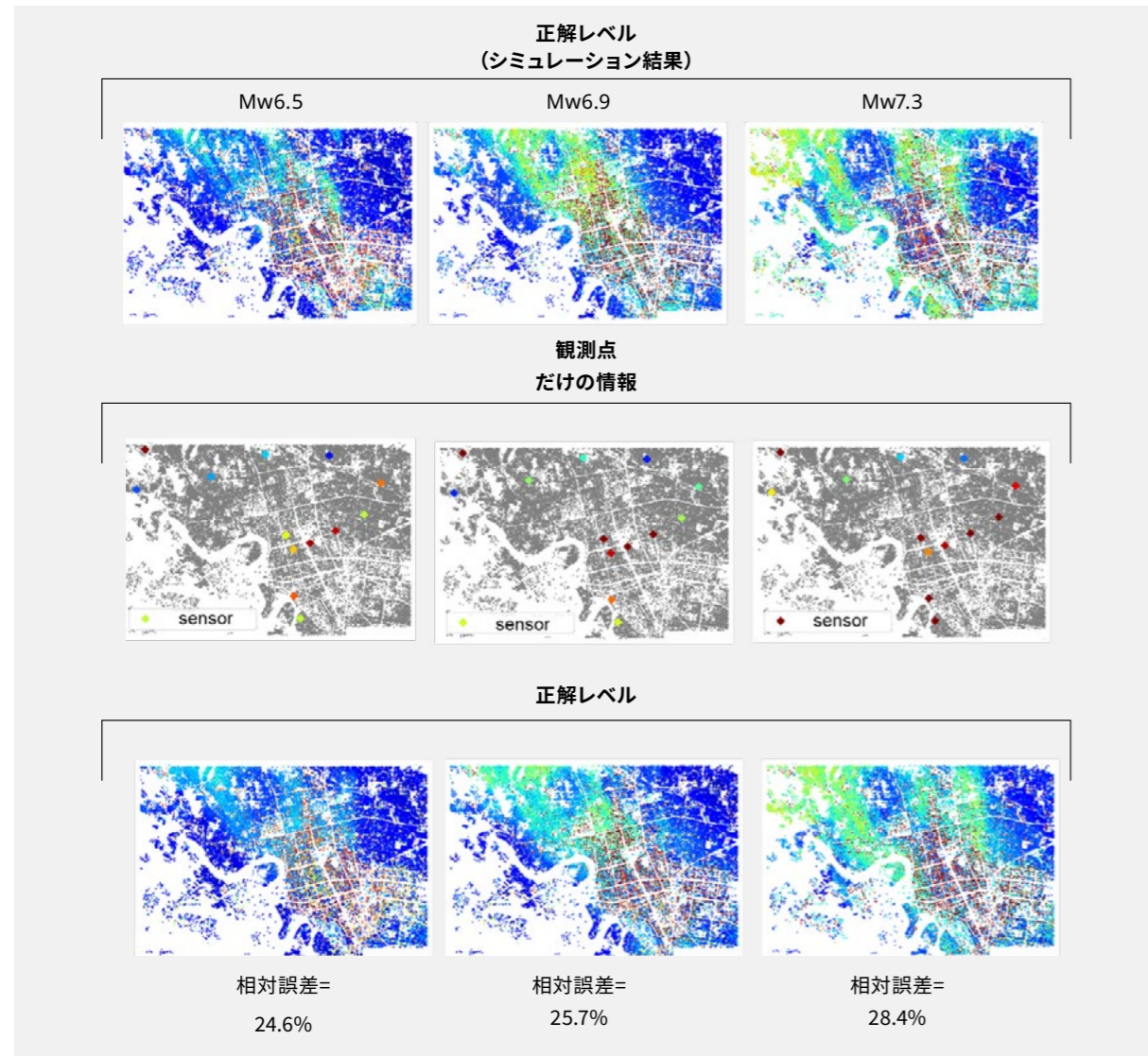


図18 検証結果 (3種類のシナリオに関する精度検証)

ン結果と異なる部分があるものの、対象領域全体の分布としてはかなり良い精度で表現できています。全建物の平均誤差率は20~30%程度となることがわかりました。

ここで示した検証結果は、あくまで地震計が理論的な最適配置である条件のものなので、地震計の個数や配置が最適ではない条件の結果も紹介します。この検証で

は、建物数を変化させて精度をチェックしました。図18がその結果です。最適配置の説明の部分でも少し触れましたが、地震計を設置する建物が8棟以下の場合には急激に精度が低下し、9棟以上ではある程度良い精度となることがわかります。

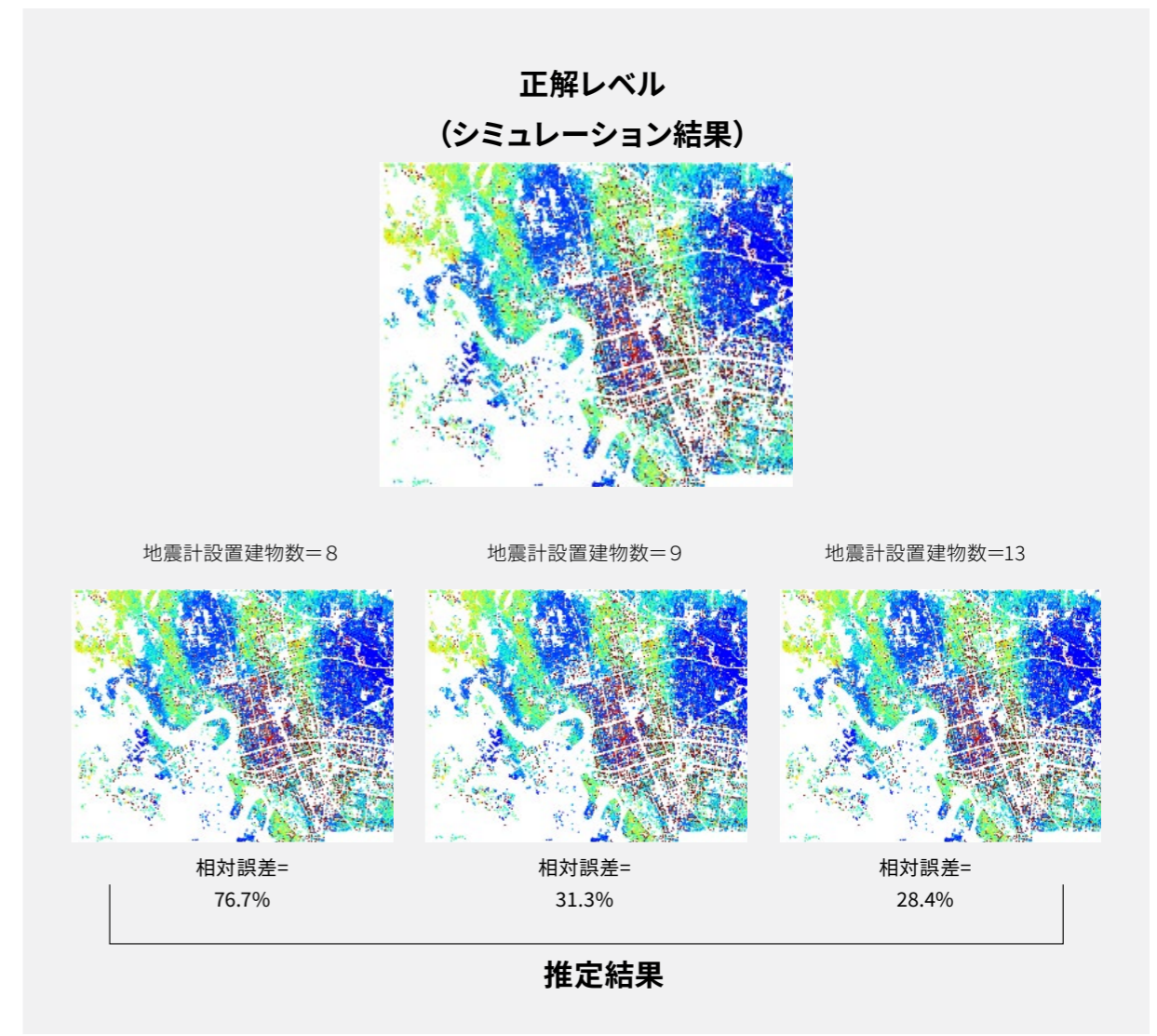


図19 検証結果 (地震計を設置する建物数が異なる場合の精度比較)

4.0

デジタルツインシステム「SAMRRAi」

前節までで説明してきた都市のレジリエンス向上に資するシミュレーション・センサ融合による地震被害即時評価のプラットフォームとして、デジタルツインシステムSAMRRAiを開発しました。以下では、その仕様や適用例について説明します。

4.1 SAMRRAiの仕様

図19に示すように、SAMRRAiは発災前と発災直後の双方で使用可能なシステムです。発災前には、シミュレーションと連携することで、予測される様々な地震に対して、個別建物ごとの地震リスク評価を行うことが可能です。また、任意の地震シナリオ（震源断層と対象領域）に対して、地震動波形の作成、および建物モデルや地盤モデルなどの設定が可能になっています。そのため、複数の地震シナリオについて一連の解析を実施することで、様々な地震に対する地震応答を事前検証し、データベース化することも可能です。発災直後には、事前に登録され

たセンサ端末（地震計）から得られる観測値、対象領域全棟での地震応答予測値、および構造物と非構造部材の被害状況を即時的に提供することが可能です。

SAMRRAiは、オープンソースソフトウェアのQGISをプラットフォームとして、QGISのプラグインにより機能を拡張したシステムです。QGISは、Windows、MacOS、Linux等のOSで動作するマルチプラットフォームソフトウェアであり、GISデータの可視化だけでなく編集、分析、レイアウトなどの機能を有しています。

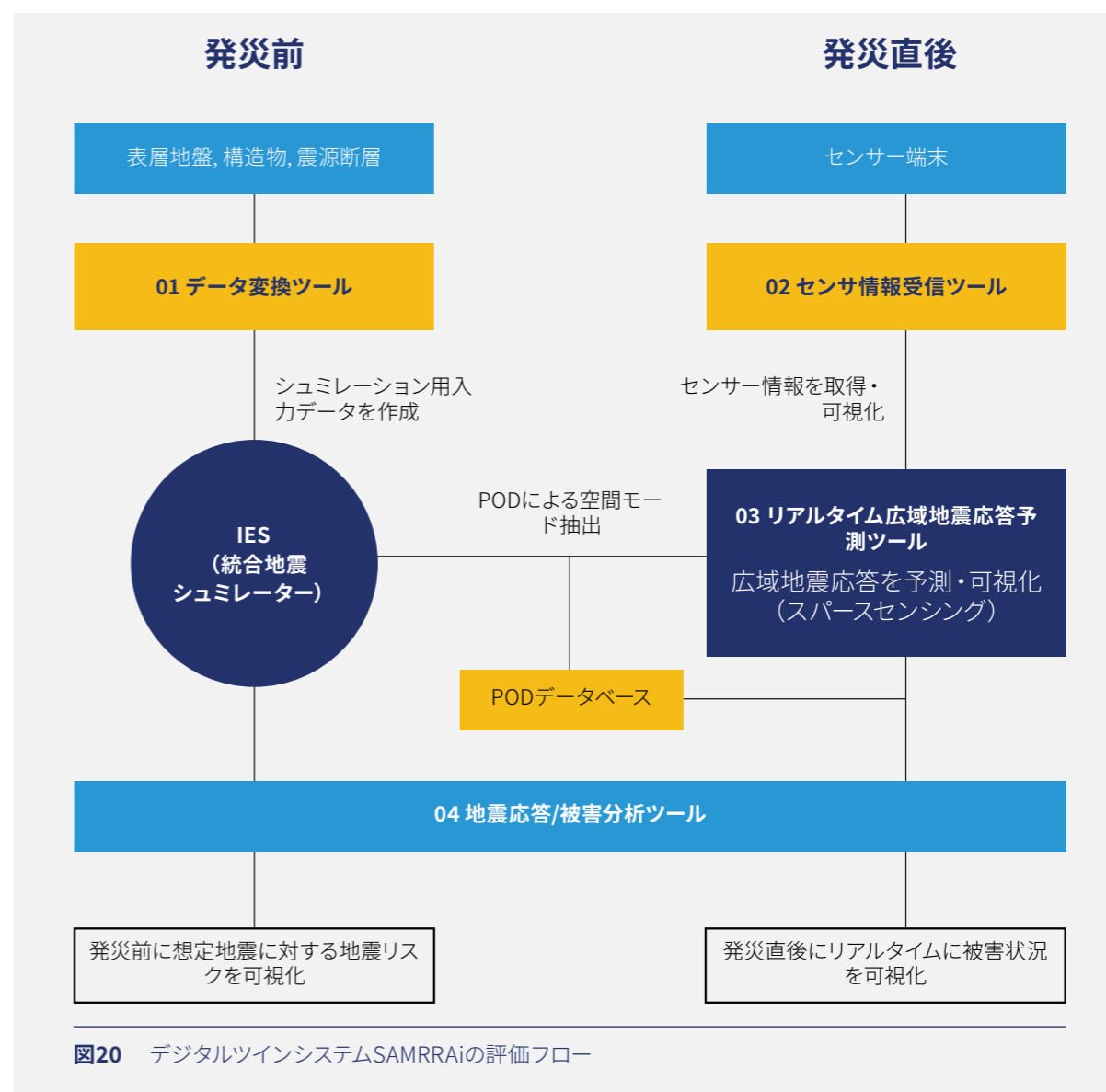


図20 デジタルツインシステムSAMRRAiの評価フロー



4.2 SAMRRAiの適用例

2章と3章で説明してきた仙台市青葉区の一部を対象とし、対象領域内に仮想観測点(3章で説明した13の最適配置)があるものとして、地震発生直後のSAMRRAiを用いた一連の評価の可視化結果を示します。図20は、仙台駅付近の仮想観測点の位置を示しており、の赤いマークが観測点を意味します。図に示すように、観測点上ではセンサの観測記録を確認することが可能です。図中では、観測記録の一部のみが表示されていますが、建物の揺れの時系列データが観測されるため、2.4節で説明した様々なリスク評価指標を算出することが出来ます。また、3章で説明したように、観測点における観測記録と事前に実施したシミュレーションの結果から抽出した共通モードを用いることで、対象領域内の全建物での構造物応答値を推定することが可能です。ここでは、最大水平変位をリスク評価指標として例を示します。図21が対象領域全体を推定した結果を示しています。図を見てわかるように、観測点以外の建物でもリスク評価指標が推定されており、任意の建物の情報を確認することが出来ます。

各建物のリスク評価指標を入力として、 fragility関数を用いて各損傷レベルの発生確率を計算することも可能です。具体的には、RC構造や木造などの建物種

別ごとに損傷なし(None)、軽微(Slight)、小破(Moderate)、中破(Extensive)、大破(Complete)の各損傷レベルの発生確率を評価することが出来ます。例えば、図22は地図上の全建物について大破する確率を色分けした図です。また、右下に現れている数値表には、地図内でクリックした建物(図中では矢印で指示している建物)の属性とともに各損傷レベルの発生確率が表示されています。この評価結果の妥当性を確認するため、宮城県のオープンデータポータルサイトで公開されている第5次地震被害想定調査結果7)との震度マップと重ね合わせて分析しました。その結果が図23であり、図中のグレーで色分けされている地域は震度6以上の揺れが観測されると想定される地域です。本システムで算出された構造物の損傷確率分布において危険と判定されている建物が想定震度マップのグレー部分と傾向がよく一致していることが確認でき、評価結果の妥当性が確認できます。SAMRRAiは、QGISベースのシステムであるため、このように様々なGISデータとの重ね合わせが可能です。独自の評価結果と外部のGISデータを容易に重ね合わせることが出来るという点も魅力の1つです。

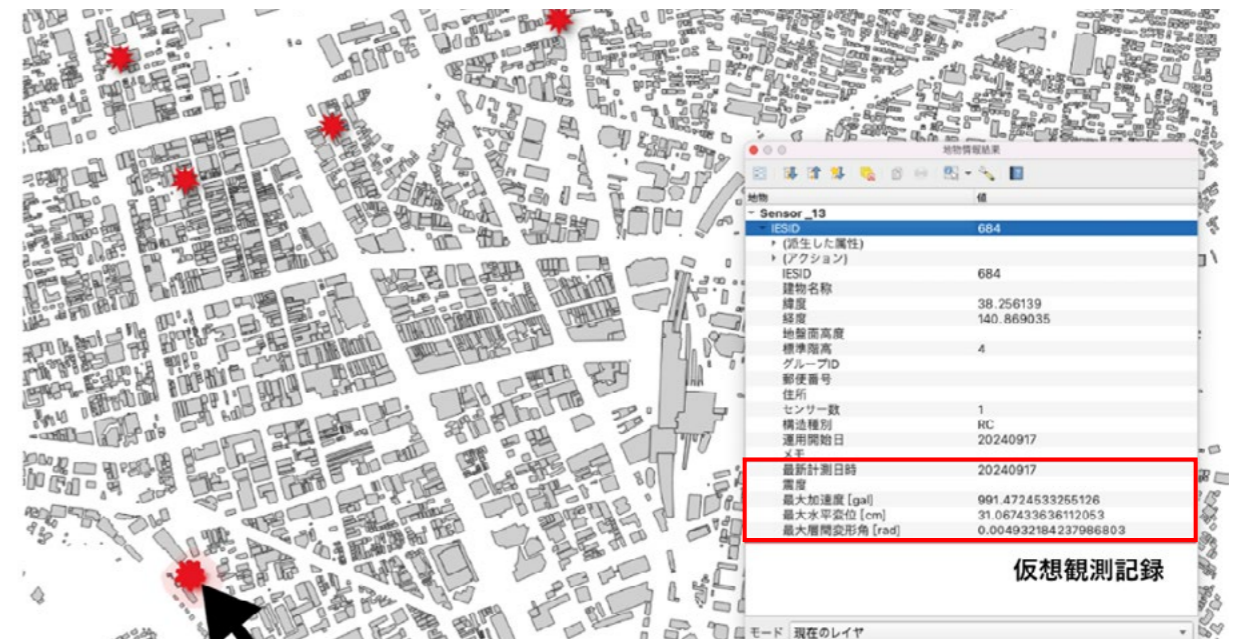


図21 仮想観測点上の観測記録

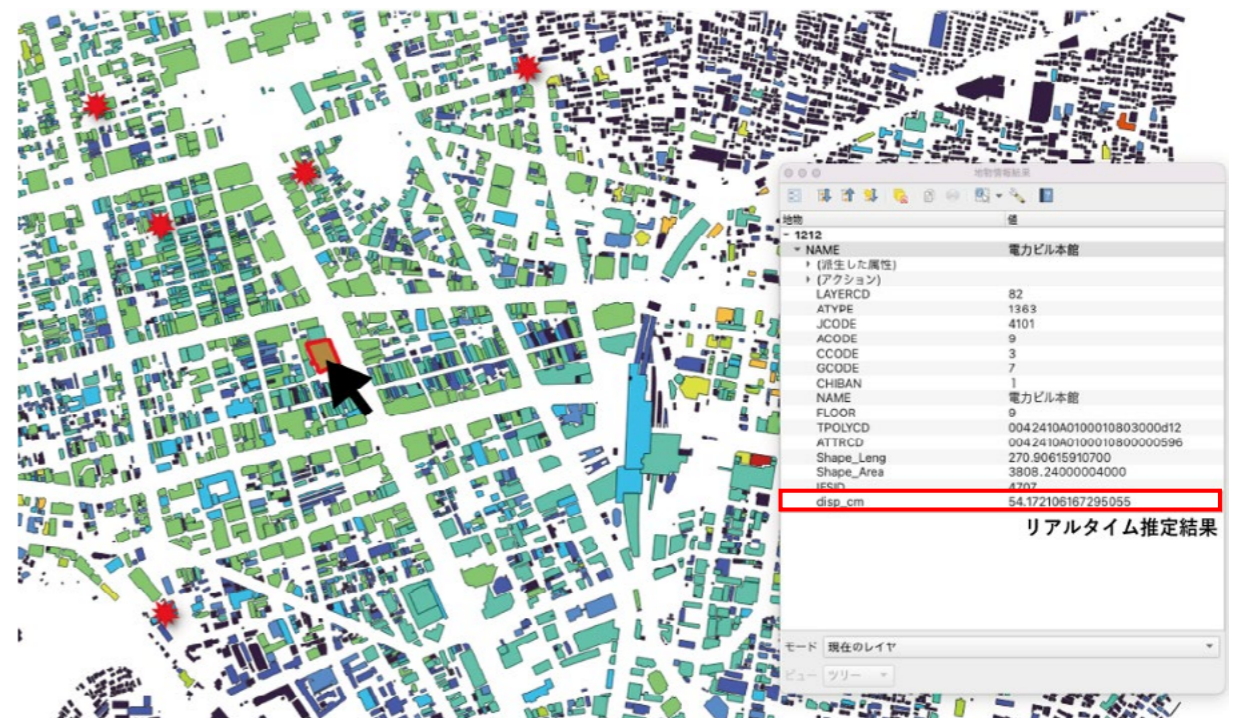


図22 観測点以外の建物のリスク評価指標(最大水平変位)

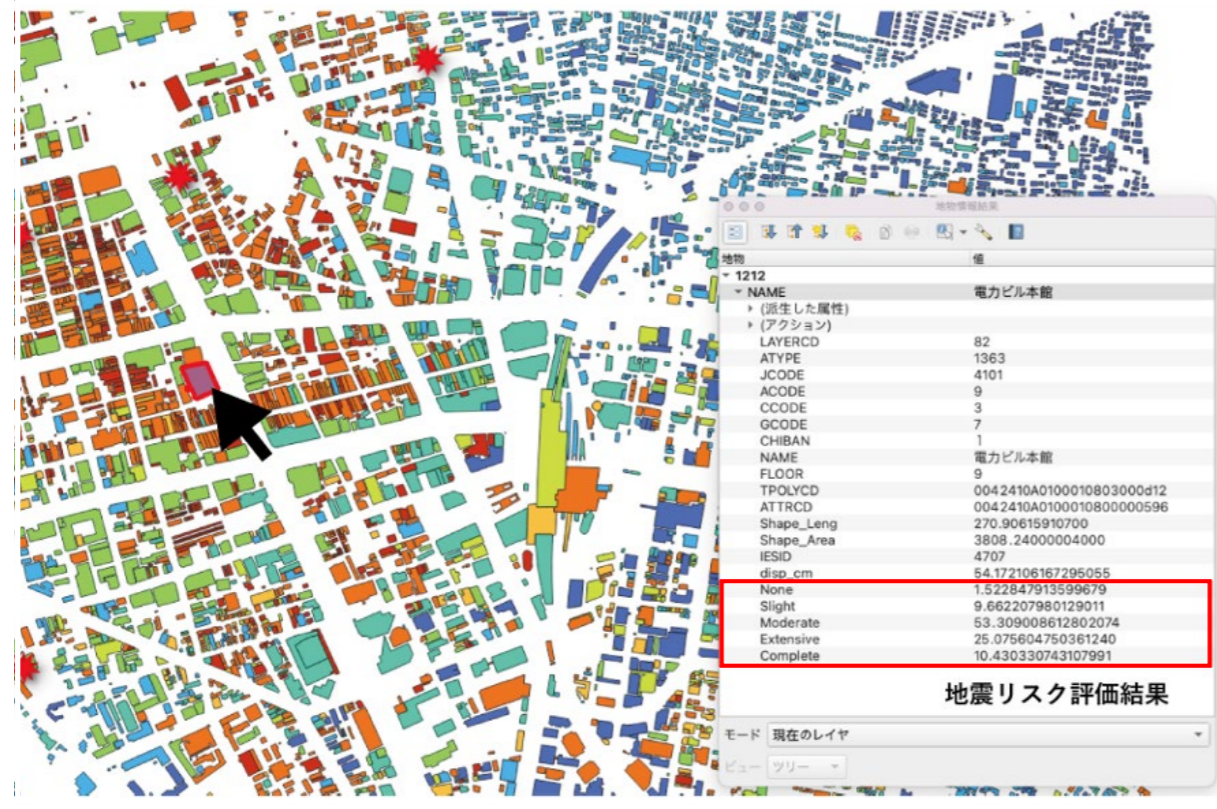


図23 フラジリティ関数による大破の確率分布

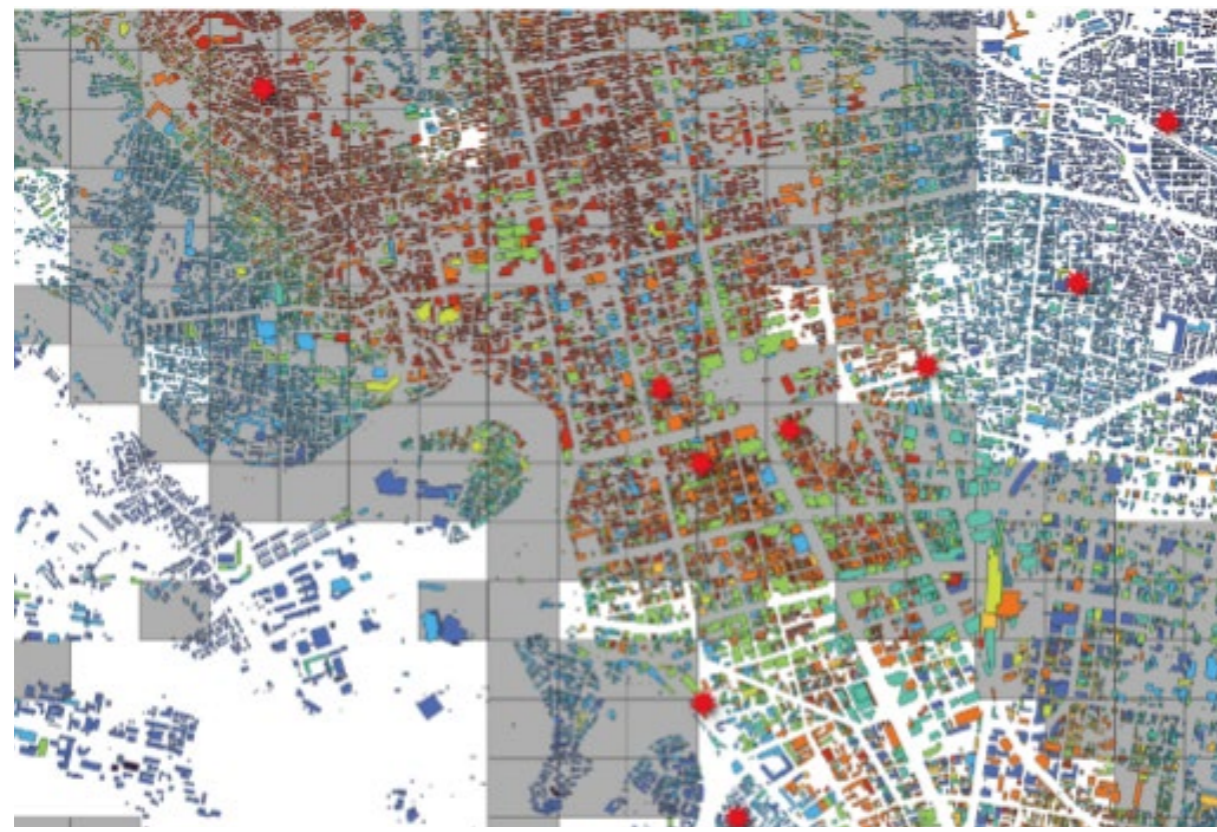


図24 第5次地震被害想定調査結果 (グレー部は震度6以上) との比較

5.0 まとめ

本研究の成果として、都市のレジリエンスを高めるためのシミュレーションと観測を融合した地震被害即時評価技術の枠組み、およびそれを実装した地震リスク評価のプラットフォームであるデジタルツインシステムSAMRRAiについて紹介しました。以下にSAMRRAiの仕様と特徴を整理します。

- 地震リスク評価のためのシミュレーションの入力データの生成と結果の可視化が可能。
- 構造物と非構造物の両方について様々なリスク評価指標を算出可能。また、決定論的リスク評価と確率的地震リスク評価の双方を行うことが可能。
- 地震発生時には、事前に実施したシミュレーションの結果から抽出した共通モードと地震計の観測結果から、対象領域内の全ての建物のリスク評価指標を算出可能。
- 様々なGISデータを読み込んで、それらと独自の評価結果の重ね合わせが可能。

最後に、今後の社会実装に向けた課題についても説明しておきます。これまでに構築した評価の枠組みは、事前に実施したシミュレーションの範囲内で都市全体のリスク評価指標の即時予測が可能です。逆に、シミュレーションの中で想定していない地震については精度よく予測できる保証はありません。

例えば、本研究では、長町-利府断層帯の断層運動に伴う内陸直下型地震を想定しましたが、他の断層による地震に対応するためには、その断層を対象としたシミュレーションを実施する必要があります。また、異なる複数の断層を同時に対象にする場合は、断層によって共通モードが変化する可能性が高く、現状の枠組みをよりロバストなものにするための高度化が必要になります。今後、その高度化についても研究を進めていく予定です。また、もう一つの大きな課題として、入力データの問題があります。特に、表層地盤データが問題です。本研究で対象とした仙台市の一部地域については既存の地下構造3次元モデルが存在していたために、対象地域として設定することが出来ました。しかし、他の地域に適用する場合、必ずしも既存の情報から表層地盤データが入手できるわけではなく、そのデータの作成には費用と労力が必要です。この問題は、本研究だけの問題ではなく、シミュレーションによる広域の災害リスク評価に共通の問題です。現代では、様々なデータの整備が進んでいますが、地盤のデータについても、容易にシミュレーションの入力データを生成できる形でデータベースが進むことを期待します。

参考文献

- 1) J-SHIS 地震ハザードステーション: <https://www.j-shis.bosai.go.jp>.
- 2) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長: 地震のスケールリング則に基づいた大地震時の強震動予測: 統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 430, pp.1-9, 1991.
- 3) 檀一男, 佐藤俊明: 断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 63, No. 509, pp. 49-60, 1998.
- 4) J-SHIS 地震ハザードステーション (統計的グリーン関数法計算プログラム): <https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/JSHIS2/download.html>
- 5) Hori, M. and Ichimura, T.: Current state of integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster, Journal of Seismology, Vol. 12, No. 2, pp. 307-321, 2008.
- 6) 米国連邦緊急事態管理庁FEMA: Earthquake model, Hazus-mh 6.1 technical manual, 2024.
- 7) 宮城県: 第五次地震被害想定調査最終報告書, <https://miyagi.dataeye.jp/resources/819>

発行者

東北大学災害科学国際研究所

日本工営レジリエントシティー技術実装共同研究部門

寺田賢二郎 教授

森口周二 教授

櫻庭雅明 特任教授 (日本工営株式会社 中央研究所長)

野島和也 特任准教授 (日本工営株式会社 中央研究所スペシャリスト)

協力

東京海上ホールディングス株式会社

発行日

2026年1月



TOKIO MARINE
GROUP