

# 拡張クリギング法による建物毎の地震被害推定システムの開発に関する基礎的研究

## Basic Study on development of the earthquake disaster information system estimating hazards and risks at arbitrary point based on advanced kriging method

林 敬三\*・巢 宇燕\*・太田 好規\*・漁 夏輝\*  
中村 和稔\*\*・菅井 径世\*・森 保宏\*\*\*

LIN Jinsan\*, CHAO Yuan\*, OTA Yoshiki\*, SUNADORI Natsuki\*,  
NAKAMURA Kazunori\*\*, SUGAI Michiyo\* and MORI Yasuhiro\*\*\*

\*名古屋産業大学・\*\*尾張旭市消防本部・\*\*\*名古屋大学大学院

\*Nagoya Sangyo University, \*\*City fire Department, \*\*\*Nagoya University

Abstract: The present paper is to be preparing the establishment of an earthquake disaster information system based on advanced Kriging method. The system can estimate seismic risks at arbitral point immediacy after the earthquake occurrence. Also the system can be utilized for anticipated focal region of any earthquakes. As a result the system is to be utilized as real time information system to aid the emergent investigations, to make plans of prior countermeasures, and to develop the user's skills as a training simulators.

**Key Words:** disaster information system seismic hazard; risk analysis, Kriging Analysis, Program Control (被害情報システム、地震ハザード、リスク、クリギング解析、プログラム制御)

## 1. はじめに

### 1-1. 概要

本研究の目的は、建物毎に地震動および建物被害を、リアルタイムで推定し、その緊急対策に資するためのシステムを開発することにある。

リアルタイム地震被害推定システムは大きな可能性を秘めている。地震災害に対しては、発生時（リアルタイム）に利用できる対策手段よりも、事前対策において利用できる対策手段を講じた方が災害を大幅に軽減できることは周知の事実である。しかしながら、事前に利用可能な対策費も無限であるわけではない。予測される地震被害に対して費用対効果の

点でも最適化を図る必要があるが、地震という現象は、頻繁に発生するものではなく、大災害に至るケースはさらに少ない。同時に、地震動の大きさや被害の推定には大きな不確実性が伴うため、事前および発災時の最適行動を、精確に予測することは非常に困難である。こうした状況において、建物毎という詳細さでリアルタイム被害推定システムを開発すれば、システム内のバーチャル空間において、予測されるさまざまな地震や、被害状況を「発生」させることによって、発災時の最適対応や多様な事前対応がどのような効果を発揮するか確認することができるようになる。この際には、「発生」させる地震動や被害状況を多様なものにする 것도容易であり、同時に同じ状況を繰り返し「発生」させることによ

って、対応者の能力によって、被害状況がどのように変化するかを検証することも可能である。こうした検証結果は事前対策の最適化に利用できる。本研究において開発を目指すシステムにおける地震動推定法は、想定震源に対しても有効に活用できるものである。

菅井ら<sup>[4]</sup>は、すでに、上記のような性能を持ち合わせた地震被害予測法に関する理論を展開しており、システム化が可能な状況に至っている。その成果は、尾張旭市の被害推定事業において平成26年度事業から実用に供されている。

そこで、本研究では、そのシステム化に関する本格的な事業を開始すべく活動を行ったので、その結果を報告する。

## 1-2. メッシュ単位の地震動推定法（従来法）

従来の仮想地盤モデルを利用して地震被害推定をする方法では、地震同強さは50m～500m四方のメッシュ単位で算出されていた。

しかしながら、地震動はメッシュ内で一様ではない。建物所有者が、その建物固有の情報として認識し耐震改修の促進や防災意識の向上につなげるためにも、また、地震発生後の適切な初動活動のためにも、地震動強さを精度よく建物ごとに評価することが望まれる。将来、開発を目指している地震災害のための訓練シミュレーターを構築するためにも、建物ごとの被害推定ができるシステムを設計することが最重要ポイントの1つとなる。

したがって、構築を目指すリアルタイム地震被害推定システムには、メッシュという面ではなく、点で推定することができる手法を用いることとしている。この手法では、精度を保持しつつ大幅なコストダウンすることが可能であり、かつ新しいデータを容易に取り込むことができるため、従来の仮想地盤モデルを利用するメッシュ単位の地震動推定法よりも優れた方法となっている。

## 1-2. システム開発のために利用した想定震源例と地震動パラメタの事例

上記の地震動推定法を利用するには地盤応答解析等による表層地盤の伝達関数の空間分布を推定し、データベース化しておく必要がある。尾張旭市では、地震被害想定事業の中で、東海・東南海の2連動地震、東海・東南海・南海の3連動地震と、東海・東南海・南海・日向灘の4連動地震の陸側における震

源と、高浜・猿投断層を震源とする地震に対して表層地盤の地盤応答解析を実施している。特に、東海・東南海・南海・日向灘の4連動地震に関しては、平成26年5月に愛知県から被害予測の調査結果が報告されている。この報告によると、南海トラフで繰り返し発生する地震について「過去最大モデル」と「理論上最大モデル」によって想定している。「過去最大モデル」は、南海トラフで繰り返し発生している地震の中で、発生したことが明らかで規模の大きいもの（宝永、安政東海、安政南海、昭和東南海、昭和南海の5地震）を重ね合わせたモデルである。

「理論上最大想定モデル」は、千年に一度あるいはそれよりもっと発生頻度が低いものであり、南海トラフで発生する恐れのある地震の中で、あらゆる可能性を考慮した最大クラスの地震を想定している。この「理論上最大想定モデル」は陸側ケースと東側ケースの2つのケースに分けて検討している。本報告では、以上の6震源モデルに対して行った地盤応答解析の結果から表層地盤の伝達関数の空間分布を求めた結果を用いてシステム開発を行う。すなわち、著者らは、解析対象である尾張旭市とその周辺部の領域内において密に採集されたボーリング等の表層地盤データと、想定地震を用いた当該地点での表層地盤における伝達関数、および拡張クリギング法によって全建物地点等の任意地点での伝達関数を周波数毎に推定することで、限られた地震観測地点から工学的基盤面におけるスペクトル評価と空間補間計算を経て、任意地点での地表面における加速度フーリエ振幅スペクトルを推定する手法を利用する。

表層地盤の伝達関数の空間分布が精度よく推定できれば、リアルタイムにおける地震被害想定システムやその他の災害対応システム開発が現実的なものとなり、発災時のみならず事前対策の最適化を図ることも可能となる。

令和元年度、水谷ら<sup>[10]</sup>は、地震被害想定に利用することができる固有依存型SI値の観測記録と、推定値の比較をもとに、想定震源による地震動に対しても、リアルタイムに観測された振動に対しても、適切な地震計の配置により、精度よく地震動を推定できることを証明し、日本建築学会構造系論文集において公表している。

図1は、この手法によって推定された地震動マップの事例である。図は、上記の6震源に対する最大速度（PGV）の空間分布を示している。PGVは、建

物の被害推定を行う際に利用される代表的な地震動パラメタの1つである。

さらに、このシステム開発で利用する地震動強さの推定法では、図1に示すような建物ごとのPGVといったスカラー値のみでなく、図2に示すようなスペクトルなどのベクトル値を推定することも可能で

ある。すなわち、スペクトル値として推定されたより詳細な地震動強さにより、より高精度の被害推定が可能となる。

#### 1-4. 既往の情報システム例

地震被害推定システムとしては、阪神・淡路大

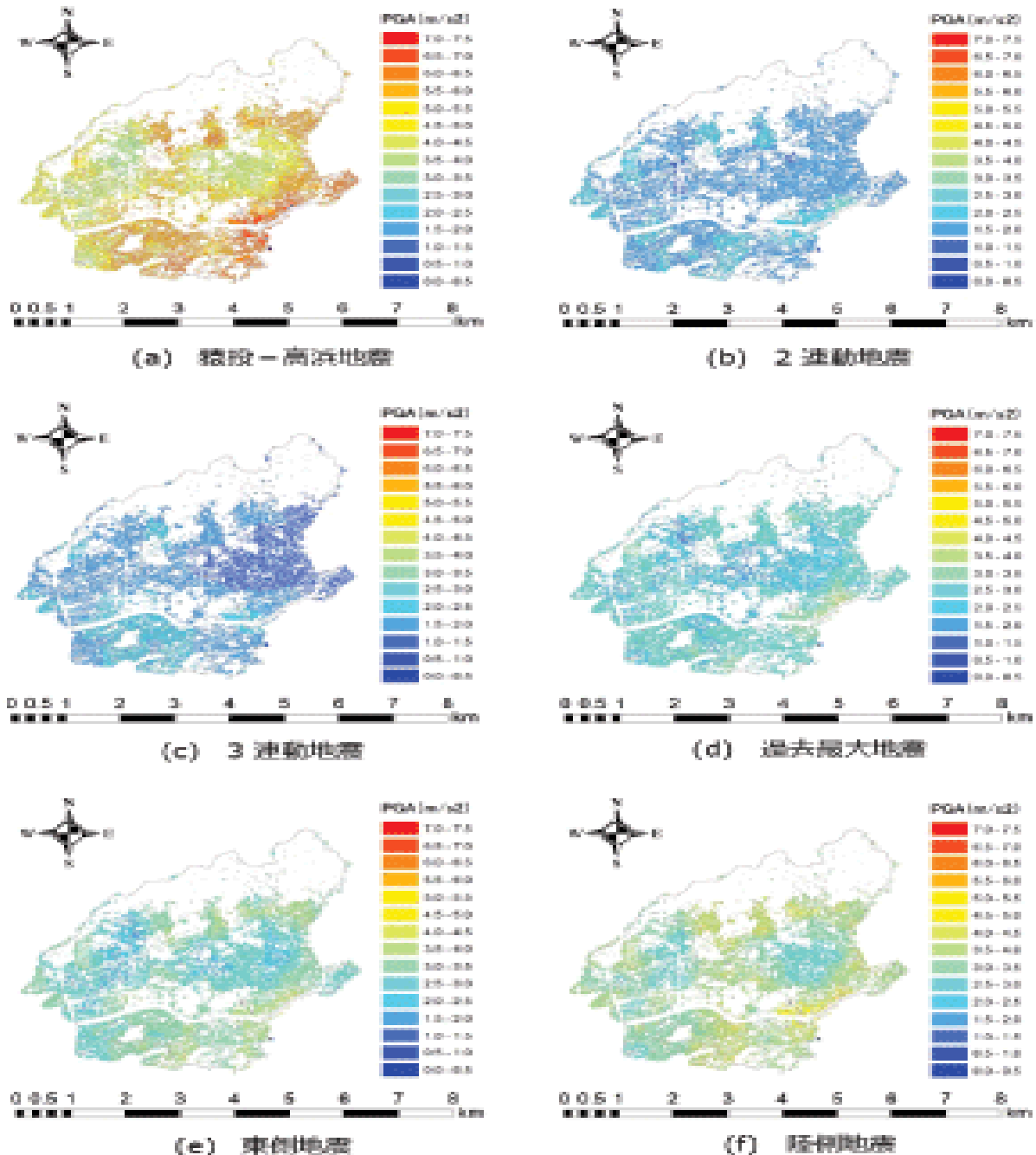


図1 尾張旭市内の建物地点ごとの地震ハザードマップ (PGV)

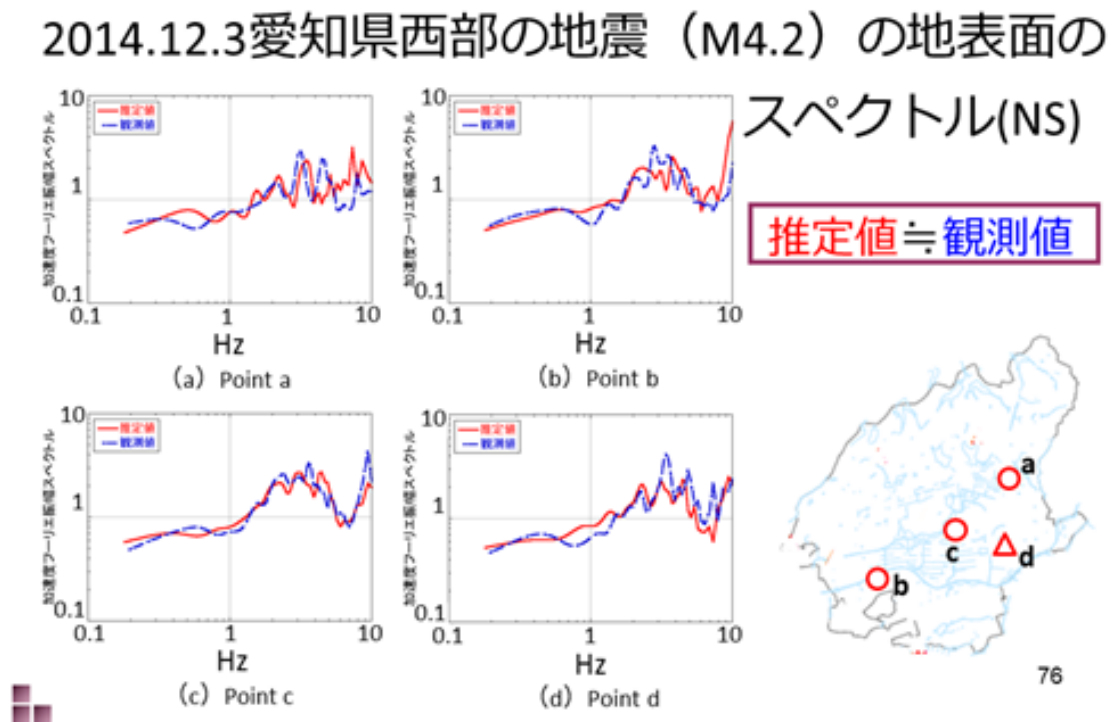


図2 尾張旭市内の地震計設置地点で推定した地表面の地震動スペクトルと観測値の比較  
(2014年12月3日発生 of 愛知県西部の地震)

震災後、兵庫県が導入した災害情報システムや、SIP4Dを参考にすることができる。SIP4D<sup>[11]</sup>とは、内閣府が主導する戦略的イノベーション創造プログラムの一環として、国立研究開発法人防災科学技術研究所(防災科研)と株式会社日立製作所が、2014年より共同で研究開発を進めてきた基盤的防災情報流通ネットワークである。2019年3月のSIP第1期開発期間終了にともない、公的機関の災害対応支援に資することを目的として防災科研が試験運用を行いつつ、研究開発を継続している。SIP4Dは、災害対応に必要とされる情報を多様な情報源から収集し、利用しやすい形式に変換して迅速に配信する機能を備えた組織を越えた防災情報の相互流通を担う基盤的ネットワークシステムである。SIP4Dとの連携をすることにより様々な防災機関が地震災害情報を同時に共有できるようになるため、迅速な救助活動を実施することも可能となる。本研究では、このシステムを念頭に市町村や都道府県といった自治体で利用可能なシステム開

発を目指す。

## 2. 任意の点でのリアルタイム地震動の推定法

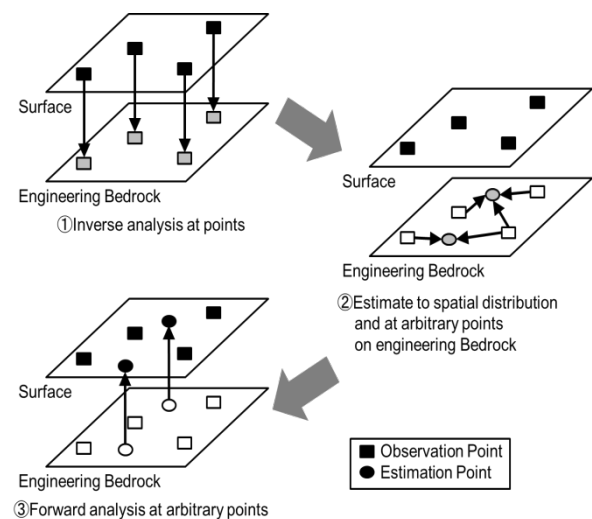


図3 任意地点の計測方法

図3に、本研究で用いる観測地震波から任意地点における地震動を推定する方法を示す。この方法では、予め地震計設置地点と推定する任意地点での伝達関数を求めデータベース化しておく必要がある。このデータベース化の構築において、伝達関数の空間分布を推定するには上記の拡張クリギング法を用いることとする。図2に示すように、尾張旭市の事例では、最初におおよそ1km四方に1台の密度で地表面に地震計を設置し、得られた観測記録から伝達関数による逆解析を利用（増幅率の逆数を乗ずる）ことによって同地点での工学的基盤面における地震動を推定する。続いて工学的基盤面における任意地点での地震波の空間分布を推定する。最後に、これに当該地点での伝達関数による順解析を利用（増幅率を乗ずる）すれば、任意地点での地表面における地震動強さを推定することができる<sup>[10]</sup>。

### 3 システムの構築

現在検討中のシステムの処理手順について述べる。図4には、地震が発生して地震が発生し被害の予測を確率化しシステムを終了するまでの流れを示した。

① 地震発生時に地震を検知し、システムを稼働させる。このためには、予め地震観測網を構築しておかなければならない。気象庁等が所有している地中に埋められている地震計のみでなく、図1に示したような地上に設置した地震計を増やして使用することでコストを削減しながらも、高精度な地震動推定を期する。

② 地震による建物の倒壊確率を防災マップに表示させるための計算プログラムをここに組み込んでおく。このプログラムは上記の拡張クリギング法を利用し、建物ごとの地震動推定を行う。また、推定した地震動強さと建物の耐震性から被害

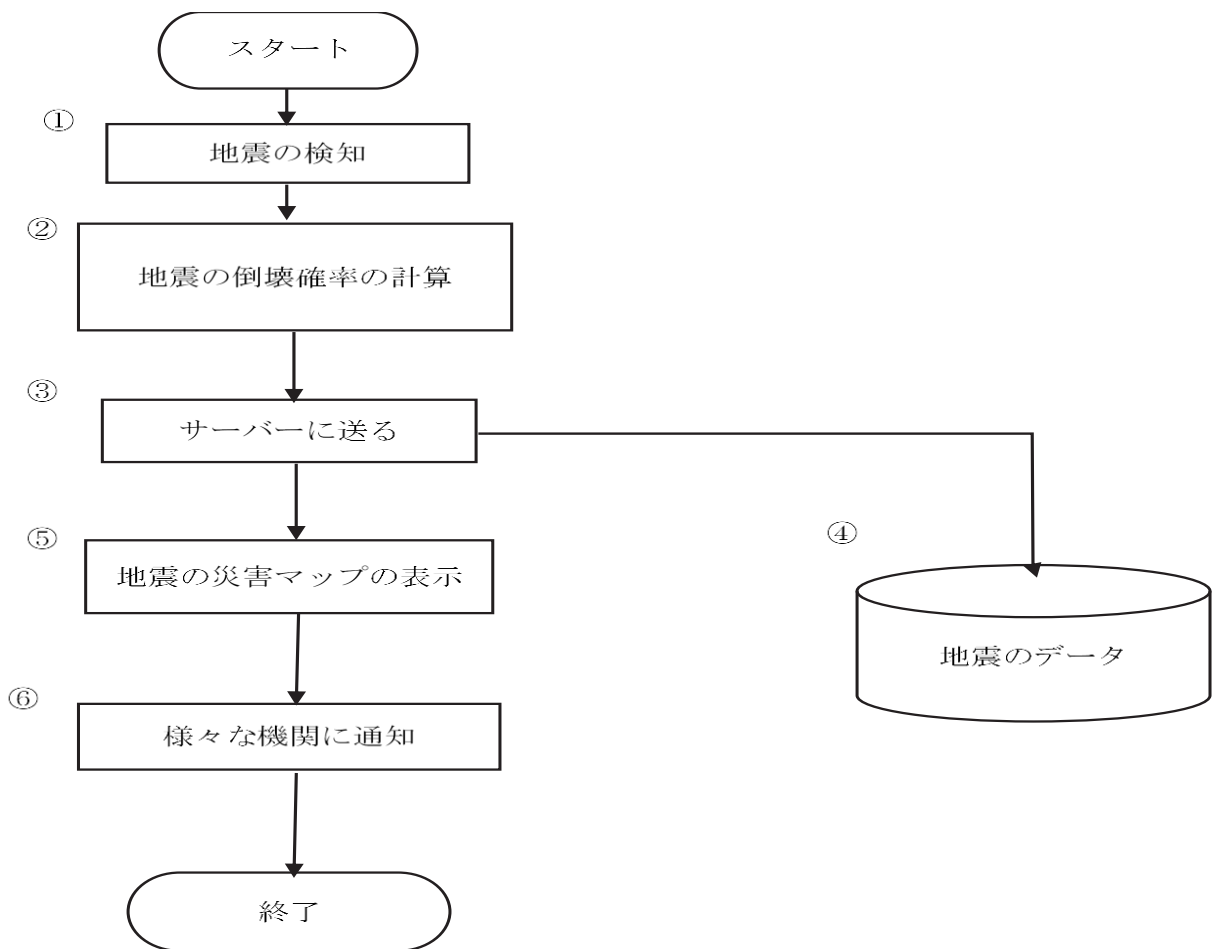


図4 構築するリアルタイム地震被害想定システムのフロー



を推定するプログラムを組み込むこととなる。さらに、以上のプログラムで利用する地盤の伝達関数のデータベースおよび建物の耐震性に関するデータベース、建物の利用者数等に関するデータベースも組み込みとする。

④ データベースには、発生した地震を将来活用するため、地震情報を詳細に記録する。

地震による倒壊確率等の地震災害情報およびその集計結果などを地理情報システムやグラフなどに表示するアプリケーションを付帯させる。これにより発生した地震災害への対策を実施できるようにする。

⑤ 防災マップにはどの建物が倒壊し、幹線道路のどの地点が通行不可となっているかなどの情報や、避難所などの収容状況、混雑状況などの、発災後に得られる情報も表示される機能を付帯させる。これにより安全に避難所まで移動ができ、どの避難所にどれほどの人数がいるかを確認できるようになる。

⑥ 各種防災機関にどの場所で建物が倒壊しているか、人が建物の下敷きになる等の事由により発生した負傷者の位置情報や、負傷の状況、さらには救急車両の位置情報や、ドクターヘリの着陸可能位置なども表示させる。こうした情報共有により、捜索活動や救助活動を速やかに行い、被害を軽減させる。同時に、これらの被害情報は、国、都道府県、市町村などの行政機関、消防などの機関と共有するための通信システムも付帯させ、より効率的な緊急対応を可能とさせるとともに、避難生活、復旧、復興作業を迅速かつ効率的に実施するために利用する。

実際に阪神・淡路大震災では約25万棟の住宅が

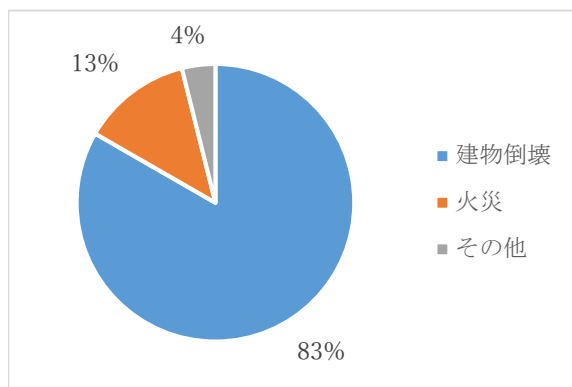


図5 阪神淡路大震災の死因別割合  
阪神淡路大震災による人身被害の実態<sup>[12]</sup>より

全半壊し、6434人が犠牲になった。図5に示すように、建物の倒壊により下敷きになって死亡された方が、5147人であったと報告されている。怪我をされたり、避難所生活が必要になったりされた方の総計はこの数字を大きく上回っている。これだけの被害が発生した場合、安否確認、捜索活動、救助活動にはかなりの時間が必要となるものと考えられる。しかし、システム化をすることで安否確認が避難所で容易にとれ、捜索範囲が広範囲のものを狭めて捜索することが出来るため時間を減らすことができる。

ただし、このプログラムを作製するにあたっては、様々な仕様を決めていかなければならない。例えば、図4のフローチャートのスタートにおいても、地震が発生する際まで、常時、システムを稼働させておくのか、地震が発生するとシステムが起動する仕様としておくべきかなど、実際の運用者と利用者の利便性によって、設計変更しなければならない機能がある。このような様々な利用者の利便性によって設計変更しなければならない仕様は、図のフローの各所に残された課題である。

システム仕様については、愛知県のもつ災害情報システムとの連携や、他の市町村および国や県をとおして自衛隊等との広域連携も視野に入れながら、構築していくことも重要課題の1つである。

さらには、発災直後の緊急対応時における情報把握のために利用すべき最適システムであり、直後からの捜索活動、救急活動のためのシステム機能を持たせることも重要である。避難者やその支援者のための情報システム機能を持たせることによって、過去の地震災害発生時には、後手後手に回ってしまっていた災害対応活動を先手先手でを行うための情報システムとならなければならない。これは、緊急時の後で課題となる復旧、復興活動への最適支援を行うことのできる情報システムとすべきであることも意味している。本システムによって訓練シミュレーターを作成すれば、事前準備の最適化にも利用可能である。

以上のように、本研究で目指している地震災害システムにおいては、建物毎、任意地点での被害想定が可能な理論に基づいて、様々な機能、高度の性能が要求されることを念頭に、完成時には、操作性がよいことを条件としつつも、複雑なシステムとなることが予想される。報告者らは、こうした困難な課題に答えるべく、システム構築に関

する課題を1つ1つ整理し、課題可決を目指すこととしている。

#### 4 おわりに

本論文では、拡張クリギング法を用いた建物毎の地震動推定法を利用し、これを災害情報システムに組み入れることによって、地震災害の軽減を図ることを目指した。最初に、拡張クリギング法による地震動解析事例を示し、その後、基本となるシステムの流れについて考察した。この結果、システム構築のために解決すべきいくつかの課題点が明らかとなった。本研究で構築を目指す情報システムは、現時点から訓練シミュレーターにも利用することを念頭に置いたため、システム構築に係る課題点のほか、本格的なプログラミングを完成させる前に、訓練シミュレーター構築のための課題点も整理しておくことで、効率よく、高性能、高機能のシステムとシミュレーターを構築することができるものとする。

同時に、本研究の検討結果からも、地震動推定法をシステム化し、プログラム制御することにより、地震の検知から安否確認、搜索活動終了までの所要時間が大幅に減らせることや、避難生活、復旧、復興活動にも大きく寄与することを期待できることも予測できるようになった。さらに、各防災機関と連携することにより迅速な行動や正確な被害状況の確認ができるため被害を大幅に減少させるのではないかと考えられる。

#### 謝辞

本報告における研究成果を挙げるにあたり、尾張旭市から、ボーリングデータの提供のほか、常に暖かく力強いご支援を賜りました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- [1] 平成27年度環境経営研究所共同研究報告書：「尾張旭市で実際に利用された高精度地震動マップの空間統計解析結果、実用化されたハザードマップの統計解析結果とその妥当性、有用性について」、平成28年3月
- [2] 平成28年度環境経営研究所共同研究報告書：「尾張旭市で実際に利用された高精度地震動マップの展開に関する研究クリギング法を用いた工学的基盤面における地震動分布の推定に関する研究」、平成29年3月
- [3] 尾張旭市で予想される地震の予測結果 <https://www.city.owariasahi.lg.jp/kurasi/bousai/bousai/owariasahisideyosousareru.html> , 2015.9 参照 2018.3.3.
- [4] 菅井 径世、水谷由香里、森保宏：クリギング法を用いた建物ごとの地震ハザード推定の実用化、日本建築学会技術報告集 第22巻 第51号, 447-452, 2016年6月
- [5] 菅井径世, 森 保宏, 小川克郎：クリギング法による地震動分布推定の実用化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 707, pp.39-46, 2015.1.
- [6] 例えば, 中部電力株式会社：尾張旭市 地震動・液化調査等委託業務 報告書, 2005.1
- [7] 藤原広行：リアルタイム地震被害推定システムの開発, 地域防災, 日本防火・防災協会, No. 17, pp. 14-17, 2017.12
- [8] 福和伸夫, 林 宏一, 飛田 潤：地盤モデルに基づく2地点間の伝達関数と地震観測記録を用いた任意地点における地震動の推定, 日本建築学会構造系論文集, No. 609, pp. 81-88, 2006.11
- [9] 水谷由香里, 菅井径世, 森 保宏：クリギング法を用いた工学的基盤面における地震動推定に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告書, 第55巻, pp. 189-192, 2017.2
- [10] 水谷由香里, 菅井 径世, 森 保宏, 野津 厚, 水戸部 茂樹：拡張クリギング法による表層地盤における伝達関数の空間分布を用いた任意地点での加速度フーリエ振幅スペクトル評価法, 日本建築学会構造系論文集, 日本建築学会技術報告集 84 巻 758 号 p. 459-467, 2019 年
- [11] SIP4D の 概 念 ・ 基 盤 的 防 災 情 報 <<https://www.sip4d.jp/outline/>>
- [12] 阪神淡路大震災による人身被害の実態 <[https://www2.nhk.or.jp/archives/tv60bin/detail/index.cgi?das\\_id=D0009030267\\_000000](https://www2.nhk.or.jp/archives/tv60bin/detail/index.cgi?das_id=D0009030267_000000)>
- [13] IoT防災システム LONGLIFE AEGiS <<https://www.asahi-kasei.co.jp/j-koho/press/20200108/index/>>