

大都市大震災軽減化特別プロジェクト
平成15年度研究成果報告書

地震被害情報の統合処理に基づく緊急対応支援システムの開発

平成16年3月

研究代表者

岐阜大学工学部
能島 暢呂

3.2.4 地震被害情報の統合処理に基づく緊急対応支援システムの開発

目次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5カ年の年次実施計画
- (e) 平成15年度業務目的

(2) 平成15年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 地震動情報による被害早期把握に関する開発
 - 1) 業務の実施方法
 - 2) 業務の成果
 - 3) 結論ならびに今後の課題
- (c) リモートセンシング情報による被害早期把握に関する開発
 - 1) 業務の実施方法
 - 2) 業務の成果
 - 3) 結論ならびに今後の課題
- (d) 異種情報の統合処理による意思決定支援システムの開発
 - 1) 業務の実施方法
 - 2) 業務の成果
 - 3) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

(3) 平成16年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 地震被害情報の統合処理に基づく緊急対応支援システムの開発

(b) 担当者

(研究代表者) 岐阜大学工学部・助教授・能島暢呂

(研究分担者) 岐阜大学流域圏科学研究センター・教授・杉戸真太

岐阜大学工学部・助手・古本吉倫

防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター・
副チームリーダー・松岡昌志

(c) 業務の目的

1995年兵庫県南部地震以降、迅速な被害把握と的確な緊急対応が地震直後の最優先課題であることが強く認識され、図1に示すように、地震動モニタリングによる早期被害推定、広域的な被害把握手段としてのリモートセンシング情報、および、巡回・目視・通報などによる実被害情報などを主たる情報源とするリアルタイム地震防災システムが展開されてきた¹⁾。こうした情報源は、「迅速性」「正確性」「広域同時性」などの面からそれぞれ一長一短があり、相互補完的に有効活用されるのが適切である。しかし単に被害情報を蓄積するだけでは「情報の洪水」を招くばかりであり、「データの一元管理」という平常時における統合化の概念を超えた「統合処理手法」の開発が必要となる。ところが現状では、これらの情報源の連携を密接にするような情報処理手段が整備されていない。

本研究課題では「被害情報の統合処理」という基本理念のもとに、地震動モニタリングに基づく早期被害推定情報と、リモートセンシング情報、ならびに時々刻々入手される実被害情報を統合処理することによって、迅速かつ正確な被害把握を可能とし地震後の緊急対応を支援するシステムを開発するものである。この目的を達成するため、被害把握の手がかりとなる異種情報を合理的に処理するための理論的枠組みの整備に取り組み、ベイズ確率の方法を基本とする逐次処理アルゴリズムを構築するとともに、実務面での利用を前提としたシステム開発を目指す。

ここで開発する「地震被害情報の統合処理に基づく緊急対応支援システム」は、図2に示すように、早期被害推定と実被害情報との間にある時間面・精度面でのギャップを埋めるのに有効な役割を果たすものである。各情報を単独で利用するよりも効果的に被害推定を行うことができ、緊急対応の意思決定に有用な情報を提供することが可能となると期待される。図3に被害情報の統合処理と意思決定支援のおおまかな流れを示す。地震動情報の入手後、数分程度で詳細な震度分布を推定し、10分以内には初期被害把握を行う。その後の実被害情報の入手に応じて被害推定を更新して精度を上げながら、緊急対応の意思決定を支援する。

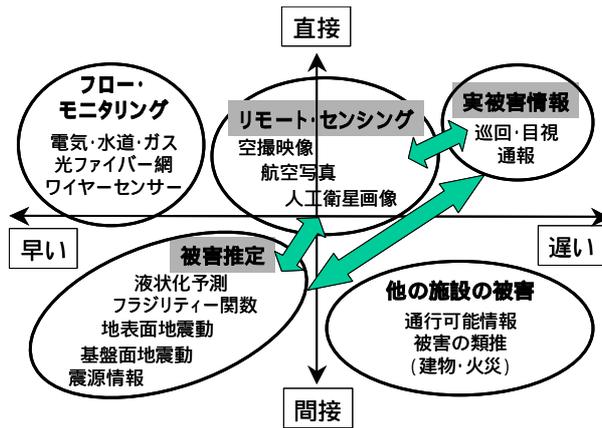


図1 地震被害の早期把握のための情報源¹⁾

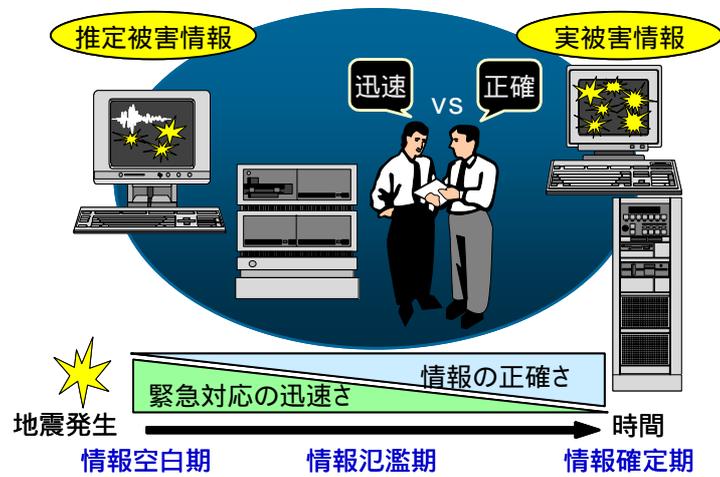


図2 異種情報の「迅速性・正確性」と情報の「空白期・氾濫期」

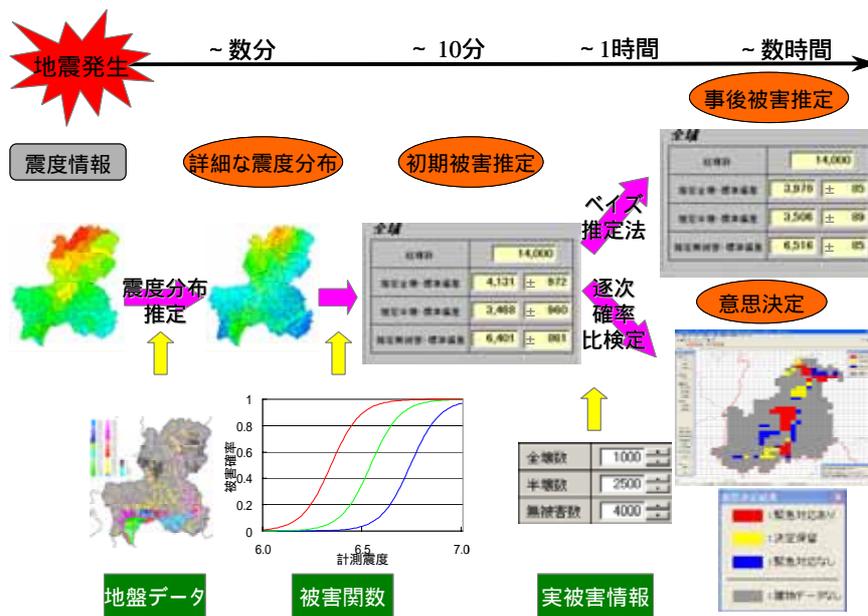


図3 被害情報の統合処理と緊急時の意思決定支援の流れ

(d) 5カ年の年次実施計画

1) 平成14年度(実績):

異種被害情報の統合処理による意思決定支援システムのモジュールのプロトタイプを行い、第2年度以降に予定しているパイロットスタディーの準備を進めた。

- ・ 「工学的基盤面における地震動予測モジュール」および「表層地盤における地震動予測モジュール」に関しては、「EMPR」と「FDEL」のソフトウェアを提供できる体制を整えた。加えて、震度情報ネットワークからの受信情報を用いて、面的震度分布を推定するための検討を行い、震度曝露人口を即時推計するシステムを構築した。「被害関数を用いた早期被害推定モジュール」については、供給系ライフライン機能を対象とした予測モデルを構築した。
- ・ 「人工衛星画像処理・被災地判定モジュール」に関しては、兵庫県南部地震を対象として実施したケーススタディーにより、被災地域の早期検出という利用目的のために人工衛星画像情報と震度情報との統合処理が有効であることを確認することができた。また、将来発生が予想される東海地震、東南海地震、南海地震での被害抽出のため ERS 衛星画像等の基礎データとして収集した。
- ・ ベイズ確率の方法に基づく確率更新と逐次確率比検定のアルゴリズムを用いて、「被害情報の統合処理モジュール」および「緊急対応の意思決定支援モジュール」のプロトタイプを作成した。兵庫県南部地震の被災地域を対象としたデモンストレーションを通じて、震度に基づく被害推定と実被害情報の統合処理による被害の逐次先行予測が有効であることを確認した。

2) 平成15年度:

- ・ モジュール群のプロトタイプ作成と入出力データ仕様等について検討する(継続)。
- ・ 画像データや地盤データの前処理作業を行う(幾何補正, 多府県データの整合化, GIS化)
- ・ モジュール群のプロトタイプによるパイロットスタディーを実施する。
- ・ 兵庫県南部地震および想定東海・東南海地震を対象とした被害情報処理過程および意思決定過程のシミュレーションとその時空間 GIS 表示を行う。

3) 平成16年度:

- ・ モジュール群のプロトタイプによるパイロットスタディーを実施する(継続)。
- ・ 既往地震および想定地震を対象としたパイロットスタディーの成果を踏まえ、開発システムの試験的運用に向けて課題を抽出する。
- ・ 「リスク対応型地域管理情報システム」へのプラグインのためのモジュール群の仕様策定とその構築作業を行う。
- ・ 研究開発成果の中間とりまとめを行う。

4) 平成17年度:

- ・ モジュール群の構築作業(継続)と「リスク対応型地域管理情報システム」へのプラグインを行う。
- ・ ケーススタディーによるプラグインモジュール群の試験的運用を行う。
- ・ 開発システムの本格的運用に向けて課題を抽出する。

5) 平成18年度：

- ・ 「リスク対応型地域管理情報システム」におけるプラグインモジュール群を本格的に運用するとともに開発システムの有効性を評価する。
- ・ 被害情報の統合処理による意思決定支援について提言を行う。
- ・ 研究開発成果の最終取りまとめを行う。

(e) 平成15年度業務目的

初年度に引き続き、異種被害情報を統合処理する意思決定支援システムの全7モジュール（工学的基盤面における地震動予測，表層地盤における地震動予測，各種被害関数を用いた早期被害推定，空撮画像処理・被災地判定，人工衛星画像処理・被災地判定，被害情報の統合処理，緊急対応の意思決定支援）のプロトタイプ作成を進める。加えて，モジュール群のプロトタイプによるパイロットスタディーを実施し，兵庫県南部地震および想定東海・東南海地震を対象とした被害情報処理過程および意思決定過程のシミュレーションとその時空間 GIS 表示を行う。

(2) 平成 15 年度の成果

(a) 業務の要約

異種被害情報の統合処理による意思決定支援システムのモジュールのプロトタイプ開発を進め、一部モジュールについては「リスク対応型地域管理情報システム」²⁾、³⁾への試行的プラグインを行った。さらにこれを用いて、想定地震を対象としたパイロットスタディーを実施し、被害情報処理過程および意思決定過程のシミュレーションとその時空間 GIS 表示を行った。

- 1) 「工学的基盤面における地震動予測モジュール」および「表層地盤における地震動予測モジュール」に関しては、震度情報ネットワークによる観測点震度から面的震度を即時推定する方法の高精度化を図った。「被害関数を用いた早期被害推定モジュール」に関しては、推定震度分布に簡易的な被害推定手法を適用し、不確定性を考慮して木造建物の初期被害推定を実施できるようにした。これらのモジュールについては「リスク対応型地域管理情報システム」に試行的にプラグインし、「被害情報の統合処理モジュール」および「緊急対応の意思決定支援モジュール」と連携をとれるようにした。
- 2) 「人工衛星画像処理・被災地判定モジュール」に関しては、第 1 年度に検討した人工衛星 SAR 強度画像を用いた被災地判定手法の拡張を図った。これまで「無被害地域」と「全壊または大破率 100%地域」との二群判別を基本とする被災地判定を行ってきたが、本年度においては、判別可能な被災ランク数を上記 2 ランクから 7 ランクに増加した。さらに、震度情報と SAR 強度画像情報の統合処理によって、建物の「全壊または大破率」を確率統計的に推定し、その期待値と標準偏差の定量的評価を可能とした。また昨年度入手した中部地方の ERS 衛星 SAR 画像を用いて、2 時期の画像の変化抽出を行い、土地被覆の変化を航空写真により確認して手法の妥当性を検証した。「空撮画像処理・被災地判定モジュール」に関しては、エッジ情報に基づく被害抽出手法の自動処理化について検討し、パラメータファイルと実行ファイルの 2 つで構成されるモジュールに簡素化した。
- 3) 「被害情報の統合処理モジュール」および「緊急対応の意思決定支援モジュール」に関しては、モジュールの動作を支配する 4 種のパラメータが意思決定プロセスに与える影響について詳細に分析し、それらの決定方法について検討した。また「リスク対応型地域管理情報システム」に試行的にプラグインすることによって、上記 1) の 3 モジュール群と連動して動作するプロトタイプを作成した。さらに岐阜県を対象としたパイロットスタディーを行い、時空間 GIS 表示により迅速・正確な被害把握と意思決定支援を目指す本開発システムの有効性を検証した。

(b) 地震動情報による被害早期把握に関する開発

1) 業務の実施方法

次の3モジュールに関するプロトタイプを構築し、「リスク対応型地域管理情報システム」に試行的にプラグインしてシステムの稼働確認と有効性の検証を行う。

- ・「工学的基盤面における地震動予測モジュール」
- ・「表層地盤における地震動予測モジュール」
- ・「被害関数を用いた早期被害推定モジュール」

具体的には、昨年度において検討した面的震度分布の推定手法の高精度化を図るとともに、簡易的な被害推定手法を適用して木造建物の初期被害推定を実施可能とする。さらに想定地震を対象としたパイロットスタディーを行って、統合情報処理システムによる震度分布推定と初期被害把握を行い、「被害情報の統合処理モジュール」および「緊急対応の意思決定支援モジュール」への1次情報を提供するまでの一連の流れをシミュレーションする。

2) 業務の成果

震度分布推定の手段として本システムでは、地震動予測モデル EMPR⁴⁾と地盤震動解析モデル FDEL⁵⁾とを組み合わせた詳細な方法と、震度情報ネットワークによる観測震度を空間補間する高速処理法⁶⁾の二種類を検討している。前者については、「リスク対応型地域管理情報システム」へのプラグインに向けての仕様について基礎的検討を行った。ここでは後者の高速処理法に関する手続きについて説明する。

(i) 震度情報ネットワークからの震度の受信

岐阜県震度情報ネットワークにおいては、岐阜県内99市町村(2002年度末現在)で観測された計測震度が伝達される。これらを受信して基本情報とする。現在、市町村合併が進んでいるが、これに伴って震度観測体制が変更されることはない見込みである。

(ii) 各観測点における工学的基盤レベルでの震度推定

観測点での地表面震度を工学的基盤レベル相当の震度に変換する。この処理を高速化するため、「岐阜県地震被害想定調査」⁷⁾および「岐阜県東海地震等被害想定調査報告書」⁸⁾で用いられた49種類の地盤モデルを対象として、表層地盤の非線形増幅特性を震度増分値として表す変換テーブルを作成した。各地盤モデルの基盤相当層にEMPRによって発生した様々な震度レベルのシミュレーション地震動を各地盤モデルに入力し、FDELによる地盤応答解析を行って計測震度を算出して作成したものである。

なお岐阜県域は2分の1地域メッシュ(約500m四方)単位で41,461メッシュに分割され、それぞれの地形・地質条件などを考慮して適切な地盤モデルが割り当てられている。

(iii) 工学的基盤レベルでの震度の補間推定

震度の面的補間については、未観測地点の半径25km以内で短距離順に5点の観測点を選定し、距離の2乗に反比例した重み付き平均で評価した。なお震源情報(マグニチュードと震源位置)が既知の場合には、距離減衰式からの誤差成分の補間を行うことで精度向上を図る。震源情報が未知の場合には震度自体を補間する。この手続きを県内の全メッシュについて適用して、工学的基盤レベルでの震度分布を推定する。

(iv) 各メッシュにおける表層地盤での震度推定

任意地点での基盤面震度が求められると、前述の変換テーブルを用いて、当該地点での地盤モデルの震度増分値を加えることによって地表面震度を算出する。この手続きを県内の全メッシュについて適用して、面的震度分布の即時推定を行う。

以上の手続きを担う「**工学的基盤面における地震動予測モジュール**」および「**表層地盤における地震動予測モジュール**」に関しては、「リスク対応型地域管理情報システム」に試行的にプラグインを行い、想定地震を対象としたパイロットスタディーを行った。一例として、想定関ヶ原 - 養老断層地震 ($M_j = 7.7$) を対象としたケースを示す。図 4 は「リスク対応型地域管理情報システム」で岐阜県領域を表示したものである。断層は岐阜県南西部の三重県との県境付近に位置している。図 5 は地震動シミュレーションによる予測震度を用いた仮想的な震度情報を受信した画面を示しており、図 6 は震度情報表示部を拡大したものである。これに基づいて、上記手順により求めた市町村震度を図 7 に、工学的基盤面での面的推定震度を図 8 に、地表面における面的推定震度分布を図 9 に示す。距離減衰特性および地盤増幅特性を反映した推定結果となっている。

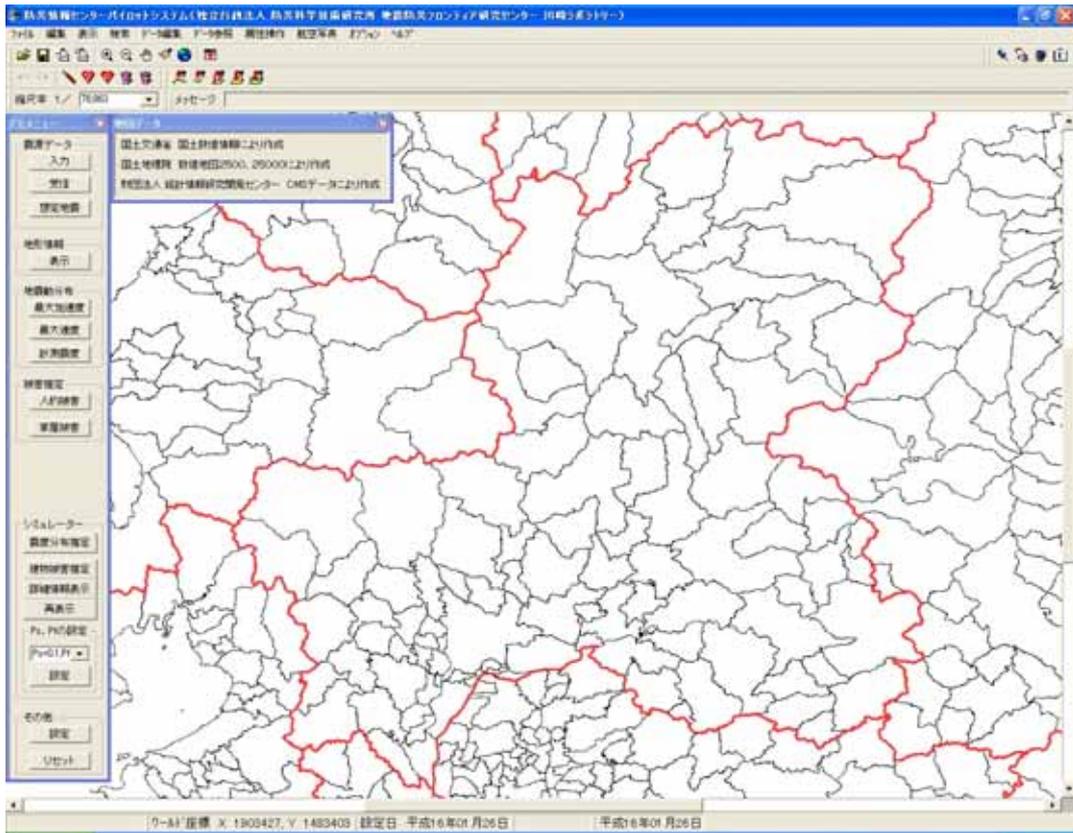
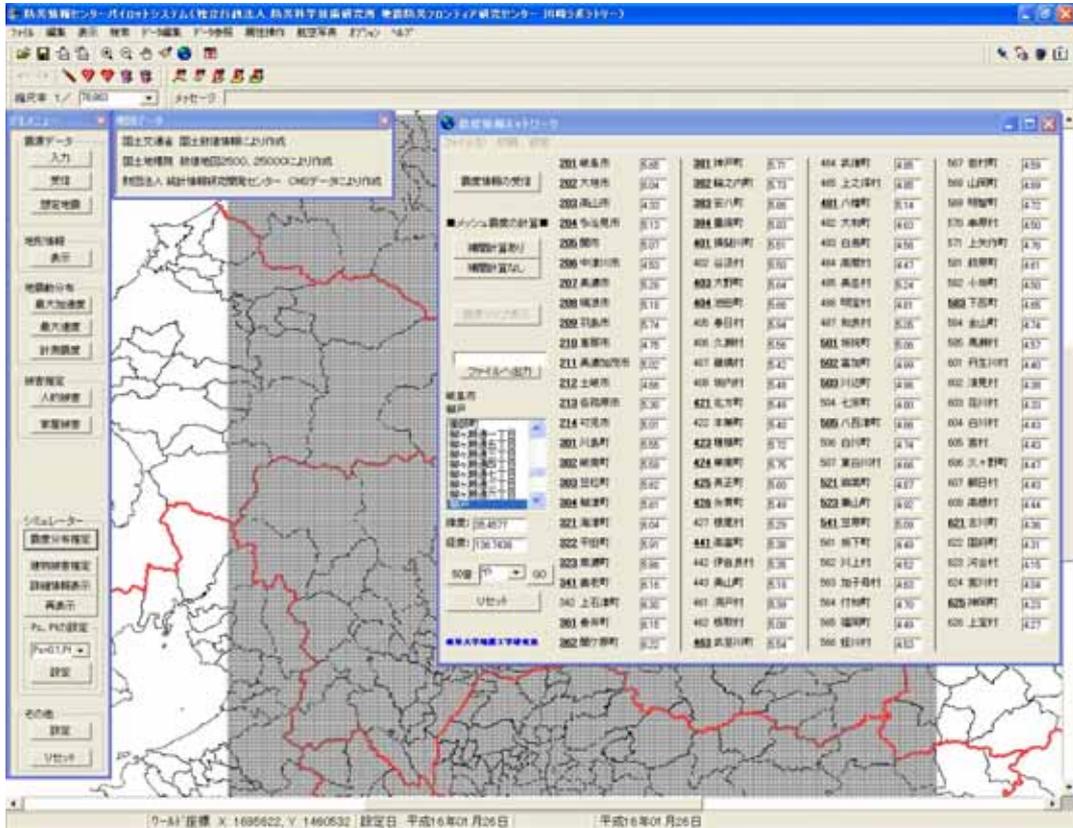


図4 「リスク対応型地域管理情報システム」における岐阜県領域の表示



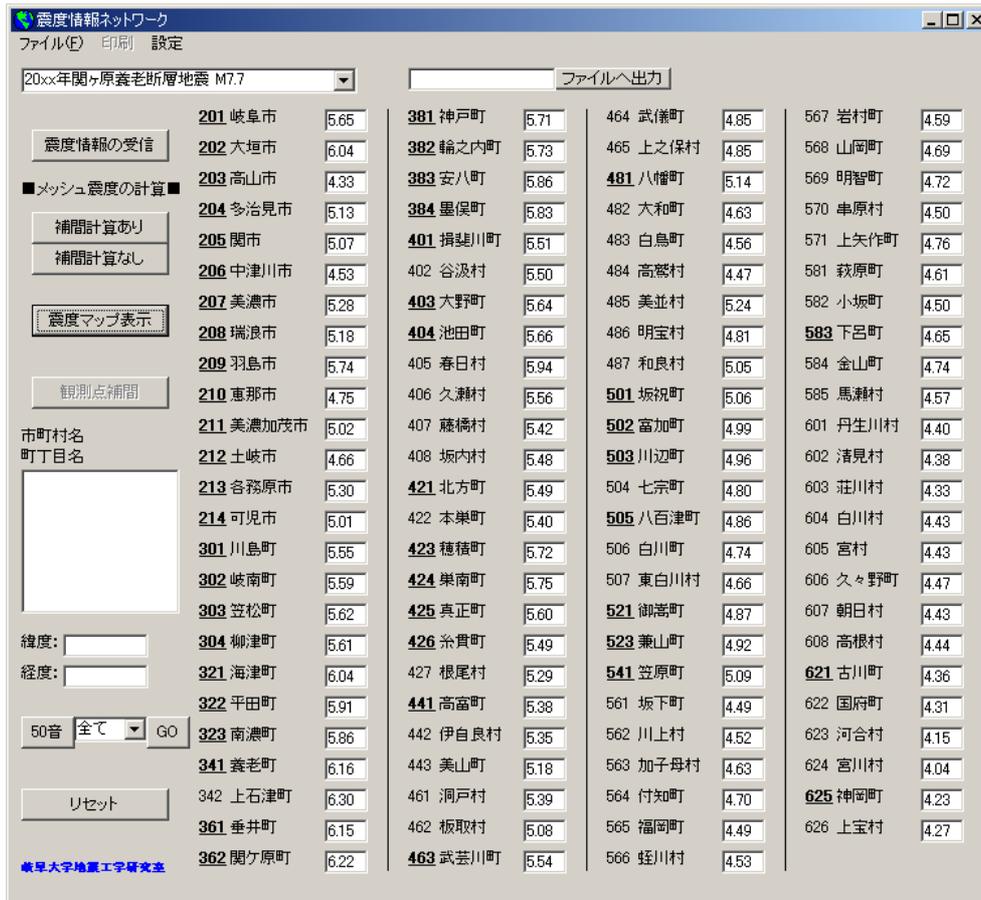


図 6 県内の各市町村から受信した震度情報の表示部

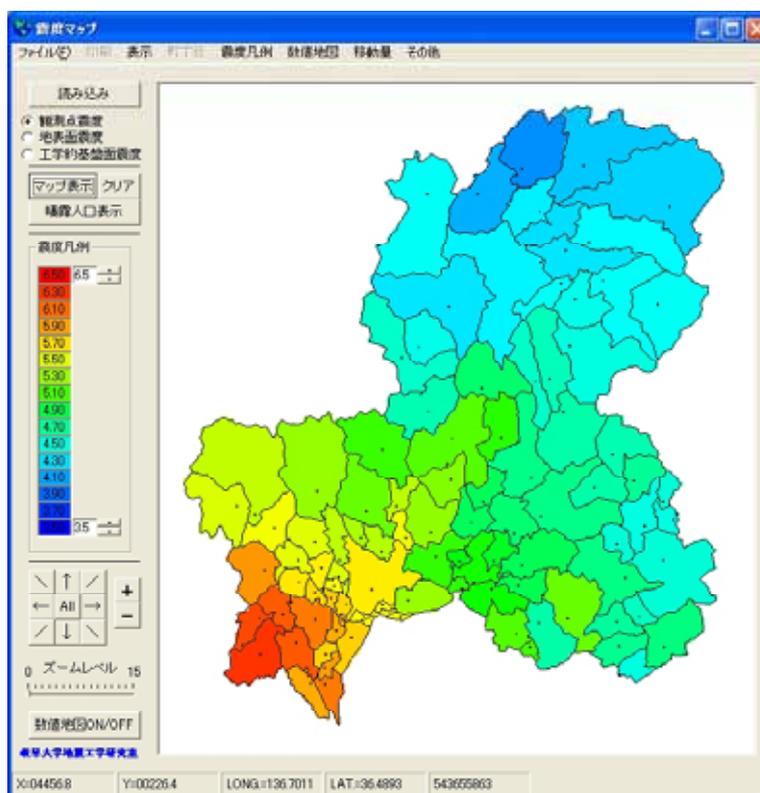


図 7 各市町村における観測点震度

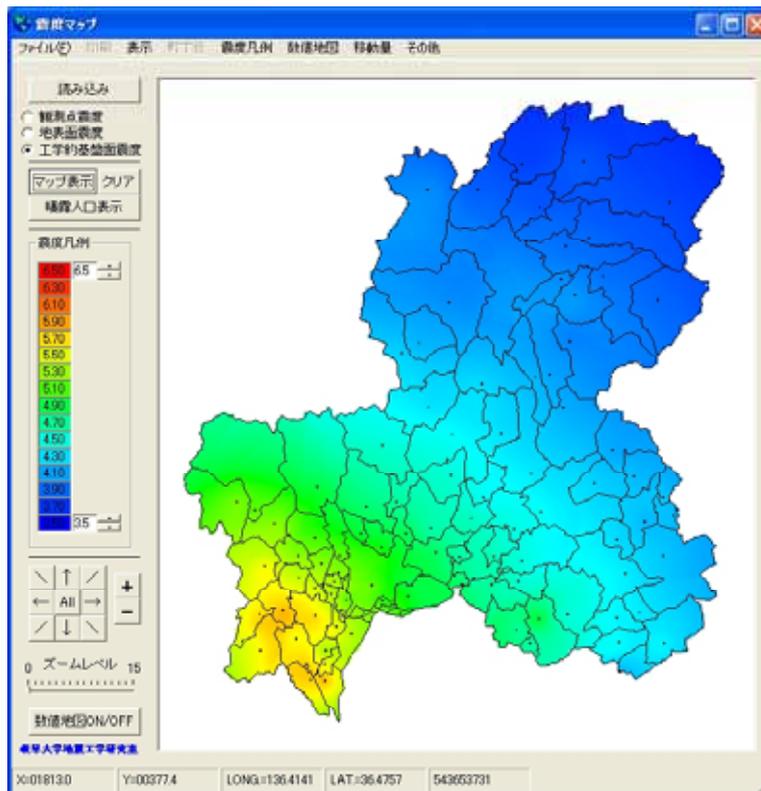


図 8 工学的基盤面における面的推定震度分布

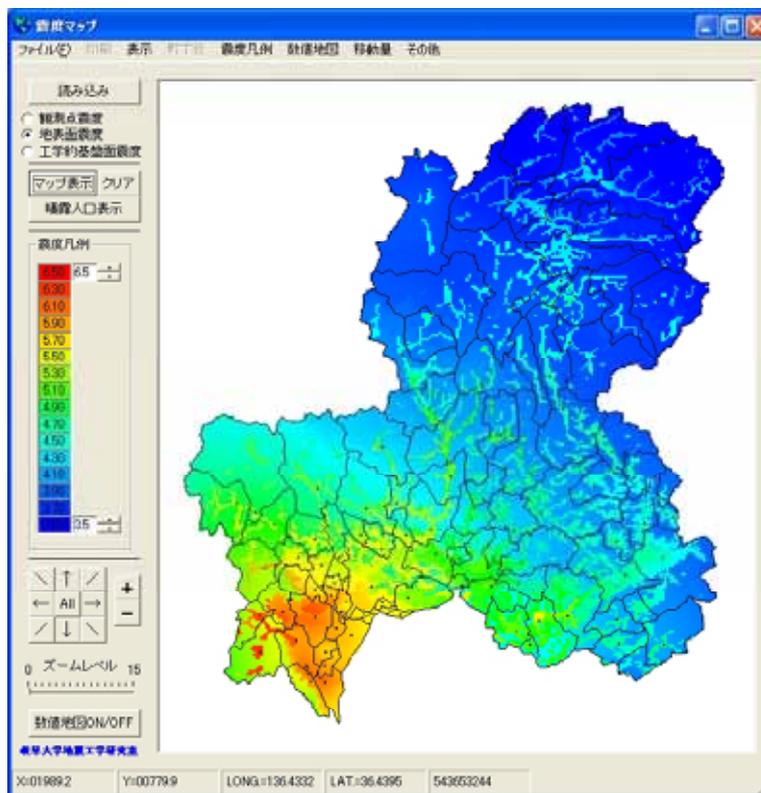


図 9 地表面における面的推定震度分布

「被害関数を用いた早期被害推定モジュール」は、上記のようにして推定される震度を利用して、各種の被害関数を適用することによって初期被害推定を行うものである。本年度においては、木造建物を対象としたモジュールを構築することとした。

木造建物の被害予測に関しては、「岐阜県地震被害想定調査」⁷⁾および「岐阜県東海地震等被害想定調査報告書」⁸⁾の手法を踏襲した。表 1 に示すように、木造建物は建築年代と屋根の重量種別の組み合わせに応じて、耐震性の低い順に A, B, C, D の 4 ランクにグループ分けされている。これらの 4 ランクそれぞれについて、全壊および半壊の被害関数が設定されている。計測震度の関数として表示された全壊の被害関数を図 10 に示す。全壊率 50%に相当する計測震度は、耐震性ランク A, B, C, D の順に、6.25, 6.4, 6.5, 6.7 である。

木造建物データについては、「岐阜県東海地震等被害想定調査報告書」⁸⁾における作業過程で整備されたデータセットを用いた。被害想定における集計単位は 2 分の 1 地域メッシュ（約 500m 四方）であり、木造建物棟数もこれにあわせて取りまとめられている。建物は用途別に、1) 住宅系建物、2) 工場・事務所・学校系建物、3) 飲食店・公衆浴場系建物、4) 福祉施設・病院系建物の 4 種類に分類されているが、本研究課題では用途分類については考慮せず、耐震性ランクのみに注目して集計を行うこととした。

次に、メッシュごとの全壊率と半壊率を求める方法について説明する。まず、あるメッシュで推定された震度に基づいて、全壊の被害関数（図 10）と半壊の被害関数を用いて耐震性ランクごとの全壊率と半壊率を求める。この被害率と当該メッシュにおける耐震性ランク別の木造建物棟数を用いて、全壊棟数と半壊棟数を算出する。これらをメッシュ内の全棟数で除すことによって、当該メッシュにおける全壊率と半壊率を求める。

被災ランクを全壊・半壊・無被害の 3 ランクとすると、これらの総和は 100%であるから、任意の被害率の構成パターンは、全壊率・半壊率・無被害率の 3 つの軸からなる三角座標系の 1 点で示される。しかし本研究課題では、その後の情報入手に応じて逐次推定更新を行うために、被害率の構成パターンの不確定性を考慮する。具体的には図 11 に示すように、総和が 100%になる被害率の構成パターン（平均値は全壊率 20%、半壊率 30%、無被害率 50%）を、三角座標系での確率密度関数として表すこととしている。この点については、「(d) 異種情報の統合処理による意思決定支援システムの開発」の項で詳述する。

図 12 は、先に示した想定関ヶ原 - 養老断層地震 ($M_j = 7.7$) の推定震度をもとにして、大垣市における 2 つのメッシュで推定された初期被害推定の結果を示したものである。図 12(a) は非耐震的な建物が多いメッシュ（全棟数 800）で、反対に図 12(b) は耐震的な建物が多いメッシュ（全棟数 126）である。双方の震度は 6.06 および 5.90 であり、いずれも 6.0 前後の値で大差はない。しかし、耐震性および建物棟数の差が顕著にあらわれ、全壊棟数の初期推定値は、(a) で平均 106 棟であるのに対して、(b) ではわずか平均 3 棟となっている。また被害率の不確定性を見込んでいるため、被害棟数の推定値にも幅が与えられている。なおこの段階では、調査は未実施であるので「実被害情報」の欄はすべて 0 となっている。

以上のようにして得られる被害の初期推定結果は、最終的なアウトプットではなく、逐次推定更新のための「一次情報」と位置付けられる。

表 1 木造建物の耐震性のランク 7), 8)

建築年代	~1950	1951~1960	1961~1970	1971~1980	1981~
軽量屋根	A	B	C	D	D
重量屋根	A	A	B	C	D

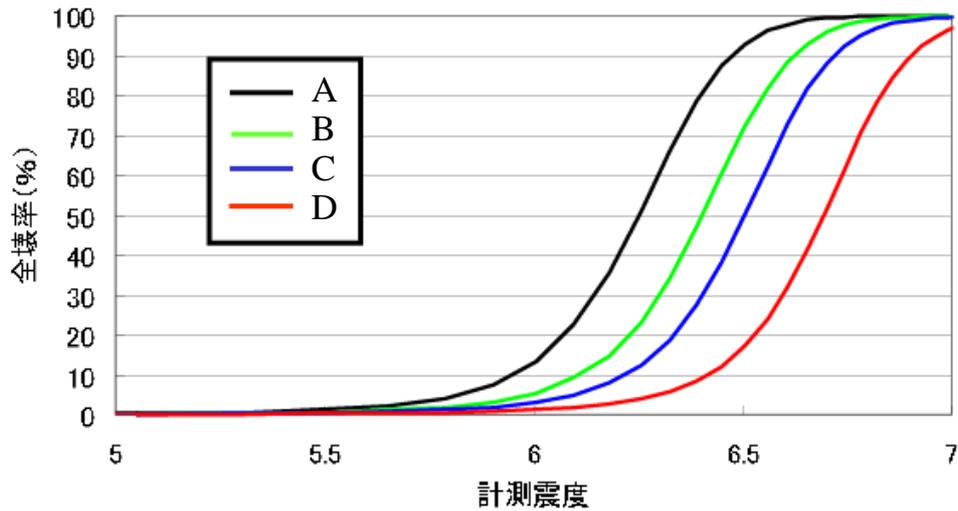


図 10 木造建物の耐震性のランク別に設定された全壊率の被害関数

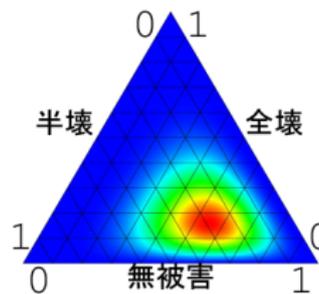


図 11 ばらつきを考慮した被害率の初期推定結果の一例



(a) 非耐震的な建物が多いメッシュ (b) 耐震的な建物が多いメッシュ
 図 12 震度情報に基づく木造建物の初期被害推定 (大垣市内の2メッシュ)

3) 結論ならびに今後の課題

- ・ 「工学的基盤面における地震動予測モジュール」および「表層地盤における地震動予測モジュール」に関しては、昨年度に引き続き、震度情報ネットワークによる観測点震度から面的震度を即時推定する方法について検討を進めた。昨年度に改善課題として挙げた欠損値補完と基盤レベルでの補間に関する問題を解決するとともに、基盤面と地表面での震度変換テーブルを修正した。今後さらに、基盤レベルでの補間と表層地盤の非線形増幅特性の両面で、推定精度の向上を図る。
- ・ 「被害関数を用いた早期被害推定モジュール」に関しては、推定震度分布に簡易的な被害推定手法を適用し、不確定性を考慮して木造建物の初期被害推定を実施できるようにした。今後、RC造などの非木造建物についても、木造建物と同様に初期被害推定を行うことができるよう検討を進め、地域の建物属性に適合したフラジリティ関数の合成を行う。
- ・ これらのモジュールについては「リスク対応型地域管理情報システム」に試行的にプラグインし、「被害情報の統合処理モジュール」および「緊急対応の意思決定支援モジュール」と連携をとれるようにした。プラグイン方法および入出力データに関してはコアチームで仕様策定中であり、その結果にあわせて調整を進める方針である。

(c) リモートセンシング情報による被害早期把握に関する開発

1) 業務の実施方法

昨年度においては、人工衛星 SAR 強度画像を用いて「無被害地域」と「全壊または大破率 100%地域」とを確率統計的に判別することを目的とした被災地判定手法について考察した⁹⁾。また「人工衛星画像処理・被災地判定モジュール」のプロトタイプを構築し、被災地域の早期検出という利用目的に関しては、人工衛星画像情報と震度情報との統合処理が有効であることを確認した。

本年度においては、判別可能な被災ランク数を上記 2 ランクから 7 ランクに増加し、統合処理モジュールの推定精度の向上と適用性の拡大を図ることとした。具体的には、震度情報とその後に行われる SAR 強度画像情報を統合処理することによって、建物の「全壊または大破率」を確率統計的に推定し、その期待値と標準偏差を定量的に評価できるように拡張する。また昨年度に入手した中部地方の ERS 衛星 SAR 画像を用いて変化抽出を行い、土地被覆の変化を航空写真により確認して手法の妥当性を検証する。また「空撮画像処理・被災地判定モジュール」に関しては、エッジ情報に基づく被害抽出手法の自動化について検討し、パラメータファイルと実行ファイルの 2 つで構成されるモジュールに簡素化する。

2) 業務の成果

人工衛星 SAR (合成開口レーダ) は、照射マイクロ波の地表反射 (後方散乱) を測定する能動型センサを用いたリモートセンシング技術であり、広域性・同時性という特徴に加えて、昼夜観測可能かつ全天候型という利点を有する。松岡ら¹⁰⁾は、兵庫県南部地震の前後の ERS/SAR 画像を用いて、下記に示す 7 つの被災ランクの地域からそれぞれ 2000 画素ずつをランダム抽出し、建物の被災が SAR 強度画像に与える影響を考察した。

被災ランク 0:	全壊または大破率	0%	(中央値 0.0%)
被災ランク 1:	同	0.0 ~ 6.25%未満	(同 3.13%)
被災ランク 2:	同	6.25 ~ 12.5%未満	(同 9.38%)
被災ランク 3:	同	12.5 ~ 25%未満	(同 18.75%)
被災ランク 4:	同	25 ~ 50%未満	(同 37.5%)
被災ランク 5:	同	50 ~ 100%未満	(同 75.0%)
被災ランク 6:	同	100%	(同 100%)

その結果、地震前後における後方散乱強度の差分値 (dB) と空間相関係数が、建物倒壊の激しい地域において無被害地域よりも低下する傾向が明らかにされた。図 13 は、後方散乱強度の差分値および空間相関係数の散布図を上記のランク別に示したものである。

本年度においては、このデータセットに回帰判別分析の手法¹¹⁾を適用して回帰判別関数を求め、SAR 強度画像情報の 7 被災ランクに対する尤度関数を構築する。回帰判別分析とは、目的関数が名義尺度ではなく順序尺度や間隔尺度である場合に用いられる判別分析手法の一つで、ここでの問題設定に適切に適用可能な手法である。回帰分析における被説明変数としては、各被災ランクの「全壊または大破率」のレンジの中央値をとることとした。分析の結果、得られた回帰判別関数は次式のようなものである。

$$Z_R = -1.2098 * d - 4.3595 * r$$

ただし， d ：後方散乱強度の差分値(dB)， r ：後方散乱強度の空間相関係数である．二群判別関数においては判別境界を 0 に調整するような定数項が存在するが，多群判別を目的とする回帰判別関数の場合には定数項がない．この式に基づいて，各被災ランク 2000 画素の判別スコア Z_R の頻度分布を示したものが図 14 であり，さらにモーメント法により正規分布でフィッティングしてモデル化したものが図 15 である．各被災ランクにおける平均と標準偏差を以下に示す．

被災ランク	0	1	2	3	4	5	6
平均値	-2.057	-1.999	-1.728	-1.423	-1.024	-0.380	-0.301
標準偏差	0.715	0.810	0.935	0.997	1.211	1.437	1.602

図 14 および図 15 より，高い被災ランクほど判別スコア Z_R が大きな値をとる傾向は一貫して認められる．しかし 7 被災ランクの分布が十分に分離しておらず，相互の重なりが顕著であるため，判別スコア Z_R でのに基づいて最尤法で判別することは適切ではないことは明らかである．

そこで，判別スコア Z_R の関数として人工衛星 SAR 強度画像情報の尤度関数をモデル化することとした．具体的には，図 15 を用いて判別スコア Z_R ごとに各被災ランクの構成比率を求めて尤度関数とする方法をとった．図 16 はその結果を示す．なお $Z_R < -2.5$ の領域においては，尤度関数の値の序列に矛盾が生じること回避するため，モデル関数の適用限度を $Z_R = -2.5$ としている．

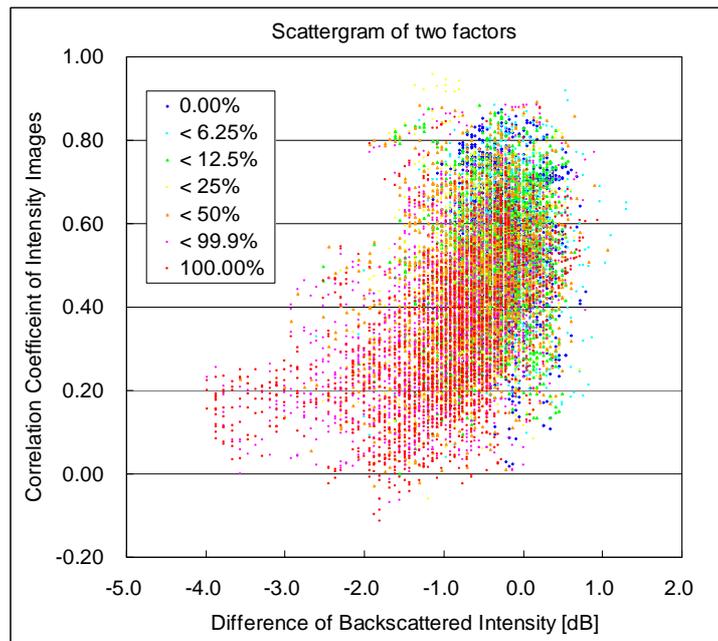


図 13 後方散乱強度の差分値および空間相関係数の散布図
(各被災ランク 2000 画素のランダム抽出)

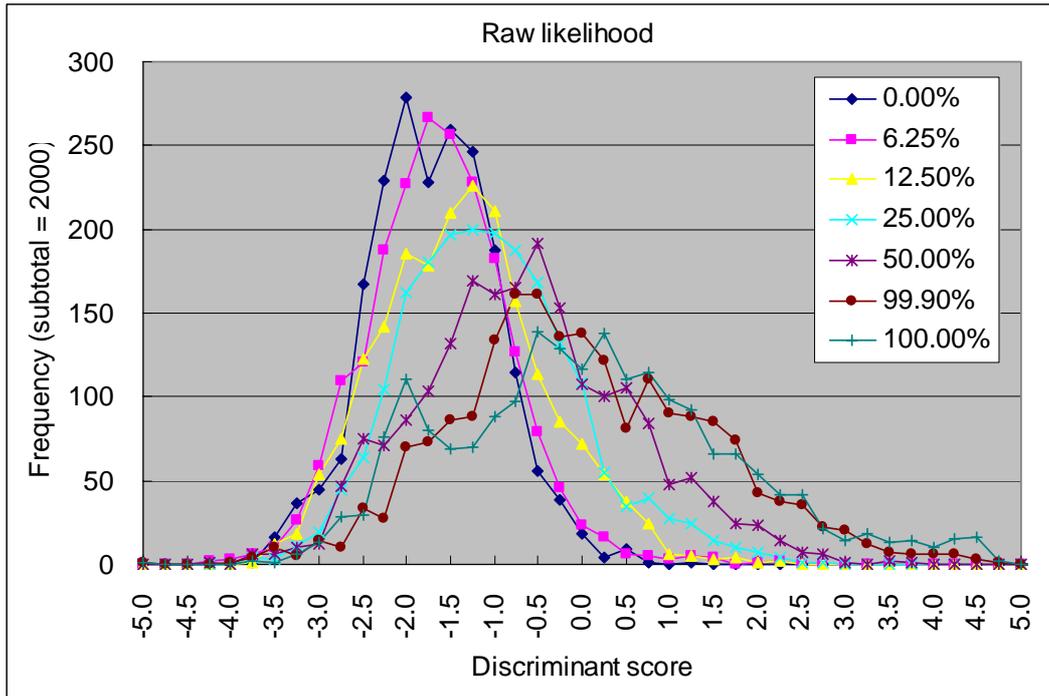


図 14 各被災ランク 2000 画素の判別スコア Z_R の頻度分布

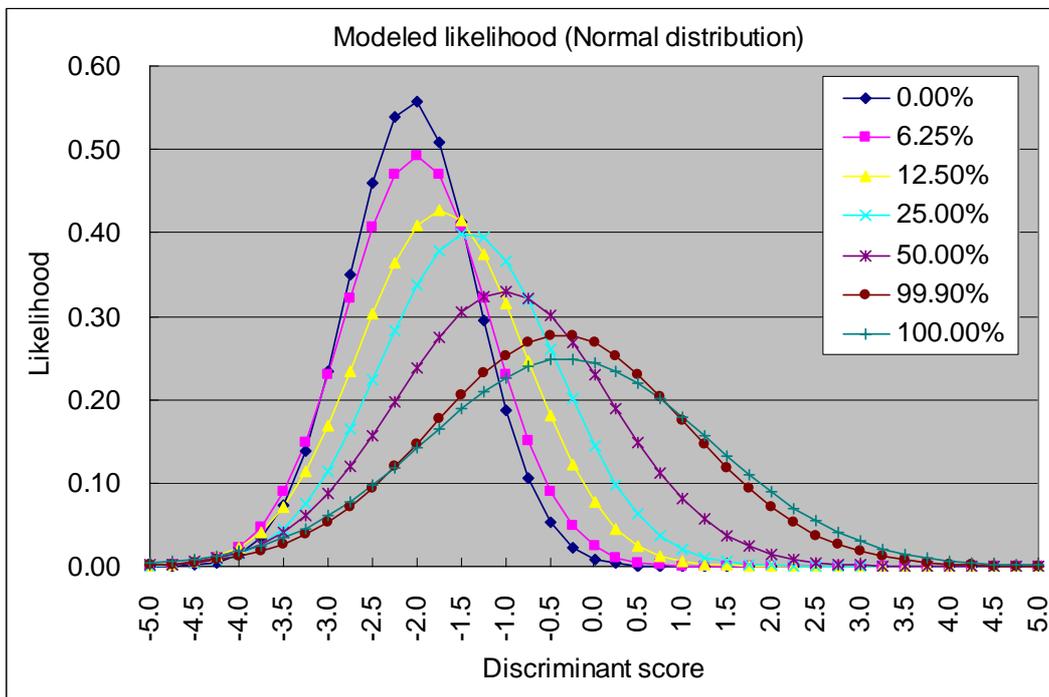


図 15 各被災ランク 2000 画素の判別スコア Z_R の頻度分布の正規分布モデル

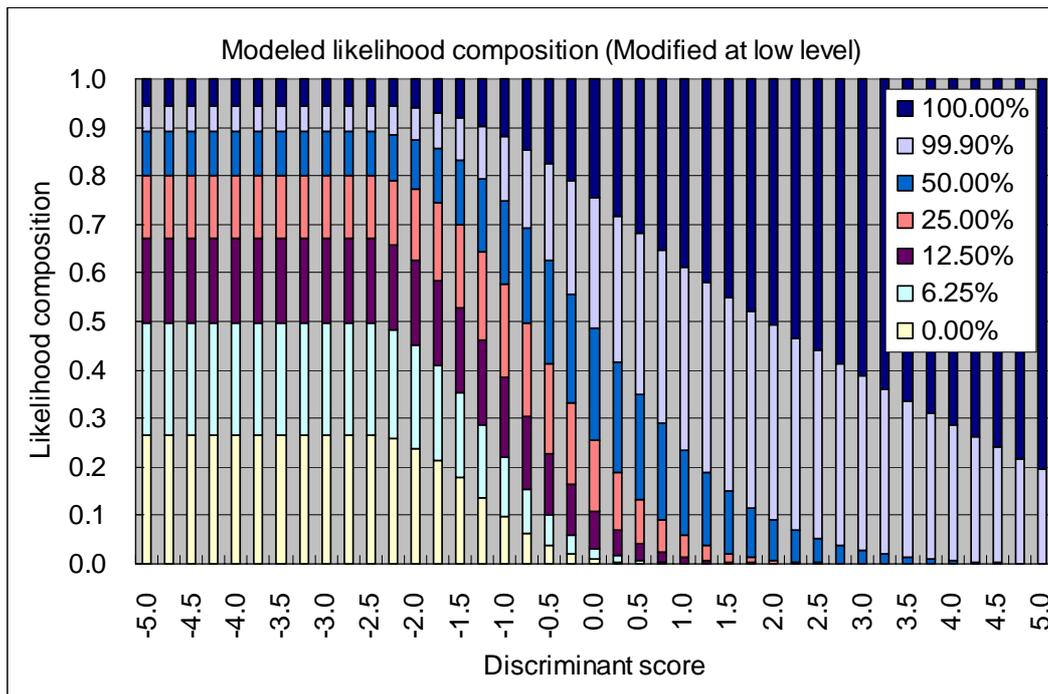


図 16 判別スコア Z_R による尤度関数

上記の7被災ランクの発生確率を計測震度相当の震度で推定する被害関数については、建設省（現国土交通省）建築研究所による兵庫県南部地震の被災データ¹²⁾を利用して構築した。まず、大被害を受けた神戸市7区（東灘、灘、中央、兵庫、長田、須磨、垂水）および他6市（川西、宝塚、伊丹、尼崎、西宮、芦屋）における計3296町丁目の「全壊または大破率」を、上記の被災ランクごとに整理した。次に、各市区の全体の「全壊または大破率」から、山口・山崎¹³⁾の被害関数より震度を逆推定して各市区の平均的な震度を当てはめた。図17は推定震度の小さい順に13市区の結果を並べ替えたものである。さらに、震度に対する非超過確率を被災ランクごとにロジスティック分布でモデル化し、最尤法によるフィッティングにより各被災ランクの超過確率（各被災ランク以上の被害となる確率）を求めた。その結果は図18に示すとおりである。各曲線の分離はよくないが、これは各市区につき1つの震度を当てはめたためである。震度情報の空間解像度が高い場合には、精度の高い被害関数を利用することが可能となろう。

これら6本の非超過確率のカーブより、隣り合う2つのカーブの差をとることによって各被災ランクに入る確率を求めたものが図19である。震度6.6を超える高い震度領域では図18のカーブの裾野で交差が生じているため、被災ランク1~5の確率については若干の修正を行った。分析に利用したデータの最高震度が東灘区の6.59であることを考慮して、震度6.6における被災ランク1~5の確率の比率を、被災ランク6以外の部分に乗じて分解することにより、負の値が生じないように工夫している。被災ランクごとに分解した7種類の被害関数の平均値をとり、元の被害関数¹³⁾と比較して適合度を確認した(図20)。分解した被害関数の平均値は、元の被害関数よりも若干大きめの被害となっているが、大

きな差異ではない。ただし、分解した被害関数の平均値は、80%程度で頭打ちとなっている。これは、被災ランクを離散的に扱い、中央値を代表値としたことに起因すると考えられる。

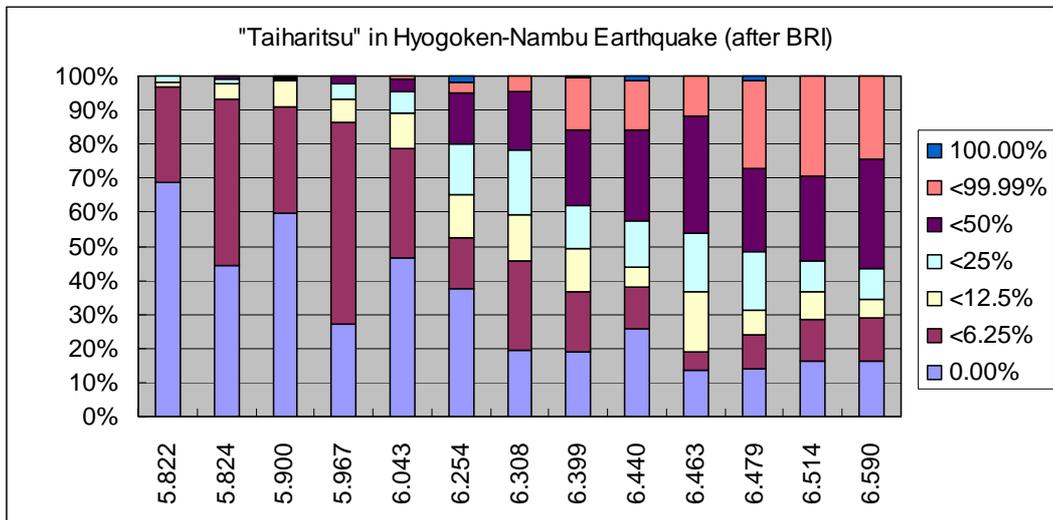


図 17 神戸市 7 区および他 6 市で推定された平均震度と「全壊および大破率」の関係

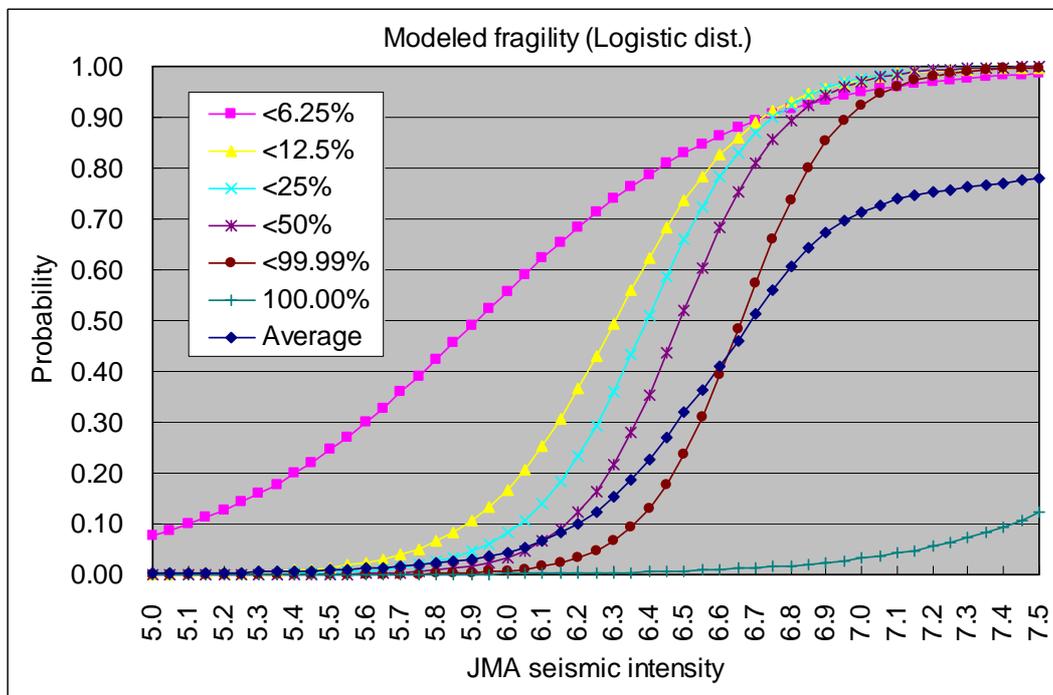


図 18 震度による被害関数（各被災ランク以上となる確率）

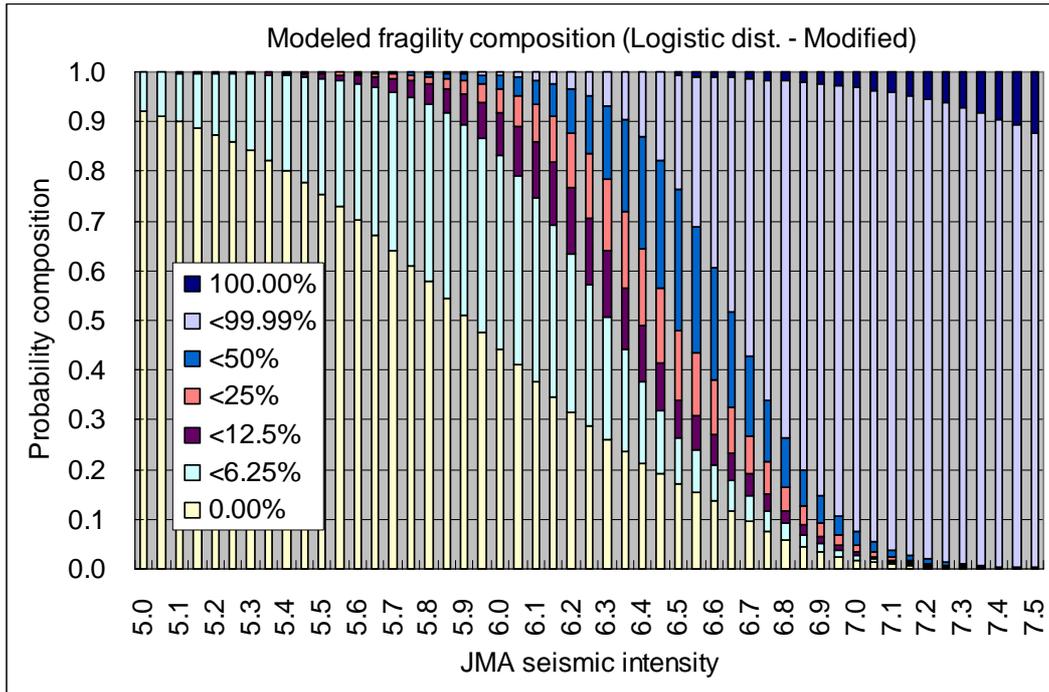


図 19 震度による被害関数（各被災ランクの生起確率）

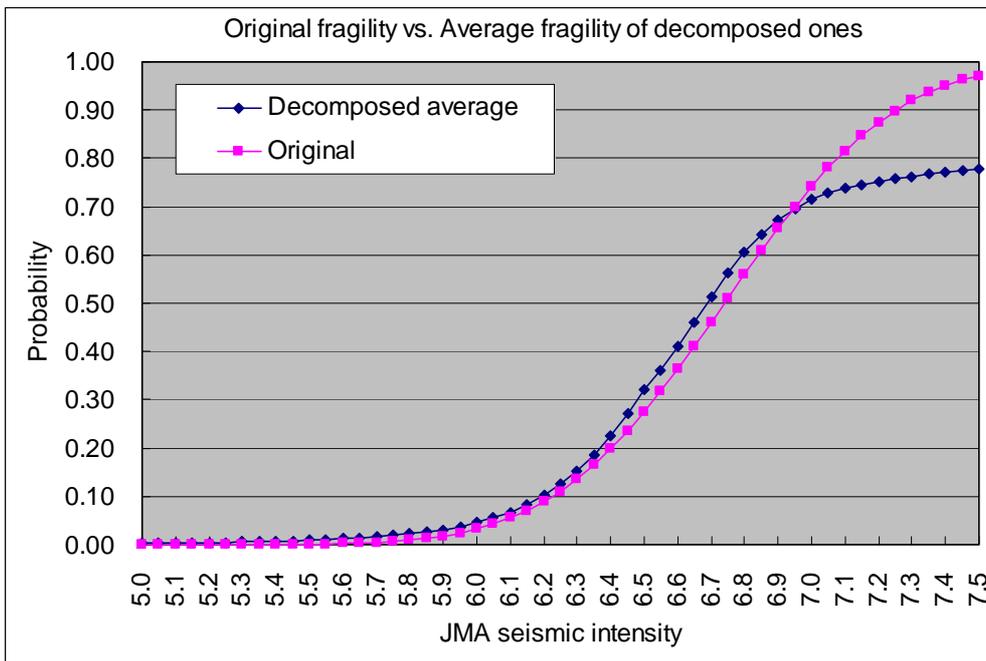


図 20 元の被害関数（山口・山崎¹³⁾）と分解された被害関数の平均値の比較

震度情報（震度 5.0, 5.25, 5.50, 5.75, 6.0, 6.25, 6.5）を単独使用して図 19 により推定される「全壊または大破率」の確率分布をもとにして、平均値 μ 、標準偏差 σ 、および $\mu + \sigma$ と $\mu - \sigma$ で示した結果が図 21 である。同様に図 16 を用いて、SAR 強度画像情報（ $Z_R = -3.0, -2.0, -1.0, 0.0, 1.0, 2.0, 3.0$ ）を単独使用した場合の結果を図 22 に示す。

次に、震度情報に基づいて被害関数により得られた被災ランクの確率分布と、SAR 強度画像情報に基づいて得られた判別スコアごとの尤度関数とを統合処理して、ベイズ確率の方法を適用して推定確率分布を更新した結果を示す。図 23(a)(b)は、49 種類（判別スコア 7 種類 × 震度 7 種類）の情報入手パターンに対する「全壊または大破率」の確率分布をもとに、それぞれの期待値 μ と標準偏差 σ を示したものである。また図 23(c)(d)は、期待値 $\mu - \sigma$ （下限値 0）および期待値 $\mu + \sigma$ （上限値 1）を示したものである。

実際には、GIS 上に展開された震度分布と SAR 強度画像情報の判別スコア Z_R とを用いて、本提案手法により確率更新を行うことによって、図 23(a)(c)(d)に示したような結果（ μ 、 $\mu - \sigma$ 、 $\mu + \sigma$ ）の空間的分布が表示されることになる。

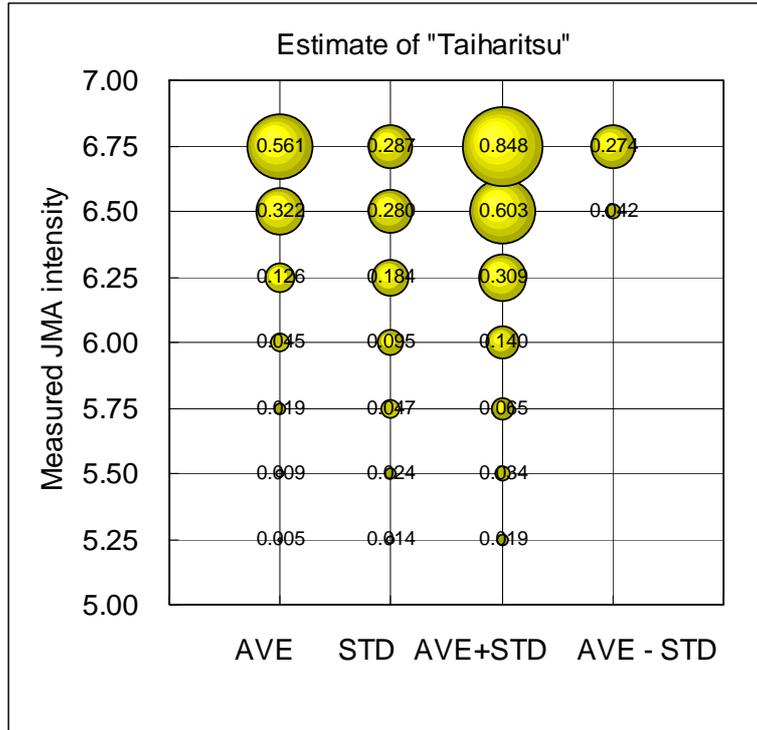


図 21 震度情報による「全壊または大破率」の確率分布の要約
 (左列より平均値 μ , 標準偏差 , $\mu +$, $\mu -$)

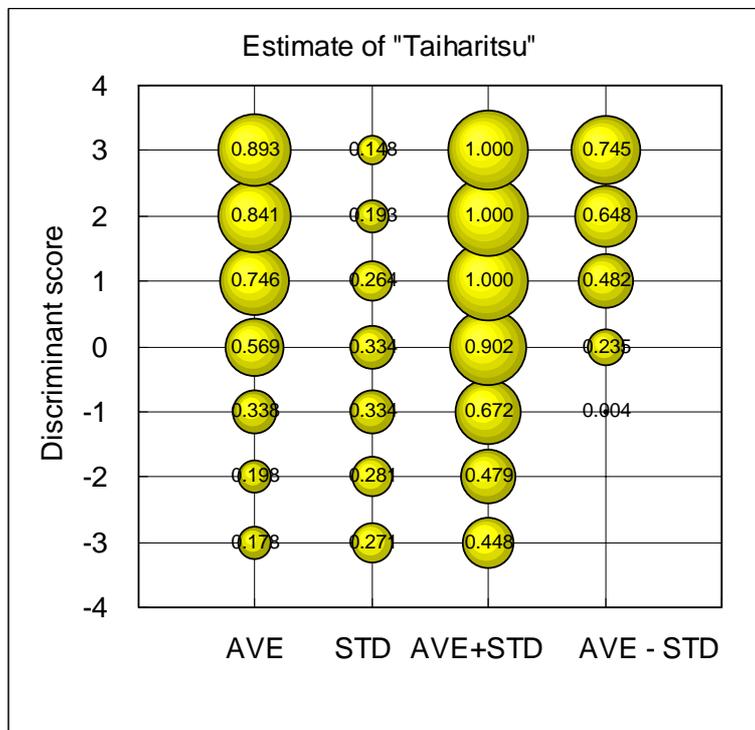
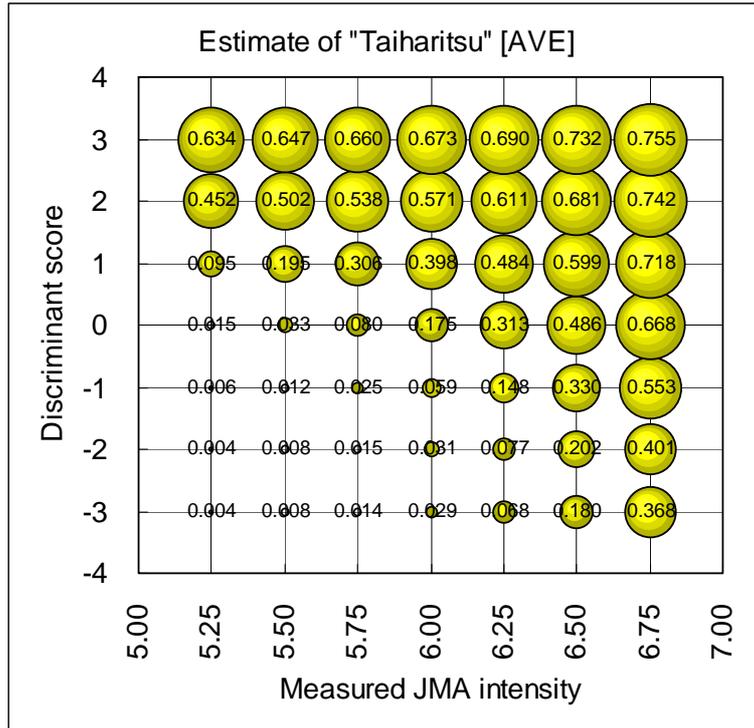
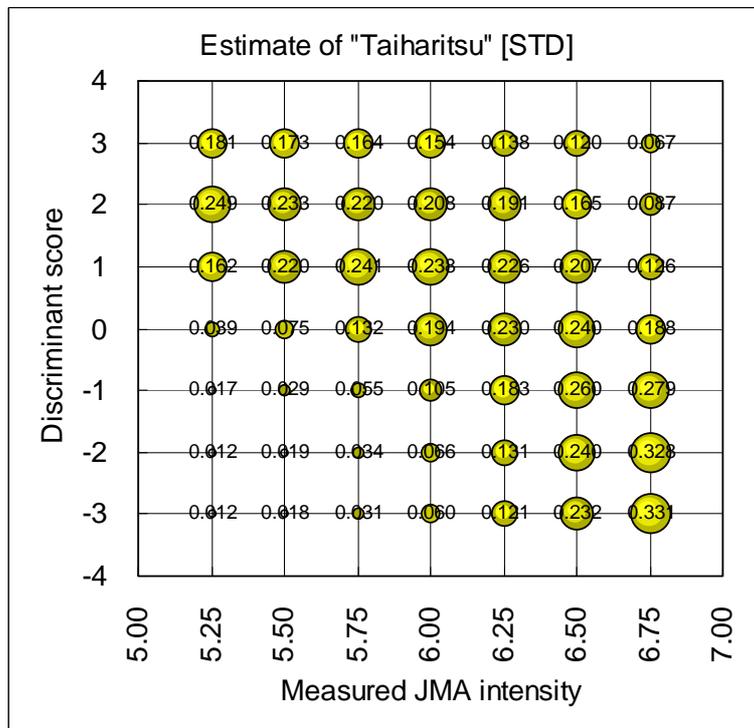


図 22 SAR 強度画像情報による「全壊または大破率」の確率分布の要約
 (左列より平均値 μ , 標準偏差 , $\mu +$, $\mu -$)

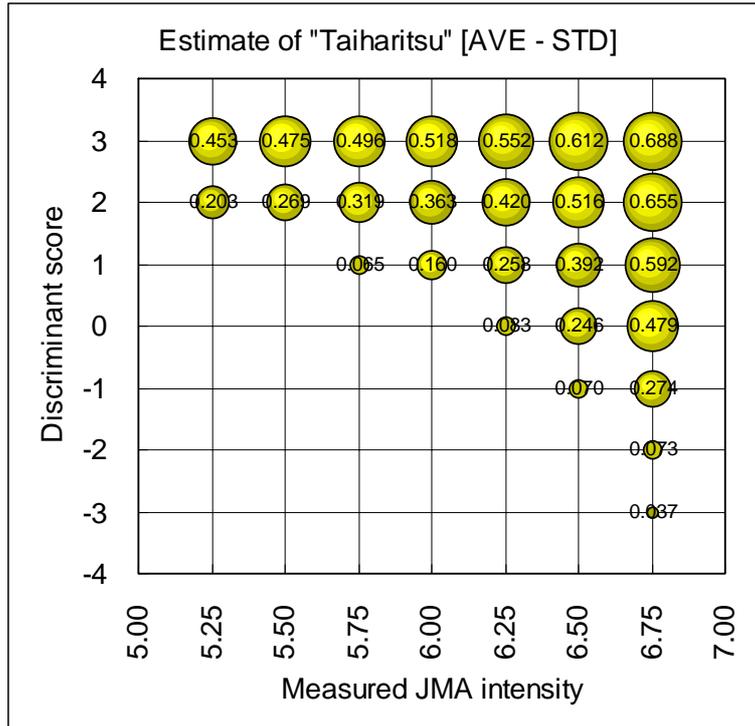


(a) 確率分布の期待値 μ

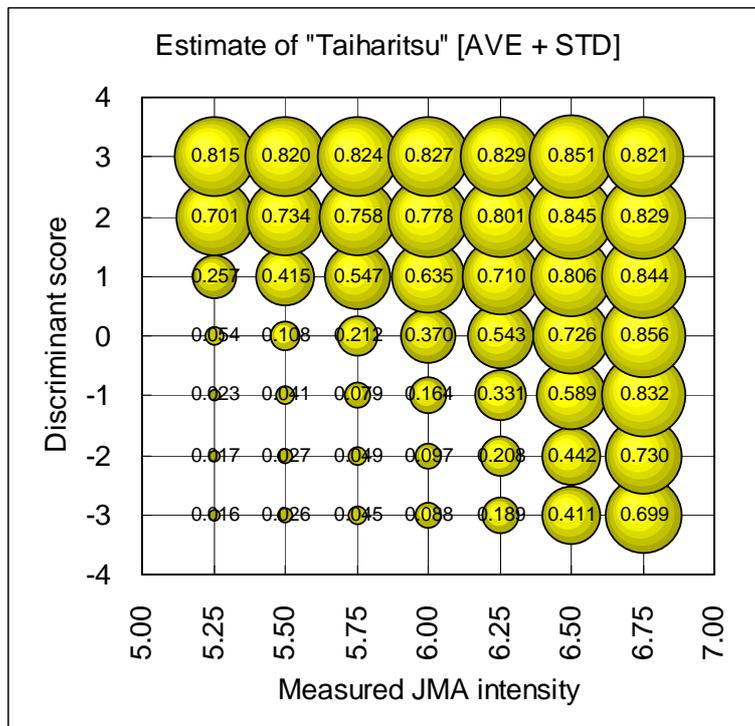


(b) 確率分布の標準偏差

図 23 震度と SAR 画像情報の統合処理による「全壊または大破率」の推定(つづく)



(c) 確率分布の期待値 μ - 標準偏差 (下限値 0)



(d) 確率分布の期待値 μ + 標準偏差 (上限値 1)

図 23 震度と SAR 画像情報の統合処理による「全壊または大破率」の推定(つづき)

昨年度と同様に、兵庫県南部地震の被災地域を対象として、被害推定結果を更新するケーススタディーを行った。地震後ほぼ即時的に得られる市区単位の震度分布（図 24）を 1 次情報とし、次いで得られる SAR 強度画像情報（図 25）を 2 次情報とする場合を想定した。まずベイズ確率の方法により「全壊または大破率」の確率分布を更新して、その期待値 μ と標準偏差 σ を求めた。これをもとに、 μ 、 $\mu + \sigma$ 、 $\mu - \sigma$ の 3 種類を図示したものが図 26 である。ただし、 $\mu + \sigma$ においては 1 を上限とし、 $\mu - \sigma$ においては 0 を下限としている。震度情報が市区単位であるため行政界での不連続性が目立つものの、いわゆる「震災の帯」に相当する被害地域が明確に現れて抽出が容易となっている。また、被害率を定量的に把握でき、その不確定性評価も可能であることが、提案手法の利点として挙げられる。より詳細な面的震度分布を適用した場合には、推定精度をさらに向上できることは明らかである。

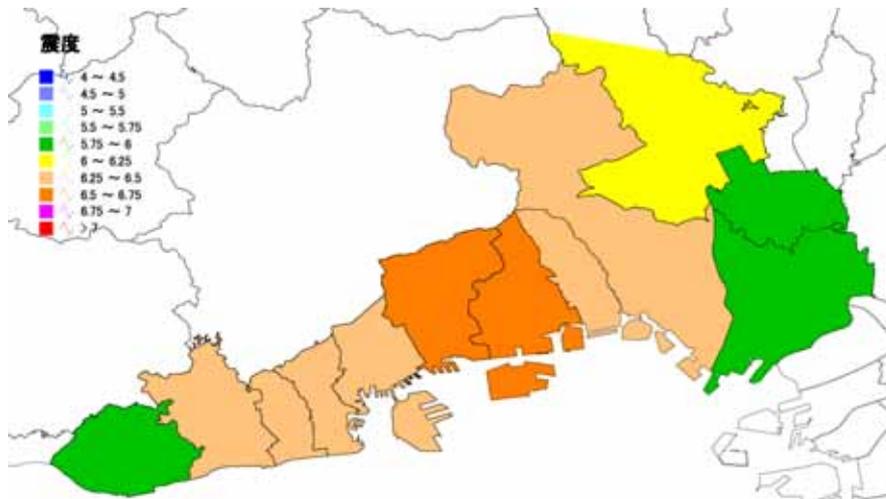


図 24 兵庫県南部地震における市区ごとの代表震度

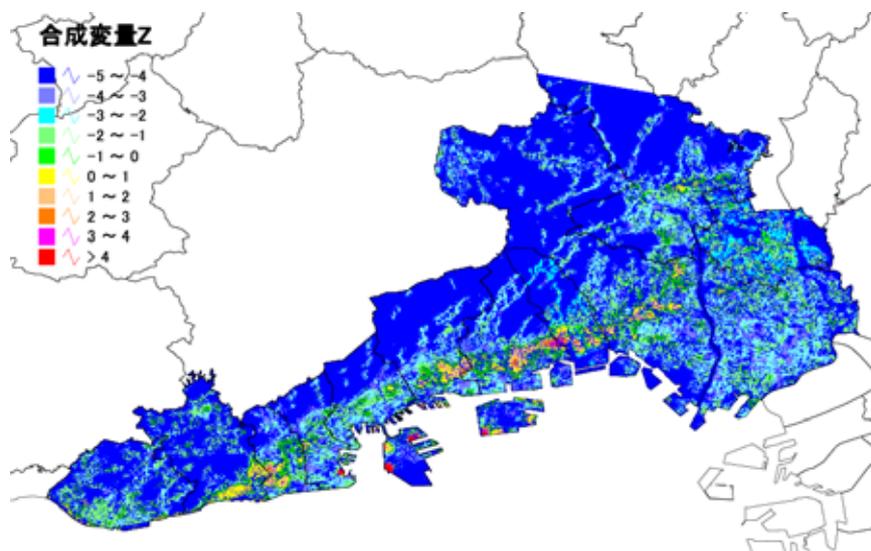
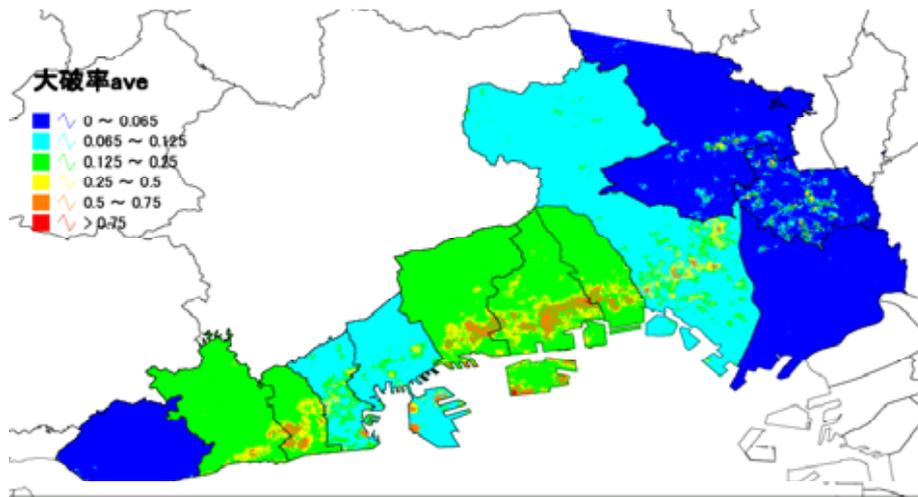
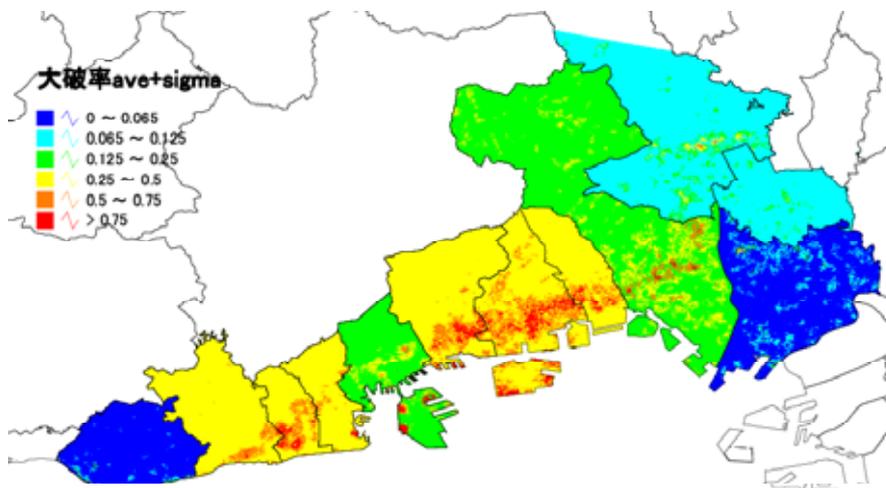


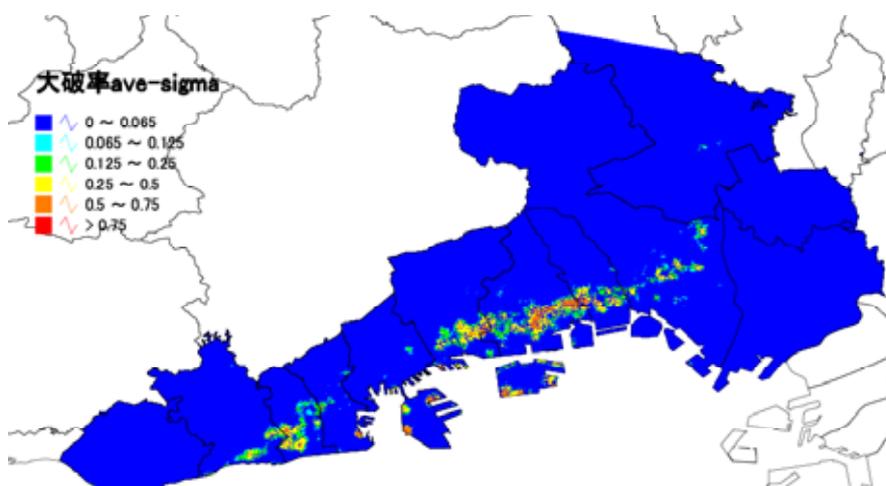
図 25 地震前後の人工衛星 SAR 強度画像の差分情報による判別スコア Z_R の分布



(a) 期待値 μ



(b) 期待値 μ + 標準偏差



(c) 期待値 μ - 標準偏差

図 26 統合処理による「全壊または大破率」の推定値の更新結果

「人工衛星画像処理・被災地判定モジュール」に関しては，以上に加えて，市販ソフトウェアのオブジェクトに依存していた一部の処理について，他システムにも実装ができるよう，FORTRAN プログラムの再コード化を完了した．これにより，キャリブレーションおよび位置合わせが済んだ地震前後の SAR 画像（8 ビット raw フォーマット）が与えられれば，ノイズ除去処理，差分値と相関値の計算と，合成変量の算出までを自動的に処理できるようになった．さらに，被災地判定手法の精度検証のために，昨年度入手した中部地方の ERS 衛星 SAR 画像（1997 年 9 月 7 日，2000 年 3 月 5 日）に対して手法を適用し，被害（この場合は変化）抽出を行った．そして，この 2 時期間での土地被覆の変化（建物撤去や新築状況など）を航空写真により確認し，手法の妥当性を検証した．また，2003 年 12 月 26 日に発生したイラン・バム地震へ適用するために，地震前後の RADARSAT 画像を入手した．今後，処理を進める予定である．

「空撮画像処理・被災地判定モジュール」に関しては，以前は，解析者の判断に基づき，多くのプログラムを対話形式あるいはコンパイルを繰り返して実行・確認等する必要があった．そこで今年度は，エッジ情報に基づく被害抽出手法については，誰でも簡単に処理できるよう，パラメータファイルと実行ファイルの 2 つで構成されるモジュールに簡素化した．これは，8 ビット x3 チャンネルの bmp フォーマットの画像ファイルを入力とし，エッジ情報の算出，テクスチャ解析，そして，被害地を抽出して画像化するまでを完全に自動化したものである．これにより，航空写真や高分解能衛星画像が地震後に得られれば，即座に被災地の自動推定ができるようになった．図 27 には，阪神・淡路大震災の 1 日後に観測された航空写真に手法を適用し，被害地域を検出した例を，図 28 には，イラン・バム地震の 1 日後にバムを観測した IKONOS 画像（リモート・センシング技術センターとの共同研究に基づき入手）に適用した例を示す．



図 27 阪神・淡路大震災後の 1 日後に撮影された航空写真から被災地を推定した結果

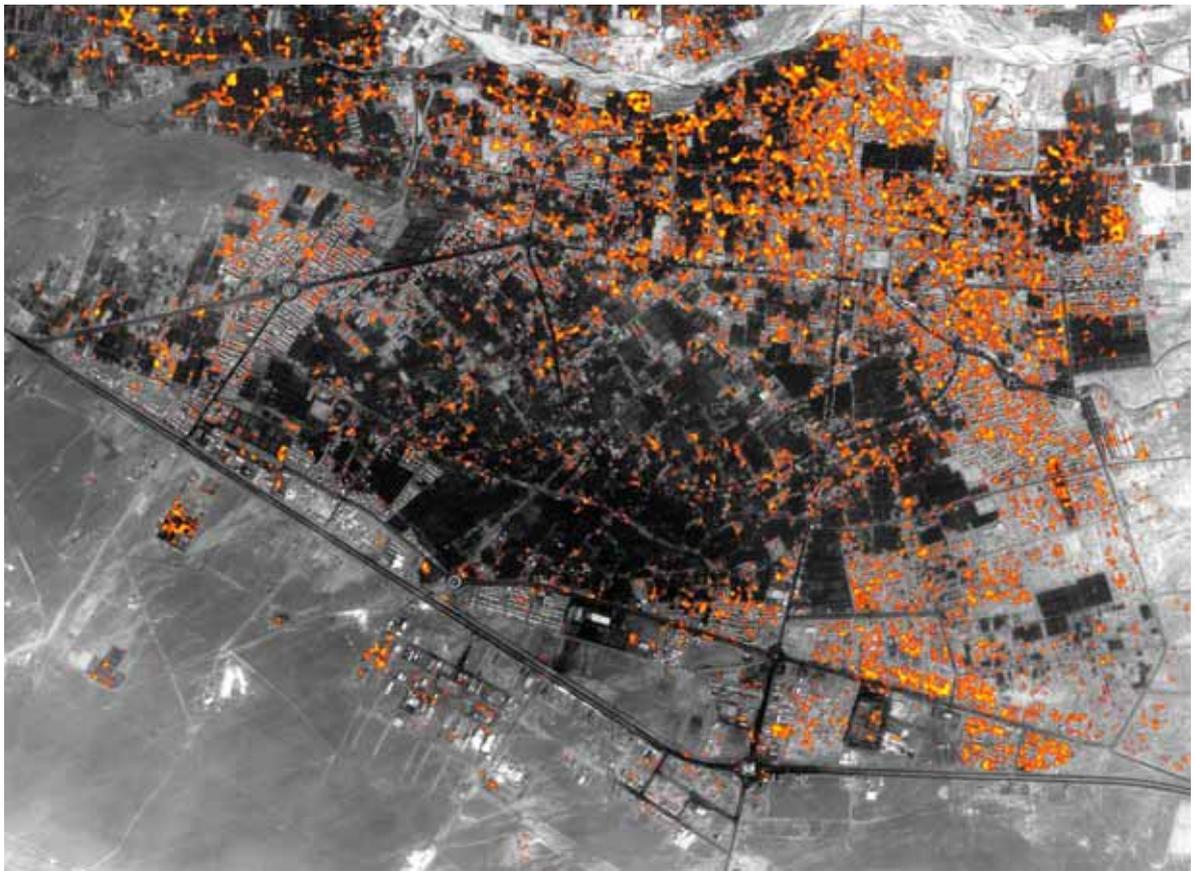


図 28 イラン・バム地震の 1 日後にバムを観測した IKONOS 画像から被災地を推定した結果

3) 結論ならびに今後の課題

- ・ 震度情報とその後得られる SAR 強度画像情報を統合処理することによって、建物の「全壊または大破率」を確率統計的に推定し、その期待値と標準偏差を評価する方法論を開発した。昨年度に検討した方法では「全壊または大破率 100%」となっている確率を示すに過ぎなかったが、「全壊または大破率」そのものを推定可能としたことにより、被害量の相対的評価にとどまらず、絶対的評価が行えるようになった。兵庫県南部地震を対象として実施したケーススタディーにより、提案手法の有効性を示した。さらに、昨年度入手した中部地方の ERS 衛星 SAR 画像を用いて、2 時期の画像の変化抽出を行い、土地被覆の変化を航空写真により確認して手法の妥当性を検証した。次年度には、本年度に完成した統合処理手法を元にして「人工衛星画像処理・被災地判定モジュール」のプロトタイプを改良し、モジュール作成を進める。
- ・ また「空撮画像処理・被災地判定モジュール」に関しては、エッジ情報に基づく被害抽出手法の自動処理化について検討し、パラメータファイルと実行ファイルの 2 つで構成されるモジュールに簡素化した。今後、震度情報等の異種情報との統合処理に適用できるよう被害抽出アルゴリズムの検討し、プログラムのコード化を進める方針である。また、「被害情報の統合処理モジュール」との親和性を考慮して、推定被災度を「棟(パラメータ M_0)のうち $\times \times$ 棟(パラメータ n_0)が全壊」という形式で表現する手法について検討を進める。

(d) 異種情報の統合処理による意思決定支援システムの開発

1) 業務の実施方法

昨年度においては、地震動情報および実被害情報の異種情報を統合処理して意思決定を支援することを目的として、次の2モジュール群のプロトタイピングを行った。

- ・「被害情報の統合処理モジュール」
- ・「緊急対応の意思決定支援モジュール」

本年度においては、これらを司る4種のパラメータの規定方法について検討する。またモジュール群に改良を加え、「(b) 地震動情報による被害早期把握に関する開発」で示した3モジュール(工学的基盤面における地震動予測モジュール、表層地盤における地震動予測モジュール、被害関数を用いた早期被害推定モジュール)と連動して動作するプロトタイプを作成する。また、岐阜県を対象としたケーススタディーを通じて、迅速・正確な被害把握と意思決定支援を目指す本開発システムの有効性を検証する。

2) 業務の成果

「被害関数を用いた早期被害推定モジュール」によりもたらされる初期被害推定は、さきに(b)で述べたように逐次推定更新のための「一次情報」となる。ここではまず、被害推定の不確定性の扱い方について解説する。

一般に、地震動強度情報に基づいて被害推定を行う際には、本来ばらつきを含む被害関数から算定された被害確率が確定論的に取り扱われる場合が多い。例として被災ランクを3種類として、全壊確率 p_1 、半壊確率 p_2 、無被害確率 $p_3 (= 1 - p_1 - p_2)$ と推定された場合を考える。これは先に述べたように、図 11 でいえば、三角座標の1点で表わされることとなる。対象棟数を N とすると、全壊・半壊・無被害の棟数はそれぞれ $N \cdot p_1$ 、 $N \cdot p_2$ 、 $N \cdot p_3$ と推定されるが、リアルタイム地震防災システムの多くは、初期被害推定と実被害情報を関連付ける手だてを持たない。これでは初期被害推定は一過性の情報に留まり、実被害情報を逐次取り込んだ推定更新ができない。

本研究課題では、地震動強度情報と実被害情報の統合処理を実現するため、初期被害推定値に適当な不確定性を与える方法をとった。「10分の2」と「1000分の200」はいずれも「確率 0.2」を表わすが、分母を母集団からのサンプル数と考えると、これが大きいほど推定確率が統計的に確からしいことを意味する。これを利用して初期被害推定の不確定性を表わすのが「仮設的事前標本」¹⁴⁾であり、「棟数 M_0' あたりの被害棟数が $n_0'1$ 、 $n_0'2$ 、 $n_0'3 (= M_0' - n_0'1 - n_0'2)$ 」という表現形式をとる。ここで、ある被害確率のもとでの被害棟数が多項分布に従うと仮定すると、被害棟数から推定される被害確率の確率分布はディリクレ分布に従い、仮設的事前標本(M_0' 、 $n_0'1$ 、 $n_0'2$ 、 $n_0'3$)で記述される。

図 29 は、 $M_0' = 1, 10, 100$ の場合のディリクレ分布を三角座標で表示したものであり、全壊・半壊・無被害の確率が等確率で3分の1ずつの場合(上段)と、0.2、0.3、0.5の場合(下段)を示している(ちなみに図 11 は $M_0'=10$ とした場合の下段のパターンである)。 M_0' が小さいほど確率分布が拡がり、逆に M_0' が大きいほど確率分布が平均値まわりに密集している。つまり初期被害推定の不確定性が M_0' の大小で表現されることから、震度情報や被害関数の精度に応じて、初期被害推定の確からしさを M_0' で規定する。ディリクレ分

布は多項分布と「共役分布」の関係にあり、事前・事後の分布の種類が変化しない。実被害情報 ($M_0, n_{01}, n_{02}, n_{03}$)を得た場合、事後分布は更新されたパラメータ ($M_0' + M_0, n_0'1 + n_{01}, n_0'2 + n_{02}, n_0'3 + n_{03}$)のディリクレ分布となり、仮設的事前標本との連続的扱いが可能である。なお被害棟数の確率分布の予測分布は、多項分布との混合分布で求められ、ディリクレ多項分布となる。

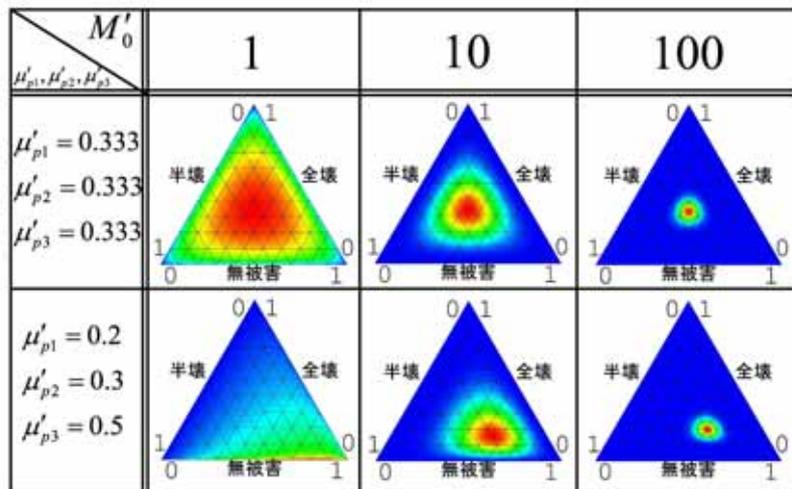


図 29 被害確率のばらつきの表現 (ディリクレ分布)

次に、推定された被害をもとにした緊急対応の意思決定過程を記述する方法について述べる。地震時には様々な被害が同時多発するので、限りある人的・物的資源を効果的に活用するには、被害状況に応じた優先付けが重要となる。その判断基準としては建物全壊率が最適であろう。建物全壊率が低ければ当該地域での自律的対応が可能である一方、全壊率がある程度高くなると外的支援が不可欠となるからである。本研究では一般表現として、次のようなルールにより意思決定を下すこととする。

- ・全壊率 p が p_s 以下なら緊急対応を優先しない。
- ・全壊率 p が p_f 以上なら緊急対応を優先する。

p_s および p_f を大きく設定すると、激甚な被害を受けた地域のみが限定的に抽出される。逆に p_s および p_f を小さく設定すると、被害の可能性のある地域が広く抽出される。 p_s と p_f については、地震の規模、被災地の状況、緊急対応の目的などに応じて適切に設定する。

ところで全壊率の真値は全貌把握まで不明であり、被害調査の中途段階では推定値である。従って上記の意思決定では、2種類の過誤の危険性がある。

- ・優先する必要がないところを優先すると判断する誤り (許容確率)。
- ・優先すべきところを優先しないと判断する誤り (許容確率)。

品質管理の分野では、前者は「生産者危険」、後者は「消費者危険」と称され、その許容誤り確率はそれぞれ α および β で表される。迅速性より正確性を重視するには α と β を低く

設定して「慎重」に判断すればよい。逆に、正確性より迅速性を重視するには α を高く設定して「大胆」に判断すればよい。ただしその上限は $\alpha = 50\%$ である。

ここまでを示したパラメータを用いると、確率比検定の手法を応用した逐次決定過程を定式化することができる。その概要は昨年度の報告書に掲載したので、本報告では省略する。また定式化の詳細については文献 15) を参照されたい。

ここでは、図 9 の想定関ヶ原 - 養老断層地震の推定震度分布を用いて、木造建物の被害推定と緊急対応の意思決定の経過について例示する。対象としたのは、震源にやや近い大垣市（人口約 14.9 万人）、震源近傍の上石津町（人口約 0.8 万人）、ならびに震源からやや距離のある岐阜市（人口約 40.8 万人）である。面的震度分布および震度曝露人口の推定結果は図 30(a) ~ (c) に示すとおりであり、大垣市で計測震度 5.3 ~ 6.2、上石津町で計測震度 5.3 ~ 6.4、岐阜市で計測震度 4.5 ~ 5.9 の範囲となっている。

まず大垣市を例にとり、上述の 4 種のパラメータ α, β, p_s, p_f が初期段階の意思決定結果に及ぼす影響について考察する。図 31 は $\alpha = 20\%$ としたパターンであり、緊急対応を行う被災レベルについては、 $(p_s, p_f) = (1.25\%, 2.5\%), (2.5\%, 5\%), (5\%, 10\%), (10\%, 20\%), (20\%, 40\%)$ の 5 ケースについて示している。緊急対応を行う基準となる全壊率 (p_s, p_f) を比較的 low に設定した図 31(a)-(c) では、全メッシュにおいて「決定保留」となっており、ある程度実被害情報がある程度入手するまで判断を下さないという結果となっている。逆に基準全壊率 (p_s, p_f) を比較的高く設定した図 31(d) では、市中心部を除いて初期段階で「緊急対応なし」と判断されている。さらに基準全壊率 (p_s, p_f) を高く設定した図 31(e) では、1 メッシュを除いて初期段階で「緊急対応なし」と判断されている。

一方、図 32 は $\alpha = 50\%$ としたパターンであり、先に示した 5 ケースの基準全壊率 (p_s, p_f) のペアについて表示している。この場合には、逐次決定過程において用いられる上下限值（上限を破れば「緊急対応あり」、下限を破れば「緊急対応なし」と意思決定）が一致することになる。従って被害調査開始前の初期段階で「緊急対応あり」もしくは「緊急対応なし」のいずれかの意思決定が必ず下されることから、「正確性」より「迅速性」を極端に優先したパターンであるといえる。図 32(a)-(c) に示すように、市中心部の多くのメッシュにおいて初期段階で「緊急対応あり」と判断されている。しかし、緊急対応を行う基準となる被災レベル (p_s, p_f) を低く設定するに従って、そのメッシュ数が少なくなっており、図 32(d) では 1 メッシュ、図 32(e) ではゼロとなっていることがわかる。

次に、大垣市、上石津町、岐阜市における初期被害推定と実被害による更新結果についての結果を示す。ここでは、逐次決定過程のパラメータは $p_s = 5\%, p_f = 10\%$ および $\alpha = 20\%$ とした。建物全壊率が 10% を超えるような被害地点を許容誤り確率 20% で迅速に把握し、緊急対応をできるだけ早期に行うことを狙ったパターンである。

大垣市において震度情報を受信した初期段階における意思決定結果の分布は図 33 に示すとおりであり、市内の全メッシュで決定保留となっている。このうち 3 つのメッシュ（図 33 の ~ ）に着目する。メッシュ は市中心部に位置するメッシュで建物総数が多く、なかでも耐震性に劣る木造 A の建物が約半数を占める。推定震度は 6.06 で、初期推定全壊棟数は平均 106 棟（標準偏差 73 棟）と極めて多い。一方、メッシュ は耐震性に優れた木造 D の建物が多い地区である。推定震度は α と同じく 6.06 であるが、初期推定全壊棟数が 18（標準偏差 18 棟）と比較的少ない。最後にメッシュ は、 α と同じく木造 D の

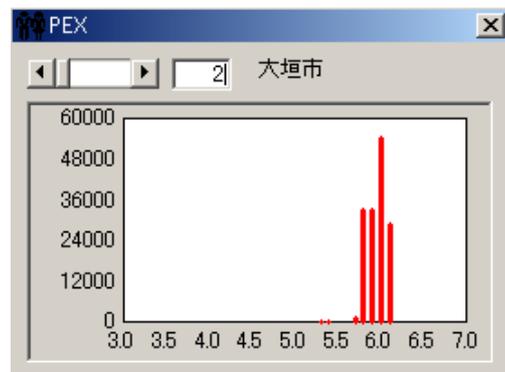
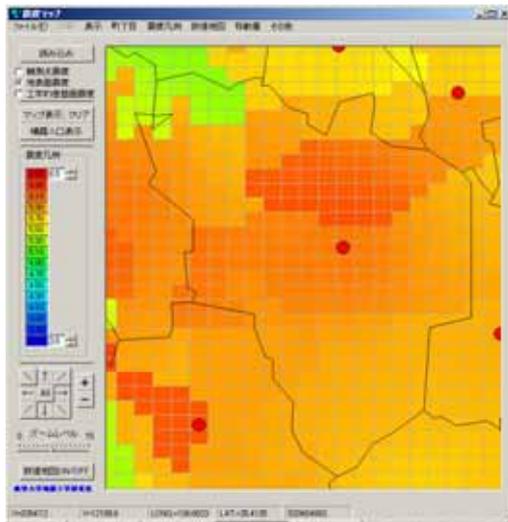
建物が多い地区である。推定震度が 5.90 と および に近いものの、初期推定全壊数が 3（標準偏差 5 棟）で よりさらに少なくなっている。

次に、やや時間が経過して全棟数の 10% が調査された段階を考える。簡単のため、各メッシュにおいて、全壊・半壊・無被害棟数の初期推定値の 10% にあたる実被害情報の報告があったことを仮定した場合を示す。図 34 は更新された意思決定結果の分布で、一部のメッシュで判断が下されており、「緊急対応あり」は 18 メッシュ、「緊急対応なし」は 52 メッシュとなっている。先のメッシュ では全壊が多く報告され、優先的に緊急対応の対象とすべきとの意思決定が下された。この時点での推定全壊棟数は平均 107 棟（標準偏差 27 棟）である。メッシュ では無被害の報告が多いものの、この段階では決定保留のままである。推定全壊棟数は平均 19 棟（標準偏差 10 棟）である。メッシュ では無被害が多く報告され、緊急対応を優先しないとの結論に達している。推定全壊棟数は平均 3 棟（標準偏差 3 棟）である。いずれにおいても、推定被害の標準偏差は初期推定の段階より小さくなっており、推定精度が向上したことを意味する。

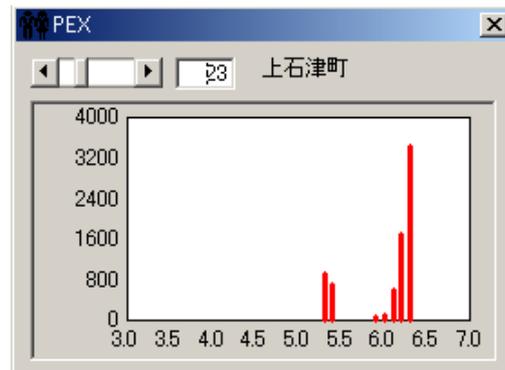
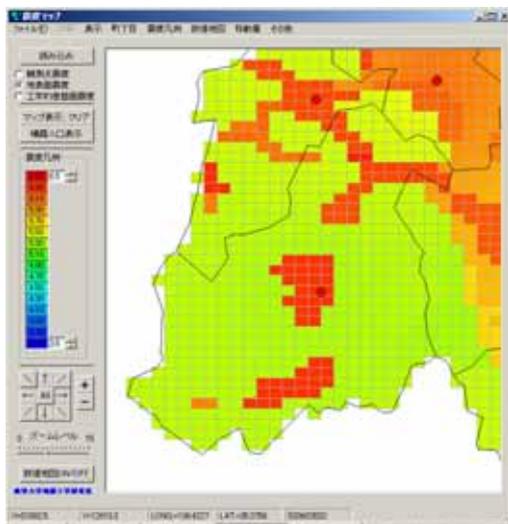
大垣市よりさらに震源に近い上石津町では、初期被害推定と意思決定の結果は図 35 のようになった。ここで特徴的なのは、震度情報のみに基づく初期段階で 5 つのメッシュで「緊急対応あり」となっていることである。これはリアルタイム意思決定基準¹⁵⁾が満たされたことにより、実被害情報を待つことなく行動を起こすべきであると判断されたことを示す。その一つであるメッシュ における推定震度は計測震度 6.42 と高い。さきと同じく全棟数の 10% が調査された段階では、図 36 に示すように、震度 6.29 のメッシュ など 42 メッシュで「緊急対応あり」、震度 5.74 のメッシュ など 30 メッシュで「緊急対応なし」となっている。

大垣市よりもさらに震源から遠い岐阜市では、初期被害推定と意思決定の結果が図 37 のようになった。震度レベルは 5 強～6 弱のメッシュが多く、初期段階ではすべてのメッシュで「決定保留」となっているが、図 38 に示すように調査が進むにつれて大きな被害がないことが明るみにされると、ほぼ全域で「緊急対応なし」と判断されている。

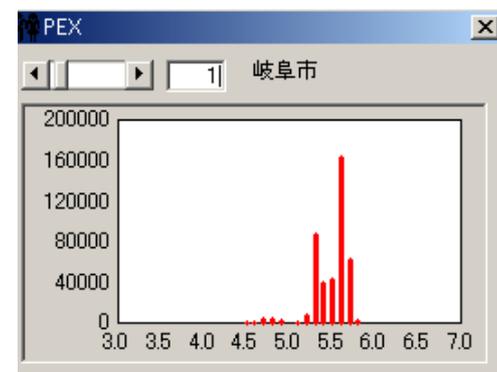
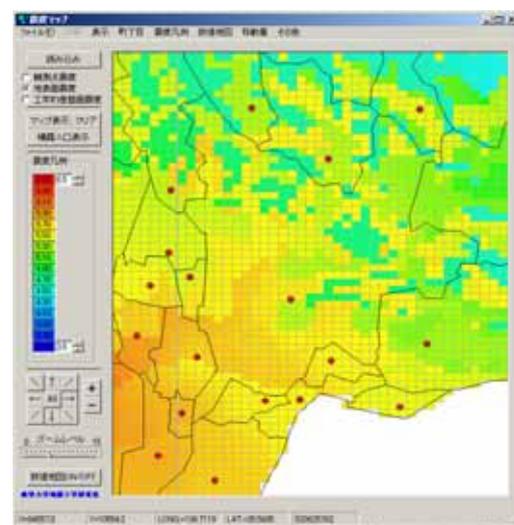
なお、初期被害推定と整合しないような実被害情報が報告されたパターンについてもシミュレーションを実施した。本報告ではその詳細を割愛するが、初期推定が徐々に是正される様子が再現されたことを付記しておく。



(a) 大垣市周辺

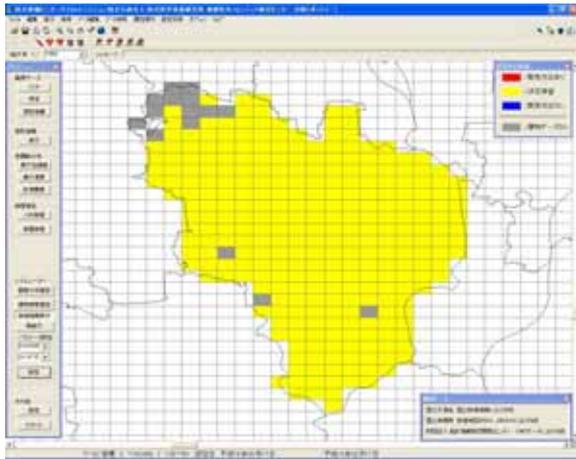


(b) 上石津町周辺

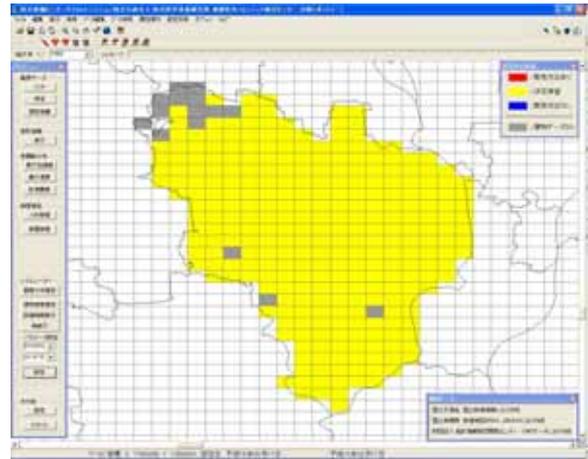


(c) 岐阜市周辺

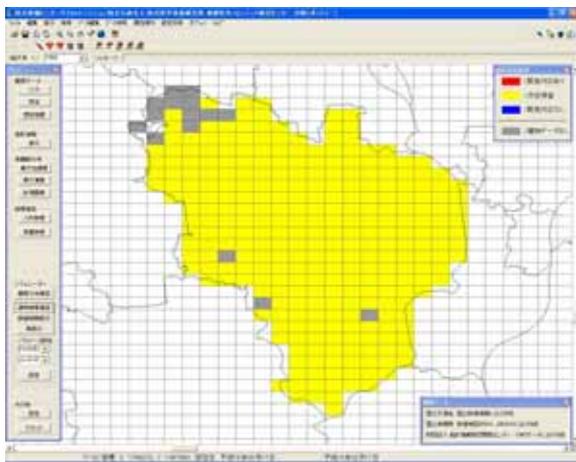
図 30 面的震度分布および震度曝露人口の推定結果



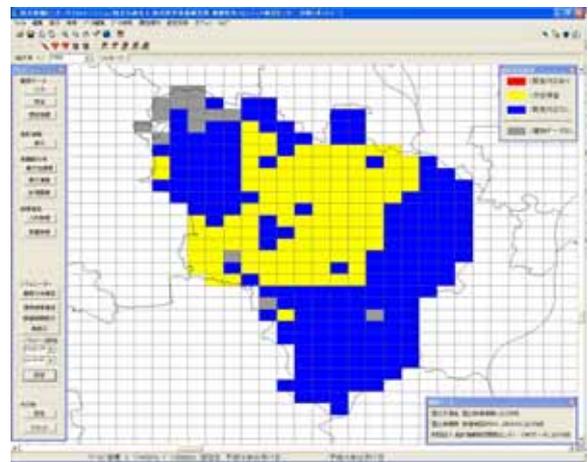
(a) $p_s = 1.25\%$, $p_r = 2.5\%$



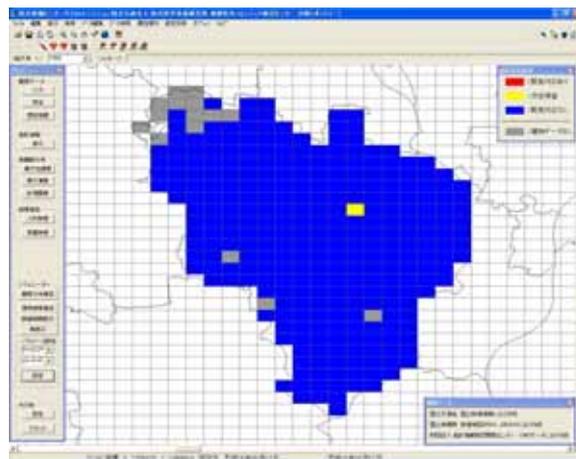
(b) $p_s = 2.5\%$, $p_r = 5\%$



(c) $p_s = 5\%$, $p_r = 10\%$

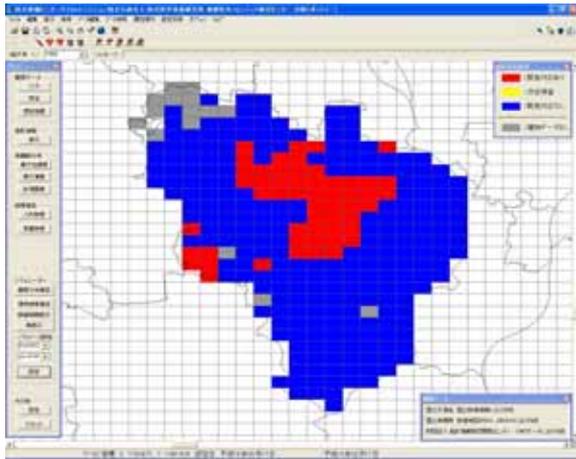


(d) $p_s = 10\%$, $p_r = 20\%$

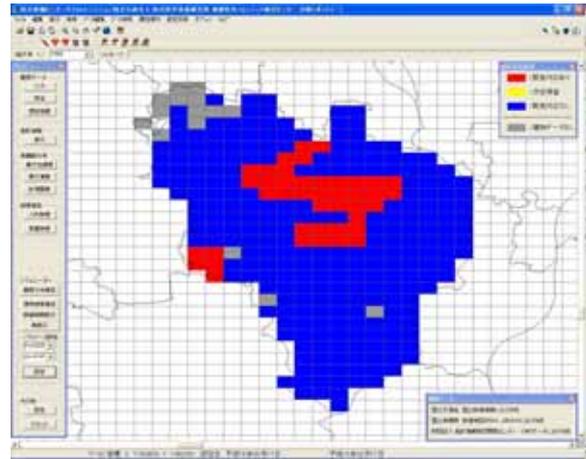


(e) $p_s = 20\%$, $p_r = 40\%$

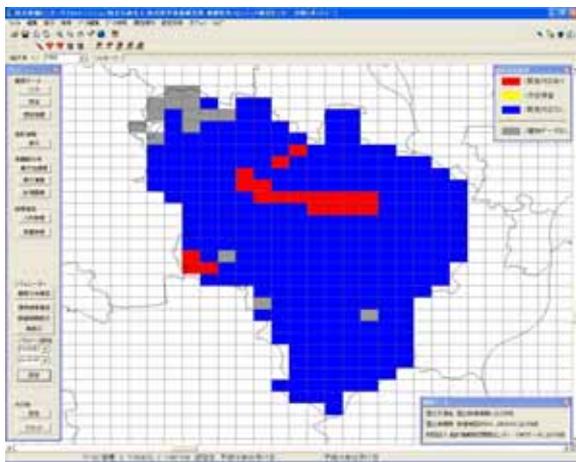
図 31 パラメータ p_s , p_r が地震直後の初期意思決定結果に及ぼす影響
(大垣市 , $\alpha = 20\%$)



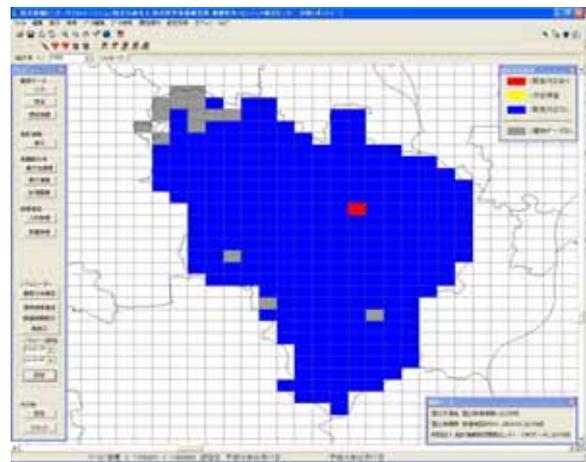
(a) $p_s = 1.25\%$, $p_f = 2.5\%$



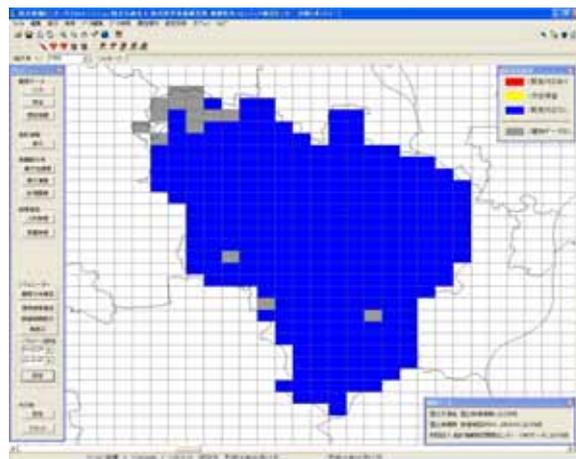
(b) $p_s = 2.5\%$, $p_f = 5\%$



(c) $p_s = 5\%$, $p_f = 10\%$



(d) $p_s = 10\%$, $p_f = 20\%$



(e) $p_s = 20\%$, $p_f = 40\%$

図 32 パラメータ p_s , p_f が地震直後の初期意思決定結果に及ぼす影響
(大垣市 , $\alpha = 50\%$)

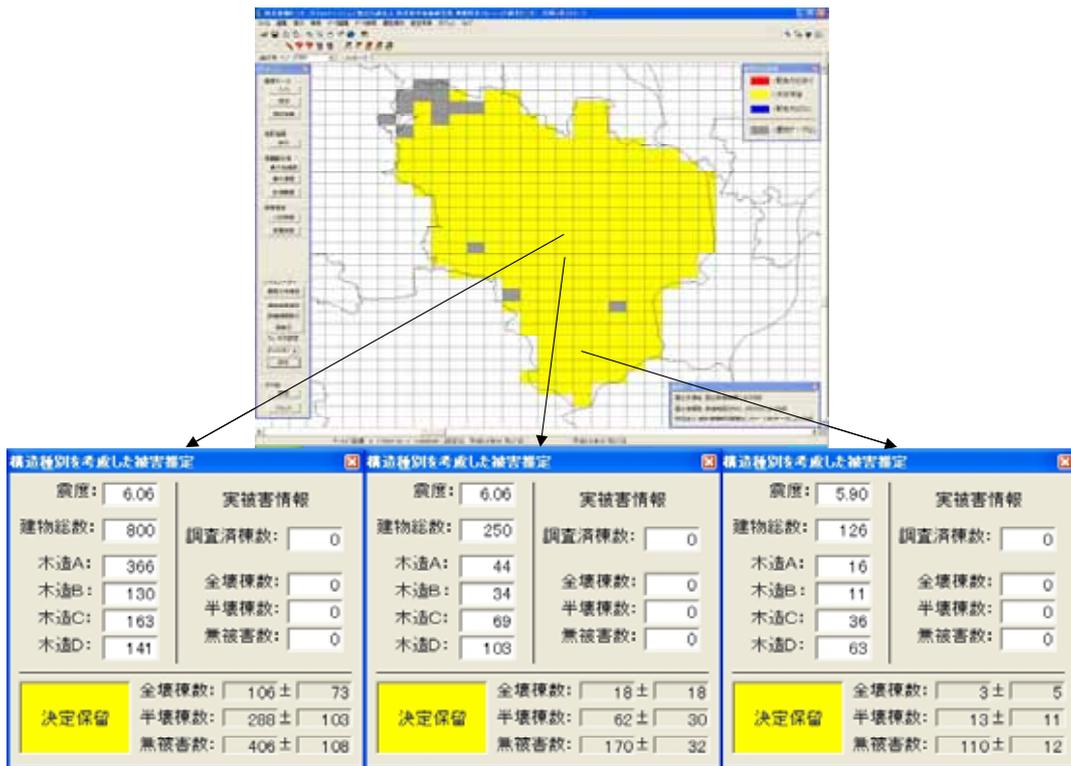


図 33 初期段階での被害推定と意思決定結果（大垣市）
 ($p_s=5\%$, $p_f=10\%$, $\alpha=20\%$)

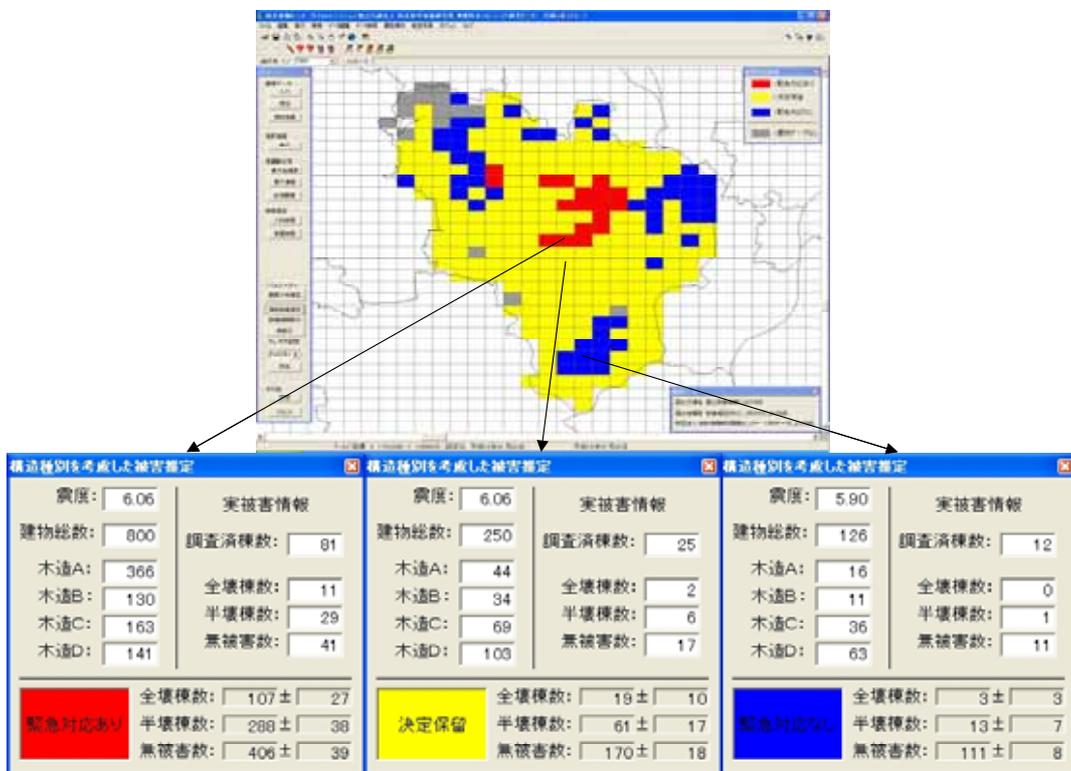


図 34 実被害情報により更新された被害推定と意思決定結果（大垣市）
 ($p_s=5\%$, $p_f=10\%$, $\alpha=20\%$)

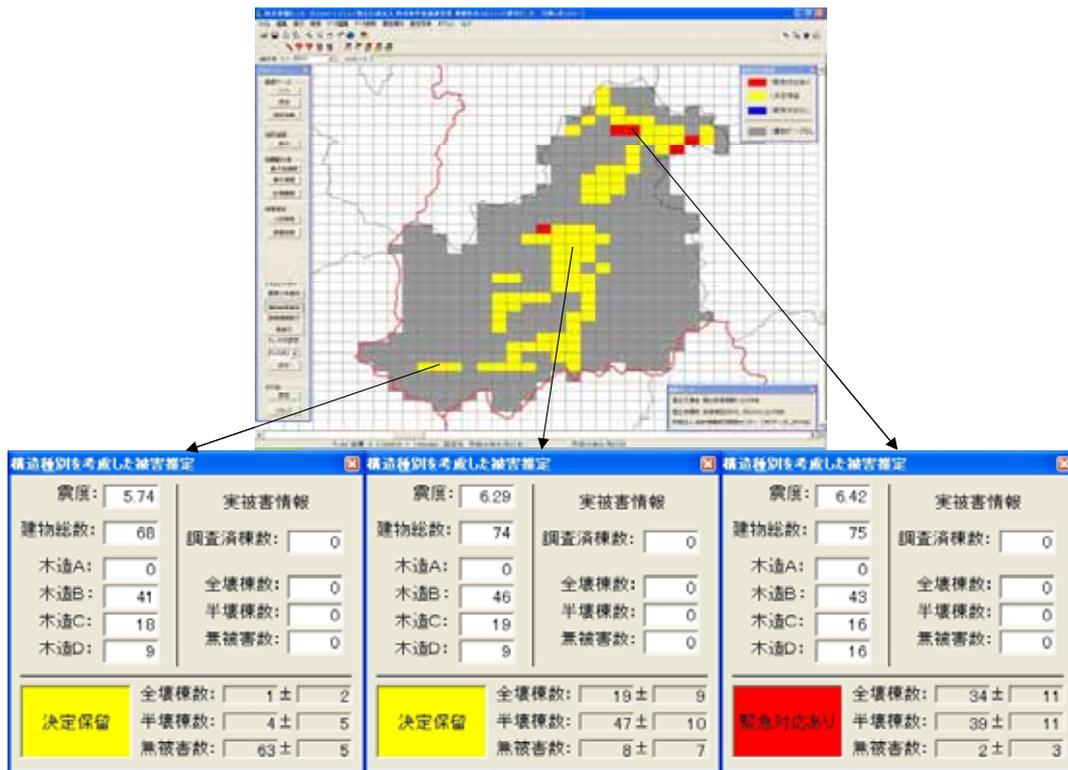


図 35 初期段階での被害推定と意思決定結果（上石津町）
 ($p_s=5\%$, $p_f=10\%$, $\alpha=20\%$)

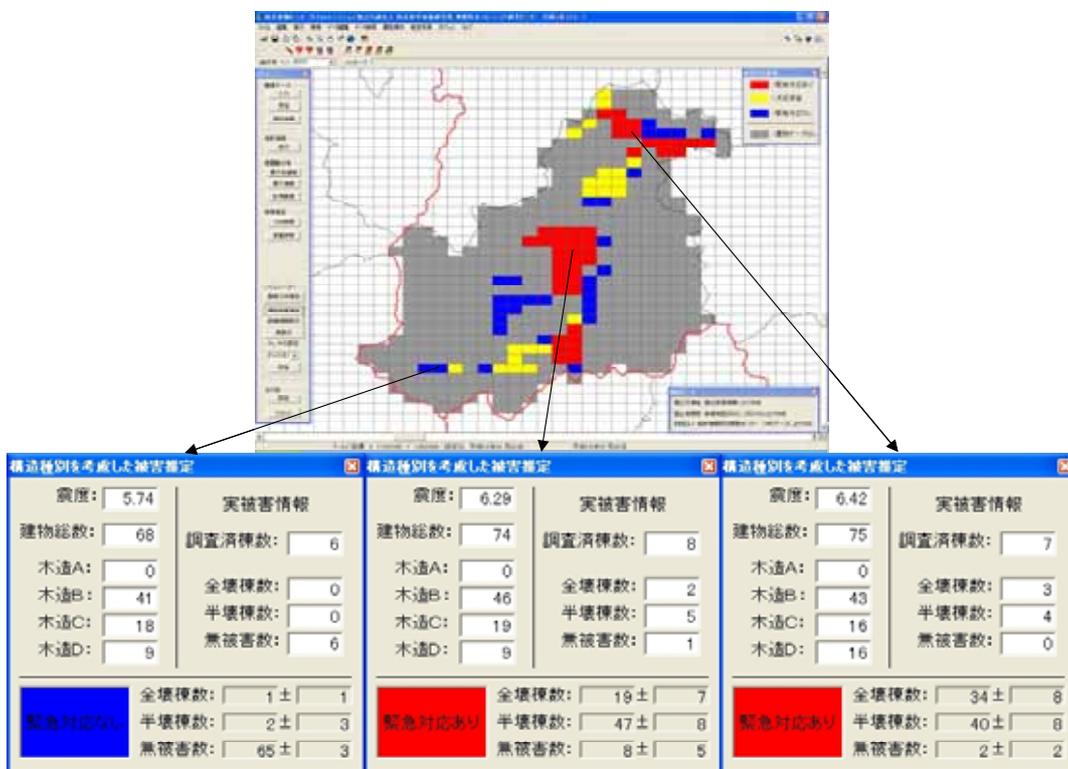


図 36 実被害情報により更新された被害推定と意思決定結果（上石津町）
 ($p_s=5\%$, $p_f=10\%$, $\alpha=20\%$)

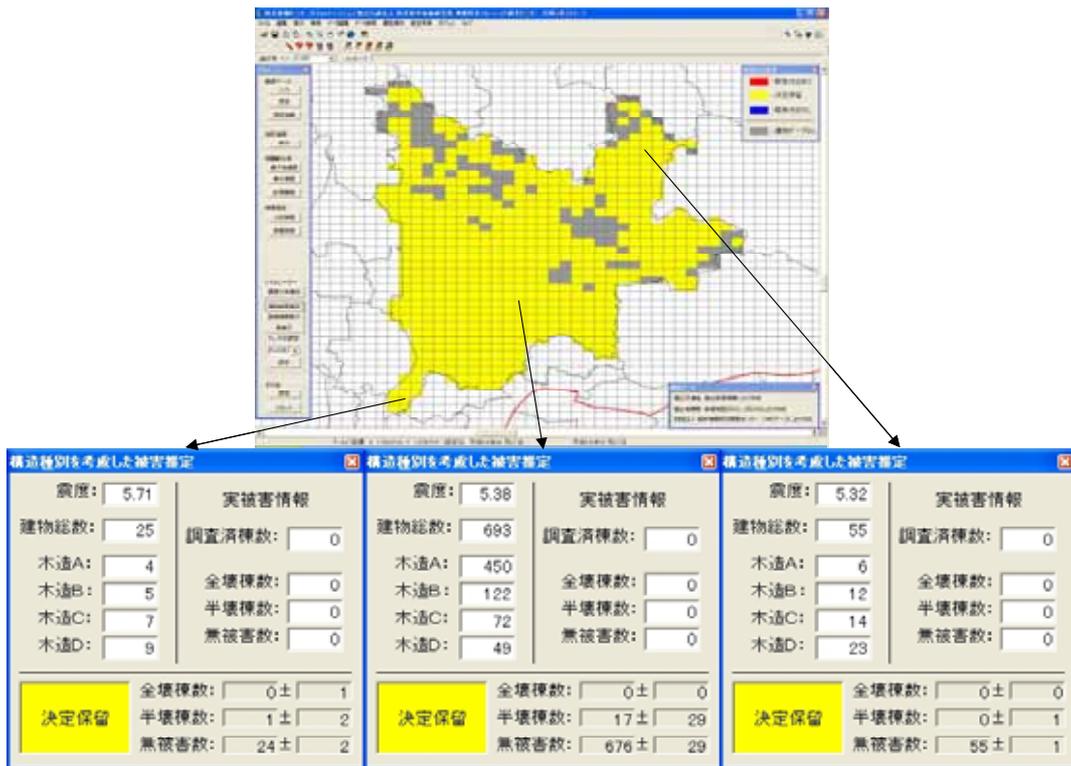


図 37 初期段階での被害推定と意思決定結果（岐阜市）
 ($p_s=5\%$, $p_f=10\%$, $\alpha=20\%$)

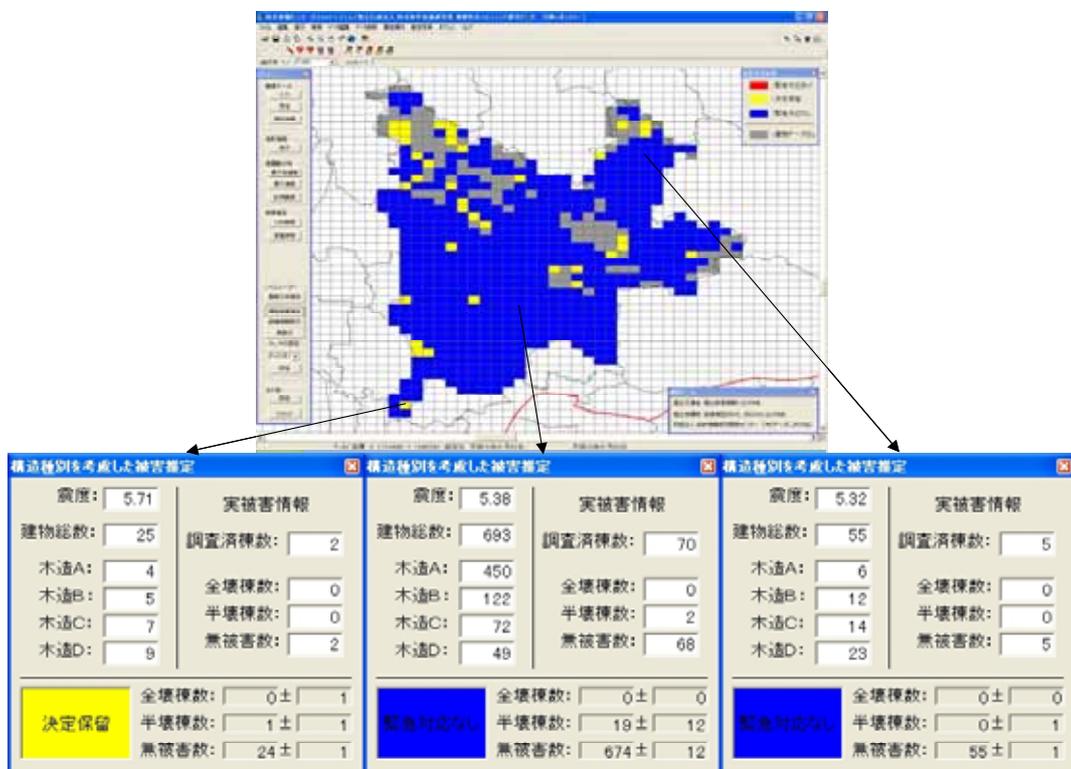


図 38 実被害情報により更新された被害推定と意思決定結果（岐阜市）
 ($p_s=5\%$, $p_f=10\%$, $\alpha=20\%$)

3) 結論ならびに今後の課題

- ・ ベイズ確率の方法に基づく確率更新のアルゴリズムを用いて、「被害情報の統合処理モジュール」のプロトタイプを作成した。さらに、逐次確率比検定のアルゴリズムを用いて、「緊急対応の意思決定支援モジュール」のプロトタイプを作成した。また、このモジュールの動作を規定する4種のパラメータ（基準全壊率 p_s 、 p_f 、許容誤り確率、 ϵ ）が意思決定プロセスに与える影響について分析し、それらの決定方法について検討した。
- ・ またこれらのモジュールを「リスク対応型地域管理情報システム」に試行的にプラグインすることによって、「工学的基盤面における地震動予測モジュール」、「表層地盤における地震動予測モジュール」、「被害関数を用いた早期被害推定モジュール」の3モジュール群と連動して動作するプロトタイプを作成した。想定関ヶ原-養老断層地震を対象として、時空間GIS表示による迅速・正確な被害把握と意思決定支援を目指す本開発システムの有効性を検証した。
- ・ 今後、非木造建物を含めて、早期被害把握および緊急対応の意思決定過程のデモンストレーションを行う予定である。
- ・ 実被害情報の収集過程については、現段階では、無被害を含めて建物一軒一軒の情報が得られることを仮定している。実被害情報の収集・伝達手段（GPS搭載のモバイル端末など）に関する課題をクリアするとともに、空撮画像およびリモートセンシング情報による広域被害推定との重ね合わせについて検討を進める必要がある。

(e) 引用文献

- 1) 能島暢呂・杉戸真太：リアルタイム地震防災システムにおける被害情報の統合処理について，第1回日本地震工学研究発表・討論会梗概集，2001.11，p.259.
- 2) 角本繁：時空間情報処理とリスク対応情報システムの構築に関する研究，京都大学博士論文，2002.5．
- 3) 山田博幸・古戸孝・浦山利博・末富岩雄・角本繁：リスク対応型地域管理情報システムのための全国空間データベースの構築に関する研究，土木学会地震工学論文集，2003.12，No.244．
- 4) Sugito, M., Furumoto, Y. and Sugiyama, T.: Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000, Paper No.2111 (on CD-ROM).
- 5) 杉戸真太・合田尚義・増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集，No.493/III-27，1994.6，pp.49-58．
- 6) 能島暢呂・杉戸真太・久世益充・濱本剛紀：震度情報ネットワークを利用したリアルタイム震度曝露人口推計，第22回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，2003.9，pp.209-210．
- 7) 岐阜県：岐阜県地震被害想定調査報告書，1998．
- 8) 岐阜県：岐阜県東海地震等被害想定調査報告書，2002．
- 9) 能島暢呂・松岡昌志・杉戸真太・立石陽輝・金澤伸治：建物被災地域の早期把握のための震度分布と人工衛星 SAR 強度画像の統合処理手法，地域安全学会論文集，No.4，2002.11，pp.143-150．
- 10) 松岡昌志・山崎文雄：人工衛星 SAR 強度画像を用いた被害地域検出手法の最近の地震への適用とその妥当性の検討，日本建築学会構造系論文集，No.558，2002，pp.139-147．
- 11) 奥野忠一・久米均・芳賀敏郎・吉澤正：多変量解析法《改訂版》，日科技連，1981，pp.313-321．
- 12) 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書(CD-ROM 添付)，1996．
- 13) 山口直也・山崎文雄：1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定，土木学会論文集，No.612/I-46，1999.1，pp.325-336．
- 14) 渡部洋：ベイズ統計学入門，福村出版，1999.9．
- 15) 能島暢呂・杉戸真太・金澤伸治：地震動情報と実被害情報の統合処理による緊急対応支援の数理モデル，土木学会論文集，No.724/I-62，2003.1，pp.225-238．

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

論文発表

- 1) Nojima, N. and Sugito, M., "Development of a Probabilistic Assessment Model for Post-Earthquake Residual Capacity of Utility Lifeline Systems, (Proc. of the 6th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, August, 2003, TCLEE/ASCE Monograph No.25, eds. J. E. Beavers), Long Beach, CA, USA, pp.707-716.

口頭発表・その他

- 1) 濱本剛紀・能島暢呂・杉戸真太：被害情報の統合処理による震後対応支援システムのプロトタイプ構築，第 58 回土木学会年次学術講演会，2003.9，I-345．
- 2) 能島暢呂・杉戸真太・久世益充・濱本剛紀：震度情報ネットワークを利用したリアルタイム震度曝露人口推計，第 22 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，2003.9，pp.209-210．
- 3) 能島暢呂・杉戸真太・鈴木康夫・佐藤寛泰：被災事例に基づく供給系ライフラインの地震時機能停止と復旧過程の予測 - 想定東海・東南海地震を対象として - ，地域安全学会梗概集，No.13，2003.11，pp.101-104．
- 4) 濱本剛紀・能島暢呂・杉戸真太：地震被害情報の統合処理に基づく緊急対応支援システムのプロトタイプ構築，第 27 回地震工学研究発表会，土木学会，論文番号 117(報告)，(CD-ROM)，2003.12．
- 5) 濱本剛紀・能島暢呂・杉戸真太：地震被害情報の統合処理に基づく緊急対応支援システムの構築，土木学会中部支部平成 14 年度研究発表会，2004.3，I-12，pp.23-24．
- 6) 神谷涼介・能島暢呂・松岡昌志・杉戸真太・濱本剛紀：地震被害の早期把握と逐次推定更新のための人工衛星 SAR 強度画像の活用，土木学会中部支部平成 14 年度研究発表会，2004.3，I-16，pp.31-32．
- 7) 能島暢呂：地震被害情報の統合処理に基づく緊急対応支援システムの開発，第 5 回地震災害マネジメントセミナー「GIS を利用した地震防災情報管理の最前線」- 事前予防・事後復旧における情報活用の現状と課題 - ，土木学会地震工学委員会地震防災技術普及小委員会，2004.3，pp.37-43．

(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

ソフトウェアのプロトタイピングの進捗状況については研究開発課題ごとの「業務の成果」で述べたとおりである．単体として稼動するソフトウェアを以下に掲げる．

名称「震度情報ネットワークを利用した面的震度推定およびリアルタイム震度曝露人口推計システム」

機能：観測震度をもとに面的震度分布を求め，即時的に震度曝露人口を推計する．

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 16 年度業務計画案

第 2 年度までに作成した，被害情報の統合処理と意思決定支援のための 7 モジュール群（工学的基盤面における地震動予測，表層地盤における地震動予測，各種被害関数を用いた早期被害推定，空撮画像処理・被災地判定，人工衛星画像処理・被災地判定，被害情報の統合処理，緊急対応の意思決定支援）のプロトタイプに関して，開発システムの本格的な運用に向けて下記に示すように改善を進める計画である．

- ・ 「**基盤面における地震動予測モジュール**」および「**表層地盤における地震動予測モジュール**」については，「面的震度分布推定システム」としてほぼ完成しつつあり，すでに単独で稼働可能な状況にある．そこで，基盤レベルでの補間と表層地盤の非線形増幅特性の両面で，さらなる推定精度の向上を図る．
- ・ 「**被害関数を用いた早期被害推定モジュール**」については，木造建物・RC 建物を対象として，地区ごとの建物属性を考慮して，地域特性に適合したフラジリティー関数の合成方法について検討を進める．
- ・ 「**人工衛星画像処理・被災地判定モジュール**」については，兵庫県南部地震で得られたデータに基づいて，被害ランクの尤度関数を再定義することによって，逐次更新アルゴリズムを改良して推定精度向上を図る．また「**空撮画像処理・被災地判定モジュール**」については，兵庫県南部地震の被災地域のデータに基づいて被害ランクの尤度関数を構築する．第 2 年度までに基礎的検討を行ったが，第 3 年度においてはさらに，「**被害情報の統合処理モジュール**」との親和性を考慮して，推定被災度を「 x 棟(パラメータ M_0) のうち $x \times x$ 棟(パラメータ n_0) が全壊」という形式で表現する手法について検討を進める．
- ・ 「**緊急対応の意思決定支援モジュール**」および「**被害情報の統合処理モジュール**」については，ベイズ確率の方法に基づく確率更新と逐次確率比検定のアルゴリズムを用いて，統合情報処理による被害の逐次先行予測システムが完成しつつある．そこで「面的震度分布推定システム」および「**被害関数を用いた早期被害推定モジュール**」と連携させたデモンストレーションを実施する．

また第 3 年度においては，開発システムの本格的な運用に向けて入出力データの仕様策定を行うとともに，上記モジュール群の「リスク対応型地域管理情報システム」へのプラグイン作業に入る方針である．具体的には，兵庫県南部地震や想定東海・東南海地震などを対象として，被害情報処理過程および意思決定過程のシミュレーションを，時空間 GIS (DiMSIS) 上で実施する．同様に，コアチームで用意する川崎市川崎区の検証用データを用いたシミュレーションを，時空間 GIS (DiMSIS) 上で実施する．プラグイン作業については，当面，「面的震度分布推定システム」，「被害関数を用いた早期被害推定モジュール」，「被害情報の統合処理モジュール」，「緊急対応の意思決定支援モジュール」の 4 つを先行して実施する計画である．

第 3 年度に実施される中間評価においては，上記のプラグインの進捗状況について報告するとともに，仮想的なシミュレーションを行った結果のデモンストレーションを行う予定である．