

地震・津波シミュレーション解析技術の 地域防災への活用 — 巨大災害から復興できる地域づくりのために —

甲斐 芳郎*

(受領日：2013年5月7日)

高知工科大学システム工学群
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

* E-mail: kai.yoshiro@kochi-tech.ac.jp

要約：東日本大震災の惨状を見るまでもなく、災害が予想される地域では、災害への備えはもちろんのこと、事前に災害後の復興に向けた検討や準備までも行っておくことが重要である。これが機能するには、まず当事者である一般の住民に被災のイメージを具体的に伝えることが有効であると考えられる。そのための道具として地震・津波シミュレーション解析技術の活用が考えられる。統合地震シミュレーションはこのために、対象地域の建物全体をモデル化し、地震時の挙動を解析技術を駆使して評価し、結果をアニメーションを用いてわかりやすく示すように開発されたものである。このシステムに高知県特有の条件を加味し、防災に役立てようとする試みを紹介する。具体的には、高知県下各地の地盤情報の取り込み、地域に存在する建物の構造種別や建設年代の特定、津波に対する建物の損傷評価法の開発、津波に対する海岸林の抵抗力のモデル化、実験による構造物に対する津波波力の評価、想定外を想定するために地震発生直後に解析を行いその結果を活用するための超高速計算の実現である。さらに、開発した地震・津波シミュレーション技術を地域に役立てる活動についても紹介する。

1. 東日本大震災の教訓

平成23年3月11日に東北地方を襲った大津波は数多くの犠牲者を生じ、今も仮設住宅での生活を強いられている住民が多数存在している。

被災した地域には、復旧・復興の計画も確定せず、未だに生き生きとした街並みが甦っていない所も多い。産業の復興も困難を極めている。

このような事態を避けるために、災害が予想される地域では、事前に復興に向けた検討や準備を十分に行っておくことが重要であるという指摘が各所から聞かれる。

ところで、災害社会学の分野では、とうの昔にこの議論は行われていたようである。平成7年1月17日の阪神淡路大震災後の復興の進み具合に、地域で開きがあったために、災害社会学の分野では地域の

災害に対する脆弱性 (vulnerability) に着目するだけでなく、災害から回復する力：レジリエンス (resilience) を強化することが重要であるとの議論が活発に行われていた。また、それに基づいた防災まちづくりの活動も行われてきたようである¹⁾。

しかしながら、その研究成果は残念ながら東北の被災地域には役立てられていないように見える。それは想定外という言葉が象徴するように、被害の具体的なイメージが災害の当事者である地域の住民に事前に伝わらない限り、実際の地域活動として機能しないからではないだろうか。

2. シミュレーション解析の可能性

近年、様々な解析技術が開発され、現象の事前予測がかなりの精度で可能となってきた。災害に対しては、過去の教訓に学ぶことはもちろんである

が、都市の近代化が進むことにより、過去の事例を参照するだけでは予期できない状況も存在する。

東京大学地震研究所の堀宗朗教授はこの状態に鑑み、様々なシミュレーション技術を統合することにより、都市の災害の様子を精度よくシミュレーションし、結果をアニメーションなどでわかりやすく示す「統合地震シミュレーション(Integrated Earthquake Simulation)」を開発した²⁾。解析のモデルイメージを図1に示す。以下では、このシステム

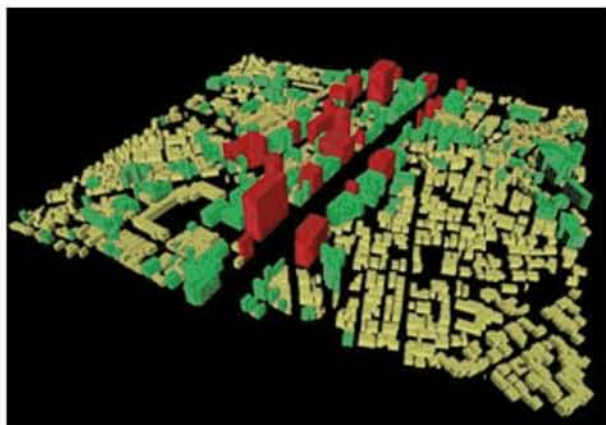


図1. 統合地震シミュレーション

を活用し、地域防災に役立てる試みを紹介していこうと思う。

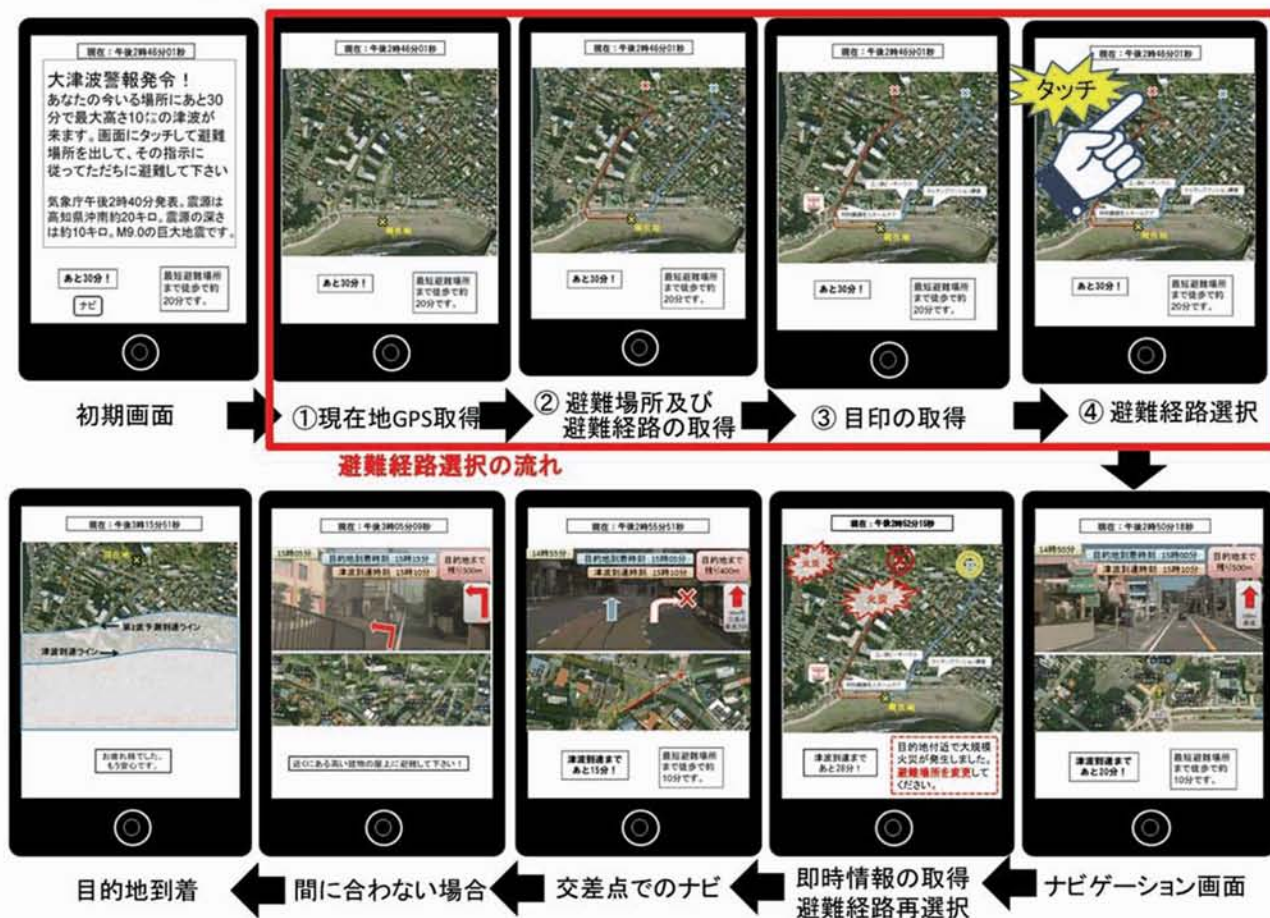
3.地域防災への活用のイメージ

3.1 緊急対応

津波被災のイメージが薄い地域に対して、解析を用いての警報が考えられる。

津波被害を度々経験し、地震発生後、津波がすぐに到達する地域では常日頃津波避難に備えた活動が活発に行われている。東日本大震災においても、従来から津波被害が強調されていた三陸の沿岸では津波避難が適切に行われたようである。それと比較して仙台よりも南側の沿岸地域では、過去に際立った津波被害が報告されてこなかったこともあり想定外という声が多く聞かれた。

沿岸地域において、津波が到達するまでにそれなりの時間がかかる地域も存在する。そこで、津波発生直後に実際の津波の波源を観測し、その波源を用いた津波遡上解析を超高速で行い、津波到着前に想定される津波遡上域を発信することで、津波遡上を真剣に考えていない地域の人々にも実データに基



©2011 Google - 画像 ©2011 TerraMetrics, NASA, 地図データ ©2011 SK M&C, ZENRIN

図2. 「デジタル皆助ナビ」の画面のイメージ

づいたシミュレーション解析により、想定外の津波が間もなく押し寄せることを伝えることができればと考えている。

図 2 はこの目的のために東京工科大学デザイン学部板宮朋基助教らが開発を進めている「津波等避難ナビシステム“デジタル皆助ナビ”」³⁾のイメージである。システム完成後は避難の必要がない中小の津波も含めて、このようなシミュレーション解析の計算結果の発信を継続的に行うことにより、予想に用いられている津波遡上解析結果と実際の津波遡上の対応を日常的に市民に感じてもらおうと考えている。このような継続的な信頼の積み重ねが、いざという時の避難につながると考えている。

3.2 応急復旧

自然災害、都市災害及び緊急処理事態における自治体の防災活動を支援し、被害の軽減や住民の安全・安心の確保のために、総合防災情報システムなるツールが活躍している。これは、市民から寄せられた被災状況を、GIS などを活用して一元管理し、より効率的な復旧・復興活動に役立てようとするものである。

図 3 は高知市総合防災システムの画面イメージである。図では各家屋は白地図となっていて付加的な情報は無い。市職員は、市民からの情報をこの白地図に書き加えていくことで、効率的な防災活動を行っている。

このシステムに統合地震シミュレーションで得られた様々な情報を加えることを考えてみよう。地震が生じた際に観測された地震波を用いて統合地震シミュレーションを動かすことで、地域の被害状況を推定することができる。具体的にはどの地域の家屋の倒壊が予想されるか、どの地域は比較的地震被害が少ないか、などである。また、津波の浸水域に関しても同様の推定が可能であるし、後述するよ



図 3. 高知市総合防災システム

うに津波による家屋被害も推定することができよう。この推定結果を総合防災システム上に表示し、市民からの連絡に対応する際に、被害状況をイメージしながら対応ができるようにすれば、対応の内容も、復旧・復興作業も大幅に効率化されるのではないだろうか。

3.3 長期復興

1 章でも述べたように、巨大災害からの復興に際しては、多くの努力を要する。関係者も多く、復興に向けての作業も多いため一朝一夕には達成することは難しい。さらに言えば、早期復興に向けて、被災前から適切な対策、いわゆる事前復興の考え方が重要になる。これが 1 章で述べた災害に対する地域の回復力：レジリエンスとなる。

しかしながら、日々の暮らしの中で、巨大災害後の自身の姿を想像することはそれほど容易いことではない。昨年には東日本大震災の地震規模を踏まえて、内閣府より南海トラフを震源とする巨大地震・津波の想定が発表され、各地の震度や津波高さが公表された。これを受けて県や市町村はそれぞれの地域の被害想定や浸水域想定の結果などを公表している。それでも、それらの想定の結果、それぞれの地域の被災状況を想像することは難しいのではないだろうか。30m を超える津波が襲来すると聞かされ、ただ恐れ諦めるのでは想定の意味がない。

統合地震シミュレーションを用いれば、このような災害想定により、地域のどの建物が地震で倒壊し、あるいは津波により、どの建物が流失してしまうのか具体的なイメージをアニメーションなどで表現して提供することができる。また、災害の際の時間的な経過についても知ることができる。それにより、地域住民は災害後の復興の姿や事前に行うべき策が考え安くなるのではないだろうか。

4. 活用に向けての取組み

上述のようなイメージの元、現在行っている活動について紹介する。

4.1 高知県地盤モデルの導入

高知「ユビキタス(防災立国)」実証事業(<http://www.geonews.jp/kochi/>)⁴⁾では高知市内を対象として国土交通省、高知県および高知市が実施した公共事業の成果である地盤ボーリングデータをインターネットの Web-GIS システムを利用して提供している。合わせて地盤条件を考慮した地表の最大加速度分布、震度階分布、最大速度分布および液化化危険度、斜面崩壊危険度の評価結果も公開してい

る。さらに、平成 24 年度からは高知「選定フィールド実証」事業として香南市、南国市、土佐市、須崎市、中土佐町、黒潮町を含めたボーリングデータおよびそれを用いた 2 次情報の公開に向けて活動が進んでいる。

このデータを統合地震シミュレーションに取り込み、地盤の影響を考慮した建物の損傷の予測やさらに高度な地震応答評価が行えるように開発を進めている⁵⁾。図 4 に統合地震シミュレーションに取り込んだ地盤データを図化したものを示す。このように、現在収集されている地盤データは地点ごとの情報であり、地域の地盤構造を推定するためには更なる検討が必要である。現在、地域全体の地盤モデル構築に向けて検討を進めている。

4.2 建物の構造種別、建設年代に応じた解析

建物の地震や津波に対する挙動は建物の構造種別により異なることはもちろんのこと、建設年代に応じても傾向が異なる。これは、主に建築基準法が改定され構造安全性が向上してきていることによる。したがって、統合地震シミュレーションにおいて、構造種別、建設年代のような個別の建物の情報を得ることは解析の精度に大きな影響を及ぼす。しかしながら通常の地図データでは建物の平面形状は判別できるものの建物の構造種別や建設年代といった情報は存在しない。

一方、各自治体は、それらの情報を把握している。そこで、自治体よりそのような情報を提供してもらい、解析に反映する作業を進めている。図 5 に調査事例を示す。残念なことに、そのような建物の情報の中にはその所在地に関する情報が不十分な場合が多い。ある自治体ではその 4 割のデータがどの建物の情報であるか特定できなかった。そのため、建築面積や高さといった情報から個々のデータを特定する作業を自治体と協力して続けている。

それぞれの建物の形状、構造種別、建設年代が特定できると、それらの情報に従って、地震に対する

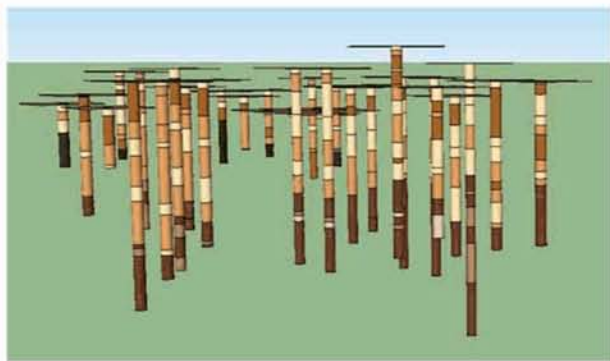


図 4. 地盤モデルの検討

建物の応答や損傷の程度、津波に対する浸水量や損傷の程度を評価する。ここで、課題となるのは、上述の情報だけで建物の構造解析モデルを作成する必要があるということである。

通常、建物の構造解析モデルは建物の設計図などの図面情報から作成する。しかしながら、地域に存在する建物全体を解析しようとする場合、全ての建物の設計図を手に入れることはほぼ不可能である。したがって、限られた情報から建物の構造特性を推定する方法を確立する必要がある。

現状の統合地震シミュレーションでは鉄骨構造と鉄筋コンクリート構造に関しては、構造種別、建設年代から非線形構造解析モデルを設定する方法を提案し、運用している。これにならって、木造建物に関して、建設年代からの非線形構造解析モデルを設定する方法を検討している⁶⁾。また、柱はり接合部に金具を用いない土佐伝統の木造建物についても地震時の挙動が再現できるよう検討を行っている⁷⁾。

4.3 津波に対する建物の損傷解析

地震動に対する建物の応答と同様に津波に対する建物の挙動の評価についても検討を始めている。津波に対する建物の構造被害については、経験的に木造建物に関しては津波が地上 2 m を超えると被害が避けられないとされている。鉄筋コンクリート造建物の津波被害に関しては、津波避難ビルに対する構造要件としてまとめられている。これらの情報を参照し、津波による建物の被害を解析的に予測する検討を行っている⁸⁾。図 6 に津波に対する構造解析モデルの例を示す。この例では、津波により、建物のピロティ部分が破壊する現象を解析できるようになっている。

地震応答解析と同様に、限られた情報から地域に存在する建物の津波応力解析モデルを作成し、それらの津波に対する損傷状況が推定できるよう解析



図 5. 建物を構造種別で色分けした図
(ピンク：RC 造 緑：木造 白：未特定)

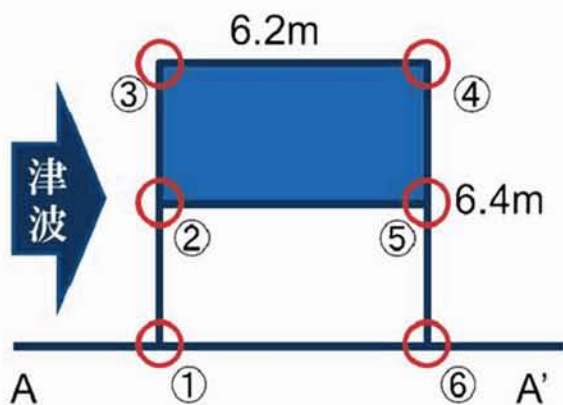


図 6. 津波応力解析モデル

手法の整備を続けている。これにより津波被災後の街並みの状況が予想できるようになると期待している。さらに、津波に対する地域の脆弱性についても一般市民にわかりやすく伝えることができればと考えている。

4.4 海岸林の復元力特性

シミュレーションを行っても、それが現実と異なっているのは、地域防災に誤った判断を与えてしまう可能性がある。解析の妥当性を確保するために、実験的な研究も行っている。

一つ目は海岸林の倒壊耐力に関する現地試験である⁹⁾。

日本沿岸各地では防風、飛砂・飛塩防止、防霧機能等の防災機能を果たすため、古くから海岸の植林が進められその土地ならではの景観を形作ってきた。この海岸林は津波の際にも波力を弱め、また船舶などの浮遊物の侵入を防ぐなど東日本大震災においても防災に多くの役割を果たしたことが確かめられている。

現在、様々な津波遡上解析が行われている。一般的に行われているのは、地上部の構造物などを無視して、地形データのみから津波遡上解析を行うものである。一般に地上構造物が存在するとそれだけ津波の遡上が抑制されるため、地上構造物を無視した

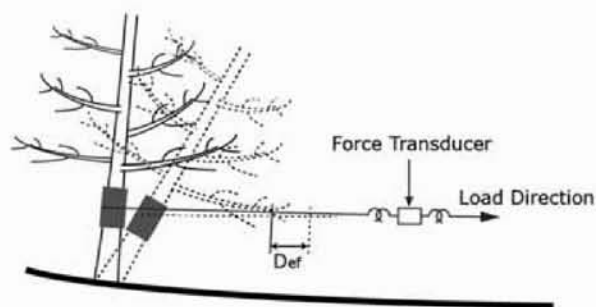


図 7. 樹木引き倒し実験の概要

解析は津波の遡上域を広めに評価し、防災計画では安全側の評価になるものと考えられる。しかしながら、地上構造物の影響で津波の遡上が抑制されれば、行き場を失った海水が回り込んで浸水量が増してしまう地域も存在する。そのような地域にとっては構造物の存在を無視した評価は危険な評価となっている可能性がある。

同様に、海岸林の影響を考慮した津波遡上解析を行うことは、地域の津波被害予測を行う上で、重要な作業であると考えられる。ただし、海岸林の効果は限定的であり、津波の規模によっては樹木が根こそぎ流されてしまい、その機能を失ってしまう。そのため、海岸林の効果と限界の両方を加味した検討が大切である。

海岸林を考慮した津波遡上解析を行うためには海岸に植えられた一本一本の木をモデル化し、それぞれの海外林の津波に対する挙動を適切に表現することが必要である。そのため、実際に海岸に赴き海岸に植えられた樹木を引き倒して、その復元力特性を計測する作業を行っている。樹木引き倒し実験の概要を図 7 に示す。実験では海岸の樹木を実際にロープで引き倒し、樹木が倒伏するまでの力や変形を計測することで、樹木の復元力特性を評価する。今後、その復元力特性の定式化を行い、海岸林を考慮に入れた津波遡上解析を行ってゆく予定である。

4.5 津波遡上実験

もう一つは津波の遡上の様子を実験にて検討を行う津波遡上実験である¹⁰⁾。

津波の解析では、津波の遡上域を明らかにすることはもちろん大切だが、津波により建物に作用する力を明らかにすることが、津波に対する建物の安全性を評価するうえで大変重要である。

津波荷重に関しては、実際の津波被害の状況から



図 8. 津波遡上実験の様子

津波の浸水深と建物に作用する荷重の関係を明らかにしようとする試みが行われている。これらの研究では建物の耐力、建物の被害状況から建物に作用した外力を推定し、この結果とその地域の浸水深との関係を明らかにしようとしている。

これに対し、現在行っている実験は、一様勾配を持った水路に津波に相当する波を起こし、その波が水路をどのように遡上していくかを観測している。実験の様態を図 8 に示す。本格的な津波実験施設を準備することが難しかったため、本実験は隣接する片地小学校のプールを借用して行った。この極めて原始的な方法では、津波の波形まで制御することはできないが、津波の一般的な特性は再現でき、ビデオなどを用いて津波の性状に関する計測もできることが確認できた。

今後は、水路の陸域に建物を設置し、建物に作用する圧力を実際に計測し、解析で得られる圧力との関係を明らかにする実験を計画している。さらに建物の形状や配置、複数の建物が存在する場合の水の流れや建物に作用する圧力を観測することも計画している。これらの実験には精度が要求されるため、次回の実験では外部の本格的な津波実験施設を借用しようと考えている。

4.6 解析の高速化

3 章で述べたように、シミュレーション解析を地震発生直後に観測された地震波形や津波波源を用いて高速に行えば、防災に大いに役立つものと期待できる。このため、シミュレーション解析技術の高速化に取り組んでいる。具体的には高知工科大学に設置したスーパーコンピュータの計算能力を最大限に活用することである。

スーパーコンピュータには 2 種類の計算ユニットが装備されている。ひとつは CPU と呼ばれるパソコンにも用いられている計算装置である。メモリの管理から計算の同期などあらゆる操作がうまくゆくよう管理されている。もう一つは GPGPU と呼ばれるもので、本来パソコンからの出力を画面に表

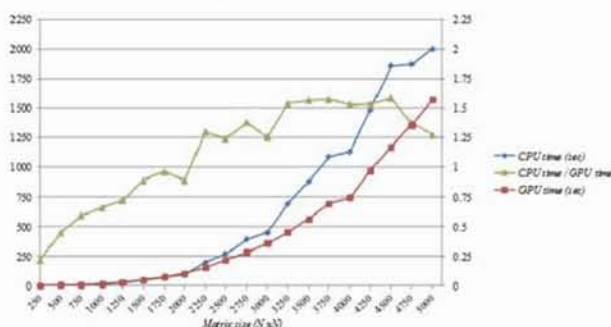


図 9. CPU(左軸)と GPU(右軸)の演算時間

示するための信号の処理を行うために開発されたもので、CPU とは異なりメモリの管理や計算の同期など複雑なことは一切行わずに、与えられた計算をひたすら行う。そのため、その演算時間は格段に早い。例として図 9 に単純なマトリックスの乗算について、CPU (Intel Xeon Processor E5645) による演算時間と GPGPU (Tesla M2050) による演算時間を比較して示す。マトリックスのサイズにも依存するが凡そ 1000 倍程度の速さで演算を行うことができることがわかる。

統合地震シミュレーションは都市全体を解析するため、個々の建物の解析は複数の CPU に分散させて計算することで、解析時間の短縮を図っている。さらに、個々の建物の構造解析についてはマトリックス演算など基本的な解析部分で GPGPU を用いた並列計算が行えるよう開発を進めているところである¹¹⁾。

津波遡上解析についても同様にスーパーコンピュータでの高速演算を目標に既往の遡上解析プログラムのオブジェクト分析を行い、今後の並列計算プログラム作成に向けて取り組んでいる^{12,13)}。図 10 に完成させた津波解析のクラス構造を示す。このような分析から、津波の水位や流速の解析を行う各計算格子の演算は独立に行えることが明らかになった。この特性を利用して GPGPU を用いた高速演算が行えるよう、開発を進めていく予定である。地震発生直後に高速演算を行い、津波到来前にシミュレーション解析結果を公表できることを楽しみにしている。

4.7 統合減災マネジメント研究室

大学で行っている防災に関わる様々な研究を地域防災に役立てるために、地域連携機構連携研究セ

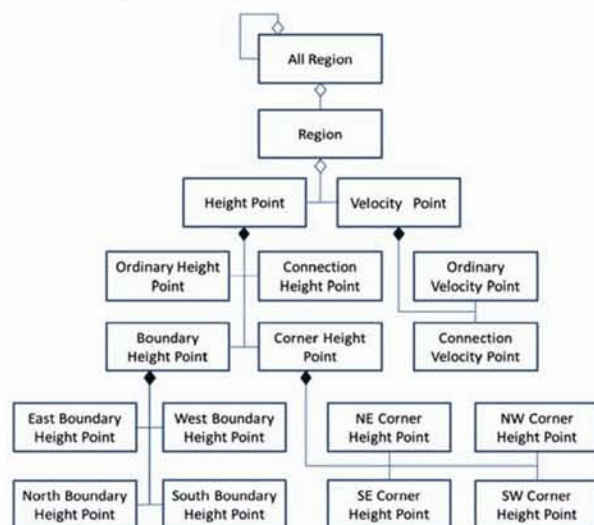


図 10. 津波遡上解析のオブジェクト分析結果

ンターの中に統合減災マネジメント研究室を設置している¹⁴⁾。これまでに示したシミュレーション解析技術も当然地域の減災に役立てようと考えている。

ここで目指しているのは、減災に役立つ最先端の技術を導入すること。導入した技術を高知県各地に適用すること。適用した結果を各地に発信すること。そして、技術を学内にとどめるのではなく、技術そのものを学外に展開することである。

この一環として、高知県沿岸 19 市町村の津波遡上解析を実施した。また、検討を行った津波遡上解析結果はアニメーションにして地方自治体だけではなく一般の希望者に対しても公開している。

また、津波解析技術を身に付けようという企業に対しては、解析ソフトの利用方法を講習し、実際の業務に役立てられるよう協力を行っている。これにより、それぞれの地域のニーズに即したシミュレーション解析が数多く行われ、地域の回復力向上にすることができれば、これ以上の喜びはない。

5. おわりに

ここまで、シミュレーション解析をベースとした防災への取り組みについて紹介してきた。統合地震シミュレーションのソフトを高知工科大学に導入したのは一昨年夏のことである。同時期に津波解析のソフトを東北大学今村文彦教授の研究室より導入し、高知県が抱える地震リスクに関するシミュレーションを行う体制を整えることができた。これを実際の防災に役立てるには、地域に即したデータを用いて、地域ニーズに即したアウトプットを、地域住民に伝わる形で提示していく必要がある。

災害は明日にも襲ってくるかもしれない。それに対して、研究の歩みは遅々としているが、地震・津波による死者を 0 とし、被災後も各地域が生き生きと復興を成し遂げられるよう、努力を続けていこうと思う。

文献

- 1) 浦野正樹、“災害社会学の岐路——災害対応の合理的制御と地域の脆弱性の軽減”、大矢根淳・浦野正樹・田中淳・吉井博明編 災害社会学入門、弘文堂、pp.35-43、2007
- 2) Hori M, Ichimura T and Oguni K. “Development of Integrated Earthquake Simulation for Estimation of Strong Ground Motion”, Structural Responses and Human Action in Urban Areas. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing). 7 (4). pp. 381-392, 2006.
- 3) 東京工芸大学、“プレスリリース「津波等避難ナビシステム “デジタル皆助ナビ”」の実証活動に着手(<http://www.teu.ac.jp/press/2012/022565.html>) ”
- 4) 総務省 高知「ユビキタス (防災立国)」実証事業、“高知県地盤災害関連情報ポータルサイト (<http://www.geonews.jp/kochi/>) ”
- 5) 井口直人、甲斐芳郎、“統合地震シミュレーションに用いる高知市の三次元地盤モデルの作成”、日本建築学会四国支部研究報告集、第 13 号、pp.59-60、2013
- 6) 兵頭慶祐、甲斐芳郎、平井宏、“木造の構造耐震診断指標 I_w と実被害との関係評価”、日本建築学会四国支部研究報告集、第 13 号、pp.43-44、2013
- 7) 河野あすみ、甲斐芳郎、“伝統木造構法住宅の耐震性向上のための研究”、日本建築学会四国支部研究報告集、第 13 号、pp.39-40、2013
- 8) 中川英里香、浅田啓介、甲斐芳郎、“建物の津波被害調査結果を用いた構造物に対する津波荷重の算定方法の検討”、日本建築学会四国支部研究報告集、第 13 号、pp.33-34、2013
- 9) 川口誠史、甲斐芳郎、今井健太郎、原田賢治、南幸弘、二宮栄一、“海岸林の倒伏耐力評価式の高度化”、日本建築学会四国支部研究報告集、第 13 号、pp.31-32、2013
- 10) 門田龍介、大塚和樹、甲斐芳郎、“津波模型実験による検証用データの整理”、日本建築学会四国支部研究報告集、第 13 号、pp.25-26、2013
- 11) Panon Latcharote, 甲斐芳郎、“High Performance Computing of Dynamic Structural Response Analysis for the Integrated Earthquake Simulation”、日本建築学会四国支部研究報告集、第 13 号、pp.57-58、2013
- 12) 深津宗祐、甲斐芳郎、“オブジェクト指向による津波数値解析の分析 その 1 クラス構造の確立”、日本建築学会四国支部研究報告集、第 13 号、pp.27-28、2013
- 13) 深津宗祐、甲斐芳郎、“オブジェクト指向による津波数値解析の分析 その 2 クラスのモデル化”、日本建築学会四国支部研究報告集、第 13 号、pp.29-30、2013
- 14) 高知工科大学、“統合減災マネジメント研究室 (http://www.kochi-tech.ac.jp/renkei/labo/kai_lab.html) ”

Earthquake and Tsunami Simulation Analysis Technology for the Disaster Management

– For the Community Which can Revive from Catastrophes –

Yoshiro Kai*

(Received: May 7th, 2013)

School of Systems Engineering, Kochi University of Technology,
185 Tosayamadacho-Miyanokuchi, Kami, Kochi, 782-8502, JAPAN

* E-mail: kai.yoshiro@kochi-tech.ac.jp

Abstract: Seeing the tragic state of the Great East Japan Earthquake, it is important to carry out not only the preparation to a disaster, but also the examination and the preparation towards the reconstruction in advance. For this functioning, concrete image of suffering a calamity can be good information to the ordinary residents who are the stake holders. In order for that, use of earthquake and tsunami simulation can be considered. Integrated Earthquake Simulation (IES) is the tool for this purpose, which consists of modeling of the whole building of the region, evaluation of the response of each building to the earthquake, illustration of the result using animation. The activities for utilizing the IES for disaster prevention considering the condition in Kochi are introduced. Issues are taking in of the soil information, specification of structure classification and construction age of buildings, development of the damage evaluation method of a building to tsunami, modeling of the resistance of a coastal forest to tsunami, experiment study of tsunami wave force and realization of ultra-high-speed computation to analyze immediately after an earthquake and to utilize the result before the accident. Moreover, the activity to utilize the developed earthquake and tsunami simulation technology is presented.