

# 地震災害予測のための大都市圏強震動シミュレータの開発

東京大学 地震研究所 瀧澤 一起

Development of the strong motion simulator for earthquake disaster prediction in the large cities of Japan.

Kazuki Koketsu, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

## Abstract:

We have developed a strong motion simulator for earthquake disaster prediction in the large cities of Japan. It consists of three modules that are the underground structure modeling module, the seismic wave propagation simulation module, and the web-based presentation module. The deep underground structures in the Kanto, Nobi and Osaka basins were built using the underground structure modeling module. The digital maps of geomorphological classifications and site amplification in these basins were also developed. The seismic wave propagation simulation module based on the parallelized voxel FEM can simulate seismic ground motions in a large-scale land and sea structure with surface topography. The statistical Green's function method was introduced to include high-frequency components of strong ground motion. The web-based presentation module can register simulation results for various earthquakes and publish them through the Internet.

## 1. はじめに

地震災害は稀な現象であるが、一旦起これば地域環境に与えるインパクトは甚大で、その影響は自然環境にとどまらず社会・経済環境など広範囲に及ぶ。この地震災害を高い精度で予測するためには、地震が起こす強い揺れ（強震動）を正確に予測することが必須で、都市再生の鍵となる技術のひとつと考えられる。強震動予測とは、地震動（地震による揺れ）が震源で発生し、それが複雑な地下構造を伝わって、我々の住む場所に到達する過程を再現することである。特に多くの大都市圏は大規模な堆積平野に立地し、その地下構造は複雑で三次元的に変化している。(1) この複雑な三次元地下構造を高精度でモデル化して、(2) モデルにおける地震動伝播を高精度かつ現実的な計算規模の数値シミュレーションで再現し、さらに(3) シミュレーション結果をわかりやすい形で提示して被害予測へつなげることが求められている。

本研究開発ではこれら一連の予測・モデル化を行うソフトウェアとして「大都市圏強震動シミュレータ」を、計算科学技術の成果を取り入れながら開発した。

## 2. 研究開発項目とその成果概要

### 2.1 地下構造モデル化モジュール

これまで個別の解析しか行われなかった各種地下構造探査データをデータベース化するとともに、それらを逆問題として総合的に解析するモジュールを開発した。さらにこのモジュールを関東平野、濃尾平野、大阪平野に適用し、大都市圏の深部地下構造モデル化を構築した。

また、関東平野、濃尾平野、大阪平野について表層地盤の増幅率を地形分類から計算し、GIS技術を活用してデータベース化を行った。その結果、これらの地域全域で500mメッシュ精度の増幅率マップを求

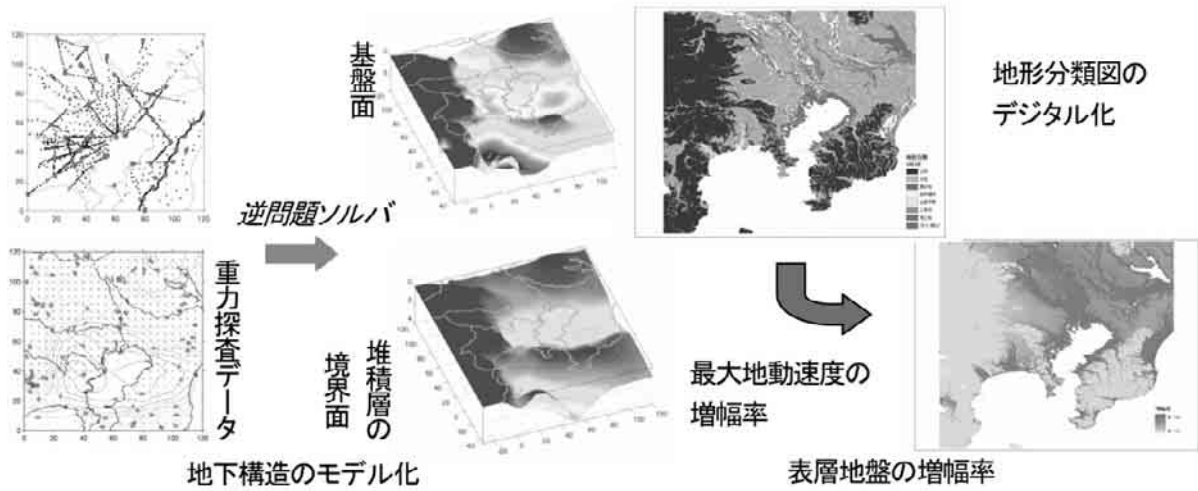


図1 地下構造モデル化モジュール

めることができた。また関東平野については更に50mメッシュを用いて高精度な増幅率マップを求めることができた。

## 2.2 地震波伝播シミュレーションモジュール

計算の大幅な効率化が可能なボクセル型有限要素法を導入し、以下のような特徴を持つコードを開発できた。

FEMを用いた震源を含む地震波伝播解析をクラスタPC上で実行可能

本システムはボクセル型有限要素法に大規模計算のための効率化を施し、これまで有限要素法では困難だと考えられていた、震源を含む大規模地震波伝播解析をスパコンのみならず安価なクラスタPC上で実行可能にした。現在、8台程度のクラスタPC上で約2億要素の計算が可能となっており、兵庫県南部地震のような50kmX50kmX30km程度の直下型地震およびさらに大規模な解析が必要な2003年十勝沖地震のような海溝型地震についても部分モデルによりクラスタPC上で実現した実績がある。また並列化効率も大幅に改良してきており、クラスタPCの台数を増やすまたはスパコンを使用することにより、海溝型地震についても震源を含む全体モデルで問題なく実行できると考えられる。

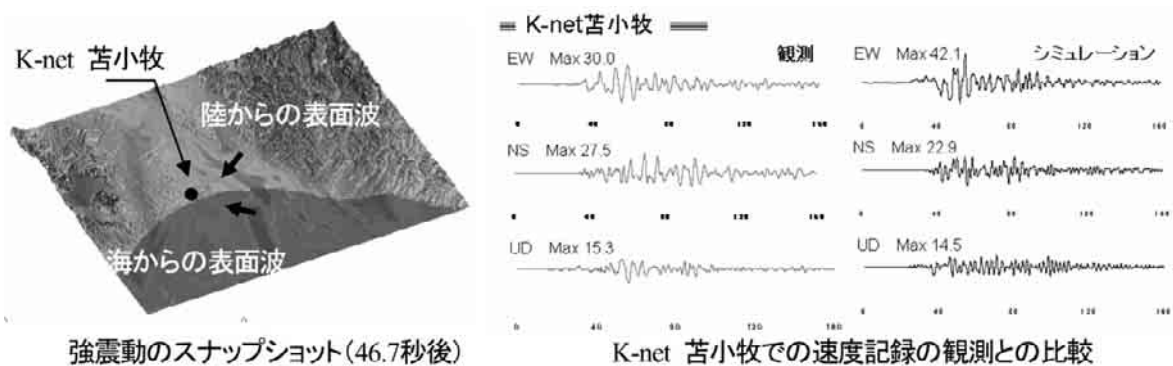


図2 平成15年(2003年)十勝沖地震の解析例

### 地下構造、海、地形の総てを考慮した解析が可能

本システムでは有限要素法の特徴を生かし、地下構造、海、地形の総てを考慮した大規模地震伝播シミュレーションを安定に動作させることが可能である。本システムで解析した興味深い問題として、2003年9月26日午前4時50分に北海道十勝沖で発生した「平成15年（2003年）十勝沖地震」の例を紹介する。我々は、図2に示すように、勇払平野とその周辺を海および地形を含めてモデル化し、平野外の地中記録を平面波としてモデルへ入力してシミュレーションを行い、盆地表面波の生成メカニズムの解明をはかった。その結果によれば、盆地表面波は主に海底下の盆地構造の東端部で発生し、海そのものの存在もその振動特性に影響を与えている。また、勇払平野東端部でも発生しており、その表面波と海からの表面波が苫小牧付近でいっしょになって大きな振幅、長い継続時間の長周期地震動を生み出していることが分かった。

### 広帯域の地震波シミュレーションおよび表層地盤増幅率を考慮した解析が可能

本システムでは、統計的グリーン関数法と組み合わせることにより広帯域の地震波解析を可能にした。ボクセル型有限要素法では低周波数領域での解析に有利なため、約1 Hz以下の低周波数領域の地震波を計算しているが、約1 Hz以上の高周波領域の地震波を統計的グリーン関数法コードを用いて計算することにより広帯域の地震波解析を実現する。図3に地震発生源と地下構造の位置関係および本システムでの解析適用範囲を示す。ここでボクセル型有限要素法コードでは震源から工学的基盤までの地震波を求めており、統計的グリーン関数法コードでは地震基盤までの地震波を求めた後に地震基盤から工学的基盤までの地震波の増幅率から工学的基盤での地震波を求めている。さらにこれら二つの方法による地震波をフィルターを用いて、双方の結果にハイブリット波形合成を行う。以上の処理により工学的基盤上での地震波が計算できる。最後に地表面までの浅部地盤の影響を増幅率として地震波に取り込むことにより地表面での地震動を求めることが可能となっている。

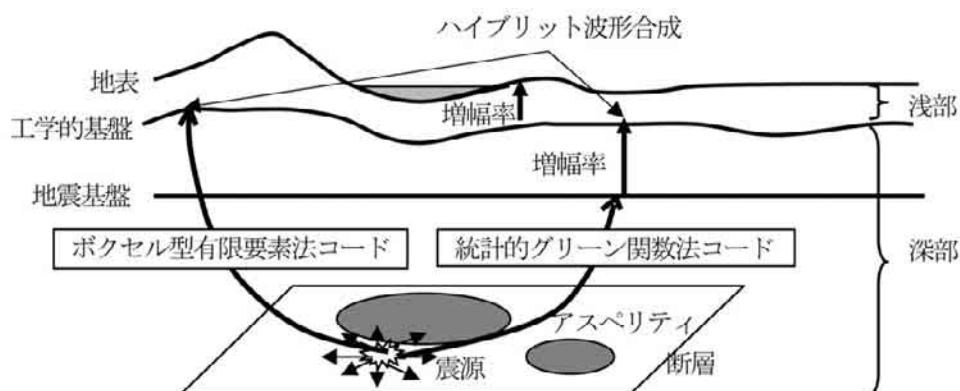


図3 広帯域の地震波シミュレーションおよび表層地盤増幅率を考慮した解析の概念図

## 2.3 プレゼンテーションモジュール

シミュレーション結果の可視化やデータベース化を行い、種々の地震を想定した強震動・被害予測をコンテンツ・アーカイブ技術で提示するシステムを開発した。構成は以下の通りである。

サーバプログラム：

- 1) (a)震源、(b)解析領域、(c)解析条件をそれぞれ設定し、解析結果を登録する。
- 2) 断層パラメータ詳細を入力する。

3) 「登録」等のボタンで、データベースを更新する。

クライアントプログラム：

- 1) 解析結果を(a)震源、(b)解析領域のいずれかの方法で検索できる。
- 2) 「表示」等のボタンで、解析結果の表示画面が表示される。
- 3) 地図/標高図を背景に、各解析結果を重ね合わせで表示できる。

### 3. ネットワークの活用について

本研究開発では、図4に示されるように強震動シミュレータの中核である、ボクセル型有限要素法による地震波伝播解析コードをMPIライブラリを用いて並列化することにより、ネットワークで接続された複数のPCを用いて大規模な計算を高速に実行できるように整備した。

また、先述のプレゼンテーションモジュールを用いることにより、インターネットを経由して種々の地震を想定した強震動・被害予測の解析結果を一般に公開することが可能なシステムを開発した。このプレゼンテーションモジュールでは、本強震動シミュレータで計算した結果をサーバプログラムから登録することが可能であり、最新の計算結果を随時インターネットを経由して公開することが可能となっている。

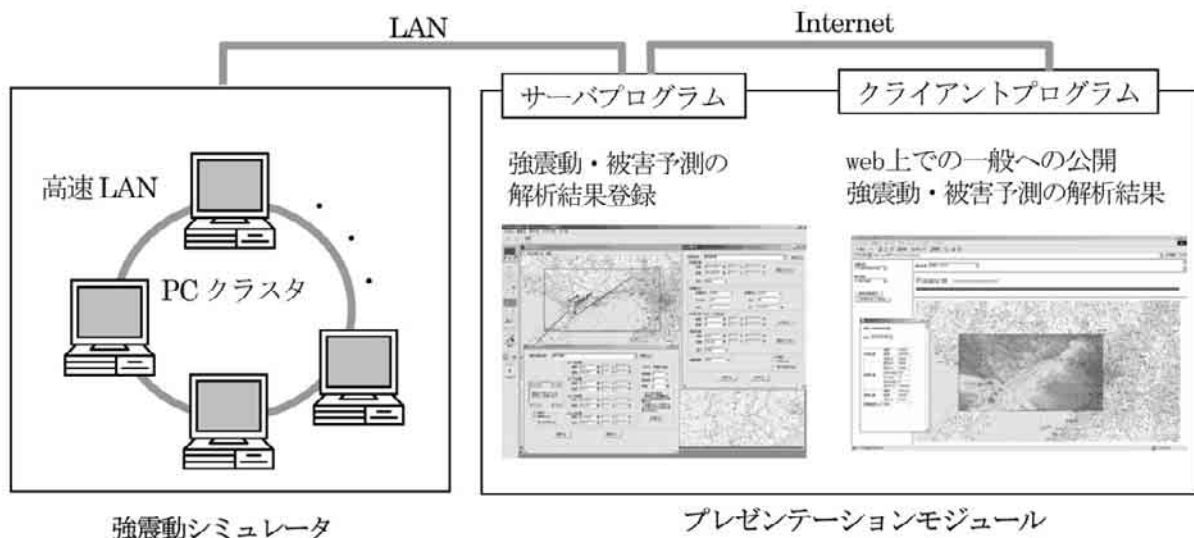


図4 ネットワークの活用について

### 4. まとめ

我々は、地震災害を高い精度で予測するためのシミュレータとして、地下構造モデル化モジュール、地震動伝播シミュレーションモジュール、プレゼンテーションモジュールを開発してきた。地下構造モデル化モジュールでは関東平野、濃尾平野、大阪平野の深部地下構造のモデル化を可能にした。また、関東平野、濃尾平野、大阪平野について表層地盤の増幅率を地形分類から計算しデータベース化を行った。本シミュレータで中核をなす地震波伝播シミュレーションモジュールでは、一般的に大規模な地震波伝播解析が困難とされる有限要素法をあえて採用し、並列化等の大規模解析のための改良を行うことにより実用的な地震波解析を行なえるようになった。さらに、これまで困難であった地下構造、海、地形の総てを考慮した解析を安定的に実行可能とした。また統計的グリーン関数法とのハイブリッド解析により、より現実的な広帯域での地震波シミュレーションを実現した。またプレゼンテーションモジュールでは、シミュレ

ーション結果の可視化やデータベース化を行い、種々の地震を想定した強震動予測結果をweb上で公開するシステムを開発した。

このように、地震学と最新の計算科学を融合して、一連の強震動シミュレーションを実行できる実用的なシステムを開発することができたのも、ACT-JSTの3年間に渡る多大なる支援のおかげである。ここに感謝の意を表す。

## 5. 研究開発実施体制

代表研究者 東京大学 地震研究所 額縁一起

研究分担

研究開発項目：地下構造モデル化モジュールの開発、深部地盤構造データベース化

東京大学 地震研究所 額縁一起、古村孝志、アフニマル(15年度まで)

研究開発項目：ボクセル型FEMソルバの並列化、シミュレーション結果データベースの開発・広帯域地震動作成モジュールの開発、統合システムの開発

(株)CRCソリューションズ 中村均、池上泰史、柄谷和輝、酒井新吉

研究開発項目：地下構造モデル化モジュールの開発、表層地盤増幅率データベース化

独立行政法人 消防研究所 座間信作、畑山健、鄭炳表

研究開発項目：表層地盤増幅率データベース化

工学院大学 久田嘉章、久保智弘(現在、ABSコンサルティング)