

有限要素法による波動場解析の一例

学生会員 東京大学地震研究所 市村 強
正会員 東京大学地震研究所助教授 堀 宗朗

1. 研究の背景と目的

阪神大震災での経験からわかるように、都市部での大地震による震害は著しいものがある。この震害を防ぐことを考えるときに、都市部に於ける広域かつ高密度な「どこがどれくらいゆれるのか」という情報、すなわち、広域・高密・高精度な強震動分布の情報が提供されることの社会的意義・工学的意義は大きいものと考えられる。

従来、強震動分布をもとめる方法は三つのものが知られている。それはスペクトラム法などに代表される経験的手法、経験的グリーン関数をもちいる半経験的手法、計算機による波動場計算である。実際に震災対策にもちいるためには、強震動分布情報は定量的かつ精度保証されることが必要である。そのため、第三の手法である計算機による波動場計算がとるべく手法として望まれる。

その基礎研究として著者らは弾性波動場シミュレーションのための計算手法の開発を行っている。現在、地震波のシミュレーション手法としてもちいられている代表的なもののうち、有限要素法 (FEM)¹⁾、多重極境界要素法 (FMMBEM)²⁾、擬スペクトラム差分法 (PSMFDM) をもちいたシミュレーション・ツールの開発をおこなっている。ここでは、FEMをもちいた波動場シミュレーション法について概説する。

ここで用いているFEMでは、格子空間をボクセルメッシュで分割し、ヤコビ細胞ごとに反復をおこなわせて解いている（考えている領域をアイソパラメトリック一次メッシュで分割し、反復・連立方程式陰解法のひとつであるヤコビ法を用いて停留解をもとめる）。時間方向に関してはニューマークのベータ法にもとづいて離散化をおこなっている。通常の連立方程式を直接法で解く方法をもちいた場合には要素剛性マトリクスから全体剛性マトリクスをつくりさらに、それを解ける形に変換するための計算機環境が必要とされる。今回の解法では全体を均質なボクセルメッシュで離散化し要素剛性マトリクス

にもとづくヤコビ法によって停留解をもとめるため、物性定数の数に依存した要素剛性マトリクスを保持するための計算機環境だけが必要とされる。結果として、大幅に必要とされる計算機環境が軽減される。実際の地震の波動場がとるような媒質において、より詳細には複雑な構造があることは知られている（たとえば地表付近での物性の分布）。しかしながら、実際に大局的に数値シミュレーションにのせられる程度のオーダーで既知となっているのはせいぜい不整形成層構造として考えられる程度の分解能であり、考えうる物性定数もさほど多くの数にはならない。（たとえば関東平野での波動場シミュレーションを1[Hz]程度までで考えるときに一般的に考えられる物性は4種類程度であり、4層程度の不正形成層構造としてモデル化されることが多い³⁾）。以上より、本手法によれば十分に実際の地震の波動場がとるような数値計算モデルにおいて効率のよいFEM解析がおこなえることが期待できる。

また、この手法では全体剛性マトリクスをつくらずに要素剛性マトリクスにもとづいた反復解法をおこなうため並列計算機に適したアルゴリズムを容易に作成することが可能となることも特徴のひとつである。以下では、この手法を適用したFEM解析の適用例をしめす。

2. ボクセル FEM による波動場解析の一例

波動場解析の一例として実際に観測された地震のシミュレーションをおこない、実測データと比較をおこなう。また、断層破壊後の波動場（速度）の経時性状をも図示する。

シミュレーションの対象として1998年8月29日午前8:46に東京湾近郊で発生したイベントを選んだ。断層パラメータは表-1のようである。地殻・地質構造は³⁾にもとづいて決定した。

表 - 1

Lat.	Long.	Dep.	Strike	Dip.	Rake	Mag.
35.6N	140.0E	56km	213 °	66 °	-151 °	5.3Mw

キーワード：波動場解析，有限要素法，ボクセル

連絡先：〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

東京大学地震研究所 03-5814-5756

次にモデル化についてのべる。今回のシミュレーションでは1[Hz]以下の精度を保証する。ここでは、一波長を8つ以上の要素をもちいてあらわすこととする。これを指針として空間を離散した結果、以下のような離散化となった。地表から400[m]までは $50 \times 50 \times 50$ [m]メッシュ、1600[m]までは $100 \times 100 \times 100$ [m]メッシュ、3200[m]までは $200 \times 200 \times 200$ [m]メッシュ、それ以深 $400 \times 400 \times 400$ [m]メッシュ。計算領域としては、 $30 \times 44 \times 73$ [km]（南北×東西×深さ）を対象とした。その結果、自由度は22741332となった。時間方向の離散化についてはニューマークのベータ法（ベータ=0.25，ガンマ=0.5）をもちいた。震源は点震源で、変位制御のランプ・ファンクションであらわした。境界条件としては粘性境界を適用している。この自由度の計算を4000ステップおこなうのにメモリ1.8[GB]をもちいてORIGIN 2000の4CPU並列計算で32時間を要した。

図-1に地表からみたソースと観測点の位置関係をしめす。図-2ではシミュレーションされた結果と観測データとの比較をしめす（東西方向、速度[kine]）。図-3では、地表での時刻歴の波動場性状をしめす（速度ノルム[kine]、断層破壊後13.8秒（P波到達時）、22.2秒（S波到達時））。

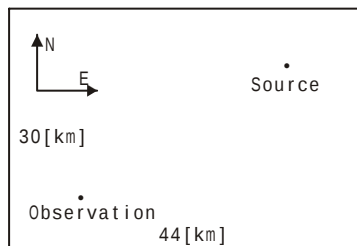


図 - 1

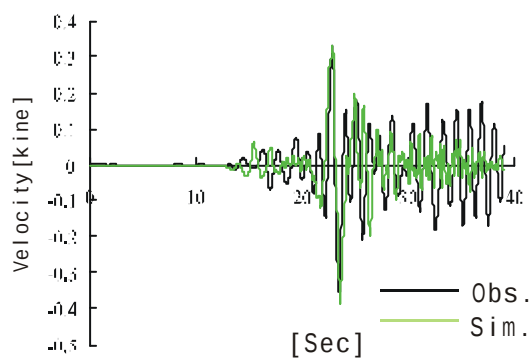


図 - 2

3. 結論

現在までで6000万自由度程度の問題を現実的なCPU時間で解析できることが実証されている。しかしながら、この手法で

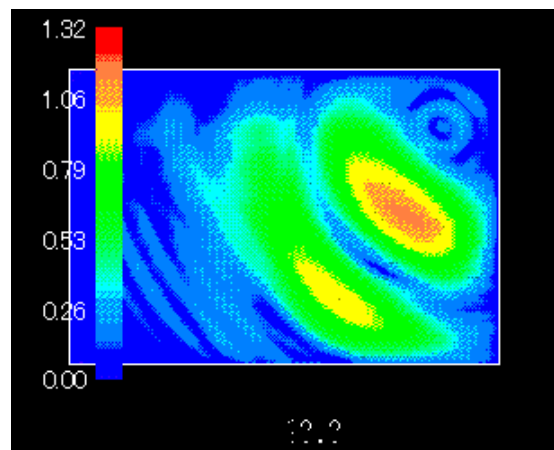
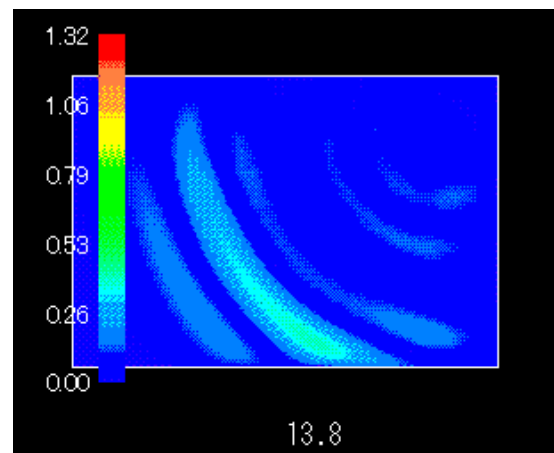


図 - 3

はFEMがフーリエ変換型の数値解析であることを考えればわかるように形状関数でとらえることが困難な波動場はあらわせず、波動場を散乱させる可能性がある。そのような場合には特異性を示しそうな格子空間について適合的な格子で組みなおすことが必要とされる。今後は、不正形成層構造を不整形メッシュをもちいてとりこみ、より詳細な解析に向けた基礎検証をすすめていくことを考えている。

謝辞

本研究のために、東京大学地震研究所地震予知情報センターの計算機システムを利用しました。

参考文献

- 1) 鷲津久一郎，宮本博，山田嘉昭，山本善之，川井忠彦：有限要素法ハンドブック 2 応用編，培風館，1997。
- 2) 市村強：広域強震動シミュレーターに関する基礎研究，東京大学工学部学士論文，1998。
- 3) 山中浩明ら：関東平野南西部におけるやや長周期微動のアレイ観測，地震第2輯，pp.355-365，第51巻，1999