

3次元有限要素法による地震波動伝播解析

吉村智昭

Keywords: Kanto basin, 1998 East off Izu peninsula earthquake, Domain reduction method, Irregularity, Topography

関東平野, 1998年伊豆半島東方の地震, 領域縮小法, 不整形, 地表地形

1. 序

建築基準法の性能規定への移行に伴い、個別の建設地点ごとに周囲の地下構造や想定地震を考慮して適切に設計入力地震動を設定する必要性が高まっている。また、地震調査研究推進本部による活断層の調査と評価^{1)~6)}、および堆積平野地下構造の調査⁵⁾、中央防災会議による想定地震の評価⁷⁾が公表されており、これらの研究成果を設計入力地震動の評価に反映させることが重要となっている。

このような状況をふまえ、筆者は震源・伝播経路地盤・サイト周辺地盤を3次元有限要素法によりモデル化し、地震の波動伝播を計算する試みを行った。有限要素法のプログラムは、米国 Carnegie Mellon 大学で開発されたプログラム⁸⁾を筆者らが改良したものである。当プログラムは空間を有限要素法で離散化し、時間微分を中央差分で近似して時間領域で波動方程式を解くプログラムである。

本報告書では、上記手法による計算事例の紹介を行う。1つ目の計算例は、震源を含む平野規模の地震波動伝播の計算例であり、関東平野を対象に1998年伊豆半島東方沖地震のシミュレーションを行った例を示す。2つ目の計算例は、領域縮小法⁹⁾¹⁰⁾による局所地形の地震応答解析である。領域縮小法とは、興味の対象となる局所地形のみを詳しくモデル化し、モデルの中に設けた入射境界に遠方の震源とまったく等価な節点力を入力できる手法である。

2. 関東平野での地震波動伝播シミュレーション

関東地域では南関東地震の発生が懸念されており、地震動予測のために地盤モデルを構築し、波動の伝播性状を把握しておくことが重要である。本計算例では、地盤のモデル化の妥当性を検証し、関東平野における長周期表面波の伝播性状を把握するため、関東一円で K-NET により観測され

た1998年伊豆半島東方沖の地震のシミュレーション解析を実施し、観測記録と比較した。

2.1 震源モデルと地盤モデル

シミュレーションの対象とした1998年伊豆半島東方沖の地震の諸元を表-1に示す。これらをもとに、震源を点震源としてモデル化して解析に用いた。地盤モデルは、Sato et al.(1996)¹¹⁾の地盤モデルを簡略化し、媒質を表-2に示す9の媒質に集約し、不整形性も考慮して作成した。図-1に不整形境界面の例を示す。なお、要素サイズは周期4秒以上で有効であるように設定した。

表-1 1998年伊豆半島東方沖の地震の諸元

Fault parameters of 1998 East off Izu peninsula earthquake

発生日時	1998/5/3 11:09	気象庁による
マグニチュード	5.7	
北緯	35.0 度	防災科学研究所による
東経	139.1 度	
深さ	5 km	
strike	165 度	
dip	85 度	
slip	8 度	Harvard 大学CMT解による
地震モーメント	2.35×10^{17} Nm	
ライズタイム	2.8 秒	

表-2 地盤物性

Soil parameters

層序数	Vs (km/s)	Vp (km/s)	密度 (g/cm ³)	Q値 (T=6秒)
1	0.6	1.8	1.8	100
2	0.84	2.06	1.9	118
3	1.3	2.7	2.1	152
4	2.4	4.7	2.5	233
5	2.7	4.7	2.5	256
6	3.3	5.7	2.6	300
7	3.7	6.6	2.8	330
8	3.9	7.0	3.0	344
9	4.44	7.9	3.2	384

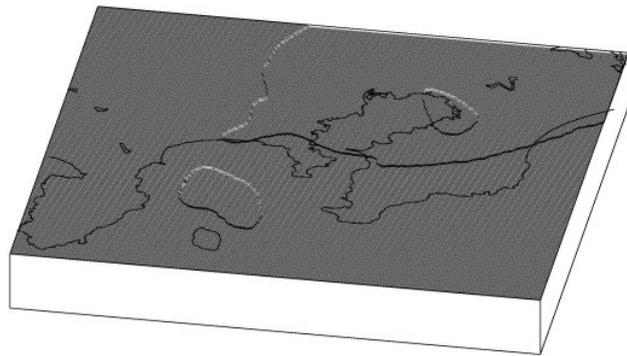
2.2 解析結果

図-2 に震央位置(●)を示す。地盤の固い山地(Mountain)、堆積層が存在する平野部(Kanto Plain)、相模湾の堆積層(Sagami Bay)の区分も示す。

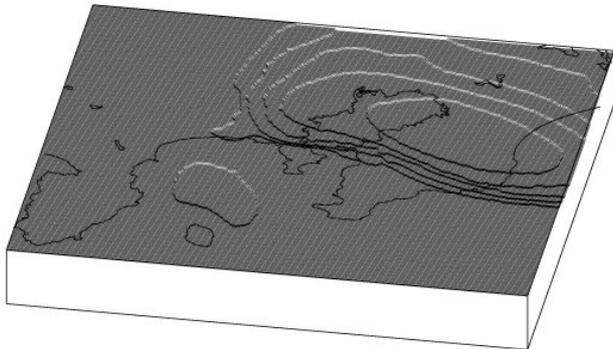
図-3 は K-NET の観測記録と解析結果を比較したものである。変位の周期5秒以上の成分の質点運動を比較した。震源に近い伊豆半島での質点運動の向きや、山地で質点運動の振幅が小さいこと、平野部で振幅が大きいことがうまく模擬されている。ただし、震源に最も近い観測点では、観測で見られる大きな振幅が解析ではうまく模擬できておらず、

地盤のモデル化において地震基盤($V_s=2.7\text{km/s}$) 露頭としたために、実際の表層地盤の影響が模擬できていない可能性がある。また、全体的に震源に近いところで振幅が過小であり、東京湾に沿った平野部で振幅が過大であり、減衰の評価を見直す必要がある。なお、ここで用いた減衰は周期 6 秒で表-2 の Q 値となる質量比例減衰を用いた。

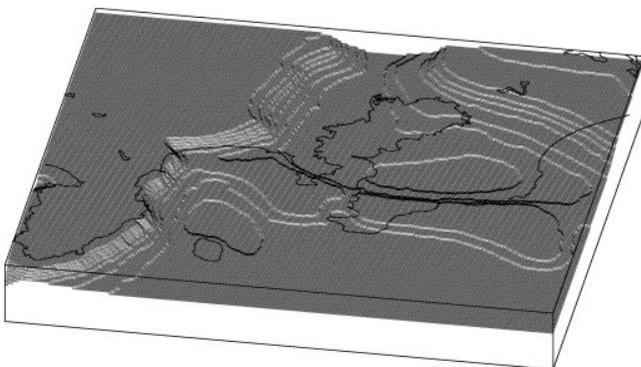
図-4 に波動伝播のスナップショットを示す。水平、上下3



(a) $V_s=0.6\text{km/s}$ 底面



(b) $V_s=0.84\text{km/s}$ 底面



(c) $V_s=2.7\text{km/s}$ 上面

図-1 不整形境界面のモデル化の例
Examples of irregular boundaries

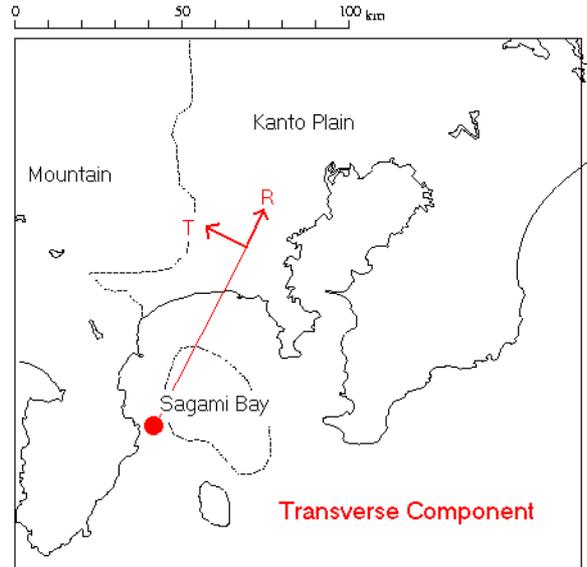
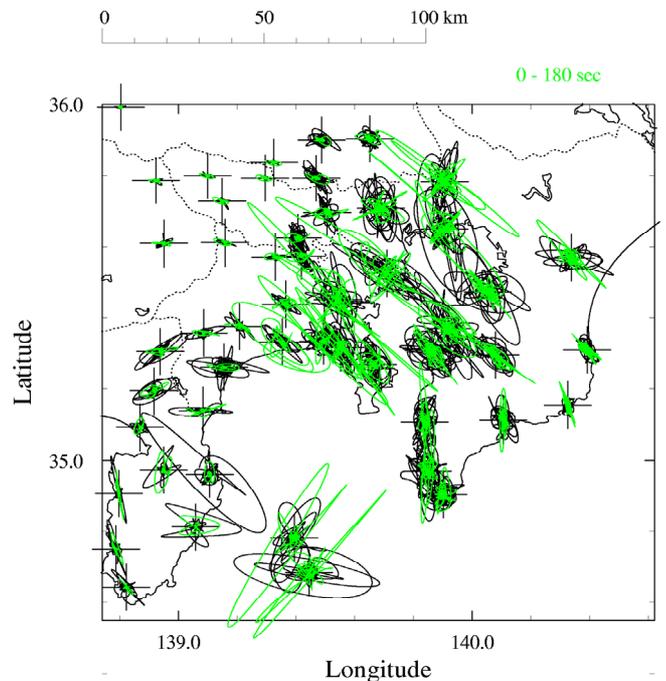


図-2 震央位置(●)およびR成分とT成分の分解
Epicenter(●) and decomposition of R and T components



K-NET(黒)、解析(緑)

図-3 質点運動の比較(変位、周期5秒以上の成分)
Particle motions: Observed(black), synthetic(green)

成分の変位を表す。水平成分は、震央からみた Radial 成分と Transverse 成分(図-2 参照)に分解している。地震発生後の経過時間 $T=4\text{sec}$ では、Radial 成分に4象限型のラディエーションパターンが明瞭に観察できる。 $T=40\text{sec}$ 以降の図で、濃い赤青の部分で表面波が卓越している。Transverse 成分にはラブ波が、Radial 成分と Up 成分にはレイリー波が

現れている。これらの表面波は、地盤の固い山地では振幅がほとんど見られず、相模湾、東京湾に沿った平野部でよく発達して伝播していく様子が観察できる。Transverse 成分に現れるラブ波を詳しく見てみると、 $T=40\text{sec}$ で山地と平野の境界で2次的に生成される表面波(A)が現れており、震央から直接伝播してきた波面(B)の北側は神奈川県南部の相

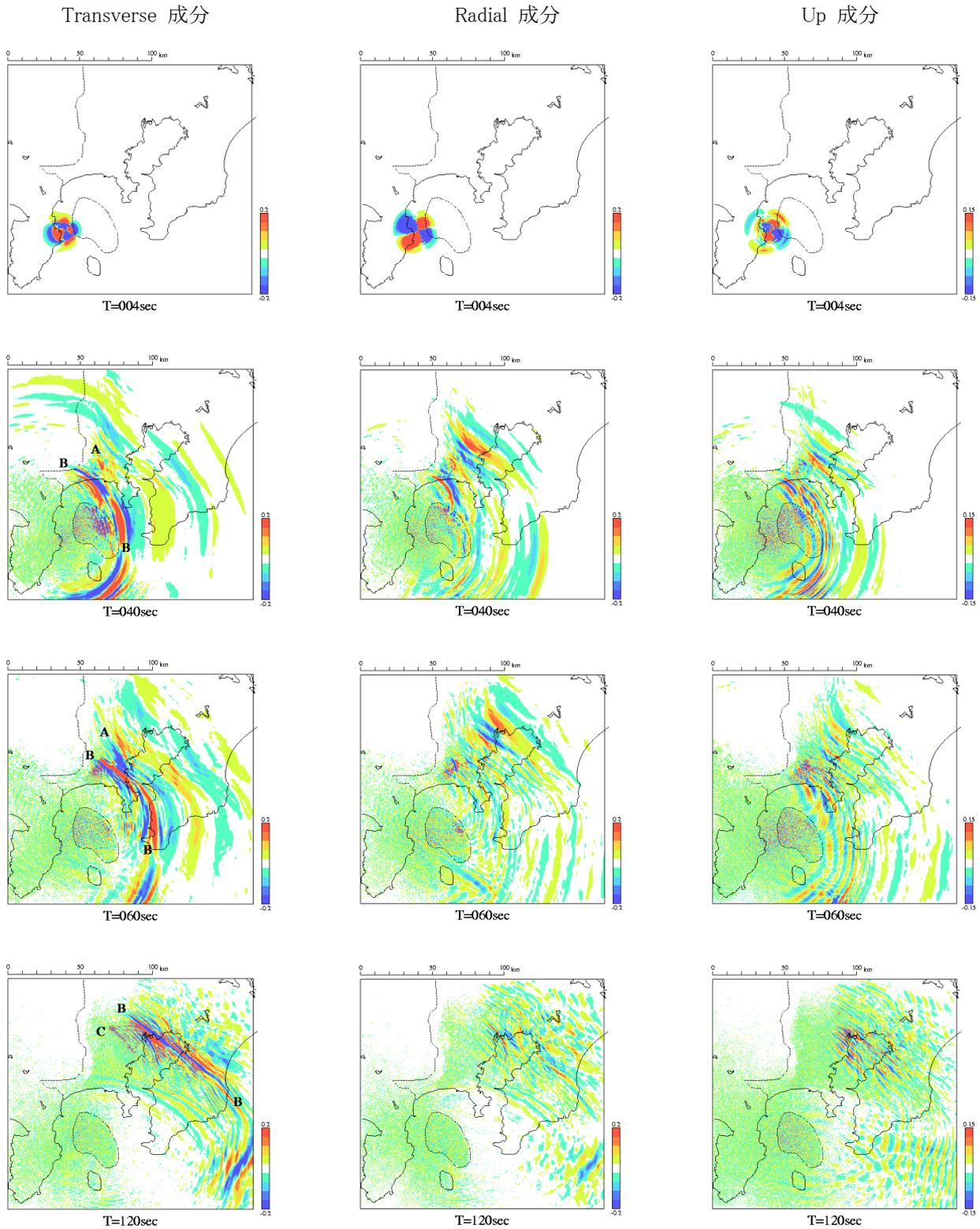


図-4 波動伝播のスナップショット(変位、cm)
Snapshots of wave propagation (displacement, cm)

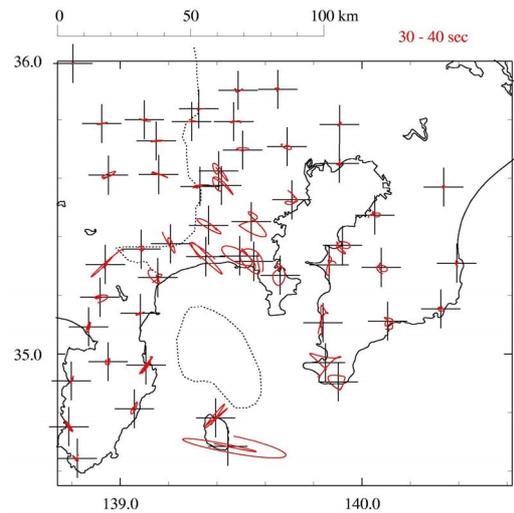
模湾沿岸を通過し、東側は三浦半島に達し、南側は伊豆大島を通過したところである。T=60sec では、神奈川県陸地において、波面Aと波面Bの2つの波面が明瞭に観察される。Bの東側の波面は房総半島に達している。T=120sec では、神奈川県を通過したラブ波の波面は東京湾北部に達し、房総半島の西から入射した波面も房総半島の北部にまで達している。また、表面波の分散性により、伝播速度の遅い高振動数成分が遅れて伝播している様子(波群C)も観察される。

図-5は、図-4の解析結果の妥当性を調べるために、実際にK-NETの観測点において得られた観測記録から周期5秒以上の変位成分を取り出して10秒間の質点運動を描いたものである。質点運動の振幅がTransverse方向に顕著であることから、ラブ波が伝播しているものと考えられる。30-40secでは相模湾沿岸部と伊豆大島で振幅が大きく、50-60secでは山地-平野境界部に沿う部分、三浦半島とその付近の神奈川県陸地部、房総半島の西側で振幅が大きい。また、110-120secでは、東京湾北部の沿岸や、房総半島北部で振幅が見られる。これらの観測結果は、図-4のTransverse成分の解析結果から予測される傾向とよく対応しており、図-4での地盤構造モデルにより関東平野での長周期成分の波動伝播の傾向をうまく把握できることが確認できた。

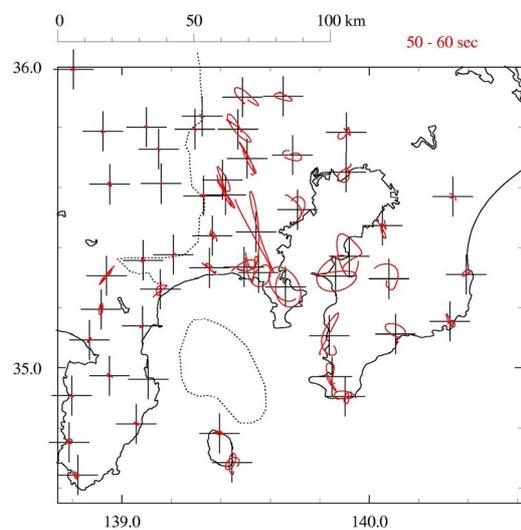
3. 領域縮小法による局所地形の解析

近年の計算機の発達により、震源・伝播経路地盤・サイト周辺地盤を含めた3次元モデルを用いて有限要素法や差分法により地震波動を計算することが可能となっているが、このような大きな領域を高振動数まで計算するには、メッシュや格子分割を細かくする必要があり、また、サイト周辺の低速度層や不整形性の影響を数Hzに至る高振動数まで検討するにはさらに細かくメッシュや格子を分割する必要があり、膨大な自由度となって近年の計算機をもってしても計算する事が難しい。

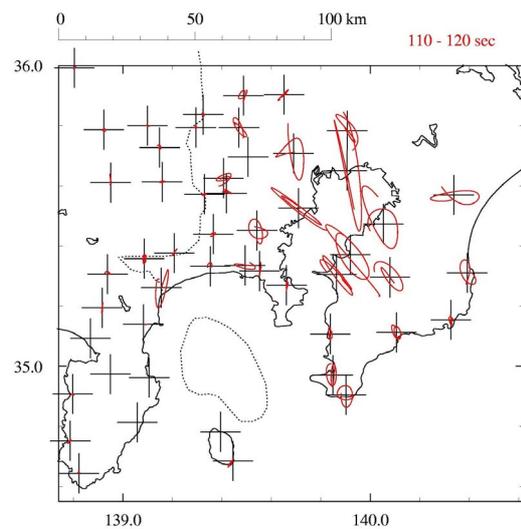
そこで、局所地形を除いた広域的な地盤モデルと局所地形周辺の詳細モデルを分けてモデル化するサブストラクチャ的方法が有効である。領域縮小法⁹⁾¹⁰⁾はこの考え方に従った手法であり、サイト周辺の局所地形を詳しく有限要素法でモデル化し、遠方の震源と伝播経路による波動場を、局所地形を除いた単純なモデルで効率的に計算し、これを局所地形モデルに設けた入射境界において等価な節点力に変換して入力する方法であり、また、本手法は局所地形部分の非線形応答を取り入れることが可能な時間領域の解法である。以下では、簡単な堆積地盤モデルおよび丘地形モデルを用い、不整形地盤への領域縮小手法の適用性を示した計算例¹⁰⁾を示す。



(a)地震発生後 30-40 秒の質点運動



(b)地震発生後 50-60 秒の質点運動



(c)地震発生後 110-120 秒の質点運動

図-5 観測記録の質点運動(周期5秒以上の変位成分)
Particle motions of observed records (displacement component more than 5 seconds)

表-3 水平成層モデルの地盤定数

Soil parameters of layered media			
層厚	Vs	Vp	密度
m	m/s	m/s	g/cm ³
200	250	500	2.0
400	500	1000	2.0
-	1000	2000	2.0

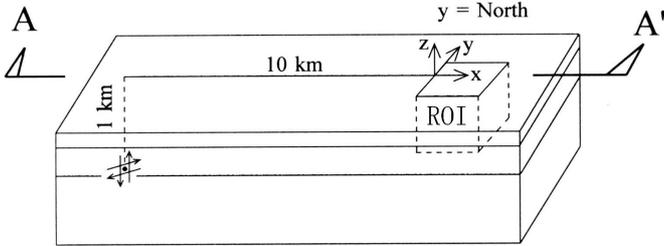


図-6 震源・伝播経路地盤と局所地形の領域(ROI)
Source, path and local region of interest (ROI)

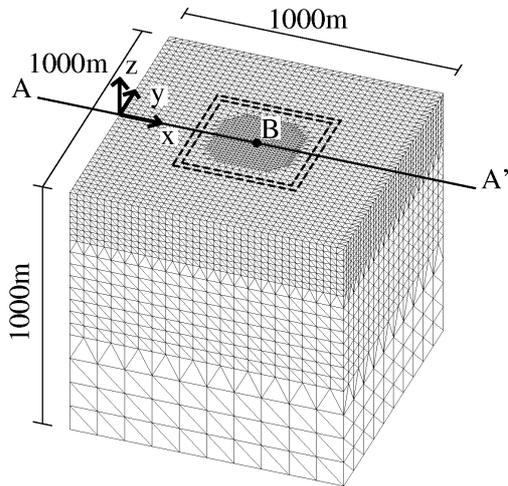


図-7 堆積谷モデル
Filled valley model

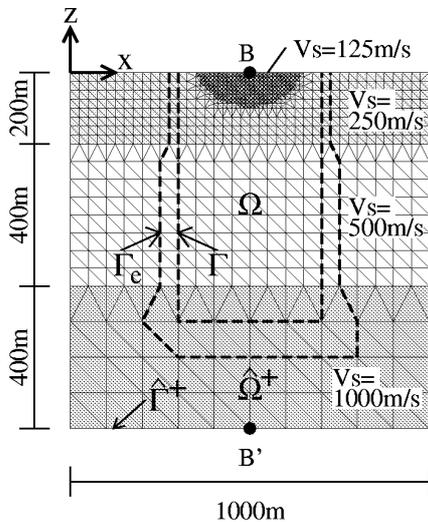


図-8 堆積谷モデルの A-A'鉛直断面
A-A' vertical section of filled valley model

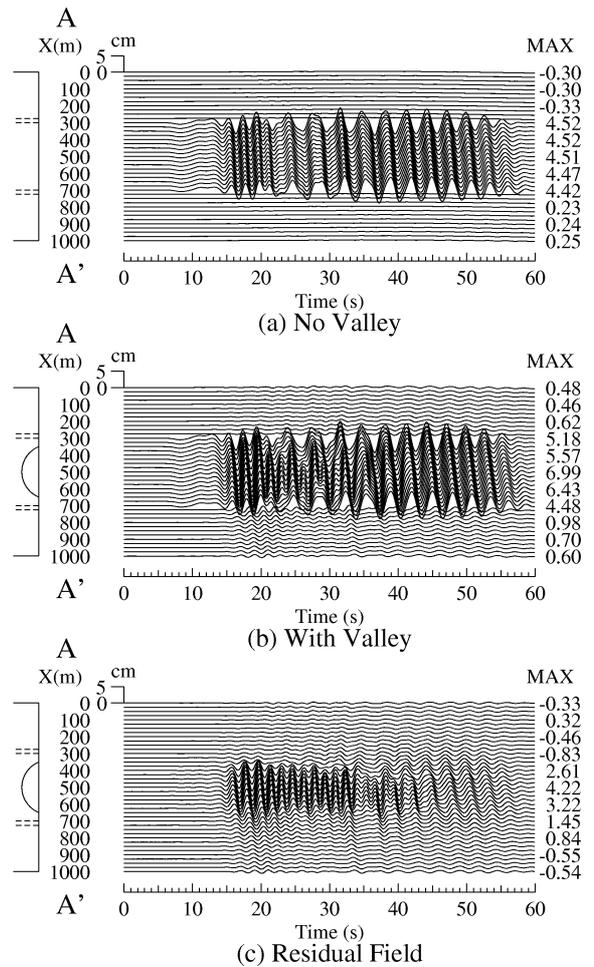


図-9 堆積谷の変位応答(A-A'側線でのX成分)
Displacement on A-A' line of filled valley model

3.1 伝播経路地盤と局所地形のモデル化とその結合

震源を含む伝播経路地盤を表-3、図-6 に示す平行水平層でモデル化する。今回の計算では地盤の減衰は考慮していない。震源は点震源とし、Y軸を北として震源メカニズムは(strike,dip,rake)=(0,90,90)度、地震モーメントは $M_0=6 \times 10^{15} \text{Nm}$ とする。この地盤モデル、震源モデルによる波動場は久田の方法¹²⁾による波数積分法により効率よく計算することができる。図-6 の ROI は興味の対象となる局所領域を表し、図-7 にこの領域が堆積谷地形を含む場合の有限要素モデルを示す。図-8 は A-A'鉛直断面である。図-8 の点線で示した Γ と Γ_c の間にある有限要素の一層が入射境界であり、この位置にある節点で、波数積分法により水平成層地盤の変位波形を保存しておき、これを遠方の地震力と等価な節点力に変換⁹⁾して入力する。局所地形を含む Γ の内側では、局所地形がない場合の波動場に局所地形があることにより生じる散乱場が加わった全体場を変数とし、 Γ の外側の領域では散乱場のみを変数として釣り合い方程式を解く⁹⁾。 Γ_c の外側は、外向きの散乱場のみなので、これを側面および底面に粘性境界を設置して吸収する。

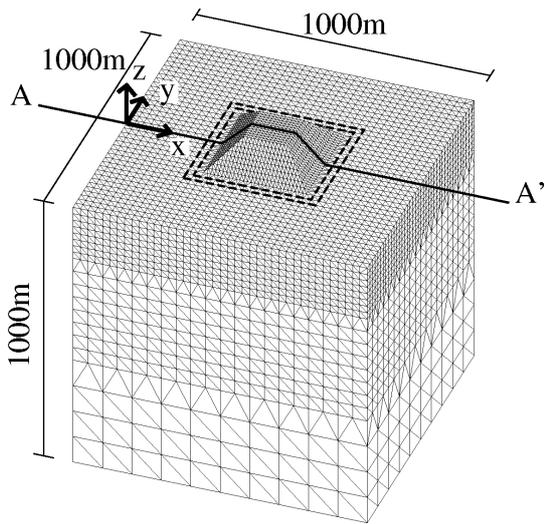


図-10 丘モデル

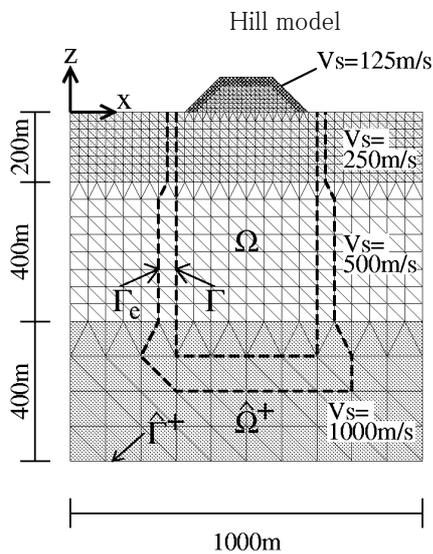


図-11 丘モデルの A-A'断面

A-A' vertical section of hill model

3.2 計算結果

図-9 は A-A'側線に沿った地表面でのX成分の変位応答を示す。(a)は堆積谷がない場合、(b)は堆積谷がある場合、(c)は(b)から(a)を差し引くことにより、堆積谷があることにより生じた散乱場(残差場)を表したものである。なお、(a)(b)では、入射境界(断面図の点線)の外側では散乱場、内側では全体場を表している。(b)では、堆積谷の存在により地震波の増幅と散乱が生じていることが分かる。(c)において散乱場は入射境界の内と外で連続していることが分かる。入射境界の位置は任意に決めたものであり、計算される波動場には影響を及ぼさないことがわかる。(b)で入射境界の外側でも全体場が必要な場合は、得られている散乱場に平行水平層による波動場を加えればよい。

局所地形として、図-10、図-11 に示す丘地形を考えた場合も同様な計算を行うことができる。図-12、図-13 はそれぞ

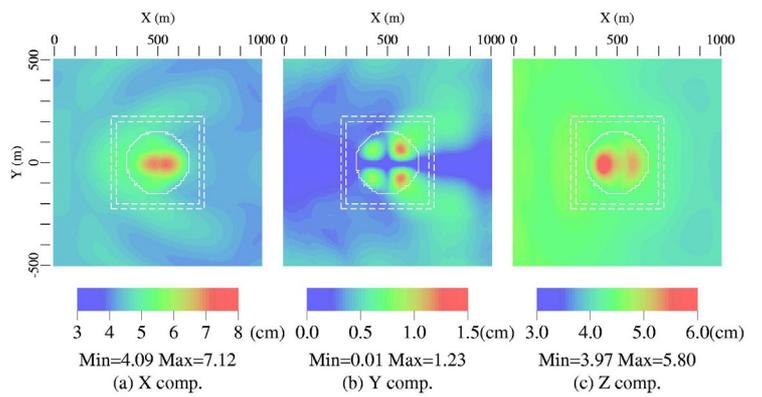


図-12 堆積谷モデルの最大変位分布

Max displacement distribution of filled valley model

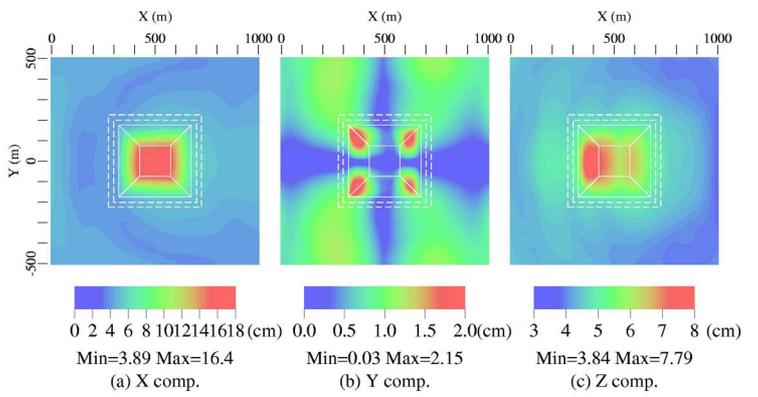


図-13 丘モデルの最大変位分布

Max displacement distribution of hill model

れ堆積谷モデル、丘地形モデルについて地表面の最大変位振幅を描いたものである。震源はX軸のマイナス方向にあり、入射境界の外側は平行水平層による波動場を加えて全体場とした結果を示している。局所地形により複雑な増幅パターンが生じることが分かる。

図-14 は、平行水平層モデル、堆積谷モデル、丘モデルの A-A'断面における変形(赤色)のスナップショットを示す。入射境界 Γ の内側では全体場、外側では散乱場を示している。(a)はS波が到着した様子、(b)はS波の重複反射が起こり、これにレイリー波の基本モードが重なっている様子、(c)はレイリー波の基本モードが現れている様子、(d)はレイリー波の高次1次モードが現れている様子を示す。このように領域縮小法では、遠方の震源と等価な波動場を局所モデルに入力することができ、実体波のみならず表面波も含む完全な3次元波動場を計算する事ができる。なお、図中で、平行水平層モデルでは、局所地形がないので入射境界の外側では散乱場は生じず、堆積谷モデル、丘モデルでは局所地形によって散乱場が生じ外向きに伝播する。

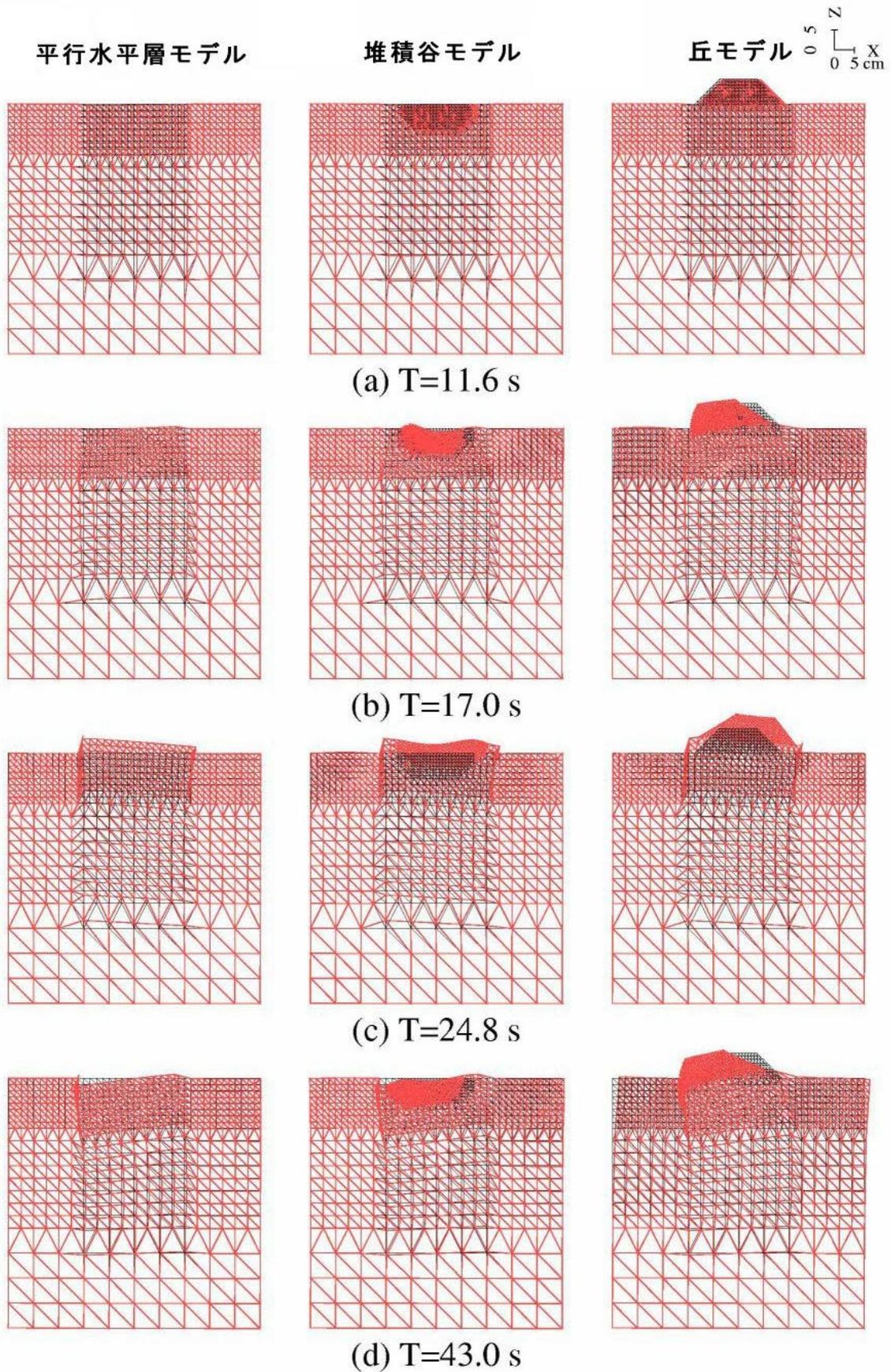


図-14 平行水平層モデル、堆積谷モデル、丘モデルのA-A'鉛直断面における変位応答のスナップショット
Snapshots of displacement response in A-A' vertical section for layered model, filled valley model and hill model

4. まとめ

関東平野の不整形地盤モデルと点震源を用いた3次元有限要素法により、1998年伊豆半島東方沖の地震のシミュレーションを行った。解析結果と、K-NET観測記録の周期5秒以上の成分による質点運動を比較すると、解析結果は表面波であるラブ波の伝播をうまく模擬していることが示され、当手法と設定した地盤モデルが関東平野の長周期地震波の伝播性状を把握するのに有効であることがわかった。

領域縮小法は、興味の対象となる局所地形を詳しくモデル化し、入射境界面において遠方の震源とまったく等価な地震力を節点力として導入することができる手法である。震源を点震源、伝播経路地盤を水平成層地盤と見なし、堆積谷地形と丘地形を局所地形として3次元有限要素モデルでモデル化した場合に領域縮小法を適用した。遠方の震源により生じた実体波や表面波を含む完全な3次元波動場が、有限要素の離散化による近似以外にいかなる近似も設けない厳密さで、等価な節点力として入射境界に導入され、局所地形の3次元性を考慮した地震応答が計算できることを示した。

Earthquake(M_j 5.1) and the Great 1923 Kanto Earthquake (M_s 8.2) In Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 89, pp.579-607, 1999.
12)久田嘉章:成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法、日本建築学会構造系論文集、第501号、pp.49-56、1997.

参考文献

- 1)科学技術庁:平成7年度・平成8年度地震調査研究交付金成果報告会予稿集,平成9年9月4日・5日
- 2)科学技術庁:第2回活断層調査成果報告会予稿集,平成10年11月
- 3)科学技術庁:第3回活断層調査成果報告会予稿集,平成11年11月
- 4)科学技術庁:第4回活断層調査成果報告会予稿集,平成12年11月
- 5)文部科学省:2001年活断層調査成果および堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集,平成13年11月
- 6)地震調査研究推進本部ホームページ:<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
- 7)中央防災会議ホームページ <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/>
- 8) Bao, H., J. Bielak, O. Ghattas, L. F. Kallivokas, D. R. O'Hallaron, J. R. Shewchuk, J. Xu: Large-scale simulation of elastic wave propagation in heterogeneous media on parallel computers, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 152, pp.85-102, 1998.
- 9) Bielak, J., K. Loukakis, Y. Hisada, and C. Yoshimura: Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions. PART I: Theory, Bull. Seism. Soc. Am. (投稿中)
- 10) Yoshimura, C., J. Bielak and Y. Hisada: Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions. PART II: Verification and applications, Bull. Seism. Soc. Am. (投稿中)
- 11) Sato, T., R. W. Graves and P. G. Somerville: Three-dimensional finite-difference simulations of long-period strong motions in the Tokyo metropolitan area during the 1990 Odawara