

三次元差分法による仮想関東地震の地震動予測

吉田 隆治・野田 茂*¹

Strong Motion Prediction for a Large Earthquake like the 1923 Kanto Earthquake by Three-Dimensional Finite Difference Method

Takaharu YOSHIDA , Shigeru NODA

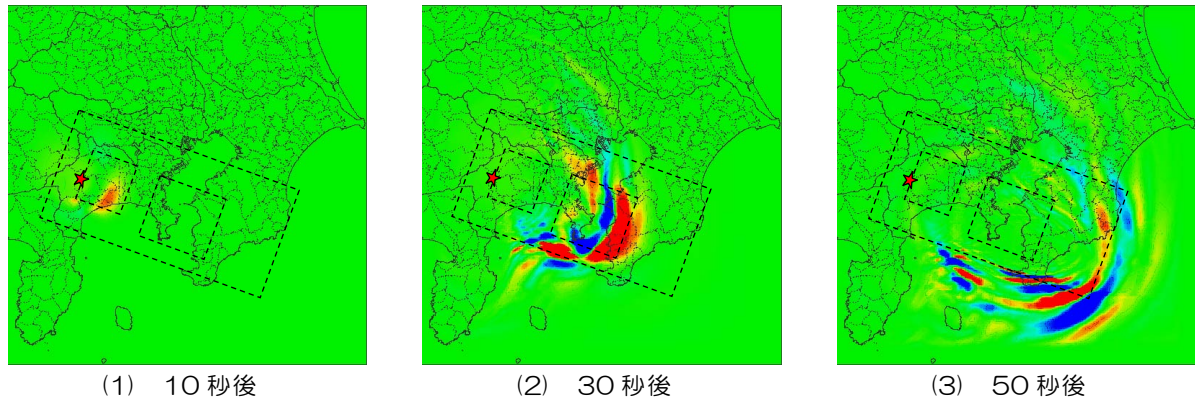


図-1 仮想関東地震の波動伝播状況図（EW成分）

研究の目的

超高層ビル、長大橋梁等の固有周期の長い構造物の耐震設計ではやや長周期成分を含んだ適切な設計用地震動を用いることが必要である。1983 年日本海中部地震の新潟での揺れや 2003 年十勝沖地震の苫小牧での揺れから分かる様に、やや長周期地震動は平野の深い地盤構造に大きく影響され、長周期構造物の設計用地震動評価では建設地点の深い地盤構造の影響を反映できる手法を用いることが必要となる。これを受けて、最近では広帯域の地震動評価にハイブリッド法が用いられるようになってきた。ここでは、このハイブリッド法による広帯域の地震動評価の前段として、長周期帯域の評価に用いられる三次元差分法を用いて仮想関東地震の地震動評価を行い、解析条件の違いが評価結果に与える影響について検討した。

技術の説明

多数の点震源で近似された面的広がりを持つ断層モデルと、震源から観測点までを含む深い地盤構造の三次元不均質地下構造モデルに対して、等方かつ微小変形を仮定した弾性波動方程式を差分近似により解き、想定断層からの長周期地震動を計算する。ここで、差分法による計算は(独)防災科学技術研究所¹⁾より公開されている三次元差分法による地震動計算ツール「GMS」により行った。想定地震は 1923 年の関東地震(地震規模 $M=7.9$)とし、断層モデルは Wald & Somerville²⁾の研究に基づいたモデルとした。アスペリティを考慮した断層の巨視的パラメータ、微視的パラメータは地震調査研究推進本部地震調査委員会³⁾による海溝型地震の地震動評価レシピに基づいて求めた。図-1 に仮想関東地震の想定断層の平面位置とともに、断層の破壊開始 10 秒後、30 秒後、50 秒後のそれぞれの波動伝播状況図(EW成分)を示す。

主な結論

三次元差分法による仮想関東地震の試解析から、今回使用した計算機における解析可能な解析領域の大きさ、差分格子間隔等を確認するとともに、想定断層を粗い分割で点震源にモデル化すると、過大評価の可能性があることを確認した。

* 1 香川大学工学部 教授

三次元差分法による仮想関東地震の地震動予測

吉 田 隆 治 野 田 茂^{*1}

要 旨

超高層ビル、長大橋梁等の固有周期の長い構造物の耐震設計ではやや長周期成分を含んだ適切な設計用地震動を用いることが必要である。1983年日本海中部地震の新潟での揺れや2003年十勝沖地震の苫小牧での揺れから分かる様に、やや長周期地震動は平野の深い地盤構造に大きく影響され、長周期構造物の設計用地震動評価では建設地点の深い地盤構造の影響を反映できる手法を用いることが必要となる。これを受けて、最近では広帯域の地震動評価に短周期帯域には半経験的手法を、長周期帯域には理論的手法を適用し、それらを合成するハイブリッド法が用いられるようになってきた。ここでは、このハイブリッド法による広帯域の地震動評価の前段として、長周期帯域の評価に用いられる三次元差分法を用い、仮想関東地震の評価を試みた。この試解析から、今回用いた計算機における解析可能な解析領域の大きさ、差分格子間隔等を確認するとともに、想定断層を粗い分割で点震源にモデル化すると、過大評価の可能性があることを確認した。

キーワード 強震動予測／三次元差分法／仮想関東地震／断層モデル／アスペリティ／関東平野

目 次

- | | |
|------------|------------|
| 1. はじめに | 3. 地震動評価結果 |
| 2. 地震動評価手法 | 4. まとめ |
| および設定条件 | 5. おわりに |

STRONG MOTION PREDICTION FOR A LARGE EARTHQUAKE LIKE THE 1923 KANTO EARTHQUAKE BY THREE-DIMENSIONAL FINITE DIFFERENCE METHOD

Takaharu YOSHIDA Shigeru NODA

Synopsis:

In this paper, assuming a large earthquake like the 1923 Kanto earthquake ($M_{JMA}=7.9$), strong ground motions on engineering bedrock at eight sites in the Tokyo metropolitan area were synthesized by the three-dimensional finite difference method after Aoi and Fujiwara. The analyses were carried out on fifteen conditions for grid size of the finite difference idealization, the number of point sources of the fault idealization and so on.

From the results, it was certified that the number of point sources of the fault idealization had an important effect on the predicted motions.

* 1 香川大学工学部 教授

1. はじめに

構造物の耐震安全性を検討する場合、入力地震動を如何に設定するかが重要な項目の一つとなる。特に、1995年兵庫県南部地震以降に実施された耐震設計基準の見直しにより、入力地震動を合理的に設定することが重要となってきた。すなわち、重要度の高い構造物に対しては、原子力発電所等の耐震設計に採用された2段階設計法が土木構造物に対しても本格的に導入され、構造物の供用期間中に1~2回受けるL1地震動と供用期間中の発生頻度は非常に低いが構造物に多大な影響を与えるL2地震動に対して構造物の耐震安全性を照査することとなった。1995年兵庫県南部地震以降に見直された耐震設計基準には、建設地点周辺に特定の巨大地震が想定される場合、その想定地震断層から直接地震動を合成し、設計用L2地震動とすることができる様、改訂された基準もある。これによって、建設地点の地震環境を反映したより合理的な耐震設計が行える様になった。

一方、超高層ビル、長大橋梁等の固有周期の長い構造物の耐震設計ではやや長周期成分を含んだ適切な設計用地震動を用いることが必要である。1983年日本海中部地震の新潟での揺れや2003年十勝沖地震の苫小牧の揺れから分かる様にやや長周期地震動は平野の深い地盤構造に大きく影響される。それ故、長周期構造物の設計用地震動を評価する場合、建設地点の深い地盤構造の影響を反映できる手法を用いることが必要となる。これを受けて、最近では広帯域の地震動評価に短周期帯域には半経験的手法を、長周期帯域には理論的手法を適用し、それらを合成するハイブリッド法が用いられる様になってきた。

ここでは、耐震設計技術向上の基礎資料とすることを目的に、ハイブリッド法による広帯域の地震動評価の前段として、理論的手法である三次元差分法を用い、仮想関東地震における長周期地震動の評価を試みた結果を報告する。

2. 地震動評価手法および設定条件

2.1 地震動評価手法

多数の点震源で近似された面的広がりを持つ断層モデルと、震源から観測点までを含む深い地盤構造の三次元不均質地下構造モデルに対して、等方かつ微少変形を仮定した弾性波動方程式を差分近似により解き、想定断層からの長周期地震動を計算する。ここで、差分法による計算は(独)防災科学技術研究所¹⁾より公開されている三次元差分法による地震動計算ツール「GMS」により行う。

2.2 想定地震

想定地震は1923年の関東地震(地震規模 $M=7.9$)とする。断層モデルはWald & Somerville²⁾の研究に基づいたモデルとし、アスペリティを考慮した断層の巨視的パラ

メータ、微視的パラメータは地震調査研究推進本部地震調査委員会³⁾による海溝型地震の地震動評価レシピに基づいて求める。図2-1に仮想関東地震の想定断層の平面位置を示す。

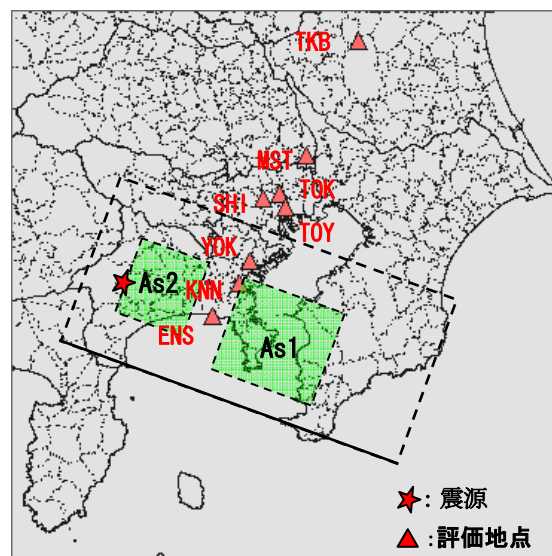


図2-1 仮想関東地震の想定断層の平面位置

2.3 地震動評価地点

地震動評価地点は断層の直上に位置するYOK、断層の北側に位置し、埋め立て地盤上のTOY、同じく断層の北側に位置し、比較的硬質地盤のSHIの3地点に、山田ほか⁴⁾の研究と比較できるようにTKB、MST、TOK、KNN、ENSの5地点を加えた8地点とする。前項の図2-1に地震動評価地点も併せて示した。

3. 地震動評価結果

3.1 仮想関東地震の断層モデル

Wald & Somerville³⁾の研究を参考に設定した仮想関東地震の断層モデルの諸元を表3-1に示す。断層モデルは2つのアスペリティと背景領域から成り、断層西端に破壊開始点を設定する。図3-1に断層モデル図を示す。

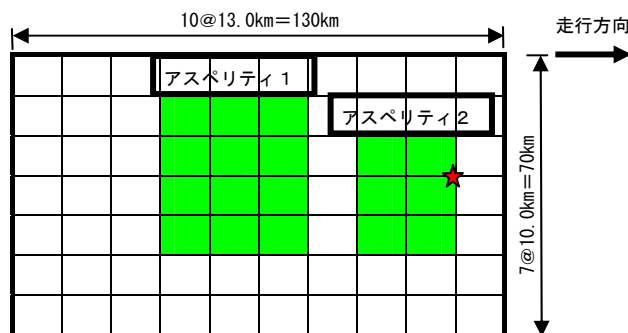


図3-1 仮想関東地震の断層モデル
(★：断層の破壊開始点)

表 3-1 仮想関東地震の断層モデルの諸元

項 目			設定値
巨視的パラメータ	マグニチュード		7.9
	地震モーメント (N・m)		7.8×10^{20}
	断層左上端 位置	北緯 (度)	34.834
		東経 (度)	140.215
	断層長さ (km)		130
	断層幅 (km)		70
	断層上端深さ (km)		2
	走行 (度)		290
	断層傾斜角 (度)		25
	すべり角度 (度)		138
	破壊形式		同心円状破壊
	断層面積 (km ²)		9.100
	平均応力降下量 (MPa)		2.19
	地殻のせん断波速度 (km/s)		3.71
	破壊伝播速度 (km/s)		3.0
	平均すべり量 (m)		2.23
微視的パラメータ	立ち上がり時間 (s)		11.3
	高 動数 界 (H)		13.5
	アスペリティ1	面積 (km ²)	1.560
		すべり量 (m)	4.93
		地震モーメント (N・m)	2.96×10^{20}
		応力降下量 (MPa)	8.51
		立ち上がり時間 (s)	4.7
	アスペリティ2	高 動数 界 (H)	13.5
		面積 (km ²)	780
		すべり量 (m)	3.49
		地震モーメント (N・m)	1.06×10^{20}
		応力降下量 (MPa)	8.51
	背景領域	立ち上がり時間 (s)	3.3
		高 動数 界 (H)	13.5
		面積 (km ²)	6.760
		すべり量 (m)	1.45
		地震モーメント (N・m)	3.78×10^{20}
		応力降下量 (MPa)	1.7
		立ち上がり時間 (s)	9.7
		高 動数 界 (H)	13.5

3.2 関東平 の深い地 構造

関東平野の深い地盤構造は山田ほか⁴⁾ の地盤モデルを参照する。

3.3 三次元解析モデル

前項の断層モデルおよび関東平野の深い地盤構造を用い、三次元差分法の解析モデルを作成する。

3.3.1 地 のモデル化

震源から観測点までを含む三次元不均質地下構造を考慮した地盤モデルとし、側面および底面には波動吸収領域を設ける。ここで、地震基盤面より深い層境界面は水平成層構造を仮定する。

(1) 解析領域

解析領域は

①東西 200.4km、南北 221.2km、深さ 90km

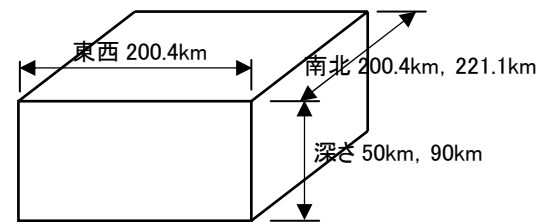


図 3-2 三次元差分法の解析領域

②東西 200.4km、南北 200.4km、深さ 90km

③東西 200.4km、南北 200.4km、深さ 50km

の 3 ケースを考える (図 3-2 参照)。ここで、①は平面的な解析領域を山田ほか⁴⁾ の研究と同じとしている。

(2) 層境界面データ

各層境界面の深さに関するデータは東西方向、南北方向に等間隔で与え、その間隔として

①400m 間隔

②200m 間隔

の 2 ケースを考える。ここで、②は①のデータを補間して作成する。

(3) 差分格子間隔

差分格子間隔は東西方向、南北方向、上下方向に等間隔とし、

①深さ 0～5.2km : 200m 間隔

深さ 5.2km～ : 600m 間隔

②深さ 0～10km : 250m 間隔

深さ 10km～ : 750m 間隔

③深さ 0～12km : 400m 間隔

深さ 12km～ : 1200m 間隔

の 3 ケースを設定する。ここで、次項の地盤物性との関係から①は周期 2 秒、②は周期 2.5 秒、③は周期 4 秒が解析上の最小周期となる。

(4) 地 値

地盤物性値は山田ほか⁴⁾ の研究を参照し、関東平野の三次元地盤モデルの物性値を表 3-2 のとおり設定する。

表 3-2 関東平 の三次元地 モデルの 値

	波速度 (m/s)	波速度 s (m/s)	量 度 (k /m ³)	値 (IH)	上 面深度 (km)
1 層	1800	500	1900	100	0
2 層	2400	1000	2100	100	形
3 層	3200	1700	2300	150	形
4 層	5600	3000	2500	300	形
5 層	6000	3300	2700	500	5 (一部 形)
6 層	6800	3740	2900	600	15 (水平)
7 層	7600	4180	3200	1000	30 (水平)
8 層	8100	4500	3400	1000	60 (水平)
9 層	8300	4570	3500	1000	80 (水平)

3.3.2 断層のモデル化

(1) 断層分割数

断層分割数 (長さ方向×幅方向) は

① 10× 7 分割 (小断層の大きさ : 13km×10km)

② 20×14 分割 (小断層の大きさ : 6.5km×5km)

③130×70 分割 (小断層の大きさ : 1km×1km)

の 3 ケースを考え、分割した小断層をそれぞれ点震源でモデル化する。図 3-3 に断層を 10×7 分割した場合の断層のモデル化模式図を示す。図 3-3 では地震モーメントの大きな点震源を大きな円で表示している。

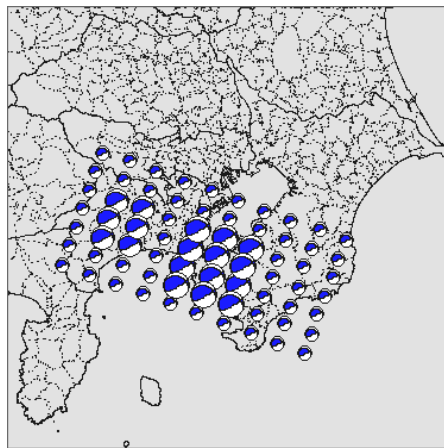


図 3-3 断層のモデル化模式図
(断層 10×7 分割の場合)

(2) 断層上端深さ

断層上端深さは

①2km

②5km

の 2 ケースを考える。ここで、②は山田ほか⁴⁾の研究と同じ深さとしている。

(3) 震源時間関数

震源時間関数は滑らかな傾斜関数とする (図 3-4 参照)。

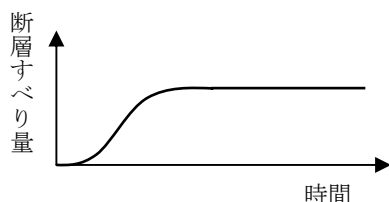


図 3-4 解析に用いた滑らかな傾斜関数模式図

3.4 仮想関東地震の地震動合成結果

今回使用した記憶容量 2 ギガバイトの計算機でどの程度の解析ができるかも含めた表 3-3 の 9 項目を検討の目的とし、前項の地盤および断層のモデル化のケースに、

断層立ち上がり時間、断層の破壊伝播速度の揺らぎ、時間刻みの違いを加えた表 3-4 の 15 ケースの解析を実施した。ここで、解析は空間差分演算子の次数を 4 次とし、120 秒までの計算を行った。また、計算された速度波形に対して 3.3.1(3)に示した各差分格子間隔に対する解析上の最小周期を参考に以下のローパスフィルター処理を施した。

①200m/600m 間隔 : 0.5Hz (2 秒)

②250m/750m 間隔 : 0.4Hz (2.5 秒)

③400m/1200m 間隔 : 0.25Hz (4 秒)

表 3-3 三次元差分法による検討目的

No.	検討項目	比較検討ケース
1	解析結果の検証	山田ほかの結果-110
2	水平方向の解析領域の影響	101-105
3	深さ方向の解析領域の影響	105-106
4	差分格子間隔の影響	106-107-108-113
5	時間刻みの影響	102-103
6	断層分割数の影響	102-105-115
7	断層立ち上がり時間の影響	102-104, 106-111-112
8	断層上端深さの影響	108-110
9	破壊伝播速度の揺らぎの影響	108-109, 113-114

(1) 解析結果の検証

表 3-5 に各ケースの最大速度と山田ほか⁴⁾の結果を比較して示した。断層を非一様なすべりでモデル化しているなど細かい条件は異なるが、比較的條件の近いケース 101 と山田ほかの結果を比較すると、断層直上かつ断層面までの深さが比較的浅い ENS 地点で山田ほかに対してケース 101 の最大速度は 1.9~3.0 倍の値を示すものの、TKB, MST, TOK, YOK, KNN の各地点では 0.8~1.8 倍と良い対応を示している。

この結果から、ここでの解析が基本的に大きな間違いはないと判断し、以降の検討を進めた。

(2) 水平方向の解析領域の影響

今回使用した計算機の性能上の制約から南北方向の解析領域を狭めたことの影響を把握するために、南北方向の解析領域を 221.2km (山田ほか⁴⁾の研究と同じ) としたケース 101 と 200.4km に狭めたケース 105 を比較検討

表 3-4 三次元差分法による仮想関東地震の解析ケース

ケース No.	解析領域 (km)						層境界面データ 間隔 (m)		差分格子間隔 (m)			断層分割数 (長さ方向×幅方向)			破壊伝播速度 の揺らぎ		断層立ち上がり時間				時間刻み (sec)		断層上端深さ (km)	
	南北		東西	深さ		400	200 (補間)	400	250	200	10×7	20×14	130×70	有	無	τ	0.5τ	1.5τ	2τ	0.01	0.005	2	5	
	221.2	200.4	200.4	90	50																			
101	○	—	○	○	—	○	—	○	—	—	—	—	○	—	○	○	—	—	—	○	—	○	—	
102	—	○	○	○	—	○	—	○	—	—	○	—	—	—	○	○	—	—	—	○	—	○	—	
103	—	○	○	○	—	○	—	○	—	—	○	—	—	—	○	○	—	—	—	—	○	—	—	
104	—	○	○	○	—	○	—	○	—	—	○	—	—	—	○	—	—	—	○	○	—	○	—	
105	—	○	○	○	—	○	—	○	—	—	—	—	○	—	○	○	—	—	—	○	—	○	—	
106	—	○	○	—	○	○	—	○	—	—	—	—	○	—	○	○	—	—	—	○	—	○	—	
107	—	○	○	—	○	○	—	—	—	○	—	—	○	—	○	○	—	—	—	○	—	○	—	
108	—	○	○	—	○	—	○	—	—	○	—	—	○	—	○	○	—	—	—	○	—	○	—	
109	—	○	○	—	○	—	○	—	—	○	—	—	○	—	○	○	—	—	—	○	—	○	—	
110	—	○	○	—	○	—	○	—	—	○	—	—	○	—	○	○	—	—	—	○	—	—	○	
111	—	○	○	—	○	○	—	—	—	—	—	—	○	—	○	—	○	—	—	○	—	○	—	
112	—	○	○	—	○	○	—	○	—	—	—	—	○	—	○	—	—	○	—	○	—	○	—	
113	—	○	○	—	○	○	—	—	○	—	—	—	○	—	○	○	—	—	—	○	—	○	—	
114	—	○	○	—	○	○	—	—	○	—	—	—	○	—	○	○	—	—	—	○	—	○	—	
115	—	○	○	—	○	○	—	○	—	—	—	○	—	○	○	○	—	—	—	○	—	○	—	

表 3-5 最大速度一覧表

		山田ほ か ⁽²⁾	最大速度 (kine)														
			解析ケース														
			101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115
TKB	EW	4.8	2.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	NS	2.0	1.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	UD	2.3	2.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
MST	EW	9.6	13.7	20.4	21.1	8.4	13.3	12.1	16.7	16.8	16.5	15.1	12.7	8.6	16.3	15.8	15.8
	NS	12.8	9.0	22.9	23.3	8.7	9.1	10.1	12.2	12.5	12.1	12.6	19.4	11.0	11.9	12.3	11.9
	UD	4.7	5.5	10.3	10.8	3.2	5.7	3.2	6.3	5.6	5.6	3.8	3.8	1.6	5.7	6.2	9.1
TOK	EW	10.5	24.6	34.2	35.7	11.1	24.6	24.7	20.9	20.4	20.5	18.8	25.9	12.6	24.0	24.1	31.2
	NS	18.8	17.6	27.4	27.4	9.3	17.6	18.4	25.3	25.8	24.9	27.4	33.3	15.6	25.4	24.7	20.0
	UD	3.6	6.5	10.3	10.3	4.3	6.3	5.5	6.7	4.8	4.7	4.8	6.3	2.8	7.0	7.5	10.2
SHI	EW	—	23.7	26.4	26.8	13.6	23.7	24.3	24.4	23.9	23.8	23.2	23.5	16.4	27.6	27.5	34.8
	NS	—	23.7	45.7	46.6	17.0	23.8	24.2	29.3	30.1	28.9	31.6	37.0	19.8	30.3	30.0	29.6
	UD	—	5.9	19.7	19.6	6.0	5.9	6.8	6.4	6.3	6.2	6.0	5.6	3.9	11.0	10.6	9.5
TOY	EW	—	19.3	26.5	27.2	8.2	19.2	20.1	16.3	15.5	15.2	15.6	22.6	11.2	15.4	15.3	21.8
	NS	—	18.3	25.6	25.0	7.9	18.4	18.3	20.2	19.8	19.2	20.5	26.5	13.4	20.7	20.2	28.3
	UD	—	5.4	12.4	12.4	4.3	5.4	4.9	5.6	5.5	5.4	6.0	8.3	3.7	6.7	7.0	11.0
YOK	EW	21.8	29.9	53.4	53.8	23.9	29.9	28.7	28.3	27.4	27.8	21.9	22.5	16.4	27.8	27.8	31.7
	NS	33.5	33.2	78.6	78.7	18.9	33.2	36.2	31.4	33.7	33.3	28.8	29.4	23.9	35.0	34.9	33.4
	UD	10.0	17.5	29.7	30.0	9.5	17.5	16.0	17.5	17.6	17.4	14.5	14.9	9.4	16.1	15.9	15.7
KNN	EW	23.8	46.0	67.7	68.1	30.8	46.0	45.3	43.4	43.2	43.8	33.3	39.5	26.5	44.1	44.6	44.4
	NS	34.2	37.6	124.4	123.6	24.2	37.6	37.5	30.2	31.7	30.3	25.7	45.1	23.1	39.9	40.8	45.7
	UD	13.7	21.4	34.8	35.0	11.3	21.3	19.8	23.6	23.8	24.0	18.9	17.4	11.2	21.7	21.8	21.4
ENS	EW	16.1	57.4	82.7	82.7	34.9	57.4	56.1	73.5	72.8	71.5	49.0	53.4	31.8	71.9	71.2	59.7
	NS	20.9	38.3	104.4	104.0	28.4	38.3	37.6	42.6	43.2	42.8	38.7	50.5	18.0	65.6	61.7	49.7
	UD	19.4	28.0	46.0	46.2	19.8	28.0	28.5	46.8	47.7	47.5	33.8	28.2	18.2	43.3	42.9	33.2

した。

表 3-5 から、ケース 101 とケース 105 の最大速度は MST, TOK, SHI, TOY, YOK, KNN, ENS の各地点でほぼ同じ値を示しており、南北方向の解析領域を 200.4km に狭めてもその影響は小さい。

(3) 深さ方向の解析領域の影響

同じく、深さ方向の解析領域を 90km としたケース 105 と 50km としたケース 106 を比較検討した。

表 3-5 から、ケース 105 に対してケース 106 の最大速度は、MST 地点の UD 成分の 0.56 倍を除き、MST, TOK, SHI, TOY, YOK, KNN, ENS の各地点で 0.87~1.15 倍の値を示し、良い対応を示している。また、ここでは示していないが、ケース 105 とケース 106 の速度波形およびその減衰 5% の疑似速度応答スペクトルの差は小さく、深さ方向の解析領域を 50km としてもその影響は小さい。

前項(2)の結果と合わせ、南北方向、東西方向、深さ方向の解析領域を 200.4km×200.4km×50km としても問題ないと判断した。

(4) 差分格子間隔の影響

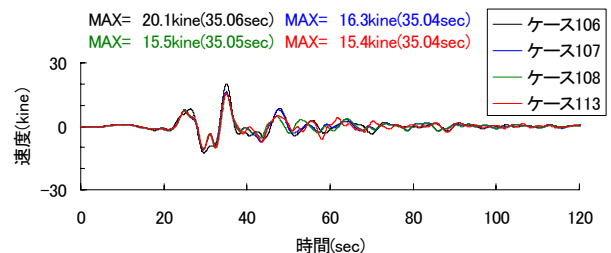
南北方向、東西方向、深さ方向の解析領域を 200.4km×200.4km×50km とした場合、差分格子間隔をどこまで狭められるか、すなわち解析対象周期をどこまで小さく設定できるかを検討した。

表 3-5 に示した差分格子間隔 400m のケース 106, 200m のケース 107, ケース 108, および 250m のケース 113 を比較すると、格子間隔の違いによって最大速度に差が見られる。

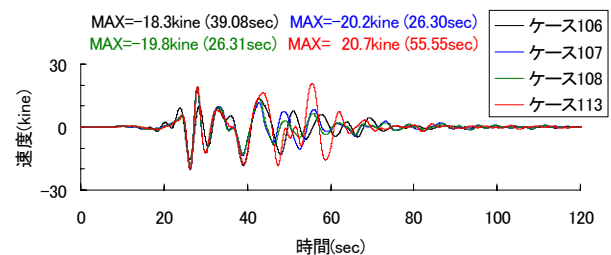
図 3-4、図 3-5 にケース 106, ケース 107, ケース 108 およびケース 113 の TOY 地点における速度波形、減衰 5% の疑似速度応答スペクトルを比較して示した。図 3-4、

図 3-5 から、

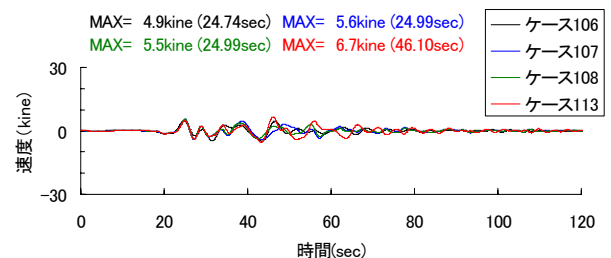
- ①速度波形は 40 秒までの振幅の大きいところでは各ケースの差は小さいが、40 秒以降の振幅の小さなところで振幅および位相に差が見られ、ケース 113 の振幅が比較的大きい傾向を示す。



(1) EW 成分



(2) NS 成分



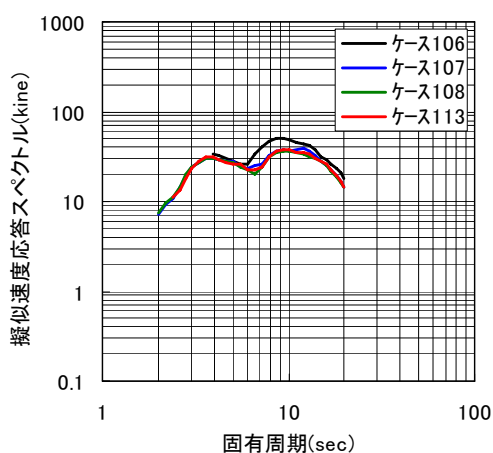
(3) UD 成分

図 3-4 差分格子間隔の違いによる速度波形の比較 (TOY 地点)

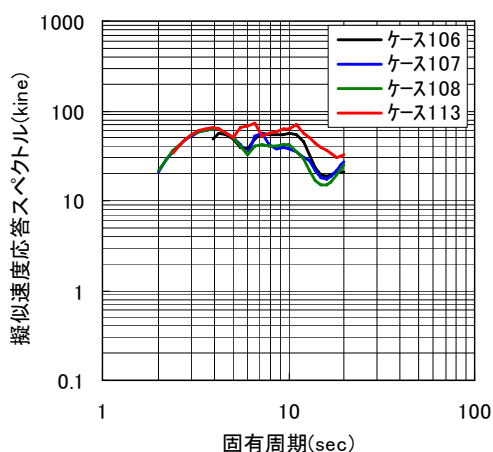
②最小周期の異なる各ケースが比較可能な周期 4 秒以上の疑似速度応答スペクトル ($h=5\%$) はどのケースもほぼ同じ卓越周期を示すが、ケース 113 のスペクトル値が比較的大きい傾向を示す。

がわかる。

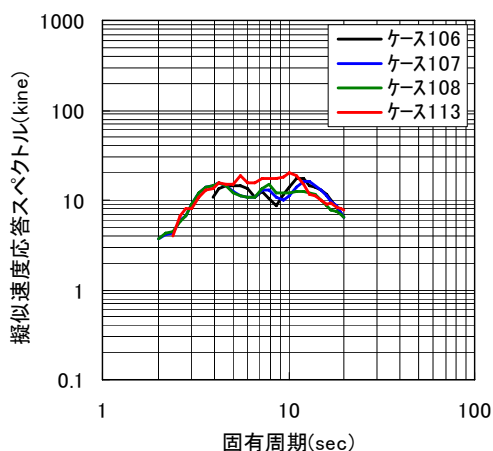
また、別途行った 300 秒までの解析では差分格子間隔を 200m としたケース 107、ケース 108 で 150 秒以降に数



(1) EW 成分



(2) NS 成分



(3) UD 成分

図 3-5 差分格子間隔の違いによる疑似速度応答スペクトル ($h=5\%$) の比較 (TOY 地点)

値的発散現象が見られた。詳しい検討は行っていないが、3.3.1(3)に示したように細かい差分格子と粗い差分格子の境界深さを計算機の記憶容量の制約から 5.2km に設定せざるを得なかったことが原因の一つと考えられる。

これらのことから、今回の試解析では差分格子間隔は 250m まで解析可能と判断した。

なお、ケース 107 とケース 108 では層境界面データ間隔をそれぞれ 400m、200m と設定して解析したが、両者の差は小さく、今回の試解析の範囲では層境界面データの間隔が評価結果に与える影響は小さいと言える。

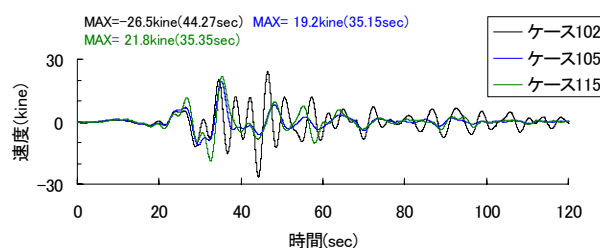
(5) 時間刻みの影響

比較的大きい時間刻み 0.01 秒を用いたことの影響を把握するため、時間刻みを 0.01 秒としたケース 102 と 0.005 秒としたケース 103 を比較検討した。

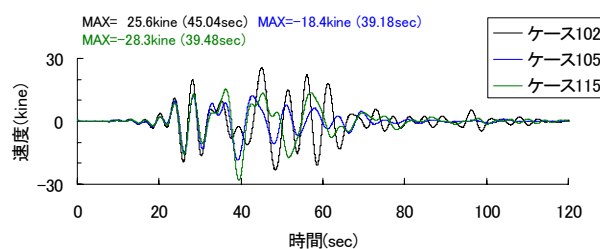
表 3-5 から、ケース 102 とケース 103 の最大速度は MST, TOK, SHI, TOY, YOK, KNN, ENS の各地点でほぼ同じ値を示しており、時間刻みを 0.01 秒としても問題ない。

(6) 断層分割数の影響

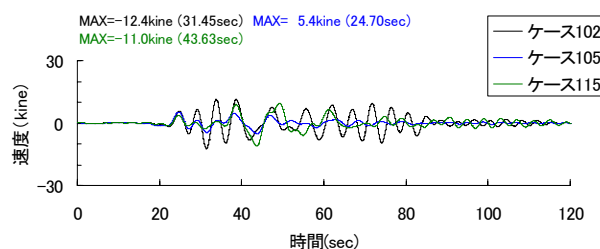
断層分割数が結果に与える影響を把握するため、断層



(1) EW 成分



(2) NS 成分



(3) UD 成分

図 3-6 断層分割数の違いによる速度波形の比較 (TOY 地点)

分割数（長さ方向×幅方向）を 10×7 としたケース 102、 130×70 としたケース 105、 20×14 としたケース 115 を比較検討した。

表 3-5 から、ケース 102 の最大速度はケース 105 に比較して大きく、ケース 115 の最大速度は概ね両者の間に位置する。

図 3-6、図 3-7 にケース 102、ケース 105 およびケース

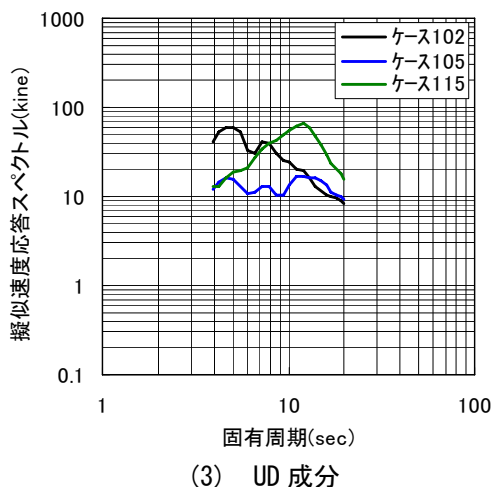
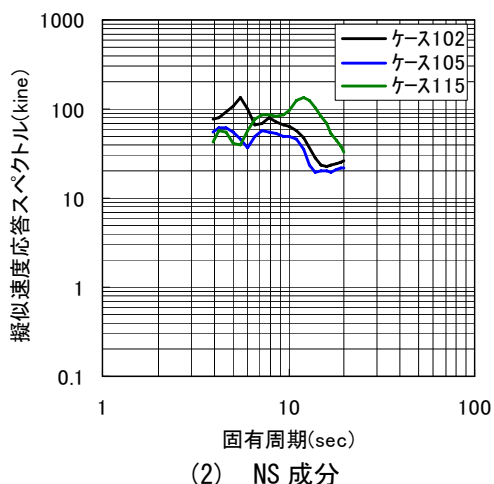
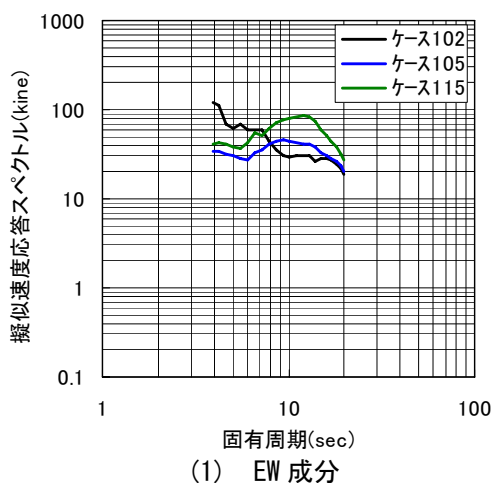


図 3-7 断層分割数の違いによる擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$) の比較 (TOY 地点)

115 の TOY 地点における速度波形、減衰 5% の疑似速度応答スペクトルを比較して示した。図 3-6、図 3-7 から、

- ①速度波形は 30 秒までの立ち上がり部分では差は小さいが、30 秒以降に大きな差が見られ、ケース 102 では 4~5 秒の周期成分が卓越して現れている。一方、ケース 105 とケース 115 の速度波形は、振幅はケース 115 が大きいものの、ほぼ同じ位相を示している。
- ②疑似速度応答スペクトル ($h=5\%$) はどのケースもほぼ同じ卓越周期を示すが、周期 10 秒以下の帯域ではケース 102 のスペクトル値が相対的に大きく、ケース 115、ケース 105 の順に小さくなる。周期 10 以上の帯域ではケース 115 が相対的に大きい。

がわかる。

これらのことから、解析結果は断層の分割の荒さに大きく影響され、速度波形から判断して粗い分割では過大評価の可能性がある。

(7) 断層立ち上がり時間の影響

断層立ち上がり時間の影響を把握するため、断層立ち上がり時間を τ としたケース 106 と 0.5τ としたケース 111、 1.5τ としたケース 112 を比較検討した。

表 3-5 から、ケース 111 の最大速度はケース 112 に比

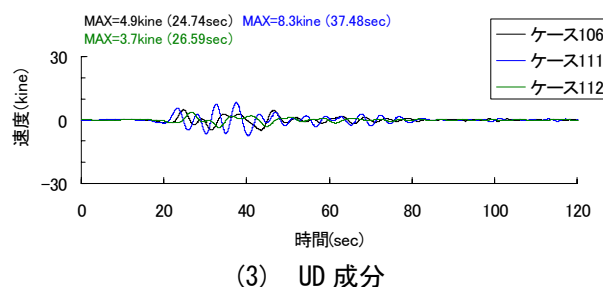
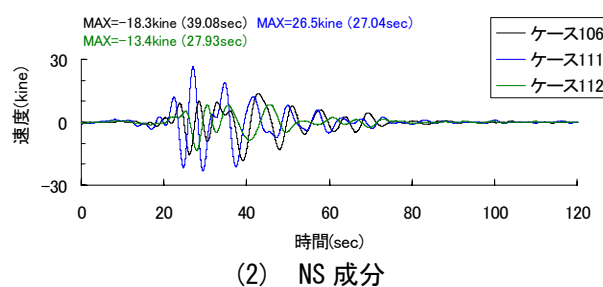
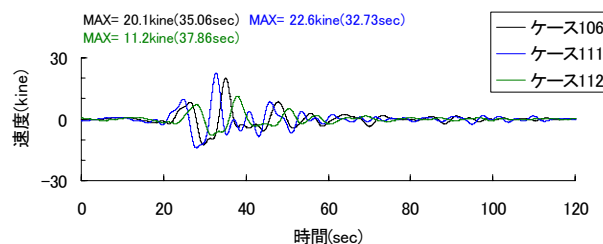
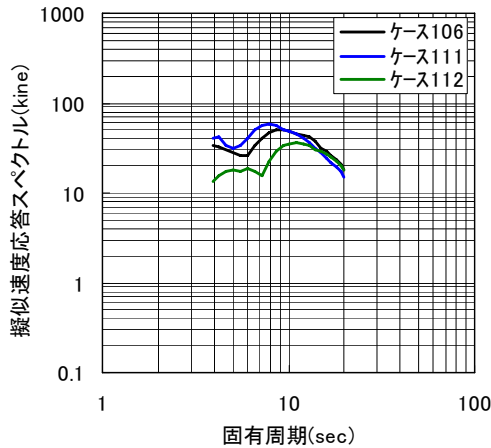


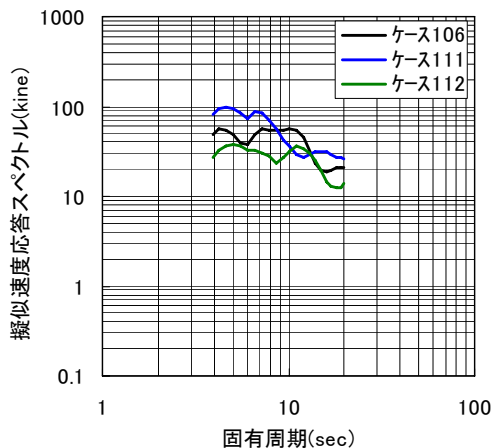
図 3-8 断層の立ち上がり時間の違いによる速度波形の比較 (TOY 地点)

較して大きく、ケース 106 の最大速度は概ね両者の間に位置する。

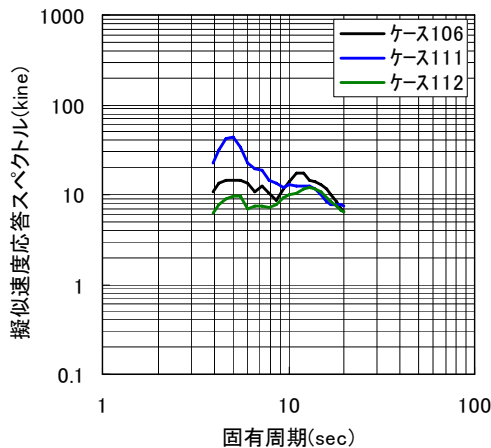
図 3-8、図 3-9 にケース 106、ケース 111 およびケース 112 の TOY 地点における速度波形と減衰 5% の疑似速度応答スペクトルを比較して示した。図 3-8、図 3-9 から、



(1) EW 成分



(2) NS 成分



(3) UD 成分

図 3-9 断層の立ち上がり時間の違いによる疑似速度応答スペクトル (h=5%) の比較 (TOY 地点)

①速度波形の初期の立ち上がり部分はケース 111、ケース 106、ケース 112 の順に位相が遅れ、その振幅も同じ順に小さくなる。

②疑似速度応答スペクトル (h=5%) はどのケースもほぼ同じ卓越周期を示すが、ケース 111、ケース 106、ケース 112 の順にスペクトル値が小さくなり、EW 成分では卓越周期もこの順に長くなる傾向がある。

がわかる。これらは定性的に予想される結果である。

(8) 断層上端深さの影響

本文では断層上端深さ 2km を基本としているが、山田ほか⁴⁾の研究では 5km を採用していることから、断層上端深さを 2km としたケース 108 と 5km としたケース 110 を比較検討した。

表 3-5 から、ケース 108 に対してケース 110 の最大速度は、断層直上に位置する YOK, KNN, ENS の各地点で 0.67~0.90 倍、それ以外の MST, TOK, SHI, TOY の各地点では、MST 地点の UD 成分の 0.68 倍を除き、0.90~1.09 倍の値を示し、震央域からはずれると断層深さの影響は小さい。

(9) 破壊伝播速度の揺らぎの影響

断層の破壊伝播速度に揺らぎを与えたことの影響を把握するため、揺らぎを与えていないケース 108 と揺らぎを与えたケース 109、および揺らぎを与えていないケース 113、揺らぎを与えたケース 114 を比較検討した。

表 3-5 から、ケース 108 とケース 109、およびケース 113 とケース 114 の最大速度の差は小さく、今回の試解析では、断層破壊伝播速度の揺らぎの影響は小さい結果となった。

4. まとめ

三次元差分法 (計算機コード: GMS) を用いて仮想関東地震の地震動の合成を試みた。主な結果を以下にまとめる。

- ①今回用いた計算機の記憶容量 (2 ギガバイト) の制約から、南北方向、東西方向、深さ方向の解析領域は 200.4km×200.4km×50km となる。
- ②このときの差分格子間隔は 250m (最小周期 2.5 秒) となり、200m にすると数値的に発散する場合がある。
- ③時間刻みは 0.01 秒としても問題ない。
- ④評価結果に与える断層分割数の影響は大きく、粗い分割では過大評価の可能性はある。

5. おわりに

今後は、今回の試解析で得られた結果、および別途実施した「統計的グリーン関数法による仮想関東地震の地震動予測」⁵⁾ から得られた結果をハイブリッド法による地震動評価に活用する予定である。また、より大規模な

解析に対応できる様に解析環境の充実も図る予定である。

謝辞：三次元差分法の解析には（独）防災科学技術研究所¹⁾の公開ソフト GMS を用いました。また、関東平野の地震基盤以浅の地盤データは東京工業大学大学院山中准教授⁴⁾のデータを使用させて頂きました。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 青井真，藤原広行：不連続格子を用いた 4 次精度差分法による波形合成，第 10 回日本地震工学シンポジウム，Vol.1，pp.879-884，1998 年 11 月。
- 2) Wald and Somerville：Variable-Slip Rupture Model of the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake： Geodetic and Body-Waveform Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 85, No. 1, pp.159-177, 1995.
- 3) 地震調査研究推進本部：地震に関する評価，<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>，2007 年 3 月現在。
- 4) 山田伸之，山中浩明：地下構造モデルの違いが関東地震の強震動シミュレーション結果におよぼす影響，第 11 回日本地震工学シンポジウム，pp.273-276，2002 年 11 月。
- 5) 吉田隆治，野田茂：統計的グリーン関数法による仮想関東地震の地震動予測，前田技術研究所報，Vol.48，2007 年。
- 6) 吉田隆治，野田茂：断層分割数が統計的グリーン関数法による仮想関東地震の地震動評価結果に与える影響について，土木学会第 62 回年次学術講演会講演集，第 I 部門，2007 年 9 月（投稿中）。