

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

吉田 隆治・野田 茂*¹

Strong Motion Prediction for a Large Earthquake like the 1923 Kanto Earthquake by Stochastic Green's Function Method

Takaharu YOSHIDA, Shigeru NODA

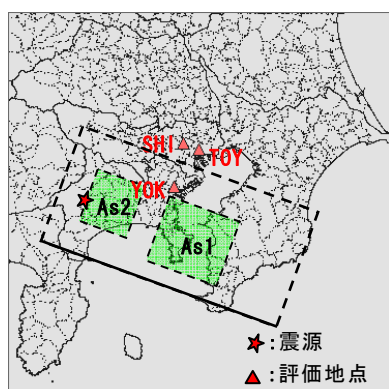


図-1 仮想関東地震の想定断層の平面位置、地震動評価地点

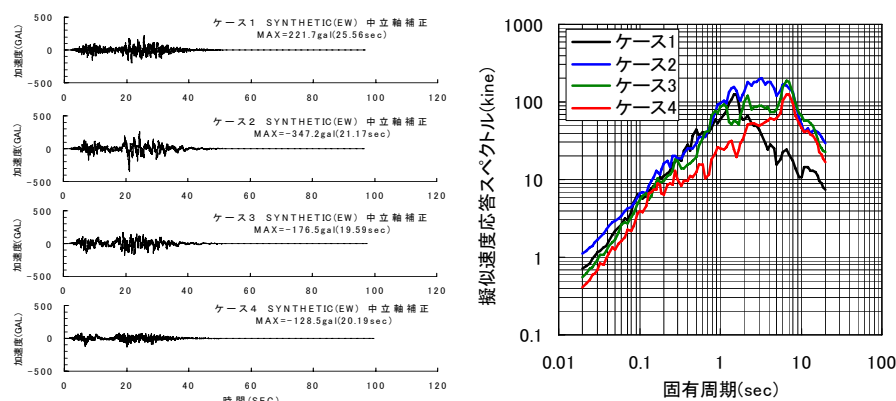


図-2 TOY 地点の解放工学的基盤面の合成加速度波形 (EW), 擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$)

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、短周期帯域の評価に用いられる統計的グリーン関数法を用いて仮想関東地震の地震動評価を行い、断層の分割数が評価結果に与える影響について検討した。

技術の説明

地震動評価手法は釜江ほか¹⁾の統計的グリーン関数法に久田²⁾による長周期領域への拡張法を導入した方法とした。地震動は表層地盤の非線形性の影響を受けない工学的基盤面 (せん断波速度 $V_s=400\text{m/s}$ 程度の地盤) で評価し、水平 2 成分、上下 1 成分を対象とした。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 & Somerville³⁾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⁴⁾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。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 地点とした。図-1 に仮想関東地震の想定断層の平面位置と地震動評価地点を示す。

主な結論

統計的グリーン関数法による仮想関東地震の試解析から、断層分割を細かくすると釜江ほか⁷⁾の研究に示されている様に中間周期帯で過小評価の可能性があることが確認された (図 2 のケース 2 に対するケース 4)。今後は中間周期帯での落ち込みの補正法に関する既往の研究を調査し、地震動評価システムに導入を図る予定である。

* 1 香川大学工学部 教授

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

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，短周期帯域の評価に用いられる統計的グリーン関数法を用いて仮想関東地震の地震動評価を行い，断層の分割数が評価結果に与える影響について検討した．その結果，断層分割を細かくすると釜江ほかの研究に示されている様に中間周期帯で過小評価の可能性があることが確認できた．

キーワード 強震動予測／統計的グリーン関数法／仮想関東地震／断層モデル／アスペリティ

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 STOCHASTIC GREEN'S FUNCTION 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 three sites in the Tokyo metropolitan area were synthesized by stochastic Green's function method. When the fault was divided into small events, some cases for the number of small events were considered.

From the results of these cases, it was certified that values of the pseudo-velocity response spectra with 5% damping in period range between 0.3 and 5 second became smaller as the number of small events on the fault increased.

* 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、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、短周期帯域の評価に用いられる統計的グリーン関数法を用いて仮想関東地震の地震動評価を試み、主に断層の分割数が評価結果に与える影響について検討した。以下に結果を示す。

2. 地震動評価手法および設定条件

2.1 地震動評価手法

地震動評価手法は釜江ほか¹⁾の統計的グリーン関数法に久田²⁾による長周期領域への拡張法を導入した方法とする。地震動は表層地盤の非線形性の影響を受けない工学的基盤面(せん断波速度 $V_s=400\text{m/s}$ 程度の地盤)で評価し、水平2成分、上下1成分を対象とする。

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 & Somerville³⁾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⁴⁾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。

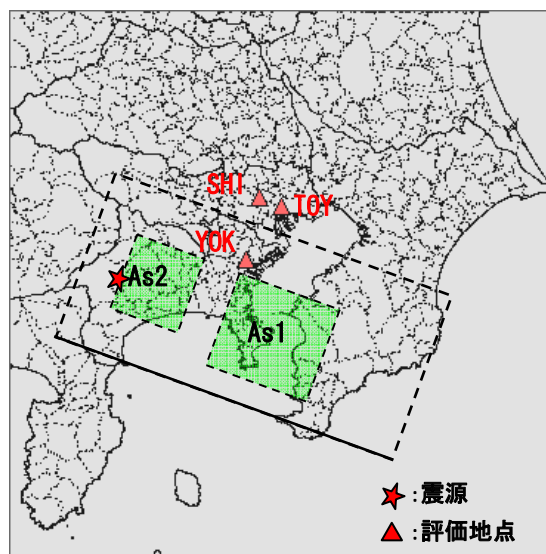


図 2-1 仮想関東地震の想定断層の平面位置

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地点とする。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。断層分割数(長さ方向×幅方向)は10×7分割(小断層の大きさ13km×10km)とした場合、20×14分割(6.5km×5km)とした場合、および130×70分割(1km×1km)とした場合の3ケースを考える。図3-1に断層を10×7分割とした場合の断層モデル図を示す。

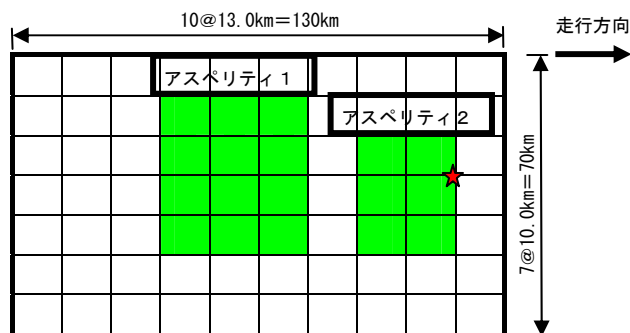


図 3-1 仮想関東地震の断層モデル
(断層分割数：10×7分割の場合)
(★：断層の破壊開始点)

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 北緯 (度)	34.834
	位置 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
	立ち上がり時間 (s)	11.3
	高 動数 (H)	13.5
微視的パラメータ	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
	高 動数 (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 (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 (H)	13.5

3.2 要素波の 成

釜江ほか¹⁾の方法に久田²⁾による長周期領域への拡張法を適用した方法により地震基盤面での加速度波形を求め、それを工学的基盤まで引き上げ、グリーン関数(要素波)とする。

(1) 要素波の想定断層

要素波の作成に用いる想定断層は仮想関東地震の断層中心に設定し、走行、断層傾斜角、すべり角度、平均応力降下量の断層諸元は仮想関東地震の巨視的パラメータと同じとする。また、断層の大きさ(長さ方向×幅方向)は13km×10km、6.5km×5km、1km×1kmの3種類を設定する。表 3-2 に要素波の断層諸元を示す。

表 3-2 要素波の断層諸元

	断層の大きさ(長さ×幅)		
	13km×10km	6.5km×5km	1km×1km
地震モーメント(N・m)	1.33×10^{18}	1.67×10^{17}	8.99×10^{14}
高 動数 (H)	13.5	13.5	13.5
震 深さ (km)	18	18	18
走行 (度)	290	290	290
断層傾斜角 (度)	25	25	25
すべり角度 (度)	138	138	138
平均応力降下量 (MPa)	2.19	2.19	2.19

(2) 要素波 成ケース

断層分割数の影響を確認するための小断層の大きさを変えた3ケースに久田の方法による効果を確認するため

の1ケースを加えた表 3-3 の4ケースについて要素波を作成する。

表 3-3 要素波 成ケース

ケース No.	久田の方法		要素地震の断層の大きさ(長さ×幅)		
	無	有	13km×10km	6.5km×5km	1km×1km
1	○	—	○	—	—
2	—	○	○	—	—
3	—	○	—	○	—
4	—	○	—	—	○

(3) 工学的基盤面での要素波

表 3-2 の要素波の諸元、および要素波の断層位置と評価地点の位置から先ず地震基盤面での加速度を求め、それを工学的基盤面まで引き上げ、解放工学的基盤面での要素波とする。ここで、地震基盤での要素波作成に用いる地殻の内部減衰は[3-1]式⁵⁾

$$Q=94 \quad (0 \leq f \leq 0.8) \quad [3-1] \quad ^{5)}$$

$$=110 f^{0.69} \quad (0.8 < f)$$

Q: 地殻の Q 値

f: 振動数(Hz)

で与え、地震基盤面から工学的基盤面までの地震波の引き上げは、基盤内での波動伝播であることから、線形重複反射理論(計算機コード SHAKE)により行った。評価地点の地盤モデルは山田ほか⁶⁾の研究による関東平野の深い地盤構造などを参考に設定した。表 3-4 に YOK, TOY, SHI の3地点うちの TOY 地点の地盤モデルを示す。

表 3-4 TOY 地点の地盤モデル

深度 (m)	層 (m)	位重量 (t/m ²)	波速度 (m/s)	波速度 (m/s)	定数 (%)
5	5	1.8	100	385	3
15	10	1.8	130	1500	3
33	18	1.7	110	1500	3
45	12	1.9	270	1500	3
400	355	1.9	500	1800	0.5
1500	1100	2.1	1000	2400	0.5
2600	1100	2.3	1700	3200	0.3
—	—	2.5	3000	5600	0.16

図 3-2、図 3-3 に YOK, TOY, SHI の3地点うちの TOY 地点における解放工学的基盤面での要素波の加速度波形および減衰 h=5%の疑似速度応答スペクトルを示す。

図 3-2 から、

①久田の方法を適用していないケース1と久田の方法を適用したケース2から、要素波の包絡形はほぼ同じ形状を示すが、ケース2の加速度波形はケース1に比べ、周期2~3秒の周期成分が明瞭に現れた加速度波形となっている。

②断層の大きさを変えたケース2~ケース4からは、断層の大きさが小さくなるに従い、振幅が小さく、継続時間も短くなり、ケース2に見られる2~3秒の周期成分も周期が短くなる傾向がある。

が分かる。また、図 3-3 から、

③久田の方法を適用したケース2の疑似速度応答スペク

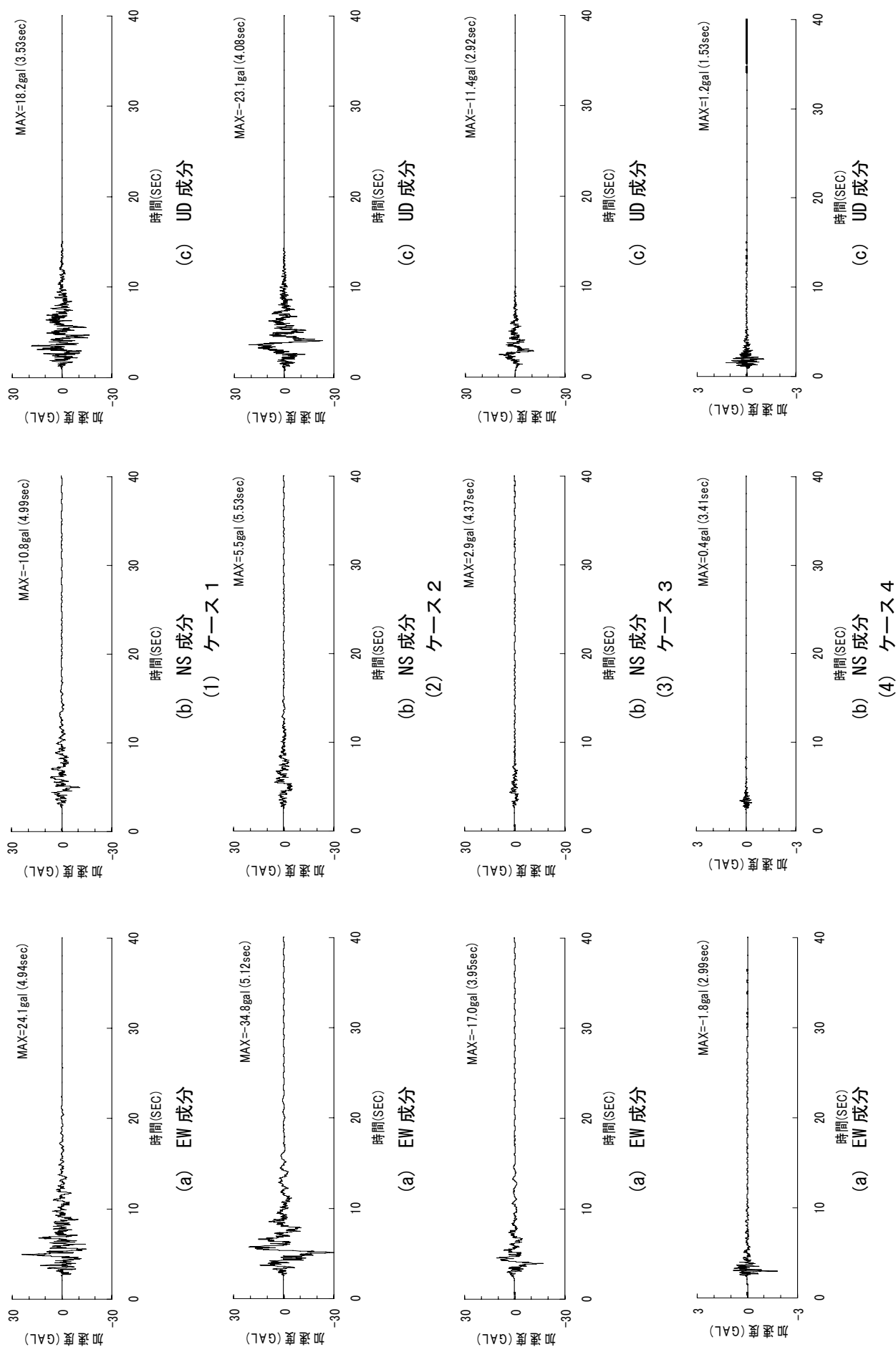
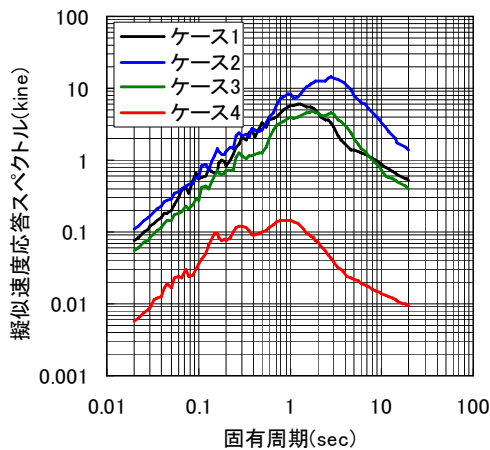
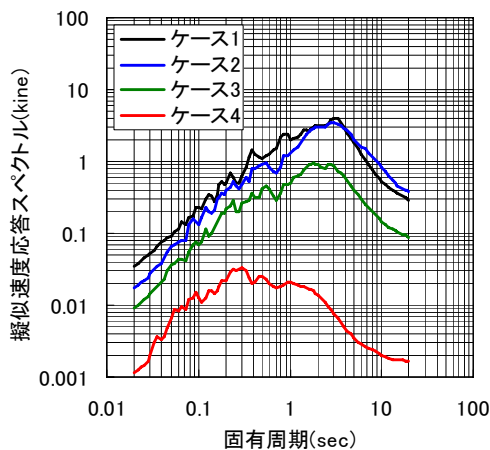


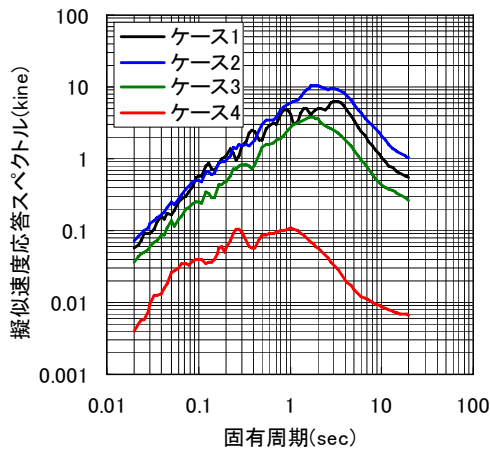
図 3-2 TOY 地点の解放工学的基盤面での要素波の加速度波形



(1) EW 成分



(2) NS 成分



(3) UD 成分

図 3-3 TOY 地点における解放工学的基盤面での要素波の疑似速度応答スペクトル(h=5%)

トルは周期 1 秒以上で久田の方法を適用していないケース 1 と差が見られ、ケース 2 はケース 1 に比べて大きなスペクトル値を示す。

②断層の大きさを変えたケース 2～ケース 4 からは、断層の大きさが小さくなるに従い、卓越周期が短周期側に移動する。

が分かる。

3.3 仮想関東地震の地震動合成結果

前項で求めた要素波（図 3-2）および表 3-1 の仮想関東地震の断層モデル諸元から地震動評価地点の解放工学的基盤面の加速度波形を合成する。解析は表 3-5 に示す 4 ケースとした。

表 3-5 仮想関東地震の地震動合成ケース

ケース No.	久田の方法		断層分割数（長さ方向×幅方向）		
	無	有	10×7	20×14	130×70
1	○	—	○	—	—
2	—	○	○	—	—
3	—	○	—	○	—
4	—	○	—	—	○

図 3-4、図 3-5 に YOK, TOY, SHI の 3 地点うちの TOY 地点の解放工学的基盤面の加速度波形および減衰 $h=5\%$ の疑似速度応答スペクトルを示す。

図 3-4 から、

- ①加速度波形の包絡形はほぼ同じ形状を示すが、久田の方法を適用したケース 2 の加速度波形は久田の方法を適用していないケース 1 に比べて、長周期成分を多く含む加速度波形となっている。
- ②ケース 2 の加速度はケース 1 に比べて全体的に大きく、ここには示していないが YOK, TOY, SHI の 3 地点の最大加速度で比較すると水平動では 96～184%、上下動では 98～155%の値となっている。
- ③加速度波形の包絡形はほぼ同じ形状を示すが、断層を 130×70 分割したケース 4 の加速度波形は 10×7 分割したケース 2 に比べて長周期成分が少ない加速度波形となる。
- ④断層を 130×70 分割したケース 4 の加速度は 10×7 分割したケース 2 に比べて全体的に小さく、ここには示していないが YOK, TOY, SHI の 3 地点の最大加速度で比較すると水平動では 37～93%、上下動では 49～74%の値となっている。

の傾向が見て取れる。また、図 3-5 から、

- ⑤久田の方法を適用したケース 2 の疑似速度応答スペクトルは久田の方法を適用していないケース 1 に比べておおよそ 1 秒以上の周期帯域で大きいスペクトル値を示す。
- ⑥断層を 130×70 分割したケース 4 の疑似速度応答スペクトルは周期 0.3 秒付近までおよび 5 秒以上では 10×7 分割したケース 2 と良い対応を示すが、周期 0.3 秒から 5 秒にかけてスペクトル値の落ち込みが見られる。
- ⑦断層を 20×14 分割したケース 3 の疑似速度応答スペクトルは、周期 1～5 秒で多少小さなスペクトル値を示すものの、断層を 10×7 分割したケース 2 と良い対応を示す。

が見て取れる。

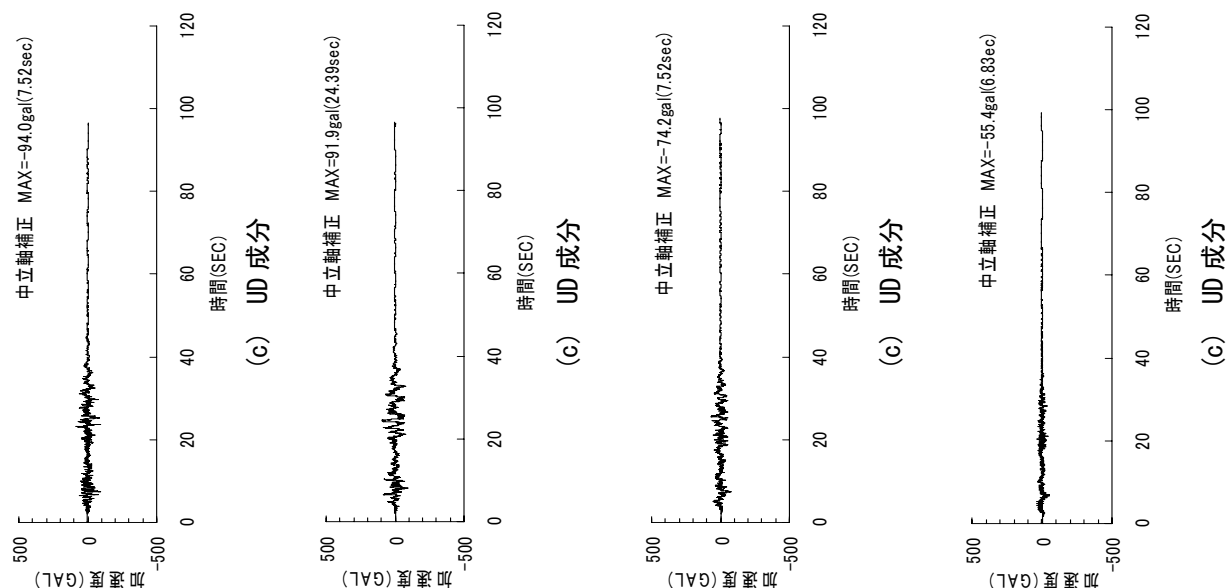
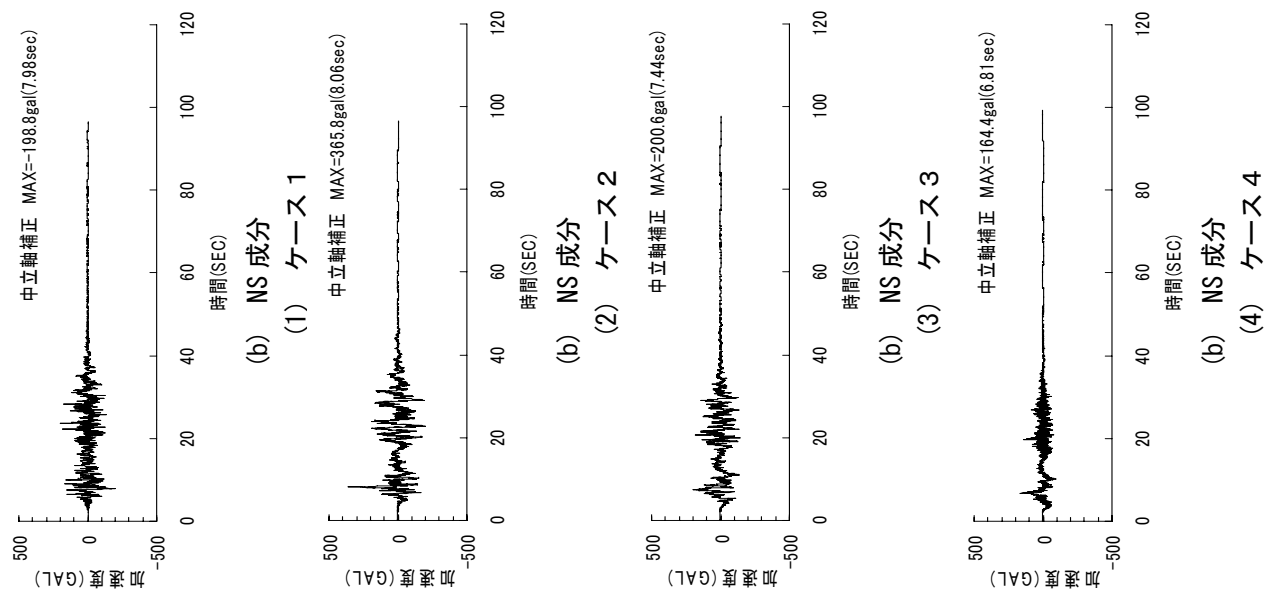
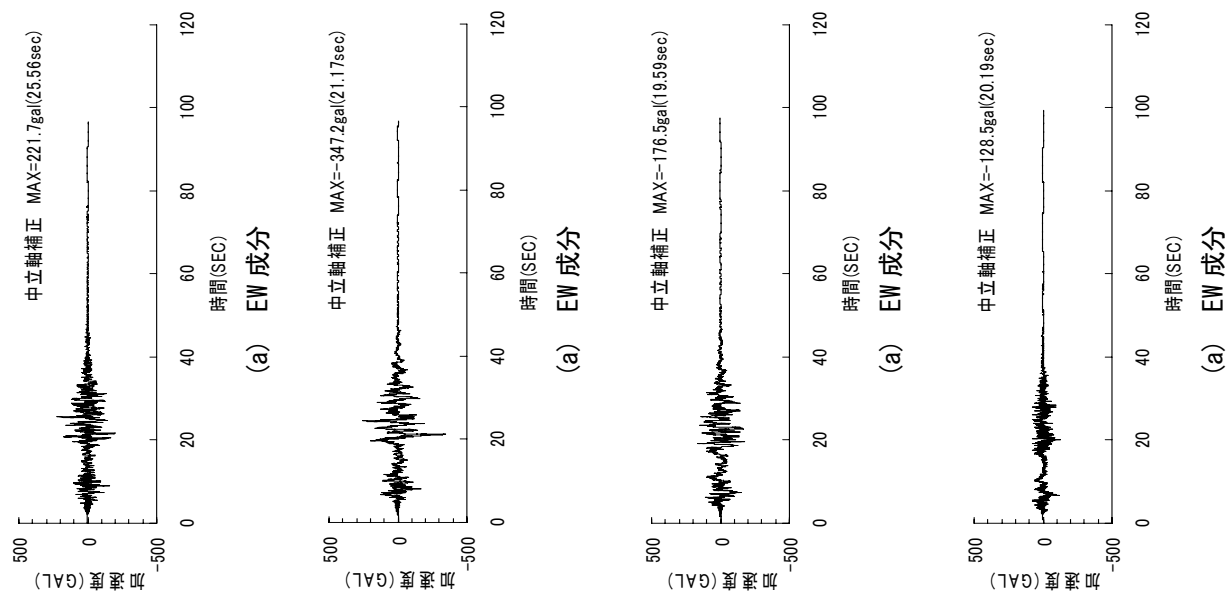
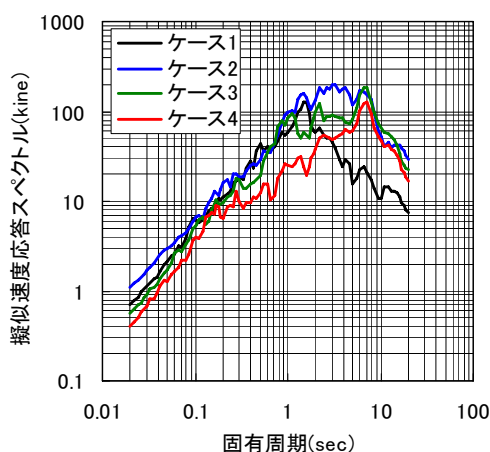
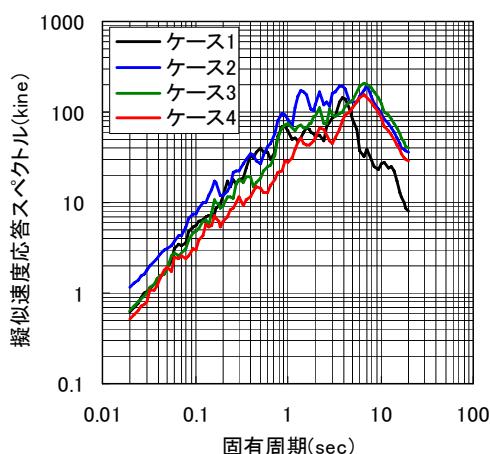


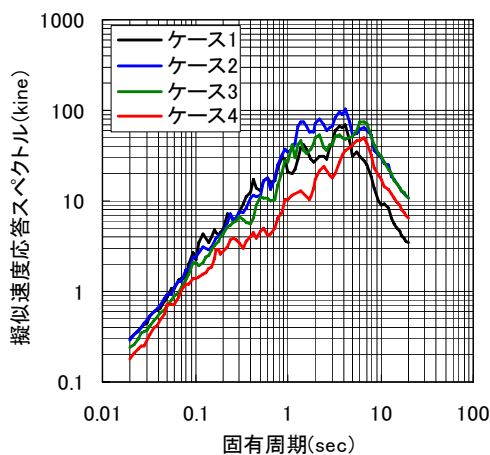
図 3-4 T0Y 地点の解放工学的基盤面での合成加速度波形



(1) EW 成分



(2) NS 成分



(3) UD 成分

図 3-5 TOY 地点の解放工学的基盤面での疑似速度
応答スペクトル ($h=5\%$)

4. まとめ

統計的グリーン関数法を用いて仮想関東地震の地震動の合成を試みた結果、

- ①久田による長周期領域への拡張法を適用することにより周期の長い帯域で改善が見られる。
- ②合成波形は断層の分割の粗さに大きく影響され、細かい分割では粗い分割に比べて加速度が小さめに評価される。

価される。

- ③釜江ほか⁷⁾の研究に示されている様に細かい分割では粗い分割に比べて疑似速度応答スペクトルに中間周期帯域での落ち込みが見られる。

が確認できた。

これらのことは、三次元差分法とのハイブリッド法を考えた場合、山田ほか⁶⁾は三次元差分法による関東地震の解析で $1.2\text{km} \times 1.4\text{km}$ に断層を分割しているが、これと整合するように統計的グリーン関数法の断層分割を行うと中間周期帯域で過小評価の可能性があることを示唆する結果と言え、注意が必要である。

5. おわりに

統計的グリーン関数法による仮想関東地震の試解析から、断層分割を細かくすると従来から指摘されている様に中間周期帯で過小評価の可能性があることが確認された。今後は中間周期帯での落ち込みの補正法に関する既往の研究を調査し、地震動評価システムに導入を図る予定である。

図 5-1 に断層の分割を細かくし、重ね合わせの数が大きくなった場合に生じた見かけの長周期成分を含む合成波形の例を示した。これは地震基盤で作成した要素波をそのまま用い、地震基盤面で合成した加速度波形である。この見かけの長周期成分に関して詳細な検討は行っていないが、要素波(継続時間 40 秒)に含まれる基線のずれや傾斜等が原因していると推察される。この原因についても今後検討の予定である。

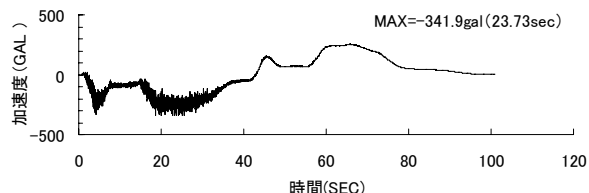


図 5-1 重ね合わせの数が大きくな場合に生じた見
かけの長周期成分を含む合成波の事例

謝辞：図 2-1 は(独)防災科学技術研究所⁸⁾の公開ソフト GMS のツール「GmsSsee」を使用して作成しました。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長: 地震のスケールリング則に基づいた大地震時の強震動予測 統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 430 号, pp.1-9, 1991 年 12 月。
- 2) 久田嘉章: 統計的グリーン関数法の震源域及び長周期帯域への拡張, 日本地震工学会大会-2004 梗概集,

2005 年 1 月.

- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 宮腰淳一, 佐藤智美 : 統計的グリーン関数法による 1923 年関東地震 ($M_{JA}7.9$) の広域強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 530 号, pp. 53-62, 2000 年 4 月.
- 6) 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.
- 7) 釜江克宏, 入倉孝次郎 : 1946 年南海地震 ($M_w=8.1$) 時の震源近傍及び周辺地域における強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 455 号, pp.61-71, 1994 年 1 月.
- 8) 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.
- 9) 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) .