

M9クラス巨大地震の強震動評価

田中清和 野畑有秀

Estimation of Strong Ground Motion during Huge Earthquake

Kiyokazu Tanaka Arihide Nobata

Abstract

After the Great East Japan earthquake in 2011, the importance of seismic disaster mitigation and seismic countermeasures has been recognized. In particular, because this earthquake was a huge earthquake of magnitude 9.0, seismic countermeasures for huge earthquakes in the near future along the Nankai Trough have gained attention. In this study, we performed a general survey on the seismic ground motion characteristics of the 2011 Great East Japan earthquake and simulated its seismic ground motions around Tohoku and near Tokyo to verify the applicability of strong ground motion estimation methods. Adopting the estimated strong ground motions to both seismic-resistant structural design and damage potential estimation, such as for BCP (Business Continuity Plan), will enable effective preparation for expected great earthquakes.

概要

東日本大震災の発生以降、地震防災や地震対策への意識が高まっている。特に、東日本大震災をもたらした2011年東北地方太平洋沖地震がM9の巨大地震であったことで、近い将来の地震発生が懸念されている南海トラフ沿いの巨大地震への耐震対策が注目されている。本論文では、まず東北地方太平洋沖地震における地震動の特徴について整理し、次に、巨大地震を対象とした地震動評価技術の検証として、2011年東北地方太平洋沖地震による東北～東京地域での地震動シミュレーション解析結果を示す。強震動評価手法とその予測波形を、構造設計やBCP等の被害想定へ適用し、展開をはかることによって、より効果的な巨大地震への備えが可能となる。

1. はじめに

2011年3月11日に発生したマグニチュード9.0(以下M9と称する)の東北地方太平洋沖地震は、広範囲にわたって大きな被害をもたらした。巨大地震の深刻な脅威を教訓として残した。これらの教訓を来たるべき巨大地震に対して、有効に活用することが社会から求められており、近い将来の地震発生が懸念されている南海トラフ沿いの巨大地震への耐震対策が注目されている。南海トラフ沿いの地震に関しては、今回の地震を受け、内閣府が幾つかの領域が連動しM9クラスの地震が発生する可能性や沈みこんだプレートの深い部分でも強震動を生成する可能性を指摘しており、被害想定を行う上で、これらの想定を反映した強震動評価が重要となっている。さらには、建設業にとっても構造物の安全性、機能被害を照査する上で、巨大地震の強震動予測は必須の課題となっている。一方、1995年の阪神大震災以降、急速に普及してきた強震動予測手法は、その後発生した内陸活断層地震や海溝型地震に適用されてきた。しかしながら、巨大地震で多数の検証用強震記録が得られているのは、M8クラスでは2003年十勝沖地震、M9クラスでは今回の地震の2例に過ぎず、必ずしも巨大地震に対しての有用性が十分に確認

できているという状態ではない。従って、M9クラスの東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーションを行い、その有用性や課題を把握しておくことが重要である。この地震については、有限差分法単独による長周期成分のシミュレーションや経験的手法による評価は幾つか報告されているが、短周期～長周期までを評価する際に多用される強震動予測手法、即ち、統計的波形合成法と有限差分法により同時に解析した例は殆どない。

本論文では、東北地方太平洋沖地震の強震動の特徴を観測記録から簡単に紹介するとともに、シミュレーション解析を行った結果について報告する。

2. 2011年東北地方太平洋沖地震の地震動の特徴

Fig. 1 に震度分布を示す。今回の地震では広い範囲で強い揺れが観測されている。震度分布は過去の東北地方の太平洋側で発生した地震と同様に南北に広がる分布を示しているが、広域な断層面に呼応するように関東北部においても震度6弱となる領域が見られる。

防災科学技術研究所で観測しているK-NET、KiK-net観測記録を用いて、減衰5%の加速度応答スペクトルを計

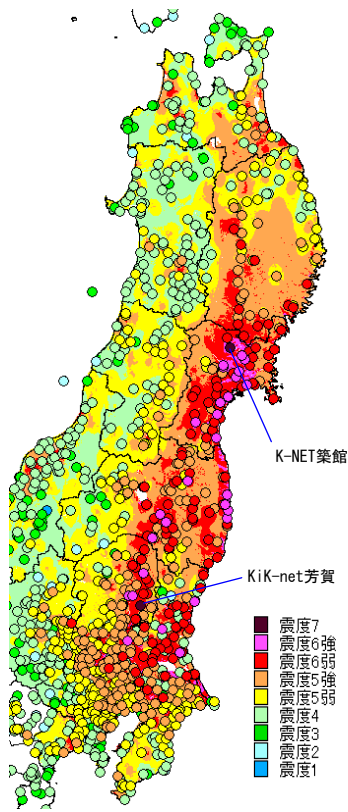
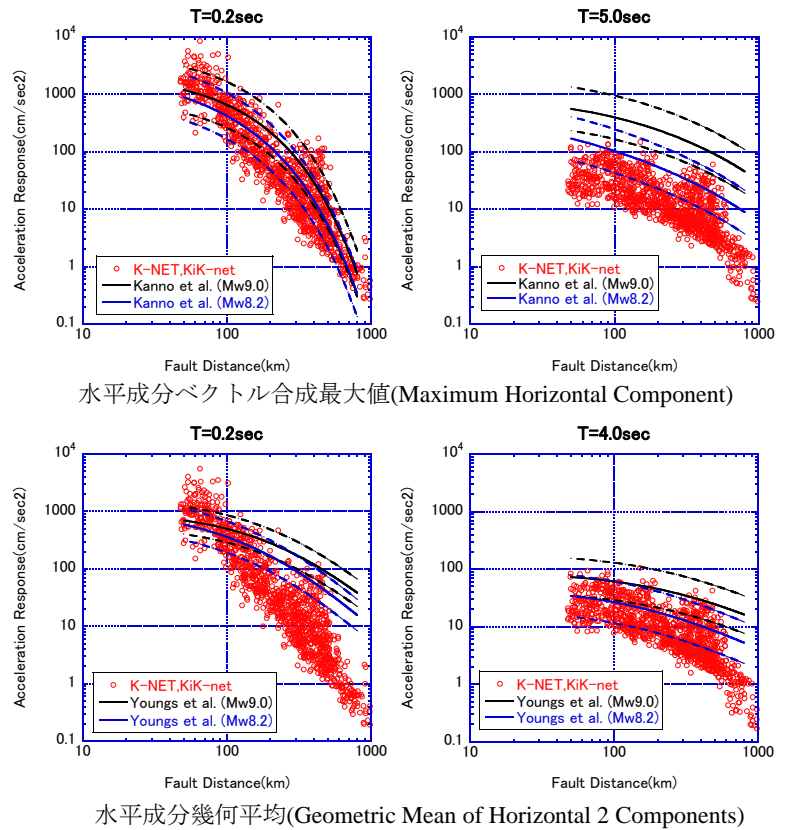


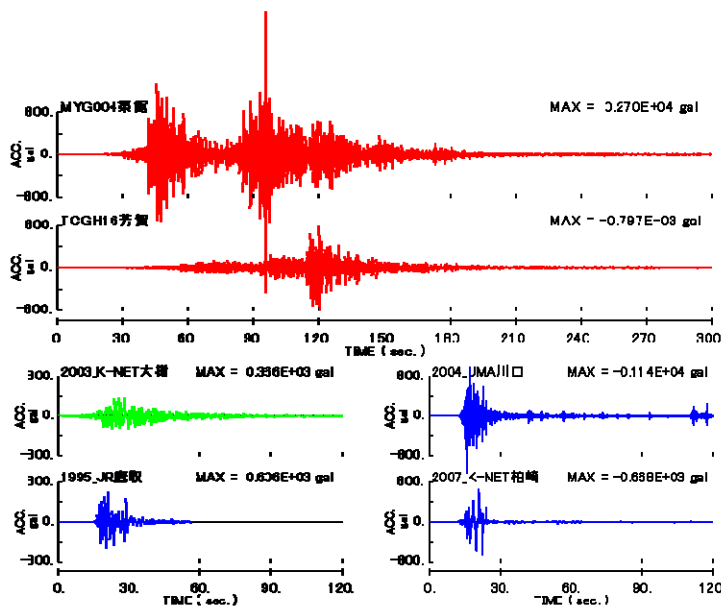
Fig. 1 2011年東北地方太平洋沖地震の震度分布
Seismic Intensity of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake



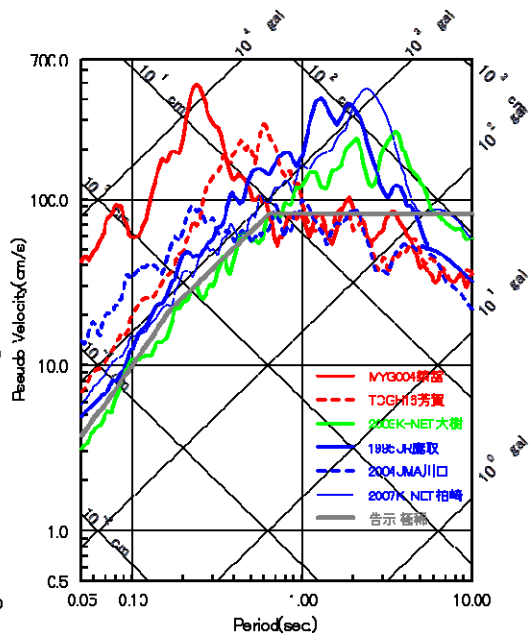
水平成分ベクトル合成最大値(Maximum Horizontal Component)

水平成分幾何平均(Geometric Mean of Horizontal 2 Components)

Fig. 2 2011年東北地方太平洋沖地震の加速度応答値(h=5%)の距離減衰特性(丸印：観測，実線：予測値，点線：予測値±1σ)
Attenuation of Acceleration Response(h=5%) of Seismic Ground Motion during the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake



NS成分加速度波
Accelerograms of NS Component



水平2次元擬似速度応答スペクトル (h=5%)
2-D Pseudo Velocity Response Spectra with h=5% damping

Fig. 3 既往の強震記録と2011年東北地方太平洋沖地震の記録の比較
Comparison Seismic Records of Past Earthquakes and the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

算し、その周期0.2秒と5秒または4秒の距離減衰特性をFig. 2 に示す。同図には、M8クラスの海溝型地震を含む観測記録から作成された加速度応答スペクトルの距離減衰式の代表的な例として、Kanno et al.(2006)¹⁾またはYoungs et al.(1997)²⁾による距離減衰式の予測結果を併せて示す。前者の距離減衰式は日本国内を主とする4979地震約92500記録から水平成分ベクトル合成最大値を対象に、後者は世界の沈み込み帯の164地震480記録から水平2成分の幾何平均値を対象に作成されたものである。計算に用いたマグニチュードは、両距離減衰式の適用範囲の外挿となるモーメントマグニチュード(Mw)9.0の場合に加えて、マグニチュードに頭打ち傾向がみられるという最近の検討例を参考にMw8.2(両距離減衰式の適用上限Mw値)の場合を併せて示す。周期0.2秒、即ち加速度を決定づける周期帯の減衰特性は距離減衰式に比べて急激に減衰する傾向、または距離の短い地点では観測値の方が大きくなる傾向がみられる。周期5秒または4秒では、観測値よりも距離減衰式の方が大きい傾向が見られ、今回の地震のやや長周期帯の地震動の励起は少なかったものと考察される。

Fig. 3 に近年の被害地震の代表的な強震記録(1995年兵庫県南部地震(M7.3)のJR鷹取、2003年十勝沖地震(M8.0)のK-NET大樹、2004年新潟県中越地震(M6.8)のJMA川口、2007年新潟県中越沖地震(M6.8)のK-NET柏崎)と今回震度7を観測したK-NET築館とKiK-net芳賀の強震記録を比較して示す。波形は加速度でNS成分であり、時間軸と加速度軸は概略揃えて示している。今回の地震の特徴は継続時間が非常に長いことがあげられる。同じ海溝型の2003年十勝沖地震(Mw=8.3)と比較してもかなり長く、振幅の大きな時間が3分間程度継続している。K-NET築館においては最大加速度も大きく2.7Gの加速度を記録している。擬似速度応答スペクトルをみると、2.7Gを記録したK-NET築館では周期0.3秒が卓越しており、短周期成分の卓越が大きいのがわかる。同様にKiK-net芳賀においても、周期0.7秒以下の短周期成分の卓越が大きい。参考として同図には建築基準法の告示スペクトルの工学的基盤での極稀地震のスペクトルを示すが、この2つの観測記録とも、周期1秒以上では工学的基盤の極稀レベル以下の地震動強さとなっている。一方、既往の観測記録においては、周期1秒~3秒の卓越が大きく、告示スペクトルのレベルを大きく上回っている。

3. 東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーション

3.1 波形合成法(グリーン関数法)による評価

巨大地震を対象とした地震動評価法の検証として、2011年東北地方太平洋沖地震を対象とする統計的波形合成法および経験的波形合成法による強震動シミュレーションを実施した。

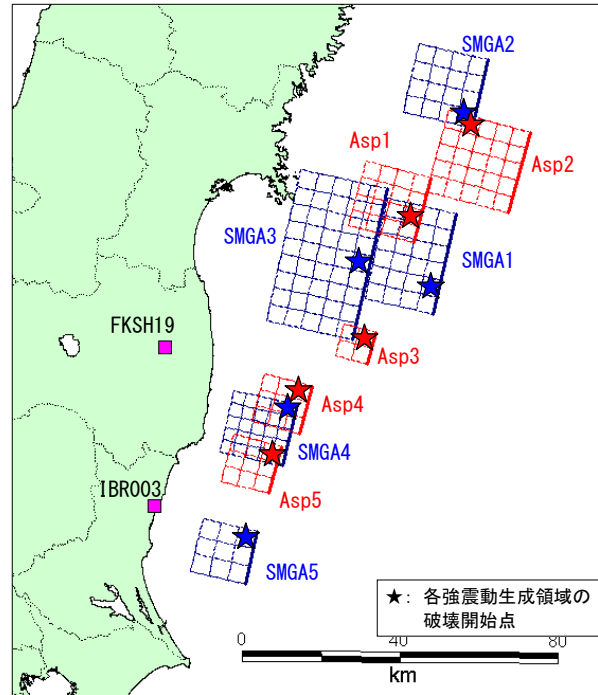


Fig. 4 強震動生成領域の震源モデル
(赤：釜江・川辺モデル, 青：入倉・倉橋モデル)
Fault Models of Strong Motion Generation Areas
(red : Kamae and Kawabe, blue : Irikura and Kurahashi)

Table 1 釜江・川辺(2011)モデルの震源パラメータ
Source Parameters of Kamae and Kawabe(2011) Model

	Asp1	Asp2	Asp3	Asp4	Asp5
走向角(°)	195	195	195	195	195
傾斜角(°)	13	13	13	13	13
面積 (km ²)	40×40	50×50	20×20	30×30	30×30
地震モーメント(Nm)	4.93E+20	1.10E+21	8.8E+19	1.19E+20	2.58E+20
応力降下量(MPa)	18.9	21.6	27.0	10.8	23.1
ライズタイム(sec)	3.6	4.5	1.8	2.7	2.7
破壊開始時間(sec)	0.0	35.0	57.0	87.0	102.0
経験的グリーン関数とした地震	2011.3/10 3:16 M6.4	2011.3/10 3:16 M6.4	2011.3/10 3:16 M6.4	2011.3/10 3:16 M6.4	2005.10/13 20:44 M6.3

Table 2 入倉・倉橋(2011)モデルの震源パラメータ
Source Parameters of Irikura and Kurahashi(2011) Model

	SMGA1	SMGA2	SMGA3	SMGA4	SMGA5
走向角(°)	193	193	193	193	193
傾斜角(°)	10	10	10	10	10
面積 (km ²)	62.4×41.6	41.6×41.6	93.6×52.0	38.5×38.5	33.6×33.6
地震モーメント(Nm)	2.31E+21	7.05E+20	4.34E+21	3.83E+20	3.99E+20
応力降下量(MPa)	41.3	23.6	29.5	16.4	26.0
破壊開始時間(sec)	15.64	66.42	68.41	109.71	118.17

3.1.1 評価の方法 統計的波形合成法による地震動の計算では、サイト直下の地震基盤における地震動を統計的波形合成法により算定し、求めた地震基盤波(水平動)を一次元平行成層地盤に鉛直入射して非線形時刻歴応答解析により地表面での地震波を算定した。波形合成法には壇ほか³⁾の方法を採用し、地震基盤における要素断層波の包絡形は佐藤ほか(1994)⁴⁾による統計的経時特性を使用した。経験的波形合成法の計算では、評価位置

(地表または地中)での地震観測記録をバンドパスフィルター処理(0.1~10sec)した波形をグリーン関数として用いて、地表面または地中での波形を入倉⁵⁾の方法により合成した。

3.1.2 震源モデル 東北地方太平洋沖地震については多くの研究者により震源のすべり分布モデルや震源過程モデルが提案されている。本検討では、主として周期10秒以下を対象とした強震動波形解析により求められた

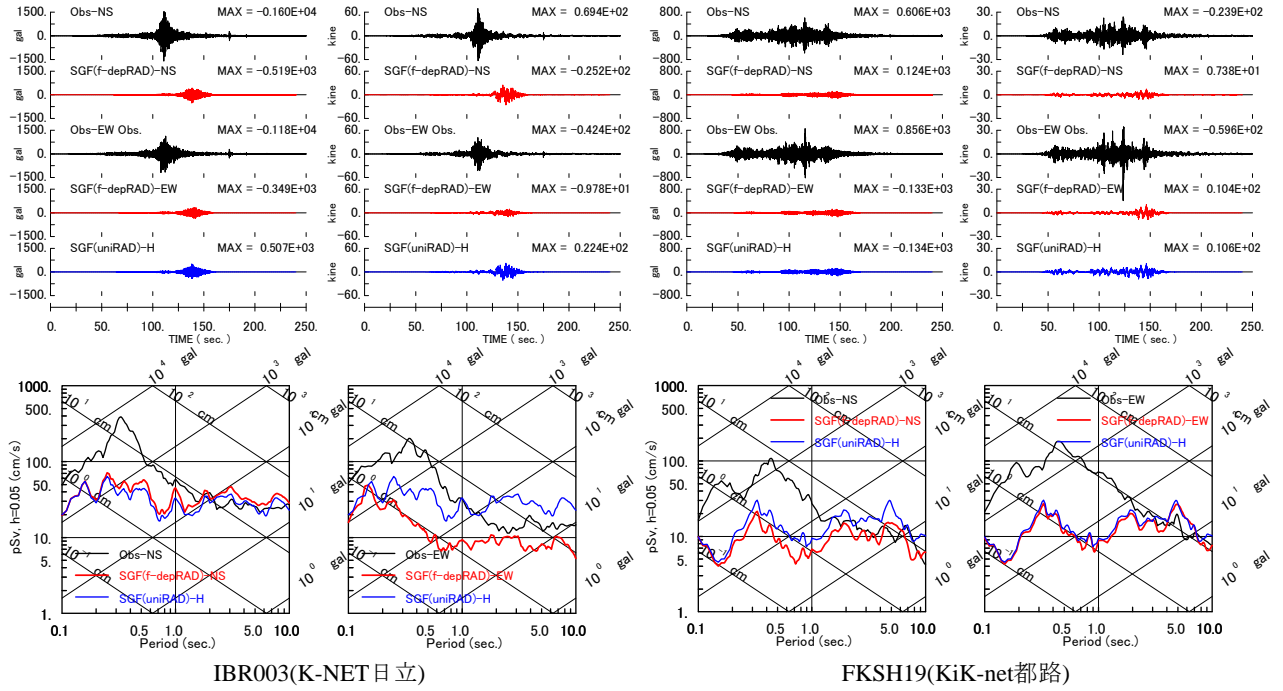


Fig. 5 統計的波形合成法による地震動シミュレーション波形(釜江・川辺モデル)
Calculated Ground Motion by Stochastic Green Function Method (Kamae and Kawabe Model)

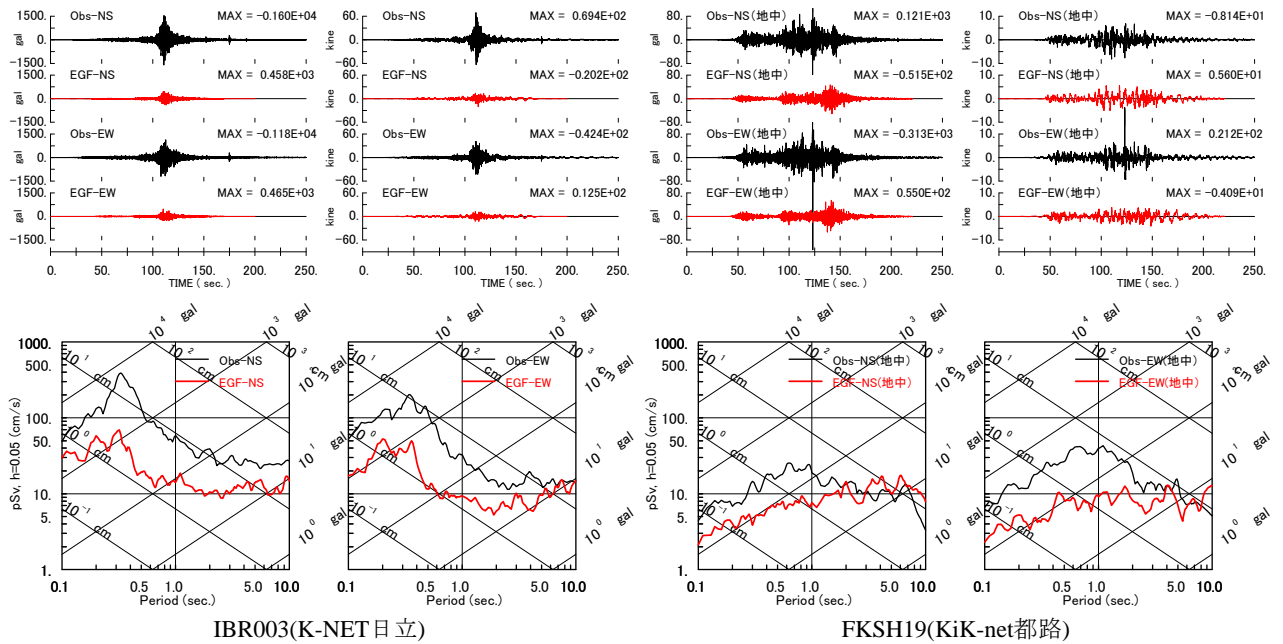


Fig. 6 経験的波形合成法による地震動シミュレーション波形(釜江・川辺モデル)
Calculated Ground Motion by Empirical Green Function Method (Kamae and Kawabe Model)

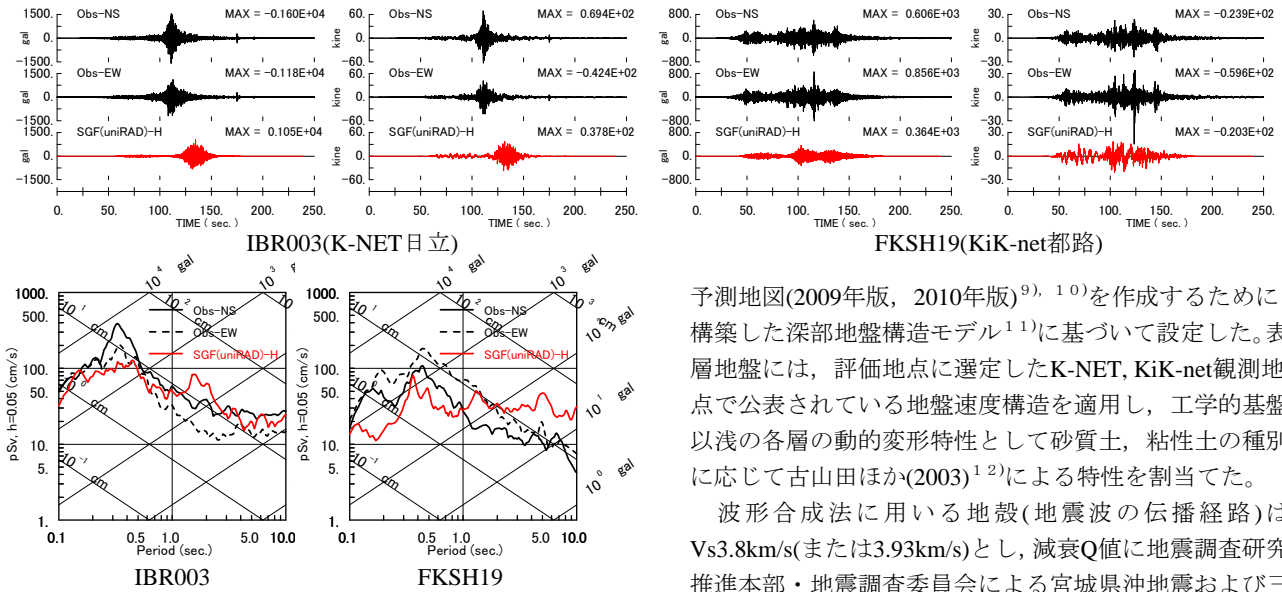


Fig. 7 統計的波形合成法による地震動シミュレーション波形(入倉・倉橋モデル)
Calculated Ground Motion by Stochastic Green Function Method (Irikura and Kurahashi Model)

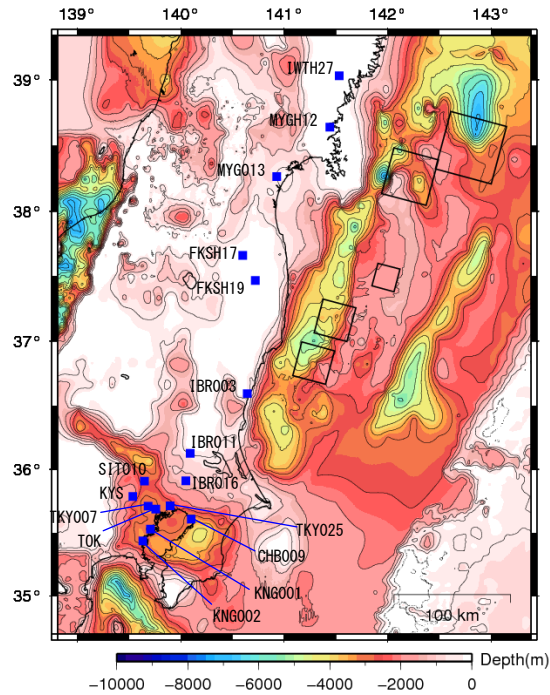


Fig. 8 差分モデル化範囲と地震基盤構造の等深度線図
Region of Finite-Difference Modeling and Depth Contours for the Sediment-Bedrock Interface

強震動生成領域から成る震源モデルのうち、釜江・川辺(2011)^{6), 7)}と入倉・倉橋(2011)⁸⁾によるモデルを採用した。Fig. 4 に各震源モデルの強震動生成領域の位置を、Table 1~2 に震源パラメータを示す。各強震動生成領域は約10km四方の要素断層に分割して計算に用いた。

3.1.3 地盤構造モデル 深い地盤構造については、防災科学技術研究所が地震調査研究推進本部の全国地震動

予測地図(2009年版, 2010年版)^{9), 10)}を作成するために構築した深部地盤構造モデル¹¹⁾に基づいて設定した。表層地盤には、評価地点に選定したK-NET, KiK-net観測地点で公表されている地盤速度構造を適用し、工学的基盤以浅の各層の動的変形特性として砂質土, 粘性土の種別に応じて古山田ほか(2003)¹²⁾による特性を割当てた。

波形合成法に用いる地殻(地震波の伝播経路)はVs3.8km/s(または3.93km/s)とし、減衰Q値に地震調査研究推進本部・地震調査委員会による宮城県沖地震および三陸沖北部地震の強震動評価^{13), 14)}に使用された設定(Q=110f^{0.69} (f>1Hz), Q=110 (f<=1Hz), [f: 周波数])を用いた。

3.1.4 計算結果 地震動評価を実施した複数地点のうち例として、K-NET 日立(IBR003)とKiK-net都路(FKSH19)を評価対象サイトとした場合について示す。

釜江・川辺モデルに基づき統計的波形合成法により算定した結果をFig. 5 に、経験的波形合成法により算定した結果をFig. 6 に示す(図中の波形は観測と計算で絶対時刻は一致させていない)。統計的波形合成法の計算においては、要素断層波作成時の震源放射特性係数を、S波の全震源球面での平均値¹⁵⁾である0.63を水平成分の自乗平均と考えると√2で除した値0.445にて等方的に与えた場合(uniRAD)と、周波数依存型の放射特性として、短周期域では同様にS波全震源球面平均値に基づき等方的に0.445を与え、長周期域では理論放射特性値¹⁶⁾を与えることとして、これらの値が振動数3Hz~6Hz間¹⁷⁾で両対数軸上で線形に遷移するように与えた場合(f-depRAD)の2通りを計算した。

釜江・川辺モデルに基づく統計的波形合成法の結果では、波形振幅を比較すると観測記録に比べて計算波がかなり小さい。応答スペクトルでみると、周期1~2秒程度以上の長周期帯域では観測と計算が概ね同等の振幅レベルとなっているが、短周期域では計算波が大きく下回っており、そのために波形振幅が小さくなっていることが分かる。経験的波形合成法の結果においてもこの傾向は同様で、短周期域では計算が観測を下回っている。このことは震源モデルに短周期成分の説明能力が不足しているとも解釈できるが、この他のサイト(例えば、KiK-net 十王IBRH14, いわき東FKSH14, 等)での経験的波形合成法結果では観測と計算波の短周期レベルが良く一致している場合もあり単純には判断できない。

統計的波形合成法における震源放射特性の設定による差違に関しては、IBR003のNS成分, FKSH19のNS,EW成

分では等方型、周波数依存型ともに計算波は観測と同程度の応答振幅レベルであるが、IBR003のEW成分では観測は等方型と周波数依存型の計算波の中間のレベルとなっており、等方型の方がやや過大であるが安全側の評価結果である。

Fig. 7 には、入倉・倉橋モデルに基づく統計的波形合成法の算定結果を示す。計算時の震源放射特性係数は等方的に与えた場合のみとした。応答スペクトルによれば、周期1~2秒程度以上の長周期帯域ではやや過大評価の部分もあるが観測と計算で概ね同等の振幅レベルとなっている。短周期域については釜江・川辺モデルの場合に比べて振幅が大きく、比較的良好な振幅レベルの一致を示すが、やや過小評価であることは同様の傾向である。

以上の検討結果から、巨大地震の波形合成法による強震動評価については、特に短周期成分の評価において震源設定の影響が大きく、今後の研究・改良の余地があると考えられる。また、本検討には含まれないが、K-NET 築館MYG004サイト等における地盤増幅特性に関する既往研究を鑑みると、地盤増幅の考慮方法についてもより精度の高い評価に向けて改善の余地ありと思われる。

3.2 三次元有限差分法による評価

巨大地震を対象とした長周期地震動の評価法の検証として、2011年東北地方太平洋沖地震を対象に、三次元有限差分法による長周期地震動のシミュレーション解析を実施した。

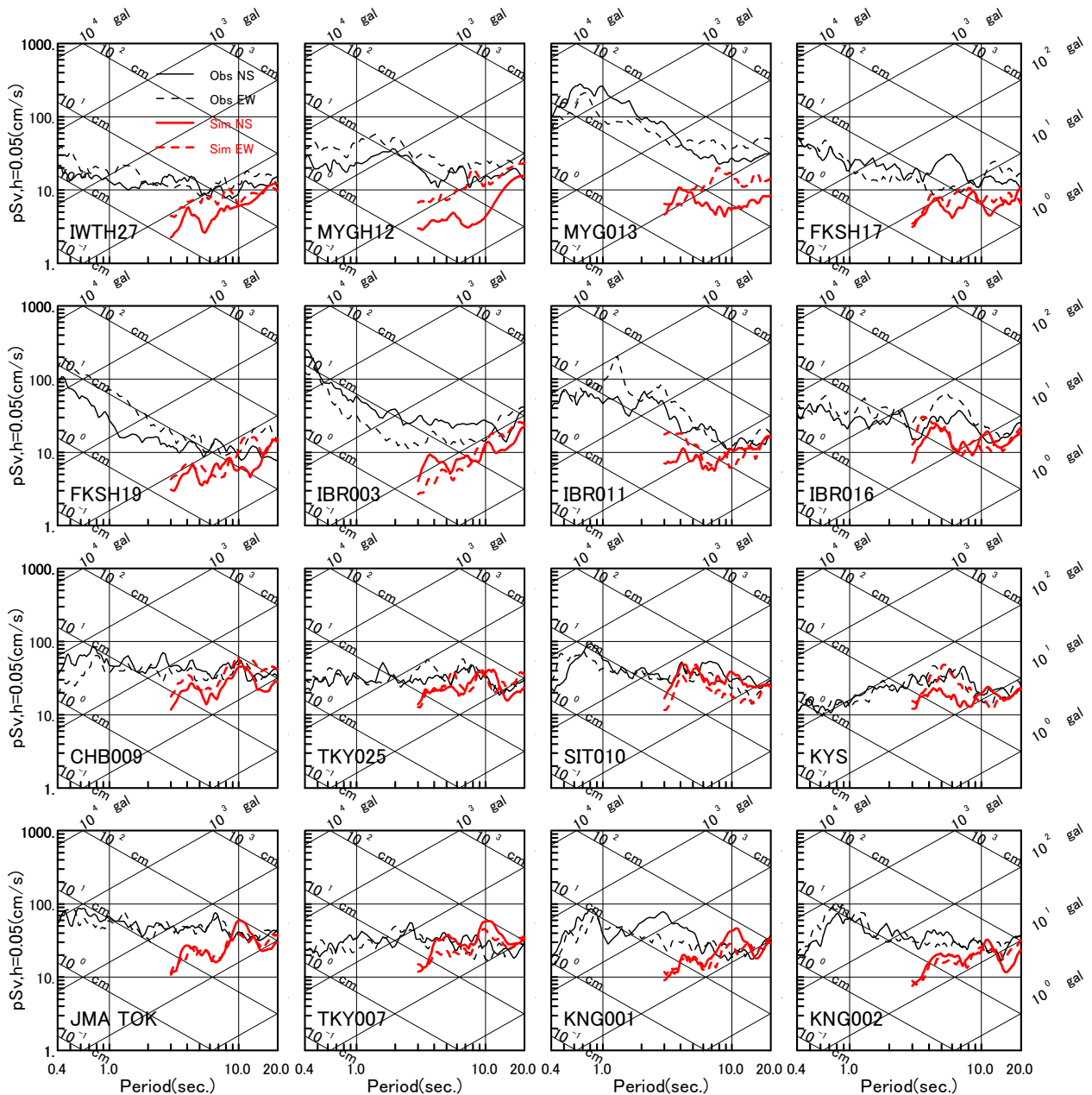


Fig. 10 三次元有限差分法による地震動シミュレーション波形の擬似速度応答スペクトル(釜江・川辺モデル)
Pseudo-velocity Response Spectra of Calculated Ground Motion by 3-D Finite Difference Method (Kamae and Kawabe Model)

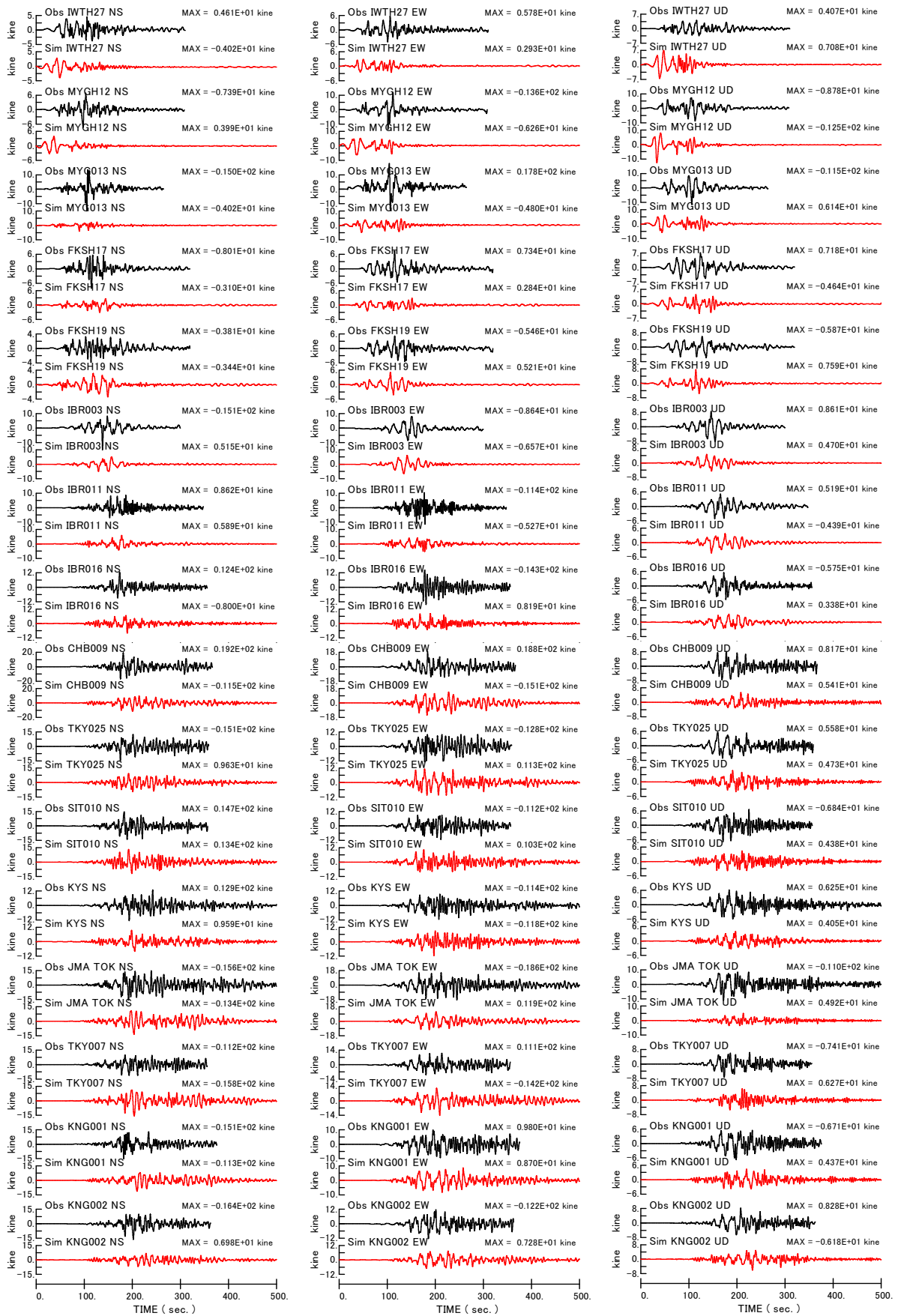


Fig. 9 三次元有限差分法による地震動シミュレーション波形(釜江・川辺モデル)
 Calculated Ground Motion by 3-D Finite Difference Method (Kamae and Kawabe Model)

3.2.1 評価の方法 解析手法には不等間隔格子のスタaggerドグリッドを用いた空間4次時間2次精度の三次元有限差分法^{18), 19)}を用いた。解析モデル範囲は、東西410km, 南北515km, 深さ100kmの領域である。Fig. 8にモデル化範囲を示す。地震動の評価位置は解放工学的基盤面上(V_s 500m/s層上面)とした。解析に当たっては時間刻みを0.011秒, 差分メッシュ間隔は水平0.3km, 上下0.2km~0.6kmとし, 最小S波速度500m/sの層において周期3.0秒以上の帯域で計算精度が確保されるように設定した。減衰の考慮についてはGraves¹⁸⁾による手法を用いることとし, リファレンス周期 $T_0=5$ 秒で所定の値となるように設定した。

3.2.2 震源モデル 震源は釜江・川辺(2011)^{6), 7)}によるモデルを採用した。Fig. 8中に震源モデルの強震動生成領域の位置を示す。強震動生成領域は10km四方に分割した各要素断層を点震源でモデル化し, 各点震源の震源時間関数については, 中村・宮武(2000)²⁰⁾によるすべり速度時間関数に要素断層内でのユニラテラル破壊仮定時の破壊伝播効果を加えた震源時間関数を作成し, これを複数のCosine型関数で近似して設定した。すべり角については川辺ほか²¹⁾に倣い90度とし, 要素震源深さを太平洋プレート上面(海洋性地殻第2層 $V_s=2.8$ km/s上面)の深さと同じになるように変更して用いた。

3.2.3 地盤構造モデル 地盤構造については, 地震調査研究推進本部が長周期地震動予測地図 2012年試作版²²⁾のために構築した地下構造モデルに基づき設定することとし, 最表層 V_s 350m/s層の地盤定数は V_s 500m/s層の値へ置換して用いた。設定した地下構造モデルの地震基盤(V_s 3.2km/s層上面)の深度分布をFig. 8に示す。

3.2.4 計算結果 地震観測サイト16地点(K-NET 10地点, KiK-net 4地点, 気象庁1地点(TOK), 大林組1地点(KYS))について, 三次元有限差分法により計算した長周期地震動の速度成分波形を観測記録と比較してFig. 9に示す。波形には3~20秒のバンドパスフィルター処理を施した。Fig. 10には観測と計算波の応答スペクトルを示す。

シミュレーション計算結果と観測記録とを比較すると, K-NET取手(IBR016)よりも震源寄りの東北地方の各サイトでは計算波が観測よりもやや過小評価になる傾向が見られる(例えばK-NET仙台MYG013, 等)。また, IWTH27からMYG013までのサイトでは計算波に観測波よりも前に出現するフェーズが認められる。フェーズについては震源モデルに起因する可能性が高いが, 振幅過小については地盤構造の精度に原因がある可能性があり, この地域あるいは評価サイト周辺での地盤モデルの妥当性について吟味する必要性を示唆している。

一方で, IBR016以降の関東平野内の各サイトでは, 観測と計算の波形が概ね同等の振幅レベルで形状も同様となっており, 継続時間が長く続く点についても再現できている。細かく見ると波形の個々のフェーズがずれたり異なっていたりスペクトルの卓越形状がやや違っていたりするが, スペクトル振幅やスペクトル形状は概ね各サ

イトで観測と同様となっていることから, 関東平野での長周期地震動の考慮は概ね妥当であると判断できる。

4. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震の強震動の特徴を観測記録から概観した後に, M9クラスの巨大地震に対する強震動予測手法の適用性の検証として, 統計的波形合成法および三次元有限差分法によるシミュレーション解析を実施した。その結果, 統計的波形合成法では震源モデルに依存する部分はあるものの観測をある程度再現できること, 有限差分法では関東平野部での長周期地震動を概ね妥当に考慮できることを示した。また, 短周期成分の地震動評価には震源モデルの影響が大きく巨大地震の妥当な震源モデル評価法について, より一層の研究が必要であるという課題が明らかになった。

今後, このような強震動予測手法による予測地震動を耐震設計やBCP(事業継続計画)等における被害想定へ適用し, 展開を計ることによって, より精度の高い巨大地震への備えが可能となるものと期待される。具体的には南海トラフ巨大地震を対象とした強震動予測に適用し, 超高層や免震などの長周期構造物の設計や工場建屋等の一般耐震構造物の耐震性検討に資する予定である。

謝辞

防災科技研K-NET, KiK-netおよび気象庁の観測記録データ, GMTを使用させて頂きました。また, 地震動計算を実施するに当たり, 京都大学・川辺秀憲助教より提供して頂いた有限差分法プログラムを利用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kanno, T., et al. : A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.96, No.3, pp.879-897, (2006)
- 2) Youngs, R. R. et al. : Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes, Seismological Research Letters, Vol.68, No.1, pp.58-73, (1997)
- 3) 壇一男, 他 : 統計的グリーン関数法による1923年関東地震(Mjma7.9)の広域強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, No.530, pp.53-62, (2000)
- 4) 佐藤智美, 他 : ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性, 日本建築学会構造系論文集, No.461, pp.19-28, (1994)
- 5) Irikura, K. : Estimation of near-field ground motion using empirical Green's function, Proc. of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto,

- Japan, Vol.8, pp.37-42, (1986)
- 6) 釜江克宏, 川辺秀憲: 2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0)の震源のモデル化(強震動生成域)(第1報), <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/eq/tohoku1/Tohoku-ver1-rev20110601.pdf>, (2011)
 - 7) 川辺秀憲, 他: 2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル, 日本地震学会2011年秋季大会予稿集, B22-05, (2011)
 - 8) 入倉孝次郎, 倉橋奨: 2011年東北地方太平洋沖地震の強震動生成のための震源モデル(2011年8月17日修正版), http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/tohoku_irikura20110816.pdf, (2011)
 - 9) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 全国地震動予測地図, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/index.htm, (2009)
 - 10) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 全国地震動予測地図2010年版, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/10_yosokuchizu/index.htm, (2010)
 - 11) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 4.4.2節 深い地盤構造のモデル, 4章 震源断層を特定した地震動予測地図, 「全国地震動予測地図—地図を見て私の街の揺れを知る—」技術報告書(2009), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/index.htm, (2009)
 - 12) 古山田耕司, 宮本裕司, 三浦賢治: 多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性, 第38回地盤工学会研究発表会, pp.2077-2078, (2003)
 - 13) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 宮城県沖地震を想定した強震動評価(一部修正版), 平成17年12月, (2005)
 - 14) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 三陸沖北部の地震を想定した強震動評価, 平成16年5月, (2004)
 - 15) Boore, D. M. and Boatwright, J.: Average body-wave radiation coefficients, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 5, pp.1615-1621., (1984)
 - 16) Aki, K. and P. G. Richards: *Quantitative Seismology, Theory and Methods (Vol. I, Chap. 4, Section 4.5)*, W. H. Freeman and Company, San Francisco, (1980)
 - 17) 佐藤智美: KiK-net強震記録に基づく鳥取県西部地震とその余震のラディエーションパターン及びfmaxの評価, 日本建築学会構造系論文集, 556, pp.25-34, (2002)
 - 18) Graves, R. W.: Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences., *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.86, No.4, pp.1091-1106, (1996)
 - 19) Pitarka, A.: 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.89, No.1, pp.54-68, (1999)
 - 20) 中村洋光, 他: 断層強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, 地震第2輯, 第53巻, pp.1-9, (2000)
 - 21) 川辺秀憲, 他: 2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション, 第39回地盤震動シンポジウム, pp.35-42, (2011)
 - 22) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 「長周期地震動予測地図」2012年試作版, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/index.htm, (2012)