



## 2011年東北地方太平洋沖地震の震源のモデル化

川辺秀憲<sup>1)</sup>、釜江克宏<sup>2)</sup>

1) 正会員 京都大学原子炉実験所、助教 博士(工学)

e-mail: kawabe@rri.kyoto-u.ac.jp

2) 正会員 京都大学原子炉実験所、教授 博士(工学)

e-mail: kamae@rri.kyoto-u.ac.jp

## 要 約

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)に対し、経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングにより工学的に重要な0.1~10秒の周期帯を対象とした震源のモデル化を行った。結果として、宮城県沖から茨城県沖にかけて、5つの強震動生成域からなる震源モデルを提案した。得られた震源モデルにおける5つの強震動生成域は、これらの地域における地震調査研究推進本部による想定震源域内にほぼ含まれていること、強震動生成域のみの地震モーメントは総地震モーメントの5%程度であり、より周期の長い地震動、巨大津波及び地殻変動を説明する震源モデル(海溝軸側に大すべり領域)とは相補的であるとの結果が得られた。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震、震源モデル、経験的グリーン関数法、フォワードモデリング、強震動生成域

## 1. はじめに

2011年3月11日14時46分に宮城県沖(東経142° 51.6'、北緯38° 6.2'、深さ24km)を震源とするMw9.0の超巨大な海溝型プレート境界地震が発生し、気象庁はこの地震を2011年東北地方太平洋沖地震と命名した。気象庁やF-netによるこの地震の震源メカニズム<sup>1),2)</sup>は低角逆断層であり、余震分布<sup>2)</sup>などは沈み込む太平洋プレートの上面に沿っていることから、太平洋プレートと北米プレートとのプレート境界で発生した地震であることが分かる。また、余震分布は三陸沖から茨城県沖の広範囲に広がり<sup>2)</sup>、本震の破壊領域が非常に大きかったこと示している。

この地震により東北地方から関東地方の広い範囲で震度6弱以上の強い地震動が観測され、多種多様な被害が発生した。また、超巨大な津波により東日本の太平洋沿岸部に激甚な人的・物的被害がもたらされた。特に、大津波によって東京電力福島第一原子力発電所で甚大な原子力災害まで発生してしまった。なお、今回の地震では震源域に近い関東のみでなく、震源域から500km以上離れた大阪でも大規模堆積盆地を反映した長周期地震動に襲われ、超高層ビルでの天井の落下、内装材、エレベータなどの被害が発生した<sup>3),4),5),6)</sup>など。ただし、関東地方での長周期地震動の特性として、超高層ビルに影響を及ぼす周期帯の地震動が比較的小さかったことが指摘<sup>3)</sup>などされるなど、今後長周期地震動の生成メカニズムについても検討が必要である。

一方、この地震の震源過程については、遠地実体波、地殻変動、強震動や津波データを用いて解析さ

れ、震源域でのすべり分布<sup>7), 8), 9)</sup>などが求められており、得られたすべり分布は宮城県沖の震源の西側や東側の海溝軸に近い領域（海溝軸の西側）に大きなすべり領域の存在を示している。しかし、これらの震源モデルは周期の長い地震波や津波データなどに基づくもので、工学的に重要な周期帯（周期0.1～10秒程度）の地震動（広域に震度6弱以上の揺れをもたらした地震動）を対象とした震源モデルの検討が必要である。そこで筆者らは地震直後から、経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングによる震源のモデル化を行ってきた<sup>10)</sup>。一方、Kurahashi and Irikura<sup>11)</sup>、佐藤<sup>12)</sup>、Asano and Iwata<sup>13)</sup>等でも経験的グリーン関数法を用いた同様なモデリングが行われている。これらのモデルを比較すると、いずれも宮城県沖に2つの強震動生成域<sup>14)</sup>（以後SMGAと言う）が求められていると言う共通点はあるが、それらの大きさや位置は若干異なっている。また、宮城県沖以外にもSMGAが求まっているが、それらの位置や大きさは異なっており、全体的には類似のモデルが求まっているとは言い難い。また、野津<sup>15)</sup>は経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法<sup>16), 17), 18)</sup>により、周期1秒～5秒を対象として9つのスーパーアスペリティを配置した震源モデルを提案している。

このように既に同様の手法を用いた震源モデルがいくつか提案されているが、扱った周期帯、用いた経験的グリーン関数の違いに加え、仮定したS波速度など設定条件の違いから、モデル間での違いが顕著な部分も存在し、観測波形の再現性が十分でない部分も見受けられる。このような状況から、本論文では筆者らがこれまでにやってきた広帯域強震動の生成域に関するモデリングについて報告するとともに、今回の地震の震源像全体を明らかにする上での課題などを述べる。

## 2. 観測記録

今回の地震では宮城県から茨城県にかけ、多くの観測点で大加速度振幅を有する強震記録が得られた。ここでは震源の情報を得ることが重要であるため、本震の観測記録は表層地盤の非線形性の影響などを含まない硬質地盤で観測された記録であることを条件とし、（独）防災科学技術研究所（NIED）の基盤強震観測網（KiK-net）の地中観測点での記録を使用した。図1に太平洋沿岸部のKiK-netの観測点位置及

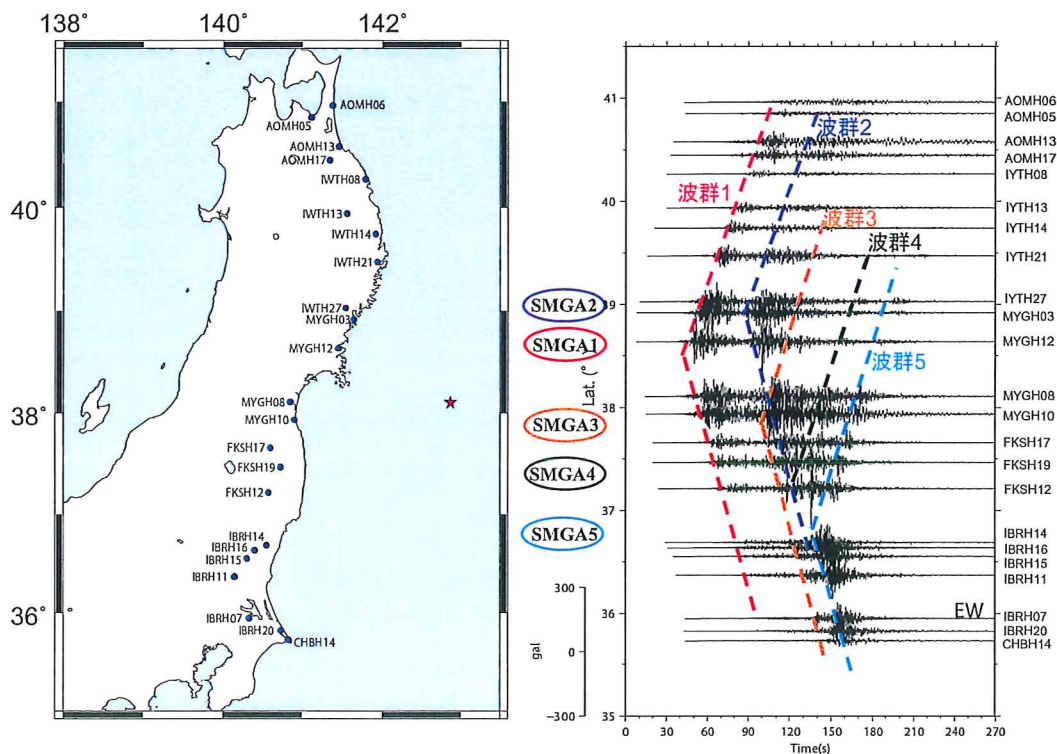


図1 KiK-netの観測点位置及び地中観測波形（バンドパスフィルター：0.1-10. Hz）  
破線は宮城県沖から福島県沖が発生源と推定される5つの波群の南北への伝播を表している



びそれぞれの地点での観測波形を示す。図1の時刻（横軸）は気象庁の震源時間を0としており、観測波形には0.1~10Hzのバンドパスフィルターを施してある。これらの加速度波形を見ると、宮城県以北の地域では特徴的な2つの波群が、福島県ではその2つの波群に加えて異なった波群も見られ、その南の茨城県では特徴的な振幅の大きい1つの波群が見られる。

詳細に見ると、宮城県以北での特徴的な2つの波群のうち、1つ目（図1に示す波群1）はMYGH12に最も早く到来しているのに対し、2つ目（波群2）はその北側のMYGH03に最も早く到来していることがわかる。また、この2つの波群は北側方向の伝播については同様に減衰し振幅が小さくなっている。一方、南側への伝播に関しては、波群1の伝播と減衰特性は明瞭であるが、波群2については福島以南において別の波群に干渉され、その伝播については明瞭ではない。また、福島県のFKSH19とFKSH12の間付近やFKSH12と茨城県のIBRH14の間付近から、それぞれ北側に伝播する波群（波群4、波群5）が見られる。これら2つの波群の南側への伝播は、前述したように波群2の伝播と重なり、図1だけからでは詳細な地震波の伝播については議論できない。もう一つの波群3については、図1からだけではその存在を議論しにくい。後述の3章（震源のモデル化）でその必要性について述べることにする。

### 3. 震源のモデル化

#### 3.1 モデル化の手法及び条件

釜江・入倉の先駆的な研究<sup>19)</sup>に従い、経験的グリーン関数法<sup>20), 21)</sup>を用いたフォワードモデリングによって東北地方太平洋沖地震の強震動生成域（SMGA）を評価した。仮定したS波速度は、地震調査研究推進本部の三陸沖北部の地震を想定した強震動評価<sup>22)</sup>で使用された地下構造モデルの下部地殻の速度を使い3.9km/sとした。SMGA内の破壊伝播速度はGeller (1976)<sup>23)</sup>から2.8km/s（S波速度の0.72倍）とした。ここでは、前述したように硬質な地盤での観測記録として図2に示す太平洋沿岸部のKiK-netの地中観測記録を用いた。なお、観測点の選定にあたっては、P波速度5km/s以上、S波速度2.5km/s以上を原則とした。また、観測点によっては地中観測の方位にずれがあることがわっているが、ここでは用いる手法上、特に補正は行っていない。対象とする地震動の周期範囲は0.1~10秒である。本震の震源断層面は、沈み込む太平洋プレートの形状に基づき、気象庁の震源を含む走行195度、傾斜角13度の面とした。観測記録を経験的グリーン関数として使用した地震は、表1及び図2に示す4地震(Event1からEvent4)であり、以後これらの地震をEGF地震と言う。表1には4地震の震源スペクトルから読み取ったコーナー周波数 $f_c$ 及び応力降下量 $\Delta\sigma$ も示してある。 $\Delta\sigma$  (MPa)は、 $f_c$  (Hz)から次の式<sup>24), 25)</sup>を用いて評価した。

$$\Delta\sigma = M_0 \times 10^6 \left\{ f_c / (4.9 \times 10^6 \beta) \right\}^3 \quad (1)$$

ここで、 $M_0$ は地震モーメント(Nm)、 $\beta$ はS波速度(km/s)である。それぞれの地震は宮城県沖、福島県沖、

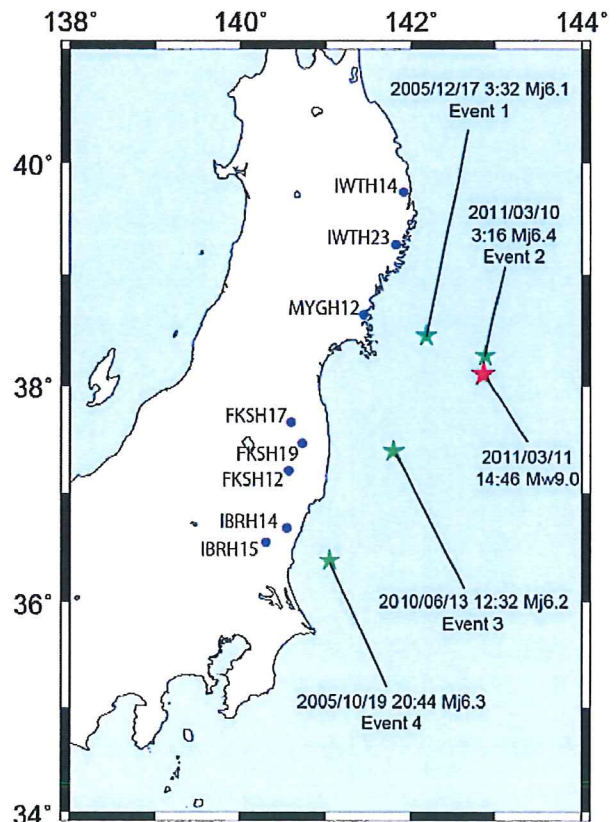


図2 本震及びEGF地震の震央位置、震源のモデル化に使用したKiK-netの観測点位置

表1 EGF地震の諸元

|                          | Event 1               | Event 2               | Event 3                | Event 4               |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Origin Time (JST)*       | 2005/12/17 3:32       | 2011/3/10 3:16        | 2010/6/13 12:32        | 2005/10/19 20:44      |
| Latitude (deg.)*         | 38.449                | 38.271                | 37.396                 | 36.382                |
| Longitude (deg.)*        | 142.181               | 142.879               | 141.796                | 141.043               |
| Depth (km)*              | 39.9                  | 28.9                  | 40.3                   | 48.3                  |
| M <sub>j</sub> *         | 6.1                   | 6.4                   | 6.2                    | 6.3                   |
| M <sub>w</sub> *         | 6.0                   | 6.0                   | 5.9                    | 6.3                   |
| M <sub>0</sub> (Nm)**    | $1.12 \times 10^{18}$ | $1.10 \times 10^{18}$ | $7.94 \times 10^{17}$  | $3.18 \times 10^{18}$ |
| Strike/dip/rake** (deg.) | 20/72/91<br>196/19/86 | 22/71/90<br>201/19/89 | 247/47/72<br>92/46/108 | 25/68/88<br>209/22/94 |
| f <sub>0</sub> (Hz)      | 0.26                  | 0.18                  | 0.36                   | 0.26                  |
| $\Delta \sigma$ (MPa)    | 2.91                  | 2.68                  | 5.23                   | 7.70                  |

\*気象庁, \*\*F-net

茨城県沖で発生した地震であり、SMGAの位置などに基き使い分けた。なお、震源スペクトルは、岩盤上での記録をサイト特性が無いものとして扱い、伝播経路特性で割って求めた。ここでは、図1に示す各波群が1つのSMGAからの地震動に対応するとして、前章で述べた地震波の伝播の特徴を考慮し、各観測点へのそれぞれの波群の到達時刻などから5つの波群に対応するSMGAの位置や破壊開始時間などを観測波形との一致度を見ながら試行錯誤で推定した。5つのSMGAのモデル化の手順を以下に示す。

### 3.2 モデル化の手順

波群1から5に対応する強震動生成域をそれぞれSMGA1～SMGA5とする。まず、図1の波群1に対応するSMGA1を次の手順で推定した。具体的には、各観測点における波群1のS波到達時刻を読み取り、表2に示す水平成層地盤を仮定して、設定した震源断層面から各観測点へのS波到達時刻を計算し、観測記録のS波到達時刻との二乗誤差が最少となる場所をSMGA1の破壊開始点とした。ここで仮定した地下構造は、地震調査研究推進本部の三陸沖北部の地震を想定した強震動評価で設定されたモデル<sup>22)</sup>である。次に各観測点における波群のエンベロップにも配慮し、観測記録が再現できるようにSMGA1の位置、大きさ及び応力降下量を試行錯誤によって推定した。SMGA1からの地震動合成のための経験的グリーン関数として、宮城県沖で発生したEvent1 (Mj6.1)の記録を用いた。

次に、波群2に対応するSMGA2について、波群2がMYGH03に最も早く到来していることから、破壊開始点がMYGH03の東方沖にあると仮定し、各観測点の波群2の到達時刻及び観測波形（エンベロップにも配慮）が再現できるように、SMGA2の破壊開始点、破壊開始時間、位置、大きさ及び応力降下量を推定した。SMGA2からの地震動合成のための経験的グリーン関数としては宮城県沖で発生したEvent2 (Mj6.4)の記録を用いた。なお、前述の佐藤<sup>12)</sup>やAsano and Iwata<sup>13)</sup>の結果では宮城県沖のSMGAの領域は重なっているが、ここではSMGA1とSMGA2の領域は重ならないものとしてSMGA2の位置を決定した。この拘束が正しいかどうかについては本論文では言及できていないため、今後の課題としたい。

次に、波群4、5に対応するSMGA4、SMGA5について、波群4、5がそれぞれFKSH19やFKSH12付近、及びFKSH12やIBRH14付近から北側に伝播していることから、SMGA4、SMGA5はこれらの観測点の東側にあると仮定し、試行錯誤によってそれぞれの破壊開始点や破壊開始時間、位置、大きさ、応力降下量などの震源パラメータを推定した。

最後に、波群3に対応するSMGA3について、当初は明瞭な波群1、2、4、5を仮定して震源のモデル化を行っていたが、FKSH17より南側の2つ目の波群の到達時刻が説明できなかったことから、新たに波群（波群3）の存在を考え、SMGA3の震源パラメータを定量化した。なお、SMGA3、4からの地震動合成のための経験的グリーン関数としては、Event3 (Mj6.2)の観測記録を、SMGA5にはEvent4 (Mj6.3)の観測記録を用いた。

表2 SMGA1の破壊開始点の推定時に使用した地下構造モデル<sup>22)</sup>

|         | Vp (km/s) | Vs (km/s) | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Qs  | Depth (km) |
|---------|-----------|-----------|-----------------------------|-----|------------|
| Layer 1 | 5.8       | 3.4       | 2.67                        | 110 | 0          |
| Layer 2 | 6.37      | 3.67      | 2.7                         | 250 | 7          |
| Layer 3 | 6.9       | 3.93      | 2.8                         | 300 | 16         |
| Layer 4 | 8.0       | 4.5       | 2.9                         | 300 | 32         |

#### 4. 震源モデルと議論

図3、図4及び表3に強震動生成域（SMGA）の配置及び推定した震源パラメータを示す（以後KKmodelと言う）。表3には経験的グリーン関数法による波形合成時に使用した重ね合わせ数 $n$ 及び本震とEGF地震の応力降下量の比 $C$ も併せて示している。表3の破壊開始時間は気象庁の本震発生時刻からの破壊開始の遅れ時間である。求まった震源モデルは岩手県南部沖から茨城県沖にかけての5カ所にSMGAを配置したモデルとなっている。SMGAの位置は、地震調査研究推進本部の東北沖のプレート境界地震の想定震源領域（図5）<sup>26)</sup>のうち、宮城県沖、三陸沖南部海溝寄り、福島県沖、茨城県沖にそれぞれ良く対応している。SMGA1及びSMGA2の位置はJointインバージョンによる震源のすべり分布<sup>27)</sup>のすべりの大きな領域とよく対応している。一方、遠地実体波、津波波形、近地の長周期地震記録などを用いた震源インバージョンにより求まったすべり分布<sup>7), 8), 9)</sup>などでは、宮城県沖の海溝軸付近に大きなすべりがあったことが示されているが、ここで推定したSMGAの位置とは大きく異なっており、周期0.1秒～10秒程度の強震動の生成領域はこれらの震源インバージョンで対象とした長周期地震動などの生成領域とは異なり、互いに相補的な関係のように見える。

5つのSMGAの地震モーメントの総和は $2.03 \times 10^{21}$  Nmとなり、気象庁のCMT解による本震の地震モーメント（ $4.22 \times 10^{22}$  Nm）の約5%であり、残りの地震モーメントの多くは海溝軸付近のすべり<sup>7), 8), 9)</sup>などに、また一部は背景領域のすべりによるものと考えられる。

図6に経験的グリーン関数法による合成波形と観測波形の比較を、図7にその擬似速度応答スペクトルでの比較を示す。各観測点の波群の到達時刻及びエンベロープなど観測波形の主な特徴はほぼ再現できており、またそのスペクトル特性についてもほぼ観測結果を再現できている。なお、観測点によっては周期の長い領域で両者の違いが顕著であるなどの問題はある。これは今回の波形合成ではSMGAとEGF地震とのメカニズムや場所の違いによる放射特性の違いを補正していないことも原因の一つであると思われる。時刻歴波形を詳細に比較すると、例えばMYGH12の35秒と83秒付近、FKSH19の106秒付近に見られるような大きな振幅のパルス波は再現できていない。こうした結果は既に入倉<sup>28)</sup>や野津<sup>15), 29)</sup>などにより指摘されており、SMGA内での応力パラメータの不均質を考慮したモデルでパルス波の再現が可能

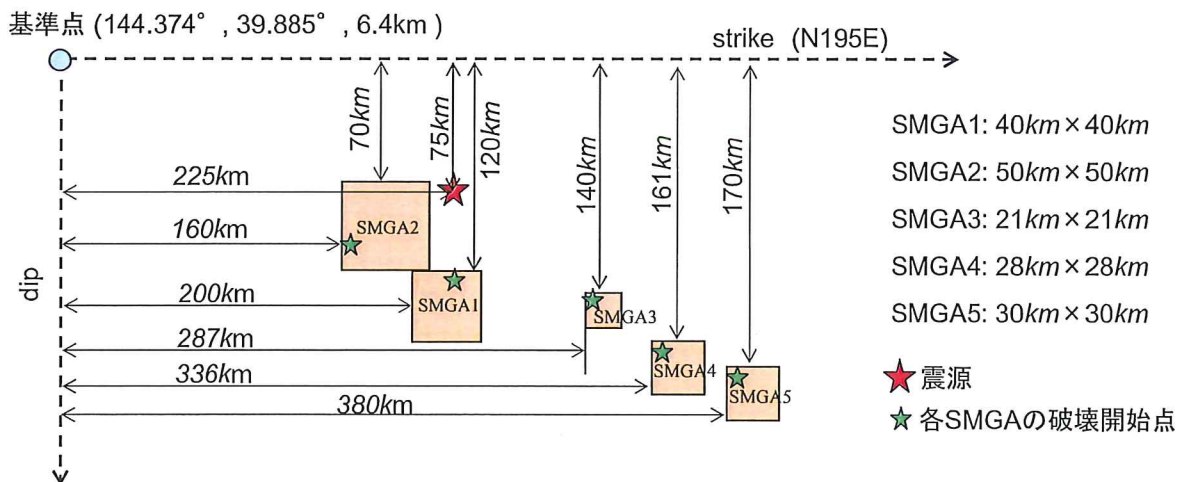


図3 東北地方太平洋沖地震の5つの強震動生成域（SMGA）からなる震源モデル



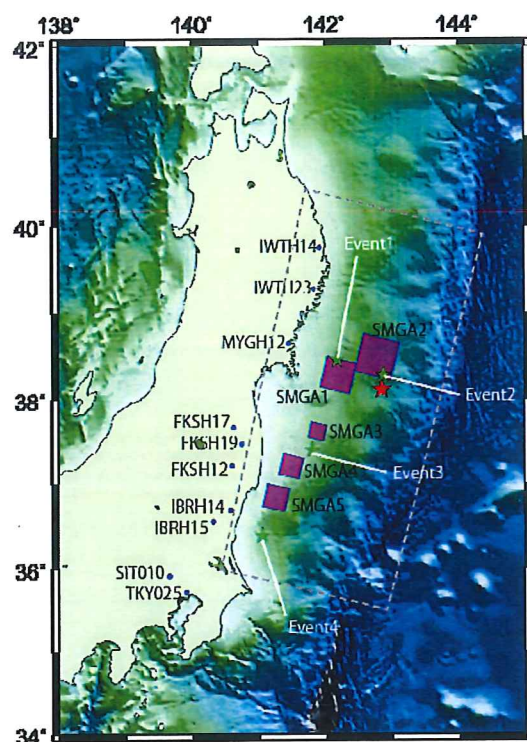


図4 強震動生成領域 (SMGA) 及びEGF地震の震央位置

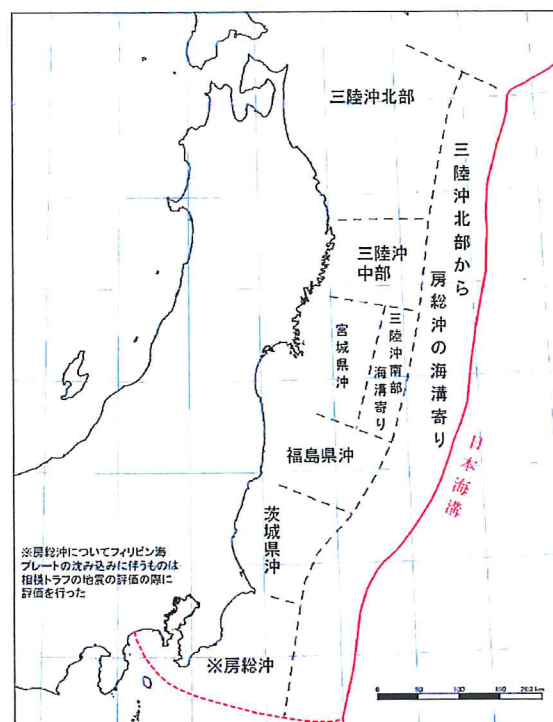


図5 東北地方太平洋沖の想定震源領域<sup>26)</sup>

表3 震源パラメータ及び波形合成時に使用した係数

|                      |                    | SMGA1                   | SMGA2                   | SMGA3                    | SMGA4                    | SMGA5                    |
|----------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 走行                   | (°)                | 195                     | 195                     | 195                      | 195                      | 195                      |
| 傾斜角                  | (°)                | 13                      | 13                      | 13                       | 13                       | 13                       |
| 面積                   | (km <sup>2</sup> ) | 40×40                   | 50×50                   | 21×21                    | 28×28                    | 30×30                    |
| 地震モーメント              | (N・m)              | $5.02 \times 10^{20}$   | $1.10 \times 10^{21}$   | $6.43 \times 10^{19}$    | $1.02 \times 10^{20}$    | $2.58 \times 10^{20}$    |
| 応力降下量                | (MPa)              | 20.4                    | 21.6                    | 15.7                     | 10.5                     | 23.1                     |
| ライズタイム               | (s)                | 3.6                     | 4.5                     | 1.9                      | 2.5                      | 2.7                      |
| 破壊開始時間               | (s)                | 24.0                    | 59.0                    | 81.0                     | 111.0                    | 126.0                    |
| EGF地震                |                    | 2005/12/17<br>3:32 M6.1 | 2011/03/10<br>3:16 M6.4 | 2010/06/13<br>12:33 M6.2 | 2010/06/13<br>12:33 M6.2 | 2005/10/19<br>20:44 M6.3 |
| 重ね合わせ数               | n                  | 4                       | 5                       | 3                        | 4                        | 3                        |
| 本震とEGF地震の<br>応力降下量の比 | c                  | 7.0                     | 8.0                     | 3.0                      | 2.0                      | 3.0                      |

であるとしている。ここではSMGA内でのすべりが一様であると仮定しているため、このようなパルス波が再現できていないものと考えられる。詳細な検討は今後の課題である。次に、図8にMYGH12、FKSH17、IBRH14の観測点について、SMGAごとに計算した合成波形と観測波形の比較を示す。この図から、5つのSMGAから5つの波群がそれぞれ伝播し各観測点に到達していることが分かる。

最後に、本モデルの有効性を確認するため、関東平野内の観測点における本震記録の再現を試みた。用いた観測点は、図4に示したNIEDの強震観測網 (K-NET) のSIT010及びTKY025であり、図9に経験的グリーン関数法による合成波形と観測波形の比較を示す。表面波と見られる後続波の再現性は十分ではないが、概ね良好な結果であると考えられる。なお、合成した変位波形の振幅が200秒の少し手前で急激に小さくなっているが、これは、経験的グリーン関数として使用した観測記録の長さが不十分だったためである。

以上のように、岩手県から茨城県に至る観測点において、観測記録に見られる特徴的な波群に焦点を

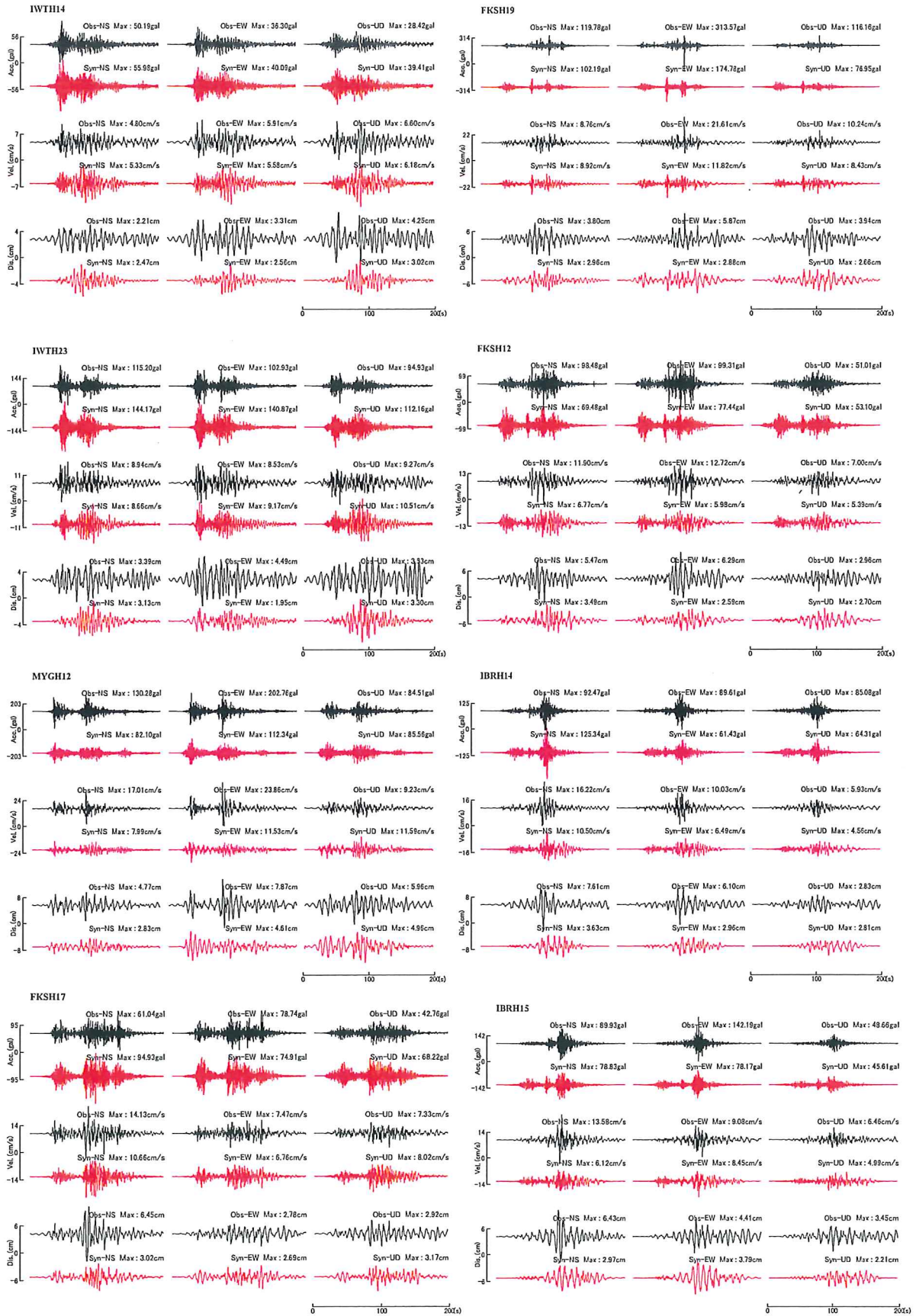


図6 観測波形 (Obs) と経験的グリーン関数法による合成波形 (Syn) の比較 (Bandpass Filter: 0.1-10Hz)



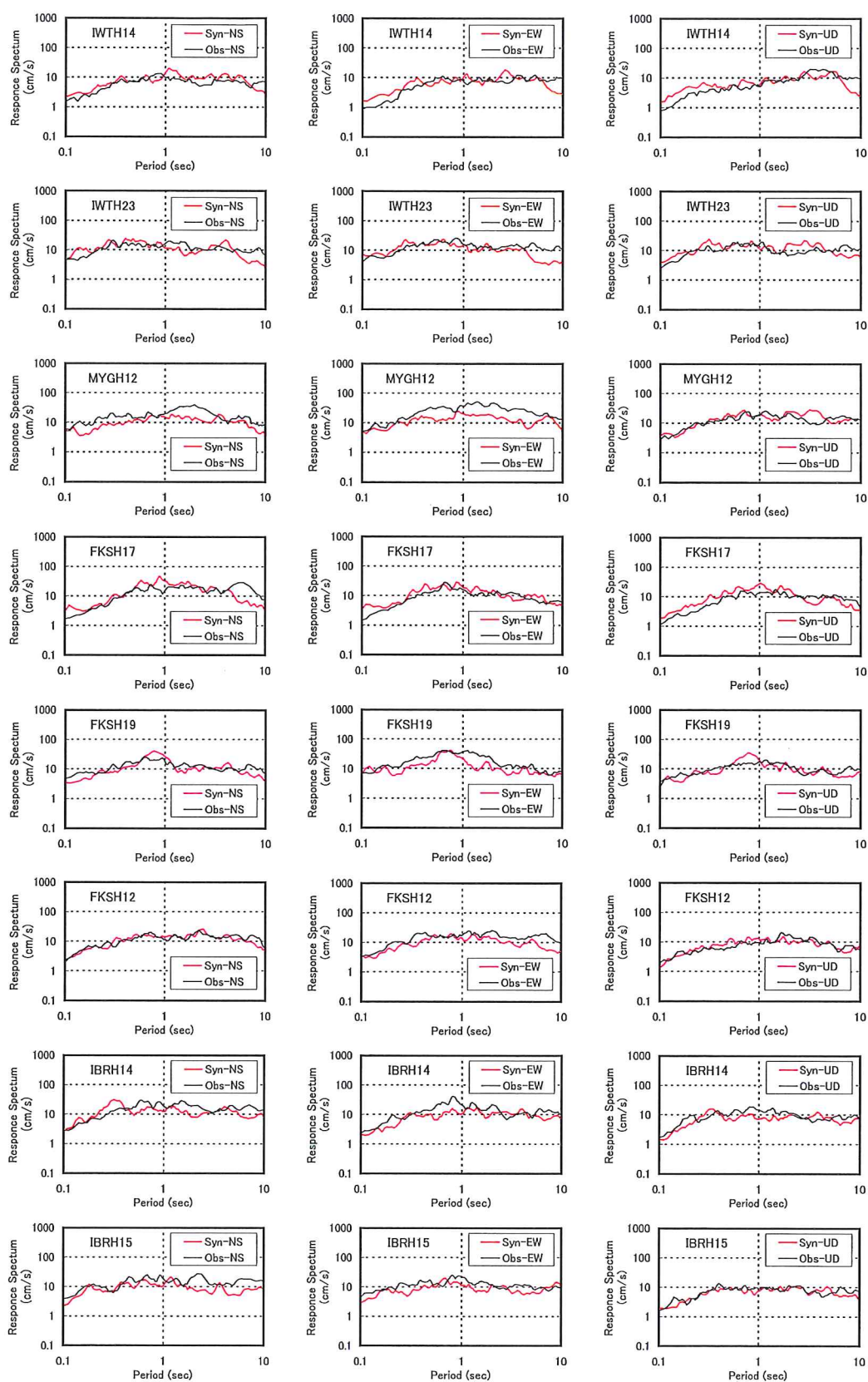


図7 観測波形 (Obs) と経験的グリーン関数法による合成波形 (Syn) の疑似速度応答スペクトルの比較  
(減衰: 5%)



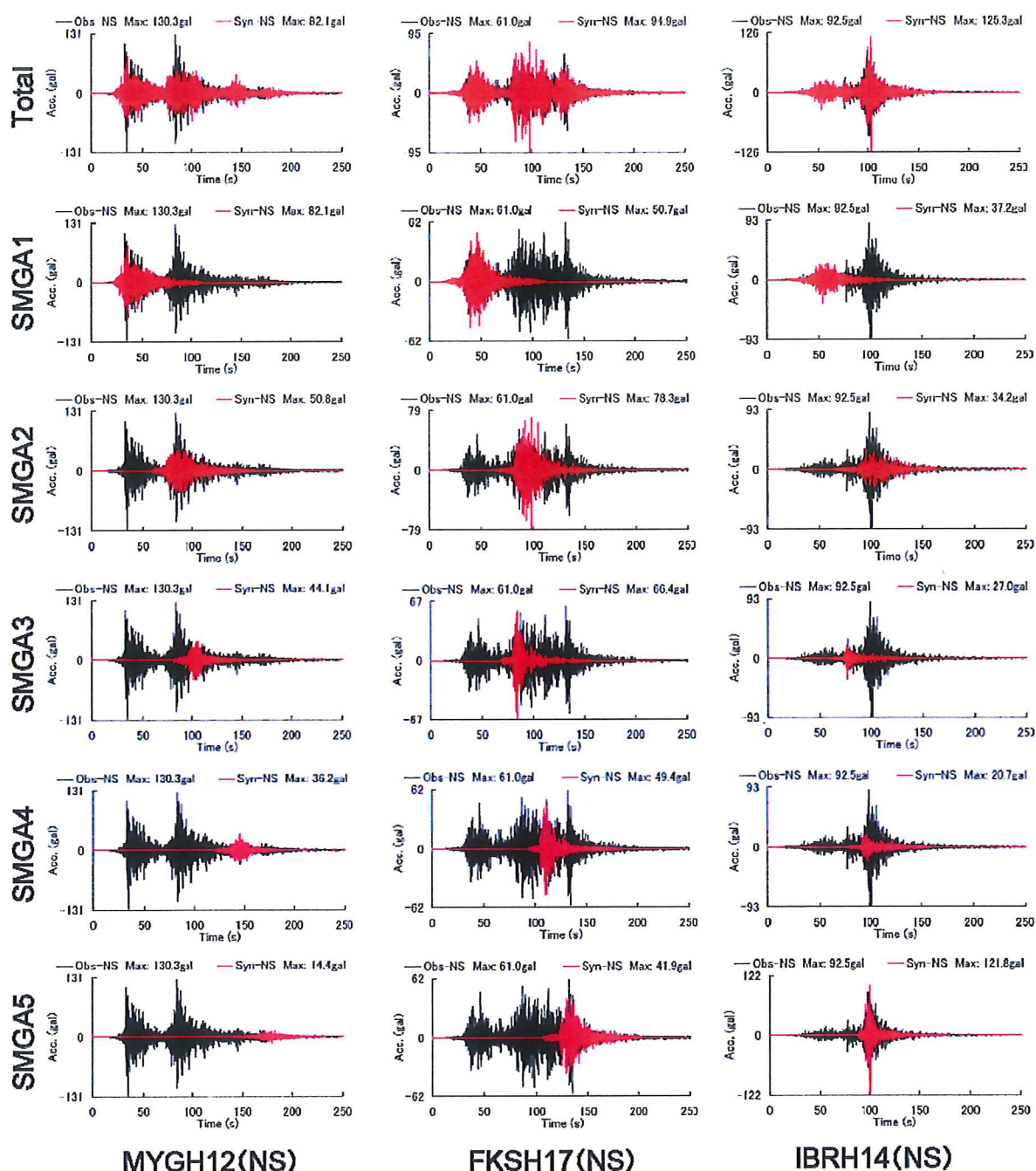


図8 SMGAごとの合成波形 (Syn) と観測波形 (Obs) との比較 (Bandpass Filter: 0.1-10Hz)

当て、それらの伝播特性や振幅特性を再現することから、それぞれの波群に対応する複数のSMGAをモデル化した。結果的には5つのSMGAを配置することによって広域の広帯域観測記録が再現できることを示した。ただし、モデル化されたSMGAだけでは全体の地震モーメントの5%程度しかなく、今回の超巨大地震の全体の震源像については、今後SMGA以外の背景領域や巨大津波の発生源になったともされる海溝軸側の大すべり域なども含めた検討が必要である。

冒頭でも述べたように、本地震に対する経験的グリーン関数法を用いた震源のモデリングは既にいくつか報告され、複数のSMGAを有する震源モデルが提案されている。ここではそれらの結果を簡単に概観し、本論文における結果との違いなどについて議論する。以下では、Kurahashi and Irikura<sup>11)</sup>、佐藤<sup>12)</sup>、Asano and Iwata<sup>13)</sup>によるモデルをそれぞれ、KI-model、S-model、AI-modelと言う。

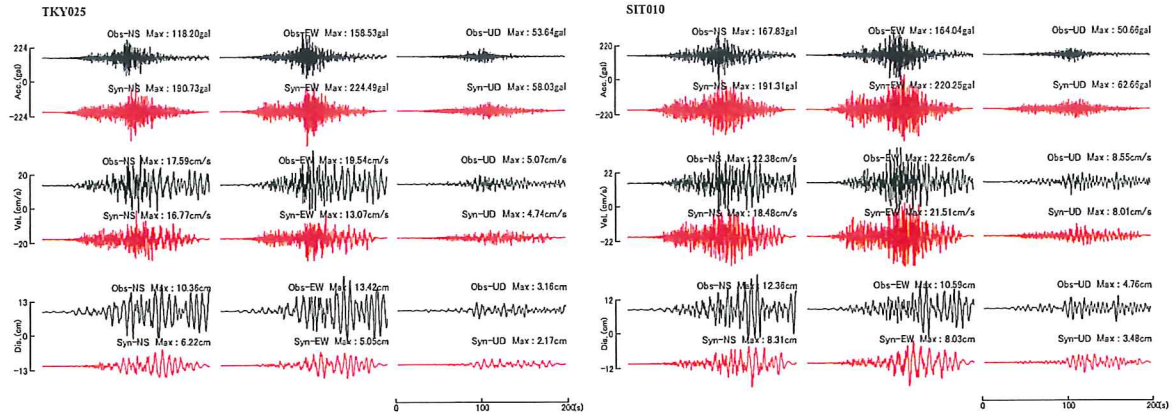


図9 震源のモデル化に使用していない観測点における観測波形 (Obs) と経験的グリーン関数法による合成波形 (Syn) の比較 (バンドパスフィルター : 0.1-10Hz)

まず、SMGA1については、波群1が多くの観測点で明瞭に識別できるためか、その位置や大きさはS-model及びAI-modelとほぼ同じである。しかしSMGA2については時間的、空間的にユニークな解として求めた結果として、S-modelやAI-modelはSMGA1とSMGA2がその領域を一部共有するモデルとなっていると考えられる。一方、本モデルでは、前述したようにSMGA2の破壊開始点は多数の観測点での波群2の到達時間から決めたが、領域についてはSMGA1の位置も確認しながら、合成波形と観測波形の一致度から決めた。ここではSMGA1との領域の共有はないと仮定してモデル化を行ったが、観測波形の再現性以外の情報からは両モデルの是非を詳細に議論することは困難である。なお、SMGA2の位置がSMGA1の北東に位置するという点では、これら3つのモデルは共通する。一方、KI-modelでは宮城県沖のSMGAはSMGA1の西側にSMGA3が配置されており、本研究で求めたモデルと破壊の順番が異なっている。また、KI-modelでは岩手県内のIWT018 (K-NET観測点) 以北では波群1と波群2の間にもう一つの波群を読み取り、その波群の生成場所として岩手県沖にSMGA2を設定している。こうした解釈は本研究も含め、既往の研究とは異なる。本研究のSMGA2の大きさはAI-modelより若干大きい程度であるが、S-modelは本研究の3倍程度大きく設定されている。佐藤<sup>12)</sup>はこの原因として、対象とした地震動の周期範囲として長周期側を20秒までとしており、他の研究 (10秒まで) との対象周期範囲が異なることがSMGAの大きさなどの推定結果の違いに影響している可能性があると考えしている。波群1と波群2の観測波形と合成波形の一致度に焦点を当てれば、波群1についてはどのモデルも同じような合成結果になっているが、波群2についてはAI-modelでは宮城県、岩手県内の観測点において合成波形が2倍前後過大評価になっている。また、KI-modelでは波群2の合成波形は福島県内の観測点 (FKSH19) で観測より遅れている。一方、本KK-modelとS-modelではほぼ観測波形と整合する結果となっている。

福島以南のSMGAについても各モデル間で違いが見られる。本KK-modelのSMGA4はAI-modelのSMGA3の西側に位置し、大きさについてはほぼ同じである。AI-modelのSMGA4、S-modelのSMGA3、4は本KK-modelのSMGA5の西側の陸域にかかる位置に設定されている。KI-modelのSMGA4、SMGA5はここで求めたSMGA4、SMGA5のそれぞれ南側に設定されている。各SMGAからの波形への寄与を見ると、図1に示す波群4、波群5について、S-modelではSMGA3、4でそれぞれ波群4、波群5を合成しようとしたが、グリッドサーチの結果、SMGA3、4の領域が重なっており、破壊開始時間もほぼ同じであるために、波群4と波群5の到達時間差を説明できていない。AI-modelでは各SMGAからの波形への寄与を説明する図は示されていないが、茨城県内の観測点を見ると、合成波形には2つの波群が見て取れる。一方、観測波形では図6に示すように100秒付近に大きな波群が1つ観測されているのみであり、本研究の合成波形はこの観測波形をよく再現している。KI-modelもAI-modelと同様に各SMGAからの波形への寄与を説明する図は示されていないが、FKSH19の波形を見ると、合成波形の波群5 (図1) に対応する部分は観測より遅れている。

以上のように、本研究で求めた震源モデルは、既往研究と比べて観測波形の波群の到達時刻及び波群の形状をよく再現できていると考える。そして、これらのモデル間の相違は、観測記録に見られる波群の読み取り (到達時間も含め)、波形合成に用いた経験的グリーン関数の違いに加え、観測波形の再現



性にに基づく判断に依存しているものと考えられるが、それぞれのSMGAからの合成波形が分離して示されていないなど、文献のみからは詳細な議論はできない。また、今回のようなプレート境界地震の場合、観測記録が震源域の片側にのみ存在するため、SMGAの位置の拘束に曖昧さがあることは否定できないものと考えられる。今後は理論的な検討などを併用し、より精度の高い震源モデルの構築が求められる。

## 5. まとめ

本研究では、経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングによって2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0)の強震動生成域 (SMGA) をモデル化した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 宮城県沖、岩手県南部沖、福島県沖、茨城県沖に全体で5カ所のSMGAを配置した震源モデルを提案した。これらSMGAの位置は、地震調査研究推進本部の東北沖のプレート境界地震の想定震源域のうち、宮城県沖、三陸沖南部海溝寄り、福島県沖、茨城県沖にそれぞれほぼ対応している。
- (2) 推定したSMGAの位置は、遠地実体波、津波、近地の長周期地震記録、地殻変動などを用いた震源インバージョンにより求めたすべり分布<sup>7),8),9)</sup>などとは大きく異なっており、海溝型プレート境界の超巨大地震の震源過程の複雑さとともに、すべり量の大きいところで必ずしも周期の短い地震動が生成されないことを示唆しており、今後このような超巨大地震の震源のモデル化では最終すべり量のみでなく、周期に応じた震源のモデル化の必要性が指摘される。
- (3) 5つのSMGAの地震モーメントの総和は気象庁のCMT解による地震モーメントの約5%であり、残りの地震モーメントはSMGA以外の背景領域に加え、その大半が海溝軸付近の大すべり域によるものと考えられる。
- (4) 周期0.1~10秒程度の強震動を単純化した5つのSMGAからなる震源モデルによって再現でき、本研究で用いた震源のモデル化手法が海溝型巨大地震時の強震動予測にも有効であることが示せた。
- (5) 今回考慮しなかったSMGA内での不均質性のモデル化の必要性やその方法の検討、より周期の長い地震動、地殻変動や津波を含めた震源の全体像の解明などを進め、こうした超巨大地震時の地震動や津波などの予測のためのレシピの構築が必要である。

## 謝 辞

本研究では(独)防災科学技術研究所のKiK-net、K-NETの観測記録を使用させて頂きました。また、気象庁及び(独)防災科学技術研究所のF-netの震源情報を使用させて頂きました。ここに記して感謝致します。

## 参考文献

- 1) 広帯域地震観測網F-net、<http://www.fnet.bosai.go.jp/event/tdmt.php?LANG=ja&ID=20110311054500&all=>.
- 2) 気象庁：平成23年12月 地震・火山月報（防災編）。
- 3) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、2011年7月。
- 4) 東京消防庁予防部：東京消防庁管内における東北地方太平洋沖地震時の対応状況等の調査結果、2011年8月。
- 5) 大阪府総務部：咲洲庁舎の安全性等についての検証結果、2011年5月。
- 6) 久田嘉章：東日本大震災緊急報告 東京を襲った長周期地震動—新宿西口超高層ビル街からの報告—、JABS・建築雑誌、2011年、pp.6-8。
- 7) Yoshida, Y., H. Ueno, D. Muto, and S. Aoki: Source process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake with the combination of teleseismic and strong motion data, *Earth Planets Space*, 63, 2011, pp.565-569.
- 8) Suzuki, W., S. Aoi, H. Sekiguchi, and T. Kunugi: Rupture process of the 2011 Tohoku-Oki mega-thrust earthquake (M9.0) inverted from strong-motion data, *Geophys. Res. Lett.*, 38, 2011, L00G16, doi:10.1029/2011GL049136.

- 9) Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa: Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 2011, pp.815-820.
- 10) 川辺秀憲、釜江克宏、上林宏敏：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年度秋季大会講演予稿集、B22-05、2011年。
- 11) Kurahashi, K. and K. Irikura: Source model for generating strong ground motions during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 2011, pp.571-576.
- 12) 佐藤智美：経験的グリーン関数法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル - プレート境界地震の短周期レベルに着目して - 、日本建築学会構造系論文集、675、2012年、pp.695-704.
- 13) Asano, K. and T. Iwata: Source model for strong ground motion generation in 0.1-10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planets Space*, 64, 2012, pp.1111-1123.
- 14) Miyake, H., T. Iwata, and K. Irikura: Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, 2003, pp.2531-2545.
- 15) 野津厚：2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案、日本地震工学会論文集、Vol.12、 No.2、2012、pp.21-40.
- 16) 古和田明、田居優、岩崎好規、入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価、日本建築学会構造系論文集、514、1998年、pp.97-104.
- 17) 野津厚、菅野高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法－因果性と多重非線形効果に着目した改良－、港湾空港技術研究所資料、No.1173、2008年。
- 18) 野津厚、長尾毅、山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良－因果性を満足する地震波の生成－、土木学会論文集A、Vol.65、2009年、pp.808-813.
- 19) 釜江克宏、入倉孝次郎：1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、500、1997年、pp.29-36.
- 20) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Tokyo, 1986, pp.151-156.
- 21) 釜江克宏、入倉孝次郎、福知保長：地域的な震源スケーリング則を用いた大地震（M7級）のための設計用地震動予測、日本建築学会構造系論文集、416、1990年、pp.57-70.
- 22) 地震調査研究推進本部：三陸沖北部の地震を想定した強震動評価、2004年5月21日。
- 23) Geller, R.J.: Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 1976, pp.1501-1523.
- 24) Brune, J. N. : Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 75, 1970, pp.4997-5009.
- 25) Brune, J. N.: Correction, *J. Geophys. Res.*, 76, 1971, pp.5002.
- 26) 地震調査研究推進本部：三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（一部改訂）、2009年3月9日。
- 27) Koketsu, K., Y. Yokota, N. Nishimura, Y. Yagi, S. Miyazaki, K. Satake, Y. Fujii, H. Miyake, S. Sakai, Y. Yamanaka, and T. Okada: A unified source model for the 2011 Tohoku earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, 310, 2011, pp.480-487.
- 28) 入倉孝次郎：海溝型巨大地震の強震動予測のための震源モデルの構築、第40回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、2012年11月6日、pp.67-74.
- 29) 野津厚、山田雅行、長尾毅、入倉孝次郎：海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケーリング、日本地震工学会論文集、Vol.12、 No.4、2012、pp.209-228.

(原稿受理日：2012年4月1日)

(登載決定日：2013年2月1日)



# Source Modeling of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

KAWABE Hidenori <sup>1)</sup> and KAMAE Katsuhiro <sup>2)</sup>

1) Member, Assistant Professor, Research Reactor Institute of Kyoto University, Dr. Eng.

2) Member, Professor, Research Reactor Institute of Kyoto University, Dr. Eng.

## ABSTRACT

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake of 11 March 2011 occurred along the subduction zone plate boundary between the Pacific and North American plates along the Japan Trench. This earthquake caused the Great East Japan Earthquake Disaster. In this study, we try to estimate the source model by a forward-modeling approach based on the characterized source model using the empirical Green's function method. Based on the results, we proposed a source model composed of five strong motion generation areas (SMGAs) along the subduction zone plate boundary. The SMGAs were located in the sea off Miyagi Prefecture, south Iwate, Fukushima and Ibaraki Prefectures. Comparing synthetic waveforms calculated by the empirical Green's function method and the observed waveforms, it can be seen that the observed waveforms are well reproduced at each observation station. The total seismic moment of SMGAs is 5% of the seismic moment determined by the Japan Meteorological Agency.

*Key Words: Tohoku earthquake, Source Model, Empirical Green's Function Method, Forward Modeling, Strong Motion Generation Area*