

2011年東北地方太平洋沖地震の強震動生成域を 対象とした地震規模の推定

池田 隆明¹・釜江 克宏²・小長井一男³・高瀬 裕也⁴

¹正会員 飛島建設 技術研究所 部長 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

E-mail:takaaki_ikeda@tobishima.co.jp

²非会員 京都大学 原子炉実験所 教授 (〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西2丁目)

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

³正会員 横浜国立大学 教授 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1)

E-mail:konagai@ynu.ac.jp

⁴正会員 飛島建設 技術研究所 副主任研究員 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

E-mail:yuya_takase@tobishima.co.jp

2011年東北地方太平洋沖地震は観測史上最大のMw9.0の極めて規模が大きい地震であり、複数の震源域の破壊が連動したと考えられている。地震観測記録には強震動生成域に起因すると考えられる波群が確認され、少なくとも大きな強震動生成域が3つ存在すると想定された。各地で観測された地震動は、周辺の強震動生成域の影響を受けており、本地震の地震動生成過程や地震被害メカニズムの解明のためには、強震動生成域の地震規模を明確にすることが重要と考えられたことから、距離減衰式を用いて強震動生成域の地震規模を推定を試みた。

Key Words : *the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake, strong motion generation area, source model, maginitude, attenuation equation*

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した西北西-東南東方向に圧縮軸を有する逆断層型の地震であり、規模は我が国における観測史上最大のMw9.0と公表されている。震源域の大きさは南北約450km、東西約200kmと推定され、主な破壊継続時間は約160秒に達したとされている¹⁾。

観測された地震動には、震源が複雑に破壊したと考えられる特徴が示されている。図-1に想定震源域の走向に沿った6地点 (IWT023, IWT011, MYG013, FKS009, IBR004, TKY028, いずれもK-NET²⁾) での観測地震動を北から南に並べて示す。それぞれの時間軸の初期値は最も早く地震動が観測されたMYG013の観測開始時間 (14:46:20) に一致させている。☆印は気象庁による震央を示す¹⁾。

地震動波形を並べてみると複数の波群が認められる。震央に近いMYG013やIWT011では二つの大きな波群、やや離れたIBR004やTKY028では一つの波群が見られる。FKS009では二つの大きな波群が見られるが、90秒以降

の後半の波群は3つに分解することができる。また、IBR004の120秒以降の大きな揺れも2つの波群に分解することができる。

これらの波群の生成過程についてはいくつかの考え方が示されている^{例えは3)}。これらの考え方を参考に観測記録に見られた4つの波群の生成過程を以下のように整理する。

- ①最初の大きな震源破壊は宮城県沖で発生し、強い地震動が東北日本全体に伝播した。
- ②その数十秒後に、最初の震源破壊領域よりも東側 (太平洋沖合) で大きな震源破壊が再び発生し、強い地震動が伝播した。地震波の到着時間は震源からの距離に応じて遅くなるが、二番目の破壊による各地の地震動の到着時間の差は最初の破壊の到着時間の差よりも短いことから、二番目の破壊の方が最初の破壊に比べて速い地点で発生したと考えられる。
- ③三番目の破壊が、それまでの二つの破壊域よりも南側に離れた福島県沖で発生した。
- ④四番目の破壊が、三番目の破壊に引き続き茨城県沖で発生した。三番目と四番目の破壊により生成された地震動により茨城県を中心に関東地方広範に大きな揺れ

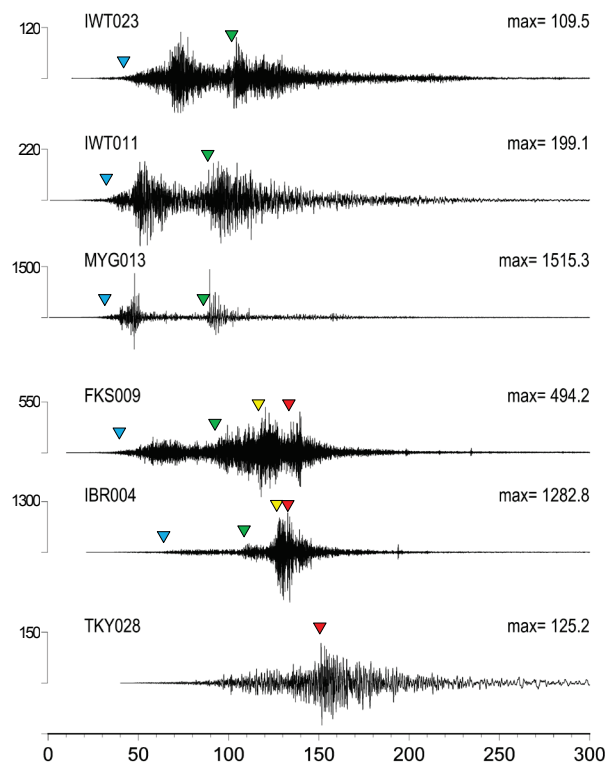
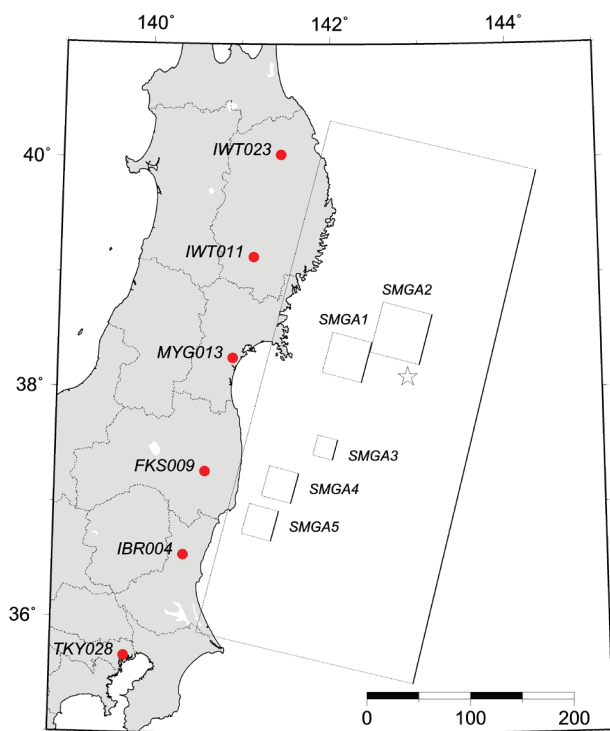


図-1 東北地方太平洋沖地震の震源域と川辺・釜江¹⁾の強震動生成域、および断層面走向方向に沿った地震観測点で得られた加速度時刻歴波形と波群 (▼, ▼, ▼, ▼)

を引き起こした。

地震調査研究推進本部では過去に発生した地震履歴などにに基づき日本列島および周辺域における地震発生源を設定している⁴⁾。東北地方太平洋沖地震の震源域と考えられる三陸沖から房総沖にかけては、①三陸沖北部、②三陸沖中部、③宮城県沖陸型、④宮城県沖海溝側、⑤福島県沖、⑥茨城県沖、⑦房総沖、そしてそれらよりも日本海溝軸寄りの⑧三陸沖北部から房総沖の海溝寄り、の8つの領域が設定されていた。観測記録に見られた波群より、少なくとも③～⑥の領域が連動したと考えられている。

この地震では様々な被害が発生したが、地域によって強震動生成域の影響は異なると考えられる。この地震では東京湾岸の埋立地および緩い砂層で構成された軟弱地盤において多くの液状化が発生したが、この液状化は四番目の茨城県沖で発生した震源破壊により生成された地震動に大きく影響されていると考えられている⁵⁾。

今後発生すると考えられる巨大海溝型地震や内陸活断層を対象とした直下型地震に対する地震防災・減災を考える上では、被害を与えた地震の規模を明確にすることが重要と考えられる。筆者は関東地方で観測された地震動の最大値が茨城県沖の強震動生成域により支配されたと想定し、関東地域のKiK-netの地中観測記録と司・翠川の距離減衰式を使用し、最大速度の観測値と距離減衰式による推定値との一致度から、この地震規模をMw7.7～8.0程度と推定している⁹⁾。

そこで本報告では、同様の手法を用いて宮城県沖の二つの強震動生成域の地震規模を推定する。また、茨城県沖の強震動生成域についても地震規模の再検討を実施した。

2. 検討手順

本検討では、強震動生成域を異なる地震イベントと想定し、特定の強震動生成域から生成された地震動の最大値が距離減衰式で評価できると仮定し、最も観測記録を評価可能な地震規模を推定する。具体的な手順を以下に示す。

- ①既往の研究成果に基づき、強震動生成域を設定する。
- ②特定の強震動生成域からの地震動が卓越した地震観測記録を収集し最大値を算出する。
- ③強震動生成域を個別の地震とみなし、距離減衰式により地震動の最大値を推定し、最も最大値を評価できる地震規模を推定する。

強震動生成域は既往の震源モデルに基づき設定する。波形インバージョン結果を参考に、断層面上のすべりの大きい場所に強震動生成域を配置し、強震動生成域の位置、面積、地震モーメント、応力降下量などのパラメータを定量化する震源のモデル化手法が釜江・入倉⁶⁾により行われている。強震動生成域の形状を矩形とし、強震動生成域内のすべり量を均一にした単純なモデル化であ

るが、その後国内外で発生した複数の地震に適用され、その有効性が確認されている^{例え7)}。この手法を用いて東北地方太平洋沖地震の震源モデルがKurahashi & Irikura⁸⁾、佐藤⁹⁾、Asano & Iwata¹⁰⁾、川辺・釜江¹¹⁾により提案されている。いずれも宮城県沖に2つの強震動生成域が設定されているという共通点を有するが、茨城県沖を含むそれ以外の強震動生成域については差異が見られる。川辺・釜江の震源モデルは、それ以外の震源モデルに比べ観測波形の到達時間および波群の形状を良く再現できていることから、本検討では強震動生成域は川辺・釜江の震源モデルを基本として設定する。なお、福島県沖と茨城県沖の強震動生成域から生成された地震動は重なって到達している観測地点が多く、分類することが困難であるため一つの強震動生成域として評価する。図-1に川辺・釜江の震源モデルを示す。SMGA1とSMGA2を宮城県沖の2つの強震動生成域に、SMGA5を福島県沖・茨城県沖の強震動生成域とする。

距離減衰式は、震源タイプおよび地盤条件を考慮した司・翠川¹²⁾の方法を使用する。震源からの距離は断層面最短距離を使用し、基盤における最大速度の一致度から地震規模を推定する。式(1)に司・翠川の距離減衰式を示す。

$$\log PGV = 0.58Mw + 0.0038D - 1.29 - \log(X + 0.0028 \times 10^{0.50Mw}) - 0.002X \quad (1)$$

ここで、PGVは硬質地盤上の最大速度(cm/s)、Mwはモーメントマグニチュード、Dは震源深さ(km)、Xは断層面最短距離(km)である。

距離減衰式での推定値と比較する最大速度は、司・翠川の距離減衰式のコンパイル条件に従い、二方向の最大値とし、地表で観測された最大値を式(2)、式(3)に基づき硬質地盤上の値に変換する。

$$\log R = 1.83 - 0.66 \log AVS_{30} \quad (2)$$

$$V_{cor} = \frac{V_{org}}{R} \quad (3)$$

ここで、Rは最大速度の地盤増幅度、AVS₃₀は地表から30mまでの平均S波速度^{13), 14)}、V_{cor}とV_{org}はそれぞれ地表で観測された最大速度と硬質地盤上の最大速度である。

司・翠川の距離減衰式では、Mw7.0以上の地震は断層面最短距離が300km以下、Mw6.6-7.0の地震では200km以内のデータを用いてコンパイルされている。本検討では地震規模がMw7.0以上と推測されることから基本的に300km以下のデータを使用する。地震観測記録が得られていても地盤条件が公開されておらず硬質地盤上の最大

値に変換できないサイトは検討対象から除外する。

マグニチュードはMw7.0～Mw8.5まで0.1刻みで変化させ、式(4)に示す指標(R値)が最小になるマグニチュードを算出する。

$$R = \sqrt{\frac{\sum (\log(Obs_{max}) - \log(Atten))^2}{N}} \quad (4)$$

ここで、Rは一致度を示す指標、Obs_{max}は硬質地盤上の最大速度、Attenは司・翠川式で推定した最大速度、Nはサイト数である。

3. 検討に使用する距離減衰式の検証

検討に先立ち、太平洋沖合で発生したプレート間地震に対する司・翠川の距離減衰式の適用性を検証する。検討に用いた地震は、東北地方太平洋沖地震の余震で、2011年3月11日15時08分の地震である。震源メカニズムは本震と同じく、西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型であり、マグニチュードはMw7.4とされている¹⁵⁾。

図-2にこの地震で観測されたK-NETとKiK-netの最大速度と司・翠川の距離減衰式を比較して示す。速度波形は加速度波形に0.1Hz～10.0Hzのバンドパスフィルターを作用させた後、数値積分により算出した。司・翠川の距離減衰式は断層面最短距離の式を使用した。この地震の震源モデルが明らかになっていないことから、距離は気象庁の震源情報¹⁶⁾に基づき算出した震源距離を使用した。表-1に震源情報を示す。

図-2からわかるように、司・翠川の距離減衰式はK-NETおよびKiK-netの最大速度を精度よく再現できている。前述のように、司・翠川の距離減衰式は、Mw7.0以上の地震は断層面最短距離が300km以内のデータを用いてコンパイルされているが、それよりも距離が離れている地点の最大速度も評価できている。

これらの結果より、東北地方太平洋沖地震の硬質地盤上の最大速度は司・翠川の距離減衰式で評価可能と考えられる。

表-1 2011年3月11日15時08分の地震の震源情報

発生日時 ¹⁵⁾	2011年3月11日
発生時刻 ¹⁵⁾	15時08分53.4秒
震央 ¹⁵⁾	39° 49.2'N, 142° 46.0'E
深さ ¹⁵⁾	32km
マグニチュード	Mj7.4 ¹⁵⁾ , Mw7.4 ¹⁶⁾
地震モーメント ¹⁶⁾	1.40 × 10 ²⁰ Nm
STR/DIP/RAK ¹⁶⁾	179/23/60

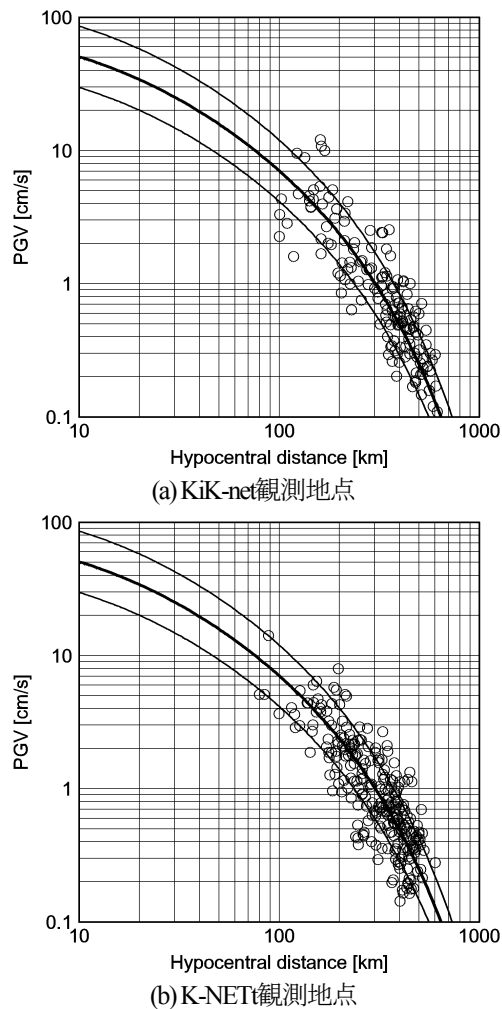


図-2 2011年3月11日 15時08分の地震における最大速度の司・翠川の距離減衰式との比較

4. 強震動生成域の地震規模の検討

東北地方太平洋沖地震の硬質地盤上の最大速度が司・翠川の距離減衰式で評価できると仮定し、東北地方太平洋沖地震の強震動生成域の地震規模を検討する。前述のように、強震動生成域は川辺・釜江モデルを参考に宮城県沖に2つ（強震動生成域A、B）、茨城県沖に1つ（強震動生成域C）を仮定する。強震動生成域のパラメータを表-2に示す。

表-2 強震動生成域のパラメータ

	強震動生成域		
	A	B	C
大きさ	40km×40km	50km×50km	30km×30km
深さ	27.8km	37.9km	48.0km
走向	N195E	N195E	N195E
傾斜	13°	13°	13°

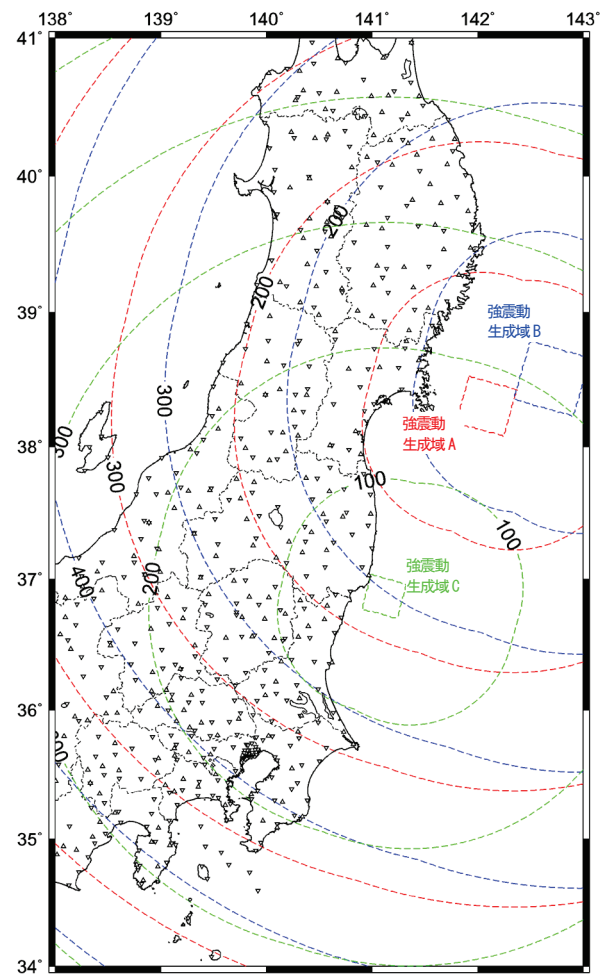


図-3 強震動生成域（A～C）に対する断層面最短距離のコンター図とK-NETおよびKiK-netの地震観測地点

大きさは断層面最短距離を設定するためのデータとして使用し、距離減衰式に用いる深さは強震動生成域の中心点での深さとする。図-3に各強震動生成域を対象とした断層面最短距離のコンターを示す。

(1) 強震動生成域A

強震動生成域Aは宮城県沖に位置する。図-1からわかるように、この強震動生成域から生成された地震動は宮城県、福島県、岩手県内では最初の大きな揺れを構成しており、他の強震動生成域からの地震動と比較的分離しやすい。ここでは、宮城県、岩手県、福島県、山形県、秋田県で観測されたK-NETおよびKiK-netの地表面地震動記録を使用して地震規模の推定を行う。

図-4にMwとR値との関係を示す。図からわかるようにMw=7.9の場合が最もR値が小さい。そのため、強震動生成域の地震規模はMw7.9程度と推定される。図-5にMw7.9の場合の司・翠川の距離減衰式と観測記録（硬質地盤上の最大速度）との関係を示す。

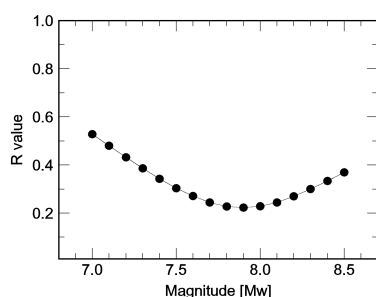


図-4 強震動生成域Aを対象とした場合の地震規模Mwと一致度指標（R値）との関係

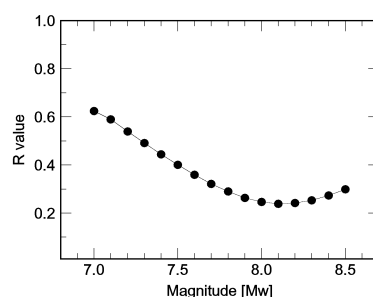


図-6 強震動生成域Bを対象とした場合の地震規模Mwと一致度指標（R値）との関係

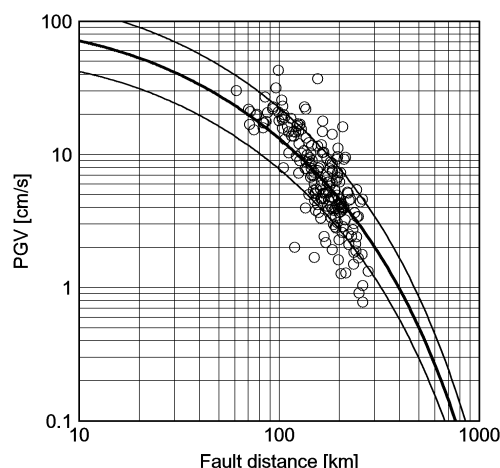


図-5 強震動生成域Aからの地震動による硬質地盤上の最大速度とMw7.9とした場合の司・翠川の距離減衰式との比較

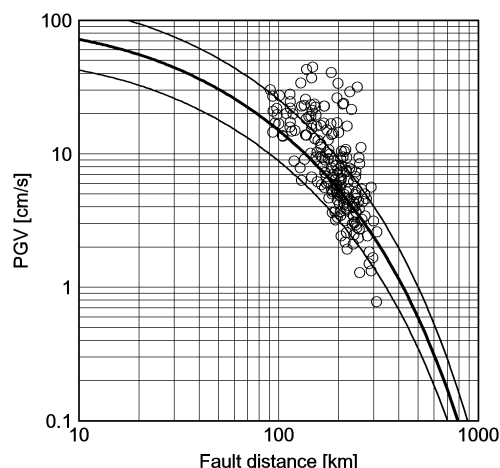


図-7 強震動生成域Bからの地震動による硬質地盤上の最大速度とMw8.0とした場合の司・翠川の距離減衰式との比較

(2) 強震動生成域B

強震動生成域Bは強震動生成域Aよりもさらに沖合に位置する。図-1からわかるように宮城県、岩手県内では最初の大きな揺れから約70秒程度遅れて出現する二番目の大きな揺れを構成している。ここでは、強震動生成域Aと同様に、宮城県、岩手県、福島県、山形県、秋田県で観測されたK-NETおよびKiK-netの地表面地震動記録を使用して地震規模の推定を行う。なお、福島県の観測記録の一部には、強震動生成域Cから生成されたと考えられる地震動が干渉したと考えられるため、観測最大値の抽出では波群を考慮し細心の注意が払って実施した。

図-6にMwとR値との関係を示す。図からわかるようにMw=8.0の場合が最もR値が小さい。そのため、強震動生成域の地震規模はMw8.0程度と推定される。図-7にMw7.9の場合の司・翠川の距離減衰式と観測記録（硬質地盤上の最大速度）との関係を示す。

なお、図-1からわかるように、強震動生成域Bからの地震動は強震動生成域Aからの地震動の後半部と重複している。そのため、厳密には強震動生成域Bからの地震動の最大値は、二番目の大きな揺れの最大値よりも小さいと考えられる。

(3) 強震動生成域C

強震動生成域Cは、茨城県沖と福島県沖の強震動生成域を合わせた強震動生成域である。強震動生成域の位置は茨城県沖に設定した。図-1からわかるように茨城県以南では強震動生成域Cからの地震動が支配的である。ここでは、茨城県、宮城県、栃木県、群馬県、千葉県、埼玉県、東京都で観測されたK-NETおよびKiK-netの地表面地震動記録を使用して地震規模の推定を行う。福島県の観測記録は強震動生成域からの地震動を分離することが難しいことから検討対象から除外した。

図-8にMwとR値との関係を示す。図からわかるようにMw=8.2の場合が最もR値が小さい。図-9にMw8.2の場合の司・翠川の距離減衰式と観測記録（硬質地盤上の最大速度）との関係を示す。

推定された地震規模は3つの強震動生成域の中で最も大きい。地震調査研究推進本部が推定した福島県沖と茨城県沖の地震の規模はM7.4とM6.8～M7.2であり¹⁷⁾、これに比べても大きい。前述のように、強震動生成域Cは福島県沖と茨城県沖の二つの強震動生成域を合わせた強震動生成域としているため、大きめのマグニチュードが推定されたと考えられる。

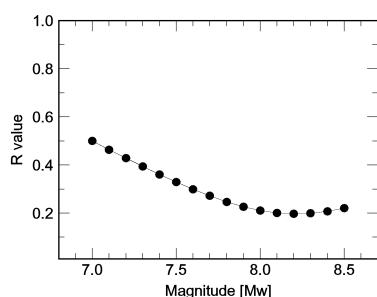


図-8 強震動生成域Cを対象とした場合の地震規模Mwと一致度指標（R値）との関係

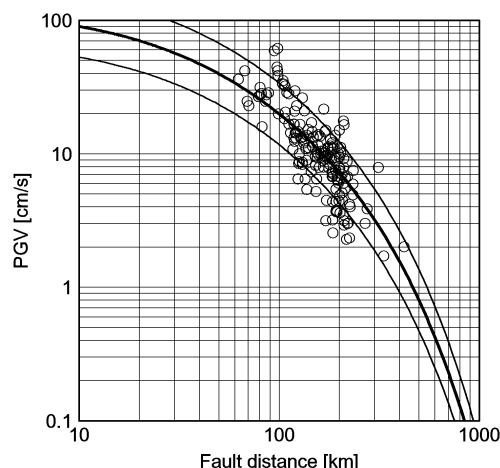


図-9 強震動生成域Cからの地震動による硬質地盤上の最大速度とMw8.2とした場合の司・翠川の距離減衰式との比較

また、強震動生成域Bと同様に、観測記録の最大値は強震動生成域Cからの地震動だけではなく、他の強震動生成域からの地震動の影響も受けていると考えられることから、地震規模はMw8.2よりも小さいと考えられる。

5. まとめ

東北地方太平洋沖地震で観測された地震動記録と司・翠川の距離減衰式を用いて、強震動生成域の地震規模を推定した。強震動生成域は川辺・釜江の震源モデルを参考に、宮城県沖に2つ、茨城県沖に1つの計3つとした。茨城県沖に設定した強震動生成域は福島県沖の強震動生成域と茨城県沖の強震動生成域をあわせた強震動生成域とした。

検討の結果、宮城県沖の強震動生成域の規模は、最初に活動したと考えられる海岸線に近い強震動生成域がMw7.9、約70秒後に活動した強震動生成域がMw8.0、最後に活動した茨城県沖の強震動生成域がMw8.2と推定された。茨城県沖の強震動生成域の規模は、福島県沖

の強震動生成域を含めているため、規模は最も大きくなった。また、二番目の宮城県沖の強震動生成域と茨城県沖の強震動生成域から生成されたと考えた地震動には他の強震動生成域からの地震動の影響を受けていると考えられるため、実際の地震規模はそれよりも小さいと想定される。

今後、観測記録を詳細に分析し、推定精度の向上をはかる予定である。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所の強震観測網K-NETおよびKiK-netの地震動記録ならびに地盤データを使用させていただきました。また、本研究の一部は科研費基盤研究(C)24560595（研究代表者：池田隆明）の助成を受けて実施しました。最後に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震調査報告，気象庁技術報告，第133号，2012.
- 2) 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET，KiK-net），<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>（2014.09.07参照）
- 3) Furumura, T., Takemura, S., Noguchi, S., Takemoto, T., Maeda, T., Iwai, K. and Padhy, S.: 2011, Strong Ground Motions from the 2011 Off- the Pacific-Coast- of- Tohoku, Japan (Mw=9.0) Earthquake Obtained from a Dense Nation-wide Seismic Network, *Landslides*, Vol.8, No.3, pp.333-338, 2011.
- 4) 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 一地図を見て私の街の揺れを知る一，2009., http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/honpen.pdf（2014.09.07参照）
- 5) 三輪滋，筒井雅行，本山寛，池田隆明，沼田淳紀：2011年東北地方太平洋沖地震における関東地方の液状化被害調査，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.68, No. 4(地震工学論文集第31巻)，pp.I_1250-I_1265, 2012.
- 6) 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，No.500，pp.29-36, 1997.
- 7) 池田隆明，釜江克宏，三輪 滋，入倉孝次郎：経験的グリーン関数法を用いた2000年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，No. 561，pp.37-45, 2002.
- 8) Kurahashi, S. and K. Irikura: Source model for gen-

- erating strong ground motions during, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp.571-576, 2011.
- 9) 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，Vol.77, No.675, pp.695-704, 2012.
 - 10) Asano, K. and T. Iwata: Source model for strong ground motion generation in the frequency range 0.1-10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 64(No. 12), pp.1111-1123, 2012.
 - 11) 川辺 秀憲，釜江 克宏：2011 年東北地方太平洋沖地震の震源のモデル化，日本地震工学会論文集，Vol. 13, No.2 (特集号), pp.75-87, 2013.
 - 12) 野津厚：東北地方太平洋沖地震を対象とする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, pp.21-40, 2012.
 - 13) 翠川三郎: 地震断層と地盤条件を考慮した地表面最大加速度・最大速度分布の推定，第 8 回地盤震動シンポジウム，pp.59-64, 1980.
 - 14) Midorikawa, S., Matsuoka, M. and Sakugawa, K.: Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chiba-Ken-Toho-Oki, Japan earthquake, *Proceedings of the 9th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Vol.3, pp.85-90, 1994.
 - 15) 防災科学技術研究所：広帯域地震観測網，F-net, <http://www.fnet.bosai.go.jp>(2014.09.07 参照)
 - 16) 気象庁：強震観測報告，2011 年，No.1
 - 17) 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の一部改訂について，http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09mar_sanriku/index.htm(2014.09.07 参照)

ESTIMATION OF MAGNITUDES FOR STRONG MOTION GENERATION AREAS OF THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Takaaki IKEDA, Katsuhiro KAMAE, Kazuo KONAGAI and Yuya TAKASE

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake had been the biggest earthquake with M9.0 on record. Many wave groups were observed in strong ground motion records near source area. It was estimated that multiple source area were ruptured consecutively. It is important to explain magnitude of strong motion generation areas to find out a source rupture process and mechanism of earthquake damage. We tried to estimate the magnitude of strong motion generation areas using attenuation equation of peak ground motion.