

特集 東日本大震災

A Catastrophic Earthquake in Tohoku, Japan

1) 東北地方太平洋沖地震の地震・地震動について

1) Earthquake and Strong Ground Motion of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

小林 喜久二 Kikuji Kobayashi*1

2011年3月11日午後2時46分に三陸沖を震源として発生した東北地方太平洋沖地震は大津波を伴い、東北地方から関東地方の広範囲にわたって甚大な被害をもたらした。本報告では、今回の地震及び地震動の特徴について既往の調査結果を参考にして整理するとともに、地震動の性状について若干の考察を行った。

1 地震

1.1 地震・被害の概要

地震・被害の概要をTable 1に示す。今回の地震は、東日本が位置する北米プレートとその下に沈み込む太平洋プレートの境界で発生した海溝型地震であり、地震規模は国内観測史上最大のMw9.0(Mw: モーメントマグニチュード)と評価されている¹⁾。死者・行方不明者は2万人を越し、建物全壊戸数も10万戸以上と甚大な被害となったが²⁾、特に大きな被害を受けた地域は報道情報からも分かるように海に面しており、被害の多くは津波によるものと推察される。津波に関しては地震後の調査により、津波の遡上高は岩手県宮古市姉吉地区で最大の38.9m、青森県から茨城県の広範囲の地域で10mを超えたことが明らかにされている³⁾。

Table 1 地震・被害の概要
Outline of earthquake and damage

発生日時	2011/3/11 14:46
地震規模	Mw9.0
震源位置	牡鹿半島の東南東、130km付近、深さ24km
地震タイプ	プレート境界地震(逆断層)
最大震度・最大加速度	震度7、加速度2700cm/s ² (いずれも宮城県栗原市)
津波最大遡上高	38.9m(岩手県宮古市)
被害概要 2011/8/29現在 警察庁発表	死者: 15,745人 行方不明者: 4,467人 建物全壊: 115,404戸

1.2 東北地方太平洋沖で過去に発生した大津波地震

Table 2に今回の地震が発生した海域で過去に発生した大津波地震を示す⁴⁾。現在までに4地震が確認されているが、いずれも規模は今回の地震より小さく推定されている。4地震の中で規模が最も大きいと推定されている地震は869年の貞観地震であり、最近の津波堆積物の調査等によりその詳細が明らかにされつつある⁵⁾。なお、今回の地震の津波浸水域は明治三陸地震と貞観地震を合わせた津波浸水域とおおむね対応していると言われている⁶⁾。

Table 2 東北地方太平洋沖で過去に発生した大津波地震(理科年表)
Tsunami earthquakes occurred past off the Pacific coast of Tohoku

発生年	地震名	地震規模	最大震度	津波最大遡上高	犠牲者
869年	貞観地震	8.3	-	-	死者約1,000人
1611年	慶長三陸地震	8.1	-	-	死者2,000~5,000人
1896年	明治三陸地震	8¼	3	38.2m	死者21,959人
1933年	昭和三陸地震	8.1	5	28.7m	死者・行方不明者3,064人

1.3 余震・誘発地震

Fig.1に震源域と余震・誘発地震の分布(4/11現在)を示す⁷⁾。今回の地震の特徴の一つは余震が過去の地震と比べて極端に多いことであり、M5以上の余震数は本震発生から90日間で約500を数えている(これまで余震数が最も多かったのは1994年北海道東方沖地震(M8.2)で、同条件の余震数は約130)⁸⁾。M7以上の余震は本震発生当日に3回、4月になって2回、計5回発生している。そのうち、本震発生の約30分後に茨城県沖で発生した余震(Mw7.7)は現時点での最大余震で、関東地方の被害を拡大させた可能性もある。今回の地震では、震源域から遠く離れた内陸や海域で誘発地震が発生していることも特徴である。内陸のM6クラスの誘発地震として、本震発生の翌日には長野

*1 技術研究所 マネージャー 工学博士 General Manager, Research & Development Institute, Dr. Eng.

県北部の深さ8kmでM6.7の地震が発生、また、3月15日には静岡県東部の深さ14kmでM6.4の地震が発生しており、いずれも最大震度6強が観測されている。なお、1854年安政東海地震（M8.4）では本震の約10ヶ月半後に最大余震（M7~7.5）が発生し、また、1944年東南海地震（M7.9）の誘発地震として4年半後の1948年に福井地震（M7.1）が発生している等の事例があり⁷⁾、余震・誘発地震については今後とも注意が必要であると考えられる。

1.4 東北地方太平洋沖で想定されていた地震

Fig.2に、地震調査研究推進本部地震調査委員会により、今回の地震前に評価されていた当該海域の震源域区分と想定地震の規模を示す^{9), 10)}。今後30年以内の発生確率は図中アの領域（宮城県沖）と図中オの領域（三陸沖南部海溝寄り）が非常に高く、それぞれ99%、80~90%と評価され、両領域で大地震の発生が危惧されていた。アとオの連動によるM8.0前後の地震も想定されていたが、今回の地震はイを除く6つの領域が連動して発生しており、地震前にはこのような連動は想定されていなかった。

なお、今回の地震では大被害に繋がる大津波が発生したが、後述するように、震源が位置するオの領域と海溝に沿った図中ウの領域（三陸沖北部から房総半島沖の海溝寄り）で、大津波の原因となる最大約30mの大きな断層すべりが発生したことが明らかにされている。ちなみに、ウの領域ではM8.2前後の地震が想定されていたが、今後30年以内の発生確率は20%程度と評価されていた。

1.5 断層のすべり分布

断層のモデル化は観測された強震記録や津波の特性を検討する上で重要であり、今回の地震についてはこれまでに複数の研究機関によって断層モデルが検討されている。Fig.3に国土地理院によって推定された断層のすべり分布を示す¹¹⁾。この結果は陸域GPS観測と海底地殻変動観測のデータに基づくものであり、大きなすべりは震源より海溝側の領域で発生し、最大すべり量は約60mと推定されている。一方、Fig.4に気象庁によって推定された断層のすべり分布を示す¹²⁾。この結果は強震記録の周期7~100秒成分の波形に基づくものであり、断層面は約500km×約200km、断層の破壊継続時間は約170秒と推定されている。すべりの大きな領域は震源付近とそれより海溝側の領域であり、上述の国土地理院の結果とおおむね対応しているが、最大すべり量はこの場合約30mと推定され、国土地理院の結果と大きな違いを示している。Fig.5には京都大学・釜江研究室により推定されたすべりの大きい領域を示す¹³⁾。このモデルも気象庁と同様強震記録の解析から推定されているが、工学的に重要な周期0.1~10秒の波形に基づいている点に大きな特徴がある。すべりの大きい領域はこの場合沿岸域に5つ推定されており、国土地理院及び気象庁の結果とは整合していない。また、5つの領域の地震モーメントの総量は本震の1割程度になることが示されている。

以上の検討例からも類推されるように、強震動の生成領域は周期帯によって異なるなど、今回の地震の断層の破壊過程は単純ではない。そのため、強震記録や津波のシミュレーション解析を行う場合、その精度は参考とする断層モデルに大きく依存する可能性があり、今後の研究動向にも留意が必要である。

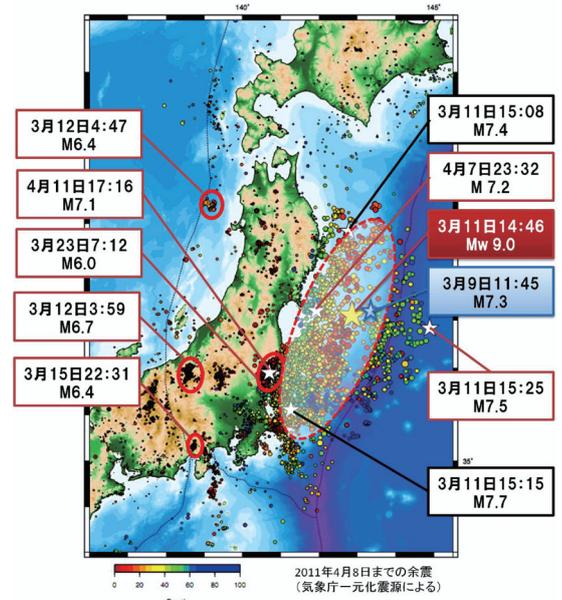


Fig.1 今回の地震の震源域と余震・誘発地震の分布（地震研究所）
Distribution of aftershocks and induced earthquakes by Earthquake Research Institute

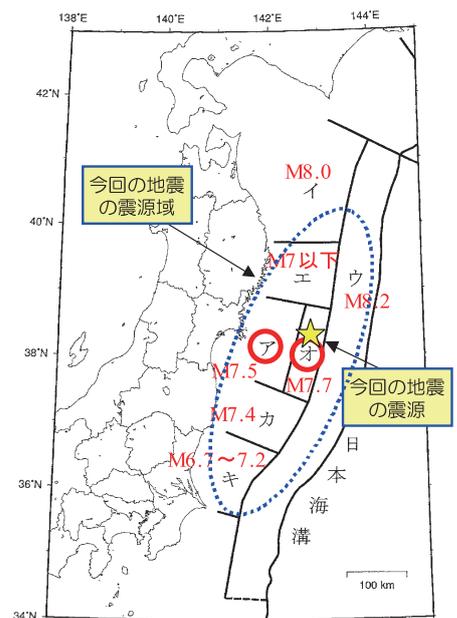


Fig.2 地震調査委員会による震源域区分と想定地震の評価（一部加筆）
Division of source area and assumed magnitude by Earthquake Research Committee

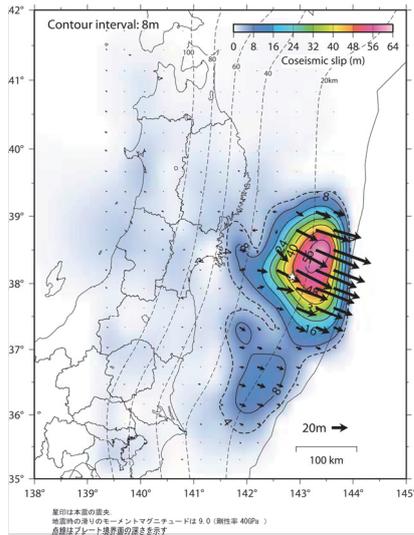


Fig.3 国土地理院により推定された断層のすべり分布
Slip distribution on the fault by GSI

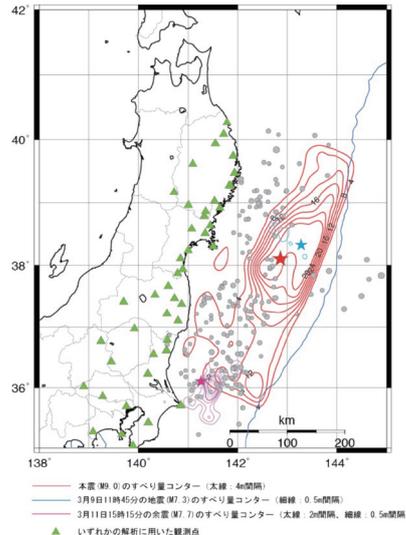


Fig.4 気象庁により推定された断層のすべり分布
Slip distribution on the fault by JMA

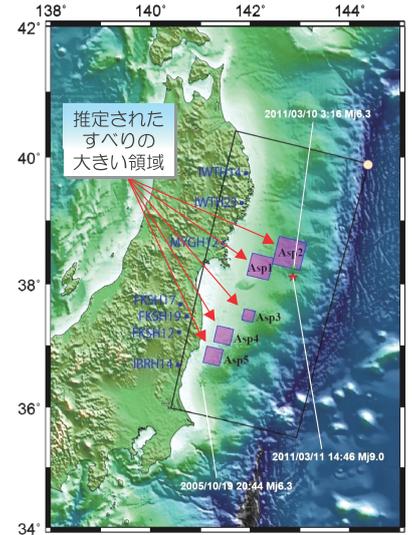


Fig.5 京大釜江研究室により推定されたすべりの大きい領域 (一部加筆)
Asperities estimated by Kamae laboratory

2 地震動

2.1 大きな加速度を記録した観測点

今回の地震で観測された地震動の特徴として、広範囲で大加速度を記録したことが挙げられる。観測記録の一例として、Fig.6に2,700cm/s²と最も大きな加速度を記録した宮城県栗原市K-NET観測点(MYG004)のNS成分の観測波形を示す。長い継続時間は断層の破壊継続時間が前述のように約170秒と長かったことに起因している。また、大きな2つの波群が約40秒の間隔で出現しているが、

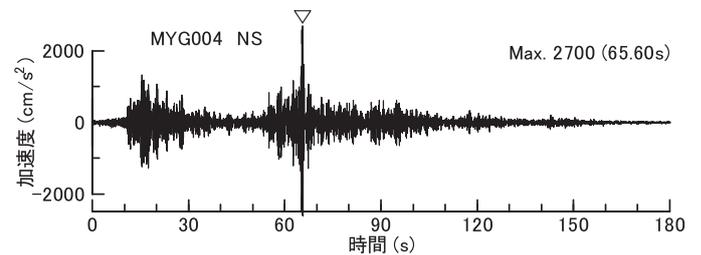


Fig.6 観測波形例 (MYG004)
Example of observed seismogram (MYG004)

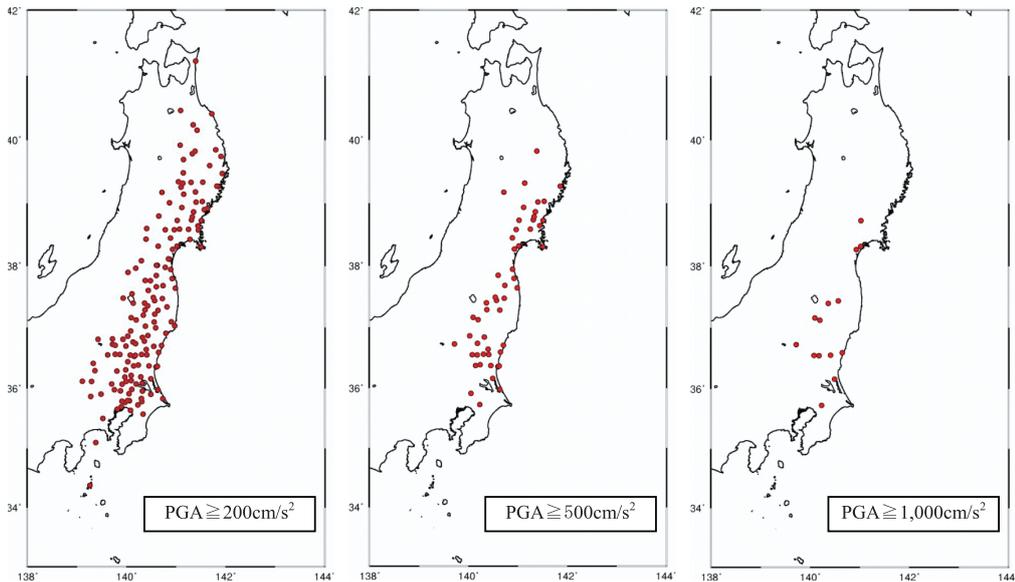


Fig.7 大きな加速度を記録したK-NET・KiK-net観測点の分布
Distribution of K-NET and KiK-net sites where large peak ground accelerations were observed

このような特徴から、震源周辺で特に大きな断層すべりが約40秒の間隔をおいて2回発生したと推定されている。

Fig.7に防災科学技術研究所の強震観測網K-NET・KiK-netで大きな加速度を記録した観測点の分布を示す。左図は最大加速度200cm/s²以上、真中の図は500cm/s²以上、右図は1,000cm/s²以上を記録した観測点を示しており、観測点数はそれぞれ160, 52, 14になる。これによると、関東地方でも200cm/s²以上の大きな加速度が多数の地点で観測されており、茨城県日立市では3番目に大きい1,598cm/s²が観測されている。今回の地震では関東地方でも非構造部材等に大きな被害があったことが報告されているが、以上のように大きな加速度が観測されたことと関係していると考えられる。

なお、500cm/s²以上及び1,000cm/s²以上を記録した観測点の分布に着目してみると、必ずしも震源に近いわけではなく、その多くはかなり内陸に入った地域に系統的に分布するような傾向があり、今後その原因について検討が必要と考えられる。

2.2 地盤の非線形性の影響

Fig.8に宮城県石巻市と茨城県日立市で観測された本震、M>7の余震及びM<5.5の余震・既往地震の速度応答スペクトル (h=0.05)を示す。石巻市の結果(左図)をみると、振幅の小さいM<5.5では周期1秒付近にピークが存在するが、振幅の増大とともにその周期は伸長し、本震では周期1.8秒付近に長周期化している。日立市の結果(右図)でもピークの周期は異なるが、同様に長周期化しており、本震時には表層地盤がかなり非線形化したことを示唆している。今後、地震動が原因となる建物・地盤被害の検討や強震記録の特性の検討にあたっては、地盤特性の把握も重要な課題になると考えられる。

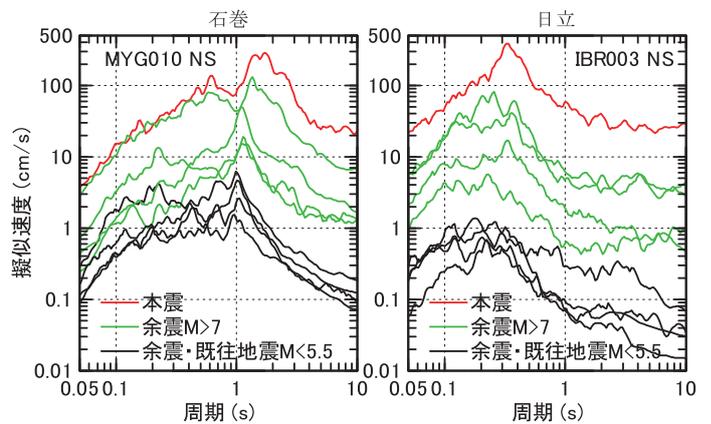


Fig.8 速度応答スペクトル (h=0.05)
Velocity response spectra (h=0.05)

2.3 最大振幅の距離減衰特性

今回の地震については従来からよく利用されている距離減衰式と観測値の比較結果が報告されているが、従来の距離減衰式は観測値の距離減衰性状をよく説明できないことが示されている¹⁴⁾。一方、筆者らは、K-NET・KiK-netで2010年以前に観測された主要な地震を含む49地震のデータに基づいて最大加速度及び最大速度の距離減衰式を作成している¹⁵⁾。本距離減衰式はMw7.9以下かつ距離300km以下のデータベースから作成されており、従来の距離減衰式と同様Mw9.0の今回の地震対しては外挿になるが、本距離減衰式が適用可能か否か検討を行ってみた。

本距離減衰式の基本的な特徴はパラメータとして見掛け入射角を導入していること、また、距離として断層中心からの距離を採用していることであり、基本モデルとして次式を仮定している。

$$\log A = aM_w - \log X_c - bX_c + (d_1 + e_1\theta^3 + e_2\theta^2 + e_3\theta)se_i + f \cdot \log(AVS20/700) \quad (1)$$

ここに、Aは地震動の最大振幅、M_wはモーメントマグニチュード、X_cは断層中心距離、se_iは地震タイプのダミー変数、θは見掛け入射角、AVS20は地表面からGL-20m間の平均S波速度 (m/s)を示す。見掛け入射角項は伝播経路特性に関係するが、便宜的に地震タイプで区分し3次関数で表現した。Table 3に回

Table 3 回帰係数と標準偏差 (小林・植竹, 2011)
Regression coefficients and standard deviation

	a	b	d	e1	e2	e3	f	σ
			地殻内 プレート間 プレート内					
最大速度	0.70	0.0014	-1.81	-0.60e-6	0	0	-0.63	0.27
			-1.49	0.24e-6	-0.12e-4	-0.96e-2		
			-1.51	-0.20e-5	0.19e-3	-0.12e-1		
最大加速度	0.59	0.0037	0.19	-0.13e-6	0	0	-0.27	0.32
			0.64	-0.11e-5	0.19e-3	-0.14e-1		
			0.88	-0.12e-5	0.16e-3	-0.14e-1		

帰係数 $a\sim f$ 及び予測誤差の対数標準偏差 σ を示す。見掛け入射角を導入した効果として、従来からの課題であった震源近傍及び深さ30km以上の地震に対する適用性が大きく向上することを確認している。また、稠密な観測データが得られている1994年Northridge地震(Mw6.7)の距離減衰性状もよく説明できることを確認している。

Fig.9に本震の観測値と本距離減衰式の比較を示す。比較にあたって、断層中心距離は防災科学研究所の断層モデル¹⁶⁾を参照して算出した。また、観測値は回帰係数 f に基づいてAVS20=700m/s相当地盤に変換した。観測値の特徴として最大加速度と最大速度の減衰勾配に大きな違いがみられる

が、本距離減衰式は外挿となる断層中心距離300km以上の領域も含めて、最大加速度、最大速度の観測値の平均的な距離減衰性状をおおむねよく説明している。ただし、震源近傍で過大な予測値を示すなどの課題もあり、今後今回の地震の余震データも利用してさらに詳細な検討を行う予定である。

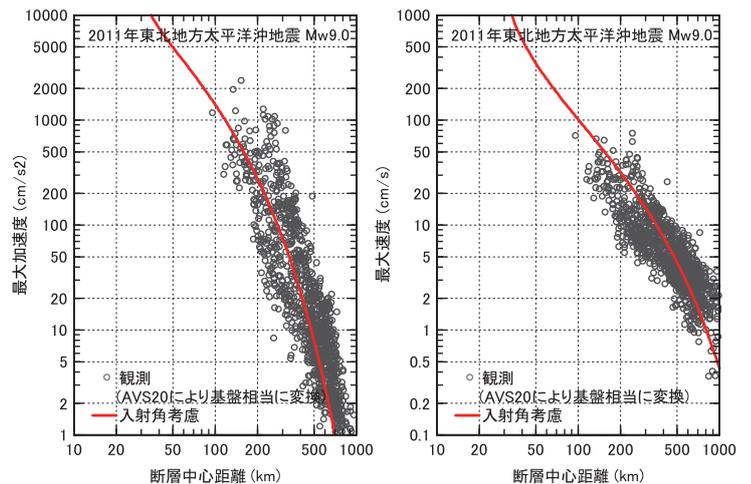


Fig.9 距離減衰式と観測値の比較
Comparison of attenuation curve with observed values

3 おわりに

地震動予測では、地震想定が基本的かつ重要な課題となるが、地震動を精度よく予測することも大きな課題である。今回の地震では北海道から九州にわたる全域でMw9.0の多数の貴重な観測記録が得られており、今後これらの観測記録を活用して地震動予測の高度化に繋げていきたいと考えている。

謝辞

本報告をまとめるにあたり、各研究機関のインターネット公開情報及び防災科学技術研究所のK-NET・KiK-netデータを利用させて頂きました。

参考文献

- 1) 気象庁：「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」について（第15報），<http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13b/kaisetsu201103131255.pdf>.
- 2) 警察庁：被害状況と警察措置（2011年8月29日），<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>.
- 3) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：<http://www.coastal.jp/ttjt/>.
- 4) 国立天文台編：理科年表平成23年度版，丸善，2010.
- 5) 宍倉正展，澤井祐紀，行谷祐一，岡村行信：平安の人々が見た巨大津波を再現する—西暦869年貞観津波—，AFERC NEWS, No.16, 1-10, 2010.
- 6) 佐竹健治：東北地方太平洋沖地震の津波について：過去の津波地震との比較も含めて，http://www.bosai.go.jp/koho/event/report311/img/20110417_03.pdf.
- 7) 東京大学地震研究所：2011年3月東北地方太平洋沖地震，http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/.
- 8) 気象庁：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」について（第47報），<http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13b/kaisetsu201106081030.pdf>.
- 9) 藤原広行，河合伸一，青井真，功刀卓，奥村俊彦，石井透，早川譲，森川信之，小林京子，大井昌弘，先名重樹，奥村直子：全国を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，第275号，2005.
- 10) 地震調査研究推進本部：活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧（2011年1月1日での算定），<http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/ichiran.pdf>.
- 11) 国土地理院：陸域及び海域の地殻変動と滑り分布モデル，<http://www.gsi.go.jp/cais/topic110520-index.html>.

- 12) 気象研究所：「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」の断層すべり分布の推定—近地強震波形を用いた解析http://www.mri-jma.go.jp/Dep/sv/2011tohokutaiheiyo/source-process2_detail.pdf.
- 13) 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>.
- 14) 防災科学技術研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による地震動，http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo_20110311/nied_kyoshin2j.pdf.
- 15) 小林喜久二，植竹富一：距離減衰式への見掛け入射角の導入とその効果に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，89-90，2011.
- 16) 防災科学技術研究所：近地強震記録を用いた2011年03月11日東北地方太平洋沖地震の震源インバージョン解析（2011/08/12改訂版），http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo_20110311/inversion/.