S1-1

2011 年東北地方太平洋沖地震の震源像と強震動

Source Models of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Some Features of the Strong Ground Motion

工藤一嘉[1]
Kazuyoshi Kudo[1]

Abstract: This paper is a review for the studies on the source processes and strong ground motions of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. The moment magnitude of the earthquake was 9.0. It was the largest one among the historical earthquakes occurred in and near Japan. We regret that we could not anticipate such mega earthquake and could not save people from the tsunami.

１．はじめに

本年3月11日14時46分頃に発生した，「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」（気象庁）は，15,989名の死者と3,917人の行方不明者（H23年9月26日現在，総務省消防庁発表）という，信じ難い多くの犠牲者と30万棟にも及ぶ建物の全・半壊をもたらした．さらに福島第一原子力発電所では冷温停止が出来ずにメルトダウン，そして水素爆発・広域の放射能汚染などの重大な事故への引き金となった．発電所近隣の人々に避難を余儀なくし，将来への大きな不安を与えており，わが国に留まらず，世界に大きな衝撃を与えた．この大災害は，まだまだ調査中のところは多いが，犠牲者の死因や原子力発電所の事故は大津波によることは疑いのない事柄である．しかし，地震による震動被害も決して無視できるほど軽いものではなかった（例えば[1]）．

1995年兵庫県南部地震の直後から，地震観測，強震観測, 地殻変動観測, 海域での観測などの整備が進み，それらのデータと世界中の観測記録から，どのような震源過程であったかは地震発生後半日程度で第1報がインターネット上で公開され，概要が把握されるようになった（例えば，八木[2]）．しかし，東北地方太平洋沖地震により，地震学における将来の地震発生予測に関する欠点と言うべきか，限界というべきか，未熟さを露呈した．地震研究者のおそらくほとんどが，東北日本近海でMw 9 の巨大地震を事前に想定することが出来ず，従って地震対策は不十分であったと言わざるを得ない．筆者は地震活動・発生について直接専門としている訳ではないので，自らの意見と言うよりは地震学関係者のいくつかの（代表的な）意見を紹介する内容となることお許しいただきたい．

２．東北日本の海域（下）で何が起こったのか？

１）震源の概要（**Mw9.0**）

東北地方太平洋沖地震の震源（破壊開始点）は三陸沖（牡鹿半島の東南東約 130km）, 深さ約 24km であり，気象庁が最初に発表した（3 月 11 日 14 時 49 分）地震のマグニチュードは M7.9（速報値）であったが，同日 16 時に M8.4（暫定値），同 17 時 30 分には Mw8.8（暫定値）に，最終的には Figure 1 に示す Centroid Moment Tensor（CMT）解（気象庁［3］）から Mw9.0 に修正された（3 月 13 日 12 時 55 分発表）．日本国内で観測された最大の地震である．太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した逆断層型の地震である．

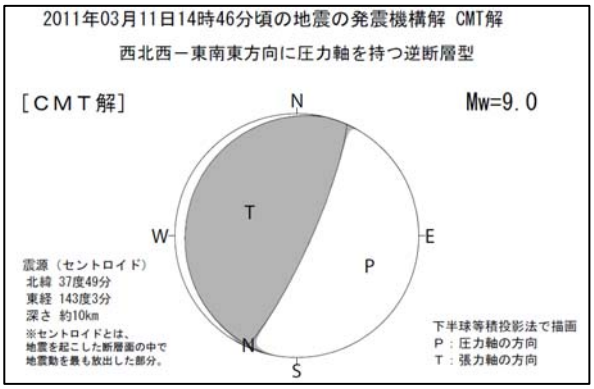

Figure 1. Centroid moment tensor solution determined by JMA.

震源（余震）域は，岩手県沖から茨城県沖までに及んでおり，長さは約 400km 以上（～500km），幅は約 200km，最大のすべり量は 20m（～60m）以上であったと推定される．

２）強震動・震度

震度分布は Figure 2.に示すが，宮城県栗原市で震度７が，岩手県・宮城県・福島県・茨城県・栃木県で震度 6 強が観測されている．震度 6 弱は上記の県以外に群馬県・埼玉県・千葉県にも広がっている．沖縄県を

１：日本大学総合科学研究所（生産工学部勤務），　University Research Center, Nihon University (College of Industrial Technology).

除き日本列島全体が有感となった．

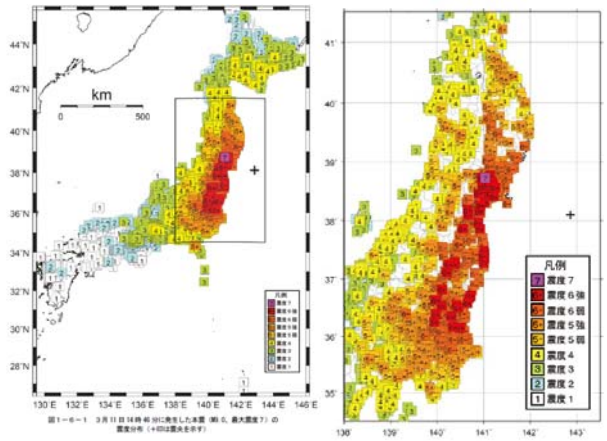

Fig.2　2011 年東北地方太平洋沖地震の震度分布（気象庁による）．

３）津波

観測史上国内最大級の津波が太平洋沿岸を襲った．東北地方，北海道地方，関東地方の太平洋沿岸の，宮古で 8.5m以上，大船渡で 8.0m以上，石巻市鮎川で 7.6m以上，相馬で 7.7m以上など，極めて高い津波を観測した．遡上高は 30m 以上が観測されている（気象庁）．三陸海岸南部から仙台平野を含む宮城県・福島県・茨城県・千葉県では，過去にこのような大津波の経験は少ない，あるいは無いので，対策が不十分であったことは否めない．なお，詳細に理解されているとは言いがたいが，869 年貞観地震により仙台平野では同じような津波浸水域が生じたことが徐々にわかってきた（例えば，宍倉・他[4]）．津波の常襲地帯とも言える三陸海岸では，防波堤・防潮堤を超える高さとなり，ハード的に災害を防止することの難しさを露呈した．繰り返しになるが，この地震による死者・行方不明者のほとんどがこの津波によってもたらされたものである．この巨大な津波はわが国に留まらず，海外の太平洋沿岸にも押し寄せ，米国カリフォルニア，ガラパゴス諸島などにも被害をもたらした．原子力発電所の事故-電源の喪失は津波によるものと考えられており，津波対策の不十分さが指摘されている．

４）余震（4 月 11 日地震調査推進本部発表から）・他

最大余震は 3 月 11 日 15 時 15 分の Mw7.7 の地震で（茨城県沖），M6.0 以上の余震が６０回以上発生．4 月 7 日には，M7.1 の地震，宮城県で震度６強を観測．

余震域は南北約 500km にわたっており，今後も余震・津波に注意喚起があった．また，今回の地震の発生に伴い広域でひずみが変化しているので今後の地震活動に要注意であること，東北地方から関東・中部地方にかけて，まとまった地震活動が観測されている地域があるなどの見解が発表された．一般的には余震とは破壊された断層面の周辺に起こるものを指すが，今回(3.11)の地震では本震直後に長野県北部や静岡県東部など，明らかに余震域を外れる地域で被害が発生するほどの大きな地震が起こっている．また，茨城・福島県境で M7 となる正断層型の地震が発生し（4 月 11 日），活動するとは考慮されていなかった活断層が動くなど，広域に応力場の変化をもたらしたことの反映と推測される．

3. 震源過程（観測記録の逆解析結果の比較）

前節で簡単に説明したが，震源過程（破壊過程）の現時点における研究・解析結果の整理を試みる．この種の研究から「なぜ巨大地震になったのか」の疑問への答えにつながることが期待される．ここで紹介するのは１）遠地および近地地震記録による震源過程逆解析の結果で解析対象周期はほぼ 10～100 秒程度であり，次に２）地殻変動データ（GPS 観測データが中心）による逆解析，３）津波データによる断層運動の推定，４）強震動データ（0.1～10 秒程度）による解析などである．１）と２）の統合逆解析も試みられている．これらは使う資料や見ているものが違うので，当然統一的なモデルには制限がある．個別に見てみよう．

１）遠地（主として海外）実体波を用いた逆解析結果

多くの研究者による報告があり，詳細は（例 EPS 特集号：http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/toc/6307.html）を参照されたい．気象研究所[5]の解析を一例として Fi.g. 3 に紹介する．

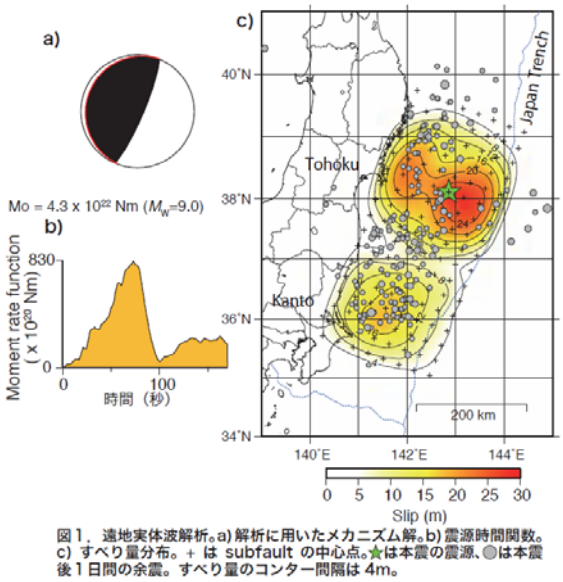

Fig.3 遠地記録を用いた震源逆解析結果（気象研）[5].

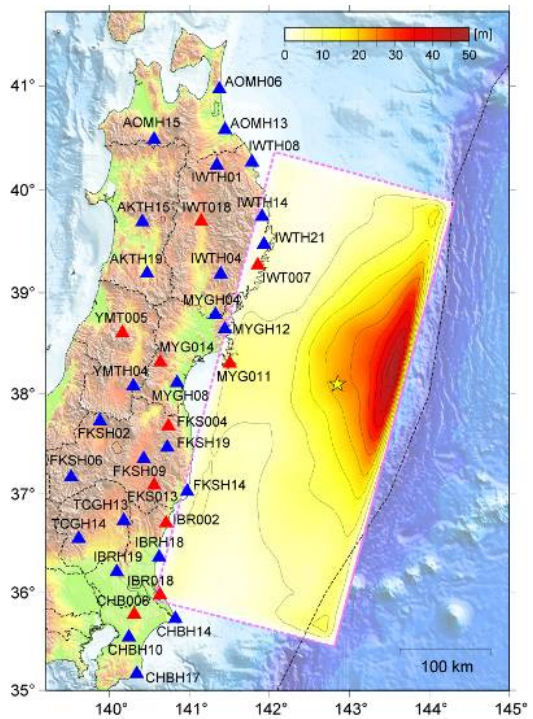

Fig.4　近地<強震）記録を用いた震源逆解析，防災科技研[6]による．

一方，近地の強震記録から，長周期成分のみを用いた逆解析も多く実施された．その一例として，防災科学技術研究所[6]の解析結果を Fig. 4 に示す．Fig.3，Fig.4 の最終すべり分布は，宮城県沖の海溝沿いに大きなすべりがあり，牡鹿半島と茨城県沖にやや大きいくい違い領域が見られることな
ど，定性的には遠地記録の解析結果と共通する要素が多い．防災科技研の解析で，破壊開始の 60-100 秒後に大きなすべりが生じたとしている．岩手県，宮城県，福島県沖合の断層の浅い領域で大きなすべりが生じたことにより，これらの地域を襲った大津波が生じた可能性がある．

２）地殻変動データの解析（GPS 観測を中心として）

全国に配備された GPS 観測網（GEONET：国土地理院[7]）により捉えられた地殻変動は Fig.5 に示すように，東北日本の太平洋側は東南東方向に数m移動している．最大の変動は，石巻市牡鹿では 5.3mの水平変動が観測された．上下変動としては，牡鹿では最大の 120cm 沈降が観測されている．さらに，海底の GPS 観測（海上保安庁）から，水平の最大変動は 24m，上下動は 3m と言う極めて大きい変動があった．日本海側は大きな変動は無かったので，東日本は全体が東西方向に引き伸ばされたことになる．この地殻変動データを説明する断層くい違い量が国土地理院と海上本庁との共同で解析された結果が Fig.6 である[8]．くい違い量は宮城県沖の日本海溝付近で最大で 56m と推定された．陸上部だけのデータを用いた場合と比較すると，海溝寄りで 2 倍以上のくい違いとなった．

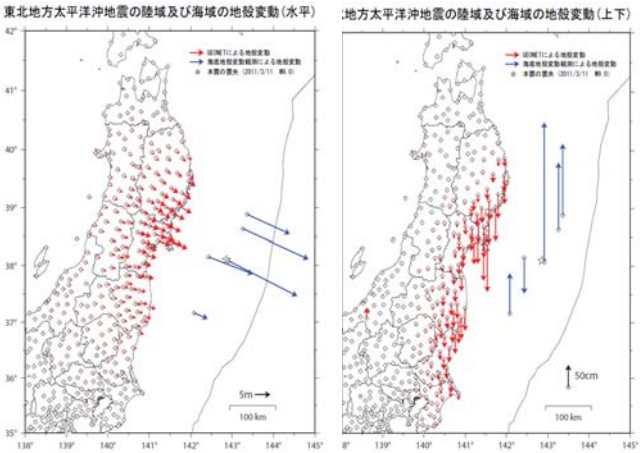

Fig.5 GPS 観測に基づく地殻変動量（国土地理院）　[8]

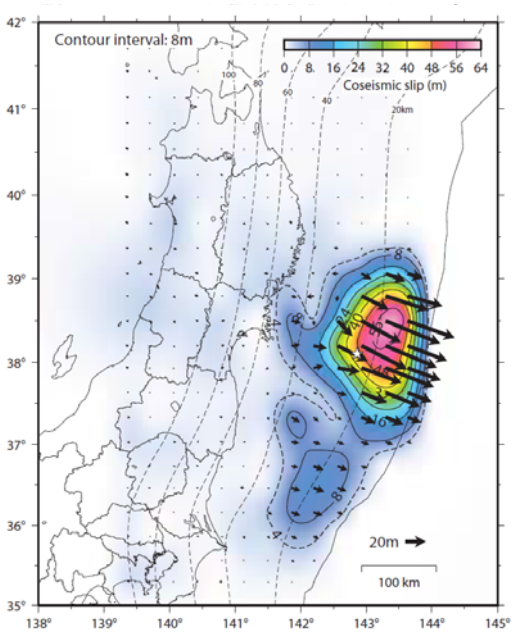

Fig. 6　国土地理院・海上保安庁によるプレート境界面上の地震時すべり分布モデル（すべり量：最大 56m）[8].

３）津波データに基づく震源断層の推定

津波データの解析は基本的には海底面の上下変動を推定し，断層の変位量を求めることになる．地殻変動データを用いた解析かなり類似した結果も得られているが（Fujii et al., 2011）[9]，ここでは，東北大学グループ（今村・他, 2011）[10] の逆解析結果をFig.7に示す．他の解析結果とは岩手県沿岸の津波を説明するためには，岩手県沖の海溝近くに20mの食い違いを設定している．これは岩手県沿岸の津波遡上高を説明するためであるが，他の解析は海面変動の観測に重点を置いており，

その差が現れていると考えられる．岩手県北部沖に大きなくい違いを置くのは東北大グループの特徴であるが，1896年明治の地震・津波の活動評価との密接な関係があり，今後の地震活動の評価に極めて重要であろう．

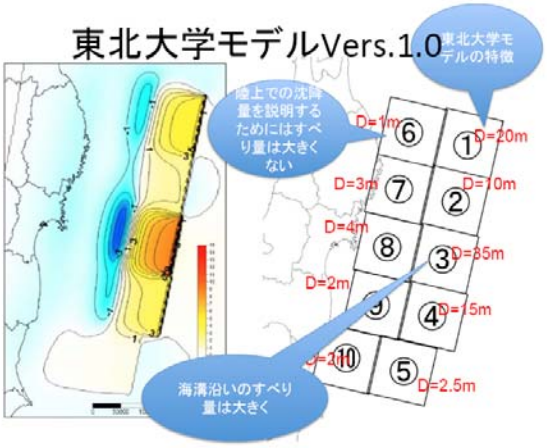

Fig.7　今村・ほか(2011)[10]による津波による震源逆解析モデル．

４）強震動データからの震源モデル

はじめに観測された地震動の特徴を簡単に指摘したい．

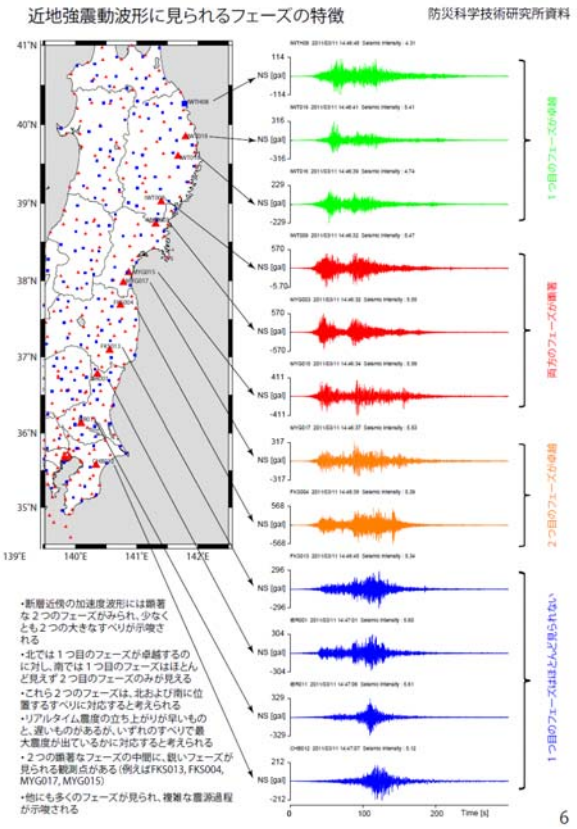

Fig. 8　K-NET,KiK-net 観測網で捉えられた強震加速度記録（http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo_20110311/inversion/）.

全国に均質に展開されている K-NET, KiK-net 観測網（防災科学技術研究所）データの代表地点の加速度波形を並べたのが Fig.8 である．

震源に近い宮城県周辺と北部の記録には大きな振幅が少なくとも 2 つ見られ大きなすべりに関連しているであろう．一方で，茨城県・千葉県では一山のように見える．破壊が南に伝播したことを示唆する．震動継続時間が極めて長いこともこの地震の大きな特徴である．Fig. 9 は Kurahashi and Irikura(2011)[11]によって解析された結果であるが，経験的グリーン関数法を用いて周期 0.1 秒から 10 秒の帯域の地震動に着目して震源を見たことになる．これまでの１）～３）までの周期ほぼ 10 秒以上とは異なった結果を与えている．強震動の解析では沿岸に近い 5 箇所に，くい違い量の大きい場所が求まっている．背景の破壊大領域の濃淡は Yoshida et al.(2011)[12]による周期 10～100 秒の地震動を用いた断層くい違い量を表しているが，海溝寄りに大きな食い違いがあるのと大きなコントラストをなしている．

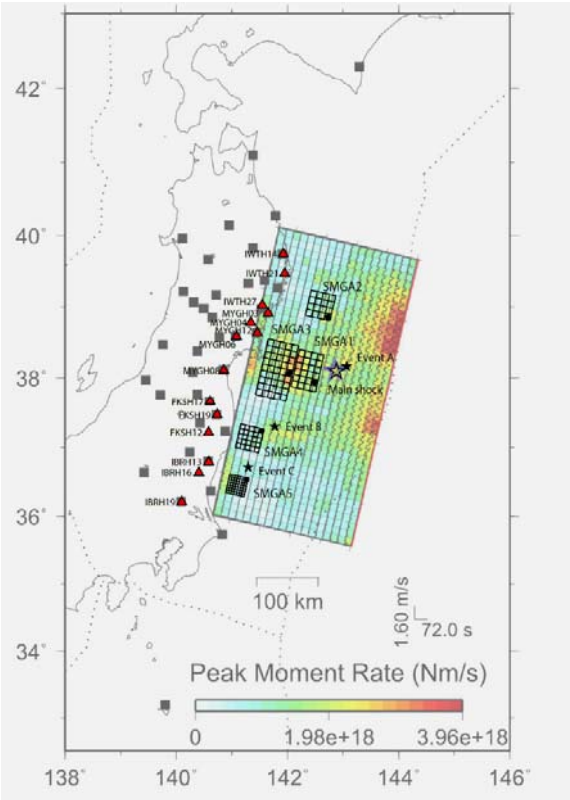

Fig. 9 強震動を出したモーメント解放量の大きかった領域（Kurahashi and Irikura, 2011）[12] .

Kurahashi and Irikura(2011)[12]による5つのアスペリティ（大きなくい違いの領域）の総モーメントはΣ Moi ＝8.14x10^{21}Nmで，CMT解によるMw9.0のモーメント

はMo=4.5x10^{22}Nmなので，強震動を説明するためのモーメント量は総モーメント量の20%程度であり，Mは8.5程度となる．

最も簡単に地震動強さを表すために用いられる最大加速度・速度の距離減衰はFig.10に示すとおりで，既往（提供範囲外ではあるが）予測式に比べ，Mw=8.9では観測が下回り，強震動解析の結果と調和的である．

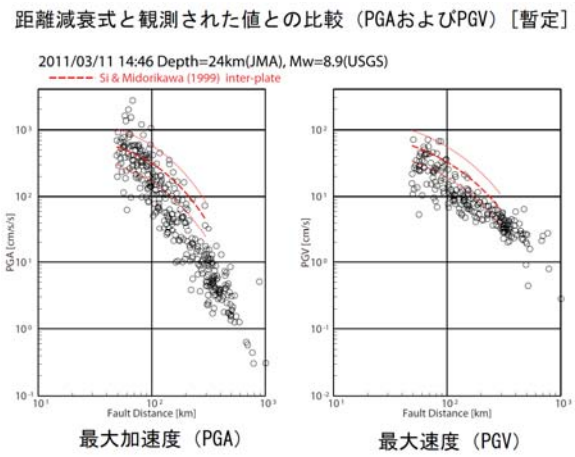

Fig. 10　最大加速度・速度の距離減衰式とK-NET, KiK-netデータ[6].

Fig. 11　地震調査研究推進本部地震調査委員会発表の 2011 年 1 月 1 日現在での海溝型地震の発生評価.（http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_kaiko.htm）

５）震源像のまとめ

地震調査研究推進本部（事務局：文部科学省）が想定していた海溝型地震の震源域は Fig.11 のようになっていた（平成 21 年時点）．東北地方太平洋沖を見ると，幾つかのセグメントに分けられ，それらが同時に起ることは考えられていなかった(いわゆる「想定外」)．１）～４）で震源像を見てきたが，全ての手法の結果を包絡的に見ると，Fig.11 の東北地方太平洋沖のセグメントのうち，北から岩手県南部，宮城県沖，福島県沖，茨城県沖が次々と破壊され(連動)，さらに三陸から房総沖から津波地震発生領域と想定した部分（どの部分が割れるかは不明だが，M は最大でも 8.2 を想定）が食い違いを起こしたと考えられる．中でも海溝沿いの海底変動が大きな津波をもたらしたが，強震動（短周期）はあまり出さなかった．一方で，内陸近くのプレートが沈み込むやや深い場所で短周期（強）震動を発生させたと考えられる．巨大地震のために津波と強震動が共に大きくなったのか，地域的な特徴かなどはすぐには分かることではないであろうが．注意深い検討が必要に思う．

４．強震動の特徴

先にも紹介したように，多くの強震記録が得られた．中には，震度 7 の地点や重力加速度を越える観測点も少なくない．境有紀氏の分析では，Fig.12 に示すように，建物の大きな被害に結びつく 1-2 秒応答は，大きかった K-NET 石巻でも 1995 年兵庫県南部地震の JR 鷹取の半分程度で，震度 7 の K-NET 築館，震度 6 強の K-NET 仙台，K-NET 日立は，はるかに小さいことが報告されている．必ずしも建物被害調査が十分行われない，あ

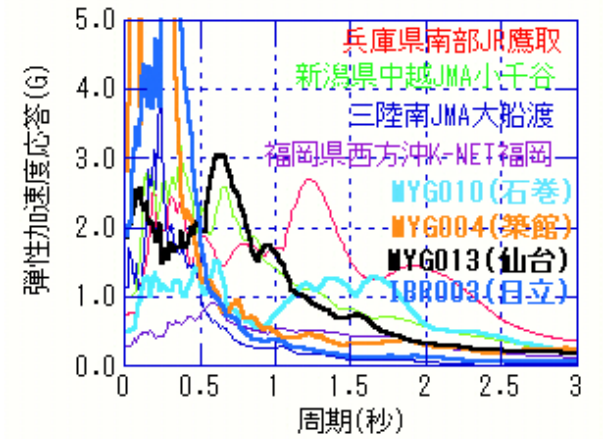

Fig. 12　過去・今回の地震動の加速度応答の比較（境有紀，2011)[13].

るいは出来ないなどの理由で，正確さは期せないが，今回の地震の被害は，圧倒的に津波によるもので，強震動の被害は M の大きさに比べて少ないことを示唆する資料と言えよう．

大地震による長周期の構造物への影響が懸念されたが,今回の地震による長周期地震動は関東平野では懸念したほどの被害は報告されていない．しかし、東海・東南海・南海の巨大地震による関東平野の長周期地震動には要注意であることを忘れてはいけない．

５．「想定外」「未曾有」などについて

地震発生直後から，政府もマスコミもこぞって「未曾有」の大災害が発生したと発表や報道をし，地震発生の２日後に Mw9.0 が気象庁から発表される至って，政府や地震・地震工学研究者など「想定外」の言葉がしきりにマスコミを通して伝わってきた．

畑中洋太郎氏[14]が既に指摘されていることではあるが「未曾有」とは，これまで経験したことの無い凄まじいことを意味するのであって，例えば多少場所にもよるが，三陸海岸の津波の高さ（正確にはきちんと定義が必要だがここでは略），1896 年の明治三陸津波の高さとほぼ同じであった，あるいは今回の地震でクローズアップされたとも言える 869 年の貞観地震では仙台平野に今回と同等の津波浸水域が指摘されており[4]，津波に関しては，全く想像もつかないことが起きたわけではないので,「未曾有」という言葉を使うのは問題であろう．また，島崎邦彦氏[15]が指摘するように，日本海溝沿いの領域では津波地震の発生が地震調査研究推進本部（地震本部と略）で指摘されていたので，津波の到来が「想定外」とは言えない筈である，との指摘はうなずける．東京電力が地震本部の想定に基づき福島原子力発電所での津波を試算していて，その高さは今回の津波と原子力サイトではほぼ同等であった（2011 年８月 24 日，　読売新聞）ことを照らし合わせれば，むしろ「想定の範囲内」にあったというべきかも知れない．しかし，北は岩手県沖から南は茨城県沖まで，一時期に（連動して）破壊することは，ほとんどの地震学・地震工学関係者は想像できなかったであろう．少なくともデータや学理を背景に，説得性のある（M9 地震発生の）警告は出来なかった.それは我々が自然にたいして未熟であることによる．特に，地震の予測が発生時期を除けば、ある程度確からしさが備わってきたのではないかとの期待的評価は、今回の地震で完全に打ちのめされた．プレートの運動を既知として,すべり欠損のモデル(アスペリティモデル)、固有地震説にあまりにも依存しすぎたのではないか．しかし,2003 年十勝沖地震を代表として、同じような M の 巨大地震が繰り返すことも事実であり,これまでの考え方が全く否定された訳ではない．多様な顔を持つ自然を十分に理解出来ていないことが明白になったことは事実である．

やや尻切れトンボの感がありますが、講演時に補充します。

参考文献

[1]日本建築学会，2011 年東方地方太平洋沖地震災害調査速報，日本建築学，2011.

[2] 八木勇治，http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~yagi-y/EQ/ Tohoku/，2011

[3] 気象庁，http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13b/kaisetsu201103131255.pdf，2011.

[4] 宍倉正展ほか，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 ニュース，No.16/ 2010 年８月号，pp1-10. 2010.

[5]気象研究所，http://www.mri-jma.go.jp/Dep/sv/2011tohokutaiheiyo/source-process_MIS036-P33.pdf，2011,

[6]防災科学技術研究所,http://www.kyoshin.Bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo_20110311/inversion

[7]国土地理院，http://terras.gsi.go.jp/ja/index.html，2011.

[8]国土地理院，http://www.gsi.go.jp/cais/topic110520-index.html，2011.

[9] Fujii Y. et al.,2011, Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake,*Earth Planets Space,* Vol. 63 (No. 7), pp. 815-820.

[10]今村・他，http://www.dcrc.tohoku.ac.jp/surveys/20110311/docs/20110610_1-1_imamura.pdf，2011.

[11] Kurahashi, S. and K. Irikura, Source model for generating strong ground motions duringthe 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space,* Vol. 63 (No. 7), pp. 571-576, 2011.

[12] Yoshida K., K. Miyakoshi, and K. Irikura, Source process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake inferred from waveform inversion with long-period strong-motion records,*Earth Planets Space,* Vol. 63 (No. 7), pp. 577-582, 2011

[13] 境　有紀，http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/113g.htm)

[14] 畑中洋太郎，未曾有と想定外―東日本大震災に学ぶ，現代新書，講談社.

[15] 島崎邦彦,予測されたにもかかわらず被害想定から外された巨大津波，科学 10 月号，岩波書店,2011.