

1-1 地震と地震動

防災保全事業部
東京支社 防災保全部 末富岩雄
中国支社 防災保全部 福島康宏

1. はじめに

(本文は、弊社報告書「東日本大震災 被害調査報告」平成 23 年 6 月を引用したものである)

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃、三陸沖から茨城県沖に及ぶ巨大地震が発生した。気象庁により、「2011 年東北地方太平洋沖地震」と命名され、政府は災害名称として、「東日本大震災」と呼んでいる。

気象庁による地震の規模(M)は、発生直後は 7.9、16 時の報道発表第 1 報で 8.4、17 時 30 分の第 3 報で 8.8、3 月 13 日 12 時 55 分の第 15 報で 9.0 と少しずつ大きく修正されている。発震機構は、西北西—東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、プレート境界で発生した地震である¹⁾。

宮城県栗原市築館で震度 7 が観測されるなど、東北から関東地方の多くで震度 5 以上の強い揺れが観測された。

2. 過去の地震と想定地震

三陸地区では、過去に何度も津波に見舞われ、多くの犠牲を払ってきた。そのため、堤防などハード面の対策、避難訓練などソフト面の対策、において国内でも最も精力的に取り組んできた地域である。岩手県では三陸地震、宮城県では宮城県沖地震、福島県・茨城県では福島県沖及び塩屋崎沖地震を、津波を伴う海溝型地震として想定しているが、今回の地震は、これらの想定地震が同時に起きたことに相当する。以下に、過去の地震の概要を記す。

2.1 明治三陸地震

1896 年 6 月 15 日 20 時頃、三陸沖約 200km で発生した地震(M=8.5)で、揺れは強くなく震度 3 程度であった。死者は約 22,000 人に及び、その多くが岩手県内である²⁾。死者数は今回と同程度であるが、当時は現在より人口が少なく、吉浜村で人口の約 9 割が亡くなるなど、犠牲者の比率は今回より高い。

2.2 昭和三陸地震

1933 年 3 月 3 日 2 時半頃に発生した地震(M=8.1)で、揺れはやや強く震度 5 程度であった²⁾。深夜ではあったが、揺れが強かったので、多くの人は

目を覚ましている³⁾。死者は約 3,000 人と明治の際よりは大幅に減少している。津波の高さが 7~8 割程度とやや小さかったこともあるが、まだ明治の際の記憶が焼きついており、速やかに避難行動をとった人々が多かったものと推察される。

この後、1960 年チリ地震、2011 年チリ地震があるが、今回とは条件が異なるので省略する。ただし、人々の津波に対する意識に影響した可能性はある。

2.3 貞観の地震

東北地方で地震の記録が残るのは、江戸幕府が開かれる 17 世紀以降である。ただし、869 (貞観 11) 年の地震については、大津波により広い範囲で被害が生じたことが記録に残っている²⁾。

最近になって、石巻平野・仙台平野でジオスライサーを用いた地盤調査により、津波堆積物の分布が面的に明らかになってきた⁴⁾。再現期間も 600~1300 年と推定されている(さらに前の 3 回の痕跡も発見)。津波シミュレーションにより、想定宮城県沖地震よりもはるかに大きい地震があったのではと、その地震像が明らかになってきていた。ただし、それは、この数年のことである。

なお、1611 (慶長 16) 年にも、大きな地震があり、三陸地震や宮城県沖地震よりも広い範囲での地震であった可能性が高いが、詳しいことはまだ明らかでない。

3. 断層の破壊過程

今回のように断層域が広大になると、観測波形を時刻を合わせて並べるだけでも、およその様子は把握できる。図 1 は、東京大学地震研究所によるもの⁵⁾で、防災科学研究所による K-NET、KiK-net の波形を太平洋岸に沿って南北に並べたものである。

最初の大きな断層破壊は宮城県沖で起きている(最初に大きく揺れている、図中の紫色の線)。その数十秒後に宮城県沖で大きな断層破壊が再び起きて同様に伝播している(水色)。そして、三つ目の断層破壊が茨城県北部の、陸に近い沖合で起きたと考えられる(赤色)。

東北地区では 2 つの波群が見えるのは①②に対

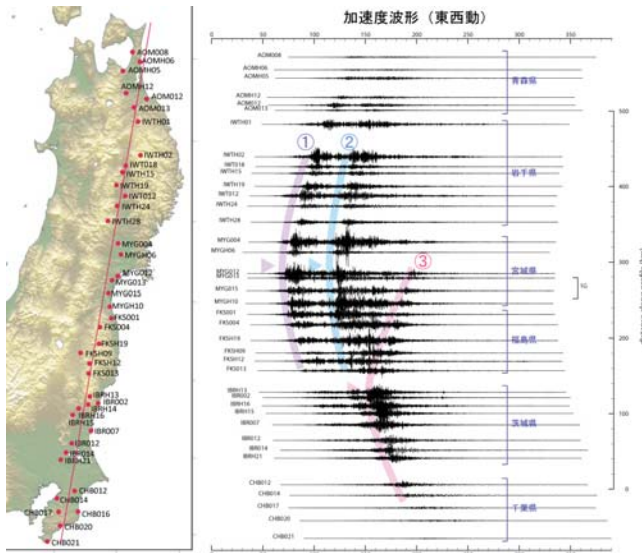


図1 加速度波形と断層破壊の関係⁵⁾

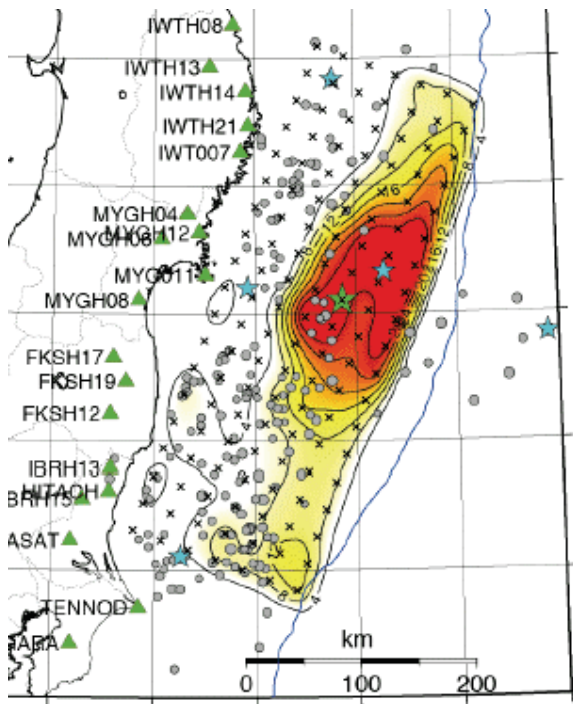


図2 断層面上のすべり分布の推定例
(気象庁気象研究所による¹⁾)

応し、首都圏では長くコトコト揺れた後に大きく揺れたのは、①②は遠く③が主となったものである。図2は波形を用いて震源インバージョンにより断層上のすべり分布を推定した例¹⁾である。図1の内容と概ね対応している。

4. 震度分布の推定

被害と地震動の大きさの関係を検討する上では、被害地点で地震記録が得られるわけではないので、地震動分布が必要となる。本章では、観測記録の

補間により 250m メッシュ単位での評価を行う。

(1) 地震観測記録

波形データが公開されている防災科学技術研究所 K-NET 及び KiK-net⁶⁾、港湾地域強震観測⁷⁾、気象庁⁸⁾、横浜市高密度強震計ネットワーク⁹⁾、のデータから計測震度、SI 値等の地震動指標を算出する。補間推定には、K-NET278 点、KiK-net166 点、気象庁 36 点、港湾 13 点、横浜市 86 点の値を用いる。

(2) 地盤条件

末富ら¹⁰⁾で実施したように防災科学技術研究所の地震ハザードステーション¹¹⁾から公開されている若松らによる 250m メッシュの地形分類及び AVS30 (深さ 30m までの平均 S 波速度) を用いる。増幅度評価も、末富ら¹⁰⁾による非線形モデルを用いる。

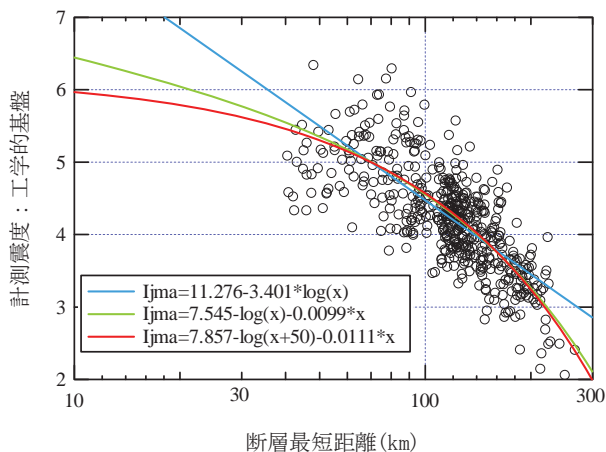
(3) 推定結果

末富・福島¹²⁾では、IDW 法 (距離の重み) による補間推定を行った。この場合、やや特定の観測値の影響が強かった (局所的な要因と思われるのに対し、広域で大きくなっていった)。そこで、図3に示すように、今回の観測値を用いて、断層からの最短距離 x のみをパラメータとする距離減衰式を回帰分析により構築する。○で示した観測値は、(2)の 250m メッシュでの AVS30 を用いて、工学的基盤 ($V_s=600\text{m/s}$ 相当) に引き戻した値である。赤線で示した定数項を入れた式の方がより観測値への適合性がよいので、これを採用する。log 内の定数項の値は一義的に決まらないので、既往の距離減衰式を踏まえ、ここでは 50 としている。この式をトレンド成分として、Kriging 法により推定した計測震度分布を図4に示す (プログラム RASMO 使用¹³⁾、最大加速度、SI 値、最大速度についても同様に算出している)。海岸付近で大きい他、内陸の低地部で大きくなっており、文献12)より、改善されていると考えられる。

5. 余震と誘発地震の影響

M=9.0 の巨大地震なので余震でも M が 7 を越えるものが多発している (図5)。また、余震域から推定される断層面とは全く異なる箇所での地震 (誘発地震) も多く、翌日未明に発生した地震では、栄村付近に大きな被害をもたらし、3/15 の地震では静岡県で大きな揺れが観測された。

5.1 30 分後の余震



断層最短距離 (km)

図3 計測震度の距離減衰
(○: 地表での観測値を工学的基盤に引き戻した値)

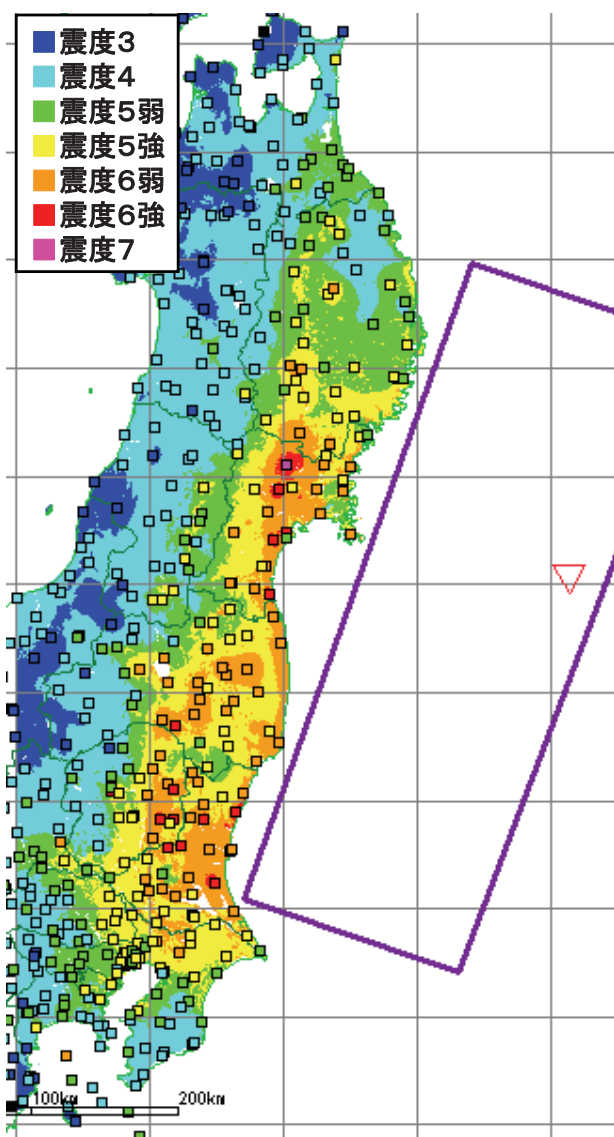


図4 計測震度の250mメッシュ推定分布
(▽: 震源、□: 推定断層、■: 観測値)

茨城県沖でM=7.7の地震が、本震から約30分後に発生している。いくつかの目撃証言として、本震で噴砂現象が生じていたところ、この余震によ

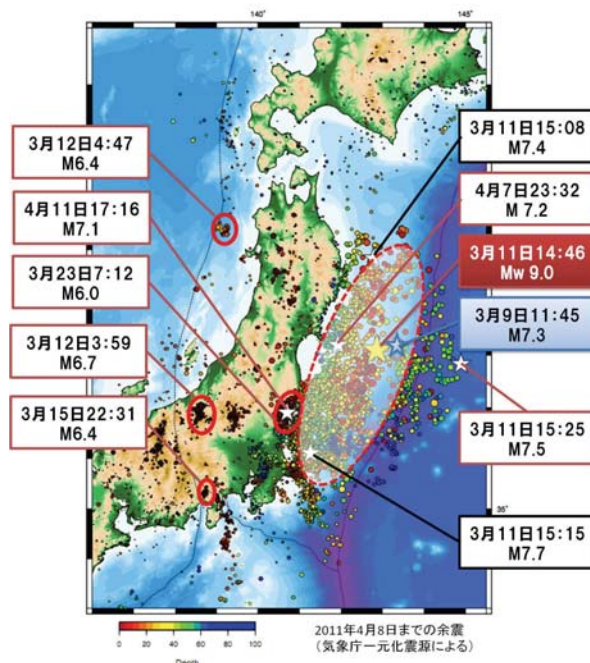


図5 主な余震・誘発地震の位置
(東京大学地震研究所⁵⁾による)

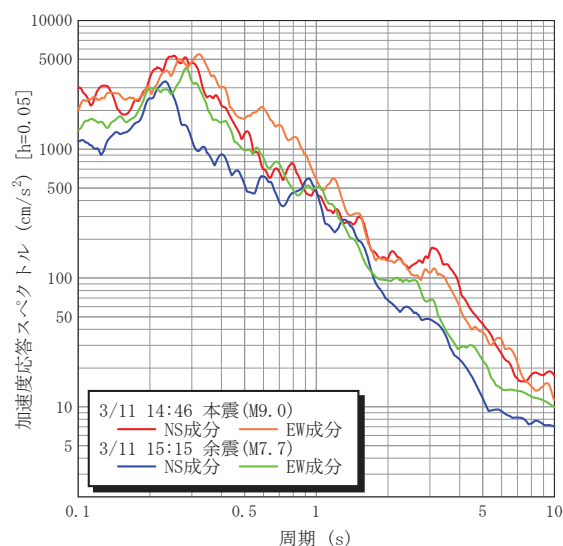


図6 K-NET 銚田における加速度応答スペクトル

り強く噴出したとある。

K-NET 銚田 (IBR013) における加速度応答スペクトル (減衰5%) を図6に示す。ほぼ本震に匹敵する大きさである。

5.2 4月7日の余震

4月7日23時32分頃に宮城県沖の深さ約65kmでM=7.1の地震が発生し、宮城県で最大震度6強を観測した(図7)。

発震機構は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型であり、震源が深いこと、余震分布が南東傾斜であることから、プレート境界の地震ではなく、太平洋プレート内で発生した地震とされて

いる (図 8) ¹⁾。

この地震では、東北電力管内で最大 4,006,382 戸と大規模な停電が発生した ¹⁴⁾ (ほぼ東北全体の 7 割に相当)。復旧は、10 日 0 時 15 分である。原因は、原子力安全・保安院によるとスイッチの切り替えの設定ミスで保護装置が働かなかったためである ¹⁵⁾。また、東北自動車道では、平泉前沢 SA 付近で盛土が長さ 30m ほどにわたって崩れ、通行止めとなった (10 日に復旧)。この付近では、住宅被害も少なくなく、10 日に応急危険度判定が実施されていた。

図 9 に K-NET 北上 (IWT012)、図 10 に K-NET 仙台 (MYG013) における加速度応答スペクトルを示す。周期 1 秒以下では、部分的に本震を上回る周期帯もある大きさである。

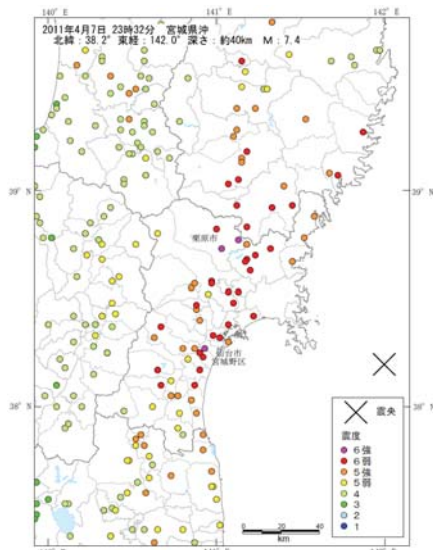


図 7 震度分布 (4 月 7 日の余震)

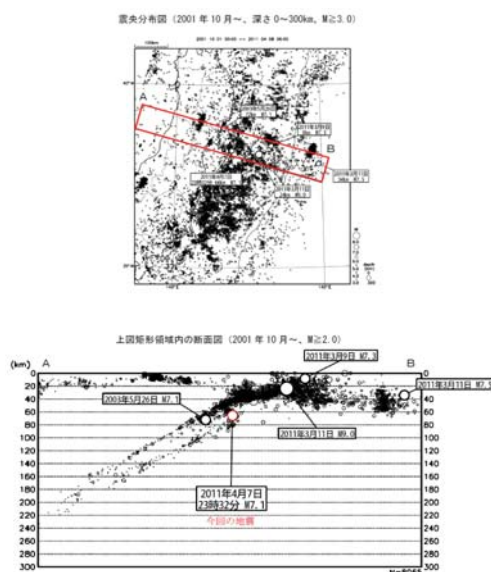


図 8 余震の分布と 4 月 7 日の余震の位置

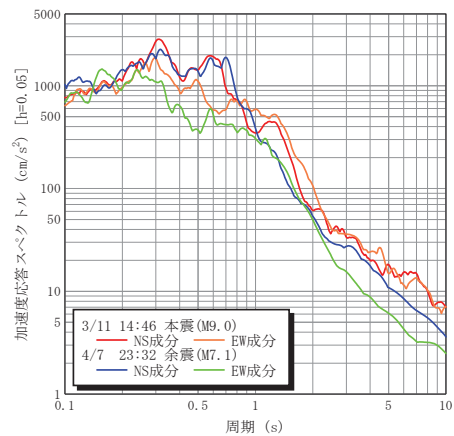


図 9 K-NET 北上における加速度応答スペクトル

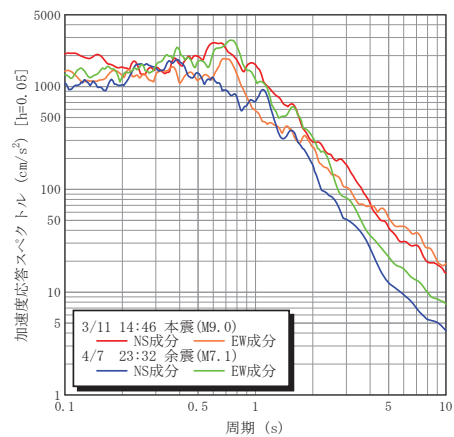


図 10 K-NET 仙台における加速度応答スペクトル

5.3 4 月 11 日の活断層による地震

4 月 11 日 17 時 16 分頃に福島県浜通りの深さ約 6km で M=7.0 の地震が発生し、福島県と茨城県で最大震度 6 弱を観測した。

この地震の発震機構は、西南西-東北東方向に張力軸を持つ正断層型で、地殻内の浅い地震であ

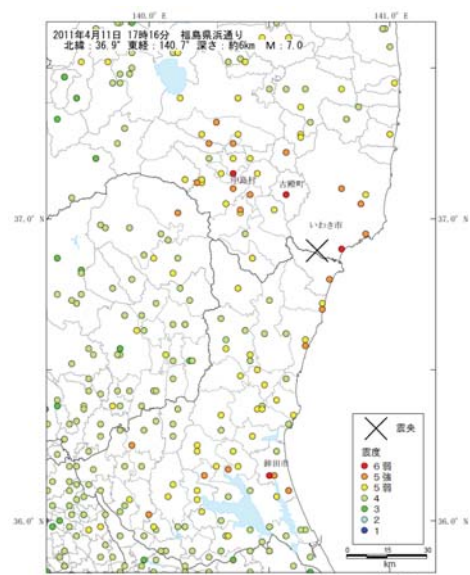


図 11 震度分布 (4 月 11 日の地震)

る ¹⁾。産業総合技術研究所により、断層が地表に露頭したことが報告されている ¹⁶⁾。

いわき市を中心に、停電、住宅倒壊、崖崩れ、等の被害が発生した。

6. 観測地震動の特徴

6.1 周波数特性

主な観測記録の加速度応答スペクトルを重ねて図12に示す。また、1995年兵庫県南部地震や2007年新潟県中越沖地震など国内での主な強震観測記録との比較を図13に示す。いずれも、水平2成分を合成した値を示している。

既往の主な記録と比べると周期1秒以上では小さい。地震規模が巨大であることから、周期20秒辺りの通常の構造物に影響しない成分で大きいようである。K-NET 築館(MYG004)の周期0.24秒で約13,000cm/s²という極めて大きな最大加速度応

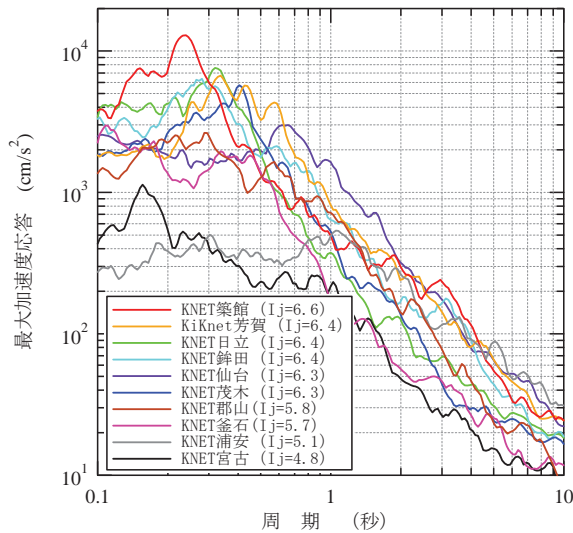


図12 観測記録の加速度応答スペクトル (減衰5%)

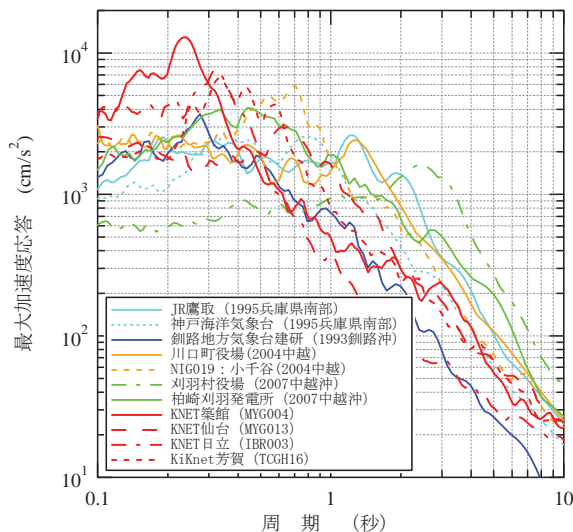


図13 既往地震の加速度応答スペクトルとの比較 (減衰5%)

答となっている。加速度波形を図14に示す。かつ他の観測点でも、0.5秒以下の短周期成分が著しく卓越している。図15にK-NET 築館での常時微動のフーリエスペクトルを示す。4Hz (周期0.25秒)付近で卓越しており、地盤条件と関連していると考えられる。また、高さ1.5m程度駐車場位置より上に地震計はあり、上では大きく増幅されていることがわかる。このような局所的条件により大きく揺れた地点と考えられ、周囲での建物被害は少ない。K-NET 日立等も、盛土上に置かれており、同様に局所的条件が影響していると考えられる。

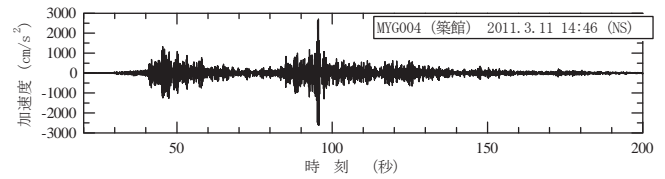


図14 K-NET 築館における観測加速度波形 (NS)

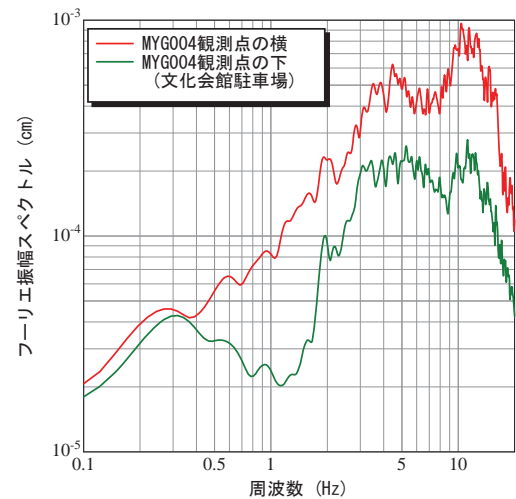


図15 常時微動のフーリエ・スペクトル

6.2 継続時間

図16は、国内における主要観測加速度波形を並べたものである。縦軸は少し変えているが、横軸は合わせてある。1995年阪神淡路大震災や2004年新潟県中越地震の波形は20~30秒であるのに対し、今回の地震は120秒程度続いており、極めて長い。M=8.0で同じプレート境界型である2003年十勝沖地震と比べても1.5倍程度ある。

継続時間が長いことが、被害に影響していると考えられ、その典型例が地盤の液状化である。図17は、K-NET 稲毛(千葉市美浜区)での観測波形である。時刻120秒付近で、サイクリックモビリティにより急激に大きな加速度が現れた後、液状化に至ったと推察され、観測点敷地内では大量の噴砂が見られた。

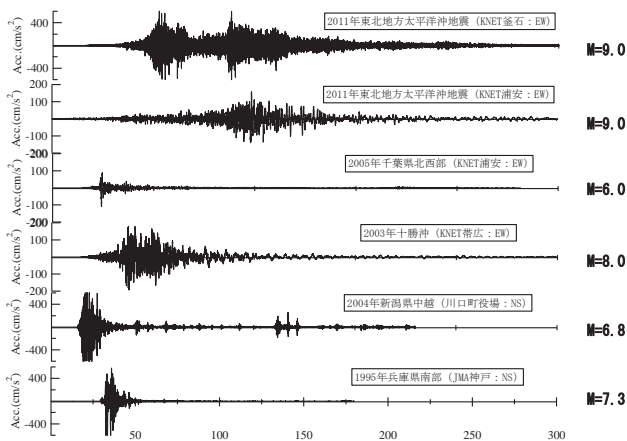


図 16 過去の地震記録との継続時間の比較

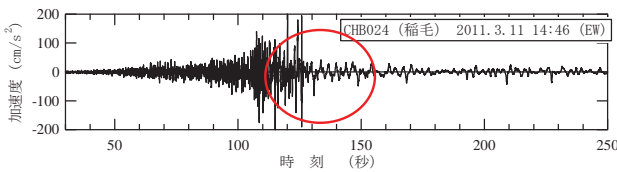


図 17 液状化地点の波形 (KNET 稲毛)

6.3 首都圏における地震動

首都圏では、東京ガス株式会社の地震防災システム SUPREME により、約 4000 点の地震観測網が構築されている。図 18 は、その観測値を収集・表示している Jishin.net (会員制) による SI 値分布図¹⁷⁾である。東日本大震災に関しては、防災科研 K-NET 及び KiK-net、国土交通省、横浜市による高密度強震観測網による記録からの値も示している。SUPREME では、50m メッシュの SI 値分布推定、液状化危険度推定、導管被害推定が地震発生から 10 分以内に行われている。

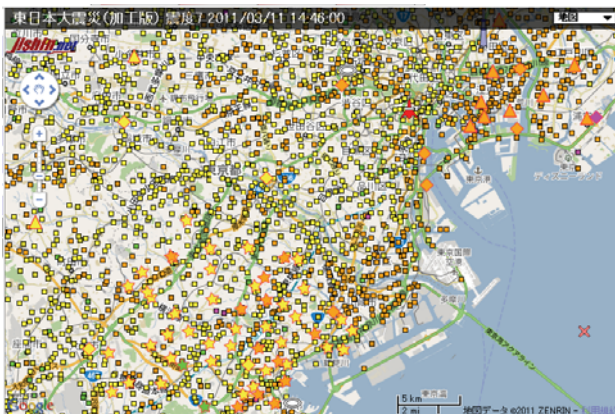


図 18 首都圏における高密度 SI 値分布 (TG 情報ネットワーク : Jishin.net¹⁷⁾ より)

今後、地震動分布の高精度化をさらに進めると共に、各種被害と地震動との関係について検討を進める予定である。本研究では、防災科学技術研

究所強震観測網、港湾地域強震観測、横浜市強震計ネットワークのデータを使用させて頂きました。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁 : 気象庁発表情報、
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/jishin-porta1.html#b>
- 2) 宇佐美龍夫 : 最新版 日本被害地震総覧 [417]-2001、東京大学出版会、2003 年
- 3) 山下文男 : 津波てんでんこー近代日本の津波史、新日本出版社、2008 年
- 4) 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター : 貞観地震に関する成果報告、報道等、
<http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/Tohoku/press.html>
- 5) 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/
- 6) 防災科学技術研究所 強震観測網 web サイト :
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 7) 港湾地域強震観測 web サイト :
<http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>
- 8) 気象庁 web サイト : http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/jishin/110311_tohokuchihou-taiheiyouuki/index.html
- 9) 横浜市高密度強震計ネットワーク web サイト :
<http://www.city.yokohama.jp/me/anzen/kikikanri/eq/>
- 10) 末富岩雄・石田栄介・福島康宏 : 全国即時地震動分布推定のためのモデル構築に関する一検討、第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集 CD、PS3-Sat-23, 2010 年
- 11) 防災科学技術研究所 地震ハザードステーション : <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 12) 末富岩雄・福島康宏 : 2011 年東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災) における地震動分布の推定、土木学会第 66 回年次学術講演会 (投稿中)
- 13) (独) 防災科学技術研究所 川崎ラボラトリー : 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト「Ⅲ.1 震災総合シミュレーションシステムの開発」公開ソフトウェア、2007 年
- 14) 東北電力 web サイト :
<http://www.tohoku-epco.co.jp/index.html>
- 15) 経済産業省原子力安全・保安院 web サイト :
http://www.nisa.meti.go.jp/earthquake_index.html
- 16) 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター : 平成 23 年東北地方太平洋沖地震速報、
<http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/Tohoku/index.html>
- 17) ティージー情報ネットワーク web サイト :
<http://www.jishin.net/>