東北地方太平洋沖地震による地震動の特徴

Strong-motion characteristics during the 2011 Tohoku earthquake

大野 晋^{a)*}

Susumu OHNO

Abstract

Strong-motion characteristics during the 2011 Tohoku earthquake are summarized. The major characteristics are: 1) predominant at short periods and large accelerations are observed in wide area, 2) significant spatial variation due to the differences of substructure conditions, and 3) very long duration due to wide faulting rupture area.

Key words: 2011 Tohoku earthquake, strong-motion, large acceleration, duration

和文要旨

東北地方太平洋沖地震で観測された強震記録の概要を紹介した。主な特徴としては、1) 短周期卓越型で広域に渡る大加速度、2) 地盤による相違、3) 非常に長い継続時間があげられる。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 強震動, 大加速度, 継続時間

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) は、この地域で事前に想定されていた規模をはるかに上回る地震であり、沿岸域の津波被害のみならず広域に渡る地盤震動で多くの構造物被害や地盤災害を引き起こした。今回の地震は、比較的高密度な強震観測網で観測された初めての巨大地震でもある。本稿では、東北地方太平洋沖地震で観測された強震記録の主な特徴について述べる。

2. 地震の概要

東北地方太平洋沖地震の主な諸元¹⁾と被害概要²⁾を表-1に示す。Mw9.0は日本観測史上最大級であり、東北地方太平洋沿岸の広い範囲で震度6弱以上を観測した。

この地震の発生以前、地震調査研究推進本部では、過去の地震の発生状況から日本全国の地震の長期評価を行い、東北地方太平洋沿岸では図-1のように複数のセグメントに分けていた³⁾。このうち宮城県沖の領域ではM7クラスの地震が繰り返し発生し、2005年にもM7.2の地震が起こったものの、地震発生のポテンシャルは残っていると思われていた。また、三陸沖南部海溝寄りの領域は宮城県沖の領域と連動して破壊することが考慮されていた。一方、この地域で過去に大津波を起こした地震の発生が指摘されていたが、それを反映させた長期評価は審議中であり⁴⁾、地震発生時点で図-1のセグメントを超えた破壊は想定地震に反映されていなかった。

東北地方太平洋沖地震のおおよその破壊領域を図-1に重ね書きした。地震発生前の長期評価の想定をはるかに超え、宮城県沖の領域を含む複数のセグメントにまたがる長さ約500km、幅約200kmの領域が破壊した。ただ

し後述のとおり、全ての領域が一様に滑った訳ではなく、津波・地殻変動と強震動を引き起こした場所が空間的に全く異なる複雑な破壊であった。

3. 東北地方太平洋沖地震で観測された強震動

主な強震観測網では、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net⁵⁾、気象庁および自治体⁶⁾、港湾空港技術研究所⁷⁾、国総研⁸⁾等で東北地方太平洋沖地震の強震記録が得られている。なお、仙台市では東北大学⁹⁾と東北工業大学¹⁰⁾による観測でも記録が得られている。

上記のデータを用いて、計測震度(JMAI)・水平最大加速度(PGAH)・水平最大速度(PGVH)を求め、さらに等価周期(Teq)を次式で算定した。

$$T_{eq} = 2\pi (PGVH/PGAH)$$

その際、最大速度はカットオフ周期10sのローカットフィルタをかけた加速度積分波形の最大値で求めている。

上記の機関で観測された主な記録の諸元を表-2に示

表-1 地震諸元¹⁾と被害概要²⁾
Table 1 Summaries of the 2011 Tohoku earthquake

発生時刻	平成23年3月11日14時46分18.1秒
震源位置	三陸沖 (北緯38度06.2分, 東経142度51.6分, 深さ24km)
規模	モーメントマグニチュードMw=9.0
震度7	宮城県(栗原市)
震度6強	宮城・福島・茨城・栃木県
震度6弱	岩手・宮城・福島・茨城・栃木・群馬・埼玉・千葉県
津波高さ	相馬9.3m以上, 等 (検潮所データ欠損前最大値)
人的被害	死者18,131人, 行方不明者2,829人, 負傷者6,194人
住家被害	全壊129,391棟, 半壊265,096棟, 一部破損743,298棟

* 連絡著者 / corresponding author

a) 東北大学・災害科学国際研究所

International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University
〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11-1103
Aoba-yama, 6-6-11-1103, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

す。ここで、自治体の観測点で波形が残されていない地点については加速度最大値（3成分のうちの最大値）のみを、計測震度算定用の3成分合成加速度最大値PGA3しか残されていないものについては、東北地方太平洋沖地震の記録から求めた換算式¹⁾

$$PGAH = 0.9141 \cdot PGA3$$

図－1 長期評価のセグメント³⁾に主な破壊領域を加筆

Fig.1 Fault-segment map of long-term evaluation with major rupture area of the 2011 Tohoku earthquake

による水平最大加速度の換算値PGAHを示した。

この表から、MYG004（宮城県栗原市築館）、TCGH16（栃木県芳賀町）、CCHG（仙台市若林区荒井）の3ヶ所で震度7が観測されていること、最大加速度では、上記MYG004と宮城県川崎町で2.7Gが観測されているに加え、宮城県・福島県・茨城県・栃木県で1Gを超える値が観測されていることがわかる。

ただし、MYG004については崖上に位置することによる増幅の影響¹²⁾に加え、地震計の浮き上がりの可能性が指摘されており¹³⁾、観測値をそのままその場所の地動を表すものとして扱ってよいか検討が必要な地点もある。

3.1 強震動指標の分布

図－2に計測震度値の分布を示す。K-NETの主な地点のNS方向の加速度波形も図中に示すと同時に、表層地質区分図¹⁴⁾も併せて示している。また、図－3に水平最大加速度・水平最大速度と等価周期の分布を示す。これらの図表から下記の傾向が読み取れる。

- ・加速度波形は福島県北部以北では大きく2つの波群で構成されているが、それより南部では1つの波群になっている。なお、それぞれに対応した複数の強震動生成域が推定されている¹⁵⁾。
- ・最大速度は概ね100cm/s内に収まっている。50cm/s以上は主に宮城県中央部と関東平野の一部（表層地質区分図との対応ではいずれも第4紀層分布域）で観測されており、表層地盤による増幅の影響が表れている

表－2 2011年東北地方太平洋沖地震の主な記録（計測震度順）

Table 2 List of ground motion records during the 2011 Tohoku earthquake (order of JMA intensity)

No	機関	観測点	場所	計測震度	最大加速度 (cm/s/s)	最大速度 (cm/s)*2	等価周期 (s)
1	防災科研	MYG004	宮城県栗原市築館	6.6	2700	109	0.25
2	防災科研	TCGH16	栃木県芳賀町	6.5	1197	71	0.37
3	東北工業大学	smt.CCHG	仙台市若林区荒井	6.5	1074	115	0.60
4	防災科研	IBR003	茨城県日立市助川町	6.4	1598	69	0.27
5	防災科研	IBR013	茨城県鉾田市当間	6.4	1355	68	0.32
6	東北工業大学	smt.IWAK	仙台市宮城野区岩切	6.4	859	74	0.76
7	東北大学	dcr.009	仙台市泉区松森	6.4	821	83	0.64
8	防災科研	MYG013	仙台市宮城野区苦竹	6.3	1517	74	0.31
9	防災科研	TCG014	栃木県茂木町	6.3	1205	60	0.32
10	宮城県	石巻市桃生町	宮城県石巻市桃生町	6.3	901		
11	福島県	大熊町下野上*1	福島県大熊町下野上	6.3	843		
12	福島県	国見町藤田*1	福島県国見町藤田	6.3	568		
13	宮城県	宮城川崎町前川	宮城県川崎町前川	6.2	2692	62	0.05
14	福島県	天栄村下松本	福島県天栄村下松本	6.2	908	77	0.39
15	宮城県	大崎市田尻	宮城県大崎市田尻	6.2	854		
16	防災科研	IBRH11	茨城県岩瀬町	6.2	827	58	0.44
17	茨城県	那珂市瓜連	茨城県那珂市瓜連	6.2	723	80	0.70
18	国総研	8274102	気仙沼国道維持出張所	6.2	570	65	0.71
19	気象庁	4B9	大崎市古川三日町	6.2	550	80	0.91
20	宮城県	登米市米山町	宮城県登米市米山町	6.2	487	76	1.54
21	東北工業大学	smt.NAKI	仙台市泉区七北田	6.1	1853	73	0.09
22	防災科研	FKS016	福島県白河市新白河	6.1	1295	55	0.27
23	防災科研	TCG009	栃木県日光市今市	6.1	1186	46	0.25
24	防災科研	IBR005	茨城県笠間市石井	6.1	967	56	0.36
25	栃木県	高根沢町石末	栃木県高根沢町石末	6.1	874	66	0.39
26	防災科研	TCGH13	栃木県馬頭町	6.1	840	62	0.47
27	宮城県	栗原市高清水	宮城県栗原市高清水	6.1	821		
28	栃木県	大田原市湯津上	栃木県大田原市湯津上	6.1	691	65	0.62
29	福島県	新地町谷地小屋	福島県新地町谷地小屋	6.1	696	82	0.62
30	宮城県	名取市増田	宮城県名取市増田	6.1	655	105	0.69

*1 3成分合成加速度最大値PGA3から最大加速度PGAHにPGAH = 0.9141・PGA3で換算

*2 カットオフ周期10sで計算

図一 2 2011年東北地方太平洋沖地震の計測震度分布・加速度波形 (左) と表層地質図⁴⁾ (右)
Fig. 2 JMA intensity map with acceleration waveforms of the 2011 Tohoku earthquake (Left) ; geologic map (Right)

図一 3 2011年東北地方太平洋沖地震の最大加速度分布 (左)・最大速度分布 (中)・等価周期分布 (右)
Fig. 3 Maps of PGA(left), PGV(center), equivalent period(right) of the 2011 Tohoku earthquake

ものと思われる。

- ・太平洋岸では等価周期で0.5秒以下の値が広く分布しており、多くの地点で短周期が卓越していたと推定される。ただし宮城県中央部の平野や東京湾沿岸部などの沖積平野では周期1秒ないしそれ以上になっており、地盤による相違も大きい。

3.2 主な加速度記録とその特性

図-4は東北地方太平洋沖地震と過去の内陸地震被災域で観測された記録のPGAとPGVの関係である。2011/4/7の宮城県沖の地震(M7.1)及び川瀬¹⁶⁾による大被害生成レベル($PGA \geq 800 \text{ cm/s}^2$, $PGV \geq 100 \text{ cm/s}$)も記入している。この図から、東北地方太平洋沖地震では最大加速度は大きい、最大速度は過去の被災域の記録に達しないことがわかる。

図-5は、東北地方太平洋沖地震の記録と、過去の地震の甚大な被害域で観測された記録(例として、1995年兵庫県南部地震の鷹取及び2004年新潟県中越地震の川口町)について、擬似速度応答スペクトルを比較したものである。(a)では計測震度が大きな3地点について示しているが、鷹取及び川口町では低層建物の被害に影響が大きい周期1-2秒¹⁷⁾が卓越しているのに対して、東北地方太平洋沖地震の記録は短周期は大きいものの周期1秒付近の周期帯の振幅は小さい。

一方(b)は宮城県大崎平野の中心部、古川地区に位置するK-NET MYG006, 気象庁4B9, 国総研8274202(大崎出張所)を比較したものである。周期1秒前後で鷹取・川口町に近づいており、こういった軟弱地盤の場所では過去の被災域で観測されたレベルに近い記録も観測されており、地盤による差異が非常に大きいことがわかる。

なお、2.7Gを観測したMYG004(築館)周辺ではほとんど被害がないが、古川では1995年兵庫県南部地震及び2004年新潟県中越地震の震源域での低層建物の被害率には達しないものの、建物被害も報告されている¹⁸⁾。

4. 経験式との対応

東北地方太平洋沖地震の最大加速度、最大速度を司・翠川¹⁹⁾の経験式と比較した結果を図-6および図-7に示す。断層面がおおよそ500km×200kmにも達することから、経験式を適用する場合は距離の定義により結果が大きく異なる。断層面からの距離の取り方は図-8に示すように複数あるが²⁰⁾、ここでは断層面からの最短距離Rrupと等価震源距離Xeq(断層面を観測点が受けるエネルギーが等価な点震源に置換したときの距離)両方の結果を示し、比較のため2003年十勝沖地震(M8.2)の観測値を重ね書きしている。

経験式を適用する際には、マグニチュードはMw9.0(十勝沖地震はMw8.2)とし、地盤は平均的なもの(補正なし)とした。東北地方太平洋沖地震に対しては、鈴木ほか²¹⁾の断層面(図-6右図)により最短距離を計算し、川辺ほか¹⁵⁾の強震動生成域(図-7右図)から放出される短周期レベルで重みづけして等価震源距離を求めた。なお、他の震源モデルを用いても結果に大きな相違はない。十勝沖地震に対しては、Hondaほか²²⁾の震源モデルから最短距離および等価震源距離を計算している。

この図から以下のことがわかる。

- 1) 断層最短距離の場合、同じ距離で東北地方太平洋沖地震と2003年十勝沖地震の観測値はほぼ等しくなり、経験式でM9.0として評価した場合は過大評価となる。

図-4 東北地方太平洋沖地震と過去の内陸地震被災域のPGA-PGV関係

Fig. 4 PGA-PGV relationships for the records of the 2011 Tohoku earthquake, 4/7 aftershock, and for the records observed in the disastrous area of the past inland earthquakes.

図－5 東北地方太平洋沖地震と過去の内地地震被災域擬似速度応答スペクトル

(a) 計測震度が大きい地点 (b) 古川市街地

Fig. 5 Pseudo-velocity response spectra for the records observed during the 2011 Tohoku earthquake and observed in the disastrous area of the past inland earthquakes.

(a) Sites with large JMA intensity, (b) Furukawa area of Ohsaki city, Miyagi prefecture.

図－6 東北地方太平洋沖地震PGA, PGVと経験式との比較 (断層最短距離)

Fig. 6 Observed and predicted PGA, PGV for the 2011 Tohoku earthquake records (fault distance)

2) 一方等価震源距離の場合は、東北地方太平洋沖地震の観測値は十勝沖地震よりも系統的に大きく、経験式でM9.0として評価した場合は、観測値のばらつき

きは大きいものの、概ね観測値と整合する。

これは、図－8に示すように強震動を生成した領域は断層面全体のごく一部であるにもかかわらず、最短距離

図－7 東北地方太平洋沖地震PGA, PGVと経験式との比較（等価震源距離）

Fig. 7 Observed and predicted PGA, PGV for the 2011 Tohoku earthquake records (equivalent hypocentral distance)

図－8 断層面からの距離の定義

Fig. 8 Variation of source-to-site distances

では断層面のうち観測点に最も近い位置を強震動に寄与する位置として選んでいるためと思われる。等価震源距離の場合は強震動生成域で重みづけして距離を求めており、算定に手間はかかるものの上記のような問題は原理的に生じない。

西村ほか²³⁾も同様の結果を得ており、東北地方太平洋沖地震の強震動強さは、距離に注意すれば、既存の経験式と整合することがわかる。ただし、このような巨大地震は始めて観測されたので、経験式においてマグニチュード、距離とも外挿になっている（司・翠川のデー

図－9 東北地方太平洋沖地震（M9.0）とM7クラスの地震動波形と周期特性
Fig.9 Comparison of acceleration waveforms and their spectra
between the 2011 Tohoku earthquake (M9.0) and M7-class earthquakes

タ範囲は $M \leq 8.3$, 距離＜概ね300km）ことから、今後より詳細な検討が必要と思われる。

4. M7クラスの強震動との比較

上記の通り、短周期卓越で加速度が大きめという傾向はあるが、それを除けば強震動振幅としては特に大きかった訳ではない。ではM9クラスとしての地震動の特徴はどこに表れているのであろうか。

図－9は宮城県山本町のKiK-net地中観測点（MYGH10）で、2005年、2011年の宮城県沖の地震（M7.2, M7.1）と東北地方太平洋沖地震の加速度波形と変位フーリエスペクトルを比較したものである。破壊領域自体は数100 kmに及んだため、東北地方太平洋沖地震の震動継続時間はM7クラスに比べて非常に長くなっているが、加速度最大値はそれほど大きくなっている訳ではない。

次にM7クラスとスペクトルを比較する。一般に地震規模が大きくなるとより長周期が卓越するが、今回の地震の場合は周期帯域別に地震動の生成域も異なる。ごく長周期（10s以上）では海溝沿いの浅部の寄与が大きく（図－6右図）²¹⁾、50mにも達するすべり量が周期10s以上のオーダー違いの振幅を生み出している。一方周期10sより短周期（いわゆる強震動の帯域）ではより陸域に近い部分から強震動が生成されているが（図－7右図）¹⁵⁾、こちらはごく長周期ほどの差は生じていない。

今回の地震はこのように周期帯域により2つの異なる

側面を持った地震であり、M9クラスとしての地震動の特徴は、主に通常の強震動の周期帯から外れた周期10s以上での卓越と、非常に長い継続時間として現れている。

5. まとめ

東北地方太平洋沖地震で観測された強震記録の概要を紹介した。主な特徴としては、1) 短周期卓越型で広域に渡る大加速度、2) 地盤による相違、3) 非常に長い継続時間があげられる。このうち2) 3) については他のM9クラスの地震でも共通するものと思われるが、宮城県沖で起きる地震の強震動は短周期が卓越することは以前から知られており^{例えば24)}、1) についてはこの地域の特徴である可能性もある。今後より詳しく成因を検討していく必要があると思われる。

謝辞

防災科学技術研究所、気象庁、自治体、港湾空港技術研究所、国土技術政策総合研究所、東北工業大学の記録を使用し、作図にはGMT²⁵⁾を利用しました。

引用文献

- 1) 気象庁（2011）：災害時地震・津波速報平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震。
- 2) 消防庁（2012）：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）について（第146報）。
- 3) 地震調査研究推進本部（2009）：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。
- 4) 地震調査研究推進本部 (2012)：今後の地震動ハザード評価に関する検討～2011年・2012年における検討結果～。
 - 5) <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
 - 6) 気象庁 (2012)：加速度データ (95型震度計波形データ) 2011年，気象業務支援センター。
 - 7) <http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>
 - 8) <http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/index.htm>
 - 9) Susumu Ohno, Masato Motosaka, Akihiro Shibayama, Kazuya Mitsui (2012)：Strong-motion characteristics in Sendai city during the 2011 Tohoku earthquakes, Japan, Proc. of 15 WCEE, Paper No. 3631.
 - 10) 神山眞・松川忠司・穴澤正宏 (2011)：2011年東北地方太平洋沖地震における東北工業大学アレー強震システムSmall-Titanによる強震記録について，東北工業大学強震観測グループ，2011年4月16日。
 - 11) 大野晋 (2011)：東北地方太平洋沖地震とその余震における強震動分布，日本地震工学会・大会－2011梗概集，pp. 490－491.
 - 12) 山中浩明・津野靖士・地元孝輔・加藤圭・ヤダブダカル・山田伸之・福元俊一・江藤公信 (2011)：2011年東北地方太平洋沖地震で震度7が観測された地域での余震及び微動観測，日本地震学会講演予稿集，pp. 2－31.
 - 13) 源栄正人・Tsoggerel Tsamba (2011)：Investigation of High Acceleration Records at K-NET Tsukidate Station During the 2011 off the Pacific Coast Tohoku Earthquake, 日本地震工学会大会－2011梗概集，pp. 24－25.
 - 14) 若松加寿江・松岡昌志 (著)，杉浦正美 (著)，久保純子 (著)，長谷川浩一 (著) (2005)：日本の地形・地盤デジタルマップ，東京大学出版会。
 - 15) 川辺秀憲・釜江克宏・上林宏敏 (2011)：2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル，日本地震学会講演予稿集 2011年度秋季大会，B22－05.
 - 16) 川瀬博 (2001)：建物の地震被害の予測とその軽減への展望，地学雑誌，110, pp. 885－899.
 - 17) 境有紀・額綱一起・神野達夫 (2002)：建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案，日本建築学会構造系論文集，No. 555, pp. 85－91.
 - 18) 日本建築学会 (2011)：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報。
 - 19) 司宏俊・翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，523, 63－70, 1999.
 - 20) 日本建築学会 (編) (2005)：地盤震動—現象と理論。
 - 21) 鈴木亘・青井真・関口春子 (2011)：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/Tohoku_Taiheiyo_20110311/inversion/.
 - 22) Honda, R., S. Aoi, N. Morikawa, H. Sekiguchi, T. Kunugi and H. Fujiwara (2004)：Ground motion and rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net, Earth Planets Space, 56, pp. 317－322.
 - 23) 西村利光・堀家正則・宮腰研 (2011)：2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の距離減衰特性と距離指標の関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，21042.
 - 24) Ohno, S. (2008)：Development of a statistical strong-motion evaluation method considering regional variation of source and path effects in the Tohoku region, Japan, 14th World Conf. Earthq. Eng., 02－0072.
 - 25) Wessel, P. and W. H. F. Smith (1991)：Free software helps map and display data, EOS Trans. AGU, 72, 441.
- (原稿受付2012年10月15日，原稿受理2013年1月4日)