

2011年東北地方太平洋沖地震の強震動

切刀 卓*・青井 真*・鈴木 亘*・中村洋光**・森川信之**・藤原広行**

Strong Motions of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake

Takashi KUNUGI*, Shin AOI*, Wataru SUZUKI*,
Hiromitsu NAKAMURA**, Nobuyuki MORIKAWA**, and Hiroyuki FUJIWARA**

**Monitoring and Forecast Research Department,*

***Social System Research Department,*

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
kunugi@bosai.go.jp

Abstract

The 2011 Tohoku-Oki, Japan, earthquake (March 11, 2011, 14:46 JST; 38.1N, 142.9E, depth 24 km, M9.0 by the Japan Meteorological Agency) is the largest instrumentally recorded earthquake in Japan to date. Seismic intensity 7 was observed at Kurihara city, Miyagi prefecture. Moreover seismic intensities larger than 6 upper were observed at 24 cities, towns and villages of Miyagi, Fukushima, Ibaraki and Tochigi prefectures. The vibration from this devastating earthquake was felt almost all over Japan. The earthquake generated a huge tsunami, which caused catastrophic damages to the Pacific coast of the Honshu Island, particularly to Iwate, Miyagi, and Fukushima prefectures. The National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) operates two nation-wide strong-motion observation networks K-NET and KiK-net, which succeeded to record the strong-motion accelerograms at more than one thousand stations almost all over Japan. This is the first M9-class earthquake that is closely recorded by a dense seismic network. The earthquake and the associated tsunami directly affected facilities and operation of K-NET and KiK-net. The tsunami damaged 5 stations in Iwate or Miyagi prefecture. The data center of K-NET and KiK-net in Tsukuba, Ibaraki prefecture was also damaged by the strong motion of main shock and major aftershocks, and a blackout lasted for almost 1 day. The latest dataset consisted of accelerograms from 1,223 stations including 20 stations where peak ground accelerations (PGAs) above 1g (980 gals) were recorded. The largest PGA of 2,933 gals was observed at the K-NET Tsukidate (MYG004).

Key words : 2011 Tohoku-Oki earthquake, M9- class earthquake, Strong motion, K-NET, KiK-net

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に発生した平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震は、日本の観測史上最大となるマグニチュード9.0を記録した海溝型の超巨大地震であった。この地震にともない宮城県栗原市で震度7が観測されたのをはじめ、宮城県、福島県、茨城県、栃木県の4県37市町村にも及ぶ地域で震度6強が観測された。全長500 kmにも及ぶ長大な断層運動に伴う、津波、地震動、地盤の液状化、地滑りなどによりもたらされた被害は、

死者16,079人、行方不明者3,499人、全壊120,248棟、半壊189,778棟、一部破損616,055棟、床上浸水10,971棟、床下浸水13,677棟(消防庁災害対策本部、平成23年11月15日現在¹⁾)と、関東大震災(大正12年)に次ぎ、明治三陸地震(明治29年)に匹敵する甚大なものである。世界的に見てもマグニチュード9を超える超巨大地震は、1952年に発生したカムチャッカ地震(Mw9.0)から今回の地震までおよそ60年間で5回しか発生していない。今回の地震は近代的な観測網により詳細な強震記録が得られた史上

* 独立行政法人 防災科学技術研究所 観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット

** 独立行政法人 防災科学技術研究所 社会防災システム研究領域 災害リスク研究ユニット

初めての超巨大地震である。本稿では、防災科学技術研究所(防災科研)の運用する強震観測網(K-NET・KiK-net)^{2, 3)}で観測された強震動について概要を報告する。

2. 地震の概要

平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震は、牡鹿半島の東南東約 130 km(北緯 38.1 度, 東経 142.9 度, 深さ 24 km, 気象庁発表)の三陸沖を震源(破壊開始点)とする。気象庁より地震直後に発表されたマグニチュードは, M7.9 であったが, 最終的には M9.0 に修正された。地震のメカニズムが低角逆断層であることや, 多数の余震が日本海溝に沈み込む太平洋プレートの上面で発生していることから, 太平洋プレートと北米プレートの境界で発生した海溝型地震とされている。また, K-NET および KiK-net の強震記録を用いた震源過程のインバージョン解析の結果から, 断層の破壊は岩手県沖から茨城県沖にかけての約 400 km にわたる広大な領域に及び, 150 秒にわたって断層面の破壊が進行したことが明らかになっている。地震の概要と震源過程については, 本調査報告内の詳報^{4, 5)}も参考にされたい。

3. 観測された強震動の特徴

この地震に伴い, 防災科研が全国に展開する K-NET および KiK-net ではそれぞれ 698 点, 525 点の合計 1,223 観測点の強震記録を公開している(平成 23 年 12 月 4 日現在)。この公開観測点数は K-NET・KiK-net の運用が始まって以来の最大である。図 1, 図 2, 図 3 に観測された強震記録に基づく最大加速度, 最大速度, 計測震度の各分布図を示す。

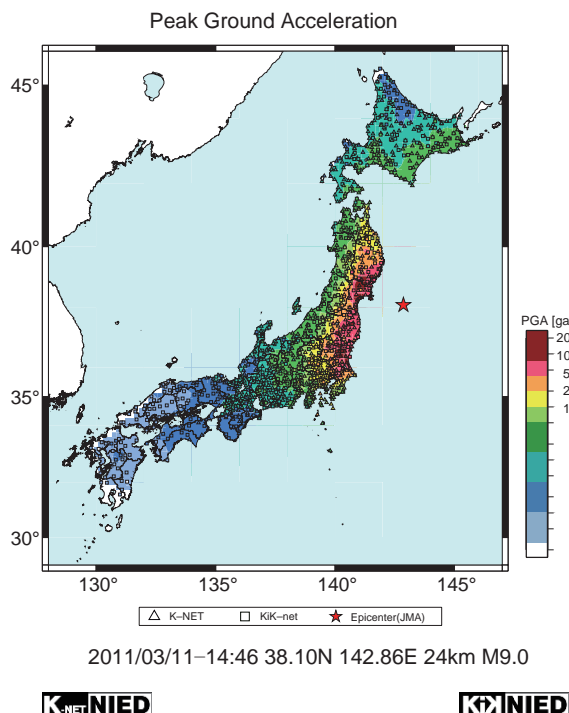


図 1 強震観測網(△: K-NET, □: KiK-net)により観測された地表における最大加速度の分布
Fig. 1 Peak ground acceleration map derived from strong-motion records of K-NET and KiK-net.

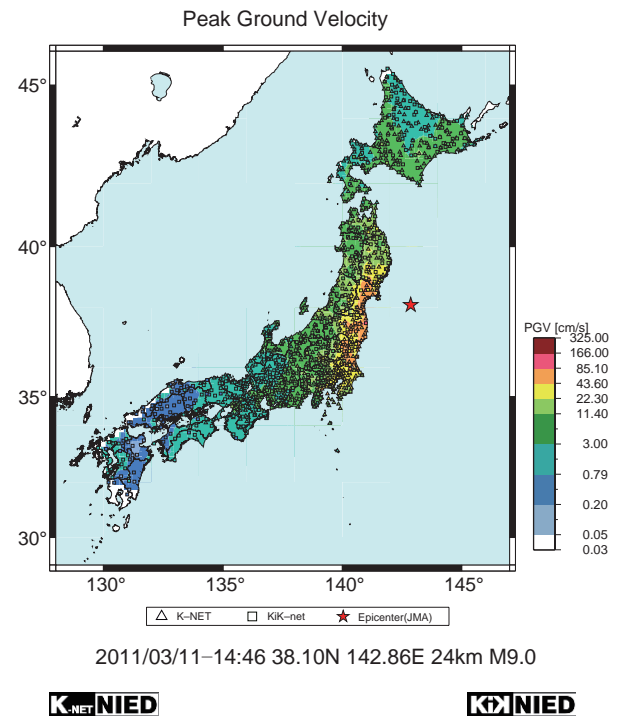


図 2 強震観測網(△: K-NET, □: KiK-net)により観測された地表における最大速度の分布
Fig. 2 Peak ground velocity map derived from strong-motion records of K-NET and KiK-net.

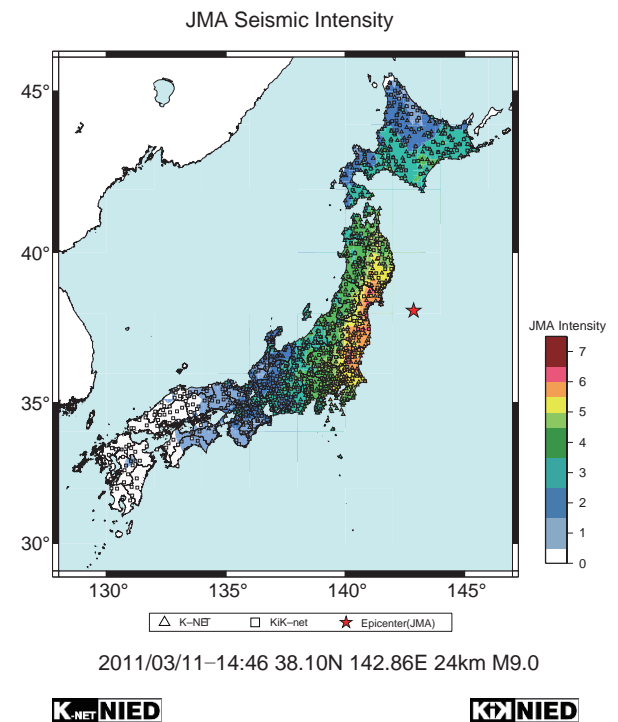


図 3 強震観測網(△: K-NET, □: KiK-net)により観測された地表における計測震度の分布
Fig. 3 Seismic intensity map derived from strong-motion records of K-NET and KiK-net.

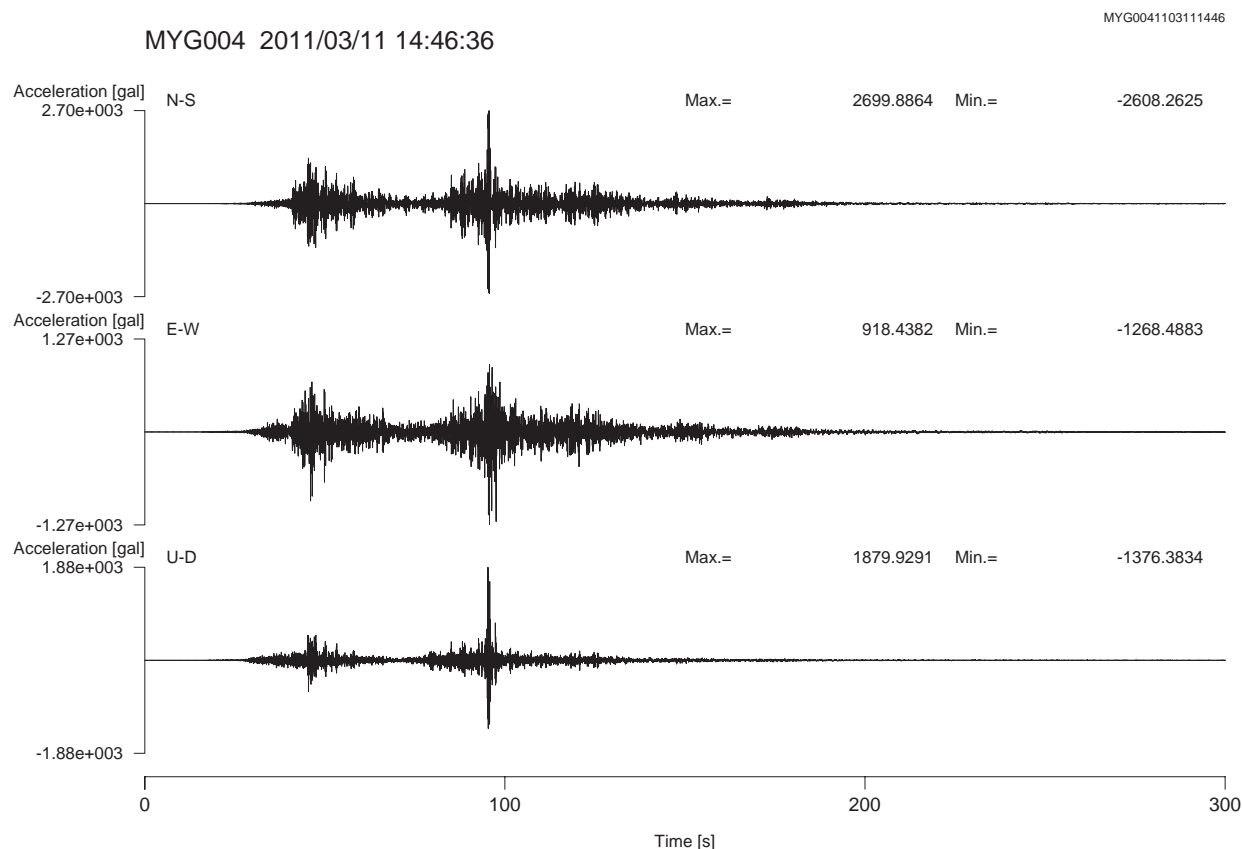


図 4 K-NET 築館 (MYG004) の加速度記録

Fig. 4 Strong-motion accelerograms recorded at K-NET Tsukidate (MYG004).

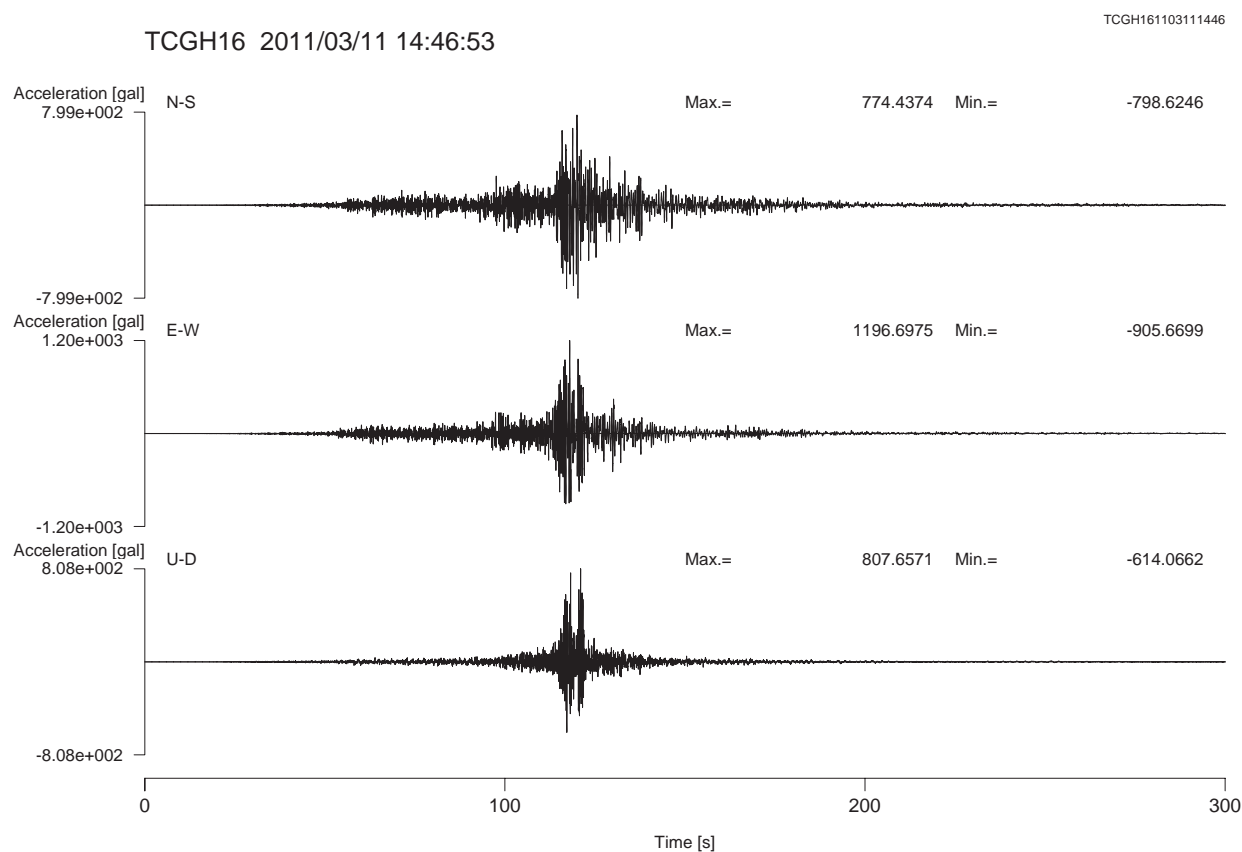


図 5 KiK-net 芳賀 (TCGH16) の地表加速度記録

Fig. 5 Strong-motion accelerograms recorded at KiK-net Haga (TCGH16).

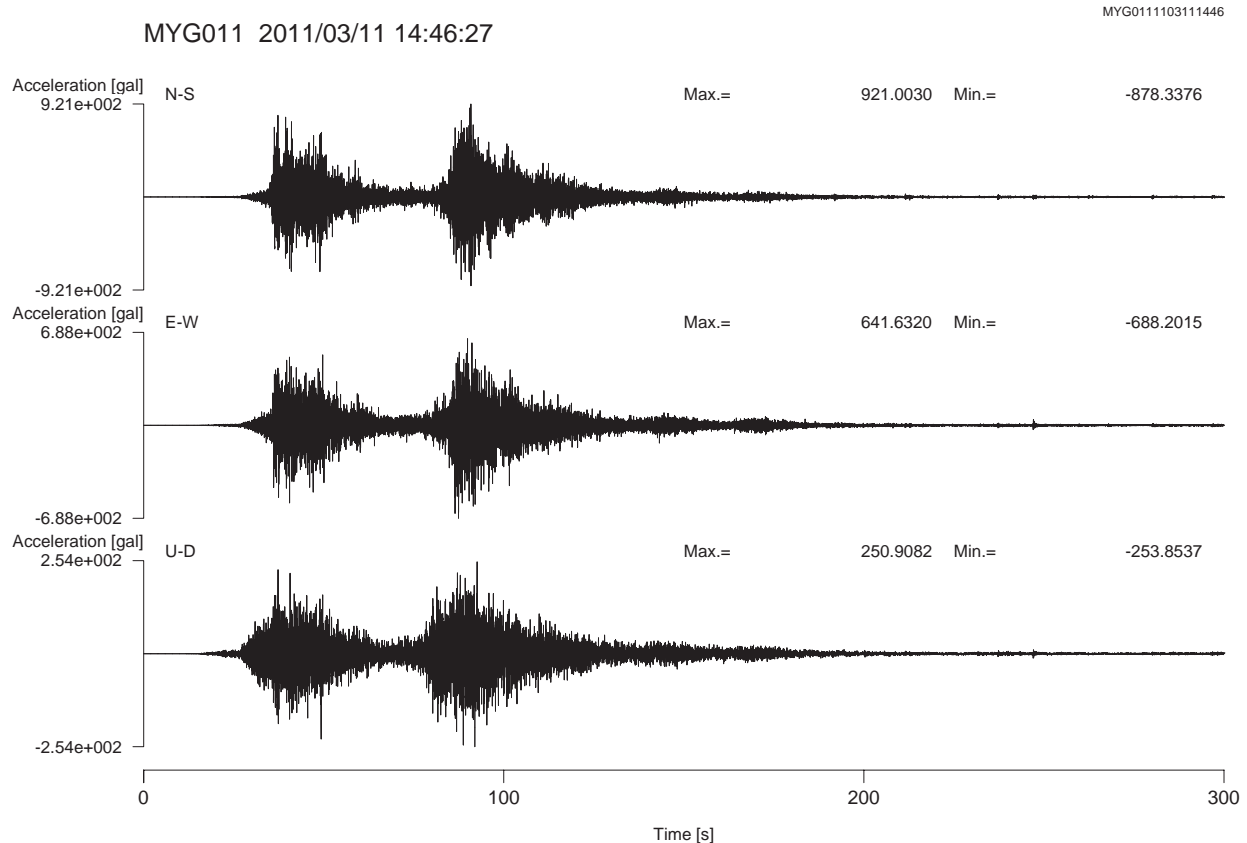


図6 K-NET 牡鹿(MYG011)の加速度記録

Fig. 6 Strong-motion accelerograms recorded at K-NET Oshika (MYG011).

観測された最大の加速度（3成分合成値）はK-NET 築館（MYG004）で観測された2,933 galであった。なお、今回の地震で震度7を観測した宮城県栗原市築館の震度観測点はこのK-NET 築館観測点である（強震記録：図4）。また、KiK-net 芳賀（TCGH16）は震度観測点ではないが、強震記録から計算された計測震度は震度7相当であった（強震記録：図5）。震源（破壊開始点）から最も近い観測点はK-NET 牡鹿（MYG011）で震央距離は約121 kmである（強震記録：図6）。今回の地震では、北海道から九州に至る広い範囲で強震記録が得られ、岩手県から千葉県にかけての20にもおよぶ観測点で1 g（980 gal）を超える加速度が記録された（表1）。震度6強を記録した地域は宮城県、福島県、茨城県、栃木県にわたる約300 kmの範囲にも及んでいる。図7には、観測された最大加速度（PGA）および最大速度（PGV）と距離減衰式の比較を示した。マグニチュード9まで適用できる距離減衰式はこれまでに提案されていないため、司・翠川（1999）⁶⁾の関係式を外挿して表示しているので注意されたい。図8は、概ね南北に並ぶ強震記録の群表示である。複数の波群が伝播していく様子が認められ、本地震の震源過程が複雑であることを示している。今回の地震の特徴の1つとして、地震動の継続時間が長かったことが挙げられている⁷⁾。この特徴は、震度のリアルタイム演算法⁸⁾により0.01秒毎に計算された震度の時間変化（図9）にもあらわれている。震源に比較

表1 1 g（980 gal）以上の最大加速度を記録したK-NET・KiK-net 観測点

Table 1 List of K-NET and KiK-net stations where PGAs above 1 g was recorded.

	コード	観測点名	PGA(gal)	PGV(cm/s)	計測震度
1	MYG004	築館	2933	107	6.6
2	MYG012	塩竈	2019	64	6.0
3	IBR003	日立	1845	74	6.4
4	MYG013	仙台	1808	82	6.3
5	IBR013	鉾田	1762	70	6.4
6	TCG009	今市	1444	47	6.2
7	FKS016	白河	1425	63	6.1
8	FKSH10	西郷	1335	41	6.0
9	IBR004	大宮	1312	47	6.0
10	TCGH16	芳賀	1305	82	6.5
11	TCG014	茂木	1291	66	6.3
12	FKS010	広野	1240	65	5.9
13	IWT010	一関	1226	55	5.9
14	IBRH11	岩瀬	1224	64	6.2
15	MYGH10	山元	1137	62	6.0
16	FKS018	郡山	1110	53	5.9
17	FKS008	船引	1069	43	5.8
18	IBRH15	御前山	1062	36	5.7
19	CHB007	佐倉	1054	32	5.5
20	IBR005	笠間	996	59	6.1

距離減衰式と観測された値との比較

2011/03/11 14:46 Depth=24km(JMA), Mw=9.0(JMA)

----- Si & Midorikawa (1999) inter-plate

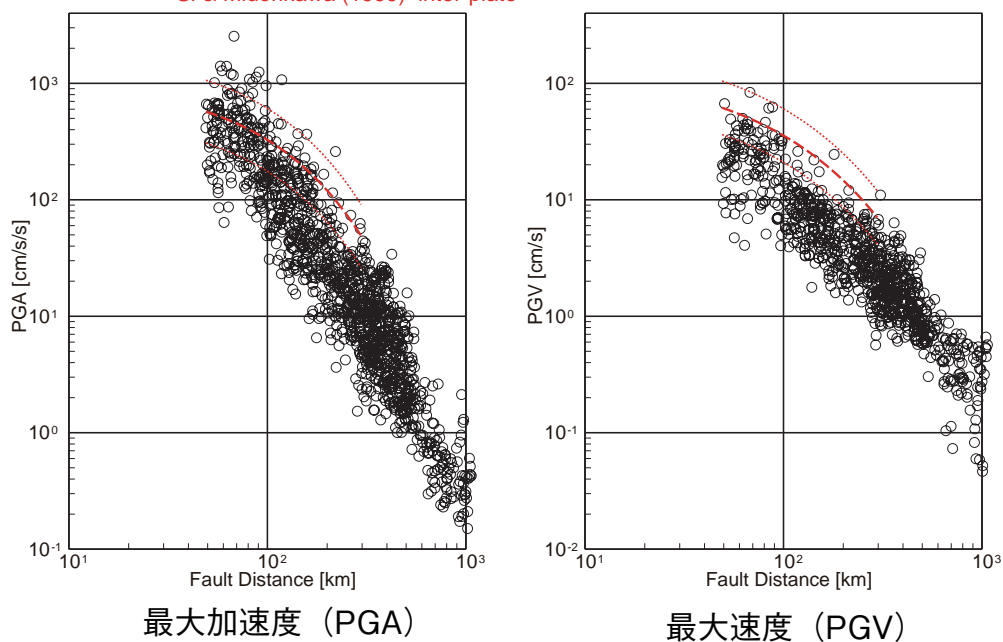


図7 最大加速度および最大速度の観測値と距離減衰式(左図は地表における最大加速度, 右図は S 波速度が 600 m/s の工学的基盤相当に変換した最大速度を示した).

Fig. 7 The observed PGA and PGV versus the distance from the fault. PGVs are converted from the observed velocities on the ground surface into those on a stiff soil site, where V_{s30} is 600 m/s.

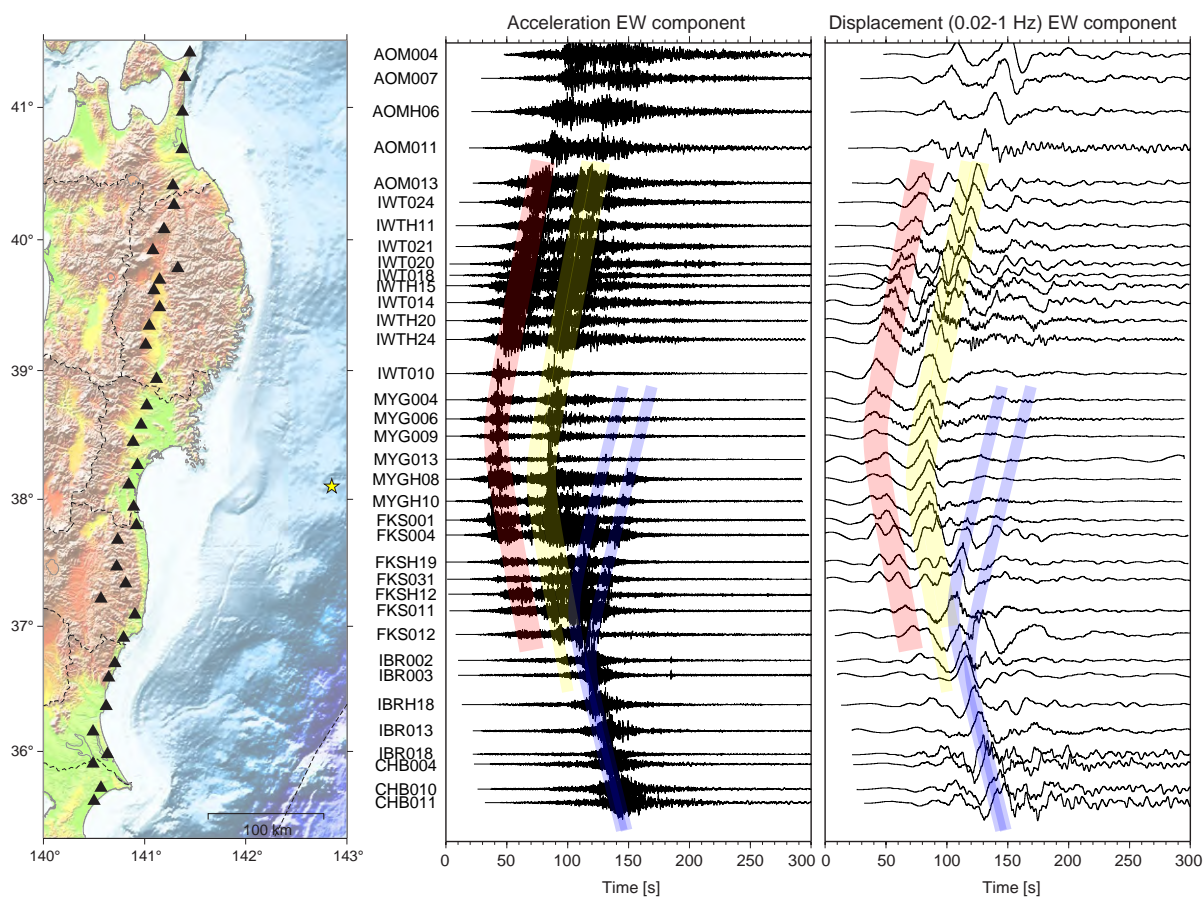


図8 強震記録の群表示(東西動)

Fig. 8 Record sections of normalized acceleration and displacement waveforms ordered by latitude.

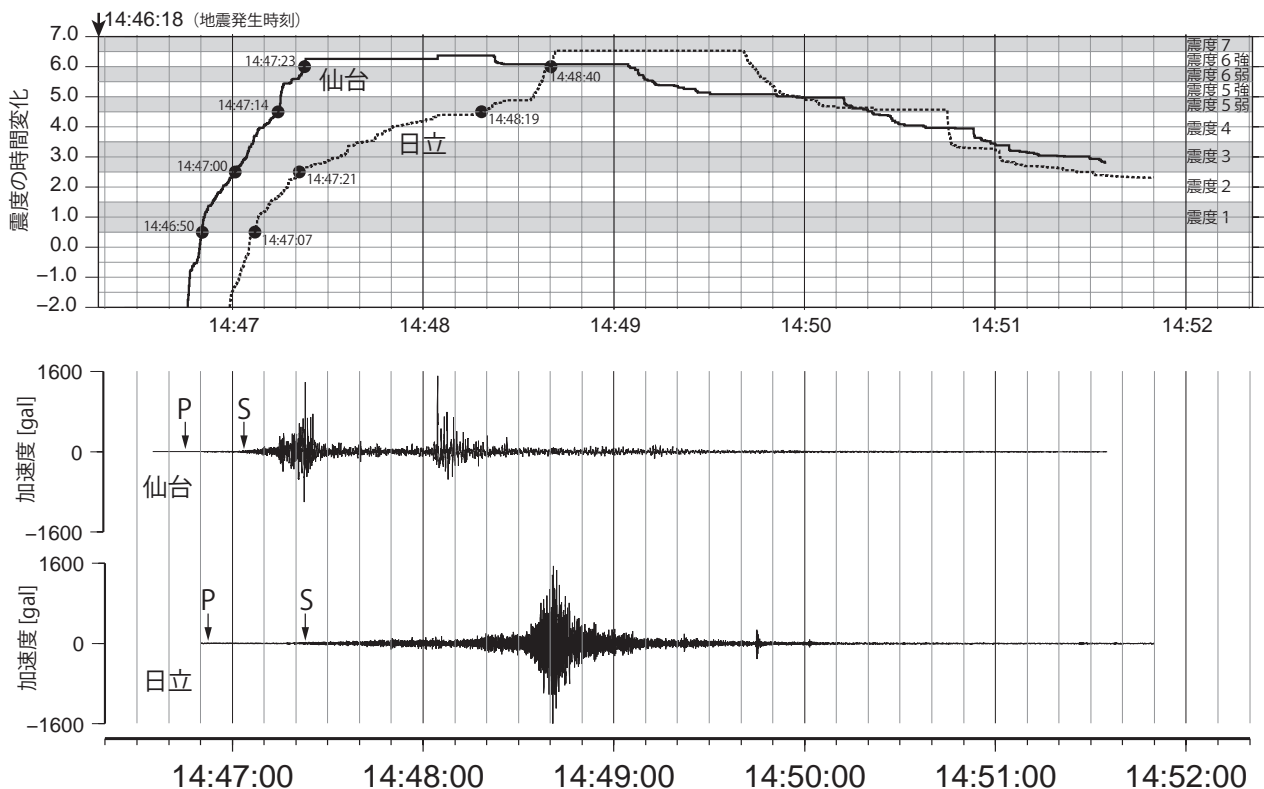


図9 K-NET 仙台(MYG013)およびK-NET 日立(IBR003)における震度の時間変化および南北動の加速度記録
 Fig. 9 Real-time seismic intensities and accelerograms of K-NET Sendai (MYG013) and K-NET Hitachi (IBR003).

的に近い K-NET 仙台(MYG013, 震央距離 170 km)では、震度 1 で揺れ始めてから 6 強に達するまでに約 30 秒の時間がある。一方、より震源から離れた K-NET 日立(IBR003, 震央距離約 260 km)におけるその時間は 1 分以上に及び、さらに、震度 5 弱以上の揺れが 1 分間以上にわたって継続している様子がわかる。関東平野では、巨大地震の発生にともない、長周期地震動が発生し数秒程度の固有周期を持つ長大構造物に被害をもたらすことが懸念されていた。今回の地震では石油タンクのスロッシング等の被害をともなったが⁹⁾、地震の規模が超巨大である割には発生した長周期地震動は小さいとされている¹⁰⁾。図 10、図 11 には K-NET 新宿(TKY007), K-NET 千葉(CHB009)で観測された長周期地震動(加速度記録を速度に変換)を示した。

4. 強震観測施設等の被害

今回の地震では、K-NET および KiK-net 観測データの受信、処理、公開を行っている防災科研本所(茨城県つくば市)においても震度 6 弱が記録され、地震直後に発生した停電などの影響で、データセンターの機能は地震発生約 30 分後に停止した。翌日には電力が復帰し、システムの復旧作業が開始されたが、計算機の故障や安定的な給電が確保されていないなどの要因から、数日にわたりセンター機能の運用に影響があった。また、岩手県と宮城県の計 5 観測点、K-NET 田老(IWT004)、山田

(IWT006)、北上(MYG008)、KiK-net 仙台(MYGH01)、志津川(MYGH12)、においては津波で観測施設自体が流失するなどの直接的な被害を受けた(写真 1, 2, 3, 4, 5)。加えて、東北地方を中心とする多くの観測点においては通信回線断や停電による影響でデータの取得が一時的に不可能になった。K-NET および KiK-net の観測点に設置されている機器は蓄電池で 1 週間程度観測を継続する能力を持っているため、地震直後のデータ回収はできなかったものの停電を直接の原因として本震記録が収録不能となることはなかった。通信の途絶によりデータが回収できないまま津波により流失した観測点を除けば、福島第一原子力発電所周辺の立ち入り制限区域内(2011 年 11 月末現在)に設置されている K-NET 大熊(FKS007)以外全てのデータが回収されている。強震計からのデータ受信が途中で途絶したことから、3 月 15 日に行った初回の公開データでは、システム停止前までに回収が完了していた 385 地点のものにとどまった。その後データ回収が進むとともに公開データを 4 回更新し、本稿執筆時において最新のデータセットは 9 月 15 日に公開した 1,223 地点の強震記録からなる。最終的なデータの回収率は 99 % を超えたものの、地震直後の自動処理によるデータ回収率は 3 割程度に過ぎず、大災害を伴う地震発生時という防災上最も強震データが重要な状況下における観測継続の困難さがあらためて明らかになった。

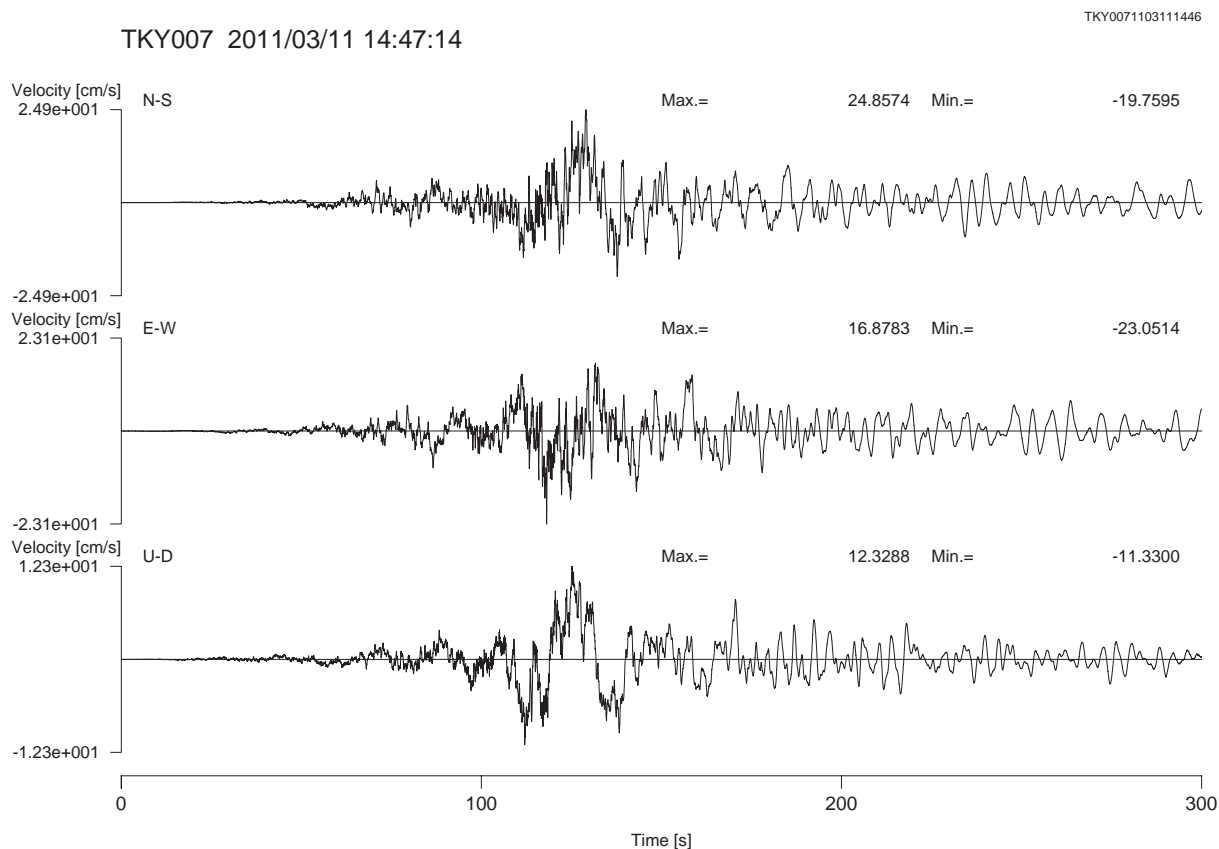


図 10 K-NET 新宿(TKY007)で観測された長周期地震動(地動速度)
 Fig. 10 Long period ground motion recorded at K-NET Shinjuku (TKY007).

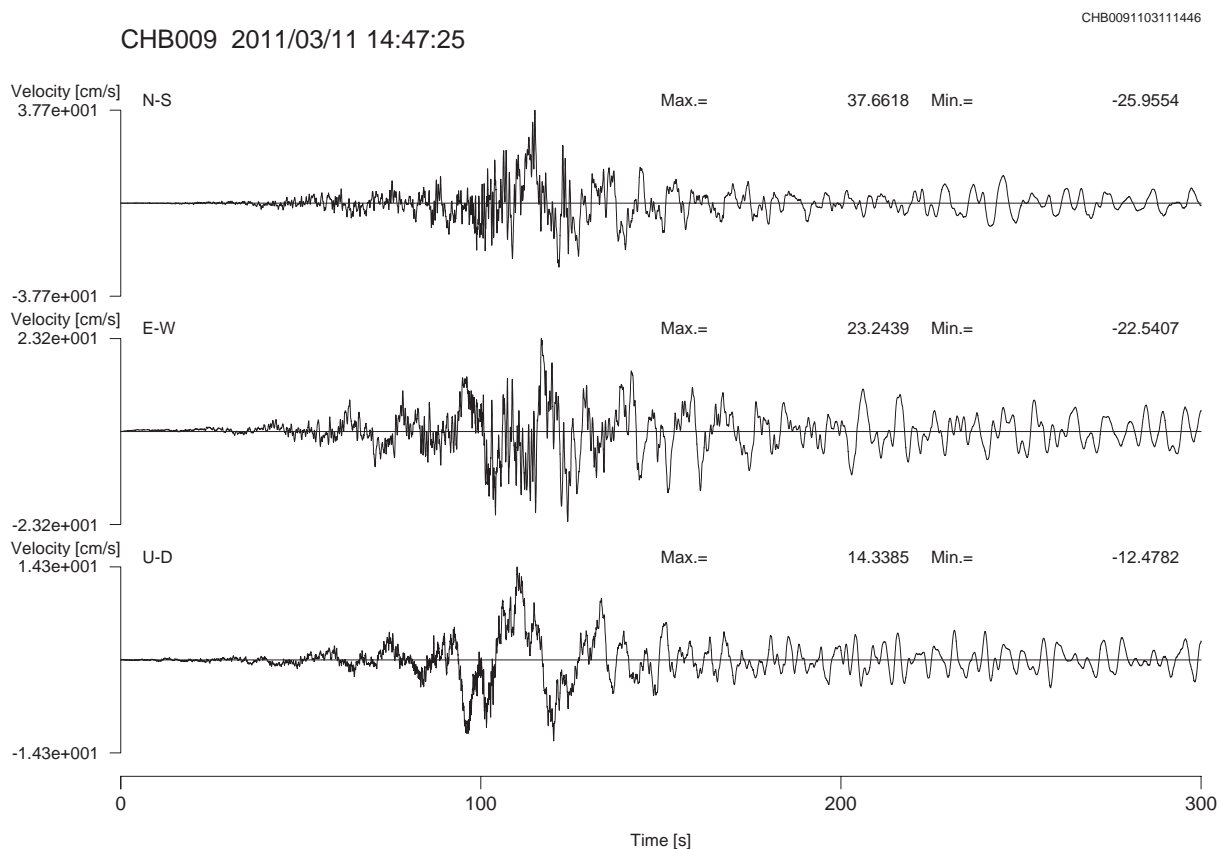


図 11 K-NET 千葉(CHB009)で観測された長周期地震動(地動速度)
 Fig. 11 Long period ground motion recorded at K-NET Chiba (CHB009).



写真1 K-NET 田老(IWT004)の津波による被害
Photo 1 K-NET Taro (IWT004) station damaged by tsunami.



写真2 K-NET 山田(IWT006)の津波による被害
Photo 2 K-NET Yamada (IWT006) station damaged by tsunami.



写真3 K-NET 北上(MYG008)の津波による被害
Photo 3 K-NET Kitakami (MYG008) station damaged by tsunami.



写真4 KiK-net 仙台(MYGH01)の津波による被害
Photo 4 KiK-net Sendai (MYGH01) station damaged by tsunami.

5. おわりに

本稿では、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の強震動について、K-NET・KiK-netで観測された強震記録に基づき概説した。強震動研究を行う上で必須となる強震記録は、大地震の発生が希であることから、収録の機会は元来低い。このような中、日本においては、阪神淡路大震災(平成7年)を教訓として、全国規模の強震観測網であるK-NETおよびKiK-netが整備され、強震記録が着実に蓄積されつつあった。地球規模で見ても、マグニチュード9を超える超巨大地震の発生は、地震の計器観測が始まって以来数回を数えるのみであり、今回の地震が近代的な観測網により詳細な強震記録が得られた史上初めての超巨大地震となった。K-NETおよびKiK-netでは、複数の観測施設とデータセンターが被災し、津波による観測施設の破壊により一部のデータを失いながらも、本震の最終的なデータ回収率は99%を超えた。これらの記録が将来の地震および津波防災の強化に役立つことを切に願う。



写真5 KiK-net 志津川(MYGH12)の津波による被害
Photo 5 KiK-net Shizugawa (MYGH12) station damaged by tsunami.

参考文献

- 1) 消防庁災害対策本部(2011)：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 141 報)，<<http://www.fdma.go.jp/bn/2011/detail/691.html>>，(参照 2011-11-28)。
- 2) Kinoshita, S. (1998)：Kyoshin net (K-NET), Seism. Res. Lett., **69**, 309-332.
- 3) Aoi, S., Kunugi, T., Nakamura, H., and Fujiwara, H. (2011)：Deployment of New Strong Motion Seismographs of K-NET and KiK-net, in Earthquake Data in Engineering Seismology, Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering, **14**, 167-186, Springer, Dordrecht, Netherlands, doi:10.1007/978-94-007-0152-6_12.
- 4) 岡田義光(2011)：2011 年東北地方太平洋沖地震の概要，防災科学技術研究所主要災害調査，No.**48**，1-14.
- 5) 鈴木 亘・青井 真・関口春子・切刀 卓(2011)：2011 年東北地方太平洋沖地震の電源破壊過程．防災科学技術研究所主要災害調査，No.**48**，53-62.
- 6) 司 宏俊・翠川三郎(1999)：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.
- 7) 青井 真・中村洋光・切刀 卓・鈴木 亘(2011)：東北地方太平洋沖地震の揺れの成長と強震モニタ．科学，**81**，1065-1067.
- 8) 切刀 卓・青井 真・中村洋光・藤原広行・森川信之(2008)：震度のリアルタイム演算法．地震 2，**60**，243-252.
- 9) 総務省消防庁消防大学校消防研究センター (2011)：(速報)コンビナート被害(平成 23 年 4 月 26 日報告)，<http://www.fri.go.jp/cgi-bin/hp/index.cgi?Page=hpd_view&ac1=JNN2&ac2=&ac3=740>，(参照 2011-11-28)。
- 10) 大川 出(2011)：長周期地震動．月刊建築技術，**741**，112-113.

(2011 年 12 月 5 日原稿受付，
2011 年 12 月 19 日改稿受付，
2011 年 12 月 19 日原稿受理)

要 旨

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に発生した平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震は、日本の観測史上最大となるマグニチュード 9.0 を記録した海溝型の超巨大地震であった。この地震にともない宮城県栗原市で震度 7 が観測されたのをはじめ、宮城県、福島県、茨城県、栃木県の 4 県 37 市町村にも及ぶ地域で震度 6 強が観測され、長大な断層運動に伴う、津波、地震動、地盤の液状化、地滑りなどにより甚大な被害がもたらされた。今回の地震は近代的な観測網により詳細な強震記録が得られた史上初めての超巨大地震である。この地震に伴い、防災科学技術研究所が全国に展開する K-NET および KiK-net では、それぞれ 698 点、525 点の合計 1,223 観測点の強震記録を公開している(平成 23 年 12 月 4 日現在)。観測された最大の加速度(3 成分合成値)は K-NET 築館(MYG004)で観測された 2,933 gal である。また、岩手県から千葉県にかけての 20 にもおよぶ観測点で 1 g (980 gal) を超える加速度が記録された。本稿では、K-NET および KiK-net で観測された強震動について概要を報告する。

キーワード：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震，超巨大地震，強震動，K-NET，KiK-net