

シリーズ「新・強震観測の最新情報」

「新・強震観測の最新情報」連載にあたって

強震動委員会委員長 干場充之

強震動委員会ニュースレター新連載担当班 中原 恒（班長）、植竹富一、古村孝志

今から20年ほど前のことになりますが、地震学会ニュースレター紙上で「強震観測の最新情報」という連載がありました。これは、日本や海外の強震観測の現状を会員内外に広く紹介する目的で、地震学会強震動委員会により企画されたものです。各観測網の関係者に執筆していただいた記事は、1998年1月号から2003年3月号までの約5年間、23回にわたってニュースレターに掲載されました。それらは以下のURLでご覧いただけます (<https://www.zisin.jp/publications/document03.html>)。当時は、1995年兵庫県南部地震の発生により強震観測の重要性が広く認識されていた時期でしたし、防災科学技術研究所のK-NETやKiK-netが構築されている時期でもありましたので、この企画は時宜を得たものであったと思います。

早いものでそれから約20年の歳月が経過しました。その間、各観測網では機器更新により仕様が変更になったり、中には縮小や廃止の憂き目にあった観測網も出てきて、記事中のリンクが切れてしまったり、記事の内容が古くなっ

てしまうという問題が生じておりました。また、極大地震動の観測事例の増加による機器の高ダイナミックレンジ化があり、緊急地震速報や迅速な災害対応等への利用をめざしたデータ転送のリアルタイム化もありました。さらに近年では海底における強震観測なども始まっています。

そこで強震動委員会では、ニュースレター新連載担当班を中心に、前回の「強震観測の最新情報」の内容の更新をベースにしつつ、この20年間の観測技術の進展も踏まえて、「新・強震観測の最新情報」を企画することに致しました。今回は国内の強震観測網に限定して、研究機関、大学、民間企業等の観測網の関係者に記事の執筆依頼を進めており、これから約20回の連載を予定しております。本連載により、地震研究・防災に携わる皆様、特に前回の企画を知らない若い世代の方々にとって、強震観測に関心を持ち、貴重な強震観測データを有効に活用していただく契機になれば、担当者一同大変うれしく思います。

(第1回) K-NET

防災科学技術研究所 刃刀 卓

はじめに

K-NET (Kyoshin Network: 全国強震観測網) は、国立研究開発法人防災科学技術研究所 (防災科研) が運用する、全国を約20km間隔で均質に覆う1,000箇所以上の観測点からなる強震観測網である。K-NET整備の契機となったのは1995年(平成7年)に発生した兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)である。この地震では震度7に相当する激震に襲われた「震災の帯」と呼ばれる地域が出現した。しかし、当時の強震観測体制では激震に相当する強震記録をほとんど得ることができず、全国均質な強震観測網の必要性が強く認識されることとなった。この状況を受けて、K-NETは科学技術庁防災科学技術研究所(当時)により整備が開始され、わずか1年後の1996年(平成8年)6月から運用を開始している。発足当初のK-NETは、全国1,000観測点からなる観測網であったが、現在では、計画

以前に整備されていた一部の観測点や相模湾の海底ケーブル式地震計の海底観測点等も加わり、その観測点数は、2019年(平成31年)3月31日の時点で1,037箇所となっている。図1にはK-NETの観測点分布図(2019年3月31日現在)を示した。強震計は海底ケーブル式地震計を除けば、すべて地表に設置されており、市町村役場や学校などの公共施設の敷地内にあることが多い。このためK-NETは地震被害に関連した強震動の研究に特に適した観測網である。

K-NETでは均質な強震記録を得るため、可能な限り統一された観測施設と強震観測装置を用いることとしている。観測施設は3m平方の敷地からなり、中央にコンクリート製の地震計台が設置されている。建屋は軽量のFRP製であり地震計台とは独立した基礎の上に設置され、強震記録に影響を与えないように配慮がなされている。観測点建設

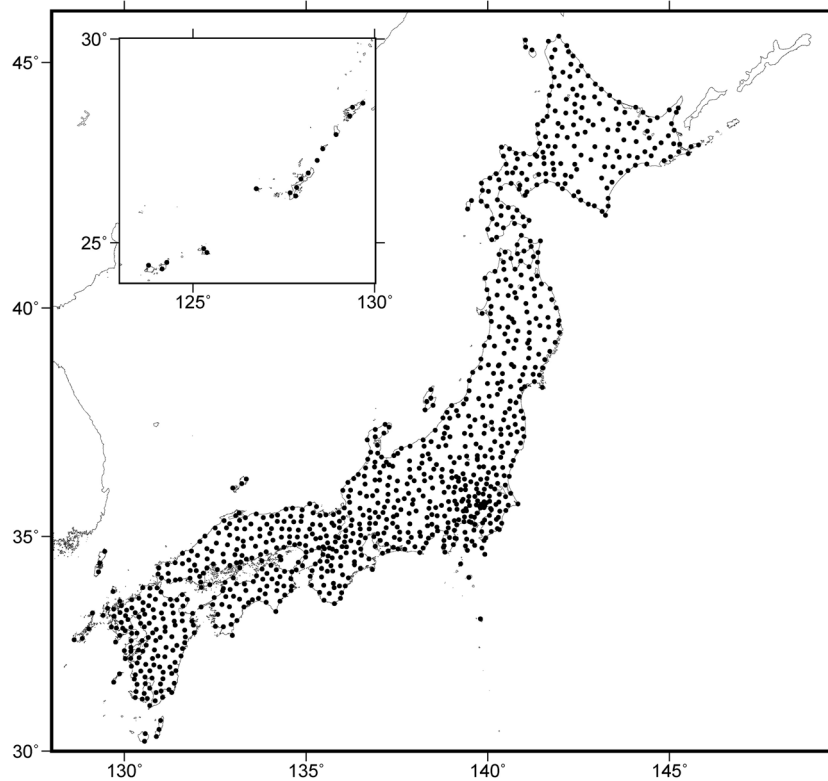


図 1 K-NET の観測点分布図 (2019 年 3 月 31 日現在)

にあたっては、観測点近傍で最深 20 m までの N 値検層、PS 検層、密度検層が行われ、土質柱状図と検層データが取得されている。

強震観測装置

K-NET は、観測目的に適合した専用設計の強震計を使用していることが特徴の一つである。K-NET 強震計は、開発順に K-NET95、K-NET02、K-NET02A、K-NET11 の形式に大別される。K-NET95 と K-NET02 はすでに全数が更新されており、現在稼働している強震計は K-NET02A と K-NET11 のいずれかである。

K-NET95 は観測網発足に伴い開発された強震計である。加速度計として V403BT (アカシ製) を用いた 24 bit 分解能の強震計であり、100 Hz サンプリング、実効ダイナミックレンジ 114 dB、最大計測レンジ 2,000 gal、刻時精度 5 ms の性能を持つものであった。K-NET95 は 8 MB のフラッシュメモリを持ち、これは 2.5 時間分の 3 成分強震記録の記録容量に相当する。また、停電時には内蔵蓄電池で 20 時間の動作を行うことが可能であった。強震記録の収録はトリガ方式であり、データ回収はセンターからのダイヤルアップ方式によっていた。

続いて開発された K-NET02 では、加速度計として EpiSensor (米国 Kinemetrics 社製) を採用し、実効ダイ

ナミックレンジ 132 dB、最大計測レンジ 4,000 gal、刻時精度 0.1 ms、記録容量 512 MB に性能が引き上げられた。K-NET02 は 2003 年に運用が開始されている。K-NET02 以降の強震計の特徴として OS (Linux) を搭載することで、強震計内での演算機能の大幅な強化がなされたことが挙げられる。K-NET02 は強震動の発生を検知すると、自動的にセンターに接続し、強震記録を送信する機能を持つ。この機能により、規模の大きな地震後に発生する通信回線の輻輳を避け、迅速な強震記録の収集が可能になった。さらに、K-NET02 以降の強震計は、気象庁が行う検定に適合した震度計としての機能を有し、地震検知後 2 分以内に震度電文の送信が可能である。この震度電文は、気象庁が取りまとめて発表する震度情報の一部として利用され、地震後の初動対応等へ役立てられている。K-NET02 は、停電時に内蔵蓄電池を用いて、1 日間の震度電文およびトリガ強震記録の送信が可能である。さらに停電が継続した場合には、トリガ強震記録の収録のみ 7 日間の動作が可能である。

K-NET02A は K-NET02 の改良型であり、加速度計として JA-40GA (日本航空電子工業製) が採用されている。JA-40GA は可動部にクォーツフレクチャ (石英ヒンジ) を採用した加速度計である。この種の加速度計は金属製の可動部を採用した加速度計に比べ加速度強震記録にしばし

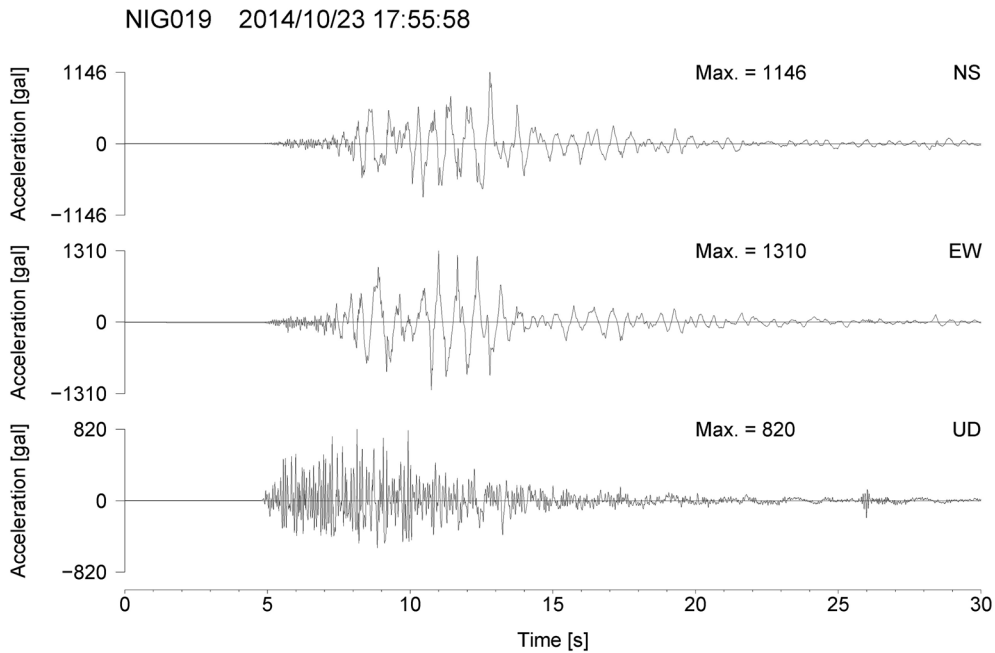


図 2 2004年新潟県中越地震時の小千谷（NIG019）観測点での強震記録

ば見られるステップ状ノイズの発生が少ないという利点を持つ。

現時点で最新である K-NET11 は、2011 年（平成 23 年）に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）後に開発され、2012 年に運用が開始されている。K-NET11 は最大計測レンジが 8,000 gal に引き上げられた他、長期間の停電に備え 7 日間の震度電文およびトリガ強震記録の送信が可能である等、特に計測の確実性に重点を置いた開発がなされた。

収集システムとデータ公開

K-NET95 の強震記録収集は、防災科研本所（茨城県つくば市）にあるセンターからダイヤルアップで行っていた。この作業は完全自動化されていたものの、大規模な地震時には通信回線の輻輳の影響を受け、数時間以上の遅延が発生することがあった。これを解決するために、強震計から自動的に送信される強震記録および震度電文を、一括して受信可能なデータ収集システムが 2003 年に開発された。このシステムは数度の改良を受けながら現在まで運用されている。震度電文に関しては通信の頑健性のため、本所と兵庫耐震工学研究センター（兵庫県三木市）にある 2 か所のセンターに同時送信される。

収集された強震記録は、運用者による品質チェックを受けた後、本連載の第 2 回で紹介する KiK-net の強震記録と合わせて、WEB サイト（<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>）から公開されている。この WEB サイトでは、地震諸元や

最大加速度等を入力とした強震記録の検索が可能であり、土質柱状図等の付帯情報も利用可能となっている。なお、K-NET と KiK-net には「防災科研 K-NET, KiK-net (NIED K-NET, KiK-net)」としてデータ DOI (<https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>) も付与されている。

顕著な記録の例

K-NET は 1,000 箇所の観測点が一斉に運用開始となったことや均質な観測点配置もあり、運用開始から 2019 年（令和元年）9 月末までに、40 万波形以上の強震記録を蓄積している。この中には、3 成分合成最大加速度が 1,000 gal を超える 27 記録、震度 7 相当となる 2 記録、震度 6 強相当となる 32 記録が含まれている。一例として、K-NET 記録中で最大の震度となる、2004 年新潟県中越地震時に記録された、小千谷（NIG019）観測点（計測震度 6.7 相当）の強震波形を図 2 に示した。水平動記録には、地盤の非線形応答（液状化）を示唆するサイクリックモビリティ現象が認められる。

おわりに

以上、K-NET の概要を簡単に紹介した。全国均質な観測施設に同一の観測機器を配置し、得られたデータを迅速に公開するという観測網の在り方は、整備当時としては先駆的な試みであり、後に整備された観測網のモデルともなったと言える。K-NET は強震動を記録するための観測網であると同時に、震度観測等により地震防災に対し直接

の利用がなされているという側面も持つ。K-NETが観測する情報が様々な形で活用されれば幸いである。

参考文献

- 1) Aoi, S., T. Kunugi, and H. Fujiwara, 2004, Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, Jour. JAE, 4, 65-74.
- 2) Eguchi, T., Y. Fujinawa, E. Fujita, S. Iwasaki, I. Watabe, and H. Fujiwara, 1998, A real-time observation network of ocean-bottom-seismometers deployed at the Sagami trough subduction zone, central Japan, Mar. Geophys. Res., 20, 73-94.
- 3) 藤原広行・切刀 卓・安達繁樹・青井 真・森川信之, 2007, 新型 K-NET: 強震動データリアルタイムシステムの構築, 日本地震工学会論文集, 7, 2-16.
- 4) Kinoshita, S., 1998, Kyoshin Net (K-NET), Seism. Res. Lett., 69, 309-332.
- 5) 木下繁夫・上原正義・斗沢敏雄・和田安司・小久江洋輔, 1997, K-NET95 型強震計の記録特性, 地震 2, 49, 467-481.
- 6) 切刀 卓・青井 真・藤原広行, 2009, 強震観測—歴史と展望—, 地震 2, 61, S19-S34.
- 7) 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.
- 8) Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, and A. Yamamoto, 2004, Recent progress of seismic observation networks in Japan—Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net—, Earth Planets Space, 56, xv-xxviii.

(第2回) KiK-net

防災科学技術研究所 切刀 卓

はじめに

KiK-net (Kiban-Kyoshin Network: 基盤強震観測網) は、国立研究開発法人防災科学技術研究所 (防災科研) が運用する、約 700 箇所の観測点からなる強震観測網である。KiK-net の最大の特徴は、各観測施設に観測井が掘削され、地表と地中の双方の強震計からなる鉛直アレーが構成されていることである。

1995 年 (平成 7 年) 兵庫県南部地震 (阪神・淡路大震災) の発生を受け、全国にわたる総合的な地震防災対策を推進するため、地震防災対策特別措置法が制定された。同法に基づく地震調査研究推進本部令により 1995 年 (平成 7 年) 7 月 18 日に地震調査研究推進本部 (地震本部) が総理府に設置された (現在は文部科学省に設置)。地震本部の下では、地震に関する各種の基盤的調査観測が推進されることとなったが、KiK-net はこの一環として Hi-net (High-Sensitivity Seismograph Network: 高感度地震観測網) に併設される形で防災科研により建設された強震観測網である。

KiK-net の観測施設は、2019 年 (平成 31 年) 3 月 31 日の時点で沖縄県や離島を除く全国 695 箇所に配置され、各観測施設では地表と地中の 2 カ所に強震計が設置されている。地中強震計は Hi-net の高感度地震計と共に耐圧筐体に格納され、深さ 100 m 以上の観測井の孔底に設置されている。KiK-net の観測点分布図 (2019 年 3 月 31 日現在) を図 1 に示した。KiK-net には地中強震計の設置深度が

2,000 m 以深に及ぶ観測施設が含まれており、大阪市此花区に設置されている 1 地点を除いて 12 地点が関東地方に分布している。最深の観測井は、さいたま市岩槻区にある岩槻深層観測施設 (SITH01) であり、その深さは 3,510 m である。KiK-net では、Hi-net 観測施設の地点選定の関係から、本連載の第 1 回で紹介した K-NET に比べると、一般的に硬質な地盤上に観測施設が設置されているのが特徴である。同様な理由から都市部にある観測施設の数は少ない。観測井の掘削にあたっては PS 検層が行われボーリング柱状図が作成されている。

強震観測装置

KiK-net では、K-NET と同様に専用設計の強震計を使用している。KiK-net 強震計は、開発順に SMAC-MDK, KiK-net06, KiK-net11 の形式に大別される。SMAC-MDK はすでに全数が更新されており、現在稼働している強震計は KiK-net06 と KiK-net11 のいずれかである。

SMAC-MDK は K-NET95 と同様に 24 bit 分解能を持つ強震計であり、200 Hz サンプリング、実効ダイナミックレンジ 114 dB、最大計測レンジ 2,000 gal で、6 成分 (地表 3 成分、地中 3 成分) の計測を行っていた。地表加速度計としては V404BT (アカシ製) を採用している。SMAC-MDK は 85 MB のフラッシュメモリを持ち、これは 6.5 時間分の 6 成分強震記録の記録容量に相当する。強震記録の収録は K-NET95 と同様トリガ方式であり、データ回収は

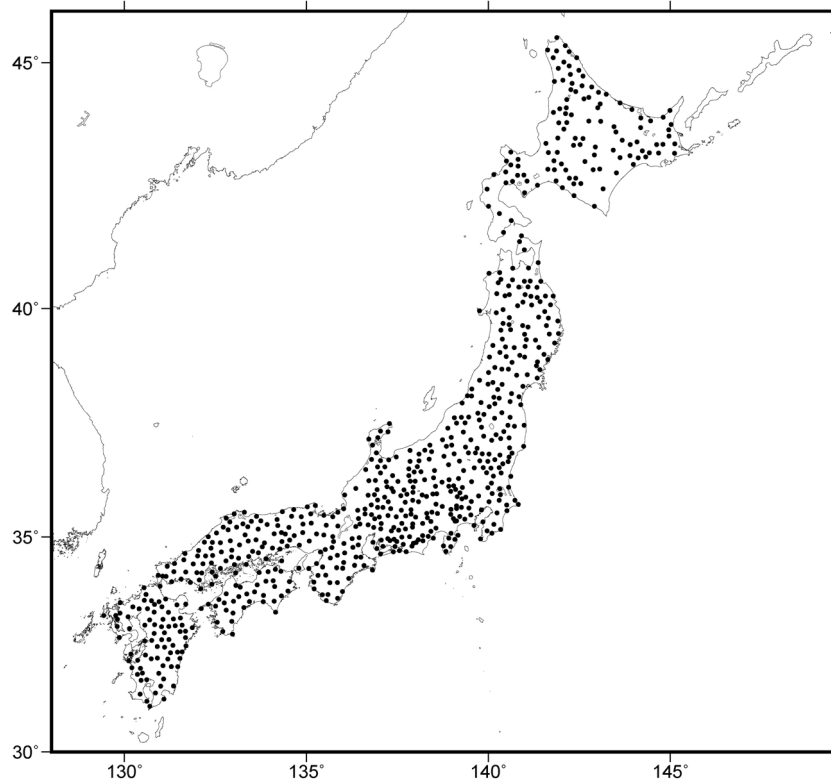


図 1 KiK-net の観測点分布図 (2019 年 3 月 31 日現在)

センターからのダイヤルアップ方式によっていた。

KiK-net06 は K-NET02A をもとに開発された強震計である。地表加速度計としては JA-40GA (日本航空電子工業製) が採用されており、計測性能は K-NET02A と同等の実効ダイナミックレンジ 132 dB, 最大計測レンジ 4,000 gal, 刻時精度 0.1 ms となっている。OS (Linux) を搭載し各種の演算が可能であることも共通である。

KiK-net11 は現時点で最新の強震計である。KiK-net11 は構成部品、ソフトウェア等のほとんどを K-NET11 と共通化することにより、導入およびメンテナンスコストの低減がはかられている。KiK-net11 では K-NET11 と同様に最大計測レンジが 8,000 gal に引き上げられ、停電後 7 日間のトリガ強震記録の送信が可能である。

KiK-net の地中加速度計としては、V404-BT, その後継品の V410-BT, および JA-40GA が採用されている。KiK-net06 と KiK-net11 は、リアルタイム震度、長周期地震動指標、最大加速度等の各種強震指標演算や、気象庁の定めるアルゴリズムによる地震諸元推定等の高度な機能を持つ。これらの機能は OS 上のプログラムにより実現され K-NET 強震計でも共通に使用可能である。

収集システムとデータ公開

SMAC-MDK の強震記録収集は、K-NET95 と同様に防

災科研本所 (茨城県つくば市) にあるセンターからダイヤルアップで行っていた。KiK-net では、K-NET の 2 倍の成分数となるため、通信の輻輳時には全データ回収までにより多くの時間を要することとなっていた。このため、KiK-net06 の導入時からは、K-NET と同様に強震計から自動的に送信される強震記録を一括受信可能なデータ収集システムが運用されている。

収集された強震記録は、運用者による品質チェックを受けた後、K-NET の強震記録と合わせて、WEB サイト (<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>) から公開されている。この WEB サイトでは、地震諸元や最大加速度等を入力とした強震記録の検索が可能であり、ボーリング柱状図等も利用可能である。なお、K-NET と KiK-net には「防災科研 K-NET, KiK-net (NIED K-NET, KiK-net)」としてデータ DOI (<https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>) も付与されている。

KiK-net は Hi-net に併設された観測網であるため、多くの観測施設で、Hi-net の高感度地震波形データを送信するための帯域保障された通信回線が敷設されている。この通信帯域の一部を利用して、KiK-net06 と KiK-net11 では、リアルタイム震度、長周期地震動指標、最大加速度等の強震指標を連続伝送する試みを行っている。このデータは、防災科研が運用する、強震モニタ (<http://www.kmoni>).

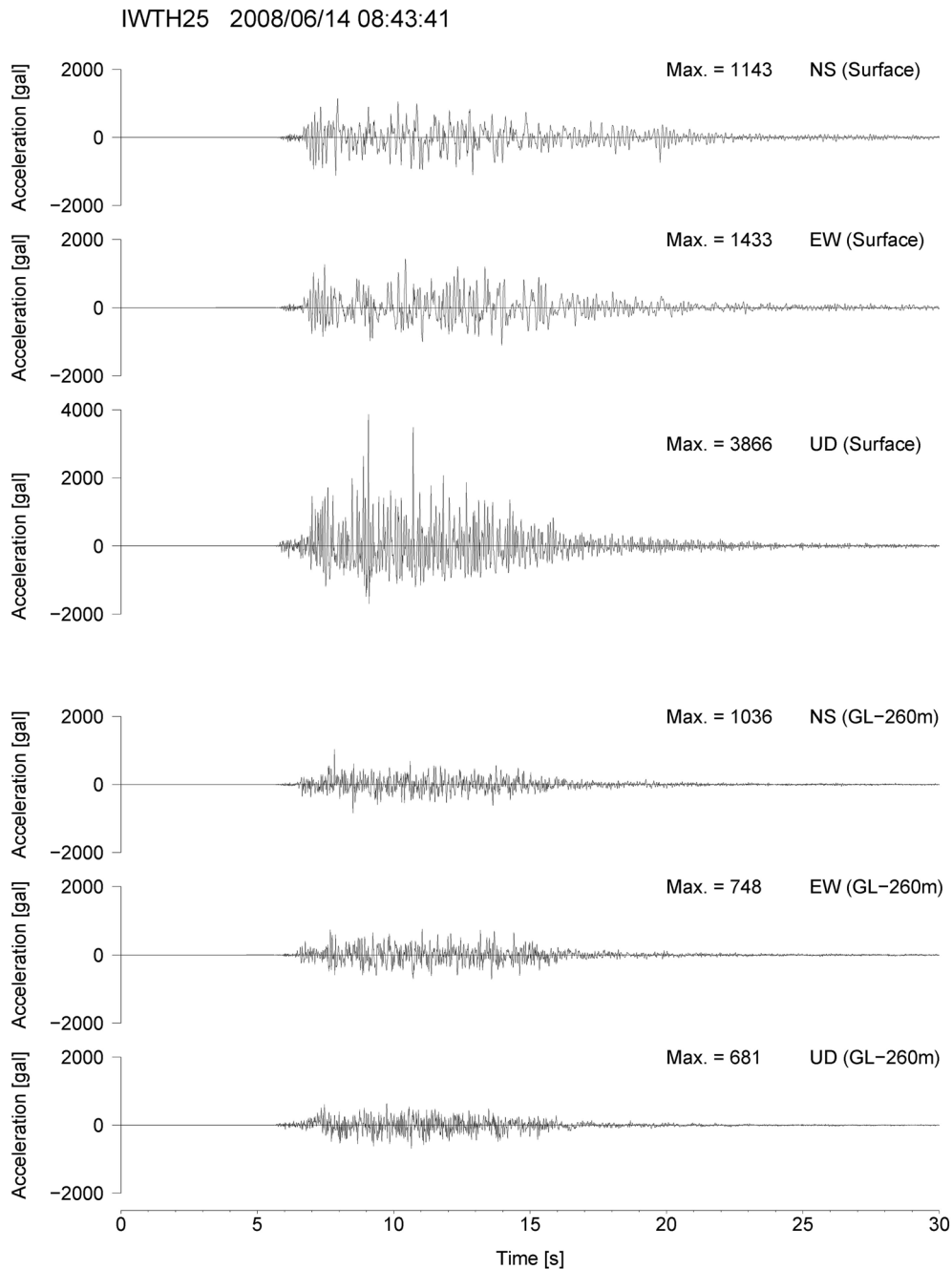


図 2 2008 年岩手・宮城内陸地震時の一関西 (IWTH25) 観測点での強震記録

bosai.go.jp/) に代表される即時地震動把握のためのシステムで活用されている。また、関東地方に位置するいくつかの KiK-net 観測施設からは、気象庁の定めるアルゴリズムにより推定された地震諸元に関する情報が、帯域保障回線を通じて気象庁に送信されている。この情報は 2015 年 (平成 27 年) 3 月から緊急地震速報の発表に活用されている。

顕著な記録の例

KiK-net では運用開始から 2019 年 9 月末までに、38 万波形以上の強震記録を蓄積している。この中には、3 成分合成最大加速度が 1,000 gal を超える 20 記録、震度 7 相当となる 4 記録、震度 6 強相当となる 15 記録が含まれている。一例として、KiK-net 記録中で最大の加速度となる 2008 年岩手・宮城内陸地震時に記録された、一関西 (IWTH25) 観測点の強震波形を図 2 に示した。図中には 6 成分の強震記録が示されており、上から地表 3 成分の記録、地中 3 成

分の記録となっている。この強震記録は観測史上最大の加速度（地表3成分合成で4.022 gal）を示すものであり、地表上下動記録には上向きにより強く揺れた上下非対称の波形が認められる。この顕著な非対称性は、いわゆる“トラポリン効果”発見の契機になったものである。

おわりに

本稿では KiK-net の概要を簡単に紹介した。地表と地中に加速度計を配した鉛直アレーでの大規模な強震観測は世界的にも例がなく、KiK-net の強震記録は海外の研究者による利用も多い。特に1,000 m を超える設置深度での強震記録については、他では代え難いものとなっている。KiK-net は地震に関する基盤的な観測の一部を担うと同時に、強震モニタ等の即時地震動把握システム、気象庁の運用する緊急地震速報システムにデータを提供する等、地震防災の分野にも役立っている。

参考文献

- 1) Aoi, S., T. Kunugi, and H. Fujiwara, 2004, Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. JAEE*, **4**, 65-74.
- 2) Aoi, S., T. Kunugi, and H. Fujiwara, 2008, Trampoline Effect in Extreme Ground Motion, *Science*, **322**, 727-730.
- 3) 刃刀 卓・青井 真・藤原広行, 2009, 強震観測一歴史と展望一, *地震* **2**, **61**, S19-S34.
- 4) 刃刀 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.
- 5) Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, and A. Yamamoto, 2004, Recent progress of seismic observation networks in Japan -Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net-, *Earth Planets Space*, **56**, xv-xxviii.