

防災科学技術研究所高感度地震観測網が捉えた2011年東北地方太平洋沖地震
— 観測記録・被害・対応 —

松原 誠*・汐見勝彦*・武田哲也*・木村尚紀*・松本拓己*・廣瀬 仁*・浅野陽一*・
齊藤竜彦*・松澤孝紀*・上野友岳*・木村武志*・三好崇之*・田中佐千子*・
エネスクボグダン*・松林弘智**・風神朋枝*・針生義勝***

The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake detected by NIED Hi-net
— Seismograms, damage, and recovery —

Makoto MATSUBARA*, Katsuhiko SHIOMI*, Tetsuya TAKEDA*, Hisanori KIMURA*, Takumi MATSUMOTO*,
Hitoshi HIROSE*, Yoichi ASANO*, Tatsuhiko SAITO*, Takanori MATSUZAWA*, Tomotake UENO*,
Takeshi KIMURA*, Takayuki MIYOSHI*, Sachiko TANAKA*, Bogdan ENESCU*,
Hirotohi MATSUBAYASHI**, Tomoe KAZAKAMI*, and Yoshikatsu HARYU***

*Monitoring and Forecast Research Department, Earthquake and Volcano Research Unit,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
mkmatu@bosai.go.jp, shiomi@bosai.go.jp, ttakeda@bosai.go.jp, kimura@bosai.go.jp, mtakumi@bosai.go.jp,
hirose@bosai.go.jp, asano@bosai.go.jp, saito-ta@bosai.go.jp, tkmatu@bosai.go.jp, ueno@bosai.go.jp,
tkimura@bosai.go.jp, miyoshi@bosai.go.jp, tanaka@bosai.go.jp, benescu@bosai.go.jp, teku@bosai.go.jp
**Technical Division, ANET Co. Ltd., Japan
matsubayashi@anetrt.com
***Research Supporting Group, Association for the Development of Earthquake Prediction, Japan
haryu@bosai.go.jp

Abstract

The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake hit the facilities of the Earthquake Data Management Center (DC) at the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) in Tsukuba as well as in eastern Japan. Although the high sensitivity seismograph network (Hi-net) recorded the waveform data of the great earthquake, the data processing system was also damaged by the earthquake. The DC system failed to run after a few hours from the earthquake because of electric power failure and the destruction of seismic stations near the Pacific coast by the strong tsunami. However, we recovered the system after a few days and collected the data accumulated at each seismic station during the time period in which data communication was unavailable. We have then processed the collected seismic data, so the catalog of foreshocks, mainshock and numerous aftershocks and induced seismicity became available. In this article, we first characterize the damage of the system by the megathrust earthquake and the recovery that followed. We also show some records of aftershocks occurred close to the Tohoku mainshock and hypocenters of induced earthquakes.

Key words: Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, The NIED Hi-net, Seismogram, Hypocenter distribution, Induced seismicity

* 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

** 株式会社 ANET 技術部

*** 地震予知総合研究振興会 研究業務支持機構

1. はじめに

2011年3月11日14時46分頃、東北地方から関東地方の太平洋沖を震源域とするマグニチュード(M)9.0(気象庁による。以下、 M_{JMA})の「東北地方太平洋沖地震」が発生した。この地震により、宮城県栗原市の震度7をはじめ、宮城・福島・茨城・栃木の各県で震度6強を観測するなど、東日本の各地で強い揺れを観測するとともに、太平洋沿岸部を激しい津波が襲った。東北地方太平洋沖地震の震源(地震の破壊の開始点)は2日前の2011年3月9日の地震($M_{JMA}7.3$)の震源のやや西に位置する。地震の発震機構解から、沈み込む太平洋プレートと陸側のプレートの境界部で発生したと考えられる。この地震発生後、青森県沖から房総半島沖の非常に広い範囲で余震と見られる地震活動が活発化した。さらに、長野県・新潟県県境付近、静岡県東部、茨城・福島県境付近など、内陸においても浅い地震が発生した。

この地震により、防災科学技術研究所(防災科研)の高感度地震観測網(Hi-net)では、超巨大地震の発生メカニズムの解明や地震災害の低減に役立つ多くの貴重なデータを得ることができた(例えば、Asano *et al.*, 2011; Hirose 2011)。一方で、観測網としても小さくない被害を受けた。つくば市に位置する本研究所においては、停電により、データ収集・蓄積・処理ならびに公開が困難となり、一時的にデータセンター機能を停止することとなった。さらに、高感度地震観測施設(Hi-net 観測施設)においては、停電によるデータの一時的な欠測が生じたのをはじめ、強い揺れにより地震計が故障したり、津波により観測施設が流失した。

ここでは、まず、この地震によるHi-netが受けた被害とその対応を説明する。さらに、Hi-netで捉えられたこの地震や余震活動、その後発生した内陸地震についての観測記録を紹介する。

2. 東北地方太平洋沖地震とHi-netにおける観測体制

2.1 地震発生時の状況と対応

2.1.1 Hi-net 観測施設およびデータセンター棟の被災と観測への影響

Hi-net 観測施設の一部では、東北地方太平洋沖地震によ

る激しい揺れやその後の津波により、甚大な被害を受けた。宮城県の志津川(N.SZGH)観測点や仙台(N.SNDH)観測点では、観測小屋が津波で大破したため、当面の観測休止を余儀なくされた。また、福島県・三春(N.MRUH)観測点では、観測小屋に著しい傾斜が見られるなど、複数の観測点で観測小屋やハンドホール等に被害が発生した。

施設自体の損壊は免れた観測点においても、大規模かつ長期にわたる停電により観測業務に支障を生じた観測点は少なくない。Hi-netの観測施設で停電が発生した場合、通常、バッテリー駆動により停電から約50分間は観測データをリアルタイムで送信可能である。その後も停電が継続する場合、リアルタイムでのデータ送信は休止となるが、現地設置の高精度A/D装置(データロガー)内の記憶メディア(CFカード)に最長22時間分の波形データを蓄積することができる。蓄積されたデータは、CFカードの交換や復電後にネットワークを経由することにより回収できる。後述の通り、本システムにより、東北地方太平洋沖地震直後の非常に活発な余震活動に関するデータの収録に成功したが、とりわけ東北地方太平洋側各県ならびに茨城県内では地震後から数日にわたる停電が発生したため、域内の多くの観測点で数日間のデータ欠測を余儀なくされた。

岩手県・陸前高田(N.RZTH)観測点など太平洋沿岸部に位置する観測点では、当該観測点のデータ伝送を担うNTT東日本の主要局舎が津波等により甚大な被害を受けたため、復電後もリアルタイムでのデータ収集を実現することができなかった。ただし、観測点への給電が再開された後の観測データは現地設置のデータロガー内に蓄積されており、回線回復後にネットワーク経由で回収作業を実施した。福島県・浪江(N.NMEH)観測点は、平成23年11月現在、東京電力福島第一原子力発電所の事故による警戒区域内に位置しており、給電も停止されているため、観測再開の見込みは立っていない。表1に、観測施設側理由による長期停止観測点と復旧状況をまとめる。

東北地方太平洋沖地震に際しては、防災科研においても、つくば地区敷地内に設置された強震観測網(K-NET)の観測点で震度6弱を記録する強い揺れを観測した。本地震により、防災研究データセンター(DC)棟内では、屋

表1 オンラインでの観測が長期停止した高感度地震観測施設と復旧日
Table 1 High-sensitivity seismograph stations with long-term network trouble and their restoration days.

観測点			長期停止理由	状況
宮城県	仙台	N.SNDH	津波により観測施設被災	長期休止中
宮城県	志津川	N.SZGH	津波により観測施設被災	長期休止中
岩手県	陸前高田	N.RZTH	NTT 中継局被災	4/14 局舎復旧
岩手県	山田	N.YMDH	NTT 中継局被災	5/07 局舎復旧
岩手県	田老	N.TROH	NTT 中継局被災	5/11 局舎復旧
宮城県	唐桑	N.KKWH	NTT 中継局被災	6/07 局舎復旧
福島県	浪江	N.NMEH	福島第一原発警戒区域内のため、状況確認できず	長期休止中

上タンクからの漏水や壁面に軽微なクラックの発生、壁面に固定した書庫の損壊が生じた。また、居室内に配置された PC、書籍、震源クリスタル等、様々な物品の落下・散乱が見られたほか、棚、プリンタといった物品の移動が確認されたが、幸いにも負傷者を含む人的被害は無かった。DC 棟では、地震発生直後に給電が停止し発動発電機が作動した。観測データの受信・蓄積や震源決定の自動処理などの最低限必要なサーバー類の稼働は継続したが、研究所周辺地区において復電の見込みが立たないため、同日 20 時をもって発動発電機の稼働を停止した。これにより、高感度地震観測データ処理システム全サーバーの稼働も停止した。なお、サーバー類については、強い揺れそのものや停電時に正常にシャットダウンできなかったこと等の理由により、ディスク装置、メモリ等様々な部分で多様な障害が発生した。

Hi-net および広帯域観測網 (F-net) の観測データの収集は、エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社 (NTTCom) による EarthLAN サービス (小原・他, 2008) を用いている。EarthLAN サービスでは、観測データを各観測施設から DC 棟に直接配信する経路とは別に、東京都内に設置されたコントロールセンター (CC) を経由して防災科研を含む各機関に配信する経路の 2 系統が存在している。このため、停電を免れた観測施設のデータについて、DC 棟が停電している時間帯においても CC 経由で気象庁等の他機関に継続して配信することができた。

3 月 11 日から 3 月 15 日までにおける Hi-net 観測データの収集状況について取りまとめた結果を図 1 に示す。つくば地区の停電のため、地震当日 (3 月 11 日) の 20 時頃から 14 日の 20 時頃まで DC でのリアルタイムデータ受信は停止していた (図 1 灰色領域)。この時間帯については、DC での波形データ受信ログから、各観測施設の稼働状況を把握することはできない。そこで、NTTCom より提供された CC におけるデータ欠測状況 (速報値)、高感度地震観測管理室にて運用する「欠測状況履歴モニター」データおよび現地設置 AD 装置収録データを ftp で回収・補完後に調査した欠測情報に基づき、以下の条件でリアルタイムデータ配信の欠測状況を推定した。推定された時間帯は、図 1 に濃いピンク色で表示した。

- (1) CC で欠測となっているデータは、リアルタイムでは流通していないとする。
- (2) 東北地方太平洋沖地震発生以降、CC で欠測記録のない観測点では、最終的に補完されていれば、リアルタイムでは流通していたとする。
- (3) 欠測状況履歴データ上で補完が完了していない時間帯があっても、データ欠測の開始・終了時刻がともに正時であるものは、手動補完未了と解釈し、リアルタイムでは流通していたとする。
- (4) 欠測状況履歴データ上では、3 月 14 日 18 時頃および同日 19 時頃に蓄積回復するログが複数の観測点で見られる。この傾向は、CC での状況に依存していないため、データ手動補完が未了であると解釈し、リアルタイムでは流通していたとする。

図 1 の青色は、最終的にデータ回収ができなかった時間帯を表す。なお、栃木県、千葉県、神奈川県の一部観測点で、3 月 15 日の午後、東京電力による輪番計画停電の影響と思われるリアルタイムデータ欠測が見られる。他の観測点においても、同様の影響が発生したと考えられるが、上記 (2) の条件により表には示されていない可能性がある。

図 1 から、東北地方および関東地方の多数の観測点で、地震発生直後の 14 時 48 分頃よりリアルタイムでのデータ受信に障害が発生したことが分かる。東北地方日本海側および福島県では電力供給の復帰が比較的早く、これらの地域での最終的な欠測期間は 10 時間程度であるのに対し、岩手県、宮城県、茨城県の各観測点での欠測期間は長く、電力の復旧に時間を要したと考えられる。岩手県や宮城県では、通信回線の不具合がより長期にわたって発生していたが、電力供給に限定すると、岩手県の大半よりも茨城県の方が復旧に時間がかかったようである。

2.1.2 高感度地震観測データ処理システム障害発生状況

現在の高感度地震観測データ処理システム (以下、システム) は、2004 年新潟県中越地震後の非常に活発であった余震活動を滞りなく処理することを目安として整備されたものである。しかし、東北地方太平洋沖地震後は、当該地震の震源域が非常に広い点に加え、日本全国の広範囲で地震活動の活発化が見られたため、本システムの処理に支障を来す事例が複数発生した。

活発な地震活動に伴い、伝送される波形データの総量そのものが増大したことに加え、通常よりも遅延して到着するデータも増加した。システムの波形データ受信部では、EarthLAN サービスより受信したリアルタイムデータを観測実施機関および観測網ごとに 1 分単位のファイルとしてディスク装置に書き出す、あるいは遅延して到着したデータを該当するファイルに挿入する作業を実施している。しかし、遅延データ増加に伴い、処理が過負荷状態となり、システムの異常動作が頻発したため、受信部の再起動を繰り返すことが必要となった。

一方、地震の多発により、地震検出を行う部分 (トリガー部) でも異常停止が繰り返し発生した。これは、計算処理の増大によるメモリーリークにより、計算機リソースが枯渇したことが原因であった。通常時は、毎週、観測点情報の更新作業に伴ってプログラムの再起動を行なっているため、問題が顕在化しなかったと思われる。また、1 日あたりとして事前に想定していた数をはるかに超える地震が発生したため、地震の位相情報をデータベースに登録するためのキーの桁があふれ、処理結果をデータベースに登録できない事象が発生した。これに対しては、暫定的に位相検出条件を厳しくすることによって当座をしのぐとともに、キーの拡張作業を行うことで対応した。データ保存用として確保していたディスク領域の枯渇により、地震情報や波形データをディスクに保存できないという問題に対しては、不要データの別ボリュームへの移送、空きボリュームの準備、データのディスク保存期間の短縮などの対応を実施した。

2.2 観測データの事後収集とオフライン処理

2.2.1 コントロールセンター(CC)からの移送

防災科研が停電したためにリアルタイムで収集できなかった観測データのうち、電力供給および通信回線に異常がなかった観測点については、EarthLANのCCで一時的なデータ蓄積が行われていた。これらの観測点のデータについては、CCからDCへ移送し、補完する作業を実施した。補完対象は、実際の停止時間に前後数時間分のデータを加え、3月11日14時から14日24時までとした。なお、平成23年度より新しいEarthLANサービスを開始するため、地震発生時点では、通信回線等の移行作業を行っていた。移行作業完了済み観測点のデータは、新CCにて蓄積されており、移行前の拠点については、旧CCにて蓄積されていた。新CCからは約570GB、旧CCからは約80GBのデータの補完を実施した。

2.2.2 観測点A/D装置からのftp転送

通信回線の物理的な断絶や50分間以上の停電発生により通信機能が停止した場合はCCにもデータは存在しない。そのような観測点や時間帯であっても、観測点において高精度A/D装置が稼働していたならば、当該装置内にデータが保存されている可能性がある。そこで、観測点との通信が回復した後、EarthLAN経由で観測点設置のデータロガーにアクセスし、必要なデータをftpにより取得した。一部の観測点については、現地にてデータの回収を行った。本作業により、津波で被災した志津川観測点について、水没直前までのデータ回収に成功した。また、本震直後の停電時に加え、計画停電時に回線が停止した拠点についても同様の作業を実施した。

2.2.3 オフライン自動処理の実施

リアルタイムでデータ収集・処理できなかった期間について、大半のデータ回収と補完が終了した日付から順次、ディスク上に蓄積されたデータを用いたイベント再検出・震源決定処理(オフライン一次自動処理)を行った。サーバー類の負荷やデータベース格納領域等に不安があったため、当初は、数時間単位でオフライン処理を行った。

気象庁一元化処理結果を用いた自動震源決定処理(マージ処理)は、Hi-net側の一次自動処理が停止していたことに加え、気象庁側からの一元化処理震源情報提供も遅延したり、「参考情報」を含むものであったりしたため、状況確認の意味も含め地震発生からしばらく処理を休止した。マージ処理は4月5日から再開したが、一次自動処理と同様、サーバー類の負荷やデータベース格納領域といった不安要素を抱えていたため、通常勤務時間帯に1日分ないし2日分の処理に制限して実行した。6月に入ってから、試験評価用システムを使ったマージ処理を行い、処理の遅延を解消した。

2.2.4 高感度地震観測管理室対応状況の概略時系列

東北地方太平洋沖地震発生2日前の3月9日、宮城県はるか沖を震源とする $M_{JMA}7.3$ の地震が発生した。高感度地震観測管理室では、この地震に対して定型的な緊急対応を実施した。表2に、3月9日以降の高感度地震観測管理室による対応ならびにデータ処理状況の概略について

まとめる。

2.3 リアルタイムでのデータ欠測と地震活動把握への影響

これまでに述べたように、電力供給ならびに通信サービスに支障のなかった観測点のデータ流通サービスは継続していたが、東北地方および茨城県に位置する大半のHi-net観測点において地震発生直後から障害が発生し、リアルタイムでのデータ伝送は停止した(図1)。東北地方太平洋沖地震発生直後から同日の20時ごろまでは、DC内のサーバー群には発動発電機から給電されていたため、システム上の自動処理が稼働しており、オンラインで収集可能であったデータのみを利用した一次自動処理を実施していた。処理結果の一例として、3月11日16時台の自動処理結果を図2左上に示す。当該時間帯に30分以上のデータ欠落があった観測点の分布を図2左下に赤で示す。震源決定状況を比較する対照として、リアルタイムで収集できなかった観測点のデータを補完した後に暫定再検測を行った結果を図2右上、同期間の気象庁一元化震源暫定値(2011年6月30日取得)を図2右下に示す。

図2左下に示すように、3月11日の16時台は、東北地方および関東地方北部に設置されたHi-net観測点および大学等観測点の大半でオンラインデータが得られていない。3月11日16時台から翌12日午前中の間は、リアルタイムでのデータ収集にもっとも支障を生じた期間である。この時間帯について、システムの自動処理結果(図2左上)と観測データ補完後に暫定再検測を行った結果(図2右上)を比較すると、自動処理では東北地方太平洋沖地震の余震活動を1つも決めることができているだけでなく、関東地方や中部地方の内陸部に浅い地震として誤決定していることが分かる。逆に、オンラインデータが得られていた佐渡島周辺や長野・富山県境付近、長野・岐阜県境付近の地震は、自動処理でも適切な震源位置が求められている。以上の特徴は、震源近傍観測点のデータ不足により検知能力そのものが低下したこと、仮に検知したとしても検出した位相を地震ごとに適切に集約することができなかったことを表す。一方、東北地方における本時間帯でのリアルタイムデータ収集は、気象庁観測点のみであった(図2左下)。気象庁一元化処理震源情報は、オンラインで気象庁に配信されている観測データに基づいて整備された震源カタログである。このため、当該時間帯において、比較的大きいイベントは検知可能であるが、高精度な震源決定をするには観測点数が十分ではない。結果、沿岸部の観測点が極めて少ない状態で海域のイベントの震源決定をしている状態であり、Hi-net暫定再検測震源カタログ(図2右上)との比較から、岩手県沖の地震を沿岸部の深さ60km以深に決めたり、茨城県はるか沖の地震を深さ50km以深に決めたりしていることが分かる(図2右下)。

この傾向は、3月31日のデータでも確認することができる(図3)。3月31日時点では、大半の観測点からのリアルタイムデータ配信が再開されているものの、津波等により被災した沿岸部の観測点からのデータは、依然、停止していた(図3左下)。その結果、Hi-net自動処理のイ

表 2.1 高感度地震観測管理室の対応の概略

Table 2.1 Summary of actions taken by the high-sensitivity seismograph laboratory.

日 時	状 況	その他
3/09 11:45 頃 13:00 18:30 頃	宮城県はるか沖の地震(M7.3)発生 ・ 定例調査委員会提出用 AQUA-CMT 解析メモ作成 ・ 「2011 年 3 月 9 日三陸沖の地震」特集 HP 公開	地震調査委員会定例会開催
3/11 14:46 頃 14:49 頃 15:30 頃 16:00 頃 20:00 頃	東北地方太平洋沖地震(M9.0)発生 ・ 発動発電機作動 －データ収集および自動処理は継続 －公開ページ停止(所内ネットワーク停止) ・ 一部観測点にて、通信回線支障による観測停止 ・ 一部観測点にて、現地通信装置バッテリー断による観測データ収集停止 <高感度観測管理室としての対応方針> ・ 余震と停電回復の状況を見つつシステムの復旧をはかる. ・ 原則、週末の作業はなし. 自宅・家族の安全確保を優先する. ・ 復旧目処が立つ場合、常勤職員を招集する可能性あり. ・ データセンター棟発動発電機停止 －自動処理停止	東日本広範囲で停電発生 ・ 職員およびスタッフは、順次、屋外退避・点呼 ・ 職員帰宅指示 －建物内への単独での立入禁止 夜：地震調査委員会臨時会開催
3/12 03:59 頃 10:00 頃 11:00 頃 午後	新潟・長野県境付近の地震(M6.7) －停電のため、緊急対応できず. ・ データセンター常勤職員参集 ・ 研究交流棟第一セミナー室にて打ち合わせ後、データセンター棟へ移動 ・ データセンター棟への部分的な給電再開 (電力総量の制限あり. 安定給電の担保無し) － K-NET/KiK-net データ回収を優先. 高感度・広帯域関連サーバー群の起動は月曜以降に見送り ・ 臨時観測機材確認 ・ 観測点停止状況確認	
3/13	・ 臨時観測を計画 －停止中 Hi-net 観測点への低消費 AD 設置検討 － F-net つくばバッテリー復帰検討 いずれも検討のみ	地震調査委員会臨時会開催 3/14 請負業者一部自宅待機指示
3/14 09:30 頃 18:00 頃 20:00 頃 20:30 頃	・ 高感度地震観測管理室ミーティング －週末の状況の概略報告/当面の方針指示 ・ 高感度地震観測システム立ち上げ開始 所内データ配信再開：波形モニター再開 EarthLAN 波形データ受信部起動完了 ・ Hi-net 受信部起動完了：波形データ保存再開 ・ Hi-net 自動処理起動：ハードウェア不具合発生	3/17 までの予定で一部職員に自宅待機発令(特別休暇適用) －ガソリン不足, 断水, 電力供給不安定 3/15 請負業者一部自宅待機継続

表 2.2 高感度地震観測管理室の対応の概略

Table 2.2 Summary of actions taken by the high-sensitivity seismograph laboratory.

日 時	状 況	その他
3/15 10:00 頃	・引き続き、高感度地震観測システム立ち上げ作業 Hi-net 自動処理起動完了(ただし、片系のみ) 再検測システム動作確認	つくば市研究機関関係連絡会 気象庁一元化震源情報参考値公開決定 (3月12日分以降).
20:00 頃	・津波被災観測点情報抽出作業開始 ・DC に保存されていないデータの収集依頼 － DC 短期蓄積部のデータ確認開始 － CC でのデータ蓄積状況の確認	
22:31 頃	・Hi-net ホームページ公開再開 －負荷を避けるため、登録ユーザーページは公開せず 静岡県東部の地震(M6.4)発生 → 緊急参集	
3/16 09:00 頃 18:00 頃	緊急再検測処理開始 ・「2011年3月15日静岡県東部の地震」特集 HP 公開	大学臨時点データ一元化处理開始
3/17 15:00 頃 20:30 頃	・不要不急サーバーの停止指示 －電力確保と不測の停電による故障回避のため	海江田経産相緊急会見 －大規模停電の危険性を警告 気象庁一元化「参考値」* 公開開始
3/18 15:00 頃	・波形データダウンロード以外の公開サービス再開	
3/19 18:56 頃 21:00 頃	茨城県北部の地震(M6.1)発生 →出勤者にて緊急対応 ・「2011年3月19日茨城県北部の地震」特集 HP 公開	
3/23 07:12 頃 18:00 頃	福島県東部の地震(M6.0)発生 →緊急対応実施 ・「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」特集 HP 公開	

ベント検出数はかなり改善されているが、岩手県沖から宮城県沖での検知レベルはやや低い状態が継続している(図3左上)。また、気象庁一元化震源(図3右下)も、沿岸部の観測点を加えて処理したHi-netの暫定震源(図3右上)と比べて、沖合の地震の震源が深く決まる傾向が見える。

2.4 観測記録

2.4.1 地震波形記録

Hi-netの北海道から九州にかけての観測点の中から100観測点を選び、北から順に並べた波形を図4に示す。黒い部分が大きな振幅の揺れが観測された時間・地域を示す。3月7日や8日は多少の大きな地震活動が見られるが、3月9日11時46分の宮城県沖の地震以降、東北沖を震源とする余震が発生し、日本全国へ地震波が伝播した様子が分かる。余震が引き続き発生していた中で、3月11日の東北地方太平洋沖地震が発生した。その後は、東北から房総沖を震源とする地震が多く発生しているとともに、3月12日3時59分、4時31分、7時26分には長野・新潟県境付近の地震(それぞれ $M_{JMA}6.7$, $M_{JMA}5.9$, $M_{JMA}5.6$)が、午前4時46分には秋田県西方沖の地震($M_{JMA}6.4$)、午前10時12分には福島県東部の地震($M_{JMA}5.1$)等が発生し、地震波が日本全国へ伝わる様子も記録されている。

次に、Hi-netの宮城県石巻市にある河北(N.KHKH)観測点における3月8日～3月11日の連続波形画像を図5に示す。通常、Hi-netのホームページから各観測点における連続波形画像を過去30日分公開している(<http://www.hinet.bosai.go.jp/strace/>)。しかし、東北地方太平洋沖地震に関しては、振幅が非常に大きいため、通常の見出しでは黒い画像が表示されるのみになってしまう。そのため、図5では通常の見出しの200分の1に振幅を縮小したものを示した。これらの図は、Hi-netの東北地方太平洋沖地震の特集ページにおいても閲覧可能である(http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/low/?EQ_ID=off-tohoku110311)。振幅を圧縮しているため、図4ほど明瞭ではないが、3月9日の地震の後に余震が発生しつつ、3月11日の地震が発生した様子が分かる。

2.4.2 震源分布

東北地方太平洋沖地震の発生から一週間ごとの震源分布を図6に示す。岩手県から房総半島南東沖までの太平洋沖では東北地方太平洋沖地震後の活動が活発であった様子が分かる。赤色の丸は深さ10kmより浅い地震の分布を示すが、秋田県沖、秋田県北部・秋田県中部、長野県北部、茨城・福島県境付近、静岡県東部などの内陸においても大きな地震が発生し、地震活動が活発化した

様子が分かる。さらに、箱根から伊豆半島東部、日光・足尾地域、飛騨山脈などの火山の付近においても、地震活動が活発化した。地震から一週間経過後は、箱根から伊豆半島東部でやや収束した様子が見えるが、日光・足尾地域や飛騨山脈、長野県北部、茨城・福島県境付近の活動は引き続き活発なほか、福島県北部の地震活動が活発になっている。これら3つの地域の地震活動は、その後2か月に渡っても活発な状態が続いている。

東日本における1か月ごとの震源分布を図7に示す。東北地方太平洋沖地震の前の1か月の震源分布では、2011年3月9日の地震(Mw7.2)の宮城沖の地震とその余震活動が見られるが、その活動範囲は限定的であった。内陸では、2008年岩手・宮城内陸地震の余震域や長野・岐阜県境付近での地震活動が活発であった。しかし、東北地方太平洋沖地震の後では、前述の通り、岩手県沖から房総半島南東沖までの広い領域に渡って地震活動が活発になったとともに、内陸においても大きな地震とその余震活動が活発であった。地震の数も2月11日から3月10日と比べて3月11日以降は大幅に増加したことが分かる。太平洋沖の地震活動は時間の経過とともに、南側の端は房総半島の東側程度までやや北上する傾向が見られるが、北側の端は、10月はじめの段階においても岩手県北部まで活発な状態が続いていることが分かる。内陸の地震については、秋田県中部、福島県西部、茨城県・福島県境、長野県・新潟県県境などで活発な状態が続いている。火山地域については、日光・足尾地域、飛騨山脈で活発な状態が継続中である。一方で、岩手宮城内陸地震の余震活動は東北地方太平洋沖地震の後の1か月はやや少なくなっているように見え、特に4月11日以降では少なくなっている。

3. 誘発された内陸の地震活動

東北地方太平洋沖地震が発生した直後から、日本各地で誘発地震と思われる地震が発生した。主な誘発地震活動については、岡田(2011)が紹介しているが、そのうち長野県・新潟県県境付近、静岡県東部、茨城県北部・福島県東部で発生した地震活動について述べる。また、関東地方で活発化した銚子付近と東京湾での地震活動についても合わせて取り上げる。

3.1 長野県・新潟県県境付近

3月12日3時59分頃に長野県・新潟県県境付近を震源とする $M_{JMA}6.7$ の地震が発生し、長野県栄村で最大震度6強の揺れが観測された。Hi-netおよびF-netによる発震機構解はともに北北西-南南東圧縮の逆断層型を示す(図8右)。4時31分頃には、 $M_{JMA}5.9$ の余震が、また5時42分頃には $M_{JMA}5.3$ の余震が発生し、最大震度6弱の揺れが観測された。その後4月12日7時26分頃に $M_{JMA}5.6$ の地震が発生し、最大震度5弱の揺れが観測された。4月12日の地震は、3月12日の地震より約20km南で発生し、Hi-netおよびF-netの発震機構解はともに北北西-南南東圧縮の横ずれ断層型を示す。4月12日の地震の周辺の震源分布は、3月12日の地震の余震分布から離れており、

またほぼ東西方向に線状に分布している。発震機構解とも合わせて判断すると、3月12日の地震とは別の断層で発生したと考えられる。

図8の3月12日の地震の余震分布は、深さ5~15kmに分布しており、北に向かって深くなる傾向を示す。しかし、この地域はひずみ集中帯と呼ばれるひずみ速度の大きな地域であり(Sagiya *et al.*, 2000)、非常に複雑な速度構造になっているため、定常処理の震源の深さには注意が必要である。

この地域では平成20年度より文部科学省からの研究委託事業「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」によって、稠密なオフライン自然地震観測が実施されている。そこで3月12日の地震発生直後に震源域周辺の9観測点(図9左)のデータを回収し、解析を行った。波形相関データを用いたDouble-difference法(DD法; Waldhauser and Ellsworth, 2000)による精密震源決定の結果、3月12日9:00までに発生した余震の分布は、本震を中心として北北東-南南西方向に約17kmの広がりを持ち、深さ4~10kmに集中する(図10)。本震の震源の深さは約8kmであった。余震分布は定常処理(図8)の結果よりも浅く、北に向かって深くなる傾向は示していない。このことは、定常処理から得られた分布は見かけ上のものであったことを表す。複雑な速度構造の地域で詳細な震源分布を把握するためには稠密観測データが重要となる。

余震域の北東側と南西側では余震分布の特徴に違いがあり、北東側の余震域では、余震が南東傾斜の面状に分布するが、南西側ではその特徴は見られない。北東側の面状分布は発震機構解と調和的である。このことから北東側と南西側では断層面の傾斜が異なる可能性がある。

3.2 静岡県東部の地震活動

3月15日22時31分頃に静岡県東部を震源とする $M_{JMA}6.4$ の地震が発生し、富士宮市で最大震度6強が観測された。Hi-netによるこの地震の震源の深さは約15km、P波初動の押し引きによる発震機構解は横ずれ成分を持つ北北西-南南東圧縮の逆断層型であった(図11)。また、F-netおよびHi-netの記録波形解析によるセントロイド・モーメントテンソル(CMT)解は、北北西-南南東圧縮のほぼ横ずれ断層型となった(図11)。Hi-netの地震検測値とその波形相関データを用いたDD法による精密震源決定を行った。その結果、16日午前中までに発生した余震は北北東-南南西方向に広がり(図11)、東南東に向かって深くなる急勾配の面状に分布する(図12左)。その余震域の範囲は、水平方向に約5km、深さ方向に約6kmである(図12右)。こうした余震分布は発震機構解と調和的であり、今回の地震は北北東-南南西走向の断層に沿って発生したものと考えられる。

防災科研が運用していた旧関東・東海観測網による震源データから、本地震発生前にも断層面周辺での地震活動を確認することができる(図12左)。今回の余震域は、富士山下で発生している低周波地震発生域とは重ならない(図12右)。本震発生直後にM4を超える余震が2個発生したものの、その後はM4を超える余震は発生していな

い(図13)。震源域の広がり、本震発生当初から大きく変化していない(図14)。

3.3 茨城県北部・福島県東部の地震活動

2011年東北地方太平洋沖地震の発生後、茨城県北部から福島県東部にかけての領域で、最大Mw6.6の地震を含め数多くの浅発地震が発生した。2011年東北地方太平洋沖地震発生後の、茨城県北部から福島県東部にかけての領域における震央分布を図15に、主な地震の震源要素を表3に示す。図15には、主な地震のHi-netおよびF-netによる発震機構解をあわせて示す。茨城県北部から福島県東部にかけての領域に見られる地震密集域で発生する地震はほぼすべて15kmより浅く、日本島弧地殻内の活動と考えられる。

最大の地震(番号4)は、東北地方太平洋沖地震から1か月後の2011年4月11日17時16分に発生し、地震の規模はHi-netおよびF-netによりそれぞれM6.8、Mw6.6と求められた。震源の深さはそれぞれ7km、および5kmと推定されている。発震機構解はHi-netおよびF-netとも正断層型に求まっているが、伸長軸の方位はHi-netは東西方向、F-netは北東-南西方向とやや異なる。

活動の時間変化を見るため、図15の矩形領域A-Bに投影した時空間分布および同領域のM-T図を図16に示す。この領域では、東北地方太平洋沖地震前はほとんど地震が発生しなかったが、東北地方太平洋沖地震直後から多数の地震が発生した。最大の地震が発生するまで、地震は大きく南北2つの領域で発生しており、南北2つの領域の間では地震がほとんど発生しなかった。最大の地震はこの間を埋める領域で発生した。

発震機構解は最大地震を含め正断層型の解が多いが、正断層型以外の解も見られる。4月12日14時7分に発生した地震(番号8)は、Hi-netでは北西-南東方向に圧縮軸を有する逆断層型、F-netでは横ずれ型に近い解が求まっている。この地震は震源の深さにも特徴があり、これ以外の地震がほぼすべて10kmより浅く求まっているのに対して、15kmとやや深い。3月23日7時12分に発生した地震(番号2)は、F-netでは正断層型の解が求まっているが、Hi-netでは横ずれ成分をやや含む。

発震機構解の空間分布を見るため、主な地震のF-netによる発震機構解および伸長・圧縮軸の分布を図17に示す。伸長軸の方位は東西方向に近いものが多いが、南北に近いものから北西-南東方向を向くものまであり、多様である。

3.4 銚子付近の地震活動

2011年東北地方太平洋沖地震の発生以降、銚子付近で地震が多数発生した。この中には、東北地方太平洋沖地震以前はほとんど見られなかった浅発地震も多数含まれ、M6級の地震も複数発生した。関東地方では相模トラフから沈み込むフィリピン海プレートおよび、フィリピン海プレートの下に沈み込む太平洋プレートが重なる(笠原, 1985; Kimura *et al.*, 2006; 木村, 2010a, Uchida *et al.*, 2010; 上野・他, 2008)。これらのプレートが相互作用するため、この地域の地震活動は複雑である。東北地方太平洋沖地

震後の銚子付近の震央分布および鉛直断面を図18および図19に赤丸で示す。主な地震のHi-netおよびF-netによる発震機構解、およびプレート境界の指標としてフィリピン海プレートおよび太平洋プレートの相似地震(Kimura *et al.*, 2006; 木村, 2010a)をあわせて示す。図19の鉛直断面には、相似地震の分布から推定されるプレート境界の位置を重ねて示す。なお、水平位置0~20km、深さ20~30kmの相似地震は、これまで太平洋プレート上面境界における地震としてきたが、相似地震の分布の連続性から判断してフィリピン海プレート上面と分類することが妥当と考えられるため、暫定的にフィリピン海プレート上面境界における地震として取り扱った。これは後述する3月17日の地震がフィリピン海プレート上面の活動と考えられることと調和的である(図19)。太平洋プレートの上に位置するフィリピン海プレートの北限は、CMT解および構造探査より図18の青点線の位置に推定されている(上野ほか, 2008)。銚子付近の地震は、太平洋プレート・フィリピン海プレートの境界、およびフィリピン海プレート・日本島弧地殻の境界付近で特に多く発生している。東北地方太平洋沖地震後は、これらの境界に加えて、銚子付近の20kmより浅い日本島弧地殻内でも地震が多数発生した。主な地震周辺のM-T図を図20に示す。以下、注目すべき活動について述べる。

銚子付近の20kmより浅い領域で最大の地震は3月16日に発生した。地震の規模はMw5.8で、発震機構解は東西方向に伸長軸を有する正断層型に求まっている(図18, 図21)。20km以浅のその他の地震についても正断層型の解が卓越する(図21)。この領域では東北地方太平洋沖地震以前も浅発地震活動が見られ、発震機構解は正断層型が卓越した(図21)。東北地方太平洋沖地震以前は、主な活動域は北緯35.6°~35.7°の範囲に限られていたが、東北地方太平洋沖地震以後は発生領域が拡大し、それまで活動が低調だった北緯35.6°~35.9°の範囲で数多くの地震が発生した。

3月17日に銚子沖でMw5.5の地震が発生した。発震機構解は北西-南東方向に圧縮軸を有する低角逆断層型に、震源の深さはフィリピン海プレート上面付近に求まっている。

4月12日に房総半島沖でMw6.3の地震が発生した。発震機構解は東北東-西南西方向に伸長軸を有する横ずれ型に求められた。震源の深さはフィリピン海プレート上面付近だが、Hi-netおよびF-netによる発震機構解は、プレート境界で発生した場合に期待される低角逆断層型とは異なる。これよりプレート境界近傍の活動と考えられる。

4月21日および5月22日に、銚子付近でそれぞれMw6.1, Mw5.5の地震が発生した。震源の深さは太平洋プレート上面付近に、また発震機構解は西北西-東南東方向に圧縮軸を有する低角逆断層型に求まっている。これらの地震は二次余震と見られる多くの地震を伴ったが、直上の観測点では構造に起因すると見られる要因により、S波の立ち上がりが極めて不明瞭で深さの決定精度が低く、断層面の特定には困難が伴った。

東北地方太平洋沖地震後、関東地方では相似地震が多数発生している（木村，2011）。この領域の太平洋プレートの相似地震を元に平均積算すべりを推定しところ図 22 のようになった。東北地方太平洋沖地震後にすべりが加速したのに加えて、4 月 21 日および 5 月 22 日の地震後もすべりが加速した様子が見られる。なお、3 月 22 日 M5.3 (Hi-net による) の地震後もすべりの加速が見られる。この地震について、F-net では解が得られておらず、Hi-net でも決まりが悪いが、低角逆断層型の発震機構解と矛盾しない初動押し引き分布が得られている（図 19）。関東地方の相似地震はプレート運動の指標と見なせることから（Kimura *et al.*, 2006, 木村，2010a），平均積算すべりの増加はプレート間すべりの加速を示していると言える。これより、3 月 22 日、4 月 21 日、および 5 月 22 日の地震は太平洋プレート上面の活動と考えられる。この領域の M6 級の地震発生後のプレート間すべりの加速はこれまでも報告されており（木村，2010a），今回も同様の現象と考えられる。

5 月 20 日に銚子沖で Mw5.7 の地震が発生した。発震機構解は F-net では西北西－東南東方向に圧縮軸を有する低角逆断層型に、震源の深さは太平洋プレート上面付近に求まっている。これより太平洋プレート上面の活動と考えられる。

防災科研では、Hi-net により得られた地震波形記録の相似性解析に基づき、相似地震の自動検出を行なっている（木村，2010a）。相似地震の活動状況から、銚子付近の太平洋プレート上面でのプレート間すべりの加速が推定された（木村，2011）。また、4 月 21 日に Mw6.1、5 月 20 日に Mw5.7、5 月 22 日に Mw5.5 と M6 級の地震が連鎖的に発生した。銚子付近ではフィリピン海プレートの相似地震も見られること（Kimura *et al.*, 2006）、およびフィリピン海プレートの北限（上野ほか，2008）より南であることから、これらの地震は太平洋プレートとフィリピン海プレートの境界で発生したと考えられる。これらの事実は、東北地方太平洋沖地震による応力変化によって引き起こされたプレート間すべりの加速が、フィリピン海プレートの北限を越えて関東地方下のフィリピン海プレート・太平洋プレートの境界にも及んだことを示している。関東地方下の地震活動の監視を今後も継続する必要がある。

3.5 東京湾の地震活動

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生後、東京湾で地震が多数発生した。東京湾北部から東京・神奈川都県境にかけての深さ 15 ～ 35 km の領域ではフィリピン海プレート上面および上面付近で地震が多数発生する（松原ほか，2006；木村・武田，2009；木村，2010b）。そこで、今回の地震活動の分布と過去 32 年間の活動と比較した。

今回の地震周辺の震央分布および主な地震の発震機構解を図 23 に示す。3 月 15 日 4 時 59 分に発生した Mw4.0 の地震が最大である。主な地震の Hi-net および F-net による発震機構解は、南北方向に伸長軸を有する正断層型あるいは北東－南西方向に伸長軸を有する正断層成分を含む横ずれ型と、非低角逆断層型に求まっている。今回の

活動域周辺の過去 32 年間の M-T 図を図 24 に示す。この領域では M4 クラスの地震が 2005 年（松原ほか，2006）を含め過去に何回か発生している。

今回の活動域の近傍では 2005 年 6 月 1 日に M3.8 – 4.2 の 3 個の地震が連続して発生し、多くの余震を伴った。これらの地震では低角逆断層型の発震機構解が卓越したこと、および震源位置からフィリピン海プレート上面の活動と考えられる（松原ほか，2006）。今回の最大地震の震央位置は、2005 年の最大地震（2005 年 6 月 1 日 20 時 44 分、M4.2）より約 5 km 東、約 3 km 南と、ほぼ同じ場所に求まっている。しかし、発震機構解は非低角逆断層型でありプレート境界近傍の活動と考えられる。

4. 今後の課題

Hi-net の暫定再検測カタログと気象庁一元化震源カタログの比較から、大規模地震発生時の余震活動状況を適切に把握するためには、まずは観測データを安定して収集することが重要であることが明らかになった。余震域の拡がりを即時的に把握するためには、データのオンライン収集の手段を確保しなくてはならない。そのため、激甚災害発生時に業務を継続するための観測技術開発が必要である。加えて、東北地方太平洋沖地震発生後、非常に活発な余震活動ならびに誘発地震活動が日本全国の広範囲で発生した。地震活動が活発な時期は、各観測点で地震に起因する位相の検出に成功したとしても、広範囲で同時多発するどの地震に起因する位相であるかを見出し、適切な位相のグループを自動的に構築することは非常に難しい。これらの点は、本震直後の地震活動状況を把握するうえでデータ処理上の課題であると言える。

現行の高感度地震観測システムは、システムを構成するサーバー台数が多いため、消費電力量も大きいことから、再起動を 3 月 14 日まで見送った。その結果、Hi-net のホームページの再開は、翌 15 日まで延びた。本震災において、システムを構成するハードウェアに少なからず被害が出たこと、増大するデータ量に対応できない側面が明らかになったこと等を踏まえ、平成 23 年度 1 次補正予算において、高感度地震観測データ処理システムの復旧ならびに強化を実施することとなった。今回の震災の反省のもと、コンパクトかつ省電力で全データ処理が可能となるようなシステムの整備を心掛けたい。

さらに、ミラーサイトの構築により、つくば市停電時においても情報配信が継続する仕組みの導入を進めたい。また、地震が頻発する状態での迅速かつ適切な震源情報推定の仕組みの研究開発とともに、その情報やこれまでの地震活動推移等、緊急時に必要とされる情報の整理と適切な情報配信のあり方についても検討を行う必要があると考える。

謝辞

本稿をまとめるに当たり、気象庁一元化震源情報を用いた。また、Hi-net システムでは、2011 年東北地方太平洋沖地震合同観測グループにより設置された臨時観測点

のデータを使用している。本稿では、歪集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクトのデータを使用している。Hi-net システム復旧にあたり、ご尽力頂いた関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) Asano, Y., Saito, T., Ito, Y., Shiomi, K., Hirose, H., Matsumoto, T., Aoi, S., Hori, S., and Sekiguchi, S. (2011) : Spatial distribution and focal mechanisms of aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, 669-673.
- 2) Hirose, H. (2011) : Tilt records prior to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, 655-658.
- 3) 笠原敬司(1985) : プレートが三重会合する関東・東海地方の地殻活動様式. 国立防災科学技術センター研究報告, **35**, 33-137.
- 4) 活断層研究会編(1991) : 新編 日本の活断層, 東京大学出版会.
- 5) 木村尚紀(2010a) : 関東地方の相似地震. 地震予知連絡会会報, **83**, 596-608.
- 6) 木村尚紀(2010b) : 2010年5月9日東京都東部の地震. 地震予知連絡会会報, **84**, 126-128.
- 7) 木村尚紀(2011) : 東北地方太平洋沖地震以降の関東地方の相似地震活動. 地震予知連絡会会報, **86**, 印刷中.
- 8) Kimura, H., Kasahara, K., Igarashi, T., and Hirata, N. (2006) : Repeating earthquake activities associated with the Philippine Sea plate subduction in the Kanto district, central Japan: A new plate configuration revealed by interplate aseismic slips. *Tectonophysics*, **417**, 101-118.
- 9) 木村尚紀・武田哲也(2009) : 2008年8月8日東京・神奈川県境付近の地震. 地震予知連絡会会報, **81**, 300-302.
- 10) 松原 誠・木村尚紀・汐見勝彦・伊藤喜宏(2006) : 2005年6月1日の東京湾における地震活動. 地震予知連絡会会報, **75**, 221-223.
- 11) 小原一成・汐見勝彦・針生義勝・松村 稔・島貫 卓(2008) : データ伝送ネットワークプラットフォームの開発とHi-net システムへの実用化. 日本地球惑星科学連合2008年大会, S144-P012.
- 12) 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.
- 13) Sagiya, T., Miyazaki, S., and Tada, T. (2000) : Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure Appl. Geophys.*, **157**, 2303-2322.
- 14) Uchida, N., Matsuzawa, T., Nakajima, J., and Hasegawa, A. (2010) : Subduction of a wedge - shaped Philippine Sea plate beneath Kanto, central Japan, estimated from converted waves and small repeating earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **115**, B07309, doi:10.1029/2009JB006962.
- 15) 上野友岳・武田哲也・木村尚紀・小原一成・笠原敬司・鶴 哲郎(2008) : 関東東方沖における太平洋およびフィリピン海プレートの沈み込みの形態と地震活動. 日本地球惑星科学連合2008年大会予稿集, J248-005.
- 16) Waldhauser F. and Ellsworth, W. L. (2000) : A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 1353-1368.

(2011年11月15日原稿受付,
2011年12月2日改稿受付,
2011年12月2日原稿受理)

要 旨

防災科学技術研究所の高感度地震観測網は、東北地方太平洋沖地震やその後の余震などの地震波形を記録し、地震の発生メカニズムの解明や災害の低減に役立つデータを収集してきた。この地震により防災科研も被害を受け、Hi-net も停電によるシステムの停止・津波による観測点の流失などの影響を受けた。しかし、その後の施設復旧やデータ回収作業により、前震・本震・余震や誘発地震の震源カタログ整備などのデータ処理が行われている。本稿では、防災科研 Hi-net が受けた被害とそれの対応および東北地方太平洋沖地震やその後に発生した誘発地震などに関する観測結果について紹介する。

キーワード : 東北地方太平洋沖地震, 防災科研 Hi-net, 地震波形, 震源分布, 誘発地震

観測点コード	11		12		13		14		15		データ復帰日時 (D:Data, N:Network)
	am.	pm.									
N.NAWH/KKWH10											
N.OPWH/ABSH02											
N.TUSH/ABSH05											
N.SNNH/KSRH08											
N.AYEH/TKCH02											
N.SKNH/TKCH10											
N.OOMH/AOMH01											
N.SAIH/AOMH02											
N.KUCH/AOMH03											
N.AOMH/AOMH04											
N.NHJH/AOMH05											
N.RKSH/AOMH06											
N.FKUH/AOMH07											
N.AJSH/AOMH08											
N.IKIH/AOMH09											
N.KRIH/AOMH10											
N.TWWH/AOMH11											
N.TWEH/AOMH12											
N.HHEH/AOMH13											
N.NYAH/AOMH14											
N.OWNH/AOMH15											
N.SHGH/AOMH16											
N.NWAH/AOMH17											
N.TTKH/AOMH18											
N.NHEH/IWTH01											
N.TMYH/IWTH02											
N.IWZH/IWTH03											
N.SMTH/IWTH04											
N.FSWH/IWTH05											
N.NHWH/IWTH06											N: 04/04 09:42
N.KRMH/IWTH07											
N.KJNH/IWTH08											
N.KJSH/IWTH09											N: 03/26 09:56
N.ASRH/IWTH10											
N.IHEH/IWTH11											
N.KHEH/IWTH12											
N.KZMH/IWTH13											
N.TROH/IWTH14											N: 05/11 14:04
N.YHBH/IWTH15											
N.SZKH/IWTH16											
N.KANH/IWTH17											
N.KASH/IWTH18											
N.HMNH/IWTH19											
N.HMSH/IWTH20											
N.YMDH/IWTH21											D: 03/16 11:31 N: 04/28 14:46
N.TOUH/IWTH22											

M9.0

■ データ欠測 ■ データセンタ停止 ■ ネットワーク停止

図 1.1 地震発生直後の Hi-net 観測点におけるデータ収集状況

Fig. 1.1 Data collection circumstances at the Hi-net stations.

観測点コード	11		12		13		14		15		データ復帰日時 (D:Data, N:Network)
	am.	pm.									
N.KMIH/IWTH23											D:03/18 11:26 N:03/18 11:27
N.KGSH/IWTH24											
N.ICEH/IWTH26											
N.RZTH/IWTH27											D:03/18 13:19 N:04/14 16:21
N.IW2H/IWTH28											
N.SNDH/MYGH01											津波被災：観測休止
N.NRKH/MYGH02											
N.KKWH/MYGH03											D:04/06 14:14 N:06/07 13:00
N.TOWH/MYGH04											D:03/17 20:51 N:03/17 20:52
N.ONDH/MYGH05											
N.TAJH/MYGH06											D:03/17 17:06 N:03/17 17:07
N.KWSH/MYGH07											D:03/17 16:29 N:03/17 16:30
N.IWNH/MYGH08											
N.SISH/MYGH09											D:03/16 15:54 N:03/16 15:55
N.YMMH/MYGH10											D:03/16 17:59 N:04/08 12:09
N.KAKH/MYGH11											D:03/19 11:36 N:03/19 11:36
N.SZGH/MYGH12											津波被災：観測休止
N.NSNH/AKTH01											
N.NSSH/AKTH02											
N.YJMH/AKTH03											
N.HNRH/AKTH04											
N.CKH/AKTH05											
N.OGCH/AKTH06											
N.KOSH/AKTH07											
N.FSTH/AKTH08											
N.TSRH/AKTH09											
N.ODTH/AKTH10											
N.OGAH/AKTH11											
N.GJOH/AKTH12											
N.ANIH/AKTH13											
N.KZNH/AKTH14											
N.KWAH/AKTH15											
N.NSBH/AKTH16											
N.NSEH/AKTH17											N:04/05 11:49
N.OMRH/AKTH18											
N.YUZH/AKTH19											
N.TDOH/YMTH01											
N.YGTH/YMTH02											
N.NYOH/YMTH03											
N.KMYH/YMTH04											
N.ONIH/YMTH05											
N.THTH/YMTH06											
N.YNZH/YMTH07											
N.YWTH/YMTH08											
N.TZWH/YMTH09											
N.FGTH/YMTH10											

M9.0

■ データ欠測 ■ データセンタ停止 ■ ネットワーク停止

図 1.2 地震発生直後の Hi-net 観測点におけるデータ収集状況

Fig. 1.2 Data collection circumstances at the Hi-net stations.

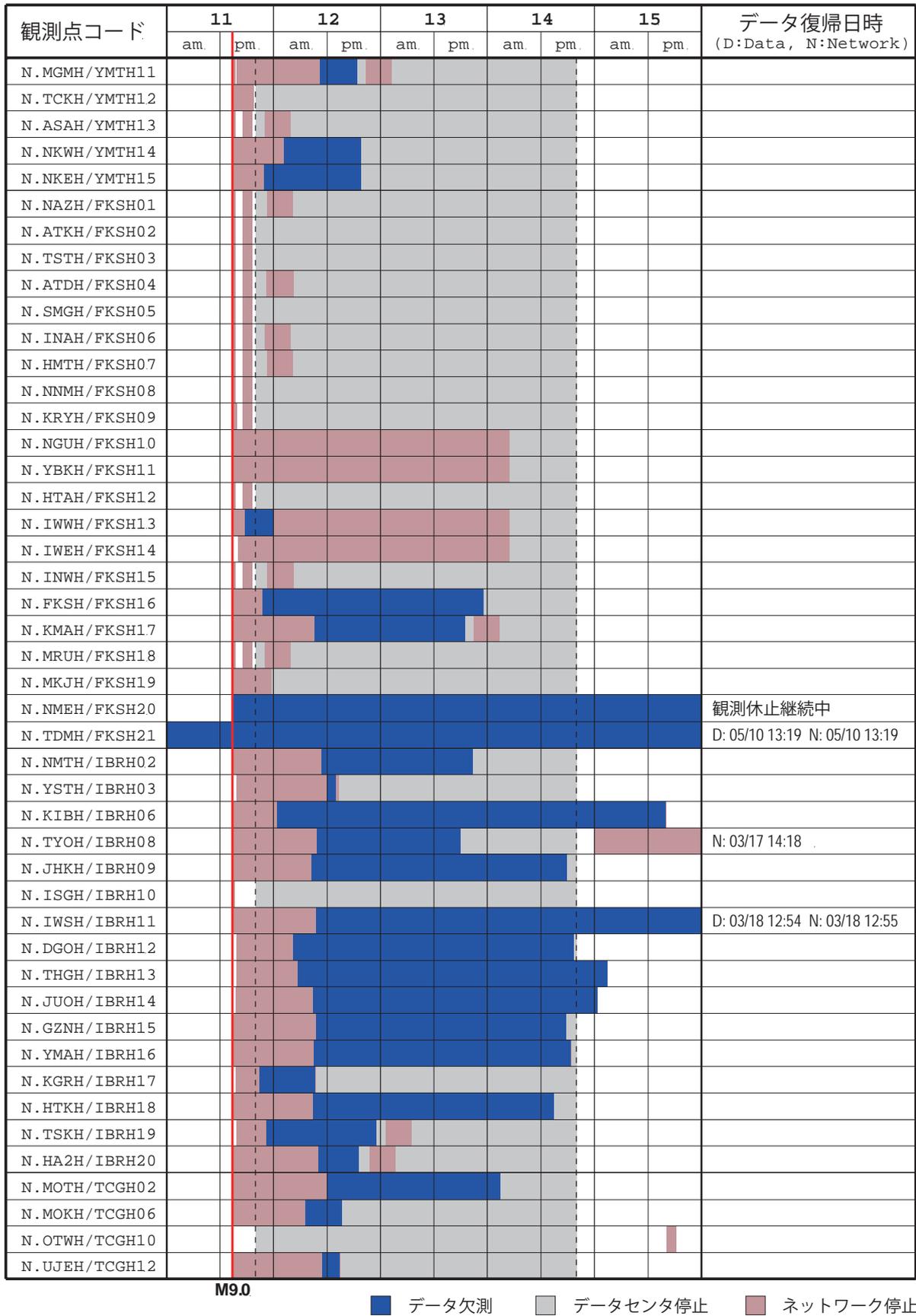


図 1.3 地震発生直後の Hi-net 観測点におけるデータ収集状況

Fig. 1.3 Data collection circumstances at the Hi-net stations.

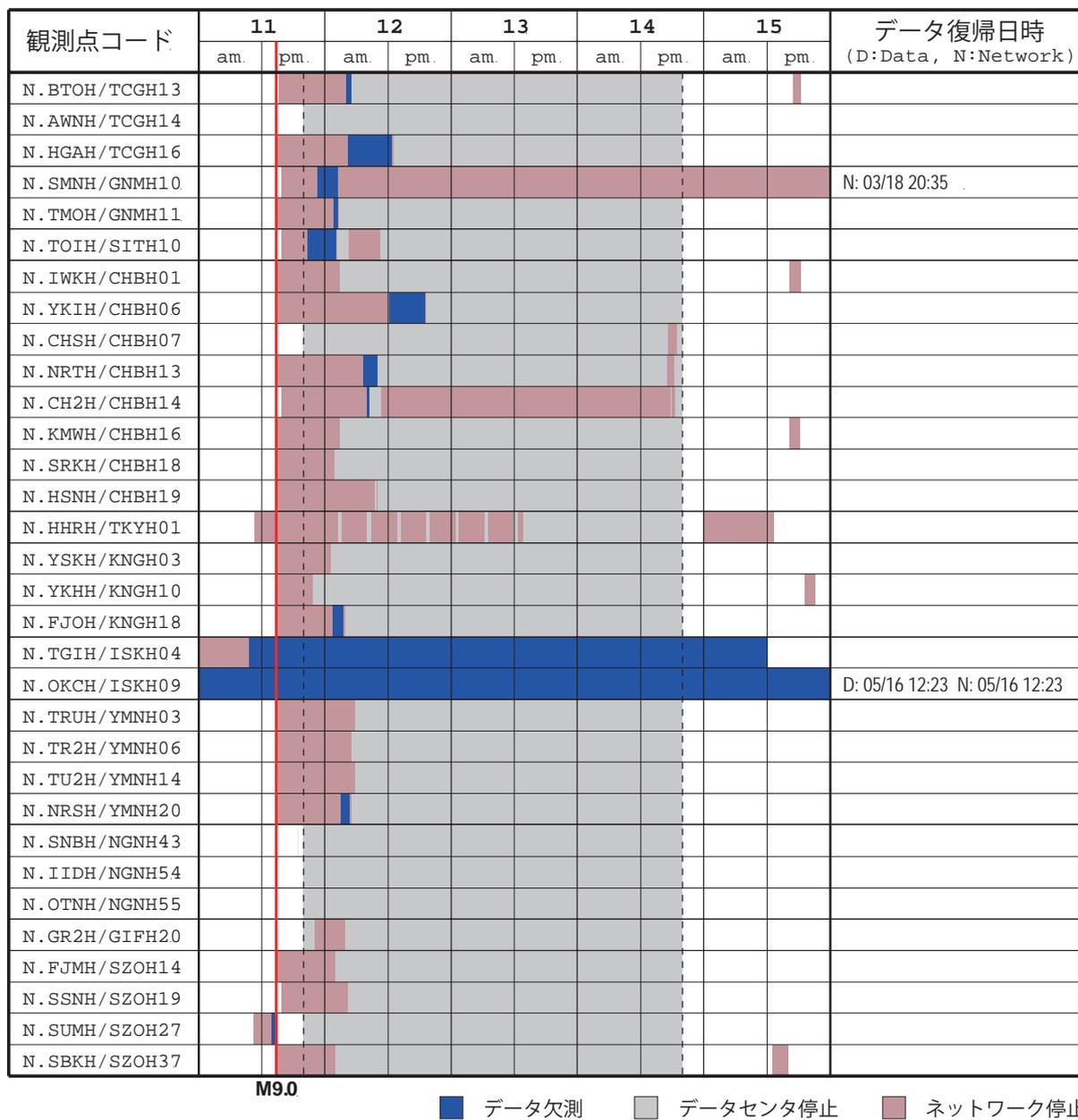


図 1.4 地震発生直後の Hi-net 観測点におけるデータ収集状況
 Fig. 1.4 Data collection circumstances at the Hi-net stations.

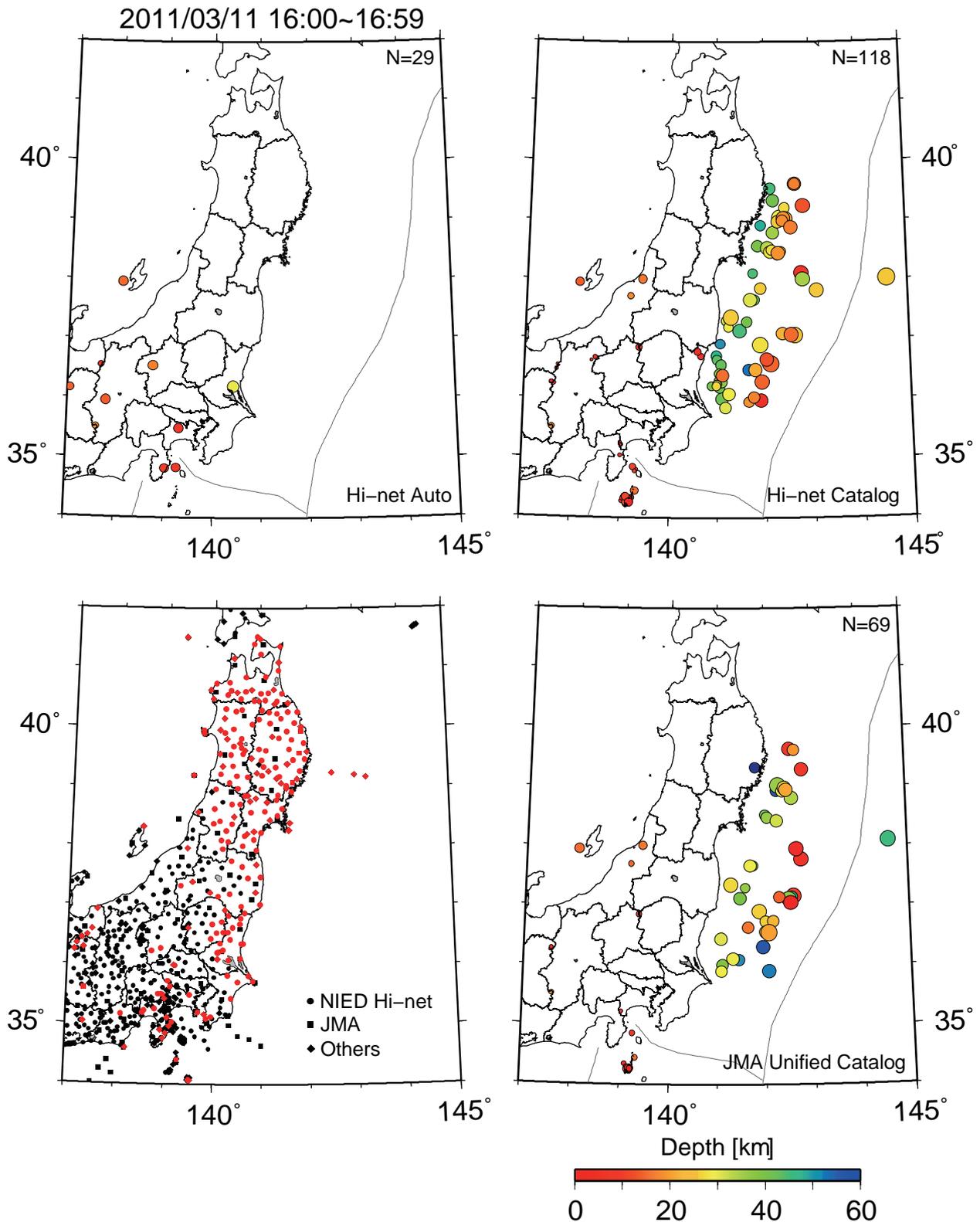


図2 3/11の16:00~16:59における震源決定状況

左上) 高感度地震観測処理システム(Hi-net システム)における自動処理結果. 右上) Hi-net システムにおける暫定再検測結果(2011/6/30 時点). 右下) 気象庁一元化震源情報カタログ. 左下) 観測点分布. 当該時間の大半でオンラインデータ収集に支障があった観測点を赤で示す.

Fig. 2 Hypocenter distribution of earthquakes occurred from 16:00 to 16:59, on March 11.

Upper left) Hypocenters detected automatically by the Hi-net system. Upper right) Hypocenters determined manually by the Hi-net system, as of June 30, 2011. Lower right) Hypocenters based on the JMA unified earthquake catalog. Lower left) Station distribution. Red dots indicate the stations where waveform data could not be transmitted in real-time for 30 minutes or more, from 16:00 to 16:59 on March 11.

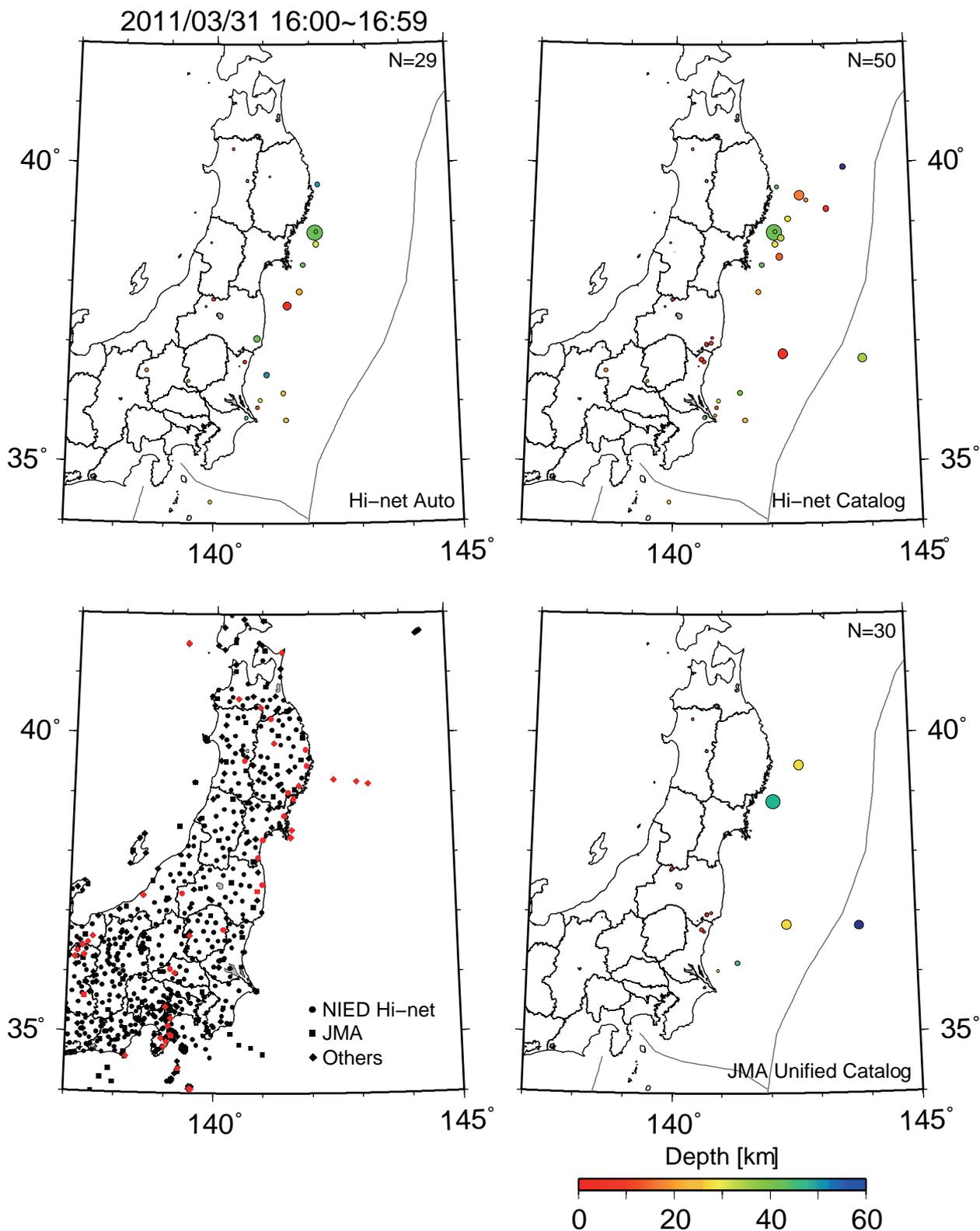


図3 3/31の16:00~16:59における震源決定状況
 左上)高感度地震観測処理システム(Hi-netシステム)における自動処理結果。右上)Hi-netシステムにおける暫定再検測結果(2011/6/30時点)。右下)気象庁一元化震源情報カタログ。左下)観測点分布。当該時間の大半でオンラインデータ収集に支障があった観測点を赤で示す。

Fig. 3 Hypocenter distribution of earthquakes occurred from 16:00 to 16:59, on March 31.
 Upper left) Hypocenters detected automatically by the Hi-net system. Upper right) Hypocenters determined manually by the Hi-net system, as of June 30, 2011. Lower right) Hypocenters based on the JMA unified earthquake catalog. Lower left) Station distribution. Red dots indicate the stations where waveform data could not be transmitted in real-time for 30 minutes or more, from 16:00 to 16:59 on March 31.

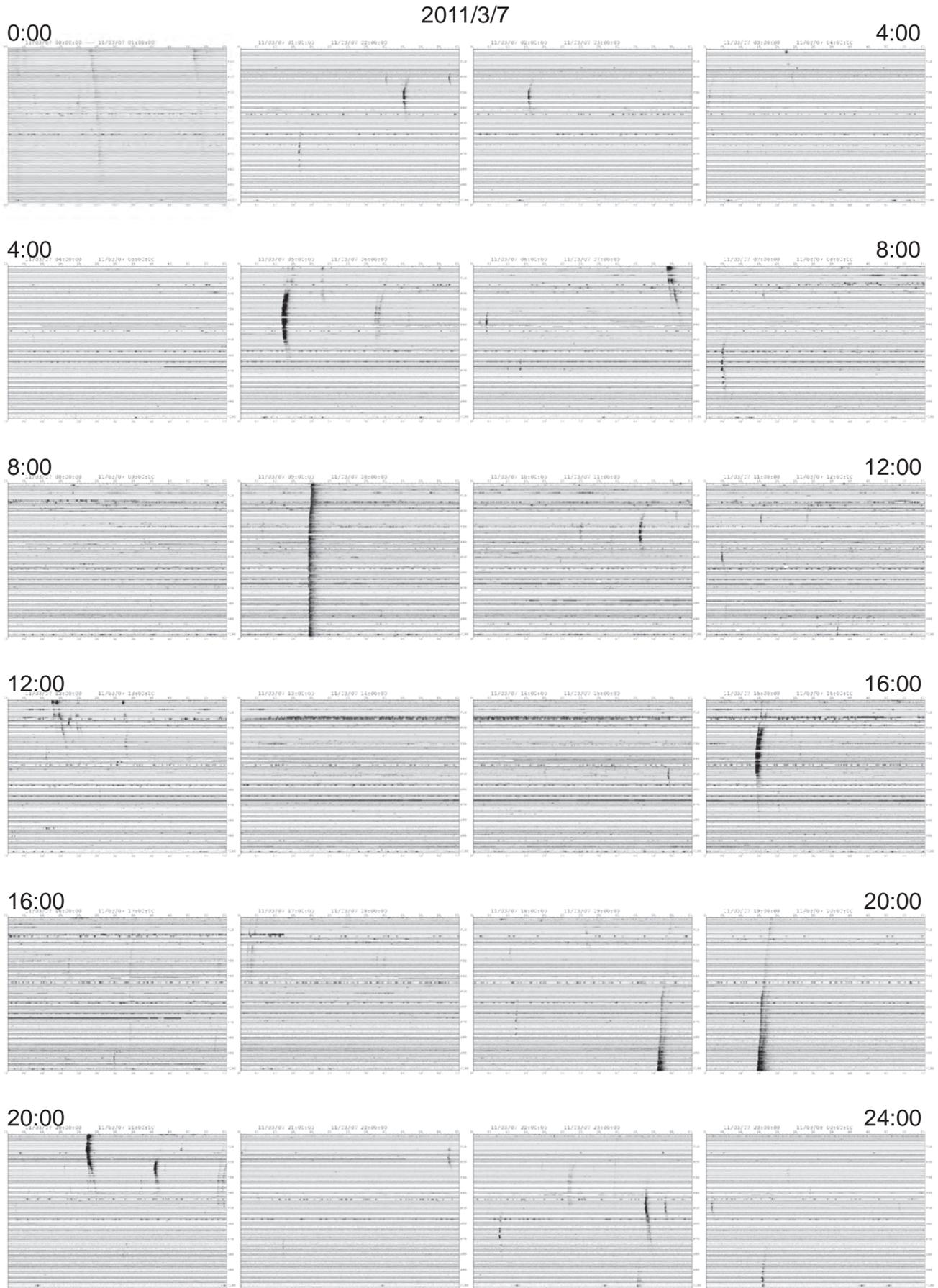


図 4.1 防災科研 Hi-net の 100 観測点における 3/7 ~ 3/13 の波形
 Fig. 4.1 Waveforms recorded at 100 Hi-net stations from March 7 to March 13, 2011.

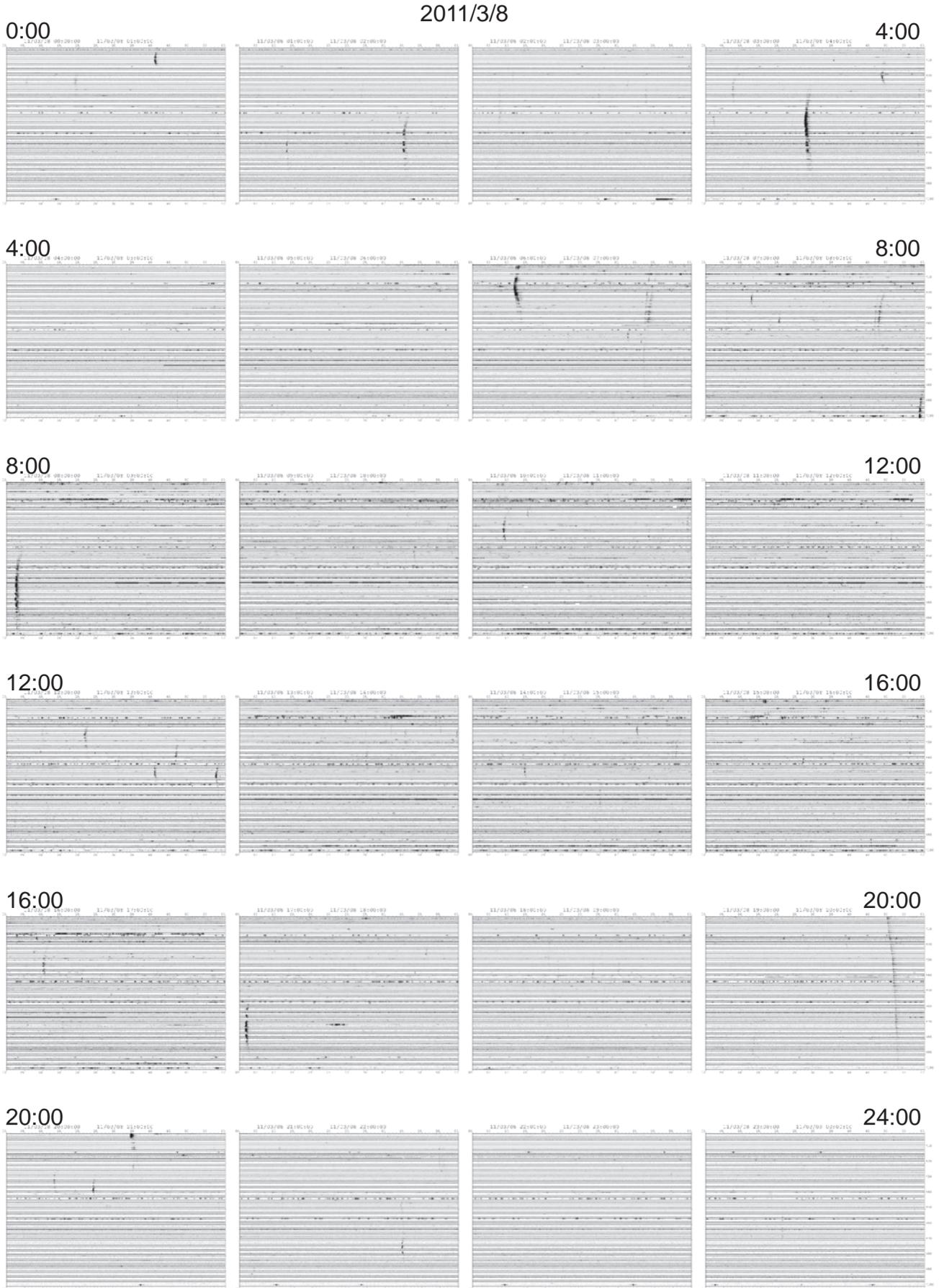


図 4.2 防災科研 Hi-net の 100 観測点における 3/7 ~ 3/13 の波形
Fig. 4.2 Waveforms recorded at 100 Hi-net stations from March 7 to March 13, 2011.

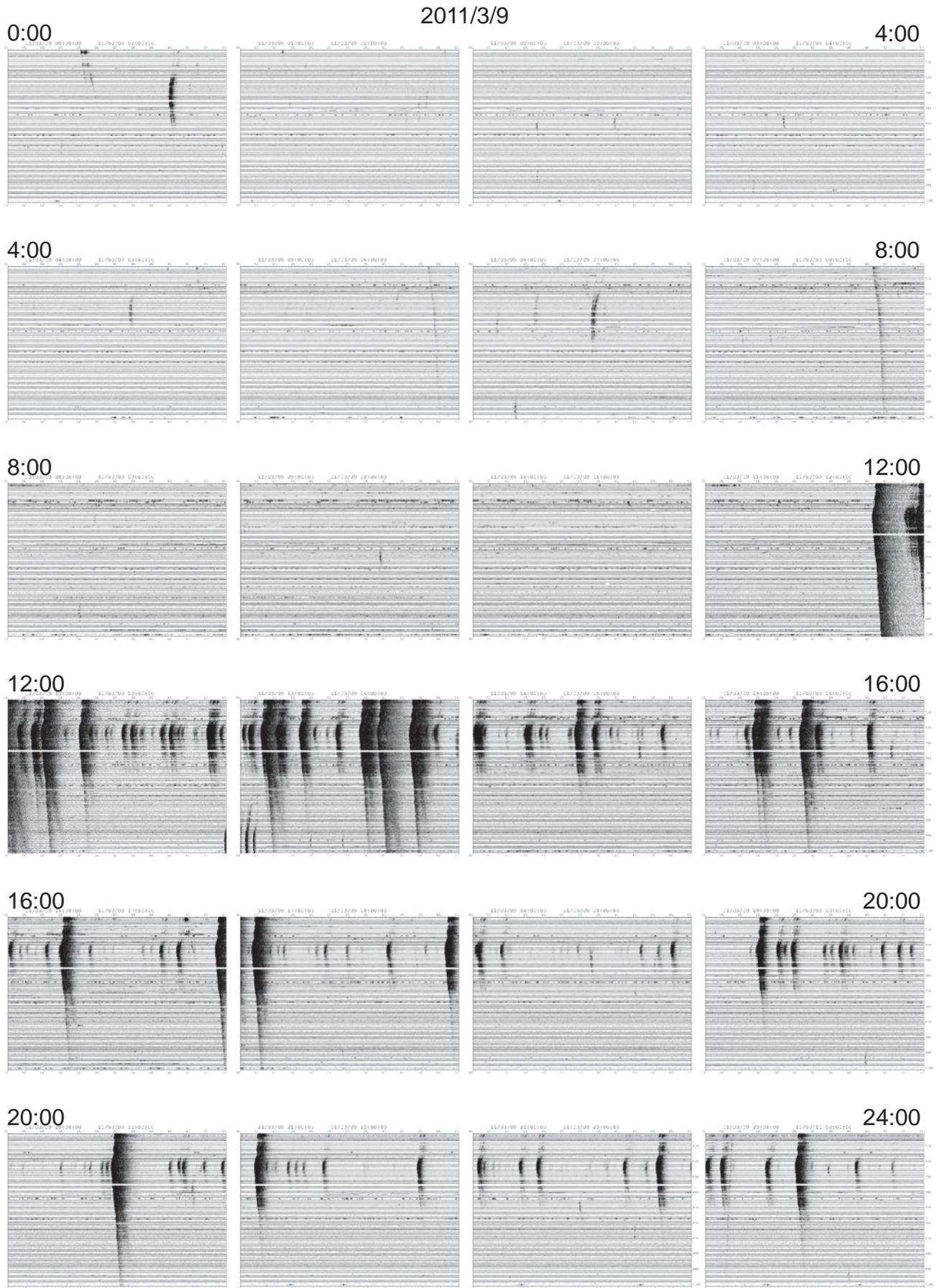


図 4.3 防災科研 Hi-net の 100 観測点における 3/7 ~ 3/13 の波形
Fig. 4.3 Waveforms recorded at 100 Hi-net stations from March 7 to March 13, 2011.

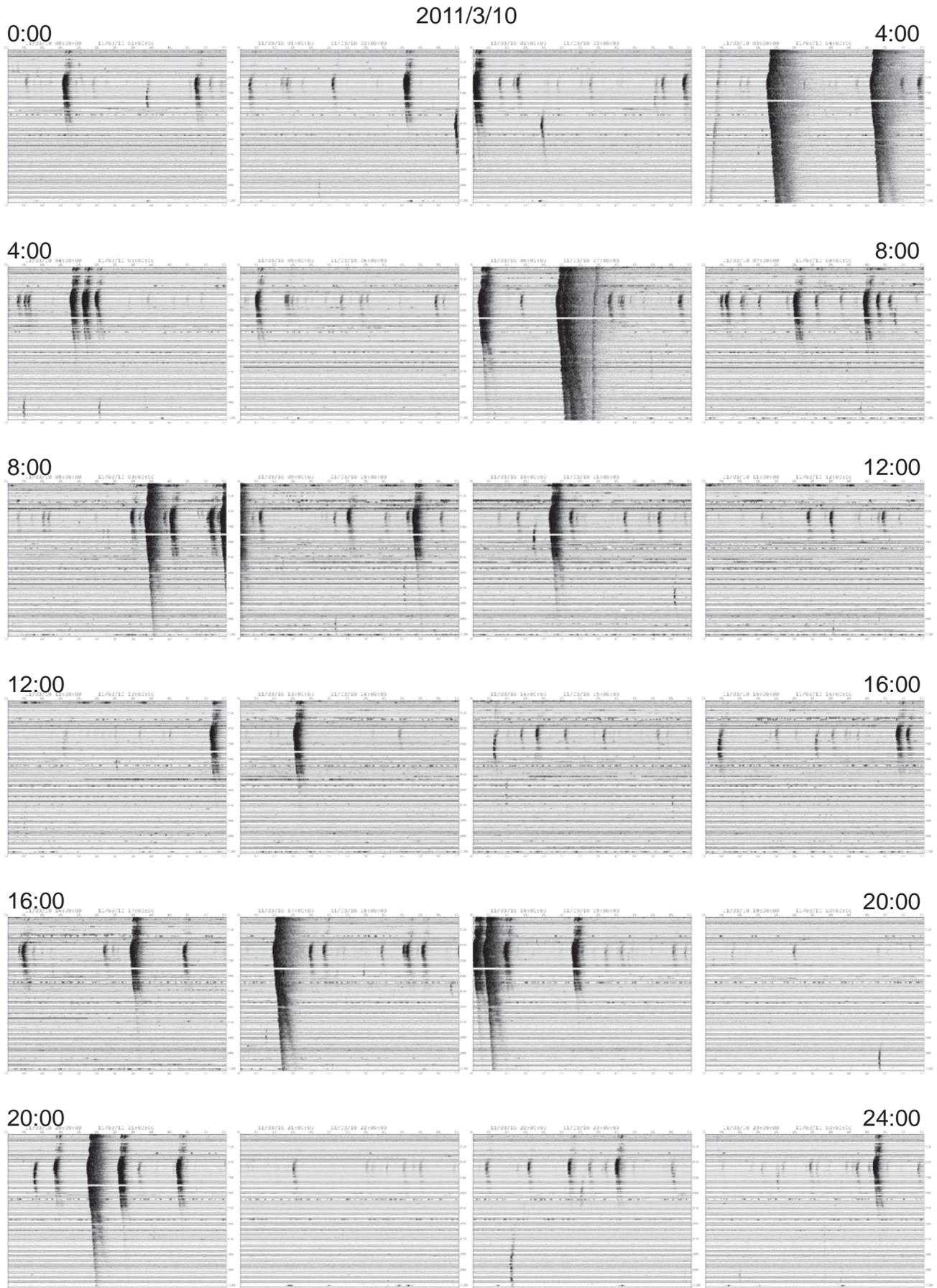


図 4.4 防災科研 Hi-net の 100 観測点における 3/7 ~ 3/13 の波形
Fig. 4.4 Waveforms recorded at 100 Hi-net stations from March 7 to March 13, 2011.

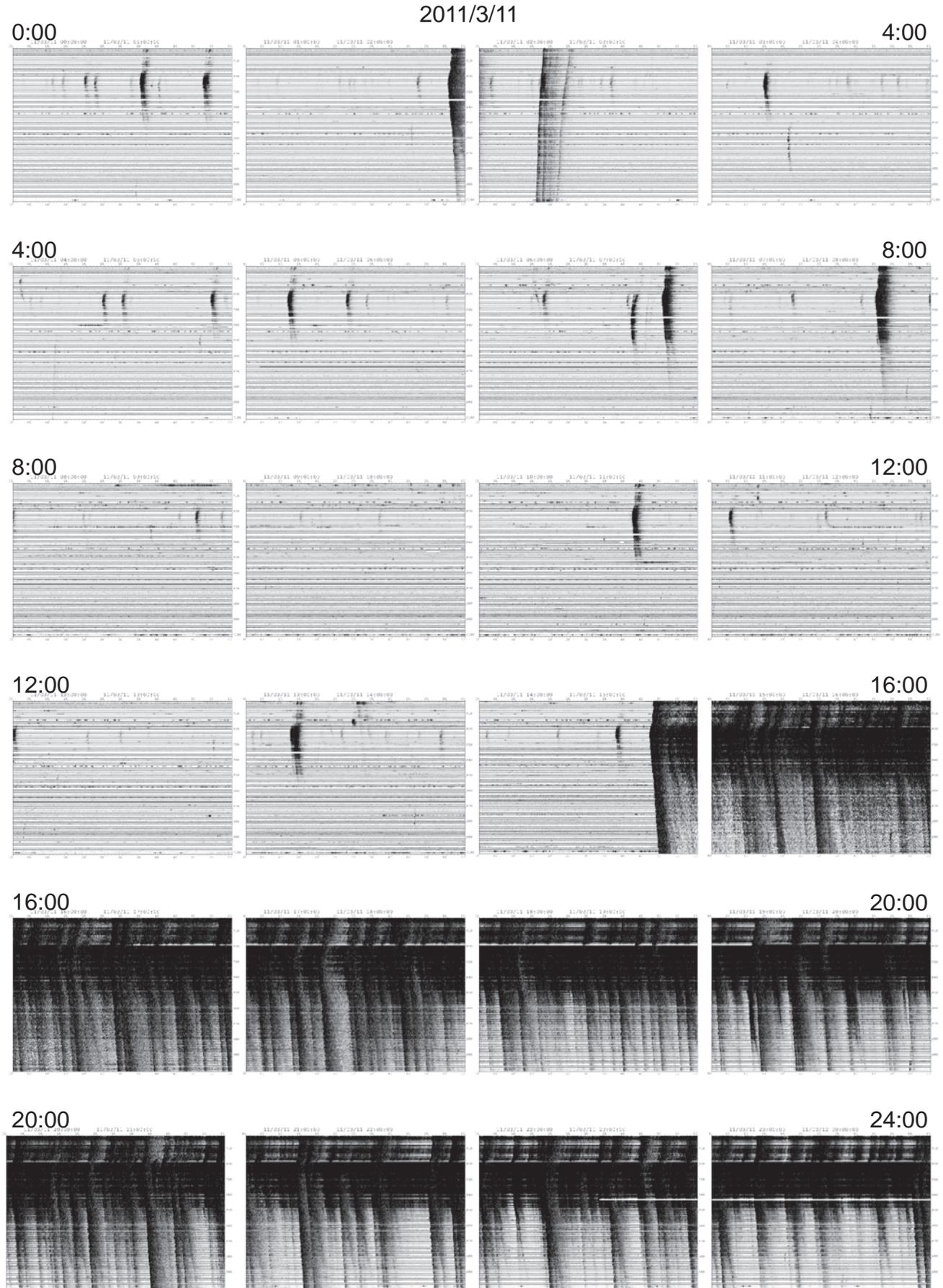


図 4.5 防災科研 Hi-net の 100 観測点における 3/7 ~ 3/13 の波形
Fig. 4.5 Waveforms recorded at 100 Hi-net stations from March 7 to March 13, 2011.

2011/3/12

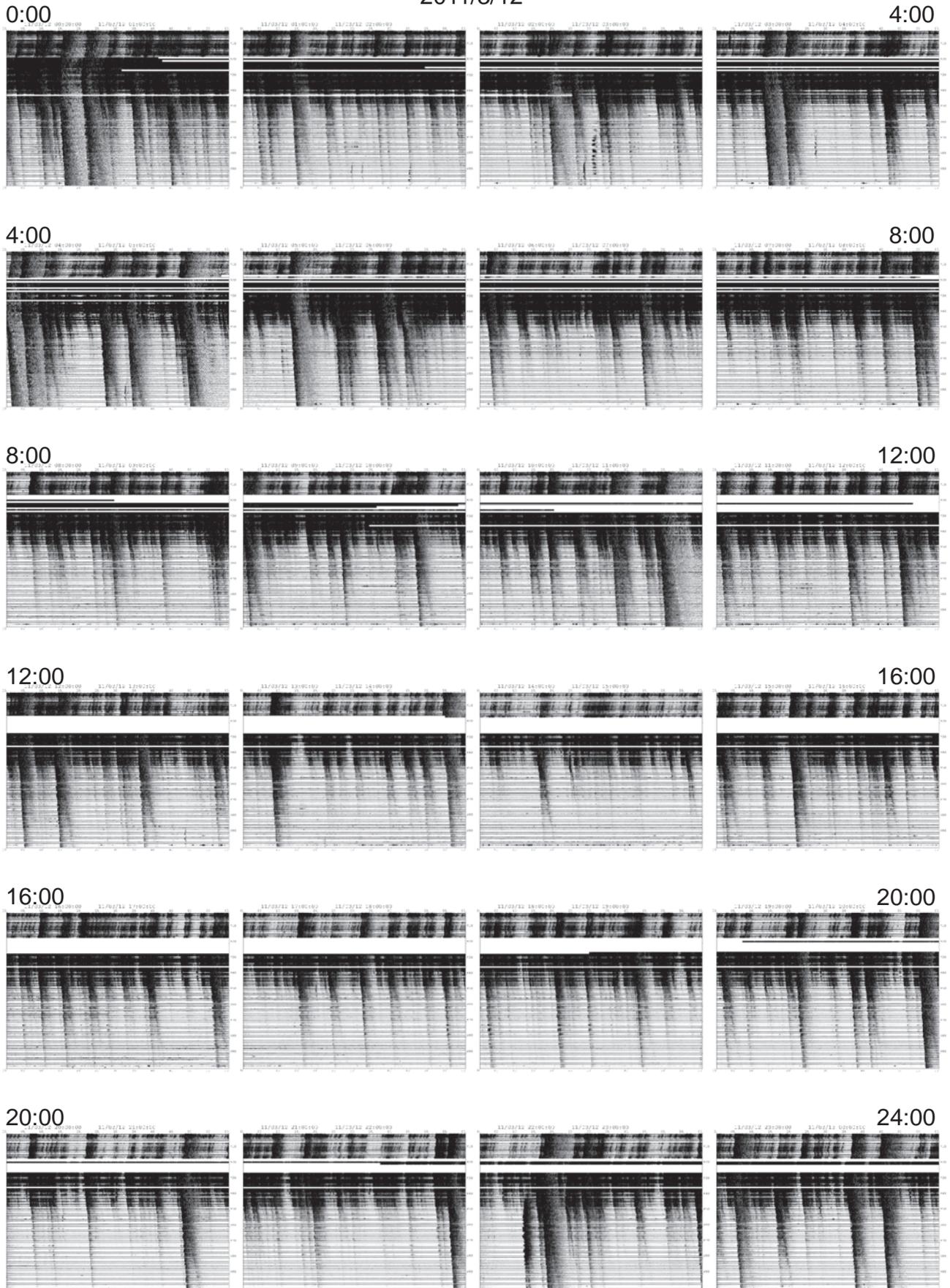


図 4.6 防災科研 Hi-net の 100 観測点における 3/7 ~ 3/13 の波形

Fig. 4.6 Waveforms recorded at 100 Hi-net stations from March 7 to March 13, 2011.

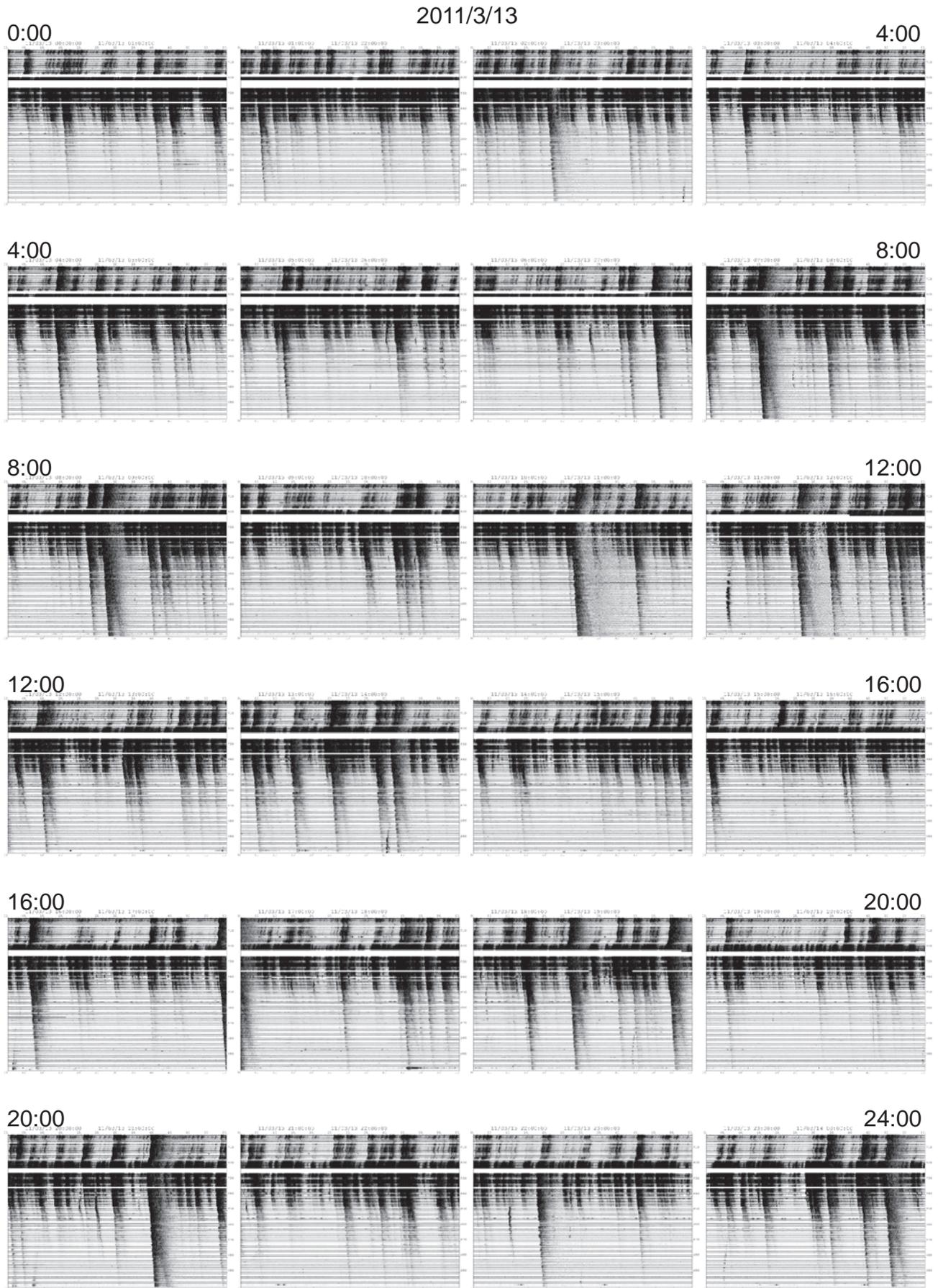


図 4.7 防災科研 Hi-net の 100 観測点における 3/7 ~ 3/13 の波形
Fig. 4.7 Waveforms recorded at 100 Hi-net stations from March 7 to March 13, 2011.

2011/3/8

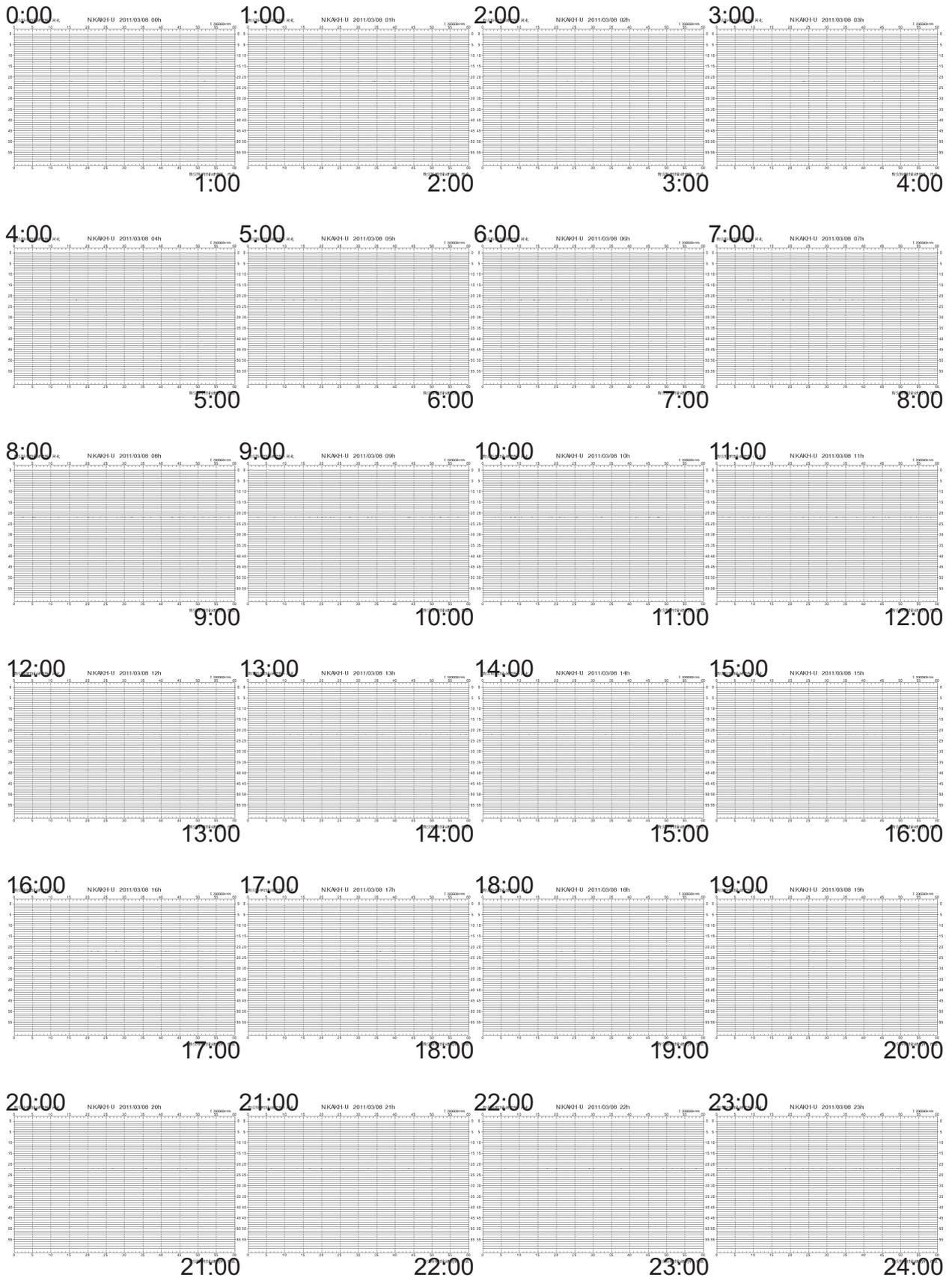


図 5.1 宮城県石巻市の河北 (N.KAKH) 観測点における 3/8 ~ 3/11 の連続波形
 各 1 時間の波形は、横幅が左から右へ 1 時間の波形を示し、上から下へ 60 本並び、1 時間の波形を表している。
 Fig. 5.1 Continuous waveform data recorded at the N.KAKH station (in Ishinomaki city, Miyagi prefecture) from March 8 to 11.

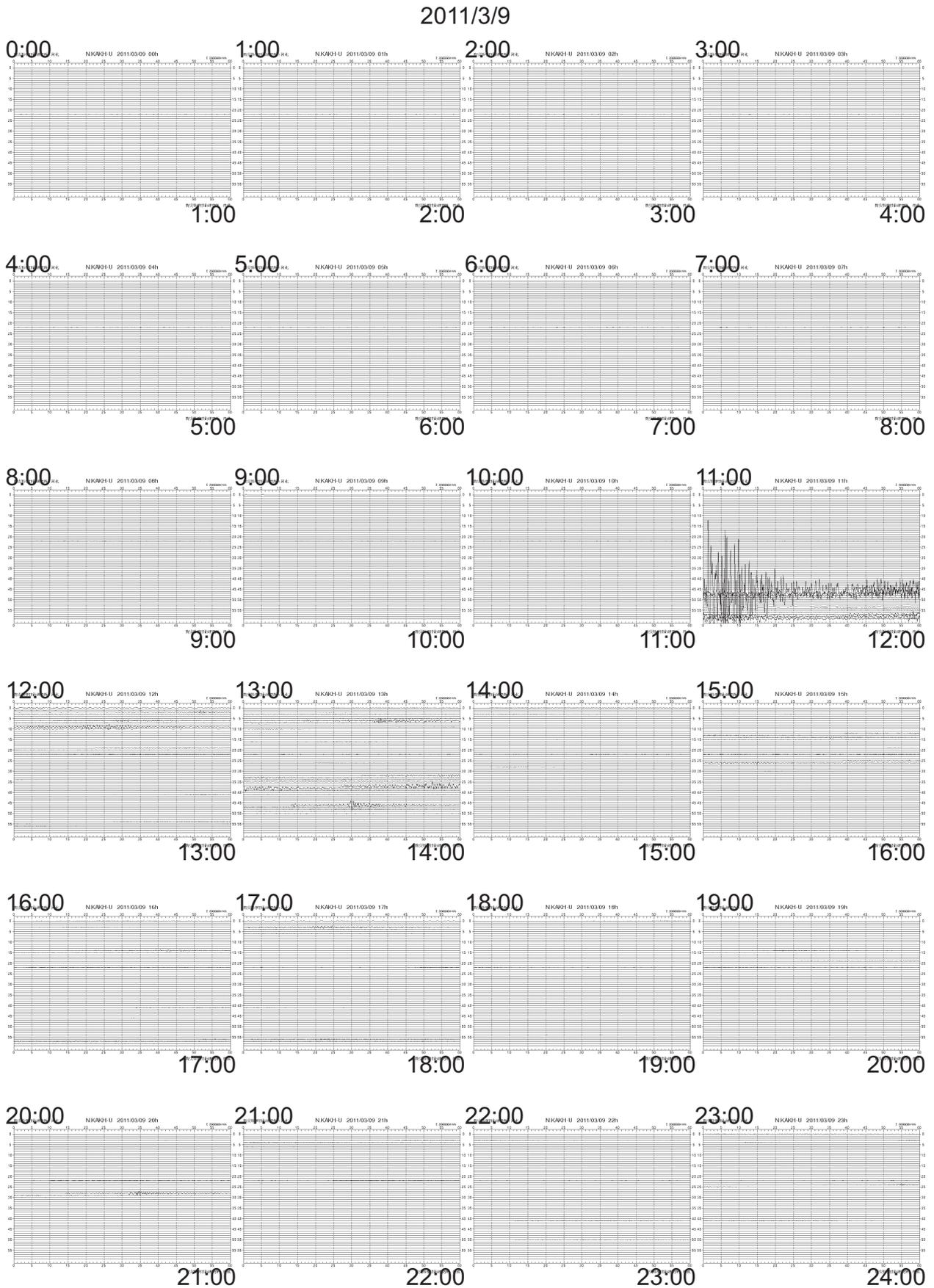


図 5.2 宮城県石巻市の河北 (N.KAKH) 観測点における 3/8 ~ 3/11 の連続波形
各 1 時間の波形は、横幅が左から右へ 1 時間の波形を示し、上から下へ 60 本並び、1 時間の波形を表している。

Fig. 5.2 Continuous waveform data recorded at the N.KAKH station (in Ishinomaki city, Miyagi prefecture) from March 8 to 11.

2011/3/10

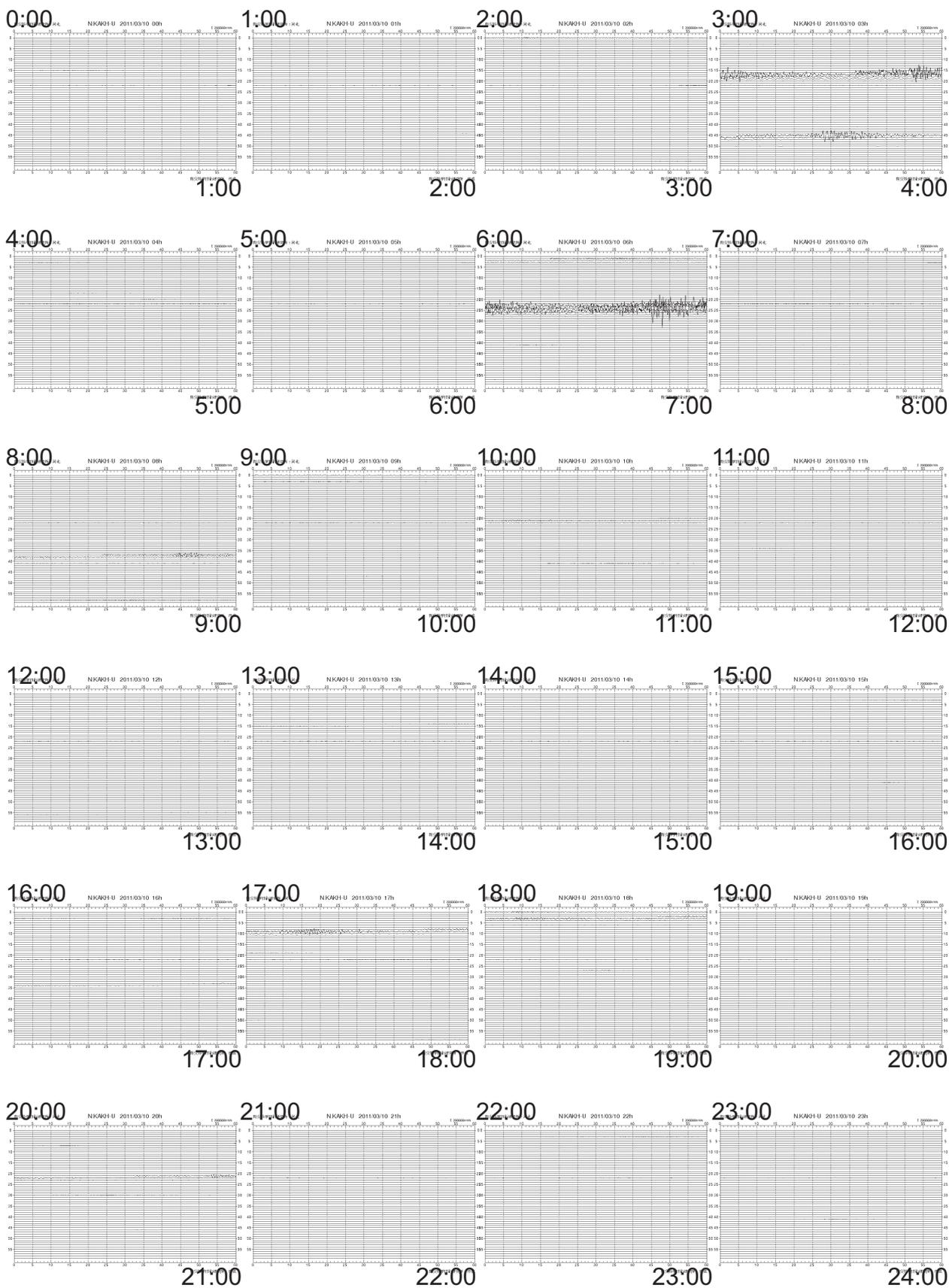


図 5.3 宮城県石巻市の河北 (N.KAKH) 観測点における 3/8 ~ 3/11 の連続波形

各 1 時間の波形は、横幅が左から右へ 1 分間の波形を示し、上から下へ 60 本並び、1 時間の波形を表している。

Fig. 5.3 Continuous waveform data recorded at the N.KAKH station (in Ishinomaki city, Miyagi prefecture) from March 8 to 11.

2011/3/11

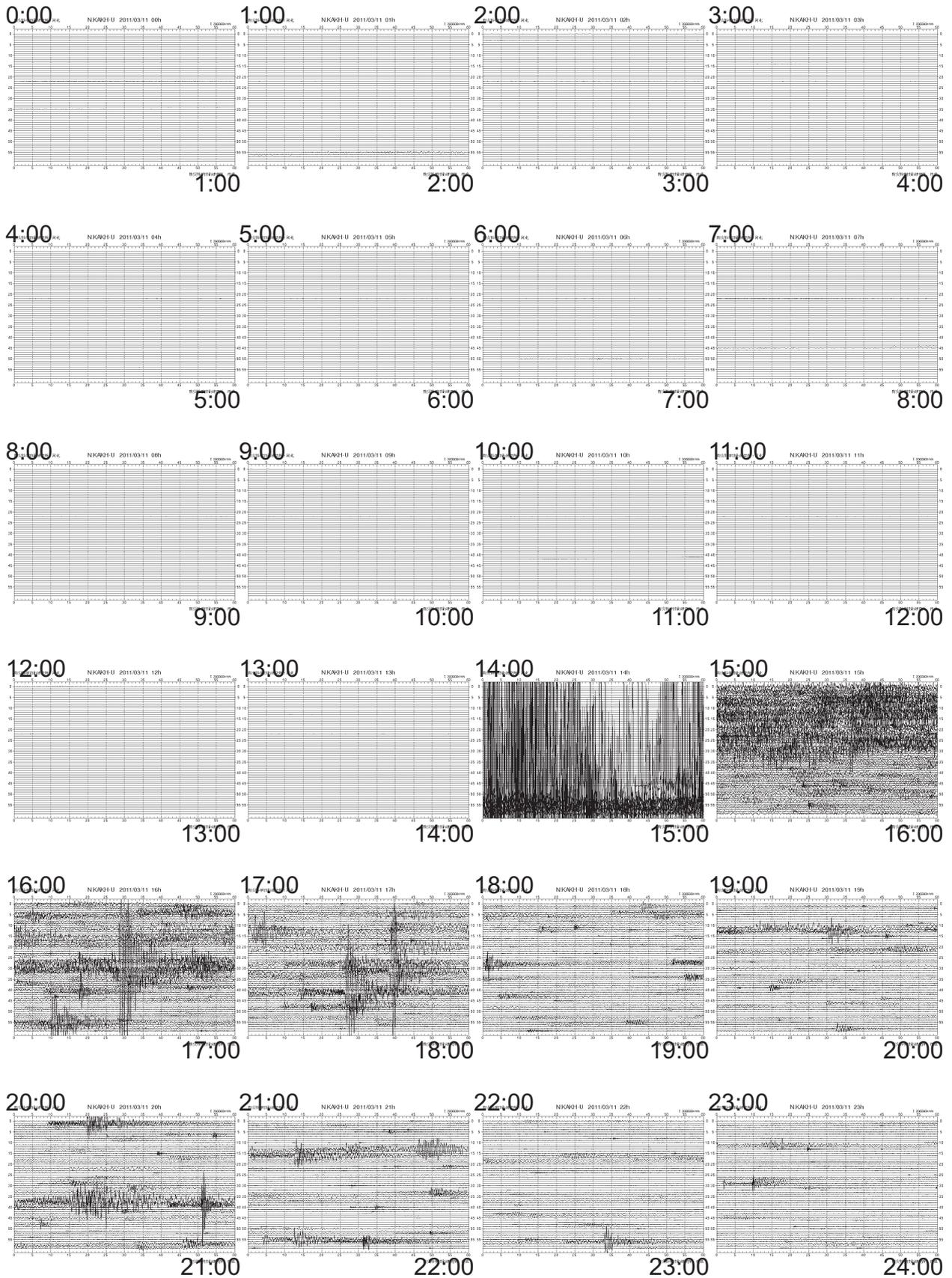


図 5.4 宮城県石巻市の河北 (N.KAKH) 観測点における 3/8 ~ 3/11 の連続波形
 各 1 時間の波形は、横幅が左から右へ 1 時間の波形を示し、上から下へ 60 本並び、1 時間の波形を表している。
 Fig. 5.4 Continuous waveform data recorded at the N.KAKH station (in Ishinomaki city, Miyagi prefecture) from March 8 to 11.

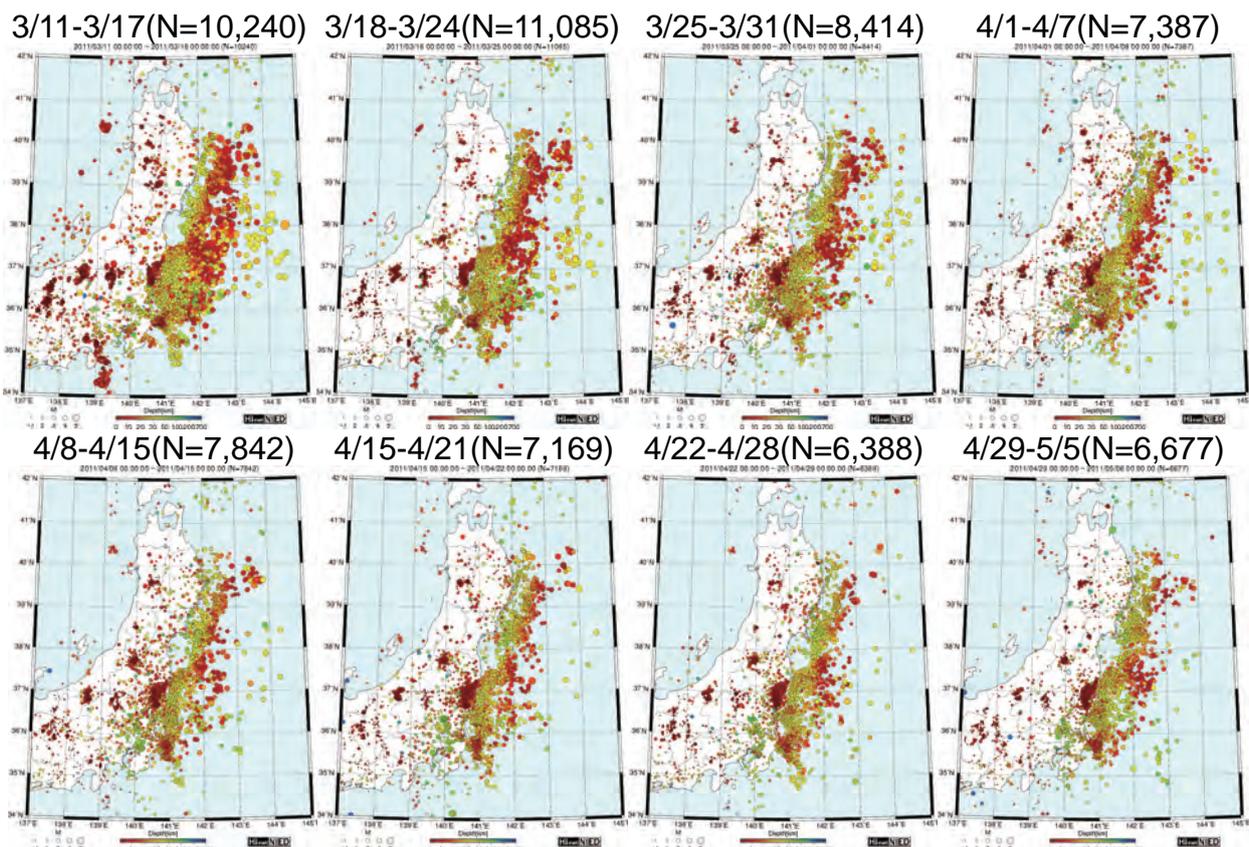


図 6 3/11 ~ 5/5 の 1 週間毎の震源分布

Fig. 6 Weekly hypocenter distribution of earthquakes occurring from March 11 to May 5.

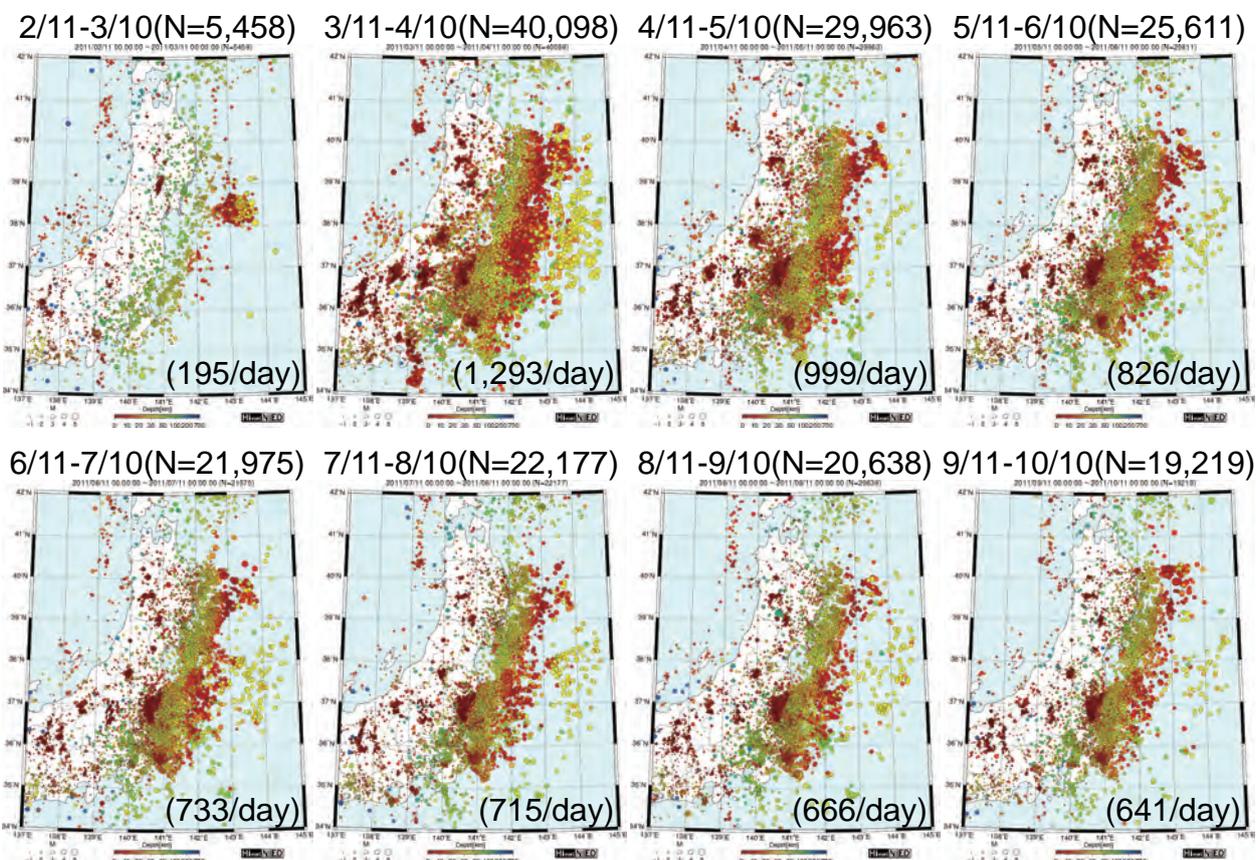


図 7 2/11 ~ 10/10 の 1 か月毎の震源分布

Fig. 7 Monthly hypocenter distribution of earthquakes occurring from February 11 to October 10.

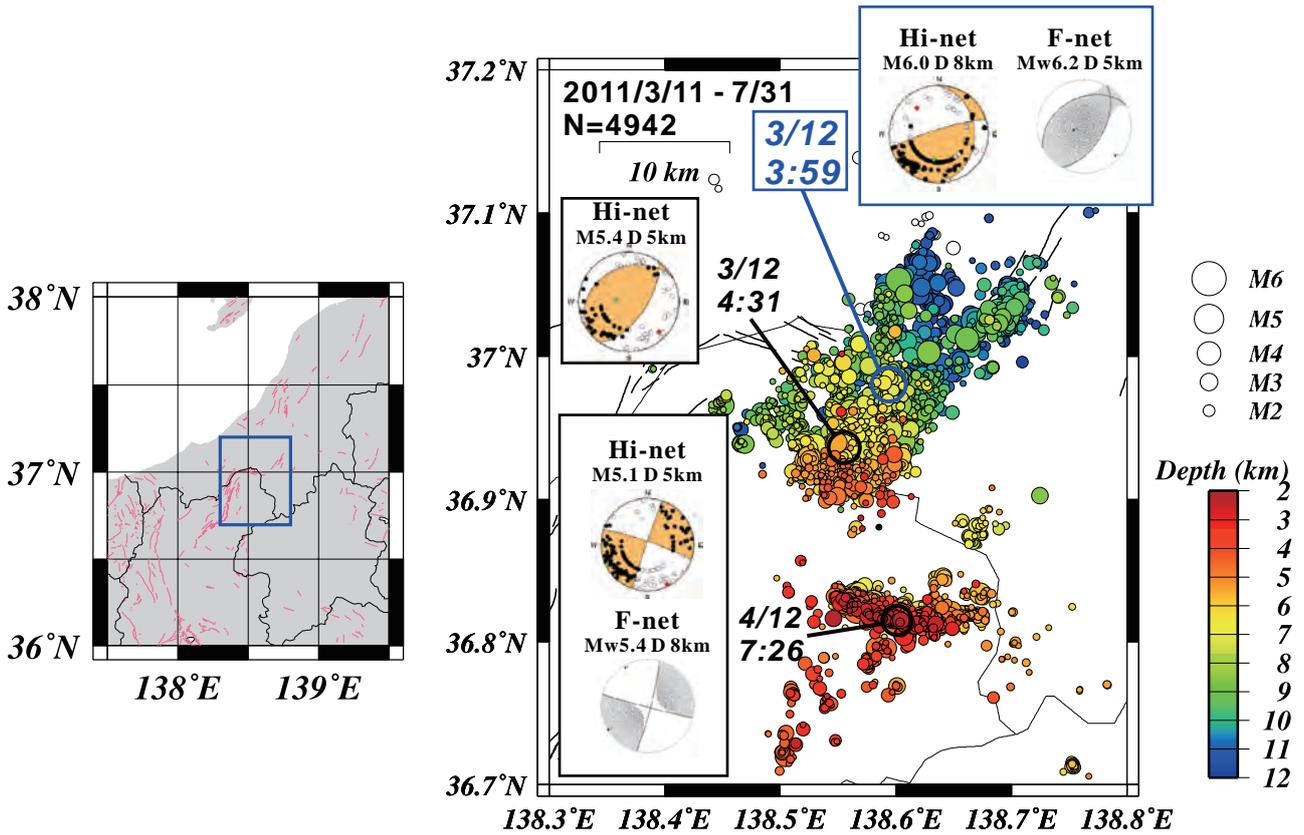


図 8 Hi-net による震央分布. 主な地震の Hi-net および F-net による発震機構解をあわせて示す.
 Fig. 8 Epicentral distribution of earthquakes determined using Hi-net data.
 The focal mechanisms determined by Hi-net and F-net are shown.

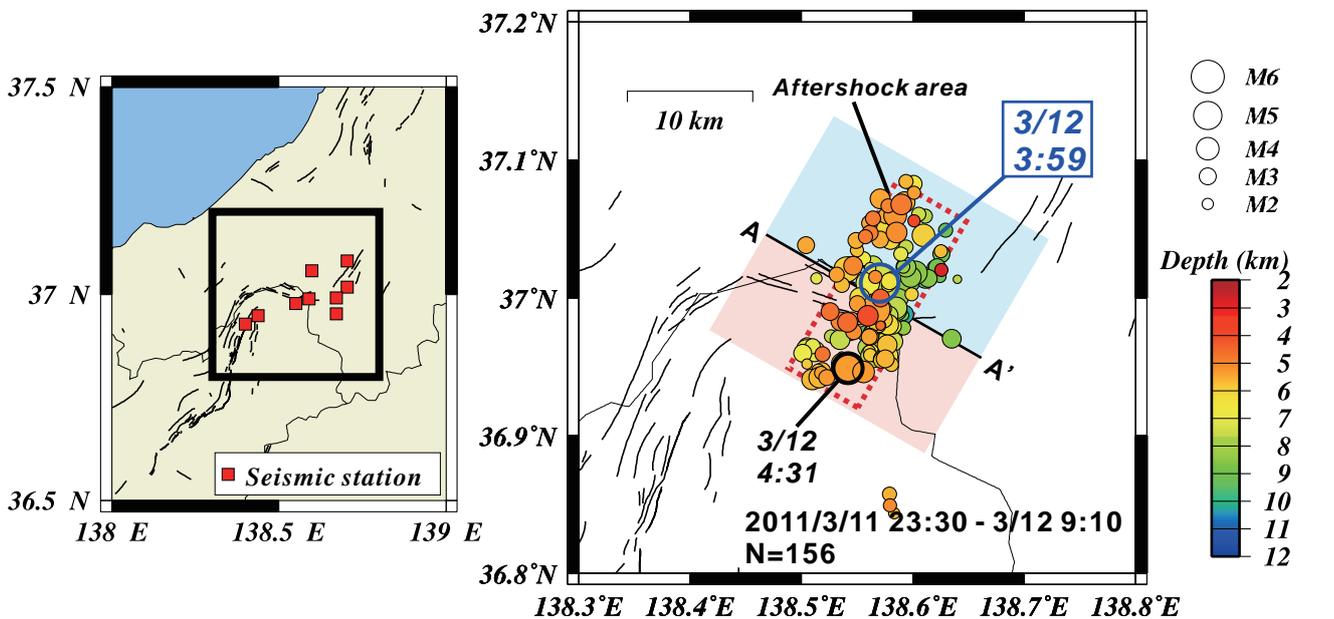


図 9 (左)領域図. 赤四角は、「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」で設置された 9 点のオフライン観測点
 (右)震央分布. 「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」によるオフライン観測点データの解析から得られた精密震央分布
 (2011 3/11 23:30 - 3/12 9:10)
 Fig. 9 (Left) Map showing the location of 9 offline observation stations (red squares) deployed during the HIZUMI project.
 (Right) Precise hypocenter distribution of earthquakes occurred from 21:00 March 11 to 9:00 March 12, 2011, determined using data
 from the offline stations. The earthquake epicenters are shown as circles colored according to event's depth.

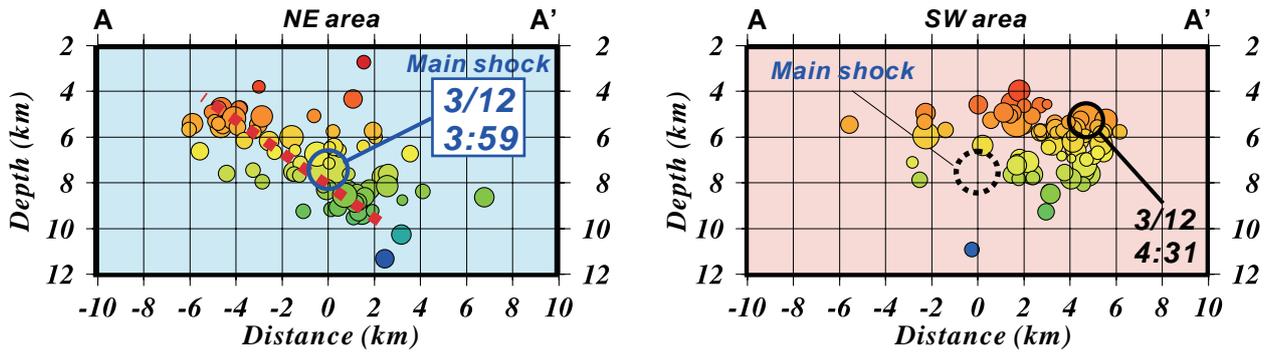


図10 図9のA-A'に沿った断面図。図9の色塗りされた領域(青とピンク色)の震源をそれぞれの断面に投影した。
 Fig. 10 Cross sections along A-A' line in Fig. 9. Left) Hypocenters in the blue area of Fig. 9 are projected on the A-A' profile. Right) Same for the hypocenters occurred in the pink region.

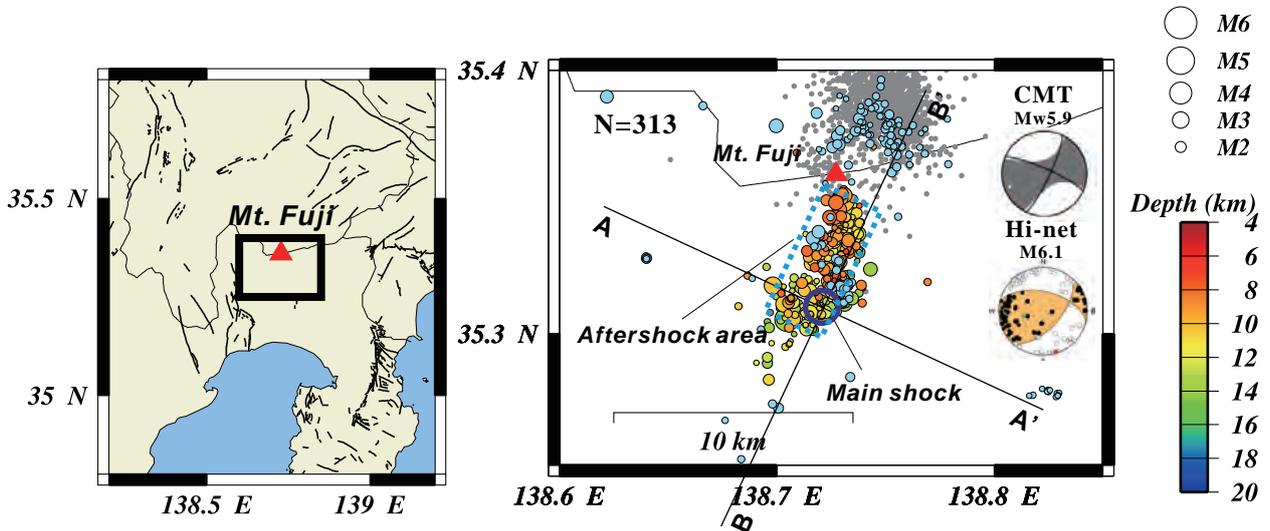


図11 波形相関データを用いたDD法による精密震央分布(2011/3/15 22:31 - 3/17 23:55)。水色丸は旧関東・東海観測網による震央分布(1980 - 2001)。灰丸は低周波地震(気象庁, 1999年以降)を示す。また、F-netとHi-netに記録波形解析によるCMT解およびHi-netによるP波初動解を合わせて示す。赤三角は富士山を示す。
 Fig. 11 Precise epicenter distribution from 22:31 March 15, 2011 to 23:55 March 17, estimated by using cross-correlation data and a double-difference method. Light blue circles show epicenters of earthquakes occurred from 1981 to 2001, determined using data of the former Kanto-Tokai network. Gray circles show low frequency earthquakes since 1999, located by JMA. The CMT focal mechanism solution estimated by using Hi-net and F-net waveform data is shown in grey. The focal mechanism estimated using P-wave arrival polarities of Hi-net is shown in orange. Red triangle indicates Mt. Fuji.

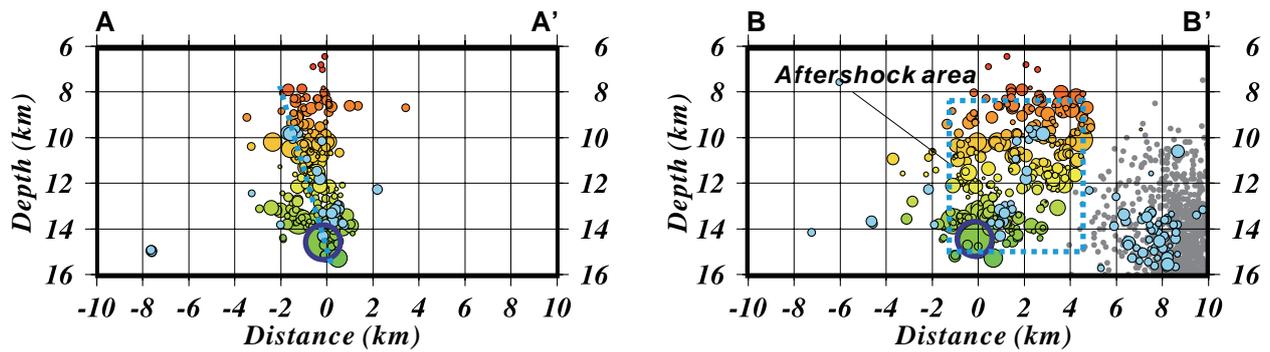


図 12 図 11 の A-A' および B-B' における断面図. 図 11 の震源をそれぞれの断面に投影した.
 Fig. 12 Hypocentral distribution of earthquakes in cross sections along A-A' and B-B' lines in Fig. 11.

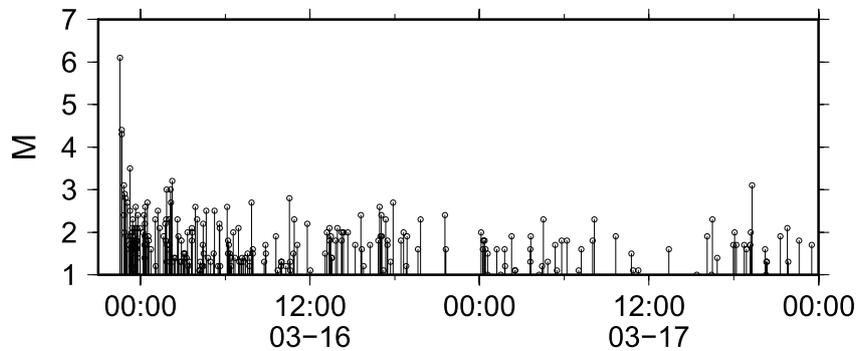


図 13 M-T 図(但し, Hi-net 自動震源も含む)
 Fig. 13 Time series of earthquakes (preliminary hypocenters are also included).
 Each earthquake is shown as a black stem proportional to its magnitude.

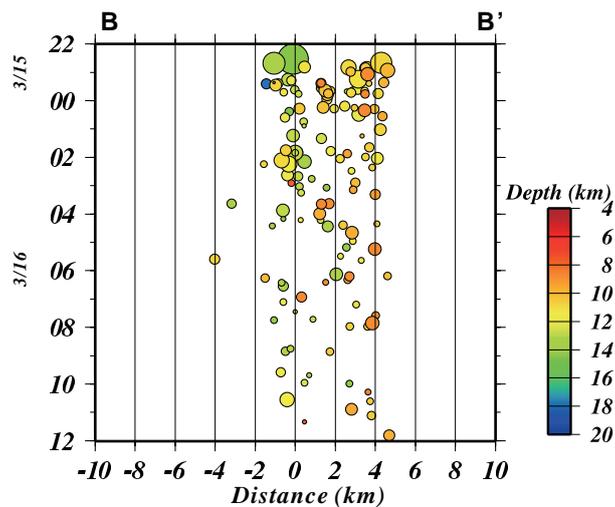


図 14 図 11 の B-B' に沿って投影した震源の時空間分布図
 Fig. 14 Space versus time plot of hypocenters projected on the B-B' profile in Fig. 11.

表3 防災科研 Hi-net および F-net による主な地震の震源要素

Table 3 Hypocentral parameters for major earthquakes determined by NIED Hi-net and F-net.

	Hi-net			F-net	
	震源時	深さ [km]	M	深さ [km]	Mw
1	20110319 18:56:48	5.3	6.0	5	5.8
2	20110323 07:12:28	8.0	5.8	5	5.7
3	20110323 07:36:31	7.4	5.9	5	5.4
4	20110411 17:16:12	7.1	6.8	5	6.6
5	20110411 17:26:29	7.3	5.4		
6	20110411 18:05:18	12.3	5.6		
7	20110411 20:42:35	11.8	6.1	8	5.5
8	20110412 14:07:42	15.3	6.2	8	5.9
9	20110413 10:07:58	5.4	5.8	5	5.4

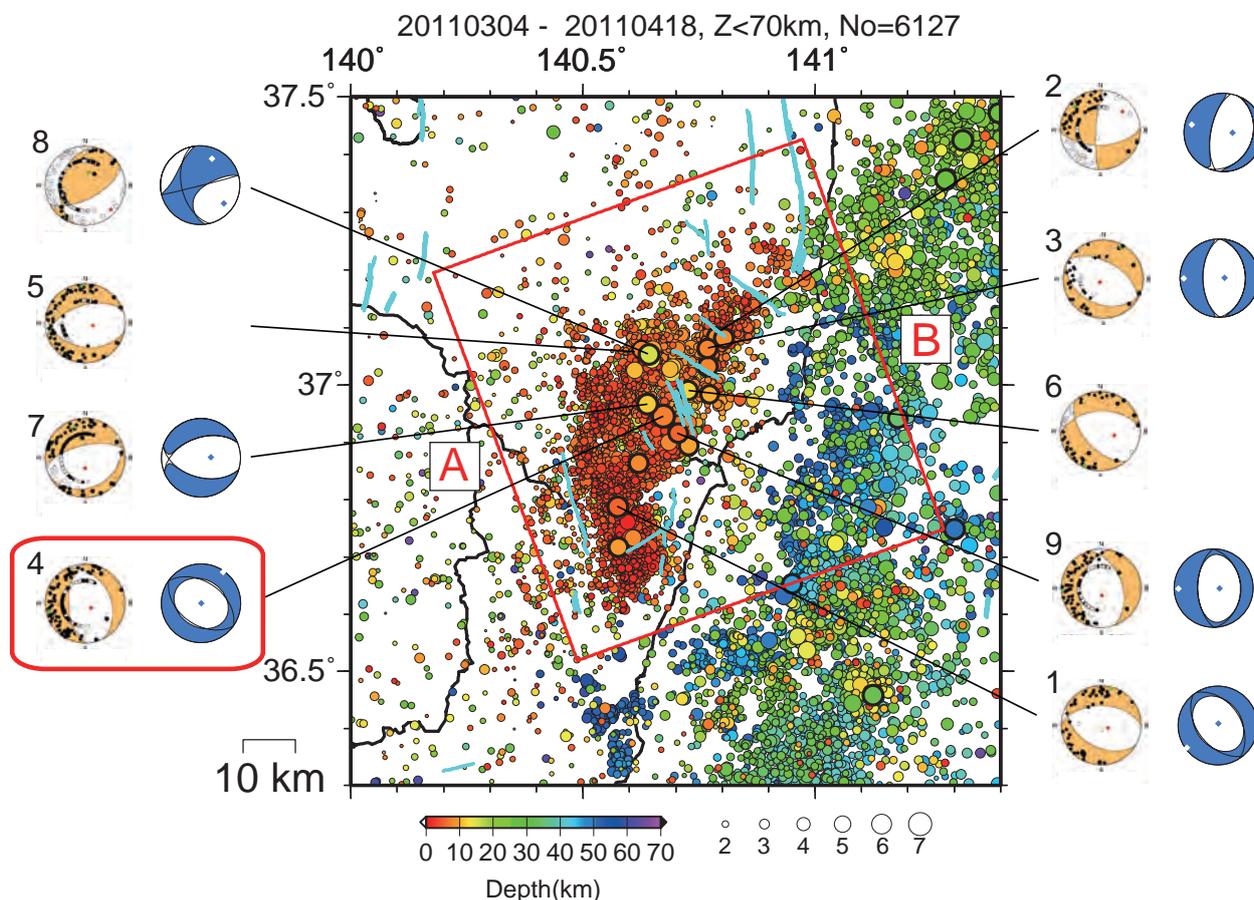


図15 東北地方太平洋沖地震以降の茨城県北部・福島県東部の震央分布。シンボルのカラーは震源深さを表す。主な地震の防災科研 Hi-net および F-net による発震機構解をあわせて示す。図中に番号で示した地震の震源要素は表3を参照。地震カタログは2011年3月11日から15日の期間は気象庁暫定震源リスト、それ以外の期間は防災科研 Hi-net による(自動処理結果を一部含む)。断層の分布(活断層研究会, 1991)をあわせて示す。

Fig. 15 Epicentral distribution of earthquakes in the northern Ibaraki prefecture and eastern Fukushima prefecture, after the 2011 Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake in Japan. Color of symbols scales with the hypocentral depth. The focal mechanisms determined by the NIED Hi-net and F-net are shown for major earthquakes. Hypocentral parameters for earthquakes labeled with numbers in the figure are listed in Table 3. Seismic data from the JMA preliminary catalogue for March 11 – 15, 2011 and from NIED Hi-net catalogue for other periods (automatically determined hypocenters are partially included) are used. Surface faults (The Research Group for Active Faults of Japan, 1991) are also shown.

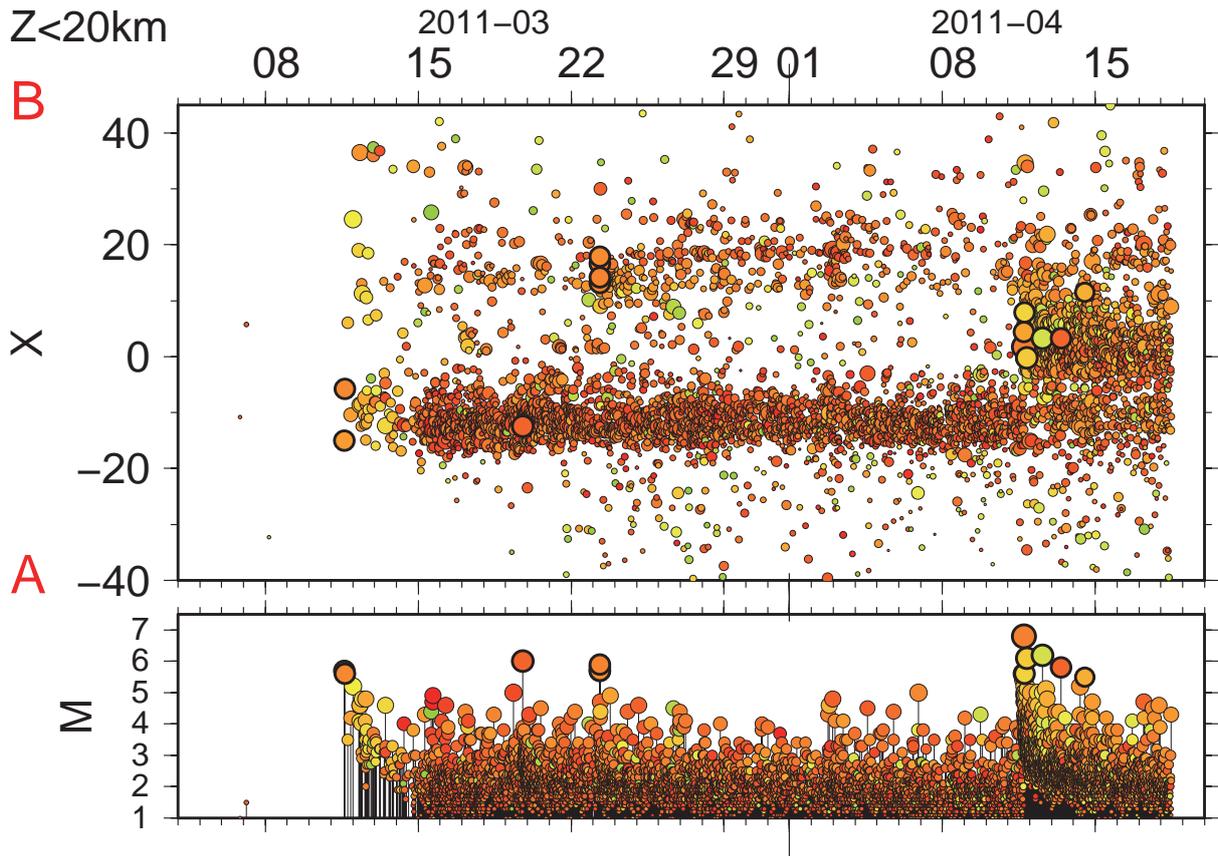


図 16 図 15 の矩形領域 A-B に投影した時空間分布および同領域の M-T 図 ($Z < 20$ km).
 Fig. 16 The space-time plot projected along the rectangle A-B in Fig. 15 and M-T diagram for earthquakes in the same region ($Z < 20$ km).

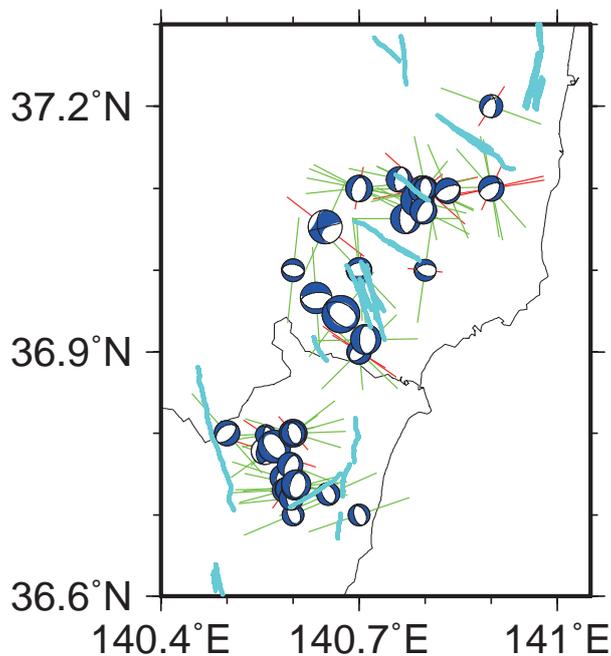


図 17 防災科研 F-net による発震機構解および伸長(緑線)・圧縮軸(赤線)の分布. V. R. 70 % 以上の解について示す. 伸長・圧縮軸の長さは地表面への投影長で示す.
 Fig. 17 The distribution of focal mechanisms determined by NIED F-net and T- (green lines) and P- (red lines) axes. Focal mechanisms with variance reduction larger than 70 % are shown. Length of each axis corresponds to a length projected to the surface.

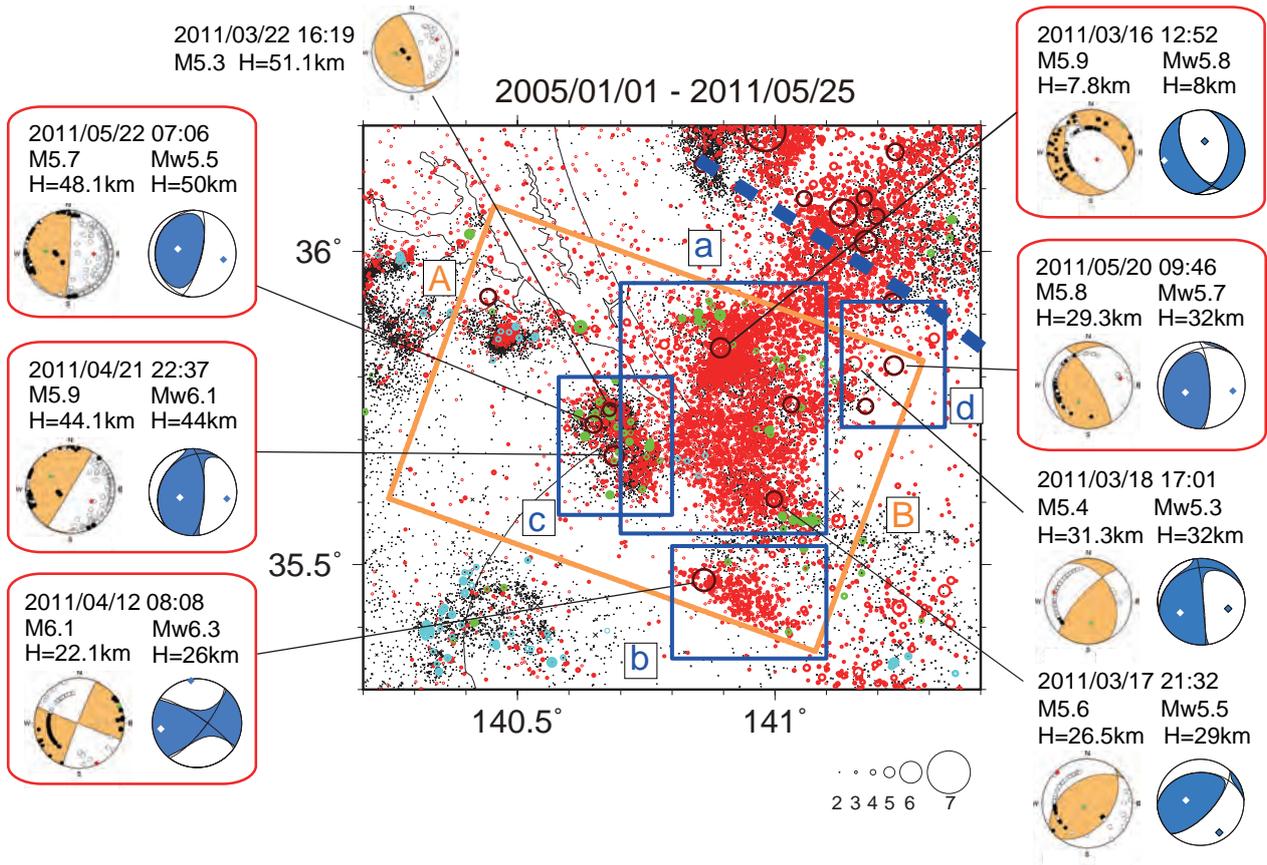


図 18 銚子周辺の震央分布。東北地方太平洋沖地震後に発生した地震を赤丸で示す。また、フィリピン海プレートおよび太平洋プレートの相似地震 (Kimura *et al.*, 2008; 木村, 2010) をそれぞれ水色および緑色のシンボルで示す。主な地震の防災科研 Hi-net および F-net による地震の発震機構解をあわせて示す。震源要素は防災科研 Hi-net による (一部自動処理結果を含む)。上野ほか(2008)によるフィリピン海プレート北限を太破線で示す。

Fig. 18 Epicentral distributions near Choshi, central Japan. Earthquakes that occurred after the 2011 Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake in Japan are denoted by red symbols. Repeating earthquakes on the Philippine Sea plate (PHS) and the Pacific plate (PAC) (Kimura *et al.*, 2008; Kimura, 2010) are shown by blue and green symbols, respectively. The focal mechanisms determined by the NIED Hi-net and F-net are also shown for major events. Hypocentral parameters determined by NIED Hi-net are used (automatically determined hypocenters are partially included). The northern edge of the PHS (Ueno *et al.*, 2008) is shown by thick dashed line.

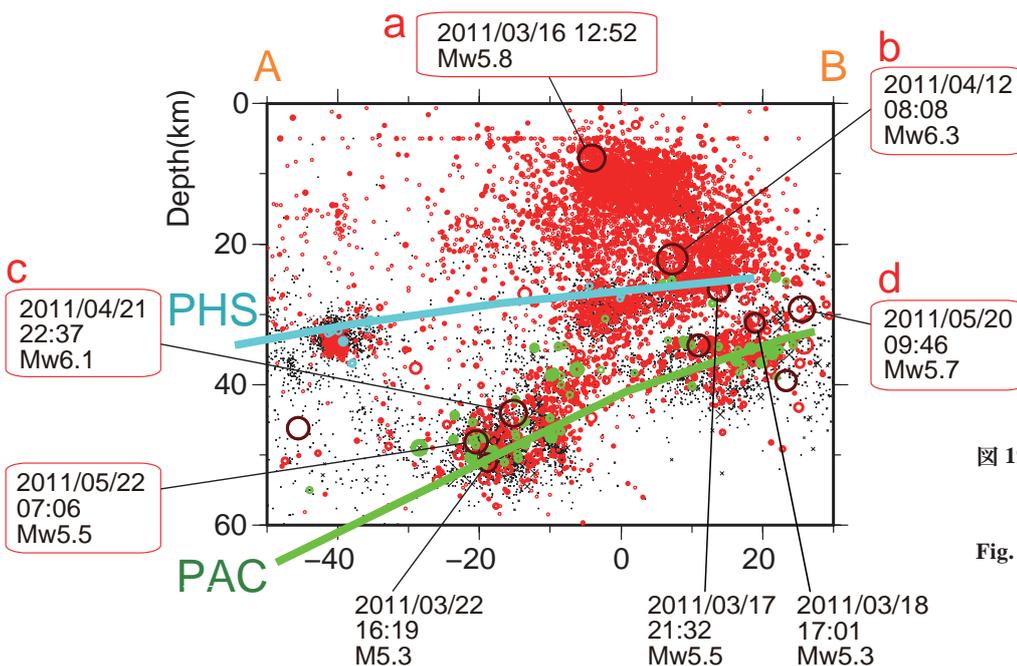


図 19 図 18 矩形領域 A - B の鉛直断面図。図の凡例は図 18 と同じ。

Fig. 19 Vertical cross section along the rectangle 'A-B' in Fig.18. Nomenclatures are the same as in Fig. 18.

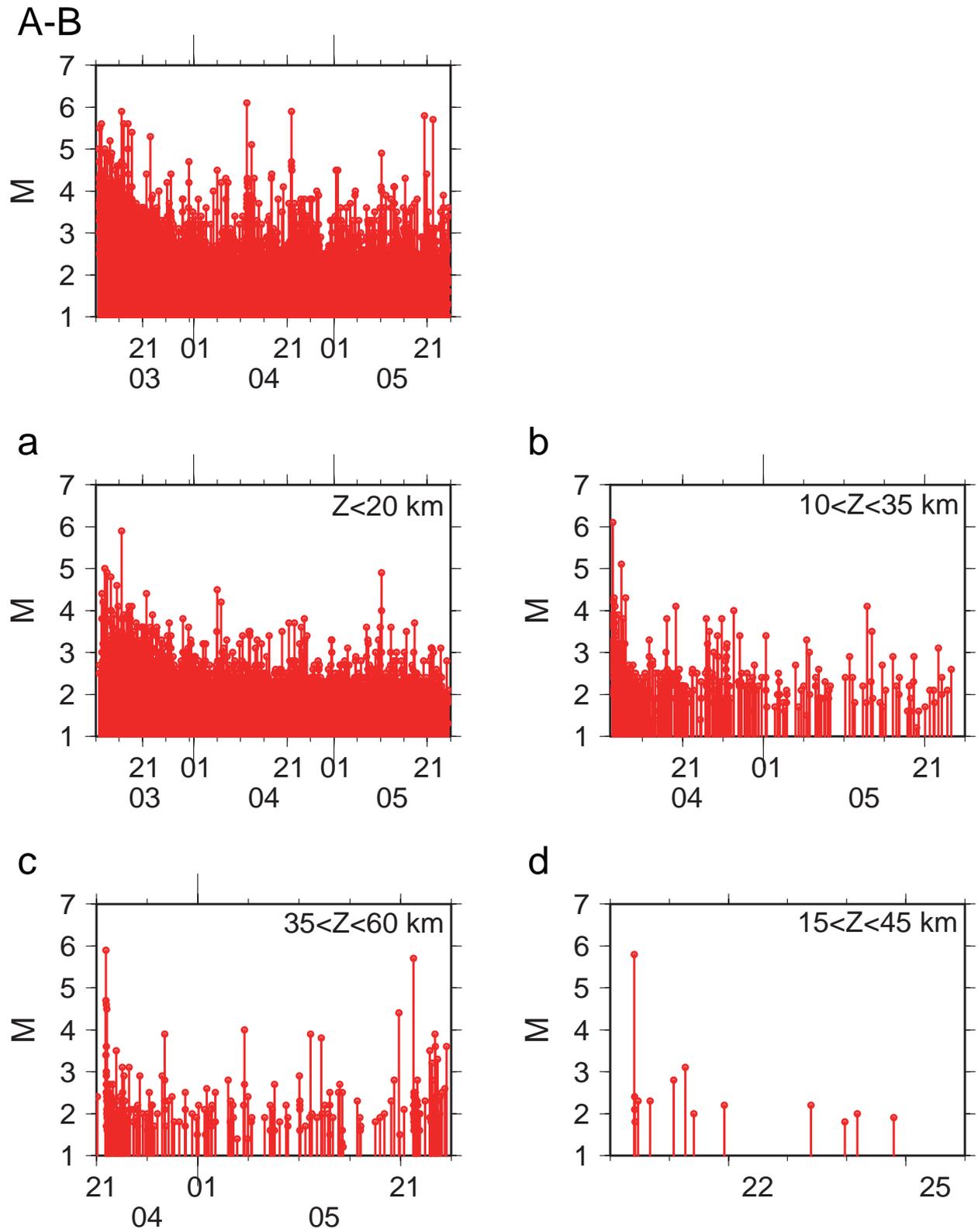


図 20 図 18 矩形領域 A - B, a, b, c, および d の M-T 図

Fig. 20 M-T diagrams for earthquakes in rectangles indicated as 'A-B', 'a', 'b', 'c', and 'd' in Fig. 18.

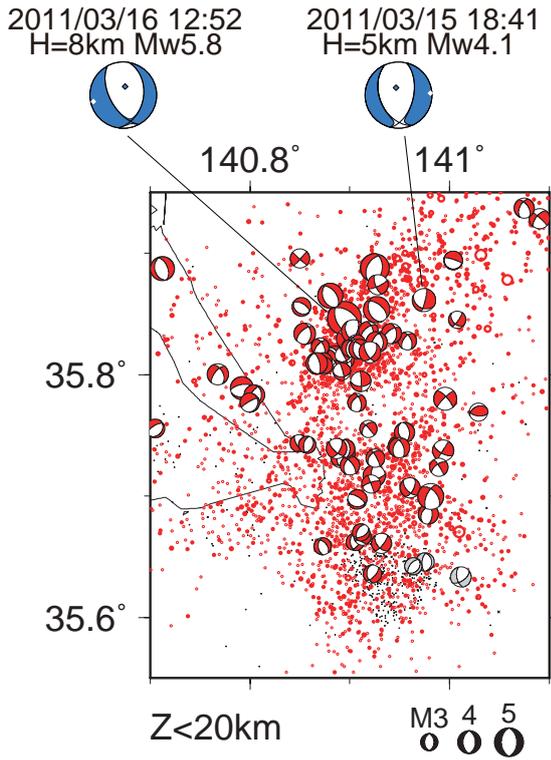


図 21 銚子付近の浅発地震 ($Z < 20$ km) の震央分布. 東北地方太平洋沖地震後に発生した地震を赤丸で示す. 防災科研 Hi-net による発震機構解を, 東北地方太平洋沖地震後の地震については赤, 以前はグレーのシンボルで震央位置に示す. 主な地震の F-net による発震機構解を枠外に示す.

Fig. 21 The epicentral distribution of shallow ($Z < 20$ km) earthquakes near Choshi. Earthquakes after the 2011 Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake in Japan are denoted by red symbols. The focal mechanisms determined by NIED Hi-net are plotted at epicenter as red and gray symbols for events before and after the 2011 Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, respectively. The focal mechanisms determined by NIED F-net are shown outside the figure for major earthquakes.

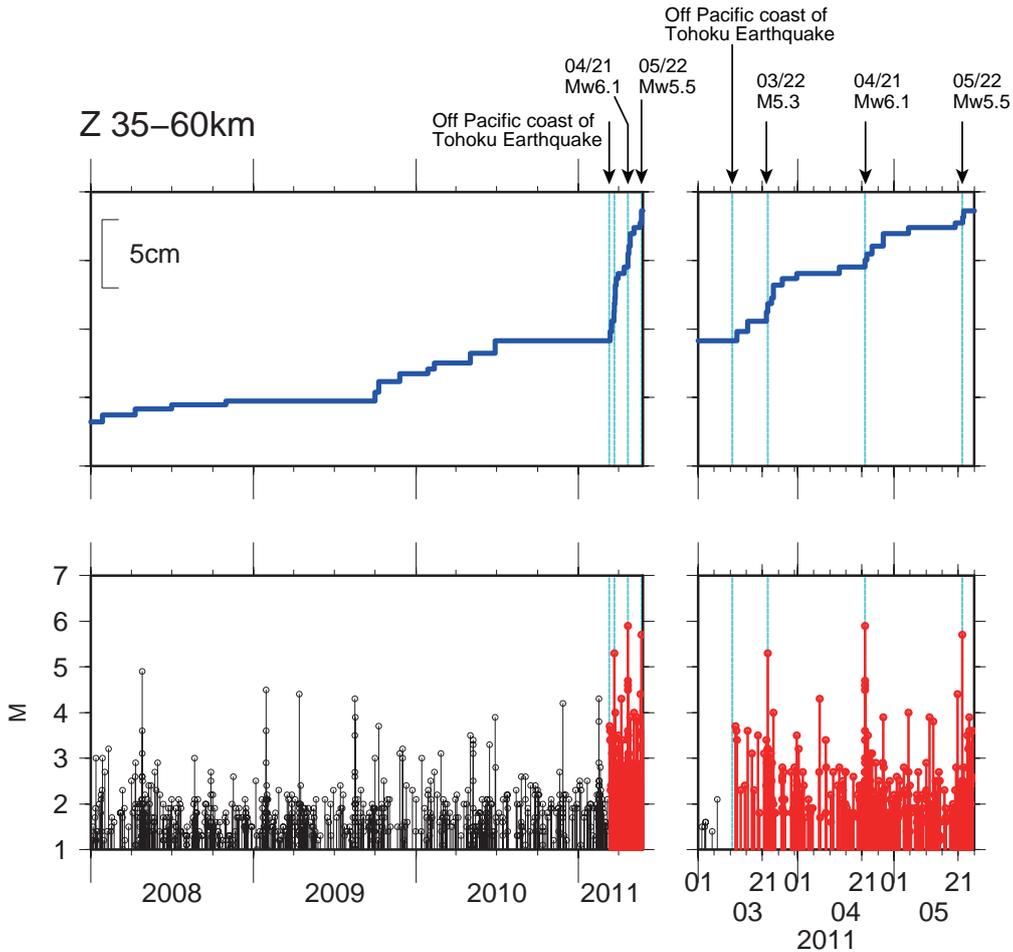


図 22 相似地震より推定した銚子付近(図 18 矩形領域 'c')の太平洋プレート上面の平均積算すべりおよび M-T 図. 主な地震の発震時をあわせて示す.

Fig. 22 Averaged cumulative slip histories estimated from repeating earthquakes on the PAC near Choshi (region 'c' in Fig. 18) and M-T diagram. Origin time of major earthquake is also shown.

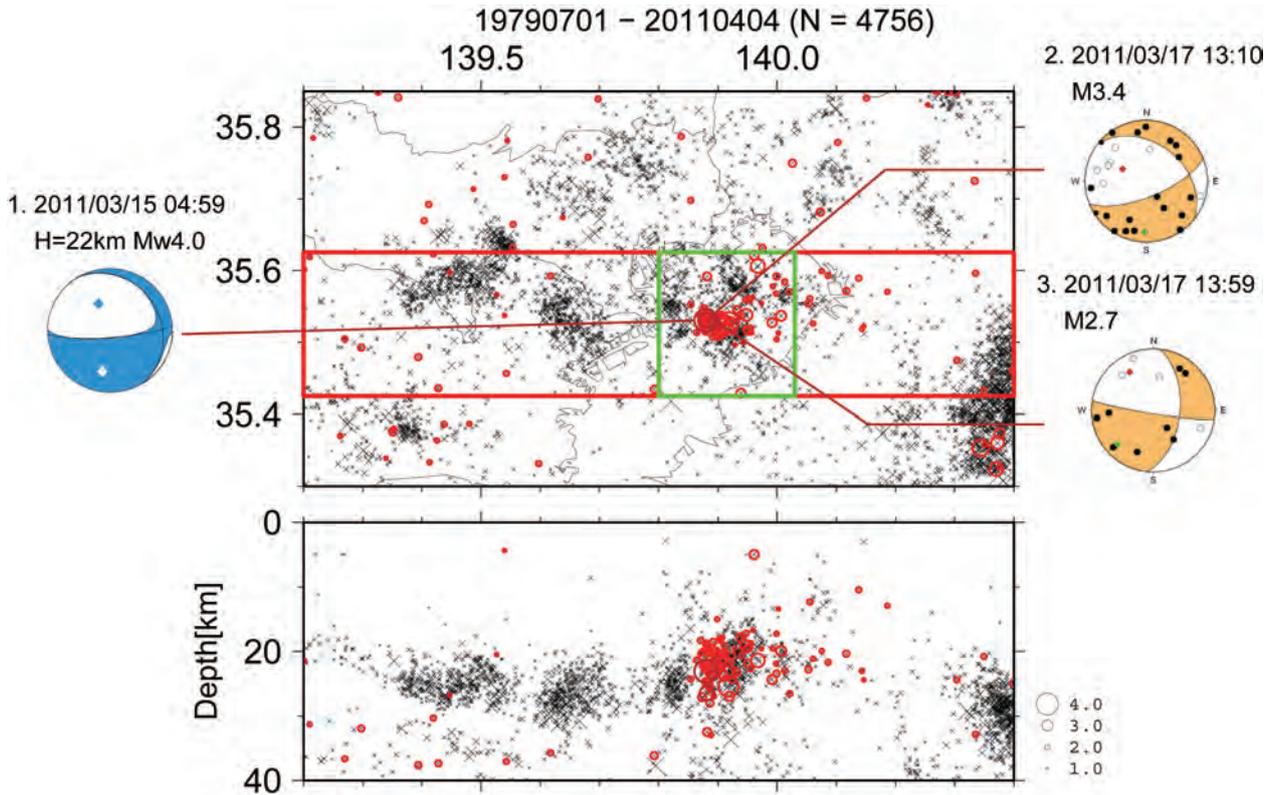


図 23 (上図) 2011 年 3 月 11 日以降の東京湾の地震活動域周辺の震央分布図。2011 年東北地方太平洋沖地震後に発生した地震を赤シンボルで示す。防災科研 Hi-net および F-net による地震の発震機構解をあわせて示す。震源要素は 2011 年 3 月 11 日から 15 日の期間は気象庁暫定震源リスト, それ以外の期間は防災科研の震源カタログ(2002 年 8 月 31 日までは防災科研関東東海観測網, 2002 年 9 月 1 日以降は Hi-net)による。2002 年 8 月 31 日以前については P・S 読み取り 5 点以上, 震央・深さ誤差がそれぞれ 5, 10 km 以下の地震をプロットした。Hi-net による震源は自動処理結果を一部含む。(下図)震央分布図の赤枠で囲まれた範囲の東西断面図。

Fig. 23 (Top) The epicentral distributions of earthquakes below the northern Tokyo bay. Earthquakes that occurred after the 2011 Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake in Japan are denoted by red symbols. The focal mechanisms determined by the NIED Hi-net and F-net are also shown. Hypocentral parameters from JMA preliminary catalogue for March 11 – 15, 2011 and from NIED seismic catalogue for other periods are used (NIED Kanto-Tokai network catalogue before August 31, 2002 and Hi-net catalogue after September 1, 2002). Earthquakes with a number of P- and S-picks of 5 or larger and epicentral and hypocentral depth errors smaller than 5 and 10 km, respectively, are plotted before August 31, 2002. Automatically determined hypocenters by Hi-net are partially included. (Bottom) The E-W cross section of earthquakes occurred within the red box above.

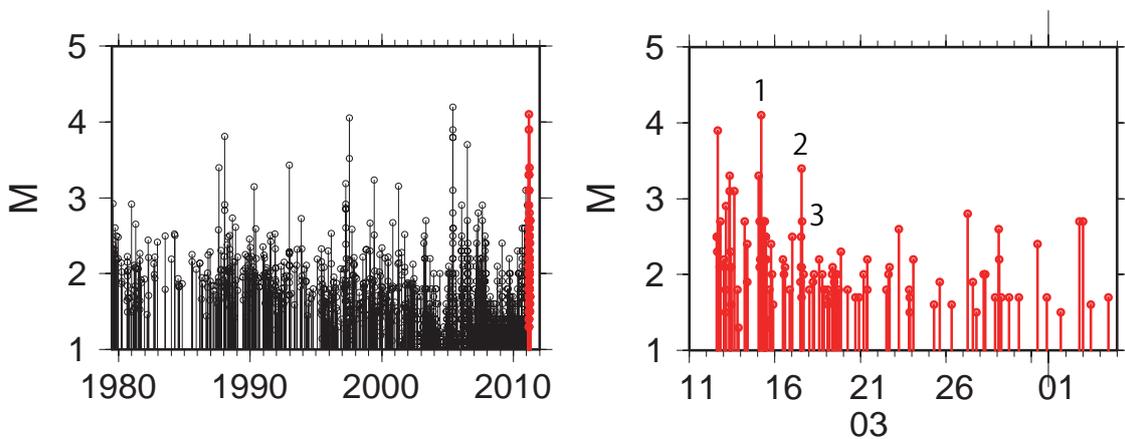


図 24 図 23 緑枠内の過去 32 年間の M-T 図。東北地方太平洋沖地震後の地震を赤シンボルで示す。数字で示した地震の震源要素は図 23 を参照。

Fig. 24 M-T diagram for earthquakes within the green box in Fig. 23 for the last 32 years. Earthquakes after the 2011 Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake are shown by red symbols. Hypocentral parameters for earthquakes labeled with numbers are shown in Fig. 23.