

ペタバイト規模の大規模連続地震波形データ解析システム

中川茂樹^{1)*}・鶴岡 弘¹⁾・加藤愛太郎¹⁾・酒井慎一¹⁾・平田 直¹⁾

¹⁾ 東京大学地震研究所

A Petabyte-scale Large Continuous Seismic Data Analyzing System

Shigeki Nakagawa^{1)*}, Hiroshi Tsuruoka¹⁾, Aitaro Kato¹⁾, Shin'ichi Sakai¹⁾ and Naoshi Hirata¹⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

Abstract

Many Japanese research and administrative institutions, including universities, the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), and the Japan Meteorological Agency (JMA), collect and catalog seismic observations. Although each institution independently collects these data, practically all seismic data are distributed among Japanese research institutions and the JMA through a data exchange network in real-time using the WIN system. The Earthquake Research Institute (ERI) of the University of Tokyo has collected waveform data since September 19, 1989. ERI stores seismic data with a volume of about 320 TB. Continuous waveform data are increasing every minute by about 60 MB. Recent progress in information technology makes it possible to have all long-term continuous waveform data online for various analyses. However, it is still difficult for individual institutions to use all available data because of the high costs of implementing and maintaining both a large data storage server and a data-analyzing server for such a large volume of data. Therefore, the most efficient solution is to establish a nationwide shared storage and analysis system that is large enough to store all available data online for a continuous data analysis system, which is open to all research institutions. We have developed and installed a petabyte-scale seismic data analyzing system at ERI to create a Joint Usage/Research Center. This system mainly consists of four Linux computers and one storage system with a capacity of 1 PB. This system provides researchers with tools and data, and produces leading-edge scientific results.

Keywords: analyzing system, WIN system, continuous seismic waveforms

1. 背景

地震観測データの解析処理は、複数の観測点の波形データを基準時刻で揃えて並べることから始まる。テレメータ観測は、地理的に離れて設置された観測点のデータを通信によって即時に一か所に収集し、基準時刻に合わせて処理を行う仕組みである。日本では1950年頃から観測波形のテレメータ観測が試みられるようになり、1960年に火山観測で実用化された(宮村, 1967)。東京大学地震研究所では、1963年から堂平微小地震観測所で400 MHz帯の地上無線を用いたテレメータ観測が行われるようになった(宮村, 1967)。米国でも1960年代後半にサンアンドレアス断層に沿ってテレメータ観測が開始された(Eaton *et al.*, 1970)。その後、通信技術や電子

技術の進展により、NTT等の専用線や衛星通信、ISDN(Integrated Services Digital Network)を用いたテレメータ観測が普及した(卜部, 1991)。例えば、国立防災科学技術センター(現在の国立研究開発法人防災科学技術研究所。以下「防災科研」という。)は、1978年から関東・東海地域地殻活動観測網のテレメータ観測を開始し(浜田・他, 1982)、高感度地震観測網・広帯域地震観測網・強震観測網を整備している(Okada *et al.*, 2004)。21世紀になり、携帯電話や無線LAN(Local Area Network)の利用、テレメータ装置の小型化・低消費電力化が急速に進み、手軽にテレメータ観測が実施できるようになった(例えば、Havskov and Alguacil, 2016)。海域観測でも光ファイバーを伝送路として用いたケーブル式海底地

* e-mail: nakagawa@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

震計が開発され、テレメータ観測が行われるようになった（例えば、Shinohara *et al.*, 2014）。このように容易に大規模観測が実施できるようになったため、収集される地震波形データ量が増大していった。

日本では、これまで大学や研究機関、気象庁などが、独立に地震観測を行ってきたが、1995年兵庫県南部地震前後から観測データの機関間での交換が始まり、現在では、すべてのテレメータ観測データが実時間で交換され流通している（卜部, 2000）。地震研究所は、当初は全国共同利用研究所、現在では地震火山科学の共同利用・共同研究拠点として、全国の大学や研究機関、気象庁等の地震に関する観測データを収集して、流通させ、地震調査研究を推進している。このようなデータを機関間で流通し、他機関のデータを研究活動に利用するために、1996年3月8日に「関係機関より提供を受けた地震波形データの流通及び利用に関するガイドラインについて」（以下、「ガイドライン」という。http://eoc.eri.u-tokyo.ac.jp/eisei_system/riyou/guideline.htm（最終参照日：2016年2月26日））が定められた。その後、2004年3月31日に「地震に関する観測データの流通、保存及び公開についての協定」（以下「データ流通協定」という。）が締結され、2014年9月30日に改正された。データ流通協定では、各機関の保有する観測データを共有できるように流通を行い、調査研究や業務に活用するとともに、観測データを保存及び公開するために必要なことが定められた。ガイドラインは、データ流通協定の細目協定の別紙として、大学がデータを第三者に提供する際の指針となった。このガイドラインに基づき、9つの大学（北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学）が「全国地震データ等利用系システム」（http://wwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/harvest/（最終参照日：2016年7月9日））を運用している。研究者は、このシステムからWWW及びFTPによって観測データをダウンロードし、研究に利用することができる。

さて、現在の計算機やストレージ、ネットワークの性能向上に伴い、長期間の連続地震波形データを用いた解析を行うことが現実的となった。例えば、テンプレート波形を使って連続波形データから地震を検出し地震活動の推移を考察する研究（Kato *et al.*, 2012 など）、常時雑微動を用いた地殻構造に関する研究（Denolle *et al.*, 2014）や相似地震を用いたプレート境界における長期間にわたる平均滑り速度を推定する研究（Igarashi, 2010）は、その好例である。しかし、技術的に可能となった解析ではあるが、その研究基盤の整備は遅れている。大量

のデータを展開するストレージとそれに接続された解析用の計算機が必要であるが、大規模な設備となるため導入は容易ではない。

また、過去の連続波形データの多くは内蔵用ハードディスク（ベアドライブ）やテープ等に記録後、オフラインの状態で保管されている。オフラインで保管されているデータを利用する際には、一時的に解析用計算機に接続されたストレージにデータを蓄積する必要がある。解析に至るまでに多くの準備時間が必要となっている。これは、過去の連続波形データを所有する研究機関と研究者に共通する大きな問題であり、効率的な研究に対する障害となっている。さらに、臨時観測で取得されたデータも含めてオフラインで保管されているデータはメディアの旧式化や劣化に伴い定期的にメディア変換を実施する必要がある。それにかかる経費や時間の負担も増大する一方である。

共通して利用する計算資源を集中し、長期間にわたる連続地震波形データ等を解析する研究支援基盤を設置して大学等の共同利用として運用すれば、準備段階も含めた解析に要する時間の短縮や管理コストの低減が図られる。研究者としても新たな発想を得たときに即時に解析に着手できるシステムは魅力的なものであり、研究をより一層発展させることが期待できる。そこで「地震データ利用システム」（堀内・他, 1997, 鷹野・他, 1997）の一部として「長期間地震波形データ解析システム」を構築し、長期間の地震波形データ等を容易に解析するための研究基盤として整備を進めた。このシステムでは地震波形データの他にも、地殻変動観測データや温度・圧力などのデータも扱うが、もっともデータ量の多い地震波形データを中心にシステムの設計を行ったので、名称は地震波形データ解析システムとした。小論では、システム設計の方針と開発したシステムの概要を紹介する。

2. システムの構築と利用法

2.1 格納対象となるデータの種類と量

システムの設計にあたって最も重要な項目は、格納するデータの容量を見積もることである。一般的に技術の進展や部品の劣化や供給減少の観点から情報システムは5年程度でシステム更新が行われることが多いので、本システムにおいても運用開始5年後までに必要となるデータの容量を見積もることとした。格納するデータの種類を、表1の通り3つのカテゴリに分類した。カテゴリAはデータ流通協定に基づいて衛星テレメータシステムや地上回線等による地震観測データ流通システムなどをを用いて機関間でデータ交換されているデータ、カテ

Table 1. Categories of data stored.

Category		Description
A	Telemetered continuous data via data exchange network	Data were transferred using the satellite network system and JDXnet after April 1, 2004. Some data are missing because of packet losses. Hi-net data were bit-shifted before October 1, 2007.
B	Temporary observational data from universities	Temporary observations were carried out by groups within universities and other institutes. Because these data were usually stored on tape or optical media, our system prevents their loss due to deterioration of the original storage media. Permission from each observational group is required to use these data.
C	Closed data	All data before April 1, 2002 are closed. Permission from each observational group is required to use these data.

ゴリ B は大学等が合同で実施する臨時地震観測及び受託研究等のプロジェクト経費で実施される観測のデータ、カテゴリ C はデータ流通協定ができる以前のデータや試験的な観測データ、である。データ公開の点からは、カテゴリ A のデータはデータ流通協定に則って公開されるデータ、カテゴリ B とカテゴリ C は観測グループ内での利用が優先されるが観測グループによっては共同研究等で利用可能なデータである。データ収集形態の点からは、カテゴリ A とカテゴリ C は主としてテレメータシステムにより収集されるもの、カテゴリ B はオフラインシステムにより収集されるものである。オフラインで収集されたデータは、メディアの経年劣化によりデータを読み取れなくなる恐れや観測者の異動・退職等により散逸する恐れがあり、データの保全という観点からは本システムに代表されるような仕組みを用いて保管することが望ましい。

さて、システムに格納されるデータ量を見積もるために、便宜上、(1) これまで地震研究所に保管されているデータ、(2) 本システムの運用開始後 5 年間に流通するデータ、(3) 地震研究所が参加している臨時観測データ、の 3 種類に分けることにする。

(1) 地震研究所では、1989 年 9 月 19 日から定常観測点のテレメータ観測データの WIN フォーマット（ト部、1994）によるデジタルアーカイブを開始した。WIN フォーマットは、日本で一般的に用いられている地震波形データのフォーマットで、センサ感度や観測点の位置情報といったチャネル情報と波形データを分離して管理している。波形データは直前のサンプルとの差分値を記録することでデータ圧縮を行っている。デジタルアーカイブの開始当時に用いられたメディアは磁気テープであった（図 1 上）。その後、1997 年 6 月からの衛星テレメータシステム（ト部・他、1999a、ト部・他、1999b）

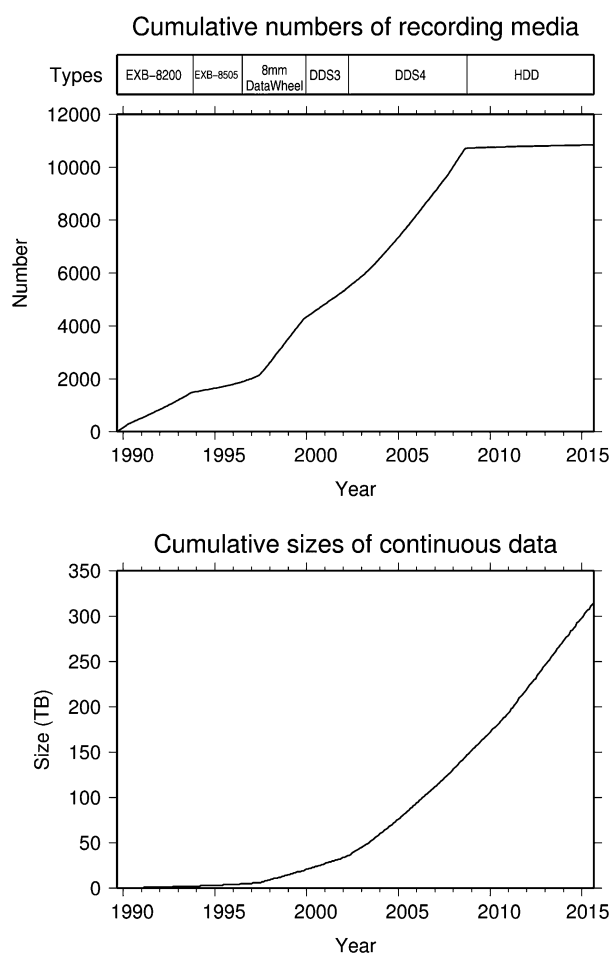


Fig. 1. Volume of data collected. (Top) Cumulative numbers of recording media. Top shows types of medium. (Bottom) Cumulative sizes of continuous data. Major changes are indicated in both frames.

による大学の地震観測データの交換開始、2002 年 4 月 1 日の気象庁及び防災科研の地震観測データの流通開始に伴う観測点数の増加や、観測機器や通信手段の技術改良

に伴うダイナミックレンジの拡大から飛躍的にデータ量が増大した。2015年9月現在で地震研究所に保管されているテレメータデータは、約320TBに及ぶ(図1下)。

(2) 地震観測データ流通システム (Japan Data eX-change network: JDXnet) (鷹野・他, 2005) に流通する地震波形データの容量は、WIN フォーマットのデータ圧縮の効率にも依存するが、2016年2月現在、1分間あたり約60MB程度である。1年間に換算すれば約32TB、5年間では約160TBとなる。今後、防災科研による日本海溝海底地震津波観測網(植平・他, 2012)のデータが流通ようになるためデータ量はさらに1年間で約2TB増加することが見込まれる。

(3) 臨時観測は、陸域や海域で行われる現地収録型の地震観測が多いが、JDXnetには流通させないオンライン型の地震観測もある。代表例として、文部科学省の研究委託事業である首都直下地震防災・減災特別プロジェクト(平成19年度~23年度)と都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト(平成24年度~28年度)で整備、運用している首都圏地震観測網(MeSO-net)(酒井・平田, 2009)があげられる。MeSO-netでは首都圏に296か所からなる地震観測網を展開し、連続地震観測を行い、地震波形は地震研究所へテレメータされ収録を行っている。データ量は、1分間あたり約42MB程度であり、1年間に換算すれば約22TB程度となる。2つのプロジェクト期間内で約220TB程度のデータが収集される。

また、臨時観測データはデータ取得者の異動やデータを取得したメディアの劣化によるデータの散逸が懸念される。そこで、淡路島北部(吉本・他, 1997)と鳥取県西部(Shibutani *et al.*, 2005)で行われた大容量デジタルレコーダ(篠原・他, 1997)を用いた合同余震観測の観測データのうち地震研究所に保管されていたテープを再生し、試験的にWINフォーマットによる連続波形データ化を行った。テープの劣化のため一部のデータは読み取ることができなかったが、複数のバックアップを作成していたこともあり、ほぼ全てのデータをWINフォーマットの連続波形データにすることができた。このときに必要となった容量は、両者あわせて約1TB程度であった。このような臨時観測が年に数回行われたとしてデータ量が年間2TBと仮定すれば、最大50~100TB程度の容量を確保すれば十分に保管可能と思われる。

これらを全て足しあわせれば、約800TB程度のデータ保管領域が見積もられる。実際には、ユーザが解析作業を行う領域も必要なので、余裕をみて1PB程度の容量のストレージを導入することとした。

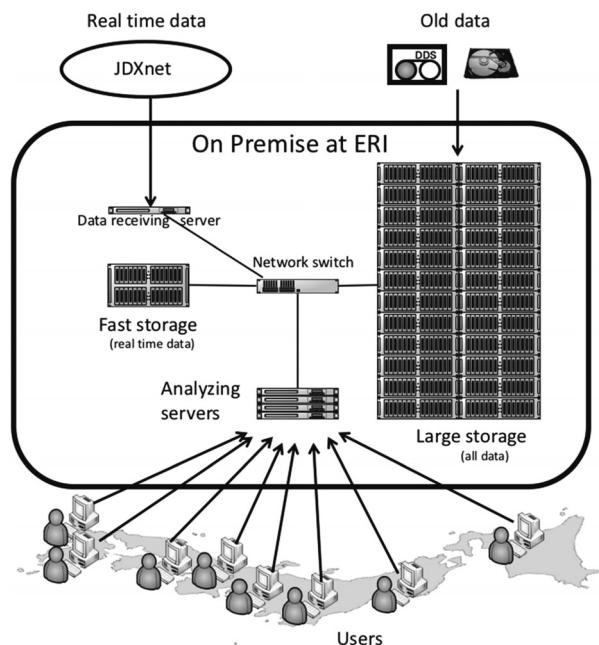


Fig. 2. Illustration of petabyte-scale large continuous seismic data analyzing system installed at ERI. Telemetered data were collected from JDXnet, tapes, and HDDs, and stored in the large storage. Researchers remotely log into analyzing servers.

2.2 システムの構成

本システムの主たる構成要素は、図2のように実効容量約1PBからなる大容量ストレージ、汎用の解析サーバ(ユーザ管理サーバを含む)、データの受信サーバと高速ストレージであり、これらの機器は10Gbase-Tで高速ネットワークスイッチに接続されている。ハードウェアの主な仕様は表2の通りである。解析サーバは、大容量ストレージをNFS(Network File System)によりマウントし、ユーザのデータ利用に供している。

ソフトウェアの仕様は表3に示した。基本ソフトは、Red Hat系のサーバ用OSの1つであるCentOSを採用した。WINシステム(ト部・東田, 1992)自体はOSがFreeBSDである環境を中心として開発されてきたことからFreeBSDとの親和性が高いと考えられるが、地震波形の解析に主眼をおけば世界の趨勢としてLinuxの方が対応している解析用ツール類やノウハウも多いため、本システムではCentOSを採用することとした。表4に示すように標準的な解析用ツールの多くも利用可能とした。しかし、ソフトウェアのバージョン依存性の問題がある言語やツール(例えば、Python処理系を用いた解析用ツールであるObsPy(Beyreuther *et al.*, 2010))は、運用初期における標準ツールとしての導入は見送った。今後、有用な解析ツールについて、標準ツールとし

Table 2. Hardware specifications.

Items	Numbers	Specifications
Analyzing servers	4	Newtech 1U server Intel Xeon E5-2660v2 (2.2 GHz) x 2, 128 GB memory, 3 TB HDD (system disk)
Large storage	1	Newtech storage with file server connected by 8 Gbps fiber channels Effective: 1 PB (Physical: 52 TB x 24)
Data receiving server	1	Newtech 1U server Intel Xeon E5-2660v2 x 2 (2.2 GHz), 128 GB memory, 3 TB HDD (system disk)
Fast storage	1	Panasas ActiveStor14 PanFS 48 TB (parallel access to file system)
Network switch	1	Dell N4064 10 GBase-T 48 ports

Table 3. Software specifications.

OS	CentOS 6.6
Applications	WIN system, GMT, SAC, Seismic Un*x, GNU Science Library, Intel Compiler, Other standard tools installed with OS
User management	NIS
File sharing	NFS

での導入が適当であるとの判断がなされれば、インストールすることを検討する。また、本システムの利用者が開発したツール類についても、開発者が公開しているものは積極的にインストールし、その利用を促進して研究成果の創出につなげたいと考えている。

データは、大容量ストレージに格納される。大容量ストレージは、容量 52TB の RAID (Redundant Arrays of Inexpensive/Independent Disks) 筐体 24 機から構成されているため、本システムからは 24 個のパーティションに分割されて見えている。各パーティションの利用状況は、1 個はユーザのホーム領域、12 個程度は衛星テレメータや JDXnet 等によるテレメータ観測データ、8 個程度は臨時観測データとし、残りは今後のデータの格納状況から必要とところに割り当てて、使用することになっている。

地震研究所にオフラインで保管されているテレメータ観測データは、すべて大容量ストレージにコピーして格納した。JDXnet で流通しているデータは、データ受信サーバで JDXnet から取り込み、高速ストレージに一定期間保管して遅延データの補完を行った後、大容量ストレージに格納する。大容量ストレージには、WIN フォーマットの 1 分ファイル形式で格納し、そのディレクトリ名とファイル名は YYYY/MM/DD/YYMMDDhh.mm (YYYY は西暦 4 桁、YY は西暦の下 2 桁、MM は月、DD は日、hh は時、mm は分を表す) とした。

2.3 システムの利用方法

本システムは「地震データ利用システム」の一部として運用されるので、ユーザは「ガイドライン」に従って利用する。具体的には、現行の大学のデータ利用システムである HARVEST システム (鶴岡, 2002) と同等のユーザインタフェース (図 3) を使って利用申し込みと関係機関への周知、利用の諾否、利用者への回答を行う。利用が許可されれば、本システムのアカウントが発行される。

ユーザは解析サーバに遠隔ログインして、本システムを利用する。解析サーバは同じ環境で 4 台用意されており、ユーザは負荷の低いサーバを任意に選択して利用することができる。ユーザのホームディレクトリは、全体で 50TB 用意した。解析サーバは大容量ストレージを NFS マウントしているので、ユーザはデータを解析サーバから利用することができる。

また、WIN フォーマットデータの利用にはチャンネル情報が必須である。チャンネル情報は、その正確性が保証されている必要があり、またデータとチャンネル情報が揃わないと解析ができないのでデータを不正な利用から保護するための鍵の役割も担っている。チャンネル情報はユーザが自らデータを提供した機関に個別に問い合わせて用意することになる。

表 1 でカテゴリ分けしたように、研究グループ内での利用に限られているデータや非公開のデータも本システムには格納されている。このようなデータは、データ

Fig. 3. Example of application web form of the system.

ファイルにグループ属性を設定してアクセス制御を行うこととした。具体的には、観測グループ単位で unix グループを設定して、ユーザが自由にアクセスできないように設定した。データを利用するには、それぞれのデータの管理者から個別に利用許可を得る必要がある。利用許可が得られた後、そのユーザを unix グループに追加することによってデータへのアクセスが可能となる。

3. 想定される利用シーン

本システムは、大量の連続データを用いた解析に最も威力を発揮する。ここでは、本システムの利用シーンの一例として、Matched Filter 法を用いたデータ解析研究を紹介する。

Matched Filter 法とは、既知の地震のイベント波形と類似の波形を連続波形データからパターン検索することで地震を検出する方法である (e.g., Shelly *et al.*, 2007, Peng and Zhao, 2009, Kato *et al.*, 2012)。図 4 に、Matched Filter 法による地震の検出例を示す。2014 年 11 月 18 日 20 時 10 分に長野県北部地域において発生した M-0.4 の地震である。使用したテンプレート地震は、気象庁一元化処理震源リストに掲載されている 2014 年 11 月 18 日 20 時 41 分に起きた M 1.0 の地震である。図 4 から連続波形記録にテンプレート地震の波形と類似する

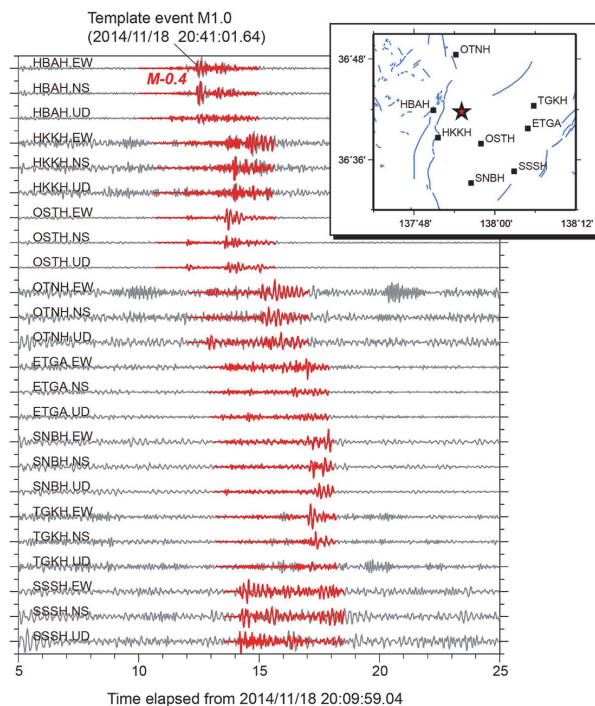


Fig. 4. Example of earthquake detection using Matched Filter method. Grey lines and red lines show continuous waveform and template waveform, respectively. The inset map indicates all seismic stations used for this earthquake detection. The red star and the blue lines indicate the epicenter of the template earthquake and active faults, respectively.

波群が到達していることがわかる。この新たに検出された地震は、気象庁一元化処理震源リストには掲載されていないものである。このように、Matched Filter 法を適用することで、目視では検出できない地震を発見することができ、地震活動のより詳細な時空間発展に関する新たな知見を得ることが可能となる。特に、震源域とその周辺で非常に活発な地震活動が生じる巨大地震発生直後や群発地震活動中では、非常に有効な技術である。一方で、Matched Filter 法を適用すると、複数の地震が同時多発する際も、それぞれの震源を分離できる場合があり、既存の地震カタログの検出レベルの改善へと繋がる。この Matched Filter 法の適用にあたっては、長期間の地震波形データに連続的にアクセスする必要がある。オフラインで保存されているデータを解析対象とした場合には、解析の準備作業に多くの時間を要することになる。本システムは、ほぼ全てのテレメータデータがオンラインの状態にあるので、解析の準備作業は不要となり、本システムの利用に適しているといえる。

2011 年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）の発生直後に、房総半島沖で発生したスロースリップを

Matched Filter 法を用いた地震検出により示した (Kato *et al.*, 2014) 研究がある。解析には 36 チャンネル、120 日間の観測データを用いた。データは、地震研究所においてベアドライブ 10 台に保管されていたため、ベアドライブを 1 台ずつマウントしてデータを読み出し、解析に用いる観測点の連続波形データのみに編集し、解析用の計算機にデータを転送する、といった解析の準備作業として約 10 日間を要した。解析したデータの総容量は 61 GB であった。本システムを用いれば、この解析の準備作業が不要となるので、すぐに解析に取りかかることが可能となり、約 10 日間の時間短縮ができると推定できる。

また、2016 年熊本地震にともなう地震活動の詳細な時空間発展を調べるために、本システムを用いて Matched Filter 法を適用した (Kato *et al.*, 2016)。熊本県熊本地方や阿蘇地方では、2016 年の地震が発生する前から定常的な地震活動が起きていたため、これらの過去の地震をテンプレート地震として用いた。2010 年 1 月から 2016 年 5 月までに発生した地震約 20,000 個（気象庁一元化処理震源による）の地震に対して、本システムを用いてテンプレート地震の波形データを作成した。約 20,000 個の地震波形データの作成に費やした時間は約 3 時間であった。仮にベアドライブを 1 台ずつマウントしてデータを読み出し、解析に用いる観測点のデータのみ選択し、且つ、イベント波形を切り出し解析用の計算機にデータを転送する、といった作業を行っていたなら、約 6 日間という時間を波形切り出し作業に費やしていたと推定される。このように、解析対象の地震波形データがより長期間になればなるほど、本システムを利用することで解析の時間を大幅に短縮できる。

4. まとめと今後の展望

長期間の連続波形データを効率的に解析するためのシステムを開発した。計算機の性能や記憶装置の容量の観点からこれまで行うことが困難であった大規模な解析、オフラインでデータを保管しているが故に解析の準備作業に必要な労力から積極的に行ってこなかった過去のデータの再解析、などが、本システムを用いることにより容易に実行できるようになった。本システムは、今後 5 年間程度のデータを保管することができる大容量のストレージを有している。

今後は、大量のデータから新しい事象を発見するためのツールの開発と整備が重要になってくる。Obara (2015) は、連続波形データを可視化して眺めることから新しい発見が生まれると述べている。本システムに格納

されたすべての波形データを紙に出力することは現実的ではないので、パソコンの画面上に任意の観測点や時間範囲の波形を表示する仕組みが有効であると考えられる。また、個々の研究者が作成したデータの読み書きやフィルタリング、相関処理など基本的なデータ解析ツール（プログラム）を集約して研究者が容易に利用可能となるような解析環境の整備も必要であろう。このようなツールを個々が作成する手間を省力化し、研究者がアイデアを思いついたときにすぐにデータ解析に取りかかることのできる環境作りも重要である。

本システムの構築にあたっては、設備を地震研究所内に設置して管理する方式（オンプレミス）と外部業者の設備をネットワーク経由で利用する方式（クラウドサービス）の 2 種類の形態について検討を行った。検討した項目は、システムの冗長性、拡張性、安定性、障害対応、サービスの継続性、維持経費である。検討に際して、地震波形データは毎分約 60 MB のレートで単調増加することを条件とした。クラウドサービスは、国内で事業を展開している大手 2 社のサービスを参考に検討を進めた。表 4 に示すように、クラウドサービスを利用すればハードウェア障害は事業者対応であり、電源やネットワークも含めてサービスは安定している。クラウドサービス事業者の継続性は懸念材料であり、サービスの利用ができなくなったときに最も憂慮すべきはデータの消失である。しかし、その場合でもオリジナルのデータを別途保管してあれば別事業者にて再構築することは可能であり、大きな問題とはならない。だが、現時点における最大の問題は、クラウドサービスの利用経費がオンプレミスによる機器の導入と維持にかかる経費に比べて約 5 倍程度の高額となる点にある。従って、現時点ではオンプレミスによるシステムの構築が望ましいと判断した。本システムの経年劣化に伴う機器更新の折に、技術の進展やサービスの改善等について情報収集し、クラウドサービスの利用も再検討することが望ましい。

一方、運用上の課題もすでに浮かびつつある。システムの障害、特に約 400 本のハードディスクからなる大容量ストレージは数年後には頻繁にディスク障害が発生すると見込まれ、その障害への人的対応が日常的な運用の負荷となることは想像できる。また、計算機の進歩は著しいものがあるので、数年後にはシステム全体が陳腐化する恐れもある。本システムの導入時に想定していない新たな地震観測網の構築や他の地球物理学的データの利用等によるデータ量の増大が、大容量ストレージを逼迫させる事態もあり得る。

本システムのような資源集中型ともいえる解析基盤は

Table 4. Comparison of Cloud Services and On-premise Services.

	Cloud Services		On-premises Services
	Cloud A	Cloud B	
Redundancy	◎ Replication at three domestic data centers.	○ RAID equivalent.	○ RAID 6.
Extensibility	○ Easy to expand size of storage but will increase maintenance costs.	△ Difficult because the storage configuration is designed for only our use.	○ Easy but involves costs for new expansion storage.
Stability	◎ Not affected by power cuts, earthquakes, or other damaging events because the system is installed at the data center and is backed up regularly.		○ Not affected by power cuts of a few days due to Constant Voltage Constant Frequency (CVCF) power supply. However, generator failures or long power cuts will result in system failure.
Applications	○ Standard computer environments are pre-installed, but special applications for seismic analysis have to be installed by users.		◎ Special environment only for seismic analysis is installed.
Troubleshooting	◎ By the respective cloud-service company.		○ By our administrator.
Continuity	○ Service continues as long as the service is provided by the cloud-service company.		○ Service continues until the end of the life of the facility.
Maintenance fee	△ High. Costs are measured by usage, such as amount of stored data, packets of communication, CPU time, etc. Trial calculations for costs result in equal to or higher costs than that of Cloud B.	△ High. Costs are constant, but five times higher than costs of on-premise system.	○ Medium. The total of the initial cost and five years' maintenance fee is half of the cost of Cloud B.

今後ますます重要となってくるであろう。昨今流行しているディープラーニングも格好の利用テーマになり得る。本システムが全国の研究者に活用されることにより、本システムに備えるデータや解析環境の充実と観測研究の進展及び地球惑星科学の発展が期待される。

謝 辞

匿名査読者の査読意見は、本稿の内容を改善する上で大変有益でした。深く感謝します。本研究では、京都大

学及び防災科学技術研究所の地震観測データを用いました。また、文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」及び東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けました。記して感謝します。なお、作図には GMT (Wessel and Smith, 1998) を用いました。小論中に記載されている製品名などは、各社の商標または登録商標です。

参考文献

- Beyreuther, M., R. Barsch, L. Krischer, T. Megies, Y. Behr and J. Wassermann, 2010, ObsPy: A Python Toolbox for Seismology, *Seismol. Res. Lett.*, **81**, 530–533, doi: 10.1785/gssrl.81.3.530
- Denolle, M.A., H. Miyake, S. Nakagawa, N. Hirata, and G.C. Beroza, 2014, Long-period seismic amplification in the Kanto Basin from the ambient seismic field, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, doi: 10.1002/2014GL059425.
- Eaton, J.P., W.H. K. Lee, and L.C. Pakiser, 1970, Use of micro-earthquakes in the study of the mechanics of earthquake generation along the San Andreas fault in central California, *Tectonophysics*, **9**, 259–282.
- 浜田和郎・大竹政和・岡田義光・松村正三・山水史生・佐藤春夫・井元政二郎・立川真理子・大久保正・山本英二・石田瑞穂・笠原敬司・勝山ヨシ子・高橋 博, 1982, 関東・東海地域地殻活動観測網—国立防災科学技術センター, 地震 II, **35**, 401–426.
- Havskov, J. and G. Alguacil, 2016, Instrumentation in Earthquake Seismology 2nd ed., Springer, 413 p.
- 堀内茂木・鷹野 澄・ト部 卓・平田 直・高波鐵夫・小菅正裕・松沢 暢・山崎文人・片尾 浩・木村昌三・清水 洋・後藤和彦・小原一成・宇平幸一, 1997, 全国地震データ流通システム (1) —地震波形データベースとその利用法—, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, 67.
- Igarashi, T., 2010, Spatial changes of inter-plate coupling inferred from sequences of small repeating earthquakes in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L20304, doi: 10.1029/2010GL044609.
- Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2012, Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, **335**, 705–708, doi: 10.1126/science.1215141.
- Kato, A., T. Igarashi, and K. Obara, 2014, Detection of a hidden Boso slow slip event immediately after the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 5868–5874, doi: 10.1002/2014GL061053.
- Kato, A., J. Fukuda, S. Nakagawa, and K. Obara, 2016, Foreshock migration preceding the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **43**, doi: 10.1002/2016GL070079.
- 宮村三三, 1967, 群列方式地震観測へのあゆみ, 地震 II, **20**, 107–115.
- Obara, K., 2015, Discovery of non-volcanic tremor and contribution to earth science by NIED Hi-net, S23E-01, 2015 Fall Meeting, AGU.
- 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 and Space*, **56**, xxv–xxviii.
- Peng, Z., and P. Zhao, 2009, Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake, *Nat. Geosci.*, **2**, 877–881, doi: 10.1038/ngeo697.
- 酒井慎一・平田 直, 2009, 首都圏地震観測網の設置計画, 地震研究所彙報, **84**, 57–69.
- Shelly, D.R., G.C. Beroza, and S. Ide, 2007, Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, *Nature*, **446**, 305–307, doi: 10.1038/nature05666.
- Shibutani, T., H. Katao, and Group for the dense aftershock observations of the 2000 Western Tottori Earthquake, 2005, High resolution 3-D velocity structure in the source region of the 2000 Western Tottori Earthquake in southwestern Honshu, Japan using very dense aftershock observations, *Earth Planets Space*, **57**, 825–838.
- 篠原雅尚・平田 直・松田滋夫, 1997, GPS 時計付き地震観測用大容量デジタルレコーダ, 地震 II, **50**, 119–124.
- Shinohara, M., T. Kanazawa, T. Yamada, Y. Machida, T. Shinbo, and S. Sakai, 2014, New compact ocean bottom cabled seismometer system deployed in the Japan Sea, *Marine Geophys. Res.*, **35**, 231–242, doi: 10.1007/s11001-013-9197-1.
- 鷹野 澄・山中佳子・ト部 卓・趙悦・酒井慎一・堀内茂木・松沢 暢・一柳昌義・渡辺和俊・山崎文人・大見士朗・木村昌三・馬越孝道・後藤和彦・小原一成・宇平幸一, 1997, 全国地震データ流通システム (2)—地震波形データベースの標準の利用システム—, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, 76.
- 鷹野 澄・ト部 卓・鶴岡 弘・中川茂樹・三浦 哲・松澤暢・岡田知己・中島淳一・中山貴史・平原 聡・伊藤武男・大見士朗・植平賢司・松島 健, 2005, 超高速ネットワーク JGNII によるリアルタイム地震波形データ交換システムの構築実験, 日本地震学会講演予稿集, C098.
- 鶴岡 弘, 2002, 全国地震等データ利用系システムの紹介, EIC ニュースレター, **24**, <http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/NEWSLETTER/24EICnewsletter/24hp.htm> (最終参照日 2016 年 4 月 11 日).
- 植平賢司・金沢敏彦・野口伸一・功刀 卓・汐見勝彦・青井真・関口渉次・松本拓己・岡田義光・篠原雅尚・山田知朗, 2012, 日本海溝海底地震津波観測網の概要, 日本地震学会講演予稿集, D11–09.
- ト部 卓, 1991, 地震波データの伝送法—テレメータ方式, 地震 II, **44**, Suppl., 15–26.
- ト部 卓・東田進也, 1992, win-微小地震観測網波形観測支援のためのワークステーション・プログラム (強化版), 日本地震学会講演予稿集, P41.
- ト部 卓, 1994, 多チャンネル地震波形データのための共通フォーマットの提案, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, P24.
- ト部 卓・平田 直・金澤敏彦, 1999a, 衛星データ受信局を借りて地震波形を利用する方法—だれでも, どこでもできるリアルタイム地震学—, 日本地震学会講演予稿集, P183.
- ト部 卓・山脇康直・袴田亜希子, 1999b, 衛星システムに対応した地震研究所—高感度地震観測データ処理システムの構成, 日本地震学会講演予稿集, P182.
- ト部 卓, 2000, 衛星通信による大学の地震波形データ集配信システム, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集, Ae-007.
- Wessel, P. and W.H. F. Smith, 1998, New, improved version of Generic Mapping Tools released, *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, **79**, 579.
- 吉本和生・平田 直・飯高 隆・関根真弓・篠原雅尚・藏下英司, 1997, 淡路島直下における 1995 年兵庫県南部地震の余震分布—余震分布と活断層との対応—, 地震 II, **50**, 251–257.

(Received May 10, 2016)

(Accepted August 15, 2016)