

## 研究論文 Original Paper

## 世田谷アレーの即時地震インフォメーションシステム

堀 直人\*・山本 俊六\*\*

## Real-Time seismic information system for Setagaya-array

N. HORI, S. YAMAMOTO

**Abstract:** Real-time seismic processing system using the strong motion array data in the Setagaya, Tokyo is reported. The system can automatically renew Web data after the occurrence of an earthquake. As soon as an earthquake occurs the records of seismograph are immediately transmitted to a key station via telemeter. The received data is analyzed by the data-processing server and opened to the public by the database server and the WWW server. The telemetry of the record and the data processing need about 3 or 4 minutes after the earthquake's trigger. Using the obtained seismic data, the maximum velocities and the measured seismic intensity are calculated for the purpose of the disaster prevention. For the detailed analysis the response spectrums, Fourier-spectrums, running-spectrums and shake map data are analyzed and immediately opened to the public. These works are automatically controlled by C-shell scripts which always work on a data-processing server.

**Keywords:** Array, Strong motion, Seismology, Real-time, Web server, Seismometer

## 1. はじめに

著者らは1991年に世田谷地区アレーシステムとして地震観測装置を設置した<sup>1)</sup>。その時点では、やや長周期のコーダ波の特性解析を中心とした関東平野の堆積盆地構造による地震波増幅特性を把握することを目的としていた。現在ほぼその目的は達成されたが<sup>2,3)</sup>、その後地震予知の観点から、より防災的な地震時緊急対応のための地震観測網の整備が唱えられるようになった。金森らによる南カリフォルニアのCUBEシステム<sup>4)</sup>がその最初の提唱であった。これは1994年ノースリッジ地震でその成果が証明されたことは周知のことである。わが国においても翌1995年1月17日に発生した神戸地震（兵庫県南部地震）により、リアルタイムによる地震観測網の必要性が説かれるようになった。これらの考えを受けて研究・開発されている成果のひとつとし、平均20 kmメッシュで配置されたHi-net地震観測網のデータを加工して作成した0.5 kmメッシュのシェークマップが挙げられる<sup>5)</sup>。これは最終的には日本全国の地震動を即時表示することを目指しており、膨大なデータベースが必要とされる。これらが完成されれば緊急対応にとって必須のものとなる。

一方筆者らは、以前からよりローカルなアレーシステ

ム（観測点間距離1 km以下）を組んできたので、対象地域を絞った、より詳細なデータを扱った、そして対象地域に対する即時性の優れたシステムを構成できる可能性がある。そこで本論は、世田谷地区の即時地震動シェークマップ（地震動の振幅のコンター図）作成を想定して、即時web表示・通報のシステムを作成することとした。その即時性は、地震計から転送されるデータを10秒ごとに監視し、約5分以内で解析を行い、その結果をインターネット上でブラウザ表示可能とする程度のものである。本システムはシェークマップの他に、最大速度、計測震度などの情報（防災）、最大加速度、速度波形、速度スペクトル、ランニングスペクトル、速度応答スペクトルなどの情報（研究対象）を即時的に表示する。最終的には世田谷地区の防災拠点の1つとして、総合的なインフォメーションシステムの作成を目指す。

## 2. アレーシステムと地震観測ハードウェア

地震観測点（サイト）情報と、地震観測機器のシステム構成を述べる。

## 1) 震観測点（サイト）情報

観測点は国土館大学世田谷校舎を中心とした3点のアレーを成すように配置されている。アレーはFig. 1に示すように三角形の1辺が1 km以下であり、強震動の実体波と周期2.3秒以下の表面波を対象としている。各観測点は豪徳寺の境内に1点、世田谷通りを越えた国土館大学前女子寮敷地に1点、世

\* 工学部建築デザイン工学科教授 工学博士

\*\* 地震予知総合研究振興会研究員 工学博士

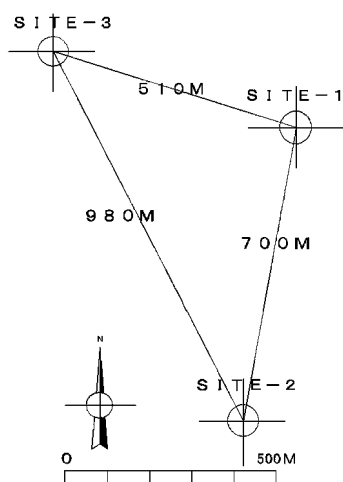


Fig. 1 Layout of observation system of the Setagaya array



Photo. 1 Seismograph (Kokushikan Univ., Setagaya, Site-1 (1))

田谷校地に1点, 同校舎(地上5階建地下1階)1階床に1点配置された。いずれも世田谷の中心部とも言える世田谷区役所に近接しているため, 大きな人工ノイズが予想されるが, 常時微動観測によれば比較的小さな地震を観測するにも十分なS/N比を示している。特に豪徳寺の協力によって維持されてきた豪徳寺観測点は, 地下2mに地震計を埋設したS/N比の優れた観測地点であり, 10年以上の観測期間を通して最も安定し信頼性の高いデータを与えている。女子寮の地震計は地下1mに埋設されている。閑静な住宅街の行き止まりの道沿いにあるが, 交通量の多い世田谷通りとの距離が200m以下のため, 時々人工ノイズにより地震計にトリガーがかかることがある。各観測点の位置情報をTable 1に示す。

## 2) 地震計とシステム

豪徳寺(SITE-3), 女子寮(SITE-2)に配置し, 地中埋設型の長周期サーボ型強震速度計を設置している。世田谷校地(SITE-1(1))には強震加速度計を地中1mまで埋設したコンクリート基礎の上に設置している(Photo. 1)。また世田谷校舎内(SITE-1(2))には可搬型の長周期サーボ型速度計を置いている。長周期サーボ型強震速度計は0.1~30 Hzでフラットな増幅特性を持ち, この出力はA/Dを通してサンプリング100 Hz, 24 bitのデジタルデータとして記録される。データはイベントトリガー方式で記録され, トリガー起動後一般公衆回線を経由して親局(工学部地震研究室内)にダイヤルアップされる。トリガーレベルは可変である。地震計の特性およびトリガーレベルはTable 2のようである。センサーの周波数特性をTable 3(a), (b)に示す。詳しくは文献1)を参照されたい。

Table 1 Site location and geology

CODE	SITE	LATITUDE	LONGITUDE	DEPTH(m)	Geology
SITE-1(1)	Setagaya 1	35 38 40	139 39 22	0	Rome
SITE-1(2)	Setagaya 2	35 38 40	139 39 22	0	Rome
SITE-2	Jyoshiryou	35 38 18	139 39 19	-2	Surface
SITE-3	Goutokuji	35 39 47	139 39 03	-1	Rome

Table 2 Seismometer & loggers

CODE	SITE	SEISMOMETER CODE	MAX. AMPLITUDE	DATA LOGGER	TRIGGER LEVEL
SITE-1(1)	Setagaya 1	JEP-4A3(A)	2G/2(A)	RTS-2(A)	0.5 GAL
SITE-1(2)	Setagaya 2	VSE-15D(T)	10 kine/10 V	CV901VR(T)	0.05 KINE
SITE-2	Jyoshiryou	VSE-311B(T)	40 kine/10 V	CV901VR(T)	0.05 KINE
SITE-3	Goutokuji	VSE-311B(T)	40 kine/10 V	CV901VR(T)	0.05 KINE

**Table 3(a)** Frequency characteristics of seismometer (VSE-311BR)

Frequency (Hz)		0.03	0.05	0.1	0.5	1
Amplitude (%)	X	90.0	96.6	98.3	100.0	100.0
	Y	90.0	96.6	98.3	100.0	100.0
	Z	90.0	96.6	98.3	99.3	100.0
Phase (°)	X	35.0	17.3	8.7	3.6	1.5
	Y	35.0	16.1	7.4	3.6	2.2
	Z	32.5	18.3	8.7	3.6	1.5

		10	20	30	50	70
X		100.0	99.9	98.9	100.0	101.0
Y		100.0	99.8	98.8	100.1	102.3
Z		100.0	99.8	98.8	100.0	103.0
X		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Y		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Z		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Table 3(b)** Frequency characteristics of seismometer (VSE-15D)

Frequency (Hz)		0.1	0.2	0.5	1	10
Amplitude (%)	X	46.6	99.1	100.7	100.8	100.1
	Y	51.8	99.2	100.8	100.4	100.1
	Z	51.9	100.3	100.7	100.3	100.1
Phase (°)	X	118.7	55.7	20.8	10.3	—
	Y	113.8	51.2	19.5	9.5	—
	Z	113.1	52.1	19.6	9.2	—

		20	30	50	70	100
X		100.2	100.0	100.2	100.2	99.9
Y		100.1	100.1	99.8	100.0	100.0
Z		100.3	100.3	100.3	100.3	99.8
X		—	—	—	—	—
Y		—	—	—	—	—
Z		—	—	—	—	—

### 3) 地盤特性

柱状図を Fig. 2(a)～(d)に示す。表土の下に関東ローム層が続く、深度10 m 前後から砂礫層が続く。さらに深度13 m 程度から30 m 以上まで土丹層が続く。地盤種別から砂礫層下の土丹層は、せん断波速度400 m/s～500 m/s とみなせる。地震計はいずれもローム層上に設置されており、ローカルな表層地盤の増幅特性を反映する。これらの特性の概略は常時微動の測定から確認できる（文献1 参照）。Fig. 3

に Site-1 の常時微動スペクトルを示す。

## 3. 即時地震インフォメーションシステム

即時地震インフォメーションシステムの概念図を Fig. 4 に示す。矢印は情報の流れ、横軸は時間の経過である。図に示したように、地震発生後、地震データは地震計に記録され、その後テレメータによる転送を経て、データ処理サーバで処理後、データベースサーバ、Webサーバで公開される。地震計による記録およびデータ処理サーバまでの転送時間は、トリガー判定後約3～4分である。データ処理サーバ上でのデータ処理（データフォーマット変換、フィルタリング、最大値の抽出、計測震度相当値の推定、各種スペクトルの計算、これらの値の可視化など）には1分程度を要し、データベースサーバおよびWebサーバ上でのデータベースアップデート、httpファイルの更新、メール送信などの作業には約10秒程度の時間を要する。以上より、地震発生から5分程度で、地震計からのデータ収集とデータ処理等を終え、インターネットを経由した情報の受信、閲覧が可能となる。これらの作業は主にデータ処理サーバ上で常時稼動するCシェルスクリプトにより自動的に制御される。このシェルスクリプトが呼び出す各処理ルーチンは独立しており、それぞれはFORTRAN, SACマクロ, Cシェル等で記述されている。従って新規処理の導入、各処理ルーチン内容の変更などは随時容易に行うことができる。また、処理ルーチン毎の主な出力が作業ファイルとして作成されるため、仮に障害が発生してプロセスが中断した場合も障害発生直前までの履歴と出力を用いて再解析可能となる（ハードディスククラッシュなどの場合を除く）。以下各ハードウェア内で実行される処理の詳細に関して述べる。

### 1) 地震計

2章2)で概略を説明した。各地震計はトリガーレベル、収録終了条件などを独立設定することが可能である。現在のトリガー条件は「いずれかの成分が0.05 kine 以上の場合起動」と統一設定されているが、将来的には、それぞれのサイト特性、対象地震を考慮して最適な条件を与える予定である。また現在テレメトリングには一般公衆回線を使用しているが、大地震の際の断線・不通などによる情報伝達遅れの可能性を低減するためにも専用回線あるいは無線回線などの使用を検討する余地がある。

### 2) データ処理サーバ

データ処理・解析に関する主要な処理ルーチンを本サーバ上で実行している。地震計データが転送されるディスクはCシェルにより記述されたスクリプトにより常時監視されており、一旦新規データが転送されると各処理ルーチンが自動的に実行される。なお、これらの処理ルーチンは観測点毎に独立して

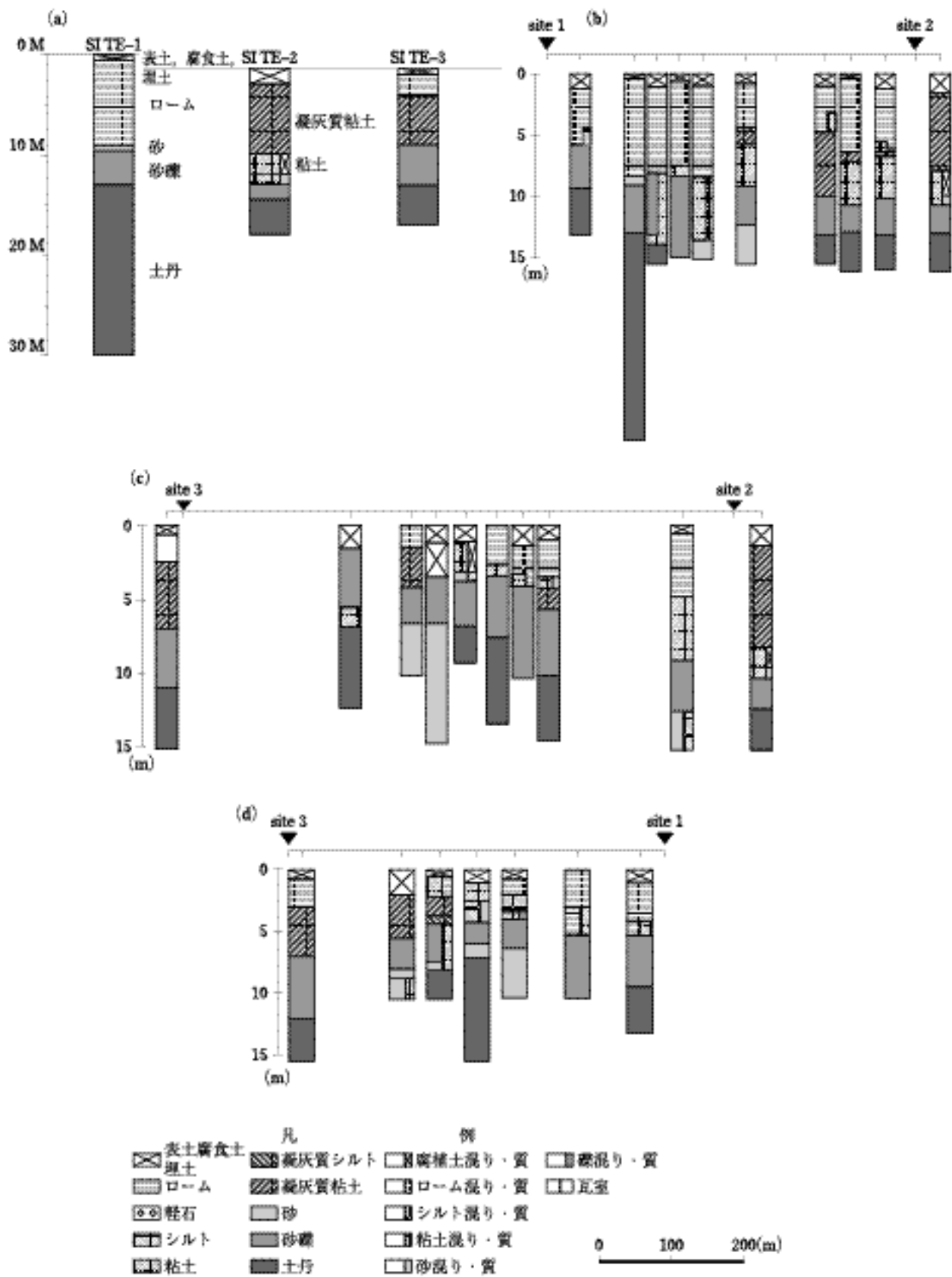


Fig. 2(a)-(d) Geological logs at each site section

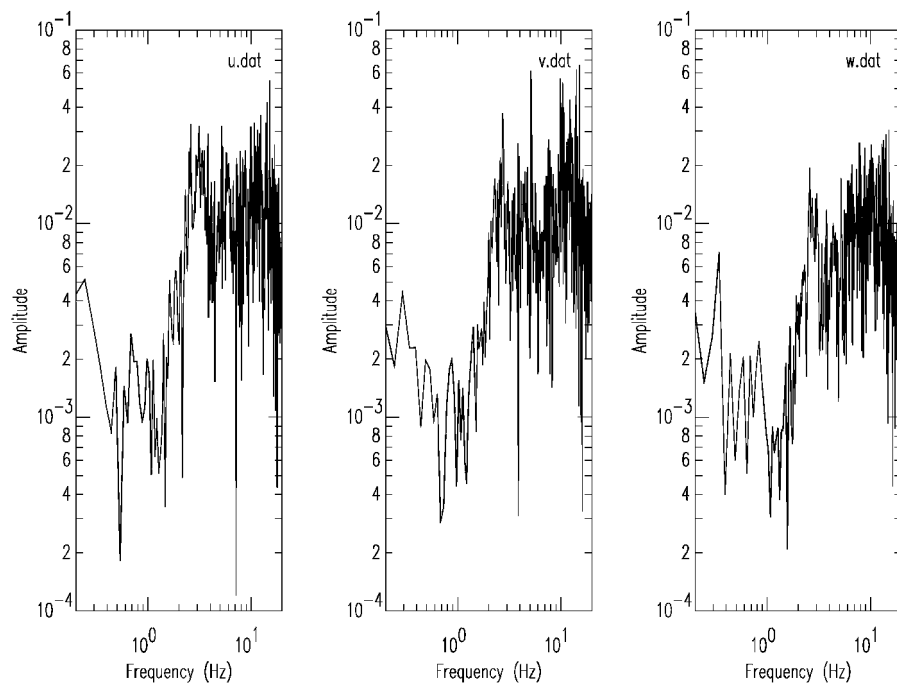


Fig. 3 Fourier spectra for microtremor at Site-1(1)

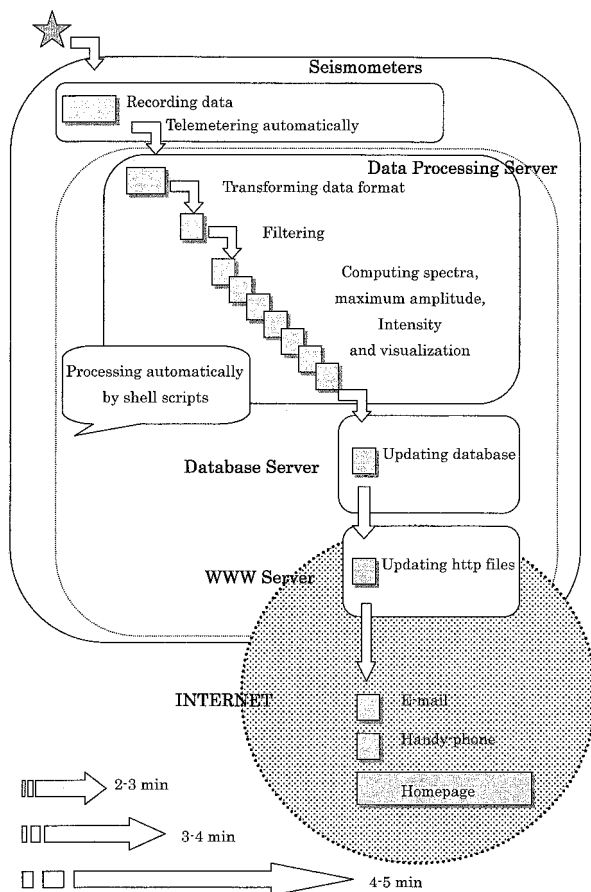


Fig. 4 Schematic flow of seismic information

実行されるため、特定の観測点の欠測、転送遅れが発生した場合もシステムの全体の処理が影響を受け難い。

- データフォーマット変換：地震計依存のバイナリファイルをSACバイナリファイルに変換する。変換に際してはあらたにヘッダー情報の作成を行う。またデータ変換時にはDC成分を除去するフィルター処理を行う。これは、サーボ型速度計のデータが含むDC成分を取り除くことにより、振幅最大値などの抽出を容易にするためである。以降処理および出力の大半はSAC上で行う。
- 最大値の抽出：各成分の速度最大値および全成分を通しての速度最大値を求める。
- 計測震度相当値の推定：通常は気象庁基準の加速度計の出力を用いて求めるものであるが、ここでは速度計のデータを一旦加速度領域に変換し、気象庁と同一のプロセスで計測震度“相当値”を計算している。これはあくまでも参考値であり相対的な揺れの強弱を判断するひとつの指標とする。
- バンドパスフィルター処理：やや長周期領域の性状を明瞭にするため0.1~1 Hzのバンドを通過させるフィルター処理を行う。この処理により、大規模構造物などに影響を与えるやや長周期成分の性状、また各観測点間の波形の相関などに関する情報を確認することができる。
- スペクトルの計算：各観測点・各成分の周波数

特性を明らかにするため速度フーリエスペクトルを計算する。

- f) ランニングスペクトルの計算：波形の非定常特性を明らかにするため速度ランニングスペクトルを計算する。
- g) 速度応答スペクトルの計算：各種の構造物の地震応答を簡便に推定するため速度応答スペクトルを計算する。

以上の処理結果は SAC 上で可視化され、さらにファイル容量低減と Web ブラウザによる閲覧を可能にするため jpg ファイルに変換される。

### 3) データベースサーバ

観測点、地震、処理結果毎にデータベースを作成し、随時アップデートを行う。これらのデータベースは通常の処理ルーチンと独立して利用可能である。

### 4) Web サーバ

このサーバはインターネットからアクセス可能なドメインを持ち、Web サーバが稼動している。本システム外部からはこのサーバを通してのみ、最新および過去の地震情報が閲覧可能である。最新地震波形と処理結果は上記の処理ルーチン終了後自動的に更新される。ホームページの http ファイルには 1 分毎の自動リフレッシュ機能を与えているため、このページを簡便な地震発生監視モニターとして利用することも可能である。またあらかじめ登録されたアドレスに地震情報に関するメール送信も行う。一定の振幅以上の値が記録された場合、メールを携帯電話などに送信することにより簡易呼び出しシステムを構築できる。

## 4. システム稼動例

稼動後まだ速度最大振幅が 10 kine を超えるような波

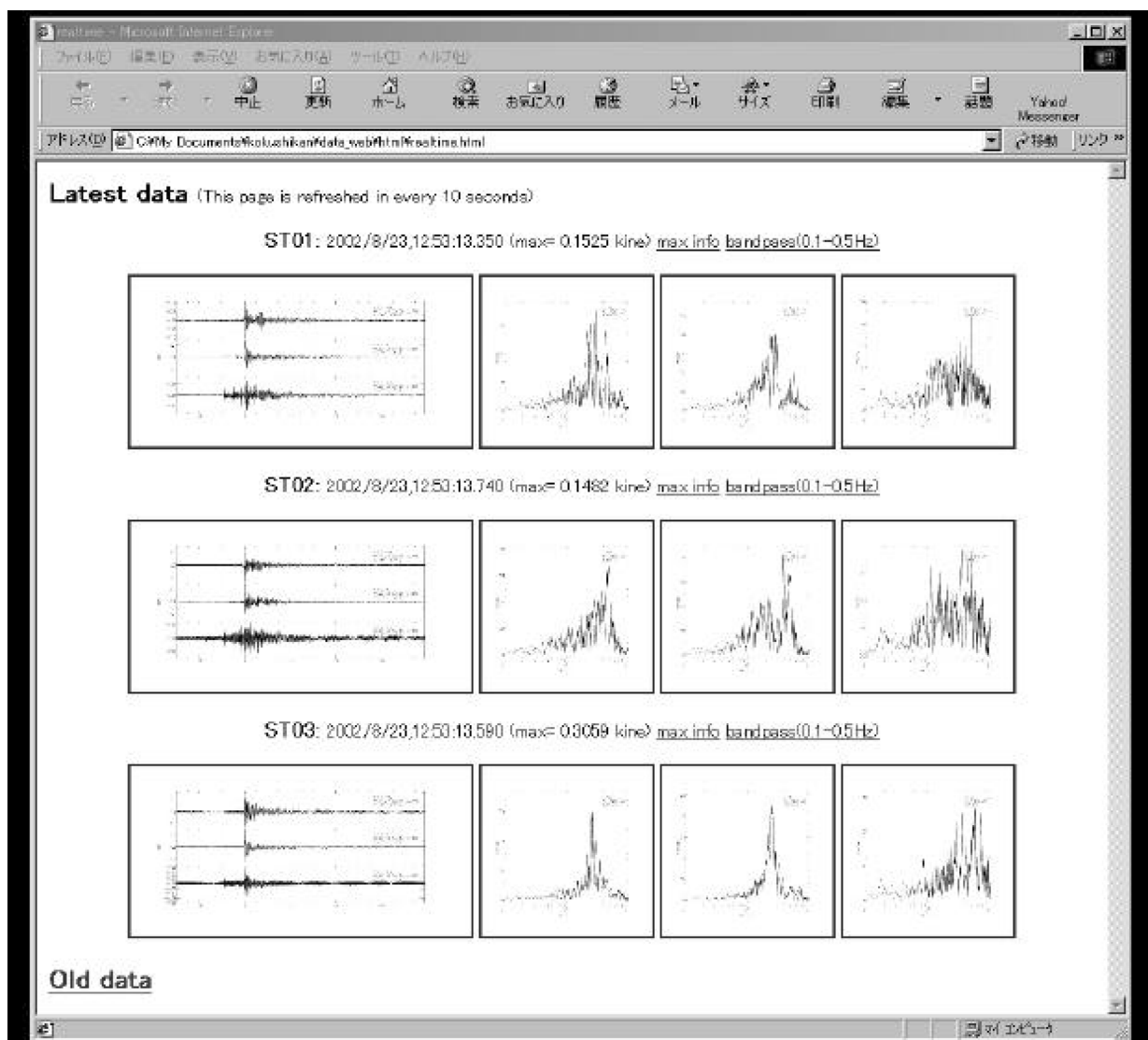


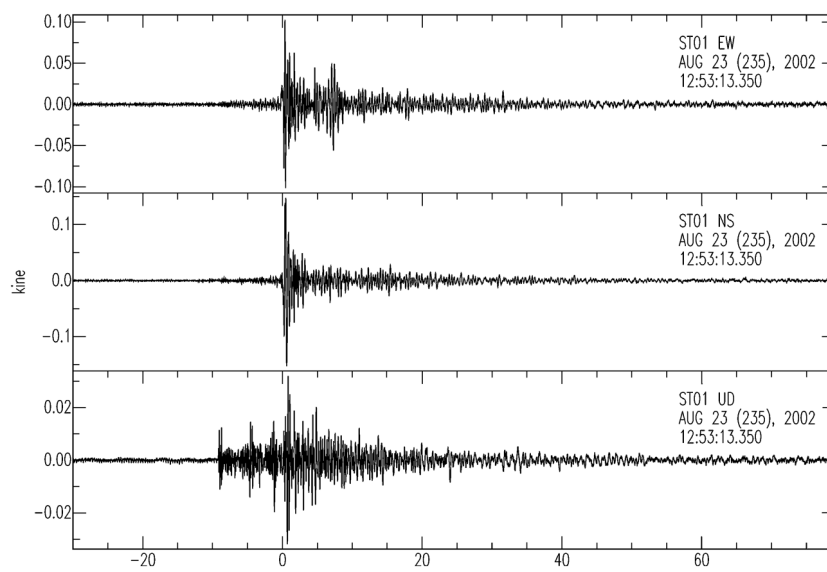
Fig. 5 Image of homepage

形は記録されていない。ここでは、システムの稼働例として2002年8月23日に発生した千葉県北西部の地震(Mj=4.0)発生時の出力を示す。地震の諸元は Table 4 に示した通りである。地震発生後、3観測点の地震計がトリガー起動しテレメータによるデータ自動送信が行われた。データ処理サーバ、データ処理サーバ、Webサーバ上で各処理ルーチンが実行された後、更新されたホームページの状況を Fig. 5 に示す。ホームページには速度波形、スペクトルが縮小した形で表示される。これらの図はクリックにより拡大することができる (Fig. 6~Fig. 7 参照)。また観測点毎に速度振幅の最大値、計

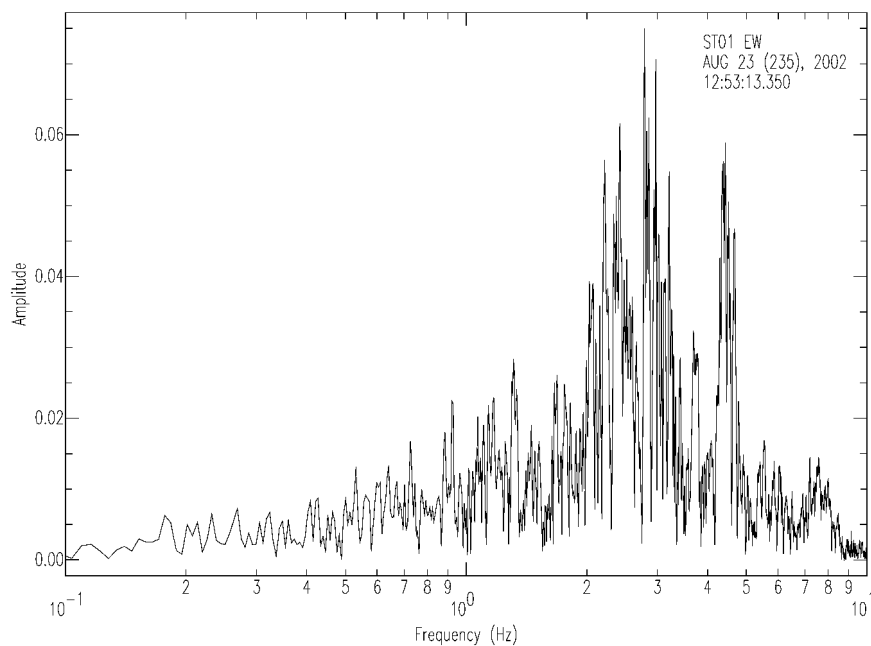
測震度が表示される。この地震では最大振幅は水平動で0.1 kine を超える程度、上下動で0.03 kine 程度であった。さらに所定の箇所をクリックすることによりバンドパスフィルター処理後の速度波形、ランニングスペクトル、速度応答スペクトルなどを表示することができる

**Table 4** Event data

Event time	2002/08/23, 12:52:51.69 (JST)
Event Location	35.6740N 140.0462E 72.90 km
Magnitude	Mj 4.0



**Fig. 6** Velocity waveform



**Fig. 7** Velocity Fourier spectrum

(Fig. 8~Fig. 10参照)。図よりこの地震の場合、豪徳寺のEW成分でははじめに4 Hz程度の周波数が卓越した後、2 Hz程度の周波数の卓越が認められる。結果として0.25秒~0.5秒(2 Hz~4 Hz)の固有周期を持つ振動系により大きな影響を与えることなどが分かる。短周期の主要な振動時間は10秒程度であるが、長周期の波形は初動以降1分以上継続していることも分かる。

ホームページは自動更新を行うため、常に最新情報を表示することになる。また本ページでは各観測点の情報が並べられて表示されるため、観測点毎のデータ収集状況と、観測点間の地震応答の違いを一画面でチェックすることができる。さらに過去の地震情報に関するデータ

ベースも呼び出すことができる。

## 5. ま と め

世田谷地区の防災を目的とした即時地震インフォメーションシステムを構築した。現時点ではホームページによる最大速度、計測震度などの情報(防災)、最大加速度、速度波形、速度スペクトル、ランニングスペクトル、速度応答スペクトルなどの情報(研究対象)を即時的に表示することを可能とした、今後は世田谷地域の地盤増幅特性を調べ、全地域のシェークマップ表示に関する機能を追加すれば防災上の意義が増すと思われる。また観測点数も増し世田谷区内全域により細かなメッシュ

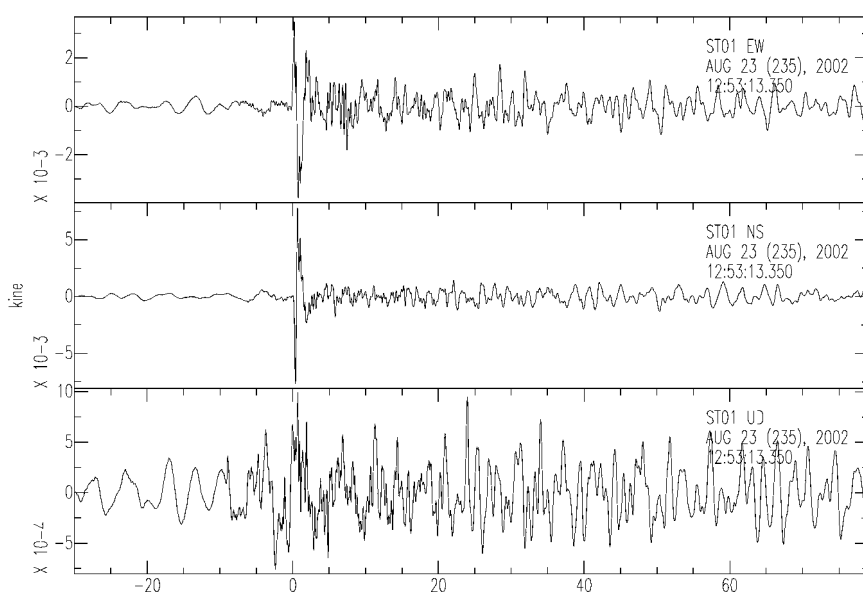


Fig. 8 Bandpass-filtered Waveform

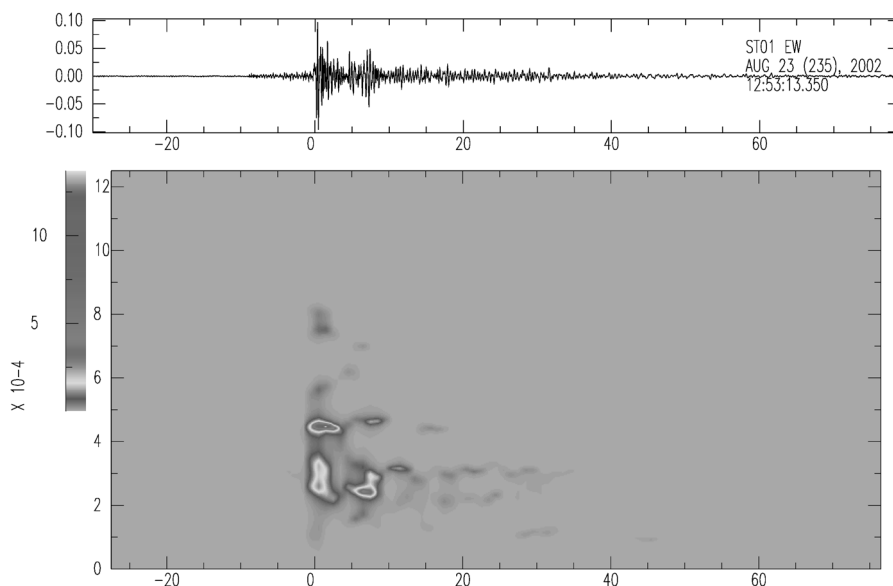


Fig. 9 Running Spectrum



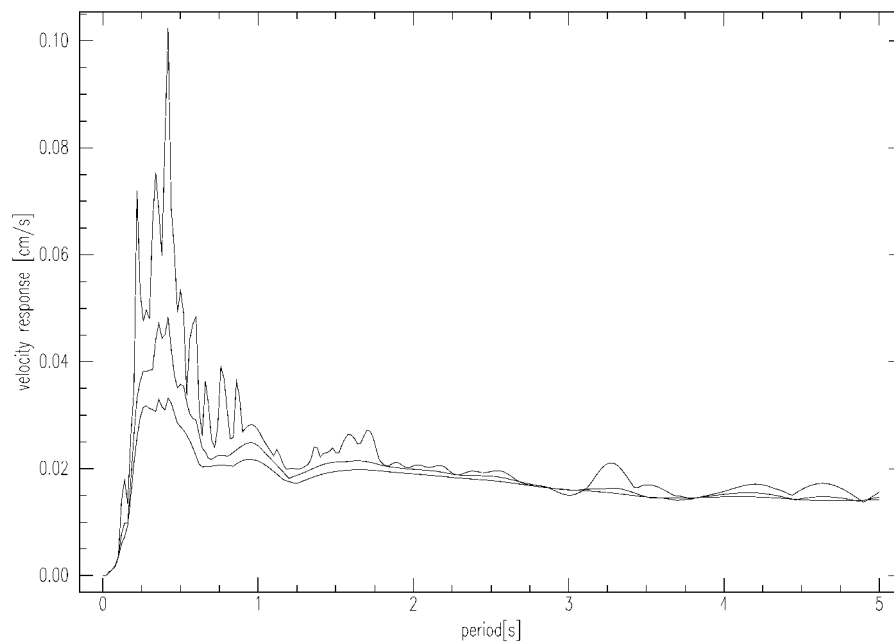


Fig. 10 Velocity response spectrum

配置がなされれば、その精度はさらに増す。今後も地域に密接した地震防災情報の現実的なシステム作成を目指す。

### 参考文献

- 1) 堀 直人 (1992), トリパータイトアレイによる地震動表面波の観測, 国土館大学理工学研究報告 第5号, pp. 34-48
- 2) 堀 直人, 山本俊六 (1993), 周期3, 4秒の地震動表面波の波動特性, 研究+成果 10号 pp. 23-29, 早稲田大学専門学校
- 3) 山本俊六, 堀 直人 (1994-12), 堆積盆地における後続地震波動の解析, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp. 349-354
- 4) Kanamori, H., E. Hauksson, and T. Heaton (1991), TERRAScope and CUBE project at Caltech, EOS v. 72, No. 50, p. 564
- 5) 大井昌弘 他 (2000), リアルタイム地震動推定システムの開発(1), 日本地震学会講演予稿集 2000年度秋季大会