

オンラインアレー地震観測システムの構築と その記録の若干の考察

神山 眞¹・莊司雄一²・松川忠司³・浅田秋江¹・中居尚彦⁴

¹正会員 工博 東北工業大学教授 工学部土木工学科 (〒983-0381 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

²正会員 東北工業大学大学院生 土木工学専攻 (〒983-0381 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

³正会員 東北工業大学助手 工学部土木工学科 (〒983-0381 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

⁴東北工業大学講師 情報処理技術研究所 (〒983-0381 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

仙台市圏に構築・展開されたリアルタイム・オンライン・アレー観測システム Small-Titan の概要とそれにより得られた強震記録の特性が述べられる。最初に、このシステムの構築にあたっての目的と観測ステーション、観測センターの内容、システム全体の構成と特徴が紹介される。このシステムの構築以後の2年半の経過の中で約100個の地震記録を得ているが、これらの地震記録のいくつかの特徴が分析される。特に、1998年9月15日に発生した仙台直下の地震(マグニチュードM=5.0)による強震記録にみられる震源、ローカルサイトの影響に関する解析結果が詳細に述べられる。また、このシステムによる記録を利用したサイズミックゾーニングについての考察がなされる。

Key Words : real time, on line, array observation, earthquake, stron-motion record, earthquake mitigation system, seismic source, local site effect

1. はじめに

地震動は大別して震源特性、伝播経路、ローカルサイトによって決まることが知られている。これらの要因の複合的な寄与により、地震ごとに地点固有の地震動がもたらされ、ひいては地震災害も特定のある地域に集中して生じることが多い。したがって、地震防災の要諦はこれらの要因の寄与を総合的に考慮して地震動を予測する適切な手法を確立するとともに、これに基づき種々の防災ならびに減災対策をきめ細かく立てることである。

地震動予測に関してこれまで各種の試みがなされているが、現状は、未だ試行錯誤の域をぬけていないといつてよかろう。その大きな理由として、上記の各要因の相互干渉や連鎖が複雑であること、複雑であるがゆえに機構が十分に明らかにされていないことがあげられる。このような現状を克服する最も確実な方法は、回り道のようにであるが、「観測による事実」の積み重ねとその有効利用であると考えられる。その意味から、観測体制の飛躍的充実が必要である。しかも、震源、伝播経路、ローカルサイトが多面的に、かつ多様に取りこめるアレー観測の充実が望ましい。

アレー観測は大別すれば「Local laboratory array」と「Simple extended array」が考えられるが¹⁾、上記の目的に沿ったアレーとしては後者がコストパフォーマンス的には有利と考えられる。特に、実時間の地域地震防災システムへの併用を目的としたとき、後者は地点による地震動強さの差を容易に明らかにでき、地震動情報の点から面への拡張が可能であることから、地域地震防災の決め手となる事前情報、実時間情報がマップの形で取得できる。すなわち、このタイプのシステム充実によりリアルタイムに更新可能なサイズミック・ゾーニングマップの作成が期待でき、これにより地域地震防災システムのきめ細かな確立が可能となろう。

以上の観点および阪神淡路大震災の反省に基づき近年、日本においても各所で「Simple extended array」型の観測システムが構築されてきている。これは大別すれば、二つに分類できよう。すなわち、「集中処理型」と「分散処理型」である。ここでは、日本全国のような広域的地域に観測サイトを網羅して、これを一つのセンターで集中的に処理するシステムを「集中処理型」とよび、市町村単位の領域で別個にこれを行い、これらを集合させるシステムを「分散処理型」と区別している。例えば、科学技術庁の

K-net²⁾は前者であり、リアルタイム地震防災を念頭においた横浜市の観測システム³⁾は後者の例である。両者は長所欠点を有するが、運用経費、システムの安定性・確実性、地域へのリアルタイム防災システムへの併用を考えると、後者の分散処理型の観測システムはもっと積極的な導入を検討する価値がある。

以上の観点から、筆者らは東北地方における地方都市を対象として、この種の観測システムのプロトタイプを設置することを構想した。本来、地域地震防災を念頭に置いた、このような観測システムは地方自治体が率先して検討すべきものであろうが、種々の意味の不如意が存在するのも事実である。一方では、地域と大学の連携を考えれば、「大学がパイロットになる」ことも必要である。このようなことから、リアルタイム・オンライン・アレー観測システム構築を柱の一つとして、「重力場擾乱およびリアルタイム地震動情報による振動制御・地域防災システムの開発研究」のテーマで文部省の「ハイテクリサーチセンター整備事業」に応募することとなり、その採択により本観測システムが平成9年度末に構築された。

本観測システム構築の目的は、モデル地域（後述の理由から仙台市圏が選ばれた）の各種地盤にデジタル強震計を数多く展開して、これを公衆デジタル回線で結び、リアルタイムで強震動を得ることにより、震源、伝播経路、ローカルサイトの影響に関する基礎的な研究を進めるとともに、地域地震防災システムへの応用を開発することである。現在、強震動を対象とした「Simple extended array」型観測システムで、単独の大学で運用するシステムとしては恐らく世界で最も大規模なものと考えられる。このシステムは「Small-Titan (Strong Motion Array of Local Lots by the Tohoku Institute of Technology Area Network, スモールタイタン, 小さな巨人)」と命名された。1998年度末に構築が完了して、3ヶ月あまりの機器調整を経て、1998年6月から試験観測にはいつている。本稿では、このシステムの概要とその後の継続観測によって得られている記録の例、特に1998年9月15日の仙台地方に起こったM=5.0の直下地震による強震記録とその若干の特性を中心に報告する。

2. 観測システムの概要

上述のように、本観測システム Small-Titan は分散処理型アレーのモデルを東北地方の自治体関係者に提起することも意図している。その観点から、当初、

モデルサイトは東北地方の適地ということで検討をすすめたが、最終的には次の理由から仙台市圏をモデルサイトとすることにした。すなわち、

- サイズミシティが高いこと、
 - プレート間地震およびプレート内地震という種類の異なる地震による地震動情報を得やすいこと、
 - 各種の地盤が存在し、それらの分布がメリハリをもっており、ローカルサイトの影響を把握しやすいこと、
 - 1978年宮城県沖地震の被害を経験しており、地震動と被害の関係を考察しやすいこと、
 - 管理がしやすく、運用経費がやすいこと、
- などである。

仙台地方は過去のデータから少なくとも年平均10回の有感地震があり、しかも三陸沖、宮城県沖、福島県沖という我が国でも有数の地震（プレート間地震）の巣を有している。これに加え、仙台市の中央部を南西から北東に横断する活動度Bの長町一利府構造線という活断層が存在している。1978年宮城県沖地震から22年を経て、再び宮城県沖の地震の生起が危惧されると同時に、長町一利府構造線の活動に伴うと思われる地震が最近起きはじめている。事実、後述のように、本観測システム Small-Titan によるはじめての本格的強震記録はこの断層に関連した地域でおきたものである。

仙台地方の地盤・地質については、先の長町一利府構造線を境に、それより西部は洪積台地、東部は沖積低地と明確な対照を示しており、ローカルサイトの影響、とりわけ不整形地盤による地震動の影響把握が期待できる。

アレー観測システム構築に当たり、次の諸点を初期条件とした。当初予算の上限から、観測点の配置は最大20サイトとすること、各サイトの地震動データは公衆デジタル回線 ISDN を利用して観測センターで集中的に受信・処理するオンライン・リアルタイムとすること、全観測点のデータは地震動感知後3分以内に観測センターで受信完了できること、地震計（換振器）は±2000ガルを記録できるデジタル強震加速度計として、A/D変換機能は24ビット以上とすること、などである。これらの条件およびデータ品質の互換性を考慮して、換振器はK-netで採用されているデジタル強震加速時計 K-net95 と同等もしくはその上位機種として、リアルタイム伝送用強震計 RTS-2（（株）アカシ）を採用することにした。リアルタイム伝送用強震計 RTS-2 は加速度検出器（記録範囲±2000ガル、記録周波数特性0.02~32Hz、3成分）、A/D変換器（24ビット）、フラッシュメモリーカード（10MB）、DSP(Digital Signal Processor)、

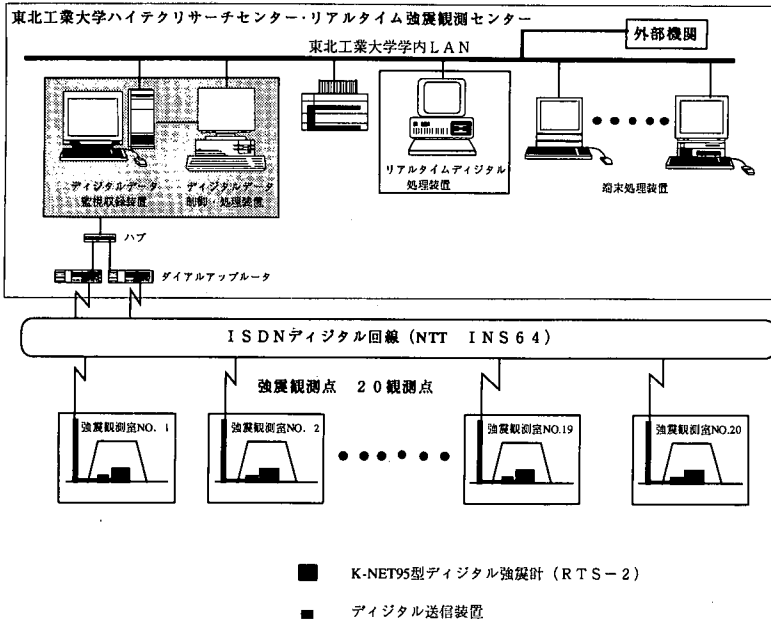


図-1 Small-Titanの全体構成

MPU(Micro Processor Unit), GPS(Global Positioning System), ISDN 用通信ポート, RS-232C 準拠通信ポート (最大通信速度: 38400BPS), バックアップバッテリー (停電保証時間 3 時間以上), パウファ出力などから構成されている。なお, リアルタイム防災システムへの併用を考え, 計測震度処理システムの導入も検討したが, 気象庁認定の計測震度は地震計サイトでスタンドアローンの形で最低 1 分間の計測震度の処理を原則としており, これを採用すると回線が輻輳したときのデータ送信に支障が懸念されることから, 震度計測は観測センターで算定する方式とした。図-1 にリアルタイム強震観測システム Small-Titan の全体構成を示す。

図-1 に示すように, 本観測システムは各観測点における観測ステーションとこれらの各観測ステーションのセンサーの状態を監視・制御するとともにデータを集中的に収録する観測センターから構成されている。観測ステーションのセンサーは任意に設定可能なトリガーレベルの加速度が感知されたとき, それらの加速度デジタルデータ (NS, EW, UD 成分) をフラッシュメモリーカードに保存すると同時に ISDN 回線を通して自動的に観測センターに送信するように設計されている。その際のサンプリングタイムは 100Hz, 200Hz の両設定が可能であり, トリガーの遅延時間も任意に設定できる。なお, 各センサーにおける絶対時刻は GPS システムにより 1 時間

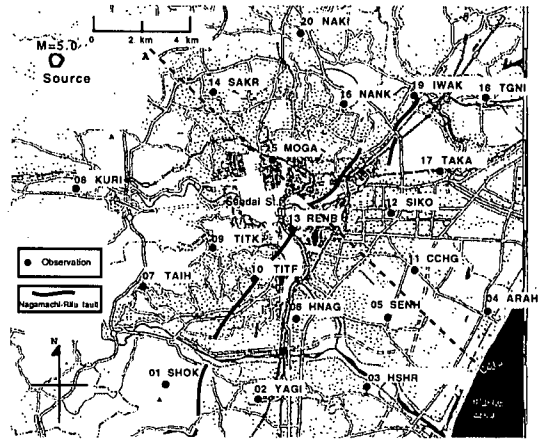


図-2 Small-Titanの観測点配置

ごとに補正され, これらの絶対時刻によるトリガータイムが加速度データとともに送信されることにより各ステーションの記録の同期がとられている。

3. 観測点配置

設置数 20 を条件に最終的に決定された観測ステーション配置を図-2 に示す。また, 各観測ステーションの一覧を表-1 に示す。

この種のアレー観測システムの構築で最も苦勞す

るのが観測点の配置と設置許可の折衝である。震源効果やローカルサイト効果への配慮から理想的な配置計画があったとしても、最終的には妥協的に決めざるを得ない側面が多い。特に、都市内では敷地確保が最大のネックであり、電源、電話回線の完備も意外な支障となる（都市内では電線、電話線が共同溝として地中化されていることが多い）。表-1に示すように、ここでの観測ステーションは全て学校関係の敷地内の地表に設置されている。これは設置許可が得られやすいという理由の他に、地域防災システムへの利用を考え、学校が大地震の避難地点となっていること、児童生徒への防災教育への一助にもなりうることを配慮した結果である。これを含めて、配置に当たり、考慮した基本点は以下の通りである。

- (a) 防災システムへの併用を考え、仙台市圏を出来るだけ均等に網羅する
- (b) 地震動に対するローカルサイトの影響を的確に把握すべく種々の地盤に配置する
- (c) ローカルサイトの影響のうち不整形地盤の応答把握にも資する配置とする
- (d) 懸念される潜在地震の震源効果を的確に把握できる配置とする

このうち、基本点 (a) ~ (d) と決定された観測ステーションとの関係を以下に簡単にコメントしておく。

上述のように仙台市には中央部を南西-北東に横断する活動度 B の活断層・長町-利府構造線が横断する。図-2にはそのトレイスの概略がプロットされている。この位置関係から明らかなように観測点 10(TITF), 13(RENB), 19(IWAK) はこの断層のほぼ直上に配置されていると同時に、他の観測点もこの断層を取り囲み、同心円上に配置されており、同断層の活動に伴う地震の震源効果が取りこめるように設計されている。この断層については微小地震の観測によりこの断層の活動に伴う極微小地震が多く発生していることが知られており、後述の観測システム Small-Titan による最初の本格的な強震記録はこの断層に関連した震源によるものである。このように、この断層による潜在地震は将来の問題ではなく、現実的な懸念となっている。仙台市圏はこの断層を挟み、西部と東部で対照的な地盤構成を示している。若干古い資料であるが⁴⁾、仙台市圏の地盤種別を図-3に示す。各観測点と地盤種別の関係は図-2、図-3を比較されたい。

ローカルサイト効果を考慮してSimple extended array型のアレー観測を展開する場合、最も重要なことの一つは全観測点の基盤に相当する観測点を確保する

表-1 観測点一覧

No.	Code	Site Name	Latitude, Longitude
1	SHOK	高崎女学院短大	38° 11' 30" N, 140° 49' 56" E
2	YAGI	柳生中学校	38° 11' 11" N, 140° 52' 33" E
3	HSHR	東四郎丸小学校	38° 11' 28" N, 140° 55' 37" E
4	ARAH	荒浜小学校	38° 13' 11" N, 140° 59' 00" E
5	SENH	仙台東高校	38° 13' 02" N, 140° 56' 11" E
6	HNAG	東長町小学校	38° 13' 00" N, 140° 53' 37" E
7	TAIH	太白小学校	38° 13' 41" N, 140° 49' 17" E
8	KURI	栗生小学校	38° 15' 51" N, 140° 47' 21" E
9	TITK	東北工大香澄町キャンパス	38° 14' 33" N, 140° 57' 16" E
10	TITF	東北工大二ツ沢キャンパス	38° 13' 52" N, 140° 52' 26" E
11	CCHG	七郷中学校	38° 14' 04" N, 140° 56' 57" E
12	SIKO	仙台工業高校	38° 15' 20" N, 140° 55' 17" E
13	RENB	蓮坊小路小学校	38° 14' 33" N, 140° 53' 29" E
14	SAKR	桜丘小学校	38° 18' 00" N, 140° 51' 15" E
15	MOGA	宮城県立盲学校	38° 16' 30" N, 140° 52' 56" E
16	NANK	南光台東小学校	38° 17' 45" N, 140° 54' 58" E
17	TAKA	高砂小学校	38° 16' 16" N, 140° 57' 39" E
18	TCNI	多賀城第二中学校	38° 17' 54" N, 140° 58' 58" E
19	IWAK	岩切中学校	38° 17' 56" N, 140° 56' 55" E
20	NAKI	七北田中学校	38° 19' 17" N, 140° 53' 44" E

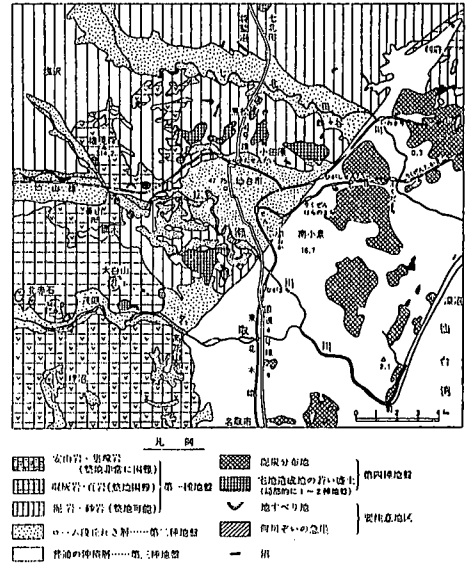


図-3 仙台市圏の地盤種別

ことである。仙台市圏の地盤構成で地表に露出する最も妥当な基盤は安山岩の高館層である。この観点から、観測点1(SHOK)はこの高館層の露出する地点に設置されている。また、活断層・長町-利府構造線を境に分布する洪積台地、沖積低地に出来るだけ均等に配分すること、1978年宮城県沖地震の被害経験を踏まえ、洪積台地に数多く存在する人工的造成地にも盛土、切土の地点の違いも含めて観測ステーションを配置すること、沖積低地のうち軟弱な泥炭層の存在する地点にも配置すること、などに配慮している。これらを含めて、当初構想された各観測ス

テーションと地盤種別との関係は次の通りである。

- 基盤：観測点 1
- 洪積台地：観測点 7, 8, 9, 14, 15, 16, 20
- 沖積低地：観測点 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 17, 18
- 洪積，沖積の境界：観測点 10, 13, 19
- 造成地：観測点 7, 9, 16
- 沖積軟弱地盤：観測点 5, 18

なお，以上は観測ステーション配置設計の当初構想されたものであり，各観測ステーションにおけるジャストポイントのボーリング資料が整っていないので，今後変更されることがあることを承知されたい。

最後に，各観測ステーションと地盤構造の不整形性との関係について若干触れておく。これまでの公刊資料から引用したほぼ長町-利府構造線に直角な地盤断面の代表例(図-2のA-A線)を図-4に示す。これには対応する観測ステーションがプロットされている。このようにここでの観測アレーは地盤の不整形性の影響も念頭に置いて設計されたものである。

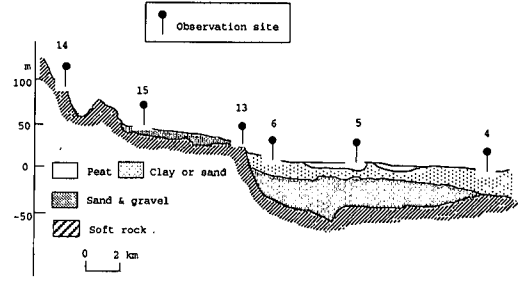


図-4 代表的側線(図-2のA-A')における地盤構造断面

4. 観測記録の例

(1) 加速度記録の波形

本観測システム Small-Titan は 1998 年 6 月から試験観測にはいっている。地震観測特有のトラブルを経験しながら，ハード，ソフト両面からシステムの完全構築を進めている。これまで，いずれかの観測点で起動がなかった地震の数は 109 個に及んでいる(2000 年 3 月 25 日現在)。なお，各観測ステーションのトリガーレベルはそれぞれのバックグランドノイズを考慮して試行錯誤的に設定しているが，現在のトリガーレベルは 1gal-5gal の範囲である。

上述のようにこれまで多くの記録を得ているが，本格的な記録は 1998 年 9 月 15 日午後 4 時 24 分頃発生した仙台市青葉区愛子に震源を持つ直下地震によるものである。ここでは，この記録を例に観測記録の特徴を紹介する。気象庁による同地震の震源要素は次の通りである。

- 発生時刻：1998 年 9 月 15 日 16 時 24 分頃
- 震源：宮城県南部 北緯 38.3 度，東経 140.8 度，
- 震源深さ：10 km
- 規模：M5.0

図-2には震央の位置が示されている。図-2に示すように，震源とアレー観測サイトが極めて近接しており，地震規模が小さいとは言え，このような直下の地震をアレー観測システムとしてキャッチしたのは大変珍しく，貴重なものと考えられる。また，こ

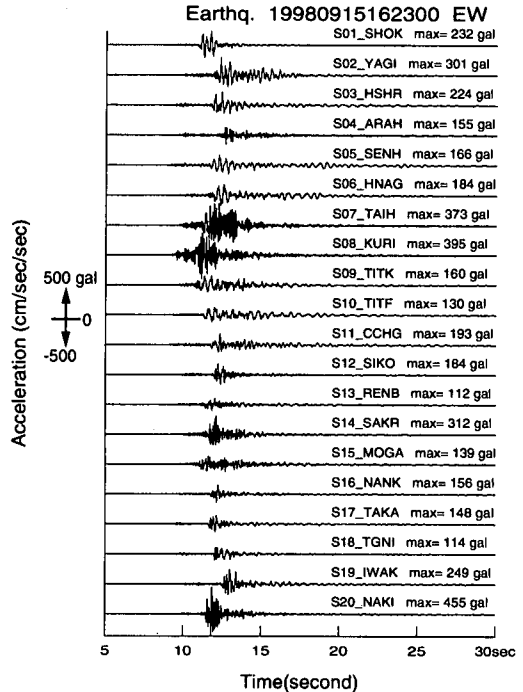


図-5 各観測点における加速度記録 (E-W 成分)

の地震の前震，余震による記録も約15個得られており，本震記録とともに非常に価値あるデータを構成している。なお，この地震の本震による気象庁発表の震度は仙台市宮城野区で震度4である。ただし，本観測システム Small-Titan による計測震度は観測点1 (SHOK)，2(YAGI)，5(SENH)，6(HNAG)，7(TAIH)，8(KURI)，20(NAKI)などで震度5弱を示している。また，この地震による被害は窓ガラスの破壊，物の転倒，落下，一部建物のクラックなどが報告されている⁵⁾。

図-5～図-7 はそれぞれ各観測ステーションで得ら

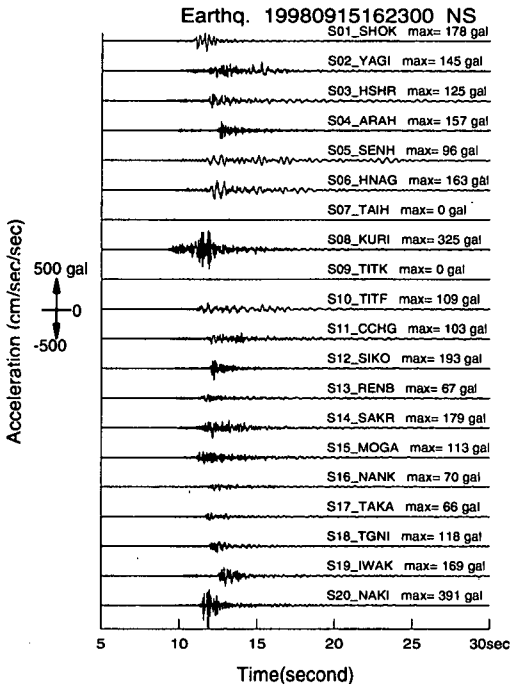


図-6 各観測点における加速度記録 (N-S成分)

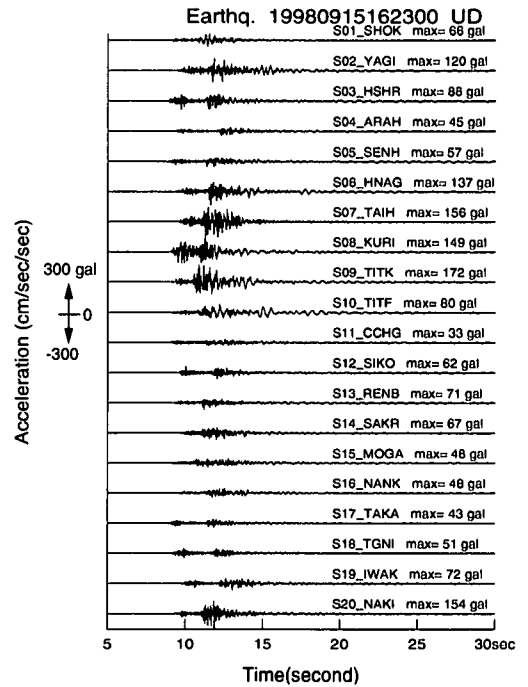


図-7 各観測点における加速度記録 (U-D成分)

れた E-W 成分, N-S 成分, U-D 成分の加速度記録を示したものである。なお, N-S 成分では観測ステーションの加速度センサーの不良により観測点 7(TAIH), 観測点 9(TITK)において欠測となっている。水平動の最大加速度は観測点 20(NAKI)の約 455 ガル, 鉛直動のそれは観測点 9(TITK)の約 172 ガルである。これらの記録からでも, 震源は観測点 7(TAIH), 8(KURI), 20(NAKI)に近いことが推定される。また, 各成分の記録において, 観測点ごとに大幅に波形が異なっており, 各観測点のローカルサイト特性, 震源と各観測点の位置関係などにより地震動が大きく変動することがわかる。この地震の記録の例からだけでも, きめ細かく地震計を配置することの必要性が理解できよう。

(2) 加速度記録のスペクトル特性

ここでは各観測点の記録におけるスペクトル特性を簡単に紹介する。図-8 は震源に最も近い観測点 8(KURI)の 3 成分加速度記録の主要動におけるフーリエスペクトルを示したものである。また, 図-9 は基盤 (reference site) と想定される観測点 1(SHOK)の 3 成分加速度記録の主要動のフーリエスペクトルを示したものである。図-8, 図-9 をみると, 全体に短周

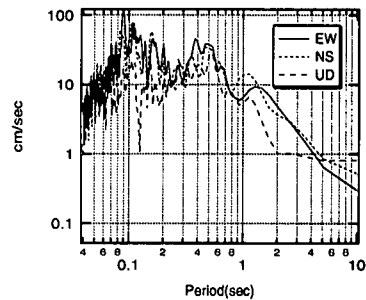


図-8 観測点 8(KURI)における 3 成分加速度フーリエスペクトル

期が卓越しているとともに, 成分にあまり依存しないスペクトル形状を示していることがわかる。特に, 鉛直動が水平動と非常に相似な周波数特性を有することが注目される。これは震源規模を反映すると同時に, 直下地震の一つの特徴が現れたものと推定される。次に, 各観測点におけるスペクトル特性の違いをみるため, 代表的観測点の主要動におけるフーリエスペクトルをそれぞれ E-W 成分, U-D 成分について重ねてプロットしたのが図-10, 図-11 である。これらの図をみると, 全体に震源規模を反映して短

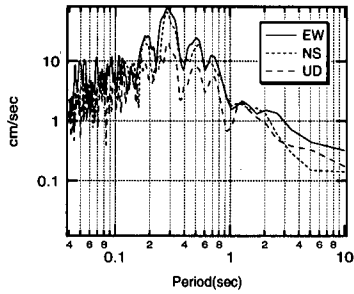


図-9 観測点1 (SHOK)における3成分加速度
フーリエスペクトル

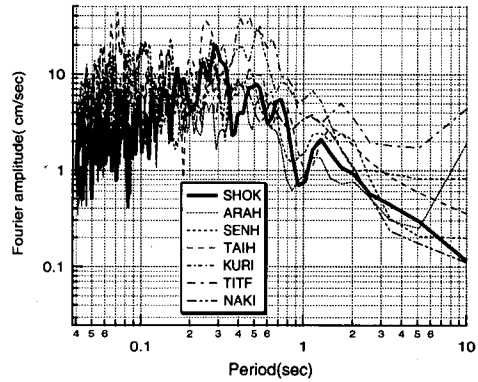


図-11 代表的観測点の加速度フーリエ
スペクトル (U-D成分)

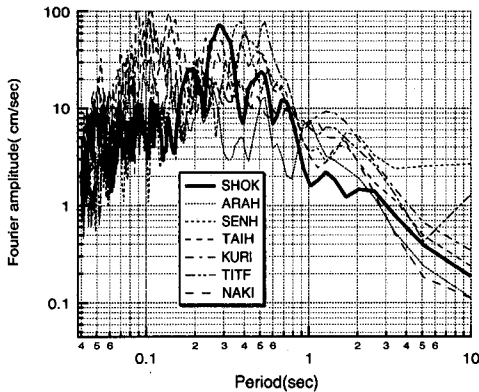


図-10 代表的観測点の加速度フーリエ
スペクトル (E-W成分)

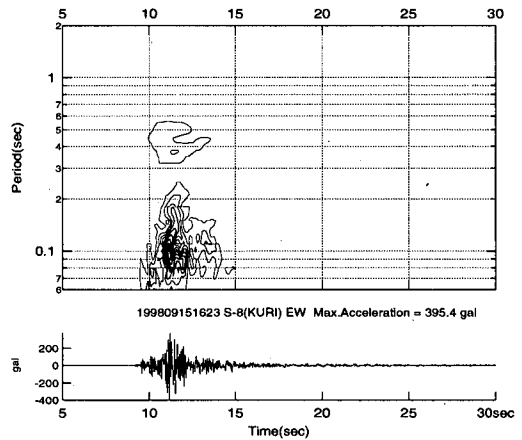


図-12 観測点8 (KURI)の非定常スペクトル
(E-W成分)

周期が卓越しているものの、各観測点のローカルサイト特性(局部的な地盤構造)によりスペクトル振幅が大きく変動していることがわかる。言うまでもなく、これらの各観測点におけるスペクトルは先に述べたように震源、伝播経路、ローカルサイト効果の3要因による影響が総合的に作用した結果である。したがって、地震動予測モデルの構築のためには、このような観測スペクトルから各要因による因子スペクトルを逆解析することが必要である。

一方、図-12~図-15は観測点8(KURI)、7(TAIH)、20(NAKI)、5(SENH)におけるE-W成分の非定常スペクトル⁶⁾を示したものである。これらの非定常スペクトルには二つの時刻に分離した明確な卓越時間がみられ、この地震は二つの主破壊から構成される地震であることが示唆される。ただし、観測点8(KURI)、観測点7(TAIH)の二つの観測点にこの特徴が顕著に観察されるのに対して観測点20(NAKI)では非定常スペクトルの周期特性をみても二つの主破壊の時間的分離が明瞭でない。これは震源断層における破壊

伝播が観測点8(KURI)、観測点7(TAIH)から離れる方向でかつ観測点20(NAKI)に近づく方向で生じたことによること、すなわちドップラー効果に原因するものと推定される。このような断層破壊の指向性の影響により観測点20(NAKI)において最大の加速度が生じたものと考えられる。このように、ここでの加速度記録には震源断層の破壊伝播方向の指向性(directivity)によると思われる震源効果がみられる。

一方、観測点5(SENH)には主要動に加え、明確な後続の相が観測され、この相の生起時間からこれが地盤構造の急変する長町一利府構造線付近で発生された二次的な波動成分であることが推定される。このことを地盤構造の不整形性との関連から検討するため地盤断面の波形記録を並べてプロットしたのが図-16である。図-16は図-4に示した地盤断面に沿って配

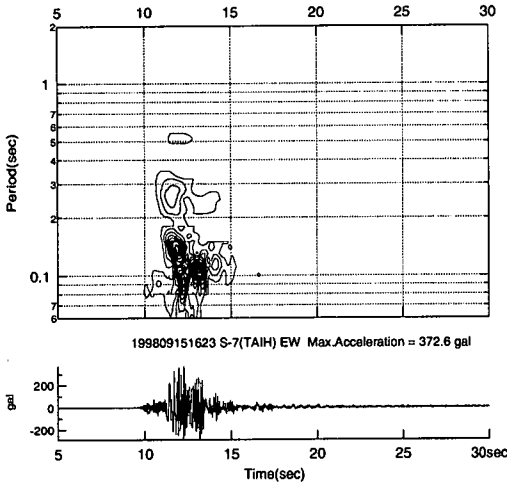


図-13 観測点 7(TAIH) の非正常スペクトル (E-W 成分)

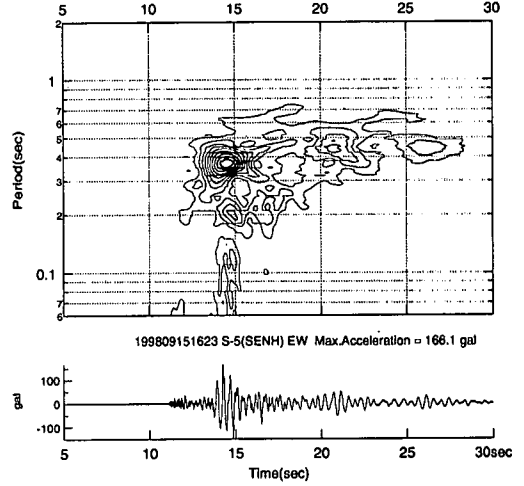


図-15 観測点 5 (SENH) の非正常スペクトル (E-W 成分)

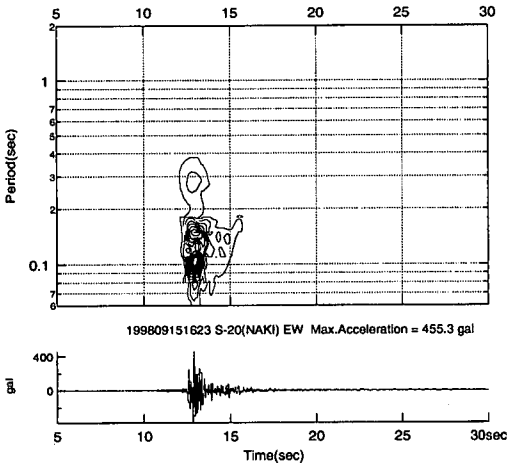


図-14 観測点 20(NAKI) の非正常スペクトル (E-W 成分)

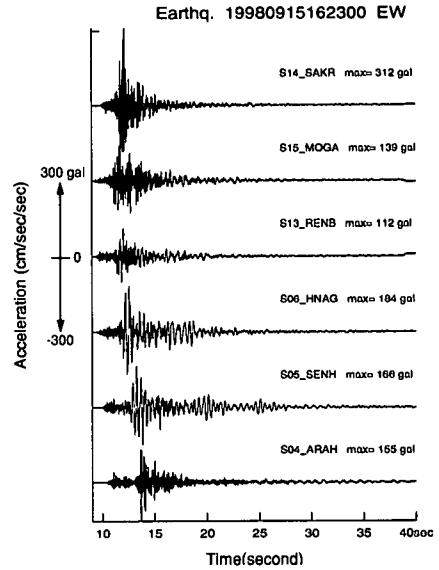


図-16 地盤断面に沿う加速度記録 (E-W 成分)

置されている観測点でのE-W成分加速度記録を並べて比較して描いたものである。これを見ると、西部の洪積台地に位置する観測点14(SAKR)から東部の沖積低地に位置する観測点4(ARAH)に向かって地盤が変化することに対応して震動継続時間が長くなるとともに、加速度波形が大きく変形していることがわかる。また、その加速度振幅も震源に近い観測点14(SAKR)を除き、全般に長町-利府構造線の地盤急変部分より東部に位置する観測点の方が西部に位置する観測点より大きくなっていると同時に、明確な後続の相を有している。さらに、東部の観測点における後続の相は観測点6(HNAG)から観測点4(ARAH)に向かい水平方向に伝播していることがみてとれる。このように、

ここでの観測記録にはローカルサイトの効果のうち、不整形地盤の影響も混在していることが推定される。

5. 震源効果の影響

以上のように、一定の震源距離を有する海洋型地震（プレート間地震）に比べ、内陸型直下地震（プレート内地震）の強震記録にはローカルサイトの影響とともに震源特性の影響がかなり強く含まれると

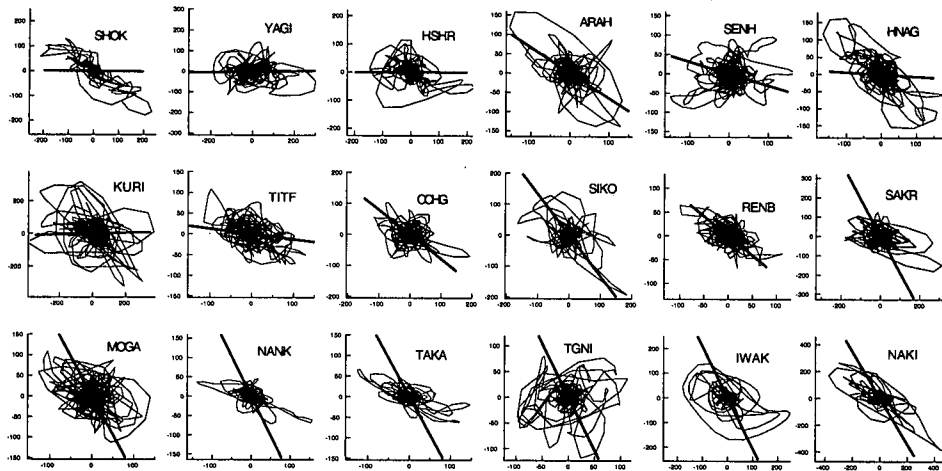


図-18 実測加速度記録による水平面内のオービットと理論オービットの比較 (直線:理論ラディエーションパターン)

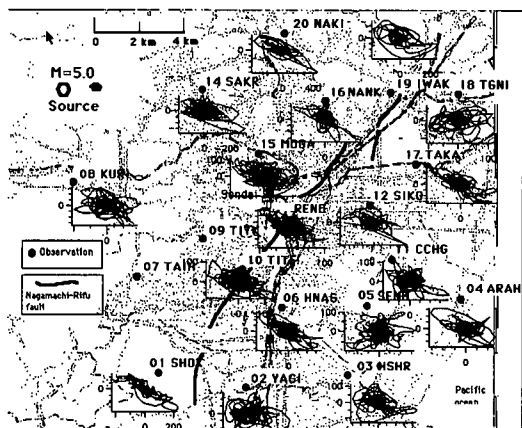


図-17 加速度オービットの分布

考えられる。1995年兵庫県南部地震以降に問題となっている直下地震の重要性に鑑みて、このことは地震防災上きわめて重要なことを意味する⁷⁾。そこで、本章では上述の1998年9月15日の直下地震を例に震源効果を検討してみる。

図-17は各観測点におけるN-S成分、E-W成分の加速度記録から水平面内での加速度震動のオービットを描いて、これを観測点の位置に対応させてプロットしたものである。これをみると、観測点ごとに若干の変動があるものの、全般にオービットは観測点から震源の方向に偏向した形状を示していることがわかる。このようなオービットの偏向性には震源の破壊特性、地盤構造の影響など種々の原因が考えられるが、先に述べた仙台市の地盤種別分布から西部と東部では著しく異なる地盤構造を有するにも関わ

らず、オービットには西部、東部の観測点に共通して震源に偏向した性状がみられることから、ここでの原因には震源の影響がより強く寄与していることが考えられる。そこで、震源メカニズムからこのオービットの偏向性をどの程度まで説明できるかを検討してみた。周知のように、震源断層における断層パラメータが与えられれば、半無限媒質での振幅分布(ラディエーションパターン)の理論的計算は容易である⁸⁾。図-18は半無限媒質内の点震源を仮定して、S波(SH波、SV波)のラディエーションパターンを理論的に求め、これを実測加速度オービットと各観測点について比較して示したものである。なお、その際の断層パラメータは東北大学地震噴火予知センターによるメカニズム解⁹⁾を用いた。また、各観測点における理論ラディエーションパターンの振幅は実測加速度記録のE-W成分における最大値の振幅に合わせており、偏向性のみ注目してプロットしてある。図-18の比較から、ここでの特徴的なオービットはS波のラディエーションパターンで大局的には説明できることがわかる。このことから、ここでの加速度振幅のオービットにみられる偏向性は震源における断層破壊メカニズムの影響が強く表れていることが推定される。ただし、図-18の理論ラディエーションパターンは点震源によるものであり、震源の広がりや考慮したさらに詳細な検討が必要である。

6. 地震動情報の内挿問題とゾーニング

(1) 加速度記録の内挿問題

地域地震防災で重要なサイスミックゾーニングを

進める場合、各点で得られる様々な地震動パラメータを面的情報として拡張する必要が生じる。すなわち、地震動情報の点から面への拡張問題がサイズミックゾーニング構築の主要な課題の一つとなる。特に、アレー観測からゾーニングするとき、本研究の観測システム Small-Titan の例からも知れるように、一般には予算の制約から観測点の密度に限界が存在するので、観測点での地震動の知見をいかに面的情報として敷衍するかは、地震計配置とともに重要な問題である。これは、広義の内挿問題であるが、これまで多くの試みがなされている。これらの既往の研究の大半は確率統計手法に立脚したものである¹⁰⁾。

一方、リアルタイム・アレー観測の内挿に絞った場合、確定論的に地震動情報を内挿することも求められる。これに関して、最近、川上ら¹¹⁾は周波数領域での重み付き相乗平均を用いた確定論的な地震動記録の内挿法を提案している。彼らの手法は長周期帯域からなる速度記録に適用され、その妥当性が検討されているが、加速度記録への応用に関しては、空間的なエイリアジング誤差の問題がからむことから、十分に吟味されていない。本章ではアレー観測システム Small-Titan の加速度記録を用いて内挿法について検討してみる。

いま、図-19 において三角形の各頂点 l, m, n の観測点で加速度記録が得られたとき、三角形内の任意の点 o における加速度記録を幾何学的条件のみから内挿する問題を考える。このとき、各頂点の記録をフーリエ変換して、構成される各三角形の面積を重みとして相乗平均すれば、点 o の記録のフーリエ変換は次式で与えられる。

$$F_o(\omega) = |F_l(\omega)|^{S_l/S} |F_m(\omega)|^{S_m/S} |F_n(\omega)|^{S_n/S} \times e^{i[\varphi_l(\omega) + (\varphi_m(\omega) - \varphi_l(\omega))S_m/S + (\varphi_n(\omega) - \varphi_l(\omega))S_n/S]} \quad (1)$$

ここに、 $|F_i(\omega)|$ 、 $\varphi_i(\omega)$ は i 観測点のフーリエ変換の絶対値、位相。

式(1)は任意点のフーリエスペクトルの振幅スペクトルが三角形面積の相乗平均、位相スペクトルが相加平均でそれぞれ内挿されることを意味している。このとき、振幅スペクトルは一意に決定されるが、位相は一般に多価関数なので一意に決定できない。川上らはこの困難を克服するため、各点間の波動の伝播速度を考慮して、式(1)で各点の位相差を表す項を一意に与えられるように拘束する方法を提案している。そのため、彼らは各点の記録の相互相関係数が最大となる時刻を利用することを試みている。しかし、加速度記録を対象とした著者らの内挿の試み

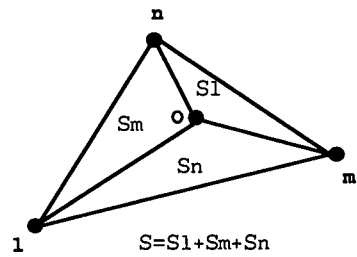


図-19 内挿のための観測点

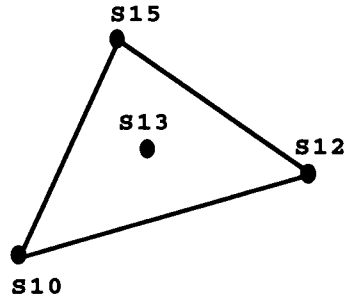


図-20 Small-Titan の内挿観測点配置

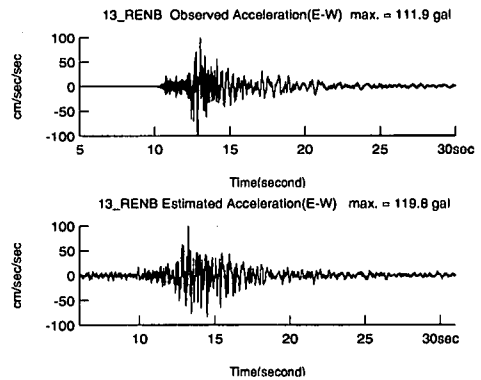


図-21 実測加速度記録と内挿により求められた加速度記録の比較 (E-W 成分)

によると観測点間の距離が大きくなると、相互相関に明確な最大が存在しなくなる傾向がある。そこで、ここでは、加速度記録にローパスフィルターを掛け、長周期帯域のみを有する加速度記録に変換して、それを対象に相互相関を求め、その最大の時刻を用いて、位相差を拘束することとした。ローパスフィルターのカットオフ周期は種々の値を試みたが、以下では、一律に周期1.0秒の結果を紹介する。

式(1)は純粹に幾何学的な条件のみから記録を内挿するものであり、地震動を大きく支配する各点の

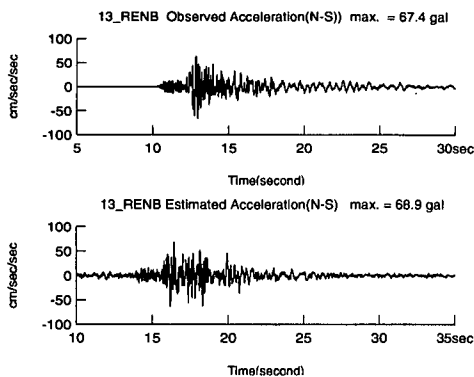


図-22 実測加速度記録と内挿により求められた加速度記録の比較 (N-S成分)

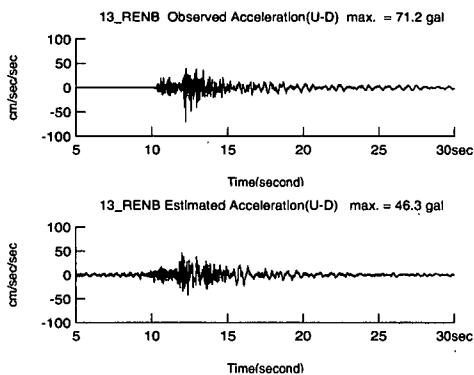


図-23 実測加速度記録と内挿により求められた加速度記録の比較 (U-D成分)

ローカルサイトの効果を導入するものでない。また、幾何学的には三角形という形状で、線形の内挿関数を仮定しているので、地震動の内挿法からすれば、精度の点で問題も含んでいる。しかし、簡易な方法であり、リアルタイムに記録を内挿する目的には捨てがたい魅力をもっている。そこで、本研究では最初のステップとして、この方法がどの程度まで加速度記録を内挿できるかを検証することにした。対象とした地震は1998年9月15日の仙台市直下の地震(M=5.0)である。

図-2に示されているように、3観測点10(TITF)、12(SIKO)、15(MOGA)は観測点13(RENB)を内包する形で三角形を構成している。この三角形配置を模式的に図-20に示す。図-20に示すように、観測点13(RENB)が三角形のほぼ重心に位置することから、ここでは代表例としてこれらの3観測点についての解析結果を示す。図-20の三角形頂点に位置する観測

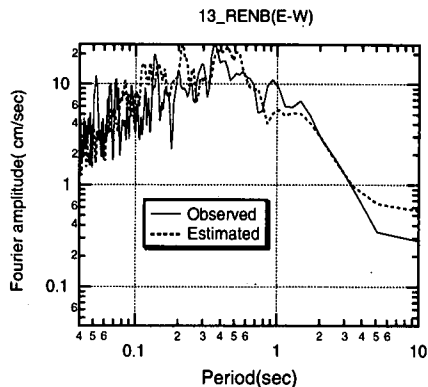


図-24 実測と内挿により求められた加速度記録のスペクトルの比較 (E-W成分)

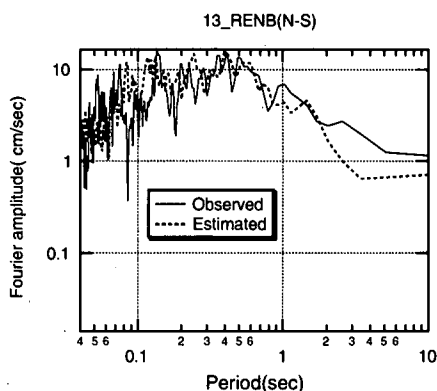


図-25 実測と内挿により求められた加速度記録のスペクトルの比較 (N-S成分)

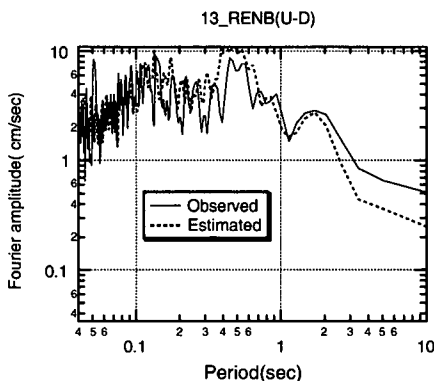


図-26 実測と内挿により求められた加速度記録のスペクトルの比較 (U-D成分)

点の3成分加速度記録は図-5～図-7に示されている。これらの3観測点は高々5km程度しか離れていないにも関わらず、加速度記録は各成分とも大きく異なることがわかる。そこで、これら三角形の頂点に位

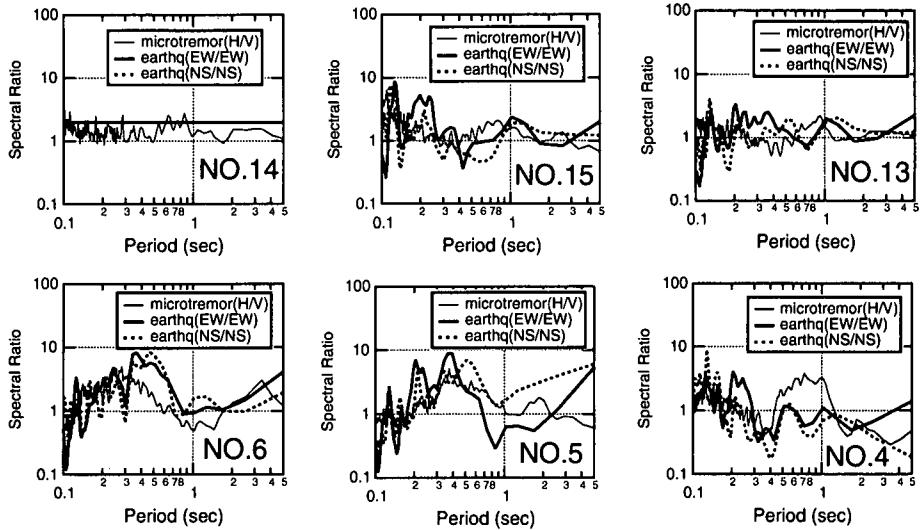


図-27 地震動増幅スペクトルと常時微動 H/V スペクトルの比較 (図-4の地盤断面の観測点, 太線:地震動増幅スペクトル (N-S, E-W成分), 細線:常時微動 H/V スペクトル)

置する観測点の記録から観測点 13(RENB)の加速度記録を上記の内挿法で求め、これを実測の加速度記録と比較してみる。図-21～図-23 は実測加速度記録と内挿された加速度記録をそれぞれ E-W 成分, N-S 成分, U-D 成分について比較して示したものである。ここで上のトレースが実測, 下のトレースが内挿により推定された加速度記録を示している。この比較をみると、各成分とも内挿波形は実測波形を比較的よく再現していることがわかる。特に、この地震の記録では EW 成分が NS 成分, UD 成分より大きな振幅を有するが、この特徴が内挿波形でもよく表現されている。

一方、図-24～図-26 は実測加速度記録と内挿された加速度波形とのスペクトルを同様に成分別に比較した結果である。この比較でも内挿された記録のスペクトルは実測記録のスペクトルとよく対応していることがわかる。特に、実測スペクトルの主なる卓越周期は各成分とも内挿された記録のスペクトルでも再現されていることから、周期特性が地震被害に大きな影響を及ぼすことを考えると、この内挿方法は実用にある程度まで耐えられると思われる。

以上の波形、スペクトルの比較から、ここで試みた純粋に幾何学的な内挿法であっても、加速度記録をかなりの程度まで推定できる可能性があることを確認できた。ただし、種類の異なる観測点の組み合わせ、違った地震による記録に適用してさらに検討を重ねることが必要である。

(2) ゾーニングにおける問題点

アレー観測システム Small-Titan により取得される

地震動情報をより有効に利用するためには、これらの点における情報を面として拡張するとともに、これらの情報が一目瞭然に理解できるような視覚化がなされることが望ましい。このためには、点としての地震動情報を地図上にゾーニングマップの形でイメージとして展開することが必要である。

従来、サイズミックゾーニングは幾つかのシナリオ地震を想定して、それらのシナリオ地震による地震動分布を地図として表すことが一般である。確かに、このようなハザードマップとしてのサイズミックゾーニングは地震防災の対策を立てる上で有力な手法であるが、これらのハザードマップの信頼度について検討されることは意外と少ない。ハザードマップはあくまでも何らかの仮定による理論的な予測地図である。したがって、シナリオ地震を想定して事前に用意されるサイズミックゾーニングが実際の大地震による被害分布と一致しないという事態も生じる¹²⁾。このような予測と実際の違いは防災行政としては重大な問題であり、今後重点的に取り組むべき課題である。この点、Small-Titan のようなアレー観測システムは実際の地震動を正確に表すものであり、信頼度において優れている。現在ではアレータイプの地震観測は経費の点から容易でないが、今後地震計の低価格化が進めば Small-Titan のようなアレー観測に基づくサイズミックゾーニング手法が将来の主流となると考えられる。以上の観点から、本観測システム Small-Titan はアレー観測による地震動情報のサイズミックゾーニングへの適用を一つの研究目的としている。このとき、幾つかの解決すべき問題があるが、ここではマッピング手法と採用すべ

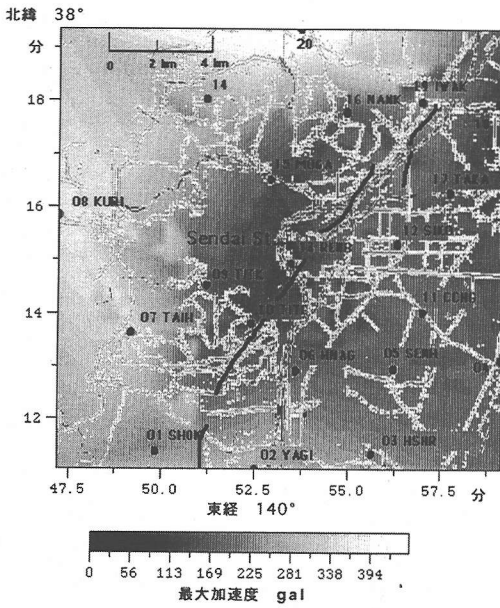


図-28 最大加速度のゾーニング (1998年9月15日の仙台直下地震, M=5.0)

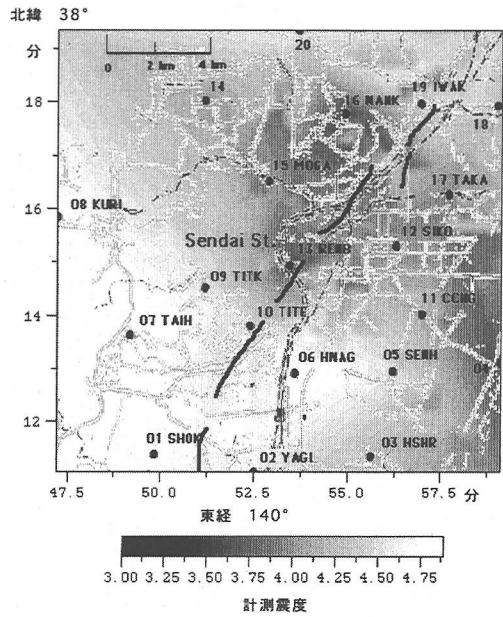


図-30 気象庁計測震度のゾーニング (1998年9月15日の仙台直下地震, M=5.0)

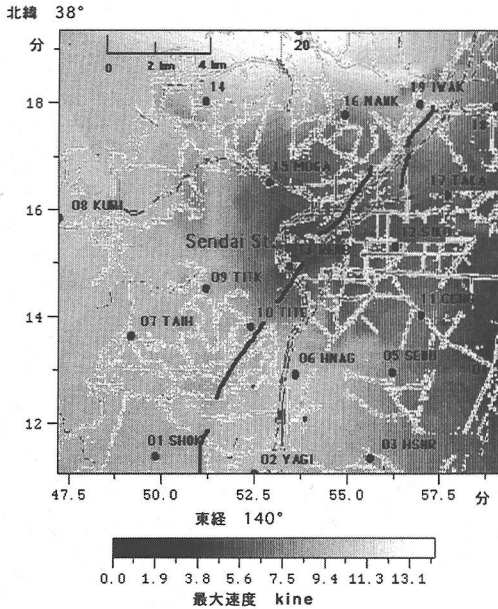


図-29 最大速度のゾーニング (1998年9月15日の仙台直下地震, M=5.0)

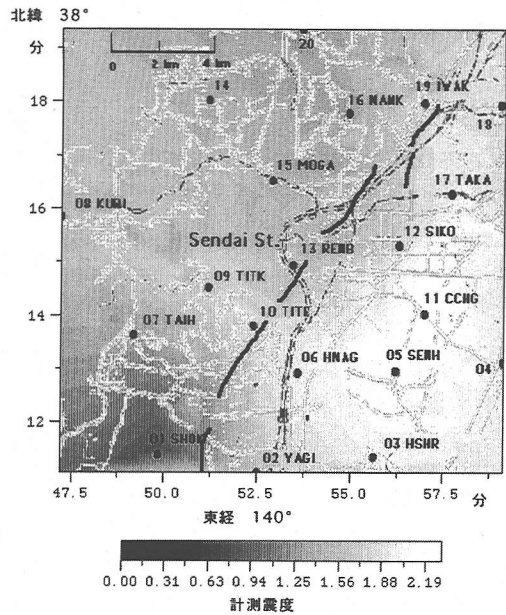


図-31 気象庁計測震度のゾーニング (1999年1月28日の鉦路沖地震, M=6.8)

き地震動パラメータについて述べる。

最近発達しつつある GIS 技術を用いれば地震動情報のマップ表示は比較的簡単になされる。地震動情報のマッピングに関して言えば、問題となるのは点における観測情報を面的に拡張する際に、ローカルサイト効果を如何に取り込むかということである。

これを解決する一つの方法は地盤構造のデータベースを構築して、これを GIS に組み込むことである。ただし、この場合でも問題が残る。一つは地盤情報と地震動情報の連結問題であり、他は一般の地盤構造のデータではせいぜい深さ 50m 程度の構造であり、深い構造の地盤情報が不足するという点である。第

一の問題は理論的な地震応答計算をインターフェースとすれば解決可能であるが、第二の問題の解決は容易でない。一方、地盤情報のデータベース利用に代わり、常時微動を用いることも考えられる。これを利用すれば、上記の深い構造の問題はある程度解決可能である。特に、常時微動の鉛直動スペクトル (V(T)) に対する水平動スペクトル (H(T)) の比である H/V スペクトルは地盤の増幅スペクトルを近似的に与えることが知られているので¹³⁾、これをスペクトルの内挿に有効利用できる可能性がある。そこで、筆者らは Small-Titan の展開されている仙台市圏の学校 220 校を対象に常時微動観測を実施した¹⁴⁾。そのゾーニングへの適用は別途述べることとして、本稿では常時微動と Small-Titan の地震動データとの相関について触れる。

図-27 は図-4 で示した地盤断面に沿う観測点における地震動の増幅スペクトルと常時微動の H/V スペクトルの相関を示したものである。ここで、地震動の増幅スペクトルは先に述べた 1998 年 9 月 15 日の仙台直下の地震 (M=5.0) による地震記録を用いて、この地盤断面で最も堅固な観測点 14(SAKR) のスペクトルに対する各観測点のスペクトル比として N-S, E-W 成分ごとに与えられている。これらの地震動の増幅スペクトルは太線で表示されている。一方、図-27 では同一観測点で測定された常時微動の H/V スペクトルが細線で比較されている。ここに、常時微動の H/V スペクトルは 5 個の異なる時間の平均値である。図-27 をみると、地盤構造に対応して地震動増幅スペクトルが変化していることがわかるとともに、この変化が常時微動の H/V スペクトルとよく似ていることがわかる。以上の例からも知れるように常時微動の H/V スペクトルはアレー観測による地震動情報を用いてサイスマックゾーニングを構築する際の内挿法に有力なツールを提供すると期待できる。現在、常時微動の H/V スペクトルのみを用いたサイスマックゾーニングの作成をすすめている。

(3) マッピング処理の事例

上述のように常時微動によるローカルサイト効果を導入したサイスマックゾーニングを検討しているが、他方では前々節で述べたように純粋な幾何学的内挿法によってもある程度まで信頼できるゾーニングが可能である。特に、リアルタイムにサイスマックゾーニングを更新するシステムを作成する場合、この手法は捨てがたい実務的利点を有している。そこで、本節では純粋な幾何学的内挿法に絞ってマッピング処理した事例を述べるとともに、このようなマッピングイメージが内挿法の選択よりも地震動パ

ラメータにより大幅に変わることを紹介して、サイスマックゾーニングで採用する地震動パラメータの重要性について注意を喚起する。

サイスマックゾーニングのマッピングでは地震動パラメータとして最大加速度が用いられるのが普通である。しかし、地震災害は必ずしも最大加速度によって生じるとは限らない。周知のようにこのパラメータは地震動の破壊性能を総合的に表すものではないことから、最近ではこれに代わり、最大速度、気象庁計測震度¹⁵⁾、スペクトル強度 (SI 値)¹⁶⁾ などをとるべきとの意見も多い。この点、気象庁計測震度は水平動 2 成分、鉛直動成分をすべて考慮するとともに、振幅、周期特性、継続時間などを総合して算定される地震動パラメータであり、地震防災を目的としたサイスマックゾーニングでは最も妥当なパラメータと考えられる。

図-28 は先に述べた 1998 年 9 月 15 日の仙台直下の地震 (M=5.0) による最大加速度を用いて式(1)の内挿法で求めた最大加速度分布をマップに表示したものである。また、図-29 は各観測点の加速度記録から数値的に速度記録を求め、その最大値 (最大速度) の分布を同様にマップとして表示したものである。二つのマップイメージは細部の違いがあるものの大局的には同一のゾーニング結果といえよう。これに対して、図-30 は気象庁計測震度を加速度記録から算定して、同様な手法でマップ表示したものである。図-28、図-29 と図-30 を比較すれば、マップイメージは大きく異なることがわかる。対象としている地震では前述のように若干の地震被害が生じているが、その被害分布との対応では図-30 の計測震度の方が優れている。

一方、気象庁計測震度に基づくゾーニングも地震ごとに変動する。これは、前述のように地震動が震源、伝播経路、ローカルサイトの 3 要因によって総合的に決定されることを考えれば当然のことである。その一例を図-31 に示す。図-31 は 1999 年 1 月 28 日の釧路沖の地震 (M=6.8) による Small-Titan の地震記録から求めた気象庁計測震度のゾーニングマップである。図-31 を図-30 の規模の小さい直下地震によるゾーニングと比較すれば違いは一目瞭然である。図-31 の分布と図-3 の地盤種別の分布とを対比させれば、両者はよく似た分布を示していることがわかる。つまり、軟弱な地盤が分布する東部で震度が相対的に大きくなっている。これに対して、図-30 の規模の小さい直下地震によるゾーニングは地盤分布とはあまり対応せず、震源との位置関係に分布が依存している様相がみられる。

7. まとめ

以上、オンラインアレー観測システム Small-Titan の概要とそれによる地震記録の幾つかの特性を述べた。これらは次のようにまとめられる。

1) 「Simple extended array」型のリアルタイム・オンライン・アレー観測システム Small-Titan を仙台市圏に構築した。このシステムは当初の構想通り、全 20 観測点の地震動データを地震感知後 3 分以内に観測センターで集中収録でき、極めて有効な地震観測システムであることが確認できた。

2) これまで、得られた地震記録は 109 地震に達する。これは観測システムのプロトタイプ提案として選定された仙台市圏という観測地が極めて適切であったことを示している。この地震記録の中には直下地震による最大加速度 455 ガルの強震記録を含む。また、その直下地震の前震、余震によるアレー記録を含めて、このような直下地震によるアレー記録を取得したことは世界的にも珍しく、貴重な強震動データを提供している。

3) これまで得られている地震記録は波形、スペクトル特性とも観測点ごとに異なる特性を示す。すなわち、ローカルサイト効果が顕著に現れている。さらに、これに地震の震源特性も影響を及ぼす。特に、1998 年 9 月 15 日発生 of 仙台直下の地震 ($M=5.0$) による強震記録では水平面内のオービットに震源方向に偏向した特徴がみられる。これは同地震による断層パラメータを用いた点震源モデルによる理論ラディエーションパターンである程度まで説明できる。また、同地震では断層破壊の伝播効果に伴う地震動特性も観察された。

4) 観測点近傍のローカルサイト効果に加え、地盤構造の不整形により地震動が影響を受けること、とりわけ長町-利府断層付近の地盤構造の不整形個所で二次的に発生する波動群が含まれることが確認された。

5) 地震動情報の点から面への拡張問題では純粋な幾何学的内挿法は加速度記録の推定にある程度まで有効であることが知られた。

6) Small-Titan の観測ステーションを含めて仙台市圏の 220 個所の学校で常時微動観測を実施して Small-Titan のアレー地震動情報と常時微動の震動特性をリンクしたサイズミックゾーニング手法の開発に着手した。これまでの検討では、地震動の増幅スペクトル特性と常時微動の H/V スペクトルは比較的よい相関を示すこと、常時微動とアレー地震動情報をミックスしたサイズミックゾーニング手法は有望なことを把握できた。

7) サイズミックゾーニングに採用すべき地震動パラメータについて検討した結果、従来多用される最大加速度よりも気象庁計測震度の方が地震防災に関連してより妥当なパラメータであることを Small-Titan の地震動データを通して確認できた。

8. あとがき

本文でも再三述べたように最近、長町-利府活断層に関係した地震発生は明らかに非常に不気味な兆候を示しつつある。この活断層による仙台直下の大地震の発生は遠い将来の問題ではなく、現実的な問題として考えるべきことであるというのが、この 2 年半を通じて得た率直な感想である。また、宮城県沖のプレート間地震も確実に 30~40 年の周期をもって繰り返して発生しており、1978 年宮城県沖地震から 22 年を経て、既に危険な期間に入っていることも忘れてはならない。このように考えると、Small-Titan の役割はますます重要である。今後とも慎重な観測を怠ることなく、注意深く監視をしつつ、研究を続けていきたいと考えている。

なお、本観測システムによる記録は何らかの形で順次公開をすすめていく予定である。

参考文献

- 1) Iwan, W. D.: The deployment of strong-motion earthquake instrument arrays, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.7, pp.413-426, 1979.
- 2) Kinoshita, S.: Kyoshin Net(K-NET), *Seismological Research Letters*, Vol.69, pp.309-332, 1998.
- 3) 鳥居盛男, 阿部進, 新保康裕, 岸本健二: 横浜市のリアルタイム地震防災システム, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.3, pp.3451-3456, 1998.
- 4) 奥津春生: 大仙台圏の地盤・地下水, 宝文堂, 1973.
- 5) 日本建築学会東北支部: 1998年9月15日仙台市近郊の直下地震調査報告, 1999.
- 6) 神山 真: 強震地震動の非定常スペクトル特性とその波動論的考察, 土木学会論文報告集, 284号, pp.35-48, 1979.
- 7) Sekiguchi, H., Irikura, K. and Iwata, T.: Fault geometry at the rupture termination of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.90, pp.134-150, 2000.
- 8) Aki, K. and Richards, P. G.: *Quantitative Seismology Theory and Methods*, pp.105-119, 1980.
- 9) 岡田知己, 海野徳仁, 長谷川昭: 1998年9月15日仙台近郊の地震 ($M5.0$) の震源過程, 地球惑星科学関連学会, 1999年合同大会, 1999.
- 10) Thrainsson, T. and Kiremidjian, A. S.: Spatial interpolation of earthquake ground motion, *Proc. of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*, CD-ROM Vol.1, pp.1-10, 1998.
- 11) 川上英二, 茂木秀則, 佐藤誠一: 周波数領域での重み付き相乗平均を用いた地震波の内挿法, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp.953-958, 1998.

- 12) 武村雅之：データベースが成否を分ける地震動予測地図作成, 第1回地震調査研究と地震防災工学の連携ワークショップ講演集, pp.59-64, 2000.
- 13) 中村 豊, 上野 眞：地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み, 第7回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.265-270, 1986.
- 14) 松川忠司, 神山 眞：常時微動による仙台市圏サイズミックゾーニング作成の試み, 第35回地盤工学研究発表会講演集, pp.1-2, 2000(発表予定).
- 15) 関田康雄：新しい気象庁震度階級について, 地震工学振興会ニュース, No.147, pp.21-26, 1996.
- 16) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, pp.146-149, 1994.

(2000. 4. 14 受付)

AN ON-LINE ARRAY OBSERVATION SYSTEM OF EARTHQUAKE MOTIONS : THE DEPLOYMENT AND RECORDS

Makoto KAMIYAMA, Yuuichi SHOJI, Tadashi MATSUKAWA,
Akie ASADA and Naohiko NAKAI

An array observation system of earthquake motions, named Small-Titan, was installed in Sendai City, Japan in 1998. It consists of 20 observation stations and one control center. The average station-to-station distance is about 4 km and each station was installed at various kinds of soils to effectively detect local site conditions. Since its completion, the observation system has obtained some 100 records. Especially, it observed a maximum acceleration of about 455 gal during a typical near-distance earthquake with a magnitude of 5. This paper outlines the observation system and discusses the effects of source and local site conditions found in the observed records.