

# Small-Titan の観測記録に基づく震源・伝播経路・ローカルサイト特性の推定

庄司雄一<sup>1</sup>・神山 眞<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 ドービー建設工業株式会社 東北支店 (〒980-0014 仙台市青葉区本町1-1-8)

<sup>2</sup>正会員 工博 東北工業大学 土木工学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

仙台市圏で展開しているアレー観測システムSmall-Titanの観測記録を用いて震源特性、伝播経路特性、ローカルサイト特性の分離を試みる。一般化逆解析手法(インバージョン)と他の評価手法との比較を行う。インバージョンが、ローカルサイト特性を評価するための有効な手法であることを述べる。リファレンスサイトの重要性を示し、リファレンスサイトに対する依存度について考察する。インバージョンによる増幅スペクトルと常時微動のH/Vスペクトルは、比較的高い相関を与えていることを示す。インバージョンから得られた震源特性と伝播経路特性が、既往の研究と調和的であることを述べ、ローカルサイト特性を含めたインバージョンの妥当性を検証している。

**Key Words :** array observation system, source effects, propagation path effects, local site effects, generalized inversion scheme

## 1. はじめに

構造物の耐震設計では、従来の震度法から、地盤や構造物の地震時動的挙動を正確に求め、それに基づいて構造解析を行う動的解析法による設計あるいは照査が主流となってきた。

その際、対象地点近傍の地盤における増幅特性を適切に評価した上で、入力地震動をどのように設定するかが非常に重要な問題となる。

地盤増幅特性の評価は、解析的手法または経験的手法により行われるのが一般的である。

解析的手法で地盤増幅特性を評価する場合には、地下構造の情報が必要となる。1次元重複反射理論による評価でさえ、表層から地下深部までの地盤物性を調査し、成層地盤モデルを設定しなければならない。地盤構造の情報を得るための地下構造探査法が種々開発されているが、任意の地点での詳細な地盤情報の取得、とりわけ、地震基盤に至るまでの地盤情報の取得には限界がある。

一方、経験的手法では観測記録を用いて増幅特性を見積もることになるが、地震動は震源特性、伝播経路特性、ローカルサイトの影響によって決まることが知られている。それゆえ、観測された地震記録には、震源特性、伝播経路特性およびローカルサイトの影響が含まれており、地盤増幅特性を評価しようとする場合には、それらの影響を適切に分離しなければならない。地震基盤内に観測点を有する鉛直アレー観測では、直接地盤増幅特性を評価することが可能であるが、地震基盤内に観測点を有する鉛直

アレー観測にも限界がある。

こうした点を解決するため、観測記録を直接用以て、何らかの方法で震源特性、伝播経路特性、ローカルサイト特性を適切に分離することで地盤増幅特性の評価が可能であるならば、それは簡便かつ有効な経験的手法と考えられる。

そこで、本研究では、仙台市圏で展開しているSmall-Titan<sup>1)</sup>で得られた観測記録を用いて、S波の観測スペクトルを対数変換により線形化した式に適切な拘束条件を与えた最小二乗法による一般化逆解析手法(generalized inversion scheme)(以下、インバージョンという)を用いて、震源特性、伝播経路特性、ローカルサイト特性の分離を試みる。インバージョンと他の評価手法との比較を行い、インバージョンから得られた震源特性、伝播経路特性、ローカルサイト特性の妥当性を検証する。

## 2. 観測点の配置と観測記録の例

### (1) 観測点の配置

図-1にSmall-Titanの観測点の配置を示す。また、観測点の一覧を表-1に示す。観測点の配置に際し、留意した点は次の通りである。

- ① 防災システムへの応用を考え、仙台市圏を出来るだけ均等に網羅する。
- ② 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
- ③ 1978年宮城県沖地震の被害経験から、人工造成地にも配置する。

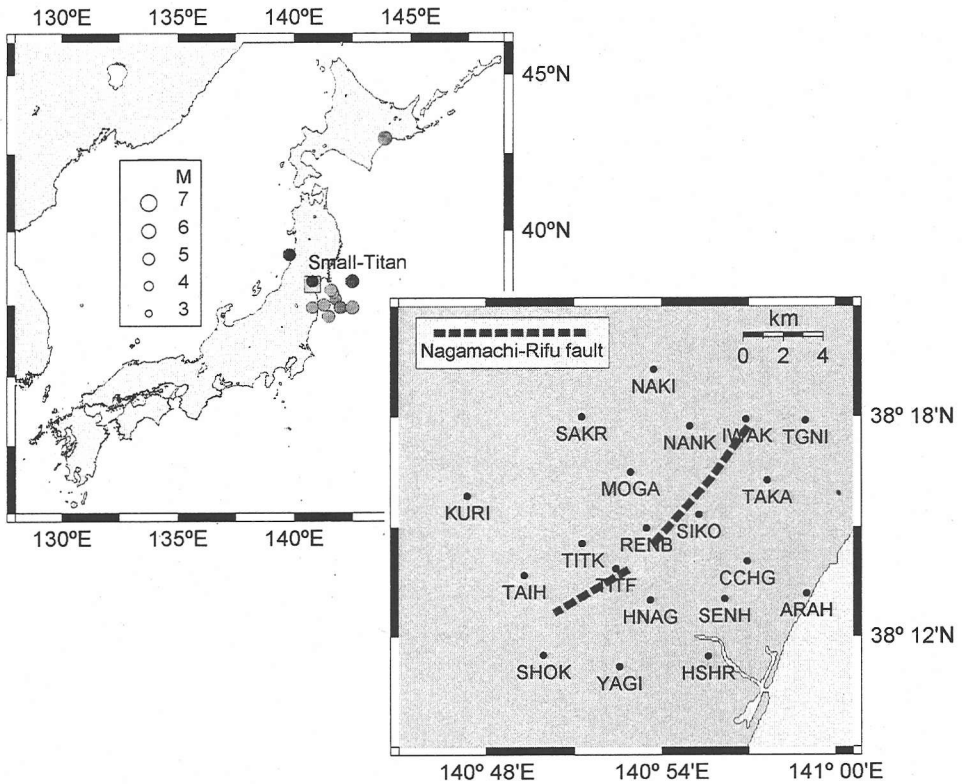


図-1 観測点配置図

表-1 観測点一覧

観測点No.	観測点コード	観測点名称	緯度	経度
1	SHOK	尚綱女学院短大	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	38°14' 33" N	140°51' 16" E
10	TITF	東北工大二ツ沢	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	連坊小路小学校	38°14' 58" 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	TGNI	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

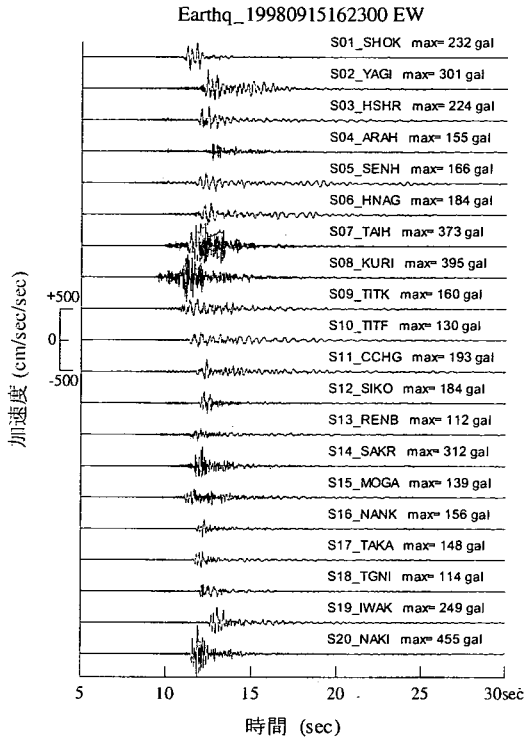


図-2 各観測点における加速度記録 (E-W成分)

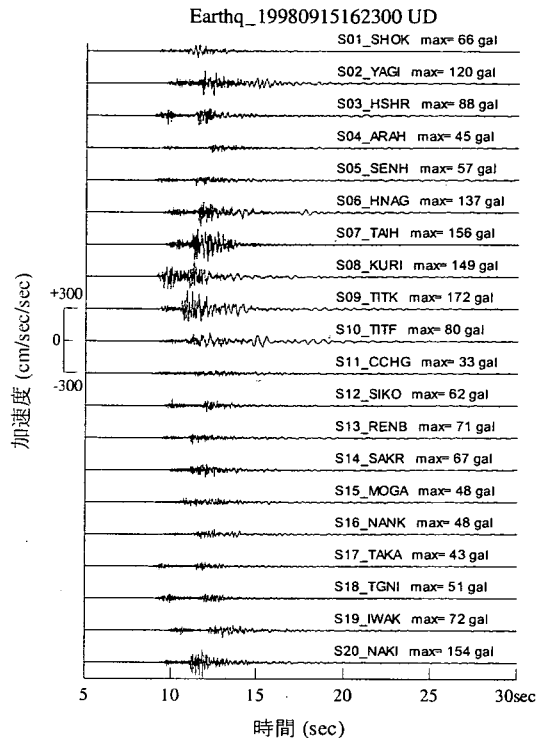


図-3 各観測点における加速度記録 (U-D成分)

表-2 解析データ

NO.	Earthquake name	Date (yr/mo/da)	Origin time	Latitude	Longitude	Focal depth (km)	M <sub>J</sub>
1	Earthq_19980824232018	1998/08/24	23:20:18	37.7	141.8	60	4.9
2	Earthq_19980915161800	1998/09/15	16:18:00	38.3	140.8	13	3.6
3	Earthq_19980915162300	1998/09/15	16:23:00	38.3	140.8	13	5.0
4	Earthq_19980915163104	1998/09/15	16:31:04	38.3	140.8	13	3.6
5	Earthq_19980915175648	1998/09/15	17:56:48	38.3	140.8	13	4.1
6	Earthq_19980925065955	1998/09/25	06:59:55	37.5	141.3	80	5.2
7	Earthq_19981024231950	1998/10/24	23:19:50	38.3	140.8	13	4.0
8	Earthq_19981103164839	1998/11/03	16:48:39	37.9	141.7	80	4.6
9	Earthq_19981124044817	1998/11/24	04:48:17	38.0	141.6	80	5.4
10	Earthq_19981223110043	1998/12/23	11:00:43	38.3	140.8	13	3.8
11	Earthq_19990201015215	1999/02/01	01:52:15	37.1	141.5	50	5.4
12	Earthq_19990206172431	1999/02/06	17:24:31	38.3	140.8	13	3.8
13	Earthq_19990226141844	1999/02/26	14:18:44	39.2	139.8	20	5.4
14	Earthq_19990513030127	1999/05/13	03:01:27	43.0	143.9	100	6.1
15	Earthq_19990612074350	1999/06/12	07:43:50	37.4	142.0	70	5.2
16	Earthq_19991005093853	1999/10/05	09:38:53	37.4	142.5	50	5.5
17	Earthq_19991024022010	1999/10/24	02:20:10	38.3	140.8	13	3.5
18	Earthq_19991107215341	1999/11/07	21:53:41	37.4	140.8	80	5.0
19	Earthq_19991115103443	1999/11/15	10:34:43	38.3	142.5	40	5.7

- ④ 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。
- ⑤ 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。

ローカルサイト効果を考慮して Simple extended array 型<sup>2)</sup>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 SHOK は、この高館層の露出する地点に設置されている。なお、文献 1) で述べているように仙台市圏は図-1 に示す長町-利府断層(点線)を境に北西が洪積台地、南東が沖積低地という明確な地盤構成の対照を有している。

各観測点と地盤種別との関係は次の通りである。なお、重複している観測点は両方に関係していることを示している。例えば、TAIH は洪積台地に位置し、かつ造成地上に設置されている観測点であることを表している。

基盤：SHOK

洪積台地：TAIH, KURI, TITK, SAKR, MOGA  
NANK, NAKI

沖積低地：YAGI, HSHR, ARAH, SENH, HANG,  
CCHG, SIKO, TAKA, TGNI

洪積、沖積の境界：TITF, RENB, IWAK

造成地：TAIH, TITK, NANK

沖積軟弱地盤：SENH, TGNI

## (2) 観測記録の例

Small-Titan は、平成 10 年 6 月から試験観測にはいつている。これまで多くの地震記録が得られているが、本格的な記録は平成 10 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央を持つ直下地震によるものである。

気象庁速報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：10km

規 模：M=5.0

図-2 は、各観測点で得られた E-W 成分の加速度記録、図-3 は、U-D 成分の加速度記録を示したものである。ここに示した加速度記録において、各観測点ごとに大幅に波形が異なっていることが観察できる。また、気象庁発表の震度は仙台市宮城野区で震度 4 であるが、Small-Titan による計測震度では、観測点 SHOK, YAGI, SENH, HNAG, TAIH, KURI, TITK, TITF, IWAK, NAKI で震度 5 弱を示している。これらのことから、きめ細かく計画的に地震計を配置している Small-Titan の特徴が視える。なお、この地震による被害として、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<sup>3)</sup>。

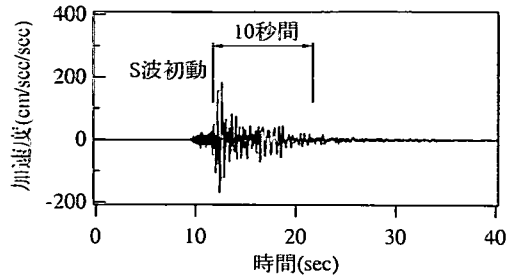


図-4 波形の切り出し模式図

## 3. データセット

本研究で用いた観測記録は、Small-Titan の 20 観測点で得られた 19 地震、338 個の加速度記録である。表-2 にその観測記録の諸元を示す。また、図-1 に 19 の地震の震央分布もプロットしてある。図-4 に示す模式図のように、S 波初動を視て読み取り、そこから 10 秒間のウィンドウを対象とした。S 波部分は地震規模の大きさ比例して長くなることや観測点によっては後続位相が含まれる場合も考えられる。本研究では、基準観測点(以下、リファレンスサイトという)に対する仙台市圏の相対的なローカルサイト特性の評価が目的であることと、全観測記録を参照した上で、10 秒間に固定した。波形の切り出しにおいて、前後にウィンドウ長さの 10% のコサインテーパをつけた。EW 成分、NS 成分のフーリエスペクトルを求め、得られた水平 2 成分をベクトル合成した水平動スペクトルをインバージョンの対象として解析を行った。代表的な観測記録の水平動スペクトルの例を図-5 に示す。図-5 では表-2 に示した代表的な 4 つの地震(全観測点でトリガーのかかった地震のうちの代表)を対象に全観測点の水平動スペクトルを重ねてプロットされている。ここでは、仙台市圏の地盤構成で基盤と目される地点の観測点 SHOK とそれに準ずる洪積台地に位置する観測点 NANK のそれぞれのスペクトルを他の観測点のスペクトルと区別して示している。図-5 に示した NO.3 の地震の場合、震源が SHOK に比較的接近することから、SHOK のスペクトル振幅が下限を構成していないが、この地震を除くと SHOK のスペクトル振幅レベルは相対的に小さく、概ね全観測点のスペクトル振幅の下限を示す傾向が見られる。また、NANK もそれに準ずるスペクトル特性をもっていることがわかる。

このことから、本研究におけるリファレンスサイトとして、SHOK が最も有力で、次に NANK が考えられる。

## 4. インバージョンモデル

一般に媒質の応答が線形のととき、地震動観測スペ

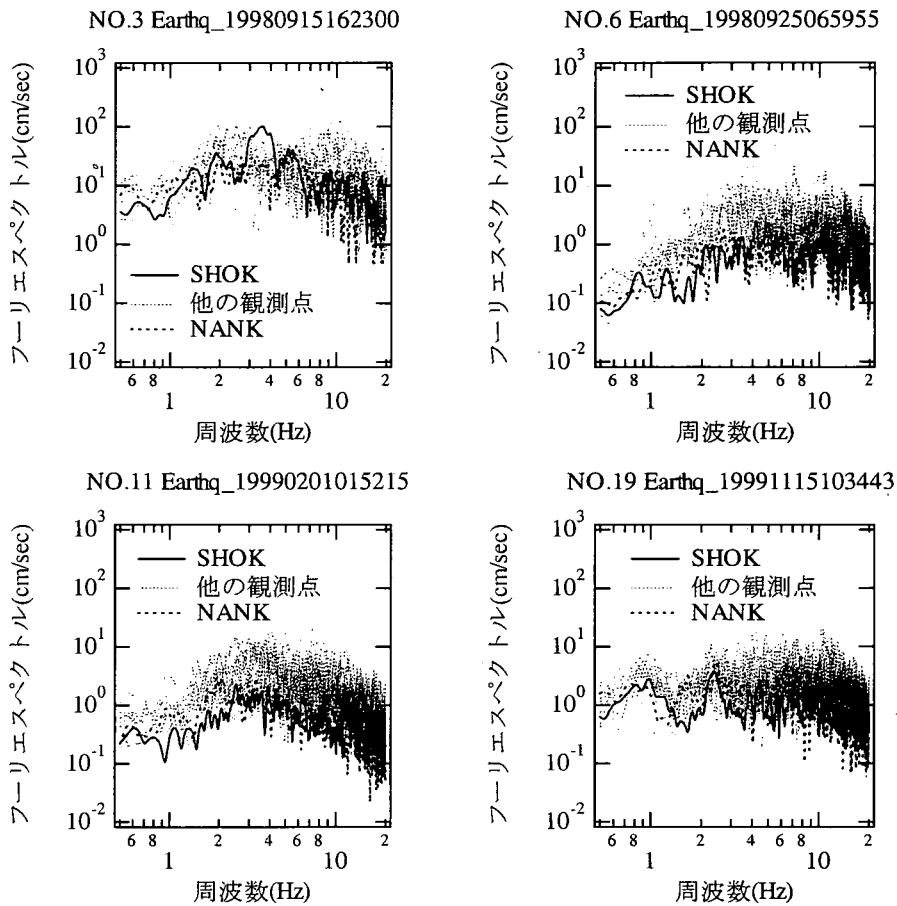


図-5 水平動スペクトルの例

クトル  $O(f)$  は次のように表される。

$$O(f) = S(f)G(f)P(f) \quad (1)$$

ここに、 $S(f)$  は震源特性、 $G(f)$  はローカルサイト特性、 $P(f)$  は伝播経路特性及び  $f$  は周波数を示す。

本研究では、以下に示すように岩田・入倉<sup>4)</sup>と同様の方法を用いてインバージョンモデルを構成する。いま、地震  $i$  による観測点  $j$  における S 波の観測スペクトルを  $O_{ij}(f)$  と記し、式 (1) の  $P(f)$  を幾何減衰と非弾性減衰でモデル化すると、 $O_{ij}(f)$  は、

$$O_{ij}(f) = S_i(f)G_j(f)R_{ij}^{-1} \exp\left(\frac{-\pi f R_{ij}}{Q_s(f)V_s}\right) \quad (2)$$

と表すことができる。

ここで、 $S_i(f)$  は  $i$  地震の震源スペクトル、 $G_j(f)$  は  $j$  観測点のローカルサイト特性、 $Q_s(f)$  は S 波に対する周波数ごとの  $Q$  値、 $R_{ij}$  は  $j$  観測点における  $i$  地震の震源距離、 $V_s$  は地殻の平均的な S 波速度である。

距離補正のための任意距離  $R_{ref}$  を導入すると、震源距離の補正を行った S 波の観測スペクトル  $\bar{O}_{ij}(f)$  は、

$$\bar{O}_{ij}(f) = \frac{R_{ij}}{R_{ref}} O_{ij}(f) \quad (3)$$

となる。

式(2)と式(3)から、常用対数をとって線形化すると、次式を得る。

$$\log \bar{O}_j(f) = \log S_i(f) + \log G_j(f) \\ + \log R_{ref}^{-1} + \log(e) \left( \frac{-\pi f R_j}{Q_s(f) V_s} \right) \quad (4)$$

この線形化された連立方程式を最小二乗法<sup>5)</sup>を用いて解くことにより、周波数毎の  $S_i(f)$ 、 $G_j(f)$ 、 $Q_s(f)$  を決定できる。

しかしこのモデル化では、震源特性、伝播経路特性、ローカルサイト特性の分離を行うためには、解を求める際に自由度 1 が残されており、さらに何らかの拘束条件が必要となる。

ここで拘束条件について、主な既往の研究を整理しておく。

#### ①岩田、入倉の研究

岩田、入倉は、拘束条件として各観測点でのサイト増幅特性が 2 以上という条件を設定している。しかし、周波数が 5Hz 以上ではサイト増幅特性が 2 以下になることもあると指摘している。

#### ②山本・他の研究<sup>6)</sup>

山本・他は、 $\omega^2$  モデルに基づく震源モデルから評価した入射波スペクトルを仮定して、それを拘束条件として与えている。

#### ③山中・他の研究<sup>7)</sup>

山中・他は、岩盤観測点における表層地盤の増幅特性と、地震計が設置されている建物の影響を考慮した理論増幅特性が一致することを拘束条件として設定している。

#### ④Kinoshita の研究<sup>8)</sup>

Kinoshita は、深層ボーリングにおける観測記録を入射波と仮定して、それを拘束条件として与えている。

#### ⑤Kato *et al.* の研究<sup>9)</sup>

Kato *et al.* は、地震基盤相当の露頭岩盤上の観測点でのサイト増幅特性が周波数に係わらず 2 であるという拘束条件を設けている。その結果、ほぼ全ての観測点で約 6Hz 以上で一次元波動論と合わなくなり単調増加することを示している。

#### ⑥Hartzell の研究<sup>10)</sup>

Hartzell は、自由度 1 を取り除くために、リファレンスサイトのサイト増幅特性が 1 ( $G_{REF} = 1.0$ 、 $\log G_{REF} = 0.0$ ) であるという拘束条件を与えている。

#### ⑦Andrews の研究<sup>11)</sup>

Andrews は、全観測点における伝播スペクトルの対数値の総和が 0 となる拘束条件下で解析している。そのため、伝播経路の幾何減衰や  $Q$  値、地表付近の堆積層のサイト増幅特性などの具体的なパラメータは求められなかった。また、対数和が 0 となる拘束条件の物理的意味は必ずしも明確ではない。

#### ⑧Castro *et al.* の研究<sup>12)</sup>

Castro *et al.* は、地盤増幅率の対数平均の全観測点のは 0 という拘束条件を用いている。この条件は、全観測点の平均的増幅率は 1 と考えていることになり、全観測点の平均に対する偏差を各観測点の増幅

率とみなすことになる。したがって、観測点がほぼ地震基盤に相当しない場合には、震源特性や伝播経路特性の推定に悪影響を及ぼすことになると考えられる。

以上のように、インバージョンでは、拘束条件が重要な役割を演じると考えられる。

本研究では仙台市圏という限られた地域の観測点を対象とすることを考慮して、先に述べた地盤構成並びに図-5 に例示した観測スペクトルの相対比較を参照にした上で、拘束条件として SHOK をリファレンスサイトに設定する。SHOK のローカルサイト特性を周波数に係わらず  $G_1 = 1$  ( $\log G_1 = 0$ ) として拘束した。したがって、各観測点におけるインバージョンの結果は、観測点 SHOK に対する相対的なローカルサイト特性を表すことになる。加えて、NANK を同様にリファレンスサイトに設定した場合も検討し、比較しながら議論を進める。

## 5. インバージョン結果

### (1) ローカルサイト特性

#### a) インバージョン

図-6 にリファレンスサイトを SHOK にした場合と NANK にした場合の各観測点のローカルサイト特性（以下、増幅スペクトルという）を示す。各観測点の増幅スペクトルを見ると、両者とも観測点近傍の地盤の影響を反映して各観測点毎に、かつ周波数帯域毎に大きく変動している様子がわかる。各観測点毎の両者のスペクトル形状は、ほぼ同じ傾向を示している。2Hz 以下の低周波数帯域で NANK をリファレンスサイトにした場合が、いずれも小さい増幅度を示し、ここにリファレンスサイトの違いが見られる。先に述べたように、仙台市圏は、長町-利府断層を境に、それより北西部は洪積台地、南東部は沖積低地と明確な対照を示している。そのことは、図-6 にも明瞭に現われている。北西部の観測点 SAKR、MOGA、NANK と、南東部の観測点 ARAH、SENH、HNAG を比較すると、北西部の観測点の増幅は、全般に小さく、それに比べ南東部の増幅は相対的に大きいことが見てとれる。また、増幅が卓越する周波数帯域にも顕著に違いが見られる。北西部の洪積台地の TAIH、KURI、SAKR、MOGA、NAKI では、10Hz 以上の高周波数帯域で増幅が卓越しているのが特徴となっている。それに対して、南東部の沖積低地の HSHR、SENH、HNAG、TAKA、TGNI では 2Hz あるいは 3Hz 付近で増幅度が卓越している。これらのことは、基盤深さに対応しているものと考えられ、長町-利府断層の北西部では南東部に比べ基盤深さが浅く、南東部では、北に向かうにつれて浅くなっていることが推定される。

図-7 は、SHOK をリファレンスサイトにした場合の、リファレンスサイト以外の全観測点の増幅スペクトルとその平均を重ねてプロットしたものである。この図から仙台市圏における増幅度は、最大で 10 倍程度で、低周波数側より高周波数側でその倍率が

— リファレンスサイトSHOK  
 - - - リファレンスサイトNANK

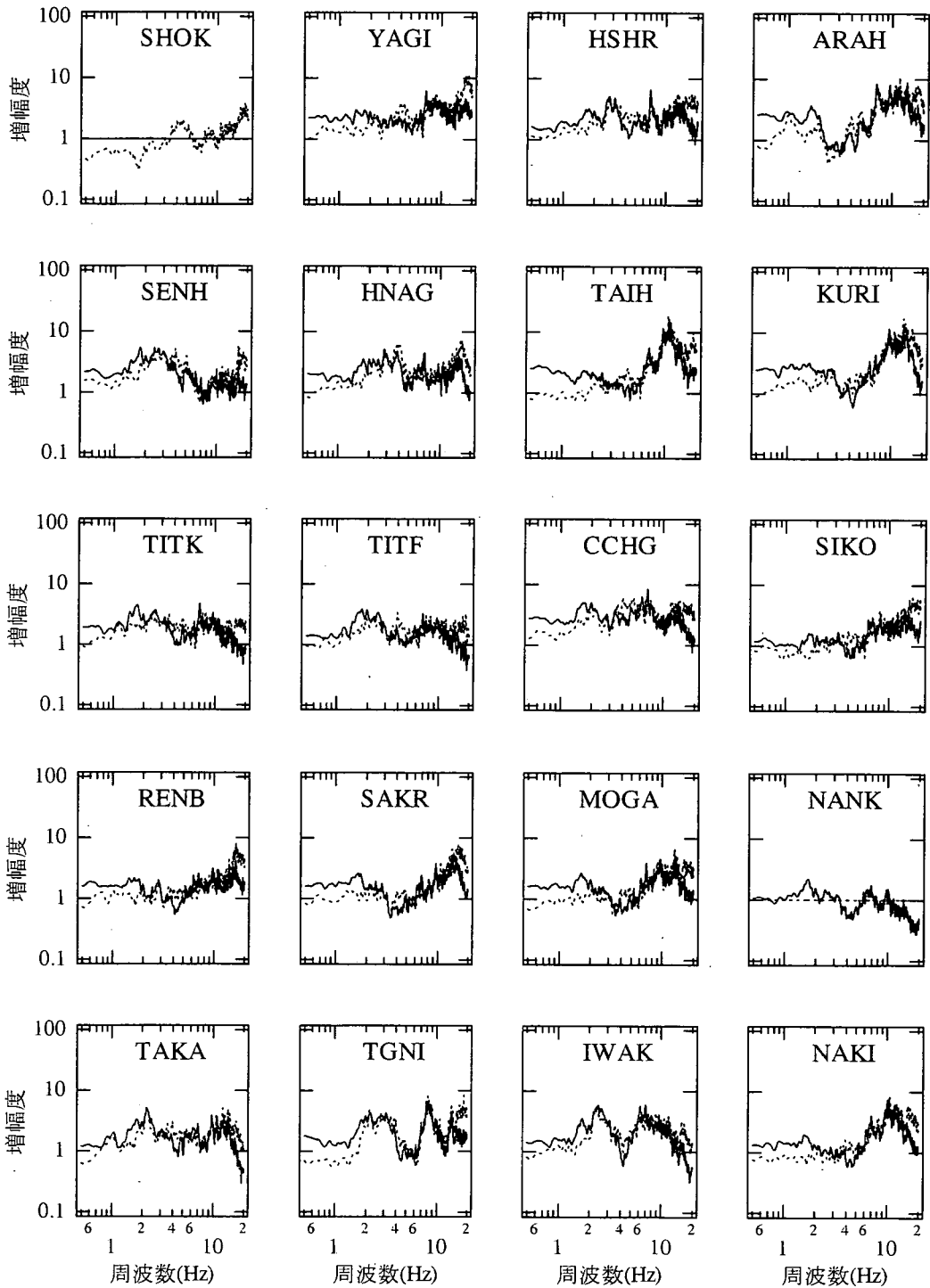


図-6 増幅スペクトルの比較 (リファレンスサイト SHOK と NANK)

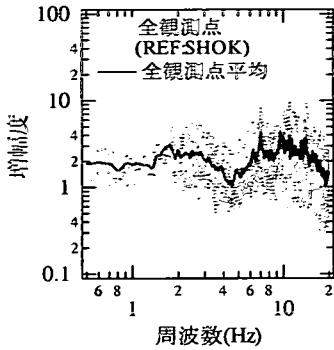


図-7 全観測点の増幅スペクトル平均 (リファレンスサイト SHOK)

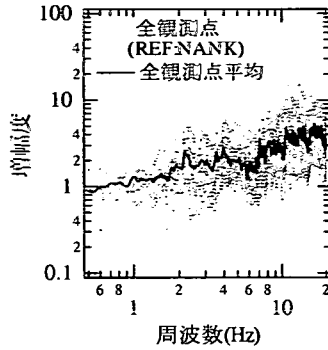


図-8 全観測点の増幅スペクトル平均 (リファレンスサイト NANK)

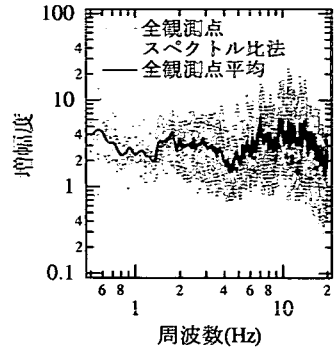


図-9 全観測点の増幅スペクトル平均 (スペクトル比法)

大きいことがわかる。また、同図には共通の山と谷が見られ、リファレンスサイト以外の全観測点の増幅スペクトル平均は、リファレンスサイト固有の増幅特性を幾分包含しているものと考えられる。図-8は、NANKをリファレンスサイトにした場合を、同様にプロットしたものである。SHOKをリファレンスサイトにした場合と比較すると、増幅度の倍率はやや小さく、全観測点の増幅スペクトル平均は、ほぼ平坦で高周波数側に向けて増加傾向を示している様子が観察できる。図-7、図-8の比較から、増幅度の視点からはSHOK、スペクトル形状の視点からはNANKがリファレンスサイトとして妥当との様相が見られるが、その優劣は明確でない。

#### b) direct spectral ratios scheme

ローカルサイト特性だけに着目し、それを簡易に求める方法として、direct spectral ratios scheme<sup>13)</sup>がある(以下、スペクトル比法という)。これは、インバージョン同様、観測記録のS波スペクトルを用いる経験的手法で、複数の観測点で同時に地震記録が得られていて、それらの観測点の中で、基準観測点となるリファレンスサイトがあれば、このリファレンスサイトに対する相対的なスペクトル比を求めることができる。このスペクトル比で近似的にローカルサイト特性を評価しようとする方法である。

いま、式(1)を参照して、あるひとつの*i*地震を想定すると、*j*観測点における地震動スペクトルは

$$O_{ij}(f) = S_i(f)G_j(f)P_{ij}(f) \quad (5)$$

同様に*k*観測点における地震動スペクトルは

$$O_{ik}(f) = S_i(f)G_k(f)P_{ik}(f) \quad (6)$$

と表される。

*j*観測点をリファレンスサイトと仮定し、 $P_{ij}(f)$ と

$P_{ik}(f)$ が等しいと見なせるような観測点配置では、*j*観測点に対する*k*観測点のローカルサイト特性は次のように近似することができる。

$$\frac{O_{ik}(f)}{O_{ij}(f)} = \frac{S_i(f)G_k(f)P_{ik}(f)}{S_i(f)G_j(f)P_{ij}(f)} = \frac{G_k(f)}{G_j(f)} \quad (7)$$

ここでは、インバージョンと同様に、リファレンスサイトSHOKに対するスペクトル比を算定した。ただし、算定されるスペクトル比は、直接リファレンスサイト固有の増幅度の影響を強く受けるため注意が必要となる。また、インバージョンでは各観測点の増幅スペクトルは統計的な最適条件から各観測点毎にユニークな値として得られるのに対して、スペクトル比法では地震毎に変動する値として得られる。ここでは、対象とする全地震のスペクトル比を平均したものを各観測点のスペクトル比法による増幅スペクトルとした。

図-10は、インバージョンとスペクトル比法それぞれの増幅スペクトルを観測点毎に比較して示したものである。リファレンスサイトSHOKが共通であることから、スペクトル形状は比較的によく一致しているが、1Hz以下の低周波数帯域ではあまりよく調和していない。これは、スペクトル比法ではリファレンスサイトであるSHOK固有の増幅度が直接反映されたことが考えられる。また、スペクトル比法がインバージョンより大きな増幅度を与える傾向も見られる。図-9は、スペクトル比法による全観測点の増幅スペクトルとその平均を重ねてプロットしたものである。図-7と比較すると、全観測点の増幅スペクトル平均の形状は、全体的によく似ているが、1Hz以下では相違が認められる。図-7、図-9の比較から、スペクトル比法はローカルサイト特性を概略近似できるが、インバージョンに比べ、リファレンスサイトの影響を強く反映することが示唆される。



— インバージョン(REF:SHOK)  
 ..... direct spectral ratio  
 — Bootstrapインバージョン

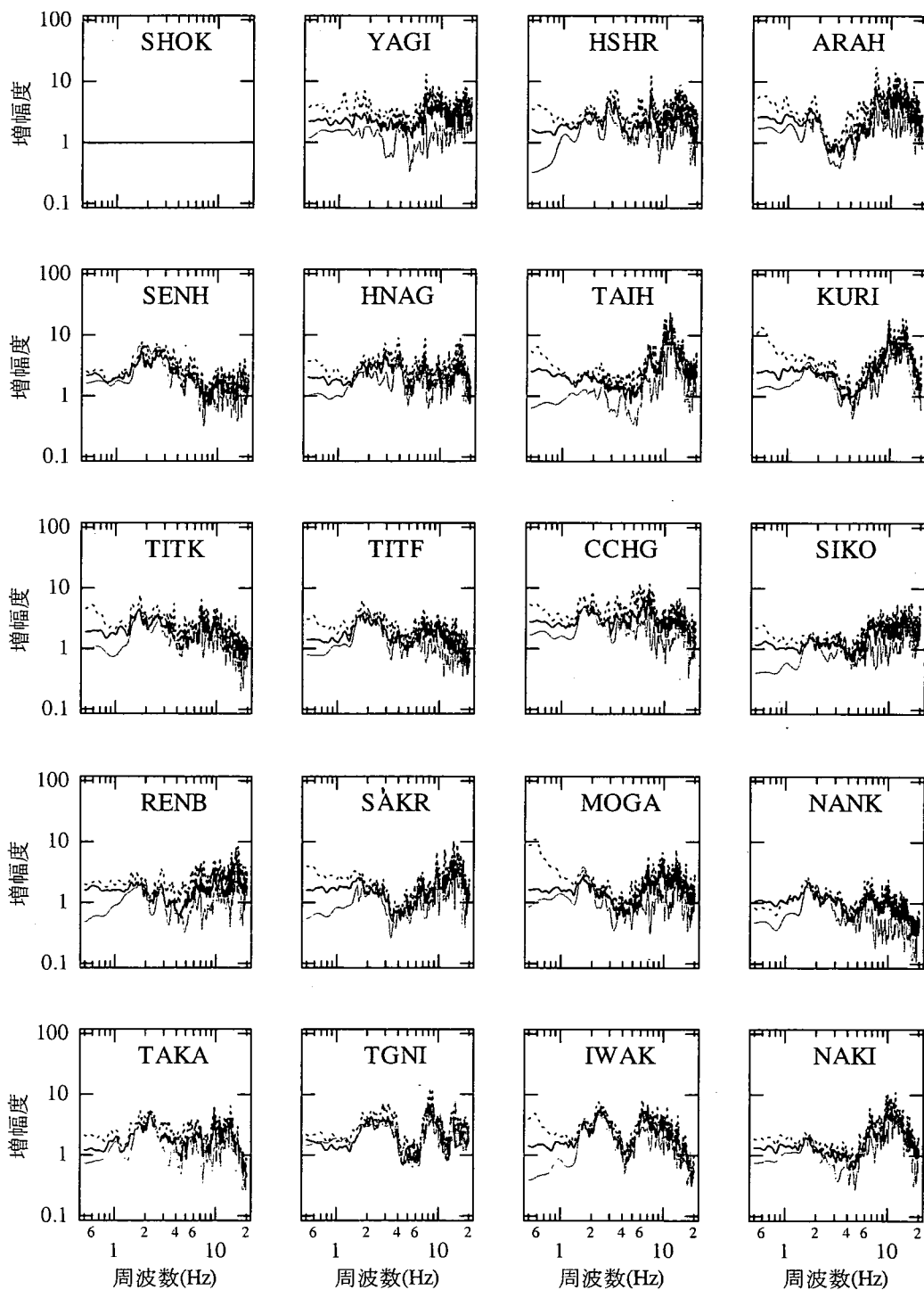


図-10 増幅スペクトルの比較 (インバージョン, スペクトル比法, Bootstrapインバージョン)

表-3 Bootstrap インバージョンの説明

観測記録	1	2	.....	134	135	.....	338
上段 Site	0.576	0.601	.....	0.725	0.270	.....	0.449
Source	1.051	1.051	.....	1.717	1.717	.....	1.814
Path	-0.187	-0.204	.....	-0.161	-0.143	.....	-0.101
中段 観測値	1.521	1.397	.....	2.191	1.879	.....	2.203
予測値	1.440	1.448	.....	2.281	1.844	.....	2.162
残差	0.081	-0.051	.....	-0.090	0.035	.....	0.041
下段 残差	0.041	0.035	.....	0.081	-0.051	.....	0.081
予測値	1.440	1.448	.....	2.281	1.844	.....	2.162
新観測値	1.481	1.483	.....	2.362	1.793	.....	2.243

c) Bootstrap インバージョン

Bootstrap 法は複雑な理論や数式に基づく解析をコンピューターを用いた大量の反復計算で置き換える (Efron が導入した) 統計的推測の一手法である<sup>14)</sup>。この方法では、図-11 の概念図に示すように母集団から大きさ  $n$  の標本を無作為に反復抽出し母集団全体の特性を推測しようとする。この場合、標本の反復抽出回数は、一般に 100 回から 2000 回程度必要となる。とりわけ、Bootstrap 法は、母集団の変動を表すモデルとして特定の確率分布を仮定しないノンパラメトリックな手法も可能であることから、自然科学の分野のみならず人文社会科学の各分野においても、注目されている。本研究では、リファレンスサイトの増幅特性が未知であることから、インバージョンの妥当性を検証する目的で、Bootstrap 法のインバージョンへの適用を試み (以下、Bootstrap インバージョンという)、一般化インバージョンと比較した。ここで、インバージョンに Bootstrap 法を組み込む方法を簡単に説明する。表-3 は Bootstrap インバージョンの 1 過程を模式的に示したものである。表-3 では、ある特定の周波数の例が示されている。観測で得られたデータセットを用いて 4. で述べた方法でインバージョンを実施し、ローカルサイト (Site)、震源 (Source)、伝播経路 (Path) の特性が上段に示すように定量的に得られたとき、その値を用いた予測値と残差が中段のように算定される。次に、この残差が生起する確率モデルと特性値を用いてコンピューター上で乱数を発生させ、残差の一つの実現値を下段のように得る。このような乱数に基づいた残差と中段の予測値とから下段に示すように新しい観測値を得る。この観測値に再度インバージョンを実施する。このような過程を所要の回数だけ繰り返し、母集団のパラメーター推定を行うことができる。ここで、上記過程を 200 回繰り返し、そこで得た Site, Source, Path の平均値を用いて Bootstrap イン

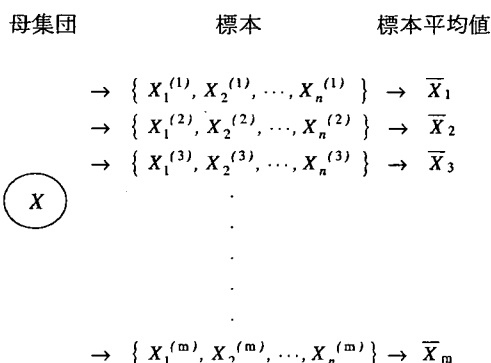


図-11 母集団からの標本の反復抽出概念図

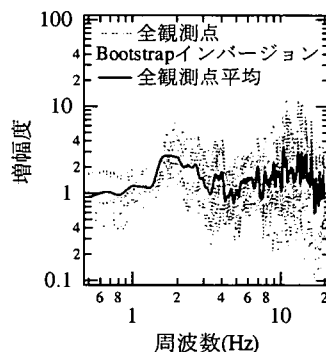


図-12 全観測点の増幅スペクトル平均 (Bootstrap インバージョン)

バージョンの結果とした。図-10には、このようにして得た Bootstrap インバージョンによる増幅スペクトルを観測点毎にプロットしている。インバージョンと Bootstrap インバージョンはよく調和していることがわかる。一部の観測点で 2Hz 以下で Bootstrap インバージョンの減少傾向が観察されるが、インバージョンと Bootstrap インバージョンは同様の増幅度を与えることが示唆される。図-12は、Bootstrap インバージョンによる全観測点の増幅スペクトルとその平均を重ねてプロットしたものである。2Hz 付近に共通の山が観察され、インバージョンの場合同様、リファレンスサイトである SHOK 固有の増幅特性を幾分包含していると推定される。ただし、Bootstrap インバージョンによる全観測点の増幅スペクトルの平均は、図-13に示すように、インバージョン及びスペクトル比法と比較すると、相対的にフラットな様相を示していることがわかる。特に、2Hz 付近を除くと概ねフラットであることが認められる。図-13を見ると、3手法とも得られる結果が、リファレンスサイト固有の増幅特性の影響を受け、少なからずリファレンスサイトに依存していることが推定される。その中でリファレンスサイトに対する依存度は、図-13の比較から高い方から順に、スペクトル比法、インバージョン、Bootstrap インバージョンであることが示唆される。

#### d) 常時微動の H/V スペクトル

常時微動の水平成分に対する上下成分のスペクトル比、H/V スペクトルが地盤のローカルサイト増幅スペクトルを近似的に与えることが知られている。H/V スペクトルは、地盤の卓越周期を推定する上では有効ではあるが、ピークレベルは符合しないなど、S 波のローカルサイト特性との対応は低いとの指摘もある<sup>15)</sup>。しかしながら、任意の地点での観測が可能であることなど、観測の機動性と簡便さには魅力がある。インバージョンによる増幅特性と常時微動の H/V スペクトルを直接比較した例も少ないことから、本研究では、Small-Titan 観測点のジャストポイントで観測した常時微動の H/V スペクトルを求め、それらとインバージョンによる増幅特性との相関について触れる。ここで用いる常時微動の H/V スペクトルは、Small-Titan の観測点で得られた常時微動記録のうち、乱れが少なく最も安定している 20.48 秒間のデータを同時刻で 3 成分、1 観測点につき数区間抽出し、それぞれフーリエスペクトルを求めた。その際、常時微動の水平動成分の方向性が顕著に見られなかったため、NS、EW 成分からベクトル合成した水平動 H 成分と鉛直動 V 成分の比 H/V スペクトルを求めた。ここでは時間的変動を少なくすることを目的に、時間軸を変えて数個の H/V スペクトルの平均を算出し、その平均スペクトルをその観測点の H/V スペクトルとして代表させた。

図-14は、リファレンスサイトを SHOK にした場合及び NANK にした場合のインバージョンによる増幅スペクトルと常時微動の H/V スペクトルを重ねて示したものである。観測点近傍の地盤構造を反映

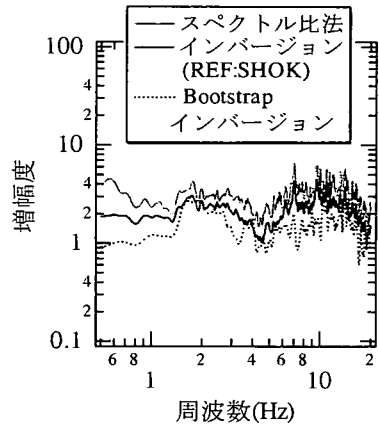


図-13 全観測点増幅スペクトル平均の比較

した各観測点のインバージョン増幅スペクトルと常時微動の H/V スペクトルが全体によく似ていることがわかる。TAIH の 3Hz 以下、TGNI の 8Hz 付近、IWAK の 6Hz 付近でインバージョン増幅スペクトルと常時微動の H/V スペクトルで相違が観察できるが、卓越周波数はほぼ一致している。また、リファレンスサイトの違いでは、SHOK に比べ NANK の方が調和していることが観察できる。図-14の比較から、インバージョン増幅スペクトルと常時微動の H/V スペクトルは、スペクトル形状、卓越周波数のみならず、概ねピークレベルも符合していることが示される。これまで、強震動から何らかの逆解析で求められるローカルサイトの増幅特性と常時微動の H/V スペクトルとの相関については中村・上野<sup>16)</sup>の研究以来、多くの説が提出されている。特に、国外の追試では卓越周期の一致性は相関を支持するものの、スペクトル振幅の相関に関して否定的な見解が多く発表されている。それに対して本研究では卓越周期のみならず、スペクトル振幅についても比較的高い相関を与えている。この相関については逆解析法の種類、リファレンスサイトの設定法など多くの要因が関与すると考えられるが、常時微動の H/V スペクトルの実体も含めてさらに検討を続ける必要がある。

図-15は、全観測点の常時微動 H/V スペクトルとその平均を重ねてプロットしたものである。この図を見ると、全観測点の常時微動 H/V スペクトルの平均はフラットな形状を示している。全周波数で平均が概ねフラットであるということは、Small-Titan の観測点が種々の地盤にバランス良く設置されていて、観測点毎に多種多様なローカルサイト特性を有していることが逆説的に示唆される。

#### e) S 波重複反射理論

Small-Titan の観測点では、ジャストポイント位置での詳細な地盤構造は今のところ得られていない。しかしながら、仙台市圏では、建設省建築研究所と(社)建築研究振興協会の共同研究として仙台高密

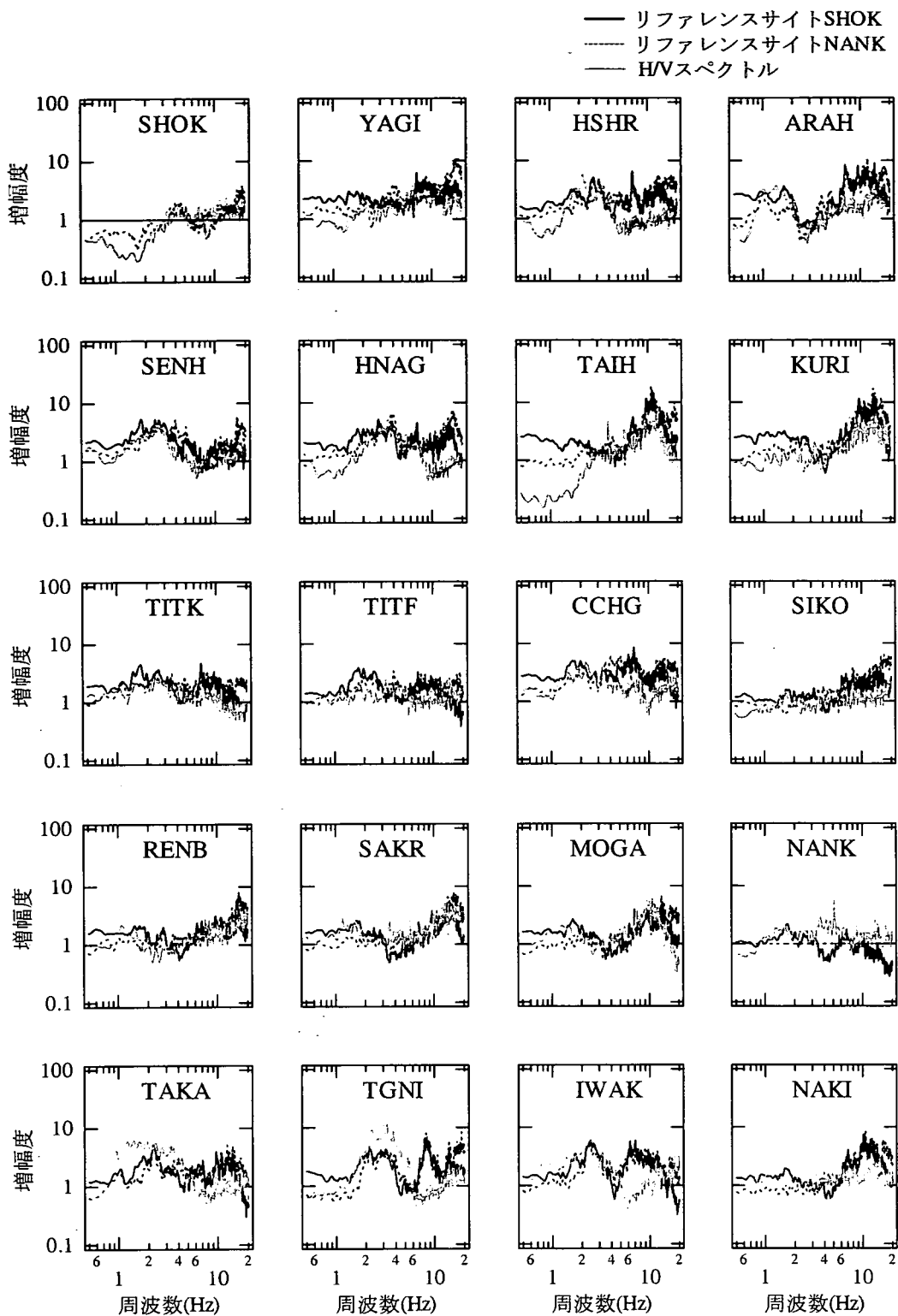


図-14 増幅スペクトルの比較 (インバージョンと常時微動のH/Vスペクトル)

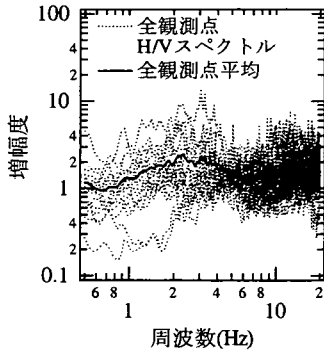


図-15 全観測点の増幅スペクトル平均  
(常時微動の H/V スペクトル)

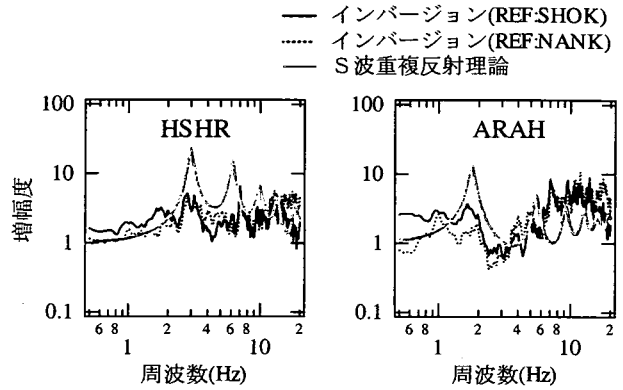


図-16 インバージョンと S 波重複反射理論との比較

度強震観測事業が実施されている<sup>17)</sup>。観測点 HSHR は仙台高密度強震観測事業の観測点 SHIR と近接している。さらに、観測点 ARAH は同じ小学校に設置されている。そこで、仙台高密度強震観測事業の様々な研究成果のうち、地表と地中の地震記録のスペクトル比に S 波の 1 次元理論増幅率が合致するように PS 検層結果を初期モデルとした S 波速度と減衰定数を逆解析した研究<sup>18)</sup>がある。その研究から地盤構造を参照し、S 波重複反射理論に基づく 1 次元理論増幅度を算定した。算定した結果と、インバージョンの結果を重ねてプロットしたものが図-16 である。インバージョンによる増幅スペクトルと S 波重複反射理論に基づく 1 次元理論増幅スペクトルは、概ね調和していることがわかる。

## (2) 伝播経路特性

ここでは伝播経路特性を代表するパラメーターとして  $Q_s$  値について、リファレンスサイトを NANK にした場合、SHOK にした場合を比較しながら議論する。

### a) リファレンスサイト NANK

インバージョンの結果、分離された  $Q_s$  値の逆数  $1/Q_s$  を図-17 に示す。この図から、 $Q_s$  値の周波数依存性が観察され、複雑に変動しているが、ほぼ周波数の 0.8 乗に比例していることがわかる。これは、 $Q_s$  値が周波数の 0.5~0.9 乗に比例しているとの既往の研究結果<sup>8),19),20)</sup>と矛盾していない。1Hz で  $Q_s$  は 250 となり、平均的特性を直線で近似し、式 (8) の形でモデル化すると、式 (9) を得る。

$$Q_s = Q_0 f^n \quad (8)$$

$$Q_s = 250 f^{0.8} \quad (9)$$

### b) リファレンスサイト SHOK

図-18 に、 $1/Q_s$  を示す。図-17 のリファレンスサ

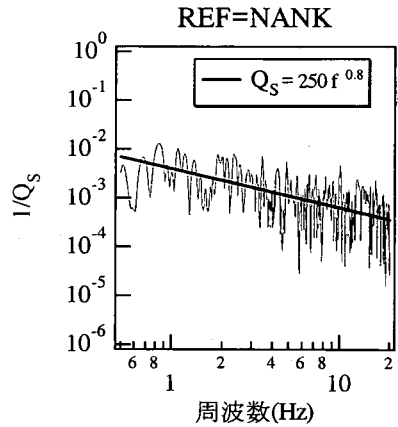


図-17  $Q_s^{-1}$  (リファレンスサイト NANK)

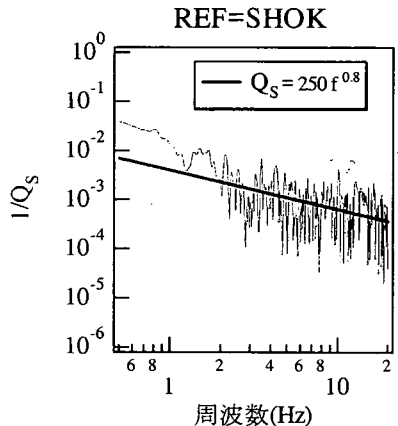


図-18  $Q_s^{-1}$  (リファレンスサイト SHOK)

イト NANK の場合と同様に、 $Q_s$  値は複雑な変動を示し、周波数依存性が見られる。しかし、図-17 と比較すると、2Hz より低周波数帯域において  $Q_s^{-1}$  値が大きく、かつ変動が小さいことが観察できる。図-18 には、式(9)をプロットしてあるが、2Hz より低周波数帯域では調和していないことが認められる。

### (3) 震源特性

図-19 には、インバージョンの結果から得られた 19 地震の震源スペクトルのうち、他の研究から地震モーメントが求められている 11 地震の震源スペクトルを示す。本研究では、仙台市圏の SHOK に対する相対的なローカルサイト特性の評価が目的である。そのため、インバージョンの妥当性を検証するために、工学的観点から、インバージョンから得られた震源スペクトルと理論震源スペクトルを比較してみることにする。理論震源スペクトルを計算する際に必要な地震モーメントは防災科学技術研究所の地震モーメントテンソルカタログ<sup>21),22)</sup>を参照した。表-4 には、マグニチュードと理論震源スペクトルを計算する際に用いた地震モーメントを示す。なお、理論加速度震源スペクトル  $S_a(f)$  は、Boore<sup>23)</sup>に従い、 $\omega^{-2}$  モデルに、 $f_{max}$  を考慮した次式によりモデル化した。

$$S_a(f) = (2\pi f)^2 \times \frac{M_0}{1 + (f/f_0)^2} \times \left(1 + (f/f_{max})^m\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$f_0 = 4.9 \times 10^6 \beta_0 \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

ここに、

- $f_0$  : コーナー周波数 (Hz)
- $\beta_0$  : せん断波速度 (km/sec)
- $\Delta\sigma$  : ストレスドロップ (bars)
- $M_0$  : 地震モーメント (dyne-cm).

$f_{max}$ ,  $m$  は、Sato *et al.*<sup>20)</sup>が仙台で観測された強震記録から推定している値、 $f_{max}=13.5\text{Hz}$ 、 $m=4.2$  を用いた。Brune<sup>24),25)</sup>のストレスドロップを  $\Delta\sigma=50$  bars と 200 bars にした場合に対して、 $\beta_0=3.5$  km/sec を仮定して理論震源スペクトルを算定した。算定した理論震源スペクトルとインバージョンから得られた震源スペクトルを、リファレンスサイトを NANK にした場合、SHOK にした場合をそれぞれ比較して、地震毎にプロットしたのが図-19 である。

#### a) リファレンスサイト NANK

図-19 を見ると、インバージョンから得られた震源スペクトルは、概ね  $\omega^{-2}$  モデルに近い形状を呈していることが観察される。また、スペクトル形状が 10Hz 付近から高周波数側へ向けて減少している様

表-4 マグニチュードと地震モーメント

NO.	Earthquake name	$M_j$	$M_0$ (dyne*cm)
1	Earthq_19980824232018	4.9	2.86E+22
2	Earthq_19980915161800	3.6	*****
3	Earthq_19980915162300	5.0	3.19E+23
4	Earthq_19980915163104	3.6	*****
5	Earthq_19980915175648	4.1	*****
6	Earthq_19980925065955	5.2	1.52E+23
7	Earthq_19981024231950	4.0	*****
8	Earthq_19981103164839	4.6	*****
9	Earthq_19981124044817	5.4	5.73E+23
10	Earthq_19981223110043	3.8	*****
11	Earthq_19990201015215	5.4	*****
12	Earthq_19990206172431	3.8	*****
13	Earthq_19990226141844	5.4	7.19E+23
14	Earthq_19990513030127	6.1	1.72E+25
15	Earthq_19990612074350	5.2	1.53E+23
16	Earthq_19991005093853	5.5	3.43E+23
17	Earthq_19991024022010	3.5	2.70E+21
18	Earthq_19991107215341	5.0	6.06E+22
19	Earthq_19991115103443	5.7	2.89E+24

子が認められ、 $f_{max}$  が示唆される。振幅の変動が見られるが、ストレスドロップが  $\Delta\sigma=50$  bars と 200 bars の範囲内で、概ね説明できることがわかる。

#### b) リファレンスサイト SHOK

図-19 には、リファレンスサイト SHOK の場合の震源スペクトルも示している。この図を見ると、振幅レベルはリファレンスサイト NANK の場合とほぼ同じであるが、低周波数帯域で理論震源スペクトルと相違が認められる。特に、マグニチュード  $M_j$  が比較的小さい地震の震源スペクトルではそれが顕著である。詳細に見てみると、全ての地震で 2Hz 以下の周波数帯域でインバージョンから得られた震源スペクトルと理論震源スペクトルの間に顕著な違いが観察できる。このことは伝播経路特性の  $Q_s^{-1}$  値の結果と併せて考えるとその理由が理解できる。すなわち、伝播経路特性と震源特性との間でトレードオフが生じていることが考えられる。Small-Titan は、高密度アレー観測システムであるがゆえ、震源距離に対して観測点間距離が短く、各観測点に対する震源距離がほぼ等しくなる。Parolai *et al.*<sup>26)</sup>が指摘するように、震源と各観測点間で単一の ray path となることに起因して適切に伝播経路特性と震源特性は分離できていない可能性が示唆される。ローカルサイト特性は、観測点近傍の地盤の影響を反映して適当なバラツキがあるのに対して、伝播経路特性は単一であるため、ローカルサイト特性だけは分離できるが、伝播経路特性と震源特性はトレードオフが著しくなり、分離できないことが示唆される。また、拘束条件としてのリファレンスサイトの設定に注意しなければならないことが示唆される。

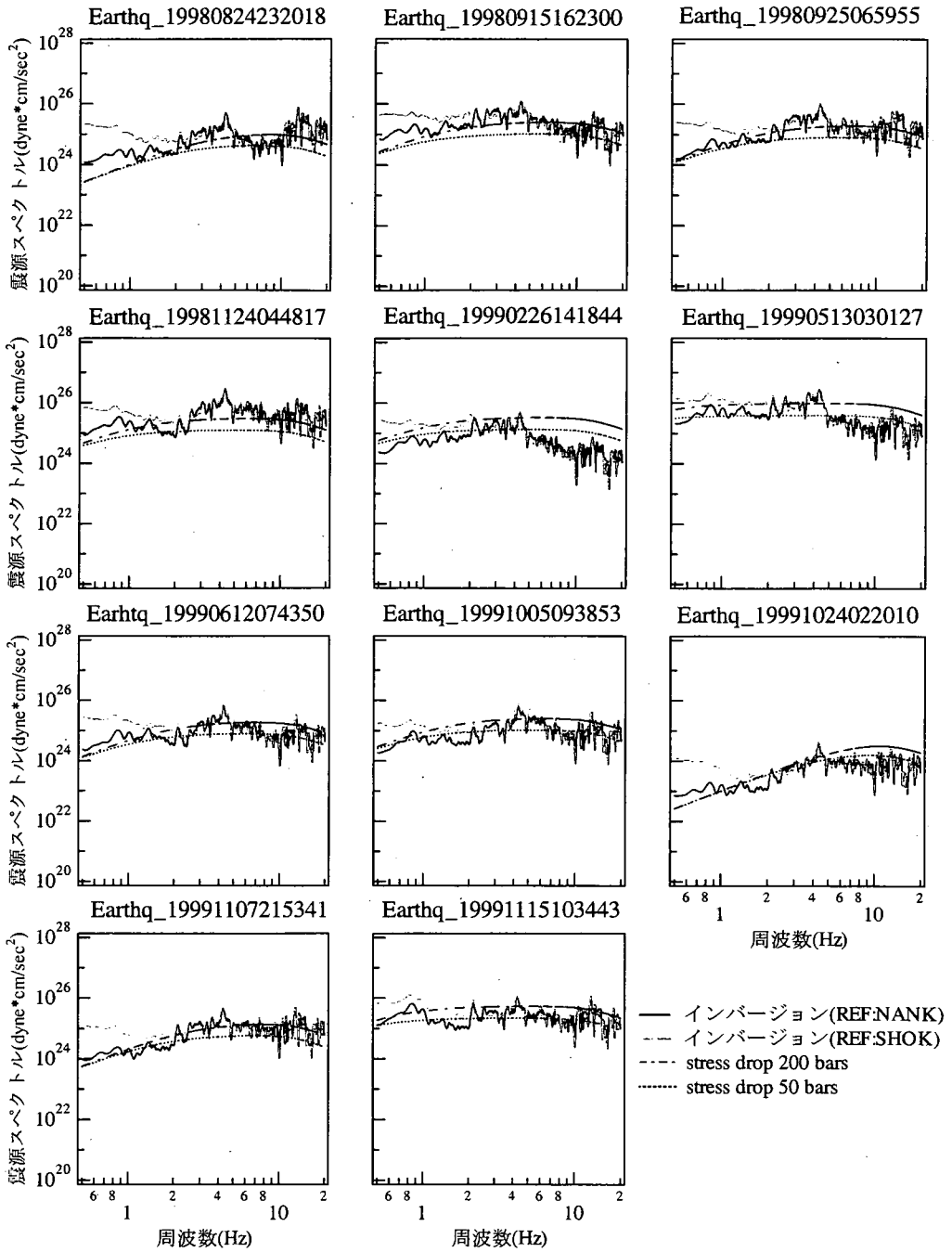


図-19 震源スペクトルの比較

## 6. まとめ

本研究では、Small-Titan で得られた観測記録を用いて、インバージョンを実施して、震源特性、伝播経路特性、ローカルサイト特性の分離を試みた。そして、インバージョンと他の評価方法との比較を行い、分離されたそれぞれの特性の妥当性について述べた。得られた知見は次のようにまとめられる。

- 1) Small-Titan のように観測点が種々の地盤に配置されている場合、観測点毎に適当に増幅度のバラツキがあることから、インバージョンは、ローカルサイト特性を評価するための有効な手法であることが確認できた。
- 2) インバージョンでは、どのような拘束条件を課すかが重要になる。とりわけ、震源特性、伝播経路特性、ローカルサイト特性を合理的に分離するためには、拘束条件としてのリファレンスサイトが重要な役割を演じる。インバージョンの結果は、リファレンスサイト固有の増幅度の影響を受け、リファレンスサイトに依存することが推定された。
- 3) スペクトル比法は、ローカルサイト特性を概略近似できるが、インバージョンに比べ、リファレンスサイトの影響が強く反映され、リファレンスサイトに対する依存度が高いことがわかった。
- 4) Bootstrap インバージョンは、インバージョンと同じ傾向のローカルサイト特性を与え、スペクトル比法、インバージョンに比べ、リファレンスサイトに対する依存度が低いことが推定できた。
- 5) インバージョン増幅スペクトルと常時微動のH/V スペクトルは、スペクトル形状、卓越周波数のみならず、スペクトル振幅についても比較的高い相関を与えていることが示唆された。
- 6) リファレンスサイトの選定とインバージョンにおけるトレードオフには密接な関係が示唆された。特に、震源と各観測点間で単一の ray path となるような観測記録を用いる場合、伝播経路特性と震源特性との間でトレードオフが生じ、適切に伝播経路特性と震源特性は分離できない可能性がある。また、伝播経路特性と震源特性との間のトレードオフを解消するためには、適切なリファレンスサイトの選定が有効であることが確認できた。
- 7) リファレンスサイトを NANK としたインバージョンでは、分離された  $Q_S$  値は周波数に依存することが認められ、 $Q_S = Q_0 f^n$  の形でモデル化すると、 $Q_S = 250 f^{0.8}$  で説明でき、既往の研究結果と調和的であることが確認できた。震源スペクトル形状は、 $\omega^{-2}$  モデルに  $f_{max}$  を考慮した既往の研究と調和しており、ストレスドロップが 50bars から 200bars の範囲内で、概ね説明できることが知れた。

今後の課題としては、次のことが挙げられる。

- 1) 先に述べたように、Small-Titan の観測点での詳細な地盤構造は得られていないことから、仙台市圏の基盤と目される SHOK のローカルサイト特性は未知である。その観点から、リファレンスサイトに依存しない、あるいはリファレンスサイトを必要としないインバージョン手法の検討が必要であると考えられる。その意味で、山本・他による  $\omega^{-2}$  モデルに基づく震源モデルから評価した入射波スペクトルを仮定して、それを拘束条件として与える手法は、適用性が高いと考えられる。
- 2) 本研究では、基盤と目される SHOK に対する相対的ローカルサイト特性の評価が主であったため、伝播経路特性および震源特性についてはインバージョンの妥当性の検証のみ行なった。岩盤サイトであっても高周波数領域では増幅度を有することが指摘されている<sup>27)</sup>。とりわけ、安山岩サイトである SHOK では、その可能性が高いと考えられるため、SHOK に対する相対的ローカルサイト特性の推定可能な周波数帯域の検討が必要であると考えられる。さらに Small-Titan の観測網で推定可能な  $Q_S$  値についての検討も課題である。

今後これらの課題に対して検討を加え、伝播経路特性と震源特性に関しては別途詳細に論じる予定である。加えて、Small-Titan の観測記録のさらなる有効利用を図っていく予定である。

謝辞：文献 18) を補足する観測点 HSHR と ARAH の地盤構造データは、株式会社東京ソイルリサーチから提供して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 神山 真, 莊司雄一, 松川忠司, 浅田秋江, 中居尚彦: オンラインアレイ地震観測システムの構築とその記録の若干の考察, 土木学会論文集, No.688/I-54, pp. 283-298, 2001.
- 2) Iwan, W. D.: The deployment of strong-motion earthquake instrument arrays, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.7, pp.413-426, 1979.
- 3) 日本建築学会東北支部: 1998年9月15日仙台市近郊の直下型地震調査報告, pp. 26-33, 1999.
- 4) 岩田知孝, 入倉孝次郎: 観測された地震波から、震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震, 第2輯, 第39巻, pp.579-593, 1986.
- 5) Menke, W.: *Geophysical Data Analysis: discrete inverse theory*, Academic Press Inc., San Diego, California, 1989.
- 6) 山本みどり, 岩田知孝, 入倉孝次郎: 釧路地方気象台における強震動と弱震動に対するサイト特性評価, 地震, 第2輯, 第48巻, pp.341-351, 1995.
- 7) 山中浩明, 中丸明子, 栗田勝実, 瀬尾和夫: 表層の地盤特性を拘束条件にした S 波スペクトルのインバージョンによるサイト特性の評価, 地震, 第2輯, 第51巻, pp.193-202, 1998.



- 8) Kinoshita, S.: Frequency-dependent attenuation of shear waves in the crust of the southern Kanto area, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, pp.1387-1396, 1994.
- 9) Kato, K., Takemura, M., Ikeura, T., Urano, K. and Uetake, T.: Preliminary analysis for evaluation of local site effects from strong motion spectra by an inversion method, *J. Phys. Earth*, Vol.40, pp.175-191, 1992.
- 10) Hartzell, S. H. : Site response estimation from earthquake data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.82, 2308-2327, 1992.
- 11) Andrews, D.J.: Separation of source and propagation spectra of seven Mammoth Lakes aftershocks, Proceedings of Workshop 16, Dynamic characteristic of faulting, 1981, *U.S. Geol. Sur. Open File Rep.*, 82-591, 1982.
- 12) Castro, R.R., Anderson, J.G. and Singh, S.K.: Site response attenuation and source spectra of S waves along the Guerrero, Mexico, subduction zone, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.80, pp.1481-1503, 1990.
- 13) Bonilla, L.F., Steidl, J.H., Lindley, G.T., Tumarkin, A.G. and Archuleta, R.J.: Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.87, pp.710-730, 1997.
- 14) Efron, B.: Bootstrap methods, another look at the jackknife, *Ann. Stat.* Vol.7, pp.1-26, 1979.
- 15) Field, E.H. and Jacob, K.H.: A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.85, pp.1127-1143, 1995.
- 16) 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 回地震工学シンポジウム論文集, pp.265-270, 1986.
- 17) (社)建築研究振興協会 : 仙台高密度強震観測総合報告書, pp.1-25, 1999.
- 18) Satoh, T., Kawase, H. and Sato, T.: Evaluation of local site effects and their removal from borehole records observed in the Sendai region, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.85, pp.1770-1789, 1995.
- 19) 木下繁夫 : 地震観測に基づく観測点特性と経路減衰特性の評価, 地震, 第 2 輯, 第 46 卷, pp.161-170, 1993.
- 20) Satoh, T., Kawase, H. and Sato, T.: Statistical spectral model of earthquakes in the eastern Tohoku district, Japan, based on the surface and borehole records observed in Sendai, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.87, pp.446-462, 1997.
- 21) Fukuyama, E., Ishida, M., Horiuchi, S., Inoue, H., Kubo, A., Kawai, H., Murakami, H. and Nonomura, K.: *NIED Seismic Moment Tensor Catalogue January - December, 1998 (revised)*, 2001.
- 22) Fukuyama, E., Ishida, M., Horiuchi, S., Inoue, H., Hori, S., Sekiguchi, S., Kawai, H., Murakami, H., Yamamoto S., Nonomura, K. and Goto, A.: *NIED Seismic Moment Tensor Catalogue January - December, 1999, 2000*.
- 23) Boore, D.M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 24) Brune, J.N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
- 25) Brune, J.N.: Correction, *J. Geophys. Res.*, Vol.76, pp.5002, 1971.
- 26) Parolai, S., Bindi, D. and Auglira, P.: Application of the generalized inversion technique (GIT) to a microzonation study: numerical simulations and comparison with different site-estimation techniques, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.90, pp.286-297, 2000.
- 27) Yoshimoto, K., Sato, H., Kinoshita, S. and Ohtake, M.: High-frequency site effect of hard rocks at Ashio, central Japan, *J. Phys. Earth*, Vol.41, pp.327-335, 1993.

(2001. 7. 23 受付)

## ESTIMATES OF LOCAL SITE EFFECTS BY A GENERALIZED INVERSION SCHEME USING OBSERVED RECORDS BY "SMALL-TITAN"

Yuichi SHOJI and Makoto KAMIYAMA

A generalized inversion scheme to separate the effects of source, propagation path and local site from S-wave spectra was applied to "Small-Titan" records obtained in the Sendai region, North East Japan.

Site amplification factors estimated from the generalized inversion scheme vary significantly, reflects the effects of soil characteristics at each site: strong site-dependency was found in the site amplification factors. Results from the generalized inversion scheme are compared with those obtained by the direct spectral ratio scheme, the H/V method and the bootstrap inversion. There is a good agreement in the amplification factors between them. The H/V method for estimating site amplification is found to extract the same predominant periods as the other methods. This paper especially emphasizes a good agreement in not only predominant periods but also amplification factors. Estimated source spectra and  $Q_s$ -value were also in an agreement with results of previous studies by others.