

2.4 短スパン地震計アレイ観測

2.4.1 はじめに

静岡県森町に設置された弾性波アクロス送信装置の送信信号を Hi-net のような地震観測点の連続波形データを用いて解析することにより、各観測点での伝達関数が求められ、P 波、S 波とそれらの後続波も観測されている（本報告 2.3.2 項）。しかし、送信信号の周波数が数 Hz 以上と高周波であることや、Hi-net の配置間隔に比べて小スケールの地下構造の不均質のため、波群の到来方向が分からないとそれぞれの識別は困難である。また、送信装置からの距離が遠い、あるいは、近距離でもノイズレベルが高い観測点の場合は、地下の状態変化の情報を持つ波群の走時の時間変化を検出するための十分な SN 比が得られない（本報告 2.3.2 項）。このため、波群の識別のためには、観測点間の距離を狭くし多数の地震計を設置して、短波長不均質構造を検出可能な地震計アレイを構築することが有効である。弾性波アクロス送信信号を対象とした短スパンの地震計アレイ観測は、これまでに岐阜県土岐の送信装置からの送信信号について行われている（例えば、Saiga *et al.*, 2006）が、森町の送信装置からの送信信号については行われていない。そこで、森町の送信装置の送信信号を解析して、波群の伝播方向及びスローネスを特定し、SN 比を向上させることを目的として、静岡県東部で短スパンの地震計アレイ観測を行った。本節では、このアレイ観測データを用いて、アレイの性能を評価すると共に、アレイに入射する波の検出を行った。

2.4.2 観測

アレイを設置した場所は、静岡県東部（島田市）にある富士山静岡空港へのアクセス道路周辺である。空港周辺は開港準備のため、アクセス道路等の建設工事が行われている。この工事によって、工事以前は山林や茶畑等であった土地が切土され、平坦な地表面が数か所現れている。これらの土地を有効に利用して、道路建設工事への影響や工事後の土地利用の制約も考慮して、波群の同定が可能な分解能を有するアレイを構築した。Fig. 2.4.1 にアレイの位置、観測点の位置座標及び観測点番号を示す。送信装置からアレイまで距離は 20km、方向は N100° E である。アレイは、滑走路西端から北西に約 1.5km 離れたアクセス道路周辺において、東西約 300m、南北約 150m の範囲で標高がほぼ同じ領域に、名古屋大学の協力を得て静岡大学と共同で 8 点の観測点で構成した。アレイ周辺は、牧の原台地（礫層）の丘陵にあたり、牧の原台地の基盤となる第三紀の砂・泥質層（相良層群）が表層を覆う（町田・他，2006）。Fig. 2.4.2 に station 5 から station 3 を遠望した写真を示す。地震計を設置した場所は平坦地なので地震計の信号ケーブルの敷設が容易であり、上空をさえぎる物が無いため GPS の電波の受信状況は良好であるが、商用電源と固定電話回線は利用できない。また、昼間は工事のためにトラックや重機が往来していて、ノイズレベルは高い。

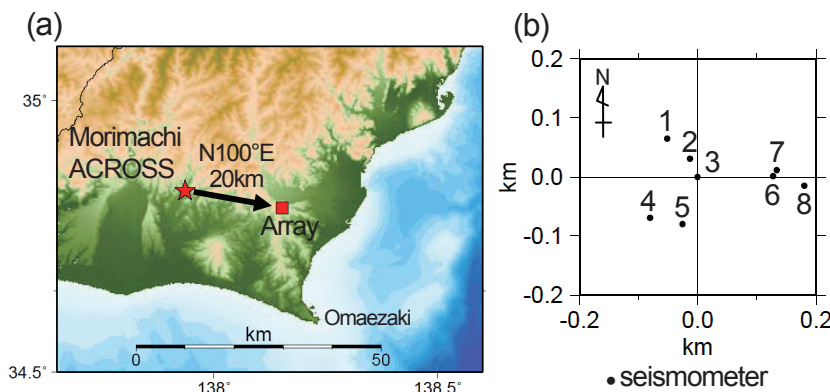


Fig. 2.4.1. (a) Map of locations of the ACROSS transmitter and seismic array. (b) Geometry of stations of the seismic array.



Fig.2.4.2. Array observation site of station 3. This photo was taken from station 5.

Fig. 2.4.3 に観測点の機器構成とその写真を、Table 2.4.1 に観測点座標、観測期間、所属機関等を示す。地震計は3成分速度型、固有周波数 2Hz、感度 2V/cm/sec、内蔵ダンピング定数 0.7 の China Geo-Equipment Corporation 製である。データロガーは白山工業 (株) の LS7000XT または LS7000 を使用し、地震計からの出力波形データをアンプ倍率 20db、A/D 変換 (デルタシグマ型) の量子化ビット数 24bit、線形位相フィルター、サンプリング周波数 100Hz で連続収録した。時計の時刻校正は GPS によって毎時行われ、1 μ sec 以下の精度が保たれている。連続波形データは、データロガー搭載の 2GB の CF カードに加えて、8GB の CF カード 2 枚を搭載したマイクロサーバー (OS は Linux) を LAN 接続して、FTP プロトコルで前日分のデータを毎日定時に取得することにより、約 6 ヶ月間の保存が可能である。マイクロサーバーは、消費電力を抑えるため直流電源用タイマーをマイクロサーバーとバッテリー間の電源ケーブルに挿入することにより、毎日定時に 1 時間だけ起動させた。これらのデータロガー、マイクロサーバー、直流電源用タイマーに加えて、GPS アンテナの避雷器、地震計ケーブルの避雷器、接続ケーブルを 1 つのプラスチック容器に収容した (Fig. 2.4.3 右下の写真)。電源には、ディープサイクルバッテリーを太陽電池パネルと併用した。太陽電池の出力とバッテリーの容量は、データロガーとマイクロサーバーの消費電力約 5Ah/日を満たし、連続無日照日 5 日間を想定して選定した。地震計位置の測位には 1 周波型 GPS 受信機を使用した。気象研究所の 6 点は、データロガー 1 台につき 2 つの地震計を接続し、そのうち 1 点はデータロガー近傍に、もう 1 点はデータロガーから約 50m~80m 離れた場所に埋設した信号ケーブルを用いて設置した。観測期間は 2007 年 11 月末から約 7 カ月間である。一方、静岡大学の 2 点はデータロガー 1 台につき 1 つの地震計を接続し、それぞれデータロガー近傍に地震計を設置して、2007 年 9 月中旬から約 4 カ月間観測した。Fig. 2.4.4 に station 3 の上下成分の 2008 年 1 月 27 日 10 時台の生波形と、2008 年 1 月における 1 時間毎の時間波形の振幅の二乗平均平方根 (RMS) の時間変化を示す。森町・掛川付近で発生した自然地震が記録されている。RMS 振幅は、昼間の工事ノイズの影響で昼と夜では 1 桁程度差があり、工事の休止日は小さくなっている。

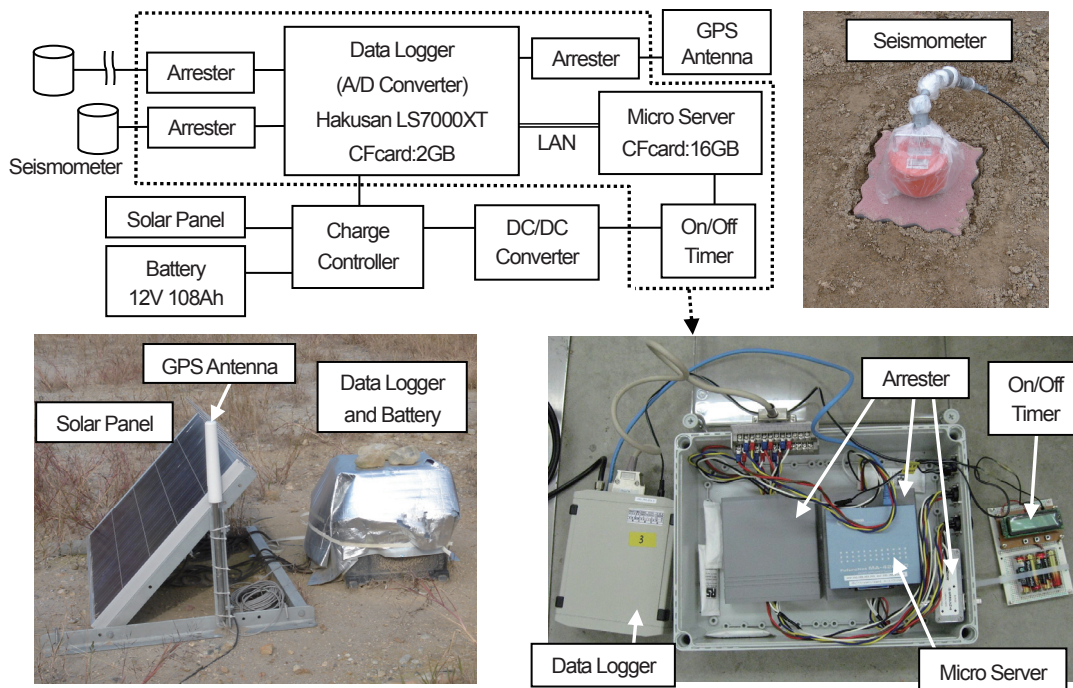


Fig. 2.4.3. Block diagram and photos of the seismic observation system.

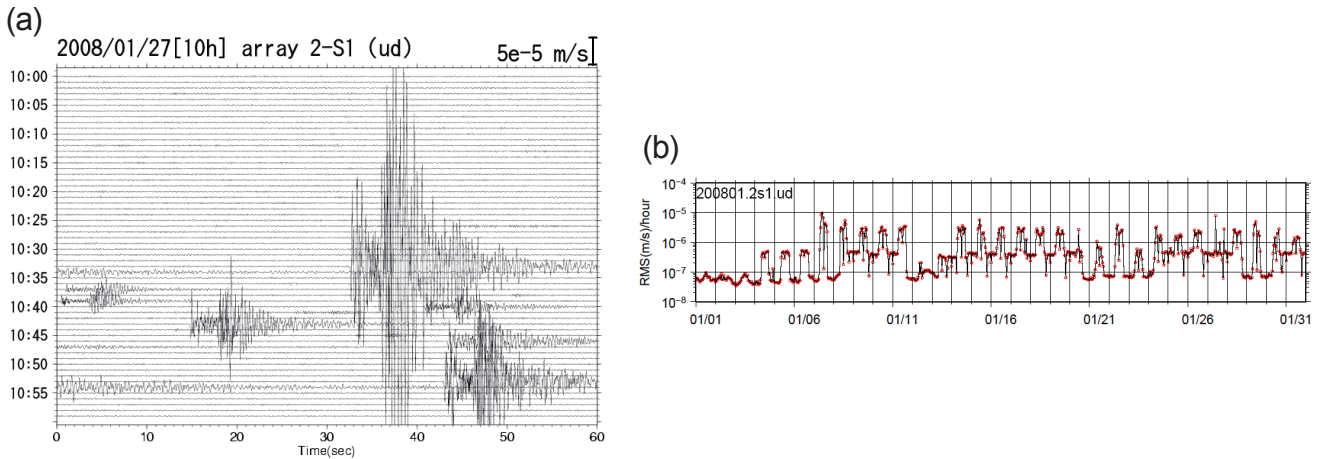


Fig. 2.4.4. (a) Observed UD component seismograms at station 3 from 1000 to 1100 on January 27, 2008. (b) Time series of hourly RMS amplitude of the UD component at station 3 in January 2008.

Table 2.4.1. Parameters of the seismic stations on the array site.

Station code	Latitude (Deg.)	Longitude (Deg.)	Natural freq. of seismometer	Data Logger	Observation period	Number of stacks (days)	Note
1	34. 803653N	138. 152327E	2Hz	LS7000XT	※1	172	MRI
2	34. 803348N	138. 152759E	2Hz	LS7000	※2	80	Shizuoka Univ.
3	34. 803066N	138. 152900E	2Hz	LS7000XT	※1	201	MRI
4	34. 802441N	138. 152010E	2Hz	LS7000XT	※1	212	MRI
5	34. 802344N	138. 152615E	2Hz	LS7000XT	※1	212	MRI
6	34. 803071N	138. 154295E	2Hz	LS7000XT	※1	164	MRI
7	34. 803166N	138. 154360E	2Hz	LS7000	※2	81	Shizuoka Univ.
8	34. 802931N	138. 154878E	2Hz	LS7000XT	※1	153	MRI

※1) 2007/11/30 to 2008/7/1 ※2) 2007/9/14 to 2008/1/24

2.4.3 スタッキングと伝達関数の取得

解析には、2007年11月3日から2008年7月1日の低周波（3.51Hz～7.71Hz）送信信号を用いた。観測データからノイズに埋もれている信号を取り出すため、重み付きスタッキング（長尾・他、2004）を行った。重みはノイズレベルの2乗に逆比例するように決めた。ここで、ノイズレベルは送信周波数帯域におけるノイズチャンネルのスペクトル振幅のRMSである。スタックを行う波形データのセグメント長は200secとした。スタッキング期間は、送信装置の運用状況、地震計の設置期間及び信号ケーブルの障害（小動物による噛み傷）等のために地震計ごとに異なり、Table 2.4.1に示すように約3～7ヶ月間である。スタッキング日数の増加による信号とノイズレベルの推移をstation 3の東西成分を例にFig. 2.4.5に示す。縦軸は信号またはノイズチャンネルのスペクトル振幅のRMSである。スタッキング開始直後は信号がノイズレベル以下であるが、3日目以降は、SN比（信号スペクトルをノイズスペクトルで割った値）が1を超えている。ノイズレベルはスタッキング期間の平方根の逆数で小さくなり、信号レベルは一定の値に収束している。Fig. 2.4.6に送信装置で発生する力のスペクトル、各観測点の東西成分のスタッキング後の振幅と位相のスペクトルを示す。送信信号のFM変調周期が50secなので周波数領域で0.02Hz毎に信号チャンネルが、また、スタッキングのセグメント長が200secなので0.005Hz毎にノイズチャンネルがある。スタッキング後のSN比はどの観測点も、4.5Hz付近よりも低周波域では2～3と低く、高周波側では2～10程度と高い。

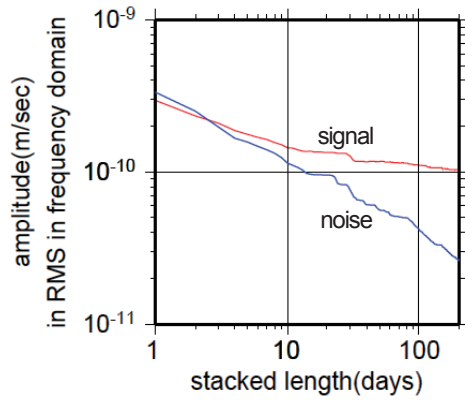


Fig. 2.4.5. Reduction of noise level and appearance of signal on data stacking for the EW component at station 3.

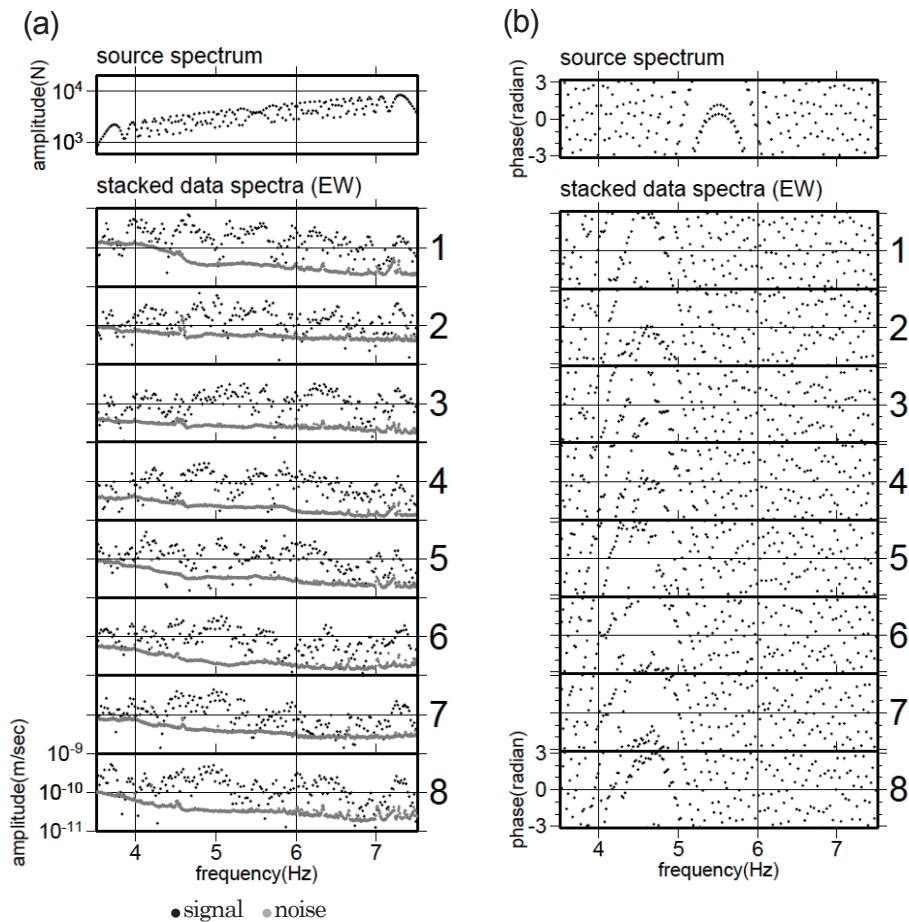


Fig. 2.4.6. Top: Theoretical spectrum at the ACROSS transmitter. Bottom: Stacked data spectra of the EW component at the array. (a) Amplitude spectra. Black dots indicate signals, and gray dots indicate noise. (b) Phase spectra. Black dots denote signals.

スタックした周波数領域のデータから信号成分を取り出し、送信装置で発生している理論的な力のスペクトルで除算することにより、送信装置と地震計の間の伝達関数が求まる。解析期間中の送信装置は回転方向を2時間毎に反転させて送信しているので、これら正回転と逆回転のデータの位相を調整して合成することにより、水平面内で任意の直線方向に加振したのと等価なデータが得られる。そこで、radial 方向及び transverse 方向の加振に対する各観測点の z, radial, transverse 方向の伝達関数を求めた。今後は、例えば radial 加振の transverse 方向の伝達関数を Htr のように表すことにする。送信装置は水平面内でのみ加振しているので、全部で6成分の伝達関数 (Hrr, Htr, Hzt, Hrt, Htt, Hzt) が得られる。このうち Hrr 成分についての振幅スペクトルとスペクトルを逆フーリエ変換することによって得られた時間領域の波形を Fig. 2.4.7 に示す。時間波形のはじめの 2sec 間には緑色でノイズレベルを付している。信号レベルは低周波のパワーが大きく、P 波、S 波らしき相がみられるが、観測点間の相関は悪い。Fig. 2.4.8 に6成分の伝達関数の時間領域の波形を示す。Hzt, Hzt の振幅は、他の4成分の振幅の2倍にして表示している。単純な水平成層構造の場合の振幅は、Hrr の方が Htr より大きく、Htt の方が Hrt より大きく、Hzt は Hzt よりも小さくゼロになるはずであるが、各成分同士の振幅は同程度である。これは、送信装置の送信周波数帯において、水平方向の構造の不均質もしくは散乱による影響を大きく受けているためと考えられる。

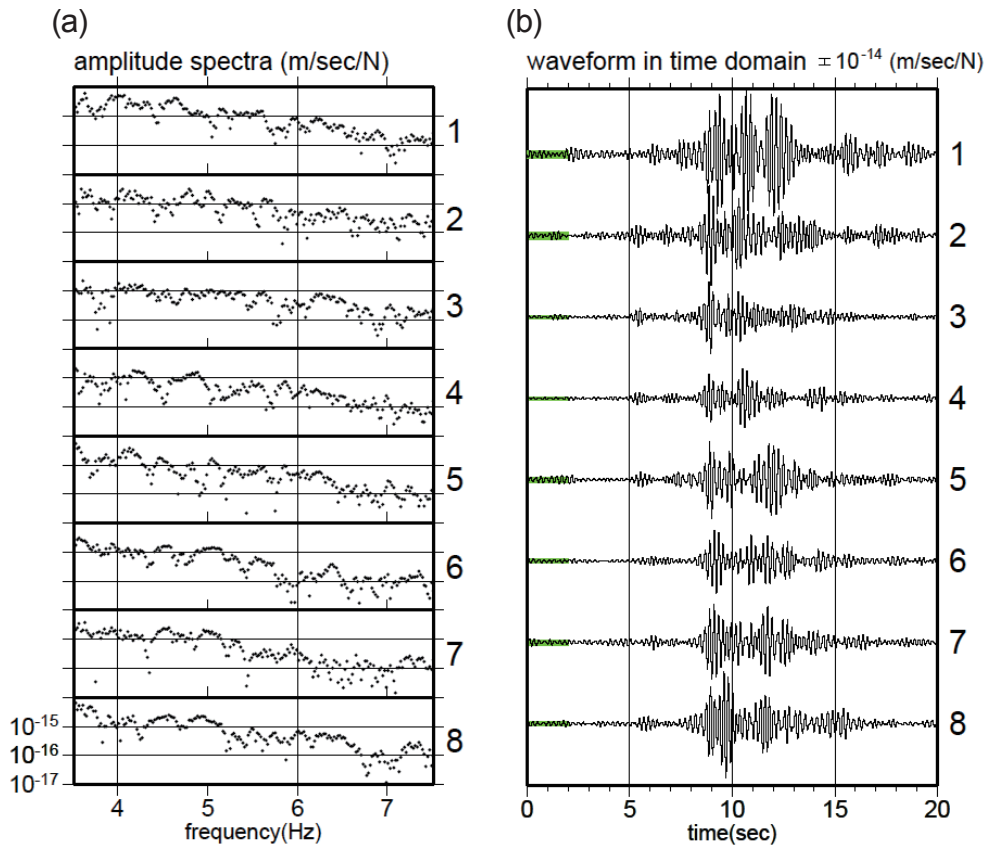


Fig. 2.4.7. Transfer functions between the ACROSS transmitter and the array for the Hrr component. (a) Amplitude spectra. (b) Waveforms in the time domain. Thin green line along each base line of 2sec indicates the estimated noise level ($\pm\sigma$).

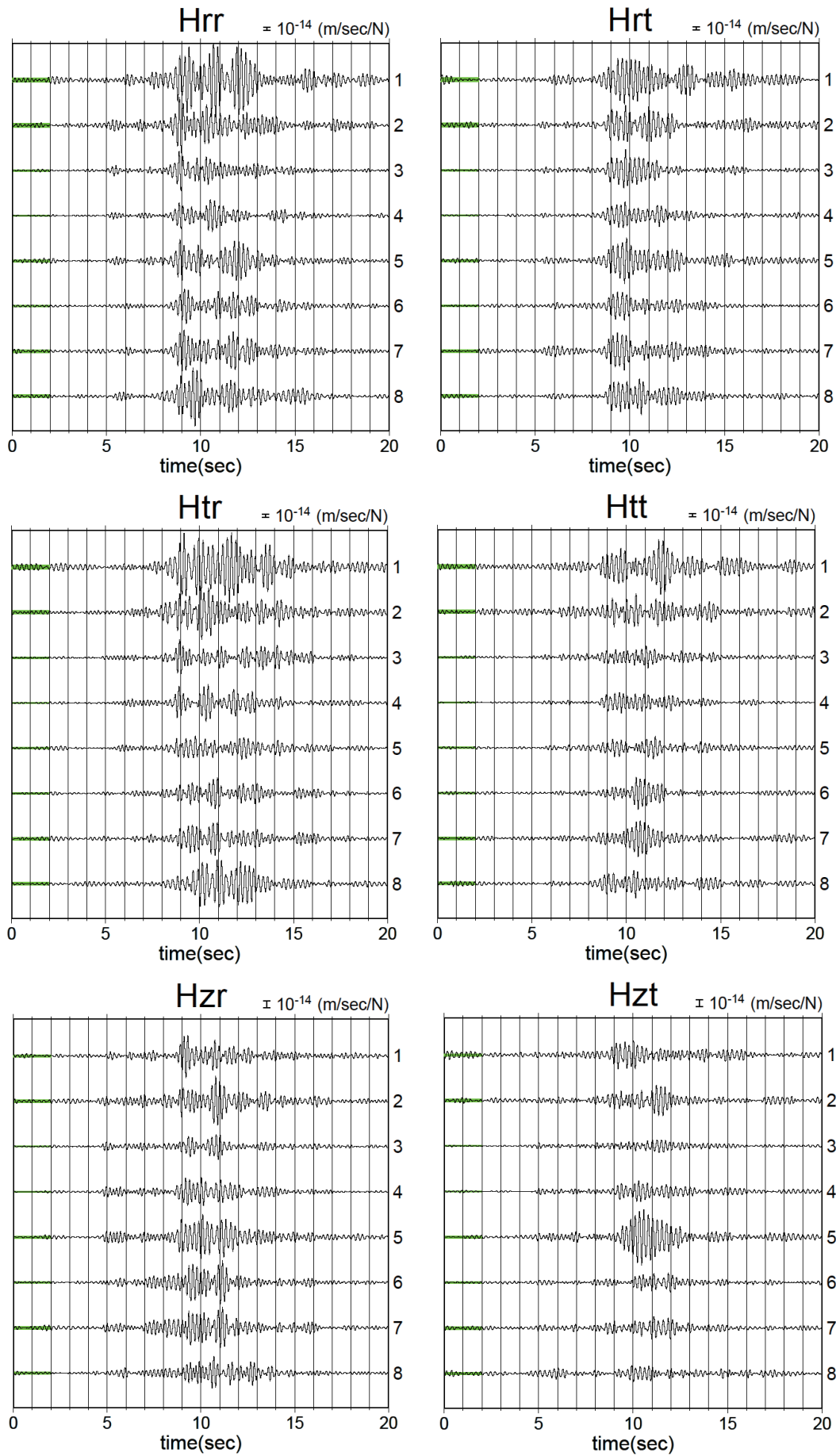


Fig.2.4.8. Six components of transfer functions between the ACROSS transmitter and the array in the time domain. Thin green line along each base line of 2sec indicates the estimated noise level $(\pm\sigma)$.

2.4.4 アレイ解析方法

アレイ観測によって得られた波形データの中から相関の高い波の到来方向とスローネスを調べる方法の一つにセンブランス法 (Neidell and Taner, 1971) がある。アレイのひろがりや震源からの距離に比べて十分に小さい場合、入射波をすべて平面波と仮定すると、センブランス値 SEM は次式で与えられる。

$$SEM(s_x, s_y, T) = \frac{\sum_{i=T-W/2}^{T+W/2} \left(\sum_{j=1}^N f_j(t_i - \tau_j) \right)^2}{N \sum_{i=T-W/2}^{T+W/2} \sum_{j=1}^N f_j^2(t_i)}, \text{ where } \tau_j = s_x \cdot x_j + s_y \cdot y_j \quad (1)$$

ここで、 N は観測点数、 $f_j(t_i)$ は j 番目の観測点で時刻 t_i に観測された振幅、 T は経過時間である。 W はセンブランスを計算する時間窓で、これを長くするとセンブランスのばらつきを押さえることができるが時間分解能は下がる。いくつかの時間窓でセンブランスを計算したところ、時間窓は 0.2sec 以上であればセンブランスのばらつきが適度に押さえられたので、時間窓は信号の周波数帯 (3.51Hz~7.51Hz) とアレイ解析の時間分解能を考慮して 0.3sec とした。 s_x, s_y はスローネスの x, y 成分、 x_j, y_j はアレイ観測点中の任意の 1 点 (今回の計算では観測点 3) を原点とした j 番目の観測点の位置 (Fig. 2.4.1(b)) を表す。スローネスベクトルの向きは、アレイからみた波の到来方向 (逆方位角) をとった。センブランスの大きいスローネスベクトルは、波形間の相関が高い入射波の到来方向とスローネスを表している。センブランスの値は、全ての観測点の波形が同一の場合には観測点数によらず、また、波形の振幅の大小に関係なく 1 となり、波形間に全く相関が無い場合には $1/N$ となる。以降の解析では、任意の時刻における波群のスローネスベクトルを求めるために、(1)式に従い、時間窓 0.3sec 内のデータに対して、-1.0sec/km から 1.0sec/km の範囲の s_x, s_y の組み合わせについてのセンブランスのコンターマップを作成した。そして、時間窓 0.3sec を 0.1sec 間隔でずらして、スローネス空間上でセンブランスが最大となる逆方位角とスローネスの時間変化を調べた。また、送信装置方向におけるスローネスの時間変化を調べるため、アレイに到来する波のセンブランスを送信装置方向に投影して、スローネスと時間を関数としたセンブランスのコンターマップを作成した。

特定の方向に特定のスローネスで伝わる平面波を強調するためのデータ処理としてスラントスタックがある (例えば、松本, 2001)。スラントスタックとは、相関の高い (センブランスの大きい) 波群のスローネスベクトルから得られる各観測点の位相差を使って、波形をずらしてスタックすることにより、その波群の平面波が強調された波形を得る手法である。本研究では、スラントスタックは周波数領域で行った。一般に地震計 N 点の波形データを使ってスタックすると、1 点のみでスタックした場合に比べて、同じ SN 比を得るためのスタック時間は $1/\sqrt{N}$ になり、波群の走時変化の検出の時間分解能が向上することが期待できる。

2.4.5 アレイ応答

アレイの口径、形状、地震計の数・間隔などのパラメータの設定によって、アレイに到来する波のみかけスローネスベクトルの分解能が決まる。これらのパラメータがアレイの能力にどのくらい寄与するのかを表す指標のひとつに、次式で表されるアレイレスポンス関数 (例えば、Johnson and Dudgeon, 1993) がある。

$$R(k_x, k_y) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{N} \exp(ik_x x_n + ik_y y_n) \quad (2)$$

ここで、 N は観測点数、 k_x, k_y は波数の x, y 成分、 x_n, y_n は観測点の位置を表す。アレイで観測されるのは、地表における波動場に空間的な窓としてアレイレスポンス関数をかけた波動場である。今回設置したアレイについて、3.5Hz, 5.5Hz, 7.5Hz における(2)式のアレイレスポンス関数をスローネス空間で表示したものを Fig. 2.4.9 に示す。一般に、アレイの観測点数が増えるほど SN 比が向上してサイドロブが抑えられ、アレイの口径が大きくなるほどメインロブが鋭くたちあがり、スローネ

スペクトルの分解能が向上する。Fig. 2.4.9 をみると、周波数が高いほど、メインロブの立ち上がりが鋭く分解能が高い。アレイが東西方向 (x 軸) に伸びた形状になっているため、アレイレスポンス関数のピークはそれと直交する南北方向 (y 軸) に伸びている。つまり、南北方向の分解能は低い。アレイレスポンス関数の方位依存性をなくすには円状や三角型のアレイが適切であるが、実際の観測では設置場所の制約からアレイの形状を自由に取ることは難しい。そこで、今回のアレイの形状は、送信装置方向に伸ばしてその方向の分解能を高くし、かつ、空間的にある程度ばらつきをもたせて送信装置方向以外から到来する波も識別できるように考慮した。

送信装置方向から到来するスローネスを 0.2sec/km と仮定し、3.5Hz, 5.5Hz, 7.5Hz のそれぞれの正弦波 1 周期で構成された平面波がアレイに入射した場合のスローネス空間におけるセンブランス分布 (篠原・他, 1990) を Fig. 2.4.10 に示す。周波数が高いほどメインロブの幅が狭く分解能が高くなり、どの周波数の場合もほぼ仮定したスローネスベクトルが得られている。センブランスのピークは送信装置方向とは直交する方向に長軸をもつ楕円形をしており、この長軸方向は分解能が最低であることを示している。送信装置方向のスローネスは、半値幅で 0.4sec/km 程度の分解能である。分解能がこの程度となったのは、設置した場所の制約のためアレイの口径が小さくなったためである。口径が小さいと地震計の間隔が狭くなり波形の相関が高くなると考えられるが、観測された伝達関数 (Fig. 2.4.8) は観測点間で不揃いである。

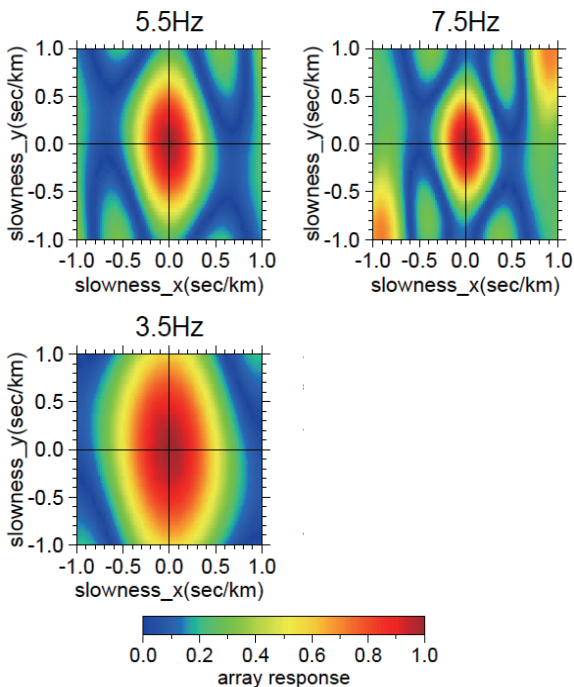


Fig. 2.4.9. Array response function defined by equation (2) as a function of s_x and s_y for 3.5Hz, 5.5Hz, and 7.5Hz.

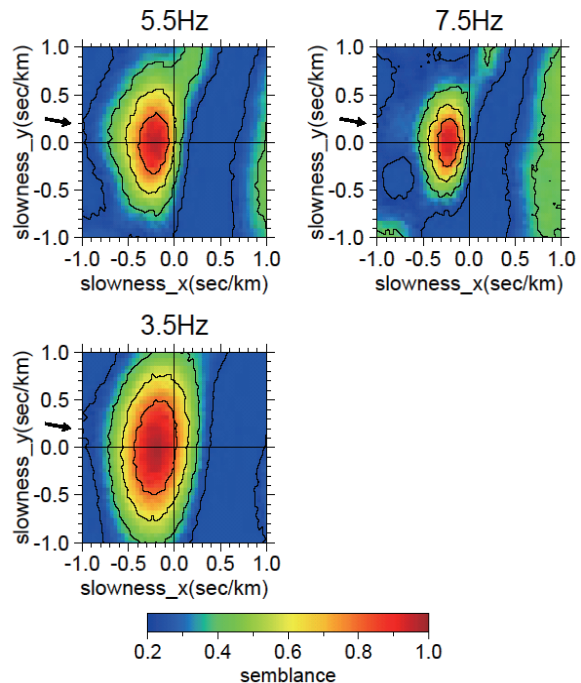


Fig. 2.4.10. Theoretical distribution of semblance as a function of s_x and s_y for a plane wave that has an apparent slowness of 0.2sec/km and arrives from the ACROSS transmitter. The plane wave consists of one cycle of a sinusoidal wave of 3.5Hz, 5.5Hz, and 7.5Hz. The arrows indicate the direction from the ACROSS transmitter to the array. The contour interval is 0.2.

Fig. 2.4.11(a)に示す3次元速度構造 (勝間田・他, 2008) に基づく波線追跡によると、送信装置からアレイへ伝播すると推定される平面波は、直達波、上部地殻からの屈折波、コンラッド面からの反射波、フィリピン海プレートからの反射波である。それぞれの平面波に対するアレイにおけるスローネスベクトルを Fig. 2.4.11(b)に示す。推定されたスローネスベクトルの方向はほぼ送信装置方向を指しており、直達波と入射角の小さい地殻深部からの入射波は識別可能と考えられる。アレイの観測点間隔が信号の 1/2 波長を越えると空間的なエイリアシングが生じる。3次元速度構造より推定される平面波のスロ

一ネスは 0.07~0.4sec/km と推定され、送信信号の最大周波数 7.51Hz の場合の 1/2 波長は 160m~900m となるので、直達波や地殻深部からの反射波については空間的なエイリアシングは避けられると考えられる。

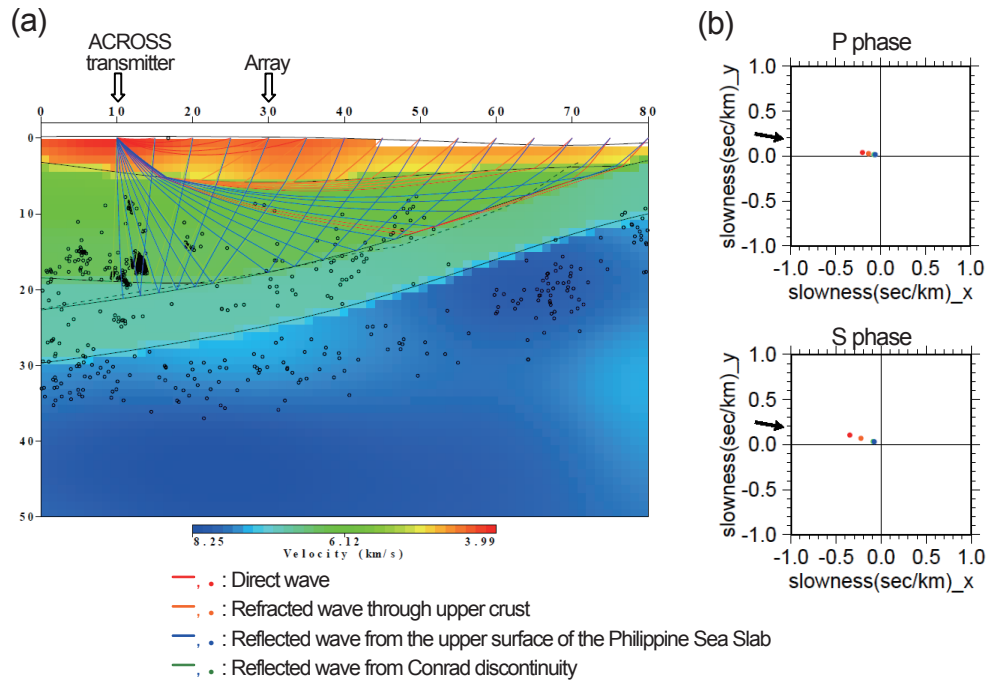


Fig. 2.4.11. (a) Ray tracing based on a three-dimensional P wave velocity structure. Black circles denote hypocenters of $M \geq 1.0$ earthquakes (2007/1/1 to 2008/12/31) relocated by the three-dimensional structure. (b) Slowness vector estimated by (a). The solid arrows indicate the direction from the ACROSS transmitter to the array.

2.4.6 アレイ解析の結果と考察

実際に記録された自然地震についてセンブルランス解析を行い、今回のアレイの応答を調べた。Fig. 2.4.12 に解析に用いた地震の震央、上下・東西成分の地震波形データとそのセンブルランス解析結果を示す。JMA2001 (上野・他, 2002) に基づく P 波、S 波の理論走時を赤線で示している。地震波形データには、送信装置の送信周波数帯域 (3.51Hz~7.51Hz) のバンドパスフィルターをかけた。上下成分の P 波初動付近と東西成分の S 波初動付近では、センブルランスが大きく、逆方位角は震源方向を向き、スローネスは P 波で 0.2sec/km、S 波で 0.5sec/km と値が安定している。これらの後続波には、センブルランスが特に大きな波群はみられず、逆方位角とスローネスのばらつきも大きい。これらの結果から、アレイによって直達波の平面波成分が同定され、その後続波はアレイ付近の不均質構造による散乱によって観測点間の相関が低くなったと推定される。

Fig. 2.4.13 に、伝達関数 6 成分のうち Hrr、Htt、Hzz の各成分についてセンブルランス解析を行った結果を示す。図には 3 次元速度構造モデル (Fig. 2.4.11) から推定された理論走時と理論スローネスベクトルを合わせて示し、時間波形の直下には送信装置方向におけるスローネスと時間を関数としたセンブルランスのコンターを載せてある。センブルランス解析には、波形データの十分な SN 比が必要である。2.4.3 項で述べた伝達関数のスペクトルをみると、概ね 2 以上の SN 比が得られている。また、Fig. 2.4.13 をみると、実体波が到着する前のノイズ区間だけでセンブルランスを計算した場合に、目だって高いセンブルランスは存在しない。Fig. 2.4.13 には、センブルランスが大きい区間 (時間窓 0.3sec) を a~g とし、それぞれの区間のスローネス空間図には、区間 b と d では S 波の理論スローネスベクトルを、それ以外の区間では P 波の理論スローネスベクトルを載せてある。地震波が単純な水平成層構造を伝播する場合、P 波及び SV 波は Hrr または Hzz に、SH 波は Htt に卓越すると考えられる。Hzz の走時 5.0sec (区間 e) のセンブルランスが大きい (観測点間の相関が高い) 波群は、走時、逆方位角、スローネス共に P 波の理論値と同程度である。Hrr と Htt の走時 6.0sec 付近 (区間 a と c) と Hzz の走時 7.1sec (区間 f) の波群は、

センブリランスが大きいことから、平面波としてアレイに入射していることが分かる。これらの平面波は、3次元速度構造から計算したスローネスベクトルと比べると、スローネスが大きく（入射角が大きく）、逆方位角が送信装置の方向とは異なることから、地殻浅部で反射して伝播したと考えられる。H_{zr}の走時7.6sec（区間g）の波群は、逆方位角が送信装置を向き、スローネスが直達P波よりも小さい（入射角が小さい）ことから、地殻深部を伝播した波であると考えられる。この波群はコンラッド面またはフィリピン海プレート上面からの反射波の理論走時にあたるが、スローネス0.12sec/kmは理論値0.07sec/kmよりも大きい。この波群がフィリピン海プレート上面からの反射波であるかどうか確認するためには、この波群が広域に認められ、それが走時の上から反射波として整合的であることを確認する必要があると考えられる。H_{rr}とH_{tt}の走時8.4sec（区間bとd）のセンブリランスが大きい波群は、走時、逆方位角、スローネス共にS波の理論値と同程度で値が安定している。S波の後続波は、H_{rr}、H_{zr}、H_{tt}共に振幅が大きいがセンブリランスは小さい（観測点間の相関が低い）ことから、アレイ付近の不均質構造に起因した散乱波が卓越したと考えられる。

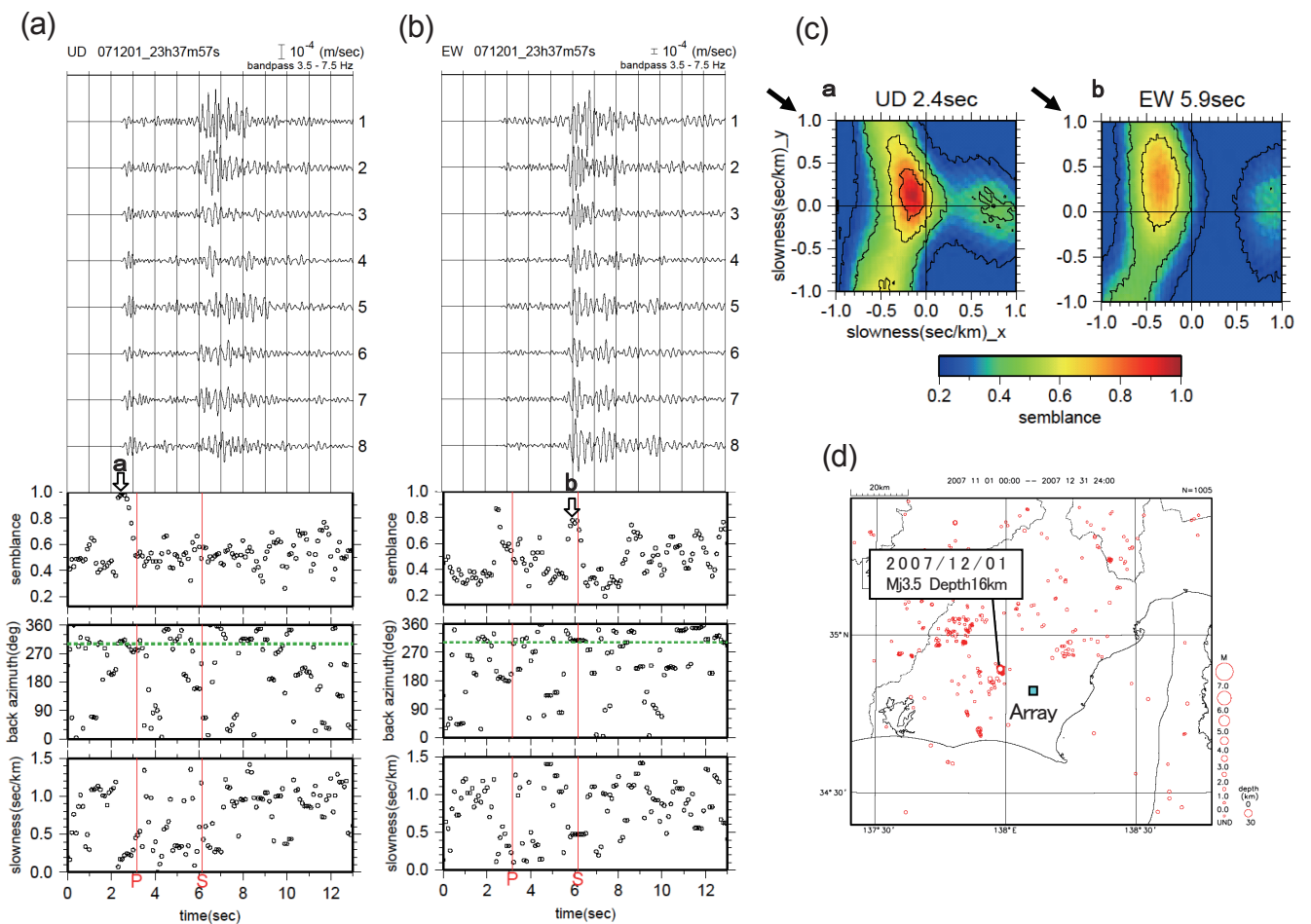


Fig. 2.4.12. (a) Results of semblance analysis for the UD component waveforms of the natural earthquake presented in (d). Top: Band-pass-filtered (3.51Hz to 7.51Hz) seismograms at the array. Bottom: Time series of maximum semblance value for variables of s_x and s_y . The back azimuth is defined as $\tan^{-1}(s_y/s_x)$ where s_x and s_y give the maximum semblance, and slowness is defined as $(s_x^2 + s_y^2)^{1/2}$. The red P and S symbols and the solid lines indicate theoretical travel time based on a one-dimensional velocity model. The green dashed line indicates the direction from the array to the epicenter. (b) Results of semblance analysis for the EW component. (c) Distribution of semblance as a function of s_x and s_y at lapse times (a and b) in (a) and (b). The diagrams a and b are for the time window of 0.3sec duration. The solid arrows indicate the direction from the epicenter to the array. The contour interval is 0.2. (d) Map of locations of seismic array and the epicenter used for semblance analysis in Fig. 2.4.6.

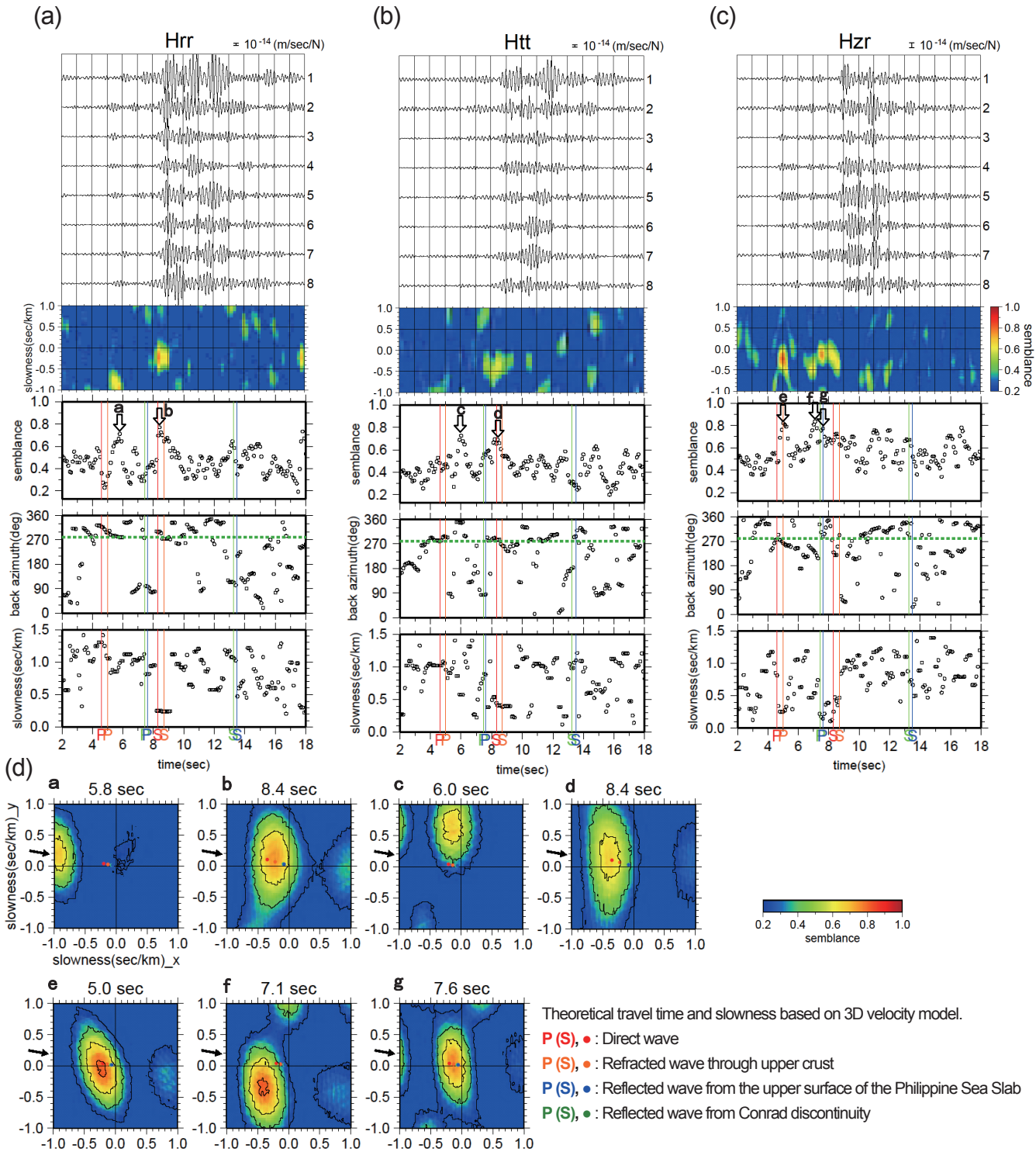


Fig. 2.4.13. (a) Results of semblance analysis of the transfer function for the Hrr component. Top: Waveforms of the transfer function at the array. Middle: Distribution of semblance as a function of slowness and lapse time, where slowness is the radial component of the slowness vector. Bottom: Time series of maximum semblance value for variables of s_x and s_y . The back azimuth is defined as $\tan^{-1}(s_x/s_y)$ where s_x and s_y give the maximum semblance, and slowness is defined as $(s_x^2 + s_y^2)^{1/2}$. The colored P and S symbols and the solid lines indicate P wave and S wave theoretical travel times based on the three-dimensional velocity model (Fig. 2.4.11). The green dashed line indicates the direction from the array to the ACROSS transmitter. (b) Results of semblance analysis of the transfer function for the Htt component. (c) Results of semblance analysis of the transfer function for the Hrz component. (d) Distribution of semblance as a function of s_x and s_y at lapse times (a ~ g) in (a), (b), and (c) for the time window of 0.3sec duration. The solid arrows indicate the direction from the ACROSS transmitter to the array. The contour interval is 0.2.

H_{zr} に対してスラントスタックを行った結果を Fig. 2.4.14 に示す。逆方位角は送信装置の方向を仮定した。スローネス 0.12sec/km を仮定すると、フィリピン海プレート上面からの反射波の可能性のある走時 7.6sec 付近の波形が強調されている。このように、アレイ観測によって性質が明らかとなった平面波を対象としたスラントスタックを行うと、SN 比が向上し、平面波の走時の時間変化の検出精度が向上することが期待される。

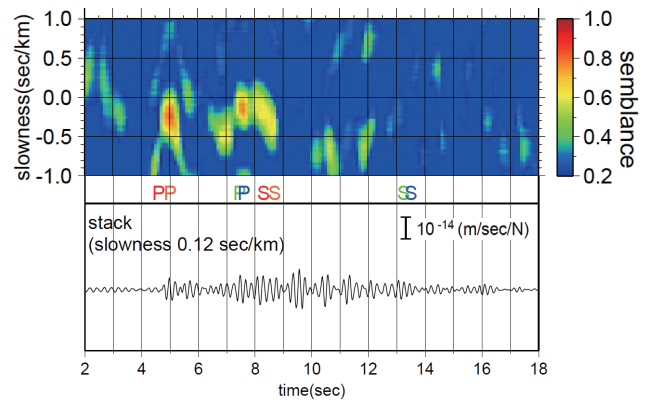


Fig. 2.4.14. Top: Distribution of semblance presented in Fig. 2.4.13(c). Bottom: Examples of slant stacking for the H_{zr} component waveforms in the direction from the array to the ACROSS transmitter with slowness 0.12sec/km. The colored P and S symbols indicate P wave and S wave theoretical travel time based on the three-dimensional velocity model (Fig. 2.4.11).

2.4.7 まとめ

短スパンの地震計アレイ観測を行い、森町弾性波アクロス送信装置から送信される信号を捕らえ、その性質を調べた。今回のアレイは口径が小さいにもかかわらず、観測点間の波形の相関が悪くスローネスの分解能が低い、いくつかの相関のある平面波を検出した。P 波、S 波の初動付近では直達波または上部地殻からの屈折波、P 波の後続波では地殻浅部からの反射波及び地殻深部を伝播したと推定される平面波を同定した。これらの平面波以外の S 波の後続波には、アレイ付近の不均質構造に起因した散乱波が卓越していると考えられる。また、同定した波群の SN 比がアレイ処理によって向上することを示した。今後 Hi-net のような定常観測点の周辺でアレイ観測を行い、伝播経路を特定して波群の SN 比を向上させ、地下状態の時間変化の検出精度向上に寄与したい。

(岩切一宏)

謝辞

地震計の設置場所の利用については、静岡県防災局及び静岡空港建設事務所に多大なる協力を頂きました。観測及び解析結果の議論にあたっては、静岡大学の藤井直之氏、熊澤峰夫氏、國友孝洋氏、里村幹夫氏、伊藤広和氏他、名古屋大学の渡辺俊樹氏他、に協力を頂きました。地震計位置の GPS 測位データは気象研究所の高木朗充氏に解析して頂きました。Fig. 2.4.1(a)の標高データは国土地理院の数値地図 250m メッシュ (標高)、水深データは日本海洋データセンターの資料を使用しました。

参考文献

- Johnson, D. H. and D. E. Dudgeon, 1993 : Array signal processing —Concepts and techniques—, Prentice Hall., 533p.
- 勝間田明男・吉田康宏・岩切一宏, 2008 : 弾性波アクロス送信波のフィリピン海プレート境界反射点, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会予稿集, O135-003.
- 町田 洋・松田時彦・梅津正倫・小泉武栄, 2006 : 「日本の地形 5 中部」, 東京大学出版会, 385p.
- 松本 聡, 2001 : 地震計アレイ観測に基づく不均質構造の推定, 地震 2, **54**, 193-201.
- 長尾大道・中島崇裕・熊澤峰夫・國友孝洋, 2004 : 最適重みつきスタッキング法による最大 SN 比を持つアクロス伝達関数の取得, 月刊地球, 号外 **47**, 53-60.
- Neidell, N. S. and M. T. Taner, 1971 : Semblance and other coherency measures for multichannel data, *Geophysics*, **36**, 486-497.

- Saiga, A., K. Yamaoka, T. Kunitomo, and T. Watanabe, 2006 : Continuous observation of seismic wave velocity and apparent velocity using a precise seismic array and ACROSS seismic source, *Earth Planets Space*, **58**, 993-1005.
- 篠原雅尚・平田 直・ト部 卓・浅沼俊夫, 1990 : 伊豆半島熱川における小規模アレイ観測による散乱体の推定, *地震*, **2**, 43, 471-482.
- 上野寛・畠山信一・明田川保・舟崎淳・浜田信生, 2002 : 気象庁の震源決定の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—, *験震時報*, **52**, 11-19 .