

12 - 21 アクロスによるプレート境界状態変化検出の試み

A trial for detection of temporal change at plate boundary using seismic ACROSS transmitter

気象庁・気象研究所，名古屋大学
Meteorological Research Institute, Nagoya University

プレート境界で発生する大地震の予測を行うためには，プレート境界状態変化を検出する必要がある．状態変化の1つの指標として，プレート間の固着強度（カップリングレート）の変化が有効であることが最近の研究によって明らかになってきている．エアガンと海底地震計を用いた構造探査により，GPS のデータ解析から得られたプレート境界がずるずる滑っている（固着強度が弱い）領域のほうが，境界面からの反射効率が高いことがわかってきた¹⁾．また，岩石実験より，断層を横切る弾性波の振幅（透過係数）は断層面の摩擦強度と比例関係があることも明らかになってきた²⁾．以上のことより，プレート境界面からの反射波の反射強度が状態変化検出のための有効なパラメータであることがわかる．

プレート境界反射波の強度変化を監視する手段として，我々は弾性波アクロス送信装置を用いた検出方法の開発を行っている．弾性波アクロス送信装置は精密に制御された弾性波を地中に放射し，その時間変化を精度高く監視するために開発された装置である³⁾．偏心錘を精密に制御して回転させることにより，地中に弾性波エネルギーを照射する．この装置の主な特徴には以下のような事柄がある．

1. 回転はGPS時計に基づいて精密に制御されているため，時刻精度の高い信号を送信できる．このため非破壊の微弱信号でも，長期にわたる重合（スタッキング）を行うことでSN比を上げることが可能である．
2. 送信信号が正確にわかっているため，時間変化はすべて伝播媒質の変化と考えることができ，長期間にわたりモニタリングを行うことが可能である．
3. 錘を2時間毎に時計回り，反時計回りと回転方向を反転させている．両者を合成することで任意の方向に直線加振した記録ができ，伝達関数をテンソルとして求めることができる．

以上のことより，アクロス装置は長期にわたる反射強度の精密な監視に適していることがわかる．

我々はプレート境界状態変化を検出するためのテストフィールドとして，東海地域を選んで観測を行っている．東海地域はフィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界面において大地震が規則的に起きている．また，東海地震の震源域と予想されている地域は陸の下か，陸に非常に近く，真上に多数の地震計が設置されている，という利点がある．この地域に気象研究所，日本原子力研究開発機構（JAEA），名古屋大学は4台の弾性波アクロス送信装置を展開して，プレート境界の面的能動監視を行っている．第1図に送信装置の設置位置を示す．森町に1台，土岐に1台，豊橋に2台設置している．

送信周波数は4台の送信装置毎に異なるが，3～20Hzの帯域に収まっている．第2図に各送信装置の送信信号のスペクトルを示す．送信信号は周期50秒の周波数変調波で，2時間毎に偏心錘の回転方向を反転している．地震計のデータは400秒の時間長を1つのセグメントとして，重合を行う．このため，データのスペクトルは0.0025Hz間隔，信号スペクトル間隔は0.02Hzとなり，周

波数領域で信号スペクトルは8個に1個の割合で現れる。信号スペクトルの位置をずらすことにより、同一周波数帯域の信号であっても混信することなく、最大8点で送信可能であり⁴⁾、実際に東海地域に設置してある4つの弾性波アクロス送信装置の信号を識別できる⁵⁾。例としてHi-netの鳳来(N.HOUH)の南北動の記録を約4ヶ月間重合したスペクトルを第3図に示す。震央距離は森町が34km、土岐が56km、豊橋が30kmである。4台のアクロス装置から送信された信号を分離できていることがわかる。

プレート境界付近を通ってくる波を用いて、(伝達関数の)波形変化を見れば、ノイズレベル以上の変化があれば状態変化を検出できることになる。しかし、Hi-netのように観測点間隔が10km以上離れていると、高周波(1Hz以上)では隣接観測点間で位相を追う事ができない。このため、伝達関数の各相が地球内部のどの部分を通ってきた波であるかを同定するのが困難となる。相の同定を行うためにはアレイ観測や稠密観測をして、観測点間距離を短くし、同一相を追跡して波の性質を明らかにする必要がある。東海地域では2008年4月から約4ヶ月間森町と土岐の送信点を結ぶような測線で短周期地震計約80台をほぼ1km間隔で設置して臨時稠密地震観測を行った⁶⁾。このデータを用いて、森町送信点との間の伝達関数を求めた結果⁷⁾を第4図上図に示す。S波のエネルギーが大きい伝達関数のHtt成分(transverse方向に加振してtransverse成分で観測)を図示してある。S波の初動だけでなく、後続波についても幾つか波群を追跡できることがわかる。プレート構造を仮定して波線追跡を行い⁸⁾(第4図下図)走時を計算して第4図上図に書き入れた。プレート境界からの反射波の走時曲線を青点線で示してある。幾つかの観測点間で反射波と思われるコヒーレントな波が捉えられている。

深部低周波微動に伴う伝達関数の時間変化を見た例として土岐送信点・鳳来観測点(N.HOUH)間の例を第5図に示す⁹⁾。3ヶ月間重合した記録を1ヶ月ずつずらして伝達関数(Hzr:radial方向に加振して鉛直成分で観測)を計算した。term間で位相がそろっていると思われる波群について走時順に取り出して、(A)~(G)と名前を付けた。プレート構造を仮定して波線追跡を行った⁸⁾(第5図(e))ところ、プレート境界からの反射波(第5図(b)の(G)波群)は深部低周波微動が起きている部分を通ってきていることがわかった。後続波である(E)~(G)の波群について時間変化を調べたところ、走時の変化は2005年夏と2006年冬の深部低周波微動が活発な時期¹⁰⁾で逆センスに出ているが(第5図(d))、波群のエネルギーは両期間とも増加している(第5図(c))ことがわかる。これは微動に伴ってプレート境界面の反射係数が増加している可能性を示している。

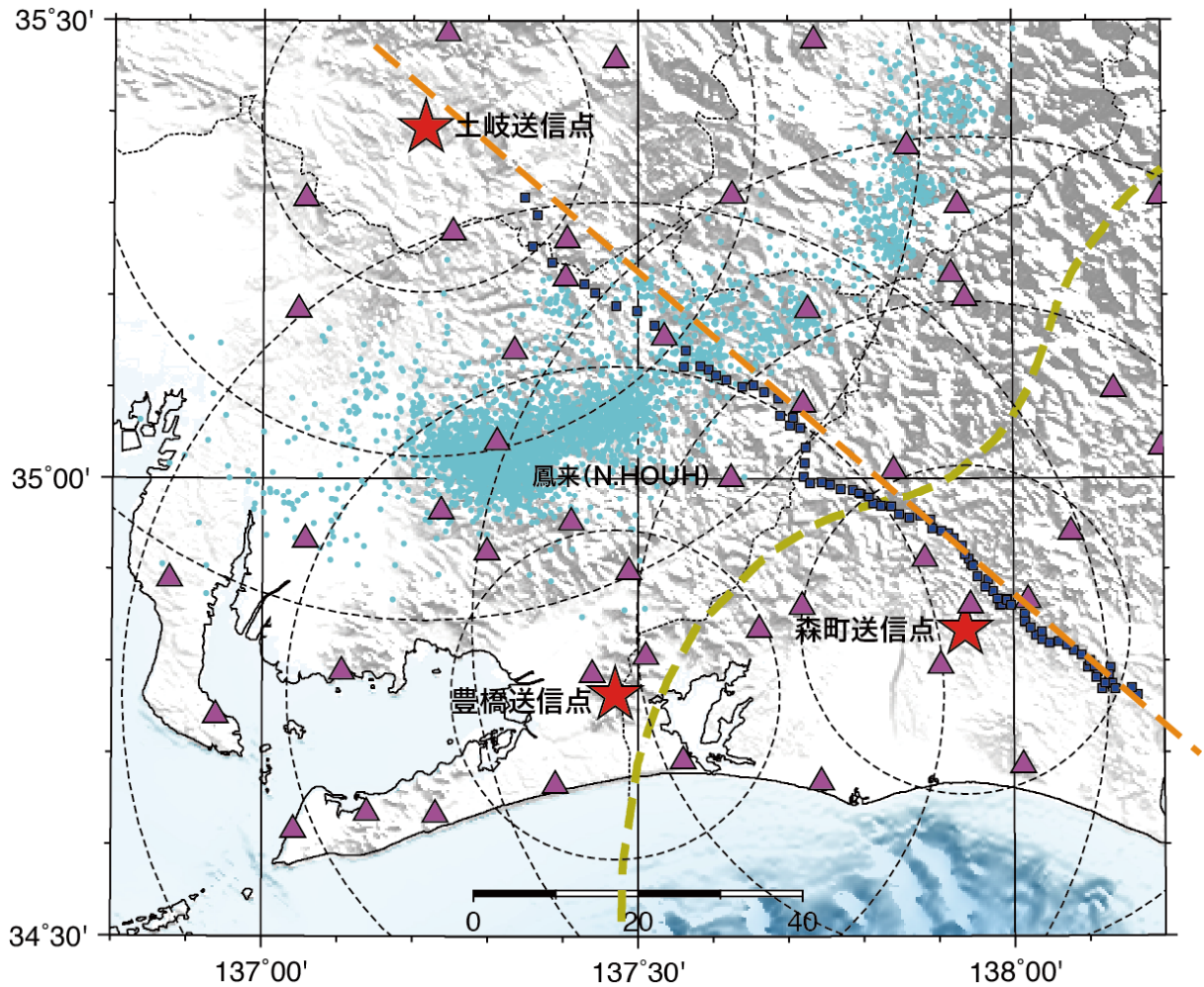
謝辞

伝達関数を求める際に防災科学技術研究所のHi-net及び気象庁の地震観測点の波形データを使用した。図中で示した地震の震源は気象庁が決定した一元化震源を用いた。

参 考 文 献

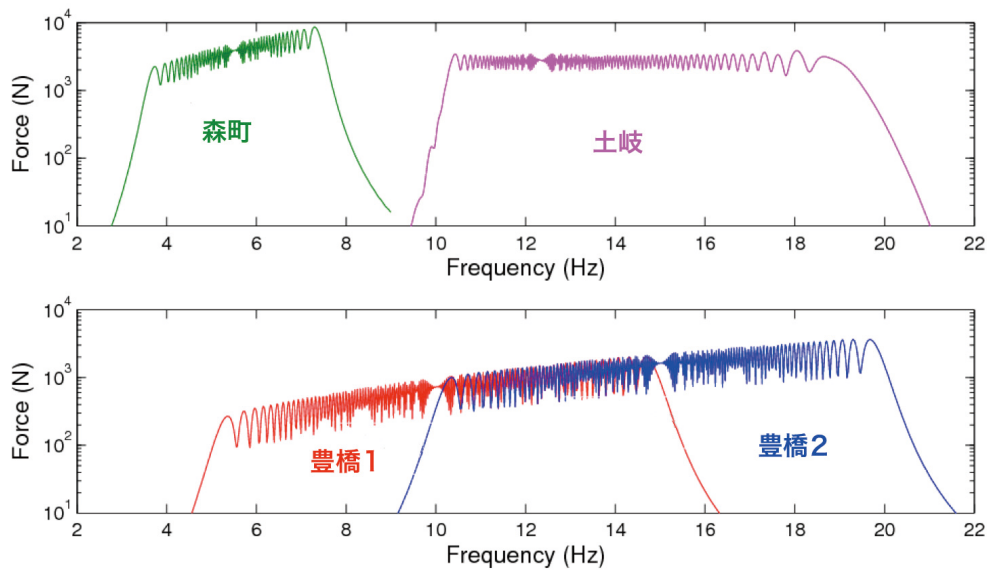
- 1) Mochizuki, K., M. Nakamura, J. Kasahara, R. Hino, M. Nishino, A. Kuwano, Y. Nakamura, T. Yamada, M. Shinohara, T. Sato, P. P. Moghaddam, and, T. Kanazawa, Intense PP reflection beneath the aseismic forearc slope of the Japan Trench subduction zone and its implication of aseismic slip subduction, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi:10.1029/2003JB002892, 2005.

- 2) Nagata, K., M. Nakatani, and S. Yoshida, Monitoring frictional strength with acoustic wave transmission, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, doi:10.1029/2007GL033146, 2008.
- 3) 國友孝洋・熊澤峰夫 (2004), 弾性波アクロスによる地殻構造アクティブモニタリングー弾性波アクロスにおける送受信技術ー, 月刊地球, 号外 47, 44-52.
- 4) 國友孝洋 (2006), 弾性波アクロス送信規約試案ー中部地域における送信周波数の割り当てー, 日本地震学会講演予稿集 2006 年秋季大会, C027, 2006.
- 5) 山崎賢志・渡辺俊樹・山岡耕春・羽佐田葉子・中道治久, 鳳来アレイ観測による弾性波 ACROSS 信号の解析, P2-51, 2009.
- 6) Kato, A., T. Iidaka, R. Ikuta, Y. Yoshida, K. Katsumata, T. Iwasaki, S. Sakai, C. Thurber, N. Tsumura, K. Yamaoka, T. Watanabe, T. Kunitomo, F. Yamazaki, M. Okubo, S. Suzuki, and N. Hirata, Variations of fluid pressure within the subducting oceanic crust and slow earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, doi:10.1029/2010GL043723, 2010.
- 7) 吉田康宏・勝間田明男・國友孝洋・岩切一宏・加藤愛太郎・飯高隆・生田領野・勝俣啓・岩崎貴哉・酒井慎一・山岡耕春・渡辺俊樹・山崎文人・津村紀子・野崎謙治・高橋福助・大久保慎人・鈴木貞臣・平田直・熊澤峰夫, 東海臨時観測で見た森町アクロスの信号の解析, 日本地震学会講演予稿集 2009 年秋季大会, B21-02, 2009.
- 8) 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, 日本地球惑星連合 2008 年大会予稿集, O135-003.
- 9) Furukawa, T., T. Watanabe, Y. Hasada, K. Yamaoka, K. Yamazaki, and R. Ikuta, Time variation of wave phases of 2 years of ACROSS continuous transfer function observed at Hi-net Hourai station, Programme and abstract of the 7-th General Assembly of Asian Seismological Commission, Y3-223, 2008.
- 10) 防災科学技術研究所, 西南日本に発生する深部低周波微動の活動状況 [微動源推定結果に基づく], http://www.hinet.bosai.go.jp/research_result/web_tremor/, 2010.



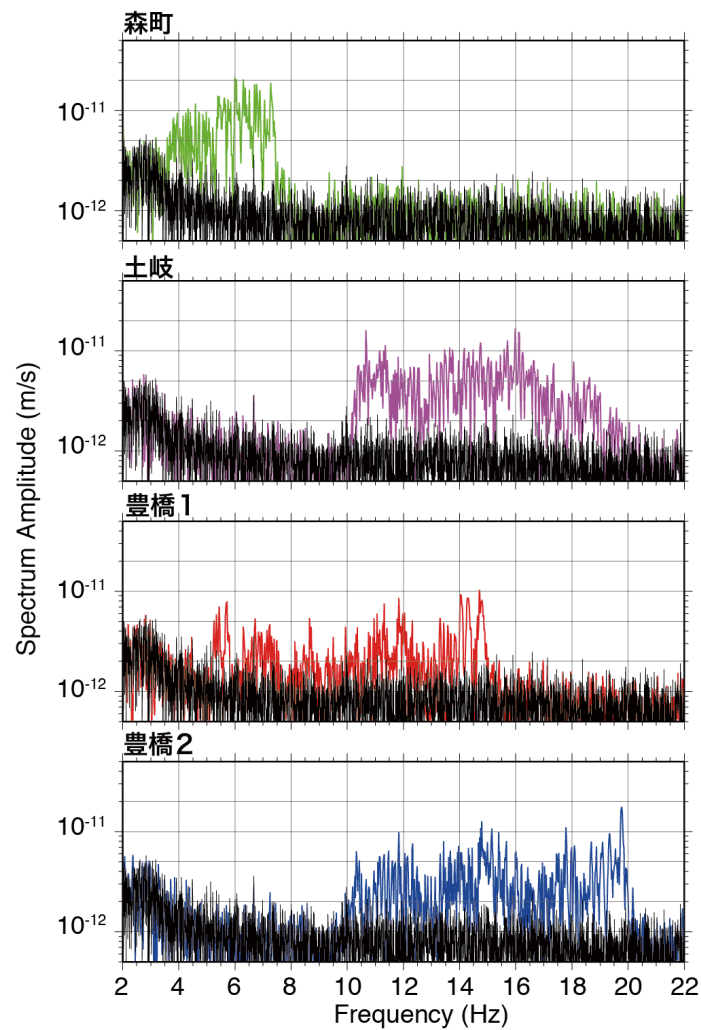
第1図 東海地域に設置してある弾性波アクロスの送信点（星印），気象庁にテレメータされている地震観測点（三角），2008年に東海地域で行われた稠密臨時地震観測（Kato *et al.*, 2010）の観測点（四角）を地図に示す。また，東海地震の想定震源域を黄色の破線，第4図に示す地震波速度構造断面を橙色の破線で示す。深部低周波地震の震央を水色の点で，各送信点から20km毎等距離線を点線で示す。

Fig. 1 Location of seismic ACROSS transmitter installed in Tokai area (stars), seismic stations telemetered to JMA (triangles), and dense linear array in 2008 consisting of temporal seismic stations (Kato *et al.*, 2010) (squares). Yellow and orange dashed lines denote the assumed rupture area of anticipated Tokai earthquake and depth section line shown in Fig. 4, respectively. Locations of non-volcanic tremor are represented by cyan dots. Equi-distance circles from seismic ACROSS transmitters for every 20km are shown by dotted lines.



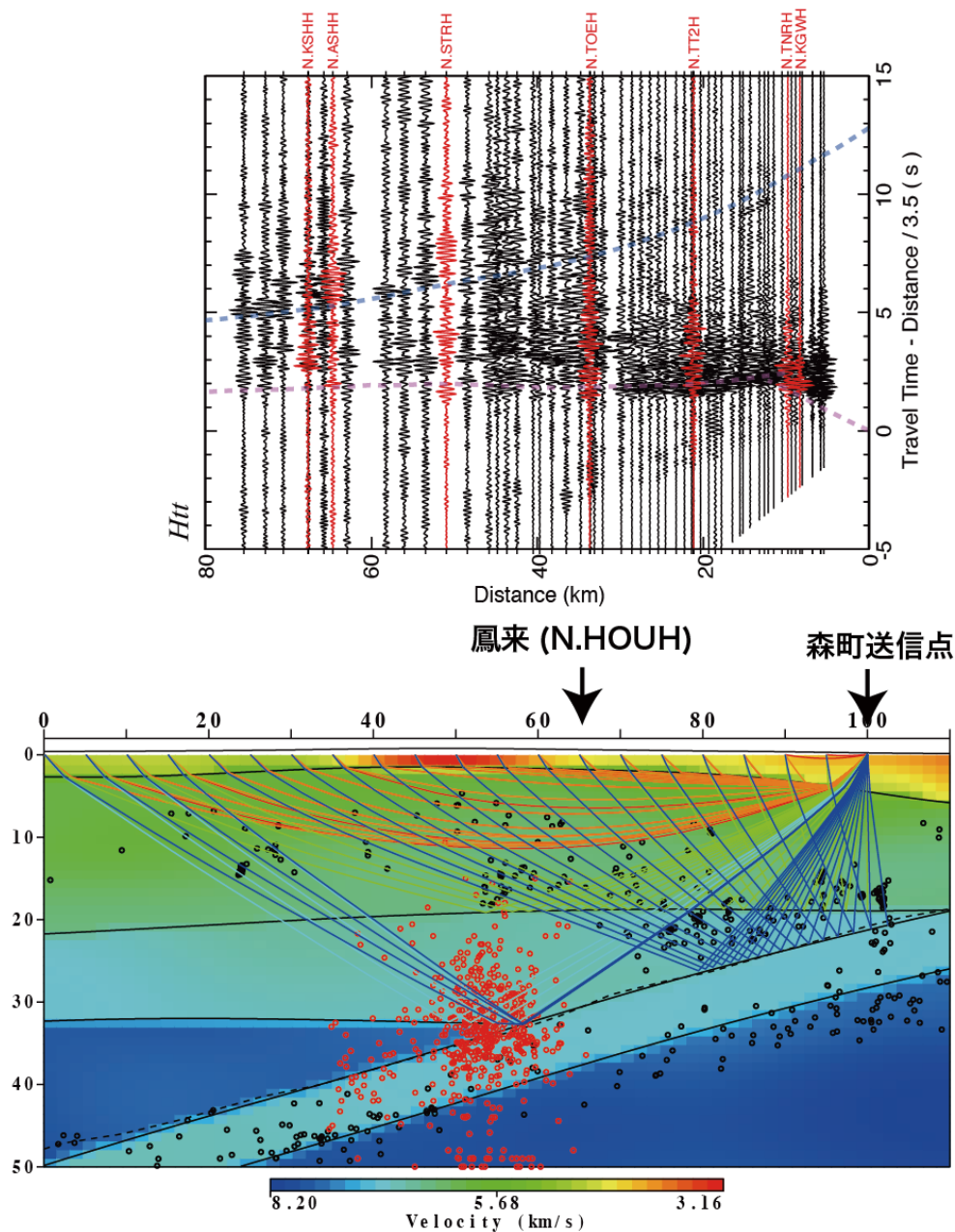
第2図 東海地域に設置してある4台の弾性波アクロス送信装置の送信信号のスペクトル. 送信装置毎に色を変えてある.

Fig. 2 Transmitted force spectra of 4 seismic ACROSS transmitters installed in Tokai area. Different colors are selected for different transmitters.



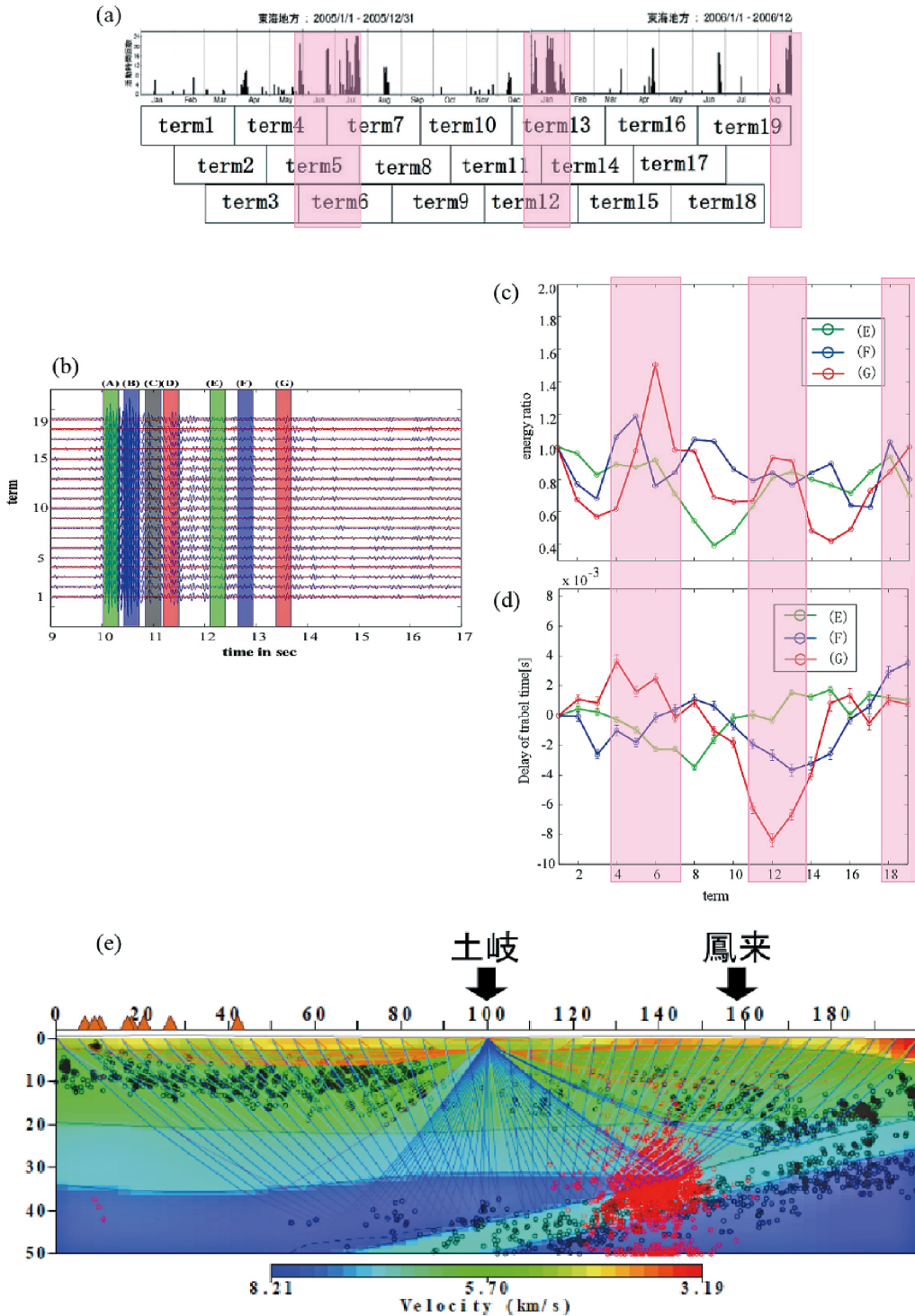
第3図 鳳来 (N.HOUH) 観測点のデータを4ヶ月間重合した記録のスペクトル. 黒線がノイズのスペクトル, 色付き線が各送信装置の信号スペクトルを示す.

Fig. 3 Spectral stacking records of N.HOUH station with 4 month. Black and colored lines represent noise and signal spectra, respectively.



第4図 (上) 東海臨時観測及び、Hi-netのデータを用いて計算した森町送信点との間の伝達関数の記録断面。3.5km/sでレデューズしてある。黒線が臨時観測点、赤線が定常観測点の波形である。点線は下図のようにS波速度構造を仮定した時の計算走時。赤点線がS直達波、青点線がフィリピン海プレート上面から反射してきた波の走時。(下) 上図の走時曲線を計算する際に用いたS波速度構造の断面図と波線。第1図の橙色の破線に沿った断面である。黒丸と赤丸は各々普通の地震と低周波地震の震源位置を示す。

Fig. 4 (Top) The record section of the transfer functions (H_{tt}: transverse-forced and transverse-observed) between the Mori-machi seismic ACROSS transmitter and temporal seismic stations and Hi-net stations. The records are reduced by 3.5km/s. Black and red waveforms are transfer functions for temporal seismic stations and Hi-net stations, respectively. Dotted lines are travel time curves calculated assuming the seismic velocity in bottom figure (red: direct S phase, blue: reflected wave at plate boundary). (Bottom) Depth section of S-wave velocity structure along the orange dashed line in Fig. 1. Black and red small circles denote normal and low-frequency earthquakes, respectively.



第5図 鳳来 (N.HOUH) と土岐送信点間の伝達関数の時間変化. ピンク色に網掛けしてあるのは深部低周波微動が活発だった時期を示している. (a) 東海地域で起きた深部低周波微動の日別頻度分布 (10) と各 term の期間. (b) 各 term の伝達関数 (Hzr). (c) (b) で示した (E)~(G) の時間の伝達関数の term 1 の関数に対する波のエネルギー比. (d) (b) で示した (E)~(G) の時間の伝達関数の term 1 の関数に対する波の遅れ時間. (e) 走時を計算する際に用いた N.HOUH と土岐送信点を結ぶ断面の P 波速度構造と波線. 青線がフィリピン海プレート及び陸側モホ面からの反射波の波線, 黒丸と赤丸は各々普通の地震と低周波地震の震源位置を示す.

Fig. 5 Temporal change of transfer function between Toki transmitter and Hi-net N.HOUH station. Pink shaded area corresponds to the active period of non-volcanic tremor. (a) Daily activity of non-volcanic tremors (10), and definition of terms used in this paper. (b) Transfer function (Hzr: radial-forced and vertical-observed) for each term is displayed along vertical axis. Energy ratio (c) and travel time delay (d) for wavelets (E) - (G). Transfer function determined in term 1 is used as a reference. Depth section of P-wave velocity structure along the Toki transmitter and N.HOUH line. Blue lines denote the seismic rays reflected at the plate boundary. Black and red small circles denote normal and low-frequency earthquakes, respectively.