

12 - 23 防災科研におけるモニタリング手法高度化への取り組み

Development of advanced monitoring methodologies for interplate slip at NIED

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

防災科研ではこれまでに、基盤的地震観測網による連続観測や、機動的な臨時観測等によって、深部低周波微動¹⁾、スロースリップイベント (SSE)^{2,3)}、深部・浅部超低周波地震 (VLFE)^{4,5)}等のスロー地震や、繰り返し地震のモニタリング⁶⁾、およびそれらの発生場を知るための詳細な地下構造の推定^{7,8)}等を行ってきた。

本稿では、防災科研で現在進めている多項目のモニタリング手法高度化・地下構造推定の高精度化への取り組みのうち、(1) 地殻変動データに基づく短期的 SSE の自動検出：(2) 浅部 VLFE の高精度震源推定：(3) 詳細な微動分布とエネルギー放射の時空間変化の理解を目的とした臨時アレイ観測計画：について紹介する。

(1) 地殻変動データに基づく短期的 SSE の自動検出

防災科研では、高感度地震観測網 Hi-net に併設されている高感度加速度計水平動成分のデータに基づき地殻傾斜観測を行っている。西南日本の深部低周波微動発生領域では活発な微動活動に伴い傾斜変動が観測される場合があり、沈み込むプレート境界面上での SSE によってこの地殻変動が生じていると考えられる^{2,3)}。この短期的 SSE の傾斜変動は非常に小さく、最大でも $0.1 \mu\text{rad}$ 程度と、気圧変動や降雨等によるノイズに容易に埋もれてしまうレベルであり、現状では深部低周波微動の活動を手がかりにして、解析者の主観によって SSE の同定を行っている。しかしながら、解析者の主観によらない客観的な基準を設け、イベント検出を自動化することによって、プレート境界すべりのモニタリングに資することができ、ひいてはプレート境界型巨大地震の準備過程の監視に役立つと期待される。

このような目的のもと、防災科研では短期的 SSE の自動検出手法の開発をすすめている。すでに第 186 回地震予知連絡会重点検討課題において我々の取り組みの一部を報告している⁹⁾が、それ以降もより検出精度を高めるための改良を行っている (第 1 図)。傾斜や歪などの地殻変動連続観測データは、GPS 観測データに比べ、サイト固有の影響を強く受け、観測点毎のデータの特性が大きく異なることが一般的である。そのため、いかにして SSE による地殻変動の記録のみを抽出するかが非常に重要なポイントとなる。これを実現するため、我々は特に傾斜データのモデリング部分の改良を行っている。例えば、ノイズ成分としてランダムウォーク成分を加え、より現実的な観測データを表現できるようにしている。また、ある観測点だけのローカルな変動による SSE の誤検知を防ぐため、検出された SSE のロバスト性テストも組み込んでいる。

このような手法を 2007～2008 年の 2 年間の四国全域の傾斜データに適用した結果を第 2 図に示す¹⁰⁾。ここではプレート境界の形状を模して $30 \times 30 \text{ km}^2$ の大きさの矩形断層を配置し、SSE の発生期間と場所、すべり速度を推定した。この結果、四国西部で約 6 か月周期で発生する短期的 SSE を自動的に検出することに成功している。それらの断層パラメタはいずれもこれまでに手動解析で求められている値と調和的な値が推定されている。この自動検出手法の利点として、SSE の継続時間を客観的に定義できる点や、それに基づき、SSE とそれに伴う微動活動の場所や時間推移を相

互に比較することが可能な点などが挙げられる。このことで、SSEの統計的な性質の評価や、微動とSSEの活動推移の対比により、これらの現象の発生メカニズムの理解が進むと考えられる。

今後は、さらに手法自体の改善を進めるとともに、適用領域を他地域へも広げていく予定である。また、現在、防災科研と産業技術総合研究所との共同研究で、産総研が整備している地下水等総合観測網のボアホール歪計データと我々の傾斜データとの相互流通の取り組みを進めており、その両者の併合処理を行うことで、自動検出精度の向上を目指していく。

(2) 浅部 VLFE の高精度震源推定

防災科研の地震観測網により浅部 VLFE が見出されて以降⁴⁾、Hi-net 高感度加速度計データのアレイ解析に基づく浅部 VLFE の全国規模でのモニタリングを準リアルタイムで行っている¹¹⁾。それにより、十勝沖の日本海溝・千島海溝会合点付近で初めて VLFE 活動が見出され、さらにその活動の時間推移は2003年十勝沖地震後の余効的地殻変動に良く似た変化を示すことが分かった(第3図)。また、例えば足摺岬沖では2003年と2010年の豊後水道長期的SSEの時期にのみ活動が活発化するなど、他の領域でも特徴的な時間推移を示すことが分かってきている。西南日本の浅部 VLFE は、震源の深さや震源メカニズムから、南海トラフに沿って発達している付加体内部で発生していると考えられている^{4,13)}のに対し、付加体が存在しない十勝沖では、プレート境界付近で発生していると考えられている¹¹⁾。いずれの場合においても、浅部 VLFE の活動はプレート境界すべりと密接に関連していることが示唆され、海域における観測態勢がまだ十分整備されていない現状では、プレート境界浅部の挙動を知る上で、浅部 VLFE のモニタリングを行うことは非常に重要である。

我々はこのような準リアルタイムアレイ解析システムによる浅部 VLFE のモニタリングを継続的に行うとともに、より詳細な震源位置を推定するための手法開発にも取り組んでいる。具体的には、既知の VLFE の波形をテンプレートとし、それぞれの観測点での別の期間の波形との相互相関関数から到達時間差を求め、既知 VLFE に対する相対的な震源を精度よく決定するものである¹⁴⁾(第4図)。ここでは、Hi-net 観測開始より以前まで遡ることができる F-net 記録にも適用可能な手法とすることで、より長期間の VLFE 活動を、より詳細に求めることを目的としている。1998年以降の F-net 記録にこの手法を適用した結果、従来は1つの直径50 km程度の範囲にばらついた震源分布しか得られていなかった十勝沖の VLFE 活動が、より細かい複数のクラスタに分かれ、さらにそれぞれのクラスタで特徴の異なる時間的推移を示すことが明らかとなった¹⁴⁾。

今後は、この手法を他の領域のデータにも適用していくことで、プレート境界でのすべり挙動が異なる様々な場所での VLFE 活動を明らかにし、VLFE 発生メカニズムの解明を目指すとともに、プレート境界すべりのモニタリングツールとしての精度を高めていきたい。

(3) 詳細な微動分布とエネルギー放射の時空間変化の理解を目的とした臨時アレイ観測計画

我々は、Hi-net の記録に基づき、エンベロープ波形の相互相関と波形振幅の情報を組み合わせたハイブリッド法¹⁵⁾及びクラスタリング処理¹⁶⁾により、深部低周波微動活動のモニタリングを行っている。一方、より詳細な微動活動、特に微動の細かいスケールでの移動現象をとらえるために、地震計アレイによる臨時観測を四国西部にて実施し、2007年3月の微動エピソードを3か所のアレイで観測することに成功し、通常より速い速度での微動の移動現象をとらえるなどの成果を得ている¹⁷⁾。

そこで、より詳細な微動分布の把握や、微動源でのエネルギー放射の時空間変化などを調べるため、我々は新たな臨時アレイ観測計画を進めている（第5図）。この計画では、四国西部の微動発生域をカバーする5か所に、固有周波数2Hzの3成分地震計で構成するアレイを展開する。そのうちの1か所は、地震計約30台を面的に配置し、アレイの指向性を極力抑えることで広範囲の微動をカバーすることを狙っている（L-array）。また他の4か所には約10台の地震計を配置し、それぞれの近傍の微動を、L-arrayと併せることで詳細にマッピングすることを目指す（S-array）。

この地域では活発な微動活動が約6か月周期で発生し²⁾、直近のエピソードが2010年8月に発生していることから¹⁸⁾、次のエピソードは2011年の早い時期の発生が予想される。これを観測するために、2010年12月中の観測開始を目指している。そして、微動の移動などの特徴を幅広くとらえるために、できれば複数回の微動エピソードが観測できるだけの長期間、観測を継続したいと考えている。

(廣瀬仁・木村武志・浅野陽一・武田哲也・汐見勝彦)

参 考 文 献

- 1) Obara, K. (2002), Nonvolcanic Deep Tremor Associated with Subduction in Southwest Japan, *Science*, 296, 1679-1681.
- 2) Obara, K., H. Hirose, F. Yamamizu, and K. Kasahara (2004), Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23602, doi:10.1029/2004GL020848.
- 3) Hirose, H. and K. Obara (2005), Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor activity around the Bungo channel region, southwest Japan, *Earth Planets Space*, 57 (10), 961-972.
- 4) Obara, K., and Y. Ito (2005), Very low frequency earthquakes excited by the 2004 off the Kii peninsula earthquakes: A dynamic deformation process in the large accretionary prism, *Earth Planets Space*, 57 (4), 321-326.
- 5) Ito, Y., K. Obara, K. Shiomi, S. Sekine, and H. Hirose (2007), Slow Earthquakes Coincident with Episodic Tremors and Slow Slip Events, *Science*, 315, 5811, 503-506.
- 6) Matsubara, M., Y. Yagi, and K. Obara (2005), Plate boundary slip associated with the 2003 Off-Tokachi earthquake based on small repeating earthquake data, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L08316, doi:10.1029/2004GL022310.
- 7) Shiomi, K., M. Matsubara, Y. Ito, and K. Obara (2008), Simple relationship between seismic activity along Philippine Sea slab and geometry of oceanic Moho beneath southwest Japan, *Geophys. J. Int.*, 173, 1018-1029.
- 8) Matsubara, M., K. Obara, K. Kasahara (2009), High-Vp/Vs zone accompanying non-volcanic tremors and slow-slip events beneath southwestern Japan, *Tectonophys.*, 472, 6-17.
- 9) 防災科学技術研究所 (2010), 短期的スローイベントと微動の準リアルタイムでの検知能力, 連絡会報, 84, 577-590.

- 10) Kimura, T., K. Obara, H. Kimura, and H. Hirose (2010), Automated detection of slow slip events within the Nankai subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2010GL045899 (in press).
- 11) Asano, Y., K. Obara, Y. Ito (2008), Spatiotemporal distribution of very-low frequency earthquakes in Tokachi-oki near the junction of the Kuril and Japan trenches revealed by using array signal processing, *Earth Planets Space*, 60, 871-875.
- 12) 防災科学技術研究所 (2010), 日本周辺の超低周波地震活動 (2009年11月～2010年4月), 連絡会報, 84, 6-7.
- 13) Ito, Y., and K. Obara (2006), Dynamic deformation of the accretionary prism excites very low frequency earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02311, doi:10.1029/2005GL025270.
- 14) 浅野陽一・小原一成・松澤孝紀・廣瀬仁 (2010), F-net 記録の波形相関解析によって明らかになった 1998 年以降の十勝沖における超低周波地震活動, 日本地震学会 2010 年秋季大会, B22-11
- 15) Maeda, T., and K. Obara (2009), Spatiotemporal distribution of seismic energy radiation from low-frequency tremor in western Shikoku, Japan, *J. Geophys. Res.*, 114, B00A09, doi:10.1029/2008JB006043.
- 16) Obara, K., S. Tanaka, T. Maeda, and T. Matsuzawa (2010), Depth-dependent activity of non-volcanic tremor in southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L13306, doi:10.1029/2010GL043679.
- 17) Ueno, T., T. Maeda, K. Obara, Y. Asano, and T. Takeda (2010), Migration of low-frequency tremors revealed from multiple-array analyses in western Shikoku, Japan, *J. Geophys. Res.*, 115, B00A26, doi:10.1029/2008JB006051.
- 18) 防災科学技術研究所 (2011), 西南日本における深部低周波微動活動 (2010年5月～2010年10月), 本連絡会報 (9-1).

①SSEが発生していると仮定して、傾斜データのモデリング

- すべり量・各時系列データの背景トレンドパラメータ
→Kalman Filter
- SSE開始時刻・継続時間・断層モデル(位置)
→Grid Search

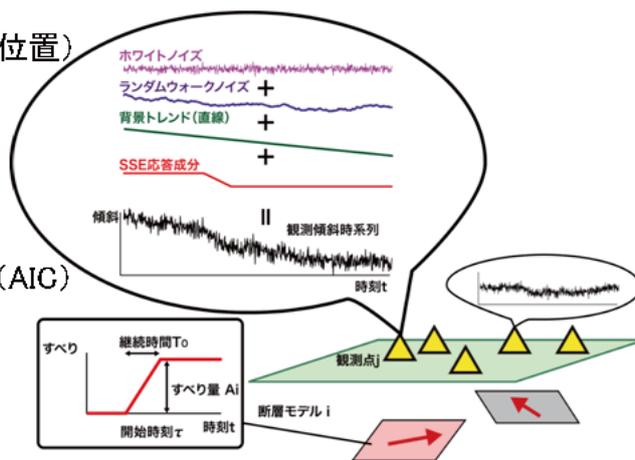
②モデルの評価1

SSE応答成分を含まないモデルとの比較(AIC)

③モデルの評価2

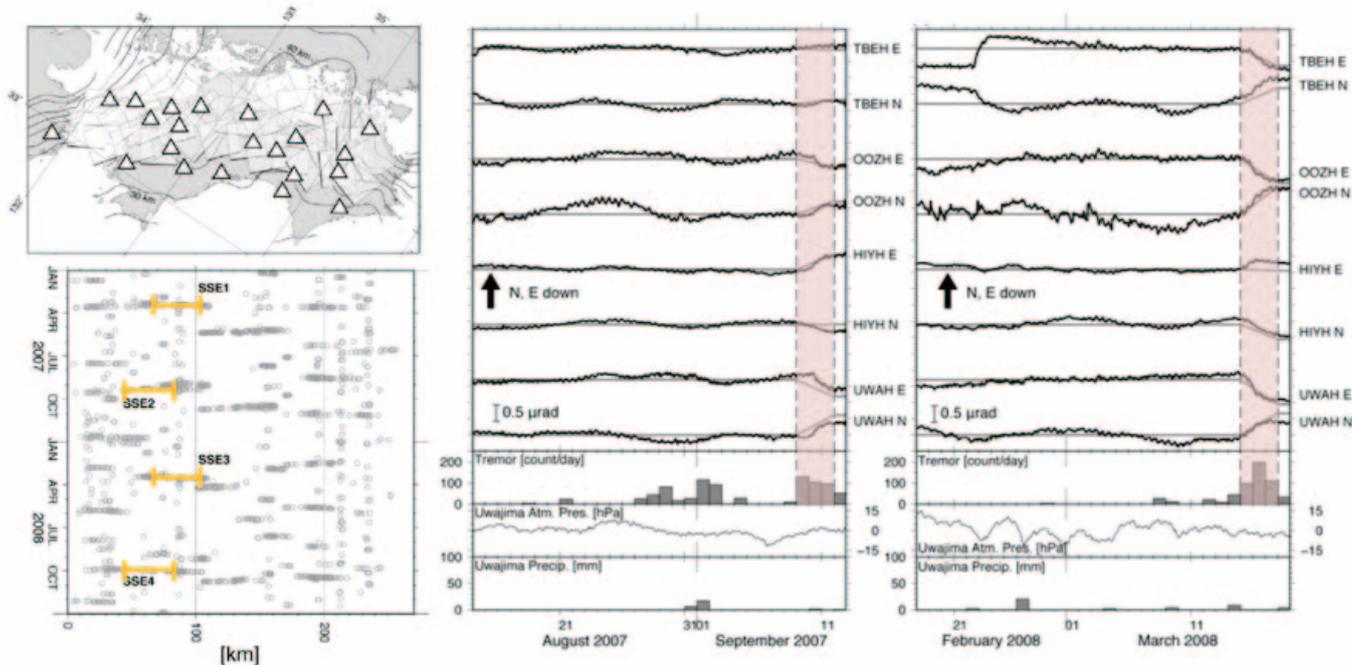
各観測点を1つずつ除外して①②を実行

- ある観測点について検出されない場合
→除外された観測点におけるローカルな異常変動の誤検出
- 全ての観測点について検出された場合
→SSEとして検出



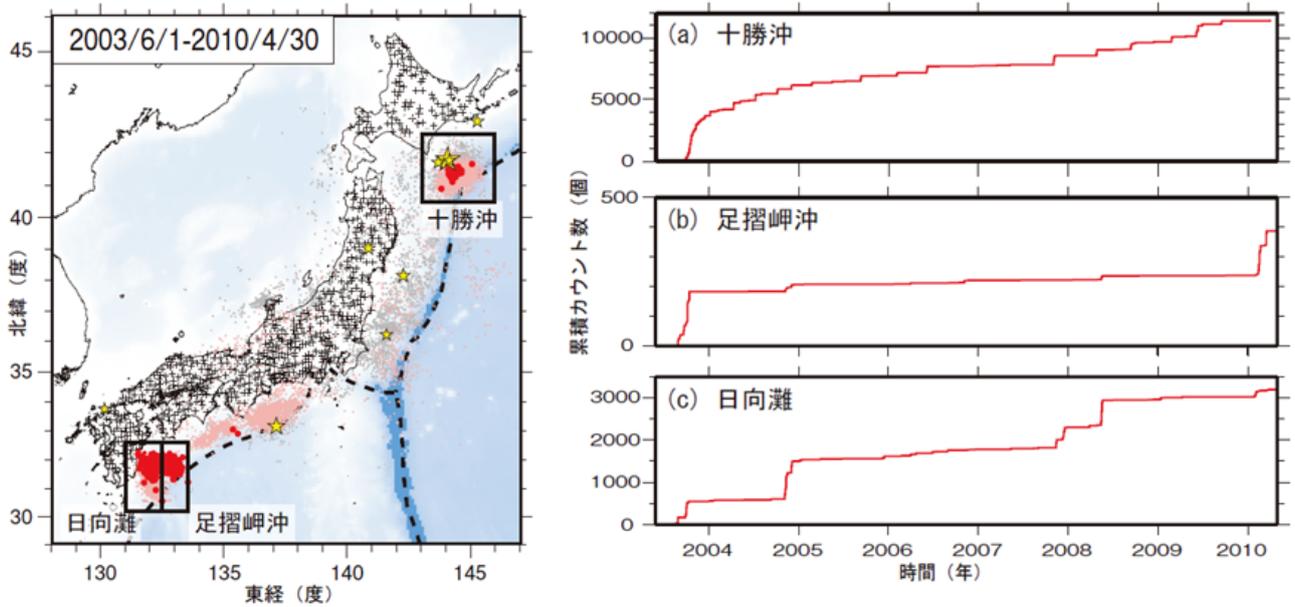
第1図 短期的 SSE の自動検出の手順.

Fig. 1 The procedure for automated detection of a short-term SSE.



第2図 四国全域での2007～2008年の2年間における自動検出結果 (Kimura et al., 2010¹⁰) を修正).

Fig. 2 Results of the application of the automated detection procedure to tilt data in Shikoku for 2007-2008 (modified after Kimura et al., 2010¹⁰).

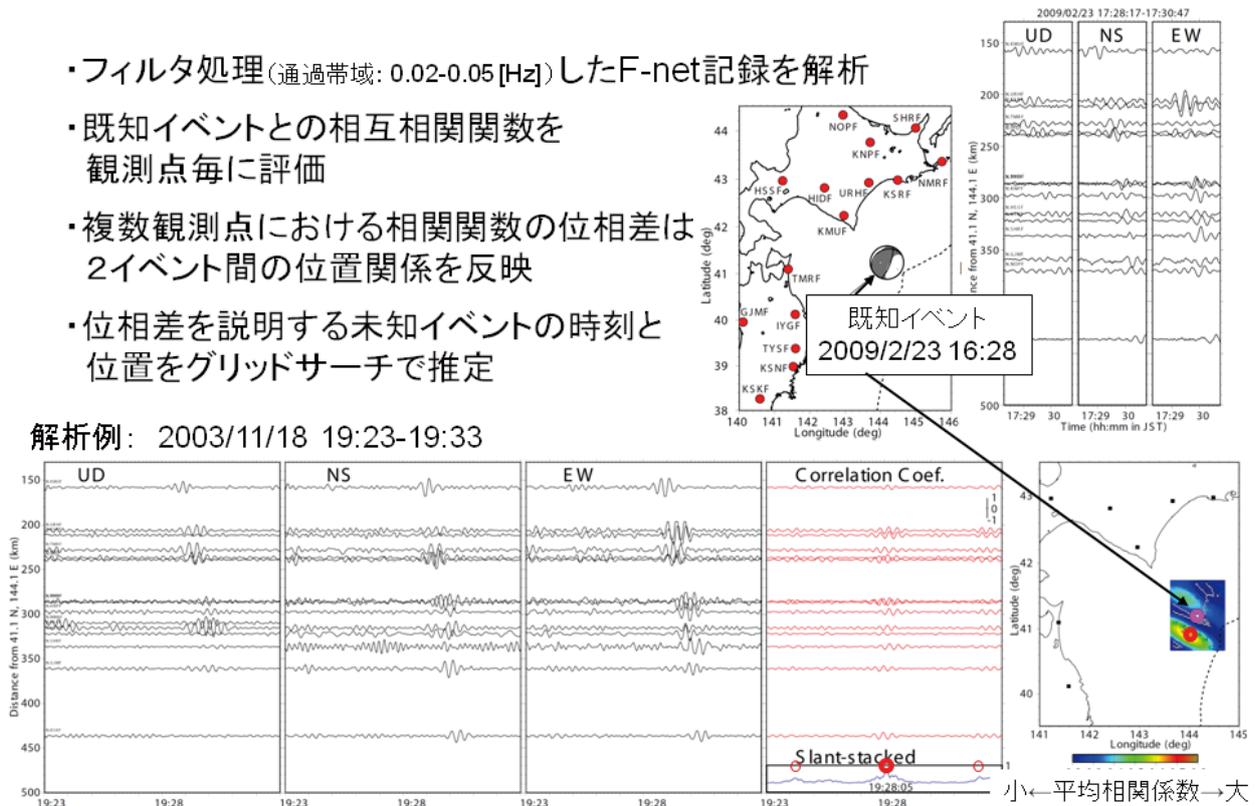


第3図 準リアルタイムアレイ解析システムによる浅部 VLF のモニタリング結果¹²⁾.

Fig. 3 Monitoring result of the semi-realtime array signal processing for shallow very low frequency earthquakes¹²⁾.

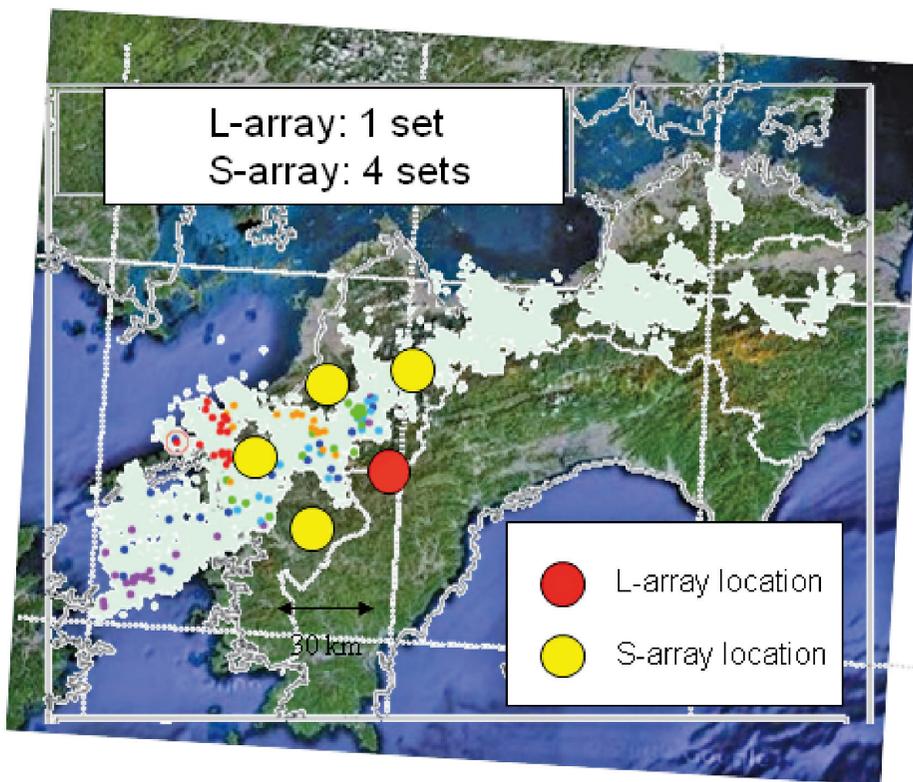
- ・フィルタ処理(通過帯域: 0.02-0.05 [Hz])したF-net記録を解析
- ・既知イベントとの相互相関関数を観測点毎に評価
- ・複数観測点における相関関数の位相差は2イベント間の位置関係を反映
- ・位相差を説明する未知イベントの時刻と位置をグリッドサーチで推定

解析例: 2003/11/18 19:23-19:33

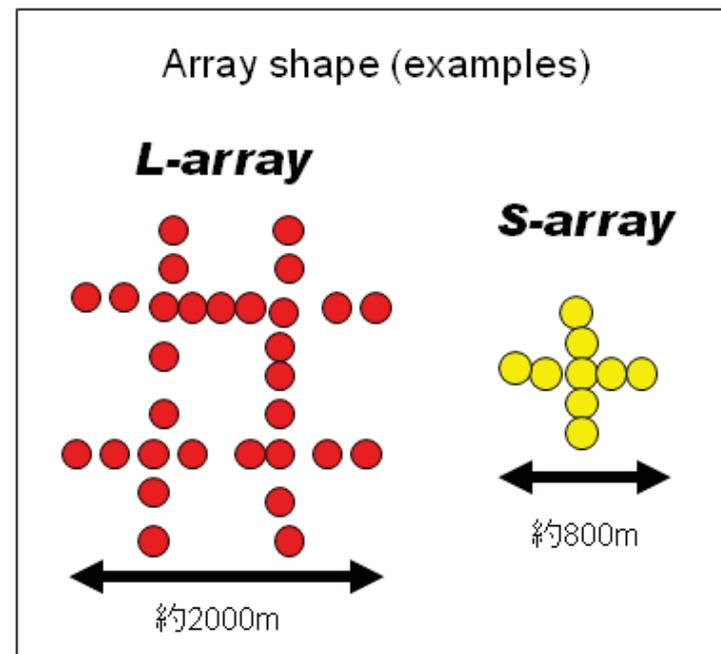


第4図 波形相関解析による VLF の検出手法の手順.

Fig. 4 Detection of shallow VLFs based on waveform cross-correlation.



Array spacing: 30 km
 Station spacing: 150-250 m
 Sensor: 2Hz 3-comp. seismometer
 Period: Dec. 2010 -



第5図 四国西部における微動の臨時アレイ観測計画.

Fig. 5 A plan for a multiple array observation experiment for deep low-frequency tremor in western Shikoku.