

1 2-2 プレート境界深部すべりに係る諸現象の全体像

Characteristics of phenomena related to interplate slip at deep portion on the subducting Philippine Sea plate boundary

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

1. はじめに

西南日本に沈み込むフィリピン海プレートと上盤プレートとの境界では、約100年間隔で巨大地震が発生することが知られているが、その巨大地震発生領域のさらに深部側で、プレート間のゆっくりすべりとそれに関連する複数種類の振動現象が発生していることが、近年の地震・地殻変動観測網の整備によって明らかにされってきた。本稿では、沈み込むフィリピン海プレートの走向に沿って長さ約600kmの範囲に発生する深部低周波微動（地震）と、それに伴って発生する短期的スロースリップイベントおよび深部超低周波地震について、時空間的分布の特徴を示す。はじめに、これらの現象の観測記象に見られる特徴や観測計器、及び解析手法について第1表にまとめる。

2. エンベロープ相関法による微動源と気象庁一元化カタログの低周波地震

深部低周波微動は、1.5–5Hz程度に卓越し長時間継続する微弱振動で、P, S波の初動検出は非常に困難であり、そのため微動振幅の時間的变化、つまりエンベロープ形状に基づいた微動源決定法（エンベロープ相関法：ECM）が開発された¹⁾²⁾。しかし、微動波群の中には複数観測点で検測可能なやや孤立的な位相を含む場合があり、気象庁ではこの位相検測に基づいて震源決定を行ない、低周波地震というフラグを付与して一元化震源カタログに掲載している³⁾。第1図に、ECMによる微動源と気象庁一元化処理による低周波地震の検出例を示す。ECMの場合、微動が活発化しエンベロープ振幅が大きくなると検出に失敗することもあるものの、比較的微動活動を忠実に反映しているのに比べ、気象庁一元化カタログの低周波地震は、エンベロープ振幅が大きい場合でも検出されないことが多く、振幅に係らず、位相検出が可能なものののみを抽出している傾向がある。第2図に、ECMカタログ及び気象庁一元化カタログによる微動源震央分布を示すが、両者とも全体的傾向は変わらない。ECMでは、微動活動が非活発領域（ギャップ）で隔てられたいくつかのセグメントに分かれる。一方、気象庁カタログでは震源の集中度が良く、それぞれのセグメント内でも複数のクラスターが存在する。しかし、ECMカタログには気象庁一元化カタログに掲載されていない微動も多く含むことから、以下の微動活動全体像に関する特徴を示す際には、主としてECMカタログを使用する。最近、ECMを改良しエンベロープ振幅の空間分布を考慮したハイブリッド法を開発し⁴⁾、時空間的に高分解能の微動源分布が得られたが、これに関しては現在評価中であり、本稿では取り扱わないこととする。

3. 深部超低周波地震、短期的スロースリップイベントの空間分布

第3図に、深部超低周波地震の震央とメカニズム解^{5) 6)}、及び傾斜変化から推定された短期的スロースリップイベントの矩形断層モデルの位置⁷⁾を示す。これらの活動は、微動発生領域の全域に検出されているわけではなく、特に四国西部の豊後水道側、及び三重県北東部と愛知県中部のそれぞれ伊勢湾に近い側に集中している。第4図に、プレート形状の走向方向に沿った頻度分布を示す。ECMによる微動分布と気象庁低周波地震の分布パターンはほぼ同様であるが、深部超低周波地震についてはそれらとは異なった分布パターンを示し、伊勢湾の両側に存在する微動・低周波地震の活動のピーク位置から伊勢湾に向かって数多く分布する。また四国西部では、深部超低周波地震の分布パターンは微動・低周波地震とは一致せず、より豊後水道側に分布している。短期的スロースリップイベントの矩形断層の位置は、深部超低周波地震の分布とほぼ一致する。

4. 時空間分布の全体的特徴

微動は、セグメント毎にほぼ固有の周期で発生する。第5図に、ECM カタログ及び気象庁一元化カタログによる微動活動の時系列分布を示す。四国西部では顕著な微動活動が約半年周期で、四国東部では約3ヶ月周期で発生する。2003年後半には、四国西部で微動が連続的に発生しているが、この活動期間を含み、豊後水道では長期的スロースリップイベント⁸⁾が発生していた。東海地域では、伊勢湾を挟んだ両側で約半年周期で微動が活発化しているが、愛知県内では2003年から2004年にかけて小規模な微動が頻発している。この地域に隣接する浜名湖を中心とした地域では、2000年末から2005年まで東海スロースリップイベント⁹⁾が発生しており、2003年前後には積算モーメント速度が加速している。短期的スロースリップイベントは、必ず活発化した微動活動に同期して検出される。第6図に、短期的スロースリップイベントの検出状況を微動の時空間分布に重ねて示す。四国西部では、約半年周期で活発化する微動活動に毎回同期して、複数観測点で傾斜変化が検出され、断層モデルが推定されている。2003年の豊後水道長期的スロースリップイベントの発生期間中及びその前後では、約3ヶ月間隔で、短期的スロースリップイベントが活発な微動とともに検出された⁸⁾。一方、四国東部では、約3ヶ月毎に発生する微動活動に対して、短期的スロースリップイベントの断層モデルが推定された事例は3回のみであるが、この地域に発生した全ての微動エピソードのうち約半数の12回のエピソードにおいて、極少数の観測点で傾斜変化が検出されている。このことは、スロースリップイベントとしての規模が、四国西部で発生するものに比べ小さいことを示していると考えられる。

5. 周期性

第7図に、四国における顕著な微動エピソードの発生間隔の推移を示す。四国東部や中部では94日あるいは96日間隔で微動が発生するのに対して、四国西部では166日間隔で揺らぎも大きい。しかし、先に述べた豊後水道長期的スロースリップイベントに影響を受けたと考えられる活動を除いて評価すると、発生間隔は177日となり、揺らぎもかなり小さくなる。他のセグメントも含めた微動の発生時系列を第8図に示す。四国

西部では、1日あたりの微動検知数が400を超えるような活発な微動エピソードは半年間隔に発生するが、小規模な活動は頻繁に発生している。

6. 移動性

微動活動の特徴のひとつは移動性である。第9図に四国中西部、第10図に紀伊半島における主なエピソードにおける微動の時空間分布を示す。微動の移動の開始・終了位置や速度はエピソードによって異なるが、通常の場合、移動範囲はセグメント内に限られ、逆にセグメントの定義としても有効である。しかし、四国中西部における水平距離150km(第9図)の地点は、移動パターンの境に位置しているが、更に詳細に観察すると、北東及び南西への移動の開始点、あるいは両方向から移動してきた場合の終点となるなど、2つのセグメントで重複しているとも考えられ、非常に特殊な場所である。また、同じ四国中西部の150~200km(第9図)の間には、気象庁一元化カタログでは明瞭なギャップが存在するが、ECMカタログではギャップはあまり明瞭ではなく、例えば2006年1月の時空間分布に見られるように、この区間においても微動は連続的に移動する。このように、微動が連続的に移動する場合でも、気象庁カタログでは離散した特定の場所に震源が集中する傾向にあり、このことは、微動の中に含まれる比較的大きな活動が気象庁で検測される低周波地震であるとすると、規模の大小で分布パターンが異なることを示している。

微動の移動方向は、セグメント毎に傾向性を有する(第11図)。例えば、四国西部では豊後水道側から北東方向に移動するケースが全体の7割を占める。また、明瞭なギャップが存在する場合、例えば四国東部と中部や伊勢湾では、ギャップに隣接した場所からバイラテラルに移動が伝播する傾向がある。なお、移動する際にはそのフロントはシャープであるのに対して、その背後では微動活動がしばらく継続している。このことは、微動の移動がすべりの破壊フロントの伝播を反映し、その背後ですべりが継続する間は微動が継続することを示していると考えられる。

7. 連動性

微動の移動は、通常は单一セグメント内にとどまるが、隣接したセグメントにも移動が連続的に及ぶことがある。そのような移動現象をここでは「連動」と呼ぶことにするが、2006年1月に東海地域で明瞭な連動現象が確認されている。この連動現象は、紀伊半島中部から開始した活動が1日約10kmの速度で北東方向に移動し、連続的に伊勢湾を越え愛知県側まで達し、さらに愛知県内を北東方向に移動した¹⁰⁾(第11図)。このときの紀伊半島側での移動方向は、通常この地域で観測される移動方向とは逆であった。

8. 微動活動からすべりモニタリングの可能性

微動活動が短期的スロースリップイベントによって誘発される現象であると考えると、スロースリップイベントが地殻変動として検出されない場合でも、微動活動からすべりを評価し、プレート運動のモニタリングと

して利用することが可能であるかもしれない。そのため、短期的スロースリップイベントの断層パラメタが推定されているエピソードについて、微動の検出数とスロースリップイベントのモーメントを比較すると、その両者は線形関係にある（第12図a）。この関係を用いて、すべての微動エピソードから、スロースリップが発生していた場合におけるモーメントを評価し、モーメントの定義式からすべり量を評価した¹¹⁾。2001年から2007年まで積算したすべり量の空間分布、及びそれぞれのセグメントを代表する地点における積算すべり量の時間履歴を第12図b,cに示す。7年間の積算すべり量は、ギャップ領域を除きほとんどの場所で30～40cmであるが、四国西部と中部の境界付近では特に大きなすべり量が推定されており、微動活動からすべり量を評価する際の換算効率が他とは異なることを示唆している。また、四国西部ではすべり量のほとんどが地殻変動として直接計測されているのに対して、他の地域では地殻変動として計測される割合が少なく、プレート間すべりをモニタリングする上で、微動活動を利用することの有効性を示すものである。

微動活動から換算した積算すべりは、どの地域においてもおよそ年間4～5cmの一定速度で変化しているが、2つの地域ですべり速度の変化が認められる。つまり、四国西部では2003年前半で減速し、後半で加速してもとの速度に戻っている。また愛知県内では、2003年から2004年にかけて加速している。これらのすべり速度の変化は、豊後水道や浜名湖周辺で発生した長期的スロースリップイベントの影響であると考えられる。

（小原一成）

Kazushige Obara

参考文献

- 1)Obara, K., 2002. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, 296, 1679–1681.
- 2)Obara, K., Hirose, H., 2006. Non-volcanic deep low-frequency tremors accompanying slow slips in the southwest Japan subduction zone, *Tectonophysics*, 417, 33–51.
- 3)西出則武・橋本徹夫・舟崎淳・中澤博志・岡正善・上野 寛・山田尚幸・笛川巖・前田憲二・杉本和信・高嶋鉄也, 2000. 地震データの一元的処理により把握された地殻下部の低周波地震活動. 地球惑星科学関連合同大会講演予稿集, Sk-P002.
- 4) Maeda, T., Obara, K., 2009. Spatio-temporal distribution of seismic energy radiation from low-frequency tremor in western Shikoku, Japan, *Geophys. J. Res.*, submitted.
- 5) Ito, Y., Obara, K., Shiomi, K., Sekine, S. and Hirose, H., 2007, Slow Earthquakes Coincident with Episodic Tremors and Slow Slip Events, *Science*, 315, 503–506.
- 6) Ito, Y., Obara, K., Matsuzawa, T., and Maeda, T., 2009, Very-low-frequency earthquakes related to small asperities on the plate boundary interface at the locked to aseismic transition, *Geophys. J. Res.*, submitted.
- 7) Sekine, S., Hirose, H., Obara, K., 2009, Along-strike variations in short-term slow slip events in the southwest Japan subduction zone, *Geophys. J. Res.*, submitted.
- 8) Hirose, H. and Obara, K., 2005. Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor

- activity around the Bungo channel region, southwest Japan. *Earth Planets Space*, 57, 961–972.
- 9) Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, Y. Hatanaka, H. Yarai, and T. Nishimura, 2002. Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan. *Science*, 298, 1009–1012.
- 10) Obara, K., and S. Sekine, 2009. Characteristic activity and migration of episodic tremor and slow-slip events in central Japan. *Earth Planets Space*, in press.
- 11) Obara, K., 2009, Phenomenology of deep slow earthquake family in southwest Japan –Spatiotemporal characteristics and segmentation–, *Geophys. J. Res.*, submitted.
- 12) 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.
- 13) 小林昭夫・山本剛靖・中村浩二・木村一洋, 2006. 歪計により観測された東海地域の短期的スロースリップ (1984~2005 年). *地震* 2, 59, 19–28.

第1表 プレート境界深部すべりに伴う諸現象の特徴

Table 1 Comparison of phenomena associated with slip event at deep portion along the plate interface.

1-1 a. 観測記録の特徴

現象	特徴	観測計器	解析手法
深部低周波微動 (Tremor)	1.5–5Hz に卓越し、長期間継続する微弱振動	速度地震計の他、高感度加速度計(傾斜計)、広帯域地震計でも観測可能	<ul style="list-style-type: none"> ・エンベロープ相関法 ・ハイブリッド法(エンベロープ相関法+振幅分布) ・Source Scanning Algorithm ・テンプレート波形(位相)相関による高精度震源決定
深部低周波地震 (LFE)	微動波形に含まれるやや孤立的な振動	同上	<ul style="list-style-type: none"> ・マニュアルによる初動検測(気象庁) ・波形(位相)相関による高精度震源決定
深部超低周波地震 (VLF)	20 秒に卓越する長周期微弱振動	高感度加速度計(傾斜計)、広帯域地震計にて検出可能	<ul style="list-style-type: none"> ・グリッド MT 解析
短期的スロースリップイベント (S-SSE)	数日間かけて変化する地殻変動 ($\sim 0.1 \mu$ radian)	傾斜計、ひずみ計で検出可能 (Cascadia では GPS で検出可能)	<ul style="list-style-type: none"> ・矩形断層すべりパラメタインバージョン ・時間発展グリッドすべりパラメタインバージョン
長期的スロースリップイベント (L-SSE)	数ヶ月～数年間かけて変化する地殻変動	GPS で検出可能(傾斜計、ひずみ計では一部を除いて検出不可能)	

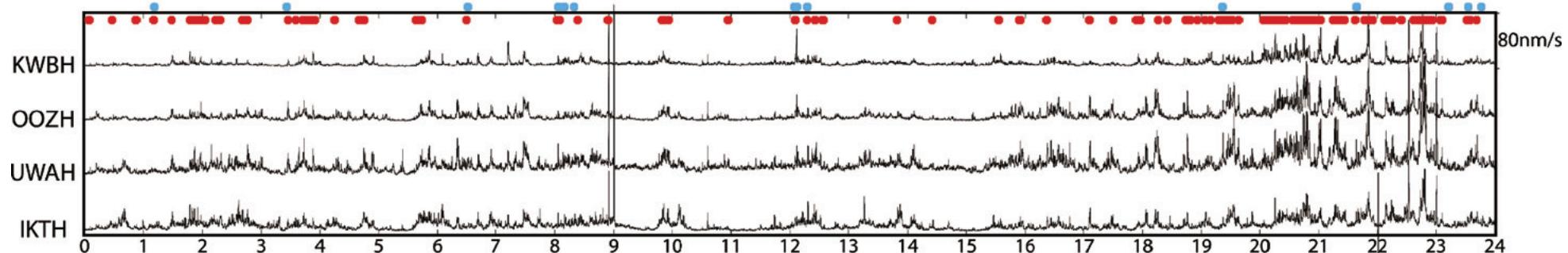
(下線(実線) : 防災科研にて定常的に使用しているモニタリング手法、

下線(点線) : 防災科研にて開発段階のモニタリング手法)

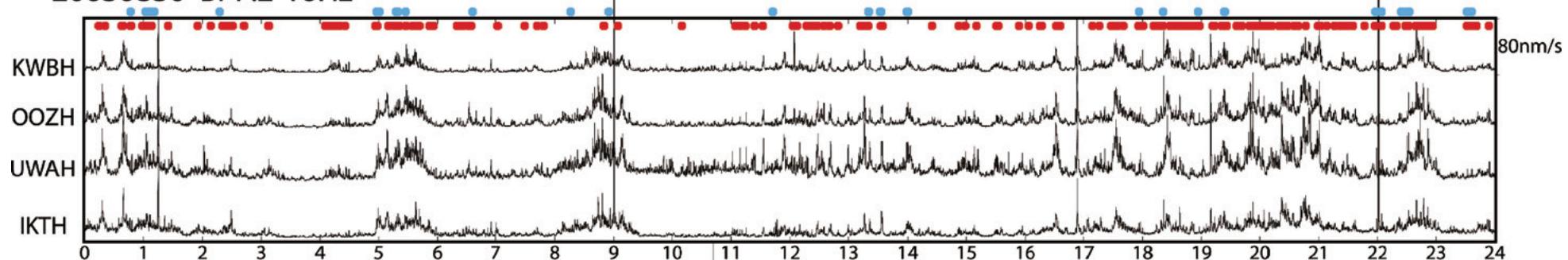
1-1 b. 活動の特徴

現象	継続期間	発生間隔
S-SSE, VLF, Tremor, LFE	数日～2週間程度	3ヶ月～半年程度
L-SSE (豊後水道) (東海)	数ヶ月～1年 ～5年	7年程度 10年程度

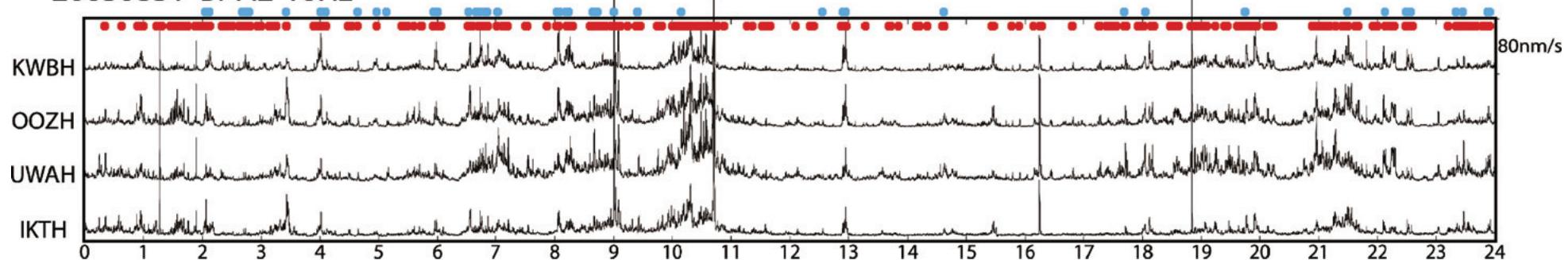
20030829 BPF:2-16Hz



20030830 BPF:2-16Hz



20030831 BPF:2-16Hz

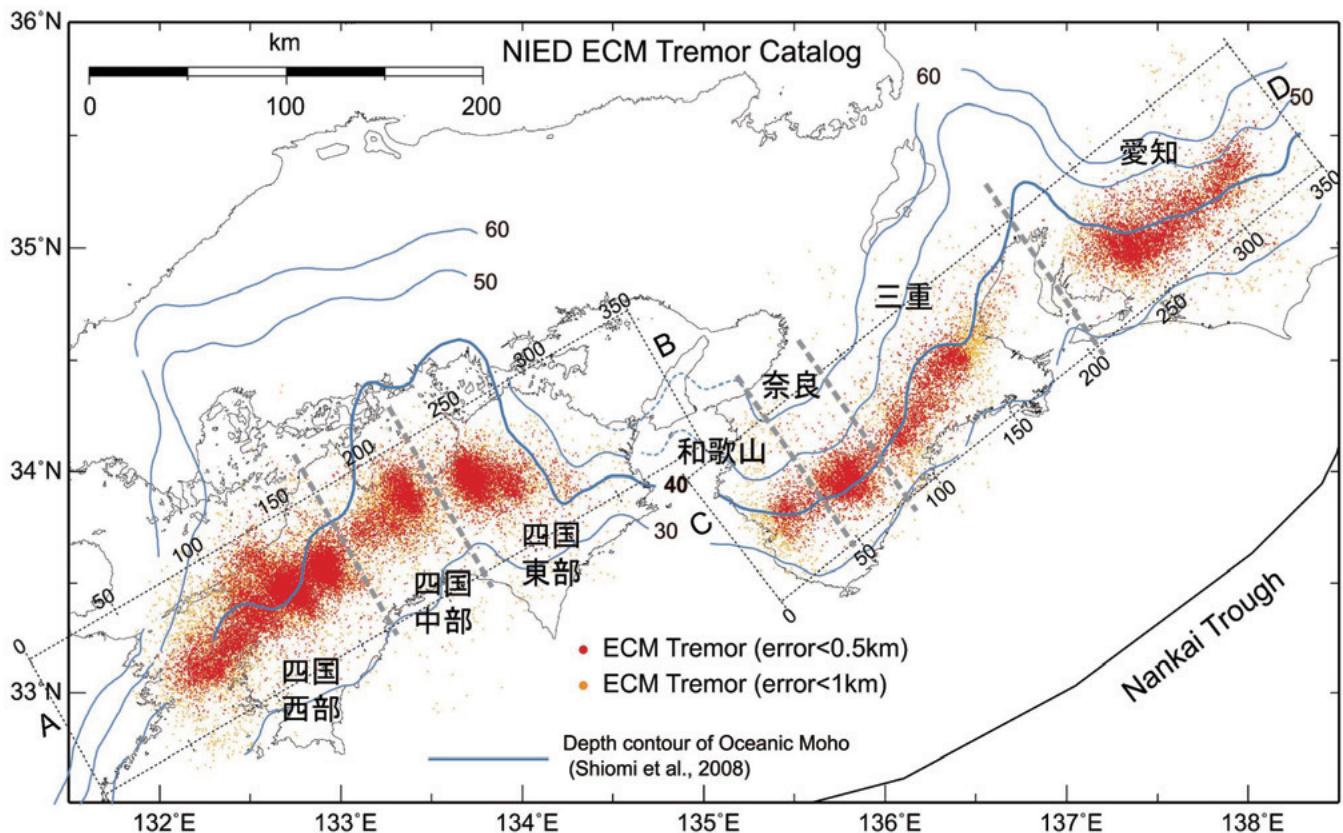


第1図 エンベロープ相関法 (ECM) と気象庁カタログ (JMA LFE) との比較。

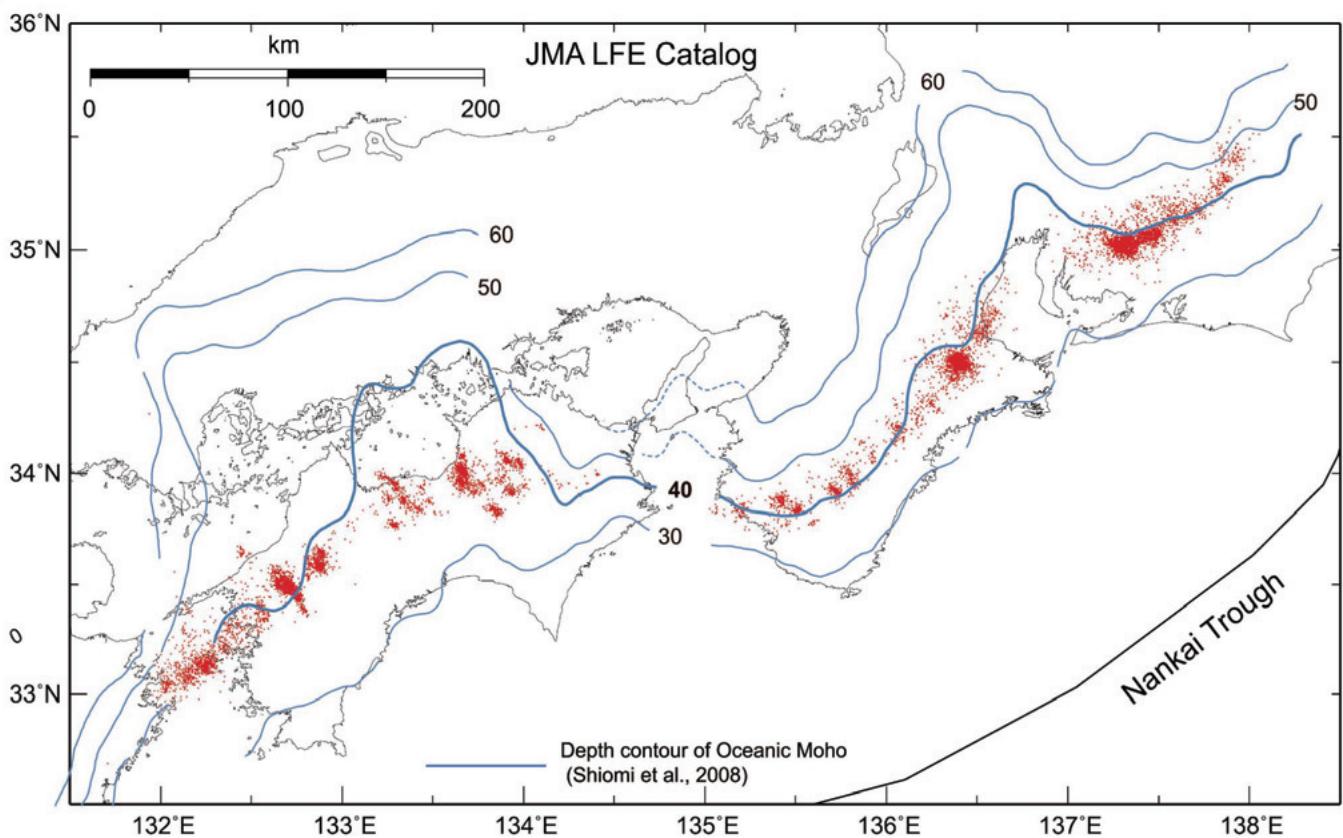
四国西部4観測点における2003年8月29日から31日までの3日間の2-16Hz帯域のエンベロープ記録と、ECM（赤丸）気象庁一元化カタログの低周波地震（青丸）の検出状況を示す。

Fig.1 Comparison of detection capability as tremor by ECM and low-frequency earthquake by JMA from the same envelope seismograms of tremors. The envelopes are RMS traces from the band-pass filtered waveforms with a pass band of 2-16 Hz observed at 4 stations in western Shikoku. The red and blue circles are detected tremors by ECM and low-frequency earthquake by JMA, respectively.

(a)



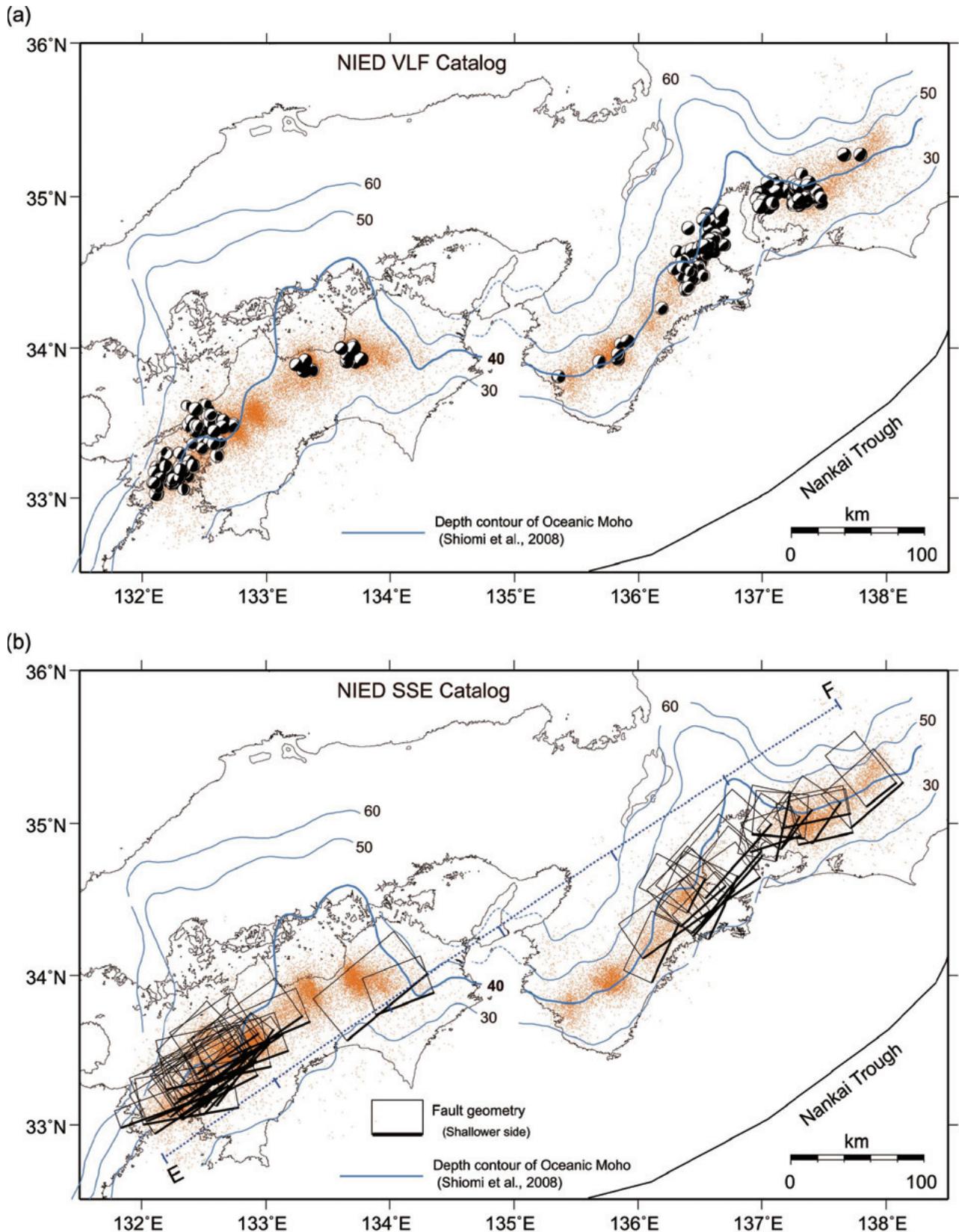
(b)



第2図 (a)ECM微動力タログに基づく微動源震央分布。

期間は2001年から2007年まで、赤点が誤差0.5km以下に決定されたもの、橙点は誤差1km以内に決定されたもの。図中のAB,CDで示された点線の四角は、第4図における頻度分布の範囲を表わす。図中の青線は、Shiomi et al.(12)によるフィリピン海プレート内部のモホ面等深度線（単位はkm）である。(b) 気象庁一元化カタログ中の低周波地震フラグが付与された地震のうち、深部低周波微動の発生域に重なっている地震の震央分布。期間は2001年から2007年までである。

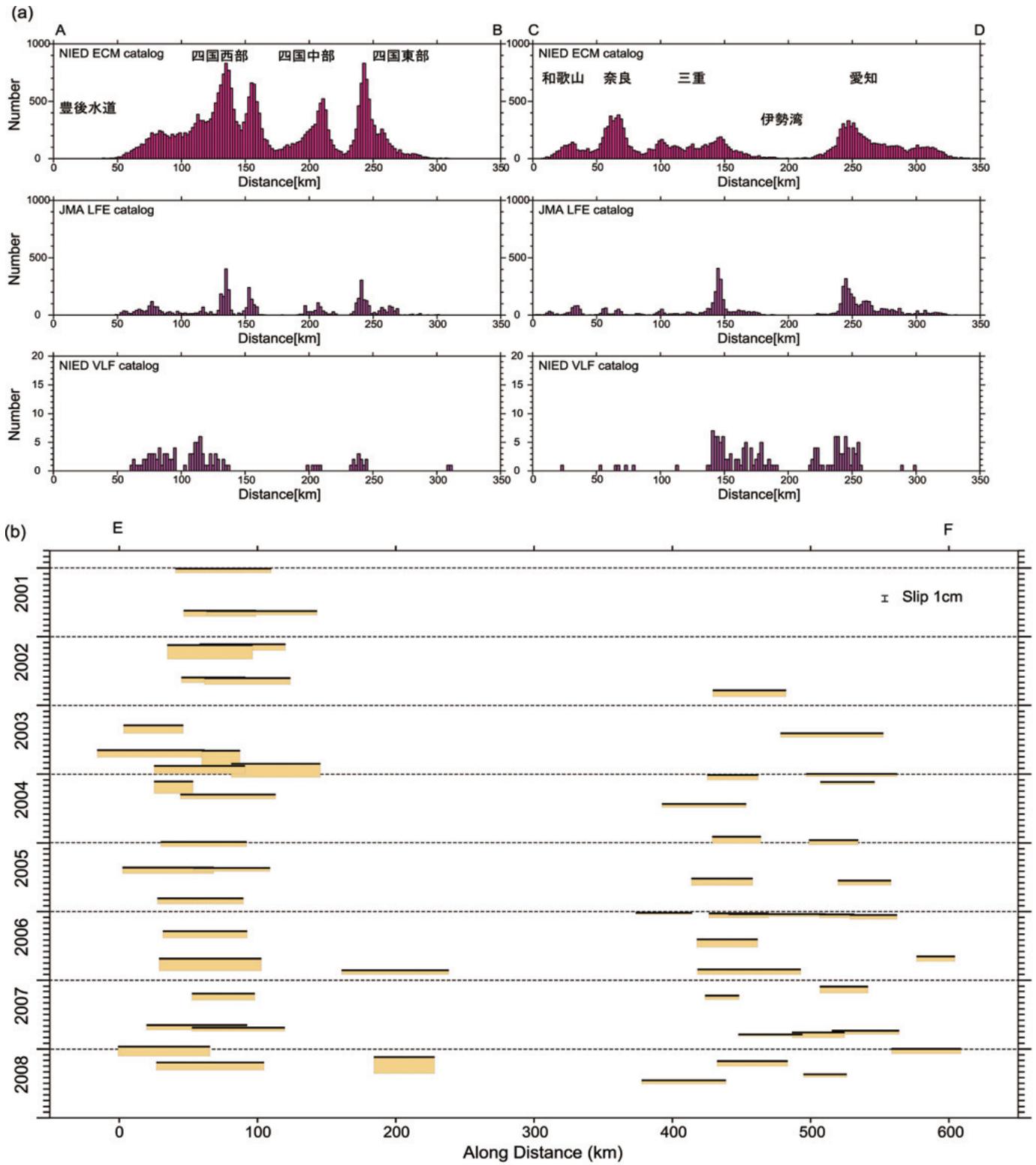
Fig.2 (a) Epicentral distribution of tremor by ECM catalog from 2001 to 2007. Red and orange dots are epicenters of tremors located with error within 0.5 km and 1 km, respectively. The dotted rectangle AB and CD are indicated in Fig.4. Blue lines are depth contours of oceanic Moho discontinuity in the Philippine Sea plate estimated by Shiomi et al.(2008) 12) (unit:km). (b) Epicentral distribution of low-frequency earthquake by JMA catalog from 2001 to 2007.



第3図(a)CMT解析に基づく深部超低周波地震の震央分布及びメカニズム解。

期間は2001年から2008までで、背景の赤点は、ECM微動カタログに基づく微動源震央分布で、誤差1km以内に決定されたもの。(b)傾斜計で検出された短期的スロースリップイベントの断層モデル推定結果。期間は2001年から2008まで、断層モデルは、矩形断層均質すべりインバージョンに基づく。それぞれの矩形のうち、太線で示された辺が浅い側を示している。全ての断層モデルは逆断層で、深さはおおむねプレート境界の深さと調和的である。点線EFは、第4図(b)の範囲を示す。

Fig.3 (a) Epicentral distribution and focal mechanism of deep very-low-frequency earthquake by CMT analysis from 2001 to 2008. Red dots are epicenters of tremors located with error within 1 km. Blue lines are depth contours of oceanic Moho discontinuity in the Philippine Sea plate estimated by Shiomi et al. 12 (unit:km). (b) Location of fault planes of short-term slow slip events detected and estimated by NIED tiltmeters from 2001 to 2008. The bold line of each rectangle indicates the shallower side of the fault plane. All fault models are reverse fault type and are located at around the plate interface. Dotted lines of E-F indicates the profile for the space-time plot in Fig.4(b).

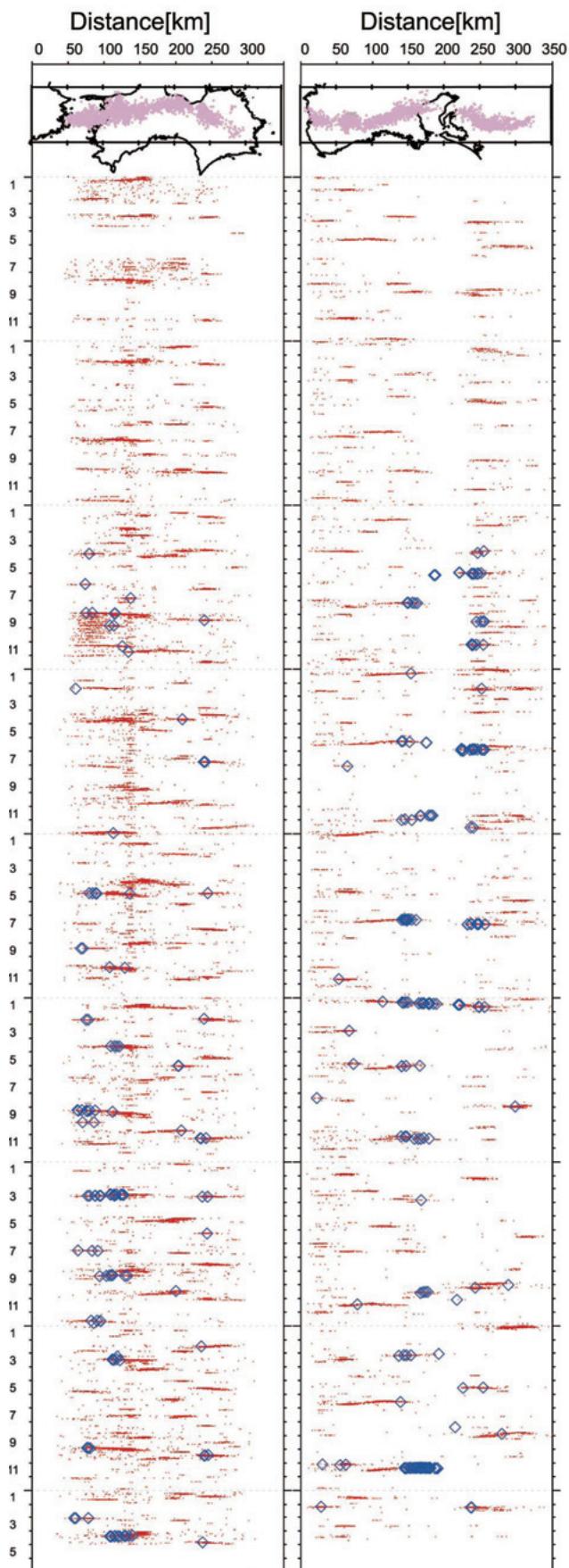


第4図(a)プレート形状の走向方向に沿った深部低周波微動等の発生頻度分布。

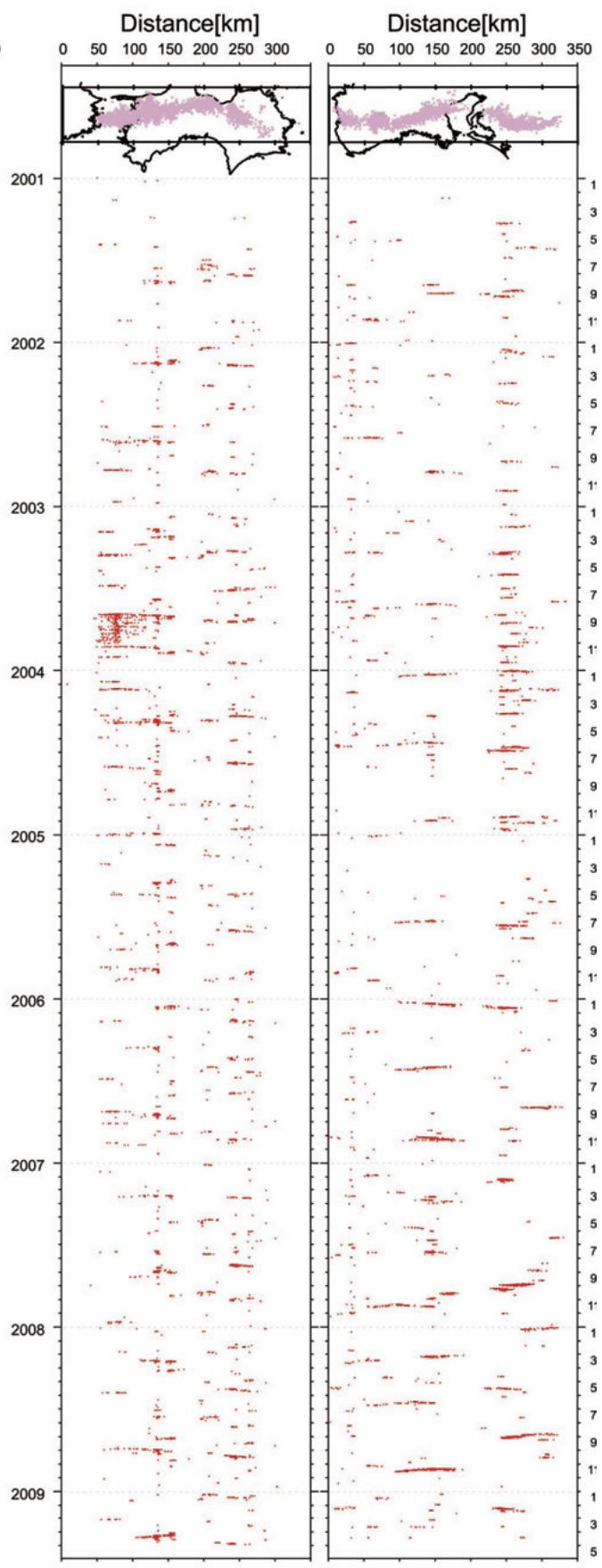
第2図の微動源震央分布で示された範囲AB,CDに沿って示す。上から、ECMで決定された深部低周波微動、気象庁一元化カタログ中の低周波地震、深部超低周波地震の分布であり、いずれも2007年までのデータに基づく。(b)短期的スロースリップイベントすべり量時空間分布。傾斜変化から推定されたSSE断層位置をプレート形状走向方向に投影した。黒い実線がSSEの発生時期を表わし、ピンク色の矩形の縦軸はすべり量を表わす。四国西部ではすべり量が2cm前後であるのに対し、紀伊半島や東海地域では1cm程度である。

Fig.4 (a) Frequency distribution of tremors, low-frequency earthquakes and very low-frequency earthquakes along the profile of A-B and C-D indicated in Fig.2. The tremors by ECM catalog, low-frequency earthquakes from the JMA catalog, and very low-frequency earthquakes from the CMT analysis with a duration from 2001 to 3007 are plotted. (b) Spacetime distribution of slip amount of the slow slip event along the profile of E-F indicated in Fig.3. The bold line of each rectangle indicates the origin time of the slow slip event and the width indicates the slip amount.

NIED ECM Tremor and VLF Catalog



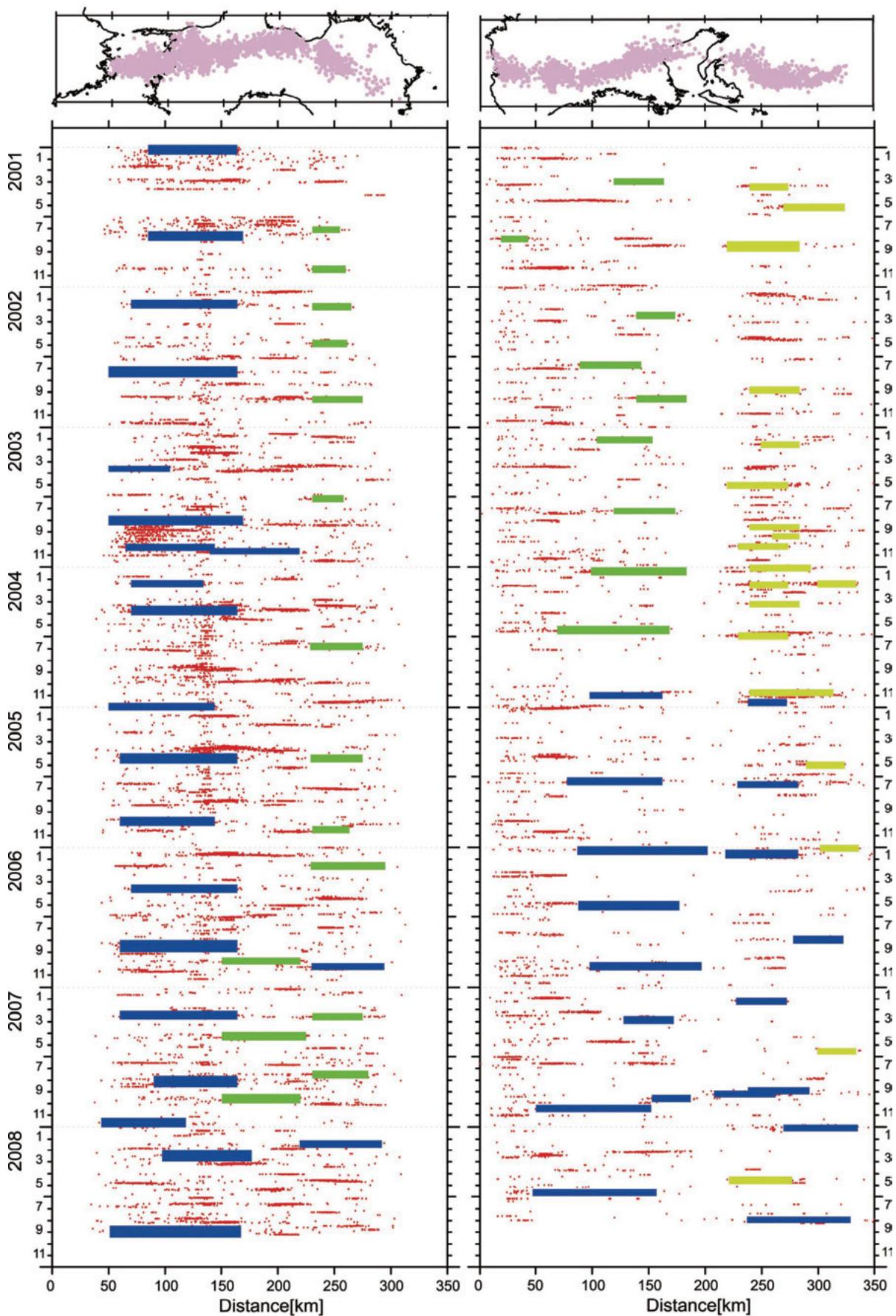
JMA LFE Catalog



第5図（左）深部低周波微動（赤点）及び深部超低周波地震（青菱形）の時空間分布。

深部超低周波地震については2003年の4月から解析を行なっている。（右）気象庁一元化カタログ中の低周波地震の時空間分布。

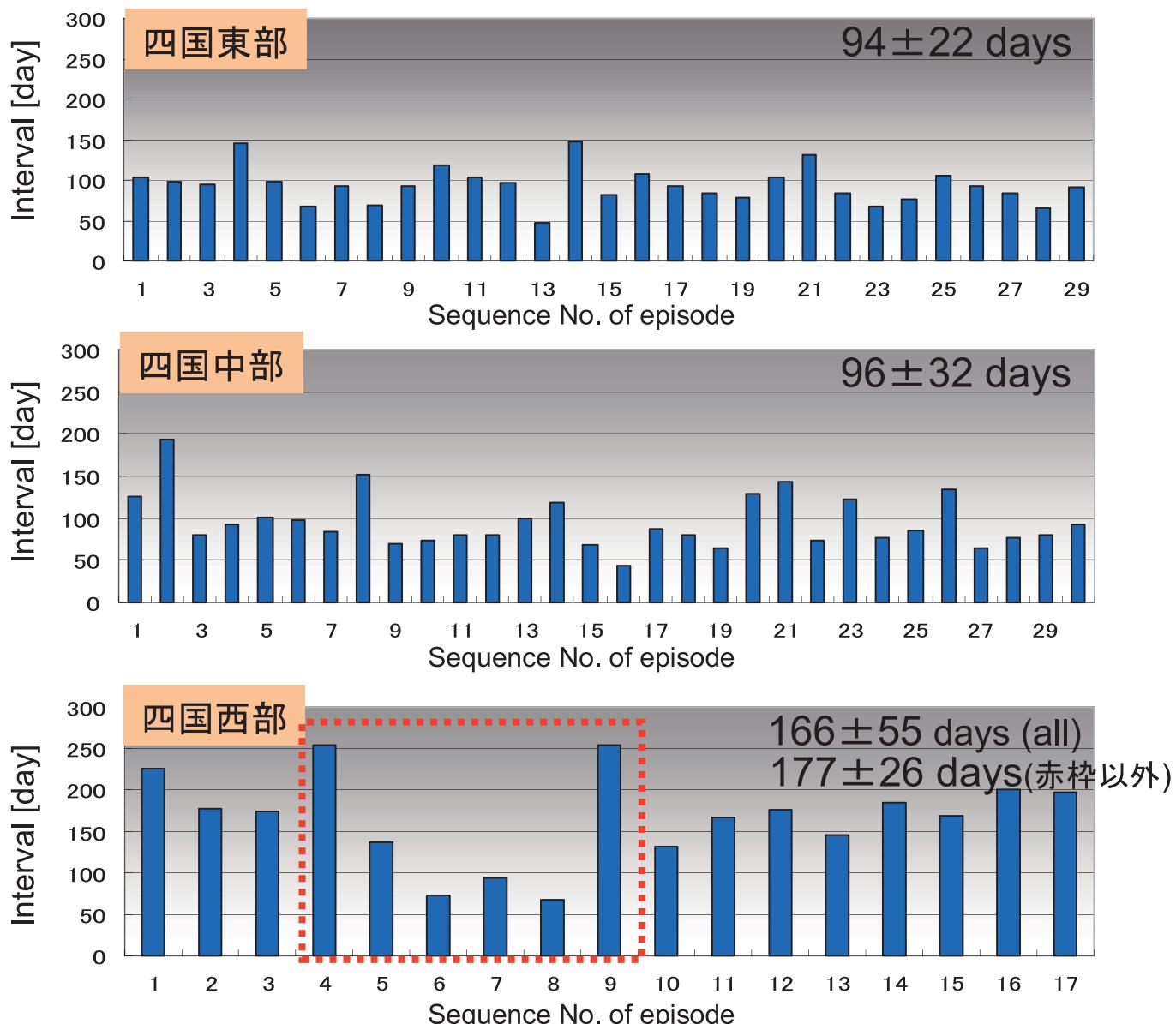
Fig.5 Spacetime distribution of tremors from ECM catalog (left) and low-frequency earthquakes from the JMA catalog (right) plotted by red dots. Blue diamonds are very low-frequency earthquakes, which have been analyzed from April, 2003.



第6図 短期的スロースリップイベントの発生（検出）状況。

深部低周波微動の時空間分布に、SSE の発生（検出）状況を重ねたもの。青が、複数観測点で傾斜変化を観測し SSE の断層パラメタモデルが推定可能であったもの、緑が、観測数が少なく SSE としての断層モデルは推定できなかったが、微動活動に同期した傾斜変化を捉えることができた場合である。また、黄緑は、小林他(2006)¹³⁾によって気象庁ひずみ計において観測された短期的SSE を示す。

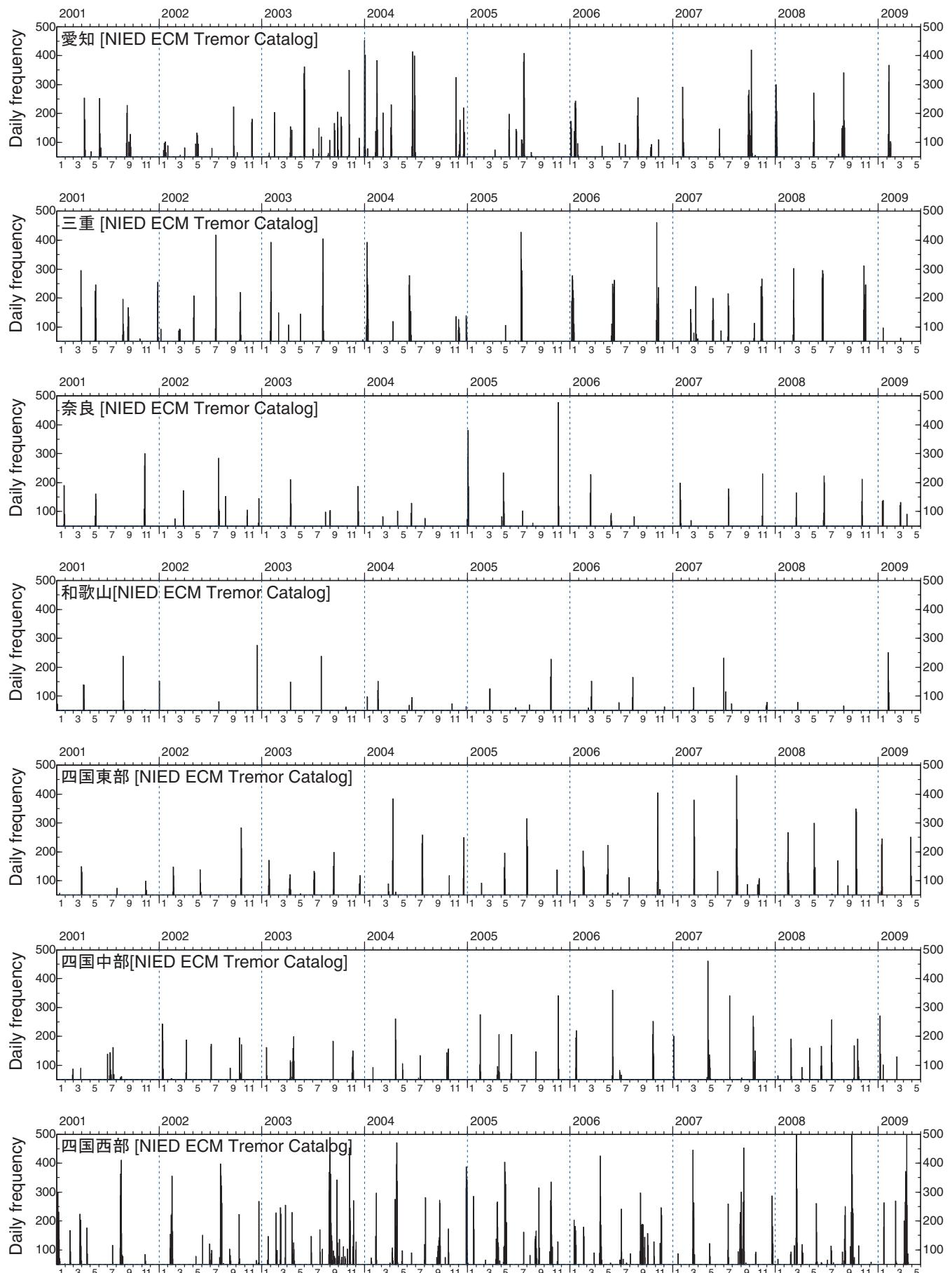
Fig.6 Spacetime distribution of slow slip events plotted on the tremors. Blue rectangles are large-size slow slip events with fault parameters estimated from tilting data. Green rectangles are small-size slow slip events with fault parameters not estimated whereas associated with the tilt step detected by only a few stations. Yellow rectangles are slow slip events in Tokai area estimated by strainmeters by the JMA by Kobayashi et al.(2006)¹³⁾.



第7図 四国の3地域における顕著な微動活動の発生間隔。

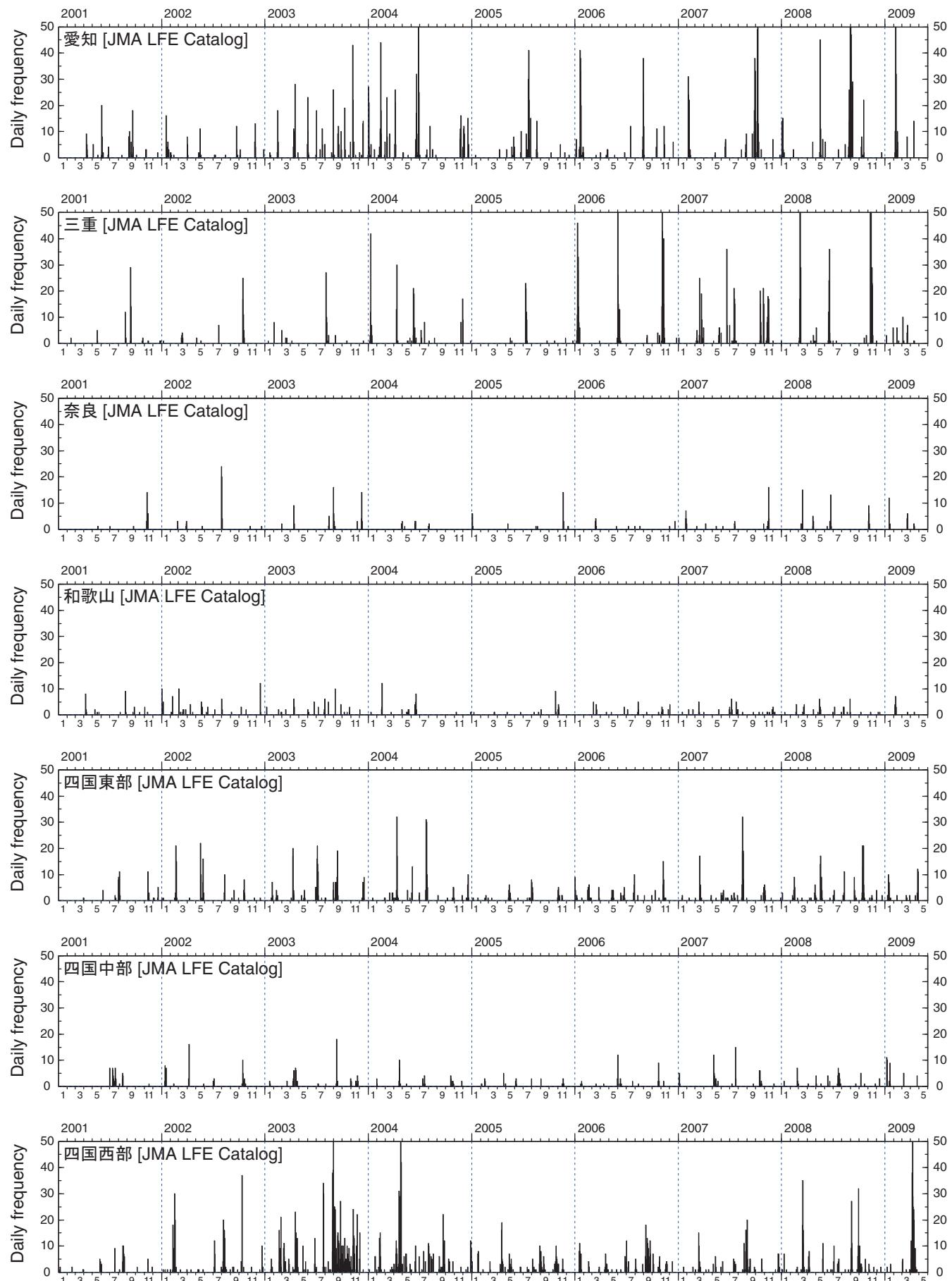
横軸は2001年1月から数えたエピソードの順番であり、縦軸に、次のエピソードとの時間間隔を示す。赤枠内のエピソード番号4とは、2002年8月と2003年4月との間隔、9番とは2004年4月と2004年12月との間隔を示したものであるが、これらの発生間隔は長く、逆に、その間のエピソード番号5～8における発生間隔は短い。この赤枠区間中には、豊後水道において長期的スロースリップイベントが発生している。

Fig.7 Time interval between the sequential tremor episodes in the three segments in Shikoku. The horizontal axis is the sequential number of the tremor episode from January 2001. The red dotted rectangle indicates affection by the long-term slow slip event in the Bungo Channel.



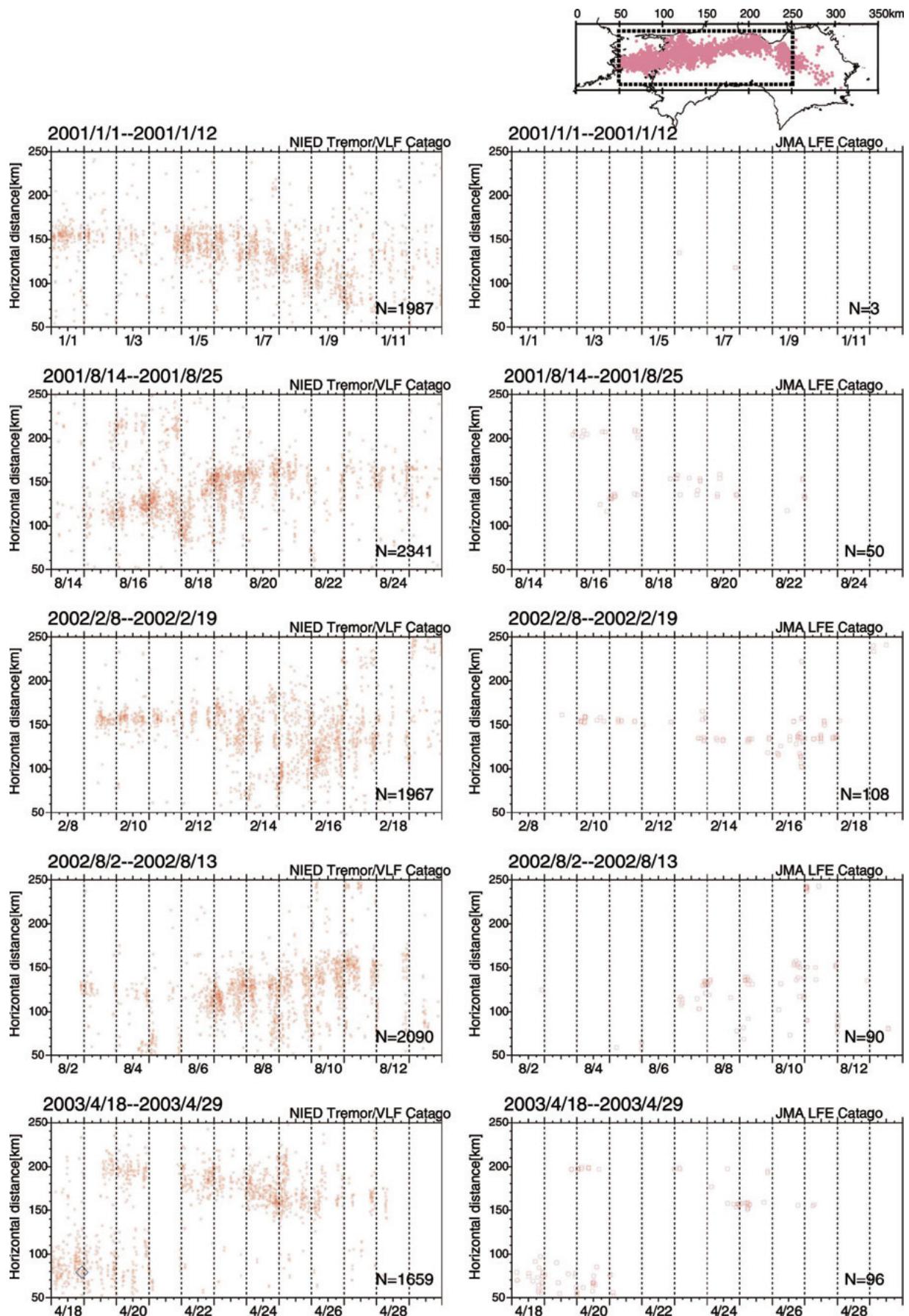
第8-A図 ECM カタログに基づく深部低周波微動活動時系列分布。

Fig.8A Daily frequency of tremors from the ECM catalog.



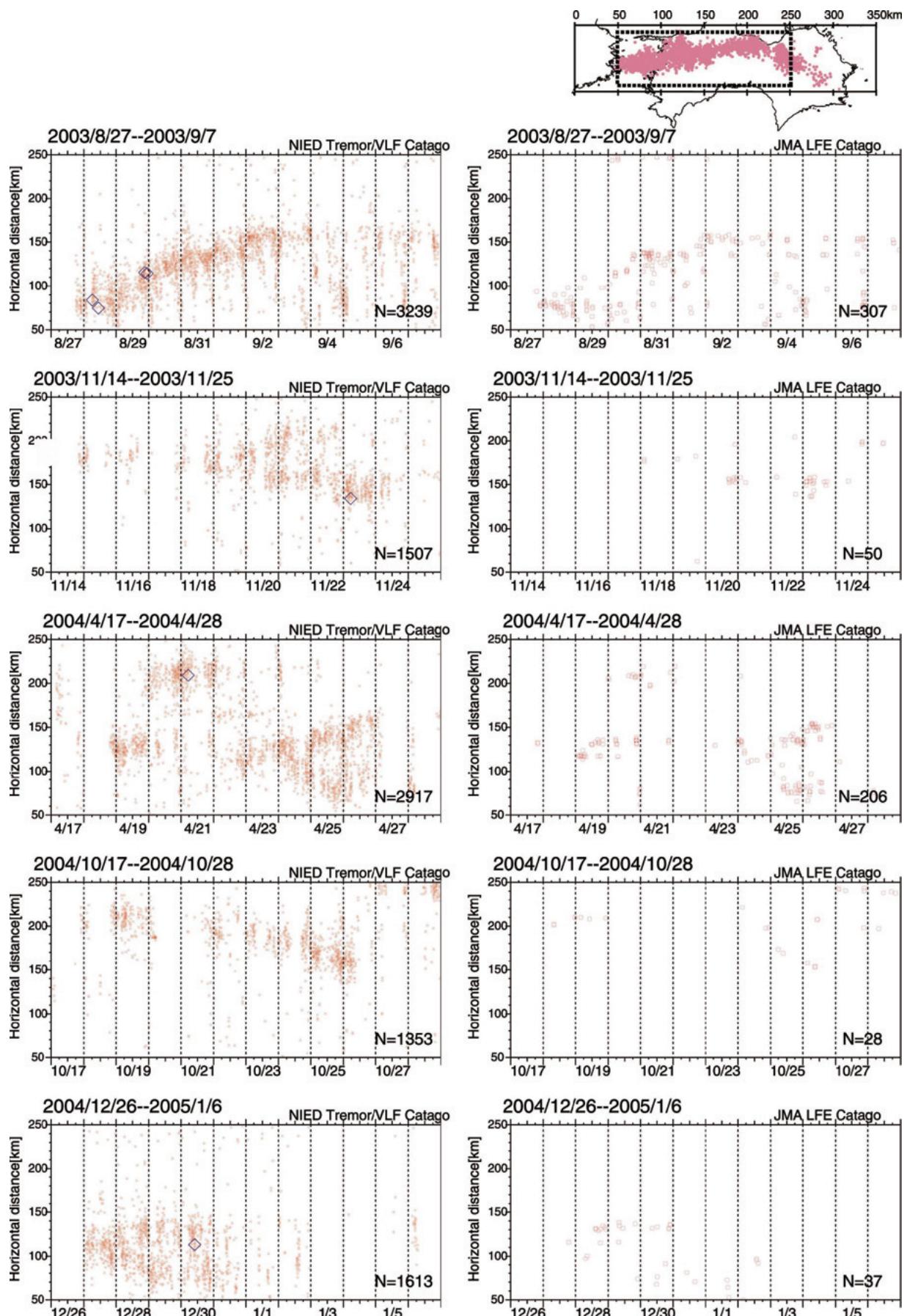
第8-B図 気象庁一元化カタログに基づく深部低周波地震活動時系列分布。

Fig.8B Daily frequency of low-frequency earthquakes from the JMA catalog.



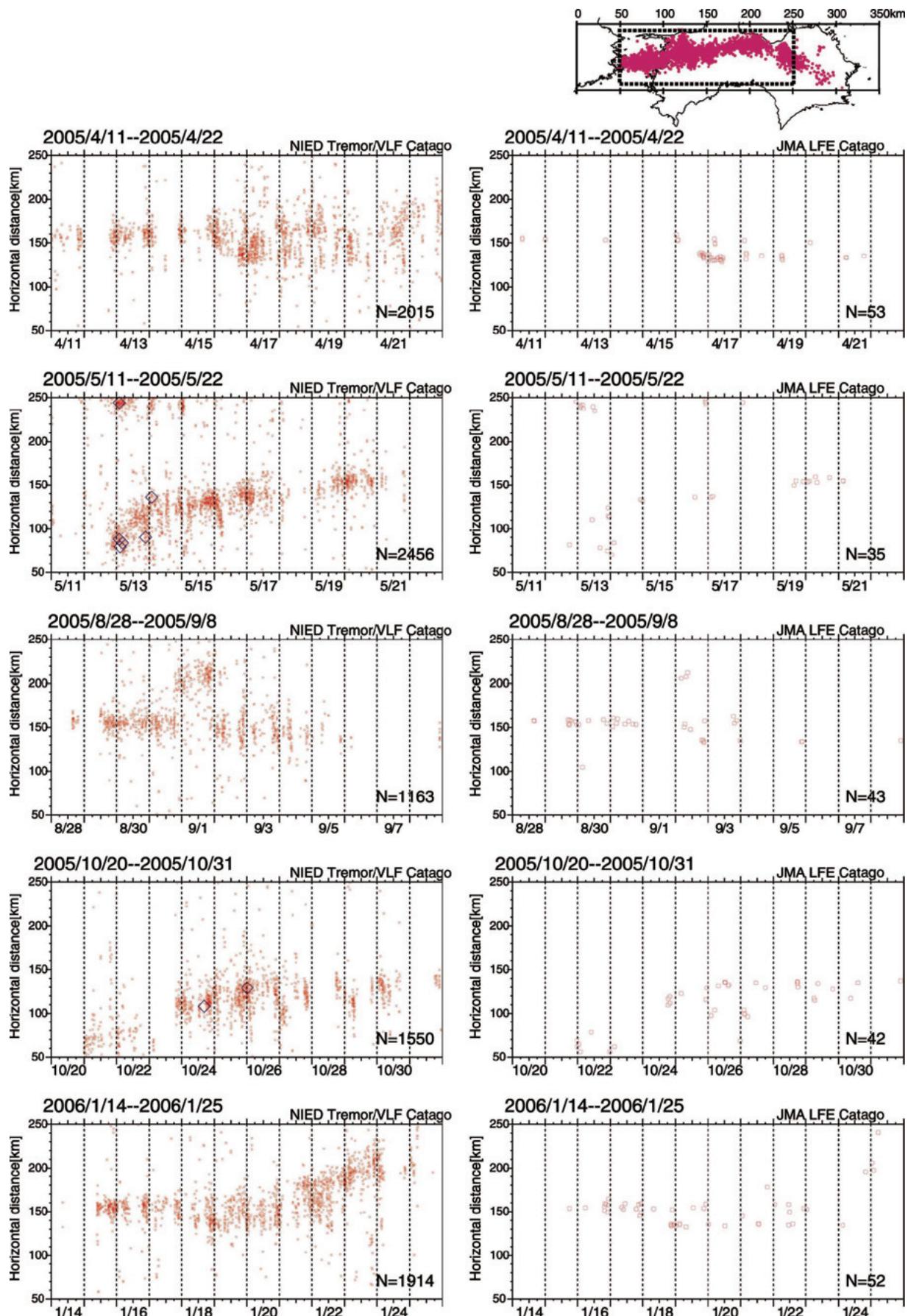
第9—A図 四国中西部で発生した顕著な深部低周波微動活動エピソードにおける微動 (ECM カタログ) 及び低周波地震 (気象庁一元化カタログ) の時空間分布。
横軸は全て12日間。左側の赤点がECM 微動源で青菱形が深部超低周波地震 (VLF)。右側の赤丸が気象庁による低周波地震。

Fig.9A Spacetime distribution of tremors from the ECM catalog and low-frequency earthquakes from the JMA catalog in western and central Shikoku with a time window of 12 days.



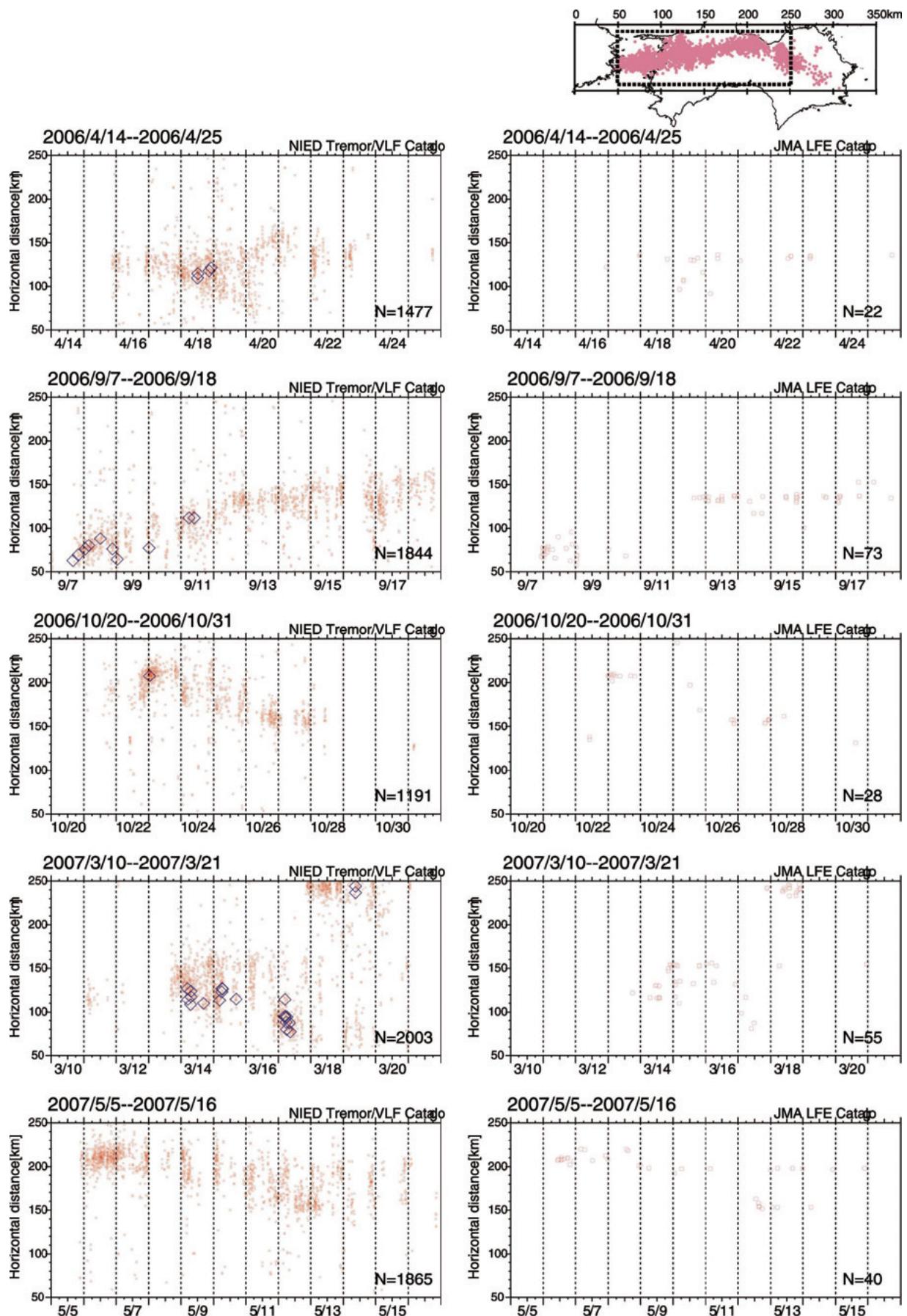
第9—B図 四重中西部で発生した顕著な深部低周波微動活動エピソードにおける微動 (ECM カタログ) 及び低周波地震 (気象庁一元化カタログ) の時空間分布。
横軸は全て12日間。左側の赤点がECM 微動源で青菱形が深部超低周波地震 (VLF)。右側の赤丸が気象庁による低周波地震。

Fig.9B Spacetime distribution of tremors from the ECM catalog and low-frequency earthquakes from the JMA catalog in western and central Shikoku with a time window of 12 days.



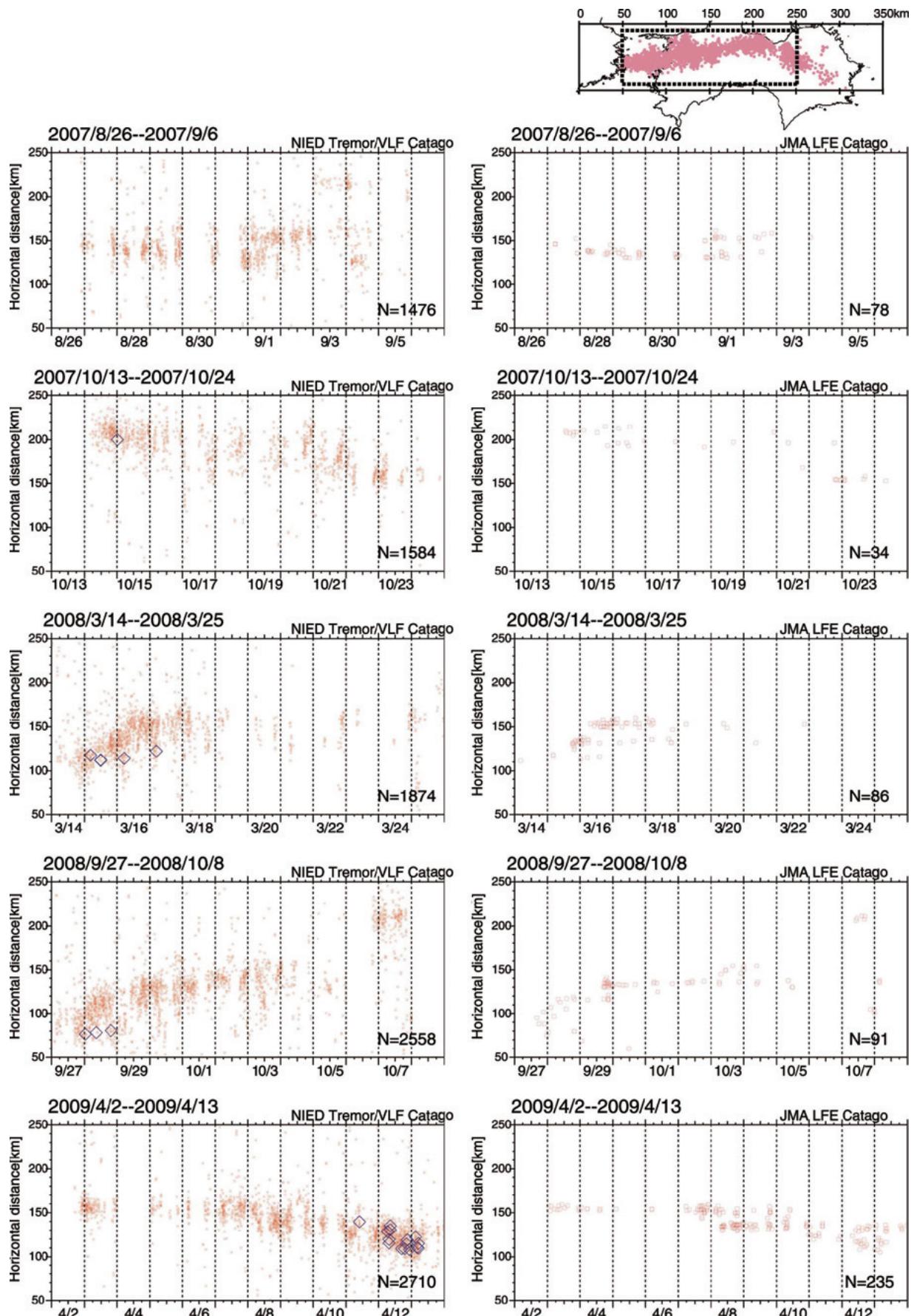
第9—C図 四国中西部で発生した顕著な深部低周波微動活動エピソードにおける微動 (ECM カタログ) 及び低周波地震 (気象庁一元化カタログ) の時空間分布。
横軸は全て12日間。左側の赤点がECM 微動源で青菱形が深部超低周波地震 (VLF)。右側の赤丸が気象庁による低周波地震。

Fig.9C Spacetime distribution of tremors from the ECM catalog and low-frequency earthquakes from the JMA catalog in western and central Shikoku with a time window of 12 days.



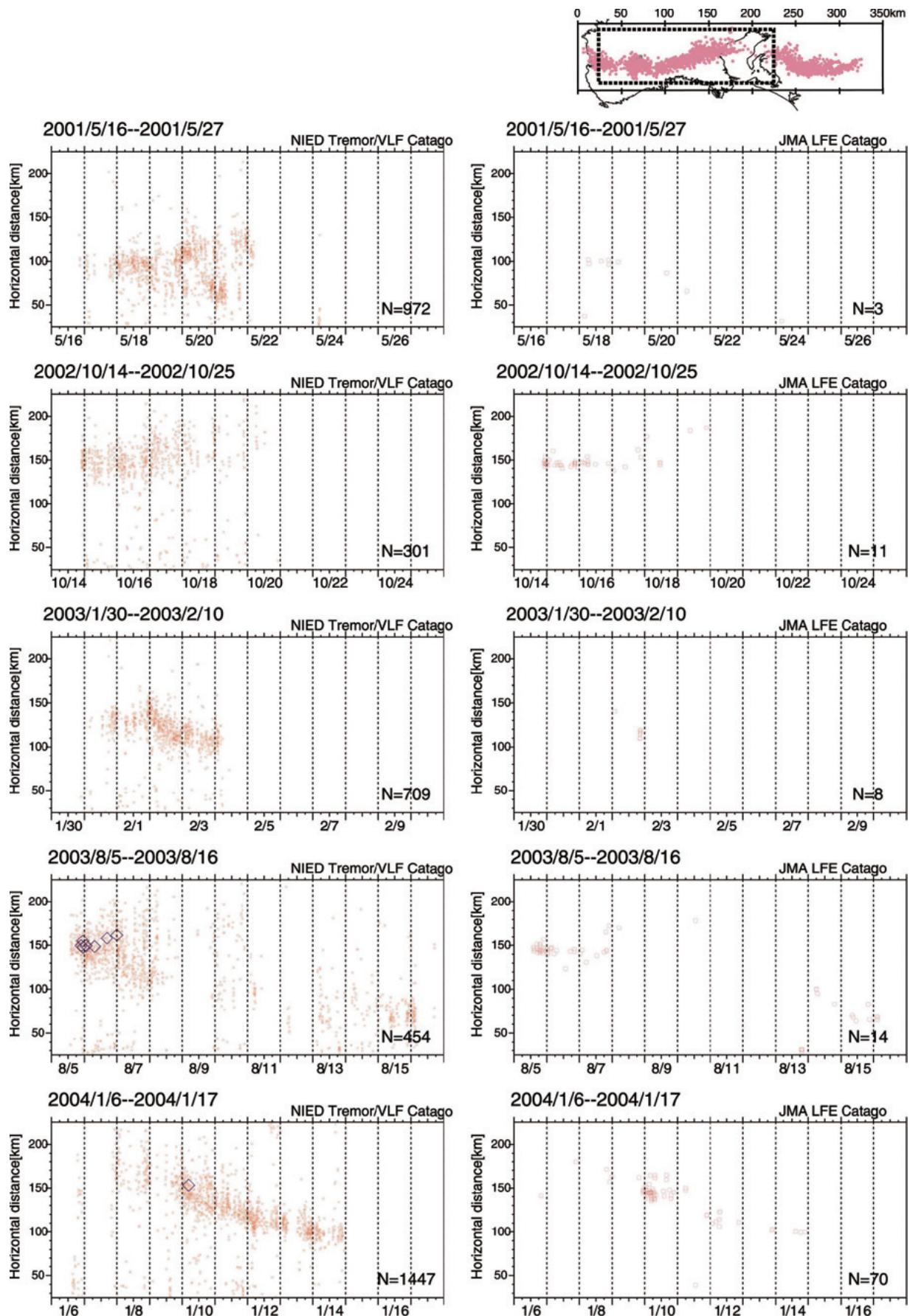
第9—D図 四国中西部で発生した顕著な深部低周波微動活動エピソードにおける微動 (ECM カタログ) 及び低周波地震 (気象庁一元化カタログ) の時空間分布。
横軸は全て12日間。左側の赤点がECM 微動源で青菱形が深部超低周波地震 (VLF)。右側の赤丸が気象庁による低周波地震。

Fig.9D Spacetime distribution of tremors from the ECM catalog and low-frequency earthquakes from the JMA catalog in western and central Shikoku with a time window of 12 days.



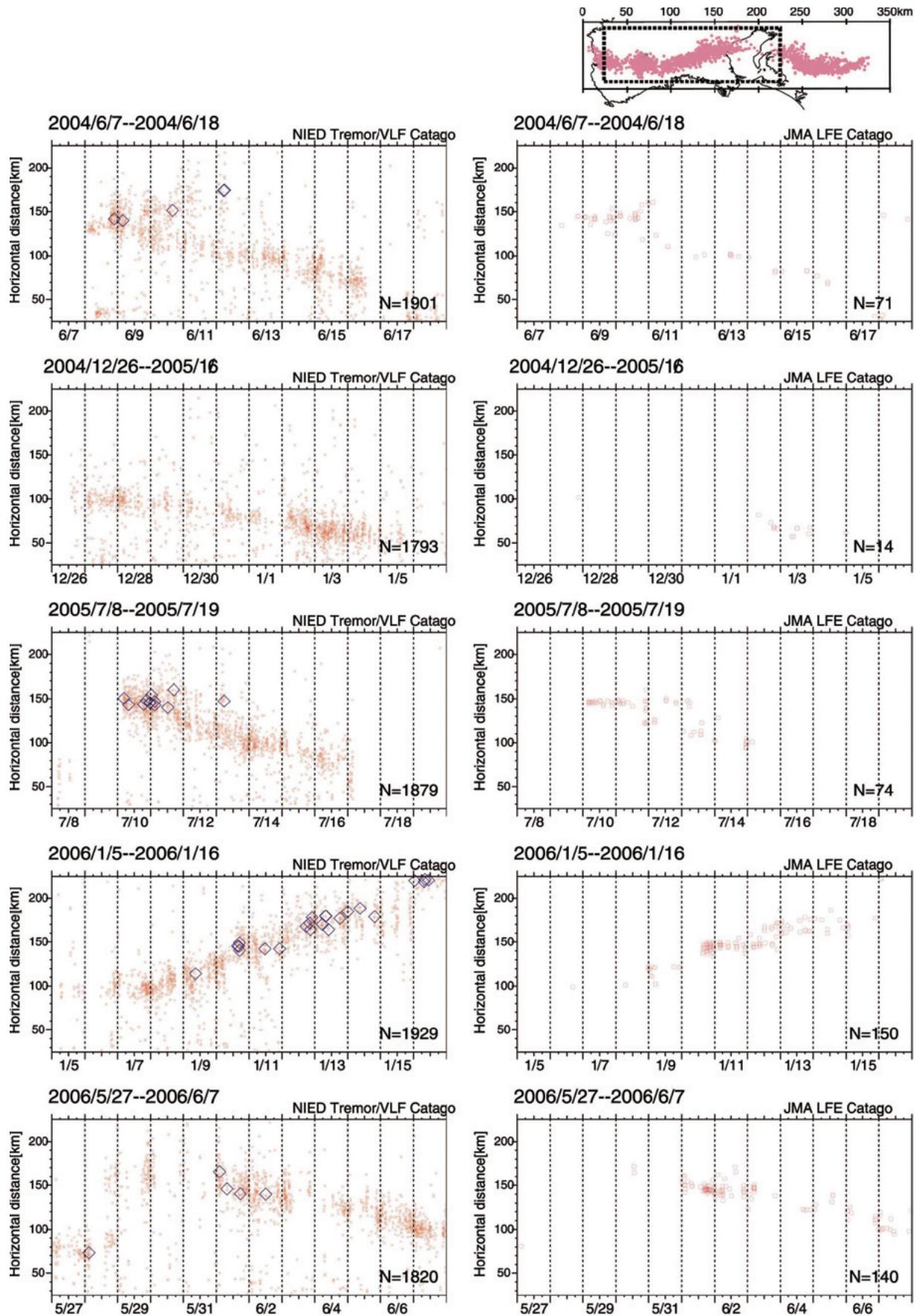
第9—E図 四重中西部で発生した顕著な深部低周波微動活動エピソードにおける微動 (ECM カタログ) 及び低周波地震 (気象庁一元化カタログ) の時空間分布。
横軸は全て12日間。左側の赤点がECM 微動源で青菱形が深部超低周波地震 (VLF)。右側の赤丸が気象庁による低周波地震。

Fig.9E Spacetime distribution of tremors from the ECM catalog and low-frequency earthquakes from the JMA catalog in western and central Shikoku with a time window of 12 days.



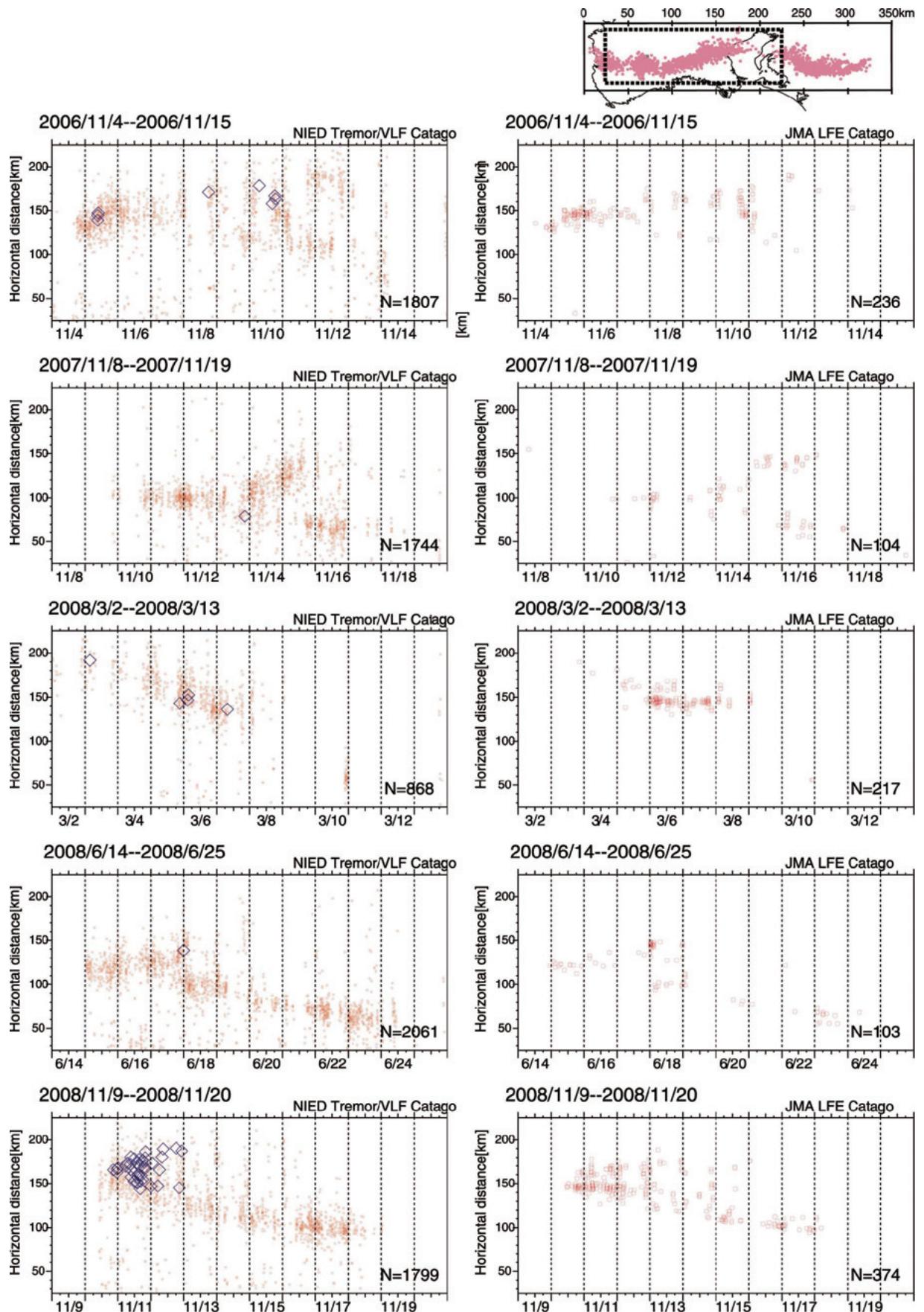
第10—A図 紀伊半島で発生した顕著な深部低周波微動活動エピソードにおける微動 (ECM カタログ) 及び低周波地震 (気象庁一元化カタログ) の時空間分布。
横軸は全て12日間。左側の赤点がECM 微動源で青菱形が深部超低周波地震 (VLF)。右側の赤丸が気象庁による低周波地震。

Fig.10A Spacetime distribution of tremors from the ECM catalog and low-frequency earthquakes from the JMA catalog in Kii peninsula with a time window of 12 days.



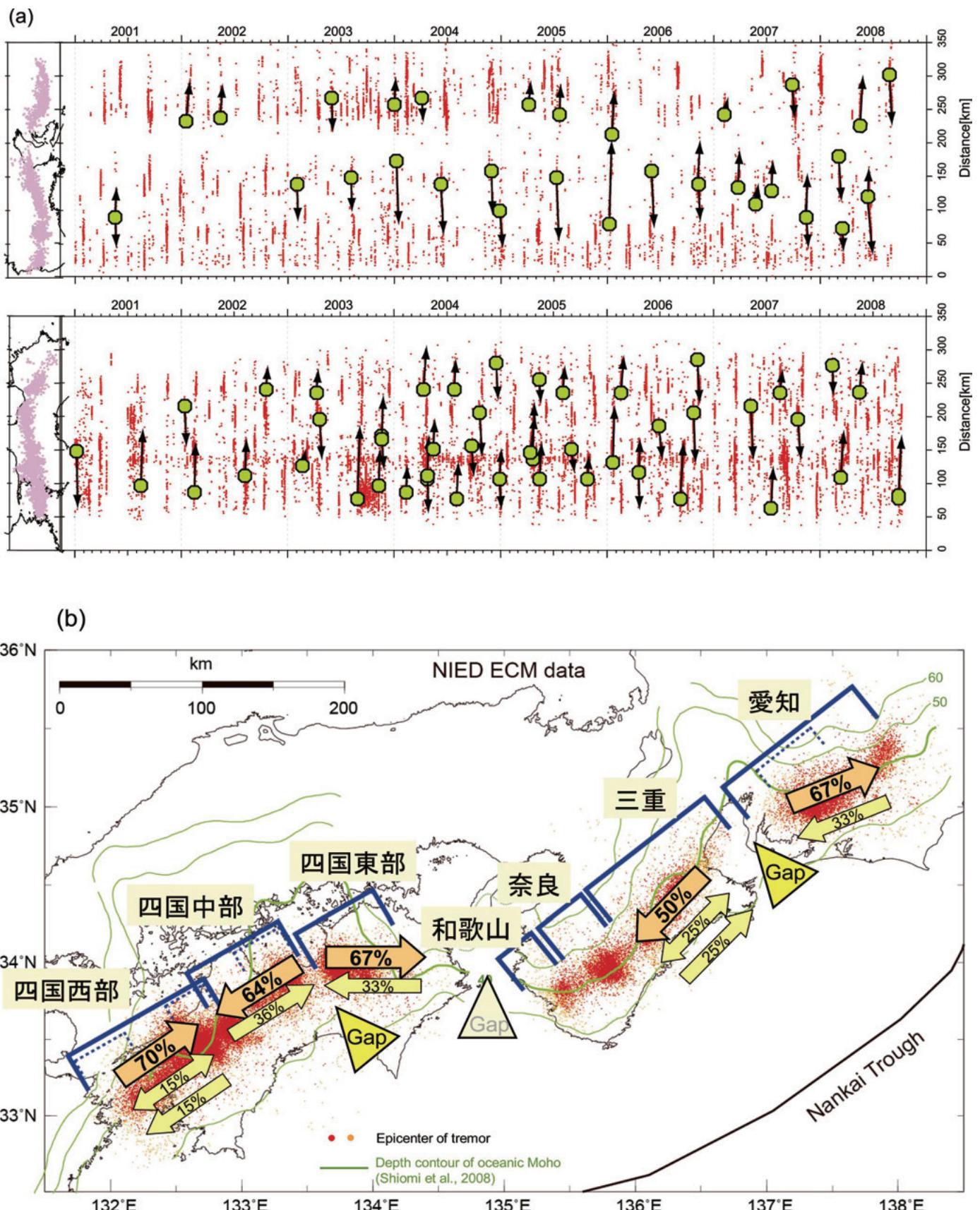
第10—B図 紀伊半島で発生した顕著な深部低周波微動活動エピソードにおける微動 (ECM カタログ) 及び低周波地震 (気象庁一元化カタログ) の時空間分布。
横軸は全て12日間。左側の赤点がECM 微動源で青菱形が深部超低周波地震 (VLF)。右側の赤丸が気象庁による低周波地震。

Fig.10B Spacetime distribution of tremors from the ECM catalog and low-frequency earthquakes from the JMA catalog in Kii peninsula with a time window of 12 days.



第10—C図 紀伊半島で発生した顕著な深部低周波微動活動エピソードにおける微動 (ECM カタログ) 及び低周波地震 (気象庁一元化カタログ) の時空間分布。
横軸は全て12日間。左側の赤点がECM 微動源で青菱形が深部超低周波地震 (VLF)。右側の赤丸が気象庁による低周波地震。

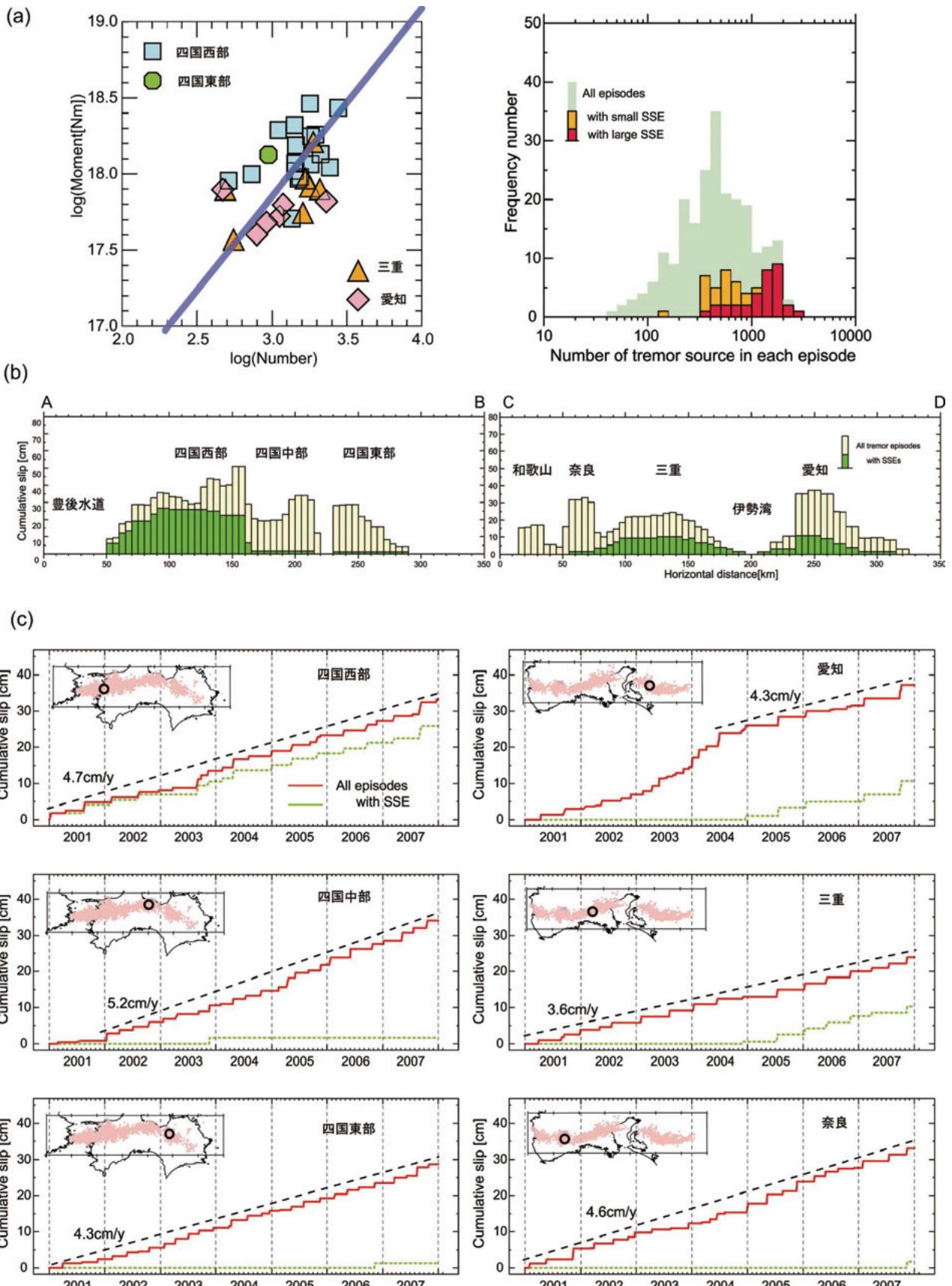
Fig.10C Spacetime distribution of tremors from the ECM catalog and low-frequency earthquakes from the JMA catalog in Kii peninsula with a time window of 12 days.



第11図 (a)深部低周波微動移動方向.

2001年から2008年までに深部低周波微動活動全域で顕著な移動を伴った微動エピソードにおける移動の開始位置(緑丸)と移動方向(矢印),及び移動距離(丸から矢印までの長さ). (b)セグメント毎に集計した移動方向のパターン.

Fig.11 (a) Spacetime distribution of starting points (green circle) and direction (arrow) of migrating tremors from the ECM catalog in southwest Japan from 2001 to 2008. The length of the solid line attached with arrow indicates the size of the tremor episode. (b) The percentage of the migration direction at each tremor segment.



第12図 (a) (左) この分布から得られた回帰直線ある。(右) 微動エピソードに含まれる微動検出数の頻度分布。全ての微動エピソードについては緑で、またそのうち傾斜変化が微動活動に同期して観測されたが数が少なくSSE パラメタの推定ができないエピソードをオレンジ色で示す。つまり、赤は規模の大きな SSE、緑は規模の小さな SSE であると判断される。(b) 換算すべり量空間分布。全ての微動エピソードに含まれる微動検知数から換算したすべり量を算出し、プレート走向方向に沿って示す。ここで使用された微動エピソードは2001年から2007年の7年間に発生したものである。黄色は全ての微動エピソードに対応し、緑は SSE 断層モデルが推定されたエピソードによる積算すべり量である。(c) 地域毎の換算すべり量積算時系列変化。挿入地図中の黒丸で示した地点における、全ての微動エピソードに含まれる微動検知数から換算したすべり量の積算値を、時系列で示す。ここで使用された微動エピソードは2001年から2007年の7年間に発生したものである。赤線は全ての微動エピソードに対応し、緑線は SSE 断層モデルが推定されたエピソードに対応する。

Fig.12 (a)(Left) Relationship between the number of tremor source detection and moment of the slow slip event for each major episode. The blue line is the regression line estimated from the distribution. (Right) Frequency distribution of the number of the tremor source detection in each episode. The red bar indicates the episode associated with large-size slow slip event with slip parameters estimated by enough tilting data. Orange bar indicate the episode associated with small-size slow slip event with tilting step detected at only a few stations. (b) Spatial distribution of cumulative slip amount along the profile of A-B and C-D as shown in Fig.2. Yellow bars are cumulative slip amounts estimated from all of the tremor episodes. Green bars indicate the cumulative slip amounts from the tremor episode associated with the large-size slow slip events. (c) Time history of the cumulative slip amount at each point indicated in the insert map on the upper-left corner. Red lines indicate cumulative slip amounts estimated from all of the tremor episodes. Green dotted lines indicate the cumulative slip amounts from the tremor episode associated with the large-size slow slip events. Dashed lines are regression line estimated from each area.