１２－５　関東地方の相似地震
Repeating earthquakes at Kanto region

防災科学技術研究所
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

１．はじめに

関東地方ではフィリピン海プレートおよび太平洋プレートの沈み込みに伴って多数の相似地震が見出されている．相似地震は波形の相似性が極めて高く，ほぼ一定の規模・間隔で繰り返すことからプレート境界上の微小なアスペリティにおける破壊の繰り返しと考えられ，プレート運動の指標として利用可能である．本稿では，相似地震活動から推定される関東地方におけるプレートの運動について，定常的な成分および定常的な運動からの揺らぎの２つの観点から示す．また，相似地震の発生場と速度構造との関連も示す．はじめに，相似地震の解析手法について第１表にまとめる．

２．相似地震解析

波形の相似性の高い地震を抽出するため，観測波形の相互相関解析に基づき相似地震の抽出を行っている．解析手法および相似地震と判定する条件は Kimura et al. (2006)[1] と同様である．Hi-net のデータを関東東海観測網のデータと比較する際は,後者を前者のサンプリングレートにリンサンプルして比較した．なお，M3.5 以上の地震についてはすべての地震との比較を行っている．相似地震ペアが得られた後，共通した地震を有するペアを同一のグループと見なし，同一の地震が複数のグループに含まれなくなるまでグルーピングを繰り返した．

相似地震のパッチにおけるすべり履歴を推定する際は，相似地震の規模 M から Hanks and Kanamori (1979)[2] のスケーリング則を用いて モーメント解放量を求め，Nadeau and Johnson (1998)[3] によるすべり量とモーメント解放量との関係式を用いてすべり量を推定している．平均すべり履歴は,注目する領域の相似地震グループについて,個々のグループのすべり履歴を求めた後,これを平均化したものである．すべり履歴はプレート境界におけるプレートの相対変位を表すと考えられ，横軸を時間で表した場合，すべり履歴の傾きがすべり速度に相当する．

３．相似地震から推定される関東地方のプレート間すべり

解析の結果得られたフィリピン海プレートおよび太平洋プレートの相似地震のパッチの分布を第１図に示す．関東地方南部の 1923 年関東地震の震源域でフィリピン海プレートの相似地震が少数見られるが，すべて短期間に集中的に発生するバースト型である．関東地方では，房総沖(g) から茨城県南西部(f) に至る関東地方東部で定常的に繰り返す相似地震が多数見られる(Kimura et al., 2006)[1]．太平洋プレートについても関東東部で相似地震の発生数が多い．また，いずれのプレートでも相似地震は特定の領域に集中して発生しておりクラスタリングが明瞭である．相似地震の深さ分布および速度構造との関連については第６節に示す．

第2図に,第1図に示したクラスター毎に推定したすべり履歴を示す.東京都付近(h),房総沖(g),および銚子付近(d)をのぞいて，過去約 30 年間にわたってすべり速度はほぼ一定で，プレート沈み込みに伴うすべりが定常的に継続してきたことが分かる．すべり速度は，プレート運動モデルからは太平洋プレートでフィリピン海プレートより速い速度が期待されるが [4]，相似地震からも太平洋プレートでフィリピン海プレートより速い速度が推定され，相対的な関係は再現されている．1923

年関東地震の震源域のすぐ北に相当する東京都付近(h)で,フィリピン海プレートの他の領域より遅いすべり速度が推定されている．ここでは，1923 年関東地震のすぐ北に位置することからすべりは小さいと期待され，1923 年関東地震の余効すべりの影響を見ている可能性がある．太平洋プレートについては，第 7 節で述べるように M6 クラスのプレート境界地震が発生している．関東地方東部について見ると，相似地震の分布の隙間を考えると M7 クラスの固着域が存在する可能性がある．1894 年明治東京地震(M7.0)および 1895 年茨城県南部の地震(M7.2)については,プレート境界の地震だった可能性が指摘されている(地震調査研究推進本部，2004)[5]．M7.0 の地震の典型的なすべり量を 1.6 m とし[6]，カップリング率が 100% とすると，太平洋プレートとフィリピン海プレートの間の相対運動速度を 6.3 cm/y として[4]，約 25 年間の繰り返し間隔が期待される．しかし，最近およそ 100 年間に M7 クラスのプレート境界地震は発生していない．

房総沖ではところどころにすべりの加速，銚子付近ではすべりの減速が見られる．房総沖ではフィリピン海プレート上でスロースリップイベント(SSE)がほぼ 6 年間隔で繰り返し発生しており[7),8),9)](青矢印)，すべりの加速は房総 SSE の発生時期とほぼ同期している．また，銚子付近では M6 クラスのプレート間地震が過去約 30 年間で 5 イベント発生したが(赤矢印),すべりの減速はこれらの地震に先行する傾向が見られる．これらのすべりの揺らぎについては第 7 節で詳しく示す．

４．相似地震の発生予測

プレート沈み込みに伴う定常的なすべりを反映して，ほぼ定常的に繰り返し発生するグループが見られる．M5 クラスの地震についての例を第 3，4 図に示す．これらのグループでは，相似地震の発生が非常に規則的で等間隔であることから，相似地震の時系列を元に発生予測を行った．発生予測は，相似地震の繰り返し間隔が正規分布に従うとして，最新の相似地震の発震時から平均の繰り返し間隔後の時期を中心として，繰り返し間隔の標準偏差の幅を持った期間を次の相似地震の発生予測時期とした．第 4 図に発生予測結果を青いシンボルで示す．水色のシンボルはひとつ前までの相似地震から発生予測を行った結果である．これを見ると，最新の相似地震は発生が予測される時期にほぼ発生しており，定常的に発生する相似地震グループについてほぼ発生時期を予測できたと言える．相似地震グループ A および B では，最新の相似地震が必ずしも予測された期間内に発生していないが，これらのグループでは事前のイベント数が少なく，グループ B ではそもそも繰り返し間隔の標準偏差が得られていない．相似地震のデータが多いグループ C では，予測された期間内に最新の相似地震が発生している.今後データが蓄積することで発生予測の精度の向上が期待される．

５．相似地震モニタリング

プレート間すべりの状況をモニターするため，相似地震の自動解析を行っている．処理の流れおよび対象領域を第 5，6 図に示す．処理のおおまかな流れは以下のようになる．Hi-net による震源データが決定された後，波形データの切り出しを行い，既存の相似地震との比較を行う．自動決定震源(1 次，2 次自動処理震源)，手動読み取りによる震源と処理が進むに従って処理内容をアップデートしている．1 次自動処理震源については相似地震抽出に貢献度の高い観測点から，なるべく均等に分布するように選んだ 9 点について解析を行っている．これ以後の震源については，旧関東東海観測網の点およびこれから Hi-net 化された点すべてについて解析を行っている．相似地震と判定された場合にはグルーピングを行い，すべり履歴の推定，発生予測，および波形画像の作成を自動的に行い相似地震モニタリングに役立てている．

６．相似地震の分布と速度構造

相似地震の発生する場を調べるため，相似地震分布と地震波速度構造（Matsubara et al., 2008)[10] を比較した(第７図)．東西断面(A-A’ および B-B’)では太平洋プレートの高速度マントルと上面付近の低速度層が見られる．北西－南東断面(C-C’ および D-D’)では太平洋プレートの上にフィリピン海プレートの高速度マントルと上面付近の低速度層が見られる．太平洋プレートよびフィリピン海プレートの相似地震は，いずれも地震波速度構造から推定されるプレートの上面付近に分布する．いずれのプレートでも上面付近には低速度層が見られるが，詳しく見ると，相似地震はプレート上面付近でも比較的高速な領域に分布する(Matsubara et al., in prep).

７．相似地震とプレート境界活動

第３節で述べたすべりに揺らぎの見られる房総沖および銚子付近の相似地震活動の特徴とプレート境界活動との関連について示す.

７－１．房総スロースリップイベントに同期した相似地震の活動

房総 SSE は最近では 2007 年８ 月に発生している．房総 SSE は群発地震活動を伴うことが特徴であり，相似地震も多数検出されている．第８図に測地データから推定された房総 SSE のすべり分布[9] および相似地震・群発地震の震央分布・時空間分布を示す．相似地震は房総 SSE のすべり域の深部に相当する北側の縁に沿って分布する．時空間分布を見ると，相似地震の多発した時期は房総 SSE によると推定される大きな傾斜変化の現れた時期(灰太線[8])と重なる．測地データから推定された房総 SSE の断層面[8]と相似地震の深さ分布を比較するとほぼ一致し，群発地震の分布とも良く重なる(第９図)．これらのことから，相似地震は房総 SSE によるすべりによって，同じ境界面上で誘発されたと考えられる.

2007 年房総 SSE では相似地震データと測地データの双方ですべり変化を検出できているため両者の比較が可能である．2007 年房総 SSE では多数の傾斜計で地殻変動がとらえられ，測地データの時間発展解析を行うことで詳細なすべりの時空間分布が得られている[9]．東側の領域 A および西側の領域 B のそれぞれで大きなすべりが起き始めた時期を第８図に合わせて示す．相似地震の活動と比べると，大きなすべりの起きた時にその場所で相似地震が多発しており，相似地震の活動が房総 SSE の震源過程を反映することが示唆される．相似地震からすべり量を推定し，スムージングによってすべり分布を推定したところ，第 10 図のような結果が得られた．北部・東部で大きなすべりが推定され，すべり量は最大 6.3cm と得られた．測地データからも相似地震の分布域の北部・東部にあたる領域ですべり量が大きい(第８図)．測地データで震源域の端ですべり量は 50mm 程度に推定されているが誤差も同程度であり，海域で相似地震による推定の分解能が高い可能性がある．モーメント解放量は相似地震からは 3.7×10^{18} Nm (Mw6.3) と推定された．これは測地データからの推定値 9.0×10^{18} Nm (Mw6.6)[9] より小さい．これは，相似地震が震源域の周辺に分布し周辺のすべりのみを反映しているためとすると説明できる．ここで，測地データからの推定結果は房総 SSE の非地震性すべり領域のすべりを反映し,相似地震からの推定結果は非地震性すべり+地震性すべり領域のすべりを反映するとして，両者のモーメントを合計すると 12.7×10^{18} Nm (Mw6.7) となり，両者を足しても房総 SSE の Mw はほぼ同じである.いずれにしても相似地震だけからでも Mw6 を越える規模は再現されており，房総 SSE の大まかな規模を推定するには役立つといえる.

７－２．M6 クラスのプレート境界地震に先行する相似地震の静穏化現象

太平洋プレートの銚子付近では，過去約 30 年間に M6 クラスのプレート境界地震が 5 イベント発生している(イベント A-E，第 11，12 図)．相似地震活動から推定されるすべりと比較すると M6 地震の 2～5 年前からすべりの減速，すなわち相似地震の静穏化現象が見出され(静穏期)，M6 地震発生後すべりが加速し(加速期)，やがて定常速度に戻る(安定期)様子が見られる．M6 地震後のすべりの加速期には，震源域周辺で相似地震の発生数が増えており，M6 地震による余効すべりによって相似地震が誘発されたと考えられる．すべりの静穏期には，M6 地震の震源域周辺で相似地震の発生数が減少しており，M6 地震との関連が示唆される．静穏化のモデルとして(I) M6 地震の余効すべりが長時間継続した後すべりが終了 (II) M6 クラス地震の震源域で地震発生に至る過程で M6 アスペリティの固着の影響が周囲に伝播した可能性，が考えられる(第 13 図)．

(木村尚紀)

Hisanori Kimura

参考文献

1) Kimura, H., Kasahara, K., Igarashi, T., and Hirata, N.: Repeating earthquake activities associated with the Philippine Sea plate subduction in the Kanto district, central Japan: a new plate configuration revealed by interplate aseismic slips. Tectonophysics, 417, 101-118, 2006.

2) Hanks, T.C., Kanamori, H., A moment magnitude scale. J. Geophys. Res. 84, 2348- 2350, 1979.

3) Nadeau, R.M., Johnson, L.R., Seismological studies at Parkfield VI: moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes. Bull. Seismol. Soc. Am. 88, 790-814, 1998.

4) Seno T., S. Sakurai, and S. Stein, Can the Okhotsk plate be discriminated from the North American plate?, J. Geophys. Res., 101, 11305-11315, 1996.

5) 地震調査研究推進本部，相模トラフ沿いの地震活動の長期評価，2004.

6) 宇津徳治ほか編，地震の事典，朝倉書店，1987.

7) Ozawa, S., H. Suito, and M. Tobita, Occurrence of quasi-periodic slow-slip off the east coast of the Boso peninsula, Central Japan, Earth Planets Space, 59, 1241-1245, 2007.

8) Sekine, S., H. Hirose, H. Kimura, and K. Obara, The 2007 Boso Slow Slip Event and the associated earthquake swarm, Eos Trans. AGU, 88(52), T21A-0363, 2007.

9) Hirose, H., S. Sekine, H. Kimura, K. Obara, Source Process of the 2007 Boso Slow Slip Event With an Earthquake Swarm From Tiltmeter Data, Eos Trans. AGU 89 (53), U32A-02, 2008.

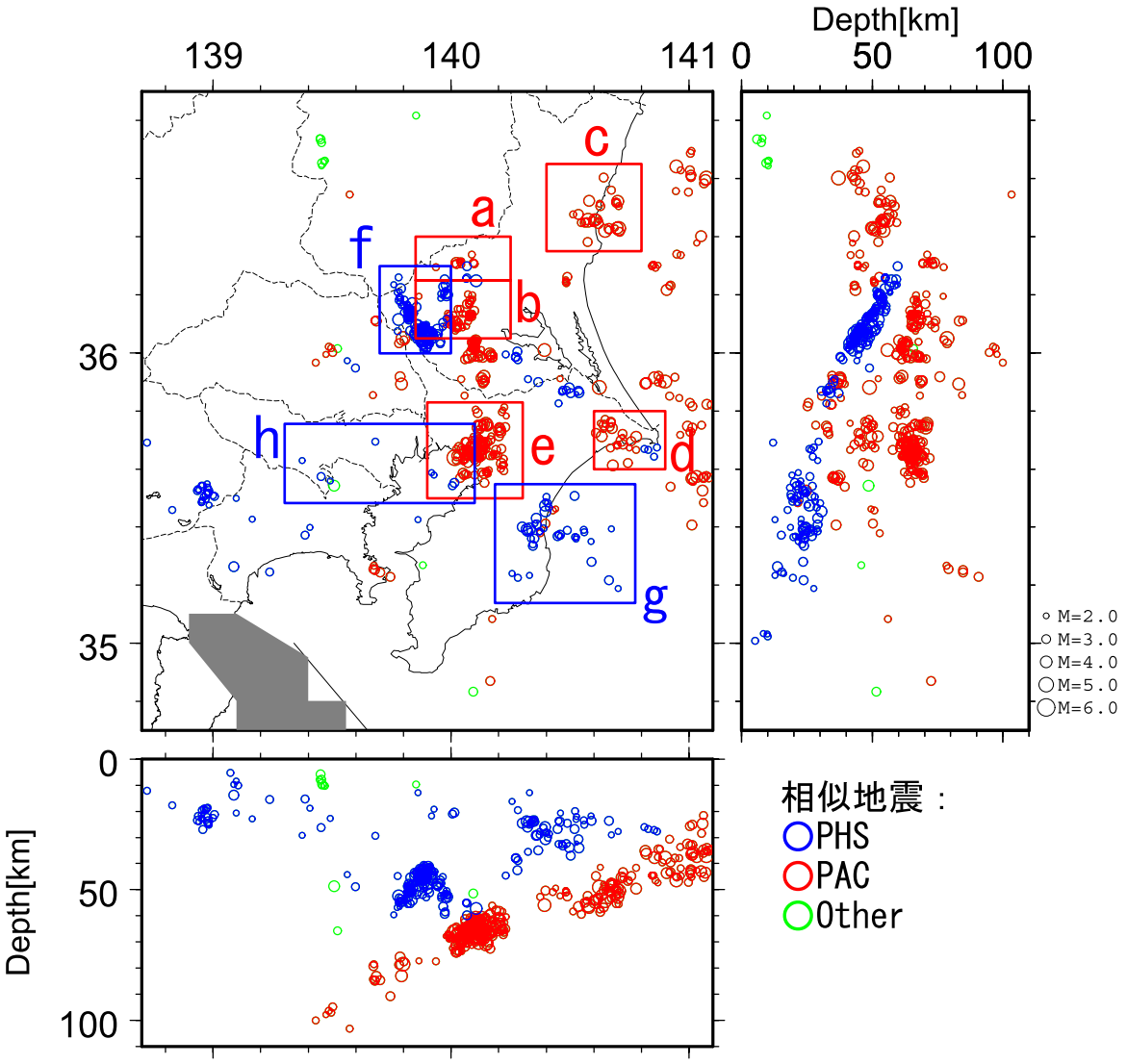
10) Matsubara, M., K. Obara and K. Kasahara, Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, Tectonophysics, 454, 86-103, 2008.

11) 松村稔・伊藤喜宏・木村尚紀・小原一成・関口渉次・堀貞喜・笠原敬司，高精度即時震源パラメータ解析システム(AQUA)の開発，地震，59，167-184. 2006.

第 1 表　相似地震の解析内容.

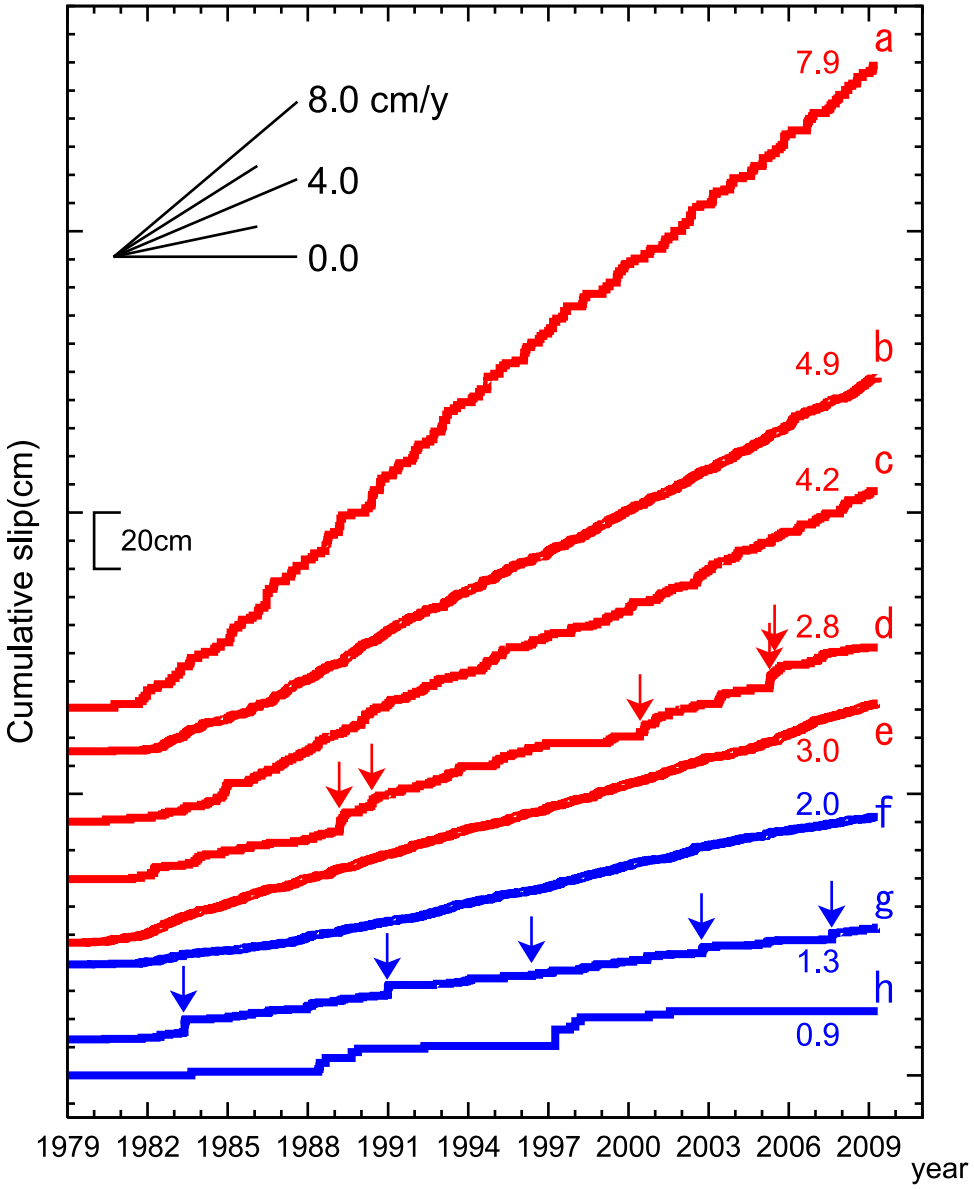
Table 1　Parameters for repeating earthquake analysis

処理内容	処理条件
波形データ	上下動成分, 1-20 Hz バンドパスフィルター
相似地震判定条件	2点以上で相関係数 0.95以上
震源データ	1979/7/1 – 2002/8/31 防災科学技術研究所 関東東海観測網, M≧2.0
探索範囲	内陸: 水平 10 km 以内, 鉛直 20 km 以内 海域: 水平 40 km 以内



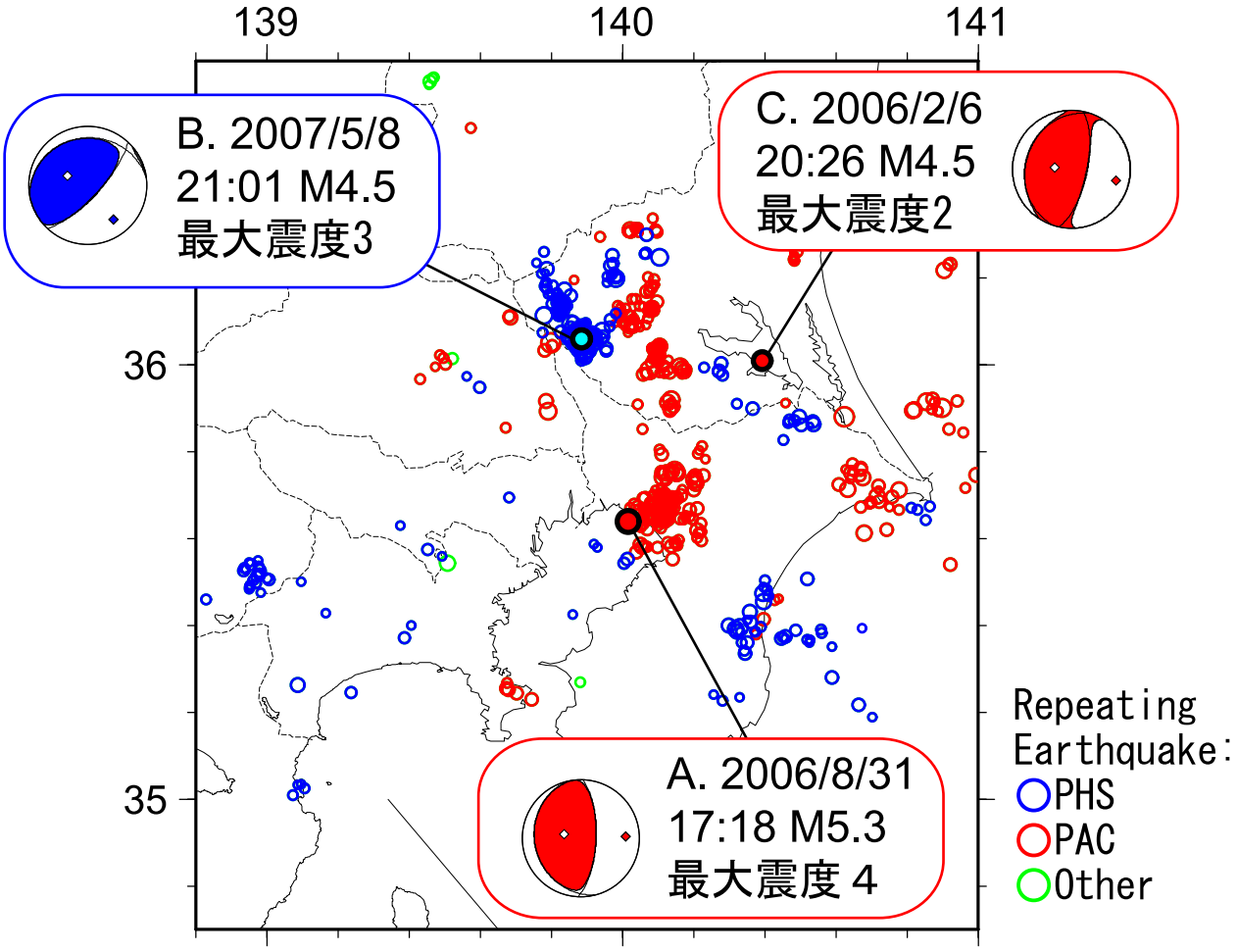
第 1 図　相似地震のパッチの分布．フィリピン海プレート(PHS)(青丸)，太平洋プレート(PAC)(赤丸)，およびその他の相似地震(緑丸)を示す．グレーの領域は未処理領域.

Fig. 1　Distribution of fault patches of repeating earthquakes. Repeating earthquakes on the Philippine Sea plate (PHS) (blue circle), on the Pacific plate (PAC) (red circle), and others (green circle) are shown. Earthquakes in a gray shaded region were not analyzed.



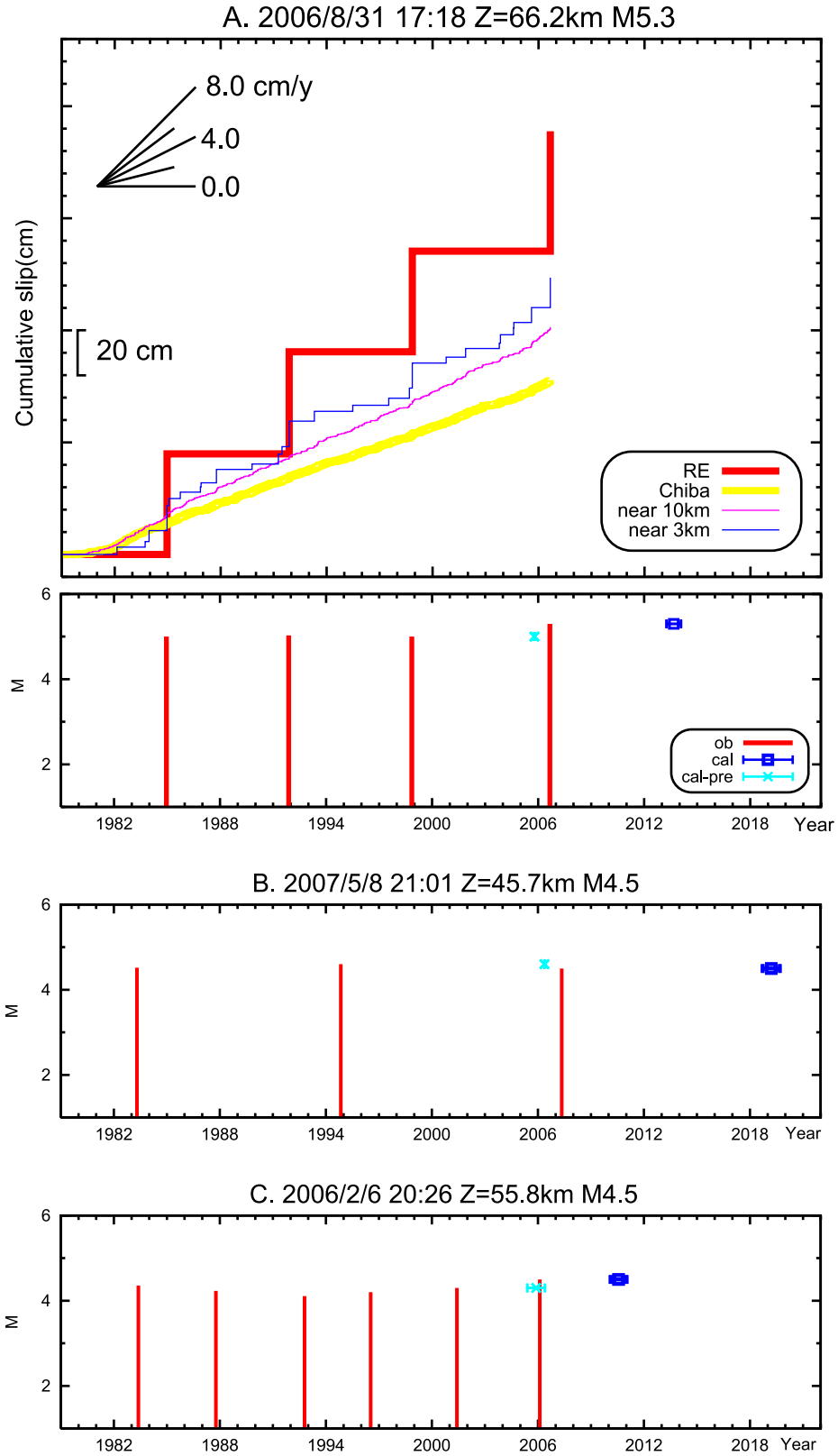
第 2 図　相似地震クラスター毎の平均すべり履歴．クラスターの位置は第 1 図参照．房総スロースリップイベントに伴う群発活動の開始時期(青矢印)および銚子付近の M6 クラス地震の震源時(赤矢印) をあわせて示す．数字は 1996 年以降の平均すべり速度を示す(cm/y).

Fig. 2　Averaged cumulative slip at each repeating earthquake cluster. Location of each cluster is shown in Fig. 1. Beginning of seismic swarm activity associated with the Boso Slow Slip Event and an origin time of M6-class earthquake are shown by blue and red arrows, respectively. Numbers denote averaged slip rate (cm/y) after 1996.



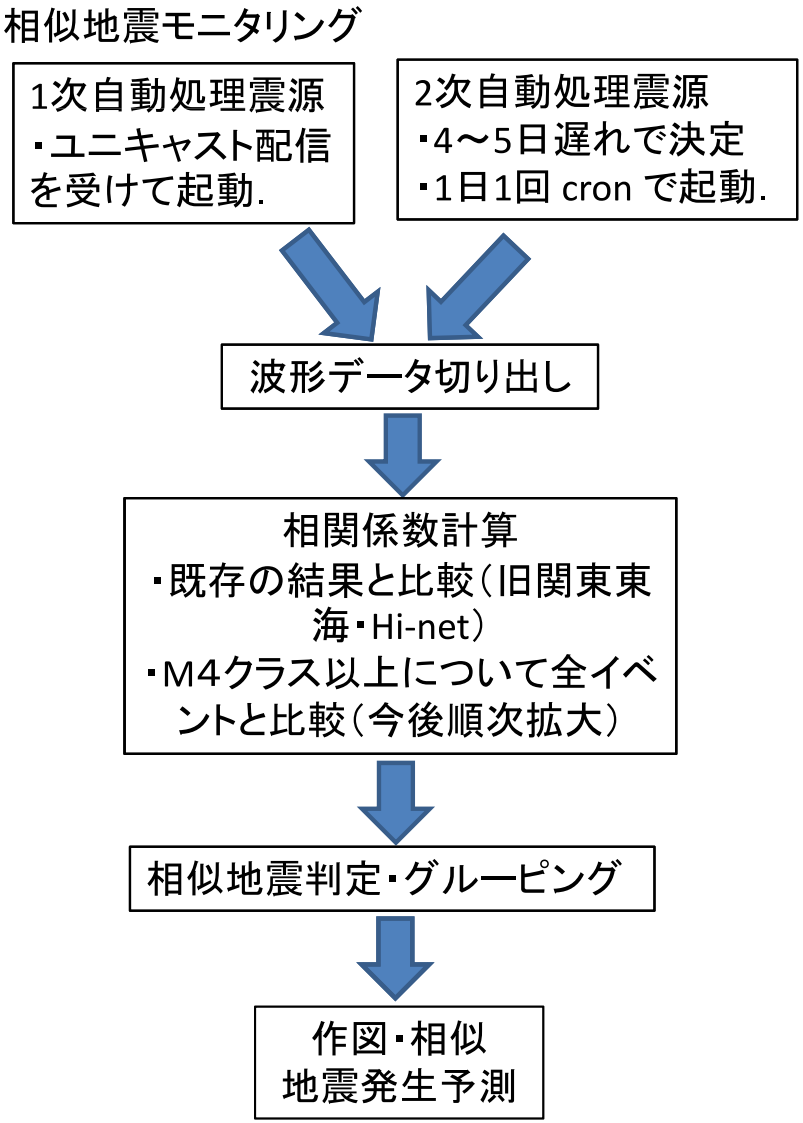
第 3 図　相似地震グループ A-C のパッチの位置および最新イベントの防災科学技術研究所 F-net モーメントテンソル解．これらの相似地震グループについての発生予測結果を第 4 図に示す．相似地震のパッチの分布をあわせて示す．

Fig. 3　Locations of fault patches of repeating earthquake groups A to C and their NIED F-net moment tensor solutions, for which results of earthquake prediction are shown in Fig. 4. Distribution of fault patches of repeating earthquakes are also shown.



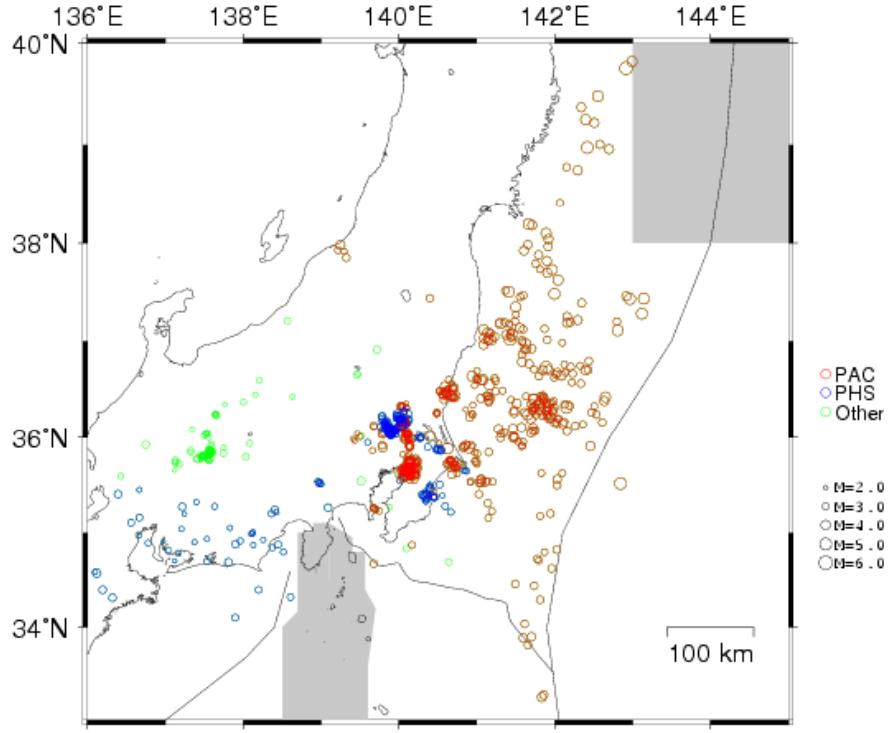
第 4 図　相似地震グループ A –C の M-T 図および発生予測結果．発生予測時期(青シンボル)を±1σの幅とあわせて示す．水色は一つ前の相似地震までの予測結果．相似地震グループ A については，すべり履歴をあわせて示す．すべり履歴は，相似地震グループ A(赤)，周辺 3 km (青)，5 km (紫)，および千葉県中部のクラスター(黄)のすべり履歴を示す．

Fig. 4　M-T diagram and results of repeating earthquake prediction for groups A to C, assuming that the recurrence interval would follow the normal distribution. Expected time period of the next event is shown with range of +- 1 sigma (blue symbol). Sky-blue symbol denotes the result using repeating earthquake data until the second latest repeating earthquake. Cumulative slip is also shown for group A.



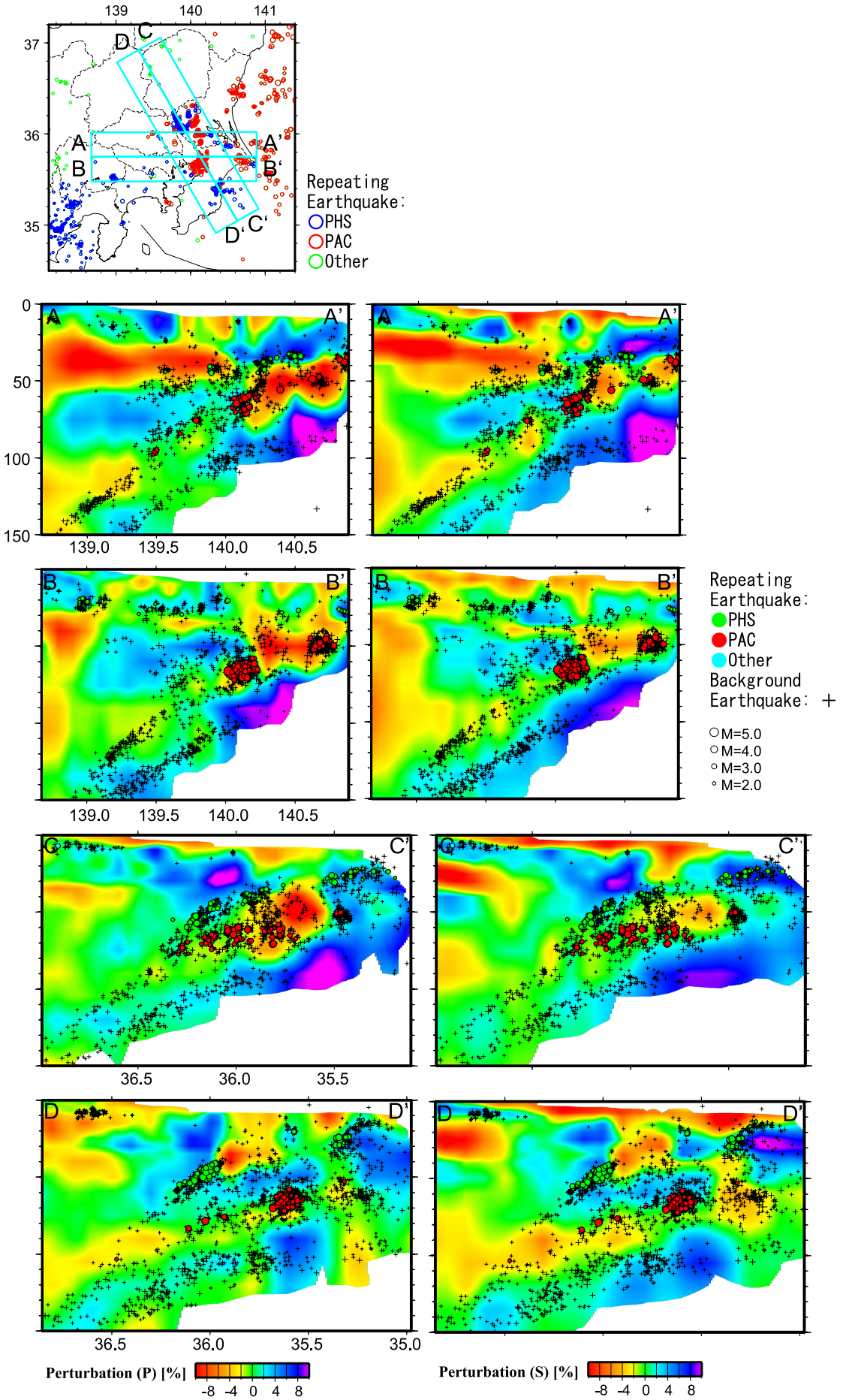
第５図　相似地震モニタリング処理のフローチャート.

Fig. 5　Flow chart of processes for repeating earthquake monitoring.



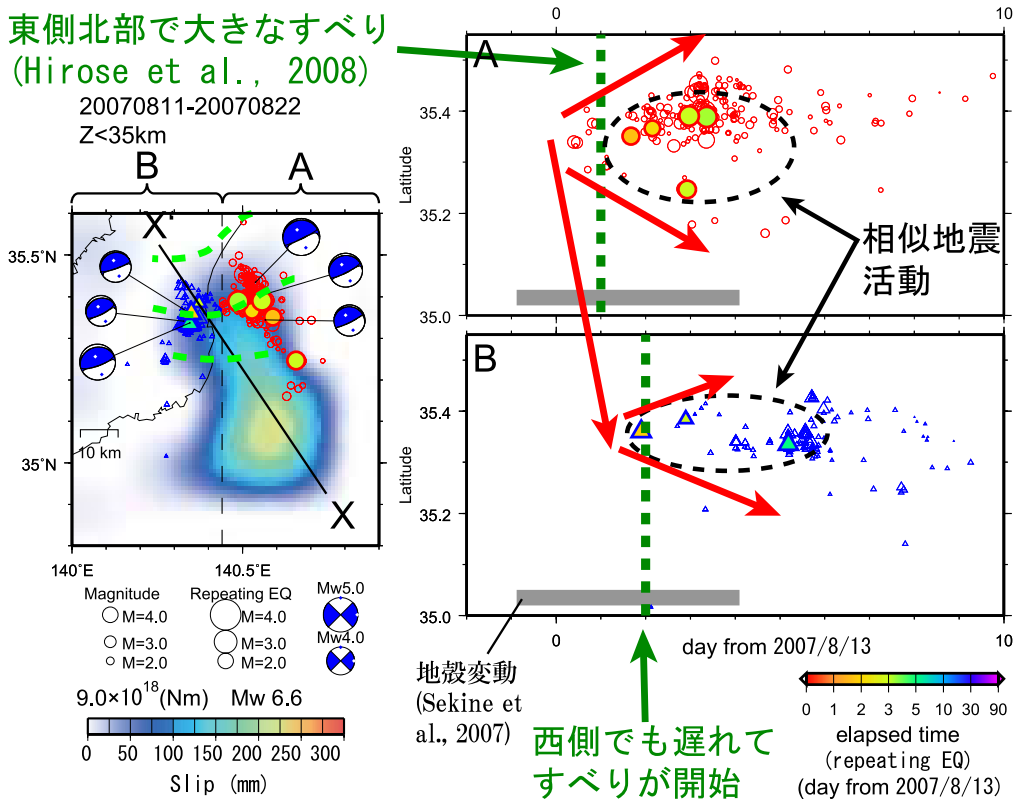
第６図　相似地震モニタリングの対象領域．グレー領域は処理対象外.

Fig. 6　Target region of repeating earthquake monitoring. Earthquakes in gray shaded regions are not analyzed.



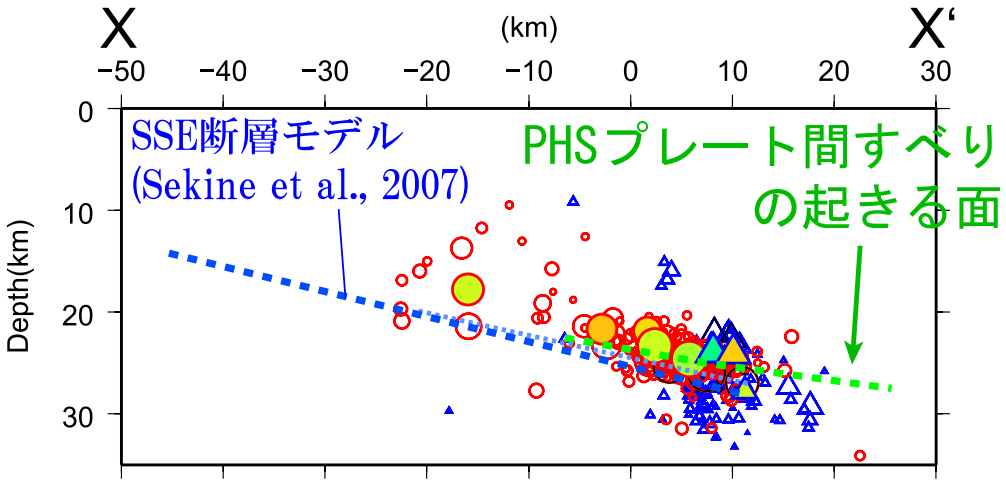
第 7 図　相似地震と速度構造 [10]の比較．左上図に示した矩形領域内の地震の深さ分布および矩形領域の中心線での速度構造を示す．P 波パータベーション(左) および S 波パータベーション(右) を示す．

Fig. 7　Comparison between repeating earthquakes and seismic velocity structure [10]. Distribution of hypocentral depths in a rectangle shown in the upper left panel and seismic velocity structure at the center of the rectangle are shown. Perturbations of Vp (left) and Vs (right) are plotted



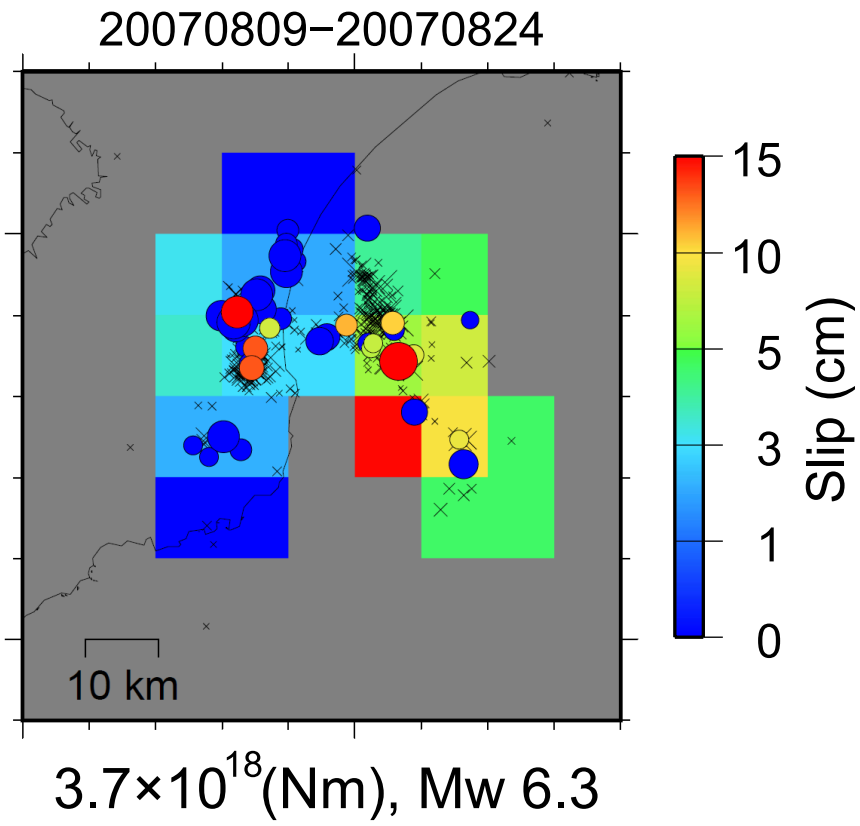
第 8 図　2007 年房総 SSE に同期した群発地震活動の震央分布(左) および南北方向に投影した時空間分布(右). 色つきシンボルは相似地震を示しカラーは経過時間を表す. 時空間分布は領域 A・B について示す. 太灰線は大きな地殻変動の見られた時期を表す [8]. 震央分布図に測地データから推定したすべり分布 [9] および主なイベントのメカニズム解(AQUA-CMT)[11] をあわせて示す. 緑破線は Kimura et al. (2006)[1] によるフィリピン海プレートのプレート間すべりの起きる面としての形状モデルを示す. 時空間分布図の縦の緑破線は測地データからそれぞれの領域で大きなすべりの起き始めた時期を示す.

Fig. 8　Epicentral distribution of seismic swarms associated with the 2007 Boso SSE (left) and space time plots projected to N.S direction (right). Solid symbols denote repeating earthquakes and color of solid symbol denotes the elapsed time from the beginning of the seismic swarm activity. Space time plots are shown for regions A and B, respectively. Thick gray line denotes a period when large crustal deformations were observed[8]. Slip distributions estimated from geodetic data[9] and focal mechanisms of major events (AQUA-CMT)[11] are also shown in the map. Green dashed lines in the map show configuration model of the Philippine Sea plate along which relative plate motion occurs[1]. Green vertical dashed lien in the space time plot represents a time when the large slip started to occur at each region.



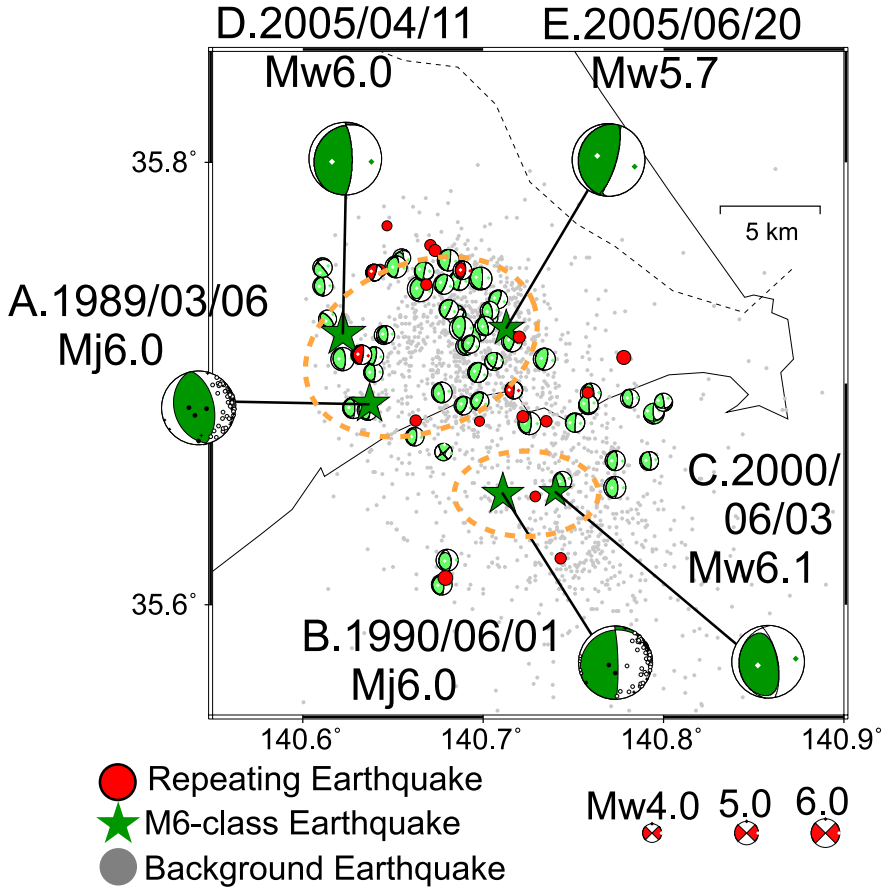
第 9 図　第 8 図 X-X' に沿った鉛直断面.

Fig. 9　Vertical cross section along a line X-X' in Fig. 8.



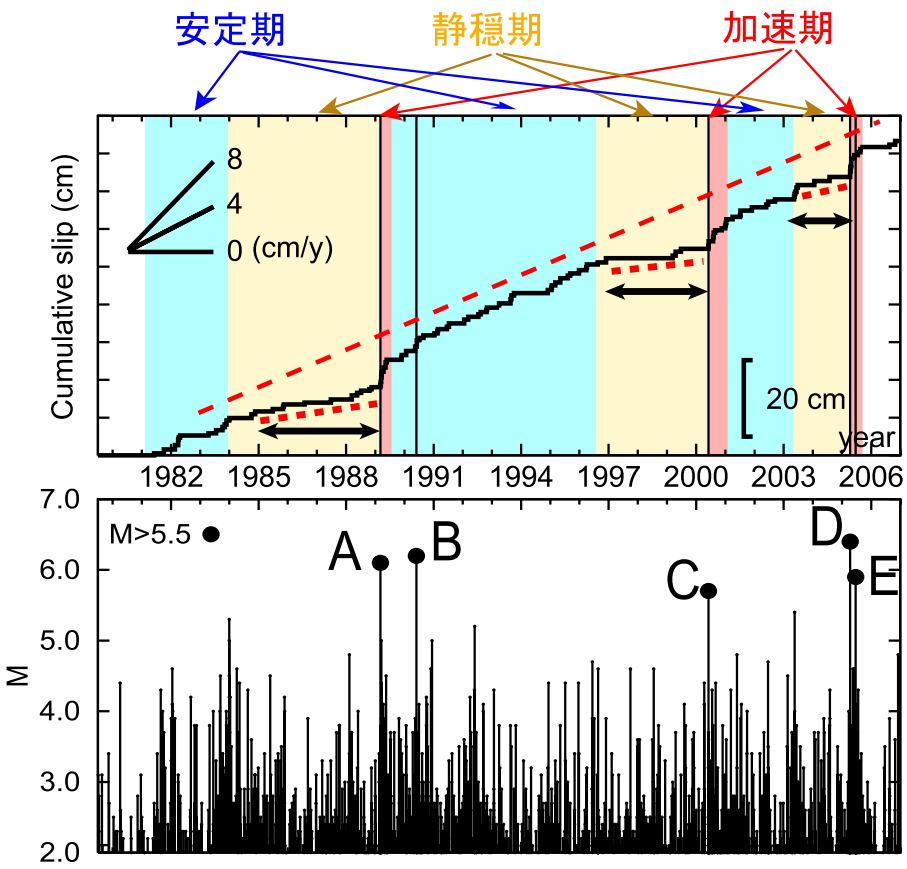
第 10 図　相似地震から推定した 2007 年房総 SSE のすべり分布.

Fig. 10　Slip distribution of the 2007 Boso SSE estimated from repeating earthquakes.



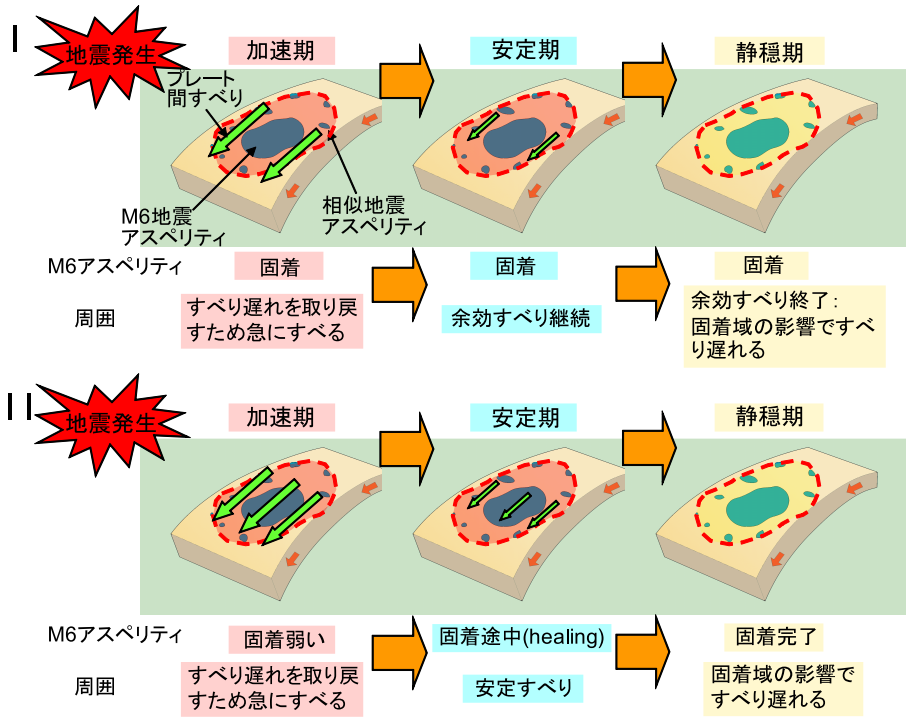
第 11 図　銚子付近の相似地震(赤丸)および M6 クラスのプレート境界地震(緑星印)の分布．主な地震のメカニズム解(F-net モーメントテンソル解および関東東海観測網による解)をあわせて示す.

Fig. 11　Distribution of repeating earthquakes (red circle) and M6-class interplate earthquakes (green star) near Choshi. Focal mechanism solutions for major events are shown, too. NIED F-net moment tensor solutions and focal mechanisms determined by NIED Kanto-Tokai network are used.



第 12 図　相似地震より推定した銚子付近の太平洋プレート上面のすべり履歴および M-T 図.

Fig. 12　Averaged cumulative slip near Choshi on the PAC estimated from repeating earthquakes and M-T diagram.



第 13 図　静穏化モデルの模式図.

Fig. 13　Schematic of quiescence model of repeating earthquakes.