

2 (3) (3-1) 地震発生先行過程

「地震発生先行過程」計画推進部会長 中谷正生
(東京大学地震研究所)

地震発生の予測の時間精度を高め、短期予測を可能にするためには、地震の直前に発生する非可逆的な物理・化学過程(直前過程)を理解して、予測シミュレーションモデルにそれらの知見を反映させ、直前過程に伴う現象を的確に捕捉して活動の推移を予測する必要がある。これまでの研究によって、地震に先行して発生する現象は多種多様であり、地震発生準備過程から直前過程にまたがって発生する現象の理解を進める必要性が認識されてきた。このために、1) 地震に先行する地殻等の諸過程を地震発生先行過程と位置付けて研究し、2) そのメカニズムを明らかにして、特定の先行過程が地震準備過程や直前過程のどの段階にあるかを評価し、3) 数値モデルを作成し、4) それを予測シミュレーションシステムに組み込む必要がある。、地震発生予測システムの研究で行う3)と4)の研究に資する目的で、地震発生先行過程に関する研究では、上記のうち1)と2)を実施している。

ア. 観測データによる先行現象の評価

(電磁気学的現象)

地震発生に先行してVHF帯の電波が見通し外に伝播する異常(地震エコー)が観測されることが国内外で報告されている。2004年から行われている、日高山脈を挟んで反対側にある広尾放送局のFM放送波を北大えりも観測所構内で受信する観測では、日高山脈周辺で発生する概ねマグニチュード4以上の地震50例以上についてこの伝播異常が観測され、発生する地震のマグニチュードとの関係について、1)断続的に観測される伝播異常の出現時間の総和が、その後発生する地震のマグニチュードの指標になる。2)伝播異常が観測されなくなってからある時間の経過後(1日から10日位の範囲)に地震が起きるが、その時間とマグニチュードとの間には相関は見られないことの2点が示された(北海道大学[課題番号:1005])。さらに、この現象の観測を効率的に行うために、擾乱発生位置の特定もできる安価な電波干渉計を開発し、北海道等に設置してテストしている。予察的な解析ではあるが、散乱波の偏波について着目したところ地震に先行している可能性がある擾乱の場合、受信偏波が送信偏波と異なっていることが分った(岡山理科大学[課題番号:2913])。

地震の数日前に電離層総電子数(TEC)の日変化の振幅が小さくなるのが、海外の大地震について示されているが、それらはいずれも低緯度地域でおこった地震である。近年日本でも観測条件のよい内陸浅部で比較的大きな地震がおこっているため、その検証を試みた。2007年中越沖地震では、中国等で報告されたようなTEC減少が比較的明確に見られたが、2008年岩手宮城内陸地震は、異常検出に最も適した太陽活動の最小期に発生したにもかかわらず、地震と関係ない時にもしばしば起きている程度の異常しか認められなかった。もう少し他の例を検討する必要があるが、この現象は、低緯度地域でなければ大きなシグナルを出さないとする理論的モデルも提出されており、日本では利用できない現象である可能性もある(北海道大学[課題番号:1005])。

衛星による観測は、電離圏の擾乱の時空間分布を効率よく取得できる。フランスのDEMETER衛星の2004年から6年間にわたる電離圏観測データについて、昨年度、技術的な問題がないことを明らかにしたが、今年度は、四川地震前の電離圏変動擾乱が震央より南でおこったことをつきとめた。一方で、同衛星のデータと日本のひのとり衛星のデータを併せて解析したところ、これまでにしら

れていなかったタイプの大気圏・電離圏相互作用に起因する電離圏擾乱で、地震先行電離圏擾乱の変動と類似するもののものがみつかった。地震と関連する擾乱を同定するためには、このような他の原因による変動を順次取り除いていかななくてはならない。そのような作業のfeasibility studyとして、磁気嵐および赤道ジェット電流が発生していたときにおこった皆既日食時のデータを解析し、複雑な変動を起源別に分解することに成功した（東京学芸大学 [課題番号：2908]）。

伊豆諸島では地震に先行するDC-ULF帯の地電位差変動が多数観測されており、異常の性状によって地震先行異常と、雷・人工ノイズの経験的判別基準が確立している。昨年度に神津島・新島の観測点を再構築し順調にデータを取得している。本年度は、先行的な地電位差変動は出現せず、また、経験的にそれが期待されるような大きさ・位置の地震も発生しなかった。人工ノイズが少なく観測条件のよいフィールドでこのようなブランクテストができたことは、この手法のポテンシャルに対して積極的な意味合いをもつ。（東海大学 [課題番号：2501]）。

VLF帯の地中電磁波観測では、3成分磁場と鉛直成分電場センサーをボアホール孔底と地表に設置した和歌山県白浜の新観測点で得られたデータの解析を行った。現在までのところ、この観測点で確実に地中起源の電磁波と確認された事例はないが、垂直入射モードと表面伝搬モードの2種類の電磁波伝搬モードがある事がわかった。（東海大学 [課題番号：2501]）

(地球化学的現象)

本計画で開発・運用をしている地下水溶存ガスの連続観測装置における「観測開始からの経過時間の増加に対応した大気ガスの混入割合の増加」の原因が、揚水に使用していたペリスタポンプのガスバリア性能の経時低下であることを特定し、この部分の改造をおこなった。この結果、揚水の技術的条件が困難である跡津川断層直上に断層を貫くように掘削された観測井での連続観測において、これまで $S/N=1$ 程度であった地下水溶存ヘリウムのシグナルが $S/N=10$ 程度に改善した。また、地下水溶存メタンのピーク解析精度も向上した。地下水流経路の亀裂総量のダイレクトな指標である 4He と 36Ar の絶対濃度まで自動連続観測できる本装置の性能は、地下水の化学モニタリングの歴史において画期的といえる。また、この連続観測装置は、将来の多数展開を意識しており、そのための一つの困難が、生スペクトルの解析を必要とする質量分析計データ解析の自動化であったが、上記の装置改造でデータの安定性が向上したため、1時間前の結果を初期値にして自動解析ができるようになった。これにより、1時間ごとの溶存ガスの主要成分を計算できるようになり、Web上に自動表示できるようになった（東京大学理学系研究科 [課題番号：1502]）。

ラドン濃度については、地下水の観測だけでなく、大気中での濃度変動にも地震や地殻ひずみに関連すると思われる変化がみられることがあり、地下の不均一構造の影響を受けにくいため、地下水より効率のよい手法であると考えられる。1995年兵庫県南部地震の先行現象として観測された大気ラドン濃度上昇をその他の地殻変動データと詳細に比較検討した結果、観測された数回の顕著なピークは、地殻ひずみ変動・地下水中ラドン濃度変動・地下水湧水量変動のピークとほぼ一致しているが、地殻ひずみ変動に最も対応している前駆現象は大気中ラドン濃度変動であることを見いだした。しかし、大気ラドンは確実に気象要素の影響をうけるのでその弁別が不可欠である。牡鹿半島における大気ラドン濃度連続データを題材に、物理的な要因を考慮して、変動の気象由来成分を気温および顕熱の観測値から評価することによって、地殻応力による変動を推定するモデルをつくった（東北大学 [課題番号：2906]）。

(地震活動)

先行現象として物理的に期待されるもので、微小地震からしかえられない重要な情報の一つとして、地震発生層の深度での応力場の方位が挙げられる。その推定のためには、多数の微小地震の断層面解を精度よくもとめることが欠かせない。観測地域中央部における観測点間隔はほぼ2-3 kmの臨時観測を展開している丹波山地では、M0.5クラスの非常に小さな地震でもルーチ的に断層面解を決定できるようになった(図1)。定常観測網のデータでは、M2以上のものしか断層面解をきめられないので、GR則から考えると、応力場推定に使えるデータの密度が一挙に30倍増えたことになり、応力場モニターの時空間分解能が30倍改善されることになる(京都大学防災研究所[課題番号:1811])。一方、日本全域をカバーした応力推定を行うために、国立大学観測網地震カタログ(JUNEC)のP波初動を用いて、1985年7月から1998年12月までに日本で発生した約14,000個の地震のメカニズム解を推定し(図2)、カタログ化した。同様のカタログとして、F-netのデータを用いたものが存在するが、これはM4程度以上の地震についてだけであり、今回は、M2以上の微小地震を含んでいるため、応力場解析に有利であると考えられる。検証のために、1995年兵庫県南部地震に伴う静的クーロン応力変化(ΔCFF)と地震活動変化の相関性を、推定されたメカニズム解を用いて計算された ΔCFF の確率分布の時間変化から検討を行った。本震後に発生した地震の確率分布は本震前に比べて明らかに ΔCFF が正の方向へ移動しており、 ΔCFF 増加域において活発化、あるいは ΔCFF 減少域において静穏化したことが示された(東京大学地震研究所[課題番号:1419])。

南アフリカ大深度金鉱山の誘発地震を対象に行なっている震源のごく近傍で、25kHzの高周波帯域までのカバーする地震観測では、至近距離(<150 m)で発生したマグニチュード-3~0の極微小地震について、応力指標パラメータのひとつである静的応力降下を求めることに成功した。これまで、観測周波数帯域の制約から、マグニチュード-1以下の地震についてはコーナー周波数が求められず関係がわからなかったが、今回の観測により、中大規模地震で知られている応力降下一定則が、マグニチュード-3まで成り立っていることが明らかになった(図3)。鉱山で大量に観測できる極微小地震が基本的に中大規模地震と相似な剪断滑りであることを示唆している。さらに、南ア鉱山では大きな地震の直前期に応力降下の低い地震が多発するようになるといわれているが、より信頼性の高い高周波観測のデータでこの現象を検証できるはずである(東京大学地震研究所[課題番号:1420])。

2005年宮城県沖地震の震源域の周囲で発生した中小規模地震のメカニズム解を用いて応力場の推定を行った結果、宮城県沖の応力場の空間不均質は小さいことが明らかとなった。宮城県沖では震源域の東端を境にプレート境界の沈み込み角度が10°程度から25°程度に変化しており、推定された宮城県沖の応力場は震源域内ではプレート境界に対する法線応力がその東側よりも大きくなる(東北大学[課題番号:1210])。

広域地震活動の時間的推移から、大地震の中期的先行過程の進行がとらえるのではないかという考えが臨界現象の立場から提出され、カリフォルニア等で肯定的な解析例もでている。最近提唱された、イベントが起こるたびに時間が進むナチュラルタイムという新概念を用いて、1995年以降のM7以上の日本の大地震である1995年阪神淡路地震、2000鳥取県西部地震、2003十勝沖地震、2004紀伊半島沖地震、2005年福岡県西部地震、2008岩手宮城内陸地震について臨界点検知を行った。十勝沖、岩手・宮城内陸を除く大地震については従来の研究と同様な臨界点と思われる変化が見られた。さらに、地震カタログの一般的統計的性質を検討し、通常の物理的時間よりも、ナチュラルタイムのほうが、臨界点の検知に有効であるとの知見をえた(東京大学地震研究所[課題番号:2912])。

(測地学的現象)

GEONETと東北大学のGPS データを統合処理して日々の座標値がルーチンのように算出するシステムを開発し、GPS精密暦公表までの14日間をまたずにプレート境界の準静的滑りモニタリングを准リアルタイムで運用する目処がたった。また、小繰り返し地震を用いたプレート境界でのすべりモニタリングにおいては、2010年に東北日本の日本海溝沿いで 249 個の新たな小繰り返し地震が抽出され、それらの活動から、福島県沖から宮城県沖の海溝に近い場所において2008 年に滑り速度が加速した後、滑り速度がしだいに減速していることが分かった（東北大学 [課題番号：1210]）。

南アフリカ大深度鉱山内で震源極近傍に設置したひずみ計では、従来から地震波放射効率の低いゆっくり地震に相当するイベントについては前駆滑りが多数例検出されている。昨年度マグニチュード (Mw) 0.3の普通の地震について、震源から20m以内にある2台のひずみ計で、本震時のひずみ変化の10分の1～数分の1の明瞭なひずみ変化が6.5 時間前から開始したケースがみつかった(図4)。本年度は、この観測の信頼性を吟味した。まず、この6.5 時間の最中にマグニチュード (Mw) 0.2の地震が近隣で発生しているが、これは先行ひずみのトレンドには影響をあたえなかった。また、採掘発破がない週末に2台のひずみ計で記録された潮汐変化が互いに類似するなど、ひずみ計の動作や岩盤とのカップリングが安定していることもよく確認され、観測データ自体には問題がないことが確認されている。さらに本震によるひずみ変化の極性と前駆ひずみ変化の極性が一致しており、天然の地質構造の中で発生した地震の前駆すべりが世界で初めて明瞭に捉えられた例である可能性が非常に高い。（立命館大学 [課題番号：2401]）一方で、これまで鉱山内の至近距離観測において、より大きな地震に対して先行ひずみが観測されなかった例が多数確認されており、どのような場合に先行ひずみがおこるのか、今後良質のデータを増やして十分検討する必要がある。また、このイベントの発生時期には同じサイトでおこなわれていた超微小地震観測（立命館大学 [課題番号：2402]）が欠測していたが、同観測でそれ以前の時期に10 m×10 mくらいの平面的活動の集中があり、この部分がマグニチュード (Mw) 0.3の震源になったとすると、coseismicなひずみ変化が定量的に説明できることが確認された。これは、今回の事象の解明には間接的な役割しか果たしていないが、震源極近傍での超高感度複合観測の有効性を示すものである。現在は、大規模な天然断層を囲む鉱山地下のサイトに、ひずみ計、超微小地震ネットワークを含む新たな観測網を構築している。

(地殻構造)

地殻構造の時間的変化を監視する新しい手法として注目されている、地震計の雑微動記録を用いる地震波干渉法で、従来の主流であるRayleigh波の位相速度ではなく、実体波の反射波を雑微動の観測点間の相互相関関数(CCF)で検出する試みを行った。使用する観測点の1つを大深度ボアホール観測点として15 カ月以上のデータをスタックするとRayleigh 波の基本モード以外の信号が認められるようになり、既知の構造情報に照らして、これらがモホ面や地殻内反射面からの信号として解釈可能であることがわかった（京都大学防災研究所 [課題番号：1810]）。

イ．先行現象の発生機構の解明

(電磁気学的現象)

地震の先行現象について、その発生機構が理解されていることは稀であり、このような段階では、観測データから現象を愚直に遡っていくアプローチが必要とされる。ア.で述べた地震エコー現象について、8 km 間隔で3 点の受信局を展開した。複数の地震について、地震エコーがこの3 つの観測点全てで観測され、さらに、エコーの開始時刻が西から東へ 15 分ずつ遅れていることが

わかった。エコーの直接の原因である上空の散乱帯の移動速度と整合する値であり、さらにこのような実験を継続して順次可能性を絞りこむことが望まれる（北海道大学〔課題番号：1005〕）。

一方で、例は多くないが、大地震に先行する地磁気異常がみられた例が過去に報告された例もあり、応力の変化により地殻構成鉱物の磁化が変化するピエゾ磁気のひとつの可能なメカニズムとして指摘されている。海溝型の巨大地震が想定される道東地域の南岸域には、強い磁気異常があり、さらにその経年変化には、コア起源の永年変化ではありえない小スケールの地域性があり、プレート運動による巨大地震スケールの応力蓄積過程がピエゾ磁気効果を通してモニターできる可能性があることが、1990年代の観測データとモデル計算から指摘されている。その検証のため、気象庁地磁気観測所と協力して各磁気観測点における地磁気三成分の絶対測定を行い、1990年代の観測データでみられた強い地域性が再確認されたとともに、当時とはパターンがかなり異なってきたことがわかった(図5)。今後は、海溝型の巨大地震に伴うコサイスミックな変化が捉えられるかどうかピエゾ磁気効果モデルを検証する上で本質的に重要となる（北海道大学〔課題番号：1005〕）。一方で、気象庁が伊東市御石ヶ沢付近でおこなっている地磁気の連続観測については、昨年度の周辺調査データからローカルな磁気異常の影響が示唆され、シミュレーション等による影響の除去を試みたが、地殻変動起因の変動を、信頼性をもって抽出することは困難と結論し、伊東市玖須美元和田に観測点を移動した（気象庁〔課題番号：7020〕）。

ア.で述べたDC-ULF帯の地電位差変動をもたらすメカニズムはいくつも提案されているが、その多くは、先行的な微小破壊を仮定するものであり、一方でそれに対応する微小地震は観測されていない(小さすぎて観測できないだけかもしれない)。室内実験で、微小破壊をとみなさない条件で岩石試料を不均一に静的加圧すると、圧縮部から非圧縮部に電流を流す起電力が発生することが観察された(図6)。この現象は、火成岩(花崗岩、ハンレイ岩)の場合にのみおこり、非火成岩(大理石)ではおこらないこと、および試料内の電位分布から火成岩鉱物に広くみられる過酸化架橋とよばれる格子欠陥の圧縮で生じた正孔電荷キャリアが圧縮部から非圧縮部へ拡散することによるものとみられ、高い一般性が期待される。このメカニズムによれば、DC-ULF帯の地電位差変動は、断層の準静的な局所滑りによるひずみの再配分自体から直接生じることになる（東海大学〔課題番号：2501〕）。

断層ガウジ層内に内部構造として発達する剪断集中帯が、震源核形成から本震にいたる一連の仮定で果たす役割に注目して、内部構造の発達と摩擦電気の発生を同時にとらえる一連の室内実験を、圧電効果をもたないはんれい岩の模擬ガウジを用いておこなってきた。実験結果を総合すると、断層に斜交する剪断帯でのゆっくり滑りが震源核の発達をにない、断層に平行な剪断帯の形成にいたって本震の高速破壊がおこることになるが、このときの電位変化は、すべり速度および接触面積(すべり面積)に依存し、本震では、震源核形成段階より1桁近く大きいシグナルが観測された（東北大学〔課題番号：2906〕）。

また、ギリシャの観測例では、DC-ULF帯の地電位差変動の出現する観測点と、それに関連すると思われる地震の発生場所には、非常に複雑な関係がある。さらに東海大学の伊豆諸島の観測では、地震の発生場所によって異常の極性がきまっていることがみついている。電磁気シグナルの伝播は非常に難しい問題であるが、地震予知への利用のためには、その具体的な理解が強くのぞまれる。神津島の詳細な浅部電気伝導度探査と地質調査を並行実施し、比抵抗は2-3桁の範囲で空間的に異なり、かなりの部分が溶岩の分布に支配されていることがわかった（東海大学〔課題番号：2501〕）。一方、地殻内での電磁波透過距離と地殻内物質のフラクタル構造との関係を理論的に導出し、石英

板pin-on-disk実験での岩石摩擦にともなう発光放電現象研究結果とあわせて、震源が浅所ならば、 10^{-1} - 10^{-8} Hz の電磁波が地表に到達可能であるとの結論を得た（東北大学 [課題番号：1502]）。

一方で、地震に先行したといわれる電磁気現象に関して、提案されている多くのメカニズムではコサイスミックに大きな異常が観測されるべきであるのに、多くの場合それが観測されないことが、基本的な問題点として指摘されている。最も代表的なメカニズムである圧電効果が実際の岩石中でのどのように働くか詳細に調べるために、京都大学防災研究所では、室内実験で磁場と電場を多チャンネルで同時測定するシステムを開発した。検証のために、大型岩石試料中に地震波を伝播させたところ、それにともなう局所電磁場の時空間分布が検出できた。（京都大学防災研究所 [課題番号：2907]）。

（地震活動）

プレート境界での大小地震が入り混じった地震クラスターの相互作用を調べるために、とくに精度のよいデータがあるマグニチュード4.9の繰り返し地震4つについて、近傍で発生した微小地震の解析を行い、繰り返し地震のすべり域内に全ての微小地震の震源があること、それらの微小地震の発生時期が、繰り返し地震のサイクルの後半に多いことが分かった。これらの微小地震の活動は、繰り返し地震のアスペリティへの応力集中を表していることが考えられ、アスペリティの応力レベルを微小規模地震の活動から推定できる可能性を示している（東北大学 [課題番号：1210]）。

西南日本における深部低周波微動については、その浅部延長にあるプレート境界巨大地震のアスペリティを載荷する深部の準静的すべりの詳細のモニター手段として注目されている。プレート境界深部の準静的すべり部の中に、多数の微小なアスペリティを仮定したシミュレーションを行い、深部低周波微動の活動域が10 km/day程度で移動する現象を再現した(図7)。シミュレーションでは、巨大地震発生前になると、発生間隔が短く、伝播速度が速く、解放モーメント率が増加する傾向がみられた（東北大学 [課題番号：1210]）。

一方で、非クリープ域での大小地震の応力相互作用はスケール間相互作用が大きく、大地震の予測に本質的な困難をもたらすと考えられている。大規模な離散要素モデルを用いて、大小の断層が自発的に形成・再活動をする数値モデルを作成し、応力場の時空間発展を広いスケールレンジにわたって観察した。断層運動があると、断層運動周辺の差応力は確実に減少するが、その断層を含むより広い領域での差応力の変化量を見る場合、この限りではない。つまり、広い領域で見ると全体に平均して増加する場合と減少する場合があることが確認された。局所的な応力減少が広域な応力増加となることがより大規模な断層運動につながる。このことを局所的な観測の時系列だけから推定することは不可能だが、応力増加を多点で観測できれば、地震サイクルより十分短い期間のデータからでも大規模地震の中期的な予測に資する可能性がある（東京大学地震研究所 [課題番号：1421]）。

（測地学的現象）

地震発生サイクルのシミュレーションなどに用いられている従来の摩擦則は、どのような実験によるデータに対しても共通する系統的なずれがあった。最近、室内実験データを詳細に検討し、このずれを解消する新たな摩擦則が提案された。この摩擦則を用いて、地震発生サイクルのシミュレーションを単一バネ-ブロックモデルで行い、従来の摩擦則によるモデルと比較したところ、サイクル後半の固着状態の減少がかなり大きくなることがわかった。もし、この摩擦則が正しいとすれ

ば、地震発生前の前駆滑りは大きくなるので、観測により検出できる可能性が従来考えられていたよりも高いことを示唆している（東京大学地震研究所〔課題番号：1421〕）。

（地殻構造）

地殻流体の挙動が地震発生やその先行過程に果す役割は、理論的に考えて大きいはずであり、様々な手段で地殻の電氣的・力学的構造をモニターすることで、地震に先行する現象が見つかる可能性がある。下部地殻に流体の存在を示唆する可能性が高いS波反射面がみつかっており、また微小地震活動が異様に高い丹波山地周辺域において行っている、82点の臨時観測点による超稠密な地震観測で得られた反射波の解析によって、北摂地域で知られていた下部地殻のS波反射面は同地域に限定的なもので、丹波山地周辺全域に存在するものではないことがわかった。また、レシーバー関数解析によってモホ面やプレート形状のローカルなスケールでの詳細が解明された。沈み込む海洋プレートから下部地殻への地殻流体の供給は、内陸大地震が多発する新潟-神戸ひずみ集中帯(丹波山地域もその一部)の成因であるとも考えられており、このような構造の具体的な解明は重要である。また、ひずみ集中帯の成因の鍵である断層の強度の推測や、化学的・水文学的な先行現象の評価に重要な断層破碎帯等の透水率を計測する新しい手法として、密閉ボアホールを用いた間隙水圧測定データの自然擾乱(大気圧や地球潮汐)に対する応答の解析を行った。(京都大学防災研究所〔課題番号：1811〕)

課題と展望

本年度は、多くの課題で予察的な結果が得られはじめた。電磁気現象に関しては、VHF帯伝播異常で望まれていた観測データから現象を遡る研究で成果が出始めた。この手法は都市部でも観測できるので、他地域へ展開して様々なタイプの地震に対するケースを収集することが比較的容易である。メカニズムに関しては当分解決が困難であろうが、研究を継続することが重要と考える。大気ラドンに関しては気象要素由来の変動の問題がクローズアップされ、それを補正する方法が提案されたのは大きな進歩であるが、強い地域性が期待される観測項目であるので、様々な場所でのデータを入手して解析することが望まれる。個々の地震がなぜその大きさとなったか、すなわち大地震発生のための要件はなにかという、地震予知のための地震発生の物理学が解明されていないので、中期的、短期的にある大きさ以上の地震に先行することが多いと言われる事象を徹底的に調べあげることは、地震発生の物理的理解を進めるためにも大きな貢献となるはずである。そのためには、少なくとも観測データの特性はきっちりと把握し、データの意味するところを明確にさせておく必要があり、現計画での電磁気現象や地球化学的現象を扱う課題では、その部分が非常にまじめに実行されている。しかし、一つの地域での大地震の頻度は低いので、今後、可能なものについては、短期間でケースを増やす方策をとるべきだろう。物理メカニズムがわかるまで待つのではなく、多数のケースを研究することで先行過程と地震停止のメカニズムを同時に明らかにすることをめざすべきである。その意味で、南ア鉱山での誘発地震を用いた研究は、先駆的なアプローチである。

小地震の断層面解を用いた応力場のモニターは、(固有)地震サイクルの概念に基く地震発生予測においては欠かせない要素であるが、まだ未成熟な段階にある。しかし、今年度の成果でみられるように、相当小さな地震のデータをこれに用いることが十分現実的になっており、積極的に推進すべき項目である。マグニチュードで1小さい地震まで使えば時空間モニタリングの分解能が10倍改善され、先行過程を検出できる可能性が高くなる。

一方、地震発生数の消長が、応力の少なくともステップ的变化を鋭敏に反映することは明らかに

観測事実であるが、それだけでは説明できない非常に不思議な変化が昔から種々報告されている。この問題は、多体系のスケール間相互作用を含む本質的に困難な問題である可能性が高くメカニズムは全く理解されていないが、本年度は、断層の力学的相互作用の本質的な部分を含む大規模な多体系モデルによるシミュレーションが登場した。計算技術と微小地震観測データ品質の大幅な向上によって、この分野でブレークスルーが得られる蓋然性は増している。

地震カップリングの弱いクリープ性の領域での先行現象の研究は、非常に急速に進展している。繰り返し地震自体は、大地震とは大きく異なる力学的状況下でおこっているが、そのアスペリティ内部は、大地震のアスペリティのモデルとして十分参考になりうる。繰り返し地震のアスペリティ内部で多数の小規模繰り返し地震があること、その発生頻度が繰り返し地震のサイクルの前半と後半で明瞭に異なることは重要な発見である。一方、巨大地震アスペリティ下のクリープは、巨大地震発生確率を確実に変化させるはずのものであり、そのモニター指標となる微動活動を表現できるシミュレーションが登場したことは重要な進歩であり、この方向での一層の研究の深化を目指すべきである。

ロック部の前駆滑りについては、ついに南ア鉱山の誘発地震で明瞭な例がみつかった。しかし、南ア鉱山でも、他の地域でも、顕著な前駆滑りを伴わないで地震が発生した例も多く、検出限界のよい事例を増やして、様々なテクトニック環境下で、大地震の前駆滑りが検出可能な例がどの程度の割合であるか、狭義の前震との関連はどうか、戦略的な調査を検討すべきである。また、実験室でなされたような固着度自体をモニターできれば、前駆滑りよりもずっと検出されやすいことが期待できるので、自然地震、人工震源を用いたフィールドでの固着度変化測定の feasibility study を開始することが望ましい。

参考文献

- 青木裕晃・片尾浩・飯尾能久ほか, 2010, 稠密地震観測による近畿地方北部におけるメカニズム解と応力場, 日本地震学会秋季大会, P1-56.
- Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, J-P. Ampuero, R. Nakata, T. Hori, Y. Kaneda, R. Hino, and A. Hasegawa, 2010, Migration process of very low-frequency events based on a chain-reaction model and its application to the detection of preseismic slip for megathrust earthquakes, *Earth, Planets and Space*, 62, 1-10, doi:10.5047/eps.2010.09.003, in press.
- Ariyoshi, K., T. Hori, Y. Kaneda, J-P. Ampuero, T. Matsuzawa, R. Hino, and A. Hasegawa, 2010, EFFECTS OF SMALL ASPERITIES ON MIGRATION OF SLOW-EARTHQUAKES ALONG TRENCH DIRECTION OF SUBDUCTION PLATE BOUNDARY: INVESTIGATION THROUGH A 3-D NUMERICAL SIMULATION, *Advances in Geosciences (Proceedings of AOGS 6th Annual Meeting 2009)*, in press.
- Durrheim, R. J., A. M. Milev, H. Ogasawara, H. Kawakata, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Cichowicz, H. Moriya, and the SATREPS research group, 2010, Observational study to mitigate seismic risks in mines: a new Japanese - South African collaborative project, *The proceedings of the fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining*, 6-8 October, Santiago, Chile, Australian Centre for Geomechanics, 215-226.
- 藤田哲史・亀伸樹・中谷正生, 2010, Seismic cycle simulation by modified RSF law added stress dependent term, 地球惑星科学連合大会.
- 藤田哲史・亀伸樹・中谷正生, 2010, 修正されたRSF 則による余震発生レートのモデリング, 2010, 日本地震学会秋季大会.
- 堀高峰・阪口秀, 2010, 大きな破壊への準備過程: 数値実験にもとづく考察, 日本地震学会秋季大会, B32 09.

- 堀高峰・阪口秀, 2010, 付加体発達過程で作り出される応力場で自発的に形成されるデコルマ断層, 地球惑星科学連合連合大会, SCG087-02.
- 飯沼卓史・松澤暢・長谷川昭, 2010, 変位勾配から見た東北日本広域のプレート間カップリングの時空間変化, 日本測地学会第114回講演会.
- 加納靖之・伊藤久男・木下正高, 2010, 神岡鉱山内南東部断層での水理試験, 日本地球惑星科学連合大会, MIS007-10.
- 片尾浩, 2010, 四半世紀にわたる近畿地方北部の応力空間分布と時間変化, 日本地震学会秋季大会, P1-57.
- 桂泰史・小笠原宏・川方裕則・中谷正生・直井誠・矢部康男・安武剛太・山本覚仁・石井紘・E. Pinder・G. Morema・JAGUARS, 2010, 2台のひずみ計から約100mで続発したMw~2の震源メカニズムと周辺領域の長期的な応力変化-南アフリカMponeng 金鉱山, 日本地震学会秋季大会, P3-33.
- Katsumata, K., M. Kosuga, H. Katao and the Japanese Group of the Joint Seismic Observation at NKTZ, 2010, Focal mechanisms and stress field in the Atotsugawa fault area, central Honshu, Japan, *Earth Planets Space*, 62, 367-380.
- 小笠原宏・R. Durrheim・中谷正生・矢部康男・A. Milev・A. Cichowicz・川方裕則・森谷祐一・佐藤隆司・S. Murphy・A. Ward・G. Morema・M. Kataka・R. Vermeulen・G. van Aswegen・Research Group of SATREPS, 2010, 鉱山での地震被害低減のための観測研究-日本と南アフリカの共同研究, 日本地球惑星科学連合大会, SSS020-13.
- Ohmi, S., Detecting subsurface reflectors in southwestern Japan using ambient seismic noise, *Geophysical Research Abstracts*, Vol.12, EGU2010-8179, 2010, EGU General Assembly.
- 大見士朗・平原和朗, 2010, 雑微動の相互相関関数による西南日本の地殻下反射面の検出, 日本地震学会秋季大会.
- Ohmi, S. and Hirahara, K., 2010, Detecting Subsurface Reflectors in the Shikoku District, Southwestern Japan, Using Ambient Seismic Noise, AGU Fall Meeting.
- 太田雄策・三浦哲・松村信介・森俊行, 2010, 低価格2周波GPS受信機とデータロガーを用いたGPS観測システムの構築, 測地学会誌, 56(3), 101-106.
- 太田雄策・三浦哲・松村信介・森俊行, 2010, 低価格2周波GPS受信機とデータロガーを用いたGPS観測システムの構築, 日本地球惑星科学連合大会, SGD001-P01, 2010.
- 太田雄策・小林竜也・三浦哲・高須知二, 2010, 中・長基線RTK-GPS時系列の長期安定性とそのノイズ特性評価, 日本地球惑星科学連合大会SGD001-P02.
- Onishi, T., J.-J. Berthelier, and M. Kamogawa, 2011, Critical analysis of the electrostatic turbulence enhancements observed by DEMETER over the Sichuan region during the earthquake preparation, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1-10, doi:10.5194/nhess-11-1-2011
- Onuma, K., Muto, J., Nagahama, H. and Otsuki, K. 2010 (accepted), Electric potential changes associated with nucleation of stick-slip of simulated gouges. *Tectonophysics*.
- Orihara, Y., M. Kamogawa, A. Takeuchi, H. Fukase and T. Nagao, Subterranean electrical structure of Kozu-shima volcanic island, Japan, *Proc. Japan Acad., Ser. B*, 914-919.
- 三浦勉・飯尾能久・片尾浩ほか, 2010, 近畿地方中北部における臨時地震観測, 京都大学防災研究所年報, 53, B, 203-212.
- 森谷武男・茂木透, 2010, 浦河沖 えりも沖の地震活動とVHF伝播異常との関係, 日本地球惑星科学連合大会.
- 森谷武男・茂木透, 2010, えりも沖の起こる地震の前に札幌観測点(HSS)で観測される特徴的なVHFの地震エコー, 日本地球惑星科学連合大会.

- 森谷武男・茂木 透・山下晴之・佐々木智彦、2010, 定常的55-70MHz帯電波の地震エコー観測のための調査とその利用, 日本地震学会秋季大会.
- Moriya, T., T. Mogi and M. Takada, 2010, Anomalous pre-seismic transmission of VHF-band radio waves resulting from large earthquakes, and its statistical relationship to magnitude of impending earthquakes. *Geophysical J. International*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04461.x. 180, 858-870.
- 村上雅紀・杉本雅明・角森史昭・田中秀実, 2010, 化学的地震先行現象の検出を目的とした質量観測計の開発, 日本地球惑星科学連合大会.
- 武藤潤・長濱裕幸・三浦崇・荒川一郎, 2010, 岩石のすべり摩擦による放電発光と地震前兆電磁気現象について, 月刊地球, 通巻371, vol.32, No.8, 484-490.
- 佐々木裕樹, 2011, 近畿地方北部の微小地震活動域直下の地殻構造の推定 - S 波反射法とレーバ関数解析による -, 京都大学理学研究科修士論文.
- 鈴木健介・日野亮太・伊藤喜宏・金沢敏彦・山田知朗・篠原雅尚・植平賢司・山本揚二郎・金田義行, 2010, 宮城県沖における応力場とプレート間固着強度の関係, 日本地震学会秋期大会.
- Takahara, K., Muto, J. and Nagahama, H., 2010, Skin depth of electromagnetic wave through fractal crustal rocks. *IEEJ Trans. FM (Elect. Eng. Jpn.)*, 130, No.3, 258-264.
- 竹内昭洋・藍檀オメル・佐柳敬造・長尾年恭, 2011, 火成岩の不均一圧縮に伴う起電力の発生とそのメカニズム, 東海大学海洋研究所研究報告, 32, 45-52.
- Teisseyre, R., Nagahama, H. and Majewski, E., 2010, *Physics of Asymmetric Continuum: Extreme and Fracture Processes: Earthquake Rotation and Soliton Waves* (Paperback, 14 Oct 2010), Springer-Verlag, 293pp. The 1st Edition. Edition (14 Oct 2010), ISBN-10: 3642087957, ISBN-13: 978-3642087950.
- 角森史昭, 2010, 地下水溶存ガス濃度を透水係数と同時に観測するシステムの構築について, 日本地球惑星科学連合大会.
- 内田直希・松澤暢・長谷川昭, 2010, 東北日本の中規模繰り返し地震の分布とそのアスペリティでの特徴的地震活動, 日本地震学会秋季大会.
- Uyeda, S., and M. Kamogawa, 2010, Reply to Comment on “ The Prediction of Two Large Earthquakes in Greece ”, *Eos Trans. AGU*, 91(18), doi:10.1029/2010EO180004.
- Varotsos, P. A., N. V. Sarlis, E. S. Skordas, S. Uyeda and M. Kamogawa, 2010, Natural time analysis of critical phenomena. The case of Seismicity, *Europhys. Lett.*, 92, 29002.
- 和田直也・小笠原宏・川方裕則・中谷正生・矢部康男・直井誠・宮川幸治・安武剛太・吉光奈奈・三宅 弘恵・井出哲・五十嵐俊博・G. Morema・E. Pinder, 2010a, 48kHz サンプリング距離 200m 以内で 観測された $-3 < M < 0$ の地震の応力降下量, 日本地球惑星科学連合大会, SSS011-P05.
- 和田直也・川方裕則・村上理・小笠原宏・土井一生・吉光奈奈・中谷正生・矢部康男・直井誠・宮川幸治・三宅弘恵・井出哲・五十嵐俊博・G. Morema・E. Pinder, 2010b, コーダスペクトル比法による極微小地震 ($-3 < M < -1$) のコーナー周波数の推定, 日本地震学会秋季大会, P3-34.
- Yajima, T. and Nagahama, H., 2010, Differential geometry of viscoelastic models with fractional-order derivatives. *Jour. Phys. A: Math. Theor.* 43, 385207 (9pp) doi:10.1088/1751-8113/43/38/385207 (<http://iopscience.iop.org/1751-8121/43/38/385207>)
- Yamashita, H., T. Mogi, T. Moriya, M. Takada and M. Morisada, 2010, Simultaneous observation of VHF radiowave transmission anomaly propagated beyond line of site prior to earthquakes in multiple sites, AGU Fall meeting.
- 山下晴之・渡邊朋典・森谷武男・茂木透, 2010, ウェーブレット変換の VHF 地震エコー記録への適用と効果, 日本地球惑星科学連合大会.
- Yasuoka, Y., Nagahama, H. and Ishikawa, T., 2010, Anomalous Radon Concentration Prior to an Earth-quake: A Case

Study on the 1995 Kobe Earthquake, Japan. Collected Papers. LAP Lambert AcademicPublishing, ISBN 978-3-8433-8451-3, paperback, 148pp.

吉村令慧・大志万直人・藤田安良,2010, 近畿北部における比抵抗構造調査の目的と現状, CA 研究会.

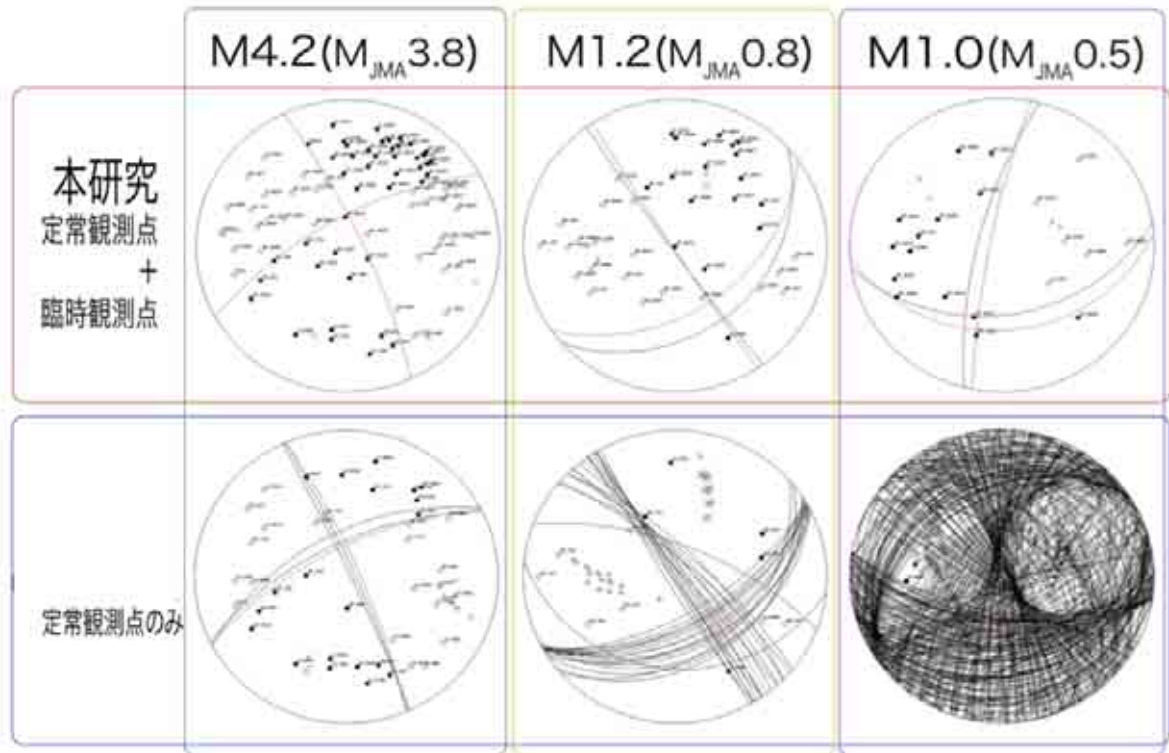


図1. 発震機構決定に及ぼす稠密観測の効果（京都大学防災研究所〔課題番号：18119〕）上段が本研究の稠密観測による決定。下段は同じ地震を定常観測点のみで決定した結果。押し引きを説明可能な節面のペアをすべてプロットしたもの。（青木，2010）

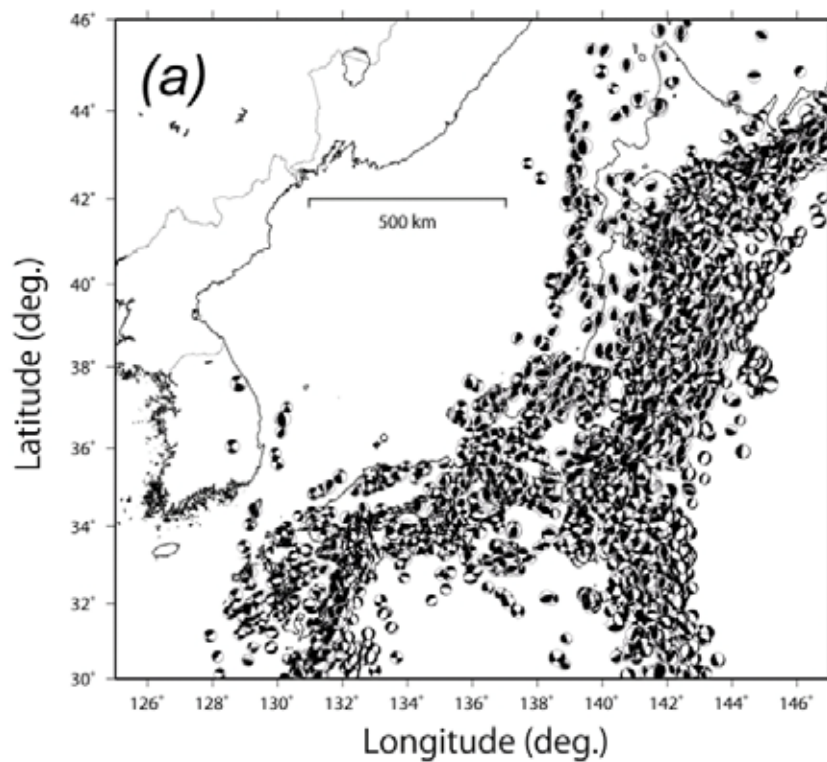


図2. JUNE C の初動より決定されたメカニズム解分布（東京大学地震研究所〔課題番号：1419〕）

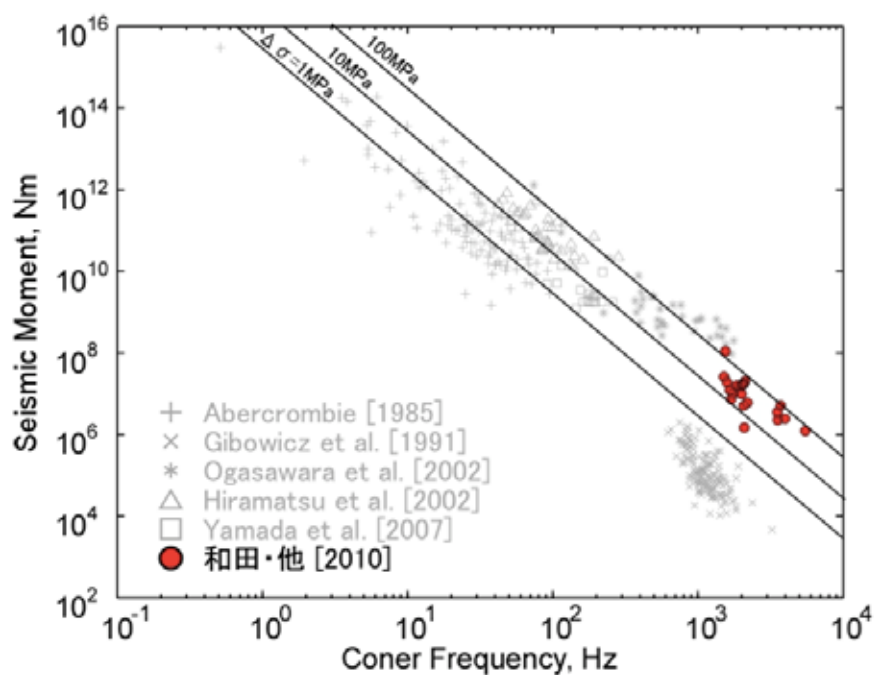


図3. 南アフリカ大深度金鉱山での高周波数至近距離観測波形から求めたM-3にいたる極微小地震コーナー周波数と地震モーメントの関係（東京大学地震研究所〔課題番号：1420〕）

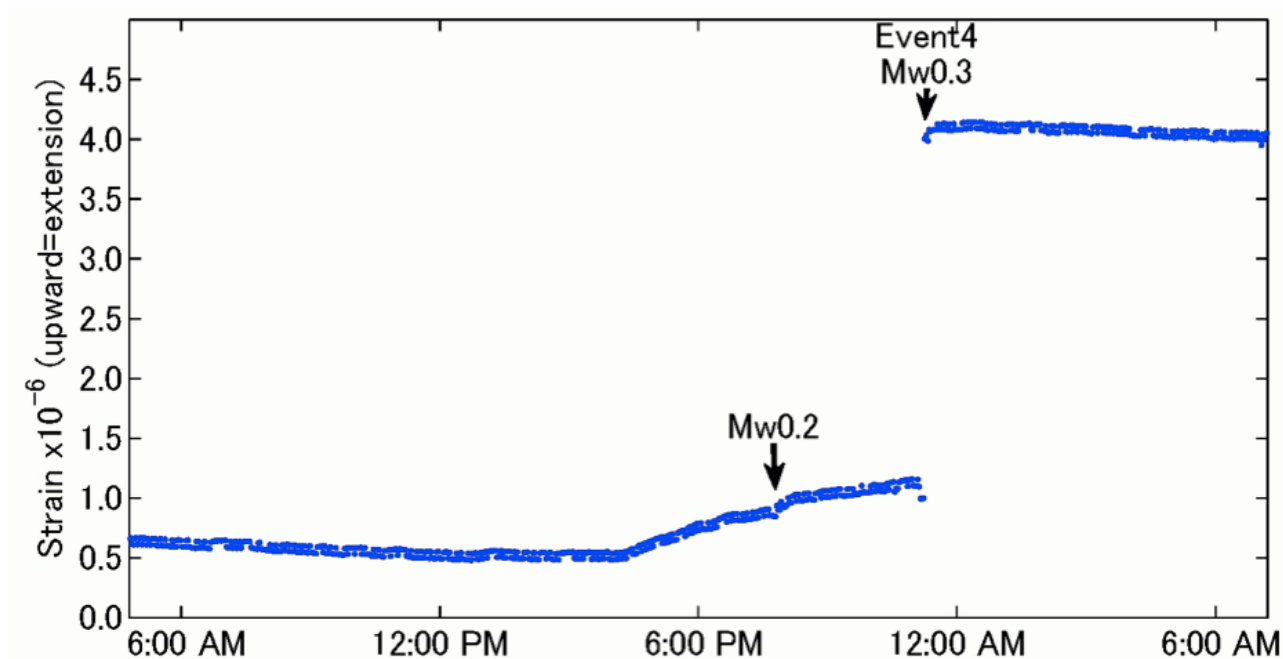


図4. 南アフリカ大深度金鉱山での至近距離ひずみ観測でとらえられた、Mw0.3の地震の6.5時間前から始まった先行ひずみ（立命館大学〔課題番号：1420〕）。近隣でおこったMw0.2の地震によるデータへの影響はほとんどない。

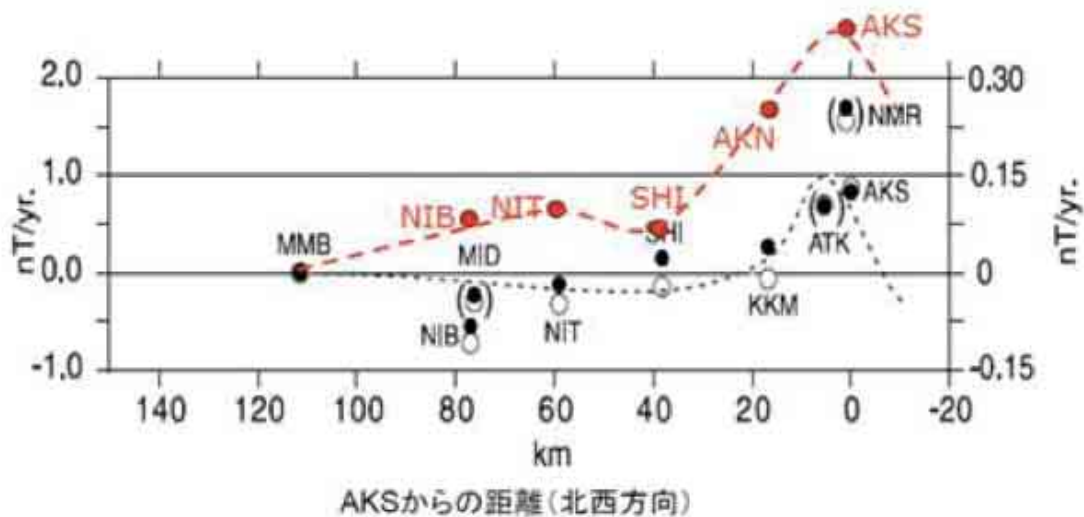


図5. 道東での地磁気観測点での全磁力永年変化率の空間分布(Nishida et al., 2004 に加筆)。横軸は厚岸から北西方向にとった距離。黒丸 は Nishida et al. (2004) による 1990 年代の変化率、赤丸は本研究課題によって求めた 2004～2010 年の変化率(DI 補正後の値)。(北海道大学〔課題番号：1005〕)

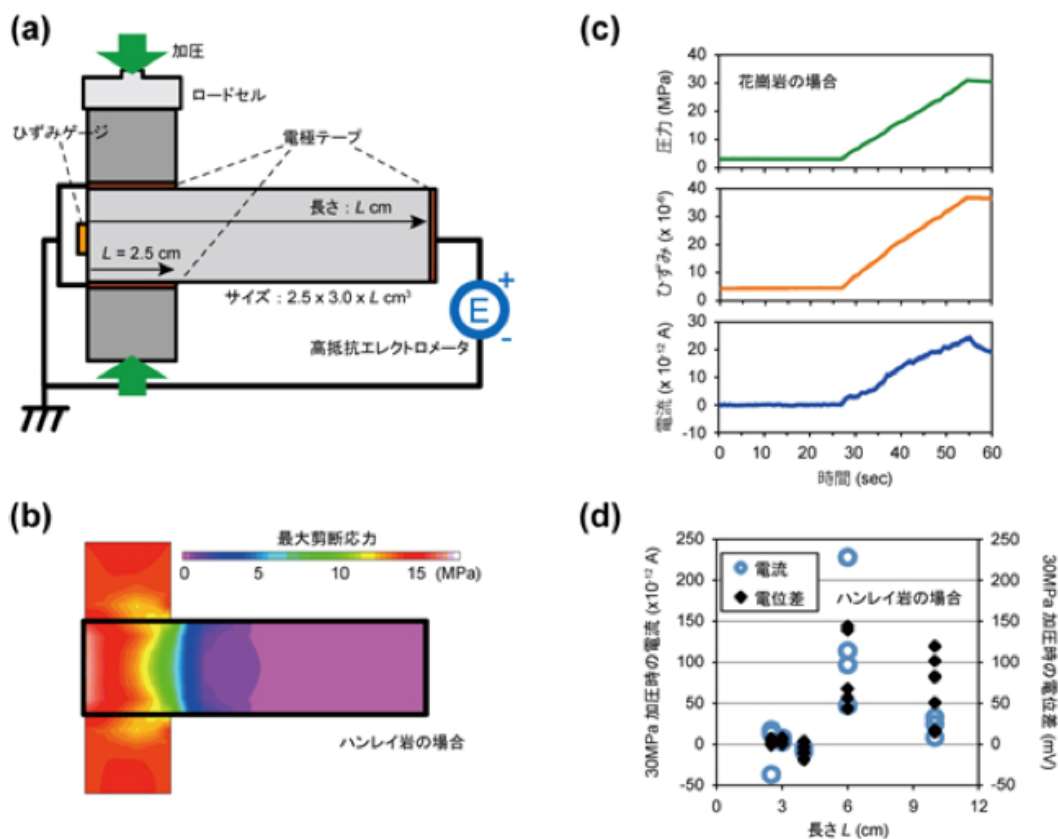


図6. 破壊強度よりずっと低いレベルの不均一载荷で火成岩に発生した起電力。(b)の内部応力分布は計算値。圧電鉱物に拘わらず、同程度の起電力が発生した。(東海大学〔課題番号：2501〕)

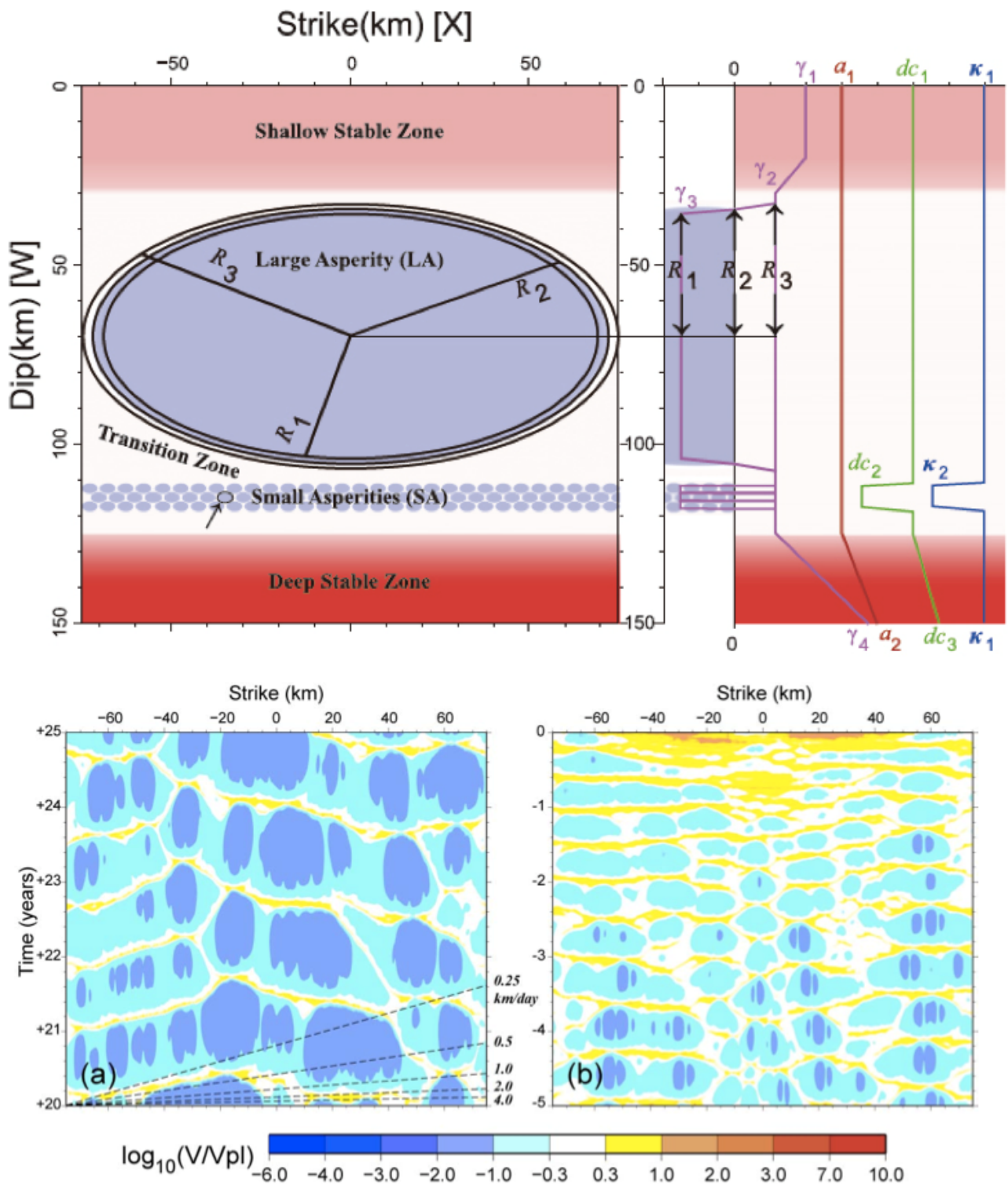


図7. 摩擦シミュレーションによる南海トラフの深部低周波微動の再現(東北大学[課題番号:1210])

上段: モデルのセットアップ。

下段: Dipが115 km(図1でSAが分布する領域)でのインターサイスミック (a) および大きなアスペリティの破壊直前 (b) のすべり速度の時間変化.大地震発生前になると、発生間隔が短く、伝播速度が速く、解放モーメント率が増加する様子が分かる。

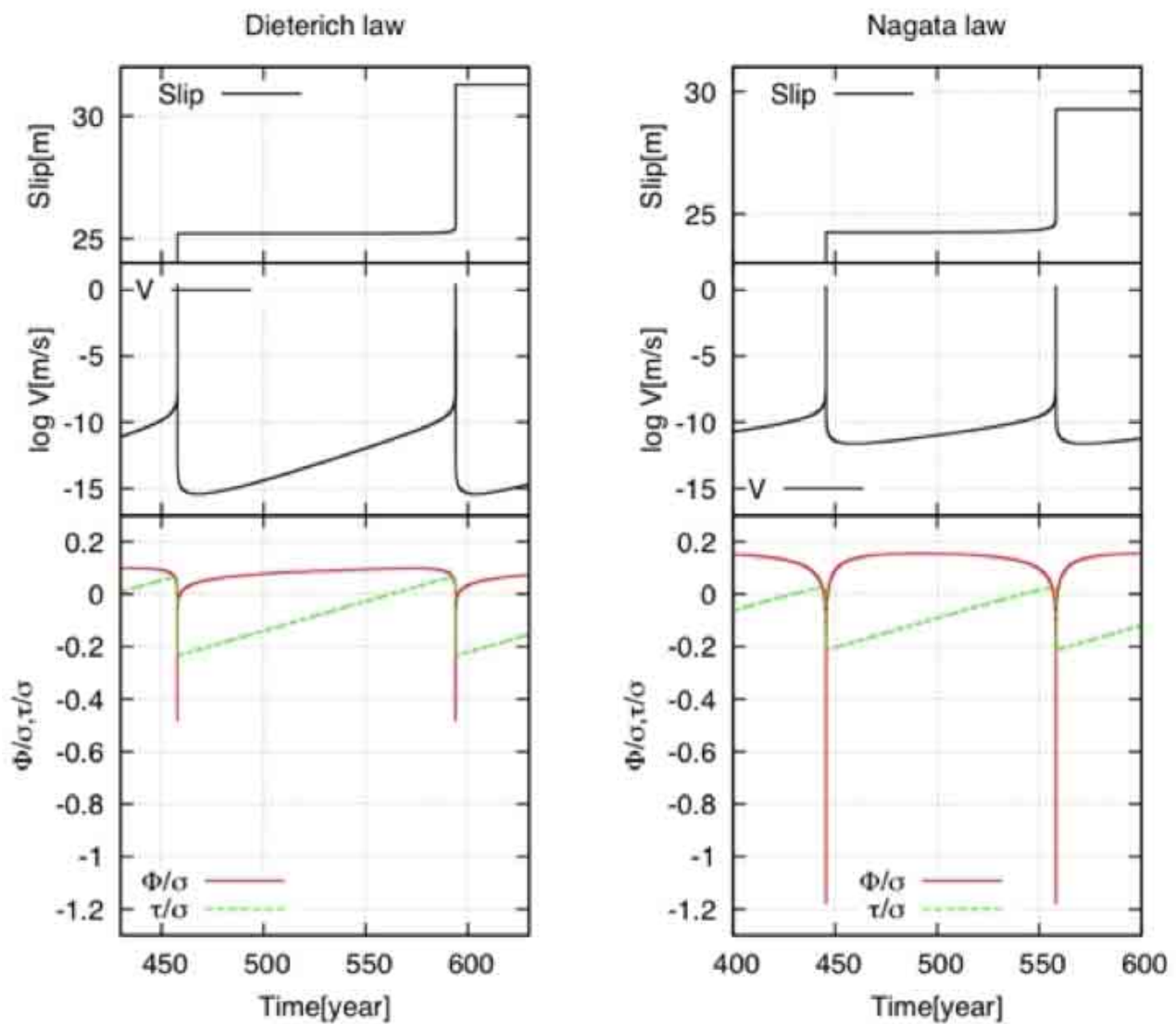


図8. バネブロックモデルによる地震サイクルシミュレーションにおける摩擦則修正の効果。 Φ は任意にさだめた基準滑り速度をおこすのに必要な剪断応力として定義された断層の固着度。
(東京大学地震研究所 [課題番号:1421])

左列：従来の摩擦則によるもの。

右列：修正された摩擦則によるもの。