

「次期地震予知研究計画検討シンポジウム」

開催趣旨

平成16年度に開始した「地震予知のための新たな観測研究計画(第2次)」は、今年1月に科学技術・学術審議会測地学分科会によるレビューが終わり、現在、外部評価を受けている。今回のシンポジウムは、次期計画を検討するための最初の検討会である。現行計画の成果を踏まえ、何が未解決で、何を目指すべきか、更に発展させるには如何にしたらよいか、という観点から多くの提案を行い、次期計画をより実りの多いものにするために、研究計画の方向性を議論する。

地震・火山噴火予知研究協議会 企画部 吉田真吾

日時:

2007年6月4日(月) 13:00 から 17:45 まで

2007年6月5日(火) 09:00 から 17:30 まで

場所： 小柴ホール 東京大学理学部1号館内（東京都文京区本郷7-3-1）

次期地震予知研究計画検討シンポジウムプログラム

2007年6月3日

日時： 1日目 2007年6月4日(月) 13:00から17:45まで

2日目 2007年6月5日(火) 09:00から17:30まで

場所： 小柴ホール 東京大学理学部1号館内(東京都文京区本郷7-3-1)

開始時刻	発表時間	内容	発表者
13:00	0:05	● はじめに	吉田真吾
座長： 加藤尚之		● 計画推進部会提案	
1	13:05	0:15 日本列島及び周辺域の長期広域活動	飯尾能久
2	13:20	0:15 地震発生に至る準備・直前過程における地殻活動 次期計画で推進すべき「地震発生に至る準備・直前過程における地殻活動」の研究	鷺谷威
3	13:35	0:15 <u>地震破壊過程と強震動</u>	瀬戸一
4	13:50	0:15 <u>地震発生の素過程</u>	矢部康男
5	14:05	0:15 <u>地殻活動モニタリングシステムの高度化</u>	山岡耕春
6	14:20	0:15 <u>地殻活動予測シミュレーションモデルの構築</u>	平原和朗
7	14:35	0:15 地殻活動情報総合データベースの開発	大見士朗
8	14:50	0:15 新たな観測・実験技術の開発	佐野修
15:05	0:15	◇ 休憩	
座長： 勝俣啓		● 機関・センター提案	
9	15:20	0:15 <u>北海道大学の次期5か年計画の概要</u>	茂木透
10	15:35	0:05 プレート境界と内陸における非弾性及び応力敏感構造の解明(仮)	小菅正裕
11	15:40	0:05 <u>東北日本弧の比抵抗構造と震源分布</u>	坂中伸也
12	15:45	0:10 <u>東北大からの次期計画にむけた提案 その1</u> 全体の説明およびプレート境界における地震発生準備過程の解明	松澤暢
13	15:55	0:10 <u>東北大からの次期計画にむけた提案 その2</u> 沈み込み帯の物質移動・ダイナミクスと内陸・スラブ内地震発生過程の理解	岡田知己
14	16:05	0:10 <u>東北大からの次期計画にむけた提案 その3</u> 観測の高度化のための新規技術開発	太田雄策
15	16:15	0:10 地震研究所が目指す次期予知研究計画 その1	佐藤比呂志
16	16:25	0:10 <u>地震研究所が目指す次期予知研究計画 その2</u> アスペリティの実体把握・歪応力集中機構・プレート境界と地殻内の応力時間変化	篠原雅尚
17	16:35	0:10 地震研究所が目指す次期予知研究計画 その3 地殻活動モデルのための物質・状態構造の解明に向けて	加藤尚之
18	16:45	0:10 時間空間幅広いスケールでの地震発生過程解明	井出哲
19	17:05	0:10 <u>地下起源ガスの観測に基づく地下構造の状態評価の試み</u>	角森史昭
20	17:15	0:10 比抵抗不均質構造からみた地殻内流体及びアスペリティ	小川康雄
21	17:25	0:10 静岡大学における今後の地震予知研究の取り組み	藤井直之
22	17:35	0:10 <u>国土地理院の地殻変動観測研究計画</u>	飛田幹男
17:45		◇ 一日目終了 懇親会(山上会館)	
座長： 松本聡			
23	9:00	0:10 名古屋大学の次期計画(1)活断層の位置・形状・ずれにもとづく地震発生予測	鈴木康弘
24	9:10	0:10 <u>名古屋大学の次期計画(2)技術開発からプレート境界モニタリング</u>	渡辺俊樹
25	9:20	0:10 名古屋大学の次期計画(3)中部東海地殻活動シミュレータ	鷺谷威
26	9:30	0:15 京都大学防災研究所の次期地震予知研究計画について 1.内陸地震	飯尾能久
27	9:45	0:15 <u>京都大学防災研究所の次期地震予知研究計画について</u> 2.プレート境界型地震:アスペリティ境界の特性の解明	橋本学
28	10:00	0:10 <u>西南日本弧の地震活動と深部比抵抗構造</u>	西田良平
29	10:10	0:10 斜め沈み込みテクトニクスと四国の前弧域から中央構造線系の応力場形成	久保篤規

10:30	0:10	◇	休憩		
座長：吉田真吾					
30	10:40	0:10	伸張場島弧における地震発生メカニズムの解明	松本聡	シ
31	10:50	0:10	プレート境界面周辺での起震応力場の解明	植平賢司	シ
32	11:00	0:10	日向灘南部・南西諸島北部域におけるプレート間カップリングの解明	後藤和彦	シ
33	11:10	0:10	東南海・南海地震前後における地下水変化のメカニズム解明	小泉尚嗣	シ
34	11:20	0:10	海底地殻変動観測の最近の成果と将来展望	佐藤まりこ	シ
35	11:30	0:10	(仮)基盤的地震観測網に基づく地殻活動モニタリングとモデル構築	小原一成	シ
36	11:40	0:10	紀伊半島沖海底における地震・津波観測網の構築について	金田義行	シ
				代理・荒木英一	
11:50	1:10	◇	昼食休憩		
座長：平田直					
37	13:00	0:10	南海トラフ地震発生帯における海底ボアホール観測計画	伊藤久男	シ
38	13:10	0:10	海溝沿い巨大地震の発生予測に向けたシミュレーション及び モニタリング技術の高度化、並びに関連した知識ベース開発の推進	森滋男	シ
			●グループ・個人提案		
39	13:20	0:10	南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験	小笠原宏	シ
40	13:30	0:10	内陸地震の震源断層の微細構造と回復過程の研究	西上欽也	シ
41	13:40	0:10	変動地形・地質学からのアプローチ	佐藤比呂志	シ
42	13:50	0:15	内陸合同観測による歪・応力集中過程の解明	岩崎貴哉	シ
43	14:05	0:10	地震予知研究における電磁気観測の成果と今後の展望	上嶋誠	シ
44	14:15	0:10	断層深部すべり過程の検証と内陸地震予測	重松紀生	シ
45	14:25	0:10	地震サイクルシミュレーションへのデータ同化にむけて	宮崎真一	シ
46	14:35	0:10	スロースリップイベントの予測モデルの検討	廣瀬仁	シ
47	14:45	0:10	内陸活断層近傍探査による、構造、強度、応力の不均質性と 時間変化に関する研究	小村健太郎	シ
48	14:55	0:10	地震断層の化学(ガス・流体)モニターと化学的素過程のリンク研究	田中秀美	シ
15:05	0:15	◇	休憩		
座長：加藤尚之					
49	15:20	0:10	微小地震観測データのバックグラウンドノイズ部分を用いた 地殻構造のモニタリングの試み	大見士朗	シ
50	15:30	0:10	間隙水圧観測を中心とする総合地殻活動モニタリング法の確立	加納靖之	シ
51	15:40	0:10	地震活動予測手法の共通評価基盤構築	鶴岡弘	シ
52	15:50	0:10	地震切迫度評価法の研究	桑原保人	シ
53	16:00	0:10	神岡地下サイトの総合観測に基づいた、地震・地殻変動観測手法の 大深度(km級)における地殻応力の定量的評価技術の開発	新谷昌人	シ
54	16:10	0:10		伊藤高敏	シ
55	16:20	0:15	●企画部提案	吉田真吾	シ
	16:35	0:55	●総合討論	吉田真吾	シ
	17:30		閉会		

日本列島及び周辺域の長期広域地殻活動

日本列島及び周辺域の長期広域地殻活動 研究計画部会

本部会の研究は、日本列島の歪・応力場のモデル化の上での境界条件を明らかにするために、地震サイクルを越えた時間スケールを扱い、列島スケールの空間スケールを扱うものであり、

ア 日本列島及び周辺域のプレート運動

イ 列島規模のプレート内の構造と変形

という2つの柱から成り立っている。

アでは、日本列島周辺のプレートモデルを定量的に構築することが主な目的であり、GPSデータを用いて、アムールプレート、オホーツクプレートについては、その存在の有無とプレート境界の位置を明らかにし、相対速度を1 mm/yr程度の精度で決定するという目標が置かれている。一方、イでは、日本列島における内陸地震の発生機構を解明するために、(1) 日本列島および周辺域の構造・物性を明らかにし、(2) そのもとで日本列島自体がどのような応力状態にあってその結果どのような変形をしているのかということを明らかにする。ア、イ両方に関係する重要な課題としては、日本海東縁部や内陸の歪集中帯がプレート境界か内部変形かという問題が挙げられる。

これまでの研究により、アでは、1) 日本を取り巻く周辺地域でのGPS観測を実施しデータを蓄積、2) アムールプレートの内部変形についての調査を実施、3) VLBI, SLR, GEONETについての観測を継続など、日本列島の歪・応力に対する外部境界条件の推定のための基礎資料が蓄積されている。ただし、GPS機器の老朽化により、受信機故障で観測点を放棄せざるを得なかったり、雑音の大きなデータしかとれない、などの支障がでてきている。イでは、1) 海洋プレート境界の位置や形状の解明、2) 列島規模での上部マントルと地殻の構造の解明、3) 鳥取県西部等における断層の強度の推定、4) 山陰地方の地震帯において、直下のフィリピン海プレートからのメルト(水?)の上昇をトモグラフィーにより、下部地殻の水を比抵抗構造によりイメージングし、下部地殻の断層帯の変形による地震帯への応力集中を観測とモデリングにより推定、5) 新潟-神戸歪集中帯において、地震波トモグラフィーにより、西部では下部地殻に、東部では地殻上部と最上部マントルに、中央部では地殻・最上部マントル全体に低速度異常を発見し、歪集中帯の幅や地質構造と関連を指摘するなどの重要な成果を上げた。

今後の主な課題は、上記で得られた成果を吟味・検証するとともに、下記に示すものが挙げられる。

アについては、データの集積が十分でない観測点もあるためアムールプレートやオホーツクプレートの運動をより精密に計測するためにはまだ数年程度の観測を積み重ねる必要がある。使用している受信機が老朽化していることも問題であり、観測機器の更新を図る必要がある。また、日本列島への外部境界条件を精密に求めるためにはGEONETや太平洋・フィリピン海プレートの他の観測網とも統合的に解析を行い、太平洋、フィリピン海、アムール、オホーツク、北米、ユーラシア等の相対運動を正確に求め、日本列島に対する外部境界条件をより精密に明らかにする必要がある。

イについては、沈み込むプレートの位置や形状および陸側の構造の把握、特に、フィリピン海プレートに関して、アサイスミックなスラブやプレート境界の位置等の把握、上部マントルの構造の解明に続いて、地殻構造の分解能をあげることで、プレートからの脱水過程の精細を解明すること、応力や強度は一部の地域でしか推定されていないため、広範囲でその推定を行うこと、プレートの固着状態の推定のため、プレート境界付近の熱構造や陸側プレートのモホ面近傍の構造決定が重要である。

次期計画への展望

「地震発生にいたる準備直前過程における地殻活動」計画推進部会
発表者：鷺谷 威（名大・環境）

地震発生にいたる準備・直前過程における地殻活動の研究は、地震発生に先だって生じる様々な現象を調べてその物理メカニズムを解明し、将来、定常的なモニタリングや地殻活動モデリングに貢献することを目指している。

第2次計画では、プレート境界の地震について、アスペリティ・モデルの検証が進み、地震サイクルにおけるゆらぎや連動型巨大地震の証拠が発見され、様々なスロー地震に代表される多様なすべり過程の存在が明らかにされた。内陸地震については、歪み集中帯（跡津川断層）における集中観測や大地震発生後の余震観測を通じて、地震発生に関連する不均質構造が明らかにされつつある。

アスペリティについては、現時点における理解は必ずしも十分ではなく、その内部構造など不明な点も多い。また、過去の大地震の繰り返しや規模に関しては、情報が非常に不足しており、物理メカニズムも未解明なままである。スロー地震については、現象自体が新たに発見されたものであり、プレート境界のすべり挙動全体としての描像を得るには至っていない。一方、内陸の地震についても、大量のデータによってこれまでに無く高い分解能の情報が得られているが、構造的特徴と地震時破壊の対応は普遍的とまでは言えず、応力蓄積メカニズムや地震発生モデルとの間にはギャップが存在する。地震サイクルの観点から応力蓄積過程を理解することも重要であるが、再来期間の長い内陸地震については、過去の履歴が不明なものも多く、現在の観測を通して地震の切迫度を評価できる指標を持つことが望ましい。

こうした現状を踏まえ、第3次計画で推進すべき内容として以下を提案する。

- (1) アスペリティ・モデルの高度化
構造的特徴との対応付け、準静的すべりモニタリングの高精度化、数値モデルを用いたモニタリング高度化、地震の1サイクルを通じてのデータ蓄積などにより、アスペリティ・モデルの一層の高度化を図る。
- (2) 地震サイクルのゆらぎや連動型巨大地震のメカニズム解明
ゆらぎの観測事例を増やすとともに、そのメカニズムを考察する。連動・非連動を分ける条件、発生前の応力状態の違いなどを解明する。
- (3) スロー地震の発生場と物理メカニズム解明
スロー地震について新たに提案されたスケーリング則を検証し、物理メカニズムを解明する。スロー地震が発生する場所の構造的な特徴を明らかにする。
- (4) 内陸地震発生の物理モデル構築
不均質構造の観測事例を増やすとともに、そうした構造と地震発生との関連を迫及し、応力蓄積過程の定量的なモデルを構築する。
- (5) 内陸地震の切迫度評価法開発
地震発生の切迫度や地殻の臨界度を評価するための指標を検証する。
- (6) 地震発生直前の物理過程解明
前駆現象の観測事例蓄積とメカニズム解明を進める。

こうした研究の内容は、他の部会（長期広域、地震発生素過程、モニタリング、モデリング）と密接な関係にあり、幅広い連携が必要不可欠である。

次期地震予知研究計画検討シンポジウム 「地震破壊過程と強震動」部会提案

大地震の震源に関わるこれまでの成果として、海溝型地震の震源解析が精力的に進められたことにより東北日本のアスペリティマップが完成したことがあげられる。これによりアスペリティの繰返しやその面積、応力降下量などの微視的震源パラメータの特徴が明確となり、震源のスケーリング則に基づく想定大地震の震源モデルの設定が可能になった。次に、地下構造モデルの成果として、反射・屈折法などの物理探査などによる平野部構造探査の進展により、強震動シミュレーションに不可欠な高分解能の地下構造モデルが構築されたことがあげられる。二つを結びつけることにより、強震動の生成過程を理解し、将来の大地震の揺れを予測することが可能になりつつある。同時に、高密度強震観測網の整備により、複雑な震源過程と不均質な地下構造における波動伝播と強震動の生成過程を詳細に理解し、シミュレーションモデルの高度化に資するための基礎データが蓄積されている。

次期計画では、地震破壊過程と強震動に関わるこれまでの研究成果をもとに、広帯域地震動の生成に関わる震源・波動伝播の特性の理解と、地震直後の強震動の予測・被害軽減をめざし、以下の研究計画を推進したい：

- (1) 強震動予測の確度向上のため、内陸活断層やプレート境界でのアスペリティ領域の事前マッピングを行うことを念頭に、地下構造探査や地震活動によるアスペリティ領域の特徴の抽出と不均質構造との対応をより多くの地震について行い、アスペリティのマッピングに必要な情報を明確にする。
- (2) 長周期～短周期の強震動予測に資する広帯域震源モデルを構築する。このために、断層運動の動的パラメータを、広帯域波形インバージョンから求める手法の開発と、震源物理モデルに基づく断層運動のミクロ構造と不均質揺らぎの導入を行う。
- (3) 歪み集中帯付近で発生した内陸地震の震源モデル（濃尾地震、福井地震、新潟地震など）を精査する。近地強震記録を用いた詳細な震源過程解析のために、3次元地下構造を考慮した震源インバージョン手法の高度化をさらに進める。
- (4) プレート境界地震の成果をもとに、スラブ内地震の精査を進める。スラブ内地震の発生メカニズム、およびプレート境界地震との関連性を理論と観測データから考察する。歴史地震の震源モデルの精査を引き続き行い、地震時と地震直後・直前に至る地震サイクルの一連の物理過程を理解する。
- (5) 巨大プレート境界地震と、M7級のプレート境界地震やスラブ内地震の関連性を調査するために、古地震記象や史料を統合的に解釈することにより M7級地震の震源モデルを構築する。トモグラフィー解析や地震活動と震源断層・アスペリティ位置の対応を調査する。
- (6) 強震動シミュレーションモデルの高度化のために、表層、堆積層、地殻、海域、最上部マントル(プレート)にバランスのとれた統合化地下構造モデルの整備を進め、シナリオ地震の長周期地震動地図を作成する。また、地下構造モデルと震源モデル

の高度化を進め、短周期地震動を含む広帯域地震動シミュレーションに挑戦する。

- (7) 津波の波形や遡上高、震度やその分布などの新しいデータの開拓や、高レート GPS や SAR など最近のデータの活用に努め、地震破壊過程の研究、特に歴史地震の破壊過程の研究における新展開をめざす。
- (8) 強震動および海底津波計等による観測データ等を用いた即時震源解析・リアルタイム津波予測のための研究を推進する。

「地震発生の素過程」計画推進部会提案

「地震発生の素過程」に関する次期研究計画

部会長代理 矢部康男（東北大学）

基本方針

次期計画において、以下の三つの主要課題のもと、地震発生の素過程に関する研究を推進する。

- (ア) 摩擦・破壊現象の物理・化学的素過程の解明
- (イ) 地殻・上部マントルの物質・物性と摩擦・破壊構成則パラメータの推定
- (ウ) 自然地震の時空間スケールでの摩擦・破壊現象の解明

現行の地震予知研究計画では、地震発生の素過程に関する研究の主要課題は上記(ア)、(イ)である。(ア)は、地殻活動予測シミュレーションモデルを構築するのに必要な摩擦・破壊構成則の確立とシミュレーション結果の検証に必要な手法の開発を主目的としている。(イ)では、予測シミュレーションモデルに代入すべき現実的な物性値や構成則のパラメータの値を、地震波速度や比抵抗などから推定することを目的とした理論的・実験的研究をおこなっている。

(ア)については、例えば、高橋(産総研)らは、透水率の異なるセラミックスの間に粘土鉱物を挟んで高温化ですべり実験をおこない、粘土鉱物からの脱水と周辺媒質の透水率が粘土鉱物の摩擦特性に著しい影響を及ぼすことを示した。また、清水(東大)らは、ある圧力以上では蛇紋岩は脱水軟化を起こし、脆性的な挙動を示さないことを明らかにした。これらの結果は、脱水不安定が生じるための条件や蛇紋岩の力学特性に関する従来の理解がいかに未熟であったかを示すものである。

一方、吉岡(横浜市立大)や阪口(JAMSTEC)は載荷状態にある粉体中に形成される応力鎖の構造は、印加応力が破壊応力に近いところでドラスティックに変化すること、そして、音波探査でその変化を検出できることを実験とモデル計算に基づいて示した。さらに、中谷(東大)らは、弾性波の透過振幅の変化から摩擦強度の変化を推定できることを示した。これらの結果は、地震波の観測から断層面の固着状況の変化を推定できることを示しており、地震の準備過程のモニタリングに新たな道を開くものである。

(イ)については、たとえば、渡辺(富山大)は、蛇紋岩を高温型と低温型に分類して弾性波速度を測定し、高温型蛇紋岩の V_p/V_s は大きくないことを示した。この結果は、地震波速度トモグラフィなどで推定される沈み込んだスラブ直上の高 V_p/V_s 領域が必ずしも蛇紋岩化したマントルの存在を示すものではないことを意味する。

以上のように、地震発生の素過程に関する研究は、現行研究計画で掲げた課題について着実な成果をあげており、次期計画においてもこの方向を維持し、さらに発展させていくべきであると考ええる。一方で、例えば、弾性波を用いた断層固着状態のモニタリングのように、天然の断層を対象とした実験でその有効性を検証すべき段階にまで達したものもある。現行研究計画が終了するまでの今後2年間で、それぞれの研究がさらに前進することを考えると、次期計画においては、多くの研究成果が、天然の地質構造における有効性を検証すべき段階に達すると期待される。天然の地質構造と室内実験との時空間的スケールの乖離は、室内実験に常に付きまとう問題であり、決して新しいテーマではないが、これまでは研究に未熟な部分が多かったため、その問題を回避してきた。現行計画において、地震発生の素過程の研究レベルは格段に向上し、次期計画においては、この問題に正面から挑む必要がある。そこで、次期計画での地震発生の素過程の主要研究課題として、現行計画でも謳われている(ア)、(イ)に加えて、「(ウ)自然地震の時空間スケールでの摩擦・破壊現象の解明」を掲げたい。

具体的には、南アフリカ大深度金鉱山半制御地震発生実験グループと連携しての断層直近での多項目観測や、南海掘削でえられる震源物質の解析、さらには、爆破地震観測グループやアクロスのグループと連携しての断層透過波の観測などが挙げられる。

モニタリング部会からの提案

山岡耕春（名古屋大学環境学研究科）

地殻活動のモニタリングは地震の定量的予知のためには欠くことのできない分野である。一方、モニタリング部会が次期の計画でどのような扱いになるかはまだ確定していない。したがって、本提案では部会として責任を持って実施したい研究内容を述べるよりも、地殻活動モニタリングには何が必要かという観点で述べたい。

定量的予測のためにはシミュレーションにおけるモニタリングデータの同化が必要となる。これを一言で言えば、シミュレーションによって予測される各種データと実際に観測されるデータとの比較により予測とモデルの修正を行っていくことである。そのために必要なデータとは、地殻の応力・歪および断層面上のすべりの状態、それらと関係の深い観測量である。

現時点で定量的地殻活動予測のためのデータとしては、（１）GPS・歪計・地下水位などの地殻の歪みに関するデータ、また（２）GPS等の歪み観測および相似地震を用いたプレート境界のすべりのデータが定常的に提供されるレベルにきている。これらのデータに関しては今後も研究開発を進めることによって精密化が期待できる。

一方、地殻応力に関する観測は、一部で応力の直接測定が行われているものの、せいぜい地表から1 kmまでの深さにおける測定であり、それらの値と地下深部の値との関連に関する研究の進展が必要である。地震活動は、応力とその変化を反映していると考えられており、地震や火山活動などによる応力変化を反映した地震活動の変化が観測されている。応力と応力変化の順問題として地震活動変化を予測できる定式化が求められる。また地震発生による周辺の微小地震の発震機構の変化などを利用した応力のモニタリングも試みられており、発震機構の利用したモニタリング手法の開発も待たれる。

海域における各種観測のリアルタイムデータ取得が必要であることは言うまでもない。この分野に関しては、技術的な開発が現在精力的に行われているので、期待したい。

地震予知のための観測として電磁気変化なども提案されているが、現時点では個々の観測と地震活動との前後関係を述べるにとどまっており、データの共有も不十分で、総合的なモデル化ができていない。定量的な地殻活動予測に貢献するためには応力やすべりなどの力学的な現象と電磁気学的現象をつなぐしくみの解明とモデル化が必要である。

従来の観測量だけでなく、モニタリングのための新しい観測量を取得する試みも必要である。断層面の「摩擦強度」の変化を透過弾性波によってモニタリングできる可能性を指摘した研究があり、アクロスなどを利用してこの検証を進めることが必要である。また弾性波速度、減衰、比抵抗変化など応力やすべりの変化に伴う地下構造変化が予想されているので、その定量的関係の解明と、観測手法の研究開発が求められる。

シミュレーション部会提案

京都大学大学院理学研究科 平原和朗

地震予知のための新たな観測研究計画（第2次）において、「地殻活動予測シミュレーションモデルの構築」課題では、主として以下の成果を挙げた：

- 1) 作成した日本列島域の3次元プレート境界面形状標準モデルを利用し、粘弾性滑り応答関数の計算を行い、日本列島域の地殻活動シミュレーションモデルのプロトタイプを完成した。
- 2) 弾性モデルではあるが、北海道東部、三陸沖、東海沖、南海トラフといった地域において、アスペリティーの相互作用、プレート境界面形状・摩擦特性が生み出す、非地震すべりを含むさまざまなタイプの複雑な地震発生サイクルについて、観測されているすべりの多様性や過去の地震サイクルを再現するシミュレーションが試みられた。

以上の成果により、シミュレーションモデルの有効性が確かめられ、プレート境界のすべり過程に関しては、ある程度モデル化できる、見通しを得たと言える。

ただし、現状では、シミュレーションモデルの基本的な部分についてはある程度完成したと言えるが、予測に使えるほど十分に（定量的に）正確であるとは言えない状況にあり、また、モデルパラメーター等を制約するための情報が不十分である。当初の計画では、「地殻活動の現状をモニターし、そのデータを地殻活動予測シミュレーションモデルに取り込むことで、大地震の発生に向けた地殻活動の推移予測を行う」と述べられていたが、シミュレーションと他のグループの連携は十分とは言えなかったという問題点も残されている。

以上の成果および問題点を踏まえ、次期5ヵ年では、まずは、プレート境界型地震の発生予測に向けて、以下のような戦略が考えられる。

1) 日本列島シミュレーションモデルに基づく日本列島広域における長期評価

現在行われている統計モデルに基づく長期評価（ポテンシャル評価）を物理モデルによるものに置き換えるべく、今期作成された日本列島広域シミュレーションのプロトタイプモデルを発展させる。

2) プレート境界型地震の中期予測シミュレーション実験

さらに、この広域モデルの中に、地域モデルを構築し、プレート境界型地震の中期予測（十年～）を目指し、プレート境界におけるすべり進展および地震発生予測の実験を行う。

以上の課題を実現するためには、現実の観測データのモニタリングとシミュレーションを融合させ、構成パラメータ等の推定を行う手法（データ同化手法）の確立が必須である。これには、現在の部会構成のように、モニタリングとシミュレーション部会が独立ではなく、プレート境界型地震の中期予測実現を目指して、組織再編を行う必要がある。また、現在のモデルでは考慮されていない物理過程（たとえば、媒質の不均質性、地震性すべり時の摩擦特性、間隙流体圧等の時間変化、動的破壊における亀裂の進展など）についての更なる研究を要するが、これには素過程部会との融合といった再編を考える必要がある。

「地殻活動情報総合データベースの開発」計画推進部会提案

文責：大見士朗（京大防災研）

1. はじめに

「地殻活動情報総合データベースの開発」計画推進部会は、平成16年度からの第二次新計画で設置された。本研究計画は、地殻活動予測シミュレーションモデルの開発のために基礎となる観測データの整備と、地殻活動モニタリングシステムから有効に情報を取り出すために必要不可欠である。このような立場から、本部会では、これまで蓄積されてきた日本列島規模の各種の基礎データを整理・統合する「ア. 日本列島地殻活動情報データベースの構築」の実施と、地殻活動モニタリングシステムからの多種・大量の観測データを有効処理するための「イ. 地殻活動データ解析システムの開発」を目指して研究を推進してきた。平成18年度の成果を概観しても、大学、防災科学技術研究所、産業技術総合研究所、国土地理院、気象庁等の関係各機関による精力的な研究が遂行され、一定の成果を挙げてきたと考えられる。

2. これまでの経緯

その一方で、平成18年12月25日付の「東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 外部評価報告書」によれば本項目の評価は必ずしも芳しくなく「データベース開発の進捗状況は芳しくない。データベース開発を進めるためにまずどのようなデータベースが必要かを示すところ、大学の役割であると考え」というような厳しい指摘がなされている。このような指摘に対しては、「データベース開発」が研究そのものというよりはその後方支援的な要素の強い分野であり、昨今のような短期的に研究成果を求められる研究者にとっては、必ずしも取り組むことが容易でない現状を斟酌していないという反論もある。しかし、平成18年度の本部会の年次報告にもあるように、「地殻活動予測シミュレーションモデルの開発に寄与するためのデータベースを構築するためには、基礎となる多項目で大量の観測データを効率よく整理・統合することが必要不可欠である。しかしながら、現状では、それぞれの観測主体によって個々のデータベースが構築されている。今後は、各機関が連携して、それぞれのデータベースの統合化を図っていかなければならない」という反省点があることも事実である。次期計画においてはこれらの問題点の解決を図ることが可能な計画を提案することが必要となる。

3. 次期計画への提案～「素材」DBと「成果」DBを両輪として～

次期計画では、現在も進行中の、各種の基礎データの収集蓄積を主体とするデータベース（素材DB）の構築と、こ

れまでの各種の研究で得られた成果を主体とするデータベース（成果DB）の双方の開発を促進することを目標としたい。この際、本来は緊密な関係を保つべきモニタリング部会やシミュレーション部会との連携が必ずしも充分でなかったことが厳しい外部評価につながった面も否定できないと考えられることから、素材DBについてはモニタリング部会、成果DBについてはシミュレーション部会等との連絡を密にして計画を策定することをめざす。

3-1. 素材DB：まず、データベース（DB）開発において、その構成要素となる各種の基礎データ（素材）の収集蓄積を主体とする研究は本質的に重要であり、今後とも継続する必要がある。これに加えて、各機関が長期にわたって構築してきた独自の素材DBを有効に利用するためにそれらを容易にアクセス可能にする方策を考える必要がある。そのためには、各機関の既存のDBを共通フォーマットに変換することがひとつの解決法であるがそれは現実的ではない。次善の策として、既存のDBをアクセスするためのフロントエンドとして共通仕様のものを開発し、その部分だけを各機関のDBシステムに実装していただくという方法がある。このフロントエンドは、各機関の独自データを入力とし、共通フォーマットでの出力を行う。次期計画では、DB部会として、各機関に分散している各種のDBを対象とした、共通フロントエンドのデザインを行うことを提案する。対象としては、まずは各機関が膨大なデータを蓄積している地震観測データを対象としたプロトタイプ開発を行い、試験的に複数機関に実装することをめざす。さらに開発が順調であれば、地震データ以外のDBへの拡張もめざしたい。

3-2. 成果DB：これまで発表されてきた各種の研究成果を収集し、数値化が可能なものについて共通フォーマットでのDB化を行う。このDBについては本部会が中心となって構築し、代表機関にサーバを設置して公開することをめざす。収集すべき研究成果やその登載方法については、成果DBのpotential userとも考えられるシミュレーション部会等とも密接に連絡を取りながら選定する。当面収集すべき研究成果としては、地震波速度トモグラフィ、制御震源探査結果、減衰構造、プレート形状、地震発生メカニズム等の成果を想定している。

4. 次期計画でめざすところ

上に述べたように、他部会との有機的な連携を図りながら、地震予知研究計画に必要とされるデータベースの性格を模索し、地道な努力の産物であるデータベースが有効に活用され、かつ正当に評価される方向を探ることをめざしたい。

新たな観測・実験技術の開発部会からの提案

「新たな観測・実験技術の開発」研究とは、これまで捉えることが困難ないし不可能であった現象をみるための「道具」の開発である。この研究計画には10機関が参加し18研究課題が実施されてきた。技術開発の最終目標は、他研究課題で実用化されることにあるので他項目の研究課題と共同で実施されることが多いだけでなく、この研究計画課題には含まれていないが、他項目で実施されている観測技術開発も存在している。全体は4つの細目に分類される。

(1) 海底諸観測技術の開発と高度化

陸域の観測だけでは海域で発生する地震観測の空間分解能が低いため、十分な精度の海底諸観測技術開発と高度化が必要である。主として、(1)GPS—音響測距結合方式による海底測位計測システム、(2)海底における圧力・傾斜変動観測、(3)海底ケーブル利用システム、(4)海底ボアホールを利用した歪・傾斜変動観測、および(5)海底における長期地震観測の高度化研究が実施されてきた。

(2) ボアホールによる地下深部計測技術の開発と高度化

ボアホール利用による地下深部計測技術とは、雑音の多い地表から離れることによって高分解能のデータをえるだけでなく、震源核に近づいて地殻応力状態や断層物質を直接測定するための重要な技術の一つである。主として、(1)水圧破碎法や水を使わない破碎法による地殻応力測定、(2)オーバーコアリング法による応力測定、(3)光干渉計測技術など先端技術をもちいた地殻変動観測技術開発、(4)局所的地殻変動と広域地殻変動との関係の解明や地下水位の影響評価、(5)ボアホールによる地震・地殻変動観測技術の高度化研究が実施されてきた。

(3) 地下構造と状態変化をモニターするための技術の開発と高度化

この細目では、(1)精密制御震源技術の高度化により、微小な応力変化、散乱体や地殻内流体の分布の変動、プレート境界での反射強度の時間変動などをモニターするための技術開発、(2)GPS とボアホール歪計の中間の時空間規模の観測を目的としたレーザ光などを利用した超高精度・高安定測定技術、(3)広帯域電磁気観測手法、地殻比抵抗の時空間変化、(4)精密制御信号源を用いた電磁気学的なモニタリング手法の開発研究、(5)マントル起源のヘリウム放出量の時空間変化から地殻深部の物質移動を調べる手法の開発が実施されてきた。

(4) 宇宙技術等の利用の高度化

GPS に代表される宇宙技術の利用は地殻変動観測に革命をもたらした。海底諸観測技術細目で実施されているキネマテック GPS—音響測位もまた宇宙技術利用の一つである。また、日本の L-band SAR 衛星 ALOS(だいち)の実用化により SAR に関する研究課題も注目されている。この細目では(1) キネマテック GPS の高精度化や大気補正技術の高度化研究および(2) SAR を用いた地殻変動計測手法開発が実施されてきた。また次世代衛星テレメータシステムの開発研究が実施されてきた。

いずれの研究課題も重要な技術開発であり、すでに実用化されているものも含めて、さらなる高度化研究が必要である。高精度、高分解能、広帯域、広ダイナミックレンジはキーワードであるが、稠密、広域、オンライン、リアルタイムも重要なキーワードである。観測のための基本技術は火山・噴火予知計画と地震予知計画で共通なものが多いので連携は比較的容易と考えられる。人が容易にアクセスできない状態・場所に観測装置を設置するための技術開発など、これまでの予知計画に含まれなかった、新たな技術開発の提案も期待される。

次期5ヵ年計画の概要

北海道大学地震火山研究観測センター

1. はじめに

最近の海溝型巨大地震や内陸型大地震の発生は、広域の歪集中過程を理解し、それがローカルな構造に及ぼす影響を理解することが最も重要である事を再確認させた。北海道での大地震発生は、カムチャッカから北海道に渡る千島海溝に沿った太平洋プレートの沈み込み、それによる上盤側（オホーツクプレート側）への歪集中、さらにはアムールプレートとの衝突境界の形成によることが現在までの研究により明らかになってきた。次期5ヵ年計画では、それらを包括的に理解するとともに、歪を集中させるローカルな構造を調査し、モデル化に導くことを目的とする。

2. プレート境界地震

北海道太平洋岸には数百年おきに大津波が押し寄せたことが津波堆積物の調査から明らかになってきた。しかも、最後の大津波は17世紀に発生しており、次の大津波地震が遠くない将来に発生することが予想され、地元でも防災対策を考える段階になってきている。最近まで、このような大津波を起こす巨大地震がどのようにして起こるのかよくわからなかったが、2004年スマトラ地震が発生し、このような巨大地震、大津波が現実にかかることが実感された。現実となった超巨大地震は、近い将来北海道でも起こりえるため、その発生メカニズムや準備過程解明の観測研究を行う。

このような連動型巨大地震を予測するためには、それぞれの震源域でのプレートのカップリング状況の変化を捕らえることが重要であり、また、それらの境界域の構造も調べておく必要がある。カップリングの状況を調べるためには、陸上及びトレンチ側海底での地震観測や地殻変動観測が重要であり、またS波反射波による繰り返し観測も必要であろう。特に根室沖については、発生確率の高い地域として、重点的に観測を行う必要がある。

3. 内陸地震

北海道では、大きな被害を起こすM6-7クラスの内陸地震が道北地域や道東弟子屈地域で発生している。道北地域はアムールプレートとオホーツクプレートとが衝突している地域であり、歪が集中しているので過去に内陸大地震が多く起こっている。また、弟子屈地域は1950-60年代に多くの大地震が発生したが、この地域は火山フロントに位置しており、プレートからの応力が火山地域に集中していると考えられる。これまでの構造調査により、道北では基盤岩の起伏と大地震の発生地域との関係が指摘され、また弟子屈ではカルデラ形成に係る断層が地震断層になっていることがわかってきた。このようなテクトニックな背景をもった構造の特徴を把握すると共に、HINETやGEONETよりも稠密な地震観測、GPS観測および電磁気観測を行って、歪の集中過程を観測していく必要がある。また、大都市に近く地震発生確率も高い活断層（石狩平野東縁断層、函館平野西縁断層等）での観測も考える必要がある。

4. 津波履歴の観測

北海道太平洋岸からカムチャッカにかけては、繰り返し起こる海溝型巨大地震による津波で打ち上げられた堆積物が分布している。その履歴を調べることで、巨大地震の発生頻度や大きさが得られ、この地域での巨大地震発生過程の理解する。

5. アムール・オホーツクプレート運動モデルの高度化

日本列島の地震活動に大きな影響をもたらすアムール・オホーツクプレートの運動については、アムールについてはその存在はほぼ確実のものとなったものの、南の境界が不明瞭であり、また中部一西南日本と北日本ではその収束形態が異なっている可能性がある。またオホーツクプレートに関しては、特に東北日本の所属について不明確な点が多い。これらの問題を明らかにするため、現在行っているロシアとの共同GPS観測を継続してプレート運動モデルの高度化をはかるとともに、特に沿海州地域に観測点を増設し、日本列島との相対的運動モデルの精密化をはかる。

6. VHF帯電波による前兆現象の観測

VHF電波伝播異常の観測を2002年より行ってきたが、M4~5以上の地震の1日から10日前に地震の大きさに比例した時間の伝播異常が観測されてきた。引き続き、観測を続けることにより、道東や日高地域の地震について、地震の大きさと異常現象の継続時間や現象終了時間と発生時間との間の統計的関係について検討する。また、その信号の波形や持続時間からその発生メカニズムの推定を試みる。

プレート境界と内陸における応力敏感構造の解明

弘前大学大学院理工学研究科（発表者：小菅 正裕）

弘前大学としては、現行の計画の「地震発生に至る準備・直前過程における地殻活動」に該当する分野において、標記課題を設定して研究を推進したい。

現計画では、プレート境界地震について、アスペリティ・モデルの検証とアスペリティの実体解明が大きな課題として掲げられ、それなりの成果が得られてきた。アスペリティ・モデルは地震の発生を理解する枠組みとして優れているが、各種調査・探査結果と比較するには、アスペリティ位置の推定精度はまだ低いのが現状であり、その改善が必要である。それに加えて、地震の発生予測の観点からは、応力分布とその時間変化に関する情報が決定的に不足している。これは内陸地震についても同様である。そこで、これらに関する情報を得ることを次期計画での目的とする。

応力の絶対値を推定することは極めて困難なので、

- (1) アスペリティまたは内陸地震断層近傍が応力の集中域となっているか
- (2) アスペリティまたは内陸地震断層が応力の臨界状態にどれだけ近いのか

を解明することとする。そのために、応力テンソルや応力降下量の分布を求めることに加えて、どのような構造が応力集中の程度を反映するかを調べることを、この計画のポイントとする。最近、坂口・他（2007）は、ガウジ層に応力がかかると透過散乱波の振幅が顕著に変わるという実験結果を示した。実験室で試料に応力をかけ始めた段階と、既に応力がかかっている状態から応力が増加した場合の振る舞いが違うことや、人工的な透過波は利用しにくいといった問題はあるが、いくつかの方法で応力変化を反映する構造を見いだしたい。例えば地震波干渉法では、波動場の相互相関がグリーン関数を表すと考えるので、適当な地震を選んでこの方法を適用することで、応力変化に伴う場の変化をグリーン関数の変化として捕らえることが可能かもしれない。また、大規模地震後の断層の固着過程における変化を検出することで、破壊に至る過程において期待される変化が推定できるかもしれない。

これらの研究を、青森県東方沖のアスペリティ領域及び内陸合同観測対象領域において実施する。内陸においては地震断層周辺における非弾性的性質の空間分布の解明とも関連付けて行い、プレート境界域のアスペリティ仮説に対応する指導原理を確立する一助としたい。

東北日本弧の比抵抗構造と震源分布

秋田大学工学資源学部

西谷忠師

坂中伸也

◎東北日本弧の大スケール比抵抗構造の詳細化に向けて

東北日本弧の比抵抗（電気伝導度）の大構造は Utada (1987)により提唱された(図 1)。その後、地殻比抵抗研究グループによる奥羽山脈から日本海までの東北弧を横断するより詳細な 2 次元比抵抗構造（Ogawa et al., 2001）が提唱された（図 2）。東北地方ではその他、活断層や被害地震、活火山に対応した比抵抗構造がいくつか提出されつつある。

秋田大学はこれまで、地震予知計画の一環として秋田県中部で観測点を密にして広帯域比抵抗探査を行い、東北日本弧の比抵抗構造は大局的には 2 次元とみなせる中でも 3 次元的な構造が無視できない程度に存在することを示した（図 3）。これまで、1914 年の仙北地震（M7.1）の震源付近の微小地震震源が不均質に対応した均質一様から外れる比抵抗構造が明らかになった。

次期予知計画では、これまでの奥羽山脈以西にとどまらず、火山フロントを越えた太平洋側に向けて測線を伸ばし、東北地方の大構造の中の 3 次元的な構造を明らかにすることを目標とする。まずは Ogawa et al. (2001)による測線の約 10km 南に測線を設定し、別の 2 次元断面を提出することを目標とする。基本的にはこれまでと同じ手法を用いて地殻比抵抗構造と震源分布や地震波速度構造や V_p/V_s などを比較し、地殻内流体の振る舞いに注目するものの、これまで注目してきた局所的な構造から、より大構造の解明を目指す。比抵抗構造と震源分布という研究事例をさらに多く集め、地殻内流体と地震発生の物理的関係を明らかにすることを目指す。

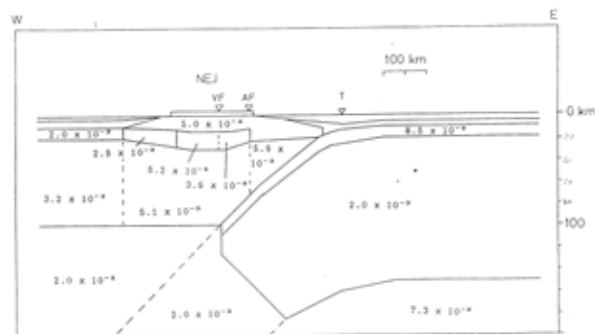


図 1 Utada (1987)による東北弧 2 次元電気伝導度断面

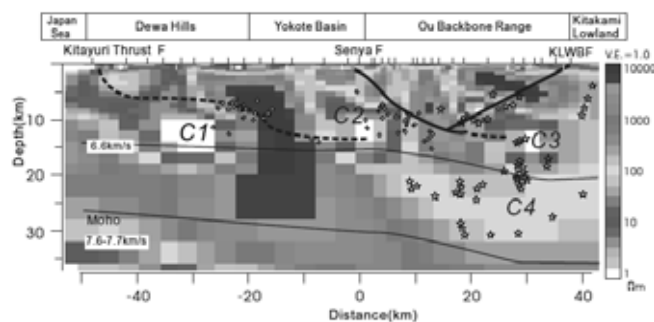


図 2 Ogawa et al. (2001)による奥羽山脈から日本海までの東北地方 2 次元比抵抗断面

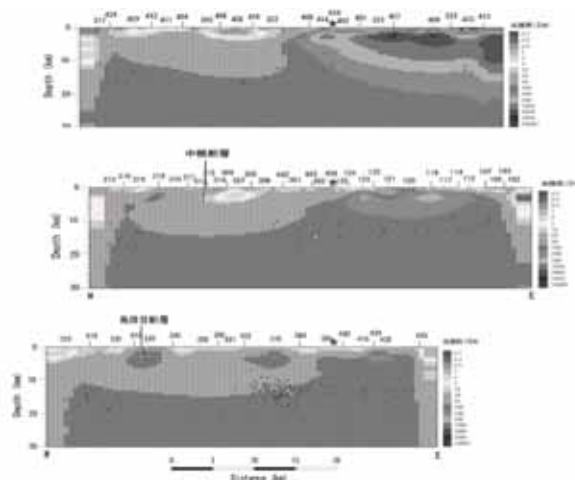


図 3 秋田県中部の東西 2 次元比抵抗構造（秋田大学，2007）。各断面の距離は約 10km。

東北大学からの次期計画にむけた提案 その1

- 全体の説明およびプレート境界における地震発生準備過程の解明 -

東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター（発表者：松澤 暢）

1. はじめに

「新たな計画」によって地震発生に至る準備過程の理解が進み、プレート境界型地震を説明する「アスぺリティ・モデル」、および内陸の歪集中帯と地震発生の関係を説明する「下部地殻軟化モデル」の検証が進んだ。さらにスラブ内の地震発生を説明する「脱水不安定モデル」の検証も進みつつある。今後、これらのモデルの一層の検証と精緻化・定量化を行う必要があり、またそのためにはいくつかの技術開発も必要とされている。以下では東北大が提案する計画案の全体像と、プレート境界における地震発生準備過程の解明にむけた計画案について述べる。なお、内陸・スラブ内の地震については「その2」を、新規技術開発については「その3」を参照されたい。

2. 東北大が提案する計画の全体像

スラブ内地震 これまでの計画では、スラブ内地震は研究対象として明示的には取り込まれていなかった。しかし、スラブ内の地震を説明するモデルとして脱水不安定説が提唱され、その仮説検証が進みつつあるため、次期計画ではスラブ内地震も視野に入れるべきである。

総合化と水 スラブ内やプレート境界、内陸での地震発生モデルは構築されているが、まだ定性的なモデルの段階である。定量的な地震発生モデルに昇華させるためには、これらを総合的に理解する必要がある。そのためには「水」の役割の解明が重要となる。たとえば、内陸の地震発生モデルの定量化のためには、内陸の応力場を見積もらなければならないが、このためには境界条件としてのプレート境界での応力と地殻底部の basal drag の見積もりが必要となる。前者は間隙水圧が影響し、後者はマントルウェッジ内の対流の挙動や粘性率の理解が重要であり、どちらもスラブから放出された水が大きな影響を与える。プレート境界の長期のすべり欠損を GPS から見積もるためにも、マントルウェッジの粘性の影響を無視できない。つまり、沈みこみ帯全体の地震発生過程を総合的に理解するために、水の分布・移動・役割についての理解を深める必要がある。

マルチスケール解析 モデルの定量化のために、時空間上の様々なスケールの現象をシームレスに解析することも重要である。たとえば、グローバルスケールから断層スケールまでの様々な空間スケールの不均質性を理解しなければ、地震発生に至る応力集中過程を定量的にモデル化することは困難である。また、他の自然現象に比べて地震現象の特異な点は、その時間スケールのダイナミックレンジの大きさにある。つまり、断層の固着期間は数十年～数万年と極めて長期であるのに対して、破壊時間は数秒～数分のスケールにすぎず、このことも総合的・定量的モデルの構築を難しくしている。この問題の解決のためには、様々な時間スケールの現象をシームレスに観測することが必要であり、また、それは地震発生のシミュレーションに必要な断層面の摩擦パラメータの推定にとっても極めて重要である。高サンプリング GPS 観測はそのために重要な役割を果たすと期待される。

切迫度評価 以上のような研究に基づき、地震発生の定量的なモデルが構築できれば、ポテンシャル評価や長期予測にとって極めて有効である。短期予測に役立てるのは難しいかもしれないが、定量的なモデルがあれば、何らかの擾乱があったときにそれが次の大地震の発生を促進するか抑制するのかの判断はできるようになると期待される。たとえば、プレート境界で大地震が発生して、大規模な余効すべりを生じたとき、その近傍に「満期」に近い別のアスぺリティがあれば、そのアスぺリティの破壊の「切迫度」が高まったと判断できるはずである。この「切迫度」をいかに定量的に評価していくかが、次期計画の重要な課題の一つである。

3. プレート境界における地震発生準備過程の解明

マルチスケールのアスペリティ解析 大地震時のすべり量分布を正確に把握することは、次のサイクルの地震像を予測する上で重要である。大地震の発生頻度は小さいため、より小規模な地震を詳細に解析して、アスペリティの破壊の再現性について検証を行い、アスペリティの複合破壊や連鎖破壊の条件を明らかにすることが重要である。さらに、将来の地震時の大すべり域を事前に予測するために、最近の地震活動から判明しているアスペリティ域と非アスペリティ域について、その構造の違いを詳細に調べていく必要がある。

準静的すべりの検知に基づく切迫度評価 プレート境界型大地震のあと、その余効すべりが隣接する大アスペリティの破壊（＝近傍の大地震）を促したと考えられる事例が蓄積されつつある（図1）。このことは、プレート境界上の準静的すべりをモニターすることにより、次の大地震の切迫度評価がある程度可能であることを示している。このような考え方にに基づき、切迫度評価の定量化をめざすとともに、GPS観測・解析の高度化や、小繰り返し地震（相似地震）の判断基準の最適化とスケーリング則の確立を急ぐ必要がある。

水の影響の評価 含水鉱物の相転移に伴って水が放出されることによりスラブ内地震が生じ、またその水によってプレート境界の間隙水圧が上昇すると期待される。この考え方が正しければ、スラブ内とプレート境界における地震活動や地震波速度構造に相関が見られるはずであり、このような考え方にに基づき観測・データ解析を行う必要がある。

大地震の詳細な把握 宮城県沖等、大地震発生が近付いていると考えられる場所においては、まず何よりも、地震時に何が生じたのかを正確に把握することが、次のサイクルにおける地震活動を予測するために極めて重要である。プレート境界型大地震については、陸からだけでは観測方位に偏りが生じるため、すべり量分布の正確な把握を目的とした海底観測の高度化が不可欠となる。

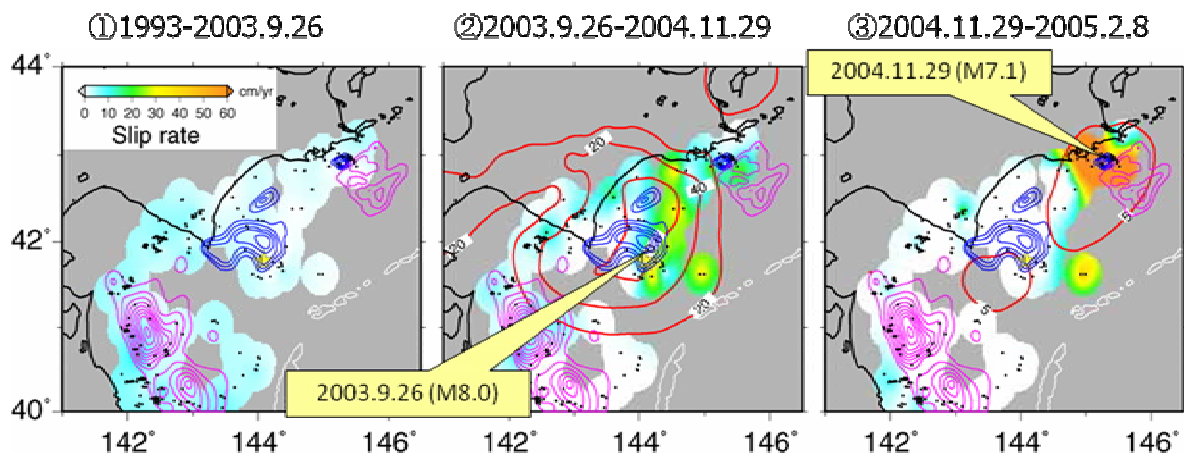


図1. 小繰り返し地震（黒点）とGPS観測によって推定された、2003年十勝沖地震（M8.0）の余効すべりとそれによって発生が促進されたと考えられる2004年の釧路沖M7.1の地震。小繰り返し地震によるすべりレート分布（カラー）はUchida et al. (2007), GPSから推定された余効すべりの分布（赤コンター）は油井・他(2005)による。ピンクと青色のコンターは大地震のすべり量分布(Yamanaka & Kikuchi, 2004, 2005; Yamanaka 2004)。

東北大学からの次期計画に向けた提案 その2

- 沈み込み帯の物質移動・ダイナミクスと内陸・スラブ内地震発生過程の理解 -

東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター（発表者：岡田知己）

1. はじめに

日本列島は沈み込み帯に位置しており、活発な地震・火山活動が見られる。それらの地震・火山活動の理解のためには、プレートの沈み込みに伴う物質循環・ダイナミクスの理解を欠くことはできない。本研究では、上記の視点から、地震波トモグラフィを主な手法とした地下深部イメージングにより、沈み込み帯の物質（特に水）の不均質分布を明らかにし、その移動・様態を推定することで、内陸・スラブ内地震発生過程の理解を深めることを目的とする。以下では、大まかに、スラブ・マントルウェッジ・地殻の3つの領域にわけ、それぞれの今後の目標・課題を述べる。

2. スラブ

沈み込む太平洋プレート・フィリピン海プレートの海洋性地殻付近で発生する地震（上面）について、ある深さ範囲に分布する地震の帯が確認された（Kita et al., 2006, Nakajima & Hasegawa, 2006, Hasegawa et al., 2007 など）。このことは、脱水不安定化がスラブ内地震の発生過程で主要な役割を果たしていることを強く示唆する。さらにスラブ内に含まれる水の分布を明らかにすることによって、スラブ内地震の発生箇所を特定し、それに基づいた数値シミュレーションにより、その発生予測が可能であると考えることができよう。この考えを検証するために、スラブ内の不均質性とスラブ内大地震との関係を明らかにすることとマントル内（下面）の活動の理解を図るとともに、海域での観測やグローバルスケールでのトモグラフィにより沈み込む前あるいは沈み込みを開始した直後の海洋性プレートの構造の推定を行う。

3. マントルウェッジ

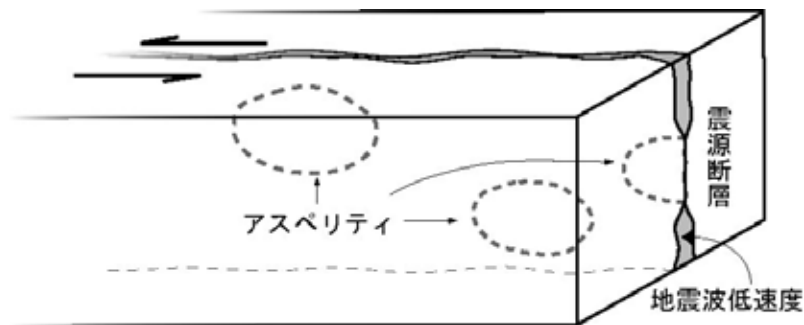
スラブ直上（スラブからの水の放出箇所）および遠地地震・深発地震・海域下での観測を利用した日本海深部のイメージングによりマントルウェッジ側に放出された水がどのように（三次元的に）上昇流を形成するかを明らかにする。

4. 地殻

歪集中帯・地震発生帯付近に最近発生した大規模な内陸地震（例えば、2003年宮城県北部地震 M6.4）の震源域およびその周辺で過去に発生した地震の震源域（例えば、1962年 M6.5, 1900年 M7.0(6.5)）を含む領域で稠密観測を行い、詳細な（三次元）不均質構造を推定する。歪集中帯・地震発生帯の成因をその空間変化を含め明らかにするとともに、それぞれの震源域（アスペリティ領域）、境界域（非アスペリティ領域）の特徴の共通性からアスペリティ・破壊開始点のマッピングに必要な情報を明確にし、地震の切迫度評価に資する情報を抽出する。

5. 総合理解とモデル化

変換波・反射波などの後続波走時（例：Zhao et al., 2005）や波形を利用するなどトモグラフィの手法の高精度化・高度化を行う。得られた地震波速度、震源分布、地震波減衰・散乱構造、異方性構造、反射面・変換面分布、密度構造や比抵抗構造のイメージの相互比較・定量的評価を行い、さらに物質科学的知見との比較と合わせ、不均質構造の実体（水・流体量・温度・流れ場・歪場）の解明を行う。それらと稠密GPS観測による歪分布や地震・地殻変動観測による地震時すべり分布との比較、メカニズム解を利用した起震応力場やb値のマッピングと総合し、歪集中機構やアスペリティの分布・実態を明らかにし、地震発生モデルの詳細化・定量化を目指す。



岡田・長谷川, 2004

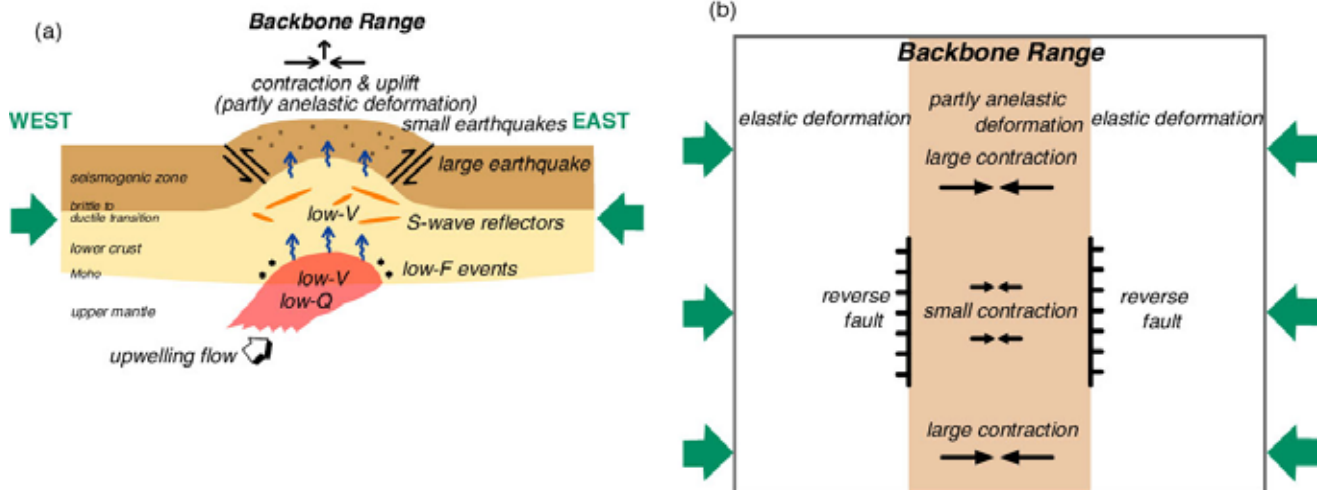
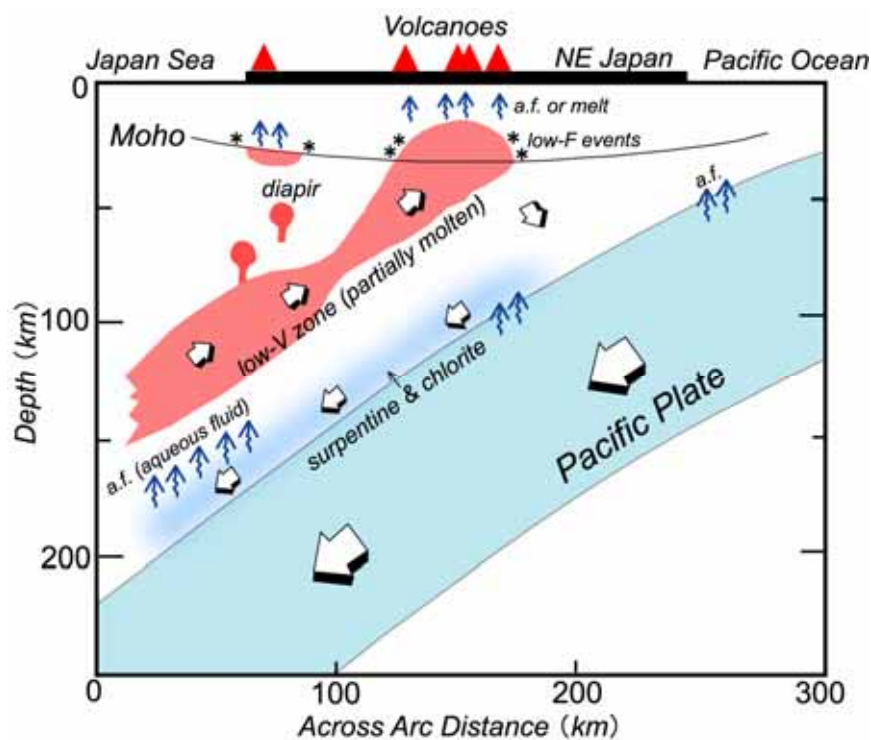


Fig. 11. (a) Schematic illustration of across-arc vertical cross-section of the crust and uppermost mantle, showing the deformation pattern of the crust and the characteristic shallow seismic activity beneath NE Japan. (b) Map view schematically showing the deformation pattern of the upper crust.

A. Hasegawa et al. / Tectonophysics 403 (2005) 59–75



Hasegawa and Nakajima, 2004

図 1. 沈み込み帯の物質移動と地震・火山活動の模式図. (上)アスペリティ, (中)歪集中帯, (下)スラブの沈み込みとマントルウェッジ上昇流

東北大学からの次期計画にむけた提案 その3

- 観測の高度化のための新規技術開発 -

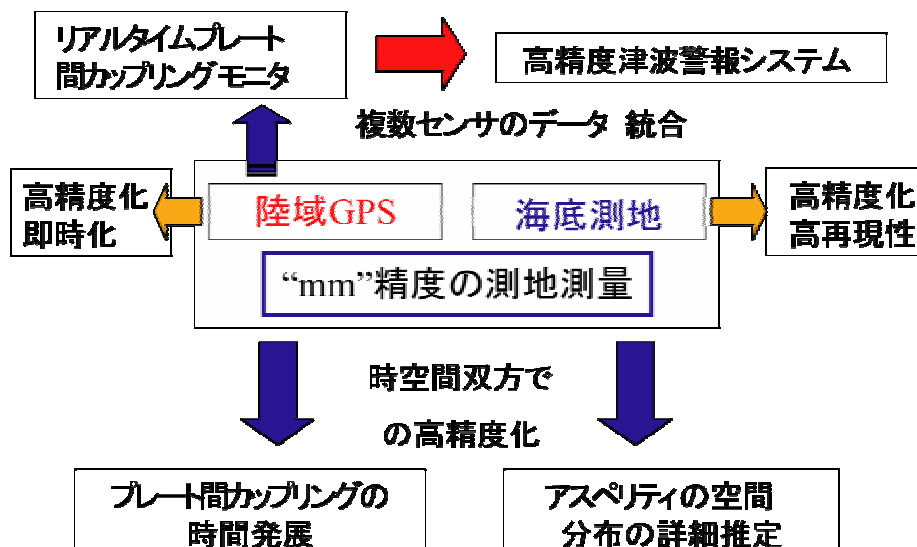
東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター（発表者：太田雄策）

1. はじめに

1990年代の GEONET の導入以降、地震時地殻変動や地震後余効変動といった現象が各 GPS 観測点における 3 次元変位場として定量的に検出可能になった事は周知の通りである。最近では高サンプリング GPS データを地殻変動解析に用いた解析（キネマティック GPS 解析）も一般的になりつつある（例えば Miyazaki et al, *GRL*, 2004, Ohta et al, *EPS*, 2006）。また海域においては、プレート間巨大地震発生域の地殻変動をより詳細に捉えるために、海底における測地観測の技術開発と繰り返し観測が各機関・大学によって精力的に行われている。特にキネマティック GPS と音響測距を組み合わせた海底地殻変動観測は、地震時地殻変動（例えば, Kido et al, *EPS*, 2006, Tadokoro et al, *GRL*, 2006）や定常的なプレート運動を捉えることに成功（例えば Fujita et al, *EPS*, 2006）している。本発表では、それら測地観測の精度向上と、それに関連した新規技術開発を提案する。以下に事項毎に記述する。

2. 陸域 GPS 観測網の高精度・高再現性・即時化

現在の GPS の日毎の座標値（静止解析）の精度は、水平で数 mm、上下変動に関しても 10mm 程度の精度が既に達成されている。しかし一般に時間分解能を上げた解析（キネマティック解析）では、測位座標解の精度は静止測位と比較し大きく低下する。これはより少ない観測量で多くの未知数を推定する事と、静止測量では平均化によって無視できるノイズが座標値の精度に直結するためである。例えば精密単独測位法（PPP 法）によるキネマティック解析では、その精度はスタティック解析と比較して大幅に低下し、水平で 10-20mm、上下で 40-60mm 程度である（例えば、太田 他, *測地学会誌*, 2006）。こうした精度の低下は対流圏伝搬遅延誤差やアンテナマルチパス、衛星軌道情報の不安定性等、多くの原因が考えられる。こうした誤差源の同定と、それらの適切なモデルによる除去を試みることにより、キネマティック解析において水平で 10mm 以下、上下で 30mm 以下のスタティック解析と同程度の精度を目指す。測位解精度に最も大きな影響を与える対流圏伝搬遅延誤差に対しては、通常の座標値との同時推定だけではなく、適切な数値モデルを先験情報としたモデルによる推定を試みる。こうした対流圏伝搬遅延誤差の軽減は ALOS を始めとする InSAR の測位精度向上にも寄与が期待される。また同時に解析の即時化を試み、それらのデータを入力としたリアルタイムプレート間カップリングモニタの構築を目指し、プレート間の固着状況の時間発展を定量的に捉える。また、これら要素技術の高精度化は、最終的に高精度津波警報システムの構築等に寄与できると考える。



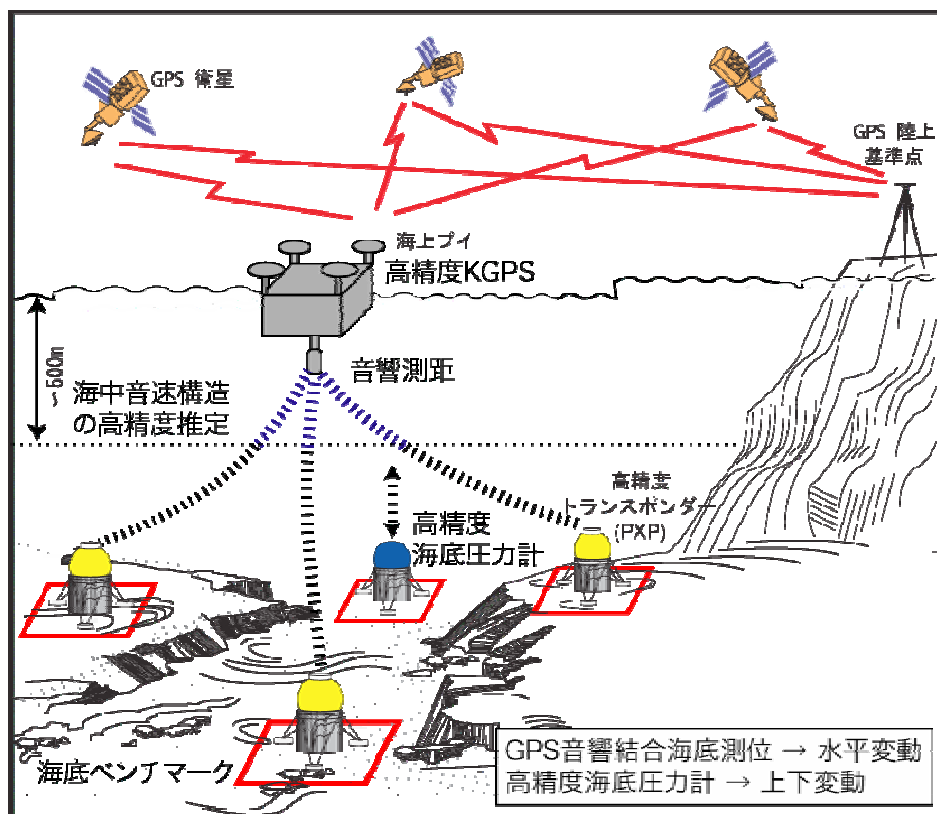
3. 海底測地観測の高精度化・実用化 (海底地殻変動観測・海底圧力計観測・海底重力観測)

海域における GPS 音響結合海底測位は現在、すでに繰り返し観測を行えるフェーズに入り、地震時変動の定量的な検出や地震間のプレート運動を定量的に捉える事が可能になりつつあるものの、測位精度の更なる向上が求められている。そこで東北大学地震・噴火予知研究観測センターは、GPS 音響結合海底測位で現在最も大きな誤差要因と考えられる海中音速の空間的不均質を考慮した解析方法の開発を行う。これにより座標推定精度の高精度化と観測時間の短縮が期待される。目標とする精度は、繰り返し観測精度の再現性で 2-3cm である。また、長期的に同一の観測点で観測を継続するための試みも必要と考えられる。

我々の行っている GPS 音響結合海底測位法では水平変動のみを計測できる。しかしアスペリティ分布の断層傾斜方向の把握には上下変動量の情報が必須である。すでに海底圧力計が海底上下変動を捉えた事例は幾つかあり、例えば玉木 (東北大修士論文, 2001) では 2000 年三宅島イベントの際に設置された海底圧力計のデータから隆起と考えられる変動を検出している。こうした背景から高精度海底圧力計の高サンプリング (1Hz) での連続観測を試み、海底の上下変位の高精度検出を目指す。目標とする再現性は水深換算で 1cm である。海底の水圧変化を知る場合、長期的なドリフト補正が必須である。その除去のために海底観測と坑内観測を結合したドリフト補正を行い、長期的な安定性の評価を行う。

更にこうした様々な観測を繰り返し安定して行うために、観測機材設置用プラットフォームとしての「海底ベンチマーク」の設置とその評価を同時に行う。具体的には海底に数 m 四方のフレームを沈め、ベンチマーク基台とし、種々の繰り返し観測に汎用的に用いる事のできる体制を確立する。

ここまで述べてきたような陸域・海域に全域における高精度な測地測量によって、海域から陸域にかけて全ての範囲で高い時間・空間分解能を持ったプレート間カップリングモデルの構築が可能になると考える。



地震研究所が目指す次期予知研究計画 その2

アスペリティの実体把握・歪応力集中機構・プレート境界と地殻内の応力時間変化

発表：篠原雅尚（東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター）

地震発生の準備直前過程

- プレート境界地震
- アスペリティの実体把握
- 空間スケール・固着支配の要因の解明
- 内陸地震
- 歪集中のメカニズムの解明
- 応力集中過程のモデル化
- 地震活動の時間変化
- 余震活動推移予測の高度化
- プレート境界地震とスラブ内地震の連動性

1

アスペリティの実体解明

構造探査実験
高密度OBS (60~100台規模) アレイ
大エネルギー制御震源
・高分解能構造 (プレート境界面の形状)
・反射法的解析・AVO解析による速度構造

広帯域を含む長期OBS地震観測
・構造と比較可能な高精度の震源分布
・スロースリップイベント
・地震活動モニタリング

南関東周辺に関しては、これまで海底観測は少ない
房総沖のアスペリティに着目した観測研究

陸域グループや関連する他の研究と連携

・他の海溝域との比較

2

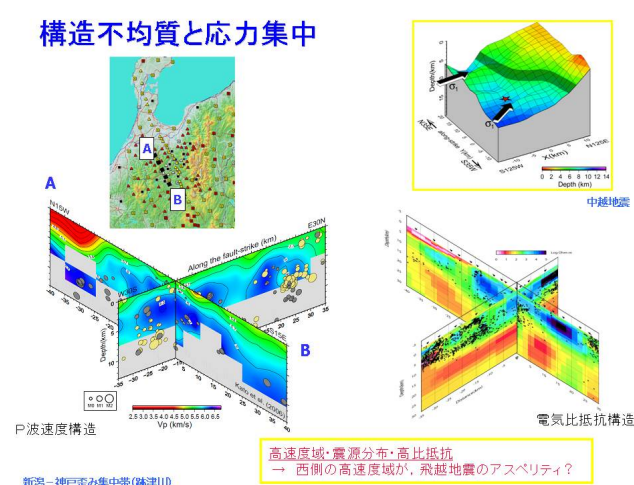
技術開発

- 海底ケーブル式の稠密な地震・津波・地殻変動観測システムの開発
- 余震観測等の突発的な観測に対応する、機動式の海底ケーブル式観測システムの開発

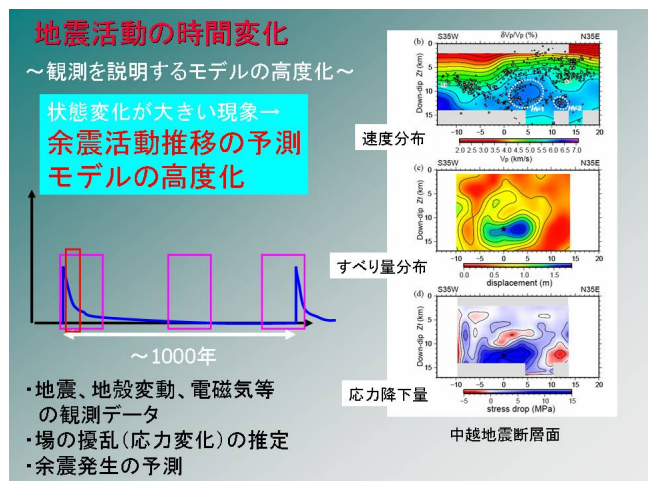
高密度・2次元配置のリアルタイム観測網

冗長性構成による信頼性を向上させたネットワーク構成

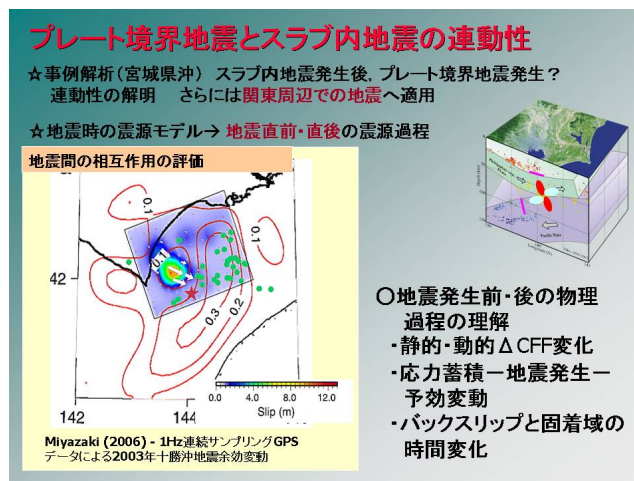
3



4



5



6

地震研究所が目指す次期予知研究計画 その3 地殻活動モデルのための物質・状態構造の解明に向けて

東京大学地震研究所（発表者：加藤尚之）

地震予知研究計画では、地震発生域への応力集中機構から断層の破壊過程までをモデル化し、数値シミュレーションとモニタリングされた多項目の地球物理的観測データを組み合わせることにより、地殻活動の定量的な予測を目指している。内陸地震とプレート境界地震では理解の程度が異なるため、現段階での研究内容も異なるが、どちらの場合も、地震発生域への応力集中をもたらす不均一な非弾性変形、すべり過程を理解することが重要であり、そのような不均一な変形・摩擦の原因となる不均一構造を明らかにする必要がある。

内陸地震については、(1) 地震断層への応力集中をうながす深部での非弾性変形を明らかにすること、および (2) 内陸大地震の地震性すべりの不均一性の原因を明らかにすることが重要である。空間的に不均一な非弾性変形は、物質や温度等の状態の不均一に起因すると考えられる。このような不均一構造を明らかにするために、地震波速度、減衰、電気伝導度構造、地殻熱流量から、地下の物質、流体含有率、温度を推定する。地震・電磁気的共同観測を行うとともに、両者の観測データを同時解析する手法を開発することを計画している。

海溝型のプレート境界地震については、固着しているアスペリティの周囲の非地震性すべりが地震発生を引き起こすという基本的な考え方に基づき、摩擦構成則を用いた数値シミュレーションができるようになっている。おおよその現象を理解できるようになったが、摩擦特性の不均一分布の原因については理解できていないし、予測シミュレーションを行うためには、プレート境界面上の摩擦構成則パラメータの正確な分布を知る必要がある。これらに関しては、以下の研究を計画している。(1) 測地データ等の観測データとシミュレーションを組み合わせることにより、構成則パラメータの値と誤差を推定する（宮崎、グループ提案）。(2) 構造探査により、プレート境界面周辺の地震波速度・密度を明らかにし、物質を推定する。室内実験により、存在が推定された物質の摩擦特性を調べる。

以上の地球物理学的探査と室内実験に基づく構造・状態構造の研究、観測データに基づくシミュレーション研究に加えて、これらに関連する次の研究を計画している。(1) InSARを用いた内陸の地殻変動研究。(2) シミュレーションに用いる摩擦構成則の物理的理解、構成則の改良に関する実験的、理論的研究。(3) 断層面の固着状態モニターに関する実験・観測研究。(4) 摩擦熱、流体の関与等の現実的な条件下での破壊、破壊の前駆現象に関するシミュレーション研究。(5) アスペリティ相互作用による複雑な地震サイクルに関するシミュレーション研究。(6) 鉾山における断層運動を至近距離で観測する研究（小笠原、グループ提案）。(7) 破壊の規模依存性（スケールリング）に関する実験・観測・理論研究。(8) 地殻変動連続観測に関する研究（新谷、グループ提案）。

機関提案

「地下起源ガスの観測に基づく地下構造の状態評価の試み」

東京大学大学院理学系研究科
附属地殻化学実験施設

基本方針

次期計画においては、地下起源ガスの観測に基づいた地下構造の状態評価を継続的に行うことを通して、地震の準備過程もしくは直前過程の理解に貢献する研究を推進する。

当施設ではこれまでに、地下に起源を持つ化学種のうち特にガス成分に注目し、その濃度や組成の変化にもとづいて、地震発生の準備・直前過程や地下構造の状態変化を評価する方法を開発してきた。

現行の計画では、地下水中のラドン濃度を連続観測する井戸を利用して、地下水に溶存しているガスの組成と濃度の変化を、四重極質量分析計で迅速に測定する方法を確立した。観測の結果、メタンガスの濃度が帯水層の水の動きと深いかわりを持っており、地下起源ガスが地下の状態を反映していることを示した。また、岩石を圧縮することで放出されるガスを調べる実験を行い、破壊に至る過程で放出されるガスの放出挙動が変形速度によって決まる亀裂の生成量と深くかわっており、地下起源ガスのモニタリングは地下構造の評価に有効であることを間接的に示した。さらに、四国全域の 30 点で温泉遊離ガスや温泉水中に含まれるマントル起源のガスである ^3He (ヘリウム3) の量を調査した。その結果、中央構造線に沿う地域と、深部低周波微動が観測されている地域で、ヘリウム3の同位体比が高く、地下構造の状態を評価するためにはヘリウム3のようなマントル起源のガスを使うことが重要であることを示した。

上述のように、地下に起源をもつ揮発性物質を用いた地下構造の状態評価法が、現行の研究計画内で確立できると考えられることから、次期計画においてはこの方法に基づく観測を継続的に行い、地下構造の状態が時間空間的にどのように推移するのかについて明らかにする研究を行うことを提案する。

具体的には、地震波測定に基づいて地下構造が示されている領域や天然の断層を含む領域に、地下起源のガス(水素、ヘリウム3、ヘリウム4、メタン、アルゴン、二酸化炭素、ラドン、トリオンなど)を連続観測する装置を展開し、濃度と組成の時間空間変化を記録する。基準となる観測地点のヘリウム3と4の同位体比は、現計画で開発を進めている「ヘリウム同位体比連続測定用質量分析計」を用いて行う。地下起源ガスの空間分布の時間変化は、小型でしかも安価な「高分解能四重極質量分析計」を用いる。後者の分析計は現在試作を行っており、現計画内での実現が可能であるので、次期計画ではこれを積極的に活用する。

得られた観測結果は、物理的な方法で調べられる地下構造に、化学的な情報に基づく制約を与えると期待される。また、活断層で起きる地震の切迫度の化学的な評価を提供できると期待される。

東京工業大学理工学研究科 機関提案

比抵抗不均質構造からみた地殻内流体及びアスペリティ

(講演者：東京工業大学火山流体研究センター 小川康雄)

1. 研究の経緯

内陸地震については、その繰り返し間隔が長いために、その発生メカニズムに関しては、プレート境界地震に比べて、良く理解されていない。そのために、まず地下の不均質構造を解明することはその発生場を理解するうえで基本的な情報を与える。とくに電磁気観測から求められる比抵抗構造は、地殻中深部の流体分布を反映するため重要である。

東京工業大学理工学研究科・火山流体研究センターでは、全国の電磁気グループと連携を取りながら、いくつかの内陸地震地域において広帯域 MT 法電磁探査を実施してきた。具体的には、東北脊梁、宮城県北部、糸静線北部、中越地震震源域、長町利府断層である。またトルコの北アナトリア断層においては Izmit 地震の本震域や余震域で比抵抗構造を解明してきた。

これまでわかってきたことは、以下のようにまとめられる。(1) 微小地震活動は地殻中深部低比抵抗異常体の上方で高く、微小地震の cutoff 深度が低比抵抗体の上面と一致することが多い。(2) 地殻の変形の大きな地域に低比抵抗体が存在する。(3) 本震が比抵抗構造境界で発生する。

以上の特徴から、地殻深部で流体の不均質な分布があって、流体に富む低比抵抗部は変形が容易であるが、流体の少ない高比抵抗部では変形できず、アスペリティを形成し、その低比抵抗部との境界が破壊の開始点となるというモデルを考えることができる。活断層の深部延長の低比抵抗異常は、定常的なすべり領域を提供すると考えられる。

2. 今後の研究提案

【観測・解析方法】

構造解析における制約条件として、これまで比抵抗構造の粗さを用いていたが、地震波速度構造などの他の物理量を先見情報として採用し、それに適切な重みを与えつつ解析するインバージョンスキームを開発する。

面的にデータを取得し、3次元比抵抗構造の解析を進める。

【国内フィールド】

糸魚川静岡構造線断層帯に関して、観測研究を進める。また、全国の電磁気グループと連携しながら、主要な活断層において観測研究を行う。

【海外フィールド】

北アナトリア断層については、科研費で MT 観測を実施する。近い将来に地震発生が危惧されるマルマラ海において、JAMSTEC・京都大学と共同して海底 MT 観測を実施する。これを契機として、海底観測機器を整備し、海底の電磁気観測についても積極的に関与する。インドネシア国のスマトラ断層については、科研費にて名古屋大学・ITB 等の協力の下で、地殻変形と比抵抗異常に関する研究を進める。ニュージーランドのアルパイン断層とその周辺については、米国ユタ大学と IGNS との協力の下で研究を進める。

国土地理院の地殻変動観測研究計画

地震調査研究推進本部がとりまとめた「今後の重点的調査観測について（―活断層で発生する地震及び海溝型地震を対象とした重点的調査観測、活断層の今後の基盤的調査観測の進め方―）」（平成17年 8 月30日）に掲げられたGPS連測観測（基盤的調査観測）、水準測量、人工衛星搭載型の合成開口レーダーによる面的地殻変動観測について、次のような観測・研究を計画している。

1. GPS連続観測網（GEONET）

5年前の主な課題は、電子基準点（GPS連続観測点）の増強（1,000点から1,200点へ）、リアルタイム化（目標：900点）、アンテナ更新であったが、これらは全て達成された。現在、電子基準点の数は1,233点になり、約99%に相当する1,218点がリアルタイムデータ配信機能を有している。アンテナは全てチョークリング型に更新され、機種別のネットワーク解析は廃止された。

今後、平成22年までにGEONETは、1,253点まで増強される計画であり、平成19年度には、東南海・南海地域で5点が新設される予定である。また、ルーチン解析の改良として、Bernese 5.0への対応、アンテナ位相特性の相対モデルから絶対モデルへの移行、大気遅延勾配推定機能の追加、ITRF2005への適合等を行い、新たな解析戦略（F3解析）への移行を目指す。

2. 水準測量

全国の約20,000キロメートルの水準路線を対象に約8年周期で繰り返し水準測量を実施している。現在、10回目を実施中である。今後も、観測強化地域、特定観測地域、重点地域などで、1/4年～2.5年周期で水準測量を実施する計画である。

平成19年度には、中国・四国地方、首都圏～浜松市までの旧東海道沿い、牡鹿半島、紀伊半島、室戸地方、御前崎地区（年4回）の観測が予定されている。

3. 人工衛星搭載型の合成開口レーダーによる面的地殻変動観測

平成18年 1 月に打ち上げられた地球観測衛星「だいち」（ALOS）に搭載されたLバンド合成開口レーダーPALSARによる観測データの干渉解析を実施し、空間分解能の高い地殻変動情報の抽出を行う。日本全域を視野に入れて解析対象地域を増やす「量の充実」とともに、精度の向上など「質の向上」を目指す。

機関提案：名古屋大学の次期計画（2）



技術開発からプレート境界モニタリングへ

名古屋大学大学院環境学研究科
附属地震火山防災研究センター

海底地殻変動および精密周波数制御信号システム（アクロス）は現計画において技術開発が進められた。次期計画では技術開発から実用的モニタリング・ツールを目指して研究を展開する。

- ・ 海底地殻変動観測の連続展開によるプレート運動とそれによるひずみ分布の蓄積のモニタリング
- ・ アクロスによるプレート間カップリングおよび非定常すべりのモニタリング
- ・ 名古屋大学の特長である広帯域地震計網と地震計アレイによる深部低周波微動、超低周波地震動の観測によるプレート間すべりの理解と時空間モニタリング

これらの技術による観測は、中部東海地域の地殻活動の総合的理解とモデル構築および将来予測のための新たな情報を提供する。

技術開発からプレート境界モニタリングへ

技術開発

海底地殻変動：
長期繰り返し観測 → 地震時の地殻変動
アクロス：
アレイ観測 → 波群の時間変化

モニタリング・ツール

海底地殻変動：
海溝から陸域まで／トラフの両側のひずみ分布
アクロス：
プレート間物性の時間変化
稠密広帯域地震観測：
地震計アレイ：
プレート境界すべりの時空間変化

プレート境界モニタリング

海底地殻変動

地震時の地殻変動
定常的なプレート運動

アクロス

プレート間カップリング
スロースリップ
深部低周波微動

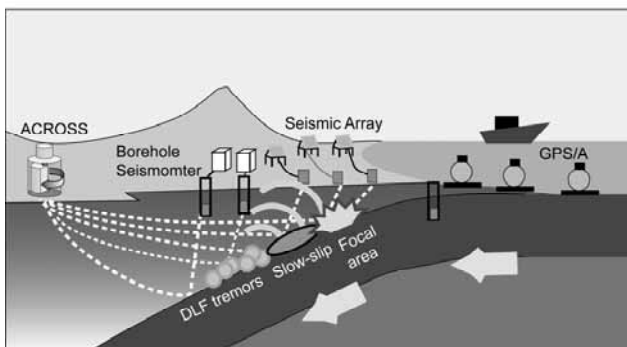
広帯域地震観測 アレイ観測

深部低周波微動
超低周波振動
地震性すべり

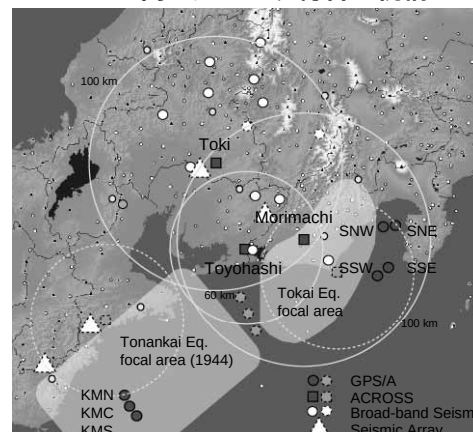
新しい情報

震源域の監視

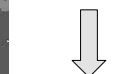
新しい観測技術によるプレート間カップリング監視



プレート間カップリング総合監視網



- ・ ACROSS
- ・ 海底地殻変動観測
- ・ 広帯域地震観測
- ・ アレイ地震観測



- ・ 東海地方のプレート間カップリングの状態と監視が可能。



名古屋大学の次期計画（3）
—中部・東海地殻活動シミュレーター—

発表者：鷺谷 威（名大・環境）

中部・東海地域はフィリピン海プレートの沈み込みに伴い、複雑な地下構造や活発な地殻活動が生じている興味深い地域である。これまで、地震学的な地下構造について多くの研究がなされているが、こうした知見を有効活用するためには、様々な解析手法による知見を総合した標準モデルを作成し、地震波形や地殻変形の計算と有機的に連携するシミュレーターが必要である。我々は、こうした考えに基づき、「中部・東海地殻活動シミュレーター」の構築を計画している。

「中部・東海地殻活動シミュレーター」は、様々な観測、探査、解析等の結果を統合した構造モデル、地殻活動モニタリングの結果として得られる地殻活動観測データベース、構造モデルや観測データを利用する変形、地震波動場等の解析モデルから構成される。構造モデルは、プレート境界やモホ面、活断層、基盤等の形状、トモグラフィー解析による地震波速度構造といった基礎的な情報に加え、減衰構造、散乱係数、密度、粘性係数等の様々な情報を取り込めるように設計する。構造モデルは、解析手法や解析時のパラメータとセットで保存することで、できるだけ再現性を保証し、データ追加時の更新が行えるようにする。構造モデルのフォーマットは、全国レベルの検討課題であるが、格子点における値と関数による表現を併用し、位置情報による問い合わせが可能になるような手法を検討する。また、本シミュレーターでは対象を中部・東海地域に限るため、構造モデルの周辺地域との整合性についても注意する必要がある。こうして得られる構造モデルは、中部・東海地域における様々な地殻活動を理解する上での共通のプラットフォームとなる。

構造モデルを用いた解析モデルとしては、まず、プレート運動に伴う応力蓄積を計算するための「変形モデル」や不均質構造中での地震波動場を計算するための「地震波伝播モデル」の構築を考えている。

実用的なモデル計算が行えるようになるまでには長い期間が必要になるものと思われるが、5年間のうちに、地震予知コミュニティに共通な構造データや出力の規格を決定するとともに、試験的な解析が行えるような環境を整備し、本格的な地殻活動シミュレーションへの応用を想定したデータ同化実験が行えるレベルまで持っていきたい。

京都大学防災研究所の次期地震予知研究計画について 1. 内陸地震および破壊過程・強震動

京都大学防災研究所地震予知研究センター（発表者 飯尾能久）

内陸地震に関する予知研究は、プレート境界地震に比べて遅れているが、第2次計画においては、その発生メカニズムの解明に関して数々の重要な進展があった。それらのいくつかは、観測に適したフィールドにおける集中観測の成果であった。次期計画においては、この流れをさらに加速し、最適なフィールドにおける(1)メカニズムの解明、および(2)手法開発という基礎的な研究を一つの柱とする。これらの基礎的な研究の成果に基づき、地震活動期に入ったと考えられる西南日本内陸、および、地殻活動の異常が報告されている近畿地方北部において、大地震の発生予測や断層の診断という(3)臨床的な研究をもう一つの柱として行う。これらの研究は一機関だけで実行できるものではないため、全国共同利用研究所の機能を生かして、西南日本における共同研究を積極的に推進する。下記において、内陸地震および破壊過程・強震動に関する研究項目を簡単に紹介する。

★ 内陸地震

◎ 基礎的な研究 1. メカニズムの解明

1. 1. 断層への応力蓄積過程はどのように行われるか？
1. 2. 破壊開始点・アスペリティはどのようなところか？
1. 3. 自然地震データから震源断層の正確な位置を推定できるか？
1. 4. 上部地殻でも非弾性変形は起こっているか？
1. 5. 水は地震を起こりやすくするのか？
1. 6. 前回の地震からの経過時間により断層はどう変わるか？

◎ 基礎的な研究 2. 手法開発

3. の研究に必要な新しい解析手法や観測技術の開発を行う。
2. 1. 地震波干渉法による構造の時間変化検出手法の開発, 2. 2. PSInSAR による地殻変動検出手法の開発, 2. 3. 間隙水圧観測による地殻変動連続観測の高度化, 2. 4. 超高感度比抵抗変化計の開発, 2. 5. 新しい応力逆解析手法の開発と応力場の時空間変化検出

◎ 3. 臨床的な研究

- 1, 2 の知見を生かして、西南日本の内陸大地震の発生予測に挑む。
3. 1. 西南日本における内陸地震の発生予測南海トラフ巨大地震による陸側プレートの粘弾性応答を考慮した西南日本内陸の断層における応力の時間変化の推定。
3. 2. 近畿地方北部の断層の診断

フィールド：琵琶湖西岸・花折・丹波地域など。地殻活動異常の原因解明、断層の破壊過程の推定、断層への応力蓄積過程の解明、『切迫性』の評価を行う。現在の状態を評価するために、兵庫県南部地震前のデータを、新たに開発された手法等を用いて再解析する。

★ 破壊過程・強震動

1) 特性化震源モデル：特に震源近傍の directivity pulse などを評価できる震源モデルの構築。2) プレート境界地震のアスペリティ：1952&2003 十勝沖, 1978&200 宮城沖、フィリピン、メキシコにおける広帯域波形モデリングと震源インバージョン。3) 長周期地震動：大大特1で作られた地殻・盆地速度構造モデルの改良。4) 極大強震動：広帯域波形モデリングと震源インバージョン、地震基盤・工学的基盤における地震動レベルの検証（サイト特性のはぎとり）。

プレート境界型地震：アスペリティ境界の特性の解明

京都大学防災研究所 橋本 学

「地震予知のための新たな観測研究計画」と引き続く第2期計画において、アスペリティ・モデルに基づくプレート境界地震の発生様式の理解が深まるとともに、数値シミュレーションによる地震サイクルの研究の大きな進展を見た。しかし、地震調査委員会により今後30年間に発生する確率が50%程度と評価された南海地震は、西日本の地震研究において依然第一級の課題として残っている。すなわち、次の地震が連動型の超巨大地震となるのか、あるいは東海と南海の2つの地震として歪エネルギーを解放するのか、現在の地震学が明確な回答を与えられない。一方、2004年12月26日に発生したスマトラ地震は、海溝に沿って並んだ複数のアスペリティが連動して破壊したことにより、M9.2という超巨大地震に成長したことが明らかにされた。しかし、それまでほとんど存在すら知られていなかったアスペリティが連動して破壊したのか、という問いにも、明確な回答は与えられていない。このように破壊の進展または連動の理解が必須であり、プレート境界型地震の発生予測において喫緊の課題である。この観点から京都大学防災研究所として、以下のような研究を提案する。

研究の目標：プレート境界のアスペリティ境界の特性の解明

小林・橋本(2006)の新しいプレート形状モデルを用いたGPS速度のインバージョンにより、紀伊半島先端部付近に測地プレート間カップリング率の低い領域の存在が示された。この地域は1944年東南海・1946年南海地震の震源域の境界であり、さらにこれらの地震の破壊の開始点もこの領域内に位置する。堀によるシミュレーションは、この地域の固着が地震サイクル後半に弱くなることを予想しており、現在のカップリングの状況が時間的に固定されたものか否かを評価することがきわめて重要である。

ターゲット：紀伊半島沖南海トラフ（+日向灘）

小林・橋本(2006)の低カップリング領域を集中的に調査する。

研究内容：

①稠密アレー地震観測による地殻・上部マントル構造の解明

紀伊半島において複数の測線を設け、稠密地震観測を実施し、レシーバー関数解析等により地殻・上部マントル地震波速度構造の詳細なイメージを得る。

②PSInSARによる経年的地殻変動の面的把握

衛星搭載合成開口レーダー・データをPSInSAR処理し、面的な地殻変動を把握する。

③不均質構造モデルによるプレート間カップリングの時間変化の推定

①の成果や大大特などの成果に基づき三次元構造モデルを作成し、②のデータおよび過去の測地データのインバージョンを行うことにより、南海トラフにおけるプレート間カップリングの時間変化を推定する。

④南海トラフおよび西南日本内陸活断層における地震発生サイクルシミュレーションモデルの構築

③までに得られたカップリング領域などをモデルに組み込み、西日本内陸活断層における応力の時間変化を推定する。また、セル・モデルにより地震活動のシミュレーションを行い、南海地震と内陸地震の相関のメカニズムについて迫る。

西南日本弧の地震活動と深部比抵抗構造

鳥取大学工学部 西田良平・塩崎一郎

現在の研究計画：鳥取大学工学部は、地震予知のための新たな観測研究計画（第2次）において、課題番号 1901「沈み込む海洋プレートの形状と脱水反応による流体分布の解明」、課題番号 1902「内陸地震の発生機構の解明 —特に、西南日本の地震特性と深部構造の関連に着目して—」の2つの研究課題を実施している。（いずれの研究課題も京都大学防災研究所・東京大学地震研究所等との共同研究）これらの研究の目的は、四国地方から山陰地方の日本海沿岸部に至る比抵抗構造断面を提出することに尽きる。この深部比抵抗構造と、山陰地方では、地震活動の特性（内陸大地震発生域および地震の空白域）の関連、四国地方においては中央構造線やフィリピン海プレートの沈み込み、深部低周波地震との関連、外帯上部地殻内の無地震域との関連を明らかにし、上部地殻における地殻流体分布と地震活動（低周波地震を含む）との関連を一般化し、その供給源としての海洋プレートの関わり方も考慮することにより、比抵抗構造の観点から地震発生を制御する主因を解明することを到達目標と考えている。

これまでの研究成果：鳥取大学を含む研究グループは、主に中国・四国地域で東西および南北方向に約 200km に及ぶ観測網を設定し調査研究を進めている。山陰地方・四国地方の内陸地震の発生や沈み込む海洋プレートと深部比抵抗構造の関連について明らかになった研究成果は次の通りである。

1. 山陰地方での比抵抗構造調査の結果、鳥取地震(1943, M7.2)・鳥取県西部地震(2000, M7.3)の震源域をはじめとして、この地域で発生する内陸地震の震源域を内含するような帯状の地震活動域下に、特徴的な比抵抗構造（地殻深部の低比抵抗領域の存在とその上側の高比抵抗の地殻内で地震が発生すること）の存在を明らかにした。
2. 山陰地方の顕著な地震空白域である島根東部地域においては、石川（1995）が定義した地震空白域下の比抵抗構造の特徴として、上部地殻内に他の山陰地域でみられる高比抵抗領域が殆どみられないことを示した。また、第四紀の火山である無震域である大山火山周辺域では、火山下の上部地殻内に深部地殻に及ぶ低比抵抗領域の存在を示した。上部地殻内の低比抵抗領域と無地震域が関連付けられることを示した。
3. 大規模活断層との関連では、四国地方・中央構造線付近に明瞭な比抵抗コントラストがあり、外帯には上部地殻内に顕著な低比抵抗領域が存在することを示した。その低比抵抗領域も、2.の場合と同じく、無地震域と関連付けられることを示した。
4. 四国東部で得られた深部比抵抗構造から、低周波地震発生域は相対的に低比抵抗であることを示した。
5. 鳥取東部・岡山東部地域の脊梁部から日本海側にかけての大局的な比抵抗断面を推定した。その結果、フィリピン海プレートの沈み込みの先端と考えられる高比抵抗層が鳥取東部の日本海沿岸の下約 70km の深さに推定された。

鳥取大学工学部の今後の研究計画：このような観測成果は、低比抵抗領域をもたらすもの、おそらくは地殻流体（水）が地震発生に関して重要な役割を果たすことを、主に山陰地方をテストフィールドとして確認したと考えている。その地殻流体の供給源の一つの候補として沈み込むフィリピン海プレートの脱水反応に伴う水が想定されるが、西南日本弧では、四国地方・中央構造線以北では瀬戸内海側の未測定地域があるため、北部地域（中国地方）にかけての海洋プレートの沈み込みの様子を比抵抗構造の観点から完全に追跡できていない。従って、西南日本弧において海溝から背弧側までの全体像をつかむ上でも、中国・四国地方を横断するような広域の深部比抵抗構造調査をもとにした定量的な議論の展開が望まれる。一方、山陰地方など、限られた地域での複数の構造調査により、地殻内地震に関しては地震活動と比抵抗構造の両者の関係が一般法則化されつつある。しかし、震源分布との対比を詳細に議論するためには、近畿北部から山陰地方全域の海岸線にほぼ並行に連続してみられる地震活動域の評価を行う必要がある。これらをふまえ、今後の研究計画の方針として、鳥取大学工学部は他機関と連携し、以下の2点を中心課題に据えて地震予知研究に取り組む所存である。近年、内陸地震の発生過程のモデル化が検討されつつあるが、深部比抵抗データが同モデル確立のための基礎的な作業データとして使用できることを期待する。

- (1)陸域のみならず海域へ測線を延長、同時に都市化ノイズの混入が激しい瀬戸内海側地域における構造調査の実施
- (2)山陰地方沿岸に沿う地震活動帯下の低比抵抗領域の発生源及びその規模を解明するための、より広域でより深部構造調査の実施

プレート境界面周辺での起震応力場の解明

発表：植平賢司（九州大学大学院理学研究院地震火山観測研究センター）

1. はじめに

大地震発生サイクルの中で、震源域およびその周辺域で応力場が時間的・空間的にどのように変動するのを知ることにより、地震発生に至るまでの物理過程の理解を深めることを目的とする。内陸地震に比べ、プレート境界での大地震発生サイクルは短いので、プレート境界地震を対象とするのは妥当であり、その中でも M7 クラスの地震が十数年から数十年間隔で発生し、プレート間のカップリングが空間的に変化している日向灘を主たる研究対象地域とする。

2. これまでの研究成果

日向灘におけるプレート間カップリングの空間変化は、プレート境界での大地震の滑り分布や、GPS の観測データによる解析結果により明らかになってきた。一方、日向灘での地震活動を精密に知るために、海底地震計による自然地震観測を毎年行ってきた。そのデータを用い詳細な震源分布・発震機構解を求め、応力テンソル逆解析法を適用することにより、日向灘における起震応力場を求めた所、プレート境界面付近の応力場（ σ_1 軸の向きとプレート境界の法線ベクトルのなす角度）とプレート間カップリングと間に良い相関があることが分かった。

3. 次期計画での課題・目標

応力場とカップリングとの関係の検証 日向灘南部から種子島近海では海底地震観測が十分に行われていないことにより応力場が求まっていない。GPS解析によるこの地域のカップリングはほとんどないことが分かっているので、そこから予想される応力場になっているかどうか検証する必要がある。また、日向灘以外のプレート境界、例えば茨城沖や宮城沖などとの比較も重要である。

時間変化の検出 近年実用化された長期型海底地震計を早急（出来れば本計画のうちにでも）に導入することにより、応力場の時間変化検出のためのデータ蓄積を図ることが必要である。

解析手法の高度化 近年、応力テンソル逆解析法は著しい進歩を遂げているので、それらの結果を踏まえて解析手法を高度化することにより、時間的・空間的な分解能を上げる。将来的に海域データがリアルタイムで得られるようになった暁にはモニタリングでの使用に耐えうるような解析手法を目指す。

プレート境界面の把握 プレート境界面での剪断応力を知るためにはプレート境界の形状を精度良く知っておく必要がある。そのために、人工震源を用いた構造探査を行うことが不可欠である。これは日向灘の応力場変化の原因の実体は何であるのを知る上でも必要である。

日向灘南部・南西諸島北部域におけるプレート間カップリングの解明

鹿児島大学理学部

プレート間カップリングは日向灘ではあまり強くなく、その南方の種子島・屋久島・トカラ列島・奄美大島を含む南西諸島北部域ではさらに弱い状態であると考えられている。これは、規模の大きなプレート境界地震の発生状況や GPS による変動ベクトル分布などに基づいている。しかし、南西諸島北部域でも中規模の低角逆断層型地震が発生していることやプレート境界域での微小地震活動度が日向灘よりも高いなど、プレート間カップリングが非常に弱いとは考えにくい事象も見られており、この領域のカップリングの実態の解明が必要である。さらに、当該領域は高角度沈み込み帯で沖縄トラフが存在するなど日本の他の領域と異なる環境下にあり、この領域での研究はプレート間カップリングの普遍性と地域特殊性の解明のためにも重要である。

しかしながら、南西諸島北部域の観測体制の整備は大幅に遅れており、その整備は急務である。特に喜界島での高精度地震観測点の設置は重要である。しかし、それがまだ実現していないため、鹿児島大学では現地震予知研究計画で、次善の策として、喜界島を含む数ヶ所で臨時地震観測を実施してきた。そして、奄美大島域については、それらのデータを用いてカップリング研究に欠かせないプレート境界の形状を明らかにするなどの成果を得た。また、数年分の臨時観測データから、プレート間カップリングに関係すると考えられる相似地震活動が明らかになってきた。

南西諸島北部域におけるプレート間カップリングの解明のためには、既存の観測データだけでは不十分であり、精度の高い観測データを取得するための臨時観測を実施することが必須である。次期計画では、現在おもに現地記録収録方式で行っている奄美大島域5点、トカラ列島域3点、および三島村竹島の計9点の臨時地震観測を、テレメータ化による観測効率の向上を計りながら継続して実施する計画である。このことにより、本課題終了時にはおよそ10年分のデータが蓄積でき、相似地震を含むプレート境界地震の活動について、空間だけでなく時間的な変化についても成果が期待できる。また、トカラ列島臥蛇島では新規の臨時地震観測を開始する計画である。さらに、GPS 観測をトカラ列島の悪石島・宝島・臥蛇島および三島村黒島で実施する計画である(現状の GEONET 観測点は南北約 200km のトカラ列島域に1点のみ)。なお、新規に地震と GPS の観測を計画している臥蛇島は無人島であるが、海溝軸に平行なトカラ列島域で直交方向に観測網の幅を持たせることができる唯一の離島であり、この島で観測を実施する効果は大きいものと考えられる。本課題は、上述の南西諸島北部域と常設観測網の整備が進んでいる日向灘南部域で、臨時および常設の地震と GPS の観測データを基にして、当該領域でのプレート間カップリングの実態の解明をめざすものである。

1. はじめに

過去 1300 年間に 8-9 回の発生が古文書等で確認されている南海地震では、四国や紀伊半島の温泉でくりかえし自噴量や水位の低下があったことが知られている(宇佐美, 2003). 特に, 1946 年南海地震(M8.0)においては, 地震時における温泉水の自噴量・水位の低下に加え, 地震の数日前から, 紀伊半島～四国の太平洋岸の浅い地下水の水位が, 推定で数十 cm 以上低下したことが知られている(水路局, 1948; 京大防災研, 2003a). 重富・他(2005)によれば, このような地震前の沿岸部の浅い地下水の水位低下は, 1854 年安政南海地震の前にも, 紀伊半島の和歌山県広川町周辺や四国の土佐清水市周辺であったとのことで, 南海地震前の浅部地下水位低下には再現性があることになる. 他方, 1944 年東南海地震(M7.9)の際にも, 従来, 南海地震の際に湧水量が低下するとされてきた和歌山県南部の湯峯温泉で(宇佐美, 2003), 湧水量が激減していたことが判明し(佐藤・他, 2005), その変化は, 湯峯温泉における地震時の体積歪変化と関係が深いことが示された(小泉・他, 2005). 東南海(東海)地震と南海地震は, 数日～数年以内に連動して発生していることを考慮すると, 上述の地震前後の地下水変化については, 南海地震だけでなく東南海(東海)地震も考慮に入れて評価すべきである.

1946 年南海地震の断層モデルから計算すると, 紀伊半島から四国の陸域では基本的に体積歪が地震時に増大, すなわち地盤が地震時に膨張する. したがって, 地震時の温泉水の自噴量・水位の低下については, 温泉水を被圧地下水と考えて, 上述のように計算される体積歪変化で定性的に説明できるだけでなく, 一部の地域では定量的にも説明できる(小泉, 2004; 小泉ほか, 2005).

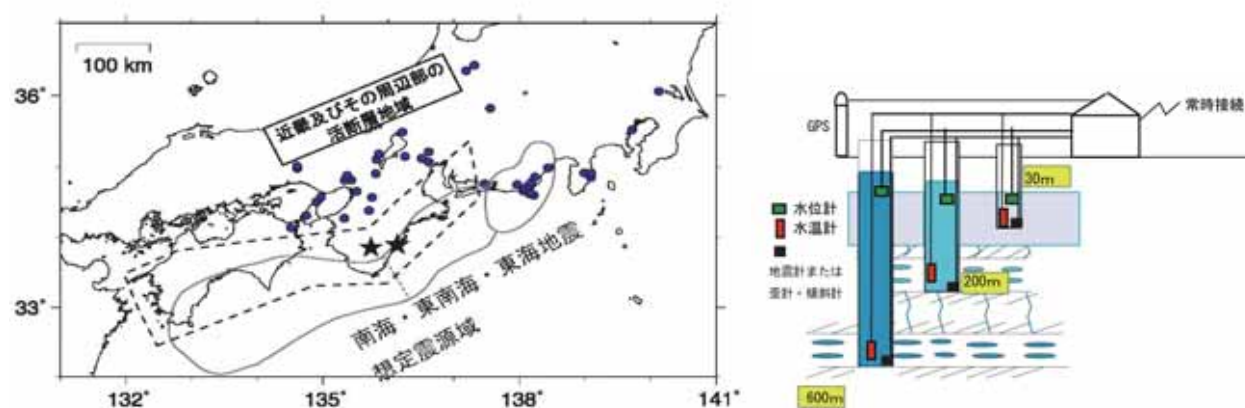
地震前の浅い地下水(＝不圧地下水)の水位低下も, 1946 年南海地震の震源域周辺でプレスリップがあったとすれば, 紀伊半島～四国の太平洋岸で陸地が隆起することで, 相対的に海水面が低下し, 海水面と圧力平衡にある海岸付近の地下水面が低下すると考えると定性的に説明できる. ただし, 京大防災研(2003b)の計算によれば, 1946 年南海地震にプレスリップがあったとしても, 沿岸部の陸の隆起量が最大 5 cm 程度となっていることから不圧地下水の水位低下は数 cm 以下にとどまることになり, 上述の数十 cm 以上といった振幅は説明できない. この結果を踏まえて京大防災研(2003a)は, 地盤が隆起して海水面と地下水面が圧力平衡に達する前の遷移的な過程において, 局所的に不圧地下水の水位が大きく低下し得るというモデルを出している. 他方, 同じ京大防災研(2003b)の計算において, 面積歪は最大 5×10^{-7} の増加を示していることから, 小泉・板場(2006)は, 被圧地下水なら数十 cm 以上の水位低下が可能であるとし, (深い)被圧地下水の水位低下の影響を受けて, 浅い不圧地下水の水位が低下した可能性を指摘している. これらのモデルを検証し, 地震予測につなげるためには, 地下水と地殻変動の精度良い連続観測が必要である.

2. 東南海・南海地震予測のための新たな地下水等総合観測網

産総研は, 2006 年度から, 東南海・南海地震予測のために, 愛知県～紀伊半島～四国に地下水等総合観測網の整備を開始した(図). 南海地震前の地下水変化メカニズムとして, 地震前の地殻変動と地下水流動が考えられることから, 1つの観測施設に深さの異なる 3 本の観測井戸(原則として 600m, 200m および 30m 程度)を掘削し, 水位・水温の測定を行うとともに, GPS やボアホール歪計等で地殻変動の観測も行う. 地震計も設置する(図). 図からわかるように, この観測網の基本的な概念は, 東南海・南海地震の想定震源域の陸側の縁から深部低周波微動(短期的スロースリップ発生域)までの帯状のプレート境界域直上で, 地下水も含めた地殻変動と地震を精度よくモニターしようというものである.

2007 年度に 2 点で観測が開始され(第 8 図), 2008 年度にはさらに 10 点の観測が開始され, 既存の東海地域における地下水等観測網と統合して運用される予定である. 次期地震予知研究計画(2009-2013 年度想定)時に, これらの観測データを用いて, 東南海・南海地震に伴う地下水変化メカニズムを解明し, 同地震の予測精度向上に資する.

図 左: 地下水総合観測点の分布(★: 2007 年度観測開始点, 破線内が新たな観測点整備域), 右: 新規地下水総合観測施設の概念図



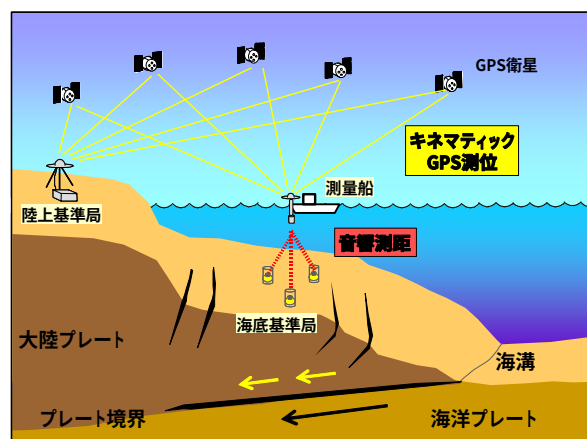
海底地殻変動観測の最近の成果と将来展望

海上保安庁・東京大学生産技術研究所

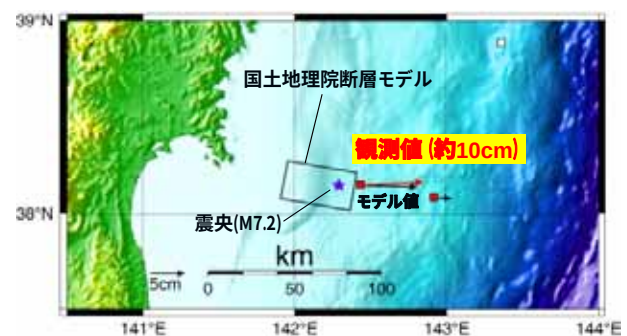
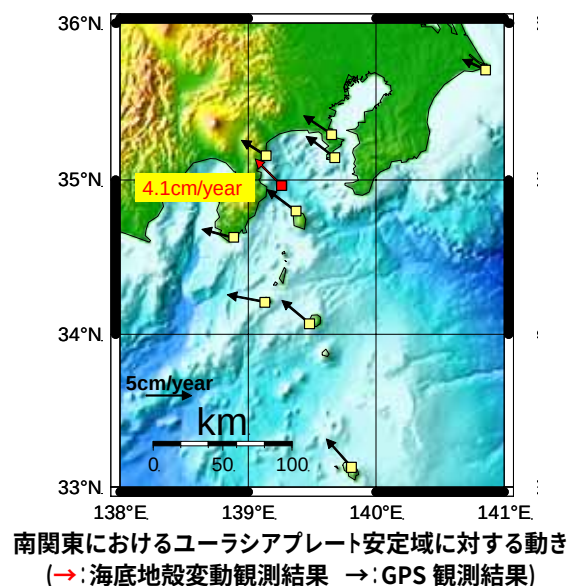
海上保安庁と東京大学生産技術研究所では、GPS/音響結合方式による海底地殻変動観測の技術開発及び海底基準点の展開を行っている。我々の海底基準点は、主に海溝型巨大地震の発生が予想されている日本海溝及び南海トラフ沿い陸側に十数点設置しており、測量船による繰り返し観測を実施している。

これまでの観測から、宮城沖及び相模湾における定常的なプレート運動、2005年8月16日の宮城県沖の地震（M7.2）に伴う地殻変動が検出されており、技術レベルとしては実用段階に入りつつあると考えられる。

現状では、十分な観測回数の確保や海底基準局の電池の寿命の問題等いくつかの検討すべき課題はあるが、海底の地殻変動データの蓄積により、陸上のGPSデータだけでは分からなかった海域の詳細な固着状況の把握やより実態に近い断層モデルの推定が可能となると期待される。



海底地殻変動観測概念図



2005年8月16日の
宮城県沖地震(M7.2)に伴う地殻変動

紀伊半島沖海底における地震・津波観測網の構築について

海洋研究開発機構

金田義行

1. はじめに

海溝型巨大地震研究においては、震源域の多くが分布する海域におけるリアルタイム観測が不可欠である。

特に、再来が危惧されている東南海地震、南海地震、東海地震といった南海トラフ巨大地震の発生システムを理解し予測精度の向上を目指すためには、震源域のリアルタイムモニタリングを可能とする海底観測網の整備が重要である。

平成18年度より文部科学省の委託研究プロジェクトとして開始された、紀伊半島沖地震・津波観測網の構築は、長時間スケールでの東南海地震震源域のリアルタイムモニタリングを目指すものである。(図1)

1. 地震・津波観測網の整備

本研究プロジェクトは、紀伊半島熊野灘域に強震計、広帯域地震計、精密水圧計等を組み込んだ20ヶ所の観測点を展開し、リアルタイムモニタリングを行うものである。(図2a, b) 海底観測網の整備により、東南海地震震源域の長期的な地殻活動を把握し、地震発生の予測モデルの高度化ならびに地震・津波の早期検知／高精度な解析評価を目指す。

3. 今後の展開

本研究プロジェクトは紀伊半島沖東南海地震震源域に観測網を展開するものであるが、このようなリアルタイムモニタリングシステムの整備は、連動が危惧されている南海地震震源域、さらには日本海溝における海溝型地震震源域等においても海溝型地震研究の推進ならびに防災・減災の観点からも緊急の課題である。また、本年度下期より熊野灘で計画されている南海掘削における坑内計測と海底観測網とのネットワーク化も必要不可欠である。

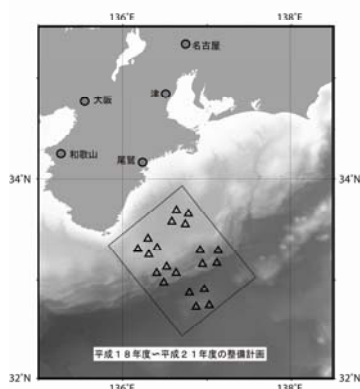


図1：観測点配置案（事前調査により詳細検討中）

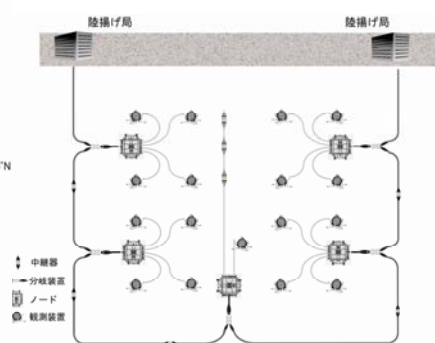


図2a：システムコンセプト

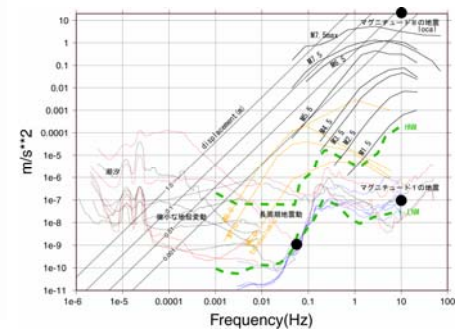


図2b：周波数特性

南海トラフ地震発生帯における海底ボアホール観測計画

海洋研究開発機構

末廣潔、木下正高、許正憲、倉本真一、荒木英一郎、伊藤久男

1. 観測計画の概要 南海トラフ地震発生帯では国際協同研究プログラム IODP (Integrated Ocean Drilling Program) の一環として、熊野灘沖に複数の坑井が掘削される予定である。IODP 南海地震発生帯掘削では、multi-scale での地震発生帯ダイナミクスの理解が主目的である。そのため、我々は以下の科学目的達成のため、掘削坑を利用した観測・モニタリングを計画している。

2. 科学目標と観測の内容

- ・ M8 級地震発生域の固着の実態把握
- ・ アスペリティの周囲（特に updip 側）での定常滑りの実態把握
- ・ 断層の厚さと歪集中の範囲を知る
- ・ 分岐断層・付加体の活動様式を知る

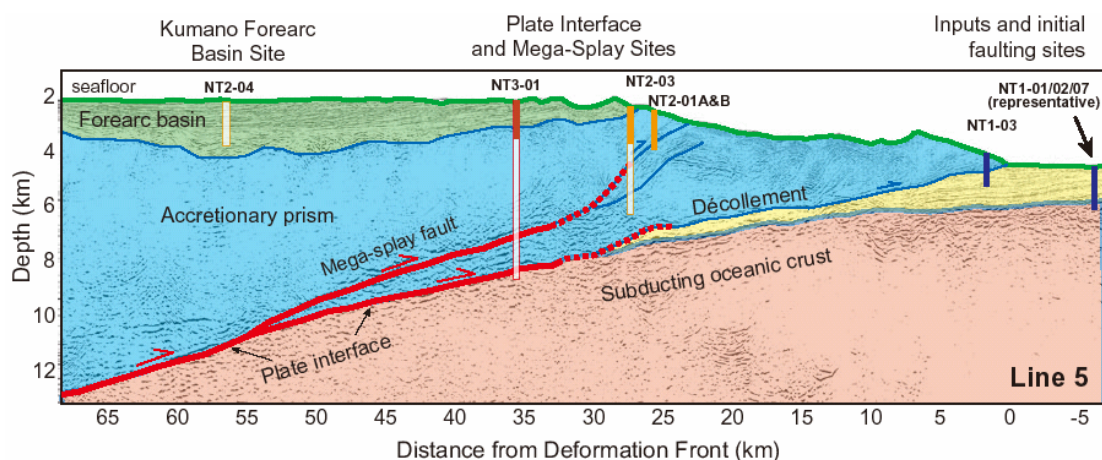
これらの実現のために、以下の目標を設定する：

—ニアフィールドでの非弾性媒質の歪蓄積過程を運動学的に理解する。

—地震断層内の特性・水理学的状態の観測

—低周波イベント等の性質のより正確な理解（海底・浅部孔観測）

3. 観測計画 掘削が予定されている坑井は 1 km、3.5 km、6 km であり、歪・傾斜による地殻変動、地震、間隙水圧、温度等を坑井に応じて組み合わせたオブザーバトリーを設置する。上記目標達成のために、水平アレーとして海底・浅部孔水平アレー観測と、地震断層までの深部掘削孔による垂直観測を組み合わせる。海底ボアホール観測点は将来海底ケーブルに接続され、海底観測と併せ、観測ネットワークを構築する。

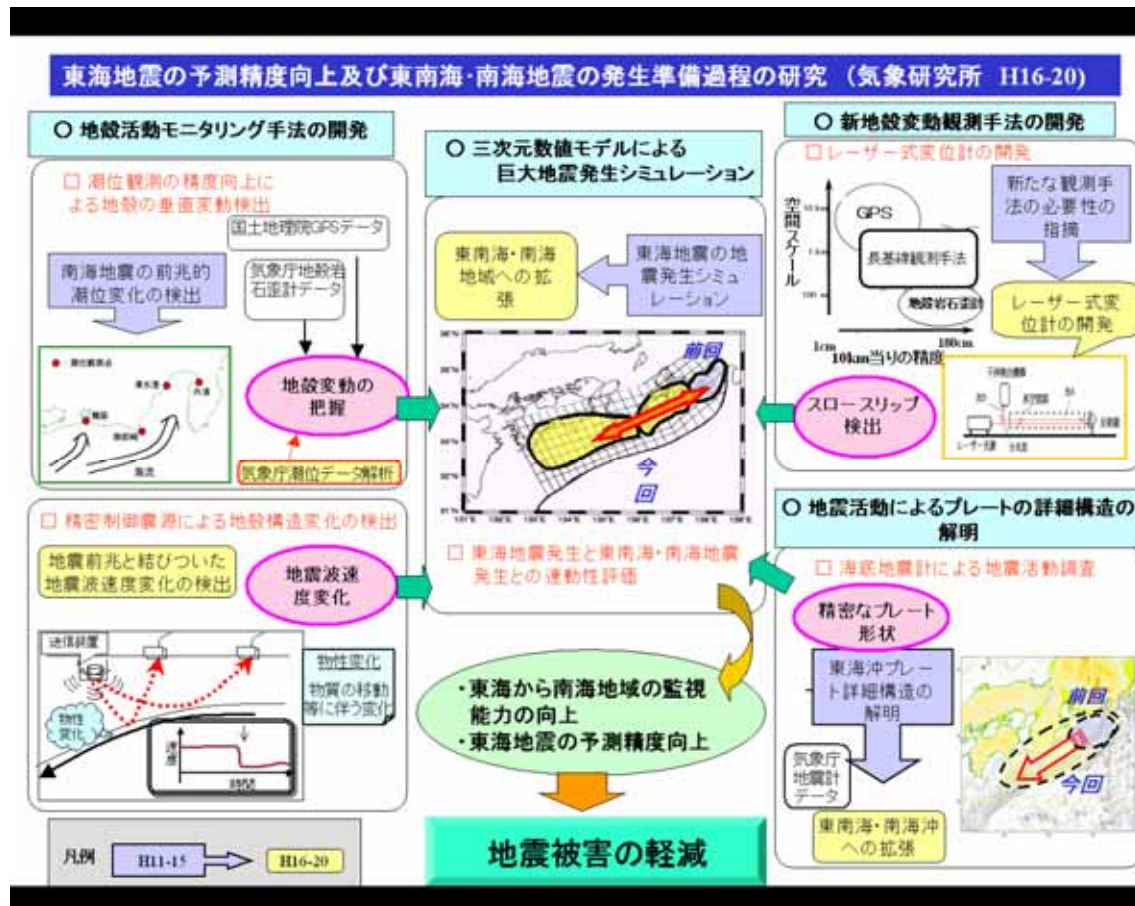


機関・センター提案

内容：海溝沿い巨大地震の発生予測に向けたシミュレーション及びモニタリング技術の高度化、並びに関連した知識ベース開発の推進（10分）

提案者：気象研（発表者：森 滋男）

気象研究所では、第2次計画（H16-20）を踏まえ、東海から南海地域の監視能力の向上、及び東海地震の予測精度向上を具体的な目標とし、それらの推進に不可欠と考えられた次のような研究項目を実施してきている。



次期計画においても、「地震発生サイクルにおける現在のステージ」や「プレート間カップリングの状態変化」の推定に結びつけることを目標とし、シミュレーションで用いる構造等のモデルに関する最新研究成果を踏まえ、モデルの改善とそれに応じたシミュレーション技術の開発を進めることが必要と考える。また、上述の目標を念頭におき、必要とするモニタリング技術として、「精密制御震源を用いた技術」、及び「GPSと岩石歪計の観測境界領域をカバーする観測技術」の開発研究をさらに推進し、プレート境界付近の挙動をより信頼度高く把握できるようにする努力が必要と考える。なお、特に海域下で発生する変動については、海域で観測する技術が重要であると認識している。

ところで、関係機関からのこの種の研究成果を、同関係機関で適切に共有することで、効率的な研究の推進が期待できる。しかし、必ずしもそれを推進してきていない。このため、そのような共有を可能とする体制を作る（本提案では「知識ベース開発」と呼んだ）ことが重要と考える。

グループ・個人提案

「南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験(SeeSA)」に関する次期研究計画

SeeSA 研究グループ
小笠原宏 (立命館大学)

1. 基本目標 (=破壊の物理学の半制御実験場)

南アフリカ金鉱山の地下2~3.6kmにおいて、明瞭な断層破碎帯などの弱面を持つ岩盤に 10^{-4} 級の歪(MPa級の応力)が採掘とともに100mオーダーの範囲に蓄積すると、 $M<3$ の高速破壊と付随する多数の極微小地震が群発する。その領域は採掘計画から事前に予測可能であるため、その領域に様々な計器を埋設し、挙動の一部始終を至近距離から仔細に観察することが、基本目標である。そして、地表付近からの自然地震では観測が非常に困難な仔細像を、AEから領域全体を破壊する地震までの幅広いソースサイズの範囲で、また、AEや地震などの高速破壊からslow eventまでの幅広い継続時間の範囲で明らかにする。また、その領域の環境(応力等)・物性を直接調べ、観測された挙動と比較することによって、どの環境・物性が何を引き起こすかを明らかにすることも目標である。これらの結果は、小サイズの岩石実験と巨大サイズの自然巨大地震のスケールギャップを埋めることにもなる。地質や応力などの環境が比較的わかっていて発生する現象を観測するため、地震の観測波形などから環境を間接的に推定する方法の検証やキャリブレーションを行うことも目標としている。

2. これまでの到達点

$M<3$ の地震が発生する可能性が高い既存弱面を、地震発生前に複数選定することができ、2~3年で 10^{-4} 級の歪の蓄積とその後の挙動の一部始終を観察できた。さらに、現5ヶ年計画中に、残されていた課題を解決するための複数の実験(3.1に詳述)を、科研費(2006-2008)によって立ち上げることができた。これらを通じて、多数の日本の若い研究者達が南アフリカ金鉱山で多くの経験を積み、多くを学ぶこともできた。

特筆される科学的な新しい成果は次の通りである。鉱山地震も、より大きな自然地震と同様な、破壊過程の相似性や複雑さを持っていることが明らかになった(Yamadaら)。M2級の地震群の中には、数多くのゆっくりした歪変化が観測され、一部の最もゆっくりとしたイベントのみに前駆が明瞭に観測された(Naoiら)。2台の隣接した石井式歪計によって、ゆっくりした歪変化のソース規模を絞り込むことができ、それらは自然のより大きいゆっくり地震と比較すべき非常に興味深いものであった(安武ら)。一例のゆっくりイベントでは、これまでで最も仔細に変化の全容が記録され、前駆歪変化は加速的ではなく、時間に対して直線的であることがわかった(安武ら)。

3. 次期5ヶ年

次期5ヶ年計画では、当実験を「地震発生の素過程」の一課題と位置づけ、「素過程」の諸課題と連携を深めるとともに、「地震発生に至る準備・直前過程における地殻活動」にも寄与できるように実験を進める。

3.1 現在進行中の観測計画によって次期5ヶ年の初頭で答えが得られ始めると期待される問題

- ・間隙水の存在する時の岩盤挙動の違い(水没域と非水没域の地震活動の比較;境界の挙動観測)?
- ・AEと微小地震に物理の違いがあるのか(GR則、破壊様式など)?
- ・Seismogenic Zone全体を破壊する地震発生の際や、前駆滑り、slow eventの際にAE活動がどう推移するのか?
- ・高周波生成の現場の挙動、破壊停止の現場の挙動は(On fault 地震計アレイによる)?
- ・近傍高周波数電位観測による破壊電気信号の大きさは?

3.2 次期5ヶ年でのさらなる計画

上記に加え、次のような課題にも挑戦したい。まず、すべり現象の多様性を明らかにするために、周波数レンジとダイナミックレンジに盲点のない岩盤挙動観測を目指す。そのための計器開発や特性の詳細な検討も行う。そして、対象領域に盲点がないように、多点観測を目指す。100mスケールの地震($M\sim 2$ 級)の震源核形成過程を明らかにし、無視できない厚さの断層破碎帯が、地震準備期や発生期、終息期にどのように挙動するのかも明らかにしたい。ただし、高応力下での多数のドリリングを短期に行うための技術開発や経験を積むことが課題であり、これを次期5ヶ年で解決したい。

これまでに蓄積されてきた地震や歪のデータも引き続き解析する。これらと新しい観測データを用い、例えば、毎日ほぼ定時に行われる採掘発破の地震波などを利用した、 $M<3$ 級地震断層の特性変化の検出なども試みたい。

以 上

内陸地震の震源断層の微細構造と回復過程の研究

断層解剖計画グループ（発表者：京大防災研、西上欽也）

1. これまでの研究による成果等

断層解剖計画グループは、1995年兵庫県南部地震の震源断層である野島断層の南西端付近（富島）において、ボアホール群（1800m、800m、500m）を用いた連続観測、注水実験等の地球物理学的手法、およびコア解析等の物質科学的な手法により、野島断層の回復過程、断層構造と地震発生過程等の研究を行ってきた。主な成果としては、繰り返し注水実験（図1、540m深度注水）により、野島断層近傍岩盤の透水係数が1997年～2006年にかけて約60%低下したことを検出した。これは断層近傍におけるクラック密度の低下（強度回復過程）を示唆すると考えられる。また、注水に伴う誘発地震と考えられる極微小地震を検出し（深さ2～4km）、それらのクラスター活動特性、震源パラメータ等を推定した。これらの地震に対して1800m孔底で断層トラップ波を検出し、破砕帯構造を推定した。また、破砕帯を含む詳細なコア解析、断層岩の分布性状（平林）によるアスペリティ分布の推定、等の研究が行われてきた。これらの成果の一方で、震源断層そのものの透水性の測定とその時間変化（回復過程）の検出、確実な注水誘発地震の同定、注入水の挙動の推定、および野島断層中央部（平林）で回復過程が早く進行した可能性の検証と解釈、等は今後の課題として残されている。

2. 次期計画における課題提案

これらを踏まえて、次期計画では以下の2点を新たな切り口として、野島断層（震源断層）の詳細な破砕帯構造の解明、および、その強度回復過程の検出、さらに、応力蓄積過程の解明につながるような観測的知見の集積・比較研究を提案する。

(1) 野島断層（震源断層）の1800m深度破砕帯への直接注水実験

- ・1800m孔底の断層破砕帯から注水し、500m孔の破砕帯位置で地下水（圧力、化学成分）を測定し、震源断層の詳細な透水性、破砕帯構造を調べる（図1）。
- ・注水誘発地震を確実に発生させ、その発生過程、破砕帯構造（トラップ波の解析）、および断層面の摩擦特性を推定する。
- ・震源断層の回復過程を検出する。
- ・従来の540m深度注水も合わせて行い、断層帯の広範囲（図1の範囲）における、透水性構造、注入水の挙動を解明する。

(2) 他の内陸活断層の震源断層の構造・回復過程との比較

- ・野島断層の平林、および最近発生したM7クラス地震の震源断層の断層構造（走向方向の変化）および時間変化を注水実験以外の手法（散乱強度、S波偏向異方性等）により推定する。
- ・これらの比較により、震源断層の構造・破壊過程（アスペリティ等）と回復過程（に要する時間）の関係等を調べ、断層への応力蓄積過程の理解につなげる。

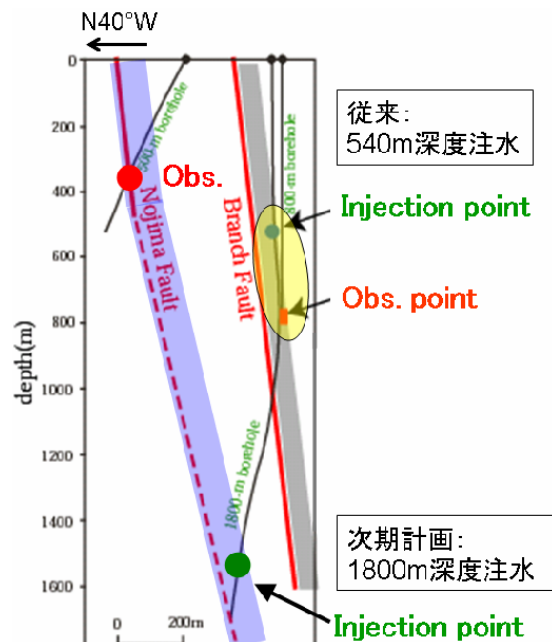


図1 野島断層およびボアホール群の断面図。1800m深度注水：1800m孔底から注水し、500m孔の破砕帯位置で測定する。

変動地形・地質学からのアプローチ

発表者： 佐藤比呂志（地震研） 変動地形・地質グループ

変動地形・地質学的なアプローチは、地球物理学的には観測できない時間スケールをカバーすることができる。次期計画では、こうした特性を活かして以下の三つのテーマについての研究を提案する。

(1) 津波堆積物・海岸の隆起沈降調査によるプレート境界地震とプレート相互作用についての研究：新計画では、この期間の中で開発されたジオスライサーなどの新しい手法を用いて、日本列島の太平洋側の各地で過去数千年のプレート境界地震イベントや海岸の隆起沈降運動について新事実が明らかになりつつある。西南日本では通常の地震サイクル（百数十年）を越えたサイクル（3〜4 百年）や 1000 年以上の間隔で発生する沈降運動の存在が明らかになりつつあり、連動型地震やそのメカニズムを明らかにする上で基礎的な観測データとなっている。こうした津波堆積物・海岸の隆起沈降調査から推定される広域的な事象は、より広範な地域で確認する必要がある、千島弧から琉球弧まで日本列島の広い範囲で次期計画でも実施していきたい。とくに、東北日本弧ではプレート相互作用、とくに島弧地殻内の応力蓄積過程のメカニズムを考える際に重要なデータを提供する。また、関東周辺では元禄型・大正型などプレート境界で発生した地震の記載と物理学的な理解のための重要な拘束条件となる。これらのデータは、プレート境界地震・プレート相互作用についてのシミュレーションにとって、重要な拘束条件を提示することになる。

(2) 内陸活断層のセグメンテーション・グルーピングなどに関連する研究：活断層のマッピングは発生する内陸地震の規模と場所を予測するための唯一の方法である。地表の断層トレースや活動時期にもとづいた長期評価は、地震調査推進本部によって報告されているが、活断層のセグメンテーションやグルーピングについては、未解決の問題が多く、継続した研究が必要である。古地震学的手法による活動時期解明の高精度化、活断層図の詳細精密化、変位速度データの高密度化・高精度化によって、物理モデルを構築するための観測データを取得し、モデル化を目指す。

(3) 第四紀の歪速度のマッピング、震源断層の 3D マッピングに関連した研究：活断層の活動サイクルは数千年におよび、プレート境界の地震活動にも 1000 年を超えるサイクルが存在する可能性がある。こうした時間帯域を考えると将来のシミュレーションは、活断層の数サイクルの時間を取り込む必要がある。こうした長期間に地殻内に蓄積される塑性歪みを定量することは、地殻変形を理解する上で基本的である。塑性歪みの定量には断層形状と地質構造の理解も必要であり、これまで蓄積した地下構造探査の結果なども考量して震源断層モデルとそれによる塑性歪みの定量を行っていく必要がある。

地震予知研究における電磁気観測の成果と今後の展望
電磁気観測研究グループ（発表担当：上嶋 誠（東大地震研））

1. 構造研究の意義

- ・電気伝導度構造・地震波速度構造など観測によって直接決定することが可能な構造の解明から、温度、圧力、岩石種、間隙流体などの「物質・状態」構造をできるだけ精度良く推定したい。
- ・地殻活動を規定する（言い換えれば地殻シミュレーションモデルを構成する主要素である）ばね、ダッシュポット、スライダーが地下においてどのように分布しているか、どのような性質をもっているかを推定したい。

2. この5年間の電磁気構造研究の進歩

- ・広帯域 MT 法、ネットワーク MT 法観測法の確立により、安定して広帯域、広領域での電磁場データが得られるようになった。一方で、データプロセッシング技法、次元解析のが高度化され、インヴァージョン技術の進歩とあいまって、hybrid 2D 解析が主流となり、3D 解析も行われるようになった。
- ・これらの進歩をうけ、様々な地域で様々なスケールで構造決定のための観測が実施された（歪集中帯、各被害地震震源域、北海道各地、東北背弧―前弧域、紀伊半島、西南日本背弧―前弧域など）。その結果、震源分布、歪分布などの地殻活動に直接関連のある電気伝導度構造が提出され、歪集中帯下部や断層下部延長域、地震発生帯直下に低比抵抗領域が存在すること、それらの地震波低速度帯との関連性などが議論されるようになった。
- ・一方で、電気伝導度、地震波速度などの観測可能な物理量と、温度、間隙流体の量、形状などの物質・状態との間の定量的な関係式が提出されるようになった。また、海外において、地震・電磁気同時インヴァージョン手法が開発されつつある。

3. 今後の展望

- ・合同観測としては、地震、電磁気、地殻変動が一体となって、出来るだけ、同一のフィールドで観測を実施（歪集中帯の延長、西南日本背弧地域などが候補地＋被害地震震源域での緊急的観測）。
- ・地殻活動シミュレーションにおける各部品（ばね、ダッシュポット、スライダー）に現実的な構成則を与えることを究極目標として、より有機的、統合的解釈から、地下の「物質・状態」の実体に迫りたい。
- ・研究対象を広げるための観測手法（特に海での観測、人工電磁法）、解析手法（特に3次元インヴァージョン）の更なる洗練化が必要。

断層深部すべり過程の検証と内陸地震予測

陸域震源断層の深部すべり過程のモデル化研究グループ

(講演者:産総研地質情報研究部門 重松紀生)

1. はじめに

内陸大地震の発生過程は不明な点が多い。本グループでの研究内容は、このことについて、内陸大地震が断層深部すべりにより発生するという作業仮説に基づき、仮説の検証とともに、その実態を解明し、内陸地震の発生過程の理解につなげようというものである。

深部すべりとは地震が発生しないような断層深部延長において(深さ 10~15 km 以深)、断層が定常的にすべっているという考えである。このとき、固着している脆性領域と、深部すべりを起こしている断層深部との変位の差により、応力集中が発生し、地震にいたるものと考えられる。実際地質学的には、断層深部で幅の狭い領域に変形が集中した延性剪断帯が世界各地で報告されており、これが深部すべりに対応しているものと考えられる(Snoke et al., 1998 など)。また跡津川断層近傍で S 波偏向異方性に変化することが報告されており、深部すべりにその原因が求められている(Mizuno et al., 2005)。

2. 深部すべりの実態を示唆する結果

深部すべりの実態解明について、過去の断層深部が現在地表に露出している畑川破碎帯や中央構造線では、脆性-塑性遷移領域の条件で、塑性歪を被る領域が断層の限られた部分のみで、地震の破壊が主としてこの領域から始まること、さらにこのような領域は非常に高い差応力で変形したことが明らかに becoming つつある(重松他 2003 など)。また、2000 年鳥取県西部地震(Uehira et al., 2006 など)、2004 年新潟県中越地震(Korenaga et al., 2005 など)、2005 年福岡県西方沖地震(Shibutani et al., 2005 など)の余震の震源分布、地震波速度構造、比抵抗構造などを見ると、余震分布がお椀型をしており、お椀の底の部分に本震の震源が位置していること、本震の下断層深部において、地震波速度が遅い、あるいは比抵抗が小さいなど、岩石が周辺よりやわらかく変形しやすい領域になっている可能性があり、やわらかい領域直上での応力集中が示唆されている。

地質学的事実、最近のいくつかの内陸地震での観測事実は、いずれも深部すべりには、断層の走向方向に不均質があり、これに伴う応力集中が内陸地震の発生に深く関わっていることを示唆している。しかし、過去の深部が現在地表に露出している断層の場合、岩石の被った履歴を考慮する必要がある。また、断層深部の地震波速度の遅い場所、あるいは比抵抗の小さい場所が本当に延性剪断帯に対応するかという点については疑問がある。また断層深部での応力集中、地震発生に至る過程を理解する上でも、断層深部における岩石のレオロジーの解明、レオロジーに基づく数値実験が必要となる。

3. 研究内容

以上を踏まえると、次のような研究の方向が考えられる。(1) 過去の深部が現在地表に露出している断層の応力履歴を明らかにし、断層深部の応力集中に制約を与えるとともに、得られた結果が現在の活断層における観測事実と整合性があるかについての検証を行う。(2) 過去の深部が現在地表に露出している断層の岩石変形機構を解明するとともに、明らかになった変形機構を実験室で再現することにより、断層深部すべりの原因となる岩石のレオロジーを解明する。(3) 弾性波速度が遅い領域、比抵抗が小さい領域は漠然と柔らかい領域と解釈されることが大きい。(2)の岩石変形機構の再現実験の際に、あわせて弾性波速度と比抵抗の測定を行うことにより、地震波速度、比抵抗に対し、より現実的な解釈を可能にする。(4) (3)の成果に基づき、現在地震波トモグラフィー等で得られる情報をもとに、断層深部の応力集中過程に制約を与えられるようにする。(5) (1)~(4)の成果を数値モデルとして統合し、断層深部における応力集中過程を明らかにする。(6) (4)~(5)の成果に基づき、個別の内陸活断層に対する応力集中モデルを提唱することにより、内陸地震予測精度向上に資する。

文献

- Korenaga et al., 2005, Earth Planet Space, 57, 429-433.
 Mizuno, T., et al., 2005, J.R.L. 32, doi:10.1029/2005GL023875.
 Shibutani et al., 2005, Earth Planet Space, 57, 825-838.
 重松他, 2003, 地学雑誌, 112, 897-913.
 Snoke, A.W., et al., 1998, "Fault-related rocks", Princeton University Press.
 Uehira et al., 2006, Earth Planet Space, 58, 1605-1610.

地震サイクルシミュレーションへのデータ同化にむけて
データ同化研究グループ（宮崎真一）

従来の地震予知研究計画では、観測、理論・シミュレーション、実験の各分野が、それほど連携を持たずに進められてきた。各分野別に成果があがりつつある現在、これらの研究手法別の進め方を改め、各手法のフィードバックシステムを構築し、共同体として予測という問題に取り組んでいくことを検討している。その具体的な方向性として、データ同化システムの構築を行いたいと考えている。

我々が提案するデータ同化システムは、海溝型地震サイクルシミュレーションに対して様々な観測データを用いることで、これまで主観的に与えられてきた、摩擦パラメータなどのパラメータ（場合によっては構成則そのものの選択）やシミュレーション変数の初期値の推定を試みるものである。具体的には、（１）摩擦パラメータの空間分布の推定、（２）長期間データ同化、（３）逐次的データ同化の３つのステップからなる。

最初の摩擦パラメータの空間分布の推定とは、地震波からアスペリティーの形状を決めたり、地殻変動データから余効すべりの領域を決めたりすることで、すでに研究が進んでいる。従来は地震波、地殻変動など、独立の形状・構造が用いられてきたため、それらの結果を単純に一つのモデルで扱うことが出来なかった。（２）、（３）の同化ステップにスムーズに移行するためには、共通の作業モデルを用いて推定することが肝要である。

長期間データ同化は、地震サイクル以上の時間スケールにわたる各種観測資料を用い、摩擦パラメータやシミュレーション変数の初期値を推定するものである。具体的には、（１）のステップで得られたアスペリティーの形状などを用い、測地測量のデータや津波のデータ、さらには巨大地震の発生時期などの各種資料に合うようなパラメータの値を推定する。ただし、観測量の精度や観測誤差の扱いが難しく、パラメータや初期値の分布を統計的に厳密な形で推定するのはほぼ不可能であり、半定量的なものになる。しかし、この長期的データ同化の成否が、我々が提案する同化システムの成否の鍵を握っているともいえる。

一旦パラメータや物理量の初期値が求まれば、それを改めて初期分布とし、逐次的にデータを取り込みつつ、パラメータや物理量の分布を更新していくような逐次的データ同化を行う。最新のデータが得られた時点での更新値を「将来予測の初期値」として用いることで、予測を行おうというものである。

また、どちらのデータ同化においても、パラメータ間の相関があり、分離が難しいことも想定されるため、データ同化に着手する前に、人工データを用いた同化実験を数多くこなし、パラメータの相関に関する先験的な情報を得ることも重要となってくる。

我々は、観測研究者と理論・シミュレーション研究者の共同体という利点を最大限に活かし、次の５年間で（１）を行いつつ、（２）、（３）のデータ同化手法の構築を行いたいと考えている。

スロースリップイベントの予測モデルの検討

防災科学技術研究所 廣瀬仁

背景

西南日本で発生している深部低周波微動に同期して継続時間数日のスロースリップイベント (SSE) が発生していることが明らかになってきている。またこの同期現象は、3-6 か月の地域によって異なる周期で繰り返し発生している。SSE は沈み込んだプレートと上盤との境界面で発生するすべりイベントと考えられるが、プレート間のすべりイベントが数サイクルにわたってほぼ同じ条件で観測されているという点において特異な現象といえる。

観測から得られる各サイクルでのすべり量やすべり領域の空間分布等の情報を全て活用することで、どの程度の精度でイベントの発生予測ができるのかを検討することは、より限られた繰り返しサイクルの情報しかないプレート境界型巨大地震の予測モデルを構築するためにどのような情報が必要か、ということを整理するのに役に立つ。

このような観点から、以下のような SSE 発生予測モデルを構築・検討する。

SSE 発生予測モデルの考え方

SSE のすべり挙動の特徴 (規模, すべりの継続時間, 繰り返し間隔, すべりの伝播, 等) のいくつかを再現しようとするシミュレーション研究は、既にいくつか行われてきている。それらの全てが、速度・状態依存摩擦則に基づいたモデルを使用している。このようなモデルはすべりイベントの場所・時期・規模だけでなく、連続モデルの条件を満たすような大規模なモデルの場合、どこからすべりがはじまり、どの方向へ伝播していき、何日間継続するか、といったすべりの挙動まで予測できる可能性がある、大変有力な方法である。しかしながら (1) 摩擦則自体がプレート境界深部に適用可能か不明; (2) 設定すべきパラメタが多く、かつどのような値が適正なのか、はシミュレーションしてみないと分からないことが多い; などの問題点を抱えている。

別の考え方として、この速度・状態依存摩擦則を適用せず、より簡単なすべり基準 (降伏応力) のみをパラメタとし、断層要素間の相互作用のみを取り入れたシンプルなモデルでも、次のイベントの場所・時期・規模がある程度予測できる可能性がある。もしそうであれば、十分検討する価値がある。

本稿では特にこの後者の「応力相互作用モデル」について検討する。

応力相互作用モデル

このモデルは研究領域のプレート境界面を複数の断層要素に分割し、(i) 各断層要素はそれぞれのすべり欠損レートで応力が増大; (ii) 他の断層要素がすべることによって応力変化; (iii) 応力が臨界応力 (降伏応力) を越えたらすべる; というモデルである (Hashimoto, 2001)。重要なパラメタは上述の (1) すべり欠損レートおよび (2) 臨界応力である。このモデルを SSE サイクルに適用する場合、地殻変動観測から毎回のすべり量分布を精度良く求め、それから応力変化を計算することで、(1) は観測から推定可能; (2) は相対的な臨界応力が定義できる可能性がある。そしてモデルの時間を進めていけば、例えば断層要素毎の「満期度」 (= 臨界応力に対する現在応力累積量の割合) が時間変化し、次にすべるのはどの断層要素か、そしてその要素がすべることによる応力再配分で連動してすべる要素はどこか、ということが判定できることになる。すなわち次のイベントの場所・時期・規模が予測できる。

以上の前提となるのが、各サイクルでの精度よいすべり量分布の推定である。このためには、信頼性の高いプレート形状モデル・高品質の地殻変動観測データの蓄積・地殻変動データからすべり量分布を推定する手法の開発・推定精度の評価手法の確立などが不可欠である。

文献

Hashimoto, M. (2001), Complexity in the recurrence of large earthquakes in southwestern Japan: A simulation with an interacting fault system model, *Earth Planet Space*, 53, 249–259.

次期地震予知研究計画検討シンポジウム

地震断層の化学（ガス・流体）モニターと化学的素過程のリンク研究

田中秀実（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻）

地震の化学素過程・観測研究の目標

現在では、地震に伴う応力蓄積、地震の発生、応力回復のいずれの過程においても、断層破碎帯という滑り面を含んだごく薄い、非弾性的な帯の物理化学過程が非常に重要な役割を持っていることが広く知られている。上記の各過程において、破碎帯内に働いている化学反応を実験的に明らかにするとともに、反応に対して最も鋭敏な物質であるガス、流体を「断層破碎帯内部」でモニターすることにより、地震期、地震直後期、間震期のあるべき化学過程を実証する。

現在の状況

断層破碎帯内部では、通常の平衡反応以外の化学反応（破壊に伴うラジカル反応や、非平衡溶解）が地震サイクルの中で大きな役割を占めている。断層破碎帯のラジカル反応については、流体の酸化、還元素過程の証明（Saruwatari et al., 2004）、ラジカル反応起源の各種鉱物の水素生成能力の相違とその素過程の証明（Kameda et al., 2003a, 2003b）に成功している。水素が主にラジカル反応起源であるのに対し、メタンは破壊に伴う岩石からの放出であることも現時点ではほぼ明らかにされている（Saito and Tanaka in prep）。ヘリウムはその同位体組成比によって、マントル流体の地殻流体への混合率が推定されることが知られている（Matsumoto et al., 2003）。断層帯における各種ガスの素過程の全容は明らかにされていないが、上記の実験および観測結果から地震サイクルの各ステージにおいて特徴的なガスが破碎帯内部で優勢に生成されることが示唆される。

一方、断層破碎帯を掘削し、その破碎帯のガス、流体組成を直接観測する研究が跡津川断層において進められている。地震にともなって粉碎された岩石と流体の化学反応を直接検知するための観測である。掘削は 200 m 深度ながら主要な断層破碎帯を 3 枚貫通した。その下側の破碎帯から採取された流体は、マントル He を約 25% 含んでおり、天水循環による汚染の少ない破碎帯内部の流体が連続観測に供されている。流体連続観測は 2006 年度より開始された。機器の安定化を測りつつ、データの集積を待っている。流体採取観測システムは 2006 年度に特許を取得している。

次期予知計画における展望

超短時間における粉碎に伴う化学反応素過程の実証とともに、さらに地震サイクル全期間の化学反応の全貌および、地震の化学的エネルギー収支を解明するために、間震期で発生すると期待される長時間化学反応の実験的研究にも重点を置く。また、現在地殻化学グループとの共同研究によって、同位体連続観測を目的とした QMS システムの開発に取り組んでいる。次期予知計画においては、同装置を連続観測システム内に実装し、同位体変動観測を行なう。

微小地震観測データのバックグラウンドノイズ部分を用いた地殻構造のモニタリングの試み

大見士朗 (京大防災研)・平原和朗 (京大理)

1. はじめに

昨今、地震波干渉法 (seismic interferometry) による地下構造のイメージング手法が物理探査分野で発展している。この方法では地表に設置された複数の地震計で地震による震動やノイズを観測し相互相関処理することにより、ある受振点を震源として全ての受振点でその震源の波動伝播を観測したような波形記録を合成することができるというものである。この方法は、本来はある時刻の地殻構造のスナップショットを得るための方法であるが、同一の組み合わせの複数受震点間の相互相関や、単独受震点の自己相関を求め、その時間発展を追うことにより地殻構造のモニタリングをおこなう方法が最近提唱されている。この方法では、データとして微小地震観測波形データの中のバックグラウンドノイズ部分を用い、近接観測点間の相互相関または同一観測点の自己相関を計算し、その時間的な推移を監視するというものである。この方法により、たとえば Wegler and Sens-Shonfelder (2007) は、新潟県中越地震前後の地殻の状態変化を F-net の柏崎観測点のデータの自己相関関数によって論じている。今回、同様の方法を能登半島地震前後の中部地方北部の微小地震観測点のデータに適用した結果を紹介し、本手法による地殻構造の時間変化のモニタリングの可能性を提案する。

2. 能登半島地震前後のデータへの適用例

2-1. データ処理

ここでは、Wegler and Sens-Shonfelder (2007) と同様、微小地震観測データのバックグラウンドノイズの自己相関関数 (ACF) の時間変化を監視する方法を用いた。データの処理は以下のように行った。まず、考察している観測点のある 1 日の 24 時間分の 100Hz サンプリングの上下動連続波形記録データに適切な High Pass フィルタをかけ、脈動等の信号を落とす。次に、自然地震等、「バックグラウンドノイズではない」部分を除くため、典型的なノイズ部分の振幅に対して一定値以上の値となっている部分にゼロを満たした。このような前処理を行った波形データに対して ACF を計算し、これをその日の結果とする。同様の処理を、考察している期間の全データに対して施し、これらを比較する。この方法を、能登半島と周辺の京大防災研の定常観測点のデータに適用した (図 1)。

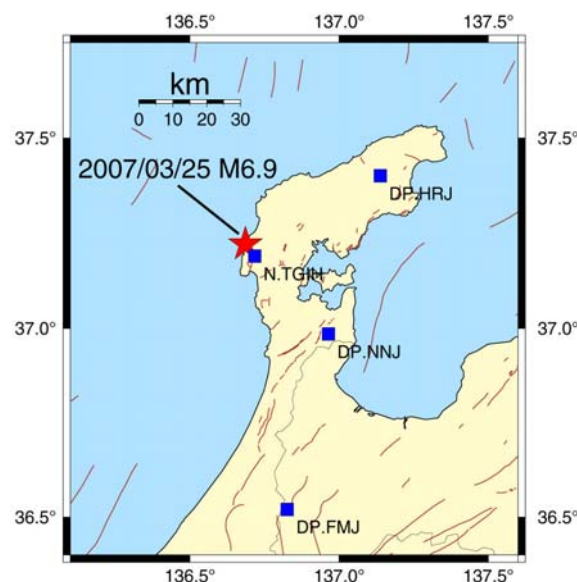


図 1 : 能登半島地震の震央と観測点の分布

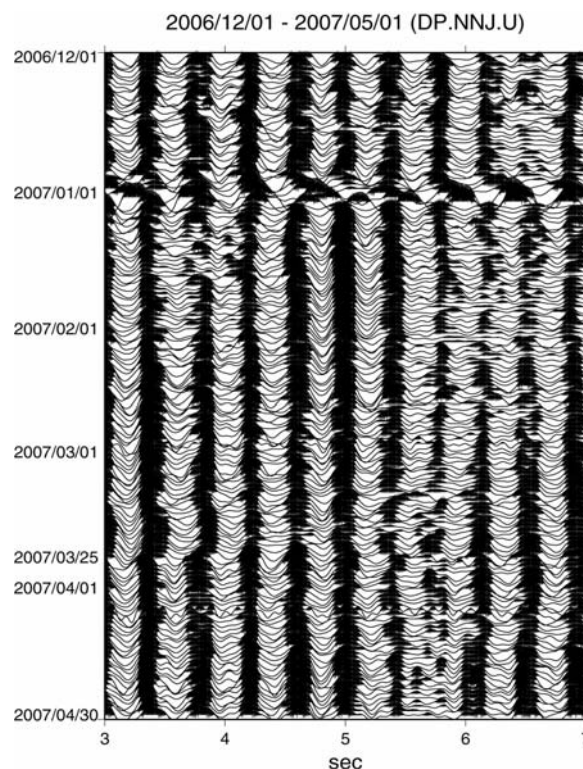


図 2 : DP.NNJ 観測点における、自己相関関数の 5 ヶ月間の変化。横軸はラグタイムを表す (大見・他, 2007, 連合大会 Z255-P052 より)

2-2. 結果

比較的安定した結果の得られた観測点のうち、京大の七尾観測点(DP.NNJ, 本震の震央距離 36 km)の例を図2に示す。それぞれの観測点ごとに ACF の形は異なるが、それぞれ、時間的には安定したいくつかのコヒーレントなフェイズが見える。DP.NNJ では、ACF には周期 0.4 秒程度のフェイズが卓越している。そのうち、ラグタイム 3 秒から 4 秒付近に見えるフェイズは、本震の発生前後でラグタイムに「とび」が発生しているほか、本震の 2 週間ほど前から次第にわずかながらラグタイムが長くなり始め、地震とともに元に戻ったように見える。

3. 考察と課題

上に述べたように、解析した ACF には以下の 2 つの興味ある特徴、(1)各観測点毎に ACF の形は異なるが、時間的には安定したコヒーレントないくつかのフェイズが存在する、(2)特定のフェイズのラグタイムが地震前後で変化することがある、が見られた。(1)については、各観測点下での地震波速度構造を推定できる可能性を示している。すなわち、ここでは、一日毎の ACF を計算しているが、ACF が時間的に安定しているなら、長期にわたって ACF をスタックすれば微弱な反射波を捕らえることが可能になり、各観測点毎に反射地震記録を作成できる可能性を示している。(2)に見られる、ACF の特定のフェイズのラグタイムが変動する原因のひとつは、実際に地下の地震波速度構造が変化した場合である。一般に、ラグタイムが長くなるのは、考察している空間の地震波速度が低下した場合、短くなるのは地震波速度が増加した場合と考えられる。地震波速度の変化は、応力変化などのほか、水などの流体の挙動、さらには媒質の圧密状態の変化等によっても現れることが

予想される。水の挙動に関連する場合には、降水量との相関や、年周変化等が見られる可能性もある。むろん、これ以外のデータ処理上の理由による見かけ上の変化が現れる可能性もあるが現状では原因の特定には至っていない。

なお、今回の解析結果にも現れた、地震前後でラグタイムに「とび」が発生する現象は、Wegler and Sensenig (2007)によれば地震による応力変化がもたらす速度構造の変化によると解釈されている。また、地震前から地震波速度構造の変化が見られることが事実ならば大変に興味深い。

4. 次期計画への提案

上述のように、本手法を用いることにより、考察している観測点下の地殻構造の時間変化をモニタリングできる可能性がある。特に、一点の観測データの自己相関関数によるモニタリングが可能であるならば、現在展開されている微小地震観測網を用いた連続的な地殻構造モニタリングが可能になることになり興味深い。しかしながら、現状では、そもそも、なぜバックグラウンドノイズ部分で時間的に安定な自己相関関数が求められるのか、また、求められた自己相関関数が地下のどの程度の深さの情報を持っているのかなど、基本的な理解がまだ不十分である。そのため次期計画では本手法の有効性を検証するための基礎的な研究を行うことを提案したい。具体的には、高密度のアレイ観測を用いた比較観測等により、観測されているフェイズの特定作業を進めるほか、より多くの観測点における長期間の記録の解析を行うことにより、上記観測結果の信頼性を検討し、地震波速度構造推定、およびフェイズの時間変動要因の特定等を行うことをめざす。

間隙水圧観測を中心とする総合地殻活動モニタリング法の確立

京都大学防災研究所 加納靖之・柳谷 俊

背景：

地震発生やそれに伴う地殻の応答についての理解を深めるためには、地震にともなう応力変化を正確に測定することが必要である。応力自体はとても測定しにくい量であるが、線形間隙弾性理論にもとづいて、岩盤の間隙水圧変化を測定することができれば、間隙水圧がスカラー量であるという制約はあるが、岩盤と間隙水のあいだの力のつりあいから、応力変化に換算することができる。我々はこの考えにもとづき、神岡鉱山において、密閉したボアホールを使った間隙水圧測定をおこなってきた。そして、以下のことがわかった。

- ・ 間隙弾性理論は、堅い岩とクラックとで構成されるような場でも適用可能
 - ・ 岩盤の変形（ひずみ・応力）と間隙水圧は力学的にカップルしている
- ・ 密閉したボアホール井戸をつかえば、岩盤の間隙水圧を正確に測定できる
- ・ このような井戸では、間隙水圧は広帯域の応力変化センサーとなる
 - ・ 地震波：速度波形と比例。P 波成分のみに応答し、数 Hz という高周波数帯域まで記録可能。
 - ・ 地球の自由振動：微小な間隙水圧変化に対して十分な分解能をもち、この周波数帯域もカバーする。
 - ・ 地球潮汐：計算した地球潮汐ひずみにに対して位相おくれなし
 - ・ 大気圧変化による载荷：周期数十日まではフラットな応答
 - ・ コサイスミックなステップ：震源（+井戸近傍）の応力・間隙水圧変化

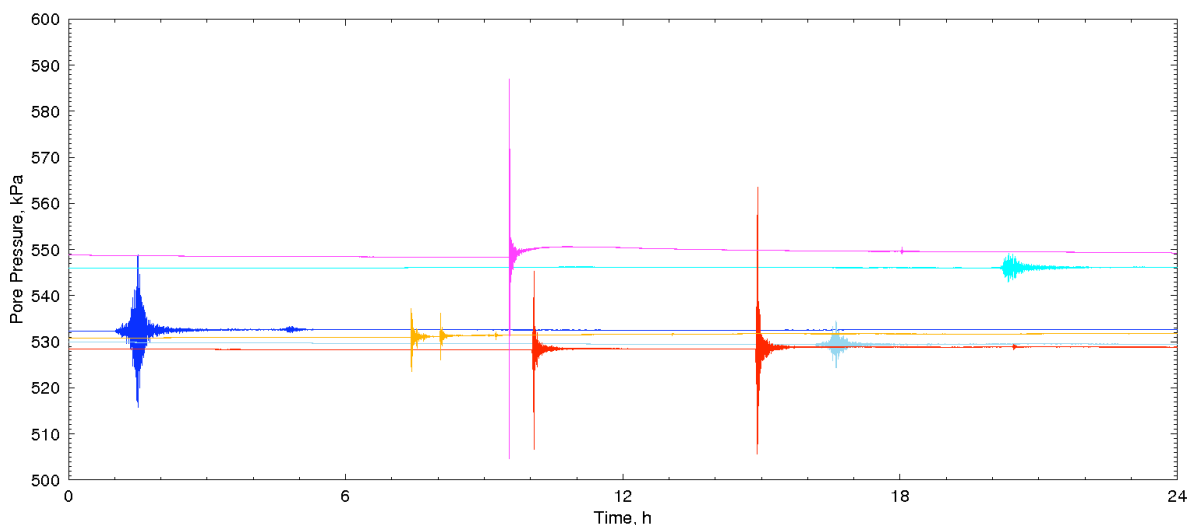
目標：間隙水圧を考慮した岩盤の応力変化モニター手法の確立

地殻活動の評価のために、応力変化をモニターすることはきわめて重要である。神岡での間隙水圧観測を拡張し、ひずみ観測と組み合わせることで、岩盤の応力変化のモニターをめざす。

方法：(1-a) 多成分ボアホールひずみ計との同位置での並行観測

(1-b) 他の地殻変動観測との相互参照

(2) アレイ化：震源か観測点効果かをみわけけるために重要



図．神岡鉱山での間隙水圧測定による地震波形

地震活動予測手法の共通評価基盤構築

(発表担当：鶴岡 弘 (東大地震研))

地震活動の予測は古くて新しい問題である。大森房吉の余震の減衰式に始まり、地震活動については、これまで多くの予測手法が提案されてきた。一方、日本国内では阪神・淡路大震災以降に地震観測網が飛躍的に整備され、現在陸域ではマグニチュード1.5程度以上の地震はもれなく震源決定され、一元化された地震カタログに記載されて誰でも利用することが可能となっている。これに先立って、統計地震学は尾形による点過程に基づく定式化を契機として飛躍的に発展し、定量的な地震活動の予測手法が進展するとともに、予測された活動からはずれた活動を異常とみなして大地震の前兆現象を捉える提案など、赤池情報量基準を用いた客観的な手法が開発されている。これらの手法が、大量の地震データに適用され、様々な成果が生まれている。このように書くと、あたかも地震活動予測の研究には何ら問題がなく、それぞれが個々に探求を進めれば良いかのように聞こえるであろう。しかし、個々の手法が高度化されたため、互いに追試を行うことが容易ではなくなっている。このため、様々な手法が提案されるのみで、地震活動予測研究の分野外はもちろん、分野内でも各手法の評価が困難となっている。それぞれの手法は、論文に客観的に記述されているが、実際に地震データに適用する場合には、様々なパラメータが必要となる。例えば、時・空間からどのようにデータを切り出すのかという、解析の最初の部分を取ってみても、人それぞれである。論文で選ばれたパラメータとは異なる値を設定した場合に、結果がどう変わるは、記述されていない場合がほとんどであり、予測手法が有機的に結合していない現状がある。

アメリカを中心としてTesting Center of Regional Earthquake Likelihood Models、ヨーロッパを中心としてEuropean Framework for Testing Earthquake Forecastsなるプロジェクトがすでにスタートしており、本研究により日本でも同様なプロジェクトが立ち上がることによって世界規模で地震活動予測研究の活性化が期待される。日本においては、地震予知のための新たな観測研究計画（第2次）において地殻活動の予測シミュレーションとモニタリングのための観測研究の推進が図られている。そのなかで地震活動をどのようにシミュレーションに取り込むかがキーとなっているが、本研究はそれに対して大きな役割を果たすと考えられる。

地震活動予測手法は、上記で述べたように、個々の研究レベルにおいて高度に専門化され、他の研究者がその高度なレベルに達することが困難な状況にある。この状態を打開するためには、地震活動予測に関するインフラ整備が重要であり、これまで開発された地震活動予測手法を共通の基盤に載せ、アルゴリズム間の相互評価が可能な共通評価基盤を構築することが本研究の目的である。まずは、共通基盤となるシステムを完成させ、相互評価を行い、さらに、将来的に分野外の研究者が自由に評価できるように設計を行う必要があると考えている。また、そのための地震カタログ等のデータベース整備も重要である。

この研究計画は、2006年1月に葉山で開催された第4回国際統計地震学ワークショップ (Ogata et al., 2006) に参加した日本人研究者を中心として発案されており、日本の地震活動のための共通評価基盤の標準となることを目指す。

地震切迫度評価法の研究

地震切迫度評価研究グループ [発表者：桑原保人（産総研）]

1. はじめに

内陸地震については、その発生間隔は千年以上、過去の地震活動履歴の時間精度も千年オーダーで、今後 30 年程度の地震発生を予測することは現実的ではない。このような現状を改善するためには、活断層の活動履歴のデータにのみ基づく統計的手法では根本的に限界がある。また、現状では、活動履歴データそのものが得にくい活断層も多く存在し、そのような活断層では長期予測そのものが成り立たないと言える、我々は、内陸活断層が現在どのような状態になっているかを調べ、適切な物理モデルを導入することで内陸地震の発生予測精度が向上できるのではないかと考えている。

2. 研究内容

ここでは、古地震データのみに頼らない地震切迫度評価技術の開発を目標とする。そのために、地震サイクルの特徴とステージ区分に関する研究を、岩石破壊・物性実験、マクロな数値実験、大地震のデータ解析を通じて実施する。また、切迫性の現状把握のため、複数のテストフィールドを設定し、応力場の評価、モニタリング、地震統計解析や、近傍の地震・火山活動・その他の地殻変動イベントとの相互作用の研究を行い、可能な古地震データで検証しつつ、地震サイクルステージ判別を試みる。

一方で、近い将来活動が懸念される活断層については、詳細な 3 次元地下構造、断層のすべりの構成則、応力場をすべて考慮した地震発生シミュレーションにより、地震発生の時間予測の手法の研究を行う。現状では、断層の地下のジオメトリーを推定することは不確定性が伴うことが多いが、地質図、微小地震活動、地震波トモグラフィー、反射法断面、重力等の情報を総合的に利用し、可能な構造モデルの絞り込みは可能であると考えている。シミュレーションによる予測をおこなう際には、いくつかの他の可能な構造について計算を実行し、アンサンブル予測の方法をとることが現実的であろう。また、結果に大きく影響を与えそうな構造については、より詳細な構造探査を行いながら構造モデルを改訂していく、というフィードバックをかけていくことが望ましい。

神岡地下サイトの総合観測に基づいた、地震・地殻変動観測手法の研究

神岡地下観測グループ(参加者(仮) 地震研 新谷・佐野
京大理 早河・東・福田、京大防災研 森井・加納、
海洋研 今西、国立天文台 田村、宇宙線研 大橋、他)

研究の背景

- ・神岡地下サイト(地下 1000m)での世界最高精度での総合観測
(レーザー歪み計・超伝導／絶対重力計・広帯域地震計・間隙水圧・宇宙線観測)
- ・歪み、重力の co-seismic 成分・長周期成分に地下水の影響がみられる

研究の目的

- ・大深度地下の総合観測による地下水の挙動の把握
- ・上記を用いた長期地殻変動観測精度の向上(歪み集中帯におけるトレンド観測等)
- ・跡津川断層の観測(地震・地殻変動、地表GPSとの比較)

実施内容

- ・地下水の入口(雨量)と出口(湧水量)の測定(池ノ山・・・比較的孤立した系)
- ・間隙水圧の多点観測、坑内ハイブリッド重力観測(直接・間接測定による地下水の3次元的な把握)

特徴・メリット

- ・地殻変動観測でしばしば問題となる地下水の動きを地下深部から「重力」で連続観測
- ・大深度地下の低雑音環境における高精度観測
(地表からの短周期雑音が少ない→モデルの単純化)
- ・多種の物理量の観測手段(ミューオン等宇宙線の観測も)の活用

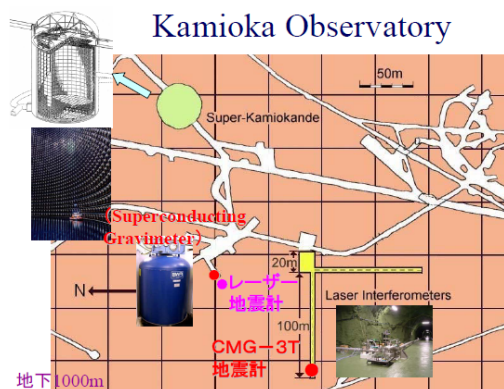


図1 神岡地下サイトにおける歪み・重力・地震の観測

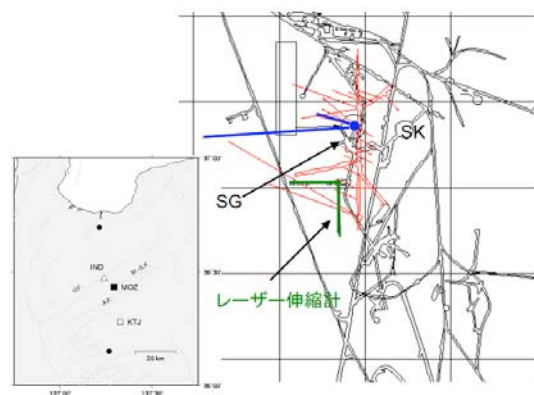


図2 間隙水圧の観測点(図1の直上90 m)

大深度(km 級)における地殻応力の定量的評価技術の開発

BABHY 開発 Gr. 伊藤高敏(東北大・流体研), 伊藤久男(JAMSTEC), 小村健太郎(防災科研)

水圧破碎法は、大深度における地殻応力の現位置計測を可能とする唯一の実用的手段として従来から広く用いられてきた。しかし、この方法では、坑井直交面内における最大応力 S_H を評価する要領に致命的な欠陥があり、そのままでは S_H の評価が不可能であることがわかっている (e.g., Ito et al., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., 1999, Ito et al., Earth Planets Space, 2006)。その原因は、従来の仮定に反し、(a) 残留き裂開口幅の存在によって、き裂の開口以前から坑井水圧がき裂内に浸入してしまうこと、(b) 加圧システムのコンプライアンス C (システム内の水圧を単位量だけ増加させるのに必要な水の体積、換言すると剛性の逆数) が大きすぎるために、き裂開口の影響が坑井水圧の変化挙動に現れにくいことにある。これらを考慮して大深度での計測を可能にすべく我々は、坑井底部に直径の小さい試験孔を新たに掘削して、その中で水圧破碎を実施するという新方式 (Baby Borehole Hydro-fracturing, BABHY (ベビー)) を提案した (Ito et al., Proc. Int. Symp. Rock Stress, 2006)。また、同概念の具体化を進めており、既に深度約 1000 m までの測定であれば、ほぼ実施可能なレベルにある。

その新方式の要領は Fig. 1 の通りである。すなわち、本体となる坑井 (マザー孔) の底部に直径数十ミリで長さ 1~2 m の試験孔 (ベビー孔) を新たに掘削し (Fig.1(iii))、その中で水圧破碎を実施する (Fig.1(vi))。これにより、マザー孔の大きさと無関係に加圧システムを小型化し、問題のコンプライアンス C を極小にできる。また、特に大深度化に適した点として、(a) ベビー孔掘削用のダウ

ンホールモータ及びストラドルパッカー装置の昇降は、いずれの場合も掘管内部を通路として行うので抑留の危険がないこと、(b) ベビー孔掘削時のコアを検査することで、天然割れのない、水圧破碎に適した試験区間を事前に選定し、その場所にストラドルパッカーを正しく設置でき、かつ、しばしば障害となるコア深度とロギング深度のずれのような問題は起きないこと、(c) 揚降管することなく、自由落下ないしワイヤーラインで試験装置の上げ下ろしを行うので、大深度でも測定時間を極小にできること、などが挙げられる。

上記のような特長を踏まえれば、技術開発をさらに進めることで km 級への対応も十分期待でき、地球物理現象の解明に必要な大深度における地殻応力の定量評価が初めて可能になると考えられる。また、ベビー孔を設けて、その中に測定装置を設置するという技術は、応力測定のみならず、ひずみ計や地震計など他の測定機器の設置方法としての応用が期待できる。一方、「ちきゅう」に代表される科学掘削では、コアを回収することが大命題である。しかし、深度がおよそ 1 km を越えるとコア掘りが非常に困難になるというのが実情である。ベビー孔掘削によるコア回収技術は、そのような問題の解決策になり得るものである。しかしながら、本方式を km 級の大深度対応とするためには、ベビー孔をコア掘りする際の高比重泥水対策、測定システムの耐熱化、ジャイロを使った方位測定法、などのさらなる技術開発が必要である。

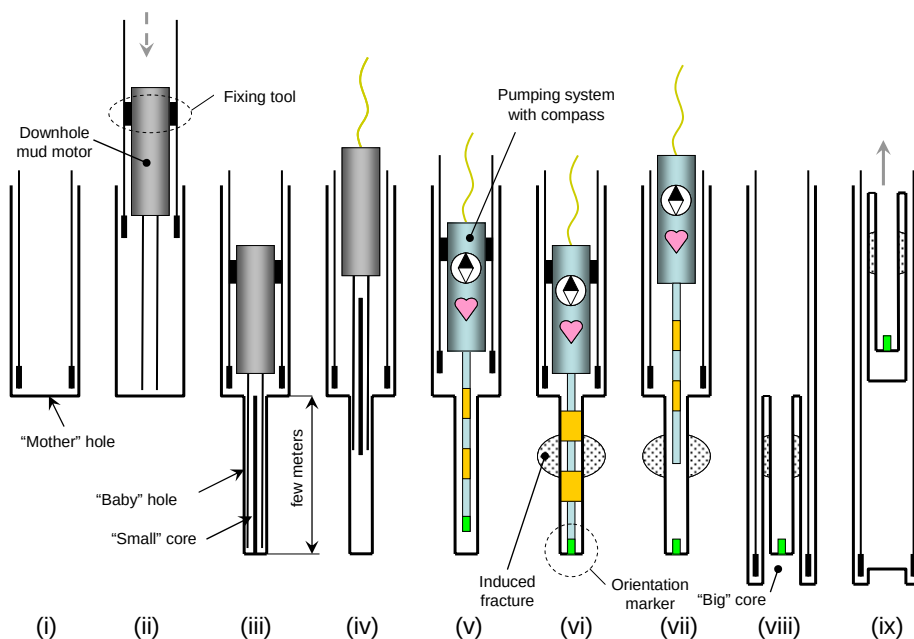


Fig. 1 Proposed new strategy: BABHY.

企画部提案

東京大学地震研究所 吉田真吾

5年前の検討シンポジウムで、企画部案として以下の3つを重要課題として提案した。

- (1) アスペリティ・スロースリップ系
- (2) 歪集中帯の総合的研究
- (3) 低周波地震・微動の解明

その後の地震予知研究により、(1)については、アスペリティの実体は不明な点が残ったままであるが、アスペリティが保存されることはほぼ確かだとわかるなどアスペリティモデルの検証がなされ、(3)については、当時、深部高圧水の移動によるのではと推測されていたが、実は最近発見されたプレート境界深部のスロースリップによるらしいことがわかった。その結果、予想外に(3)が(1)と融合されて、プレート境界の描像が刷新された。(2)については、下部地殻の局所的塑性変形により内陸断層で応力が増大するモデルが提案され、様々な観測データをうまく説明できているように見える。

シミュレーションにより固着やすべりを予測し、データと比較することによりパラメータなどを随時更新していき、最終的には大地震発生を予測できるようになることが、地震予知計画の長期的目標である。次期計画では、プレート境界に関しては、いくつかの地殻活動の予測を実際に行う段階に入れるかもしれない。例えば半年に1度程度（大地震に比べるとはるかに頻繁に）起こる深部スロースリップ、余効すべり、余震などを予測しその予測結果を観測により検証することができるのではないだろうか。大地震の発生予測はまだ先であるが、スロースリップの時空間的發展を予測することは、アスペリティの歪蓄積を予測しているわけなので、その予測精度を高めることが大地震の予測シミュレーションにもつながっていくはずである。内陸地震に関しては、変形速度が遅いこともあり、プレート境界地震の研究より1ステージ遅れて進んでいるような状況で、次期計画で歪蓄積モデルの検証を行うことになるだろう。既に提出されているモデルはかなり有力と思われるが、それに匹敵する新たなモデルが提案されることも望まれる。また、既に簡単なシミュレーションは行われているので、内陸での地殻活動に関しても何らかの予測を開始するよう努めるべきだろう。

現計画では、主に理解を深めるための基礎研究を行っている計画推進部会がパラメータ分布や構造の情報をアウトプットとしてシミュレーション部会に渡し、それらに基づいてシミュレーション部会が予測を行おうとしている。しかし、各計画推進部会でも特定の地殻活動現象に着目してモデルを求め、有効性を確かめるために予測まで行い、その予測モジュールをシミュレーション部会に渡す、という進め方もありうる。潮汐応答など細かい要因をいきなり統合システムに取り込むのは非効率的だと思われるからである。また、シミュレーションとモニタリングの融合が不可欠であろう。