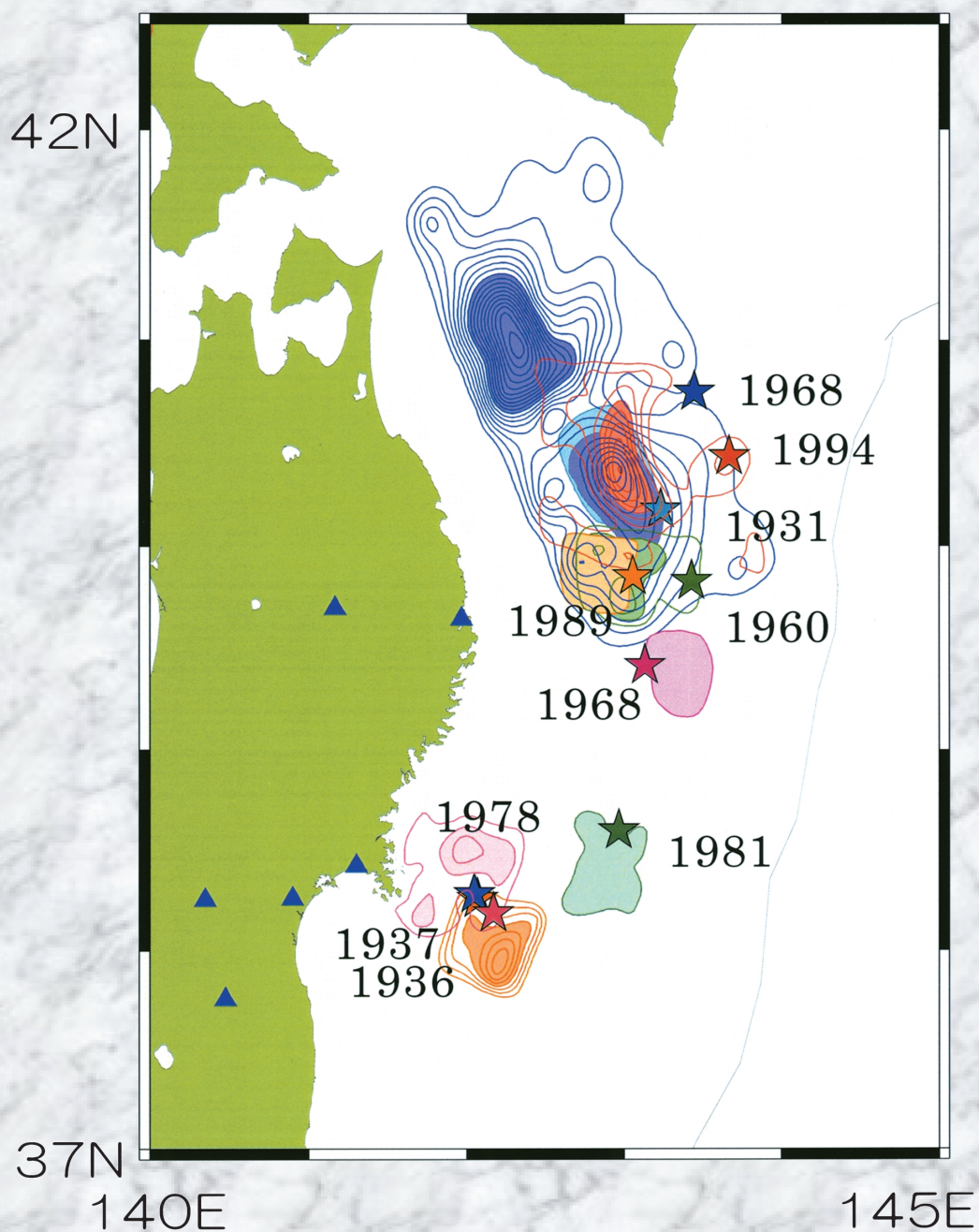


日本の地震予知研究

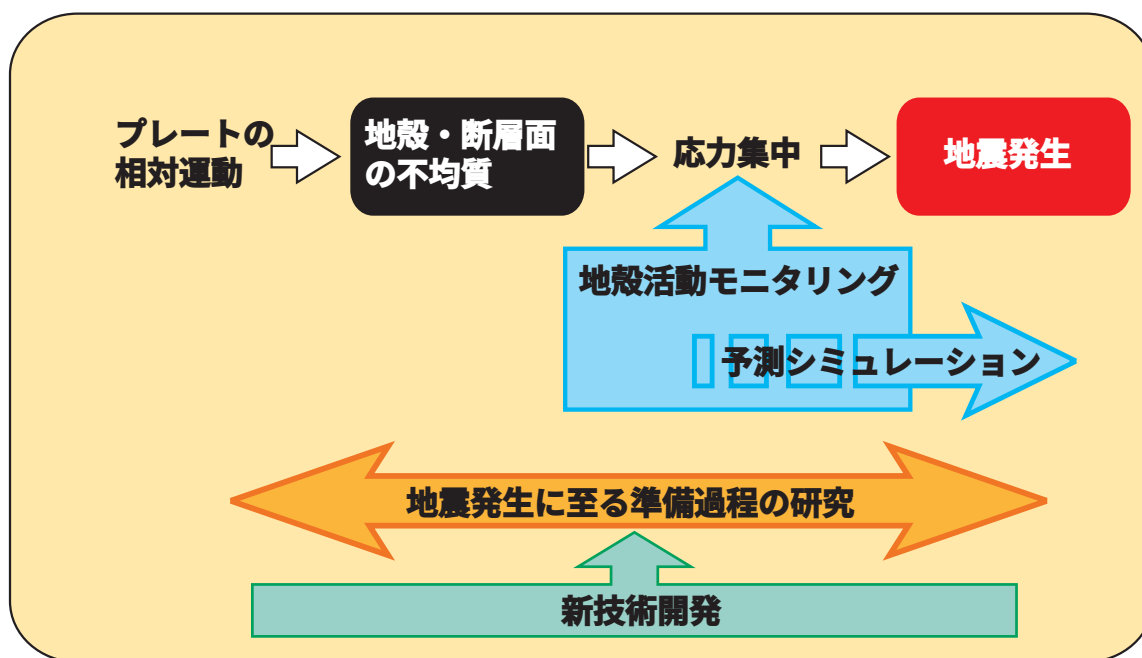
地震予知研究協議会



平成15年4月

地震予知のための新たな観測研究計画

日本における地震予知研究は、昭和39年以来7次にわたる測地学審議会の建議に沿って推進されてきました。しかし平成7年1月の兵庫県南部地震に対し地震予知研究が十分役立っていないのではないかという反省から、これまでの地震予知計画の見直しと進捗状況の総括的評価をおこない、平成10年8月に地震予知のための新たな観測研究計画の推進についての建議が行われました。建議にもとづいた新しい5カ年計画（以下、新計画）は平成11年度から始まりましたが、その計画は、前兆現象の検出に重点をおいていたこれまでの方針を改め、地震発生に至る準備過程の研究成果をもとに、充実した観測網により得られる地殻の状態と活動に関する情報を用いて（地殻活動モニタリング）、地震の発生とそれに至る過程を定量的に予測すること（シミュレーション）を目指しています。新計画のスタートから3年半が過ぎましたが、本パンフレットではその間の成果を紹介しています。



新計画の考え方

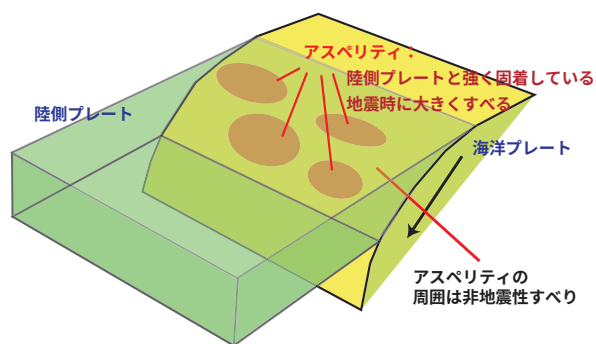
新計画前半の成果

新計画前半では、地震発生の基本的な仕組みを明らかにする重要な知見が得られています。ゆっくりしたすべりや変形により断層の固着した部分に応力が蓄積されて地震が発生するという性質です。しかしながら、得られた知見は仮説の段階を脱しておらず、これらの仮説を検証することが今後の課題であると考えられます。

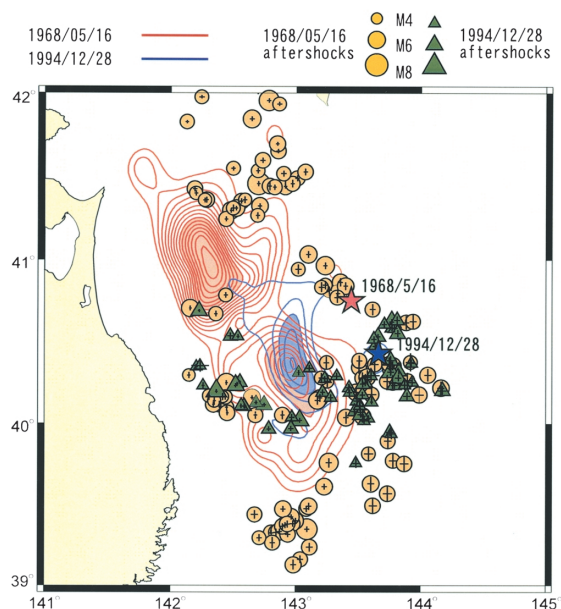
アスペリティの保存性

三陸沖の太平洋プレートと陸側のプレートの境界の断層では、強度が大きくしっかり固着している領域（アスペリティ）はあらかじめ決まっており、その領域の周囲では、断層は様々なやり方でゆっくりすべっていることが分かってきました。内陸の断層についても、大地震の発生前に、断層面内のかなりの部分が既にすべっていることを示唆する観測結果が得られました。

また、アスペリティの場所は地震発生ごとに変わるのではなく、毎回同じである可能性が高いことがわかりました。つまり、地震発生のプロセスには再現性があり、地震の予測可能性を強く示唆しています。右図は、1994年三陸はるか沖地震のアスペリティは、1968年十勝沖地震のアスペリティの一つが再び破壊したものであることを示しています。三陸沖については、さらに古い地震の波形記録を活用することにより、やはりアスペリティの位置が毎回同じであることが明らかになりつつあります（表紙の図）。



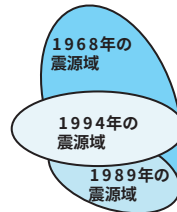
三陸沖のアスペリティと余震分布。赤いコンターは1968年十勝沖地震、青いコンターは1994年三陸はるか沖地震でのすべりの大きさを表している。余震はすべりの小さい部分で発生している。



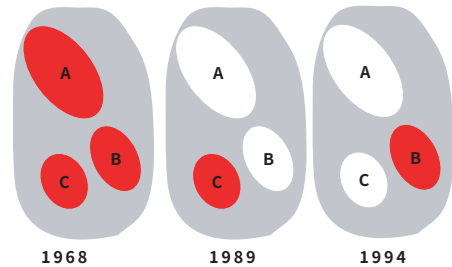
アスペリティを単位として地震を理解する

従来は余震域から大地震の震源域を推定していました。1968年十勝沖地震の震源域では右図に模式的に示されているように、1968年、1989年、1994年の地震の震源域が複雑に重なっていました。このことを理由に地震発生はランダムであるという主張もなされました。しかし、新しい見方では、この地域は3つのアスペリティからなり、1968年には3つのアスペリティが同時に破壊したのに対し、1989年、1994年の地震では、1つのアスペリティが破壊したに過ぎないと推定されています。このことは、地震を一つの単位として見るのではなく、アスペリティを単位として見るのが、より本質的であることを示します。

従来の見方



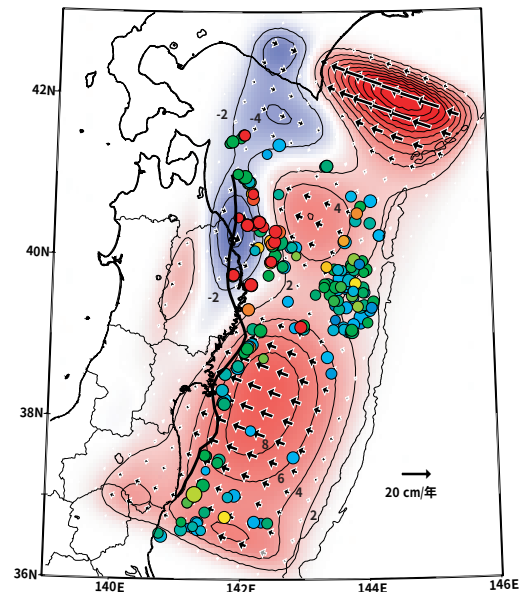
新しい見方 —破壊したアスペリティの組み合わせの違い—



大地震はアスペリティを単位として発生する。地震発生時のアスペリティの組み合わせにはいろいろな組み合わせがあり得る。

ゆっくりすべり分布の推定 —三陸沖相似地震—

三陸沖における相似地震の研究により、GPS とは独立の方法でゆっくりすべりの時空間変化が明らかになってきました。相似地震により推定されたすべり速度分布（色の付いた○で示す）を右図に示します。陸上のGPSにより推定された固着域の周辺（濃い赤色の領域）ですべり速度が大きい（赤丸になっている）ことが分かります。GPS 観測とは独立な方法でプレート固着の程度をモニターすることができたことは特筆に値します。この手法を用いることにより、GPSではわからなかった陸から離れた地域のゆっくりすべりの時空間変化を、精度良く推定できる見通しがつきました。



コンター：GPSデータから推定されたプレート間すべり速度偏差（1996年4月～1999年3月の平均）
-50 -15 -10 -5 0 5 10 15 50
すべり過剰 すべり不足

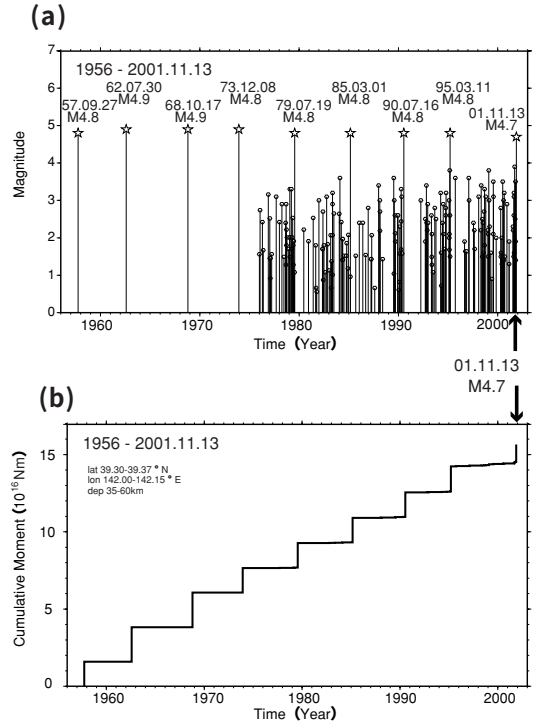
丸印：相似地震データから推定されたプレート間すべり速度（1992年4月～2000年7月の平均）
0 5 10 15 20
cm/年

三陸沖のゆっくりすべり分布。
GPSによるすべり分布の推定は西村（2000）による

釜石沖の繰り返し地震と予知の成功

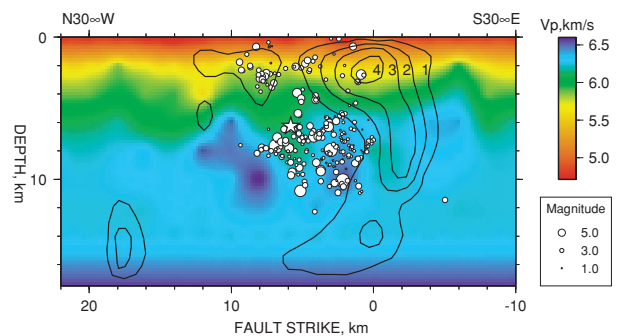
アスペリティが繰り返し破壊していることを示すより顕著な例が、岩手県の釜石沖で見つかりました。ここでは、アスペリティの破壊が1957年から1995年まで、ほぼ周期的に8回繰り返したことが明らかになりました。その活動に基づき、次の地震は、2001年11月末までに99%の確率で発生し、その大きさは $M4.8 \pm 0.1$ であると1999年に予測されていました。2001年11月13日に予測通り $M4.7$ の地震が発生しました。アスペリティのサイズは1km程度と小さいですが、1995年と2001年の地震のすべり量分布がほぼ一致することが分かりました。

釜石沖における繰り返し地震。発生した個々の地震のマグニチュード（上）と累積地震モーメント（下；放出されたエネルギーの積算に相当する）の時間変動を示したもの。



内陸地震のアスペリティ？

内陸地震におけるアスペリティとゆっくりすべり領域との関係はどうなっているのでしょうか。2000年鳥取県西部地震では、すべり量の大きなところは地震発生前に群発地震が発生したところの周りにあることが分かりました。本震発生前に群発地震発生域で応力が既に解放されていた可能性を示唆しています。内陸地震についてもゆっくりすべりがアスペリティに応力集中を起こすという解釈が可能です。



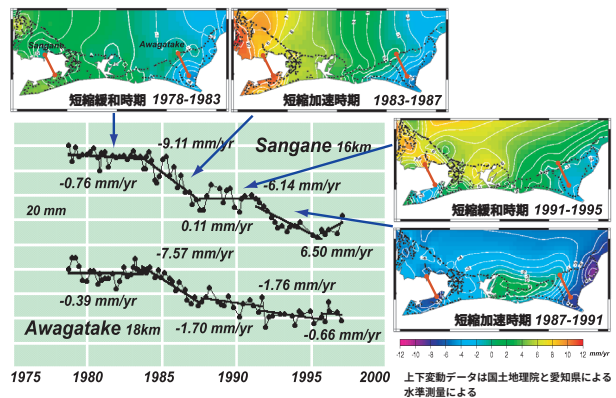
2000年鳥取県西部地震の断層面上におけるすべり量（コンター）、P波地震波速度（色）、前震の分布（白丸）。すべり量分布は岩田・関口（2002）による

内陸断層の深部の低比抵抗帯と低周波地震

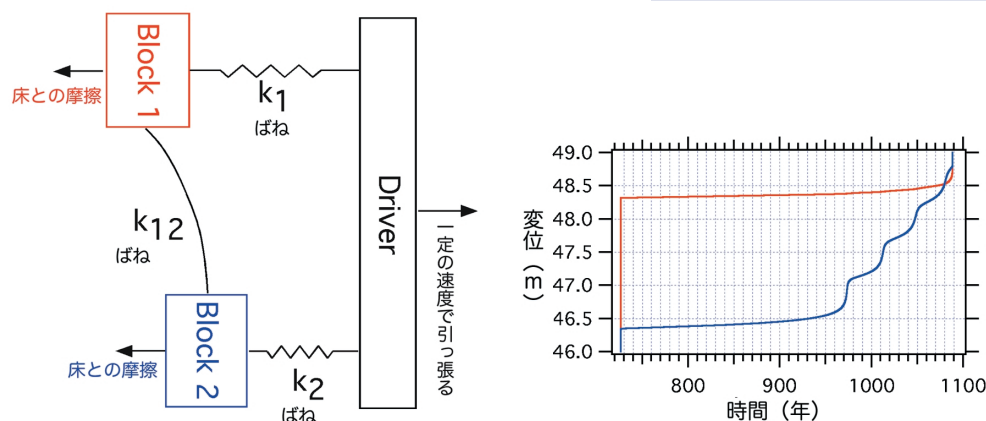
2000年鳥取県西部地震の集中的研究によって、内陸の断層の下部地殻への延長部付近で、低比抵抗帯や低周波地震が発見されました。これらの観測結果は、断層の直下の下部地殻では、周囲に比べて水が豊富に存在する可能性を示しています。一つの可能性としては、断層の下部地殻への延長部が水の通り道になっており、水の存在下で断層の延長部はゆっくりしたすべりを起こし、断層に応力蓄積が行われることが考えられます。あるいは、断層の直下において下部地殻の岩石が水の存在下で流動的な変形を起こし、その直上の上部地殻に応力を蓄積する可能性も考えられます。まだはっきりしたメカニズムはわかりませんが、低周波地震は内陸地震発生ひきがねの謎を解く鍵になるかもしれません。

東海地域における間欠的な非地震性すべり

東海地方では、国土地理院のGPSデータに、異常な動きが検出され、プレート境界でのゆっくりすべりが発生していると解釈されています。一方、過去の水準測量のデータなどの注意深い解析から、同様な変動が過去に繰り返し起きていた可能性があることがわかりました(右図)。又、摩擦特性を考慮した簡単な数値シミュレーションにより、断層面の性質が安定と不安定の間断的な状態にあると、観測されたような間欠的な非地震性すべりが発生することが示されています(左図)。



東海地方の2点間で行っていた距離測定の結果とそれぞれの時期における地盤の上下変動。距離の変化にも地盤の上下変動にも揺らぎがあった可能性が示されている。

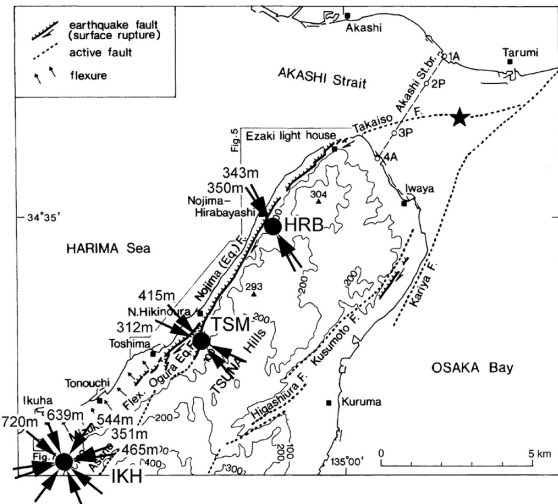


まさつの異なる2台のブロックを左図のようにばねでつなぎ、右向きに引っ張るシミュレーションを行う。赤いブロックは地震を起こすブロック、青いブロックはゆっくりすべりを起こすブロックとすると、青いブロックは時間とともに間欠的にゆっくりすべるようになる。

断層の強度

断層への応力蓄積過程に加えて、断層の強度を知ることでも大変重要です。地震は、断層に加わった応力が断層の強度を越えたときに発生すると考えられるからです。しかし、アメリカでもサンアンドレアス断層で長年研究が続けられていますが、断層の強度が大きいのか小さいかという問題は解決されていません。特に沈み込むプレート境界における断層強度の推定は困難で、内陸における観測研究に期待されています。

1995年兵庫県南部地震に関連しては、重要な結果が得られています。野島断層における応力測定がなされ、その結果、断層のごく近傍でせん断応力が小さいことから、断層は、強度の大きい部分（アスペリティ）が局所的に分布しているものの全体的には強度が小さいというモデルが提出されました。

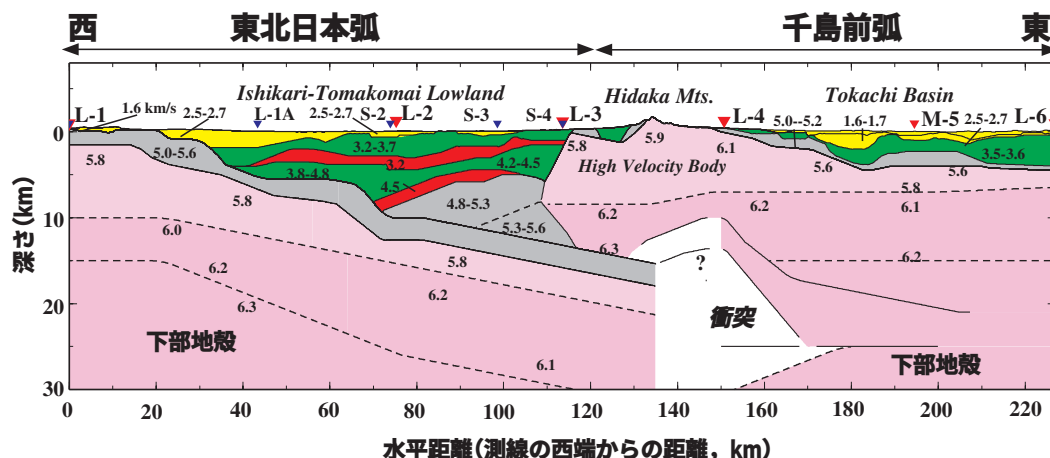


野島断層における応力測定結果。矢印の向きが最大圧縮主応力の向きである。向きが断層と直行していることから、断層面はせん断応力を支えられないと考えられる。

内陸の断層の深部構造 —下部地殻と上部地殻の境界の調査—

プレート境界と違って、内陸の断層の深部がどうなっているかはまだよくわかっていません。

この問題を明らかにすることなどを目的として、日高地方周辺において大規模な地殻構造探査が行われました。この地域では、千島弧の地殻が東北地方の地殻に衝突して上下に裂けていると考えられています。地殻構造探査により日高地方の主断層につながる西上りの反射面が地殻深部に見つかりました。



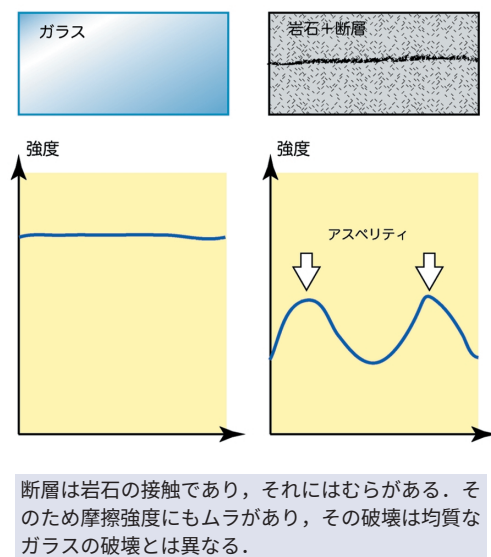
北海道日高山脈を横切る地殻の地震波速度構造。人工地震を用いた地殻構造探査によって推定された。数字はP波の速度。

地震は予測不可能な現象か？

将来発生する地震の場所・規模・時期を予測することを地震予知といいますが、その予測は可能なのでしょうか。

地震とガラスの破壊とは違う

「地震は岩石の破壊現象である。破壊現象の予測は一般的には極めて困難である。したがって地震の発生予測も極めて困難である。」これは、地震予知に対する典型的な批判の一例です。確かに、ガラスのような均質な物質の破壊現象の発生予測は一般的には難しいと考えられます。しかし、地震は、ガラスではなく不均質な岩石内の破壊現象です。したがって、弱い部分から順に破壊が発生するため、破壊の進行をモニターすることが可能です。



強い部分に力を集中して初めて地震は発生する

ガラスの破壊の予測が難しいのは、一旦破壊が始まると、たとえそれが非常に小さなものでも一気に急激な破壊に成長するためです。それは、ガラスは弱面がなく均質なため、破壊を起こすのに必要な力（応力）はそもそも大きく、かつ、破壊の進展を妨げる働きをする強度の不均質は小さいためであると考えられます。

断層は地震が始まる前にゆっくりすべり始めている

地震は断層面が急激にすべって地震波を放射する現象です。断層面のまさつには不均質性が大きいので、応力が増加していくとまさつ強度の弱い場所からゆっくりすべり始め（非地震性すべり）、強度の大きい領域（アスペリティ）に応力を蓄積していきます。それまですべっていなかった領域でも、応力が高まるとすべりが発生します。すると、残された領域への応力蓄積の速度がますます大きくなります。この様に加速度的に大地震発生へ向かうと考えられます。このように、地震は突然発生するのではなく、ゆっくりとした準備過程を経て発生します。この準備過程の存在が、地震が予測可能であると我々が考える大きな根拠です。

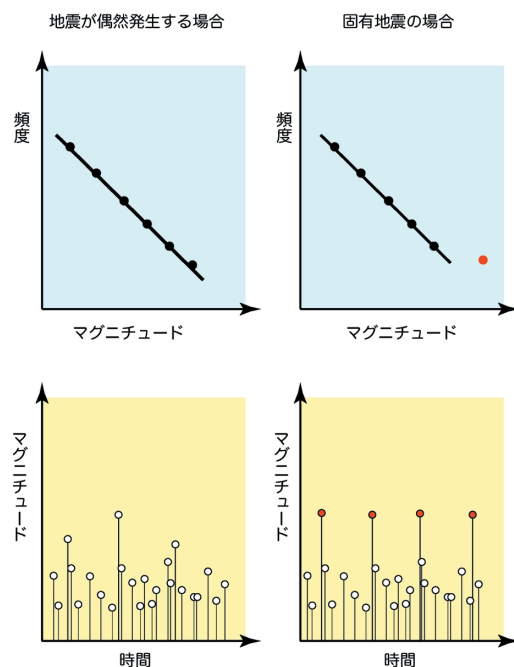
東海地震予知体制

地震の前にゆっくりすべり始める現象が実際に発生した場合、観測により最もとらえられる可能性の高い地震がいわゆる「東海地震」です。静岡県を中心とした東海地方では、非地震性すべりを早期に検知することにより、大地震の発生を予測しようとする体制が、実際に取られています。

地震は全くでたらめに起きているか？

大地震を含め地震は偶然に発生しているという考えがあります。大地震はいつでも起こる可能性があり、地震の発生予測は原理的に不可能であるという主張です。この考えの根拠は、地震の規模別頻度分布が、「偶然に支配されるモデル」により説明可能であるということです。しかしながら、ある領域における最大級の地震は、より小さな地震から得られた分布に従わないことが分かっています。最大級の地震は、特別なものであり、偶然発生したのではないということです。

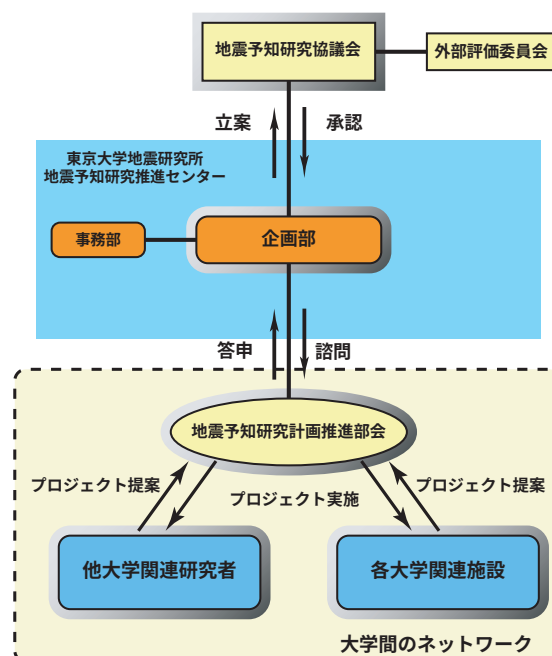
また「偶然に支配されるモデル」は、周期的な地震の発生を否定しますが、周期的な活動があることは昔から知られています。前述の釜石沖の地震はこのような周期的な性質に注目して発生予測が行われ、予測どおり地震が発生しました。これが、地震は予測可能であると我々は考えるもう一つの根拠です。



地震が偶然に発生する場合には頻度とマグニチュードは左上の図のような関係になる。しかし例えば海溝沿いの地震では、右上の図のようになり、最大規模の地震だけが特別な地震であるように見える関係を示す。

大学の地震予知研究体制

平成12年4月1日、大学の地震予知研究体制が一新されました。「予知研究体制をより開かれたものとして広く学際的な分野からの英知を集めること、果敢で明快なリーダーシップを発揮すること、多くの研究者が参加できること」という目的のもと、新たな地震予知研究協議会が発足しました。新体制の協議会は「大学の地震予知研究の方針を決定する意志決定機関」と位置づけられています。研究計画の立案と実行を機能的に行うために、協議会の下に企画部と計画推進部会が置かれています。さらに、研究計画の進捗状況と結果の評価を行うため、協議会とは独立の「外部評価委員会」を置きました(図参照)。



新体制のかなめとなる企画部は、大学の地震予知研究が整合性のとれた合目的なものとなるように、地震予知研究の全体計画をまとめます。そのために計画推進部会を組織し大学の研究者からのプロジェクト提案を受けるとともに計画の進捗状況を常時把握し、計画全体の舵取りを行います。さらに、大地震発生時の緊急対応や補正予算等の緊急予算のとりまとめを行い、協議会に連絡して予算要求を行います。

研究計画の実施にあたる計画推進部会には現在8つの部会があります。

- | | |
|-------------------|-------------------------|
| 1) 「定常的な広域地殻活動」 | 2) 「準備過程における地殻活動」 |
| 3) 「直前過程における地殻活動」 | 4) 「震源過程と強震動」 |
| 5) 「地殻活動監視システム」 | 6) 「地殻活動シミュレーション手法」 |
| 7) 「観測技術開発」 | 8) 「過去の大学地震観測網のデータベース化」 |

おわりに

本パンフレットでは、ここ数年において飛躍的に進んだ地震発生の基本的なプロセスに関する理解を、具体的な観測例に基づき、分かりやすく紹介しました。ゆっくりした変形により断層の固着した部分に応力が蓄積されて地震が発生するという共通の性質は、基本的に地震の予測可能性を示唆しています。得られた知見の中には、これまで海外において地震の予測が不可能性であることを示すものとして報告されていた重要な結果を、注意深い研究によりくつがえしたものもいくつかあります。このことは誤った先入観がデータの解釈を誤らせる危険性があることを明瞭に示しています。ここ数年で得られた成果についても、厳しい目で検証を行っていくことが極めて重要であると考えられます。

地震予知研究協議会は、これまで、大学間における地震予知研究の有効な推進を図ることを目的として活動してきました。日本の地震予知研究において最大のマンパワーを持つ大学の研究組織を統括し、今後は日本の地震予知研究全体の進展のためにさらに幅広い活動を行うことが期待されていると考えています。

地震予知のように長期的な努力を要する研究においては、学問の現在の水準と今後の方向をわかりやすく社会に伝えることが特に重要です。このパンフレットがその一助になることを願っています。

地震予知研究協議会を構成する組織（平成15年4月）

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター
弘前大学理工学部附属地震火山観測所
秋田大学工学資源学部地球資源学科
東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター
東京大学地震研究所
東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設
東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻
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
京都大学防災研究所附属地震予知研究センター
鳥取大学工学部土木工学科
高知大学理学部附属高知地震観測所
九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター
鹿児島大学理学部附属南西島弧地震火山観測所

本パンフレットに用いたやや難解な用語

アスペリティ：プレート境界や断層面において固着が特に強い領域のこと。この領域が地震時にすべると、すべり量がまわりより大きくなる。

下部地殻：地殻を上下2分した場合の下側の部分。陸域の地震は、上部地殻内の断層のすべりにより発生する。下部地殻は高温なため、急激なすべりや変形は起こりにくいと考えられている。

規模別頻度分布：ある領域における地震の大きさ毎の発生回数の分布。大きな地震ほど数が少ない。マグニチュードが1小さくなると地震の数は10倍くらい増える。

地震と地震動：地震とは地下の断層面に沿って両側の岩盤が急激にすべって地震波を放射する現象である。地震による地面の揺れを地震動というが、マスコミ等では地震動のことも地震と呼ぶことが多い。

相似地震：波形が大変良く似ている地震のこと。同じ震源位置、すべり方をしていると考えられる。相似地震を用いてゆっくりすべりのすべり速度を検出する手法は、米国のサンアンドレアス断層において開発された。相似地震は、ゆっくりすべりの領域の中にある、同一のアスペリティの破壊によるものであり、相似地震のすべり量は、その周囲のゆっくりすべりのすべり量を反映する。

反射面：地震波を効率よく反射する面。そこでは地震波の速度が低い、やわらかい物質が面上に広がっていると推定されている。

非地震性すべり：断層面に沿って両側の岩盤が地震波を出さないでゆっくりとすべる現象。近年多くの実例が観測されるようになった。

地震予知研究協議会企画部
〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1
東京大学地震研究所内
電話 03-5841-5712

表紙に用いた図：過去の地震記録を解析して得た、三陸沖海溝型地震のアスペリティ分布。