

独立行政法人産業技術総合研究所
地質調査総合センター第18回シンポジウム

地質学で読み解く巨大地震と将来の予測 —どこまでわかったか—

平成24年1月12日(木)
秋葉原コンベンションホール



主催



独立行政法人
産業技術総合研究所 地質調査総合センター



独立行政法人産業技術総合研究所
地質調査総合センター第18回シンポジウム

地質学で読み解く巨大地震と将来の予測 —どこまでわかったか—

平成24年1月12日(木)
秋葉原コンベンションホール

主催

独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

地質学で読み解く巨大地震と将来の予測

—どこまでわかったか—

趣旨

2011年東北地方太平洋沖地震は岩手県沖から茨城県沖までの広範囲を震源域とする超巨大地震でした。一方、過去を振り返れば、西暦869年に発生した貞観地震を始めとし、今回の地震とよく似た超巨大地震が数百年間隔で繰り返していたことが、地質学的な研究から明らかになっていました。このことは、地震防災対策において、過去の巨大地震の研究が極めて重要であることを私たちに再認識させました。産総研では、過去の様々な巨大地震の痕跡を地質学的に読み解き、地球物理学的な手法を融合させながら過去の地震像を再現し、さらに、それらの結果を将来の予測に活かすことを目指してきました。今回のシンポジウムでは、過去の巨大地震の解明と将来予測に関する産総研の研究の現状を紹介します。今後の巨大地震による被害を少しでも小さくするために、私たちの研究の方向性や目標について、様々な立場の方からご意見を頂きたいと考えております。

開催日：平成24年1月12日（木）13:00-18:00

会場：秋葉原コンベンションホール（秋葉原ダイビル2F）

東京都千代田区外神田1-18-13 秋葉原ダイビル (<http://www.akibahall.com/>)

主催：独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

スケジュール

13:00 挨拶 山崎正和

13:05 東北地方太平洋沖地震の教訓 岡村行信 …… 1

海溝型巨大地震

13:20 地層に残された巨大地震の記録 澤井祐紀 …… 2

13:45 海溝型巨大地震の履歴に関する研究の現状と課題 宍倉正展 …… 4

14:15 東海・東南海・南海地震の予測 松本則夫 …… 6

14:40 ポスター概要説明 桑原保人

14:45 休憩・ポスター発表 ポスター発表者 …… 14

内陸大地震

15:15 内陸巨大地震の地形・地質学的痕跡と将来予測 近藤久雄 …… 8

15:45 内陸巨大地震を予測するための地震発生物理モデル 長 郁夫 …… 10

16:10 断層運動による地表変形の評価と予測に向けて 吉見雅行 …… 12

16:35 総合討論 小泉尚嗣

17:00 まとめ 岡村行信

17:05 ポスター発表 ポスター発表者 …… 14

東北地方太平洋沖地震の教訓

岡村行信（活断層・地震研究センター長）

東北地方太平洋沖地震の発生後、様々な分野で異なる視点から「教訓」や「反省」が議論されてきた。このような大災害となった最大の原因は、東北地方の太平洋沿岸域で巨大津波に対する備えがハード・ソフトともに不十分であったことであろう。私たちは西暦 869 年に東北地方を襲った貞観の津波を復元する研究を進め、完全ではなかったものの重要な結果を出していた。しかし、その成果を津波防災にほとんど活かすことができなかった。私たちの研究成果を防災に活かすための課題について考えてみたい。

自然科学の学術的な研究成果を社会に周知し、防災や減災に役立てるためにはいくつかの段階がある。まずは、研究成果の信頼性を客観的に確認することが重要である。そのために、研究成果を学会や学術雑誌に公表し、他の研究者からの評価を受ける必要がある。しかし、信頼性の高い研究成果を出すためには高い精度の調査と解析を行う必要があり、結果として時間がかかるし、研究者間の議論も簡単に決着しないことが多い。

このような研究成果に対する客観的な評価を行うことが期待されているのが地震調査研究推進本部である。この組織は、防災上重要であると判断される研究成果を取り上げ、国としての判断に基づいて社会に公表している。貞観地震の研究成果も地震調査研究推進本部で議論され、東北地方の沿岸域に対して巨大津波が来襲する可能性が公表される直前であった。公表されていれば、自治体などを通じて巨大津波の警告が周知され、被害も軽減されていたかもしれないが、地震には間に合わなかった。

もっと早く成果を公表する方法として、マスコミを通じた報道、被害が予測される地域での講演会なども考える必要がある。貞観津波の研究成果は地震前に何度かマスコミに取り上げられ、全国紙にも何度か紹介されたが、記事だけでは現実味のある警告と受け取られていなかったかもしれない。地震後は、学会発表前の調査段階で研究者の見解が報道されることがある。しかし、マスコミ報道はニュース性が求められるため、必要以上に大きさになることもあり、信頼性に欠ける報道も見受けられる。

津波に限らず、地震、火山などの大災害は地形や地層中に不明瞭な形で記録されている。一部の研究者がその危険性に気付いても、その警告は必ずしも社会には受け入れられない。その背景には、日本列島が大きな地殻変動によって形成されてきたことが理解されていないことがあると考えられる。地形学や地質学の重要性が認識されたこの機会に、自然科学の教育を広げることも重要である。私たちも、過去の地震に関する調査・研究を根気よく続け、信頼性の高い結果を出していかなければならないと考えている。

地層に残された巨大地震の記録

澤井祐紀（海溝型地震履歴研究チーム）

2011 年 3 月 11 日、東北地方太平洋沖において、日本では観測史上最大となる M9 の超巨大地震が発生した。この地震は非常に大きな津波を引き起こし、東日本の各地に甚大な被害をもたらした。この地震と津波に関しては、その発生直後から「想定外」という言葉が繰り返されたが、あのような津波は全く想定できなかったのであろうか？

確かに、近年の観測記録では、宮城県沖と福島県において M7 クラスの地震しか起きていなかった。また、明治三陸地震と昭和三陸地震による津波は、三陸地方に比べて仙台平野や福島県沿岸において小さかった。こうした経験から、宮城県南部と福島県沿岸では津波に対して楽観的な雰囲気があったのかもしれない。しかしながら、歴史的・地質学的なスケールで見ると、宮城県と福島県沿岸は決して「平穏な」場所ではない。

平安時代に編纂された日本三代実録には、西暦 869 年 7 月 9 日（貞観十一年五月二十六日）に巨大な津波が仙台平野を襲ったという記録がある。そこには「陸奥國地大震動 流光如晝隱映（中略）去海數十百里 浩々不辨其涯俟 原野道路 忽爲滄溟 乘船不湟 登山難及 溺死者千許 資産苗稼 殆無子遺焉」とあり、陸奥の国において大きな地震が発生し、その後の津波によっておよそ 1000 名の溺死者がでたことを伝えている。この地震は、その年号から貞観地震と呼ばれてきた。私たちの研究チームは、この貞観地震津波の実態を解明するため、地質学的・地球物理学的なアプローチを融合させて研究を進めてきた。

貞観地震による津波の地質学的証拠は、1990 年代はじめに東北電力や東北大学の研究グループによって調べられていた。私たちは、こうした先行研究を参考にし、その津波堆積物の分布から貞観地震の津波による浸水域を詳しく復元しようとした。津波堆積物は、沿岸における湿地の堆積物中に挟まれるかたちで分布している。巨大な津波は沿岸の砂礫を浸食・運搬し、そうしてできた砂礫層がもともとある湿地の地下に残されていくのである。西暦 915 年に降下した十和田火山灰と放射性炭素年代測定値を手がかりに、貞観地震による津波堆積物を追いかけていった結果、当時の海岸線から最大で 4 km 程度内陸まで津波堆積物が達している場所が見つかった。

貞観地震が残した地質学的な証拠は、津波堆積物だけではない。福島県の沿岸では、堆積物中の珪藻化石^{けいそう}を詳しく見ることによって、当時の地震性地殻変動を推定することができた。珪藻類は、淡水域から海水域まで、水分と光の存在するあらゆる環境に適応している単細胞藻類である。この珪藻類は種によって生育環境が異なるため、地層中の珪藻化石を見ることで地層が形成された当時の環境を推定することができる。貞観地震とそれより古い巨大津波による津波堆積物が発見された福島県南相馬市において、津波堆積物の直下と直上の地層、つまり津波が来る直前と来た後の環境変化を見た結果、地震時に沈降したと考えられる環境変化を復元することができた。

こうした津波堆積物の分布と地殻変動の証拠を説明するような断層破壊領域を、コンピュータシミュレーションで再現しようと試みた。具体的には、様々な断層の長さ、断層の深さ、すべり量を仮定し、そこから発生する津波の浸水域を計算機上で復元しようとするものである。合計 14 のモデルを検討したところ、宮城県沖と福島県沖を含んだ領域で、断層の長さが 200 km、幅が 100 km の場合に、津波堆積物の分布範囲と計算上の浸水範囲が最もよく一致した。この場合の Mw（モーメントマグニチュード）は 8.4 であるが、一般に津波堆積物の分布域が津波の浸水範囲より小さいことを考えると、実際の貞観地震の規

模は Mw8.4 以上と考えられた。

貞観地震のような巨大地震の繰り返しは、津波堆積物の年代測定を行うことによって推定することができた。宮城県から福島県の沿岸には、津波堆積物の可能性がある地層がいくつも見るができるが、福島県沿岸で地殻変動を伴うような地震は、今のところ貞観地震を含んで2回分（貞観地震そのものと、その一つ前）しか見つかっていない。これら2つが似たような地震、いわば「貞観タイプの地震」ならば、その繰り返し間隔は450年くらいである。私たちは「貞観地震の1つ前の地震」からさらに800年遡った頃の津波堆積物を広範囲で確認したが、これに伴った地殻変動の証拠は今のところ見つかっていない。この津波については明確な評価を避けたいが、仮にこれも貞観タイプのものであれば、その繰り返し間隔は450~800年程度の幅を持ったものと推定される。さらに問題だったのは、貞観地震以降に似たような地震があったかどうかだった。室町時代に巨大な津波が奥州を襲ったという歴史記録があるが、これが貞観タイプかどうかは未評価だった。

2010年の時点で貞観地震から1100年以上経過していた。貞観から2010年までに「貞観タイプ」が発生していなかったとすると、再来間隔の450~800年を大きく過ぎており、似たような巨大地震と津波はいつ起きてもおかしくない状態であった。私たちは、こうした研究結果を2010年6月に文部科学省に提出していた。そしてこの成果を受けて、政府の地震調査研究推進本部（事務局：文部科学省）は日本海溝における地震の長期評価の見直しに取りかかり、将来の巨大地震・津波の可能性に言及した評価を2011年4月に公表予定であった。また私たち自身も、津波浸水履歴図を作成し、津波防災に対する意識が不十分な地域に研究成果を周知しようとしていた。しかしながら、そうした試みがなされる前に、懸念していたような巨大地震・津波が2011年3月11日に発生してしまった。東北地方太平洋沖地震の発生は大変悲しい出来事であり、残念であるが、一方でこの研究の方向性が決して間違っていないこともわかった。今回の教訓を生かし、今後も防災に役立つ地質研究を進めていきたいと考えている。

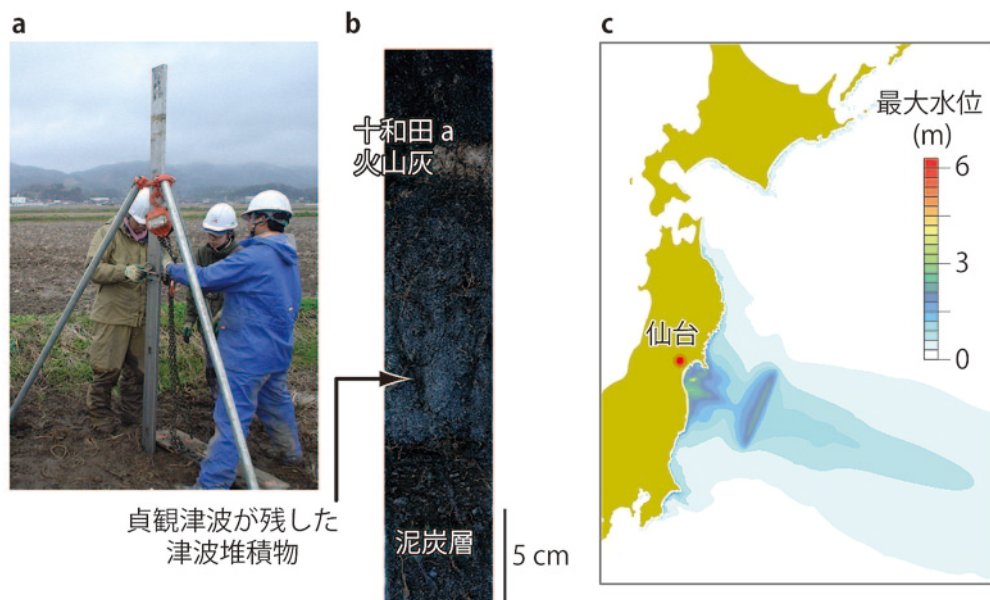


図 a：仙台平野における調査風景。 b：仙台平野で採取された堆積物試料。 c：コンピュータシミュレーションによる過去の津波の再現（行谷佑一研究員提供）。

どに関して不明な点が多い。今後、断層モデルの推定など過去の地震像の解明に向けて継続的な調査が必要である。

ところで先に紹介した中央防災会議の提言を受けて、現在、関係する自治体では、被害想定の見直しを行う上で、津波堆積物調査を取り入れる動きが見られる。これは古地震学の重要性が社会的に認知された現れだが、一方で、津波堆積物の調査経験のある専門家は非常に限られており、人材不足は深刻な問題である。また早急に結果を求めるばかりに、十分な検証のないまま地震・津波の評価が行われるのではないかという懸念もある。当センターによる千島海溝や日本海溝での調査・研究は、津波堆積物が保存される地形・地質の条件が揃っている中で、5~6年かけて広域で高密度な調査を行うことで得た成果である。したがって、まったく手探りの状態から始める調査では、1~2年の短期間で結論は出にくいと思われる。再び「想定外」となることを恐れるばかりに、異常に大きな津波の想定も一部で見受けられるが、これでは社会に不安を煽る恐れもあり、それに対する防災対策に過剰な負担を強いることにもなりかねない。沿岸の古地震調査を着実に進めて、既往最大級の地震、津波がどのような規模であったかを、より正確に捉えていくことが必要であろう。もちろん過去の情報は限られており、古地震調査が万能ではないことも承知しておかなければならない。過去を知るためには、歴史時代であれば古記録を丹念に読み解くこと、また津波堆積物に限らず、地盤の上下動や液状化など、自然に記録されたあらゆる痕跡を逃さず読み取り、その上でシミュレーション技術等を併用して過去の地震・津波を総合的に検証していかなければならない。



図1 チリやタイで観察された近年の津波による堆積物とその下位にみられる古津波の堆積物（タイの写真は澤井祐紀撮影）。



図2 和歌山県串本町橋杭岩の1707年宝永地震で移動したと考えられる津波石。400~600年に1度の間隔で大きく移動している可能性が高い。

東海・東南海・南海地震の予測

松本則夫（地震地下水研究チーム長）

1. はじめに

東海地方から四国の沖合にある駿河・南海トラフでは、マグニチュード8クラスの巨大地震が100年から200年程度の間隔で繰り返し発生している。

東海地震については、1978年の大規模地震対策特別措置法に基づき、気象庁を中心として地震・地殻変動などの観測体制が整えられ、日本で唯一予知できる可能性がある地震である。活断層・地震研究センターでは、東海地震の想定震源域近くに10地点15本の地下水観測井戸を展開し、観測データを気象庁に提供し、さらに、東海地震の判定を行う地震防災対策強化地域判定会に説明員として参加することにより、国の地震予知事業を分担している。

2. 東南海・南海地震の予測に向けた地下水・地殻歪観測

2003年に「東南海・南海地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法」が施行され、観測施設の整備が求められた。産総研は、東南海・南海地震の予測の研究を行うために、紀伊半島～四国周辺に14カ所の新たな観測点を2006年～2010年に整備した（図1）。これらの観測施設では、地下水位の観測のほか、多成分ボアホール型歪計や傾斜計を用いた地殻変動の観測や、地震計による地震の観測など多項目の観測を行っている。

最近の地震研究の進展で、プレート境界の東海・東南海・南海地震の想定震源域（図2の固着域）の深部延長部（深さ30～40km：図2の遷移領域）で通常地震よりも低い周波数の連続した微動「深部低周波微動」が発生していることが発見された [Obara (2002) *Science* 296:1679-]。さらに、この深部低周波微動に同期して、ほぼ同じ場所で、3～6ヶ月程度に1回の頻度で数日から1週間程度継続するゆっくりとしたすべり「深部ゆっくりすべり」が発生していることが示された [Hirose & Obara (2006), *G R L*. 33 doi:10.1029/2006GL026579]。

深部低周波微動と深部ゆっくりすべりを正確に把握することは巨大地震の予測に有用である。巨大地震の発生が近づくと、深部低周波微動と深部ゆっくりすべりの活動パターンが変化し、あるいは、普段は遷移領域で発生するそれらの活動が巨大地震の発生域（固着域）に移動するということがいくつかのコンピュータシミュレーションで示されている [Matsuzawa *et al.* (2010) *J. G. R.*, 115, doi:10.1029/2010JB007566]。また、深部ゆっくりすべりを正確に把握することにより、想定震源域での応力増加の度合いを推定できる可能性がある。

深部低周波微動と深部ゆっくりすべりの位置と規模をできるだけ詳細に正確に推定し、その時間変化を捉えることにより、東海・東南海・南海地震の中期予測技術の開発に繋げることが本研究の目的である。

新たな観測施設の多成分ボアホール歪計データから客観的に深部ゆっくりすべりの断層モデルを推定するための解析方法の開発を行った。この解析方法によって推定した深部ゆっくりすべりの矩形断層を図3に示す。

2011年より防災科学技術研究所（防災科研）との共同研究によって、産総研の地下水・歪等の観測データと防災科研 Hi-net 高感度加速度計（傾斜計）との相互データ交換を開始した。これにより、双方のデータを統合してより詳細な深部ゆっくりすべりの解析を行うことが可能となった [板場他, 本要旨集（ポス

ター発表)]. 今後、深部ゆっくりすべりの位置・規模・時間変化をさらに詳細・正確に把握するための技術開発を進め、東海・東南海・南海地震の中期予測技術の開発に貢献したいと考えている。

微動の解析には、防災科研 Hi-net, 気象庁, 東京大学, 京都大学, 名古屋大学, 高知大学, 九州大学の地震波形記録を使用しました。ここに記して感謝します。

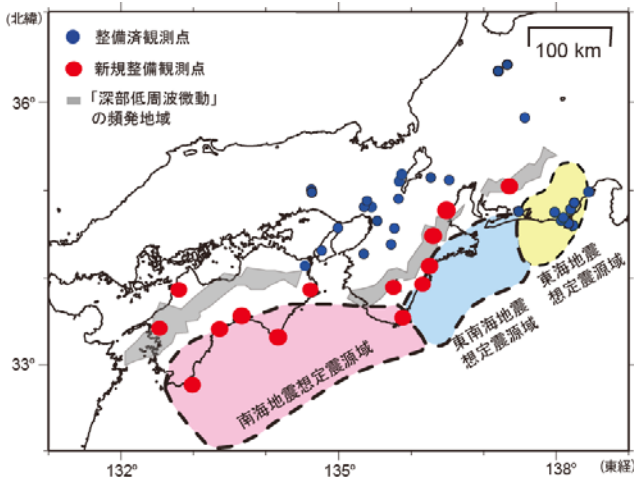


図1 東海・東南海・南海地震の想定震源域と、産総研が新たに整備した観測点(●)および既存観測点(●)。深部低周波微動の発生領域は灰色で図示。

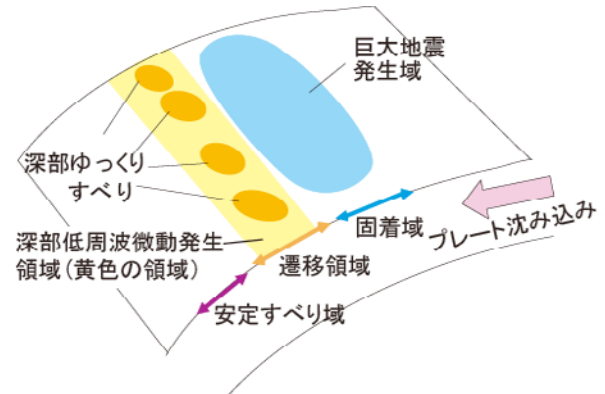


図2 プレート境界における巨大地震発生域, 深部低周波微動発生領域と深部ゆっくりすべり発生域の概念図。

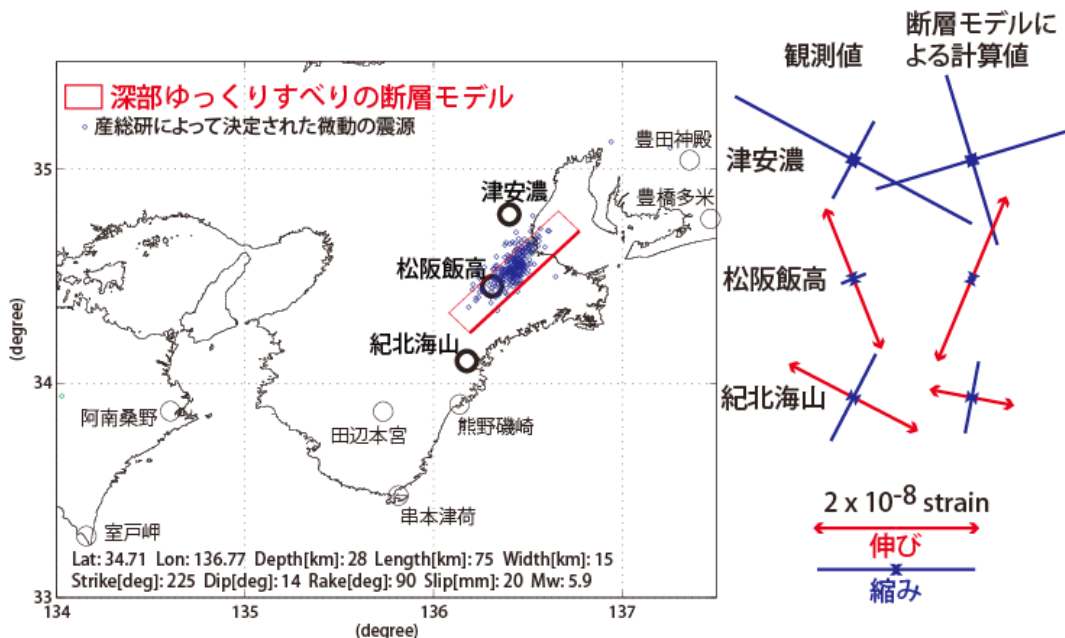


図3 右: 2011年6~7月に発生した深部ゆっくりすべりの期間に観測された主歪の変化. 左: 主歪の変化を用いて推定した深部ゆっくりすべりの矩形断層の位置と大きさ. 75 km x 15 km の断層で 20 mm のすべりがあったことが推定された。

内陸巨大地震の地形・地質学的痕跡と将来予測

近藤久雄（活断層評価研究チーム）

従来の内陸大地震の予測は、比較的単純に、ある活断層系からは決まった規模の大地震が規則的な時間間隔で繰り返し発生すると考える、いわゆる固有地震モデルを基本として行われてきた。しかし、実際には、複数の活断層によって構成される大規模な活断層系（もしくは活断層帯）では、複数の断層が同時にずれ動くことによって、単独の活断層が活動した場合よりも大規模な地震が生じる事例が認識されつつある。このような連動型地震については、その発生様式が未解明であり、将来の地震規模や発生時期の予測にとって重要な課題となっている。

我が国の内陸活断層系において、最も地震発生可能性が高い断層系の一つである糸魚川－静岡構造線活断層系では、長さが約 150 km の活断層系が一度に活動した場合には、M8 クラスの巨大地震が発生する可能性が地震調査研究推進本部等によって指摘されている。その一方では、同断層系は複数の活断層で構成されるため、一部の断層区間だけが活動して M7 クラスの大地震を起こす可能性もある。さらに、後述するトルコの事例など世界の活断層系では、数日から数十年の間に一つの活断層系から多数の大地震が連鎖的に続発する事例もあり、大規模な活断層系から生じる大地震像は単純ではない。

このように、一つの活断層系から発生しうる地震像は多様であることがわかりつつあり、発表では、現実的な将来予測に寄与するための古地震学的な調査研究について現状と課題を述べる。

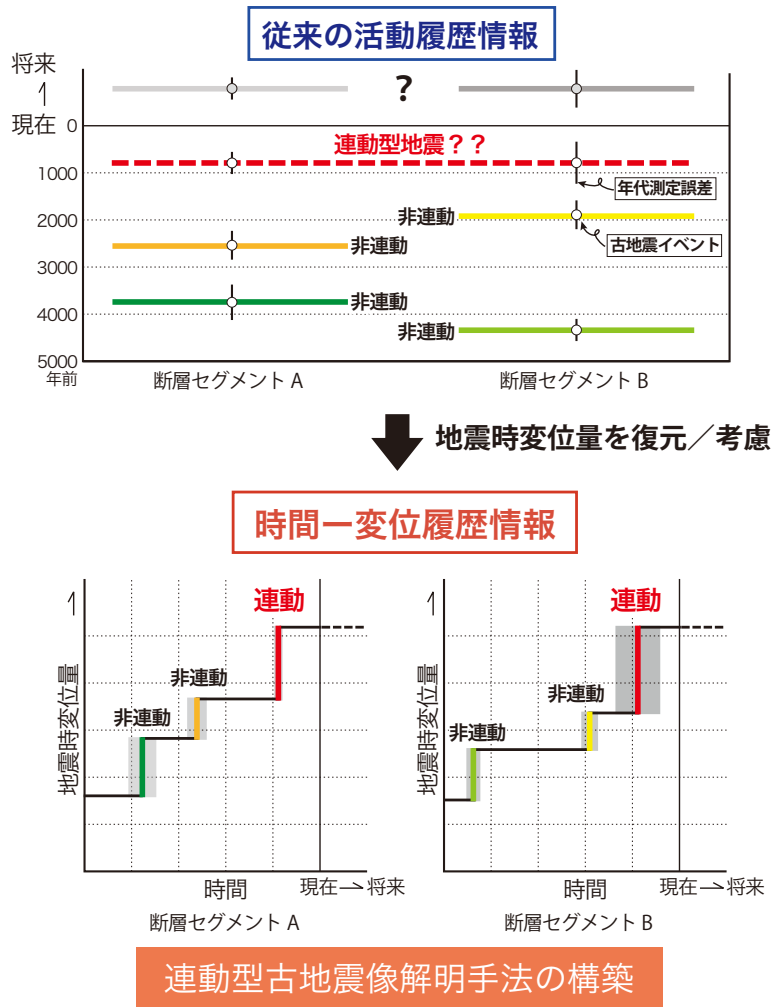
我々は、大地震／巨大地震に伴って生じた変位量を地形や地質から復元することが、複雑な連動型地震を復元し予測していく上で鍵となると考えている。この基になる考えは、トルコ・北アナトリア断層系での研究成果による。全長 1,200 km にわたる同断層系では、20 世紀の数十年間に M7 クラスの大地震が次々と発生し、連鎖型の大地震群が生じた。西暦 1668 年には、断層系中部の連動区間が 600 km に及び、M8 クラスの巨大地震を生じた可能性が歴史記録によって推定されている。そこで、20 世紀に比較的短い断層区間がずれ動き、連動しなかったとみられる 1942 年地震と、巨大地震とみられる 1668 年地震のそれぞれに伴うずれ量を比較すれば、連動しなかった場合と連動した場合の違いが明確になると期待される。

トルコ鉱物資源調査開発総局との共同研究の結果、北アナトリア断層系中部で発生した 1942 年地震 (M7) では、長さ約 48 km の地震断層が生じ、約 3 m の地表変位を生じたことがわかった。さらに、三次元的なトレンチ調査と地形測量を実施した結果、1668 年地震に伴うずれの量が約 7～8 m と 1942 年よりも 2 倍以上大きかったことが判明した。さらに、過去 2500 年間に生じた 6 回の地震に伴う変位量は、4 つが 1942 年地震と同程度であり、2 つが 1668 年地震と同程度であったことが示された。さらに、連動時に最も変位量が増加する領域は、1668 年地震における 1942 年地震断層区間のように、1) 断層セグメント間の継ぎ目（セグメント境界）周辺、2) 長大な断層系における相対的に小さな規模の（短い）断層セグメント、3) 地震サイクルで部分的に割れ残った断層セグメントである可能性がある。これらの結果は、連動した場合としない場合では、同一地点でずれ量が大きく異なることを示すとともに、逆に変位量を指標として連動／非連動を復元できる可能性を示す。

このように、地震規模に応じて変位量が異なるという事実は、活断層系から決まった規模の大地震が規則的に繰り返す、という考えでは説明できず、今後、国内外の活断層系でも検討されるべき重要な課題である。ある活断層系で復元された地震時変位量が大きい場合には、地震規模も大きかった可能性、あるいはその逆についても検討する必要がある、その判断の根拠となる地震時変位量の復元と整備が不可欠となる。

現状では、全国主要活断層帯の活動時期と間隔が概略的に整備されつつあるものの、地震時変位量の実測値は圧倒的に不足している。変動地形学的に復元される変位量データは、空間的なデータ充足率が比較的高いものの、時間的な分解能が現存する地形面の形成時期と年代推定精度に依存し、歴史地震を除き地震時変位量を直接識別することが難しい。一方、掘削調査などによって地質学的に得られる時間情報は、データの空間分布が局所的であるものの、場所によっては数十～百年程度まで分解能を高められる。同様に、横ずれ断層では同一地点における複数回の変位復元に優位性があるが、逆断層では相対的に困難であり、空間的なデータの充足可能率はその逆と考えられる。したがって、このような諸条件を認識して、各々の利点と難点を相補的かつ合理的に組み合わせた地形・地質学的調査によって、過去の地震に伴う変位量を復元できるものと期待される。

さらに、地形・地質学的なデータは、特に日本においては取得できる場所が限定的な場合もあり、数値計算など他分野の手法や研究者と協働して、空間拡張性について検討することも重要である。このように、過去の地震に伴う変位量の復元とそれを考慮した数値計算等による連動型地震の評価は、活断層系から現実的に起こりうる地震規模や発生可能性の検討に貢献できるものと考えられる。



地震時変位量を考慮した連動型地震像の復元。上段：従来の活動履歴と古地震の時空間分布。活動時期のみでは年代誤差等によって連動した情報の取得が難しい。下段：地震変位量を考慮した時間-変位履歴。地震時変位量の大小を加味して、連動型地震を復元する。

内陸巨大地震を予測するための地震発生物理モデル

長 郁夫（地震発生機構研究チーム）

1. はじめに

地震発生の予測は、現状では、過去の地震発生履歴データから地震発生間隔と最後の地震発生時期の情報をを用い、長期評価という形で統計的になされている。我々は、複雑な地殻構造・応力場や断層間の相互作用を考慮した現実的な地震発生の物理モデルを作成することで地震発生予測精度を向上させることを目標としている。このためには個々の断層でのミクロな地震発生の物理法則を解明するだけでなく、着目する複数の活断層の深部構造や周辺の地殻粘性および断層にかかる力等の具体的な情報が必要となる。

しかし、現状ではそれらを直接調べる方法はない。更に、例えば糸魚川－静岡構造線（糸静線）活断層系のような地震災害軽減のために着目すべき大規模な断層構造は地質構造形成過程が複雑で地殻の不均質が強い場所にあり、地殻構造のモデル化に用いられるトモグラフィ解析結果はデータや解析手法に依存するばらつきが大きい。また内陸地震は再来間隔が 1000 年オーダーなので、仮に地殻構造や応力場のモデルを作ったとしてもモデルの精度を検証しにくい。内陸巨大地震を予測するための物理モデル構築にはこのように様々な困難がともなう。以下ではこの具体的な情報の問題に対する産総研のアプローチと進捗状況を述べる。

2. 地殻－上部マントルの 3 次元粘弾性構造のモデル化

我々は、上記の問題に対処するために、列島規模の地殻－応力場モデルをつくることを考えた。それによって糸静線以外の地域でも観測データを用いた検証が可能となり、我々が提案する地殻－上部マントルの 3 次元粘弾性構造のモデル化方針が糸静に特化された特殊なものではなく、汎用性を持つものになると期待する。具体的には、まず速度・減衰トモグラフィ、太平洋・フィリピン海プレート形状、震源データを用いて、3 次元温度分布をモデル化した。次にこの温度構造にべき乗流体の流動則を適用し、また速度トモグラフィデータを参考にして弾性定数の 3 次元分布を与え、3 次元粘性・強度構造モデルを得た。

ここでは、こうして得られた複雑な 3 次元地殻モデルが現実的なものであるかどうかを検証するため、本モデルを単純な弾性層厚の不均質モデルとして、3 次元 FEM により東西圧縮場を与えた場合の応力や変位分布を計算した。その結果、日本列島の歪集中帯を再現するようなシミュレーション結果が得られた（図 1）。

3. モデルの高度化

本アプローチによって地質学や岩石学、地球物理学を基礎として日本列島の粘弾性地殻構造モデルが得られ、数値シミュレーションを基礎としてモデルの大局的な妥当性が検証された。しかし細部についてはまだ高精度化が必要である。例えば本研究のターゲットである糸静線周辺については、このモデルでは観測された複雑な応力場を再現できないことが分かっている。これは、応力場のモデル化に伊豆半島の衝突の影響を組み込んでいないことが原因と考えている。そこで我々は目下伊豆半島の衝突の影響を考慮したモデルを作成しつつある。モデルの作成後、再度観測データを用いて検証したいと考えている。

4. 展望

近い将来、我々は上述の地殻モデルに列島規模での主要な活断層とその深部延長を埋め込み、東西圧縮や伊豆の衝突の影響によって地震発生を繰り返すようにする予定である（図2）。この段階では活断層の深部構造や下部地殻の粘性等を精度良くモデル化することが極めて重要となるが、冒頭で述べたように物理探査でこれらのファクターを評価するのは困難である。我々としては、上述のような列島規模のモデル化アプローチがここでも有効となると考えている。列島全体を見渡すスケールでどれだけ多くの現象を説明できるかという観点で、与えた粘性係数や活断層深部構造モデルの一般性を評価できるからである。

このように我々は、これまで内陸地震理解のために行われてきた様々な研究成果を一つの物理モデルに統合する作業によって、現在の我々の内陸地震発生に関する理解が正しいかどうかをチェックしつつ、活断層の深部構造や地殻粘性を始めとする曖昧なパラメータのモデル化に取り組んでいる。これは内陸巨大地震の発生を予測するための物理モデルの叩き台になると考えている。

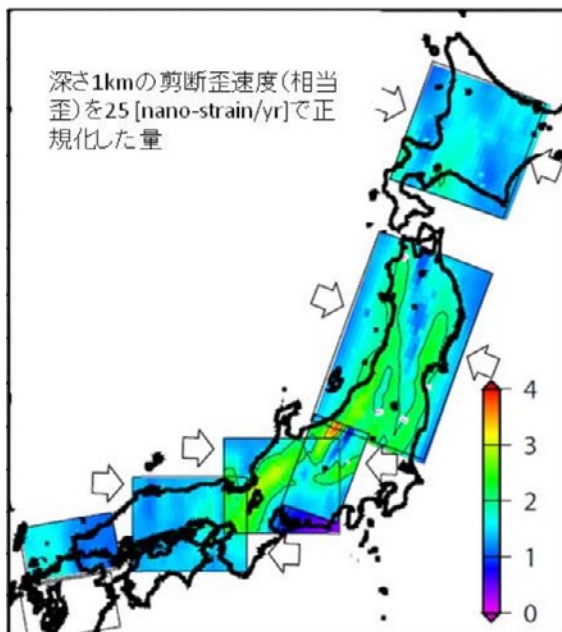


図1 日本列島の3次元粘弾性地殻構造モデルを基礎とした有限要素シミュレーションによる歪レート分布。

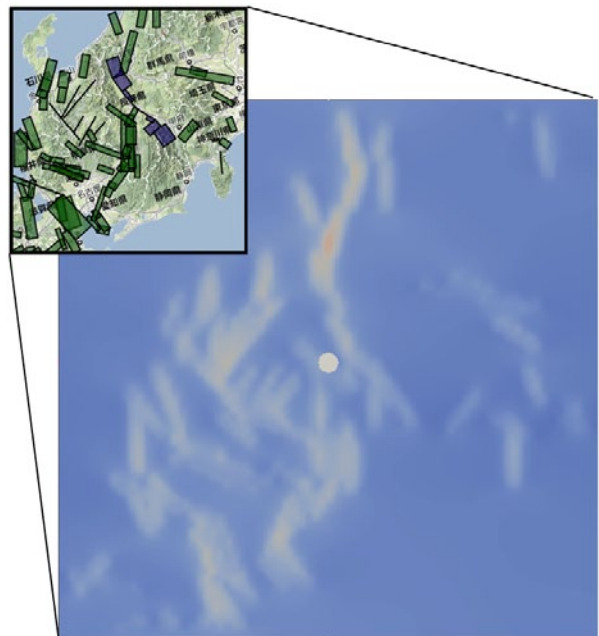


図2 主要な活断層の深部延長を埋め込んだ地殻モデルを東西圧縮する予備的なシミュレーションの結果、中部地方の応力レート分布（深さ9 km）を示す。

断層運動による地表変形の評価と予測に向けて

吉見雅行（地震災害予測研究チーム）

1. はじめに

内陸地震ではしばしば断層運動による地表変形が生じ、これによる被害も発生する。1999年台湾集集地震、2008年中国四川省の地震では地表に10メートルもの断層が現れ、ダムや建物を破壊した。こうした地表変形による直接的な被害は断層直上に限られるとはいえ、鉄道や道路などの重要なインフラが破壊されれば間接的な影響は広範囲に及ぶ。活断層が縦横に走る我が国では、断層運動による地表変形にも注意を払わねばならない。

過去の断層運動による地表変形は、空中写真判読、地質調査、地下構造探査等により調査されてきた。これらの知見は活断層マップ等に集約されると共に活断層調査に活用されているが、地表変形予測においても基本的なデータとなる。しかし、予測の観点から見直すと、1) 残存地形と実際の地表変形の関係、2) 地下深部の断層形状、3) 次回の断層出現位置・形態、4) 次回の変形量等、いくつか補完すべき課題が浮かび上がる。

当チームでは地表変形の予測に向け、現地調査と数値計算の両面から研究を展開している。本稿ではこれまでの成果と今後の課題、展望を紹介する。

2. 地表変形の位置・深部断層形状の評価

ひとたび地表変形が生じて、その後の河川侵食・堆積作用等により痕跡が不明瞭になったり、崖や撓曲などの見かけの位置と実際の変形位置に差異が生じたりする。こうした場合、本物の変形位置を把握するには地下構造探査が必要である。特に、地表変形予測では広域かつ精密な評価が求められるため、広域をカバーする高精度な探査と簡便かつ稠密に実行できる探査の併用が望ましいと考えている。

当チームでは地震波反射法探査を補完する調査として極浅層探査への地中レーダーの適用性を検討している。地中レーダーは電磁波を用いた探査で、地中の誘電率の違いをイメージングする。綾瀬川断層のS波およびP波反射法探査実施地点にてシングルチャンネルの地中レーダー探査を実施した。その結果、地震波探査の撓曲位置にて地表付近から地下5m程度まで複数の反射面が撓む様子がイメージングされた。誘電率と地質との関連性の明確化など課題は多いが、簡易探査による変形帯の把握可能性を示す例である。

断層全体にわたる地表変形を評価するには、地表での変形位置に加え、これを形成した断層の深部形状の把握も重要な課題である。断層上盤のやや広域の地形変形から、変動地形学的手法により断層深部形状を見積もる研究に取り組んでいる。現状ではデータの蓄積段階であるが、多くの重要断層帯の深部形状把握を進めるとともに、次節に述べる数値計算を援用した深部形状把握の手法開発も進めていく予定である。

3. 地表変形予測のための数値解析

地表変形の予測には、過去の地表変形の情報に加え数値解析が不可欠である。そこで現地調査と数値解析を融合した地表変形予測にも取り組んでいる。

断層運動が地表変形を引き起こす過程は、深部の断層破壊、堆積層内の断層進展、浅部の地盤変形から成る。数値解析では、現象の非線形度の違い、および出力として必要な解像度の違いから2つのフェーズに分ける。第1のフェーズは基盤岩から固結した堆積層にかけての断層破壊および断層進展である。第2

のフェーズは未固結あるいは半固結堆積層内の断層進展および地盤変形である。

第1フェーズである深部の断層破壊・進展解析では、不均質媒体中に3次元的な断層面(曲面)が置かれた場合の破壊進展を計算する。断層形状は変動地形学的手法により求めるものとし、媒質は構造探査等を参考に基盤形状および基盤岩と堆積層の大まかな物性値を与える。解析対象のスケールに比べて1回の変形量が小さいため、連続体的な取り扱いを基本とする。解析手法としてはFEM, X-FEM等である。

第2フェーズの解析では、第1フェーズの解析結果を入力とし、浅部堆積層内の断層形成過程(せん断集中帯の形成過程)を解析する。具体的には、解析領域の底面に第1フェーズ解析の変位場時刻歴を与える。堆積層はボーリング調査や既存反射法断面をもとに泥層・砂層・礫層等の層相を考慮してモデリングする。特に、変形を支配するパラメータは、断層近傍にて不攪乱試料を採取し、三軸圧縮試験等の土質試験を行なって取得する。解析手法は個別要素法等の大変形問題に適した手法を用いる。

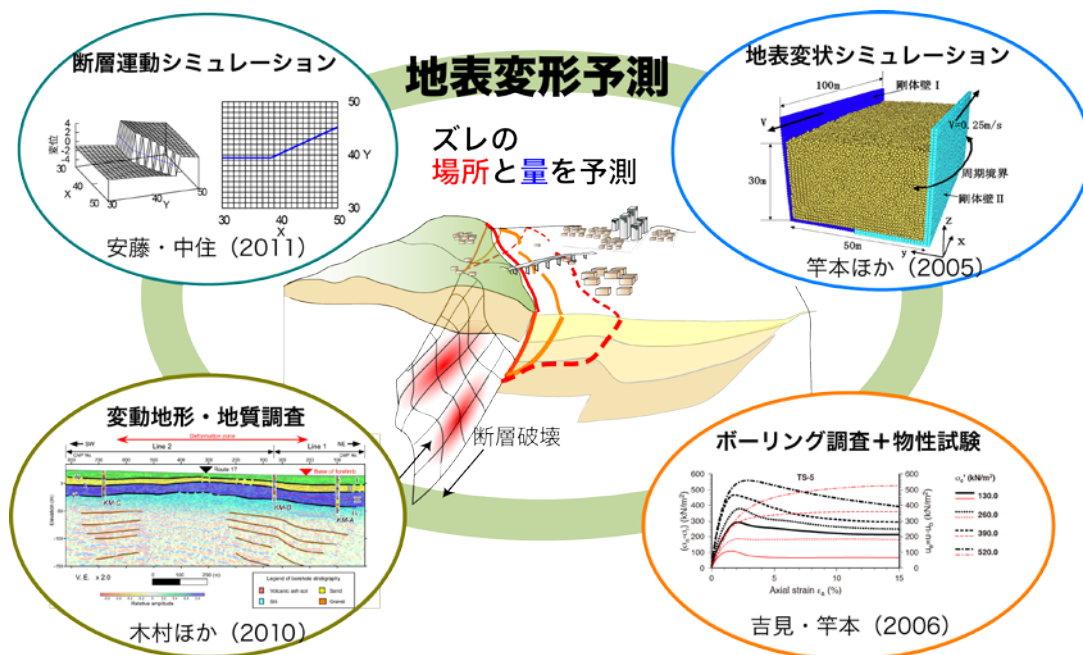
これら地表変形の予測計算では大変形・固体摩擦問題など技術的難度の高い計算が必要のため、手法の開発・改良も大きな課題である。なお、数値計算の醍醐味はパラメータスタディにあり、種々の計算パラメータを変動させ、現実に近いパラメータの選定および予測のバラツキの提示などに取り組んでいきたいとも考えている。

4. おわりに

本稿では割愛したが、当チームでは地表変形予測に加え地震動予測にも取り組んでいる。両者を総合した内陸地震による災害(ハザード)評価により、災害に強い社会の構築に貢献したいと考えている。

文献

安藤・中住, 日本地球惑星科学連合大会, 2011; 木村ほか, 地震(投稿中), 2011; 木村ほか, 活断層・古地震研究報告, 2010; 竿本ほか, 地震工学論文集, 2005; 吉見・竿本, 活断層・古地震研究報告, 2006



ポスター発表要旨 (21 件)

1. 2011 年東北地方太平洋沖地震の発生過程の概要

2. 仙台・石巻平野における 2011 年東北地方太平洋沖地震津波調査

海溝型地震履歴研究チーム

2011 年東北地方太平洋沖地震において、甚大な津波被害を受けた地域である仙台・石巻平野では、地震前から津波堆積物調査によって過去の津波の浸水範囲が明らかになっていた。地震後に同地域で、今回の津波による堆積物の特徴やその分布範囲を調べていったところ、過去のそれとの類似性だけでなく、砂、泥、水の到達限界の違いなど、古津波の痕跡だけではわからなかった事実も明らかになってきた。

3. 茨城県および千葉県沿岸における 2011 年東北地方太平洋沖地震津波調査

海溝型地震履歴研究チーム

活断層・地震研究センターでは、東北地方太平洋沖地震が発生した 2011 年 3 月 11 日の翌日から、海溝型地震履歴研究チームが中心となって津波の緊急調査を行った。対象とした地域は茨城県高萩市から千葉県一宮町にかけての沿岸部で、主には津波の高さを測定した。千葉県九十九里浜沿岸では、住民からの証言などを基に津波の浸水限界についても推定した。さらには、九十九里浜中央部に位置する山武市蓮沼地区では、津波堆積物の調査も行った。

4. 2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震で出現した地震断層

丸山 正・粟田泰夫・吾妻 崇・斎藤英二・楮原京子・杉山雄一・吉岡敏和・谷口 薫・吉見雅行・安藤亮輔・林田拓己 (産総研)

2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) に伴う地殻変動の影響は東北日本弧に広く及び、内陸の地震活動に大きな変化をもたらした。茨城県北部から福島県浜通りにかけての地域では正断層型の

地震活動が活発化した。4 月 11 日に発生した福島県浜通りの地震 (Mw6.6) では、井戸沢断層 (塩ノ平断層) および湯ノ岳断層に沿って明瞭な正断層型の地震断層が出現した。地震断層の性状の詳細を明らかにするために実施した断層沿いの変位量や変位ベクトルの分布調査の結果を報告する。

5. 歪観測による巨大地震の即時規模把握

板場智史・松本則夫・北川有一・小泉尚嗣 (産総研)

2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖において発生した Mw9.0 の巨大地震によって、産総研が四国～東海に展開している歪観測網において 10-7 オーダーの歪ステップが観測された。これを用いて、太平洋プレート境界面上において断層モデルを推定したところ、地震発生 6 分後 (P 波到達 4 分後) には地震の規模を Mw8.7 と推定できることがわかった。これは、地震 3 分後に発表された気象庁による震源速報の M7.9 より実際の値に近い。精度の高い歪観測は、巨大地震の規模早期把握に有用であることを示している。

6. 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地下水変化

北川有一・小泉尚嗣 (産総研)

2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) が発生した。産総研の地下水観測井では、地震前に前兆的な地下水位等の変化は観測されなかったが、地震後には多数の変化 (主に水位等の減少) が観測された。地震後 24 時間での変化の多くは地震の断層変位による静的な体積歪変化に符合したが、体積歪増加 (体積膨張) によって水位等の減少が予想される観測井で増加が観測された所もあった。これらの水位等の増加は、体積歪増加による減少より、他の要因による増加の効果が大きかったことを示唆する。

7. 2011 年東北地方太平洋沖地震の前震が本震の発生に果たした役割

安藤亮輔・今西和俊 (産総研)

3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、

顕著な前震を伴った巨大地震であった。最大の前震 (Mw7.3) は、本震の51時間前に、約40 km離れた場所で発生した。前震の余震活動を解析したところ、その発生域が本震の破壊開始点に徐々に接近していたことが分かった。これは本震震源に到達した前震の余効滑りが、本震発生の最後の一押しを与えたことを示唆している。その他の観測結果とシミュレーションも含めて紹介する。

8. 沿岸海域活断層調査「布田川・日奈久断層帯」: ブーマー音源による高分解能マルチチャンネル音波探査

楳原京子 (産総研)・愛甲崇信・足立幾久 (大和探査技術 (株))・坂本 泉・滝野義幸 (東海大学)・井上直人・北田奈緒子 ((財) 地域地盤環境研究所)・村上文敏・岡村行信 (産総研)

布田川・日奈久断層帯南西部にあたる八代海で高分解能マルチチャンネル音波探査を実施した。その結果、八代海に上部更新統に変位を与える多数の活断層が存在することが再確認された。このうち完新統に明らかな変位をもたらす活断層は北部に集中しており、活断層の平面形態と上部更新統の変形構造から、少なくとも断層群の北半部は右横ずれ断層と判断される。また、反射断面とピストンコアとの対比から、K-Ah 降下以後、2660±40 yBP 以前と1680±40 yBP 以後、630±40 yBP 以前の2回の活動が推定された。

9. 断層破砕物質を用いた断層活動性評価手法の開発: 鳥取県西部地域における断層岩の産状

宮下由香里 (産総研)・小林健太 (新潟大学)・亀井淳志 (島根大学)・伊藤順一・間中光雄・福士圭介 (金沢大学)

断層ガウジの色調を指標として、活動性の低い活断層を評価する手法開発研究を実施している。鳥取県西部地域での事例研究の結果、ガウジの発色要因は鉄を含む鉱物の相変化によって規定される推定され、ガウジの色調は地表風化による酸化反応の進行プロセスと、断層活動に伴う酸化反応

の抑制プロセスとの兼ね合いによって決定されるモデルを提案する。ポスターでは、一連の研究の基礎となった野外での断層岩類の産状と活動性評価手法の概要を解説する。

10. 邑知潟断層帯石動山断層の最新活動時期に関する検討

吾妻 崇 (産総研)・杉戸信彦 (名古屋大学)・堤浩之 (京都大学)・廣内大助 (信州大学)・細矢卓志・眞柄耕治・伊藤太久 (中央開発株式会社)

邑知潟断層帯 (石川県) の主たる断層である石動山断層の最新活動時期については、これまでの調査結果から12~16世紀である可能性が指摘されていながら、それを示す証拠が少なく長期評価には反映されていない。本発表では、平成22年度に実施した追加・補完調査で得られた、石動山断層の歴史時代における活動の存在を示唆する新たな地質学的証拠を紹介する。

11. 柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯、鍛冶屋、関ヶ原および宮代断層の活動履歴

吉岡敏和 (産総研)・佐護浩一・山根 博 (株式会社ダイヤコンサルタント)

福井県、滋賀県および岐阜県にまたがる柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯のうち、主部の南部にあたる鍛冶屋断層、関ヶ原断層および宮代断層について、トレンチ調査やボーリング調査などの古地震調査を実施した。その結果、鍛冶屋断層では、滋賀県長浜市鍛冶屋町でのトレンチ調査の結果、約1,000年前以降に最新の断層活動があったことが明らかとなった。これに対し、関ヶ原断層では約19,000年前以降に活動した断層は認められず、宮代断層では最新活動時期を十分に絞り込むことができなかった。

12. 動的破壊シミュレーションによる北アナトリア断層系の連動可能性の検討

加瀬祐子・近藤久雄 (産総研)

北アナトリア断層系では、過去繰り返し連動

型地震が発生している。近年発生した地震の地表すべり量分布と現在の応力場のデータを基に、動的破壊モデルを構築した。このモデルを用いたシミュレーションに、歴史記録や古地震学的調査結果から得られる断層の活動履歴情報を加味することにより、連動のパターンやすべり量の変動を再現する。

13. 日本列島のレオロジー構造と応力場のモデル化 長 郁夫・桑原保人（産総研）

地震発生予測に用いる3次元粘弾性地殻構造のモデル化手法として次の手順を提案する。まず震源分布とマンツルの減衰トモグラフィデータから列島規模の3次元温度分布を得る。次にこの温度構造と岩石実験による流動則および速度トモグラフィデータ等を用いて3次元粘性・強度構造モデルを得る。こうして得られた地殻モデルを用いてFEMで変位・応力レートを評価したところ、日本列島の歪集中帯を定性的に再現する結果が得られた。

14. 脆性および塑性領域における蛇紋岩の変形挙動の研究

高橋美紀（産総研）

プレート境界に分布する蛇紋岩は、従来地震を起こさないと考えられてきたが、高温では剪断によって促進される脱水反応により地震性の滑りが引き起こされることが実験により明らかになった。変形条件（温度・歪速度）の違いによる脆性—塑性領域の分布パターンもこの脱水反応により特徴づけられていた。局所的な化学反応による強度や滑り特性の不均質化が低周波微動などの複雑な現象をおこしている可能性が示唆される。

15. 西暦869年貞観地震の実態を探る

海溝型地震履歴研究チーム

平安時代に編纂された日本三代実録には、西暦869年の東北地方に巨大な地震と津波が襲ったと

記されている。この津波（貞観津波）による津波堆積物は、1990年代初めに東北大学の研究者や東北電力が仙台平野で報告していたが、その浸水範囲などは詳しく分かっていなかった。海溝型地震履歴研究チームでは、貞観津波によって残された津波堆積物を仙台・石巻平野から福島県沿岸にかけて、広範囲で詳しく調べ、当時の浸水範囲やその波源を推定してきた。また、そうした巨大津波の再来間隔を復元してきた。

16. 南海トラフ沿岸における古地震・津波調査 海溝型地震履歴研究チーム

地震・津波の発生予測と被害想定などに貢献するため、南海トラフ沿いの静岡県、三重県、和歌山県、徳島県、高知県の沿岸において地形・地層に残された津波や地震の履歴を調査している。各地域では、歴史時代だけでなく先史時代も含めて海溝型地震の履歴を復元することで、再来間隔や規模の特徴の解明を目指している。ポスター発表では、これらの調査地域のうち静岡県西部の太田川低地と和歌山県串本町の橋杭岩を対象とした調査について詳細に報告する。

17. 歪・傾斜統合解析による、プレート境界深部ゆっくりすべりのモニタリング精度向上

板場智史・松本則夫・北川有一・小泉尚嗣（産総研）・木村武志・木村尚紀・廣瀬 仁（防災科研）・針生義勝（地震予知総合研究振興会）

東海・東南海・南海地震の震源域のプレート境界深部側において、数日かけて数cmすべる深部ゆっくりすべりが規則的に発生している。この現象を精度良く検出することは、同地震の予測精度向上に有用である。2011年より、防災科研のHinet高感度加速度計（傾斜計）と産総研の歪計の統合解析を開始した結果、ゆっくりすべりの検知能力が向上し、四国～東海の広い範囲でMw5.5程度の規模のすべりまで検出できるようになった。向上した検知能力の空間分布と、ゆっくりすべりの統合解析例を紹介する。

18. 鉛直地震計アレイによる、プレート境界深部低周波微動のモニタリング

今西和俊・武田直人（産総研）

海溝型巨大地震の発生機構を理解し予測につなげるためには、プレート境界深部で起こる様々な現象の詳細を知ることが欠かせない。東海・東南海・南海地震が繰り返し発生している南海トラフ沈み込み帯では、深部ゆっくりすべりとそれに伴って発生する低周波微動が発見されており、巨大地震発生との関連が注目されている。我々は低周波微動の詳細なモニタリングを、西南日本に展開している鉛直地震計アレイ観測網を用いて行っている。観測を開始した 2008 年 7 月以降の 3 年半のモニタリングによって、新たに見えてきた低周波微動発生の様子を紹介する。

19. 東南海・南海地震予測のための地下水等観測施設整備で得られた四国・紀伊半島周辺の浅部地殻応力分布

佐藤隆司・北川有一・重松紀生・高橋 誠・塚本 齊・木口 努・板場智史・梅田康弘・佐藤 努・関 陽児・小泉尚嗣（産総研）

産総研では、東南海・南海地震の発生予測精度向上を目的に、紀伊半島および四国地域周辺において地下水位、歪、地震等の観測を行う総合観測施設の整備を行っており、これまでに 14 点が完成している。観測井掘削中には、いくつかの観測点において水圧破碎法による地殻応力測定を実施した。また、多くの点で孔壁の観察から地殻応力方位に関する情報が得られた。ここではこれらによって得られた四国・紀伊半島周辺の浅部地殻応力分布について報告する。

20. 綾瀬川断層北部の浅層地盤構造探査 — 埼玉県鴻巣市・北本市における S 波反射法地震探査及び地中レーダー探査 —

木村治夫・堀川晴央（産総研）・末廣匡基・秋永康彦（（株）阪神コンサルタンツ）・安藤亮輔（産総研）

首都圏中心部に近接する綾瀬川断層では、都市部の人工改変や河川の堆積・浸食作用によって多くの断層変位地形が失われ、位置や諸性状について不明な点が多い。また、断層周辺では、幅数百 m 以上に及ぶ広い範囲で撓曲変形が生じており、地表変形による地震被害の予測のためには、こうした変形形状も解明する必要がある。本研究では、S 波反射法地震探査と地中レーダー探査により、地下 100 m 以浅の地盤構造をイメージングし、綾瀬川断層による撓曲変形構造を明らかにした。

21. 雑微動の相互相関関数による中京地域の地下構造モデルの検証

林田拓己・吉見雅行・堀川晴央（産総研）

近年、地震波干渉法を用いて地震観測点間のグリーン関数を推定し、既往の地下構造モデルの高度化を目指す取り組みがなされつつある。当研究では、中京地域で得られた連続地震観測記録に対して地震波干渉法を適用し、各観測点間の相互相関関数を求めた。その結果、多くの観測点ペアにおいて良好な相互相関関数を得た。これらの記録を用いて観測点間の相互相関関数を評価することにより、中京地域の地下構造モデルのより詳細な検証が可能になると思われる。

文献引用例

岡村行信（2012）東北地方太平洋沖地震の教訓．地質調査総合センター研究資料，no.551，p.1

独立行政法人産業技術総合研究所
地質調査総合センター第18回シンポジウム
地質学で読み解く巨大地震と将来の予測
ーどこまでわかったかー

発行日

平成24年1月12日（木）

地質調査総合センター研究資料集，no.551

編集・発行

独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター
〒305-8567 茨城県つくば市東1丁目1-1 中央第7
TEL:029-861-3691

本誌掲載記事の無断転載を禁じます

印刷

谷田部印刷株式会社

18th GSJ Symposium

Deciphering Paleo-Earthquakes and Challenge to Earthquake Forecast

Geological Survey of Japan, AIST