

Contents

- 遅い地震と速い地震 … 1
- 2012 AGU Fall Meeting
に参加して … 5
- 2012 年度地震・津波に関
する自治体職員用研修プロ
グラム報告 … 6
- 外部委員会活動報告
2012 年 12 月 … 8



遅い地震と速い地震

安藤亮輔（地震災害予測研究チーム）

はじめに

活断層・地震研究センターでは、地震の起こり方を理解し、将来発生する地震の様々な側面を予測するための様々な研究に取り組んでいます。その一環として、通常の地震のような強烈な地震波を放射する速く短時間（数分以下）で終わる断層の滑りとは異なった、もっと遅く長時間継続する断層滑りである、スロー地震（ゆっくり地震）が、どこでどのような物理法則に従って発生しているのかを研究しています。スロー地震とは、低周波地震や低周波微動、スロースリップ（ゆっくり滑り）などと呼ばれる遅い地震の総称です。これらの遅い地震は、断層面上の大地震の巣となる領域（本誌の読者にはアスペリティーと呼んだ方が分かりやすいかもしれませんが）に寄り添って発生していると考えられており、断層の挙動や状態を理解し予測するための様々に重要な手掛かりを与えると考えられています。スロー地震の研究は、最近 10 年で急速に進んでおり、世界各地で発見・観測されるようになる中で、日本が先進的役割を果たしています。スロー地震の一般的な解説は他に譲り（例えば、ヴィダーレ・ヒューストン, 2013, パリティ）、ここでは、著者らが最近行った二つの研究とそれらが地震の予測に対して示唆することを簡単に書きたいと思います。

スロー地震を支配している断層の物理法則

大規模なスロー地震が頻繁に発生しているのが先駆的に発見されたのは、西南日本の南海トラフ沈み込み帯とアメリカ西海岸のカスカディア沈み込み帯でした。そこでは、プレート境界断層の約 30km の深さに位置する、巨大地震を起こす危険な固着域の下限を指し示すように断層走行方向に広範囲に、発生していることが観測されています（図 1）。国内では特に短期的スロースリップと呼ばれる、この種のスロー地震は、数ヶ月程度の周期で、頻繁に発生しています。

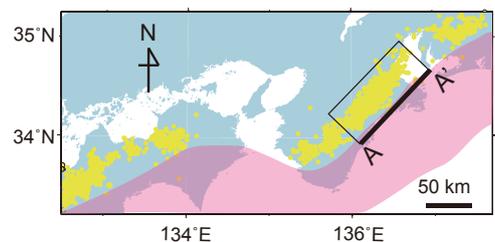


図 1 南海トラフ沈み込み帯でのスロー地震発生状況。黄色い点はスロー地震（低周波地震）の震源を示し短期的スロースリップの震源域と重なる。薄赤色はプレート境界の固着域を大まかに示す：ここが将来の巨大地震のおよその震源域。



ここで特徴的だったのは、一回のスローリップが、全体としては数日以上継続し約 10km/日という地震波を放射しえない大変な低速で伝播するにも関わらず、その震源領域で地震波を発生させるようなスロー地震であっても比較的高速な断層滑り(低周波地震や微動と呼ぶ)が同時に発生しているという、一見矛盾するような現象が見られていることでした。これは、地震の物理学にとっては大問題です。現在の知見では、断層の滑りはいったん高速化すると、滑りが断層の末端まで到達しない限りなかなか低速化しないというのが常識なのですが、これらの現象は遅い滑りと速い滑りが断層上の同じような領域で生じているというのです。従来のスロー地震の物理モデル(物理法則に基づくモデル)では、遅い滑りの部分のみ考慮され速い滑りの部分が考慮されていなかったのですが、筆者らの一連の研究(Ando et al., 2010, JGR; Nakata et al., 2011, JGR; Ando et al., 2012, JGR)はそれを乗り越え、遅い滑りと速い滑りが共存することの意味や重要性を明らかにしたのです。

地震発生の物理法則の研究は、物理モデルを立ててそれを観測データで検証するというプロセスを基本とします。筆者らが考えた物理モデルは、断層面上にはヌルーと(遅く)滑る背景領域の上にパシッと(速く)滑る領域がパッチ状に分布するという、概念的には比較的単純なものです(図2)。しかし、そのような単純なモデルが、スロー地震の多くの経験則を統一的に説明することが分かりまし

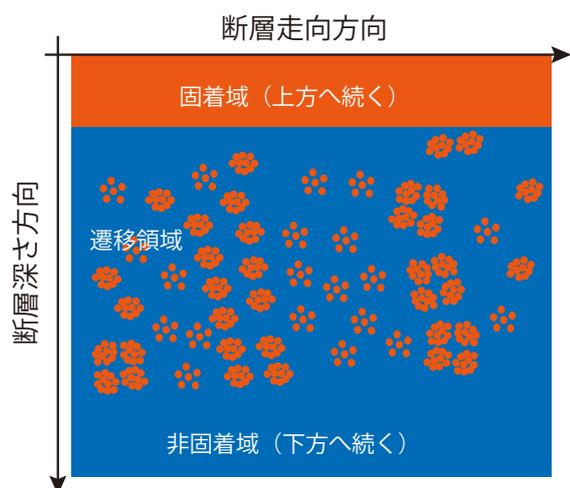


図2 断層面上の摩擦特性を表す模式図。オレンジで示した固着域の深部に非固着域が存在する。その中間の遷移領域には、非固着域と同様のヌルーと滑る摩擦特性をもつ背景領域に、固着域と同様のパシッと滑る領域がパッチ状に存在すると考える。

た。そのような経験則には、遅い滑りと速い滑りの共存に留まらず、低周波地震や微動が放射する地震動のスペクトル特性や、地震モーメントと滑り継続時間のスケージング則(Ide et al., 2007, Nature)、滑りの伝播パターン(Ide, 2010, Nature)などが含まれます。これらのどれもが、通常地震とは明らかに異なる特徴を持つことが示されているものです。できるだけ多くの現象・観測データが一つの物理モデル(物理法則)の異なる現れとして説明できれば、それは良いモデルと言えます。

具体例の一つを、年末に出版された Ando et al. (2012) で扱った、滑りの伝播パターンについて紹介します(図3)。紀伊半島直下の微動震源の時空間分布を詳細に観測すると、伝播の初期ではバースト(爆発)と呼ばれるように非常に活発化し高速で伝播しますが、その後は不活発化し徐々に伝播も放物線的に減速することが分かりました。さらに、著者らはこの減速のパターンとヌルーと滑る断層領域の摩擦力の特性の間に、一般的関係があることを理論的に示し、二次曲線のパターンでは、摩擦力が滑り速度に正比例して増加すること(ニュートン粘性)が必要であることを示しました。これは、直接的な測定が不可能な断層の摩擦的な特性を間接的に測定するための、新しい方法が発見されたことを意味し、断層岩の地質学的研究への応用も期待されます。

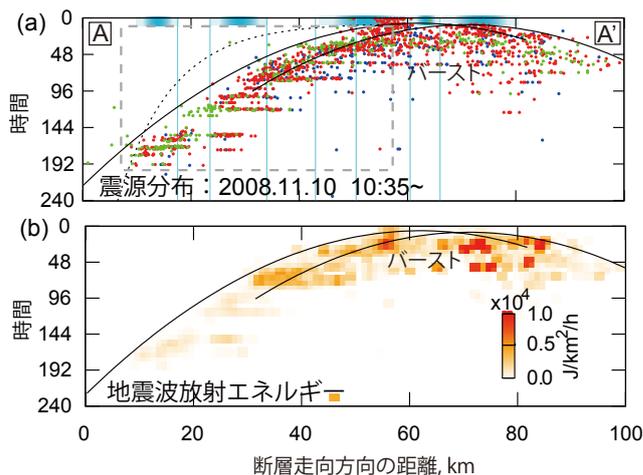


図3 スロー地震の伝播パターンの例。(a) 図1の矩形領域の中で微動震源の時空間分布(断層傾斜方向の位置は無視して断層走向に平行なA-A'面に投影して表示)。(b) 色はそれぞれの微動が放射した地震エネルギーの値を示す。全体として約10日で約100kmの距離を伝播したことが分かる。伝播は、初期に大きな波動放射を伴い高速であり、徐々に減速していることが分かる。伝播パターンは、実線で示した放物線で近似できる。

2011年東北地方太平洋沖地震の引き金を引いたスロースリップ

これらのスロースリップ地震研究を行っていたことは、一昨年の3月11日の巨大地震を理解するためにも役立ちました。ご存じのように、この地震に際していわゆる予知や短期予測を行うことはだれにも不可能でしたが、著者らは3月9日に起きたM7.3の地震がまさに前震であり、その余効滑り（アフタースリップ）が、2日かけて本震の震源領域に到達したことが、最終的な本震への引き金を引いた証拠を、震度6弱後の混乱の中で発見し（Ando and Imanishi, 2011, EPS）、直後の地震予知連に報告しました。その証拠となったのは、前震後の余震域が前震の震源域から本震の破壊開始点へ接近していったことです（図4）。この余震活動の移動パターンは、上記

の短期的スロースリップにおいて、微動の震源がゆっくりと長距離を伝播するパターンととてもよく似ていました。この結果を著者らはまだデータの少ない中で提出したのですが、その後の海底観測を含めたより豊富なデータを解析した他機関の研究でも追認されました（例えば、Kato et al., 2012, Science ; Ohta et al., 2012, GRL）。

今回の余震活動の移動パターンで強調したいのは、それが西南日本の微動の移動に見られるように、減速するパターンだったということです。現状、地震予知の手法は、大地震前に遅い滑りが徐々に加速するようなシナリオを前提としており、それを検出できるかに成否がかかっています。今回実際に観測されたのは、それとは反対の減速する滑りのパターンだったのです。これは何を意味するのでしょうか？

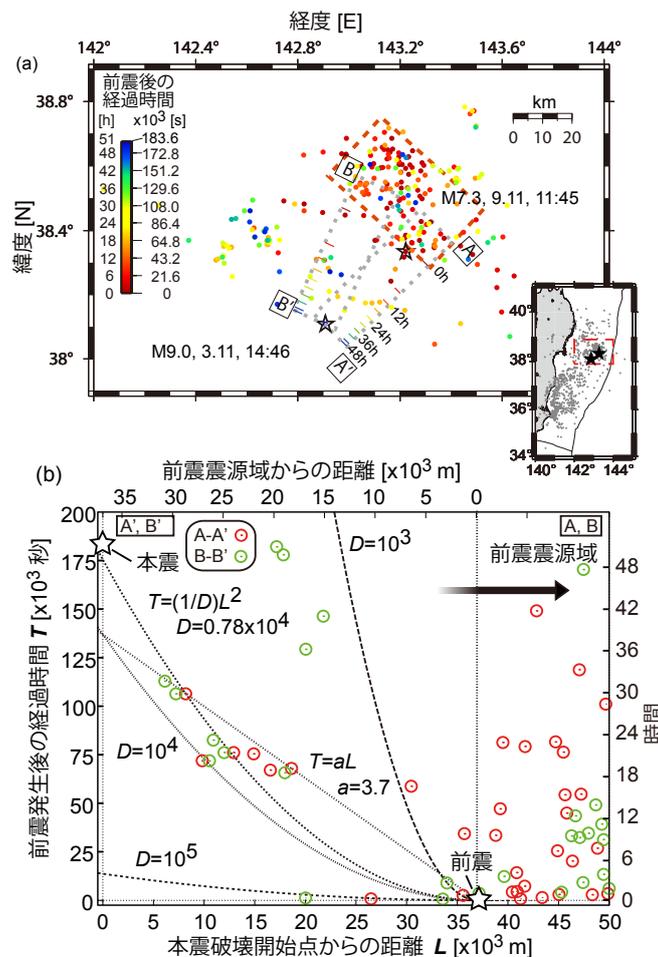


図4 2011年東北地方太平洋沖地震の最大前震から本震発生までの地震活動。(a) 最大前震の余震の震央分布。赤い破線で囲んだ矩形領域が前震のおよその震源域。星印は前震と本震の破壊開始点。丸の色は前震からの経過時間を示す。色の赤から青へ変化により前震の震源域から余震が南西方向に2日間かけて伝播したことが分かる。(b) 時空間分布の形で(a)図のA-A'とB-B'の矩形領域の震源位置をプロットしたもの。右下から左上方向に余震が移動しているのが分かる。移動のパターンは、一定速度を表す直線より原則を表す放物線によりよくフィットされる。興味深いことに係数Dの値は図3のものと同程度。

地震発生シナリオの複数化と地球物理・古地震データの統合

大規模な数値シミュレーションが可能となった現在では、上記のような遅い滑りが観測可能な加速の過程を経て巨大地震に至るといったシナリオは、高々一部の物理モデルに現れる典型例の一つであることが分かりつつあります。実際、著者らが提案しているような別の物理モデルでは、観測可能な減速する遅い滑りでも、それが伝播する先に満期に近い固着域があれば加速過程の観測可能性に関わらず大地震に繋がります。従来のシナリオは、室内実験などでの経験からは受け入れやすかったのですが、その経験を天然現象に外挿するときにはよほど深く考えるべきことを意味していそうです。

これらを踏まえると、震源現象の予測可能性を上げるには、狭い経験から思い切って視野を広げて、現在の知見で考え得るあらゆるシナリオを前提にする必要があると考えられます。上記の滑り加速モデルのみでなく、南海トラフの地震のばらつきの大きさ多様さを考えると、現行の経験的な固有地震モデルが語れることの限界が見えてきます。現代のスーパーコンピュータの力で、どれだけ多様な物理モデルとその帰結であるシナリオを作れるのが、地震発生予測への道として一つの重要なカギでしょう。しかし、有意な予測のためには、観測データによるシナリオの選択・重みづけ（データ同化と呼ぶ）が必要であり、情報量に富むデータが必要です。地形・地質学的、歴史学的な古地震データは、断層のどの範囲がどれほど満期に近いかの情報を十分ではありませんが含んでいます。一方、地震学・測地学的、岩石力学的データからは、過去の履歴情報を得ることは困難ですが、古地震データでは得られない現在のプレートの固着状態・断層摩擦特性や力学構造の高分解能の情報を含んでいます。個別分野の深化は当然ですが、これら質的に異なるデータをいかに物理モデルの上で統合できるかが、もう一つのカギでしょう。

このような観点からも、現状での地球物理学と古地震学の融合は、まったくもって不十分です。それに取り組むことが、災害科学への応用のために震源

モデルの信頼性を高めることや、地震像の予測可能性を少しでも高めることに繋がられないかと思えます。それは、3.11後の地震科学のそれでも挑戦的な仕事の一つに思われます。

参考文献

- Ando et al., "A slip pulse model with fault heterogeneity for low-frequency earthquakes and tremor along plate interfaces", *Geophys. Res. Lett.*, VOL. 37, L10310, doi:10.1029/2010GL043056, 2010.
- Ando and Imanishi, "Possibility of Mw 9.0 mainshock triggered by diffusional propagation of after-slip from Mw 7.3 foreshock", *Earth, Planets Space*, Special Issue for Tohoku-oki Eq., 63, 767-771, 2011.
- Ando et al., "Propagation Dynamics of Seismic and Aseismic Slip Governed by Fault Heterogeneity and Newtonian Rheology", *J. Geophys. Res.*, 117, B11308, doi:10.1029/2012JB009532, 2012.
- Ide et al., "A scaling law for slow earthquake", *Nature*, 447, 76-79, doi:10.1038/nature05780, 2007.
- Ide, "Striations, duration, migration and tidal response in deep tremor", *Nature*, 466, 356-359, doi:10.1038/nature09251, 2010.
- Kato et al., "Propagation of Slow Slip Leading Up to the 2011Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake", *Science*, 335, 705-708, doi:10.1126/science.1215141, 2012.
- Nakata et al., "Generation mechanism of slow earthquakes: Numerical analysis based on a dynamic model with brittle-ductile mixed fault heterogeneity", *J. Geophys. Res.*, 116, B08308, doi:10.1029/2010JB008188, 2011.
- Ohta et al., "Geodetic constraints on afterslip characteristics following the March 9, 2011, Sanriku-oki earthquake", *Japan, Geophys. Res. Lett.*, 39, L16304, doi:10.1029/2012GL052430, 2012.
- ヴィダーレ・ヒューストン, "新種の地震, スロースリップ", 安藤亮輔 訳, パリティ, 丸善, 2013年3月号(予定)



学会，研究会参加報告

2012 AGU Fall Meeting に参加して

竿本英貴（地震災害予測研究チーム）

2012年12月3日から12月7日まで、米国カリフォルニア州サンフランシスコ市にあるモスコーン・センターにて標記会議が開催され、6年ぶりに参加した。この会議は、毎年モスコーン・センターにて開催されているもので、地質・地球物理関係の研究者にとっては馴染みのある会議である。一方、工学部出身の筆者にとっては、標記会議はあまり馴染みがない。

筆者は、Recent Advances in Theoretical, Numerical, and Experimental Methods in Flow and Transport in Porous Media III Posters というセッションにてポスター発表を行った。上記セッションでは、多孔質体内の流動に関する数値解析についての発表が多く行われていた。考察の対象となる多孔質体は、球形粒子の集合体として構成されたもの、筆者らの研究のようにX線CT画像から直接的に実物の内部構造を構成するものまで、研究の目的に応じて多孔質体の形態は様々であった。

数値解析手法については、筆者らが用いた格子ボルツマン法（比較的新しい数値流体解析手法の一つ）やVOF法（Volume of Fluid Method）などがあった。とりわけ、日本人研究者の発表では格子ボルツマン法を採用しているケースが多いように感じた。このことについての理由は不明である。多孔質体の流動解析には、格子ボルツマン法が有利であると皆感じているためであろうか。また、上記セッションでは、各研究者が間隙を様々な量（間隙比、間隙率、

固相の球形度、間隙の最短パス等）を用いて評価しており、各自馴染みのある量で記述しているようであった。間隙構造を合理的・定量的に記述する事がまだ十分ではないように感じられた。

ポスター会場では、上記セッションのほか、地質学や地震学、気象学や水文学など多岐にわたる分野の発表がなされていた。今回は様々なセッションに行き、数値解析関連の発表を中心に見て回った。気象関連のセッションにて、4次元変分法と呼ばれるデータ同化（観測値と数値シミュレーション結果の差を小さくするようにモデルパラメータ等を調整する一連の手続き）に関する発表があり、比較的良い精度でデータ同化がなされている結果が示されていた。一連の解析の中で、クリロフ部分空間法が利用されている箇所があり、筆者にはこの点が新しく感じられた。クリロフはロシアの応用数学者であるが、この発表者もまたロシア系の方であった。「なるほど、だからクリロフ法」と妙に腑に落ちた瞬間があった。この方が取り扱っていた順問題の箇所は線形の問題であったため、非線形問題に適用可能かどうかを質問した。結果、「まだ試したことがないが、局所的な解に収束する可能性がある」という回答をいただいた。

会議が開催されている期間のサンフランシスコの気温は、日本の気温に比べて暖かく、コートなしで会場まで歩けたほどであった。

帰国後、疲れからなのか気温差からなのか、原因は不明であるが、体調が悪くなり、ダウンしてしまった。良くも悪くも、記憶に残る結果となった。



2012年度地震・津波に関する自治体職員用 研修プログラム報告

小泉尚嗣（活断層・地震研究センター 主幹研究員）

地震・津波の研究成果を実際の地震防災に生かすためには、防災の現場にいる自治体の防災担当者との連携が不可欠です。この目的のために、活断層・地震研究センターでは、2009年度から自治体の防災担当の職員を受け入れて研修を行なってきました。今年度は、日本全国の47都道府県すべてに声をかけた所、静岡・愛知・三重・香川・福島の5県から6名の参加を得ることができ、11月5日～9日の5日間に研修を行ないました（表1）。研修初日の11月5日には歓迎会を開いて交流を深め（写真1）、研修最終日の5日目には福島県いわき市周辺への巡検も行いました（写真2）。

研修プログラム内容は表1に示した通りです。南海トラフの巨大地震についての講義や質疑応答を入れたことが今年度の研修の特徴です。本研修に関する感想・意見交換会（写真3）やアンケートでは、参加者の方から概ねよい評価をいただきました。南海トラフ巨大地震に加えて、東北地方太平洋沖地震・津波堆積物調査・データベースの利活用といったことに関心や評価が高かったです。研究者や他

県の参加者との率直な交流も意義深かったという意見もありました。地質標本館見学の評価も高く、データベースと合わせ研究成果の出口部分への関心の深さを伺わせました。「事前に講義用の資料があった方がよい。」「自治体では一般に4月に異動



写真1 11月5日の歓迎会の様子。机の向こう側が受講者の皆さん。手前側の右側が岡村センター長、その左隣が松本地震地下水研究チーム長。

日付	9時半～10時半	10時45分～11時45分	13-14時	14時15分～15時15分	15時半～16時半	16時45分～17時45分	18時半
11/5 月			受講者到着	活断層・地震研究センターの研究業務概要、日本列島の地質と地震(岡村)	海岸の地形や地質の発達史(宍倉)	地形や地質調査(津波堆積物調査含む)による海溝型地震の長期予測(宍倉)	歓迎会
11/6 火	活断層の基本的性質と調査方法(吉岡)	地下水等総合観測による東海・東南海・南海地震予測(小泉)	2011年東北地方太平洋沖地震が地震学に投げかけた問題(桑原)	南海トラフ巨大地震について(岡村)	南海トラフ巨大地震に関する質疑応答(岡村・桑原・小泉)	本研修に関する感想・意見交換-1	
11/7 水	活断層データベースの解説と使い方(吉岡)	地震に関連する地下水観測データベースの解説と使い方(松本)	地質図の利活用(齋藤真)	ジオパークについて(下川)	地質標本館見学(下川)	本研修に関する感想・意見交換-2	
11/8 木	東海～紀伊半島～四国の直下で起きているスロー地震(安藤)	海溝型巨大地震に誘発される内陸直下地震(今西)	自由研修	自由研修	自由研修		
11/9 金	福島県いわき市周辺の巡検:2011年4月11日に発生した、福島県浜通の地震(M7)の地表地震断層の露頭や地震性地滑りの跡の見学、地震後に温泉が噴き出した場所の見学等(小泉・武田)						

表1 2012年度のプログラム。()内は担当者。

があることを考慮すると、11月ではなくもう少し早めにこの研修を受けた方がより効果的かもしれない。」とか「今回は参加者が別々の宿に個別に泊まったが、同じ宿にした方が一体感があり、自治体同士の情報交換もより効果的になる。」という趣旨の研修実施上の具体的な改善案もありました。他方、「メールで案内が来たが、文書の方がありがたい。」「5日間の日程は長すぎるので3日位にした方が参加しやすい。」という趣旨の意見には考えさせられました。前者については、日程を決めるのが遅れたことがメールで連絡せざるを得なかった大きな理由です。今後は、日程だけでも早く決めて早期の文書による連絡をしたいと思います。後者については、確かに全日程に参加したのは6人中1名だけでした。今までは、主に駿河・南海トラフに近くて地震防災に関心の深い自治体を対象としてきたので、5日間と長めの研修期間を設定してきましたが、全国の自治体を対象と考える場合は、日程の短縮も考慮すべきかもしれません。今後考えて行きたいと思います。

このような研修を行なって、自治体の防災担当者に知識を深めてもらうことに加えて、研究者とのつながりをもってもらうことも大事だと考えています。そのためには、研修を続けていくことが最も大切と考えています。頂いたいくつかの課題を解決しつつ2013年度もこの研修を行ないたいと思います。



写真2 11月9日の巡検の様子。福島県浜通りの地震（2011年4月11日、M7.0）の地表地震断層である湯ノ岳断層露頭を見学している所。



写真3 11月6日の感想・意見交換会の様子。

外部委員会等 活動報告 (2012年12月)

2012年11月21日

地震予知連絡会 (桑原、小泉、松本出席 / 東京)
「地殻活動概要」、重点検討課題「世界の巨大地震・津波」について議論をおこなった。

2012年11月22日

原子力規制委員会 東北電力東通原子力発電所敷地内破砕帯の調査に関する有識者会合 (栗田出席 / 東京)

2012年12月11日

南海トラフ巨大地震モデル及び首都直下地震モデル検討会 (岡村出席 / 内閣府)
南海トラフ巨大地震及び首都直下地震による長周期地震動など

2012年12月11日

地震調査委員会 (岡村出席 / 文部科学省)
11月の地震活動

2012年12月13日-14日

原子力規制委員会 東北電力東通原子力発電所敷地内破砕帯の調査に関する有識者会合 (栗田出席 / 青森)

2012年12月17日

地震防災対策強化地域判定会 (小泉出席 / 気象庁)
東海地方周辺の最近の1ヶ月のデータを持ち寄って検討し、東海地震発生可能性について協議した。

2012年12月18日

地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会第23回活断層分科会 (吉岡・近藤出席 / 東京)

2012年12月20日

原子力規制委員会 東北電力東通原子力発電所敷地内破砕帯の調査に関する有識者会合 (栗田出席 / 東京)
第1回評価会合

2012年12月26日

原子力規制委員会 東北電力東通原子力発電所敷地内破砕帯の調査に関する有識者会合 (栗田出席 / 東京)
第2回評価会合

2012年12月21日

地震調査研究推進本部第123回強震動評価部会 (栗田出席 / 東京)
第123回強震動評価部会

2012年12月26日

地震調査研究推進本部地震調査委員会第186回長期評価部会 (吉岡出席 / 東京)

2012年12月28日

南海トラフ巨大地震モデル及び首都直下地震モデル検討会 (岡村出席 / 内閣府)
南海トラフ巨大地震及び首都直下地震による長周期地震動、過去の津波などについて議論した。