

Mon. Sep 16, 2019

ROOM A

award lecture | General session | S20. Award Ceremony and Lecture

[S20]PM-1

chairperson:Kazutoshi Imanishi(AIST), Jun Kawahara(Ibaraki University)

1:15 PM - 2:25 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S20] President speech

1:15 PM - 1:18 PM

[S20] Award ceremony

1:18 PM - 1:25 PM

[S20-01] [INVITED]Study on broadband strong ground

motion: observed characteristics and

methodology for prediction

*Asako Iwaki¹ (1. National Research Institute for Earth
Science and Disaster Resilience)

1:25 PM - 1:45 PM

[S20-02] [INVITED]Data assimilation towards

understanding and predicting slip behavior on

subducting plates and reconstructing better

seismic wavefields

*Masayuki Kano¹ (1. Graduate School of Science,
Tohoku University)

1:45 PM - 2:05 PM

[S20-03] [INVITED]Mathematical modeling of interface

effects on dynamic rupture

*Shiro Hirano¹ (1. Dept. Sci. Eng., Ritsumeikan Univ.)

2:05 PM - 2:25 PM

award lecture | General session | S20. Award Ceremony and Lecture

[S20]PM-1

chairperson:Kazutoshi Imanishi(AIST), Jun Kawahara(Ibaraki University)

Mon. Sep 16, 2019 1:15 PM - 2:25 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S20] President speech

1:15 PM - 1:18 PM

[S20] Award ceremony

1:18 PM - 1:25 PM

[S20-01] [INVITED]Study on broadband strong ground motion: observed characteristics and methodology for prediction

*Asako Iwaki¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:25 PM - 1:45 PM

[S20-02] [INVITED]Data assimilation towards understanding and predicting slip behavior on subducting plates and reconstructing better seismic wavefields

*Masayuki Kano¹ (1. Graduate School of Science, Tohoku University)

1:45 PM - 2:05 PM

[S20-03] [INVITED]Mathematical modeling of interface effects on dynamic rupture

*Shiro Hirano¹ (1. Dept. Sci. Eng., Ritsumeikan Univ.)

2:05 PM - 2:25 PM

1:15 PM - 1:18 PM (Mon. Sep 16, 2019 1:15 PM - 2:25 PM ROOM A)

[S20] President speech

1:18 PM - 1:25 PM (Mon. Sep 16, 2019 1:15 PM - 2:25 PM ROOM A)

[S20] Award ceremony

Study on broadband strong ground motion: observed characteristics and methodology for prediction

*Asako Iwaki¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

・はじめに

強震記録は震源断層から表層地盤まで地震波が伝わる過程の様々な情報を含んだデータである。強震動に関する研究は、大地震時の強い揺れやそれに伴う現象の生成要因を、強震記録をはじめとした観測記録解析や理論・モデルに基づく数値シミュレーションによって分析することで進められてきた。その中で、強震動予測とはさまざまな知見に基づいて強震動の生成過程をモデル化し将来発生しうる地震による揺れを予測することである。さらに、地震の発生可能性や強震動予測のバラツキを確率論的にモデル化することで地震ハザード評価がなされ、そこに社会的影響を加味したものが地震リスク評価となる。

強震動の研究は自然現象の解明が根底にある理学的側面を持ちながらも、表層地盤応答や構造物への影響、強震動予測の観点からは工学の各分野とも密接に関連する。本講演では強震動の現象理解から予測モデル構築について、著者のこれまでの取り組みや周辺の研究動向を研究背景とあわせて紹介し、今後の展望についても触れたい。

・平野部での強震動

人口と社会機能が集中する大都市の多くは平野または盆地に位置する。平野内では地震波速度の遅い堆積層で地震波が増幅し、また震源から遠く離れていても特に周期1～数秒以上の長周期地震動が長時間継続することが知られており、それらは平野や盆地の二・三次元的な地下構造の影響を強く受ける(e.g. Kawase and Aki 1989; Frankel 1993)。このような地震動については地下構造モデルの構築とそれを用いた地震波伝播シミュレーションが行われてきた(e.g. Iwata et al. 2008; Koketsu et al. 2012)。震源・地下構造モデルに基づく地震波伝播シミュレーションはモデル化精度の限界から概ね1秒以上の長周期帯域に限られ、それより短周期の地震動は決定論的にモデル化されない要素を含むと捉えて、長周期側とは別の計算手法が取られることが多い。著者らは、長周期の理論計算に組み込まれた情報を短周期地震動予測にも活かすため、観測記録の分析により長周期と短周期地震動の経験的な関係性を用いた広帯域地震動予測手法を開発している(Iwaki et al. 2016)。この周期帯域間の関係性にモデルを介さないdata-drivenな予測器の開発も現在進められている。

・断層近傍の強震動

陸域の活断層帯では多くの被害地震が発生しており、強いパルスや地表永久変位を伴う特徴的な断層近傍強震動が観測されている。記録の解析によって震源像が明らかになるとともに、強震動予測のための知見が得られてきた(e.g. Hartzell and Heaton 1983; Kamae and Irikura 1998)。日本では断層すべり分布の不均質性の特性化とアスペリティモデルに基づく震源モデル開発が精力的に進められ(e.g. Somerville et al. 1999, 入倉・三宅2001)、地震調査研究推進本部(以下、地震本部)による標準的な強震動予測手法に取り入れられ継続的に改良されている(「レシピ」; 地震本部2017)。また最近では米国南カリフォルニア地震センターの広帯域地震動プラットフォーム(SCEC BBP, <https://github.com/SCECcode/bbp>)上でも公開され客観的な性能評価や他手法との比較が可能になっている。予測性能評価においては予測地震動の平均レベルとバラツキが重視される。後者は日本の強震動予測において従来あまり重視されていなかったが、特に断層近傍では断層の位置形状や断層内部のパラメータの不確実性によって予測地震動が大きくばらつく(e.g. Iwaki et al. 2017)。活断層調査情報や震源物理の知見に基づき断層近傍強震動予測の高度化を進めるとともに、バラツキの定量評価において観測記録の空間的・時間的な不足を断層モデルに基づくシミュレーションで補うことで、確率論的ハザード評価とシミュレーションの融合(e.g. Graves et al. 2011)が実現すると考えている。

・地震ハザード評価

地震ハザード評価について、現在は全国の概観的な情報として全国地震動予測地図（地震本部, 2018）やその情報を提供するプラットフォーム(J-SHIS; www.j-shis.bosai.go.jp)がある。高度化した社会において、国・自治体・企業等が地震に対するリスクヘッジを行うことで災害時の被害軽減や素早い回復につなげることは可能であり重要である。各主体にとって体系化された地震ハザード・リスク情報が整備されれば、情報技術の活用等によってそれはより現実的になると思われる。

Data assimilation towards understanding and predicting slip behavior on subducting plates and reconstructing better seismic wavefields

*Masayuki Kano¹

1. Graduate School of Science, Tohoku University

大気海洋分野で先駆的に研究されているデータ同化はベイズ統計学に基づき物理数値モデルに観測データを統合する計算技術である。従来の地震学では観測データ解析と物理数値モデリングは独立に行われることが多かったが、近年の地殻変動・地震観測網の充実や計算機性能の向上に伴い、緊急地震速報や波動場・津波の即時予測などの研究においてデータ同化の有効性が示されている[例えばHoshiba and Aoki, 2015; Maeda et al. 2015; Gusman et al. 2016; Wang et al. 2017; Furumura et al. 2019]。筆者らは、以下に述べるように、これまでデータ同化を用いて余効すべりやスロー地震などの沈み込み帯の断層すべりの理解や予測、地震波動場推定の高度化に向けた研究を行ってきた。本講演では、行ってきた研究の概要を時系列に従って、その経緯を踏まえながら紹介する予定である。

(1)アジョイント法による余効すべり発生域の摩擦特性の解明と余効すべりの予測

プレート沈み込み帯で観測される様々な時定数を持つ断層すべり現象は、主にプレート境界面の摩擦特性の違いを反映していると考えられる[例えばYoshida and Kato, 2003]。従って摩擦特性を観測データから推定することにより、より定量的にプレート境界のすべりの挙動を知ることができる。加納他[2010]やKano et al. [2013]は、速度状態依存摩擦構成則を仮定して計算される断層すべりの数値シミュレーションに、断層すべり速度を観測データとしてアジョイント法により同化し、プレート境界の摩擦特性を推定する手法を開発した。さらに、2003年十勝沖地震の余効すべり発生域の摩擦特性の空間分布を推定し、余効すべりの予測性能が向上することを示した[Kano et al. 2015]。この成果は地殻変動データから摩擦特性が推定できること、断層すべりの予測問題に対するデータ同化の有効性を示している。

一方で、アジョイント法は大自由度の問題に対して適用可能ではあるが、最適値のみを推定するため、推定した摩擦特性やすべりの状態の推定誤差の評価が困難であった。近年、二次のアジョイント法を用いてより簡便に不確実性を評価する方法が確立されたため[Ito, Nagao, Kano et al. 2016]、この手法をプラグインすることで、今後不確実性を含む摩擦特性の推定や断層すべりの時空間発展の予測が可能になることが期待される。

(2)レプリカ交換モンテカルロ法による地震動イメージング

大地震発生時に都市の構造物における地震応答を数値計算で即時的に評価することは、救助活動の円滑化や二次災害の軽減に向けて重要な課題である。この地震応答の計算には、構造物直下における地震動が入力として必要となる。Kano et al. [2017a, GJI]は、限られた地震観測点での波形記録から、地下構造に関するパラメータを推定することで構造物直下における波動場を推定する手法を開発した。その際、マルコフ連鎖モンテカルロ法の一つである、レプリカ交換モンテカルロ（REMC）法を用い、推定するパラメータの事後確率分布からの実現値を得た。REMC法は、特に多峰性のある確率分布から効率よくサンプリングが可能な手法である。開発手法を首都圏地震観測網（MeSO-net）で得られた地震記録に適用し、周期3秒程度以上の長周期の地震波動場の推定が行えることを示した[Kano et al. 2017b, JGR]。推定手法の更なる高度化により、地震発生時の即時的な被害推定や二次災害の軽減への貢献が期待される。

(3)スロー地震発生場の理解と予測に向けた研究

(1)で開発した手法をスロー地震（特にスロースリップイベント, SSE）に用いることを念頭に[例えばHirahara and Nishikiori, in revision; 伊藤他、本大会]、観測データに基づきスロー地震の発生場の理解に関する基礎研究を行った。

Kano et al. [2018a, Sci Rep]は、四国西部の深部低周波微動活動を詳細に調べ、微動の移動速度とエネルギー輻射レートの間には正の相関があること、またこの正の相関は沈み込み帯の微動パッチが数十kmスケールで

走向方向に不均質な強度を持つというモデル[Ando et al., 2012]で定性的に説明されることを示した。また、この強度の不均質性と、微動の潮汐応答性、微動発生域周辺の流体分布の不均質性が対応していることを解明した。この結果は、スロー地震の発生様式が発生環境で規定されていることを示唆している。

また、Kano et al. [2018c, JGR]は八重山地方において約半年周期で発生している5回のSSEの断層すべりの時空間変化を推定し、超低周波地震や低周波地震との時空間的關係を議論した。これらのSSEはほぼ同じ場所・規模で発生するにも関わらず、断層すべりの加速の様式がSSE毎に異なっており、このことはプレート境界の摩擦特性や流体分布が時間変化する可能性を意味している。今後Kano et al. [2015]で開発したデータ同化手法を適用することで、摩擦特性が時間変化することを地殻変動データから初めて直接拘束できる可能性がある。

これらの研究で使用した各種スロー地震カタログは、「スロー地震データベース」[Kano et al. 2018b, SRL; 松澤ほか、本大会]から取得可能である。

Mathematical modeling of interface effects on dynamic rupture

*Shiro Hirano¹

1. Dept. Sci. Eng., Ritsumeikan Univ.

1. はじめに

「断層」という言葉は文字通り、震源と媒質境界の位置関係の重要性を表わすものであり、またプレート境界など媒質境界そのものが断層である事例も多い。しかし媒質境界が断層の動的挙動に及ぼす影響を定量化する理論的研究は、異種媒質の固着という境界条件の下、その動的問題の解を構成する数学的・数値的モデリングの難しさに律速される。そこで理論研究では単純化のため、直線的な媒質境界を含む2次元2層弾性媒質中の亀裂を考えることが多い。ここでは媒質境界と交差する亀裂、および媒質境界に沿う亀裂のそれぞれについて、著者による理論的研究を紹介する。

2. 媒質境界と交差する亀裂の動的破壊

媒質境界と交差する断層の挙動の理解は、地震学的な地下の解像度を考慮すれば、観測よりも理論的なモデリングに頼るところが大きい。準静的問題については、直線亀裂 [Rivalta et al. 1999] や屈曲亀裂 [Hirano & Yamashita 2011] などを仮定した多くの解析的・数値的研究事例がある。これに対し動的破壊が媒質境界を突き破る際の挙動については、著者らが極めて精密な数値解析を可能にした。

Hirano & Yamashita [2015] は震源物理学における境界積分方程式法(BIEM)を拡張し、媒質境界と交差する動的 mode-III 破壊の数値解析を行なった。BIEM は滑りに伴う Green 関数の具体的表現を要する。これを解析的に求めることに成功し、数値計算を実施した結果、断層面上を駆け戻る反射波が滑りを促進あるいは抑制することを確かめた。このことは、近年提案された高速滑りにおける速度依存型摩擦則との相互作用により、破壊伝播や滑り分布が時空間的に複雑たりうることを示唆する。また導出した Green 関数由来の積分核は、それ単独でもある種の転位から放射される2層媒質中の弾性波の厳密解を与え、既に後発の数値計算手法 [Kusakabe & Kame 2017] にとってのベンチマークとなるなど、有益な応用可能性を持つ。

3. 媒質境界に沿う亀裂の動的破壊

プレート境界などは媒質境界に沿って動的破壊が伝播する典型的な場所であり、その地震発生頻度や観測データの豊富さから、多くの研究が試みられてきた。特に境界に沿う動的刃状転位が特定の一方方向に走りやすいような法線応力擾乱を作り出すことが理論的に示されると [Weertman 1980]、以来それを基にした数値解析の結果が地震学的・地質学的観測と比較され、トランスフォーム断層のような境界に沿って mode-II 破壊が一方方向に伝播しやすい傾向が確かめられた。理論的進展は80年代以降乏しかったが、Hirano & Yamashita [2016] によって、滑り弱化型摩擦下で一方方向破壊を生じやすいことの裏付けも得られた。

一方で沈み込み帯の長大逆断層では、2004年 Sumatra 地震のように時として海溝軸に沿う一方方向破壊が伝播し、その変位は mode-III 破壊によってよく近似される。ところが媒質境界に沿う mode-III 破壊が作る応力擾乱は対称であり、非対称な破壊を説明するとは考えられておらず、一般に両方向ではなく一方方向破壊に終わりやすい理由は謎とされていた [McGuire et al. 2002]。

Hirano [2019] は媒質境界の効果だけでなく、海洋プレートが海溝軸に対し斜めに沈み込むこと、および動的破壊により断層面外に非弾性変形が生じることの3つが合わさって非対称なエネルギー散逸率が生じ、mode-III 破壊が一方方向に伝播しやすくなるメカニズムを提案した。更に Sumatra 地震を含め既知の M8.2 以

上の海溝型巨大地震について、11イベント中少なくとも8イベントが理論と整合的な方向に破壊している可能性を論じた。これは強震動や津波到達時間の分布など、海溝型地震の一方向破壊がもたらす影響を予測する手がかりとなりうる結果である。

4. 終わりに

以上のように、著者は2層媒質中における破壊の問題を理論的に扱ってきたが、その工程は、断層面上に応力の時空間分布を与え、滑りの時空間分布を求めるための特異積分方程式を解く作業であった。静的・動的いずれにせよこの工程は難易度が高く、安易な数値計算に頼れば極めて精度の低い解しか得られない。これを高精度に解くための解析的・数値的アプローチは、地震学者のみならず、応用数学・計算工学者らの興味も惹いてきた。講演では、著者の経験に基づくそれら異分野研究者らとの学際的協働の可能性にも触れる。