

Thu. Oct 29, 2020

ROOM A

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

[S20]AM

chairperson: Ryosuke Ando (University of Tokyo)

9:00 AM - 12:00 PM ROOM A

[S20] President speech

9:00 AM - 9:04 AM

[S20] Award ceremony

9:04 AM - 9:43 AM

[S20-01] The Evolution of the ETAS Model and the Modeling of Causal Inference

○Yosihiko Ogata¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

9:43 AM - 10:13 AM

[S20-02] Three-dimensional dynamic rupture propagation including fault weakening processes and stress conditions

○Yumi Urata¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

10:13 AM - 10:33 AM

[S20-03] Study of stress magnitude in the lithosphere based on earthquake data

○Keisuke Yoshida¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

10:33 AM - 10:53 AM

[S20-04] Research on the seismogenic environment bridging the gap between laboratory rock experiments and natural earthquakes

○Nana YOSHIMITSU¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

10:53 AM - 11:13 AM

[S20-05] Improvement and Prospect of GNSS Earth Observation Network system (GEONET)

*GEONET Group, Geospatial Information Authority of JAPAN¹ (1. Geodetic Observation Center / Geography and Crustal Dynamics Research Center, Geospatial Information Authority of JAPAN)

11:13 AM - 11:33 AM

[S20-06] Establishment of regular GNSS-A seafloor geodetic observation technique and its contribution to seismology

*Masayuki FUJITA¹, Yoshihiro MATSUMOTO¹, Mariko

SATO¹, Tadashi ISHIKAWA¹, Shun-ichi WATANABE¹,

Yusuke YOKOTA² (1. JHOD; Hydrographic and

Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. IIS

UT; Institute of Industrial Science, University of

Tokyo)

11:33 AM - 11:53 AM

[S20] Discussion

11:53 AM - 12:00 PM

Award lecture | Regular session | S20. Commemorative lectures from SSJ award recipients

[S20]AM

chairperson: Ryosuke Ando (University of Tokyo)

Thu. Oct 29, 2020 9:00 AM - 12:00 PM ROOM A

[S20] President speech

9:00 AM - 9:04 AM

[S20] Award ceremony

9:04 AM - 9:43 AM

[S20-01] The Evolution of the ETAS Model and the Modeling of Causal Inference

○Yosihiko Ogata¹ (1. The Institute of Statistical Mathematics)

9:43 AM - 10:13 AM

[S20-02] Three-dimensional dynamic rupture propagation including fault weakening processes and stress conditions

○Yumi Urata¹ (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

10:13 AM - 10:33 AM

[S20-03] Study of stress magnitude in the lithosphere based on earthquake data

○Keisuke Yoshida¹ (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University)

10:33 AM - 10:53 AM

[S20-04] Research on the seismogenic environment bridging the gap between laboratory rock experiments and natural earthquakes

○Nana YOSHIMITSU¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

10:53 AM - 11:13 AM

[S20-05] Improvement and Prospect of GNSS Earth Observation Network system (GEONET)

*GEONET Group, Geospatial Information Authority of JAPAN¹ (1. Geodetic Observation Center / Geography and Crustal Dynamics Research Center, Geospatial Information Authority of JAPAN)

11:13 AM - 11:33 AM

[S20-06] Establishment of regular GNSS-A seafloor geodetic observation technique and its contribution to seismology

*Masayuki FUJITA¹, Yoshihiro MATSUMOTO¹, Mariko SATO¹, Tadashi ISHIKAWA¹, Shun-ichi WATANABE¹, Yusuke YOKOTA² (1. JHOD; Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. IIS UT; Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

11:33 AM - 11:53 AM

[S20] Discussion

11:53 AM - 12:00 PM

9:00 AM - 9:04 AM (Thu. Oct 29, 2020 9:00 AM - 12:00 PM ROOM A)

[S20] President speech

9:04 AM - 9:43 AM (Thu. Oct 29, 2020 9:00 AM - 12:00 PM ROOM A)

[S20] Award ceremony

The Evolution of the ETAS Model and the Modeling of Causal Inference

*Yosihiko Ogata¹

1. The Institute of Statistical Mathematics

1. はじめに

日本の地震活動の研究には、豊富なデータベースのもと、世界をリードしてきた長い伝統がある（例えば宇津徳治著「地震活動概論」参照）。これらの研究成果をもとに、講演者は主に「条件付強度関数」という点過程概念に基づく統計的モデルを考案して、地震発生データを予測する研究や、データの診断解析で捉えられる地震活動の異常現象の研究に取り組んでいる。これらの研究は、統計的予測理論や数値解析法などの実用化と相まって進展している。

2. ETASモデル

ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence) モデル¹⁾は、短期的な地震発生率を予測するための余震活動の経験的根拠に基づいて作成されたものである。ETASモデルによって地震活動の特徴づけ、そのパラメータを直接的に最尤法で求める。ETASモデルは各地域の標準的な地震活動の中長期的な変化をシミュレーションする際に利用されることが多いが、ストレス場の変化に伴う地震活動の微妙な異常変化（相対的な静穏化や活性化）を検出するための「ものさし」としても利用できる。群発活動の中には、時間の経過とともに常時地震活動パラメータが変化する非定常ETASモデルが適しているものが多い。このような地震活動の異常は、例えば、スロースリップによる応力の変化や、流体の断層への侵入（断層の弱化）によると考えられ、これらと地震活動の間の定量的な関係を提供する可能性がある。

3. 時空間ETASモデルと地震予測の高度化

地震活動の近傍・遠方界への影響を表現した様々な時空間的ETASモデルが紹介されて以来、地震発生の物理モデルも参入した予測性能実験が、国際プロジェクトCSEPで10年以上にわたって比較検討されている。

中でも階層的時空間ETAS (HIST-ETAS) モデル²⁾は、地震活動の空間的非一様性を表すために、主要パラメータが地震の位置にも依存するモデルである。これは任意の位置でのパラメータの値が、デロネ三角形網の各頂点での値（デロネ係数）によって線形的に補間（区分的線形関数）されるものである。地震の数に比例して係数の数が膨大になるので、適切な推定には区分線形関数に滑らかさの制約を課して、「罰則付き対数尤度」を最大化する逆問題（インバージョン）として、ベイズ最適解（MAP解）を求める。これで地震の集中地域での高解像度の変化を提供し、大地震の初期段階で、実際の余震発生分布に良く対応した時空間予測を提供する。特に、余震や群発地震の非等方性の短期空間予測を準リアルタイムで提示する。他方、このような誘発効果を分離した常時地震活動のMAP解は、空間的に強度が数桁の違いで変化し、大地震の長期的予測に効果的である。すなわちHIST-ETASモデルの常時地震強度の高い地域は、大地震の予測および歴史地震の多発域と調和的であり、さらにGNSS測量結果による最大せん断応力の高蓄積率の地域と良く対応している。

同様に、関東地方の深さ100kmまでを、震源位置などを頂点としたデロネ四面体で分割した区分的線形関数による3次元版の階層的時空間ETASモデルを作成し、東北沖地震の効果を考慮した総合モデルは、顕著に関東直下の地震予測の実用性を示している。プレート境界では、東北沖で誘発された地震は常時地震活動が高いエリアで優先的に発生している。

4. 地震活動の因果推論

時を遡り、条件付強度関数で定義されたホークス過程を、講演者が初めて目にしたのは1970年代のことである。当時、統計数理研究所の赤池弘次博士は、ホークス型モデルを時系列解析の「自己回帰モデル」に擬え、予測の観点から尤度法を適用し、AICで誘発の応答関数の形状を推定する取り組みを周囲に推奨した。地震データが十分にあれば、そのような応答関数は大地震とともに急上昇し、その後速やかに減少するが長期的

には裾が重く、暗に大森・宇津型の減衰関数を示唆していた。さらに演者は、従来の統計検定解析法の障害となっていた続発性に対して、ホークス過程を組み入れて、地震活動の周期性（季節性）や因果関係などを調べるモデル³⁾を目指した。これらのモデルは地震活動に対する外部変数からの影響の有意性を調べるのに有用で敏感であった。その後ホークス型モデルに代わってETASモデルを使って、前駆的事象系列、異常地磁気変動、ひずみ応力変化の時系列、人口注水などの地震活動への誘発の可否（情報量利得）や応答の遅れなど、予測における確率利得の計算に応用されつつある。これらの発展について紹介する。

図の説明： HIST-ETASモデルを1923年から2018年に南西日本で発生したM4.5の地震に合わせた地震活動の時空間画像（条件付き強度の対数スケールの等値面）。昭和南海地震後の時間の表面と交差した活動度を対数スケール等高線で示している。

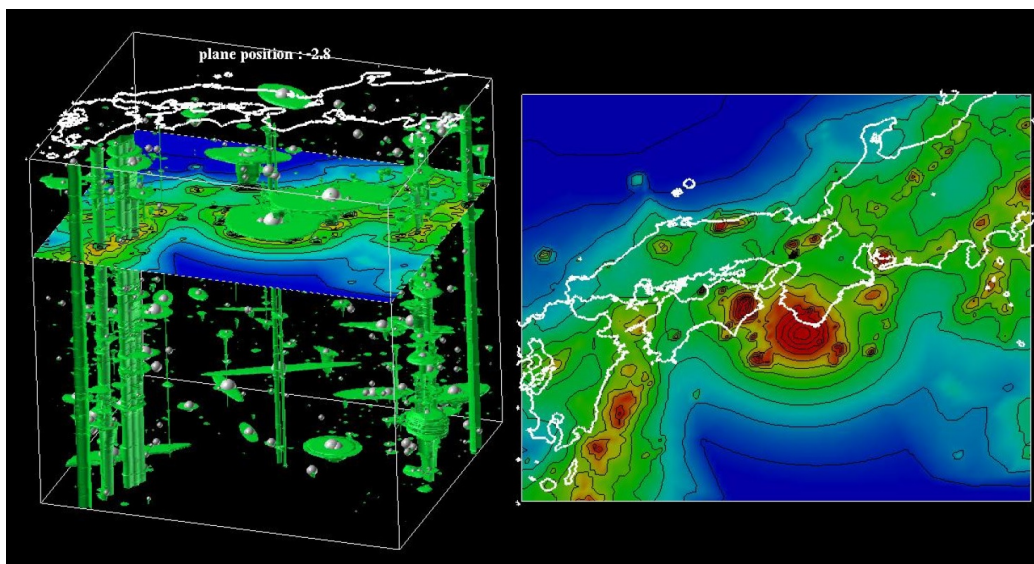
参考のソフトウェアとマニュアル：

1) ETAS modelなど: *Computer Science Monographs*^{*)}, No. 33, 統計数理研究所, 2006, および, XETAS (TSEIS -ETAS, GUIモジュール) > 連絡先 鶴岡弘@地震研究所

2) HIST-PPMモデルと予測：統計数理研究所 *Computer Science Monographs*^{*)}, No. 35に投稿中（2020），当面<http://bemlar.ism.ac.jp/ogata/HIST-PPM-V2/> に格納。

3) 周期性，因果性モデルなど: *Computer Science Monographs*^{*)}, No. 32, 統計数理研究所, 2006.

*) *Computer Science Monographs*はhttps://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index_j.html 参照。



Three-dimensional dynamic rupture propagation including fault weakening processes and stress conditions

*Yumi Urata¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

(1) はじめに

地震の発生と成長は、断層面に働く応力状態と断層の摩擦挙動によって決まる。地震発生層の応力場と岩石摩擦に関する研究は、主に地震学・地質学・測地学的な観測や観察、室内実験によって進められてきた。一方、地震の発生と成長の物理を理解するため、ミクロな物理過程からマクロな応力蓄積・断層破壊までの幅広い時空間スケールを扱う、数値シミュレーション研究が行われてきた。著者は、理論・数値モデル研究を主軸に、実験・観測データを組み合わせることで、断層摩擦と応力を推定し、地震の発生と成長の物理モデルを構築することに取り組んできた。

(2) 断層摩擦発熱と流体の相互作用が動的破壊過程に与える影響の解明

断層摩擦の急激な弱化によって、断層はすべりやすくなり、大地震に至る。断層摩擦の急激な弱化の要因の一つとして、断層摩擦発熱による間隙流体圧の増加（thermal pressurization、以下TP、Sibson 1977）がある。TPは理論的・地質学的には予想されていたが、地震時の断層破壊に与える影響は未評価であった。そこで著者らは、TPを3次元の動力学断層破壊伝播の数値計算に組み込み、TPによってすべり量や破壊伝播速度が増加、断層破壊が連動しやすくなり、結果として地震規模が大きくなることを定量的に明らかにした（Urata et al. 2008, 2012）。また、TPは分岐断層系での破壊伝播経路を変え（Urata et al. 2014）、津波の発生にも影響を及ぼしうる。さらに、TPの関連現象である、ダイラタンシー（断層破壊による空隙生成）や水の物性論から予想される相変化を動的破壊伝播計算に導入し、それらの効果の強さや複雑な影響を明らかにした（Urata et al. 2013, 2015）。これらの研究により、地震の成長に関する理解を深化させた。

(3) 岩石摩擦実験における断層面の摩擦の推定

小スケールの岩石摩擦実験から構築された速度状態依存摩擦則が、大スケールの自然地震でも成り立つのかは、地震学の大きな問題の一つである。一方、大型岩石を用いた摩擦実験（Fukuyama et al. 2014）では、固着すべりが起こるために、一般的な方法で摩擦パラメータを推定することができない。そこで、固着すべりの数値シミュレーションによって大型岩石摩擦実験データを再現することで、不安定すべり中の摩擦パラメータを推定する手法を確立した。その結果、スケールの効果として、従来の摩擦則で記述できない、断層面の状態の変化があることを明らかにした（Urata et al. 2017a）。

(4) 大地震が連続発生するための応力と断層摩擦の力学条件の解明

大地震の発生を規定する要因である応力場や断層面における摩擦パラメータ等を実際の観測データから明らかにすることは、大地震の発生前に現実的な地震シナリオを想定する観点からも重要である。著者らは、2016年熊本地震について、大地震を連続発生させる力学条件を解明した。まず前震による応力変化と本震破壊による応力解放に必要な力のバランスの理論的考察によって、応力と断層摩擦のとりうる範囲を推定した。次に、地震観測データから推定された応力の向きを用い、応力と断層摩擦を変化させた約150ケースで本震の動力学断層破壊シミュレーションを実施した。本震を再現できるのはわずか数ケースであり、本震を再現しうる応力場および断層摩擦の推定に成功した（Urata et al. 2017b）。この結果は、観測データから制約される応力場と動的破壊伝播シミュレーションを組み合わせることで、巨大地震の現実的な発生シナリオを合理的に提示しうることを示している。

Study of stress magnitude in the lithosphere based on earthquake data

*Keisuke Yoshida¹

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University

1. はじめに

地球内部で進行する変形過程の統合的な理解のためには、応力状態の知識が不可欠である。これまでの研究により、地球内部の応力場の“方向”の特徴が大まかに明らかになってきた。しかしその一方で、応力場の“大きさ”に関する情報は、その推定の困難さにより中々得られないままであり、このことが地震の発生をはじめとした地球内部の変形機構の理解を困難にしている。本講演では、筆者がこれまでの研究で得た日本列島地震発生域の応力状態およびそれと地震発生機構の関係に関する知見を紹介する。

2. 応力場の回転を利用した応力の大きさの推定に関する研究

東北日本の応力状態は大局的には東西圧縮の逆断層型であることが知られており、一つの支配的な考えは、それがプレート相対運動に由来する強い東西圧縮応力に起因するというものだった。筆者らは、地震データを用いた応力テンソル・インバージョンにより、応力場の方向の空間変化を調べ、それが実際にはプレート相対運動だけでなく地形や過去の地震活動などの様々な影響を受け変化していることを示した。例えば、標高が高い地域に横ずれ断層場が分布する (Yoshida *et al.*, 2015a, Tectonophysics)。また、複数の大地震震源域において、その静的応力変化と非常によく似た特徴的な応力場の空間変化のパターンが存在する (e.g. Yoshida *et al.*, 2014a, JGR, 2015b, GJI, 2016a, GJI)ことが分かった。

筆者らは、観測応力場と理論に基づくモデル応力場の比較により、東北日本の差応力が数十 MPa程度と小さい場合にのみ、前者は地形による影響により、後者は本震の静的応力変化の影響により説明可能であることを示した。それに基づき、東北日本の地震発生場の差応力が数十 MPaと非常に小さく、同程度の大きさの外的影響を受けた際に応力場の方向が擾乱されてしまうモデルを提案した (Yoshida *et al.*, 2015a, 2019, PAGEOPH)。東北日本内陸域では、2011年東北沖地震後に東西圧縮逆断層型と大きく異なる地震が生じるようになった。Yoshida *et al.* (2012, GRL)は、それが2011年東北沖地震による応力変化により応力場が回転したことに起因する可能性を示したが、Yoshida *et al.* (2019)は上記モデルの空間不均質な応力場に起因する選択的地震トリガリングが原因である可能性を考え、観測データ解析からそれを支持する結果を得た。このことは、応力場の地震前後の変化などの検出・議論の際には、額面的な誤差だけでなく、仮定、特に空間変化に関するものの妥当性についての注意深い考慮が極めて重要であることも示す。

3. 間隙水圧・断層強度変化に伴う地震活動・震源過程の変化に関する研究

上記で推定したような差応力が非常に小さい場で地震を生じさせる機構として、間隙水圧増加による断層強度低下が考えられる。筆者らは、2011年東北沖地震後にせん断応力が減少したにも拘らず生じた東北日本の誘発地震活動を用いることにより、間隙水圧・断層強度低下が地震活動・震源過程に与える影響を調べた。特に、東北沖地震のおよそ1週間後から生じた山形-福島県境周辺の顕著な群発活動を調べることにより、通常推定できない断層強度・間隙水圧の時間変化を推定することに成功した (Yoshida *et al.*, 2016b, JGR)。また、地震活動度、b値、応力降下量などのパラメータが、それと同期して変化することを示し (Yoshida *et al.*, 2017, JGR)、それらが断層強度・間隙水圧の変化を反映している可能性を示した。

4. 小地震の震源過程・構造推定手法の高度化に関する研究

上記で得た応力降下量と間隙水圧・断層強度の同期した時間変化から、地震の応力降下量から断層強度や間隙水圧の情報が得られる可能性が示唆される。一方、小中地震の応力降下量の推定手法には様々な仮定が含まれており解釈が非常に難しい。一つの大きな仮定は破壊伝播の等方性に関するもので、実際に観測されている directivity効果と明らかに矛盾している。そこで非対称な破壊伝播も考慮して応力降下量・破壊伝播速度等を

同時推定する新しいアプローチを模索している (Yoshida, 2019, Geoscience letters). また近傍の地震の波形を用いて地震波に含まれる伝播の影響を除去して震源過程の情報を抽出する方法 (経験的グリーン関数法) が広く用いられているが, 多くの場合に微妙な位置の違いにも影響を受けるはずである. そのわずかな差を用いて地震発生域の流体の情報を取り出す試みを行っている (Yoshida, 2020, GJI).

5. おわりに

以上, 筆者が自然地震データを用いて行ってきた応力・断層強度に関する研究についてまとめた. 講演時には上記で取り上げられなかった著者以外の研究も含めて紹介を行う予定である. これらの研究の中で幾度も直面したように, 地震データを用いた解析では現実と異なる仮定が必要な場合が多く, 得られた結果・誤差を鵜呑みにできないことが少なくない. そのような一筋縄でいかない状況下で, 常に解析結果の前提を疑い何が妥当か自分の頭で考え, 可能であればそこから何か引き出せるような研究を行っていきたいと考えています.

Research on the seismogenic environment bridging the gap between laboratory rock experiments and natural earthquakes

*Nana YOSHIMITSU¹

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

はじめに

直接観測が難しく複雑な地震現象の素過程を観察する手段として、室内実験を用いた観測が1970年代頃から盛んになった。その後さらに、断層サイズ数mm～数cmという室内実験スケールと自然地震の間を埋めることを目指して、金鉱山における半制御地震発生実験のような観測も行われるようになった。岩石の圧縮破壊実験は、地震発生に至るまでの破壊面近傍での詳細な観測を可能とし、大きな断層滑りに向けて微小破壊が増加する様子や(Yanagidani et al., 1985)、弾性透過波の速度・振幅の低下(Lockner et al., 1977; Yukutake et al., 1989)などが報告されてきた。これらの記録には収録機器や観測の制約により自然地震の解析手法をそのまま適用できないという課題があったが、近年の技術の進歩によりこの課題を解決できる見通しが立ってきた。本講演では課題解決のための著者らの取り組みを周辺の研究動向や今後の展望と併せて紹介する。

実験システムの改良

岩石試料や鉱山地震観測の利点である震源極近傍観測のメリットを生かし、波形から震源や伝播経路の情報を明瞭に検出するには、媒質の微細な変化を捉えるために波の高周波成分を逃さず収録する必要がある。実験用の広帯域センサには耐圧性能がないため、地震発生環境に近い圧力下では利用することができなかった。また、自然地震と同様の解析を実施するには、高速・多点での観測が求められる。著者らは波形収録システムの改良とセンサの耐圧性能向上に取り組み、広帯域・高速・多点・連続での波形収録を実現した(Kawakata et al., 2011)。このシステムで収録した実験波形には一般的な自然地震解析と全く同じ手法を適用できるという点で、革新的である。

収録された波形を後続波まで利用するためには、有限の実験試料の中で反射波や変換波がどのようにふるまうのか把握する必要がある。筆者らは3次元差分法計算で、反射・変換波や表面波などの後続波を含む岩石試料内の全波動場を再現し、将来のより詳細な透過波研究への道を拓いた(Yoshimitsu et al., 2016)。

破壊進行過程

円柱状の岩石試料の圧縮破壊にともなう断層成長を観察する実験では、人工的に弾性波を透過させて震源断層付近の応力状態や不均質状態を推定する。Yoshimitsu et al. (2009) やYoshimitsu and Kawakata (2011) では上述の計測システムを用いて破壊中の岩石試料内で断層透過波をモニターし、破壊に至るはるか前から媒質の不均質性が高まるだけでなく、破壊直前に急激に波が通りにくくなるフェーズがあることを明らかにした。さらに、繰り返し地震を人工波源のように利用することによって、金鉱山における地震についても破壊の前から震源近傍で媒質の不均質性が地震発生前から進行していることを明らかにした(Yoshimitsu et al., 2012)。断層サイズ数百mの金鉱山と、数cmの実験室という中・小2つの異なるスケールで、破壊面近傍における減衰の強化が観測されたことは非常に興味深い。

震源特性の階層性

岩石試料内の破壊現象と自然地震の破壊サイズには数桁にわたるスケールギャップがあり、これらを直接比較してよいのかという疑問があった。規模の違う破壊の比較には、地震の震源特性を表す震源パラメタが用いられる。自然地震においては既往研究により震源パラメタが規模依存性を持つことが示されていた(e.g., Kwiatak et al., 2011)。Yoshimitsu et al. (2014) はこのスケーリング則がマグニチュード-7に相当する実験試料内での微小破壊にも当てはまることを初めて明らかにし、破壊サイズ数mm～cmの岩石試料、数m～kmの誘発地震、そして数km～数十の自然地震までが同一の表現で説明できることを示した。この発見は実験地震学の有用性を高めるとともに、破壊現象の幅広い階層性を示した。

今後に向けて

実験室における広帯域観測システムを用いた研究はまだ始まったばかりである。軽量・小型の広帯域センサの開発などもおこなわれており、今後さらなる観測・解析の深化が期待される。また、小スケールの研究を他のスケールと比較するうえで考慮すべき点や、微小イベント波形ならではの解析上の課題解決などについて、統計学的手法の導入などによる他分野の研究者との協働の可能性についても紹介する。

Improvement and Prospect of GNSS Earth Observation Network system (GEONET)

*GEONET Group, Geospatial Information Authority of JAPAN¹

1. Geodetic Observation Center / Geography and Crustal Dynamics Research Center, Geospatial Information Authority of JAPAN

1. GEONETについて

国土地理院のGNSS連続観測システム（GEONET：GNSS Earth Observation Network system）は、南関東・東海地域のGPS観測網（110点）と、全国GPS連続観測網（100点）を引き継ぐ形で、1996年4月に運用を開始したシステムで、全国に展開したGNSS連続観測局（電子基準点、2020年現在1,318点）と観測データの収集、解析、提供を行う中央局から構成されている。

GEONETは、地震調査研究の基盤的観測網であり、平時においては、プレート運動に伴う日本列島の定常的な地殻変動、地震発生時には地震時の地殻変動や余効変動を捉えている。またスロースリップ現象を日本各地で発見する等、地震調査研究に不可欠なツールとなっている。

2. システムの高度化

GEONETは、運用開始から20年以上が経過しており、その間、GPSを始めとする衛星測位システムを巡る環境は、利活用の観点を中心として急速に変化してきた。そういった変化に対応するため、GEONETではデータ収集のリアルタイム化やマルチGNSS対応等を行い、常に高精度な位置情報を提供する基盤となってきた。

1) データ収集のリアルタイム化

2002年に地殻変動の監視を強化するため、電子基準点の1秒間隔の観測データを常時接続の通信回線（IP-VPN）を使ってリアルタイムで収集するシステムを整備した。このリアルタイムデータを利用するとリアルタイムでcm級測位が可能となるため、測量の効率化や測位の高精度化を期待する民間の要望に応え、リアルタイムデータの民間事業者への配信を開始した。開始当初、配信は200点だけだったが、2004年には約1,200点に拡大し、全国で電子基準点を用いたネットワーク型RTK（Realtime Kinematic）によるcm級のリアルタイム測位が可能な環境が整った。

また、2018年11月から正式な運用を開始した、我が国の準天頂衛星システム（QZSS）のサービスの一つであるセンチメートル級測位補強サービス（CLAS：Centimeter Level Augmentation Service）は、特に自動走行・安全運転支援や高精度位置情報サービスでの利用が期待されており、その実現のためにはGEONETのリアルタイムデータが必要不可欠なものとなっている。

2) マルチGNSS対応

GEONETは、当初米国のGPSだけを観測していたが、2010年に準天頂衛星システムの初号機が打ち上げられたことを契機に、各国が整備を進めてきた衛星測位システムを利用できるよう、観測機器の更新や中央局の拡充を進めた。その結果、2012年には準天頂衛星とグロナス（GLONASS、ロシア）の観測を、2016年にはガリレオ（Galileo、欧州連合）の観測を開始し、これにより利用できる衛星数が増え、都市部や山間部等、上空の視界に制約がある地域においても電子基準点を使った測量や測位が可能となった。特に、ネットワーク型RTKによる測位の性能を安定的なものとし、リアルタイム測位が不可欠な建設機械の自動制御を行うICT施工の利用が拡大した。

3. システムの安定運用

GEONETは、止めてはならないインフラであり、観測データの取得率99.5%以上、リアルタイムデータの遅延時間1秒以内という目標を設けている。現在、取得率（99.77%）や遅延時間（0.4秒程度）は目標を満たすが、その維持には確実な保守が必要である。現地の電子基準点の保守は外部委託しており、異常発生時には原

則7日以内に復旧される。中央局の運用・保守も外部委託しており、夜間・休日も含めGEONETの状況を常に監視している。また、電子基準点は、比較的観測条件の良い場所に設置されているが、周辺環境の変化によって観測データの品質が低下し、測位結果に影響が出ることがある。一番多いのは、周辺の樹木が伸長し低仰角の衛星が観測できなくなり、測位結果のバラツキが大きくなるケースである。そのため、電子基準点は5年に一度現地調査を行い、適宜伐採も行っている。

4. 今後

GEONETは、これまで、位置情報の基盤として、測量や測位における利活用はもちろん、巨大地震における震源断層モデルの推定、余効変動の詳細な把握、またプレート間の固着分布の推定やスロースリップ現象の発見をはじめとした様々な地殻変動の把握に真価を発揮してきた。例えば、GEONETが捉えた地震・火山活動に伴う地殻変動情報は、遅滞なく、気象庁、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会、地震防災対策強化地域判定会、地震調査委員会、火山噴火予知連絡会、地震予知連絡会等の関連機関に提供され、地震・火山活動のメカニズムの評価や減災のための活動に活用されている。

今後も、国土地理院では、GEONETの安定的な運用と、高精度な位置情報の提供を行うとともに、電子基準点の高度化や解析方法の改良等を行い、観測データの品質やサービスの向上等に努めていく。

最後に、GEONETの20年以上にわたる運用と高度化は、国土地理院に在籍した多数の職員の尽力によるものであり、今回の技術開発賞の受賞はこうした長年の努力の成果を評価していただけたものだと感じている。また、GEONETは数多くの研究者や測量関係者に支えていただいております、関係各位に深く謝意を表する。

Establishment of regular GNSS-A seafloor geodetic observation technique and its contribution to seismology

*Masayuki FUJITA¹, Yoshihiro MATSUMOTO¹, Mariko SATO¹, Tadashi ISHIKAWA¹, Shun-ichi WATANABE¹, Yusuke YOKOTA²

1. JHOD; Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. IIS UT; Institute of Industrial Science, University of Tokyo

海溝型巨大地震の発生メカニズムにアプローチするためには、地震発生時及びその前後のプレート境界の状態や地球物理学的情報が重要である。このような情報を得るためには、プレート境界震源域直上、特に海底における地殻変動データの観測が必要となる。陸域での精密な地殻変動観測技術は、GEONETをはじめとするGNSS観測技術によって20世紀後半に急速に発展したが、海底の精密な地殻変動観測については、海水の存在が精度向上を阻んでいた。このため、20世紀末の時点では海底が地殻変動観測データの空白域となっていた。

私たち海上保安庁海洋情報部では、長きにわたり海図作成を原点として培ってきた海中計測技術、測位技術を活かし、この海底精密測位という技術課題に挑戦してきた。その実現が、今回受賞対象となったGNSS技術と音響測距技術を結合する「GNSS-A海底地殻変動観測」技術（左図）である。

GNSS-A技術の原理は、1980年前後にScripps海洋研究所で提案されたが[たとえばSpiess, 1985, MG], 実際の技術開発は、同研究所を含め、1990年代に入ってから進展した。海上保安庁海洋情報部では2000年代初頭から、船上及び海底に設置する観測装置（ハードウェア）、データ解析技術（ソフトウェア）の開発を進め[Fujita et al., 2006, EPS], 2010年頃までに、ほぼ現在のGNSS-A海底地殻変動観測システムの構築を実現した。

具体的な測位方法は以下のとおりである：海底に設置した複数の音響トランスポンダ（海底局）が、刻々と移動する船上局から送信された音響信号を受信し、船上局に対して受信信号をそのまま返信することにより、その往復走時を計測する。送受信時の船上局の位置は、ハイレートGNSSによって決定されるため、これらをその時点の往復走時から求めた海中距離と組み合わせることにより海底局の位置を決定する。

これらの技術開発に合わせて、日本海溝及び南海トラフの近傍陸側に、海底観測点を展開した。この過程で、宮城県沖でのプレートの沈み込みに伴う定常的な地殻変動[Sato et al., 2013, JGR] や2005年宮城県沖の地震に関連する地殻変動を捉える[Matsumoto et al., 2006, EPS; Sato et al., 2011, GRL] などの重要な初期成果を得た。

2011年東北地方太平洋沖地震時には、震源域直上の海底で24mの地震時変位を捉えるなどの成果が得られた[Sato et al., 2011, Science], これを契機とした南海トラフ側の大幅な観測点の増設により、現在では30点近い観測点網が構築されている（右図）。

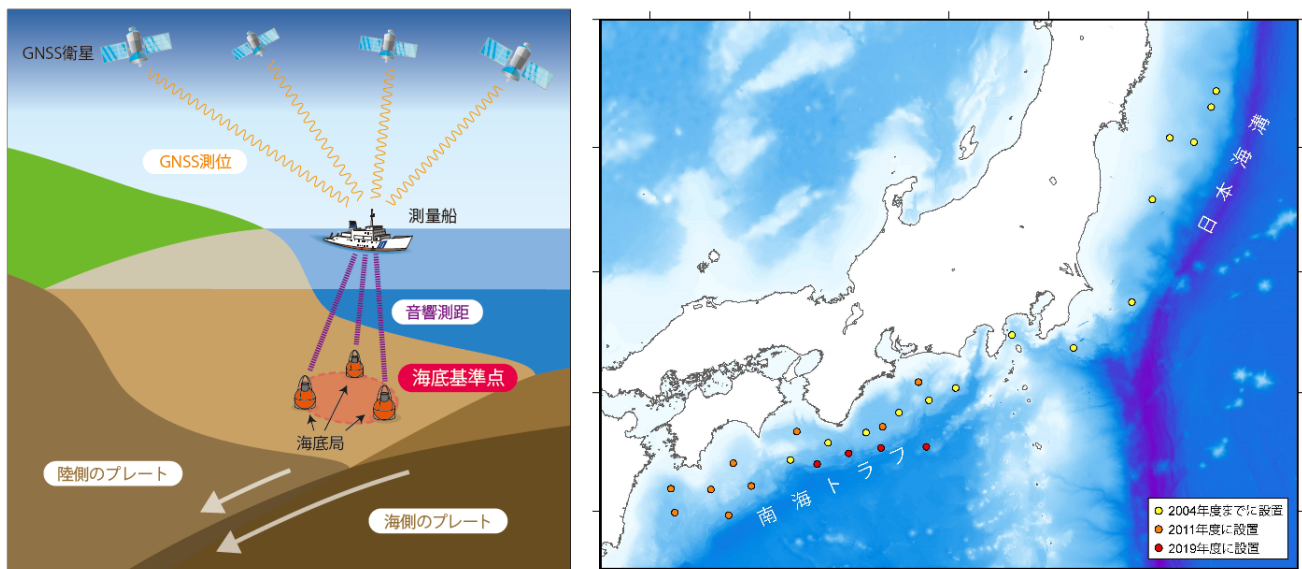
また、2010年代には、「定常的なGNSS-A観測」を目指した研究開発により、観測の高精度化、高頻度化が図られた[たとえばIshikawa et al., 2020, Frontiers in ES]. 近年では、東北沖地震の余効変動の観測[Watanabe et al., 2014, GRL], 南海トラフ沿いプレート間固着状態の導出を可能とする変動速度分布の検出[Yokota et al., 2016, Nature], 浅部スロースリップの検出[Yokota & Ishikawa, 2020, Sci Adv] など、次々とより詳細な観測成果の導出に成功している。

これらの観測成果は、他の技術では捉えることができない海底の地殻変動情報を数多く提供しており、海溝型地震の調査研究分野に大きく貢献している。また、この分野においては、データ論文やデータDOIを活用した

オープンデータシステムの開発も先駆的に進めており、GNSS-A観測システムによって取得されたデータが、今後さらに地震学・防災分野で活用され、社会貢献が進められていくだろう。

謝辞：本技術開発を通じて、これまで貢献されてきた多くの研究者、技術者の皆様、船舶運航・観測作業にご協力いただいた皆様、多大なご支援・ご助言を賜りました関係の皆様に、改めて厚く御礼を申し上げます。

図：（左）GNSS-A海底地殻変動観測技術の模式図，（右）2020年4月の観測点網



11:53 AM - 12:00 PM (Thu. Oct 29, 2020 9:00 AM - 12:00 PM ROOM A)

[S20] Discussion