

測位衛星搬送波解析による次世代型の早期津波予測技術の開発

代表研究者	鴨川仁	静岡県立大学グローバル地域センター
共同研究者	楠城一嘉	静岡県立大学グローバル地域センター
共同研究者	金井龍一	University College London

1 研究の背景と目的

近い将来の発生が懸念される南海トラフ巨大地震に対し、減災に効果のある津波の早期予測技術が強く求められている。現行の気象庁の津波警報・注意報は地震発生後約3分という早さで発表されるが、その予報は全国を66に分けた津波予報区を単位とするものであり、個々の沿岸住民にとっては大まかな情報にとどまる。加えて、地震計に基づく即時的なマグニチュード推定は、断層破壊そのものが終了するまでに5分以上を要する巨大地震では困難であり、長周期地震波形が揃う発生後30分程度を経なければ正確なマグニチュードを決定できない。このため、規模がM8を超える巨大地震では、あらかじめ計算された断層モデルのデータベースから対応する津波伝搬予測を即時に引き出すことができず、結果として津波規模を過小評価するという本質的な課題がある。とりわけ南海トラフ巨大地震のように広い震源域をもつ地震では、断層破壊の進展に時間を要し、初期段階の地震波形だけでは最終的な規模を見積もることが原理的に難しい。

加えて、地震の規模が判明したとしても、実際にどの程度の津波が発生するかは別の問題である。津波伝搬計算に最も重要な二次元的な初期津波波源を地震学的に正確に求めることは難しく、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)で想定をはるかに上回る大津波となった一因も、地震学的には予測しにくい海溝軸付近の大規模な海底変動(オーバーシュート)にあった。裏を返せば、シミュレーションの初期条件として最も重要な二次元初期津波高を早期に把握できれば、計算機による津波伝搬の高精度な予測は技術的に可能である。実際、海底津波計やGPS海洋ブイの観測波形を初期条件として津波伝搬を再現する手法は確立しており、課題はむしろ、津波発生のごく初期に波源情報をいかに早く・面的に得るかにある。海底津波計やGPS海洋ブイは、設置された地点における波形を高い精度で与えるものの、観測点の配置に依存するため、波源の二次元的な形状を早期に面的に把握するには限界がある。電離圏観測は、この面的・早期という二つの要請に、既存の地上インフラのみで応えうる点に独自の意義がある。すなわち、早期津波予測の精度を決める最大の要因は、津波そのものを伝搬計算する技術ではなく、その出発点となる初期津波波源をどれだけ早く正確に与えられるかにある。

地震・津波に伴う電離圏変動の観測は、1960年代のHFドップラー観測に始まり、GNSSによる全電子数(Total Electron Content; TEC)観測が可能になってからは、これらの現象が空間的にも解明されてきた。研究代表者のグループは、電離圏データを用いた震央決定や津波伝搬の検知に成功してきた。世界各地のGNSSデータが無償で公開されていることも研究を後押しし、北海道大学(日置ら)、京都大学・名古屋大学・情報通信研究機構(齋藤・大塚・津川ら)、フランス・パリ地球物理研究所(IPGPのLognonnéら)、東京大学地震研究所(綿田ら)など、数多くのグループがこの分野を推進している。本現象は既存の地上GNSS受信網のみで早期津波予測につながる可能性をもつことから、科学雑誌Nature等でも研究代表者らやIPGPらの成果が紹介され、かねてから注目を集めてきた。すなわち、本分野は基礎科学としての関心と防災実装への期待の双方から、国際的に活発な研究が続けられてきた領域である。

しかしながら、従来の地震・津波電離圏擾乱の検知方法では、発生地震のマグニチュードや津波の規模を知ることは難しく、早期津波予測技術として実用には至らなかった。これは、励起された音波・重力波の数分周期の波の振幅だけでは、複数の波の重なりと地磁気の影響が作用し、規模を推測できないためである。研究代表者らは、後述する津波電離圏ホールおよび初期TECパルスの検知により、これらの問題を大きく解決する現象を見出した。本研究は、これらの課題を解決する次世代型の早期津波予測技術を、測位衛星(GNSS)の搬送波解析により得られるTECの観測に基づいて開発することを目的とする。少なくとも変動が電離圏に伝わるまでの約10分のタイムラグはあるものの、本手法は既存の地上GNSS受信網のみで初期津波波源を面的に捉えられる点で、早期津波予測に大きく貢献できると期待される。

2 研究の方法と成果

2-1 電離圏全電子数による津波検出の原理と二つの予測指標

(1) 電離圏全電子数観測と電離圏擾乱

GNSS 衛星と地上受信局の間を伝搬する搬送波は、分散性媒質である電離圏プラズマ中で周波数に依存した位相遅延を受ける。二つの搬送波周波数間の位相差から、衛星・受信局間の TEC（単位は TECu 、 1.0×10^{16} electrons/ m^2 に相当）が得られ、その主要な寄与は高度約 300km の F 領域の電子に由来する。観測の簡便のため、F 領域を高度 300km の薄層と近似し、衛星から受信局への視線がこの層を貫く点を電離圏貫通点（Sub-Ionospheric Point; SIP）と呼ぶ。日本の国土地理院が展開する GNSS 連続観測網（GEONET）は 1300 点以上の受信局を有し、世界的にも受信局数とサンプリング頻度が増大しているため、地震・津波が引き起こす電離圏擾乱を空間的・時間的に詳細に捉えることが可能になっている（図 1）。TEC 観測は受信局と衛星の組ごとに独立した視線を与えるため、稠密な受信網では多数の視線が津波波源域上空を覆い、擾乱の時間発展を面的に追跡できる。

(2) 地震・津波後の電離圏応答と複数の波動モード

地震・津波後の電離圏応答は、複数の起源をもつ波動から構成される。第一に、本震の約 9～10 分後、震源・津波波源域の近傍で、最初に到達した音波により TEC が変動する初期 TEC パルスが現れる。第二に、レイリー波の伝搬に伴って励起された音波による擾乱が、レイリー波速度（約 2.5km/s）で伝搬する。第三に、音波共鳴に起因する周期 150～210 秒程度の変動が現れる。そして第四に、本震後 10～20 分にかけて、津波波源域の上空に半径数百 km に及ぶ大規模な TEC 減少が定在的に発生する。これが津波電離圏ホール（Tsunami Ionospheric Hole; TIH）であり、津波に伴う電子数の顕著な減少として明瞭に観測される（図 1）。これらの走行性擾乱は、震源・津波波源域から赤道側と極側で非対称に伝搬する。これはプラズマの運動が地磁気の磁力線に影響されるためである。

TIH は、津波が海面を持ち上げることで生じた大気の上昇流が、F2 領域付近で電子・イオンの再結合を促進し、電子数が減少することで形成されると考えられている。研究代表者らはこの TIH を 2011 年東北地方太平洋沖地震において見出し（Kakinami & Kamogawa et al., 2012）、その後、世界の大地震においても同様の現象が検証され（Astafyeva et al., 2013）、数値シミュレーションによっても再現された（Shinagawa et al., 2013）。TIH は、これまで誰も直接観測できなかった津波波源を宇宙から面的に捉えることに相当し、いわば宇宙から撮影した初期津波のスナップショットとみなすことができる。この面的な観測は、点的な海底観測やブイ観測では得られない情報であり、津波伝搬計算の初期条件として直接活用できる可能性をもつ。

(3) 最大津波高と関連する二つの予測指標

研究代表者らは、TIH の最大 TEC 減少率（背景 TEC に対する減少の割合の絶対値）が最大初期津波高と関連することを示した（Kamogawa et al., 2016）。この関係は $H_{\text{max}} = 1.559 \times \text{Log}(R) + 1.5771 [\text{m}]$ （ R は最大 TEC 減少率[%]、 H_{max} は最大初期津波高[m]）で表され、最大 TEC 減少は本震後 20 分前後に現れる。この相関は、既存の地上受信網による TEC 空間観測が、沿岸到達まで 20 分以上を要する近地津波に対して、初期津波高の空間像を与えうることを意味する。近地津波は地震発生から沿岸到達までの時間が短く、早期かつ面的な波源把握の価値が高いため、TIH 観測の意義はとくに大きい。

さらに本研究では、TIH に伴って本震後 10 分程度で現れる初期 TEC パルスの上昇率もまた、最大初期津波高と関連すると考え、関係性を示す。以上のことから、TIH の最大 TEC 減少率（20 分前後）と初期 TEC パルスの上昇率（10 分程度）という二つの指標を、いずれも電離圏観測から最大初期津波高を即時推定する予測量として活用できる。とりわけ初期 TEC パルスは TIH よりも早期に得られる利点をもつ。本研究では、これら二指標を早期津波予測に活用するための要素技術を開発した。なお両指標は、TIH という一連の電離圏応答における異なるフェーズ（初期の上昇と後続の減少）に対応するものであり、物理的に独立な二つの観測量として、互いの推定を補完する。

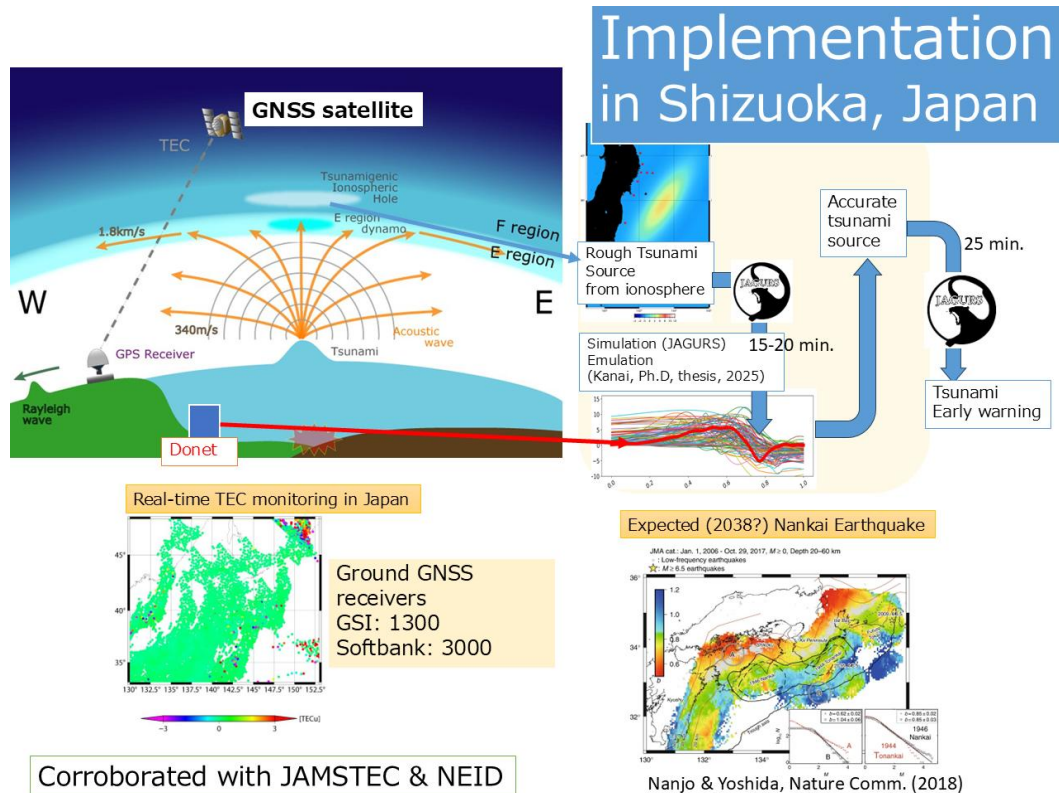


図1 早期津波予測技術の全体構想図 (GNSS-TEC 観測からリアルタイム早期警報まで)

2-2 津波電離圏ホール観測データのノイズ除去とシステム化

(1) 解析手順

初期 TEC パルスの上昇率を求めるため、本研究ではリアルタイム運用を見据えた一連の自動解析手順を確立した。手順は次のとおりである。まず GNSS (GPS) の RINEX データから斜め全電子数 (slant TEC; sTEC) の時系列を取得し、衛星の軌道情報から衛星地心座標を求め、両者から電離圏貫通点 (SIP) の緯度・経度および天頂角の時系列を算出する。次に、本震の 30 分前から 60 分後までの区間を切り出し、天頂角を用いて sTEC を鉛直全電子数 (vertical TEC; vTEC) に換算する。

続いて、本震前 30 分から本震後 6 分までのデータを最小二乗法により 2 次関数でフィッティングし、フィット曲線と観測値の差分として、衛星・受信局ごとに固有のバイアス成分を除いた $\Delta vTEC$ を求める。初期 TEC パルスの上昇率は、背景 TEC の大小に影響されるため、全球電離圏マップ (Global Ionosphere Maps; GIM) から求めた絶対 vTEC で規格化し、変化率 ($\delta vTEC/vTEC \times 100[\%]$) として評価する。これにより、日照条件や季節・地方時の異なる事例を横断的に比較できる。最後に、本震発生時から本震後 13 分までの最大 $\Delta vTEC$ を用いて初期 TEC パルスの上昇率を算出する。なお、地磁気嵐に伴う電離圏嵐は TEC 変動を生じるが、その卓越周期は数時間オーダーであり、本解析が対象とする数分スケールの初期パルスに対しては背景としてほぼ一定とみなせるため、上昇率の評価に大きな影響を与えない。

(2) 初期 TEC パルスの自動判定

本研究では、初期 TEC パルスを定量的に自動判定するアルゴリズムを新たに実装した。具体的には、 $\Delta vTEC$ およびその時間微分 $d\Delta vTEC$ をゼロアップクロス演算によって凹凸ごとの区間に分割し、最初の凹凸に対して 2 倍以上の振幅をもつ凹凸が現れた場合に「パルスあり」と判定する。あわせて、SIP 位置から求めた地磁気の伏角と観測天頂角との差を評価軸に加え、判定の信頼度を高めた。これにより、従来は目視に依存していたパルス検出を機械的に再現できるようになり、リアルタイム処理への適用に必要な計算の高速化も進めた。自動判定の導入は、多数の観測点・衛星の組を連続的に処理する実運用において、検出の客観性と再現性を確保するうえで重要である。また、自動判定により、人によって判断が異なりうるパルスの有

無を一貫した基準で決定でき、推定結果の品質管理にも寄与する。

(3) 対象地震と相関の評価

解析対象は、十勝沖地震（2003）、紀伊半島沖地震（2004）、新潟県中越沖地震（2007）、東北地方太平洋沖地震（2011）および同地震の最大前震に加え、日本と同等の地磁気伏角をもつ南米の Maule 地震（2010）、Iquique 地震（2014）、Illapel 地震（2015）など、津波規模の幅広い事例に拡張した。これらの地震では、日本（地磁気緯度 20°N～40°N）およびチリ（同 20°S～40°S）の稠密～中密度の GNSS 受信網により、津波波源域上空の TEC データを得ることができ、地磁気の伏角をほぼ一定とみなせる。各地震の初期津波高は、海岸検潮所や沖合 GPS ブイの観測と整合する津波シミュレーション文献値を用いた。

各地震について、多数の観測点・衛星の組から得られた初期 TEC パルスの上昇率の代表値を統計的に評価し、津波高との関係を求めた。代表値には外れ値の影響を抑えるためにロバストな統計量を用い、関係式の精緻化を進めた。なお、初期パルスの空間分布は TIH の減少域に比べて小さいため、GNSS 受信点の密度すなわち TEC の空間分解能が不足すると、初期津波高の小さい事例では上昇率にばらつきが生じる。この点は、受信網の高密度化や複数衛星系の活用によって今後改善が見込まれる。実際、近年は単一の GPS のみならず複数の測位衛星系が利用可能となっており、同一の津波波源域を覆う視線の本数が増えることで、初期 TEC パルスの空間分解能の向上が期待できる。この空間分解能の向上は、初期津波高の小さい事例での検出能力を高め、適用可能な地震・津波の範囲を広げることにつながる。

得られた関係は、TIH の最大 TEC 減少率と最大初期津波高の相関（Kamogawa et al., 2016）と並び、初期 TEC パルスの上昇率もまた最大初期津波高と相関することを示すものである（図 2）。初期 TEC パルスは本震後約 10 分という TIH より早い段階で得られるため、暫定的ながらより早期の津波規模推定に資する。二つの指標を相補的に用いることで、電離圏観測に基づく早期津波予測の確度を高めることができる。

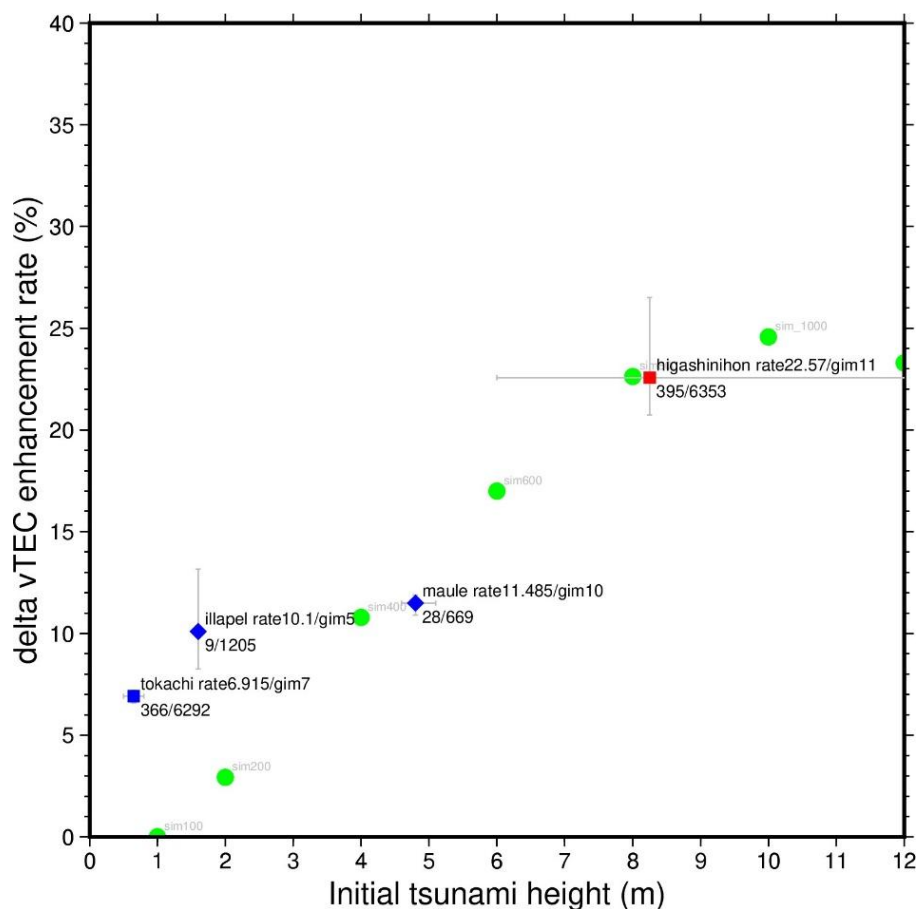


図 2 地震ごとの初期 TEC パルスの上昇率と最大初期津波高の関係図（本研究の解析結果。TIH 最大 TEC 減少率との比較を含む）

2-3 津波電離圏ホール観測データのノイズ除去とシステム化

リアルタイムでの実用に向けては、観測データに含まれるノイズの自動除去が不可欠である。観測された TIH データには、データ欠損や受信装置の不具合に起因するハネ値などのノイズが含まれる。本研究では、すでに確立しているノイズ除去手法を汎用化・システム化し、実用に耐える計算速度を得るための高速化を進めた。具体的には、ハネ値の自動判別と除去、平滑化処理の最適化を行い、多数の受信局・衛星の組み合わせを連続的に処理できるようにした。これにより、TIH および初期 TEC パルスの検出を、人手を介さずリアルタイムに近い速度で実行する基盤を整えた。計算の高速化は、津波到達までの限られた時間内に波源情報を提供するうえで、実用化の鍵となる要素である。とくにリアルタイム処理では、入力データの取得・前処理・ノイズ除去・指標算出までを一貫して自動化し、観測から数分以内に結果を出力できる構成とすることが求められる。

2-4 ラフな津波波源からの高精度な波源復元

TIH の形状・範囲からは、初期津波波源の中心位置、水平・鉛直方向の広がり、高さ分布、走向といったパラメータをラフに推定できる。本研究では、このラフな津波波源を高精度な波源復元へと繋ぐため、英国 University College London (UCL) の Serge Guillas 教授らとの共同研究において、統計的手法に基づく要素技術の開発を進めた。本要素技術は、TIH が与える初期情報と津波伝搬の数値シミュレーションを組み合わせ、観測された津波波形と整合する波源パラメータの範囲を絞り込むことで、津波波源の推定精度を段階的に向上させることを目指すものである（図 1）。なお本要素技術は現在論文化を準備中である。TIH が与えるラフな波源は、膨大な波源パラメータ空間のなかから探索の初期範囲を限定する役割を果たし、これにより高精度化のための計算を現実的な時間内に収めることができる。

高精度な津波波源の復元には、海底津波計による実観測波形が重要な役割を果たす。2011 年東北地方太平洋沖地震以降、津波を伴う大地震が想定される太平洋側には、海底ケーブルを用いた大規模な海底津波計ネットワークが構築された。海底津波計のみの観測から津波波源を推定する手法は、気象庁気象研究所を中心に開発されている（tFISH; 沖合津波波形逆解析に基づく津波即時予測手法）が、本研究の枠組みは、TIH の与える初期波源情報を組み合わせる点で、現存の技術のなかでも早期かつ高精度な津波波源情報を与えることを期待される。海底観測のみに依拠する手法と比べ、電離圏由来の初期波源情報を加えることで、波源推定の収束を早め、かつ観測網の空白域を補完できる点に本研究の優位性がある。

高精度な津波波源が求めれば、計算機による津波伝搬計算によって、沿岸各地への到来津波高を高い精度で予測できる。本研究の枠組みでは、まず電離圏観測からラフな津波波源を準リアルタイム（本震後 8~12 分程度）で提供し、続いて上記の高精度化を経て、より確度の高い津波早期警報（本震後 25 分程度）へと繋ぐことを想定している。この二段階の枠組みは、初期 TEC パルスと TIH という観測タイミングの異なる指標、およびラフな波源と高精度な波源という精度の異なる情報を、時間軸に沿って段階的に提供する設計思想に基づいている。津波伝搬の数値計算自体は確立した技術であり、ボトルネックは正確な初期条件すなわち二次元津波波源をいかに早く与えるかにある。本研究の枠組みは、まさにこの初期条件を電離圏観測と海底観測の統合によって与えるものである。

2-5 ラフな津波波源からの高精度な波源復元

研究代表者の所属機関は、2024 年より海洋研究開発機構（JAMSTEC）および防災科学技術研究所と共同研究契約を結んでおり、将来の南海トラフ地震の破壊開始点になると想定される紀伊半島沖の海底に配備された地震・津波観測監視システム（DONET）の情報を、将来的にリアルタイムで入手できる環境にある。本研究では、これらの海底津波計データをリアルタイムで取り込むことを想定し、電離圏由来のラフな津波波源情報と海底観測とを統合した早期警報システムの構築を検討した。地上の GNSS 受信網（国土地理院約 1300 点、Softbank 約 3000 点）によるリアルタイム TEC 監視と組み合わせることで、静岡県沿岸を対象とした到来津波高情報の提供を見据えた構想を整理した（図 1）。静岡県は南海トラフ地震による津波被害が懸念される地域であり、本システムの実装は地域防災への直接的な貢献となる。

なお、国土地理院が提供するリアルタイム測位衛星受信データからは、全電子数データを入手することが可能であり、これをリアルタイムで取り込み TIH を監視するシステムの構築を進めた。DONET データのリアルタイム入手にはデータを分岐して送信するシステムの導入が必要であるため、本研究のシステムが完成し実

証実験を行う段階で、その手続きおよび技術開発を行う予定である。

システムの実証に向けては、2011 年東北地方太平洋沖地震のデータを南海トラフ地震に見立て、緯度・経度を移動させるなどして仮想的に再現し、遡及的な予測実験を行う計画である。これにより、電離圏観測から海底観測との統合、津波伝搬予測に至る一連の処理を、リアルタイム運用を想定した条件下で検証できる。

2-6 2011 年東北地方太平洋沖地震を用いた検証と二指標の比較

開発した手法の妥当性は、観測事例の最も豊富な 2011 年東北地方太平洋沖地震(M9.0)を用いて検証した。本地震では、本震の約 9 分後に初期 TEC パルスが震源の赤道側で明瞭に出現し、続いて本震後 10～20 分にかけて TIH が津波波源域の直上に発達した。走時時間曲線上では、津波波源由来の音波（初期 TEC パルス）、レイリー波伝搬に伴う音波、音波共鳴、TIH という複数の擾乱が、それぞれ異なる見かけ速度で識別される。これらのうち、初期 TEC パルスと TIH の最大 TEC 減少が、最大初期津波高との相関に用いる二つの指標である。

本震後 10.5 分の初期 TEC パルスと、約 23 分後に最も発達した TIH を比較すると、初期 TEC パルスの正の領域と TIH の減少領域は、いずれも津波波源域に対応して現れる。初期 TEC パルスは早期に得られる一方で空間的な広がりが小さく、TIH はやや遅れて現れるが大きな空間スケールをもち、津波波源の二次元的な形状をより明瞭に与える。したがって両指標は、観測のタイミングと空間情報の点で相補的であり、早期警報においては、まず初期 TEC パルスにより本震後約 10 分で津波規模の暫定推定を行い、続いて TIH により波源形状を含む情報へと更新する運用が合理的である。このように、観測タイミングの異なる二つの指標を時間的に連携させることで、限られた時間のなかでも段階的に確度の高い情報を提供できる。

また、本地震では地磁気活動がやや活発であった（Dst 指数が大きい期間に該当）が、津波由来の TEC 擾乱域の外側では数分以上の周期で有意な変動は認められず、初期 TEC パルスの上昇率の評価が地磁気擾乱によって大きく損なわれないことを確認した。これらの検証により、二指標を組み合わせた電離圏観測が、巨大地震の早期津波予測に対して実効的な初期情報を与えることが示された。この検証結果は、過去の実観測データに基づくものであり、将来の地震に対する遡及的な予測実験の基礎となる。

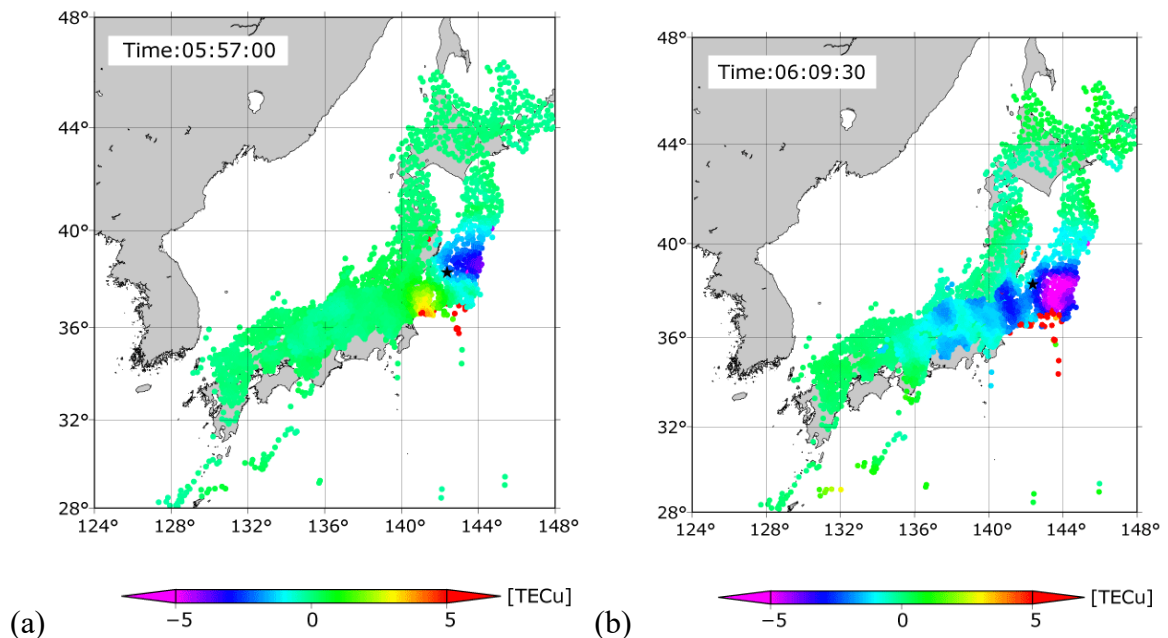


図 3 2011 年東北地方太平洋沖地震における (a) 初期 TEC パルス（本震後約 10.5 分）と (b) TIH（本震後約 23 分）の比較図

3 まとめと今後の展開

本研究により、GNSS 搬送波解析から得られる電離圏 TEC 観測を用いて、最大初期津波高を即時推定する二つの予測指標を整備した。すなわち、TIH の最大 TEC 減少率（本震後 20 分前後）に加え、本震後約 10 分で得られる初期 TEC パルスの上昇率についても、自動解析手順・自動判定アルゴリズム・統計的評価を確立し、最大初期津波高との相関を示した。あわせて、TIH 観測データのノイズ除去の汎用化・高速化、ラフな津波波源からの高精度化に向けた要素技術、DONET との統合を見据えたリアルタイム処理基盤の整備を進めた。とくに、地震計のマグニチュード推定が M8 級で飽和するのに対し、電離圏の応答は実際の津波エネルギーが大きいほど顕著に現れるため、本手法は M9 クラスの巨大地震の早期警報において有用である。電離圏観測は、海底ケーブルや GPS ブイが未整備の海域においても、既存の地上 GNSS 受信網のみで初期津波波源の推定までを本震後 10 分強で行いうる点で、世界的にも適用範囲が広い。台湾、米国、インドネシアなど GNSS 受信点が稠密な地域であれば、その周辺海域でのリアルタイム津波波源の推定が可能である。これは、規模が大きい地震ほど早期予測が難しいという従来の課題に対し、規模が大きいほど信号が明瞭になるという逆の特性を活かせることを意味する。

近年、米国 GPS に加え、日本の準天頂衛星（みちびき）、ロシアの GLONASS、中国の BeiDou、欧州の Galileo など測位衛星の数は激増しており、受信点におけるデータサンプリングも従来の 30 秒から 1 秒へと高頻度化が進んでいる。したがって、TEC 観測の時空間分解能は今後さらに向上すると見込まれ、初期 TEC パルスの検出限界や TIH の空間分解能の改善が期待される。こうした観測環境の進展は、本手法の適用可能な地震規模の下限を押し下げ、より多様な津波事例への展開を可能にすると考えられる。

本研究の主たる目的は実用的な早期津波予測技術の基盤を構築することにあるが、学術的には、地震が引き起こす電離圏・磁気圏変動を包括的に理解することも目的である。これらの研究は、宇宙地震学という新たな学問分野の創出に結びつくものであり、本研究は実用・応用面のみならず学問的発展性も高い。今後は、想定される南海トラフ地震に向けたリアルタイム早期津波予測システムの構築を継続するとともに、国際的な展開を視野に研究を推進する。本研究の成果の一部は、International Tsunami Symposium 2025（インド・ハイデラバード）および AGU Fall Meeting 2025（米国・ニューオーリンズ）において発表した。また、本研究で整備した自動解析・自動判定・統計評価の各要素は、対象地域や測位衛星系を変えても適用可能な汎用性をもつため、世界各地の津波リスク地域への展開基盤となりうる。TIH や初期 TEC パルスのみならず、地震に伴う電離圏・磁気圏の電流系の変動など、固体地球から超高層大気に至る結合過程の理解は、地球物理学の基礎研究としても重要である。今後は、これらの成果を査読付き国際誌において公表するとともに、実証実験に向けたシステム統合とプレスリリース等を通じて、本技術の社会実装を進める。本研究は、宇宙からの津波直接観測という新しい観測パラダイムを、防災の現場で活用しうる技術へと発展させる第一歩である。

【参考文献】

- Kakinami, Y., M. Kamogawa, et al. (2012), Tsunamigenic ionospheric hole, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L00G27.
- Kamogawa, M., Y. Orihara, et al. (2016), A possible space-based tsunami early warning system using observations of the tsunami ionospheric hole, *Scientific Reports*, 6, 37989.
- Astafyeva, E., S. Shalimov, E. Olshanskaya, and P. Lognonné (2013), Ionospheric response to earthquakes of different magnitudes, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1675-1681.
- Shinagawa, H., et al. (2013), Two-dimensional simulation of ionospheric variations in the vicinity of the epicenter of the Tohoku-oki earthquake on 11 March 2011, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5009-5013.
- Kanai, R. (2025), Tsunami estimation using TEC data in the ionosphere and Gaussian process regression as well as functional history matching, Ph.D. thesis, University College London.
- Heki, K. and J. S. Ping (2005), Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236, 845-855.

Nanjo, K. Z. and A. Yoshida (2018), A b map implying the first eastern rupture of the Nankai Trough earthquakes, Nature Communications, 9, 1117.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Current Status of Early Tsunami Warning Using Tsunami Ionospheric Hole Observations	International Tsunami Symposium 2025 (口頭)	2025 年 11 月
Tsunami estimation using TEC data in the Ionosphere and Gaussian process regression as well as functional history matching	International Tsunami Symposium 2025 (ポスター)	2025 年 11 月
Real-Time Tsunami Warning from the Ionosphere: GNSS Detection of Tsunami-Induced Electron Depletion	AGU Fall Meeting 2025 (ポスター)	2025 年 12 月