

## 地震直前の電離圏変化

日置 幸介

**超高層大気は大地震の発生を前もって知っているのか。測位衛星による電離圏観測が示すデータは、直前予知不可能論をゆるがしている。**

■ 2011年3月11日

1995年の兵庫県南部地震を契機に、日本列島には様々な地震計に加え、地殻変動を測るための全球測位衛星システム(Global Navigation Satellite System, GNSS)受信局の密な観測網が展開された<図1>。モーメントマグニチュード ( $M_w$ ) 9の2011年東北地方太平洋沖地震(以後3.11と呼ぶ)は、こういった高精度センサーが敷き詰められた中で発生したため、多くの人は地震直前に何か異常な地殻変動が発見されることを期待した。実際に二日前の前震に続く大き目のゆっくりすべりは見つかったが、それが本震に向けて加速した証拠は見つけられなかった。

3.11以後、専門家は地震には直前予知につながる前兆は存在しないという「政治的に正しい」意見以外を控えるようになり、一方大衆的な雑誌の一部は疑似科学的な予知を繰り返して取り上げ続けている。専門外の人々は何が真実なのかわからず困惑するばかりである。しかし想像を交えて取って言うと、30年後の人々は3.11を、明瞭な短期的前兆が超高層大気で初めて捉えられ、根強い地震予知不可能論が崩れた地震として位置付けるに違いない。

■ 測位衛星で測る電離圏全電子数

大気のとっぺんにある電離圏(通信では電離「層」の呼称が一般的)には、太陽放射によって大気分子からはじかれた自由電子が漂う。電子数は昼間側に多いため、地球上から見ていると、その数は朝に増えて午後には減る日周変化を示す。

GNSS衛星からやってくるマイクロ波は、電離圏を通過する際に無視

できない量の遅延を受ける(電離圏がない場合に比べて十数mも遅れる)。通常はその分散性(周波数が低いほど遅れる)を利用して、複数搬送波での遅延差から補正するため、電離圏遅延は測位精度にあまり影響しない。電離圏遅延は、視線方向に電子数を積分した量のTEC(全電子数 Total Electron Content)に比例する。

そのままのTEC(斜めTEC)は視線が電離圏となす角度に依存する(斜めに貫くと見かけ上多くなる)ので、時間変化を議論する場合は、電離圏を垂直に貫いた時の鉛直TEC(VTEC)に換算する。世界中に無数のGNSS局が存在するが、その生データの多くは多少の時間遅れで自由に入手でき、地殻変動だけでなく電離圏研究にも広く利用されている。

■ 大地震直前にTECが変わる

VTECは正午前後で最も高く、日本では10-30TECU(1TECUは底面積 $1m^2$ の円柱に含まれる電子が $10^{16}$ 個)に達する。3.11が発生したのは午後二時(世界時UTで五時)四十六分であるが、図2aがその前後四時間ほどのVTECの様子である。太陽が傾くにつれてVTECは徐々に減りつつあった。ところが震源近くで、午後二時頃から本来のなめらかな減少に対して正にずれ始めた。異常は地震時に最大となり、地震約十分後に音波の擾乱を受けて揺らいだ後、地震二十分後には平常の値に戻った。なめらかな変化を仮定した標準曲線からのずれ(異常)は元のVTECの一割程度である。正の異常が生じた地理的範囲は、3.11の断層に重なる<図2c><sup>1)</sup>。

この一例だけでは地震の前兆なのか偶然の変化なのか判断できない。2010年2月末に中部チリを襲った $M_w$ 8.8のマウレ地震は深夜に発生したため、VTECは数TECUで低

めに安定していた。ところが地震約40分前にその値が増え始め、地震後に戻ったことがわかった。2004年12月末の朝に発生したスマトラ・アンダマン地震( $M_w$ 9.2)でも同様の異常が見られた。その後の調べでこの現象は $M_w$ がおよそ8.5以上の地震の直前に必ず起こることが確認された<sup>2-3)</sup>。

観測例が増えるとともに、 $M_w$ の大きな地震ほど、(1)大きなTEC変化が、(2)広い範囲に、(3)早く生じるという依存性が明らかになった<sup>3)</sup>。(1)は異常の強さと $M_w$ との関係である。基準曲線の影響を受けにくいVTEC変化率の増加で前兆の強さを定量化すると、それは $M_w$ が大きいほど、また元々の電子数(背景VTEC)が大きいほど強いことがわかった。これまでの様々な地震での観測例を図3に示す。大きな地震が力強い前兆を示すのに対して小さな地震の前兆はあるのかわからないのか良くわからない。

TEC異常は電子の再配置によって生じるため、材料である電子が潤沢な方が(背景VTECが大きい方が)作りやすいのは自然である。 $M_w$ 9級の地震では時刻を問わず前兆が見られるが、 $M_w$ 8級では電子が多い時間帯(昼間)に発生した地震でだけ前兆が見えるようである。 $M_w$ 7級ならVTECが特に多い赤道異常の領域で昼間に起こらないと前兆は小さくて見えない<sup>4)</sup>。

(2)は空間スケールの $M_w$ 依存性であり、 $M_w$ が大きいほど広範囲のTECが変化する( $M_w$ 9で500km程度)。(3)は前兆が始まる時刻の $M_w$ 依存性であり、目安は $M_w$ 9級で地震の40分前、 $M_w$ 8級で20分前、 $M_w$ 7級で10分前である。(1)と(2)を用いると、VTECの傾きが急に増えた場合、その時の背景VTECと折れ曲がりの強さ、および空間的な広がりから $M_w$ が事前にわかる。震源は異常が出た空の下であ

る。M<sub>w</sub>に応じて(3)から地震が起こる時刻 (M<sub>w</sub>9 級なら 40 分後) が予測できる。巨大地震限定であるが、直前予知という長年の夢が実現するのである。

#### ■ 学術雑誌上の批判と反論

このあたりで眉に唾をつけ始める人がいるかも知れない。本研究も最初の論文以降いくつかの批判論文が出版されたが、その都度「同じ学術雑誌で、半年以内に、その項目では再反論できないような証拠を揃えて」反論してきた<sup>3)</sup>。その過程で本現象の理解が深まった面もあり、学術雑誌上の真剣な討論は有意義であることを実感した。

批判は二点に集中している。第一の点は初期に多かった批判で、折れ曲がり目錯覚ではないかという指摘である。地震と同時に起こる地殻上下変動によって励起された低周波の音波は、空気中を上向きに伝搬して 10-12 分後に電離圏を揺らす<sup>5)</sup>。押し波によって持ち上がった中性大気は、引き波によって下がる。そのとき電子は磁力線に沿って斜め下方に移動する(他の粒子とは別行動をとる)ため、一時的に震源直上で TEC が下がる。地震後の減少のせいで地震前に TEC が増えたように錯覚するという論理である。

これを否定するのは簡単で、地震前の VTEC データだけを使って、折れ曲がり目錯覚が生じていることの有意性を数値的に示せばよい<sup>3)</sup>。図 1a 下部では、赤池情報量基準(AIC)を使って、地震 40 分前の折れ曲がり目錯覚でないことを示している(見ればわかることでも定量的に示さないと専門家は安心できない)。この批判は、当初データを斜め TEC で表現していたため見かけの変化が重なって見にくかった事が原因であり、VTEC を用いた図 2a では「錯覚感」は薄い。

二番目の点は、電離圏の電子数は様々な原因で四六時中ふらついており、3.11 の 40 分前に始まった異常も地震と関係ないのであるというもったもな指摘である。言うまでもな

く様々な自然現象が電離圏を乱す。例えば太陽面で爆発が起こると放射が増え、超高層大気における電離が促されて VTEC は上昇する。ただしこれは広範囲で生じ、図 2c のような局地的な変化はもたらさない。厄介なのは爆発からしばらくたつて、磁場を伴う太陽風が地球の磁気圏に作用して起こる一連の現象である。中でもオーロラ帯に流れた大量の電流が大気を加熱して生じる内部重力波が中緯度に流れてくる大規模移動性電離圏じょう乱(Large-scale traveling ionospheric disturbance, LSTID)は、3.11 直前の TEC 異常と同程度の空間波長を持っており、一瞬で区別することは難しい。

図 2 の VTEC 変動が LSTID でないことはそれらが空間に固定されている(伝搬しない)ことから明らかである<sup>5)</sup>が、図 3 のすべての例が LSTID でないことを確認するのは、地上 GNSS 局の観測網が密でないため難しい。そこで実際に、ある場所でどの程度の頻度で地震と関係ない VTEC の折れ曲がり目が生じるかを調べてみた<sup>3)</sup>。3.11 は最も地磁気活動度が高い時期に起こった大地震である。その前後数週間を調べれば、LSTID 発生の確率が最悪でもこの程度という値を示すことができる。その結果、図 2a 程度の VTEC の折れ曲がり目は十時間に一回程度は生じていたことがわかった。つまり地震直前の一時間に偶然生じて前兆と誤認する確率は一割ほどである。これは単独ではそこそこの確率だが、これが三回重なる確率は千分の一である。従って偶然で片づけられるのはせいぜい大地震二回程度までだろう。大きな地震の前で「必ず」起こることの重大性がここにある。逆に、非移動性の TEC 変動があれば「必ず」地震が起こるのかは定かでない。地震がない時期の長期間データの地道な解析が今後必要である。

#### ■ 異常の空間構造と電場

何が地震直前に電離圏を変化させ

るのか。そのヒントは、電子密度が増減する領域の空間構造にある。TEC は視線に沿って積分した電子数しか与えないが、様々な方向の TEC を組み合わせると電離圏のどの部分の電子密度が変化したのかを特定できる。地震学者が地震波伝搬速度構造をトモグラフィーで求めるのと同じである。我々は広域に渡って GNSS 局が密に分布している南米において、チリで発生した三回の大地震直前における電子密度の正と負の異常の三次元分布を調べた<sup>7)</sup>。

その結果、高さ 200 km を中心に正の電子密度異常が、その上の高さ 400 km あたりに負の異常が生じており、震源—正異常—負異常が地磁気磁力線に沿って並ぶことがわかった。これは北向きの磁場 **B** と西向きの電場 **E** の相互作用による電子の下向きドリフトが作る異常で説明できる。地磁気は最初からあるから、地震直前にその上空の電離圏に生じた電場が異常の直接原因であることを示唆する。電場が犯人である証拠はもう一つある。超高層では電子が動きやすい磁力線に沿って等電位になる。従って北半球の震源上空で西向きの電場が生じていれば、南半球の磁気共役点の上空でも同様の電場が生じており、同じ TEC 異常が見えるはずである。3.11 の震源の磁気共役点はオーストラリア大陸北部になる。そこではやはり地震の約 40 分前に TEC の上昇が始まっていた(図 3 の下から二番目の曲線)。地震直前の電離圏異常はどうやら電気仕掛けのようである。

ここから先の話には想像が混じる。地震発生直前には震源核が形成され、じわじわと断層が壊れ始める。その時は地殻変動も生じるはずであるが、地表では小さすぎてまだ観測された例はない。また室内実験によって、強い応力をかけた岩石が電池と化して電流が流れ続ける現象が知られている(こちらが実際の地震では確認されていない<sup>8)</sup>)。これは岩石中の過酸化架橋と呼ばれる格子欠陥が、応力の高まりに伴う微小な転移や割目の発生で活性化し、そ

の時生じた動きやすい正孔（電子が抜けた穴）が周囲に拡散してゆくことによって生じる。震源核形成は破壊がゆっくりと広がってゆく過程であるから、そこから拡散してきた正孔が担う正電荷が、互いの反発力によって震源上の地表（陸地部分）に溜まることはありそうに思える。

この正電荷を使って電離圏に電場を作るには、大気中に上向き電流を流す方法<sup>9)</sup>と、地表の正電荷で直接電離圏に静電場をつくる方法<sup>6)</sup>がある。電場さえできれば、あとはそれが磁場と協力して電離圏電子を動かしてくれる。地表にたまった正電荷を地震前に広域に捉えられるかが、このシナリオを立証する鍵になるはずである。地震直前に地表に現れた正電荷を示唆する宏観現象は数多い<sup>10)</sup>が、TECのように既存センサーで系統的に観測することは難しい。

#### ■地震の規模は予め決まってる？

前兆は地震直前に電離圏に現れる。すなわち地震の開始直前の段階で岩石から放出される大量の正電荷が電離圏の電子の再配置を促し、それが作った TEC 異常を GNSS が捉えたと考えられる。物理過程に関しては未解明部分も多く仮説の域を出ないが、一連の観測事実は強固であり、本格的な断層すべりが始まる前に地震の最終サイズがある程度決まっていることを示唆する。地震予知不可能論の拠り所の一つは、地震計記録から見る限り地震が始まる時の

様子が最終サイズを示唆する情報がないという事実である。つまり、巨大地震でも代り映えのしない小さな地震として始まり、偶然に導かれて大きく育つというわけである。これが本当なら地震の直前予知は原理的に不可能になるが、地震計データを拠り所とする地震学者の多くはそう考える。

だが地震の始まりである準静的な断層の動き（震源核の形成）は地震計を揺らさない（地殻変動でしか見えない）。地殻変動は地震波に比べて空間減衰が大きい。そのセンサーは地震計のように遠方のわずかなしるしを捉える能力に乏しく、前兆の存否に関する観測事実は確立していない。数時間という時間スケールでは GNSS より高感度なセンサーである傾斜計を使って、3.11 直前の地殻変動を議論した論文がある<sup>11)</sup>。その結論は、3.11 直前に震源近くの断層がじわじわすべったとしても、その大きさは  $M_w7.3$  を超えなかったというものである。言うまでもなく「 $M_w7.3$  を超えない」ことは「ない」ことを意味しない。地殻変動観測による前兆の有無が不明（そもそも直前の物理プロセスが地殻変動を伴うかも不明）な現状で「原理的に不可能」は言い過ぎである。

ひるがえって我々は、地殻変動ではなくはるか上空の電子数の変化を根拠に、3.11 の 40 分前には最終サイズもおおむね決まっていて、そ

の前兆が十分な信号対雑音比で観測されたと主張している。直前予知なんて不可能と教えられて育った最近の地震学者にとって、この主張は受け入れ難いかも知れない。それでも地球科学は昔から、理論からの演繹より観測事実の主導によって発展してきた。そして観測は地震の発生に関する現在の常識の再考を促しているのである。

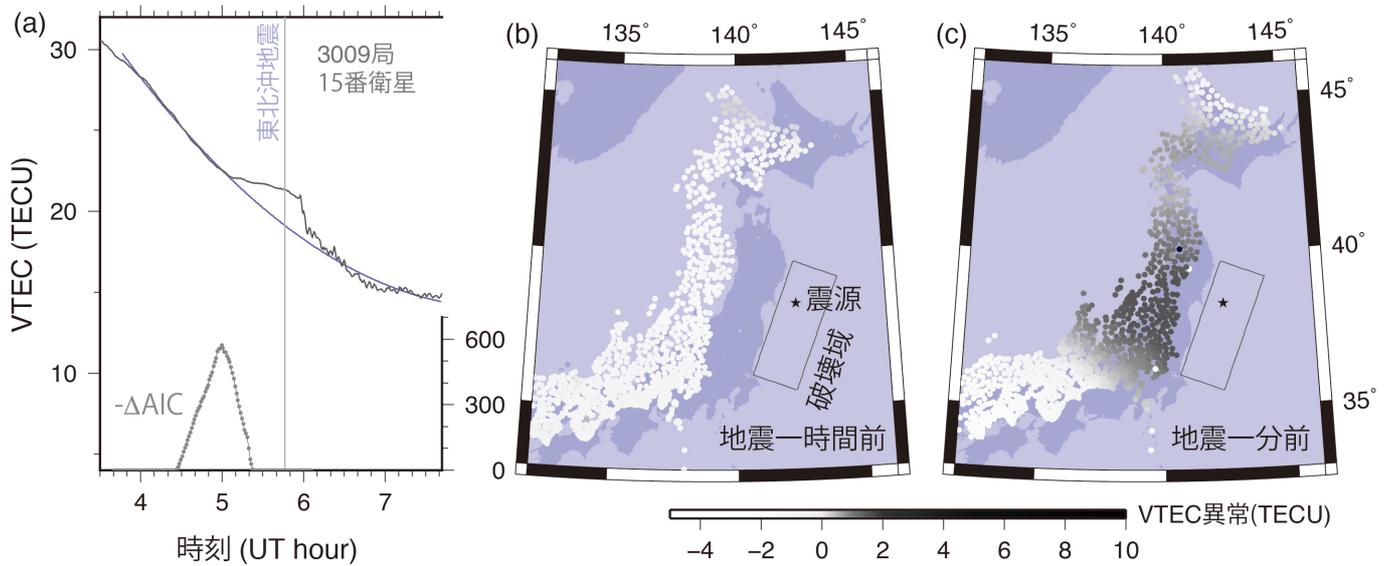
#### 参考文献

- 1) K. Heki: Geophys. Res. Lett. **38**, L17312 (2011).
- 2) K. Heki and Y. Enomoto: J. Geophys. Res. **118**, 6618-6626 (2013).
- 3) K. Heki and Y. Enomoto: J. Geophys. Res. **120**, 7015-7020 (2015).
- 4) L. He and K. Heki: J. Geophys. Res. **122**, 8659-8678 (2017).
- 5) M. N. Cahyadi and K. Heki: Geophys. J. Int. **200**, 116-129 (2015)
- 6) M. Kelley, W. Swartz, and K. Heki: J. Geophys. Res. **122**, 6689-6695 (2017).
- 7) L. He and K. Heki: Geophys. Res. Lett. **43**, 7287-7293 (2016).
- 8) F. Freund: J. Asian Earth Sci. **41**, 383-400 (2011).
- 9) Kuo, C.L., L. C. Lee, and J. D. Huba: J. Geophys. Res. **119**, 3189-3205 (2014)
- 10) H. Tributsch: Nature **276**, 606-608 (1978).
- 11) H. Hirose: Earth Planets Space **63**, 26 (2011).



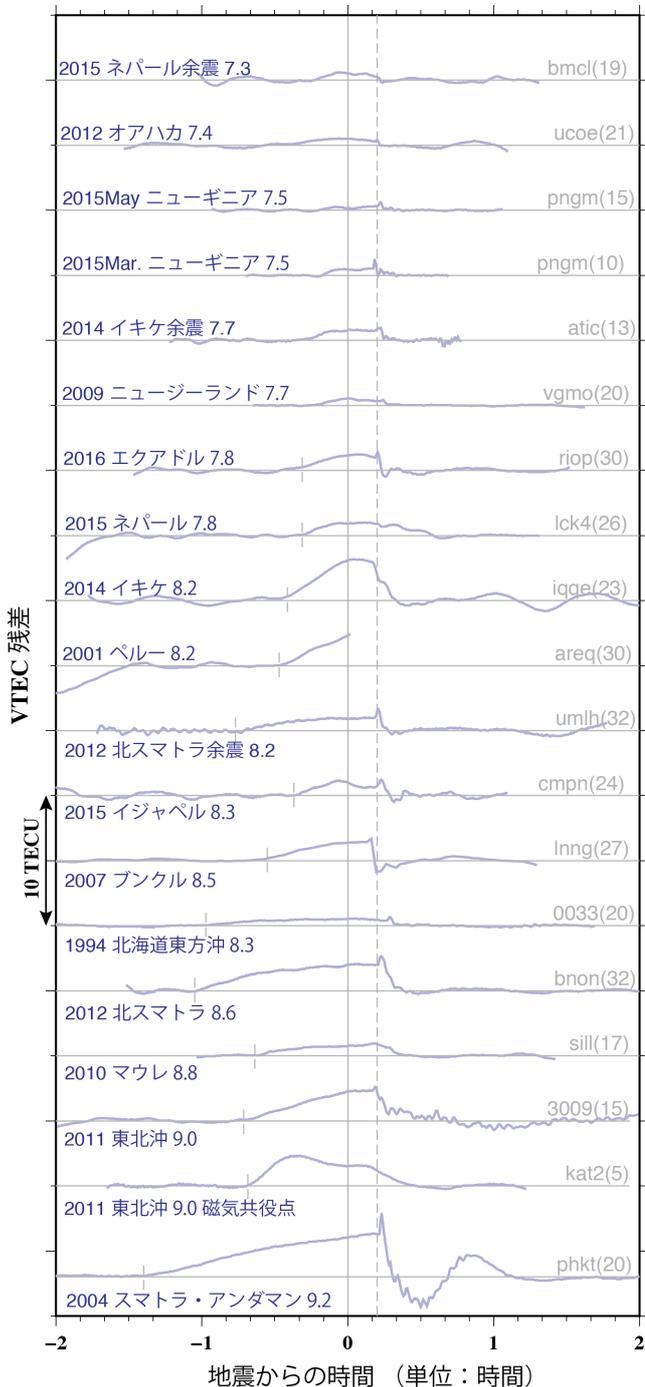
<図 1> 3.11 の津波の瓦礫に囲まれた宮城県名取市の GNSS 局

ステンレス柱上部の覆いの中にあるアンテナで受信した L1, L2 のマイクロ波の位相差から、アンテナと GNSS 衛星を結ぶ線上の電子数がわかる。米国が打ち上げた GPS をはじめ、ロシア、中国、EU 等が打ち上げた様々な GNSS が現在運用されている。(写真提供：国土地理院)



<図 2> 3.11 直前の電離圏の変化

(a)GNSS で計測された 3009 局（茨城県鹿嶋市）の、3.11 前後の VTEC の時系列（上部の黒い線、目盛は左の縦軸）。太陽が傾くに従って滑らかに減りつつある VTEC が、地震発生約 40 分前に正にずれ始め、UT5:46 に起こった地震の後に本来のトレンドに戻った。異常（青の基準曲線からのずれ）を地図上に、視線と高度 300 km の薄い層の交点の位置にプロットすると、地震一時間前に無かった異常(b)が、地震直前には断層近くの広範囲で正の値を示す(c)。VTEC 時系列に片側 40 分の時間窓を設定し、その中のデータを一本の直前で近似したときと中心での折れ曲がりを仮定したときの AIC の差 ( $-\Delta AIC$ ) を計算し、時間窓を移動してどこで VTEC が有意に折れ曲がったかを調べた結果を(a)の下部に示す（目盛りは右側）。正の異常は地震約 40 分前に始まったことがわかる。



<図 3> 地震前後の VTEC 変化

基準曲線からのずれを、18 個の地震について  $M_w$  の小さいものから順に並べたもの（2011 東北沖に関しては磁気共役点のデータも示す）。多くの例で、地震後 12 分を示す縦の破線の前で、地表から伝搬してきた音波による擾乱が見えている。地震の名前と  $M_w$  を左に、観測局名と衛星番号（すべて GPS）を右に示す。前兆の始まりを AIC で決定できた例では短い破線でその時刻を示す。 $M_w$  が大きい地震の前兆ほど早く始まる傾向がみられる。折れ曲がりは  $M_w$  が大きいほど強いが、背景 VTEC の量にも依存する。