

大地震直前に観測された電離層の変化

議論の的となっている新説によると

大地震の早期警報につながる変化が上空300kmに現れている可能性がある

E. バンス (サイエンスライター)

2011年3月11日金曜日の午後に地面が揺れ始めたとき、北海道大学教授の日置幸介（へき・こうすけ、51ページの監修者紹介参照）は大学の研究室にいた。数秒の強い揺れが何度かあった。地震発生直後に上空の電子の分布に奇妙なパターンが生じる不可解な現象を調べている地球物理学者の日置は揺れに関心を持ったが、慌てて身構えることはなかった。大きな地震だが、震源は遠いと思われたからだ。揺れが続くなか、この地震のデータがその研究に役立つかもしれないと考えていた。その後、誰かがテレビのニュースをつ

け、日置の好奇心は恐怖に変わった。この地震波は近代日本史上で最大の地震によるものだった。マグニチュード9.0という超巨大な東北地方太平洋沖地震によって1万5000人以上が犠牲となり、被害は莫大な額に上った（東日本大震災）。津波が福島第1原子力発電所を襲い、過去四半世紀で世界最悪といえる原子力事故を引き起こした。救急隊が人々の避難や救助を進めるなか、日置は電話とインターネットの接続が回復するのを待つしかなかった。日曜日にはインターネットが回復したので、すぐに東北地方上空の衛星観測

データをダウンロードして調べ上げた。予想通り、地震発生から10分後に電離層（電離圏）内の電子に乱れが生じていた。だが、地震後の時間帯のデータが示す振る舞いは彼の理論モデルと合致しなかった。そこで時間枠を広げ、地震発生1時間前までさかのぼってデータを調べた。彼が異変に気づいたのはそのときだ。

地震発生の40分前に、震央上空の電子密度が少し上昇していたのだ。これは1回限りの異常現象かもしれないが、観測計器の不具合かもしれないが、それ以上の意味を持つ可能性もあった。大地震発生前に警報を出せるような信頼に足る前兆現象はまだ見つからない。この電子の変化がそうした警報となるなら、地震で毎年失われている多くの人命を救えるかもしれない。

研究者仲間から謙虚で物静かで慎重な人物と評されている日置はこのデータを疑わしく思い、別の2つの地震に関するデータを入手した。それらにも電子密度の変化が見つかったので、さらに深く調べることにした。これまでに18の大地震について同様の信号を見つけ、日置は過去7年間でこれらが

KEY CONCEPTS

30分以上前に生じた電子密度の変動

- 1回の地震で何万人もの死者が出る場合がある。このため科学者たちは、事前に警報を出せるだけの確度で地震を予報しようと努めてきた。
- 近年の観測で、地震発生の30分以上前に、電離層内に電子密度の高い部分が生じる場合があることが示唆された。早期警報が可能になるかもしれない。
- これまで地震予知の期待が裏切られてきた経緯があるため、この考え方は懐疑的に見られてきた。だが、今回の観測データは確かだと考える科学者も増え始めた。



MARIA CORTE

現実の現象だと信じるようになった。

他の専門家は現在、この現象を詳しく検討し始めている。米航空宇宙局（NASA）ジェット推進研究所にいるリモートセンシングの専門家ソン（Yuhe Song）は「その昔、天気予報は不可能だと考えられていたが、いまでは実現している」と語る。「おそらく、地面の揺れを感じる前に何らかの現象を観測できる。何かが起こっている。これは議論に値すると思う」。

違う見方もある。多くの科学者は、地震を予知できるとする誤った主張は昔からあり、日置の研究はその最新の

例にすぎないとみている。様々な地震予知のアイデアを長年にわたって論駁してきた東京大学名誉教授のゲラー（Robert J. Geller）は「これらは風邪のようなもので、常に世間にはびこる」という。「放っておけば消える」。

だが、今回は消えずに残っており、むしろ強固になっている様相だ。この電子のシグナルは巨大地震だけでなく、中規模の地震でも出現している。また、日置とは別の科学者によって、地下の断層と上空の活動を結びつける仮説が提唱されている。日置はこの発見を報告する論文を *Geophysical Research*

Letters 誌など権威ある学術誌に発表したほか、アメリカ地球物理学連合の年次大会に招かれてこの結果について講演した。2018年春には、日置の説も含め地震予知を議論する特別シンポジウムが千葉大学で開かれた。

日置の説が正しければ公共の安全に非常に大きな意味を持つが、そうした前兆をどう利用するかという点では難しい問題がある。警報を発するには前兆がどの程度正確でなくてはならないか、そして警報発令に続いてどんな緊急対応を取るべきなのか？

最悪の事態を予測する

地震の規模を表す指標マグニチュード（リヒター・スケール）を考案したリヒター（Charles E. Richter）はかつて、「地震を予言するのは愚か者と食わせ者だけだ」と述べたといわれる。だが、地震予知の試みは昔から続いてきた。紀元前373年にギリシャを襲ってヘリケーという都市を破壊した推定M6.0～6.7の地震では、発生5日前に動物が逃げ出したと伝えられる。日本ではかつて、ナマズが騒ぐと地震が起こると考えられていた。このほか、イヌやヒツジ、ムカデ、乳牛、スマトラ島にいるセイランというキジの一種はいずれも、地震の前に通常と異なる行動を示すとされてきた。

また、井戸が突然干上がる現象や気温の変化、ラドンガスの放出、そしてもちろん小さな前震の頻発も、前兆現象の可能性があるとされてきた。中国は1975年、これらの兆候（動物の行動も含む）を組み合わせてM7.3の地震（海城地震）の発生を予測し、遼寧省海城市の市民を避難させた。これで期待が高まった。「1970年代、米国と日本の地震学者は地震の短期予知についてかなり楽観的になった」と岩石力学の専門家である東京大学准教授の中谷正生（なかに・まさお）はいう。「地震は予知できるはずだ」という雰囲気

あった」。1980年代になると、この難題を追求するための研究グループが日米の両国に作られた。

だが信頼性の高い信号はなかなか得られなかった。中国では前述の成功から1年後、同じ手法で別のより大きな地震を予測することに失敗し、数十万人が死亡した（唐山地震）。環太平洋火山帯に位置する日本はかなりの研究を重ねたが、前兆と考えられた現象が別の地震で繰り返すことはないとわかっただけだった。自然はルールを常に変えているらしい。米国では、過去の地震発生パターンからカリフォルニア州パークフィールド付近で発生すると予測された地震が実際には起こらなかったことを受け、1990年代後半に地震予知研究を放棄した（パークフィールドでは後の2004年に地震が発生したものの、想定されていた前兆現象は一切生じなかった）。

東日本大震災が起こったその年、イタリア政府が組織した地震予知に関する国際専門家委員会は議論を打ち切った。ある委員は2011年5月に、「日本における継続的な研究にもかかわらず、差し迫る大地震の前兆現象の存在を示す証拠はほとんど見つかっていない」と書いている。その4カ月後、日置の論文が議論を再開させる形となった。

彼が見たのは、地球の表面ではなく約300km上空に生じた電離粒子の奇妙な領域だった。

天と地が関係しているという考え方に前例がないわけではない。1970年代、岩石が過剰な圧力を受けると電流が生じることが発見された。極めて弱い電池のようなものだ。理論的には、岩石が圧力を受けると内部の酸素原子が電子を手放し、その跡に「正孔」という欠陥が残る。近くの別の原子から電子が移動してきてこの正孔を埋め、その電子の跡に新たな正孔が生じ、という具合に、連鎖的な電荷の移動が進む。この正孔は「長距離にわたって移動しうる。何キロも何十キロも何百キロも」と、この現象を発見したNASAとSETI研究所の研究者フロイント（Friedemann Freund）はいう。「バケツリレーのように次々と受け渡されていく」。

岩石内を移動した正孔は最終的に地表に達し、そこで磁石が鉄くずを引き寄せるように、負に帯電している電子を空中の分子から引き寄せるとフロイントはいう。そして、この電荷が上層の大気へと移動していく。この機構は実際の現場での測定が難しいため理論にすぎないが、地震発生後に見られる電子密度の高い領域の兆候と符合する

と思われる。だが、地震発生前にこの効果をはっきり観測した例はこれまでなかった。

日置は今回の研究にあたって、精巧なGPS衛星ネットワークを用いる新手法を取り入れた。GPSの電波信号は電離層を通過する際、周波数が低い電波ほど遅れるため、これをもとに衛星と観測点を結ぶ線にある大気中の電子総数の微妙な変化を検出できる。日本は特に高密度のGPS受信網を展開しており、そのおかげで日置は、東北地方太平洋沖地震の震央のはるか上空で地震発生約40分前に電子の密度がわずかに上昇を始めたのを特定できた（ただし、その成因について、日置はフロイントとはやや異なる見方をしている。右ページの囲みを参照）。

だが、この発見を発表することには躊躇したという。「どう発表するか悩まざるをえなかった。地震予知は一種特別で、誰もが非常に感情的になる」。

実際、彼はすぐには発表しなかった。東日本大震災の後、詳しいGPSデータを入手可能な過去の2つの巨大地震についても調べたのだ。両方とも地震発生約30分以上前に電子密度の上昇が見つかった。また、地震の規模が大きいほど、時間的に早くから上昇が始まるようだった。2014年に南米チリで発生したM8.2の地震では先行時間が25分だったが、M9.2の東北地方太平洋沖地震では40分だ。つまり、この信号は断層が動く直前であることを示しているだけでなく、その後の地震の相対的な規模も示していた。「地震の直前にこれほど明確な現象が生じるのを見たのは初めてだ」と日置はいう。

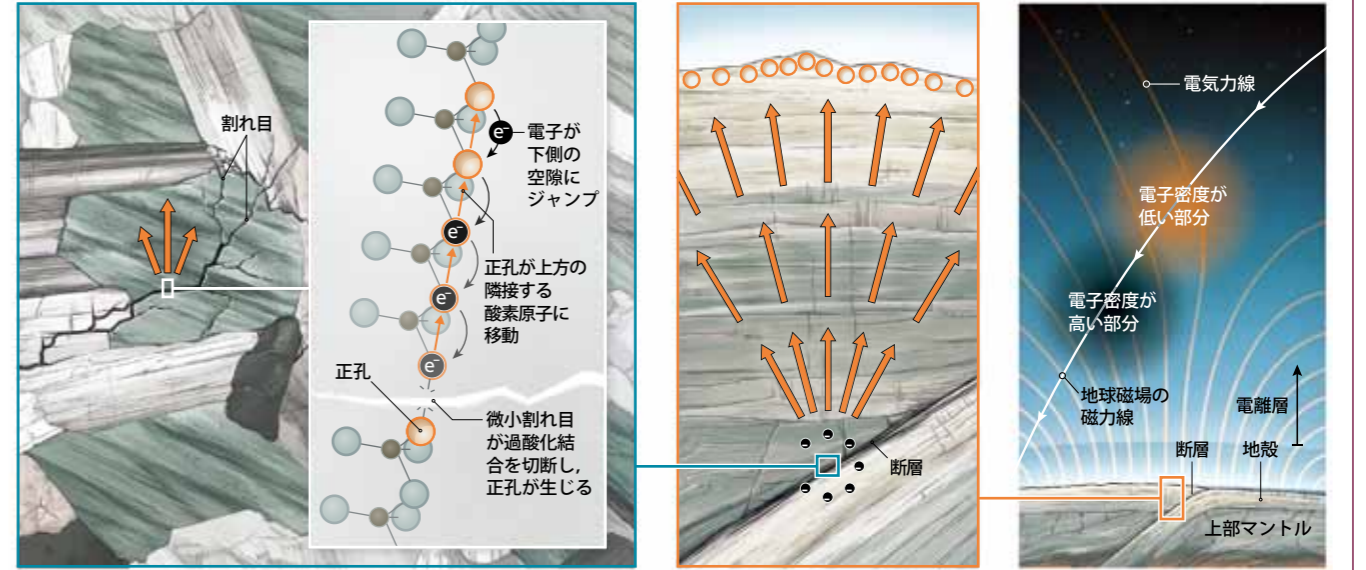
混沌とする議論

日置はこれらのデータをそろえたうえで、2011年9月に自らの発見を論文発表した。他の科学者はすぐに潜在的問題点を指摘し始めた。一部の研究者は、この結果はデータの解釈違い

大地から空へ

新研究によると、大地震発生の30分以上前に、地表から数百km上空で電氣的な乱れが生じるようだ。地震の初期警報と

なる可能性があるだろう。岩石中の割れ目がはるか上空で変化を生み出す仕組みについて、下のような仮説が提唱されている。



1. 割れ目ができる

地下では地殻を構成する各部分が互いにゆっくりとずれている。これらはときどき断層において急に動き、その動きが生んだ歪みによって岩石が引き裂かれて、マイクロフラクチャーと呼ばれる微小な割れ目が生じる。

2. 電子がジャンプ

マイクロフラクチャーが生む力は、岩石粒の分子内で酸素原子どうしを結びつけている結合（過酸化架橋）を切断するだけの強さがある。この力が、岩石粒内にある負に帯電した電子のエネルギーを変え、電子を動かす。移動の跡には「正孔」という正に帯電した空隙が残る。電子の移動が進むにつれて正孔は逆向きに移動し、岩石粒の内部に小さな電流が生じる。

3. 地表へ

電子が動いて正孔を残すこの過程が、隣接する岩石粒を通じてドミノ倒しのように続く。正孔の正電荷は、岩石粒から岩石粒へと飛び移りながら、元の割れ目から地表へと移動していく。元の場所では、蓄積した歪みが臨界に近づく。

4. 上空へ

地表に正孔が蓄積すると、周囲に電場を生じて反対の電荷を持つ電子を引き寄せる。この電場の電気力線ははるか上空に及ぶ場合がある。日置は、この電場と地球磁場の電磁氣的な作用で電子が移動、電離層内の電子の分布パターンを変えて、密度の高い部分と低い部分を生み出すと考えている。こうした電子密度の異常はGPS衛星で検出できる。



甚大な被害 東日本大震災をもたらした超巨大地震の揺れと津波で破壊された陸前高田市。

M8級～M9級の巨大地震に感度

巨大地震直前に生じる電離層の電子密度変化の研究はまだ初期段階で、多くの研究者の支持を得るには至っていない。しかし、研究をリードする日置は「30年後には、3.11（東日本大震災）の巨大地震が、明瞭な短期的前兆が超高層大気で初めて捉えられた地震として位置づけられているだろう」と述べる。

本文にあるように地震直前の電離層の電子密度の変動は、地震のエネルギー、つまりマグニチュード（M）が大きいほど先行時間が長い。その変動を検出し始めた時点では、いつ地震が起きるかはわからないが、日置によれば、マグニチュードが大きい地震ほど電子密度の変化が急なので、ある程度の時間、その変動をモニターすれば、地震発生前にその規模を予測できる。

ただ検出感度は地震の発生時刻によって異なる。電離層の電子は太陽光を受けて大気分子から弾き出された自由電子がもとになっているので、電子の数は正午頃が最も多く、夜は減る。地震の発生直前に地表の電位が変化した場合、昼の方が電離層の電子密度の変動が大きく表れ、逆に夜は小さくなる。日置によれば、M9級の超巨大地震は昼夜を問わず前兆が見えるが、M8級の巨大地震の前兆は夜は捉えにくい。2018年に起きた北海道胆振東部地震や大阪北部地震は前兆が観測されなかったが、これらはM7にも達していないためだ（マグニチュードは2つ小さいと地震のエネルギーは1000分の1になる）。

日置は現在、GNSS（米国のGPS衛星や日本のみちびき衛星などを用いた衛星測位システム）の観測データを用いて、電離

層の電子密度分布を3次元的に調べている。地球内部を伝わってくる地震波の観測データを使って地球の内部構造を調べる地震波トモグラフィーと同様の手法で、日置は「電離圏3Dトモグラフィー」と呼んでいる。

地震波トモグラフィーは何年もかかって多数のデータを集めて3次元構造を明らかにするのに対し、電離圏3Dトモグラフィーは原理的にはほぼリアルタイムで電子密度の3次元分布を把握できる。2017年8月に北米大陸を横断する皆既日食があったが、日置のグループはその際のGNSSデータを解析、日食の影に入り一時的に夜のようになった地域の上空で電子密度が減少する様子を電離圏3Dトモグラフィーで明らかにした。現在、詳細なGNSS観測データをリアルタイムで公表している国や機関はないが、その有用性が認められれば、GNSS観測網は巨大地震の早期警戒網として威力を発揮するかもしれない。

今回紹介した電子密度変化は地震発生の数十分前から始まる現象だが、数日前から始まる変化も多くの研究者が報告している。日置によれば、前者は地震直前の地表の電位の変化で生じるのに対し、後者は地下から放出されるラドンが大気中で崩壊して生じている可能性が高い。またGNSSデータをもとにした地震予知の商業サービスが行われているが、「GNSSのデータを使っている以外、何の共通点もない。専門誌への論文掲載や学会発表などの研究活動が見られないので反論も何もできない」という。（日本経済新聞・中島林彦）

タリア国立地球物理学火山学研究所のマッシ（Fabrizio Masci）はいう。マッシは日置の手法だけでなく他の地震予知の考え方に反駁する論文を発表しており、日置の対応は「論文の読者を惑わす巧妙な方法だ」と述べる。

批判的な研究者の多くは、日置による電子密度のベースラインの解釈を問題視している。電子は地球の周囲に遍在し、日照の変化などを受けて天気と同じくらい変動が大きい。日置は地震の直前に電子密度が平均値よりも少し高まるとしている。批判派はそうした変化は日常的な増減によるという。言い換えると、日置は統計が生んだ幻を追いかけているにすぎないとの見方だ。

マッシはさらに踏み込んで、地震そのものが基本的にカオス的だとすれば、前兆をつかむのは不可能だろうと主張

する。ある事象について初期条件を正確に決定できない場合、その現象がどう展開するかを知ることは不可能だ。そして地震の場合、すべての初期条件を特定するのは恐ろしく難しい。

パリ地球物理学研究所のオッキピンティ（Giovanni Occhipinti）はそこまで悲観的ではないものの、岩石の種類や圧力、付近の断層など関係するすべての要因を十分に理解して正確な予測につなげるのは非常に困難だとみる。

彼は地震が電離層のイオンにどう影響するかを調べており、そうしたイオンの振る舞いがいかにカオス的であるかを考えると、ノイズのなかから1つのシグナルを引き出すのはまるで無理だという。それは1日前にあった1片の雲に基づいて台風の襲来を予測しようとするようなものだ。「問題は、数

えきれないほど多くの雲が行き来していることだ」と彼はいう。「そのなかから前兆と思われる特定の雲を見分ける方法は、簡単には導き出せない」。

オッキピンティは最近まで懐疑的な側で、日置の発見は単なる統計上の乱れだと感じていた。しかし日置の最近の研究に関心を掻き立てられた。電子密度の変化が生じている複雑な3次元空間を考慮に入れた研究だ（上の囲み記事）。この3次元モデルは衛星からの限られたスナップショットと違って、電子密度の異常の背景に一貫した物理過程があることを示唆する時間空間的効果の存在を示しており、それらを幻として片づけるのは難しい。

オッキピンティはさらに多くの3次元解析の結果を他のモデルと比較し、それらがどの程度うまく一致するか調

べたいと考えている。つまり彼は現時点で日置の考えを完全に信じているわけではない。ただし「興味深い」と考え、より詳細に検討している。「この考え方は科学を前に進めている」とオッキピンティはいう。だが「本当に本当に正確でなくてはならない。人の命を扱っているのだから」と付け加える。

直前予知の難しさ

その人命の数は数十万に達することがある。米地質調査所は2000年からの16年間について、地震による世界の死者数を調べた。巨大地震が毎年起こるわけではないので死者数には変動があるが、それでも恐ろしいほどの数だ。20万人を超えた年が16年間に2つあり、それとは別に2万人を超えた年が7つあった。被害が特に大きかった国では警報システムが切望されており、わずか数秒前でも構わないからと考える人が多い。

メキシコシティを例に取ろう。この都市が位置する地震帯は、世界でも大きな被害を出し、十分に研究されている。1万人の死者を出した1985年の壊滅的な地震の後、メキシコ政府は、同地域では地震波が非常に長い距離を伝わってくる場合が多いことを利用して、メキシコシティから十分に遠くにある地震計で地震波を捉えた場合には、揺れが到達する2分前に警報を出せる監視システムを構築した。

メキシコ国立防災センターの所長を務めている地球物理工学者バルデス（Carlos Valdés）は、40分前に警報を出せたらもっとよいと思えるかもしれないが、実際にはそう単純ではないと語る。まず、間違い警報を出すと、すべての緊急対応が破綻しかねない。警報が発令されたものの、実際には地震の規模がごく小さいか、震源の推定が間違っていたために、メキシコシティでは揺れなかった例があった。市民はこれにいら立ち、警報が発令されて

も対応しなくなった。だがバルデスももっと心配しているのは、その反対にパニックが起こることだ。「『あと40分ある、俺は街を離れるぞ』と言う人が出てくるだろう。たった1人が叫び走り出すだけで、全員がそれに続く」。道路は渋滞し、誰も安全なところに避難できなくなる（L. ドウエナス＝オソリオほか「都市洪水からあなたを守る 超精密ハザードマップの試み」日経サイエンス2019年1月号）。

さらに、たとえ直前の警報であっても、都市ガスの供給遮断や地下鉄の運行停止といった危険防止策を講じる機会が得られると他の防災担当者は指摘する。精度が高まれば誤警報の問題も解決するだろう。英国とロシアの科学者たちは、日置が調べているような大気の異常をもっと詳しく追跡できる人工衛星を提案している。また中国は、電離層の電磁気的な乱れを人工衛星から捉え、それに基づいて地震を予測する計画を進めている。ただし、電離層と地震の複雑な性質を考え合わせると、大気データが実際の地震警報となるのは数十年先になるだろう。

ゲラーはその日は永久に来ないとみる。「過去130年、前兆現象を探し求

めた人々は子供じみた考えにとらわれてきた。1つは前兆現象が存在するはずだという思い込み、もう1つは大きな地震ほど前兆現象もはっきりしているはずだという考えだ。だが、これらが正しいと考える理由は特にない」。

それでも日置は前進を続けている。最近、2015年のチリ地震の前兆を詳細な3次元モデルで解析した結果を論文発表した。この結果は自説を一段と強固にするだろうと日置はいう。また、地表に現れるとされる電荷と実際の震源との間にあるデータのギャップを埋めようとしている。目指しているのは、地殻内の何が上空の変化を生み出しているのか、理解を深めることだ。「地震の前に電離層で何かが起こっている」と彼はいう。「物理的なメカニズムは未解明だが、観測そのものは極めて明確だ」。

訳者 熊谷玲美（くまがい・れみ）
翻訳家。訳書にトム・クラインズ著『太陽を創った少年』（早川書房）など。

監修 日置幸介（へき・こうすけ）
北海道大学理学研究院教授。専門は測地学で、地殻変動や地球の重力場などを研究している。東日本大震災以降、電離層と地震の関係に興味を持つようになった。



著者 Erik Vance

フリーライター。科学の知られざる意外な側面に注目している。著書に「Do Chocolate Lovers Have Sweeter Babies? The Surprising Science of Pregnancy」（フリープレス、2011年）などがある。Wall Street Journal紙やOprah.com、Psychology Today誌、Nautilus誌などに寄稿している。

原題名 Earthquakes in the Sky (SCIENTIFIC AMERICAN October 2018)

もっと知るには…

APPARENT IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT VARIATIONS PRIOR TO MAJOR EARTHQUAKES DUE TO ELECTRIC FIELDS CREATED BY TECTONIC STRESSES. Michael C. Kelley et al. in *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 22, No. 6; pages 6689–6695; June 2017.

IONOSPHERIC ANOMALIES IMMEDIATELY BEFORE MW 7.0–8.0 EARTHQUAKES. Liming He and Kosuke Heki in *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 122, No. 8, pages 8659–8678; August 2017.

THREE-DIMENSIONAL TOMOGRAPHY OF IONOSPHERIC ANOMALIES IMMEDIATELY BEFORE THE 2015 ILLAPEL EARTHQUAKE, CENTRAL CHILE. Liming He and Kosuke Heki in *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 123, No. 5, pages 4015–4025; May 2018. 「揺れる前に警報 緊急地震速報システム」R. アレン、日経サイエンス2011年6月号。