

今回の地震に前兆はあったか？

東北地方太平洋沖地震の発生前の“異常”を検証する

世界の地震の1割が発生しているともいわれている日本は、地震計やGPS（全地球測位システム）など、世界で最も優れた観測網が整備された地域でもある。そのような場所で発生した、今回の東北地方太平洋沖地震。前兆とよべそうな何らかの現象が記録されている可能性は十分にあり、地震学者による分析が進められているところだ。最新の分析結果を報告する。

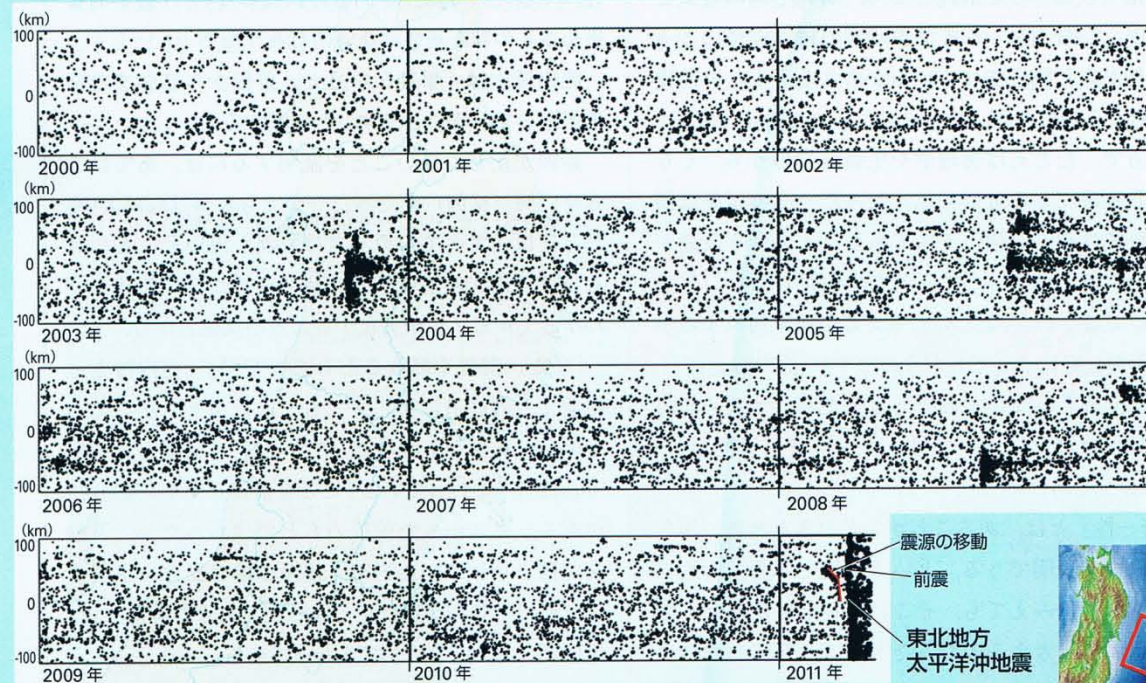
協力 **加藤愛太郎**
東京大学地震研究所助教

西村卓也
国土地理院主任研究官

廣瀬 仁
防災科学技術研究所主任研究員

日置幸介
北海道大学大学教授

東北地方太平洋沖地震の発生以前の地震活動



2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の震源の周辺で、2000年から2011年3月末までに発生し、気象庁がその震源の位置を特定した地震の発生状況を示した（一つの点が一つの地震）。図の横軸は時間を、縦軸はおおむね南北の震源の位置をあらわしている。正確には、北北東から南南西につづく「日本海溝」にほぼ平行な線を基準として設定し、それぞれの地震の震源の位置を、その線に投影した結果である。投影後の東北地方太平洋沖地震の震源の位置を原点（ゼロ）としてある。多数の点が集まったかたまりは、活発な地震活動をあらわしている。かたまりの縦軸方向の幅は、その地震活動が発生した場所の、南北方向の範囲を示す。かたまりの横軸方向の幅は、地震活動の継続期間をあらわしている。いくつか見られるかたまりのうち、最も目につくのは、図の右下の部分である。3月11日以降の地震は本震の余震だが、本震の2日前にはマグニチュード7.3の「前震」が発生した。また、前震のおよそ1か月前には、震源の位置が連続的に南に移動していく地震活動がみられた。これらについては記事でくわしく解説する。



左の図の地震は、上の赤枠の範囲の中で発生したものである。また、各地震を投影する基準線は、上の黄色い線である。

3月11日の東北地方太平洋沖地震^{ちしん}の発生から5か月が経過した。この地震の規模は、ご存じの通り、日本での観測史上最大であるマグニチュード9.0である。一般論として、発生する地震の規模が大きければ大きいほど、それに先だって何らかの“異常”な現象、つまり前兆のようなものがあらわれやすくなるという期待がある。

ましてや、地震や地殻変動^{ちかく}についての日本の観測^{かんそく}網は、世界一といえるほどの緻密さを誇る。最高の観測網に、最大級の地震。3月11日の「本震」に先立つ何らかの“異常”な現象をとらえることはできたのだろうか。これはサイエンスとしても、今後の防災を考えるうえでも、非常に重要なことである。

今回の記事では、本震の前の地震活動、GPS（全球測位システム）による地殻変動データ、大地のわずかな傾き^{かたむ}の変化をとらえる傾斜計^{けいしやけい}のデータ、近年注目を集めている上空の電子数の変化という四つのデータについて、順に紹介していく。

地震はなぜおきるのか？

その前に、地震がなぜおきるのか、少しでも確認をしておこう。地球の表面は、十数枚の「プレート」でおおわれており、それぞれのプレートが別々の方向にゆっくりと移動している。東北地方では、東から西向きに移動している「太平洋プレート」が、東日本をのせた「北アメリカプレート」の下に沈みこんでいく構造になっている。

二つのプレートが接しているプレート境界面は、普段はかたく結びついている（専門的には「固着」という）。このため、太平洋プレートが沈みこむにつれて、それにひきずられるように、北アメリカプレートが変形していく（ひずみが蓄積^{ちくせき}される）。一方、プレートが変形していくにつれ、元の形にもどろう（ひずみを解消しよう）とする力も大きくなる。そしてあるとき、限界をむかえたプレート境界面（断層面）の固着が一気にはがれ、北アメリカプレートがはね上がる。これがプレート境界地震であり、今回の東北地方太平洋沖地震も、このようにして発生した。

なお、断層面の固着が最初にはがれはじめた地点（断層面の破壊の開始地点）のことを「震源」とよび、断層面のうち、実際に地震でずれ動いた領域のこと

を「震源域」とよぶ。東北地方太平洋沖地震の震源は、宮城県^{みやぎ}の牡鹿半島^{おしか}の沖合約130キロメートル、地下約24キロメートルの地点であり、震源域は、岩手県沖から茨城県沖にかけて、長さ約500キロメートル、幅約200キロメートルの範囲^{はんい}に広がっている。

本震前の地震活動

まず、本震の前の地震活動についてみていこう。

東京大学地震研究所^{かとうあいどう}の加藤愛太郎博士は、3月11日の本震発生のおよそ1か月前からはじまっていた、奇妙な地震活動に注目している。

気象庁は、日々発生する地震の震源の位置やマグニチュードの値などを特定し、公表している。加藤博士はそのデータを見て、本震の震源の北側で、2月中旬からやや活発な地震活動があり、しかもそれらの地震の震源の位置が、南に向けて（つまり本震の震源となった地点に向けて）移動しているように見えることに気がついた（110ページの図を参照）。

加藤博士は、さらにくわしい分析をするためには、もっと多くの地震のデータがあった方がよいと考えた。そこで、地震計の観測データの中に“埋もれて”しまっただけの地震としては特定されていない微小な地震を、新たに多数特定した。こうして2月中旬から本震発生までの間に本震の震源のまわりで発生した合計1416個（うち、気象庁によるものは333個）の地震について分析を行った結果、見えてきたのは、次のような経緯である。

まず、最初の見通しのとおり、2月中旬から下旬にかけて、微小な地震の発生する場所が、本震の震源となる地点の北東50キロメートルほどの地点から南南西に向けて、1日あたり2～5キロメートルの速度で移動していった。本震の震源となる地点付近まで到達すると、地震活動はいったん沈静化した。

ところが、2月中旬に地震活動がはじまった場所の付近で、3月9日、マグニチュード7.3の地震が発生した。それまでの微小な地震にくらべて明らかに大きな地震である。この地震は、後の分析で、3月11日の地震の「前震」であった可能性が、気象庁などから指摘^{してき}されている。

さて、この3月9日の地震の後、その震源の北部では、「余震」が頻繁^{ひんぱん}に発生した。この地震の震源域

は震源の北側に広がっているため、そこで余震が発生することに不思議はない。ところが震源域から外れた南側の領域（本震の震源に近い側）でも地震が頻繁に発生し、その震源の位置は、またもや南南西に向けて移動していった。震源の移動速度は前回よりもやや速く、1日あたり約10キロメートルだった。そして3月11日、本震発生にいたったのである。

本震の前兆をとらえたとはいえない

加藤博士によると、大規模な地震の発生前に地震活動の震源が移動していく今回のようなケースが明瞭に確認されたのは、宮城県から岩手県の沖合の過去11年間の気象庁の震源情報を確認するかがり、はじめてだという。震源の移動は、断層の破壊がその方向に進んでいると解釈できる。では、この現象と本震との関係は、どう理解すればよいのだろうか。

室内での実験によると、岩石に大きな力を加えて擬似的な地震を発生させた場合、まず、断層面のうちのある部分から、ゆっくりとした「すべり」ともいえないながら、断層面の破壊が徐々に進んでいく。そしてすべりの速度が増加するとともに破壊の進行速度が急激に加速し、一気に断層面が破壊される（本震の発生）。あるいは理論研究でも、同様に、本震の発生前に周囲でじわじわと断層面の破壊がはじまり、それが加速していった本震が発生するというモデル

がある。この、本震の数日前からあるいは直前にはじまるじわじわとした破壊のことを「プレスリップ」とよんでいる。プレスリップ自体は強い揺れを出さないで通常の地震計では観測できないが、後で紹介する「GPS」や「傾斜計」などで観測できると考えられている。地震の前兆として観測できる可能性がある現象として、最も期待されているものだ。

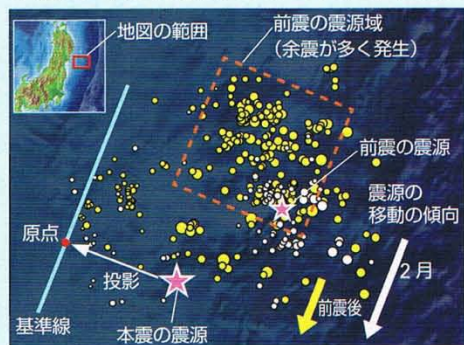
今回のケースは、室内実験や理論研究などから予測されるこのような過程を、実際の地震活動を通してとらえたということなのだろうか。

この点について、加藤博士は次のように語る。「今回、たしかに震源の移動がみられ、ゆっくりとしたすべりの伝播が本震発生をうながした可能性が考えられます。しかし室内実験や理論モデルのように、断層の破壊が急激に加速してそのまま本震の発生につながった、というようにはみえません。本震発生の直前に震源の移動が加速していないからです。ただし震源の移動と本震の発生がまったく無関係とも思えません。過去の地震も同様の方法で分析して比較してみるなど、もっとくわしく調べる必要があると考えています」。

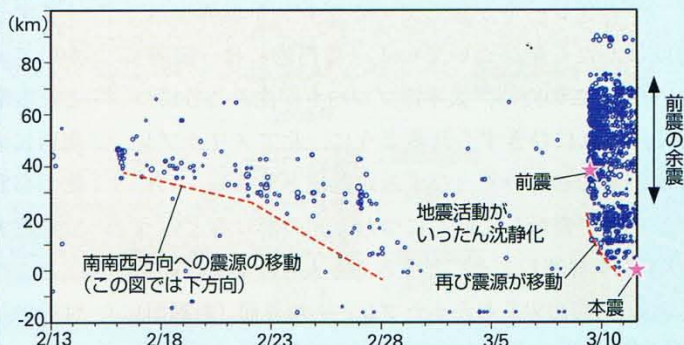
GPSによる地殻変動データ

GPSは、上空にある複数の人工衛星からの信号を地上の受信機で受け取り、受信機の位置を特定する

本震の1か月前からみられた、震源の移動



白い丸は2月13日から3月9日の前震の直前までに発生した地震の震源の位置、黄色い丸は、前震の直後から3月11日の本震の直前までに発生した地震の震源の位置を示している。加藤博士の分析による。2月に震源の位置が南西の方向に移動して沈静化、3月9日の前震発生後に再び南西の方向に移動、3月11日に本震が発生した。



左の地図に示された地震を、時間の経過と組み合わせるとあらわした図である。横軸は地震の発生日時、縦軸は、各地震の震源の位置を北北東-南南西方向の基準線に投影した結果である。左の地図に示したように、基準線に投影した本震の位置（原点）からの距離が縦軸の数値となっている。2月中旬から下旬にかけて、震源が南南西方向（上の図では下方向）に移動する。3月9日の前震の後も、南南西に向けて震源の移動がみられる。なお、前震の発生後、前震の周辺で発生している地震は余震と考えられる。

システムである。日本では1990年代の半ばから地殻変動を観測する手段として整備が進められており、現在では、国土地理院により、受信機を内蔵した電子基準点^{きじゅんてん}が、全国に約1200か所設置されている。基準点の動きをミリ単位で測定できる精度をもつ。

そのデータを見ると、2000年代の前半ころから、東北地方の太平洋側の観測地点で、ある“異変”があらわれていたという。

東北地方がのっている北アメリカプレートの下には、太平洋プレートが西向きに移動しながら沈みこんでいる。この動きにより、北アメリカプレートは、東西方向に圧縮されるような力を受けつづけており、実際、GPSによる観測データでも、3月11日の本震の発生までは圧縮（基準に定めた観測地点との距離の短縮）をつづけていたことが確認されている（ちなみに本震の発生時には東西方向に伸びた）。

“異変”とは、その東西方向の圧縮のペースが、2000年代前半以降はそれ以前にくらべてゆるやかになっていったということだ。その傾向はとくに宮城県から福島県のあたりで強くあらわれていた。

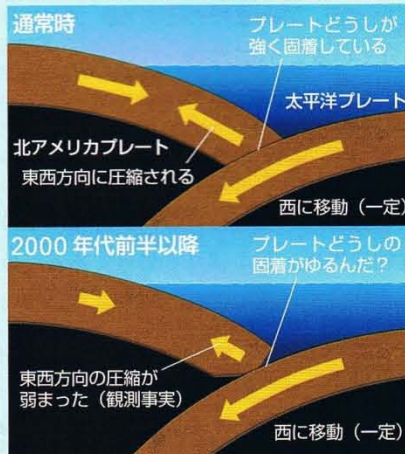
太平洋プレートが西へと移動する速度は、年間約8センチメートルで一定である。にもかかわらず、圧縮のペースがゆるむとは、どういうことだろうか。国土地理院^{にしもらたきや}の西村卓也博士は、次のように語る。「おそらく、太平洋プレートと北アメリカプレートとの固着が場所によっては若干はがれ、少しずつプレートの境界面がすべっていたのではないのでしょうか」。

この地域のデータにこのような傾向があることは、今回の地震以前から知られていたという。しかし今回の地震がさしさまっていることを察知するのは、非常に困難だったという。まず、このような変化を観測したこと自体が、はじめてのことだった。また、そもそもプレート境界面の一部でおきた固着のゆるみと今回の超巨大地震^{ちやうきよおおい}の発生に因果関係があるのかどうか、その可能性はあるが、はっきりとしたことはわかっていないというのが現状なのである。

直前のプレスリップは観測されず

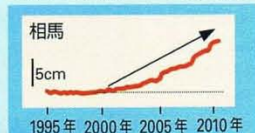
ところで、東西方向の圧縮の“異変”は、数年以上にわたる比較的長期間の現象である。では、「前震活動」の説明でも登場したプレスリップが、本震の直

プレートの東西方向の圧縮とは？



上は、太平洋プレートと北アメリカプレートの構造を、南側から断面図としてみたものである。太平洋プレートが西向きに移動するにつれて、北アメリカプレートは東西方向に圧縮されていく。2000年代の前半以降は、宮城県や福島県などで、圧縮のペースがゆるやかになったことがGPSによる観測でとらえられていた。その原因として、プレートどうしの固着が一部でゆるんだ可能性が考えられるという。

東西の圧縮ペースが減少



GPSの観測データの代表として、福島県の相馬のデータを示した（東西成分のみ）。縦軸は、基準となる観測地点からの、東西方向の距離を示している。ただし通常時のペースでの距離の短縮（圧縮）分は差し引いて、データを補正してある。2000年代の前半ころから、相馬の観測地点と基準となる観測地点との距離が、本来のペースで圧縮がつづいた場合の距離よりも長くなっている（つまり東西圧縮のペースがゆるやかになっている）ことがわかる。なお、急激な変化がみられる部分は、近くで発生した地震の影響である。

前に、もし発生していたとしたら、GPSでとらえられている可能性があるのではないだろうか。

GPSによる観測は、1秒間に1回、データが測定されている。ただしこのデータをそのまま観測記録とすると、誤差が非常に大きくなる。通常の場合は、一定時間以上の観測データから平均値を求めることで誤差を小さくしているが、1回測定されたデータのみの場合には、少なくとも2～3センチメートル以上の誤差が出てしまうのだ。

そこで西村博士らは、本震発生の直前のデータを、5分ごとに平均値をとって分析した。結果、プレスリップが発生したことを示す、本震の直前に加速するような地殻変動はみつからなかったという。今回の地震の震源域と観測網との距離などを考慮したモデル計算によると、少なくともマグニチュード7.4に相当するプレスリップがあれば、それによる地殻変動をとらえることができたはずだという。逆に言えば、今回の地震では、プレスリップはまったく発生しなかったか、発生していたとしても、この地域での観測限界以下の規模だったということになる。

また、誤差は覚悟のうえで、1秒ごとの観測データ

にプレスリップがあらわれているかどうか、分析を進めているというが、これまでのところ、プレスリップが観測されているようにはみえないという。

傾斜計データ

次は、傾斜計による観測結果についてみてみよう。防災科学技術研究所が設置している傾斜計は、正確には「高感度加速度計」とよばれる装置である。地下数百メートルに設置されており、地殻変動によって生ずる大地のわずかな傾斜を測定できる。

傾斜計の設置地点と今回の地震の震源域を考慮したモデル計算によると、プレスリップが発生した場所が観測地点に近い場合はマグニチュード6.2、遠い場合はマグニチュード7.3以上の規模があれば、その地殻変動が傾斜計で観測できるはずだという。

結論からいえば、今回の地震の前の傾斜計の観測データに、地殻変動が原因と考えられる変化はみあたなかった。少なくとも、観測可能なほどの規模のプレスリップは発生しなかったということである。

防災科学技術研究所の廣瀬仁博士が語る。「これまでに発生した地震で、明確なプレスリップが確認されたことはありません。観測をつづければつづける

ほど、プレスリップを検知することのむずかしさが浮き彫りになってきていると感じています」。

プレスリップは、発生が懸念されている「東海地震」の予知を目指すうえで、非常に重要な現象だと考えられている。東海地震は、静岡県駿河湾から浜名湖の付近が震源域となり、地震の規模はマグニチュード8前後になると想定されている。今回の東北地方太平洋沖地震と同じ、プレート境界地震だ。

この地域にはさまざまな観測装置がとくに重点的に張りめぐらされている。東海地震の想定震源域は東北地方太平洋沖地震の震源域よりも陸に近い（観測地点に近い）こともあり、この地域で検出可能なプレスリップのマグニチュードの値の下限は、東北地方よりは小さい（検出能力が高い）。しかし今回の地震でプレスリップが観測されていなかったという事実は、東海地震を予知することのむずかしさを、改めて示しているといえそうだ。

上空の電子数の異常

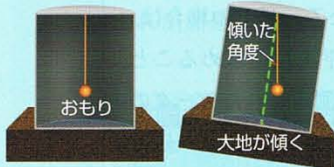
最後にもう一つ、近年になって注目を集めている現象を紹介しよう。

地上からおおよそ300キロメートルの上空では、太陽からの紫外線が大気分子にぶつかることで放出された電子が多く存在している。この層を「電離層」とよぶ。電離層の電子の数は、太陽の活動が活発化すると増加するなど、常に変化している。

一方、先ほど紹介したGPSの衛星は、地上の受信機と電波をやり取りしている。電波は電離層を通過する際、電子の数が多いほど速度が落ちる性質があるため、逆にこの電波の遅れを測定すれば、電離層の電子の数（密度）の変化をとらえることができる。

上空の電子の数と地下で発生する地震に、何の関係があるのだろうか。まず、地震が発生した後については、上空の電子数がはげしく増減する現象が知られている。地震が発生すると、地面が隆起したり沈降したりする。あるいは震源域が海底下の場合には、その真上の海面の高さが変化する。また、「表面波」とよばれる地震波が地面の表層を伝わっていく際にも、地面が上下に変動する。これらのことは、地面あるいは海面が、大気を垂直方向に押している（あるいは引いている）ということにほかならない。こ

傾斜計の原理と、観測データ

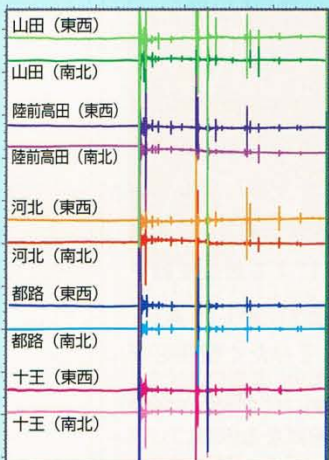


傾斜計の原理

傾斜計の中にはおもりがぶら下げられている。大地といっしょに装置が傾いても、おもりは常に真下に向かってぶら下がっているため、装置とおもりの位置のずれを観測すれば、大地の傾きが求められる。

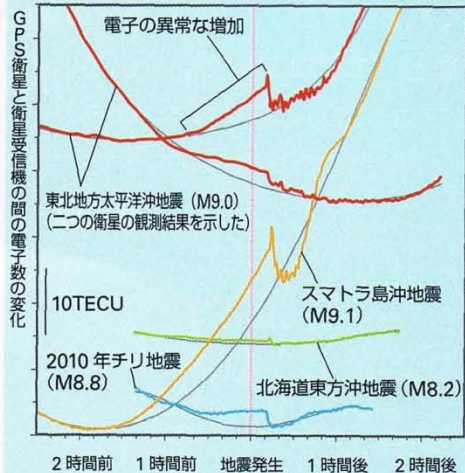
観測データ

山田、陸前高田、河北、都路、十王の5地点の傾斜計の、3月8日から本震発生までの観測データを示した。各地点について、東西方向と南北方向の傾斜のデータを示している。グラフの小さな1目盛りは0.1マイクロラジアン（約0.0000573度）の傾斜に相当する。東向きに、あるいは北向きに傾くような傾斜の場合にグラフが上に伸びるようにえがかれている。3月9日の前震など、地震の際にデータがはげしく変動しているが、本震発生に向けて加速していくような変化はみられない。



3月8日 9日 前震 10日 11日 本震

GPS衛星によってとらえられた、電子数の異常



GPS衛星で観測された、東北地方太平洋沖地震など規模の大きな地震の発生前後の、上空の電子数の変化を示した。衛星の移動にともなって電波の入射角度が変化し、電離層を通過する距離も増減するため、もし異常がなければ電子数のデータはなめらかな曲線となる(グレーの線)。観測データは、地震発生のおよそ1時間前から電子数が増加しているようにみえる。また、地震の規模が大きいくほど、電子数の増加も多い傾向があるようにもみえる。なお、電子数に異常がない場合の電子数の推移(グレーの線)を、地震発生前の観測データの線に重ねる解釈もありうる。その場合、地震発生前には異常はなく、地震発生後、電子数が減少したということになり、前兆とはいえない。

※縦軸の2目盛り分が10TECUに相当する。電子数が1TECU増加するとは、底面積1平方メートルの円柱の延長上に、電子が10の16乗個増加することを意味する。

電子数が増えるメカニズムは?



電子数増加のメカニズムは解明されていない。候補の一つとして、地震発生前に地表付近がプラスの電気を帯び、電子が引き寄せられるとする説がある。

うして生じた^{しんどう}振動は上空へと伝わっていく。そして電離層の空気と電子がいっしょにかき乱されるため、電離層の電子の数がはげしく変化するようにみえる。これはあくまでも地震発生後の現象だ。

地震発生前に、上空の電子数が増加か?

北海道大学の日置幸介博士は、地震後の分析により、今回の地震発生のおよそ1時間前から震源域の上空の電子数が増加していたとする成果を発表した。

日置博士によると、この時間に太陽活動が活発化したという事実はなく、上空の電子数の増加は、地下で発生した何らかの地震の前兆現象により、間接的に引き起こされたと考えられるという。

過去に発生した規模の大きな地震の際のデータをみると、2004年のスマトラ島沖地震や2010年のチリ地震などで今回と同様の現象がみられるという。また、マグニチュードの値が小さくなると電子数の変化も小さくなり、マグニチュード8.2前後の地震では、電子数の変化がほとんどみられなくなるという。

日置博士は、もし電子数の変化が本当に地震の前兆現象ならば、地震予知の実現が大いに期待できると考えている。まず、いつ地震が発生するかについては、電子の数が増加してからおよそ1時間後と予測できる。地震の発生場所は、上空で電子数が増加した場所の真下ということになる。そして地震の規模は、電子数の増加幅^{はば}から予測できる。つまり地震の予知に必要とされる「いつ」、「どこで」、「どのく

らいの規模で」という三つの要素を満たした予測が可能になるというのだ。

ただし、地下でどのような前兆現象が発生し、それがどのようにして上空の電子数を変化させているのかについては、解明されていない。日置博士は次のように語る。「室内実験により、岩石に圧力がかかるとその表面付近はプラスの電気を帯びることが確認されています。地震の発生前にも同様のことがおきて地殻の表面がプラスの電気を帯びる可能性があります。すると上空では、マイナスの電気をもらった電子が周囲から引きよせられ、震源域の上空で、電子数が増加するのかもしれませんが。あるいはほかの原因がある可能性もあります。いずれにせよ、この部分をきちんと解明する必要があります」。

一方、電子数の変化について、地震前に増加はしておらず、見かけ上、そのように見えているのだとする解釈もある(上のグラフの説明を参照)。いずれにせよ、まだまだ研究がはじまったばかりの現象であり、さまざまな分野の地球物理学者の間で議論が進められている段階だ。

東北地方太平洋沖地震の発生前の現象をここまでみてきた。明瞭に前兆と断言できる現象は、現時点ではみつかっていない。現状では予知に過剰な期待を寄せるのは危険である。一方で、いくつかの“異変”がとらえられていたのも事実である。これらの“異変”の意味が解き明かされれば、地震に対する私たちの理解が、また一歩進むはずだ。

(担当: 編集部 赤谷拓和)