

## 測位衛星でみる地殻変動

日置 幸介

### ■宇宙測地学

測地学は本来静的な地球を対象としてその形や回転、重力場を研究する古典的な学問であったが、この30年に宇宙技術を取り入れて計測精度が桁も向上し、動的な地球を研究する宇宙測地学へ様変わりした。測位（位置決め）は地図作成の技術が源流であるが、全球航法衛星システム(GNSS)でミリ単位の測位が可能になった現在では、位置の時間変化すなわち地殻変動が重要な研究対象である。

地球の表面を覆うプレートの動きは、表層に現れたマントル対流であり、そもそも固体の流動による動きなので、年間数センチというゆっくりしたものである。大陸間でセンチメートルの相対測位精度をいち早く達成して、プレート運動の実測に成功したのは、衛星レーザー測距(SLR)と超長基線電波干渉法(VLBI)であった。VLBIは遠方の電波星からくる白色雑音電波を離れた電波望遠鏡どうしで干渉させ、幾何学的な遅延から望遠鏡の相対的な位置を求める方法である。1984年に始まった国際共同観測に日本も参加し、翌1985年には太平洋プレートの動きが初めて計測された<sup>1)</sup>。

天然の電波源を人工衛星群におき換え、雑音電波をマイクロ波の搬送波におき換えたのがGNSSである。衛星を作って打ち上げるコストは大きいですが、個々の地上局は小さなアンテナと安価な受信機で済むため、複雑に変動するプレート境界域に地上局を密に展開するのに適している。

GNSSの嚆矢である米国の全球測位システム(GPS)の衛星は1980年代からつぎつぎに打ち上げられていたが、当初は測位精度を左右する衛星の軌道精度が不十分であった。1990年代前半に研究者の国際組織が独自の観測網で決定した高精度軌道情報をユーザーに提供する仕組みが完成し、VLBIを上回る測位精度

が実現するとともに、地上局の数が急速に増えていった。プレートの沈み込み帯に位置する日本では、国土地理院による稠密なGNSS観測網が整備され、今では地球観測の重要なインフラとなっている。またGPS以外にもロシア、EU、中国が独自のGNSSを打ち上げ、世は複数GNSSの時代を迎えている。小規模だが日本の「みちびき」も同様な測位衛星である。

GNSSは複数の軌道面を持つ多くの衛星(GPSでは20個以上)から構成される。同時に見える四個以上の衛星の電波を地上局で受信し、搬送波の位相とその変化から地上局の三次元的な位置を推定する。位置が既知の地上局群(地上基準座標系)からの追跡によって決められた衛星軌道が、これから位置を決める局の測位基準となる。丸一日観測した時の測位精度は、水平成分が3ミリ、上下が1センチほどだが、時間分解能を上げるとやや悪くなる。

衛星からやってくるマイクロ波は、電離圏や対流圏を通過する際に無視できない量の遅延を受ける。前者は分散性を持つため複数の搬送波での遅延差から補正できる。後者は様々な仰角の衛星を観測すれば局位置と分離して推定できる。ちなみに電離圏遅延から得られた全電子数は超高層大気物理学の研究に有用であり、対流圏遅延から求めた可降水量は天気予報の精度向上に役立っている。

### ■島弧の地殻変動

海溝はプレートが収束する境界である。その陸側に位置する典型的な島弧である日本列島の地殻変動は、ゆっくりとした普段の縮みと地震時の伸びで特徴づけられる。普段の縮みは、沈み込む海洋プレート(東日本では太平洋プレート、西日本ではフィリピン海プレート)が摩擦力によって日本列島を陸向きに押すこと

が原因である。その大きさは、約二百キロの幅を持つ日本列島が一年に約二センチ縮む僅かなものであるが、来るべき地震で解放される日まで、日本列島に圧縮応力と短縮ひずみを着実に蓄積する。

島弧に溜まった応力がプレート間の静摩擦を上回ると、プレート境界を成す断層がすべりだす。多くの地震断層では、動き出した断層の動摩擦が静摩擦より小さくなる。この場合、蓄積した応力のかなりの部分が解放されるまで断層が一気にすべる。これが地震の発生であり、励起された弾性波動(地震波)が地震計を揺らす。

断層面の性質によっては、すべり始めると却って摩擦が大きくなることもある。この場合はゆっくりとした断層すべりが数日から数か月継続し、スロー地震となる<図1>。応力の解放という観点からはどちらも重要だが、スロー地震は地震計を揺らさないため、GNSS網に捉えられないまで謎に包まれていた<sup>2)</sup>。

通常地震、スロー地震に関わらず、地下で断層がずれると、地表のGNSS点に変位する。断層すべりと地表変位の関係は、反無限弾性体における静力学的な釣合を近似的に満たす<sup>3)</sup>。従って複数の地表GNSS点で測られた地震時の三次元変位ベクトルから、断層の位置や大きさ、すべり量などを推定できる。ある程度大きな地震が国内で起こると、地震を起こした断層の概要が国土地理院によって推定され公表される。こういった断層の情報は地震計記録からも得られるが、断層がとてもゆっくりすべった場合、地震計は非力なのである。

### ■多様な地殻変動と新技術

GNSS局を動かすのは、プレート運動やそれに関連した地殻変動だけではない。例えば日本列島では、冬季の積雪による季節的な地殻変動

(冬に雪国がわずかに沈降して水平面内で縮む)が知られる<sup>4)</sup>。また地下水位の上下に連動した上下変動も場所によっては無視できない。

空間分解能はGNSS局をどれだけ密に展開するかで決まるが、複雑な地殻変動を面的にとらえるのは、衛星からの干渉合成開口レーダ(InSAR)観測の独壇場である。2011年東北地方太平洋沖地震による圧縮応力の解放に伴って、東北地方の火山地域が軒並み沈降する様子が「だいち」によってとらえられた<sup>5)</sup>。現在では空間分解能に優れるInSARと、時間分解能に優れるGNSSが上

手に使い分けられている。

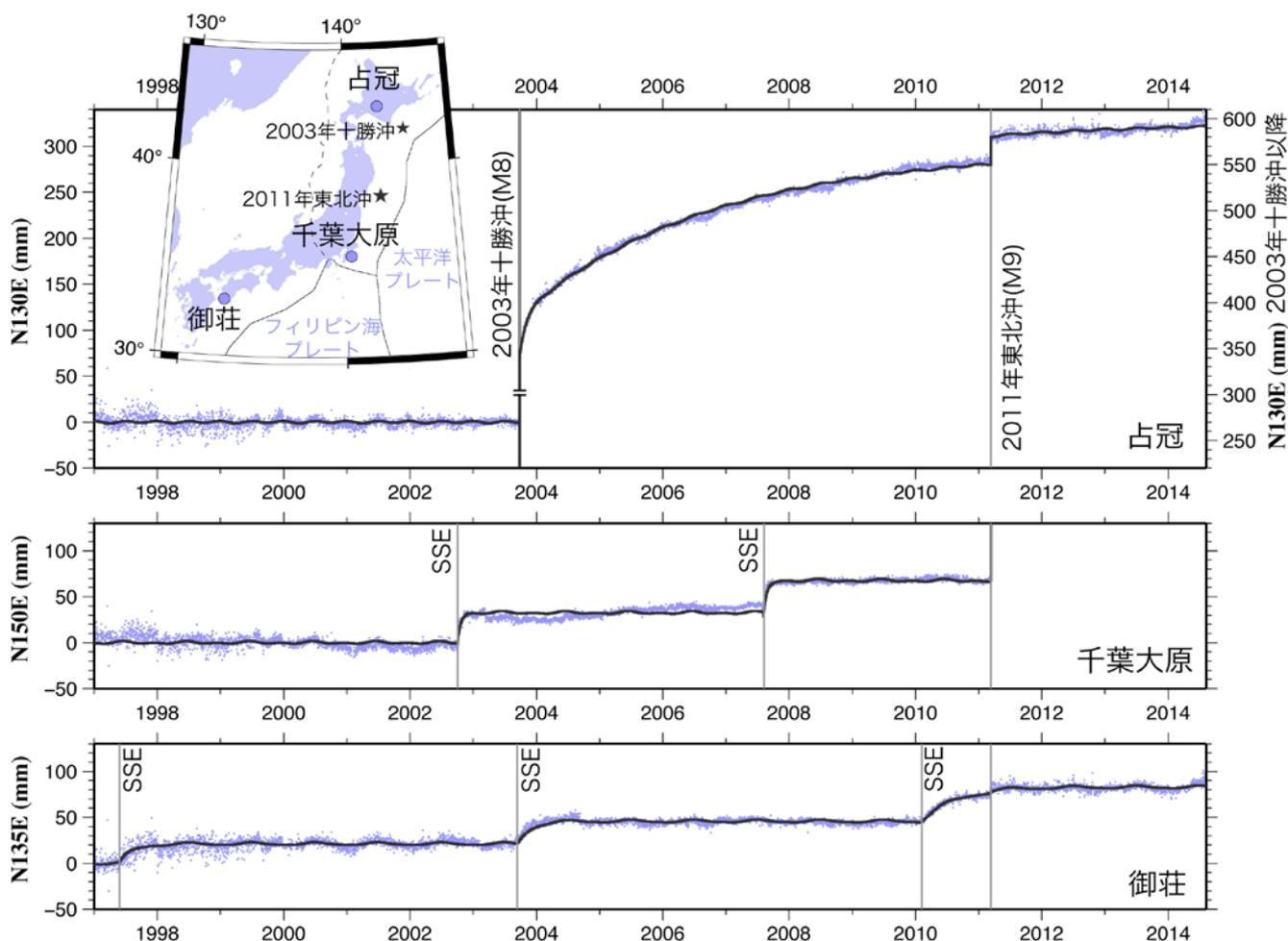
GNSSの時間分解能を秒単位まで上げると、変位を記録する地震計にもなる。東北地方太平洋沖地震直後には、振幅1ミリに満たない地球の自由振動の様々な振動モードがGNSS局の変位から観測された<sup>6)</sup>。

電波が届かない海底の地殻変動を測るため、船と海底の間は音波で、船と衛星の間はマイクロ波で結ぶ海底測位法が、ここ十数年で徐々に精度を上げてきた。東北地方太平洋沖地震で20メートル超の東向きの動きが観測されたのは、海上保安庁が宮城沖に設置した海底の基準点であ

った<sup>7)</sup>。

参考文献

- 1) 日置幸介: 科学 **59**, 316-319 (1989).
- 2) 廣瀬仁, 平原和朗, 宮崎真一: 科学 **70**, 200-206 (2000).
- 3) Y. Okada: Bull. Seism. Soc. Am. **82**, 1018-1040 (1992).
- 4) K. Heki: Science **293**, 89-92 (2001).
- 5) Y. Takada and Y. Fukushima: Nature Geosci. **6**, 637-641 (2013).
- 6) Y. Mitsui and K. Heki: Sci. Rep. **2**, 931 (2012).
- 7) M. Sato *et al.*: Science **332**, 1395 (2011).



<図1> GNSSで計測された占冠(北海道), 大原(千葉), 御荘(愛媛)の観測点の海溝向きの動き(直線成分を取り除いて平時のデータを平らにしてある, N130Eは北から時計回りに130度の意味)。占冠では地震時の急な動きとそれに続くスローな動きが, 大原と御荘では静かに始まり静かに終わるスロー地震(SSE)がみえる。SSEはしばしば同じような時間間隔で繰り返す, 個々のSSEの継続時間は数週間(大原)や数か月(御荘)と様々である。一日毎の位置を表す個々の点に, スローな断層すべりを適切な時定数の指数関数等で近似したモデル曲線を重ねてある。2011年東北地方太平洋沖地震に伴う位置のとびは全国規模で見られる。