

地球の極運動

—チャンドラー運動の地震による励起説—

島崎 邦彦*

地球の極運動で約1.2年の周期をもつチャンドラー運動がどのような機構で励起されているかは長い間不明であった。近年地球物理学の方面から地震によって励起されているとする主張がなされてきている。この説の紹介を兼ねて、極運動をめぐる考え方の発展を簡単にたどってみたいと思う。

1. はじめに

地球の自転極、すなわち自転軸と地表との交点は、地表にいるわれわれからみると、ある一点のまわりを円に近い軌道を描いて、約一年で回っている。この円の半径は数m~10m ($0.1 \sim 0.3$) である。これを極運動 wobble という。ここで注意したいことは、極運動は自転軸に対する地球自身の相対的な運動であることである。恒星空間に対する自転軸の動きではない。後者は才差運動と呼ばれている。地球上の点の緯度は自転軸に対して決められているから、極運動により緯度変化を生ずる。逆に各瞬間の自転極の位置は、地球上の数点での緯度観測によって求めることができる。

現在、極運動の観測は、同一緯度での観測をもとにした国際極運動観測局 (IPMS, 岩手県水沢市緯度観測所内) によるものと各国天文台の観測をもとにした国際報時局 (BIH) のものとがある。前者は1900年より開始された国際緯度観測局 (ILS) の業務を1962年に引き継いだものである。最近では恒星ではなく人工衛星を使った観測も米国で試みられるようになった。なお、国際報時局が極の位置を決定しているのは、極運動により星の南中時が変るためである。

2. チャンドラー運動の発見

回転している地球上で質量の増減や運動が起こったりトルクが働いたりすると、極は円形の軌道を描いて運動する。この自由章動の振幅は、質量や速度、トルクの大きさによって決まる。(極運動の力学理論はムンクとマクドナルドの名教科書 *The Rotation of the Earth* にくわしい) SF の元祖ジュール・ヴェルヌは 180,000 トン

の物質を打ち上げて、公転面に対する赤道面の約 23° の傾きをなくすことを考えた。

実際には赤道部分のふくらみのため、自転極を移すことは容易ではない。 1.8×10^{11} g の物質を消滅させても極の移り、すなわち自由章動の振幅は 0.1 ミクロンにすぎない。

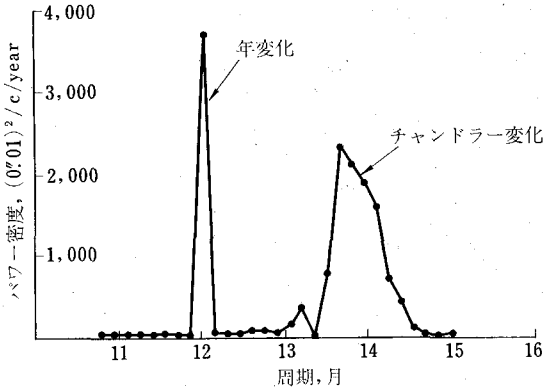
ところで自由章動の周期は地球が剛体の場合、 $A/(C-A)$ に等しい。(C: 自転軸のまわりの慣性能率, A: 地球の中心と赤道を通る軸のまわりの慣性能率)。この値は春分点の才差から約 305 日であることがわかっている。この自由章動の周期は 1765 年にオイラーによって導びかれた。このオイラーの結果に基づき、ベッセルやマクスウェル等の有名な学者が緯度変化を天文観測から見出そうとした。しかし、成功せず、彼等が見出したものは 0.1 秒より小さい振幅の、実際に存在するかどうかわからない変化にすぎなかった。

真実は意外なところから現われる。1884年に光行差を研究していたベルリンのキュストネルは、注意深く誤差の原因をとり除き 0.2 程度の振幅の緯度変化を見出した。この結果は 1888 年に発表され、多くの注目を集めた。そして 1891年にはマサチューセッツの富裕な商人チャンドラーにより、年変化と 428 日の周期を持つ緯度変化が存在することが発表され、まもなく追試によって確かめられたのである。この 428日=約 14 月の周期をもつ極運動に対し彼の名がつけられている。彼は趣味により、その名を歴史にとどめたのである。

緯度変化のパワースペクトルの例を第 1 図に示した。これはムンクらの本にある例をもとにして書いたものである。さて、オイラーによって予想された周期とチャンドラー周期の違いの説明は、チャンドラー運動発見の翌年ニューカムによって与えられた。地球が剛体ではないために、回転によって地球が変形を受け、周期が伸びるのである。

第 1 図をみると、年変化に比べ、チャンドラー変化はスペクトルのピークの幅が広い。このことはメルキオールらによってチャンドラー運動の振幅だけでなく周期も変化するためであると考えられた。しかし、チャンドラー周期が地球の変形、すなわち、地球のかたさによって

* 東京大学地震研究所
Kunihiko Shimazaki: Polar Motion of the Earth



第1図 緯度変化のパワースペクトルの例 (Munk らの本による)

決るものとすれば、地球の物性が比較的短い時間に変化していることになる。一方、ジェフリースらはチャンドラー運動の減衰によってピークの幅が広がることを主張した。このように考えると、チャンドラー運動は20年程度の減衰時間をもつことになる。ほとんどの地球物理学者はこのように考えているようである。

一方、第1図にみられる鋭いピークの年変化は1901年、スパイターラーにより空気質の季節的な移動によると主張された。現在でもこの結論は支持されており、冬季のシベリア高気圧による空気質の移動の位相と大きさは、年変化をうまく説明することができる。

3. チャンドラー運動の地震による励起説

さて、比較的大きな減衰係数をもつチャンドラー運動を保持するには、それを励起する機構が必要である。この機構については、地震による変形、地球の核とマンツルの電磁的結合、大気の運動等々が考えられた。しかしいずれも否定的結論が導びかれ、チャンドラー運動を励起する機構は、チャンドラー運動の発見以来約90年間不明のままであった。

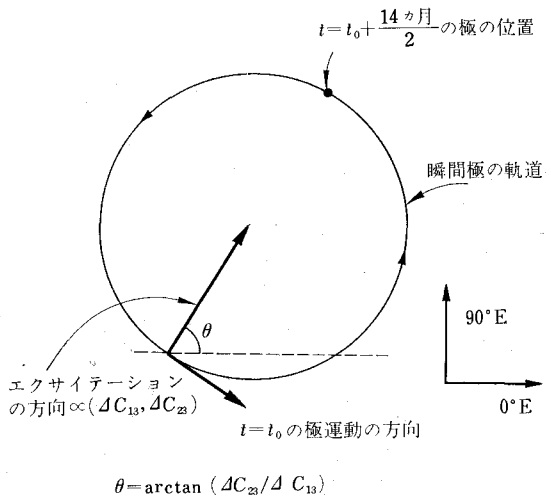
ムンクらの教科書(1960)では次のようなオーダー推算で、地震によるチャンドラー運動の励起を否定している。地震によって $100\text{ km} \times 100\text{ km} \times 30\text{ km}$ の縦・横・高さをもつブロックが 1 m 上昇したとしよう。この場合の励起の大きさのオーダーは 0.00001 にすぎない。たとえ 100 km を 1000 km に変えたとしても、観測される 0.1 のオーダーにはならない。

しかし、上の考え方は今やくつがえされつつある。それは、最近の地震学の発展によってなされたといえよう。物理学のディスロケーションの概念から発展して、弾性媒質内での変位あるいは応力の不連続はディスロケーションと呼ばれている。地震の震源すなわち断層のモデルとしてこのディスロケーションが近年用いられるように

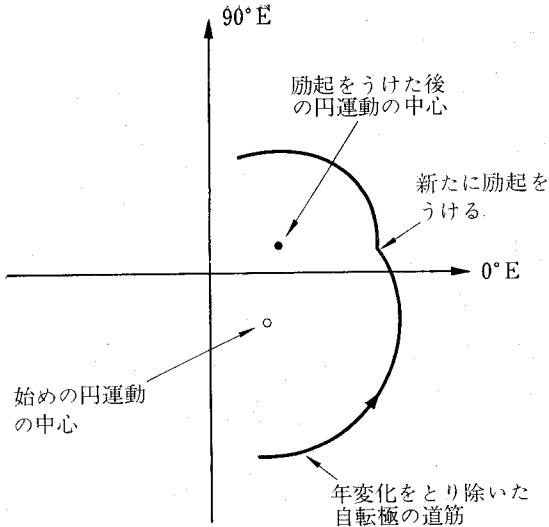
なってきた。このモデルは実際の地震波や地震による地殻変動をよく説明する。そして、ディスロケーションにより弾性媒質がどのように変形するかを扱うディスロケーションの弾性論を用いて、各観測点での地震波の振幅、位相等から、断層の方向や向き、その大きさ等が推定されるようになったのである。金森によれば、1964年のアラスカ地震の断層面の大きさは $200\text{ km} \times 600\text{ km}$ で、断層のずれは 15 m であるという。

1965年、プレスは半無限弾性体内のディスロケーションの理論を用い、アラスカ地震の地殻変動がハワイで観測されたと報告した。これに注目したマンシンハとスマイリーは1967年半無限弾性体内のディスロケーションによる変位を球に投影して、地震の変位による地球の慣性乗積の変化を近似的に求めた。その結果、ムンクらの本と違い、地震による変位が、震央から遠く離れた点でも積分を行なうことにより無視できなくなることがわかった。彼らの値は観測される値に比べて一桁程度小さい値であったが、それにもめげず翌年には極軌道の解析の結果を発表した。

ところで、地球の慣性乗積が変化するとどのような極運動が生ずるであろうか。極運動に関する慣性乗積の変化は ΔC_{13} と ΔC_{23} である。地球の慣性乗積が階段関数的に $t=t_0$ で $C_{13} \rightarrow C_{13} + \Delta C_{13}$, $C_{23} \rightarrow C_{23} + \Delta C_{23}$ に変化すると自由章動が励起され、この円運動の半径は $\sqrt{\Delta C_{13}^2 + \Delta C_{23}^2}$ に比例する。円の中心の方向は $\arctan \Delta C_{23} / \Delta C_{13}$ によって決まる。ここで特に、励起された時 ($t=t_0$) の運動の方向がベクトル $(\Delta C_{13}, \Delta C_{23})$ の方向に垂直であることに注目しよう。この様子は第2図に示されている。 $(\Delta C_{13}, \Delta C_{23})$ の方向をエクサイテーションの方向という。



第2図 $t < t_0$ で静止していた自転極が $t = t_0$ で慣性乗積の変化 $C_{13} \rightarrow C_{13} + \Delta C_{13}$, $C_{23} \rightarrow C_{23} + \Delta C_{23}$ を受けたときの $t \geq t_0$ の軌道。



第3図 チャンドラー運動の理論的に期待される道すじ (Smylie and Mansinha による)

さて、上述のようにして次々と自由章動が励起されるとすると、チャンドラー運動はこれらの重ね合わせと考えることができる。励起されるたびに一つの円から他の円に乗り移る形の軌道が期待されることになる(第3図)。

スマイリーとマンシンハが1968年に発表した論文では、各瞬間の極の位置から次の極の位置を予想し、予想が 0.02 以上はずれた場合は励起されたとして、次の点から新たに予想をするという方法を用いた。このようにして励起が起こったと考えられる点(円と円との切れ目)とマグニチュード7.5以上の地震の起きた点とを比べたのが第4図である(1957年 BIH データを用いた例)。

4. 地震予知ができるか

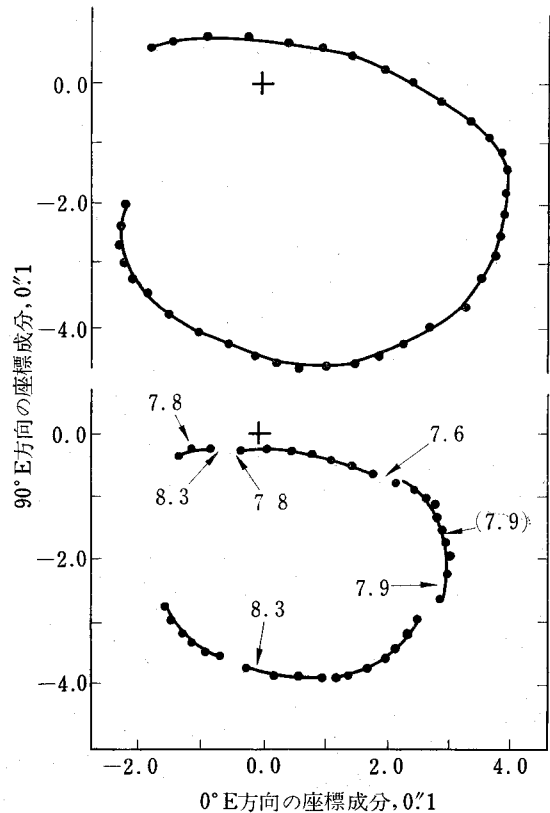
励起される円運動が左回りであることに注意すれば、第4図で $M=8.3$ や $M=7.9$ の地震では円軌道の切れ目の方が地震より先に生じていることに気がつかれるであろう。丸一つは10日おきのデータであるから、地震の起こる10日ほど前に極軌道に異常が生じていることになる。日本では、地震の起こる数時間前に海岸が隆起した記録が、1793年西津軽の地震、1802年佐渡の地震を始めとして数例報告されている。それでは地震の起こる10日ほど前に全地球的な規模で地殻変動を生じているのだろうか。スマイリーらは上の解析結果から地震予知を示唆している。

スマイリーらの方法では最初に年変化をとり除く必要があった。データの期間が短いことから厳密な意味で年変化を引き去ることは不可能である。筆者・竹内は年変化を引き去る必要のない新しい方法を用いて極軌道解析してみた。その結果はほとんどスマイリーらと同じで

あった。やはり、地震の起こる前に極運動の異常がみとめられるのである。

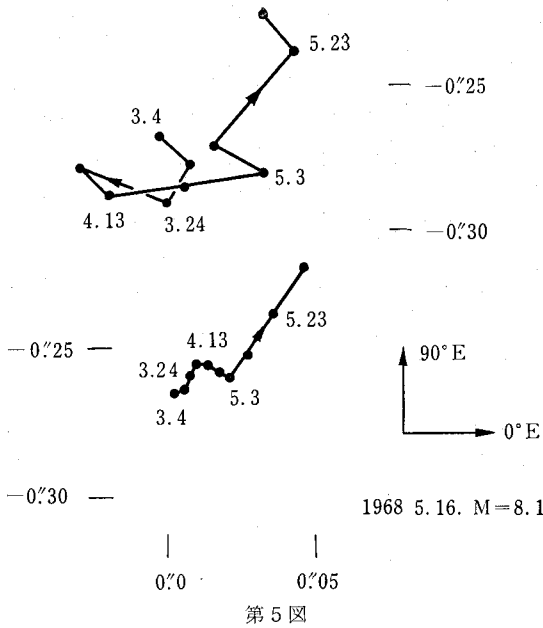
ところで、瞬間極の位置はどの程度によく決まるものなのであろうか。BIH で5日おきに極の位置を決める場合の分散の値は 0.02 程度である。このようにバラツキが大きいと極軌道はギクシャクしたものになってしまう。このため、実際に公表されている極の位置はこれらをスムーズしてならしたものとなっている。

第5図の上段はほとんどスムーズされていない極軌道、下段は BIH から公表されているスムーズされた極軌道(スマイリー・マンシンハ、筆者・竹内が用いたデータと同じもの)である。1968年3月4日から6月3日までの瞬間極の位置が示してある(数字は日付である)。5月16日には十勝沖 $M=8.1$ の地震が起きている。上段では5月13日の極の位置と5月23日の極の位置が大きく離れ、異常が生じたことを示唆している。ところが下段ではスムーズしたために、5月13日の極の位置が5月23日の方に引かれてしまっている。このような場合に解析



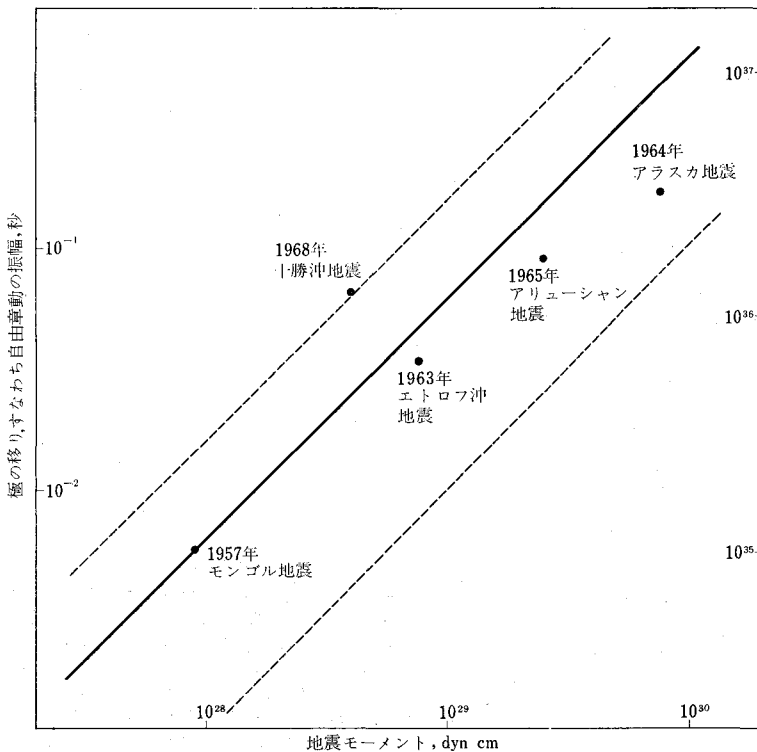
第4図 上段: BIH による1957年の極軌道, 1点は10日おきの極の位置を示す。

下段: 上段から年変化を引き去ったもの(黒丸)に対し円軌道のあてはめを行なったもの(本文参照)。矢印はマグニチュード7.5以上の地震の起きた時を示す。数字はマグニチュードである。(Smylie and Mansinha による)



を行なうと、異常が5月3日と13日の間に生じたという結果が得られる。このような例から考えると、地震の前に生ずる極運動の異常はスムーズされたデータを使うためと考えるとよいのではないだろうか。

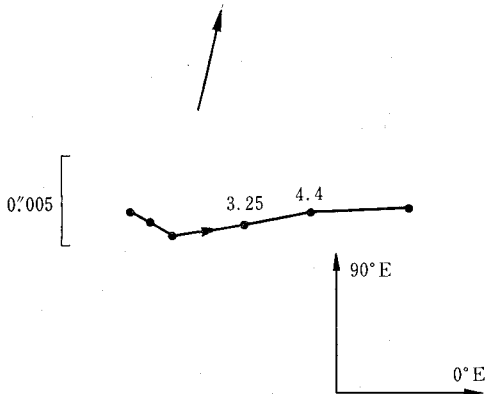
5. 地震学のデータとの一致



第6図 いろいろな地震により期待される自由章動の振幅(計算に用いた地震のデータは金森およびBruneによる)。横軸の地震モーメントは断層面の面積と断層のずれの大きさと剛性率の積である。同じ地震モーメントでも震源の位置や断層の方向・傾きによって自由章動の振幅は異なる。ほぼ上限と下限とを破線で示した。実線は深さ30kmに横ずれ断層が生じたときの平均の自由章動の振幅を示す。

ところで、前にもどって地震による変位はチャンドラー運動を十分励起する大きさをもっているのだろうか。マンシンハらの結果は、半無限弾性体の計算を用いたために一桁小さい値になっている。ベン・メナヘムらが1969年に行なった均質弾性球の内部に生じたディスロケーションによる表面の変位の計算を用いて、慣性乗積の変化を計算してみた。その結果は第6図のとおりである。表面の変位のみを用いたため1.7倍程度大きく値を見積ったことになる。この図からみれば、地震による変位は十分チャンドラー運動を励起し得るようである。地球内部には低速度層のように変位を受けやすい層が存在するから、均質弾性球の仮定は、値を小さく見積ることになるであろう。第6図は値を大きく見積る分と小さく見積る分が打ち消してちょうど良い値が得られているのかもしれない。均質弾性球の内部の変位をも含めたより厳密な計算は1970年にベン・メナヘムらによってなされた。彼らは結論で、チャンドラー運動の30%を地震が励起していると述べている。これは恐らく均質弾性球の仮定のために実際の変位を小さく見積ったためであろう。

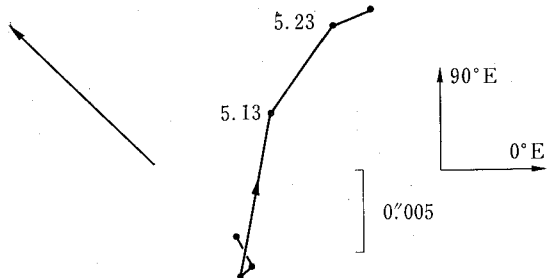
ところで、地震波の観測から断層の方向や傾き等がわかれば、極がどの方向に移動するかがわかる。実際に地震のデータから予想される極の運動方向と観測の結果は一致するであろうか。第7図、第8図はその比較の例である。それらに示されている極運動は、異常な運動部分を抜き出したものであり、矢印は地震のデータから予想される(ΔC_{13} , ΔC_{23})、すなわちエクサイテーションの方向である。第2図と比べてみれば、これらの極の異常な運動の方向が地震のデータから予想される方向とよく合っていることがわかるであろう。



第7図 1964年アラスカ地震の際の極の異常な運動(黒丸)と地震のデータ(金森による)から予想されるエクサイテーションの方向(矢印), 数字は日付を示す。(アラスカ地震 1964.3.28. 61.1°N, 47.6°W, $M=8.5$, 深さ 20km)

以上述べてきた事実からは, チェンドラー運動が地震によって励起されている公算が強い。地球内部の層構造を考慮に入れて地震の変位による慣性乗積の変化の厳密な計算がなされるのは時間の問題と思われる。

6. 永年変化の問題



第8図 1968年十勝沖地震の際の極の異常な運動(黒丸)と地震のデータ(金森による)から予想されるエクサイテーションの方向(矢印), 数字は日付を示す。(十勝沖地震 1968.5.16. 40.8°N, 143.2°E, $M=8.1$, 深さ 7km)

極運動にはもう一つ永年変化と呼ばれる現象がある。関口らによればその大きさは $0'003/\text{yr}$ の程度である。マンシンハラはこの問題を地震によってランダムな方向へ極が移ると考え、酔歩の問題として論じている。実際の地球上での震央分布は決してランダムではなく、各点での断層の方向やずれの向きには規則性があり、これは New Global Tectonics として現在注目を浴びている問題である。これらを考えにいった場合、永年変化の方向も十分説明ができるであろうか。これは今後の興味深い問題である。

天体写真の写し方

小型カメラ・小望遠鏡による天体写真の撮影 藤井旭 編著

天体写真は、特別の用意をしなくても、魅惑あふれる夜空を写せ、楽しむことが出来ます。本書は、『天文ガイド』の読者の実際の作例を示しながら、対象についてどんな方法で写せばよいのか。現象やプリントでは、どの点に注意すればよいかなど、わかりやすく解説したやさしい入門書。

■ A 5 変型判・256頁・定価550円好評発売中!

広角レンズによる星野写真集

好評をいただいた『望遠レンズによる星野写真集』の姉妹編。小型カメラの特徴を生かし、とくに広角レンズによる星野の楽しみ方を紹介しました。星座・星雲・星団をはじめ、銀河まで、カラー4枚、モノクローム117枚を収録した。

■ B 5 変型判・128頁

天文ガイド別冊 550円 好評発売中

誠文堂新光社

東京・神田錦町1-5/振替東京6294