

緯度変化から極運動へ

奥 田 豊 三*

1. 極運動の理論的予言から緯度変化の発見へ

今日においては経度・緯度に変化することは天文学や測地学、地球物理学に関心を抱く人々にとってひとつの常識にすらなっているが、フランスの天体力学者ラプラスですら“地球の緯度は不変のもので、位置天文学の体系はこの原則にもとづいて組立てられている”と述べていた。ラプラス自身フランス科学アカデミーの度量衡特別委員会の委員長であり、緯度決定の問題についても専門家であったのである。ところが、ほぼ同時代にスイス出身の解析数学者オイラーは 1759 年から 1765 年頃にかけて、地球の自転軸が地球自体に対して形状軸のまわりに約 305 恒星日（約 10 カ月）周期で円錐運動を行なうはずであることを理論的に予言した。この現象が極運動における自由章動とよばれるものである。極運動の影響が実在するものであれば、緯度・経度および方位角が変化するはずである。すなわちラプラスの緯度不変説は根底からくつがえされることになる。

一方子午線観測において天頂儀が最初に登場して実際に緯度観測が行なわれたのが 1726 年イギリスのキュー天文台においてであって、オイラーの時代にも緯度観測は天頂儀、経緯儀、子午環等によって実施されていたが、星の位置（星表に採用されている）の誤差、視差、歳差常数および章動常数、屈折常数等の天文常数系の精度が極運動による緯度変化現象を観測から見出すのに充分なほどにはまだ達していなかった。

後に 1834 年にホレボウ・タルコット法という観測方法の改良案が発表され、タルコット法にもとづく天頂儀が開発されるに及んで観測精度が一段と向上してきた。このタルコット法はほぼ等しい天頂距離で、天頂の北と南を相次いで子午線通過する 1 対の 2 星の僅かな天頂距離の差をマイクロメーターで測定する巧妙な観測方法であって観測器械も子午環ほど大型であることを要しない。大気屈折の影響も天頂距離の差をとることによって 2 次的な微小量となる。

1884 年から 1889 年にかけてドイツの旧ベルリン天文台のキュストナーは光行差常数を決定しようとして経緯儀を天頂儀式に用いた緯度観測から、はじめて緯度が変化していることを突きとめた。彼はブルコボ天文台の子午環観測の結果を調べて、ますます緯度変化現象を確

め、1888 年にベルリン天文台の観測結果報告書にこの発見を発表した。これに刺激されて 1889 年の初めにはベトレヘム、ブラーグ、ベルリン、ポツダムの各地で緯度観測が行なわれ、その年の終り頃にはキュストナーの結論が確認された。

一方アメリカのチャンドラーもキュストナーとほとんど同時に、自分で考案・設計したアルムキャンターという水銀盤に浮べた水平望遠鏡により緯度変化の実在を発見した。チャンドラーはすでにキュストナーの発見を知っており、むしろその発見にはげまされて彼自身の観測からも緯度変化を見出したというところであるが、そのかわりに彼の大きな功績は緯度変化の周期が実際にはオイラーの予言した 305 日（約 10 カ月）ではなくて 427 日（約 14 カ月）であることを大胆につきとめたことにある。

実はこの 427 日のチャンドラー周期がオイラーの 305 日周期よりも遙かに長い周期であるため、当時果してこれが本当に極運動の周期であるかどうかについて若干の疑惑も抱かれた。ところが 1891 年から 1892 年にかけてアメリカ海軍天文台のニューカムが直観的な理論づけで、オイラー周期は地球を完全な剛体として導かれたもので、実際の地球は剛体ではなく弾性体であり、さらに地球表面の大部分を掩っている海洋は流体であるから、周期は当然長くなり、地球は平均して鋼鉄ほどの剛性率をもてばチャンドラー周期が極運動の自由章動の周期であることを証明した。このようにして観測と理論の美事な協力によって極運動による緯度変化現象は 1890 年代に確認された。実にオイラーの理論的予言から約 130 年経過している。

2. 国際緯度観測事業の創設および発展

1895 年ベルリンにおける国際測地学協会総会でベルリン天文台長フェルスターによって国際緯度観測事業 (I L S) が提案され、次の総会 (1898 年ドイツのストットガルトで開催された) においてその実施が決議された。

北緯 39°08' の緯度圏上に水沢、カルロフォルテ、ユカイア、ゲザスバークの 4 観測所を設置し、同じ天頂儀、同じ観測プログラムで国際共同観測が実施されるはこびになった。これらの 4 観測所のほかに丁度同一緯度圏上にあったロシア領中央アジアのシャルデュイ、アメリカのシンシナチ天文台もこの事業に参加して、全部で 6 観測所が 1899 年 12 月から正式に観測を開始した。観測

* 緯度観測所

T. Okuda; On the Development of the International Service from the Latitude Variation to the Polar Motion.

の結果はすべて当時測地学のメッカであったポツダムの ILS 中央局に送られ、極座標が計算されて発表された。最初極座標 x, y は各観測所における緯度変化 $\Delta\varphi_i$ から

$$\Delta\varphi_i = x \cos \lambda_i + y \sin \lambda_i$$

で導かれた。ここに λ_i は観測所の経度である。ところが中央局長アルブレヒトの発表した結果によれば、水沢の (O-C) が 1900 年 1 年間について最も大きく、水沢に他の観測所に比べて 1/2 のウエイトをつけて発表した。水沢の緯度観測所初代所長木村栄博士はこの意外な成績に接して熟慮を積み重ねた結果各観測所の (O-C) にある共通な年周項の存在をみとめて

$$\Delta\varphi_i = x \cos \lambda_i + y \sin \lambda_i + z$$

として z 項を発見し、各観測所の緯度変化より極座標 x, y を導く式に z 項を加えることを提唱した。 z 項発見の論文は直ちに 1902 年ドイツ、アメリカの天文学研究雑誌 (A. N., A. J.) に発表され、中央局もこの z 項導入を承認した。これが有名な z 項発見の由来である。後にこの z 項は極運動によらない項という意味で局地的な要素と共通的な要素とをひきくろめて non-polar variation (非極変化) と総称されるにいたった。

z 項が発見されると早速その原因についての考察が次々と発表された。星の年周視差の影響、光行差常数の採用値の誤差の影響、地球重心の南北振動の年周変化、鉛直線の年周変化、大気屈折の異常等がまず吟味された。

南半球に同一緯度圏上の国際緯度観測所を設置して極運動を北半球のみにとどまらず南半球からも求め、しかも発見されたばかりの z 項の南・北両半球における在りかたをしらべる意義からも、1903 年の国際測地学協会総会の決議によって南緯 $31^{\circ}55'$ 圏上にあつて経度がほぼ 180° はなれているオーストラリアのベースウォーター、アルゼンチンのオンカティボの 2 カ所に緯度観測所が設置された。しかし気候の不順、観測者の健康をおびやかす悪条件が重なって数年にして観測を中絶せざるを得なかった。

1914 年第一次世界大戦が勃発してドイツに在る ILS 中央局と各観測所との間の連絡が途絶えてしまった。中立国オランダのライデン天文台長のバックハイゼンの斡旋によって日本、アメリカ、イタリアの 3 カ国は観測を継続することが提議された。丁度この時緯度変化事業の条約の期限も切れ、国際測地学協会は解散してしまつた。この機会にアメリカのゲザースバーグ観測所が 1915 年の初めに観測を中止し、翌年 1916 年の初めにシンシナチ観測所も観測を停止し、1919 年にはロシアのチャルデュイ観測所も観測を中止して、残る観測所は水沢、カルフォルテ、ユカイアの 3 カ所のみとなつた。第一次世界大戦終了後国際天文学連合 (IAU)、国際測地

学・地球物理学連合 (IUGG) が組織され、ILS はそれらのうちの緯度変化委員会に引き継がれた。木村栄博士は IAU, IUGG の緯度変化委員会の委員長に推され、それらの決議にもとづき 1922 年 9 月より ILS 中央局に水沢観測所が指定され、その中央局長に推された。水沢中央局は 1936 年まで続き、国際緯度変化観測結果報告書第 7 巻、第 8 巻が刊行された。第 1 巻から第 6 巻まではドイツのポツダム中央局から刊行された。

水沢中央局時代に再び南半球共同観測所の設立が決議され、南緯 $34^{\circ}55'$ の同緯度圏上にあつて経度差が 180° に近いオーストラリアのアデレード観測所とアルゼンチンのラプラタ天文台に緯度観測所が設置された。アデレードの方は水沢から天頂儀を貸与して観測が始められた。アデレード観測所は 1931 年より 1940 年まで約 10 年間緯度観測をつづけ、ラプラタ観測所は 1932 年より現在まで観測を継続している。木村中央局長は赤道付近に緯度観測所を設置することに奔走して、インドネシアのパタビア郊外のチリリタン飛行場の一隅にジャワ陸軍三角測量部の管理によって 1931 年より 1940 年まで約 10 年間緯度観測が遂行された。

1936 年より ILS 中央局はイタリアのナポリに在るカポディモンテ天文台に移され、カルネラが中央局長に就任した。その後第二次大戦の戦渦にまきこまれて 1943 年に遂にイタリアのカルフォルテ観測所は観測を止むなく 3 年間休止した。水沢は戦時中の困難を乗り越えて観測を無休で遂行した。さかのぼって 1930 年にソビエトのキタブ観測所がチャルデュイ観測所に代わつて観測を開始し、1932 年にゲザースバーグ観測所が観測を再開して、一時わずか 3 観測所に追い込まれた ILS も 1932 年以後は 5 観測所に戻つて現在に及んでいる。終戦後アメリカの沿岸測地局長コルバート少将の斡旋によって再び各観測所とイタリアの中央局との連絡がついた。

1949 年にイタリアの中央局はナポリ天文台よりトリノ天文台に移され、トリノ天文台長チュツキニーが中央局長となつた。1955 年にチュツキニーは緯度観測の観測時間を従来の 4 時間から 6 時間に延長する観測プログラムの変更を敢行した。これは緯度の日周変化の実態をつかむことを主な目的としたためである。

ILS は今世紀のはじめに発足して以来今日まで同じ星対を用いて、同じ観測器械によって緯度観測を満 65 年間も継続してきた。その真価は平均極の永年変化の問題、チャンドラー項および年周項等の周期的変化の研究等に多くの貴重な基礎資料を提供してきたことに在る。

3. 緯度変化から極運動へ

前にも述べたように極運動の影響は経度変化にも現われる。水沢でもすでに z 項が発見された年すなわち 1902 年に当時の海軍水路部より子午儀を借用して水沢—東京

間の経度差観測の準備を行ない、1903年から観測を開始したことがあった。

第二次大戦中空襲下にさらされ始めた東京天文台では報時業務の遂行を期するために、万一の場合に備えて水沢において時刻観測が正式にできるような体制をもつことに協力した。戦後世界的に国際報時業務の迅速化およびその精度向上が要望され、天文観測用精密時計も戦前の振り型時計（リーフラー、ショルト時計等）から戦後は磁歪時計、音片時計さらに水晶時計が開発され、時計の精度も格段の向上を見るにいたった。さらに戦前アメリカのワシントン海軍天文台において緯度観測に用いられてきたロス天頂儀が戦後改良・工夫を重ねられて写真天頂筒（PZT）という時刻および緯度を同時に測定できる新型の観測器械として登場してきた。このPZTは観測精度において天頂儀をしのぐことが期待され、短波の無線報時における電波の伝播時間の不確かさをのぞいては経度観測は0.001を目標にし、緯度観測に匹敵する精度まで漕ぎつけ得る見通しが次第に立ってきた。国際報時においては極運動の影響をまず取り除くことが先決である。緯度観測より導かれる極座標の速報が国際的に要望されるにいたり、1955年より国際緯度速報事業（IRS）が発足することとなった。当初この速報事業をILSが担当することとなったが、その後間もなくフランスのパリー天文台に在る国際報時局（BIH）がその実務を担当するようになり、観測もILSの他に多くの独立観測所の資料を集めて10日ごとの極座標の速報を現在にいたるまで遂行している。

一方従来の眼視天頂儀の改良もソビエトにおいてこころみられ、口径も従来の108cmから130cm乃至180cmの大型天頂儀（ZTL）が開発され、さらに古くからあったアストロラーブが野外測量用の域を脱して、国際地球観測年（IGY）を契機としてパリー天文台においてダンジョン台長のもとで改良・工夫を加えられて半自動的な個人差なしのダンジョン・アストロラーブとして登場し、固定観測所においてPZTと同じく時刻および緯度同時測定用器械として採用されはじめた。

短波による国内・国際無線報時もより安定した超長波無線報時に切り換えられ、いよいよ経度変化観測からも極運動を決定する明るい機運が生じてきた。

ここにいたって従来の緯度変化一本槍の時代から経度・緯度の2つの観測面から総合的に極運動を決定する時代に移行することになってきた。時あたかも1960年フィンランドのヘルシンキにおいて開催されたIUGG総会における“緯度変化研究の現状と将来について”のシンポジウムで従来のILSを再編成して、新たに国際極運動観測事業（IPMS）に発展すべきことが勧告され、1961年8月アメリカのパークレーにおける第11

回IAU総会において正式にIPMSの発足が決議され、1962年より水沢がIPMSの中央局に指定された。

1964年ドイツのハムブルグで開催された第12回IAU総会において従来の緯度変化委員会は地球回転委員会として名称と内容が一新されるにいたった。かくして伝統あるILSを中核として極運動を経度・緯度観測から精密に決定する国際協力事業が1962年をエポックとして“緯度変化から極運動”の時代に入った。この事業に協力・参加する国は現在緯度観測について（同時に経度観測を報告してくるものを含めて）21、観測所の数も35、経度観測のみについて6カ国、6観測所という現状である。

4. 極運動観測の重要性

かつて日露戦争終結後北カラフトと南カラフトの国境設定に当たって北緯50°ラインに当時の緯度変化が考慮されたというが、真偽のほどは明らかにし得なかった。しかしいざれにしても測地天文観測のデータがあるエポックにreduceするにはどうしても極運動の補正が必要である。このような実用的な応用性はともかくとして位置天文学・測地学・地球物理学分野における重要性を考えて見よう。

i) 位置天文学において

位置天文学においては天球の極は地球の自転軸すなわち極にもとづいているから、極運動は基本的に天球における座標系に関係してくる。天文常数系において光行差常数、章動常数等はかつて緯度観測から決定される方向が期待された。光行差常数は緯度観測からは20°51'~20°52'が導かれ、従来の採用値20°47'よりやや大きい値が得られた。近年地球と金星との間のレーダー測定により光行差常数が緯度観測よりよい精度で決定され、1964年のハムブルグIAUにおいて20°49'6"が新たに採用された。章動常数は約19年ごとの緯度観測の資料を用いて9°20'の値が得られた。この結果は地球の流体核を考慮した内部構造論にとって極めて重要な示唆を与える。

さらに最近チャンドラー周期項とともに自由章動のもう一つの要素として日周章動が地球の流体核の存在を考慮してソビエトのモロデンスキー、イギリスのジェフリースおよびポルトガルのビセンテ等によって理論的に予言され、ソビエトのポルトバ天文台のポポフ、イギリスのグリニチ王立天文台のトマス等によって経緯度観測からもその実在がほぼ確認された。

天文屈折については等密度の気層傾斜による異常屈折の影響が検出され、緯度の季節変化の一部を説明するところみが最近の高層気象データを用いてなされた。気象学特に高層気象、局地微気象と天文観測との密接な関係が緯度変化観測を通じて、幅広く研究された。

ILS 観測はボスの G. C. 基本星表に準拠しているが、星表に採用された赤緯および赤緯方向の固有運動の値についての修正が緯度観測自身から得られる。これを赤緯および固有運動補正という。アストロラープによる経・緯度観測は比較的明るい星を全天に亘って選び得るので FK 4 および FK 4 Supp. のような基本星系に対する星の位置の改正を目指すことができる。

極運動観測には星の視位置の精密整約が必要となってきたので、視位置計算法の絶えざる改良を促がした。この項の発見は章動項のより多き展開を必要とし、光行差常数の決定には太陽系の重心に準拠する新しい光行差の整約方法をもたらした。星の視位置計算法も従来のベッセル整約法およびその拡張から発展して、直角座標にもとづく整約法が電子計算機による計算に伴なって展開され、現在アストロラープ観測の整約に用いられている。

極運動と地球自転速度の変動との関係も新しい観点から研究されつつある。月の運動の影響も古くから考慮され、緯度変化のうちに 19 年 (18.6 年の昇交点黄経周期) 周期やその倍周期 37~38 年周期の存在も論じられてきた。

ii) 測地学において

チャンドラー項の楕円性は地球の三軸不等を示すことになる。極運動からチャンドラー項を抽出して地球の三軸不等を推定するところみはしばしばなされたが、そのオーダーは赤道楕円の長軸と短軸の不等が約 300 m 前後と推定され、重力分布および人工衛星観測から推定される 100 m 前後とかなりへだたりがある。かくして極運動は地球の形状に関してある情報を提供し得る。

海面水位に及ぼす極運動の影響すなわち pole tide も多くの研究者の解析によって確認されている。緯度観測および経度観測は観測所における鉛直線の周期的変化または経年変化をも含んでいる。鉛直線の変化の検出は極めて重要な問題であって、最近水沢においては東西・南北方向における相対的な水準面の変動の精密連続観測が計画されている。

極の経年変化の問題は地球自転速度の変動と関連して、観測から追求できるようになってきた。最近ワシントン海軍天文台のマロヴィッツの研究によれば、極は西経 60° の方向に永年的に移動しつつあるという。この方向は丁度水沢の反対方向にも相当する。水沢において観測所の南への変位または鉛直線の南への偏倚があれば、極は見かけ上水沢と反対方向に移動する。観測所の局地変化によるものか、真に極のみがたまたま水沢と逆方向に移動するかは測地学の分野からみても興味深い問題である。

1959 年より中共の天津観測所が北緯 39°08' の同緯度圏上にあって緯度観測を ZTL-180 によって開始した。

1959 年より 1963 年にかけての期間について経年変化をしらべてみると水沢と天津における緯度変化は実によく平行している。この事実は日本列島とアジア大陸との間に相対的な緯度方向における永年運動はあり得ないことを示している。地殻変動の問題に対して極運動の演ずる役割は重要である。最近経度変化からも大陸間の地殻運動がストイコおよび東京天文台の虎尾正久博士によって研究されつつある。

iii) 地球物理学において

緯度変化発見当初においてチャンドラー周期が地球の弾性のために剛体と仮定したオイラー周期より延びることが論じられた。チャンドラー項の振幅および周期が時期によって変動することが認められ、その原因についてはまず地球の剛性率の時期による変化が考えられ、次に地球の力学的扁率の時期による変動が考えられ得る。しかしチャンドラー運動の変動の真の原因についてはまだはっきりしていない。地球の内部構造を表わすラヴ常数の k はチャンドラー周期より求められる。一方緯度観測自身からは月及び太陽による地球潮汐の影響による鉛直線の半日周変化が求められる。ひいてはラヴ常数の組合せ $(1+k-l)$ が得られる。したがって重力計、水平振子、伸縮計等による地球潮汐観測から求められる $(1+k-h)$ 、 $(1-\frac{2}{3}k+h)$ と総合して k, h, l の値を推定することができる。最近ベルギー王立天文台 (国際地球潮汐観測事業中央局) のメルキオールは地球潮汐と歳差・章動との関連を追求して、地球潮汐の観測から章動の展開において従来剛体と仮定して導かれた各項の振幅、周期、位相を弾性体地球にもとづいて改正できる可能性を示唆している。

チャンドラー運動が一種の減衰振動であるという見方も可成り以前から支持され、その原因を海洋、地殻、マントル、流体核に求めるところもしばしばなされてきた。最近ハンガリーのバルタは流体核の内核の中心が地球の中心からいくらかはずれていることと内核自身の運動を想定して重力場に及ぼす影響をしらべた。この方向に沿っての研究は極運動の解析にも大きな示唆を与えつつある。地球磁場の周期的変化および経年変動と極運動との関係も研究されつつある。

さらに地球の外圏に及んでは太陽微粒子の地球への影響にもとづく極運動との関連も最近のロケットおよび人工衛星の観測結果を用いて理論的に研究されつつある。一方地球の内部構造、地球表面の海洋、大気の循環と極運動との関係はますます注目を浴びつつある。かくして極運動は地球科学の一つの分野として位置天文学・測地学及び地球物理学と密接な接触を保ちながら、今後ますます天を測って地を識る“地球の診断”に大きな基本的役割を演ずることであろう。