

弥生ゆかりの郷土の偉人

木村^{ひさし} 榮博士が発見した「Z項」とは

平成30年3月1日

はじめに

弥生町会連合会が企画した「弥生ゆかりの偉人木村榮博士に光をあて、その業績を啓蒙する活動」が平成 29 年度金沢市地域コミュニティ活性化モデル事業の一つとして採択されました。この小冊子の発行は当該事業の一つとしてなされるものです。

「Z 項」の発見者として知られる木村榮博士は明治 3 年(1870 年) 石川郡野村字泉野新 84 (現在の金沢市泉野町 3 丁目 18-16) にて菜種油の生産や酒づくりなどを手広く商う素封家 篠木庄太郎の二男として誕生しました。翌年(明治 4 年(1871 年)) 近くに住む親戚で子供のいなかった木村民衛の養子となり、幼少の頃より養父民衛の経営する木村塾にて、養父に代わって塾生に漢学や算盤を教えるなど神童ぶりを発揮し、長じて後に著名な科学者として世界的に知られるようになりました。

このように郷土の偉人として称えられる木村榮博士ですが、その名声のほどには代表的業績である「Z 項の発見」の内容についてはあまり知られていないように思われます。そのような思いから、分子分光が専門で地球物理学や天文学についての知識はあまり持ち合わせていない筆者ですが、素人目線からの「Z 項」の解説ということでこの小冊子の執筆をすることとなりました。主としてインターネットから知識を仕入れながら、筆者自身の視点での理解を深めつつ書き綴りました。説明の不十分なところがあったり、退屈な部分もあるかと思いますが、郷土の偉人 木村榮博士 が発見した「Z 項」への理解を少しでも深めることのお役に立てばと思う次第です。

なお、文中『 』で囲ったところが数か所ありますが、数式の導出等について説明したところですので、関心がなければ、読み飛ばしてください。

筆者の浅はかな理解力により、間違った記述や表現が含まれているかもしれません。また、不注意による誤字・脱字などもあるかと思いますが、お気づきの点があれば遠慮なくご指摘いただければ幸いに存じます。

はじめに	2
序章 「Z項」とは あらまし	4
第1章 地球の公転と自転	5
第2章 地軸の移動	
2. 1 地球の極運動による地軸の移動	8
2. 2 「歳差・章動」による地軸の移動	11
第3章 地軸の移動と緯度変化	
3. 1 緯度	14
3. 2 極運動と緯度変化	15
第4章 「Z項」の発見へ	22

序章 「Z 項とは」 あらまし

ご存知のように、地球は自転軸の周りに回転しながら（自転）、太陽の周りをほぼ円軌道に沿って1年（約365日）周期で移動しています（公転）。地球の自転軸の方向は第1章および第2章で述べるように約2万6千年という長い周期で「歳差運動」と称する運動をしています（第1章の図1.1および図1.4参照）、我々人間の一生の程度の時間の範囲内ではほぼ一定の方向（北極星の方向）を向いていて、地球の公転面に垂直な方向とはほぼ23.4度の角度をなしています。なお、北極星というのは地球の自転軸の北極側の延長線上（天の北極）近くにある恒星を指し、現在の北極星はこぐま座 α 星という星ですが、紀元前1100年頃はこぐま座 β 星という違う星でした。話が少しそれましたが、木村榮博士が発見した「Z項」とは の話に移りましょう。それは、地球の「自転軸の移動」に関連する事柄です。夜ごと望遠鏡（眼視天頂儀）で北の夜空を眺めながら得た観測データをもとに、それを当時（西暦1900年前後）知られていた緯度変化と地軸（地球の自転軸）の移動の関係を表す関係式 $\text{緯度変化} = x\cos\lambda + y\sin\lambda$ (λ :観測点の経度、 x, y は地軸の移動量を表す未知定数) にしたがって、データ解析を進めていた博士でしたが、この式では観測データを十分に説明できなくて、悩み考え抜いた末に到達したのが「Z項」の発見、すなわち上の式の右辺に $\text{緯度変化} = x\cos\lambda + y\sin\lambda + Z$ と Z という項を加えることでした。これにより、観測データが見事に説明できたのです。この「Z項の発見」は1899年（明治32年）に開始された国際緯度観測事業の中でなされた偉業でした。岩手県の水沢に設置された臨時緯度観測所（初代所長：木村 榮博士）を含む北緯39度8分という同じ緯度線上の6つの観測所で緯度観測を行い、それぞれの観測地でのデータを集積の上、解析して地軸の変動の様子を詳しく調べるという国際協力研究だったのです。Z項が発見された1902年（明治35年）と云えば、我が国の科学研究にとってまだまだ黎明期で、博士の偉業が国内外から高く評価されたことは想像に難くないところです。

Z項とは何か そのあらましについて手短かに記しましたが、以下の章では順を追って説明してゆきたいと思います。

第1章 地球の自転と公転

序章のはじめに書きましたように地球は自転しながら、太陽の周りをほぼ円軌道に沿って公転運動を行っています。このことは皆さんよくご存知で改めて詳しく述べるに及ばないとは思いますが、この機会に簡単におさらいをしておきましょう。

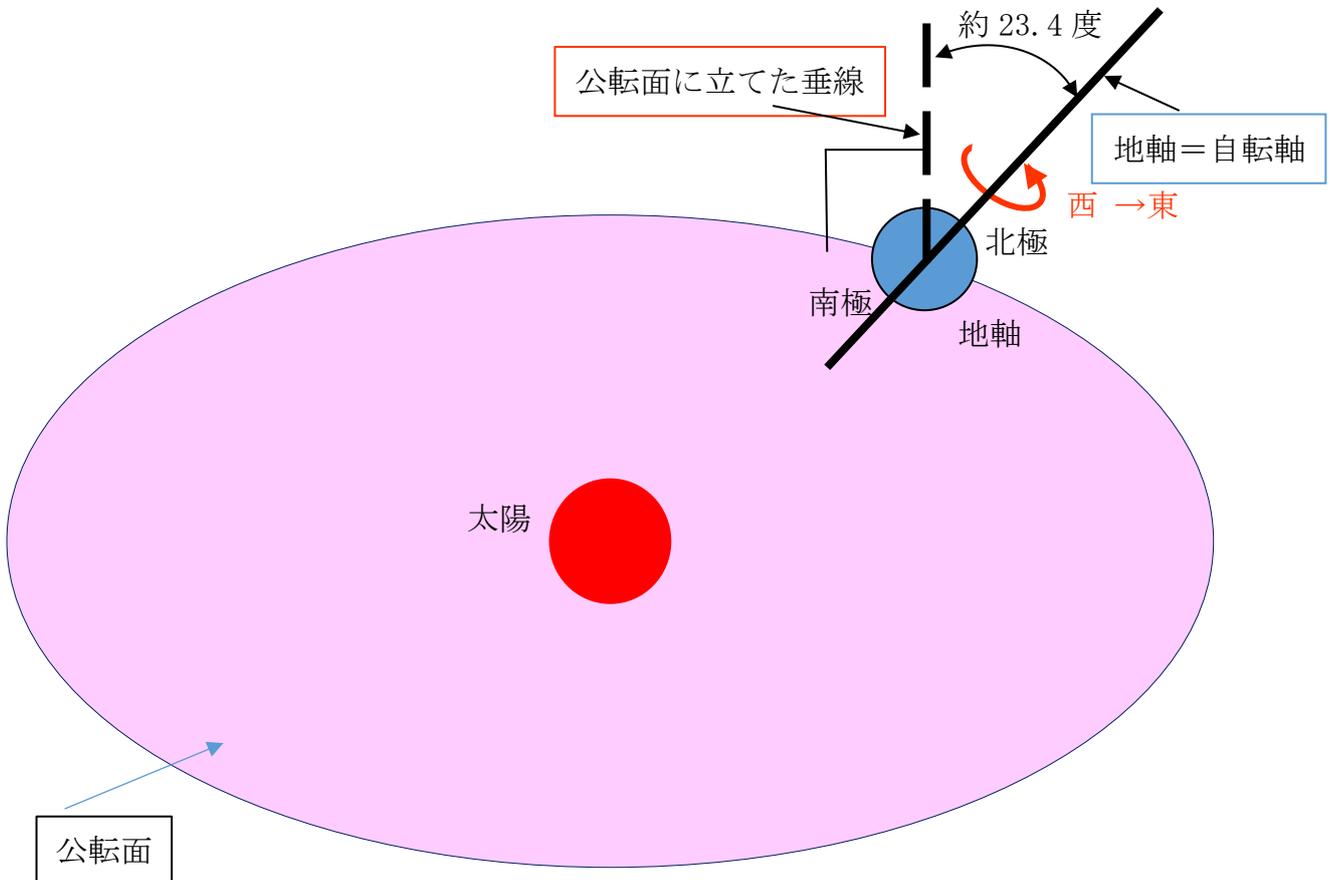


図 1,1 地球の自転と公転

地球は約 1 億 5 千万 km の半径でほぼ円軌道に沿って太陽の周りに公転運動を行い、1 年で太陽の周りを 1 周しています。ほぼ円軌道であると記しましたが、詳しく言えば、現在の地球は離心率 0.0167 という小さな値の楕円軌道に沿って移動していて、円軌道からはわずかにずれた軌道に沿って太陽の周りを公転しているのです（楕円の長軸と短軸の長さをそれぞれ a, b とするとき、離心率 e は $e = \sqrt{a^2 - b^2} / a$ と表され、完全な円軌道では $e = 0$ です）。上の図 1,1 に示すように、地球はその自転軸（＝地軸）の周りに 1 日 1 回転の自転をしながら公転軌道に沿って移動しています。序章でも簡単に触れましたが、地球の自転軸の方向は何万年という時間スケールでは大きく変化しますが、我々人間の一生程度の時間の範囲内ではほぼ一定の方向（北極星の方向）を向いていて、地球の公転軌道が作る平面（＝公転面）に垂直な軸とはほぼ 23.4 度の角度をなしています（図 1.1 参照）。地軸（＝自転軸）の方向の変化については次章の「地軸の移動」で詳しく述べることにします。仮に、地軸が公転面に立てた垂線に平行であるとするなら、昼夜の長さは常に等しく、また、季節の変化もなくなりましょう。地軸が傾いているゆえに、昼夜の長さが変化

してゆき、季節が変化するのは。地球に季節変化をもたらす最も大きな要素は地表の単位面積に照射する太陽光の量であり、その変化は地軸が傾いているからこそもたらされるのです。太陽からの距離は、ほぼ円軌道に沿って公転運動が行われているのでほとんど差がなく、日本について言えば、非常にわずかな差ではありますが、夏の時期には太陽からの距離はむしろ大きくなるのです。

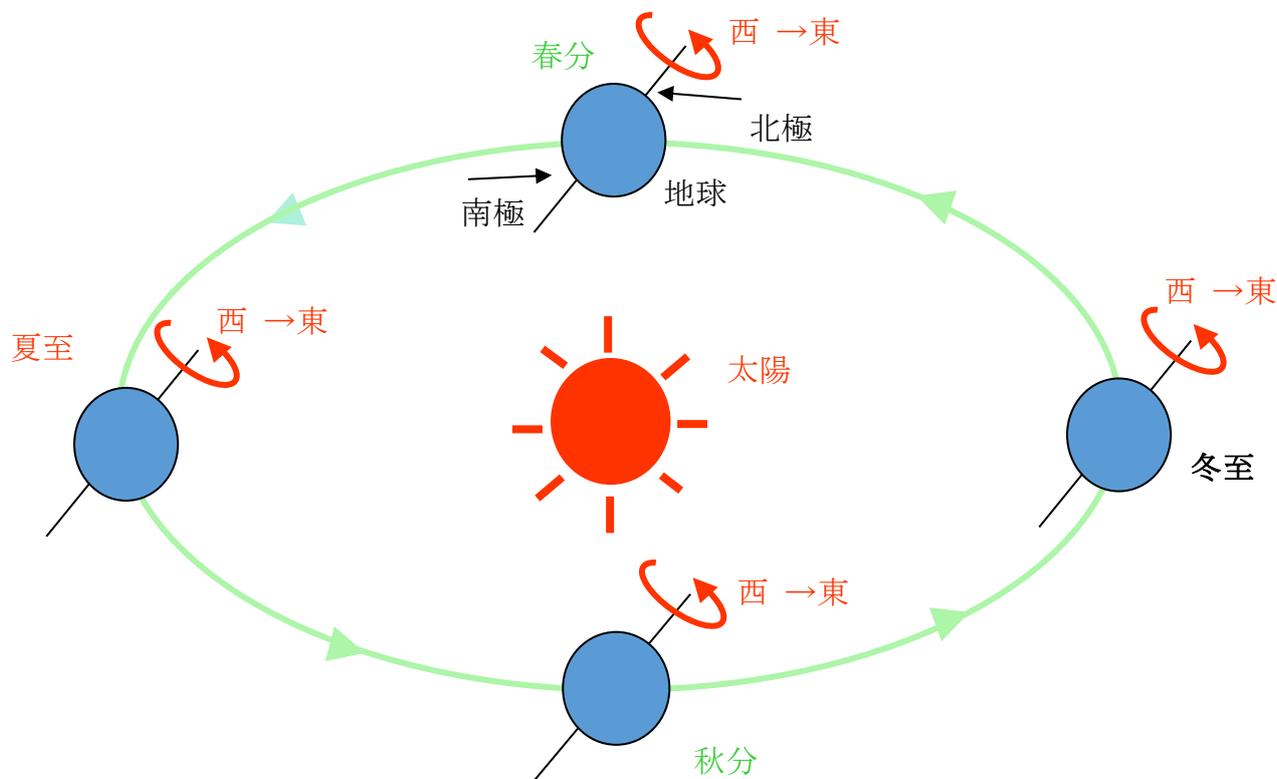


図 1.2 地球の公転運動と季節変化

次の『 』で囲ったところは、込み入った話なので一先ず読み飛ばし、後ほど読んでいただいで結構です。

『地球の公転周期は1年と書きましたが、詳しく言えばそれは365日とほんの僅か異なること、さらに言えば、地球の公転周期には二通りあります。二通りの公転周期のそれぞれを恒星年および太陽年と称しています。恒星年とは地球が太陽の周りを1周する時間のことであり、太陽年(たいようねん)とは、太陽が黄道上の分点(春分・秋分)から出て再び分点に戻ってくるまでの周期のことです。観測によりそれぞれ次の値を取ることが知られています。1恒星年は365.256363004日で、もう一方の1太陽年は365.242190402日でカレンダーの一年として採用されています。春分点、秋分点を説明するため、図1.3では地球を中心に固定し、太陽が地球の周りを公転運動するかのように描いてあります。地球の赤道面と黄道(こうどう=地球から見て、太陽が地球を中心に運行するように見える大円)との交点が春分点と秋分点です。これにより、春分点および秋分点を含むその日の昼夜の時間が等しくなることが理解できることと思います。そこで問題は、恒星年と太

陽年のこの差はどこから生ずるかです。仮に地球の自転軸の方向が一定不変であれば両者の差は生じないはずですが、実際の地球の回転運動においては、主として太陽及び月からの外力トルク（トルク＝回転軸の周りの力のモーメント＝ここでは正確さを欠きますが、簡単に回転させる力としておきます）を受けて、地軸が公転面に垂直な軸の周りに「歳差運動」と呼ばれる非常に長い周期（約 26,000 年）の周期運動を行い（図 1.4）、地軸の方向が少しずつずれてゆくため、恒星年と太陽年の差が生ずるのです。

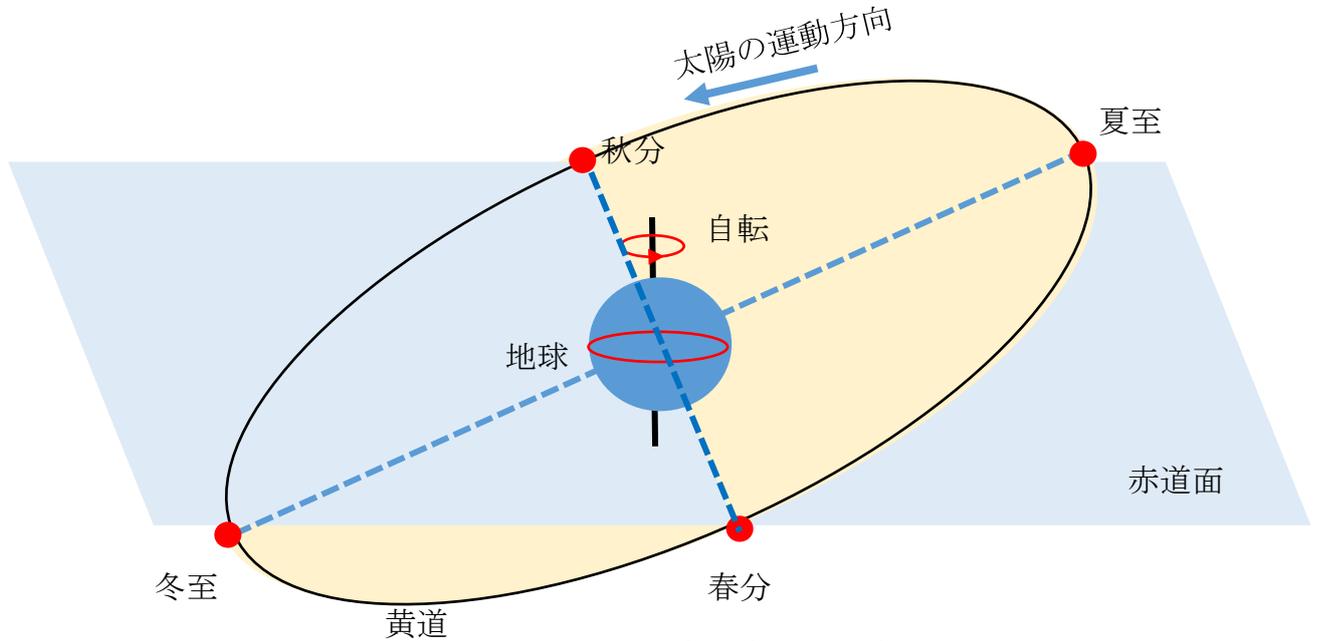


図 1.3 春分点と秋分点

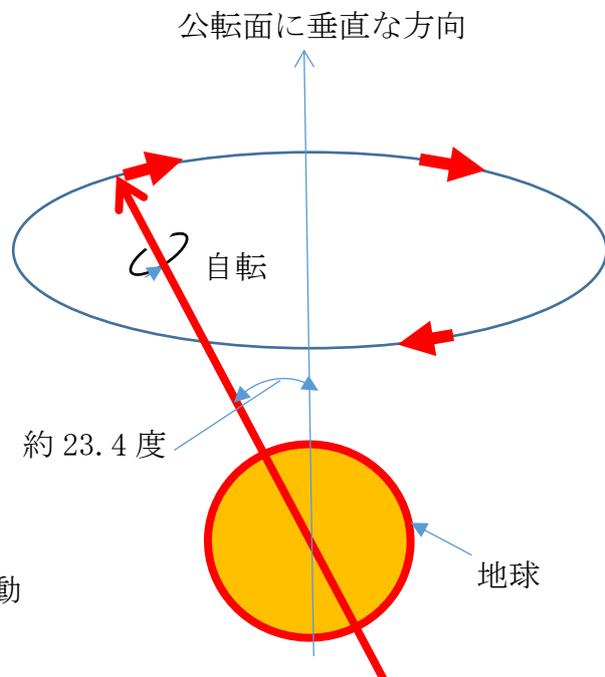


図 1.4 地球の歳差運動と地軸の移動

』

第2章 地軸の移動

地球の形状 先ず地球の形状について簡単に触れておきます。地球はほぼ球形ですが、実際には赤道半径= 6378 km, 極半径= 6356 km で、**僅かに扁平な回転楕円体**であります。以下の説明の中で地球を図示することが多々ありますが、話を分かりやすくするために、回転楕円体であることを誇張して下の図 2.1 のように描くこととします。

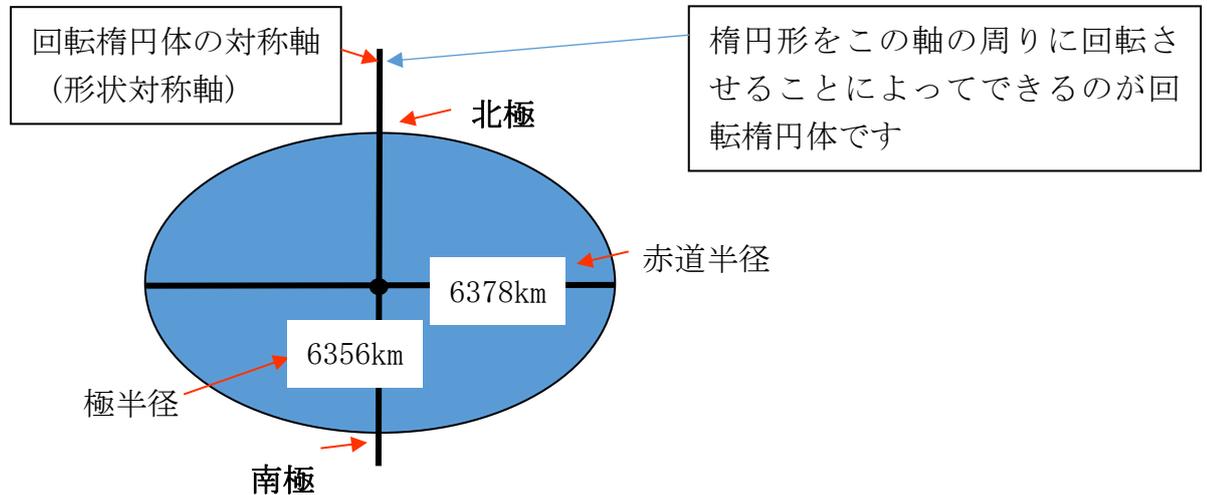


図 2.1 地球の形状 回転楕円体であることを誇張して描いています。

2. 1 地球の極運動による地軸の移動

下の図 2. 2a, 2. 2b に示すような地軸（地球の自転軸）が地球の形状対称軸の周りを巡るような運動のことを極運動と称します（地軸が地球表面と交わる位置が極です）。理論的にこのような運動が存在することは 1765 年にオランダ人数学者・天文学者オイラーによって「オイラーの運動方程式」の名で知られる剛体の回転運動を表す方程式を用いて最初に示されました。地球を剛体（物体を質点の集まりと考えたとき、質点の相対位置が常に変わらない物体を「剛体」いいます）と考え、且つ、地球を回転楕円体のような対称性を有することを仮定するとき、周期 T は次式で与えられることが示されました。

$$T = \frac{2\pi}{\omega_z^0} \frac{I_x}{I_z - I_x} \quad (2.1)$$

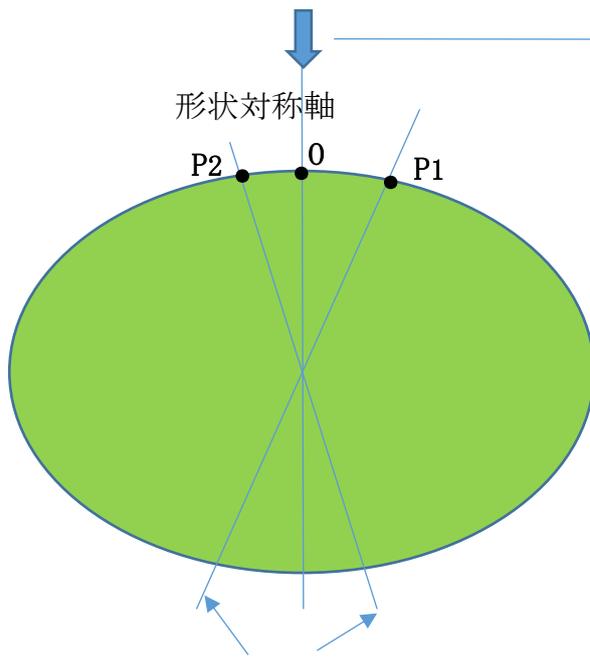
ここに、 ω_z^0 は地球の形状対称軸周りの自転角速度で、 I_z, I_x は形状対称軸周り及びそれに垂直な赤道面内の軸周りの慣性モーメントです。

$\frac{2\pi}{\omega_z^0} \approx 1$ 日で、 $\frac{I_x}{I_z - I_x}$ は地球の場合の実測値から 305 ですから T は約 305 日となります。

これをオイラーの周期と云います。

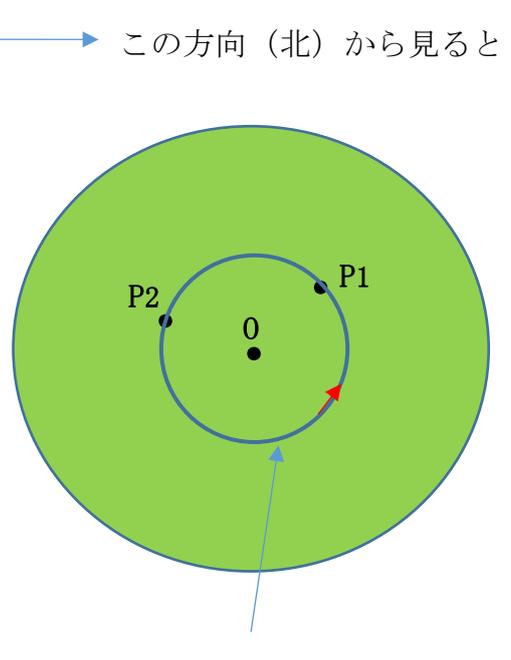
(慣性モーメント：力学で物体の回転運動を論ずるときに使われる量で、物体の回転させ易さ(させ難さ)を表す量です。この値が大きい(小さい)ほど回転させ難い(させ易い)ことに対応します。)

後にもう少し詳しく述べますが、地軸が移動すると地球上の各地点での緯度が変化します。したがって、逆に緯度変化を調べることで極運動の様子を知ることが出来ます。このことを利用してオイラーの周期を実測によって確認する努力がなされましたが、その変動は微小なものであるゆえに、なかなか確認には至りませんでした。様々な努力のなか時を経て、ドイツの天文学者キュストナーは星の位置の観測から極運動による緯度変化を発見し 1888 年にこれを公表、これとは独立に、1891 年アメリカの天文学者チャンドラーは星の位置に関する古い記録を丹念に調べて極運動の様子を明らかにしました。オイラーの予言から実に 100 年余の歳月を要したのです。実測された極の位置の変動は複雑なもので、その中に大体 14 か月の周期の回転があることがチャンドラーによって見出されました。この 14 か月周期の変動は角度にして ± 0.3 秒 ($= 0.3/3600$ 度 $= 0.000083$ 度) であり、極は半径 10 m の円内を複雑な図形を描いて回っていることになるのです(図 2.2c 参照)。14 か月というチャンドラーの周期はオイラーの予言した 305 日とは食い違いますが、この食い違いはオイラーは地球を剛体であると仮定したことにより生じたもので、アメリカの天文学者・数学者のニューカムは地球を弾性体と仮定すればチャンドラー周期と適合することを示しました。



約 14 か月の周期で地軸 (= 自転軸) は形状対称軸の周りを巡る(図 2.2b 参照)

図 2.2a 極運動による地軸の移動



この方向(北)から見ると
極の軌跡 実際にはこのようにきれいな円ではない

図 2.2b 極運動による地軸の移動

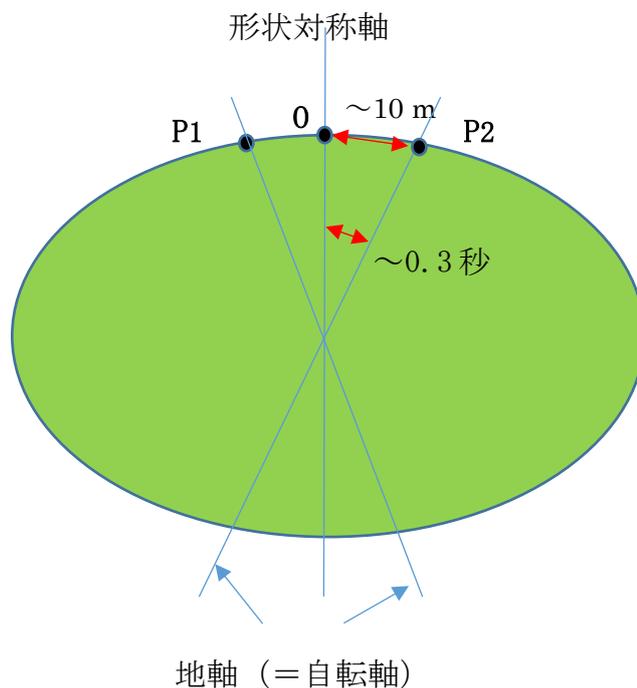


図 2.2c 極運動による地軸の移動

『ここで、式(2.1)を導出しておきます。

質量中心を原点とし、慣性主軸を x - y - z -軸とするオイラーの運動方程式

$$\begin{aligned}
 I_x \frac{d\omega_x}{dt} - (I_y - I_z)\omega_y\omega_z &= N_x \\
 I_y \frac{d\omega_y}{dt} - (I_z - I_x)\omega_z\omega_x &= N_y \\
 I_z \frac{d\omega_z}{dt} - (I_x - I_y)\omega_x\omega_y &= N_z
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

からスタートしますが、地球の自転運動の場合、外力トルク (N_x, N_y, N_z) は小さいので、連立微分方程式(2.2)の解 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ は、**第一近似**として、外力トルク (N_x, N_y, N_z) がいない場合の方程式

$$\begin{aligned}
 I_x \frac{d\omega_x}{dt} - (I_y - I_z)\omega_y\omega_z &= 0 \\
 I_y \frac{d\omega_y}{dt} - (I_z - I_x)\omega_z\omega_x &= 0 \\
 I_z \frac{d\omega_z}{dt} - (I_x - I_y)\omega_x\omega_y &= 0
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

の一般解と(2.3)の特殊解との重ね合わせとして表せます。

そこで外力トルクがない場合の方程式(2.3)を扱います。この方程式の解を初等関数で表すことは一般的には不可能ですが、地球の場合のように $I_x = I_y$ である場合には、以下に示すように初等関数で表すことができます。まず、式(2.3)で $I_x = I_y$ と置いて

$$I_x \frac{d\omega_x}{dt} - (I_x - I_z)\omega_y\omega_z = 0 \quad (2.4.a)$$

$$I_x \frac{d\omega_y}{dt} - (I_z - I_x)\omega_z\omega_x = 0 \quad (2.4.b)$$

$$I_z \frac{d\omega_z}{dt} = 0 \quad (2.4.c)$$

が得られます。(2.4.c)から

$$\omega_z = \omega_z^0 \text{ (一定)} \quad (2.5)$$

となります。(2.4.a)を t で微分した式に(2.4.b), (2.5)を代入すると次式が得られます。

$$\frac{d^2\omega_x}{dt^2} + \frac{(I_x - I_z)^2}{I_x^2} (\omega_z^0)^2 \omega_x = 0 \quad (2.6)$$

おなじみの単振動の式と同じ形のもので、この方程式の解は次のように与えられます。

$$\omega_x = A \sin(\alpha t + \beta), \quad (2.7)$$

$$\text{ここで、} \quad \alpha = \omega_z^0 \left(\frac{I_x - I_z}{I_x} \right), \quad (2.8)$$

A, β は初期条件で決まる定数である。 ω_y に対する解は(2.4.a), (2.5), (2.7)から

$$\omega_y = A \cos(\alpha t + \beta) \quad (2.9)$$

で与えられることが分かります。これにより、地軸は式(2.1)で与えられる周期で形状対称軸の周りを巡ることが導かれます。』

2. 2 「歳差・章動」による地軸の移動

地球以外の天体、特に太陽と月からトルク (=回転軸の周りの力のモーメント=ここでは正確さを欠きますが、簡単に回転させる力としておきます) を受けることにより、地球は天文学的歳差・章動運動を行います。下の図 2.3a は「歳差」運動だけを取り出して描いたもので、地軸の天空に対する配向が約 26,000 年という長い周期で大きく変化することを示しています。この運動により、約 70 恒星年に 1 日ずつ地球上の季節がずれてゆくこととなります (現在世界各国で用いられているグレゴリオ暦では太陽年が採用されているので、季節がずれることはありません)。実際の運動は「歳差」に加えて「章動」と呼ばれる比較的周期の短い振動が重なり、また、地球の内部運動の影響もからまり複雑なも

のとなります (図 2.3b)。章動は最大の 18.6 年周期の成分以下、一年、半年、一月、半月など様々な周期の運動の重ね合わせであることが知られています。

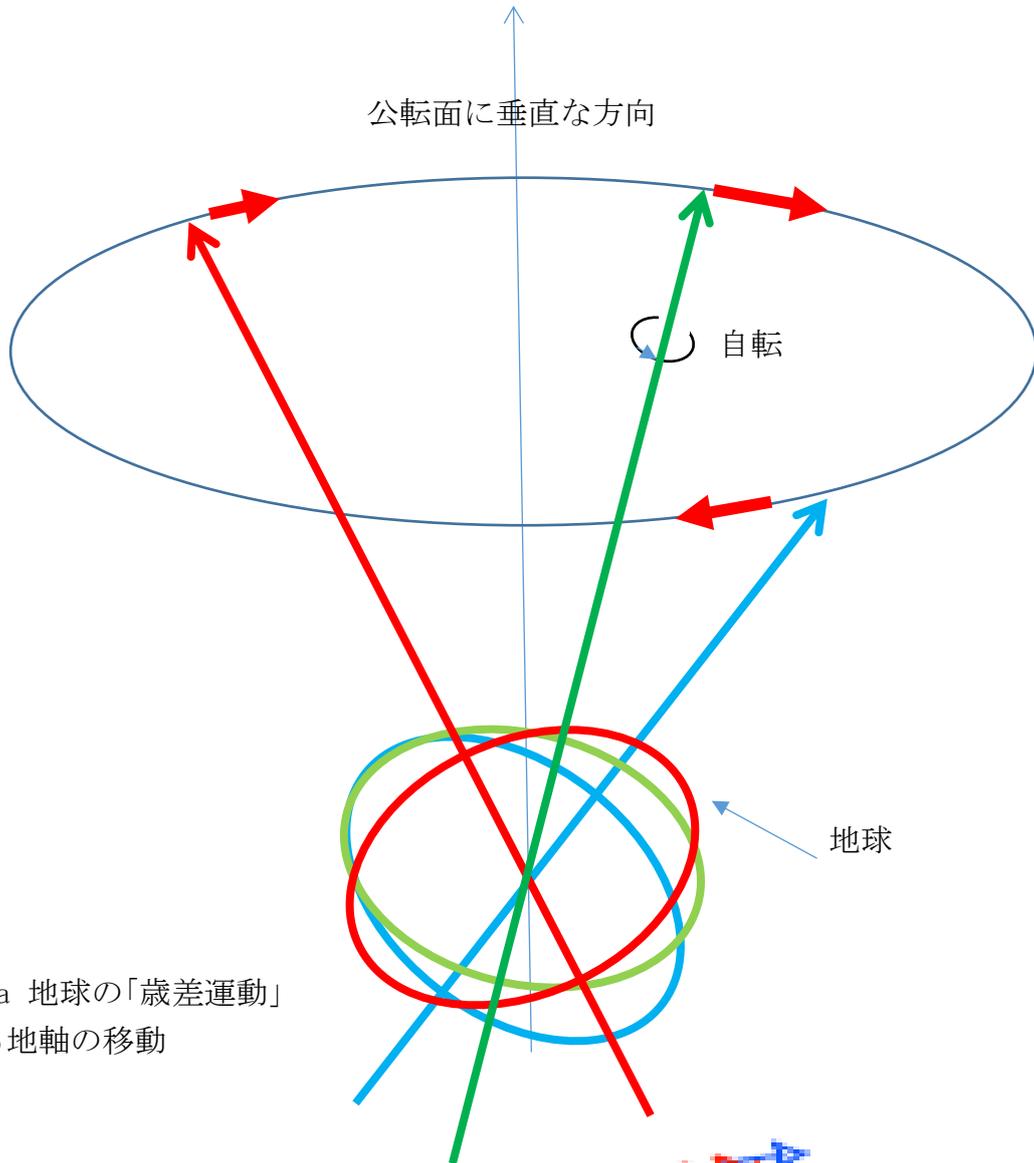


図 2.3a 地球の「歳差運動」による地軸の移動

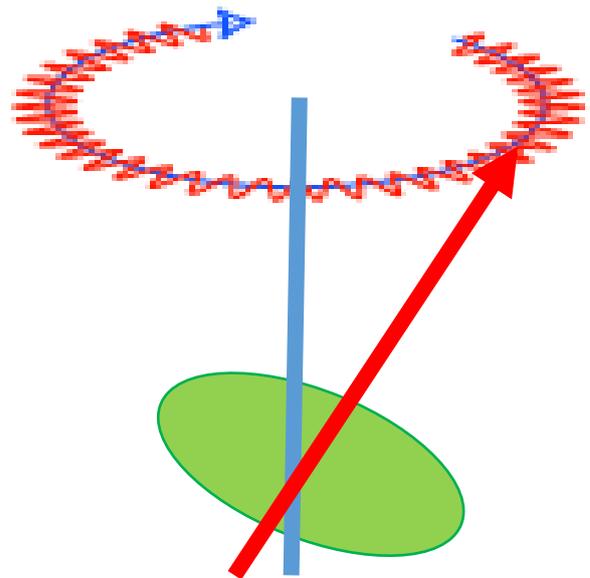


図 2.3b 地球の「歳差・章動運動」

『【歳差運動の周期の算出】

地球の歳差運動の周期は以下のようにして算出することができます。それは二つの公転周期、すなわち恒星年と太陽年との差から算出できます。まず、恒星年と太陽年とは以下のようなものです。恒星年とは地球の公転周期すなわち地球が太陽の周りを1周する時間のことであり、太陽年とは、太陽が黄道上の分点（春分・秋分）から出て再び分点に戻ってくるまでの周期のことで（図 2.4 参照）、観測によりそれぞれ次の値を取ることが知られています。

1 恒星年は 365.256363004 日で、1 太陽年は 365.242190402 日でカレンダーの一年として採用されているもので、その差 0.014172602 日は歳差と呼ばれています。このような差が生まれるのは、上に述べたように、地軸が天空に対して移動する「歳差運動」のためです。このことから、一年間での地軸のずれは

$$\frac{0.014172602}{365.256363004} = 0.000038802 \text{回転} \quad (1 \text{回転} = 360 \text{度})$$

となり、地軸のずれが 1 回転となるために要する年数は $\frac{1.0}{0.000038802} = 25772 \text{年}$ となります。

ります。すなわち、地球の「歳差運動」の周期として 25772 年が得られます。』

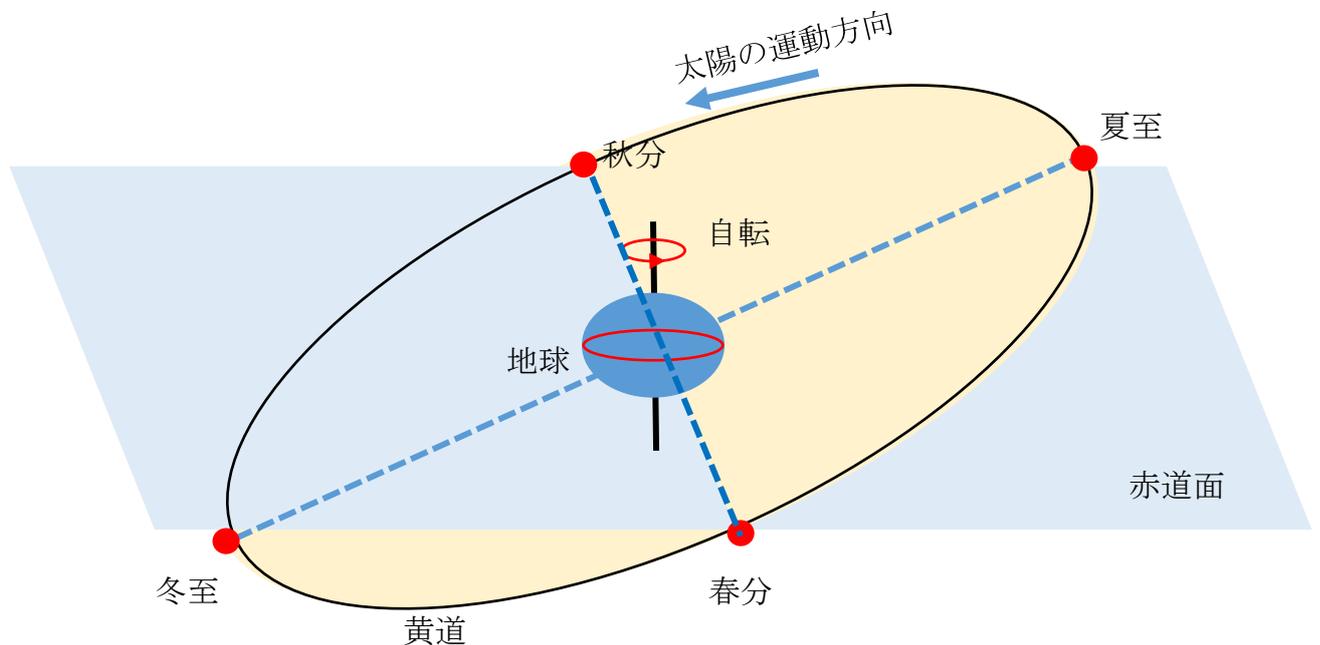


図 2.4 春分点と秋分点

第3章 地軸の移動と緯度変化

3.1 緯度

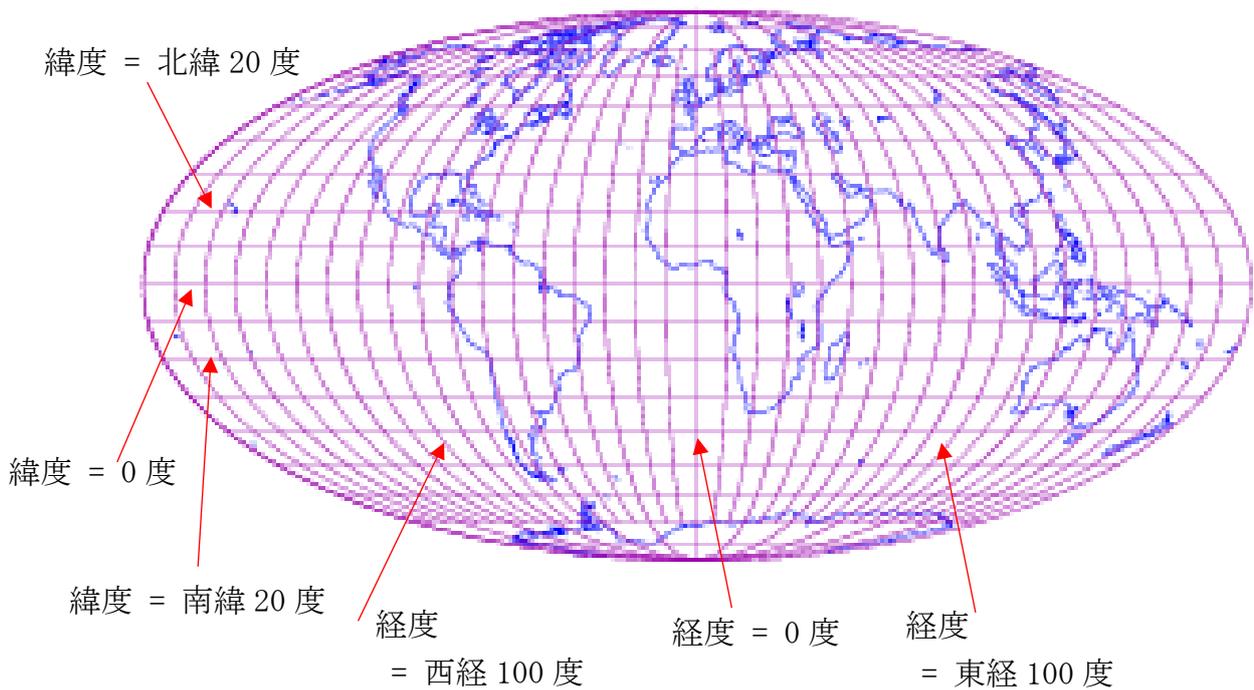


図 3.1 緯度と経度

緯度、経度については図 3.1 に示した通りですが、緯度については木村榮博士の Z 項の発見に深くかかわりますので、いま一度確認のため、その定義を下の図 3.2 で示しておきます。図 3.2 に示すように、地表上の位置 P での緯度は地軸（自転軸）の方向とその位置 P における重力の方向によって決まります。地軸（自転軸）の方向と位置 P における重力の方向とのなす角を β 度とすると、位置 P が北半球上にあるとすると、位置 P での緯度は北緯 α 度 $= (90 - \beta)$ 度で与えられます（図 3.2）。ここに、重力とは物体に働く万有引力と地球の自転によって生じる遠心力との合力です。

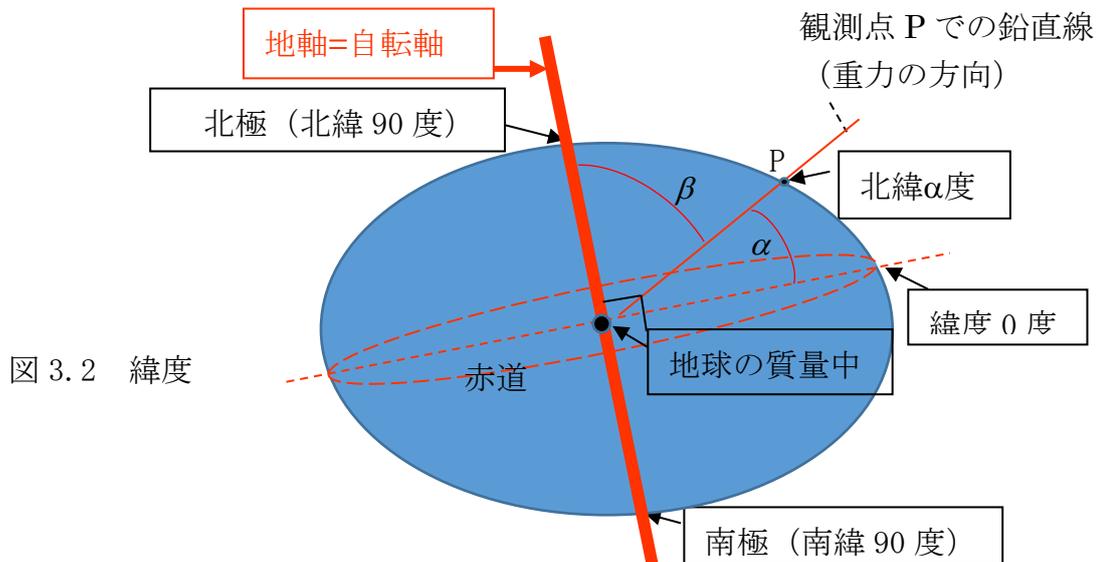


図 3.2 緯度

木村榮博士が「Z項発見」に至る研究において緯度をどのような観測を通してどのようなプロセスで決定していたかについては次節3.2の項(1)で詳しく述べることにし、この節3.1は上記に緯度の定義を示したことのみに留めます。

3.2 極運動と緯度変化

Z項は未だ登場しませんが、以上の準備の下によいよ本論に入ってゆきます。

1895年（明治28年）木村榮博士25歳のとき東京で緯度観測を始め、1898年（明治31年）28歳のとき測地学に関する国際会議出席のためドイツへ出張したそのころ地軸が地球本体に対して移動する現象である極運動の解明は、当時、天文学の最先端の研究テーマの一つでした。そのような中、1899年（明治32年）極運動の詳細の解明を目指して国際測地学協会は「国際緯度観測事業」を開始したのです。岩手県の水沢に設置された臨時緯度観測所（初代所長：木村榮博士）を含む北緯39度8分という同じ緯度線上の6つの観測所で緯度変化の観測を行い、中央局（ドイツ）でデータを解析して地軸（＝自転軸）の位置の変動の様子を詳しく調べるといった内容の国際協力研究が進められました。緯度がほぼ等しい観測地点（39度8分）で緯度変化の観測が行われたのは、同じ星をほぼ同じ方向に望みながらの観測を行うことにより系統誤差が生ずることを避けようとしからに外なりません。観測が行われた6つの緯度観測所は以下の通りです。

表 3.1 「国際緯度観測事業」（1899年）に参加した緯度観測所の所在地

番号	所在地	緯度	経度	国
1	ゲイザースバーグ	北緯39度8分12秒	西経77度11分35秒	アメリカ合衆国
2	シンシナティ	北緯39度8分3秒	西経84度25分4秒	アメリカ合衆国
3	ユカイア	北緯39度8分14秒	西経123度12分42秒	アメリカ合衆国
4	水沢	北緯39度8分1秒	東経141度7分9秒	日本 岩手県
5	チャルジュイ	北緯39度8分0秒	東経63度29分0秒	ロシア（当時）
6	カルロフォルテ	北緯39度8分13秒	東経8度18分41秒	イタリア

番号は後の記述に便利のように付したものです。

以下に何をどのように観測し、どのようにデータ処理をし、何を求めたかを順を追って述べましょう。

(1) 国際緯度観測事業における緯度測定

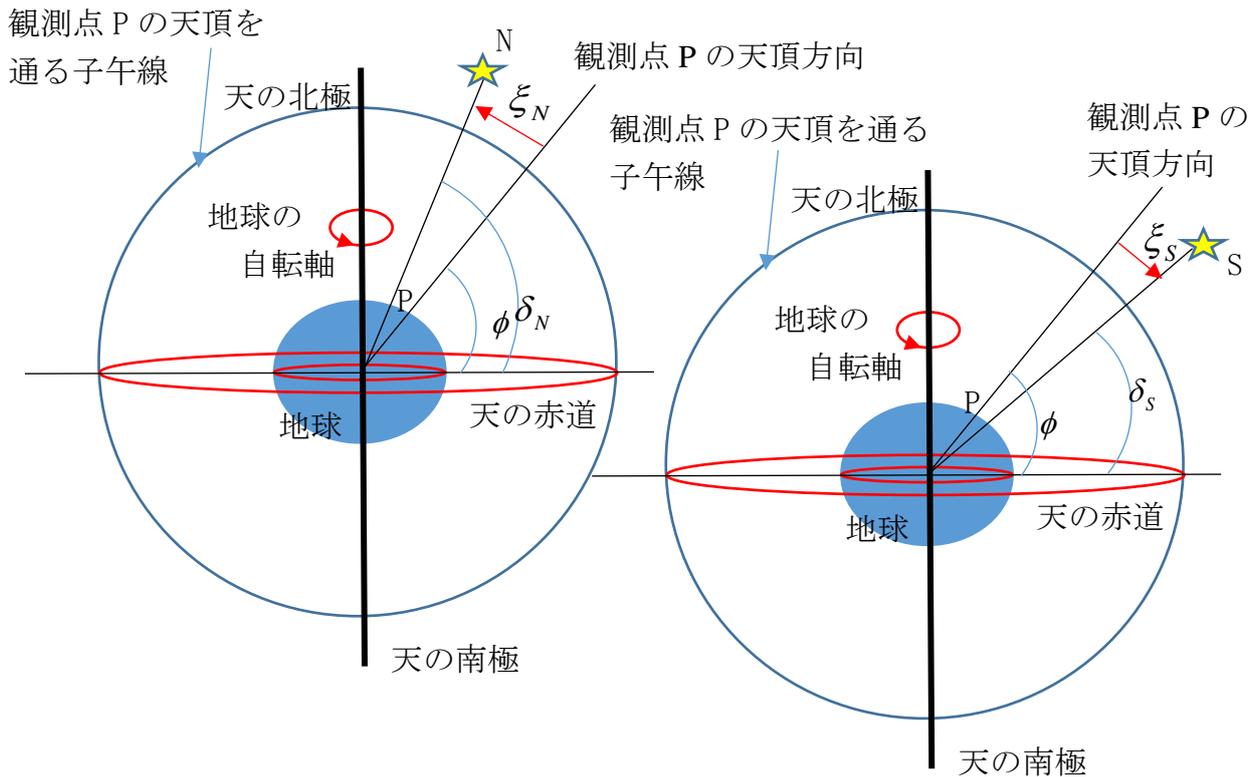


図 3.3 緯度測定概念図

この項「国際緯度観測事業における緯度測定」は先日（平成 29 年 11 月 16 日）金沢市地域コミュニティ活性化モデル事業「弥生ゆかりの偉人木村榮博士に光をあて、その業績を啓蒙する活動」の行事として泉中学校で行われた講演会の講師としてお越しいただいた大江昌嗣先生（国立天文台名誉教授）にご教示いただいたことをもとに記述したものです。

上に示した図 3.3 は国際緯度観測事業において用いられたホレボー - タルコット法と呼ばれる緯度測定概念図を示したものです。筆者自身もそうですが天文学になじみの薄い人には見慣れない用語が図中には書いてありますので、以下にその注釈を記すことから始めます。

天球：惑星や恒星がその上に張り付いて運動すると考えられた地球を中心として取り巻く球体のことです。

天の北極（南極）：地球の自転軸（＝地軸）と天球とが交わる点のうち北側（南側）のもので。

天頂：天球上において観測者の真上に当たる点を指します。地上から真上すなわち天頂方向とは、観測地点の重力の方向です。

天の子午線：ある地点の天頂と天の北極と南極とを通過する天球上の大円を指します。

天の赤道：地球の赤道面を天球にまで延長し、天球上に交わってできる大円のことで。恒星や惑星の天球上の位置を決める基準となります。

図中の N, S は国際緯度観測事業において 6 カ所の観測地点の共通の観測星として採用された一対の恒星を表しています。観測地点の天頂の北側および南側に観測されるものをそ

れぞれ N および S と表しています。観測地点の天頂の南側および北側のほぼ等しい角距離に存在し、その中心位置が定めやすいように明るさが 4~7 等星の星が選ばれました（星の明るさの目安となる等級は 1 等星、2 等星・・・と等級が上がるにつれて暗い星に対応します）。6 カ所の観測地点に共通の観測星として一つの星ではなくて、何故一對（二つ）の星かについては後ほど述べますが、どの一對の星を採用するかは観測事業を実効的に進めるにあたっては重要な事柄の一つです。この一對の星の選択に当たっても木村榮博士は貢献していたのです。実に、木村榮博士の提案が採用されたのです。

緯度測定の話に進みます。図 3.3 の左図（右図）は北側（南側）の観測星 N (S) が観測点 P の天頂を通る「天の子午線」を通過するときの配置を示したものです。図 3.3 から分かるように、観測点 P の緯度（天文緯度） ϕ は

$$\phi = \delta_N - \xi_N \quad (3.1a)$$

および

$$\phi = \delta_S + \xi_S \quad (3.1b)$$

で与えられます。

ここで、 $\delta_N(\delta_S)$, $\xi_N(\xi_S)$ は以下のように定義される量です。

$\delta_N(\delta_S)$: 観測する恒星 N (S) の赤緯と呼ばれる量で、測定及び計算に基づいて予め求められた恒星の位置座標から得られた既知の量です。この位置座標を求めるにあたっては太陽や月等によって生じる地球自転軸の天空に対する様々の運動の影響（歳差、章動、光行差、星の固有運動等々）がすべて補正されています。

$\xi_N(\xi_S)$: 天頂距離（または天頂角）と呼ばれる量で、恒星 N(S) が観測点 P の天頂を通る天の子午線を横切るとき（南中するとき）の恒星 N(S) を望む方向と観測点の天頂の間の角を指します。

地上での実際の観測では図 3.3 に示した $\xi_N(\xi_S)$ を測定できませんので、その代わりに、図 3.4 に示した $\xi'_N(\xi'_S)$ を用います。地球から恒星 N, S までの距離は地球の半径に比べてはるかに大きいので、 $\xi'_N - \xi_N$ 及び $\xi'_S - \xi_S$ の値は極めて小さく $\xi_N(\xi_S)$ の代わりに $\xi'_N(\xi'_S)$ を用いても下の式(3.2)に示すように問題を生じません。

$$\begin{aligned} \xi'_N - \xi_N &\approx \xi'_S - \xi_S \approx \frac{\text{地球の半径}}{\text{地球から観測星までの距離}} \approx \frac{6378\text{km}}{400\text{光年}} = \frac{6378}{400 \times 365 \times 3600 \times 3 \times 10^5} \\ &= 0.0000040 \times 10^{-5} \text{ ラジアン} = 0.40 \times 10^{-10} \times \frac{180}{3.14} \times 3600 \text{ 秒} \\ &= 0.00000082 \text{ 秒} = 8.2 \times 10^{-6} \text{ 秒}. \end{aligned}$$

(3.2)

こうして、式(3.2a)および(3.2b)で $\xi_N(\xi_S)$ の代わりに $\xi'_N(\xi'_S)$ を用いて得られる式から、観測点での緯度を求めるための式

$$\phi = \frac{1}{2}(\delta_N + \delta_S) + \frac{1}{2}(\xi'_S - \xi'_N) \quad (3.3)$$

が導かれます。

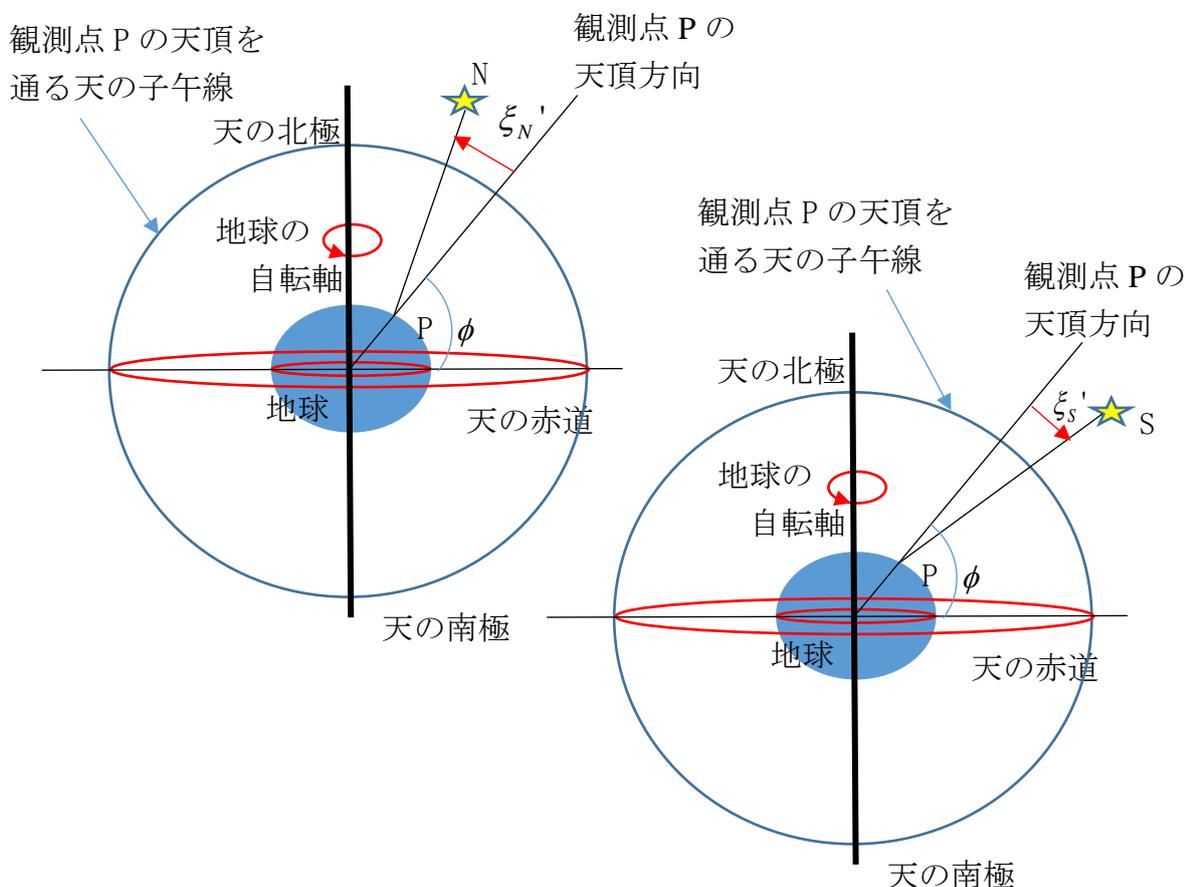


図 3.4 天頂角測定概念図

観測点の緯度を定める式(3.3)には実際に測定する2つの量 ξ'_N, ξ'_S の差が現れていることが重要な点です。2つの量 ξ'_N, ξ'_S を同一のマイクロメータを用いてそれぞれ単独に精密に測定するわけですが、それぞれの量の測定には系統的な誤差が含まれているかもしれません。そのようなことがあっても、2つの量の差を用いることでその系統誤差は相殺され、緯度測定の結果には影響を与えません。ここに一对の恒星に対して観測がなされることの利点が存することになります。以上が国際緯度観測事業で用いられた緯度測定の概要です。

(2) 観測量： 観測量は緯度と緯度変化で以下のような記号を用いることとします。

ϕ_i (○年□月△日)：○年□月△日の i 番目の地点での緯度の観測値

$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$; $i=1$ はゲイザースバーク、 $i=2$ はシンシナティ、……、に対応

$\Delta\phi_i$ (○年□月△日)

$$= \phi_i(\text{○年□月△日}) - \phi_i^0 : \text{○年□月△日の } i \text{ 番目の地点での緯度変化}$$

ここに ϕ_i^0 : i 番目の地点での緯度の基準値

ここで、各観測地点での緯度の基準値について少し触れておきましょう。基準値の理想的な設定は地軸が地球の形状対称軸に一致している場合の各観測地点での緯度の値をその地点での基準値として採用することです。しかしながらそれは実際上難しいことなので、それに近いものとして、その観測地点での緯度の過去の観測値の平均値が基準値として採用されたものと考えられます。前に述べましたように、極運動においては地軸は形状対称軸の周りに複雑ではあるが周期的に移動していると予想されます。したがって、一定の期間にわたって観測された緯度の平均は地軸が形状対称軸に一致している場合のそれに近いと云えます。このような理由で、基準値のこのような設定は妥当と云えましょう。

(3) データ解析に用いる関係式

○年□月△日のデータに対して

$$\Delta\phi_i = x \cos\lambda_i + y \sin\lambda_i \quad (3.4)$$

ここで、 $i=1,2,3,4,5,6$ であり、6つの観測所に対応します。また、 λ_i は i 番目の観測地点における経度を表し、西経は $0^\circ \leq \lambda_i \leq 180^\circ$ 、東経は $0^\circ \geq \lambda_i \geq -180^\circ$ とします。 x, y は○年□月△日における北極点が基準の北極点からどれだけずれているかを表す量であります (図 3.5 および後述の説明参照)。ここで、北極点とは地軸の北側が地球表面と交わる地点を指します。式(3.4)に現れる量 $\Delta\phi_i, x, y$ は上の section (2) の流儀にしたがえば、それぞれ $\Delta\phi_i(\text{○年□月△日}), x(\text{○年□月△日}), y(\text{○年□月△日})$ のように表記すべきですが、見づらいなので、式の前に「○年□月△日のデータに対して」という文言を付して、上の式(3.4)のように表すことにします。

ところで、緯度観測に関して 3.2 (1) 節で述べたように、観測地点の緯度を正しく決定するには観測星の赤緯 (δ_N, δ_S) を正しく見積もる必要があります。それが正しく見積もられていないとき、観測される緯度変化には「極運動」によって生じた緯度変化に加えて「歳差・章動運動」による“見かけの緯度変化”が混ざってくる可能性があることが理解できましょう。そして、「歳差・章動運動」によって生じた“見かけの緯度変化”は観測地点に依存しない値を取るものであり、上の式(3.4)の中でそれを表すとすれば、右辺に経度 (λ_i) に関係のない量を加えなければならないこととなります。しかしながら、そのような量があると煩わしいので、国際緯度観測事業の開設当時から予めその分は差し引く約束になっていたのです。当時は、未知のことが多かった「極運動」に比べて、「歳差・章動運動」はその 100 年前にはすでに十分理解されていたと思われていたのです。ところが、後に述べるように、実はこの点の理解が完全でなかったことが Z 項の発見と深く関わることになったのであります。

ここで上に書いた式(3.4)について、もう少し詳しい説明をしておきましょう。右辺に現れる x, y は角度を表す変数 (単位: 度) で、観測時における北極点(A)の X-座標および Y-座標 (単位: m) を表す量 D_x, D_y と次式で結ばれます (図 3.5 参照)。

$$x \text{ (度)} = \frac{D_x}{R} \frac{180}{\pi}, \quad y \text{ (度)} = \frac{D_y}{R} \frac{180}{\pi} \quad (3.5)$$

この式に現れる R は地球の極半径 (単位: m)、 π は円周率 (=3.14159...) です。

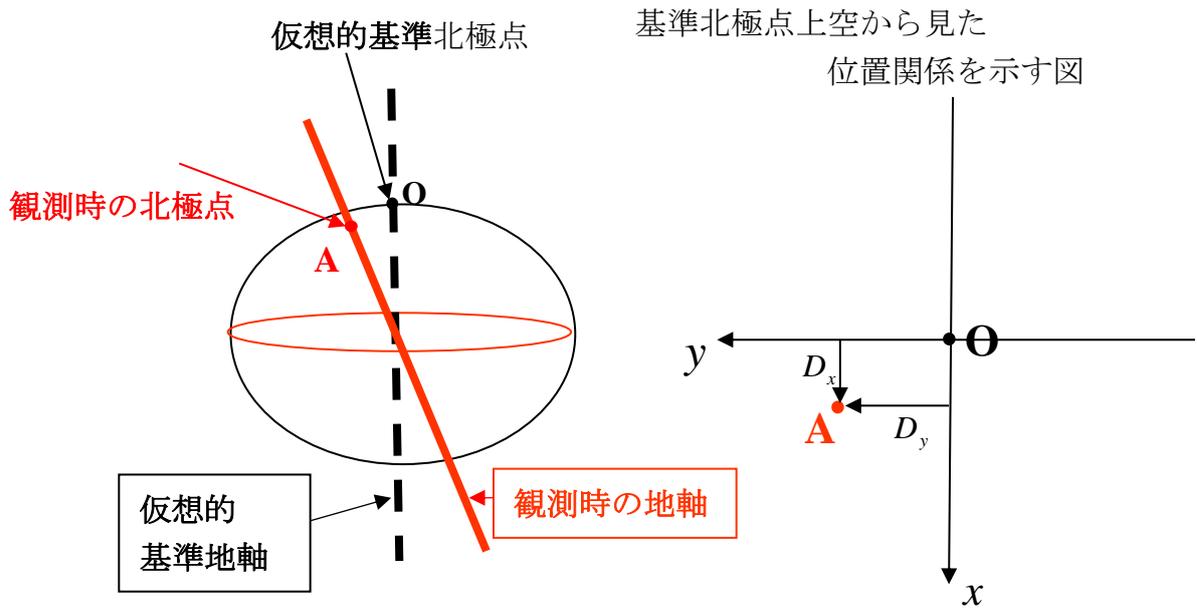


図 3.5 地軸の移動を表現する図

ここで問題となるのは、図 3.5 で基準地軸および基準北極点と記した基準となる地軸とそれに対応する北極点の取り方です。理想的なのは形状対称軸を基準地軸に取り、それに対応する北極点を基準北極点とすることですが、実際にそれをどのように決定するかは難しい問題です。そこで便宜上それに近いと考えられる平均地軸とそれに対応する平均北極点を取ることとします。ここで云う平均地軸、平均北極は 前節最後に述べた緯度の基準値の取り方に ^{まさ}正しく 対応するものです。

『ここで、極運動による緯度変化の式(3.4)がどのようにして導かれるかを簡単に述べておきます。

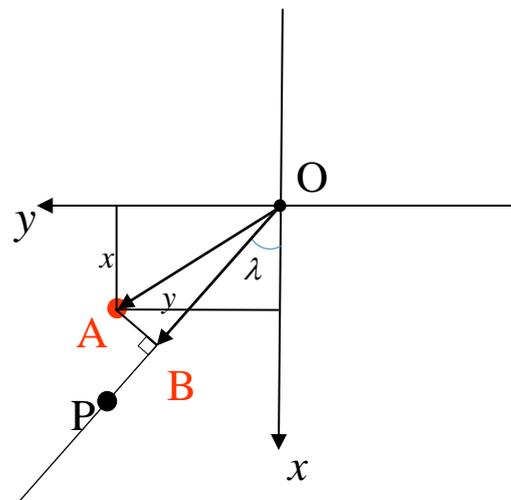


図 3.6 式 (3.4) を説明するための図

式(3.4)は幾何学的に導かれる関係式です。それを説明するための図 3.6 は式(3.4)で用いられている角度変数 x, y を用いて描かれています。北極点が基準点 $O(x=0, y=0)$ にあるときは、当然、観測点 P の経度 λ にかかわらず緯度変化 $\Delta\phi=0$ です。問題は、北極点が $A(x, y)$ にあるときの緯度変化 $\Delta\phi$ がどのように表現されるかです。観測点 P が \overline{OA} に垂直な経線上にあるときの緯度変化は十分に小さく無視できる事が分かります。したがって、北極点が O から A へと移動するときの緯度変化は北極点の移動に対応するベクトル \overline{OA} の \overline{OP} 方向成分すなわち図 3.6 における線分 \overline{OB} に対応する角度 $x\cos\lambda + y\sin\lambda$ に等しいこと、すなわち、

$$\Delta\phi = x \cos\lambda + y \sin\lambda$$

となることが分かります。』

(3) 緯度変化データの解析

次に、式(3.4)で $i=1,2,3,4,5,6$ に対応する 6 個の式から二つの未知定数 x, y を求める手法について簡単に述べておきます。そもそも未知定数が二つで方程式の数も二つなら、二元連立方程式を解くことにより二つの未知定数（この場合は x, y ）が一義的に決まるところを何故 4 個も余分の方程式を加えて 6 個の方程式を扱うかという疑問が湧いても不思議はありません。未知定数が二つなら方程式の数も二つで十分というのは、今の場合で云えば、緯度変化の観測値に全く誤差がなく、しかも、緯度変化と経度の関係が寸分の間違ひもなく式(3.4)で表されるということが予め完全に正しいということが分かっている場合はその通りといえるかもしれませんが、そうとは言い切れない余地がある場合には（大抵の場合はそうですが）、余分の観測値を取り込んで余分の方程式を加えることにより、用いる式（今の場合は式(3.4)）の正しさを検証するというプロセスを踏むこととなります。これは自然科学研究のごく普通のプロセスなのです。それでは、6 つの観測地の緯度変化に対する 6 つの方程式から、どのようにして二つの未知定数 x, y が推定されたのかといえば、最小二乗法といういろんな分野の多くの研究者によって今も使われている方法が用いられたのであります。これにより 6 つの観測地での緯度変化の値を完全に再現しないまでも全体をそこそこに再現するような x, y の値を推定することが出来たのです。最小二乗法解析で決定された未知定数 x, y の推定値 x_M, y_M (x_M, y_M を x, y の最確値と称します) を、式(3.4)の左辺 $x\cos\lambda_i + y\sin\lambda_i$ ($i=1,2,3,4,5,6$) に代入してその値を算出するとき、その値は右辺の観測値 $\Delta\phi_i$ ($i=1,2,3,4,5,6$) には完全には一致しません。その差を

$$E_i = \Delta\phi_i - (x_M \cos\lambda_i + y_M \sin\lambda_i), \quad (i=1,2,3,4,5,6) \quad (3.6)$$

と記すとき、 E_i を残差と称します。この残差 E_i こそ木村榮博士「Z 項」発見の経緯の中で重要な役割を果たした量であることを覚えておいてください。

『 最小二乗法

最小二乗法についてもう少し詳しく知りたいと望む人のために記しておきます。ここでは、一般論ではなく、式(3.4)に対応する場合に即して述べることにします。繰り返しになりますが、問題は、6 つの方程式

$$\Delta\phi_i = x\cos\lambda_i + y\sin\lambda_i, \quad i=1,2,3,4,5,6 \quad (3.7)$$

を満足する未知定数 x, y の値をいかにして推定するかであります。このような問題に対して、様々の分野の自然科学研究において今も多く研究者によって用いられているのが最小二乗法です。

いま、

$$e_i(x, y) = \Delta\phi_i - (x\cos\lambda_i + y\sin\lambda_i), \quad (i=1,2,3,4,5,6) \quad (3, 8)$$

と定義するとき、 $[e_i(x, y)]^2$ の $i=1,2,3,4,5,6$ についての和、すなわち、

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^6 [e_i(x, y)]^2 \quad (3, 9)$$

が最小になるように x, y の値を決定するというのが最小二乗法であります。最小二乗法と称する所がお分かりでありましょう。

$F(x, y)$ を最小にする x, y は次の二つの方程式を解くことによって得られます。

$$\frac{\partial F(x, y)}{\partial x} = 0, \quad (3, 10a)$$

$$\frac{\partial F(x, y)}{\partial y} = 0. \quad (3, 10b)$$

式(3. 8)および(3. 9)を用いて式(3. 10a)および(3. 10b)を具体的に記すと

$$x \sum_{i=1}^6 \cos^2 \lambda_i + y \sum_{i=1}^6 \cos \lambda_i \sin \lambda_i = \sum_{i=1}^6 \Delta \phi_i \cos \lambda_i, \quad (3, 11)$$

$$x \sum_{i=1}^6 \cos \lambda_i \sin \lambda_i + y \sum_{i=1}^6 \sin^2 \lambda_i = \sum_{i=1}^6 \Delta \phi_i \sin \lambda_i$$

となります。

式(3. 11)は方程式が二つで、未知数が x, y の二つであるから必ず一意的に解けるというわけです。

以上、この小冊子のこの後に出てくることの理解のために必要なことのみ留めます。』

第4章 「Z項」の発見へ

1899年にスタートした国際緯度観測事業において、6つの観測地点での毎夜の緯度変化の観測データがドイツにある観測事業の中央局に送られ、そこで最小二乗法を用いた解析が行われ、○年□月△日は $x = \dots, y = \dots$; ○年□月×日は $x = \dots, y = \dots$; …… というように極運動による地軸の移動に関して日々の様子が調べられていったのです。こうして求められた x, y の値というのは大変小さなもので、その値は複雑に日々変化するものですが、概ねその絶対値はせいぜい0.3秒程度のものだったのです(ここで秒は角度の単位で、1秒=1度の1/3600であり、 x, y の絶対値の0.3秒は式(3.5)に現れる北極点が基準点からずれる距離 D_x, D_y の絶対値に直すとおよそ10mという小さな距離に相当します)。西暦1900年のその頃にこのように小さな値を取る量が精密に測定されていたこと、その

ような精密機械装置が多分ドイツで製作され世に出ていたという事実にいささか驚きを禁じ得ないところです。それはともかく、そうこうする中、国際事業観測事業がスタートしてから数か月経ったある日ドイツにある観測事業の中央局のアルブレヒト局長から一通の書簡が木村榮博士のもとに届けられました。その書簡に書かれていた内容は「水沢極の残差が異常に大きい。水沢の観測に問題があると思われるので対処するように」というものでした。木村榮博士や共に観測に当たった中野徳郎観測技師たちの落胆ぶりは想像に難くありません。1899年(明治32年)と云えば、日本の科学は未だ黎明期にあり、当時の科学先進国ドイツに比べれば、科学の世界では後進国と見られても仕方がなかったかもしれません。そのような状況の中では、「水沢の観測に問題がある」は「水沢の観測は間違いを含んでいるに違いない」と取られていたのだと木村博士たちが考えるのは無理からぬことです。そこで、一旦気落ちした木村榮博士でしたが、中野徳郎技師とともにその原因究明に立ち上がったのです。観測装置や観測方法を徹底的に調べ上げ、それらには何ら問題がなかったという見解に達したのです。水沢の観測での残差が大きい原因は水沢の観測に問題があるわけではなく、緯度変化という自然現象のとらえ方に問題がある、具体的には緯度変化を記述する式(3.4)に問題があるのだということに思い至ったのであります。6つの観測地点で得られたデータの最小二乗法解析の結果をよく見るとほんの僅かながら系統誤差があることに木村榮博士は気づいたのです。式(3.4)においてその考えを表現するため、右辺に経度に関係しない項を加えて

$$\Delta\phi_i = x \cos\lambda_i + y \sin\lambda_i + Z \quad (4.1)$$

という式にたどり着いたのです。

以上が「Z項」発見に至る経緯です。当時の状況を考えればそれほどた易いことではなかったはずですが。観測地点の経度に関係しない“見かけの緯度変化”については当時よく知られており、予め除かれていたはずですが。当時のこの分野の俊秀が協議して除いたはずの項を持ち出すことは全く想定外のことであり、大変勇気のいることだったに違いありません。このようにして導入されたZの値はほぼ-0.05秒と+0.05秒の間をほぼ1年周期で変動することが見つけられました。この「Z項」の導入により、6つの観測局全体の残差は小さくなり、「残差が異常に大きい」とされた水沢の残差は最も小さいことが示されて、問題は見事に解決されたのです。1902年(明治35年)木村榮博士はこの結果を天文学の専門誌 *Astronomical Journal* に発表し、アルブレヒト局長もその結果を認め、「Z項」を加えた木村榮博士の新しい式(4.1)が中央局でも採用されることになったのです。

この「Z項発見」の功績が認められて国内外の賞を授与される榮譽に輝いています。主なものとして、1911年(明治44年)41歳のとき帝国学士院恩賜賞の第一号授与、1936年(昭和11年)66歳のときイギリス王立天文学会ゴールドメダルの受賞、そして1937年(昭和12年)67歳のとき文化勲章(第1回)受章などが挙げられます。

木村榮博士のその後の研究の主眼は「Z項」の起源の解明に向けられました。気象観測、地震観測、重力観測に取り組むなど様々な観点から「Z項の起源」について追及を続けましたが、原因究明には至らず、昭和18年(1943年)72年の生涯を終えられました。その後も多くの研究者によって「Z項の起源」の探求が行われましたがなかなか解明には至らないまま時を重ね、緯度観測所における木村榮博士の後輩の研究者 若生 康二郎博士によって「Z項の起源」の明快な解明がなされたのは、「Z項発見」の論文(1902年)の発表後68年

を経た 1970 年のことでした。その間、日露戦争（1904～1905 年）、第一次世界大戦（1914～1918 年）、第二次世界大戦（1941～1945 年）等々の戦争が続き、とくに日本の科学研究は良好でない環境に置かれていたことも影響して、「Z 項の起源」の解明に長年月を要したのかもしれませんが。若生 康二郎博士の解明によれば、国際緯度観測事業が 1899 年に開始された当時は地軸の天空に対する運動である「歳差・章動運動」が赤緯 δ , δ_s に与える影響を見積もるために地球全体を固体とみなして計算していたことが正しくなかったと断じ、実際の地球の深部には鉄などが溶けた流体の核があり、その流体の流れの効果などが重大な影響を与えていることを考慮して算出すべきであるとの考えに基づいて「Z 項の起源」の解明を行い、実測に適合する結果を得ることができたのです。若生 康二郎博士が実際に得た成果の詳細については、筆者は殆ど知識がないので、この点については上に記した程度の受け売りの説明に留めておきます。

最後に科学的なお話の本筋からはそれですが、木村榮博士の生家 篠木家は木村榮博士生誕のその地で後年 お風呂屋さん（銭湯）「ささのゆ」を始められました。そのお風呂屋さん「ささのゆ」はその後 昭和 45 年に経営者が新保 望さんに交代して「Z ささのゆ」となり、現在はその息子さんに経営が引き継がれています。新保 望さんには最近はほとんどお見かけしていませんが、お元気な頃は普段は気さくな「お風呂屋さんのおじさん」といった方でしたが、仕舞などもたしなむなかなかの文化人で、また、市井の郷土史家でもありました。その新保 望さんが出版した「金沢城下南部の歴史」という 500 ページ余の本の巻末の方に「木村榮博士と Z 項」（木村榮博士顕彰会 編者藤田清正氏）という表題の一文が収録されています。その一文の中から、木村榮博士がついに「Z 項」発見にたどり着いたときの様子と心境を伝える文章がありますので、その一部を引用して紹介させていただきますこの項を終えたいと思います。

「・・・・石にかじりついてでも、自分は自分の手で「この謎を解かねばならぬ」と固い覚悟をなさいました。

・・

その年のある秋の日の夕ぐれ、博士は所員とのテニスを終え、運動服のまま、しずまりかえった研究室に入って机の前に腰をおろしました。

楽しかるべき運動のあとの一時ですが、博士の口からもれるのは「フーツ」と太いため息でした。そして思わずも、机の引き出しから中央局の報告書を取り出し、食い入るように見つめだしました。五分、十分、二十分、石のように固くなり身動きもしなかった博士の口から「アッ」という小さな力のこもった叫び声もれました。両の目は見る見るうちに生き活きと輝き、報告書を持って立ち上がった博士は「わかったわかったそうだった、そうだったのか」とひとりごとを言って、六ヶ月にわたる血のにじみ出るような苦心、死ぬよりつらい思いの努力が実をむすんで、ついに Z 項発見の糸口が見つかったのであります。」

謝 辞

筆者は本稿第3章3.2節(1)項「国際緯度観測事業における緯度観測」を書き加えるにあたって大江 昌嗣先生(イーハトーブ宇宙実践センター理事長・国立天文台名誉教授・総合研究大学院大学名誉教授)にご教授いただきました。ここに、深く感謝いたします。

また、筆者はこの小冊子の執筆に際して、弥生が丘町会の樋渡 保秋さん(金沢大学名誉教授、専門:物理学)および弥生公民館主事の河合 睦さんに有意義な議論をしていただきました。ここに心より感謝の意を表します。

文責 大橋 信喜美
(金沢市泉野町3丁目 在住)