

## 投稿

## 天文教育における探究型学習課題(5)

## ～天文ソフトとエクセルで体感する歳差章動のメカニズム～

江頭 務(東亜天文学会)

## 1. はじめに

ここでは月の昇交点が黄道を一周する間(18.6年)の軌道を250本の独立軌道に分解しナンバリングをおこなう。それから、21本の軌道を抜き出しトルクの計算を行った後、月の歳差と18.6年周章動、半月周章動の検討をおこなう。

## 2. 月の昇交点カレンダーの作成

月の平均軌道傾斜角は $5.145^\circ$ で、しかも軌道が18.6年周期で回転しているために、地球が太陽を回る固定された公転軌道のように単純ではない。月の交点月は27.2122日である。従って、月は18.6年の間に約250の昇交点を通過することになる。ここでは昇交点を出発して、再び出発した昇交点の経度に達するまでを250本の独立した軌道と見なして検討する。

## &lt;月の軌道のナンバリング&gt;

まず、月の軌道に軌道No.を割り当て、18.6年周期における位置づけを明確にする必要がある。天文ソフトで使用する赤道座標系はJ2000.0である。起点は昇交点が黄経 $0^\circ$ の直前にある月の軌道をNo.0とする。黄緯はもちろん常に $0^\circ$ である。

## 月の軌道 No.0

2025年2月2日15時44分07秒(JST)

ユリウス日 2460708.78064

黄経  $2^\circ 41' 17'' (2.69^\circ)$ 

次に昇交点約27.2日後に来る月の軌道をNo.1とする。

## 月の軌道 No.1

2025年3月1日18時16分46秒(JST)

ユリウス日 2460735.9929

黄経  $358^\circ 19' 47'' (358.33^\circ)$ 

昇交点が黄経 $0^\circ$ に一致することは稀なので、黄経 $0^\circ$ は月の軌道No.0とNo.1に挟まれる形になる。一致する時は黄経 $0^\circ$ がNo.0となる。昇交点は月の運行と逆方向に進むのでNo.0 $\rightarrow 0^\circ \rightarrow$ No.1 $\rightarrow 358^\circ \rightarrow$ No.2のように黄経が少なくなる方向に進んでゆく。

天文ソフトをじっくり見ればわかることだが、昇交点の角度は時計の針のように均一に動いているのではなくジグザグに動いており、時には同じところをうろうろ、時には逆行することもある。しかし、ここでは角度よりも時間が重要である。時間も均等とは言えないが経験上、交点月27.2122日 $\pm 1$ 日の範囲には収まっている。そのため昇交点の動きは18.6年のスパンで見ればそれなりに時計とみなすことができる。

最後のNo.250の軌道No.は昇交点周期6793.5日(18.6年)を基準に求める。軌道No.250のNo.0を元期とする通日は表5.1から6803.4日である。No.249はこれの約27日前だから昇交点周期6793.5日に最も接近しているのはNo.250となる。仮に二つの軌道の中央値が6793.5日の場合は、若い方の軌道No.としておこう。

表 5.1 によれば、軌道 No.0 に対応する昇交点黄経は 2.69°であるが、軌道 No.250 に対応する昇交点黄経は 3.48°である。従って、0.79°分だけ回り切れてないことになるが良しとしよう。尚、昇交点は前述のように時により逆転の動きをするため黄経一巡の見地から合わせこむことは難しい。それは天文ソフトで軌道 No.251 の黄経を確認すれば納得できるであろう。

トルクの計算は大変で、1 本やるのに半日程度はかかる。そのため、250 本のなかから昇交点の時間間隔がほぼ均等になるように 21 本の軌道をサンプリングしたものが表 5.1 に示す月の昇交点カレンダーである。つまり、時間間隔は  $18.6 \text{ 年} \times 365.2422 \text{ 日} / 20 = 6793.5 \text{ 日} / 20 \div 340 \text{ 日}$  となる。かなり荒いサンプリングであるが、これでも一応の検討は可能である。

表 5.1 月の昇交点カレンダー（約 340 日間隔）

軌道 No.	昇交点黄経 度	年	月日	時刻	ユリウス日	通日
0	2.69	2025 年	2 月 2 日	15 時 44 分 07 秒	2460708.781	0.0
13	342.75	2026 年	1 月 22 日	17 時 4 分 7 秒	2461062.836	354.1
25	330.20	2026 年	12 月 15 日	14 時 26 分 16 秒	2461389.727	680.9
38	309.15	2027 年	12 月 3 日	17 時 42 分 6 秒	2461742.863	1034.1
50	292.42	2028 年	10 月 24 日	20 時 50 分 49 秒	2462068.994	1360.2
63	276.21	2029 年	10 月 13 日	18 時 22 分 27 秒	2462422.891	1714.1
75	259.82	2030 年	9 月 5 日	21 時 4 分 28 秒	2462750.003	2041.2
88	238.98	2031 年	8 月 25 日	23 時 41 分 4 秒	2463104.112	2395.3
100	212.88	2032 年	7 月 16 日	22 時 45 分 6 秒	2463430.073	2721.3
113	203.88	2033 年	7 月 5 日	2 時 4 分 9 秒	2463783.211	3074.4
125	187.62	2034 年	5 月 28 日	4 時 56 分 8 秒	2464110.331	3401.6
138	165.56	2035 年	5 月 16 日	10 時 53 分 15 秒	2464463.579	3754.8
150	149.70	2036 年	4 月 7 日	12 時 24 分 28 秒	2464790.642	4081.9
163	129.43	2037 年	3 月 27 日	15 時 12 分 4 秒	2465144.758	4436.0
175	115.64	2038 年	2 月 17 日	13 時 29 分 10 秒	2465471.687	4762.9
188	92.49	2039 年	2 月 5 日	19 時 24 分 3 秒	2465824.933	5116.2
200	74.72	2039 年	12 月 28 日	21 時 54 分 12 秒	2466151.038	5442.3
213	48.65	2040 年	12 月 15 日	19 時 33 分 50 秒	2466503.94	5795.2
225	37.54	2041 年	11 月 8 日	1 時 8 分 18 秒	2466831.172	6122.4
238	14.50	2042 年	10 月 27 日	19 時 45 分 26 秒	2467184.948	6476.2
250	3.48	2043 年	9 月 20 日	00 時 55 分 31 秒	2467512.164	6803.4

### 3. 月の歳差章動のトルク計算

トルク計算のやり方は太陽の場合と同様であるので「学習(3)」を参照願いたい。ここでは、「学習(3)」のエクセル表に基づいて若干の相違点や注意点のみを述べるに留める。説明の中で使用する行は、エクセルの固有の行でなく計算をさせる行を指す。例えば、説明に使用する行 1 は表 3.2A のエクセル画面では行 21 に相当する。また、最終行の行数は平均して約 111 であるが、軌道 No.によって±3 行程度変化する。

#### 表 3.2A エクセル画面

##### C 列 時間

1 行目は、表 5.1 月の昇交点カレンダーの軌道 No.0 の 2025 年 2 月 2 日 15 時 44 分 07 秒の 15 時 44 分 07 秒を 15.735 時間に表示したものである。これが観測の開始時間である。その後の観測時間（データの入手時間）は、1 日 4 回の 0 時、6 時、12 時、18 時である。時間を 6 時間間隔で進めてゆくと、月の赤経が観測開始時の赤経に近づいてゆく。そして、ぴったりになった時刻を記載する。これを月が地球を 1 回転した時の公転周期、即ち恒星月と見なす。従って、表の最終行の赤経  $\alpha$  を表す D から G 列は、最初の行と同じになる。恒星月の正確な平均周期は 27.3217 日（655.72 時間）である。

##### L 列 距離

地球と月の地心距離の単位は m に換算して入力する。地心距離はエクセル関数にて最大値(遠地点)、最小値(近地点)、平均値を求めておく。

#### 表 3.2B エクセル画面

##### M 列 積算時間

積算時間は、表 5.1 の軌道 No..0 の 2 月 2 日 15.735 時が起算日となる。従って、行 1 は 0 時間、行 2 は規定の観測時間 18 時から 15.735 時を減じた 2.265 時間となる。行 3 以降は 6 時間を加算してゆけばよい。3 行目に入力する式は =M2+6 となる。最終行に入力する時間は、観測終了時刻 3 月 2 日 0 時 33 分 08 秒より既定の観測時間 0 時を減算した 0.552h となる。最終行に入力する式は、最終行の手前の行+0.552h となる。

##### N 列 日数表示

最終行は前述の恒星月 27.3 日前後となる。

##### P 列 トルク $N_x$ の計算

定数は「学習(3)」の表 3.1 の  $\$H\$6=K_m=1.9342E+48$  を使用すること。

$$P1 \text{ のトルク } N_x \text{ の計算式} \\ =\$H\$6 * \text{SIN}(\text{RADIANS}(2 * K1)) * \\ \text{SIN}(\text{RADIANS}(G1)) / (L1 * 10^7)^3$$

##### R 列 トルク $N_y$ の計算

定数は前述の  $\$H\$6$  を使用すること。

R1 のトルク  $N_y$  の計算式(先頭の-符号を忘れぬこと)

$$=-\$H\$6 * \text{SIN}(\text{RADIANS}(2 * K1)) * \\ \text{COS}(\text{RADIANS}(G1)) / (L1 * 10^7)^3$$

#### 表 3.2D エクセル画面

##### U 列 自転軸の軌跡

1 行目の数式は =-I1 とする。

月の自転軸の軌跡の初期値の座標はすべて (0,0) に統一される。実際には自転軸の軌跡の初期値は昇交点によって変化するが、これについては 18.6 年周章動のところでも検討することにする。

計算結果

表 5.2 は各軌道 No.に対応した平均トルクの一覧表で、これは月の 18.6 年周章動の計算の入力データとなるものである。次ページの表 5.3 左欄は黄経 0°付近から約 90°間隔の軌道 No.に対応したトルク特性のグラフで、正の方向のみに振れているのが Nx、正負に振れているのが Ny である。表 5.3 右欄は各軌道 No.のトルク特性をフーリエ解析したもので、棒グラフの左側が Nx、右側が Ny である。

表 5.2 平均トルク Nx Ny 一覧表 単位 Nm  
表 3.2B 台形法 Nx Q 列 Ny S 列

軌道 No.	通日	度表示	Nx	Ny
0	0.0	0.0	1.431.E+22	-1.108.E+20
13	354.1	18.7	1.428.E+22	-9.659.E+20
25	680.9	36.0	1.397.E+22	-1.677.E+21
38	1034.1	54.7	1.357.E+22	-2.344.E+21
50	1360.2	72.0	1.290.E+22	-2.615.E+21
63	1714.1	90.7	1.226.E+22	-2.842.E+21
75	2041.2	108.0	1.171.E+22	-2.619.E+21
88	2395.3	126.7	1.111.E+22	-2.132.E+21
100	2721.3	144.0	1.072.E+22	-1.526.E+21
113	3074.4	162.7	1.035.E+22	-6.717.E+20
125	3401.6	180.0	1.030.E+22	9.143.E+19
138	3754.8	198.7	1.042.E+22	9.988.E+20
150	4081.9	216.0	1.069.E+22	1.679.E+21
163	4436.0	234.7	1.145.E+22	2.079.E+21
175	4762.9	252.0	1.173.E+22	2.652.E+21
188	5116.2	270.7	1.241.E+22	2.730.E+21
200	5442.3	288.0	1.313.E+22	2.645.E+21
213	5795.2	306.7	1.366.E+22	2.126.E+21
225	6122.4	324.0	1.401.E+22	1.605.E+21
238	6476.2	342.7	1.422.E+22	6.940.E+20
250	6803.4	360.0	1.429.E+22	-2.609.E+19

台形法で求めた Nx Ny の平均値

Nx 1.2361E+22 Nm  
Ny -8.1111E+18 Nm

4. 月の歳差

図 5.1 に昇交点周期 18.6 年間にわたるト

ルクの変化を示す。横に伸びた直線は Nx の平均値を示す。

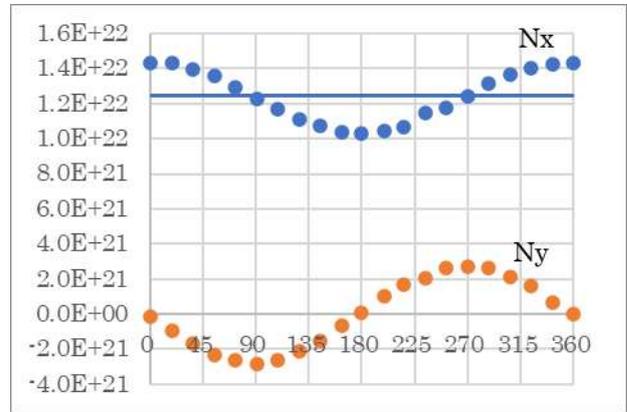


図 5.1 18.6 年周のトルク変化 単位 Nm  
Nx (上) Ny (下)

Nx の歳差トルクは表 5.2 の台形法で求めた 1.2361E+22Nm であるから年間歳差は  $\theta_{md}=(1.2361 \times 10^{22} / L \sin \epsilon) \times (180 / \pi) \times 3600 \times 365.2422 \times 86400=34.524 \text{ "/年}$ となる。学習(4)で計算した太陽の実トルクの 15.947 "/年と合算すれば、50.471 "/年となる。公表値は 50.385 "/年であるから、一致率は、 $0.471 / 50.385=1.002$  となり、よく一致していると言えるだろう。

5. 月の 18.6 年周章動

5.1 追加の計算

月が 1 回転した後のトルクを考えると、章動成分のトルクの積分値は 0 であるから、歳差成分だけが残る。これを昇交点周期 18.6 年の周期で眺めると、月が 1 回転した後のトルクは一つの代表トルクとして扱える。そこで表 5.2 のトルクをデータとして「学習(3)」のエクセル画面表 3.2C と表 3.2D に代入して作成したものを表 5.4 として新たに作成する。代入方法は以下の通りである。ここでは「学習(3)」と異なるところのみ A 列、B 列、F 列、J 列、N 列を説明する。

表 5.3 月のトルク特性と振幅スペクトル 単位 Nm

軌道 No.	トルク特性 Nx Ny	振幅スペクトル 棒グラフ 左 Nx 右 Ny
A No. 0 0°		
B No. 63 270°		
C No. 12 5 180°		
D No. 18 8 90°		

表 5.4 エクセル画面

行 番	トルク						章動						自転軸		
	時間	Nx		Ny			Nx		Ny	θx		θx	θy	軌跡	
	A	B	→	F	→	I	J	→	N	M	→	R	S	T	U
1	0														
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
21	360														

- A 列 時間 表 5.2 の度表示 0~360° をコピー
- B 列 Nx 表 5.2 の Nx をコピー F 列 Ny 表 5.2 の Ny をコピー
- J 列 章動  $N_x = (\text{表 5.2 の } N_x) - (\text{表 5.2 下部の台形法平均値 } 1.2361E+22)$
- N 列 章動  $N_y = (\text{表 5.2 の } N_y) - (\text{表 5.2 下部の台形法平均値 } -8.1111E+18)$

5.2 計算結果

図 5.2 は 18.6 年周のトルクのフーリエ解析の結果である。エクセルには 21 本の軌道データを 128 個のデータに変換して入力した。

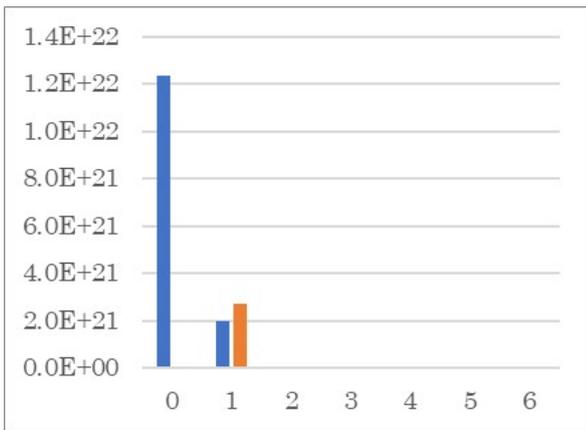


図 5.2 18.6 年周フーリエ解析 単位 Nm

まず、月のトルクによる年間歳差は、次数 0 のトルク  $N_x = 1.2376E+22$  Nm から  $\theta_{md} = (1.2376 \times 10^{22} / L \sin \epsilon) \times (180/\pi) \times 3600 \times 365.2422 \times 86400 = 34.566''$  となる。これは、前述の実トルクによる月の歳差と比較して  $34.566/34.524 = 1.001$  でほとんど同じである。

次に章動は、次数 1 のトルク  $N_x = 2.0136 E+21$  Nm から  $\omega_{m1} = 2\pi / (6793.5 \times 86400) = 1.0705 \times 10^{-8}$

$$\theta_x = (2.0136 \times 10^{21} / \omega_{m1} L) \times (180/\pi) \times 3600 = 6.621''$$

$\theta_y$  は  $N_y = 2.7139 \times 10^{21}$  から同様に  $\theta_y = 8.924''$  となる。

図 5.3 は 18.6 年周の位相差 90° の傾きのないウーラー型章動楕円である。

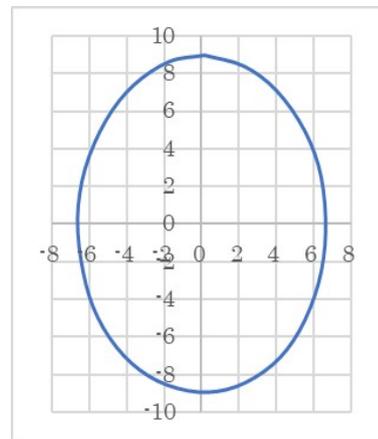


図 5.3 18.6 年周章動パターン 単位 ''

表 5.4 R 列—S 列

$\theta_x$  6.621 ''  $\theta_y$  8.924''

図 5.4 は 18.6 年周章動の時間変化を示したものである。 $\theta_x$  は sin 状に、 $\theta_y$  は cos 状に変化していることがわかる。ドットで示しているのが実トルクで、実線がウーラー章動表である。

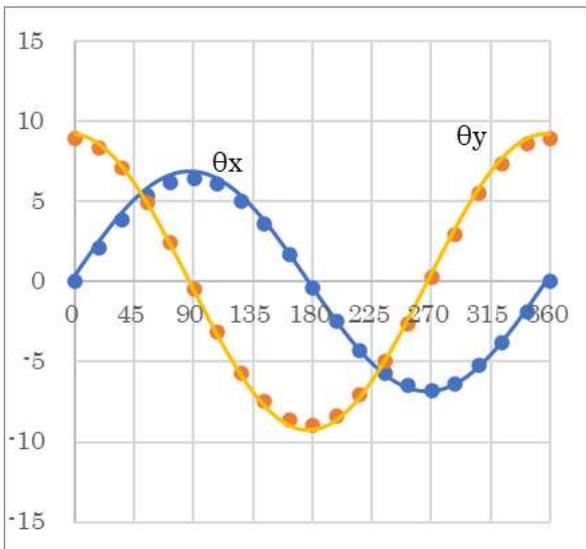


図 5.4 18.6 年周章動 単位 "   
 ドット  $\theta_x$  表 5.4 A 列—M 列   
 ドット  $\theta_y$  表 5.4 A 列—S 列   
 実線 ウーロード章動表

宇宙空間における自転軸の軌跡

ここで「学習(4)」図 4.10 で述べた宇宙空間から眺めた地球の自転軸の動きを見てみよう。

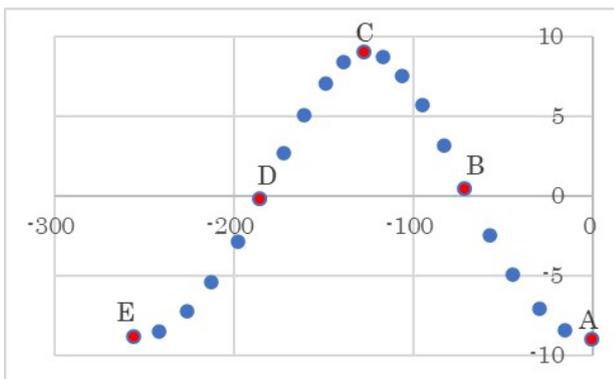


図 5.5 宇宙空間から眺めた   
 地球の自転軸の動き 単位 "   
 横軸  $\theta_x$  縦軸  $\theta_y$

前述の月による赤道部の歳差は  $34.524''/\text{年}$  であった。これを歳差円の動きに換算すると、 $\sin \epsilon = \sin 23.4348^\circ$  を乗じて  $13.730''/\text{年}$  となる。

よって昇交点が一巡する間の歳差は  $13.730''/\text{年} \times 18.6 \text{ 年} = 255.4''$  となる。宇宙空間から眺めると地球の自転軸の  $\theta_x$  成分は西側（負の方向）に移動する。また  $\theta_y$  成分は図 5.2 の逆方向に移動、即ち上昇する。

ここで図 5.5 の A~E の位置にあるドットの中身を調べると、次の図 5.6A~E となる。ここでは特徴的な位置にある 5 種類の中身しか表してないが、もし 250 本の自転軸の位置を軌道 No.0 の終点に軌道 No.1 の始点、軌道 No.1 の終点に軌道 No.2 の始点というように順次を繋げてゆくならば、図 5.5 のようになるようになるであろう。生徒が計算した各グラフを模造紙のようなものに張り付け、18.6 年周章動が出来上がるのを体感するのも学習効果を高めるであろう。

自転軸の軌跡

表 5.4 T 列—U 列 初期値 0   
 グラフはほぼ比例尺 単位 "

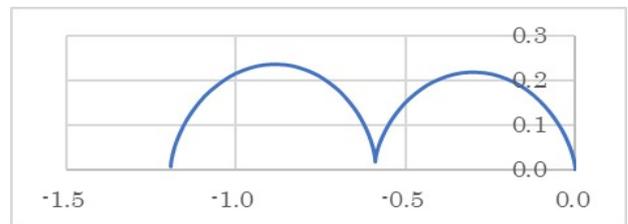


図 5.6A 軌道 No. 0 (位置 A)

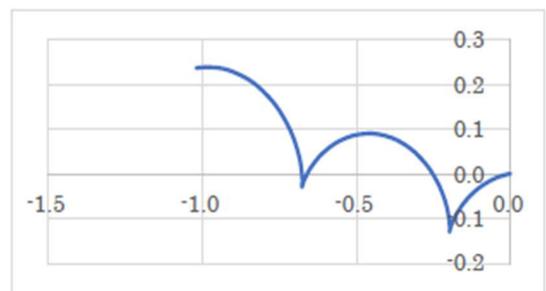


図 5.6B 軌道 No. 63 (位置 B)

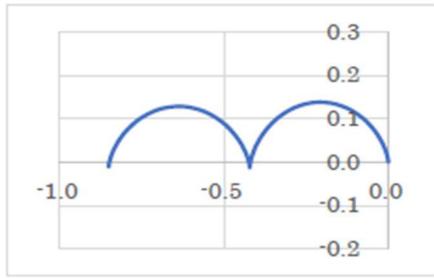


図 5.6C 軌道 No. 125 (位置 C)

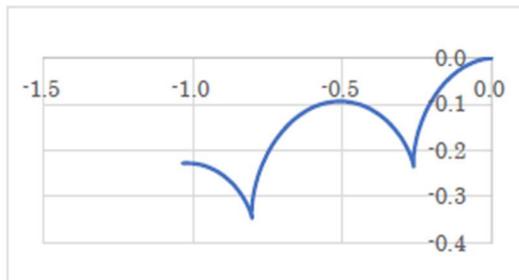


図 5.6D 軌道 No. 188 (位置 D)

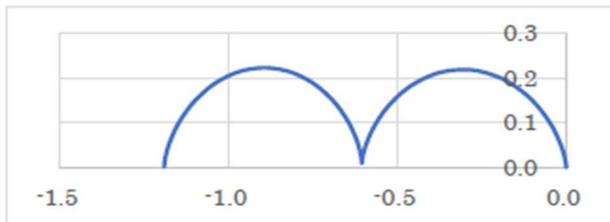


図 5.6E 軌道 No. 250 (位置 E)

角距離で表した振幅は

$$\omega_{ms}L = 2 \times 2\pi / (27.3217 \times 86400) \times 5.8599 \times 10^{33}$$

$$\theta_x = (1.2490 \times 10^{22} / \omega_{ms}L) \times (180/\pi) \times 3600$$

$$= 1.2490 \times 10^{22} \times 6.6122 \times 10^{-24} = 0.083''$$

つまり、振幅のトルクに定数  $6.6122 \times 10^{-24}$  を乗じたものが " で表した振幅となる。従って

$N_y$  は  $N_y = 1.3594 \times 10^{22}$  Nm より

$$\theta_y = 1.3594 \times 10^{22} \times 6.6122 \times 10^{-24} = 0.090''$$

となる。

### 章動パターンとフーリエ章動楕円

サイズ  $\theta_x \times \theta_y$  単位"

グラフはほぼ比例尺

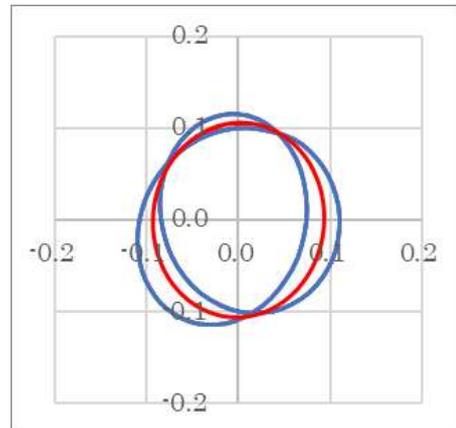


図 5.7A 軌道 No. 0 0.093'' × 0.106''

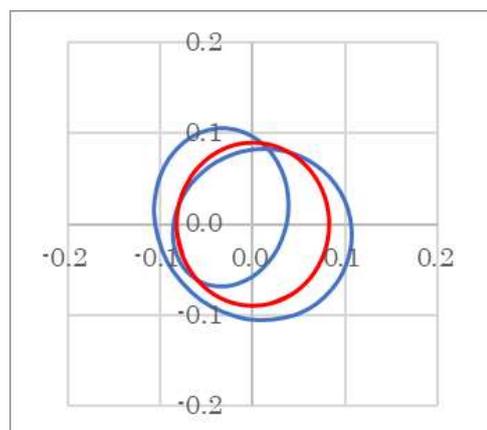
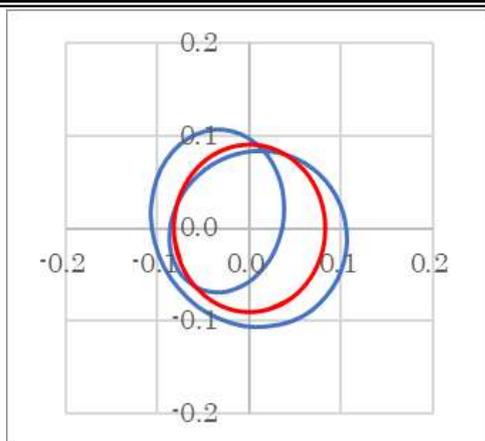
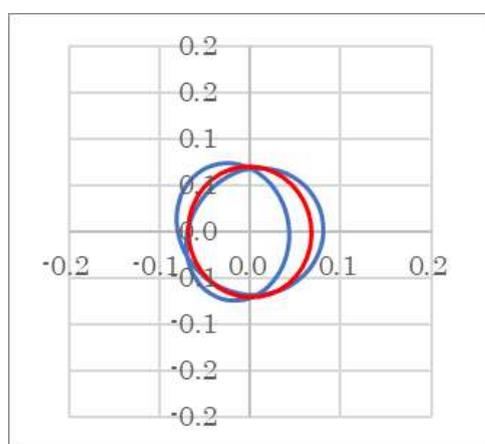
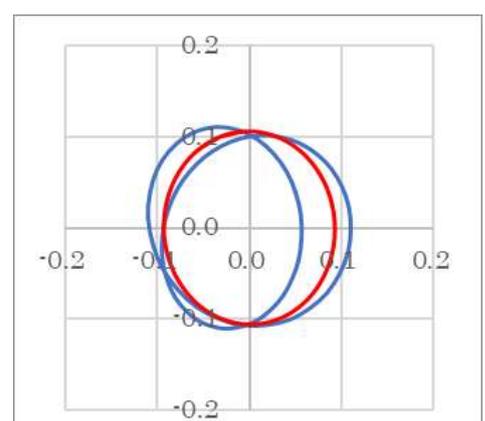


図 5.7B 軌道 No. 63 0.083'' × 0.090''

## 6. 月の半月周章動

最初に月の軌道 No.に対応した章動パターンとフーリエ解析により求めた章動楕円（以下フーリエ楕円と呼称）を示そう。フーリエ楕円は次の図 5.7 を見ればわかるように、章動パターンの 2 回転のループを 1 回転に平均化したものと見なせる。これにより、月の複雑な章動を簡単なものに置き換えることができる。

ここで、月の平均的な軌道である軌道 No.63 を例にとり角距離 " で表した振幅を求めよう。フーリエ解析により求めたトルクの振幅  $N_x$  は  $N_x = 1.2490 \times 10^{22}$  Nm

図 5.7C 軌道 No. 125  $0.068'' \times 0.070''$ 図 5.7D 軌道 No. 188  $0.083'' \times 0.090''$ 図 5.7E 軌道 No. 250  $0.092'' \times 0.106''$ 

次の図 5.8 は 18.6 年周期におけるフーリエ楕円の振幅の変化を示したものである。厳密には「学習(3)」で紹介したように位相差が  $90^\circ$  からずれる場合には傾いた楕円となるが

位相差は  $90^\circ \pm 3^\circ$  の範囲内にあり、これによる楕円の半径の変化は 1% 以下であった。そのため、ここでは簡明を期して標準形楕円として扱うことにする。

フーリエ楕円は図 5.7 に示されたように昇交点の位置によって変化する。図 5.8 は、この変化をまとめたものである。フーリエ楕円の最大は軌道 No.0 と No.250、最小は軌道 No.125、中間は軌道 No.63 と No.188 である。そのため最大と中間は二重線で表示されている。

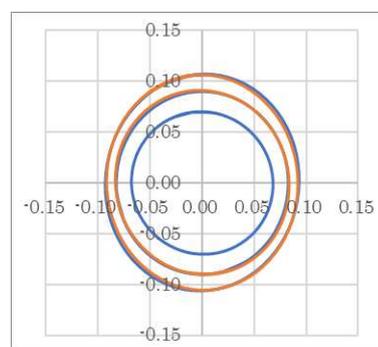


図 5.8 フーリエ楕円の変化 単位''

図 5.9 はフーリエ章動の振幅と昇交点黄経の関係を示したものである。 $\theta_x$  と  $\theta_y$  の差異は黄経  $180^\circ$  (軌道 No.125) 付近で最小となり、 $0^\circ$  (No.0) と  $360^\circ$  (No.250) 付近で最大になることがわかる。グラフは  $180^\circ$  を中心にほぼ対称である。

## 7. 月の 186 年周章動

章動パターンは指紋のように軌道によって異なり、トルクの平均だけでなく変化の中身まで鋭敏に反映する。そのためパターン認識によって軌道の力学的特性(トルクによる地球の揺さぶられ方)を分類することができる。

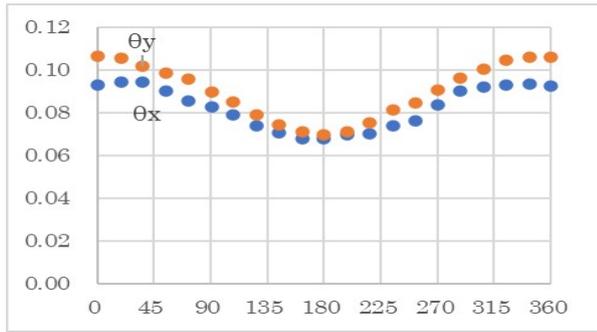


図 5.9 フーリエ章動の振幅と 18.6 年周期  
横軸 昇交点黄経  
縦軸 上  $\theta_y$  下  $\theta_x$  単位”

前述の 18.6 年周章動の前後、即ち軌道 No.0 と No.250 の章動パターンを比較すると図 5.10 に示すようにかなりの相違があることがわかる。

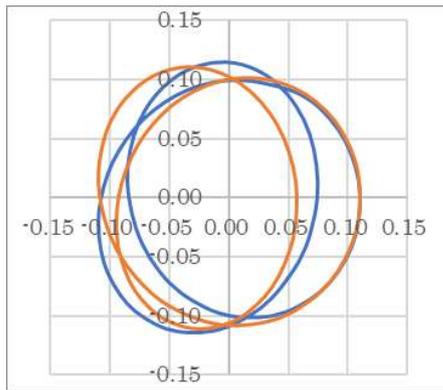


図 5.10 軌道 No. 0 と No. 250 における  
章動パターンの比較 単位”

これまでの計算結果から、月と地球の距離が大きな影響を及ぼしていることがわかる。そこで 18.6 年周期を近地点の周期[1]で除すると、 $18.6 \text{ 年} / 8.85 \text{ 年} = 2.1017$  となる。つまり、昇交点が黄道上を 10 回まわる間に、近地点は約 21 回まわることになる。ならば、186 年の周期でより精度の高い章動パターンの相似が得られるはずである。軌道 No.0 から  $\pm 186 \text{ 年} = \pm 67935 \text{ 日}$  後の軌道 No.A は次のように求められる。

月の軌道 No.0

2025 年 2 月 2 日 15 時 44 分 07 秒 (JST)

ユリウス日 2460708.78064 黄経  $2.7^\circ$

$A = \pm 67935 \text{ 日} / 27.2122 \text{ 日}$  (交点月)

$= \pm 2496.5$

ぴったりとはゆかないので、軌道 No.2496 か No.2497 が軌道 No.A の候補となる。

軌道 No.A のユリウス日は、  
 $2460708.78064 \pm 27.2122 \times A$  となる。

このユリウス日を年月に換算し、天文ソフトで昇交点を確認する。昇交点は約 27.2 日のピッチで移動するので、軌道 No.0 の昇交点黄経に最も近いものを  $\pm 186$  年後の軌道 No.A に採用する。このような検討により得られた軌道 No. は次の通りである。

軌道 No.-2496

1839 年 2 月 16 日 18 時 15 分 30 秒

ユリウス日 2392786.88576

昇交点黄経  $359.0^\circ$

軌道 No.2497

2211 年 2 月 17 日 14 時 54 分 5 秒

ユリウス日 2528657.74589

昇交点黄経  $2.0^\circ$

軌道時間間隔

No.-2496 ~ No.0 67922 日

No.0 ~ No.2497 67949 日

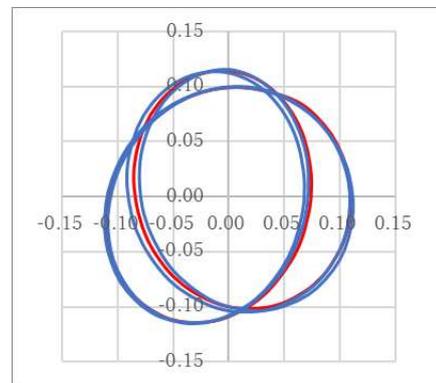


図 5.11 元期 2025 年 2 月 2 日  $\pm 186$  年の  
章動パターンの比較 単位”  
軌道 No. -2496 ~ No. 0 ~ No. 2497

図 5.11 を見ればわかるように三つの章動パターンは図 5.10 に比較してかなり近似していることがわかる。この周期性は任意の軌道に対しても確認できる。例えば、下記のような任意の軌道 No.-1248 があるとする。

軌道 No.-1248

1932 年 2 月 10 日 15 時 4 分 30 秒

ユリウス日 2426747.75312

昇交点黄経  $2.1^\circ$

上記の 186 年後の軌道 No. は  $-1248 + 2496.5 = 1248.5$  であるから軌道は No.1248 か No.1249 である。この内、天文ソフトにより軌道 No.-1248 の昇交点黄経  $2.1^\circ$  により近いものを採用すると、以下ようになる。

軌道 No.1248

2118 年 1 月 27 日 12 時 27 分 41 秒

ユリウス日 2494669.64422

昇交点黄経  $6.4^\circ$

軌道 No.-1248 と No.1248 の厳密な日数間隔は 67922 日となる。

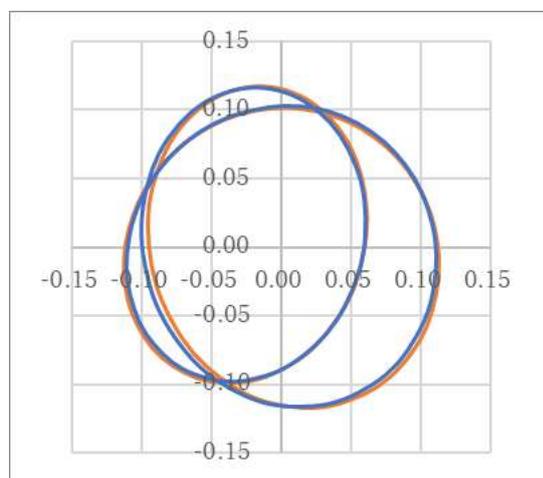


図 5.12 章動パターンの比較 単位”  
軌道 No. -1248~No. 1248

一般に昇交点の位置が近似しているならば、186 年の前後の章動パターンは近似することがわかる。従って、186 年周期は 18.6 年周期より高度な近似ができることがわかる。186

年周期は月の軌道が約 2500 本にもなるが、エクセルは 4096 個まで処理できるので、上記の平均トルクをフーリエ解析すれば、186 年周期~18.6 周期の新たな章動楕円を求めることができる。

尚、18.6 年周期における交点月と恒星月の間には次の関係がある。

交点月  $6793.5/27.2122=249.649$

恒星月  $6793.5/27.3217=248.649$

つまり、月が地球を回る回数は昇交点の出現回数よりも 1 回少ない。

### 参考文献

- [1] 暦 Wiki/月の公転運動/近地点と遠地点  
- 国立天文台暦計算室  
<https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/wiki/B7EEA4CEB8F8C5BEB1BFC6B02FB6E1C3CFC5C0A4C8B1F3C3CFC5C0.html>



江頭 務