Reliability of the totality of the eclipse in AD628 in Nihongi
推古天皇36年の皆既日食記事の信憑性

Kiyotaka TANIKAWA and Mitsuru SOMA
National Astronomical Observatory
Mitaka, Tokyo, 181-8588, Japan
谷川清隆, 相馬 充 (国立天文台)

Abstract

It is generally accepted that the solar eclipse on April 10, 628 (the second day, the third month, the thirty-sixth year of Empress Suiko) recorded in Nihongi is not total but partial though it is written as a total eclipse. We argue for the record appealing to the contemporary total or near total eclipses in Chinese history books and Japanese occultation observation. If the value of the tidal term in the lunar longitude(the coefficient of T^2 term) is different from the present value by about $-2''/\mathrm{cy}^{-1}$, then there disappears an apparent contradiction of ΔT around AD600 derived from lunar and solar eclipses. Grazing occultation data are found to be useful.

1 序.

三月丁未朔戊申, 日有蝕盡之

この記述は日本書紀の推古天皇三十六年の項にある. 長い伝統を持つ中国史書の規則どおりに読むと, これは皆既日食である. 計算によると (渡邊敏夫, 日食月食宝典), 確かにこの日皆既日食はあった. 西暦 (ユリウス暦)628 年 4 月 10 日の日食である. 問題は皆既帯が日本列島上を通ったかどうかである.

1.1 この日食記事を取り上げた理由

1.1.1 日本書紀の最初の日食記事

書き手が意識して書いた日食記事として最初のものであることを注意しておく. 帝紀の書き方に則っている. 日本書紀, 神代上に有名な天の岩戸記事がある. 「是時, 天照大神..., 入干天石窟, 閉磐戸而幽居焉」これは江戸時代以来, 日食記事であると理解する研究者も多い. ただしこの記事は「日食」を意味する記事であって, 「日食記事」ではない.

1.1.2　倭国の歴史上重要な時点に対応する

倭国の興隆の歴史を中国の史書に見る. 以下に掲げる魏志倭人伝, 宋書倭国伝, 隋書たい国伝の記事を見ればわかるように, 3 世紀, 5 世紀, 7 世紀と順に倭は国として成長していることがわかる. 7 世紀の大業三年 (西暦 607 年) の倭からの国書は独立宣言であると見ることができる. これは大方の歴史学者の認めるところである (西嶋, 1994). ただし独立することの意味については意見が別れるように窺える. 独立国家は何をするか. 筆者の考えによれば, (1) 法律を定めること, (2) 度量衡を定めること, (3) 暦を作ること, および (4) 歴史を書くこと, である. 最初の 3 項目は必須である. これらは同一国内の住人同士に会話なり契約なりを成立させるため必要な規則だからである. 第 4 項目は時間軸方向にも国としてのまとまりを示すために必要な事業であるとの解釈ができる. もっとまともな解釈があるかもしれない. 中国に属している間は中国のものを借用すればよい. 独立直後は中国の制度をまねる. ただ中国には複数の国が並立することがあるから, どの国から制度を輸入するかは輸入する側の事情によるだろう.

中国は有史以来, 日食, 月食, その他の天文現象を記録し続けてきた. この記録は上記項目 (3) と (4) に関係して重要視された. とくに暦の狂いを補正するためには日食と月食の観測データが重要である. 朔 (新月) が月初からずれると改暦が必要になる. 改暦のためには長期にわたる観測データが必要である. 独立国家はこのデータを独自に持たなければならない. 独立した倭国はデータをすでに蓄積していたか? それはわからない. だが, 独立宣言 (西暦 607 年) 直後の皆既日食記事 (西暦 628 年) はデータを蓄積しようという姿勢を見せたと思えないか? それはほぼ確実である. というのは, その後, 天文観測記事が連綿として続くからである (神田 茂, 日本天文史料, 1978). 日食記事だけではない. 彗星 (634 年), 流星 (637 年), 月食 (643 年), 月星接近 (640 年), 惑星現象 (692 年), 星昼見 (702 年) などの観測も始まった. 暦を作る作業は複雑であり, 江戸時代, 渋川春海による貞享暦 (1685 年) に至ってようやく日本独自の暦を作ることができた. それ以前はいつも中国暦を用いていた. 中国の暦の精度が良かったからである (薮内, 1969).

3 世紀 (魏志倭人伝, 参考文献 11) – 卑弥呼

- 倭人は帯方の東南大海の中にあり. 山島に依りて国邑をなす. 旧百余国. 漢の時朝見する者あり, 今, 使訳通ずる所三十国. ...
- 景初二年六月 (紀元 238 年), 倭の女王, 大夫難升米等を遣わし, 郡に詣り, 天子に朝献せんことを求む. ...
- 景初二年十二月「... 汝がある所はるかに遠きも, 乃ち使を遣わし貢献す. 我れ甚だ汝を哀れむ. 今汝をもって親魏倭王となし, ...」

5 世紀 (宋書倭国伝, 参考文献 12) – 倭の五王

- 倭国は高驪の東南大海の中にあり. 世々貢職を修む.
- 高祖の永初二年 (421 年), 詔していわく, 「倭讃, 万里を修む. ..., 除授を賜うべし」と.
- 太祖の元嘉二年 (425 年), . .. 讃死して弟珍立つ. ... 詔して安東将軍・倭国王に除す.
- (元嘉) 二十年 (443 年), 倭国王済, 使を遣わして奉献す. また以って安東将軍・倭国王となす.
- (元嘉) 二十八年 (451 年), ... 済死す. 世子興, 使を遣わして貢献す.

- 世祖の大明六年 (462 年), 詔していわく, 「倭王世子興, ..., 安東将軍・倭国王とすべし. 」興死して弟武立ち, ... 安東大将軍・倭国王と称す.
- 順帝の昇明二年 (478 年), 使を遣わして表を上げる. いわく「封国は偏遠にして, ... 窃かに自ら開府儀同三司を仮し, ...」 ... 安東大将軍・倭国王に除す.

7 世紀 (隋書たい国伝, 参考文献 13) – 日出処天子致書日没処天子無恙

- 倭国は百済・新羅の東南にあり. ... 則ち「魏誌」のいわゆる邪馬台なる者なり.
- 開皇二十年 (600 年), 倭王あり. 姓は阿毎, 字は多利思比孤, 阿輩き弥と号す.
- 大業三年 (**607** 年), その王多利思比孤, 使を遣わして朝貢す. ... その国書にいわく, 「日出処天子致書日没処天子無恙」と. 帝, ... 「夷蛮の書, 無礼なる者あり. 復た以て聞するなかれ」と.
- 大業四年 (608 年), 文林郎はい清を遣わして倭国に使せしむ.
- その後遂に絶つ.

1.1.3　千年規模の地球自転変動, 月運動を求めること

現在, 月レーザー測距観測により, 月が徐々に遠ざかっていること, それが年に数 cm(3.8cm) であることも知られている. このことから, 月の軌道周期の増加率も計算できる. この増加率は千年前も同じであったのか. また地球自転は遅くなっている. この遅くなり方は, 現在と千年前と同じであろうか. このような問題に答えるための理論はない. 正確に言うと, 理論の精度は足りない. 海あり大気あり, 地下にマグマあり, 流体核ありのこの地球と月, 太陽, 惑星の相互作用を解いて, 地球の自転運動を千年にわたって追う. これは現代の科学ではまだできないことである. 唯一, 日食, 月食, その他の天文現象の古代記録を使うと, 自転がどうであったか, 月の公転周期がどうであったかを決めることができる.

1.2　この記事に関する通説

通説では, 推古天皇三十六年の皆既日食記事は誇張表現であるとされている (渡邊敏夫「日食月食宝典」,1979; 内田正男「日本暦日原典」, 1975; 齋藤国治「星の古記録」, 1982). 代表して内田正男氏の見解を掲げておこう. 「この日食記事を当時暦法をすでに採用していた証とする説がある. 私は必ずしもそうは思わない. この日食は飛鳥地方で, 午前 9 時半前に食甚となり, 食分は 9 割を越えたが皆既とはならなかった. しかし皆既とはならなくとも, 9 割以上もかければ気温は下り, 一種異様な雰囲気となる. 別に暦に予報されなくとも誰でも気付く現象である. 書紀の記録を実見の記録とすれば, 暦法の施行とは必ずしも結びつかないであろう.」(内田正男, 1975 年, 525 ページ.)

この通説には根拠がある. 西暦 600 年あたりの $\Delta T = 4000$ 秒とすると, 推古天皇三十六年日食の皆既帯は, 日本列島上ではなく, 太平洋上にある. もうひとつは, 古代日食の信憑性である. 中国の史書の天文記事の中には信用ならないものもある. とくに皆既食の場合はそうである. これが通説の強い支えになっているものと思われる. それについては次節で述べよう.

ここでは外国人研究者のコメントを挙げておく.

Stephenson(1997, p.267) による 628 年日食の計算

'The recorded date proves to be in accurate accord with that of a computed solar eclipse. Although the obscuration of the Sun was said to be total, further description is lacking, so that I have included the observation in the lowest category. It is noteworthy that event does not seem to be linked in any way with the Empress' death by the chronicler(unlike several similar occurrences in China – see above).

Steele(2000),

'In common with all of the other observations in the Nihongi, this record is not very detailed. No times are ever recorded for any of the eclipse records in this work.'

表 I. 中国歴代史書に載る日食記事の検証[1]

西暦	日食数	的中	的中率	夜食・不食	非食
春秋	37	35	95	1	1
史記 (戦国)	10	4	40	6	0
漢書	61	42	69	1	18
後漢書	88	65	74	7	16
三国志	12	11	92	0	1
晉書	82	49	60	16	17
宋書	83	60	72	16	7
魏書	61	41	67	16	4
南斉書	5	4	(80)	1	0
梁書・陳書	10	7	70	10	0
南史	35	23	66	10	2
北斉書	2	2	(100)	0	0
周書	22	7	32	15	0
北史	82	46	56	34	2
隋書・梁	3	2	(67)	1	0
隋書・陳	1	0	0	1	0
隋書・斉	1	1	(100)	0	0
隋書・周	10	2	20	8	0
隋書・隋	8	3	(37)	5	0
旧唐書	99	69	70	25	5
新唐書	93	66	71	25	2
旧五代史	20	15	75	5	0
新五代史	18	14	78	4	0

[1] 中国古代の天文記録の検証 (齋藤国治・小沢賢二, 雄山閣, 平成 4 年, p.17).

1.3　古代中国の日食記事の信憑性

古代中国の日食記事の信憑性を齋藤・小沢 (1992) が調べた. 彼らは, 春秋から五代に至る中国の史書からすべての天文記事を抜き出し, それを現在の知識で再現し得る現象とそうでない現象とに分類した. ここでは日食記事に関して彼らの結果を紹介し, 若干のコメントを述べる.

表 II. 五 ~ 九世紀の皆既日食全記録

西暦	国と年月	食分 (齋藤・小沢) $\Delta T = 4000?$	谷川・相馬 $\Delta T = 2000$
453.08.20	(宋) 元嘉三十年七月辛丑朔, 日有蝕之, 既	不食	
	星辰畢見		
454.08.10	(宋) 孝建元年七月丙申朔, 日有蝕之, 既	0.96	0.97
516.04.18	(梁) 天監十五年三月, 日有蝕之, 既	0.97	0.94
522.06.10	(梁) 普通三年五月壬辰朔, 日有蝕之, 既	皆既直後に日出	0.97
			非・日出帯食
562.10.14	(北周) 保定二年九月戊辰朔, 日有食之, 既	0.35	0.225
		周書には「既」なし	
616.05.21	(隋) 大業十二年五月丙戌朔, 日有食之, 既	0.90	0.967
		記事の” 既” は不当	
702.09.26	(則周) 長安二年九月乙丑朔, 日有食之,	0.99	1.016
	幾既, 在角初度		
	日有蝕之, 不尽如鈎, 京師及四方見之	旧唐書	
754.06.25	(唐) 天宝十三載六月乙丑朔, 日有食之,	0.87	0.854
	幾既. 在東井十九度. 京師分也		
	日有蝕之, 不尽如鈎	旧唐書	
756.10.28	(唐) 至徳元年十月辛巳朔, 日有食之, 既	0.96	0.886
	在てい十度		
		旧唐書, 既なし	
761.08.05	(唐) 上元二年七月癸未朔, 日有食之, 既	0.99	1.011
	大星皆見, 在張四度		
	蝕既, 大星皆見	旧唐書	
846.12.22	(唐) 会昌六年十二月戊辰朔, 日有食之,	0.85	0.818
	在南斗十四度		
	皆蝕	旧唐書	
879.04.25	(唐) 乾符 六年四月庚申朔, 日有食之, 既	非食	
	在胃八度		
		旧唐書, 記述なし	

表 1 は齋藤・小沢 (1992) の 17 ページの表そのものである. 表中, 日食の的中率とは史書の日食記事のうち, 本当に起こったものの百分率である. この表を見てはじめに不思議に思うのは,

的中率が必ずしも時代とともに上がらないことである. これには理由がある. そのために, 表中の夜食, 不食, 非食なる用語を説明しておく. 古代中国においては, 暦法を使って日食推算が行われていた. ただし必ずしも予測は成功せず, 予測した日食が地球の裏側であったり (夜日食あるいは夜食), 予測した日食が南半球であったりあるいは北半球でもずっと北の方であって観測地では食が起こらなかったり (不食), 地球上のどこで見ても日食が起こらなかったり (非食) した. 予測が行われていたことは驚きであるが, それがすでに前漢や後漢の時代に行われていたとするとさらに驚きである.

以上のことからすると, 個々の日食記事の信憑性を問うことには危険がつきまとう. 特定の日食があったかなかったをわれわれはチェックできるので, 記事の信憑性をしらべることができるように見える. ところが, 当時の天文官が日食を見たかどうかをわれわれははっきり断言できない. 曇っていたかもしれない. 日食をみたのではなく, 予測が当たったのかもしれないからである. さらに, われわれの計算に使用したパラメータが正しいかどうか保証がない.

皆既日食記事, あるいはほぼ皆既 (幾既) の日食記事の場合, 問題はもう少し微妙である. ほとんどの場合, この記事に対応してたしかに日食はあった. しかし, 天文官あるいは, 天文官のいた首都の住人は本当に「皆既」を見たのであろうか. この問題に関する齋藤・小沢 (1992) の答えを表 II に掲載した. 齋藤・小沢の計算によると, どの「皆既食」も実は皆既食ではない. ほかの研究者も同様の意見を持っている. 「大体食分 0.9 ぐらいになると, 皆既と記したものと解してよいようである. この点でも「既」とある記録をそのまま受け入れるわけにはいかない」(渡邊敏夫, 日食・月食宝典, 1979).
著者は素朴に疑問に思う. 5 世紀から 9 世紀の間, 長安や洛陽の住民は皆既食を一度も見なかったのだろうか. この疑問が今回の研究のきっかけである. 皆既帯が緯度線にほぼ平行で, 皆既帯を東西にずらしても長安あるいは洛陽が決して皆既帯に入らない日食もある. たとえば 754 年 6 月 25 日の日食である. この場合, たしかに, 「皆既」記事は誇張であろう. 皆既食帯が緯度線を斜めに横切る場合は, 異なるパラメータで再計算してみる価値はある. パラメータの値を変えても皆既帯が東西にしかずれない理由は 2.1 節参照.

1.4 Stephenson(1997) の結果 − 研究の発端

Stephenson(1997) のグラフ (1997, p. 508) で 600 年前後の日月食の結果を見ると，585 年から 596 年の中国における月食の結果 (これらの個々の数値は p. 301 の表に掲載されている) からは $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}=5000$ sec 前後の大きな値が得られているのに対して，680 年ころの中国の日食の結果 (グラフ上の× 印) からは $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}=2000$ sec 前後の値が得られていて，滑らかな曲線は日食の結果からはずれ，月食の結果に合うように引かれていることがわかる．628 年の日本の日食の記録はこれらの日食の記録とほぼ一致しており，その結果滑らかな曲線からはずれているのである．そこで日食と月食の結果がどうして食い違っているのかが問題になる．

2 日月食と地球自転速度の永年変化

日食・月食は太陽・地球・月が一直線上に来ることによって起こる現象である. 太陽まわりの地球の公転運動, 地球まわりの月の公転運動, 地球の自転運動がどれも不変であれば, 日月食

は周期的あるいは準周期的に生起する. 上記 3 つの運動が永年的に変化すると, 日月食の起こり方は準周期的でなくなる. 以下では, この三千年間, 太陽まわりの地球の公転運動は不変であるとして (歳差, 章動などを無視するわけではない), 残りの 2 つの運動が永年的に変化した場合の日月食の生起の永年変化を定性的に調べる.

現代の理論からは計算できないのが, 数千年間の地球自転の遅れと, 月の永年加速量である. われわれは, 月が遠ざからないとして計算した地球まわりの月の公転運動を得ることができる. また地球自転は変化しないとする.

地球自転の永年変化, 月距離の永年変化に関してはそれぞれ, 40 年 (国際極運動事業), 20 年程度 (月レーザー測距) のデータしかない. つまり, 永年変化の瞬間値しか知ることができない. その値が 2000 年, 3000 年にわたって正しい保証はない.

2.1 地球自転減速と月の永年加速項の効果

この節で記述することはすべて知られていることである. 記述を一貫したものにするために付け加えた.

2.1.1 永年変化なしの場合

われわれは過去の日食の生起場所, 時刻, 継続時間などを計算することができる. この場合, 歴史記録はわれわれの計算のチェックにしか使えない. 「永年変化なし」は現実ではない.

2.1.2 地球自転が遅くなる場合

過去, 地球自転が速いとする. ただし, その変化は定量的にはわからないとする. 一方, 月の公転速度はいまと変わらないとする. 太陽系を北から見る. 簡単のため, 地軸は傾いていないとし, 地球の北極の真上から物事を見る. 地球の自転を巻き戻す. 過去 (例えば 1000 年前のある月のある日) に皆既日食が, ある場所で観測されたとする. (その日食が記録されていることを意味する.) 過去の日食記録が有用となる.

地球の公転運動, 月の公転運動は現在の理論で過去に戻れるので, 一様時間で見て, 地球・月・太陽が一直線上に来る時刻は計算可能である. 問題は, その時刻に地球のどの部分が日食の場所に来るかである. 過去の方が自転が速いので, 自転が一定であると考えて巻き戻す場合よりも, 余分に (西へ) 巻き戻す必要がある. したがって, 予想 (自転が一定であるとした場合) よりも東で日食が起きる.

一様に流れる時間で測った時刻を TT, 地球の自転が変わらないとして流れる時間で測った時刻を UT とし, 近代のある時に時計合わせをしておく. すると, それ以前には UT の進みが速いから, 時刻にすると, UT の値が小さい.

$$\Delta T = \mathrm{TT} - \mathrm{UT}$$

この時刻の差は, 1 時間に 15° 自転するとして, 実際の日食点と予想した日食点の回転角度の差である. その際, この 1 時間を TT で測ろうと, UT で測ろうと違いはない. ここ数千年では自転速度の差は非常に小さい.

当時の ΔT を求めるには, 観測地点が皆既帯の西端に来る場合と東端にくる場合を両極端として, その中間の ΔT がすべて可能である. 日食の継続時間の記録があれば, もっと絞り込める.

2.1.3 月公転が遅くなる場合

過去, 月公転が速いとする. ただし, その変化は定量的にはわからないとする. 一方, 地球の自転速度はいまと変わらないとする. 前節と同様な視点で日食の場所を推定する.

月公転が今も昔も変わらないとして日食を予想する. 太陽・月・地球が一直線上にあり, 観測点が本影に入るはずである. ところが, 過去, 月の公転は速かった. だから時間を巻き戻すと, 月は予想より西にいる. 月の位置が予想と少ししかずれていないとする. 過去数千年間はこれが成り立つ. すると, 月は太陽からの平行光線の中にいる. 月の影は西にできる. つまり, 月の公転速度が過去ほど速いことの効果は, 過去の日食が予想より西に起こることである. これは地球自転減速の効果と逆であることに注意しよう.

2.1.4 地球自転が遅くなり, 月公転が遅くなる場合

この場合, 地球自転が遅くなる効果で, 日食地点は予想より東に来る. 月公転が遅くなる効果で, 日食地点は予想より, 西に来る. 併せた効果を知るには, 地球自転の遅くなる割合と, 月公転の遅くなる割合の関係を求める必要がある.

地球・月系の角運動量保存を考える. 簡単のため, 地球・月系の重心の動きは等速直線運動であるとする. 地球, 月の質量をそれぞれ $M_\oplus$, $M_{\rm moon}$ と書く. $M_t = M_\oplus + M_{\rm moon}$ と書く. 地球・月間の平均距離を R とする. 地球・月系の重心を O と書く. O に関する地球・月系の全角運動量を L_t, 共通重心 O に関する地球重心, 月重心の角運動量を $L_\oplus^{\rm orb}$, $L_{\rm moon}^{\rm orb}$, また, 地球重心, 月重心のまわりのそれぞれのスピン角運動量を $L_\oplus^{\rm spin}$, $L_{\rm moon}^{\rm spin}$ と書くと,

$$L_t = L_\oplus^{\rm orb} + L_{\rm moon}^{\rm orb} + L_\oplus^{\rm spin} + L_{\rm moon}^{\rm spin}.$$

以下, 右辺各項の表現を求める. 簡単のため, 地球・月の相互運動は円運動であるとする. 地球・月系の互いの重心のまわりの公転運動の周期 (または平均運動) を求めよう.

$$GM_t = n^2R^3 \quad \text{または} \quad n = \sqrt{\frac{GM_t}{R^3}}.$$

すると, $\mu = M_\oplus M_{\rm moon}/M_t$ と置いて

$$L_\oplus^{\rm orb} = M_\oplus \left(\frac{M_{\rm moon}}{M_t}R\right)^2 n = \mu M_{\rm moon}\sqrt{\frac{GR}{M_t}},$$
$$L_{\rm moon}^{\rm orb} = M_{\rm moon} \left(\frac{M_\oplus}{M_t}R\right)^2 n = \mu M_\oplus \sqrt{\frac{GR}{M_t}}.$$

両者を加えると,

$$L_\oplus^{\rm orb} + L_{\rm moon}^{\rm orb} \quad = \mu\sqrt{GRM_t}.$$

一方, 自転角運動量は, 自転角速度をそれぞれ $\omega_\oplus$, $\omega_{\rm moon}$ とし, 慣性モーメントをそれぞれ $I_\oplus$, $I_{\rm moon}$ として

$$L_\oplus^{\rm spin} = I_\oplus \omega_\oplus,$$
$$L_{\rm moon}^{\rm spin} = I_{\rm moon}\omega_{\rm moon}.$$

各項の大きさを見積もる. $G = 6.672\times10^{-11}{\rm MKS}$, $R = 3.844\times10^{8}{\rm m}$, $M_\oplus = 5.974\times10^{24}{\rm kg}$, $M_{\rm moon} = 1.23\times10^{-2}M_\oplus$, 球と考えて, $I_\oplus = \frac{2}{5}M_\oplus r_\oplus^2$, $I_{\rm moon} = \frac{2}{5}M_{\rm moon}r_{\rm moon}^2$, ただし, $r_\oplus, r_{\rm moon}$ は地球および月の半径, $\omega_\oplus = 2\pi/(24\,\text{時間})$, $\omega_{\rm moon} = 2\pi/(27.3\,\text{日})$. MKS 単位で,

$$L_\oplus^{\rm orb} = 3.47\times10^{32},\quad L_{\rm moon}^{\rm orb} = 2.82\times10^{34},\quad L_\oplus^{\rm spin} = 7.07\times10^{33},\quad L_{\rm moon}^{\rm spin} = 2.37\times10^{29}$$

これからわかるとおり,

(地球・月重心のまわりの) 月の公転角運動量 $>$ 地球の自転角運動量 $>$
(地球・月重心のまわりの) 地球の公転角運動量 $>$ 月の自転角運動量.

さて, 月が永年的に遠ざかり, 地球自転が徐々に遅くなる場合の, 角運動量の再配分のされ方を見ることにより, この節の目的を達成しよう.

$$L_t = \mu\sqrt{GRM_t} + I_\oplus\omega_\oplus + I_{\rm moon}\omega_{\rm moon},$$

を時間で微分して, 全角運動量が保存されることを考慮すると,

$$0 = \frac{\mu}{2}\sqrt{\frac{GM_t}{R}}\dot{R} + I_\oplus\dot{\omega}_\oplus + I_{\rm moon}\dot{\omega}_{\rm moon}.$$

ケプラーの第三法則を時間で微分して

$$2\dot{n}R = -3n\dot{R}\quad \text{または}\quad \dot{R} = -\frac{2}{3}R^2\sqrt{\frac{R}{GM_t}}.$$

これらを上式に代入すると

$$I_\oplus\dot{\omega}_\oplus = \frac{\mu}{3}R^2\dot{n} - I_{\rm moon}\dot{\omega}_{\rm moon},$$

あるいは

$$\dot{\omega}_\oplus = \frac{5}{6}\left(\frac{M_{\rm moon}}{M_t}\right)\left(\frac{R^2}{r_\oplus^2}\right)\dot{n} - \left(\frac{M_{\rm moon}}{M_\oplus}\right)\left(\frac{r_{\rm moon}^2}{r_\oplus^2}\right)\dot{\omega}_{\rm moon}.$$

月の自転が公転周期にロックされていると考えれば, $\dot{\omega}_{\rm moon} = \dot{n}$ である. その場合には,

$$\dot{\omega}_\oplus = \left[\frac{5}{6}\left(\frac{M_{\rm moon}}{M_t}\right)\left(\frac{R^2}{r_\oplus^2}\right) - \left(\frac{M_{\rm moon}}{M_\oplus}\right)\left(\frac{r_{\rm moon}^2}{r_\oplus^2}\right)\right]\dot{n}.$$

$\dot{\omega}_\oplus$ と $\dot{n}$ の関係式である. これが求めるものであった. 数値を入れると

$$\dot{\omega}_\oplus = \left(36.8 - 9.1\times10^{-4}\right)\dot{n} \simeq 36.8\dot{n}.$$

第二項の影響は 4 桁ほど小さい. それゆえ, 3 桁の精度の話をするなら, 月の自転が公転周期にロックされていると考える必要はない.

2.2 ΔT と月の永年加速

2.1.4 節において, 簡単な近似のもとで, 地球自転速度の変化率と月公転速度の変化率に簡単な関係があることがわかった.

いま過去のある時点における ΔT が判ったとする. そのときの月の公転速度は判るか? これが問題. 同じことだが, 地球自転速度はわかるか. 判らない. これが答えである. 複数の日付のデータがあれば, その限りでない.

そこで, ここでは地球自転鈍化の効果で皆既帯が東にずれる効果と同等な月公転の鈍化の効果を求めよう. 月は太陽平行光線の中を動くと考えてよいから, 月が軌道上で動いた距離は地上で月の影が動いた距離である. 月が軌道上 1 秒角動くと, 月の影は地上で 1.86km 動く. 地球自転を赤道上で測ると, 1 秒間に 0.463km である. つまり ΔT の 1 秒は 0.463km. 月の軌道上の 1 秒角は ΔT の 4.0 秒に対応する. したがって, たとえば, ΔT の 2000 秒は月の軌道上の位置の違いで 500 秒角に相当する.

2.3 日食と月食の結果の不一致と月の潮汐項の効果

月食観測から得られた TT − UT の値は記録にある月食の開始・終了などの時刻を現在の暦から計算した時刻と比較して求めたものである．それに対して日食の方は (当時の中国の日食については Stephenson の本 (1997) や論文 (Stephenson and Morrison, 1995) に詳しい記述がなく実際の記録が未調査なのではっきりしないが，少なくとも 628 年の日本の日食については) 時刻観測ではなく，皆既食の見られた場所から TT − UT の値が推定されている．そこで，当時の夜間における時刻観測の精度なども検討する必要があると思うが，ここでは，月の運動理論にまだ不確定性が残っている月の黄経の潮汐項がこれらの決定に及ぼす効果について考察しておく．

月の黄経の潮汐項としてはこれまで次のような値が得られていた．T は 100 年単位で測った時間である．

Spencer Jones (1939)	$-11''.22T^2$	(Moon vs planets)
Van Flandern (1970)	$(-28'' \pm 8'')T^2$	(Moon vs Brown)
Morrison (1973)	$(-21'' \pm 3'')T^2$	(Moon vs Brown)
Van Flandern (1975)	$(-32''.5 \pm 9'')T^2$	(Moon vs Num. Int.)
Morrison & Ward (1975)	$(-13'' \pm 1'')T^2$	(Moon vs Mercury Transits)
Calame & Mulholland (1978)	$(-12''.3 \pm 2''.5)T^2$	(LLR)
Williams et al. (1978)	$(-11''.9 \pm 2''.0)T^2$	(LLR)
Ferrari et al. (1980)	$(-11''.9 \pm 1''.3)T^2$	(LLR)
Dickey et al. (1982)	$(-11''.9 \pm 0''.8)T^2$	(LLR)
Dickey et al. (1994)	$(-12''.94 \pm 0''.25)T^2$	(LLR)

現在の潮汐項の採用値は $-13''T^2$ である. 暦による潮汐項の差の例として，DE200 と DE405 の月の位置の差を 1600 年から 2000 年まで 50 年毎に示しておく．

DE405 - DE200　　Moon

date			long	lat	dist	d-long	d-lat	d-dist
			o	o	au	"	"	km
1600	1	1	104.77143	+1.41719	0.002561	-40.91810	+3.67448	-3.48105
1650	1	0	245.58877	-0.85420	0.002415	-25.18135	+2.29119	+0.83199
1700	1	0	26.53991	-3.28175	0.002557	-10.42751	+0.71961	+1.42244
1750	1	0	180.28823	-5.20741	0.002703	-4.47492	+0.09208	+0.07907
1800	1	0	335.71660	-4.33024	0.002589	-2.98036	-0.17168	-0.37561
1850	1	0	119.43714	-2.18999	0.002395	-1.80050	-0.15803	-0.09627
1900	1	0	258.26803	-0.18464	0.002492	-0.61495	-0.06873	+0.05555
1950	1	0	49.31906	+3.00530	0.002689	-0.06852	-0.01840	-0.00134
2000	1	0	205.08024	+5.17687	0.002655	-0.04320	+0.01766	-0.00966

例えば，DE406 の潮汐項への補正として $-2''.0T^2$ を採用して計算すると，600 年ころの月食の時刻は 10 分程度異なるだけであり，当時の時刻観測精度からして無視できる量であるが，皆既日食の見られた場所は大きく異なり，628 年の日食に対しては $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}$ の値を 1000 sec 大きくして $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}=3000$ sec としないと日本で見られたことにならない．これにより当時の日食と月食の結果から得られた $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}$ の値の不一致は解消されることになる．現在の月の暦の潮汐項に $-2''.0T^2$ もの補正が必要だというのは現在の月レーザー測距データとは相容れないが, この事実は過去千数百年間に潮汐項が変化した可能性を示唆している.

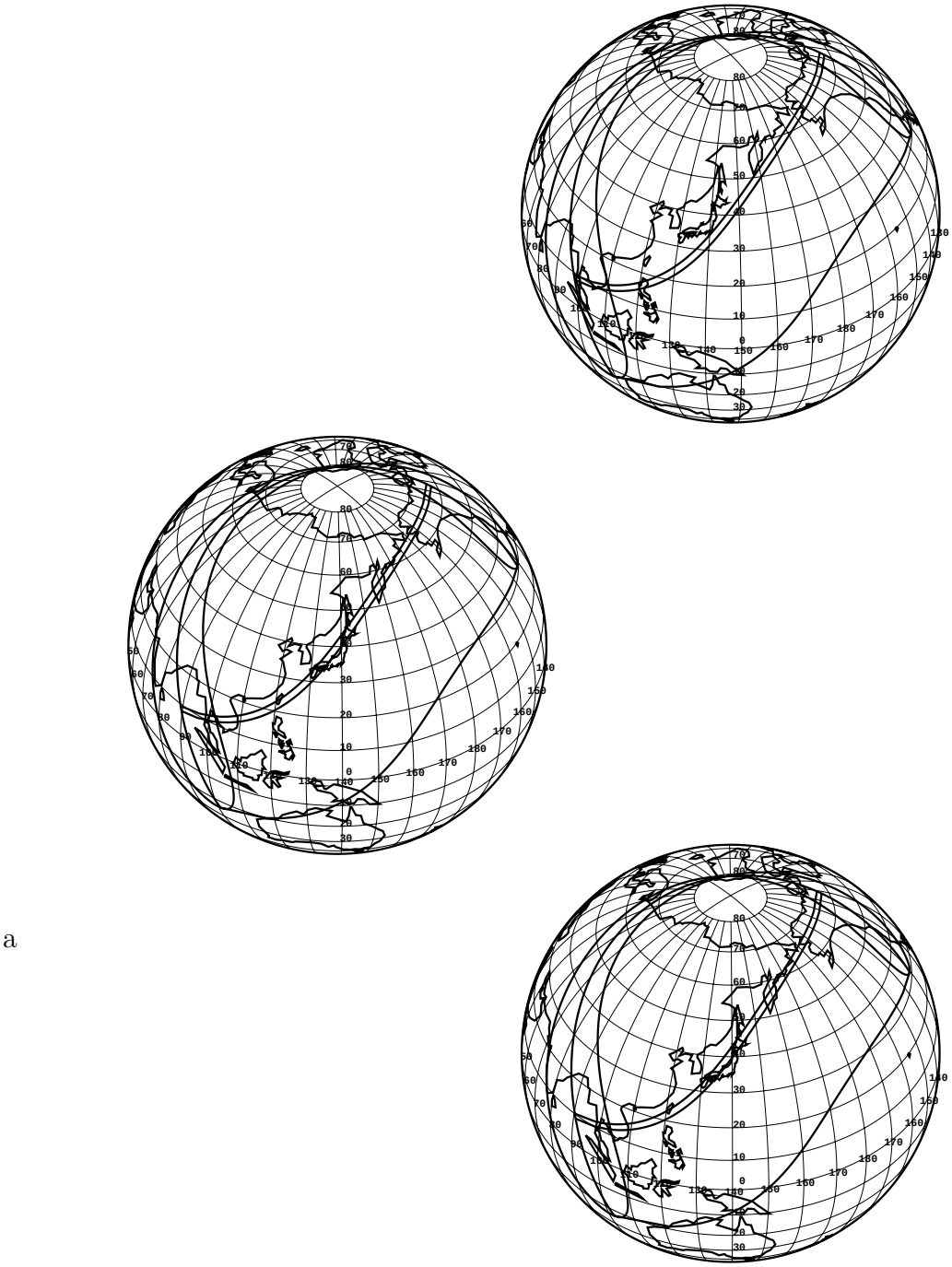
3　検証

3.1　日食

推古天皇 36 年の皆既日食は $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}$ として Stephenson による 4000 sec を仮定すると斎藤らの言うように皆既帯が太平洋上を通り，日本では部分食になる．これを $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}=2000$ sec とすると日本書紀にいうように日本で皆既日食が見られたことになる．ただし，この場合，1.4 節で述べたように，日食と月食から求めた $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}$ の値に大きな隔たりがある．そこで，月の暦の潮汐項に $-2''.0T^2$ の補正を加えてみる．先にも述べたように，この補正では月食から求めた $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}$ の値には大きな変化がない．しかし日食については，$\mathrm{TT}-\mathrm{UT}=3000$ sec 程度の値を仮定しないと日本で皆既日食が見られたことにはならない．これによって，日食と月食による $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}$ の値の不一致はかなり解消されることになる．結果は図 1 に示した.

3.2　星食による検証

古記録の中には月が惑星や恒星を隠す星食もある．星食が見られる範囲は部分日食と同様に一般に広いため，パラメータの値を求めるのに役立つものは少ないが，限界線に近いところで起きるものでは役に立つものがある．ここでは，そのような現象のうち，681 年 11 月 3 日の火星食が我々の議論に重要な役割を果たすことが判明したので紹介しておく．



a

図 1: The solar eclipse on Arpil 10, 628(The second day, the third month, the thirty sixth year of Empress Suiko). Shown are the bands of total eclipse. From the top, $\Delta T = \mathrm{TT} - \mathrm{UT} =$ 4000s, Corr. to tidal term = 0"T^2; $\Delta T = 2000$s, Corr. to tidal term = 0"T^2 ; $\Delta T = 3000$s, Corr. to tidal term = -2"T^2.

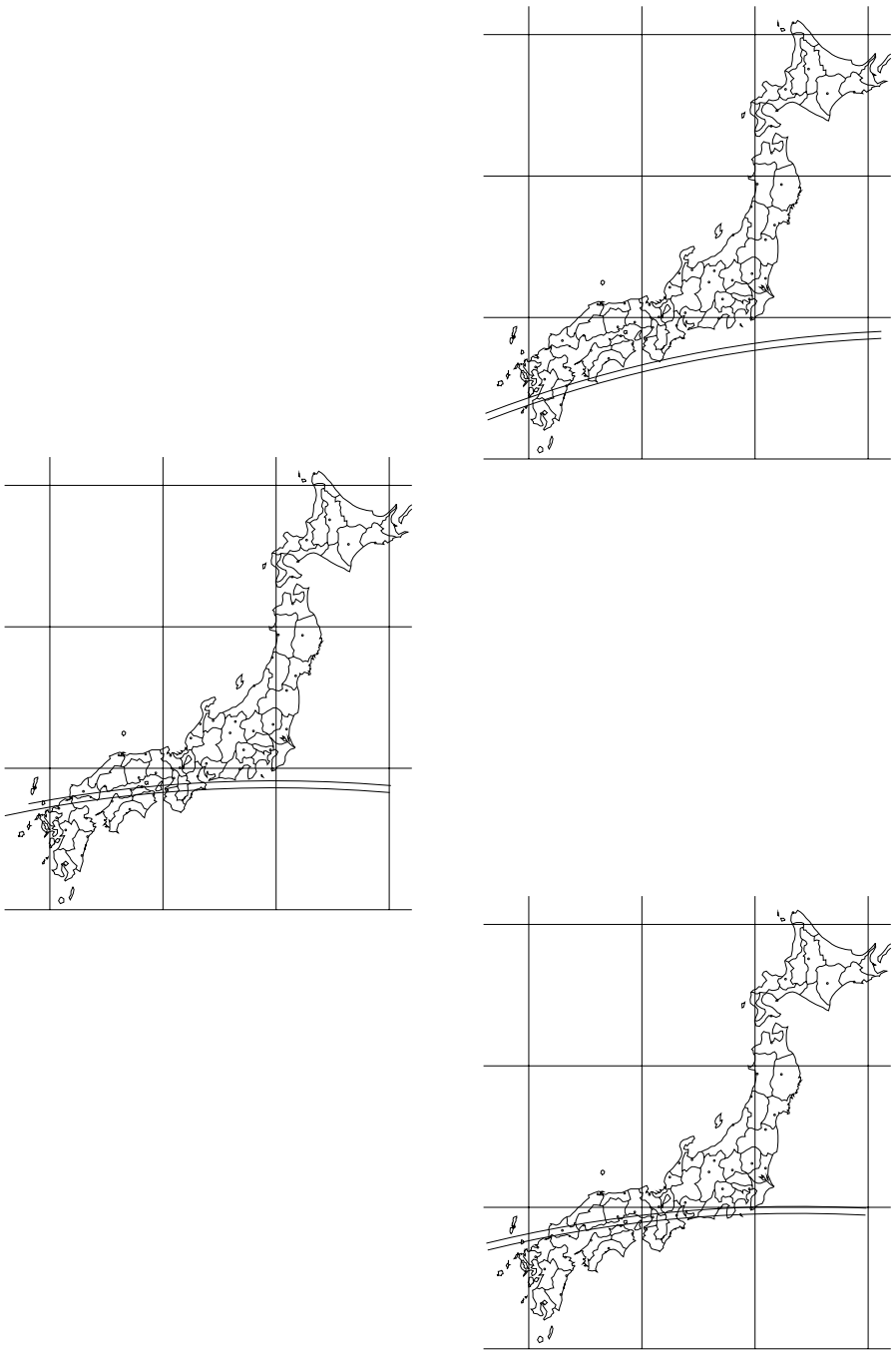


図 2: Occultation of Mars by the Moon on November 3, 681. Shown are the bands of partial eclipse. The total occultation took place to the south of the band. From the top, ΔT = TT − UT = 4000s, Corr. to tidal term = 0”T^2; ΔT = 2000s, Corr. to tidal term = 0”T^2; ΔT = 3000s, Corr. to tidal term = -2”T^2.

日本書紀には「天武天皇 10 年 9 月癸丑，螢或月に入る」(「螢」の「虫」は「火」) とある．斎藤 (1982b, p.14) は「螢或とは火星のこと．この夜の光度は -1.3 等，月齢 17.3 日，月の見かけの半径 $0°.28$．計算によると，ユリウス暦 XI 4, 2h a.m. に螢或が月の北へりの外 $0°.04$ のへんを通過したことになる．『日本書紀』原文には「入月」とあるが，実はわずかにはずれて「犯」である．観測者は，月齢 17.3 日の月体の明るさに幻惑されて，食と見誤ったのであろう」としている．月が月齢 17.3 日 (満月から約 2 日後) の明るさだったとしても，-1.3 等の火星を月の縁から $0°.04$ で見失うというのは不自然に思える．確かに現在の月の潮汐項を採用し，$\mathrm{TT}-\mathrm{UT}=4000\mathrm{sec}$ とすれば日本では九州南部などを省いて食にならないが，$\mathrm{TT}-\mathrm{UT}=2000\mathrm{sec}$ とすると近畿南部でも星食が見られたことになるし，さらに潮汐項に $-2''/\mathrm{cy}^2$ の補正を施して $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}=3000\mathrm{sec}$ とすれば飛鳥地方でも食が見られたことになるのである．日本書紀のこの星食記事は我々の仮定している $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}$ と潮汐項の値を支持しているのである．(図参照. なお, 図で, 2 本の線で挟まれた地域では火星の一部が月に隠され, それより南では完全に隠され, 北では食は見られない.)

4 議論

われわれは日本書紀の記事が必ずしも誇張表現でない可能性のあることを指摘したい.

その理由をまとめると,

1. $\mathrm{TT}-\mathrm{UT}=2000.0\mathrm{sec}$ とすれば西日本で皆既食になったはず. これは無理な値ではない.
2. 倭国は紀元 607 年に独立した (独立宣言を中国に送っている).
3. 日食 (628 年) だけでなく, 彗星 (634 年), 流星 (637 年), 月星接近 (640 年), 月食 (643 年) などの記録が始まっている. このことから, 天文官がいたと思われる (河鰭, 2001).
4. 倭国と通じていた百済の採用した元嘉暦を使っていた可能性が大きい (小川, 1997).

謝辞. 国立天文台の中村 士氏および杏林大学の横尾広光氏は参考文献を紹介し, 議論してくれた. ここに謝意を表する.

参考文献

1. 内田正男 編, 日本暦日原典, 雄山閣, 1975 年.
2. 渡辺敏夫, 日食月食宝典, 雄山閣, 1994 年 (1979 年).
3. 小川清彦, 日本書紀の暦日について, 小川清彦著作集-古天文・暦日の研究-(斎藤国治編著), 1997 年.
4. 神田 茂, 日本天文史料, 原書房, 昭和五十三年.
5. J.M. Steele, Observation and Predictions of Eclipse Times by Early Astronomers, Kluwer Academic Press, 2000.
6. F.R. Stephenson, Historical eclipses and earth's rotation, Cambridge University Press, 1997.
7. 斎藤国治, 星の古記録 (岩波新書, 1982a), 飛鳥時代の天文学 (河出書房新社, 1982b).

8. 齋藤國治, 小沢賢二, 中国古代の天文記録の検証, 雄山閣, 1992.

9. 薮内 清, 中国の天文暦法, 平凡社, 昭和 44 年.

10. 西嶋定生, 邪馬台国と倭国, 吉川弘文館, 平成 6 年.

11. 三国志, 陳寿 撰, 中華書局, 1959.

12. 南史, 李延寿 撰, 中華書局, 1975.

13. 隋書, 中華書局.

14. F.R. Stephenson and L.V. Morrison, Long-term fluctuations in the Earth's rotation: 700BC to AD1990 *Phil. Trans. R. astr. Soc. London* **A 351**, 163-202, 1995. (http://th.nao.ac.jp/~tanikawa/に翻訳あり.)

15. 河鰭公昭, Private communication, 2001.