PASJ: Publ. Astron. Soc. Japan , 1–??,
© 2008. Astronomical Society of Japan.

複数地点の日食観測から求めた ΔT および月運動の潮汐項

Kiyotaka TANIKAWA and Mitsuru SÔMA
National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588, Japan
tanikawa@exodus.mtk.nao.ac.jp, somamt@cc.nao.ac.jp

(Received 2004 May 17; accepted 2004 July 27)

Abstract

紀元前 188 年 7 月 17 日の日食は長安 (中国) とローマ (イタリア) で観測され記録された. 紀元 873 年 7 月 28 日の日食は ニシャプール (イラン) と京都 (日本) で観測され記録された. この日食はニシャプールでは金環であった。このような深い日食の複数記録は歴史上まれであり, また時計補正 ΔT や月潮汐加速 $\dot{n}$ を決めるのに有用である. ここでは, できる限り精密にこの 2 つのパラメータの範囲を決めるつもりである. 潮汐加速を $-25''.83/\mathrm{cy}^2$ と決めると, 最良の見積もりとして, 紀元前 188 年の日食およびそれと同時代の日食から 12581 秒 $< \Delta T <$ 12741 秒が得られ, 紀元 873 年の日食および同時代の日食から 3327 秒 $< \Delta T <$ 3498 秒が得られた.

Key words: 同時代日食: ΔT: 潮汐加速

1. 序

最近の一連の仕事 (Tanikawa & Sôma 2002, Tanikawa & Sôma 2004, Sôma, Tanikawa, & Kawabata 2004, Kawabata, Tanikawa, & Sôma 2004) により, ほぼ同時代の食や掩蔽などの天文観測が, 時計補正 $\Delta T = \mathrm{TT} - \mathrm{UT}$ と月運動の潮汐加速の同時決定にきわめて有用であることがわかった. 同時決定法は文献 Kawabata, Tanikawa, & Sôma (2004) に記述した. ΔT の長期変動の予備的結果は Sôma, Tanikawa, & Kawabata (2004) に与えた. 手法の有用性は時間差が小さいほど, 観測地の距離が大きいほど, そして食が深いほど増加する.

本報告では, われわれの手法を 紀元前 188 年 7 月 17 日と紀元 873 年 7 月 28 日の 2 つの日食に適用する. どちらの日食も数千 km 離れた複数の場所で観測された. 前者は長安とローマで観測され, 後者は京都とニシャプール (Nishapur, Iran) で観測された. 紀元前 188 年 7 月 17 日の日食の場合, ほかに同時代の食が 紀元前 198 年 8 月 7 日と紀元前 181 年 3 月 4 日にあり, 漢書に記録されている. どちらも長安で観測されたものである. 3 つの時間差はたったの 17 年であるので, われわれの手法から, パラメータ範囲が狭く得られることが期待できる. 紀元前 188 年 7 月 17 日の日食に関しては矛盾する記録が中国にあるが, その矛盾を解いた. すなわち, 本紀では皆既と書き, 五行志では ほぼ皆既という. われわれの解析によると, 日食は長安でほぼ皆既であった. そこで, ' ほぼ皆既' とは食分としてどの範囲を言うかについて解析した. 今回の解析結果は, Sôma, Tanikawa, & Kawabata (2004) の結果の改良になっている. その論文では紀元前 188 年 7 月 17 日の日食は単独で解析した.

紀元 873 年 7 月 28 日の日食の場合, ほぼ同時代のものとして, 紀元 822 年 4 月 25 日の日食が 舊唐書と新唐書に記録され, 紀元 975 年 8 月 10 日の日食が日本紀略やほかの日本の書物に記録されている. とはいえ, 最終的には紀元 822 年 4 月 25 日と紀元 873 年 7 月 28 日の日食のみパラメータの決定に使ったので, 時間差は 51 年までに縮まる. 紀元 822 年 4 月 25 日の日食に関する舊唐書の記録には, 余分な記述がある. すなわち,「不盡者四之一, 燕趙見之, 既」, つまり,「4 分の 1 が欠けずに残った. 燕や趙では皆既であった」とある. この記述を独立な記録として扱ってパラメータ決定に利用する. これをするにあたって,「不盡者四之一」の意味に関してある解釈を提案する.

中国のデータに関しては, 四庫全書 Siku Quanshu (1999) の電子版を使って探索し, データは中華書局出版の漢書および舊唐書と新唐書から取った. 日本のデータは Kanda (1935) から取った. 本報告では, 月太陽の暦は JPL の DE406 (Standish 1998) から取り, 地球の歳差や恒星時に関しては, Williams (1994) の公式を使用した.

2. ΔT と潮汐加速の決定

2.1. 紀元前 *188* 年 *7*月 *17*日の日食

紀元前 188 年 7 月 17 日の日食 (オッポルツアー番号 2425) は長安とローマで観測された. 観測地の地理学位置は表に記載した. 中国の記録は天文学者によって書かれた公式のものであり, 一方ローマの記録は重要な政治的事件に付随する記述として, 天文学者ではない人物によって書かれた. この日食に加えて, ほぼ同時代の 2 つの日食を解析してパラメータ決定の信頼性を上げるつもりである. これらは紀元前 198 年 8 月 7 日と紀元前 181 年 3 月 4 日の日食である. どちらも漢書に記録があり, 皆既と記されている. 観測は長安で行なわれたとみなす. 以上 3 つの日食においては ΔT と $\dot{n}$ が共通であったと仮定する.

記録が何と言っているかさっそく見てみよう. 紀元前 188 年 7 月 17 日の日食に関する漢書の記述は以下のとおりである.

(1a) 漢書巻二 (恵帝七年) 夏五月丁卯 [4] [a], 日有蝕之, 既. (師古[b] 曰「既, 盡也」)

[a] 数字は甲子 [1] から始まる干支の通算番号.
[b] 顔師古 (581 - 645) は唐王朝初期の著述家.

(1b) 漢書巻二十七下之下 五行志第七下之下
(恵帝七年) 五月丁卯, 先晦一日, 日有食之, 幾盡, 在七星初.

本紀の記述と五行志の記述が異なっている. 本紀では' 既'

Table 1. 観測地の経緯度

City		longitude °	latitude °
Changan	長安	108.9	34.3
Rome		12.2	41.8
Beijing	北京	116.4	39.9
Shijiazhuang	石家荘	114.5	38.1
Nishapur		58.8	36.2
Kyoto	京都	135.8	35.0

とあり, 五行志では' 幾盡' とある. 当面, 食分に関しては結論を出さずにこのままにしておく.

次に, 紀元前 188 年 7 月 17 日の日食に関するローマの記録が言うところに耳を傾けよう. これは Stephenson (1997, p.367) に引用されている. それを再現すると,

> (1c) Then, when Marcus Valerius Messala and Gaius Livius Salinator had been inaugurated as consuls on the Ides of March, they consulted the senate... Before the new magistrates (i.e. the consuls) departed for their provinces, a three-day period of prayer was proclaimed in the name of the College of Decemvirs at all the street corner shrines because in the daytime, between about the third and fourth hours, darkness had covered everything (*tenebrae obortae fuerant*).
> その後, マークス バレリウス メッサラとガイウス リビウス サリナトールは三月のイデスにコンスルとして就任するとき, 元老院に意見を求めた... 新しい執政官 (すなわち コンスル) が自分達の属州に帰る前に, 祈りのための 3 日間が, すべての街角の神社において 10 大官 college の名で宣言された. なぜなら, 昼間, 第三時と第四時の間に, すべてが暗闇に包まれたからである (*tenebrae obortae fuerant*).
>
> [Livy, XXXVIII 36,4; trans. Sage(1936, vol.XI, pp. 117-119).]

Stephenson が彼の本 (1997) で言うには, 「紀元前 188 年の食がローマにおける昼の間の暗闇の原因であろうが, 状況はあまりにも曖昧で, この記録から ΔT の範囲を出すことを保証してはくれない」われわれは, この日食から意味のあるパラメータ値を引き出したい. そこで, 図 1 には, $\Delta T = 12600$ 秒, $\dot{n} = -25''.83/\mathrm{cy}^2$ を仮定したときの皆既帯と部分食帯の位置を図示した. 2 つの× 印はローマと長安の位置を示す. この図は予備的なものである. なぜなら, ここで採用したパラメータ値が予備的だからである. しかし, ローマと長安での深い食の間に強い相関があることが見てとれる. 経度差を考慮すると, ローマでは食が朝に観測され, 長安では食が午後に観測されたことは明らかである. また, 両観測地で皆既であることが不可能であることも明らかである. 加えて, $\Delta T > 16000$ 秒とすると, ローマでは最大食は日の出前になる.

次のデータは紀元前 198 年 8 月 7 日 (オッポルツアー番号 2402) の日食の漢書の記録である. 観測地は長安であると考えられる. 本紀によると食は皆既でない. 五行志では皆既である. (古代中国では, 金環食は「既」と記録されたことを注意しておく.)

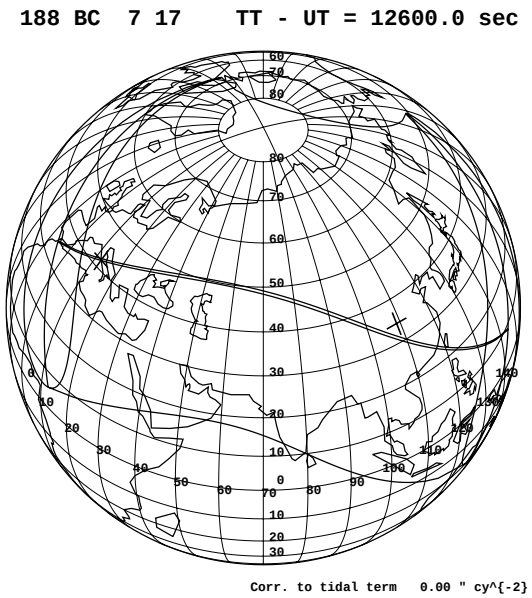

Fig. 1. 紀元前 188 年 7 月 17 日の日食の皆既日食帯. × 印は長安とローマを示す.

(2a) 漢書巻一下 (高帝九年) 夏六月乙未晦 [32], 日有食之.

(2b) 漢書巻二十七下之下 五行志第七下之下
(高帝九年) 六月乙未晦 [32], 日有食之, 既, 在張十三度.

以下に続くのは, 紀元前 181 年 3 月 4 日 (オッポルツアー番号 2441) の, これも漢書の日食記録である. 観測は長安で行なわれたと考える. 本紀にも五行志にも食は皆既と記されている.

(3a) 漢書巻三 (高后七年) 正月己丑晦 [26], 日有蝕之, 既.

(3b) 漢書巻二十七下之下 五行志第七下之下
(高后七年) 正月己丑晦 [26], 日有食之, 既, 在営室九度.

上記 4 つの食データを使って紀元前 188 年あたりのパラメータ ΔT と $\dot{n}$ を見積もることにしよう. 表 2 は, 潮汐加速の関数としての ΔT の範囲を, 紀元前 188 年 7 月 17 日日食に対して示したものである. ただし, 各観測地で食は皆既であったとした. 第一欄は, 潮汐加速 $\dot{n} = -25''.83/\mathrm{cy}^2$ への補正 $\Delta\dot{n}$ を示す (以後は, $\Delta\dot{n}$ を単に潮汐加速への補正とよぶことにする). だから, たとえば, $\Delta\dot{n} = +2''.0/\mathrm{cy}^2$ は $\dot{n} = -23''.83/\mathrm{cy}^2$ のことである. この約束は以下でずっと用いる. この値 $\dot{n} = -25''.83/\mathrm{cy}^2$ は DE406 に固有のもので

Table 2. 紀元前 188 年 7 月 17 日の日食の場合の，潮汐加速の関数としての ΔT の範囲.

$\Delta\dot{n}$	紀元前 188 年 7 月 17 日	紀元前 188 年 7 月 17 日
	長安	ローマ
$''/$ 世紀^2	秒	秒
+4.0	11181 – 11486	12136 – 12419
+2.0	12461 – 12768	12361 – 12660
0.0	13735 – 14044	12581 – 12898
−2.0	15004 – 15316	12795 – 13131
−4.0	16268 – 16584	12997 – 13356
−6.0	17530 – 17849	13185 – 13570
−8.0	18788 – 19111	13351 – 13769
−10.0	20045 – 20373	13488 – 13945

Table 3. 紀元前 188 年 7 月 17 日の日食と紀元前 181 年 3 月 4 日日食の場合の，潮汐加速の関数としての ΔT の範囲.

$\Delta\dot{n}$	紀元前 198 年 8 月 7 日		紀元前 181 年 3 月 4 日
	長安 (A)		長安 (T)
$\frac{''}{\mathrm{cy}^2}$	秒		秒
+4.0	–		11201 – 12096
+3.0	–		
+2.8	7238 – 8840		
+2.4	6798 – 9743		
+2.0	6575 – 10430		11517 – 12426
−0.0	6232 – 13090		11816 – 12741
−0.6	6231 – 13787		
−0.8	6236 – 9597	9967 – 14014	
−1.2	6253 – 8780	11246 – 14461	
−1.6	6278 – 8504	11983 – 14900	
−2.0	6310 – 8341	12607 – 15331	12094 – 13039
−4.0	6551 – 8097	15162 – 17414	12349 – 13317
−6.0	6878 – 8210	17361 – 19412	12576 – 13571
−8.0	7258 – 8468	19417 – 21359	12771 – 13798
−10.0	7673 – 8808	21393 – 23274	12927 – 13993

あり, 最近の月レーザー測距 (LLR, Lunar Laser Ranging) 観測と合う値である (Chapront et al. 2003). 第二欄と第三欄は, 同じ日食を長安とローマで観測したときに食が皆既になるための ΔT の範囲である. 同様に表 3 で, 第一欄は潮汐加速への補正, 第二欄と第三欄は 紀元前 198 年 8 月 7 日日食からの ΔT の範囲であり, 第四欄は紀元前 181 年 3 月 4 日の日食からの ΔT の範囲である. 紀元前 198 年 8 月 7 日の日食は長安で金環であった. 表 3 で, (T) は皆既, (A) は金環を表す.

図 2 には表 2 と 3 の条件を図示した. 仮定したのは, 紀元前 198 年と紀元前 181 年の間に ΔT も潮汐加速も変化しないことである. 最初に気づくのは, 日食のぜんぶが皆既または金環ではあり得ないことである. というのは, $(\Delta\dot{n}, \Delta T)$ 面で, 4 本の皆既帯の共通部分は空だからである. 紀元前 188 年の日食は, 漢書の本紀では皆既とされているが, 五行志では, ほぼ皆既 (幾盡) と書かれている. 後者が真実を述べていると取るのがもっともらしい. なぜなら, 皆既は決してほぼ皆既とは書かれないであろうからである. 紀元前 181 年の長安の日食が皆既と解釈できるのは, 本紀にも五行志にも皆既と書いてあるからである. この解釈の正しさは, 紀元前 188 年 7 月 17 日の日食のローマでの観測により強められる. 事実, ローマでの日食が皆既なら, 紀元前 181 年の長安での日食はほぼ自動的に皆既になる. というのは, $(\Delta\dot{n}, \Delta T)$ 面の後者の日食の皆既食帯は前者の皆既食帯を含んでしまうからである (図 2). 紀元前 198 年の日食の漢書の 2 つの記録は完全には一致しない. 五行志の記述の方が詳しい. この日食が長安で金環であったと考えたい. その理由は, それ以外の場合には, 図 2 の 1 点鎖線の左右の外側で観測したことになり, 潮汐加速の値が $-25''.83/\mathrm{cy}^2$ から大きくずれてしまうからである. (図 2 を見よ).

上記考察から導かれる結論を, 紀元前 198 年と紀元前 181 年の日食は少くとも, 長安においてそれぞれ金環および皆既であり, 加えて, 紀元前 188 年のローマの日食は皆既である, としたい. 長安において紀元前 198 年日食が金環で, 紀元前 181 年日食が皆既である条件から, ΔT の範囲

$$11654 \text{ sec } < \Delta T < 13092 \text{ sec} \tag{1}$$

を得る. $\dot{n}$ の範囲は $-28''.23/\mathrm{cy}^2 < \dot{n} < -24''.73/\mathrm{cy}^2$ である. これに, 紀元前 188 年日食がローマで皆既であったとする条件を加えると,

$$12535 \text{ sec } < \Delta T < 13092 \text{ sec.} \tag{2}$$

を得る. こうして, ΔT の範囲は狭くなる. 公式には, 潮汐加速の範囲は $-28''.23/\mathrm{cy}^2$ と $-25''.43/\mathrm{cy}^2$ の間にある. この項を $-25''.83/\mathrm{cy}^2$ に決めれば, ΔT の範囲は, ローマの記録を含めなければ

$$11816 \text{ sec } < \Delta T < 12741 \text{ sec,} \tag{3}$$

となり, ローマの記録を考慮すれば

$$12581 \text{ sec } < \Delta T < 12741 \text{ sec,} \tag{4}$$

となる.

最後に, 紀元前 188 年 7 月 17 日の日食の' 幾盡' の食分の大きさを見積もろう. 潮汐加速が $-25''.49/\mathrm{cy}^2$ であって, $\Delta T = 12689$ 秒のときに最大食分 0.947 が紀元前 188 年 7 月 17 日世界時 07:48.6 に達成される. 潮汐加速が $-27''.97/\mathrm{cy}^2$ であって, $\Delta T = 12810$ 秒のとき, 最小食分 0.857 が紀元前 188 年 7 月 17 日世界時 08:08.0 に達成される. もっとも確からしい値は, 潮汐加速として $-25''.83/\mathrm{cy}^2$, また $\Delta T = 12661$ を採用したときに得られる. そのときの食分は紀元前 188 年 7 月 17 日世界時 07:52.2 の 0.932 である. だから, いまの場合, 食がほぼ皆既と言われるのは, 食分が 0.93 以上のときであろう.

2.2. 紀元 *873* 年の日食

紀元 873 年 7 月 28 日の日食は, オッポルツアー番号 4955 であって, イランの北の都市ニシャプールと日本の京都で観測された. 観測値の経緯度は表 1 に記載した. この日食についての日本のデータは三代實録や日本紀略に記載されている. 前者によると以下のとおりである.

(4a) 秋七月癸亥朔, 日蝕無光, 虧昃如月初生, 自午至未乃復

一般的な注釈を述べるなら, この時期の日本の歴史書は多数の食を記載しているけれども, ほとんどが予想されたものである. 記録は簡単に「日蝕」とか「日有蝕之」と書かれている. だから, ほとんどすべての記録は, ΔT の決定には使えない. だが, 数少いけれども例外がある. 紀元 873 年 7 月 28 日 の日食記録がこれである. 上のような補足的な記述がある. この記録が観測記録であると信じられるのはこのためである.

紀元 873 年 7 月 28 日の同じ日食をニシャプールで観測した記録がある. これは Stephenson(1997, p.467) から取ってきた. 記録が言うには,

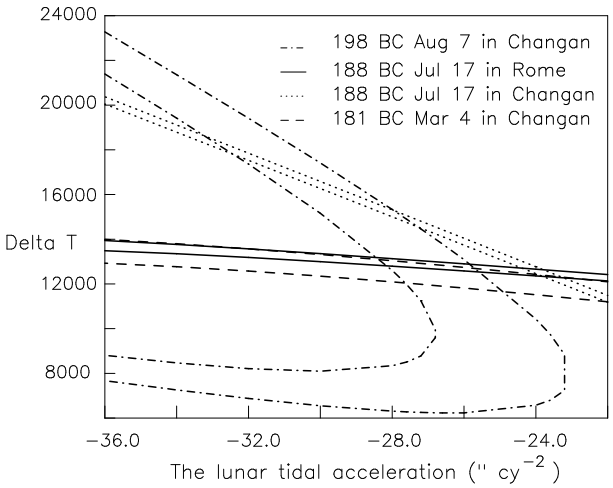

Fig. 2. 3 つのほぼ同時代日食, 紀元前 198 年 8 月 7 日, 紀元前 188 年 7 月 17 日, and BC 181 Mar 4 の 4 個の観測の $(\Delta\dot{n}, \Delta T)$ 面の皆既または金環領域.

(4b) AD 873 Jul 28 [Tuesday] (annular: mag.= 0.94 Nishapur)
This solar eclipse was observed by Abu al-'Abbas al-Iranshahri at Nishapur early in the morning on Tuesday the 29th of the month of Ramadan in the year 259 of *al-Hijrah* ... (date on Persian calendar) ... He mentioned that the Moon's body (i.e. disk) was in the middle of the Sun's body. The light from the remaining uneclipsed portion of the Sun surrounded it (i.e. the Moon). It was clear from this that the Sun's diameter exceeded in view that of the Moon.
この日食はアブ アル アッバース アルイランシャーリによってニシャプールにおいて (ペルシア暦) ヒジラ紀元 259 年のラマダン月 29 日水曜日朝に観測された... 彼が言うには, 月本体は太陽の中に入った. 食されずに残った部分は (月を) 囲んだ. これから明らかなように, 太陽の直径は月の直径より大きい.

[(*al-Qanun al-Mas'udi); trans Said and Stephenson(1997).]*

記録によると, 食は明らかに金環である.

上記 2 つの記録の信頼性を上げるために, 2 つの食記録を加えよう. それは, 紀元 822 年 4 月 25 日の日食, オッポルツアー番号 4841 で長安で観測されたもの, そして紀元 975 年 8 月 10 日の日食, オッポルツアー番号 5184 で京都で観測されたものであり, ともに皆既と記録されている.

紀元 822 年 4 月 25 日日食の記録は

(5a) 舊唐書巻三十六 志第十六 天文下
(穆宗長慶二年) 四月辛酉朔, 日有蝕之. 在胃十二度, 不盡者四之一, 燕趙見之, 既

(5b) 新唐書巻八 (穆宗長慶二年) 四月辛酉朔, 日有食之.

(5c) 新唐書巻三十二 (穆宗長慶二年) 四月辛酉朔, 日有食之, 在胃十三度

燕趙での観測の代表地として, 燕の場合は北京, 趙の場合は石家荘を採用する. 経緯度は表 1 に記載した.

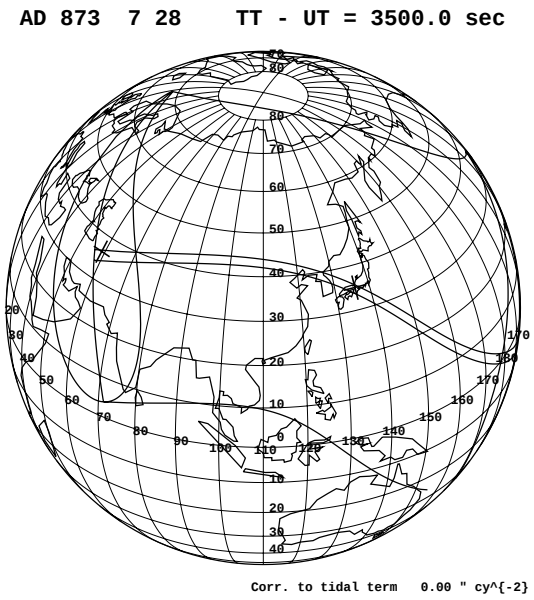

Fig. 3. 紀元 873 年 7 月 28 日の日食の金環食帯. × 印はニシャプールと京都を表す.

京都で観測された紀元 975 年 8 月 10 日の日食の記録は次のとおりである.

(6) 日本紀略 天延三年七月一日辛未 [8], 日有蝕, 十五分之十一, 或云皆既, 卯辰刻皆虧, 如墨色無光, 群鳥飛亂, 衆星悉見.

この日食は, 併せて 14 の歴史書や日記に記録されていた. 朝野群載や扶桑略記はそれらのうちのひとつである.

さて, AD 873 ごろの ΔT と $\dot{n}$ を以上の日食データを使って見積もろう. 表 4 は, $\Delta\dot{n}$ の関数としての ΔT の範囲を, それぞれの日食に対して, 観測地で食が皆既または金環であったとして求めたものである. 第一欄は潮汐加速への補正, 第三欄から六欄までは ΔT の範囲であって, 長安で観測された紀元 822 年 4 月 25 日の日食, ニシャプールおよび京都で観測された紀元 873 年 7 月 28 日の日食に対するもの, そして京都で観測された紀元 975 年 8 月 10 日日食に対するものである. 第二欄は紀元 822 年 4 月 25 日の日食が 燕と趙において皆既であったとする記述に対応する ΔT の範囲を示す. 表 4 で, (T) は皆既を, (A) は金環を意味する.

図 4 には表 4 の条件を図示した. 紀元 822 年から紀元 975 年まで 153 年間, ΔT も潮汐加速も変化しなかったと仮定する. 今回も, まず気づくのは, すべての日食が皆既または金環であったわけではないことである. なぜなら, $(\Delta\dot{n}, \Delta T)$

Table 4. 潮汐加速の関数としての ΔT の範囲. 日食は, 紀元 822 年 4 月 25 日, 紀元 873 年 7 月 28 日, および and 紀元 975 年 8 月 10 日のもの. $\Delta\dot{n}=0$ は $\dot{n}=25''.83/\mathrm{cy}^2$ に対応する.

$\Delta\dot{n}$	822 Apr 25(T) 燕趙	822 Apr 25(T) 長安	873 Jul 28(A) ニシャプール	873 Jul 28(A) 京都	975 Aug 10(T) 京都
$''/\mathrm{cy}^2$	sec	sec	sec	sec	sec
+4.0	2392 – 3479	3850 – 5351	1684 – 3604	2473 – 3328	−249 – 3624
+2.0	2394 – 3492	3930 – 5444	1762 – 3682	2855 – 3716	+515 – 4041
0.0	2386 – 3498	4009 – 5537	1838 – 3760	3237 – 4106	1167 – 4452
−2.0	2368 – 3495	4087 – 5629	1912 – 3838	3619 – 4497	1757 – 4859
−4.0	2336 – 3483	4162 – 5720	1984 – 3916	4003 – 4889	2308 – 5261
−6.0	2290 – 3460	4236 – 5811	2054 – 3994	4387 – 5283	2829 – 5659
−8.0	2225 – 3424	4308 – 5901	2122 – 4072	4772 – 5678	3329 – 6053
−10.0	2137 – 3373	4377 – 5990	2188 – 4150	5157 – 6074	3812 – 6444

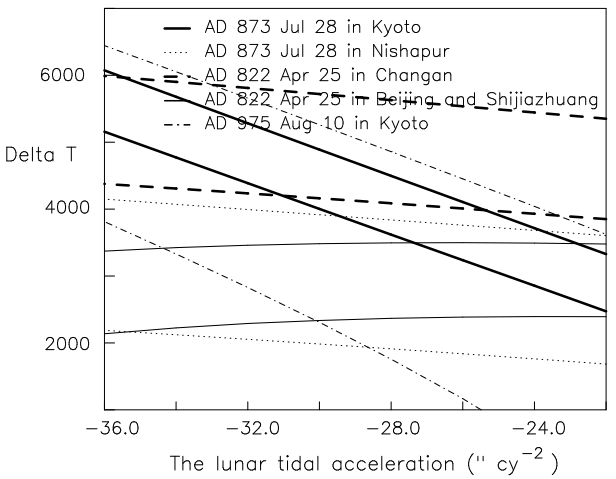

Fig. 4. $(\Delta\dot{n},\Delta T)$ 平面の皆既および金環食帯. 観測は, ほぼ同時代の紀元 873 年 7 月 28 日, 紀元 822 年 4 月 25 日, および 紀元 975 年 8 月 10 日の日食に関する 4 つの観測. 右に向かって上がる実線に囲まれた領域は, 紀元 822 年 4 月 25 日の日食の北京および石家荘の皆既帯を表す.

面における 5 つの皆既領域と金環領域の共通部分が空となるからである. すると, 紀元 822 年 4 月 25 日の日食が長安で部分食であったとするのがよさそうである. この結論は記録 (5a), (5b), および (5c) と整合的である. このとき, 紀元 975 年 8 月 10 日の日食の京都の皆既領域は 紀元 873 年 7 月 28 日の日食の京都の皆既領域を含んでしまい, また, 紀元 873 年 7 月 28 日日食のニシャプールの金環食領域は紀元 822 年 4 月 25 日日食の北京および石家荘の皆既食領域を含んでしまう. 言い換えると, 紀元 873 年 7 月 28 日日食が京都で金環であるなら, 紀元 975 年 8 月 10 日日食は京都で皆既である. 同様に, 紀元 822 年 4 月 25 日日食が北京と石家荘で皆既なら, 紀元 873 年 7 月 28 日日食はニシャプールで金環である. 紀元 873 年 7 月 28 日のニシャプールの記録と紀元 975 年 8 月 10 日の京都の記録は パラメータ決定には余分である. 別の見方をすれば, この 2 つの記録は, 高い確率で真実である.

余分なデータを取り除いて, 表 4 の条件をあらためて図 5 に描く. この場合, 紀元 822 年から紀元 873 年までの 51 年間のパラメータの不変性を仮定する. だから議論の信頼性は, 前段落におけるより増す.

それぞれ 2 本のほぼ平行な線によって囲まれる領域が 2 つあり, それらが共通部分を持つことが見てとれる. しかし, まだ共通部分の面積は大きい. ここではこの面積を減らす努力をしよう. そのために, 「不盡者四之一」(四分の一が隠れずに残った) という句に注目する. これはたしかに何らかの意味で食の大きさを表現している. しかし, 食分が 0.75 であることをこの句が述べているとは解釈できない. 図 6 を見てわかるように, 等食分 0.75 曲線 (破線) は皆既食帯からはるかに遠く, 長安はその曲線よりずっと皆既食帯に近寄っている. この句の別の解釈として, 太陽円盤の周囲のうち残った割合を述べているとの解釈を提案する. 残った割合が 90°, 105°, および 120° の場合を計算し, 対応する ΔT を得たので表 5 に記載する. 等 90° 線, 等 105° 線, および等 120° 線を 3 本の 1 点鎖線として上から順に図 5 に描いた. 図 7 には, 残った太陽円盤の外周が 90°, 105°, および 120° の場合の実際の太陽の像を描いた. 太陽像のはじは細いので, 残った比率が過小評価されかねない.

さて, 紀元 873 年の京都における日食と紀元 822 年の北京および石家荘の日食は金環または皆既であること, および $\Delta\dot{n}\le+4''.0/\mathrm{cy}^2$ であることから, ΔT の範囲として

$$2473\ \mathrm{sec}\ <\Delta T<3498\ \mathrm{sec}. \tag{5}$$

を得る. 潮汐加速の範囲は $-27''.23/\mathrm{cy}^2$ から $-21''.83/\mathrm{cy}^2$ までである. 「四分の一が隠れずに残った」が太陽円盤のことを言っているとの介錯に立って, 数値として 120° を採用するなら, ΔT の範囲は

$$3185\ \mathrm{sec}\ <\Delta T<3498\ \mathrm{sec}. \tag{6}$$

となる. この場合, とくに $\dot{n}=-25''.83/\mathrm{cy}^2$ を採用すると, ΔT の範囲はさらに狭くなって

$$3327\ \mathrm{sec}\ <\Delta T<3498\ \mathrm{sec}. \tag{7}$$

となる.

3. 議論

前節では, 複数データを使うことにより, 別々に扱うと信頼度の低いデータが信頼性を増すことを見た. これは別の場所で経験したことである (Tanikawa & Sôma 2004 を見よ). とくに, 紀元前 188 年 7 月 17 日 年の日食は, ローマでは確かに皆既である一方, 中国の歴史書の記録も正しい. Stephenson (1997) は ΔT の範囲として

$$\Delta T<13830\quad\text{or}\quad\Delta T>14140 \tag{8}$$

を中国のデータから得た. 単一のデータを使う限り, これ以上の精度は出ないであろう.

予備的な解析 (Sôma, Tanikawa, & Kawabata 2004) によれば, 月の潮汐加速は, 月レーザー測距で決定された最新

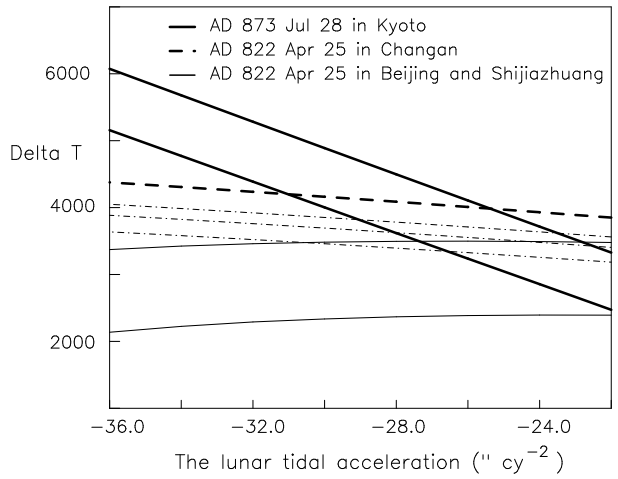

Fig. 5. $(\dot{n}, \Delta T)$ における皆既食または金環食領域．食はほぼ同時代の 紀元 873 年 7 月 28 日 および 紀元 822 年 4 月 25 日のものである．点線は，長安で観測された紀元 822 年 4 月 25 日の日食の皆既帯の下側境界を表す．3 本のダッシュ線は，紀元 822 年 4 月 25 日の日食を長安で観測したときの，太陽円盤の残り角度が 90° (上), 105° (中), および 120°(下) となる軌跡を表す．

Table 5. 紀元 822 年 4 月 25 日の日食の場合の太陽円盤の残り角度が異なる場合の ΔT と潮汐項．

Angle	90 °	105 °	120 °
Magnitude	0.9860	0.9789	0.9687
$\Delta\dot{n}$	Δ T	Δ T	Δ T
″/ 世紀 ^{2}	秒	秒	秒
+4.0	3561	3405	3185
+2.0	3637	3480	3257
0.0	3710	3554	3327
−2.0	3783	3625	3394
−4.0	3853	3694	3460
−6.0	3621	3760	3522
−8.0	3986	3824	3581
−10.0	4050	3885	3637

値 $-25''.83/\mathrm{cy}^2$ と過去 2000 年間一致するとして矛盾がない．この値を全歴史データに適用するなら，ΔT の範囲として (3), (4), および (7) 式で与えられる狭い範囲が得られる．

今後調べるべきことが 3 点ある．まず，「不盡者四之一」(四分の一が隠れずに残った) の意味である．普通，食分が歴史書に書いてある．今回，食分 0.75 は適当でない．このことは図 5 を見れば容易に理解できる．理由は簡単である．食分は長安で 0.75 ほど小さいことはあり得ない．なぜなら，北京や石家荘で皆既だったからである．我々は，上の句の解釈として良さそうなものを提案した．その解釈は観測データをよく説明する．その解釈とは，その句が太陽円盤の周の残りの割合について述べている，というものであった．

2 点目は，日食の観測方法である．著者らが理解する限り，古代および中世の中国の天文学者は裸眼で観測を行なったと信じられている．観測が夕方であったり早朝であったりすれば，太陽の高度は低いので大気中の塵の層によってまぶしくなくなる．しかし紀元 822 年 4 月 25 日の日食は昼に生じた．だから塵によって太陽が見やすくなることはなかったはずである．加えて，「不盡者四之一」が 我々の言う意味であるなら，裸眼観測では太陽円盤の残りの割合を

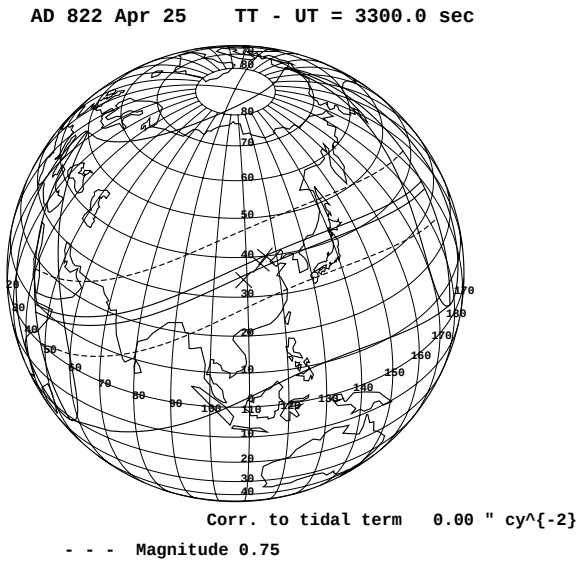

Fig. 6. 紀元 822 年 4 月 25 日の日食の皆既日食帯．× 印は南から長安，石家荘，北京を示す．

見定めることは出来なかった可能性の方が高い．そこで，著者らは，中国の天文学者が何らかの薄い遮蔽物を使用したのではないかとの仮説を提案する．現代の映画撮影で使用されるオーガンジーのような絹の薄布を使ったのではないであろうか．これは太陽黒点の観測にも使える．

3 点目は「幾盡」の食分はいくつかという問題である．データ (1b) を他のデータと結んで，もっとも確からしい値として食分 > 0.93 を得た．他の日食を使って，別の見積もりを得たい．

Acknowledgments.

東京大学宇宙線研究所の福来正孝氏は，ニシャプールで観測された紀元 873 年の日食に著者らの注意を向けてくれた．議論してくれた韓延本氏に感謝する．本研究は，文部科学省の科研費の特定領域研究 14023233 の補助を受けた．河鰭公昭氏は本来は著者に加わるべきであるが，本人の意向により著者から名前をはずした．

References

Chapront, J., Chapront–Touzé, M., & Francou, G., 2003, in Proceedings From the Science Session and Full Proceedings CD–ROM, eds. Ron Noomen, Steven Klosko, Carey Noll, & Michael Pearlman, NASA/CP–2003–212248

Kanda, S. 神田 茂 1935, Astronomical Records in Japanese History (日本天文史料), (Tokyo: Maruzen)(in Japanese)

Kawabata, K., Tanikawa, K., & Sôma, M. 2004, in *Astronomical Instruments and Archives from the Asia-Pacific Region*, (eds. W. Orchiston, F.R.. Stephenson, S.

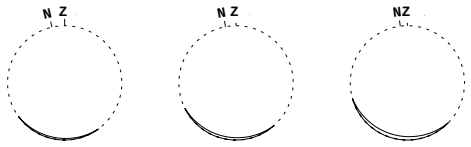

Fig. 7. 太陽円盤の円周が $90°, 105°$, および $120°$ 残ったとした場合の太陽の実際の像.

Debarbat, & I.-S. Nha, Soeul: Yonsei University Press) (in press)

Oppolzer, Th. Ritter von: 1962, Canon of Eclipses, translated by O. Gingerich, New York: Dover Publications INC., New York. Originally published as Vol.52 of the Memoirs, Mathematics natural Sciences Classes of the Imperial Academy of Sciences in Vienna, 1887

Siku Quanshu – electronic version (四庫全書 電子版) 1999, (Shanghai: Digital Heritage Publishing); the original book version has been published in 1781

Stephenson, F.R. 1997, *Historical Eclipses and Earth's Rotation* (Cambridge: Cambridge University Press)

Sôma, M, Tanikawa, K., & Kawabata, K. 2004, Earth's rate of rotation between 700 BC and 1000 AD derived from ancient solar eclipses, *Journées 2003: Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from Milliarcseconds to Microarcseconds*, St. Pertersburg, Russia, 2003 Sept 22–25(in press)

Standish, E.M. 1998, JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE405/LE405, JPL Interoffice Memorandum 312.F–98–048

Tanikawa, K. & Sôma, M. 2002, Reliability of the totality of the eclipse in AD628 in Nihongi, Astronomical Herald **95** No.1, 27 – 37 (in Japanese)

Tanikawa, K. & Sôma, M. 2004, On the totality of the eclipse in AD628 in the Nihongi, Publ. Astron. Soc. Japan **56** No.1, 215 - 224

Williams, J.G. 1994, Astron. J. **108**, 711 - 724