Phil. Trans. R. astr. Soc. London A **351**, 165-202(1995)

谷川清隆 訳

地球回転の長期的ゆらぎ: 紀元前700年から紀元1990年

Long-term fluctuations in the Earth's rotation: 700BC to AD 1990

F.R. Stephenson and L.V. Morrison

目次

1. 序
2. 解析方法の原理
   (a) タイムスケール
   (b) 太陽および月の暦
   (c) 潮汐摩擦および日長の変化
   (d) ΔT を測るための観測的要請
   (e) 前望遠鏡時代の日食観測のタイプ
3. 観測
   (a) 前望遠鏡時代の日食記録
   (b) AD 1620–1955.5 の月による掩蔽
4. ΔT への帰着
   (a) 前望遠鏡時代の太陽観測
   (b) 前望遠鏡時代の月観測
5. 解析
   (a) 地球自転の一定減速成分
   (b) 地球自転の変動加速部分
   (c) 日付時刻つきデータの精度
   (d) 日長の変化
6. 結論

参考文献

概 要

バビロニア, 中国, ヨーロッパ, アラブ世界の古代および中世に記された紀元前 700 年から紀元 1600 年の日食および月食の記録を集め, 地球自転の長期的変動に関する問題に答えるのにこれらが有用であるかどうか批判的に評価した. 以前行なった, 紀元 1600 年–1955.5 年の月による掩蔽データの解析および 1955.5–1990 年の高精度データの結果も今回の論文に加えた.

平均太陽日の長さの変化 (単位は世紀あたりのミリ秒, つまり ms/cy) を自転の加速の目盛りとして使って, 日長は過去 2700 年にわたって, 平均して $(+1.70 \pm 0.05)ms/cy$ $(\equiv (-4.5 \pm 0.1) \times 10^{-22} rad/s^2)$ だけ増加したことがわかった. ただし, 月の加速の値として $-26''.0/cy^2$ を仮定すると, 潮汐減速で期待される値は $+2.3 \pm 0.1ms/cy$ $(\equiv (-6.1 \pm 0.4) \times 10^{-22} rad/s^2)$ である.

こうして, 地球自転には平均的加速成分があり, これは日長を $(-0.6 \pm 0.1)ms/cy$ $(\equiv (+1.6 \pm 0.4) \times 10^{-22} rad/s^2)$ だけ減少させる. その上, この加速成分に加えて, 日長のゆらぎがあって, それは $\sim 4ms$ の振幅で周期は ~ 1500 年である.

1 序

「これらの場所 (Baghdad, Aleppo, Alexadria) およびその近くにおいて, すべての観測は行なわれた. それを使って太陽と月の平均運動 (middle motions) は制限される. だから, 月の運動がどれほどの率で加速しているかをわたしは述べることができはずだ. それは実際そうであって (?which that it does), わたしの考えるところによれば, それを証明することができ, 公衆に示すことができるであろう」

三百年前 (1695) に Edmond Halley はこのように書いた. 彼の公表論文を見る限り, かれが自分の目標を自覚していたとは思えないが, 月の永年加速を決定するにあたって, 古代および中世の観測が重要であることを初めて認識したのが彼である.

ほんのこの 10 年ほど前になってから, 月レーザー測距や月潮汐により引き起こされる人工衛星軌道摂動の観測により, 月の永年加速が正確に求められるようになった. 地球・月系の角運動量保存則によって, 月軌道が獲得する角運動量は地球の失う角運動量である. 地質学的な年代にわたる地球自転減速の機構は海洋および固体地球内部で生じる月および太陽による潮汐散逸である. 地球自転におよぼす, この支配的な機構に加えて, 数日から数十年にわたるタイムスケールの変化が天文観測により測られている. コア・マントル相互作用を通しての地球内部の角運動量再配分がもっともらしい数十年スケールの変化の原因である. 数日から数年のタイムスケールの変化は大気と殻/マントル間の角運動量の交換で説明される.

1950 年代以来, 現代的天文技術で得られる高精度データによって, この最近の期間に関しては地球自転の短期的変動を非常に詳しく調べることができる. 紀元 1620 年ごろの望遠鏡観測の開始以後に手に入る精度の低いデータによって数十年変動はある程度詳しく調べることができる. しかしながら, 数世紀から数千年にわたる地球自転変動に関してはほんの少ししかわかっていなかった. それに合う観測の精度は悪いし, データ間隔がまばらだからである.

前研究 (Stephenson & Morrison, 1984) において, 紀元前 700 年から紀元 1700 年の期間の天文データを収集解析し, 潮汐摩擦による地球自転の減速に加えて過去 2700 年間にわたって小さな加速成分のあることを示した. この加速の大きさを見積もる努力を行なったが, この成分

は千年単位で変化しているらしいとの結論に達した. しかし, 証拠は決定的でない. というのも, データがまばらだからである. 紀元の最初の 1000 年間がとくに少ない. 最近, とくにバビロニア, 中国からのデータが追加されて状況は改善された. これらのデータを加えた上に, いままでに知られていたバビロニア (紀元前 700–紀元前 50 年), 中国 (紀元前 200–紀元 1300 年), ヨーロッパ (紀元 800–1600 年) およびアラブ (紀元 800–1200 年) のデータを再評価することにより, 加速成分とその変動を, 背景となる潮汐摩擦による減速から分離することができた.

この結果は, 地球自転の歴史に関するわれらが知識を増大させるとともに, 地球回転に影響を与える各種地球物理学的機構に制限条件を課すだけでなく, 今後の研究の刺激になるであろう.

2 解析方法の原理

太陽の方向に相対的な地球自転の観測的周期は視太陽日である. その長さは年変化する. これは自転速度が変わるからではなく, 楕円上の地球の運動の幾何学的性質および軌道面と赤道面が傾いていることからくる. これらのよく知られた効果を観測から取り除くと, 標準化された, 現実の自転周期が得られる. この周期は平均太陽日とよばれる. この論文では日長 (l.o.d.) とはこの平均太陽日のことを意味する.

(a) タイムスケール

観測された日長から構築された時間尺度は世界時 (UT) とよばれる. 一様時間との違いは日長の変化の積分値である. 一様性からのずれを測るためには, 比較標準が要請される. 長期の変動を測ろうと思ったら, この標準は千年間にわたって手に入るものでないといけない.

原理的には, 太陽の運動 (地球の運動の反映), 月や惑星の運動の重力理論において, 独立変数は時間の一様な目盛りを提供する. この変数は, 惑星系の基本的暦において時間引数として陽に現れる. だから, これはもともと暦表時 (ET) として知られていたのである.

ET 目盛りの単位はニューコムの太陽暦 (Newcomb 1895a) の単位に等しくなるように選ばれた. これは 1960 年においても一般に使われていた. 基本暦において ET が時間引数として導入されたのがこの年である. ニューコム暦においては, 太陽の平均運動は, 18 世紀の後半および 19 世紀のほとんどの期間, UT 目盛りの秒の長さ (同じことだが, 日長) の平均を単位として測られた. この結果は, 彼の理論を 1750–1892 間に UT に相対的に行われた太陽の位置観測と fit することによって得たのである (Newcomb, 1895b). だから, 18 世紀の後半および 19 世紀のほとんどの期間の間の UT 目盛り上での平均日長が ET 目盛りの一日の標準長さ (86400 秒) になったのである.

1955 年 7 月にセシウム原子の共鳴周波数が新しい, 高精度時刻標準 (standard of timekeeping) として導入され, 国際原子時 (International Atomic Time, TAI) 目盛りがこの周波数から生成された. この周波数のサイクルの数を ET 目盛りの秒に対して Markowitz et al.(1958) が測った. その後, 国際単位系 (SI) の秒が TAI 目盛りの秒として定義され, 86400 SI 秒の一日が比較標準となった. TAI 目盛りの単位時間は, 最初 ET 目盛りに対して測られたが, 両方を合わせる努力はなされなかった. その結果, これらの元期 (epoch) の間に 32.184 秒の差がある.

最近, ET は地球時間 (TT) に取って代わられた. TT とは惑星系の実視地心暦の時間引数である. 実際上, TT はその前任者 ET とは違って, TAI 目盛り (86400 SI 秒) と正確に等しい単位

を定義上持っている. ただ, その原点はずれており,

$$\mathrm{TT} = \mathrm{TAI} + 32.184\mathrm{s}$$

となっている. 定数 32.184s は TT 目盛りと前任者 ET の間の連続性を保つために導入された. 以下では, TT を次のような意味に使うことにする. ひとつは 1955.5 に TAI 目盛りが導入される以前の力学理論から導かれる一様な時間目盛り, もうひとつは $\mathrm{TT} = \mathrm{TAI} + 32.184\mathrm{s}$ なる時間目盛りである. これは 1955.5 以後の TAI から直接回復できる.

図 1

この節で議論するいろいろな時間目盛りの間の関係は, 図 1 に表示される. 潮汐トルクおよびその他の長期的な力の影響の下で, UT は TT からほぼ放物線的に離れていく. 一日から数十日, あるいはもっと長い時間スケールで作用するトルクが, この基本となる放物線的な動きから UT のふるまいをずれさせる. これは図 1 に示されている. 放物線の頂点 (カスプ) が 1750 – 1892 の期間の中間あたりにあるはずである. 中間の時期における平均日長 (すなわち傾き) が TT 目盛り (86400 SI 秒) の日の標準的長さに等しくなるべきという要請を満たす必要があるからである. この理由により, 頂点は図 1 の 1820 年の近くに置いた. UT(実際) が元期 1958.0 年に TAI に等しく, TT が TAI から 32.184 秒ずれている (offset) ことから, 放物線の縦軸方向の位置が決まる.

この論文の目標は, TT によって用意される一様標準に準拠して, 過去 2700 年 (比較的信頼し得る天文観測のある期間) にわたる UT 目盛りの非一様性を測定することである. 太陽系における天文現象の UT 目盛りによる観測時刻を TT 目盛りによる対応する時刻と比較する. 後者は現象を引きおこす天体の運動方程式を計算することによって得られる. こうして, 天文観測は直接的かつ間接的に, 特定の現象の起きた時刻における TT と UT の差を与える. この差について, 通常の記法を採用する:

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

ΔT の 1 階微分は UT 目盛りの日長の変化を測る. 準拠するのは, 86400 SI 秒の TT 目盛りの準拠日である.

(b) 太陽および月の暦

過去2700年にまで遡る太陽と月の精密暦は, 日長の長期変化を導くために必須である. 太陽の位置に関してはニューコムの解析暦 (Newcomb 1895a, 平均運動への補正 $+1.05''cy^{-1}$ 込み) を使った. この暦から出る太陽の位置とBretagnon(1982) による最近の解析理論からの位置の差は, 2700年にわたって $5''$ 未満である. ニューコム理論の精度は, 上の補正付きで, 17世紀以前のわれわれのデータ集合の基礎をなす裸眼で行われた食観測の解析にふさわしいものである.

月の位置は $j = 2$ と記される解析暦 (IAU 1968) から取ってきた. ただし, 最近の潮汐加速の見積もりとの整合性のため若干の放物線補正を加えてある (以下参照). この暦はジェット推進研究所 (JPL, Newhall et al. 1983) の作成したDE102とよばれる数値暦と比較した. 経度方向の差は時間に関して主として放物線項であり, 紀元前700年において $\sim 120''$ に達する. 緯度方向では, 最大差は $\sim 10''$ である. これらの食い違いの多くは, われわれの使った月潮汐加速の値 $(-26.0''\mathrm{cy}^{-2})$ とDE102に含まれる値 $(-26.2''\mathrm{cy}^{-2})$ との小さな差から来るものである. この放物線項の差を考慮すると, 平均的な食い違いは, 経度方向で $\sim 25''$, 緯度方向で $\sim 1''$ となる. これは17世紀以前の観測資料の内部精度に比べて小さい.

月の平均経度の潮汐加速の値, $\dot{n}$, はこの論文の以後の解析の観点からすると, 月の暦において決定的に重要なパラメータである. 月の運動の長期的ふるまいにおいて潮汐加速が支配的であり, これは経験的に決定するしかない. その値の誤差は直接 ΔT の誤差に入り込む. 月の暦は食や掩蔽観測を整約するときに必ず関係するのである. われわれの解析は2500年以上にわたる. だからこの長期間の $\dot{n}$ の一定性を考える必要がある.

加速 $\dot{n}$ は地球の回転エネルギーの潮汐による散逸率に正比例する. 潮汐は大部分海洋および海において生じる. このエネルギー散逸は深い海洋と浅い海において主として起こるように見える (Lambeck 1980). 1000年程度の時間尺度では, 安定な深い海洋において潮汐散逸率の変化が無視できるほど小さいと考えてもいいだろう. また, 過去2700年間に, 浅い海の貢献もほぼ一定と信じていい証拠がある. この期間における海水面高の変化は1ないし2mを越えないと見積もられている (Fairbridge 1961; Morner 1971). これは大陸棚の平均水深 (100m) に比べて小さい. だから, 大陸棚の面積変化は歴史時代にわたって1 %以上であることはありそうもない. だから, われわれが解析する観測期間において $\dot{n}$ が大きく変わったとする理由はない.

$j = 2$ における $\dot{n}$ の値は $-22.44''\mathrm{cy}^{-2}$ である. この値はスペンサージョーンズ (1939) が, 1677-1927の水星の日面通過を含む月や惑星の位置から求めたものである. 1677-1973期間の水星の日面通過や月掩蔽のもっと手広い解析をやって, Morrison & Ward(1975) は $-26 \pm 2''\mathrm{cy}^{-2}$ を得た. 月レーザー測距からの最近の結果 (Williams et al. 1992) $(-25.9 \pm 0.5''\mathrm{cy}^{-2})$ および人工衛星からの結果 (たとえばChristodoulidis et al. 1988参照) $(-25.27 \pm 0.61\mathrm{cy}^{-2})$ はこの数値を裏付ける. この論文では, 潮汐加速の値として $-26.0''\mathrm{cy}^{-2}$ を採用し, 対応して $j = 2$ における平均経度の表式を修正 (amend) した. 潮汐加速の値の採用値の不確実性 $\pm 0.5''\mathrm{cy}^{-2}$ は直接 ΔT の不確実性 $\pm 0.46\mathrm{s\ cy}^{-2}$ として現れる. このことは論文の結論に実質的に影響しない.

1830 – 1990の期間については, 日長の変化としてJordi et al.(1994) による月掩蔽データの最近の解析を採用した. 彼らの論文で使われた月の暦JPL LE200では $\dot{n}$ の値は $-23.9''\mathrm{cy}^{-2}$ である. われわれの採用した値と整合性を取るために $-2.1''\mathrm{cy}^{-2}$ の補正が必要である. これは永年項 $+0.1\mathrm{ms\ cy}^{-2}$ をその論文から取ってきた日長の値に加える必要があることを意味する. こ

れは過去 200 年間の日長の十年スケールのゆらぎに比べて小さく, この論文で議論する長期傾向へは実質的に影響を与えない. だから, Jordi et al.(1994) の結果を修正なしで用いる.

(c) 潮汐摩擦および日長の変化

地球近くを周回する人工衛星への月太陽による潮汐摂動の解析から, また地球–月系の角運動量が保存すべきという要請から, Christodoulidis et al. (1988) は観測される月の潮汐加速 $\dot{n}$ と月・太陽による地球自転の減速 $\dot{\Omega}_{\rm tidal}$ の間に次のような経験関係をみつけた.

$$\dot{\Omega}_{\rm tidal} = +(49 \pm 3) \times 0.004869\dot{n} \times 10^{-22}{\rm rad\ s^{-2}}.$$

$\dot{n} = -26.0''{\rm cy}^{-2}$ と取ると

$$\dot{\Omega}_{\rm tidal} = (-6.20 \pm 0.38) \times 10^{-22}{\rm rad\ s^{-2}}$$

となる. rad $\rm s^{-2}$ 単位で表した地球自転加速度と, ms $\rm cy^{-1}$ 単位で表し日長の永年変化, つまり $d(l.o.d.)/dt$, の関係は (Stephenson & Morrison 1984, 表 2 参照),

$$1\ {\rm ms\ cy^{-1}} = -2.67 \times 10^{-22}{\rm rad\ s^{-2}}$$

である. 上の $\dot{\Omega}_{\rm tidal}$ の値は

$$d({\rm l.o.d.})_{\rm tidal}/dt = +2.3 \pm 0.1{\rm ms\ cy^{-1}}$$

と同等である. 他のトルクがなく, 慣性主軸が変わらなければ, 日長は $+2.3{\rm ms\ cy^{-1}}$ の割合で, 淡々と増大するはずであり, UT は時間とともに TT から

$$\mathrm{TT} - \mathrm{UT} = \Delta \mathrm{T}_{\rm tidal} = ct^2$$

にしたがって放物線的に離れてはずである. ただし, c は定数, t は UT 目盛りで測った時間と TT 目盛りで測った時間が等しくなる元期から測った時間である. 言い換えると, 日長が 86400 SI 秒に等しい時刻を元期とする. また上の 2.a 節で議論したように, この元期は 19 世紀の始めあたりのどこかにある. t を世紀 (cy) で測ると, c は単位が $\rm s\ cy^{-2}$ であり, これは $\rm ms\ cy^{-1}$ 単位で測った日長の永年変化と次式で関係する (Stephenson & Morrison 1984, 表 2 参照).

$$d({\rm l.o.d.})/dt = 0.0548{\rm c}.$$

$d({\rm l.o.d.})/dt$ として $+2.3 \pm 0.1{\rm ms\ cy^{-1}}$ を代入すれば,

$$\Delta T_{\rm tidal} = (+42 \pm 2)t^2{\rm s},$$

を得る. ここで t は, 1800 年近くの元期から世紀単位で測る.

(d) ΔT を測るための観測的要請

潮汐による日長の計算上の変化は歴史時代全体を通して数十 ms を越えないが, $42t^2$ と表される時間の累積量はかなりのものになる. 元期西暦 1000 年において, $\Delta T_{\rm tidal}$ は ~ 1 時間に達し, 紀元前 500 年には ~ 7 時間に増大する. だから, 天文現象の歴史的観測は地球自転に関して潜在的に有用な情報を含んでおり, 各観測時にそれが持っていたよりもよい精度で ΔT を決めることができる.

精度の問題以外に, 観測は以下の要請を満たさなければならない.

(i) 観測者の地理的位置が正確に知られていること

(ii) 観測は太陽系の事象を含むものであること. 事象の TT を、関与する天体の運動方程式から計算可能であること.

(iii) 事象の厳密な日付が与えられていること, あるいは, この事象を囲む状況から日付が決まり得ること.

(iv) UT, またはそれと同等な量が与えられているか, あるいは報告された状況から計算可能であること. UT に関する要請の例外は, 皆既あるいはほぼ皆既の日食である. 地表上で皆既帯が狭いため, 地球の回転位相を決めること, つまり UT を決めることができる (4a(i) 節参照).

望遠鏡以前の時代の天文観測のうち, 上の条件をみたすもののほとんどすべては日食か月食である. 食の強みは何と言っても, 裸眼でみても明々白々なることである. また, 時刻記録が本質的でない皆既食あるいはほぼ皆既食を除いても, 測定がしばしば地平線に相対的になされたこと (日の出や日の入りからの時間ではかる), あるいは太陽や月あるいは選ばれた明るい星の高度によって測られたことから, 過去の食の時刻の誤差は小さくなっている. 日の出や日の入りの時刻を観測者の地理学的位置を結びつけると, 太陽に対する地球の回転位置が決まる. つまり UT が決まる. だから, 時計の誤差が入ってくるのは, 日の出/日の入りと食事象の時間差がどれほどかに関してだけである. いくつかの場合には, この時間差が非常に短く, 2,3 の場合には, 日の出/日の入りの最中の食が報告されている. この場合, 精度は食の性質と観測可能性のみによって限られ, 時計の誤差は入らない. 同様な考察は, 月食にも当てはまる. 観測に関するこれらの因子は関連する高度の測定とともに, 3 節で観測について議論する場所で論じる.

食以外の観測も最近は解析されているが, 結果は満足のいくものではない. たとえば, Newton(1970 の 9-29 ページ, 1972a) は古代ギリシャおよび中世アラブの天文学者が (食以外に) 行った (春) 分点観測を解析した. 春分点データからの彼の結果は不確かさが非常に大きい. 月による惑星や星の掩蔽記録がたくさん古代および中世の歴史に記録されている (主として中国) が, そのほとんどは UT を決めるのには役に立たない. 月が明るいために, 裸眼で見ると掩蔽が本当に起こったのかどうか明るい星でない限り決めるのがむずかしい. また初期の文献の用語は曖昧である. 加えて, 食とはっきり違う点は, ほんの少ししか時刻付きの掩蔽観測はないのである. Fotheringham & Longbottom(1915) はプトレミーがアルマゲスト (Almagest, book VII) で指摘した古代ギリシャおよびローマの掩蔽観測を数個解析した. だが, そのうち 2 つだけが, 明るい星 (α Vir) の掩蔽観測であった.

時刻記録なしの掩蔽観測を扱うために, Liu Ciyuan(1988a,b) は「時間窓」を使う技術を発展させた. 各事象は記録された日の, 月が地平線の上にある夜の任意の時刻に起きたと仮定する. このやり方で出る ΔT の不確かさは非常に大きい (Kiu & Yau 1990; Hilton et al. 1992 も参照). 西暦 1620 以後の望遠鏡観測では, 月による星の掩蔽を信頼するに足る精度で観測することが可能になった. 現象の時間的するどさと科学雑誌にのる記録の豊富さにより, 1955 年 7 月の TAI の導入以前では, これが ΔT 測定の最善のデータとなった.

(e) 望遠鏡以前の食観測のタイプ

この仕事において, われわれの以前の仕事のときと同様, 2.d 節で述べた理由によって, 前望遠鏡時代の食観測にのみ注目する. 幸いにも, ΔT を決めるのに, いろいろな種類の日食, 月食記録を使うことができる.

潜在的に使えそうな日食および月食観測としては以下のものが含まれる:

(i) 時刻記録なしの皆既および金環食;

(ii) 時刻記録なしの大食分食 (皆既性あるいは金環性が否定されているもの);

(iii) (最大食分における) 食分の見積もり;

(iv) 日出帯食, 日入帯食;

(v) 各種接触の地方時の測定

これに加えて, 以下のタイプの月食も入れておくべきであろう.

(vi) 月出帯食, 月入帯食における食分;

(vii) 月出, 月入の瞬間 (食分の記述なし);

(viii) 各種接触の地方時. 月食の食分は UT とは関係ない. だから, これを見積もっても UT の決定にはなんら寄与しない.

上で示したカテゴリーに属する観測から ΔT を導く前に, 観測史料について, また各種前望遠鏡記録について議論する. 何も記述がない場合, すべての翻訳は著者による.

3 観測

(a) 望遠鏡以前の食記録

2.d 節の判定基準を満たす望遠鏡以前の食観測記録は, ほとんどすべて四大文明起源である. すなわち, 古代バビロニア, 古代および中世中国, 古代および中世ヨーロッパ, 中世アラブ世界. たとえば, エジプト, インド, あるいは中央アメリカにおいては初期の食記録は保存されていないようである. 4 大記録源からの史料は, 例を挙げつつ順に議論していく. 個々の観測データの解析も含む詳細は Stephenson(1995) で公表する. 各記録源からの観測数は表 I にまとめた.

表 I. 食観測数

	時刻なし		時刻あり	
史料源	太陽	月	太陽	月
バビロニア	5	33	14	105
中国	11	4	27	52
ヨーロッパ	21	-	3	17
アラブ	4	-	18	25

(i) バビロニア

紀元前 700 年より少し前に, バビロニアの天文学者は系統的に日食・月食を予報し観測することを始めた. これはおそらく紀元 1 世紀まで続いた. バビロンの都市は紀元 1 世紀に無人となった (Oates 1986, p.143). ところが紀元前 50 年以後の観測記録は見つかっていない (Sachs & Schaumberger 1955). バビロニアからのデータ化可能なテキストは almanac であり, そのうちのひとつは紀元 75 年を予報している (Sachs 1975).

プトレミーはアルマゲスト (Almagest, books IV - VI) にバビロニアの月食の時刻を 2,3 載せている. しかし, これらは, プトレミーがもっと豊富なデータから数値例として選び出したものであると考えられる (Toomer 1988). 観測時刻が元の形とは違っていることは明白であり, Fotheringham(1915) によれば, これらはヒッパルコスによって, 「非常にいい加減に整約された」. だから, これに関しては, もうこれ以上考えない.

幸いにも, 元のバビロニアの食観測は多数生き残っている. これらは三種類の文書として保存されている. すなわち, 天文日記; いわゆる「goal-year 文書」; および食のみを扱う文書である. これらの記録のほとんどすべては英国博物館にあり, バビロニアの現場から復元されて 1 世紀以上になる (Sachs 1974; Stephenson & Walker 1985). 多様な銘が粘土板に楔形文字 (cuneiform script) で書かれており, 研究者の地道な努力によってこれらは解読されている. 残念ながら, 多くの粘土板はひどく損傷しており, もとの資料の 10 %しか現存していない.

天文日記は観測の 1 次資料である. これらは典型的には 6 ないし 7ヵ月間を扱い, 多様な天文現象の毎日の記録を含んでいる. 観測の究極目的は占星術である. 紀元前 652 年 (最古の例) から紀元前 165 年までのデータ化可能な日記すべての写真, 音訳および翻訳が Sachs & Hunger(1988,1989) によって出版された. それ以後の日記に関しては出版が予定されている.

セレウコス朝 (seleucid)(紀元前 4 世紀後半以後) の間, バビロニアの天文学者は過去の日記の材料を使って, goal-year 文書 (将来の予言をするためのもの) と特定の現象 (たとえば食や惑星データ) を扱う文書をコンパイルした. たくさんの日記が失われてしまったので, これら後年のコピーは補足的情報として価値が高い.

天文日記および goal-year 文書に保存されている観測のほとんどすべては, 紀元前 350 年以後のものである. 日食記録のいくつかの収集もほぼ同じ時期をカバーする. ただ, 幸いなことに, 紀元前 700 年にまで遡る記録を保持する文書も存在する. 偶然, この種の生き残り粘土板はほぼすべて月食に関係するものであり, 日食に関する文書はわれわれの手に入らない. というわけで, 手に入る太陽観測は短い期間しかカバーしない.

ただで配っている未公表の論文原稿の中で, Huber(1973) は, 手に入れた日記, goal-year 文書, 食表から抜きだした多数の日食および月食の音訳と翻訳を提供している. Huber は Sachs & Schaumberger(1955) の出版した粘土板の図を大々的に使った. われわれは彼のこの原稿をバビロニア食観測の主資料源として使い, これを, Sachs & Hunger(1988,1989) からの資料および Hunger が提供してくれた日記の未発表の音訳と翻訳で補った.

バビロニア暦は太陰太陽暦であり, 年初はほぼ春分である. 月は三日月が最初に見える日から始まる. 一方, 日は日没から始まる. Parker & Dubberstein(1956) によるバビロニア暦の広範囲にわたる研究によって, 紀元前 625 年から紀元 75 年までの日付がユリウス暦に正しく変換された. バビロニアの日付は元の日記のものであろうと, 二次的粘土板にコピーされたものであろうと, 高い精度で報告されるようになった.

文書に記されている期間を通して, バビロニアの天文学者は系統的に食の開始時刻と日の出, 日の入りの間隔 (近い方) を記録した. 晴の天気 (この地域では夏の間はたいてい晴である) のときには, 日の出と日の入りというのは正確に定義できる瞬間である. とくに, バビロンのあった平原はきわめて平らであった. しかしながら, 太陽が地平線近くにあるときに雲が邪魔すると, 不確かさが増大する. 天文学者は個々の食の継続時間も測り, 最大食分も見積もった. また日出帯食, 日入帯食であるかも記録した.

ある種のクレプシドラ (水時計) を使って, 時刻や時間間隔を測ったのではないか. 採用された標準時間単位はウス (us) およびベル (beru) であった. 前者は一昼夜の $\frac{1}{360}$ であるから 4 分である. この単位は天球が 1° 回転するのに必要な時間である (Stepehnson & Fatoohi 1994b) から, us は通常, 度と翻訳されている. ベルは 30 ウスなので, 2 時間である. 食分はシ (si) すなわち指で見積もられた. 12 シは太陽あるいは月の直径である. この用法はギリシャに広がり, 次にアラブに広がった.

バビロニアの観測の好例として紀元前 80 年 4 月 11 日の部分月食記録を示そう. この記録はこのための特別な粘土板に書かれており, 翻訳すると以下のとおりである (重要でない細かい点は省略した).

> '168 年 (Arsacid), すなわちセレウコス 232 年, アルサセス (Arsaces), 王の中の王, オロデス王 (I), I 月, 13 日の夜... 5° μ Her の南中の前に, 月食, 南東側から始まる. 夜の 20° に 6 指となった. 夜 7° に最大食分, それ以後次第に明るくなる. 13° に南東から北西に 4 指分明るさが足りない. 沈んだ [...] 40° に日の出前に (始まり)'(MB 33562A, Obv. および Rev.; 翻訳は Huber, 75-76 ページ).

この記録はバビロニアの食記録の典型的な特徴の多くを含んでいる. また, これは, 選んだ南中星の子午線通過に対しての現象の開始時刻を与える. 紀元前 250 年以後, *ziqpu* あるいは南中星とよばれる 30 個ほどの星の子午線通過を使って, しばしば食の時刻を測った. これは従来の日の出, 日の入からの時間を測るやり方を補足するものである (Schaumberger 1952). 南中星のうち暗いものについては疑義がはさまれているが, ほかのものについては確立されたと考えて良い.

上の例では, 月食は日の出の 40° 前に始まり, 20° 後に月は半分隠された. その後の 7° の間食分の変化は見られなかった. その後食は減少に向かった. 月が沈むまでに, 3 分の 1 だけ隠された. バビロン地方時での日の出を計算し, 地理経度および equation of time を許すと (?), 日の出の UT は 2.67h に対応する. ゆえに、第一接触の UT はちょうど 0.00h であると帰結される. 第一接触についての結果は μ Her の南中 (UT0.05h) に相対的な測定によって支持される. 月の食分が変化しない期間の中央に極大相をとれば, 食の中央時間として 1.57h の UT が得られ, これにより, もう一つ独立な測定データが得られたことになる.

紀元前 136 年 4 月 15 日の皆既日食の 2 つの記録が別々のバビロニアの粘土板に保存されている. gaol-year 文書 (BM 34034) は食が皆既であることを主張し, 天文日記 (BM 45745) は記述的な詳細を補足する.

> 1. ' セレウコス 194 年, XII/2 月, 29 日, 日食. 朝 18° に南西で食が始まったとき, 皆既になった (til-ma til-ti gar-an). 日の出後 24° に (それは始まった).' (BM 34034, Rev. 24-28; 翻訳は Hunger, プレプリント).

2. '[...] 29 日. 日の出後 24° において日食. 南西側からそれが始まったとき [...], 金星, 水星および普通の星 (normal stars) が見えた; 木星と火星は見えない時期であったが, 食のため見えた [...]. それは影を南西から北東に投げた. はじまりから, 最大食, 食の終りまで, 35°(の時間). 食の間, 北風 [それは西 [?] へ動いた, が吹いた].' (BM 45745, Rev. 13'-15'; 翻訳は Hunger, プレプリント).

最初の例では, XII/2 月は閏 (intercalary)12 月である. 日付はまさしく紀元前 136 年 4 月 15 日に対応する. 日記には月の何日であるかのみが保存されていた. だが, その粘土板には数多くの月惑星観測が報告されていたので, 天文計算により, 日付が特定できたのである. そこで, 2 つの粘土板が同一の事象について語っていること, しかもその事象がバビロニアの歴史の中で唯一皆既日食について語っていることが確かになった.

日の出あるいは日の入りに対して測った期間のあるものはきわめて短い. たとえば, 紀元前 321 年の日食は日の入りのほんの 3° 前に始まったと報告されている. また紀元前 240 年の月食は日の出のたった 3° 前に始まったとされる. このような, あるいは似たような場合に, 時計のずれ (shift) - 数時間以上を働かせたときの原始的な水時計にとって深刻な - は極小である. われわれの解析において (5.b 節参照), 日の出や日の入りからの隔たりが 25° 未満の観測に対してはすべて重みを倍にした. *ziqpu* 星 (南中星) の子午線通過に対する時間決めに対しては重み 1 を割り振った. ある種の場合に事象を同定することに困難があるからである.

われわれが収集した日月食に関する 119 個のバビロニア接触時刻記録のうち, 60 以上は第一接触であり, 20 個ほどのみが第四接触である. 残りは食の中央時刻あるいは皆既に関係する. 8 個は月の出, 月の入りにおける食分に関係する.

(ii) 中国

中国の日食記録は紀元前 700 年ごろに始まるが, 月食を報告することへの興味は紀元 400 年頃まではほとんどなかった. おそらく, 日食に比べて不吉な出来事の前兆としての重要性が小さかったのであろう. しかしながら, それぞれこの 2 つの年以後, 途切れることなく近年まで連綿と記録が続くのである. ほとんどは説明が短く, 事象の生起した日付のみであるので, 今回の目的にはほとんど役に立たない. だが, 日月食の小部分ではあるが, 重要な情報を含むものもある.

中国史において食観測の主資料源は公式の帝国史である. これらは (最後の清帝国を除いて) 何度も再版され, もとの報告はとうの昔に朽ち果てている. 帝国の歴史は, それが亡びるとすぐに編纂される. このような著作のなかで, 食観測は主として 2 つの場所に見つかる. 天文学 (占星術) に関する特別の巻 (天文志) と帝紀 (imperial annals) である. 加えて, 2,3 の歴史書の暦の巻 (暦志) で, 時刻付き食に注意を払っているし, 重要な人物の記録 (列伝) においてもときに説明がある. 天文志と暦志に引用されている食観測は, 宮廷天文学者の記録からのものがほとんどであろう. この宮廷天文学者は宮廷天文台において定期的にあらゆる種類の天文現象を監視していた. 帝紀と列伝に記録された観測はやや出の不確かなデータである.

公的な史書に引用された食に主として注意を向ける. 補足的な資料は年代記や歴史概説書 (compendium) から抜きだした. たとえば, 紀元 1300 頃に Ma Duanlin の編纂した Wenxian Tungkao(文明の総合史?). 最近, 北京天文台 (1988) は中国史に保存されているあらゆる種類の天体観測 (日食も含む) の膨大なリストを集めた. これは非常に価値のある 2 次資料である.

すべての文書は古代中国語で書かれている. 紀元前 3 世紀における中国帝国の統一のあと, 各地で使われていたいろいろな字体は統一された. 西暦 1 世紀以来, 古典文書には字体の違いは少ない.

日付を表すのに, 年は統治期間の始まりから数えた. バビロニア暦と同様, 中国暦は太陰太陽暦である. 各年の最初の月はおよび冬至と春分の中間から始まった. ずっと古代から, 中国でも 60 日周期が連続的に採用された. これは天文パラメータとは独立である. この習慣は日付の計算にかなり便利である. いろいろな専門家の作成した表 (たとえば, Hsueh & Ou-yang 1956) により, 漢帝国のはじめ (紀元前 202 年) 以来のすべての日付はユリウス日へと正確に変換できる. この表を使って, 日付変換を行う計算プログラムを考案した. バビロニアのものと同様, 中国の日付は高い精度で報告されている.

古代および中世の中国の日食観測の多くは, 単にこの特殊な事象が起きたことを記録するだけで, その他の記述はない. 時刻とか食分はまれである. 時に, 食が皆既であると書かれているが, 古代になればなるほどそれ以外の記述はない. たとえば, 古代の年代記「春秋」(Chunqiu) に記録された紀元前 709 年, 601 年, および 549 年の観測がそれである.

ほぼ紀元前 200 年以来, ほぼ皆既とされる日食も出現する. だが, ほとんどの記述は手短かである. どちらの記録も, 元々の観測をおおまかにまとめたもの以上ではないのであろう. 食の占星術的重要性は次の引用文で判断できる.「食によって太陽の小部分が隠されるときはいつでも, もたらされる災厄は小さい. だが, 大きな部分が隠されるとき, 災厄は深刻である」(7 世紀の晋書 (Jin-shu) 天文志より. 編纂, 翻訳は Ho Peng Yoke 1966, p.159). だから, ときに, 大きな部分食の食分をおおげさに記録する傾向があった. その結果, 時刻付きでない観測の場合は, 補足的な記述のある報告のみを選ぶことにした. たとえば, 星が見えたとする皆既食とか,「鉤のようだ」と記される部分食である. これらは元の説明を注意深くまとめた記録であろうと思われる.

以下の例は時刻記録なしの日食の説明の質をよく示す.

1. 紀元 360 年 8 月 28 日 (首都は建康, いまの南京): 升平四年八月辛丑 [38], 日有蝕之, 不尽如鉤 (宋書五行志)

この説明は, 前晋王朝で観測された日食を記述する節にある. 晋の公式歴史書である晋書自体もこの食が「ほぼ皆既」であると述べているが,「鉤のようである」とは書いていない. この食は地表で金環であった.

2. 紀元 454 年 8 月 10 日 (首都は建康): 孝建元年七月丙申朔 [33], 日有蝕之, 既. すべての星座が明るく光った (宋書, 34)

上の例で, 各干支のあとの数字は 60 日周期の何番目かを示す.

帝国の史書内で引用された食の説明はおそらく宮廷天文学者の記録から取ってきたものであろうから, 観測地は当時の首都であったと思われる. だから, ほとんどの文書が観測地について黙しているのであろう. 観測地は判っているものとされていたのだ. ときに次のような記録を見る:「この食は首都では見られなかったが, 地方から報告された.」しかしこのような場合 - これは悪天候によると思われる - は普通は少なく, 地方の観測者の数は少なかったと思われる.

少なくとも紀元 400 以後, 一番近い「刻」('ke') までの日食の時刻を測ることが中国天文学者の習慣となった. これは一日の $\frac{1}{100}$ であり, 0.24 時間である. それ以前は, 一番近い 2 時間刻

みへの時間として見積もられていた. 同じ頃, 月食も五番目に近い geng(night watch)(?) からの時間として記録された. 紀元 1000 年以後は, 月食にも ke が使われた. 単位'ke' は固定長であるが, night watch は季節とともに変化した. 通常, 日の入り後の薄明 (2.5ke または 0.6 時間) と日の出前の薄明 (2.5ke) の間の時間は 5 つの等しい watch に分割された. これは 2 時間より平均として長い.

時刻合わせの標準的機械は水時計 (clepsydra) であった. これは必要なら長さの単位の季節変化を調節した (Needham et al. 1989). 注意深い測定は首都でのみ行われたであろう. 地方では機械の数が少なかったであろう. 現在保存されている時刻付き記録は紀元 400–600 と紀元 1000–1300 に限られている. おそらく, 途中の時期の記録は散逸してしまった.

まとめると, 日月食の接触時刻として 80 個の中国の測定値を収集した. これらは第一接触, 中央接触, 第四接触にほぼ等しい割合で分けられる. 解釈に問題のある 2,3 の日食接触時刻を棄却した.

中国の日月食の時刻例は以下のとおりである. 最初の説明は各種接触時刻に関する説明である. だが, 首都において皆既であったという主張がもっと重要であろう.

> 3. 紀元 761 年 8 月 5 日 (首都は長安, 現在の西安): 上元二年七月癸未朔 [20], 日有食之, 既. 大星皆見. 天文官 Chu Dan は報告して曰く「癸未の日に日がかげった. chen 時の二番目の 6marks に始まった. si の後半の 1mark のとき皆既になった. wu 時の前半の 1mark に元に戻った. 太陽は在張四度 (旧唐書, 36)

上の測定は長安の地方時の 9.56 時, 10.36 時, および 11.36 時に対応する. ゆえに, UT では 2.36, 3.16, および 4.16 に対応する.

> 4. 紀元 434 年 9 月 5 日 (首都は建康 Jiankang): 元嘉十一年七月十六日, 満月. 月食. 月は chou 時の前半の第四 watch の second call に欠け始めた. 第四 call に皆既になった (宋書, 12).

皆既の終了時刻および食終了時刻は保存されていない. 日の入りの地方時および夜の継続時間から, 記録された食の位相測定が地方時で約 1.61 時および 2.42 時であること, よって UT は 17.71 および 18.52 時 (どちらも前日 9 月 4 日で) であることが出る.

ときに文書は太陽または月が食の状態で登ったり沈んだりすると述べる. また非常に数は少ないが, 地平線上にあるときの食分を見積もっている. 中国天文学者は太陽または月の直径の 15 分の 1 を単位にして食分を表現する. 次の例はそれを示す.

> 紀元 513 年 6 月 25 日: 延昌二年四月 Jihai[36]. 太陽は Ji(lunar lodge) にいた. 月は Wei(lunar lodge) にいた. (月は) 地平線から 3/15 を残して上がってきた. 次第に満ちてきた (満月になってきた). (魏書 (北魏書), 105).

(iii) ヨーロッパ

古代ギリシャおよびラテンの古典には数多くの時刻なしの日月食が記録されている. だが, 実質的にどの場合でも, 日付, 観測場所または食分 (あるいはこれらの組み合わせ) は不確かである. これらの欠陥のため, よく引用される Fotheringham の論文 (1920b) で選ばれたデータのどれ一つとして役に立つものはない. Fotheringham は' 太陽と月の加速' に関して精度のよい結果を得たように見えるが, 実質的にはこれらはたった 3 つの観測データから得たものであり,

しかもこれらは 2d 節の判定条件を満たさない.

プトレミーはアルマゲスト (books IV と V) に古代ギリシャの月食の時刻をいくつか掲げている. これらは Fotheringham(1920a) によって解析された. 日付も観測地もはっきりしている.

古代ヨーロッパの日食記録のうち, 役に立ちそうなもののひとつは紀元前 394 年のものである. この金環食は当時のギリシャの歴史家クセノフォンによって部分食と記録された.

> 「次の日, 彼 (アゲシラウス) はアケア フシオティス (Achaea Phthiotis) 山脈を横切り, 未来に向けて友好的な地域を通って行進を続け, ボエオティア (Boeotia) の境界に着いた. ここでその地域に入ろうとしたとき, 太陽が三日月のように見えた.」(クセノフォン: ヘレニカ (hellenica), IV, 3, 10; 翻訳は Dakyns(1892), pp.54)

クセノフォンはスパルタのアゲシラウス II 世の軍事行動にともなっており, 個人的に食を目撃したと思われる. 行路の慎重な記述からすると, この軍隊が日食のときにケロネイア (Chaeroneia) の 10km 以内にいたことが結論できる. (ディオファントスの支配 (archonship) の) 年は紀元前 395/4 年に対応する. 紀元前 394 年 8 月 14 日の食は東地中海においてこの数年間で最大の食であった. これがわれわれの使った数少ないヨーロッパの日食データのひとつである.

幸いにも, 中世ヨーロッパの日食報告は非常に信頼できる. ほぼ紀元 800 年から 1500 年まで, 町と修道院の年代記はしばしば印象的な天文現象, たとえば, 食, 彗星, 流星シャワーおよびオーロラ (aurora borealis) に注意した. これらの仕事の日付はたいてい正確で, また多くの年代記はそれぞれの地方の出来事にのみ関心を持っていたので, 観測地は年代記作者の属する町や修道院ととってよい. とくに食分の大きな食の記述はしばしば生き生きとしており, 個性的である. しばしば, 年代記の作者自身がその事象を目撃した. 年代記 (annals) には正確な時刻は決して与えられていない. だから, 月食観測は ΔT を決めるのにまったく役に立たない. しかし, 日食の場合, 太陽が完全に隠れたとか, 太陽円盤の小さな部分が残ったとの慎重な説明をする記録が多い. これらの分類に属する観測記録に関しては, 中世ヨーロッパの年代記がもっと昔のどの資料源よりも多い.

大量の中世ヨーロッパ年代記が, たとえば, Muratori(1723-) や Pertz(1826-) らの編集者によって元の言語 (主としてラテン語) で出版されてきた. 約 1 世紀前に, Celoria(1877a,b) や Ginzel(1884a,b,1918) は日食の説明を得るために公表された年代記を広く捜した. かれらは, たくさんの記録を発見し, それを元の言語で引用した. Newton(1972b) は歴史的な注釈を与えたが, 上記記録を翻訳した. 彼のいくつかの引用は間違いであったが. 可能な場合には, われわれは出版された年代記を調べたし, Celoria および Ginzel の収集した資料を全面的に利用した.

多くの中世年代記はユリウス暦を使った. 用語は calends, nones, および ides などを使った. 季節時間 (昼 12 時間, 夜 12 時間) が普通に使われ, 正午は日の 6 時間目であった. しかし, 上で注意したように, 年代記に記された時刻はあらっぽいものである.

eclipsis universalis とか eclipsis generalis とか, eclipsis in toto orbe とかは中世の年代記にはよく出てくる言い回しである. これの解釈としては太陽全体が隠されたのでなく, 広い範囲で見られた現象であるというのが妥当であろう. このような表現は皆既にともなう暗黒化やほかの特徴を伴わない. 星が現れたという報告自体は皆既性の証拠ではない. たとえば, 紀元 891, 990, 1191, および 1310 年の食の最中には星が見えたという. ところがこれらはみな金環食である. 金環になったときでも, どの場合も食分が 95 %を越えることはなかった. さらに, これ

らの記録はどれひとつとして金環であることを主張していないので, どの場合も大きな部分食を目撃しただけに違いない. 暗くなることは中世の文書に普通に注意されていることである. しかし, 日光が失われることは高度に主観的なことであるので, 太陽が完全に隠れたとか, 最大食分のときでも明るい部分が残ったというような説明のある記録に注意を集中する. 中心金環食であるとのい指摘はきわめて稀であることを注意しておこう.

以下の例は中世ヨーロッパ年代記の質について教えてくれる.

1. 紀元 1147 年 10 月 26 日 (Brauweiler, Germany): '1147. 日曜日, 11 月の Calends の 7 日前, 日食が第三時間に起こり, 第 6 時間まで続いた. 食は時計 (horologium) 上でわかるように, 1 時間動かないままであった... この時間の間, いろいろな色の円が現れてぐるぐる回ったと言われる (?)'(Brunwilarenses 年代記, Pertz 1859, vol. 16, pp.727).

記述はやや曖昧だが, 中世ヨーロッパの記録の中で, 金環をほのめかしているものである.

2. 紀元 1178 年 9 月 13 日 (Vigeois, France): ' わが領主の受肉 (incarnation) の年 1178. 週の第四日, 9 月の ides, 28 日月の日, 晴, 第 5 時間目ごろに, 太陽は食となった. その円盤は東 (sic) から欠けはじめ, 2 日月あるいは三日月ほどの大きさになった. 金星が北に見えた. 6 時過ぎに東から元に戻り始め, 暗くなった順番に明るくなり, 最後は完全に元に戻った...'(Ex Chronico Gaufredi Vosiensis; Bouquet 1781).

乱反射のために三日月状態が強調され過ぎているようだ.

3. 紀元 1241 年 10 月 6 日 (Stade, Germany): '1241.... ミカエルの 10 月に日食があった. すなわち, 10 月の nones の前日 (つまり 10 月 6 日), 日曜日, 昼の少しあと. 星が現れ, 太陽は完全にわれわれの前から消えた. しかし空は晴れており, 雲ひとつなかった...' (Stadenses 年代記, Pertz(1859), vol.16, pp. 368).

4. 紀元 1267 年 5 月 25 日 (Constantinople): ' そのとき月が太陽を隠した. Gemini の第 4 部分 (度), 6775 年 (Byzantinne, つまり紀元 1267 年)5 月 25 日昼の 3 時間前. 皆既食で 12digits. また食の中央のときに暗くなったのでたくさんの星が見えた.'(Nicephoras Gregoras Hist. Byzant., Lib. IV, cap. 8; Migne 1865).

望遠鏡が発明される直前の世紀においてもっとも重要な食観測はジェスイットの天文学者クリストファー クラビウスの行ったものである. 彼は紀元 1560 年の皆既食を観測し, 1567 年の実質的に皆既の食も観測した. 時刻記録は残さなかったが, 食の様子を詳細に記録している.

クラヴィウスによる紀元 1567 年 4 月 9 日の日食 (これは 1560 年 8 月 21 日の日食の直後にあたる) の記述は, 翻訳すれば次のとおりである.

'... もうひとつ (食) をローマで 1567 年に昼頃見た. 月はわたしと太陽の間にあったが, 前回のようには太陽を全部隠さなかった. 細い円環が残り, 月全体のまわりを囲んだ'(クラヴィウス 1593).

食は金環–皆既であった. ローマの近くではビーズ玉のような太陽光が残って見えたはずである. クラビウスが見たのは内部コロナであったかもしれない.

(iv) アラブ

中世アラブの食記録は主として全くことなる 2 つの資料源にある. すなわち, 年代記と天文志である. 後者は Zij とよばれる. 年代記はヨーロッパの町や修道院の年代記とほぼ同じ年代範囲にわたっている (およそ 800 年から 1500 年). さらに, 時刻記録なしで定性的な食や他の天文現象の記述はヨーロッパ紀元のものとだいたいにおいて同じである. 残念なことに, かなり少ない年代記しか残っておらず, 生き残っている食報告は対応して少ない. 食観測を記録する数少ない Zij は比較的短い期間 - 紀元 800 から 1000 年 - を扱うのみである. これらの資料 (教父アルハキムに捧げられた有名なイブンユヌスの Zij al-Kabir al-Hakini) は日月食の時刻測定値も載せている.

両方のタイプの資料において, 日付は通常イスラムの太陰暦で表現される. この暦では, 各年に 12ヵ月が割り当てられる. 各月の長さは 29 日または 30 日である. ゆえに, イスラム年には 354 日または 355 日しかない. そのため, 年初は太陽年に比べてどんどん早まり, 約 33 年で元に戻る. このやり方での「年」は (AH と記す), 紀元 622 年のモハメッドによるメッカからメジナへの移住, ヘジラ (Hijira), から数える. イスラム日付からユリウス日付あるいはグレゴリオ日付への変換表は Freeman-Grenville(1977) によって作られた.

アラブ年代記に報告された月食観測は今回の目的のためには荒っぽすぎる. 一方, 数個の皆既日食がグラフのように詳しく報告されている. そのひとつ, 紀元 1061 年 6 月 20 日の ibn al-Jawzi の年代記に引用されてものを紹介する.

> (453 AH). ' 水曜日. Jumada al-Aula(月の第 5 日) が終る 2 晩前, 夜明け後 2 時間, 太陽は完全に隠された. 暗闇があり, 飛ぶ鳥は落ちた. 占星師は太陽の 1/6 が残るはずだと主張したが, 何も残らなかった. 太陽は 4 時間余後に現れた. 食はバグダッドおよびその近隣以外では皆既でなかった.'(翻訳は Said et al. 1989).

正しい日付を与えているばかりでなく, 説明ははっきりしていて, 太陽が完全に隠されたこと, 観測地がどこかも明瞭にわかる.

al-Qanun al-mas'udi('the Masudic Canon') として知られる Al-Biruni の仕事は, イランのニシャプール (ネイシャブール) から見た金環食の興味深い観測を載せている. 彼によると, 火曜日, 29 日, ラマダンの早朝, 259 AH, Abu al-'Abbas al-Iranshahri が見た. 日付は紀元 873 年 7 月 28 日に対応する.

> ' 彼 (al-Iranshahri) は月全体が太陽全体の中に納まり, 太陽の残りの部分から光が来た. このことから, 太陽の直径が月の直径より大きいことが明らかである.'(翻訳は Goldstein 1979).

al-Biruni が皆既食の説明に気付いていないのははっきりしている. 上の報告は, 中心金環食であることを主張したという意味で重要である. ただ, 時刻の記述があいまいである.

クレプシドラ (水時計) を使う代わりに, 中世ムスリムの天文学者らは, 四分儀 (quadrant) あるいはアストロラーブを使って高度を決めることにより, 間接的に食の時刻を決める方を好んだ. これらの器具はその当時のもっとあらっぽい時刻決めの道具よりずっと精度が良かった. Zij からの次の ibn Yunus の例は, ムスリム天文学者が日月食の時刻をしばしば注意深く測ったことを示す.

1. 紀元 927 年 9 月 14 日 (バグダッド: ibn Amajur の報告した月食): (315 AH, 金曜日 - 月と日は述べられていない). ' 食はわたしの息子 Abu al-Hasan が観測した. はじめ, 星 al-Shi'ra al-Yamaniya(シリウス: α CMa) の高度は 31° で東にあった. 日の入りと食の始まりの間の天球の回転 (アストロラーブで測定したのだろう) は約 142°, 9 時 52 分等時, これは 10 非等時に等しい. 食分の大きさは, 4 分の 1 より大きく, 3 分の 1 より小さい. 約 $3\frac{1}{2}$ digits である.'(翻訳は Said & Stephenson 1991).

2. 紀元 977 年 12 月 13 日 (カイロ: ibn Yunus の観測した日食): (367 AH, Rabi I, 28 日). ' この日食を観測するために, 数人の学者を Qarafa(カイロの地方) の al-Maghribi のモスクに集めた.... 誰もが食の始まりを待った. 食が始まったとき, 太陽の高度は 15° より高く 16° より低かった. 観測者達は太陽が直径の 8 digits だけ隠されたことで一致した.... 太陽が完全に元に戻ったのは, わたしの見積もりによれば, 高度が 33° より (1/3)° ほど高くなったときであり, すべての人が食が終ったことで合意した.'(翻訳は Said, 個人情報).

Ibn Amajur は, ibn Yunus に引用されていたように, アラブの天文学者が太陽のぎらつきを減らすために水に映して日食を見たことの証拠を出している. この手法がバビロニアや中国の天文学者にも採用されたことが知られている.

アラブの 43 個の時刻観測の多くは, 第一および第四接触であり, 数は日食と月食とでほぼ同じである. 9 個を除いて, 元の高度測定値が残っている. このような状況では, 観測者自身整約に頼るよりは自分でこの測定値を変換する.

(b) 紀元 1620 - 1955.5 の月掩蔽

紀元 1620 - 1955.5 の期間には月による掩蔽の 53000 個以上の時刻観測が Morrison(1978) および Morrison et al.(1981) によってカタログ化された. この期間の初期においては, 個々の観測は 1 秒の精度が与えられた. 紀元 1800 年あたりからは, 精度は一般に 0.1s である. これらの掩蔽観測により, 1 年以上のタイムスケールでの UT の変動を詳しく追跡することができる. 紀元 1830-1955.5 の期間の詳しい解析は Jordi et al.(1994) が行なっている.

4 ΔT への帰着

2e 節に, ΔT を決めるのに価値のある食観測の 8 個の異なるカタログを掲げた. 歴史的な例は 3 節に引用した. この節では, 各タイプの観測から ΔT を決めることについて議論する.

(a) 望遠鏡以前の太陽観測

(i) 時刻記録なしの皆既および金環日食

ある特定の日および特定の場所において日食が皆既または金環であることがわかっていれば, 日食が起こった日において時刻観測は必要ない. 皆既帯は地表の約 400km の幅の細いゾーンを掃く. ΔT を増大させる効果は, 計算された帯を (地表に対して) 東にずらすことであり, その逆も成り立つ. 日食の中心線が観測地の近くで赤道 (緯度線) とかなり大きな角度交わっているなら, ΔT の不定性は小さい. 典型的に約 1000 秒の幅である. 皆既または金環の始まりは非

常にはっきりしているから, 2 つの ΔT の限界は鋭く決まる. とくに, 皆既帯や金環帯の幅が狭いとき (つまり太陽と月の視直径がほぼ同じとき), ΔT の範囲が非常に狭いから, 観測はとくに役に立つ. しかし, 皆既帯が緯度線に平行に走るとき, ΔT の範囲は大き過ぎて, 観測は使いものにならない. だから地理的な状況が重要性を持つ.

皆既または金環食の各観測を満たす ΔT の範囲を求めるために逐次法を使った. このやり方では, 観測地に皆既帯の両端が触れる ΔT の値を推論する. 皆既あるいは金環位相の継続時間が短いので, これを見積もった古代あるいは中世の報告は非常に稀であり, 上のようなやり方で見積もった ΔT より狭い値を導くのはほぼ不可能である.

説明のために, 紀元前 136 年のバビロニア皆既日食を引用してみよう (3a(i) 節参照). これは太陽が完全に隠されたことを記す古代記録としてはもっとも信頼できるものであり, バビロンの近くで皆既帯は緯度線と大きな角度 (約 60°) で交わった. 日長を 86400 SI 秒に固定した計算によると, 皆既帯はバビロンの遥か西を通る. 皆既帯の南端がバビロンに接するためには, $\Delta T = 11210\text{s}(3.11$ 時間) が必要である. 北端がバビロンに接するためには $\Delta T = 12140\text{s}(3.37$ 時間) が必要である. ゆえに, 観測を満足させるためには, この 2 つの値の間にある ΔT のみが受け入れ可能である. 同じことが他の観測にも当てはまる. 上で指摘したように, 非常に信頼できる観測報告であっても, 緯度線に平行な皆既帯を持つ食の場合には, 我々の目的に合わないので棄却される. 不幸なことに, 紀元 1239 年のイタリアにおける食はこの場合であり, 一方, この日食に関しては各地から皆既に関する詳しい報告がなされた.

(ii) 時刻記録なしの大食分の部分日食

日食の観測記録の多くは, 日食が皆既でないことをはっきり述べており, しかも太陽が細い三日月のようになったと断言しているが, 三日月の角がどちらを向いているかを述べた記録は非常に少ない. だから, ほとんどすべての場合に, 仮定できるのは, 皆既帯が観測地の北を通ったのか南を通ったのかだけである. ただ一言の言及があれば, どちらかが決まるのであるけれども. 時刻記録なしの部分食記録 (とくに皆既や金環が否定されている場合) の整約は皆既食の場合と同様に進む. ただし, ある範囲の ΔT が排除されるのである. この回避ゾーンが非常に狭ければ (太陽と月の視直径がほぼ同じ日食に対応), 記録はほとんど役に立たない. 多くの場合, 排除された ΔT の範囲のどちらかの側の任意の値が受け入れ可能である. というのは, 大食分の部分食の食分の見積もりは — 記録されているとしても — しばしば大雑把だからである. 一方, 皆既帯が広い場合, ΔT の解空間として, ほぼ同時代の食の解との相互無矛盾性から, 皆既帯の片側に絞ることが可能である.

フランスの Vigeois からの報告した紀元 1178 年の大部分食 (3a(iii) 節, 例 2 参照) は良い例である. 1140s と 2320s の間の任意の ΔT に対してこの日食は Vigeois において皆既であった. だから, 食が皆既でなかったということは, $\Delta T < 1140\text{s}$ あるいは $\Delta T > 2320\text{s}$ である. この限界から大きくはずれた ΔT でも大きな部分食となる. だから重要なのは, この排除された範囲なのである.

(iii) 日食の食分

日食の食分は ΔT の弱い関数である. この手法の潜在能力を評価するために, 月食の食分見積もりの記録と計算値 (これは ΔT には無関係) の間の不一致を調べてみた. バビロニアであろうと, 中国, アラブであろうと, 観測の平均誤差は 10 % に近い (Stephenson & Fatoohi 1994a 参照) と結論できる. 日食の場合, 食分のその程度の変更を行うには, ΔT の変化 40 分ほどが必

要である. だから, このような観測からは, 貧弱な時間分解能しか得られない. さらに, 太陽の上部が隠されたのか下部が隠されたのかを述べる記録はまれであり, 食分のそれぞれの記述からは ΔT に関して 2 つの異なる見積もりが得られる. これらは普通 6 時間ほど離れている. 日食の食分見積もりは数が少ないから, ここでの解析では, これ以上考えない.

(iv) 日出帯食, 日入帯食

ときに, 日の出あるいは日の入りの時に太陽が欠けていたと述べられていることがある. このような観測からは ΔT のひとつの範囲が決まる. 皆既食の場合に似ている. ただし, 両限界ははるかに離れているし, 決まり方も明確ではない. ある種の場合, 記録から, 太陽が地平線に達したのは第一接触と第四接触の間のある時であったことだけがはっきりすることがある. このようなとき, ΔT の範囲は食分の大きな日食の場合, 2 時間ほどに広がる (?)(ΔT can span up to 2h). ときには, 文書から食分が増大している, あるいは減少していることがわかる. このときは, ΔT の幅が半分になる.

(v) 時刻付き日食の接触

古代および中世の歴史に残されている食の接触時刻はふつう, 最初と最後の事象 (第一および第四接触) および最大食時に限られる. 直接 (水時計で) 測ったり, 間接的に (太陽の高度) 測ったりした各種の測定は, 地方時から UT へと, 地理経度と equation of time を使って簡単に変換できる. こうして, 適当な位相の TT を計算することにより, ΔT の値は差を取ることによって得られる.

計算はそれほど簡単ではない. というのは 地表での皆既帯の曲率により, TT の計算が非線形になるからである. 実際は, ΔT の値を改善しつつ逐次的に計算を行う.

初期の時刻観測は非常にあらっぽい (ふつう, 一番近い 10 分あるいは 20 分より良いことはない). ゆえに, 実際の接触時刻を使おうと, 極大食分の時刻を使おうとあまり差はない. 原理的には, 第四接触がいちばん精度が良いはずである. なぜなら, 太陽の西側の縁が次第に消えて行くのは注視していればよいのだから. しかし, 古代および中世の天文学者の間で, 食がいつ始まるかを前もっておよそ計算しておくことが行われた. そうすることによって, 彼ら — 熟練していたはず — にとって第一接触を観測するのに心構えができたであろうから. しばしば, 食の始まりにおける太陽の高度が 0.5 度の精度で測られた. これからすると, 注意深い観察が行われたはずである.

まれではあったが, アラブの観測者は, 系統的に太陽の観察ができないとき, たとえば, 途中曇ったとき, 食の始まりの時刻をあとで決めることもした. たとえば, ibn Yunus によると, 紀元 1007 年, 食に気付いたとき, カイロにおける太陽高度は 16.5° であった. 彼は食の始まりが 10 分ほど前で高度が 18.5° のときであったと見積もった. Ibn Yunus は日食観測に熟練しており, 彼の経験値は信用できる.

(b) 望遠鏡以前の月観測

(i) 月出または月入時の食分の見積もり

日食の場合には, これに対応するような観測はほとんどないから, このような節は設けなかった. しかし, 月の出あるいは月の入りの際の, 月の食分の注意深い見積もりはいくつか残されて

いる. これらの見積もりは 10 %より良いと引用される. 中心食の位相は約 6 あるいは 7 分の間にその位変化するから, この型の観測は注意深い接触時観測と同じ程度であるように思われる.

月出または月入のとき, 大気屈折は最大である. とはいえ, 月縁のゆがみは必ずしも重要でない. 地平線上にある食中の太陽の写真 (同じ状況の月の写真は少ない) を調べると, 多くの場合, 太陽であろうと, 月であろうと, 食分の見積もりがうまくできることが推論できる. いずれにしろ, 光っている方の縁がひどくゆがんでいる場合は, 古代あるいは中世の観測者は, このような見積もりが無意味と感じたかもしれない. これらの観測からの ΔT に対する個々の結果は, 自己無矛盾であることが知られている (以下参照).

月出または月入のときの食分が知られているときは, 月全体が地平線上に顔を出していると思ってよいだろう. 水平線上での屈折を考慮すると, これは月の天頂距離が 90.3° のときである. 月出および月入の地方時を出すにあたって, 視差 (parallax) の補正をしておく必要がある.

(ii) 月出帯食または月入帯食の食分のわからない観測

食分のわからない部分食と同じカテゴリーに入るのが, 地平線上にあるときに皆既となったと記録された月食である. ここでも, 解析は日食の場合とほぼ同じである. ΔT の範囲が指定される. 一般に食が皆既であって, 月出あるいは月入のときに部分食であったと書かれているなら, 皆既食は地平線の上で起こったのか下で起こったのかを決めることができる. そうでない場合には, ΔT の範囲として, 1 時間 40 分を最大限とする離れた 2 つが得られる. 皆既食が地平線で起きているとき, 裸眼では見えない.

(iii) 時刻付き月食の接触時刻

日食よりも月食の時刻観測の方が多く生き残っている. これはバビロニアにこの観測が多いからである. 第一および第四接触だけでなく, 皆既の始まりと終り (第二接触と第三接触) の時刻も多く測定されており, また部分食の最大食分記録も残されている. 上で指摘したように, 時刻は直接あるいは間接に測られた. しかし, これらの散らばった測定値が UT に変換されると, 考えている位相の TT の計算をすれば, 差を取ることによりただちに ΔT が得られる. (日食の場合と違って) 逐次法を行う必要はない. というのは, 任意に与えられた瞬間に, 月食の局地的状況は, 月を見ることの出来る場所なら地表のどこでも同じだからである. 月食の場合の皆既帯の接触観測を解析するにあたって, 地球大気の影響を近似的に取り込むため, 地球の影の半径を 2 % 増した.

5 解析

古代および中世の各種観測から推論した ΔT の値は, この解析の粗観測値である. 主目的は, これらを通る滑らかな曲線を得て, UT 目盛りの歴史的変動を測ることである. この曲線に沿っての 1 階微分は日長のゆらぎを測る.

ΔT 値は 2 つの広いグループで解析する. すなわち, 時刻なし観測と時刻あり観測である. この 2 つのグループは完全に独立なデータセットを含んでおり, この事実を使って, fit した曲線の信頼性を吟味する. 最初に, 地球自転が一様であること, つまり潮汐摩擦の影響で一定の割合で遅くなることからのずれの最も簡単なモデルを吟味する. これによると, UT が TT から放物線的に発散していく.

だが, ΔT の数学的な解析を始める前に, 紀元前/紀元後の不連続な日付システムをなんとかする必要がある. この論文の始めの部分では, 食の日付を紀元前 (BC) または紀元後 (AD) と表した. 記録が歴史的文献から取り出されたのであるから, この取扱はもっともだと思える. だが, 天文学の目的のためには BC と AD を $-$ あるいは $+$ の記号に置き換えるのが普通である. 理由は数え方が簡単であること, 実はもっと重要なことは BC/AD 系は不連続だからである. ゼロ年がない. つまり, 紀元前 1 年の次は紀元後 1 年である. 慣習的に, AD と+は同一視し, BC と $-$ は 1 年ずれているとする. だから BC311 年は -310 年であり, 以下同様. この論文の残りでは, すべての日付は $-$ または $+$ を使って表す.

(a) 地球自転の一定減速成分

時刻なしのデータから得られた ΔT の結果は図 2 に描かれている. 期間 $+1500$ から $+2000$ のデータは図中に拡大しておいた. 時刻なしのデータは ΔT の範囲 (解空間) を与える. 実際の値はその中のどこにでもあり得る.

皆既食はふつう ΔT の狭い解空間を定義する. その上限と下限ははっきりしている. 一方, 部分食はこれの逆を定義する. すなわち, 皆既になるべき細い帯を除いて ΔT の全範囲を満たす解空間を指定する. ひとつ ($+1004$ のもの) を除いて 10 個すべての部分食において, 皆既帯の片側の解空間は余計である. この余分な解は図 2 には示さなかった.

月出帯食, 月入帯食 (まれに日出帯食, 日入帯食) に関する時刻なしの観測は皆既あるいは金環食と同じ結果をもたらすが, 限界は皆既・金環に比べて広い. このタイプの 34 観測 — これらは本影食と名付けられた — のうち, 14 個だけが ΔT の解空間に制限を加えるのに有用であった. これらだけ図 2 に示しておいた.

近代の掩蔽観測から導いた連続曲線は, 図 2 の中の入れ子の図に示した. この曲線は自分達の以前の解析 (Stephenson & Morrison 1984) から取ってきた.

結果を判りやすくし, また後の議論のために, -700 から $+500$ の期間 (図 3) と $+400$ から $+1600$ の期間 (図 4) を拡大して図にした. 図 4 は時刻付きのデータも描いている. これは後の議論に必要である.

一定減速のモデルに合わせて, 図 2 のデータに放物線を fit した. この放物線は, 2a 節で説明したように, 食によって設定された境界の多くを満たし, 頂点が紀元 19 世紀の初期のどこかにあるものである. 図 2-5 においてダッシュ線で描かれたこの放物線の式は

$$\Delta T = (-20) + 31t^2 \text{ s}$$

である. ここで t は放物線の頂点 (cusp) から測った時間 (世紀) である. ここでは元期を $+1820$ とした. 定数 (-20) の正確な値は不確かである. というのは, -30 と -10 の間の数値なら, $+1600$ 以後の ΔT に許容範囲で放物線が合うからである. $+1600$ 以前のデータからは, これほどの分解能は得られない.

一般に, この放物線は, $+1600$ から $+1990$ までの近代のデータも含めて, たいていのデータにうまく適合するが, 図 3 と図 4 を見ればわかるように, 非常に信頼できる境界条件のいくつかを満足しない. $+454$(3a(ii), 例 2 参照), $+761$(3a(ii), 例 3 参照), $+1147$(3a(iii), 例 1 参照), $+1221$(Stephenson & Yan 1992 参照), および $+1267$(3a(iii), 例 4 参照) の皆既あるいは金環食と $+1178$(3a(ii), 例 2 参照) の部分食がそれである. この理由により, 最終的にはこの解を棄却

図 2

図 3

図 4

図 5

する. にもかかわらず, 潮汐摩擦のみから期待される放物線 (2c 節参照)

$$\Delta T_{\rm tidal} = (-20) + (42 \pm 2)t^2 \ {\rm s},$$

が見込みのある解とは言えないことも, ここで言っておく.

さて, $+1600$ 以前の時刻付きデータについて考えよう. これは時刻なしのデータとは対照的に, ΔT の離散的な値を与える. この離散的な値は図 2 に示された同じ放物線と一緒にして図 5(および図 4) に示しておいた. ふたたび明らかなように, 潮汐放物線だけでは見込みのある解ではない. 放物線 (ダッシュ線) は時刻なしのデータに合った. だが, 合い方は全体としてはいいものの, $+1000$ あたりの合い方はいいとは言えない (図 4). ほとんどの点が放物線の下にある. ところが, これらの点は, $+1600$ から現在までの近代の掩蔽曲線に合わない. たとえば, 放物線 (混乱を招かないため, 図には示さなかった)

$$\Delta T = (-20) + 35\tau^2 \ {\rm s}$$

を考えてみる. ただし, τ は頂点 $+1735$ からの世紀数である. この放物線は紀元前にはよく合い, $+31t^2$ の放物線より $+1000$ あたりの時刻付きデータによく合う. ただ, ほとんどの点は放物線の下にある. しかし, これは $+1600$ から現在までの ΔT 曲線に合っているとは言えないし, 2a 節の考察に基づく頂点が 19 世紀の始め近くにあるべきという要請も満たさない. この要請を強制的に満たすように放物線をいじって横方向に頂点が 1820 年に来るまでずらすと, 縦座標の値は, -135 において ~ 1100 上昇し, -500 において ~ 1350 下降する. こうなると, -135 の非常に信頼できる食 (3a(i), 例 1 参照) の上限のはるか上, また時刻付きのバビロニアデータの上に来てしまう.

ひとつの放物線ではすべてのデータを表現することはできない.

2 つの独立なデータセットから明らかなように, 潮汐摩擦のみによる地球自転の減速は大き過ぎる. 一方, 潮汐による遅れは過去 2700 年間にわたって一定でなければならないが, データはこの一定性からのはずれを示唆する. 不可避の結論は, 一定潮汐減速と同様, 地球自転には, 非潮汐加速成分があること, またこれが時間変化することである. 放物線よりもっと柔軟な曲線を使ってデータに合わせ, この変動する成分を調べよう.

これをする前に, バビロニアの -135 の皆既日食による上限と下限を用いて, t^2 の係数としてわれわれの得た数値 $+31{\rm s}\ cy^{-1}$ に, 上限と下限を設定する. 係数の下限と上限は $+29.3{\rm s}\ cy^{-1}$ と $+31.8{\rm s}\ cy^{-1}$ とする. ただ, 次の節で示すように, バビロニアの時刻付きデータは上限近くの値を示唆している. だから, われわれが好ましく思う解は, $+31.0t^2$ であり, それに $\pm 0.9t^2$ の誤差を指定する. これは日長の変化 $(+1.70 \pm 0.05){\rm ms\ cy}^{-1}$ に等価である.

(b) 地球自転の可変加速成分

望遠鏡以前のデータ分布が与えられ, 放物線 $31t^2$ がかなり合うということが判ったから, 数百年の時間尺度での一定加速からの小さなずれを見つけることのみが実行可能なことである. だから, データをもっと柔軟な曲線で合わせる際に, その制限条件は厳しくすべきである. さもないと, 余計な短周期ゆらぎを拾ってしまう.

われわれの選んだ曲線合わせの手法は, 3 次スプラインである. 3 次スプラインは, いくつかの 3 次多項式の弧 (最小自乗法で合わせる) を接続点 (join, knot) で 1 階および 2 階微分が連続

に継るようにした曲線である. 微分が連続なので, 日長の変化に関して現実的なモデルが提供できる. また, 多項式弧 (knot) の数を制限することにより, 自由度を容易に制限できる.

接続点 (knot) を $-500,\ +300,\ +1000,\ +1700,$ および $+1990$ にした 3 次スプラインが, 自由度に関する経済性原理とも折り合いのいい, 最良のやり方であることが判った. スプラインは図 2 および図 5 に描かれたデータに次のような仕方で合わされた. バビロニアの月食点 ($< 25°$)(3a(i) 参照) および中世アラブの日月食点 — これらは特別に注意深く観測されたもの — (3a(iv) 参照) には, 近代の掩蔽観測を除いて, ほかの時刻付き観測の 2 倍の重みを与えた. 近代の掩蔽観測は, $+1650$ から $+1900$ の間は 50 年間隔で, その後は 25 年間隔で高い重みを持つ標準点 (normal point) として表現されている. これら重み付きのデータ集合に, 以下の皆既食の境界から課される臨界限界が高い重みで加えられる. すなわち, $-393, -135, +454, +761, +1241,$ および $+1561$ の食である. 得られた 3 次スプライン曲線は図 2-5 に連続曲線として描かれている.

図 6

スプライン曲線は, 図 2 中で, 時刻記録なしの日食, および -408 のもの (ぎりぎりではずれる) を除いてすべての月食の限界から課される制限条件をすべて満たす (図 3 参照). このひと

つの例外は, バビロニアの月食観測であって, 食の一部の見えている月出帯食である (4b(ii)). 文書によると, 食は少なくとも 8° 見えた. それから ΔT が 15400 秒より小さいと出る. しかし, 矛盾の一端は, 測定誤差あるいは, 記述のあやまりによる可能性がある. このひとつの事実を基にして, スプライン曲線を変更するつもりはない.

スプライン曲線がダッシュ放物線から離れる時期が 2 つある. それは +400 あたりと +1100 あたりである. 最初の部分 (図 2 参照) では, スプラインへの主たる制限は +454 の皆既日食の下限である. +454 の皆既日食は宋書 (Songshu) の志において皆既と記録されている. また, 暗闇の間, 「すべての星座が明るく輝いた'(3a(ii), 例 2 参照) と書かれている. だから太陽が完全に隠れたことは疑いようがない. 観測が首都建康 (Jiankang) の外で行われたこと (首都での悪天候のため) を示唆する証拠もない. だから, 建康が実際の観測地であると想定することも自然である. 上で指摘したように, このような志は宮廷天文官の記録から収集されたものである. したがって, +454 の下限はしっかりしたものとみなす.

スプラインは, +360 の部分食にさわらずに, +454 の下限のはるか上を通るわけにはいかない. 宋書天文志の +360 年日食の説明によると, 極大のときに太陽は鈎のように見えた (3a(ii), 例 1 参照). これからはっきりわかることは, 観測者は金環位相を見ずに, 大部分食を見たことである. +360 の限界も信頼できると判断する.

+400 近傍の時刻付きデータだけではスプライン曲線への強い制限条件を与えない (図 5 参照). しかし, そうは言うものの, このデータからは, とくに, 2 つの低い点が同じ中国の月食 — +434 — の 2 つの位相から得られていること, したがって独立でないことを考えると, ダッシュ曲線より上の解が好ましい. この場合, おそらく, クレプシドラ (水時計) の働きが悪かったか, 不注意な目盛り読みがあったのだろう.

+1100 のまわりの第二の期間では, スプラインは放物線と異なっており, またダッシュ放物線は時刻なしのデータ (図 4 の +1147, +1178, +1221, +1267) とは合わない (?). アラブと中国の 2 つの文明からの時刻付きデータの独立な 2 つの集合から強い証拠がある (?原文がおかしい). 図 6 に, アラブの時刻観測 (+854 から +1019) のスプラインからの残差および中国の時刻データ (1046 から +1280) の残差の頻度グラフを載せた. 矢印はダッシュ放物線 $31t^2$ の位置を示す. 放物線は明らかに 2 つのデータ集合と矛盾しており, 各データ集合と, 約 500 秒 (~ 8 分) のバイアスを持つ. スプライン曲線から得られた ΔT の値は放物線からの値より小さい. つまり, スプライン曲線の方が ΔT は大きい. だから, 議論のために, 放物線が正しいとしてみると, アラブと中国の日月食の時刻観測に約 8 分の系統的遅れがあり得たであろうか?

これは以下の 3 点より, きわめてありそうもないことである.

1. アラブと中国の天文学者は時刻測定にまったく異なった方法を用いた.

2. 月や太陽の縁のへこみの進行は裸眼で見分けるのはむずかしい. 8 分以下の時間 (たとえば中心食の場合, 直径のうち隠される部分が 1 分角になるのは 2 分後以前である). 紀元 1020 年に死んだ中世の偉大な天文学者 al-Biruni は彼の Kitab Tahdid の中で次のように述べている.

> , ' 食が観察者にそれと判るようになるのは, zijes の何人かの著者によれば, 隠された部分が 1 digit になってからである. つまり, 天体の 12 分の 1 に... この関係で digit の量を多すぎると考えるのは, 小量の潜入が起こるからである (?) ...(翻訳は Ali 1967).

中心食の場合, 12 分の 1 の位相は第一接触から 5 分後に起こる. しかし, al-Biruni はもっと少ない遅れで食を見つけることができると言っている.

3. 食に気づくまでに, 判る程度のバイアスがあったとしても, アラブと中国の観測は第一接触と第四接触をほぼ等分に割ったということは, 実質的にバイアス効果は小さかったことを意味する. というのは, 第一接触と第四接触において効果は等しく反対向きだからである.

われわれの考えでは, 時刻なしの日食によって課される条件は, 上で議論した時刻ありのデータと一緒にして, 放物線より上に位置するスプライン曲線の正しさを支持する. ゆえに, 地球自転の非潮汐加速は過去 2700 年の間一定ではなかったと主張する. しかし, それは, 地球物理学的に異なる起源を持つ滑らかなトレンドと変動する成分の重ね合わせであるかもしれない.

(c) 時刻付きデータの精度

図 6 に描いた中国とアラブの時刻データの残差の分布から, 時刻測定の誤差を見積もることができる. 標準偏差は中国およびアラブのデータに関して, それぞれ 13 分および 9 分である. 3a(ii) 節で報告したように, 中国の天文学者は食観測の時刻のほとんどを, いちばん近い ke, すなわち一日の $\frac{1}{100}$, に対して測った. したがって, 誤差の最大要因が測定単位の影響であるなら, 誤差の最大範囲は ± 7 分のはずである. 標準偏差の計算値が 13 分であるということから, 観測の不確かさが 1 ke(14 分) であったと結論できる.

アラブの天文学者 (3a(iv) 節参照) は太陽, 月, あるいは明るい星の高度をいちばん近い度に対して測ることによって時刻を測った. 1 度は 4 分に相当する. 標準偏差のわれわれの見積もりは 9 分である. アラブの日食時刻部分データ (図 6a の色付き部分) に対しては, 標準偏差は 6 分である. ということは, 最大の誤差は月食の時刻決め (夜) のときに発生したことになる. 測定単位の影響は時刻決めの限界要因 (limiting factor) ではない. これらの最良の精度は, 1 単位 (4 分) よりやや良かった.

図 7

バビロニアの食時刻すべての残差の頻度分布から, 標準偏差を約半時間と見積もる. ごく初期の月食を除いて, すべてが一番近い度 (4 分) に対して記録された (3a(i) 参照). だから, ここでも, 測定単位は時刻決めの限界要因ではないし, 現象の本性 (日出/日入および月食の始まり/終り) も精度の限界を決めるものではない (?). 誤差の原因はおそらく, クレプシドラ (水時計)

の一種であったと思われる時計の進みの狂いであろう. これを支持する証拠として, 日の出/日の入の 1 時間以内に起きた月食 (図 5 の黒点) にデータを限ってみると, 大きくはずれるデータを棄却したあとで, 標準偏差が 13 分になったことが挙げられる.

(d) 日長の変化

図 2-5 の 3 次スプラインに沿って 1 階微分を取れば, 日長の変化が得られる. これは図 7 に描いておいた. Jordi et at.(1994) から取って来た 1830 年以後のものと一緒に日長のゆらぎも描いてある. これによると, 潮汐摩擦から予想される値 $+2.3 \pm 0.1\mathrm{mscy}^{-1}$ に比べて $+1.7\mathrm{mscy}^{-1}$ の平均トレンドが観測される. これはつまり, 日長を短くする $-0.6\mathrm{mscy}^{-1}$ という加速成分があることを意味する. 過去 2700 年の間に潮汐摩擦が有意に変化したことを示唆する証拠はないから, 図 7 に示される長期のゆらぎは潮汐起源ではないと言える. 平均トレンド $-0.6\mathrm{mscy}^{-1}$ のまわりに半振幅 ~ 4 ミリ秒を持ち, 十年スケールのゆらぎと同じ振幅を持っているが, 周期はずっと長く ~ 1500 年である.

上で述べたように, 非潮汐加速とゆらぎは異なる地球物理学的起源を持つ可能性がある. 非潮汐加速は地球の偏平度 (oblateness) の変化率に関係するかもしれない. これは最終氷期後の荷重の減少による固体地球の粘性反跳 (?) (viscous rebound) の結果であると考えられる. ラジオス衛星の軌道の昇交点の加速の解析から, Yoder et al.(1983) は地球のゾーナルハーモニクス J_2 の現在の変化率として $-3 \times 10^{-11}\mathrm{yr}^{-1}$ を導いた. これは地球自転の加速として, 日長の変化率 $-0.6\mathrm{mscy}^{-1}$ に等しい. スターレットを用いたもっと最近の Cheng et al.(1989) の結果によると $(-2.5 \pm 0.3) \times 10^{-11}\mathrm{yr}^{-1}$ であり, これから日長の変化率として $-0.44 \pm 0.05\mathrm{mscy}^{-1}$ が得られる.

$-0.6 \pm 0.1\mathrm{mscy}^{-1}$ というわれわれの結果は過去 2500 年間の平均値であり, スターレットの結果と一緒にすると, 過去の J_2 の変化率は現在より大きかったことになる. これは後氷期反跳理論から期待されることである. 過去の時刻 t と現在の時刻 t_0 の間で $\dot{J}_2$ が指数関数的に減衰することを仮定すれば,

$$\dot{J}_2(t) = \dot{J}_2(t_0)e^{(t_0-t)/\tau},$$

を得る. ここで τ は約 4000 年の緩和時間である. 対応して, 日長の変化率 $\dot{d}$ は

$$\dot{d}(t) = \dot{d}(t_0)e^{(t_0-t)/\tau},$$

で与えられる.

$\dot{d}(t_0) = 0.44\mathrm{mscy}^{-1}$ および $\tau = 40\mathrm{cy}$ を採用し, t_0 と t の間を積分すれば, 後氷期反跳による時刻 t における日長の短縮率は

$$d(t) = +40 \times 0.44 \times (e^{(18.2-t)/40} - 1)$$

で与えられる.

時刻 (epoch)$-500(t = -5)$ において, これは $+14\mathrm{ms}$ であり, 潮汐から期待される値 $-53\mathrm{ms}$ に加えると, $-39\mathrm{ms}$ が得られる. これは図 7 に描かれたダッシュ線の値に近い. 実は, データの精度の範囲で, $d(t)$ の表式を潮汐の値に代数的に加えると, 図 7 に描かれたトレンド $+1.7\mathrm{mscy}^{-1}$ からそれほど離れていない. だから, 過去 2500 年間の非潮汐「加速」に関するわれわれの結果

は, 後氷期反跳の緩和時間を 4000 年とした $\dot{J}_2$ の現代の衛星観測と矛盾しない. しかし, 時刻 -500 において, $d(t)$ の値は大きな緩和時間を取ると $+10$ms に収束する. これから図 7 の限界 -43ms が得られるが, 長期ゆらぎによって紛らわしくされたとしても, これはそれでも可能な限界内に納まっている. したがって, われわれのデータは緩和時間の上限を決めない. もっと長い時間ベース (time base) によってこの制限条件を厳しくできるだろうし, 紀元前 1000 年あるいはそれ以前の食のデータがあれば役に立つ. 残念ながら, この時代の記録については何も知らない.

1500 年ほどの時間スケールの準周期的なゆらぎはコア・マントル相互作用から生じるかもしれない. この機構は十年ゆらぎではもっとも本当らしく思われている (Lambeck 1980). 最大の角加速度は $\sim \pm 2\mathrm{mscy}^{-1}$ である. これは $\sim \pm 5 \times 10^{22}\mathrm{rads}^{-2}$ に対応する. マントルに働くトルクの大きさはだから $\sim \pm 4 \times 10^{22}\mathrm{Nm}$ である.

望遠鏡の導入以後に明らかにされた十年ゆらぎは (図 7 参照), この論文が扱う期間全体にわたって疑いもなく存在する. だが, このゆらぎを積分しても小さいので, 望遠鏡以前の ΔT の中にこれを検出することはできない.

表 2. 図 2-5 に示されるスプライン曲線から取った ΔT と日長の値

	ΔT	日長		ΔT	日長		ΔT	日長		ΔT	日長
year	(s)	(ms)	year	(s)	(ms)	year	(s)	(ms)	year	(s)	(ms)
-500	16800	-42	0	10600	-28	500	5700	-27	1000	1600	-15
-450	16000	-40	50	10100	-27	550	5200	-26	1050	1350	-14
-400	15300	-38	100	9600	-27	600	4700	-26	1100	1100	-12
-350	14600	-36	150	9100	-27	650	4300	-25	1150	900	-10
-300	14000	-35	200	8600	-26	700	3800	-24	1200	750	-9
-250	13400	-33	250	8200	-27	750	3400	-23	1250	600	-7
-200	12800	-32	300	7700	-27	800	3000	-22	1300	460	-6
-150	12200	-30	350	7200	-27	850	2600	-20	1350	360	-5
-100	11600	-29	400	6700	-27	900	2200	-19	1400	280	-4
-50	11100	-29	450	6200	-27	950	1900	-17	1450	200	-3
									1500	150	-3
									1550	110	-3
									1600	80	-2

6 結論

紀元前 700 年から紀元 1990 年までの信頼し得る歴史的観測すべての今回の解析から以下の結論が導き出される. これらは地球自転速度の長期変動性の問題に関係する.

1. 過去 2700 年にわたる日長の平均増加は $(+1.70 \pm 0.05)\mathrm{ms\ cy}^{-1}$ である. これは自転の加速 $(-4.5 \pm 0.1) \times 10^{-22}\mathrm{rad\ s}^{-2}$ に相当する.

2. この観測平均値は異なる物理的起源を持つ 2 つのトレンドの合成である.

第一は潮汐散逸であり, 日長の増加として $(+2.3\pm0.1)\mathrm{ms\,cy^{-1}}$ $(\equiv(-6.1\pm0.4)\times10^{-22}\mathrm{rad\,s^{-2}})$ を生み出す. 地球自転の潮汐制動のこの値は, 月の潮汐加速 $-26.0''\mathrm{cy^{-2}}$ と釣合っている.

第二は非潮汐起源であり, 平均として $(-0.6\pm0.1)\mathrm{ms\ cy^{-1}}$ $(\equiv(+1.6\pm0.4)\times10^{-22}\mathrm{rad\ s^{-2}})$ の日長の短縮化を引き起こす. この結果は $\dot{J}_2$ の現代的な値および後氷期反跳理論と整合的である.

3. 日長には長期ゆらぎがある. 半振幅は $\sim 4\mathrm{ms}$ であり, 周期は ~ 1500 年である. これの起源はコア・マントル相互作用かもしれない.

4. 過去 2700 年にわたる ΔT は, 8 分を越えない誤差の範囲で, 放物線 $31t^2\mathrm{s}$ で良く近似できる. ただし, t は紀元 1820 年を元期として世紀で測る. 紀元 1600 年以前の食の様子の詳細な予言に関しては, スプライン曲線から見積もって表 2 にリストした値を使うべきである. これらの値は月の潮汐加速として $-26.0''\mathrm{cy^{-2}}$ なる値を基礎にしている. この値への $+0.5\mathrm{cy^{-2}}$ の補正は ΔT の $-46t^2\mathrm{s}$ に相当する.

謝辞

省略

参考文献

Ali, J. 1967 *The determination of the co-ordinates of positions for the correction of distances between cities.* Beirut

Beijing Observatory (ed.) 1988 *Zhongguo gudai tianxiang jilu zongji* (A union table of ancient Chinese records of celestial phenomena). Kianxu: Kexue Jishi Chubanshe.

Bouquet, M.(ed.) 1781 *Recueil des Historien des Gaules et de la France*, Vol. 10. Paris: Chez la veuve Desainte.

Bretagnon, P. 1982 Theorie de mouvement des l'ensemble des plenetes. Solution VSOP 82. *Astron. & Astrophys.* **114**, 278-288.

Celoria, G. 1877a Sull 'Eclissi Solare Totale del 3 Giugno 1239. *Memoire del Reale Istituto Lombardo di Scienze e Letteri, Classe di Scienze Matematiche e Naturali* **13**, 275-300.

Celoria, G. 1877b Sull 'Eclissi Solare Totale del 3 Giugno 1239. e del 6 Ottobre 1241. *Memoire del Reale Istituto Lombardo di Scienze e Letteri, Classe di Scienze Matematiche e Naturali* **13**, 367-382.

Cheng, M.K., Eanes, R.J., Shum, C.K. Schutz, B.E. & Tapley, B.D. Temporal variation in low degree zonal harmonics from Starlette orbit analysis. *Geophys. Res. lett.* **16**, 393-396.

Christodoulidis, D.C., Smith, D.E., williamson, R.G. & Klosko, S.M. 1988 Observed tidal braking in the Earth/Moon/Sun system. *J. Geophys. Res.* **93**, 6216-6236.

Clavius, C. 1593 *In Sphaerum Ioannis de Sacro Bosco Commentarius.* Lyons: Sumtibus Fratrum de Gabiano.

Dakyns, H.G. 1892 *The works of Xenophon*, vol. 2. London: Macmillan.

Faibridge, R.W. 1961 Eustatic change in sea-level. in *Physics and Chemistry of the earth*(ed. L.H. Ahrens, F. Press, K. Rankama & S.K. Runcorn), vol. 4, pp. 99-185. Oxford: Pergamon.

Fotheringham, J.K. 1915 Note on some results of the new determination of the secular acceleration of the Moon's mean motion. *Mon. Not. R. astr. Soc.* **75**, 395-396.

Fotheringham, J.K. 1920a Note on the secular accelerations of the Moon and Sun as determined from ancient lunar and solar eclipses, occultations and equinox obervations. *Mon. Not. R. astr. Soc.* **80**, 578-581.

Fotheringham, J.K. 1920b A solution of ancient eclipses of the Sun. *Mon. Not. R. astr. Soc.* **81**, 104-126.

Fotheringham, J.K. and Longbottom, G. 1915 The secular acceleration of the Moon7s mean motion as determined from the occultations in the Almagest. *Mon. Not. R. astr. Soc.* **75**, 377-394.

Freeman-Grenville, G.S.P. 1977 *The Muslim and Christian calenders.* 2nd edn. Oxford University Press.

Ginzel, F.K. 1884a Astronomische Untersuchungen uber Finsternisse, II. *Sitzungsberichte der Kaiserkichen Akademie des Wissenschaften, Wien, Math. naturwiss* Kl. **88**, 629-755.

Ginzel, F.K. 1884b Untersuchungen uber Finsternisse, III. *Sitzungsberichte der Kaiserkichen Akademie des Wissenschaften, Wien, Math. naturwiss* Kl. **89**, 491-559.

Ginzel, F.K. 1918 Beitrage zur Kenntnis der Historische Sonnefinisternisse und zur Frage Ihrer Verwnedbarkeit. *Abhandlungen der Koniglichen Akademie der Wissenschaften, Berlin, Phys. math.* Kl. **4**, 3-16.

Goldstein, B 1979 Medieval observations of solar and lunar eclpses. *Archives internationale d'historie des scienses* **29**, 101-156.

Halley, E. 1695 Some account of the ancient state of the city of Palmyra; with short remarks on the inscriptions found there. *Phil. Trans. R. Soc. London* **19**, 160-175.

Hilton, J.L., Seidelmann, P.K., and Liu Ciyuan 1992 Examination of the changes in the Earth's rotation rate from ancient Chinese lunar occultations. *Astron. J.* **104**, 2250-2252.

Ho Peng Yorke 1966 *The astronomical chapters of the Chin Shu.* Paris: Moulton.

Hsueh Chung-san & Ou-yang I 1956 *A sino-western calender for two thousand years.* Peking: San-lien Book Co.

Huber, P.J. 1973 *Babilonian eclipse observations: 750 BC to 0.*(unpublished

IAU 1968 Epoch of ephemeris time. *Trans. Int. astr. Un.* **XIIIB**, 48.

Jordi, C., Morrison, L.V., Rosen, R.D., Salstein, D.A. & Rosselló, G. 1994 Fluctuations in the Earth7s rotation since 1830 from high-resolution astronomical data. *Geophys. J. Int.* **117**, 811-818.

Lambeck, K. 1980 *The Earth's variable rotation.* Cambridge University Press.

Liu Ciyuan 1988a Secular acceleration of Earth's rotation from Chinese records of lunar occultations of stars before AD 600. *Chinese astronomy and astrophysics* **12**, 169-178.

Liu Ciyuan 1988b The secular variation of the Earth's rotation obtained from 171 Chinese records of lunar occultation before AD 600. *Chinese astronomy and astrophysics* **12**, 260-267.

Liu Ciyuan and Yau, K.K.C. 1990 Application of early Chinese records of lunar occultations and close approaches. In *Earth's rotation from eons to days* (ed. P. Brosche and J. Sundermann), pp.33-39. Berlin: Springer.

Markowitz, W., Hall, R.G., Essen, L. & Parry, J.V.L. 1958 Frequency of cesium in terms of ephemeris time. *Phys. Rev. Lett.* **1**, 105-106.

Migne, J.P. 1865 *Patrologiae Graecae.* vol. 148, p.246. Paris.

Morner, N. 1971 Eustatic changes during the last 20000 years and a method of separating the isostatic and eustatic factors in an uplifted area. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeocol.* **9**, 153-181.

Morrison, L.V. 1978 Catalogue of observations of occultations of stars by the Moon for the years 1943 to 1971. *Royal Greenwich Observatory Bull.* **183**.

Morrison, L.V., Lukac, M.R. and Stephenson, F.r. 1981 Catalogue of observations of occultations of stars by the Moon for the years 1623 to 1942 and solar eclipses for the years 1621 to 1806. *Royal Greenwich Observatory Bull.* **186**.

Morrison, L.V. & Ward, C.G. 1975 An analysis of the transits of Mercury: 1677 - 1973. *Mon. Not. R. astr. Soc.* **173**, 183-206.

Muratori, S.(ed.) 1723 *Rerum Italicarum Scriptores*, 25 vols, Milan.

Newcomb, S. 1895a Tables of the motion of the Earth on its axis and around the Sun. *Astr. Pap. Am. Eph.* **6**,part 1.

Newcomb, S. 1895b The elements of the four inner planets and the fundamental constants of astronomy. Washington Government Printing Office.

Newhall, X.X. Standish Jr., E.M. & williams, J.G. 1983 A numerically integrated ephemris of the Moon and planets spanning forty-four centuries. *Asron. Astrophys.* **125**, 150-167.

Newton, R.R. 1970 *Ancient astronomical observations and the accelerations of the Earth and Moon.* Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Newton, R.R. 1972a The Earth's acceleration as deduced from al-Biruni's solar data. *Mem. R. astr. Soc.* **76**, 99-128.

Newton, R.R. 1972b *Medieval chronicles and the rotation of the Earth.* Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Oates, J. 1986 *Babylon.* Cambridge University Press.

Parker, R.A. & dubberstein, W.H. 1956 *Babylonian chronology: 626 BC - AD 75.* Providence RI: Brown University Press.

Pertz, G.H.(ed.) 1826 *Monumenta Germaniae Historica, Scriptores*, 32.vols, Hanover: Hahn(Reprinted Kraus Reprint Corpn., Stuttgart, 1963).

Sachs, A.J. 1974 Babilonian observational astronomy. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* A **276**, 43-50.

Sachs, A.J. 1975 The latest datable cuneiform texts. *Alter Orient und Altes Testament Sonderreihe* **25**, 379-398.

Sachs, A.J. & Hunger, H. 1988, 1989 *Astronomical diaries and related texts from Babylon*, vols 1 & 2. Wien: Osterreichischen Akademie der Wissenschaften.

Sachs, A.J. & Schaumberger, J. 1955 *Later Babylonian astronomical and related texts.* Providence RI: Brown University Press.

Schaumberger, J. 1952 Die *Ziqpu*-Gestirne nach neuen Keilschrifttexten. *Zeitschrifte für Assyriologie* **50**, 214-229.

Said, S.S. & Stephenson, F.R. 1991 Precision of medieval Islamic eclipse measurements. *Jl. hist. astr.* **22**, 195-207.

Said, S.S., Stephenson, F.R. & Rada, W.S. 1989 records of solar eclipses in Arabic chronicles. *Bull. Sch. Or. Afr. Stud.* **52**, 38-64.

Spencer Jones, H. 1939 The rotation of the Earth and the secular accelerations of the Sun, Moon and planets. *Mon. Not. R. astr. Soc.* **99**, 541-558.

Stephenson, F.R. 1995 *Historical eclipses and the rotation of the Earth.* Cambridge University Press.

Stephenson, F.R. & Fatoohi, L.J. 1994a Accuracy of early estimates of lunar eclipse magnitudes. *Q. Jl. R. astr. Soc.* **35**, 81-94.

Stephenson, F.R. & Fatoohi, L.J. 1994b The constancy of the Babylonian unit of time. *J. hist. Astr.* **25**, 99-110.

Stephenson, F.R. & Walker, C.B.F.(eds.) 1985 Long-term changes innthe rotation of the Earth: 700 BC - AD 1980. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* A **313**, 47-70.

Stephenson, F.R. & Yau, K.K.C. 1992 The total solar eclipse of AD 1221 and the rotation of the Earth. *Astron. Astrophys.* **260**, 485-488

Toomer, G.J. 1988 Hipparchus and Babylonian astronomy. In *A scientific humanis: studies in memory of Abraham Sachs*(ed. E. Leichty, M. de J. Ellis & P. Gerald), pp. 353-362. Philadelphia, PA: University Museum.

Williams, J.G., Newhall, X.X. & Dickey, J.O. 1992 Diurnal and semidiurnal tidal contributions to lunar secular acceleration. *Eos Trans. Amer. Geophys. Un. 73* **43**, 126.

Yoder, C.F., Wiliams, J.G., Dickey, J.O., Schutz, B.E., Eanes, R.J. & Tapley, B.D. 1983 Secular variation of Earth's gravitational harmonic J_2 coefficient from Lageos and nontidal acceleration of Earth roatation. *Nature* **303**, 757-762.