太陽はどこに見えるか

——理科年表（暦）を 0.1 秒の精度で使うために——

青　木　信　仰*・藤　本　真　克*

1.　K さんへの手紙

前略，昨秋の水沢での天文学会からの帰途，列車の中でいろいろとお話をうかがいましたが，その中で私に出された質問が宿題になっておりましたね．その後忙がしさにとりまぎれ，返答がおそくなって申し訳ありませんでした．その時の質問は，「理科年表の暦の部を使って，太陽の見える方向を時間にして 0.1 秒の精度で求めようとしているが，そこに使われている時間がどういう時間なのかが良く分からない．例えばうるう秒が入るか入らないかで 1 秒変わってしまうのではないだろうか.」という内容でしたね．太陽を使って電波望遠鏡の方向設定（ポインティング）の検査をやろうとする場合には，1 秒以下の精度も問題になるのですね．最近はいろいろな応用分野で，精度の良い天体位置を，だれでも入手できる理科年表などによって手軽に得たいという要求が現われて来ていますので，天文月報の紙上を借りて説明しておこうと思います．どうぞ御一読下さい．

2.　3 種類の時系

まず，暦を使うためには，そこに用いられている時間引数について知らなければなりません．図 1 に現在使われている原理の異なる 3 種類の時系を示してあります．暦表時 (ET) は，天体の運行を司さどる重力の力学法則の中に表われる時間で，太陽や惑星の位置を予報する暦の中で中心的な役割を果しています．しかし，地球の重心の位置は暦表時で分かっても，地表の観測点がどちらの方向を向いているのか，言葉をかえて言えば地球の回転角度が分かっていないと，太陽や星が頭の上にあるのか地下にかくれているのかが分からないことになります．地球の自転角は，長い期間地球自転が最も正確な時計だった時代のなごりで，世界時 ($UT1$) と呼ばれています．こうして，暦には世界時と暦表時という 2 種類の時間引数（パラメータ）が必要です．ところが，我々が日常使っている時刻，ラジオやテレビ，電話などの時報や JJY の報時信号によって得られる時刻は，上の 2 種類の時刻とはまるで違ったミクロの量子力学に支配される原子時系に属するものですから，暦のユーザーにとっては話がややこしくなるのです．今の中央標準時 (JST) のもとになる協定世界時 (UTC) は，原子時計が刻む固有の周波数を積算した原子時から作られますが，変動する地球の自転角（すなわち世界時）と 0.9 秒以内で合うように，うるう秒を挿入することによって調整された人工的な時刻です．そこで私達は，暦を使う場合に，3 種類の時刻の間の関係を知らなければなりません．図 1 にも示したように，それらは

$$UT1=ET-\varDelta T\ ,\quad UT1=UTC+DUT1$$

のように，時刻差 $\varDelta T$ と $DUT1$ で与えられます．これらの値は，天体観測に基づいてあとで最終的に決定されますので，暦の使用にあたっては，その推定値を用いることになります．$\varDelta T$ の推定値は，理科年表の暦部のはじめに与えられていて，1980 年では $+50$ 秒が用いられています．一方 $DUT1$ は 0.1 秒の単位で JJY 報時信号により通報されています．理科年表の天文の部に説明があります．ところで，理科年表の暦部にも中央標準時が使われていますが，これには注意する必要があります．前にも述べたように，暦に必要な時系は ET と $UT1$ だけですし，UTC と $UT1$ の差 $DUT1$ は，1 年間で 1 秒近く変動する長期的予想の困難な量ですから，$UT1+9^h$ を仮に中央標準時と呼んでいるのです．1 秒以上の精度では問題はないのですが，秒以下の精度が必要な時は注意して下さい．

力学時…………暦表時 (ET)
　　　　　　　　↕ $\varDelta T=ET-UT1$
地球自転角……世界時 ($UT1$) ⟶ 理科年表（暦部）の中央標準時 $(=UT1+9^h)$
　　　　　　　　↕ $DUT1=UT1-UTC$
原子時……協定世界時 (UTC) ⟶ 中央標準時 $(JST=UTC+9^h)$
　　　　　　　　↑ うるう秒
　　　　　国際原子時 (TAI)

図 1　原理の異なる 3 種類の時系と相互関係

3.　太陽の時角を求める

具体例で計算してみましょう．1980 年 1 月 2 日の $11^h 44^m 35^s$ (JST) における東経 $9^h 18^m 58\overset{s}{.}727$ の地点から見た太陽の時角を求めることにします．この数値は暦部にある太陽の南中（東京，中央標準時）の値です．まず基本的な方法で計算してみます．すなわち，考えている時刻における考えている地点の視恒星時とその時刻の太

* 東京天文台　Shinko Aoki and Masa-Katsu Fujimoto: How to Calculate Hour Angle of the Apparant Sun with the Precision of 0.1 sec?

陽の視赤経を求めれば，その差から太陽の時角が求まることになります．

〔計算 1〕

$UT1-UTC=+0^{\mathrm{s}}.6$

$UTC=2^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}35^{\mathrm{s}} \longrightarrow UT1=2^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}35^{\mathrm{s}}.6$

理科年表から補間法で 1 月 2 日 $2^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}35^{\mathrm{s}}.6\ UT1$ におけるグリニジ視恒星時を求める．表より $0^{\mathrm{h}}\ UT1$ における値とその階差は，

2 日　$6^{\mathrm{h}}43^{\mathrm{m}}11^{\mathrm{s}}.3$
3 日　6 47　7.9　〉 $236^{\mathrm{s}}.6$　　であるから，

グリニジ視恒星時 $=2^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}35^{\mathrm{s}}.6+6^{\mathrm{h}}43^{\mathrm{m}}11^{\mathrm{s}}.3$
$+236^{\mathrm{s}}.6\times(2^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}35^{\mathrm{s}}.6/24^{\mathrm{h}})$
$=9^{\mathrm{h}}28^{\mathrm{m}}13^{\mathrm{s}}.9$　　となる．

考えている地点の視恒星時は，これに東経 (λ) を加えて，$9^{\mathrm{h}}28^{\mathrm{m}}13^{\mathrm{s}}.9+9^{\mathrm{h}}18^{\mathrm{m}}58^{\mathrm{s}}.727=18^{\mathrm{h}}47^{\mathrm{m}}12^{\mathrm{s}}.6$ である．

一方，同時刻の太陽の視赤経 ($\alpha_{\odot}$) を求めるには，$\Delta T=50^{\mathrm{s}}$ を $UT1$ に加えて，1 月 2 日 $2^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}25^{\mathrm{s}}.6\ ET$ における $\alpha_{\odot}$ を，表から補間法で計算すれば良い．

$0^{\mathrm{h}}\ ET$ における $\alpha_{\odot}$ とその階差は，

2 日　$18^{\mathrm{h}}46^{\mathrm{m}}41^{\mathrm{s}}.5$
3 日　18 51　6.2　〉 $264^{\mathrm{s}}.7$　　であるから，

$\alpha_{\odot}=18^{\mathrm{h}}46^{\mathrm{m}}41^{\mathrm{s}}.5+264^{\mathrm{s}}.7\times(2^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}25^{\mathrm{s}}.6/24^{\mathrm{h}})$
$=18^{\mathrm{h}}46^{\mathrm{m}}41^{\mathrm{s}}.5+30^{\mathrm{s}}.4$
$=18^{\mathrm{h}}47^{\mathrm{m}}11^{\mathrm{s}}.9$　　となる．

したがって，求める太陽の時角 (H.A.) は

H.A. = 視恒星時 $-\alpha_{\odot}$
$=+0^{\mathrm{s}}.7$　　である．

計算の過程から，$DUT1$ の値は視恒星時に直接効いているのに対して，ΔT は $\alpha_{\odot}$ に補間を通してしか効かないので，ΔT が 4 秒違っても 0.01 秒しか結果に影響しないことが分かります．さて，結果は時角がゼロではないと出ましたが，この理由は，先程注意したように暦部の中央標準時に JST ではなく，$UT1+9^{\mathrm{h}}$ が使われているためです．ちなみに，$UT1=2^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}35^{\mathrm{s}}$ として計算すれば，視恒星時の値が $0^{\mathrm{s}}.6$ 小さくなって，時角 $=+0^{\mathrm{s}}.1$ となり，1 秒までの表示精度で南中時刻と一致します．

次に，太陽の均時差を用いた計算法を見てみましょう．理科年表に与えられた均時差とは視太陽の時角から暦表平均太陽の時角を引いたものです．この暦表平均太陽というのは，ET の時間尺度で見て角速度一定の運行をする仮想太陽です．これに対して，平均太陽は，$UT1$ で見て等角速度に動く太陽ですから，地球自転の変動に伴ってふらふらしている事になります．平均太陽は，$UT1=12^{\mathrm{h}}$ に経度 0 の地点で南中しますが，暦表平均太陽は $ET=12^{\mathrm{h}}$ に経度 0 の地点で南中していません．それは，2 つの平均太陽の角速度に数値としては同じ値を用いているためで，$UT1$ と ET の時間差だけ太陽が動くことになります．そこで，$ET=12^{\mathrm{h}}$ に暦表平均太陽が南中する地点は，暦表経度 0 と呼ばれますが，この暦表経度は ΔT の変化につれて動いていきます．東経 λ の地点の暦表経度は $\lambda-\Delta T\times1.00273$ といった具合です．ここの係数 1.00273 は，恒星に対する自転角速度と太陽に対するそれの比で，単位時間当りの地球の自転角です．ここまで理解していれば，考えている時刻の均時差を補間によって求め，暦表平均太陽の時角を加えれば，求める太陽の時角になります．

〔計算 2〕

$UT1-UTC=+0^{\mathrm{s}}.6$，　$ET-UT1=+50^{\mathrm{s}}$

$UTC=2^{\mathrm{h}}44^{\mathrm{m}}35^{\mathrm{s}} \longrightarrow ET=2^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}25^{\mathrm{s}}.6$

1 月 2 日 $2^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}25^{\mathrm{s}}.6\ ET$ における均時差を求める．

表より $0^{\mathrm{h}}\ ET$ における値とその階差は，

2 日　$-3^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}.2$
3 日　-3　58.3　〉 $-28^{\mathrm{s}}.1$　　であるから，

均時差 $=-3^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}.2-28^{\mathrm{s}}.1\times(2^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}25^{\mathrm{s}}.6/24^{\mathrm{h}})$
$=-3^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}.2-3^{\mathrm{s}}.2$
$=-3^{\mathrm{m}}33^{\mathrm{s}}.4$　　となる．

一方，暦表経度 0 における暦表平均太陽の時角は ($ET-12^{\mathrm{h}}$) であり，考えている地点 (λ) の暦表経度は，($\lambda-\Delta T\times1.00273$) だから，その地点における暦表平均太陽の時角は，

$ET-12^{\mathrm{h}}+\lambda-\Delta T\times1.00273$
$=2^{\mathrm{h}}45^{\mathrm{m}}25^{\mathrm{s}}.6-12^{\mathrm{h}}+9^{\mathrm{h}}18^{\mathrm{m}}58^{\mathrm{s}}.727-50^{\mathrm{s}}.1$
$=3^{\mathrm{m}}34^{\mathrm{s}}.2$　　である．

したがって

A.H. = 均時差 + 暦表平均太陽の時角
$=+0^{\mathrm{s}}.8$　　となる．

結果は〔計算 1〕と 0.1 秒ちがっていますが，計算上の四捨五入の影響でやむを得ないことです．ΔT や $DUT1$ の効き方をはっきりさせるために，〔計算 2〕を書き直してみましょう．

太陽の時角 = 均時差 + 暦表平均太陽の時角
= 均時差 $+ET-12^{\mathrm{h}}+\lambda-\Delta T\times1.00273$
= 均時差 $+UT1+\Delta T-12^{\mathrm{h}}+\lambda$
$-\Delta T\times1.00273$
= 均時差 $+UTC+DUT1-12^{\mathrm{h}}+\lambda$
$-\Delta T\times0.00273$
= 均時差 $+JST-12^{\mathrm{h}}+(\lambda-9^{\mathrm{h}})$
$+DUT1-\Delta T\times0.00273$

このように変形すると，〔計算 1〕のところで述べた通り，$DUT1$ は直接的に結果に効き，ΔT は 4 秒で 0.01

秒程度しか効かないことが，一目で分かると思います．

〔計算 2′〕

〔計算 2〕の前半と同じく

均時差$=-3^{\mathrm{m}}33^{\mathrm{s}}.4$ を求めてから，

H. A. ＝均時差	$=-\ 3^{\mathrm{m}}33^{\mathrm{s}}.4$	$=+0^{\mathrm{s}}.8$
$+JST-12^{\mathrm{h}}$	$-15^{\mathrm{m}}25^{\mathrm{s}}$	
$+\lambda-9^{\mathrm{h}}$	$+18^{\mathrm{m}}58^{\mathrm{s}}.727$	
$+DUT1$	$+\quad 0^{\mathrm{s}}.6$	
$-\Delta T\times 0.00273$	$-\quad 0^{\mathrm{s}}.1$	

によって，太陽の時角を得る．

最後の項は，暦表平均太陽と平均太陽との差を表わしていますが，0.1 秒の精度まで問題にする時には，無視できない項です．

4. 再び K さんへ

今迄の説明で質問に対する答になっているでしょうか．1971 年末までの協定世界時は，周波数のオフセットと 0.1 秒単位のステップ調整で，世界時から ±0.1 秒以内に収められるように管理されていたために，暦部の中央標準時と JST との差は，暦部の精度 0.1 秒に吸収されて矛盾や混乱を引き起こさずに済んでいたのですが，1972 年から現在の UTC システムになり，JST と ($UT1+9^{\mathrm{h}}$) との差が最大 ±0.9 秒にまでなるようになったので，暦のユーザーにとって混乱の生じやすい事態になったのです．理科年表暦部の説明も一工夫ほしいところです．参考までに，暦部で使われている時間引数を，どう解釈すべきかを表にまとめましたのでお送りします．

今後 100 分の 1 秒の精度まで必要になったらどうするか．……もはや理科年表では不十分ですので，海上保安庁水路部発行の天体位置表によらなければなりません．この精度になると，地球の自転軸の変化による観測点の経度変化や章動の短周期項なども考慮しなければならず，今迄の話より一段とこまかい議論が必要です．補間の方法も第 1 階差まででは不十分で，ベッセル補間法などによって第 2，第 3 階差まで加えなければなりません．さらに，$DUT1$ も平均して 3，4 日に 0.01 秒（1 年で約 1 秒）変わっていき，観測から決まる $UT1$ の精度も 1 日平均では 0.01 秒程度ですので，なかなか大変なことになります．むしろ，100 分の 1 秒以下の精度で天体の方向が測定できる装置があれば，地球自転角を測る装置としても使えるという事です．

表 1 理科年表（暦部）に使われる時間引数

時間引数	使用箇所 (精度)	正しい意味
暦表時	随所	ET
世界時	グリニジ視恒星時 ($0^{\mathrm{s}}.1$)	$UT1$
	太陽の自転軸	$UT1$
中央標準時	太陽南中 (1^{s}) 出入 (1^{m})	$UT1+9^{\mathrm{h}}$
	日食 月食 ($0^{\mathrm{s}}.1$)	$UT1+9^{\mathrm{h}}$ と $ET-\Delta T$(推定値)$+9^{\mathrm{h}}$ を併用
	北極星の子午線通過 (1^{s})	$UT1+9^{\mathrm{h}}$

雑 報

1981 年 6 月末日にうるう秒の挿入

国際報時中央局(BIH)は，協定世界時(UTC)に次のうるう秒を挿入する時日を 1981 年 6 月末日の最終秒 UTC とすることに決めた．したがって，国内において JJY 電波報時は 1981 年 7 月 1 日に $8^{\mathrm{h}}59^{\mathrm{m}}59^{\mathrm{s}}$，$8^{\mathrm{h}}59^{\mathrm{m}}60^{\mathrm{s}}$，$9^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}}00^{\mathrm{s}}$ と刻まれ，1 秒間の遅れとなる．

ここ数年来，地球の自転速度は，国際原子時に対してほぼ年間 1 秒のレイト（−2.74 ミリ秒/日）で遅れていたので，毎年 1 回，12 月末日に協定世界時にうるう秒を挿入して 1 秒づつ遅らせて来た．しかし，1979 年秋ごろから，自転速度が例年よりも年間約 0.2 秒（+0.55 ミリ秒/日）だけ，その遅れがにぶって来たので，BIH は昨年の 12 月末日におけるうるう秒の挿入を中止し，今年の 6 月末日までその挿入を見合わせることにした．これが今年の 6 月末日におけるうるう秒の挿入になったわけである．

1981 年 1 月 0 日 $0^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}}00^{\mathrm{s}}$ UTC における全世界の天文観測（時刻）を総合して決めた UT1 と BIH の UTC との差は (UT1−UTC)$=-0^{\mathrm{s}}.1957$ である．今後の地球自転速度が現状のレイトを示すと仮定するならば，今年の 6 月末日における UT1 の遅れは約 0.6 秒となり，次のうるう秒の挿入日時は 1 年後の 1982 年 6 月末日が見込まれる．

（東京天文台天文時部）