

投稿

日食計算ソフトと ΔT について

～ 日食はいつ、どこで、の前に知っておきたいこと ～

石井 馨 (日食情報センター)

1. はじめに

7月22日が近づくに連れて、マスコミでも日食の話題が取り上げられることが多くなってきました。報道内容は「46年ぶり」ということが強調され過ぎているように感じられますが、日食のような天文現象は、「前回はいつ?」、「次回はいつ?」ということが絶えず聞かれる傾向にあるようです。天文教育普及に関わる方々も、過去の日食や未来の日食を聞かれることも少なからずあると思いますので、そのような対応のために本稿では、日食計算ソフトを幾つか紹介させて頂きたいと思っています。

2. 日食計算と ΔT

個々の具体的なソフトウェアを紹介する前に、日食計算に於ける ΔT の影響につき説明しておきます。

地球の自転にはふらつきがあるため、現在ではうるう秒を挿入して原子時計と地球自転による暦との差を補正しています。私たちが生活に使う時刻の基本は地球自転による暦で、協定世界時 (UTC) になります。主たる時刻系の関係式は次の通りです。

$$\Delta T = TT - UT1$$

(TT : 地球力学時、UT1 : 世界時)

$$TT = TAI + 32.184 \text{ 秒}$$

(TAI : 国際原子時)

$$UT1 = UTC + DUT1$$

(UTC : 協定世界時、

DUT1 : 世界時と協定世界時の差分)

なので、

$$\Delta T = TAI - UTC - DUT1 + 32.184 \text{ 秒}$$

と書くこともできます。

現在は、DUT1 の値が ± 1 秒を越えないように、うるう秒による調整が行われているわけです。最新の ΔT は日本標準時 (JST) プロジェクトのサイト、(<http://jy.nict.go.jp/>) に掲載されている、UTC-TAI の値と DUT1 の値から求めることが出来ます。例えば、UTC-TAI = -34 秒、DUT1 = +0.2 秒 のとき

$$\Delta T = 34 - 0.2 + 32.184 = 66.0 \text{ 秒}$$

となります。

過去及び未来の天文計算においては、地球自転のふらつきによる補正量の差をどの程度見積もるかというのは非常に大きな問題です。ふらつき方が一定でないために、予測値と実際値は長い年月の積み重ねの差によって、随分とずれてしまいます。

例えば、2009 年の ΔT を 66 秒として、26 年後の 2035 年を予測しようとした場合にどのような値を取るかは、変化量のスパンをどのようなケースで想定するかによって異なります。

ケース 1) 直近 10 年間でのうるう秒は 2 秒しか挿入されていません。従ってこのペースならば、 $\Delta T = 66 \text{ 秒} + 2 / 10 \times 26 = 71.2 \text{ 秒}$

ケース 2) 直近 20 年間でのうるう秒は 10 秒挿入されています。従って、このペースならば、 $\Delta T = 66 \text{ 秒} + 10 / 20 \times 26 = 79.0 \text{ 秒}$

ケース 3) 直近 30 年間でのうるう秒は 17 秒挿入されています。従って、このペースならば、 $\Delta T = 66 \text{ 秒} + 17 / 30 \times 26 = 80.7 \text{ 秒}$

このように、現在の知見では 26 年後の ΔT の予測値は 10 秒程度の誤差は内在していると考えるべきで、この差を食帯の位置に換算すると、約 3km 程度の誤差が出てきてしまいます。そして、このような差が 100 年、1000

年と積み重なることにより、食帯の位置は数十～数百 km の誤差が出てきてしまうことになります。

過去に於いて、この ΔT がどの程度の値であったか、という体系的な研究は、F.R.Stephenson さんの研究が有名です。

Stephenson さんは古代史での日食記録のひとつひとつに対して、年代、見られた地域、記述の信憑性などをチェックするという膨大な作業の末、それらが大凡矛盾無く起こるための ΔT のテーブルを作成しました。但しその値は今でも議論が継続中のものもあり、過去の ΔT の値で議論の余地が無くほぼ確実と思われる値は、A.D.900 以降の 1000 年間程度でしかありません。

将来の ΔT 予測値は、過去の長い年月での変動からある程度長いスパンで予測できそうだと考えられていた時期もありましたが、地球自転のふらつきは気候変動要素（例えば温暖化による海洋膨張によって潮汐摩擦が増える、など）が無視できない影響を与えているという議論もあり、長期の気候変動予測と同様の困難さがあります。

日食計算ソフトの危うさは、このような ΔT の不確定要素という知識が無い方でも簡単な操作で数千年単位の過去から未来までの日食を計算し、日食を見る事が出来た地域を描画させてしまうことが出来るということであり、一般の方から見れば専門家という方々が書いた書籍に、「今や何千年も先までの日食が秒単位で予測できる」などというような間違った記述を促すことにも繋がってしまっていることにあります。

従って、日食計算ソフトには「計算結果の信憑性については常に議論されながら使用すべきもの」ということをご理解の上で本題に戻りお勧めソフトを紹介します。

3. 日食計算ソフトの例

日食計算ソフトは、ここに紹介したソフト以外にも幾つかあります。それぞれのソフトウェアの特性を理解した上で、用途に応じて使い分けることが、ポイントだと思います。

3.1 EmapWin Ver 1.21

以下のサイトでダウンロードが出来ます。

http://www.kotenmon.com/cal/emapwin_jpn.htm

このソフトは、プログラムそのものが軽いこともあり、筆者は他の日食計算ソフトのリファレンスとして使っております。理由は、以下のドキュメントにあるように計算ロジック（ベッセル要素法）もパラメータ（JPL 天文暦 DE406）も ΔT の出自も明らかになっているからです。

http://www.kotenmon.com/astro/cal/emapwin_jpn.txt

追加ファイルをダウンロードすることによって、BC3000～AD3000 の日食を描画させることが出来ます。

3.2 WinEclipse Ver.3.6

以下のサイトでダウンロードが出来ます。

<http://www.lcm.tuwien.ac.at/scs/welcome.htm>

ドイツ人の Heinz Scsibrany さんが作成したソフトで、このプログラムもとても軽く、Windows3.1 時代のソフトですが、WindowsXP 上でも動いているので重宝しています。

一方で、ヘルプを読むと、 $\Delta T = ET - UT$ と記述されているように IAU76 勧告以前のロジックとパラメータで計算されていることは明白で、 ΔT も上記の EmapWin などに比べると最新の情報が使われていないように思われます。

但し、作図されたデータが Windows のデータファイルとして扱いやすいことと、月の影の動きなどのアニメーション機能が充実しているので、精度が求められるビジュアル重視の用途で使うことがあります。

BC4000~AD9999 の日食を描画させることが出来ます。

3.3 Occult Ver.4.0.6

以下のサイトでダウンロードが出来ます。

<http://www.lunar-occultations.com/iota/occult4.htm>

国際的な掩蔽観測の組織、IOTA で配布している掩蔽観測用のソフトで、日・月食だけでなく、小惑星による掩蔽や月による掩蔽などの膨大なシミュレーションが出来るために、とても重たいプログラムです。

但し、次のような特徴があるために、直近の日食予報を高精度に行うには便利です。

- ① ΔT に関しては最新の観測値にダウンロードしてアップデートすることが可能
- ② 世界の主要都市の位置データがファイル化されており局地予報に便利
- ③ 食帯図を Google Map に出力可能
- ④ 月縁データが付属されており、「Baily Bead Analysis」でもって接触時刻の月縁補正が可能

BC9999~AD9999 の日食を描画させることが出来ます。

3.4 エクリプスナビゲータ Ver.2

以下のサイトに製品紹介情報があります。

<http://www.astroarts.co.jp/products/eclnav2/index-j.shtml>

3.1~3.3 のソフトはフリーソフトウェアですが、有償のソフトウェアとしてエクリプスナビゲータも紹介しておきます。このソフトウェアのロジックは、日食計算の名著である

Jean Meeus さんの、「ELEMENTS OF SOLAR ECLIPSES 1951-2200」を元にしてプログラムロジックが作成されたので、計算ロジックを検証する上では前述の EmapWin と同様に筆者にとってはリファレンスソフトです。

Ver.2 になって月縁補正も出来るようになりましたし、本影錐移動のシミュレーションなどもできます。唯一の難点は製品に添付されているベッセル要素データが少ないことで製品添付のデータだけでは、1999 年~2035 年の日食計算しか行えません。

ただし、各日食のベッセル要素は自由に追加できますので、出自の分からないベッセル要素を使うよりも自分で計算した、もしくは海上保安庁の暦や NASA のホームページなどから入手したベッセル要素を使うことで安心できる、という利点はあります。

4. プラネタリウム・ソフトに関して

ステラナビゲータ Ver.8 が発表になった際に、製品情報として地球の自転速度の変動による時刻の変化 (ΔT) を考慮しているという記述を見たときには大変に驚きました。

<http://www.astroarts.co.jp/products/stlnav8/support/show-j.shtml>

プラネタリウム・ソフトのようなリアルタイム性（高速性）が求められるプログラムにおいて、天体位置計算に ΔT を考慮している、という記述は今まで見たことがありませんでした。（筆者が不勉強なだけかも知れません）

但し上記の製品情報によれば、 ΔT を考慮している期間は、AD1681~2006 だけであり、期間以外の過去においては 1681 年の固定値を、将来においては 2006 年の固定値を使用しているようです。従って、「いつ、どこそで日食が見られた、見られなかった」というような議論には、このようなプラネタリウム・ソフトは用いるべきではありません。

5. k の値に関して

日食の予報計算に関して注意すべき点のひとつに、計算で用いる平均月縁の月半径の値としてどのような値を採用しているか、という点があります。計算で使われる基本的なパラメータとして、地球の赤道半径を1として月の半径を表した値、 k がありますが、国際天文学連合 (IAU) では、1982 年 8 月の総会で、平均の月の半径に対して $k=0.2725076$ の値を採択しました。この値を用いて日食計算を行った場合、平均月縁よりも低い谷が常に存在することになるので、計算上は皆既でも、月は光球面を完全には隠していないことになります。更に見かけ上は非常に細い金環日食や金環一皆既日食を、計算上は皆既食と誤認してしまう可能性もあります。従って、幾つかの代表的な深い月の谷から得られた最小半径としての小さい k 値を用いて計算する方が、より実際に観測される現象に近い計算が行われる、と考える計算者もおります。

NASA の Fred Espenak さんは、本影の接触計算に対して $k=0.272281$ というより小さい値を採用しており、NASA Eclipse Bulletins の予報は全てこの k の値を平均月縁として計算されております。EmapWin、Occult、エクリプスナビゲータの3本の日食計算ソフトも同様の k 値を採用しておりますので、 ΔT やベッセル要素を揃えれば、これらのソフトの計算結果は NASA の予報値とほぼ同じ値を示します。これに対して国立天文台の Web サイトにある、「国立天文台 暦計算室 日食各地予報」での計算においては IAU 勧告に従った $k=0.2725076$ の値で計算されており、この結果、NASA の予報値と比べて長めの皆既継続時間と広めの皆既帯を示す傾向にあります。

http://www.nao.ac.jp/koyomi/koyomix/eclipse_sex_s.html

誤解のないように補足すると、どちらの k 値を採用したとしても不規則な月の凹凸による影響は除去できませんので、正確な接触時刻、正確な皆既帯の限界線を求めるのであれば、月縁補正を行わなければなりません。採用する k の値によって補正する量が変わってくるだけのことと言えます。

6. おわりに

筆者は 1994 年頃から、独自に数値積分法で天体の位置計算をはじめ、月縁補正をした日食予報を行ってきましたが、日食ソフトの普及によって「計算結果が違うのは何故?」というような問い合わせを頂くようになりました。特に 1990 年代は毎年のようにうるう秒が挿入されていたのですが、2000 年以降は ΔT の変化が急激に少なくなったため、 ΔT の値を更新せずに計算されている方とは随分と計算結果が異なるようになりました。たかだか 10 年での変化ですが、Stephenson さんの研究では、このような短期間での急激な ΔT 変化は考慮されておりません。今後、この分野の研究が更に進むことによって歴史上の日食記録の再検証が行われることでしょう。

参考文献

- [1] アストロアーツ編 (2009)『皆既日食 2009』, アスキー出版, pp.20-21
- [2] 広瀬敏夫 編 (2009)『星食・月食・日食 観測編』, 誠文堂新光社, pp.116-120
- [3] Jean Meeus (1989) 'Elements of Solar Eclipses 1951-2200', Willmann-Bell Inc.
- [4] Fred Espenak (1987) 'Fifty Year Canon of Solar Eclipses:1986-2035', Sky Publishing Co.

石井 馨