

# 年差を考慮した太陽位置の簡易計算

## 1. 概要

太陽位置の計算式は様々ある【3】～【11】が、全ての計算式に視赤緯  $\delta$  と均時差  $Et$  の計算が含まれている。 $\delta$  と  $Et$  は赤道座標系による太陽位置であるが、建物等の地物が受ける日照・日射の評価に必要なのは、地平座標系の太陽位置である太陽高度  $h$  と太陽方位角  $A$  である。 $h$  と  $A$  は  $\delta$  と  $Et$  から計算され、その計算式は同じであるから、計算式の違いとは  $\delta$  と  $Et$  の計算式の違いである。

$\delta$  と  $Et$  の値は毎年少しずつ変化し、正確な値は理科年表<sup>注1)</sup>に掲載されている。しかし、年差はわずかであるから、ここで取り上げた太陽位置の計算式のうち【3】～【5】では、 $\delta$  と  $Et$  の年差を無視している。簡便で使いやすいため一般的にはこれらの計算式がよく使用されている。

一方、【6】～【11】では、 $\delta$  と  $Et$  の年差を考慮している。年差は主に歳差、章動によって生じる。歳差とは地球の自転軸の向きが太陽や月の引力によって変わる現象であり、自転軸の向きが変わることによって天の赤道と黄道の交点である春分点がずれていく。章動とは月の引力の方向の変化によって、春分点の位置と黄道傾斜角が周期的に変化する現象をいう。歳差は一方向に変わる現象であるが、章動は約19年を周期とする振動である。地球の公転と自転が光の方向にずれを生じさせる光行差<sup>注2)</sup>、楕円軌道（離心率）の変化、摂動（多体問題）等も  $\delta$  と  $Et$  に影響する。これらの現象を、どこまで、どの程度厳密に  $\delta$  と  $Et$  の計算に取り込むかによって、計算精度が異なる。

建築視環境の分野にはじめて  $\delta$  と  $Et$  の年差を導入したのは山崎均氏【6】【7】である。【8】は【6】の計算式を簡易に組み替えた計算式である。【9】～【11】はより厳密に  $\delta$  と  $Et$  の年差を取り込んだ計算式である。【9】では  $\delta$  と  $Et$  の計算に必要な係数が毎年公開されている。ただし、将来の太陽位置は、将来の係数が不明であるため計算できない。【10】、【11】では  $\delta$  と  $Et$  が計算式として整理されており、細密であるが計算精度は高い。

本稿の簡易計算（以下本計算式と呼ぶ）とは、太陽位置の年変化を考慮してはいるが、年差を考慮した計算式の中では最も簡易な式である。本計算式は【8】の計算式を再整理したものであるが、【8】には誤りが2か所あるので、それらを本稿で正した（p3脚注6, 4p脚注9）。

本稿の流れは次の通りである。2. で本計算式を整理した。3. でそのコンピュータプログラムを紹介した。4. では、2つの計算式による太陽位置の違いを、 $h$  と  $A$  のずれで評価するのは不十分で、視太陽のずれである  $\Delta DS$  を算出して評価する方法を説明した。5. では本計算式による  $\delta$ 、 $Et$  を、理科年表の値、松本の式【11】による計算値と比較し、本計算式が実用上十分な精度を持つことを確かめた。松本の式の計算値との比較にあたっては、同式が理科年表の  $\delta$ 、 $Et$  と数秒の誤差で一致することを確認した。6. では、松本の式による  $h$ 、 $A$  と、山崎の式、本計算式、【3】～【5】の式による  $h$ 、 $A$  から  $\Delta DS$  を算出して比較し、年差を考慮した松本の式、山崎の式、本計算式の3式と、年差を考慮しない【3】～【5】の3式の精度に明確な違いがあることを明らかにした。7. では、山崎の式、本計算式、【3】～【5】の式による  $\delta$ 、 $Et$ 、 $h$ 、 $A$  のずれを比較した。巻末の資料1～4には、本計算式、山崎の式、【3】～【5】の式のコンピュータプログラムと、検証のための計算例を掲載した。

注1 理科年表には毎日0時（世界時）の  $\delta$  と  $Et$  が掲載されている。これらの値は世界共通であるが、時刻がずれるとその時刻分だけずれる。例えば日本標準時（JST）は世界時と9時間の時差があるから、世界時の0時の  $\delta$  と  $Et$  は、JST では同日9時の値となる。

## 2. 本計算式の整理

本計算式は、【7】の山崎の式を簡易化して作成したいわば山崎の式の修正式である。修正した点は以下の通りである。

- ① ユリウス暦は用いずグレゴリオ暦のみを使用したこと、
- ② 離心率の経年変化及び光行差を無視し、黄道傾斜角の経年変化の式を簡明な式に換えたこと、
- ③ 近点角等の式に含まれる高次の項を省いたこと、
- ④ 計算対象の通日表示を、通日、時刻、分、秒表示に変えたこと、
- ⑤ 計算対象通日の計算式に含まれる経度を、計算地点の経度から標準時地点の経度に変えたこと、
- ⑥ 山崎氏【6】に記載されている大気外法線面日射量の計算式を含めたこと。

以上のように幾つかの修正を行ったが、本解説の7.において、【7】と本計算式による計算値はほぼ一致することを確認した。

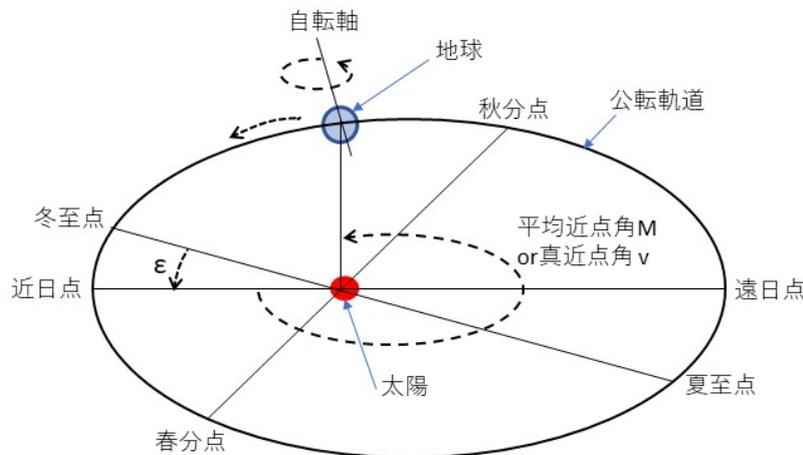


図1 (1) 地球の公転と自転

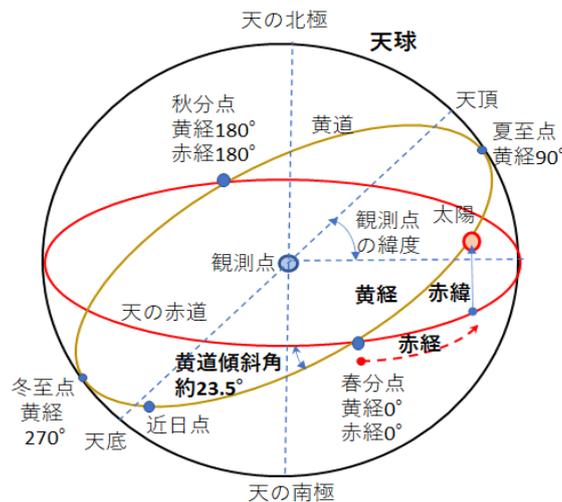


図1 (2) 天の赤道と黄道

### (1) 計算に必要なデータ

- $\varphi$  : 計算対象地点の緯度 (北半球は+, 南半球は-)
- $L$  : 計算対象地点の経度 (東経は+, 西経は-),  $L_0$  : 地方標準時の経度 (日本では+135°)
- $J_0$  : 太陽定数 (2005年理科年表では  $1.37 \text{ kWm}^{-2}$ , 2022年理科年表では  $1.361 \text{ kWm}^{-2}$ )
- year, month, day, hour, min, sec : 計算対象年, 月, 日, 時, 分, 秒

(2) 計算対象年の黄道傾斜角 $\delta_0$ [ $^\circ$ ]の計算<sup>注2)</sup>

$$\delta_0 = -23.4393 + 0.013(year - 2000)/100 \quad \dots(1)$$

(3) 1日1日基準の通算計算対象時刻 $nday$ (日)の計算

$$1月 \quad nday = day + \frac{hour}{24} + \frac{min}{24 \times 60} + \frac{sec}{24 \times 60 \times 60} - \frac{L_0}{24 \times 15} \quad \dots(2)$$

$$2 \sim 12月 \quad nday = \text{当該年1月1日から前月末日までの通算日数} + \\ day + \frac{hour}{24} + \frac{min}{24 \times 60} + \frac{sec}{24 \times 60 \times 60} - \frac{L_0}{24 \times 15} \quad \dots(3)$$

(4) 平均近点角 $M$ [ $^\circ$ ]の計算<sup>注3) 注4)</sup>

$$n = year - 1968 \quad \dots(4)$$

$$M = \frac{360}{365.2596} \left\{ nday - \left( 3.71 + 0.2596 \times n - \left[ \frac{n+3}{4} \right] \right) \right\} \quad ([ ]: \text{小数点以下切捨}) \quad \dots(5)$$

(5) 真近点角 $v$ [ $^\circ$ ], 冬至点と近日点がなす角度 $\varepsilon$ [ $^\circ$ ]の計算<sup>注5)</sup>

$$v = M + 1.918 \sin(M) + 0.02 \sin(2M) \quad \dots(6)$$

$$\varepsilon = 12.3901 + 0.0172 \left( n + \frac{M}{360} \right) \quad \dots(7)$$

(6) 均時差 $E_t$ [ $^\circ$ ]の計算<sup>注6)</sup>

$$E_t = E_{t1} - E_{t2} \\ = (M - v) - 57.3 \times \tan^{-1} \frac{0.043 \sin 2(\varepsilon + v)}{1 - 0.043 \cos 2(\varepsilon + v)} \quad \dots(8)$$

(7) 視赤緯 $\delta$ [ $^\circ$ ]の計算<sup>注7)</sup>

$$\sin \delta = \cos(\varepsilon + v) \sin \delta_0 \quad \dots(9)$$

(8) 大気外法線面日射量 $[kWm^{-2}]$ の計算<sup>注8)</sup>

$$IN_0 = J_0(1 + 0.033 \cos v) \quad \dots(10)$$

(9) 時角 $t$ [ $^\circ$ ]の計算

$$t = 15 \left( hour + \frac{min}{60} + \frac{sec}{60 \times 60} - 12 \right) + (L - L_0) + E_t \quad \dots(11)$$

注2 式(1)は文献【2】の黄道傾斜角の式を簡略化して作成した。

注3 式(4), 式(5)は文献【6】による。365.2596は近日点(図1(1),(2)参照)基準の公転周期日数。

注4 式(5)の右辺の()内は近日点通過日を表す。ただし、ここにいる近日点とは図1(2)の黄道上の(仮想の)近日点である。実際の近日点通過日(地球が太陽に最接近する日)は、地球の月の引力の影響を受けてわずかに移動するため、式(5)による近日点通過日とは異なる。

注5 式(6)は文献【1】の式を、式(7)は文献【6】の式を引用した。視太陽は黄道上を一定でない速度で移動しているが、平均近点角とは、近日点と平均角速度で黄道上を移動する平均太陽との角距離、真近点角とは近日点と視太陽の角距離である(図1(1),(2)参照)。平均近点角と真近点角の角距離を中心差という(文献【1】)。なお、文献【1】の式では離心率 $e$ として0.0167381を用いているが、 $e$ を含む式で表すと次式となる。

$$v = M + 114.59 \times e \sin(M) + 71.62 \times e^2 \sin(2M)$$

注6 式(8)右辺第2項は文献【6】の式を引用した。 $E_{t1}$ は中心差(注5)、 $E_{t2}$ は太陽黄経と太陽赤経との角距離を表す。(図1(2)参照)なお文献【8】p14の式(1.27)では $E_t = E_{t1} + E_{t2}$ となっているが、正しくは $E_t = E_{t1} - E_{t2}$ である。

注7 式(9)は文献【6】の式を引用した。

注8 式(10)は文献【6】の式を引用した。式中の0.033は $2 \times e$ (離心率)を丸めた数値である。

(10) 太陽高度  $h$  [°] と太陽方位角  $A$  [°] の計算

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad \dots(12)$$

$$\sin A = \frac{\cos \delta \sin t}{\cos h} \quad \dots(13)$$

$$\cos A = \frac{\sin h \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cos \varphi} \quad \dots(14)$$

太陽方位角  $A$  は真南を  $0^\circ$  とし、西回りを正、東回りを負とする<sup>注9)</sup>、<sup>注10)</sup>。

$$\sin A > 0 \text{ のとき, } A = 90 - \tan^{-1} \frac{\cos A}{\sin A} \quad \dots(15)$$

$$\sin A = 0 \text{ のとき, } A = 0 \quad \dots(16)$$

$$\sin A < 0 \text{ のとき, } A = -90 - \tan^{-1} \frac{\cos A}{\sin A} \quad \dots(17)$$

### 3. 本計算式のコンピュータプログラム

本計算式による太陽位置の計算プログラム (fortran90) を巻末の**資料1**に示す。

sunpos が太陽位置を計算するサブルーチンで、これを呼び出すメインプログラムが spcall である。この呼び出しプログラムは一例であり、sunpos の使用目的により適宜作成すればよい。

このプログラムを実行するには、入力データとして sunpos\_in.csv が必要であり、実行結果として sunpos\_out.csv が出力される。巻末の**資料2**は sunpos\_out.csv を見やすく整理したエクセルファイルである。sunpos\_in.csv は、sunpos\_out.csv の地点名、緯度、経度、標準時経度、西暦年、月、日、時、分、秒までの列と同じであるから、**資料2**のエクセルファイルの大気外法線面日射量以降を削除してヘッダ行 (1行) を付し、csv ファイルとして save すれば sunpos\_in.csv が得られる。ヘッダ一行は spcall の 17行で読み飛ばされる。

sunpos には太陽定数として  $1.37(\text{kW}/\text{m}^2)$  を組み込んでいる。太陽定数は人工衛星により大気圏外で測定されるが、わずかに変化する。その値は理科年表に掲載されているので、 $1.37$  以外の値を用いるときは sunpos の 61 行の J0 値を書き換えればよい。

例として、3月21日、6月21日、12月21日 (それぞれ、春分、夏至、冬至に近い日) を取り上げ、日本の3地点 (札幌、東京、那覇) の2015年、2022年、2086年、及び世界各地の6地点の2022年について、大気外法線面日射量、視赤緯、均時差、太陽高度、太陽方位角を計算した。得られた sunpos\_out.csv を見やすく整理したのが巻末の**資料2**である。

注9 文献【8】p14の4行目に、「A: 太陽方位角 (北半球では真南から西回り、南半球では真北から西回りを正)」とあるが、これは「A: 太陽方位角 (真南から西回りを正)」の誤りである。注6、注9に記した誤りは文献【8】の第1章を執筆した筆者のミスであり、文献【8】の編者である木村建一先生、文献【8】を読まれた皆様にお詫びし、訂正いたします。

注10 式(15)~式(17)で南半球の太陽方位角を求めると真北を境に太陽方位角が $-180$ から $+180$ に不連続に変わる。これは真南を方位角0としているためである。真北を基準とし、東回りを負、西回りを正に置き換えるには以下のようにすればよい。 $A_n$ は真南基準の方位角、 $A_s$ は真北基準の方位角である。

$$A_n < 0 \text{ なら, } A_s = -180 - A_n, \quad A_n \geq 0 \text{ なら, } A_s = 180 - A_n$$

日本で用いている熱負荷や建築環境シミュレーションプログラムでは、真南基準の方位角を用いて方位別日射量や斜面日射量を計算しているから真北基準の方位角に変えると正しい結果が得られない。そのため、本解説には南半球の計算例も含まれているが、真南基準の方位角をそのまま用いている。

#### 4. 2つの計算式による太陽方位角 A と太陽高度 h の計算値のずれの補正 — $\Delta DS$ の導入

赤道座標系では、**図 1(2)**のように、天球における太陽の年周期運動を、視赤緯  $\delta$ ，視赤経で表す。通常、視赤経に替えて視太陽と平均太陽の時差である均時差  $E_t$  を用いる。 $\delta$  の年間変化は±黄道傾斜角  $\delta_0$ ，視赤経の年間変化は  $360^\circ$  である。これらの日変化量はわずかであるから、**【3】**～**【5】**では  $\delta$ ， $E_t$  を日別に計算しており、時間変化は考慮していない。

一方、地平座標系では、太陽の日周運動（日周軌跡）を太陽高度  $h$ ，太陽方位角  $A$  で表す。 $h$  は観測点から太陽を見る仰角， $A$  は太陽の真南からのずれであるから視覚的にわかりやすく、建築物等の地物と太陽の位置関係を表すのに用いられる。 $h$  は緯度  $\phi$  によって異なるが終日で  $180^\circ$ （最大値）， $A$  は終日で  $360^\circ$  変化する。2つの計算法による  $h$  と  $A$  を比較するときには注意しなければならないのは、太陽が地平に近いときと天頂に近いときで、 $A$  の数値の違いの意味が異なる点である。 $h$  が大きいとき（太陽が天頂に近いとき）は  $A$  が短時間で大きく変化する。このような  $A$  の大きな時間変化は低緯度地の夏至前後の南中に近い時刻に発生する。

このことを**図 2**で説明する。太陽は**図 2**の天球の赤道にほぼ平行な日周軌跡上を移動する。地平座標系の座標軸のひとつは高度円（高度円は天球の赤道に対し  $(90^\circ - \text{観測地点の緯度 } \phi)$  傾いている。高度円は  $h$  が  $0^\circ$  では地平と一致する大円であるが、 $h$  が天頂に近づくにしたがって円が次第に小さくなっていく。もうひとつの座標軸は高度円と直行する方位円（大円）である。太陽がどの高度円上にあっても  $A$  の範囲は  $360^\circ$  で変わらないため、単位時間の  $A$  の変化量は  $h$  が天頂に近づくほど大きくなる。

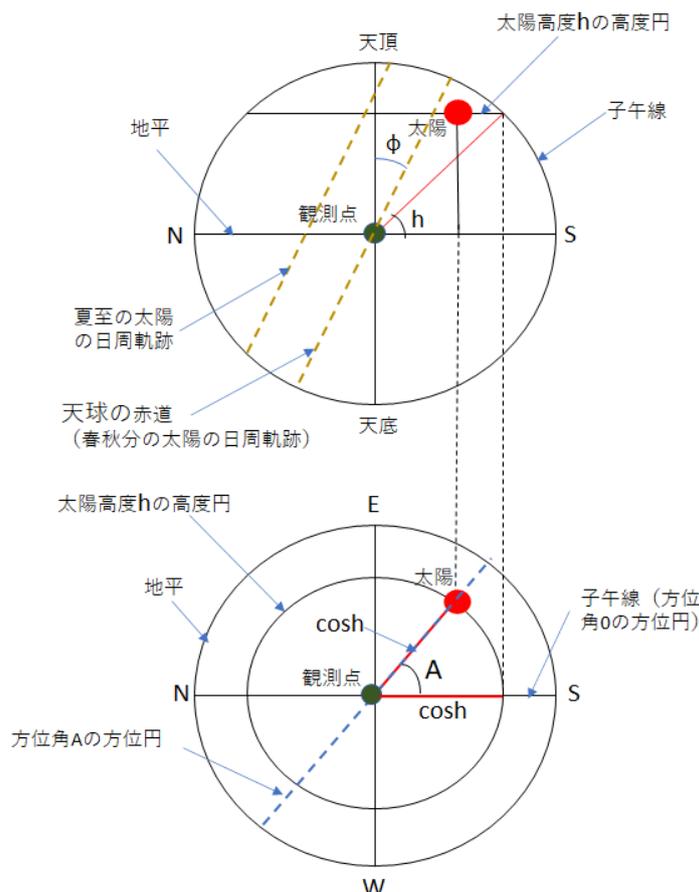


図 2 地平座標系の太陽高度  $h$  と太陽方位角  $A$

図2で説明したことを、太陽の日周運動において、太陽が天頂近くに達する日の  $h, A$ 、及び  $h, A$  の前時刻との変化量  $\Delta h, \Delta A$  の数値で確認する。 $h, A$ 、及び  $h, A$  の前時刻との変化量  $\Delta h, \Delta A$  を、松本の式と本計算式で計算した例が表1である。表1のように、 $\Delta h$  は日の出から日没まで  $11.08 \sim 13.77^\circ$  の範囲であり、それほど変わらないが、 $\Delta A$  は  $0.78 \sim -74.38$  の範囲で大きく変化する。表1のように、 $\Delta A$  の大きな変化は、太陽が天頂に近くにある時刻（12時～14時）で発生している。

表1  $h, A$  及び  $h, A$  の前時刻との変化量  $\Delta h, \Delta A$  ( $20^\circ N, 120^\circ E, 2005$  年 6 月 13 日の例)

| 計算式  | h, A<br>$\Delta h, \Delta A$ | 時刻 (JST) |         |         |         |         |         |               |               |        |        |        |        |        |
|------|------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      |                              | 7時       | 8時      | 9時      | 10時     | 11時     | 12時     | 13時           | 14時           | 15時    | 16時    | 17時    | 18時    | 19時    |
| 松本の式 | h                            | 7.76     | 21.01   | 34.52   | 48.21   | 61.98   | 75.70   | 86.79         | 75.69         | 61.97  | 48.20  | 34.52  | 21.01  | 7.76   |
|      | A                            | -111.93  | -108.02 | -104.98 | -102.83 | -102.05 | -105.68 | 179.94        | 105.69        | 102.07 | 102.85 | 105.01 | 108.05 | 111.96 |
|      | $\Delta h$                   | —        | 13.25   | 13.52   | 13.68   | 13.77   | 13.72   | 11.08         | -11.09        | -13.72 | -13.77 | -13.68 | -13.51 | -13.25 |
|      | $\Delta A$                   | —        | 3.91    | 3.04    | 2.16    | 0.78    | -3.63   | <b>-74.38</b> | <b>-74.24</b> | -3.62  | 0.78   | 2.16   | 3.04   | 3.92   |
| 本計算式 | h                            | 7.75     | 21.00   | 34.52   | 48.20   | 61.98   | 75.70   | 86.79         | 75.70         | 61.98  | 48.21  | 34.53  | 21.01  | 7.76   |
|      | A                            | -111.93  | -108.02 | -104.98 | -102.83 | -102.05 | -105.67 | -179.97       | 105.69        | 102.07 | 102.85 | 105.00 | 108.04 | 111.96 |
|      | $\Delta h$                   | —        | 13.25   | 13.52   | 13.68   | 13.77   | 13.72   | 11.09         | -11.09        | -13.72 | -13.77 | -13.68 | -13.51 | -13.25 |
|      | $\Delta A$                   | —        | 3.91    | 3.04    | 2.16    | 0.78    | -3.62   | <b>-74.30</b> | <b>-74.34</b> | -3.62  | 0.78   | 2.16   | 3.04   | 3.92   |

このように、太陽高度  $h$  が大きいときの太陽方位角  $A$  の変化量は天球上の太陽の移動量と比例しない。そのため、式(17)で定義される  $\Delta DS$  を導入する。 $\Delta DS$  は2つの計算法による太陽位置のずれを太陽視直径  $DS$  (年間ほぼ一定で約  $0.53^\circ$ ) に対する比率 (%) で表した値である。例えば  $\Delta DS=100$  (%) とは、2つの計算法による太陽位置のずれが、ちょうど太陽一個分であることを表す。

$$\Delta DS = 100 \times \sqrt{(\Delta A \times \cosh)^2 + \Delta h^2} / DS \quad \dots(17)$$

## 5. 理科年表、松本の式と本計算式の比較度

### 5.1 2086年の視赤緯 $\delta$ 、均時差 $Et$ の年間時別値の変化

図3(1), (2)で、松本の式(精算式)と本計算式による2086年の  $\delta$  ( $^\circ$ ),  $Et$  (秒) の年間時別値を比較した。視赤緯、均時差の年差はわずかで、これらとほぼ同じ変動が毎年繰り返される。

### 5.2 2005年、2022年、2086年の視赤緯 $\delta$ 、均時差 $Et$ の比較

図3(3), (4)で、理科年表、松本の式、本計算式による2005年各月15日 JST 9時(世界時0時)の角度の秒で表した  $\delta$  と角度の秒で表した  $Et$  を比較した。図3(5), (6)では同様の比較を2022年について行った。図3(7), (8)では、2086年について松本の式と本計算式を比較した。理科年表の値とのずれは月によって異なるが、松本の式のずれは  $\delta, Et$  とともに最大で2~3秒、本計算式のずれは  $\delta$  では最大で15秒、 $Et$  では最大で25秒である<sup>注11)</sup>。

松本の式と本計算式による理科年表とのずれを、 $\delta$  と  $Et$  の日変化量との比で表してみる。日変化量は日によって異なるが、理科年表から読み取ると、 $\delta$  では300~420秒程度、 $Et$  では180~270秒程度である。理科年表の  $Et$  は時間で表されているので15倍して角度に換算している。**【3】 ~ 【5】**には  $\delta$  と  $Et$  の日より短い時間変化に関する記述はなく<sup>注12)</sup>、これらを日別値として扱っているとみられる。日変化量に対する理科年表と松本の式による  $\delta, Et$  のずれは最大で日変化量の1.2%、本計算式による同様の比は最大で日変化量の10%であり、上記の2~25秒の違いは微細なものである。

注11 この  $Et$  と  $\delta$  のずれ  $\Delta Et$  と  $\Delta \delta$  から、 $100\sqrt{\Delta \delta^2 + \Delta Et^2} / (0.53 \times 3600)$  により、ずれの太陽視直径に対する比(%)をおおまかに推定すると、後出の表2の  $\Delta DS$ (%)と類似した値となる。

注12 資料3に掲載したプログラムでは、すべて、日、時、分、秒を入力するように修正し統一した。

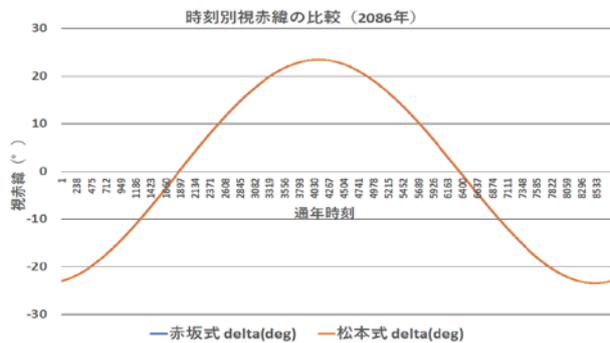


図 3 (1) 視赤緯の年間時刻別値の比較 (2086年)

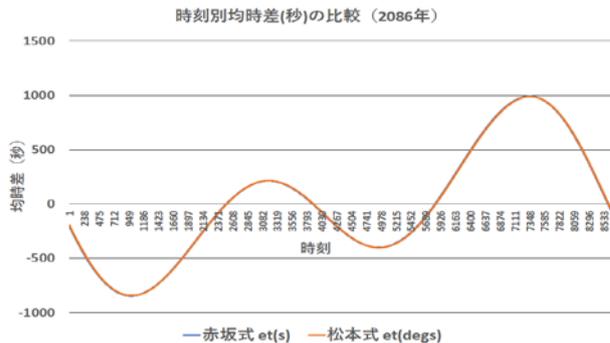


図 3 (2) 均時差の年間時刻別値の比較 (2086年)

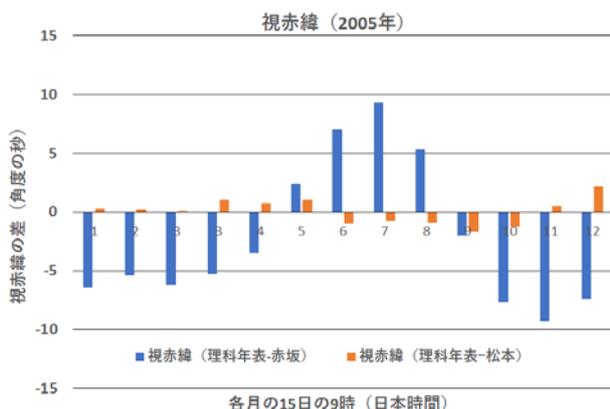


図 3 (3) 各月 15 日 9 時の視赤緯の比較 (2005年)

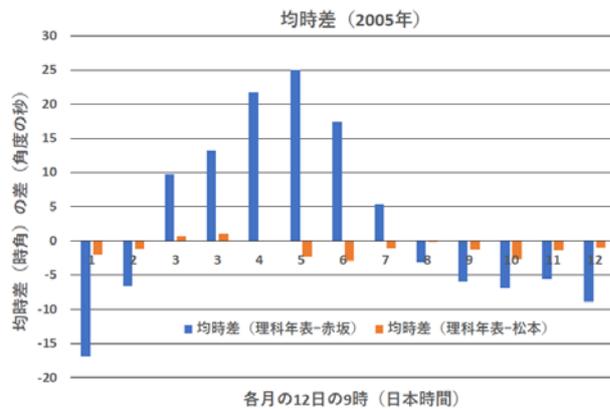


図 3 (4) 各月 15 日 9 時の均時差の比較 (2005年)

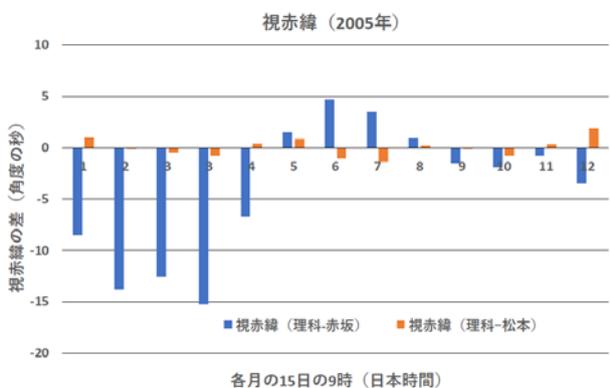


図 3 (5) 各月 15 日 9 時の視赤緯の比較 (2022年)

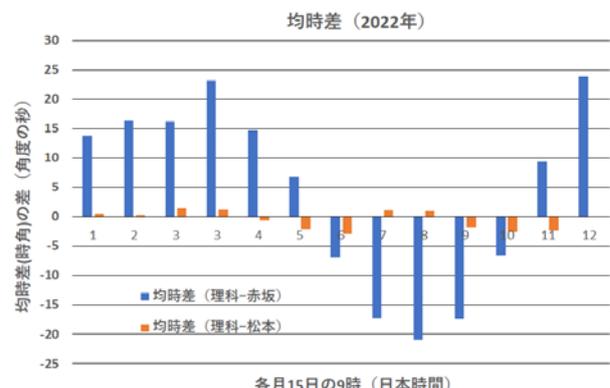


図 3 (6) 各月 15 日 9 時の均時差の比較 (2022年)

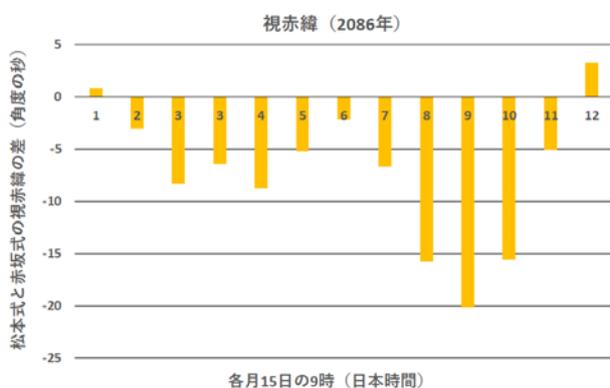


図 3 (7) 各月 15 日 9 時の視赤緯の比較 (2022年)

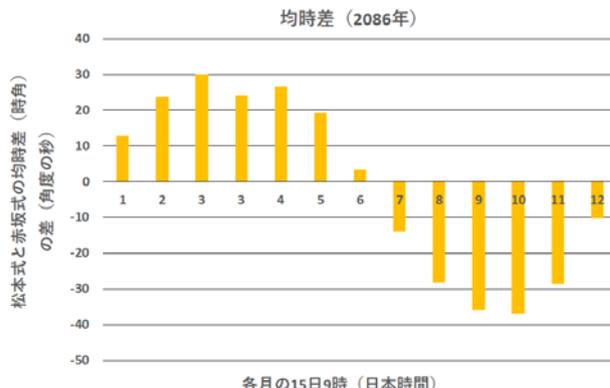


図 3 (8) 各月 15 日 9 時の均時差の比較 (2022年)

### 5.3 日本全域を覆う緯度，経度の範囲の太陽高度 $h$ と方位角 $A$ の比較

表2 松本の式と本計算式による太陽高度  $h$ ，太陽方位角  $A$  の違い

| 緯度  | 経度   | 2005年         |                     |                |        |       |              |     |                |        |       |                 |      |
|-----|------|---------------|---------------------|----------------|--------|-------|--------------|-----|----------------|--------|-------|-----------------|------|
|     |      | h>0の<br>年間時間数 | $\Delta H$ の<br>NoE | $\Delta h$ (°) |        |       | $\Delta A$ の |     | $\Delta A$ (°) |        |       | $\Delta DS$ (%) |      |
|     |      |               |                     | 最大値            | 最小値    | RMSE  | NoE          | ToE | 最大値            | 最小値    | RMSE  | 最大値             | RMSE |
| 20N | 120E | 4421          | 0                   | 0.010          | -0.010 | 0.004 | 96           | 13  | 0.256          | -0.335 | 0.024 | 1.98            | 0.95 |
|     | 130E | 4353          | 0                   | 0.010          | -0.010 | 0.004 | 50           | 12  | 0.083          | -0.065 | 0.009 | 1.98            | 0.95 |
|     | 140E | 4353          | 0                   | 0.010          | -0.010 | 0.004 | 13           | 12  | 0.075          | -0.027 | 0.008 | 1.98            | 0.95 |
|     | 150E | 4421          | 0                   | 0.010          | -0.010 | 0.004 | 97           | 11  | 0.257          | -0.336 | 0.024 | 1.98            | 0.95 |
| 30N | 120E | 4363          | 0                   | 0.010          | -0.010 | 0.004 | 34           | 13  | 0.072          | -0.006 | 0.009 | 1.98            | 0.96 |
|     | 130E | 4400          | 0                   | 0.010          | -0.010 | 0.004 | 11           | 12  | 0.056          | -0.005 | 0.008 | 1.98            | 0.97 |
|     | 140E | 4395          | 0                   | 0.010          | -0.010 | 0.004 | 24           | 12  | 0.058          | -0.005 | 0.008 | 1.98            | 0.97 |
|     | 150E | 4363          | 0                   | 0.010          | -0.010 | 0.004 | 34           | 11  | 0.072          | -0.006 | 0.009 | 1.98            | 0.96 |
| 40N | 120E | 4400          | 0                   | 0.009          | -0.009 | 0.004 | 0            | 0   | 0.033          | -0.005 | 0.006 | 1.98            | 0.98 |
|     | 130E | 4389          | 0                   | 0.009          | -0.009 | 0.004 | 0            | 0   | 0.031          | -0.005 | 0.006 | 1.98            | 0.98 |
|     | 140E | 4404          | 0                   | 0.009          | -0.009 | 0.004 | 0            | 0   | 0.031          | -0.005 | 0.006 | 1.98            | 0.98 |
|     | 150E | 4401          | 0                   | 0.009          | -0.009 | 0.004 | 0            | 0   | 0.033          | -0.005 | 0.006 | 1.98            | 0.98 |
| 50N | 120E | 4401          | 0                   | 0.008          | -0.008 | 0.003 | 0            | 0   | 0.021          | -0.005 | 0.006 | 1.98            | 1.00 |
|     | 130E | 4409          | 0                   | 0.008          | -0.008 | 0.003 | 0            | 0   | 0.021          | -0.005 | 0.006 | 1.98            | 1.00 |
|     | 140E | 4405          | 0                   | 0.008          | -0.008 | 0.003 | 0            | 0   | 0.021          | -0.005 | 0.006 | 1.98            | 1.00 |
|     | 150E | 4401          | 0                   | 0.008          | -0.008 | 0.003 | 0            | 0   | 0.021          | -0.005 | 0.006 | 1.98            | 1.00 |
| 緯度  | 経度   | 2022年         |                     |                |        |       |              |     |                |        |       |                 |      |
|     |      | h>0の<br>年間時間数 | $\Delta H$ の<br>NoE | $\Delta h$ (°) |        |       | $\Delta A$ の |     | $\Delta A$ (°) |        |       | $\Delta DS$ (%) |      |
|     |      |               |                     | 最大値            | 最小値    | RMSE  | NoE          | ToE | 最大値            | 最小値    | RMSE  | 最大値             | RMSE |
| 20N | 120E | 4421          | 0                   | 0.008          | -0.008 | 0.004 | 56           | 13  | 0.104          | -0.144 | 0.013 | 1.58            | 0.94 |
|     | 130E | 4352          | 0                   | 0.008          | -0.008 | 0.004 | 0            | 0   | 0.042          | -0.034 | 0.007 | 1.59            | 0.94 |
|     | 140E | 4353          | 0                   | 0.008          | -0.008 | 0.004 | 27           | 12  | 0.061          | -0.075 | 0.008 | 1.59            | 0.94 |
|     | 150E | 4421          | 0                   | 0.008          | -0.008 | 0.004 | 56           | 11  | 0.104          | -0.144 | 0.013 | 1.59            | 0.94 |
| 30N | 120E | 4362          | 0                   | 0.008          | -0.008 | 0.004 | 0            | 0   | 0.022          | -0.048 | 0.007 | 1.58            | 0.94 |
|     | 130E | 4400          | 0                   | 0.008          | -0.008 | 0.004 | 0            | 0   | 0.021          | -0.035 | 0.006 | 1.58            | 0.94 |
|     | 140E | 4394          | 0                   | 0.008          | -0.008 | 0.004 | 0            | 0   | 0.019          | -0.036 | 0.006 | 1.58            | 0.94 |
|     | 150E | 4362          | 0                   | 0.008          | -0.008 | 0.004 | 0            | 0   | 0.022          | -0.048 | 0.007 | 1.58            | 0.94 |
| 40N | 120E | 4400          | 0                   | 0.007          | -0.008 | 0.003 | 0            | 0   | 0.013          | -0.021 | 0.005 | 1.58            | 0.94 |
|     | 130E | 4390          | 0                   | 0.007          | -0.008 | 0.003 | 0            | 0   | 0.013          | -0.02  | 0.005 | 1.58            | 0.94 |
|     | 140E | 4404          | 0                   | 0.007          | -0.008 | 0.003 | 0            | 0   | 0.013          | -0.021 | 0.005 | 1.58            | 0.94 |
|     | 150E | 4401          | 0                   | 0.007          | -0.008 | 0.003 | 0            | 0   | 0.013          | -0.021 | 0.005 | 1.58            | 0.94 |
| 50N | 120E | 4401          | 0                   | 0.006          | -0.008 | 0.003 | 0            | 0   | 0.01           | -0.015 | 0.005 | 1.58            | 0.94 |
|     | 130E | 4409          | 0                   | 0.006          | -0.008 | 0.003 | 0            | 0   | 0.01           | -0.015 | 0.005 | 1.58            | 0.94 |
|     | 140E | 4406          | 0                   | 0.006          | -0.008 | 0.003 | 0            | 0   | 0.01           | -0.015 | 0.005 | 1.58            | 0.94 |
|     | 150E | 4401          | 0                   | 0.006          | -0.008 | 0.003 | 0            | 0   | 0.01           | -0.015 | 0.005 | 1.58            | 0.94 |
| 緯度  | 経度   | 2086年         |                     |                |        |       |              |     |                |        |       |                 |      |
|     |      | h>0の<br>年間時間数 | $\Delta H$ の<br>NoE | $\Delta h$ (°) |        |       | $\Delta A$ の |     | $\Delta A$ (°) |        |       | $\Delta DS$ (%) |      |
|     |      |               |                     | 最大値            | 最小値    | RMSE  | NoE          | ToE | 最大値            | 最小値    | RMSE  | 最大値             | RMSE |
| 20N | 120E | 4421          | 0                   | 0.008          | -0.011 | 0.005 | 74           | 13  | 0.146          | -0.171 | 0.017 | 2.17            | 1.26 |
|     | 130E | 4353          | 0                   | 0.008          | -0.011 | 0.005 | 17           | 12  | 0.080          | -0.046 | 0.010 | 2.17            | 1.26 |
|     | 140E | 4351          | 0                   | 0.008          | -0.011 | 0.005 | 31           | 12  | 0.035          | -0.071 | 0.010 | 2.17            | 1.26 |
|     | 150E | 4421          | 0                   | 0.008          | -0.011 | 0.005 | 74           | 11  | 0.147          | -0.171 | 0.017 | 2.17            | 1.26 |
| 30N | 120E | 4365          | 0                   | 0.007          | -0.011 | 0.005 | 0            | 0   | 0.040          | -0.027 | 0.008 | 2.17            | 1.26 |
|     | 130E | 4400          | 0                   | 0.007          | -0.011 | 0.005 | 0            | 0   | 0.036          | -0.029 | 0.008 | 2.17            | 1.26 |
|     | 140E | 4393          | 0                   | 0.007          | -0.011 | 0.005 | 0            | 0   | 0.031          | -0.030 | 0.008 | 2.17            | 1.26 |
|     | 150E | 4364          | 0                   | 0.007          | -0.011 | 0.005 | 0            | 0   | 0.040          | -0.027 | 0.008 | 2.17            | 1.26 |
| 40N | 120E | 4401          | 0                   | 0.006          | -0.011 | 0.004 | 0            | 0   | 0.020          | -0.019 | 0.007 | 2.17            | 1.26 |
|     | 130E | 4387          | 0                   | 0.006          | -0.011 | 0.004 | 0            | 0   | 0.021          | -0.019 | 0.007 | 2.17            | 1.26 |
|     | 140E | 4404          | 0                   | 0.005          | -0.011 | 0.004 | 0            | 0   | 0.020          | -0.019 | 0.007 | 2.17            | 1.26 |
|     | 150E | 4401          | 0                   | 0.006          | -0.011 | 0.004 | 0            | 0   | 0.020          | -0.019 | 0.007 | 2.17            | 1.26 |
| 50N | 120E | 4399          | 0                   | 0.004          | -0.011 | 0.004 | 0            | 0   | 0.015          | -0.015 | 0.007 | 2.17            | 1.26 |
|     | 130E | 4409          | 0                   | 0.004          | -0.011 | 0.004 | 0            | 0   | 0.015          | -0.014 | 0.007 | 2.17            | 1.26 |
|     | 140E | 4404          | 0                   | 0.004          | -0.011 | 0.004 | 0            | 0   | 0.015          | -0.015 | 0.007 | 2.17            | 1.26 |
|     | 150E | 4398          | 0                   | 0.004          | -0.011 | 0.004 | 0            | 0   | 0.015          | -0.015 | 0.007 | 2.17            | 1.26 |

注1：NoEはh>0の年間時間数中、両計算式の違いが閾値(=0.049°)以上となる時間数。違いが閾値以下なら四捨五入したときに小数点以下1桁の数値は変わらない。太陽高度のNoEはすべて0で、1以上となるのは太陽方位角のみである。

注2：ToEは閾値以上となる時刻。ToEは緯度、経度が同じなら同じで、太陽高度が最も高い時刻となる。

表 2 に、2005 年、2022 年、2086 年の毎時刻の、緯度  $20^{\circ}$  N $\sim$  $50^{\circ}$  N、経度  $120^{\circ}$  E $\sim$  $150^{\circ}$  E の太陽高度  $h$ 、太陽方位角  $A$  を松本の式と本計算式によって計算し、比較した。緯度、経度の範囲は日本全土を覆うように設定した。比較は太陽高度が正の時刻について行った。表 2 の  $h > 0$  の年間時間数は各緯度、経度における太陽高度  $h$  が正の時間数である。

表 2 の NoE は、両計算式の違いが閾値 ( $0.049^{\circ}$ ) 以上となる時間数である。この閾値は四捨五入したときに小数点以下 1 桁目が変わらないように、言い換えれば両計算式による  $h$  または  $A$  の小数点以下 1 桁までが一致するように設定した。 $\Delta h$  の NoE は、計算した緯度、経度の範囲で 0 であり、すべて閾値をクリアしている。一方、 $\Delta A$  の NoE は、緯度、経度の組み合わせによって異なる。 $\Delta A$  の NoE が正になる時刻 ( $\Delta A$  が閾値以上となる時刻) は、2005 年では緯度 20N、30N に現れ、緯度 40N、50N には現れず、2022 年、2086 年では緯度 20N のみに現れ、緯度 30N、40N、50N には現れない。 $\Delta A$  の NoE は 0 $\sim$ 97 時間の範囲であり、 $h > 0$  の年間総時間数 (約 4380 時間) の 0 $\sim$ 2.2% である。

表 2 の  $\Delta A$  の ToE は、 $\Delta A$  の NoE が正になる時刻 (JST) を表す。ToE は緯度、経度が同じなら同時刻であり、120E では 13 時、130E と 140E では 12 時、150E では 13 時である。すなわち  $h$  が最も大きい時刻 (太陽が天頂に近い時刻) である。経度によって ToE が 1 $\sim$ 2 時間異なるのは、 $h$  が最も大きくなる時刻が、120N $\sim$ 150N の範囲で 1 $\sim$ 2 時間ずれるからである。

表 2 全体でみると、 $\Delta A$  の最大値は 0.257、最小値は -0.336 であるから、少数点以下一桁目に 0.3 の違いが表れることになる。しかし  $h$  が大きい時刻の  $\Delta A$  の違いは、実際の太陽位置のずれを過大評価してしまう。このような  $\Delta A$  の  $h$  に対する依存性を解消するため式(17)で導入したのが  $\Delta DS$  であり、表 2 にはこの  $\Delta DS$  (%) も記入した。

表 2 のように  $\Delta DS$  の最大値は緯度、経度にかかわらず、2005 年では 2%、2022 年では 1.6%、2086 年では 2.2%程度である。 $\Delta DS$  は両者の違いを太陽視直径に対する比率で表したものであるから、2005 年、2022 年、2086 年で、それぞれ太陽位置のずれが、最大で太陽視直径の 2%、1.6%、2.2%であることを示している。このずれは太陽の輪郭が多少ぼやけて見える程度の微細なものである。

## 6. 松本の式、山崎の式、本計算式、文献【3】【4】【5】の式による太陽位置の計算値の比較

太陽位置の計算式は数多く公表されているから、それらの精度や特徴を知ったうえで、使用目的に応じて適切に使い分ける必要がある。ここでは、松本の式、山崎の式、本計算式、文献【3】【4】【5】の式による視赤緯  $\delta$ 、均時差  $E_t$ 、太陽高度  $h$ 、太陽方位角  $A$  を計算し、松本の式を基準とした太陽位置のずれを太陽視直径比  $\Delta DS$  (%) で表す。この比較は、札幌、東京、那覇の国内 3 地点については、2005 年、2022 年、2086 年の春分、夏至、冬至近辺の日の 12 時、海外の 6 都市については 2022 年の春分、夏至、冬至近辺の日の 12 時で行った。全部で 57 ケースの計算となる。

表 3 に、基準値を松本の式による計算値とし、比較した式による計算値と基準値とのずれ  $\Delta DS$  (%) の平均値と RMSE を整理した。また表 4 には、計算対象地点別の太陽視直径比  $\Delta DS$  (%) を整理した。 $\Delta DS$  は、山崎の式では、国内で 0.1 $\sim$ 1.9(%), 海外で 0.3 $\sim$ 5.9(%), 本計算式では、国内では 0.1 $\sim$ 1.4(%), 海外では 0.3 $\sim$ 1.4(% ) である。山崎の式のずれがその修正式である本計算式より大きい地点は、計算地点の経度と標準時の経度の差が大きい地点に現れる。その理由は表 3 の脚注 3) に記した通りである。この点を修正すれば相当改善され、脚注 3) に記したように山崎の式のずれが本計算式よりやや小さくなる。修正は容易であり、7. では山崎のプログラムを修正して用いている。

表3 松本の式, 山崎の式, 本計算式, 及び文献【3】【4】【5】の式による太陽位置の比較

|   | 松本の式 <sup>1)</sup> と比較する5つの式 |      | 山崎の式              | 本計算式<br>(赤坂の式)    | Spencerの式       | ISO 52010-<br>1:2017の式 | 松尾らの式           |
|---|------------------------------|------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------|-----------------|
| 1 | 式(計算法)名称                     |      | 式1                | 式2                | 式3              | 式4                     | 式5              |
| 2 | 文献                           |      | 【7】 <sup>2)</sup> | 本解説 <sup>3)</sup> | 【4】             | 【5】                    | 【3】             |
| 3 | 閏年への対応                       |      | ○                 | ○                 | × <sup>4)</sup> | ○                      | × <sup>4)</sup> |
| 4 | 年差への対応                       |      | ○                 | ○                 | ×               | ×                      | ×               |
| 5 | 松本の式とのずれ                     | 平均値  | 1.1               | 0.8               | 31.3            | 23.7                   | 55.2            |
| 6 | ΔDS(°) <sup>5)</sup>         | RMSE | 1.5               | 0.9               | 42.9            | 35.0                   | 71.1            |

松本の式【11】による計算値を基準として比較した。

1) 松本の式は $\delta, E, t$ に加え $h, A$ の計算式を含む。公開されている松本プログラムには標準時経度として135E(JST), UTとJSTの時差として9時間が組み込まれているが、本解説では世界対応とするため、これらを引数として与えるようにした。

2) 山崎の式は建築学会で数回発表されているが、ここでは最も新しい【7】のプログラム(浦野・中村編著, 建築環境工学p137に掲載されているプログラムと同じ)を用いた。

3) 本計算式(赤坂の式)は山崎の式【7】の修正式である。修正内容は本解説の1.を参照のこと。修正式の方がずれが小さいのは本解説1.⑤が原因であり、これを修正式に合わせると、平均値の1.1, RMSEの1.5は、それぞれ、0.6, 0.7となる。

4) Spencerの式と松尾らの式は閏年に対応していないので、対応するように計算式を修正した。資料3に式(3)~(5)を組み込んだプログラムを掲載しているので、修正箇所は資料3のプログラムで確認することができる。

5) 式1~式5と松本の式との太陽位置のずれを、視太陽の直径のずれ $\Delta DS(\%)$ で表した。 $\Delta DS$ に占める比率は $\Delta A$ (横方向)が大きいため、 $\Delta DS$ が100(%)とは、計算による仮想太陽が実太陽と接して横方向に並んで見える状況を意味する。

表4のように、 $\Delta DS$ は、Spencerの式では0.6~96.8(%)、ISOの式では0.7~84.4(%)、松尾らの式では15.3~145.3(%)である。これらの式による $\Delta DS$ は計算地点と計算日によって大幅に変化し、場合を特定することはできない。図4に式1~式5別に、表4で比較した世界9地点、全57ケースの $\Delta DS$ の変化を図示した。年差を考慮した式1, 2と、考慮しない式3~式5には明確な違いがみられる。Spencerの式、ISOの式、松尾らの式の中では、ISOの式が $\Delta DS$ のずれが最も少ない。式の簡易さ、使いやすさではSpencerの式がやや勝る。

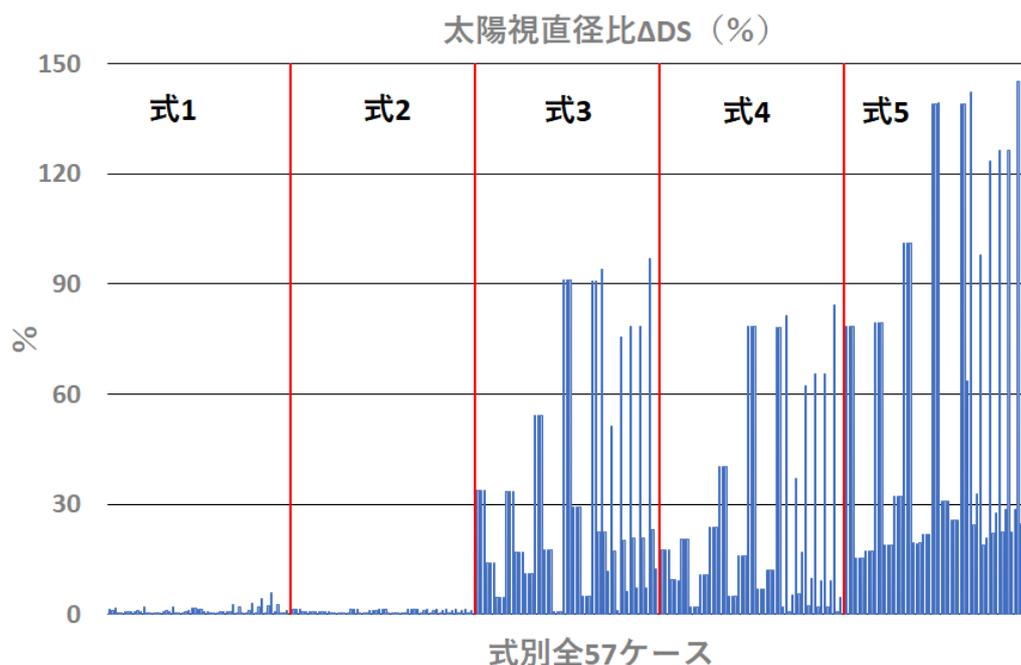


図4 式1~式5の $\Delta DS$ の比較

表4 式0(松本の式)による計算値, 式0に対する式1(山崎の式), 式2(本計算式), 式3(Spencerの式), 式4(ISOの式), 式5(松尾等の式)のいずれの太陽視直径に対する比率(%)

| 地点       | 緯度     | 経度     | 標準時<br>経度 | 年     | 月      | 日      | 時       | 式0(松本の式) |        |          |          | 式0とのずれ: ΔDS(%) |          |          |        |       |      |      |      |      |
|----------|--------|--------|-----------|-------|--------|--------|---------|----------|--------|----------|----------|----------------|----------|----------|--------|-------|------|------|------|------|
|          |        |        |           |       |        |        |         | 視赤緯(°)   | 均時差(°) | 高度(°)    | 方位角(°)   | 式1             | 式2       | 式3       | 式4     | 式5    |      |      |      |      |
| 札幌       | 43.06  | 141.33 |           | 2015  | 3      | 21     | 12      | 0.070    | -1.842 | 46.822   | 6.564    | 1.4            | 1.3      | 33.8     | 17.5   | 78.3  |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         | 6        | 21     | 12       | 23.434   | -0.410         | 69.773   | 15.881   | 1.1    | 1.3   | 33.8 | 17.5 | 78.3 |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         | 12       | 21     | 12       | -23.430  | 0.565          | 23.207   | 6.881    | 1.7    | 1.3   | 33.8 | 17.5 | 78.3 |      |
|          |        |        |           |       | 2020   | 6      | 21      | 12       | 0.381  | -1.787   | 47.128   | 6.682          | 0.5      | 0.7      | 14     | 9.4   | 15.3 |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         |          | 6      | 21       | 12       | 23.437         | -0.456   | 69.785   | 15.762 | 0.5   | 0.7  | 14   | 9.4  | 15.3 |
|          |        |        |           |       |        |        |         |          | 12     | 21       | 12       | -23.437        | 0.471    | 23.209   | 6.788  | 0.7   | 0.7  | 14   | 9.3  | 15.3 |
|          |        |        |           | 2022  | 3      | 21     | 12      | 0.188    | -1.819 | 46.938   | 6.612    | 0.7            | 0.6      | 4.5      | 20.5   | 17.3  |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         | 6        | 21     | 12       | 23.438   | -0.434         | 69.782   | 15.821   | 0.6    | 0.6   | 4.5  | 20.5 | 17.3 |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         | 12       | 21     | 12       | -23.436  | 0.539          | 23.204   | 6.855    | 0.6    | 0.6   | 4.5  | 20.5 | 17.4 |      |
|          |        |        |           | 2086  | 3      | 21     | 12      | 0.386    | -1.773 | 47.131   | 6.703    | 1.1            | 0.7      | 33.5     | 2.1    | 79.3  |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         | 6        | 21     | 12       | 23.427   | -0.499         | 69.784   | 15.644   | 0.8    | 0.7   | 33.5 | 2.1  | 79.3 |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         | 12       | 21     | 12       | -23.427  | 0.511          | 23.216   | 6.828    | 1.9    | 0.7   | 33.5 | 2.1  | 79.3 |      |
| 東京       | 35.69  | 139.76 | 135       | 2015  | 3      | 21     | 12      | 0.070    | -1.842 | 54.277   | 5.002    | 0.1            | 0.4      | 16.8     | 10.9   | 18.8  |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         | 6        | 21     | 12       | 23.434   | -0.410         | 77.177   | 18.276   | 0.2    | 0.4   | 16.8 | 10.9 | 18.8 |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         | 12       | 21     | 12       | -23.430  | 0.565          | 30.665   | 5.681    | 0.5    | 0.4   | 16.8 | 10.9 | 18.8 |      |
|          |        |        |           |       | 2020   | 3      | 21      | 12       | 0.381  | -1.787   | 54.583   | 5.134          | 0.3      | 0.1      | 11.1   | 23.6  | 32.2 |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         |          | 6      | 21       | 12       | 23.437         | -0.456   | 77.192   | 18.095 | 0.2   | 0.1  | 11.1 | 23.6 | 32.2 |
|          |        |        |           |       |        |        |         |          | 12     | 21       | 12       | -23.437        | 0.471    | 30.666   | 5.581  | 0.6   | 0.1  | 11.1 | 23.6 | 32.3 |
|          |        |        |           | 2022  | 3      | 21     | 12      | 0.188    | -1.819 | 54.393   | 5.056    | 1              | 1.4      | 54.1     | 40.2   | 101   |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         | 6        | 21     | 12       | 23.438   | -0.434         | 77.187   | 18.185   | 0.7    | 1.4   | 54.1 | 40.2 | 101  |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         | 12       | 21     | 12       | -23.436  | 0.539          | 30.662   | 5.654    | 2      | 1.4   | 54.2 | 40.2 | 101  |      |
|          |        |        |           | 2086  | 3      | 21     | 23      | 0.386    | -1.782 | -53.818  | -174.958 | 0.5            | 0.3      | 17.7     | 5.1    | 19.4  |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         | 3        | 21     | 24       | 0.386    | -1.782         | -53.817  | -174.951 | 0.5    | 0.3   | 17.7 | 5.1  | 19.3 |      |
|          |        |        |           |       |        |        |         | 3        | 22     | 0        | 0.386    | -1.782         | -53.817  | -174.951 | 0.3    | 0.3   | 17.7 | 5.1  | 19.4 |      |
| 2086     | 3      | 21     | 12        | 0.386 | -1.773 | 54.586 | 5.159   | 0.9      | 1.1    | 0.6      | 16       | 21.8           |          |          |        |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           | 6     | 21     | 12     | 23.427  | -0.499   | 77.193 | 17.911   | 1        | 1.1            | 0.6      | 16       | 21.8   |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           | 12    | 21     | 12     | -23.427 | 0.511    | 30.673 | 5.624    | 1.7      | 1.1            | 0.6      | 16       | 21.8   |       |      |      |      |      |
|          | 2015   | 3      | 21        | 12    | 0.070  | -1.842 | 62.414  | -20.095  | 1.6    | 1.3      | 91.2     | 78.3           | 139.1    |          |        |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       | 6      | 21     | 12      | 23.434   | -0.410 | 82.464   | -70.069  | 1.3            | 1.3      | 91.1     | 78.3   | 139.1 |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       | 12     | 21     | 12      | -23.430  | 0.565  | 39.935   | -8.083   | 1.3            | 1.3      | 91.2     | 78.4   | 139.2 |      |      |      |      |
| 2020     | 3      | 21     | 12        | 0.381 | -1.787 | 62.727 | -20.191 | 0.6      | 0.2    | 29.2     | 6.9      | 30.9           |          |          |        |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           | 6     | 21     | 12     | 23.437  | -0.456   | 82.426 | -70.216  | 0.6      | 0.2            | 29.2     | 6.9      | 30.9   |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           | 12    | 21     | 12     | -23.437 | 0.471    | 39.917 | -8.193   | 0.2      | 0.2            | 29.2     | 6.9      | 30.9   |       |      |      |      |      |
|          | 2022   | 3      | 21        | 12    | 0.188  | -1.819 | 62.534  | -20.127  | 0.2    | 0.2      | 4.9      | 12.1           | 25.7     |          |        |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       | 6      | 21     | 12      | 23.438   | -0.434 | 82.445   | -70.164  | 0.2            | 0.2      | 4.9      | 12.1   | 25.7  |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       | 12     | 21     | 12      | -23.436  | 0.539  | 39.926   | -8.112   | 0.9            | 0.2      | 4.9      | 12.1   | 25.8  |      |      |      |      |
| 2086     | 3      | 21     | 12        | 0.386 | -1.773 | 62.735 | -20.164 | 0.7      | 1.4    | 90.7     | 78.1     | 139            |          |          |        |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           | 6     | 21     | 12     | 23.427  | -0.499   | 82.386 | -70.268  | 0.7      | 1.4            | 90.7     | 78.1     | 139    |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           | 12    | 21     | 12     | -23.427 | 0.511    | 39.932 | -8.148   | 0.7      | 1.4            | 22.6     | 2.2      | 63.7   |       |      |      |      |      |
| Santiago | -33.26 | -70.5  | -60       | 3     | 21     | 12     | 0.402   | -1.779   | 54.409 | -158.568 | 2.7      | 1.4            | 93.9     | 81.4     | 142.4  |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        | 6       | 21       | 12     | 23.438   | -0.463   | 32.347         | -168.080 | 0.3      | 0.3    | 22.6  | 0.7  | 24.5 |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        | 12      | 21       | 12     | -23.438  | 0.472    | 76.811         | -135.557 | 1.9      | 1.1    | 11.6  | 5.3  | 32.9 |      |      |
| Sydney   | -33.57 | 151.11 | 150       | 3     | 21     | 12     | 0.172   | -1.822   | 56.251 | -178.718 | 0.5      | 1.4            | 51.3     | 37.1     | 97.9   |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        | 6       | 21       | 12     | 23.438   | -0.432   | 32.989         | 179.258  | 0.4      | 0.3    | 17.3  | 5.5  | 19   |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        | 12      | 21       | 12     | -23.436  | 0.545    | 79.762         | 171.428  | 1.2      | 1.1    | 1.1   | 16.9 | 20.9 |      |      |
| CapeTown | -33.58 | 18.36  | 30        | 3     | 21     | 12     | 0.304   | -1.797   | 53.839 | -156.807 | 2.9      | 1.4            | 75.4     | 62.4     | 123.4  |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        | 6       | 21       | 12     | 23.438   | -0.450   | 31.831         | -166.928 | 0.3      | 0.3    | 20.3  | 2.4  | 22.1 |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        | 12      | 21       | 12     | -23.437  | 0.503    | 75.925         | -133.221 | 2        | 1.1    | 6.2   | 9.9  | 27.7 |      |      |
| Madrid   | 40.27  | -3.35  | 15        | 3     | 21     | 12     | 0.320   | -1.794   | 46.049 | -29.748  | 4.3      | 1.4            | 78.3     | 65.5     | 126.3  |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        | 6       | 21       | 12     | 23.438   | -0.452   | 66.897         | -48.905  | 0.4      | 0.3    | 20.7  | 2    | 22.5 |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        | 12      | 21       | 12     | -23.438  | 0.498    | 24.157         | -17.955  | 2.4      | 1.1    | 7.1   | 9.1  | 28.6 |      |      |
| Oslo     | 60.12  | -11.05 | 15        | 3     | 21     | 12     | 0.320   | -1.794   | 26.445 | -31.443  | 5.9      | 1.4            | 78.3     | 65.5     | 126.3  |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        | 6       | 21       | 12     | 23.438   | -0.452   | 48.932         | -38.550  | 0.6      | 0.3    | 20.7  | 2    | 22.5 |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        | 12      | 21       | 12     | -23.438  | 0.498    | 3.870          | -23.369  | 2.8      | 1.1    | 7.1   | 9.1  | 28.6 |      |      |
| NewYork  | 40.46  | -73.54 | -75       | 3     | 21     | 12     | 0.419   | -1.776   | 49.958 | -0.490   | 0.5      | 1.4            | 96.8     | 84.4     | 145.3  |       |      |      |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        | 6       | 21       | 12     | 23.438   | -0.466   | 72.957         | 3.114    | 0.4      | 0.3    | 23    | 0.8  | 24.8 |      |      |
|          |        |        |           |       |        |        | 12      | 21       | 12     | -23.438  | 0.467    | 26.077         | 1.968    | 1.2      | 1.1    | 12.5  | 4.6  | 33.7 |      |      |

### 7. 山崎の式, 本計算式, 文献【3】～【5】の式による太陽位置の計算値の比較

表5は, 山崎の式を基準とした式2～式5の $\delta$ , Et, h, AのMBE (Mean Bias Error) とRMSE (Root Mean Square Error) の一覧である。計算は表4と同じ国内と海外の57ケースについて行っている。表3の脚注3)に記したように, 山崎氏のプログラムは1か所だけ修正すれば精度がやや向上することが分かっているため, 表5の計算ではその箇所を修正している。

表5のようにMBEの絶対値は式2～式5ともに小数点以下1桁まで0で小さく, EtとAに比べて $\delta$ とhがやや大きい。RMSEは2020年(閏年)と2022年(平年)で類似しているから, 閏年にも正しく対応しているとみられる。山崎の式とのRMSEが最も小さいのは本計算式で,  $\delta$ , Et, h, Aともほぼ0(°)である。式3～式5のRMSEは0.076～0.404(°)であり, 式4, 式3, 式5の順に大きくなっている。

資料3に, 山崎の式(式1), 本計算式(式2), Spencer式(式3), ISOの式(式4), 松尾らの式(式5)を組み込んだプログラム(fortran90)を掲載した。各式は, それぞれ, sunpos\_y, sunpos\_a, sunpos\_s, sunpos\_i, sunpos\_mというサブプログラムに組み込まれている。これらのサブプログラムは, 対象地点の緯度(北緯を+, 南緯を-), 経度, 地方標準時の経度(東経を+, 西経を-), 年, 月, 日, 時, 分, 秒を受けて, 視赤緯 $\delta$ , 均時差Et, 時角tを計算する。 $\delta$ , Et, tの単位は(°)である。太陽高度h(°), 太陽方位角A(°)は,  $\delta$ , Et, tをhorisysというサブプログラムに受け渡して計算する。sunpos\_yでは上述した1か所を修正し, プログラム中に修正箇所を記入した。sunpos\_s, sunpos\_mは閏年に対応するように修正している。

資料4には, 例として, 東京の2020年, 2022年12時の $\delta$ , Et, h, Aの計算結果の一部を掲載した。また図5には, 2022年通年12時の東京のh, Aの変動を示した。わずかではあるが, 位相と振幅に違いが生じている。

表5 山崎の式(式1)を基準とした式2～式5の $\delta$ , Et, h, AのMBEとRMSE

| 山崎の式(式1)と比較する4つの式    |               |             | 本計算式<br>(赤坂の式) | Spencerの式 | ISO 52010-<br>1:2017の式 | 松尾らの式  |
|----------------------|---------------|-------------|----------------|-----------|------------------------|--------|
| 式(計算法)番号             |               |             | 式2             | 式3        | 式4                     | 式5     |
| 山崎の式とのずれの<br>MBE(°)  | 2020年<br>(閏年) | 赤緯 $\delta$ | 0.001          | 0.067     | -0.061                 | 0.097  |
|                      |               | 均時差Et       | 0.000          | 0.002     | 0.005                  | -0.001 |
|                      |               | 太陽高度h       | 0.001          | 0.049     | -0.044                 | 0.070  |
|                      |               | 太陽方位角A      | 0.000          | 0.002     | 0.005                  | -0.001 |
|                      | 2022年<br>(平年) | 赤緯 $\delta$ | 0.001          | 0.003     | -0.061                 | 0.033  |
|                      |               | 均時差Et       | 0.000          | 0.000     | 0.005                  | -0.003 |
|                      |               | 太陽高度h       | 0.001          | 0.002     | -0.044                 | 0.024  |
|                      |               | 太陽方位角A      | 0.000          | 0.000     | 0.005                  | -0.003 |
| 山崎の式とのずれの<br>RMSE(°) | 2020年<br>(閏年) | 赤緯 $\delta$ | 0.001          | 0.220     | 0.123                  | 0.407  |
|                      |               | 均時差Et       | 0.003          | 0.076     | 0.081                  | 0.092  |
|                      |               | 太陽高度h       | 0.002          | 0.178     | 0.102                  | 0.318  |
|                      |               | 太陽方位角A      | 0.004          | 0.200     | 0.141                  | 0.351  |
|                      | 2022年<br>(平年) | 赤緯 $\delta$ | 0.001          | 0.217     | 0.144                  | 0.404  |
|                      |               | 均時差Et       | 0.003          | 0.087     | 0.062                  | 0.087  |
|                      |               | 太陽高度h       | 0.002          | 0.177     | 0.117                  | 0.315  |
|                      |               | 太陽方位角A      | 0.004          | 0.204     | 0.138                  | 0.346  |

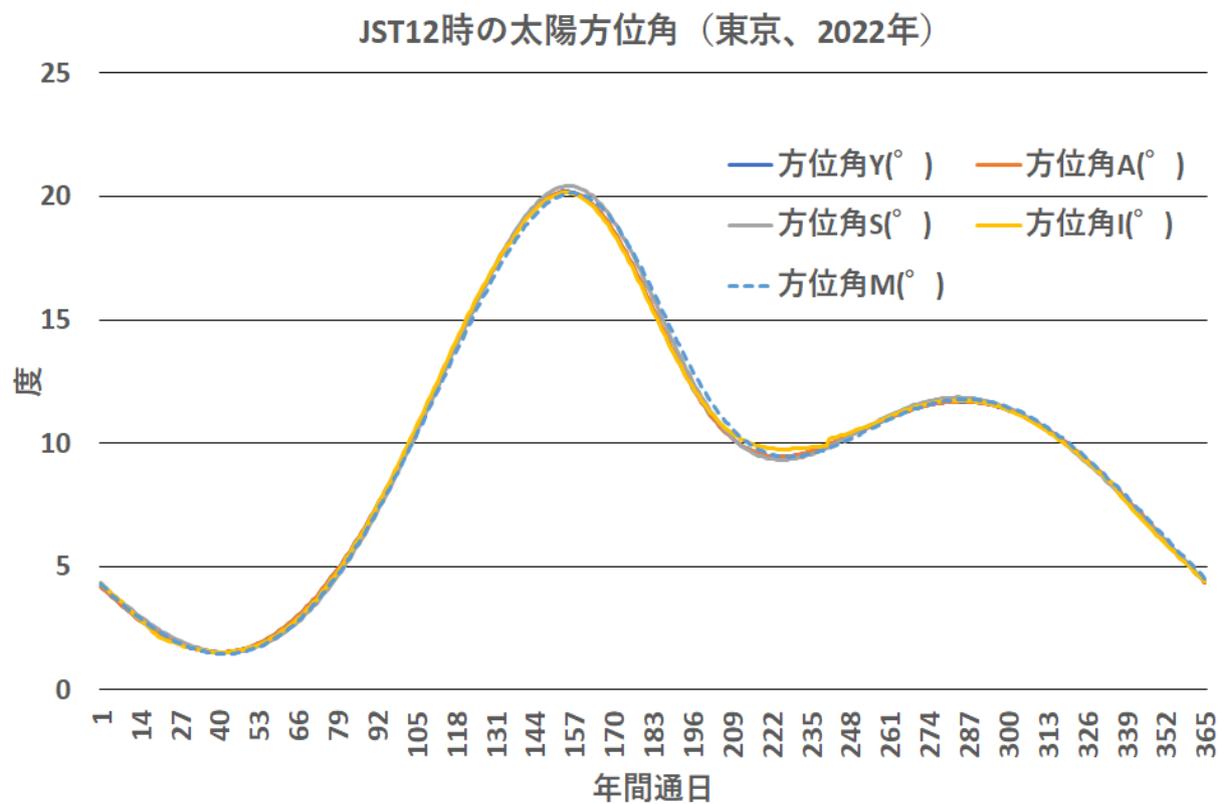
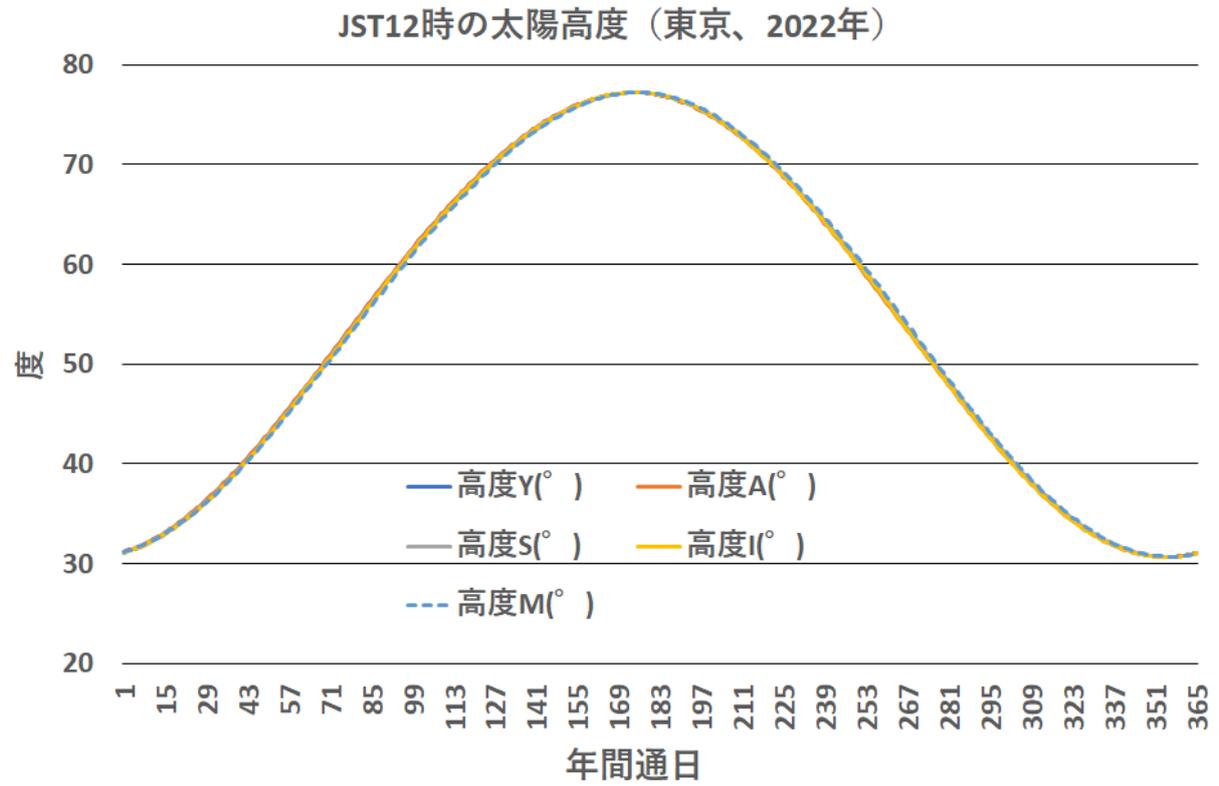


図5 式1～式5による太陽高度  $h$ ，太陽方位角  $A$  の比較（東京 2022 年通年 JST 12 時）

**【参考文献】**

- 【1】 渡邊敏夫, 数理天文学, 恒星社厚生閣版, 1973年9月15日, 増訂三版発行
- 【2】 長谷川一郎, 天文計算入門, 恒星社, 1991年5月, 新装版6刷発行
- 【3】 松尾陽, 横山浩一, 石野久彌, 川元昭吾, 空調設備の動的熱負荷計算, 社団法人建築設備技術者協会, 1992年
- 【4】 J.W. Spencer, Fourier series representation of the position of the sun, Division of Building Research, CSIRO, Aust., May, 1971
- 【5】 ISO 52010-1:2017, Energy performance of buildings – External climatic conditions – Part 1 : Conversion of climatic data for energy calculations
- 【6】 山崎均, 日照環境のための基礎式, 日本建築学会論文報告集第288号, 1980年2月
- 【7】 山崎均, 日照環境の基礎計算式, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.407-408, 昭和55年9月
- 【8】 木村建一編, 建築環境学1, 1 気象データとその応用, 丸善, 1992年
- 【9】 海上保安庁海洋情報部, コンピュータ用天体位置計算式
- 【10】 Jean Meeus, Astronomical Algorithms, Second Edition, Willmann-Bell, Inc., 1999
- 【11】 松本真一, 太陽視赤緯・均時差の代表的計算法4種類の概説とそれらの計算精度の比較, 空気調和・衛生工学会大会, 2022年

## 資料1 太陽位置の計算プログラム1

```

1  program spcall
2  ! *****
3  ! 太陽位置を計算するサブプログラム sunpos を呼び出すサンプルプログラム
4  ! *****
5      implicit none
6      real lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, in0, dlt, et, degh, dega
7      integer :: fi=8, fo=10
8      character fon*16, fin*15, stn*10
9      !
10     write(fon, '(a16)') '.¥sunpos_out.csv'
11     open(fo, file=fon, status='replace')
12     write(fo, 110)
13     110 format(' 地点, 緯度, 経度, 標準時経度, 年, 月, 日, 時, 分, 秒, 大気外法線面日射 (kW/m2), &
14             視赤緯(deg), 均時差(deg), 太陽高度(deg), 太陽方位角(deg) ')
15     write(fin, '(a15)') '.¥sunpos_in.csv'
16     open(fi, file=fin, status='old')
17     read(fi, '(0)')
18     !
19     210 read(fi, *, end=200) stn, lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec
20         call sunpos (lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, in0, dlt, et, degh, dega)
21     write(fo, 120) stn, lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, in0, dlt, et, degh, dega
22     120 format(a10, ', ', 3(f0.3, ', '), 6(f0.0, ', '), 3(f0.3, ', '), 2(f0.2, ', '))
23     go to 210
24     !
25     200 close(fo)
26     close(fi)
27 end program spcall
28 !
29 subroutine sunpos(lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, IN0, dlt, et, degh, dega)
30 ! *****
31 ! 太陽位置 (太陽高度, 太陽方位角) と大気外法線面日射量を計算するサブプログラム (山崎式の修正式)
32 ! 計算条件として与える値
33 !----- lat : 計算対象地点の緯度 (°) (東経は+, 西経は-)
34 !----- lon : 計算対象地点の経度 (°) (北半球は+, 南半球は-)
35 !----- lons : 標準時の地点の緯度 (°) (東経は+, 西経は-, 日本では 135.0)
36 !----- year, mon, day, hour, min, sec : 計算対象西暦年, 月, 日, 時刻, 分, 秒 (全て実数)
37 !----- hour, min, sec は 0, 0, 0~23, 59, 59. 24, 0, 0 は翌日の 0, 0, 0 と同じになる。
38 ! 計算結果として返す値
39 !----- IN0 : 大気外法線面日射量 (kW/m2)
40 !----- dlt : 視赤緯 (°)
41 !----- et : 均時差 (°)
42 !----- degh : 太陽高度 (°)
43 !----- dega : 太陽方位角 (°) (真南を 0 とし, 西回りを+, 東回りを-)
44 ! このサブルーチン内で定義している主な値
45 !----- J0 : 太陽定数 (=1.37kW/m2)
46 !----- dlt0 : 黄道傾斜角 (°)
47 !----- nday : 地方標準時 (日本なら JST) 1月1日基準の通算計算対象時刻(日)
48 !----- m : 平均近点離角 (°)
49 !----- eps : 公転軌道面上で太陽と冬至点, 太陽と近日点がなす角度 (°)
50 !----- v : 真近点離角 (°)
51 !----- t : 時角 (°)
52 !注1 : 本プログラムは山崎均氏(日本建築学会大会梗概集 pp. 407-408)のプログラムを修正し作成した。
53 !注2 : 本プログラムには、歳差, 章動による春分点のずれ, 黄道傾斜角の変化の簡易式を組み込んで
54 ! いるが、離心率の変化, 光差等は、太陽位置計算に与える影響が小さいとみて考慮していない。
55 !
56 !++++ AKASAKA Hiroshi 20230601 +++++
57 ! *****
58     implicit none
59     real lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, dlt, et, degh, dega, sinh, cosh, sina, cosa
60     real nday, mond(12), p(3), m, n, sindlt, cosdlt, eps, v, t, dlt0, veps, IN0
61     real :: J0=1.37, rad=3.141592/180.0
62     integer month1, k1
63     data p/4.0, 100.0, 400.0/

```

```

64      data mond/31., 28., 31., 30., 31., 30., 31., 31., 30., 31., 30., 31. /
65      !
66      ! 2月の月別日数一閏年の判定
67      if (mod(year, p(1)).ne.0.0) then
68          mond(2)=28.0
69      else if (mod(year, p(2)).eq.0.0.and.mod(year, p(3)).ne.0.0) then
70          mond(2)=28.0
71      else
72          mond(2)=29.0
73      end if
74      !
75      ! 黄道傾斜角の計算
76      dlt0 = -23.4393 + 0.013*(year-2000.)/100.
77      !
78      ! 地方標準時 (日本なら JST) 1月1日基準の通算計算対象時刻 nday (日) の計算
79      nday=day
80      month1=int(month)-1
81      if (month1.ne.0) then
82          do k1=1, month1
83              nday=nday+mond(k1)
84          end do
85      end if
86      nday = nday + hour/24. + min/(24.*60.) + sec/(24.*60.*60.)-lons/(24.*15.)
87      !
88      ! 平均近点離角 m の計算
89      n = year-1968.0
90      m = 0.9856*(nday-(3.71+0.2596*n-aint((n+3.0)/4.0)))
91      !
92      ! 冬至点と近日点がなす角度 eps、真近点離角 v の計算
93      eps = 12.3901 + 0.0172*(n+m/360.0)
94      v = m + 1.918*sin(m*rad) + 0.02*sin(2.0*m*rad)
95      !
96      ! 均時差 et の計算
97      veps=(v+eps)*rad
98      et = (m-v) - atan(0.043*sin(2.0*veps)/(1.0-0.043*cos(2.0*veps)))/rad
99      !
100     ! 大気外法線面日射量 INO の計算
101     INO = J0*(1.0+0.033*cos(rad*v))
102     !
103     ! 視赤緯 dlt 及びそのサインとコサインの計算
104     sindlt = cos(veps)*sin(rad*dlt0)
105     cosdlt = sqrt(abs(1.0-sindlt**2.0))
106     dlt = asin(sindlt)/rad
107     !
108     ! 時角 t、太陽高度 h、太陽方位角 a のサインとコサインの計算
109     t = 15.0*(hour+min/60.0+sec/3600.0-12.0) + (lon-lons) + et
110     sinh = sin(rad*lat)*sindlt + cos(rad*lat)*cosdlt*cos(rad*t)
111     cosh = sqrt(1.0-sinh**2.0)
112     sina = cosdlt*sin(rad*t)/cosh
113     cosa = (sinh*sin(rad*lat)-sindlt)/(cosh*cos(rad*lat))
114     !
115     ! 太陽高度 deg h (°)、太陽方位角 deg a (°) の計算
116     deg h=asin(sinh)/rad
117     if (sina.gt.0.0) then
118         deg a = 90.0 - atan(cosa/sina)/rad
119     else if (sina.eq.0.0) then
120         deg a = 0.0
121     else
122         deg a = -90.0 - atan(cosa/sina)/rad
123     end if
124     end subroutine sunpos

```

資料2 プログラム1の計算例

大気外法線面日射量、視赤緯、均時差、太陽高度、太陽方位角の計算例

| 地点名      | 緯度 <sup>注1</sup><br>(deg) | 経度 <sup>注2</sup><br>(deg) | 標準時<br>経度<br>(deg) | 西暦年  | 月  | 日  | 時  | 分  | 秒  | 大気外法<br>線面日射<br>(kW/m <sup>2</sup> ) | 視赤緯 <sup>注3</sup><br>(deg) | 均時差 <sup>注3</sup><br>(deg) | 太陽高度<br>(deg) | 太陽方位<br>角(deg) |
|----------|---------------------------|---------------------------|--------------------|------|----|----|----|----|----|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|----------------|
| 札幌       | 43.060                    | 141.328                   | 135                | 2015 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.072                      | -1.849                     | 46.83         | 6.55           |
| 東京       | 35.690                    | 139.760                   | 135                | 2015 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.072                      | -1.849                     | 54.28         | 4.99           |
| 那覇       | 26.207                    | 127.687                   | 135                | 2015 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.072                      | -1.849                     | 62.41         | -20.11         |
| 札幌       | 43.060                    | 141.328                   | 135                | 2015 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.436                     | -0.413                     | 69.78         | 15.87          |
| 東京       | 35.690                    | 139.760                   | 135                | 2015 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.436                     | -0.413                     | 77.18         | 18.27          |
| 那覇       | 26.207                    | 127.687                   | 135                | 2015 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.436                     | -0.413                     | 82.46         | -70.09         |
| 札幌       | 43.060                    | 141.328                   | 135                | 2015 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.433                    | 0.567                      | 23.20         | 6.88           |
| 東京       | 35.690                    | 139.760                   | 135                | 2015 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.433                    | 0.567                      | 30.66         | 5.68           |
| 那覇       | 26.207                    | 127.687                   | 135                | 2015 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.433                    | 0.567                      | 39.93         | -8.08          |
| 札幌       | 43.060                    | 141.328                   | 135                | 2022 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.192                      | -1.825                     | 46.94         | 6.60           |
| 東京       | 35.690                    | 139.760                   | 135                | 2022 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.192                      | -1.825                     | 54.40         | 5.05           |
| 那覇       | 26.207                    | 127.687                   | 135                | 2022 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.192                      | -1.825                     | 62.54         | -20.14         |
| 札幌       | 43.060                    | 141.328                   | 135                | 2022 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.436                     | -0.433                     | 69.78         | 15.82          |
| 東京       | 35.690                    | 139.760                   | 135                | 2022 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.436                     | -0.433                     | 77.19         | 18.18          |
| 那覇       | 26.207                    | 127.687                   | 135                | 2022 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.436                     | -0.433                     | 82.44         | -70.15         |
| 札幌       | 43.060                    | 141.328                   | 135                | 2022 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.434                    | 0.533                      | 23.21         | 6.85           |
| 東京       | 35.690                    | 139.760                   | 135                | 2022 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.434                    | 0.533                      | 30.66         | 5.65           |
| 那覇       | 26.207                    | 127.687                   | 135                | 2022 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.434                    | 0.533                      | 39.93         | -8.12          |
| 札幌       | 43.060                    | 141.328                   | 135                | 2086 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.381                                | 0.387                      | -1.780                     | 47.13         | 6.69           |
| 東京       | 35.690                    | 139.760                   | 135                | 2086 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.381                                | 0.387                      | -1.780                     | 54.59         | 5.15           |
| 那覇       | 26.207                    | 127.687                   | 135                | 2086 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.381                                | 0.387                      | -1.780                     | 62.73         | -20.18         |
| 札幌       | 43.060                    | 141.328                   | 135                | 2086 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.428                     | -0.499                     | 69.79         | 15.65          |
| 東京       | 35.690                    | 139.760                   | 135                | 2086 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.428                     | -0.499                     | 77.19         | 17.91          |
| 那覇       | 26.207                    | 127.687                   | 135                | 2086 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.428                     | -0.499                     | 82.39         | -70.27         |
| 札幌       | 43.060                    | 141.328                   | 135                | 2086 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.428                    | 0.511                      | 23.21         | 6.83           |
| 東京       | 35.690                    | 139.760                   | 135                | 2086 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.428                    | 0.511                      | 30.67         | 5.62           |
| 那覇       | 26.207                    | 127.687                   | 135                | 2086 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.428                    | 0.511                      | 39.93         | -8.15          |
| 東京       | 35.690                    | 139.760                   | 135                | 2022 | 3  | 21 | 23 | 59 | 59 | 1.380                                | 0.390                      | -1.788                     | -53.81        | -174.97        |
| 東京       | 35.690                    | 139.760                   | 135                | 2022 | 3  | 21 | 24 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.390                      | -1.788                     | -53.81        | -174.96        |
| 東京       | 35.690                    | 139.760                   | 135                | 2022 | 3  | 22 | 0  | 0  | 0  | 1.380                                | 0.390                      | -1.788                     | -53.81        | -174.96        |
| Santiago | -33.260                   | -70.500                   | -60                | 2022 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.406                      | -1.785                     | 54.40         | -158.56        |
| Santiago | -33.260                   | -70.500                   | -60                | 2022 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.436                     | -0.463                     | 32.35         | -168.08        |
| Santiago | -33.260                   | -70.500                   | -60                | 2022 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.436                    | 0.466                      | 76.81         | -135.54        |
| Sydney   | -33.570                   | 151.110                   | 150                | 2022 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.176                      | -1.828                     | 56.25         | -178.71        |
| Sydney   | -33.570                   | 151.110                   | 150                | 2022 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.436                     | -0.431                     | 32.99         | 179.26         |
| Sydney   | -33.570                   | 151.110                   | 150                | 2022 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.434                    | 0.538                      | 79.76         | 171.46         |
| CapeTown | -33.580                   | 18.360                    | 30                 | 2022 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.308                      | -1.803                     | 53.83         | -156.80        |
| CapeTown | -33.580                   | 18.360                    | 30                 | 2022 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.436                     | -0.449                     | 31.83         | -166.93        |
| CapeTown | -33.580                   | 18.360                    | 30                 | 2022 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.436                    | 0.497                      | 75.92         | -133.21        |
| Madrid   | 40.270                    | -3.350                    | 15                 | 2022 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.324                      | -1.800                     | 46.05         | -29.76         |
| Madrid   | 40.270                    | -3.350                    | 15                 | 2022 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.436                     | -0.452                     | 66.90         | -48.90         |
| Madrid   | 40.270                    | -3.350                    | 15                 | 2022 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.436                    | 0.492                      | 24.16         | -17.96         |
| Oslo     | 60.120                    | -11.050                   | 15                 | 2022 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.324                      | -1.800                     | 26.45         | -31.45         |
| Oslo     | 60.120                    | -11.050                   | 15                 | 2022 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.436                     | -0.452                     | 48.93         | -38.55         |
| Oslo     | 60.120                    | -11.050                   | 15                 | 2022 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.436                    | 0.492                      | 3.87          | -23.37         |
| NewYork  | 40.460                    | -73.540                   | -75                | 2022 | 3  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.380                                | 0.423                      | -1.782                     | 49.96         | -0.50          |
| NewYork  | 40.460                    | -73.540                   | -75                | 2022 | 6  | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.326                                | 23.436                     | -0.465                     | 72.96         | 3.12           |
| NewYork  | 40.460                    | -73.540                   | -75                | 2022 | 12 | 21 | 12 | 0  | 0  | 1.414                                | -23.436                    | 0.461                      | 26.08         | 1.96           |

注1：北緯は+、南緯は-。

注2：東経は+、西経は-。

注3：視赤緯、均時差は、世界時（UTC）ではなく、各地点の地方標準時（LMT）の値。

## 資料3 太陽位置の計算プログラム2

```

1  program sunpos5
2  ! *****
3  ! 太陽位置を5式によって計算し、比較するプログラム
4  ! 式1 : Yamasaki、式2 : Akasaka、式3 : Sencer、式4 : ISO、式5 : Matsuo et. al
5  ! 計算対象年 year1, 標準時の経度 lons, 地点名 10文字以内, 地点の緯度 lat, 経度 lon を指定する。
6  !
7  ! ----- 202306 AKASAKA Hiroshi -----
8  ! *****
9  implicit none
10 real lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec
11 real t(5), dl(5), et(5), degh(5), dega(5), p(3), rmse(4,5), mbe(4,5)
12 integer year1, month1, day1, hour1, tday, mond(12), k1, k2
13 real :: rad=3.141592/180.0
14 integer :: fo=10
15 character stn*10, fon*17
16 data mond/31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31/
17 data p/4.0, 100.0, 400.0/
18 !
19 ! 計算条件の設定
20 year1 = 2022.                ! 計算対象年
21 lons = 135.                  ! 地方標準時(JST)の経度
22 stn = 'Tokyo'               ! 計算対象地点名
23 lat = 35.69                 ! 計算対象地点の緯度
24 lon = 139.76                ! 計算対象地点の経度
25 min=0.
26 sec = 0.
27 year = real(year1)
28 !
29 ! 2月の月別日数 : 閏年なら29日
30 if(mod(year, p(1)).ne.0.0) then
31   mond(2) = 28
32   tday = 365
33 else if(mod(year, p(2)).eq.0.0.and.mod(year, p(3)).ne.0.0) then
34   mond(2) = 28
35   tday = 365
36 else
37   mond(2) = 29
38   tday = 366
39 end if
40 !
41 ! RMSE(Root Mean Square Error), MBE(Mean Bias Error)のクリア
42 do k1 = 1, 4
43   do k2 = 1, 5
44     rmse(k1, k2) = 0.0
45     mbe(k1, k2) = 0.0
46   end do
47 end do
48 !
49 ! 出力ファイル(csv)の定義
50 write(fon, '(a17)') '.¥sunpos5_out.csv'
51 open(fo, file=fon, status='replace')
52 !
53 ! 先頭行の出力
54 write(fo, 110)
55 !
56 ! 1年間の計算繰り返し
57 do month1= 1, 12
58   month = real(month1)
59   do day1 = 1, mond(month1)
60     day = real(day1)
61     do hour1 = 1, 24
62       hour = real(hour1)
63 ! 式1(Yamasaki)

```

```

64         call sunpos_y (lat, lon, lons, year1, month1, day1, hour, min, sec, t(1), dlt(1), et(1))
65         call horisys (lat, t(1), dlt(1), et(1), degh(1), dega(1))
66 ! 式2(Akasaka)
67         call sunpos_a (lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, t(2), dlt(2), et(2))
68         call horisys (lat, t(2), dlt(2), et(2), degh(2), dega(2))
69 ! 式3(Spencer)
70         call sunpos_s (lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, t(3), dlt(3), et(3))
71         call horisys (lat, t(3), dlt(3), et(3), degh(3), dega(3))
72 ! 式4(ISO 52010-1)
73         call sunpos_i (lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, t(4), dlt(4), et(4))
74         call horisys (lat, t(4), dlt(4), et(4), degh(4), dega(4))
75 ! 式5(Matso. et. al)
76         call sunpos_m (lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, t(5), dlt(5), et(5))
77         call horisys (lat, t(5), dlt(5), et(5), degh(5), dega(5))
78 !
79 ! RMSE の計算の準備
80         do k2 = 1, 5
81             rmse(1, k2) = rmse(1, k2) + (dlt(k2) - dlt(1))**2.0
82             rmse(2, k2) = rmse(2, k2) + (et(k2) - et(1))**2.0
83             rmse(3, k2) = rmse(3, k2) + (degh(k2) - degh(1))**2.0
84             rmse(4, k2) = rmse(4, k2) + (dega(k2) - dega(1))**2.0
85             mbe(1, k2) = mbe(1, k2) + (dlt(k2) - dlt(1))
86             mbe(2, k2) = mbe(2, k2) + (et(k2) - et(1))
87             mbe(3, k2) = mbe(3, k2) + (degh(k2) - degh(1))
88             mbe(4, k2) = mbe(4, k2) + (dega(k2) - dega(1))
89         end do
90 !
91 ! 式1~式5による計算結果(年間通日の12時)の出力
92         if(hour1.eq.12) then
93             write(fo, 120) stn, lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, &
94                 dlt(1), et(1), degh(1), dega(1), &
95                 dlt(2), et(2), degh(2), dega(2), &
96                 dlt(3), et(3), degh(3), dega(3), &
97                 dlt(4), et(4), degh(4), dega(4), &
98                 dlt(5), et(5), degh(5), dega(5)
99         end if
100     end do
101 end do
102 end do
103 !
104 ! 式1を基準とする式1~式5のRMSE, MBEの計算と出力。RMSE, MBEは夜間を含め全時刻で計算する。
105     write(fo, 130)
106     do k1 = 1, 4
107         do k2 = 1, 5
108             rmse(k1, k2) = (rmse(k1, k2) / real(24. * tday))**0.5
109             mbe(k1, k2) = mbe(k1, k2) / real(24. * tday)
110         end do
111     end do
112     write(fo, 132) ((rmse(k1, k2), k1=1, 4), k2=1, 5)
113     write(fo, 132) ((mbe(k1, k2), k1=1, 4), k2=1, 5)
114 !
115     110 format('地点, 緯度, 経度, 標準時経度, 年, 月, 日, 時, 分, 秒, , &
116             視赤緯 Y(°), 均時差 Y(°), 高度 Y(°), 方位角 Y(°) , , &
117             視赤緯 A(°), 均時差 A(°), 高度 A(°), 方位角 A(°) , , &
118             視赤緯 S(°), 均時差 S(°), 高度 S(°), 方位角 S(°) , , &
119             視赤緯 I(°), 均時差 I(°), 高度 I(°), 方位角 I(°) , , &
120             視赤緯 M(°), 均時差 M(°), 高度 M(°), 方位角 M(°) ')
121     120 format(a10, ', ', 3(f0.3, ', '), 6(f0.0, ', '), ', ', &
122             4(f0.3, ', '), ', ', 4(f0.3, ', '))
123     130 format('式1を基準値とする年間全時刻のRMSE_MBE')
124     132 format(' , , , , , , , , , &
125             4(f0.3, ', '), ', ', 4(f0.3, ', '))
126 close(fo)

```

```

127 end program sunpos5
128 !
129 !*****
130 subroutine horisys(lat, t, dlt, et, degh, dega)
131 ! 緯度 lat(°)、時角 t(°)、視赤緯 dlt(°)、均時差 et(°)を受け、
132 ! 太陽高度 degh(°)、太陽方位角 dega(°)を返すサブプログラム
133 implicit none
134 real lat, t, dlt, et, degh, dega, sinh, cosh, sina, cosa
135 real :: rad=3.141592/180.0
136 !
137 sinh = sin(rad*lat)*sin(rad*dlt) + cos(rad*lat)*cos(rad*dlt)*cos(rad*t)
138 cosh = sqrt(1.0-sinh**2.0)
139 sina = cos(rad*dlt)*sin(rad*t)/cosh
140 cosa = (sinh*sin(rad*lat)-sin(rad*dlt))/(cosh*cos(rad*lat))
141 !
142 degh = asin(sinh)/rad
143 if(sina.gt.0.0) then
144     dega = 90.0 - atan(cosa/sina)/rad
145 else if(sina.eq.0.0) then
146     dega = 0.0
147 else
148     dega = -90.0 - atan(cosa/sina)/rad
149 end if
150 end subroutine horisys
151 !
152 !*****
153 subroutine sunpos_y(lat, lon, lons, yy, mm, dd, tt, min, sec, t, delta, et)
154 implicit none
155 integer yy, mm, dd
156 real lat, lon, lons, tt, min, sec, t, delta, et
157 real yn, d, d2, d3
158 real t1, t2, delta0, e, e0, ep, am, dm, v, sd, ak, et1, et2
159 integer m(12), m1, i
160 character fon*13
161 real :: rad = 1.74533E-02
162 data m/31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31/
163 d =real(dd)
164 !
165 ! 基準年(1900年)からの経過年数の計算
166 yn = real(yy)-1900.
167 !
168 ! 閏年の2月の日数を29日とする計算
169 d2 = aint((yn-1.)/4.)
170 d3 = aint(yn/4.)
171 m(2) = 28 + int(d3-d2)
172 d = d + (yn-30.)*1.1574E-05
173 ! d = d + (tt-12.)/24. + min/(24.*60.) + sec/(24.*60.*60.)-lon/15./24.
174 ! 文献【7】の上式ではlon(対象地点の経度)であるが、本プログラムではlonをlons(標準時の経度)に変える。
175 d = d + (tt-12.)/24. + min/(24.*60.) + sec/(24.*60.*60.)-lons/15./24.
176 !
177 ! 通算計算対象時刻d(日)の計算
178 m1 = mm-1
179 if(m1.lt.1) then
180     go to 11
181 else
182     do i = 1, m1
183         d = d + real(m(i))
184     end do
185 end if
186 11 continue
187 !
188 ! 基準年月日から経過年数によるユリウス年の計算
189 t1 = (365.*yn + d2 + d)/36525.

```

```

190      t2 = t1**2.0
191      !
192      ! 黄道傾斜角の計算
193      delta0 = -(23.4522 + (9.44E-05 -1.30125E-02*t1 -1.64E-06*t2 +5.E-07*t1*t2))*rad
194      !
195      ! 離心率の計算
196      e = 0.01675 + (1.04E-06 -4.18E-05*t1 -1.26E-07*t2)
197      !
198      ! 近日点と冬至点の角 ε の計算
199      e0 = 11. + (0.220833 + t1 + (0.719175*t1 + 0.000453*t2))
200      ep = e0*rad
201      !
202      ! 平均近点角 m の計算
203      am = 0.985*d + (-1.524 -0.255*yn +0.985*d2 &
204          + (6.00267E-04*(d2+d) -9.02579E-04*yn -0.00015*t2 -1.667E-04))
205      am = am*rad
206      dm = 9.93502E-05 *(1. -e*(cos(am) -2.*e*sin(am)**2.))
207      am = am-dm
208      !
209      ! 真近点角の計算
210      v = (2. -0.25*e**2.)*e*sin(am) + 1.25*e**2.*sin(2.*am) + 13./12.*e**3.*sin(3.*am) + am
211      !
212      ! 太陽視赤緯 delta(°) の計算
213      sd = cos(v+ep) * sin(delta0)
214      delta = atan(sd/sqrt(1.-sd**2.))/rad
215      !
216      ! 均時差 et(°) の計算
217      ak = (1.-cos(delta0))/(1.+cos(delta0))
218      et1 = (am-v)/rad
219      et2 = -atan(ak*sin(2.*(v+ep))/(1.-ak*cos(2.*(v+ep))))/rad
220      et = et1 + et2
221      !
222      ! 時角 t(°) の計算
223      t = 15.0*(tt + min/60.0 + sec/3600.0 - 12.0) + (lon-lons) + et
224      end subroutine sunpos_y
225      !
226      !*****
227      subroutine sunpos_a(lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, t, dlt, et)
228          implicit none
229          real lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, t, dlt, et
230          real nday, mond(12), p(3), m, n, sindlt, eps, v, dlt0, veps, INO
231          real :: J0=1.37, rad=3.141592/180.0
232          integer month1, k1
233          data p/4.0, 100.0, 400.0/
234          data mond/31., 28., 31., 30., 31., 30., 31., 31., 30., 31., 30., 31./
235          !
236          ! 2月の月別日数一閏年の判定
237          if(mod(year, p(1)).ne.0.0) then
238              mond(2)=28.0
239          else if(mod(year, p(2)).eq.0.0.and.mod(year, p(3)).ne.0.0) then
240              mond(2)=28.0
241          else
242              mond(2)=29.0
243          end if
244          !
245          ! 黄道傾斜角の計算
246          dlt0 = -23.4393 + 0.013*(year-2000.)/100.
247          !
248          ! 地方標準時 (日本なら JST) 1月1日基準の通算計算対象時刻 nday(日) の計算
249          nday=day
250          month1=int(month)-1
251          if(month1.ne.0) then
252              do k1=1, month1

```

```

253         nday=nday+mond(k1)
254     end do
255 end if
256 nday = nday + hour/24. + min/(24.*60.) + sec/(24.*60.*60.)-lons/(24.*15.)
257 !
258 ! 平均近点角 m の計算
259     n = year-1968.0
260     m = 0.9856*(nday-(3.71+0.2596*n-aint((n+3.0)/4.0)))
261 !
262 ! 冬至点と近日点がなす角度 eps、真近点角 v の計算
263     eps = 12.3901 + 0.0172*(n+m/360.0)
264     v = m + 1.918*sin(m*rad) + 0.02*sin(2.0*m*rad)
265 !
266 ! 均時差 et(°)の計算
267     veps=(v+eps)*rad
268     et = (m-v) - atan(0.043*sin(2.0*veps)/(1.0-0.043*cos(2.0*veps)))/rad
269 !
270 ! 大気外法線面日射量 INO の計算
271     INO = J0*(1.0+0.033*cos(rad*v))
272 !
273 ! 視赤緯 dlt(°)の計算
274     sindlt = cos(veps)*sin(rad*dlt0)
275     dlt = asin(sindlt)/rad
276 !
277 ! 時角 t(°)の計算
278     t = 15.0*(hour+min/60.0+sec/3600.0-12.0) + (lon-lons) + et
279 end subroutine sunpos_a
280 !
281 !*****
282 subroutine sunpos_s(lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, t, dlt, et)
283     implicit none
284     real lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, dlt, et, t
285     real dltr, etr
286     real tday, nday, mond(12), p(3)
287     real rad, deg, omg
288     real::pai=3.141592
289     integer month1, k1
290     data p/4.0, 100.0, 400.0/
291     data mond/31., 28., 31., 30., 31., 30., 31., 31., 30., 31., 30., 31./
292 !
293 ! 2月の月別日数一閏年の判定
294     if(mod(year, p(1)).ne.0.0) then
295         mond(2)=28.0
296         tday = 365.
297     else if(mod(year, p(2)).eq.0.0.and.mod(year, p(3)).ne.0.0) then
298         mond(2)=28.0
299         tday = 365.
300     else
301         mond(2)=29.0
302         tday = 366.
303     end if
304 !
305 ! 1月1日を初日(0日)とする計算対象日の年間通算日数 nday の計算
306     nday=day
307     month1=int(month)-1
308     if(month1.ne.0) then
309         do k1=1, month1
310             nday=nday+mond(k1)
311         end do
312     end if
313     nday = nday - 1
314 !
315     rad = pai/180.0

```

```

316     deg = 180.0/pai
317     omg = 2.0*pai*real(nday)/tday
318     !
319     ! 日赤緯 dlt(°) の計算
320     dltr = 0.006918 - 0.399912*cos(omg) + 0.070257*sin(omg) &
321             - 0.006758*cos(2.0*omg) + 0.000907*sin(2.0*omg) &
322             - 0.002967*cos(3.0*omg) + 0.001480*sin(3.0*omg)
323     dlt = dltr*deg ! rad -> deg
324     !
325     ! 均時差 et(°) の計算
326     etr = 0.0000075 + 0.001868*cos(omg) - 0.032077*sin(omg) &
327             - 0.014615*cos(2.0*omg) - 0.040849*sin(2.0*omg)
328     et = etr*deg ! rad -> deg
329     !
330     ! 時角 t(°) の計算
331     t=15.0*(hour+min/60.0+sec/3600.0-12.0)+(lon-lons)+et
332 end subroutine sunpos_s
333 !
334 !*****
335 subroutine sunpos_i(lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, t, dlt, et)
336     implicit none
337     real lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, t, dlt, et
338     real dltr, etm
339     real nday, rdc, mond(12), p(3)
340     real rad
341     real::pai=3.141592
342     integer month1, k1
343     data p/4.0, 100.0, 400.0/
344     data mond/31., 28., 31., 30., 31., 30., 31., 31., 30., 31., 30., 31./
345     !
346     ! 2月の月別日数一閏年の判定
347     if(mod(year, p(1)).ne.0.0) then
348         mond(2)=28.0
349     else if(mod(year, p(2)).eq.0.0.and.mod(year, p(3)).ne.0.0) then
350         mond(2)=28.0
351     else
352         mond(2)=29.0
353     end if
354     !
355     ! 1月1日を初日とする計算対象日の年間通算日数 nday の計算
356     nday=day
357     month1=int(month)-1
358     if(month1.ne.0) then
359         do k1=1, month1
360             nday=nday+mond(k1)
361         end do
362     end if
363     !
364     rad = pai/180.0
365     rdc = rad*real(nday)*360./365.0
366     !
367     ! 日赤緯 dltr(deg) の計算
368     dlt = 0.33281 - 22.984*cos(rdc) - 0.34990*cos(2.0*rdc) - 0.1398*cos(3.0*rdc) &
369             + 3.7872*sin(rdc) + 0.03205*sin(2.0*rdc) + 0.07187*sin(3.0*rdc)
370     dltr = dlt*rad
371     !
372     ! 均時差 etm(分) の計算
373     if(nday.lt.21) then
374         etm = 2.6 + 0.44*real(nday)
375     else if(nday.ge.21.and.nday.lt.136) then
376         etm = 5.2 + 9.0*cos(0.0357*(real(nday)-43.))
377     else if(nday.ge.136.and.nday.lt.241) then
378         etm = 1.4 - 5.0*cos(0.0449*(real(nday)-135.))

```

```

379     else if (nday.ge.241.and.nday.lt.336) then
380         etm = -6.3 - 10.0*cos(0.0360*(real(nday)-306.))
381     else if (nday.ge.336) then
382         etm = 0.45*(nday-359.0)
383     end if
384 !
385     et = -etm/4.0                                ! 分 -> deg
386 !
387 ! 時角 t(°) の計算
388     t = 15.0*(hour+min/60.0+sec/3600.0-12.0)+(lon-lons)+et
389 end subroutine sunpos_i
390 !
391 !*****
392 subroutine sunpos_m(lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, t, dlt, et)
393     implicit none
394     real lat, lon, lons, year, month, day, hour, min, sec, dlt, et, t
395     real dltr, etr
396     real tday, nday, mond(12), p(3)
397     real rad, omg
398     real::pai=3.141592
399     integer month1, k1
400     data p/4.0, 100.0, 400.0/
401     data mond/31., 28., 31., 30., 31., 30., 31., 30., 31., 30., 31./
402 !
403 ! 2月の月別日数—閏年の判定
404     if(mod(year, p(1)).ne.0.0) then
405         mond(2)=28.0
406         tday = 365.
407     else if(mod(year, p(2)).eq.0.0.and.mod(year, p(3)).ne.0.0) then
408         mond(2)=28.0
409         tday = 365.
410     else
411         mond(2)=29.0
412         tday = 366.
413     end if
414 !
415 ! 1月1日を初日とする計算対象日の年間通算日数 nday の計算
416     nday=day
417     month1=int(month)-1
418     if(month1.ne.0) then
419         do k1=1, month1
420             nday=nday+mond(k1)
421         end do
422     end if
423 !
424     rad = pai/180.0
425     omg = 2.0*pai*real(nday)/(tday+1.0)
426 !
427 ! 日赤緯 dltr(rad) の計算
428     dltr = 0.006322 - 0.405748*cos(omg+0.153231) &
429             - 0.005880*cos(2.0*omg+0.207099) &
430             - 0.003233*cos(3.0*omg+0.620129)
431     dlt = dltr/rad                                ! rad -> deg
432 !
433 ! 均時差 etr(h) の計算
434     etr = -0.000279 + 0.122772*cos(omg+1.498311) &
435             - 0.165458*cos(2.0*omg-1.261546) &
436             - 0.005354*cos(3.0*omg-1.1571)
437     et = 15.*etr                                  ! h -> deg
438 !
439 ! 時角 t(°) の計算
440     t = 15.0*(hour+min/60.0+sec/3600.0-12.0)+(lon-lons)+et
441 end subroutine sunpos_m

```

資料4-1 プログラム2の計算例(その1)

| 年    | 月 | 日  | 時  | 視赤緯Y(°) | 均時差Y(°) | 高度Y(°) | 方位角Y(°) | 視赤緯A(°) | 均時差A(°) | 高度A(°) | 方位角A(°) | 視赤緯S(°) | 均時差S(°) | 高度S(°) | 方位角S(°) | 視赤緯I(°) | 均時差I(°) | 高度I(°) | 方位角I(°) | 視赤緯M(°) | 均時差M(°) | 高度M(°) | 方位角M(°) |
|------|---|----|----|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| 2020 | 1 | 1  | 12 | -23.049 | -0.787  | 31.141 | 4.272   | -23.049 | -0.786  | 31.14  | 4.273   | -23.074 | -0.73   | 31.112 | 4.331   | -23.067 | -0.76   | 31.121 | 4.299   | -23.021 | -0.774  | 31.168 | 4.288   |
| 2020 | 1 | 2  | 12 | -22.968 | -0.905  | 31.229 | 4.151   | -22.968 | -0.904  | 31.229 | 4.152   | -22.995 | -0.841  | 31.198 | 4.218   | -22.986 | -0.87   | 31.209 | 4.188   | -22.941 | -0.889  | 31.254 | 4.171   |
| 2020 | 1 | 3  | 12 | -22.879 | -1.022  | 31.324 | 4.032   | -22.879 | -1.021  | 31.324 | 4.033   | -22.908 | -0.952  | 31.291 | 4.106   | -22.897 | -0.98   | 31.304 | 4.076   | -22.854 | -1.002  | 31.348 | 4.055   |
| 2020 | 1 | 4  | 12 | -22.782 | -1.137  | 31.427 | 3.915   | -22.782 | -1.136  | 31.427 | 3.916   | -22.814 | -1.061  | 31.391 | 3.995   | -22.8   | -1.09   | 31.406 | 3.964   | -22.759 | -1.114  | 31.449 | 3.941   |
| 2020 | 1 | 5  | 12 | -22.678 | -1.251  | 31.538 | 3.799   | -22.678 | -1.25   | 31.537 | 3.8     | -22.712 | -1.169  | 31.499 | 3.886   | -22.697 | -1.2    | 31.516 | 3.853   | -22.657 | -1.225  | 31.557 | 3.828   |
| 2020 | 1 | 6  | 12 | -22.566 | -1.363  | 31.655 | 3.686   | -22.566 | -1.362  | 31.655 | 3.687   | -22.603 | -1.275  | 31.614 | 3.778   | -22.585 | -1.31   | 31.633 | 3.742   | -22.548 | -1.335  | 31.672 | 3.717   |
| 2020 | 1 | 7  | 12 | -22.447 | -1.473  | 31.78  | 3.574   | -22.447 | -1.472  | 31.779 | 3.575   | -22.486 | -1.381  | 31.736 | 3.672   | -22.467 | -1.42   | 31.757 | 3.63    | -22.431 | -1.442  | 31.794 | 3.608   |
| 2020 | 1 | 8  | 12 | -22.321 | -1.581  | 31.911 | 3.465   | -22.321 | -1.58   | 31.911 | 3.466   | -22.362 | -1.484  | 31.865 | 3.568   | -22.341 | -1.53   | 31.889 | 3.519   | -22.307 | -1.549  | 31.923 | 3.501   |
| 2020 | 1 | 9  | 12 | -22.187 | -1.687  | 32.05  | 3.358   | -22.187 | -1.686  | 32.05  | 3.358   | -22.23  | -1.586  | 32.002 | 3.465   | -22.208 | -1.64   | 32.027 | 3.407   | -22.176 | -1.653  | 32.059 | 3.395   |
| 2020 | 1 | 10 | 12 | -22.046 | -1.791  | 32.196 | 3.253   | -22.046 | -1.79   | 32.196 | 3.253   | -22.092 | -1.686  | 32.145 | 3.364   | -22.067 | -1.75   | 32.172 | 3.296   | -22.038 | -1.755  | 32.202 | 3.292   |
| 2020 | 1 | 11 | 12 | -21.898 | -1.892  | 32.348 | 3.15    | -21.898 | -1.892  | 32.348 | 3.151   | -21.946 | -1.784  | 32.295 | 3.265   | -21.92  | -1.86   | 32.325 | 3.184   | -21.893 | -1.856  | 32.351 | 3.19    |
| 2020 | 1 | 12 | 12 | -21.742 | -1.991  | 32.508 | 3.05    | -21.742 | -1.991  | 32.508 | 3.05    | -21.793 | -1.881  | 32.453 | 3.168   | -21.765 | -1.97   | 32.484 | 3.072   | -21.741 | -1.954  | 32.507 | 3.091   |
| 2020 | 1 | 13 | 12 | -21.58  | -2.088  | 32.674 | 2.952   | -21.58  | -2.087  | 32.674 | 2.953   | -21.632 | -1.975  | 32.617 | 3.073   | -21.604 | -2.08   | 32.65  | 2.96    | -21.583 | -2.05   | 32.67  | 2.994   |
| 2020 | 1 | 14 | 12 | -21.411 | -2.182  | 32.847 | 2.857   | -21.411 | -2.181  | 32.847 | 2.858   | -21.465 | -2.068  | 32.788 | 2.981   | -21.436 | -2.19   | 32.823 | 2.847   | -21.417 | -2.144  | 32.839 | 2.899   |
| 2020 | 1 | 15 | 12 | -21.234 | -2.273  | 33.027 | 2.765   | -21.234 | -2.273  | 33.027 | 2.765   | -21.291 | -2.158  | 32.966 | 2.89    | -21.26  | -2.3    | 33.002 | 2.734   | -21.245 | -2.236  | 33.015 | 2.806   |
| 2020 | 1 | 16 | 12 | -21.051 | -2.362  | 33.213 | 2.675   | -21.051 | -2.362  | 33.213 | 2.675   | -21.11  | -2.246  | 33.15  | 2.802   | -21.078 | -2.41   | 33.188 | 2.62    | -21.066 | -2.325  | 33.197 | 2.716   |
| 2020 | 1 | 17 | 12 | -20.862 | -2.448  | 33.406 | 2.588   | -20.862 | -2.448  | 33.406 | 2.589   | -20.922 | -2.331  | 33.341 | 2.716   | -20.889 | -2.52   | 33.381 | 2.506   | -20.88  | -2.411  | 33.386 | 2.628   |
| 2020 | 1 | 18 | 12 | -20.665 | -2.531  | 33.605 | 2.504   | -20.665 | -2.531  | 33.605 | 2.505   | -20.728 | -2.414  | 33.538 | 2.632   | -20.694 | -2.63   | 33.58  | 2.392   | -20.688 | -2.495  | 33.581 | 2.543   |
| 2020 | 1 | 19 | 12 | -20.462 | -2.611  | 33.811 | 2.423   | -20.462 | -2.611  | 33.811 | 2.424   | -20.527 | -2.495  | 33.742 | 2.551   | -20.492 | -2.74   | 33.785 | 2.277   | -20.49  | -2.577  | 33.782 | 2.461   |
| 2020 | 1 | 20 | 12 | -20.253 | -2.688  | 34.022 | 2.346   | -20.253 | -2.688  | 34.022 | 2.346   | -20.32  | -2.573  | 33.952 | 2.472   | -20.284 | -2.85   | 33.997 | 2.161   | -20.285 | -2.655  | 33.989 | 2.381   |
| 2020 | 1 | 21 | 12 | -20.037 | -2.762  | 34.24  | 2.271   | -20.037 | -2.762  | 34.24  | 2.271   | -20.106 | -2.649  | 34.168 | 2.396   | -20.069 | -2.891  | 34.213 | 2.123   | -20.074 | -2.731  | 34.202 | 2.304   |
| 2020 | 1 | 22 | 12 | -19.816 | -2.833  | 34.464 | 2.199   | -19.816 | -2.832  | 34.464 | 2.2     | -19.886 | -2.722  | 34.391 | 2.323   | -19.848 | -2.947  | 34.435 | 2.068   | -19.858 | -2.804  | 34.422 | 2.23    |
| 2020 | 1 | 23 | 12 | -19.587 | -2.9    | 34.694 | 2.131   | -19.587 | -2.9    | 34.694 | 2.131   | -19.659 | -2.792  | 34.619 | 2.252   | -19.621 | -3      | 34.664 | 2.015   | -19.635 | -2.874  | 34.647 | 2.159   |
| 2020 | 1 | 24 | 12 | -19.353 | -2.965  | 34.93  | 2.066   | -19.353 | -2.965  | 34.93  | 2.066   | -19.427 | -2.859  | 34.854 | 2.184   | -19.388 | -3.052  | 34.898 | 1.965   | -19.406 | -2.941  | 34.877 | 2.091   |
| 2020 | 1 | 25 | 12 | -19.113 | -3.026  | 35.172 | 2.005   | -19.113 | -3.026  | 35.172 | 2.005   | -19.188 | -2.924  | 35.094 | 2.119   | -19.149 | -3.101  | 35.139 | 1.916   | -19.171 | -3.005  | 35.114 | 2.026   |
| 2020 | 1 | 26 | 12 | -18.867 | -3.084  | 35.42  | 1.947   | -18.867 | -3.084  | 35.42  | 1.947   | -18.944 | -2.986  | 35.341 | 2.057   | -18.904 | -3.148  | 35.385 | 1.87    | -18.93  | -3.066  | 35.356 | 1.964   |
| 2020 | 1 | 27 | 12 | -18.616 | -3.138  | 35.673 | 1.892   | -18.616 | -3.138  | 35.673 | 1.892   | -18.693 | -3.044  | 35.592 | 1.999   | -18.653 | -3.193  | 35.637 | 1.827   | -18.684 | -3.124  | 35.604 | 1.906   |
| 2020 | 1 | 28 | 12 | -18.358 | -3.189  | 35.931 | 1.841   | -18.358 | -3.189  | 35.931 | 1.841   | -18.437 | -3.1    | 35.85  | 1.943   | -18.396 | -3.235  | 35.894 | 1.786   | -18.433 | -3.179  | 35.856 | 1.851   |
| 2020 | 1 | 29 | 12 | -18.096 | -3.237  | 36.195 | 1.794   | -18.095 | -3.237  | 36.195 | 1.794   | -18.176 | -3.153  | 36.113 | 1.89    | -18.134 | -3.275  | 36.157 | 1.748   | -18.176 | -3.231  | 36.115 | 1.799   |
| 2020 | 1 | 30 | 12 | -17.827 | -3.282  | 36.464 | 1.75    | -17.827 | -3.282  | 36.465 | 1.75    | -17.909 | -3.203  | 36.381 | 1.841   | -17.867 | -3.312  | 36.426 | 1.713   | -17.913 | -3.279  | 36.378 | 1.75    |
| 2020 | 1 | 31 | 12 | -17.554 | -3.323  | 36.739 | 1.71    | -17.554 | -3.323  | 36.739 | 1.71    | -17.636 | -3.249  | 36.654 | 1.795   | -17.594 | -3.347  | 36.699 | 1.68    | -17.646 | -3.324  | 36.647 | 1.706   |
| 2020 | 2 | 1  | 12 | -17.275 | -3.36   | 37.018 | 1.674   | -17.275 | -3.36   | 37.019 | 1.674   | -17.359 | -3.293  | 36.933 | 1.752   | -17.316 | -3.379  | 36.978 | 1.651   | -17.373 | -3.366  | 36.92  | 1.664   |
| 2020 | 2 | 2  | 12 | -16.991 | -3.394  | 37.303 | 1.642   | -16.991 | -3.395  | 37.303 | 1.641   | -17.076 | -3.333  | 37.217 | 1.713   | -17.032 | -3.408  | 37.262 | 1.624   | -17.096 | -3.404  | 37.199 | 1.627   |
| 2020 | 2 | 3  | 12 | -16.702 | -3.425  | 37.592 | 1.613   | -16.702 | -3.426  | 37.593 | 1.613   | -16.788 | -3.37   | 37.505 | 1.677   | -16.744 | -3.435  | 37.551 | 1.601   | -16.813 | -3.439  | 37.482 | 1.593   |
| 2020 | 2 | 4  | 12 | -16.409 | -3.453  | 37.887 | 1.589   | -16.408 | -3.453  | 37.887 | 1.588   | -16.495 | -3.404  | 37.799 | 1.645   | -16.451 | -3.459  | 37.845 | 1.58    | -16.526 | -3.471  | 37.77  | 1.563   |
| 2020 | 2 | 5  | 12 | -16.11  | -3.477  | 38.186 | 1.569   | -16.11  | -3.477  | 38.186 | 1.568   | -16.198 | -3.435  | 38.097 | 1.617   | -16.152 | -3.48   | 38.143 | 1.563   | -16.234 | -3.5    | 38.063 | 1.537   |
| 2020 | 2 | 6  | 12 | -15.807 | -3.497  | 38.489 | 1.552   | -15.807 | -3.498  | 38.489 | 1.551   | -15.895 | -3.463  | 38.4   | 1.592   | -15.85  | -3.499  | 38.446 | 1.549   | -15.937 | -3.525  | 38.36  | 1.515   |
| 2020 | 2 | 7  | 12 | -15.5   | -3.515  | 38.797 | 1.54    | -15.499 | -3.515  | 38.797 | 1.539   | -15.589 | -3.487  | 38.707 | 1.571   | -15.542 | -3.514  | 38.754 | 1.539   | -15.636 | -3.547  | 38.661 | 1.496   |
| 2020 | 2 | 8  | 12 | -15.188 | -3.529  | 39.109 | 1.532   | -15.187 | -3.529  | 39.109 | 1.531   | -15.277 | -3.509  | 39.019 | 1.554   | -15.23  | -3.527  | 39.066 | 1.532   | -15.331 | -3.565  | 38.967 | 1.482   |
| 2020 | 2 | 9  | 12 | -14.871 | -3.539  | 39.425 | 1.527   | -14.871 | -3.54   | 39.426 | 1.526   | -14.962 | -3.526  | 39.335 | 1.541   | -14.914 | -3.537  | 39.383 | 1.529   | -15.021 | -3.58   | 39.277 | 1.472   |
| 2020 | 2 | 10 | 12 | -14.551 | -3.547  | 39.746 | 1.527   | -14.551 | -3.548  | 39.746 | 1.526   | -14.642 | -3.541  | 39.655 | 1.532   | -14.594 | -3.544  | 39.703 | 1.529   | -14.707 | -3.592  | 39.59  | 1.466   |

資料4-2 プログラム2の計算例 (その2)

| 年    | 月 | 日  | 時  | 視赤緯Y(°) | 均時差Y(°) | 高度Y(°) | 方位角Y(°) | 視赤緯A(°) | 均時差A(°) | 高度A(°) | 方位角A(°) | 視赤緯S(°) | 均時差S(°) | 高度S(°) | 方位角S(°) | 視赤緯I(°) | 均時差I(°) | 高度I(°) | 方位角I(°) | 視赤緯M(°) | 均時差M(°) | 高度M(°) | 方位角M(°) |
|------|---|----|----|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| 2022 | 1 | 1  | 12 | -23.008 | -0.847  | 31.185 | 4.211   | -23.008 | -0.846  | 31.185 | 4.212   | -23.074 | -0.73   | 31.112 | 4.331   | -23.067 | -0.76   | 31.121 | 4.299   | -23.021 | -0.774  | 31.168 | 4.287   |
| 2022 | 1 | 2  | 12 | -22.923 | -0.964  | 31.277 | 4.091   | -22.923 | -0.963  | 31.277 | 4.092   | -22.995 | -0.842  | 31.198 | 4.217   | -22.986 | -0.87   | 31.209 | 4.188   | -22.941 | -0.889  | 31.255 | 4.17    |
| 2022 | 1 | 3  | 12 | -22.83  | -1.08   | 31.377 | 3.973   | -22.83  | -1.079  | 31.377 | 3.974   | -22.908 | -0.952  | 31.291 | 4.105   | -22.897 | -0.98   | 31.304 | 4.076   | -22.853 | -1.003  | 31.349 | 4.054   |
| 2022 | 1 | 4  | 12 | -22.729 | -1.195  | 31.483 | 3.857   | -22.729 | -1.194  | 31.483 | 3.857   | -22.813 | -1.062  | 31.392 | 3.994   | -22.8   | -1.09   | 31.406 | 3.964   | -22.758 | -1.116  | 31.45  | 3.94    |
| 2022 | 1 | 5  | 12 | -22.621 | -1.307  | 31.597 | 3.742   | -22.621 | -1.307  | 31.597 | 3.743   | -22.711 | -1.17   | 31.5   | 3.884   | -22.697 | -1.2    | 31.516 | 3.853   | -22.656 | -1.227  | 31.559 | 3.827   |
| 2022 | 1 | 6  | 12 | -22.506 | -1.418  | 31.718 | 3.63    | -22.506 | -1.418  | 31.718 | 3.63    | -22.601 | -1.277  | 31.615 | 3.776   | -22.585 | -1.31   | 31.633 | 3.742   | -22.546 | -1.336  | 31.674 | 3.716   |
| 2022 | 1 | 7  | 12 | -22.383 | -1.527  | 31.847 | 3.519   | -22.383 | -1.527  | 31.846 | 3.52    | -22.484 | -1.382  | 31.738 | 3.67    | -22.467 | -1.42   | 31.757 | 3.63    | -22.429 | -1.444  | 31.796 | 3.606   |
| 2022 | 1 | 8  | 12 | -22.253 | -1.634  | 31.982 | 3.411   | -22.253 | -1.634  | 31.982 | 3.411   | -22.359 | -1.486  | 31.868 | 3.566   | -22.341 | -1.53   | 31.889 | 3.519   | -22.304 | -1.551  | 31.926 | 3.499   |
| 2022 | 1 | 9  | 12 | -22.115 | -1.739  | 32.124 | 3.305   | -22.115 | -1.739  | 32.124 | 3.305   | -22.227 | -1.588  | 32.005 | 3.463   | -22.208 | -1.64   | 32.027 | 3.407   | -22.173 | -1.655  | 32.062 | 3.393   |
| 2022 | 1 | 10 | 12 | -21.97  | -1.842  | 32.274 | 3.201   | -21.97  | -1.841  | 32.273 | 3.201   | -22.088 | -1.689  | 32.149 | 3.362   | -22.067 | -1.75   | 32.172 | 3.296   | -22.034 | -1.758  | 32.206 | 3.289   |
| 2022 | 1 | 11 | 12 | -21.818 | -1.942  | 32.43  | 3.099   | -21.818 | -1.942  | 32.43  | 3.1     | -21.942 | -1.787  | 32.3   | 3.263   | -21.92  | -1.86   | 32.325 | 3.184   | -21.889 | -1.859  | 32.356 | 3.187   |
| 2022 | 1 | 12 | 12 | -21.659 | -2.04   | 32.593 | 3       | -21.66  | -2.04   | 32.593 | 3.001   | -21.788 | -1.884  | 32.458 | 3.165   | -21.765 | -1.97   | 32.484 | 3.072   | -21.736 | -1.957  | 32.512 | 3.088   |
| 2022 | 1 | 13 | 12 | -21.493 | -2.136  | 32.763 | 2.904   | -21.494 | -2.135  | 32.762 | 2.905   | -21.627 | -1.978  | 32.622 | 3.07    | -21.604 | -2.08   | 32.65  | 2.96    | -21.577 | -2.053  | 32.676 | 2.99    |
| 2022 | 1 | 14 | 12 | -21.321 | -2.228  | 32.939 | 2.81    | -21.321 | -2.228  | 32.939 | 2.811   | -21.459 | -2.071  | 32.794 | 2.977   | -21.436 | -2.19   | 32.823 | 2.847   | -21.411 | -2.148  | 32.846 | 2.895   |
| 2022 | 1 | 15 | 12 | -21.141 | -2.318  | 33.122 | 2.719   | -21.141 | -2.318  | 33.122 | 2.72    | -21.284 | -2.161  | 32.973 | 2.887   | -21.26  | -2.3    | 33.002 | 2.734   | -21.237 | -2.239  | 33.022 | 2.802   |
| 2022 | 1 | 16 | 12 | -20.954 | -2.406  | 33.312 | 2.631   | -20.954 | -2.405  | 33.312 | 2.632   | -21.103 | -2.249  | 32.915 | 2.798   | -21.078 | -2.41   | 33.188 | 2.62    | -21.058 | -2.328  | 33.206 | 2.712   |
| 2022 | 1 | 17 | 12 | -20.761 | -2.49   | 33.508 | 2.546   | -20.761 | -2.49   | 33.508 | 2.546   | -20.914 | -2.335  | 33.349 | 2.712   | -20.889 | -2.52   | 33.381 | 2.506   | -20.871 | -2.415  | 33.395 | 2.624   |
| 2022 | 1 | 18 | 12 | -20.562 | -2.571  | 33.71  | 2.464   | -20.562 | -2.571  | 33.71  | 2.464   | -20.719 | -2.418  | 33.548 | 2.628   | -20.694 | -2.63   | 33.58  | 2.392   | -20.679 | -2.499  | 33.591 | 2.539   |
| 2022 | 1 | 19 | 12 | -20.355 | -2.65   | 33.919 | 2.384   | -20.355 | -2.65   | 33.919 | 2.385   | -20.517 | -2.499  | 33.752 | 2.547   | -20.492 | -2.74   | 33.785 | 2.277   | -20.479 | -2.581  | 33.793 | 2.457   |
| 2022 | 1 | 20 | 12 | -20.143 | -2.725  | 34.134 | 2.308   | -20.143 | -2.725  | 34.134 | 2.308   | -20.309 | -2.577  | 33.963 | 2.468   | -20.284 | -2.85   | 33.997 | 2.161   | -20.274 | -2.66   | 34.001 | 2.377   |
| 2022 | 1 | 21 | 12 | -19.924 | -2.798  | 34.355 | 2.235   | -19.924 | -2.797  | 34.355 | 2.235   | -20.094 | -2.653  | 34.18  | 2.392   | -20.069 | -2.891  | 34.213 | 2.123   | -20.062 | -2.735  | 34.215 | 2.3     |
| 2022 | 1 | 22 | 12 | -19.699 | -2.867  | 34.582 | 2.165   | -19.699 | -2.867  | 34.582 | 2.165   | -19.873 | -2.726  | 34.404 | 2.319   | -19.848 | -2.947  | 34.435 | 2.068   | -19.844 | -2.808  | 34.435 | 2.226   |
| 2022 | 1 | 23 | 12 | -19.468 | -2.933  | 34.815 | 2.099   | -19.467 | -2.933  | 34.815 | 2.099   | -19.645 | -2.796  | 34.633 | 2.248   | -19.621 | -3      | 34.664 | 2.015   | -19.62  | -2.879  | 34.661 | 2.155   |
| 2022 | 1 | 24 | 12 | -19.23  | -2.995  | 35.054 | 2.035   | -19.23  | -2.995  | 35.054 | 2.035   | -19.412 | -2.864  | 34.869 | 2.18    | -19.388 | -3.052  | 34.898 | 1.965   | -19.39  | -2.946  | 34.893 | 2.087   |
| 2022 | 1 | 25 | 12 | -18.987 | -3.055  | 35.299 | 1.976   | -18.987 | -3.055  | 35.299 | 1.976   | -19.172 | -2.928  | 35.11  | 2.115   | -19.149 | -3.101  | 35.139 | 1.916   | -19.155 | -3.01   | 35.13  | 2.022   |
| 2022 | 1 | 26 | 12 | -18.738 | -3.111  | 35.549 | 1.919   | -18.738 | -3.111  | 35.549 | 1.919   | -18.927 | -2.99   | 35.358 | 2.053   | -18.904 | -3.148  | 35.385 | 1.87    | -18.913 | -3.071  | 35.373 | 1.96    |
| 2022 | 1 | 27 | 12 | -18.484 | -3.164  | 35.805 | 1.867   | -18.484 | -3.164  | 35.805 | 1.867   | -18.675 | -3.048  | 35.611 | 1.994   | -18.653 | -3.193  | 35.637 | 1.827   | -18.666 | -3.129  | 35.622 | 1.902   |
| 2022 | 1 | 28 | 12 | -18.224 | -3.213  | 36.067 | 1.818   | -18.223 | -3.213  | 36.067 | 1.817   | -18.418 | -3.104  | 35.869 | 1.939   | -18.396 | -3.235  | 35.894 | 1.786   | -18.413 | -3.183  | 35.876 | 1.846   |
| 2022 | 1 | 29 | 12 | -17.958 | -3.259  | 36.333 | 1.772   | -17.958 | -3.26   | 36.333 | 1.772   | -18.156 | -3.157  | 36.133 | 1.886   | -18.134 | -3.275  | 36.157 | 1.748   | -18.155 | -3.235  | 36.135 | 1.795   |
| 2022 | 1 | 30 | 12 | -17.687 | -3.302  | 36.605 | 1.73    | -17.687 | -3.302  | 36.605 | 1.73    | -17.887 | -3.206  | 36.402 | 1.837   | -17.867 | -3.312  | 36.426 | 1.713   | -17.892 | -3.283  | 36.4   | 1.747   |
| 2022 | 1 | 31 | 12 | -17.411 | -3.341  | 36.882 | 1.693   | -17.411 | -3.342  | 36.882 | 1.692   | -17.614 | -3.253  | 36.677 | 1.791   | -17.594 | -3.347  | 36.699 | 1.68    | -17.623 | -3.328  | 36.67  | 1.702   |
| 2022 | 2 | 1  | 12 | -17.129 | -3.377  | 37.164 | 1.658   | -17.129 | -3.378  | 37.165 | 1.658   | -17.335 | -3.296  | 36.957 | 1.749   | -17.316 | -3.379  | 36.978 | 1.651   | -17.349 | -3.369  | 36.945 | 1.661   |
| 2022 | 2 | 2  | 12 | -16.843 | -3.41   | 37.452 | 1.628   | -16.843 | -3.41   | 37.452 | 1.628   | -17.051 | -3.337  | 37.242 | 1.709   | -17.032 | -3.408  | 37.262 | 1.624   | -17.07  | -3.408  | 37.224 | 1.624   |
| 2022 | 2 | 3  | 12 | -16.552 | -3.439  | 37.743 | 1.602   | -16.551 | -3.439  | 37.744 | 1.601   | -16.762 | -3.374  | 37.532 | 1.674   | -16.744 | -3.435  | 37.551 | 1.601   | -16.787 | -3.443  | 37.509 | 1.59    |
| 2022 | 2 | 4  | 12 | -16.255 | -3.464  | 38.04  | 1.579   | -16.255 | -3.465  | 38.04  | 1.579   | -16.468 | -3.407  | 37.827 | 1.642   | -16.451 | -3.459  | 37.845 | 1.58    | -16.498 | -3.474  | 37.798 | 1.56    |
| 2022 | 2 | 5  | 12 | -15.955 | -3.487  | 38.341 | 1.561   | -15.954 | -3.487  | 38.342 | 1.56    | -16.169 | -3.438  | 38.126 | 1.614   | -16.152 | -3.48   | 38.143 | 1.563   | -16.205 | -3.502  | 38.092 | 1.534   |
| 2022 | 2 | 6  | 12 | -15.649 | -3.506  | 38.647 | 1.547   | -15.649 | -3.506  | 38.647 | 1.546   | -15.865 | -3.465  | 38.43  | 1.59    | -15.85  | -3.499  | 38.446 | 1.549   | -15.907 | -3.527  | 38.39  | 1.513   |
| 2022 | 2 | 7  | 12 | -15.339 | -3.521  | 38.957 | 1.536   | -15.339 | -3.522  | 38.957 | 1.535   | -15.557 | -3.49   | 38.739 | 1.569   | -15.542 | -3.514  | 38.754 | 1.539   | -15.605 | -3.549  | 38.693 | 1.495   |
| 2022 | 2 | 8  | 12 | -15.025 | -3.534  | 39.272 | 1.53    | -15.025 | -3.534  | 39.272 | 1.529   | -15.245 | -3.511  | 39.052 | 1.552   | -15.23  | -3.527  | 39.066 | 1.532   | -15.298 | -3.567  | 39     | 1.481   |
| 2022 | 2 | 9  | 12 | -14.707 | -3.543  | 39.59  | 1.528   | -14.706 | -3.543  | 39.59  | 1.527   | -14.928 | -3.528  | 39.369 | 1.54    | -14.914 | -3.537  | 39.383 | 1.529   | -14.987 | -3.582  | 39.311 | 1.471   |
| 2022 | 2 | 10 | 12 | -14.384 | -3.548  | 39.913 | 1.53    | -14.384 | -3.549  | 39.913 | 1.529   | -14.607 | -3.543  | 39.69  | 1.531   | -14.594 | -3.544  | 39.703 | 1.529   | -14.672 | -3.593  | 39.626 | 1.466   |