慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	日時計天文学II : 室内日時計とアナレンマ
Sub Title	Sundial astronomy II : observation of an analemma using a handmade indoor sundial
Author	東田, 豊(Higashida, Yutaka) 山本, 裕樹(Yamamoto, Yūki) 表, 實(Omote, Minoru)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2021
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of natural science). No.68 (2021. 9) ,p.33- 47
JaLC DOI	
Abstract	室内に設置した手作りの日時計を利用して，太陽の年周運動によって描かれるアナレンマを観測し，そのデータを解析することで均時差と太陽の赤緯の年周変化を測定した。
Notes	研究ノート
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20210930-0033

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

Hiyoshi Review of Natural Science
Keio University No. 68, 33–47（2021）

日時計天文学Ⅱ
――室内日時計とアナレンマ――

東田　豊*・山本裕樹**・表　實***

Sundial Astronomy II
—Observation of an Analemma Using a Handmade Indoor Sundial—

Yutaka Higashida, Yuki Yamamoto and Minoru Omote

要旨

室内に設置した手作りの日時計を利用して，太陽の年周運動によって描かれるアナレンマを観測し，そのデータを解析することで均時差と太陽の赤緯の年周変化を測定した。

1. 序論

日時計天文学Ⅰの論文（注1）[1]では，太陽の日周運動を利用して測定された時刻（日時計が指す時刻）と日時計が設置されている地域の標準時の差（均時差）を測定した。その差は季節によって変化するが，その変化の様子を表したのが均時差曲線である。均時差は地球の自転軸が公転面の垂線から傾いていることと，地球が太陽の周りを公転するときの軌道が円ではなく楕円であることによって生じる。公転軌道の離心率 e と地軸の傾角 ε の大きさをいろいろ変化させると，それに応じて理論的な均時差曲線の形も変わる。そこで，日時計を用いて測定した均時差曲線を理論的な均時差曲線で再現するように決めた場合の e と ε の値が，日時計を用いた観測から測定した地球軌道の離心率と地軸の傾角の測定値であった。これが日時計天文

* 小牧市天文ボランティア会員（〒485–0041 愛知県小牧市小牧5–253）：Komaki City Astronomy Volunteers, 5–253 Komaki, Komaki, Aichi 485–0041, Japan.
** 東北公益文科大学（〒998–8580 山形県酒田市飯森山3–5–1）：Tohoku University of Community Service and Science, 3–5–1 Iimoriyama, Sakata, Yamagata 998–8580, Japan.
*** 慶應義塾大学名誉教授（〒108–8345 東京都港区三田2–15–45）：Emeritus Professor, Keio University, 2–15–45 Mita, Minato-ku, Tokyo 108–8345, Japan.［Received, February 20, 2021］

この著作物は著作権法によって保護されています／This content is protected by the Japanese Copyright Act

学Ⅰの内容である。

地上での太陽観測から得られる興味深い曲線には，均時差曲線とは別にアナレンマ曲線がある。毎日定時に，固定したカメラで年間を通して太陽を撮り続けた写真を一枚に合成したとき，合成された写真上に映っている太陽の像を結ぶ曲線が，空に描かれるアナレンマ曲線である。太陽の写真を毎日決まった時刻，例えば正午に撮ることを想定しよう。毎日正午に撮った太陽の画像でも，季節が移るにつれて天空上の太陽の位置（高さと方角）は少しずつ変化するので，それらの画像を合成すれば変形した 8 の字形をした曲線となる。これが空に描かれるアナレンマ曲線である。観測時刻が異なれば 8 の字の傾きも変わる。このようにして撮られたアナレンマ曲線は，ウェブにもいろいろアップされているので探してみることは容易である。

空に描かれるアナレンマ曲線はなかなか美しい曲線なので，可能であれば自分でもその撮影に挑戦してみたいと思わせられるだけの魅力がある。しかし，実際に一年間カメラを固定して定時に太陽の写真を撮り続けることは，雨天時の対応など様々な要因からかなりハードルが高い課題である。また，このようにして撮られたアナレンマ曲線の美しさには魅せられるとしても，それから各季節における太陽像の位置（高さと方位）の定量的な情報を得るのは難しい。

本論文では，アナレンマを観測するための機材として，雨天時対応も考慮して室内に手作りの日時計を設置し，太陽の位置を継続観測する。またその観測データから，地上に描かれるアナレンマ曲線，空に描かれるアナレンマ曲線，均時差曲線及び太陽の赤緯の季節変化を示す曲線を求めて考察を行う（注 2）[2]。なお，計算では地心視差は小さいため無視している。

2. 室内日時計の構造

地球は自転と公転という 2 種類の運動をしている。それに伴い，地球で観測したときの太陽の位置は，一日の間の時刻で太陽の位置が変わる日周運動と，定時に測定した太陽の位置が季節によって変わる年周運動がある。太陽の日周運動は地球の自転運動に起因するものであり，その変化が描く曲線が日影曲線である [3]。また定時における太陽位置の季節変化が描く曲線がアナレンマ曲線である。

日影曲線を観測するためには，水平な地上に垂直に立てた棒が作る影の先端の位置が，時刻によって変化する様子を記録すればよい。具体的には，例えば 10 分おきに影の先端の位置を記録し，それを結ぶ曲線（注 3）を求めれば，観測日に観測地で描かれる日影曲線を求めることができる。

日影曲線を求めるこの装置はとても簡単なものであるが，同じ装置を用いてアナレンマ曲線を観測することも可能である。そのためには，決められた時刻に棒の影の先端の位置を記録し，その作業を一年継続して得られたデータを結ぶことで，地上に描かれるアナレンマ曲線が求められる。棒の影の先端の位置を表すデータは，地上の位置座標から太陽の高度と方位を表す座標に変換可能なので，地上のアナレンマ曲線のデータから空に描かれるアナレンマ曲線も求められる。

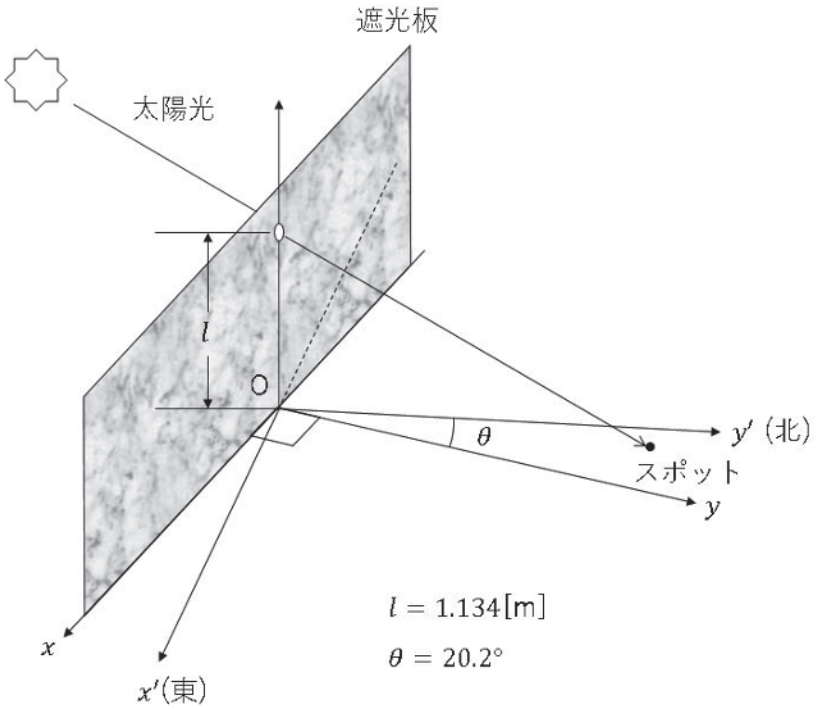

図 1．室内日時計の構造

アナレンマ曲線を観測するための自作可能な装置としては，日影曲線観測用の上記装置が原理的に応用可能であるが，一年間この装置を屋外に固定して設置しておくことは困難かもしれない。そこで考案されたのが室内の日時計である。図 1 は今回観測に利用した室内日時計のイラストである。太陽光を遮る遮光板を床に垂直に立て，南北方向になるべく垂直になるようにしてある（例えば南向きの窓に貼る）。この遮光板の床から高さ l（＝1.134［m］）のところに，小さな丸い穴を開け，この穴を通り抜けて太陽光が室内に差し込むようになっている。床に白い紙（記録用紙）を敷き，外部から室内に差し込んだ太陽光が床に作る明るいスポットの中央の位置を記録する。穴から垂直に下した線が床と交わる点を原点 O とし，原点 O から遮光板に垂直に太陽光が床に作るスポットの方向に伸ばした直線を y 軸（スポットができる方向を正方向），原点を通り遮光板と平行に引いた直線を x 軸（y 軸の右方向を正方向）とする直交座標系（この座標系を S0 とする）を設定する。この座標系を用いて太陽光が作るスポットの位置を測定する。

これで室内日時計とスポットの位置を表示する座標系 S0 が用意できたので，この装置を用いて地上に描かれるアナレンマを観測する。

3. 地上に描かれるアナレンマの観測

第 2 節で紹介した室内日時計は地上に描かれるアナレンマ曲線の観測を目指して設置したものであるが，その構造上，日影曲線も測定できる。アナレンマの観測の前段階として日影曲線の観測が必要となるので，まず日影曲線の観測について考察し，その後アナレンマの観測について考察する。なお，観測は愛知県小牧市の住宅で行った。

3–1　日影曲線の観測

アナレンマは太陽の年周運動を観測するものなので，その観測は通年の継続観測になるが，日影曲線は太陽の日周運動を観測することで得られるので，太陽を一定の時間間隔ごとに，数時間継続観測することで求められる。

図 1 に示したように，太陽光線が床に作るスポットの位置を座標系 S0 を用いて表したときの座標値を（x，y）とする。太陽の位置が同じでも，遮光板に開けた穴の高さ l が違えば，この座標値は変化する。太陽の位置を観測するという目的からは，室内日時計の構造によって測定値が変わることは望ましくない。そこで太陽の位置を表す座標として，新たに（x，y）を高さ l で規格化した座標（ξ_x，ξ_y）

$$\xi_x=\frac{x}{l},\quad \xi_y=\frac{y}{l} \tag{2.1}$$

を導入する。定義から分かるように，ξ_x と ξ_y は太陽の位置を表す無次元の座標であり，それは日時計のサイズに依存しない。

ある時刻から始めて，決められた時間間隔（例えば 10 分）ごとに，その時刻のスポットの位置を観測し，その作業を数時間続けて得られたデータを（$\xi_x(i)$，$\xi_y(i)$）（i=1, 2, 3, …, N）とする。ここで N は観測回数である。ξ_x を横軸，ξ_y を縦軸とするグラフにプロットすれば，観測日の観測地点で描かれる日影曲線が得られる。日影曲線の観測はこれで一応終わることになるが（注 4），アナレンマ曲線観測の準備として以下の考察を続ける。

x 軸と y 軸が正確に東方向と北方向を向いているとしよう（そうでない場合は後述）。日周運動による太陽の位置変化の様子は理論的に計算可能であり，その変化の様子は ξ_x と ξ_y が満たす次の式

$$(\tau^2-1)\xi_y^2-2\tau^2\xi_y\tan\phi-\xi_x^2+(\tau^2\tan^2\phi-1)=0 \tag{2.2}$$

で表される。ここで τ はこの 2 次曲線の離心率であり，観測地の緯度 ϕ と観測日時の太陽の赤緯 δ を使って，次の式

$$\tau^2=\frac{\cos^2\phi}{\sin^2\delta} \tag{2.3}$$

で与えられる。式（2.2），（2.3）から分かるように，日影曲線の形は ϕ と δ で決まる（$\tau>1$

のとき双曲線，$\tau=\infty$のとき直線）。

日影曲線の形が明らかになったので，式（2.2），（2.3）から得られる理論的な日影曲線を，観測データをプロットしたグラフに描くことにする。このとき，観測データが理論曲線上に分布すれば日影曲線の観測が成功したことが分かる。

また，遮光板が南北方向に垂直になっておらずx軸とy軸が東方向と北方向からずれている場合には，観測データは式（2.2）に直接当てはまらないため，座標変換が必要になる。x軸が東方向（x'軸とする），y軸が北方向（y'軸とする）に正確に向いている座標系を座標系Sとする。そして座標系S0のy軸と座標系Sのy'軸の成す角をθ（図1参照）とする。このとき，座標系S0の規格化された座標で表された観測データ（$\xi_x(i)$，$\xi_y(i)$）は，座標系Sの規格化された座標（$\xi'_x(i)$，$\xi'_y(i)$）と次の関係にある。

$$\xi'_x(i)=\xi_x(i)\cos\theta-\xi_y(i)\sin\theta \tag{2.4}$$

$$\xi'_y(i)=\xi_x(i)\sin\theta+\xi_y(i)\cos\theta \tag{2.5}$$

本論文の目的であるアナレンマ観測には，軸が正しく北方向と東方向を向いている座標系Sを設定することが必要である。そのために，すでに用意してある座標系S0のy軸と，座標系Sのy'軸の成す角度θを求める必要がある。角度θは，上記したことから明らかなように，日影曲線の観測データが理論曲線に合うように求めることができる。

θを求める手順は次の通りである：

① ある時刻から始めて，決まった時間間隔ごとに太陽光が作るスポットの位置を座標系S0上に記録する。この作業を数時間続けて得られたデータ（$x(i)$，$y(i)$）を，規格化されたデータ（$\xi_x(i)$，$\xi_y(i)$）に変換する。そのデータを式（2.4），（2.5）を使って座標系Sの規格化された座標でのデータ（$\xi'_x(i)$，$\xi'_y(i)$）に変換する。

② 手順①で求めたデータ（$\xi'_x(i)$，$\xi'_y(i)$）を，ξ'_xを横軸，ξ'_yを縦軸とするグラフにプロットする。

③ プロットされたデータが作る曲線は観測から得られた日影曲線であるが，角度θを変えればその形も変わる。θをいろいろ変えて観測から得られた日影曲線と，式（2.2），（2.3）の理論曲線とのズレが最小になるように最小二乗法を用いてθを決める。θの不定性を小さくするために，式（2.3）のδは理論的に計算した値［4］を用いる。

本観測では，2019年の3月31日と4月1，4，7，8，11，12，15，18，22日，さらに11月10日と12月20日の計12回，日影曲線を測定し，各観測ごとに求めた角度θの平均値20.2°をy軸とy'軸との成す角度とした。これで北方向が測定できたので，予め設置した座標系S0から，観測データを解析するために必要な座標系Sに変換することが可能になった。

本論文の以下の部分では文字表示の煩雑さを避けるため，座標系Sにおける座標（ξ'_x, ξ'_y）を改めて（ξ_x, ξ_y）で表すことにする。

3–2　アナレンマの観測

実際のアナレンマの観測は，上記の室内日時計を用いて，2019 年 1 月 19 日から 2020 年 4 月 11 日まで，雨天その他の理由で観測不可能な日を除いて，毎日正午（日本標準時 12 : 00）に太陽光が床に作るスポットを観測し，その位置を床に張り付けた用紙に記録した。図 2 は記録用紙に記入されたスポットの位置の一部を表す画像である。

用紙に記録されたスポットの位置を，座標系 S の規格化した座標（ξ_x, ξ_y）に変換する。変換された観測データ（$\xi_x(i)$，$\xi_y(i)$）を，横軸を ξ_x 縦軸を ξ_y とするグラフにプロットしたものが図 3 である。見やすいように横軸は縦軸のスケールの 4 倍に拡大してある。観測データが描く図 3 の曲線は閉じた曲線に見えるが，本来のアナレンマ曲線は変形 8 の字形の曲線を描くはずである。観測データの点列がそうなっていないことに関しては，次の章で説明する。

4. 観測データの解析

地上で太陽を観測したとき，観測地点が同じであっても観測日及び観測時刻が異なれば太陽の位置は変化する。一日の間でも観測時刻の違いによって太陽の位置が変わることを太陽の日周運動，同じ時刻でも観測日によって太陽の位置が変わることを太陽の年周運動と呼ぶことは上記した。日影曲線は太陽の日周運動を観測するものであり，アナレンマの観測は太陽の年周運動を観測するものである。

太陽の年周運動の様子は理論的に調べることができるので，観測地点と観測時刻が決まれば室内日時計を設置した地点での正午の太陽の位置を計算し，太陽の年周運動による太陽光線が作るスポットの位置の年周変化を調べることができる［3］［4］。理論計算から求めたスポットの位置の年周変化は，規格化された座標（ξ_x, ξ_y）の年周変化で表すことができる。観測地で正午に描かれるアナレンマの理論曲線を，図 3 に追加したものが図 4 である。図 4 の横軸は ξ_x（正が東方向），縦軸が ξ_y（正が北方向）を表す。この曲線は，床の紙面上に描かれるアナレンマ曲線なので，これを地上に描かれるアナレンマ曲線と呼ぶ。

図 4 では赤色の点が観測データであり，青色の曲線が理論計算から求めたアナレンマ曲線である。図 4 が示すようにアナレンマの理論曲線は変形 8 の字曲線を描いている。3 節 2 項で指摘したが，観測データは変形 8 の字曲線の下の部分が欠けていることが分かる。言い換えれば，アナレンマ曲線の下部分（データ全体では南部分に当たる）が欠けていることになる。観測データが欠けている期間は 2019 年 4 月 13 日から 9 月 6 日であり，この期間は観測地では夏季であり正午の太陽の高度が高い季節である。そのため，太陽光線が屋根のひさしに遮られて，遮蔽板に開けられた丸い穴から室内に届かなかった。この期間（5 ヶ月弱）の観測データが欠けているのはそのためである。室内日時計を用いた太陽の位置観測で，夏季のデータ取得が不可能になることを防ぐためには，天井に太陽光を取り込むための穴を開けた構造の日時計が必要となる。このような構造の日時計を設置している建築物もあるが（注 5），本論文で使用した日時計は住宅に設置したものなので，天井に穴を開けることは不可能であった。

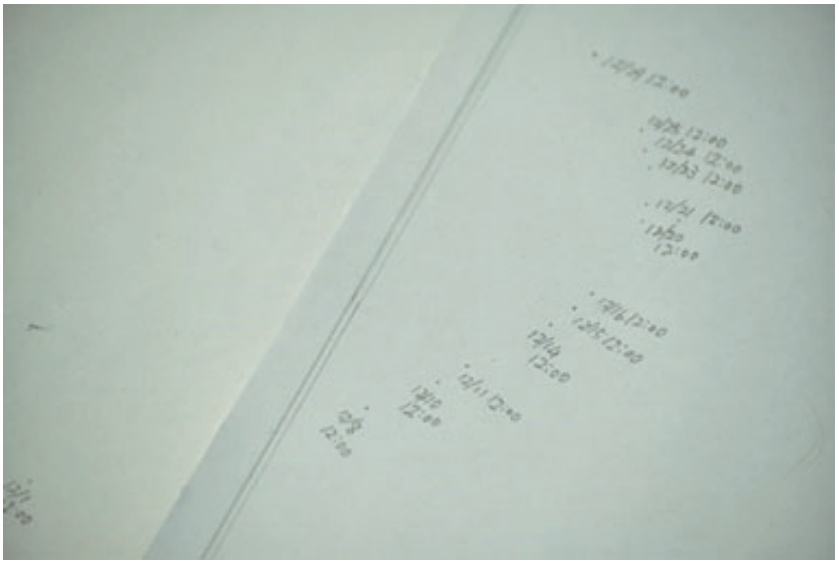

図 2. 記録されたスポットの位置

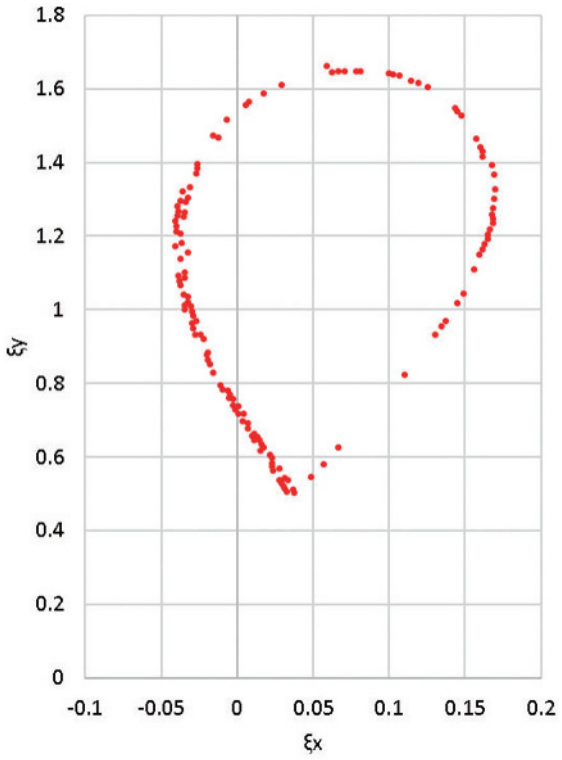

図 3. 観測データが描くアナレンマ曲線

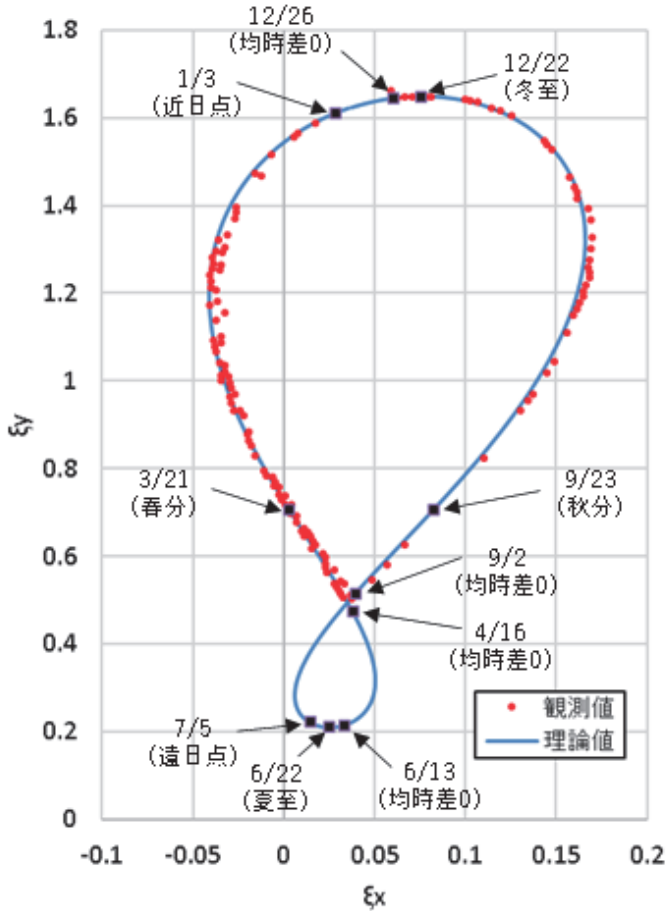

図 4. 地上に描かれるアナレンマ曲線

上記した理由により，年間を通して観測データを取れなかったのは残念であるが，観測できた期間のデータはよく理論曲線を再現していることが分かる。この観測データ（と理論曲線）が意味していることは，同じ観測地点で同じ時刻（正午）に観測しても，太陽の位置が季節によって変化していることである。南北の変化は太陽の高度の変化を，東西の変化は均時差（正午に太陽はまだ南中していないか，少し前に南中しているか）が生じていることを示している。

日時計天文学 I では屋外の公的な場所に設置された日時計を利用した観測で均時差の解析を行った。図 4 が示すようにアナレンマの観測からは，スポットの位置が南北に変化するデータと東西に変化するデータの 2 種類のデータが得られるので，これらのデータを解析することで，アナレンマだけでなく均時差を含めていろいろな情報を得ることが可能になる。この観測で得られる情報をまとめると次のようになる：

1)　空に描かれるアナレンマ

太陽の高度 h と方位角 A は，規格化された座標（ξ_x, ξ_y）から次の関係式

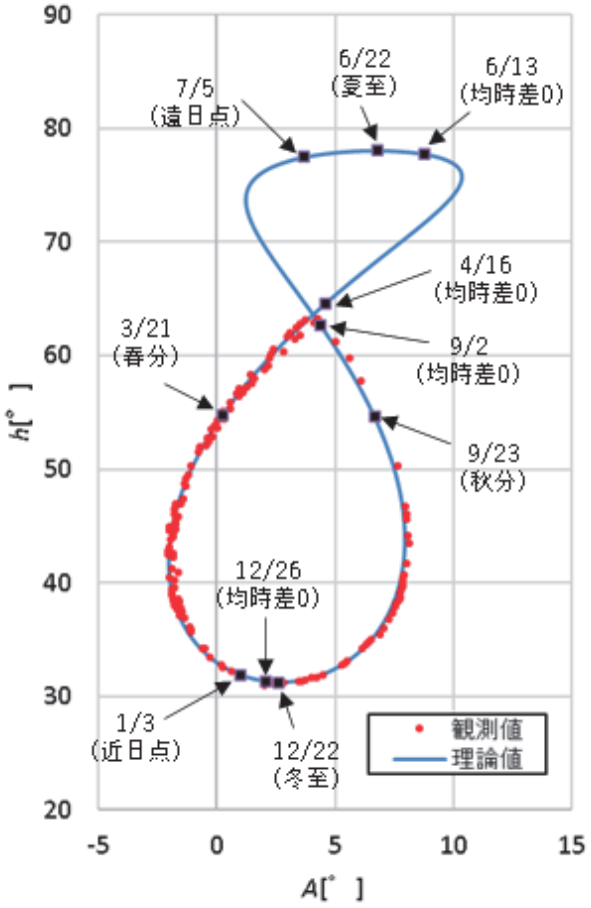

図 5. 空に描かれるアナレンマ曲線

$$\tan h = \frac{1}{\sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2}} \tag{3.1}$$

$$\tan A = \frac{\xi_x}{\xi_y} \tag{3.2}$$

を使って求められる［3］。式（3.1），（3.2）を用いて得られた太陽の高度 h と方位角 A のデータを，横軸を A，縦軸を h とするグラフにプロットしたものが図 5 である。見やすいように横軸は縦軸のスケールの 2 倍に拡大してある。これは，地上に固定した魚眼レンズのカメラから正午の太陽を毎日撮影して得られるアナレンマ曲線と同じものである。この曲線を空に描かれるアナレンマ曲線と呼ぶ。

2)　赤緯の年周変化

太陽の高度 h と方位角 A が得られたので，太陽の赤緯 δ は次の式

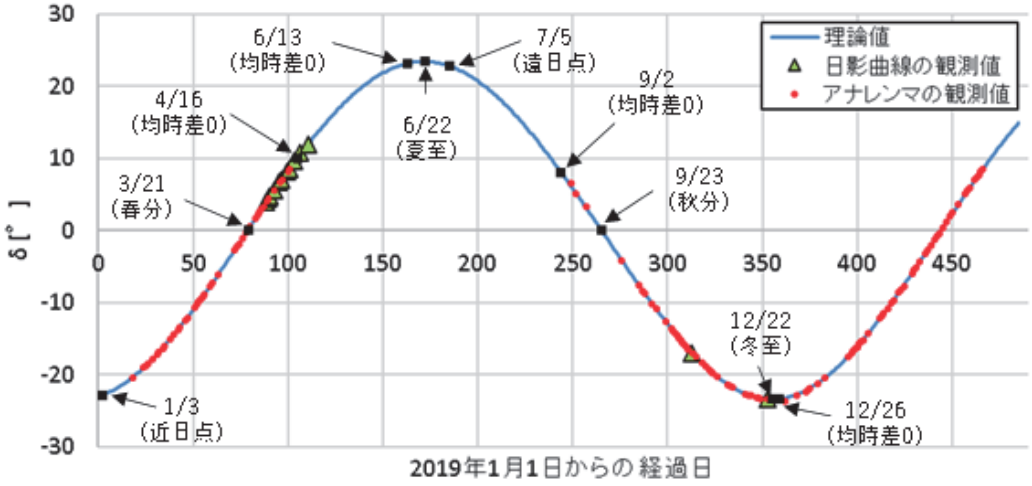

図 6．太陽の赤緯の年周変化

$$\sin\delta=\sin h\,\sin\phi-\cos h\,\cos\phi\,\cos A \tag{3.3}$$

から求められる［4］。ここで，ϕ は観測地点の緯度を表す。図 6 は，アナレンマの観測データから求めた赤緯 δ の年周変化を表す。横軸は 2019 年 1 月 1 日からの経過日，縦軸は太陽の赤緯 δ である。赤色の点は観測から求めたデータであり，青線は理論的に求めた曲線である。

また，3 節 1 項で説明したように座標系 S の設定のために日影曲線を 12 回観測しているが，それらの日影曲線からも観測日の δ を測定できるため（注 6），図 6 に三角の点でプロットした。室内日時計による日影曲線とアナレンマの観測データから求めた太陽の赤緯 δ が，理論曲線をよく再現していることが見て取れる。

3)　均時差

太陽の時角 H は，太陽の高度 h と方位角 A から，次の式

$$\tan H=\frac{\sin A}{\sin\phi\,\cos A+\cos\phi\,\tan h} \tag{3.4}$$

で求められる［4］。太陽の赤経 α は，時角 H と観測地の地方恒星時 Θ から，次の式

$$\alpha=\Theta-H \tag{3.5}$$

で与えられる。地方恒星時は観測地の経度と観測日時が分かれば計算できる量なので，式（3.4），（3.5）から赤経 α を求めることができる。太陽の均時差は，$\alpha_0-\alpha$ で与えられ［1］，平均太陽の赤経 α_0 は理論計算から求められる。アナレンマの観測データから求めた α と理論計算から求めた α_0 を用いて得られた均時差のデータをプロットしたものが図 7 である。横軸は 2019 年 1 月 1 日からの経過日，縦軸は均時差（単位：分）を表し，赤色の点が観

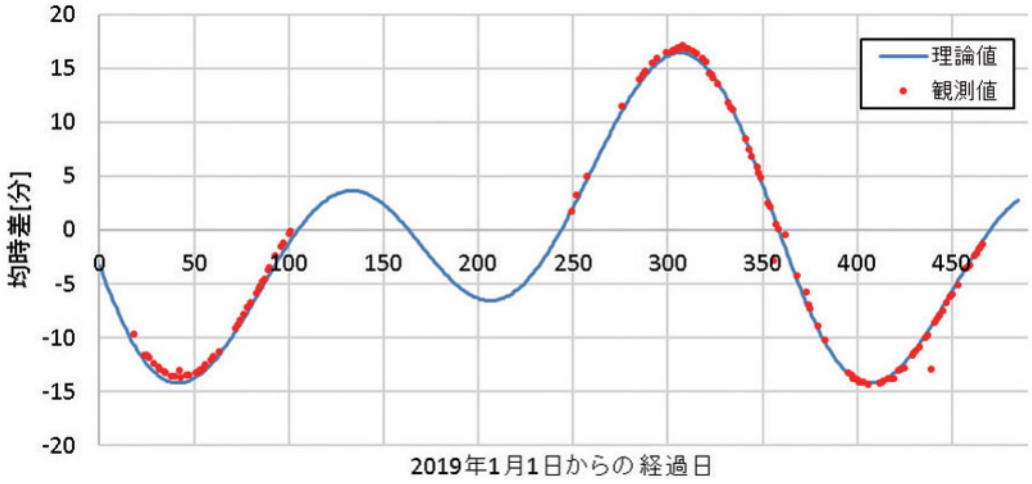

図 7．均時差曲線

測データ，青線が理論曲線である。

公共の広場に設置してある日時計を利用した観測（日時計天文学Ⅰ）では，均時差だけが測定できた。また，そのデータを利用して地球の自転軸の傾きと，公転軌道の離心率を測定した。今回の自作の室内日時計を利用した観測では，その観測データから地上に描かれるアナレンマ曲線だけでなく，空に描かれるアナレンマ曲線と太陽の赤緯の年周変化，さらに均時差曲線も測定できることが明らかになった。本論文の観測例は，この観測から得られたデータを用いて得られる 4 種類の曲線が，いずれも理論曲線をよく再現すること示している。この結果，自作の室内日時計が太陽の位置観測を観測する上で有効であり，得られたデータから太陽の運動（結果として地球の運動）に関する興味深い情報が得られることが明らかになった。

5．考察とあとがき

測定されたアナレンマの形状が何故このような形になるのかについて考察するため，地球の公転軌道の離心率 e 及び黄道面に対する軌道面の傾き ε が及ぼす影響を考える。図 8 は，e 及び ε を変化させたとき曲線の形状がどのように変わるかを計算し，測定結果と比較したものである。

A，B 及び C で示された曲線は，それぞれ

A：e=0.0167，ε=0 °

B：e=0，ε=23.4 °

C：e=0.0167，ε=23.4 °

の場合に対応する。C が現実の地球の値である。

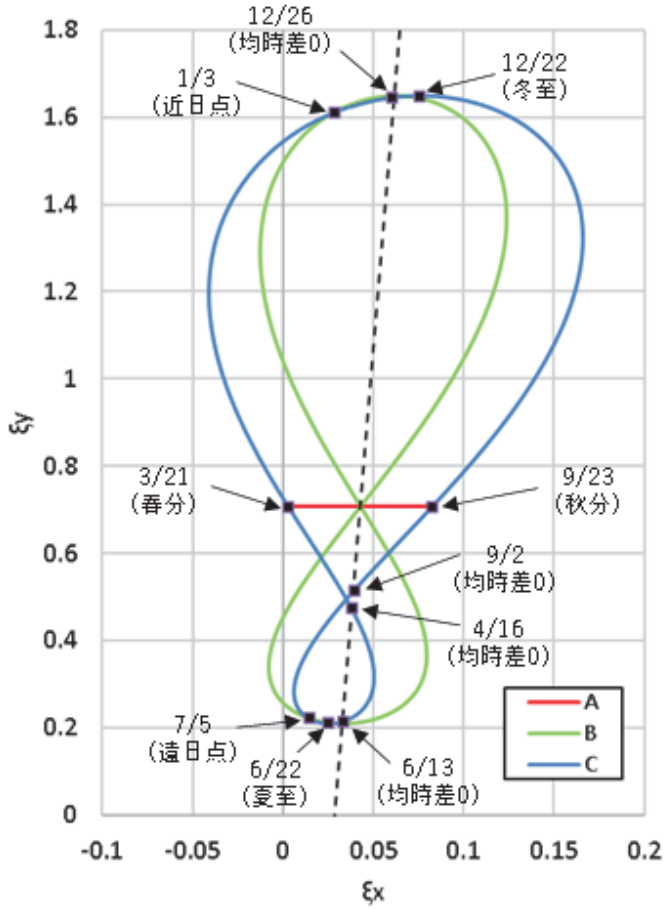

図 8. 各種の仮想的なアナレンマ曲線

測定は日本標準時の 12 : 00 に行っているので，観測地（愛知県小牧市）と日本標準時子午線との経度差 $\Delta\lambda$（>0 °）によって，各曲線は東側に傾く。図 8 の鎖線は，次の式

$$\xi_y=\frac{\cot\Delta\lambda}{\sin\phi}\xi_x-\cot\phi \tag{4.1}$$

で与えられる直線であり，その傾きはアナレンマ曲線の傾きと一致する。ここで，ϕ は観測地点の緯度である。この鎖線は，均時差が 0 になる 4 点（2019 年 4 月 16 日，6 月 13 日，9 月 2 日，12 月 26 日）でアナレンマ曲線と交わる。

太陽の年周運動の軌跡を表すアナレンマ曲線の y（南北）方向の移動は季節による太陽の高度の変化に対応する。軌跡の鎖線からの x（東西）方向のズレの大きさは，均時差（太陽時と平均太陽時のズレ）を表す。

図 9 に図 8 の A，B 及び C で示された曲線に対応する均時差曲線を示す。さらに，図 8 と図 9 上に近日点，遠日点，春分，夏至，秋分，冬至，均時差が 0 となる位置とその日付を示す。

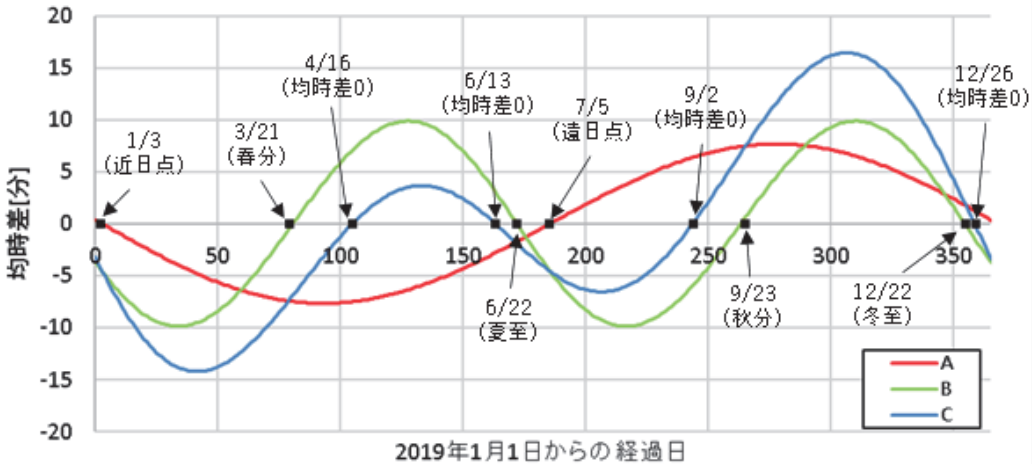

図 9. 各種の仮想的な均時差曲線

図 8 と図 9 から以下のことが分かる：

① 図 8 の軌跡のほぼ上半分（冬季：秋分から春分まで）の部分と，ほぼ下半分（夏季：春分から秋分まで）の部分とで，ループの大きさが異なるのは，それぞれの季節で均時差の変動幅が異なるためである（図 9）。

② 図 9 の曲線 C で表される均時差は，地球の公転軌道の離心率 e だけの影響（曲線 A）と，黄道面に対する自転軸の傾角 ε だけの影響（曲線 B）が重ね合わされたものである（2 つの影響の単なる和とは少し異なる）。

③ 春分から秋分までの e による均時差と ε による均時差は，互いに異符号となる領域が多く，その重ね合わせである均時差の変動幅は小さい。秋分から春分までは両者は互いに同符号となる領域が多く，均時差は相対的に大きくなる（図 9 の曲線 C）。

④ e による均時差が 0 となるのは近日点及び遠日点においてであり，その変動周期は 1 年である（図 9 の曲線 A）。

⑤ ε による均時差が 0 となるのは春分，夏至，秋分，冬至においてであり，変動周期は半年である（図 9 の曲線 B）。

図 8 の曲線 A は線分となるが，これは $\varepsilon=0^\circ$ の場合を考えているので太陽は常に赤道面上にあり，南中時の高度は変化することなく（ξ_y は一定），均時差が 0 となる点を中心として x 軸に沿って往復をするように振る舞うためである。図 8 に示す曲線 C は，曲線 A 及び曲線 B の均時差の重ね合わせの結果として理解され，それは測定結果とよく一致している。

日時計天文学 I では，均時差の観測データ解析の中で，単に観測データが理論計算で得られた曲線をよく再現することを確かめただけでなく，さらに一歩踏み込んで地球の運動を決める物理量（公転軌道の離心率と地軸の傾角）を観測データから測定する課題に挑戦した。アナレンマの観測から得られたデータを用いて，同じような解析を行うことも可能である。その場合，

均時差を再度取り上げて議論することも可能であるが，それとは別にアナレンマ曲線を使っての解析も可能である。この課題の問題意識と手法は，基本的には日時計天文学Ⅰと同様なので，本論文では割愛することにする。

日時計の歴史は古く，その構造も多様である［5］。その用途は，古くは時刻を知らせるものとして利用されていたが，近年はそれに加えて設置されている施設や建造物のシンボル的な位置づけもなされている。用途の多様化と共に，日時計のデザインにも様々な工夫がなされ，芸術的な観点から鑑賞する楽しみも加わっている［6］［7］。

日時計天文学ⅠとⅡでは，現在多くの人々に愛され関心を持たれている日時計が持つもう一つの側面として，日時計（既存のものと手作りのものを含めて）が天文学の基礎的な課題の観測装置として大変有効であること，すなわち日時計天文学の魅力とその可能性を，実際の観測成果を例にとって示した。人類にとって最も身近な存在である地球を天体の一つとして見たとき，その運動（自転運動と公転運動）に起因する太陽の日周運動と年周運動を観測し，その観測で得られたデータを利用して天体としての地球の運動の構造を調べることは，天文学の基礎的な観点と天文教育の観点から大変興味深いテーマである。

参考文献

［1］東田豊・山本裕樹・表實，慶應義塾大学日吉紀要・自然科学，64 号，11–20（2018）.
［2］炭本壮一朗・鈴木果奈・長江広晴・渡辺光哉，日影曲線による真北の特定と均時差・アナレンマ観測，第 15 回日本物理学会 Jr. セッション（2019）.
［3］慶應義塾大学インターネット望遠鏡プロジェクト，インターネット望遠鏡で観測！現代天文学入門，森北出版（2016）.
［4］慶應義塾インターネット望遠鏡プロジェクト，「いつでも・どこでも・天体観測―インターネット望遠鏡の魅力―」，慶應義塾インターネット望遠鏡プロジェクト（2008），http://arcadia.koeki-u.ac.jp/itp/?plugin=attach&refer=%A5%AB%A5%EA%A5%AD%A5%E5%A5%E9%A5%E0&openfile=itpapplication.pdf.
［5］関口直甫，日時計―その原理と作り方，恒星社厚生閣（2001）.
［6］沖允人，太陽をめぐる日時計の旅，日本日時計の会（2013）.
［7］沖允人，日本の日時計・500 選，日本日時計の会（2019）.

注

1）［1］のタイトルは日時計天文学となっているが，本論文と区別するために以下では［1］を日時計天文学Ⅰと呼ぶことにする。
2）屋外に棒を立てて棒の先端の影の位置を観測することで，アナレンマを観測した先行研究

［2］がある。ただし，この研究は観測装置を屋外に長期間固定して設置しておくことの困難さ，その他の理由により観測期間が短期間で終了せざるを得なかった。この先行研究の経験が，本研究で室内日時計を考えた動機となっていることを指摘しておきたい。

3) 高緯度以外の地域では双曲線か直線となる。

4) 日影曲線の観測とその解析に関する詳細は［3］を参照のこと。

5) モンアーレ大聖堂（イタリア・パレルモ）のようにヨーロッパには天井に穴を開けて太陽光を取り込む日時計をもつ大聖堂などがあるようである。

6) 日影曲線の観測から太陽の赤緯 δ を求めるには，観測データから τ^2 を求めて式（2.3）を用いる。詳細は［3］を参照のこと。