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 : 日時計を利用した地球軌道の離心率測定
Sub Title	Sundial astronomy : the measurement of Earth's orbit eccentricity using a sundial
Author	東田, 豊(Higashida, Yutaka) 山本, 裕樹(Yamamoto, Yuki) 表, 實(Omote, Minoru)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2018
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of natural science). No.64 (2018. 9) ,p.11- 20
JaLC DOI	
Abstract	日時計を利用して均時差を継続観測し, そのデータから地球の公転軌道の離心率と公転周期および地軸の傾角を測定した。また, この観測の副産物として, 日時計の設置されている地点の経度を求めた。
Notes	研究ノート
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20180930-0011

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. 64, 11-20（2018）

日時計天文学
――日時計を利用した地球軌道の離心率測定――

東田豊*・山本裕樹**・表實***

Sundial Astronomy
—The Measurement of Earth's Orbit Eccentricity Using a Sundial—

Yutaka Higashida, Yuki Yamamoto and Minoru Omote

要旨

日時計を利用して均時差を継続観測し，そのデータから地球の公転軌道の離心率と公転周期および地軸の傾角を測定した。また，この観測の副産物として，日時計の設置されている地点の経度を求めた。

1. 序論

地球の公転軌道が楕円であることはよく知られている。それを確かめるにはどのような観測法があるか，またどのような方法でその楕円の離心率を測定できるか，これは天文学の基礎的な課題であると同時に天文教育上も興味深い問題である。

地球軌道の離心率を測定する方法としては，太陽のみかけの大きさを継続観測しその年周変化を調べる方法や，月の朔望月と近点月の差を継続観測しその季節変化を調べる方法[1]などが知られているが，その多くは望遠鏡を利用した観測によるものである。本研究ノートでは，望遠鏡を持っていなくても「地球の公転軌道が楕円である」ことを検証できる観測法を提案し，

* 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.

その理論的な背景の説明と実際の観測結果について報告する。

地球の公転軌道が楕円であることを確かめるためには，それが円軌道ではなく楕円軌道であることが日常の生活に及ぼす影響に注目すればよい。そのような現象の一つであり，かつその影響の度合いを定量的に測定できる現象として均時差[2]がある。次章では均時差について考察する。

2. 均時差（equation of time）

均時差とは日時計を利用した時刻の測定で観測される現象である。均時差が生じる原因を探るために，まず時刻の体系から考察を進めることにしたい。時刻には様々な体系があるがそれらは，天体の動きに基づく時刻系（天文現象由来の時刻系）と，天文現象以外の周期的な物理現象に基づく時刻系（物理現象由来の時刻系）に大別できる。

2-1　天文現象由来の時刻系

天文現象由来の時刻系として代表的なものは，太陽の日周運動を基準にした太陽時（solar time）と，恒星の日周運動を基準にした恒星時（sidereal time）の 2 つが存在する。

「太陽時」

太陽時は太陽が南中（天体が真南にあるときその天体は南中しているという）してから次に南中するまでの時間間隔を 1 太陽日とし，その 1 / 24 を太陽時の 1 時間，その 1 / 60 を 1 分，さらにその 1 / 60 を 1 秒とする時刻の体系である。

「恒星時」

恒星時は恒星が南中してから次に南中するまでの時間間隔を 1 恒星日とし，その 1 / 24 を恒星時の 1 時間，その 1 / 60 を 1 分，さらにその 1 / 60 を 1 秒とする時刻の体系である。

「太陽時と恒星時」

地球は太陽の周りを公転しているので，太陽が南中してから次に南中するまでに，地球は公転軌道上を約 360 / 365.2422 度移動する（1 年は太陽日で 365.2422 日なので）。そのため，地球上で太陽が南中したのを確認してから次に南中することを確認するためには，地球が 1 回自転するのに要する時間よりも余分な時間が必要となる。一方，恒星ははるか遠方にあるので恒星日には地球公転の影響はない。この結果，1 恒星日は 1 太陽日よりもわずかに短く，その関係は 1 恒星日＝(365.2422 / 366.2422）太陽日＝0.9972670 太陽日＝23 時間 56 分 4 秒太陽時となる[1)]。

太陽時は日常の生活において有用な時刻系であり，恒星時は天体観測に有用な時刻系である。

2–2　物理現象由来の時刻系

周期的な物理現象を基準にした時刻系としては，歴史的には振り子の等時性を利用して時刻を測定した時刻系がある。近年になって利用されているものとしては，水晶の振動を基準にしたクォーツ時計が測る時刻系や，特定の原子および分子が放出する電磁波の周波数を基準にした原子時計が測る時刻系がある。原子時計の測定精度は非常に高く，その誤差は 1 億年に 1 秒程度と考えられている。原子時計よりもさらに精度の高い時計として現在注目されているものに光格子時計がある [3]。

「国際原子時（TAI）」

原子時計が刻む時刻系を原子時という。原子時計にも誤差があるので，50 ヶ国以上の国にある約 300 個の原子時計を統計処理して得られる平均の時刻系を国際原子時（TAI）と呼ぶ。

2–3　天文現象由来の時刻系と物理現象由来の時刻系の関係

天文現象由来の時刻系の一つである太陽時は太陽の動きに基準を置いた時刻系であるため，日常生活と密接な関わりがある時刻系であるといえる。しかし，上でも述べたように太陽日は，地球が 1 回自転するのに要する時間に加えて，その間に地球が公転軌道上を移動した分だけ余分な時間がかかった。この余分な時間は地球が軌道上を移動する速さによって決まるので，もし地球の公転速度が軌道上の位置によって変化する場合は，その結果として 1 太陽日の長さも変化する。

地球は太陽の周りを楕円軌道を描いて公転しているため，軌道上を動く地球の速さは季節によって異なる（ケプラーの第 2 法則）。そのため，1 太陽日の長さにも季節変化があり，太陽の動きで時刻を測る日時計の進み方は季節によって変化することになる。

一方，物理現象由来の国際原子時は原子時計の刻む時刻系であり，その精度は非常に高く，また進み方に季節変動はない。そのため，時刻系をより進化した時刻の体系である国際原子時に統一することも議論されているが，時刻が日常生活に果たす役割の重要性を考慮したとき，日常生活に大きな影響を及ぼす太陽の動きを基準にした太陽時を完全に捨て去ることは必ずしも得策とはいえない。

そこで考案されたのが世界時 UT（Universal Time）である。世界時は天文現象に由来しながら，太陽時に付随する時刻の季節変動という問題を除くことを目的として導入されたものである。具体的には，地上から見たとき赤道上を一様な速さで動く仮想的な太陽を想定し，その太陽が南中してから次に南中するまでの時間を 1 日とする時刻の体系である。この仮想的な太陽を平均太陽と言い，平均太陽の動きに基づく時刻系を平均太陽時と呼ぶ。平均太陽時と区別するために，実際の太陽の動きを基準にした太陽時を真太陽時と呼ぶ。

平均太陽時は，真太陽時のもつ時刻の季節変動を平均し，1 年経つと 2 つの太陽時が一致するように工夫されたものである。そのため，平均太陽時は季節に関係なく一様に進み，年間を通すと真太陽時と一致するという意味で，天文現象に由来する理想的な時刻系であるといえる。

しかし，平均太陽はあくまでも仮想的な天体であるため，平均太陽時そのものを測定することは不可能である。そのため，実際の平均太陽時は恒星の動きに基づいて測定された恒星時を，恒星時と太陽時の関係を用いて太陽時に変換することで得られる時刻系である。これを世界時 UT 1 という[2)]。

天文現象とは別の周期的な物理現象に由来する精度の高い原子時と同じ速さで進み，天文現象由来の時刻系である世界時 UT 1 との差が 0.9 秒以内に留まるように調整された時刻系を協定世界時（UTC）という。UTC と UT 1 の時刻差が 0.9 秒よりも大きくなると，ある月の最後に 1 秒を付け加える（または削除する）ことで，その差が 0.9 秒以内に留まるように UTC は調整されている。このとき追加（または削除）される 1 秒を閏秒という。

日本標準時（JST）は協定世界時に 9 時間を加えた時刻系である。協定世界時と日本標準時の時差は，協定世界時の基点となる経度 0 の地点と，日本標準時の基点となる東経 135 度との経度差を時間で表したものである。

2-4　日本標準時と真太陽時

時刻には様々な時刻系が存在することが明らかになったが，これらの時刻系の関係は，上記したように UTC と UT 1 の差が 0.9 秒以内に留まっていること，また UTC と TAI の差が現在 37 秒（2017 年の閏秒挿入後）[4] であることからもわかるように，UT 1 と UTC および TAI はほぼ同じ時刻系を刻んでいるとみなすことができる。これらの時刻系の中で日常生活に定着しているのは協定世界時 UTC（または協定世界時に 9 時間を足した日本標準時 JST）であり，JST は腕時計・電波時計・スマホ等の時計機能をもつ装置で知ることができる。

一方，真太陽時は協定世界時とは異なり時間の進み方に季節変化がある時刻系であり，時刻の進み方が一定である JST（または UTC）とは異なる時刻系であるが，それは太陽の動きで時刻を表示する日時計で測定できる。時刻の進み方が一定である JST と進み方が季節変化する真太陽時には差が生じることになるが，この差を均時差という[3)]。

3. 均時差測定による地球公転軌道の離心率測定法

均時差は，時刻の進み方が一定である時刻系とその進み方に季節変化がある真太陽時間の時刻差であった。時刻の進み方が一定である時刻系である JST の時刻は腕時計（またはスマホ等に表示される時刻）で知ることが可能である。また時刻の進み方に季節変動がある真太陽時の時刻は日時計で測定できる。そのためある決められた時に，腕時計が示す時刻と日時計の示す時刻を測定しその時刻差を測定すれば，そのときの均時差を求めることができる。この観測を 1 年近く継続することで，均時差の年周変化に関するデータが得られる。

真太陽時の紹介のところで説明したように，真太陽時の進み方が季節によって変動する原因は，地球が公転運動するときその軌道上の位置によって公転速度が変化することであった。従って，均時差の年周変化が示すものは，地球の公転速度の年周変化である。均時差が一定であ

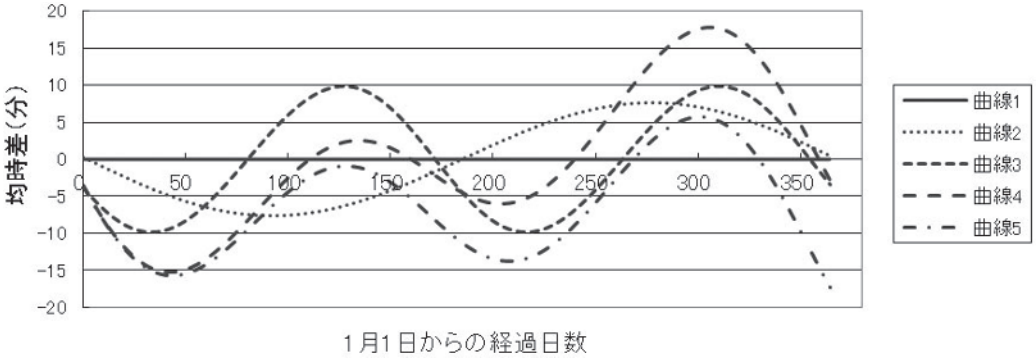

図１．いろいろな均時差曲線

表１．いろいろな曲線のｅ，ε，Ｐ

	離心率ｅ	傾角ε（度）	公転周期Ｐ（日）
曲線１	0	0	365.2422
曲線２	0.0167	0	365.2422
曲線３	0	23.4	365.2422
曲線４	0.02	23.4	365.2422
曲線５	0.0167	23.4	362

ること（年周変化がないこと）は，軌道上を移動する地球の公転速度が一定であること，すなわち地球の公転軌道は円軌道であることを示している。逆に，均時差に年周変化があることが明らかになれば，それは地球の公転軌道が円軌道ではないことを示すものとなる。その場合，均時差の年周変化の様子を調べることで，公転軌道の離心率を求めることができる。これが日時計を用いた観測で，地球軌道の離心率を測定する方法である（地球の公転軌道が楕円軌道であることの検証を含む）。

図１は，公転軌道の離心率ｅ，地軸の傾角ε，公転周期Ｐを変えたときの均時差の理論曲線である（表１参照）。

図１で，曲線１はｅ=0，ε=0，P=365.2422（日）のとき（この場合地球から見た太陽の動きは平均太陽の動きに一致する）の均時差曲線を表す。この場合の太陽の動きは平均太陽の動きと同じであるため，太陽時と平均太陽時の時刻差を表す均時差はゼロとなる。曲線２は，e=0.0167，ε=0，P=365.2422（日）のときの均時差を表す。この曲線から，地軸の傾きがゼロ（太陽は地球の赤道上を周回する）でも，離心率ｅがゼロでなければ（公転軌道が円軌道でなければ）均時差が生じることがわかる。曲線３は，e=0，ε=23.4（度），P=365.2422（日）の時の均時差曲線であり，離心率がゼロ（地球の公転軌道が円軌道）でも，地軸が傾いていれば均時差が生じることを示す。曲線４は，e=0.02，ε=23.4（度），P=365.2422（日）の時

図 2. 桃花台の日時計

の均時差曲線を，曲線 5 は，e=0.0167，ε=23.4（度），P=362（日）の時の均時差曲線である。曲線 5 から，均時差曲線の形は公転周期 P の値によっても変化することがわかる。

図 1 から，均時差を表す理論曲線の形は，離心率 e と地軸の傾角 ε および公転周期 P の大きさによって変化することがわかる。逆に，e と ε および P の値をいろいろ変えて得られる均時差曲線の形が，一年近く継続観測して得られた均時差のデータと合致するとき（このような曲線を最適曲線という），その曲線を与えるパラメーターの値は，観測データから測定した離心率 e と地軸の傾角 ε および公転周期 P の測定値となる。

4. 日時計を利用した地球公転軌道の離心率測定

図 2 の写真は愛知県小牧市桃花台（東経 136.99 度，北緯 35.30 度）にある日時計である。2017 年 4 月 18 日から 2018 年 2 月 8 日までの約 300 日間，午前 11 時にこの日時計の示す時刻と腕時計等で測った JST の時刻の差を継続観測して得られたデータが図 3 である。この図を見ると，2 種類の時計の時刻差には年周変化があることがわかる。

ここで図 3 の観測データを解析するために，第 3 章で説明したように時刻差の曲線の形を決める 3 個のパラメーター（離心率 e，地軸の傾角 ε，公転周期 P）の値を変化させて，図 3 の観測データを最もよく再現する曲線（最適曲線）を求める。具体的には，観測データと時刻差曲線の差の 2 乗の和が最小になるように 3 個のパラメーター（実際には，後述する時差補正 τ を含めて 4 個のパラメーター）を推定する。この手法を最小二乗法という。このような方法で求められた最適曲線を図 4 に示した。

図 4 の曲線 1 は，3 個のパラメーター（e，ε，P）の値として，表 2 の測定値を選んだときの曲線である。曲線 2 は，曲線 1 に 9.49 分の時差補正 τ を一様に加えた時の時刻差曲線であり，

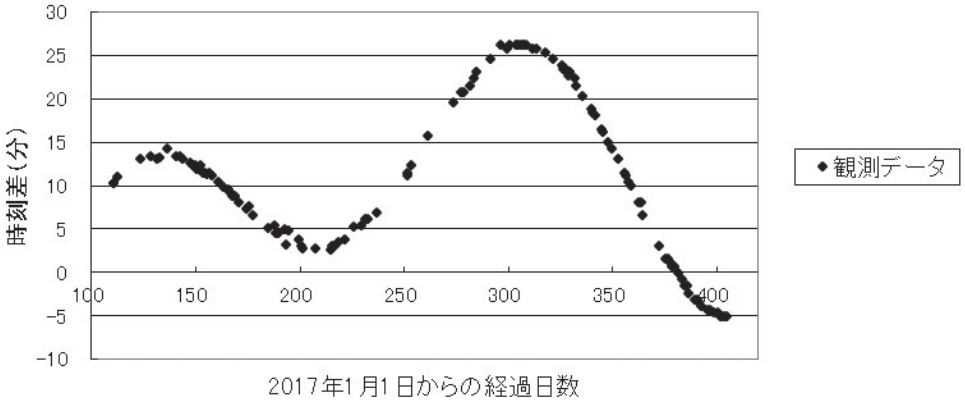

図 3．日時計と腕時計の時刻差

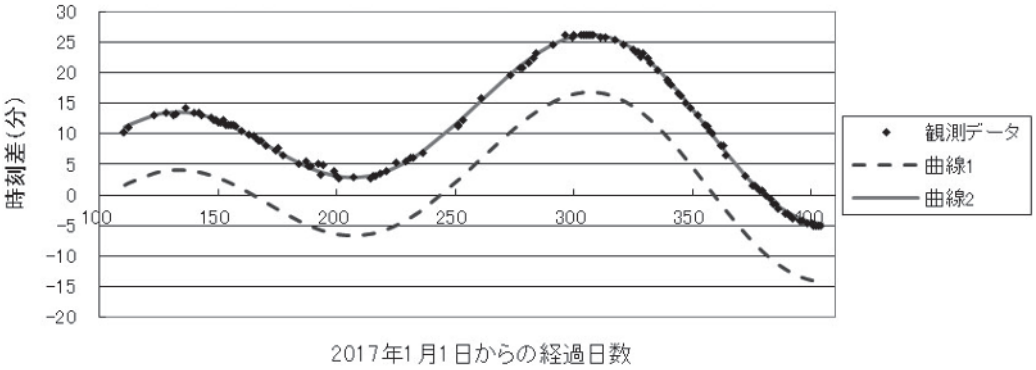

図 4．観測データの最適曲線

表 2．4 個のパラメーターの測定値

パラメーター	離心率 e	傾角 ε（度）	公転周期 P（日）	時差補正 τ（分）
測定値	0.0165	23.7	365.3	9.49
文献値 [5]	0.0167	23.4	365.2422	注 4）参照

それは観測データを最もよく再現する最適曲線である。

日時計と JST の時刻差に，表 2 の時差補正 τ が現れたのは次の理由による。日時計が表示する時刻はその日時計が設置されている地点での真太陽時であり，均時差はこの地点での平均太陽時と日時計が表示する真太陽時との時刻差であった。しかし，平均太陽は仮想上の太陽であり平均太陽時を観測によって測定することは不可能である。曲線 1 は，離心率 e と地軸の傾角 ε および公転周期 P が表 2 の測定値であるときの午前 11 時における平均太陽の動きを理論

的に求めて[6]，そのときの平均太陽が示す（はずの）平均太陽時と実際の日時計が示す時刻の差を表示した曲線である。

一方，JST は東経 135 度の地点を基点にした日本標準時であり，協定世界時（UTC）に 9 時間を足した時刻である。また，協定世界時は平均太陽時を基準にした世界時（UT 1）と近似的に同じ時刻（0.9 秒以内のズレ）を示す時刻系である，従って，UTC は近似的には経度 0 の地点における平均太陽時であると言える。これはまた，日本標準時は，東経 135 度の地点における平均太陽時であることを意味する。日本標準時と日時計が設置してある地点の平均太陽時には，両地点の経度差による時差（平均太陽時の時差）がある。この時差が表 2 の時差補正 τ である。時差補正 τ の測定値 9.49 分を経度差に直すと 2.37 度となる。

5. 考察

日常何気なく使用している時刻にもいろいろな時刻系が存在し，それらは天文現象由来の時刻系と天文現象以外の周期的な物理現象由来の時刻系に大別できる。様々な時刻系の中で，身近な装置を利用して測定できる時刻系としては，天文現象由来の時刻系である真太陽時と物理現象由来の時刻系である日本標準時がある。真太陽時は地球の公転運動と自転運動に起因する太陽の動きを基準にした時刻系であり，日本標準時は精度が高く一様な進み方をする原子時に基準を置く時刻系であった。

真太陽時の時刻を日時計で継続観測し，日本標準時の時刻と比べた結果（図 4），

1）この 2 種類の時刻系の時刻には差があること

2）その時刻差は季節によって変動すること

が明らかになった。

時刻差が生じる要因としては，公転軌道を移動する地球の速さの季節変動と，地軸が傾いていることにより太陽の赤緯（正午の時の太陽の高度）の季節変化がある（図 1）。図 3 の観測データを最もよく再現する最適曲線（図 4）を与えるパラメーターの値が表 2 の測定値である。表 2 に与えられているパラメーターの大きさは，観測データから求めたそれぞれの値であるから

3）地球軌道の離心率 e と地軸の傾角 ε および公転周期 P

が測定できたことになる。

さらに時差補正 τ の大きさが測定できたことにより，今回の観測の副産物として

4）日時計の置かれている地点と日本標準時の基点との経度差[4)]

を求めることができた。以上が今回の観測結果である。

地球の公転軌道の離心率を測定することは，天文学の基本的な法則であるケプラーの第 1 法則と第 2 法則を検証するという意味で重要であり，また地球の公転軌道が楕円であることを自分で取ったデータから確かめるという意味で大変興味深い。今回は，日時計で測る真太陽時と腕時計等で測る日本標準時の差に注目して，その差の季節変動を観測することで地球の公転軌

道の離心率が測定できることを実際の観測例で示した。これは日時計を利用した天文学という意味での‘日時計’天文学の成果であり，その結果は日時計を利用した天文学の有効性を示すものである。

最後に，この研究ノートで報告した観測のポイントは，高い精度で時刻を刻む標準時の存在と，地球の自転による太陽の日周運動を忠実に反映する日時計の存在があり，日時計の時刻表示に反映された地球の公転速度のわずかな季節変化を，精度の高い原子時を使用して測定したことである。この研究ノートで取り組んだ課題は，天文現象由来の時刻系と，天文現象とは別の周期的な物理現象由来の時刻系という，独立した基準に基づく時刻系の存在が可能にした観測テーマであることを強調しておきたい。

注

1）地球が太陽を 1 公転する間に，恒星は 366.2422 回南中し，太陽はそれより 1 回少ない 365.2422 回南中する。従って，次の関係

$$1\text{ 恒星日} \times 366.2422 = 1\text{ 太陽日} \times 365.2422$$

が成り立つ。

2）世界時 UT には，恒星時から求めた世界時 UT 0 と，UT 0 に地球の極運動に起因するズレを補正して得られた UT 1 がある。さらに，UT 1 に地球自転運動の季節変化を補正した UT 2 もある。本文で登場するのはこのうちの UT 1 である [7, 8]。

3）均時差は正確には，平均太陽時と真太陽時の差であるが，平均太陽を実質的に表示する UT 1 と，UTC の差は 0.9 秒以内に保たれているので，UTC を平均太陽時とみなすことができる。

4）観測データから求めた経度差は 2.37 度であるが，これは実際の経度差 1.99 度（136.99 度－135.00 度）よりも 0.38 度大きい。この差を時間に直すと 1.52 分に相当する。この差の原因はまだ不明であり，それが測定誤差によるものか，それとも使用した日時計の時刻表示の誤差によるものであるか，を明らかにすることは今後の課題である。

参考文献

[1] 仁田野竜太，朔望月の季節的変化を用いた地球の公転周期の測定，第 14 回日本物理学会 Jr. セッション（2018）.

[2] 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）.

[3] 産業技術総合研究所，「イッテルビウム光格子時計が新しい秒の定義の候補に」，産業技術総合研究所（2012），http://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/ 2012 /nr 20121101 / nr 20121101.html.

[4] 青木信仰，時と暦，東京大学出版会（1982）.
[5] 天文年鑑編集委員会，天文年鑑 2018 年版，誠文堂新光社出版（2017）.
[6] 表實，「インターネット望遠鏡の魅力と応用例」，慶應義塾大学インターネット望遠鏡プロジェクト（2018），http://www.kitp.org/.
[7] 長沢工，天体の位置計算　増補版，地人書館（1985）.
[8] 情報通信研究機構，「うるう秒実施日一覧」，日本標準時グループ（2018），http://jjy.nict.go.jp/QandA/data/leapsec.html.