

木星の衛星イオと光速度

～イオの公転周期変動を確認した～

谷田 瑞季 大熊 由貴子 磯崎 日奈子 萩谷 昇平
指導教員 岡崎 裕

要約

1676年、レーマーは木星の衛星イオを用いて世界で初めて光速度が有限であることを示した。私たちは彼の方法に従い、2012年秋から約半年間、学校の機材を用いて観測し、どれほど精度高く光速度を出せるかに挑戦した。観測で得た6回の食の画像データ（計1758枚）を1枚ずつ測定し、グラフを出した。そして正確な食時刻を求めて、光速度を出すと大きくばらついた。そこで光速度を定数としてイオの公転周期を求めると、半年間で約9秒変動していた。この結果は想定しないものであった。この結果は、探査機による宇宙開発にとって、イオの運動の理論を検証できる観測となる。

Abstract

In 1676, Rømer found that the speed of light is not infinite. He used the difference in the expected time and actual time of Io's eclipse behind Jupiter to calculate it. We tried to repeat his experiment using our school's observatory over about a half year from 2012, following his method.

We photographed the position of Io 1758 times over 6 orbits, and so 6 eclipses were included. From this data we got the exact eclipse time from graphs, and calculated the speed of light from each of these eclipses. The results were not the same, even considering the change in viewing angle from the Earth over 6 months. We calculated the orbital period of Io as a fixed value from the speed of light, and we found it changed about 9 seconds over a half year. We didn't assume this fact. This result can be inspected by gathering information with space probes.

キーワード 木星とイオ, 光速度, 公転周期

Keywords Jupiter and Io, speed of light (light velocity), orbital period

1 序論

光は一瞬で届くために、その当時、その速さは無限であると考えられていた。17世紀に入りガリレオらにより実験が行われたが、当時は精密な時計や実験器具が揃っておらず、地上の実験で光速度を決めることは不可能であった。他方、天体の運動、例えばイオの公転運動は精密な時計として利用され、これらの天体の動きを観測することが当時の天文台の大きな仕事になっていた。レーマーはこの時代にバリ天文台で職を得て、イオの食などの天体観測に従事した。

1676年、レーマーは初めて光速度が有限であることを示した。当時は、時計の正確さも、望遠鏡の精度も現在

と比べるとあまり良いものではなく、しかも肉眼での観測でカメラなどなかった。

このような状況の中で、レーマーは素晴らしい着想に基づいて光速度を求めた。そこで、私たちは天文台の機材を使い、観測方法・解析方法を工夫することでどこまでの精度で光速度を出せるか挑戦した。また、現在約30万 km/s と分かっている光速度と比較してその成果を評価することを研究目的とした。

2 本論

2.1 レーマーの方法について

レーマーの方法の原理を、図1を用いて説明する。木

星の衛星イオが木星の後ろに伸びる影（食）から出る時刻を地球で観測し、この時刻を食時刻 t_1 とする。その次に、イオが木星の周りを1公転（公転周期 P 秒）して次の食が観測できる時刻を食時刻 t_2 とする。このとき、木星も公転し、影の位置が変化するため、イオが62.4秒だけ余分に公転した時刻で観測される。つまり、

$$t_2 - t_1 = P + 62.4 \quad (\text{秒})$$

の関係があると考えられる。

しかし、実際に観測される食時刻には「ズレ」が生じた。「ズレ」を α 秒とする。この「ズレ」の原因は、最初の食と次の食までに地球も木星も公転するため、地球—木星間の距離が変わる。その距離の差 ($R_2 - R_1$) の分だけ“光”が (α 秒) 遅れて届くためであった。つまり、

$$t_2 - t_1 = P + 62.4 + \alpha \quad (\text{秒})$$

の関係になる。

そこで、速さ = 距離 ÷ 時間の式で光速 (c) が求められることになる。

$$c = (R_2 - R_1) / \alpha$$

この方法を使って、私たちも観測から開始した。

※) イオの公転周期 × (イオの公転周期 / 木星の公転周期) = 62.4 (秒)

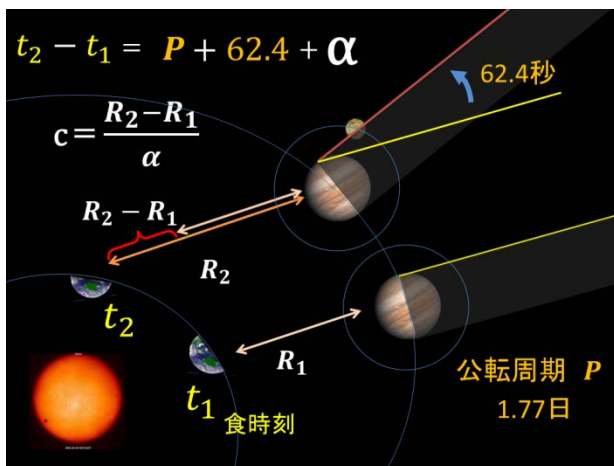


図1 レーダーの考え方

2.2 観測

金光学園天文台で木星とイオの観測を行い、6回の解析可能な食の画像（合計1758枚）を得た。

①金光学園天文台の機材と観測条件

★使用望遠鏡

CELESTRON C-14 主鏡有効径：355.6mm

焦点距離：3910mm (画像1)



画像1 木星とイオ

★使用カメラ Canon EOS 7D EOS 60Da

(デジタル一眼レフカメラ)

※) 私たちは専門的な機材に詳しくなかったため、私たちでも扱える一眼レフカメラを用いた。

★使用時計

- ・カメラに内蔵の時計で、自動で画像ファイルに書き込まれる。
- ・時刻合わせは、携帯電話の時報を耳で聞きながら使用直前に合わせた。
- ・数字では表せないが、時刻の誤差は1秒より充分に小さくしてある。

②「ゆらぎ対策」とカメラの設定

カメラの設定に関しては試行錯誤を繰り返し、露出時間は1秒、撮影間隔は4秒で行った。

- 木星の縞模様が見える露出時間 (1/30 秒) で撮影すると、「イオ」は写らなかった。(画像2)



画像2 木星 (露出 1/30 秒)

b. 「ゆらぎ」対策で、露出時間は1秒とした。(画像1)今回はイオの明るさの測定(測光)が目的なので、時間を長くして、十分にゆるがせて撮影することにし、露出は1秒とした。カメラの露出時間は1/8000秒まで設定できるので、露出時間の精度は充分ある。

c. カメラの処理能力への対策

撮影間隔は短い方がより観測の精度を上げられるが、2秒間隔で撮影すると、「busy」表示が出て撮影が止まってしまった。カメラの処理能力との関係で試行錯誤の結果、最終的には1秒露出で3秒閉の4秒間隔で、sRAW設定で撮影した。

③観測計画と実績

a. 32回の観測を計画し、13回の観測が実現(画像3)9月から3月までの約半年間に32回のチャンスがあった。しかし、天候や学校行事の関係で可能な回数が減少し、結局13回観測を行うことができた。



画像3 観測風景

b. 6回分の解析可能な食データ、合計1758枚の画像が得られた。なお、観測ができて、「薄曇りで良い結果が得られない」、「カメラの設定に無理があり途中で止まっていた」、「ピントが甘くて使えない」などの理由で当初は苦戦したが、6回分の解析可能な食データを得ることができた。撮影日時等は表1の通りである。それぞれの食で撮影された画像は200枚を超え、合計枚数は1758枚になった。

表1 観測結果—6回分の食の画像

撮影日時	12.9.26	12.10.20	12.11.12
枚数	226枚	204枚	367枚
撮影日時	13.1.22	13.2.21	13.3.9
枚数	360枚	295枚	306枚

c. 6回分の食の観測は図2のような地球と木星の関係で観測されている。前半3回は「消滅」の観測、後半3回は「出現」の観測である。

※) 消滅(影に入っていくとき)

出現(影から出てくるとき)

d. 「消滅」または「出現」の時刻は「天文年鑑」の予報(分単位)から得、その時刻を挟んで前後10分以上にわたり、1秒露出・3秒閉の4秒間隔で、sRAW設定で連続撮影した。

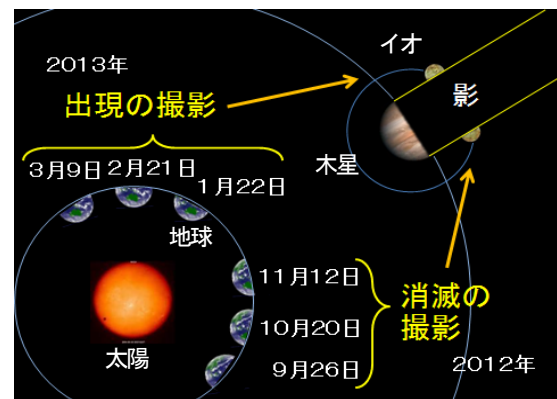


図2 地球と木星の位置関係

2.3 解析

①解析の手順

観測で得ることができた1758枚の画像データを用いて、解析を行った。

a. 「ステライメージ」というソフトウェアで、すべてのRAW画像をFITS画像に変換。

(次の「マカリ」では、FITS画像でないと使えない。)

b. 国立天文台作成ソフトウェア「マカリ」を使用し、すべてのFITS画像を元に、イオの測光(光度測定)を行う。

c. 測光結果をもとにEXCELでグラフ化(図3)し食時刻の決定をする。

d. 食時刻を元に光速度を計算する。

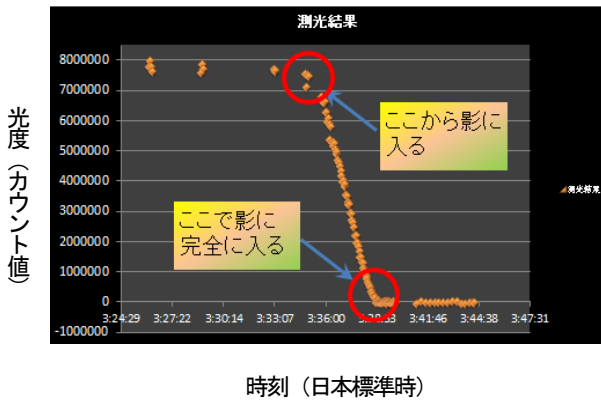


図3 食のグラフ 9/25 の説明 (消滅のグラフ)

②食のグラフについて

- 図3のように、グラフの縦軸はイオの明るさ(測光カウント値)、横軸は日本標準時を表している。
- 図3のグラフのカウント値が大きい部分ではイオがまだ木星の影に隠れておらず、曲線の上の部分の角から次第に影に入っていく、カウント値が小さい部分の角になると完全に影に入っているということを表している。影に入り始めてから完全に隠れるまでに約3分かかる。これはイオが大きな衛星であるからだ。

③食時刻の決定

- グラフをもとに食時刻を求める(図4)
 グラフ左下部のイオが木星の影に入っているときのカウント値の平均をとる。そして、グラフ右上部の完全に影から出たときのカウント値の平均をとる。この2つの値のちょうど真ん中のカウント値の時刻を食時刻と定義した。
- ※) グラフの影から出始めたときや完全にでてしまうときなどの角の時刻を食時刻とする事も可能だが、グラフを見ると角はシャープではない。理由は、太陽に大きさがあり半影の状態があること、また木星は気体の惑星なので縁がシャープでないことがあげられる。そこで、上のような食時刻の決定とした。たとえば、月の出などの時刻は、ちょうど半分出たときで決められている。

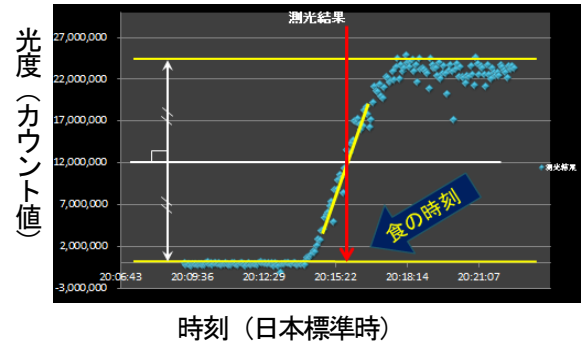


図4 食時刻の決定(出現のグラフ)

- 6回分すべてのデータにおいて行った結果はこの表のようになった。(表2)

表2 6回分のデータのまとめ

日付	食時刻	時間(秒) $t_2 - t_1$	木星との距離 ($\times 10^6$ Km)	距離の差 (Km) $R_2 - R_1$
2012/9/26	3:37:02	2140770	6.9502200	-48696063
2012/10/20	22:16:32	1987889	6.4638593	-29682716
2012/11/12	22:28:01		6.1670322	
2013/1/22	19:46:40	2599784	6.6735697	68569485
2013/2/21	21:56:24	1376362	7.3592645	38411901
2013/3/9	20:15:46		7.7433835	

※) 表中の「木星との距離」は国立天文台暦象年表から求めた値である。

- 精度約5秒で食時刻を求めることができた。
 それぞれの食の観測は1回しかできないが、解析の人を替えて独立に何度か解析を試み、食時刻の誤差を求めようとした。6回分の食の観測からそれぞれ図4のようなカウント値のグラフができるが、測光的に安定した観測では精度は約2秒であったが、やや条件の悪い観測の場合まで含めると、精度は約5秒であった。

2.4 光速度の計算

2.1に記載したレーマーの方法は、食から公転1回の次の食までの関係で説明をしたが、実際には今回の観測では9~17回(n 回とする)したところで次の観測ができている。

①光速度を求める式をつくった

2.1に記載したレーマーの方法で示した式をもとにイオの公転回数 n 回を入れて、

$$t_2 - t_1 = n(P + 62.4) + (R_2 - R_1)/c \quad \dots \text{式1}$$

(t : 食時刻 n : 公転回数 P : イオ公転周期
 R : 地球-木星間距離 c : 光速度)

この式1を基本の関係式として、光速度 c を求める。

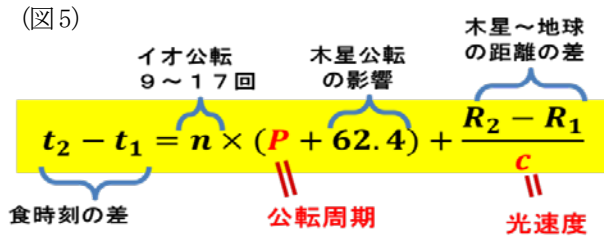


図5 私たちが用いた式の説明

②計算に使用したデータについて

a. 食時刻 t

観測・解析で得た消滅3回分と出現3回分の計6回分の食時刻から、食時刻の差の計算なので、消滅3回分から2つの計算、出現3回分から2つの計算で、計4つの光速度データを求めることができた。

b. 公転回数 n

私たちの観測では、イオが影から出てくるところの観測から再びイオが影から出てくるところを観測する間にイオが9~17回転しているため、 $P+62.4$ 秒に9~17を掛けなければならない。

c. イオ公転周期 P

現在最も信頼されている公転周期の値は、次ゴールドスタインの論文(1973)にある152853.5秒で、この値を代入して光速度を求めた。

d. 地球-木星間距離 R

国立天文台作成のホームページ「暦象年表」より、地球-木星間距離の値を得た。

2.5 結果

①光速度計算の結果は大きくばらついた

光速度計算の結果は表3のようであった。現在定義されている光速度は約30万km/sだ。

9/26~10/2 と 10/2~11/12 の光速度の値は30万km/sと

は大きくかけはなれている。1/22~2/21 と 2/21~3/9 の光速度の値は30万km/sに近い値が得られた。このように、求めた光速度が32万km/s~165万km/sと大きくばらついた。しかし観測・解析の精度から考えてこの値のばらつきは誤差の域を超えているので、何か予期せぬ原因があるのではないかと私たちは考えた。

表3 求めた光速度
公転周期 152853.5 秒使用

	光速度の値
9/26~10/20	92.0万km/s
10/20~11/12	165 万km/s
1/22~2/21	32.1万km/s
2/21~3/9	32.3万km/s

②光速度の値をばらつかせた原因は公転周期?

a. イオの公転周期以外は影響が小さい

式1を検討すると公転周期 P には n が掛かっているので影響は大きく、その他の値は誤差を考慮したところで光速度に大きな影響はあたえない。そこで私たちは P 、つまりイオの公転周期が怪しいと考えた。

b. イオの公転周期 P を1秒小さくして計算すると光速度は大きく変化した

試しにイオの公転周期 P を、152853.5秒から152852.5秒と1秒小さくして計算すると、表4のように光速度の値は大きく変化した。特に10/2~11/12の光速度は500万km/s近く変化しており、レーマー法におけるイオの公転周期の影響はとて大きいことがわかった。

表4 求めた光速度

公転周期 152852.5 秒使用

	光速度の値
9/26~10/20	126 万km/s
10/20~11/12	631 万km/s
1/22~2/21	29.7万km/s
2/21~3/9	30.0万km/s

③光速の値から逆に公転周期を計算すると変動していた

- a. 速度から公転周期を求めると約9秒の差
 計算式の c に定義された光速 299792.458 km/s を入れ、公転周期 P を計算した結果を表5にまとめた。
- b. イオの公転周期は精度約1.2秒で求めたので、公転周期は変動していると考え他はない。
 はじめ、約9秒の差はわずか6桁目の数字で0.006%分なので、これは私たちの観測・解析の誤差の可能性を考えたが、私たちが行った公転周期計算の精度は約1.2秒なので、誤差の域を超えている。つまり、公転周期は変動していると考え他はない。

表5 私達が計算して出した公転周期

	公転周期(秒)
2012/9/26	152861.3
2012/10/20	
2012/11/12	152859.8
2013/1/22	152852.6
2013/2/21	
2013/3/9	152852.5

- c. 精度約1.2秒の根拠
 式1より、食時刻は精度約5秒なので $t_2 - t_1$ は、最大10秒の誤差。
 式1から、 P を求めるにはこの最大の誤差10秒を n 回で割る必要がある。
 公転回数は、9回~17回で、最小値が9回であったため、精度は $10 \text{ 秒} \div 9 = \text{約} 1.2 \text{ 秒}$

2.6 考察

①イオ公転周期変動を裏付ける論文があった

イオの公転周期についていろいろな先生方に聞いた本やネット上の情報を調べたりしてみたが、どの資料「公転周期一定」を前提に書かれていた。レーマー法の計算も「公転周期一定」として計算されていたため、私たちは公転周期が一定と思い込んでいた。

しかし、天体力学の権威者である 国立天文台名誉

教授 木下宙先生 に教えていただいた結果、イオの公転周期変動の可能性を示す論文があることがわかった。

Lieske, J, H, 1998, Astron, Astrophys, Suppl, 129, 205-217

リースキー氏の論文ではイオの軌道が近似式で示されている。私たちが求めたような数字が直接書いてあるわけではないが、イオの公転周期変動があることは間違いなきことがわかった。

②天文シミュレーションソフトでイオ公転周期変動を確認。天体力学の最新の成果を取り入れた「ステラナビゲータ」

天体の動きを予報しているアストロアーツの天文シミュレーションソフト「ステラナビゲータ」が天体力学の最新の成果を取り入れて作られていることがわかった。メールで問い合わせたところ、次の本を参考にしてという回答をいただいた。

「Astronomical Algorithms」 - Jean Meeus / Willmann-Bell, Inc. 1991
 この本の中に、前述のリースキー氏の論文が入っているそうだ。

③公転周期が変動していることを示したグラフ

「ステラナビゲータ」の画面上で、イオの食から食時刻を読み取り計算してみると、図6のようにイオの公転周期が複雑な周期変動をしている様子を描くことができた。

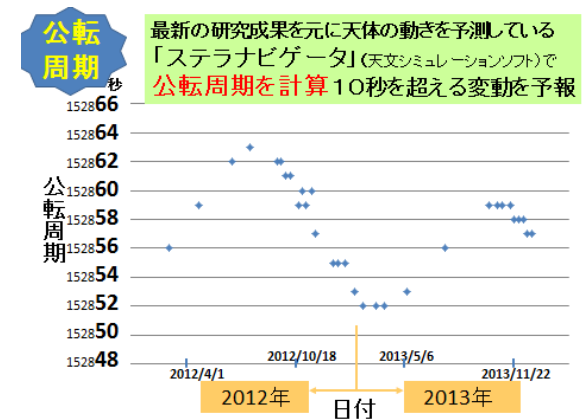


図6 ステラナビゲータによる公転周期

図6の結果から、2年間で10秒を越える変動をしていることが分かった。そして、私たちが求めた公転周期の4つの値を、図7のようにグラフに重ねてみるとかなり良く一致した。これにより私たちの観測・解析の結果は正確であったことがわかった。

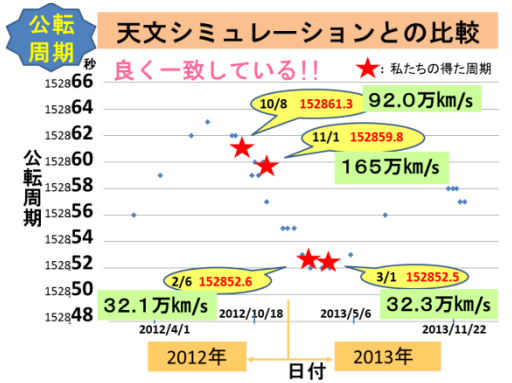


図7 ステラナビゲータとの比較

④計算の結果くばらつきの原因>

光速度を出すときに使ったゴールドスタインの公転周期の値（一定としたときの値 152853.5 秒）とも図8のように比較をしてみた。

光速度が定義されている約30万km/sに近い32万km/sの値が出た期間は、計算に使用した公転周期の値「一定としたときの値 152853.5 秒」が、実際の公転周期の値に近い値であったため、30万km/sに近い値が出た。しかし、「光速度 165 万 km/s」が出た期間は、計算に使用した「一定の値 152853.5 秒」が実際の公転周期の値と大きく違っていたためであると考察することができる。

光速度計算の結果のばらつきの原因は、イオの公転

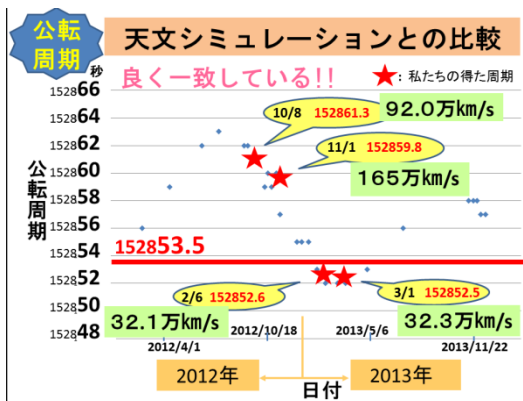


図8 公転周期と光速度のグラフ

周期が実際には変動しているのに、一定値を使用して計算していたことにあった。

⑤ レーザー法とイオ公転周期変動

レーザー法で光速度を求めるには、わずかな公転周期の変動が非常に大きく影響することが分かり、レーザー法で光速度を求めるには、イオの公転周期変動を正確に知る必要があることがわかった。

レーザーは、公転周期一定を前提として光速度を計算していたが、数十回に及ぶ食データを使って光速度を求めたため、観測データの多いことから平均操作で精度を出していたと思われる。

⑥公転周期変動の原因を考察する

天体力学専門の先生によれば、「摂動」（重力の影響）により、イオ・エウロパ・ガニメデの衛星間で互いに軌道運動に共鳴が現れ、公転周期が1:2:4という整数比になっている「ラプラス共鳴」という現象が成り立つらしい。大きくは木星の強力な重力の元で、これらの衛星の公転周期は安定したものになっている。しかし、土星・太陽の影響やイオのすぐ外側を回っているエウロパやガニメデの影響も受けながら、小さな周期変動が起きているらしい。

⑦探査機時代の学問的貢献の可能性

光速度を出すことで、金光学園天文台で可能な精度を評価する予定だったが、公転周期変動という事実直面し、逆にイオの公転周期の6桁目の変動を明らかにできる精度が出せたことが確かめられた。

私達がイオの公転周期変動を詳しく観測することは、現在多くの惑星探査機などが計画され、信用できる位置情報と運動の予報が必要な中、理論を観測で検証する学問的な貢献となる可能性があると思えた。

3 結論

①金光学園天文台の機材による観測で、精度約5秒でイオの食時刻を確定できた。

- ②精度約 1.2 秒でイオの公転周期変動を確認し、その結果は天体力学の最新成果を使った天体シミュレーションソフトの予報と良く一致した。
- ③レーマー法で光速度を求めるには、イオの公転周期変動を正確に知る必要があることがわかった。
- ④正確な光速度は得られなかったが、金光学園天文台の機材で、イオの公転周期 6 桁目の変動を明らかにできる精密な観測・解析ができることを示す事ができた。
- ⑤私達がイオの公転周期変動を詳しく観測することは現在、多くの惑星探査機などが計画され、信用できる位置情報と運動の予報が必要な中、理論を観測で検証する学問的な貢献となる可能性がある。

参考文献

「理科年表」(国立天文台)

「天文年鑑」(誠文堂新光社)

Goldstein et al. 1973,

Astronomical Journal, 78, 122

Lieske, J, H, 1998, Astron,

Astrophys, Suppl, 129, 205-217

「Astronomical Algorithms」 -

Jean Meeus / Willmann-Bell, Inc. 1991

謝辞

ご協力に感謝いたします。

元国立天文台岡山天体物理観測所所長 前原英夫 先生

大阪教育大学名誉教授 定金晃三 先生

国立天文台名誉教授 木下 宙 先生