

令和 4 年 6 月 25 日現在

機関番号：55301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K01002

研究課題名(和文) 未来のガリレオ育成のための天文教育 - 食連星の観測と光度曲線解析 -

研究課題名(英文) Astronomy Education for the Training of Future Galileo - Observation of Eclipsing Binary Stars and Light Curve Analysis -

研究代表者

佐々井 祐二 (Yuji, Sasai)

津山工業高等専門学校・総合理工学科・教授

研究者番号：40235239

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：天文教育のため、小中学生を対象とする公開講座としての「天体観測会 君も未来のガリレオだ！」を12回開催した。望遠鏡操作係を担当する補助学生はこれらの公開講座により相互教育されている。我々は食連星の測光解析も行い、IU Perの新しい光度曲線を提示した。分光データによる視線速度は、口径1mの望遠鏡でも取得が困難である。そこで、視線速度の代わりに、類似星のデータからスケールを取り入れ、IU Perの物理量をWilson-Devinneyコードを用いて計算した。その結果、IU Perは質量の小さい成分星がロッシュローブを埋めている半分離系であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小中学生と本校学生を「未来のガリレオ」に教育することで、科学技術立国日本の将来を担う人材育成の一助となる。小中学生と保護者対象の天体観測会では観測体験と共に組立望遠鏡、ペーパークラフト及び簡易分光器の工作などで天文の世界に触れることができた。望遠鏡操作係を担当する補助学生は相互教育に加え、Wilson-Devinneyコードを用いる食連星の光度曲線解析により、高度な天文教育を実践した。分光データによる視線速度は取得が困難であるので、その代わりに、類似星のデータや質量光度関係からスケール導入を試みた。つまり、教育現場やハイアマチュアの活動で得られる貴重な測光観測データの有効活用法を提示した。

研究成果の概要(英文)：We have held twelve sessions of open lectures entitled "Astronomical Observation Meeting - You are a Future Galileo, too! -" for elementary and junior high school students. These open lectures educated assistant students who operated telescopes. We also made the photometric analysis of the eclipsing binary stars. A new photoelectric light curve of the IU Per is presented. The radial velocity due to spectroscopic data is difficult to obtain, even with a 1-meter diameter telescope. Therefore, we try to incorporate the scale from similar stars' data instead of the radial velocity. Physical quantities of the IU Per were computed using the Wilson-Devinney code. Results reveal that the IU Per is a semi-detached system with the less-massive component filling its Roche lobe.

研究分野：天文教育、天文学

キーワード：天文 公開講座 測光解析

1. 研究開始当初の背景

津山高専天体観測室

研究代表者は、平成 20～22 年度の科学研究費と校費により、平成 21 年 3 月、口径 35cm シュミットカセグレン式望遠鏡（経緯台式）と口径 4cm H α 太陽望遠鏡を装備する東天体観測室（図 1）を津山工業高等専門学校（以下、本専）の校舎屋上に構築した。また、平成 23～25 年度の科学研究費と校費により、平成 24 年 3 月、口径 35cm ACF 鏡筒を大型赤道儀に同架させた西天体観測室（図 2）を校舎屋上に構築した。本校 3 年 4 年自発的学習科目全系横断演習および卒業研究の学生と共に、様々な天文教育研究活動を行っている。



図 1 東天体観測室の赤道儀式望遠鏡

地域貢献としての未来のガリレオ育成活動

イタリアの科学者ガリレオ・ガリレイが初めて望遠鏡を夜空に向け、宇宙への扉を開いた 1609 年から 400 年後の節目の年、世界天文年 2009 から小中学生対象の公開講座「天体観測会—君も未来のガリレオだ！—」を年 4、5 回行っており、受講生から 100% 近い肯定的評価を得ている。さらに、津山市公民館から依頼された「天体観測教室」も実施しており、小中学生と保護者を対象にした天体観測会は 42 回となった。簡単な天文学習も行うため、受講生には毎回学習資料を配付している。本校は、津山地域の天文教育センターとして、地域の小中学生を一人でも多く「未来のガリレオ」とするため、継続してより効率的な活動方法を探りたい。



図 2 西天体観測室外観

高専生に対する未来のガリレオ育成活動

天体観測会において、全系横断演習生が補助学生として望遠鏡操作係等を務める。例年、天体観測会は梅雨の前の 5 月に第 1 回を行う。そのため、4 月中旬から天文の基礎知識と天体望遠鏡の操作方法を急ぎ指導した上で第 1 回を迎える。初めて天体望遠鏡操作を行うと、学生は大変興味を持つが、観望だけでは長続きがしない。星雲や銀河は接眼レンズ越しには淡くしか見えないが、冷却 CCD カメラや一眼レフカメラで撮影し整約すると、綺麗に浮かび上がる。そこで、天文コースへの進学、あるいは本校卒業後も天体観測を続け、各地域で天文の草の根活動を行う「未来のガリレオ」達を育成するために、天体写真撮影やデータ解析を重視する。また、天体の 1/3 程度が連星と見積もられており、本研究では食連星の観測と光度曲線解析に取り組みたい。

2. 研究の目的

火星大接近や日食、月食などの天文現象は人々に宇宙への興味を喚起する。研究代表者は世界天文年 2009 を契機として、小学生から高専生までの年齢層を中心とする「未来のガリレオ」の育成活動を行っている。本研究では、平成 21 年度と平成 24 年度に構築した 2 つの天体観測室を利用し、食連星の観測と光度曲線解析により物理量を算出する高専生に対する天文研究と、天体観測会を通じた地域小中学生に対する教育や保護者に対する啓蒙活動を積極的に行う。今回の副題は「食連星の観測と光度曲線解析」である。食連星は恒星を理解するための情報源として非常に重要である。また、測光データや分光データも取得しやすいように天体観測室の改良を図る。宇宙・天文に対する興味を引き出すことで未来のガリレオ達を育成したい。

3. 研究の方法

小学生から高専生までの年齢層を対象とする天文教育を行うことにより「未来のガリレオ」を育成し、科学技術立国日本を元気にしたい。そのため小中学生には天体観測会を継続的に行い、天文への興味付けと観測体験を育む。高専生には天体観測会補助学生の他に食連星の観測と WD 計算コードを用いる光度曲線解析を行い、食連星の物理量を引き出す天文研究を行う。食連星の成分星半径などの比が得られる測光観測データの取得は比較的小口径望遠鏡で可能であるが、絶対値を得るための分光観測データの取得は口径 1 m クラスの望遠鏡であっても難しい。そこで、本研究では測光観測データに天文学の理論的および経験的知見を加えて、連星系理論に基づく光度曲線合成法により、対象食連星の温度、半径、質量、軌道傾斜角などの物理量の絶対値を引き出すことで、測光観測データの有効活用を図る。また、天体観測室と連携を図ることも目的として、校舎屋上に気象観測装置を置き、そのデータを校内 LAN 上で閲覧可能とする。

4. 研究成果

4. 1 天体観測会—君も未来のガリレオだ！—

世界天文年 2009 年より、地域の小中学生とその保護者を対象とする公開講座としての天体観測会を開催している。天体観測会の目的としては、本校の口径 35cm 望遠鏡、口径 25cm 望遠鏡、口径 4cm 太陽望遠鏡などを用い、様々な天体の様子を観察する、また、簡単な望遠鏡を自作す

るなど、興味をもって楽しみながら天文の世界に触れることとしている。2017年度～2019年度に開催した公開講座を表1～表3に示す。2019年度までで、本校公開講座「天体観測会」および津山市公民館「天体観測教室」を55回開催した。

表1 2017年度スケジュール

回	開催日時	テーマ	備考
1	5/29(月) 19:45～21:15	口径35cm望遠鏡で木星を見よう	月齢3.6、参加者47名 (受講生23名)
2	8/1(火) 18:30～21:00	夏休みスペシャル 手作り望遠鏡で月を見よう	月齢9.1、参加者48名 (受講生24名)
3	8/2(水) 19:45～21:15	津山市東苜田公民館「天体観測教室」 ～木星と土星を見よう～	月齢10.1、参加者24名
4	9/26(火) 19:00～20:40	口径35cm望遠鏡で土星を見よう	月齢6.2、参加者45名 (受講生20名)
5	10/25(水) 18:30～21:00	夏秋の星座を見よう 月球儀ペーパークラフト工作	月齢5.6、参加者44名 (受講生20名)

表2 2018年度スケジュール

回	開催日時	テーマ	備考
1	6/1(金) 19:45～21:15	口径35cm望遠鏡で金星と木星を見よう	月齢17、参加者41名 (受講生21名)
2	7/20(金) 18:30～21:00	夏休みスペシャル 手作り望遠鏡で月を見よう	月齢7.4、参加者47名 (受講生23名)
3	10/12(金) 18:30～20:00	口径35cm望遠鏡で土星と火星を見よう	月齢3.3、参加者48名 (受講生23名)
4	12/1(土) 13:30～15:30	分光器を作ろう、太陽望遠鏡をのぞいてみよう	太陽、参加者36名(受講生19名)

表3 2019年度スケジュール

回	開催日時	テーマ	備考
1	5/9(木) 19:45～21:15	春の星座と火星を見よう	月齢4.5、参加者48名 (受講生25名)
2	8/5(月) 18:30～21:00	夏休みスペシャル 手作り望遠鏡で月を見よう	月齢4.3、参加者47名 (受講生25名)
3	10/4(金) 18:30～20:00	口径35cm望遠鏡で木星と土星を見よう	月齢5.7、参加者35名 (受講生20名)
4	11/29(金) 18:30～21:00	夏秋冬の星座を見よう 月球儀ペーパークラフト工作	月齢2.8、参加者40名 (受講生21名)

小学生の場合、保護者同伴を要請している。小学生の受講生に対し、保護者に加え兄弟も参加することが多く、実際は受講生定員の2倍程度が参加している。なるべく沢山の天体を観測してもらうために受講生定員を20名としているが、少し多く25名程度抽選している。本校学術・社会連携推進事務室は近郊小学校に講座案内を配布するだけでなく、新聞のイベント案内にも掲載している。

実施体制は、教員1名、補助学生(望遠鏡操作担当、双眼鏡担当)として3年4年自発的学習科目全系横断演習生を約8名、受付や案内、記録写真担当として学術・社会連携推進事務室職員2名とした。教員は公開講座企画・準備と当日の星座解説・運営を行った。天候不良の場合は予備日を使用した。

単なる観測会でなく簡単な天文学習も行うため、受講者には毎回学習資料を配付している。当日のスケジュールとしては、観測会のみの場合には1時間半の公開講座とし、最初に大講義室にて、今夜の見所説明、諸注意、ミニプラネタリウム上映の後、参加者は屋上に上がり各種望遠鏡で約1時間程度観測し、最後にアンケートを採り終了となる。ただし、工作を伴う場合は1時間追加して、2時間半の公開講座としている。

アンケート質問項目8個の内、肝心の満足度「この公開講座を受けて良かったと思いませんか」は毎年100%近い肯定的評価が得られており、天体観測会開催の意義が感じられる。天体観測会の様子を図3と図4に示す。例年8月の公開講座はテーマ「夏休みスペシャル 手作り望遠鏡で月を見よう」としており、組立望遠鏡の工作もあり人気である。さらにペーパークラフトの月球儀工作も人気であるが、2018年度は代わりにテーマ「分光器を作ろう、太陽望遠鏡をのぞいてみよう」で図5のようなグレーティングシートを使った簡易分光器を工作し、各種光源のスペクトルを観察した。ただ、小学生にとっては月球儀工作の方が良さそうな印象を受けた。



図 3 天体観測会の様子
(2019年11月29日)



図 4 天体観測会の様子
(2018年6月1日)



図 5 工作した簡易分光器
(2018年12月1日)

4.2 食連星の解析(光度曲線解析、引用文献(1))

分光観測データがない状況で、教育現場やハイアマチュアの活動で得られる測光観測データから、物理量の絶対値を導出し、連星系の全体像を探りたい。ここでは、ペルセウス座の短周期食連星 IU 星 (IU Per) の解析を報告する。

短周期食連星 IU Per は公転周期が 0.8570257 日で、光度は最大 11.50 等、最小 11.6 等、スペクトル型が A4V、光度曲線の分類としてアルゴル型 (EA 型)、形状の分類 (ロッシュモデル) では半分離型 (SD 型) であるので、EA/SD 型に分類される。また、半分離型より、伴星から主星への質量移動による角運動量の減少から、長期的には周期の継続的な減少が予想される。

スペクトル型 A4V と同型の恒星である HR2285 と HR4632 の表面温度は 8375 K である。A4 型主系列星の研究データから、質量は太陽の 1.92 倍と推定される。これを $1.92 M_{\text{SUN}}$ (太陽質量単位) と表す。以下、SUN の付いている量は太陽基準量を意味する。

主星の質量を M_1 、伴星を M_2 とし、この連星間距離を a とする。成分星は共通重心の周りに円軌道を描くとする。一般化されたケプラーの第 3 法則

$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{G} \left(\frac{2\pi}{P} \right)^2 \text{ に成分星の質量比 } q = M_2/M_1 \text{ を導入すると、 } M_1(1+q) = \frac{a^3}{G} \left(\frac{2\pi}{P} \right)^2 \quad (1)$$

と書ける。太陽と地球の場合では、 $q = 0$ と近似すると、通常のケプラーの法則となる。太陽半径 $R_{\text{SUN}} = 6.9551 \times 10^8 \text{ m}$ 、 $P = 365$ 日、軌道半径は 1 天文単位、即ち $1.495978707 \times 10^{11} \text{ m} = 2.1509 \times 10^2 R_{\text{SUN}}$ より

$$M_{\text{SUN}} = \frac{(2.15 \times 10^2 R_{\text{SUN}})^3}{G} \left(\frac{2\pi}{365.3} \right)^2 \quad (2)、式(1)と(2)より \quad a^3 = \frac{M_1(1+q)}{M_{\text{SUN}}} (2.151 \times 10^2 R_{\text{SUN}})^3 \left(\frac{P}{365.3} \right)^2$$

を得る。

(3)

式(3)に、IU Per の主星質量 $M_1 = 1.92 M_{\text{SUN}}$ および、質量比 $q = 0.2738$ を代入して、連星間距離 $a = 5.12 R_{\text{SUN}}$ を得る。これが伴星軌道の半長径 SMA の値である。ここで、質量比については q -探索を試みたいが、ここでは Zhang 他 (2009) の値を使用している。伴星質量は $M_2 = q M_1 = 0.526 M_{\text{SUN}}$ となる。これでスケールを入れることができる。

PHOEBE (PHysics Of Eclipsing BinariEs) は米国ピラノバ大の Andrej Prsa が中心となって開発しているオープンソースソフトであり、光度曲線合成法 Wilson-Devinney (WD) コードを実装しており、研究用途に活用されている。以下、丸括弧内の量記号は PHEOBE 記号である。また、PHOEBE で出力された桁数の数字をそのまま記載する。

PHOEBE に対する入力データとしては、ユリウス日としての撮影日時 (HJD_UTC)、光度比 (V/C1)、誤差 (V_Error/C1) の 3 要素である。誤差の値は測光の時点で出力される V_Error を C1 カウント値で割ったものである。これらを読み込むと、内部処理によって横軸を位相とする光度曲線が PHOEBE 上に出力される。Excel では式を与えて位相を計算していたが、PHOEBE では自動で計算される。

表 4 IU Per の解析結果 (1: 主星、2: 伴星、T: 表面温度、i: 軌道傾斜角、q: 質量比、 Ω : 表面ポテンシャル、r: 相対半径、R: 成分星半径、a: 連星間距離、M: 成分星質量、左列は PHOEBE の記号、* は仮定、**は side の値)

	本報告	Zhang 他(2009)		本報告	Zhang 他(2009)
i	77.8°	77.8°	q	右を仮定	0.2738
T1	8375 K*	6450 K*	R1	1.74 R _{sun}	
T2	5042 K	4790 K	R2	1.36 R _{sun}	
Ω_1	3.28	2.9845	a	5.12 R _{sun}	
Ω_2	2.41	2.4076	M1	1.92 M _{sun}	
r1	0.339	0.3792**	M2	0.526 M _{sun}	
r2	0.265	0.2650**			

元期 (EPOCH) 2458465.96629 日と周期 (PERIOD) 0.8570251 日を設定すると光度曲線が表示される。チューニング前に定数として設定した数値は、主星の温度 (TAVH) 8375 K、質量比 (RM) 0.2738、連星間距離 (SMA) 5.116 である。成分星の表面重力や周辺減光などのパラメータは PHOEBE のデフォルト値を使用する。光度曲線を解析するためのフィッティング手法としては、Differential Corrections (差分補正) と最適化問題アルゴリズム Nelder & Mead' Simplex (ネルダー - ミード法) を使用する。

IU Per の解析結果を表 4 にまとめる。本報告と Zhang 他 (2009) の結果を並記する。

図 6 に光度曲線と赤線で描いたフィッティング曲線を示す。また、得られたパラメータにより PHOEBE 機能で描いた IU Per の形状 Star Shape を図 7 に示す。位相 0.25 の真横から見た状態を表している。縦横軸の原点が連星系の重心の位置であり、連星間距離を 1 とする相対値で描画されている。

IU Per の主星は太陽よりも巨大で温度も高い。伴星は半径が少し大きく、温度は太陽よりも少し低いことが分かった。また、主星は太陽の 2 倍に迫る質量でありながら、伴星は太陽の 1/2 程度ということも分かった。また、半分離型で伴星がロッシュローブを満たしているため、内部ラグランジュ点を通して伴星から主星への質量移動が起こり、角運動量の減少から長期的には周期の継続的な減少が起ることが予想される。

今後は、 q -探索および、詳細なスペクトル型から質量光度関係を通して主星質量の理論的予測を組み込むことで、測光観測データにスケールを入れる自己完結する方法で食連星の各種物理量導出を目指したい。

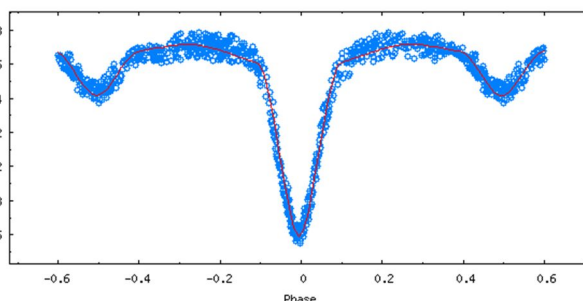


図 6 光度曲線とフィッティング曲線 (縦軸 V/C1、Johnson Ic フィルタ)

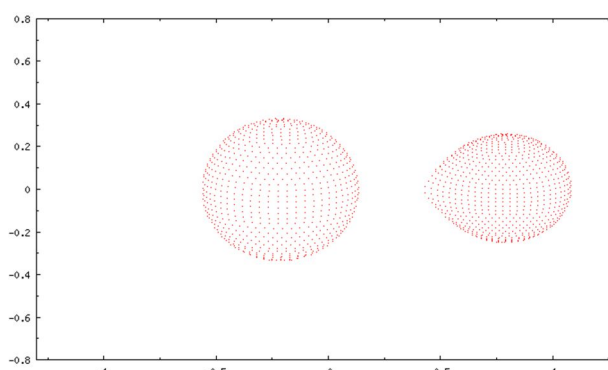


図 7 IU Per の模式図 (位相 0.25)

4.3 気象観測装置

天体観測には気象情報が欠かせない。教育目的も考え、卒業研究生と共同で Davis 社 Vantage Pro2 を使用する津山高専気象観測システムを構築した。校舎屋上の集積屋外センサで取得された室外温度、気圧、日照量などの気象情報は校内 LAN 経由で観測用 PC に転送される。気象情報管理ソフトウェア WeatherLink により生成されたリアルタイムな気象画像を Web サーバから公開している (図 8)。しかし、過去の気象変化グラフを表示できないので、希望日の過去データを表示できるように Perl による CGI スクリプトを作成した (図 9)。

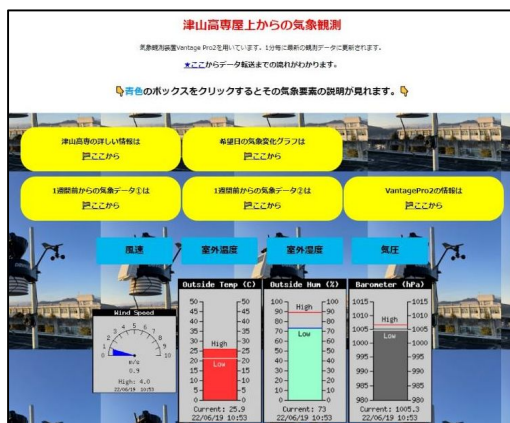


図 8 津山高専屋上からの気象情報発信 Web ページ

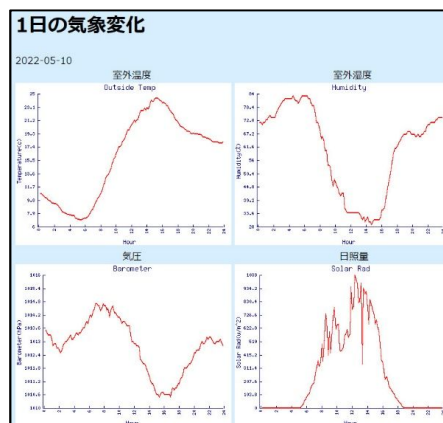


図 9 希望日の過去データ表示ページ

< 引用文献 >

- (1) 佐々井祐二、坪井元春、赤澤秀彦：半分離型食連星 IU Per の光度曲線解析、津山工業高等専門学校紀要、第 63 号、2022、33-37

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 佐々井祐二、坪井元春、赤澤秀彦	4. 巻 第63号
2. 論文標題 半分離型食連星IU Perの光度曲線解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 津山工業高等専門学校紀要	6. 最初と最後の頁 33-37
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 佐々井祐二	4. 巻 62
2. 論文標題 高専生のためのシュレーディンガー方程式の解法 - 水素原子 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 津山工業高等専門学校紀要	6. 最初と最後の頁 37-42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 佐々井祐二	4. 巻 34
2. 論文標題 ケプラー方程式による惑星運動シミュレータ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 天文教育研究会集録	6. 最初と最後の頁 271-274
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 佐々井祐二	4. 巻 61
2. 論文標題 ランダム行列理論の教育的利用へ向けて	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 津山工業高等専門学校紀要	6. 最初と最後の頁 37-42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 佐々井祐二	4. 巻 60
2. 論文標題 ケプラー方程式による惑星の会合計算	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 津山工業高等専門学校紀要	6. 最初と最後の頁 13-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 佐々井祐二, 赤澤秀彦, 大島修, 片山敏彦	4. 巻 59
2. 論文標題 PHOEBEを用いる食連星の光度曲線解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 津山工業高等専門学校紀要	6. 最初と最後の頁 73-78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 佐々井祐二
2. 発表標題 ケプラー方程式に基づく惑星軌道シミュレータ作成教育
3. 学会等名 2021年度応用物理・物理系 中国四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々井祐二, 坪井元春, 赤澤秀彦
2. 発表標題 半分離型食連星IU Perの物理量の導出
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々井祐二
2. 発表標題 Pythonプログラミングによる惑星軌道シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々井祐二
2. 発表標題 ケプラー方程式を基礎とする惑星軌道計算
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々井祐二
2. 発表標題 ランダム行列の教育的利用を目指して
3. 学会等名 令和元年度計測自動制御学会津山地区計測制御研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々井祐二
2. 発表標題 ランダム行列基礎の高専教育へ向けて
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々井祐二
2. 発表標題 ケプラー方程式による惑星の会合計算
3. 学会等名 第32回天文教育研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々井祐二
2. 発表標題 学校が開催する天体観測会の天候不良時対応について
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々井祐二
2. 発表標題 ケプラー方程式による惑星軌道計算
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々井祐二
2. 発表標題 津山高専の公開講座を活用した天文教育
3. 学会等名 日本天文学会2017年度秋季学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐々井祐二
2. 発表標題 高校物理で分かる食連星の物理量
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------