

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：10102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500818

研究課題名（和文） 金星の太陽面通過（2012 年）を理科教育教材に

研究課題名（英文） Transit of Venus as a theme of Science Education

研究代表者 岡崎 隆 (OKAZAKI TAKASHI)

北海道教育大学・教育学部・教授

研究者番号：20160666

## 研究成果の概要（和文）：

科学史解説一般に流布している金星太陽面通過観測による太陽視差確定法に対して、ハレーの原論文に基づいて彼のオリジナルな提案を解説しその相違を明らかにした。力学法則に基づくシミュレーション、視差による距離測定の教材検討、太陽観測・記録法の検討など理科（科学）教育の教材としての有用性、活用法を提示することができた。物理教育誌、大学の物理教育誌に解説論文を掲載し、報告・解説書を作成するなどこのテーマの理科教材としての普及に取り組んだ。

## 研究成果の概要（英文）：

We examine the method of determining the parallax of the Sun by Edmond Halley. In observing the transit of Venus at different positions on the Earth, the transit-times are different due to the parallax of Venus on the Sun. We carefully read the original paper of E. Halley in 1716 and find that he considered the effect of rotation of the Earth. We also study the origin of period of this phenomenon, repetition of 8 and  $113.5 \pm 8$  years and the way how to introduce these considerations in the science education.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
21年度	800,000	240,000	1040,000
22年度	800,000	240,000	1040,000
23年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2200,000	660,000	2860,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学

キーワード：金星太陽面通過、

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 金星の太陽面通過は珍しい天体現象であるが、太陽-地球間距離を確定するという科学史上重要な役割を担った現象でもある。この現象は 2004 年 6 月には百数十年ぶりで日本でも観測することができたが、この科学史上の意味・意義は今日ほとんど忘れ去られて

いる。ハレーによる太陽視差決定法として解説されることもあるが視差による距離測定についての安直な理解によって、彼のオリジナルな提案が誤って理解され解説されている状況にある。

(2) 金星の太陽面通過は 8 年の短周期と百年

を越す長周期を交互に繰り返しているが、この特異な周期性に十分な注意が払われておらずその要因が明確に解説されていない。

(3) 理科教育の題材としてこの現象が取り上げられることはまれな状況である。この現象が生ずる幾何学的条件・周期条件の考察は数理教育の題材として、また太陽系の科学的探究の歴史という側面から科学史の題材として価値があり理科・科学教育のテーマとして取り上げる今日的な意義がある。

## 2. 研究の目的

(1) 金星の太陽面通過現象に関してハレーが提案した太陽視差測定法を原論文(1716年)に基づき正しく読み取りその意味を明らかにする。

(2) 8年の短周期と百年を越す長周期を交互に繰り返す金星の太陽面通過の特徴的な周期の要因を解明し、周期現象を扱う理数教材として検討する。

(3) 視差による距離測定法の原理を理数教材の題材として取り上げ、初等中等、高等教育の各段階での導入を検討する。

(4) 2012年に日本でその全過程が観測される金星の太陽面通過現象の観測を含めた理科教育カリキュラム研究を行う。

(5) 1761、1769年また1874、1882年に世界規模でこの現象の観測が行われている。その試行錯誤の歴史、科学的探究の内容を学び理解する科学史教育の課題として検討する。

## 3. 研究の方法

(1) ハレーによる1716年の原論文「A New Method of Determining the Parallax of the Sun, or His Distance from the Earth」の和訳、内容を解説する。

(2) 金星太陽面通過現象の観測の歴史、明治7年の米、仏、メキシコ観測隊の日本における観測の試みについて解説書などの文献調査を行う。

(3) 惑星の公転運動について、万有引力と力学法則に基づく差分を使った計算機シミュレーションを行い、金星太陽面通過現象の特徴的な周期を考察する。

(4) 等速円運動の組み合わせによる惑星の公転・自転運動の数理モデルによって金星太陽面通過現象における地球自転効果を考察する。ハレーによるオリジナルな太陽視差測定法の原理を理解する数理教材を作成する。

(5) 太陽望遠鏡、遮光グラスを用いた安全な太陽観測方法、ビデオカメラを用いた現象の記録方法の検討を行い、2012年の現象観測・記録に向けた準備を進める。

(6) 大学教養科目、初等理科教育科目、教員免許講習において研究成果を提示し、理科・科学教育教材としての有効性を検証する。

## 4. 研究成果

(1) ハレーによる太陽視差決定法の考察; ハレーの原論文 (A new Method of determining the Parallax of the Sun, or his Distance from the Earth) に述べられている太陽視差決定法(金星の太陽面通過観測から太陽視差を決定する方法)が地球の自転効果を利用したものであることを解明し、様々な視点からの教育的解説を試みた(物理教育掲載論文)。

金星の太陽面通過時間は大要の中心を通過する場合、最大8時間ほどを要するためこの間の地球の自転による観測点の移動で視差が生じる。金星、地球の公転運動のために金星が太陽面上を動いてゆくのがみられるのだが、これを眺める地球の自転が金星の動きに影響する。ハレーはインド東方ガンジス河口で太陽南中をはさんだ前後4時間の観測(図1A)と、地球の裏側ハドソン湾ネルソン港(図1B)での日没前の金星太陽面侵入と次の日の日の出直後の金星太陽面離脱の観測を比較し、金星の太陽面通過時間の17分の相違を予想しているのである。

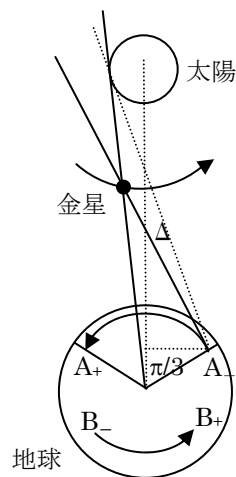


図1 A<sub>-</sub>での金星太陽面進入の遅れ

地球の表側では金星の公転運動と地球の自転方向が逆であるために太陽面上の金星の動きが早まり、裏側では遅くなることを利用した提案である。

ハレーによって考察されている金星の太陽面侵入・離脱時刻の遅れや進みを、地球の自転を考慮した金星の相対運動、太陽・金星・地球表面観測者の座標変換による近似計算などから裏づけ、作図、シミュレーションによる解説方法を検討した。一般に行われている解説、すなわち地球上の観測点の南北緯度差を利用した視差測定法との違いや関連、金星の太陽面通過位置が視差決定に及ぼす影響などを明らかにした。理科教育でこれを取り上げる際の単純化した解説には問題があり、ハレーの考察を正しく解説することの重要性を明らかにした。

ハレーの提案は一般に解説されている太陽視差測定法とは明らかに異なったものである。多くの解説では、「地球上の南北に離れた観測点からこの現象を観測し太陽面上の金星通過経路長の相違から視差を求める」(図2)としており、国内では鬼塚史郎氏による「近代科学の足跡をたどる」(東京図書出版会2004年)が唯一ハレーの提案を正しく解説している現状である。

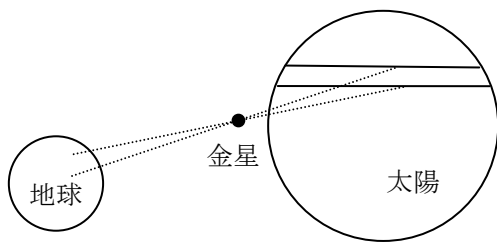


図2 金星視差による太陽面通過経路

(2) 金星太陽面通過周期の考察;地球の公転周期( $T_E$ )に対して金星のそれ( $T_V$ )は0.6152年でこれは偶然にも有理数8/13に非常に近い値である。8年間に金星は13回、地球は8回公転しこの間に5回の会合が生ずる。地球、金星の公転はほぼ等速円運動であるから会合周期 $T=1/(1/T_V-1/T_E)$ は約8/5年、地球、金星の会合は公転軌道上を五等分する位置で8年ごとに生じるという規則性を近似的に持っておりこれが現象の周期に反映するのである。規則性の破れは僅かで8年ごとの会合はその軌道上の位置を約2.4度ずつずらしてゆく(図3)。太陽半径、金星軌道傾斜角、地球・金星軌道半径によって決まる金星の太陽面通過条件は軌道交差線から±1.7度の範囲であり2.4度の会合位置のずれがここに含まれ8年の短周期が生じる。昇交点での太陽面通過の後、次の会合位置(降交点から36度)が2.4度のずれを繰り返し降交点に到達する113.5年後(

36/2.4×8年)に次の太陽面通過が生ずることになる。8年の短周期と百年を越す長周期を繰り返すこの現象の特異な周期性は地球と金星の公転運動(周期)がもつ近似的な規則性と其の僅かな破れがもたらしているのである。

二つの長周期(113.5±8年)は地球、金星の楕円運動による会合位置の変化で生ずるものである。金星、地球の公転運動シミュレーションを通じて両惑星の楕円運動が二つの長周期105.5, 121.5年(=113.5±8年)を生んでいることが明らかになった。楕円運動を考慮すると問題が複雑さを増すが金星、地球軌道の楕円離心率、長軸交差角によって両惑星の楕円運動の効果(公転速度の変動)が一部相殺する形で長周期±8年の差異を生んでいるのである。(物理教育掲載論文「金星太陽面通過の不思議な周期性」)。

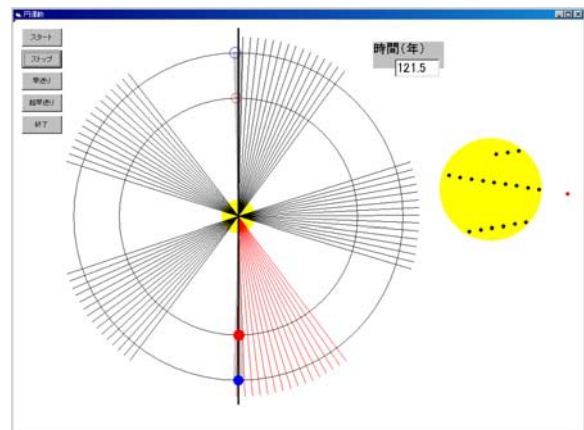


図3 金星・地球の会合と金星太陽面通過  
VisualBasicによるシミュレーション

(3) 金星太陽面通過シミュレーション;金星太陽面通過の周期パターンを解明するために万有引力と運動法則による金星、地球の公転運動3Dシミュレーションを試みた。NASA Eclipse Web Siteに紀元前2000年から4000年まで6000年間の金星太陽面通過の予測値が掲載されており、これによれば長周期131.5±8年と短周期8年がいくつかのパターンで混在する時期が生じるほか121.5年の長周期のみが続く時期がある。(図3)

金星、地球の軌道が交差していることを考慮した3次元の公転運動シミュレーションにより軌道要素(軌道半径、離心率、軌道交差角)のわずかな相違で現象の周期のパターンが変化すること、軌道半径については相対誤差10万分の一の精度が必要であることが分かった。

(4) 太陽観測・記録方法の考察;太陽望遠鏡、

ビデオカメラを用いた太陽観測を試み、安全確実な観測、記録方法の確立を図った。投射型太陽望遠鏡（LEARING TECHNOLOGIES, INC 製 SUNSPOTTER）が教育現場での多人数児童・生徒による安全な太陽観測に適していることを確認した。望遠レンズ（3倍テレコンバージョンレンズ）とビデオカメラに組み合わせにより太陽黒点観測・記録が可能であり、金星の太陽面通過観測に利用できることを確かめた。

太陽観測の試行として太陽黒点の観測記録を行った。数日間の黒点の太陽面上の移動から太陽の自転周期を導く計算法を検討した（物理教育掲載論文）。黒点の位置、太陽中心からの距離変動によって太陽自転角速度を求めることができる。カメラの配置、観測時刻の調整などを行うことなく容易に太陽自転周期を求めることができ、理科実験・観察の課題となりうることを示した。

(5)金星太陽面通過を理科教材として取り上げる際の太陽観察、観測・記録方法の検討を行った。太陽面上の金星は巨大な黒点ほどの大きさで遮光グラスを用いた肉眼で観察可能である。学校現場で用いるものとして多人数で安全に観測できる投影型の太陽望遠鏡が適していること、なかでもSunspotterは小型で構造も単純、操作も簡単で安全性も高い。現象の動画記録には普及しているビデオカメラを用いることができる。太陽の光学的拡大映像を得るためには望遠鏡に接続するよりビデオカメラ用テレコンバージョンレンズを使用するのが容易であり、遮光にはフィルムタイプの遮光フィルターが適しており、この方法で黒点の観測・記録を試みた（物理教育掲載論文「太陽の黒点観測」）。

(6)以上の考察や検討を整理、要約し日本物理教育学会（8月広島）、日本物理学会（3月西宮）で報告し、「大学の物理教育（日本物理学会）」に投稿した。研究成果報告書「金星太陽面通過の科学－ハレーが考えた太陽視差決定法－」（2012年3月発行、38ページ）を作成、配布し研究成果の普及に努めている。この現象を科学教育で取り上げるポイントとして次の三点をあげ教育現場での研究成果の活用を図っている。

- ① 18世紀の科学者が太陽系の姿、大きさを何を根拠にどのように推測していたか。
- ② 距離測定のためとなる視差がこの現象でどのように現れるか。
- ③ 地球、金星の公転運動が偶然もっている特別な関係が現象の特異な規則性を生む。

ハレーの提案（ハドソン湾での観測）は彼が用いたデータの不正確さなどによって実現せず、地球規模で取り組まれた1761年の観測は様々な困難（戦乱やブラックドロップ現象）に見舞われ、彼の期待「2秒の精度で（金星の太陽面通過）時間が測定されれば、太陽視差は1/40秒の精度で得られ、太陽までの距離は1/500の精度で決められる。」は叶わなかった。しかし、太陽系のスケールを求める世界の科学者の奮闘が観測技術の向上や国際協力を生み、宇宙や科学に対する人々の関心を高めたこと、1874年（明治7年）維新後間もない日本で行われた先端科学による観測などを科学の歴史として学ぶ意義は大きい。2012年6月はこの現象を科学教育の題材とする好機である。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計4件）

1. 岡崎隆、藪菜月、秋元来舞、長谷川遼太、藤野忠、太陽の黒点観測－太陽の自転周期を求める－、物理教育、査読有、60巻1号、2012年、61-63
2. 岡崎隆、金星太陽面通過の科学－ハレーが考えたこと－、大学の物理教育、査読有、18巻1号、2012年、4-7
3. 岡崎隆、齋藤陽樹、熊越ゆき、金星の太陽面通過で測る太陽系のスケール－ハレーが考えた太陽視差決定法、物理教育、査読有、59巻1号、2011年、50-53
4. 岡崎隆、振子の等時性とその破れ－単振り子、サイクロイド振り子、実体振り子の運動－、物理教育、査読有、58巻1号、2010年、49-52

〔学会発表〕（計2件）

1. 岡崎隆、齋藤陽樹、熊越ゆき、金星の太陽面通過（2012年）を理科教育教材に、日本物理教育学会2011年度年会、2012年3月27日、広島県情報プラザ
2. 岡崎隆、齋藤陽樹、熊越ゆき、科学教材としての金星の太陽面通過－ハレーの太陽視差決定法、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月27日、関西学院大学西宮上ヶ原

〔その他〕

研究成果報告書「金星太陽面通過の科学－ハレーが考えた太陽視差決定法－」（2012年3月発行、38ページ）

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡崎 隆 (OKAZAKI TAKASHI)  
北海道教育大学・教育学部・教授  
研究者番号：20160666

(2) 研究分担者

なし