

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：10101
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2011年度～2012年度
課題番号：23654065
研究課題名（和文）系外惑星を探る新しい眼 -大気光学過程の解明と観測可能性の追求
研究課題名（英文）Study of optical processes in the atmospheres of exoplanets and their feasibility of observations
研究代表者 山本 哲生（YAMAMOTO TETSUO） 北海道大学・低温科学研究所・教授
研究者番号：10126196

## 研究成果の概要（和文）：

大気中の光の伝播の定式化およびトランジット系外惑星の大気を通過してくる光線の屈折角の精密な公式を導出した。この公式は小さいインパクトパラメータにおいても精度のよい屈折角を与える。トランジット時の高度曲線からスケールハイトを決定する方法論を構築した。上記の公式を用いてレイトレーシングの計算を、等温静水圧平衡にある大気について行い、惑星サイズの見かけの増加の効果の系統的研究を行った。これについては観測波長による差異の計算も行った。理論の実証が容易な木星の観測に結果を応用した。その結果、理論は観測をある程度まで説明できるものの、観測結果と理論計算結果の間にはまだ差が残ることもわかった。理論モデルには考慮されていない効果がまだ効いていることを示唆する。

## 研究成果の概要（英文）：

We formulated light propagation in the atmospheres of exoplanets in transit and derived a formula of an angle of refraction for light rays propagating through the atmosphere. The formula provides precise values even for the rays incident with small impact parameters onto the atmosphere. We proposed a method of estimating a scale height of an atmosphere from a light curve at a transition of an exoplanet in front of a central star. Systematic calculations of ray tracing are carried out for the rays passing through model atmospheres under isothermal hydrostatic equilibrium with varying wavelength of the light rays, and discussion was made on apparent increase in the radius of a planet in transit. The results are applied to the observation of Galilean satellites, which are observed through the atmosphere of Jupiter. Analysis of the observation indicates that the theory roughly explains the observation but suggests the presence of some effect that is not taken into account in the theory.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,700,000円	810,000円	3,510,000円

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：系外惑星，光赤外線天文学，惑星科学

## 1. 研究開始当初の背景

これまで系外惑星本体やその大気がトランジット法等で観測されてきた。トランジット中の星の光度の減光量から惑星の半径が求

められ、スペクトルから、惑星大気の組成等が推定される。従来の研究では、恒星からの光は惑星大気中で直進するものと暗黙の内に仮定されてきた。しかし、実際には恒星光

は惑星大気中で屈折する。このため観測されるトランジット惑星の像は実際の惑星の姿を反映していない。さらに大気中を通過する星光はその波長に応じて分散や散乱が生じる。これらの効果を考慮し観測を補正・解析することによって初めて「正しい」惑星の像を得ることができる。

申請者らは地球大気におけるグリーンフラッシュの考察から本申請研究の着想を得て、これまで系外惑星大気における星の光の伝播と前述のような観測的描像の具体化に関する研究を進めてきた。最近、申請者らとは独立にトランジット時における大気による屈折を調べ、トランジット惑星の像を予言する研究が発表された(Sidis & Sari, 2010, ApJ, 720, 904)。しかしこの研究は断片的であるだけでなく、トランジット時の光度曲線において申請者らの研究とは異なる結果が得られている。また、観測する波長(カラー)や中心星-惑星間距離の違いによるトランジット惑星の見え方の違いはまったく論じられていない。より包括的な研究を行うことによって、トランジット時に生じる現象の全貌を明らかにせねばならない。

## 2. 研究の目的

系外惑星大気における光の屈折と分散を含む星の光の伝播の物理を明確にした上で、トランジット観測で期待される新しい効果の予測、観測のためのこれらの効果の具体像の提供と観測の提案、および観測から惑星の大気や本体に関する情報を引き出す解析方法の開発を行うことを目的としている。これらを通じて、系外惑星大気科学と言うべき新しい分野の糸口の開拓および今後の新たな観測の提案につなげたい。特に以下の項目を重点的に解明し、今後の新たな観測の提案につなげたい。

- (1) 惑星サイズの見かけの増加効果。
- (2) 光度曲線のカラー観測から大気構造情報を得る手法の開発と展開。
- (3) トランジット惑星に付随する像の予測。

## 3. 研究の方法

### (1) レイトレーシング計算。

系外惑星に入射する中心星からの光線の径路の広範かつ詳細なシミュレーションから得られる描像は、本申請研究の目標を達成するうえでの基礎である。このためまず、系外惑星に入射する中心星からの光線の径路の広範かつ詳細なレイトレーシング計算を推進した。

### (2) 惑星サイズの見かけ増加効果の予測。

申請者らのこれまでの準備研究から、比較的濃い大気に小さい「衝突パラメータ」で入射した光は大気内に捕獲され再び脱出しない

ことを見いだしていた。例えばモデル地球大気では、表面大気密度が地球のその4倍以上の「地球」大気ではその表面をかすめる径路で入射した光線は地表に「落下」する。その結果、トランジット惑星の大きさは実際のそれより大きく見える。種々のモデル大気について、サイズ増加効果を系統的に調査した。

見かけの大きさは中心星とトランジット惑星の距離および観測する波長にも依存する。このため、これらの依存性を系統的に探査した。

(3) トランジット惑星に付随する像の予測。トランジットのイングレスとエグレスの際に、惑星のシルエットに付随してその近傍に明像が現れる。モデル惑星大気について、特にこの像が中心星-惑星間距離によってどのように変化するかを系統的に研究し、像の形態・光度と中心星-惑星間距離に関する関係を見いだすことに重点をおく。この際、前述のレイトレーシングの結果をフルに活用する。

(4) 光度曲線のカラー依存性の予測と観測可能性の検討

これまで多くのトランジット惑星の光度曲線が観測されている。申請者らは複数のカラーで観測することによって、大気のスケールハイトや密度を決定できる方法論に関するアイデアを得た。しかし、この観測には時間分解や異なるカラーでの強度差の検出に高い精度が必要である。モデル大気についてより広範かつ詳細に推進し、カラー依存性の検出に必要な条件を定量的に解明したい。

このため、モデル惑星についての、惑星に付随する明像、光度曲線のカラー差、惑星サイズの見かけの増加効果に関する系統的な研究から、観測が比較的容易な条件にあるモデル惑星を見いだす。

## 4. 研究成果

2011年度において、大気中の光の伝播も定式化を通じて、大気を通過してくる光線の屈折角の精密な公式を導出した。従来の表式は小さいインパクトパラメータで入射する場合に精度が悪くなるのに対して、この公式は小さいインパクトパラメータにおいても精度のよい屈折角を与える。これは本研究の基礎となる。また研究目的(2)に関連して、トランジット時の高度曲線からスケールハイトを決定する方法論を構築した。加えて、研究目的(1)についてはレイトレーシングの計算をシンプルな構造をもつ等温静水圧平衡にある大気について行い、惑星サイズの見かけの増加効果の系統的な研究を行った。これについては観測波長による差異の計算も行った。その結果、上述の効果は確かに生じるものの、系外惑星条件では現在の観測精度ではその検出が困難であることを見出した。

結果の一部は国内外の学会、シンポジウムにおいて発表した。

前年度の研究から、系外トランジット惑星については、現在の精度から理論で予言する効果を検出することはかなり困難であることがわかった。また研究目的(3)の現実的な達成のためには、大気中を通過する光線の屈折に加えて、エアロゾル等による散乱・吸収のモデル化も必要である。このため、2012年度においては、理論の実証がより精度よくできる太陽系惑星の観測に注目した。木星の観測から、ガリレオ衛星が木星の影に入る際に幾何学的な影の境界にくらべて長く明るさを保つ現象が観測されている。この現象を本研究で開発を進めた理論モデルや計算式を用いて木星大気による屈折と減光の効果として理解できるかどうかの検討を行った。ある程度までは理解できることがわかったが、観測結果と理論計算結果の間にはまだ差が残ることもわかった。理論モデルには考慮されていない効果が、まだ効いているようである。このことは、系外惑星の影を観測するトランジット観測の結果を解釈する上で、重要な示唆を与えるものと思われる。

本研究は予想される今後の観測の精密化による系外惑星大気研究の進展を先取りした予測研究であり、世界的にも研究がまだほとんどなされていない。理論的予測と観測とのギャップはまだ大きいですが、理論、観測双方の精密かによって今後そのギャップが縮まりより現実的な議論が可能となることが期待される。

#### 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 8 件)

① Tanaka, K.K., Yamamoto, T., Tanaka, H., Miura, H., Nagasawa, M., and Nakamoto, T., Evaporation of Icy Planetesimals due to Bow Shocks, *Astrophysical Journal*, 2013, 764, 120-130 (2013) doi:10.1088/0004-637X/764/2/120 [査読論文]

② 山本哲生, 微小重力と惑星科学, *JASMA*, 28, 161-162 (2012)  
<http://www.e-jasma.com/index.html> [査読無し]

③ Kurokawa, H. and Nakamoto, T., Effects of Atmospheric Absorption of Incoming Radiation on Radiation Limit of the Troposphere, *Journal of the Atmospheric Sciences* 69, 403 - 413 (2012)  
10.1088/0004-637X/738/2/141 [査読論文]

④ Oka, A., Inoue, A. K., Nakamoto, T., and Honda, M., Effect of Photodesorption on Snow Line at the Surface of Optically Thick Circumstellar Disks around Herbig Ae/Be Stars, *Astrophysical Journal*, 747, 138-149 (2012)  
10.1088/0004-637X/747/2/138 [査読論文]

⑤ Kobayashi, H., Kimura, H., Watanabe, Yamamoto, T., and Müller, S., Sublimation temperature of circumstellar dust particles and its importance for dust ring formation *Earth, Planets, Space*, 63, 1-9 (2011)  
10.5047/eps/2011.03.012 [査読論文]

⑥ Tanaka, K. E. I. and Nakamoto, T., The Direct Stellar Radiation Pressure at the Dust Sublimation Front in the Massive Star Formation: Effects of Dust-Free Disk, *Astrophysical Journal* 739, L50-L53 (2011)  
10.1088/2041-8205/739/2/L50 [査読論文]

⑦ Oka, A., Nakamoto, T., and Ida, S., Evolution of Snow Line in Optically Thick Protoplanetary Disks: Effects of Water Ice Opacity and Dust Grain Size, *Astrophysical Journal* 738, 141-151 (2011)  
10.1088/0004-673X/738/2/141 [査読論文]

⑧ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., The Rebound Condition of Dust Aggregates Revealed by Numerical Simulation on Their Collisions  
*Astrophysical Journal*, 737, 36-48 (2011)  
10.1088/0004-673X/737/1/36 [査読論文]

[学会発表] (計 5 件)

① Nakamoto, T., Possible Inhomogeneity Inside of Asteroids, Asteroids, Comets, Meteors, 2012年5月17日, 朱鷺メッセ, 新潟

② Nakamoto, T., Doi, M., Nakamura, T., and Yamauchi, Y., A Correlation among Shape, Composition, and Texture of Cosmic Spherules, European Geosciences Union, 2012年4月27日, Austria Center Vienna, オーストリア

③ Nakamoto, T. and Yamamoto, T., Refraction of Light in Exoplanet Atmosphere, The First Kepler Science Conference, December 5 - 9, 2011, NASA Ames Research Center, California, USA.

④ 中本泰史「原始惑星系円盤内スノーラインの進化と微惑星の組成」, GCOE「地球から

地球たちへ」全体研究発表会 2011, 2011年  
11月23日, 東京大学・本郷

⑤ Yamamoto, T., Planetesimal  
Evaporation due to Planetesimal Bow  
Shock, AOGS 2011, 2011年8月9日,  
Convention Center, Taipei International  
Convention Center, 台湾.

[その他]

ホームページ等

<http://risu.lowtem.hokudai.ac.jp/index.html>  
1

[http://www.geo.titech.ac.jp/lab/nakamoto/a  
ctivities/activities-j-11.html](http://www.geo.titech.ac.jp/lab/nakamoto/activities/activities-j-11.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 哲生 (YAMAMOTO TETSUO)  
北海道大学・低温科学研究所・教授  
研究者番号：10126196

### (2) 研究分担者

中本 泰史 (NAKAMOTO TAISHI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・  
准教授  
研究者番号：60261757

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

