

**立教大学学術推進特別重点資金（立教SFR）**  
**プロジェクト研究（共同プロジェクト研究）**  
**2015年度研究【経過・成果】報告書**

研究代表者	所属部局・職		氏名					
	理学部	准教授	亀田真吾 印					
研究課題	太陽系外惑星の物質散逸現象							
研究組織 (研究代表者・ 研究分担者) 2016年3月現在	所属研究機関・部局・職		氏名					
	立教大学理学部教授		田口真					
明治大学工学部講師		鈴木秀彦						
研究期間	2013年度		～	2015年度				
研究経費※	2013年度		2014年度		2015年度		総計	
	3,699,995	円	1,000,000	円	1,300,000	円	5,999,995	円
(上段:支出金額)								
(下段:採択金額)	3,700,000	円	1,000,000	円	1,300,000	円	6,000,000	円

※1円単位で記入

**研究の概要** (200～300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

我々の住む地球、そして太陽系は特別な存在なのだろうか？この根源的な問いに答えるためには、太陽系と系外惑星の比較が必要である。本研究では、太陽系科学で得られた知見から、観測による情報が限定的となる系外惑星系の環境・状態を推定し、太陽系や系外惑星系の性質を探る。2015年1月に地球から1500万kmの距離において、地球の水素大気分布の撮像に成功し、金星・火星の水素大気との比較を行った。その結果をもとに、系外惑星の物質散逸現象とその時間変動の検出を目指し、紫外線分光装置の設計・開発を行った。この活動によりUV波長域での系外惑星観測を小型計画で実施することが検討されている。

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[系外惑星] [惑星大気] [分光観測]

**研究【経過・成果】の概要** (図・グラフ等は使用しないこと。)

2015年度には、惑星大気の散逸現象について、地球型惑星における水素の散逸現象、水星におけるナトリウムの散逸現象に関して観測に基づいた研究を進め、系外惑星大気散逸現象を捉えるための宇宙望遠鏡の概念設計を行った。

**(1) 地球型惑星における水素の散逸現象**

これまでに数多くの地球サイズの系外惑星が発見されたが、表面に海があるかどうかは判別できていない。一方で、太陽系の地球型惑星の中で唯一海を持つ地球の周りには、他の惑星(金星・火星)に比べて数倍の距離まで水素コロナが広がっていることが分かっている。この広がりの原因は、地球が海を持つこと、強い固有磁場を持つことから説明されている。地球の海は、大気中の二酸化炭素を取り込み、地殻に閉じ込めることで大気中の二酸化炭素量を減らしている。これが二酸化炭素を主とした大気を持つ金星や火星と異なる点である。二酸化炭素は上層大気において放射冷却によって温度を下げる効果があるため、その二酸化炭素が薄い地球では、金星や火星に比べて上層大気の温度が高い。これによって水素のコロナが広がることになる。一方で、地球には固有磁場があることからプラズマ圏が形成されており、そこには高温の陽子が存在する。その陽子が相対的に低温の水素原子と電荷交換反応を起こすことにより、水素を遠方まで到達させ、広がった水素コロナを形成することになる。過去の研究結果からは、電荷交換反応による効果が大きいと考えられていた。

我々は水素ライマンアルファ線観測装置 LAICA を超小型深宇宙探査機 PROCYON に搭載して地球水素コロナの観測を実施した。その結果から、水素コロナが遠方まで広がっていることと、その大気の下に海洋があることとの関係を議論することができる。地球型惑星は小さく、太陽系外の地球型惑星を検出することは可能になってきているが、反射分光観測などによって海洋の存在を確認することは現時点では技術的に困難である。ホットジュピター周辺の水素の観測は既に実現されており、地球のような小さな惑星においても遠方まで広がる水素コロナが、海を持つ惑星であることを示すのであれば、そのような系外惑星の発見に向けて重要な研究対象になると考えられる。

今年度は、LAICA で得られたデータの解析と、過去の研究で行われたモデル計算のレビューを進め、上記の論理が成立することを確認した。上記の議論の結論をまとめ、論文投稿中である。

**(2) 水星におけるナトリウムの散逸現象**

太陽系外のホットジュピターでナトリウム大気が検出され、スーパーアースでもナトリウムを含む金属大気が広がっていることが推定されており、惑星表面からの金属大気の形成・散逸過程の解明が重要な課題となっている。我々は水星周回衛星メッセンジャーの観測期間において、地上から水星のナトリウム大気の観測を実施し、季節変動の特徴からナトリウム大気の形成過程に関する研究を進めてきた。これまでは太陽系内の微小隕石分布によって、微小隕石衝突頻度が季節変動することとナトリウム密度の変動の関連についての研究を中心として進めてきたが、メッセンジャーによるカルシウム大気の密度変動と隕石衝突との関係に関する研究結果と整合しない部分があるため、変動が他の要因で起きていないかどうか、ハワイ・ハレアカラ観測所において昨年度以前に取得したデータに、本年度得られた観測結果を加えて検討した。水星の夕方側のナトリウム大気密度の季節変動を説明することはできていなかったが、Smyth & Marconi (1995) のモデルを参考に、太陽直下点付近から昼夜境界線方向への太陽放射圧によるナトリウムの輸送の効果を考慮することによって、夕方側の大気密度とその変動を説明できることが分かった。

**研究【経過・成果】の概要 つづき**

また、明け方側の密度変動についても、夕方側と同様の放射圧による輸送に加え、夜明け時に表面温度が急激に上昇し、ナトリウムが熱脱離を起こす効果を考慮することで説明できる可能性があることを示した。このことは、ナトリウムの大気密度変動の主要因が、隕石衝突頻度の変動ではないことを示唆している。しかしながら、公転軌道上の一部のデータが不足しており、今後も観測を継続して連続的な季節変動プロファイルを取得する必要がある。

**(3) 系外惑星大気散逸現象を捉えるための宇宙望遠鏡の概念設計**

2020 年までに K2, TESS 計画により太陽系近傍の地球型惑星が多数検出される見込みである。しかし、これらの惑星に生命が存在するかどうかを明らかにすることは困難である。特に、地球大気に多く含まれる、生命由来の酸素分子、オゾンの検出の検討が進められているが、惑星半径に対して光学的に厚い大気層は非常に薄いため、口径 6.5m の宇宙望遠鏡 JWST や 30m の地上望遠鏡(TMT)を使っても、検出には数年の時間が必要となる。本年度は、地球型惑星の超高層大気における散逸現象の新しい観測手法について検討を進めた。

今後発見される地球型惑星の多くは低温度星の周りを公転する惑星と考えられる。低温度星の惑星系において中心星から地球と同程度の熱輻射を受ける位置では、極端紫外線輻射量が数百倍程度にまで達すると考えられる。そのような環境において、今の地球や金星のような厚い大気を持つ惑星が存在した場合、強い極端紫外線によって大気が加熱される。金星では 0.130.6nm の波長において光学的に厚い酸素原子が惑星半径の 2 倍程度まで広がることを示されており(Kulikov et al., 2007)、地球ではさらに濃い酸素原子が広がる事が示されている(Tian, 2008)。酸素原子の検出は、ただちに生命存在を示すものではないが、二酸化炭素を大気の主成分とする惑星では、放射冷却の効果により酸素原子の広がりが抑えられると考えられる。(1)項においての水素大気で同様の現象が起きていることが確認されている。水素原子は星間空間に存在し、大きく吸収を受けてしまうが、酸素原子は星間吸収量が小さいため、観測が可能となる。これによって、大きさ、質量が同程度であっても、大気の性質・海洋の有無が異なる惑星の識別を行うことが可能となる。本研究期間に様々な物理量の観測の実現性を検討した結果、太陽系外惑星の物質散逸現象の研究を進める上で、上記の酸素原子量観測は重要度・実現性の点において最優先で装置検討を進めるべきという結論に至っている。また、これらの活動において、地球電磁気・惑星圏学会の「太陽地球惑星圏の研究領域の目的・戦略・工程表」に、小型衛星計画候補ミッションの1つとして「系外惑星専用紫外望遠鏡」計画が記載され、JAXA 宇宙理学委員会においても、「UV 波長域での系外惑星観測」を小型衛星計画で実施することが検討されている状況である。また、2016-2018 年度の期間において科研費基盤研究(B)「紫外線宇宙望遠鏡による太陽系外惑星大気の研究」(研究代表者：亀田)が採択され、本研究において行った系外惑星観測の検討を受け、紫外線領域の検討に集中して研究を進めていく予定である。

**研究発表** (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

**① 雑誌論文**

[1] S. Kameda, H. Suzuki, T. Takamatsu, Y. Cho, T. Yasuda, M. Yamada, H. Sawada, R. Honda, T. Morota, C. Honda, M. Sato, Y. Okumura, K. Shibasaki, S. Ikezawa, S. Sugita, Preflight calibration test results for optical navigation camera telescope (ONC-T) onboard the *Hayabusa2* spacecraft, Space Science Review, accepted.

[2] Kameda, S.; Suzuki, H.; Cho, Y.; Koga, S.; Yamada, M.; Nakamura, T.; Hiroi, T.; Sawada, H.; Honda, R.; Morota, T.; Honda, C.; Takei, A.; Takamatsu, T.; Okumura, Y.; Sato, M.; Yasuda, T.; Shibasaki, K.; Ikezawa, S.; Sugita, S., Detectability of hydrous minerals using ONC-T camera onboard the Hayabusa2 spacecraft, Advances in Space Research, Volume 56, Issue 7, p. 1519-1524 (2015)

[3] Yuichiro Cho, Seiji Sugita, Shingo Kameda, Yayoi N. Miura, Ko Ishibashi, Sohsuke Ohno, Shunichi Kamata, Tomoko Arai, Tomokatsu Morota, Noriyuki Namiki, Takafumi Matsui, High-precision potassium measurements using laser-induced breakdown spectroscopy under high vacuum conditions for in situ K-Ar dating of planetary surfaces, Spectrochim. Acta B: At. Spectrosc., 106 (2015), pp. 28-35.

**④ 学会発表**

[4] 池澤祥太, 亀田真吾, 佐藤允基, 桑原正輝, 吉川一朗, 田口真, ジオコロナ撮像装置 LAICA の開発, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 千葉, May 2015 (口頭発表)

[5] 池澤祥太, 亀田真吾, 佐藤允基, 桑原正輝, 吉川一朗, 田口真, LAICA の開発と撮像結果, 日本航空宇宙学会 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 2015 年 10 月 (7-9) かがしま県民交流センター (口頭発表)

[6] 池澤祥太, 亀田真吾, 佐藤允基, 桑原正輝, 吉川一朗, 田口真, ジオコロナ撮像装置 LAICA の開発と撮像結果, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 138 回総会及び講演会 (2015 年秋学会) 2015 年, 10 月 (31), 小柴ホール (東京大学理学部 1 号館 2 階) (口頭発表) 「学生発表賞 (オーロラメダル)」を受賞

[7] 安田竜矢, 亀田真吾, 鍵谷将人, 米田瑞生, 岡野章一, 水星ナトリウム大気の長期時間変動, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 138 回総会及び講演会 (2015 年秋学会) 2015 年, 11 月 (2), 小柴ホール (東京大学理学部 1 号館 2 階) (口頭発表)

[8] 堀越寛己, 池澤祥太, 桑原正輝, 村上豪, 亀田真吾, 吉川一朗, 田口真, 紫外線望遠鏡による系外惑星観測の検討, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 138 回総会及び講演会 (2015 年秋学会) 2015 年 (ポスター発表)