

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800258

研究課題名(和文)月希薄大気の組成・構造・生成機構の研究

研究課題名(英文)Study on the structure and dynamics of the lunar exosphere

研究代表者

横田 勝一郎(Yokota, Shoichiro)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：40435798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、KAGUYA衛星搭載質量分析器の観測データから月希薄大気の密度・構造及び組成を算出し、生成消失機構を推定した月希薄大気の数値モデルを提唱した。経度方向での空間分布において朝夕非対称が本研究で初めて明らかとなり、数値モデルから希薄大気成分の宇宙塵による外部からの供給が必須であることを提示している。また地球から月への酸素イオン輸送も観測し、宇宙機による同位体計測の重要性を改めて示した。

研究成果の概要(英文)：We have derived distributions of the lunar exosphere by using the observation data of the mass analyzer on Kaguya. We proposed a numerical model to explain a dawn-dusk asymmetry of the lunar exosphere which was discovered by Kaguya. Our model implies that the exospheric particles need to be supplied during the night for the observed dawn-dusk asymmetry. We argue that the interplanetary dust as well as grain diffusion and migration/recycling of the exospheric particles may be major suppliers. We also estimated the oxygen flux transported from the Earth to the Moon.

研究分野：宇宙プラズマ物理学

キーワード：月 外気圏 質量分析 ピックアップイオン

1. 研究開始当初の背景

月、水星、小惑星といった強い固有磁場や重力を持たない小規模天体は大気を保持することが出来ないが、ナトリウムやカリウムの外気圏が天体周囲に形成されていることがこれまで分かっている。これら外気圏粒子は重力によって保持されることなく太陽輻射圧や光電離などで常時失われている。これまで地上からの光学観測が主たる研究手法であったが、KAGUYA によって詳細なイオン観測が月軌道上で初めて行われた。月周回衛星によるその場観測の利点として、長期間に亘って連続的に観測することや、緯度のみでなく経度方向の分布を得ることが可能であることが挙げられる。今後米国月周回衛星 LADEE による月外気圏の観測が予定されていて、日本も含めて月着陸機による地表面の組成探査が検討されている。月外気圏の構成粒子として知られているナトリウムやカリウムなどの月から放出されるイオンは、KAGUYA 搭載のイオン質量分析器によって約 1.5 年間観測されている。月外気圏は月表面の状態を反映しているため、月外気圏の組成・構造の研究は、これから盛んになる月面での試料分析を用いた研究の先駆けにもなることが期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、主に KAGUYA 衛星の低エネルギー粒子計測器のデータを用いて、月外気圏の組成・構造を評価して生成消失機構を解明することである。また、月外気圏の数値モデルの構築を行い、小天体に共通する外気圏の標準モデル化を最終的な目標とする。

本研究の展開として、水星プラズマと激しく相互作用する水星外気圏のモデル推定に利用することも考えている。現在ベッピコロンボ質量分析器はフライトモデルが探査機に搭載され、システム試験が行われている。本研究成果を将来の観測運用計画の立案に利用する予定である。

3. 研究の方法

本研究では、主に KAGUYA 衛星搭載質量分析器の 2007 年 11 月から約 1.5 年の観測データを利用して観測的研究を行い、月希薄大気の密度、構造及び組成を算出する。また、生成消失機構を推定し、月希薄大気の数値モデルの構築を行う。

4. 研究成果

2008 年後半 6 か月の KAGUYA 衛星搭載質量分析器の観測データから、ナトリウムとカリウムの月外気圏の密度分布を緯度及び経度に対して算出した。緯度分布は緯度（太陽天頂角）の  $\cos^n$  ( $n \sim 2$ ) に比例した密度分布が求まり、これまでの地上観測に類似した結果が得られた(図 1)。一方で経度分布において同じく  $\cos^n$  ( $n \sim 2$ ) に比例した分布ではあつ

たが朝夕で非対称の分布となった(図 2)。

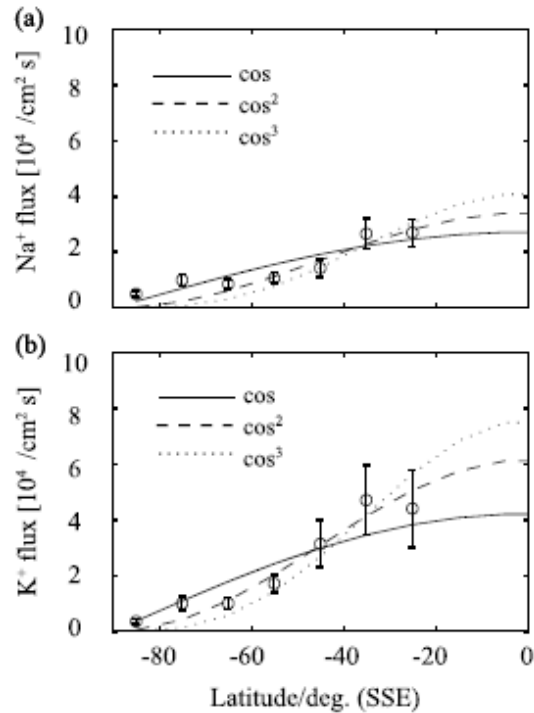


図 1 : Na と K の緯度分布 (○が観測値) .

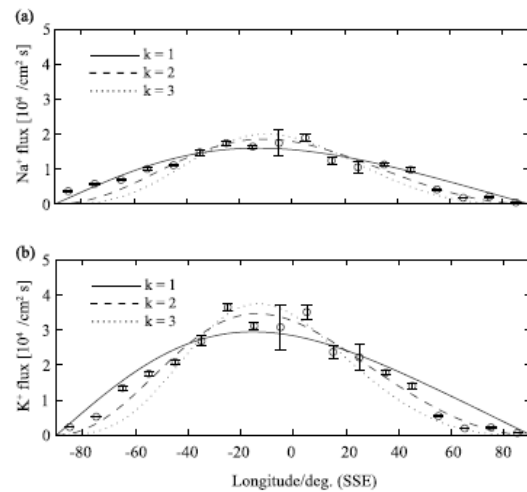


図 2 : Na と K の経度分布 (○が観測値) .

外気圏は地表面から放出される構成粒子によって形成される。放出は主に太陽光が主たる要因であると考えられている。朝夕非対称の分布を説明するため、地表面にある外気圏粒子が夕方には枯渇するという仮説を基に、パラメータを走査して観測値に一致する数値モデルを作った(図 2 の線)。一方で、この数値モデルを長期間維持するには夜間に外気圏構成粒子を次の昼間の放出に向けて備蓄する必要に迫られる。幾つか候補はあるが、宇宙塵による月表面への供給を数値モデルに追加し、毎日繰り返す図 2 の分布が実現できるモデルも定量的に示した。

月へ取り込まれる粒子、特に酸素イオンに注目して月への輸送量の見積もりを行った(表 1)。酸素イオンも月から宇宙空間に放出されているが、一方で月が地球磁気圏内に滞在する期間に地球起源の酸素イオンが月全体に漂着している。図 3 は 2008 年 4 月 21 日の観測例で、Kaguya と月が地球磁気圏に滞在した際に、プラズマシートを 2 回通過している(図 3 上部黒線)。プラズマシート通過時は高温で高密度の H+ を観測しているが、この時 O+ も H+ に比して数% の密度で観測している。1keV 以下の 2 時間毎に検出している O+ は主に月起源のものであるが、それ以外は磁気圏に属するプラズマシートイオン、即ち地球電離圏から散逸した O+ であると云える。これは地球から月へ酸素の供給がなされている観測的証拠であり、地球起源 O+ は等方的なプラズマシートイオンとして、月面の全ての場所に降り込んでいることが明らかとなった。地球起源 O+ は夜側(月が地球磁気圏に位置する場合はファースайд)のみならず、極域にも到来していることが図 3 から見て取れる。

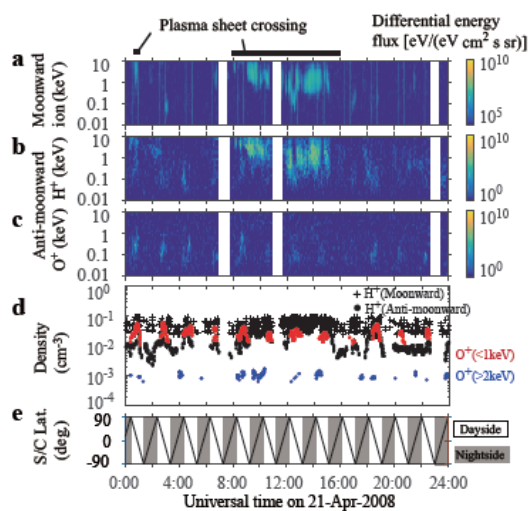


図 3 : 磁気圏 O+ の観測

2008 年の通常観測から一年分の地球からプラズマシート通過のイベントを選別し(表 1)、地球から月への酸素イオンの輸送量が  $1.5 \times 10^{27}$  ions / 年であることを見積もった。アポロ回収試料を含む月起源物質において、酸素同位体比が特に予測外の数値を示すことがこれまで報告されているため、本研究結果がその解釈に有用であると考えている。この結果は既に論文にまとめて投稿作業中である。

本研究の KAGUYA の質量分析器データの観測成果から惑星起源粒子の同位体計測の重要性を認識し、宇宙機搭載の同位体計測用の高分解能質量分析器の開発に別途着手するに至った。KAGUYA 質量分析器の後継機が火星衛星サンプルリターン計画への搭載が採択

されたため、本研究成果は火星衛星周辺での観測時にも役立つことを期待している。惑星と月との間で物質の輸送が月形成・獲得時から現在にまで行われていることを共通のテーマであり、今後発展させていきたい。

表 1 : 月に向かう地球起源酸素イオン流 : Kaguya による観測。

	Density (ions $10^{-2}$ /cm $^2$ )	Abundance ratio O $^+$ /H $^+$ (%)	Net flux O $^+$ (ions $10^4$ /cm $^2$ s)
Jan. 21 14:49-15:10	5.3	1.3	2.3
Jan. 22 02:05-02:20	3.5	2.9	3.2
09:25-12:07	3.6	2.0	2.2
Mar. 20 03:14-08:48	5.4	1.0	1.7
10:24-11:46	6.6	1.1	2.4
Mar. 22 12:45-20:52	5.8	1.0	1.9
Apr. 20 04:09-04:47	4.2	3.2	4.2
05:44-10:55	5.3	2.0	3.0
Apr. 21 08:24-15:17	5.1	2.4	2.6
May 18 13:16-14:01	5.0	-	-
16:10-22:48	5.4	-	-
May 19 11:03-11:56	4.3	-	-
17:01-17:25	4.7	-	-
21:54-23:42	4.3	-	-
Jun. 18 00:24-01:04	4.0	2.7	3.8
Jun. 19 06:05-13:26	3.7	-	-
Jul. 16 19:10-19:45	5.4	1.1	1.8
22:57-23:53	5.5	1.5	2.3
Jul. 17 01:03-02:17	4.2	0.9	0.99
Jul. 19 02:47-13:40	5.1	1.6	2.6
Sep. 14 03:36-04:11	7.4	2.3	3.9
05:03-06:16	6.3	1.5	2.7
Sep. 15 00:25-03:03	6.6	-	-
Nov. 12 05:47-05:55	9.2	1.4	2.8
08:21-08:27	5.9	1.1	1.8

## 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 3 件) 全て査読有

- ① M. N. Nishino, Y. Saito, H. Tsunakawa, F. Takahashi, M. Fujimoto, S. Yokota, Y. Harada, M. Matsushima, H. Shibuya, H. Shimizu, Electrons on closed field lines of lunar crustal fields in the solar wind wake, *Icarus*, 250, 238—248, 2015, doi:10.1016/j.icarus.2014.12.007.
- ② Y. Harada, Y. Futaana, S. Barabash, M. Wieser, P. Wurz, A. Bhardwaj, K. Asamura, Y. Saito, S. Yokota, H. Tsunakawa, S. Machida, Backscattered energetic neutral atoms from the Moon in the Earth's plasma sheet observed by Chandrayaan-1/Sub-keV Atom Reflecting Analyzer instrument, *J. Geophys. Res.*, 119(5), 3573—3584, 2014, DOI: 10.1002/2013JA019682.
- ③ S. Yokota, T. Tanaka, Y. Saito, K. Asamura, M. N. Nishino, M. Fujimoto, H. Tsunakawa, H. Shibuya, M. Matsushima, H. Shimizu and F. Takahashi, Structure of the ionized lunar sodium and potassium exosphere: Dawn-dusk asymmetry, *J. Geophys. Res.*, 119(4), 798—809, 2014, DOI: 10.1002/2013JE004529.

〔学会発表〕（計 4 件）

- ① 横田, 火星衛星から探る火星圏プラズマ環境, 地球型惑星圏環境に関する研究集会(招待講演), 2015 年 12 月 22 日, 立教大学.
- ② 横田, 齋藤, 北村, 西野, 綱川, 地球から月への酸素イオン輸送, 第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2015 年 11 月 2 日, 東京大学.
- ③ 横田, 齋藤, 浅村, 豊田, 月・惑星圏プラズマ観測を目的とした質量/同位体分析器の開発, 第 62 回質量分析総合討論会, 2014 年 5 月 16 日, 吹田.
- ④ 横田, 齋藤, 浅村, 西野, 綱川, Variation of the ionized lunar sodium and potassium exosphere, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会(招待講演), 2014 年 4 月 29 日, 横浜

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

横田勝一郎 (YOKOTA Shoichiro)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教  
研究者番号：40435798

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：