

月に吹く地球からの風 ～太陽と地球と月が、一直線に並ぶ時～

大阪大学大学院理学研究科 寺田 健太郎

1. はじめに ～月と地球と太陽の関係～

「お月見」、「かぐや姫」など、私たちの暮らしにとっても馴染み深い「月」。惑星科学的にいうと、直径約3400kmの地球の衛星です。木星や土星には、「月」よりも大きい衛星はありますが、惑星に対する衛星の比が4分の1もある大きな衛星は「月」しかありません。このような大きな月が地球の周りを回ることにより、潮の「満ち干き」を引き起こしたり、地球の地軸の傾きを安定化させたりしています。



図1:地球の衛星「月」。月の直径は地球の直径に比べ、4分の1もの大きさがある。

そんな月と地球は、約365日かけて太陽の周りを回っています。太陽は地球の約100倍の大きさがある恒星で、太陽内部で発生する核融合反応のエネルギーによって、地球は水が凍りつかないないし蒸発もしない絶妙な温度に保たれています。このように、1億5千万km離れている太陽も、約38万km（地球の直径の約30倍）離れたところにある月も、我々生命にとってかけがえのない存在です。

2. 太陽風と地球磁気圏

そんな私たちの母なる星「太陽」ですが、実は非常に活動的であることが知られています。通常太陽の表面温度は約6000度ですが、温度数千万度、大きさが1～10万kmもある巨大な爆発（フレア）を頻繁に起こし、紫外線やX線などの高エネルギーの電磁波や、電気を帯びた陽子や電子、微量のヘリウム、炭素、酸素などの荷電粒子を秒速300～900km（平均約500km）で放出しているのです。この荷電粒子の流れのことを「太陽風」と呼びます。高速の太陽

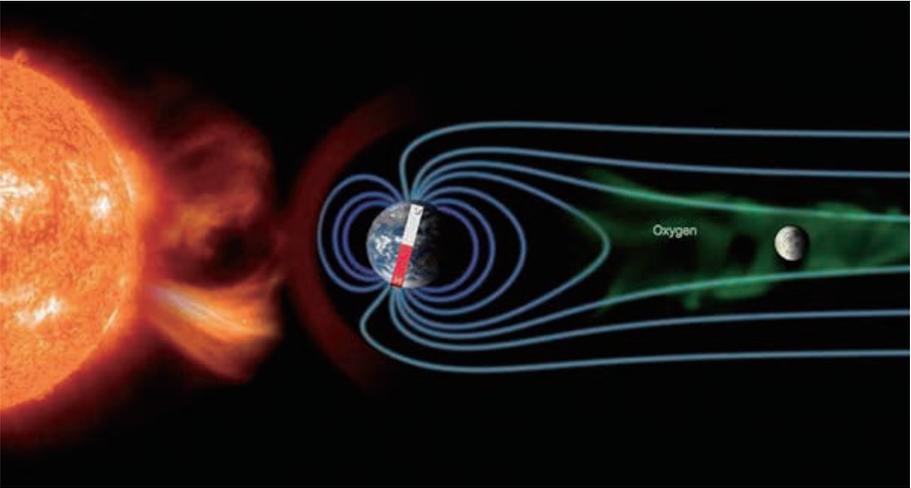


図2:太陽と地球磁気圏と月の位置関係の概念図(地球軌道を真横から見たところ)

風は2、3日かけて1億5千万km離れた地球まで到達するのですが、幸いなことに地球は磁気を帯びており、その磁力線によって太陽風から守られています(図2)。特に大きなフレアが起こると、太陽風由来の荷電粒子が、北極や南極の上空から侵入し、地球大気と衝突し発光します。これが、「オーロラ」と呼ばれる現象です(図3)。



図3:北極や南極地方で見られる「オーロラ」。高速の荷電粒子が大気を光らせる現象である(長谷川学芸員撮影)。

図2と図4に示すように、太陽風の圧力により、北極域から南極域へと繋がる磁力線は対称な形ではなく、太陽方向(昼側)では圧縮され、太陽と反対方向(夜側)では彗星の尾のように引き延ばされ、吹き流しのような形をした空間(地球磁気圏)を作っています(図2は地球軌道を真横から見たところ、図4は地球軌道を真上から見たところ)。通常、磁気圏内では荷電粒子(プラズマ)の密度はかなり低いのですが、この中央部には荷電粒子が集まって密度が高く

なったシート状の吹きだまりがあり、「プラズマシート」と呼ばれています(図4)。月は約28日かけて地球の周りを一周しますが、そのうち約5日間はこの磁気圏の中を通過し、さらに数時間から半日の間、プラズマシートを横切ります。太陽と地球と月が一直線に並ぶ時、すなわち、地球から見て月が「満月」に見える頃、月はこのプラズマシートの中を通過していると言うわけです。

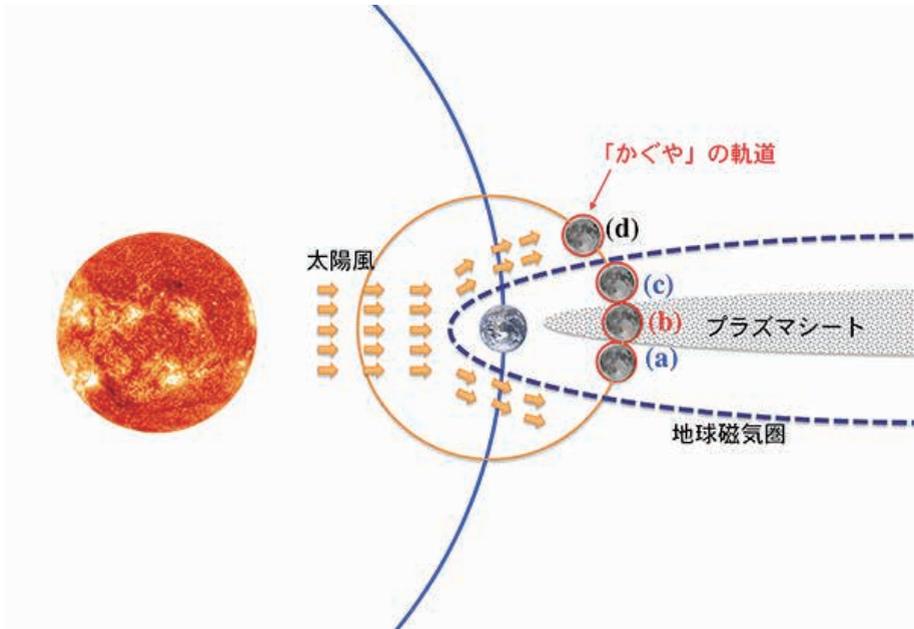


図4:今回、「かぐや」がプラズマ観測した時の地球磁気圏と月の位置関係(地球軌道を真上から見たところ)

3. 月周回衛星「かぐや」が観測した地球起源の酸素イオン

月周回衛星「かぐや」は、2007年9月に打ち上げられた日本の探査機です。「かぐや」には、地形カメラや高度計、 γ 線やX線の測定器、プラズマ観測装置など、14種類の観測装置が搭載され、2009年6月に月面に計画衝突するまで、月の起源と進化に関する有益なデータを取得しました。

今回私たちは、月周回衛星「かぐや」搭載のプラズマ観測装置が2008年に取得した、月面上空100kmのプラズマデータを再解析しました。その結果、「かぐや」がプラズマシート(図4のシャドー部分)を横切る場合にのみ、高エネルギーの酸素イオン(O^+)が現れることを発見しました(図5のスペクトルの赤線部分 約26000個/cm²/秒に相当)。これまで、地球の極域から酸素イオン(O^+)が宇宙空間に漏れ出ていることは知られていましたが、本研究により、

「地球風」として38万km離れた月面にまで運ばれていることが、世界で初めて明らかになりました。

一方、いわゆる「空気」に豊富な窒素イオン (N^+) は検出されませんでした。地上付近で約20%存在する酸素分子 (O_2) は、地球高層では酸素原子 (O)、さらに上空では電子が剥ぎ取られ酸素イオン (O^+) となるのに対し、地上で約80%存在する窒素分子 (N_2) は安定な分子であるため、窒素イオン (N^+) へと壊れにくく、地球上空の窒素イオンの存在度は酸素イオンの10分の1以下しかありません。「かぐや」が稼働していた2007–2009年は、太陽活動が比較的穏やかだったこともあり、地球から漏れ出た窒素イオンの量が少なかったためプラズマ観測装置で検出できなかったと考えています。

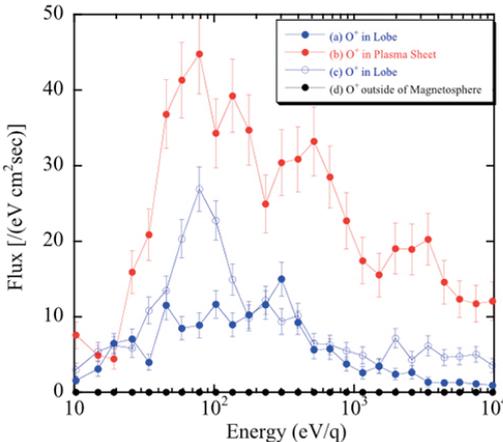


図5:「かぐや」が観測した酸素イオンのエネルギースペクトル。プラズマシート通過時(図中の赤線(b))に、 10^3 - 10^4 eVの有意な酸素イオンを検出

今回、「かぐや」が観測した1秒間に26000個/cm²の割合で酸素が地球から漏れ続けると、地球の大気はどうなってしまうのでしょうか？ 地球の大気中の酸素は、シアノバクテリアが光合成で作ったもので、今から約25億年前に急激に増加したことが、地球の岩石の分析からわかっています。現在と同じ割合で約25億年間、漏れ続けていたと仮定すると、現在の地球大気中の酸素の0.1-1%くらいが宇宙空間に散逸していると推測できます。

4. 月表土の複雑な酸素同位体組成

今回の発見で特筆すべきは、検出した O^+ イオンが1-10keVという高いエネルギーをもっていたことです。このようなエネルギーの酸素イオンは、金属粒子に衝突すると深さ数10ナノメートルまで貫入することが可能です(ナノメートルは、1メートルの10億分の1)。

酸素には質量数16、17、18の3つの安定同位体があり、そのわずかな質量

差のために、蒸発や凝縮、溶融や再結晶、化学反応や拡散などの物理化学過程によって、同位体比 (^{16}O , ^{17}O , ^{18}O の混ざり具合) がわずかに変動します。図6左のように、縦軸、横軸に標準試料の $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比と $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比の平均値からのずれの千分率 $\delta^{17}\text{O}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ を取ると、地球上の液体、固体、気体の酸素同位体はごく一部の例外を除き原点を通る傾き1/2の直線にのります。火星から飛来した隕石や、小惑星探査機「はやぶさ」が小惑星イトカワから採取した微粒子、小惑星ベスタから飛来した隕石グループの場合も、絶対値こそ異なるものの、それぞれの天体ごとに傾き1/2の質量分別線上にのります (図6左)。これは、それぞれの天体が固有の平均酸素同位体組成を持ち、母天体ごとの物理化学過程によって、独自の傾き1/2の質量分別線を変動したためと解釈されています。面白いことに、我々の「月」の同位体分別は、地球と瓜二つであり、最新の分析技術を以ってしても、アポロ計画で採取した月の岩石の酸素同位体の質量分別線と地球の分別線との有意な違いは検出できていません。

さて、話を戻しましょう。通常は傾き1/2の直線になるのですが、月の表土のごくごく表面に限ってみると状況は全く異なってきます (図6右の青いデータ)。アポロ計画で採取された月表土の表面から数10~数100ナノメートルの深さの酸素同位体は非常にユニークで、月本来の酸素成分以外に、「 ^{16}O の多い成分」と「 ^{16}O の少ない成分」があり、それが混ざって図6右の青いデータのように分布すると考えられています。この「 ^{16}O の多い成分」は、太陽風起源であることが2011年のアメリカ宇宙航空局NASAのGENESISミッションによって明らかにされましたが、「 ^{16}O の少ない成分」の起源についてよくわかっていませんでした。ただ同位体比的に、地球のオゾン層 (O_3) の酸素と似ていることは知られていました。今回の「かぐや」による観測では、濃度の

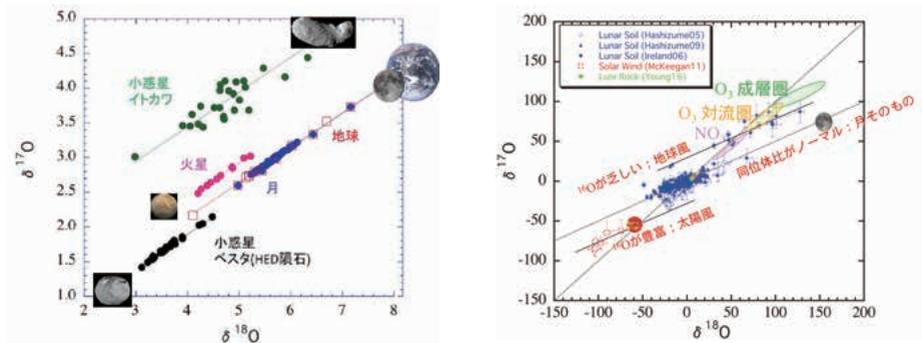


図6: 太陽系のような天体の酸素同位体比(左)と、月の表土の酸素同位体。縦軸、横軸は $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ と $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ の基準値からのずれを千分率であらわしたものの。

薄い ^{17}O や ^{18}O の直接観測はできませんでしたが（すなわち地球風の酸素同位体比は決定できませんでしたが）、地球の大気中の酸素と、月表土に保存されている酸素を、物理的に結びつけるメカニズムの観測的証拠として注目されています。

さらに今回得られた重要な知見は、月の砂の表面層の同位体比から、今は失われてしまった地球太古の大気組成が復元できる可能性を示していることです。月の砂から、地球の過去がわかるかもしれないなんて、ロマンを感じますね。

5. 終わりに

今回の発見の面白いところは、月と地球が数十億年にわたって「力学的」だけでなく、「化学的」にも影響を及ぼしあって共進化してきたことが、明らかになったことです。大きい「月」が地球の周りを公転することにより、地球環境が安定し、生命が繁栄してきました。そうした生物の活動（光合成）で作られた地球大気中の酸素が、「地球風」として38万km離れた月に到達し、月の表土に貫入し酸素同位体に影響を与えてきたというわけです。これは私自身にとっても、大変な驚きでした。以来、満月を見あげるたびに、「今頃月面に、生物由来の酸素が届いているのだなあ」とワクワクしています。この記事を読んでくださった皆さんが、月を眺めた時に「月と地球の不思議な関係」に想いを馳せてくださると大変嬉しく思います。

<参考文献>

- ・ Terada et al. Nature Astronomy volume 1, Article number: 0026 (2017)
<https://www.nature.com/articles/s41550-016-0026>
- ・ 「Nature Astronomy」著者インタビュー 「月に届く地球の風」
<https://www.natureasia.com/ja-jp/natastron/interview/contents/1>

著者紹介 寺田 健太郎(てらだ けんたろう)



1994年大阪大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程修了。博士(理学)。2012年より現職。

太陽系の美しさ・不可思議さ、広く希薄な宇宙空間における地球誕生の偶然性・必然性に魅せられて、現在に至る。専門は同位体宇宙地球化学。太陽系の年表を再構築するのが夢。

平成23年度文部科学大臣表彰「科学技術賞 研究部門」受賞