

地球と金星を作り分ける新説を提唱 —天体重爆撃が金星を乾燥させた—

<ポイント>

- 金星表層は極度に乾燥している。金星の表層水の行方は惑星科学の重要未解決問題の一つ。
- 本研究では形成末期の金星への天体重爆撃による地殻・マントルの掘削に注目。地球海洋質量相当の水と反応するのに十分な質量の岩石が大気中に放出される可能性あり。
- 天体重爆撃は地殻/マントルと惑星初期大気を混合攪拌し化学反応を起こす駆動力。金星の例だけでなく、系外惑星系でも大気質量や大気成分を決定づける重要な過程かもしれない。

<概要>

地球と金星はほとんど同じ質量であり、太陽からの距離も近いために兄弟星と呼ばれています。従って形成期の金星表層には地球の海水と同程度の水があったと考えられています^{*1}。ところが現在の金星表層は極度に乾燥しており、地球の海水量の 10 万分の 1 しか水分が存在していません^{*2}。金星表層の水の行方は地球と金星がいかにして作り分けられたか？表層に液体の水を持つハビタブルプラネットがどのように作られるか？という問題と直結しており、比較惑星学の最重要問題の一つとなっていました。

過去には金星の表層水の行方について多くの研究が行われてきました。その結果、太陽に近い金星では海が蒸発し、水蒸気の大気をまとっていた可能性が高いことが指摘されてきました。水蒸気は若い太陽からの強い紫外線^{*3}で水素と酸素に分解してしまい、軽い水素は宇宙空間に逃げてしまいます^{*4}。ところが金星サイズの惑星から地球海洋相当量の水に含まれる酸素(240 気圧相当)を宇宙空間に逃すことは容易ではありません。従って金星の表層水の行方は水蒸気の紫外線による分解と水素の宇宙空間への散逸の後に残された分厚い酸素大気をいかにして消費するかという問題に帰着すると考えられてきました^{*5}。

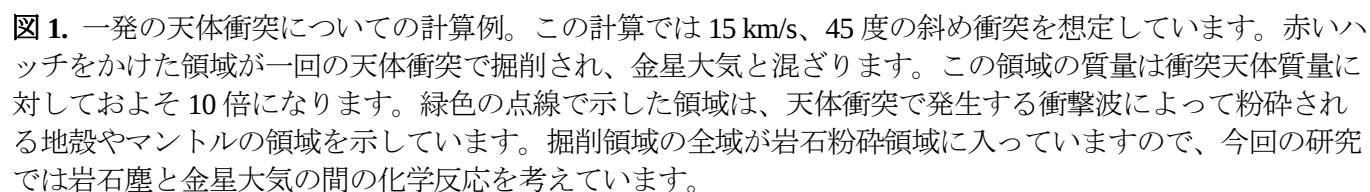
この問題に対して千葉工業大学 惑星探査研究センターの黒澤 耕介（くろさわ こうすけ）研究員は天体衝突が初期金星の水分を取り除いたとする新説を発表しました。形成末期の金星には現在の 1 万倍以上の頻度で天体衝突が起きていたと考えられています（天体重爆撃期と呼ばれます）^{*6}。この時期は太陽の紫外線が強く、水蒸気大気の光化学分解が進行する時期と重なります。天体衝突は金星の地殻・マントルを粉砕・掘削して、岩石塵を高温の初期金星大気中に放出します^{*7}。岩石塵と高温の酸素大気が反応すると岩石が酸化されることによって、大気からは酸素が取り除かれます^{*8}。従って天体衝突は正味として惑星を乾燥させる効果があることを提唱しました。

黒澤研究員は初期金星への天体重爆撃の数値モデルを構築し、天体重爆撃によって粉砕・掘削される岩石の総量を計算しました(図 1)^{*9}。その結果、大気に放出される岩石塵の総質量は現在の地球大気質量の 1 万倍に及び、原始金星においては主要な酸素消費源になり得ること、強い紫外線による宇宙空間への水素散逸の効果と合わせると、金星表層から地球の海洋質量相当の水分を消失させる可能性があることを示しました(図 2)。

初期地球にも金星と同程度の天体重爆撃があったと推定されます。しかし地球は太陽からの距離が金星よりもわずかに遠いため、水蒸気大気は凝縮して海洋を作ります。従って若い太陽からの紫外線による光化学分解を免れたと考えられます。この場合は天体衝突によって岩石塵が大気中に放出されても、酸化反応が効率よく進むことはありません。従って表層水が液体だったか、気体だったかという形態の違いによって、惑星形成過程の末期に必然的に起こる天体重爆撃に対する表層環境の応答に劇的な違いが生じ、地球と金星が作

今回の研究成果は形成末期の天体重爆撃が惑星の地殻・マントルと初期惑星大気を激しく混合させ得ることを示しています^{*8}。莫大な量の岩石塵と惑星大気間の化学反応は初期大気質量や組成を大きく変える可能性があります。金星の表層水の問題だけでなく、系外惑星の大気進化過程にも重要な役割を果たした可能性があることをも示唆する結果です。

【义】



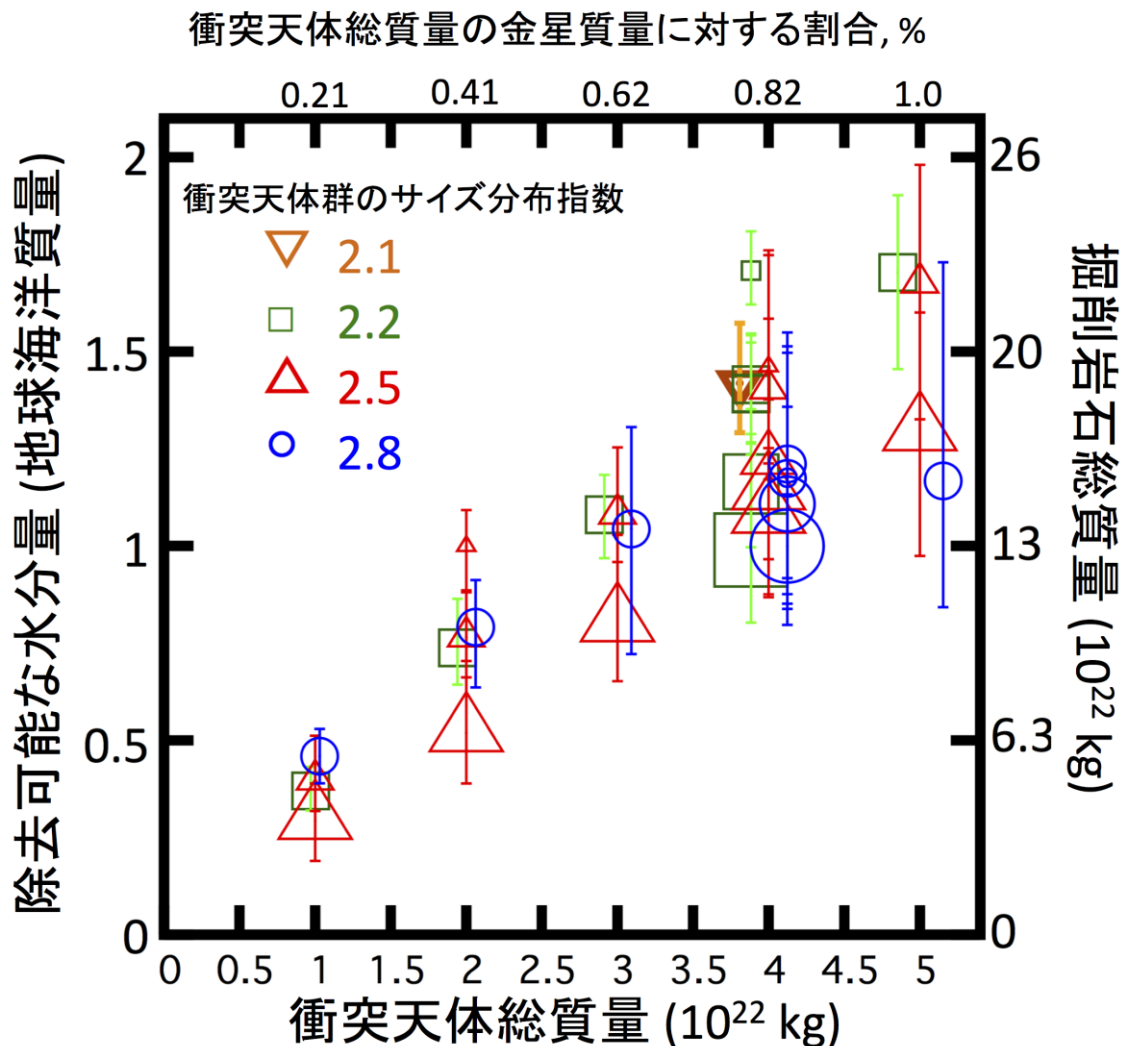


図2．衝突天体の総質量に対する除去可能な水分量の計算結果。右 Y 軸には天体衝突で掘削された岩石の総質量を示しています。金星岩石中の鉄分量と掘削総質量を合わせて、左 Y 軸に示した除去可能な水分量を算出しています。データ点の種類と色及び大きさは衝突してくる天体群についてのパラメータの違いを表しています。形成末期の金星に降り注いだ天体の総質量は現在のところ不明ですが、地球に対しては地球質量の 0.5–1 重量%の天体が衝突してきたと言われています。

<注釈>

- ※1 現在の金星の太陽からの距離は 0.72 天文単位(1 天文単位は現在の地球と太陽の間の距離、およそ 1.5 億 km のこと)です。地球と金星は非常に近い軌道で太陽の周りを公転しています。これほど近い距離にある 2 つの惑星の材料が大幅に異なったものであるということは考えづらく、形成直後の金星表層には地球表層にある水分と同程度の水が存在していたらと考えられています。
- ※2 金星大気中の水蒸気量は NASA が行ったパイオニア計画によって計測されました。金星大気にプローブを投下して計測を行いました。
- ※3 太陽に似た様々な年齢の星を系統的に調べた天文観測研究の結果から、若い太陽は現在の 100 倍から 1000 倍の強さの紫外線を放っていたと考えられています。水蒸気は紫外線を受けると水素と酸素に分解します。
- ※4 若い太陽からの強い紫外線は惑星大気を加熱します。水蒸気の光化学分解によって発生した水素が加熱されると宇宙空間に散逸してしまいます。この過程は流体力学的散逸(Hydrodynamic escape)と呼ばれています。この過程による気体の散逸率は平均分子量に依存し、軽い気体ほど速く散逸していきます。酸素は水素に比べて分子量が大きいため、金星から効率よく散逸することはできないと考えられています。

※5 水蒸気の光化学分解で生じた酸素の行方については大きく分けて3つの過程、(a)散逸していく水素の気流に引きずられて酸素が散逸、(b)太陽風イオンによる大気を持ち去り、(c)地表面の酸化が検討されてきました。(a)、(b)は残った酸素を宇宙空間に逃す過程、(c)は金星の地殻・マントルを酸化させることによって地表面に酸素を吸い取らせる過程です。それぞれに対して根拠のある反論が出されており、残存酸素の行方については未だに決着がついていませんでした。

※6 大気を持たない太陽系の固体惑星及び衛星の表面を支配する地形は衝突クレーターです。ある地形を観察したときに衝突クレーターの数が多いほうが古い地形であるとみることができます。この考え方はクレーター年代学と呼ばれています。アポロ計画によって持ち帰られた月の石の年代と月面のクレーター数密度を比較することによって月面への天体衝突頻度の進化曲線が得られており、40億年前の月面には現在の1000倍以上の頻度で天体衝突が起こっていたことがわかっています。この時期は天体重爆撃期(Heavy bombardment period)と呼ばれています。地球や金星も同様の天体重爆撃に見舞われたと考えられています。天体重爆撃は惑星集積過程で惑星になりそこねた天体群が衝突してくる(Accretion tail などと呼ばれます)ために起こったと考えられており、惑星形成過程の末期には必然的に発生すると予想されます。

※7 粉碎された岩石塵の粒子サイズは月のレゴリス粒子と同程度の50-100ミクロンと予想されます。

※8 金星の岩石中には地球と同様に酸化鉄(II)が含まれていることが、過去の金星探査によってわかっています。酸化鉄(II)(FeO)が高温の金星大気中に放出されると、残存酸素と化学反応して赤鉄鉱(Fe₂O₃)に変化します。このとき残存酸素が大気から取り除かれます。化学量論の計算から90kmの厚さの岩石層を酸化させると、地球海洋質量の水分に含まれる酸素をすべて消費することができることがわかります。この過程は補足説明※5で述べた地殻・マントルの酸化によって残存酸素を取り除くというアイデアを元としています。従来の「地殻・マントル酸化説」の弱点は厚さ90kmの岩石層を大気と混合・攪拌させる駆動力が見つからないことでした。本研究ではその駆動力として天体重爆撃を提案し、数値モデルによって頻発する天体衝突による原始金星の地殻・マントルの粉碎・掘削が金星大気と岩石層を十分に混合・攪拌することを示しています。

※9 地球化学的な分析から地球にはその質量の0.5-1重量%の天体が衝突したと言われています。金星も同程度の天体重爆撃を経験しただろうと仮定してモンテカルロ法を用いた確率論的重爆撃モデルを構築しました。過去の研究から推定された天体重爆撃の天体群のサイズ、衝突速度、衝突角度分布からランダムに天体を選び出し、衝突天体の衝突天体の総質量が閾値に達するまで計算を繰り返しました。個々の天体衝突で掘削され、大気中に放出される岩石塵の質量は過去の衝突実験によって較正されたπスケーリング則と、岩石が掘削される際の流線を記述するZモデルを組み合わせて解析的に算出しました。

<掲載論文>

Kosuke Kurosawa, Impact-driven planetary desiccation: The origin of dry Venus, *Earth and Planetary Science Letters*, **429**, 181-190, 2015.