

<ポイント>

**タイタン・原始地球大気への生成過程を解明**

—有機物エアロゾルを生成する反応メカニズムを制約—

- ・ 土星の衛星タイタンは全球が分厚いヘイズ（有機物エアロゾル）で覆われており、酸素濃度が増大する以前の原始地球も似たような環境だった可能性があるが、ヘイズの生成過程はあまりわかっていなかった。特に、大気の中層において、太陽から照射される比較的波長の長い遠紫外線によってエアロゾルが生成される反応機構はあまり制約されてなかった。
- ・ 遠紫外線光源を製作し、タイタンや原始地球の模擬大気に照射することで有機物エアロゾルを生成した。エアロゾルの成長率や化学構造を測定し、また光化学反応計算との比較により、反応機構を制約した。
- ・ メタンの少ない大気組成では成長率が小さいこと、またエアロゾル粒子は直鎖状炭化水素を多く含み、粒子表面での不均一反応によって成長していることがわかった。
- ・ 原始地球においては、従来考えられていたよりも有機物エアロゾル層は薄い可能性があることを示唆した。

<概要>

土星最大の衛星タイタン（※1）は天体全体がオレンジ色の分厚いヘイズ（有機物のエアロゾル）で覆われており（図 1）、太陽からの紫外線や高エネルギー粒子をエネルギー源として、大気中で炭化水素分子が様々な反応を繰り返して重合していることが知られています。このような現象は光合成細菌の活動によって酸素濃度が増大する以前の太古の地球（約 25 億年前）（※2）でも起こったと考えられており（図 1）、生命の起源となる前駆物質を合成する環境として大きな注目を集めています。またヘイズは太陽光を遮るため、惑星の気候を左右する上でも重要な役割を果たしています。

タイタン大気中でのヘイズの生成過程は、アメリカ航空宇宙局(NASA)と欧州宇宙機関(ESA)によって 1997 年から 2017 年まで行われたカッシーニ・ホイヘンス探査によってある程度理解されてきましたが、まだ不明な点も数多く残されています。特に、比較的波長の長い遠紫外線（120 - 300 nm）によってエアロゾルが生成するメカニズムはあまり解明されておりました。タイタンでは遠紫外線よりも波長の短い極端紫外線や高エネルギー粒子によって反応が駆動されていますが、実は地球では遠紫外線の照射量のほうがはるかに大きいことが知られております。そのため原始地球の気候を理解する上で、遠紫外線による反応メカニズムを調べるのが重要でした。

そこで千葉工業大学惑星探査研究センターの洪鵬研究員（当時：東京大学新領域創成科学研究科）、東京大学理学系研究科の関根康人准教授および杉田精司教授らは研究グループを組み、遠紫外線を発生させることができる水素—ヘリウム光源を製作し、タイタンと原始地球の大気組成を模擬したメタンと二酸化炭素の混合気体に照射しました（図 2）。そして生成したエアロゾルの生成率や赤外透過スペクトル（※3）、気相分子の質量分析（※4）を行いました。その結果、メタンより二酸化炭素が多い大気組成ではエアロゾルの生成率が大きく下がること、生成されたエアロゾル粒子には直鎖状炭化水素に由来する化学結合が多く含まれるこ

とがわかりました。さらに実験結果を解析するために、光化学反応（※5）を計算する数値モデルを構築し計算したところ、従来想定されてきた低次の炭化水素重合反応よりも、粒子表面でメチルラジカル（※6）の付着による不均一反応（※7）が卓越することがわかりました。

これらの結果から、タイタンの中層大気では不均一反応による粒子の成長が卓越すること、また原始地球では従来の予想よりも有機物エアロゾル層が薄くなる可能性が示唆されました。近年、冥王星や太陽系外の惑星でもヘイズ層の存在が確認されており、本研究で得られた知見はそのような還元的な大気を持つ天体にも広く適用できると予想されます。研究成果は、2月15日付の欧州科学雑誌「*Icarus*」電子版に掲載されました。

【図】

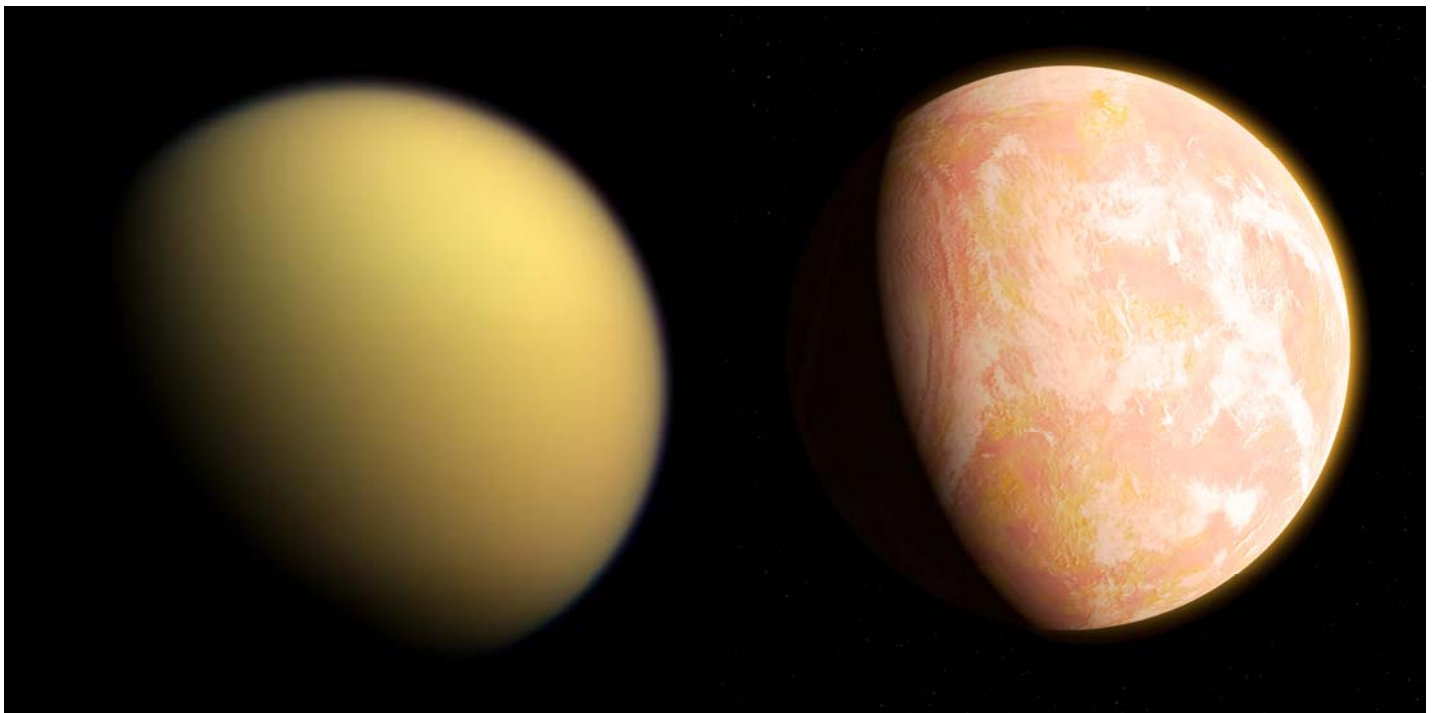


図1.（左）土星の衛星タイタン。全球がオレンジ色の分厚いヘイズで覆われているため、地表面が隠れている。この画像は2005年9月21日にカッシーニ探査機が高度21万3000 kmから撮影。（Image Credit: NASA/JPL/Space Science Institute）（右）酸素濃度が上昇する前の太古の地球の想像図。現在のタイタンと同様に大気中には有機物のエアロゾルが大量に存在し、惑星全体がオレンジ色に見えていた可能性がある。（Image Credit: NASA's Goddard Space Flight Center/Francis Reddy）

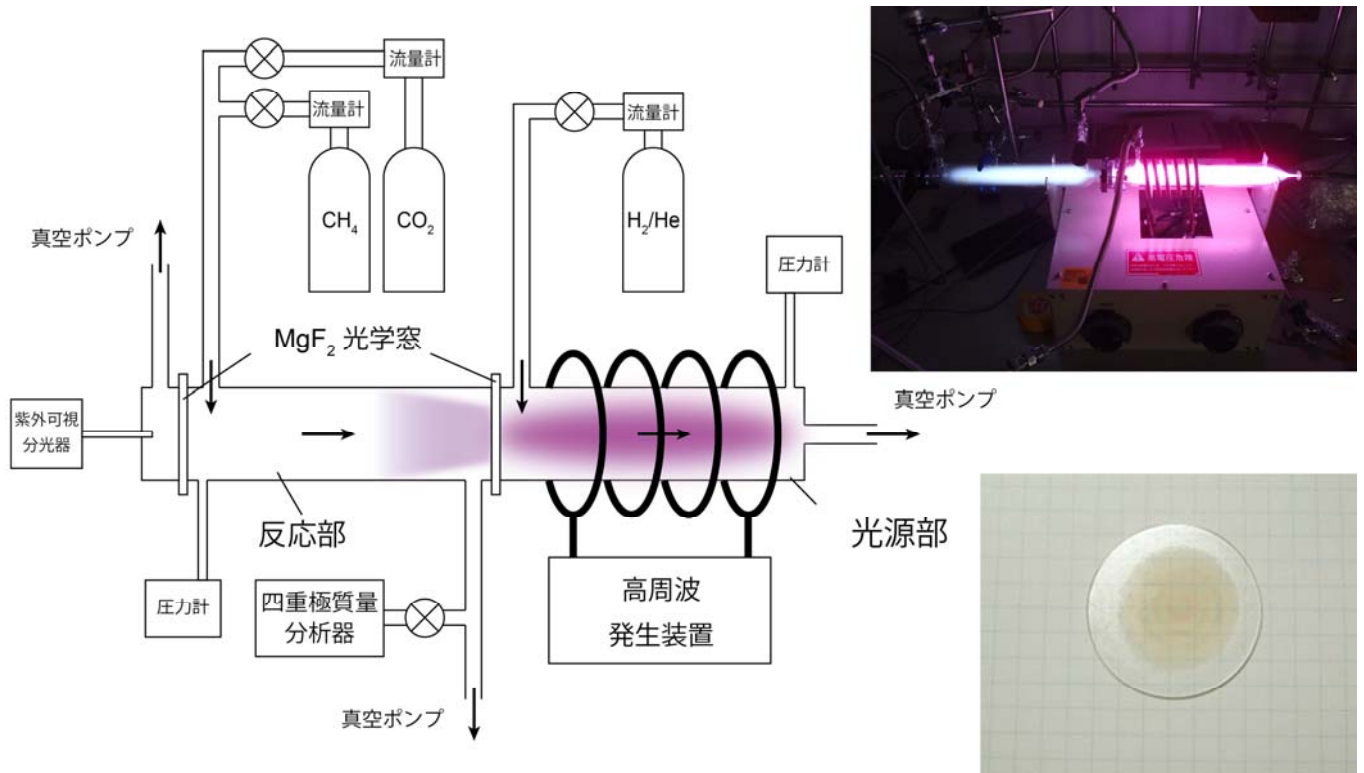
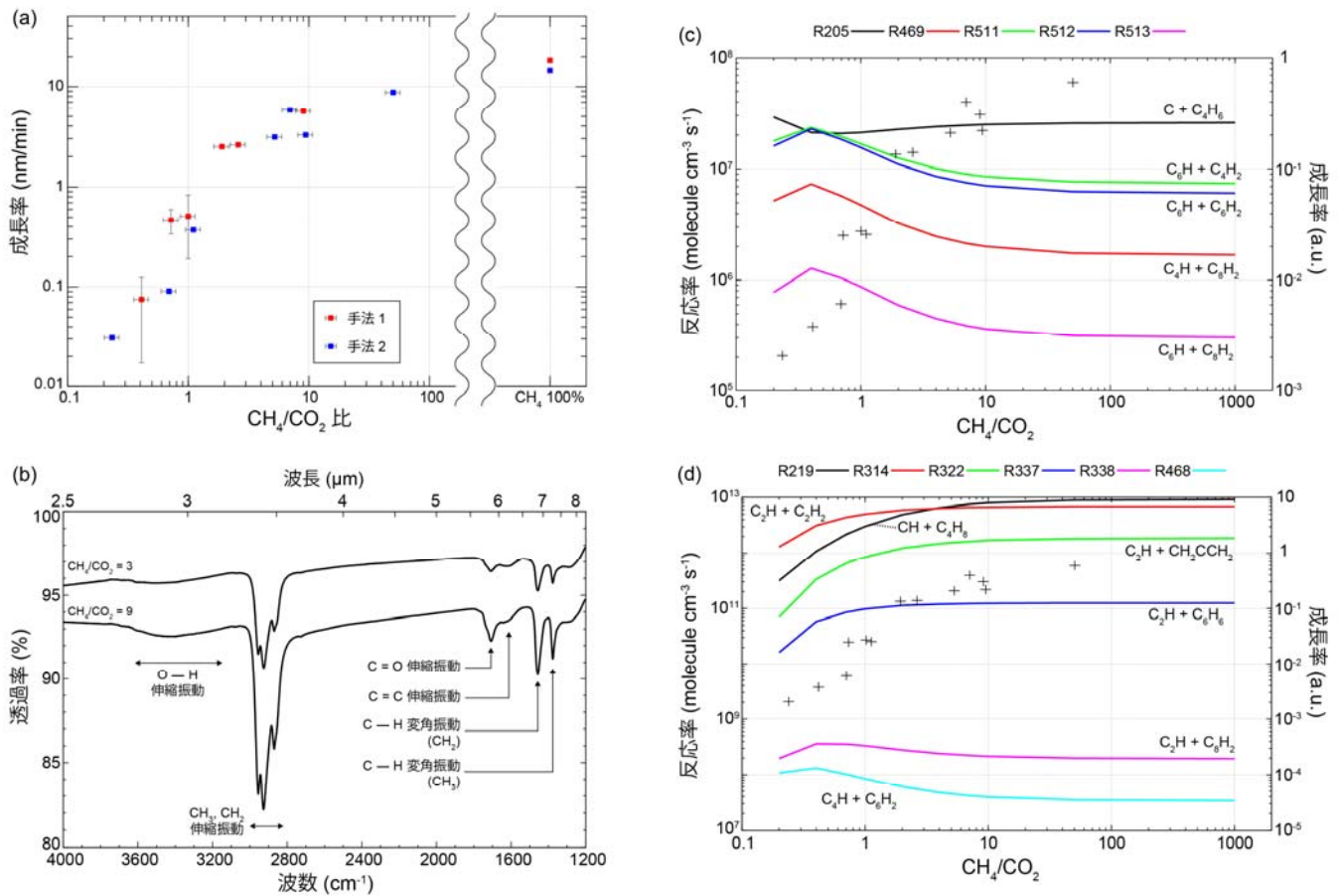


図2. (左) エアロゾル生成装置の模式図。(右上) 紫外線照射実験中の反応部(左側)と光源部(右側)。(右下) 光学窓の表面に付着したオレンジ色の有機物エアロゾル。



**図3.** (a) 実験によって計測された有機物エアロゾル層の成長率。メタンと二酸化炭素の比が小さくなると、成長率が大きく下がる。(b) 生成された有機物エアロゾル層の赤外透過スペクトルの典型的な例。エアロゾル粒子には直鎖状の炭化水素分子に特徴的に見られる化学結合 ( $\text{CH}_3$  と  $\text{CH}_2$  の伸縮振動) が多く含まれ、環状の炭化水素に特徴的な  $\text{C}=\text{C}$  結合はあまり含まれないことがわかった。(c) と (d) 光化学モデルによって計算された高分子炭化水素の重合反応の反応率 (各曲線)。実験で計測されたエアロゾル粒子の成長率 (黒十字) は、従来予想されてきた比較的低次の重合反応とは調和的でないことがわかった。

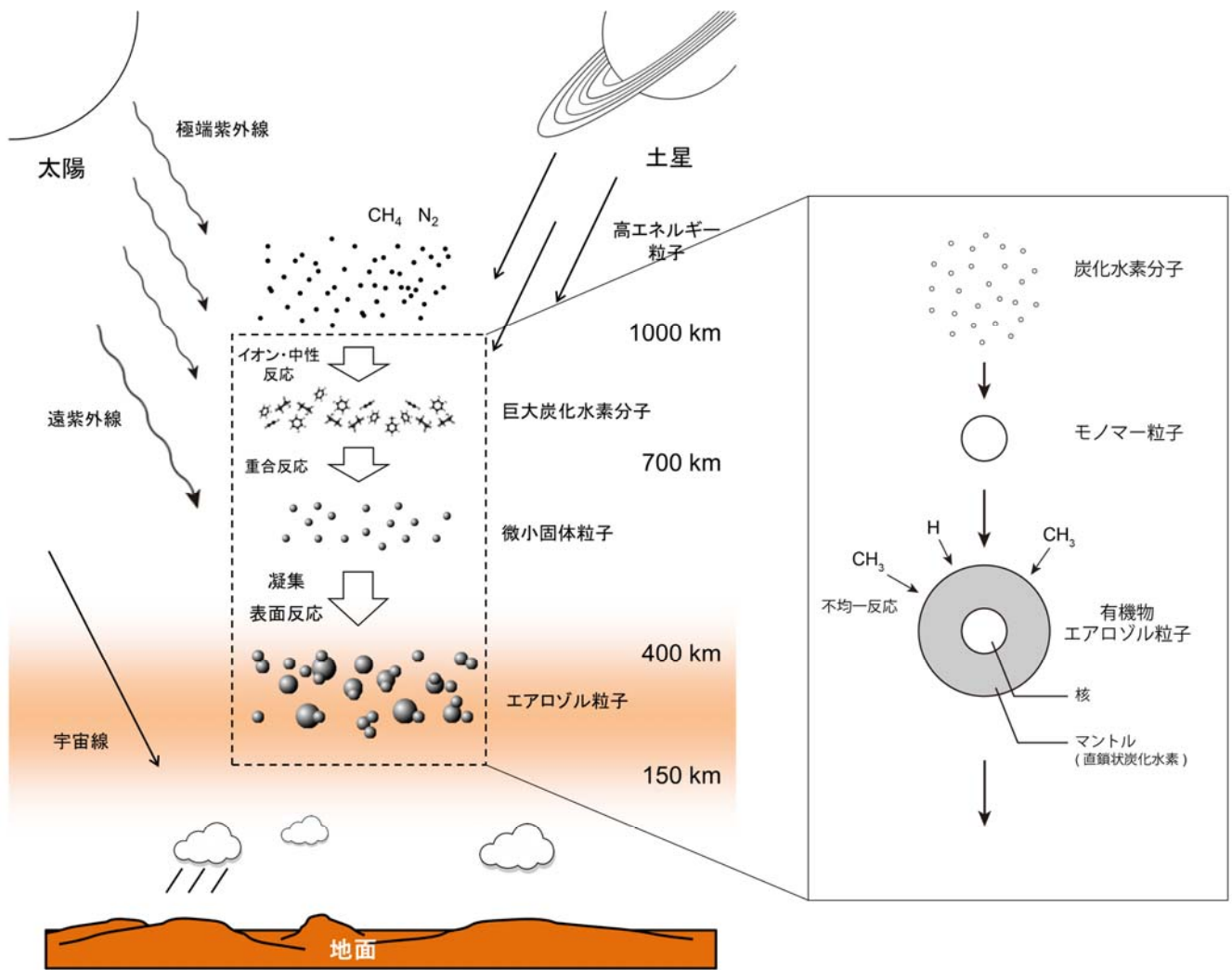


図4. タイタン大気中での有機物エアロゾル生成過程の模式図。本研究で特に着目した領域を右枠内以示す。

## <注釈>

※1. タイタンは直径が 5,150km にもなる土星系最大の衛星であり、惑星である水星よりも巨大な天体です。タイタンが他の衛星と比べて特徴的な点は、地表面で 1.5 気圧になる窒素の厚い大気を持っている点です。大気中には窒素の他にメタンも豊富に含まれ、化学反応で生成した複雑な有機物によって全球が覆われています。タイタンは太陽から非常に遠く、表面温度は $-180^{\circ}\text{C}$ と極めて冷たいため、水は液体の状態では存在できませんが、メタンなどの炭化水素が液体で存在し、湖を作っていることが確認されています。

※2. 酸素は大気中で生成された炭化水素分子を酸化して破壊します。そのため、酸素に富む現在の地球大気では、タイタンで現在起こっているような活発な有機物生成は発生しておりません。一方、約 25 億年以上前の地球大気には酸素がほとんど存在しなかったため、現在のタイタンと同様に有機物を生成する様々な反応が大気中で起こったと予想されています。

※3. 物質を透過した光を分光して計測すると、特定の波長において物質中の特定の化学結合によって光が吸収されるので、物質中にどのような化学結合が存在するのか予想できます。そのため、計測された光からどのような物質で作られているのかがわかります。

※4. 質量分析によって、分子量（または原子量）ごとの気体分子の存在量がわかります。これによって気体の組成がわかります。

※5. 光化学反応は紫外線や高エネルギー粒子などの照射によって開始される反応のことです。地球の大気中で起こる光化学反応の有名なものとして、酸素からのオゾン生成、またフロンによるオゾンの破壊などが挙げられます。

※6. ラジカルとは分子（または原子）から結合がとれたり、電荷が負荷されるなどして、エネルギーが高くなり反応性が高くなった状態の分子のことです。メチルラジカルはメタン( $\text{CH}_4$ )から水素原子が一つ取れ、 $\text{CH}_3$ になった状態の分子です。

※7. 不均一反応とは、固体と気体など、2 種類以上の相が共存する状態での反応のことです。本研究ではエアロゾルの粒子表面で起こる、分子の付着に注目しました。

## <掲載論文>

Peng K. Hong, Yasuhito Sekine, Tsutoni Sasamori, Seiji Sugita, Experimental study of heterogeneous organic chemistry induced by far ultraviolet light: Implications for growth of organic aerosols by  $\text{CH}_3$  addition in the atmospheres of Titan and early Earth, *Icarus*, **307**, 25-39, 2018.

## <お問い合わせ先>

洪 鵬 (コウ ホウ)

千葉工業大学 惑星探査研究センター 研究員

〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

TEL: 047-478-0198 FAX: 047-478-0372

E-Mail: [hong@perc.it-chiba.ac.jp](mailto:hong@perc.it-chiba.ac.jp)