

系外惑星大気の化学

川島 由依

〈理化学研究所開拓研究本部 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: yui.kawashima@riken.jp



1995年の初めての発見以降、現在までに5,000個近くの太陽系外惑星の発見が報告されている。特にここ5-10年程の間には発見された系外惑星の大気の観測が進み、系外惑星を「発見」する時代から、発見された惑星の大気の「特徴付け」を系統的に行う時代へと移り変わってきた。これにより、系外惑星の大気を持つ化学の多様性も徐々に明らかとなってきた。また、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡やAriel宇宙望遠鏡などにより、今後、さらなる系外惑星大気化学の進展が期待されている。本稿では、現在の主要な観測ターゲットである水素に富んだ大気を中心に、系外惑星大気の化学について現状の理解を概説するとともに、今後の展望を述べる。

1. はじめに

1995年に初めて太陽系外の惑星（系外惑星）が発見されて以降 [1]、現在までに5,000個近くの系外惑星の発見が報告されている [2]。ナトリウムの検出による系外惑星大気の観測が初めて報告されたのは2002年のことである [3]*¹。系外惑星大気の観測が始まった当初は、大気の観測が行えるような惑星の数は非常に限られていた。しかしその後、系外惑星の発見の進展に伴い大気観測に適したターゲットの数も徐々に増え、特にここ5-10年程の間に系外惑星大気の観測は大幅に進んだ。なお、現在のところ、大気観測の主なターゲットは水素に富んだ大気である。これは、地球のような小さな惑星と比べると木星や海王星のような大きな惑星の方が観測がしやすく、そのような大きな惑星は形成時に、惑星の形成場である原始惑星系円盤の水素に富んだガスを捕獲しやすい

ためである。

系外惑星大気中での検出が報告された化学種について述べると、従来は、可視光域で強い吸収を示すアルカリ金属のナトリウム(Na) やカリウム(K) (例えば [3])、そして水素に富んだ大気において存在量が比較的多い水蒸気(H₂O) やメタン(CH₄)、一酸化炭素(CO) など (例えば [5]) にほぼ限定されていた。しかし最近では、特に高分散分光データとモデルスペクトルとの相互相関をとる手法を用いた検出方法により、酸化チタン(TiO; [6] など) やシアン化水素(HCN; [7] など)、ヒドロキシラジカル(OH; [8] など) のような比較的存在量が少ない分子、またNaやK以外の中性・イオン化原子の発見が相次いで報告されている ([9] など)。加えて、大気中におけるエアロゾル（雲やヘイズ）の存在を示唆する、分子や原子の吸収特徴が大気のスเปクトル中にあまり見られないような観測結果も多数報告され (例えば [10,

*¹ なお、この際に大気中のナトリウムの検出が報告された系外惑星HD 209458bに対して高分散観測を行った最近の研究 [4] では、ナトリウムの吸収特徴がある波長付近の惑星大気を透過したスペクトルは中心星の表面における明るさの違いとロシター・マクローリン効果を考慮することによって説明できるとされ、この惑星の大気中におけるナトリウムの存在には疑問も呈されている。

11)], 系外惑星大気の化学の多様性が明らかとなってきた。

大気の化学組成を知ることは、大気を理解するうえで必須である。これは、大気内の各高度（圧力）における化学種の存在量は、大気温度構造や三次元的な大気循環、中心星からの紫外線放射など、様々な未知の物理量が相互に依存しあって決定されているからである。また、一部の化学種の気体の存在量は大気中でのエアロゾルの生成とも密接に関係している。さらに、大気の化学組成の理解は一歩進んでその惑星の形成・進化過程を紐解く足掛かりでもある。系外惑星の観測により木星のような巨大ガス惑星が中心星の近傍で発見され、惑星は現在の軌道の位置で形成されるのみならず、惑星形成の材料が豊富な中心星から比較的離れた場所で形成された後に中心星方向へ移動する可能性が指摘された [12]。この惑星の軌道移動の有無を見分ける方法の一つとして、大気の化学組成が着目されている。巨大ガス惑星の大気は原始惑星系円盤のガスをまとうことで形成されるが、炭素と酸素の比などの円盤ガスの元素存在度比は円盤内での場所によって異なるため、大気元素存在度比は惑星の形成位置を反映しているのではないかと期待されている [13]。

2. 系外惑星大気の観測手法

系外惑星大気の化学を議論するにあたり、その観測手法について簡単に触れる。系外惑星大気の観測は、主に二種類の大气のスペクトルの観測により行われている。

一つ目は、恒星や太陽系内惑星の大気について観測が行われているような、一般的な大気の放射スペクトルである。大気の化学組成や観測波長によっても異なるが、現在の観測の主なターゲットである水素に富んだ大気の場合、可視光域や近赤外線域ではおおよそ圧力で0.1-1 bar^{*2}付近の大

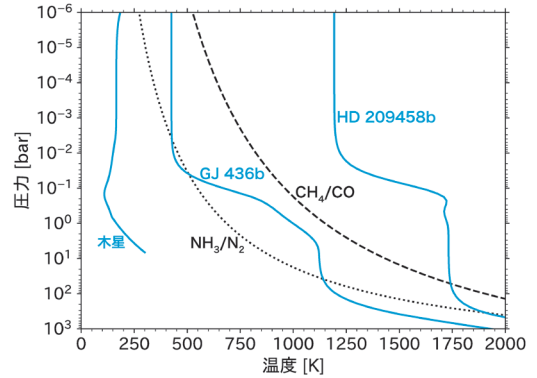


図1 CH₄とCO（黒色の破線）、NH₃とN₂（黒色の点線）の存在量が等しくなる温度・圧力条件 [16, 17]。青色の実線は [18] の温度構造モデルを用いて計算した、中心星近傍の木星サイズの惑星 HD 209458b と海王星サイズの惑星 GJ 436b の温度構造である。また、参考として木星の温度構造モデル [19] も示す。

気を観測することができる。また放射光の強度は温度の四乗に比例するため、放射スペクトルの観測は高温の惑星に適している。

中心星からの距離が十分に離れた惑星については、中心星の光をコロナグラフで隠すことにより惑星の放射スペクトルのみを直接観測することができる。一方、現在発見されている系外惑星の大多数を占める中心星近傍の惑星についてはそのような手法は取れないため、間接的な放射スペクトルの観測手法が用いられている。塩谷圭吾氏らによる2012年4月号の天文月報記事 [14] の図1もともに参照されたいが、通常、地球には中心星からの光と惑星からの光が合わさったものが届いている。しかし、地球から見て惑星が中心星の背面を通過する二次食が起こった場合、一時的に惑星からの光のみが地球に届かなくなる。この二次食前後の差分を取ることで、惑星大気の放射スペクトル成分のみを取り出すというのが、中心星近傍の惑星に対して行われている放射スペクトルの観測方法である。中心星近傍に存在する惑星は中心星

*2 1 bar = 10⁵ Pa, また地球の標準大気圧 1 atm = 1.01325 bar である。温度が 1,000 K の場合、理想気体の状態方程式より、1 bar は数密度 $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ に対応する。

どの潮汐相互作用により、ちょうど地球と月の関係のように中心星に常に同じ面を向けながら公転している。つまり、恒久的な昼面と夜面を持っている。惑星が二次食を起こす直前・直後は昼面を地球側に向けていることになるので、この手法により観測ができるのは惑星の昼面の放射スペクトルである。なお、いくつかの惑星については、惑星が中心星の周りを一周期公転する様子を継続的に観測する位相曲線の観測も行われており、この観測では、惑星の昼面のみならず全球の大気観測が可能である。

系外惑星で観測がなされているもう一つの大気スペクトルは、惑星大気を透過した中心星の光を分光する、大気透過スペクトルである。これは先程の、地球から見て惑星が中心星の背面を通過する二次食ではなく、中心星の前面を通過する一次食（トランジット）の際に、惑星大気を透過した中心星からの光の成分を分光する方法である。中心星からの光は、惑星の大気を鉛直方向ではなく水平方向に透過するので、典型的に数桁程度 [15]、大気の光学的厚みが増す。そのため、前述の放射スペクトルと比較すると大気の圧力（密度）が低い部分（典型的には 1 mbar 程度）、つまり大気上層を観測することになる。またこの手法で観測されるのは、大気の昼面と夜面の境界（明け方と夕方）である。大気透過スペクトル中の分子や原子の吸収特徴の強度は、 $(R_p + H)^2/R_*^2 - R_p^2/R_*^2 \sim 2R_p H/R_*^2$ に比例する。ここで、 R_p と R_* はそれぞれ惑星と中心星の半径、 H は惑星大気のスケールハイトで $H = RT/\mu g$ (R は気体定数、 T は温度、 μ は大気平均分子量、 g は重力加速度) である。そのため、温度が高く、水素に富んだ大気のように平均分子量が小さく、また重力加速度が小さな惑星ほど観測しやすい。

3. 大気各層における支配的な化学過程

次に、大気各領域で化学組成を決定している

主な大気化学過程について議論する。大まかに述べると、大気下層では熱化学反応が、中層では大気循環による混合が、上層では中心星から照射される紫外線が駆動する光化学反応が、それぞれの化学過程を支配している。以下では、この3つの過程について順に論じる。

3.1 熱化学反応と熱化学平衡

可視光・近赤外線域の放射スペクトル観測で探ることができるような大気下層では、圧力、つまり密度が高いために、化学種同士の衝突頻度が高く、熱化学反応のタイムスケールが短い。また、中心星からの紫外線も大気下層まではほぼ届かず光化学反応もあまり起こらないため、熱化学平衡（各熱化学反応の順反応と逆反応がともに効率的に起こっていることにより、ギブスの自由エネルギーの総和が最小となっている状態）の仮定が比較的妥当である。基本的に、反応速度定数は温度が高いほど大きくなるため、熱化学平衡の仮定は、現在の観測の主流である中心星近傍に存在するような高温（温度 $T \geq 1,000$ K）の惑星について特に当てはまる。次のセクションで述べるように、大気の混合や光化学反応、エアロゾルの生成等、大気の組成を熱化学平衡状態から逸脱させる過程はいくつか存在するが、熱化学平衡の仮定は、第0近似的に、ある温度の惑星大気で各元素がどの化学種として主に存在しうるかの目安として使えるため有用である。

例えば、太陽組成で比較的存在量の多い元素である炭素と窒素は、可視光・近赤外線域での系外惑星大気観測に関わる温度・圧力条件では、熱化学平衡の下でそれぞれ主に CH_4 または CO 、 NH_3 または N_2 として存在する。図1に、 CH_4 と CO 、また NH_3 と N_2 の熱化学平衡での存在量が等しくなる大気温度・圧力条件（太陽組成の元素存在度の場合） [16, 17] を黒線で示す。線の右上側、つまり高温・低圧側では、C または N は、 CO または N_2 として存在する方が安定である。これはルシャトリエの原理により、温度が高く／圧力が

低く、つまり数密度が低くなると、それを打ち消す方向、すなわち数密度を高くする方向に反応が進み、平衡が移動するためである。そのため、以下に示す CH_4/CO 間と NH_3/N_2 間の化学反応式はそれぞれ、反応により数密度を高くする右向きへと進む。



なお、上記の式は正味での化学反応式を示している。温度・圧力条件により、 CH_3OH や CH_3 などの中間体の化学種を通した $\text{CO} \rightleftharpoons \text{CH}_4$ 間や $\text{NH}_3 \rightleftharpoons \text{N}_2$ 間の変換が卓越するかは異なる^{*3}。

図1において青色の実線は、[18]のモデルを用いて計算した、中心星近傍に存在する木星サイズの惑星 HD 209458b と海王星サイズの惑星 GJ 436b の温度構造を示している。また参考として、木星の温度構造モデル [19] も示す。仮に大気全体が熱化学平衡状態になっていると仮定すると、高温の HD 209458b では、C は CO として、また N は N_2 として存在するのに対し、それよりも低温の GJ 436b では、C は CH_4 として、N については大気下層（圧力 $P \geq 0.1$ bar）では N_2 、大気上層（ $P \leq 0.1$ bar）では NH_3 として存在することがわかる。

3.2 大気循環による混合

前章で述べたように、圧力の高い大気下層では熱化学平衡の仮定が妥当であるが、大気透過スペクトルで観測ができるような大気中層（圧力 1 mbar 付近）では、大気循環による混合の影響を考慮することが重要となってくる。これは、大気上層にいくに連れ、圧力、つまり密度が低くなると、化学種同士の衝突頻度が減るために熱化学反応のタイムスケールが長くなり、あるところ

で大気混合のタイムスケールの方が短くなってしまふからである。大気循環による混合は、拡散過程として渦拡散係数 K_{zz} を用いて表される。渦拡散は、混合率（ある化学種の数密度を全化学種の数密度の合計で割ったもの）を圧力（高度）に対して一定に保つように働くため、ある高度よりも上層では、化学種の混合率が一定となる（このような過程はクエンチと呼ばれている）。すなわち大気中層で観測される存在量は、それよりも下層の大気での温度を反映した存在量となっている可能性がある。

図2は、太陽組成の元素存在度を仮定し各圧力における化学種の存在量を計算した結果である。点線は熱化学平衡状態の存在量の分布を、実線は一次元光化学モデル [23] により、熱化学反応と渦拡散による大気混合、光化学反応を考慮した場合の存在量の分布を示している^{*4}。例えば CH_4 の混合率の分布（紺色）に着目すると、大気下層（ $P \geq 1$ bar）では実線と点線が重なっており、密度が高いために CH_4 の存在量は熱化学平衡状態となっていることがわかる。一方、 10^{-4} bar $\leq P \leq 1$ bar では、渦拡散による混合により、 CH_4 の混合率は熱化学平衡の値とは一致せず、また圧力（高度）に対して一定になっていることがわかる。つまり、 CH_4 の混合率は $P \sim 1$ bar でクエンチしている。また、 NH_3 （水色）や N_2 （薄い水色）の混合率を見ると、計算領域下端の 1,000 bar あたりからすでに熱化学平衡値からずれており、窒素系の化学種は CH_4 よりも大気下層から、大気混合の影響が効き始めていることがわかる。これは、 $\text{CH}_4/\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$ 間の化学反応タイムスケールに比べて、 NH_3/N_2 間の変換タイムスケールが長いためである [20, 21]。

なお、このようなクエンチは鉛直方向だけではなく水平方向に対しても起こると考えられてい

^{*3} 詳細については、例えば [20, 21] を参照。

^{*4} 仮定した温度構造や中心星の紫外線スペクトル等の計算設定については、[22] の放射温度を $T_{\text{irr}} = 1,290$ K とした場合の説明をご参照頂きたい。

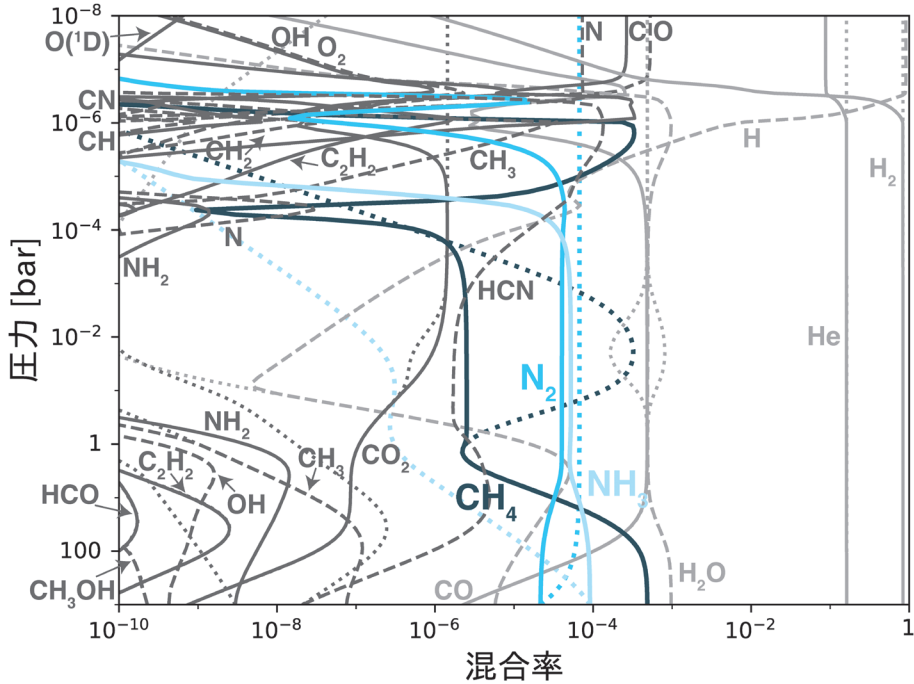


図2 太陽組成の元素存在度を仮定し、各化学種の存在量を計算した例。実線および破線は光化学反応と熱化学反応、渦拡散による大気混合を考慮した一次元光化学モデル[23]による計算結果であり、点線は熱化学平衡モデル[23]による熱化学平衡状態での存在量を示す。紺色および水色、薄い水色の線は本文で紹介するCH₄およびNH₃、N₂の存在量を、薄い灰色の線は熱化学平衡状態で多く（混合率 $\geq 10^{-6}$ ）存在する化学種の存在量を、またそれ以外の化学種の存在量を濃い灰色で示す。[22]の図19(a)を改変（フルカラーの図はそちらを参照）。

る。前述したように、中心星近傍に存在する惑星は潮汐固定されているため、恒久的な昼面と夜面を持ち、経度方向に大きな温度勾配が生じている。その結果、経度方向への大気循環が激しい場合、最も温度の高い恒星直下点付近^{*5}の化学組成が惑星全体の化学組成を支配しうると考えられている[24]。

3.3 光化学反応

現在の一次食・二次食観測の主なターゲットである短周期系外惑星（中心星近傍に存在する、公転周期が短い惑星）は、中心星からの距離が非常に近いために、中心星からの強烈な紫外線の照射を受けている。そのため大気上層では、この紫外

線が駆動する光化学反応が活発に起きている。図2で、 $P \leq 10^{-4}$ barの大気上層でH₂OやCO、NH₃等の混合率が急激に減少しているのは、中心星からの紫外線によりこれらの分子が光分解されているためである。これにより、このような大気上層では、熱化学平衡状態（点線）の場合には見られないようなHCN、C₂H₂、OHなどの様々な分子種（濃い灰色の実線・破線）が光化学反応により生成されていることがわかる。

系外惑星大気観測の主流である可視光・近赤外線域での大気透過スペクトル・放射光スペクトルで探ることのできる領域は、基本的には、このような光化学反応が活発に起きる領域よりも下層で

*5 なお、最も温度が高い「ホット・スポット」は、水平方向への大気循環の影響で恒星直下点よりも東側にずれることが三次元大気循環モデルから予測されており[25]、実際の位相曲線の観測でも、いくつかの惑星についてこのオフセットが見られている（例えば[26]）。

あるため、光化学反応の影響はあまり見られないと考えられている。しかし、ハッブル宇宙望遠鏡などを用いた紫外線観測では、このような大気上層を観測でき、大気散逸の様子なども観測されている(例えば[32, 33])。これは、可視光域や近赤外線域に比べ、紫外線では大気の光学的厚みが大きいからである。大気上層での光化学反応は、次章で述べるヘイズの生成やほかにも大気散逸にとって重要である。

4. エアロゾル

1章でも述べたように、近年の大気透過スペクトルの観測により、分子や原子の吸収特徴が見られないようなスペクトルを持つ系外惑星が多数、発見されている[10, 11]。この原因は、系外惑星大気中に存在するエアロゾルによるものだと考えられており、エアロゾルも系外惑星の大気化学を語るうえで欠かせないものとなっている。なお、スペクトル中に分子や原子の吸収特徴が見られない原因がエアロゾルだとされているのは、質量と半径の情報から水素を主体とする分厚い大気を持っていると考えられる惑星(つまり平均分子量が小さく、大気のスケールハイトが大きい)に対して、予想される吸収特徴の大きさよりも遥かに小さな波長方向の変動しかスペクトル中に観測されなかったためである。前述したように、大気透過スペクトル中の吸収特徴の大きさは、おおよそ $2R_p H / R_*$ に比例する。そのため、高平均分子量、つまりスケールハイトの小さな大気を持つ可能性がある小さな惑星については、例え吸収特徴のあまり見られないスペクトルが観測されても、それが大気平均分子量が高いことによるものなのか、エアロゾルの影響なのかを見分けることは難しい。

系外惑星のエアロゾルとしては、雲とヘイズの二種類が考えられている。ここでいう雲とは、地

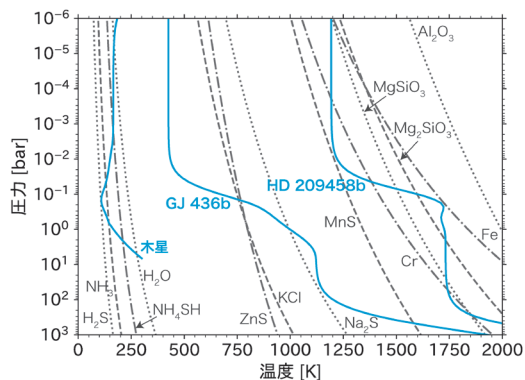


図3 代表的な雲の凝縮曲線(点線, 破線, 点破線). 図中の青色の実線は、図1と同様。

球大気中の水蒸気雲のように、相変化により生成されるエアロゾルである。一方ヘイズとは、土星の衛星タイタンの大気中にある有機物ヘイズや金星大気中の硫黄ヘイズのように、中心星からの紫外線放射が駆動する光化学反応により生成されるエアロゾルである。

4.1 雲

図3の点線, 破線, 点破線は、太陽組成の元素存在度を仮定した場合の代表的な種類の雲の凝縮曲線を示す*6。各線の右側、つまり高温側ではその化学種の凝縮は起きないが、左側、つまり低温側では凝縮が起こる。このように、太陽系内の惑星大気と同様、系外惑星大気においても様々な種類の雲が生成されると考えられているが、それぞれの雲固有の吸収特徴を捉えた例はまだない。この理由は、雲固有の吸収特徴は主に中間赤外の波長域に存在するためである。中心星近傍に存在する高温 ($T \geq 1,000$ K) の惑星と同様の温度を持つL型の褐色矮星の大気観測では、 $10 \mu\text{m}$ にあるシリケートの雲のSi-Oの吸収特徴が暫定的に観測されており[34-36]、シリケートの雲は系外惑星大気中でも同様に生成されるのではないかと考えられている。図3にも示されているように、1,000 K以下の惑星では、シリケートに代わってKClや

*6 凝縮曲線の出典については、以下の通りである。 Al_2O_3 [27], Fe, Mg_2SiO_4 , MgSiO_3 [28] Cr, MnS, Na_2S , ZnS, KCl [29], H_2O , NH_4SH , NH_3 [30], H_2S [31].

ZnSなどの雲が生成されるのではないかと考えられている [37, 38].

前述したように、大気透過スペクトルの観測では惑星の昼面と夜面の境界を観測することができるが、最近の観測 [39] で、昼面から夜面に移り変わる夕方境界では気体のFeの存在がある一方、夜面から昼面に移り変わる明け方境界ではFeが検出されなかったという報告もある。夜面からの冷たい大気が流れてくる明け方境界では、Feが雲として凝縮しているのではないかと解釈されている。一方、理論研究 [40] では、核生成のエネルギー障壁を考慮すると気体のFeはあまり凝縮に適さないという研究結果もあり、まだわかっていないことが多い。

4.2 ヘイズ

系外惑星大気中で生成されるエアロゾルとして、雲と並び考えられているのがヘイズである。主にCH₄の光分解反応が駆動して生成される有機物ヘイズ [23, 37, 40-44] や、硫黄が重合した硫化物ヘイズ [45-47] が考えられている。ヘイズの生成過程は、次の通りである。まず、大気上層での光化学反応によりヘイズの基となる前駆分子が生成される。その後、この前駆分子が衝突合体を繰り返しながら成長しつつ、大気下層へと沈降していくと考えられている。

図4に、ヘイズ粒子の合体成長と沈降・拡散による鉛直方向への輸送を考慮したヘイズモデル [23] で計算した、有機物ヘイズ粒子の分布の計算結果を示す。この計算では、ヘイズ粒子の最小単位であるモノマーの生成率（青色の点破線）は、光化学モデル [23] により計算したCH₄、C₂H₂、HCNの光分解率の合計に等しいと仮定している。青色の実線で示す体積平均半径を見ると、大気上層で生成されたヘイズのモノマーは、合体成長により大きくなりながら大気下層へと落下していることがわかる。

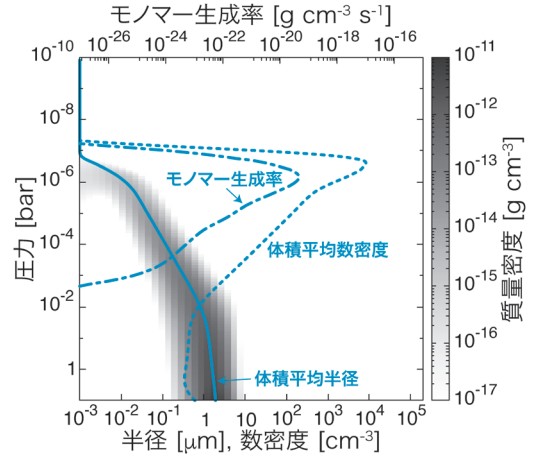


図4 合体成長と沈降・拡散による鉛直方向への輸送を考慮したヘイズモデル [23] で計算した有機物ヘイズ粒子の分布。青色の実線と点線は体積平均した半径と数密度を示す。青色の点破線はモノマー生成率であり、光化学モデル [23] により計算したCH₄、C₂H₂、HCNの光分解率の合計に等しいと仮定した。黒色のコンターで、各サイズのヘイズ粒子の質量密度を示す。

5. 現状の系外惑星大気の観測結果

5.1 低分散観測

図5は、ハッブル宇宙望遠鏡やスピッツァー宇宙望遠鏡などにより高精度な観測がなされている、16個の系外惑星の大気透過スペクトルに対して、スペクトル・リトリーバルコード ARCiS [48, 49] を用いて各惑星大気のパラメータを求めた結果である。金属量については、惑星質量が小さい程重元素に富んでいるという太陽系内の巨大惑星（灰色の四角い点）と同様の傾向がわずかに窺えるが、C/O比については、現状の観測精度ではその値にあまり制約がついていない。大気のも金属量は、ハッブル宇宙望遠鏡のWFC3 (Wide Field Camera 3) で吸収特徴を分解して観測することのできるH₂Oから、ほぼ決まっている。そのため、水蒸気存在量は比較的よく決まる一方、炭素を持つ主な化学種であるCH₄やCO、CO₂は、宇宙望遠鏡ではスピッツァーによるバン

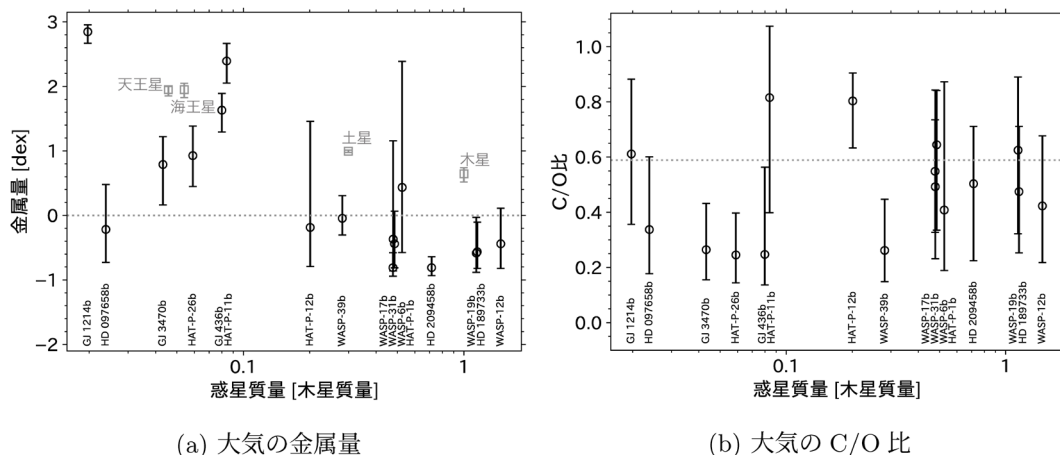


図5 比較的高精度な大気透過スペクトルが観測されている16個の惑星について、スペクトル・リトリーバルコード ARCIS [48, 49] を用いて求めた大気の (a) 金属量と (b) C/O比。 (a) においては、CH₄の存在量を基に計算された太陽系内巨大惑星 (木星 [50]・土星 [51]・天王星 [52]・海王星 [53]) の大気の金属量 [54-56] (灰色の四角い点) も示す。

ド測光でしか観測することができないため、現状、系外惑星大気のC/O比はあまり定まっていない。

ハッブル宇宙望遠鏡のWFC3によりH₂Oが多数の惑星について検出されてきたが、ExoMolグループなどによる近年の精力的な分子吸収線リストの構築もあり、AlO [57, 58] や、同様の温度を有する褐色矮星の大気スペクトル中にも存在するCrH [59] の存在を示唆する報告例もある。

5.2 高分散観測

アルカリ金属のNaとKは可視光域に非常に強い吸収特徴を持つため、系外惑星大気の観測が始まった当初から、高分散観測によりそれらの観測が行われてきた (例えば [60, 61])。加えて、高波長分解能を活かした吸収線の形状の精密な観測から、大気の温度構造の推定なども行われてきた [62, 63]。一方、特にここ数年、高分散観測と相互相関を用いた検出方法を組み合わせた手法により、NaやKのように強い吸収特徴を持たない化学種も続々と検出されている。これは、ある一種類の化学種のみを考慮したテンプレートのモデルスペクトルを用意し、そのスペクトルと実際に

観測されたスペクトルとの相関を取ることで、観測されたスペクトル中の、その化学種の吸収線の存在有無を見分ける手法である。相互相関を取らない直接的な検出も含めて、これまでに多数の中性・イオン化原子 (Ca I, Ca II, Co I, Cr I, Cr II, Fe I, Fe II, Na I, K I, Mg I, Sc II, Si I, Sr II, Ti I, Ti II, Y II [9, 60, 61, 64-68]) や分子 (CH₄, C₂H₂, CO, HCN, H₂O, NH₃, OH, TiO [6-8, 69-72]) の系外惑星大気中での検出が高分散観測により報告されている。

相互相関を用いた化学種の検出は、その化学種の存在の有無に対してはよい感度がある一方、高分散観測での化学種検出で行われているようなりトリーバルと比べると、存在量に関してはあまり感度がない。今後の観測精度の向上と高分散観測向けのリトリーバルコードの構築 [73, 74]、また高分散観測と低分散観測を組み合わせる手法 (例えば [75]) などにより、多くの化学種の確固な検出と存在量の制約が進み、一歩進んだ大気化学の議論ができるようになることが期待される。なお、C/H/O/Nと比べるとその他の原子を含む化学種の化学反応定数は未知のことが多い。大気化

学の議論には、そのような化学反応定数の理解の進展も必要不可欠である。

6. 将来観測の展望

今後10年の間には、2021年12月に無事に打ち上げられ、本稿執筆現在、太陽-地球系のラグランジュ点L2へと向かいながら展開中のJWST (James Webb Space Telescope) や、2029年の打ち上げが予定されている系外惑星大気の観測を占有の目的とした初の宇宙望遠鏡Ariel (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-Survey) などがあり、系外惑星大気化学のさらなる進展が期待される。

現状、低分散観測によりある程度の数の惑星に対して存在量が精度よく求められているのは、ハッブル宇宙望遠鏡のWFC3でその吸収特徴を分解して観測することのできるH₂Oや、強い吸収特徴を持つNaやKなどに限られている。JWSTやArielでは、炭素や窒素を含む主な分子種であるCH₄やCO、CO₂、NH₃、さらにはHCNやC₂H₂などの吸収特徴も分解して高精度に観測できると期待されているため、それらの存在量も確固に決定できるようになる。これにより、系外惑星大気の化学モデリングの本格的な観測への適用が幕を開け、大気温度構造や混合度合い、主星からの紫外線照射の強度などの理解が大幅に進むと期待される。また、これまではほぼ酸素とナトリウム、カリウムのみだった元素存在度に、炭素や窒素などの重要な元素が加わることで、惑星の形成場所や進化過程を紐解く鍵につながるだろう。

さらに、その普遍性が明らかとなった系外惑星大気中のエアロゾルについても、褐色惑星大気で観測されているようなシリケートの雲の吸収特徴をJWSTで観測するプログラムもサイクル1で採択されており、分子の吸収特徴を隠しているエアロゾルが雲なのかヘイズなのか、また雲である場合、どの種類の雲であるか、解き明かされること

が期待されている。

謝辞

本稿の執筆機会を下さり、また原稿に対して有益なご指摘とコメントを下さいました福井暁彦氏に感謝致します。また、校閲をして頂いた秦和弘氏にもお礼申し上げます。加えて、日々議論して下さい共同研究者の皆様、特に本稿で紹介させて頂いた研究[22, 23, 49]の共著者である、大学院での指導教官の生駒大洋氏と共同研究者のMichiel Min氏に、この場をお借りして改めて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Mayor, M., & Queloz, D., 1995, *Nature*, 378, 355
- [2] <http://exoplanet.eu> (2022.1.31)
- [3] Charbonneau, D., et al., 2002, *ApJ*, 568, 377
- [4] Casasayas-Barris, N., et al., 2020, *A&A*, 635, A206
- [5] Swain, M. R., et al., 2008, *Nature*, 452, 329
- [6] Nugroho, S. K., et al., 2017, *AJ*, 154, 221
- [7] Hawker, G. A., et al., 2018, *ApJ*, 863, L11
- [8] Nugroho, S. K., et al., 2021, *ApJ*, 910, L9
- [9] Hoeijmakers, H. J., et al., 2019, *A&A*, 627, A165
- [10] Kreidberg, L., et al., 2014, *Nature*, 505, 69
- [11] Sing, D. K., et al., 2016, *Nature*, 529, 59
- [12] Lin, D. N. C., et al., 1996, *Nature*, 380, 606
- [13] Öberg, K. I., et al., 2011, *ApJ*, 743, L16
- [14] 塩谷圭吾他, 2012, *天文月報*, 105, 257
- [15] Fortney, J. J., 2005, *MNRAS*, 364, 649
- [16] Visscher, C., 2012, *ApJ*, 757, 5
- [17] Fortney, J. J., et al., 2020, *AJ*, 160, 288
- [18] Parmentier, V., et al., 2015, *A&A*, 574, A35
- [19] Moses, J. I., et al., 2005, *J. Geophysical Res. (Planets)*, 110, E08001
- [20] Moses, J. I., et al., 2011, *ApJ*, 737, 15
- [21] Tsai, S.-M., et al., 2018, *ApJ*, 862, 31
- [22] Kawashima, Y., & Ikoma, M., 2019, *ApJ*, 877, 109
- [23] Kawashima, Y., & Ikoma, M., 2018, *ApJ*, 853, 7
- [24] Venot, O., et al., 2020, *ApJ*, 890, 176
- [25] Showman, A. P., & Guillot, T., 2002, *A&A*, 385, 166
- [26] Knutson, H. A., et al., 2007, *Nature*, 447, 183
- [27] Wakeford, H. R., et al., 2017, *MNRAS*, 464, 4247
- [28] Visscher, C., et al., 2010, *ApJ*, 716, 1060
- [29] Morley, C. V., et al., 2012, *ApJ*, 756, 172
- [30] Lodders, K., & Fegley, B., 2002, *Icarus*, 155, 393
- [31] Visscher, C., et al., 2006, *ApJ*, 648, 1181
- [32] Ehrenreich, D., et al., 2015, *Nature*, 522, 459
- [33] Wakeford, H. R., et al., 2020, *AJ*, 159, 204
- [34] Cushing, M. C., et al., 2006, *ApJ*, 648, 614

- [35] Burgasser, A. J., et al., 2008, *ApJ*, 674, 451
[36] Looper, D. L., et al., 2008, *ApJ*, 686, 528
[37] Morley, C. V., et al., 2013, *ApJ*, 775, 33
[38] Ohno, K., & Okuzumi, S., 2018, *ApJ*, 859, 34
[39] Ehrenreich, D., et al., 2020, *Nature*, 580, 597
[40] Gao, P., et al., 2020, *Nat. Astron.*, 4, 951
[41] Zahnle, K., et al., 2009, arXiv e-prints, arXiv: 0911.0728
[42] Miller-Ricci Kempton, E., et al., 2012, *ApJ*, 745, 3
[43] Morley, C. V., et al., 2015, *ApJ*, 815, 110
[44] Lavvas, P., & Koskinen, T., 2017, *ApJ*, 847, 32
[45] Hu, R., et al., 2013, *ApJ*, 769, 6
[46] Zahnle, K., et al., 2016, *ApJ*, 824, 137
[47] Gao, P., et al., 2017, *AJ*, 153, 139
[48] Min, M., et al., 2020, *A&A*, 642, A28
[49] Kawashima, Y., & Min, M., 2021, *A&A*, 656, A90
[50] Wong, M. H., et al., 2004, *Icarus*, 171, 153
[51] Fletcher, L. N., et al., 2009, *Icarus*, 199, 351
[52] Sromovsky, L. A., et al., 2011, *Icarus*, 215, 292
[53] Karkoschka, E., & Tomasko, M. G., 2011, *Icarus*, 211, 780
[54] <https://stellarplanet.org/science/mass-metallicity/> (2022.1.31)
[55] Wakeford, H. R., et al., 2018, *AJ*, 155, 29
[56] Wakeford, H. R., & Dalba, P. A., 2020, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A*, 378, 20200054
[57] Chubb, K. L., et al., 2020, *A&A*, 639, A3
[58] Colón, K. D., et al., 2020, *AJ*, 160, 280
[59] Braam, M., et al., 2021, *A&A*, 646, A17
[60] Narita, N., et al., 2005, *PASJ*, 57, 471
[61] Snellen, I. A. G., et al., 2008, *A&A*, 487, 357
[62] Wyttenbach, A., et al., 2015, *A&A*, 577, A62
[63] Kawauchi, K., et al., 2021, arXiv e-prints, arXiv: 2112.02546
[64] Hoeijmakers, H. J., et al., 2018, *Nature*, 560, 453
[65] Casasayas-Barris, N., et al., 2019, *A&A*, 628, A9
[66] Keles, E., et al., 2019, *MNRAS*, 489, L37
[67] Ishizuka, M., et al., 2021, *AJ*, 161, 153
[68] Cont, D., et al., 2022, *A&A*, 657, L2
[69] Snellen, I. A. G., et al., 2010, *Nature*, 465, 1049
[70] Birkby, J. L., et al., 2013, *MNRAS*, 436, L35
[71] Guilluy, G., et al., 2019, *A&A*, 625, A107
[72] Giacobbe, P., et al., 2021, *Nature*, 592, 205
[73] Mollière, P., et al., 2019, *A&A*, 627, A67
[74] Kawahara, H., et al., 2022, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 258, 31
[75] Brogi, M., et al., 2017, *ApJ*, 839, L2

Chemistry of Exoplanet Atmospheres

Yui KAWASHIMA

RIKEN, Cluster for Pioneering Research, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: Recent progress in the observations of extra-solar planets has revealed the chemical diversity of their atmospheres. Thanks to near-future facilities such as the *James Webb* Space Telescope (JWST) and the Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey (Ariel), further advances in the chemistry of exoplanet atmospheres are expected. In this article, I review our present understanding of the chemistry of exoplanet atmospheres along with the future perspectives, focusing on hydrogen-dominated atmospheres, which are the primary targets for the current observations.