系外惑星「遠い世界の物語」その12 ~系外惑星大気中の有機物ヘイズ~

川島由依

* 2020年4月10日受領, 査読を経て2020年4月27日受理

(要旨)近年の系外惑星の観測により、大気透過スペクトルに分子の吸収の特徴が見られないような惑星が多数発見された.これにより、系外惑星の大気中にエアロゾルが存在することが示唆された.本稿では、系外惑星大気中に存在するエアロゾルの候補の一つである有機物ヘイズに着目し、筆者らの最近の理論研究により得られた知見を紹介する.また、今後の系外惑星観測への示唆と、有機物ヘイズに関する現状の不定性、最新の室内実験からの示唆についても述べる.

1. はじめに

1995年に初めての系外惑星が発見されて以来 [1].2020年3月末現在までに4100個以上の系外惑 星の発見が報告されている¹. そのうち, 短周期惑星 と呼ばれる中心星の近傍を短い周期で公転する惑 星については、主にトランジット法[2、参照]によっ て、その大気組成の情報が観測的に得られるように なってきた. 地球から見て系外惑星が恒星の前を横 切る際、恒星からの光を惑星が遮るため、見かけの 恒星光度がわずかに減少する. これを異なる波長の 光,多波長で観測して得られる減光率と波長の関係 (大気透過スペクトルという)には、惑星大気中の原 子や分子, エアロゾルによる吸収・散乱の情報が含 まれる. 従って、観測データと理論的な大気透過ス ペクトルモデルとを比較することにより、 大気の組成 を推定することが出来る. 大気組成は, 惑星の内部 構造や形成過程などを解明する上で重要である.

ところが最近の観測により、大気透過スペクトル に分子の吸収の特徴が見られないような惑星が多 数発見された[例3]. これにより、エアロゾルのよう

1.SRON Netherlands Institute for Space Research, y.kawashima@sron.nl

な粒子が大気中に存在し、分子の吸収の特徴を隠 していることが示唆された.同時に、近赤外域は分 子の吸収特徴がなく平坦であるが、可視域にはレイ リー散乱の特徴(波長が短い程減光率が大きくなる) を示すスペクトルや、近赤外域に分子の吸収特徴を 示すようなスペクトルが観測された惑星も見付かって おり、大気透過スペクトルは多様であることが明ら かとなっている[4].これらの事実から、系外惑星大 気中のエアロゾルの特徴や成因は複雑であることが 示唆される.

系外惑星大気中で生成され得るエアロゾルとして は、大きく分けて、"ヘイズ"と"雲"の二種類が考えら れている.ヘイズとは、タイタン大気中の有機物ヘイ ズや金星大気中の硫黄ヘイズのように、光化学的に 生成されるエアロゾルである.一方、雲とは、地球 大気中の水蒸気雲のように、凝縮により生成される エアロゾルである.これまでの観測では、ヘイズか 雲のどちらか、またはそれらの両方が、観測された 系外惑星のスペクトルに影響を及ぼしているのかわ かっていない.そもそもエアロゾルは気体分子の吸 収の特徴を隠してしまうため、大気組成を推定する

¹https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

ためには、まずエアロゾルについて、その生成条件 や振る舞いを理解することが必須である。

筆者は大学院時代,系外惑星大気中のエアロゾ ルの候補の1つであるヘイズ、特に有機物ヘイズに 着目して研究を行った、その理由は以下の通りであ る、まず、現在多波長トランジット観測による大気観 測が可能な惑星の大半は、中心星近傍を公転する。 水素に富む大気を持つ惑星である.これは、中心星 近傍を公転する惑星の方がトランジットの頻度が高 く、また、地球のような小さな惑星よりかは、木星や 海王星のような大きな惑星(つまり、形成時に原始惑 星系円盤中の水素ガスを捕獲しやすい)の方が、トラ ンジット中の恒星光度の減光率が大きいため、発見 されやすいためである. なお、中心星近傍に存在す る惑星は、中心星からの強い輻射を受け温度が高く なるため、そもそも大気が膨張、つまり半径が大きく なりやすい、そのような、 恒星から強力な紫外線照 射を受ける還元的な大気環境下では、有機物ヘイ ズを生成する光化学反応が起きやすい².本稿では, 系外惑星大気中における有機物ヘイズについての. 筆者らの最近の理論研究[6-8]により得られた知見 を紹介する、また、今後の系外惑星観測への示唆 と、現状の有機物ヘイズに関する不定性、最新の室 内実験からの示唆についても述べる.

2. 有機物ヘイズのモデリング

有機物ヘイズの生成過程は、次の通りである.ま ず,恒星からの紫外線をヘイズの前駆物質となる炭 化水素化合物(CH₄等)が吸収し、光化学と熱化学 反応が起こることで、ヘイズ粒子の種(モノマー)が 生成される.次に、そのヘイズ粒子の種が合体成長 を繰り返すことにより、最終的なヘイズ粒子が生成 される.

ヘイズの存在を考慮した大気透過スペクトルモデ ルに関する先駆的な研究[9,10]では、大気中にヘイ ズの層を仮定し、ヘイズ粒子の粒径と数密度、ヘイ ズ層の高度と厚さをパラメータとすることで、ヘイズ が透過スペクトルに及ぼす影響が調べられた.その 後、より詳細なモデル化を行った研究[11]では、光 化学計算を行うことにより、ヘイズの前駆物質であ る炭化水素化合物の混合率の高度分布、つまり大 気中のどこに前駆物質が多く存在するかが求められ た.そして、各高度でそれらの前駆物質の一部がへ イズになると仮定された.一方、ヘイズ粒子の粒径 については、先行の研究[9,10]と同じくパラメータ とされた.これらの研究は、観測されたスペクトルと 合うようなヘイズのパラメータ(粒径や数密度)の組 を見付けてはいたが、大気中で起こるであろうと考 えられるヘイズ粒子の合体成長を解いていなかった ため、そのパラメータの値の確からしさについてはわ かっていなかった.

そこで筆者らは、ヘイズ粒子の粒径と数密度の高 度分布を理論的に決定することを目的として、 大気 中のヘイズ粒子の生成を考慮するための光化学モデ ルと、ヘイズ粒子の合体成長と沈降を考慮した理論 モデルを新たに開発した.4節で述べるように、現状 の系外惑星大気中での有機物ヘイズのモデリング において、一番の不確かなパラメータとなっている のが、光化学反応によるヘイズ粒子のモノマーの生 成率である.本稿で紹介する筆者らの研究では、従 来の研究において有機物ヘイズの前駆物質である と考えられてきたCH₄とC₂H₂, HCNの光分解率の 合計を基準のモノマー生成率と仮定し、計算を行っ た. なお、筆者らの光化学モデルでは、C₂H₄等のよ り高次の炭化水素化合物については考慮されていな い.より高次の炭化水素化合物の光分解率も考慮す ると、モノマー生成率は大きくなると考えられるが、 4節で述べる通り、そもそもヘイズのモノマー生成 率に関しては、前駆物質となる分子についても、前 駆物質の光分解からモノマーに至るまでの生成効 率(未知であるため、筆者らは上限値として100%を 仮定している)についても、まだはっきりとわかって いない. そのため筆者らは、ヘイズの前駆物質とし て、C2H4などに比べて存在量の多い[例11]、CH4と C₂H₂, HCNのみを考慮するに留めた. そして, 得ら れたヘイズ粒子の特性を基に大気透過スペクトルを モデル化した.

本稿では、GJ 1214bというミニネプチューン(地球

²系外惑星大気中で生成され得るヘイズとしては、有機物ヘイズの 他にも、硫黄ヘイズが考えられている[例5].硫黄ヘイズの素となる H₂Sは、有機物ヘイズの素であるCH₄と比べるとより低温でしか 存在せず、また太陽組成の元素存在度を仮定すると存在量も小さ い、そのため、筆者はまず有機物ヘイズに着目した。



図1: ミニネプチューンGJ 1214bを想定したヘイズ粒子の分布の計算結果.体積平均半径⁸vol(赤色の実線),表面積平均半径⁸surf(赤色の 点線),体積平均数密度nvol(オレンジ色の実線),表面積平均数密度nsurf(オレンジ色の点線),モノマー生成率(緑色の実線),各サイ ズのヘイズ粒子の空間質量密度(青色の等高線).図はKawashima & Ikoma (2019)[8]を一部改変.

よりも大きく、海王星よりも小さな惑星)をモデルとし て筆者らが行った計算の結果について、紹介する、 なお.次節で金属量,渦拡散強度,C/O比の依存 性について述べるが、本節ではまず、筆者らが基準 値として採用した、太陽組成大気(C/O比0.5)、渦 拡散係数10⁷cm²s⁻¹の場合について述べる. 図1は, ヘイズ 粒子の 粒径と数密度分布の計算結果である。 これまでの先行研究では大気中で一定だと仮定さ れていたヘイズ粒子の粒径は、合体成長により、大 気上層から下層にかけて何桁も変化していることが わかる. 大気上層(圧力~10⁻⁷bar以下)では, 合体 成長が起こるよりも短いタイムスケールで粒子が落 下するため、ヘイズ粒子はあまり成長しない、合体 成長が起きないため、モノマーの生成により、高度 が下がる(圧力が上がる)に連れヘイズ粒子の数密 度は大きくなる、ところがある高度(圧力~10⁻⁷bar) で、数密度の値はピークを取る.これは、これより下 層では、ブラウン運動による拡散で引き起こされる 合体成長が、モノマーの生成に比べて短いタイムス ケールで起こるためである。下層に行くに従い、粒子 の平均サイズはモノマーサイズである1nmから数 u

mへと合体成長により大きくなり、また数密度は何桁 も小さくなる. なお、圧力10⁻²barあたりに見られる 傾向の変化は、ガス抵抗則のレジームの変化(すべ り流からストークス流)によるものである. 沈降速度 が急に大きくなるため、粒子の成長が阻害される. ま た、体積平均と表面積平均の粒径と数密度の違い がわずかであることから、各高度における粒子サイ ズの分布は比較的狭いことがわかる. この事実は、 青色の等高線で示された、各サイズの粒子の空間質 量密度を見るとより明らかである.

繰り返しになるが、これまでの研究では、大気中 のヘイズ粒子の粒径は高度に依らず一定であると単 純化されていた.しかし、図1に示されているように、 合体成長と沈降を考慮して導かれるヘイズ粒子の粒 径分布の描像は、それとは非常に異なるものである ことがわかった.また多くの先行研究では、ヘイズ 層として、大気中の一部分にのみヘイズが存在する と仮定されていたが、ヘイズ粒子は大気中の広い範 囲で存在することが示された.

図2は、図1の分布のヘイズ粒子を考慮した場合と しない場合の大気透過スペクトルを示している.ま



図2: GJ 1214bを想定した, ヘイズを持つ場合(緑線)と持たない場合(黒線)の大気透過スペクトルモデル. 点線は, 各圧力に対応する減光率 を示す. なお, 波長解像度はR=100に下げている(これ以降のスペクトルの図についても同様). 図はKawashima & Ikoma (2019)[8] を一部改変.

ず、ヘイズがない場合には、H2OやCH4, NH3など の分子の吸収特徴がスペクトルに現れている。可視 域では、レイリー散乱による、波長が短くなる程減 光率が大きくなるようなスロープが現れている.一方 ヘイズが存在する場合のスペクトルでは、分子の吸 収の特徴が弱められている。もしくはなくなっている ことがわかる.これは、大気上層(圧力~10-3以下) に存在するヘイズ粒子が大気を光学的に厚くし、そ れよりも下層にある分子によって作られる吸収の特 徴を隠しているからである. ヘイズがある場合とない 場合のスペクトルとを比較すると、短波長側で、分子 の吸収の特徴はより隠されている。つまりヘイズの 影響を受けていることがわかる.これは、大気上層 にある小さな(≤1µm. 図1参照)ヘイズ粒子は波長 が短い光程よく吸収することと、またヘイズなし大気 のスペクトルを見ると分かる通り、大まかに言うと、 分子による光学的厚みは短波長側でより小さいから である.また、大気中にヘイズがある場合でも、~10 ⁻³barより上層にあるCH₄の吸収特徴などは見えて いることがわかる、さらに、3.0、4.6、6.3µmには、 有機物ヘイズ自身による吸収の特徴も現れている.

3. パラメータ依存性

太陽系内の惑星とは異なり,系外惑星大気には 未知のパラメータが数多くある.筆者らは,その中 でもヘイズの分布と大気透過スペクトルに大きな影 響を及ぼす,いくつかの重要なパラメータ(紫外線強 度,金属量,渦拡散強度,重力加速度,温度,C/O 比)に対するヘイズとスペクトルの応答を調べた.本 節では,それぞれのパラメータへの依存性について, 引き続きGJ 1214bをモデルとして行った計算結果を 紹介しながら述べる.

なお4節で述べるように,最近の系外惑星大気を 想定した有機物ヘイズの実験[12-15]により,従来 考えられて来たCH₄などの炭化水素化合物だけでな く,COやCO₂,H₂Oなどの分子も,ヘイズの前駆物 質として機能し得ることが示唆され始めた.しかし, ヘイズの前駆物質からヘイズのモノマーの生成まで の過程についてはまだよくわかっていない.以下に 述べるパラメータ依存性は,あくまで従来の仮定に 則った場合のものであることを先に記しておきたい. このような実験からの示唆については4節で述べる.



図3: GJ 1214bを想定した, ヘイズを持つ大気透過スペクトルの紫外線強度に対する依存性.標準モデルとは, GJ 1214bが受け取る中心星 からの紫外線強度を想定した場合である. 図はKawashima & Ikoma (2019)[8]を一部改変.

3.1 紫外線強度

図3は、紫外線強度が異なる場合の大気透過ス ペクトルモデルを示している.標準モデルとは、前節 でも紹介した, GJ 1214bが受け取る中心星からの 紫外線強度を想定した場合である.紫外線強度によ り、スペクトルは大きく変化していることがわかる。 これは、紫外線強度が高くなるにつれ、ヘイズのモ ノマー生成率が大きくなるためである.標準モデル から紫外線強度を5桁上げた、紫外線強度が非常 に高い場合(赤色の線)には、スペクトルは広い波長 範囲で平坦であり、分子の吸収特徴は全く見られな い.一方,可視域にはレイリー散乱のスロープが僅 かながら見られる。前者は、高高度にある比較的大 きなサイズの粒子によるものであり、後者は、それよ りもさらに上層にある小さな粒子によるものである。 標準モデルから紫外線強度を2.5桁上げた場合(オ レンジ色の線)には、ヘイズ粒子による可視域での レイリー散乱のスロープに加え、ヘイズ自身の吸収 特徴が3.0, 4.6, 6.3 μmに見えている. 紫外線強度 を低くすると、分子の吸収特徴が徐々に現れるよう

になる. 紫外線強度を標準モデルから5桁下げた場 合(紫色の線)には、スペクトルはヘイズなし大気の ものとほぼ同じとなっていることがわかる. これは、 ヘイズの量が十分に少なく、大気の光学的厚みに 影響を及ぼさないからである. 図3に示されているよ うに、筆者らは、本稿のはじめに述べたような観測 された大気透過スペクトルの多様性を、紫外線強度 の違いによって再現出来ることを明らかにした.

3.2 金属量

大気中の金属量(水素とヘリウムより重い元素の 量)を多くすると、ヘイズの前駆物質であるCH₄と C₂H₂, HCNの混合率は大きくなる.ところが筆者ら は、ヘイズの前駆物質の混合率は大きくなるにも関 わらず、基本的には、金属量を多くすると前駆物質 の光分解率、つまりモノマー生成率は寧ろ小さくな ることを発見した.これは、金属量が多くなると、ヘ イズの前駆物質よりも上層にある、H₂OやCO、CO₂ などの紫外線を遮蔽する他の分子の混合率も大き くなってしまうためである.その結果、ヘイズの前駆 物質が存在する高度まで届く紫外線の量が減ってし



図4: GJ 1214bを想定した, ヘイズを持つ大気透過スペクトルの金属量に対する依存性. 図はKawashima & Ikoma (2019)[8]を一部改変.

まい,モノマー生成率は小さくなってしまう.なお, 100倍と1000倍の太陽組成大気の場合とでは,モ ノマー生成率は1000倍の太陽組成大気の場合の方 が僅かに高いが,ほぼ変わらない結果となった.こ れは,太陽組成大気の1倍から10倍,10倍から100 倍と金属量が多くなった場合とは異なり,100倍から 1000倍に金属量が多くなった場合には,100倍まで の太陽組成大気においては最も存在量の多い分子 であったH₂の存在量が一気に小さくなることに起因 する.前駆物質にとって,紫外線を遮蔽する分子が 増える効果と,H₂に吸収されなくなった分の光子が 増える効果とが同程度であったため,100倍と1000 倍の太陽組成大気の場合とでは,モノマー生成率は ほぼ変わらない結果となった.

図4は、金属量が異なる場合の大気透過スペクト ルモデルを示している。モノマー生成率は、金属量 を多くすると基本的には小さくなることを述べたが、 観測を行う際に重要となるスペクトル中の吸収特徴 の大きさは、金属量に対して少し複雑な応答をする。 まず、ヘイズがない場合を考えると、分子の吸収特 徴の大きさは、大まかに述べて大気のスケールハイ トに比例する. 大気のスケールハイトは大気の平均 分子量に反比例するため, 図4の細線に見られるよ うに, 金属量を上げる, つまり平均分子量が大きくな ると, 吸収特徴の大きさは小さくなる. 次にヘイズが ある場合を考える. 前述したように, モノマー生成 率, つまりヘイズの量は金属量を上げると少なくなる ため, 金属量を上げると, スケールハイトとヘイズの 量は両方小さく(少なく)なる. この二つの効果の競 合により, 吸収特徴の大きさの金属量への依存性は 単純ではないことがわかった. ヘイズが影響を及ぼ しやすい短波長側では,吸収特徴の大きさは中程度 の金属量である100倍の太陽組成の場合に最も大き く, 一方, ヘイズの影響が少ない長波長側では, ヘ イズなし大気の場合と同じように, 金属量が少ない 程, 吸収特徴が大きくなることがわかった.

3.3 渦拡散強度

図5は、渦拡散強度が異なる場合の大気透過スペクトルモデルを示している.水色の線のように、渦 拡散係数がある値よりも大きくなると、可視域のレイ リー散乱のスロープの勾配が急になり、また赤外域



図5: GJ 1214bを想定した, ヘイズを持つ大気透過スペクトルの渦拡散強度に対する依存性. 図はKawashima & Ikoma (2019)[8]を一部 改変.

の分子の吸収特徴が顕著になることがわかった.こ れは、渦拡散強度を大きくすると、あるところで、重 力的な沈降によるヘイズ粒子の輸送よりも渦拡散に よる輸送の方が卓越するようになり、ヘイズ粒子が 効率的に大気下層へと運ばれるようになるためであ る. 大野和正氏と筆者の論文[16]中で大野氏が解 析的に示しているが、ヘイズ粒子の消散係数(密度) が、圧力が大きくなる(下層に行く)に従って小さくな ればなる程、レイリー散乱のスロープの勾配は急に なる、渦拡散係数がある値よりも大きくなり、下層方 向への輸送が効率的に行われるようになると、ヘイ ズ粒子の消散係数(密度)の勾配がより急になるため である.そして、大気中に存在するヘイズ粒子の量も 減るため、赤外域の分子の吸収特徴も顕著になる、 一方、渦拡散係数がこの臨界となる値よりも小さい場 合には、図中の緑色の線と紫色の線に示されている 通り, そもそも渦拡散による輸送が効かないため, 渦 拡散強度が異なってもスペクトルはほぼ変わらない.

3.4 重力加速度

近年、しばしばスーパーパフとも呼ばれる、超低

密度、すなわち重力加速度が非常に小さい惑星が いくつか発見された、大気のスケールハイトは重力 加速度に反比例するため、大気中にヘイズがなけれ ば、このような惑星のスペクトル中の吸収特徴の大 きさは、非常に大きくなると期待される、筆者らは、 一番最初に発見されたスーパーパフであるKepler-51bを想定し、超低密度、すなわち重力加速度が極 端に小さい場合に、ヘイズ粒子の分布とスペクト ルがどのようになるかを調べた、その結果、ヘイ ズ粒子の沈降速度は重力加速度に比例するため、 Kepler-51bのような重力加速度が非常に小さい 惑星では、ヘイズ粒子は上層で、合体成長により かなり大きくなるまで落下せずに存在出来ること がわかった、図6は、Kepler-51bのヘイズ粒子の 分布と、典型的な重力加速度を持ち、Kepler-51b とモノマー生成率や温度がほぼ同じHD 97658b のヘイズ粒子の分布を示す. HD 97658bの場合 と比べると、極端に重力加速度の小さいKepler-51bの場合には、大気上層でヘイズ粒子が大きく 成長していることがわかる。その結果、図7(d)に 示すように、ハッブル宇宙望遠鏡で観測された[17]



図6: 超低重力加速度(圧力10⁻⁶barで42cm/s²)の惑星Kepler-51b(左図)と, 典型的な重力加速度(圧力10⁻⁶barで1100cm/s²)を持つ惑 星HD 97658b(右図)を想定したヘイズ粒子の分布の計算結果. 各線の説明等については, 図2を参照.図はKawashima et al. (2019) [7]を一部改変.

ような、気体分子の吸収の特徴がほぼない、広い 波長範囲で平坦なスペクトルとなることがわかっ た.このように、重力加速度が小さ過ぎると、ヘイ ズ粒子が落下しないため吸収特徴は小さくなって しまう.しかし、逆に大きくても、大気のスケール ハイトは重力加速度に反比例するため小さくなっ てしまう.そのため、中程度の重力加速度の際に、 吸収特徴は一番大きくなると考えれられる.

3.5 その他

筆者らは、温度とC/O比の依存性についても調 べた.まず温度については、温度が高くなるほどモ ノマーの生成率は小さく、そしてスペクトルの吸収 特徴は大きくなることがわかった.これは温度が高 くなると、炭素を含む主要な分子がCH4からCOへ と変わるため、ヘイズの前駆物質の混合率が小さく なるためである、筆者らが発見したこの温度依存性 は、報告されている観測結果の傾向とも整合的で ある[22-24].ただし、金属量など、他の惑星のパ ラメータがこのように見える相関を作り出している 可能性もある. 一方C/O比については、C/O比を高くする程、モ ノマー生成率が大きく、そしてスペクトル中の分子の 吸収特徴の大きさは小さくなることがわかった.こ れは単純に、C/O比を上げると、ヘイズ粒子の前駆 物質の混合率が大きくなり、また同時に主な紫外線 吸収物質であるH₂OやCOなどの酸素を含む分子の 混合率が減るため、ヘイズ粒子の前駆物質がより紫 外線を吸収出来るためである.

4. 議論

4.1観測への示唆

今後10年の間には、James Webb宇宙望遠鏡 (JWST)やARIELなどの宇宙望遠鏡の打ち上げが 計画されており、系外惑星大気の解明が飛躍的に進 展すると期待される.観測時間が限られていること を考えると、大気の特徴付けを行いやすい、ヘイズ に覆われている可能性の低いターゲットをまずは観 測することが重要となる.前節で述べた様々なパラ メータに対するヘイズとスペクトルの依存性を考慮



図7: (a)GJ 1214b, (b)GJ 436b, (c)HD 97658b, (d)Kepler-51bの透過スペクトルモデル.上から順に,仮定されているモノマー生成率が小さい順,つまり想定される紫外線強度が低い順に並べてある.右縦軸は,大気のスケールハイトH,efを単位として減光率を示している.また,JWSTで達成可能だと期待される25ppmの精度[18]を上回る分子の吸収特徴を,図中に示している. 観測された透過スペクトル(a, b, c)と減光率(d)[3, 19-21]もプロットしている. 図はKawashima et al. (2019)[7]を一部改変.

すると,低紫外線環境下,中程度の重力加速度,高 温の惑星が,大気の特性を調べるのに適していると いえる.

一方,系外惑星の大気中に普遍的に存在すること が示唆されるヘイズを理解するための観測も非常に 重要である.大気中の光化学反応を理解する鍵とな る紫外線スペクトルが観測されている恒星まわりの 惑星の観測,また軌道長半径の違いによる紫外線 強度の影響を調べられるような複数惑星系の観測 が重要である。

図7は、大気にヘイズがある場合でも検出が可能 な分子の吸収特徴を調べるために、大気観測に適 した4つの惑星GJ 1214b、GJ 436b、HD 97658b, Kepler-51bについて、透過スペクトルを計算した 結果である.大気組成は、太陽組成を仮定した. JWSTで達成可能だと期待される25ppmの精度 [18]を上回る分子の吸収特徴を、図中に示している. なお、図は上から順に、仮定されているモノマー生 成率が小さい順、つまり想定される紫外線強度が低 い順に並べている.紫外線強度が低く、減光率が大 きい、つまり惑星と主星の半径比が大きいGJ 1214b のような惑星³では、たとえ大気中にヘイズがある場 合でも、ヘイズ層の上にある、様々な分子の吸収特 徴がJWSTで検出可能であると期待される.特に、 3.3μmのCH₄の吸収特徴は非常に顕著である.

4.2 有機物ヘイズに関する不定性と 実験からの示唆

本稿では系外惑星大気中の有機物ヘイズに関す る筆者らの研究を紹介したが、有機物ヘイズに関し ては、前駆物質とその前駆物質からの生成過程、即 ちモノマー生成率や、光学特性など、まだ不確かな 部分が非常に多い、モノマー生成率に関して、筆者 らの最初の研究[6]では、初期地球のヘイズのモデ リング[25]で行われているように、タイタンの大気中 でのモノマー生成率を基準値として用い、モデル化 する惑星でのライマンα強度でスケーリングした。こ の仮定の方法は、実際にモノマー生成率が観測され ているタイタンを基準として使っている利点がある一 方、紫外線強度の一次でスケーリングしてよいのか4. また現在の観測の主なターゲットである水素に富む 大気とは異なる、窒素とメタンから成るタイタン大気 を基準としてよいのか、などの不確定性が残る. そ の後の筆者らの研究では、本稿で紹介した通り、有 機物ヘイズの前駆物質であると考えられているCH とC₂H₂, HCNの光分解率の合計であると仮定し た. 有機物ヘイズの前駆物質がこれらの分子である ならば、この仮定を採用することで、モノマー生成 率の上限値が導けるからである.実際には、このう ちの何割かが最終的なモノマーとなるため、生成効

³実際のGJ 1214bは、図7に示されている通り、標準的なモデルよ りも平坦なスペクトルが観測されている、そのため、分子の吸収特 徴の大きさは、図中のモデルよりは小さい可能性が高い、 ⁴実際、紫外線強度を変化させた場合、炭化水素化合物の光分解 率は線形よりもわずかに弱い依存性を示していた、また先行研究 [25]では、前駆物質から光化学反応により生成された中間物質が、 さらに光化学反応によりヘイズとなる場合は紫外線強度の1乗に比例す ると提案されている。 率のようなものを掛け合わせる必要があるが、その 値はわかっていない.

最近の系外惑星大気中でのヘイズを想定した実 験[13]によると、実験が行われた100, 1000, 10000 倍の太陽組成大気の場合に関して、金属量が多い 程. ヘイズの生成量は多い結果となっている. 3.2節 で筆者は、100倍までの太陽組成大気において、金 属量が多い程、モノマー生成率は小さくなることを 述べた、これは、前駆物質よりも上層に存在する紫 外線遮蔽分子の影響であり、 チャンバーを使った実 験では取り扱われていない、1次元的な効果による ものである、金属量に依らず同じ量のプラズマが照 射され、前駆物質から最終的なヘイズに至るまでの 化学反応が実際に起こっている実験の結果は、筆 者らが金属量に依らず100%だと単純化して仮定し た、前駆物質の光分解からモノマーに至るまでの生 成効率が、金属量が多い程高いことを示唆している と考えられる. 筆者らの計算と実験の両方の結果が ある100倍と1000倍の太陽組成大気の場合につい て比較すると、1000倍の太陽組成大気の方が、筆 者らの計算によるモノマー生成率は僅かに大きく, また実験によるヘイズ生成量も多い結果となってい る. そのため. 100倍と1000倍の太陽組成大気に関 しては、金属量が多い1000倍の太陽組成大気の方 が、モノマー生成率は大きくなると考えられる.一方、 筆者らが、他の紫外線遮蔽分子の影響により、金属 量が多くなる程モノマー生成率が小さくなることを 発見した100倍までの太陽組成大気に関しては、1. 10倍の太陽組成大気についての実験が行われてい ないため、わからない. 金属量が多い程ヘイズ生成 量が多いという傾向が引き続き現れるのであれば、 その効果の大きさによっては、筆者らが本稿で述べ たものとは真逆の、金属量が多い程モノマー生成率 は大きいという結果になる可能性もある.また、同じ く最近の実験結果[12-15]によると、筆者らが仮定 した炭化水素化合物だけでなく、COやCO2, H2O, CH₂NH, HCHOなどの分子も前駆物質として寄与 する可能性が指摘されており、さらにヘイズの生成 パスは多数あることが示唆されている. 系外惑星大 気中のヘイズを理解するには、理論と観測だけでな く、実験も加えた三方向からのアプローチを組み合 わせることが非常に重要である.

5. まとめ

近年の観測により,系外惑星大気中においてエア ロゾルが普遍的に存在することがわかってきた.本 稿では,系外惑星大気中のエアロゾル候補の1つで ある有機物ヘイズについて紹介した.

本稿で述べた系外惑星大気の様々なパラメータに 対する依存性をまとめると、ヘイズを持つ大気のス ペクトル中の吸収特徴の大きさは、紫外線強度が低 く、渦拡散係数が大きく、温度が高く、C/O比が低 い程、また重力加速度については中程度の際に、大 きくなることがわかった、金属量については、ヘイズ の影響を受けやすい短波長側では中程度の時に、 ヘイズの影響を受けにくい長波長側では低い程、吸 収特徴は大きくなることがわかった。

系外惑星大気に普遍的に存在することが示唆さ れる有機物ヘイズには、モノマー生成率など、まだ たくさんの不定性がある.系外惑星大気中のヘイズ を想定した実験により、ヘイズの前駆物質や前駆物 質からの生成パス、光学特性を解明すること、大気 中の光化学反応を理解する鍵となる紫外線スペクト ルが観測されている恒星まわりの惑星や、軌道長半 径の違いによる紫外線強度の影響を調べられるよう な複数惑星系を観測し、ヘイズ生成に対する紫外線 強度の影響等を調べることが非常に重要である.理 論と観測、実験を組み合わせたアプローチにより有 機物ヘイズの理解が進み、数多く存在することがわ かったエアロゾルに覆われた系外惑星の大気につい ても、その特徴付けが進むことを期待する.

謝辞

本稿は、大学院で修士・博士課程に渡りご指導頂 いた生駒大洋先生と、Renyu Hu氏との共同研究 の結果をまとめたものです。生駒大洋先生とRenyu Hu氏に、この場を借りて感謝致します。また、紹介 した研究を行うにあたり、成田憲保氏、福井暁彦氏 からは、共同研究等を通じて、観測面に関する大変 有益な助言を頂きましたこと、お礼申し上げます。さ らに、本文中で共同研究の内容を少し紹介させて 頂きました大野和正氏にも、この場を借りて感謝致 します。また重ねて成田憲保氏に、本稿の執筆機 会を頂きましたことを感謝致します. 最後に, 注意 深く原稿を読んで下さり大変有益なご指摘とコメン トを頂いた査読者に, お礼申し上げます. 本稿の図 は, AASから転載許可を頂き, Kawashima et al. (2019)およびKawashima & Ikoma (2019)の図を 改変し掲載させて頂いたものです.

参考文献

- Mayor, M. and Queloz, D., 1995, Nature 378, 355.
- [2] 福井 暁彦,成田 憲保,2014,日本惑星科学会誌遊 星人 23,38.
- [3] Kreidberg, L. et al., 2014, Nature 505, 69.
- [4] Sing, D. K. et al., 2016, Nature 529, 59.
- [5] Zahnle, K. et al., 2016, ApJ 824, 137.
- [6] Kawashima, Y. and Ikoma, M., 2018, ApJ 853, 7.
- [7] Kawashima, Y. et al., 2019, ApJL 876, L5.
- [8] Kawashima, Y. and Ikoma, M., 2019, ApJ 877, 109.
- [9] Howe, A. R. and Burrows, A. S., 2012, ApJ 756, 176.
- [10] Ehrenreich, D. et al., 2014, A&A 570, A89.
- [11] Morley, C. V. et al., 2013, ApJ 775, 33.
- [12] He, C. et al., 2018, ApJL 856, L3.
- [13] Hörst, S. M. et al., 2018, Nature Astronomy 2, 303.
- [14] He, C. et al., 2018, AJ 156, 38.
- [15] He, C. et al., 2019, ACS Earth and Space Chemistry 3, 39.
- [16] Ohno, K. and Kawashima, Y., ApJL, in press.
- [17] Libby-Roberts, J. E. et al., 2020, AJ 159, 57.
- [18] Beichman, C. et al., 2014, PASP 126, 1134.
- [19] Knutson, H. A. et al., 2014, Nature 505, 66.
- [20] Knutson, H. A. et al., 2014, ApJ 794, 155.
- [21] Masuda, K., 2014, ApJ 783, 53.
- [22] Heng, K., 2016, ApJL 826, L16.
- [23] Stevenson, K. B., 2016, ApJL 817, L16.
- [24] Crossfield, I. J. M. and Kreidberg, L., 2017, AJ 154, 261.
- [25] Trainer, M. G. et al., 2006, Proceedings of the National Academy of Science 103, 18035.