

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800264

研究課題名(和文)スーパーアースの放射過程のモデリングとハビタブルゾーンマッピング

研究課題名(英文)Development of a radiative transfer model for Super-Earths and mapping of a habitable zone

研究代表者

大西 将徳 (Onishi, Masanori)

神戸大学・理学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：50644887

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：スーパーアースを含む系外惑星のハビタビリティの議論を目的として、汎用性の高い放射伝達モデルの開発を行った。波数スペクトルを高分解能で計算する line-by-line 放射伝達モデルを基本とし、任意の温度、大気組成プロファイルをもとに惑星大気の放射伝達過程を計算できる。大気大循環モデルや放射対流平衡モデルのための k-分布モデルの開発も行った。本モデルを用いた計算により、ハビタブルゾーンの決定に重要な惑星の対流圏界面には、2つのレジーム(低温で乾燥した圏界面と高温で湿潤な圏界面)があることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In order to estimate how habitable zone spreads in outer space and discuss about habitability for exoplanets including Super-Earths, a radiative transfer model was developed. The model is based on line-by-line method and calculates planetary radiative transfer from arbitrary temperature and mixing ratio profiles. A model based on k-distribution method was also developed for radiative-convective models and atmospheric global circulation models. These models indicate that there are two regimes for tropopause in planetary atmospheres, which is important for determining an inner edge of habitable zone. The tropopause regimes are a dry low-temperature regime and a moist high-temperature regime.

研究分野：惑星科学

キーワード：系外惑星 ハビタブルゾーン 放射伝達 スーパーアース 水損失限界 モデル開発

1. 研究開始当初の背景

1995年の系外惑星の発見以来、その大部分は巨大ガス惑星が占めているが、近年の観測技術の向上により地球質量に近い天体（スーパーアース）も発見されつつあり、宇宙空間における存在度も高いことが分かってきた。地球に近い質量を持つ天体は、岩石質の地表を持つ可能性があり、惑星環境によっては液体の水をたたえたハビタブルプラネットである可能性が高い。またトランジット観測により惑星大気の透過光スペクトルも観測できるようになり、今後スペクトルをもとに惑星の環境推定が進むことが期待される。

一方、数値モデルによる惑星大気の環境推定に関する研究は、既存の数値モデルの延長として進められてきた。巨大ガス惑星は恒星や褐色矮星のモデル、ハビタビリティの議論は地球をターゲットとしたモデルである。しかし近年ハビタブル天体として注目されている惑星は、中心星の温度も低く、ハビタブルゾーン内の天体は潮汐固定していると考えられる。潮汐固定した惑星は昼面と夜面が固定し、地球とは異なる大気循環が生じていることが示唆される。その大気構造の推定には3次元モデルが必要となる。また大気組成も地球とは異なることが示唆されており、これまでの既存のモデルとは別に、系外惑星の環境推定を可能にするための放射モデル開発が必要である。

2. 研究の目的

(1) 放射伝達モデルの基本は、line-by-lineモデルである。系外惑星の環境推定を目指した温度、圧力、組成に関して汎用性の高いline-by-line放射伝達モデルを開発する。

(2) 惑星環境の推定には、放射対流平衡モデルや、3次元大気大循環モデルが必要となる。しかしline-by-lineモデルでは計算コストが大きく現実的な計算はできない。line-by-line放射伝達モデルをもとに、放射対流平衡モデルや大気大循環モデルに組み込むことができる放射モデルを開発する。

(3) 上記のモデルをもとにハビタブルゾーンの広がりについての議論を行う。

3. 研究の方法

(1) 系外惑星は、大気の組成、温度、圧力範囲が地球に比べて広い。本数値モデルは、任意の温度、任意の大気組成で放射フラックスを計算できるものとして開発する。また中心星の温度が低い場合も計算可能にするため、地球大気計算で用いられるような短波、長波といった便宜的な波数の区分は設けず、より汎用的な放射モデルを目指して開発を行う。モデルの検証は、地球大気計算でよく用いられるLBLRTMとの比較により行う。

また、吸収線データベースや連続吸収の扱い、波数解像度、吸収線形の計算などについて

でも検証を行う。

(2) 放射対流平衡モデルや大気大循環モデルにおける放射伝達計算の重要性は、放射加熱率の計算にある。計算したいターゲットに対して、line-by-line計算による放射加熱率を再現するように吸収係数の波数解像度を落とすことで、大気大循環モデルなどに組み込み可能な放射モデルを開発する。k-分布法によるモデルと、より簡便なバンドモデル（バンドの中をサブグリッドに分割しないモデル）について検討する。

(3) ハビタブルゾーンの広がりを検討するためにline-by-lineモデルと放射対流平衡モデルを用いて、ハビタブルゾーンの内側境界を推定する。ハビタブルゾーンの内側境界は暴走温室限界と水損失限界で特徴付けられるが、最近の知見によれば水損失限界によって内側境界が決められるとされる。水損失限界の推定には惑星大気のcold trapの温度を決めることが重要であり、本研究ではcold trap（圏界面）の温度を放射モデルにより推定し、ハビタブルゾーンの内側境界について議論する。

4. 研究成果

(1) 系外惑星への適用を目指したline-by-line放射伝達モデルを開発した。任意の圧力、温度、組成プロファイルに対し、指定した波数解像度で光学的厚さを計算し、その光学的厚さのプロファイルを用いて放射伝達を解く。吸収線データベースはHITRAN2008、HITEMP2010を基本とし、連続吸収はMT_CKDモデルを採用した。GEISAやPartridge & Schwenke, 1997やBarber et al., 2006といった別の吸収線データベース、また連続吸収についてもBPSモデルや吸収線のカットオフを変えて表現する方法などを検討したが、汎用性、計算効率、ユーザビリティなどの観点から上記を基本とした。

本プログラムは、地球大気で広く使われている放射伝達コードLBLRTMと比較することで検証を行った。検証にはICRCM (Ellingson et al., 1991)の鉛直プロファイルを用い、LBLRTMの計算結果とよく一致することを確認した。

① 連続吸収モデルの検討

ハビタビリティの議論の際には、 H_2O の吸収が重要であるが、特に $10\mu m$ の大気の窓領域は、線吸収だけでは説明できない連続吸収の存在が知られている。その物理は未だ解明されておらず、本研究でも幾つかの検討を行った。

吸収線のwingで連続吸収を説明するfar wingモデルについて、吸収線のwingのcut offを設けずに計算し、far wingモデル検討を行った。結果、 $10\mu m$ 帯など長波長の窓領域に対しては、線吸収だけでは現実の

吸収スペクトルに対して過小評価になっているのに対し、短波長では過大になっていることが分かった。H₂O の複数の窓領域にて far wing モデルが整合的でないことが明らかとなった。

連続吸収の大きさは、現在も実験によって検証が進められているが、研究によって大きさが異なる (Ptashnik et al., 2011, 2012, 2013, Mondelain et al., 2014, Mlawer et al., 2012)。これらの研究の不定性が、惑星の環境推定に与える影響について検討を行った。H₂O のみの大気について地表面圧力、温度を変えてそのフラックスやスペクトルを計算したところ、上記の研究による水蒸気の連続吸収の不定性は、蒸気圧曲線に近い温度領域で寄与が大きく、輝度温度で数 10K の違いを与えうることが分かった。

②高温水蒸気大気の高速計算プログラム開発

本研究では系外惑星を想定しており、地球よりも広い大気の温度圧力範囲での放射計算が必要である。特に高温での計算を行うために、HITEMP2010 での効率的な吸収断面積の計算を検討した。放射計算を行いながら必要な温度圧力の吸収断面積を計算することは大きな計算コストが必要であり現実的でない。本研究ではあらかじめ温度間隔 100K、圧力間隔 1 桁 Pa、波数解像度 0.01cm⁻¹ のデータセットを用意し、3 次 Spline 補間によって効率的に、かつ精度よく吸収断面積を計算するアルゴリズムを開発した。これにより line-by-line 計算との比較で、線型補間よりも 1 桁近く精度よく計算できるプログラムを実現した。ただし Spline 補間には課題もある。ひとつは Spline 補間では、本来存在しない極値が現れることがあることである。また Spline 補間では、補間したい温度圧力近傍の多数のデータを参照しながら補間するため、両隣のテーブルのみを参照する線型補間に比べ、計算コストが大きくなることである。テーブルを細かくして線型補間を行い、これらに対処することも考えられるが、詳細な検討は今後の課題である。

③波数解像度の検討

波長の長い領域では吸収線の広がりには主に圧力広がりによって決まるため、圧力の低い上空ほど吸収線の幅は細くなる。そのため、低圧力まで放射計算が必要な大気構造の場合、それだけ波数方向に高解像度な計算が必要となる。吸収線の幅が細くなっても吸収線の形を捉えるために、吸収線のピークと wing の数点をサンプリングする波数可変グリッドをモデルに導入することも考えられるが、吸収線の中心が圧力、温度によってシフトすることや、k-分布モデルの元となる吸収スペクトルの計算のためには等間隔グリッドの方が都合がよいことから、本モデルでは等間隔グリッドを採用し、ターゲットとす

る大気構造に対して必要な波数解像度を検討した。ハビタブルゾーンの検討に重要な H₂O の吸収線データをもとに、波数と圧力に対して吸収線幅がどのように変化するかを計算し、必要な波数解像度を考察した。結果、地球の対流圏界面付近 (10⁴ Pa) までを計算するには、波数解像度は 10⁻² cm⁻¹ で十分であるが、Kasting et al., 2015 や Leconte et al., 2013 で推定されているような水損失限界を決めるとされる圏界面が高高度に現れるプロファイル (圏界面高度 1 Pa 付近) では、10⁻⁴ cm⁻¹ 程度の高解像度計算が必要となる。波数解像度が足りない場合、吸収スペクトルの大小のコントラストが実際よりも過小評価となり、より灰色に近い放射特性を持つことになる。Arking and Grossman, 1972 で報告されているように、このことは上空の温度を過大評価してしまう可能性がある。

ただし、すべての波数領域で高解像度計算が必要ではないことも明らかとなった。吸収線幅は圧力広がり と Doppler 広がりにより決まり、波数が大きくなると Doppler 広がり が支配的となる。Doppler 広がり は圧力に依存しないため、高波数領域では、低波数領域ほど高解像度計算を必要としないことが分かった。放射計算の波数解像度の検討には、計算しようとするターゲットの温度プロファイルを見ながら波数領域ごとに検討することが必要である。

④吸収線形計算プログラムの検討

本モデルの吸収線形は、圧力広がり と Doppler 広がり を考慮した Voigt 線形を採用しているが、解析的に解けないため、幾つかの計算プログラムが提案されている。私は、広く用いられている Kuntz 1997 に Ruyten 2004 の修正を加えたプログラムについて、まれに無意味な値を出力することを発見した。Kuntz 1997 は Humlicek 1982 をもとにしたアルゴリズムであり、Humlicek 1982 が複素数で計算するのに対し、Kuntz 1997 は実部だけを計算することで高速化を実現している。検証により、Humlicek 1982 では無意味な値が出力されないことが分かった。プログラムの高速化のためには、Kuntz 1997 でなぜ無意味な値が出力されるのかは今後の課題である。

(2) 大気大循環モデルに組み込むための放射スキーム開発は、単色バンドモデルから検討を始めた。単色モデルは計算コストが小さいことが利点である。line-by-line 放射計算によるフラックスを再現するようにバンドの吸収係数を決めるアルゴリズムを採用し、地球、同期回転惑星を例に検証を行った。単色モデルでは line-by-line モデルとの加熱率の差を 2 K day⁻¹ 程度まで小さくすることができる。さらに精度が必要な場合には、k-分布モデルが必要であり、単一の吸収物質を含むモデルまで完成した。

①同期回転惑星を対象とした単直バンドモデルの検証

同期回転惑星は昼面と夜面の温度や循環が大きく異なる。このような環境でも適用できる放射モデルの開発を目指し、単色バンドモデルで検討を行った。あらかじめ想定される温度組成プロファイル惑星全体から5プロファイル用意し、それぞれについてline-by-line計算によるフラックスと加熱率を求める。その5つのフラックスプロファイルを同時に最適化するように吸収係数を決める。同期回転惑星の設定で計算されたGCMの計算結果をもとに検討を行った結果、波数方向に11バンド、吸収係数の温度圧力依存性のないモデルで、加熱率のline-by-lineモデルとのずれは最大 2.1 W m^{-2} の精度で計算することができた。これは単色、温度圧力依存性がないモデルでも、ターゲットに合わせて吸収係数を最適化するアルゴリズムを用いれば、よい精度で計算できることを示している。

②k-分布モデルの開発

さらに計算精度が必要な場合には、k-分布モデルを用いる。このモデルもターゲットに合わせて最適化するモデルとして開発した。またk-分布モデルでは、バンド内のサブグリッドをどのように分割するかが計算精度に大きな影響を与える。バンド内を数10分割し、その組み合わせで得られるすべてのサブバンドの幅の組み合わせについてあらかじめ吸収断面積のセットを計算し、それらの中からline-by-line計算による加熱率分布と最もあうものを選ぶプログラムとした。このことにより比較的少ないサブグリッドの数で、精度よく計算できるプログラムとすることができる。

(3)ハビタブルゾーンの内側境界の考察を本研究で開発したモデルを使って行った。k-分布法による放射スキームを1次元放射対流平衡モデルに導入し、水蒸気を含む大気放射対流平衡構造の推定を行った。背景大気1 barを含む場合、地表面温度が345Kよりも低い場合には、圏界面温度が120K付近と低温となり、350K以上では200K程度となる2つの大気構造が示唆された。低温の圏界面は、非灰色の効果によることが物理的に説明された。

一方、低圧領域に圏界面が現れる場合、吸収線が細くなることから波数分解能を高くすることが求められる。本研究では、line-by-lineモデルによって十分な波数解像度での計算の検証も行った。ただし、line-by-lineモデルでは放射対流平衡計算は計算コストが大きいので、等温成層圏プロファイルを仮定し、その圏界面温度をパラメータとすることで圏界面温度の推定を行った。その結果、やはり低温の圏界面と高温の圏界面が現れることが分かった。但し放射収支を

考察することで、これらは異なる放射バランスにより実現していることが明らかとなった。つまり圏界面には2つのレジームが存在する。ひとつは乾燥して低温な圏界面レジーム(Dry regime)で、地表面温度によらず120K程度となる。一方で、圏界面が高温になると成層圏の水蒸気量も多くなり、湿潤で高温の圏界面レジーム(Moist regime)が実現する。Moist regimeは地表面温度が345K以上でしか存在しない。Dry regimeは、圏界面自身の放射による冷却と対流圏からの放射加熱のバランスで決まるのに対し、Moist regimeはそれらに加えて、成層圏からの惑星放射、太陽直達光による加熱が放射収支に寄与する。先行研究では、地表面温度が上がれば徐々に成層圏の水蒸気量が上がり、やがて水損失限界を迎えると考えられてきたが、本研究では、背景大気1 barを含む場合には水損失限界はMoist regimeでのみ生じることが分かった。このことを踏まえ、Dry regimeと水損失限界の関係を、背景大気を変えて考察した。その結果、水損失限界を考察する上で背景大気量は重要であり、 10^4 Pa 以上背景大気を含めば、惑星は水損失限界を向かえずに暴走状態に陥ることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ①Keiko Hamano, Hajime Kawahara, Yutaka Abe, Masanori Onishi, George L. Hashimoto, Lifetime and Spectral Evolution of a Magma Ocean with a Steam Atmosphere: Its Detectability by Future direct Imaging, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 806, 2015, 216
doi:10.1088/0004-637X/806/2/216

[学会発表] (計 11 件)

- ①大西将徳、はしもとじょーじ、倉本圭、高橋芳幸、石渡正樹、高橋康人、林祥介、湿潤大気に現れる対流圏界面高度の異なる二つの大気構造、日本地球惑星科学連合2016年大会、2016.5.26、幕張メッセ(千葉県)
- ②大西将徳、はしもとじょーじ、倉本圭、高橋芳幸、石渡正樹、高橋康人、林祥介、Line-by-line放射計算による湿潤大気の2つの圏界面レジーム、日本気象学会2016年度春季大会、2016.5.18、オリンピック記念青少年総合センター(東京都)
- ③Masanori Onishi, George L. Hashimoto, Kiyoshi Kuramoto, Yoshiyuki O. Takahashi, Yasuto Takahashi, Masaki Ishiwatari, Yoshi-Yuki Hayashi, Two humidity regimes

of stratosphere on a moist atmosphere、International Workshop on "Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III"、2016. 2. 23、ホテル日航八重山（沖縄県）

④大西将徳、はしもとじょーじ、倉本圭、高橋芳幸、石渡正樹、高橋康人、林祥介、放射対流平衡モデルによる水蒸気大気の圏界面温度推定、日本惑星科学会秋季大会 2015、2015. 10. 14、東京工業大学（東京都）

⑤大西将徳、はしもとじょーじ、倉本圭、高橋芳幸、石渡正樹、高橋康人、林祥介、水蒸気大気の圏界面の推定とハビタブルゾーンの内側境界、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015. 5. 25、アパホテル&リゾート東京ベイ幕張（千葉県）

⑥大西将徳、はしもとじょーじ、倉本圭、高橋芳幸、石渡正樹、高橋康人、林祥介、水蒸気大気の圏界面の推定とハビタブルゾーンの内側境界、日本気象学会 2015 年度春季大会、2015. 5. 23、つくば国際会議場（茨城県）

⑦Masanori Onishi, George L. Hashimoto, Kiyoshi Kuramoto, Yoshiyuki O. Takahashi, Yasuto Takahashi, Masaki Ishiwatari, Yoshi-Yuki Hayashi、Radiation model development and its use for exoplanets、Japanese-French model studies of planetary atmospheres、2015. 5. 15、神戸大学（兵庫県）

⑧ Masanori Onishi, Yasuto Takahashi, Yoshiyuki O. Takahashi, Yutaka Abe, Keiko Hamano, George L. Hashimoto, Yoshi-Yuki Hayashi, Masaki Ishiwatari, Hajime Kawahara, Kiyoshi Kuramoto、Development of a radiative transfer model for steam atmospheres and application to Earth-like planets、Workshop on Exoplanets in JFY2014、2015. 3. 2、東京大学（東京都）

⑨大西将徳、はしもとじょーじ、倉本圭、高橋芳幸、石渡正樹、高橋康人、林祥介、大気大循環モデルのための放射モデル開発：同期回転惑星大気、日本惑星科学会秋季大会 2014、2014. 9. 24、東北大学（宮城県）

⑩大西将徳、はしもとじょーじ、倉本圭、高橋芳幸、高橋康人、石渡正樹、林祥介、Line-by-line 放射計算による水蒸気大気の放射特性、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014. 4. 29、パシフィコ横浜（神奈川県）

⑪Masanori Onishi, George L. Hashimoto, Kiyoshi Kuramoto, Yoshiyuki O. Takahashi, Yasuto Takahashi, Masaki Ishiwatari, Yoshi-Yuki Hayashi、Development of radiative transfer model for exoplanets with steam atmospheres、The 5th Subaru International Conference in Keauhou Kona、2013. 12. 9、カイルア・コナ（アメリカ）

〔その他〕

地球流体電脳倶楽部 放射伝達モデルプロジェクト

<https://www.gfd-dennou.org/library/dcrtm/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大西 将徳 (ONISHI, Masanori)

神戸大学・大学院理学研究科・学術研究員

研究者番号：50644887