

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2011

課題番号：20244013

研究課題名（和文）系外惑星系の主星重元素比依存性

研究課題名（英文）Dependence of extrasolar planetary systems on host stars' metallicity

研究代表者

井田 茂 (IDA SHIGERU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60211736

研究成果の概要（和文）：

太陽系外の惑星（系外惑星）の発見数は750個以上、ケプラー衛星望遠鏡による候補天体も2300個以上となり、惑星および惑星系の性質についての統計的議論が始まっている。本研究では主星の組成（重元素比）によって惑星系がどう変わるのかを調べた。惑星軌道進化のN体シミュレーションおよび惑星の衝突流体シミュレーションを行う一方で、その結果を組み合わせたモンテカルロ計算を行なった。重元素比が高い主星のまわりでは重元素が多いので、巨大ガス惑星が複数形成され、軌道不安定をおこして、軌道離心率が跳ね上げられることがわかった。また、視線速度法サーベイ観測を推進する一方で、アマチュアや学生を巻き込んだトランジット・フォローアップ観測ネットワークを組織し、理論・観測の両面から追及した。

研究成果の概要（英文）：

More than 750 extrasolar planets have been discovered, as well as more than 2300 candidates by Kepler space telescope, which motivates statistical discussions of planets and planetary systems. Here we investigated dependence of planetary systems on metallicity of the host stars. N-body and fluid dynamical simulations for planet-planet scattering and collisions have been carried out. Combining these results, we also performed Monte Carlo simulations to find that in a metal-rich disk around a metal-rich star, multiple gas giants are formed and they undergo orbital stability to pump up orbital eccentricities. We also promoted radial velocity surveys and construct a transit follow-up network involving amateurs and students to study the problem both from theory and observation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2009年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2010年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
2011年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
総計	35,900,000	10,770,000	46,670,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：理論天文学・系外惑星

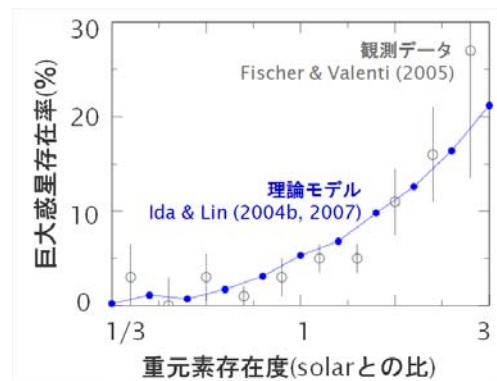
1. 研究開始当初の背景

急速に進展する系外惑星の研究には、2つの大きな流れがある。ひとつは系外生命へとつながる系外地球型惑星である。地球型惑星の検出は依然としてチャレンジングであるが、これまでの系外惑星探査の主力の視線速度法（惑星公転による中心星の揺れを、視線方向の中心星放射のドップラー効果として捕える分光観測）の超高精度化や重力マイクロレンズ観測（主星だけでなく惑星重力による、背景の星の重力レンズ現象による増光をとらえる測光観測）の高ネットワーク化などにより、可能になりつつある。

もう一つの流れは系外巨大ガス惑星の統計的議論である。平成20年度当時までに発見された系外惑星のほとんどは木星クラスの巨大ガス惑星であり、巨大ガス惑星については発見ただけで意義があった時代は過ぎ、惑星軌道分布などの統計的性質が議論の中心となってきていた。明らかになってきた重大な統計的性質として、主星の組成（重元素比）と巨大ガス惑星の存在率の間の強い相関がある。

下図は、太陽型恒星(F, G, K 矮星)のまわりでの系外巨大惑星の視線速度観測による検出確率が主星重元素存在比(FeとHの比)にどのように依存するのかを表す。白抜きのは観測データのコンパイルである(Fischer & Valenti 2005)。青塗りの円は、われわれのモデルによる理論予測である(Ida & Lin 2004b, 2007)。惑星系を生んだ原始惑星系円盤と主星の重元素存在比が等しいとするならば、主星の重元素存在比が高いほど、円盤の巨大ガス惑星のコアを作る固体材料物質多いことになるので、この傾向は自然である。われわれの理論モデルでもこの相関は見事に説明され、パラメータによっては定性的にだけでなく、定量的にも一致した相関が再現される。

さらに注目されはじめていたのは、主星の重元素比とホット・ジュピターの内部構造の相関の可能性である。ホット・ジュピターとは主星から至近距離の軌道($< 0.1\text{AU}$)を周回する巨大ガス惑星である。当時でも、惑星による主星の食を測光で観測する方法(トランジット法)で20個程度の惑星が発見されていた。視線速度法では惑星の質量、



トランジット法では惑星の断面積がわかるので、両方で検出できれば、惑星の物質密度がわかり、その密度から内部構造が推定できる

2. 研究の目的

これらの問題を解決するために、1) 主星の重元素比、すなわち惑星系を生んだ原始惑星系円盤の重元素比、が太陽組成よりも有意に大きい場合にも適用できるように惑星形成モデルを拡張し、2) 惑星の固体成分比を含めた惑星の様々な性質の主星重元素比依存性を明らかにするために、視線速度法とトランジット法双方で検出できる惑星のサンプル数増大を目的とする観測プロジェクトを推進する。

3. 研究の方法

本研究の方法は以下の2つからなる。

1) 惑星形成の理論モデルの発展

すでに申請者らによって開発済みであった惑星形成のモンテカルロ・コードを用いて、重元素比が高い原始惑星系円盤（円盤と主星の重元素比は等しいとする）で、巨大ガス惑星がどれだけの数がどの位置に形成されるのかを見積もる。それをもとに巨大ガス惑星同士の重力散乱のN体シミュレーションを行なう。その結果をモデル化して惑星形成コードにフィードバックし、観測データとの比較のもと、惑星系形成の主星重元素比依存性の理論モデルを構築する。

2) すばるN2Kプログラムとトランジット・フォローアップの推進

これまでに行ってきた、すばるN2K視線速度観測プログラムのデータ解析を進め、惑星候補天体の軌道決定を進める。その一

方で、このプログラムに呼応して作られた、アマチュア天文家や大学院生中心研究者のトランジット・フォローアップのネットワークに対して、順次、勉強会や研究会を行って全体のレベルアップをはかり、新たに公開天文台とも連携しつつ、実際に稼働できるようにする。

4. 研究成果

1) 惑星形成の理論モデルの発展

我々は、申請当時までに、系外惑星の観測データと直接比較検討できる惑星形成モデルのコードのプロトタイプを開発し (Ida & Lin 2004a)、巨大惑星の検出確率の主星重元素比依存性の再現 (Ida & Lin 2004b, 2007) や M 型星の惑星分布の予測 (Ida & Lin 2005) に成功していたが、上記のような惑星組成の問題まで取り扱うため、惑星同士の重力散乱の N 体シミュレーション (Ogihara & Ida 2009, 2010; Nagasawa & Ida 2011) や惑星同士の衝突の SPH 流体シミュレーション (Genda et al. 2012)、その結果をモデル化して惑星形成コードに導入した。まずは、小型の固体 (岩石・氷) 惑星同士の重力散乱を導入して、スーパーアースの形成問題を考えた。円盤との相互作用で円盤内縁に移動してきた原始惑星が、円盤散逸後に巨大衝突を起こして、地球質量の 10 倍のオーダーのスーパーアースが 0.1 天文単位あたりに形成されることがわかった (Ida & Lin 2010)。

巨大ガス惑星同士の重力散乱も導入し、巨大ガス惑星の軌道離心率の分布や、遠方に弾き飛ばされたガス惑星の分布を予測した。この結果は、観測されている 0.3~3 天文単位の巨大ガス惑星の軌道離心率の分布をよく再現している (Ida et al. 準備中)。このモデルによれば、重元素存在度の高い中心星の惑星系は、重元素比が高い原始惑星系円盤で成長が進むのであるが、そのような場合は、固体コアの材料物質が多いので、巨大ガス惑星が多数形成され、重力散乱がさかんにおこるので、巨大ガス惑星の軌道離心率が高い傾向があることが予測される。

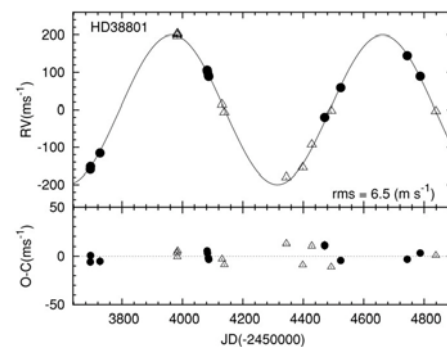
2) すばる N 2 K プログラムとトランジット・フォローアップの推進

上記の主星重元素比の依存性を明確にし、理論モデルを制約するためには、トランジット法と視線速度法の両方で捕えられる惑星

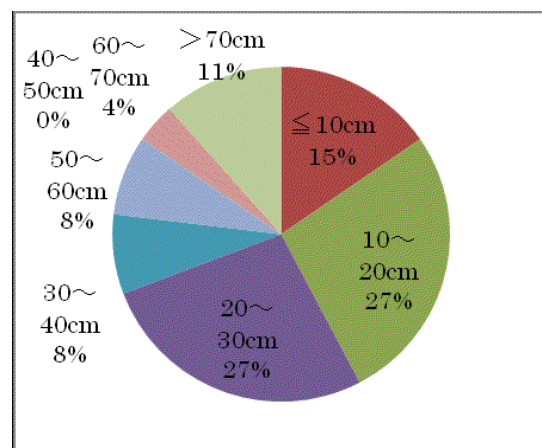
のサンプルを増やすことが観測的には必須である。

まず、すばる望遠鏡における視線速度観測では測定精度に問題があったが、我々は解析ソフトウェアの改良によってこれを解決し、その結果長期間に渡って数 m/s という高精度を維持することに成功した。

これをもとに、すばる望遠鏡や岡山観測所などで精力的に惑星候補天体のフォローアップ観測を進め、現在までに 4 個の新たな惑星系を発見した (Sato et al. 2009, Harakawa et al. 2010)。



上図は、太陽型星 HD38801 で検出された視線速度変化であり、同天体の周りを約 11 木星質量の巨大惑星がほぼ円軌道で周回していることを示している。これまでに発見した 4 つの惑星系はいずれも公転周期が長くトランジットを起こしている可能性は低いが、この他に短周期惑星の候補も見つかっており、現在フォローアップを続けている。



一方、トランジット観測のフォローアップは測光観測で小望遠鏡でも対応できる。ここでは、トランジット現象をなるべく多くの”眼”で監視するため、研究者だけでなく、アマチュア天文家や学校の先生などの教育関係者で、測光観測ができるスキルを持ち、本

観測に興味を持ってくれる方々を中心に「日本トランジット・ネットワーク」を構築した。観測者としての登録者は20名、総望遠鏡数は28台の少数精鋭である(図参照)。

このネットワークでは観測要請はもちろん、相互のノウハウ交換、データ収集などを行い、年1回の頻度でネットワーク独自の研究会を開催してきた。

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10件)

1. 渡部潤一・井田茂・大川拓也, 2012, 日本トランジット観測ネットワーク その来し方・行く末, 天文月報, 第105巻, 第2号, 65-69
2. Genda, H., Kokubo, E. & Ida, S. 2012. Merging Criteria for Giant Impacts of Protoplanets. *Astrophys. J.* 744, 137-144.
3. Nagasawa, M. & Ida, S. 2011. Orbital Distributions of Close-in Planets and Distant Planets Formed by Scattering and Dynamical Tides. *Astrophys. J.* 742, 72-87.
4. Schlaufman, K. C., Lin, D. N. C. & Ida, S. 2010. A Population of Very Hot Super-Earths in Multiple-planet Systems Should be Uncovered by Kepler. *Astrophys. J.* 724, L53-L58.
5. Ogiwara, M., Duncan, M. J. & Ida, S. 2010. Eccentricity Trap: Trapping of Resonantly Interacting Planets Near the Disk Inner Edge. *Astrophys. J.* 721, 1184-1192.
6. Ida, S. & Lin, D. N. C. 2010. Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. VI. Dynamical Interaction and Coagulation of Multiple Rocky Embryos and Super-Earth Systems around Solar-type Stars *Astrophys. J.* 719, 810-830.
7. Harakawa, H., Sato, B., Fischer, D.A., Ida, S., Omiya, M., Johnson, J. A., Marcy, G.W., Toyota, E., Hori, Y., Howard, A.W. 2010. Detection of a Low-eccentricity and Super-massive Planet to the Subgiant HD 38801. *Astrophys. J.* 715, 550-553.
8. Sato, B., Fischer, D.A., Ida, S., Harakawa, H., Omiya, M., Johnson, J.A., Marcy, G.W., Toyota, E., Hori, Y., Isaacson, H., Howard, A.W., Peek, K.M.G. 2009. A Substellar Companion in a 1.3 yr Nearly Circular Orbit of HD 16760. *Astrophys. J.* 703, 671-674.
9. Ogiwara, M. & Ida, S. 2009. N-Body Simulations of Planetary Accretion Around M Dwarf Stars. *Astrophys. J.* 699, 824-838.
10. Narita N., Sato B., Oshima O., Winn, J. 2008. A Possible Spin-Orbit Misalignment in the Transiting Eccentric Planet HD 17156b, *PASJ* 60, L1-L5

[学会発表] (計8件)

1. Revealing Evolution of Protoplanetary Disks in the ALMA Era. May 8, 2012, Kyoto, Formation of distant jupiters and its relation to disk structure, Shigeru Ida (Tokyo Tech), D.N.C. Lin (UCO/Lick), Makiko Nagasawa (Tokyo Tech)
2. Germany-Japan Round Table -From the early universe to the evolution of life-, Dec 2, 2011, Heidelberg, Formation of planets from planetesimals Shigeru Ida (Tokyo Tech)
3. Extreme Solar Systems II, Wyoming, Sep 17, 2011, Predictions from Population Synthesis - Comparison with Obs. & Constraints on Theory, Shigeru Ida (Tokyo Tech), D.N.C. Lin (UCO/Lick, KIAA/Peking Univ)
4. IAU Symposium 276, The Astrophysics of Planetary Systems: Formation, Structure, and Dynamical Evolution, Torino, Oct 11, 2010, Theoretical Predictions of M, a & e - Distributions of Jupiters/ Super-Earths, Shigeru Ida (Tokyo Tech)
5. Evolving theory of planet formation, Ishigaki, June 25, 2010, Population synthesis: planetary mass distribution, formation of close-in super-Earths, Shigeru Ida (Tokyo Tech)

東京大学・大学院理学系研究科・特任助教
研究者番号：90456260

6. 日本天文学会 2009 年秋季年会, N2K コンソーシアムによる系外惑星探査, 原川紘季、佐藤文衛、井田茂、堀安範 (東工大)、大宮正士 (東海大)、豊田英里 (神戸市立青少年科学館)、Debra A. Fischer(San Francisco State University)、ほか N2K コンソーシアム (2009 年 9 月 15 日、山口大学)
7. 日本天文学会 2010 年秋季年会, すばる HDS 用 Y ードセルによる視線速度の長期的測定精度, 原川紘季、佐藤文衛、井田茂 (東工大) (2010 年 9 月 22 日、金沢大学)
8. 日本天文学会 2011 年秋季年会, N2K コンソーシアムによる系外惑星候補天体のフォローアップ観測, 原川紘季、井田茂、大宮正士、佐藤文衛 (東工大)、堀安範 (国立天文台)、岡山 HIDES ファイバー開発チーム、N2K コンソーシアム (2011 年 9 月 20 日、鹿児島大学)

[図書] (計 2 件)

1. 「系外惑星 宇宙と生命のナゾを解く」井田茂(ちくまプリマー新書) 2012、210 ページ
2. 「スーパーアース 地球外に生命はいるのか」井田茂 (PHP サイエンス・ワールド新書) 2011、190 ページ

[その他]

ホームページ等

<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/ida/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井田 茂 (IDA SHIGERU)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：60211736

(2) 研究分担者

佐藤 文衛 (SATO BUN' EI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：40397823

渡部 潤一 (WATANABE JUNICHI)

国立天文台・教授
研究者番号：50201190

(3) 連携研究者

河合 誠之 (KAWAI NOBUYUKI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：80195031

玄田 英典 (GENDA HIDENORI)