

研究会「トランジット観測によるスーパーアースの大気組成と起源の解明」開催報告

成田 憲保¹, 福井 暁彦²

1. 本研究会の背景

太陽系外惑星の研究は近年急速に進展している。2000年代までの主な研究対象は木星型の巨大惑星だったが、近年の観測技術の発展とともに、より小さくて軽い惑星まで発見されるようになってきた。この過程で、「スーパーアース」と呼ばれる新しいタイプの惑星が発見されてきている。スーパーアースとは、まだ明確な定義はなされていないが、地球の1.4倍程度のサイズ、あるいは1-15倍程度の質量を持つ小規模な惑星の総称である。これは太陽系の地球と天王星の間のサイズ・質量をつなぐ一方、太陽系には存在しない惑星であるため、その組成や形成過程などの基本的な性質もまだよくわかっていない。そのため、太陽系から太陽系外にまで拡張した比較惑星学や惑星形成論の観点から、重要な研究対象と言えるだろう。

太陽系外惑星の観測方法にはいくつかのやり方があるが、惑星の組成や形成過程まで研究するのに最も適しているのはトランジットを起こす惑星(以下、トランジット惑星)である。トランジット惑星の最大の魅力は、視線速度の測定とトランジットの測光観測を行うことで惑星の真の質量と半径が決まり、さらにトランジットの多波長観測を行うことで惑星の大気組成まで知ることができる点にある。また、NASAのケプラー計画や地上からのトランジット惑星探索、そして次世代の全天トランジット惑星探索(TESS: Transiting Exoplanet Survey Satellite)などは、どれも木星型惑星より小さくて軽い惑星の発見へと狙いをシフトして

きているので、今後はトランジットを起こすスーパーアースの研究が本格的に始まると期待される。このように、スーパーアースの研究はまだ黎明期にあるものの、日本国内でも今後の研究に向けて理論と観測の両面、そして研究を実現するための望遠鏡と装置開発の面から検討を重ねていくことが重要となるだろう。

そこで今回は、理論、観測、装置開発をそれぞれ専門とする方々に招待講演を依頼し、今後世界の第一線で研究を行う協力体制を作ることを目標として、2012年9月25-26日にかけて本研究会を開催した。参加者は20名程度と小規模な研究会だったが、このテーマに関心の高い方々にお集まりいただき、アットホームな雰囲気の中で活発に議論が行われた。

2. 開催地およびプログラムの紹介

本研究会の開催地である岡山遥照山ホテルは、トランジット系外惑星観測グループの国内の観測拠点である国立天文台・岡山人体物理観測所が立地する竹林寺山(岡山県浅口市)の隣の山、遥照山(同県同市)に立地し、瀬戸内海が一望出来る見晴らしの良いホテルである。最寄り駅から同ホテルまでの公共交通機関は無いため、参加者の多くには、ホテルに用意してもらったマイクロバスを利用して駅から片道約30分かけて来て頂いた。

本研究会は9月25日の午後から始まり、この日は主にスーパーアースに関する観測および理論の現状についての講演や、将来のトランジット惑星観測用の装置についての講演などが行われた。これまでトランジット惑星に関して観測、理論、装置の研究者が集う研究会はあまり無かったため、今回の研究会でお互いに初

1. 国立天文台太陽系外惑星探索プロジェクト室

2. 国立天文台岡山人体物理観測所
norio.narita@nao.ac.jp

■若手研究者による分野間連携研究ワークショップ

「トランジット観測によるスーパーアースの大気組成と起源の解明」プログラム

(2012年9月25日・26日 岡山 遥照山ホテル)

〈9月25日〉

- 14:00-14:30 成田憲保 super-Earthsの透過分光研究の現状
 14:30-15:00 生駒大洋 super-Earthの組成の縮退と形成論的意義について
 15:00-15:30 玄田英典 Super-Earthsの組成についての理論的予言
 15:30-16:00 関根康人 super-Earthの大気化学-太陽系天体からの示唆-
 16:00-16:15 休憩
 16:15-16:30 大西将徳 系外惑星大気の放射過程のモデリングおよびコード開発
 16:30-17:00 柳澤顕史 OAO の ISLE, OAOWFC そして新広視野撮像カメラ
 17:00-17:30 永山貴宏 IRSF/SIRIUSによる多色同時撮像
 17:30-18:00 栗田光樹夫 京大3.8m望遠鏡計画の概要
 終了・記念撮影
 19:30-21:30 懇親会

〈9月26日〉

- 09:00-09:30 福井暁彦 SLEを用いた近赤外トランジット測光観測
 09:30-09:45 浦川聖太郎 太陽系小天体のライトカーブ観測とその系外惑星分野への応用
 09:45-10:00 大貫裕史 secondary eclipseから探る温度構造と大気組成
 10:00-10:15 塩谷圭吾 SPICA を用いたトランジット系外惑星観測
 10:15-10:30 高橋康人 放射計算に基づいたガス惑星の大気構造推定
 10:30-10:45 休憩
 10:45-11:15 平野照幸 高分散分光を用いた惑星探査の現状と将来計画
 11:15-11:45 小谷隆行 InfraRed Doppler (IRD)による地球型惑星探査
 11:45-12:00 濱野景子 軌道半径で決まる2タイプの地球型惑星の初期進化
 終了・昼食
 13:30-15:00 エクスカーション:岡山天体物理観測所の188cm望遠鏡見学
 15:00-17:00 共同研究に関する議論(希望者のみ)

顔合わせという方も多かったが、その垣根を越えて初日から活発な議論が行われた。またこの日の夜に設けられた懇親会の場でも、岡山県の特産品を使用した会席料理に舌鼓を打ちながら、お互いに交流を深めることが出来た。

26日の午前中は、トランジット惑星の観測についての講演をはじめ、トランジット惑星に関連する様々な研究についての講演が行われた。特に今回、当初講演を申し込まれていなかった方にも、自己紹介を兼ねて15分の研究紹介の講演を行ってもらったため、お互いの研究を知る良い機会となった。そしてこの日の午後は、エクスカーションとして、ホテルから車で10分の場所にある岡山天体物理観測所の見学会を行

った。同観測所は、光学式望遠鏡として国内で2番目の大きさ(口径)を持つ188cm反射望遠鏡を有する。同望遠鏡は建設から52年が経つものの、現在でも最先端の成果を出し続けており、特に現在では、高分散分光器HIDESを用いた系外惑星の視線速度探索や、近赤外撮像分光装置ISLEを用いたトランジット測光観測に重点が置かれている。研究会参加者の中には同観測所を訪れるのが初めてという方も多く、望遠鏡の意外な大きさに驚かれていた。そしてエクスカーションの後、有志のみで今後の共同研究の打合せを行い、2日間に渡る研究会を終えた。以上について、本頁の研究会プログラムも合わせて参照されたい。

3. 講演内容

本研究会では、スーパーアースについての観測、理論の専門家、および観測装置の専門家に招待講演をして頂いた。ここではそれらの講演内容の一部をかいつまんで紹介する。

3.1 観測

研究会を主催した著者(成田)から、トランジット惑星大気の透過分光研究の現状について紹介を行った。これまで透過分光の研究はホットジュピターのみがターゲットとされていたが、近年発見されてきたM型星まわりのトランジット・スーパーアースであれば惑星大気の波長依存性を精度良く調べることが可能であること、そしてスーパーアースの主な大気組成として水素大気と水蒸気大気の場合にどのような波長依存性の違いがあるのかが示された。その上で、2009年に初めて発見されたM型星まわりのトランジット・スーパーアースGJ1214bについて、南アフリカのIRSF1.4m望遠鏡のSIRIUSで行われた近赤外3色同時トランジット観測の結果と、すばる望遠鏡Suprime-Camで行われたBバンドトランジット観測の結果が紹介された。福井からは、これらのトランジット観測の基本となる高精度測光観測の方法論と、岡山天体物理観測所のISLEを用いた実際の観測例について紹介

を行った。

3.2 理論

まず、スーパーアースの組成の縮退と形成論的意義について、東京大学の生駒大洋氏に講演して頂いた。講演ではまず、トランジット惑星では惑星の平均密度が求まることが魅力であるが、惑星は岩石(シリケート)、氷(H_2O , CH_4 , NH_3 etc.), ガス(H_2 , He)などの複数の材料の組み合わせからなるため、平均密度の情報だけでは組成の縮退が起こることが紹介された。そして、これまでに発見されたトランジット・スーパーアースの質量-密度分布は広がりを持ち、その内部組成は多様である事が示された。またそのような多様性を生む内部組成モデルとして、(1)水素+ヘリウムの大気量が異なる岩石惑星、(2)含水量の異なる岩石惑星、の2つの可能性が提示された。まず(1)のモデルでは、惑星の軌道移動を考えなくともその場形成で岩石+ガスの惑星を作ることが出来るが、これまでに見つかったスーパーアースのうち、平均密度が小さいものについてはこのモデルでは説明がつかないことが説明された。一方、(2)のモデルでは、水成分をスノーライン以遠から運んでくる必要があり、また含水量の多様性を説明するためには、惑星移動などの効果をよく考える必要があるようである。

続いて、東京大学の玄田英典氏には、スーパーアースの組成の多様性を作り出す要因について、材料物質



図1: 研究会集合写真.

(水と岩石の割合)と天体衝突の観点からお話頂いた。まず、組成の多様性が軌道の遠方からの材料物質(水+岩石)の供給で生み出される場合、複数惑星系において外側の惑星ほど低密度になることが予想され、実際の観測でもその傾向が見られる事が紹介された。一方、組成の多様性を決める要因が微惑星中の水/岩石比にある場合、恒星のFe/H比と惑星の平均密度には正の相関が期待されるが、観測結果は逆センスであることが示された。さらに、惑星同士の衝突が組成の違いを作り得るかを調べた研究が紹介され、水+岩石惑星同士の衝突ではその組成はほとんど変わらず、岩石+水素惑星同士の衝突の場合は比較的組成の違いを生みやすいというシミュレーション結果が示された。

東京大学の関根康人氏には、スーパーアースで考えられる大気組成について、太陽系天体と比較した観点からお話頂いた。まず、スーパーアースに分類される惑星のうち、厚い H_2 -Heエンベロープに覆われた惑星をmini Neptune、 H_2 が少なく固体(水+岩石)が主成分の惑星をlarge Earthと定義された。まずmini Neptuneにおいては、それを代表するトランジット系外惑星であるGJ436bやGJ1214bでは、観測からCOが CH_4 より多い可能性が指摘されており、太陽系内のガス・氷惑星とは逆であることが紹介された。またその要因として、 H_2O が上層大気に輸送され、光化学反応を介して CH_4 がCOに変化した可能性や、クエンチ温度や成層圏熱源などの大気構造の違いの可能性などが挙げられた。また、大気組成を知る上で重要な観測量は、大気ダイナミクスおよびエンベロープの重元素量であることが指摘された。一方、large Earthについては、火山ガスの酸化還元状態が重要であり、低温・高圧ほど還元的組成になるため、陸惑星(～10km以下の厚さの海)では CO_2 が、海惑星(～10km以上の厚さの海)では CH_4 が豊富になることが示された。また、large Earthの大気は、主星に近く脱ガス率が小さいBlue Earthと、主星から遠く脱ガス率が大きいOrange Earthの2種類に分けられ、 CO_2 やhazeの量に違いが出る事が紹介された。また重要な観測量として、陸/海の比率や脱ガスフラックス、地表温度が挙げられた。

3.3 観測装置

国立天文台・岡山観測所の柳澤顕史氏から、現在ト

ランジット惑星観測に用いている近赤外撮像分光装置ISLEの紹介及び、トランジット惑星観測に特化した将来の広視野・多色カメラ構想の紹介をして頂いた。

まず、ISLEの詳細なスペックが紹介され、近赤外線1ミリの等級の測光精度が得られる世界トップレベルの観測装置である事が紹介された。また、ユーザーからの要望として、現在のISLEの視野(4分角)よりも広い視野をもち、さらに同時多波長観測が行えるカメラが望まれていることが紹介され、そのようなカメラの光学系レイアウトの検討結果が紹介された。その中で、岡山188cm望遠鏡に12分角の視野を持つ多色カメラを取り付け可能であることが示された。また、現在岡山観測所で開発が進められている近赤外広視野カメラOAOWFCの紹介も行われた。

京都大学の栗田光樹氏には、現在岡山観測所に建設予定で開発が進められている京大岡山3.8m望遠鏡についての概要の紹介、ならびにトランジットの高精度測光観測のための単素子観測装置の提案についてお話頂いた。まず、京大岡山3.8m望遠鏡計画の沿革や現在の開発状況について紹介があり、2015年ファーストライトを目指して開発が進められていることなどが示された。また、目指すサイエンスは突発天体観測と系外惑星の直接撮像であることが紹介された。一方、単素子を使った観測方法の提案では、世界で広く使われている赤外アレイ検出器ではなく、これまであまり検討がされて来なかった単素子を使うという斬新な提案がなされた。単素子でも十分に高精度な測光観測が行える可能性がある一方、赤外アレイ検出器は高額であるのに対し、単素子を使うと非常に安価に製作可能である事が示された。

3.4 今後の展望

研究会2日目の午後には、2日間の議論のまとめと今後の展望についての議論が行われた。

まず、理論的背景からスーパーアースの組成が岩石+水素なのか岩石+水蒸気なのかを判別することが惑星形成論的に極めて重要な課題であり、そのためには発見された惑星の観測から質量・半径関係を統計的に調べることで、透過分光の観測により縮退を解いて個々の惑星の組成を調べることの重要性が挙げられた。そしてそれを実現するためには、観測によって新しいトランジット・スーパーアースを発見することと、

個々の惑星に対する透過分光を行うことが必要であること、そのような観測のためには広視野の同時多色撮像カメラが最適であることが議論された。

このような広視野の同時多色撮像カメラとしては南アフリカの IRSF/SIRIUS の例があるが、日本国内にはまだ存在せず、また水素大気のレイリー散乱を観測するのに必要な可視領域まで網羅した可視・近赤外の同時多色撮像カメラは世界にもほとんど存在しないことから、そのようなユニークな機能を持つ装置の開発が日本の競争力を高めるために重要であることが議論された。

4. まとめおよび謝辞

本研究会はスーパーアースを主題とした研究会としては国内で初めての試みであったが、20人というちょうど良い規模の参加者に恵まれ、活発な議論と共同研究の相談を行うことができた。この研究会をきっかけとした共同研究が今後発展していくことができれば幸いである。また、今後も研究の進捗とともに同様の研究会を開催していきたいと考えているので、新しく興味を持たれた方々にもぜひご参加いただきたいと考えている。

本研究会は、平成24年度自然科学研究機構「若手研究者による分野間連携研究プロジェクト」の支援を受けて開催されました。最後に、本研究会を支えて下さった招待講演者の皆様、活発な議論を交わして下さい参加者の皆様に深く感謝いたします。