

太陽系外惑星とその形成現場の直接観測

田村 元秀

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: motohide.tamura@nao.ac.jp



1995年の太陽型恒星を回る系外惑星の発見以来、系外惑星研究は長足の進歩を遂げました。なかでも、大型望遠鏡と先端的技術によって初めて可能になった直接観測は、現在大きな成果を上げつつあります。すばる望遠鏡では、系外惑星だけでなく、惑星誕生現場の直接観測を行うというユニークなサーベイプロジェクトを進めています。その鍵となるのは、直接観測のための観測装置の開発です。さらに、本稿では、直接観測の歴史を簡単に振り返りつつ、二つのメジャーな装置開発とその成果をまとめ、将来計画について紹介します。

1. はじめに

このたびは、林先生の名前を冠した賞をいただくことができ、誠に光栄です。理論と観測の違いはありますが、林先生の研究テーマの一つであった惑星形成分野に携わる研究者として、また、京都大学で先生の薫陶を受けたものとして、最もうれしい賞です。

林先生と最初にお会いしたのは、大学院一回生の一般相対論の講義だったと記憶しています。林先生はこの年に退官されたので、最終年の講義を直に受けることができたことは、たいへん幸せなことでした。ただ、林先生の板書されるテンソルを読み取るのが難しかった程度の記憶しか残っていないので、当時は先生の偉大さを実感できないほど不勉強だったことを今になって恥じています。

ご存知のように、系外惑星研究は天文学でも最も新しい分野の一つで、歴史と言ってもたかが知れています。そこで本講演のまとめでは、系外惑星発見前夜から、系外惑星観測の進展、メインとなる系外惑星の直接観測のいくつかの報告の「波」、そして、私たちの最新の成果である

SEEDSの初期結果を紹介し、今後の計画についても言及したいと思います。

2. 発見前夜

系外惑星探査と呼べる観測は1930年代からもあるのですが、惑星や褐色矮星のような超低質量天体の本格的な探査は70年代から競争が始まったと言えるでしょう。とくに赤外線での探査は、80年代からの赤外線アレイの登場が不可欠でした。観測手段が0次元から2次元赤外検出器になることはまさに革命的な出来事でした。私は、まさにその時期をアメリカ本土でポスドクとして過ごしました。今の大学院生には全く理解してもらえませんが、キットピーク天文台での赤外カメラの試験で、チャートレコーダーではなく、いきなり計算機の画面に銀河中心の画像が現れた瞬間の感激は忘れることができません(図1)。カメラが稼働すると、すぐにEric Becklin氏からは後述の褐色矮星候補の観測依頼がきましたが、赤外カメラを用いると、わずか1.4 m望遠鏡でも容易に撮像できました。

褐色矮星の発見は、その後、Becklin & Zuckerman (1988, 最初のL型星), Rebolo et al. (1995.9,

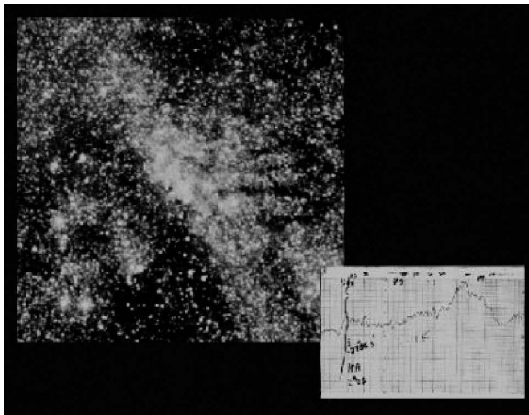


図1 銀河中心の画像と往年のチャートレコーダーによる観測¹⁾。

最初の若い褐色矮星), Nakajima et al. (1995.11, 最初のT型星)と進みました²⁾⁻⁴⁾。また, 惑星探査についても, Walker et al. (1995.8)の報告⁵⁾では, CFHT望遠鏡での12年もの観測で惑星が見つからなかったという失望感があった直後に, Mayor & Queloz (1995.11)の確実な系外惑星発見の大ニュース⁶⁾があり, 惑星探査や低質量天体の研究が一気に進み出しました。そのような中で, 若い浮遊惑星候補の報告^{7), 8)}もありましたが, 高感度だけではない他の技術を必要とする系外惑星の直接撮像までのハードルは2000年時点ではまだ少し高いという印象でした。

3. 観測手法: 間接 vs. 直接

ところで, 系外惑星のような超低質量天体の観測方法は, 大別して間接法と直接法にわかれます。前者は, 惑星そのものからの光をとらえるのではなく, 惑星が及ぼす「影響」をとらえるものです。その中でも代表的な視線速度法(ドップラー法)は, 惑星の公転運動の影響による主星の速度ふらつきを高分散分光器によるモニター観測により検出します。また, トランジット法は, 惑星が観測者と主星の間を横切の際の主星の光度変化を高精度測光モニター観測により検出します。どちらも, 主星に近い, 重い(大きい)惑星が検

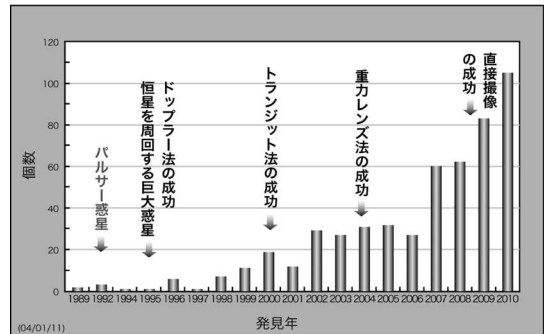


図2 2010年までの系外惑星の増加と観測手法の発展。2011年には約3,000個のケプラー惑星候補が加わった。

出されやすいというバイアスがあります。また, マイクロレンズ法は, レンズ星の重力レンズ効果による背景星の明るさ変化(マイクロレンジング)において, レンズ星の惑星による光度変化のアノマリを測光モニター観測により検出します。レンズ星のアインシュタイン半径近傍の数AUのところの惑星が検出されやすいというバイアスがあります。これらの方法でこれまでに800個程度の系外惑星が発見・確認されています。

これらに対し, 直接法は, 恒星と惑星を, 高解像度観測により見分けて撮像あるいは分光し, 惑星からの放射(反射光でも放射光でもよい)を直接に検出・撮像します。現在の望遠鏡の解像度では, 観測対象が遠いので, 恒星も惑星も点状天体として写ります。技術的には, すばる望遠鏡のような8m望遠鏡によってようやく花開きつつあるため, 間接法に比べると発見数はまだまだですが, 今後, 技術がさらに成熟すると究極の惑星観測法となると期待されます。また, 「百聞は一見に如かず」の言葉とおり, 画像に写った系外惑星には人の胸を打つものがあります。

しかし, 上述のようにすばる望遠鏡が完成した1999年の時点では系外惑星の直接観測は全く未開拓でした。一方, 1995年の発見以来, 間接法による系外惑星の発見数は急速に増え, 間接手法において先行する装置や観測サーベイがすでに数

多くあったため、われわれは、すばる望遠鏡における系外惑星研究のテーマとしては、間接法ではなく直接法に狙いを絞りました。

惑星は、(a) 恒星である主星と比べて暗く、(b) 主星のすぐ近くにあり、(c) 主星との明るさの比が非常に大きい存在です。このような天体を観測するためには、それぞれ、(a) 感度、(b) 解像度、(c) コントラスト、という観測性能が必要になります。感度・解像度は天文学のいろいろな分野で不可欠なため、望遠鏡も観測装置もこれらの性能が追求されてきました。一方、コントラスト性能は必ずしも要求されないため、一般的な望遠鏡や観測装置ではそれほど気にしません。しかし、系外惑星直接観測においては、まさにこの性能こそが一番難しく、「明るい天体の近くの暗いものをいかにして撮像するか」ということを追求しなければなりません。

このようなコントラストを追求した観測装置がコロナグラフです。皆既日食時にしか見られない太陽コロナを常時観測するためにフランスの天才 Lyot によって 1930 年代に考案されました。もちろん、太陽ほど明るくありませんが、明るい恒星を大望遠鏡で見ると、恒星近くの暗い天体は恒星のハローに隠されてしまうため、同じ原理を用いたコロナグラフが有効です。そのような太陽観測以外のコロナグラフは、これまでも大発見を導いてきました。その最初で最も有名なものは、ベガ型星 β -Pic の残骸円盤の発見⁹⁾ です。これは太陽系内の衛星観測のために製作されたものでしたが、IRAS の発見を聞き、すぐさま恒星観測に利用され、ダスト円盤を見事に撮像しました。そのマスクサイズは 7 秒角 (回折限界の 100 倍) と巨大でした。残骸円盤は今でこそ微惑星の衝突過程を見ている、すなわち惑星存在の間接証拠と理解されているので、この観測は系外惑星系撮像への序章だったと言えるでしょう。その後、装置が進展し、ハッブル宇宙望遠鏡では 1 秒角という小さな楔形マスクが使われ、上記の円盤にワープが見

つかり、惑星と円盤の相互作用が示唆されました。さらに、ジョンズホプキンス大学の低次補償光学を用いたコロナグラフによって、低温褐色矮星 Gl229B が直接撮像で発見されました⁴⁾。

4. CIAO と第一の波

このような背景もあって、すばる望遠鏡用共同利用第一期観測装置のラインアップには、ステラーコロナグラフとして最適化された CIAO という赤外線観測装置が含まれていました¹⁰⁾。CIAO (Coronagraphic Imager with Adaptive Optics, チャオ, 図 4 左) は、すばる望遠鏡の優れた結像性能を活かし、専ら補償光学システムとともに使用され、波長 1-5 μm の近赤外線最適化されたコロナグラフ機能をもちます。これによって、これまでに前例のない小さなマスクが使用できます。冷却した赤外線コロナグラフカメラは非常にユニークな観測装置で、世界の 8-10 m 級望遠鏡にはこのような性能を徹底的に追及した装置はなく、すばる望遠鏡の特徴の一つになりました。CIAO の代表的観測成果としては、(a) 原始惑星系円盤の外側領域 ($r > 100 \text{ AU}$) の構造 (うずまき、バナナスプリット) の解明、(b) 主星から非常に離れた ($r > 100 \text{ AU}$) 惑星 (質量伴星) の発見、(c) 大質量星の星周円盤の直接撮像などがあります (図 3 参照)。

そのような状況のなか、今から考えると、系外惑星直接観測の報告の第一波が 2005 年から 2006 年にかけて押し寄せました。その中でも、若い褐色矮星の伴星 2M1207 b は、主星が年齢 10 Myr、質量 24 木星質量、距離 70 pc にある褐色矮星で、伴星は 55 AU の距離にあり 8 木星質量と見積もられ、有力な直接撮像例となりました (VLT)¹⁵⁾。しかし、主星と伴星の質量比が 3 倍しかなく、24 木星質量の天体の周りの原始惑星系円盤から 8 木星質量もの惑星が生まれるのは不自然です。質量の小さい褐色矮星連星系と言うべきかもしれません。一方、星形成領域にある T タウリ型星の伴星

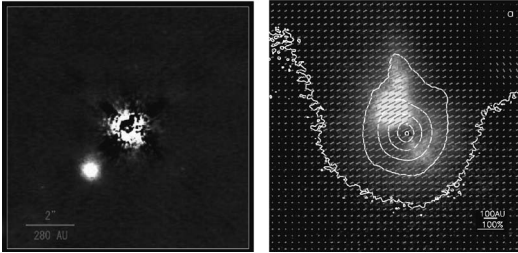
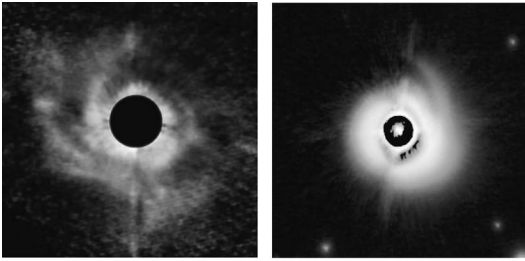


図3 CIAOで発見された、円盤外側の構造 (AB Aur, HD142527; 左上と右上)^{11), 12)}, 超遠方巨大惑星 (DH Tau; 左下)¹³⁾, 大質量星円 (Orion BN; 右下)¹⁴⁾. 中心の黒い部分は、明るい恒星をマスクで隠しているため (他図も同様).

DH Tau b, GQ Lup bは、主星がいずれも年齢 1 Myr, 距離約 140 pcで、伴星が、それぞれ100 および 330 AUにあり、質量がおよそ10および 17木星質量と考えられています (Subaru/CIAO, VLT)^{16), 13)}. 光度に基づく質量導出の方法が各論文で異なるため、ここでは主星年齢と伴星光度から同じ進化理論に基づいて計算し直しました。しかし、100 AU以遠での巨大惑星形成は、当時ほとんど議論されなかったこともあり、直接観測が本格化したというムードにまでは至りませんでした。

5. HiCIAOと第二の波

そこでわれわれは、さらにコントラストを追求した新装置開発を2005年から開始しました。それが、HiCIAO (High Contrast Instrument for the Subaru Next Generation Adaptive Optics, ハイチャオ, 図4右)¹⁷⁾です。CIAOで苦労した低温光学系の代わりにコロナグラフ部は常温とし、精

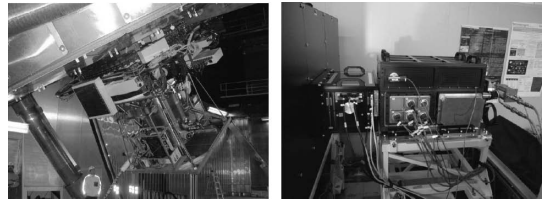


図4 すばるのコロナグラフ. (左) CIAO, (右) HiCIAO.

密さを追求しました。さらに、偏光機能と検出器は世界最高の機能をもたせました。とくに、検出器はJWSTで使われる予定の2,048×2,048素子のHgCdTeアレイとASIC読み出しを先行して使用しました。装置PIは私ですが、鈴木竜二さんを中心とする若手の大活躍で開発が急ピッチで進み2009年には本格的観測が開始できる状況が整いました。HiCIAOとともに用いる補償光学AO188も素晴らしいのでした。すばる望遠鏡のファーストライトからすでに10年が経ちましたが、偏光、波長、および角度などの差分手法との併用により、CIAOと比べてもHiCIAOは約10倍のコントラスト性能を誇ります。

さて、新装置でまさに観測を始める頃にショッキングなニュースが飛び込んできました。ついに系外惑星の本格的直接観測に成功したと言う主張でした。2008年11月に、カナダ・アメリカのチームがA型星HR8799の周りに、一方、アメリカのチームはA型星フォーマルハウトを周回する約10木星質量以下の天体の直接撮像に成功しました^{18), 19)}。とくに、HR8799の3惑星 (HR8799b, c, d) は、一度に3個もの惑星の撮像とその軌道運動を確認しました (図5; 後に第4惑星も検出)。ほかにも、有名ながか座ベータ星 (A型星) から8AUの距離に8木星質量の惑星候補が報告されていましたが、2010年6月に予想通りの軌道運動が確認されました。これらはハッブル、ケック、ジェミニの各望遠鏡によるもので、すばるは遅れをとったか、と少し青くなりましたが、一方で、太陽型星に比べると重いとは言え、ほんとうに恒

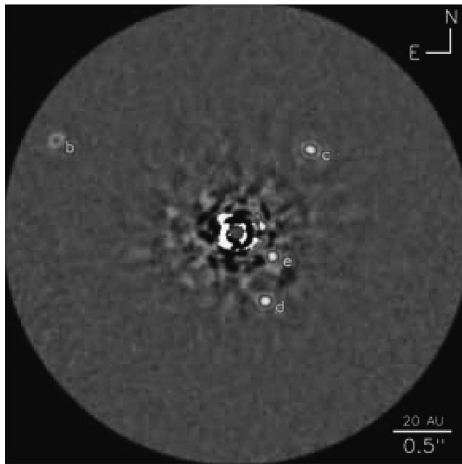


図5 A型星HR8799を回る4惑星の直接撮像¹⁸⁾。

星の遠方にも巨大惑星が存在することは、後述の私たちの新しいサーベイには追い風となりました。ちなみに、HR8799bは円盤探査のために、すばる望遠鏡で2002年に撮像された画像でも確認されています²⁰⁾。

6. SEEDSと第三の波

フォーマルハルトは、赤外線では検出されていないことから、原始惑星の星周構造が散乱光で検出された可能性が指摘されています。また、上記の代表的な3惑星系はどれも主星がA型星です。

一方、私たちは以前からHiCIAOでは太陽系型星を狙った直接撮像のサーベイを始めたいと考えていました。それがSEEDSプロジェクトです²¹⁾。SEEDSとは、“Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru”の略で、最初のすばる戦略枠観測 (Subaru Strategic Program; SSP) として、2009年からの5年間ですばる望遠鏡の120夜を集中投資することになりました。最終的には、約500個の太陽型恒星の外側領域 (数AU～40 AU) にある巨大惑星の直接撮像と統計を研究します。同時に、同じ半径領域の惑星誕生現場 (原始惑星系円盤や残骸円盤) を直接撮像し、その微細構造を解明します。そして、従来わかれて

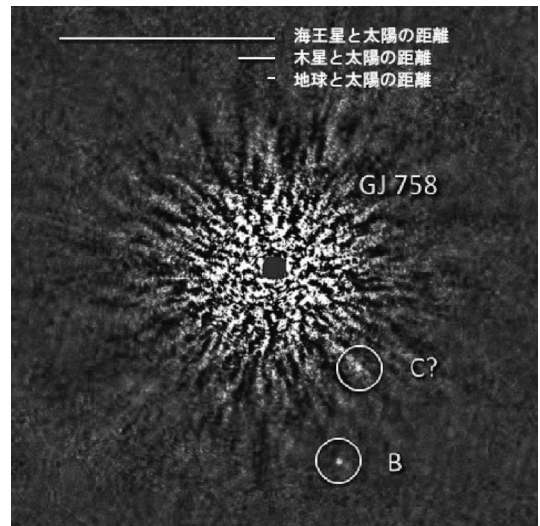


図6 HiCIAOで撮影された太陽型星GJ758の周りの巨大惑星²²⁾。

いた、系外惑星と円盤の研究を惑星の視点でリンクすることを狙います。

最初の成果はすでに装置のコミッショニング期に現れました。これは運もあります。まさに新装置の威力であると言えるでしょう。2009年8月、すばる望遠鏡において、ほぼ太陽と同じスペクトル型であるG型星GJ758の周りに約10-30木星質量の惑星が発見されたのです (図6)。見かけの距離はわずかに約30 AU (地球と海王星の距離) で、背景星でないことが確認されています²²⁾。さらに、SEEDSの最新の成果としては、約4木星質量という木星型惑星が海王星軌道に検出されました。これは、あらゆる直接法で最小質量の惑星で、年齢や進化モデルによる質量の不定性も最も少ない低温の惑星と考えています。SEEDSによって、すばる望遠鏡は真の第二の木星の撮像に成功したと言って良いでしょう！

SEEDSのもう一つの成果である円盤研究については、HiCIAOは、現在、惑星誕生現場の最も詳細な構造を調べることのできるツールとなっています。ハイライトとしては、ぎょしゃ座AB星の最も高解像度な円盤の高コントラスト画像です

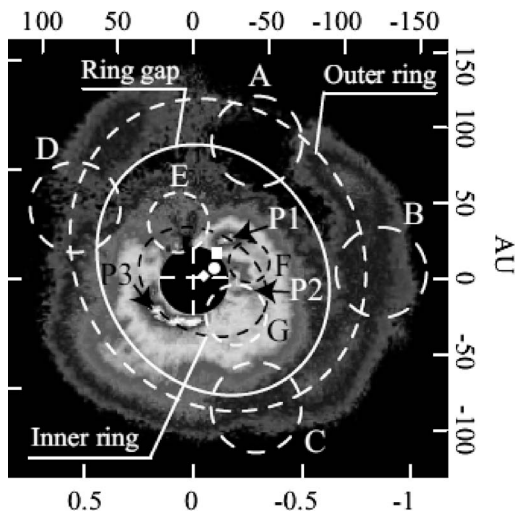


図7 HiCIAOで撮影されたAB Aurの原始惑星系円盤の太陽系スケールの詳細²³⁾.

(図7). この、年齢4 Myr、質量2.4太陽質量、距離144 pcの天体に対し、初めて太陽系サイズの詳細構造を描きました²³⁾. これは、円盤表面に反射した恒星の光を偏光撮像観測しています. SEEDSはこのような円盤を既に20個以上検出し(e.g., 24, 25, 26), 海王星の内側にギャップなど複雑な構造があることは普通であることを解明しつつあります. 私はSEEDSで描かれる原始惑星系円盤の様子は強い“Signpost of Planets”ではないかと考えています. また、わずか100万年で惑星が生まれることや、海王星軌道で巨大惑星が生まれることは標準惑星形成理論に修正を求める材料となるでしょう.

7. 将来計画

最後に、すばる望遠鏡やその後の系外惑星分野の将来計画について述べたいと思います. 巨大惑星については、いよいよ、超補償光学 (SCEXAO) が2012年に始動します. これは、あたかもすばる望遠鏡を宇宙空間に置いた性能を主星のごく近傍で実現するので、HiCIAOよりも内側の惑星系直接撮像に性能を発揮します. さらに、赤外面分光装置 (CHARIS) が2015年完成を目指して開発

が開始されました. これは、HiCIAO/SEEDSなどで発見された巨大惑星の分光を行うために重要です. 年老いた惑星の検出・分光には2022年打ち上げ予定のSPICA衛星のコロナグラフが威力を発揮するでしょう.

一方、地球型惑星については、すでにケプラー衛星が目覚ましい成果を上げていますが、それでもできないことを目指さなければならないでしょう. その鍵が、すばるの赤外ドップラー法装置 (IRD) で、2014年の完成を目指しています. これは、赤外線波長で1 m/sの速度精度を、光周波数コムなどの新技術を用いて実現するもので、1地球質量の惑星を近傍M型星周りに多数検出します. そして、そのような太陽近傍の地球型惑星に対して、次世代30 m望遠鏡であるTMTに超高コントラスト装置 (SEIT)²⁷⁾ を遅くとも2025年までに搭載し、世界初の地球型惑星の直接撮像に挑戦することが「夢」です. 実際、地球型惑星撮像はTMTのキラースサイエンスになると予想します. このような計画は、日本を代表する系外惑星分野の期待の若手が集結して検討を進めているので、今後10年で「夢」ではなく「現実」に向かうと信じています.

謝辞

末尾になりましたが、HiCIAO開発メンバー、AOチーム、系外惑星プロジェクト室メンバー、とりわけ、周藤浩士さん、Klaus Hodappさん、鈴木竜二さん、神鳥 亮さん、工藤智幸さん、日下部展彦さん、橋本 淳さん、森野潤一さん、西川 淳さん、早野 裕さん、表 泰秀さん、美濃和陽典さんに深く感謝いたします. また、SEEDSプロジェクトメンバー (約120名) の皆さんにも感謝いたします. および、すばる建設者、ならびに、観測所スタッフの皆さんには、本研究課題は、すばる望遠鏡がなくては挑戦できなかったことを強調し、御礼申し上げます. 佐藤修二先生、海部宣男先生、奥田治之先生にはいつも叱咤

激励されてきました。ポスドク時代には、M. Werner, E. Becklin, I. Gatley, S. Kleinmann, J. Houghの方々には、『ユニークな観測装置開発とサイエンスをバランスよく追及する』ことの重要さを学びました。また、HiCIAO以外の皆さんとCIAO/SIRIUS開発メンバー、院生の皆さんにも感謝いたします（松尾太郎さん、成田憲保さん、長田哲也さん、永山貴宏さん、長島知恵さん、中島 康さん、村川幸史さん、伊藤洋一さん、大朝由美子さん、深川美里さん、直井隆浩さん、眞山 聡さん、石原明香さん、佐藤八重子さん、葛原昌幸さん、権 静美さん、高橋安大さん、末永拓也さん、呉 大鉉さん、アムナート スコムさん）。

参考文献

- 1) McLean I. S. (ed.), 1994, *Infrared Astronomy with Arrays: The next generation*, Luweer Academic Publishers
- 2) Becklin E. E., Zuckerman B., 1988, *Nature* 336, 656
- 3) Rebolo R., Zapatero Osorio M. R., Martín E. L., 1995, *Nature* 377, 129
- 4) Nakajima T., Oppenheimer B. R., Kulkarni S. R., et al., 1995, *Nature* 378, 463
- 5) Walker G. A. H., Walker A. R., Irwin A. W., et al., 1995, *Icarus* 116, 359
- 6) Mayor M., Queloz, D., 1995, *Nature* 378, 355
- 7) Tamura M., Itoh Y., Oasa Y., Nakajima T., 1998, *Science* 282, 1095
- 8) Oasa Y., Tamura M., Sugitani K., 1999, *ApJ* 526, 336
- 9) Smith B. A., Terrell R. J., 1984, *Science* 226, 1421
- 10) Tamura M., Suto H., Itoh Y., et al., 2000, *SPIE* 4008, 1153
- 11) Fukagawa M., Hayashi M., Tamura M., et al., 2004, *ApJ* 605, L53
- 12) Fukagawa M., Tamura M., Itoh Y. et al., 2006, *ApJ* 636, L153
- 13) Itoh Y., Hayashi M., Tamura M., et al., 2005, *ApJ* 620, 984
- 14) Jiang Z., Tamura M., Fukagawa M., et al., 2005, *Nature* 437, 112
- 15) Chauvin G., Lagrange A.-M., Dumas C., et al., 2005, *A&A* 438, L25
- 16) Neuhäuser R., Guenther E. W., Wuchterl G., et al., 2005, *A&A* 435, 13
- 17) Suzuki R., Tamura M., Suto H., et al., 2009, *AIPC* 1158, 293
- 18) Marois C., Zuckerman B., Konopacky Q. M., et al., 2010, *Nature* 468, 1080
- 19) Kalas P., Graham J. R., Chiang E., et al., 2008, *Science* 322, 1345
- 20) Fukagawa M., Itoh Y., Tamura M., et al., 2009, *ApJ* 696, L1
- 21) Tamura M., 2009, *AIPC* 1158, 11
- 22) Thalmann C., Carson J., Janson M., et al., 2009, *ApJ* 707, L123
- 23) Hashimoto J., Tamura M., Muto T., et al., 2011, *ApJ* 729, L17
- 24) Thalmann C., Grady C. A., Goto M., et al., 2010, *ApJ* 718, L87
- 25) Muto T., Grady C. A., Hashimoto J., et al., 2012, *ApJ* 748, L22
- 26) Kusakabe N., Grady C. A., Sitko M. L., et al., 2012, *ApJ* 753, 153
- 27) Matsuo T., Tamura M., 2010, *SPIE* 7735, 264

Direct Imaging of Exoplanets and Their Formation Sites (Hayashi Prize Lecture)

Motohide TAMURA

NAOJ/NINS

Abstract: Since the first detection around a normal star in 1995, the exoplanet studies have made remarkable progress. Thanks to the large telescope and state-of-art astronomical observational technology, direct imaging is producing exciting discoveries now. In particular, the Subaru telescope is promoting a unique survey project of detecting not only exoplanets but also revealing their formation sites simultaneously. The key of such a project is the development of dedicated instruments. I will review a short history of direct imaging of planets and brown dwarfs, summarize the development of two major instruments and their results, and describe the future of the exoplanet studies on the Subaru telescope and other next generation telescopes.