

第二の地球を探す

田村 元秀¹， 中川 貴雄²

1. Pale Blue Dotを求めて

系外惑星，すなわち，我々の太陽以外の恒星を周回する惑星の存在は，1995年のドップラーシフト法による発見を契機としたその後の観測により，揺るぎ無い事実となった。現在までに約80個にもおよぶ木星型巨大惑星が発見されている。この成功に勢いを得て，現在，スペース・地上において数多くの系外惑星検出計画が進行し，提案されている。ただし，その観測手法の多くが間接法と呼ばれるもので，直接に惑星そのものの画像を得たり，スペクトルを調べたりするものではない。言うまでも無く，次のマイルストーンは惑星そのものを直接的に観測することであろう。木星のような巨大惑星の直接検出については，本格的に稼動し始めた8～10m地上望遠鏡や近い将来の大型光赤外干渉計にとって最も重要な観測的課題とされている。しかし，地球のような，木星よりさらに軽く小さな惑星（ちなみに，木星は太陽の約千分の一，地球は木星の約三百分の一の重さである）を検出するのは，直接法は言うまでも無く間接法においてさえも難しい。系外惑星探査計画において，この最も困難だが重要なステップである「地球型系外惑星の直接検出」に真正面から挑戦する計画がNASAを中心に検討されているTPF (Terrestrial Planet Finder) である。TPFは，我々の近くにある約150個の太陽に似た恒星（F，G，K型星）のまわりにおいて，生命を育むことが可能な領域，いわゆるHabitable Zoneに位置する地球に似た大気を持つ惑星（Pale Blue Dot）からの光を，主星からの反射光あるいは惑星自身の熱放射として直接に検出する。さらに，惑星の軌道や物理的性質（特に，惑星大気）

を詳しく調べ，生命の兆候となる証拠を集めることを主目的とする計画である。現在，この目的を達成するための最適なアーキテクチャーのレビューがほぼ終了した段階にある。最も有力なアイデアは，中間赤外線におけるスペース干渉計と可視光・近赤外線におけるスペースコロナグラフと考えられている。

ここでは，系外惑星検出の方法を簡単に説明し，今後の日本の地上観測や赤外線ミッション（ASTRO-F，SPICA）との関連とNASA/TPF自体の解説を行うとともに，TPFへの参加・寄与や独自ミッションの検討の場とすることを目的として準備されたJapanese-TPF (JTPF) Working Groupについて紹介する。

2. 代表的な惑星検出法

惑星の公転運動によって恒星自体も影響を受け，その位置や速度はふらつく。アストロメトリ法とは，このような惑星の周回運動による恒星の位置のふらつきを精密測定することによって惑星の存在を示す方法である。いくつかの系外惑星探査法の中で，最も古くから試みられた。しかし，何十年にもわたる測定から示唆された系外惑星は[1]，そのほとんどが別の観測者による追試で否定されてきた。その理由は，系外惑星検出に必要な位置測定精度が大気の揺らぎに比べるとはるかに小さいためである。例えば，約33光年（10 pc）離れたところから太陽系を眺めると，木星の影響で太陽は0.5ミリ秒角ふらつく。地球の影響はさらに1/300小さく，地球による位置ふらつきを検出するためには数マイクロ秒角の精度が必要となる。このような高精度アストロメ

¹ 国立天文台

² 宇宙科学研究所

トリアは大気の揺らぎを受ける地上からは不可能である。一方、周期の長い、主星から離れた惑星の位置のふらつきを決定するためには非常に長い年月を必要とし、追観測が難しい。観測精度の問題は大気揺らぎの無いスペースにおける観測で大幅に改善されると期待される。スペースアストロメトリにより地球型系外惑星の検出を目指すものとしては、2010年頃の打上げを目指すNASAのSIM計画や、同じく2010-12年頃の打ち上げを目指すESAのGAIA計画がある。

他方、惑星の公転運動による恒星の速度のふらつきを測定するのがドップラー法(動径速度法)である。これは、1995年にスイスのメイヤーとケローズがペガサス座51番星においてスペクトル線のドップラーシフトの周期的変化を発見[2]して以来、最も成功している手法である。たとえば我々の太陽系の場合では、木星の公転による太陽の速度ふらつきは13m/sであるため、巨大惑星の検出のための速度精度は数m/sが要求されるが、現在は2-数m/sの精度が達成されている。当初はこのドップラーシフトが惑星に拠るとする解釈に異論もあった。しかし、ドップラー法で検出された惑星HD209458について、惑星が恒星の前面を通り過ぎることによる2%レベルの明るさの微小変化を検出すること(トランシット法)に成功し[3]、ついに独立な2つの間接法によって惑星の存在が確認され、系外惑星という解釈は疑問を挟む余地の無いものになった。また、得られた半径(1.4木星半径)と質量(0.7木星質量)から、惑星が岩石惑星ではなくガス惑星であることも示された。

ドップラー法については、現在は精度の向上よりも、地上の大望遠鏡や専用望遠鏡でより遠方の恒星系を観測し、むしろサンプルを増やすことや、長期間観測により周期の長い主星から離れた惑星をとらえることに重点が置かれている。

トランシット法に関しては、地上においても巨大惑星を検出することが比較的容易に達成される(必要な測光精度はパーセントレベル)ため、小望遠鏡を用いたさまざまな観測が進行中である[4]。しかし、地球型惑星の検出には約0.01%というはるかに高い測光精度が求

められるため、スペースから大気の揺らぎに邪魔されずに測定することが必要である。地球型惑星検出が期待されるスペーストランシット衛星としては、2004年に打上げ予定のCOROT(仏)や、2007~8年を目指すNASAのKepler(最近ミッションが認可された)、ESAのEddingtonなどの計画がある。(トランシットに同期した惑星大気分光観測については須藤靖氏の項を参照。)

間接的系外惑星検出法としてはこのほかにも、重力レンズやパルサータイミングを利用したものがある。重力マイクロレンズにおいてレンズ天体に惑星が存在する場合、その増光曲線にスパイク状の非対称性が生じることが予想される。ただし確実な系外惑星の例はまだ無いと言って良い。パルサー法においては、惑星の公転運動により、非常に正確な「時計」である中性子星からのパルスが周期的に変化することを利用する。この方法は非常に軽い天体まで検出することができる。パルサー B1257+12は、普通の星ではないが、最初(1991年)に太陽系外に惑星が発見された天体であり、最近では合計4個の、地球の数倍から月の1/3程度(下限)質量しかない「惑星」の存在が指摘されている。

このように、間接的手法による系外惑星検出は過去数年にわたって成功を取ってきた。そこで、次なるステップとして、木星型・地球型それぞれの系外惑星の直接撮像に向かって熾烈な競争がスタートした。

3. (地球型) 系外惑星の直接検出の困難さ

木星型巨大惑星はともかく地球型惑星の直接撮像に至るためには、まだまだ多くの困難が横たわっている。それは、非常に高い感度、画像のシャープさ(解像度)、明るい恒星のすぐ近くの暗い天体を見る能力(ダイナミックレンジ)の3者を同時に実現する必要があるからである。例えば、我々から約33光年離れたところから太陽系を見た場合、地球の明るさは可視光波長のVバンド(波長0.6 μ m)で約29等、中間赤外波長のNバンド(波長10 μ m)で約20等になる。地球・太陽間の角距離

は0.1秒角(三万六千分の一度)しかない。これらは、それぞれの数値だけを見ると、現在の観測技術でもそれほど達成困難なものではない。たとえば、すばる望遠鏡の可視光装置で約3時間積分して得られる感度や近赤外線装置で補償光学を用いた場合の解像度はこれらの数値と同じ程度か上回るくらいである。最大の問題は、太陽・地球の明るさの比である。図1は地球のスペクトルエネルギー分布である。波長0.4~1 μm あたりの可視光(および約3 μm までの近赤外波長)では太陽からの光の反射が主となるが、波長7~17 μm の中間赤外より長い波長では惑星自体の熱放射の寄与のため、両者の明るさの比は多少緩和される。それでも、明るさの比はVバンドで約10桁、Nバンドで約7桁に達する。これを上記の角距離で達成できる観測装置は現在のところ存在しない。

中間赤外線におけるダイナミックレンジ条件の緩和は、確かに赤外線における系外惑星検出にとって魅力である。しかし、波長が長いので、同じ口径の望遠鏡を用いる限り低解像度の観測に甘んじなければならない。従って、単一大口径望遠鏡よりも比較的小さな望遠鏡を離して並べる干渉計が有利である。また、中間赤外線波長において超高感度を得るためには、地球大気・望遠鏡・観測装置の熱雑音から逃れるためにスペースに出ることが不可欠となる。そこで、系外惑星探

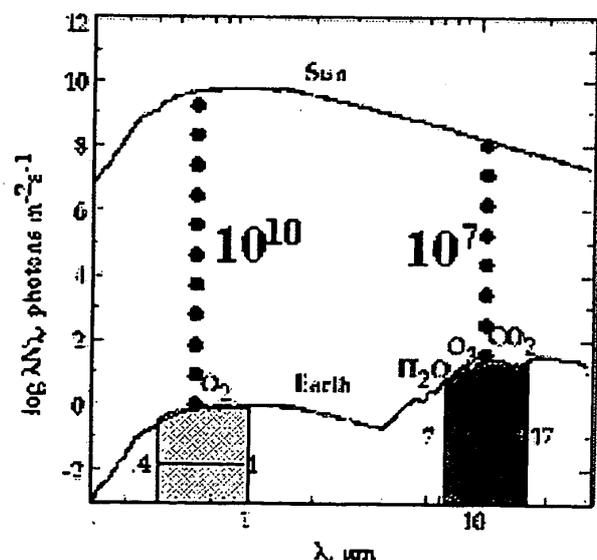


図1: 地球と太陽のスペクトルエネルギー分布

査ミッションとしては赤外線スペース干渉計が有利であるというアイデアが出てきた。中間赤外線においては、地球大気に特徴的な酸素(9.6 μm のオゾン)や水(6~8 μm)の吸収バンドが比較的容易に検出できることも強調された。NASA/TPFの最初のアイデアもこれに基づいたものである[5]。しかし、これにはいくつかの問題があることがわかった。一つは、恒星の周りには赤外線観測において雑音となる黄道光が意外に多くあり、惑星からの赤外光がこの背景光に埋もれてしまう可能性がある。黄道光の原因となるダストは惑星系形成の副産物であり、太陽系内外の両方においてその影響を避けることが難しい。星周ダストの量は恒星系によって異なるようであり、今後の赤外線ミッションのデータに基づき、黄道光・系外黄道光が系外惑星検出に及ぼす影響を定量化してゆくことが急務である。2004年にはじめに打上げ予定の宇宙科学研究所の赤外線ミッションASTRO-Fは、さまざまな星の赤外線超過の観測から、このような星周ダストの「進化」を統計的に明らかにするものと期待される。もう一つの困難は、やはり赤外線スペース干渉計に伴う技術的な壁の大きさであり、最近、提案されつつある可視光コロナグラフ(4章参照)のアイデアと比較すると、その優位性はまだ明確でない。つまり、地球型系外惑星検出のために、その反射光を狙うべきか熱放射を狙うべきかの議論は振り出しに戻っている。

4. TPFの現状と JTPFワーキンググループ

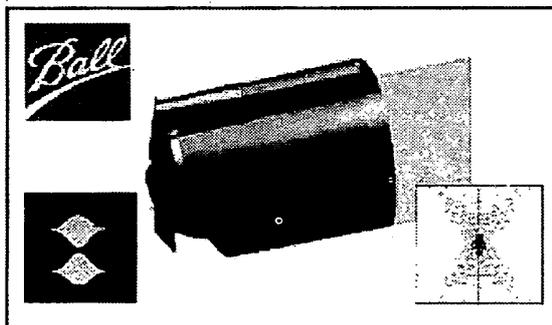
NASA/TPFの1999年当時のアイデアは、口径3.5mの冷却望遠鏡を4台用意し、基線長75mから1kmを確保する赤外線干渉計であった。波長域は3~30 μm をカバーする。これにより、太陽近傍の恒星系を周回する地球型惑星を検出するための感度と解像度が達成される。さらに、通常の干渉計と異なり、干渉計の対称軸位置にある恒星からの光に対しては山と谷との重ね合わせてその光を打ち消し、そのすぐ近くにある惑星の光

は打ち消さない「ナル干渉計」とする[6]. これにより、必要なダイナミックレンジも確保される. この野心的な素案は現在では古典的TPFとも呼ばれる. しかし、赤外線干渉計に伴う技術的困難さやそれ以外の方法による地球型惑星検出の可能性が指摘され、より広範囲にさまざまなアーキテクチャーを見直すことになった. そして約2年にわたって4つの企業・アカデミアが独立に20を超えるTPFコンセプトを検討し、2000年12月に予備レビューを、2001年12月に最終レビューを行った. ボールエアロスペースのグループは口径10mx4mの可視光のコロナグラフ、ボーイングのグループは基線長100mの中間赤外線干渉計からなる超望遠鏡とコロナグラフの一種とも言える矩形状望遠鏡の2つ、TRWのグループは大口径(28m)赤外線コロナグラフ、ロッキ

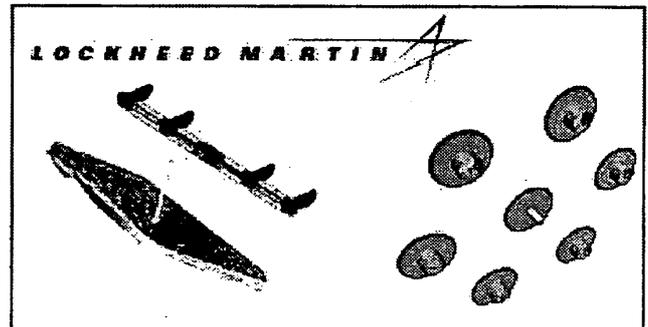
ード・マーチンのグループは古典的TPFを延長した赤外線干渉計に絞って検討を進めて来た(図2). 2002年3月現在、これらのアーキテクチャーの審査が行われている. NASA/TPFの打ち上げ自体は2014年あるいはそれ以降の計画である.

太陽系外惑星系の直接観測への関心は日本でも高い. ひとつには、すばる望遠鏡の完成で原始巨大惑星などの直接観測の気運が高まっていることや、いくつかの間接的系外惑星観測が日本においても開始されたことがある. たとえば、すばる望遠鏡にとりつけられたユニークな赤外線コロナグラフCIAO[7]によって、明るい中心星のごく近傍($r > 0.1$ 秒角)にある天体を以前より大きなダイナミックレンジで観測し、明るい原始惑星の検出や恒星から遠く離れた巨大惑星などの探査を

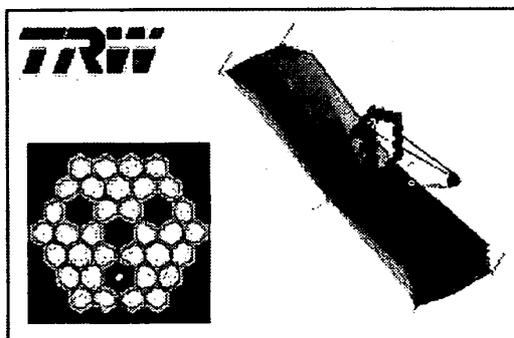
TPF Architecture Concepts



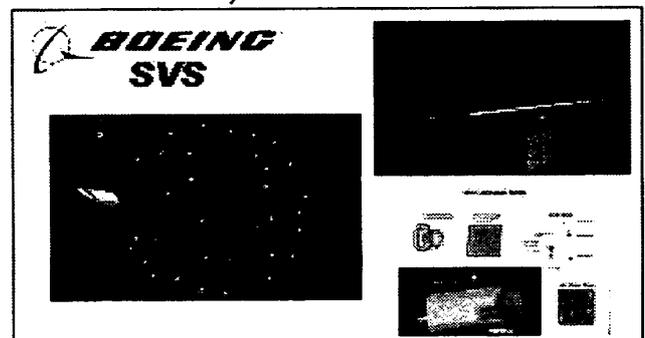
Variable-Pupil Coronagraph
10mx4m monolith



IR Nulling Interferometers
3.5mx4, 40m baseline



Large Aperture IR Coronagraph
28m segment



IR Hyper-telescope (-> NRLA) &
Vis. Apodized Square Aperture
3mx7, 100m baseline & 8m seg. square

図2: TPF Final Architecture Reviewで議論された4つのアーキテクチャー (TPF FAR資料より引用)

行うことができる。

このような背景をもとに、系外惑星、特に木星型の系外惑星を直接に観測することを目的の一つとして、日本では次期赤外線天文衛星計画SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) が検討されている[8] (図3)。前述のように中間赤外線領域では恒星と惑星との明るさの比が比較的小さくなるため、SPICAではこの波長域での観測に重点を置く。口径3.5mという大口径の望遠鏡と高機能コロナグラフを搭載することにより、近くの恒星系であれば木星型の巨大惑星が直接に観測できることが期待される。分光観測も合わせて行うことにより、惑星の大気の成分を明らかにすることもできる[9]。打ち上げは2010年頃を目指している。

もちろん、理論的研究素地に関しては、これまでも系外惑星・惑星系形成に関する盛んな研究があることは言うまでも無い。

このようにして木星型の系外惑星が直接観測されたならば、次なるステップは生命を育む可能性の高い「地球型」の系外惑星を直接検出することである。そこで、地球型系外惑星探査ミッションを日本において検討するワーキンググループ(JTPF-WG)が立ち上がった[10]。いっぽう、TPFのような地球型系外惑星探査プロジェクトの規模の大きさや目的を考えると、スペースにおける系外惑星探査プロジェクトに関して国際協力は必須とも考えられる。実際に、欧州において独立に進められてきた赤外線干渉計による系外惑星探査計画Darwin

もTPFと協力して進める可能性が検討されている。JTPFワーキンググループでは、TPF/Darwinとの協力を視野に入れつつ、当面は中口径の可視光・近赤外線高コントラストスペース望遠鏡の検討と赤外線干渉計の検討とが並行して進められる予定である。前者の新しいタイプの可視光コロナグラフを利用した3-4mクラス口径の望遠鏡の場合、64光年の距離から見た太陽系のような惑星系の場合、巨大惑星(木星、土星、天王星)が、10光年の距離からは地球型惑星(金星、地球、火星)が比較的容易に撮像できる。また、その大気を分光することで、可視光においても適切な生命の指標となる分子(とくに水と酸素・オゾンの存在が重要)の存在の有無が議論できる。このような望遠鏡はコロナグラフモード以外の、通常の紫外線・可視光・近赤外線スペース天文台としても用いることが可能なので、一般天文学への寄与も期待されるだろう。

地球型系外惑星探査はもはや天文学固有の問題では無く、惑星科学・地球科学・生物学・工学など複数の分野の研究者にとって共通の研究課題と言えよう。今後は多くの惑星科学研究者も交えた検討を進めることができれば幸いである。

この原稿はISAS Newsの記事に加筆・修正を加えたものである。

参考文献

- [1] van de Kamp, P. 1969, AJ, 74, 238
- [2] Mayor, M. & Queloz, D. 1995, Nature, 378, 355
- [3] Charbonneau, D. et al. 2000, ApJ, 529, L45
- [4] Udalski, A. et al. 2002, astro-ph/0202320
- [5] Beichman, C. A. 1998, SPIE, 3350, 719
- [6] Bracewell, R. 1978, Nature, 274, 780
- [7] Tamura, M. SPIE, 4008, 1153
- [8] Nakagawa, T. et al. 2000, ISAS Report SP-14, 189
- [9] Tamura, M. 2000, ISAS Report SP-14, 1
- [10] <http://www.cc.nao.ac.jp/jtpf/>

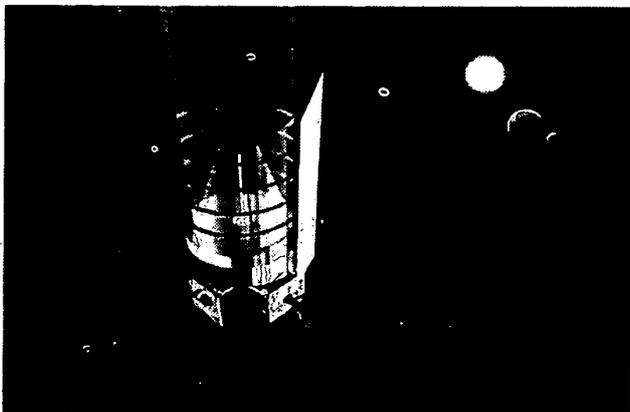


図3: 検討中の次期赤外線衛星計画SPICAの想像図