

広視野カメラが解く惑星間空間塵

臼井文彦

〈東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

e-mail: usui@provence.c.u-tokyo.ac.jp

石黒正晃

〈文部科学省宇宙科学研究所惑星研究系 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: ishiguro@planeta.sci.isas.ac.jp

黄道光とは、太陽系内の惑星間塵によって散乱された太陽光である。我々は、すばるサイトの屋外において、広視野カメラを使って黄道光の研究を行ってきた。本稿では、僅か口径 1cm 程の小型カメラによって切り開かれた惑星間塵の姿について、装置開発を交えてご紹介する。

1. はじめに

条件のよい土地へ行くと、陽が沈んでずいぶん経つのに、西の空がいつまでもぼんやりと明るいことがある。都会で暮していると街明かりとってしまいそうなどころであるが、もちろんその方向に人工の灯りが無いことを知っていれば、それが黄道光であることに気づく。この淡い光のひろがりの正体は、太陽系内の惑星領域に広く存在する惑星間塵によって散乱された太陽光である。一般の観測にとっては背景が明るくなってしまっているだけで、あまり好意的でない印象を持たれているかもしれないが、近年の太陽系外の恒星系、特にヴェガ型星といわれる赤外超過のある主系列星の周囲にダストディスクの存在が発見されたのを契機に、我々の太陽系の塵雲（黄道光）について、正確な起源や力学的進化、物理特性など、黄道光に対する関心は高まってきている。本稿では、すばるサイトにおける広視野 CCD カメラを用いた観測によって切り開かれた最近の惑星間塵の研究について紹介する。

2. 黄道光観測用カメラ：

WIZARD の開発とデータ解析

黄道光は非常に淡く全天に広がっているため、精度のよい観測が難しい対象である。黄道光の本格的な観測がはじまった 1960 年代は、望遠鏡に光電子増倍管を取り付け夜空の一点一点を数度間隔で地道に測定するというものだったが、近年は CCD カメラと広視野レンズという高感度撮像装置によって、高い空間分解能で黄道光の時間変動をとらえることが可能になった。普通の測光観測と異なり、黄道光観測の対象は「スカイ自体」であるため、その扱いは容易ではない。観測装置としても、少なくとも明るさのゼロ点がダークフレームとライトフレームで再現性のよいものでなければならない。更に、地球大気による明るさの成分や減光係数が数分単位で変動しているため、黄道光の精密な観測には、高い空間分解能と同時に、天頂付近から水平方向までを 1 フレームで収めることのできるような十分に広い視野が必要とされる。このような観

測を目的として、我々のグループでは、平成12年度から可視光 CCD カメラ WIZARD (Wide-field Imager of Zodiacal light with ARray Detector) システムを開発してきた¹⁾。以下では簡単にこの WIZARD の概要について解説する。

(a) カメラヘッド

従来の我々の黄道光観測で用いていた装置は電子冷却 CCD であったため、ゼロ点の不定性があった。CCD チップの温度のゆらぎが測光システムのゼロ点や感度に影響を与えてしまうのである。そこで、WIZARD では CCD 素子としてイギリス EEV 社製 CCD 42-80 を採用した。これは、 $2,048 \times 4,096$ ピクセルという大フォーマットで、波長 460nm での量子効率 が 90% 近いという高感度のチップである。波長 460nm 付近には、広い波長域にわたって大気光輝線のほとんどない「大気光の窓」があり、この波長域で感度が高い CCD 42-80 は黄道光観測には最適である。移動観測を想定し、このチップを重量 1kg のコンパクトなデユアーに据え付け、マウナケア山頂において液体窒素を投入してから約 15 時間はチップ温度を 176 K で安定に保つことができる。これにより、太陽離角 90° における黄道光の典型的な明るさに対して、従来のカメラでは約 10% の測光値のゼロ点不定性があったのに対して WIZARD では 0.2% 程度にまで抑えられている。

(b) 光学系

広がった光源を観測するときの明るさは、レンズの F 値 (焦点距離/口径) の⁻²乗に比例するため、小さい F 値が要求される。これと同時に十分に広い視野を確保するために、WIZARD では 10 枚のレンズを組み合わせることで、 $F = 2.8$ 、焦点距離 32.5mm、口径 11.6mm を実現し、前述の EEV CCD 42-80 と合わせることで $49^\circ \times 98^\circ$ という広視野、かつ

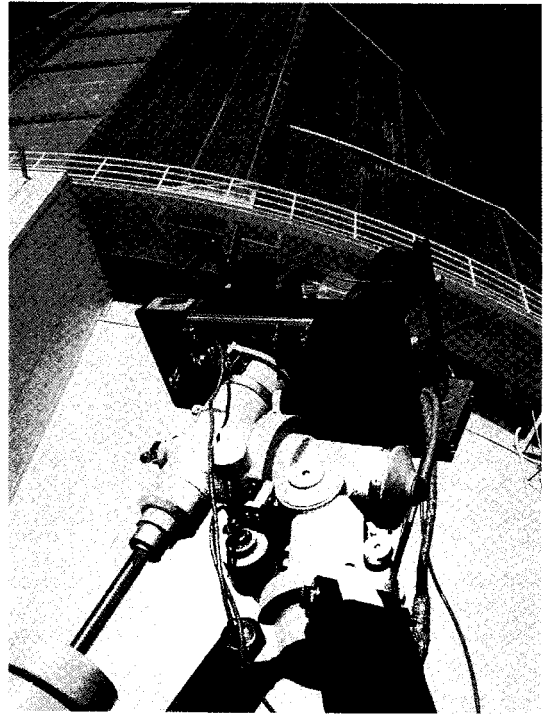


図1 WIZARD とすばるドーム。

1.435 分角という高い空間分解能を達成している。光学設計と製作は株式会社ジェネシアに依頼した。

(c) 観測

実際の観測時には、カメラヘッドと光学系をハニカム構造の防振台の上に固定し、株式会社高橋製作所製 NJP 赤道儀に取りつけて追尾を行っている。WIZARD の制御は Linux ベースのホストコンピュータを使用し、CCD 制御とデータ取得には COGITO-3 システムを用いた。現在の設定では、1 フレーム約 32.5MB のデータを読み出すのにかかる時間はおよそ 10 分となっている。

WIZARD は、2001 年 3 月 23 日にファーストライトを迎え、その後微調整やクロックパターンの最適化などを行い、再度 2002 年 3 月 8 日から 18 日の期間に観測を行った。観測場所は、すばるドームのすぐ横、まさに「軒下」

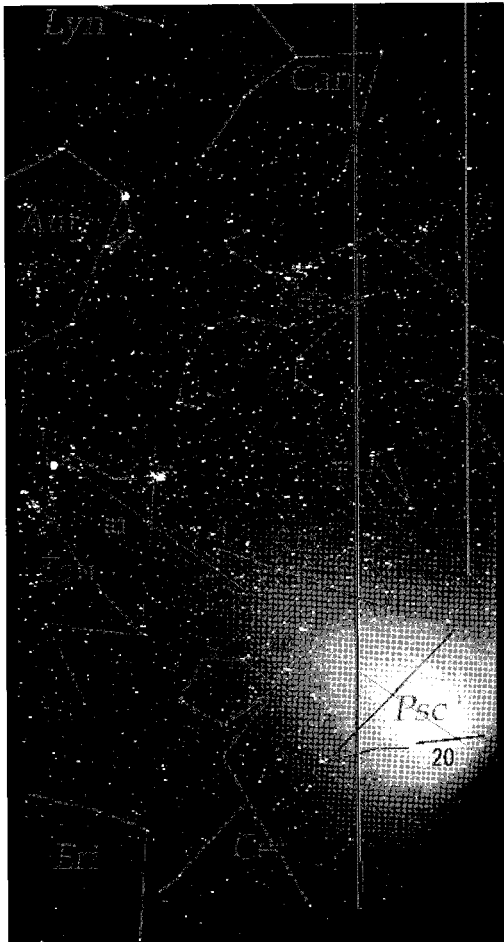


図2 2002年3月にWIZARDによって観測された夕方の黄道光。黄道面や星座を結ぶ線を青色で示した。黄道光の明るさの分布は黄道面より右(北)側にずれている。

を使わせて頂いた。これらの観測では夕方の黄道光と、夜半過ぎに見られる対日照を対象としていたので、すばるを背にカメラは西側にむけることとなった(図1)。

(d) データ解析

図2は取得したデータの一例で、夕方の黄道光を180秒露出で撮像したものである。取得したデータは、CCD画像解析における標準的な一次処理(ダークフレームの差引とフラ

ットフィールドイング)を行うが、広視野CCDカメラでは、周辺減光の影響が大きいため、特にフラットフィールドイングは重要である。しかし、WIZARDはあまりにも広視野であるために、通常の積分球では視野を十分にカバーできない。そこで、現状ではレンズ系の光学設計から数値計算によって求められたフラットの情報を用いて補正している。それと同時に、視野内には多くの標準星が写っているので、CCD上の星の明るさを調べることもよってもチェックしている。明るさの絶対値や地球大気の吸収は、同一フレームに写っている標準星や星夜光(一個一個分離することのできない点光源)の測光によって決定される。一般に、面光源に対する光学的厚さは点光源に対する光学的厚さよりも小さいことが知られている²。次に、ピクセル上の位置を天球面上の座標と対応づけるための幾何学補正を行う。これは、標準星の座標と対応するピクセル上の星像の位置関係や、光学設計から求められた収差の情報をもとにして求められる。

黄道光の解析で一番困難なのは、面光源の明るさを異なる成分ごとに分離することである。月のない夜において、観測される夜空の明るさ(I_{OBS})は、黄道光成分(I_{ZL})、地球上層約100kmの大気中の原子・分子の発光(I_{AG})、遠方の星や銀河などひとつひとつ分解して観測できない星の集積光(I_{ISL})、さらに下層大気によって散乱された成分(I_{SCA})が混ざってくる：

$$I_{OBS} = I_{ZL} + I_{AG} + I_{ISL} \times \exp(-\tau(z)) + I_{SCA}$$

$\tau(z)$ は、天頂角 z における実効的な大気の吸収による光学的厚さである。 I_{ISL} は惑星探査機パイオニア11号が黄道雲より外側で観測した値を使用する。 I_{AG} は天頂角とともに変化するvan Rhijn関数を用いることにより見積もる

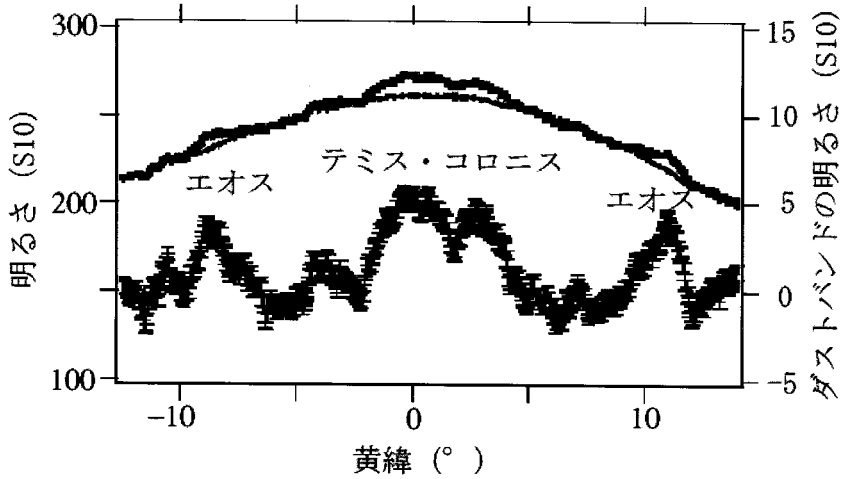


図3 黄道光の南北方向の輝度分布(太陽離隔 78°). 黄緯 0° と +2.5° 付近にある微細構造はテミス・コロニス族の, 黄緯-9° と +11° 付近にある微細構造はエオス族の小惑星同士が衝突して放出した塵雲(ダストバンド)である.

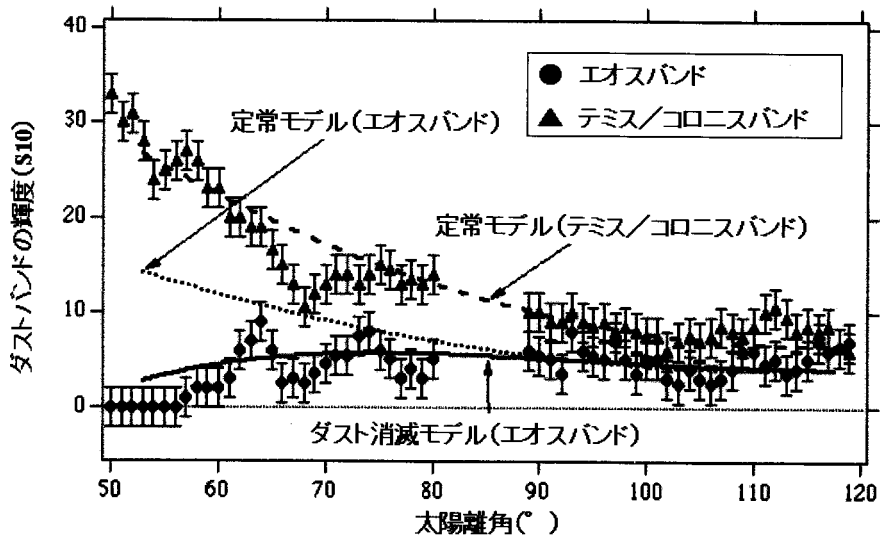


図4 ダストバンドのピークの明るさを, 太陽を原点に置いた黄経に対してプロットしている. エオスバンドは, 太陽離角 60° 付近から明るさが弱くなっている. ポインティング・ロバートソン効果のみを考えたモデル(定常モデル)とは明らかに異なっていることから, ダストバンド粒子は相互衝突やローレンツ力によって太陽に近づくにつれて拡散していると考えられている.

ことができる。 I_{SCA} は $\tau(z)$ や I_{ZL} , I_{AG} , I_{ISL} , 点光源の分布を元に推定する。このようにして黄道光成分 (I_{ZL}) だけを抽出し、その全天における輝度分布や季節による輝度分布の変化のしかたをとらえることで、惑星間塵の構造や起源、軌道進化についての情報を得ることができるのである³⁾。

3. 黄道光の起源とその軌道進化

本章では、赤外線天文衛星 IRAS (Infrared Astronomical Satellite) や我々の地上観測から明らかになってきた惑星間塵の姿について紹介する。WIZARD による観測データは現在解析中であり、ここでは以前使用していた電子冷却 CCD カメラを使ったすばるサイトでの観測の成果を中心にまとめた。

3-1. 黄道光の微細構造と起源

塵は、惑星のように安定して軌道運動することはできない。ポインティング・ロバートソン効果により、塵は約 10 万年で太陽に向かって落ち込む。従って、黄道光が定常的に見えるためには、塵の供給源が必要である。このような塵は、供給源の近くに局在する黄道光中の微細な輝度分布として観測される。これらを、可視光と赤外線といった二つの波長域で観測することにより、塵の大きさやアルベド (反射能) などの物理特性を推定することができる。ポインティング・ロバートソン効果のために、塵の寿命は中心星の年齢よりも一般的に短くなる。従って、ヴェガ型星周囲の塵雲は、星生成や惑星系生成に関わった分子雲起源というよりはむしろ、中心星周囲の惑星系が放出したと考えるほうが自然である。

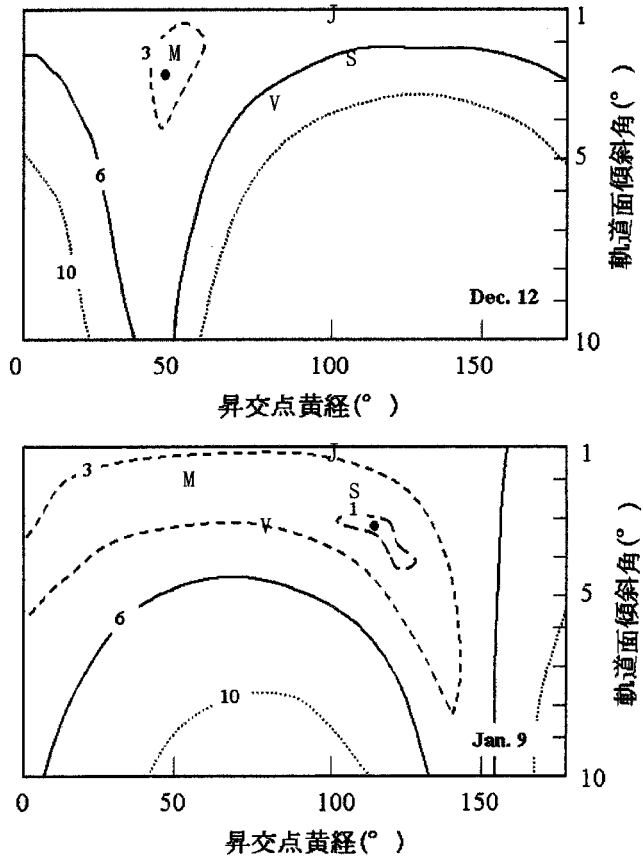


図5 黄道光の対称面を12月と1月に観測した黄道光の輝度分布より調べたもの。等輝度曲線上の数値は、モデルと観測値の差を、黄道光の代表的な明るさである太陽離隔 90° 、黄緯 0° の明るさに対する比で書いている。図中のアルファベットは、それぞれ金星(V)、火星(M)、木星(J)、土星(S)の軌道平面をあらわしている。各等輝度曲線は、モデルのフィッティング誤差を表しており、黄道光の明るさの約1%でモデルが再現できている。

る。

図3に、我々の地上観測で得られた太陽離角 78° の黄道光の輝度分布を描いている。黄道面付近に一对と、黄緯 $\pm 10^\circ$ 付近に、盛り上がったところが確認されている。この盛り上がりは、全黄経方向に広がっていて、黄道面にほぼ平行な塵の帯雲のように見えることからダストバンドと呼ばれている。黄道面付近のダストバンドは、小惑星族 (軌道要

素がよく似た小惑星の集まり)であるテミス族・コロニス族から、黄緯土 10° 付近のダストバンドはエオス族から放出された塵雲である。ダストバンドはIRASによって中間赤外線領域の波長域で発見され⁴⁾、後に我々のCCDカメラによるすばるサイトからの観測によって可視域でも検出された^{3), 5)}。通常、赤外線天文衛星は、太陽離角 90° 付近しか観測することができないが、地上観測においては観測装置を自由な方向に向けることができる。我々はこの利点を活かし、ダストバンドの輝度が太陽に近づくにつれて暗くなっていることを観測的に実証した。このことから、小惑星族で生成された塵が、ポインティング・ロバートソン効果だけでなく、塵同士の衝突やローレンツ力の影響を強く受けながら軌道進化していることが推測される(図4)。

太陽系内天体において、我々が最も身近に感じる塵といえば、彗星の塵の尾ではないだろうか。太陽に近づくにつれて揮発性物質によって加速された塵が、反太陽方向に雄大な姿を現す。ところがこのような $1\mu\text{m}$ 以下の小さい塵は、太陽の放射圧によって数年から数十年のタイムスケールで太陽系外へと吹き飛ばされ、二度と戻ってくる塵ではない。一方、IRASの黄道放射のデータから、細長い飛行機雲のような微細構造を発見した⁶⁾。この塵雲は、ダストトレイルと呼ばれ、8個の短周期彗星の軌道と一致していることがわかった。太陽の輻射圧を受け難い大きなサイズの塵がダストトレイルを形成する。我々も木曾シュミット望遠鏡(東京大学)を使って可視光でダストトレイルの検出に成功し、塵の大きさは約 1cm と大きいこともわかってきた⁷⁾。このような塵は、やがて衝突過程を経て、黄道光として見える数十 μm サイズの塵になると考えられる。このように薄く広がった彗星塵のチューブ構造もまた、我々の広視野カメ

ラによる検出に成功し、彗星塵の拡散過程について明らかになってきつつある^{8), 9)}。

3-2. 黄道光のグローバルな輝度分布

図2を見てわかるように、黄道光の輝度分布は南北対象ではない。地球上の季節によって、北側が明るくなったり、南側が明るくなったりする。これは、黄道雲の対称面が黄道面(地球軌道平面)からずれているからだ。「対称面」といっても、実際に平面なのか、そもそもそのような「面」が存在するかどうかは定かではない。一方、最近、がく座 β 星(β -Pic)周囲のダストディスクの対称面が、内側と外側でずれていることから、惑星の存在が示唆されている¹⁰⁾。黄道光は、視線方向から入ってくるすべての塵の散乱光を積分して見るために、空間分布だけでなく、散乱関数等も考慮して、黄道光の輝度分布を再現するモデルを構築することになる¹¹⁾。図5は1998年12月に観測した黄道光と、2000年1月に観測した黄道光をモデルでフィッティングした時の対称面の軌道面傾斜角と昇交点黄経を示している(青丸)。更に1997年11月に観測した対日照から対称面を推定したが、この両者は一致しない。このことから、対称面は観測する時期や方向によって異なっているようである¹²⁾。まだ明確なことは言いえないが、おそらく対称面は平面というよりはむしろ曲面になっているのではないかと考えられる。異なった時期に、より広い領域で黄道光の観測を実施する必要がある。

4. 最後に

すばる望遠鏡は、その観測機器の優れた性能によって、天文学に新たな成果をもたらしている。その一方で、素晴らしい観測サイトに立地しており、我々は太陽系の塵雲の観測において、貴重な観測機会を与えて頂いてい

現在、黄道光の地上からの観測は、次第に難しくなっている。そのような状況にあつて、地上で最も暗いサイトの一つで黄道光の観測ができることに、非常に喜びを感じている。WIZARD は問題点を改善し、2002 年より本格的な観測ができるようになった。今後もすばるサイトで黄道光の観測を継続し、太陽系内塵雲の起源と進化について追求していきたい。

5. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、すばるサイトでの観測にご協力してくださいました、中桐正夫氏、関口和寛氏、宮下暁彦氏をはじめ、国立天文台ハワイ観測所の皆様に心から感謝しています。また共同研究者である上野宗孝氏には、装置開発にあたりご指導頂きました。向井正氏、中村良介氏には科学的な面で、データ解析にあたり S.S.Hong 氏、S.M.Kwon 氏に貴重な助言を頂きました。観測・データ解析・装置開発にあたりご協力くださいました神戸大学向井研究室の皆様、東京大学宇宙地球科学部会の皆様にも感謝します。

参考文献

- 1) Ishiguro M., et al., 2002, Proc of SPIE, in press
- 2) Hong S.S., et al., 1998, Earth, Planets and Space 50, 487
- 3) Ishiguro M., et al., 1999, ApJ 511, 432
- 4) Low F., et al., 1984, ApJ 278, L19
- 5) Ishiguro M., et al., 1999, PASJ 51, 363
- 6) Sykes M.V., Walker R.G., 1992, ICARUS 95, 180
- 7) Ishiguro M., et al., 2002, ApJ 572, L117
- 8) Nakamura R., et al., 2000, ApJ 540, 1172
- 9) Usui F., Ishiguro M., 2002, ISAS Report SP No.16, submitted
- 10) Augereau J. C., et al., 2001, A&A 370, 447
- 11) Yoshishita C., et al., 2002, IAU Colloq 181, in press
- 12) Mukai T., et al., 2002, ICARUS, submitted

Observing the Interplanetary Dust Particles by the Wide-field CCD Camera

Fumihiko USUI

Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro, Tokyo 153-8902, Japan

Masateru ISHIGURO

Institute of Space and Astronautical Science, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan

Abstract: Zodiacal light is a scattered sunlight by interplanetary dust particles. We have performed the zodiacal light observations outside the SUBARU dome by using the wide-field CCD camera. In this paper, we introduce the recent results of interplanetary dust particles opened from the SUBARU site, together with the development of WIZARD, which is originally developed for zodiacal light observations.