

## 太陽系黄道光の観測と系外惑星

石黒正晃

〈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

上野宗孝

〈東京大学大学院総合文化研究科 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉  
e-mail: ueno@provence.c.u-tokyo.ac.jp

大型望遠鏡によって空間分解されたヴェガ型星周囲のダスト円盤の姿は多様である。このダスト円盤の姿から、そこにあるであろう惑星系を推定するにあたり、我々の太陽系にある黄道光の観測事実は重要な情報を与える。本稿では、ヴェガ型星ダスト円盤によって見つかった塵雲の空間構造を意識しながら、黄道光の観測で明らかになりつつある結果を紹介する。

### 1. はじめに

「太陽系外小惑星帯検出か」。このニュースが流れたのは、今から約1年前のことである。この話題の発端となったうさぎ座 $\zeta$ 星は、赤外線超過から320Kのダスト円盤をまわっており、黒体を仮定すると中心星から距離が3 AUから6 AUのところにはダスト円盤が存在することになる。ポインティング・ロバートソン効果だけを仮定すると、ダスト円盤の寿命は約1万年、一方、中心星の寿命は5千万年から5億年と推定されるので、星ができてからもダストを供給する天体が必要となる。我々の太陽系で3~6 AUというと、小惑星帯外縁部から木星軌道に該当し、この論文の著者らは、太陽系外小惑星帯の存在を主張しているのである<sup>1)</sup>。

彼らの見積もりには、様々な仮定が入っており、実際にこのような小惑星帯があるかどうかは定かではない。しかしながら、主系列星周囲のディスクの存在から、小天体集団の存在を推定するという議論は以前からある話で<sup>2)</sup>、最近ではごく自然に受け止められるようになってきた。このような背景を踏まえつつ、系外惑星系を意識しながら、太陽系の塵雲（黄道光）について観測的に明らかになってきたことを紹介する。

### 2. 惑星間ダストの構成とその進化

我々の太陽系には、古くから「黄道光」として観測されるダスト円盤が存在する（図1上）。黄道光の研究は、赤外線天文衛星 IRAS (Infrared Astronomical Satellite) の観測によって飛躍的に進歩した。小惑星ダストバンドの存在によって、小惑星ファミリーが黄道光の主たる起源であることが明らかになった<sup>3)</sup>。また、彗星ダストトレイルの発見によって、彗星ダストもまた長期間太陽系に留まり、黄道光に寄与していると考えられるようになった<sup>4)</sup>。

これらの天体から放出された塵は、ポインティング・ロバートソン効果によって、離心率を減少しながら太陽に向かって落ちていく。その寿命は、塵のサイズの1乗に、また中心星からの距離の2乗に比例する。塵が小さくなりすぎると、中心星輻射圧が効きすぎて、中心星に向かって落ちるどころか、逆に反対方向に吹き飛ばされる。このような塵は $\beta$ メテオロイドと呼ばれている。塵が大きすぎると、ポインティング・ロバートソン効果による寿命が長くなる一方、衝突による寿命が短くなる。更に、惑星摂動、太陽風やローレンツ力による効果、中心星近傍での塵の昇華などを考えると、その軌道進化は非常に複雑である。

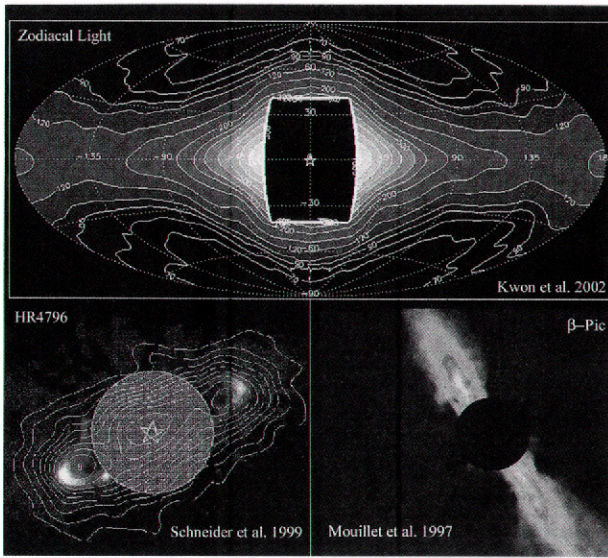


図1 様々な主系列星周囲にあるダスト円盤。(上) 我々の太陽系の黄道光。両端の明るい部分は対日照(後方散乱によって強められた部分)。(左下) HR4796と(右下) 画架座β星。

一般に、光学的に厚い(個数密度の高い)ダスト円盤では、衝突が頻繁に起こり、βメテオロイドを多く放出していると考えられる。この状態では、塵は起源である小天体ベルトより外側に分布する。塵のサイズ分布も小さいほうに集中している。ダス

ト円盤が光学的に薄くなるにつれて、塵の空間分布はポインティング・ロバートソン効果<sup>5)</sup>が重要になってくる。ポインティング・ロバートソン効果で予測される塵の個数密度は、中心星からの距離の-1乗に比例する。βメテオロイド程小さくないにしても、中心星の輻射圧が比較的効きやすい塵は、離心率の大きな軌道を取り、結果的に塵の起源である小天体ベルトの外側にも分布する(図2)<sup>5)</sup>。

我々の太陽系の場合、黄道光の観測から、地球近傍(1 AU付近)の塵の個数密度は、日心距離の-1.2から-1.4に比例していることが知られている。-1に近いことから、基本的には塵の軌道進化としてポインティング・ロバートソン効果が支配的な状態である。わず

かに-1からずれている理由として、日心距離が小さくなるにつれて(1)アルベドが高くなる、(2)別の塵の供給源が存在している、(3)衝突によって塵の散乱断面積が上昇する、等が考えられている。(1)は、黒い物質(有機物?)が昇華しているのではないかと解釈されている<sup>6)</sup>。石元は、5 AUより内側の塵の衝突・軌道進化を実際の塵のサイズ分布や空間分布を再現するために、1 AU付近ではかなり

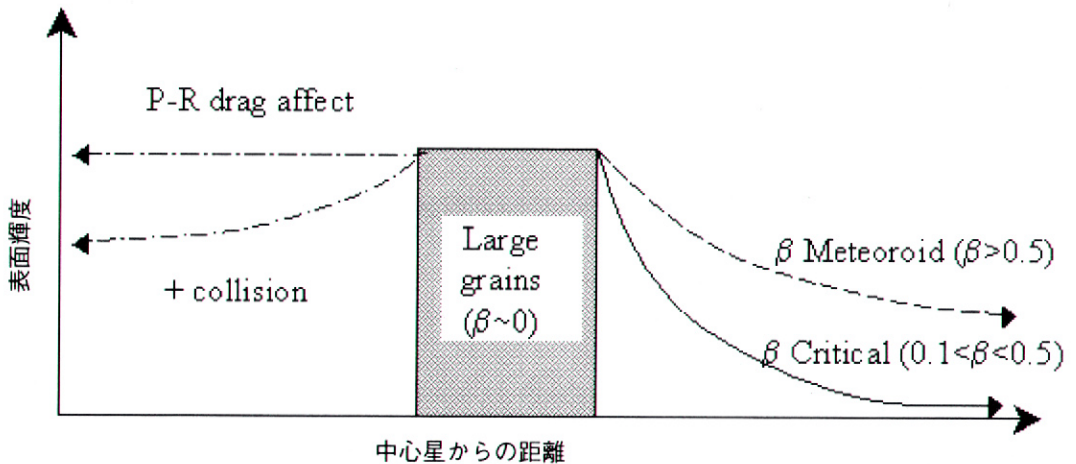


図2 塵の起源(グレーの部分)とその進化。βは中心星からの重力に対する輻射圧の比を表している。β > 0.5になるような塵は、外側に飛ばされ、0.1 < β < 0.5の塵はポインティング・ロバートソン効果によって中心星の方に落ち込む。

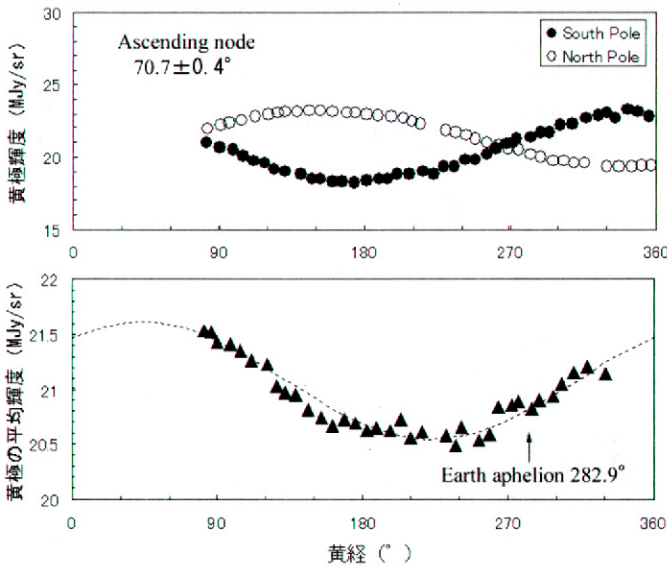


図3 黄道光の黄極の明るさの年変化(上)とその平均値の年変化(下)。

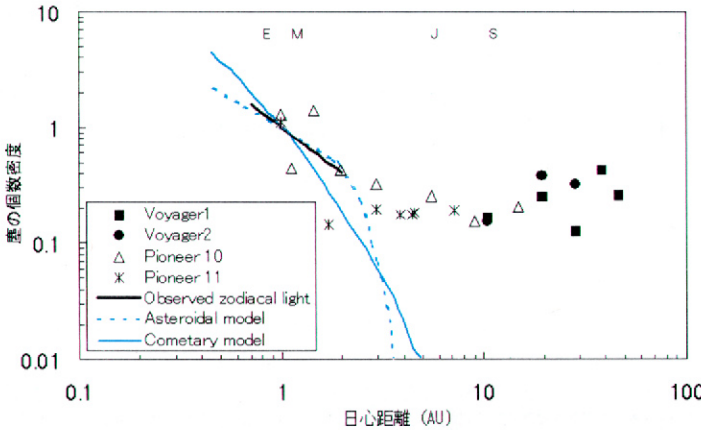


図4 太陽系塵雲の個数密度の相対値。3 AUより外側では塵の個数密度はほぼ一定である。比較のため、Gor'kavyiらによる小惑星ダストと彗星ダストの個数密度についての計算結果も示した<sup>20)</sup>。

の量の塵が彗星から供給されていると説明している<sup>7)</sup>。

### 3. ダスト円盤のゆがみと、非対称性

HR4796A 周囲のダスト円盤は、中心星に対して東西非対称な(すなわちダスト円盤の中心が中心星からずれている)輝度分布を示している<sup>8)</sup>。画架座β星は、ダスト円盤のもっとも濃い面が、中心

星からの距離によって変化している<sup>9)</sup>(図1下段)。エリダヌス座ε星周囲の塵雲は、ドーナツ状に塵が分布しているように見えるのだが、所々に不均一なムラが見えている<sup>10)</sup>。このような観測事実を元に、惑星の存在が示唆されている。実際、現在の技術をもって地球型惑星の直接検出は困難であるが、散乱断面積の大きい塵の微細構造から間接的に惑星を検出する方法は有効である<sup>11), 12)</sup>。惑星がダスト円盤にどのような空間分布構造を作るかを観測的に立証するためには、唯一惑星とダスト円盤の存在が確かな我々の太陽系を観測するとよい。

図3上は、赤外線天文衛星COBE(Cosmic Background Explorer)が観測した黄道光の黄極方向の明るさを、地球の位置に対してプロットしたものである。それぞれの明るさがサインカーブを描くのは、対称面が黄道面からずれていることを意味しており、南北黄極の明るさが等しくなる時、地球が対称面上にいることになる。この観測から、黄道光の対称面の昇交点黄経は1 AUで70°だとわかる。一方、対日照の観測から、1 AUより外側での黄道光の対称面の昇降点黄経は60°付近だと知られている<sup>13)</sup>。

これらの観測から、惑星の摂動によって、黄道光の対称面は日心距離とともに変化していると推測できる。黄道光が軸対称で、その中心が太陽と一致していると仮定すると、南北黄道光の明るさの平均値は、地球が遠日点にいる時、最小になると予想されるが、実際は異なる(図3下)。Dermottらは、黄道光の中心軸は主に木星の摂動によって

太陽からずれていると主張している<sup>14)</sup>。また、小惑星帯から放出されたダストは、ポインティング・ロバートソン効果によって太陽に落ちこむ際、地球との力学的共鳴によって、1 AU 付近にリング構造を作っていることも知られている<sup>15)</sup>。その様相は、エリダヌス座  $\epsilon$  星周囲のダスト円盤と似ていることは興味深い。このように、ヴェガ型星で説明されている惑星摂動による塵雲の空間構造は、いずれも太陽系の黄道光でも知られていることなのである。

#### 4. 最後に

近年発見されるダスト円盤の多くは、太陽系でいうところのカイパーベルト領域に相当する距離に存在している。ダスト円盤の起源としては、カイパーベルト天体同士の衝突<sup>16)</sup>や、カイパーベルト天体と星間塵との衝突<sup>17)</sup>等が考えられる。我々の太陽系を地球軌道から観測すると、手前にある黄道光の輝度が高く、太陽系外縁部のダスト円盤を直接検出することは困難である。ボイジャーやパイオニアの観測から、小惑星軌道より外側においても塵の個数密度は減っておらず、むしろ一定であると報告されている<sup>18)</sup>、<sup>19)</sup>。この原因として、カイパーベルト起源の塵の存在が考えられる<sup>20)</sup>。今後は、ASTRO-F (地球軌道) による全天サーベイ観測による中間/遠赤外線波長帯における塵の熱放射に関するデータや Planet-C (金星探査ミッション) の金星までのクルージングフェイズにおける黄道光観測<sup>21)</sup>、宇宙科学研究所のグループを中心に提案されている脱黄道光計画などによって、様々な日心距離での黄道光データが蓄積されることが予想され、黄道光の起源がより詳しく研究されることが期待される。それと同時に、ASTRO-F によるヴェガ型星の系統的なサーベイ観測<sup>22)</sup>や、SPICA (本特集, 中川氏参照) や TPF (本特集, 田村氏, 芝井氏, 村上氏参照) によって空間分解された塵雲と太陽系の塵雲を比較することによって、主系列星周囲の惑星系の進化について詳しく調べられることを大いに期待している。

#### 参考文献

- 1) Chen C.H., Jura M., 2001, ApJ 560, L171
- 2) Backman D.E., et al., 1995, ApJ 450, L35
- 3) Dermott S.F., et al., 1984, Nat., 312, 505
- 4) Sykes M.V., Waker R.G., 1992, ICARUS 95, 180
- 5) Wyatt M.C., 1999, PhD thesis (University of Florida)
- 6) L'Heret A.-C., Dumont R., 1990, A&A 304, 602
- 7) Ishimoto H., 2000, A&A 362, 1158
- 8) Wyatt M.C., et al., 1999, ApJ 527, 918
- 9) Mouillet D., et al., 1997, MNRAS 292, 896
- 10) Greaves, J. S., et al., 1998, ApJ 506, L133
- 11) Backman D.E., 1998, Exozodiacal Dust Workshop Conference Proc. (NASA/CP - 1998 - 10155), 13
- 12) Woolf N., Angel J.R., 1998, ARA&A 36, 507
- 13) Mukai T. et al., 2003, ICARUS, in press
- 14) Dermott S.F., et al., 2001, in Interplanetary Dust (Springer), 569
- 15) Dermott S.F., et al., 1994, Nat. 369, 719
- 16) Stern S.A., 1996, A&A 310, 999
- 17) Yamamoto S., Mukai T., 1998, A&A 329, 785
- 18) Gurnett D.A., et al., 1997 Geophysical. Research Letters 24, 3125
- 19) Humes D.H., 1980, Journal of Geophysical Research 85, 5841
- 20) Ozernoy L.M., IAU Symp 204, 170
- 21) 岩上直幹, 中村正人, 2002, 天文月報 95, 126
- 22) Hirao T., et al., 2000, ISAS report SP No. 14
- 23) Gor'kavyi N.N., et al., 1997, ApJ 488, 268

#### Prospects for the Exosolar Planetary Systems Based on the Zodiacal Light Observations Masateru ISHIGURO

*Institute of Space and Astronautical Science, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229-8510, Japan*

**Munetaka UENO**

*Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro, Tokyo 155-8902, Japan*

Abstract: We summarize recent results revealed by the observations of zodiacal light. These results will be an important clue to understand the other planetary debris disk around the main-sequence stars.