

# 平山族とダストバンド

石黒正晃

〈ソウル大学物理天文学部 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, South Korea〉

e-mail: ishiguro@astro.snu.ac.kr



赤外線天文衛星 IRAS による重要な発見のひとつに、ダストバンドの検出があげられる。この発見が発端となって、20年以上にわたりその解釈について論争が繰り広げられた。「ダストバンドは平山族として知られているテミス族、コロニス族、エオス族に起因するかどうか」ということが当時の議論の焦点であった。一連の議論は、「若い族」の発見と地球の深海に眠る堆積物の調査によって終止符が打たれた。本稿では、地球から約2億キロメートル離れた小惑星帯で起こった衝突現象の解釈について、平山清次先生が提唱された族の概念がのちの研究者にどのような影響をあたえ、小惑星帯を起源とする天体の研究の発展に役立ってきたかを紹介する。

## 1. ダストバンド発見にいたるまで

黄道光とは、惑星間ダスト（固体微粒子）によって散乱された太陽光である。最近では光害のため、日本国内から黄道光を観測することはすっかり困難になった。ただ本来、黄道光は肉眼でも観察できるくらいに明るく、古くから天文学の研究対象として調査されてきた。当該分野の研究者の関心は、惑星間ダストの起源である。内惑星領域に現存するダストの力学的寿命は、せいぜい1000万年以下<sup>1)</sup>とそれほど長くないことから、惑星間ダストの供給源を探す研究が長きにわたり実施されてきた。わが国では、古畑正秋先生が戦中戦後の東京天文台において黄道光観測を実施し、エンケ彗星との関連性について報告された研究例がある<sup>2)</sup>。しかし当時の観測技術では決定的証拠が得られず、本格的なダスト起源に関する議論は1980年代まで持ち越された。

1983年に打ち上げられた赤外線天文衛星 IRAS によって、赤外線拡散放射の中に微細構造が発見された<sup>3)</sup>。中間赤外線波長域では、星や銀河、星間ダストに対して惑星間ダストの熱放射（いわゆる

黄道放射）は圧倒的に明るく、可視光の黄道光観測では見えない微細構造が見つかったのである。この微細構造は、黄緯0度付近と黄緯±9度付近に、太陽を取り囲むように帯状に広がっていることから、ダストバンドと呼称されるようになった。ダストバンドの色温度は150-200 Kで、小惑星帯のダストの平衡温度と一致する。つまり発見当初から、ダストバンドは小惑星帯に起因することはわかっていたのだ。

今日までに赤外線波長で全天を観測した三機の天文衛星（IRAS, COBE<sup>4)</sup>、「あかり」<sup>5)</sup>）によってダストバンドが検出されている。その特徴を以下にまとめる。

(1) ダストバンドは、黄経方向に二本の構造が南北一対をなしており、その中心は正弦波を描くように波打っている（図1）。

(2) 黄道面付近に二対、黄緯±9度付近に一対の合計三対のダストバンドがすべての経度方向で確認された。

(3) (2) の構造のほかに、限られた黄経方向に観察される局所的ダストバンドが IRAS の観測で検出された<sup>6)</sup>。

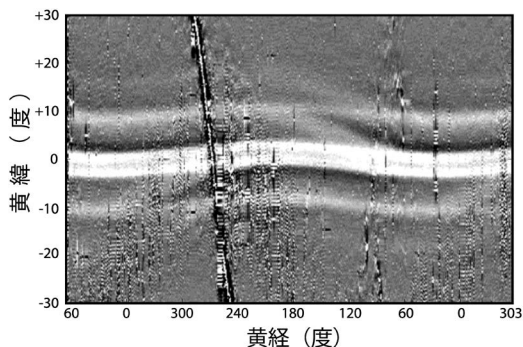


図1 日本の赤外線天文衛星「あかり」が観測したダストバンド。黄緯0度と黄緯±9度付近で対をなしている。黄緯0度の構造は、高周波数成分の解析から、さらに二組の対に分解できることが知られている。なお、この画像において、黄経240–290度において銀河面と重なり、観測データが乱されているので無視していただきたい（画像提供：Jeonghyun Pyo博士（韓国天文研究院））。

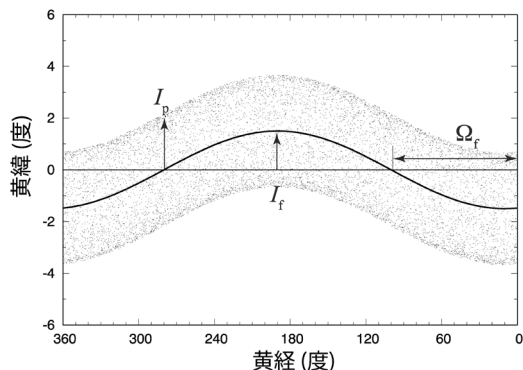


図2 ダストバンド構造と軌道要素との関係の模式図。文献9を参考にして作成した。太陽から族を観測すると、惑星の重力による強制的な軌道面（図中の太線、 $I_f$ と $\Omega_f$ によってあらわされる）を中心にして、固有軌道面傾斜角 $\pm I_p$ 以内の領域に小惑星は分布する。その滞在確率は、上下両端で最大になるため、両端に局所的集積があるように観察され、二本のバンド構造が一对をなしたように見える。強制的な軌道面は、黄道面から少しずれているので、ダストバンドの中心は波打っているように観測される。地球軌道から観測した場合、視差のため見かけは少し異なるが、基本的な概念はこの図の通りである。

## 2. 平山族との関連性

さて、このダストバンドの構造を理解するにあたり、小惑星の族の概念はとても重要である。ここでいったん、小惑星の族について言及する。小惑星の瞬時の軌道要素（接触軌道要素）は、惑星重力による強制振動成分と、各小惑星に固有の軌道要素成分によってあらかずることができる。平山清次先生は、1918年に発表された論文において、非常によく似た固有軌道要素を持つ三つの小惑星のグループ（テミス族、コロニス族、エオス族）を発見した<sup>7)</sup>。これらの小惑星グループ（いわゆる族）は、しばしば平山族と呼ばれている。平山先生が提唱されたこの概念は今日でも広く受け入れられており、現在までに知られている族の数は100を超えている<sup>8)</sup>。

ダストバンドが発見された直後に、平山族との関連性が指摘された。Stanley F. Dermott教授らは、ダストバンドの推定される固有軌道面傾斜角（それぞれ内側から1.4度、2.1度、9.4度）が平山

族の値（テミス族1.4度、コロニス族2.1度、エオス族10.2度）に近いことに着目し、衝突平衡仮説を提唱した<sup>9)</sup>。ここで注意していただきたいのは、平山族を形成した小惑星衝突は約10億年以上前のことなので<sup>10)-11)</sup>、この衝突によって生成したダストはポインティング・ロバートソン効果（太陽光圧によってダストの角運動量が失われる効果）によって太陽に落ち込み消失しているはずである。この衝突平衡仮説では、小惑星が存在するところには、必ず衝突の連鎖（collisional cascade）が起こり、一定の割合で小さなダストが生成されつづけていると考えるのだ。平山先生が提唱されたように、小惑星の固有軌道要素は全く無作為に分布しているのではなく、いくつかの集積があるため、ダスト雲にもまた局所構造が見られ、それがたまたまダストバンドとして観測されると解釈したのである（図2参照）。この仮説で

は、族でない小惑星であってもダストを放出する  
と考えるので、ダストバンドとして観測されない  
なめらかな黄道放射成分にも小惑星起源ダストが  
大いに寄与していると考察している。

わたし自身、この衝突平衡モデルに関する論文<sup>9)</sup>  
をはじめて読んだ時、大変深く感動したことを覚  
えている。固有軌道要素という、やや難解な平山  
先生の理論が見事にダストバンドとして可視化  
(といっても赤外線波長であるが) されていたか  
らである。しかしながら、この衝突平衡仮説には  
いくつかの問題があった。第一に、エオス族の固  
有軌道要素がダストバンドの値と約1度ずれている  
ことがあげられる。わずか1度のずれであるが  
観測的に有意なずれである。S. F. Dermott教授ら  
がのちに発表した論文では、ダスト粒子の固有軌  
道要素の分散を大きくすることによってこの差分  
を見かけ上小さくするモデルを提唱したが<sup>12)</sup>、  
今振り返ると無理があったように思われる。第二  
の問題は、三つの族以外には、該当するダストバ  
ンドが発見されなかったことである。平山先生が  
発見した族は当初三つであったが<sup>7)</sup>、のちの論文  
ではフローラ族とマリーア族が加わっていた<sup>13)</sup>。  
しかし、小惑星帯内側領域最大のフローラ族に対  
応するダストバンドが一向に検出されないのだ<sup>14)</sup>。  
衝突平衡仮説では、小惑星の固有軌道要素に  
集積があれば必ず対応するダストバンドが見  
えなければならない。

一方、衝突平衡仮説に対抗する考えとして、  
Mark V. Sykes博士は、ダストバンドはたまたま  
最近に起こった約10キロメートルサイズの小惑  
星の衝突崩壊現象によるものだと解釈した(衝突  
非平衡仮説)<sup>15)</sup>。全く偶発的に衝突を起こすため、  
ダストバンドの位置と平山族とは対応していなく  
てもよい。この仮説では、部分的なダストバンド  
は衝突からあまり時間が経過しておらず、全黄経  
方向に広がっていないと解釈した。ただ、1990  
年代にこうした突発的な小惑星の衝突を支持する  
観測的証拠が得られなかったことから、衝突非平

衡仮説は、憶測の域を出ないものであり、1990  
年代末にはあまり研究者の支持を受けなくなっ  
ていた。

### 3. 論争の決着

この論争は、21世紀に入り急展開する。1990  
年代後半から始まった地球近傍小惑星のサーベイ  
によって、大きな転換期がやってきたのだ。専用  
望遠鏡を用いた系統的な小惑星サーベイ観測が実  
施され、発見される小惑星の個数が飛躍的に増加  
した。David Nesvorny博士らは、このようにし  
て発見された小惑星の過去の軌道要素を数値的に  
分析した結果、約580万年前に衝突崩壊した小惑  
星のグループを見つけ出した<sup>16)</sup>。この小惑星グ  
ループは、その中で最大サイズの天体名にちなん  
で、コーリン族(カリン族とも発音される)と命  
名された。のちに、約820万年前に崩壊したと考  
えられるペリタス族<sup>17)</sup>や、約600-1000万年前に  
崩壊したと推定されるビーグル族が相次いで発見  
された<sup>18)</sup>。このような族は、前述の平山族(お  
およそ10億年前以前に崩壊<sup>10), 11)</sup>よりも最近に  
生成したことから、「若い族」と呼ばれるように  
なった。

ここで勘のいい読者の方は気がつかれたかもし  
れない。これらの若い族の年齢は、ポインティン  
グ・ロバートソン効果によるダストの寿命(お  
およそ1000万年以下<sup>1)</sup>)と同等か少し若いため、  
これら若い族を生成した当時のダストが現在も残  
りうると。驚くことに、コーリン族、ペリタス  
族、ビーグル族の固有軌道面傾斜角は、観測され  
た三対のダストバンドの値と完全に一致したので  
ある<sup>17), 18)</sup>。ポインティング・ロバートソン効果  
は、粒子サイズに反比例し、1マイクロメートル  
のダストだと約1万年で、1ミリメートルのダス  
トだと約1000万年で小惑星帯を離れ太陽に向  
かって落ち込む。つまり、現在観測されるダスト  
バンドは、若い族形成に関連する衝突崩壊時に放  
出されたダスト粒子のうち、大きなサイズ(お

むね1ミリメートル以上)のダストが今日まで残って見えているのだ。若い族を形成した衝突現象が起こった場所は全く偶発的であるため、これら一連の発見は衝突非平衡仮説を決定づけるものとなった。

では、若い族が形成されてからの状況を想像してみよう。まず最初に、直径数10キロメートルの小惑星が別の小惑星と衝突し、ばらばらに崩壊する。この時、大きな衝突破片に加え、かなりの量のダストが生成されたであろう。一部の衝突破片は自己重力で再集積し、ラブルパイル構造(岩塊が集積することによって形成された構造)を作ったはずである<sup>19)</sup>。やがて惑星(小惑星帯では特に木星と土星)の重力の影響を受け、衝突破片は、固有軌道面傾斜角、固有軌道長半径、固有離心率を一定値に保ったまま黄経方向に広がる。太陽の周りを一周するバンド構造を形成するのに必要な時間は10万年から100万年と推定されている<sup>15)</sup>。こうして、平山先生が提唱されたような族が形成される。族の形成は、平山族であろうと、若い族であろうと、基本的な機構は同じである。しかし、小さいダスト粒子の場合、状況は少し異なる。ポインティング・ロバートソン効果によって太陽に向かって落ち込むからである。こうしたダスト粒子は、小惑星帯の内側にある永年共鳴帯を横切る際に軌道が大きく乱されるものの<sup>20)</sup>、比較的短時間で太陽に落ち込み、最終的には消失したと考えられる。太陽に落ち込む途中で、一部のダストは地球に降り注いだ可能性がある。Kenneth A. Farley博士らは、地球の海底堆積物中の<sup>3</sup>Heを調査したところ、ベリタス族の衝突が起こった直後、十万年後あたりから<sup>3</sup>Heの量が通常の値より4倍も高くなっていることに気がついた<sup>21)</sup>。惑星間ダストの<sup>3</sup>Heの値は地球上の物質の値より高いことが知られており、この測定結果はベリタス族衝突によって生成されたダストが地球に降り注いだ直接的な証拠だと考えられている。

## 4. おわりに

天文月報1999年9月号に、中村良介博士との共著でダストバンドについて紹介させていただいた<sup>22)</sup>。ちょうど20年が経過し、当該研究分野においてさまざまな研究発展があった。本稿で紹介させていただいた通り、ダストバンドの起源が特定された。最近では、「若い」族という用語に違和感さえ覚えるような観測結果がでてきている。つまり、衝突の瞬間が捕らえられるようになってきたのだ<sup>23), 24)</sup>。観測機器の精度の向上にともなう研究発展の早さをつくづく痛感している。

現在、小惑星探査機「はやぶさ2」が小惑星リュウグウを探査中である<sup>25)</sup>。含水鉱物に富んだこの小惑星<sup>26)</sup>からの試料が帰還するのは来年2020年末、なんとも今から待ち遠しい。このリュウグウもまた、過去の大規模衝突によって形成された小惑星帯内側の族を起源とする天体であると考えられている<sup>27)</sup>。平山先生が提唱された族の概念にはじまり、この100年間、わが国では天体力学的な取り組みや1970年代にはじまった室内衝突実験<sup>28)</sup>によって、世界の小惑星研究を牽引してきた。そしてこんにちの一連の「はやぶさ」探査によって、その地位を揺るぎないものにしつつある。近い将来、惑星間ダストの起源と小惑星ファエトンを調査するDestiny+計画が立ち上がろうとしている<sup>29)</sup>。TMTや時間軸天文学、今後の大規模サーベイ観測もまた、小惑星研究に新たな知見をもたらすものと期待される。この先10年、20年、どのような発見が待ち受けているのか、楽しみである。

## 謝辞

本稿の執筆にあたって、大坪貴文博士と臼井文彦博士から有益なコメントをいただいた。本文中の小惑星の日本語表記は、佐藤勲博士による「天体名の日本語表記の標準化」サイト<sup>30)</sup>を参照した。ここに感謝する。

## 参考文献

- 1) Burns, J. A., et al., 1979, *Icarus*, 40, 1
- 2) Huruahata, M., 1951, *PASJ*, 2, 156
- 3) Low, F. J., et al., 1984, *ApJ*, 278, L19
- 4) Spiesman, W. J., et al., 1995, *ApJ*, 442, 662
- 5) Ootsubo, T., et al., 2016, *PASJ*, 68, 35
- 6) Sykes, M. V., 1990, *Icarus*, 85, 267
- 7) Hirayama, K., 1918, *AJ*, 31, 185
- 8) Nesvorný, D., et al., 2015, *Asteroids IV*, University of Arizona Press, 297
- 9) Dermott, S., 1984, *Nature*, 312, 505
- 10) Spoto, F., et al., 2015, *Icarus*, 257, 275
- 11) Vokrouhlický, D., et al., 2006, *Icarus*, 182, 92
- 12) Grogan, K., 1997, *Planetary and Space Science*, 45, 1657
- 13) Hirayama, K., 1992, *Japanese Journal of Astronomy and Geophysics*, 1, 55
- 14) Reach, W. T., et al. 1997, *Icarus*, 127, 461
- 15) Sykes, M. V., 1986, *Icarus* 65, 51
- 16) Nesvorný, D., et al., 2002, *Nature*, 417, 720
- 17) Nesvorný, D., et al., 2003, *ApJ*, 591, 486
- 18) Nesvorný, D., et al., 2008, *ApJ*, 679, L143
- 19) Fujiwara, A., et al., 2006, *Science*, 312, 1330
- 20) Kehoe, T. J. J., et al., 2005, *Proc. of Workshop on Dust in Planetary (ESA SP-643)*, 81
- 21) Farley, K. A., et al., 2006, *Nature*, 439, 295
- 22) 石黒正晃, 中村良介, 1999, *天文月報*, 92, 9
- 23) Ishiguro, M., et al., 2011, *ApJ*, 740, L11
- 24) Kim, Y, et al., 2017, *ApJ*, 842, L23
- 25) Watanabe, S., et al., 2019, *Science*, 364, 268
- 26) Kitazato, K., et al., 2019, *Science*, 364, 272
- 27) Sugita, S., et al., 2019, *Science*, 364, 252
- 28) Fujiwara, A., et al., 1977, *Icarus*, 31, 277
- 29) Arai, T., & Destiny+Team, 2019, 50th LPSC, No. 2132, 3223
- 30) <http://www6338.la.coocan.jp/JANNET.html>  
(2019.06.25)

## Hirayama Asteroidal Families and Dust Bands

Masateru ISHIGURO

*Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, South Korea*

Abstract: One of the major discoveries of IRAS includes zodiacal dust bands. Triggered by the finding, there was a long dispute over more than 20 years regarding the interpretation of the formation mechanism: if these dust bands were associated with the Hirayama asteroidal families (i.e., Themis, Koronis and Eos families) or not. The findings of young asteroidal families and its associated evidence detected in the seafloor sediment settled the dispute. In this article, we explain how the theory of Kiyotsugu Hirayama influenced the development of asteroidal studies by introducing the active discussion regarding the origins of dust bands.