

彗星の近赤外観測

長谷川 均¹

1. 太陽系始源物質としての彗星

毎年新しく彗星が発見されるこれらの多くは熱心なアマチュアの搜索による発見、あるいは他の天体（主として小惑星）の観測中に偶然発見されたりする。最近は地球に接近する天体を根こそぎ発見してやろうといういくつかのサーベイプロジェクトや、衛星軌道上の観測装置よっての発見が多くなり、周期彗星として回帰する彗星を合わせると年に100個近い彗星が内部太陽系を通り過ぎていくことになる。観測されないものも含めれば実際にはさらに多くの彗星が存在するだろう。発見される彗星の数が増えると、統計的に彗星をいくつかの特徴によって分類することが可能になってくる。軌道で分類すれば公転周期200年以内のものを便宜上、短周期彗星と区別し、それ以外のものを長周期彗星と呼んでいる。短周期彗星の軌道傾斜角は黄道面に近いところに分布している。黄道面上の海王星軌道の外側には最近話題のエッジワースカイパーベルト天体（EKBO）と呼ばれる氷天体が分布する最近多数発見されている。EKBOは太陽系の初期段階で海王星より外側領域で形成された微惑星のかけらであり、それが惑星摂動によって内部太陽系に落ちてきたものが短周期彗星として我々の目に止まると考えられている。EKBOについては関口が本特集に詳しい解説を書いているので参照していただきたい[1]。彗星の観測を行うことで、その化学組成やダストについて

の情報を通して太陽系の起源、進化を調べようというわけである。しかし、彗星のガスの組成、ダストのサイズ分布、組成には彗星毎に多様性があり、それが彗星の形成された時の環境を反映しているのか、あるいは太陽の周りを公転する間に変性を受けたのかがわからない。一般には短周期彗星は長周期彗星と比べて太陽系内部にいる時間が長いことから、両者の違いを調べれば彗星の進化についての情報が得られるはずである。近赤外観測は、彗星のダストの散乱光を通して彗星ダストの組成やサイズ等についての情報を得るのに適している。もちろん、他の波長での観測と併用されることによってさらに得られる情報は多くなる。

2. 彗星の色を調べる

近赤外でよく用いられるJ, H, Kバンドの観測は、それぞれ $1.25\ \mu\text{m}$, $1.65\ \mu\text{m}$, $2.2\ \mu\text{m}$ に中心波長を持つ広帯域フィルターを通した観測である。これらの波長はそれぞれ近赤外波長領域での地球大気の窓に対応している。彗星は、可視光で見るとCN, C_2 といった分子の輝線がダストの散乱光に重なった形となっていてダストの散乱光のみを取り出すのはやっかいである。それに対して近赤外ではこうしたガスの輝線はほとんど見られないか、あるいは非常に弱い場合、ダストによる散乱光が主となる。これらの波長でバンド毎のフラックス強度の比を太陽のスペクトルと比較することで彗

¹ アステック

星ダストの相対的な反射率を求めることができる。明るい彗星では、分光器を通して分光観測が可能であるが、明るい彗星は少なく、上記バンドによる3色測光から反射率を求めることが多い。

この彗星の色からいかにして情報を引き出すかであるが、彗星のダストコマは1つの固体ではなく、あるサイズ分布を持つダストの集合体であるところがやっかいである。サイズ分布が異なるとその色が違って見えてくる。実は、そこを逆手に取って、彗星ダストのサイズについての情報を得ることができる。ダストは彗星核の揮発性物質の昇華にともなうガスによって引きずり出され、ガスの密度が薄くなったところである一定の速度で遠ざかる。この速度はダストのサイズによっても異なり、その際に、ダストが蒸発、あるいは崩壊するようなことが起これば、色に違いが出るはずである。近赤外のJ, H, Kの3つのバンドによる観測でいくつかの彗星について、核から遠ざかるにつれてダストの色の変化が報告されている。例えば、Halley彗星では核から遠ざかるにつれてダストの色が赤くなっていることが報告されている[2]。しかし、同じHalley彗星でも、これとは逆に核から離れるにしたがって相対的に青くなるという観測も報告されている[3]。これら2つの観測を比較すると、前者は太陽からの距離が1.9AU付近であり、後者は0.9AU付近であった。単純な崩壊では相対的に細かいダストが増えて、傾向としては核から離れるほどダストの色は観測波長に対して小さいダストの比率が大きくなり、レーリー散乱的に青くなるはずである、太陽から近い方ではこのような崩壊的な現象が起こっているらしい[3]。太陽から遠い方の観測で赤くなっているのは、汚れた氷ダストから氷成分が蒸発するようなことで、ダストの反射率が変化していることで説明が可能である[4]。現時点において、ダストコマの色の分布が測定された彗星は非常に少ないので、今後も同様の観測

を行うことで色の変化の日心距離依存性からより現象を明らかにされることに期待したい。

3. 塵の組成を調べる

偏光観測を用いるとさらにダストについての情報量が多くなる。偏光観測は、撮像装置の前に偏光版を付けて複数の異なった偏光面で対象天体を撮像し、後からそれらの画像の演算操作によって偏光度を算出する。可視では、多くの彗星について偏光観測が行われているが、近赤外ではKohoutek, West, Halleyと言った大彗星で行われているのみで、最近でも我々のグループでHale-Bopp彗星について観測が行われた程度であり[5]、サンプル数としては非常に少ない。可視偏光観測では、様々な位相角で観測し偏光度の位相角依存性が調べられてきた。可視では、大きく分けて高位相角で偏光度の高いグループと低いグループに分けられる[6]。これが最初に分類した長周期彗星と短周期彗星の分類と一致すれば彗星の進化と関連付けられて極めて面白いのであるが、現実はそうっていない。さらにHale-Bopp彗星はこれまでの彗星の中では最も偏光度が高い彗星となり、前述の2つのグループとは異なっている[7]。我々の近赤外偏光観測の結果でも、高偏光度グループのHalley彗星よりも偏光度が高いという結果を得ている。しかし、まだ近赤外ではサンプル数が少ないために可視光のようにグループ分けができるのかどうかすらわかっていないのが現状である。偏光観測が複数の波長で行われると、偏光度の波長依存性からある程度彗星ダストを構成する物質の組成に制限を与えることができる。彗星ダストコマのようなダストの集合の場合、サイズ分布によって物質が元から持つ吸収特性が隠されてしまい、分光観測では吸収特性をとらえることが一般には難しい。しかし、偏光スペクトルでは、物質の持つ吸収係

数の波長依存性がそのまま反映し、候補物質の光学定数を使ったモデル計算との比較がしやすくなる[8]。この性質を利用して、Mieモデルを用いていくつかの候補物質、あるいはそれらを混合したダストの偏光スペクトルを計算した結果、彗星ダストの候補物質のほとんどが、偏光度が波長の増加にしたがって低くなっているという傾向があることがわかった。唯一の例外はシリケート (astronomical silicate) で、右上がりの様子を示している。Halley彗星の偏光観測では、可視から近赤外にかけて右上がりの傾向を示していて、彗星ダストの候補としてはシリケートが最も近い。近赤外で中間赤外の $10\mu\text{m}$ のシリケート放射のスペクトルを再現するためには、シリケートに有機物を混ぜたような物質を想定すると、観測をうまく再現することができる (例えばHale-Bopp彗星については[9])。ところが、同じようにシリケートに微量の有機物やカーボン、鉄などを混ぜて可視から近赤外の偏光スペクトルを説明しようとする、微量でもシリケートの特徴が埋もれてしまう。現在のところ近赤外から中間赤外まで統一的に説明できるダストのモデルは存在しない。今後の理論展開に期待したいところである。

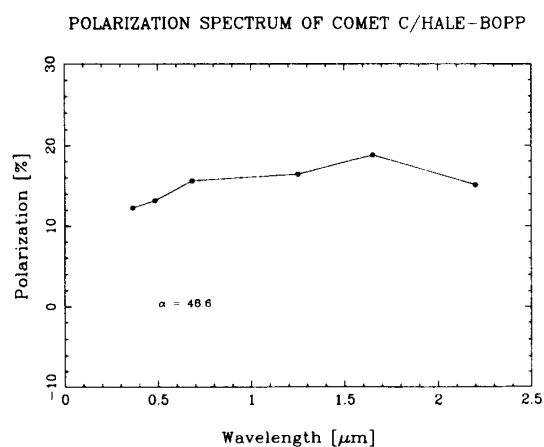


図1 Hale-Bopp彗星の偏光度の波長依存性
筆者らの得た近赤外の偏光度に、可視偏光度[6]を同じ位相角に合わせてプロットしたもの。偏光度がHバンドをピークに下がっている様子がわかる。

以上はHalley彗星についての観測結果であったが、図1は我々の観測で得られたHale-Bopp彗星の偏光度に、可視の偏光観測[7]を同じ位相角に揃えてプロットした偏光度の波長依存性である。Hバンドまでは偏光度が波長が長くなるにしたがって高くなっている。しかし、Kバンドでは偏光度が下がっている。また、過去に出現した大彗星であるWest彗星は、Jバンドから偏光度が下がる傾向にある。これらの違いについては明らかでないが、日心距離によるダスト内の有機物質量の違いという説明もある[8]。まだ、近赤外も含めた偏光観測はいわゆる大彗星しか観測例がなく、短周期彗星についてはどのような偏光度を示すかわかっていない。これまで中間赤外で観測された短周期彗星では、Halley彗星を例外とすれば、 $10\mu\text{m}$ シリケート放射が弱い、あるいはほとんど検出されていない。これは、ダストのサイズを大きいとすると熱放射の射出率が1に近付いてシリケートの特徴が見えなくなることで説明できる。このことから短周期彗星は長周期彗星に比べて大きなサイズのダストが多いようなサイズ分布であると考えられている。そこで、近赤外まで含めた偏光スペクトルが最も彗星ダストの組成を表すということから、短周期彗星の観測についての近赤外偏光観測を行い、どのような偏光スペクトルを示すか、長周期彗星と違っているのかといったところが興味深い。最近では近赤外でも2次元の撮像素子が主流であり、偏光度の空間分布を測定することが可能になってきた。さきほどの核からダストが放出される過程での崩壊、あるいは蒸発の過程は偏光度の空間分布に表れるはずである。我々のHale-Bopp彗星の近赤外偏光撮像観測では、核近傍では偏光度が低く、核から遠ざかるほど偏光度が高くなるという結果を得た ([2]図2参照)。可視光でも同様の構造が報告されている[10]。これは、彗星ダストが全て同じ物質からなるとすれば、偏光度の違いはサ

イズ分布の違いを示すことになる。中心部が偏光度が低いということは、小さいダストが少ないことを示し、離れるにつれてより細かいダストの数が増えているということになる。さきほど紹介したHalley彗星の色から得られた結果とは矛盾することになる。近赤外で得られた画像から色の分布を出してみればさらに興味深いことであるが、解析作業はこれからの予定である。

4. 「すばる」への期待

彗星は太陽に接近してガスの活動が始まるが、その活動が始まる前、あるいは遠ざかってガスの活動が収束した状態では、彗星の核を固体の太陽系天体として観測することができる。最近になって、EKBOの色もバラエティに富んでいることがわかってきた。当初は軌道長半径の違いで、遠方ほど赤い傾向が得られたがサンプル数が多くなる

につれて、そのような単純解釈が成り立たなくなってきた。さらに、Chironは、観測時期によって色が異なることも報告されていて、向けている面によって表面物質が異なるか、あるいはガスの活動によって表面物質が変化している可能性がある[11]. 「すばる」はこれまで手の届かなかった遠方の彗星を観測するのに最適の望遠鏡である。近赤外撮像分光装置 IRCS, 近赤外コロナグラフカメラ CIAOを用いた集光力と、高い分解能を用いて太陽系遠方での彗星を観測し、EKBOのバリエーションに加えて、遠方での彗星核の色の測定が加えられればEKBOから彗星への進化の道筋に対しての情報が得られるものと期待する。また、偏光観測装置を付けられるCIAOを用いて太陽からの様々な距離での近赤外偏光度の波長依存性を測定することで、彗星ダストの揮発性物質の失われてく様子が見えてくるだろう。

NIR Polarization Map of Comet Hale-Bopp

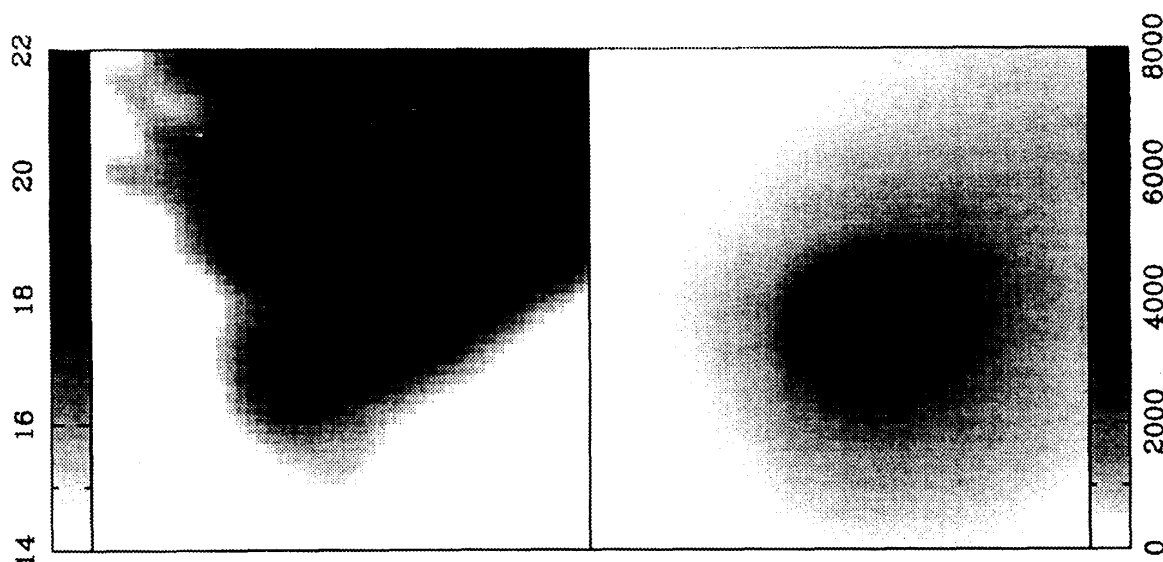


図2 Hale-Bopp彗星のHバンド偏光マップ

1997年3月18日、木曾観測所105cmシュミット望遠鏡および近赤外カメラKONICを用いて観測。左側が偏光度マップで、右側が強度マップである。核の中心付近に偏光度の低い領域が見えると共に半太陽側(図で上の方)に尾のように高偏光度領域が伸びている様子がわかる。

参考文献

- [1] 関口朋彦, 1998:太陽系外縁部小天体, 遊星人 7巻4号
- [2] Campins, H., Rieke, M.J., Rieke, G.H., 1989:An infrared color gradient in the inner coma of Comet Halley. *Icarus* 78, 54-62.
- [3] Woodward, C.E., Shure, M.A., Forrest, W.J., Jones, T.J., Gehrz, R.D., Nagata, T., Tokunaga, A.T., 1996:Ground-based near-infrared imaging of comet P/Halley 1986 III. *Icarus* 124, 651-662.
- [4] Hanner, M.S., 1981:On the detectability of icy grains in the comae of comets. *Icarus* 47, 342-350.
- [5] Hasegawa, H., Ichikawa, T., Abe, S., Hamamura, S., Ohnishi, K., Watanabe, J., 1998:Near-Infrared Photometric and Polarimetric Observations of Comet Hale-Bopp Earth, Moon and Planets, in press.
- [6] Levasseur-regourd, A.C., Hadamcik, E., Renard, J.B., 1996:Evidence for two classes of comets from their polarimetric properties at large phase angles. *Astron. Astrophys.* 313, 327-333.
- [7] Ganesh, S., Joshi, U.C., Baliyan, K.S., Deshpande, M.R., 1998:Polarimetric observations of the comet Hale-Bopp. *Astron., Astrophys. Suppl. Ser.* 129, 489-493
- [8] Kolokolova, L., Jockers, K., 1997:Composition of cometary dust from polarization spectra. *Planet. Space Sci.* 45, 1543-1550
- [9] Li, A., Greenberg, J.M., 1998:From interstellar dust to comets: infrared emission from comet Hale-Bopp (C/1995 O1), *Astrophys. J.* 498, L83-L87.
- [10] Furusho, R., Suzuki, B., Kawakaita, H., Yamamoto, N., Sasaki, T., Shimizu, Y., Kurakami, T.:Color and polarization map of the inner coma of Comet Hale-Bopp. *Proc. 31st ISAS Lunar and Planet. Symp.*
- [11] Davies, J.K., Neil, M., Ellison, S.L., Green, S.F., Ballantyne, D.R., 1998:Visible and infrared photometry of six Centaurs. *Icarus* 134, 213-227