

太陽系小天体の赤外線熱放射： 100 m サイズ天体の大きさ測定

関 口 朋 彦

〈国立天文台 〒188-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: t.sekiguchi@nao.ac.jp

太陽系小天体の大きさを決めるには、可視光観測のみではアルベドを仮定しなければ大きさが求まらない。これに対し、中間赤外線波長域での熱観測を行えば、天体の大きさとアルベドを同時に決めることが可能である。一方、これまでの研究から熱モデルパラメータが良く求まっている小惑星に対しては、その熱放射フラックスを理論的に精度良く見積もることができ、近年、中間赤外線から遠赤外線、サブミリ波長域におけるフラックス標準天体としての重要性が高まりつつある。

1. 太陽系小天体の大きさは どうやって求まる？

天体の大きさ（径）は天文学において、最も手始めに知っておくべき基礎的物理量の一つであろう。サイズは天体の質量や密度などの情報に直結し、天体の組成や組成比にも制限を与える。また天体のサイズ分布は、その天体グループの起源に起因しているはずである。ところが観測対象が点光源であって、撮像観測によって分解できない場合には何らかの仮定により天体のサイズを決めることになる。ここで具体例として小惑星、彗星核、カイパーベルト天体などの太陽系小天体について述べる。この種の天体のサイズを可視光・近赤外線波長域での観測のみによって決める場合、天体表面のアルベド（反射率）を仮定することによってサイズを決定している。それはこれらの天体が岩石や氷からなる固体天体であり、可視光・近赤外線領域においては太陽放射を直接反射して光っているからである。

1.1 可視光観測による大きさ決定の不確定性

今、Vバンドで小惑星を測光観測したとしよう。ここから得られる測光値はおおまかに言って

天体の有効半径で決まる幾何学的断面積にアルベドをかけた量に比例する¹⁾。よってアルベドを仮定することによってサイズを求めることができる。一般に小惑星のサイズ分布を議論した論文ではこの例のように可視の測光値によってサイズを決めているのが普通である。

しかしながらこの仮定の部分がくせものだ。氷天体を例にすると、彗星核においては探査機ジオットが直接測定したハレー彗星核のアルベドの0.04という値から、今日ではカイパーベルト天体の一つとも言われることもある最遠の惑星、冥王星では約0.6（場所によって異なる）、さらには土星を周る氷衛星などにはほぼ1.0の値を持つものがいくつか存在する。こうなると、アルベドはもともと個体差の大きな不定パラメータであるはずで、それを一意に仮定することによって求められた天体のサイズには大きな不定性がありえるということになる。

1.2 熱観測による大きさの決定

そこで登場するこの困難を打開する方法が、中間赤外線からミリ波長帯に至る波長領域における「熱観測」である²⁾。可視光での測光観測に加え、赤外線（または電波）での熱放射フラックスの測

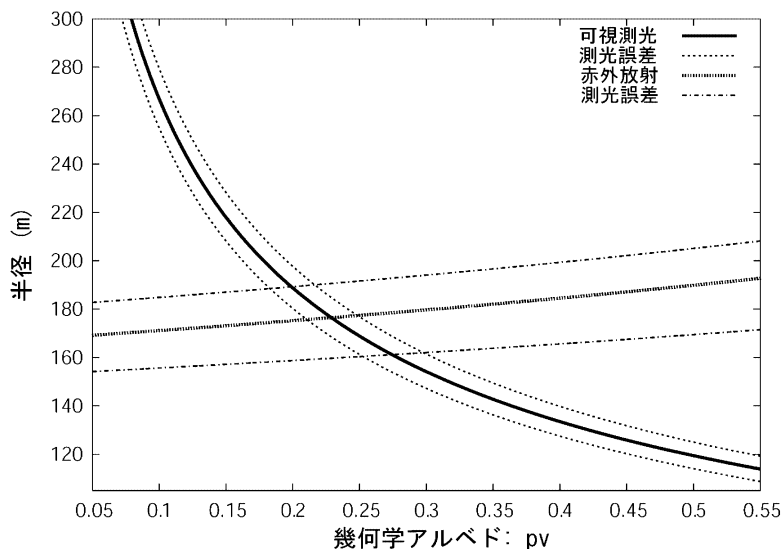


図 1 熱観測と可視光観測による天体サイズと幾何学的アルベドの導出の例. ESO 3.6 m 望遠鏡を用いて中間赤外線 (N バンド) 観測を行い, 小惑星探査機はやぶさのミッションターゲット小惑星 Itokawa の半径 $r=176 (+14/-16)m$, アルベド $pv=0.23 (+0.07/-0.05)$ が求められた³⁾.

定によって, 太陽系小天体のサイズとアルベドを同時に決定することが可能になる. 今, 二つの異なる物理過程による放射の観測を行うとしよう.

一つは可視の太陽光反射光であり, もう一つは太陽光によって熱せられた小惑星が, その有効温度において発する熱放射である. それぞれの観測結

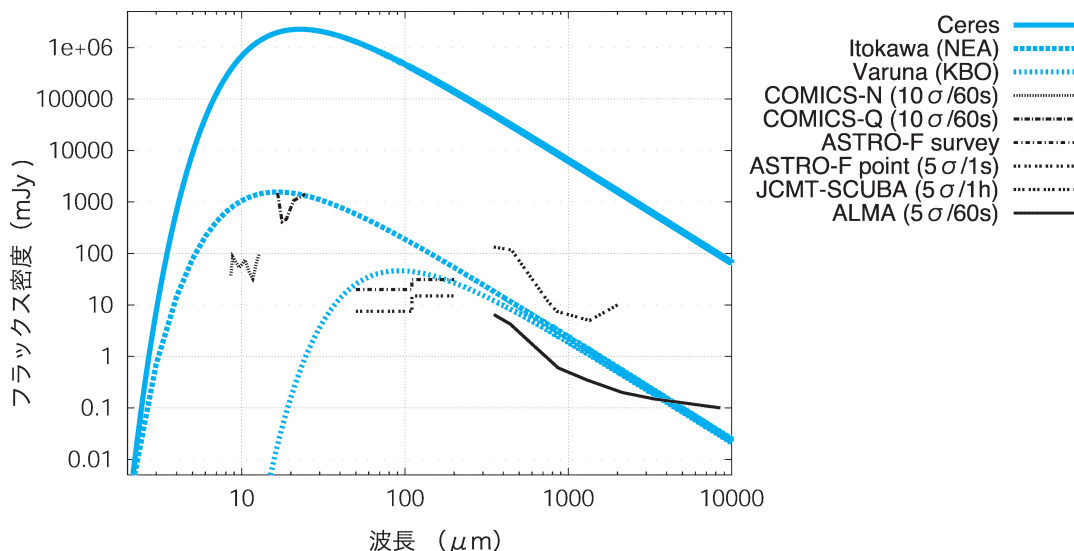


図 2 太陽系小天体の熱フラックス見積もりと観測装置感度. 最大の小惑星 Ceres, はやぶさミッションターゲット Itokawa, カイパーベルト天体 Varuna のスペクトルエネルギー分布が曲線として描かれている. 折れ線はすばる COMICS の 60 秒積分での感度, ASTRO-F のサーベイモードと 1 秒積分でのポインティングモード感度, JCMT のボロメータの 1 時間積分感度, ALMA での 60 秒積分感度を表す.

果から得られるサイズとアルベドの関係曲線を描けば (図 1), その交点が両者の求める解となる。

2. 小天体のスペクトルエネルギー分布

図 2 に太陽系小天体の波長に対する熱フラックスの見積もり (スペクトルエネルギー分布) と実際の観測装置の感度との対応を示した。COMICS-N, COMICS-Q はそれぞれ 10 ミクロン帯, 20 ミクロン帯でのすばる COMICS での 60 秒積分 10 σ 検出感度を表す。(エネルギー分布曲線が重なっていることはプランク関数で表される黒体放射の基礎概念に一見反するような印象を与えるが, それぞれの天体グループに対して, 固有の熱モデルを適用していることに注意していただきたい。)

図 2 を見ると Ceres (惑星間隔を表す「チチウス=ボーデ則」を生んだ要因でもある, 小惑星帯最大の小惑星) は当然ながら中間赤外線域からミリ波領域においても際立って明るい。またこの図で注目したいのはフラックス密度のピーク波長である。小天体はそれぞれの表面有効温度で熱放射をしており, その有効温度は第一義的には太陽からの距離によって決まる。そして近地球型小惑星のように太陽から 1 AU 程度の距離に近づく天体の場合は表面温度はちょうど地球程度となるため, ピーク波長は N バンドから Q バンドのあたりとなり中間赤外線での地上観測が有効である。近地球型小惑星はどれも非常に微小であるが地球に近づいた際には明るくなり観測好機になる。小惑星 Itokawa の観測はこのようにして行われた。

3. はやぶさ探査機の目標小惑星 Itokawa の大きさ測定

たかだか数百 m (!?) の大きさの天体でも地球に近づけば観測可能なのだ。われわれはすばる COMICS に先駆け, ヨーロッパ南天天文台 (ESO) の 3.6 m 望遠鏡の中間赤外線装置 TIMMI2

を用いて, 日本人グループとしては初めて小惑星の中間赤外線観測を行い, 近地球小惑星: 25143 Itokawa (1998SF36) の大きさを観測した^{3), 4)}。

Itokawa は 2003 年 5 月 9 日, 当時の宇宙科学研究所 (現 JAXA) が打ち上げた小惑星探査機「はやぶさ」(MUSES-C) が目指す天体であるが, 事前に目標天体の大きさを知ることができたことはサンプルリターンミッションにおける観測機器やサンプラーなどの最終決定に色濃く反映された。これは, 正に天体観測と宇宙開発との協調作業と言えよう。

4. 赤外線, サブミリ波における標準天体としての小惑星

以上のように小惑星のサイズ, アルベドといった基本物理量の測定には赤外線熱観測が不可欠である。実際, Ceres をはじめ, メインベルト (小惑星帯) にある明るい小惑星は赤外線衛星 IRAS や最近では MSX 衛星などによってサイズ測定が精密になされ, 地上からも N バンド Q バンド, サブミリ波ミリ波の大気の窓において熱観測が数多くなされてきた。

ここで思考を転換しよう。これら明るい小惑星はサイズ, アルベドはもとより, 熱モデルパラメータがしっかり決定されている。つまりこのような天体では日時を指定することによって距離と自転位相を決めてやれば, 正確にフラックスを予測できる点光源天体とみなせる (Ceres が最も大きく見えるときでも 1 秒角にはならない。一般の小惑星はほぼ点光源である)。このことから遠赤外線衛星 ISO では小惑星がフラックス校正天体として採用されており⁵⁾, また日本の遠赤外線衛星 ASTRO-F においても積極的に用いられることになりそうである (筆者は ASTRO-F キャリブレーションチームの一員でもある)。

ところでなぜ明るい惑星を校正天体に採用しないのかをここで述べておく。惑星はとても明るいので良い S/N 比を稼げるはずである。しかし外

惑星はすべて大気を持つため大気を持たない固体天体に比べ、その熱モデルはとて複雑で、しかも大気大循環を考える場合、温度が一意に決めにくい。火星のダストストームの前後による表面温度の変化や最近では海王星にも季節が存在することが知られ、ますます分が悪くなりつつある。しかも赤外線衛星において、惑星は明るすぎて、検出器が飽和してしまったり、さらに悪いことにはせっかく打ち上げた重い冷却材を消費させる可能性も指摘されている。一方、サブミリ波のようにミリ波に比べビームサイズが小さくなる場合では惑星はもはや点光源ではなく面光源として分解されてしまいかねない。それゆえフラックス校正の標準天体に小惑星が採用されるようになりつつあるのだ。

5. まとめ

ここでは太陽系小天体の基礎物理量である大きさ、アルベドを求めるためには赤外線観測が不可欠であることを述べた。小天体における天体表面物質の熱慣性にかかわる科学的重要性には触れなかったのだが、一方では熱モデルパラメータのよく決まった小惑星に対してはフラックス校正天体としての役目も持つことを紹介した。

参考文献

- 1) Sekiguchi T., et al., 2002, A&A 385, 281
- 2) Harris A. W., Lagerros J. S. V., 2002, in Asteroids III, 205
- 3) Sekiguchi T., et al., 2003, A&A 397, 325
- 4) Ishiguro M., et al., 2003, PASJ 55, 691
- 5) Mueller T. G., Lagerros J. S. V., 2002, A&A 381, 324

Mid-IR Thermal Observations of Minor Bodies in the Solar System

Tomohiko SEKIGUCHI

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588

Abstract: Thermal observations in Mid-IR wavelength allow us to derive both of size and albedo of minor bodies in the solar system. Well-studied asteroids have been used extensively as calibration sources for the infrared satellites and are planned to be used by future groundbased, airborne and space-based projects in the thermal infrared