

多様なカタログデータから見えてくる小惑星帯の姿

臼井 文彦¹⁾・長谷川 直¹⁾・春日 敏測²⁾・石黒 正晃³⁾・黒田 大介⁴⁾・大坪 貴文⁵⁾

¹⁾ ISAS/JAXA ²⁾ 国立天文台・天文情報センター ³⁾ ソウル大学
⁴⁾ 国立天文台・岡山天体物理観測所 ⁵⁾ 東北大学

Studying properties of asteroids based on several astronomical catalog data

Fumihiko USUI¹⁾, Sunao HASEGAWA¹⁾, Toshihiro KASUGA²⁾, Masateru ISHIGURO³⁾,
 Daisuke KURODA⁴⁾ and Takafumi OOTSUBO⁵⁾

Abstract

The physical properties of asteroids are fundamental to understand the formation process of our planetary system. In particular, the size and albedo are the basic physical properties of the asteroid. One of the most effective methods for measuring size and albedo of asteroids is by radiometry with the space-borne infrared surveyor. Up to now, there are three infrared all-sky survey missions: IRAS, AKARI, and WISE. Compiling these three catalogs, sizes and albedos about 130,000 asteroids are obtained. Combining with the known taxonomic information, a wide variety of asteroids in the main belt regions is revealed.

Key Words: catalogs – infrared: planetary systems – minor planets, asteroids: general – space vehicles – surveys

1 小惑星を特徴づけるさまざまなデータ

小惑星を特徴づけるパラメータとしては、軌道、大きさ、質量、温度、組成、表面状態などが挙げられます。既知の小惑星については、軌道要素から、時刻を指定すれば位置は特定できます。それに対して、小惑星の大きさは、歴史的にもさまざまな手法で測られてきていますが、それでも大きさのわかっている小惑星はそれほど多くありません。これは、(a)小惑星は知られているだけでも60万個以上存在していること、(b)小惑星が名前通り「小さい」天体であること、(c)可視光で見た小惑星の明るさは大きさと反射率(アルベド)の関数であり、短波長の地上観測だけではそれぞれを単独に求められないこと、が理由になっています。探査機によるその場計測やサンプルリターンができる時代であっても、もっとも基本的な物理量である小惑星の大きさを求めるということは重要なテーマです。また、小惑星の「色」については、可視や近赤外の観測からS、C、X、D、Vなどに分類が行われています。

2 赤外線サーベイ衛星による小惑星のサイズ測定

2.1 赤外線サーベイ衛星

ここでは、小惑星の大きさを求める方法として赤外線サーベイ衛星を使ったものを採用します。これは、中間赤外線の観測データと、可視観測に基づいた絶対等級を組み合わせることで、小惑星の大きさとアルベドを一意に求める方法です。詳細については本研究会

集録「あかり指向観測モード I R C スロースキャンによる小惑星観測」長谷川他、などをご参照ください。

さて、これまでに小惑星観測を行った赤外線サーベイ衛星としては、1983年に打ち上げられたIRAS¹⁾、2006年に打ち上げられた「あかり²⁾」、そして2009年に打ち上げられたWISE³⁾があります。他にも、Midcourse Space Experiment (MSX)、Infrared Space Observatory (ISO)、Spitzer Space Telescope、Herschel Space Observatoryなどの赤外線天文衛星が小惑星観測を行っています。IRAS、「あかり」、WISEは、全天

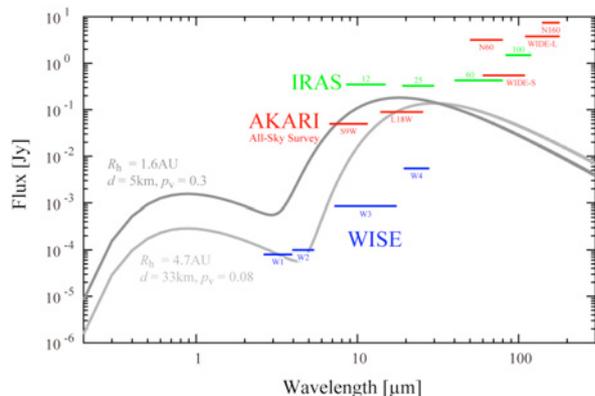


図1 モデル化した小惑星のスペクトル。近地球型と木星トロヤ群の天体のものを例示した。ここでは単純化して太陽反射光成分(可視光)と熱放射成分(赤外線)の2つを描いている。IRAS¹⁾、「あかり⁴⁾」、WISE³⁾の検出限界も付記した。

表1 赤外線サーベイ衛星による小惑星カタログ

	極低温 冷却期間	小惑星カタログ	収録天体数
IRAS	287日間	Supplemental IRAS Minor Planet Survey: SIMPS http://sbn.psi.edu/pds/resource/imps.html	2470天体
あかり	490日間	Asteroid catalog using AKARI: AcuA http://darts.jaxa.jp/ir/akari/catalogue/AcuA.html	5120天体
WISE	267日間	WISE/NEOWISE (preliminary version)	13万天体以上

サーベイを行っているので、幅広い範囲に分布する小惑星のデータを網羅するには適した観測方法と言えます。

図1に、単純化した小惑星のスペクトルの例を示しました（実際には小惑星のスペクトルは鉱物の吸収など細かいフィーチャーを持っています）。これに赤外線サーベイ衛星の感度も描きました。「あかり」はIRASより感度と分解能が向上しています。WISEは検出器と複雑な光学系を組み合わせることにより、観測波長は近赤外から中間赤外線の範囲に限られますが、検出限界が格段に向上しています。

検出限界に加えて、全天サーベイ観測を行っていた期間によって小惑星の検出個数というのは変わってきます。IRASは287日、「あかり」は490日、WISEは267日の極低温運用を行いました（日本は衛星軌道上における冷凍機に関しては世界トップの技術を持っていて、それによってサーベイ期間が他の衛星に比べて長いという特徴があります⁷⁾）。その後も「あかり」は冷凍機、WISEは放射冷却によって観測運用を継続しましたが、小惑星の熱赤外観測は主に中間赤外線を用いるので、使えるサーベイ観測の期間は極低温運用の範囲内になります。WISEは放射冷却による近赤外線の観測だけから小惑星のサイズデータを提示していますが、少し特殊な処理を行っているようです⁸⁾。

2. 2 赤外線サーベイ衛星による小惑星のサイズ・アルベド カタログ

これらの赤外線サーベイ衛星による観測データをもとに、IRAS、「あかり」、WISEでそれぞれ小惑星カタログが作られています（表1）。IRASは赤外線衛星を用いた方法ではパイオニア的存在⁹⁾、「あかり」はさらにサンプル数を増やすことに成功¹⁰⁾しています。WISEは今の段階では暫定版として論文のオンライン・テーブル¹¹⁾⁻¹⁷⁾でしかデータは見られませんが、2年後には一般公開が予定されています。これらの小惑星の検出数を比較すると、図2のようになっています。WISEは検出限界が深いおかげで圧倒的な検出数を誇っていますが、それでもIRASや「あかり」でしかカバーできていない天体があることがわかります。これは、小惑

星が移動天体で、典型的にはメインベルト内側の小惑星を網羅するには最低1年間の連続したサーベイが必要なためです。

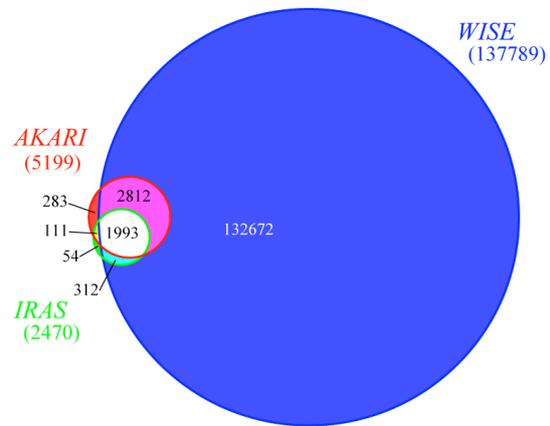


図2 赤外線サーベイ衛星による小惑星カタログの収録天体数の比較。3衛星のデータを合わせると138,237天体のサイズ・アルベドのデータが揃うことになる。なお、3衛星共通して検出しているのは1,993天体である。

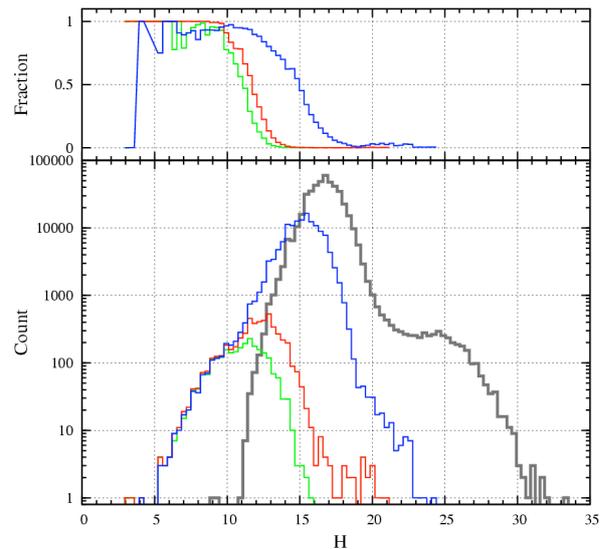


図3 赤外線サーベイ衛星で検出した小惑星の絶対等級のヒストグラム。下は絶対数、上は検出した総数に対する割合を表す。緑：IRAS、赤：「あかり」、青：WISE、灰：未検出天体。

図3は検出した小惑星の絶対等級のヒストグラムを表したものです。3衛星のデータを合わせると、11等までの既知の天体はほぼすべてサイズ・アルベドが測られていることがわかります。これはメインベルトにおいて15km以上の天体に相当します。ここで、WISEは観測期間が足りなかったために明るい天体でも取りこぼしがあるのに対して、「あかり」は9等までは100%カバーできている¹⁸⁾点は注目したいところです。

検出限界について、小惑星の大きさと日心距離の関係を見ると図4のようになっています。地球近傍では1km以下の天体も検出できていますが、5AU以上の木星トロヤ群付近では検出限界の深いWISEをもってしても10km程度までしか観測できていないことがわかります。ちなみに(1)Ceresは軌道長半径 $a=2.77$ AUに位置していて、これはIRASと「あかり」で検出されています。図4右端($a=5.73$ AU)の赤い点は、彗星・小惑星遷移天体の1つと考えられている(944) Hidalgoを表します。

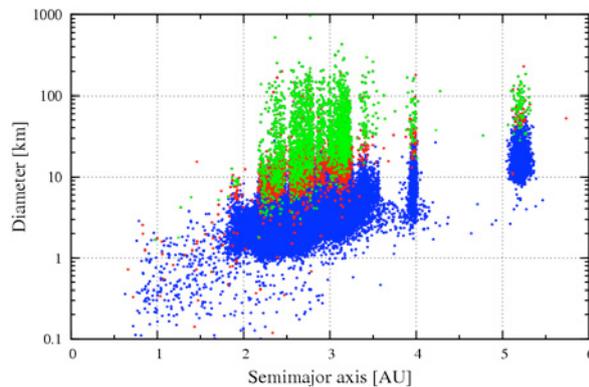


図4 小惑星の日心距離（軌道長半径）と求められた小惑星のサイズの関係。緑：IRAS、赤：「あかり」、青：WISEによるもの。検出限界のために遠方に行くほどサイズの大きい天体しか検出できなくなることがわかる。

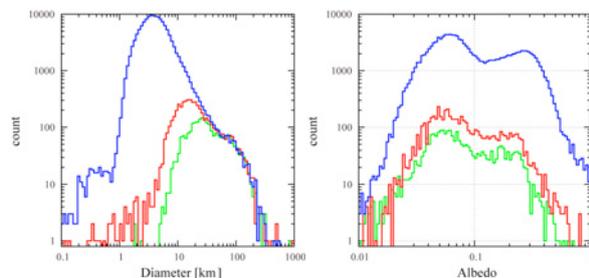


図5 3衛星によるサイズ（左）とアルベド（右）のヒストグラム。緑：IRAS、赤：「あかり」、青：WISE。

検出されている小惑星のサイズとアルベドをヒストグラムにすると図5のようになっています。検出限界の向上に伴って、IRASで23km程度までカバーしていたものが、「あかり」では15km、WISEでは4kmのものまで十分に検出できています。アルベドについては、分布に2つのピークがあることは以前から知られていました¹⁹⁾が、ここでもその傾向は確認できます。

3 小惑星のスペクトルタイプ分類

次に、これらのサイズ-アルベドデータに、小惑星のスペクトルタイプの情報を追加して考えてみます。スペクトルタイプについては、いくつかの分類方法があります²⁰⁾⁻²³⁾が、ここではこれらをまとめて、S、C、X、D、Vの5つのタイプで考えることにします。ただし、スペクトルタイプはサーベイ衛星のような手法で網羅的にデータを集めるのが難しく、既知の小惑星約60万個のうち、まだ1割程度しかわかっていません。また、特定の小惑星族のメンバーや、地上から見たときに明るい天体などに集中してデータが取られているため、必ずしも均質なサンプルにはなっていないことにも注意が必要です。

さて、これらのタイプ情報にサイズ-アルベドデータを組み合わせます。サイズ-アルベドが測定された小惑星は上述のとおり約14万天体ありますが、スペクトルタイプがわかっているのはそのうちの19%、約26,000天体です。これらについて、タイプごとのサイズ-アルベド関係を示したのが図6になります。図5で確認できたアルベドの高いグループと低いグループは、それぞれS型とC型に相当していることがわかります。ただし、サイズが小さくなるとアルベドの分布に広がりが出てくる傾向にあることが分かります。このような多様性についていくつかの議論¹⁰⁾がありますが、現在さまざまなフォローアップ観測を実施し、その原因を追究しているところです。

また、ここからタイプごとにアルベドの平均値を求めることもできます。従来、詳細な観測データが与えられていない小惑星についてはアルベドを0.1と仮定してサイズを推測することが行われていましたが、これからはより現実的なアルベドの傾向を与えることができるようになります。

ただし、ここでも観測バイアス、すなわちデータに系統的な偏りがあることに気をつけなければいけません。図6の分布を見てみると、サイズが小さくてアルベドが低い、つまり各図の左下の方向にはデータ点がほとんど見られませんが、これは現実を反映したものではないと思われます。この範囲は小惑星が暗く検出されにくいためデータが欠けているだけであって、現実には未検出の存在しているのだと考えられます。

4 まとめ

現在までに、軌道が既知の小惑星が60万個以上発見されています。これらのうち、赤外線サーベイ衛星によって約14万天体のサイズ-アルベドが求められました。一方、スペクトルタイプの分かっている小惑星は6万個あり、これらを組み合わせると、約26,000個の小

惑星について、位置・サイズ・アルベド・スペクトルタイプの情報が揃ったこととなります。これらの分布から、小惑星の多様性が見えてきつつあります。さまざまな観点からこれらのデータを用いることで、さらなる太陽系小天体の研究が発展することが期待されます。

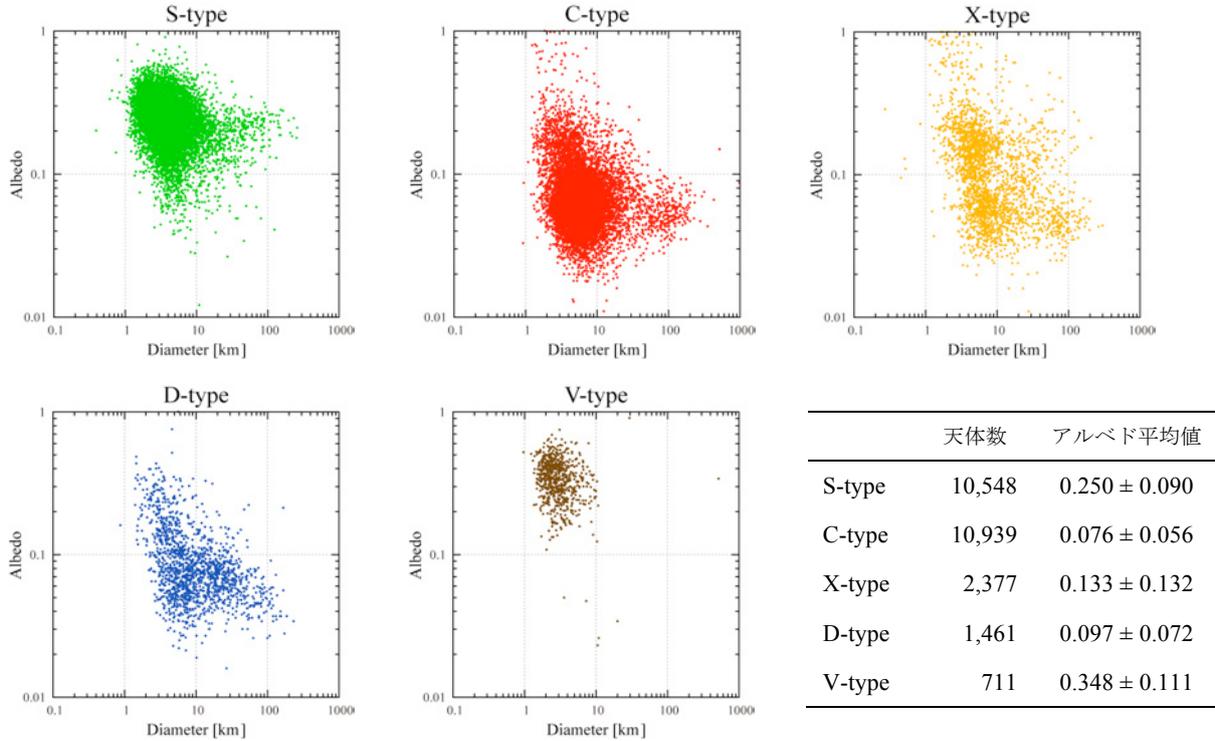


図6 スペクトルタイプごとのサイズ-アルベドの関係。赤外線サーベイ衛星でサイズ-アルベドが求められた 138,237 天体のうち、タイプが同定されている 26,036 天体について示した。各タイプのアルベド平均値も示した。

参考文献

- 1) Neugebauer, G., et al. 1984, ApJ, 278, L1
- 2) Murakami, H., et al. 2007, PASJ, 59, S369
- 3) Wright, E. L., et al. 2010, AJ, 140, 1868
- 4) Ishihara, D., et al. 2010, A&A, 514, A1
- 5) Yamamura, I., et al. 2010, AKARI/FIS All-Sky Survey Bright Source Catalogue Version 1.0 Release Note
- 6) Mainzer, A., et al. 2011, ApJ, 731, 53
- 7) Nakagawa, T., et al. 2007, PASJ, 59, S377
- 8) Mainzer, A., et al. 2012, ApJ, 760, L12
- 9) Tedesco, E. F., et al. 2002, AJ, 123, 1056
- 10) Usui, F., et al. 2011, PASJ, 63, 1117
- 11) Mainzer, A., et al. 2011, ApJ, 743, 156
- 12) Mainzer, A., et al. 2012, ApJ, 752, 110
- 13) Masiero, J. R., et al. 2011, ApJ, 741, 68
- 14) Masiero, J. R., et al. 2012, ApJ, 759, L8
- 15) Grav, T., et al., 2011, ApJ, 742, 40
- 16) Grav, T. et al., 2012, ApJ, 744, 197
- 17) Grav, T., et al., 2012, ApJ, 759, 49
- 18) Usui, F., et al. 2013, ApJ, 762, 56
- 19) Chapman, C. R., et al. 1975, Icarus, 25, 104
- 20) Tholen, D. J. 1984, PhD thesis, Arizona University
- 21) Bus, S. J., & Binzel, R. P. 2002, Icarus, 158, 146
- 22) Lazzaro, D., et al. 2004, Icarus, 172, 179
- 23) Carvano, J. M., et al. 2010, A&A, 510, A43

(2013年1月14日受付, 2013年1月25日受理)