近赤外線二色図による小惑星スペクトル型の定量的判定

神山 悠翔¹, 井上 昭雄^{1, 2}

2020年2月25日受領, 査読を経て2020年8月14日受理

(要旨)小惑星はその反射スペクトルの形によって複数のタイプに分類され、組成の統計的な調査によっ て小惑星の起源や太陽系進化に関する情報が得られる.しかし、厳密なタイプ分類には分光観測が必要 であり、これまで発見されている小惑星のうちタイプが判明しているものはごく一部に過ぎない.よって、 本研究では近赤外域のJHK_Sバンドの測光値から簡易的かつ定量的にスペクトル型を判定する方法を提 案する.2MASSの小惑星カタログを利用して、近赤外線二色図上におけるタイプごとの分布を二次元正 規分布でモデル化し、各点における確率密度を計算することでタイプの判定と評価を行う.開発した判定 法を用いてタイプが未知あるいは不明瞭な2799件の小惑星についてタイプ判定を行い、判定法の信頼性 を多角的に検証した.

1. 序論

1.1 小惑星スペクトル分類の意義と歴史

小惑星とは、太陽の周りを公転する天体のうち、 惑星や衛星,彗星などを除いたもののことである.主 に火星と木星の間に多く分布しており、2020年1月現 在までに85万個を超える小惑星が発見されている. 小惑星の起源は、太陽系初期における惑星形成の 段階で惑星に成長しきれなかった微惑星や原始惑 星の残骸だと考えられており、その性質を調べるこ とは、太陽系形成のプロセスを理解することに繋が る.

小惑星は太陽光を反射することで輝き、その反射 スペクトルは様々な形を呈する.反射スペクトルの違 いは小惑星の表面組成の違いを反映しており、地上 で採取できる鉱物や隕石のスペクトルと対応させる ことで、炭素質や岩石質など様々な組成の小惑星が 存在することが明らかになっている.このような組成 の違いは、小惑星が誕生する際の環境の違いに起 因しており、たとえば炭素質の小惑星は分化を経験 しておらず、原始太陽系円盤の元素組成を保存して いるとされる.小惑星のスペクトル分類によってその 小惑星自体の性質や起源だけでなく、それらの統計 的な情報から、原始太陽系円盤における物質移動 や、惑星への物質供給などを理解する手掛かりが得 られる[1].

小惑星をその反射スペクトルによって分類すると いう試みは1970年代に始まったが、この分野を最初 に体系づけて確立したのはTholenによる分類[2] である. Tholenは、主成分分析という手法を用い て小惑星のスペクトルを14のタイプに分けた. 主成 分分析では、複数の観測値の線形結合のうち、デー タセットの分散を最大にするものを第1主成分とし、 第1主成分に直交するという条件のもとで分散を最 大にするものを第2主成分とする. このようにして分 散が最大となるよう構成された主成分の組は、観測 対象の多様性を最もよく反映した直交基底である と考えられる. Tholen分類では、小惑星を可視域

^{1.}早稲田大学理工学術院先進理工学部物理学科 2.早稲田大学理工学術院総合研究所 kamiyan.quiz@toki.waseda.jp

の8つのバンドで観測したEight-Color Asteroid Survey (ECAS)をもとに主成分を構成し、それら を軸とするプロットを分析して小惑星を分類した。

Tholen分類から派生して, Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey の Phase II (SMASSII)をもとにしたBus分類[3]が考案され た. Tholen分類は測光観測に基づいた分類であっ たが, Bus分類ではより詳細な分光観測に基づいて おり, Tholen分類をさらに細分化しただけでなく, K型, L型, O型といったカテゴリーが追加されてい る. さらに, 2009年にはBus分類を近赤外域に拡張 したBus-DeMeo分類[4]が考案され, 近年広く使わ れるようになっている.

1.2 本研究の目的

小惑星スペクトル型を厳密に判定するには,小惑 星の分光観測が必要であり,比較的長時間の観測を 必要とする.そこで本研究では,近赤外線3バンド (JHK_Sバンド)による二色図を用いたより簡易的な 判定法を開発する.近赤外域では,2 µm付近に幅 広い吸収帯を持つS型やV型,1.0 µmから1.7 µm にかけて急激に反射率が上がるA型といったタイプ が容易に判別できると期待される.また,国内の西 はりま天文台などでは近赤外線3バンド同時測光が 可能であり[5],観測が短時間で済むことで天球上を 素早く移動する天体の分析が容易であるほか,小惑 星の自転による光度変化の影響を受けることなく測 光することができるという利点がある.

JHK_sバンドを用いた小惑星分類は古くから行 われており、Leakeほか[6]やVeederほか[7,8]に よるものがある.本研究では1997年から2001年に かけて実施されたTwo Micron All-Sky Survey (2MASS)による豊富な測光データ[9]、および長年 蓄積されてきた多数の小惑星タイプカタログを利用 し、二色図上での分布を統計的に分析することで、 より定量的かつ信頼性の高い分類を行う.2MASS の成果を利用した研究としては[10]があり、A、C、 D、S型の小惑星が近赤外線二色図上でどのように プロットされるかを示している.この二色図を参考に して、逆にタイプが未知の小惑星のタイプ判定を行 うことが考えられるが、4タイプに限られている上、直 線的な区域分けは便宜的すぎて実用には難しい、本 研究はこの二色図の区域分けを改良し,実用的なタ イプ判定が可能な程度に信頼性を高めたいという動 機から出発している.具体的には,判定可能なスペク トル型を増やし,正規分布モデルによって数学的に タイプごとの境界を定め,判定の信頼性を定量的に 評価できるようにする.また,[10]ではタイプが既知 の小惑星について分析をするに留めているが,本研 究では[9]に記載された小惑星のうちタイプ未知のも のについてのタイプ判定も行う.

近年における類似の研究としてはPopescuほ かによるMOVIS-C分類[11, 12]がある.これは VISTA Hemisphere Survey (VHS)で得られた 近赤外線4バンド(YJHK_Sバンド)の測光データを, Bus-Demeo分類と照らし合わせたのちに,近赤外 域のスペクトルに基づいた新たな分類を開発したも のである.YJHK_Sバンドを同時撮像できる観測装 置は限られており,本研究の方がより簡便な手法と言 える.

2. データの取得

2.1 2MASS Asteroid and Comet Survey

NASA Planetary Data Systemから[9]を取 得し, その中に含まれる2MASS小惑星カタログ (ast_ext2mass.tab)を利用した.2MASS小惑星 カタログは40859行×63列からなる.各列には小惑 星番号,固有名,仮符号,J(1.25 μ m),H(1.65 μ m), K_s(2.17 μ m)の3バンドのベガ等級値と測光誤差を はじめとして,測光の信頼性を表す様々なフラグや, 観測した小惑星の位置に関する情報などが含まれて いる.まず,カタログのフラグ情報に基づき,以下の 4つの条件に従って信頼性の高いデータのみを抜き 出した結果,40859件のデータから8468件を抽出し た.

・RELIABILITY_FLAG: "A"のみ

- 2MASSの天体検出の信頼性を表すフラグで、"A" はprobability of source validityが90%より大 きいと推定されたものにあたる.
- ·RD_FLG: "1", "2", "3"のいずれかのみ
 各バンドについて既定の等級値と誤差の起源を表

す読み取りフラグで、"1"~"3"が一般に品質の高い検出・測光であると説明されている。

・CC_FLG: "0"のみ

各バンドについて近くにある別光源の光が測光に混 入した可能性を表すフラグで、"0"は測光値が既知 の別天体による悪影響を受けていないことを表す. ・PH QUAL: "A"、"B"のいずれかのみ

RD_FLGや測光誤差などの情報から総合的に決 定される各バンドの測光品質を表すフラグで、"B" 以上は有効な検出が行われた範囲で各バンドの SN比が7より大きく、誤差が0.15510等級より小さ いことを示す。

この時点で縦軸J-H, 横軸H-K_sの二色図を描く と,他の大多数の小惑星に比べて異常に赤化した小 惑星が見られた.そして,これらの赤化した小惑星 は銀河系中心方向に集中していることが分かった. 銀河系中心方向は背景の恒星密度が高く,小惑星と 重なる確率が高くなる.恒星は銀河面の星間塵によ る赤化を受けるため,これが小惑星の測光に混入し て異常に赤化したと考えられる[13].[9]の付属文書 (IV.9.b.)では赤化したデータを取り除くため,可視 光で予想される明るさが17等より明るく,小惑星の 予測位置と2MASSの光源位置の誤差が1秒角より 小さいという条件を付けている.しかし,この手法 では赤化汚染されていない多くのデータも取り除か れ,有効なデータが約3分の1しか残らない.そこで, 本研究では銀経 -40~40°を長軸, 銀緯 -20~20° を短軸とする銀河系中心方向の楕円領域で観測され たデータを取り除くこととした.結果として8468件か ら1292件が取り除かれ,約85%にあたる7176件が 残った.

2.2 タイプ既知の小惑星カタログ

2MASS小惑星カタログにはスペクトル型の情報 が含まれていないため、タイプ既知の小惑星カタロ グとして次の2件を取得した。

1つ目に, NASA Planetary Data Systemか らAsteroid Taxonomy[14]を取得した. これは TholenやBusなどによる8本の論文で発表され た小惑星タイプをまとめたもので, 2615個の小惑 星について記載がある. 本研究ではTHOLEN_ CLASS[15], SMASS_CLASS[16], BUS_ CLASS[3], S3OS2_CLASS_BB[17], BUS_ DEMEO_CLASS[4]の5つを参照した.

2つ目に, NASA Planetary Data Systemか らSDSS-based Asteroid Taxonomy[18]を取得 した. これはSloan Digital Sky Survey (SDSS) で観測された63468件の小惑星タイプを記載してい る. ただし, SDSSは可視域の5バンドしか測光して いないためタイプは推定値であり[19], 信頼性に基 づいてそれぞれ0~100のSCOREが付けられてい る. 本研究ではSCOREが60以上の10991件を参照 した.

本研究	BUS_DEMEO	BUSおよびS3OS2	SMASS	THOLEN	SDSS
А	А	А	-	А	А
С	B, C, Cb, Cg, Cgh, Ch	B, C, Cb, Cg, Cgh, Ch	С	B, C, F, G	C, CX
D	D	D	D	D	D
S	K, L, S, Sa, Sq, Sr, Sv, Sw	K, L, Ld, S, Sa, Sk, Sl, Sq, Sr	S	S	L, LS, S, SQ
V	V, Vw	V	J, V	V	V
Х	X, Xc, Xe, Xk	X, Xc, Xe, Xk	Х	Е, М, Р, Х	X, XL
Ο	0	Ο	0	-	-
Q	Q	Q	-	Q	Q
R	R	R	-	R	-
Т	Т	Т	Т	Т	-

表1: 各文献のタイプ分類と本研究におけるタイプの対応.

タイプ	個数	割合[%]	J-H平均	J-H分散	J-H参考	H-Ks平均	H-Ks分散	H-Ks参考
А	8	0.5	0.691	0.031	0.836	0.112	0.005	0.108
С	360	22.6	0.367	0.006	0.354	0.127	0.009	0.171
D	87	5.5	0.474	0.011	0.438	0.186	0.011	0.195
S	819	51.3	0.432	0.010	0.364	0.072	0.012	0.055
V	30	1.9	0.281	0.036	0.102	0.020	0.023	-0.043
Х	265	16.6	0.381	0.004	0.372	0.141	0.008	0.168
Ο	0	0	-	-	0.453	-	-	-0.085
Q	9	0.6	0.437	0.013	0.430	0.081	0.030	0.055
R	1	0.1	0.373	-	0.400	0.082	-	0.101
Т	17	1.1	0.431	0.004	0.367	0.151	0.008	0.153

表2: タイプが既知である1596個の2MASS小惑星の個数と色の概観。

平均/分散:本研究で利用する2MASSカタログのうち§3.2で得られた1596件の小惑星のタイプ別平均値および分散。 参考:Bus-DeMeo分類における各タイプの典型的な反射スペクトル[20]と太陽の色[21]をもとに算出した参考値.

3. データの解析

3.1 複数回観測された小惑星の平均処理

§2.1で抽出した2MASSの7176件のデータに ついて、複数回観測がある小惑星の色(J-Hおよ びH-K。の値)を平均した.小惑星1つあたりの観 測回数の平均は1.63回であり、最大値は(1528) Conradaの112回であった.小惑星は時間によって 明るさが変化するため,測光誤差(σ_{J-H}, σ_{H-Ks})には 色のばらつきと各バンド測光値の測光誤差を平方和 の平方根で合成した,平均処理によってデータ数は 4395件に減少した.

3.2 小惑星タイプカタログの編纂

2MASS小惑星カタログにはスペクトル型の情報 が無いため、まず§2.2で取得したカタログを集約し てタイプ既知の小惑星タイプカタログを編纂した.な るべく多くの小惑星タイプのデータを集めるため、複 数の異なるタイプ分類を参考としたが、その際、表1 に基づく変換対応を行った. Tholen分類などでは スペクトルが複数のタイプの性質を併せ持つ場合に 複数タイプを割り当てる(TCGやSTUなど)場合が あるが、今回それらは除外した、同じ小惑星につい て分類が重複した場合は、原則として表1で左側に ある分類を優先した.結果、13156件の小惑星のス

ペクトル型を収めた小惑星タイプカタログが完成し. §3.1で得た4395件を対応させたところ、うち1596 件がタイプ既知となった.

3.3 判定タイプの決定

表2にタイプ既知となった1596件のタイプごとの 内訳と、色の概観としてJ-HとH-K。の平均値および 分散に加え、先行研究による参考値を示す.参考値 はBus-DeMeo分類による平均的な反射スペクトル [20]から、太陽の色[21]を用いて算出した、平均値と 参考値を比べると、分散の大きいV型やA型のJ-H に差が見られ、分散の小さいところでもS型のI-Hが 参考値よりやや高くなっている. 個数比をみるとC. S. X型の数が特に多く、合わせると全体の90.5% を占める. C型とX型は非常に近い色を持っており二 色図上で区別できないため、本研究ではC型および X型の近傍に位置するグループを「C/X」としてまと めて評価する.数が多いC, S, X型を基準として, D 型は色が赤く、二色図上で右上に現れることが分か る. 逆にV型はJ-HとH-Ksがともに小さく、二色図 の左下に現れる、A型は個数こそ少ないが、I-Hの値 が極めて大きく、二色図上で容易に判別できる.Q, R. T型は個数が少ない上、C. S. X型の集まる密集 地に近接しており、二色図での判別は困難である。〇 型は該当する2MASSのデータが無く、判定は不可 能である.以上を踏まえ、本研究では小惑星を近赤 外色に基づき,「A」,「C/X」,「D」,「S」,「V」の5タ イプで判定する. 参照するタイプ既知のデータはQ, R, Tの27件を除外し, 1569件となる.

3.4 二次元正規分布によるモデル化

小惑星のスペクトル分類がその表面組成の違いを 反映しているという考えに立つならば、各タイプに典 型的な表面組成が存在しており、その組成に従った 典型的な反射スペクトルが存在するであろう.すなわ ち二色図上において、各タイプが各々の典型的な位 置を中心として、それぞれが独立して分布するので はないかと考える.本研究では、各タイプの分布を 二次元正規分布でモデル化して各点の確率密度を 計算し、各点においてどのタイプが優位なのかを判 定する.より良いモデル化を行うため、信頼性の高い データに以下の重みを付けることで、不確かさを含 むデータの寄与を減少させた.

・タイプの参照元による重みづけ		
Asteroid Taxonomy[14]		3倍
SDSS-based Asteroid Taxonomy	[18]	
SCORE: 80以上	•••••	2倍
SDSS-based Asteroid Taxonomy	[18]	
SCORE: 60以上		1倍
・測光誤差(σ_{J-H} , σ_{H-K_s})による重みづけ		
σ _{J-H} およびσ _{H-Ks} がともに0.100未満	•••••	4倍
$\sigma_{ ext{J-H}}$ または $\sigma_{ ext{H-K}_{ ext{s}}}$ のどちらかが 0.100 以	Ŀ.	
	•••••	1倍

一般にn次元の多変量正規分布の確率密度関数 f(x)は式(1)で表される.

$$f(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \sqrt{|\boldsymbol{\Sigma}|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})\right) \quad (1)$$

ここでμはn次元の平均ベクトル, Σはn×nの共分 散行列である. n=2の場合を展開すると,

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left(\frac{(x_1-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho \frac{(x_1-\mu_1)(x_2-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2-\mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right)\right\} (2)$$

となる. ここで σ は標準偏差, ρ は相関係数である. x₁をH-K_s, x₂をJ-Hとして, タイプ既知小惑星の 2MASSカタログで得た値から各タイプの平均(μ_1 , μ_2), 不偏標準偏差(σ_1 , σ_2), 相関係数(ρ)を求め, 式(2)から二色図上の各点における確率密度を計算 した.

分布の正規性の仮定を確認するために,数が多い C/X型とS型について正規確率プロットを調べた(図 1). 正規確率プロットとは,縦軸に観測値と平均値の 差を標準偏差で規格化した値を,横軸に対応する標 準正規分布の分位数をとったプロットである.結果, ±2σの範囲で直線のグラフが得られ,小惑星分布 の正規性がある程度確認できた.



図1: C/X型およびS型の小惑星における近赤外色の正規確率 プロット.

3.5 区域分け・閾値の設定

各点においてどのタイプの確率密度が最も高くな るかによって二色図の区域分けを行うが、そのまま だと分散の大きいV型などが予想される領域を超 え、観測値の少ない背景全体に広がってしまう.ま た、各タイプの確率分布は独立しており、それぞれ 確率の総和は1であるため、単純に比較すると観測 頻度の少ない珍しいタイプの領域が必要以上に広く なってしまう.そこで、次の2つの追加処理を施す.

1つ目に、タイプの存在比を区域分けに反映させる ため、タイプごとに確率密度の重みづけを行う.重 みづけの係数を決めるにあたっては、本研究で使っ ているデータが実際の小惑星のタイプ個数比を反映 しているとは限らないので、既知のタイプと判定タイ プの一致率がなるべく高くなるように定める.2つ目 に、既知データの98 %が判定されるように閾値を設 定し、全てのタイプで確率密度が閾値以下であるよ うな点は分類不能(タイプU: unclassifiable)として 扱う.したがって、データ全体の2 %がタイプUとな る(ただし、§3.4の重みづけを外すと誤差の大きい データの割合が増えるのでタイプUの割合は2 %よ り多くなる).

結果として、式(3)に見える重みづけ係数と閾値を 採用した際に一致率が71.5%となり、これを採用し た.各タイプの確率密度関数を f_{Type} として、二色図上 の点 (x_1, x_2) におけるタイプ判定Type (x_1, x_2) は式(3) に従う.

$$Type(x_1, x_2) = \begin{cases} A & (f_{max} = 2f_A) \\ C/X & (f_{max} = 27f_{C/X}) \\ D & (f_{max} = 10f_D) \\ S & (f_{max} = 18f_S) \\ V & (f_{max} = 11f_V) \\ U & (f_{max} = 15.3) \end{cases}$$
(3)

 $f_{\max}(x_1, x_2) \coloneqq \max \left\{ 2f_{\mathbb{A}}(x_1, x_2), 27f_{\mathbb{C}/\mathbb{X}}(x_1, x_2), 10f_{\mathbb{D}}(x_1, x_2), 38f_{\mathbb{S}}(x_1, x_2), 11f_{\mathbb{V}}(x_1, x_2), 15.3 \right\}$

3.6 スコアの設定

異なるタイプとの接続域においては判定の正解率

が低く, 逆に各タイプ域の中心付近では判定の正解 率が高くなると予測される. そこで, 正解率の目安と して式(4)で定義されるスコアを導入した.

 $Score(x_1, x_2) = \begin{cases} 0 & (Type(x_1, x_2) = U) \\ \frac{f_{max}}{2f_A + 27f_{C/X} + 10f_D + 38f_S + 11f_V + 15.3} & (otherwise) \end{cases}$ (4)

スコアは0から1未満の値を取り,1に近づくほどその 点(x₁, x₂)において判定されたタイプの確率密度が 支配的であることを示す.他の領域と隣接する場所 のスコアは0.5程度より小さくなる.

4. 結果と考察

4.1 近赤外線二色図の小惑星タイプ別分布

図2に完成した二色図の区域分けを示す. 各タイ プ別に見ていくと、A型はJ-Hが特に大きく、1.0 µm から1.7 µmにかけてのスペクトルの急激な傾斜を反 映している. ただし、A型は他のタイプと比べてサン プル数が少ないため、新たなデータの追加によって



図2: 近赤外線二色図の小惑星タイプ別分布. 各タイプの色の平均値および太陽の色[21]をプロットしている. 区域の形が比較的容易に変化することが予想され る. D型は密集地の右上を占めており, 右上がりの赤 いスペクトルを反映している. S型は密集地の左側を 占めており, H-K_Sが小さいことが分かる. C/X型は 数の多さに比して領域が狭く見えるが, 元々平坦な スペクトルであり色の分散が小さいためだと考えら れる. V型は2 μmに見られる吸収帯がJ-HとH-K_S の値を押し下げ, 図の左下に表れる. 数は少ないが 天体ごとにスペクトルのばらつきが大きいため広い 領域を占めており, 平均値はS型の領域に入ってし まっている.

Sykesほかの研究[10]と比べると、A、C/X、D、 S型の4タイプの領域はいずれもSykesほかの示した 領域をほとんど含むような形になっている. 左下には V型の領域が追加されている. また、領域の形は直 線的ではなく、自然な曲線形となっている.

図3に§3.6で設定したスコアの分布を示す.スコ アが0の点は黒く、スコアがより高くなるにつれてより 明るい白色で表示している.異なるタイプ領域との 接続域はスコアが低いため暗く、各領域の中心付近 はスコアが高いため明るくなっていることが分かる.



図3: スコアの分布.

4.2 正解率と測光誤差・スコアの関係

区域分けが完成したため、1569件のタイプ既知 小惑星について§3.4で施した重みづけを外した状 態でタイプ判定を行い、区域分けの信頼性を評価し た、1569件のうち、判定したタイプが既知のタイプと 一致したものは1000件であり、正解率は63.7%に留 まった、§3.4の重みづけを外したことで、§3.5で述 べた一致率71.5%からは低下している。

図4に測光誤差と正解率の関係を表したグラフを 示す.§3.4において測光誤差に基づく重みづけを 行ったが,閾値の前後で急激に正解率が変化すると いうことは無く,測光誤差の大きさにほぼ比例する 形で正解率が減少している.σ_{J-H}+σ_{H-Ks} < 0.05の



図4: 測光誤差と正解率の関係.

横軸に測光誤差σ_{J-H}とσ_{H-Ks}の和をとった積み上げヒストグ ラム. 判定タイプと既知タイプが一致した小惑星の個数と不 一致だった小惑星の個数を表す. 折れ線は一致した小惑星 の割合, すなわち各誤差階級における正解率を表し, 母数が 全体の1%に満たない階級については点線としている.





階級においては正解率86.5%となっており、十分に 測光誤差が小さいデータが得られれば、図2の区域 分けに基づいて信頼度の高いタイプ判定が行えると 言える.

図5にスコアと正解率の関係を表したグラフを示 す.スコアが0の階級はタイプUの数を表しているが, §3.4の重みづけを外したことで閾値の基準とした 2%より多くなっている.~0.4以上の階級において はスコアが大きくなるにつれて正解率が高くなってお り, §3.6での予測通り,スコアが判定タイプの信頼 性を表す尺度として機能することが分かる.

4.3 タイプ未知の小惑星のタイプ判定

§3.1で得た4395件の小惑星の2MASSデータの うち, §3.2でタイプ既知となった1596件を除いた 2799件についてタイプ判定を行った.表3に結果を 示す.

表2に示したタイプ既知の場合と比べると、全体の割合ではA, D, V型が多く、C/X, S型が少ないことが分かる.分類不能であるUの割合も14.5%と高い.そこで測光誤差が小さいものに絞って割合を見ると、Uの割合は6.0%にまで下がり、各タイプの存在比も既知のものに近づいている.唯一A型のみは既知と比べて5~6倍ほど存在比が多くなっており、近赤外域で特徴的なスペクトルを持つことから可視域での調査に比べて多く検出・分類される可能性や、他タイプの混入が考えられる.

表3: タイプ未知の小惑星のタイプ判定.

タイプ	個数	割合[%]	個数*	割合*[%]
А	66	2.4	13	3.2
C/X	730	26.1	122	30.3
D	287	10.3	32	8.0
S	1191	42.55	203	50.5
V	119	4.25	8	2
U	406	14.5	24	6.0
合計	2799	100.0	402	100

*測光誤差が小さい(σ_{J-H} + σ_{H-K_s} < 0.1)ものに絞った場合.

4.4 判定タイプの検証

本項では本研究における小惑星のタイプ判定に ついて,異なるタイプ分類法MOVIS-C分類[12]と の比較と,軌道分布およびアルベドの統計的な考察

MOVIS-C classification											
		Ad	Bk	С	Cgx	Xt	Ds	S	KI	V	計
	А	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	3 38%	4 50%	1 13%	0 0%	8
究(全て含む)	C/X	1	3 3%	17 18%	10 11%	7 8%	9 10%	34 37%	10 11%	2 2%	93
	D	2 8%	0 0%	2 8%	0 0%	1 4%	7 29%	11 46%	0 0%	1 4%	24
	S	1	7 4%	7 4%	16 _{9%}	2 1%	10 6%	110 _{64%}	15 9%	5 3%	173
本研	V	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	3 14%	3 14%	16 ^{73%}	22
	U	2 4%	1 2%	4 8%	4 8%	0 0%	7 14%	21 42%	3 %	8 16%	50
				MO	VIS-C	clas	sifica	tion			
		Ad	Bk	С	Cgx	Xt	Ds	S	KI	V	計
	А	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	1 100%	0 0%	0 0%	0 0%	1
本研究(信頼度高)	C/X	1 3%	0 0%	9 23%	6 15%	2 5%	6 15%	9 23%	4 10%	2 5%	39
	D	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	3 60%	1 20%	0 0%	1 20%	5
	S	0 0%	0 0%	1 2%	5 9%	0 0%	1	38 69%	8 15%	2 4%	55
	V	0	0 0%	0%	0%	0%	0%	0%	0 0%	3 100%	3
	U	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図6:本研究における判定タイプとMOVIS-C分類タイプの比較比較. 各行(本研究における判定タイプ)の合計に占める割合が 大きいほどセルの色を濃くしている.

を通して多角的に検証を加える.

MOVIS-C分類は近赤外域の4バンド(YIHK。 バンド)をもとに定められたタイプ分類であり、本研 究におけるタイプ分類と対応するとは限らないが、と もにBus-DeMeo分類を参考にしていることからお おまかな傾向は同じものと期待される. [12]から取 得したMOVIS-C分類カタログに記載のある18265 件の小惑星のうち、ClassFin(最終的な分類型)が U(分類不能)でない6495件を抽出した. このうち. §3.1で得られた2MASS小惑星4395件に含まれて いるものは370件であった.この370件について、本 研究での判定タイプとMOVIS-C分類タイプの対 応を調べ、図6にまとめた¹. 上段が判定した370件 全て、下段は370件のうち判定信頼度が高い103件 $(\sigma_{1-H} + \sigma_{H-K_o} < 0.15 かつスコア > 0.5) に絞った対応$ 表である. 全体的な傾向として, MOVIS-C分類に おいてもS型が約半数を占めており、本研究でA. C/X、D型と判定した小惑星の中にS型が数多く混 入している. この傾向は判定信頼度が高いグループ

¹370件の中にはタイプが既知の天体も127件含まれるが、ここで は既知タイプを参照するのではなく、本研究の判定法を用いた判 定タイプを参照した. ではやや和らいでいる. S型(S, K1型に対応)とV型 (V型に対応)はMOVIS-C分類との一致率が7割を 超えており,他のタイプと比べて判定の信頼性が高 いと考えられる. C/X型(Bk, C, Cgx, Xt型に対応) はMOVIS-C分類の4タイプの大半がC/X型に属し ている反面,本研究でC/X型と判定された小惑星 にはDs, S, K1型も多く含まれてしまっている. D型 (Ds型に対応)は数が少ないためS型の混入の影響 が大きいが,信頼度の高いグループではDs型と一 致する割合が大きくなっている. A型(Ad型に対応)は 十分な議論に足るだけの数が無いが,同じく赤いスペ



図7: 各タイプ別の軌道分布.

横軸に軌道長半径をとった積み上げヒストグラム. タイプ未 知の小惑星2799件については判定タイプを参照し, 信頼 度が高い($\sigma_{J:H}+\sigma_{H:K_S} < 0.15$ かつスコア>0.5)判定タイ プは濃い色,その他の判定タイプは薄い色で表す. タイプ既 知の小惑星1569件については既知タイプを参照し, 黒の折 れ線で表している. クトルを持つDs型が混入しやすい可能性がある.

次に、2MASSカタログ[9]に含まれる軌道要素の 情報から小惑星タイプごと(Uを除く)の軌道分布を 調べた(図7). 小惑星タイプごとの分布はDeMeoと Carryによる研究[22]が知られており、図7の既知タ イプの分布(折れ線)はこれによく従っている、すなわ ち、S型は小惑星帯の内側、C型は外側でそれぞれ 大多数を占める. D型は5.2 auのトロヤ群でほとん どを占めるが、小惑星帯にも散見される、V型は2.2 ~2.5 auのベスタ族に分布が集中しており、それら が過去の衝突によって生じた(4) Vestaの破片に由 来していることを示唆する[23]. A型はDeMeoほか の研究[24]によると小惑星帯全体にほぼ均等に分布 しており、これも既知タイプの分布と一致する、本研 究による判定タイプの分布を見ると、S型およびV型 は小惑星帯内側の2.2~2.4 auにピークを持っており 従来の研究によく一致している。C/X型は既知タイ プの分布と比べて小惑星帯内側の割合が多くなって おりS型の混入が疑われるが、S. V型に比べれば小 惑星帯外側の割合が多い. D型はトロヤ群の割合が 他タイプに比べるとやや多く見られるが、小惑星帯 内側まで多く分布しており他タイプの混入が著しい と考えられる。A型は小惑星帯全体に広く分布して おり、軌道分布の偏りから既知タイプとの差異を見つ けることはできない.

次に、赤外線サーベイ衛星のIRAS[25]、あか り[26], WISE[27-39]から得られたデータを参 照し、小惑星タイプごとのアルベド分布を調べた (図8). WISEで同一天体に複数のデータがある 場合はthermal fittingに使われた測定数(N W1~N W4)が多いものを採用した上で、あかり →WISE→IRASの優先順で採用した. §3.1で得 られた2MASS小惑星4395件のうち、アルベドの データが得られたのは3329件であった.小惑星の アルベドとスペクトル型の間には密接な関係があり. DeMeoとCarry[22]によれば各タイプの平均値は V型が0.35±0.01. S型が0.23±0.02. A型が0.20± 0.03と比較的明るく、C型が0.06±0.01、D型が0.06 ±0.01と暗い. 図8における既知タイプの分布(折れ 線)も、C/X型についてはX型を含んでいるため注意 が必要であるものの、先行研究によく従っている、本 研究で判定した判定タイプの分布を見ると、S型とV



図8: 各タイプ別のアルベド分布. 横軸にアルベドの対数をとった積み上げヒストグラム. 形式 は図7に準ずる.

型はほとんどが明るいアルベドを持っており,既知タ イプの分布とほぼ一致している.ただしアルベドが 0.1より暗いものも全体の2割程度存在しており,これ らについては他タイプの混入が疑われる.A型は既 知タイプと同様に0.3前後にピークが見られるが,0.1 以下の暗いアルベドを持つものが約4割存在し,同じ く赤いスペクトルを持つD型などの混入が考えられ る.C/X型とD型については,約半数が0.1以下の暗 いアルベドを持っており,ヒストグラムの形状も明る いタイプとは異なることが分かるが,残りの半数はS 型などが混入しているものと考えられる.

最後に観測バイアスについて述べる.可視~近赤 外域の波長では主に小惑星の太陽反射光を観測し ているため、サイズが小さい、アルベドが低い、遠方 にあるといった天体は検出されにくい傾向にある. 特に本研究では2MASSデータのうち品質の良いも のを選んでおり,近赤外域で15等前後より暗い天体 は僅かしか扱っていない.また,厳密なスペクトル型 分類に必要な分光観測では観測対象を事前に選定 しているため,観測しやすい天体が選ばれやすい傾 向がある.したがって図7,8から現実の小惑星分布 を考察する上では,本項で議論した判定法の妥当性 に加えてこれら観測バイアスの補正を検討する必要 があり,それは今後の課題である(cf.[22]).

5. 結論

小惑星の近赤外線二色図上での分布を二次元正 規分布でモデル化し、重みづけ等の適正な処理を 施した上でスペクトル型の区域分けを作成した.区 域分けに加えて信頼度の指標としてスコアを設定す ることで、近赤外線JHK_Sバンドの測光結果から定 量的に小惑星のスペクトル型を判定することが可能 となった.また、スペクトル型が未知・不明瞭である 2799件の小惑星について判定を行い、多角的な検 証を通して、S、V型では7~8割程度、C/X、D型で は4~5割程度の正解率で判定が可能であることを 確認した.A型については従来予想される数より多 く判定される傾向にあり、近赤外域での更なる調査 が必要である.

本研究で提案した判定法は従来のスペクトル分 類に比べて、必要とする測光値が少ないため短時間 の観測で済むほか、V型などの近赤外域で特徴的 なスペクトルをもつタイプの判定に適するといった利 点がある.C型とX型の判別については今後の課題 だが、本判定法は単独で用いるだけでなく、アルベ ドや軌道要素などの情報を合わせることでより有意 義なものになると考える。今後より多くの小惑星に ついてスペクトル分類がなされることで、太陽系形 成の理解や将来的な宇宙開発の一助となることが 期待される。

謝辞

本論文の執筆にあたり, 査読者の臼井文彦氏には 多くの有益なご意見をいただきました. この場を借り

改めて厚く御礼申し上げます.

This publication makes use of data products from the Two Micron All Sky Survey, which is a joint project of the University of Massachusetts and the Infrared Processing and Analysis Center/ California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration and the National Science Foundation. This research is based on observations with AKARI, a JAXA project with the participation of ESA. This publication makes use of data products from the Wide-field Infrared Survey Explorer, which is a joint project of the University of California, Los Angeles, and the Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration. This publication also makes use of data products from NEOWISE, which is a project of the Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, funded by the Planetary Science Division of the National Aeronautics and Space Administration.

参考文献

- [1] 廣井孝弘, 杉田精司, 2010, 遊星人 19, 36.
- [2] Tholen, D. J., 1984, Ph.D. thesis, Univ. of Arizona.
- [3] Bus, S. J. and Binzel, R. P., 2002, Icarus 158, 146.
- [4] DeMeo, F. E. et al., 2009, Icarus 202, 160.
- [5] Takahashi, J. et al., 2014, PASJ 66, 53.
- [6] Leake, M. et al., 1978, Meteoritics 13, 101.
- [7] Veeder, G. J. et al., 1982, Astron. J. 87, 834.
- [8] Veeder, G. J. et al., 1983, Astron. J. 88, 1060.
- [9] Sykes, M. V. et al., 2010, NASA PDS, EAR-A-10054/I0055-5-2MASS-V2.0.
- [10] Sykes, M. V. et al., 2000, Icarus 146, 161.
- [11] Popescu, M. et al., 2016, Astron. Astrophys. 591, A115.
- [12] Popescu, M. et al., 2018, Astron. Astrophys. 617, A12.
- [13] Sykes, M. V. et al., 2002, in Proc. Asteroids,

Comets, Meteors - ACM 2002, ed. B. Warmbein, ESA SP-500 (Noordwijk, Netherlands: ESA), 481.

- [14] Neese, C., 2010, NASA PDS, EAR-A-5-DDR-TAXONOMY-V6.0.
- [15] Tholen, D. J., 1989, in Asteroids II, ed. R. P. Binzel et al. (Tucson: University of Arizona Press), 1139.
- [16] Xu, S. et al., 1995, Icarus 115, 1.
- [17] Lazzaro, D. et al., 2004, Icarus 172, 179.
- [18] Hasselmann, P. H. et al., 2012, NASA PDS, EAR-A-I0035-5-SDSSTAX-V1.1.
- [19] Carvano, J. M. et al., 2010, Astron. Astrophys. 510, A43.
- [20] Slivan, S. M., Last modified 2019 Dec 14, http:// smass.mit.edu/busdemeoclass.html.
- [21] Casagrande, L. et al., 2012, Astrophys. J. 761, 16.
- [22] DeMeo, F. E. and Carry, B., 2013, Icarus 226, 723.
- [23] Binzel, R. P. and Xu, S., 1993, Science 260, 186.
- [24] DeMeo, F. E. et al., 2019, Icarus 322, 13.
- [25] Tedesco, E. F. et al., 2002, Astron. J. 123, 1056.
- [26] Usui, F. et al., 2011, PASJ 63, 1117.
- [27] Grav, T. et al., 2011, Astrophys. J. 742, 40.
- [28] Grav, T. et al., 2012, Astrophys. J. 744, 197.
- [29] Grav, T. et al., 2012, Astrophys. J. 759, 49.
- [30] Mainzer, A. et al., 2011, Astrophys. J. 743, 156.
- [31] Mainzer, A. et al., 2012, Astrophys. J. 760, L12.
- [32] Mainzer, A. et al., 2014, Astrophys. J. 784, 110.
- [33] Masiero, J. R. et al., 2011, Astrophys. J. 741, 68.
- [34] Masiero, J. R. et al., 2012, Astrophys. J. 759, L8.
- [35] Masiero, J. R. et al., 2014, Astrophys. J. 791, 121.
- [36] Masiero, J. R. et al., 2017, Astron. J. 154, 168.
- [37] Masiero, J. R. et al., 2018, Astron. J. 156, 60.
- [38] Nugent, C. R. et al., 2015, Astrophys. J. 814, 117.
- [39] Nugent, C. R. et al., 2016, Astron. J. 152, 63.

付録

A. 区域分け・スコアの詳細

本研究で作成した区域分けおよびスコアの詳細は 以下のリンクに公開している。

https://drive.google.com/file/d/1gt4dZ8i8scE-KwcLpVzAk-8ADm7GJlfT/view?usp=sharing

B. タイプ判定した小惑星リスト

本研究でタイプ判定した2799件の小惑星リストは 以下のリンクに公開している.分類不能としたものや 判定信頼度が低いものも含んでいる.

https://drive.google.com/file/d/1QfQCk5-bgH_ DUtWNrIiniFyZ4lTmyFxB/view?usp=sharing