

# Physical Properties of Near-Earth Objects

ASTEROIDS III p255 - 268

20243069 M1 土井知也

# Contents

1. INTRODUCTION
2. TABULATION OF NEAR-EARTH-OBJECT PHYSICAL PROPERTIES
3. ANALYSIS
  - 3-1. Taxonomy of Near-Earth Objects
  - 3-2. Relationships of Near-Earth Objects to Comets
  - 3-3. Relationships of Near-Earth Objects to Ordinary-Chondrite Meteorites
  - 3-4. Shapes and Rotations
  - 3-5. Optical Properties and Surface Structure
4. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

# 1. INTRODUCTION

- NEO（地球近傍天体）の定義：近日点距離  $q < 1.3 \text{ au}$
- NEOの起源は？割合は？それぞれの関係性は？

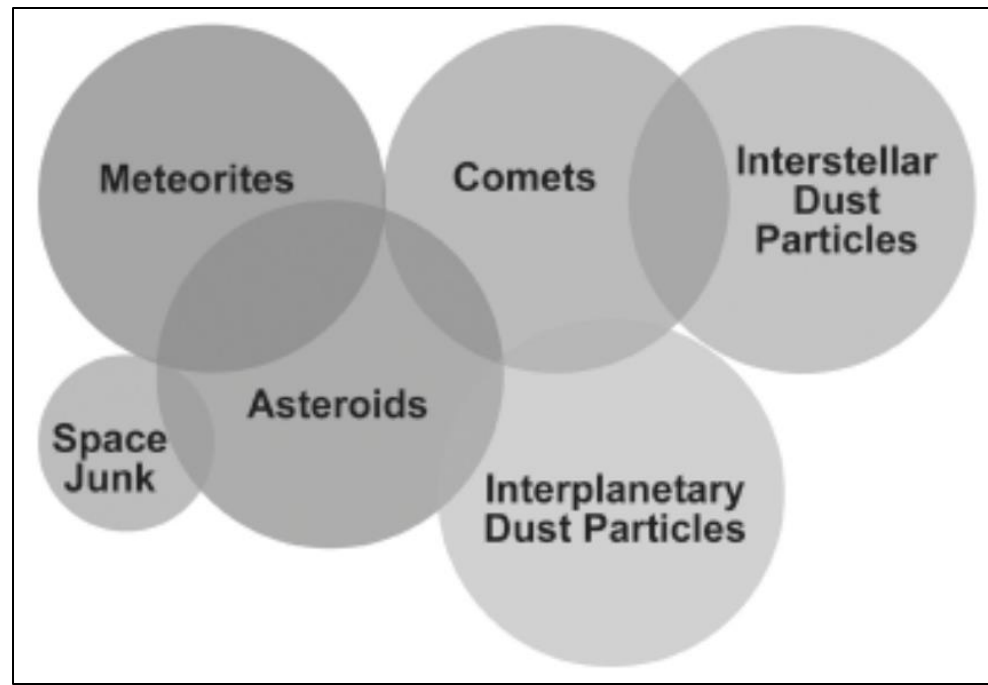


Fig. 1. Cartoon illustration of the many different groups of objects found within near-Earth space.

# 1. INTRODUCTION

- ・メインベルト由来の割合は？彗星の割合は？
- ・NEOの起源の理解＝隕石の起源の理解

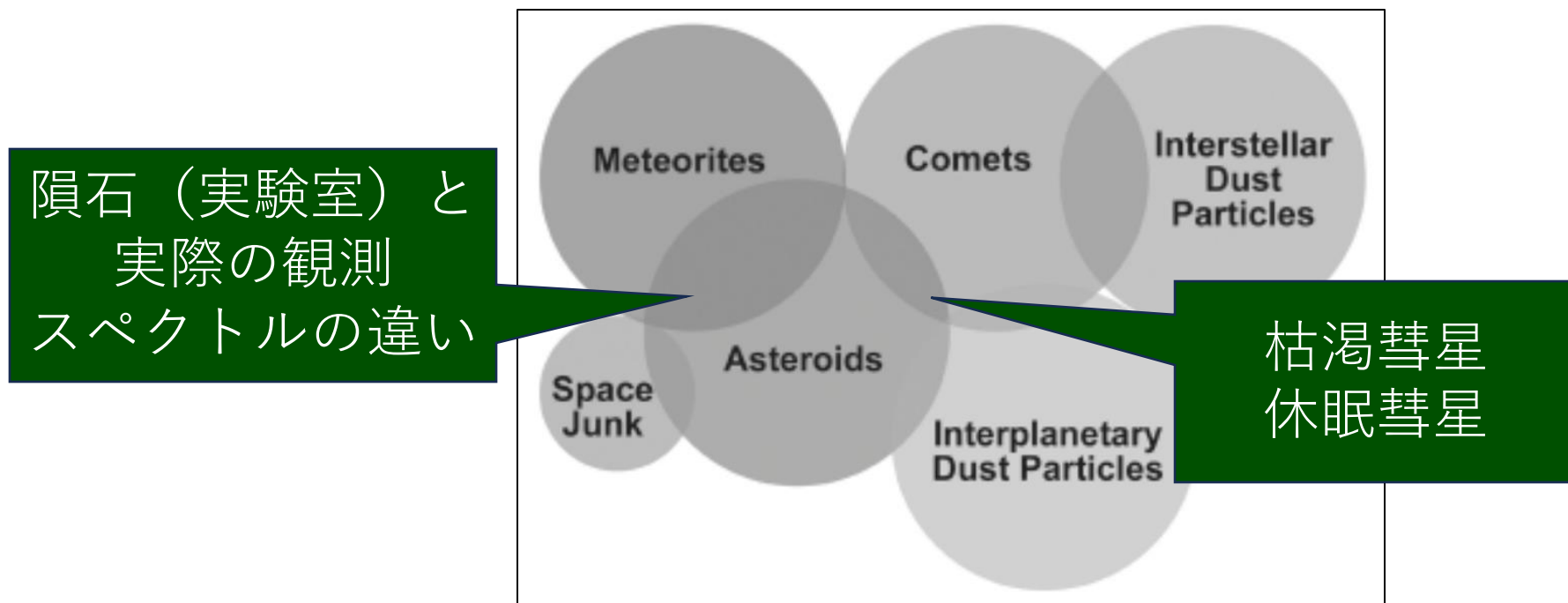


Fig. 1. Cartoon illustration of the many different groups of objects found within near-Earth space.

# 1. INTRODUCTION

- ・ NEOの物理量研究  
の意義

サンプルリターン  
ターゲット

レーダー実験  
ターゲット



地球衝突  
のリスク

全体の数量



小惑星と彗星の  
関係性の理解

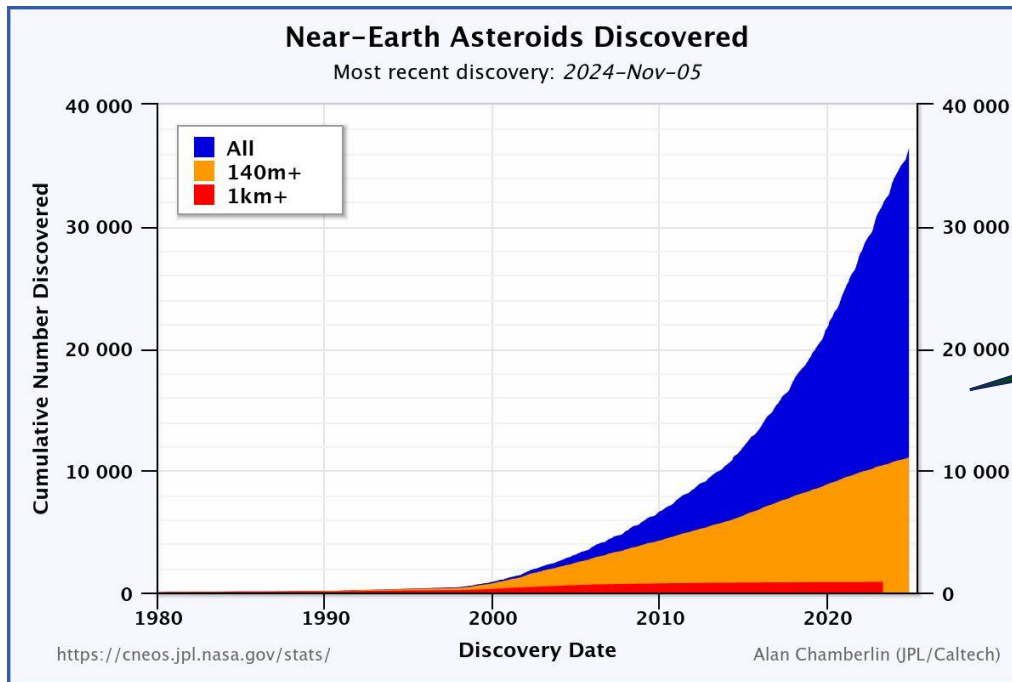
Fig. 2(left). Itokawa

Fig. 3(right). Phaethon, Arecibo Observatory/NASA/INSF.

# 1. INTRODUCTION

- NEOの数量

2000個、（短周期）彗星は約50個（2002年）



現在（2024年）の  
NEAの発見個数は  
36000個

Fig. 4. Near-Earth Asteroids Discovered, <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>.

# 1. INTRODUCTION

$a$  : 軌道長半径  
 $q$  : 近日点距離  
 $Q$  : 遠日点距離

## ・ NEOの軌道要素による分類

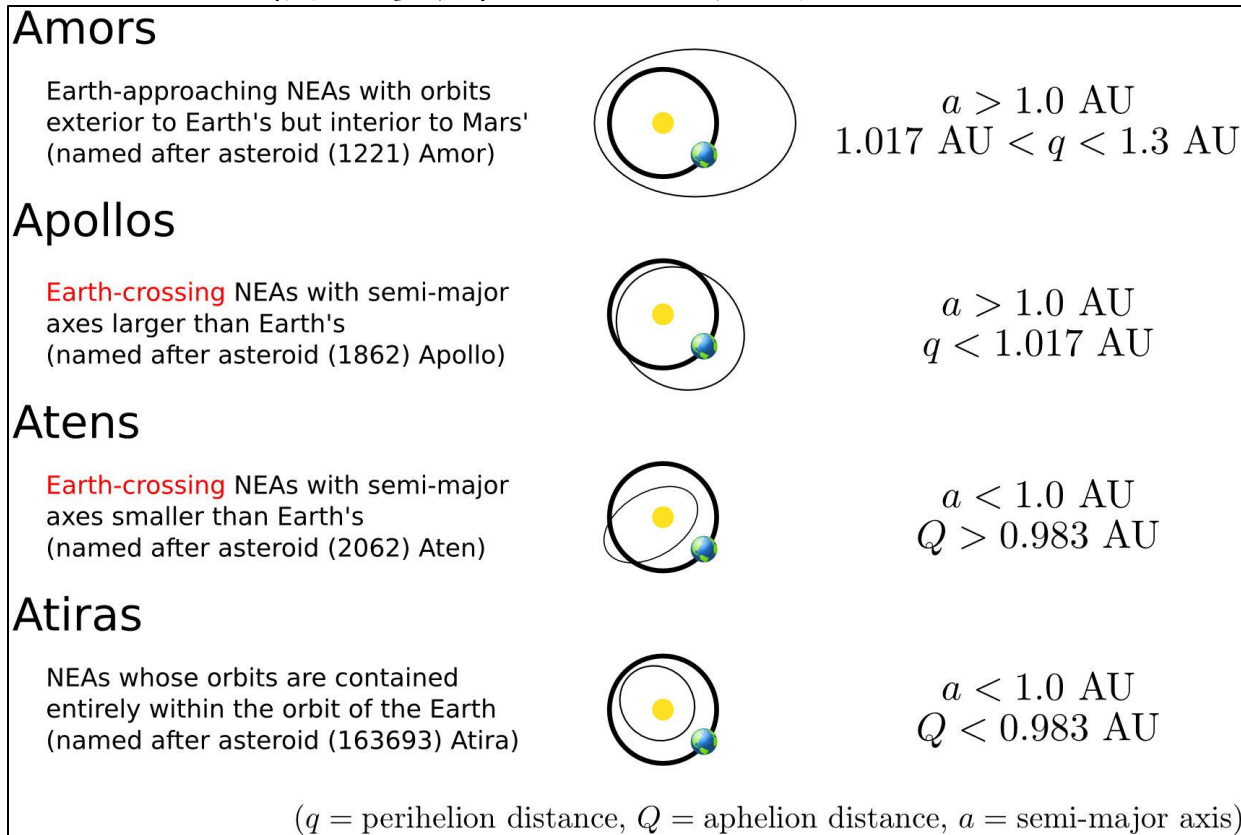


Fig. 5. NEOs orbit, <https://cneos.jpl.nasa.gov/ca/>.

## 2. TABULATION OF NEAR-EARTH-OBJECT PHYSICAL PROPERTIES

### ・ NEOの主な物理量

Asteroid Number* Name	Provisional Designation	Group	H (mag) <sup>†</sup>	Albedo <sup>‡</sup>	Diameter (km) <sup>§</sup>	Class <sup>  </sup>	Period (hrs)	Amplitude (mag)	U-B	B-V
433 Eros	1898 DQ	Am	11.24	0.21	23.6	S(IV)	5.270	0.03–1.38	0.52	0.90
719 Albert	1911 MT	Am	15.8M	m	2.4		5.80	0.6		
887 Alinda	1918 DB	Am	13.83	0.23	4.2	S	73.97	0.35	0.43	0.84
1036 Ganymed	1924 TD	Am	9.42	0.17	38.5	S(IV)	10.31	0.12–0.40	0.42	0.84
1221 Amor	1932 EA1	Am	17.46	m	1.1					
1566 Icarus	1949 MA	Ap	15.95	0.33	1.3	SU,Q	2.273	0.03–0.18	0.54	0.80

### ・ H : (小惑星の) 絶対等級

小惑星が太陽からも地球からも  
1 auの位置にあると仮定した場合  
の明るさ

$$H = m - 5 \log_{10}(r \cdot \Delta) - 2.5 \log_{10} A$$

m : 見かけの等級    r : 小惑星太陽間距離

$\Delta$  : 小惑星地球間距離    A : 位相角補正項

Tab. 1. NEOs physical properties.

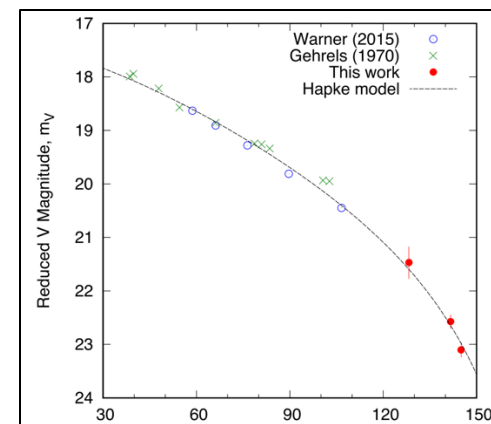


Fig. 6. Phase angle dependance of the V-magnitude, Ishiguro 2017.



## 2. TABULATION OF NEAR-EARTH-OBJECT PHYSICAL PROPERTIES

### • NEOの主な物理量

Asteroid Number* Name	Provisional Designation	Group	H (mag) <sup>†</sup>	Albedo <sup>‡</sup>	Diameter (km) <sup>§</sup>	Class <sup>  </sup>	Period (hrs)	Amplitude (mag)	U-B	B-V
433 Eros	1898 DQ	Am	11.24	0.21	23.6	S(IV)	5.270	0.03–1.38	0.52	0.90
719 Albert	1911 MT	Am	15.8M	m	2.4		5.80	0.6		
887 Alinda	1918 DB	Am	13.83	0.23	4.2	S	73.97	0.35	0.43	0.84
1036 Ganymed	1924 TD	Am	9.42	0.17	38.5	S(IV)	10.31	0.12–0.40	0.42	0.84
1221 Amor	1932 EA1	Am	17.46	m	1.1					
1566 Icarus	1949 MA	Ap	15.95	0.33	1.3	SU,Q	2.273	0.03–0.18	0.54	0.80

### • Class : 表面組成による分類

Tab. 1. NEOs physical properties.

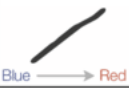
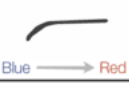
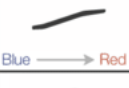
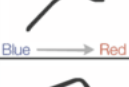

Major Taxonomic Types	Reflectance Spectrum (0.4–0.9 $\mu$ m)	Spectral Features	Visible Albedo	Suspected Composition
D (D,T)		Relatively featureless spectrum Steep red slope	0.02–0.06	Primitive carbonaceous Organic-rich compounds Hydrated minerals
C (C,B,F,G)		Slight bluish to slight reddish slope Shallow to deep absorption blueward of 0.5 $\mu$ m Hydrated asteroids with absorption at 0.7 and 3.0 $\mu$ m	0.03–0.10	Hydrated minerals Silicates Organics
X (E,M,P)		Slightly reddish spectrum E: absorption features at 0.5 and 0.6 $\mu$ m	E: 0.18–0.40 M: 0.10–0.18 P: 0.03–0.10	E: Enstatite-rich M: metallic, Nickel-Iron P: Carbonaceous, Organics
S (S,Q,A,K,L)		Moderately steep red slope ( $\lambda < 0.7 \mu$ m) Shallow to deep absorption at 1.0 and 2.0 $\mu$ m	0.10–0.22	Stony composition Magnesium Iron silicates
V		Moderate to steep red slope ( $\lambda < 0.7 \mu$ m) Very deep absorption at 1.0 $\mu$ m	0.20–0.60	Volcanic basalts Plutonic rocks

Fig. 7. Asteroid classification,  
[https://www.researchgate.net/publication/261499766\\_PING\\_Gamma\\_ray\\_and\\_neutron\\_measurements\\_of\\_a\\_meter-sized\\_carbonaceous\\_asteroid\\_analog/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/261499766_PING_Gamma_ray_and_neutron_measurements_of_a_meter-sized_carbonaceous_asteroid_analog/figures?lo=1).

## 2. TABULATION OF NEAR-EARTH-OBJECT PHYSICAL PROPERTIES

### • NEOの主な物理量

Asteroid Number* Name	Provisional Designation	Group	H (mag) <sup>†</sup>	Albedo <sup>‡</sup>	Diameter (km) <sup>§</sup>	Class <sup>  </sup>	Period (hrs)	Amplitude (mag)	U-B	B-V
433 Eros	1898 DQ	Am	11.24	0.21	23.6	S(IV)	5.270	0.03–1.38	0.52	0.90
719 Albert	1911 MT	Am	15.8M	m	2.4		5.80	0.6		
887 Alinda	1918 DB	Am	13.83	0.23	4.2	S	73.97	0.35	0.43	0.84
1036 Ganymed	1924 TD	Am	9.42	0.17	38.5	S(IV)	10.31	0.12–0.40	0.42	0.84
1221 Amor	1932 EA1	Am	17.46	m	1.1					
1566 Icarus	1949 MA	Ap	15.95	0.33	1.3	SU,Q	2.273	0.03–0.18	0.54	0.80

- Albedo : 測定できていないものは  
各タイプの代表値を記載  
d : Ctype 0.06  
m, mh : Stype 0.15-0.18  
h : Xtype 0.30

Tab. 1. NEOs physical properties.

- 直径 : アルベドと等級から経験則を用いて  
$$2 \log(D) = 6.247 - 0.4H - \log(\text{Albedo})$$

## 2. TABULATION OF NEAR-EARTH-OBJECT PHYSICAL PROPERTIES

### • NEOの主な物理量

Asteroid Number* Name	Provisional Designation	Group	H (mag) <sup>†</sup>	Albedo <sup>‡</sup>	Diameter (km) <sup>§</sup>	Class <sup>  </sup>	Period (hrs)	Amplitude (mag)	U-B	B-V
433 Eros	1898 DQ	Am	11.24	0.21	23.6	S(IV)	5.270	0.03–1.38	0.52	0.90
719 Albert	1911 MT	Am	15.8M	m	2.4		5.80	0.6		
887 Alinda	1918 DB	Am	13.83	0.23	4.2	S	73.97	0.35	0.43	0.84
1036 Ganymed	1924 TD	Am	9.42	0.17	38.5	S(IV)	10.31	0.12–0.40	0.42	0.84
1221 Amor	1932 EA1	Am	17.46	m	1.1					
1566 Icarus	1949 MA	Ap	15.95	0.33	1.3	SU,Q	2.273	0.03–0.18	0.54	0.80

- Period : 自転周期  
→ ライトカーブより
- Amplitude : 光度振幅  
→ 形状の推定にも

Tab. 1. NEOs physical properties.

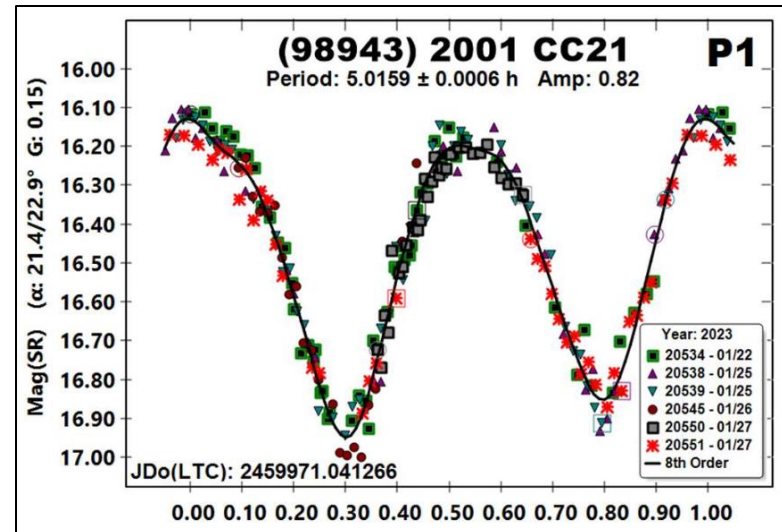


Fig. 8. 2001 CC21 light curve, Warner 2023.

## 2. TABULATION OF NEAR-EARTH-OBJECT PHYSICAL PROPERTIES

### • NEOの主な物理量

Asteroid Number* Name	Provisional Designation	Group	H (mag) <sup>†</sup>	Albedo <sup>‡</sup>	Diameter (km) <sup>§</sup>	Class <sup>  </sup>	Period (hrs)	Amplitude (mag)	U-B	B-V
433 Eros	1898 DQ	Am	11.24	0.21	23.6	S(IV)	5.270	0.03–1.38	0.52	0.90
719 Albert	1911 MT	Am	15.8M	m	2.4		5.80	0.6		
887 Alinda	1918 DB	Am	13.83	0.23	4.2	S	73.97	0.35	0.43	0.84
1036 Ganymed	1924 TD	Am	9.42	0.17	38.5	S(IV)	10.31	0.12–0.40	0.42	0.84
1221 Amor	1932 EA1	Am	17.46	m	1.1					
1566 Icarus	1949 MA	Ap	15.95	0.33	1.3	SU,Q	2.273	0.03–0.18	0.54	0.80

### • U-B, B-V : 色指数

Tab. 1. NEOs physical properties.

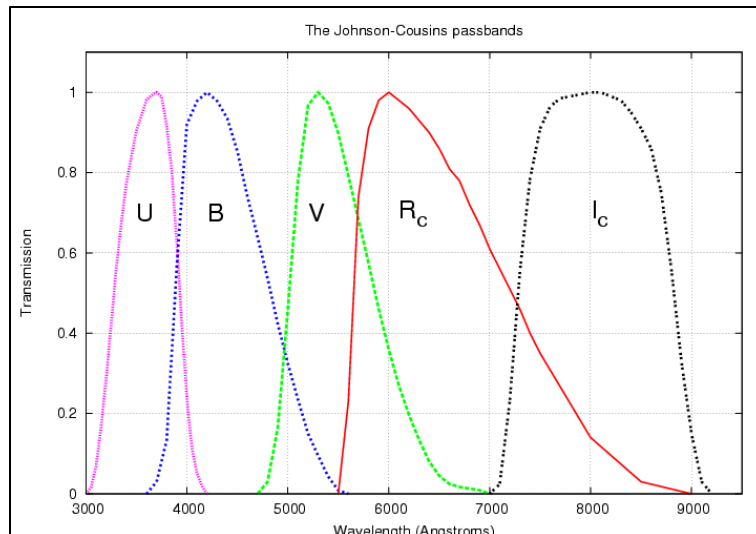
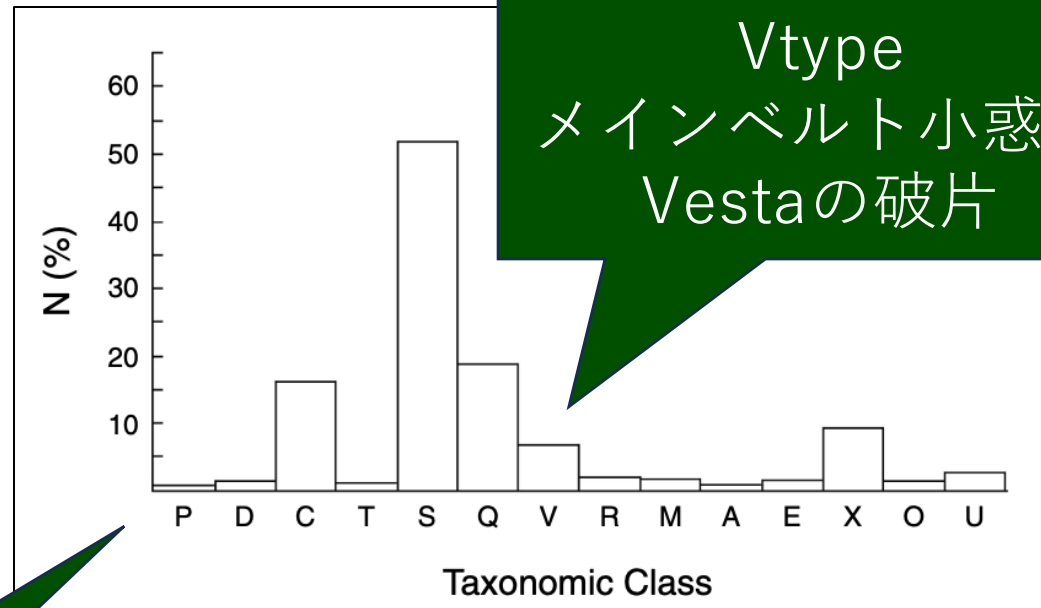
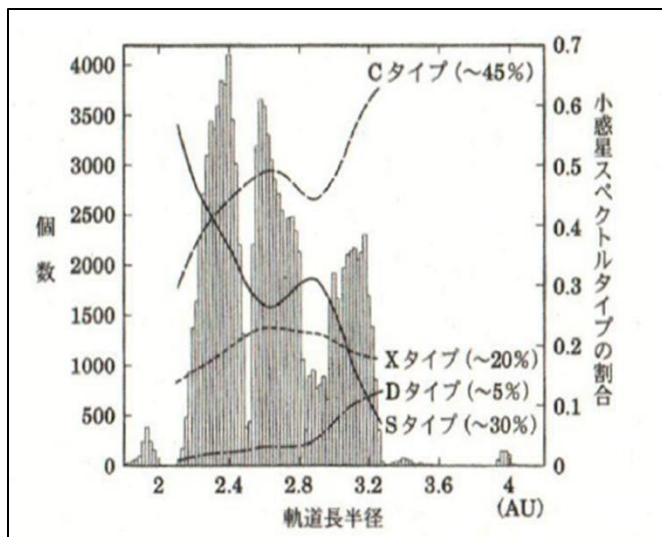


Fig. 9, 10. Johnson-Cousins filter.

# 3-1. Taxonomy of Near-Earth Objects

- ・ 様々なタイプが存在→起源も様々
- ・ S(Q)typeは明るい（アルベドが高い）→発見しやすい



P, Dtype  
外側メインベルト、  
トロヤ群、彗星

Fig. 11(left). 各メインベルト小惑星の軌道分布, 長谷川 2008.  
Fig. 12(right). Histogram of the relative proportions of measured taxonomic properties for more than 300 NEOs listed in Table 1.

## 3-2. Relationships of Near-Earth Objects to Comets

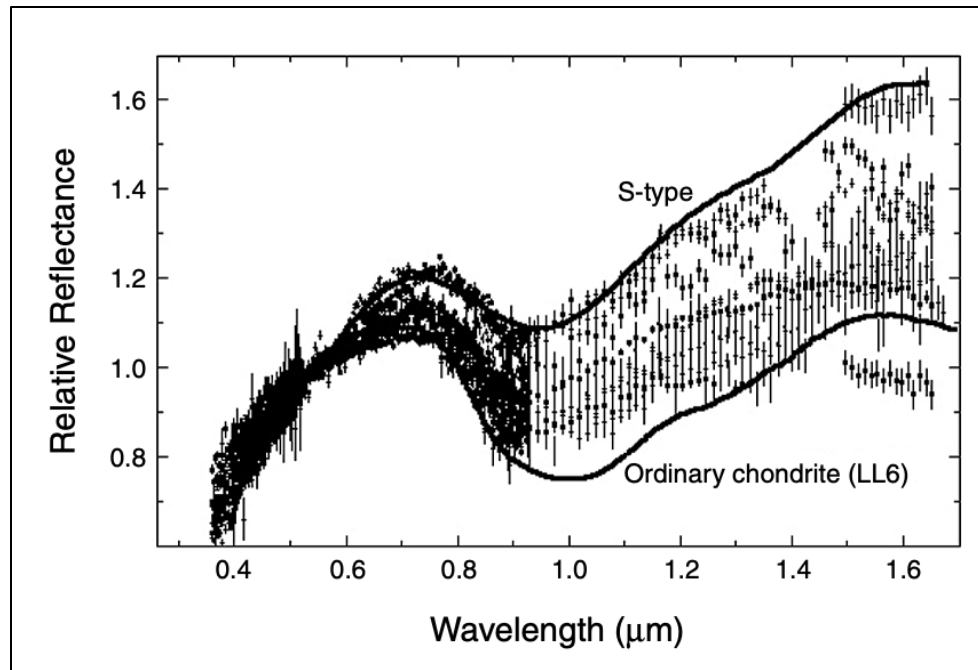
- Phaethon : 軌道計算からふたご座流星群の母天体  
現在は小惑星として観測  
→元は彗星？その起源は？

- Dtype : 彗星核に多い  
少数だが、DtypeのNEOも元は彗星？

→枯渇彗星 or 休眠彗星の可能性

### 3-3. Relationships of Near-Earth Objects to Ordinary-Chondrite Meteorites

- ・ 隕石の90%を占める普通コンドライトと、  
S-type小惑星の反射スペクトルの不一致



Q(S)type  
と一致



Fig. 13(left). S-type asteroids and ordinary chondrites spectral.

Fig. 14, 15(right). 普通コンドライト, <https://ja.wikipedia.org/wiki/普通コンドライト>.

### 3-3. Relationships of Near-Earth Objects to Ordinary-Chondrite Meteorites

- 10-100 mのStypeNEOのうち、小さなサイズで普通コンドライトと合致するスペクトルのものが確認

#### 1. 粒子サイズの影響 (△)

直径が小さく、表面重力が小さいと、レゴリスが大きく  
→可視光の吸収、反射、散乱特性に影響

#### 2. 宇宙風化 (○)

小さなNEOは表面がフレッシュで、宇宙風化を受けていない  
→隕石とスペクトルが合致

→Qtypeの大きな（古い）NEOの存在、一方で

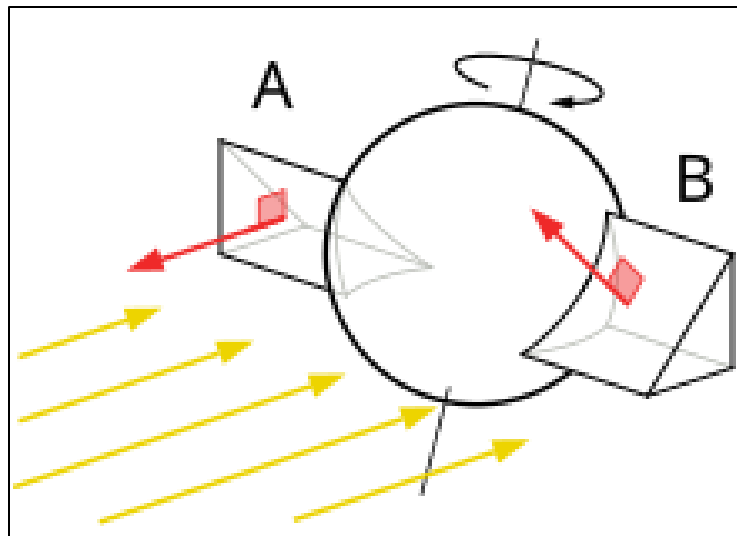
Stypeの小さな（若い）高速自転NEOの存在も確認

→Qtypeは強度が高く、隕石として発見されやすいバイアス



## 3-4. Shapes and Rotations

- 形状と自転周期はクレーター統計より、ほとんどが地球近傍に移動する以前に決定している  
→YORP効果で自転周期が後天的に変化



いびつな形の場合  
小惑星の熱吸収と熱放射の  
強度に違い  
→トルクが自転を高速化

Fig. 16. YORP効果, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ヤルコフスキー・オキーフ・ラジエフスキー・パダック効果>.

## 3-4. Shapes and Rotations

- NEOが小さなサイズのメインベルト小惑星の代表と  
考えて良い

Population	$\langle D \rangle$ (km)	Observed Amplitude (mag)	N	Reduced Amplitude (mag)	Rotation Rate (rev/d)	N
NEOs	$2.9 \pm 0.5$	$0.49 \pm 0.04$	118	0.29	$4.80 \pm 0.29$	119
MBAs ( $D < 12$ km)	$6.8 \pm 0.3$	$0.35 \pm 0.03$	102	0.28	$4.34 \pm 0.23$	100
MBAs ( $D > 130$ km)	$186 \pm 1$	$0.22 \pm 0.01$	100	0.19	$2.90 \pm 0.12$	100

- NEOの中には自転周期が2-20分の小型高速自転小惑星  
も確認  
→ 遠心力 > 重力で、レゴリスが吹き飛ばされる  
ラブルパイル構造 (×)  
モノリス構造 (○)

Tab. 2. Mean values of asteroid amplitudes and rotation rates.

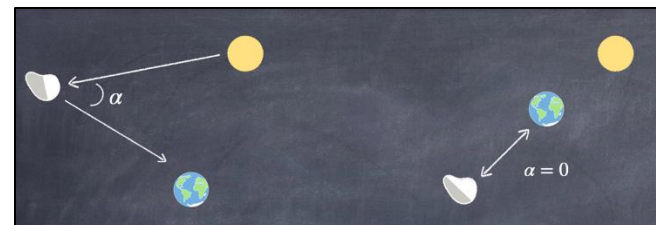
### 3-5. Optical Properties and Surface Structure

- StypeNEAと大きなメインベルト小惑星の比較

Parameter	NEAs	N	MBAs (D > 100 km)	N
Albedo polarimetric	$0.183 \pm 0.011$	9	$0.177 \pm 0.004$	28
Albedo radiometric	$0.190 \pm 0.014$	23	$0.166 \pm 0.006$	27
U-B (mag)	$0.445 \pm 0.013$	30	$0.453 \pm 0.008$	28
B-V (mag)	$0.856 \pm 0.013$	31	$0.859 \pm 0.006$	28
$\beta$ (mag/deg)	$0.029 \pm 0.002$	9	$0.030 \pm 0.006$	18
$P_{\min}$ (%)	$0.77 \pm 0.04$	3	$0.75 \pm 0.02$	28
$h$ (%/deg)	$0.098 \pm 0.006$	9	$0.105 \pm 0.003$	23
$\alpha_{\text{inv}}$ (deg)	$20.7 \pm 0.2$	6	$20.3 \pm 0.2$	18

- NEAのアルベドが高い  
→宇宙風化
- 偏光パラメータの一致  
→表面の粗さは一致

Tab. 3. Mean optical parameters of Stype NEOs and Stype main-belt asteroids.



$P_r$  vs  $\alpha$  偏光カーブ

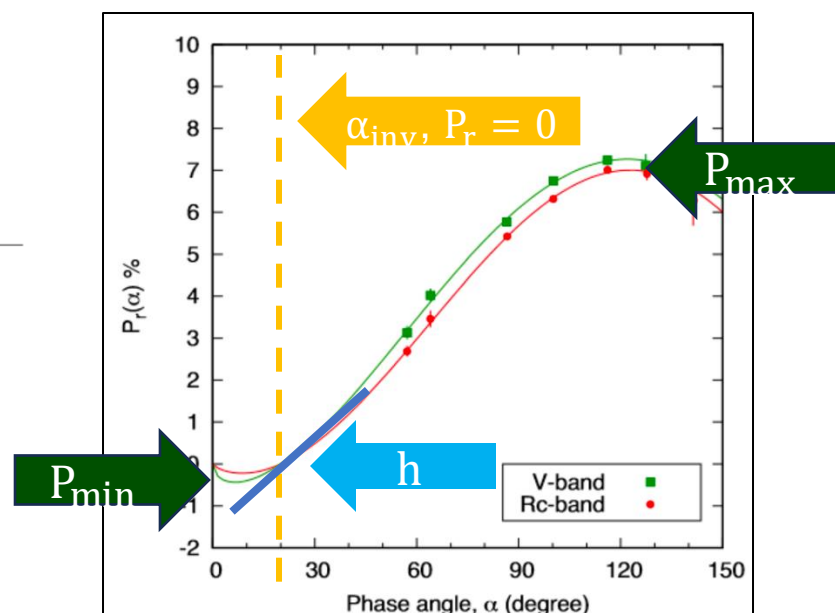


Fig 17. NEA 1566 Icarus, Ishiguro 2017.

## 3-5. Optical Properties and Surface Structure

### • Hapkeパラメータ

→表面反射特性を推定、マイクロスケールで一一致

Object	Data	Particle Albedo w	Opposition Surge		Asymmetry Parameter g	Microscopic Roughness $\theta$ (deg)	Reference
			Width h	Amplitude Bo			
Eros	NEAR	0.44 $\pm 0.044$	0.03 $\pm 0.003$	1.0 $\pm 0.1$	-0.31 $\pm 0.031$	28 $\pm 2.8$	Clark et al. (2000)
Geographos	EB,rad	$\geq 0.22$	0.02	1.32 $\pm 0.10$	-0.34 $\pm 0.10$	25	Hudson and Ostro (1999)
Apollo	EB	0.318 $\pm 0.004$	0.034 $\pm 0.007$	0.90 $\pm 0.02$	-0.32 $\pm 0.01$	15 $\pm 1$	
Toutatis	EB	0.261 $\pm 0.019$	0.036 $\pm 0.023$	1.20 $\pm 0.32$	-0.29 $\pm 0.06$	32 $\pm 8$	
Castalia N	EB	0.384 $\pm 0.07$	—	—	-0.11 $\pm 0.09$	46 $\pm 10$	
Castalia S	EB	0.239 $\pm 0.07$	—	—	-0.30 $\pm 0.09$	25 $\pm 10$	
Golevka	EB	0.58 $\pm 0.03$	0.0114 $\pm 0.0004$	0.758 $\pm 0.014$	-0.435 $\pm 0.001$	7 $\pm 7$	
Golevka	rad	0.173 $\pm 0.006$	0.024 $\pm 0.012$	1.03 $\pm 0.45$	-0.34 $\pm 0.02$	20 $\pm 5$	
Phobos	VK	0.070 $\pm 0.020$	0.055 $\pm 0.025$	4.0 $\pm 6-1$	-0.08* $\pm 0.03$	22 $\pm 2$	Thomas et al. (1996)
Deimos	VK	0.079 $\pm 0.008$ -0.006	0.068 $\pm 0.082$ -0.037	1.65 $\pm 0.90$ -0.61	-0.29 $\pm 0.03$	16 $\pm 5$	

小惑星起源と  
考えられている  
火星衛星とも比較

Tab. 4. Hapke parameters of NEOs and other small bodies.

## 3-5. Optical Properties and Surface Structure

- SC/OC : 円偏光比  
→マクロスケール (cm以上) では不一致
- SC/OCが大きい  
→NEAの表面は粗い

Sample	$\langle D \rangle$ km	Radar Albedo	N	SC/OC	N
433 Eros	$13 \times 13 \times 33$	$0.20 \pm 0.01$	1	$0.22 \pm 0.06$	1
NEAs, S-type	$6.3 \pm 2.7$	$0.16 \pm 0.02$	15	$0.31 \pm 0.03$	17
MBAs, S-type	$136.5 \pm 12.2$	$0.15 \pm 0.01$	14	$0.14 \pm 0.02$	10
NEAs, all types	$4.9 \pm 1.8$	$0.18 \pm 0.02$	24	$0.36 \pm 0.04$	36
MBAs, all types	$179.8 \pm 27.3$	$0.15 \pm 0.01$	36	$0.11 \pm 0.01$	22

NEA エロスのレゴリス



Tab. 5. Mean radar albedos and circular polarization ratios of NEAs and main-belt asteroids.  
Fig. 18, 19. Eros, <https://www.astroarts.co.jp/news/2001/10/05nao483/index-j.shtml>.

## 4. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

- NEAの供給プロセス

内側メインベルト→地球近傍→地球衝突（隕石）

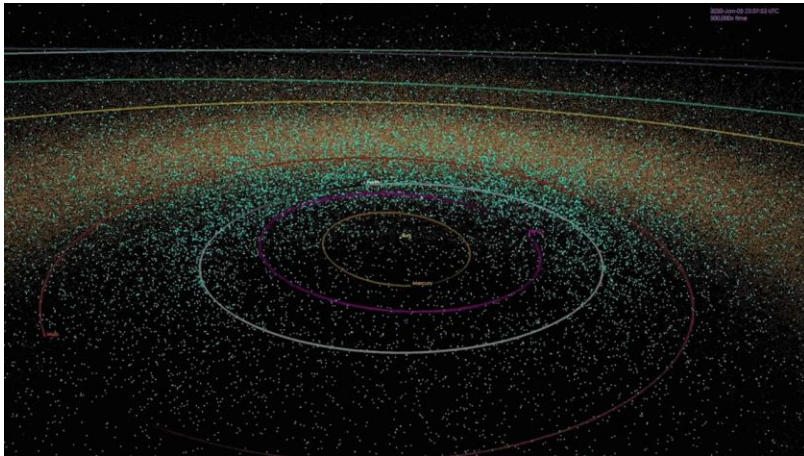


Fig 20. NEAs and MBAs orbit movie,  
<https://cneos.jpl.nasa.gov/ca/>.

- NEAの理解が、同サイズのメインベルトへの理解に  
→サンプルリターンミッション
- その他、地球衝突、金属質のNEAの資源としての活用  
→NEOの継続的な研究は重要