

はやぶさ 2 の探査と プラネタリー・ディフェンス

ープラネタリー・ディフェンスの今後の展開ー

第11回スペースガード研究会
千葉工業大学東京スカイツリータウンキャンパス
2018.11.03

吉川 真 (JAXA)

天体の衝突？



このイラストから20年余り...

イラスト：Don Davis

プラネタリー・ディフェンスとは

- 小惑星や彗星の地球衝突問題を扱う活動
- 最初は、スペースガードと呼ばれていた
- “究極の自然災害”に対して、科学的・技術的に対応
- 1990年代初めから本格的な活動が開始
- 日本では、1996年に日本スペースガード協会が設立（故磯部琇三氏による）
- 2000年頃からは国連でも議論されるなど、国際的な活動となっている



「Spaceguard」という言葉

アーサー・C・クラークの
“Rendezvous with Rama”
（「宇宙のランデブー」：早川書房）で初めて使われる。1973年刊。



Arthur C. Clarke
(1917-2008)

3

プラネタリー・ディフェンスで何をやるか

- 天体の地球衝突は起こる ← **これは前提**
 - まずは小惑星を発見
 - 追跡観測を行い軌道を正確に推定
 - 計算により衝突の可能性を確認
 - 衝突の可能性があれば、さらに観測を継続
 - 物理観測・探査（衝突回避や被害の最小化）
- 現在進行中**
- 衝突の回避
 - 被害の最小化
 - 法的な整備
 - 人々への対応（情報公開）
- 検討中**

4

プラネタリー・ディフェンスの今後の展開

スペースガード

- 発見 → NEOのさらなる発見
高速移動天体の観測へ
- 素性 → 現在進行中の探査
はやぶさ2 & OSIRIS-REx
- 回避 → 新たなミッション
AIDA (DART+Hera)

5

OSIRIS-REx



Bennu at 100 Pixels

This “super-resolution” view of asteroid Bennu was created using eight images obtained by NASA’s OSIRIS-REx spacecraft on Oct. 29, 2018 from a distance of about 205 miles (330 km). The spacecraft was moving as it captured the images with the PolyCam camera, and Bennu rotated 1.2 degrees during the nearly one minute that elapsed between the first and the last snapshot. The team used a super-resolution algorithm to combine the eight images and produce a higher resolution view of the asteroid. Bennu occupies about 100 pixels and is oriented with its north pole at the top of the image.

Date Taken: Oct. 29, 2018

Instrument Used: OCAMS (PolyCam)

Credit: NASA/Goddard/University of Arizona

6

AIDA

AIDA (Asteroid Impact & Deflection Assessment)

- AIM (Asteroid Impact Mission)
 - DART (Double Asteroid Redirection Test)
- ↓
- DART + **Hera**

7

Hera

Copyright ESA/ScienceOffice.org

Description Hera is the European contribution to an ESA-NASA double-spacecraft mission intended to test whether a kinetic deflection technique can be used to shift the orbit of an asteroid. The target of the mission is a double asteroid system, called Didymos, which will come a comparatively close 11 million km to Earth in 2022. The 800-m diameter main body is orbited by a 170-m moon, informally called ‘Didymoon’. In 2022 NASA's DART spacecraft will first perform a kinetic impact on the smaller of the two bodies, then Hera will follow-up with a detailed post-impact survey that will turn this grand-scale experiment into a well-understood and repeatable planetary defence technique. Hera will also gather crucial scientific data on asteroids as a whole by carefully studying the exterior and interior properties of both bodies in the system. The spacecraft will also host two 6-unit cubesats that will be deployed near Didymos to perform, for the first time ever, multi-point measurements in a “mother-daughter” configuration. A novel intersatellite link will be used to establish a flexible communications network supporting the close-proximity operations in very low-gravity conditions, a crucial step for future exploration activities around small bodies. Hera, a further optimisation of ESA’s earlier proposed Asteroid Impact Mission, is currently in Phase B1 of mission development in preparation of the Agency’s Council of Ministers at European Level in late 2019.

8

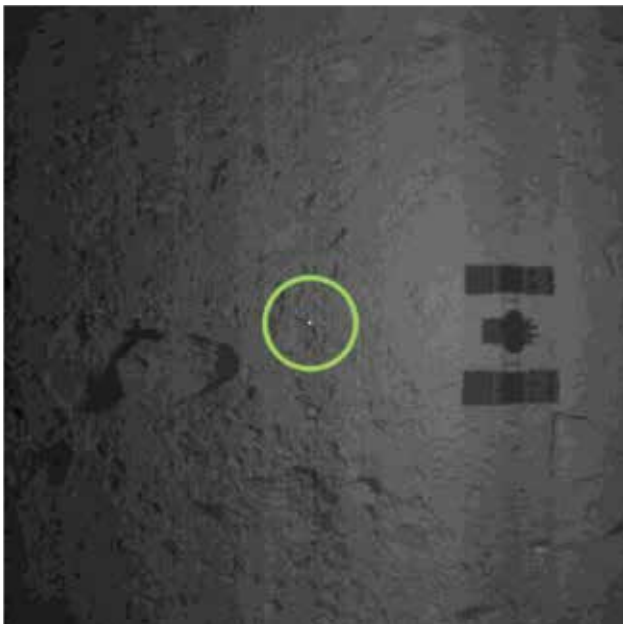
Hera



9

はやぶさ 2

- タッチダウンのためのリハーサル3回目
- 10月25日に高度約12mまで接近
- ターゲットマーカを分離



リュウグウ着地後のターゲットマーカの画像(緑色の丸印の中の白い点がターゲットマーカ)。「はやぶさ2」の広角の光学航法カメラ(ONC-W1)で撮影。

撮影時日時: 10月25日11時47分(日本時間)

撮影高度: リュウグウ表面から約20m

画像クレジット: JAXA

はやぶさ 2

- CAM-H（小型モニタカメラ）による撮影
- 2018年10月25日



「はやぶさ 2」 ミッション

2014年12月3日

打ち上げ



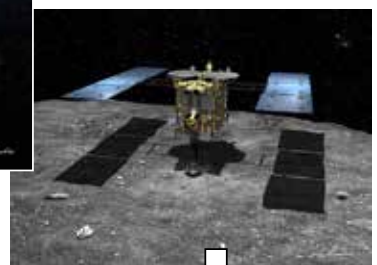
地球スイングバイ
2015年12月3日

2018年6月27日

小惑星到着



リモートセンシング観測によって、小惑星を調べる。その後、小型ローバや小型着陸機を切り離す。さらに表面からサンプルを取得する。



地球帰還

2020年11-12月



サンプル分析

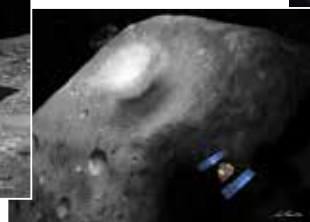
(イラスト 池下章裕氏)

小惑星出発

2019年11-12月



安全を確認後、クレータにタッチダウンを行い、地下物質を採取する。

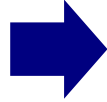
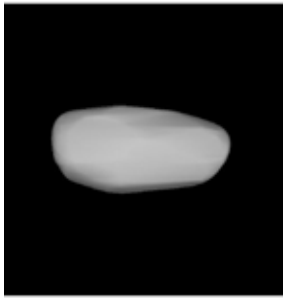


衝突装置によって、小惑星表面に人工的なクレータを作る。



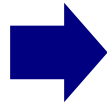
新たなる発見へ

■ 「はやぶさ」の発見



微小NEO（地球接近小惑星）の概念が変わった！

■ 「はやぶさ2」は？



13

ホームポジション(20kmの距離)から撮影

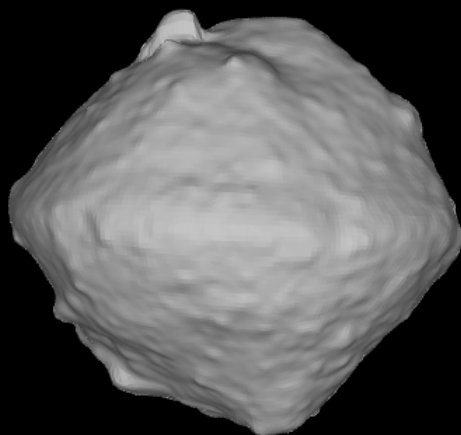


ONC-Tによって距離約20kmから撮影されたリュウグウ。左は2018年6月30日23:13(日本時間)頃の撮影。右は2018年6月30日19:21(日本時間)頃の撮影。小惑星の自転により図1のほぼ裏側が見えている。

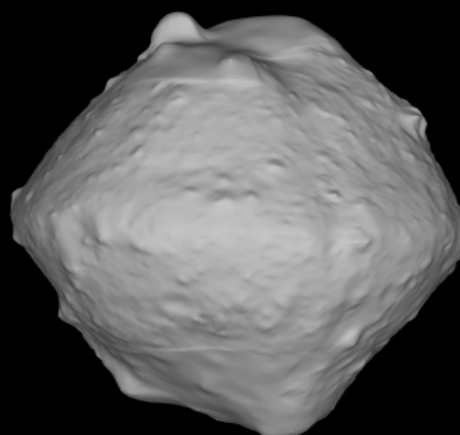
画像クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研

リュウグウの形状モデル

別々の手法で形状モデルを作成したが、両者はよく一致している



会津大による形状モデル(SfM)



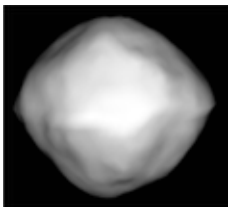
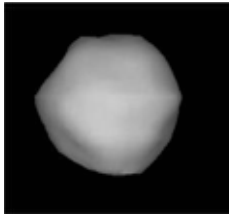
神戸大による形状モデル(SPC)

クレジット:会津大, 神戸大(形状モデル), Auburn Univ. (動画), JAXA

(動画)

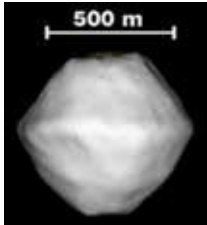
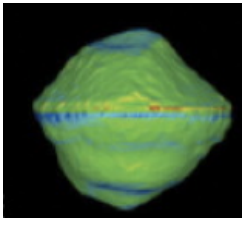
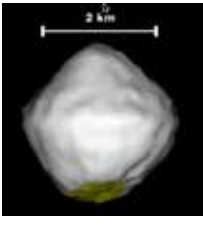
15

参考：他のミッションの探査候補小惑星

	(101955) Bennu 1999 RQ36	(341843) 2008 EV5	(65803) Didymos 1996 GT
ミッション	OSIRIS-REx サンプルリターン	MarcoPolo-R サンプルリターン(不採択)	DART 衝突
タイプ	B	C	Xk
大きさ	492 m	400 m	780 m
形状	 (by D. Lauretta)	 (by M. Busch)	 (by NASA)
自転周期	4.297 h	3.725 h	2.2593 h
自転軸	RA/Dec : 87/-65	RA/Dec : 105/-66	
アルベド	0.046	0.137	0.15
備考			バイナリー

16

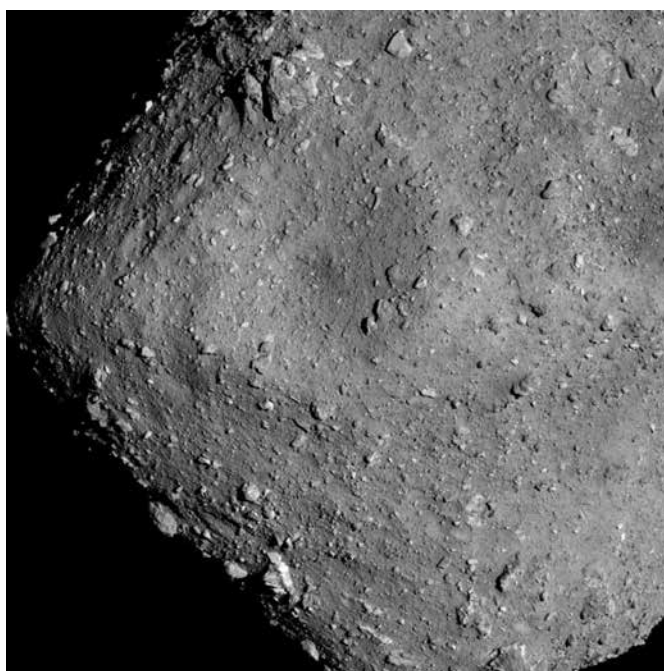
参考：他の“コマ型”小惑星

	(136617) 1994 CC	(66391) 1999 KW4	(153591) 2001 SN263	(311066) 2004 DC
タイプ		S	B	
大きさ	650 – 700 m	1532 x 1495 x 1347 m	2000 m	300 m
形状	 Brosovic et al. 2011	 Ostro et al. 2005	 Becker et al. 2015	 Taylor et al. 2008, ACM
自転周期	2.3886 h	2.7645 h	3.423 h	2.5709 h
自転軸			$(\lambda, \beta) = (309, -80)$	
アルベド	0.3?	0.3?	0.04	
備考	トリプル	バイナリー	トリプル	バイナリー
軌道	NEO	NEO	NEO	NEO

注) NEO : Near Earth Object (地球接近天体)

17

高度6kmからの撮影



高度約6kmから撮影したリュウグウ。2018年7月20日、16時頃(日本時間)に望遠の光学航法カメラ(ONC-T)によって撮影。

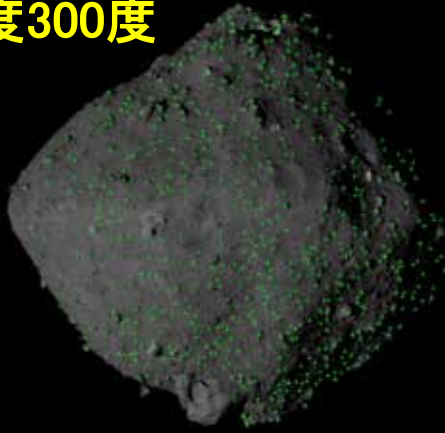
画像クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研

18

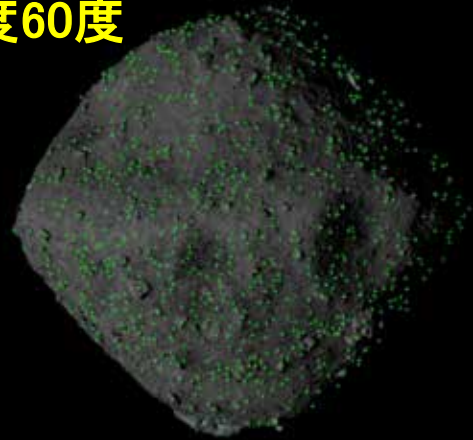
リュウグウ表面上の岩塊分布

- ・見かけの大きさが12 m以上の岩塊に+マークをつけた

経度300度



経度60度



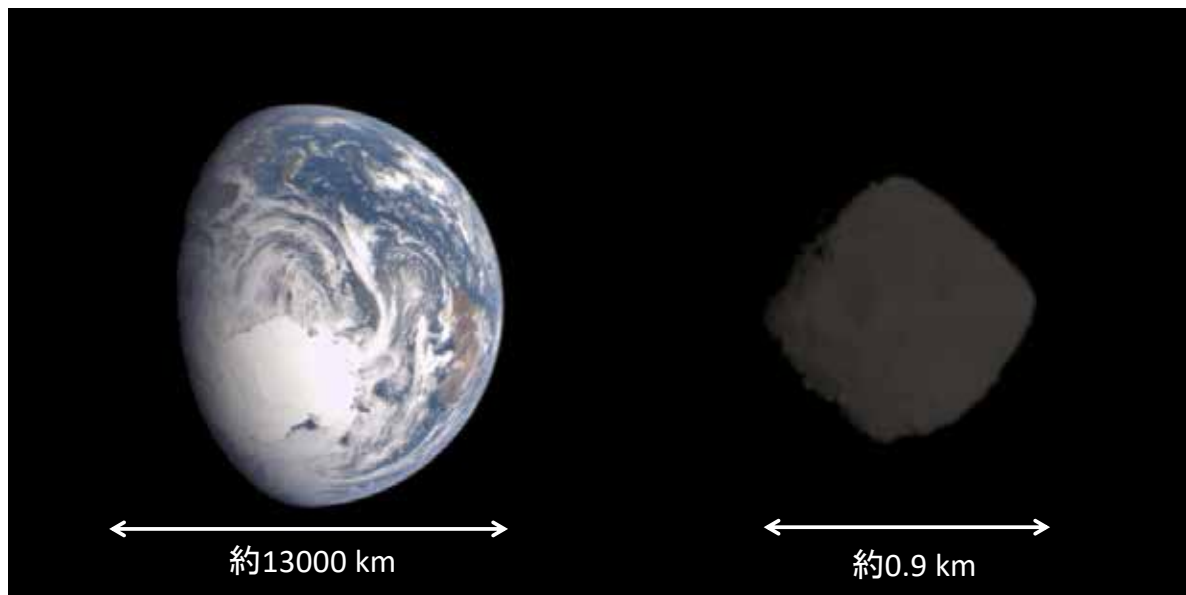
クレジット: 近畿大/JAXA/東京大/高知大/立教大/名古屋大/千葉工大/明治大/会津大/産総研

- ・小さい天体の割に大きな岩塊がある: 母天体の破片を集めた天体の可能性を示唆
- ・岩塊の数密度(単位面積当たりの個数)は, 場所により, 大きな差が見られる.
- ・表面試料を採取するタッチダウン地点を決めるには, 岩塊の分布が鍵となる.
- ・表面物質移動の確認と理解にも役立つと考えられる.

19



リュウグウのカラー画像



ONC-Tによって撮影された地球とリュウグウ。地球は、地球スイングバイの直後(2015年12月4日)に撮影されたもの。リュウグウは、2018年6月21日の多バンド画像からb,v,wを用いて天然色化したもの。

クレジット : JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研

20

MINERVA-II1

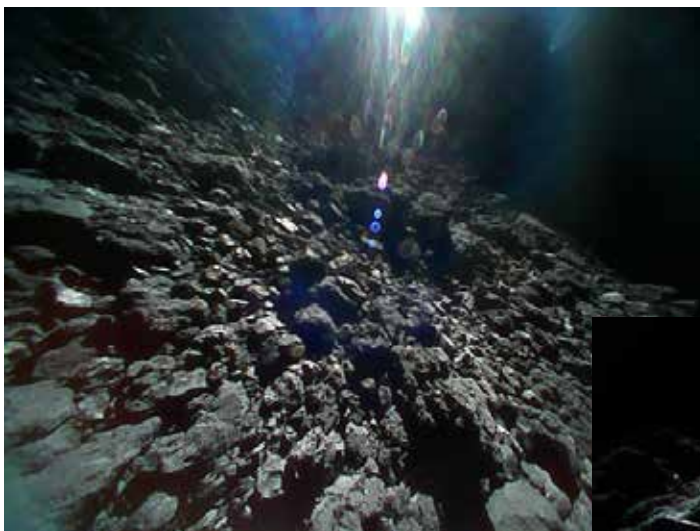


ホップ中に撮影された
画像

2018年9月22日、11:44(日本時間)頃に
Rover-1Aが撮影。カラー画像。リュウグ
ウ表面において移動中(ホップ中)に撮
影されたもの。左側半分がリュウグウの
表面。右側の白い部分は太陽光による
もの。(画像のクレジット:JAXA)

21

MINERVA-II1による画像



2018年9月23日09:46JSTに撮影。
Rover-1Bのホップ直前の画像。

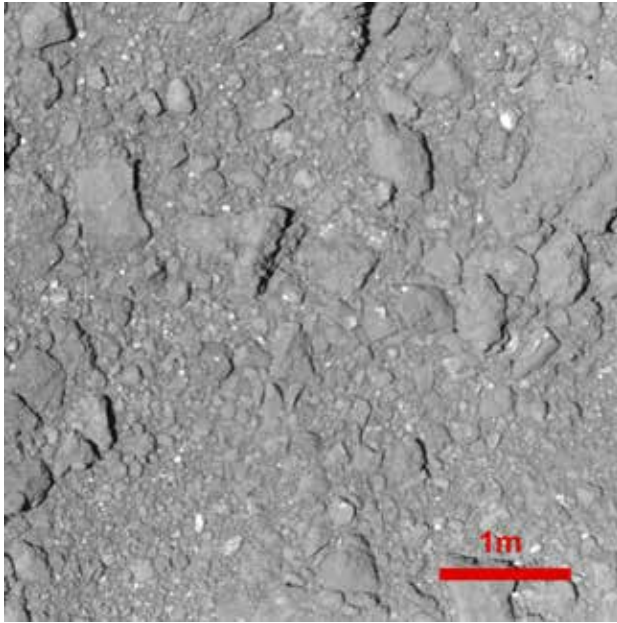


2018年9月23日10:10JSTに撮影。
Rover-1Bの再着地頃の表面画像。

(画像のクレジット:JAXA)

22

ONC-Tによる最高解像度の画像



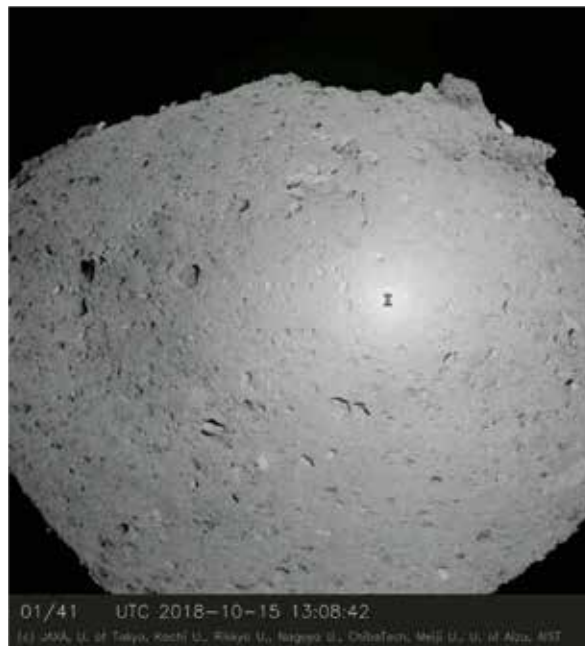
望遠の光学航法カメラ(ONC-T)によって2018年10月15日、22:40(日本時間)に撮影されたリュウグウ表面の様子。高度約42mからの撮影となる。

(画像クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)

解像度は約4.6mm/pix。これは、「はやぶさ2」がこれまでに撮像した中で最高解像度の画像である。直径2~3cmの非常に細かい岩石まではっきりと視認できる。「はやぶさ」初号機のAMICAの最高解像度は、6mm/pixであったので、1つの新記録を達成したことにもなる。

23

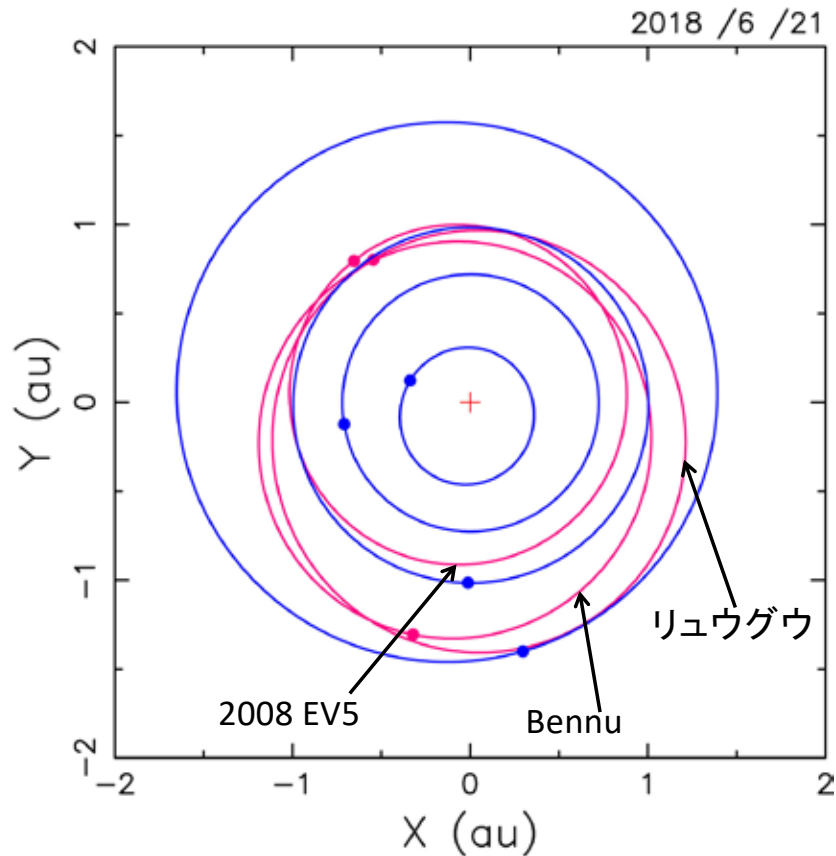
ONC-W1による近接撮影の動画



広角の光学航法カメラ(ONC-W1)によって撮影されたリュウグウの連続画像。撮影時刻は、2018年10月15日、22:08~22:53(日本時間)。最初の探査機の高度は約240m、最低高度は22:45のときで約47m、最後の高度が約370mである。

(クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研) 24

参考：軌道図



25

リュウグウの天体への接近

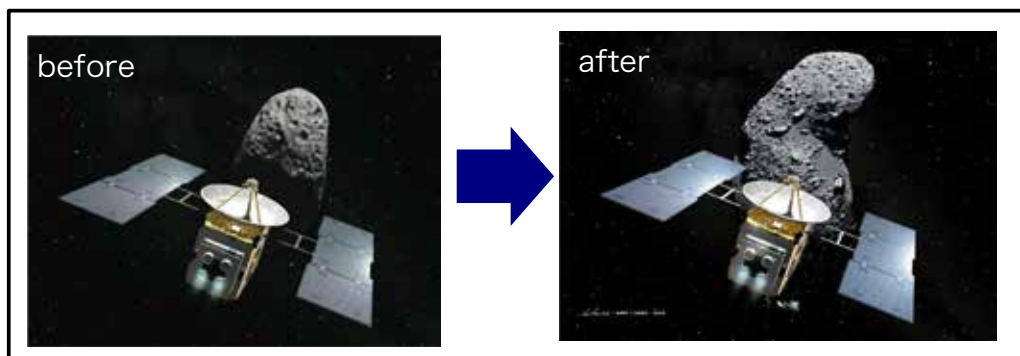
- | | | |
|---------------------|-------|---------|
| • 2020-Dec-29 00:46 | Earth | 0.061au |
| • 2033-Dec-21 05:53 | Earth | 0.047 |
| • 2076-Dec-05 06:14 | Moon | 0.009 |
| • 2076-Dec-06 05:43 | Earth | 0.010 |
| • 2101-Dec-29 22:17 | Earth | 0.059 |

※JPL Small-Body Database Browserより

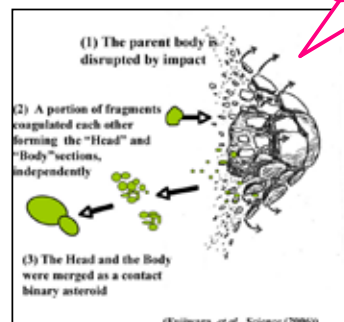
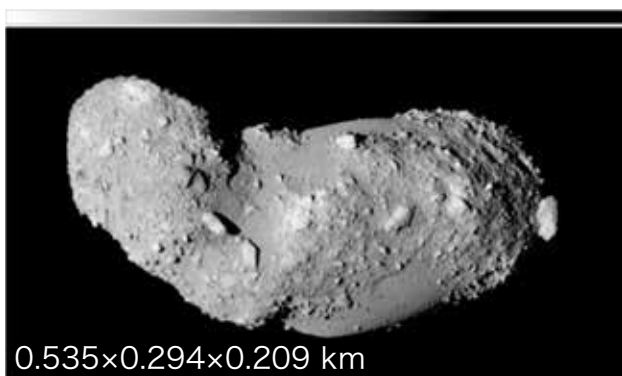
26

「はやぶさ」の成果

微小NEO（地球接近小惑星）の概念が変わった！



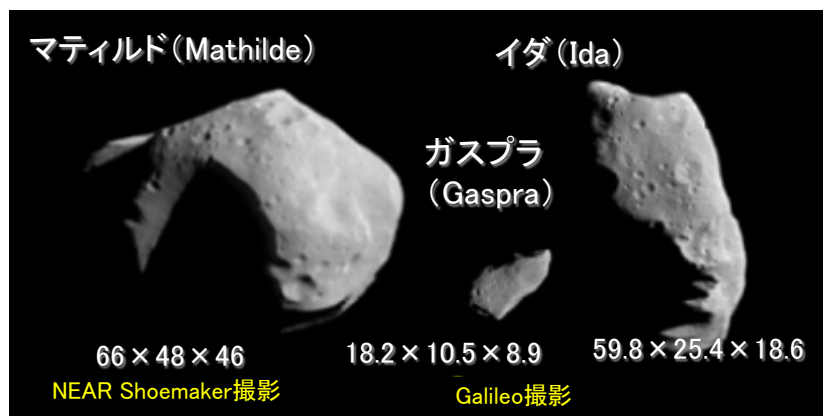
スペース
ガードから
も注目され
る。



イトカワは“がれき”の集まり
= “Rubble Pile”

27

探査機が見た小惑星

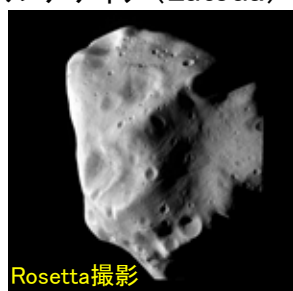


NEO

シュテインス (Steins) ルテティア (Lutetia)



6.67 × 5.81 × 4.47



121 × 101 × 75

トータティス (Tutatis)



1.70 × 2.03 × 4.26

エロス (Eros)



38 × 15 × 14

イトカワ (Itokawa)



0.535 × 0.294 × 0.209

大きさは直径(端から端まで)で、単位はkm。値はトータティス以外は理科年表(平成26年版)による。トータティスの値はJPLのWebより。

28

探査機が見た彗星

Halley彗星



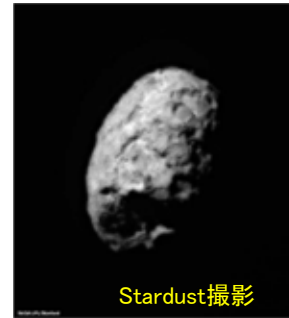
14.4 × 7.4 × 7.4 km

Borrelly彗星



4.0 × 1.58 km

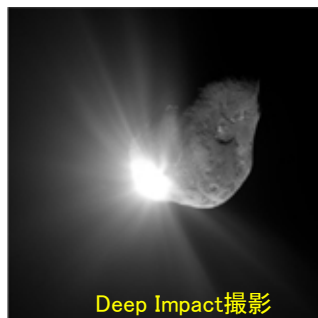
Wild 2 彗星



5.4 × 3.8 × 3.0 km

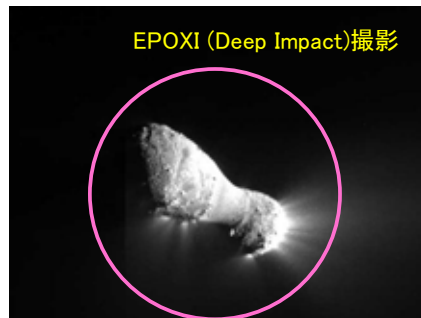
NEO

Tempel 1彗星



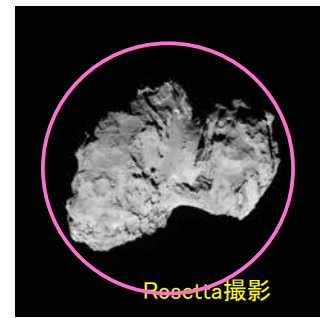
7.6 × 4.9 km

Hartley 2彗星



1 km程度

Churyumov-Gerasimenko彗星



3.5 × 4 km

29

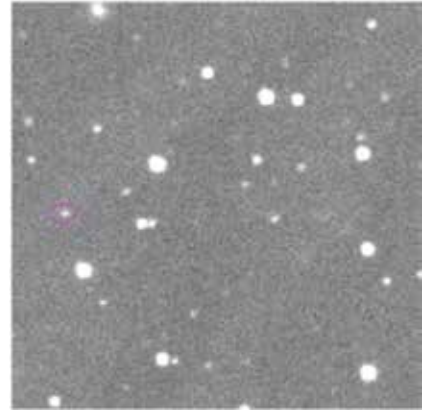
観測

小惑星 2008 TC3 の地球衝突

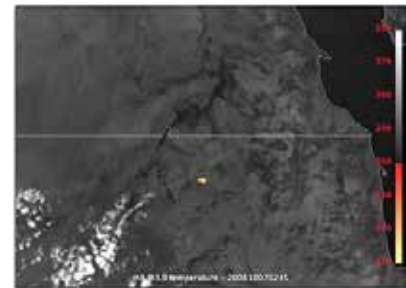
小惑星2008 TC3とは:

※小惑星の地球衝突が事前に予測され実際に衝突した初めてのケース。

- ・2008年10月6日 06:39 UTC : Mt. Lemmonの1.5m望遠鏡で、高速移動天体を発見。(カタリナ・スカイ・サーベイ) 仮符号2008 TC3、大きさ2、3m。
- ・数時間のうちに地球に衝突することが判明。衝突時刻は10月7日 02:46 UTC頃。スーダン北部上空。衝突速度は12.8km/s。
- ・このような衝突は、数ヶ月に1回くらいの割合で起こるが、事前に予測されたのは初めて。
- ・KLMのパイロットが目撃したという情報あり。ケニアのinfrasound arrayが衝突を記録。Meteosat-8の画像。



2008 TC3の観測



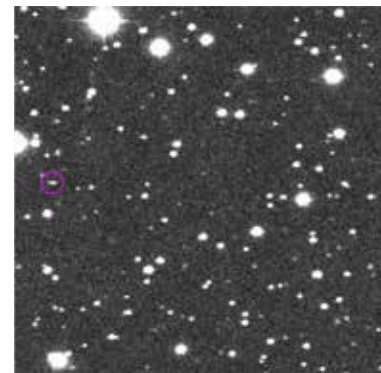
Meteosat-8の画像

31

2014 AA

2014年、最初に発見された小惑星2014 AAが、地球に衝突!

- ・2014年1月1日、Catalina Sky Surveyによって発見 (観測データ数は7個)
- ・発見されてから約21時間後に地球に衝突
- ・衝突時刻: 2014年1月2日 04:02 世界時
- ・大きさは2~3m
- ・衝突前に発見された2例目



発見されたときの2014 AA



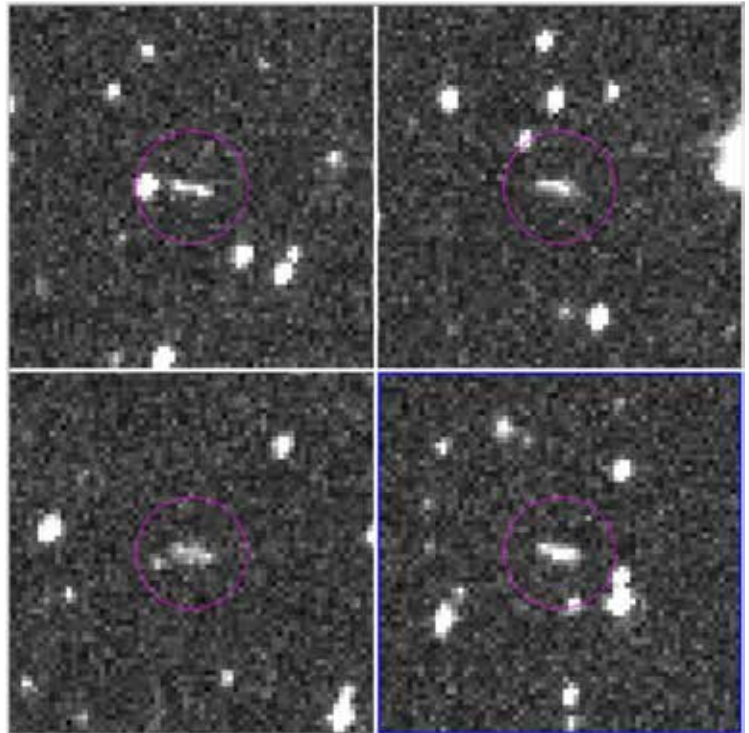
JPLによる衝突位置予測 (青) と
infrasoundによる衝突位置推定 (赤)

32

隕石予測3例目

- 2018年6月2日、小惑星2018 LAがアフリカ南部上空で大気圏に突入
- 火球として目撃
- 事前に地球に衝突することが予測された天体の3例目
- 大きさ：数メートル

小惑星2018 LAの発見時の画像。線状に移動しているのが2018 LA（提供：NASA/JPL-Caltech/CSS-Univ. of Arizona）



33

隕石予測3例目

経緯：

- 6月2日8時14分（世界時）、地球近傍天体を搜索するカタリナ・スカイ・サーベイの望遠鏡で発見
- 小惑星センターに送られて暫定軌道が計算された結果、アフリカ南部からインド洋をはさんでニューギニアまでの帯状の領域に落下すると推定
- 2018 LAのデータはNASAジェット推進研究所（JPL）の地球近傍天体研究センター（CNEOS）にも送られ、同センターの自動危険評価システム「Scout」でも、地球に衝突する可能性が高いと判定。ただし、大きさが小さいので警報は出さないことに。
- 同日11時49分（世界時）にハワイのATLAS小惑星サーベイでも観測
- この追加観測データから地球に衝突することが確実となり、落下地点はアフリカ南部に絞らる
- 発見から8時間半後の同日16時44分ごろに秒速約17kmで地球の大気圏に突入し、高度数kmの上空でばらばらに分解
- この時刻ごろにアフリカ南部のボツワナや南アフリカで明るい火球が多くの人に目撃

34

隕石予測3例目



南アフリカ北西部で撮影された2018 LAの落下(提供:barend swanepoel)

35

2012 TC4

- 2012年10月4日に発見
- ことのはときは0.03au (約450万km) まで接近
- 7日間観測された (10月11日まで)
- この観測による軌道推定によると、次回の接近は2017年10月12日で、接近距離は0.00008818~0.002896au (約13,200~433,200km)
- 大きさは10~30m (アルベドを0.05~0.5を仮定、絶対等級は26.7等)
- 自転周期: 0.2038時間=約12分

正確な軌道を知るために再発見したい!

2017年10月12日、5:42 (世界時) に0.00033au (約49,000km) まで接近

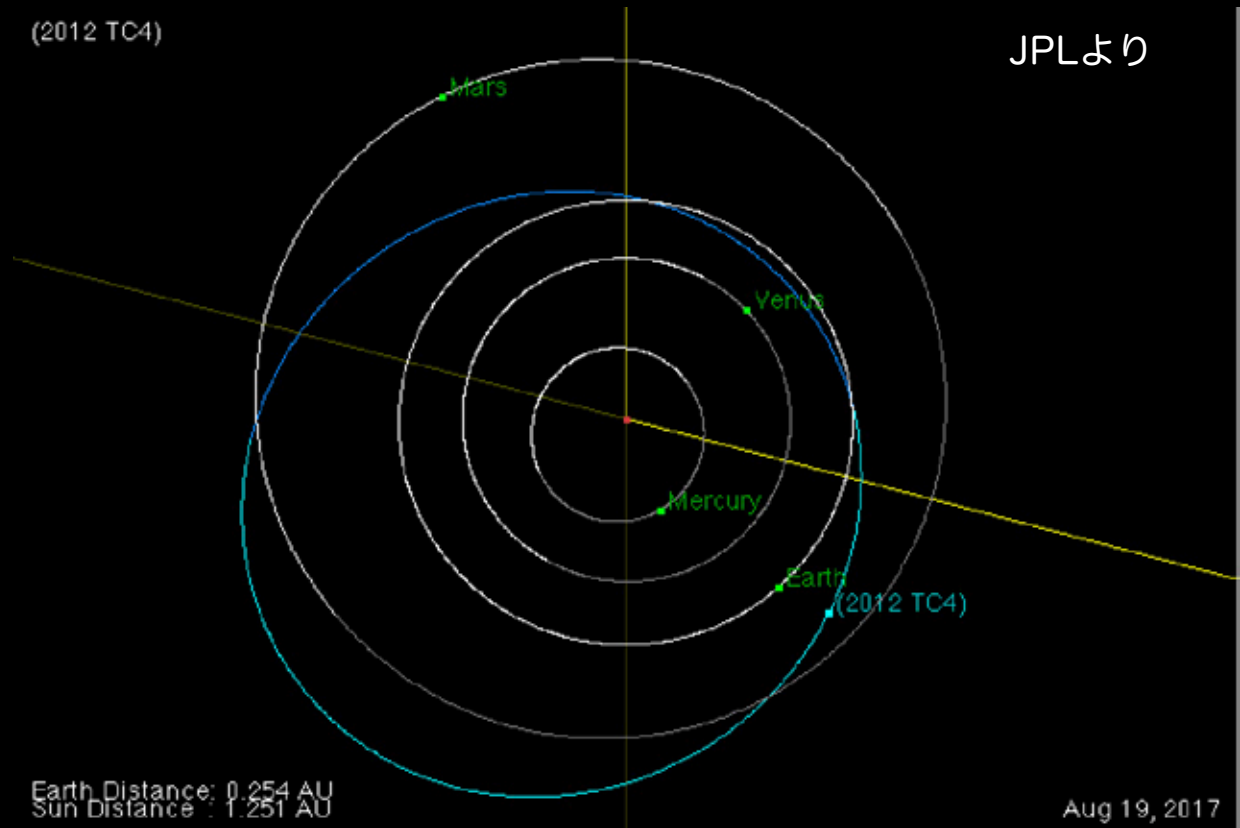
- 今年 (2017年) 6月
- 2012 TC4を再発見する動き
- JPLを中心に議論
- 2017年7月27日にVLT (Very Large Telescope) によって再発見。明るさは26.8等。発見時の地球からの距離は約0.4au。
- 軌道の再推定

36

2012 TC4

(2012 TC4)

JPLより



2012 TC4 の観測例



小惑星2012 TC4

2017年10月11日20時40分36秒～21時04分36秒(日本時間)

地球に約5万kmの距離まで接近。自転周期は約12.4分。

(画像提供: 東京大学木曽観測所)

地球接近天体（NEO）

39

NEO（地球接近天体）とは

- 近日点距離（太陽までの最短距離）が1.3天文単位以下になる天体（1天文単位＝1億5千万km）
- アポロ型、アテン型、アモール型、アティラ型
- 地球に衝突する可能性を持った天体

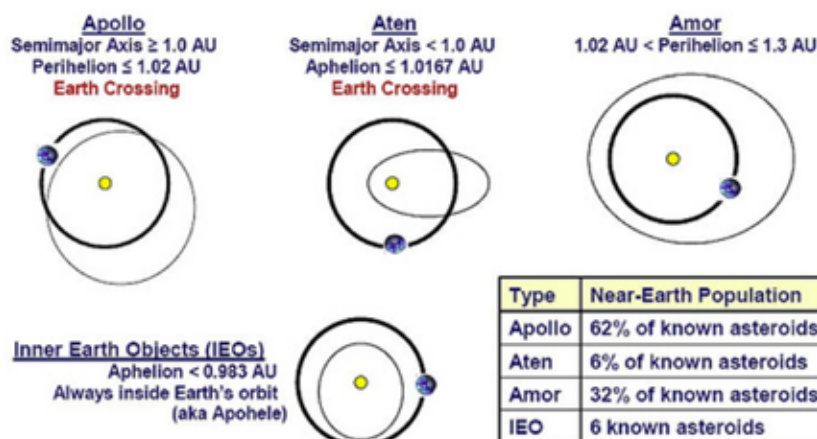


Figure 1. Near Earth Asteroid Orbit Types

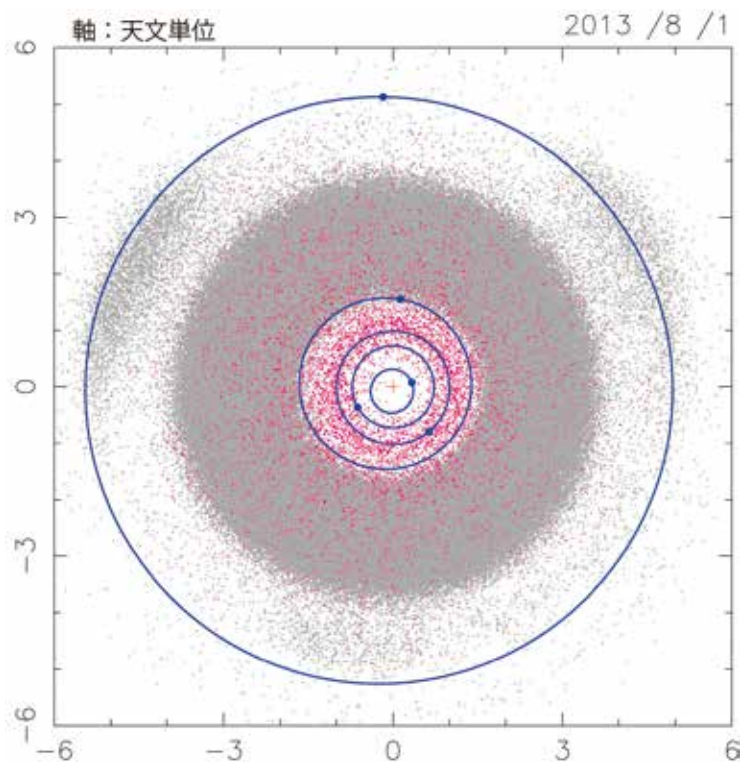
JPLのWebより

NEOの型別個数 2018年6月30日現在

NEAの型	個数
Apollo	9198
Aten	1349
Amor	7777
Atira=IEO	30
合計	18355
NEC	107

40

小惑星とNEOの分布と数



2018年9月の時点で、発見され軌道が求められている小惑星：

約79万個

確定番号付き：

約52万個

地球軌道に接近するもの：

約18,700個

赤い点はNEOを示す

41

小惑星ニアミスランキング

2018年6月現在

NO	接近距離(km)	接近日	小惑星	推定直径 (m)
1	地球衝突	2018年6月2日	2018 LA	2
2	地球衝突	2008年10月 7日	2008 TC3	2
3	地球衝突	2014年1月2日	2014 AA	2
4	11800	2011年 2月 4日	2011 CQ1	1
5	12900	2004年 3月31日	2004 FU162	5
6	13500	2008年10月 9日	2008 TS26	0.7
7	18000	2017年10月20日	2017 UJ2	1
8	18700	2011年 6月27日	2011 MD	7
9	20300	2009年11月 6日	2009 VA	5
10	20900	2017年3月2日	2017 EA	2
11	30100	2016年1月12日	2016 AH164	3
12	30800	2008年10月20日	2008 US	1
13	33800	2004年12月19日	2004 YD5	3
14	35800	2013年12月23日	2013 YB	1
15	37200	2016年1月14日	2016 AN164	2
16	38900	2010年11月17日	2010 WA	3
17	39500	2015年11月15日	2015 VY105	4
18	39600	2016年3月11日	2016 EF195	20

マイナープラネットセンターのWebより、接近距離が4万km以下のものを抽出した。接近距離は地球中心からの距離である。大きさは、小惑星のアルベド（反射率）を0.25と仮定したときのおおよその値である42

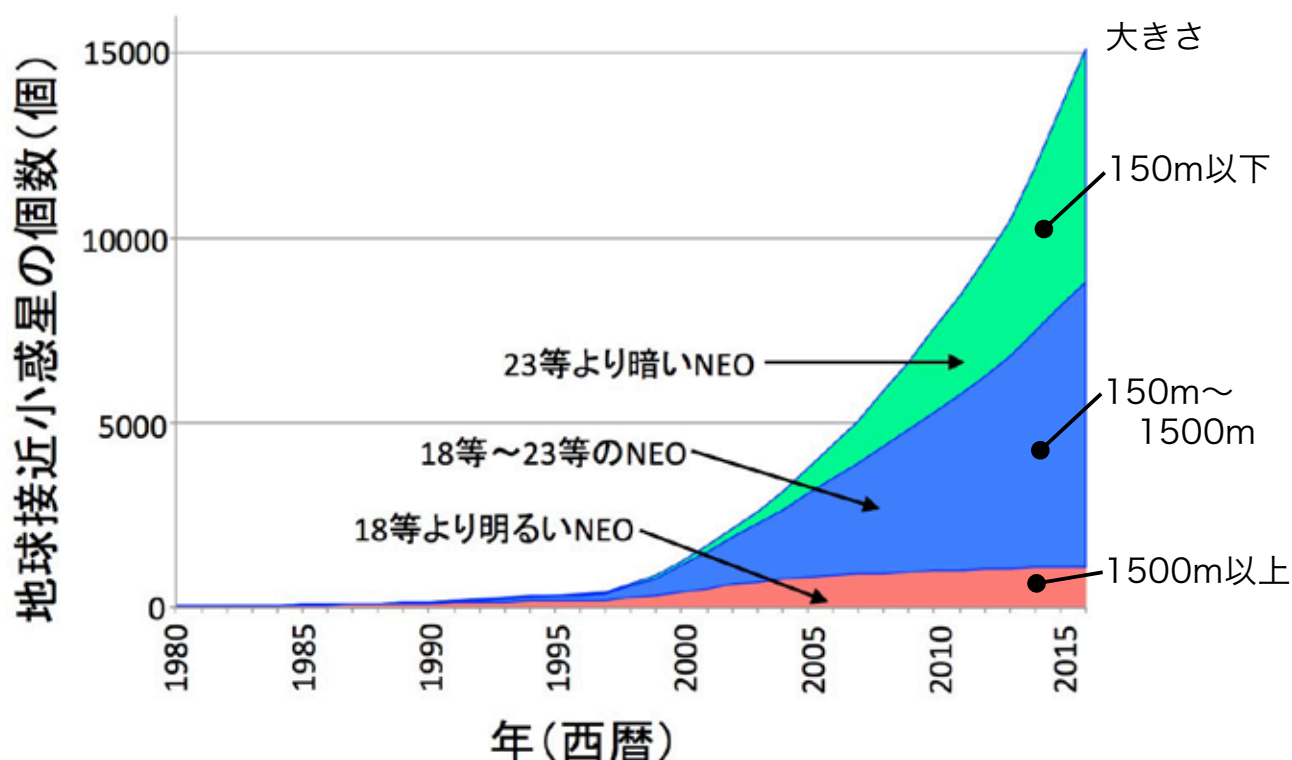
100m以上の小惑星のニアミス 2018年6月現在

NO	接近距離 (km)	接近日	小惑星	大きさ (m)
1	325000	2011年11月 8日	(308635) 2005 YU55	110
2	432000	2006年 7月 3日	2004 XP14	350
3	453000	1996年 5月19日	1996 JA1	210
4	489000	2015年10月31日	2015 TB145	260
5	528000	2002年 8月18日	2002 NY40	440
6	554000	2008年 1月29日	2007 TU24	250
7	628000	2011年 4月25日	2011 JA	150
8	684000	1989年 3月22日	(4581) Asclepius	210
9	709000	1994年11月24日	1994 WR12	110
10	741000	1937年10月30日	(69230) Hermes	840
11	833000	2002年 1月 7日	2001 YB5	240
11	918000	2017年12月18日	2017 YH1	150
12	951000	2013年11月26日	2013 NJ	110
13	1060000	1981年 5月18日	(143651) 2003 QO104	1700
14	1160000	1976年10月20日	(2340) Hathor	240
15	1220000	2002年 4月 6日	2002 FD6	110
16	1240000	2014年3月4日	2014 EG45	110
17	1250000	2002年 4月 6日	2014 HQ124	420

マイナープラネットセンターのWebより、絶対等級が22等以下のもの（より明るいもの）を抽出した。大きさは、小惑星のアルベド（反射率）を0.25と仮定したときのおおよその値である。

43

NEOの発見数（累積）



44

国際的な動き

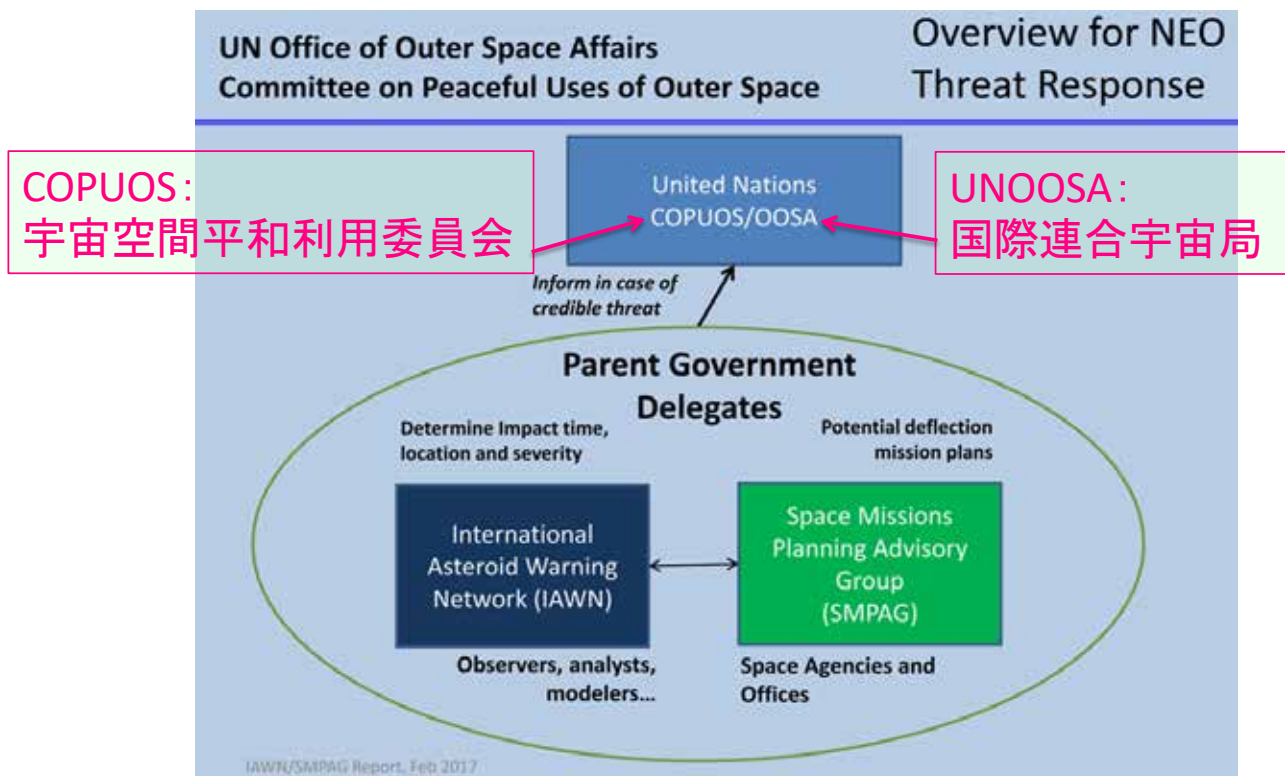
45

天体衝突に関する国連の動き

- 1999年：UNISPACE III → NEOについて議論をすべし
- 2001年：国連宇宙空間平和利用委員会（COPUOS：Committee on the Peaceful Uses of Outer Space）の科学技術小委員会（STSC：Scientific and Technical Subcommittee）にアクションチームを設置する。
- 2007年：NEOのWorking Groupが設立。
- 2013年は2月11日～22日（←ロシア隕石は2/15）、および、6月17-18日の会合で議論。
- NEOについては、小天体衝突問題に対応する国際的な枠組みについて議論がなされ、次の2つの組織を設立することを提言。
 - IAWN：International Asteroid Warning Network
 - SMPAG：Space Mission Planning Advisory Group
- 2013年12月：国連総会で了承（2014年から活動開始）

46

IAWN と SPMAG



IAWN/SMPAG report in COPUOS Feb 2017 より

47

IAWN と SPMAG

IAWN : International Asteroid Warning Network

- 地球に接近・衝突する天体を発見そして軌道を確定し、さらに地球に衝突する場合にはその予測をすることが主目的
- 天文台など天体を観測できる機関が中心
- <http://iawn.net>



SMPAG : Space Mission Planning Advisory Group

- 地球に衝突する天体が発見された場合、どのように衝突回避をするか、被害を最小限にするかを検討することが主目的
- 各国の宇宙機関がメンバー
- <http://www.cosmos.esa.int/web/smpag>



48

Planetary Defense Conference

■天体の地球衝突問題について、多角的な方面から議論をする国際会議。

■これまでの会議

- 2004年：米国・アナハイム
- 2007年：米国・ワシントンDC
- 2009年：スペイン・グラナダ
- 2011年：ルーマニア・ブカレスト
- 2013年：米国・フラッグスタッフ
- 2015年：イタリア・フラスカティ

2017年に、日本で開催
2017年5月15-19日@未来館



49

Asteroid Day : アステロイド・デイ



ツングースカの日である6月30日を記念して、天体衝突を考える日

Asteroid Day is a global awareness campaign where people from around the world come together to learn about asteroids and what we can do to protect our planet, families, communities, and future generations from future asteroid impacts. Asteroid Day is held each year on **June 30**, the anniversary of the largest impact in recent history, the 1908 Tunguska event in Siberia.

50

Asteroid Day Co-Founder



Grig Richters Rusty Schweickart



Danica Remy



Brian May



2016年



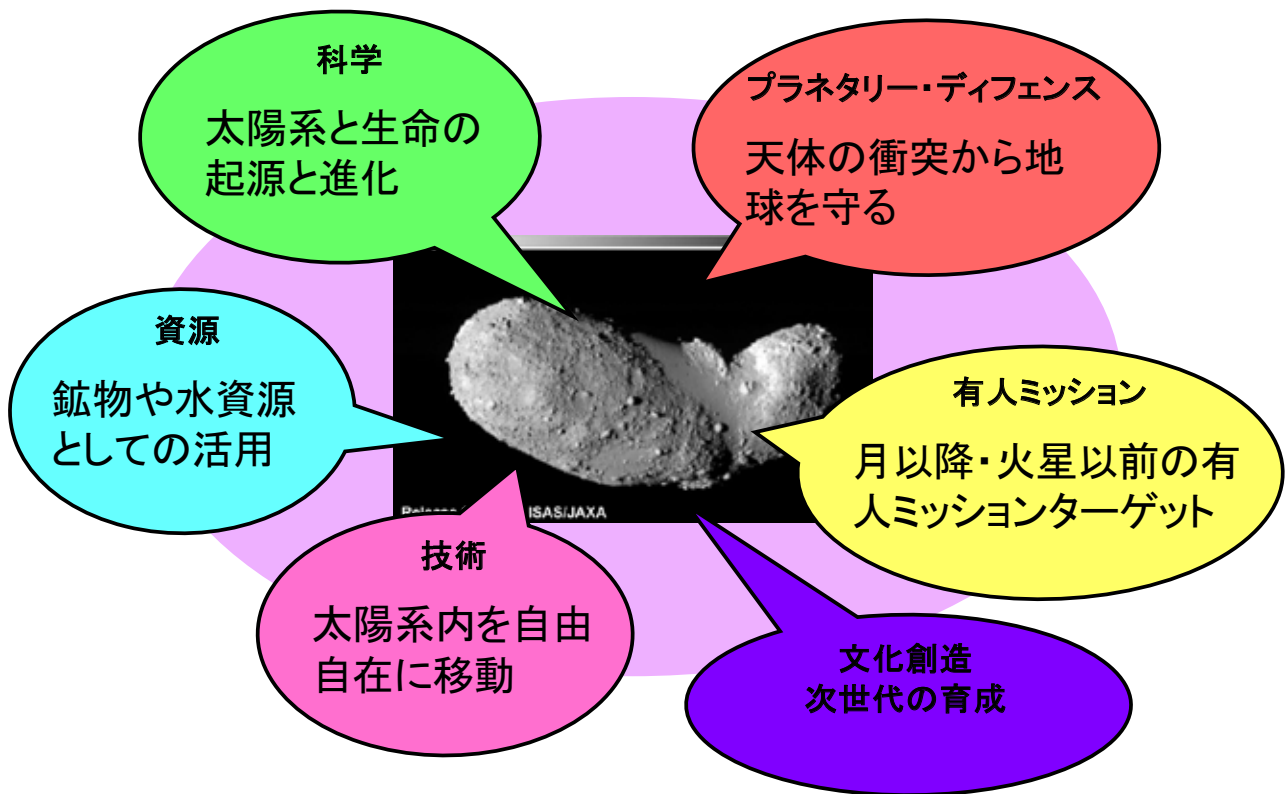
2017年

君の名は。



映画『君の名は。』公式サイトより

太陽系小天体の重要性



53

さいごに・・・

今後、どうするか・・・

54