

「はやぶさ2」トークライブ VOL.3

スペースガード

「はやぶさ」 「はやぶさ2」の役割

2016.06.12
相模原市立博物館

吉川真 (JAXA)

天体衝突：フィクション



映画：ディープインパクト
彗星が地球に衝突！



映画 アルマゲドンより
小惑星が地球に衝突！



雑誌「ニュートン」より：
富士山のような山に直径10kmの小惑星が衝突！

6500万年前の大絶滅を想定しているが、直径10km以上の小惑星はほぼ発見し尽くしたと考えられており、当面はこのような衝突を心配する必要はない。

衝突してくる天体を破壊するストーリーになっているが、破壊してもあまり意味がない。

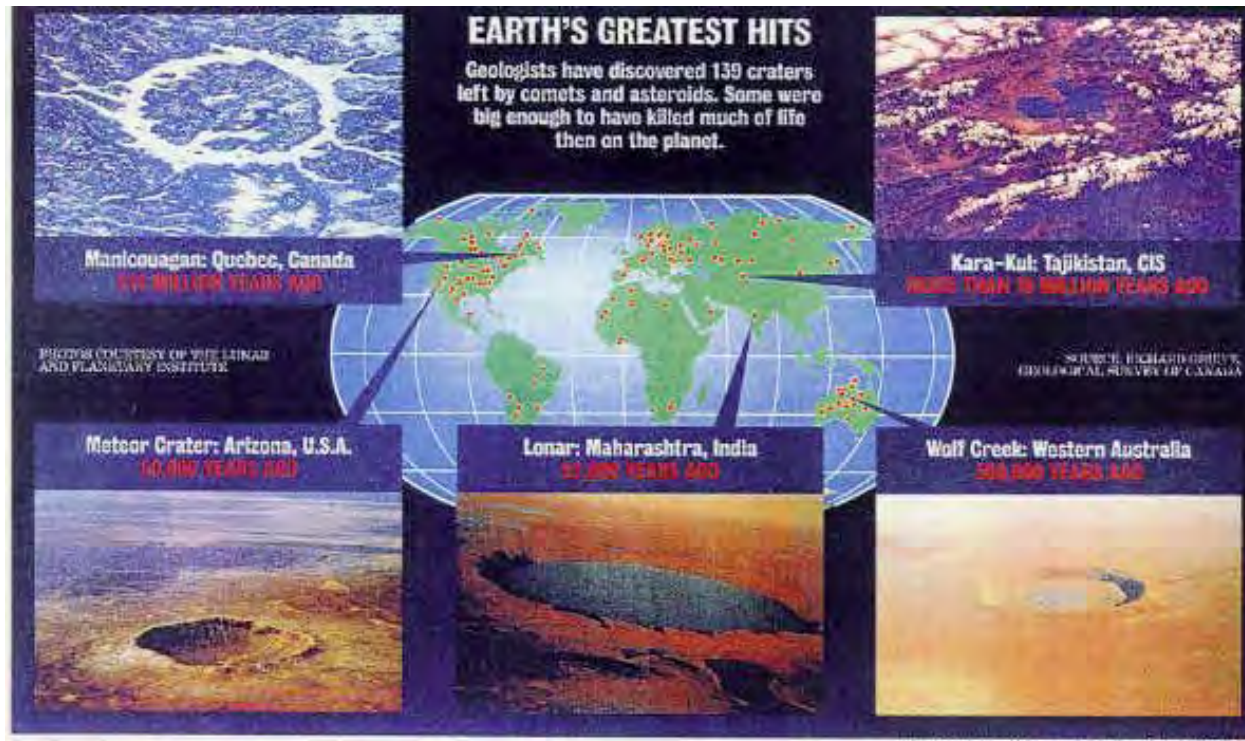
このイラストは大げさすぎ。そもそもトータチスは、当面、地球に衝突しない。



小惑星トータチスが2000年9月26日に地球に衝突？

図は、パンフレットや雑誌から、講演用に筆者がスキャンしたもの

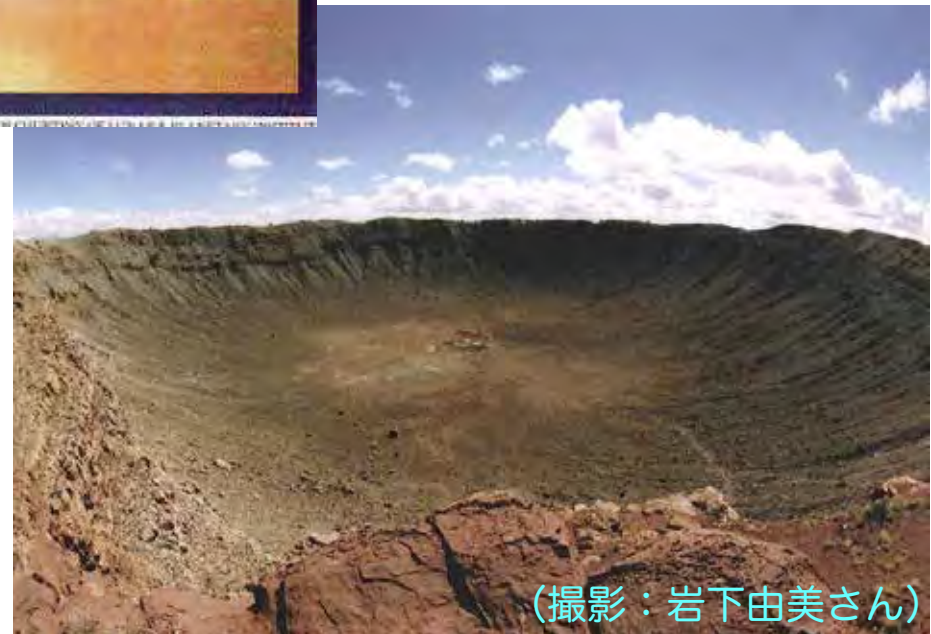
実際の天体衝突



地球上には天体衝突によるクレーターが150個ほど発見されている。地球は、水や風による風化に加えて、大陸が地下に潜り込む運動のために昔の表面がどんどん消えていく。そのために、月面のように沢山のクレーターは存在しない。

地球上の衝突クレーターの記事。(ニュースウィーク誌より)

アリゾナの隕石孔。バリンジャー・クレーターとも呼ばれる。直径1km余りで深さは200mほど。5万年くらい前に直径が50m程度の鉄質の隕石の衝突によると考えられている。



(撮影：岩下由美さん)

スペースガードとは

- 小惑星や彗星のような太陽系小天体の地球衝突問題を扱う活動。
- センセーショナル的、無責任的に扱われがちな天体衝突という問題に対して、科学的に検討する。（観測、理論）
- 地球に接近しうる天体(NEO)をなるべく早期にすべて発見しその軌道を把握することが第一の目的。（NEO : Near Earth Object）
- 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（故磯部琇三先生による）。
- 2000年頃からは国連でも議論が始まる。

方針

- まずは地球に衝突する可能性がある天体を発見する。
- 次に、追跡観測を行い軌道を正確に決める。
- 軌道が決まれば、衝突の可能性は計算で分かる。
- 衝突の可能性のある天体が見つければ、より注意して観測を続ける。
- 衝突回避策を検討する。
 - ・ 相手を知る
 - ・ 技術的課題の検討

← ここまでは
現在進行中

← これが難しい

最近の天体衝突

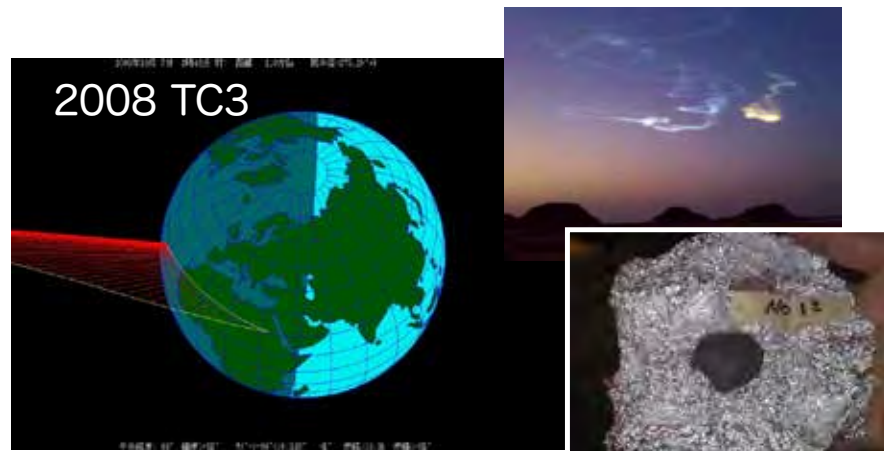
図は、Web等から取得



ニューヨークに落ちた隕石。
ピークスキル隕石（1992年10月9日）



ペルーに落ちた隕石の跡と採取された隕石。
カランカス隕石（2007年9月15日）

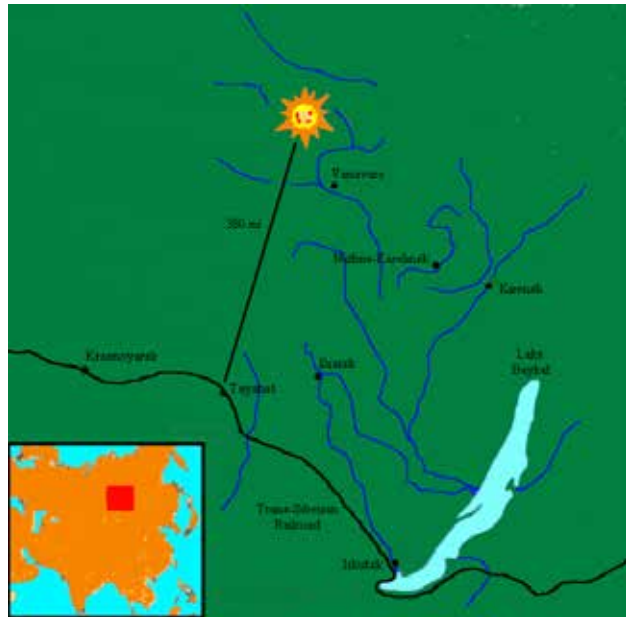


初めて事前に衝突が推定された隕石。
スーダン北部に衝突。アルマハータ・シ
ッタ隕石（2008年10月7日）



大きな被害をだしたロシア・チェリャビン
スク隕石。（2013年2月15日）

ツングースカ大爆発（1908年）



1908年に起こったツングースカ大爆発は、直径が60m程度の小天体の衝突によると考えられている。約2000平方kmの森林が被害を受けた。衝突のエネルギーは広島型原子爆弾の千個分と言われている。

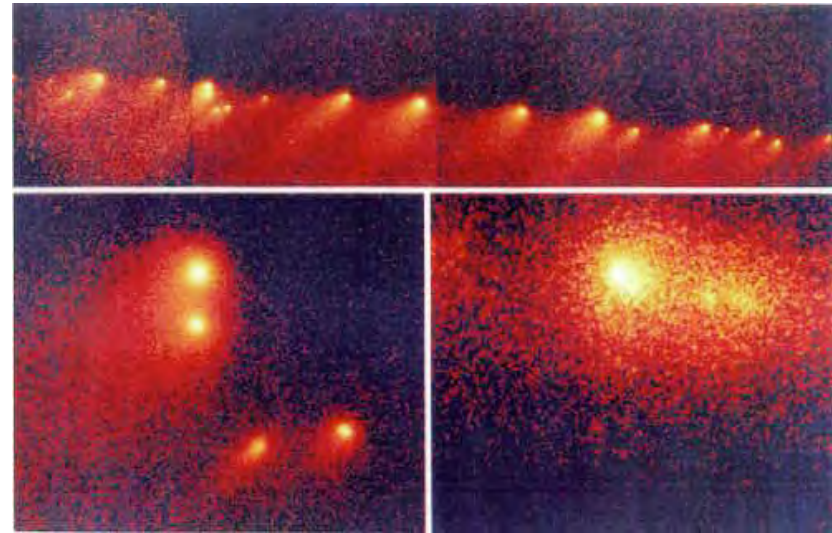


現在の様子

図は、Web等から取得

木星への彗星衝突

- 1994年に木星にシューメイカー・レビー第9彗星が衝突。
- 20個ほどに分裂した彗星核が次々と木星に衝突し、木星表面に衝突の跡をつくった。
- 衝突した彗星核の大きさは直径が数km程度であるが、木星表面の変色域は地球規模のスケールにもなった。



地球の大きさと比べてみると...



This image in light of 700 nm wavelength of the G and R sites was taken at 21:11 UT on 20 July, just after the Q impact, at Pic du Midi, which has a reputation for having some of the best seeing anywhere; on Earth's surface when conditions are good. The sharpness of this image compares quite favorably with the near-simultaneous HST image. It also illustrates the dramatic appearance of this face of Jupiter: the planet's atmosphere is seen in silhouette against the bright background of the planet's surface.



At least eight impact sites are visible simultaneously in this HST image, taken at 09:29 UT on 21 July, four hours after the B impact. They are

図は、ハッブル宇宙望遠鏡などより

6550万年前のできごと：恐竜絶滅

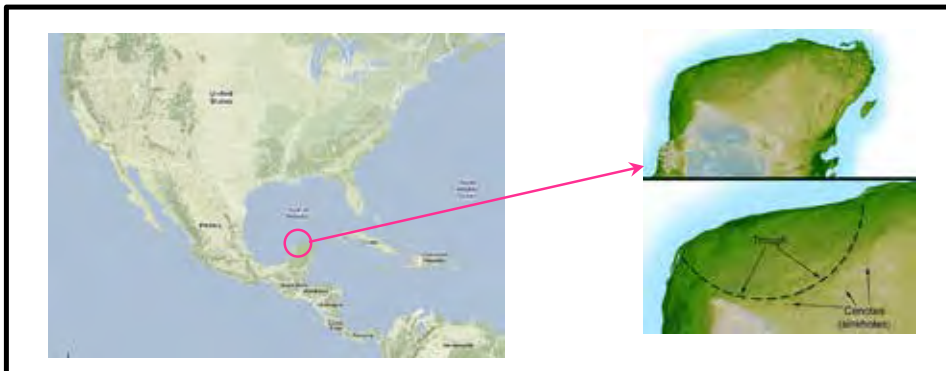


イラスト：
Don Davis

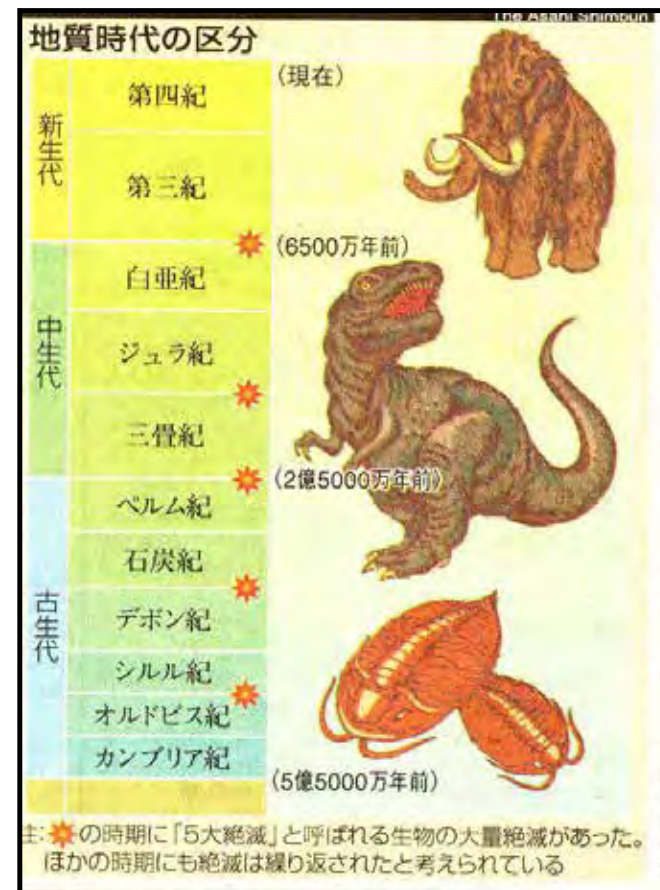


イラスト：
池下章裕

ユカタン半島のチクシュループ・クレーター
(直径180km、6550万年前)



- ・ 6550万年前に恐竜などたくさんの生物が絶滅。
- ・ 地質年代が中生代から新生代へと転換。
- ・ 直径10kmくらいの小天体の衝突が原因という節が有力。(衝突した場所は、ユカタン半島)



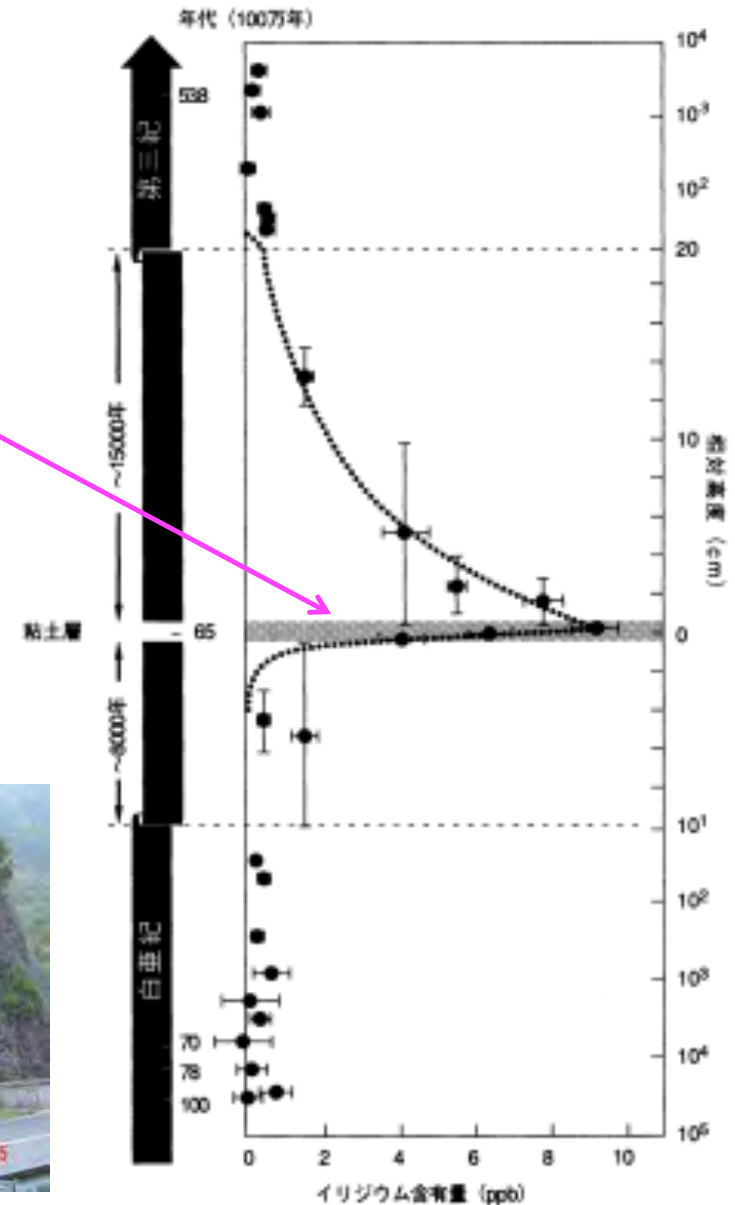
朝日新聞記事より

K-T (K-P, K-Pg) 境界

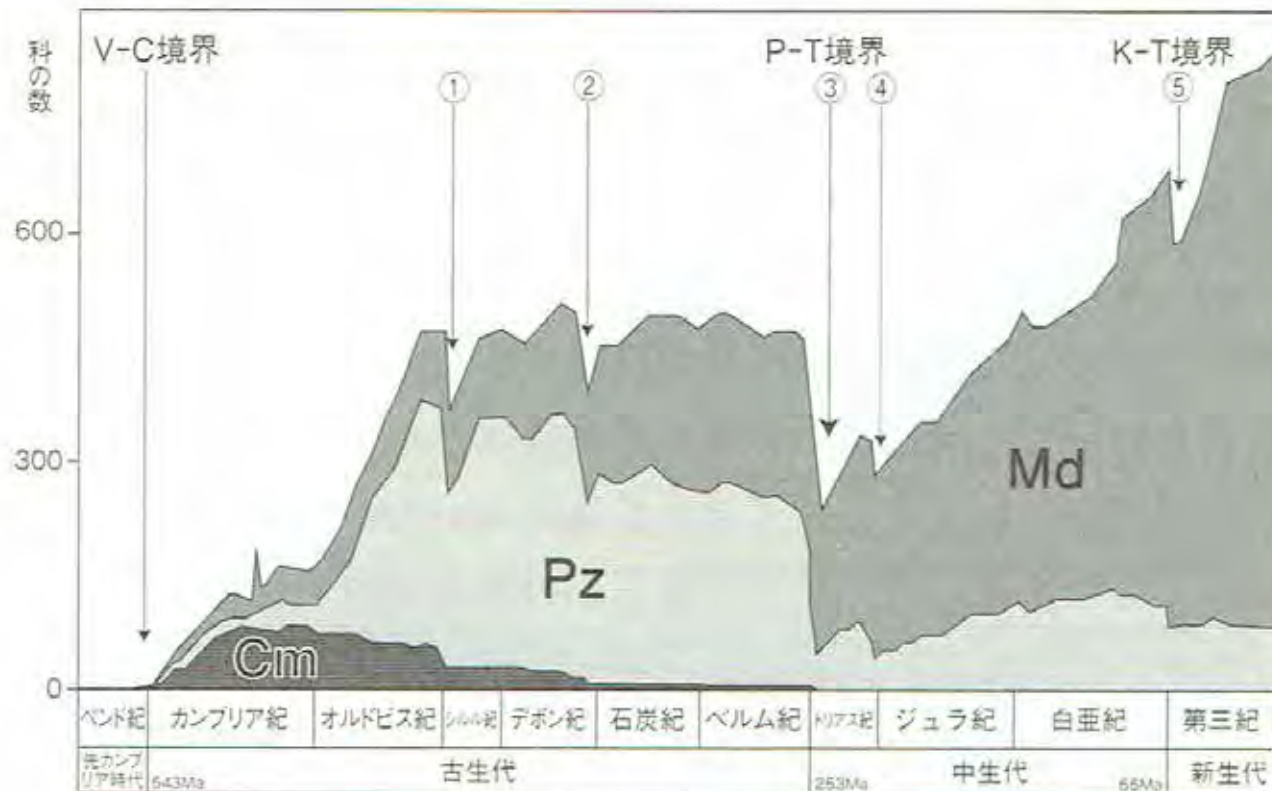
- 6550万年前の地層
- 中生代白亜紀 (Cretaceous: ドイツ語でKreide) と新生代第三紀 (Tertiary) の間 (ただし、現在では古第三期Paleogeneという名称が正しい)
- 上下の石灰岩層の間に粘土層
- この粘土層には、多量のイリジウムが含まれる
- イタリア・Gubbioの地層が有名 (最初に詳しく研究される)
- アルバレス父子によって、天体の衝突による恐竜絶滅説が提案



イタリア・Gubbio



生物の大量絶滅



V-C境界はベンド紀－カンブリア紀境界，P-T境界はペルム紀－トリアス紀境界，K-T境界は白亜紀－第三紀境界。

図15-6 過去 5.5 億年以降の生物の多様性の変化と大絶滅

縦軸は生物の多様性で、カンブリア紀型動物群（Cm）、古生代型動物群（Pz）、現代型動物群（Md）の科の数の変化を示す。①～⑤が大絶滅である。（『全地球史解説』熊沢峰夫ほか、2002、pp.452）

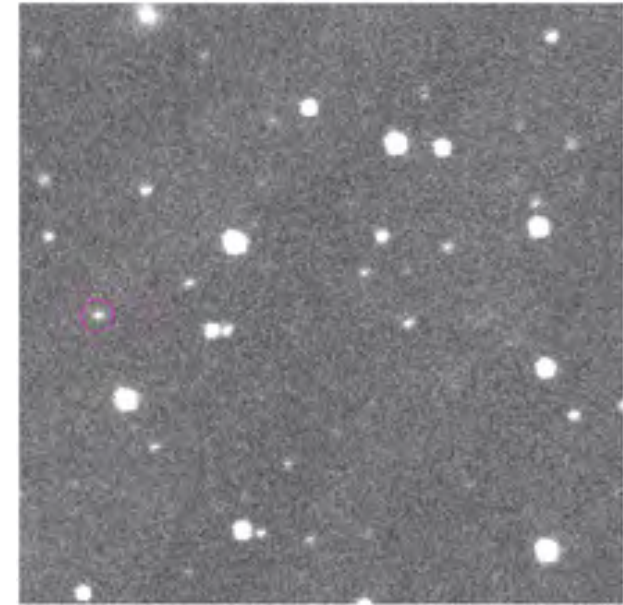
太陽系の科学（放送大学）より

小惑星 2008 TC3 の地球衝突

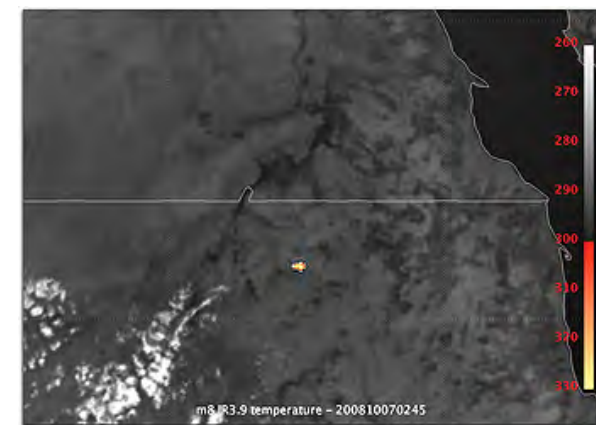
小惑星2008 TC3とは：

※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

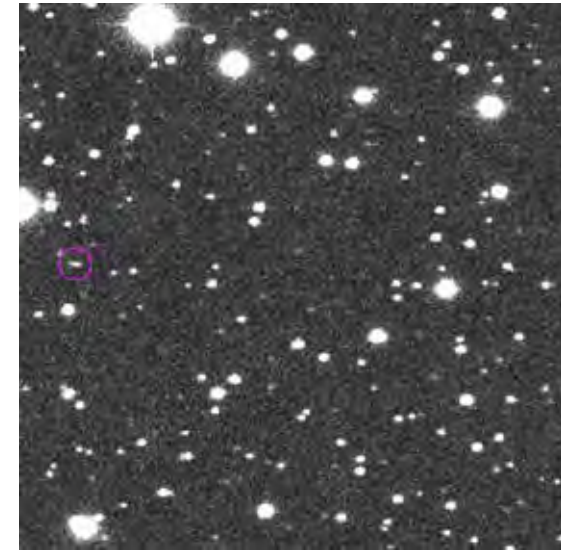


Meteosat-8の画像

図は、Web等から取得

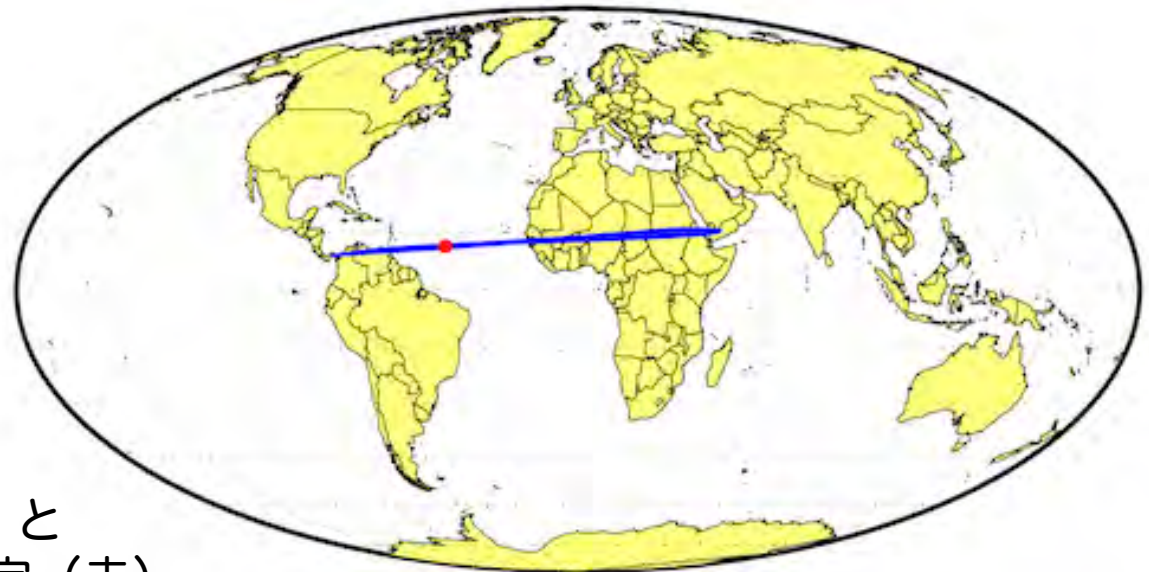
2014 AA

2014年、最初に発見された小惑星2014 AAが、地球に衝突！



発見されたときの2014 AA

- 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



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

図は、Web等から取得

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
- 地球に衝突する可能性を持った天体

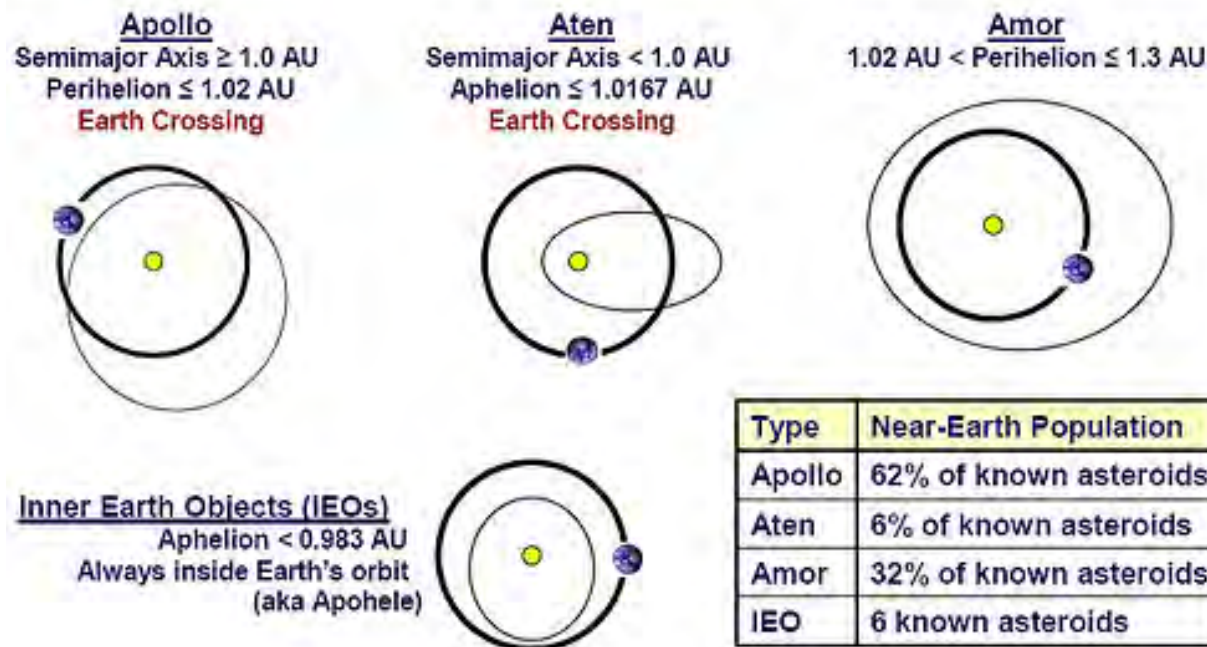


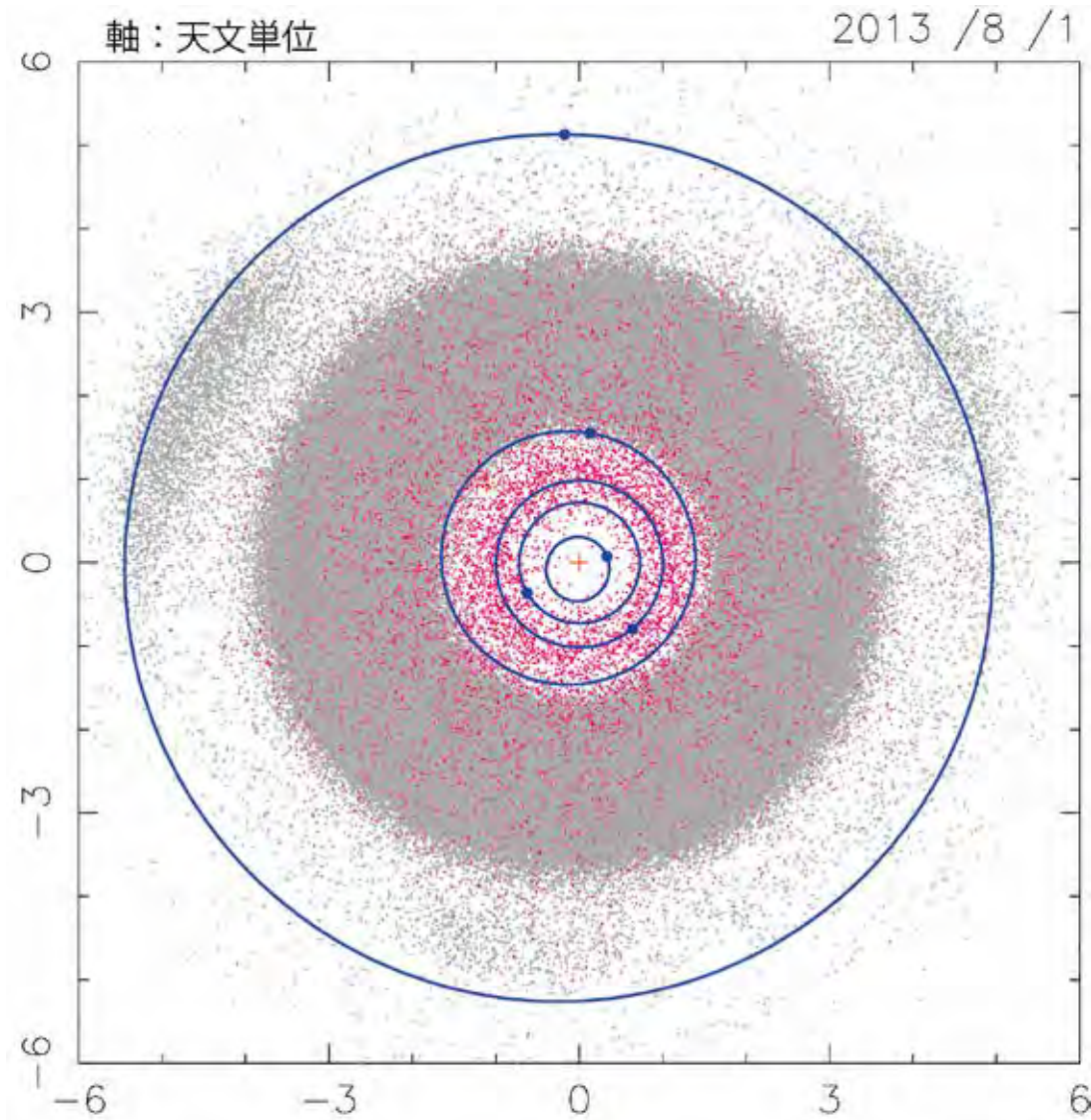
Figure 1. Near Earth Asteroid Orbit Types

NEOの型別個数
(2016年5月29日現在、
MPCのWebより)

型	個数
Apollo	7168
Aten	1055
Amor	6195
Atira=IEO	24

JPLのWebより

小惑星とNEOの分布と数



2016年6月の時点で、発見
され軌道が求められている
小惑星：

約72万個

確定番号付き：

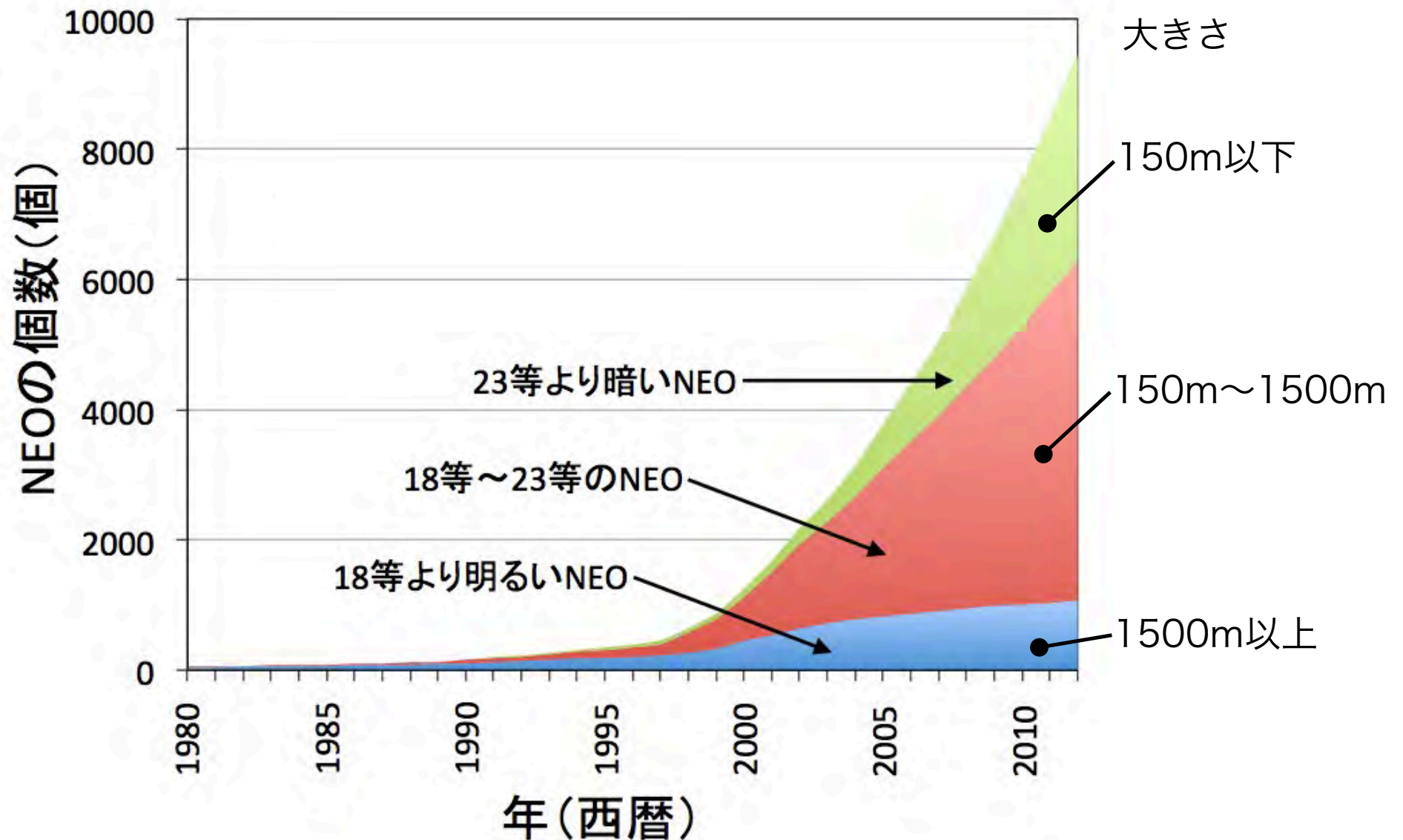
約47万個

地球軌道に接近するもの：

約14,000個

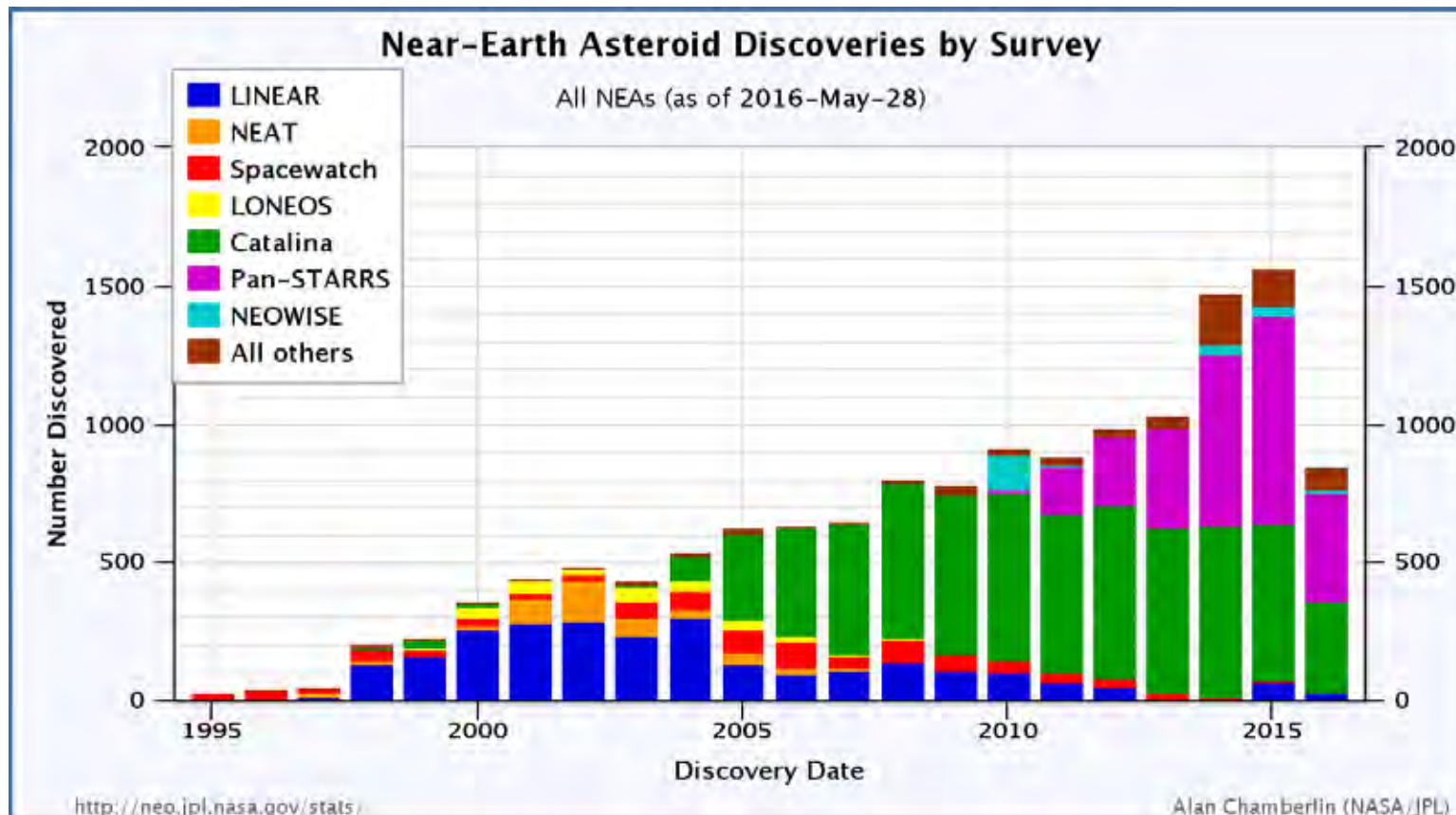
赤い点はNEOを示す

NEOの発見数（累積）



世界のNEO観測プロジェクト

LINEAR	: リンカーン研究所 (米国)
NEAT	: ジェット推進研究所 (米国)
Spacewatch	: キットピーク天文台 (米国)
LONEOS	: ローエル天文台 (米国)
Catalina Sky Survey	: スチュワード天文台 (米国・オーストラリア)
Pan-STARRS	: ハワイ・ハレアカラ
NEOWISE	: 人工衛星からの観測 (米国)



JPLのWebより

2004 MN4についての記事

→小惑星Apothis (アポフィス)

【ワシントン＝共同】25年後に小惑星が地球に衝突するかも。米航空宇宙局（NASA）の小惑星監視グループが23日、今年発見されたばかりの直径約400mの小惑星「2004 MN4」の軌道を計算したところ、2029年4月13日に地球に衝突する確率が約300分の1あると結果が出た。

2004.12.24 朝日新聞(夕)

25年後に小惑星衝突？

NASAは「観測が進んで詳細な軌道のデータが分かってくれば、衝突の危険はゼロになる可能性も大きい」としているが、仮に衝突すれば、津波などの大きな被害が予想されるという。

小惑星は今年6月に米アリゾナ州で観測者が初めて見つけ、今月18日にオーストラリアで再び観測された。地球より小さい円を描いて太陽の周りを323日かけて回り、その間に2回、地球の軌道を横切る。

NASAの推定によれば、小惑星は2029年に、地球と月の距離の2倍ほどに当たる約78万kmの距離まで地球に近づく可能性が最も高いという。

NASA推定

直径400m、確率は300分の1

2004.12.25 東京新聞

【ワシントン＝共同】25年後に小惑星が地球に衝突するかも。米航空宇宙局（NASA）の小惑星監視グループが23日、今年発見されたばかりの直径約400mの小惑星「2004 MN4」の軌道を計算したところ、2029年4月13日に地球に衝突する確率が約300分の1あると結果が出た。

2029年 4月

13日の金曜日

小惑星 地球衝突？

NASA観測

に衝突する危険性を示す十の乗の確率がある。米航空宇宙局（NASA）の小惑星監視グループが23日、今年発見されたばかりの直径約400mの小惑星「2004 MN4」の軌道を計算したところ、2029年4月13日に地球に衝突する確率が約300分の1あると結果が出た。

2004.12.25 読売新聞(夕)

【ワシントン＝共同】25年後に小惑星が地球に衝突するかも。米航空宇宙局（NASA）の小惑星監視グループが23日、今年発見されたばかりの直径約400mの小惑星「2004 MN4」の軌道を計算したところ、2029年4月13日に地球に衝突する確率が約300分の1あると結果が出た。

NASA算出

確率300分の1

25年後小惑星が地球に衝突？

NASAは「観測が進んで詳細な軌道のデータが分かってくれば、衝突の危険はゼロになる可能性も大きい」としているが、仮に衝突すれば、津波などの大きな被害が予想されるという。

小惑星は今年6月に米アリゾナ州で観測者が初めて見つけ、今月18日にオーストラリアで再び観測された。地球より小さい円を描いて太陽の周りを323日かけて回り、その間に2回、地球の軌道を横切る。

2004.12.25 毎日新聞

2004 MN4 (アポフィス) の経緯：その1

2004年12月23日 JPL発表

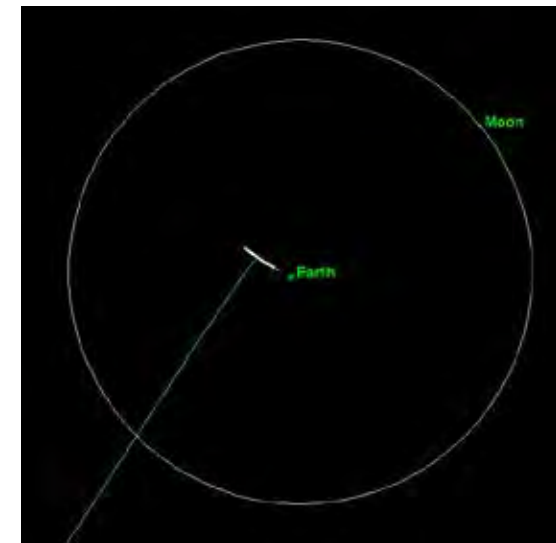
- 2004 MN4が**2029年4月13日**に地球に衝突する確率が1/300（大きさ約400m）
- 2004年6月19日に発見され2晩の観測後、2004年12月18日に再発見されて、軌道が計算
- 注意して観測すべき天体ではあるが、一般の人に注意を喚起すべきことではない（衝突確率に誤差が大きいため）

2004年12月24日 JPL発表

- その後の観測で、2004 MN4が2029年4月13日に地球に衝突する確率が1.6%となった。
- ただし、この値は変動する確率大

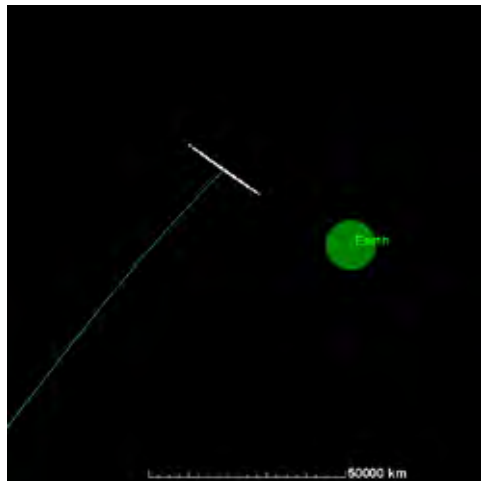
2004年12月27日 JPL発表

- Spacewatchで、2004年3月15日に撮影した写真にこの小惑星が写っていた。このデータや新たな観測データ（200件以上）をもとにして軌道決定を行ったところ、衝突の可能性は完全に否定された。（ただし、2029年4月13日には、64,000kmくらいまで接近する可能性はある。）



地球接近時の誤差範囲。斜めの白い線のどこかを通過する。

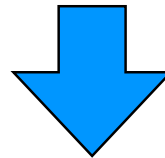
2004 MN4 (アポフィス) の経緯：その2



2029年4月13日：

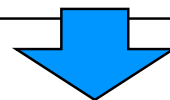
- ・ 地球中心から36,350kmのところを通過。
- ・ 明るさ3.3等。

衝突の可能性はない



ただし...

- 2029年の地球衝突はないが、その後、軌道誤差が増大する。
- 2029年の地球接近で、ある特定の場所 (keyhole：鍵穴) を通過すると、7年後に地球に接近する可能性あり。
- 次の衝突可能性は、**2036年4月13日**で、1/45,000以下程度の確率。



そして、2012年～2013年の観測で...

2036年4月13日に地球に衝突の可能性はないと結論

小惑星ニアミスランキング その1

2016年5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	2008年10月 7日	2008 TC3	2
2	地球衝突	2014年1月2日	2014 AA	2
3	11800	2011年 2月 4日	2011 CQ1	1
4	12900	2004年 3月31日	2004 FU162	5
5	13500	2008年10月 9日	2008 TS26	0.7
6	18700	2011年 6月27日	2011 MD	7
7	20300	2009年11月 6日	2009 VA	5
8	23000	2014年12月3日	2014 XX39	13
9	30100	2016年1月12日	2016 AH164	3
10	30800	2008年10月20日	2008 US	1
11	33800	2004年12月19日	2004 YD5	3
12	35800	2013年12月23日	2013 YB	1

マイナープラネットセンターのWebより、接近距離が5万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。

小惑星ニアミスランキング その2

2016年5月現在

NO	接近距離(km)	接近日	小惑星	推定直径 (m)
13	37200	2016年1月14日	2016 AN164	2
14	38900	2010年11月17日	2010 WA	3
15	39500	2015年11月15日	2015 VY105	4
16	39600	2016年3月11日	2016 EF195	20
17	39900	2014年9月7日	2014 RC	12
18	40600	2014年6月3日	2014 LY21	4
19	41100	2013年 2月15日	2012 DA14 (367943) Duende	40
20	41100	2015年9月22日	2015 SK7	4
21	45900	2008年11月 3日	2008 VM	3
22	45900	2015年2月17日	2015 DD1	2
23	49100	2004年 3月18日	2004 FH	20

マイナープラネットセンターのWebより、接近距離が5万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。

比較的大きな小惑星のニアミス 2016年5月現在

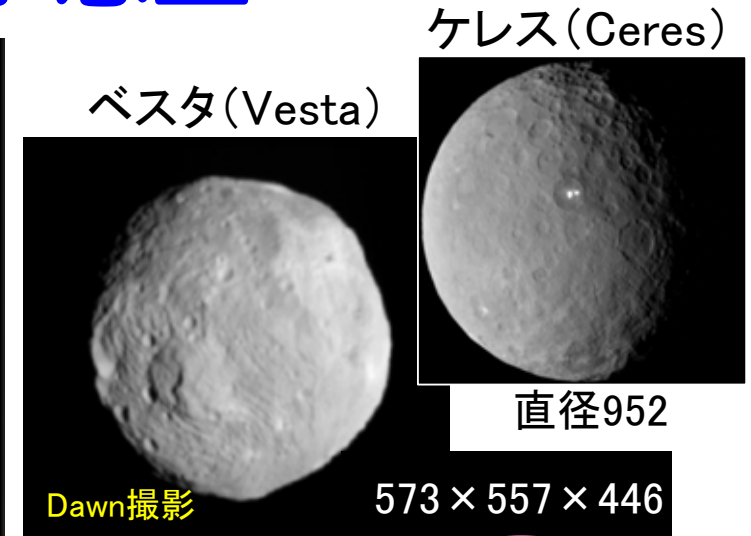
NO	接近距離 (km)	接近日	小惑星	大きさ (m)
1	325000	2011年11月 8日	(308635) 2005 YU55	110
2	432000	2006年 7月 3日	2004 XP14	350
3	453000	1996年 5月19日	1996 JA1	210
4	489000	2015年10月31日	2015 TB145	260
5	528000	2002年 8月18日	2002 NY40	440
6	554000	2008年 1月29日	2007 TU24	250
7	628000	2011年 4月25日	2011 JA	150
8	684000	1989年 3月22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
12	1060000	1981年 5月18日	(143651) 2003 QO104	1700
13	1160000	1976年10月20日	(2340) Hathor	240
14	1220000	2002年 4月 6日	2002 FD6	110
15	1240000	2014年3月4日	2014 EG45	110
16	1250000	2002年 4月 6日	2014 HQ124	420
17	1300000	2014年 6月 8日	2003 GG21	110
18	1470000	2001年 2月26日	2001 EC	530

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。

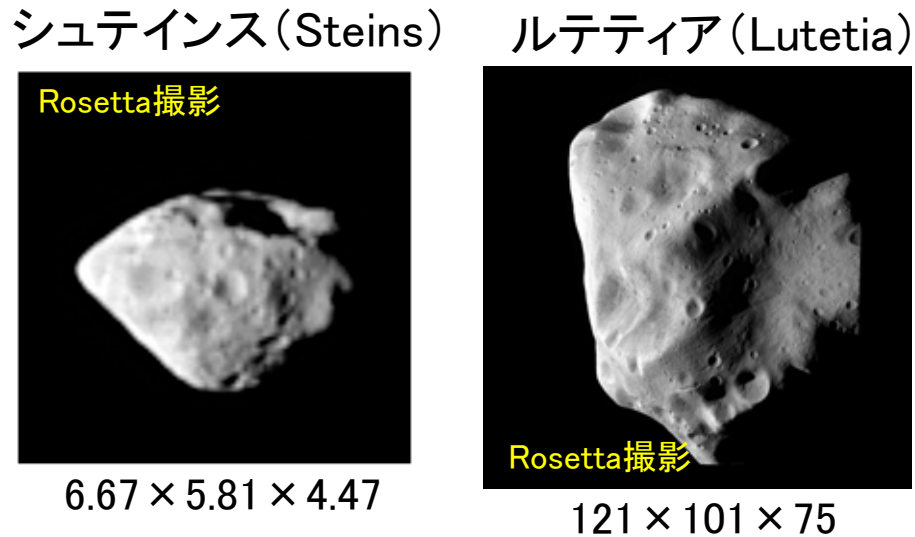
天体が衝突すると騒がれた例 2004年まで

ニュースが流れた年	衝突すると言われた年	天体名	大きさ (直径)	備考
1992年9月	2000年	トータチス	約2.7km	フランスの雑誌に掲載 すぐに否定
1992年10月	2126年	スィフト・タートル彗星	約15.6km	AUC5636 すぐに否定
1998年	2028年	1997 XF11	約1.5km	すぐに否定
1999年	2034年、2039年	1999 AN10	約1km	すぐに否定
1999年	2046年	1998 OX4	約250m	すぐに否定
2000年	2030年	2000 SG344	約40m	衝突確率が1/500。その後0に
2002年	2019年	2002 NT7	約2km	すぐに否定
2003年	2014年	2003 QQ47	約1.5km	すぐに否定
2004年	2029年	2004 MN4	約400m	すぐに否定

探査機が見た小惑星



NEO



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。

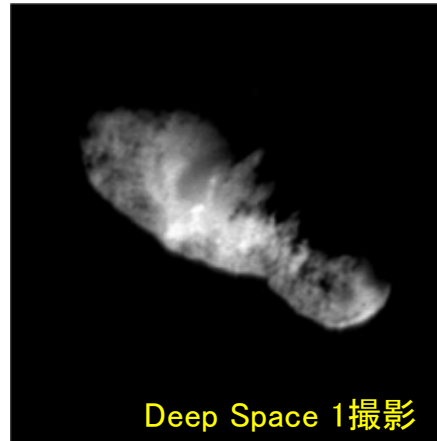
探査機が見た彗星

Halley彗星



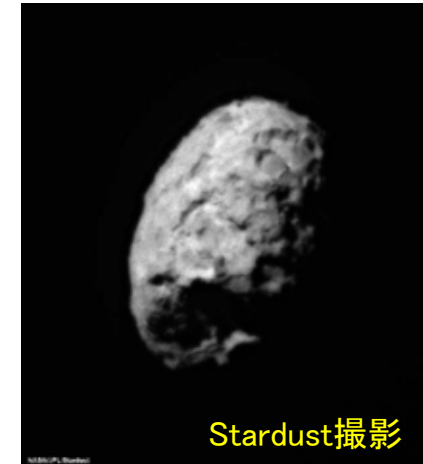
$14.4 \times 7.4 \times 7.4$ km

Borrelly彗星



4.0×1.58 km

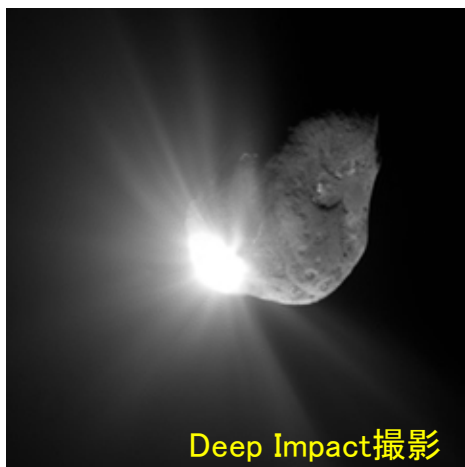
Wild 2 彗星



$5.4 \times 3.8 \times 3.0$ km

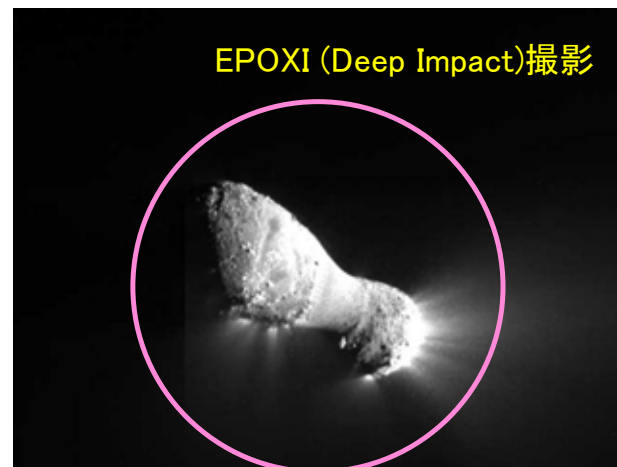
NEO

Tempel 1彗星



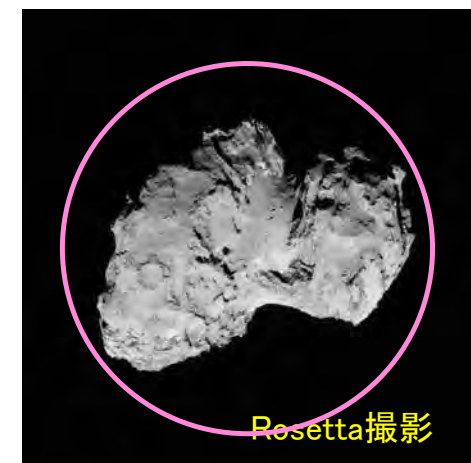
7.6×4.9 km

Hartley 2彗星



1 km程度

Churyumov-Gerasimenko彗星



3.5×4 km

小天体探査のスペースガードへの役割

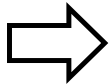
探査の種類	スペースガードとしての目的	具体例
科学探査	小惑星の形状，質量，密度，表面，内部構造などを詳細に把握することで，衝突回避のための情報とする．	ニア・シューメイカー，スターダスト，ロゼッタ，はやぶさ，はやぶさ2，OSIRIS-REx*
軌道変更	探査機を衝突させることで，小天体の軌道を変更する．	ディープインパクト，ドン・キホーテ*，AIDA*，ARM*
軌道の詳細決定	探査機を小惑星近傍に滞在させることで，その小惑星の軌道を正確に把握する．	はやぶさ2，OSIRIS-REx*
観測（発見）	スペースから小天体を発見する．（地上観測における制約を軽減できる：太陽方向からの接近する天体の観測など）	NEOWISE, NEOSSat
観測（物理）	小惑星の大きさや組成について，小惑星まで行かずに推定できる．	IRAS, あかり, WISE, MSX, ISO, Spitzer, Herschel

*印は，まだ打ち上げられていない探査機を示す

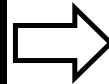
「はやぶさ」 ミッション



打ち上げ
2003年5月9日



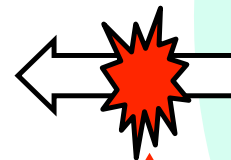
地球スイングバイ
2004年5月19日



イトカワ到着
2005年9月12日



観測・サンプル採取



深刻な
トラブル

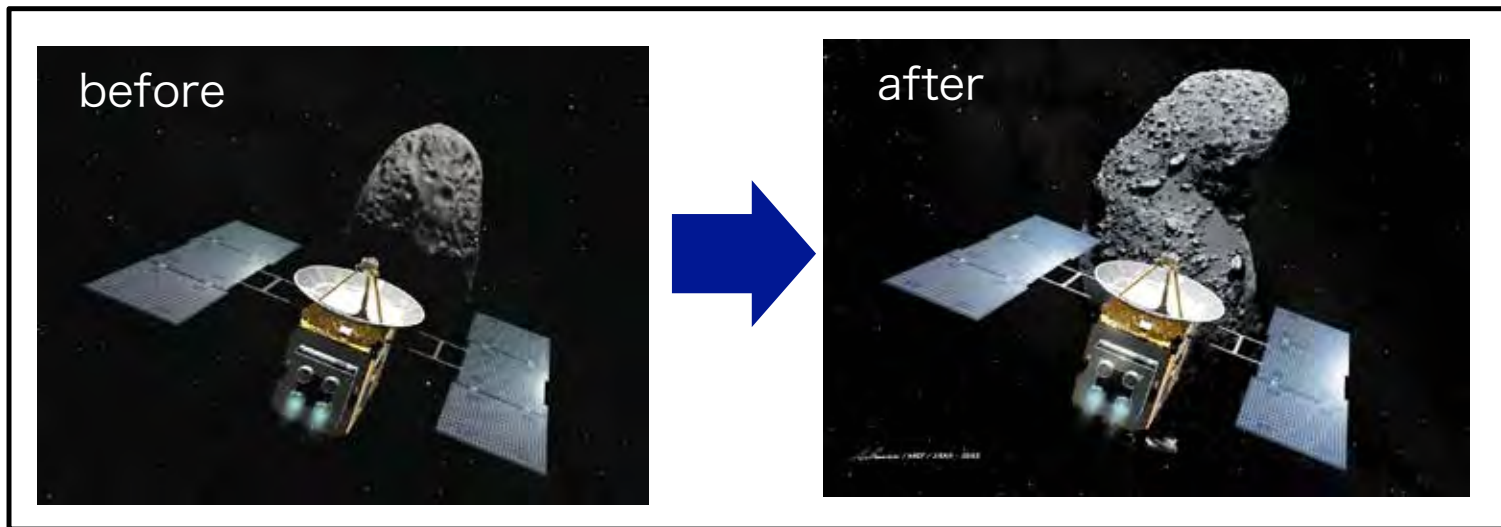


地球帰還
2010年6月13日

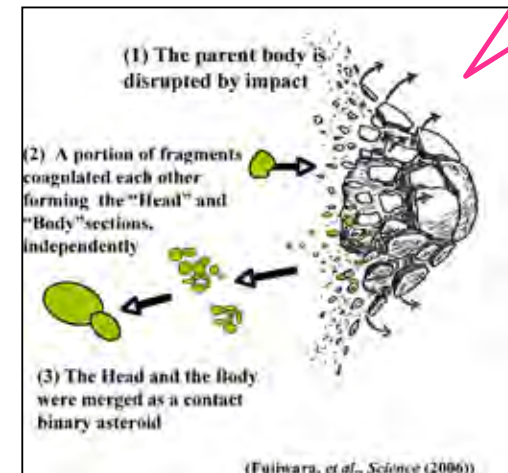
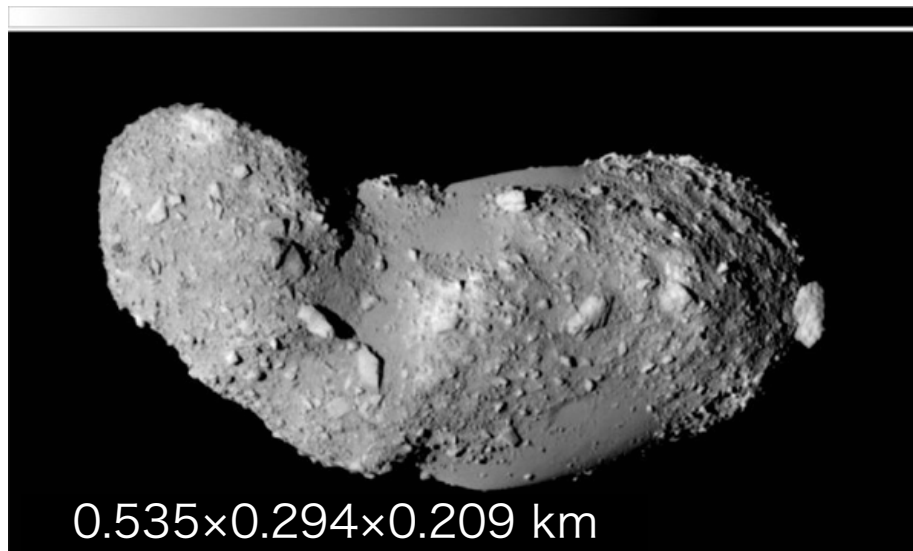


「はやぶさ」の成果

微小NEO（地球接近小惑星）の概念が変わった！

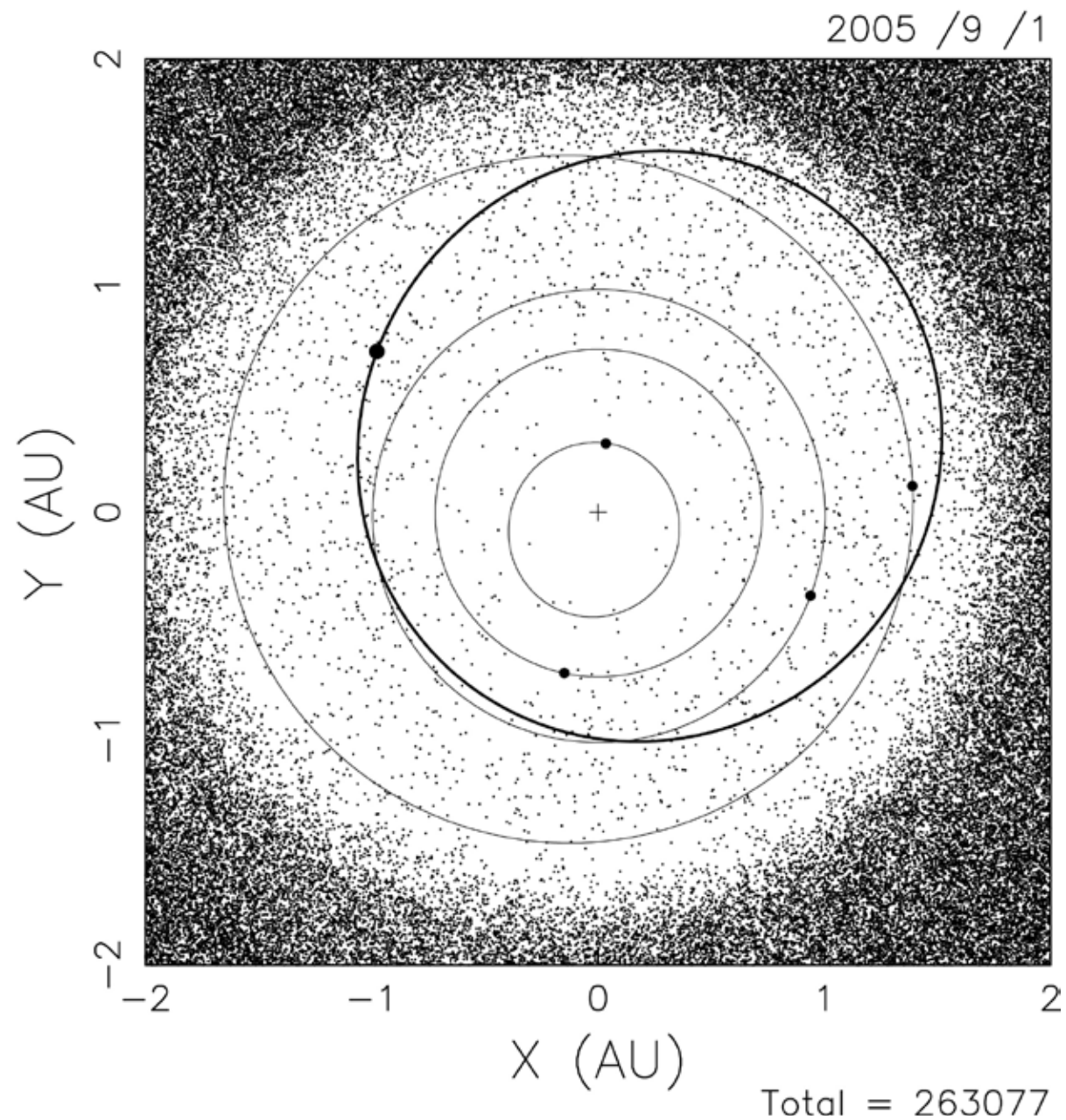


スペースガードからも注目される。

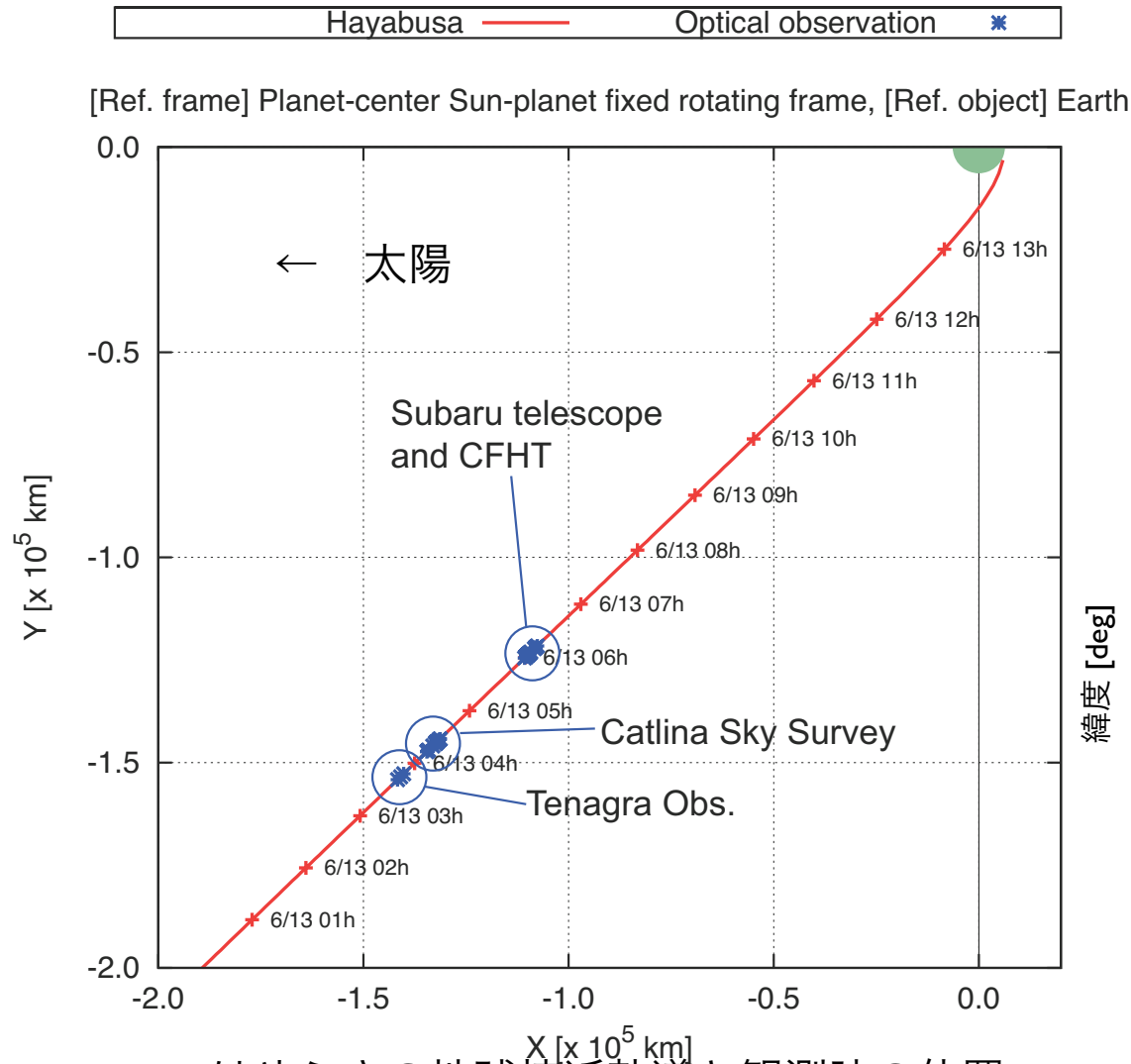


イトカワは“がれき”の集まり
=“Rubble Pile”

小惑星イトカワの軌道

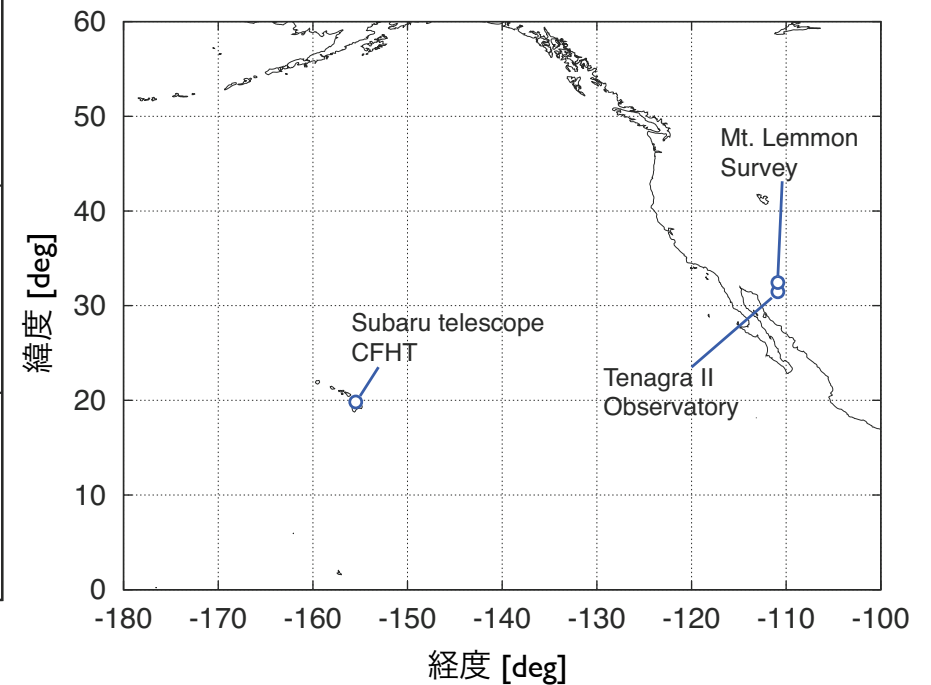


観測に成功した天文台と 観測時の「はやぶさ」の位置



はやぶさの地球接近軌道と観測時の位置
(太陽-地球固定の回転座標系)

Tenagra II Obs.
Mt. Lemmon Survey
すばる望遠鏡
CFHT



観測に成功した天文台の位置

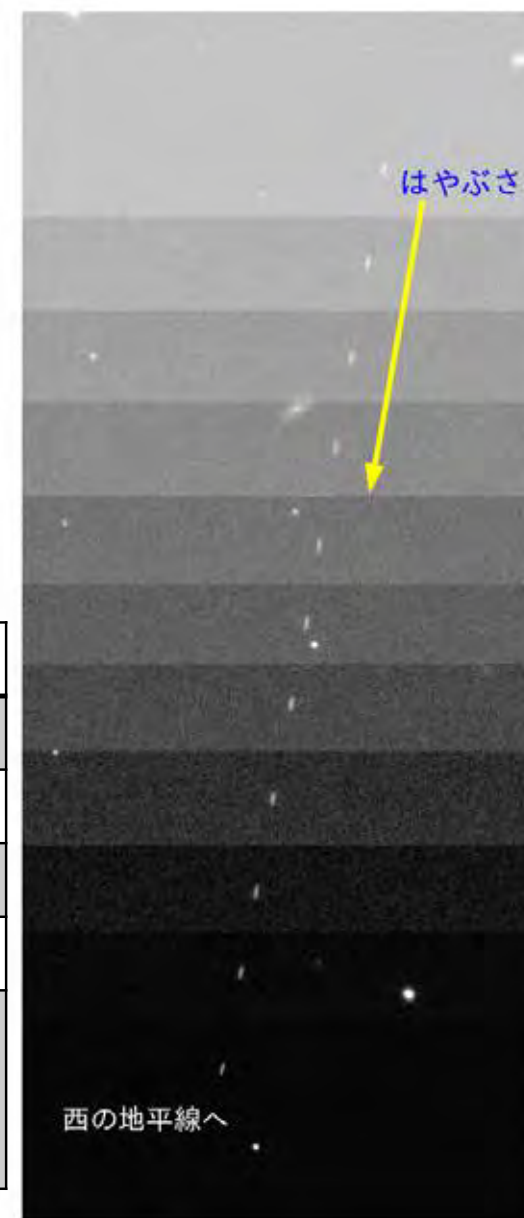
すばる望遠鏡によるはやぶさ観測

すばる望遠鏡にて11データの取得に成功！

- ・ 2010年6月10日、11日、12日の3日間観測。
10日と11日は撮影されなかった。→22.3等より暗かったと推定。
- ・ 12日は観測成功。観測された「はやぶさ」の等級は約21等と推定。

観測についての情報

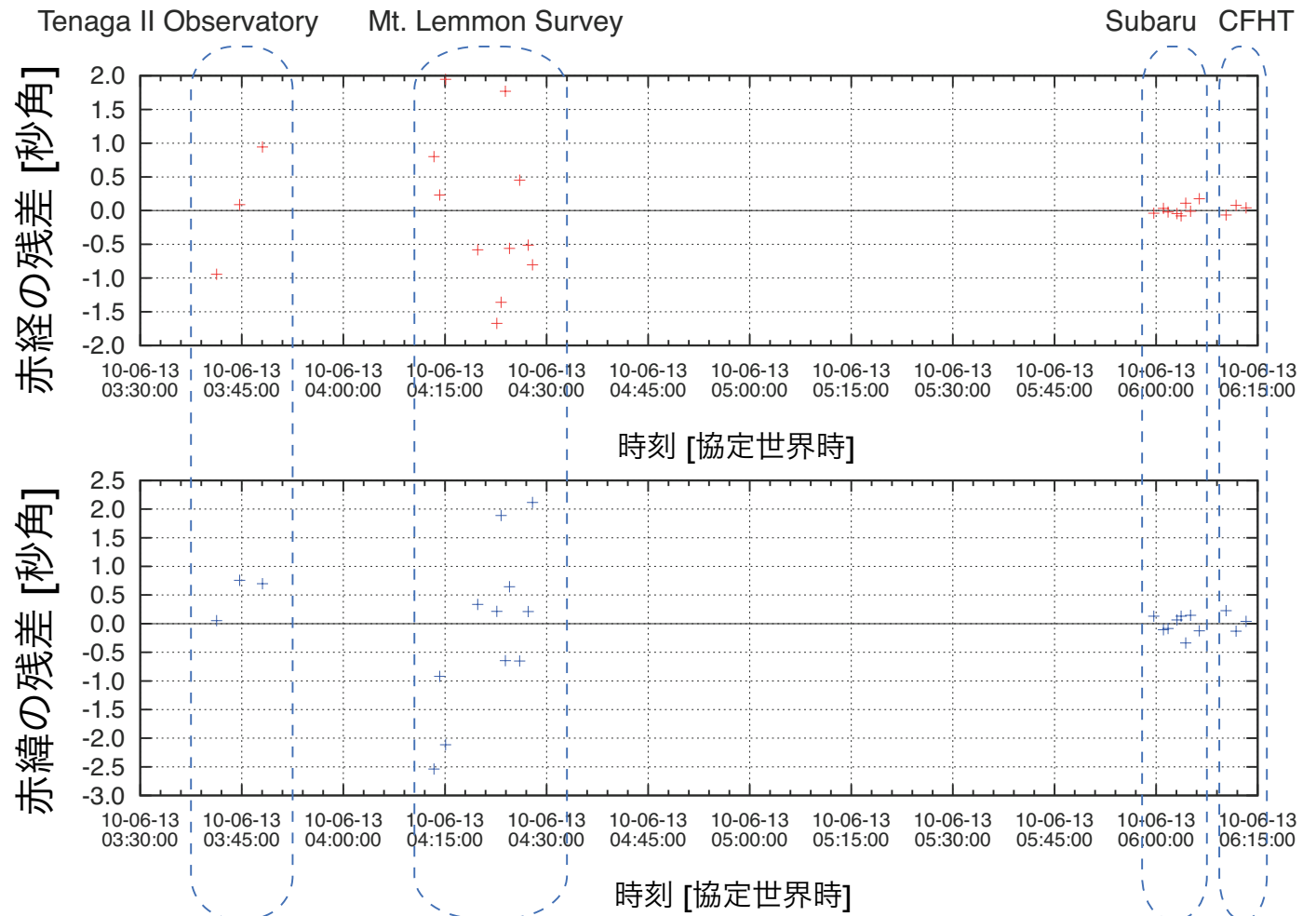
観測装置	Suprime-Cam（すばる主焦点カメラ）
露出時間	5.0 秒 x 11 露出（35～50秒間隔）
フィルター	Vバンド（550ナノメートル）
追尾モード	恒星時追尾
赤経・赤緯	08:56:34, +27:57:33（かに座の方向）
観測に成功した時刻	2010年6月12日、19:59～20:06（ハワイ時間） 2010年6月13日、05:59～06:06（世界時） 2010年6月13日、14:59～15:06（日本時間）



「はやぶさ」の光学望遠鏡によるデータ

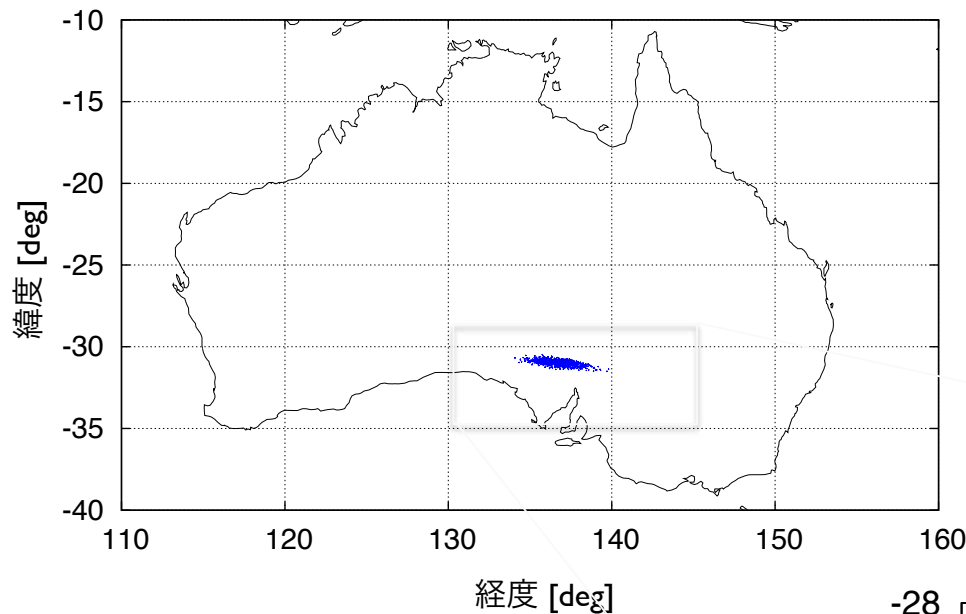
データ個数：合計23データ (Tenaga : 3個、Mt. Lemmon : 9個、すばる : 8個、CFHT : 3個)
観測期間 : 約2時間30分 (2010年6月13日、03:41~06:13 世界時)

地球帰還 : 6月13日 13:52 世界時



残差：
計算された軌道と観
測値との差
(光学観測データの
みを使用した場合)

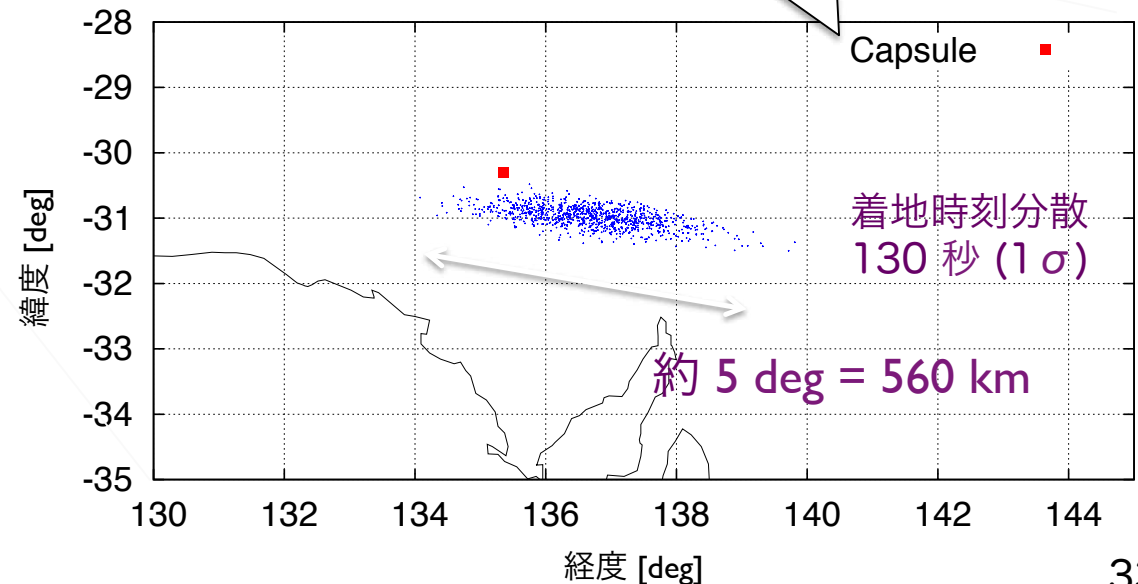
「はやぶさ」を隕石と見なした場合の 衝突位置予測結果



青い点が衝突予測位置。
モンテカルロシミュレーション (1000
点)による。(境界条件はWGS-84楕円
体モデルにおける高度 0 km。)

赤い点は実際のカプセル着地
位置。青い点で示した衝突予
測位置とずれているのは、青
い点の方は、大気による影響
を考慮していないため。

非常に限られたデータ
(23個、2時間半)でも、
天体の衝突位置が、衝
突8時間前に、この図の
ように特定できる。



「はやぶさ2」のミッション

2014年12月3日

打ち上げ

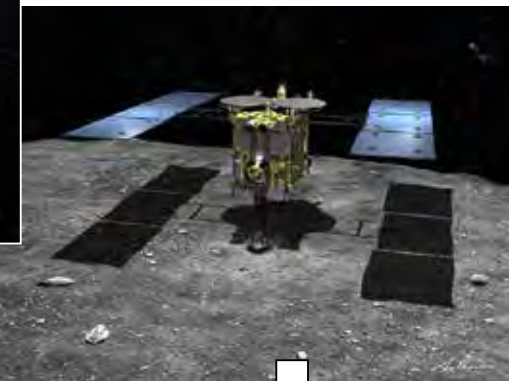


▲
地球スイングバイ
2015年12月3日

2018年6-7月
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。



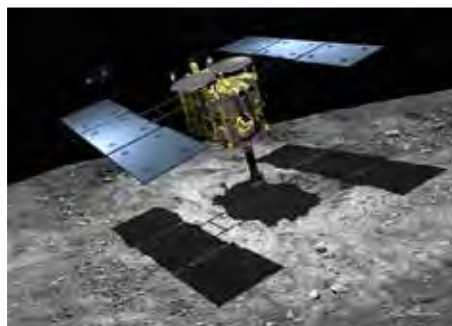
地球帰還
2020年11-12月



サンプル分析

(イラスト 池下章裕氏)

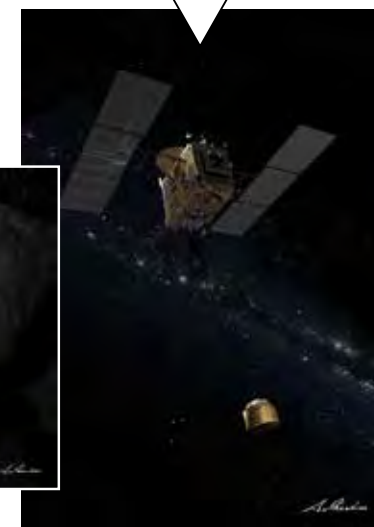
小惑星出発
2019年11-12月



安全を確認後、クレータ
ー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
レーターを作る。

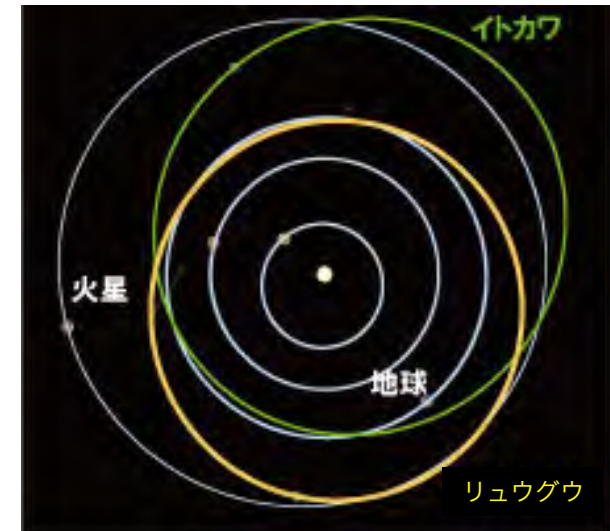


探査対象小惑星の特徴

2015年11月の時点での情報

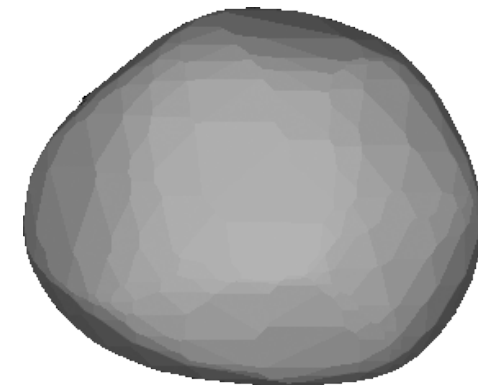
名称	: Ryugu(リュウグウ)
確定番号	: 162173
仮符号	: 1999 JU3
	1999年5月に発見された小惑星
大きさ	: 約900 m
形	: ほぼ球形
自転周期	: 約7時間38分
自転軸の向き	: 正確な推定が困難
反射率	: 0.05 (反射率が1に比べて 小さい＝黒っぽい)
タイプ	: C型(水・有機物を含む物質 があると推定される)
軌道半径	: 約1億8千万km
公転周期	: 約1.3年
密度・質量	: 現時点では不明であるが、 $0.5\text{--}4.0\text{g/cm}^3$ の密度を仮定している。 質量は $1.7 \times 10^{11}\text{kg} \sim 1.4 \times 10^{12}\text{kg}$ 程度。

小惑星Ryuguの軌道



(© JAXA)

推定された形状



(T. Mueller氏による推定形状
を会津大が可視化したもの)

天体の衝突による被害

◆直接的被害

- ・ クレータの形成（衝突してきた天体の20倍程度）
- ・ 大火災
- ・ 大地震
- ・ 大津波

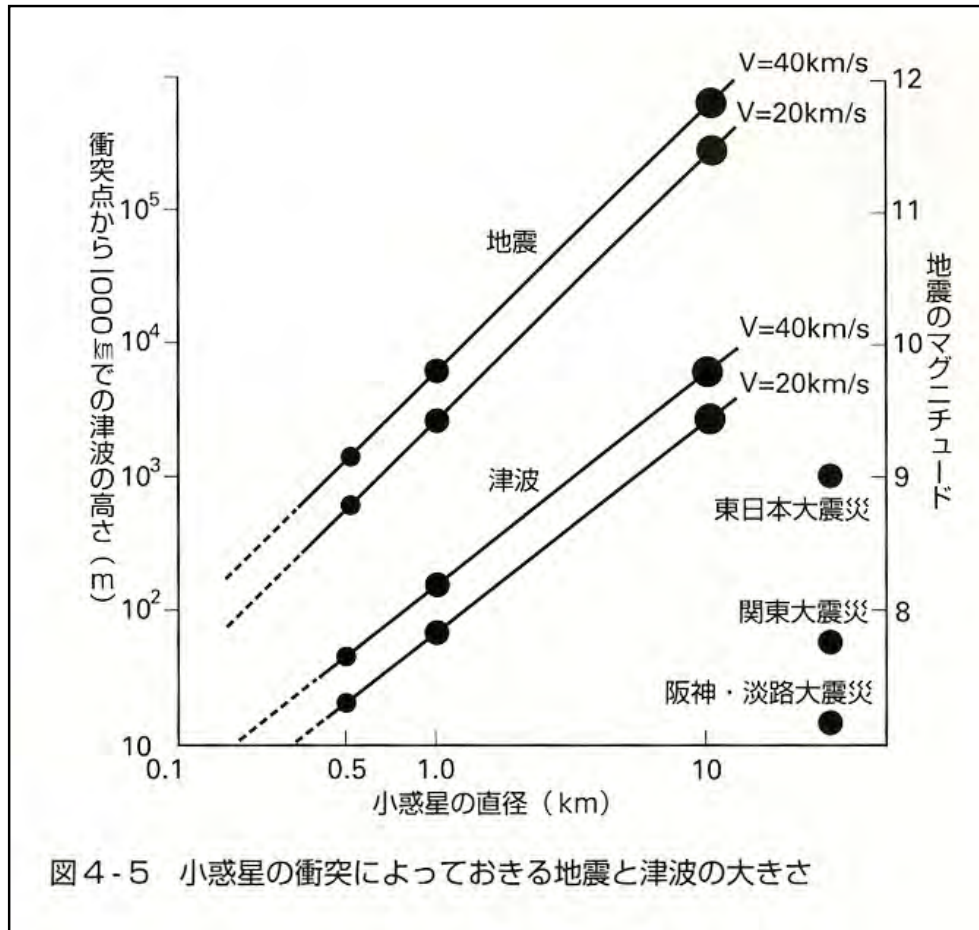
◆間接的被害

- ・ 地球環境の急変（寒冷化、酸性雨、オゾン層の破壊）
- ・ 地球環境への長期的影響（温暖化）

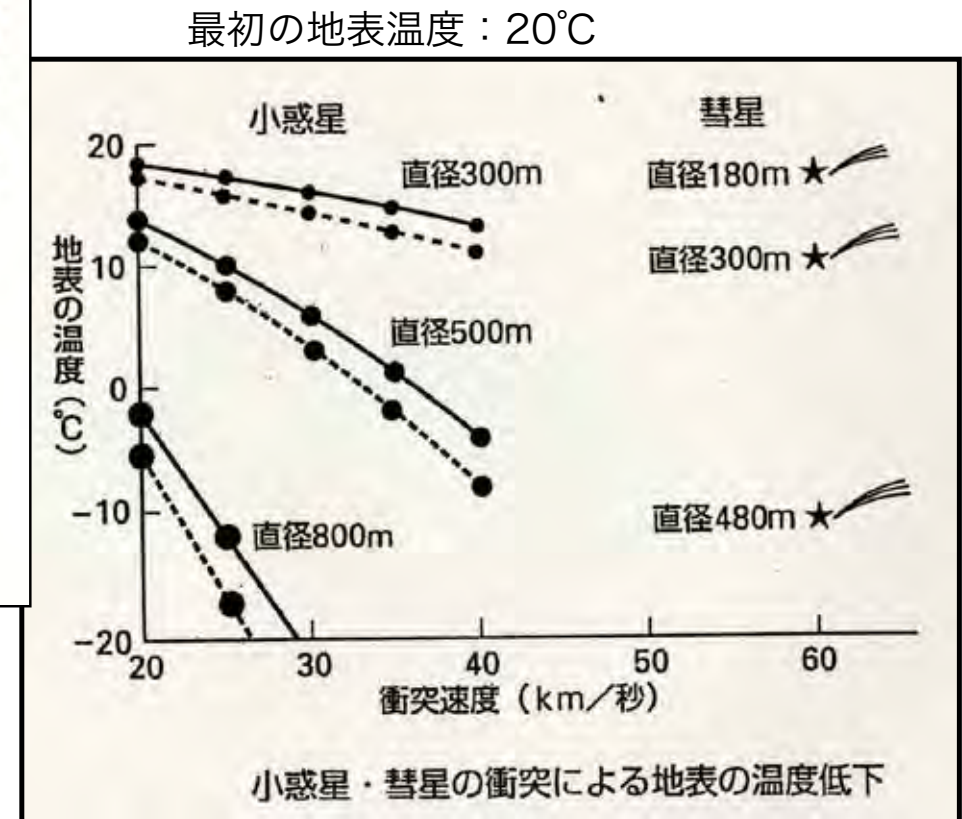
※被害対策を考える上でのポイント

- ・ 天体衝突は人類が経験したことのない被害規模になりうる。
（最悪は人類絶滅だが巨大地震以上の被害）
- ・ ただし、そのような天体衝突が起こる確率は小さい。
- ・ このような「**低頻度巨大災害**」にどのように対処すべきか。

衝突による地震・津波・気温変化



Newton 大隕石 衝突の現実 より



衝突する天体のエネルギー

表 4-2 衝突する小惑星・彗星の運動エネルギー

天体の直径 (m)	質量 (トン)	衝突速度 (km/s)	エネルギー (TNT 火薬換算メガトン) ※ 1
6	340	25	0.025
20	13,000	25	0.94
50	200,000	25	15
100	1,600,000	25	120
500	200,000,000	25	15,000
1,000	1,600,000,000	25	120,000
10,000	1,600,000,000,000	25	120,000,000

天体の形は球、密度は 3g/cm³ を仮定

具体例	質量 (トン)	衝突速度 (km/s)	エネルギー (TNT 火薬換算メガトン) ※ 1
ロシア・チェリャビンスク州 の隕石衝突 (2013 年) ※ 2	10,000	18	0.5
ツングースカ大爆発			20
広島型原子爆弾			0.02
全面核戦争 (「核の冬」の研究で仮定)			10,000

※ 1 : 1TNT 換算トン = 4.184×10^9 ジュール、1 メガトン = 百万トン

※ 2 : 米国・ジェット推進研究所による推定

Newton 大隕石 衝突の現実 より

天体の地球衝突の確率と被害

◆10m程度以下の天体

- ・ 常に衝突
- ・ 被害はほとんど無し（流星、隕石）

◆100m程度の天体

- ・ 数百年に1度程度
- ・ 地域的被害

◆1 k m程度の天体

- ・ 数十万年に1度程度
- ・ 地球的規模の被害

◆10km程度の天体

- ・ 1億年に1度程度
- ・ 地球の激変

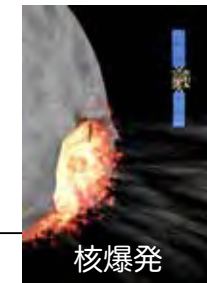
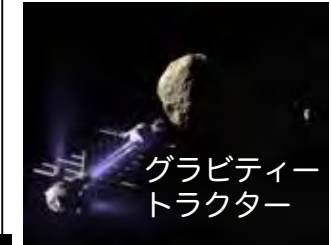
天体の衝突回避の方法と問題点

- 衝突してくる天体を破壊するのは、衝突回避としては不適當。
- 衝突天体の軌道をそらすのがよい。
- ただし、大きく軌道をそらすのは難しく、軌道の変化はわずか。
- 早めに衝突天体を発見して、衝突回避の措置をする。十分な時間が経った後（例えば、数十年後）の衝突を回避するのが現実的。

※問題点：衝突までの時間が十分でない場合や天体が大きい場合の衝突回避策は？ 情報公開は？ 法的制度は？

■衝突回避の方法

- 天体に物体を衝突させて軌道をそらす。
- グラビティー トラクター（引力で牽引する）
- 天体にレーザ光線、太陽光を照射し、軌道をそらす。
- 太陽光圧、熱輻射を利用して軌道を変える。
- 天体から物質を放出し、軌道を変える。
- 核爆発を使う。
- 天体を捕獲してしまう。



「はやぶさ2」 初期の頃の検討

打ち上げ

2014年7月

着陸帰還機と衝突機（インパクタ）は同時に打ち上げられるが、打ち上げ直後から別々の探査機として運用される。



着陸帰還機が先に到着し、小惑星の観測、ローバ（ランダ）の投下、サンプリングを行う。

2018年6月

サンプル分析

地球帰還

2020年12月



2019年8月

衝突機が小惑星に衝突する。



さらなる探査を行う。



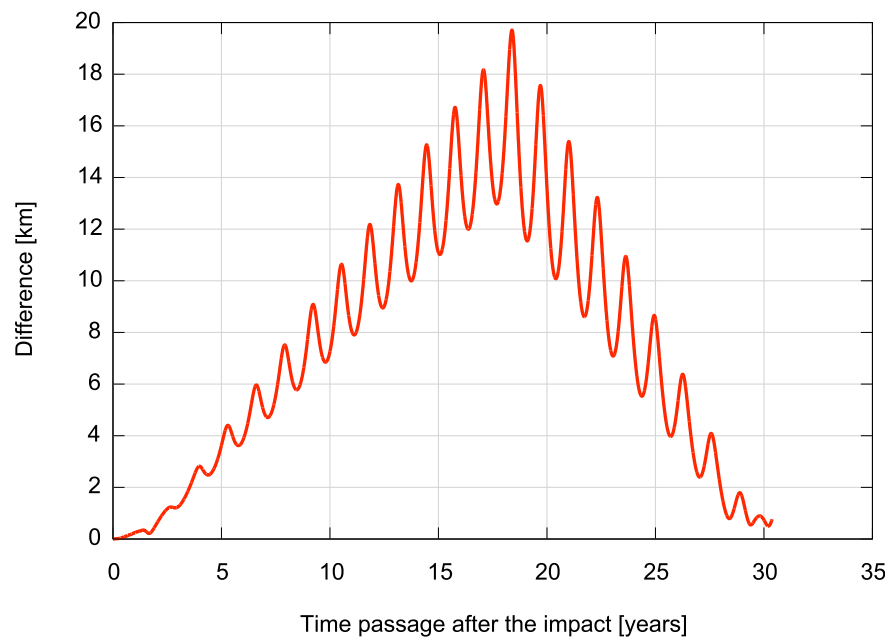
2019年12月

追加されたミッション

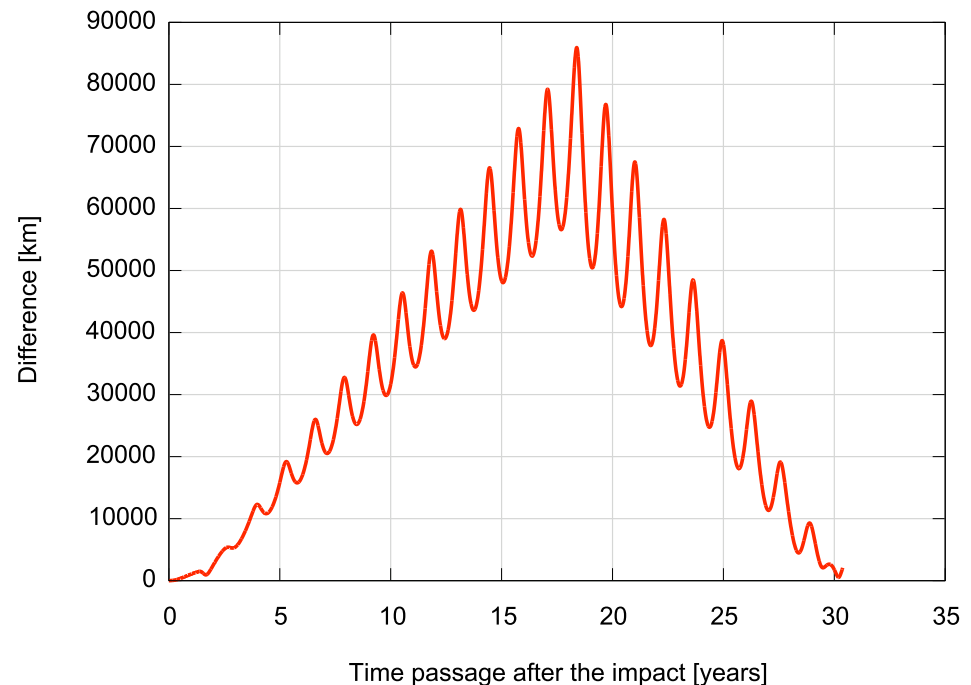
計算例：衝突機による1999 JU3の軌道のずれ

はやぶさ2の「衝突機」（「はやぶさ2」の初期検討のもの）による1999 JU3の軌道のずれの解析結果：

（探査機の衝突があった場合と無かった場合の位置の差）



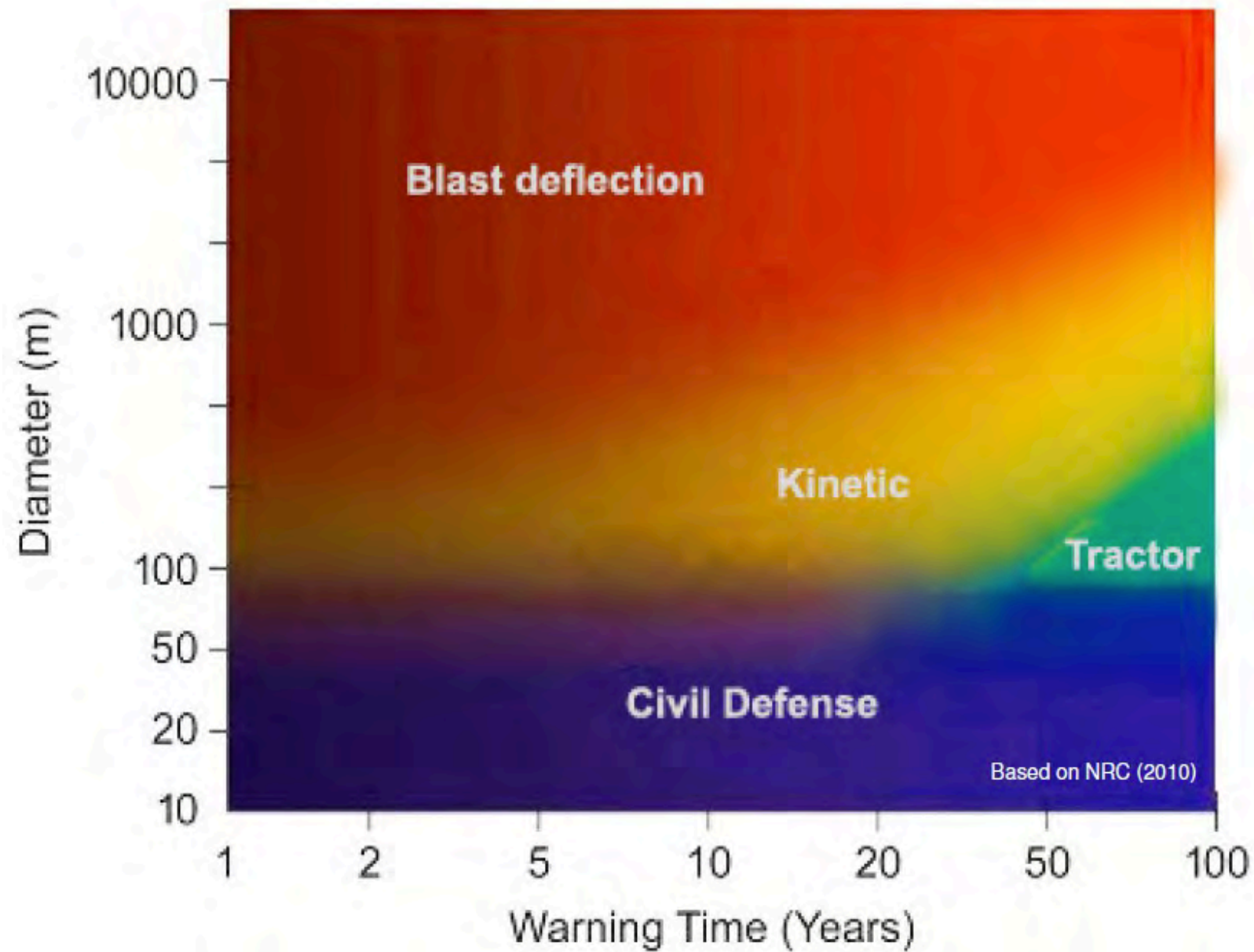
観測された大きさ(980m)を仮定した場合、ずれは数10kmオーダーとなり、地球との衝突回避は無理。



天体の大きさを60mと仮定した場合、数年でずれは1万km以上となり、地球との衝突回避が可能。

計算：山口智宏・吉川真

天体衝突回避



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）

アジア太平洋小惑星観測ネットワーク Asia-Pacific Asteroid Observation Network (APAON)

天体の地球衝突問題(スペースガード)に日本も貢献したい

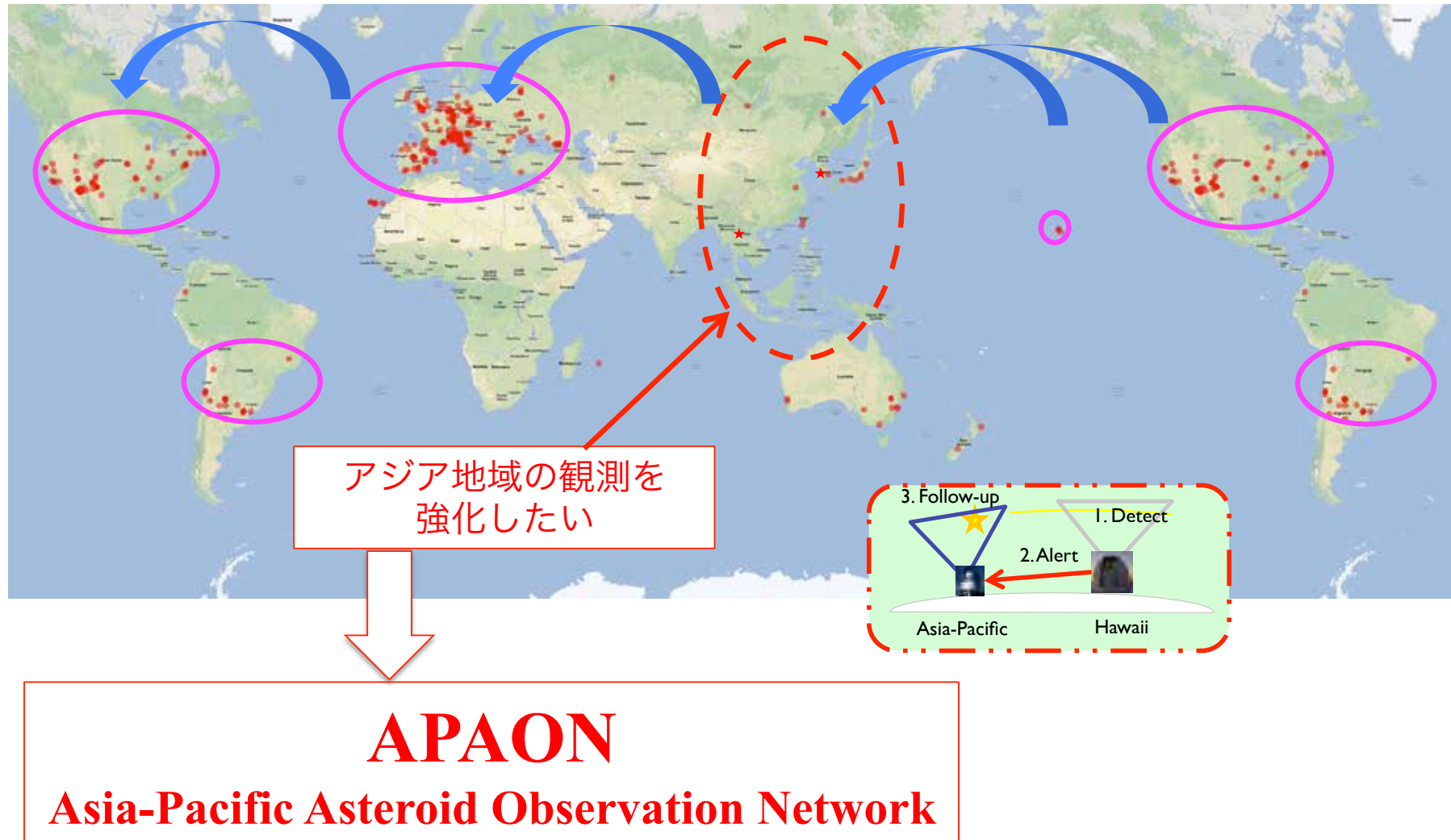


「The Asia-Pacific Asteroid Observation Network (APAON)」を設立

このネットワークの目的:

- アジア・太平洋地域にある望遠鏡を有効活用する(天候のリスクを回避できる)
- アマチュア観測家も含めて多くの天文台からのデータを集める: データとしては、位置観測、変光観測、分光観測
- アウトリーチや教育活動にも利用する
- 天体の地球衝突問題に貢献する

天文台の位置をプロットしてみると...



Asteroid Day



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.**

Asteroid Day

国内（2016年）でのイベント

- (1) 6月12日@相模原市立博物館
「はやぶさ2」トークライブ Vol.3
※Asteroid Dayと「はやぶさの日」記念企画
- (2) 7月10日@倉敷市立美術館
アステロイド・デー in 倉敷
※日本スペースガード協会・JAXA主催、日本惑星協会協力



日本惑星協会のWeb
<http://planetary.jp/AsteroidDay/>

Planetary Defense Conference

- 天体の地球衝突問題（スペースガード）について、多角的な方面から議論をする国際会議。
- これまでは、グラナダ（スペイン、2009年）、ブカレスト（ルーマニア、2011年）、フラグスタッフ（米国、2013年）、フラスカティ（イタリア、2015年）で行われた。
- 2017年に、日本で開催！
2017年5月15-19日@未来館



人類としての危機管理



"Gentlemen, the situation is critical...the climate has changed, mammals are pressing us, and we have a too little brain for these big problems" (1993)

The SGF - ACM'96 - July 8, 1996



1999年11月24日 朝日新聞社説

スペースガードのまとめ

天体サイズ	接近方向	発見観測	衝突回避
大きい 50mから 100mくらい	夜側	・衝突直前ではなくて、できる限り早期に発見しておく。 ・地上の望遠鏡で継続的に観測を行うことで発見する。（まだまだ時間はかかるが）	・大きさが数百メートル以下で、リードタイムが十分にあれば、インパクトで衝突回避可能。 ・より大きい場合、ないし、リードタイムが短い場合は、どうする？（核エネルギー？）是が非でも、衝突回避をする必要があるが、方法が確立されていない。
	昼側		
小さい	夜側	・地上の望遠鏡で衝突の直前に発見する。（衝突の十分前に発見できることに超したことはないが。）	・リードタイムが十分あれば、衝突回避は可能。ただし、衝突回避をするかどうかは、条件次第。 ・リードタイムがない場合には、被害を最小にする措置をとる。（衝突予測地点から逃げる、衝撃波や隕石衝突からの防御策をとる、など。）
	昼側	・地上の望遠鏡では発見できない。（衝突の十分前に発見できた場合を除いて）	

※赤字のところが問題