

宇宙法ミニセミナー

# プラネタリーディフェンスの現状と課題



(イラスト 池下章裕氏)

2025年2月13日@オンライン

吉川 真 (JAXAプラネタリーディフェンスチーム)

緊急

# 最新の話題

IAWN発表

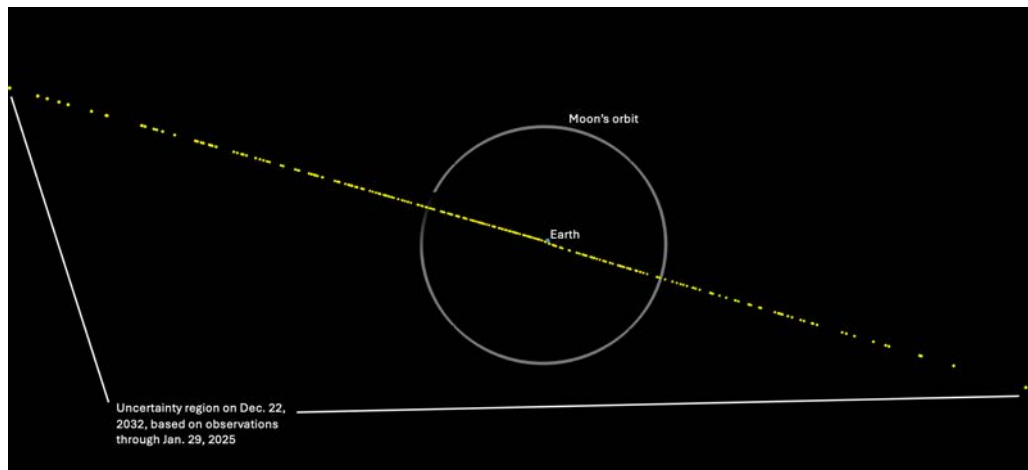
[https://iawn.net/documents/NOTIFICATIONS/IAWN\\_Potential\\_Impact\\_Notification\\_2024\\_YR4.pdf](https://iawn.net/documents/NOTIFICATIONS/IAWN_Potential_Impact_Notification_2024_YR4.pdf)

2025年1月29日発表

小惑星 2024 YR4 が、2032年12月22日に地球に衝突する確率が1.3%

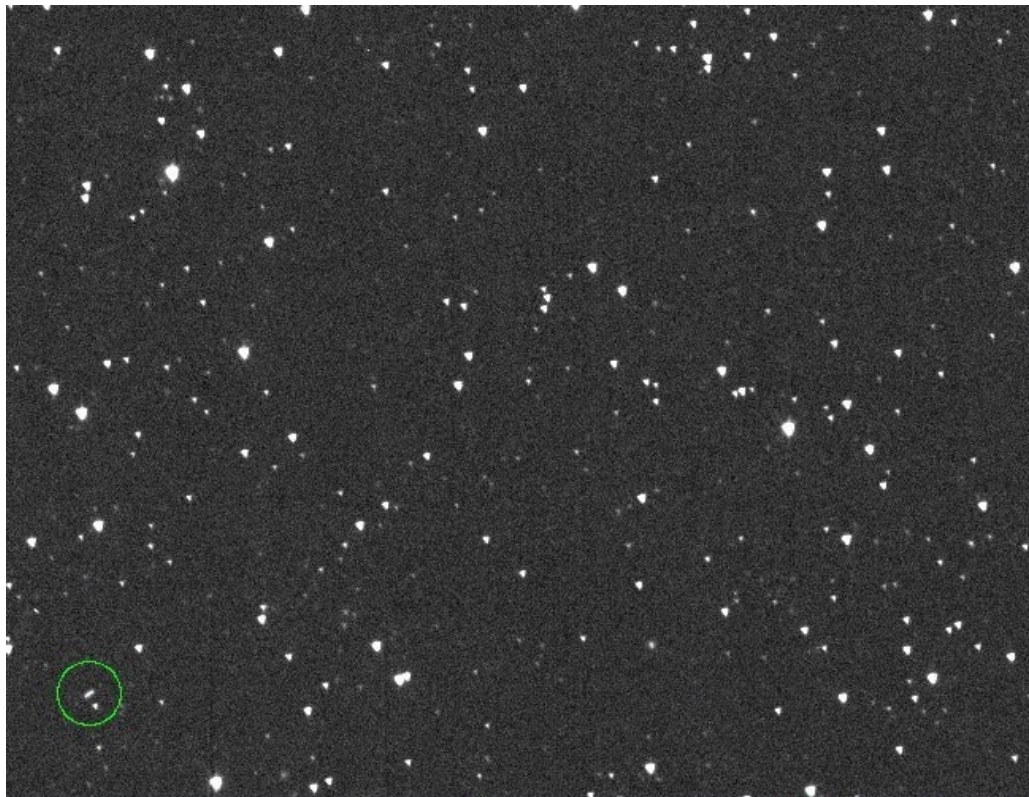
→ 2.1%(2025年2月13日)  
JPLによる

- 大きさ: 40~90m
- 発見: 2024年12月27日  
(12/25,26にも観測されていた)
- 今年の5月くらいまでは観測可能なので、衝突確率が変わる可能性あり



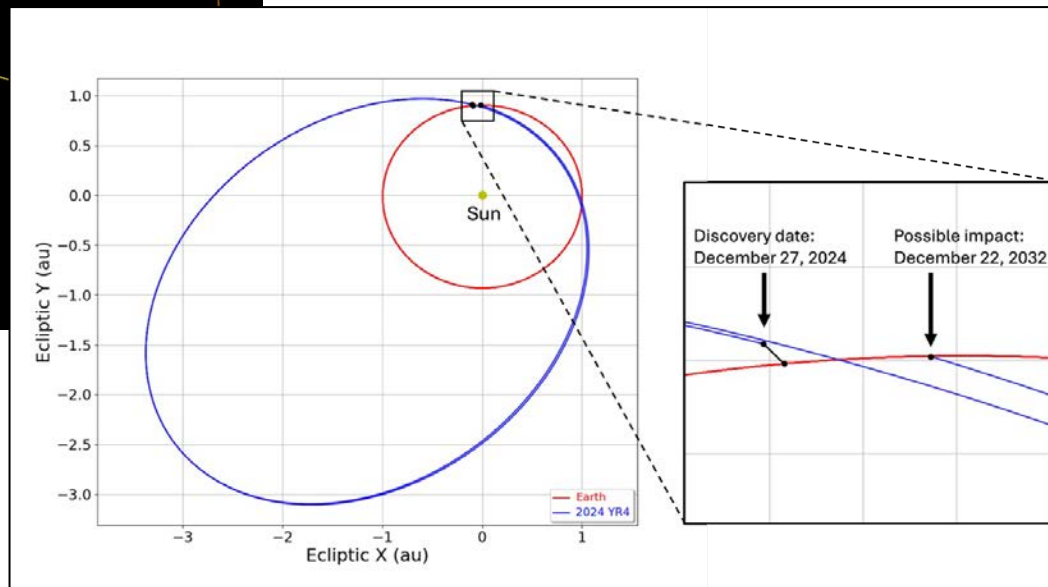
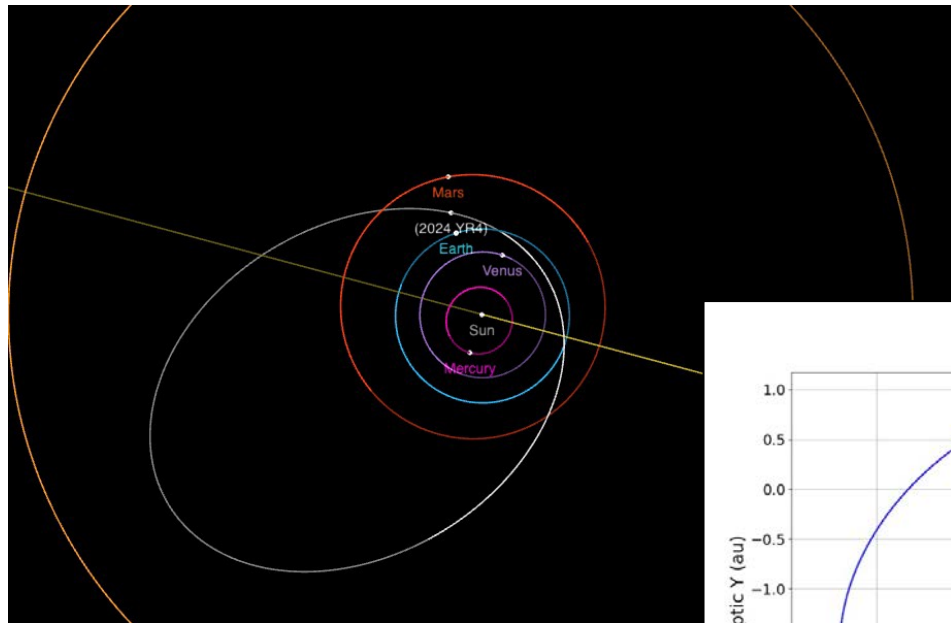
(JPLによる)

# 小惑星 2024 YR4



Discovery images of 2024 YR4. Credit: ATLAS

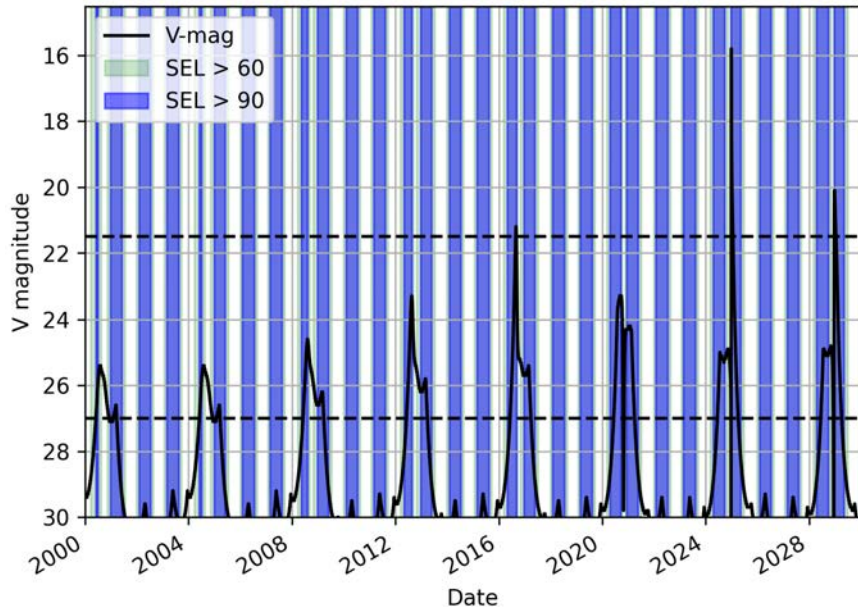
# 小惑星 2024 YR4



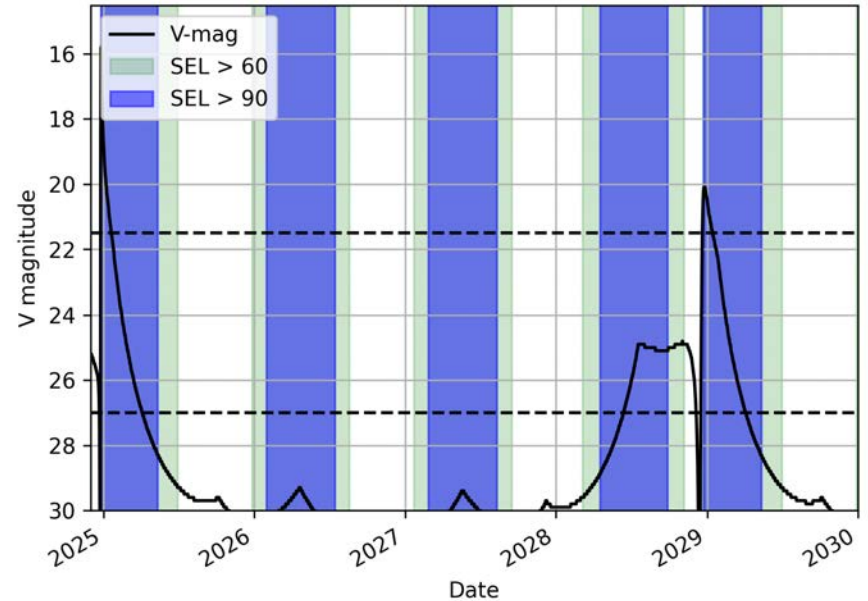
(JPLによる)

# 小惑星 2024 YR4

## 光度変化



→過去の観測を探す



→今後の観測計画

LEFT: 30-yr (2000-2030) Ephemeris of 2024 YR4 and RIGHT: 2024-2030 Ephemeris of 2024 YR4  
Courtesy NASA/JPL-Caltech/CNEOS

# 地球衝突か？ 2004 MN4についての記事

→小惑星Apophis(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あるとの結果が出た。

NASA算出

0.4の小惑星「2004 MN4」の軌道計算したところ、2029年4月13日に地球に衝突する確率が約300分の1あるとの結果が出た。

【ワシントン＝笹浪敦二】二〇〇四年四月十三日の金曜日、注目の日、直径約四百メートルの小惑星が地球に衝突する可能性があることが米航空宇宙局(NASA)の観測でわかった。

小惑星「2004 MN4」で、今年六月に再び観測された後、今月十八日に再び姿を現した。

地球のそばを通過するだけの可能性が高いが、約二百分の一の確率で衝突の危険がある。今世紀中に地球

## 確率300分の1

### 25年後小惑星が地球に衝突？

NASAは「観測が進むにつれ、地球の軌道を適切に詳細な軌道のデータが分かる。NASAの推定によれば、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。

ナ州のメテオ・クレター(直径1.3km、深さ75m)が有る。5万年前に直径数十メートルの小天体が衝突したと推定されている。日本では信州大チームが91年、長野県上水内郡にある直径約100メートルの隕石が衝突した痕跡だと発表している。

## 小惑星 地球衝突？

NASA観測

2029年 4月 13日の金曜日

に衝突する危険を示す十分な確率が確保となる場合、観測史上最大の「1」には「衝突の恐れは低い」と分類された。わずかな確率関心を持って観測する必要もあるという。Nasaでは今後詳しく観測が把握できれば、い軌道が把握できれば、0(心配なし)に格下げできるかもしれないという。

同スケールでは、「世界

2004.12.25 読売新聞(夕)

25年後小惑星衝突？

【ワシントン＝村山知博】2009年に小惑星が地球に衝突するかもしれない。そんな見通しを、米航空宇宙局(NASA)の専門家が出した。23日AP通信が伝えた。大きさは約400メートルとみられる。

今年6月に発見された「2004 MN4」の衝突の危険度について、「10」の1段階で格付けするトリノ・スケールで「暫定評価ながら初めて」に格付けされた。

2004.12.24 朝日新聞(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あるとの結果が出た。

## 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

### NASA推定

直径400メートル、確率は300分の1

2004.12.25 東京新聞

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

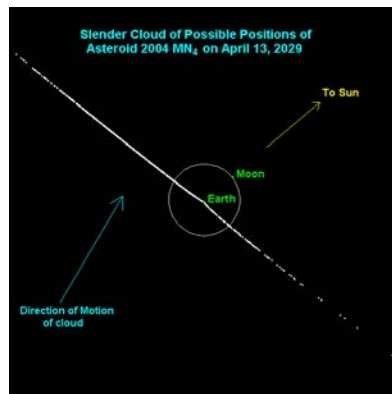
- ・2004 MN4が**2029年4月13日**に地球に衝突する確率が1/300(大きさ約400m)
- ・2004年6月19日に発見され2晩の観測後、2004年12月18日に再発見されて、軌道が計算
- ・注意して観測すべき天体ではあるが、一般の人に注意を喚起すべきことではない(衝突確率に誤差が大きいため)

2004年12月24日  
JPL発表

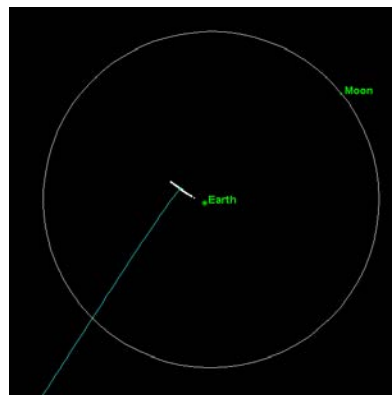
- ・その後の観測で、2004 MN4が2029年4月13日に地球に衝突する確率が1.6%となった。
- ・ただし、この値は変動する確率大

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。)

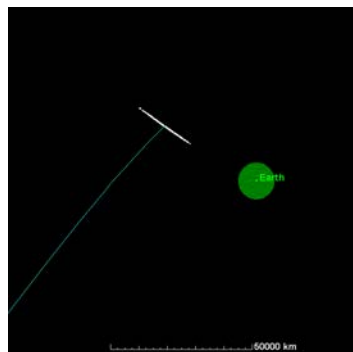


(©NASA)



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

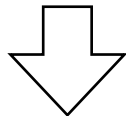


(©NASA)

2029年4月13日:

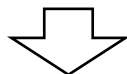
- ・地球中心から36,350kmのところを通過。
- ・明るさ3.3等。

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



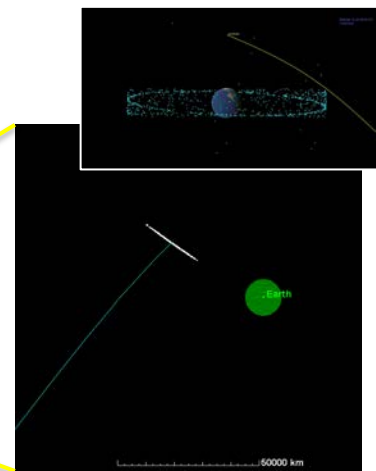
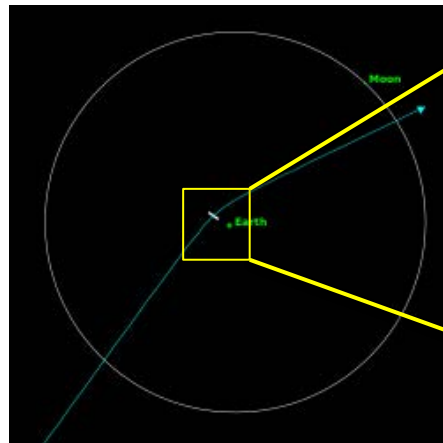
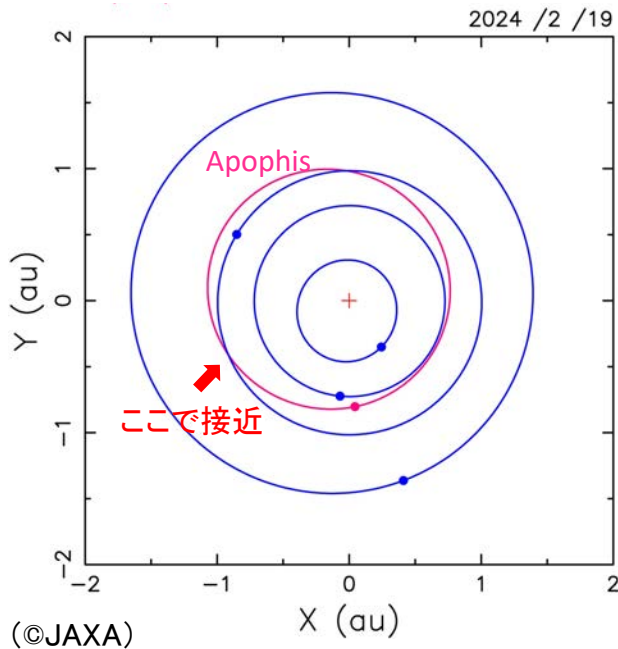
# 小惑星 (99942) アポフィスの地球接近

2029年4月13日(金)、21:46UTCに、地表から約32,000kmのところを通過

※直径: 約340m、自転周期: 30.56h、スペクトル型: Sq

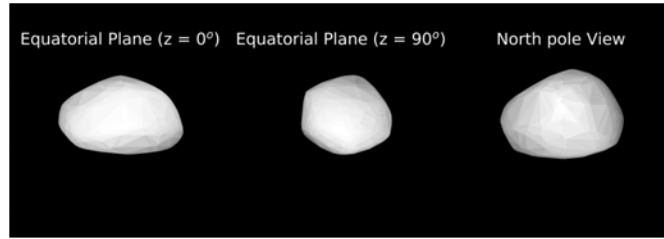
この大きさの天体がこれだけ近くを通過するのは観測史上初めて。

現在知られている天体については、今後7500年間は起こらないとも。



2029年4月13日

## 形状モデル



H.-J. Lee et al. A&A 661, L3 (2022)

# アポフィス探査の計画・検討

米国

小惑星サンプルリターンミッション「オサイリス・レックス (OSIRIS-REx)」



地球帰還後、ミッションを延長:

「オサイリス・アペックス (OSIRIS-APEX)」 OSIRIS Apophis Explorer

アポフィスに向かい、ランデブー(ただし、アポフィス地球最接近の後に到着) (©NASA)

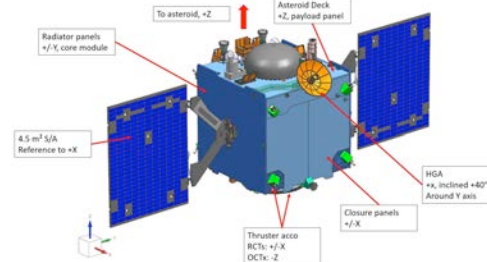


ヨーロッパ

「ラムセス (RAMSES)」 ← 検討中 (JAXAも協力)

アポフィスが地球に接近する前に到着する

- Hera探査機と同様な探査機
- 2028年打ち上げ



(©ESA)

※他にもいろいろなミッションの検討が進行中。

# 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：スペースガードとして開始
- “究極の自然災害”に対して、科学的・技術的に対応
- 1990年代初めから活動が本格化
- 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年には美星スペースガードセンターが建設
- 2000年頃からは国連でも議論が始まり、「プラネタリー・ディフェンス  
(Planetary Defense)」として国際的な活動となる

## 「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)

(Web記事より)



日本スペースガード協会の  
マーク

# 天体の地球衝突：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！

(各映画の宣伝チラシより)



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。

このイラストは大きすぎず。そもそもトータチスは、当面、地球に衝突しない。

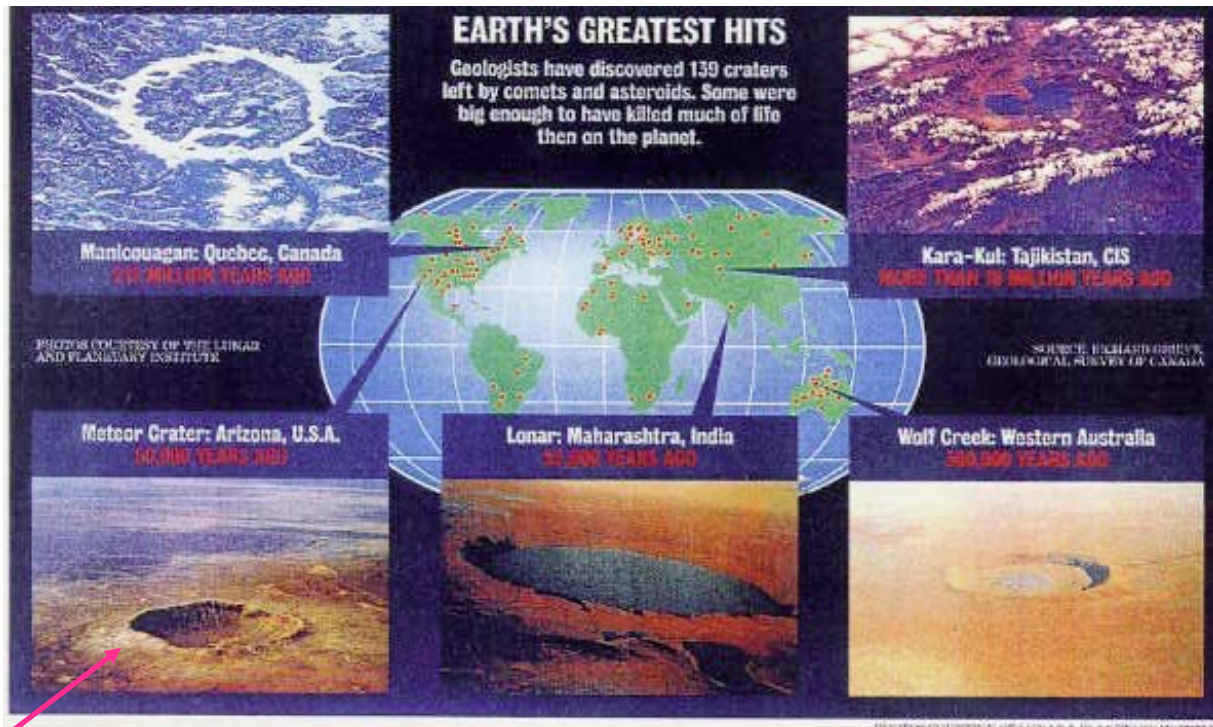


1992年

小惑星トータチスが2000年  
9月26日に地球に衝突？  
(Science Avenir より)

# 天体の地球衝突：実際

- ・地球上には天体衝突によるクレーターが150個ほど発見
- ・地球上のクレーターは消失：水や風による風化や大陸が地下に潜り込む運動(プレートテクトニクス)による



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推定。

地球上の衝突クレーターの記事  
(ニューズウィーク誌より)

# チェリヤビンスク隕石 (2013年)

2013年2月15日 午前9時20分

- ・ロシア・ウラル地方チェリヤビンスク州に隕石が落下
- ・衝撃波で1500人もが負傷する大惨事に
- ・衝突してきた天体の大きさ: 20m弱



チェリヤビンスクの大学の構内の監視カメラ



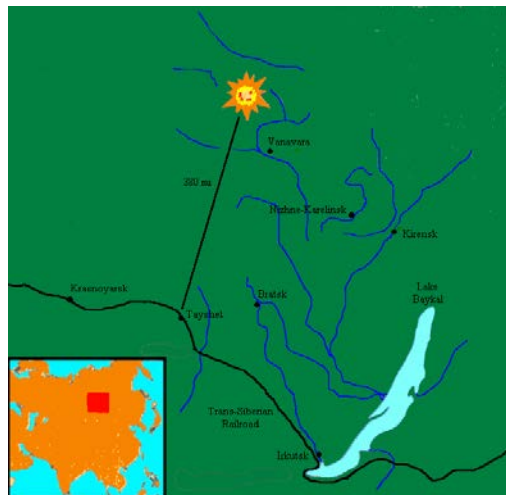
車載カメラによる映像

# ツングースカ大爆発(1908年)

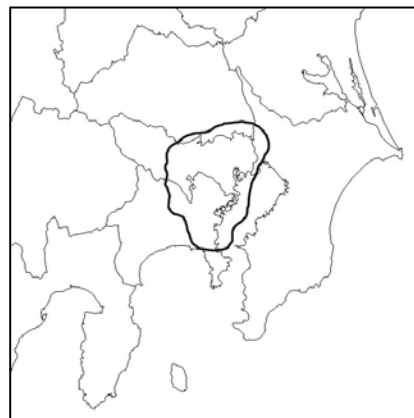
- ・1908年6月30日
- ・直径が60m程度の小天体の衝突によると推定
- ・約2000平方kmの森林が被害
- ・衝突のエネルギーは広島型原子爆弾の千個分



Figure 2-3. On June 30, 1908, at 7:50 AM, a cosmic projectile exploded in the sky over Siberia. It flattened 2,000 square kilometers of forest in the Tunguska region. If a similar event were to occur over an urban area today, hundreds of thousands of people would be killed, and damage would be measured in hundreds of billions of dollars.



(Web記事より)



被害を受けた領域の大きさ

(Web記事より)



現在の様子

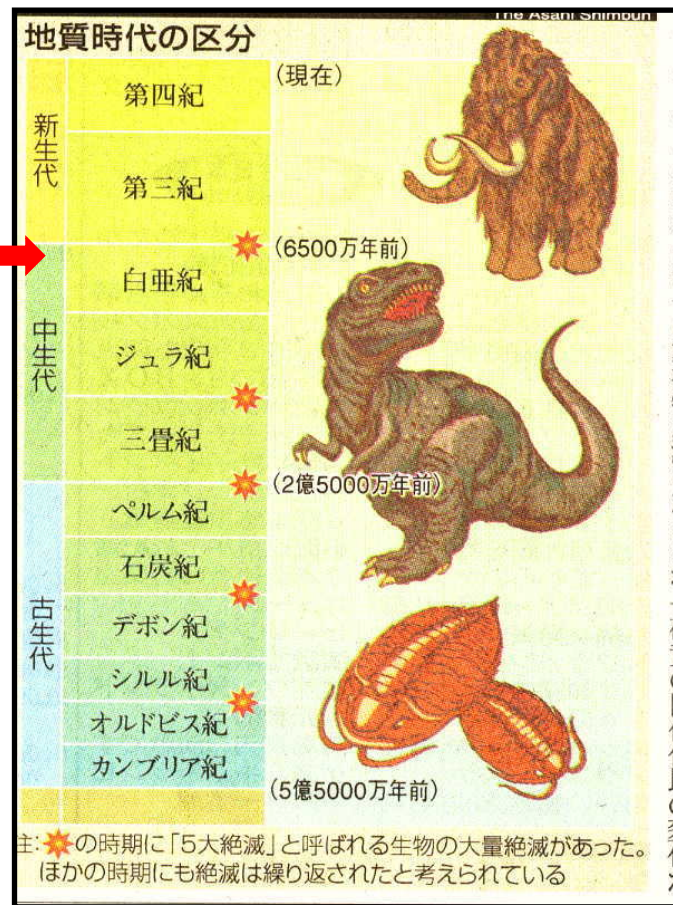
# 恐竜絶滅(6600万年前)

- ・6600万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説が有力。(衝突した場所は、ユカタン半島)



ユカタン半島のチクシュループ・クレーター  
(直径180km、6600万年前)

(Wikipediaより)



(朝日新聞 2001.10.31)



# 参考：木星への彗星衝突(1994年)

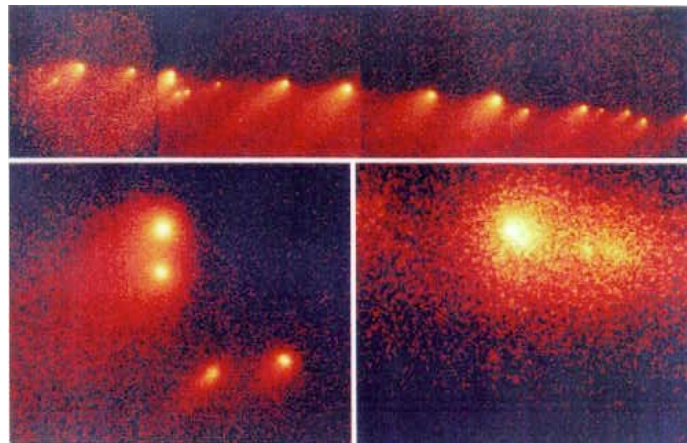
- ・1994年7月に木星にシューメイカー・レビー第9彗星が衝突
- ・20個ほどに分裂した彗星核が次々と木星に衝突し、木星表面に衝突の跡が形成
- ・衝突した彗星核の大きさは直径が数km程度
- ・木星表面の変色域は、地球規模のスケールにも



This image in light of 700 nm wavelength of the G and L sites was taken at 21:11 UT on 20 July, just after the Q impact, at P1, the Mid, 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 appeared to have two immensities, increased by the G and L sites.



At least eight impact sites are visible simultaneously in this HST image, taken at 09:35 UT on 21 July, four hours after the R impact. They are



地球の大きさと比べてみると...

(Web記事より)

# プラネタリーディフェンスとは

小惑星や彗星のような天体が地球に衝突すると大きな自然災害となる

実例

■ 2013年2月15日  
ロシア・チェリャビンスク隕石



(Web記事より)

- ・約17mの天体衝突によると推定
- ・南北180km、東西80kmにわたって建物に被害
- ・約1500人が負傷

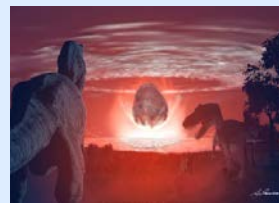
■ 1908年6月30日  
ツングースカ大爆発



(Web記事より)

- ・50~60mの天体衝突によると推定
- ・約2000平方kmにわたって、樹木がなぎ倒された

■ 6550万年前  
恐竜を含む生物の大絶滅



(©池下章裕)

- ・約10kmの天体衝突によると推定
- ・恐竜を組む多くの生物種が絶滅
- ・地質年代が中生代から新生代に転換

地域的被害

地球規模の被害

このような災害を事前に防ぎたい  
プラネタリー・ディフェンス  
(スペースガード)

※活動は1990年代初めから始まる



そのためには:

- ・地球接近天体の発見・追跡 = [観測]
- ・地球接近天体の素性解明 = [探査]
- ・天体の地球衝突回避・被害の最小化 = [技術、国際協力、法的整備、人々の理解]

# プラネタリーディフェンスで行うこと

## ステップ1

地球接近天体を発見



追跡観測を行って、  
軌道を正確に推定する



地球への衝突が予測できる

地球接近天体の物理的  
性質の調査



地球衝突回避の検討

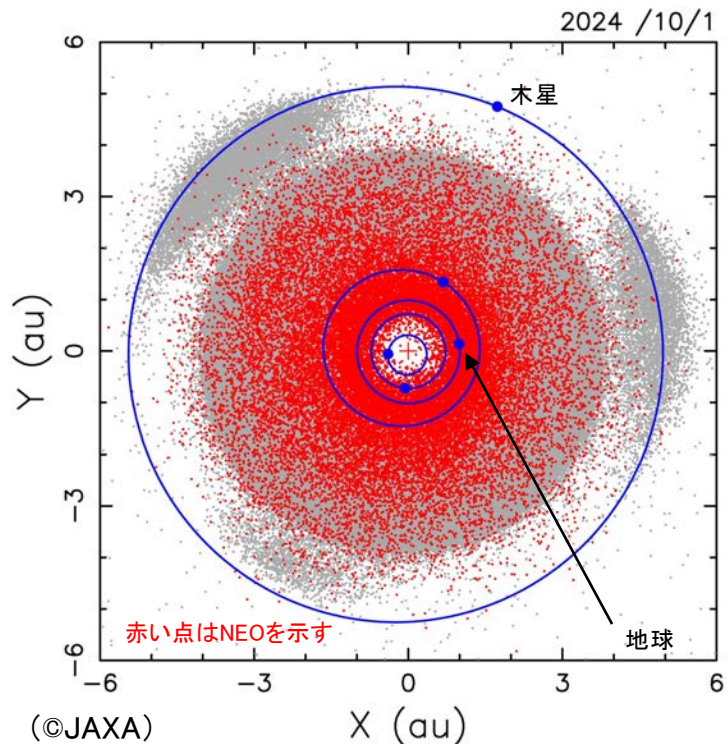
## ステップ2

地球衝突回避  
または  
被害の最小化

- ・地球接近天体の軌道を変える
- ・衝突地点を守る
- ・人々を避難させる
  
- ・情報公開
- ・国際協力(国際的な法律、協力体制)

# 小惑星・彗星の発見数

## 小惑星の分布



現在(2025年2月13日)、発見され軌道が  
求められている小天体:

小惑星: 1,434,993個

彗星 : 4,570個

(確定番号付き小惑星: 773,916個)

地球軌道に接近する小惑星: 37,594個  
(NEO: Near Earth Object)

国際天文学連合 マイナープラネットセンターのWebより  
<https://minorplanetcenter.net/mpc/summary>

# 地球衝突が予測され実際に衝突した天体

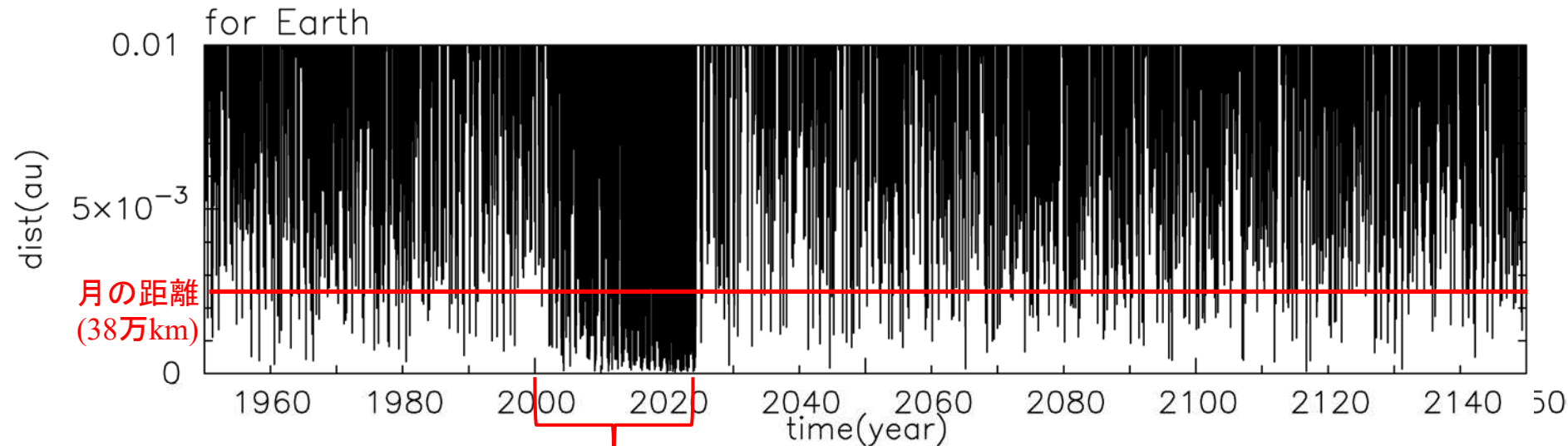
## 隕石予報

	小惑星 (仮符号)	衝突日	大きさ (推定)	発見～衝突 (時間)	衝突場所	発見者
1例目	2008 TC3	2008年10月7日	2、3m	約20時間	スーダン北部	Catalina Sky Survey
2例目	2014 AA	2014年1月2日	2、3m	約21時間	大西洋？	Catalina Sky Survey
3例目	2018 LA	2018年6月2日	数m	約8時間	アフリカ南部	Catalina Sky Survey
4例目	2019 MO	2019年6月22日	約3m	約12時間	プエルトリコ付近	ハワイ、マウナロア、ATLAS望遠鏡
5例目	2022 EB5	2022年3月11日	約2m	約2時間	大西洋、ヤンマイエン島南西部	ハンガリー、ピスケーシュタウ観測所
6例目	2022 WJ1	2022年11月19日	0.5 -1m	約3時間半	カナダ、オンタリオ州	米国、アリゾナ、Mt. Lemmon Survey
7例目	2023 CX1	2023年2月13日	1m	約6時間半	フランス、ノルマンディー	ハンガリー、コンコリー天文台
8例目	2024 BX1	2024年1月21日	1m	約3時間	ドイツ、ベルリン西部	ハンガリー、ケーシュテテー観測所
9例目	2024 RW1	2024年9月4日	1m	約11時間	フィリピン	Catalina Sky Survey
10例目	2024 UQ	2024年10月22日	1m	約2時間	太平洋、カリフォルニア海岸西	ATLAS-HKO
11例目	2024 XA1	2024年12月3日	1m	約12時間	ツングースカから1000km東	Kitt Peak National Observatory

※2025年2月1日現在

# 小惑星の地球接近状況

- 2024年初めの時点で発見されていた小惑星約134万個（うちNEOは約34,000個）の地球接近状況を確認した。（小惑星の軌道要素はMinor Planet Centerより）
- 1950年から2150年までの200年間に地球に0.01au（約150万km）以下に接近する場合を図に示す。（図の縦線がどこまで接近したかを示す。0は地球中心。）

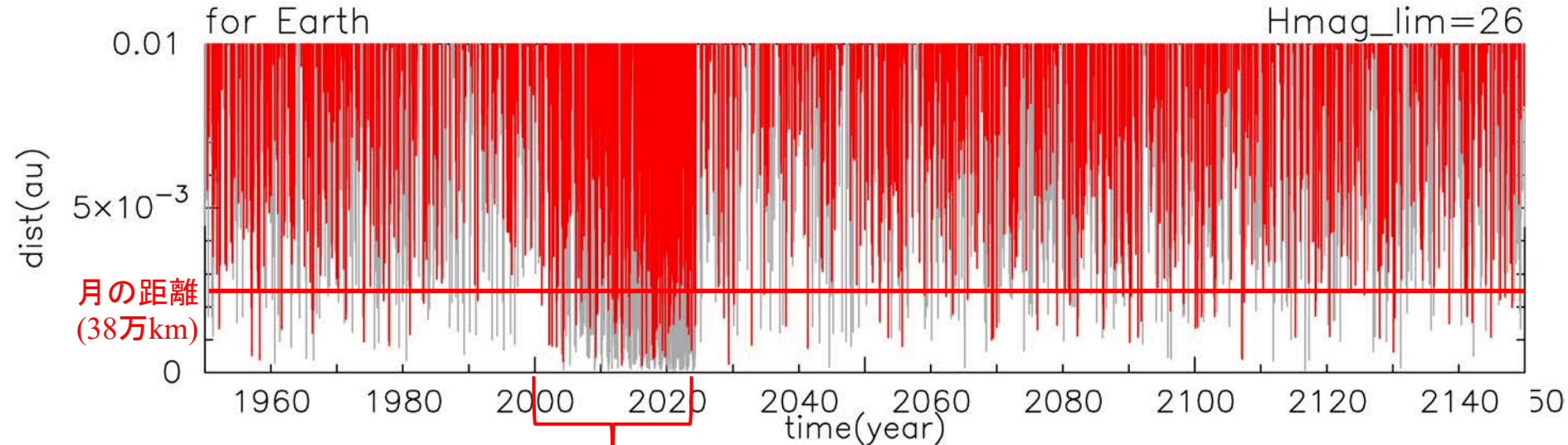


(©JAXA)

NEOの観測が積極的に行われるようになったため、地球に接近する小惑星がたくさん発見されている。

# チェリャビンスク隕石レベル以上の地球接近状況

- 計算された地球に接近する小惑星のうち、チェリャビンスク隕石レベル以上の被害が生じると思われるケースを赤色で示す。
- 小惑星の大きさは正確に分からない場合が多いので、ここでは小惑星の絶対等級が26.0等かそれより明るいものを赤色で示した。(小惑星のアルベドを0.25とすると、絶対等級26.0等は大きさ17mの小惑星に相当する。)

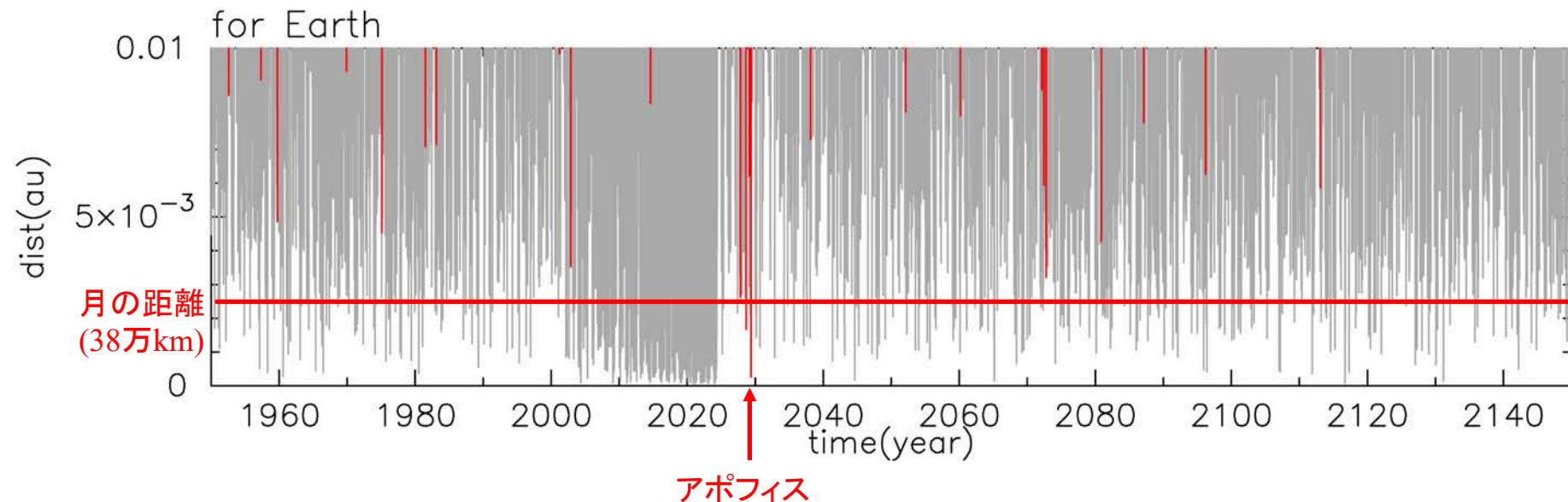


(©JAXA)

NEOの観測が積極的に行われるようになったため、地球に接近する小惑星がたくさん発見されている。

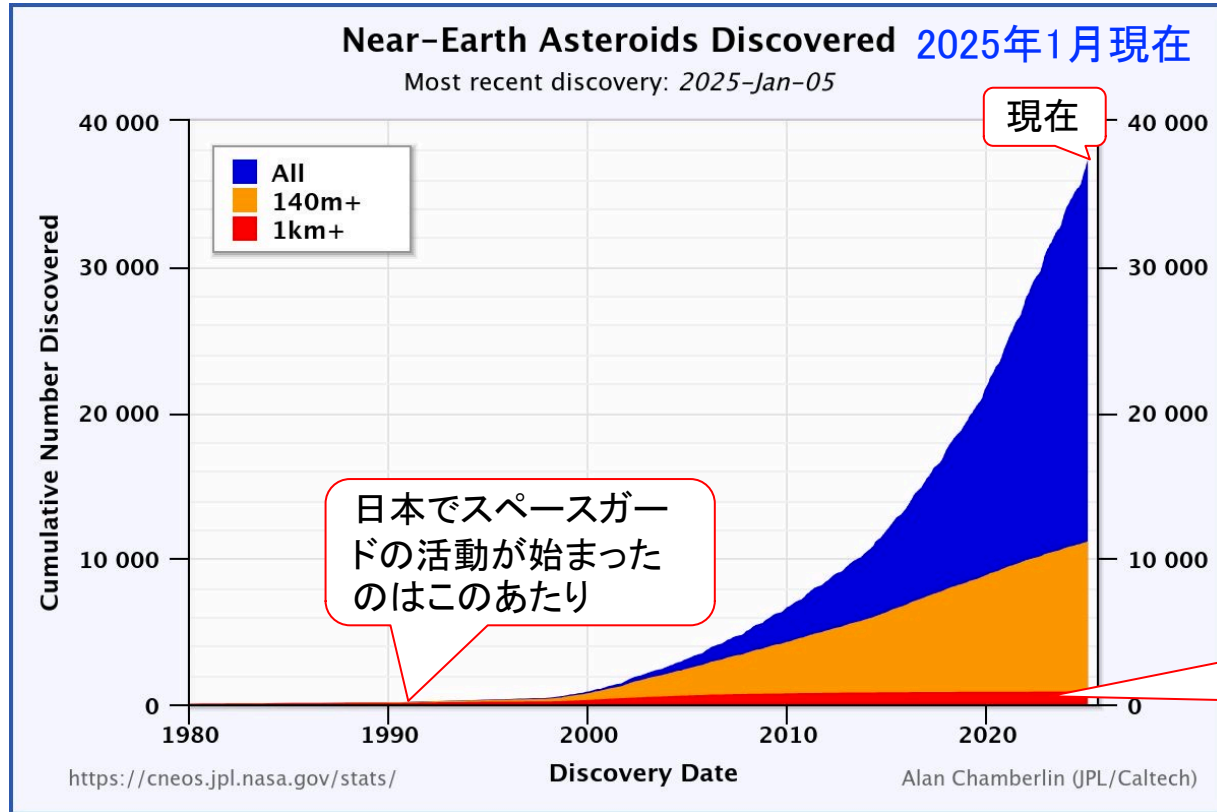
# アポフィスサイズの小惑星の地球接近状況

※絶対等級が19.01等より明るいもの(大きさがアポフィス以上)を赤





# 地球接近小惑星 (NEO) の発見数の推移



大きさが数百m、数十mの小惑星は、多数の未発見ものもある。

恐竜を滅ぼした大きさ10kmの小惑星はほぼ発見されていて、近い将来の衝突は心配なくてよい。

大きさが1km以上のNEOの発見個数は増えていない

# 更なるNEOの発見: NEO Surveyor

NASA

- ・宇宙からNEOを観測する
- ・口径50cmの赤外線望遠鏡
- ・5年で、140m以上のNEOを2/3以上発見する
- ・10-12年で、NEOの90%を発見する
- ・2027年打ち上げ予定

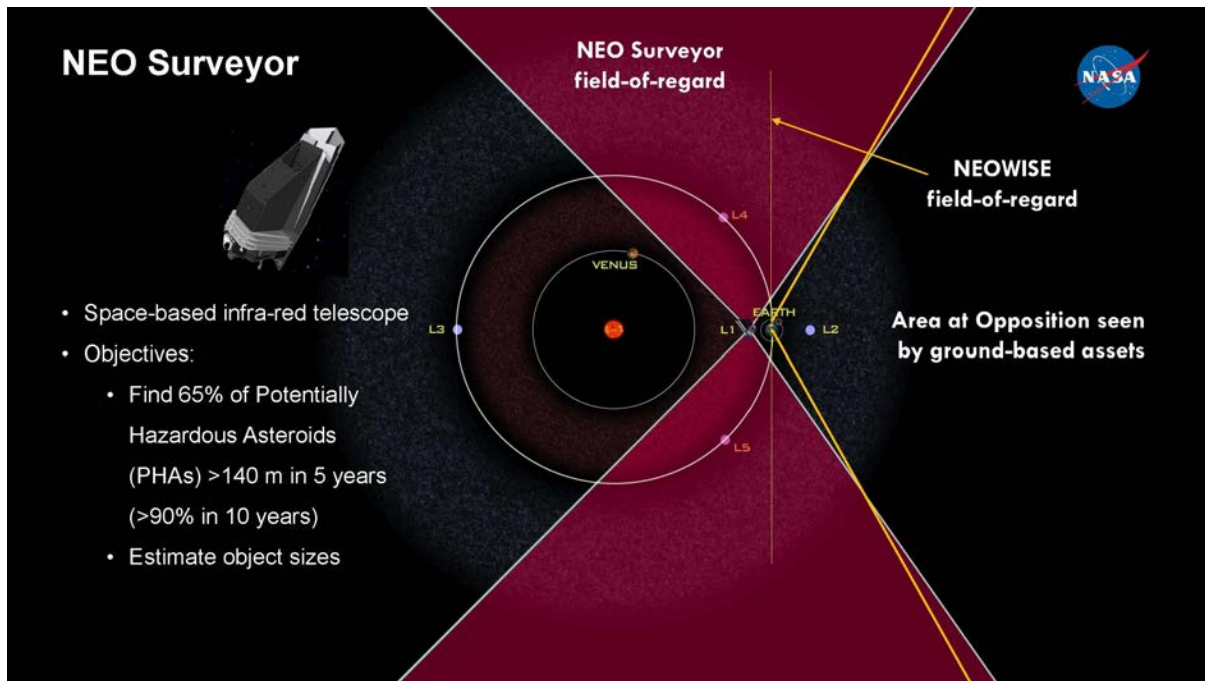


莫大な数のNEOが発見される可能性大

140m以上なら12000個  
50m以上なら20万個

が新たに発見される可能性あり

※地上からの追跡観測も重要



by Lindley Johnson (NASA)

# NEOの探査近状況

■ これまで7つの地球接近小惑星(ピンク)、3つの地球接近彗星(緑)に探査機が接近し探査。うち2つは、日本によるイトカワとリュウグウの探査である。



小惑星



地球接近  
小惑星

彗星



地球接近  
彗星

大きさは直径(端から端まで)で、単位はkm。値は理科年表(2019年版)ないし各プロジェクトによる。トータティスの値はJPLのWebより。

(黄色は探査した探査機名。画像は各ミッションより)

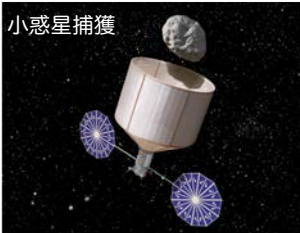
# NEOの地球衝突回避の方法

## ■ 衝突回避の方法

- ・インパクト: 天体に物体を衝突させて軌道を変える ← 実証済
  - ・重力ートラクター: 引力で牽引する
  - ・核エネルギー: 軌道を変える
  - ・イオンビーム
- 可能性あり(右図に表示)
- ・レーザー光線、太陽光の照射: 軌道を変える
  - ・太陽光圧、熱輻射の利用: 軌道を変える
  - ・マズドライバー: 天体から物質を放出し、軌道を変える
  - ・天体捕獲: 小さな天体の場合

※現時点で技術的に可能な方法は「インパクト」 ← DART

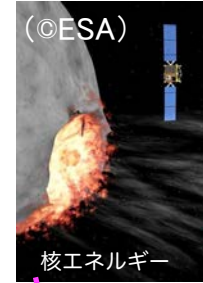
小惑星が小さい場合



(©NASA)



(©ESA)



Credit: D. DURDA,  
FIAAA/B612 FOUNDATION

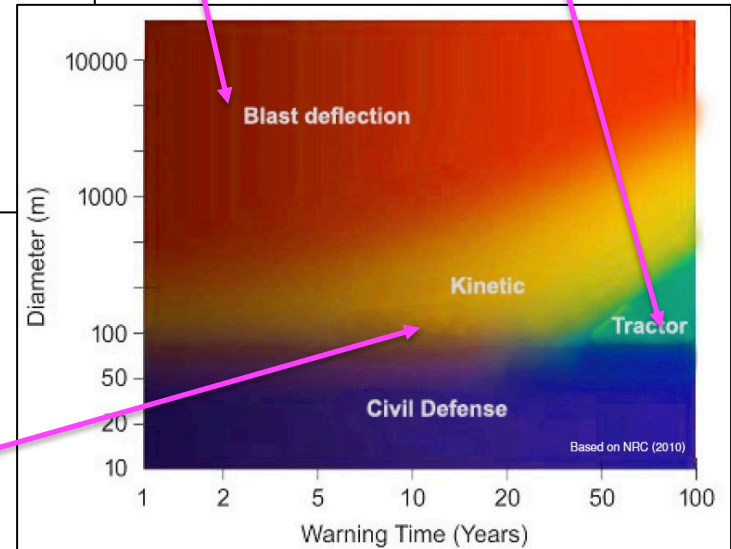


Image courtesy of Tim Warchocki

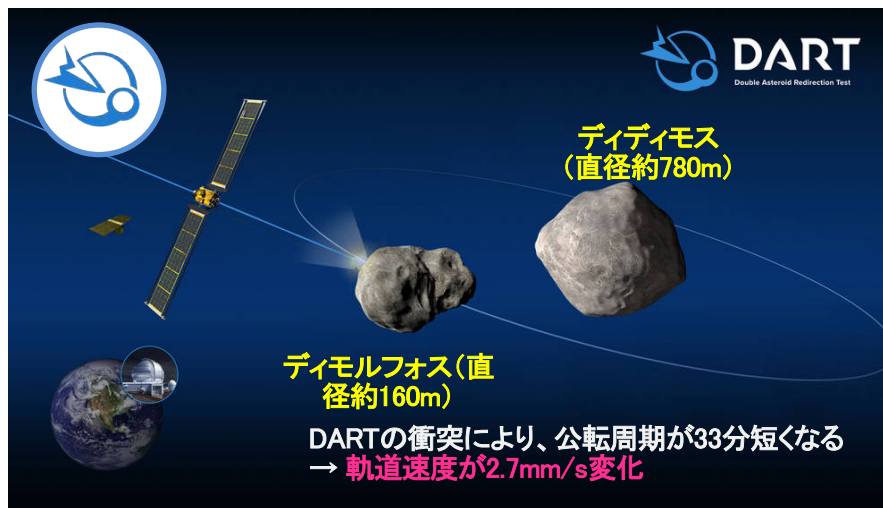
# 小惑星軌道変更計画:AIDA

米国・欧州が国際共同で行う初のプラネタリ・ディフェンスのための探査計画＝小惑星の軌道変更

AIDA (Asteroid Impact & Deflection Assessment) = DART (NASA) + Hera (ESA)

★**DART** (Double-Asteroid Redirection Test)

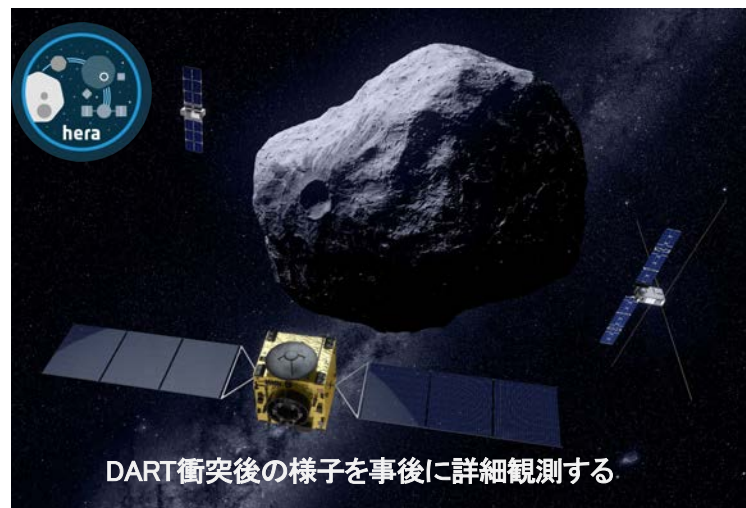
- ・打上げ: 2021年11月24日
- ・衝突日: 2022年9月26日
- ・重さ500kgのDART探査機を秒速約6km/sで  
ディモルフォスに衝突させ、軌道変化を調べる



(NASA DARTミッションより)

★**Hera**

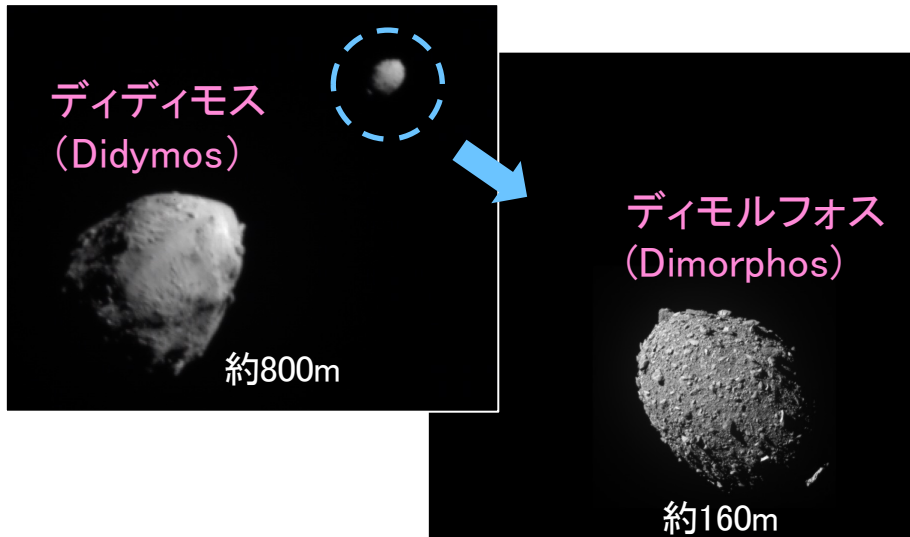
- ・打上げ: 2024年10月7日
- ・到着日: 2026年末(予定)
- ・DARTによる衝突の結果を詳細に調べる
- ・**日本(JAXA)も参加: 赤外線カメラを提供**



(ESA Heraミッションより)

# DART探査機の衝突時の映像

2022年9月26日



ディモルフォスがディディモスを周回する  
周期が、探査機の衝突によって変化

衝突前: 11時間55分

衝突後: 11時間22分 → 33分短くなる

軌道速度が2.7mm/s変化

<https://dart.jhuapl.edu/Gallery/> より

# NEOの衝突回避の方法と問題点

- 衝突してくるNEOを破壊するのは、衝突回避としては不适当  
理由：破壊された破片が地球を直撃
- NEOの軌道をそらして地球衝突を避けるのがよい
- 現在の技術：
  - 探査機をNEOに衝突させることはできる
  - ただし、軌道の変化はごくわずか
  - 大きさが300m程度以下の天体で、衝突までに十分な時間（たとえば、20年）あれば、地球への衝突回避が可能

## ※問題点：

- 衝突までの時間が十分ない場合は？
- NEOが大きい場合は？

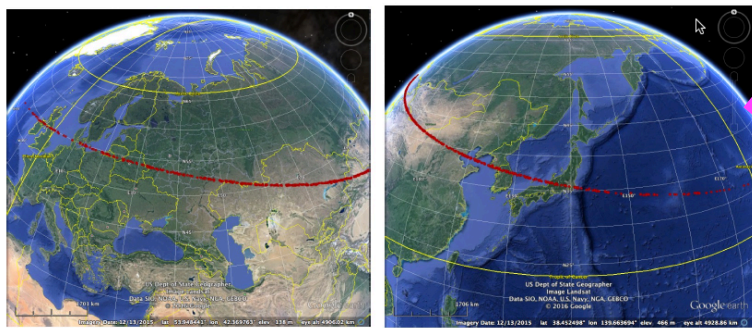


別の回避方法または地球衝突回避は諦めて、被害の最小化へ

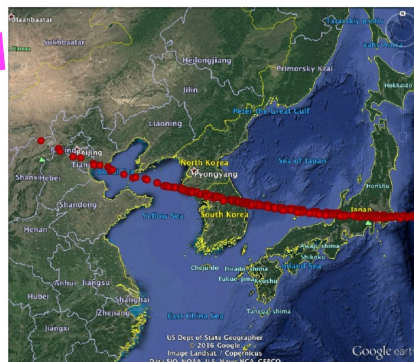
# 地球衝突予測

例:ある国際会議(PDC、後述)における“エクササイズ”で検討されたもの  
 架空の天体 (2017 PDC) の地球衝突を過程して衝突予想位置 (赤色) を検討。

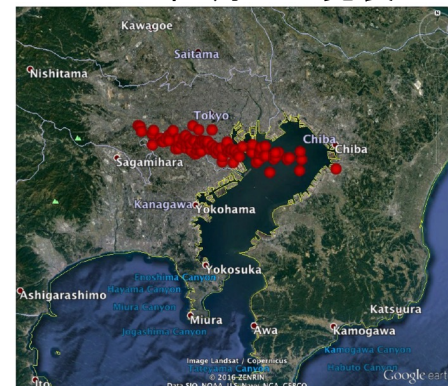
2017年5月15日発表



2018年11月30日発表



2020年5月15日発表



小惑星2017 PDCはバイナリー小惑星  
 大きさは270mと100m

このページに書かれていることは  
 架空の小惑星についてです！

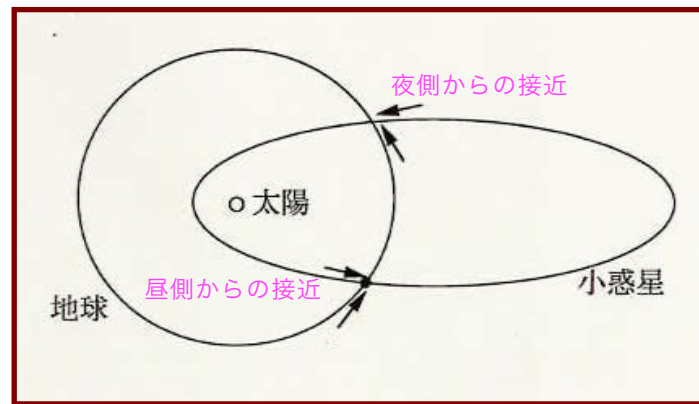
衝突日:2027年7月21日



# プラネタリーディフェンスにおける課題

## ■発見観測における問題

- ・小さな天体が発見しにくい
- ・太陽方向から接近する場合は発見しにくい
  - 重ね合わせ法の強化
  - より大きな望遠鏡での観測
  - 地球外からの観測
  - 時間をかけた観測（夜側にいるときに発見）



(©JAXA)

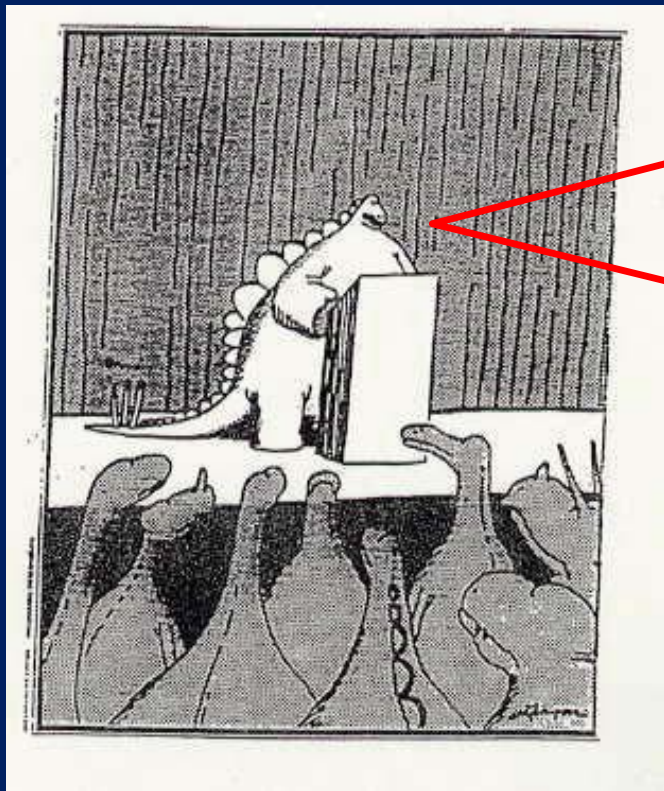
## ■衝突する天体が発見された場合の対応

- ・衝突を回避する方法は？ 被害を軽減する方法は？
- ・情報公開は？
- ・法的制度は？

# 今後の注目点

- 小惑星2024 YR4がどうなるか？
- はやぶさ2拡張ミッション(2026年7月、トリフネフライバイ)
- ESAのHeraミッション(2026年末、ディディモス到着)
- NASA NEO Surveyorの打ち上げ(2027年)
- 小惑星アポフィスの地球接近(2029年4月13日(金))
- 2029年は「**International Year of Asteroid Awareness and Planetary Defense**」

# このようには、ならないように...



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

「皆さん、状況は危機的です...気候は変化し、哺乳類は私たちに圧力をかけてきています。そして私たちはこれらの大きな問題に対して頭が足りません。」

# 小天体探査がなぜ重要か

## 科学

太陽系と生命の起源と進化

プラネタリーディフェンス  
(スペースガード)

天体の衝突から地球を守る

## 資源

鉱物や水資源としての活用

## 有人ミッション

月以降・火星以前の有人ミッションターゲット

## 技術

太陽系内を自由自在に移動

文化創造  
次世代の育成

# 資料

プラネタリーディフェンスに対する世界の動き

# プラネタリーディフェンスに対する世界の動き

## 国連

COPUOS (宇宙空間平和利用委員会)  
UNOOSA (国際連合宇宙局)

**IAWN** : International Asteroid Warning Network  
**SMPAG** : Space Mission Planning Advisory Group

## 国際的なアウトリーチ活動



## 国際会議

**PDC** : Planetary Defense Conference

## 小天体探査ミッション

米国  
ヨーロッパ  
日本  
:

## 宇宙機関

**NASA** : Planetary Defense Coordination Office (PDCO)  
**ESA** : Near-Earth Object Coordination Center

# 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
- <https://iawn.net>

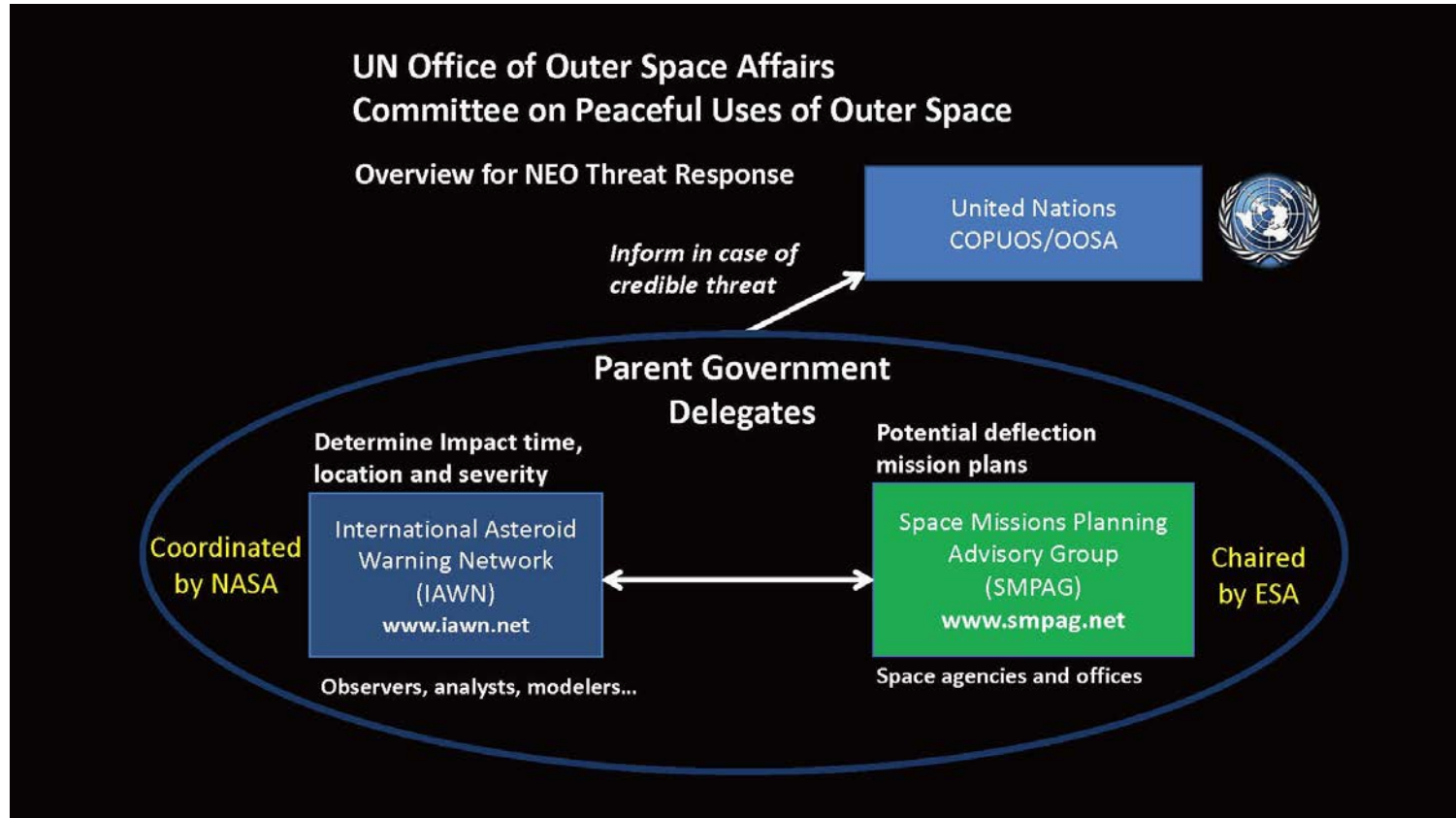


## SMPAG : Space Mission Planning Advisory Group

- 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>



# IAWN と SPMAG





# NASA・ESAの活動

## NASA

- 最も積極的に地球衝突問題に取り組んでいる。(NEOの観測は米国が主)  
※参考 <https://www.nasa.gov/planetarydefense>
- Planetary Defense Coordination Office (PDCO)
- PHO の早期発見、追跡・物理観測、情報発信、衝突回避の検討、FEMA (Federal Emergency Management Agency) に情報提供

## ESA

- Near-Earth Object Coordination Centerを設置 (2013年5月22日)  
※参考 <http://neo.ssa.esa.int>
- 場所：イタリアの地球観測センター (ESRIN) 内
- 欧州のNEO情報網の中央拠点
- ESAのSSAプログラムの一環
- NEO情報提供システムの構築・運用、欧州の専門家やアマチュアの観測をモニタリング、MPC・EARN・NEODysなどと連携

# PDC: 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：1<sup>st</sup> @スペイン・グラナダ
- 2011年：2<sup>nd</sup> @ルーマニア・ブカレスト
- 2013年：3<sup>rd</sup> @米国・フラッグスタッフ
- 2015年：4<sup>th</sup> @イタリア・フラスカティ
- 2017年：5<sup>th</sup> @日本・東京 (5/15-19@未来館)
- 2019年：6<sup>th</sup> @米国・ワシントンDC
- 2021年：7<sup>th</sup> @オーストリア・ウィーン
- 2023年：8<sup>th</sup> @オーストリア・ウィーン

## ■今後の会議

- 2025年：9<sup>th</sup> @南アフリカ・ケープタウン



PDC@東京2017

(PDC撮影)

# Asteroid Day: アステロイド・デイ

<http://asteroidday.org>

国際的アウトリーチ活動



ツングースカの日である6月30日を記念して、天体衝突について考える

- ・2014年に発足
- ・2016年からは国連によって認定

- ・恐怖をあおるようなことはしない
- ・天体の地球衝突問題について、正しい知識をひろめる
- ・対応策を検討する

## Asteroid Day Co-Founder



Grig Richters

Rusty Schweickart



Danica Remy



Brian May



2016年



2017年

(Web記事より)



# 資料

プラネタリーディフェンスに関するJAXAの活動

# プラネタリーディフェンスに関するJAXAの活動

## ■組織

- 2024年4月にプラネタリーディフェンスチームが設立

## ■観測

- JAXA: 重ね合わせ法による高速移動天体の発見観測
- 美星スペースガードセンター(BSGC)におけるNEO観測
- APAON(Asia-Pacific Asteroid Observation Network)

## ■ミッション

- 「はやぶさ」→「はやぶさ2」→「はやぶさ2拡張ミッション」
- 将来ミッション: DESTINY+、次世代サンプルリターンミッション
- 海外協力: Heraミッションへの参加、RAMSESミッションの検討
- 小惑星軌道変更の検討: 「はやぶさ2」の初期検討において
- NEO観測衛星の検討

## ■国際対応

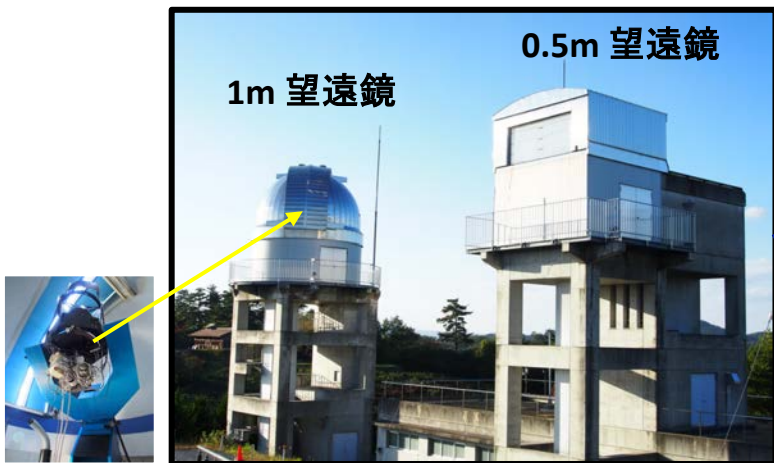
- SMPAG、IAWN、PDC、Asteroid Day

## ■その他

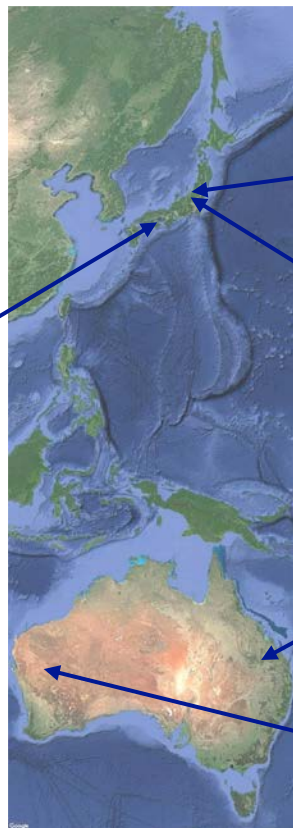
- 軌道計算
- シンポジウム、会合、セッションの開催
- アウトリーチ

# JAXAの小惑星観測施設

## 美星スペースガードセンター(BSGC) (JAXA追跡ネットワーク技術センター)

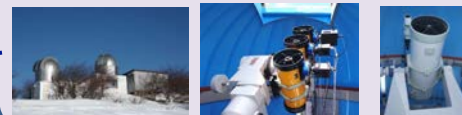


- ・2000年に建設。日本宇宙フォーラムの所有であったが、2017年4月にJAXAに移管される。
- ・観測業務は、NPO法人日本スペースガード協会が行っている。
- ・スペースデブリの観測が主。小惑星も観測。



## JAXA研開部門の観測施設

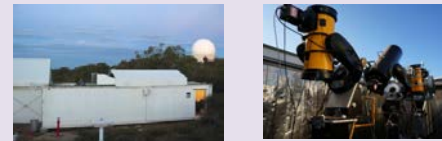
### 入笠山光学観測施設



### 調布低軌道物体観測装置



### 豪州遠隔観測施設(Siding Spring天文台内)



### 豪州第二遠隔観測施設 (Zadko天文台内)

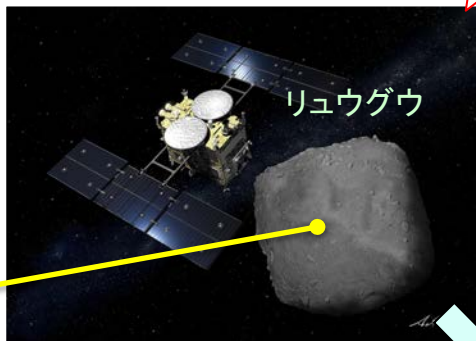


# JAXAに関する小惑星ミッション

はやぶさ 2003-2010 NEO



はやぶさ2 2014-2020 NEO

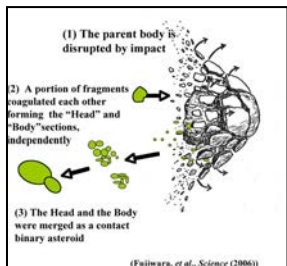


**はやぶさ2拡張ミッション**  
 フライバイ 到着 2031年  
 2026年

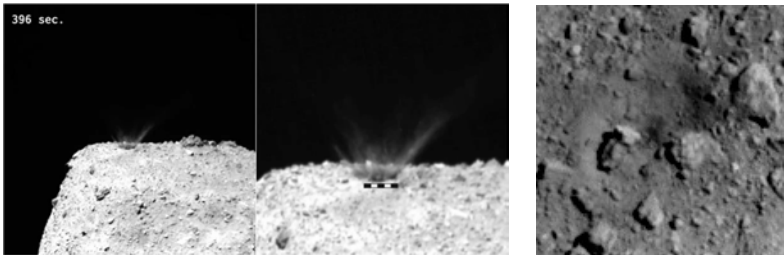
500m? NEO 30m? NEO

2001 CC21 NEO 1998 KY26 NEO

“Rubble Pile” 構造



人エクレーター



©Arakawa et al., Science 2020

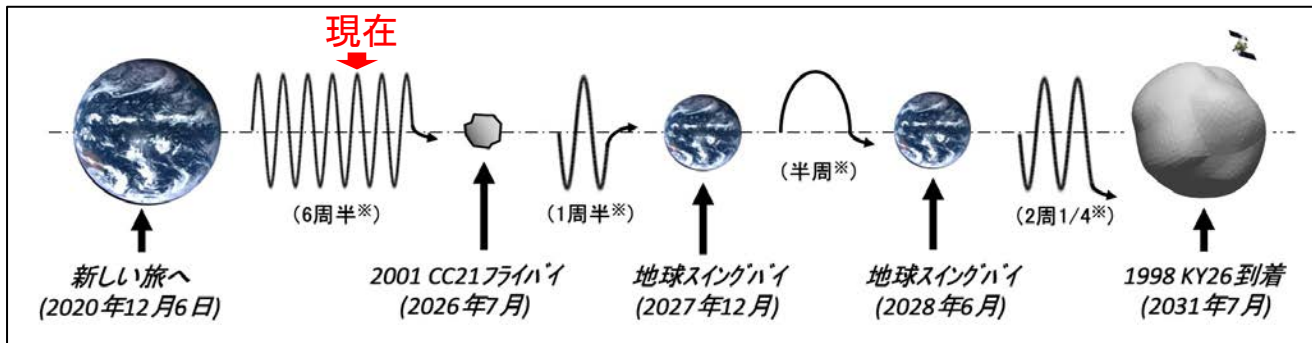
**ESA: Heraミッション** NEO  
 熱赤外カメラTIRIの提供

**DESTINY+ミッション** NEO  
 フェートンフライバイ探査

(探査機イラスト: 池下章裕、他: JAXA)

# はやぶさ2拡張ミッション: はやぶさ2#

#: SHARP = Small Hazardous Asteroid Reconnaissance Probe



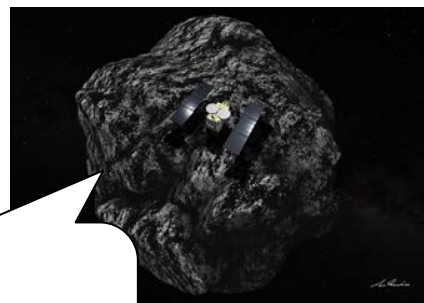
2001 CC21  
直径: 約500m  
自転周期: 約5時間  
L型 → S型?  
形状不明

←高速フライバイ技術

相対速度 約5km/s

||

探査機を微小小惑星に  
衝突させる技術の実証



1998 KY26

直径: 約30m  
自転周期: 約10.7分  
炭素質の可能性  
レーダー観測で形状推定

←微小小惑星探査

||

このサイズの小惑星の地球衝頻度が  
100~200年に1度



# はやぶさ2拡張ミッションにおけるプラネタリーディフェンスの活動

以下の2項目においてプラネタリーディフェンスに貢献する。

注)はやぶさ2拡張ミッションの愛称は「はやぶさ2#」であるが、#(SHARP)はSmall Hazardous Asteroid Reconnaissance Probe(小さくて危険な小惑星を調べる探査機の意味)のアクロニムである。



## (1) 小惑星高速フライバイのナビゲーション

2026年7月に、大きさが500m程度の小惑星2001 CC21のフライバイ探査を行う。このときに、小惑星に可能な限り接近して相対速度5km/sで通過するが、高精度のナビゲーションが必要となる。高精度のナビゲーションを行うことができれば、小さな小惑星に探査機を高速で衝突させることができる技術を獲得したことになり、小惑星の地球衝突を回避するプラネタリーディフェンスに貢献できる。

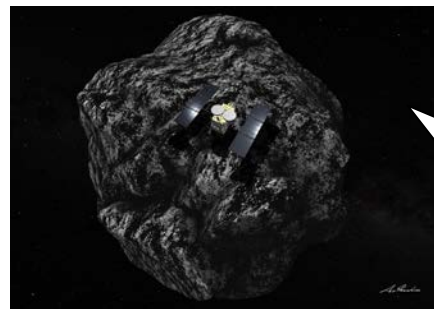


(©池下章裕氏)

2001 CC21  
直径: 約500m  
自転周期: 約5時間  
L型 → S型?  
形状不明

## (2) 微小小惑星の探査

2031年7月に、小惑星1998 KY26にランデブーをしこの小惑星を詳細に探査する。この小惑星は、大きさが30m程度であり、このようなサイズの天体が地球に衝突する確率が100年~200年に1度と推定されている。現実的に近い将来に衝突がありうるタイプの小惑星を調べることは、衝突による被害対策のために重要な情報を提供することになる。



(©池下章裕氏)

1998 KY26  
直径: 約30m  
自転周期: 約10.7分  
炭素質の可能性  
レーダー観測で形状推定

# アジア太平洋小惑星観測ネットワーク (APAON)

アジア・太平洋地域にある望遠鏡を有効活用し、プラネタリー・ディフェンスに貢献するために「アジア太平洋小惑星観測ネットワーク (APAON※1)」を組織。

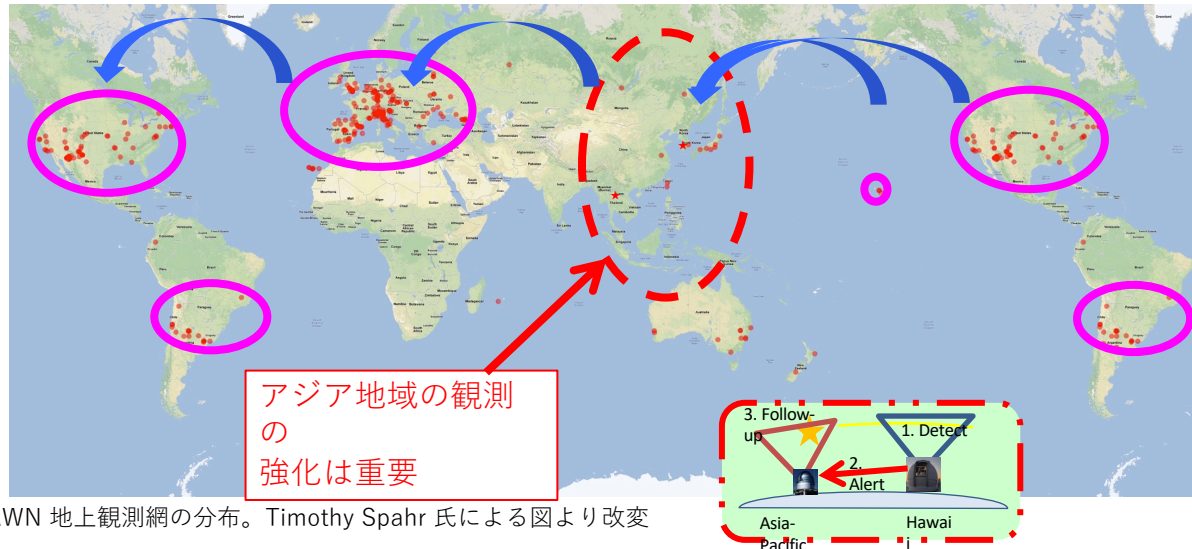
日本国内の小惑星観測者も日本国内チームとして組織。

## 【経緯】

- 2013年12月 APRSAF※2にて提案し参加を呼びかけ
- 2014年 IAWNやSMPAGの会合で紹介
- 2015年1月 試験観測としての観測キャンペーンを開始。11の国と地域が参加。
- 2018年頃 活動休止中→ 国際的なPD活動の活発化に伴い、国内チームから活動再開を検討

※1 : Asia-Pacific Asteroid Observation Network

※2: Asia-Pacific Regional Space Agency Forum



IAWN 地上観測網の分布。Timothy Spahr 氏による図より改変

# プラネタリーディフェンスの世界の動きとこれまでのJAXAの対応

天体の地球衝突は起こる→災害を防ぐ活動=プラネタリーディフェンス

- 例
- 2013年2月15日  
ロシア・チェリャビンスク隕石
  - 1908年6月30日  
ツングースカ大爆発



## 国連における議論

COPUOS  
(宇宙空間平和利用委員会)  
UNOOSA  
(国際連合宇宙局)

**IAWN**: International Asteroid Warning Network  
地球に接近する天体の発見・追跡観測  
メンバー: 天文台など観測ができる施設・人

JAXAは2023年  
4月からメンバー

**SMPAG**: Space Mission Planning Advisory Group  
天体の地球衝突に対応  
メンバー: 宇宙機関や国際機関など

JAXAは発足時の  
2014年からメンバー

## 宇宙機関における活動

主要なもの:  
NASA : Planetary Defense Coordination Office (PDCO)  
ESA : Planetary Defence Office

## 国際会議での議論

PDC: Planetary Defense Conference

2017年に東京で行われたPDC



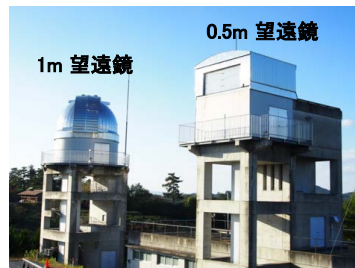
JAXA: 主催者として対応

## 国際的なアウトリーチ活動



日本でも開催  
日本スペースガード協会・JAXA

## JAXA 美星スペースガードセンター



スペースデブリと地球接近小惑の観測

## JAXA 小惑星探査ミッション



「はやぶさ2」が小惑星  
イトカワを探査



「はやぶさ2」が小惑星  
リュウグウを探査  
延長ミッションで小惑星  
2001 CC21と1998 KY26  
を探査予定

ESA Heraミッションに参加

DESTINY+計画

すべて地球接近  
小惑星

# 資料

## 関連情報

# 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)

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

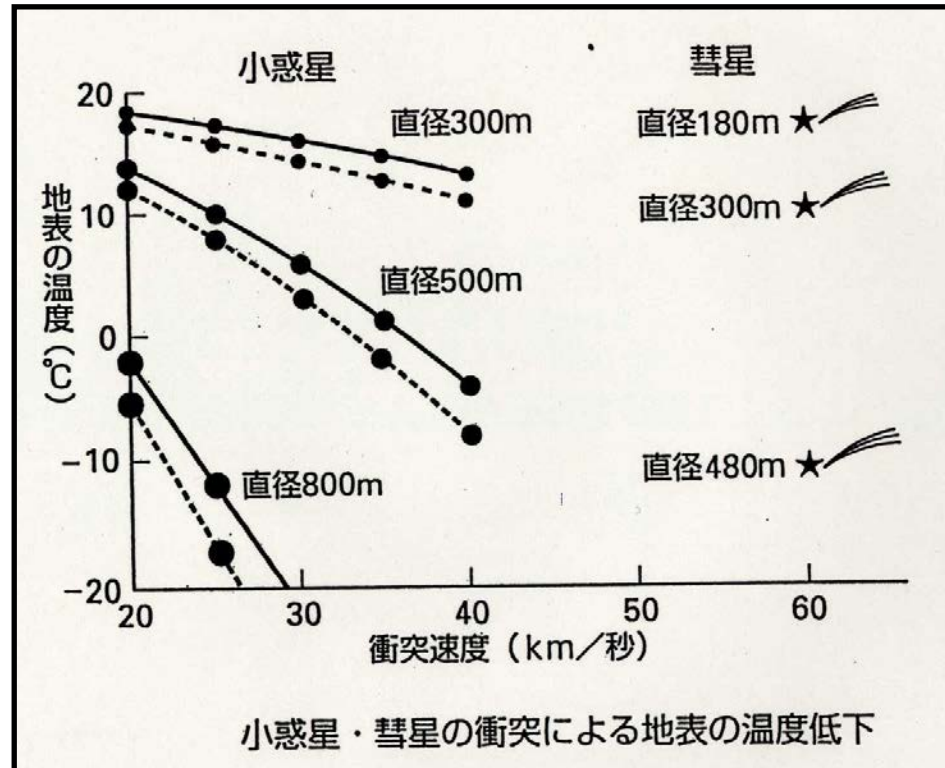
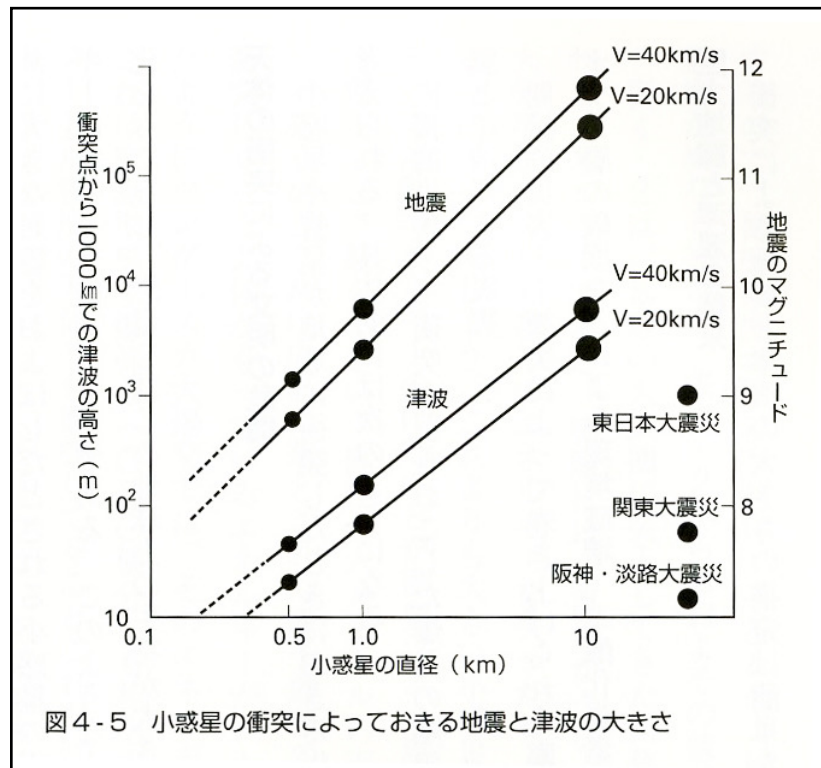
天体の形は球、密度は 3g/cm<sup>3</sup> を仮定

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 =  $4.184 \times 10^9$  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

# 天体の衝突による被害



最初の地表温度：20°C

(Newton 大隕石 衝突の現実 より)

# 天体の地球衝突の確率

## ◆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)

## ◆数十m～100m程度の天体

- ・100年～数百年に1度程度
- ・地域的被害

## ◆1km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

