

小惑星衝突回避

京都大学宇宙総合学研究ユニット
ISAS共同研究部門 特定助教 坂東 麻衣

Mar. 5-6, 2011
第4回宇宙ユニットシンポジウム
人類はなぜ宇宙へいくのか～宇宙生存学における課題～



太陽系のわく星



水星



金星



地球



月



彗星

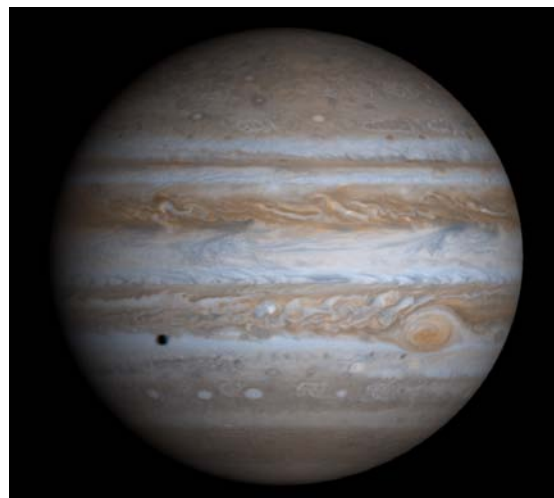


火星

Ceres
Eris, 2005^{930km}
68AU, 2700km



小惑星



木星



土星

天王星



海王星

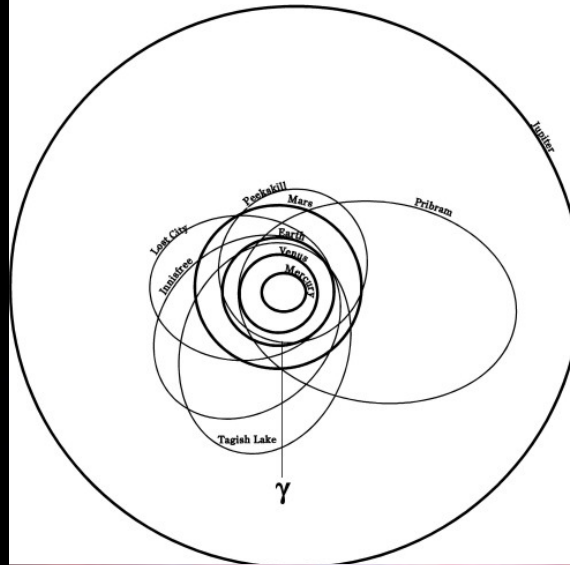


冥王星
(準惑星, 2300km)

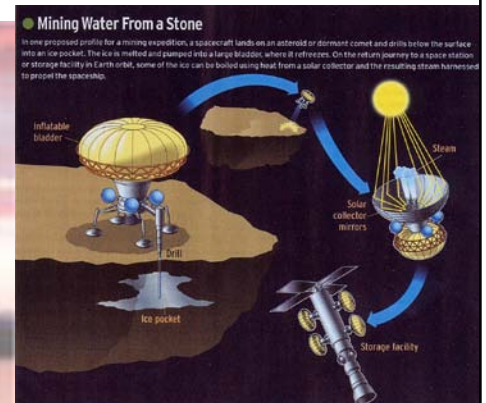


小惑星

隕石のふるさと、恐竜の絶滅、宇宙時代の資源の宝庫。隕石から生命に必要な水、塩、糖が見つかる

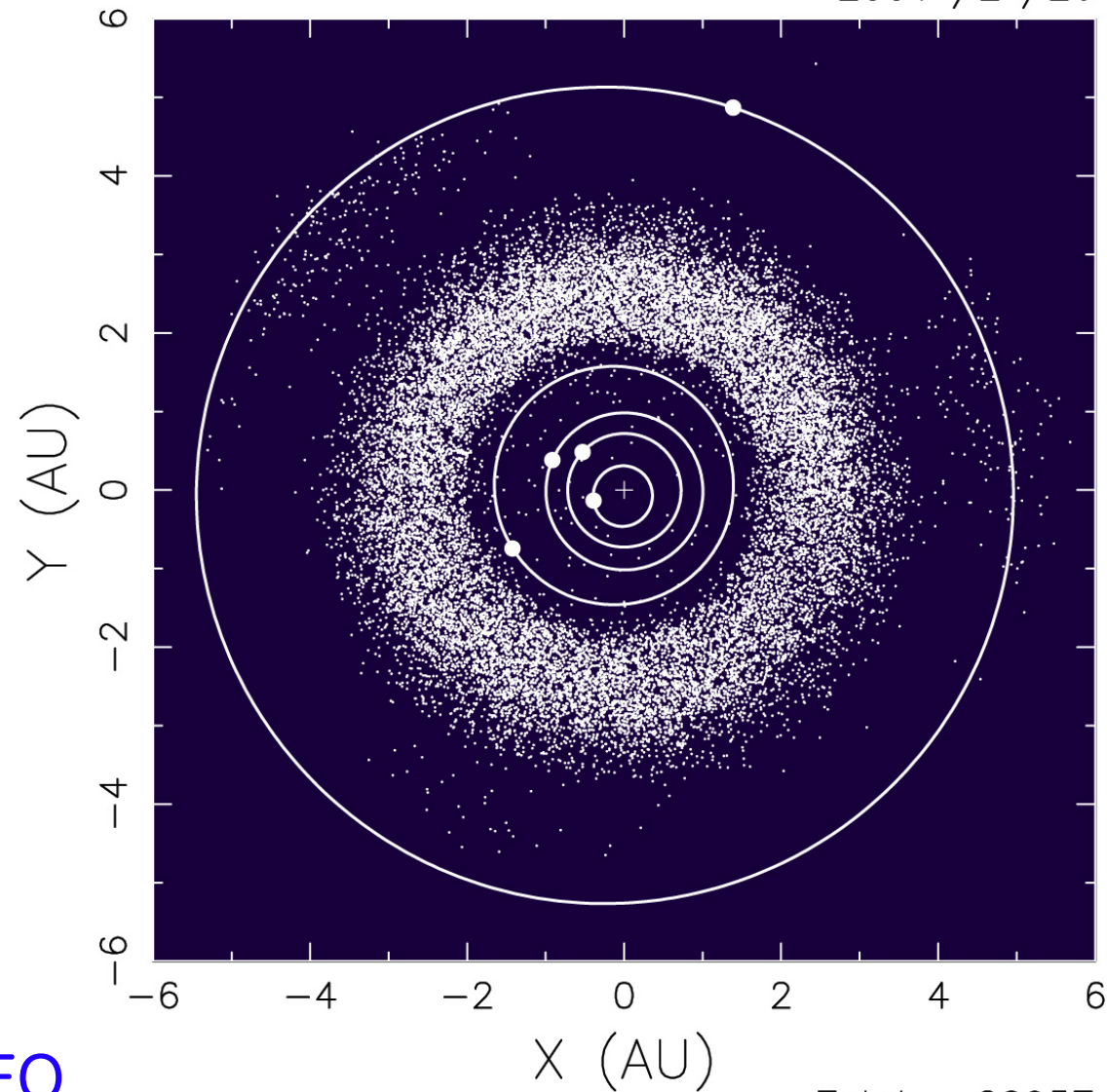


NASA ARC



JAXA矢野創氏

2001 / 2 / 26



NEO

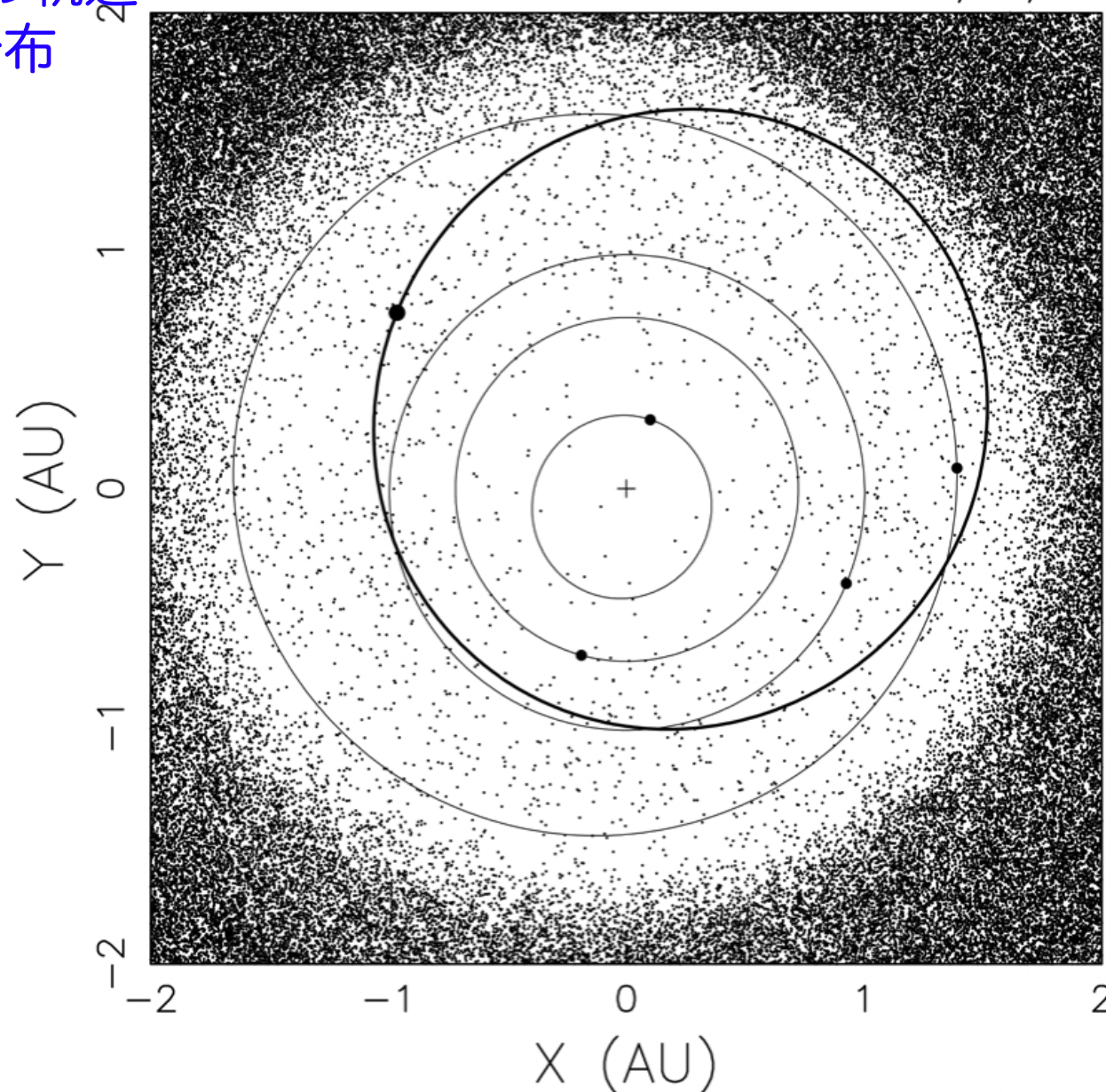
Total = 20957

小惑星図

(提供: JAXA 吉川真 助教授)

2005 / 8 / 30

小惑星イトカワの軌道 と小惑星の分布



Total = 272263

JAXA 吉川真氏

小惑星の衝突頻度

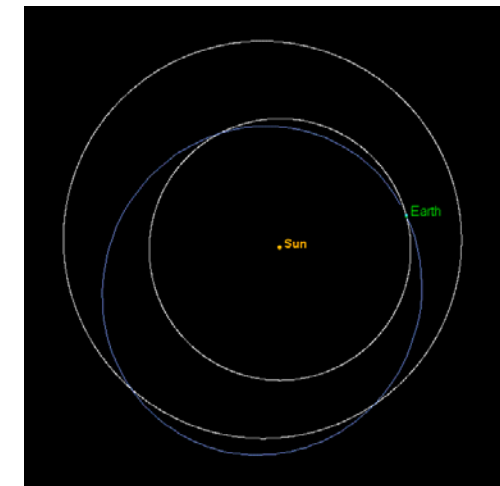
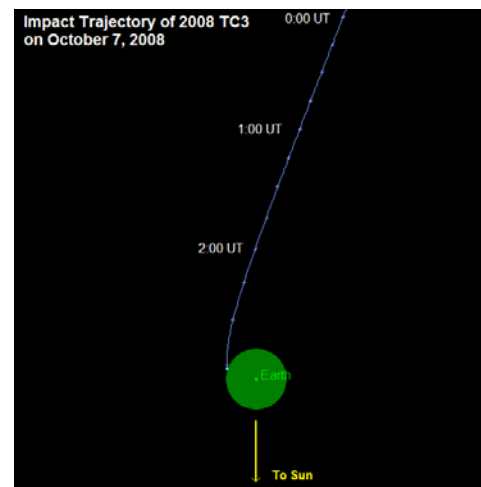
- 小惑星の衝突頻度と小惑星の大きさの関係

TABLE 2.1 Approximate Average Impact Interval and Impact Energy for NEOs

Type of Event	Characteristic Diameter of Impacting Object	Approximate Impact Energy (MT)	Approximate Average Impact Interval (years)
Airburst	25 m	1	200
Local scale	50 m	10	2000
Regional scale	140 m	300	30,000
Continent scale	300 m	2,000	100,000
Below global catastrophe threshold	600 m	20,000	200,000
Possible global catastrophe	1 km	100,000	700,000
Above global catastrophe threshold	5 km	10, 000,000	30 million
Mass extinction	10 km	100,000,000	100 million

2008TC3

- 観測史上初めて地球との衝突が事前に予測された小惑星
- 大気圏突入前の直径が2 m程度 (90cm~4m)
- **10/6 06:30** (グリニッジ標準時) : 米アリゾナ州の天文学者によって発見
- **10/7 02:46** (グリニッジ標準時) : 小惑星「2008 TC3」がアフリカ・スーダン上空で大気圏に突入
- 50~300mの小惑星は発見しつくされていないグレーゾーン.



NASA

地球接近小惑星の衝突回避

- 地球接近小惑星を題材とした映画



アルマゲドン(1998)



ディープインパクト
(1998)

地球接近小惑星への対策

- スペースガード
 - Minor Planet Center (MPC)
 - 美星スペースガードセンター (BSC)
- 地上からのサーベイ・発見
 - Catalina Sky Survey
 - LINEAR
 - Spacewatch
- 宇宙からのサーベイ・発見
 - Wide-field Infrared Survey Explorer for Near-Earth Objects (NEOWISE) 2011年02月01日終了
 - Canada's Near-Earth Object Surveillance Satellite (NEOSSat)
 - Germany's AsteroidFinder (2013)
- これから
 - Large Synoptic Survey Telescope (LSST)
 - Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System 4 (Pan-STARRS4 or PS4)
 - Catalina Sky Survey Binocular Telescopes (CSS+)
 - Discovery Channel Telescope (DCT)

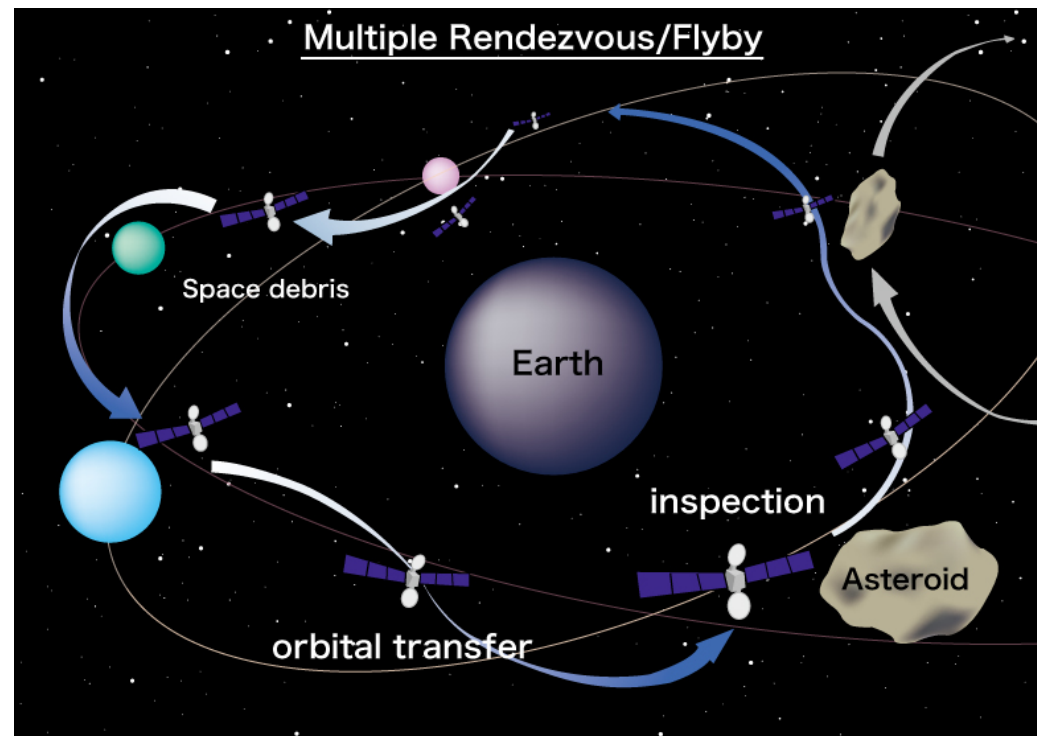


美星スペースガードセンター

軌道工学

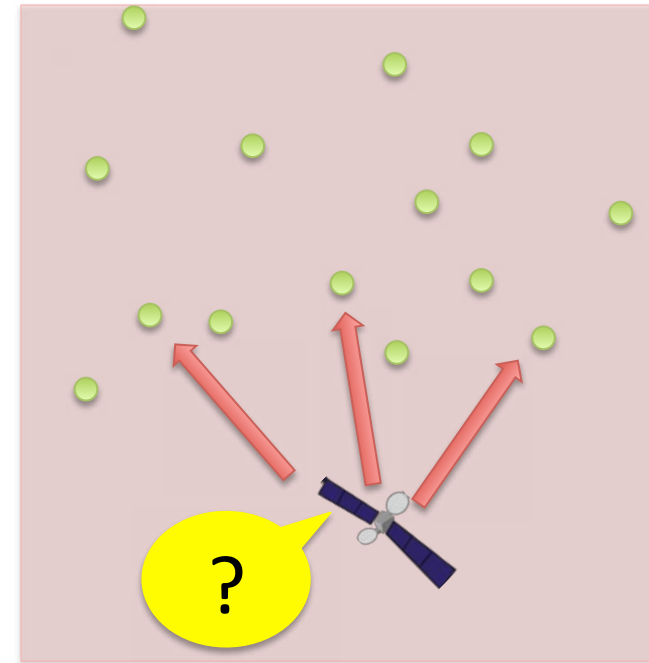
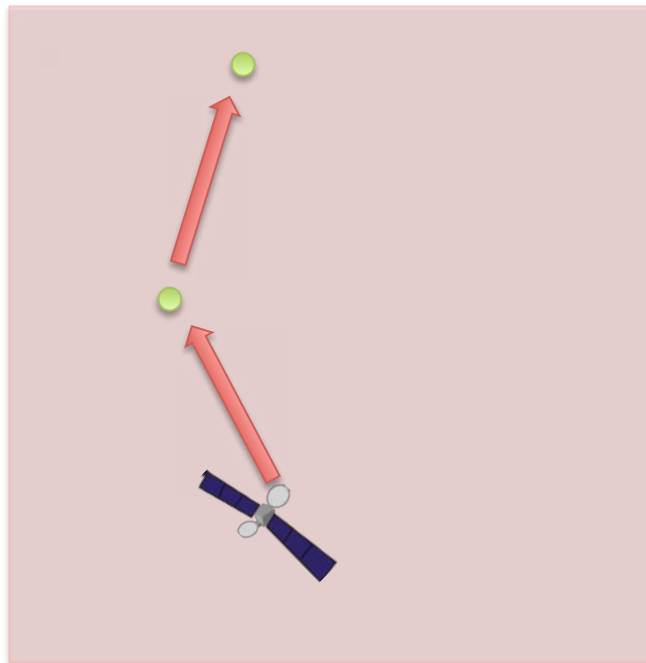
- 限られた燃料でどのようにして目的の天体までいくか？
- 数多くの小惑星の中で行くことができる小惑星はあるか？
- できるだけ多くの天体を観測するにはどの天体を選びどのようなルートで行くか？

➡ 軌道力学・軌道工学



複数フライバイ軌道の設計

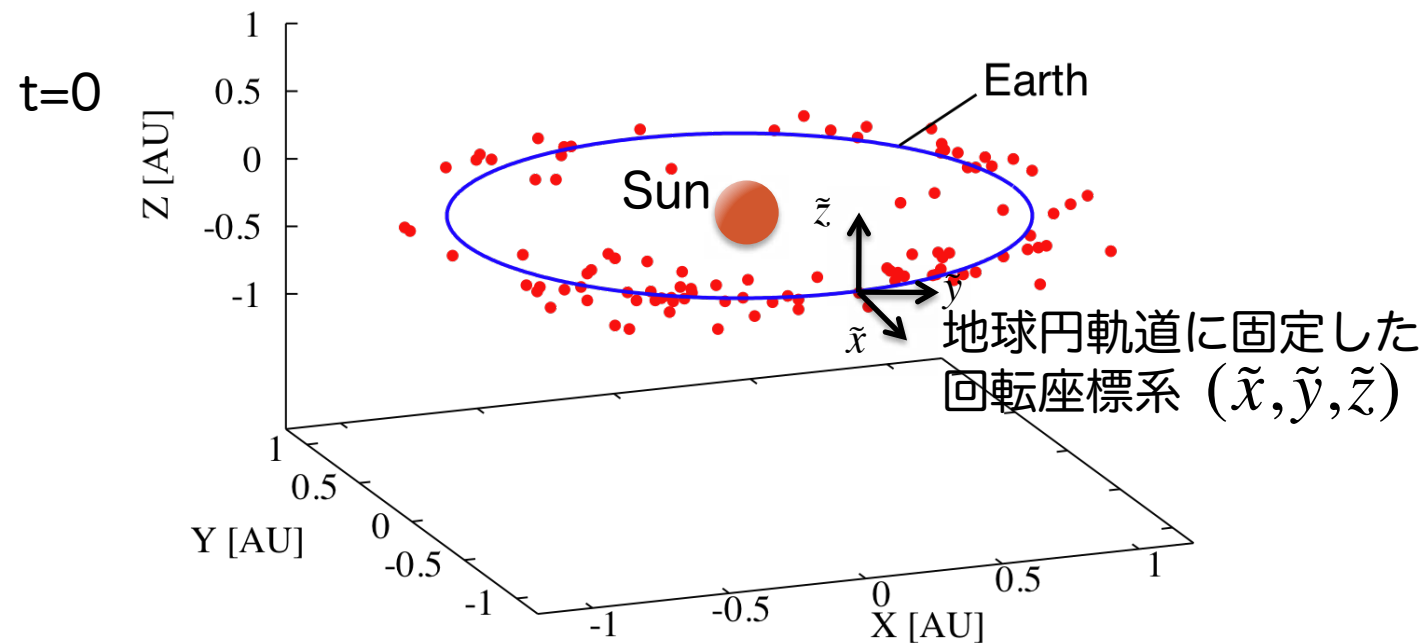
- 従来までの問題設定との相違点



- ◆従来の軌道設計で対象とする問題ではあらかじめ対象がきまっていた。
- ◆地球接近小惑星のように膨大な数の対象を観測するミッションを考えた場合、一度のフライトでできるだけ多くの観測を行うことが望ましい。

地球近傍の小惑星の分布

- The MPC Orbit (MPCORB) Database
(June 8, 2009)



113 asteroids

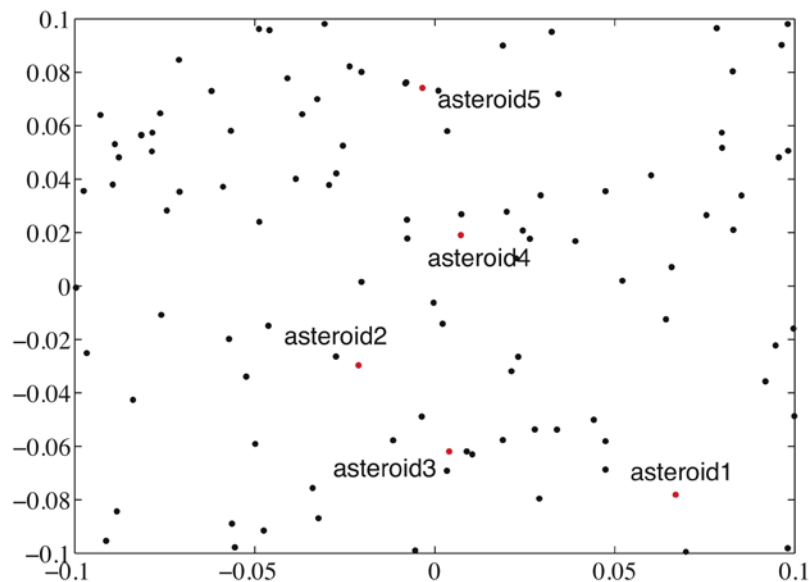


16,843,743,840通りの組み合わせ

5つの小惑星を観測する場合

計算例

- Optimal sequence



100 asteroids



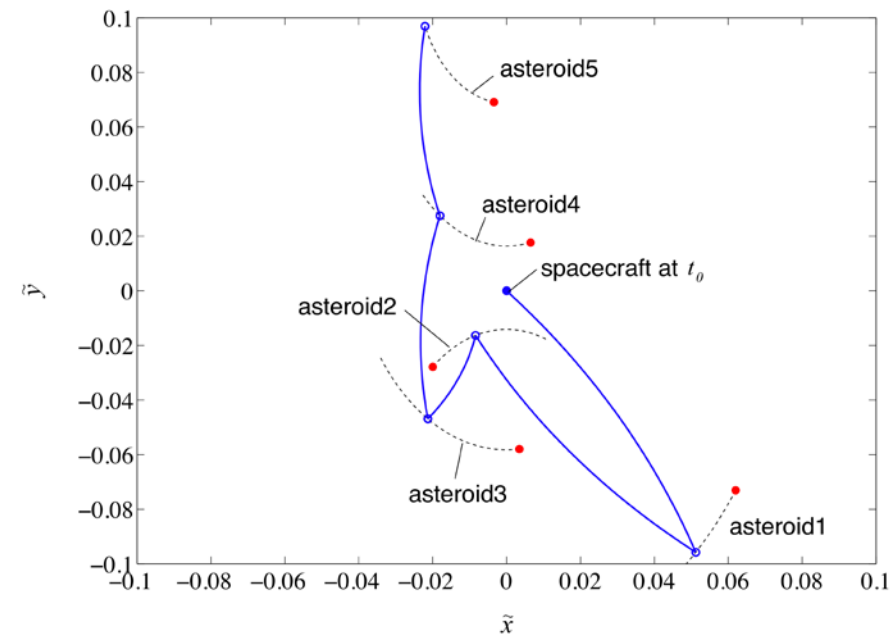
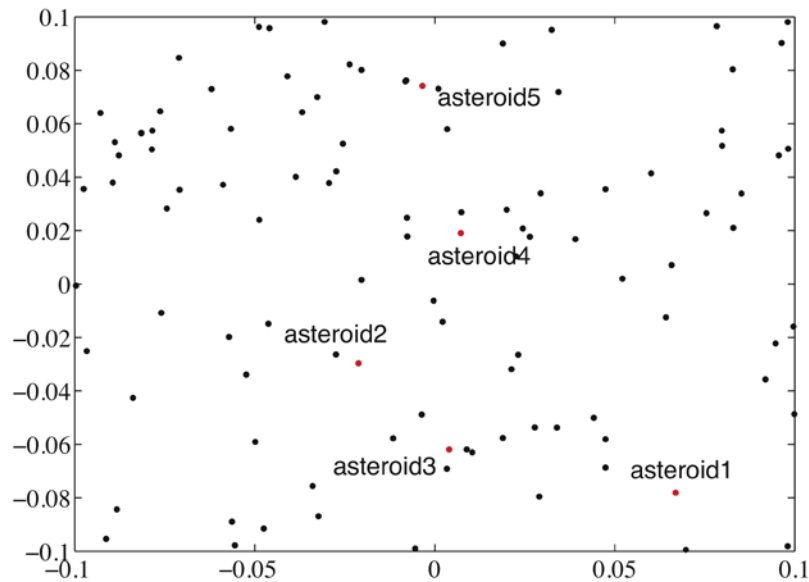
9,034,502,400 possibilities

Selection of 5 asteroids

母関数を用いた軌道の最適化により大幅な計算時間の短縮が可能

計算例

- Optimal sequence



100 asteroids



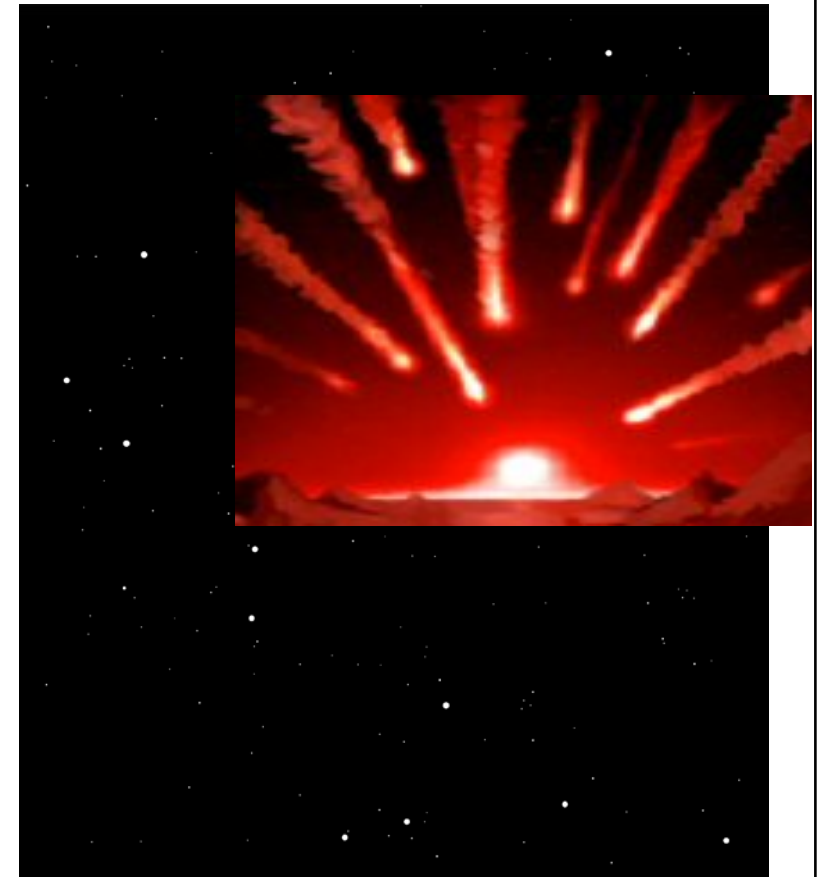
9,034,502,400 possibilities

Selection of 5 asteroids

母関数を用いた軌道の最適化により大幅な計算時間の短縮が可能

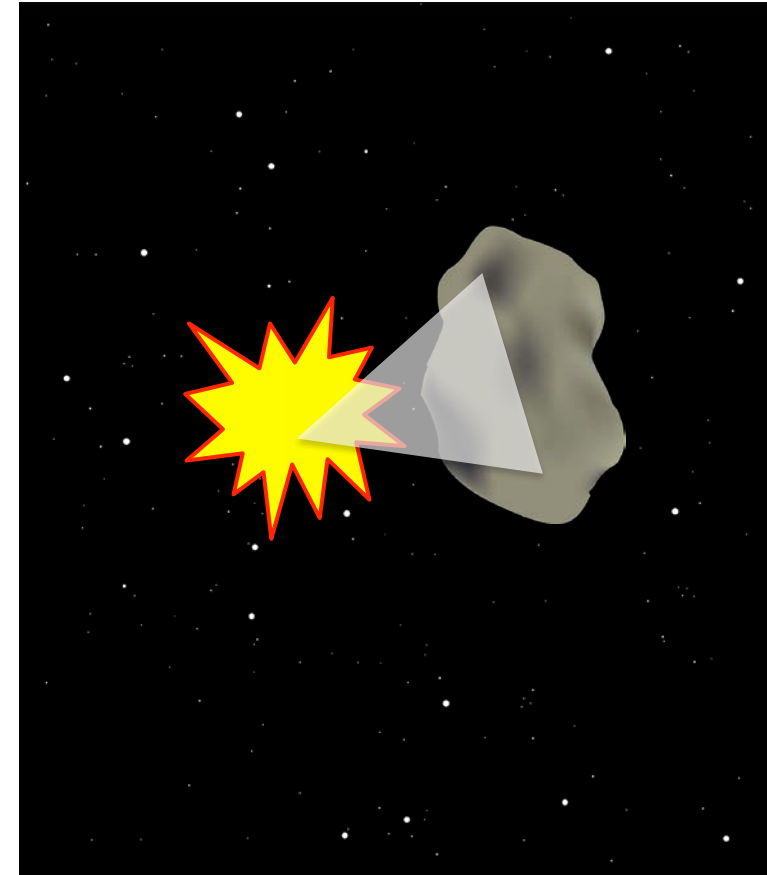
小惑星の軌道変更いろいろ

- 核兵器による破壊
 - 短時間
 - 大量の破片が地球に衝突するリスクがある



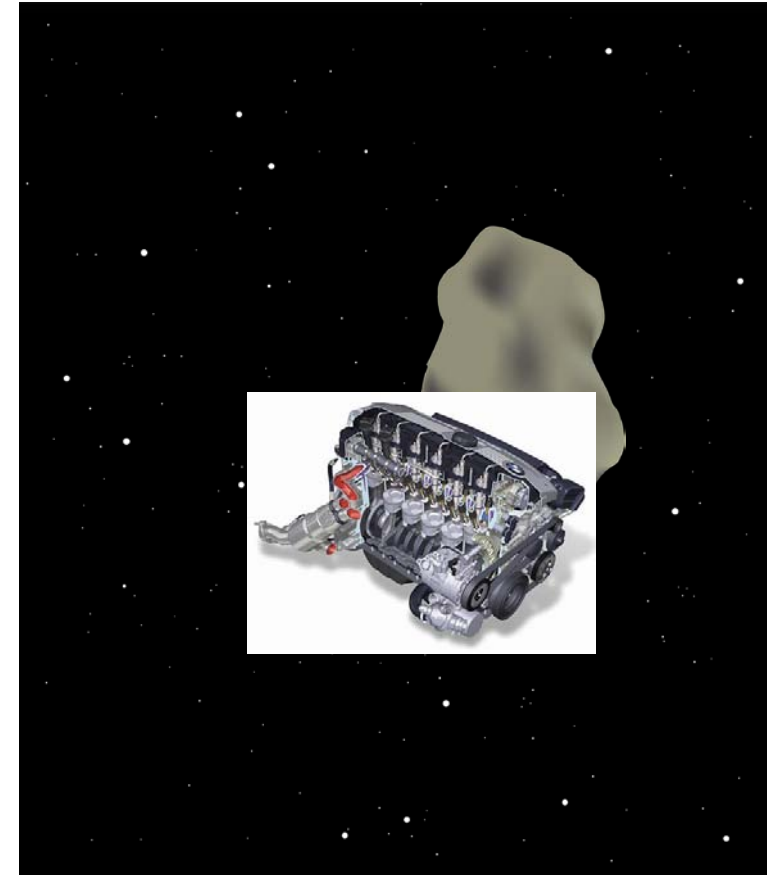
小惑星の軌道変更いろいろ

- 核兵器による軌道変更
 - 数100m離れた場所で爆発
 - アブレーションによる軌道変更
 - 長期間
 - 太陽風により破片は掃除され、汚染にはつながらない



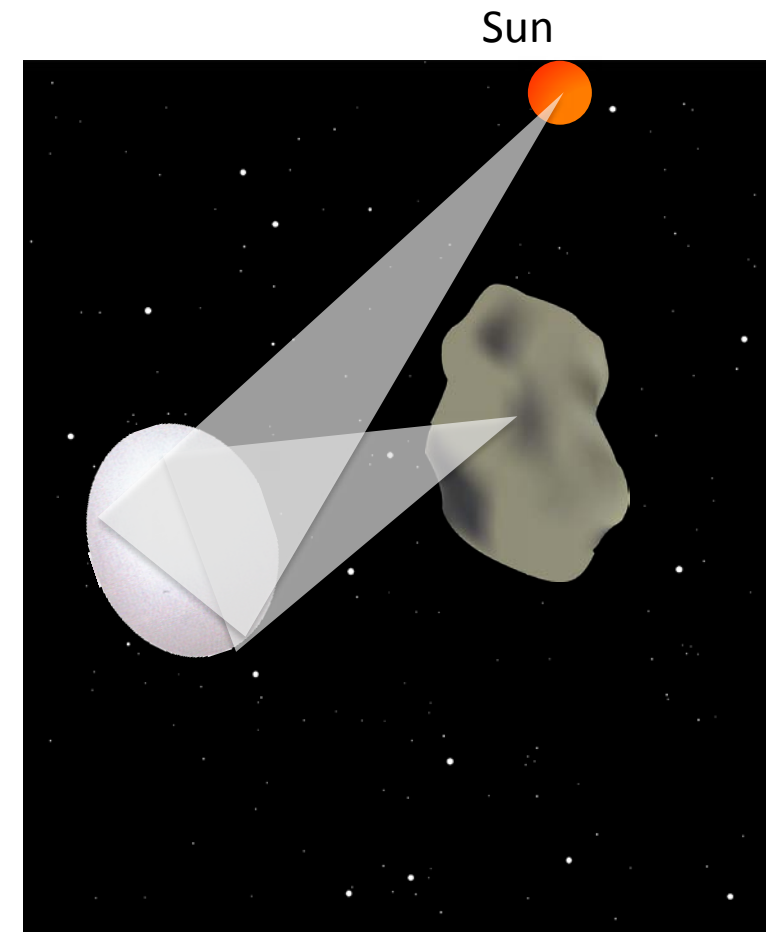
小惑星の軌道変更いろいろ

- スペースエンジン
 - 長期間
 - 小惑星に着地しないといけない.



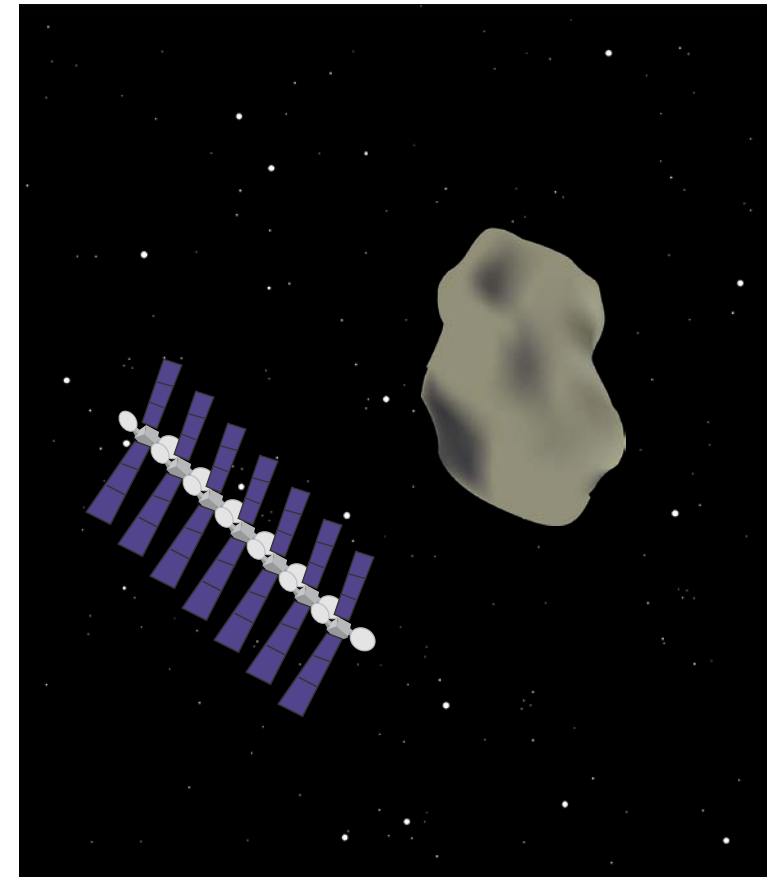
小惑星の軌道変更いろいろ

- スペースミラー
 - 太陽光を集めて小惑星に照射する.
 - アブレーションによる軌道変更
 - ヤルコフスキー効果を利用
 - 長期間
 - 小惑星に触れる必要がない



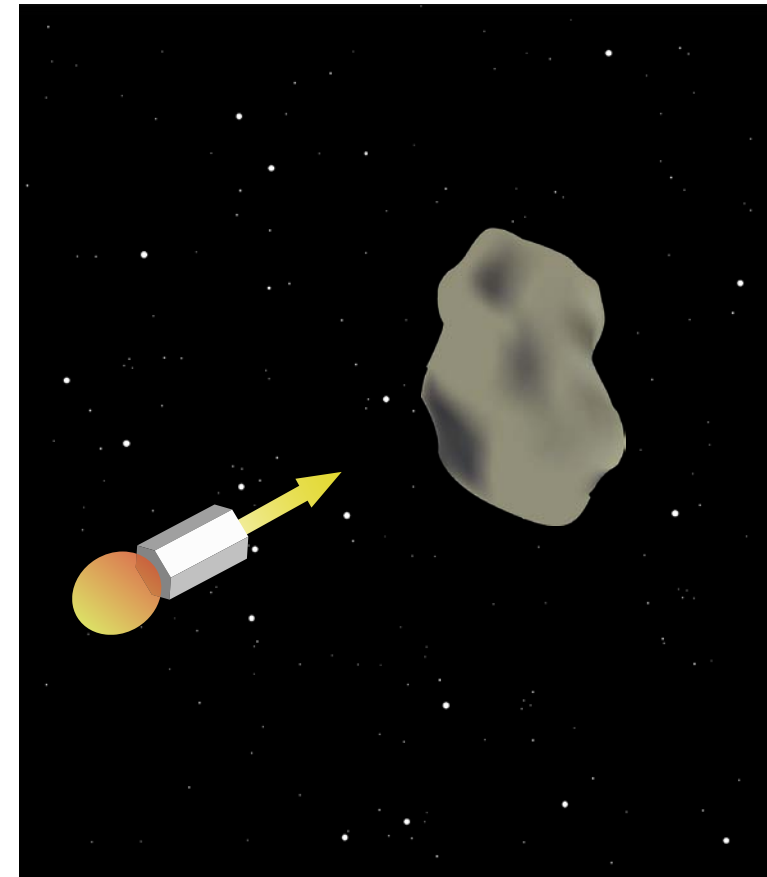
小惑星の軌道変更いろいろ

- Gravity Tractor
 - 宇宙機と小惑星間に働く重力を利用
 - 長期間
 - 小惑星に触れる必要がない



小惑星の軌道変更いろいろ

- Kinetic Impactorによる軌道変更
 - 宇宙機の直接衝突
 - 数年～10年程度の時間, 数100mの小惑星
 - 衝突過程の理解が必要



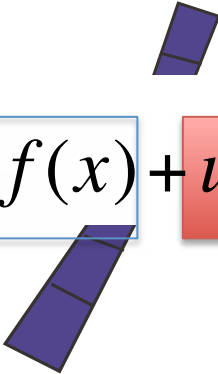
地球接近小惑星(NEA)の衝突回避策まとめ

TABLE 5.2. Summary of Implementation of Primary Mitigation Strategies. (Action matrix once high probability of impact by NEO has been established.)

Scale of Event	Warning Time			
	Short (days-few years)	Medium (few years-decade)	Long (multiple decades)	
Small (local/national)	 	  	  	 Study and monitor
Medium (regional/multinational)	  	   	     	 Characterization mission
				 Bilateral agreements
Large (global/international)	  	   	     	 International agreements/ cooperation
				 Civil defense (shelter, evacuation)
Largest (global catastrophe/ unable to avoid)	   	   	   	 Slow push orbit change (gravity tractor)
				 Kinetic impact
				 Nuclear detonation
				 No avoidance capability

宇宙機の軌道制御と小惑星の軌道変更

専門：制御工学 ➡ 基本的には「人工物」の制御



人工衛星

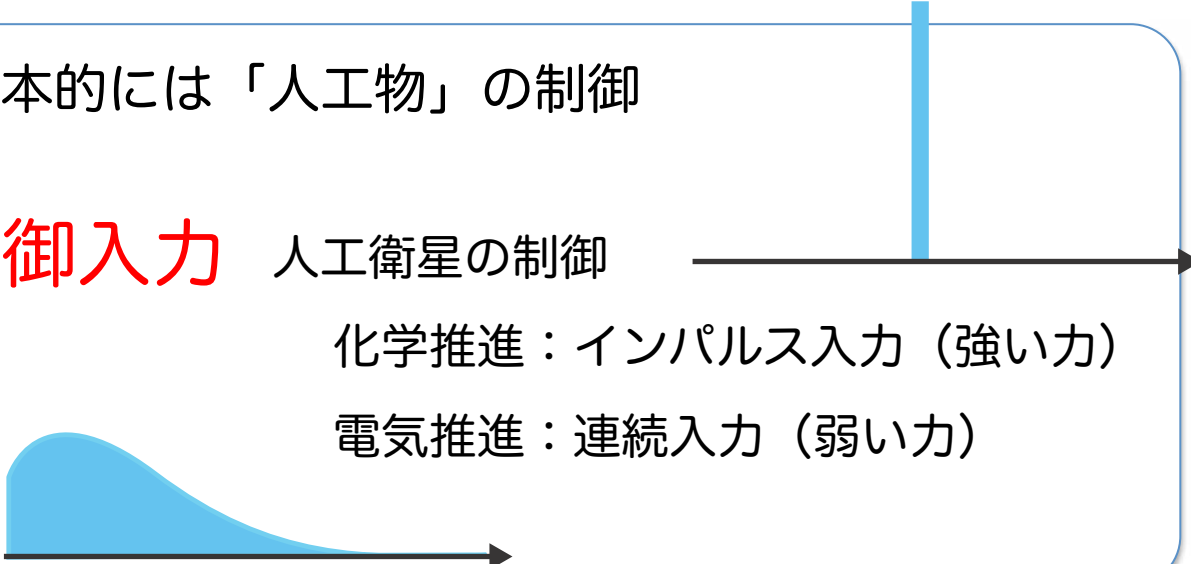
$$\dot{x} = f(x) + u$$

制御入力

人工衛星の制御

化学推進：インパルス入力（強い力）

電気推進：連続入力（弱い力）



小惑星の軌道変更 ➡ 制御工学の観点から



小惑星

インパルス入力（強い力） ➡ 核爆弾，宇宙機の衝突など

連続入力（弱い力） ➡ 自然の力を使う方法（重力，太陽輻射圧）

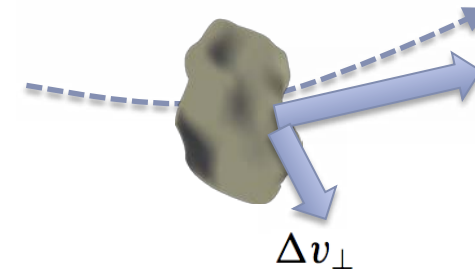
➡ 軌道変更ミッションに対する小惑星の応答がわかれば軌道を制御できる。

モデルの不確かさ

- Kinetic Impactorミッションにおける軌道設計
 - 運動量の伝達効率が求まれば、小惑星の軌道制御モデルをもとに制御方法を考えることができる
- しかし、Kinetic Impactor宇宙機が衝突した際の、NEAの応答がもっとも不確かさが大きい。
 - 特に、密度が低い物質への衝突は未知の部分が多い。

$$\dot{x} = f(x) + u$$

小惑星の運動 衝突により伝わる運動量

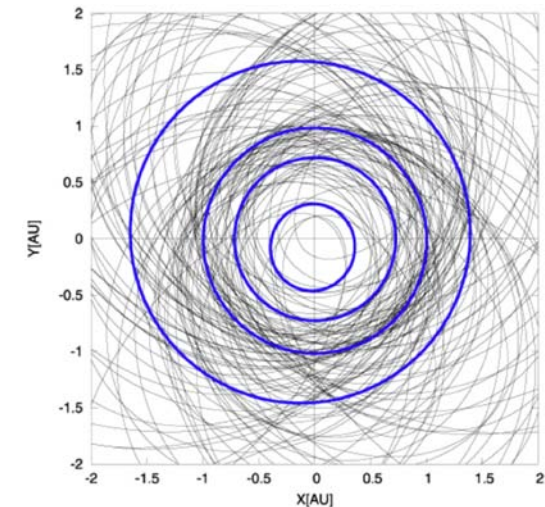


小惑星の性質を反映した小惑星の軌道変更のための制御モデルを構築するには？

山口(総研大)、山川(京大)、小木曾(大阪府立大)

「地球接近小惑星衝突回避のための軌道工学・惑星科学の融合研究」

- 地球に接近して衝突する可能性のある小惑星(Potentially Hazardous Asteroids, PHA)の衝突回避
- 地球接近小惑星とよばれる、地球に接近する軌道をもつ小惑星への早急な対策が必要
- 小さな小惑星でも空中爆発などにより地球への被害は大きい



近年、地球衝突問題を意識した小惑星のサーベイ観測、および、探査計画が立案されつつあるが、近い将来に起こりうる衝突回避問題に明確に答える研究成果および解決手段はまだ存在しない。

地球接近小惑星の衝突回避

- 小惑星の観測
 - 地上からの観測
 - 宇宙空間からの観測
- 小惑星の特性の理解
 - 組成, 内部構造
 - 質量分布, 形状, 空隙率
- 小惑星の軌道変更

理学

理学

工学

得られる小惑星の構造・組成等の基本的な知見を,どのように具体的に衝突回避のための衛星ミッションの策定に反映するか明らかではない!

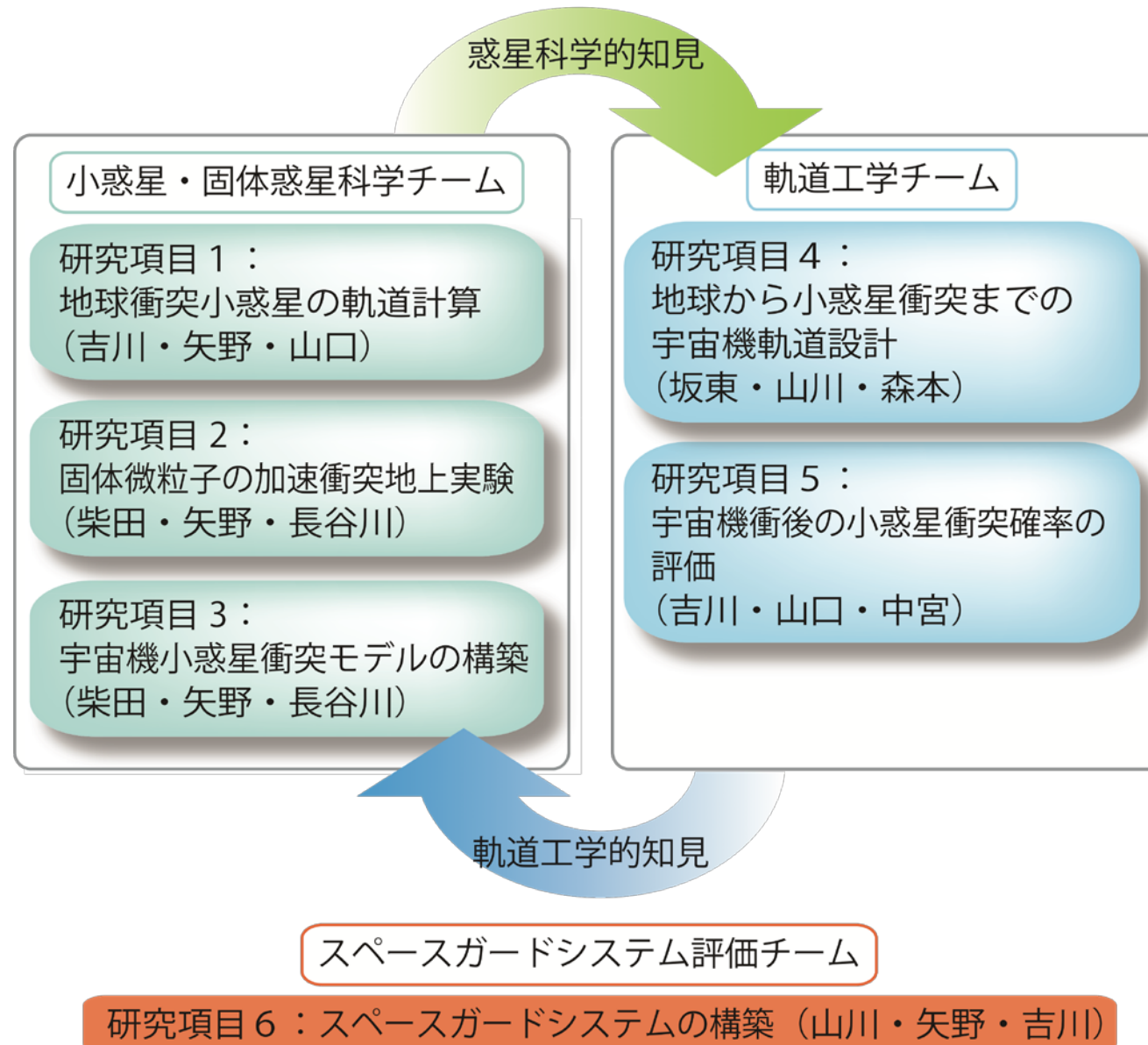


小惑星の特性や衝突までの時間などにより軌道変更方法や宇宙機の軌道や質量・材質が適切に設計される必要がある.



衝突回避アルゴリズム構築を総合的に扱うための研究を推進する

研究体制



Kinetic Impactor宇宙機の質量

- NEAを1cm/sの速度変化するのに必要な宇宙機の質量

$density = 2 \text{ g/cm}^3$

$$\Delta v = \beta \frac{mU}{M}$$

M : 小惑星の質量

m : 宇宙機の質量

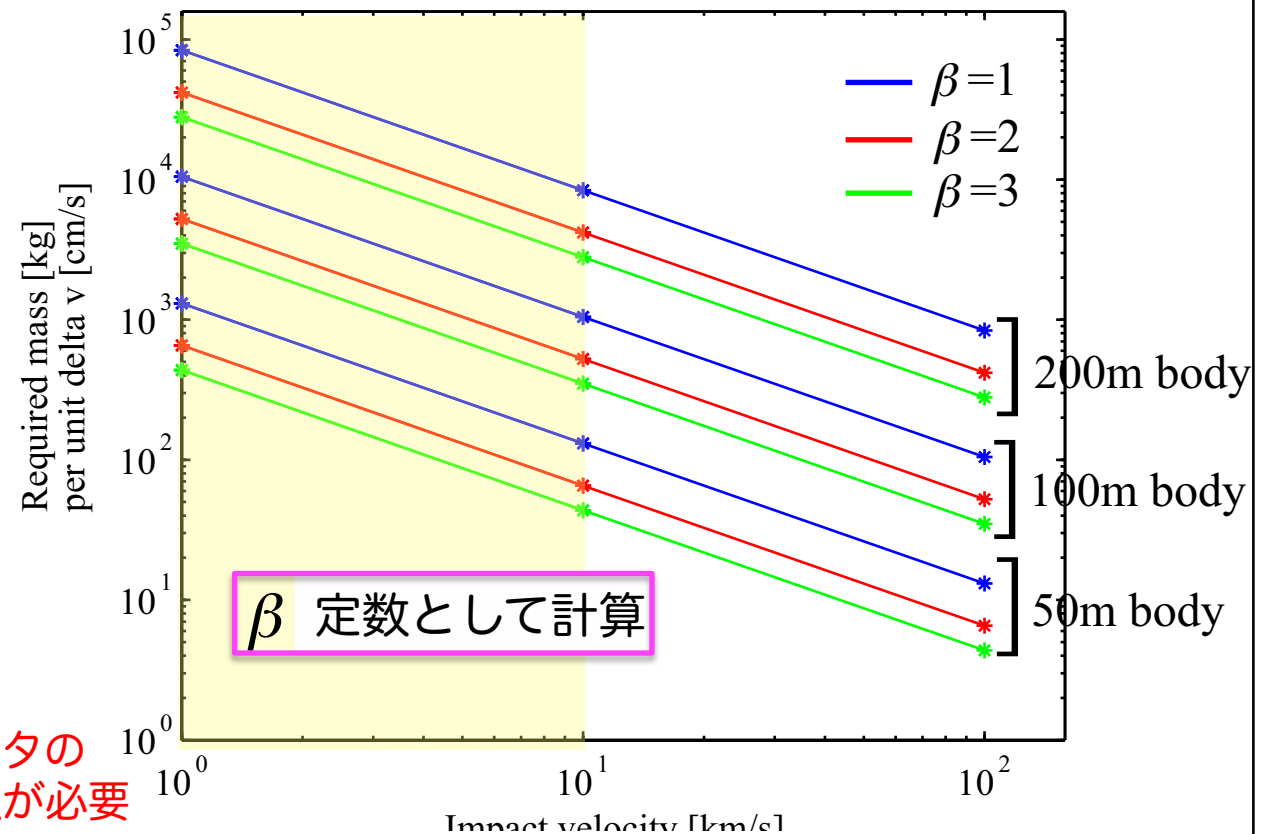
Δv : 小惑星の速度変化

U : 宇宙機の相対速度

β : 運動量伝達効率

β の見積もりには、イジェクタの質量と速度分布に関する情報が必要

ラブルパイル天体においては、小惑星との衝突による運動量伝達効率が小さくなる。



運動量伝達効率の見積もり

- NEAを1cm/sの速度変化するのに必要な宇宙機の質量

$$\Delta v_x = \frac{mU}{M_{NEO}} \left(1 + \frac{P_e}{mU} \right) \sin \theta$$

$$\Delta v_y = \frac{mU}{M_{NEO}} \left(1 + \frac{P_e}{mU} \right) \cos \theta = \beta$$

β : 運動量伝達効率

P_e : イジェクタの運動量

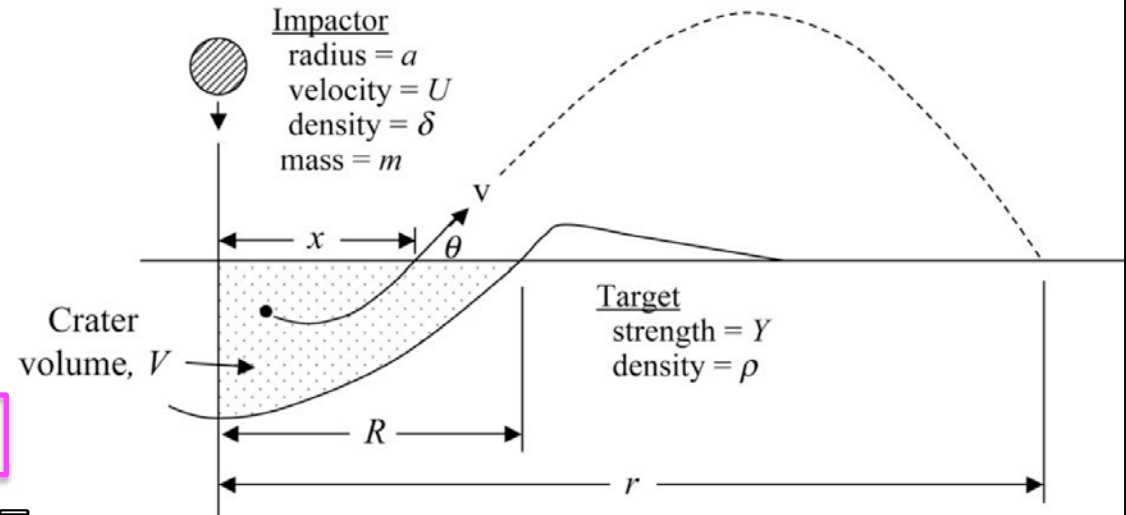


Fig. 1. Definition of variables.

空隙を考慮したスケーリング則 [Housen, Holsapple 2011]

イジェクタ速度とx
(衝突点からの位置) の関係

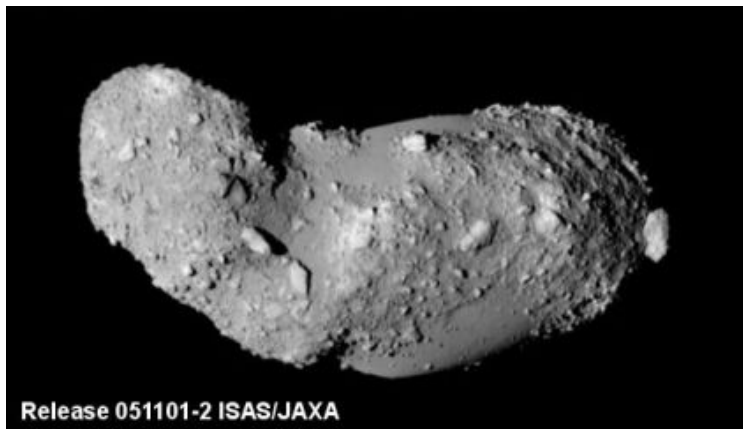
$$\frac{v}{U} = C_1 \left[\frac{x}{a} \left(\frac{\rho}{\delta} \right)^v \right]^{-1/\mu} \left(1 - \frac{x}{n_2 R} \right)^p, \quad n_1 a \leq x \leq n_2 R$$

速度(v)以上のイジェクタの質量

$$\frac{M}{m} = \frac{3k}{4\pi} \frac{\rho}{\delta} \left[\left(\frac{x}{a} \right)^3 - n_1^3 \right]$$

小惑星 Itokawa

- 最近得られたデータは、多くのNEOは重力の弱い力で結合したラブルパイルか、物理的に弱い物質であることを示している。
- イトカワのデータは空隙率が砂と同程度であることを示し、ラブルパイル天体の最も重要な例。



JAXA

バルク密度： 2g/cm^3

$\approx 1.9\text{g/cm}^3$
(砂と同程度)

空隙率にすると40%程度



ラブルパイル天体では衝突によるエネルギーが吸収され、運動量伝達効率が小さいことを考慮する必要がある。

研究課題

対象

現在までのところまだ日本以外でも手が付けられていない50~300mクラスのラブルパイル小惑星の軌道変更ミッション。

- スケーリング則に基づき，空隙のある天体への運動量伝達効率 β の見積もり，感度解析

サイロ



サブ課題

- 小惑星の自転を利用した軌道変更ミッションの検討.
- 粉粒体の性質を利用した軌道変更はできないか？



微粒子加速衝突実験との連携，「地球接近小惑星衝突回避のための軌道工学・惑星科学の融合研究」へ

地上実験から小惑星-宇宙機衝突モデルへ

- 宇宙機の運動エネルギー衝撃による衝突回避を行うためには、小惑星-宇宙機の衝突モデルを構築する必要がある。
- 小惑星軌道変更の精度向上において困難な点は、小惑星衝突の情報が圧倒的に不足していることにある。

微粒子の岩石加速衝突
による地上実験システム

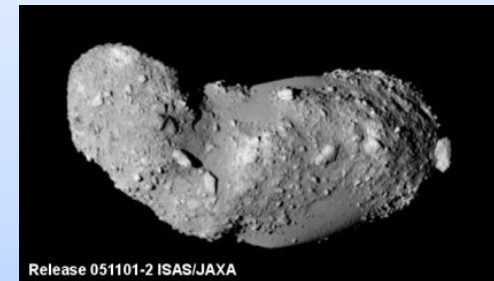


2 段式軽ガス銃

相似則



実際の大きさ



Release 051101-2 ISAS/JAXA

衝突回避アルゴリズム構築を総合的に扱うための研究を推進する

Conclusions

地球接近小惑星の衝突回避

理学・工学を融合した小惑星軌道変更ミッション
の創出へむけた研究

