



Tomo-e Gozen による minimoon 探査

木曾シュミットシンポジウム 2019

東京大学 修士1年 紅山 仁

minimoon = 有人探査の可能性を秘めた天体



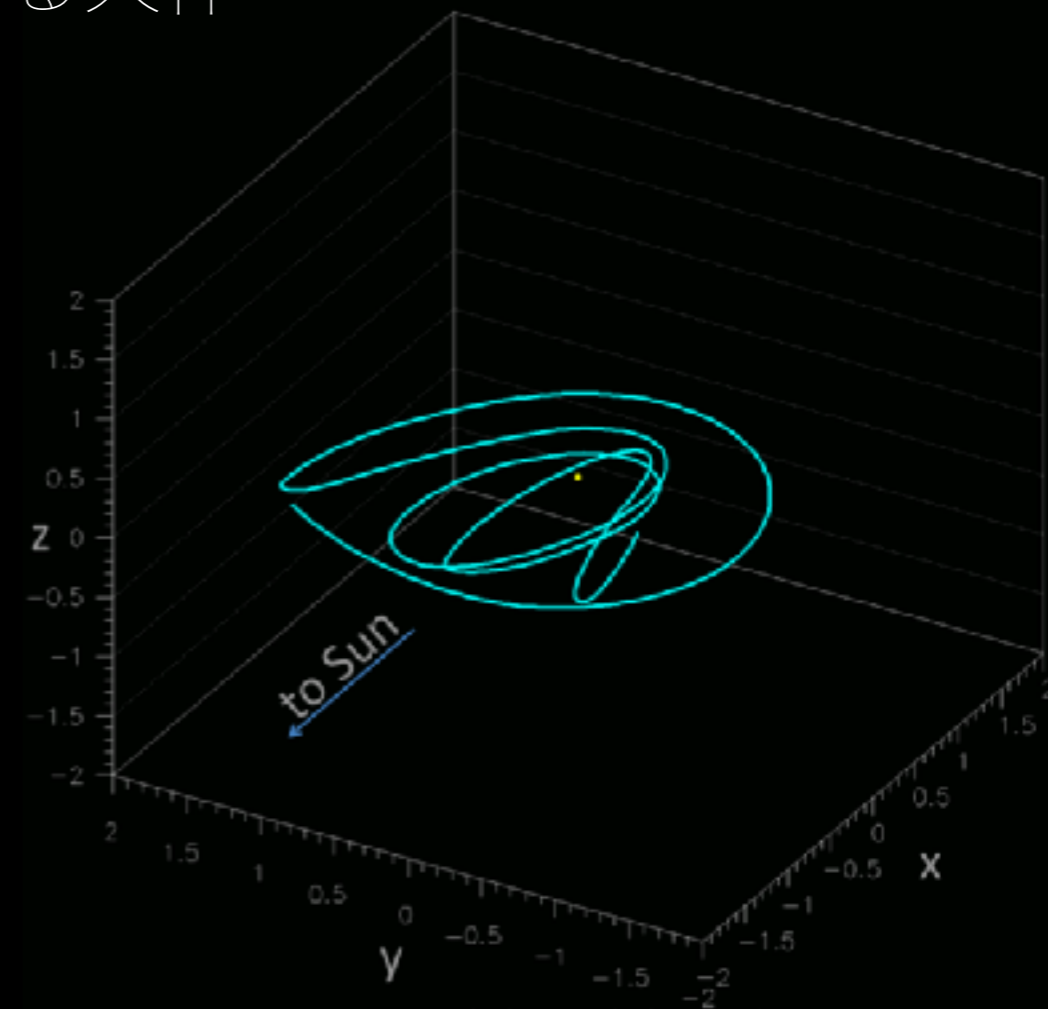
Jedicke et al. 2018

“minimoon” とは？

- **minimoon** : 地球周回軌道に存在し公転する天体
 - 観測例は**2006 RH120, 1991 VG** のみ
 - 両方とも当初は人工天体とされていた
 - 追観測により minimoon へ昇格

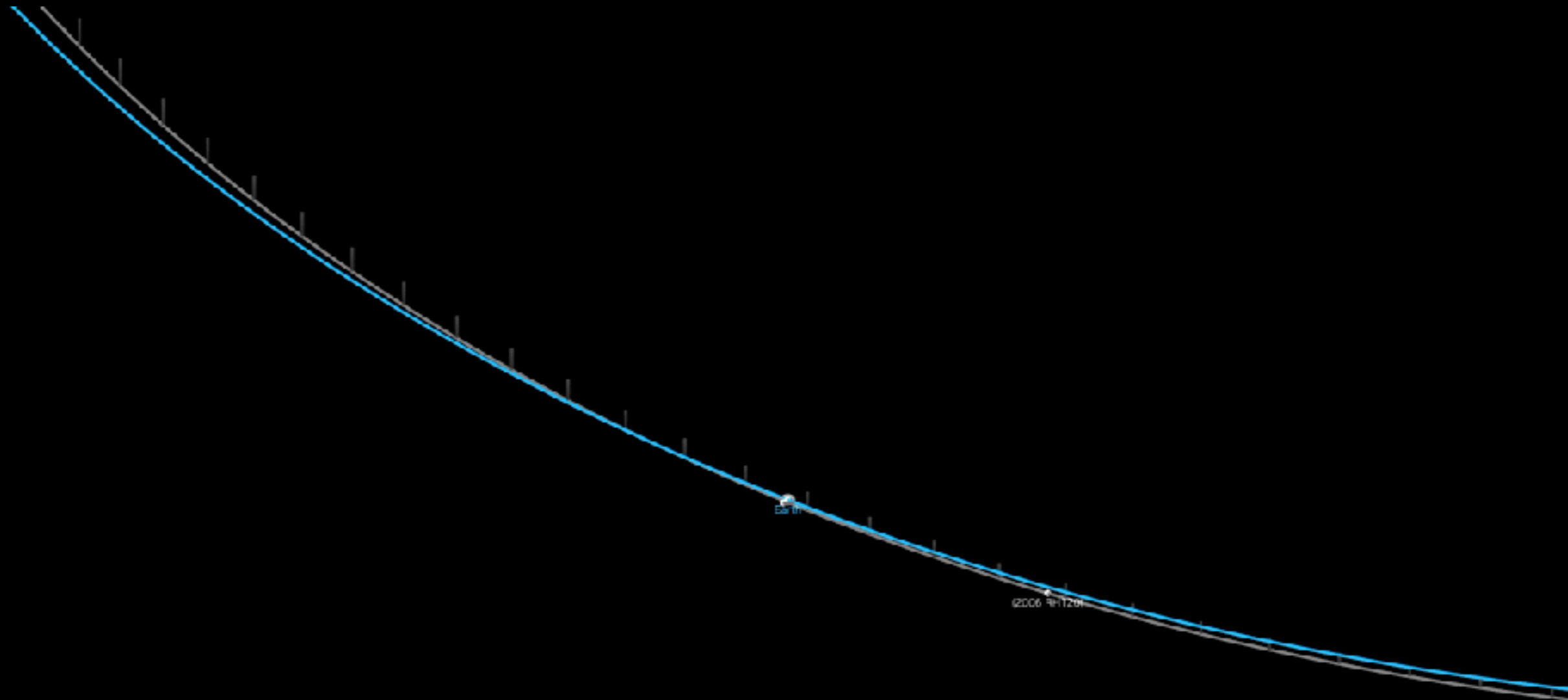
似たもの

- TCF Temporarily-Captured Flyby
 - ▶ 公転しない
- 準衛星(quasi-satellite)
 - ▶ 地球と似た軌道の太陽周回軌道



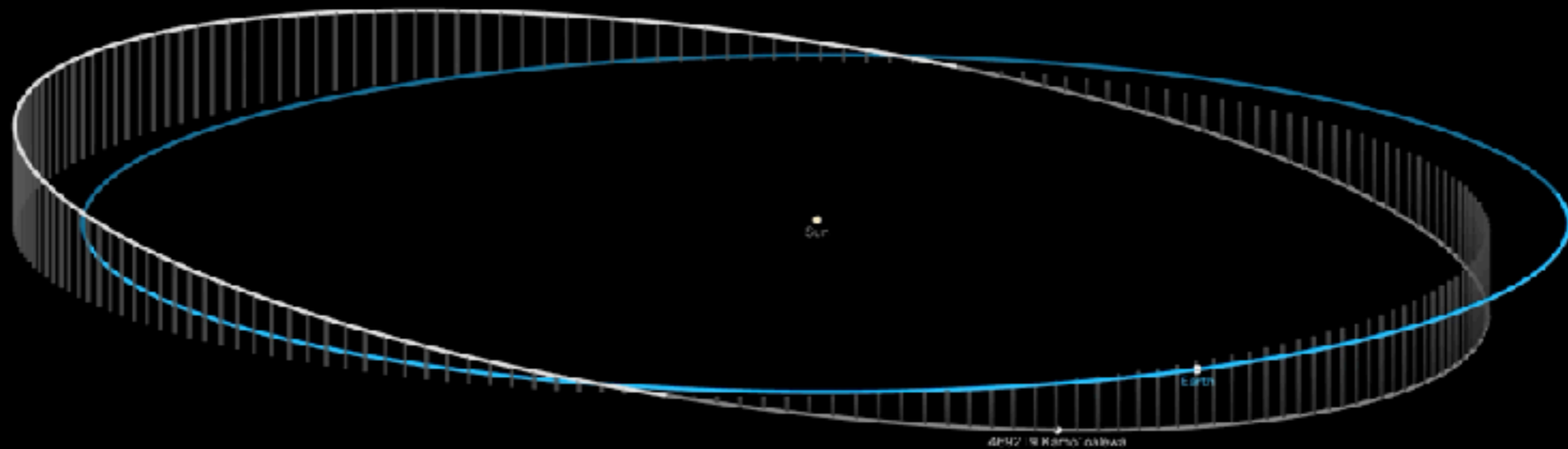
2006 RH120の軌道

minimoon の軌道



(2006 RH120)
Earth Distance: 0.123 au
Sun Distance: 1.014 au
2006-06-10 02:00 UTC

準衛星の軌道



469219 Kamoʻoalewa
Earth Distance: 0.212 au
Sun Distance: 1.01 au
2019-07-10 10:00 UTC

2つの minimoon

- **2006 RH120**

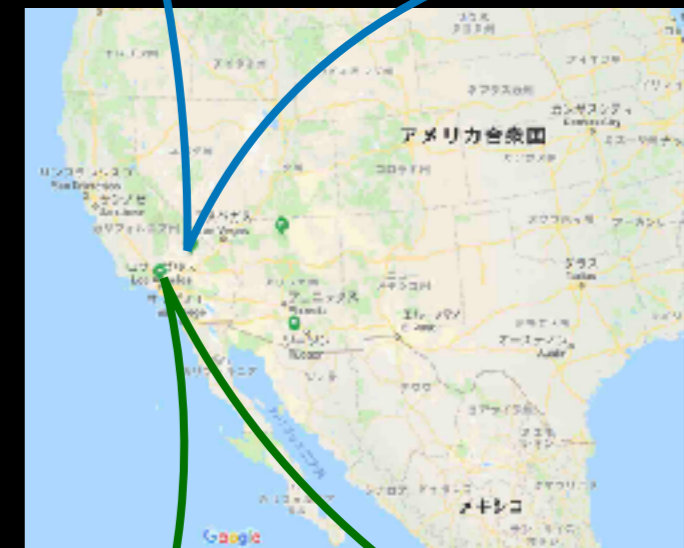
- 2006年 9月 Catalina Sky Survey で発見
- Goldstone Solar System Radarによる追観測でminimoonへ
- 2006年7月から約1年minimoonとして存在



GSSR (NASA)

- **1991 VG**

- 1991年 Spacewatch project で発見
- 2017年 Very Large Telescope による追観測で minimoonへ



- ▶ 軌道を数値計算→それほど変わった軌道
でなく人工天体説を否定 (Marcos & Marcos 2017)



spacewatch telescope (Univ. of Arizona)

世界初の minimoon?

- 1913年 2月 9日
- サスカチュワン州からバミューダ諸島を見た方向
- ブラジルからも見えた



minimoon の起源

起源

- 地球接近天体(NEO)
- ~~月の破片~~

メートルサイズで無視

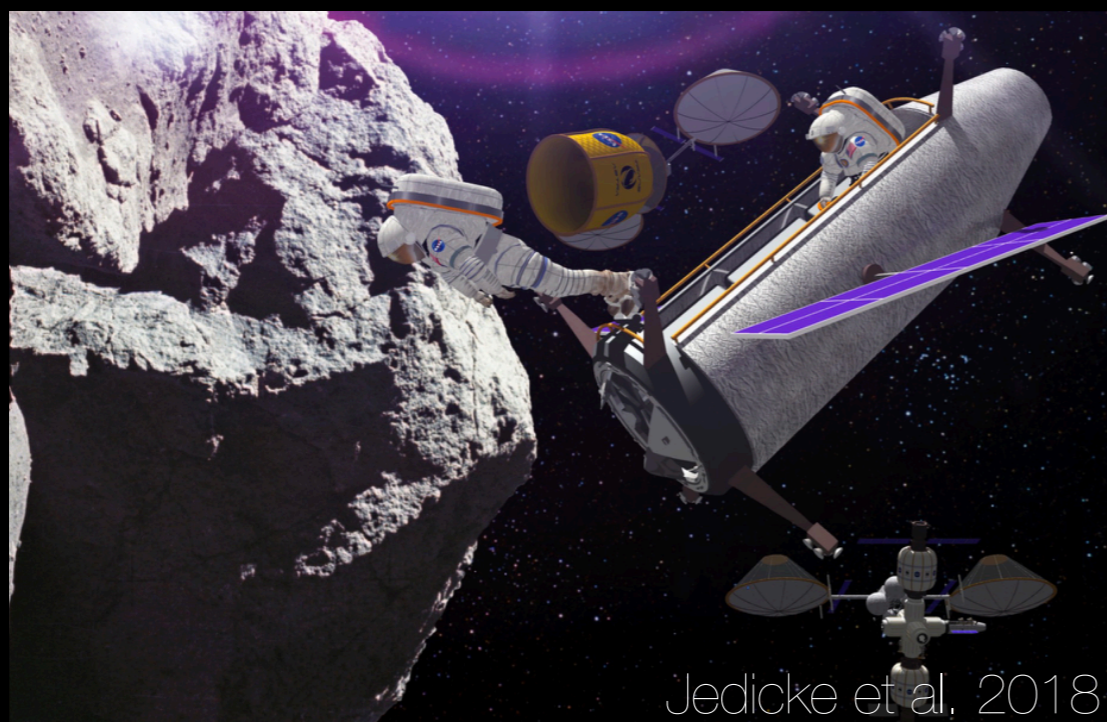
- 重力擾動
- ~~大気の抵抗~~
- ~~Yarkovsky効果~~

mimimoon



minimoon が見つかりと...

- 相対速度が小さい = 有人探査
- 小さければ、丸ごと持ち帰ることも可能
 - 生命の手がかり、レアメタル等の資源



- “生きた” sub-meter sizeの観測ができる唯一の天体

Tomo-e で発見できるのか?

- **Tomo-e Gozen**

- 木曾観測所105cmシュミット望遠鏡
 - ▶ シュミット→広視野20平方度
- 世界初広視野動画観測CMOSカメラ
 - ▶ CMOSセンサー→高速2Hz
- 2019年4月に全センサー搭載
- 多数の突発天体発見が期待



- NEOに関しては

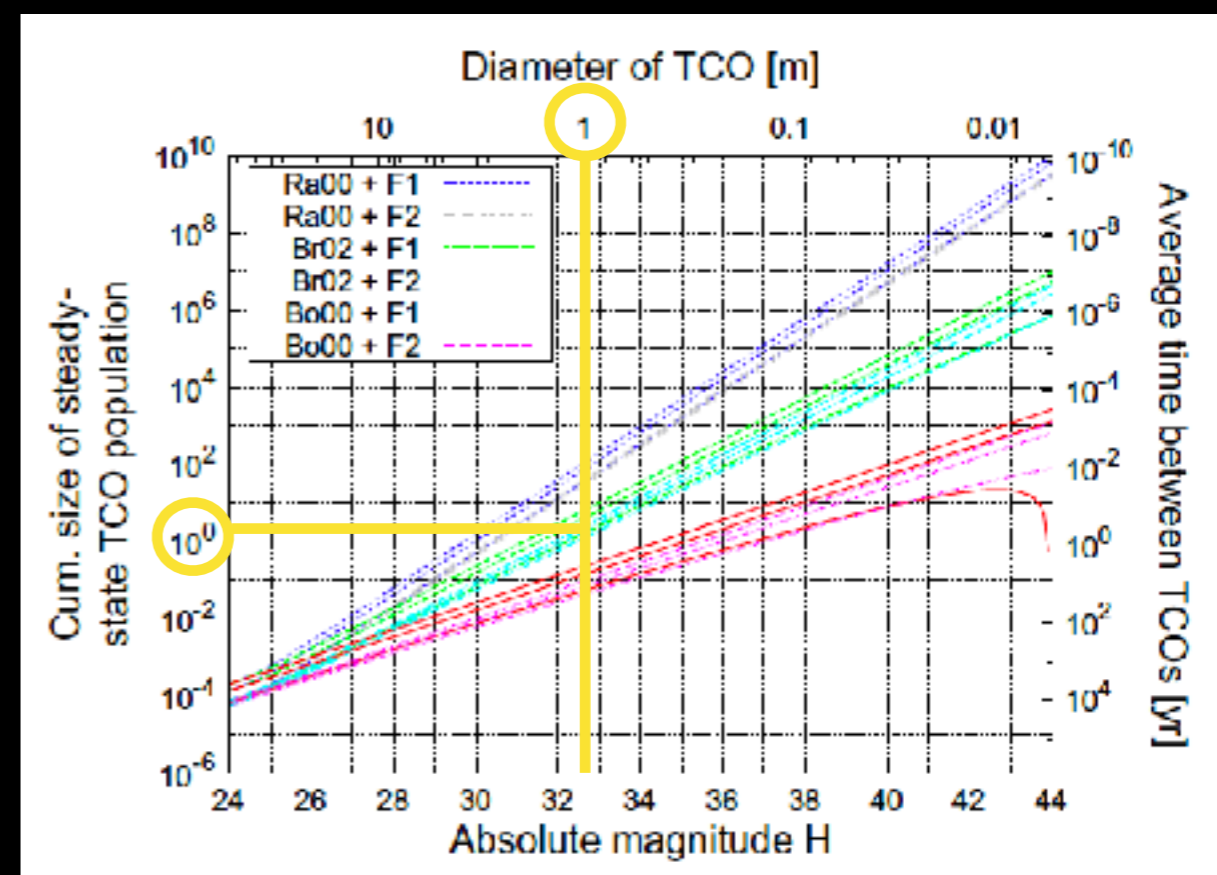
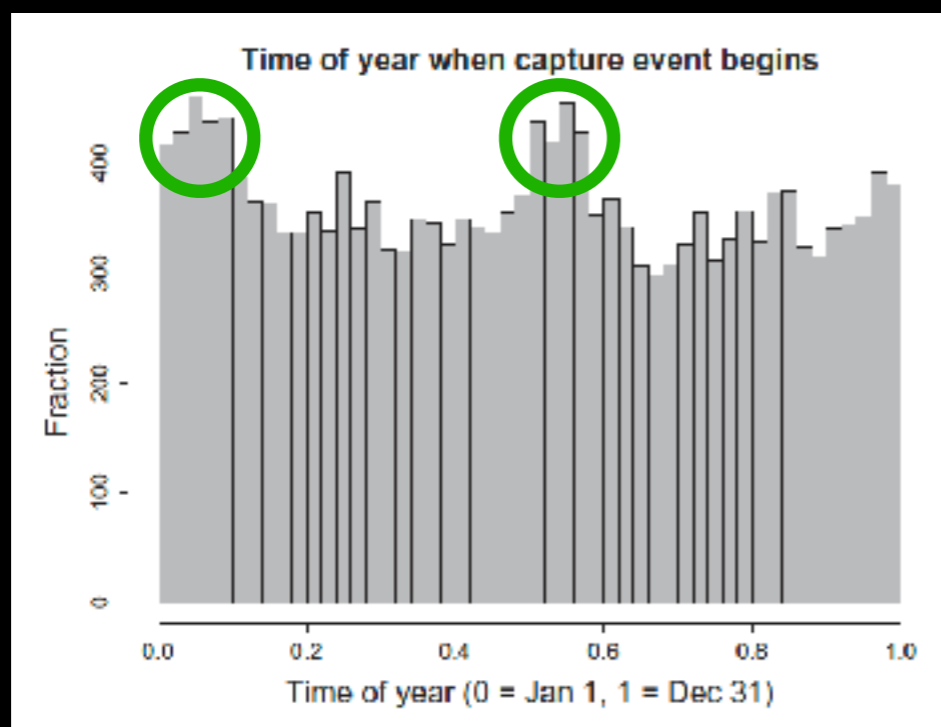
- 2019 FA (8m) 発見済み (2019年3月)

Tomo-e で発見できるのか?

- 先ほど見たようにメートルクラスのminimoon は地球接近天体 (NEO)が軌道発展したもの
→ minimoon の分布は NEOの分布から求められる

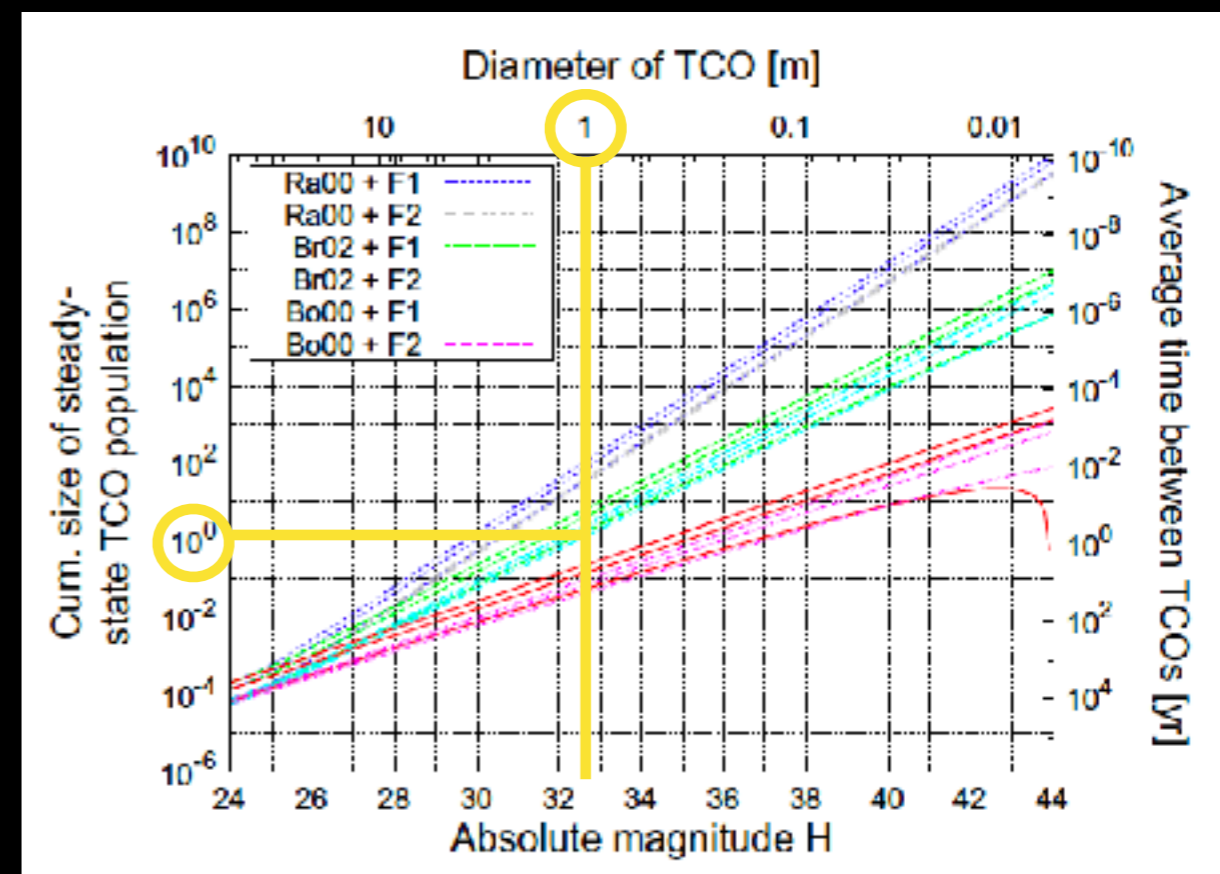
- Granvik+2012

- 太陽、8惑星、月による重力を考慮してsimulation
- 定常状態：1m級が1つ
- 時期によりcapture されやすさ



Tomo-e で発見できるのか?

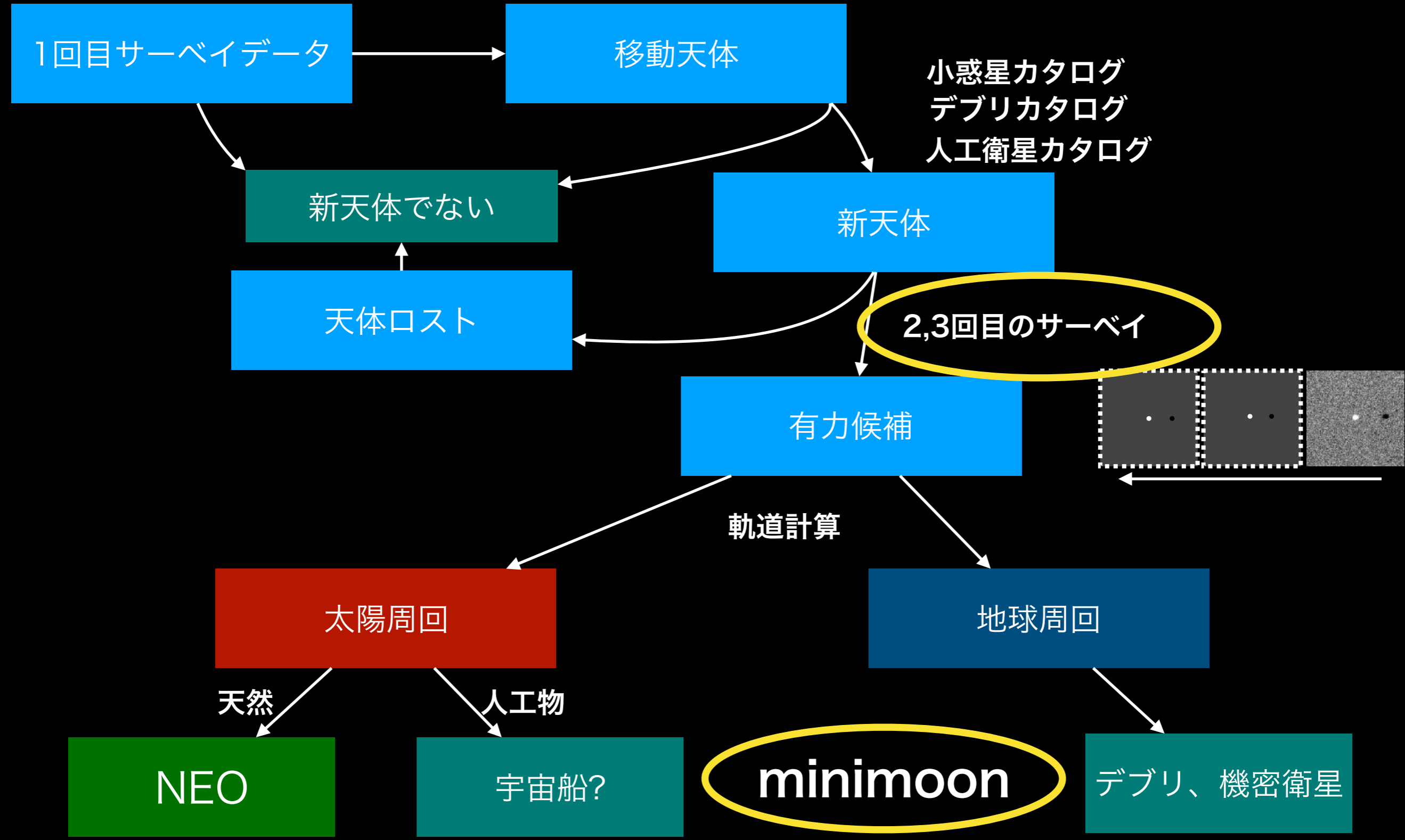
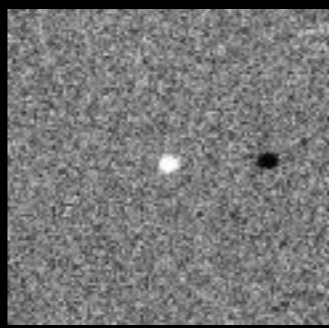
- Tomo-e Gozen
 - 限界等級 ~18等
- 発見に成功した2019FAは8m級。
最小1mまで発見できるとすると
個数は1つ...



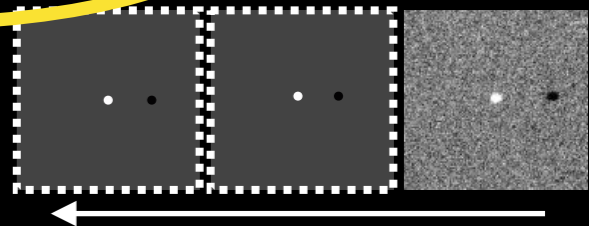
- ~~さらに梅雨もある。LSSTは梅雨ない?~~ 9ヶ月存在し、captureしたばかりを捉える必要性もないので問題なし
- 発見は厳しそうである
- しかしNEOの中に存在する可能性は考慮しなければならない
→ NEO発見手順の改良

NEOフローチャート(現在)

機械学習(小島さん)



小惑星カタログ
デブリカタログ
人工衛星カタログ



移動天体アルゴリズムの改良点

① minimoon の可能性

- 本スライドで見たように minimoonが存在する可能性
- 地球周回軌道 = デブリではない

② 候補天体への自動追観測

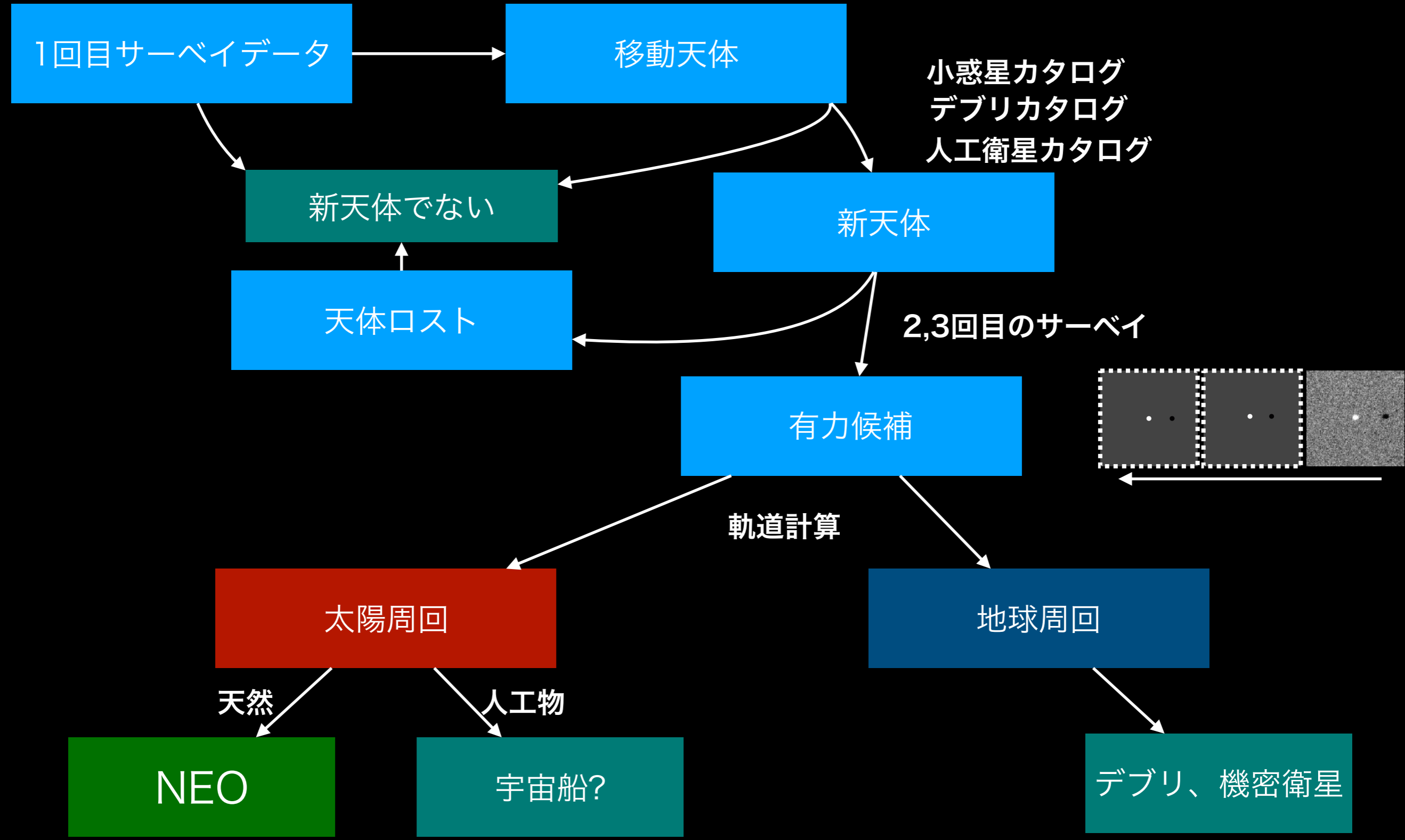
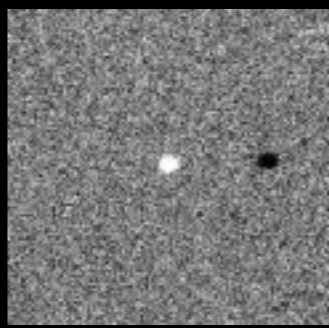
- 現在は2~3回の全天サーベイにたまたま2~3回候補天体が入り込むのを期待
- 結果として 2018FA 以来候補天体なし



1回目のサーベイ後に候補天体を絞り
自動で追観測レシピを投下することで
確実な4~5回の追観測

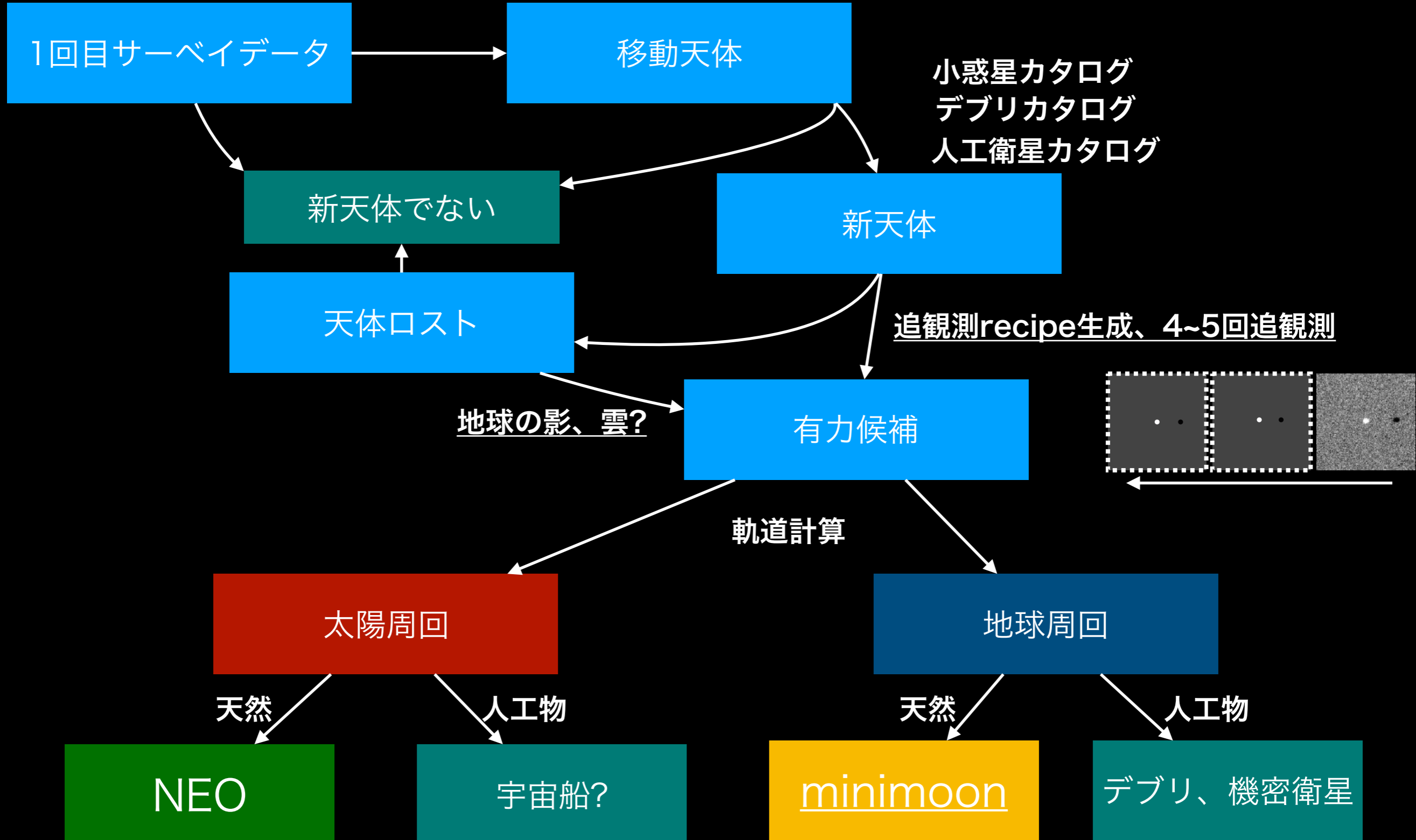
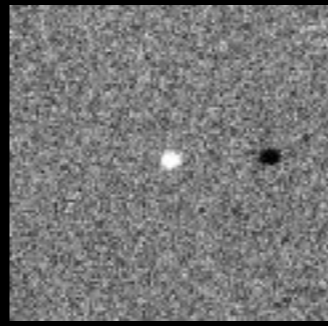
NEOフローチャート(現在)

機械学習(小島さん)



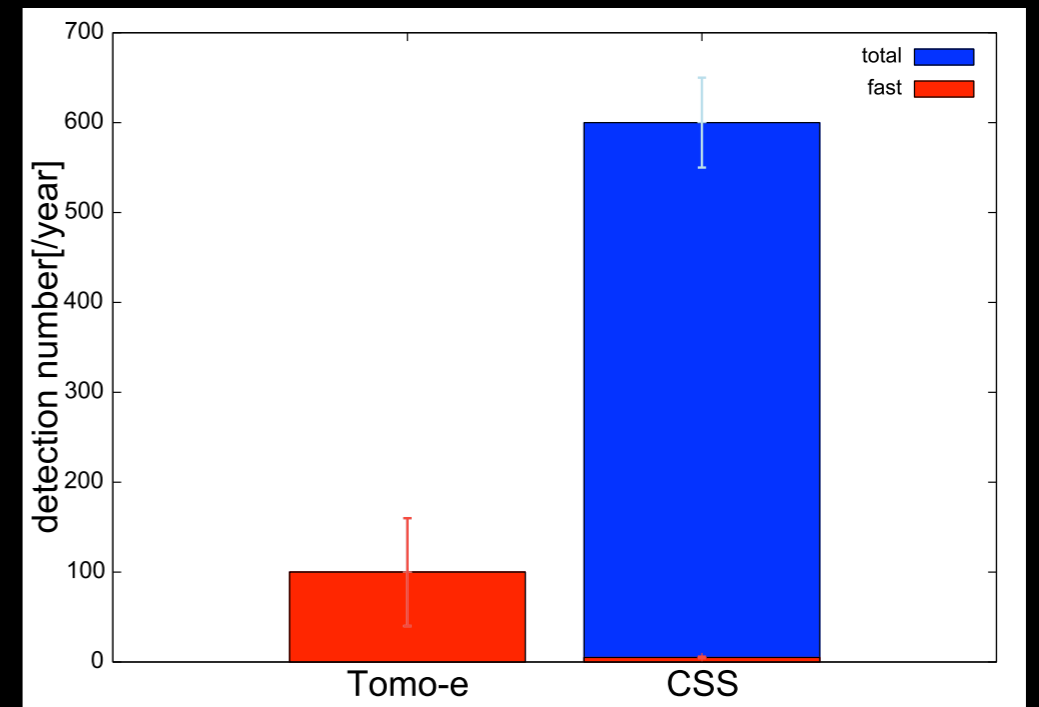
NEOフローチャート(予定)

機械学習(小島さん)



まとめ

- 今まで発見された minimoon は2つのみ
 - 滞在時間短く (9ヶ月)、小さい(m以下)ため発見は困難
 - しかし不可能ではない
 - もし見つかったら?
 - NEO探査と同様に観測点を多数得ることが大事
 - minimoonも軌道確定できるはず
 - 滞在時間が短い=より早い追観測
 - そのため
 - 1度目のサーベイ後に候補の追観測レシピを自動追加
 - 地球軌道なら minimoon であるという可能性を考慮
 - 5つ候補が見つかるとして、一時間ごとに4回行えば $5 \times 4 \times 6 \text{秒} = 4 \text{分}$
- 翌朝にはMPCに報告→新天体発見 5個/night



- 導いた minimoon 分布から求めた発見期待値

Table 1

TCO detection performance for seven optical surveys. For the first five telescopic surveys we consider only TCOs with absolute magnitude $H < 38$ corresponding roughly to those >10 cm diameter. FOR is the Field-of-Regard—the total average amount of sky surveyed each night in a mode suitable for identifying TCOs. V_{lim} and ω_{lim} are the survey's limiting V-band magnitude and approximate rate of motion. N_{sky} and N_{TCO} are the number of TCOs on the sky that are detectable by the survey at any instant and the average number of TCOs detectable by the survey per day. τ_{ref} is the refresh rate for the observable TCOs, equivalent to their average observable lifetime.

Survey	Type	FOR ($^{\circ}2$)	T_{exp} (s)	V_{lim}	ω_{lim} $^{\circ}/d$	N_{sky}	N_{TCO} TCO/d	τ_{ref} d
PS1 ^a	Wide-area	1000	40	21.7	3	0.03	0.013	2.3
ATLAS ^b	All-sky	20,000	30	20.0	15	0.0084	0.01	0.8
SST ^c	All-sky	20,000	5	22.0	20	0.4	0.02	18.0
LSST ^d	Wide-area	7000	15	24.7	10	8.5	0.27	31.0
Subaru-HSC ^e	Targeted	450	15	24.5	1.0	0.4 ^h	0.05	8.0
CAMO ^f	Meteor	20,000	N/A	7.5	N/A	~ 0	N/A	N/A
CAMS ^g	Meteor	20,000	0.017	4.8	11,300	~ 0	0.04	26.1

Tomo-e Gozen	All-sky	30,000	0.5	18	0.042			
--------------	---------	--------	-----	----	-------	--	--	--