

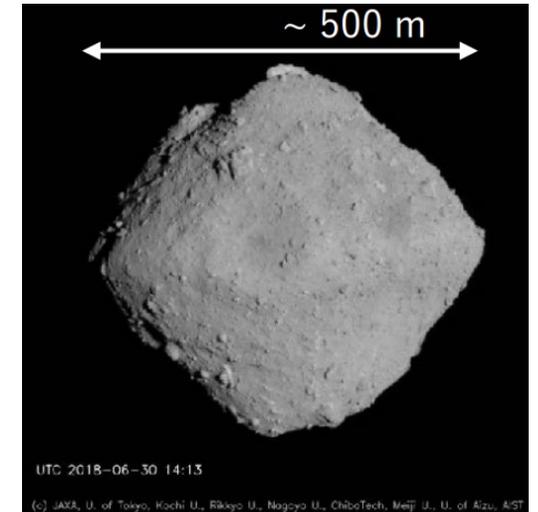
# Tomo-e Gozen NEO探査の3年 とLessons Learned

和田空大（東京大学大学院 修士1年）

酒向重行, 瀧田怜, 紅山仁, 津々木里咲, 倉島啓斗（東京大学）  
大澤亮（国立天文台）

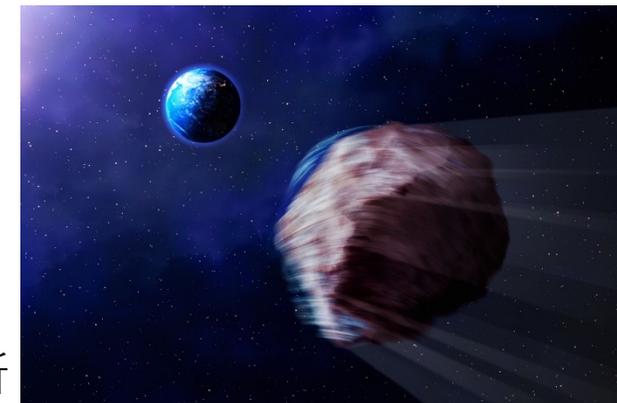
# 地球接近小惑星 (Near-Earth Objects, NEOs)

- 地球に近いので探査機によるその場観測が可能
- 地球に近いので10 m 級の微小小惑星も観測可能
  - 大きな小惑星は岩石の集積体だが、微小小惑星は一枚岩の可能性もあり、根本の構造の差も疑われる
  - 微小小惑星を用いることで、地球接近小惑星の起源、進化史に関する情報が得られる



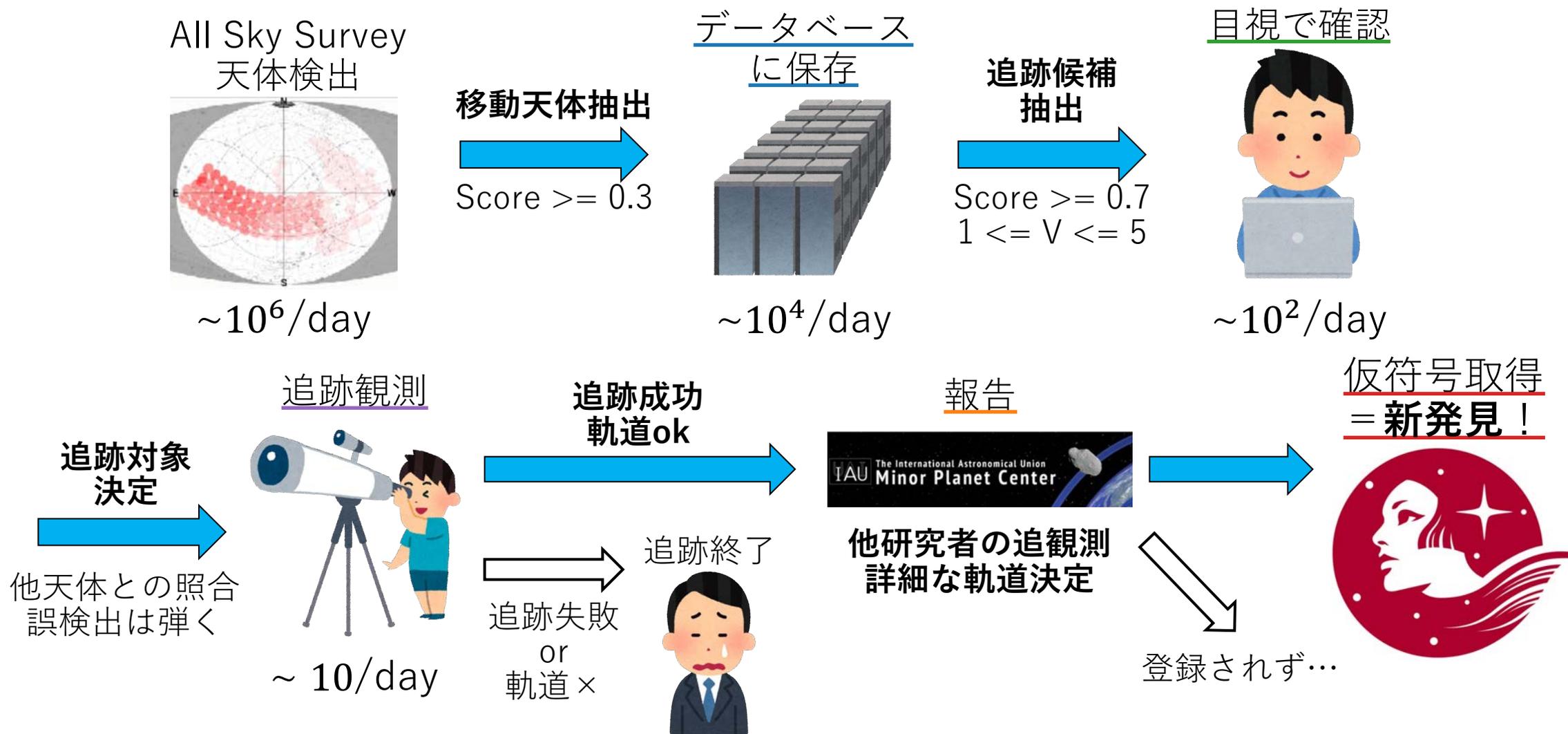
地球接近小惑星 Ryugu  
©JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)

→ **2019年からTomo-eでのNEO探査開始**



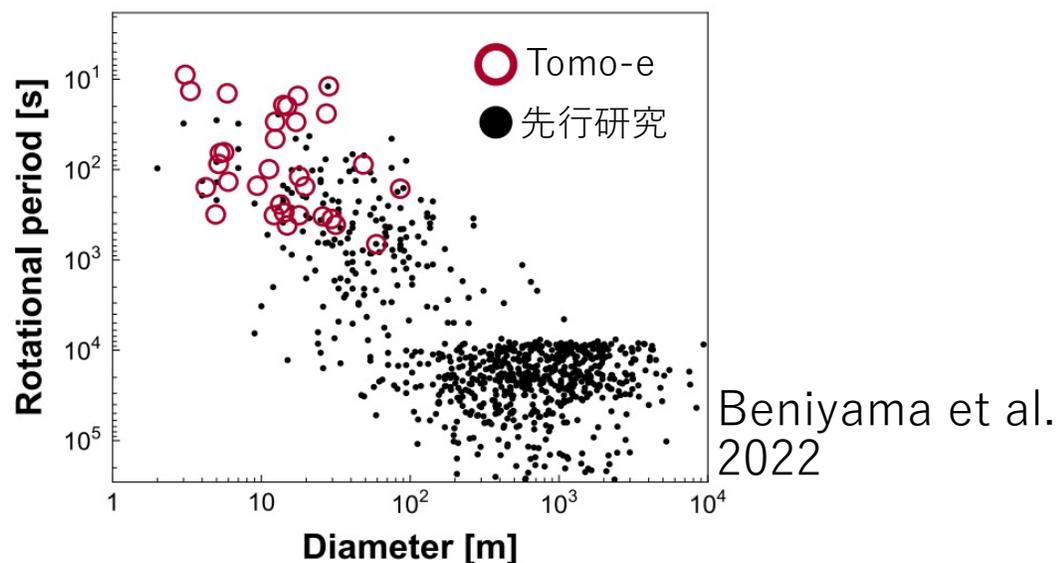
©東京大学木曾観測所

# Tomo-e GozenでのNEO探査の流れ



# これまでの成果

- 期間：2019年9月6日～現在  
(約3年9ヶ月)
- 発見総数：**49天体**
- Tomo-eは小さなNEOの発見が多い  
→直径と自転周期の関係への示唆も(左下図)



⋮

43	2022 UQ6(TM0075)	2022-10-20	16.6	4.8	29.13	5
44	2022 UQ7(TM0078)	2022-10-22	17.4	1.77	26.40	17
45	2022 UL11(TM0080)	2022-10-26	18.1	3.9	29.16	5
46	2022 UB13(TM0081)	2022-10-27	16.9 (not first detection)	3.15 (first detection)	29.80	4
47	2022 UA13(TM0082)	2022-10-27	15.7	2.08	26.34	18
48	2022 UA14(TM0083)	2022-10-28	17.3	2.05	28.25	
49	2022 YF6(TM0085)	2022-12-27	16.0	3.98	26.53	16
Num.	Object	Discovery Date	Ap. mag.	Velocity	H	D
		(UTC)	(mag)	(arcsec/s)	(mag)	(m)

# 課題

- 取りこぼしがないか
- 追跡は人間の手で = 夜間の時間確保が必要



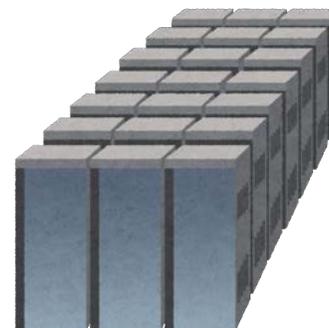
- 機械学習の精度を確認
- フィルタリングの改善

上記の課題の解決のために**現状の把握が必要**

NO.	OBSTIME OBJECT FITS	MATCHING	IMAGE	LIGHT CURVE	SCORE	SN	RA, DEC	V_MEAN ["/sec]	V_PA [deg]	V_RA ["/sec]	V_DEC ["/s]
1	2023-05-16T18:44:20.872 23Ecdsca_21216+23217 TMQ202305160097896831.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.94 FP	7.09	29h12m58.1205s +23d31m02.6812s	4.34	75.24	4.2	1.11
2	2023-05-16T18:15:13.592 23Ecdsca_21071+22587 TMQ202305160097889021.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.98 FP	64.11	29h04m16.1924s +22d33m13.8305s	4.34	68.86	4.05	1.57
3	2023-05-16T18:01:02.090 23Ecdsca_20053+17377 TMQ202305160097864913.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.73 FP	5.68	20h03m10.6597s +17d22m37.8701s	2.61	267.27	-2.61	-0.12
4	2023-05-16T17:46:45.834 23Ecdry_17945+06650 TMQ202305160097880716.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.89 FP	6.15	17h56m47.0429s +26d43m03.51s	1.05	45.0	0.74	0.74
5	2023-05-16T17:35:48.866 23Ecdra_20948+32811 TMQ202305160097878024.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.84 FP	5.4	20h56m53.6577s +32d48m42.4199s	1.46	194.72	-0.37	-1.42
6	2023-05-16T17:32:06.988 23Ecdra_19193+30123 TMQ202305160097877021.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.75 FP	7.74	19h11m37.9936s +30d07m24.1638s	1.49	243.9	-1.34	-0.6
7	2023-05-16T16:57:06.358 23Ecdri_18282+09745 TMQ202305160097866923.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.93 FP	5.76	18h16m57.324s +09d44m42.0227s	1.16	269.18	-1.16	-0.0
8	2023-05-16T16:44:24.971 23Ecdri_20631+20416 TMQ202305160097863343.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.86 FP	53.43	20h37m53.4868s +20d24m57.8767s	4.27	69.76	4.01	1.48
9	2023-05-16T16:42:31.019 23Ecdri_20990+15152 TMQ202305160097862741.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.85 FP	7.15	20h59m25.6229s +15d09m07.4381s	1.09	107.82	1.04	-0.3
10	2023-05-16T16:40:00.808 23Ecdri_19977+09836 TMQ202305160097862033.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.75 FP	6.46	19h58m39.1624s +09d50m10.6058s	1.14	223.33	-0.78	-0.8
11	2023-05-16T16:38:24.271 23Ecdri_20143+12591 TMQ202305160097861513.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.82 FP	8.73	20h08m38.1842s +12d35m28.2123s	1.11	266.13	-1.1	-0.0
12	2023-05-16T16:34:44.521 23Ecdri_19859+07450 TMQ202305160097860441.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.71 FP	5.38	19h51m33.0626s +07d27m00.2694s	1.34	79.32	1.31	0.25
13	2023-05-16T16:33:59.436 23Ecdri_19859+04480 TMQ202305160097860216.fits	AI Satellite NEO NEOCP			0.75 FP	5.54	19h22m10.0803s +04d28m50.3099s	1.71	83.05	1.7	0.21

# 使用したデータ

- Tomo-e Gozen NEO データベース
  - 期間：2019/09/06~2023/05/15
  - 総データ数  $N=11,706,962$
  - 位置、速度、明るさ、S/N、機械学習のスコア、追跡回数、人工天体のデータベースとの照合結果などの情報
- Tomo-e SWG Wiki
  - MPCへの報告や発見天体の情報を確認



the Tomoe Gozen SWG (science working group) Wiki

## TMGreport2022

Top/Planetary\_system/neo/tomoeneo/TMGreport2022  
[\[ Front page \]](#) [\[ Edit \]](#) [\[ Freeze \]](#) [\[ Diff \]](#) [\[ History \]](#) [\[ Attach \]](#) [\[ Reload \]](#) [\[ New \]](#) [\[ Page list \]](#) [\[ Search \]](#) [\[ Recent changes \]](#) [\[ Help \]](#) [\[ Log out \]](#)

Planetary\_system/neo/tomoeneo

### Mail and Find\_Orb result 2022

MPC投稿時のメールと投稿判断に使用したFind\_Orbの結果(← 実質3点).

- TMG0062 (2022.01.06)

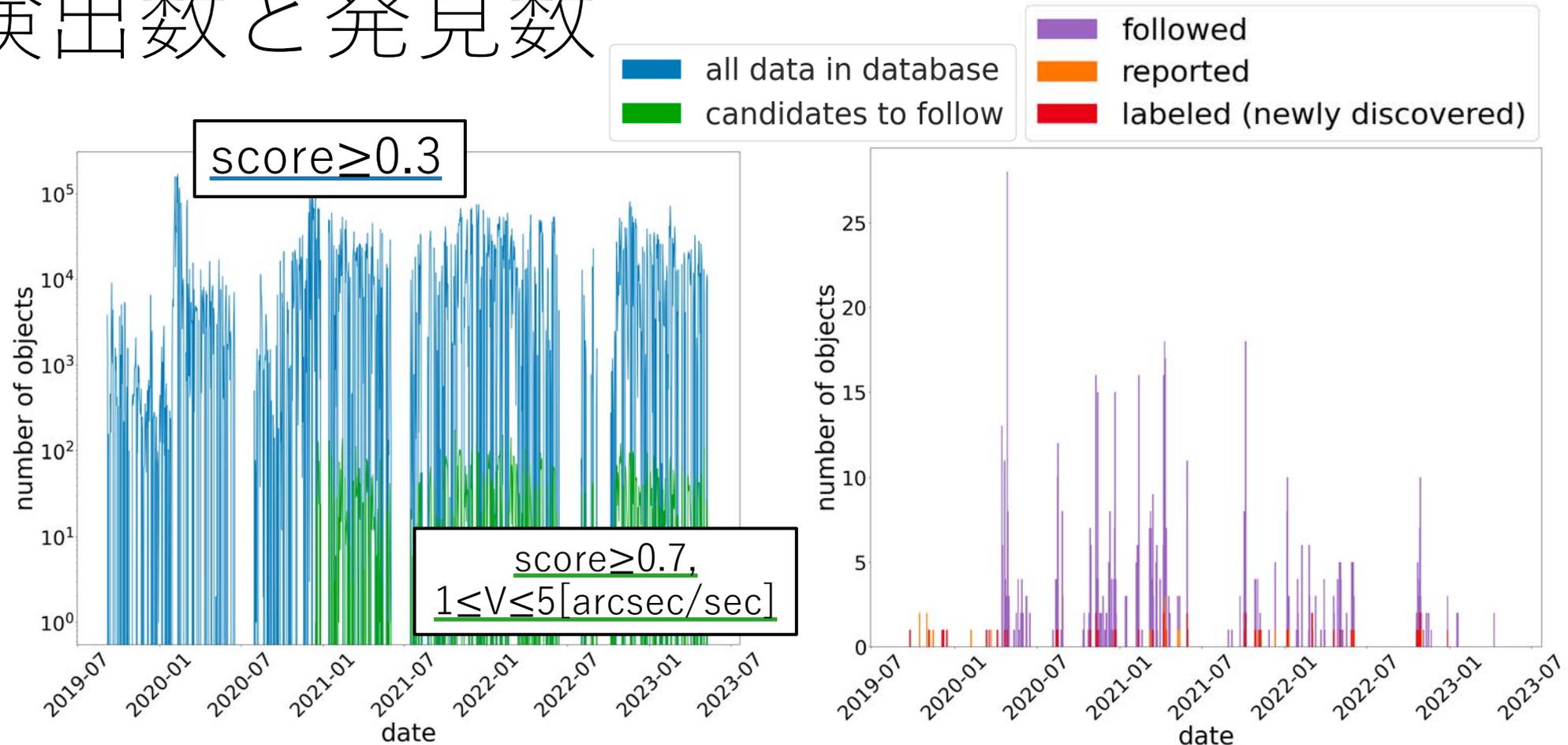
Orbital elements:  
 Perigee 2022 Jan 6.16010 +/- 0.0117 TT - 3:50:33 (JD 2459585.66010)  
 Epoch 2022 Jan 7.0 TT = JD 2459586.5 Auto-Find  
 q<sub>1</sub> 6614.274 +/- 31790 (J2000 equator)  
 H 28.7 G 0.15 Peri. 10.22185 +/- 0.6  
 e 55.4215214 +/- 9 Node 87.71714 +/- 0.0011  
 Incl. 37.24672 +/- 0.12  
 From 14 observations 2022 Jan. 6 (91.8 min); mean residual 0".49

Residuals in arcseconds:  
 220106 381 .44+ .06+ 220106 381 .01- .49+ 220106 381 .31- .71+  
 220106 381 .34- .01+ 220106 381 .71- .51- 220106 381 .21+ .18-  
 220106 381 .15+ .44- 220106 381 .42+ .03+ 220106 381 .30+ .50+  
 220106 381 .11+ .28- 220106 381 .58+ .02+ 220106 381 .64- 1.2-  
 220106 381 .82- .43- 220106 381 .62+ .70+

CCD 381  
 CON N.Kobayashi, Kiso Observatory, Institute of Astronomy,  
 CON Graduate School of Science, The University of Tokyo,  
 CON 10762-30 Mitake, Kiso-machi, Kiso-gun, Nagano 397-0101, Japan  
 OBS J.Benyama  
 TEL 1.05-m f/3.1 Schmidt + CCD  
 NET Gala-EDR3  
 ACK NEO CANDIDATE TMG0062 381 2022-01-06T14:00:06Z  
 AC2 tomo-e@oa.s.u-tokyo.ac.jp

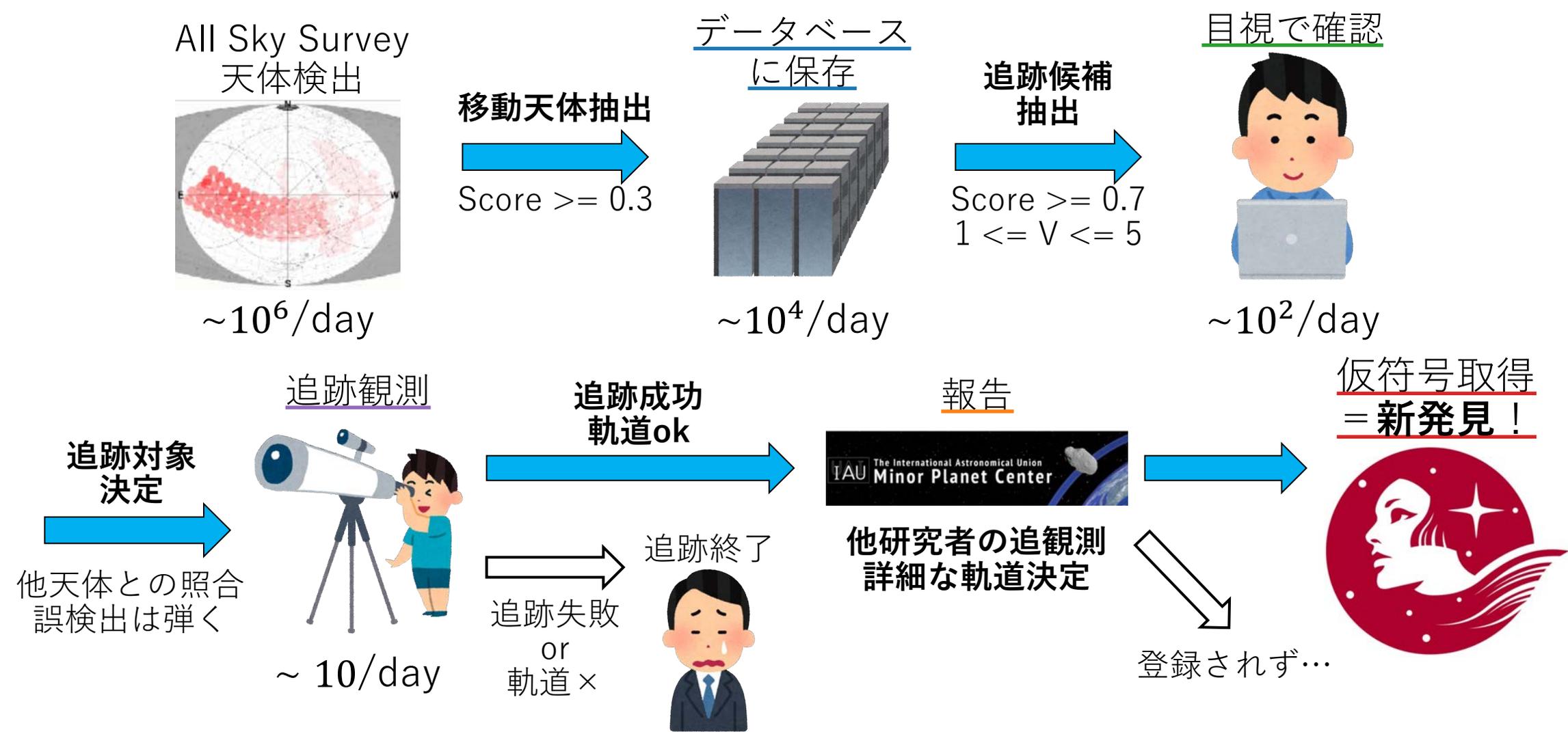
TMG0062*	C2022 01 06.49700207	17 44.54 +15 15 01.7	17.2 G	381
TMG0062	C2022 01 06.49707207	17 45.10 +15 15 08.2	17.3 G	381
TMG0062	C2022 01 06.53206007	22 46.58 +16 09 01.8	17.2 G	381
TMG0062	C2022 01 06.53215307	22 50.38 +16 09 11.0	17.2 G	381
TMG0062	C2022 01 06.53235307	22 53.61 +16 09 45.1	16.9 G	381
TMG0062	C2022 01 06.53262707	22 54.46 +16 09 54.4	16.9 G	381
TMG0062	C2022 01 06.53397007	23 05.99 +16 11 55.7	17.1 G	381
TMG0062	C2022 01 06.53406307	23 06.87 +16 12 04.7	17.2 G	381
TMG0062	C2022 01 06.54597207	24 49.23 +16 30 03.0	17.1 G	381
TMG0062	C2022 01 06.54603007	24 49.73 +16 30 08.9	16.9 G	381

# 検出数と発見数



- 移動天体と判断された数(score  $\geq 0.3$ )は $\sim 10^4/\text{day}$
- 追跡候補天体(score  $\geq 0.7$ ,  $1 \leq V \leq 5 [\text{arcsec}/\text{sec}]$ )は $10 \sim 100/\text{day}$

# Tomo-e GozenでのNEO探査の流れ

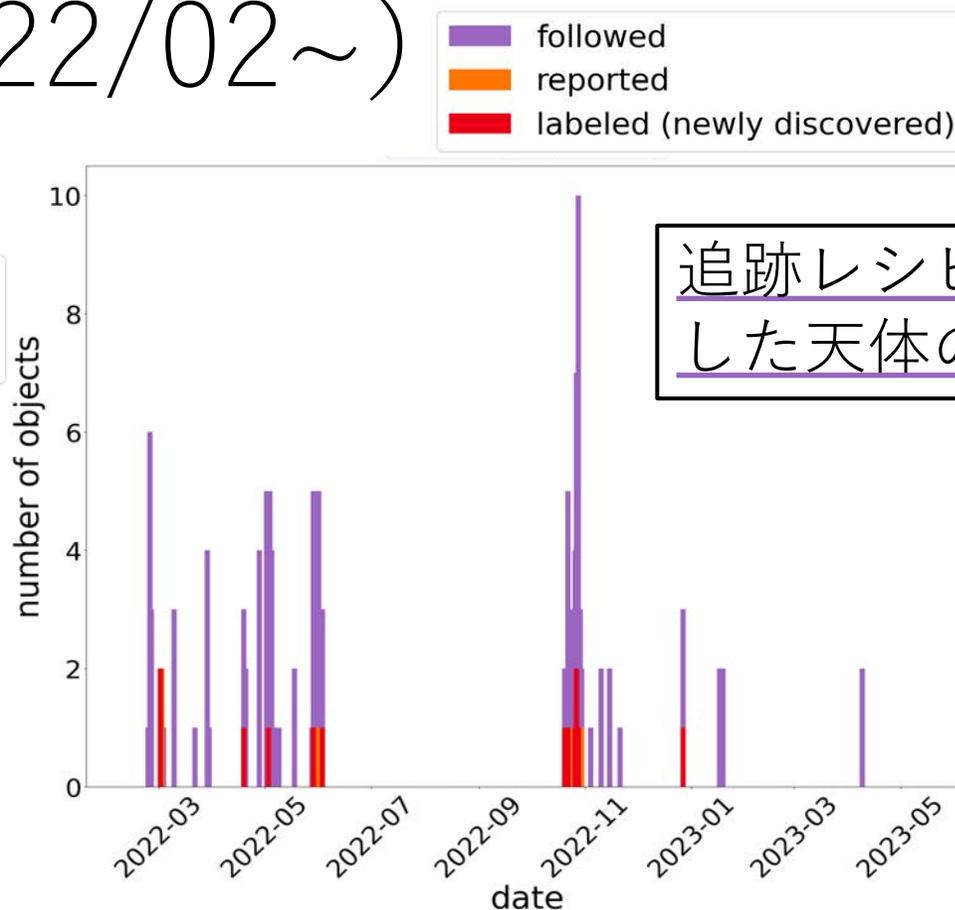
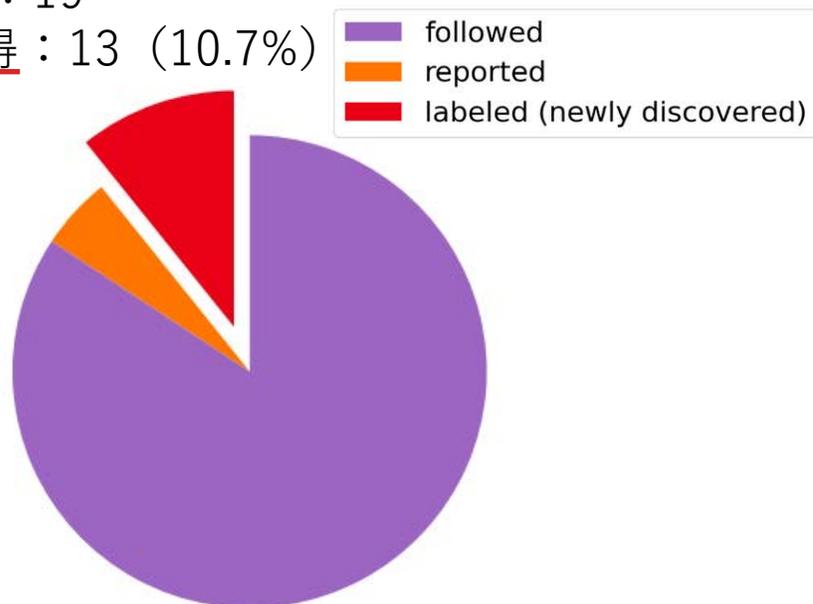


# 追跡数と発見数 (2022/02~)

追跡した全天体数 : 121

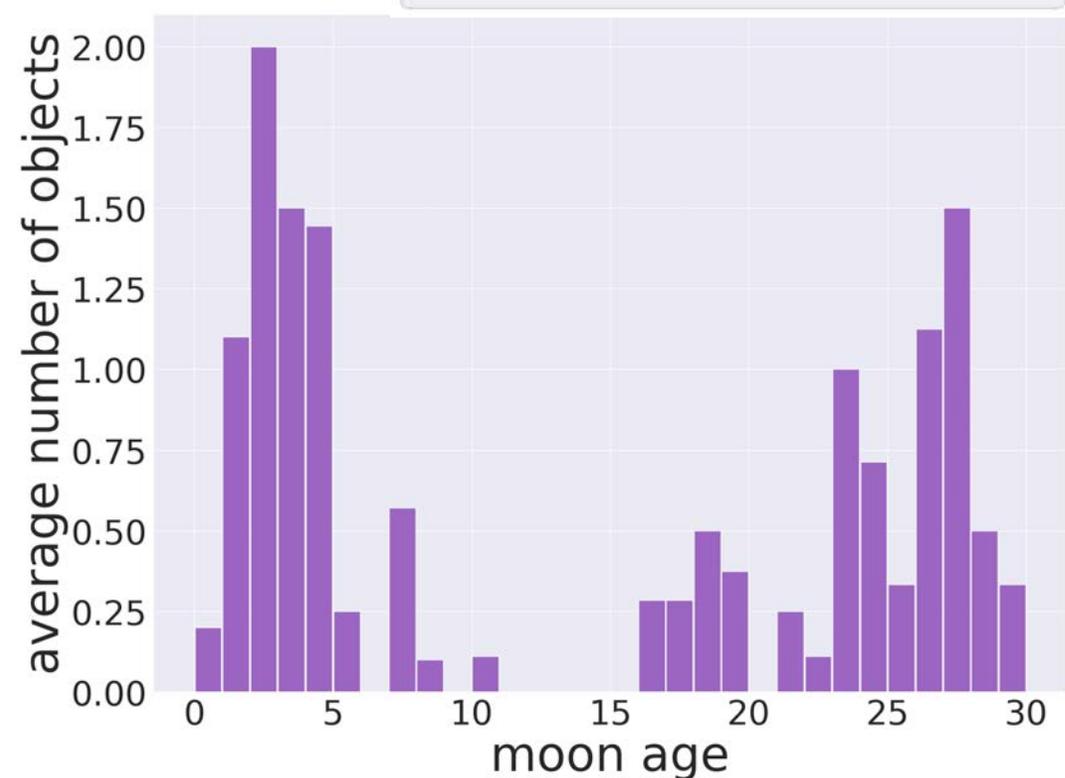
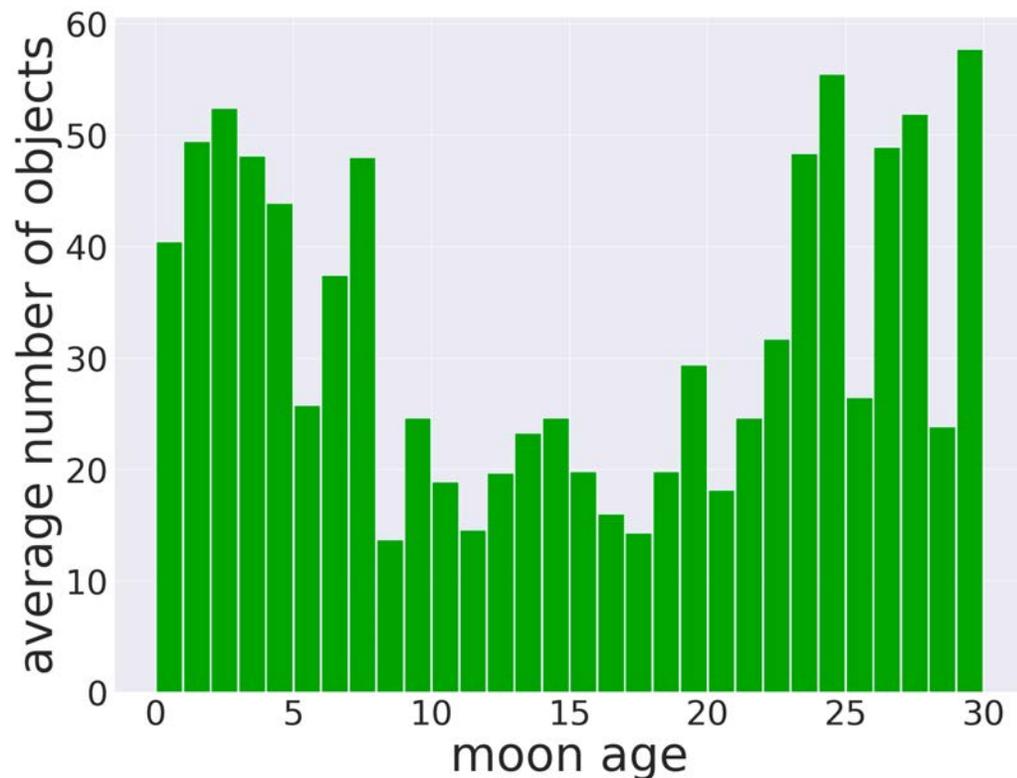
MPCに報告 : 19

仮符号を取得 : 13 (10.7%)



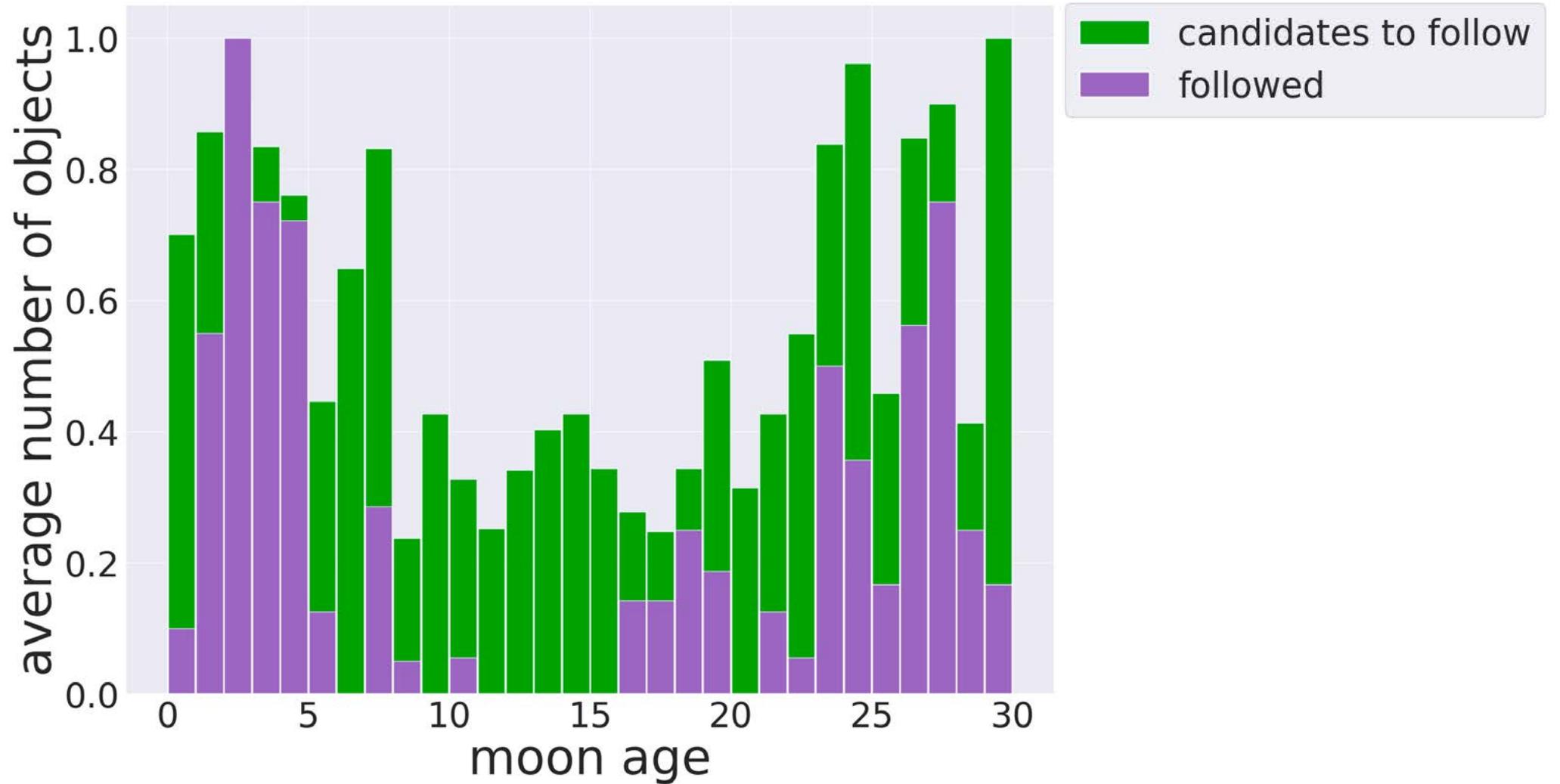
- 追跡した天体のうち10%程度が仮符号を取得  
(他は、追跡失敗 or 追跡後に人工天体と判断される)

# 月齢ごとと検出数の分布



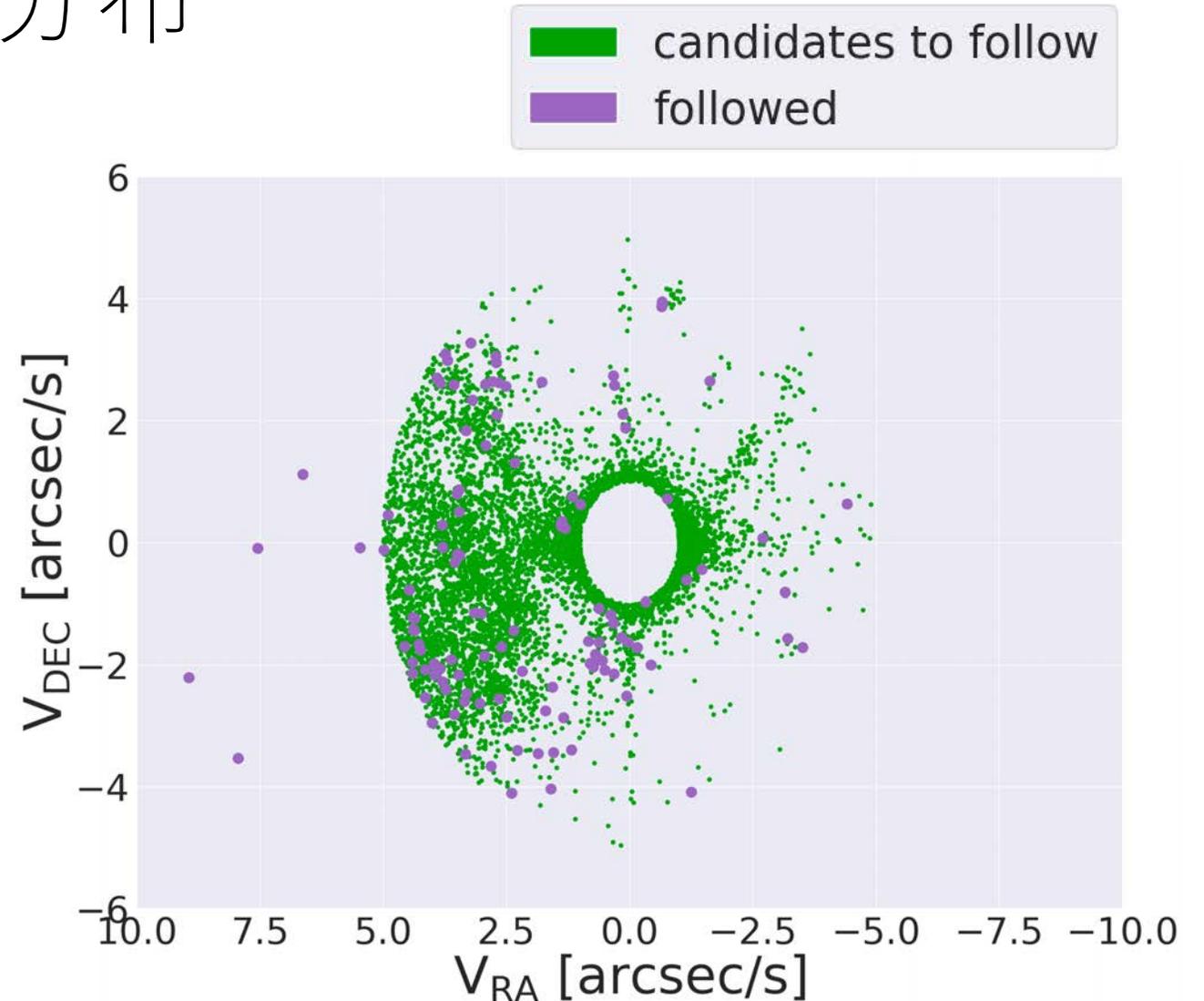
- 観測日数あたりの天体数のヒストグラム
- **満月の日周辺**は、追跡した天体は少ないが追跡候補天体は少なくなかった

# スケールを合わせて重ねた場合

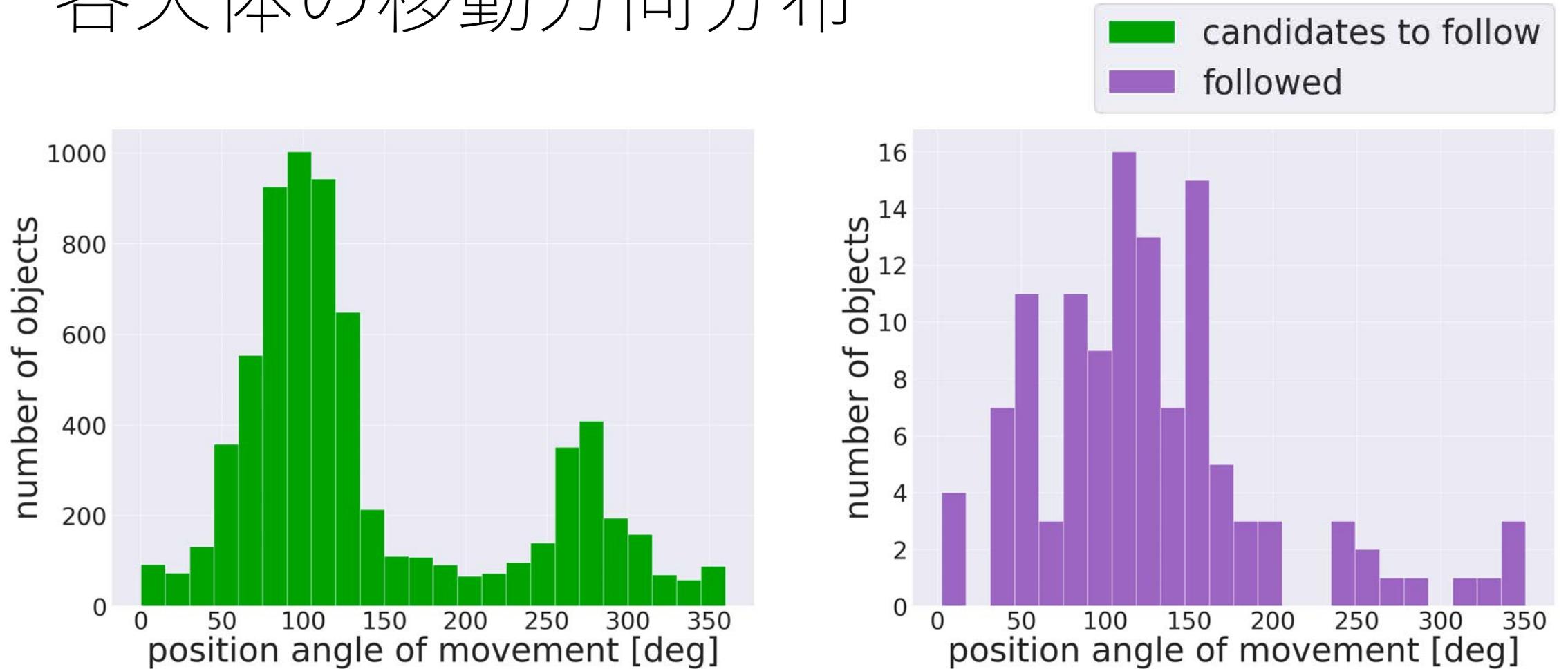


# 各天体の移動方向分布

- 静止軌道付近の人工天体の大部分は**RA**プラス方向に移動する
- これに伴い追跡天体も同様
- 仮符号取得に至った天体はデータが残っていなかった  
→ 今後は保存したい



# 各天体の移動方向分布

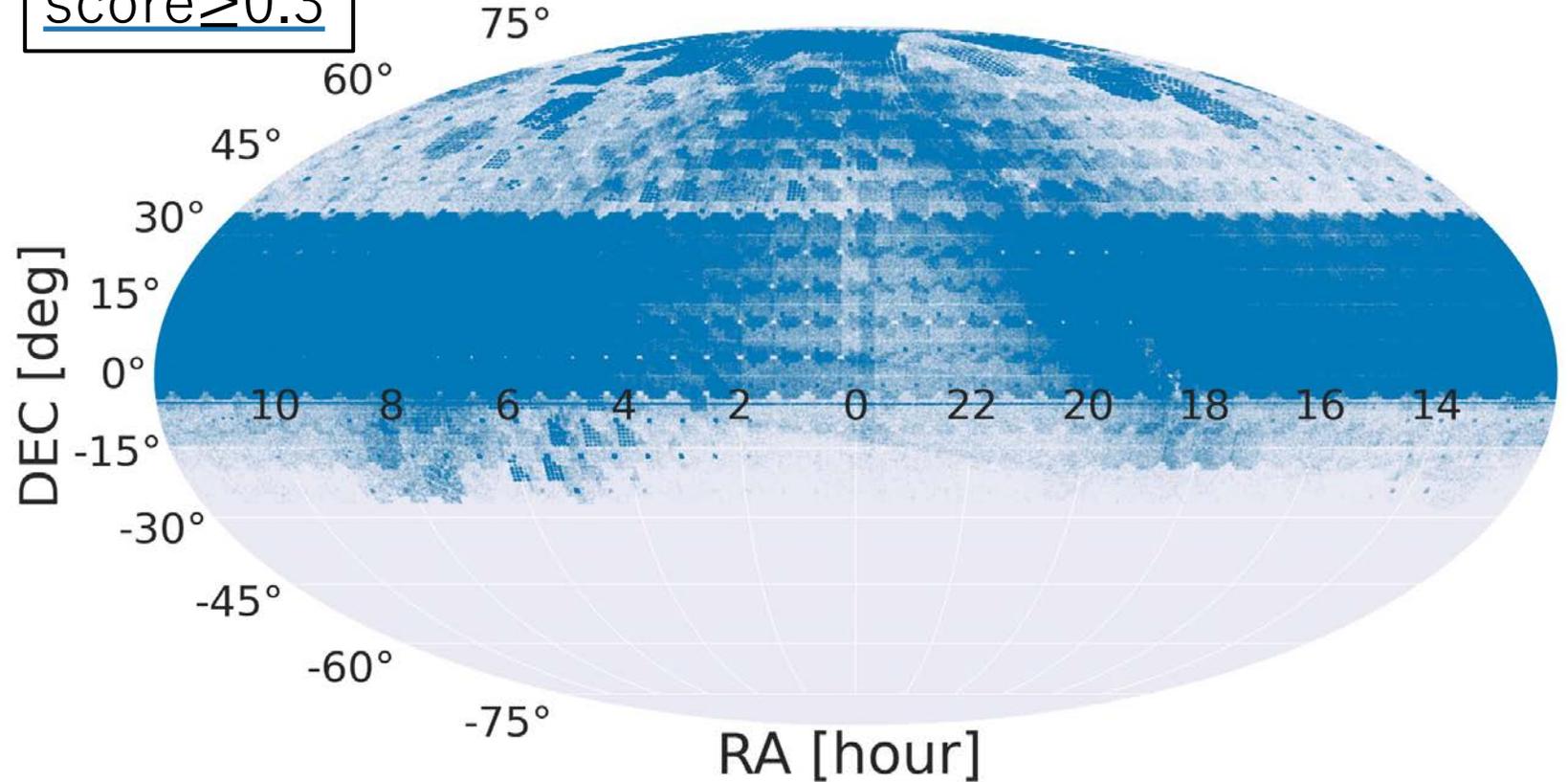


# 移動天体の位置

score $\geq$ 0.3

移動天体と判断された  
全データ

- High cadence  
surveyの領域が濃い

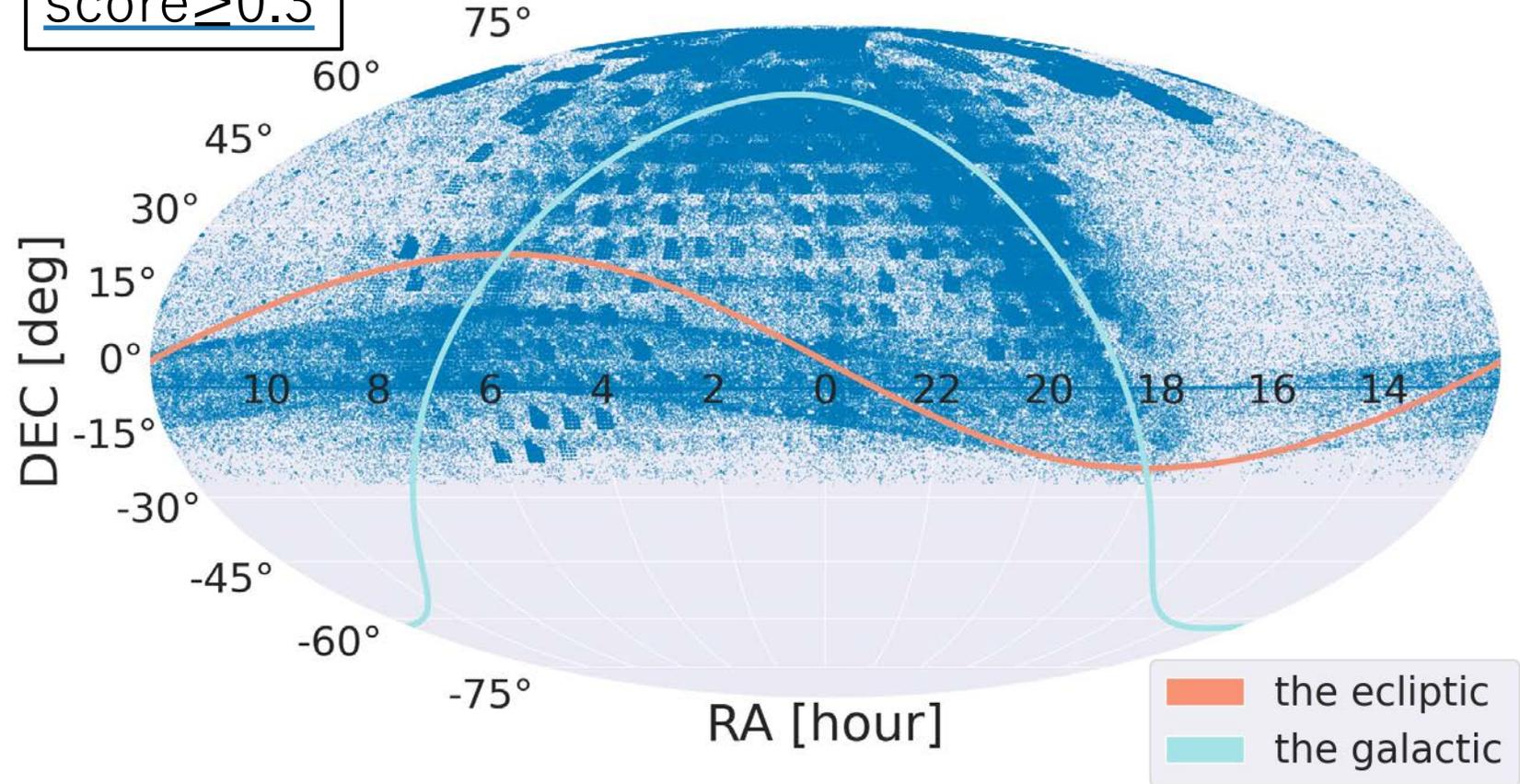


# All Sky Surveyに限定した移動天体の位置

score $\geq$ 0.3

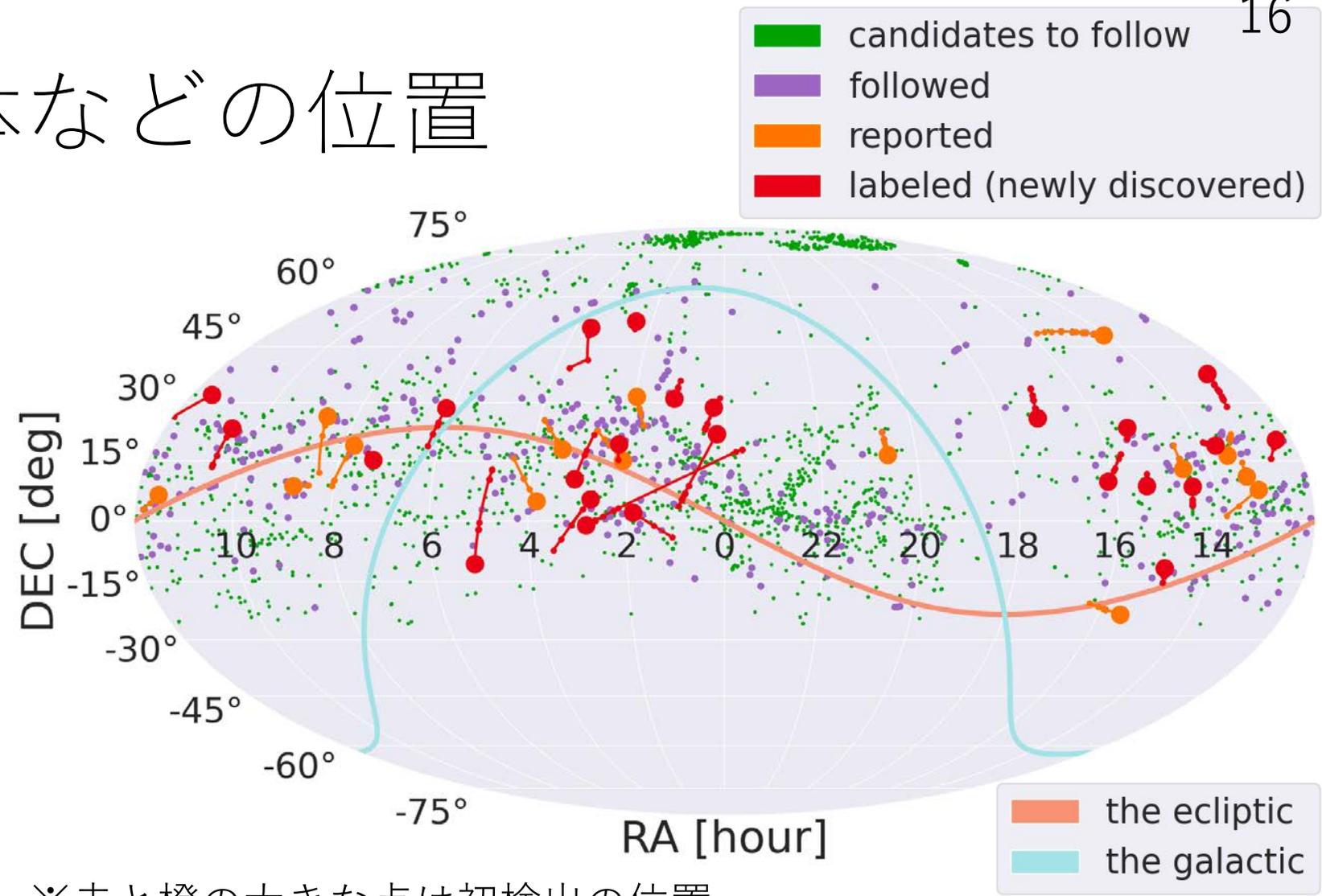
score $\geq$ 0.3の点たち  
なので誤検出が多い

- 銀河面
- 静止軌道衛星の墓場  
軌道（帯状）



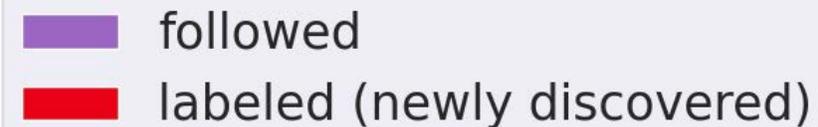
# 追跡した天体などの位置

- 追跡は広い位置で
- 報告・仮符号取得はDEC低めが多い
  - 軌道計算の問題
- 移動方向は左向きとは限らない (次頁)

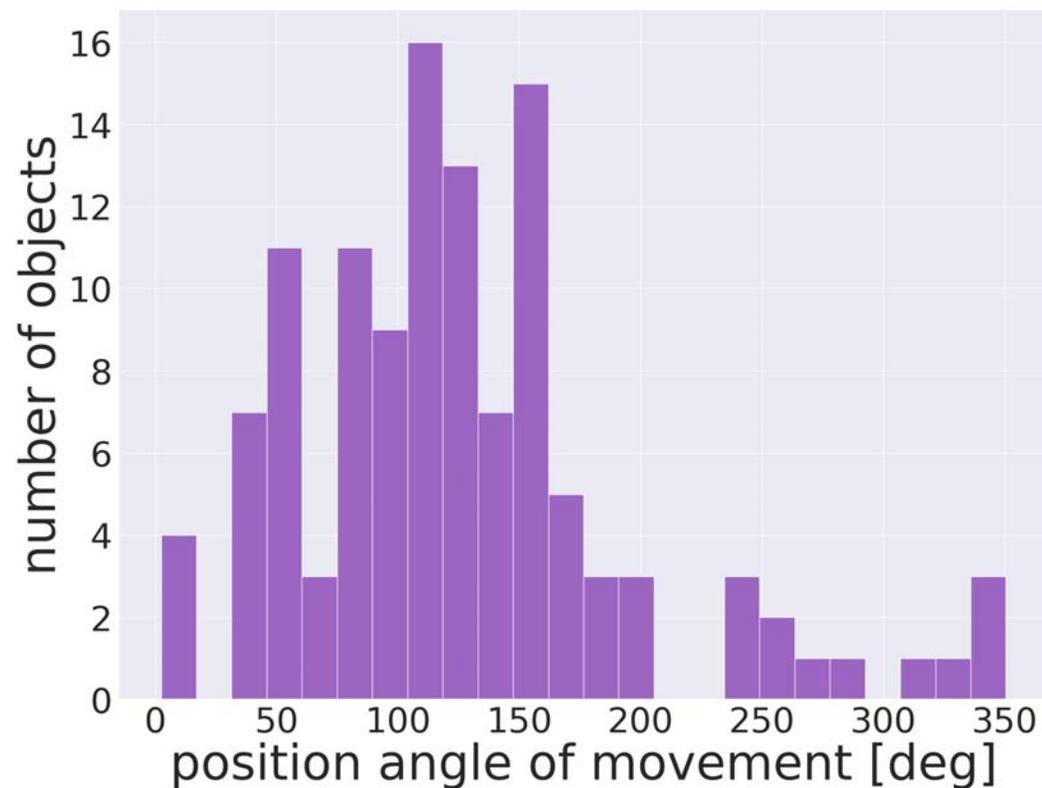


※赤と橙の大きな点は初検出の位置  
 他は追跡によって得られた位置

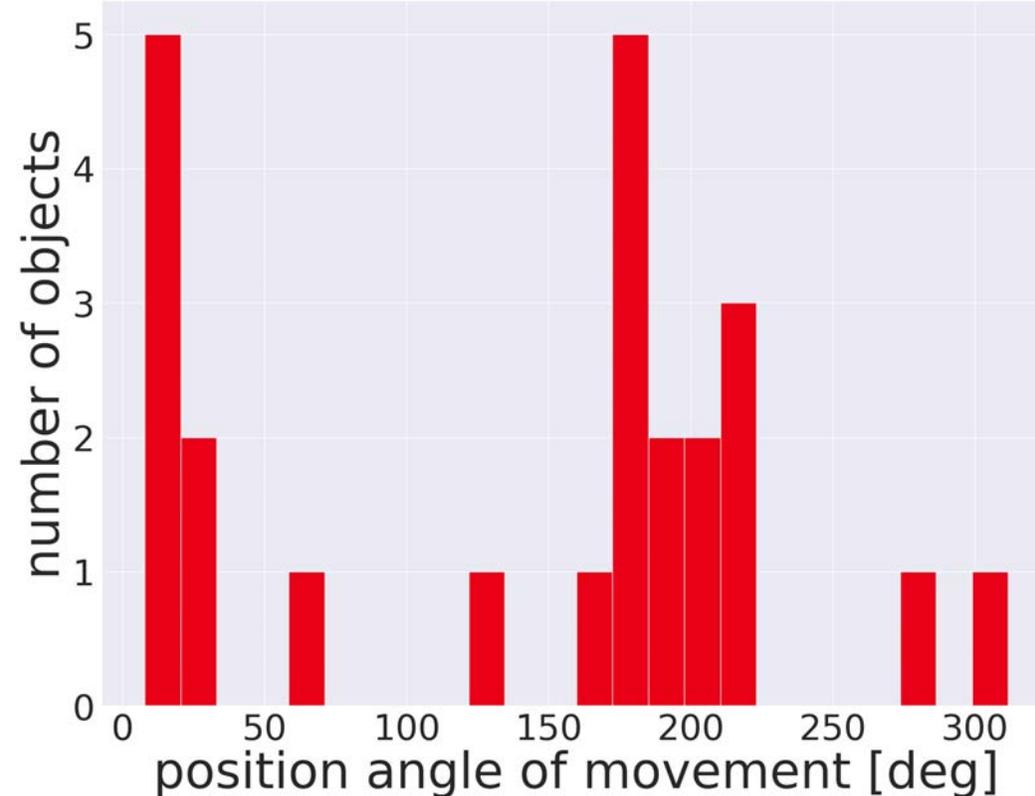
# 移動方向分布の比較



## 追跡した天体



## Tomo-eが発見した小惑星



# 見えてきた課題

- 追跡候補の中から追跡する天体を決める段階でロスが大きい
  - ➔ 特徴的な誤検出の対策・他天体との照合の自動化
- 月齢に関わらず積極的に追跡を行いたい
  - ➔ マンパワーに頼らない追跡



- **候補抽出の効率化**
- **追跡の自動化**

# まとめ

- Tomo-e Gozenによる**NEO探査**は約**3年9ヶ月**行われてきた
- 発見の精度向上のため現場を把握した
- **追跡候補の抽出**精度と手動による追跡を改善したい
- 追跡の**自動化**を目指したい
- 軌道計算の問題に対応し広い分布での発見を目指す
- データベースの内容も改善し、数年後の振り返りに繋げたい