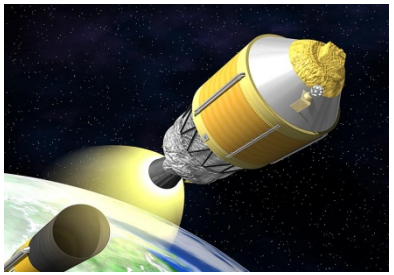
宇宙デブリの現状とJAXAの対策

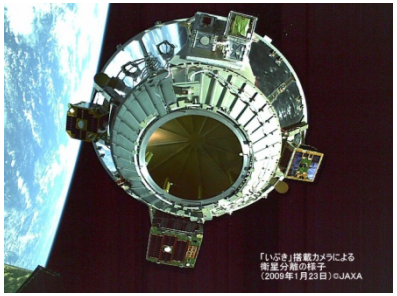
宇宙航空研究開発機構（JAXA）
未踏技術研究センター
柳沢俊史

スペースデブリとは

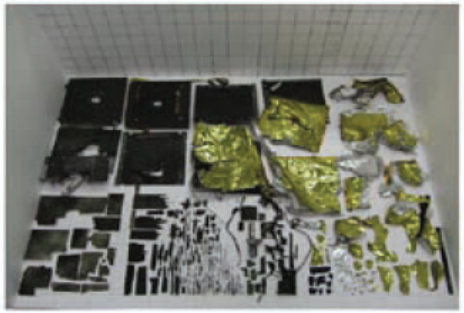
使い終わったロケット

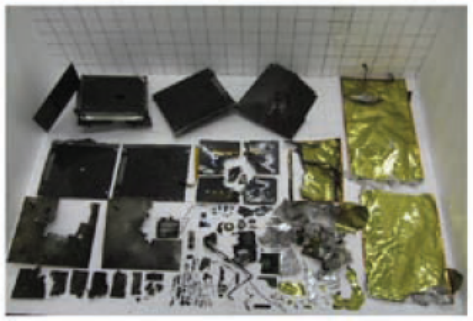


役目を終えた人工衛星



それらが破壊されてできた破片





宇宙に大量に存在するゴミである！

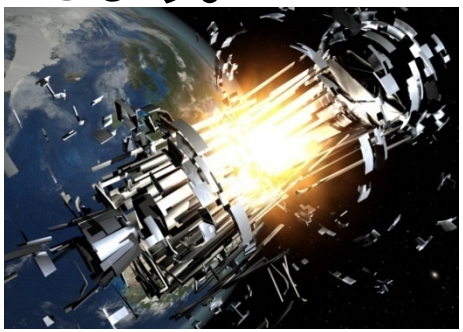
なにが問題か？

高速で移動している。 秒速数km!（鉄砲は秒速数100m）

3mmのデブリが10km/sが衝突する運動量は
100km/hのボーリーグ球が衝突するのと同じ。

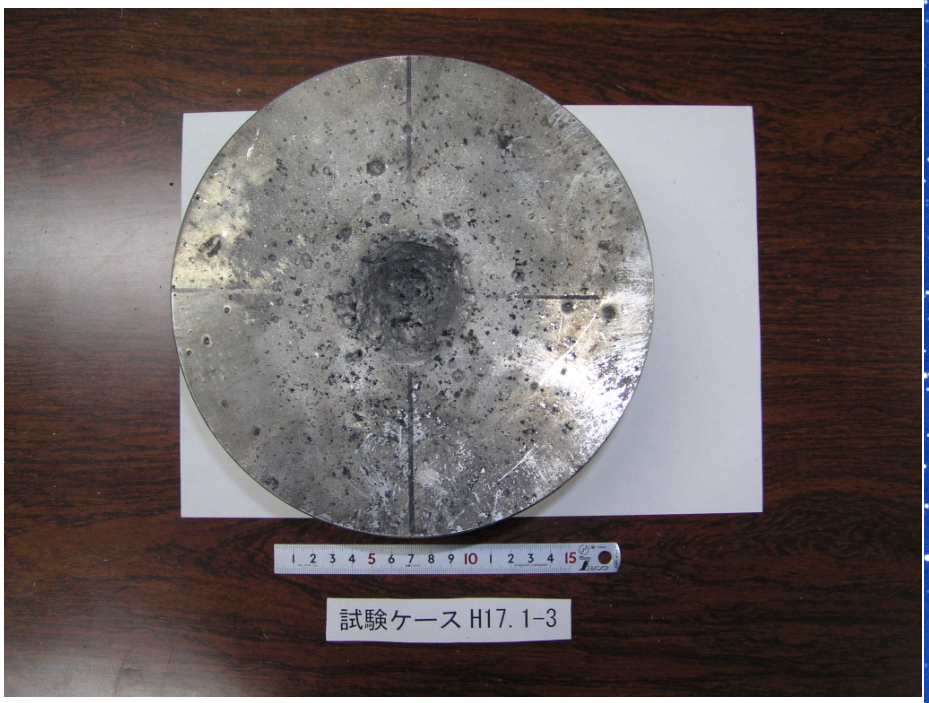
運用中の人工衛星に当たれば破壊されてしまう。

経済的損失。さらなるデブリの発生。



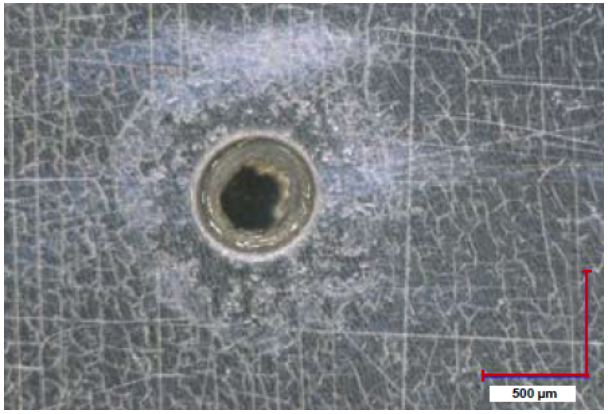
“宇宙活動が不可能になる。”

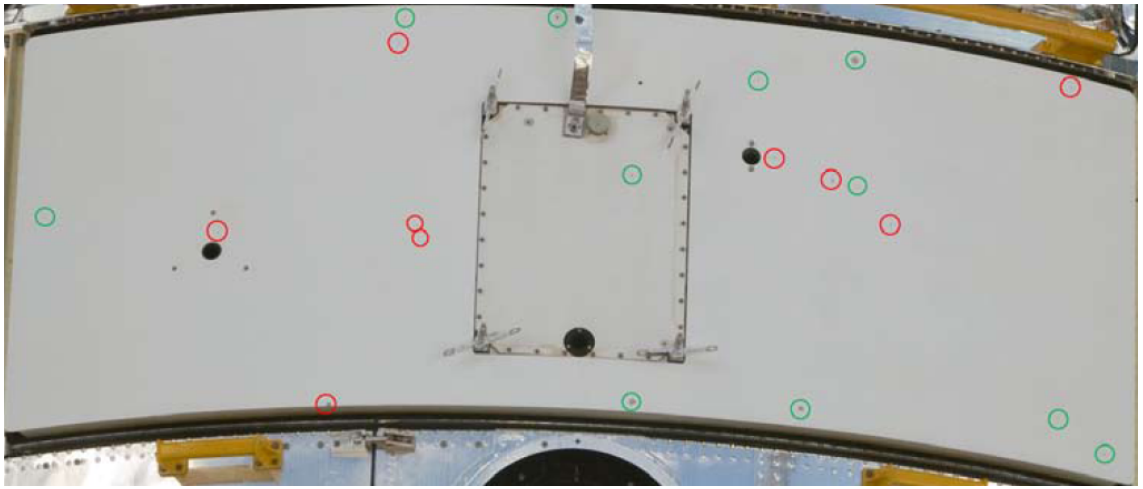
なにが問題か？



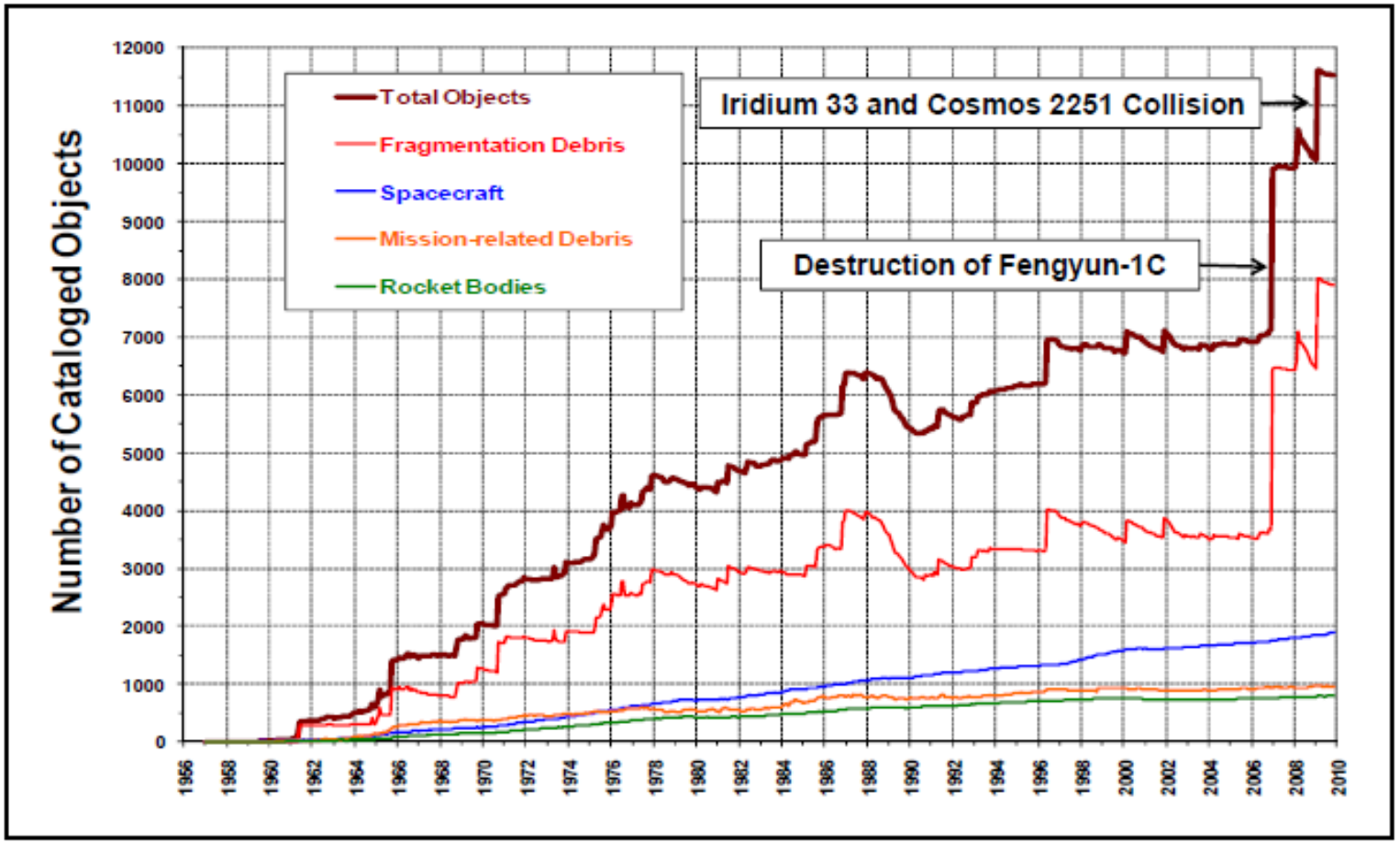
7km/sのアルミ弾（1g）をアルミ厚板に衝突させたもの

人工衛星にも小さいデブリはあたっている





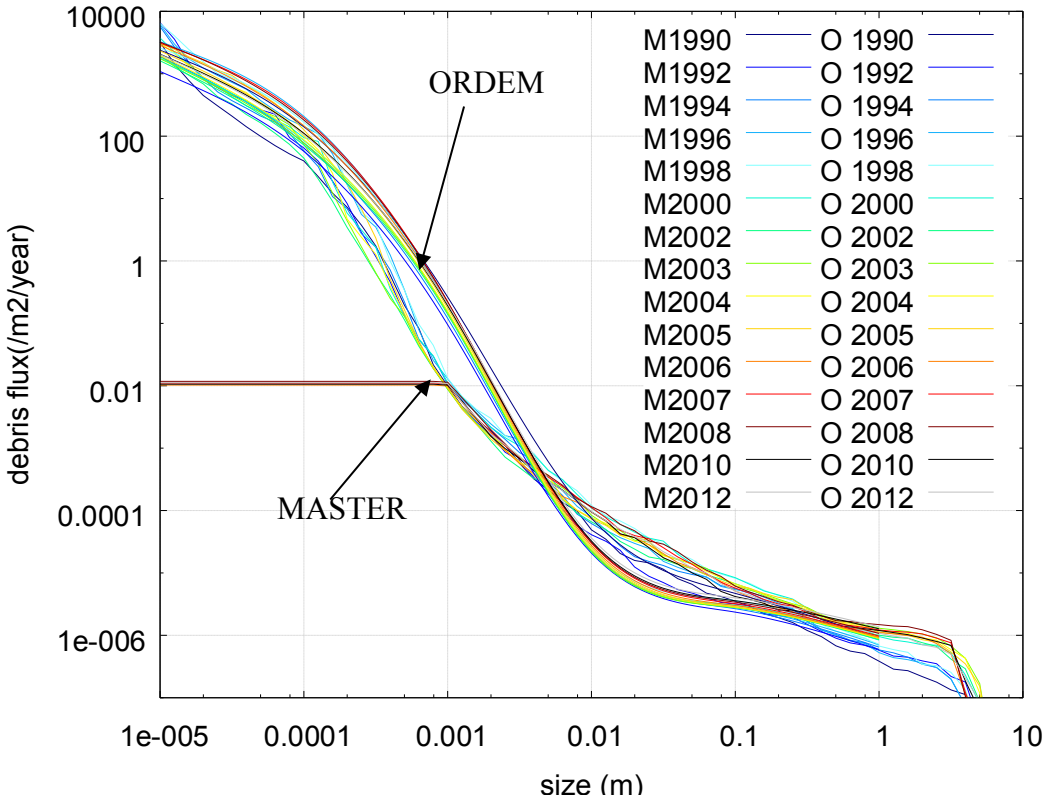
スペースデブリはいくつ存在しているのか？



現在カタログ化されている人工の宇宙物体(10cm以上)は13000個程度、1mm以上のものは1．5億個程度存在するといわれている。

スペースデブリはいくつ存在しているのか？

10cm以上	2万個
1cm以上	60万個
1mm以上	1．5億個
0．1mm以上	6兆個
0．01mm以上	120兆個
0．001mm以上	4300兆個



JAXA衛星に対するフラックス

デブリ衝突が与える被害と衝突頻度

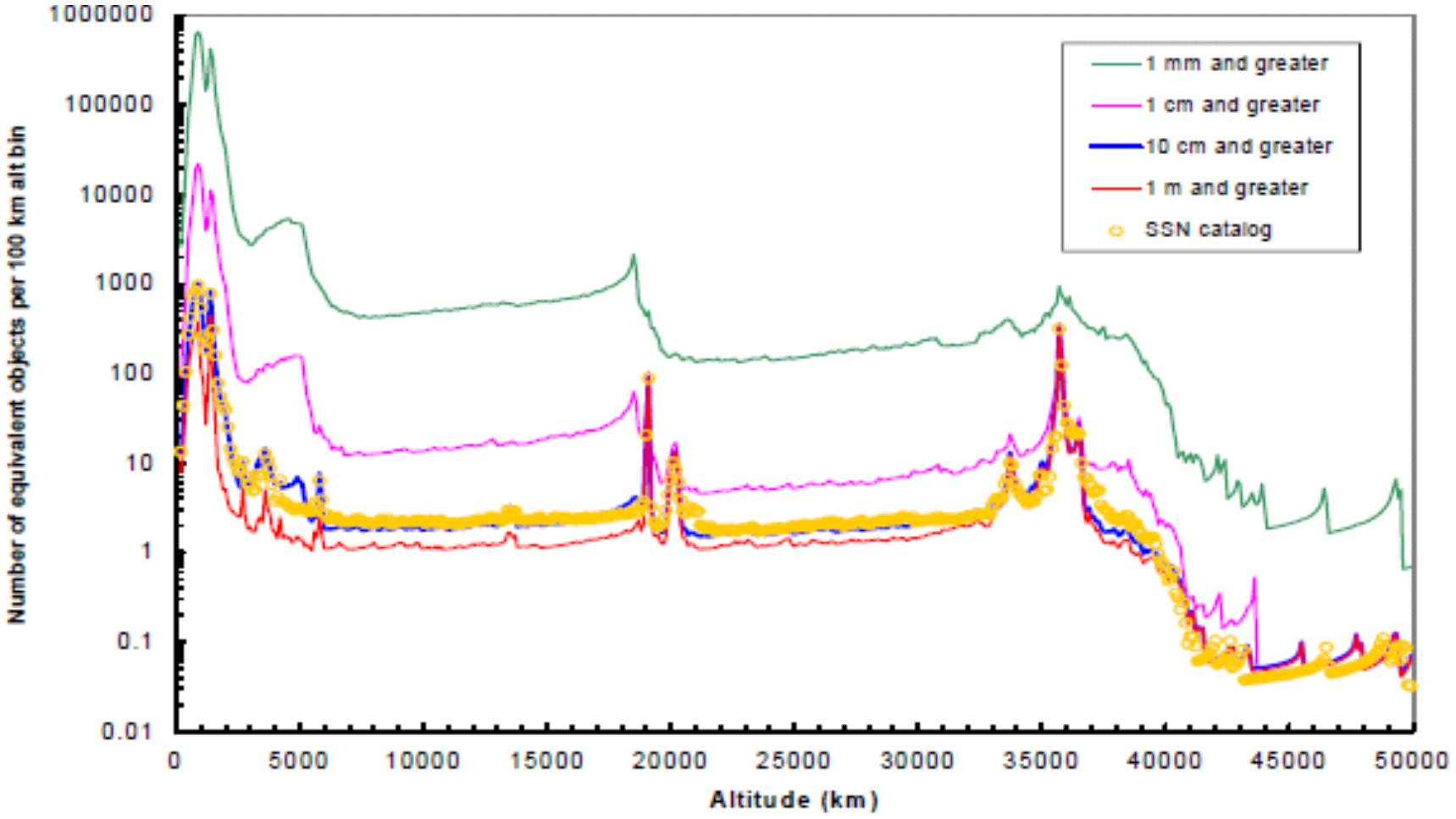
衝突デブリサイズと衝突被害

衝突デブリ寸法	0.1 mm	0.1～1cm	1～10cm	> 10cm
衛星の被る被害	太陽電池セルの損傷等	ミッション能力の部分的喪失	致命的な損傷（全壊）	完全なる破壊
衝突頻度（高度700km、20m^{2}で10年寿命の低軌道衛星）	25680 個	1.9 個	0.015 個	0.0012 個

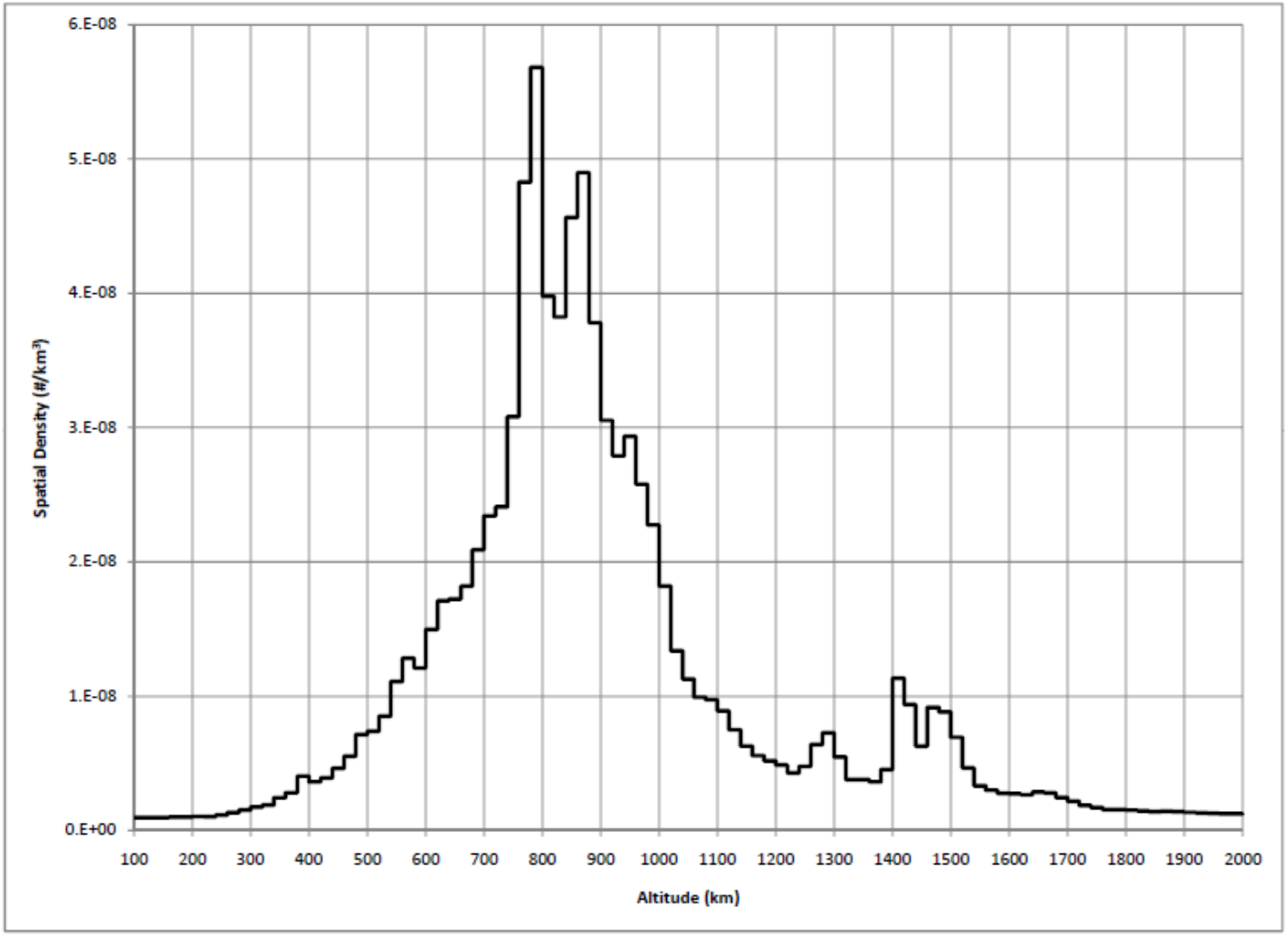
シャトルミッション関係の損傷限界デブリサイズ

被害の程度	貫通限界デブリ径	発生頻度（高度700kmと仮定した場合）
オービターの窓ガラスの交換	0.04mm	多数
宇宙服の貫通	0.1mm	0.015 個／時間／m^2
オービターの放熱パイプの貫通	0.5mm	0.0032 個／週間／m^2
オービターの翼のリーディングエッジの貫通	1.0mm	0.00018 個／週間／m^2
オービターの熱保護システムタイルの貫通	3～5mm	0.000012 個／週間／m^2
オービターの搭乗員キャビンへの貫通	5.0mm	0.0000046 個／週間／m^2
ペイロードベイの損傷	1～10mm	0.00018 個／週間／m^2

デブリの軌道高度分布


1000000
100000
10000
1000
100
10
1
0.1
0.01
Number of equivalent objects per 100 km alt bin
0
5000
10000
15000
20000
25000
30000
35000
40000
45000
50000
Altitude (km)
1 mm and greater
1 cm and greater
10 cm and greater
1 m and greater
SSN catalog

デブリの軌道高度分布

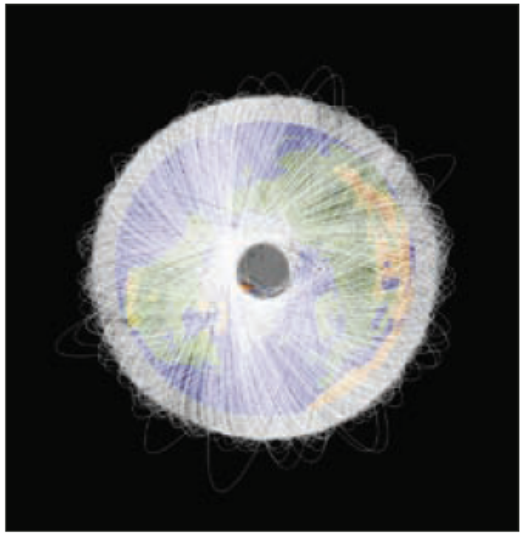


Low Earth orbit spatial density (in 20 km bins) of the cataloged objects (as of 5 June 2009). The collision of Iridium 33 and Cosmos 2251 has once again altered the relative distribution of objects in low Earth orbit.

中国の衛星破壊実験

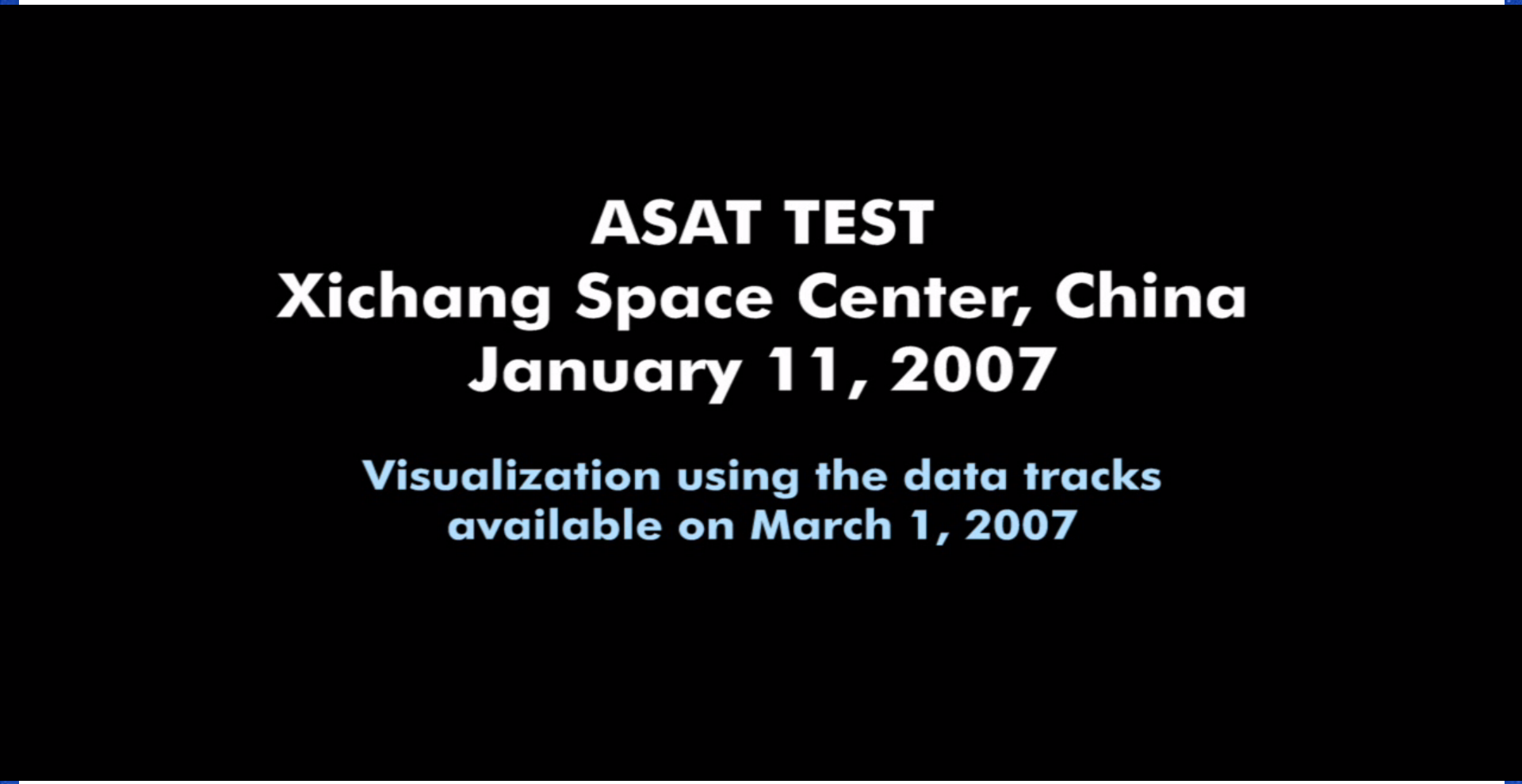
2007年1月11日、中国はミサイルによる自国の衛星の破壊実験を実施した。実験は成功し、多数のスペースデブリが軌道上に発生した。現在2800個程度のデブリが確認されている。1cm以上のデブリは150000個程度あると推測されている。

破壊実験に利用された中国の衛星Fengyun-1C



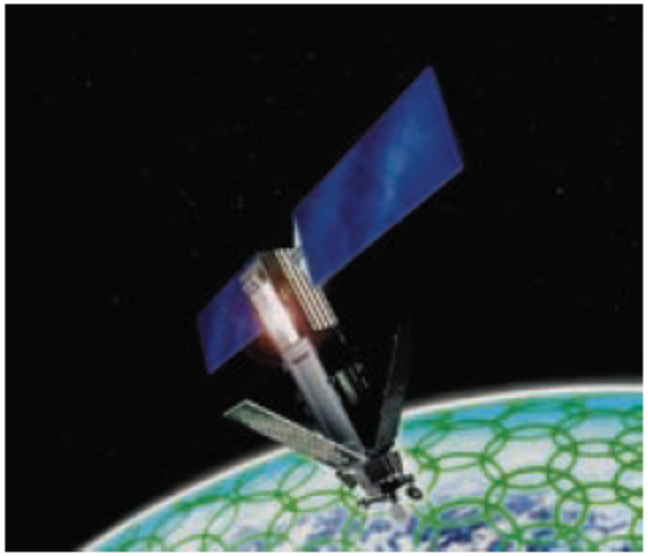
Fengyun-1C起源のデブリ2800個の軌跡
（実験から2年後）

中国の衛星破壊実験


ASAT TEST
Xichang Space Center, China
January 11, 2007
Visualization using the data tracks
available on March 1, 2007

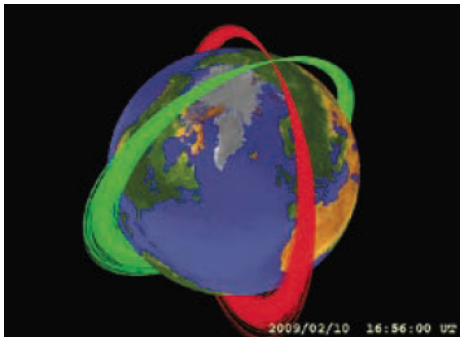
衛星同士の衝突事故

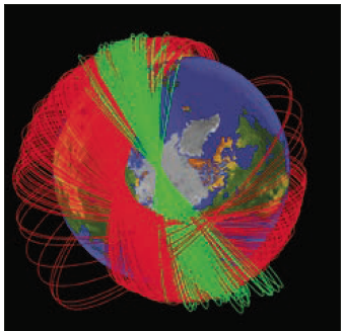
2009年2月10日、史上初めて活動中の2つの衛星（Iridium33とcosmos2251)同士の衝突事故が発生しました。多数のデブリが発生しました。



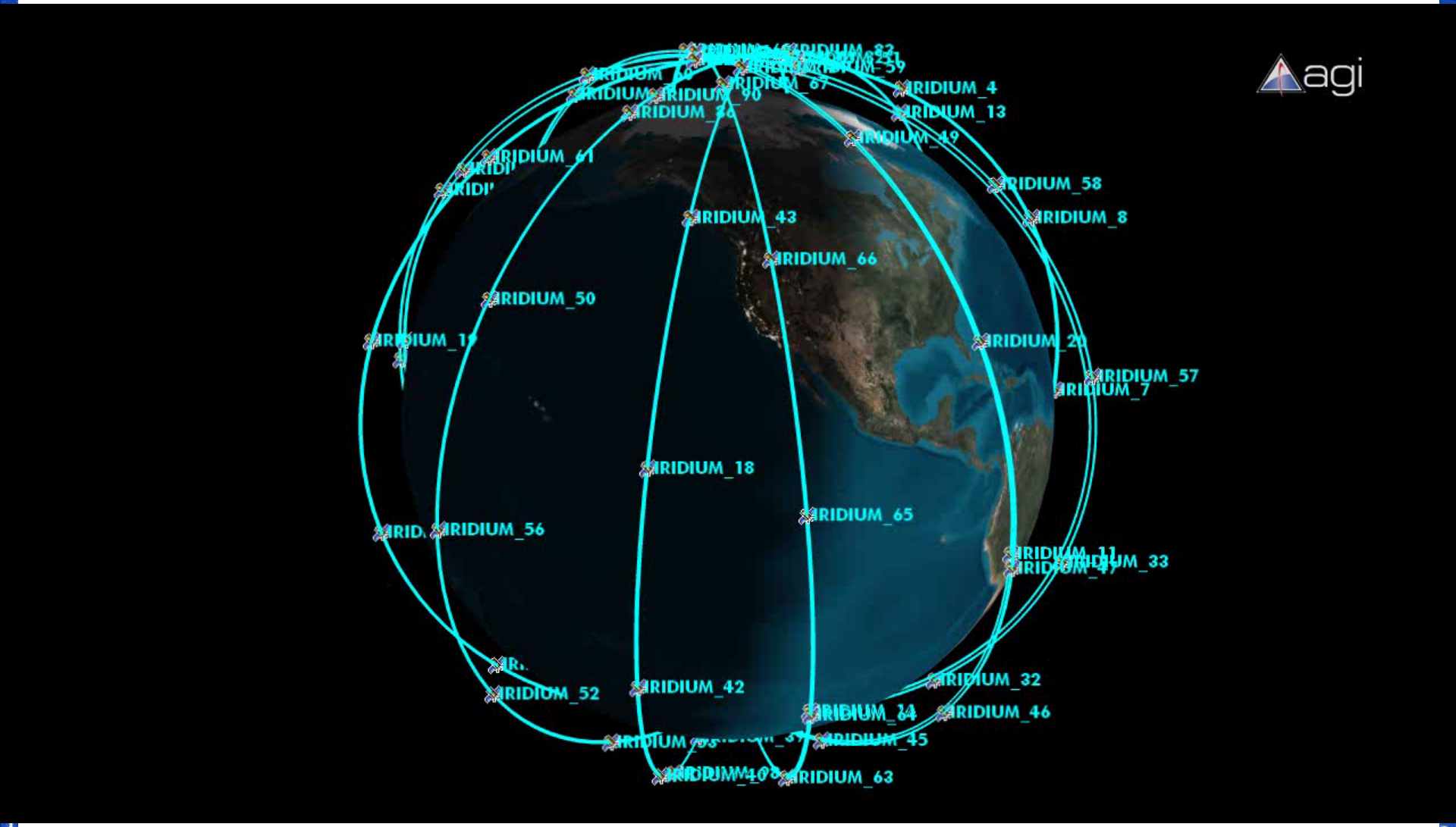
衝突したIridium33（左）とcosmos2251

衝突によって発生したデブリの分布。
衝突直後（左）と6カ月後。





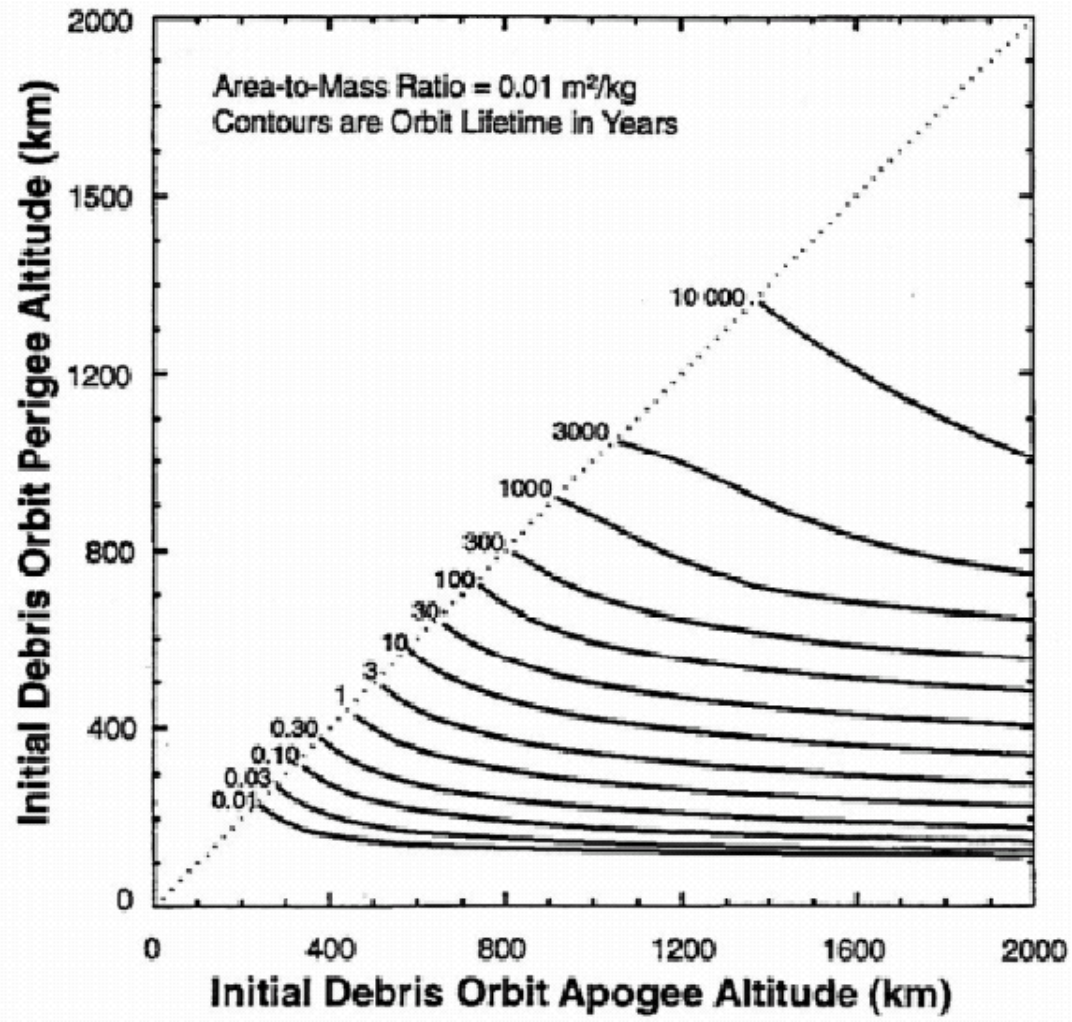
衛星同士の衝突事故


agi
IRIDIUM_4
IRIDIUM_13
IRIDIUM_49
IRIDIUM_58
IRIDIUM_8
IRIDIUM_43
IRIDIUM_66
IRIDIUM_50
IRIDIUM_57
IRIDIUM_7
IRIDIUM_18
IRIDIUM_65
IRIDIUM_56
IRIDIUM_33
IRIDIUM_52
IRIDIUM_42
IRIDIUM_32
IRIDIUM_46
IRIDIUM_45
IRIDIUM_63

軌道滞在時間

スペースデブリは軌道上に長時間滞在する。

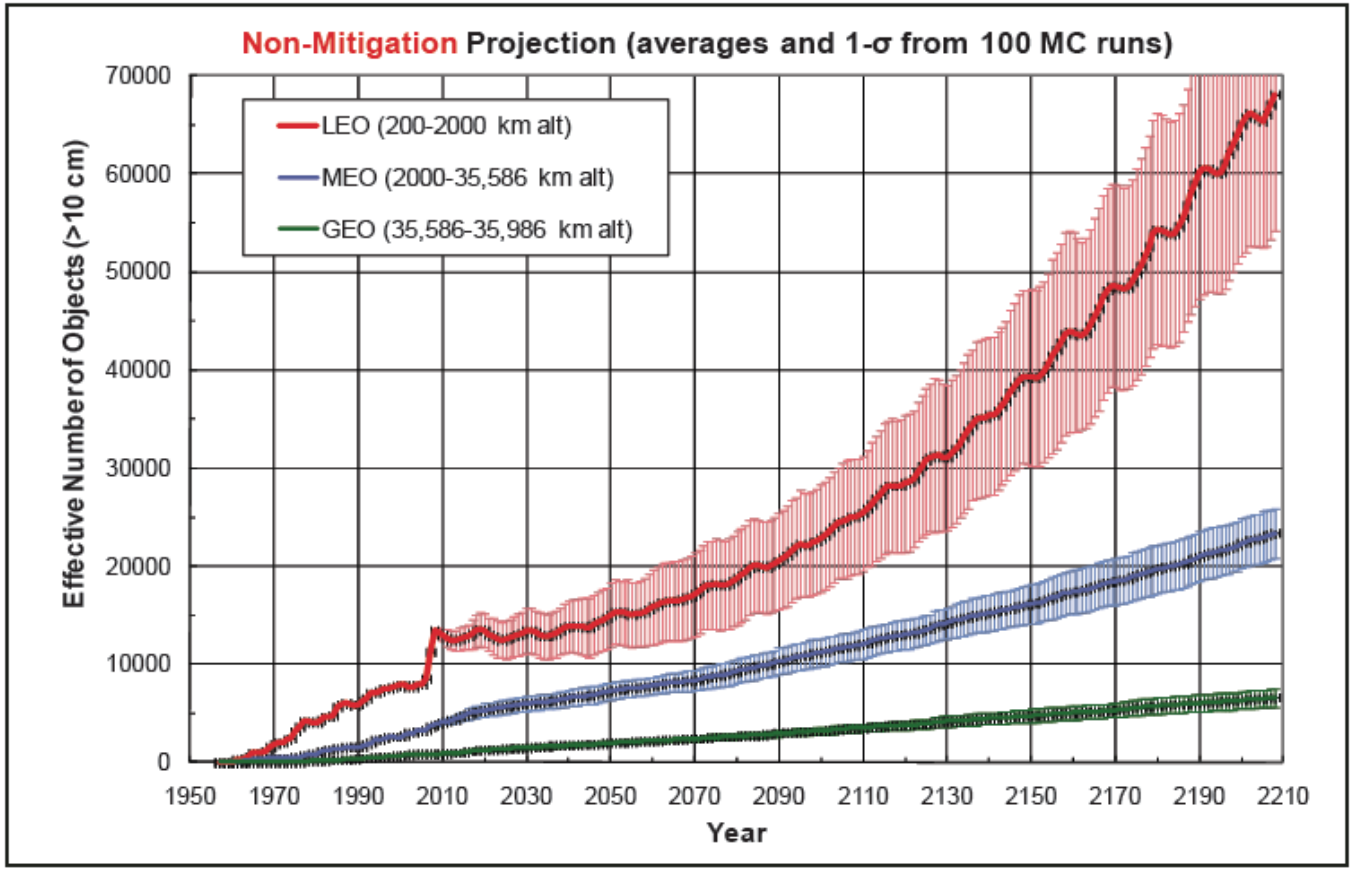
対策をこうじなければその数は増加する一方。



標準的な衛星（面積重量比0.01m2/kg）の軌道寿命

- 高度500kmで1—2年
- 高度650kmで約25年
- 高度800kmで2－300年

スペースデブリは増えつづける



今後、人類が宇宙活動を停止したとしてもスペースデブリは増え続けると推測される。

ケスラーシンドロームがすでにおきている？

大型構造物落下の危険性

ロシアの宇宙ステーションMIR
の落下の様子(2001,3,23)

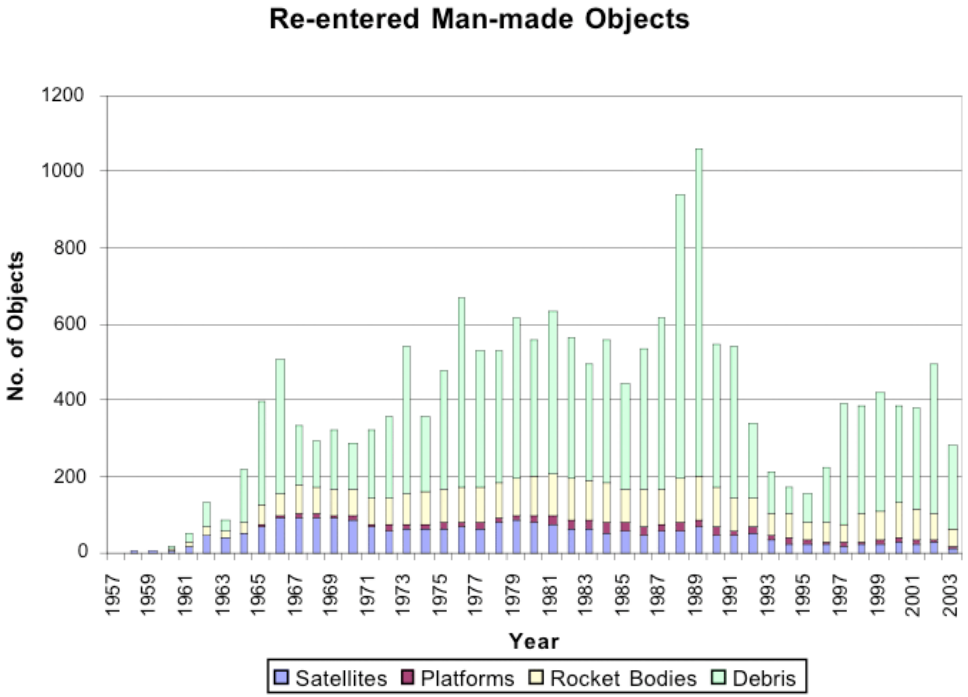
宇宙からの落下物

大型構造物の監視、姿勢運動検出、落下予測が必要である。

大型構造物落下の危険性

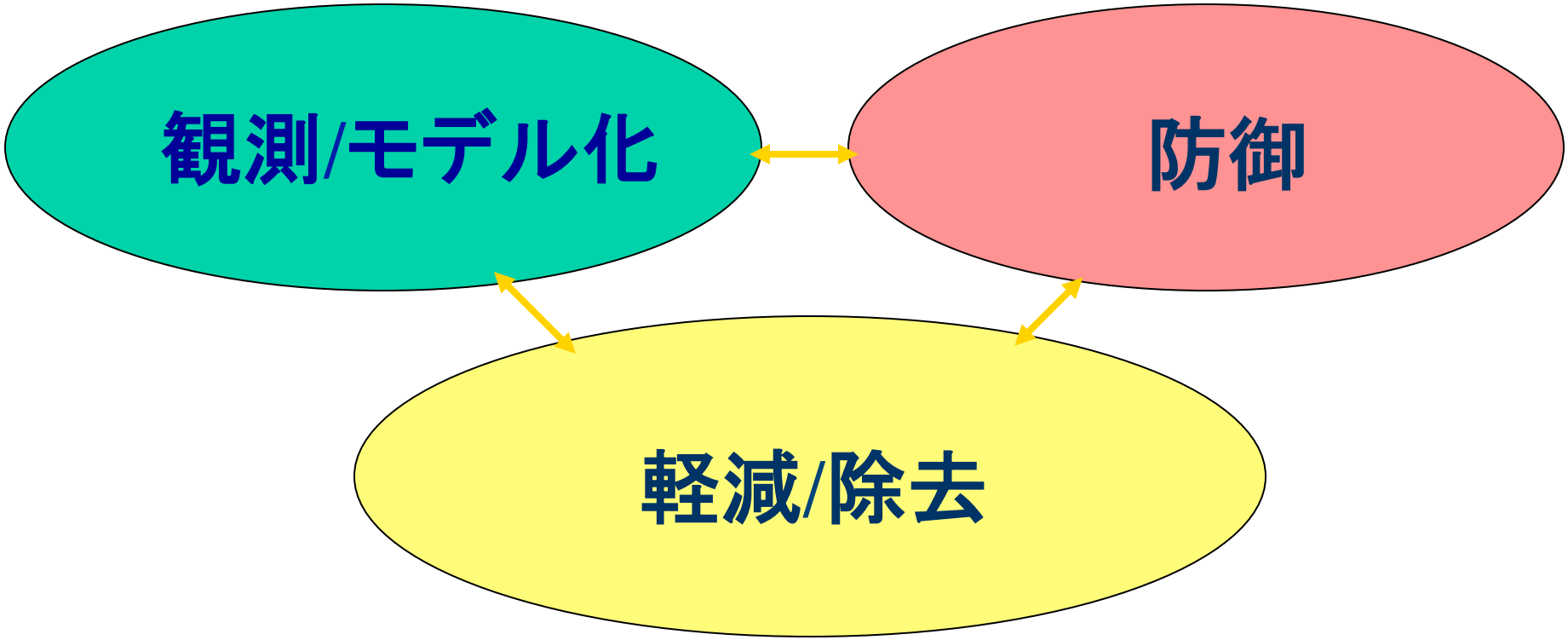
- 高度74～83km付近で分解・爆発、幅数十km、長さ～2000kmの範囲へ落下→落下地点の予測は困難
- これまで地上落下物が確認されたのは50回以上
- 原子力衛星
  - ソ連の28機1967～1985打ち上げ、再突入前に減衰するように、900km以上へリオービット。しかし少なくとも6機失敗。1978年カナダ、1983年と1987年にインド洋へ落下。
  - アメリカは軌道投入失敗などで3機再突入。

- NASAの溶融解析ツールORSATを改良したORSAT-Jで傷害予測数を計算



http://www.aero.org/capabilities/cords/

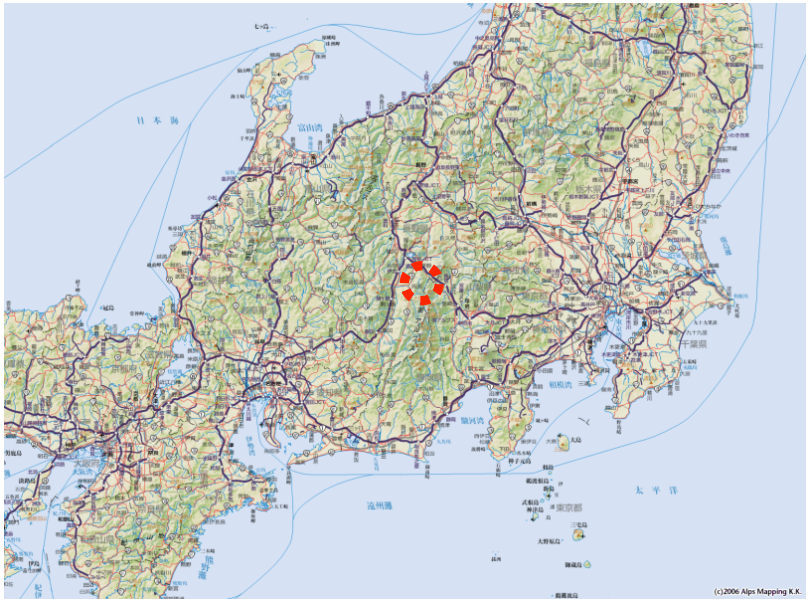
JAXA未踏センターの取り組み

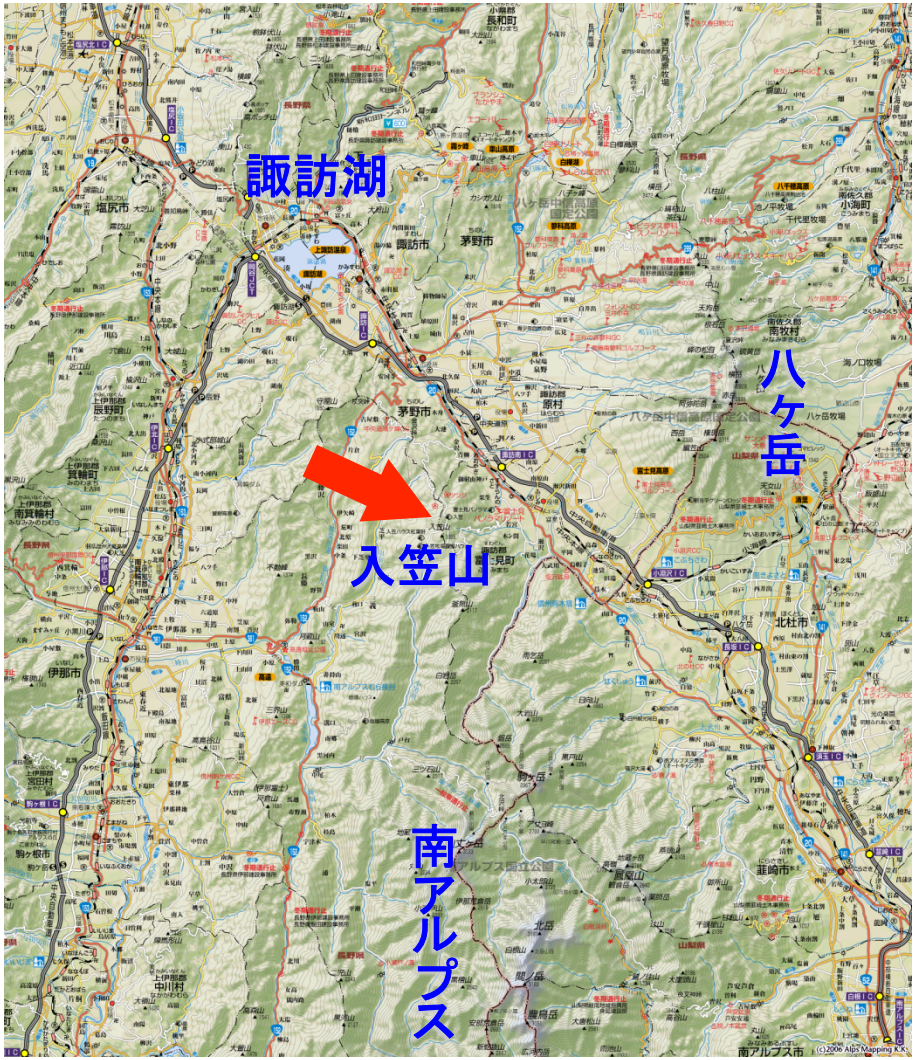


JAXA 入笠山光学観測施設

長野県伊那市高遠町芝平大沢山
経度　東経138度10分18秒
緯度　北緯　35度54分05秒
標高　1870m

MPCコード　　408 Nyukasa



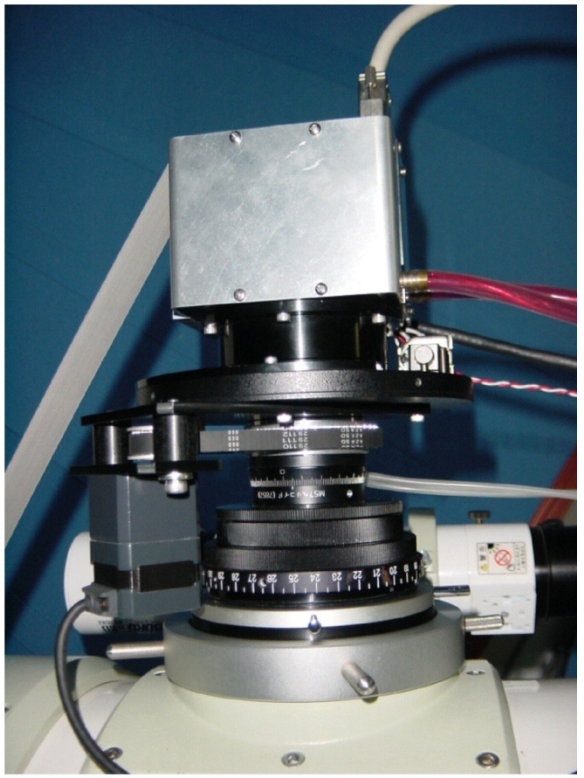


JAXA入笠山光学観測施設

35cm望遠鏡と25cm望遠鏡を設置

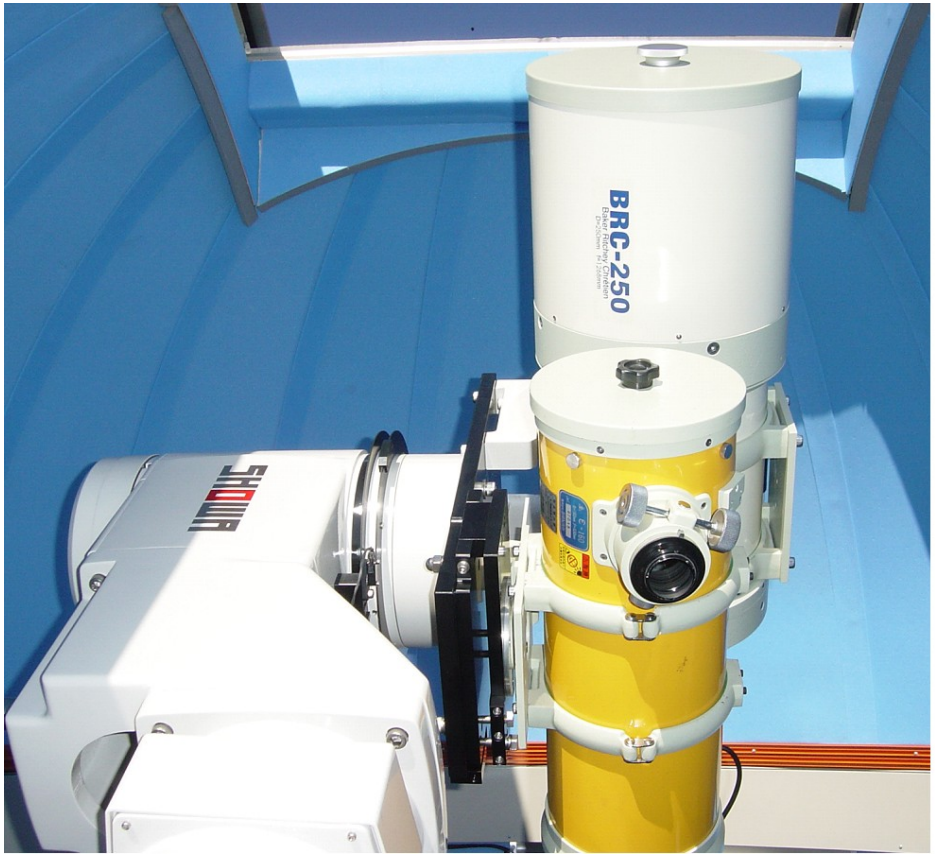
観測装置：35cm望遠鏡と2K2KCCDカメラ

望遠鏡　　タカハシε-350
　　口径355mm　f=1248mm　F/3.6
赤道儀　　昭和機械製　フォーク式 25EF



カメラ　　N.I.L.製
　　2K2K裏面照射型（e2v）
視野角　　1.27deg.

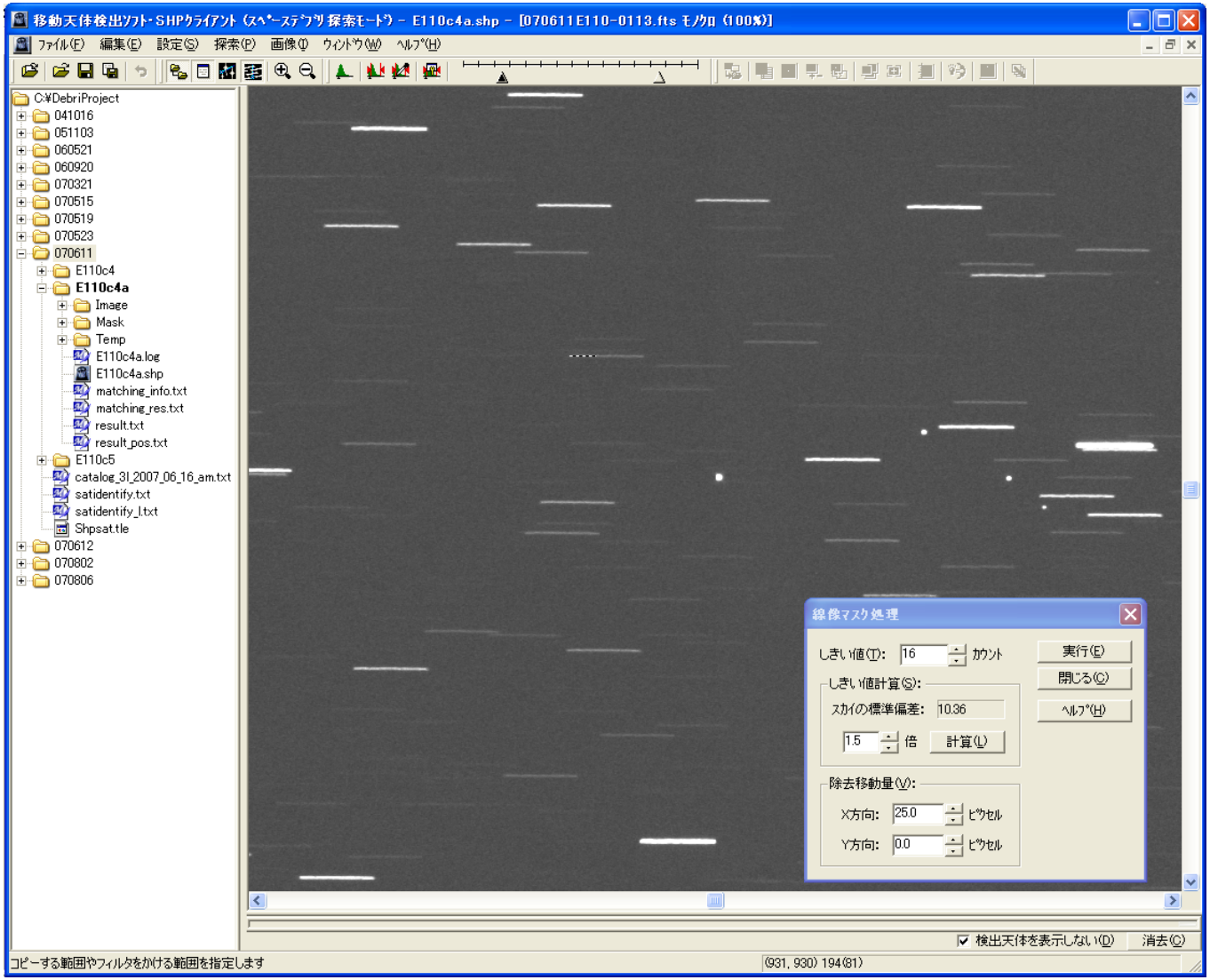
観測装置：25cm望遠鏡と4K4KCCDカメラ



望遠鏡　BRC-250 （2台まで同架可能）
口径250mm　f=1268mm　F/5.1
赤道儀　昭和機械製　エキセントリックエルボ式 25EL

カメラ　N.I.L.製
2K4K裏面照射型（e2v）×2チップ
視野角　2.78deg.

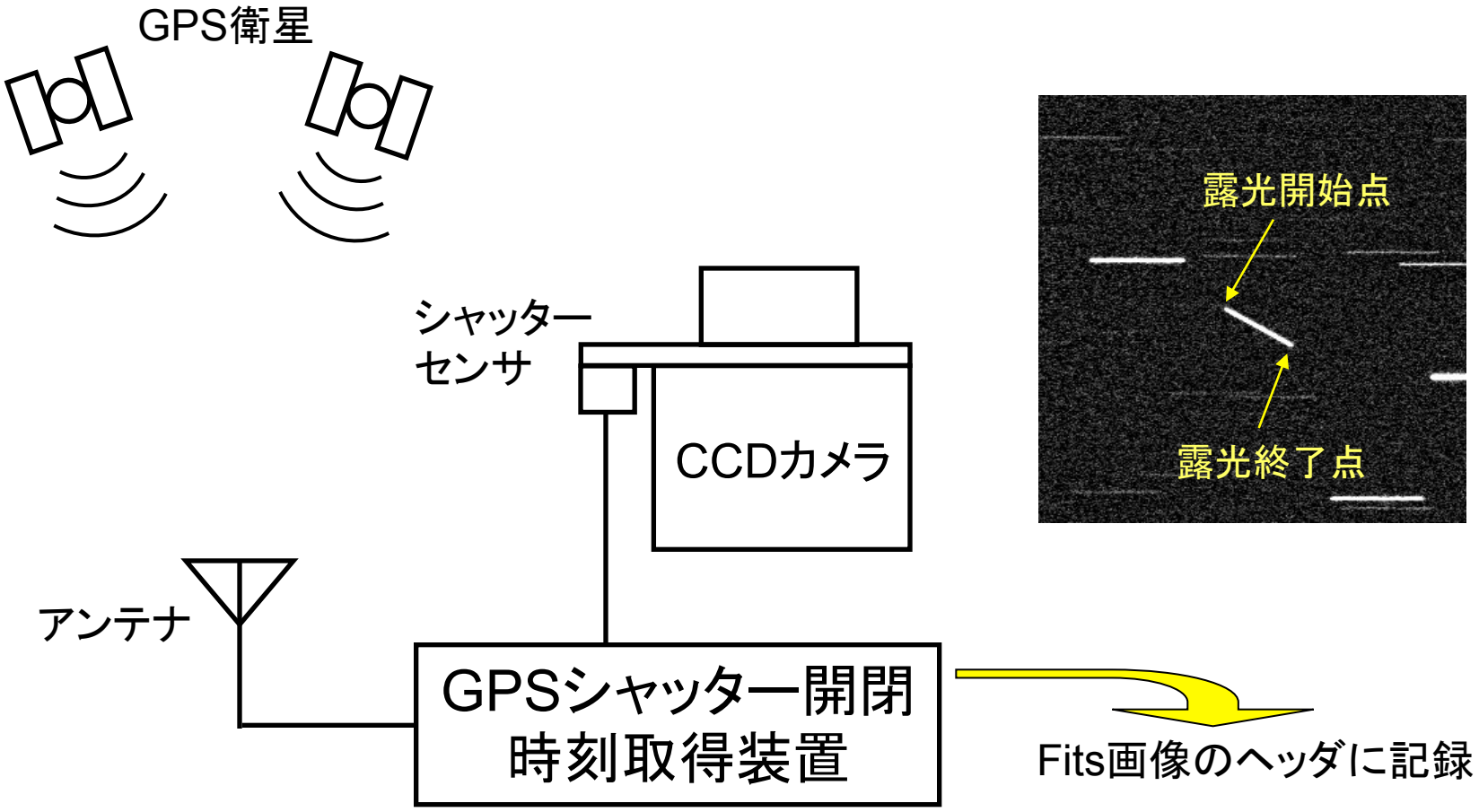
画像解析例


移動天体検出ソフト・SHPクライアント (スペーステブリ探索モード) - E110c4a.shp - [070611E110-0113.fts モノクロ (100%)]
ファイル(F) 編集(E) 設定(S) 探索(P) 画像(I) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)
C:¥DebriProject
041016
051103
060521
060920
070321
070515
070519
070523
070611
E110c4
E110c4a
Image
Mask
Temp
E110c4a.log
E110c4a.shp
matching_info.txt
matching_res.txt
result.txt
result_pos.txt
E110c5
catalog_3l_2007_06_16_am.txt
satidentify.txt
satidentify_l.txt
Shpsat.tle
070612
070802
070806
線像マスク処理
しきい値(T): 16 カウント
実行(E)
閉じる(C)
ヘルプ(H)
しきい値計算(S):
スカイの標準偏差: 10.36
1.5 倍
計算(L)
除去移動量(V):
X方向: 25.0 ピクセル
Y方向: 0.0 ピクセル
検出天体を表示しない(D)
消去(C)
コピーする範囲やフィルタをかける範囲を指定します
(931, 930) 194(81)

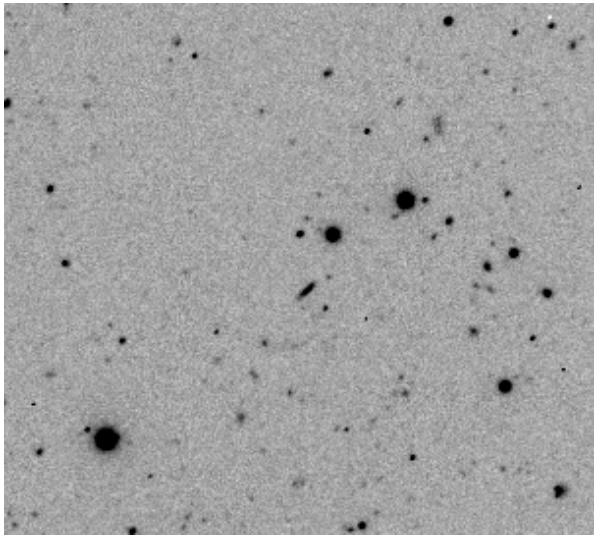
画像解析例

GPS時刻取得装置

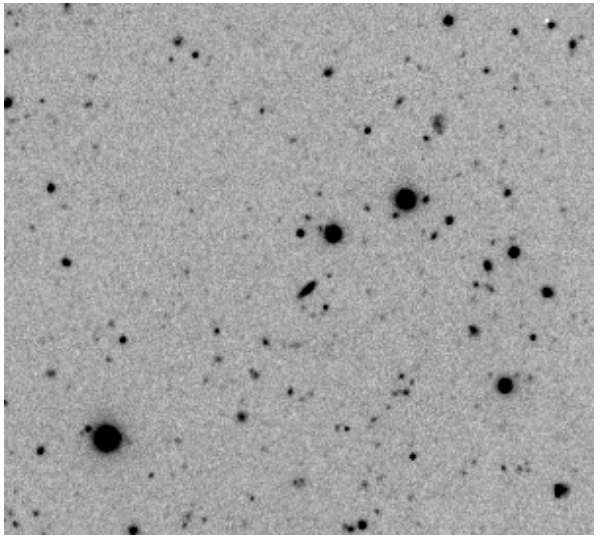
CCDカメラのシャッター開閉時刻を正確(1/1000)に計ることで、
露光開始時刻と終了時刻が精度よく求まる.



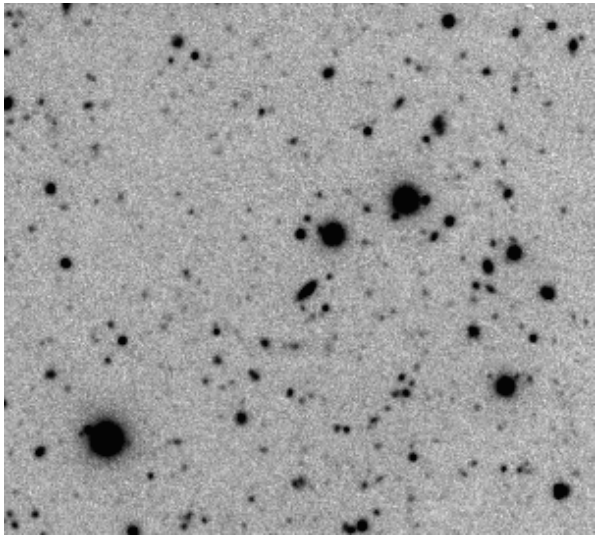
微小物体検出の概念（静止物体）



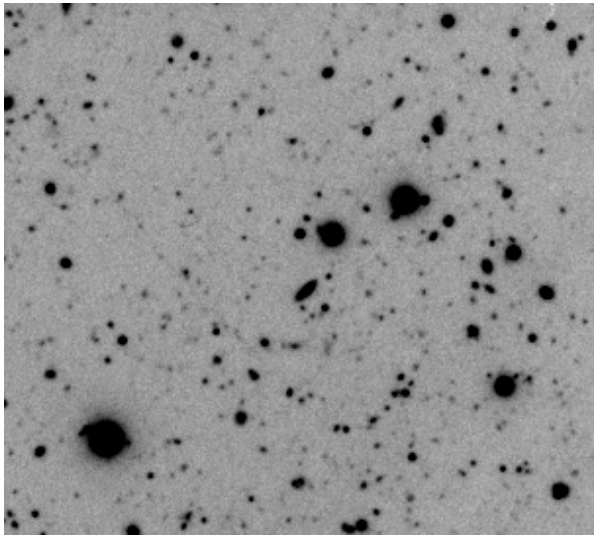
One frame



Average of 4 frames

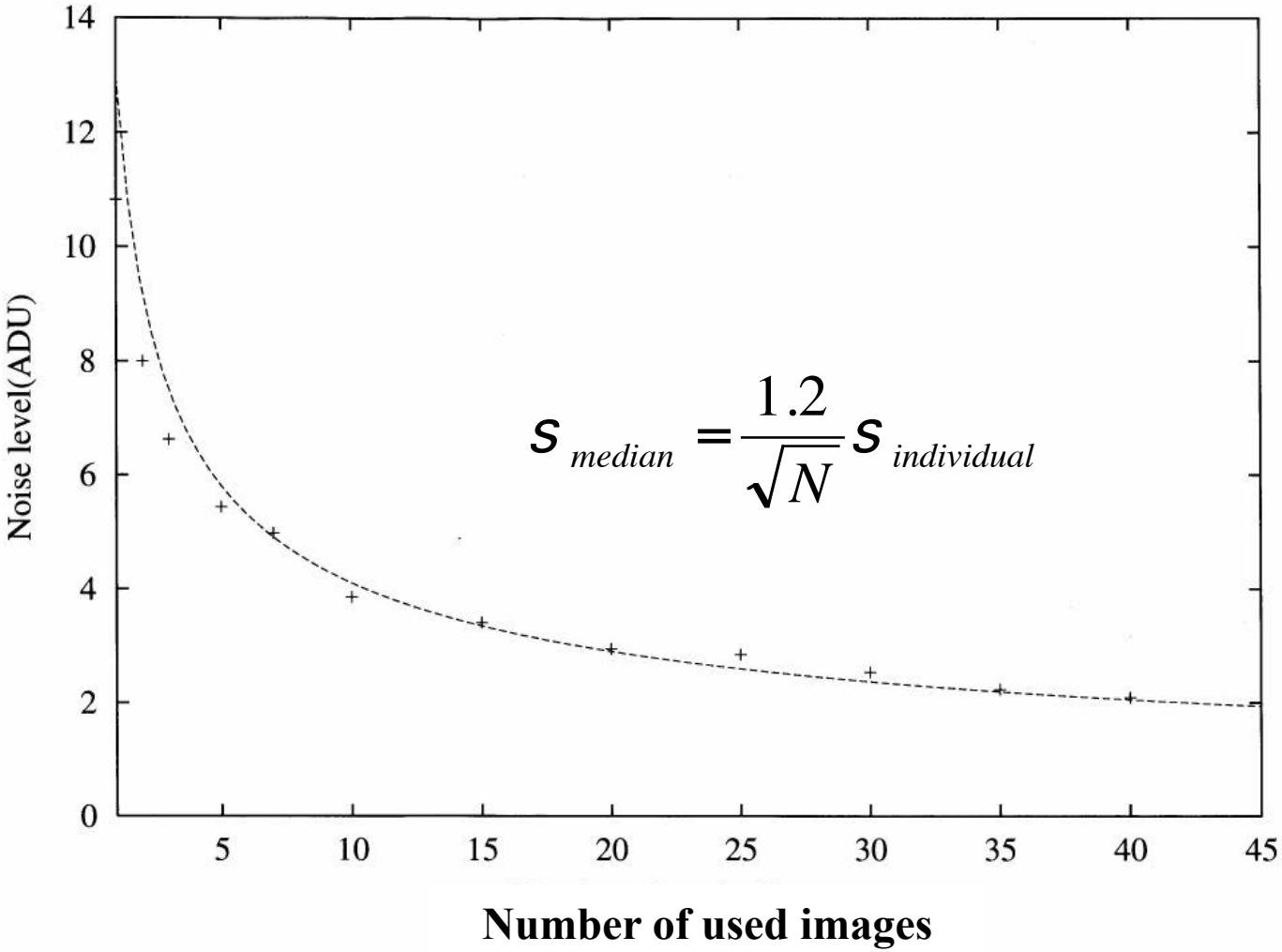


Average of 16 frames

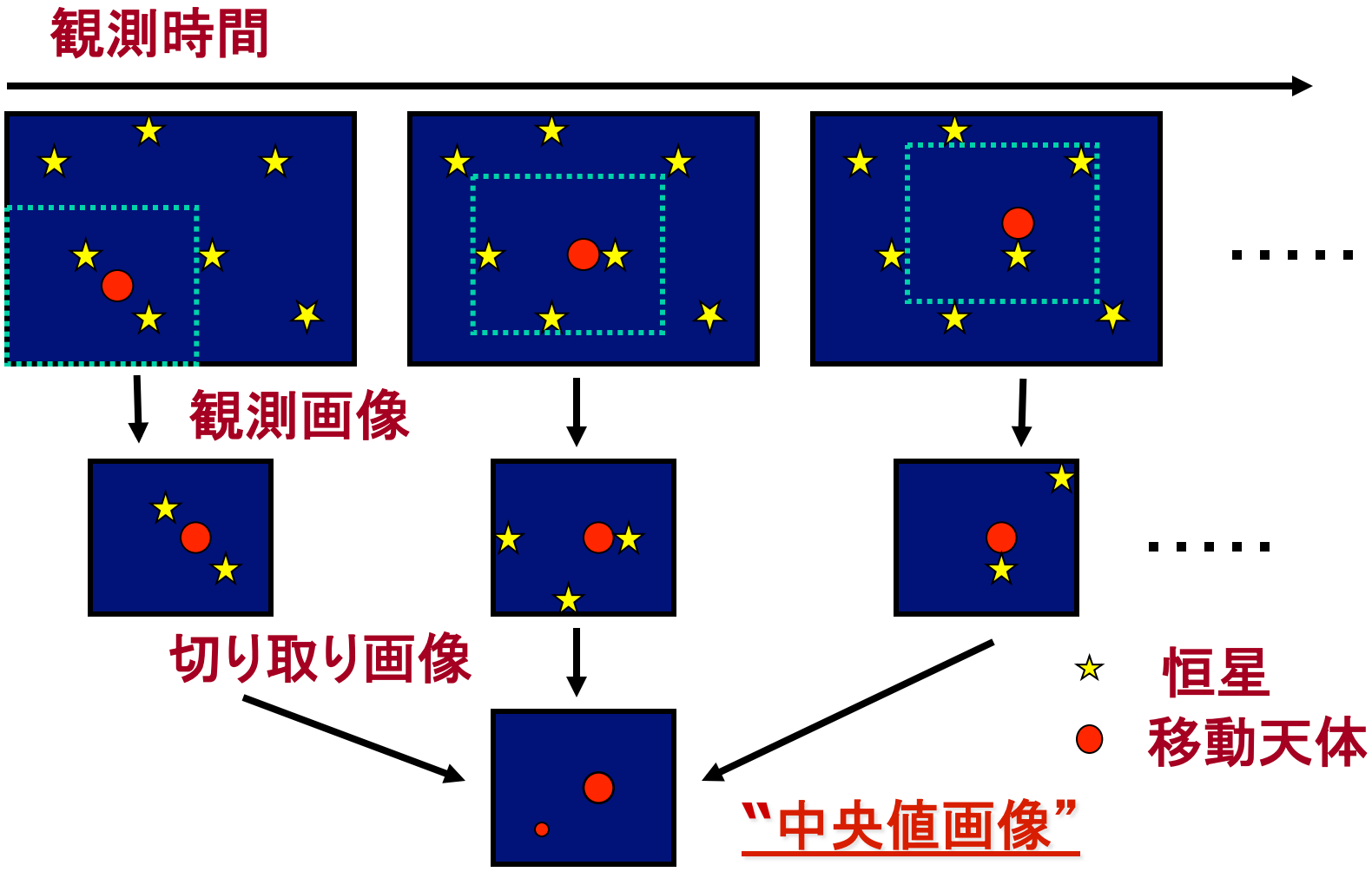


Average of 64 frames

画像利用数に対する雑音レベルの変化



微小物体検出の概念（移動物体）

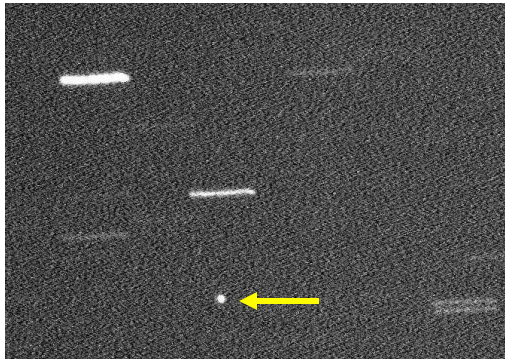


―重ね合わせ法―

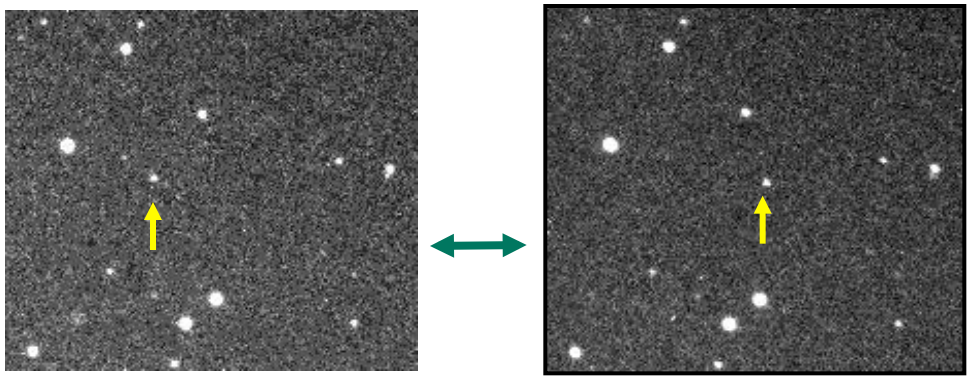
従来の検出方法との比較

従来の検出法

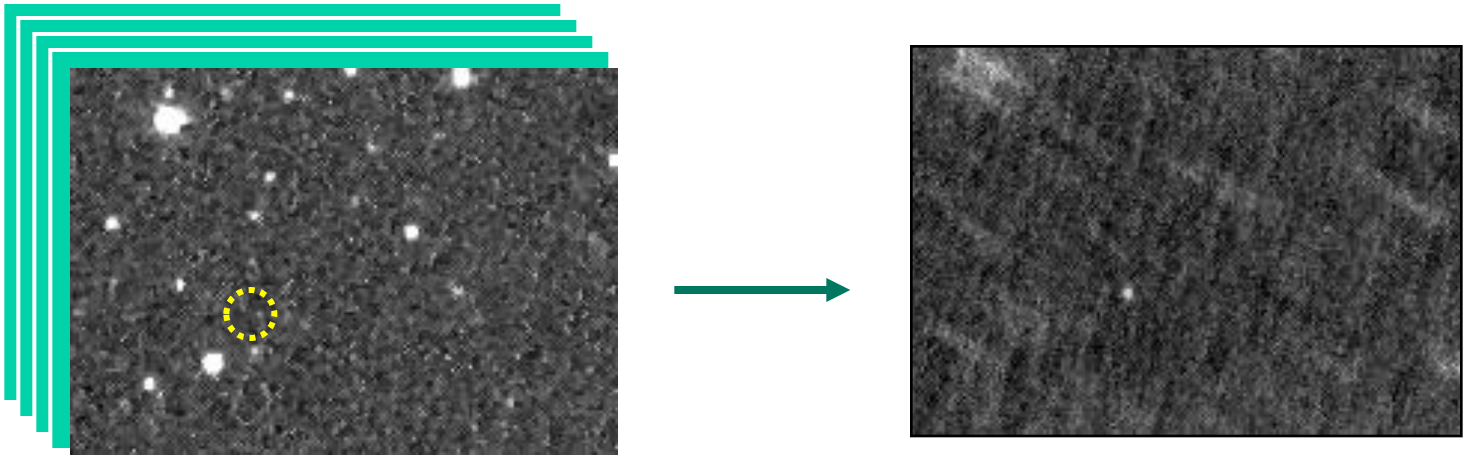
静止デブリ



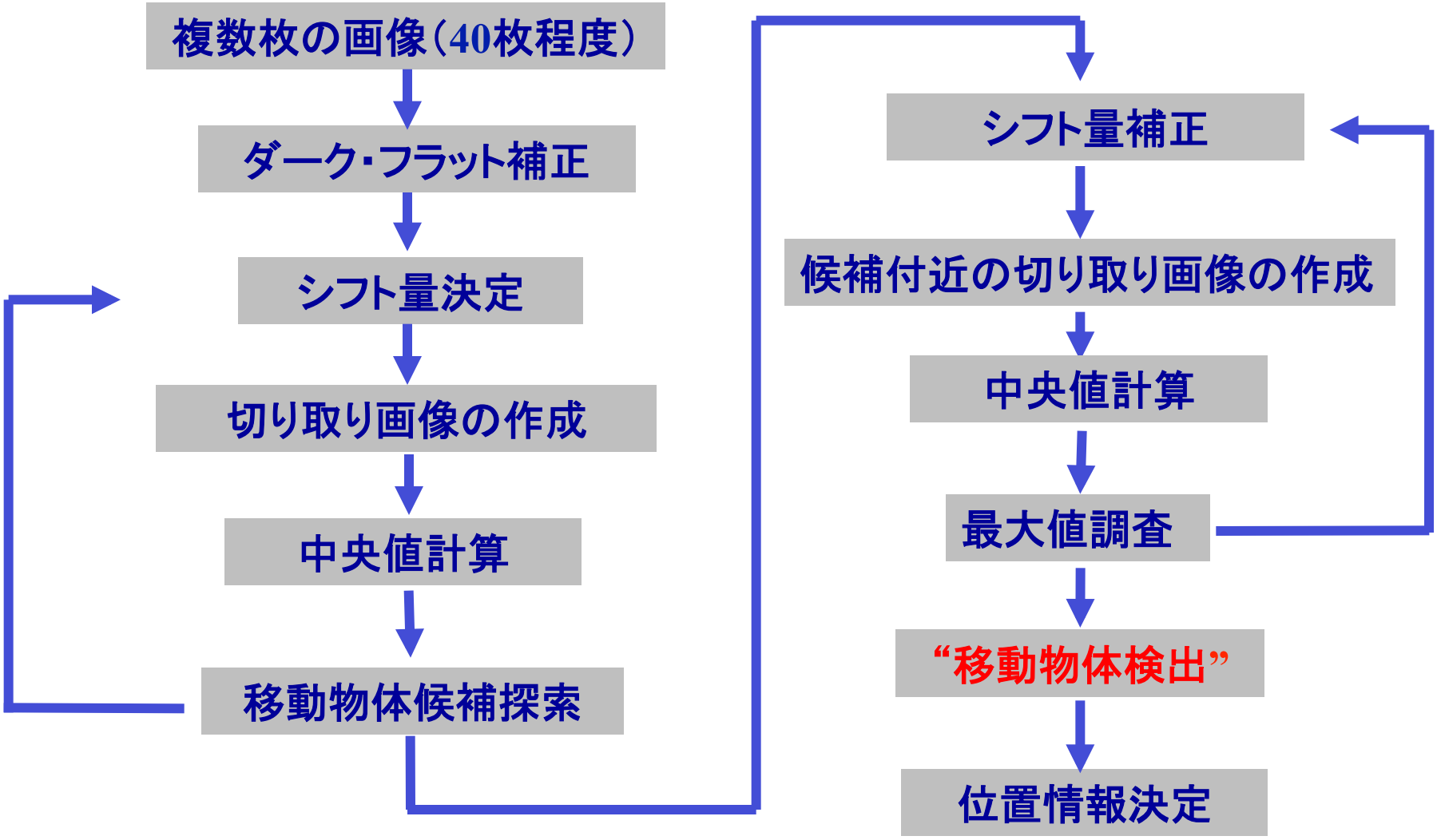
小惑星



重ね合わせ法



解析手順



これらの作業をほぼ自動で実施!!

2009.12.10 現在

発見した小惑星の仮符号

336個

2002　　2004.6 SHP発売　　2005～

(95165)
(143046)
(143047)

2002 AJ180
2002 AK180
2002 AL180
2002 AM180

2002 EQ153
2002 ER153
2002 ES153
2002 ET153
2002 EU153

2002 VP131
2002 VQ131
2002 VS131
2002 VT131
2002 VU131
2002 VV131
2002 VX131
2002 VY131
2002 VZ131

2002 VA132
2002 VB132
(170074)
2002 VD132
2002 VE132

2002 VC137
2002 VD137
2002 VE137
2002 VF137
2002 VG137
2002 VH137
2002 VJ137
2002 VK137
2002 VL137
2002 VM137
2002 VN137
2002 VO137
2002 VP137
2002 VQ137
2002 VR137

2005 CG69
2005 CH69

2005 YX231

2006 BG29
2006 BH29
2006 BJ29
2006 BK29
2006 BL29
2006 BM29
2006 BN29
2006 BO29
2006 BP29
2006 BQ29
2006 BR29
2006 BS29
2006 BT29
2006 BU29
2006 BV29
2006 BW29
2006 BX29
2006 BY29
2006 BZ29

2006 BF39
2006 BG39
2006 BH39
2006 BJ39
2006 BK39
2006 BL39
2006 BM39
2006 BN39

(199287)
2006 BY54
2006 BZ54
2006 BA55

2006 BE146

2006 BH273
2006 BJ273

2006 EK1
2006 EL1
(204693)
2006 EN1
2006 EO1
2006 EP1

2006 ER1
2006 ES1
2006 ET1
2006 EU1
(164473)
2006 EW1
2006 EX1
2006 EY1
2006 EZ1

2006 EA2
2006 EB2
2006 EC2
2006 ED2
2006 EE2
2006 EF2
2006 EG2
2006 EH2
2006 EJ2
2006 EK2
(204694)
2006 EM2
2006 EN2
2006 EO2
2006 EP2

2006 EY44
(204699)
2006 EP45
2006 EQ45
2006 FN46
2006 FO46
2006 FP46

2006 JB6
(164538)
2006 JD6
2006 JE6
2006 JF6
2006 JG6
2006 JH6
2006 JJ6
2006 JK6
2006 JL6

2006 JG42
2006 JH42
2006 JJ42
(202648)

2006 KQ103
2006 KR103
2006 KS103
2006 KT103

2006 UX61
2006 UY61
2006 UZ61

2006 UH63
2006 UJ63
2006 UK63
2006 UL63
(187531)

2006 UB218
2006 UC218
2006 UD218
2006 UE218
2006 UF218
2006 UG218
2006 UH218
2006 UJ218
2006 UK218
2006 UL218
2006 UM218
2006 UN218

2006 WK
2006 WL
2006 WM

2006 WS4

(216273)

2006 WX127
2006 WY127
2006 WZ127

(187594)
2006 WB128
2006 WC128
2006 WD128
(187595)
2006 WF128
2006 WG128

2006 YH11
2006 YJ11
2006 YK11
2006 YL11
2006 YM11
2006 YN11
2006 YO11
2006 YP11
2006 YQ11
2006 YR11
2006 YS11
(185447)
2006 YU11
2006 YV11
2006 YW11

(214860)
2006 YH12
2006 YJ12
2006 YK12
2006 YL12
2006 YM12
2006 YN12
2006 YO12
2006 YP12

2007 AF8
2007 AG8
2007 AH8
2007 AJ8
2007 AK8
(188900)
2007 AM8
2007 AN8
(188901)
2007 AP8
2007 AQ8
2007 AR8
2007 AS8
2007 AT8

2007 AU17
2007 AV17
2007 AW17
2007 AX17
2007 AY17
2007 AZ17

2007 AK22
2007 AL22
(187618)
2007 AN22
2007 AO22

2007 BJ8
2007 BK8
2007 BL8

2007 BW28
(192160)
2007 BY28
2007 BZ28
2007 BA29
2007 BB29
2007 BC29
2007 BD29
2007 BE29
2007 BF29

2007 BL72
2007 BM72
2007 BN72
2007 BO72
2007 BP72
2007 BQ72
2007 BR72
2007 BS72
2007 BT72
2007 BU72
2007 BV72

2007 DV101
2007 DW101
2007 DX101
2007 DY101
2007 DZ101

2007 DA102
2007 DB102
2007 DC102
2007 DD102
2007 DE102
2007 DF102
2007 DG102
2007 DH102
2007 DL102
2007 DM102
(202688)
2007 DO102

2007 EF125
2007 EG125
2007 EH125
2007 EJ125
2007 EK125
2007 EL125
2007 EM125
2007 EN125
2007 EO125
2007 EP125

2007 FU3
2007 FV3
2007 FW3
2007 FX3
2007 FY3
2007 FZ3

2007 FA4
2007 FB4
2007 FC4
2007 FD4
2007 FE4
2007 FF4
2007 FG4
2007 FH4
2007 FJ4
2007 FK4
2007 FL4
2007 FM4
2007 FN4

2007 DS104
2007 DT104
2007 DU104

2008 EG68
2008 ED84
2008 EE84
2008 EF84
2008 EG84
2008 EH84
2008 EU89
2008 EV89

2008 EV146
2008 EW146
2008 EX146
2008 EY146
2008 EZ146
2008 EA147
2008 EB147

2008 YT163
2008 YU163
2008 YV163
2008 YW163
2008 YX163
2008 YY163
2008 YZ163

2008 YA164
2008 YB164
2008 YC164
2008 YD164

2008 YP164
2008 YQ164

2009 AQ2
2009 AP2
2009 AR2

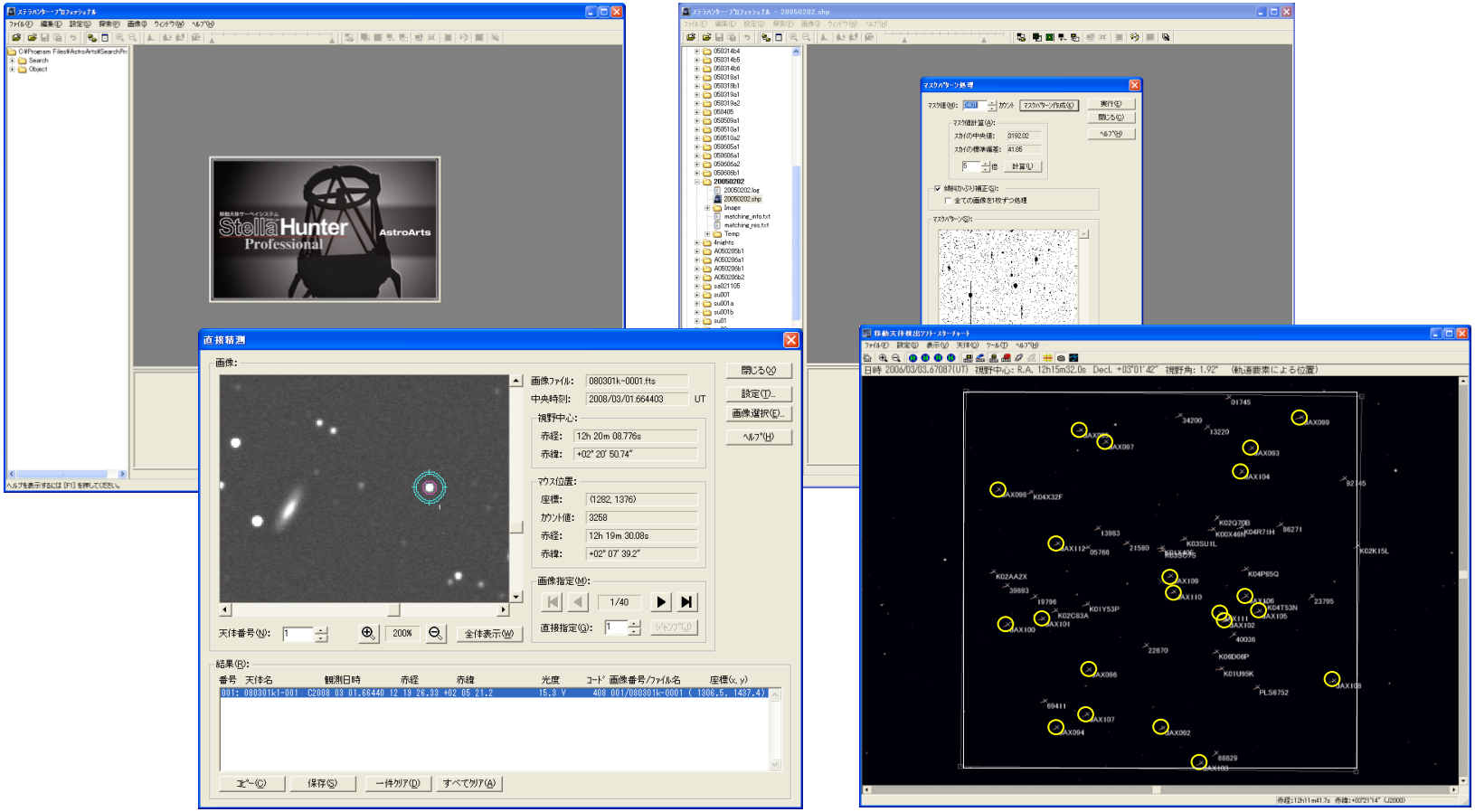
2009 CC61
2009 CD61
2009 CE61
2009 CF61
2009 CG61
2009 CH61
2009 CJ61
2009 CK61
2009 CL61
2009 CM61

2009 CT61
2009 CU61
2009 CV61
2009 CW61
2009 CX61

番号確定
24個

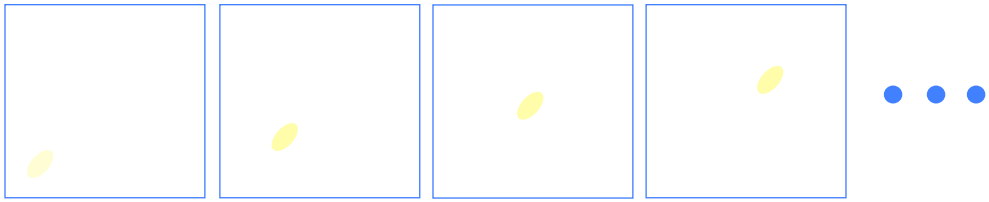
市販ソフトウェアの開発

重ね合わせ法を「移動天体検出方法」として特許出願し、この技術を民間企業に移転して小惑星や彗星を発見する市販ソフトウェア「ステラハンター・プロフェッショナル(SHP)」を開発した。Windows OSで駆動。初心者でも容易に使いこなせる。



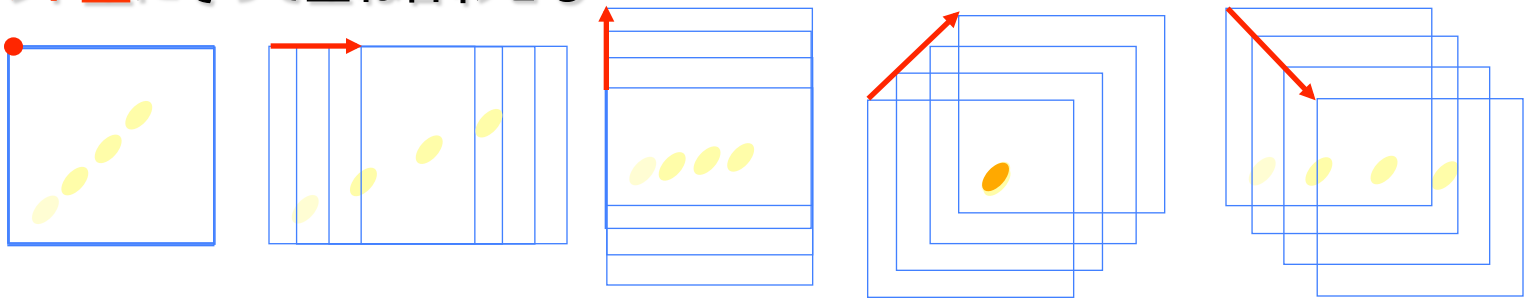
重ね合わせ法の弱点

移動方向が未知のデブリや地球接近小惑星の検出にはあらゆる方向で重ね合わせをしなくてはいけないため解析に時間がかかる。



望遠鏡を固定して連続で撮影した画像

シフト量にそって重ね合わせる



× × × ○ ×

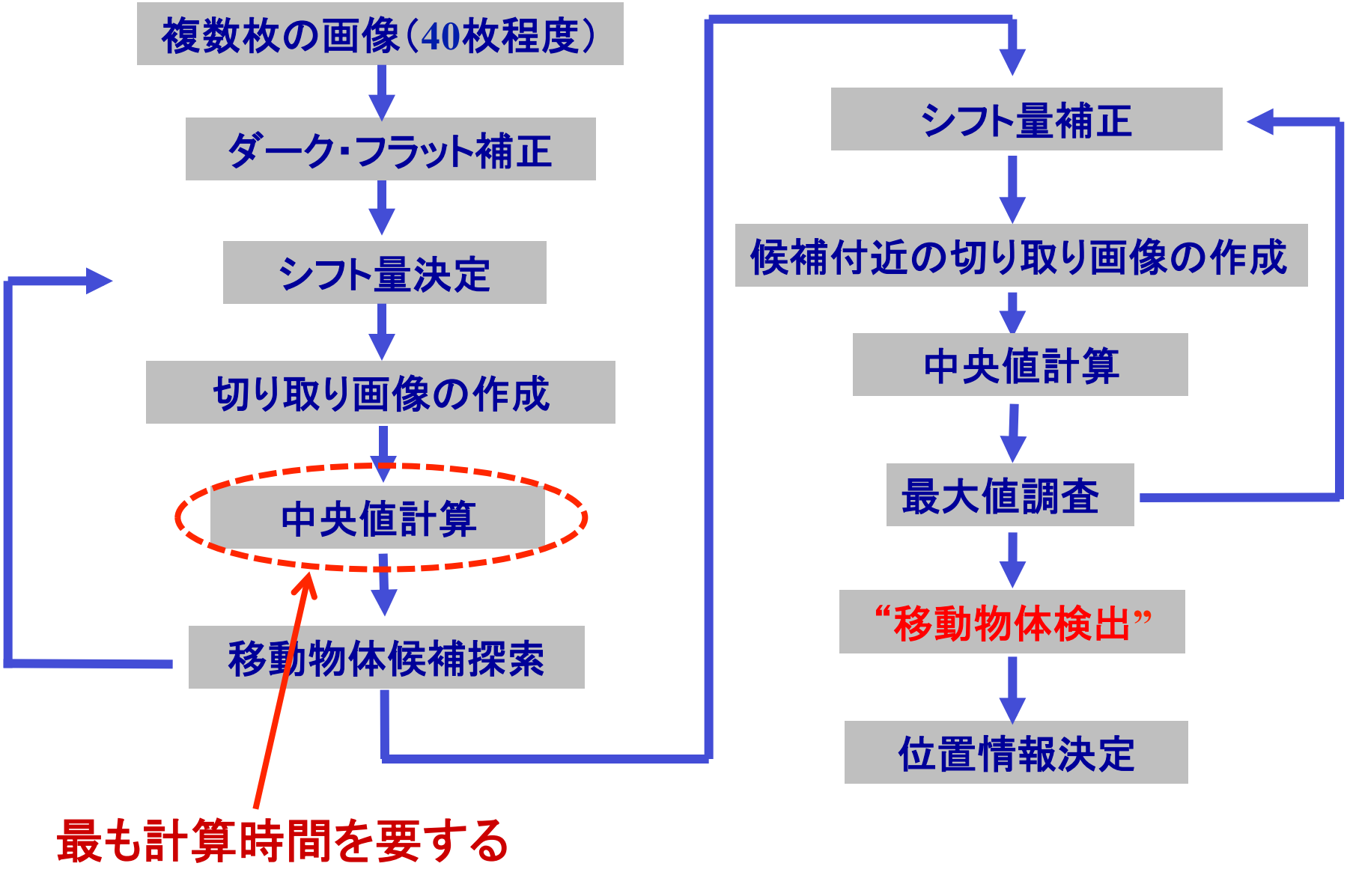
デブリが検出され、デブリの動きもわかる　**検出**

1024×1024画素のCCD画像32枚について画像内を256×256画素の範囲内で移動する物体を検出しようとした場合65536通りの解析をする必要がある。

⬇

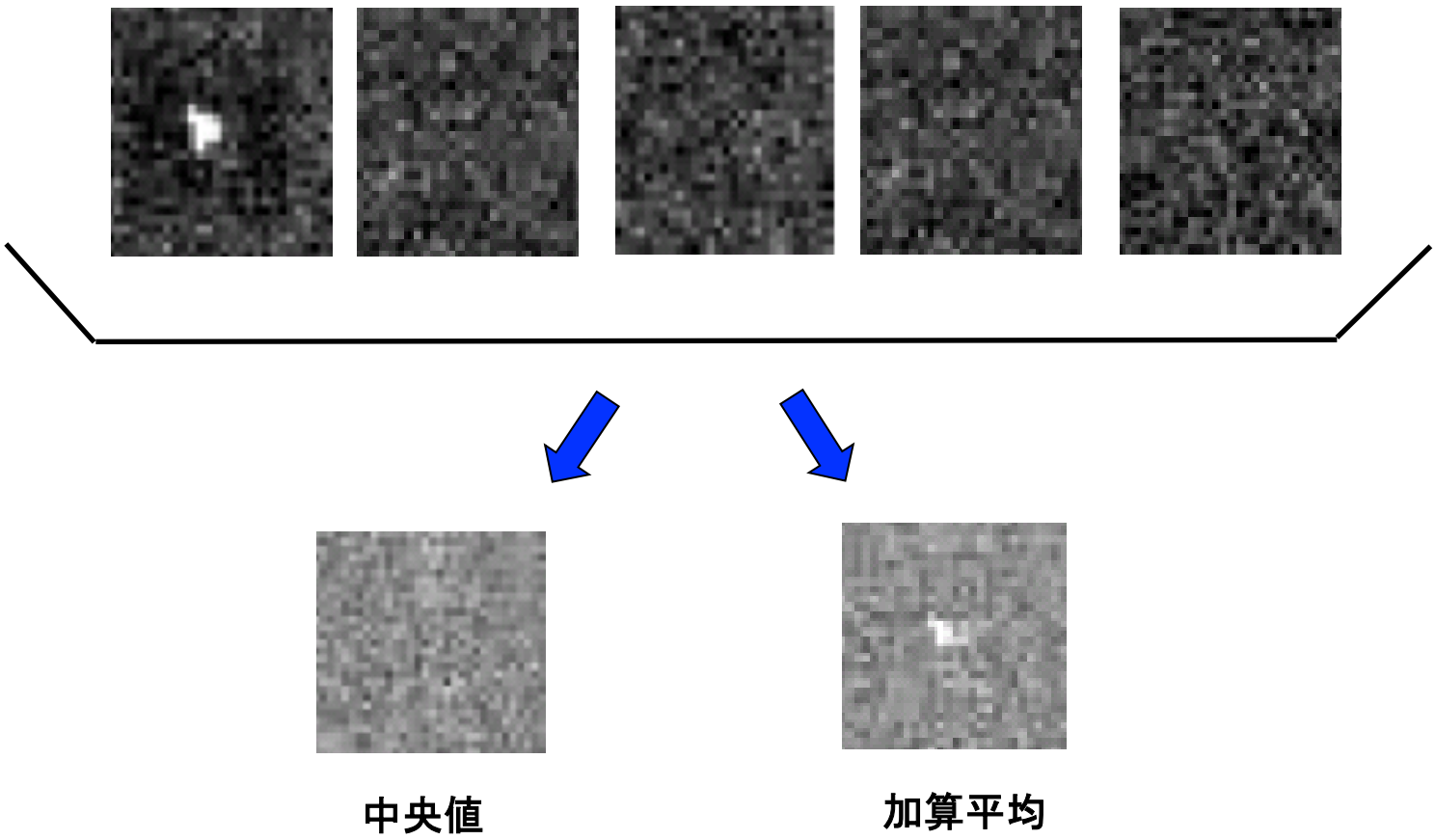
市販のPC1台で要する解析時間は**280時間！！**

解析手順


複数枚の画像（40枚程度）
ダーク・フラット補正
シフト量決定
切り取り画像の作成
中央値計算
移動物体候補探索
シフト量補正
候補付近の切り取り画像の作成
中央値計算
最大値調査
“移動物体検出”
位置情報決定
最も計算時間を要する

重ね合わせ法の弱点

中央値と加算平均の違い

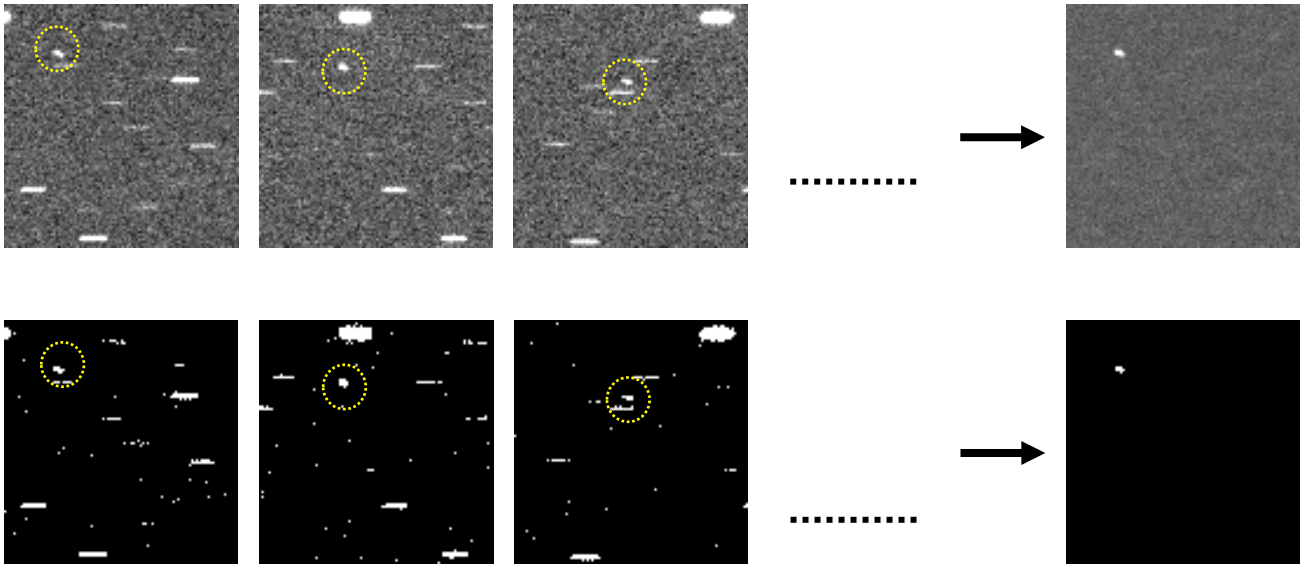


新アルゴリズムの開発

中央値の計算は加算や平均と比較すると計算が複雑で時間を要する。

中央値の利点（高いノイズの影響を除去できる）をいかしつつ加算などの単純な計算と代用できないか。

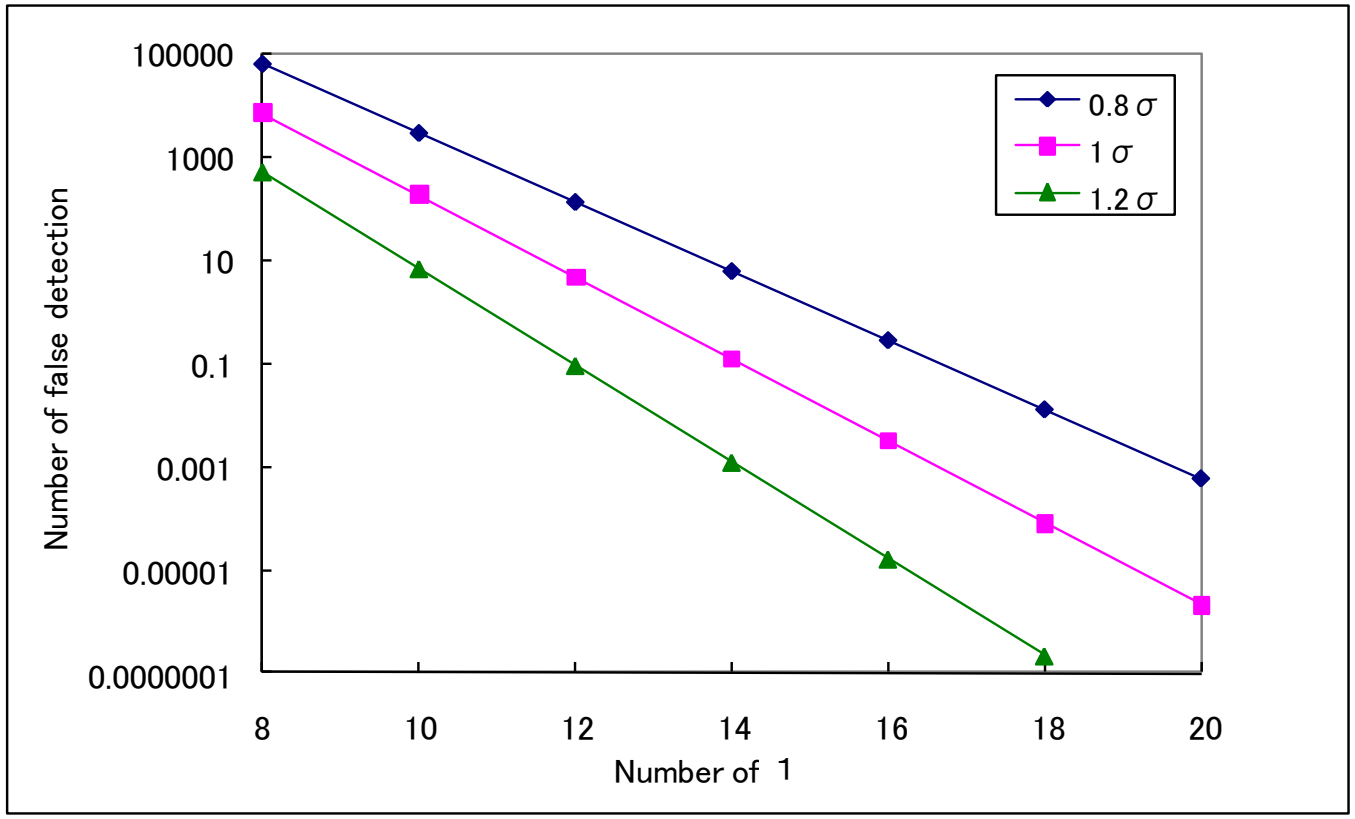
画像を2値化することにより2つの特徴を網羅できる。



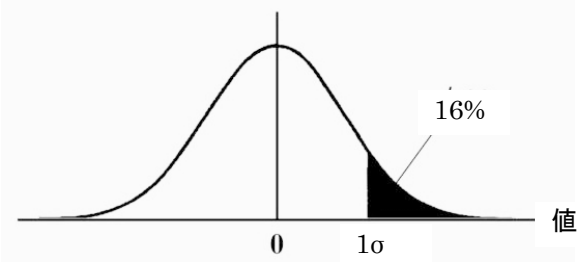
新旧アルゴリズムの比較

解析時間を**60分の1**に短縮できる。

新アルゴリズムの開発

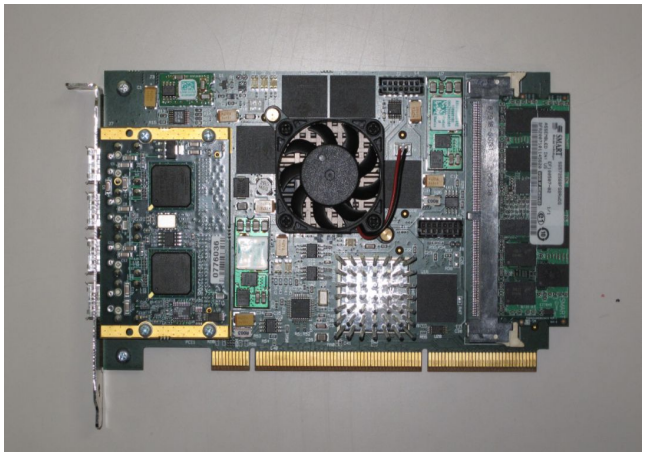


各閾値、1の数に対する誤検出の数



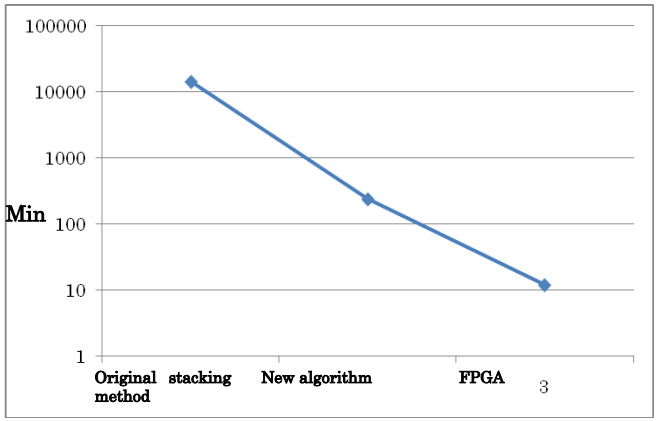
新アルゴリズムの開発

新アルゴリズムをFPGAに実装しさらなる高速化を図る。



Nallatech社製FPGAボード H101-PCIXM

iDAQs社製FPGAボードシステム

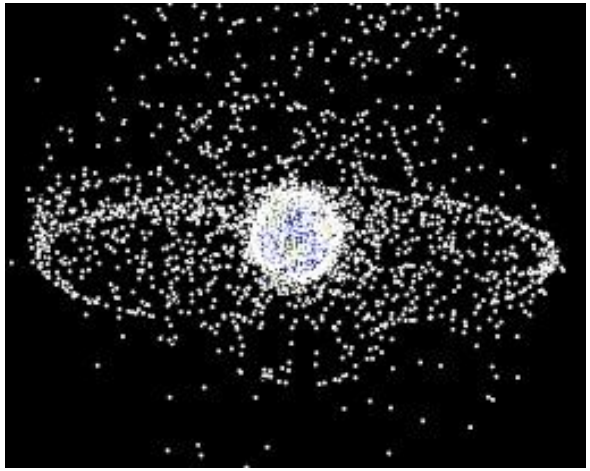


解析時間の変化

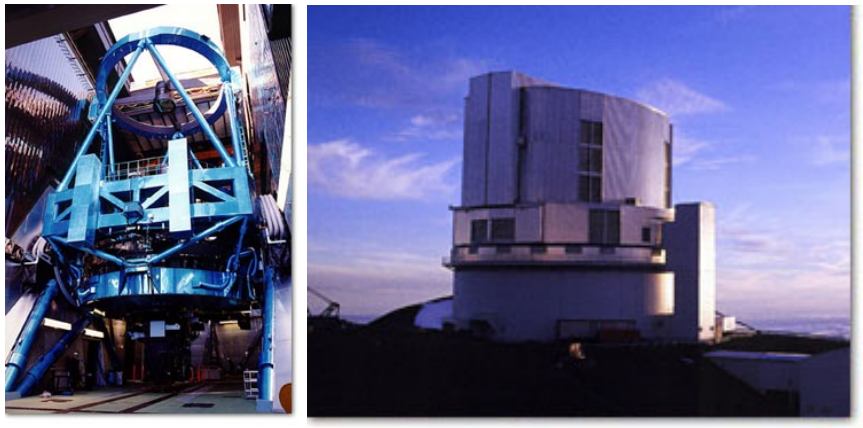
解析時間をさらに**20分の1**にできる。
合計で**1200分の1**に短縮。

280時間 → 14分

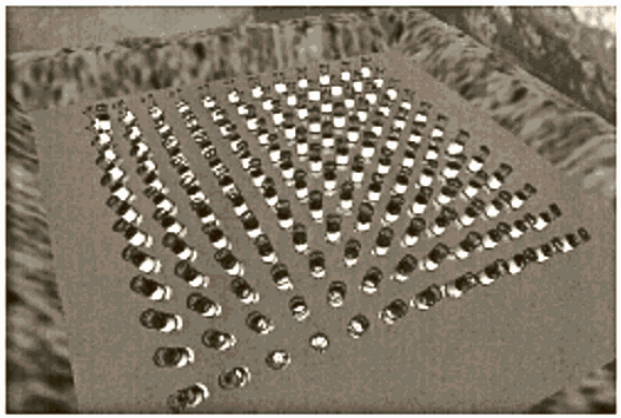
重ね合わせ法の利用



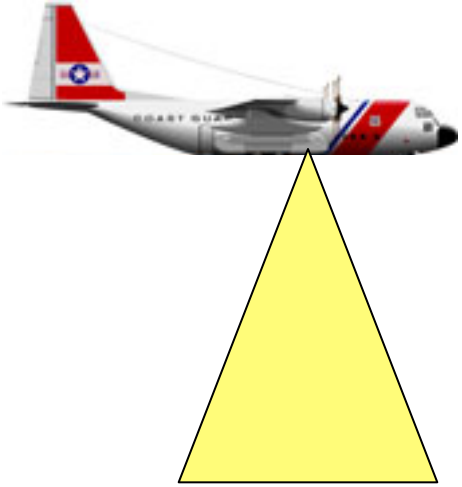
宇宙デブリ問題の解決



太陽系天文学への貢献



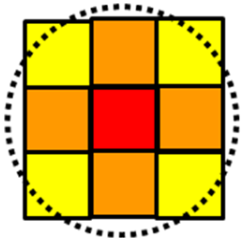
地球接近天体の発見



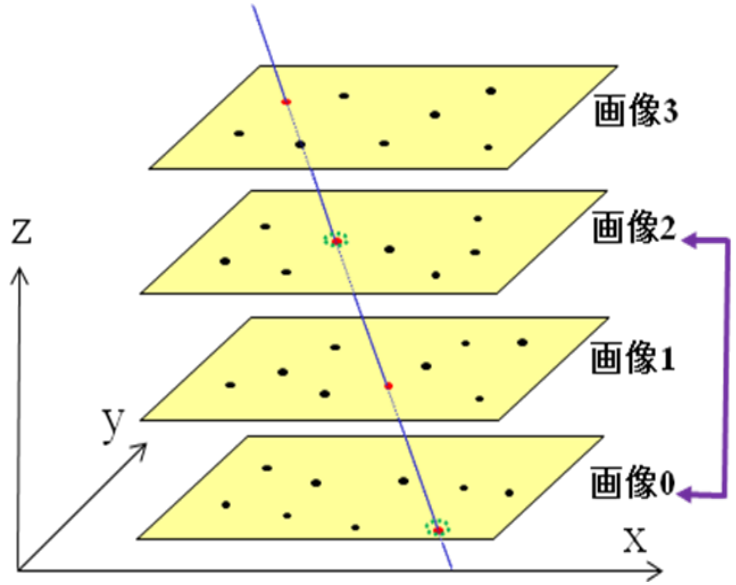
航空機を用いた遭難者広域探索

線分検出技術

重ね合わせ法を補完する検出技術として線分検出技術を開発。



形状パラメータ＝
9画素値合計／中央画素値



線分検出技術の概念図

多数枚の画像を取得

↓

画像中の星像候補閾値、形状パラメータを利用して検出

↓

移動量をもった直線上にのるものを検出

利点：

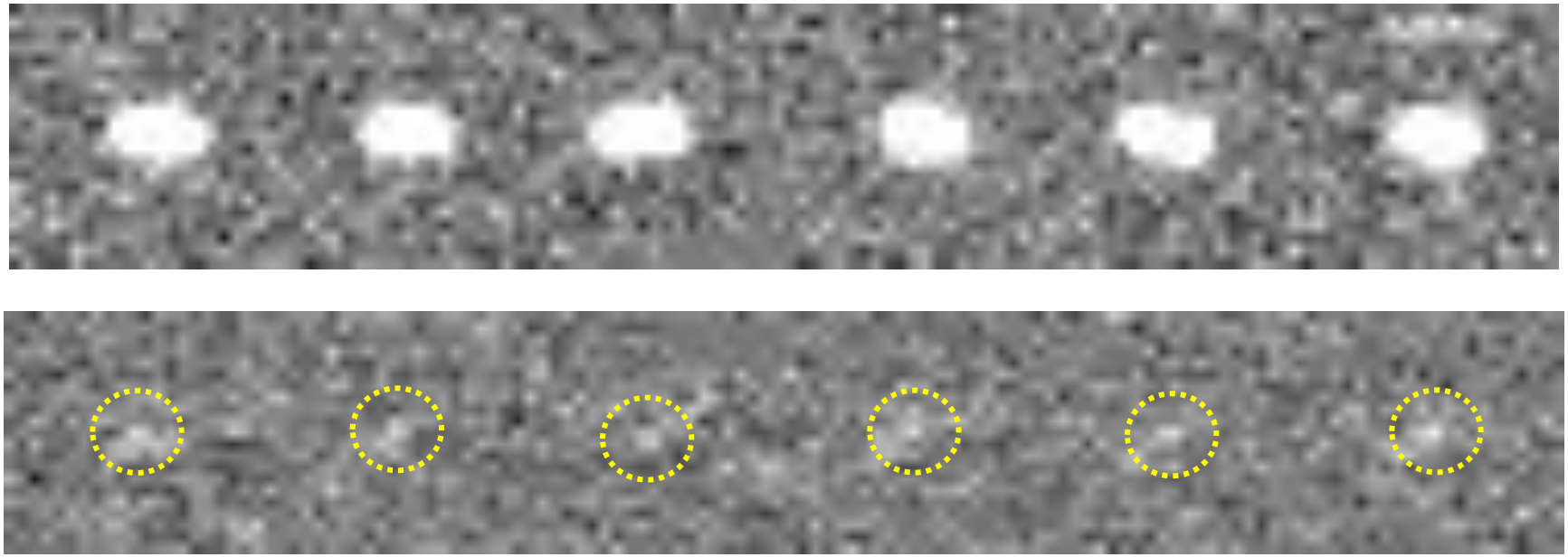
あらゆる移動方向を想定しなくてよい。

計算機の力に応じて星像候補数を調節できる。

↓

実際の観測に即適用できる。

線分検出技術（検出例）

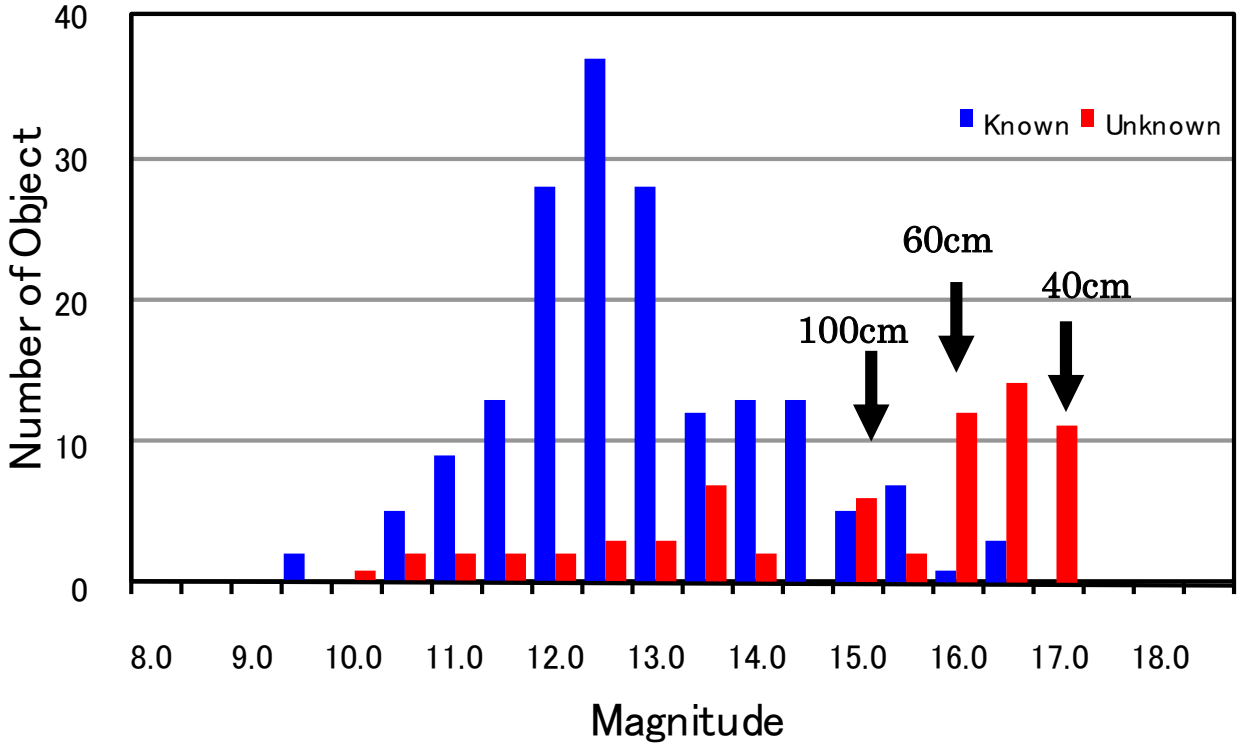


線分検出技術を利用した検出例。6枚の連続撮影画像において候補付近の画像を並べた様子。12等のカタログ物体（上）及び17等の未知デブリ。

線分検出技術(検出結果例)

date	area	a(km)	i	RAAN	mag	known	ID	SSC	name	t0(sec)	x0	y0	RA0	Dec0
2010/11/01	deb002	42469.67	10.201	54.128	12.64	1	90030A	20558	ASIASAT_1	56914.027	503.45	359.05	49.49400	-6.48361
2010/11/01	deb005	53642.07	6.535	69.962	16.58	0	N/A	N/A	N/A	58381.038	248.00	932.17	48.94929	-6.83288
2010/11/01	deb009	42384.54	1.731	76.330	10.94	1	00069A	26599	BEIDOU_1	60287.823	1360.57	524.88	47.12932	-6.55621
2010/11/01	deb010	42095.35	5.951	63.492	12.08	1	01037D	26895	SL-12_R/B(2)	60753.039	1661.29	1747.46	46.65057	-7.30381
2010/11/01	deb010	42735.10	7.278	63.225	13.39	1	92010B	21894	INSAT_2R	60834.279	1536.70	2021.56	47.07031	-7.47211
2010/11/01	deb011	41989.26	9.668	54.842	10.97	0	N/A	N/A	N/A	61234.030	504.85	603.00	47.11150	-6.57003
2010/11/01	deb011	47994.65	9.427	60.749	15.70	0	N/A	N/A	N/A	61302.378	45.85	970.93	47.68599	-6.79313
2010/11/01	deb014	42194.30	4.777	67.904	11.58	1	97071B	25050	INDOSTAR_1	62674.004	1744.18	1848.79	45.63431	-7.30843
2010/11/01	deb014	42669.77	11.020	54.292	14.41	1	90077A	20771	BS-3A_(YURI	62674.004	1671.67	674.08	45.66397	-6.57336
2010/11/01	deb014	42931.22	6.361	64.779	12.66	1	95067A	23730	TELECOM_2C	62674.004	1456.69	1950.99	45.81478	-7.36903
2010/11/01	deb014	42353.50	9.940	54.696	14.35	1	88018A	18951	SPACENET_3R	62701.067	1915.78	705.47	45.62561	-6.59573
2010/11/01	deb015	41960.86	9.242	56.817	12.60	1	00013D	26101	SL-12_R/B(2)	63166.564	593.81	1109.55	46.22900	-6.81460
2010/11/01	deb016	42180.33	1.863	76.423	11.70	0	N/A	N/A	N/A	63633.195	1795.90	685.24	45.14504	-6.55090
2010/11/01	deb017	42333.04	7.374	62.095	11.87	1	97078A	25086	GALAXY_8	64113.030	1402.96	1942.86	45.19368	-7.30516
2010/11/01	deb017	42113.94	10.070	56.798	12.65	1	95054D	23683	SL-12_R/B(2)	64113.030	961.07	1313.96	45.46311	-6.91129
2010/11/01	deb019	42188.00	2.263	74.026	12.07	1	00003A	26058	CHINASAT_22	65073.019	1299.38	845.50	44.84048	-6.58545
2010/11/01	deb020	42710.91	4.674	69.123	13.65	1	91015A	21139	ASTRA_1B	65553.857	316.56	1757.31	45.28057	-7.11596
2010/11/01	deb022	42664.76	8.797	58.276	12.43	1	88109B	19688	ASTRA_1A	66514.020	28.21	1205.26	45.10265	-6.73129
2010/11/01	deb022	42310.01	7.361	62.210	12.84	1	90091B	20873	GALAXY_6	66514.020	1011.21	1905.23	44.49999	-7.17384
2010/11/01	deb023	43671.09	6.675	60.407	12.60	0	N/A	N/A	N/A	66992.933	1144.69	1041.68	44.22676	-6.61809
2010/11/01	deb024	42570.73	6.512	64.400	13.52	1	95025A	23581	GOES_9	67472.933	849.66	1937.04	44.27779	-7.14764
2010/11/01	deb025	42158.11	0.922	87.826	13.62	1	06053A	29640	FENGYUN_2D	67953.960	578.55	237.40	44.28370	-6.06903
2010/11/01	deb025	42485.91	1.386	74.866	17.19	1	06053D	33458	FENGYUN_2D	67967.486	1410.89	178.42	43.82268	-6.04271
2010/11/01	deb026	42463.39	1.499	75.225	13.04	1	93078B	22931	THAICOM_1	68432.921	1010.63	285.86	43.86895	-6.08208

線分検出法による観測結果



入笠山光学観測施設の35cm望遠鏡で取得された画像、15日分を線分検出法で解析した結果

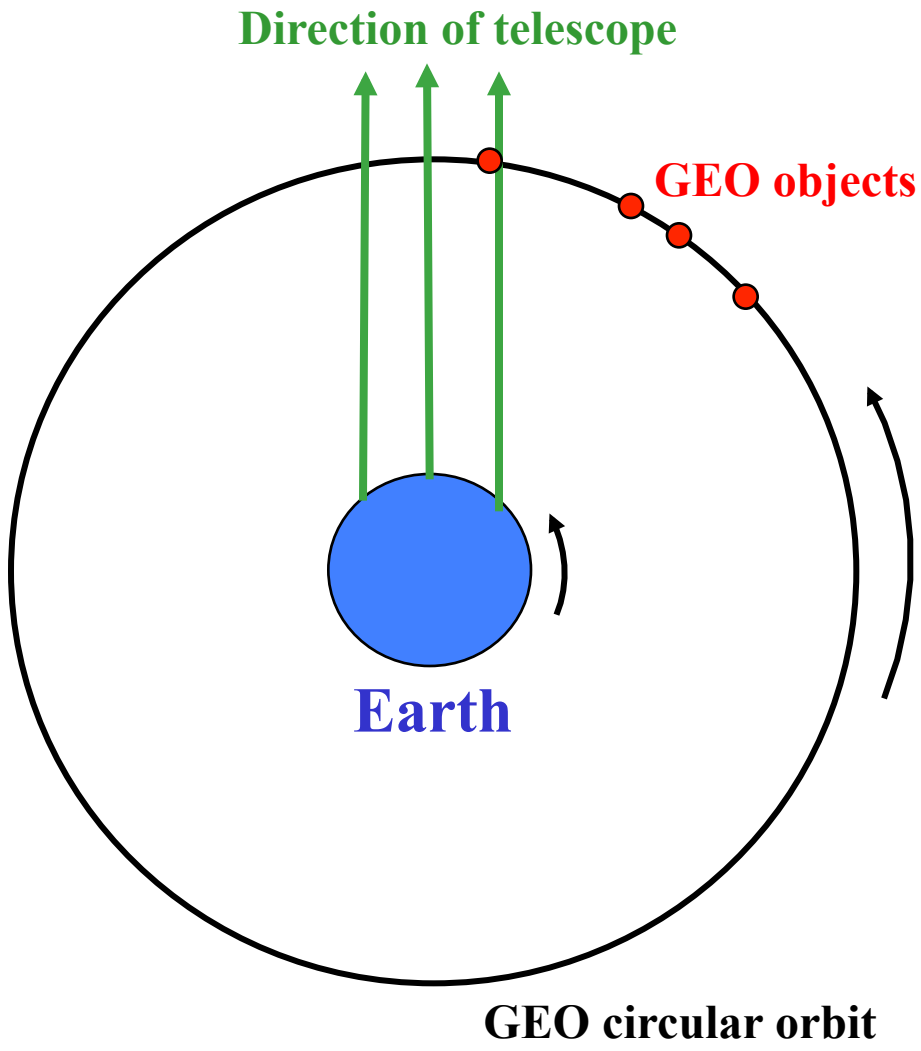
軌道決定技術

離心率をもった静止デブリの検出及び軌道決定は静止軌道付近のデブリ問題を解決する上で重要である。

しかし、光学望遠鏡は視野が狭いため通常の観測手法では実現が困難である。

そこで、１台の光学望遠鏡で多数の離心率をもった静止デブリを効率的に検出し精度よく軌道決定する手法を紹介する。

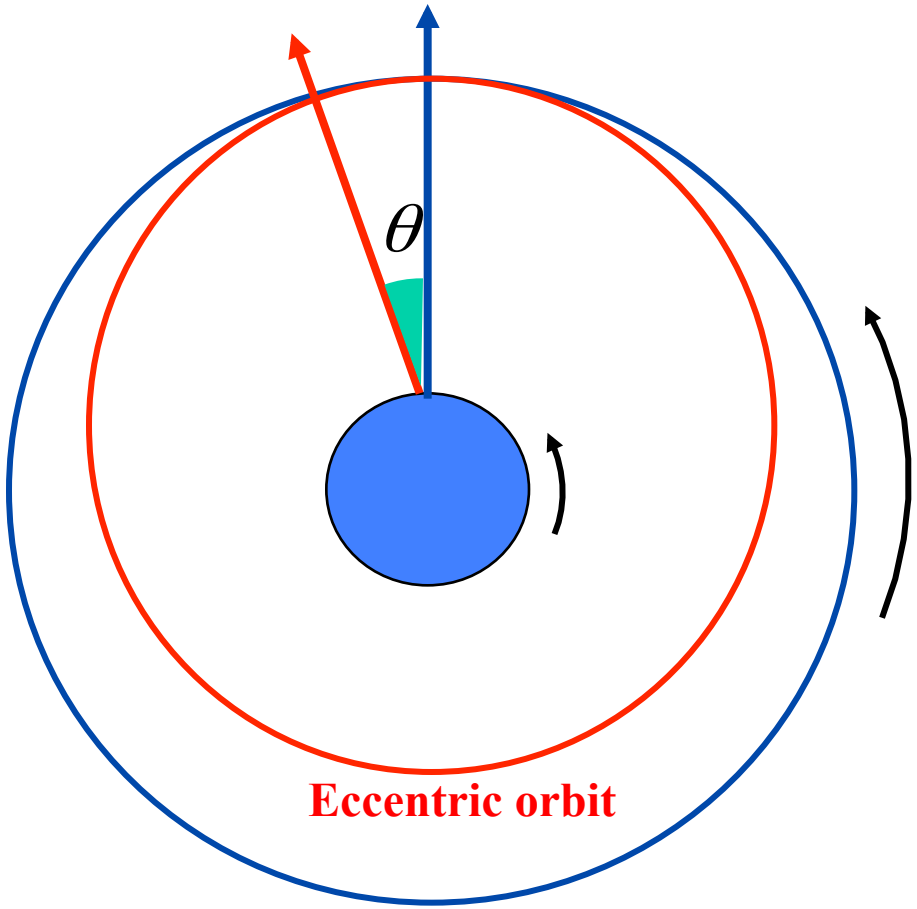
Typical observation strategy



天球上の1領域を数時間もしくは1晩中観測する。

この手法は多くの静止デブリが検出できるため、静止デブリについて統計的な研究をする上で有効である。

Weak point of this strategy



静止デブリの軌道決定をするために数時間後もしくは翌晩に再検出する必要があるが、その際、円軌道を仮定する。しかし静止デブリがおおきな離心率をもつ場合、望遠鏡の視野は狭いため再検出は不可能である。

長い観測アークを稼ぐために1つの静止デブリを長時間観測し続けなくてはならないため、効率が悪い。

	4h		24h	
e	θ	(°)	θ	(°)
0.1	6.9		55.5	
0.05	3.4		27.4	
0.01	0.7		5.4	

Typical field of view is only a 1.0×1.0-degree.

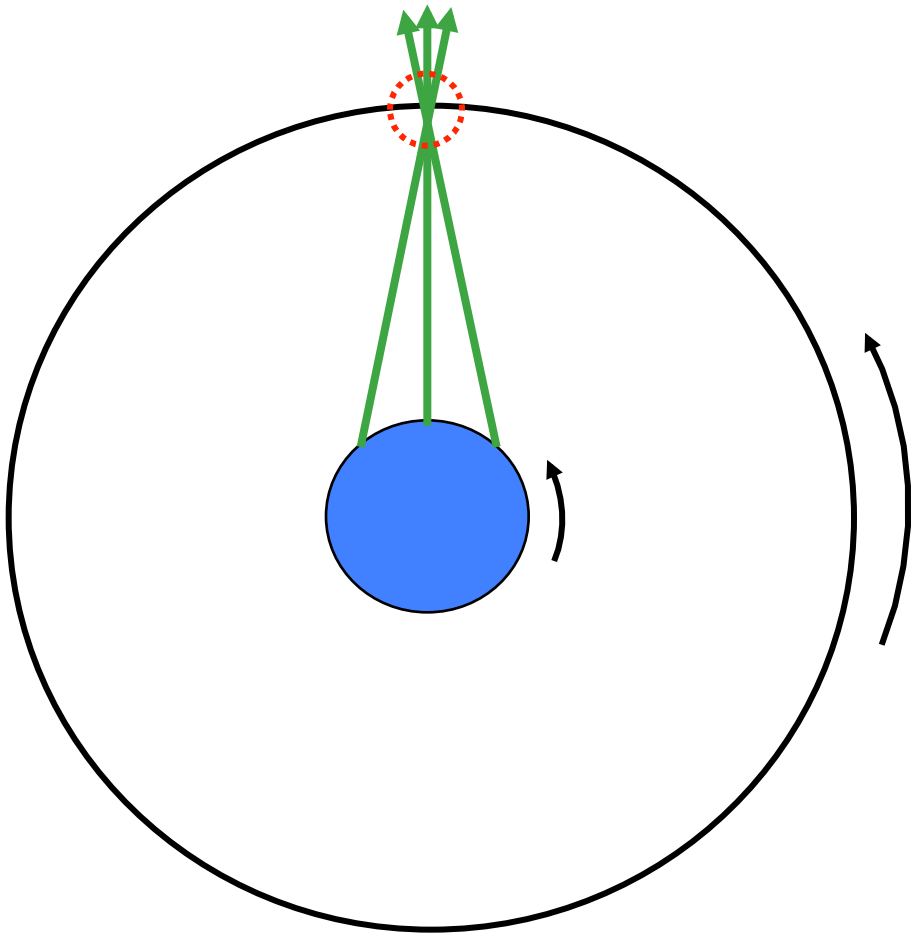
New observation strategy

静止軌道高度付近の慣性空間中のある1領域を2晩連続で観測する。

2晩の観測から求まった最小離心率軌道をもとに3晩目の追跡観測を実施し精度よい軌道を求める。

New observation strategy

First and second night

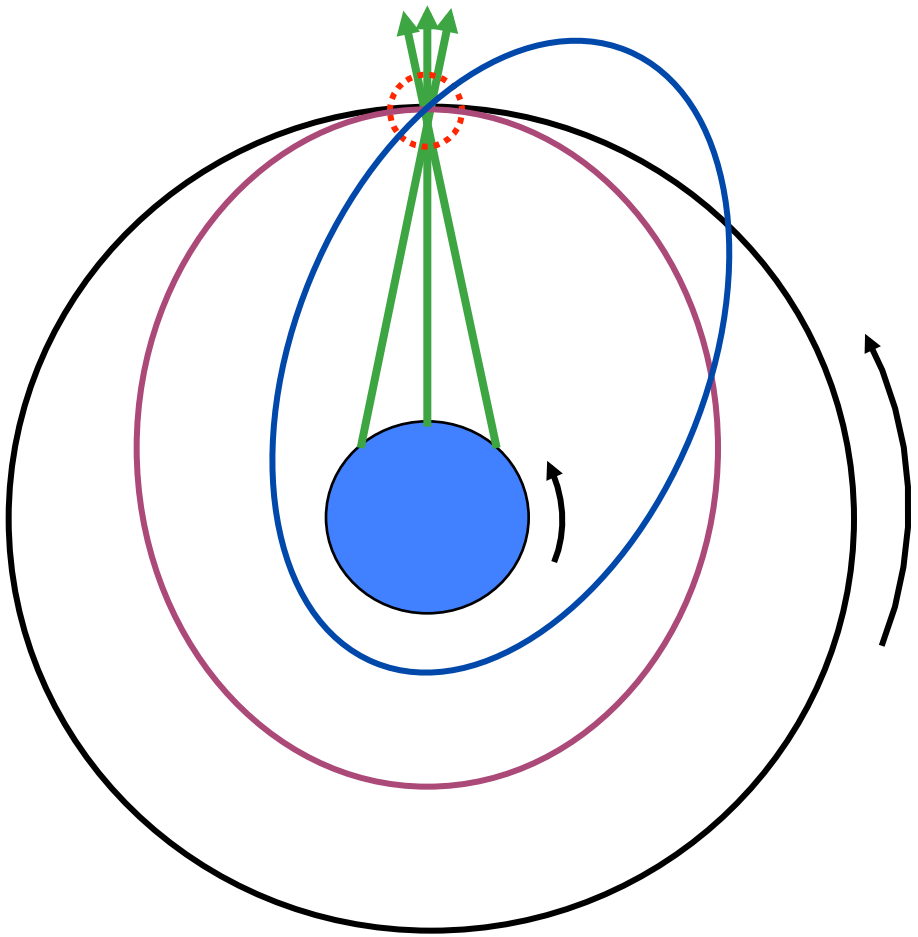


慣性空間中の1領域を観測することは天球上の1領域を観測すること本質的に異なる。

望遠鏡は観測期間中何回も観測方向を変更する必要がある。

New observation strategy

First and second night



1晩目に検出された静止デブリは2晩目に必ず同じ慣性空間中の1領域を通過するはず。

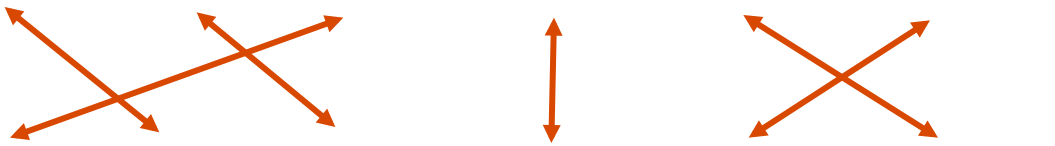
2晩目のいつその領域を通過するかは静止デブリの軌道長半径による。

How to identify same object

各晩で検出されたそれぞれの静止デブリに対し、円軌道を仮定し、その軌道半径(a')、軌道傾斜角(i)、昇向点赤経(Ω)を比較し2晩のデータからペアを同定する。

First night objects

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
a' (km)	42150	43052	41937	42236	42278	41875
i (°)	10.5	7.6	2.3	15.1	4.9	12.3
Ω(°)	90.3	16.7	45.0	120.2	62.1	58.6



Second night objects

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
a' (km)	41954	42136	43007	42245	41903	42312
i (°)	2.4	10.4	7.4	15.0	12.3	4.8
Ω(°)	44.8	89.7	17.1	122.0	59.2	63.3

Minimum eccentric orbit

ペアが同定されればその軌道周期（P）から静止デブリの真の軌道長半径( )を求めることができる。また、最小離心 e' 率( )も求めることができる。

Observational time of the first and second night

↓

Orbital period

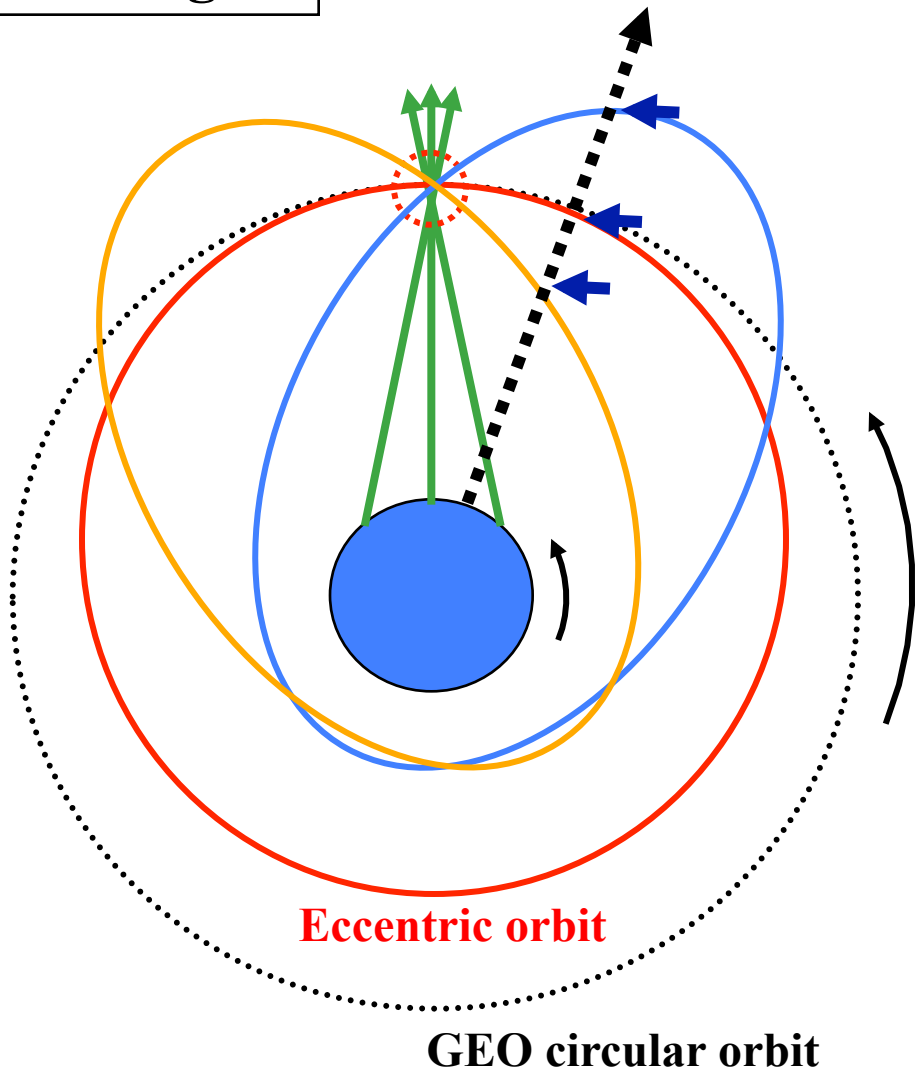
↓

True semi-major axis (a)

$$a = 42164.170 \times \left(\frac{P}{23.93447} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Third night observation

Third night



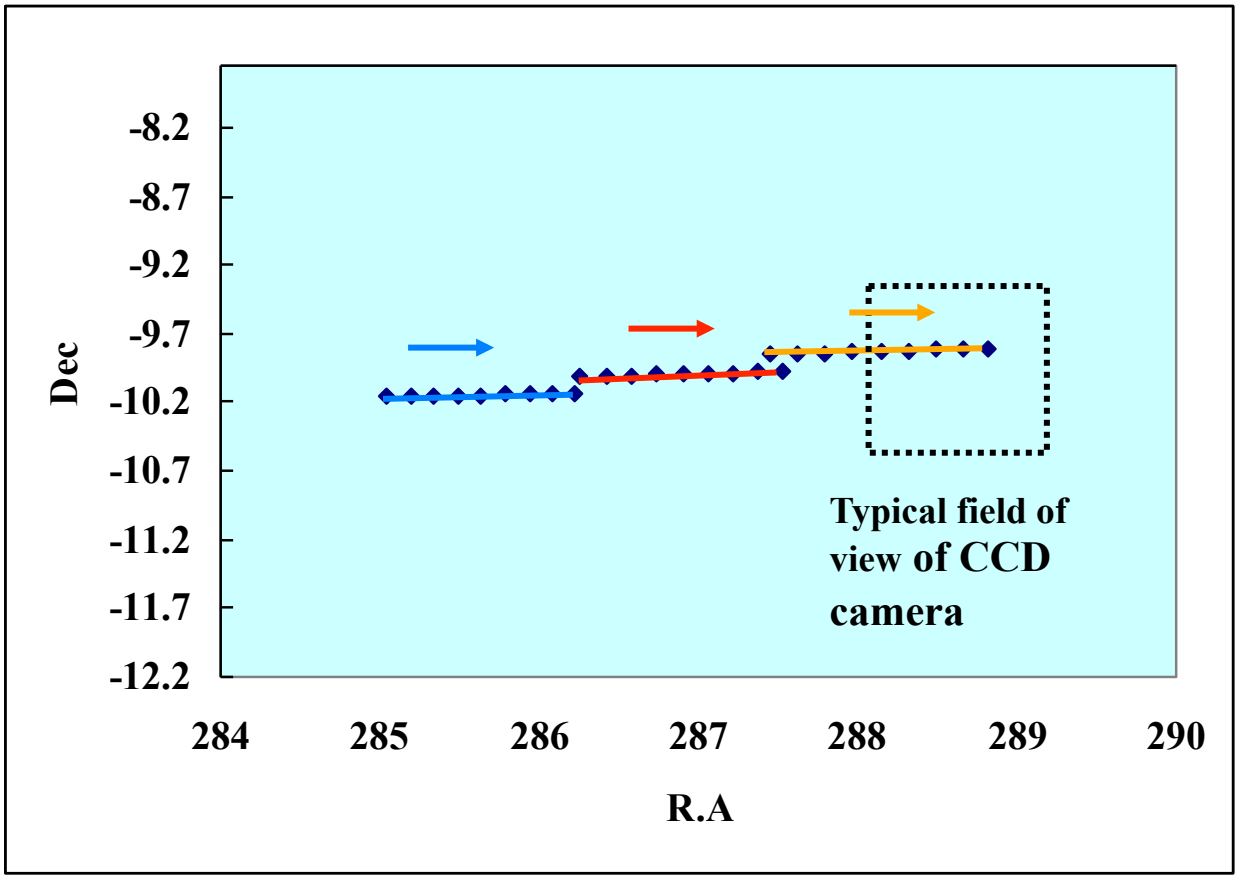
$$e' = \frac{|a' - a|}{a}$$

$$e \geq e'$$

真の離心率及び近点離角を求めるために最初の2晩から離れた領域を3晩目に観測する必要がある。

Third night observation

30 degrees from the first two nights' region.



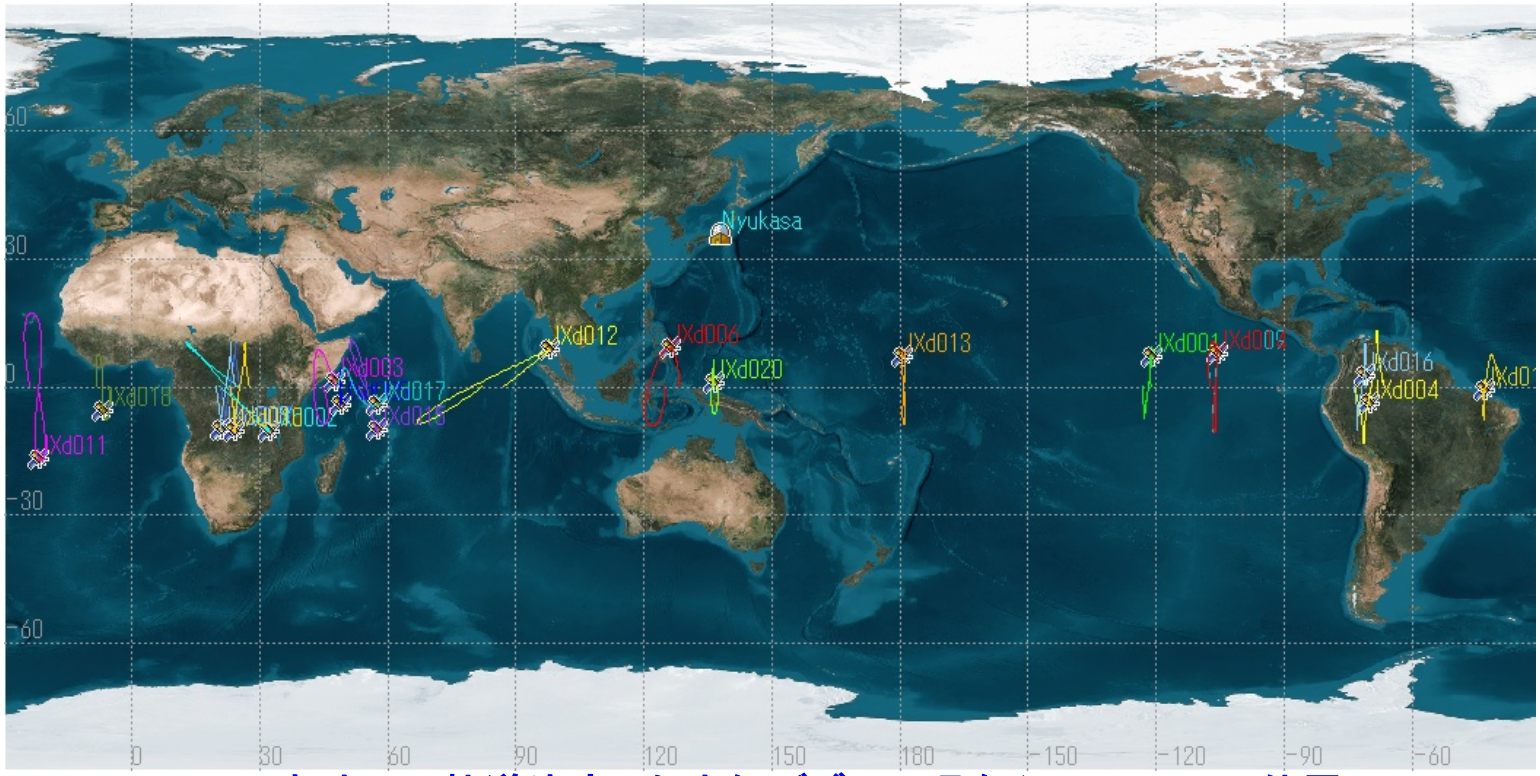
3晩目は追跡観測にあてられる。1つの静止デブリに対し20分あれば十分再検出が可能である。3晩のデータを用いることにより、精度よく軌道を決めることができる。

Results

昨年より本手法を用いた未知デブリの軌道決定を試験的に実施しており、これまでに20個の未知デブリの軌道決定に成功している。軌道決定後ただちに美星に追跡Gに連絡し美星にて追跡観測を実施してもらっている。

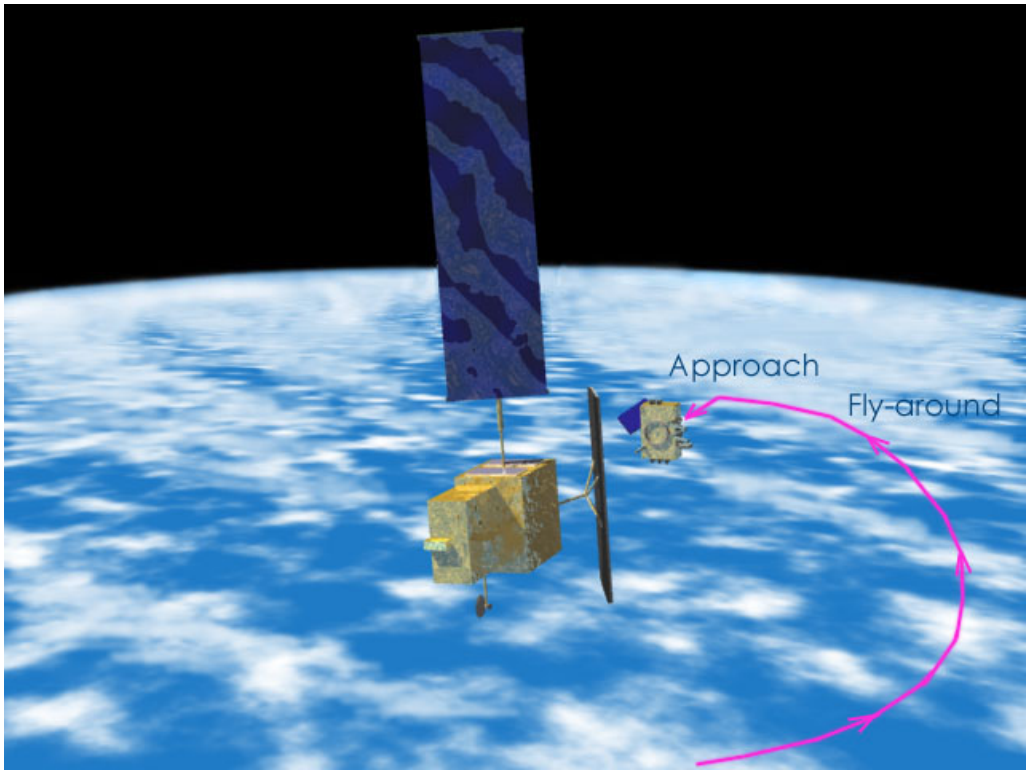
JAXAが同定した未知デブリNo.1のTLE

JAXA-d0001
1 99999U 99999A 10278.78226479 .00000000 00000-0 10000-3 0   1
2 99999 006.4394 060.4981 0028028 030.1155 313.7261 00.99698220   1



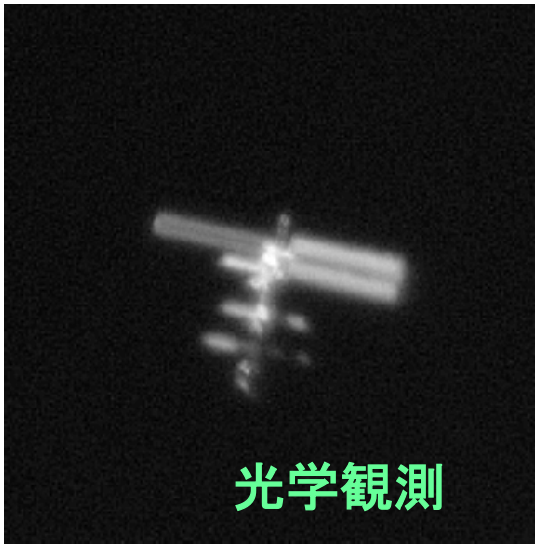
これまでに軌道決定した未知デブリの現在(2012/1/10)の位置

光度変化を利用したデブリの形状及び運動推定



デブリ除去の研究において宇宙デブリを捕獲して軌道上から除去するシステムが検討されている。このようなシステムを検討する上で実際の宇宙デブリの運動や形状を調査する必要がある。

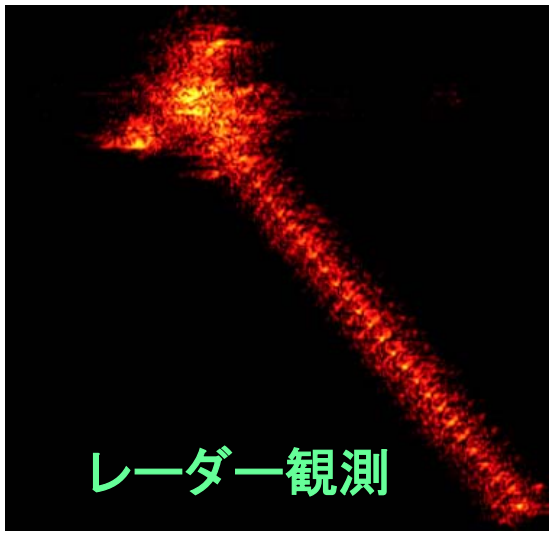
低軌道デブリの形状及び運動推定



JAXA未踏センターの35cm光学望遠鏡で観測されたISS

↓

高度2000km付近は不可能



FGANで観測されたADEOS

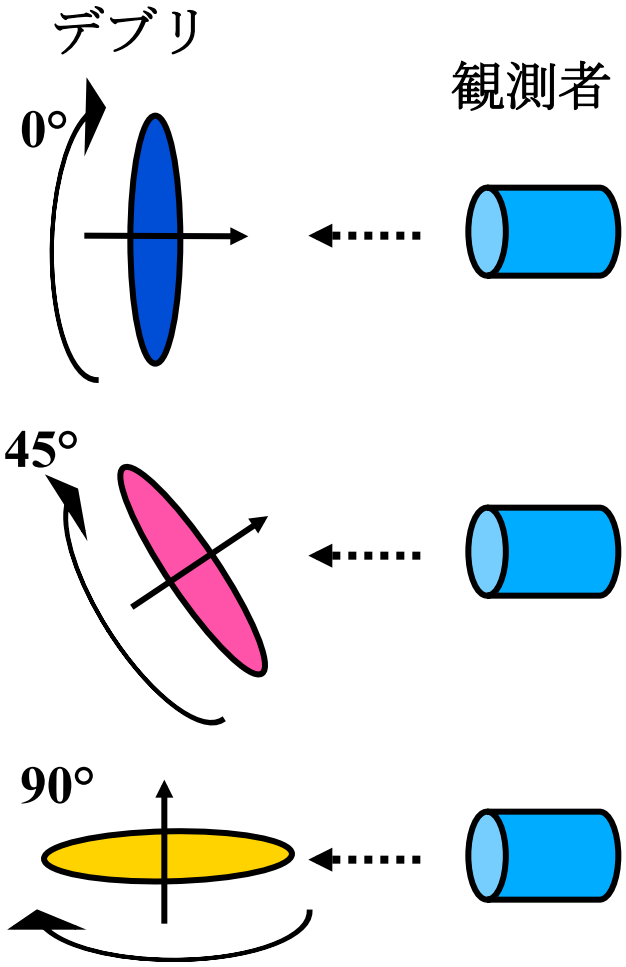
↓

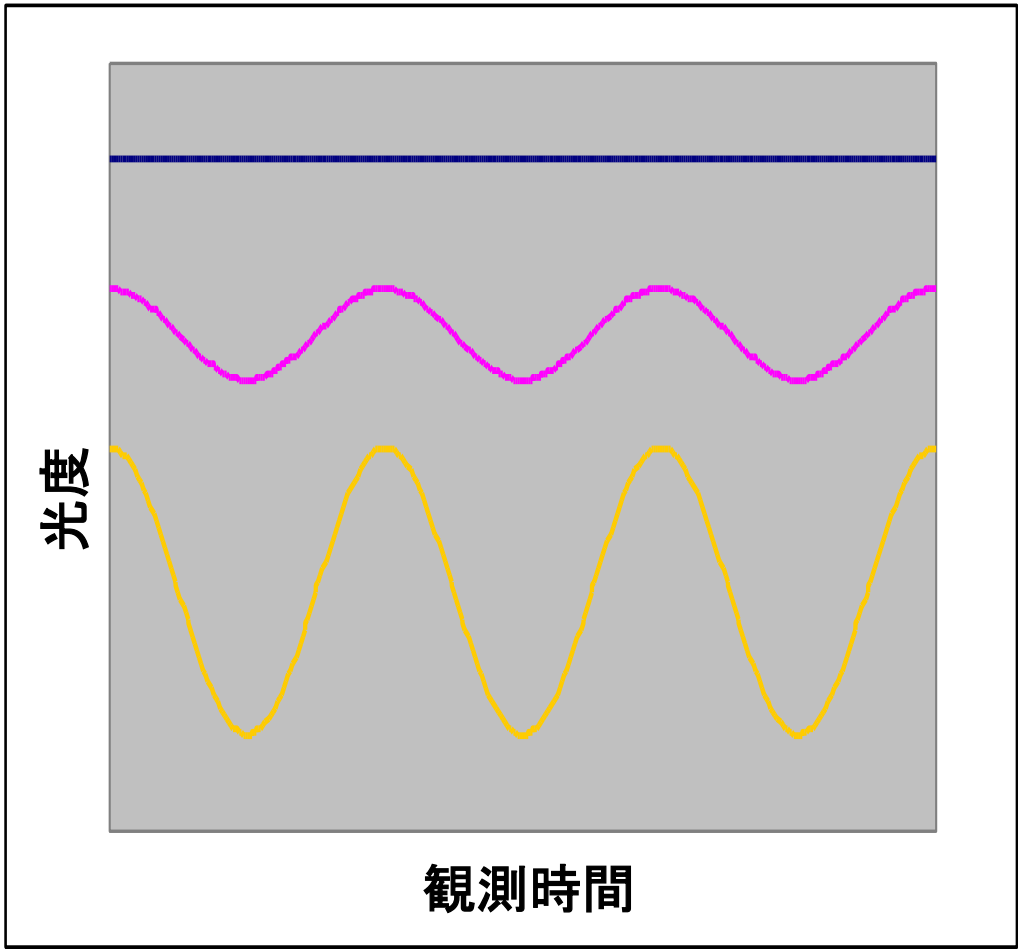
非常に高価 !!

↘ ↙

光度変化観測

デブリの光度変化観測





デブリの光度変化観測

観測地:　JAXA未踏技術研究センター(調布)

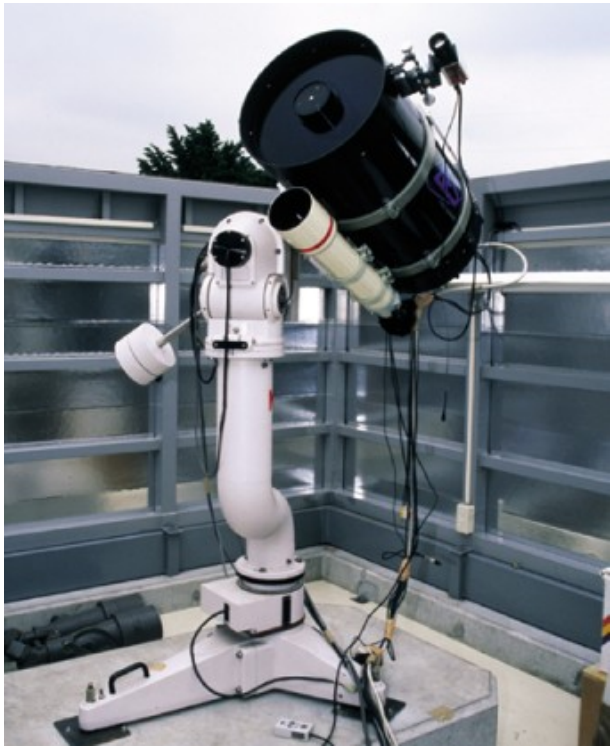
観測日時:　2004/1/6, 8, 2/16, 17, 19, 23

観測装置:　35cm光学望遠鏡＋3軸経緯儀 、
高速読み出しCCDカメラ

観測対象:　cosmos 2082 rocket body

露出時間 :　10ms-100ms

撮影枚数:　1000-1600 枚



観測装置

・3軸経緯儀

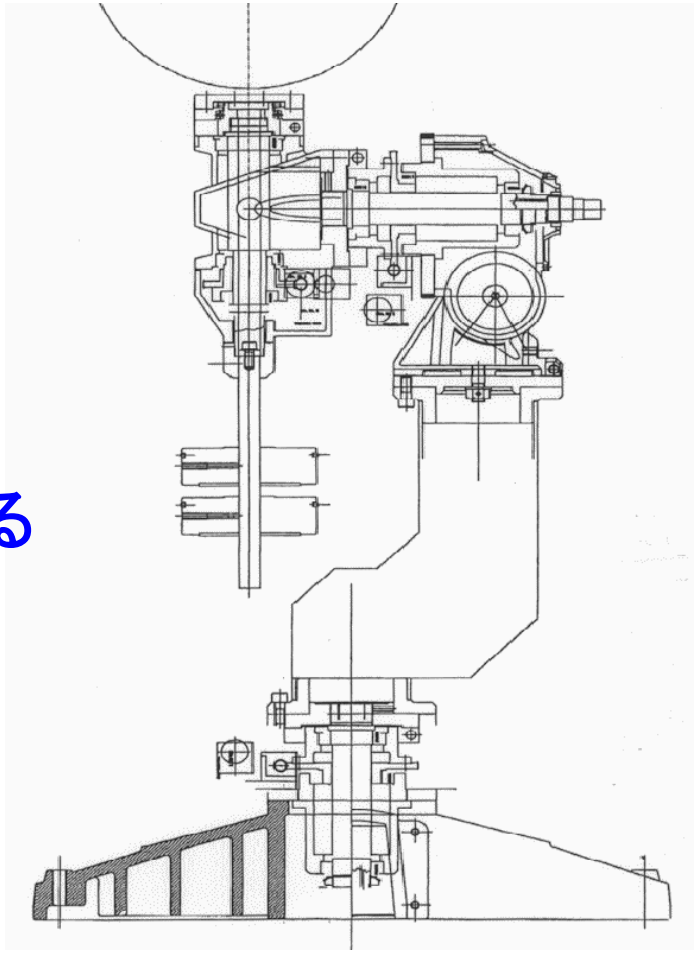
●天球上に特異点なし。

●各軸に5相ステッピングモータ。

●PC制御による自動追尾。

●複雑系を用いたアルゴリズムによる
自動修正もしくは手動修正。

●追尾速度　4.5°/sec



観測装置

・主望遠鏡 ＋ 高速読み出しCCDカメラ

●主望遠鏡: Vixen SC355L

口径 350mm, 焦点距離 3910mm

●高速読み出しCCDカメラ:

N.I.L. ICC-130M

素子: SONY ICX085AL

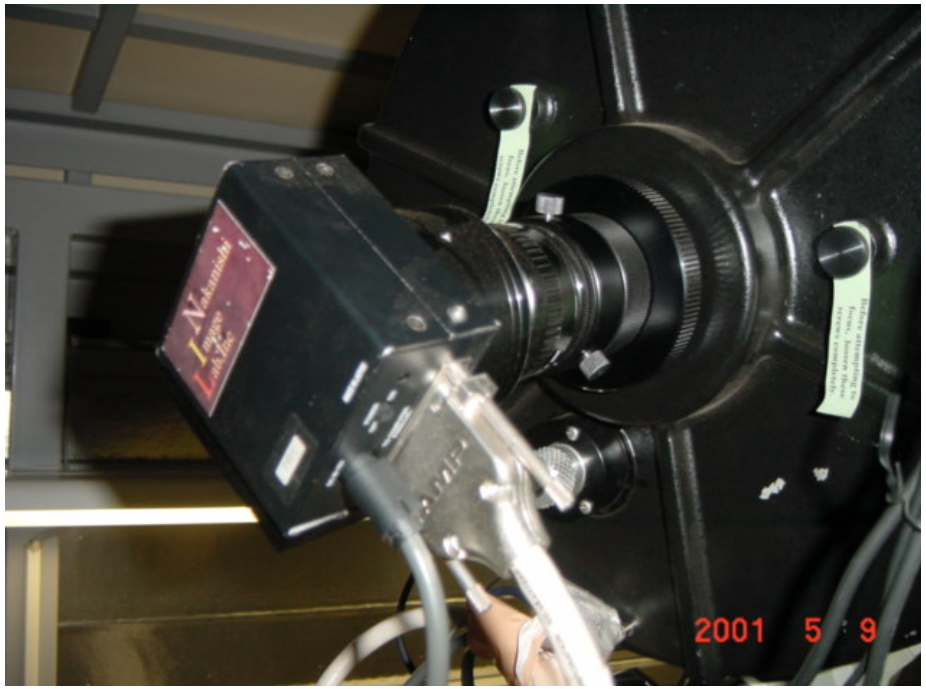
ピクセルサイズ: 6.7×6.7μm

ピクセル数: 1280×1024

A/D 変換: 12bit/18MHz

冷却: Perche

視野: 7.6′×6.1′



cosmos2082 rocket bodyの観測

SSC番号: 20625

国際番号: 1990-046B

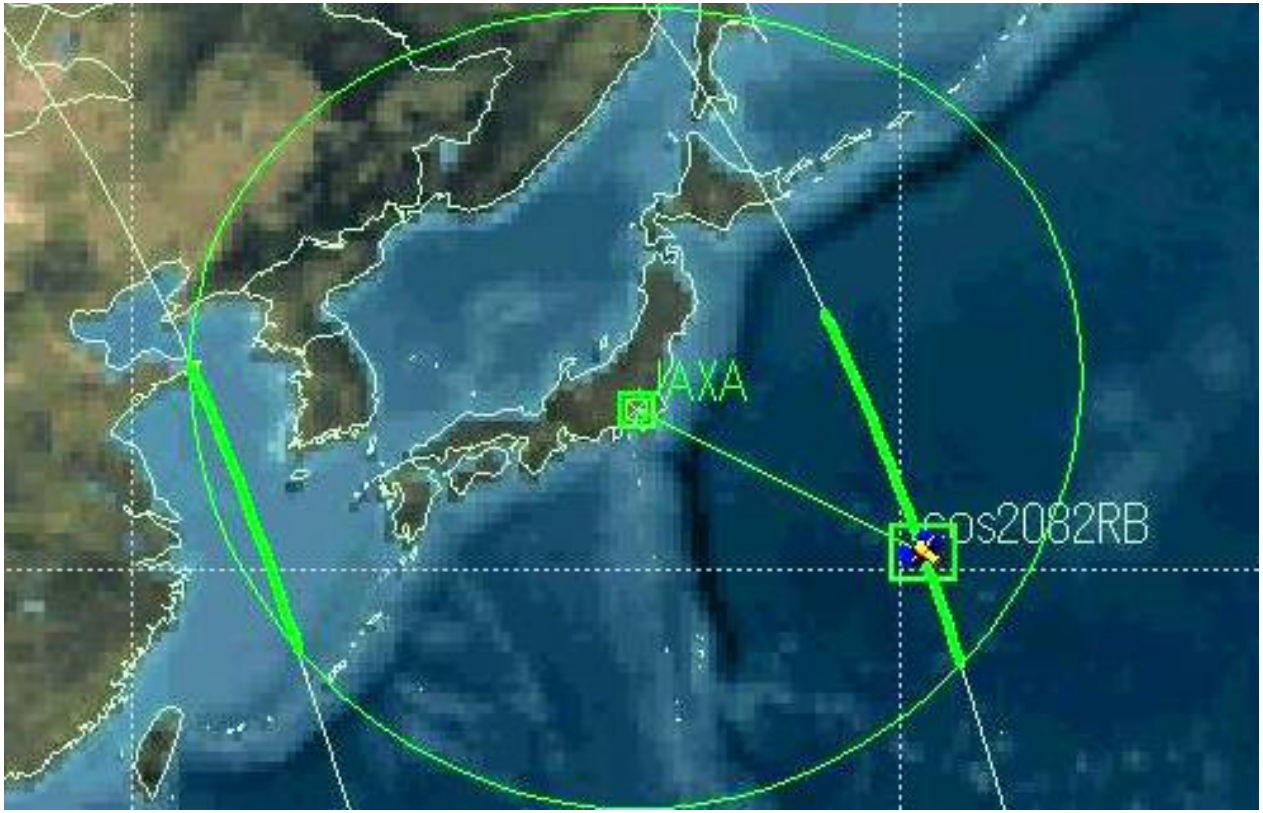
所有国: USSR

遠地点: 855km

近地点: 834km

軌道傾斜角: 71.0°

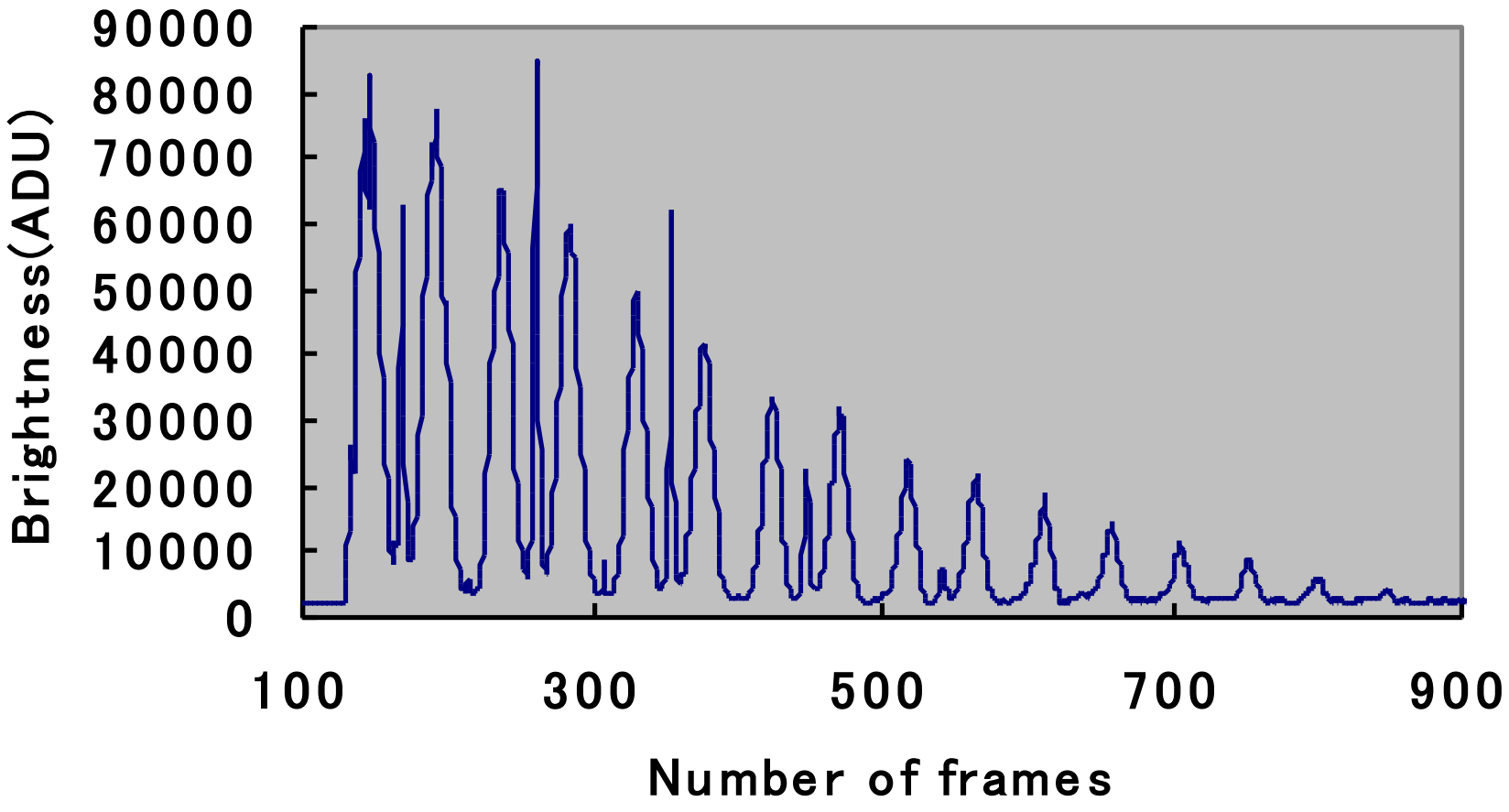
周期: 101.8 min



1月6日のcosmos 2082 rocket bodyの軌道

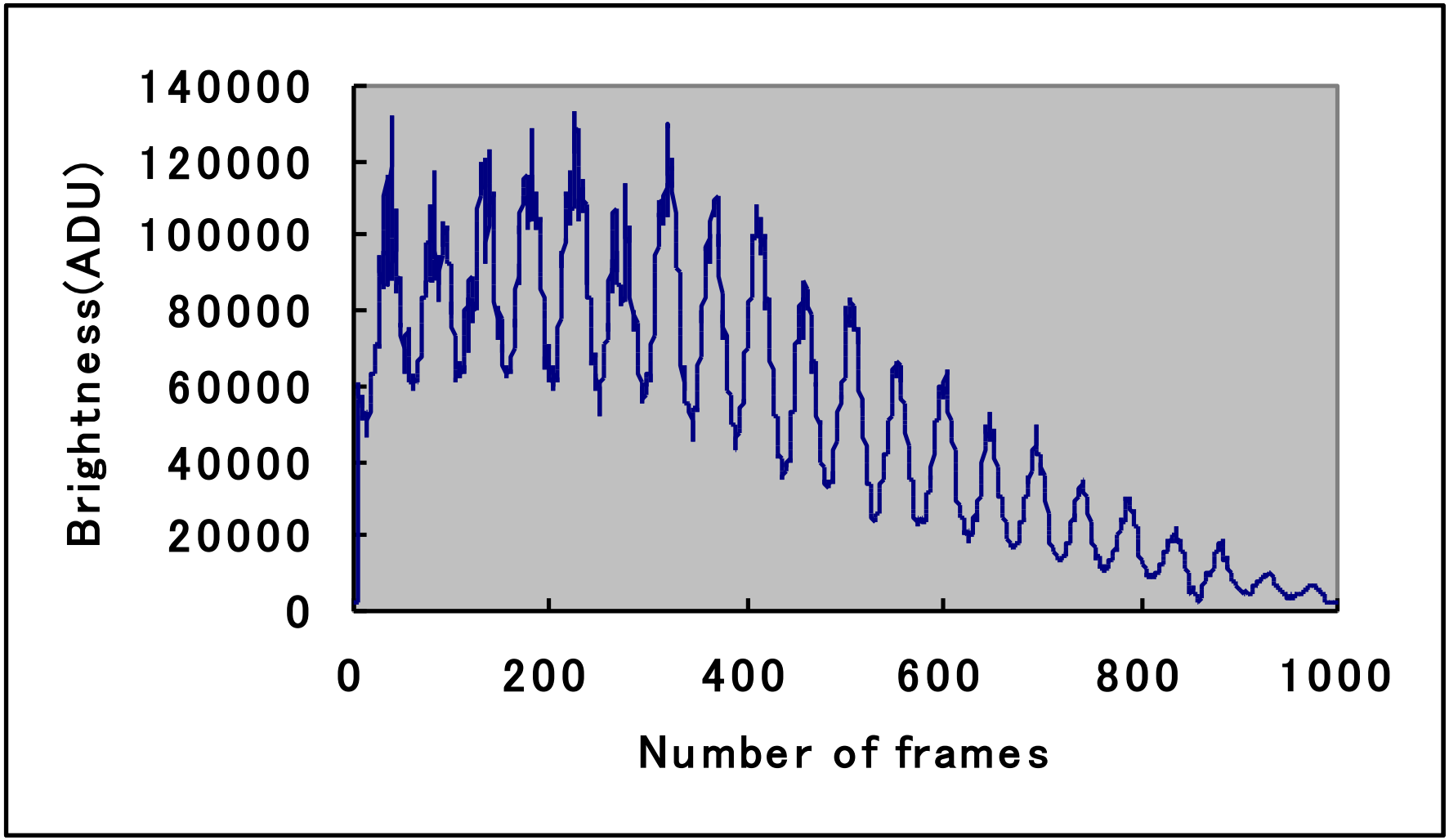
cosmos2082 rocket bodyの観測

光度変化1



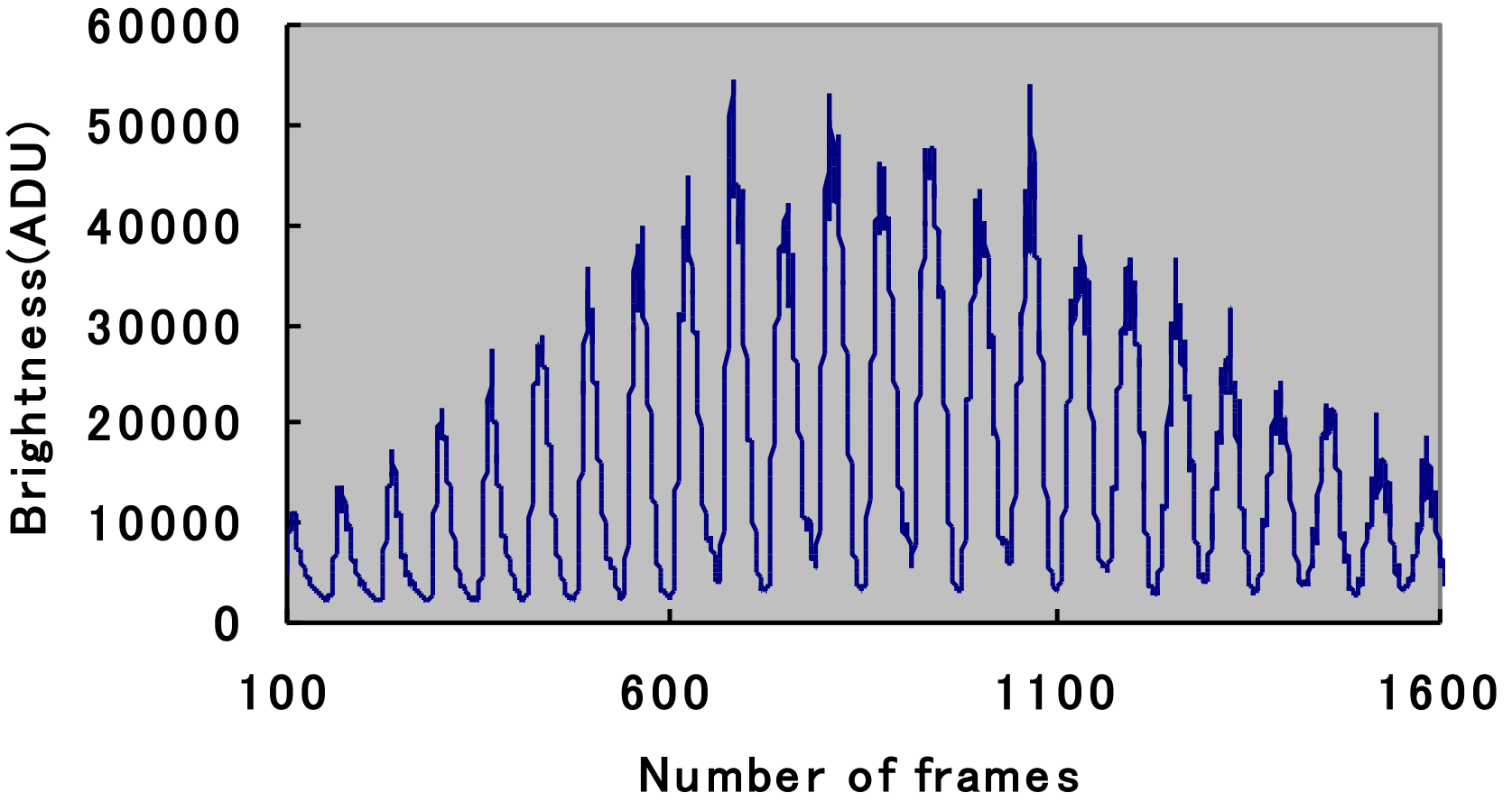
1月6日最初のパスの光度変化

光度変化2



1月6日2回目のパスの光度変化

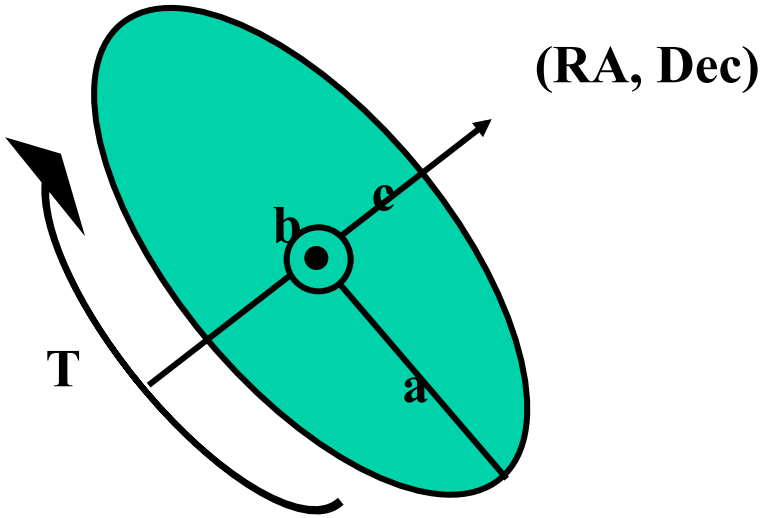
光度変化3



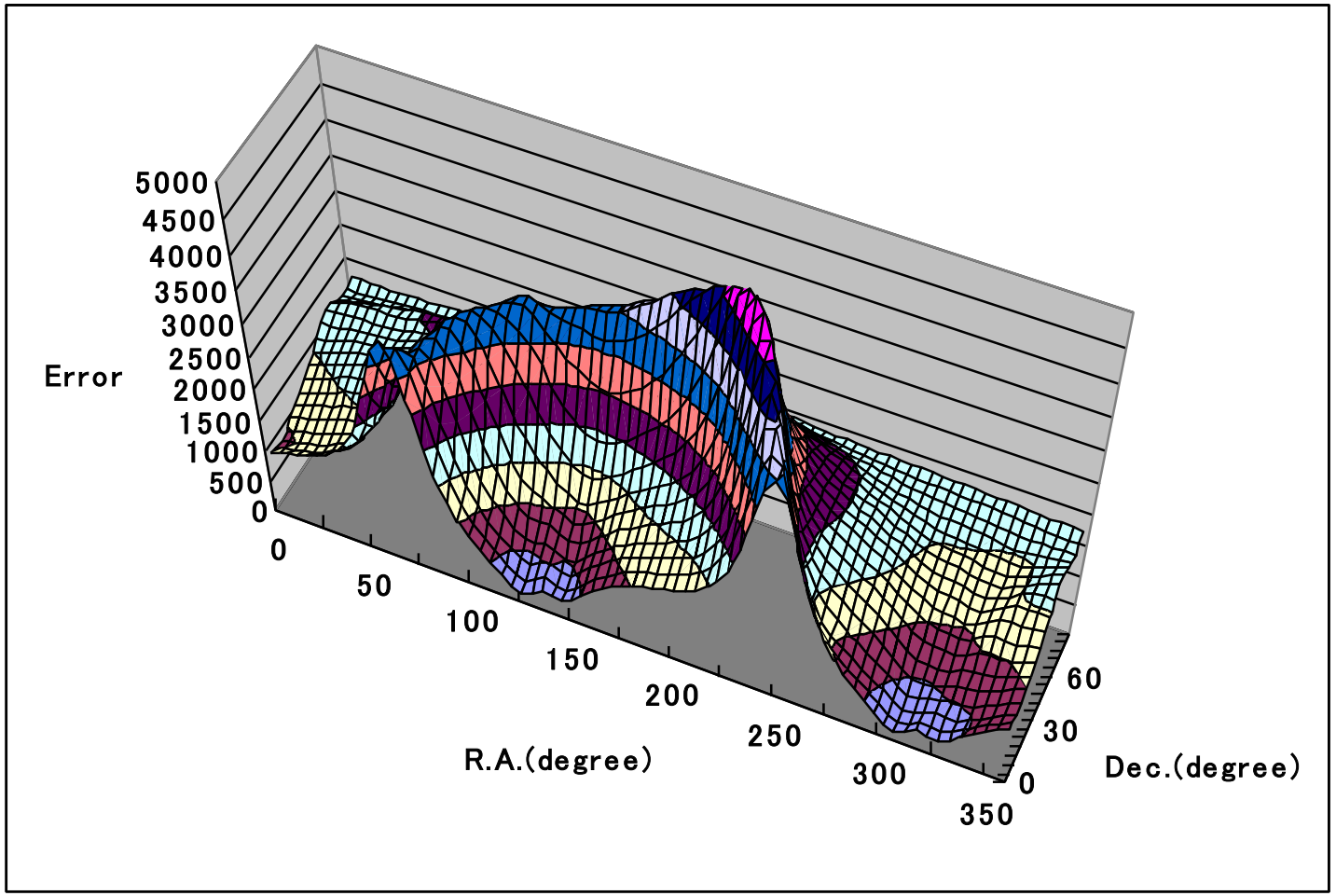
1月8日の光度変化

解析1

- これらの光度変化から対象の形状及び運動を推定する。
- 3つの仮定をする。① 対象の形状は3軸楕円体である。② 対象は最も短い軸まわりを回転している。③回転軸方向は天球上の1点を向いている。
- 最小2乗法を用いて3軸楕円体の軸比, a:b:c、回転軸方向の天球座標, (赤経, 赤緯)、及び回転周期、T を推定した。

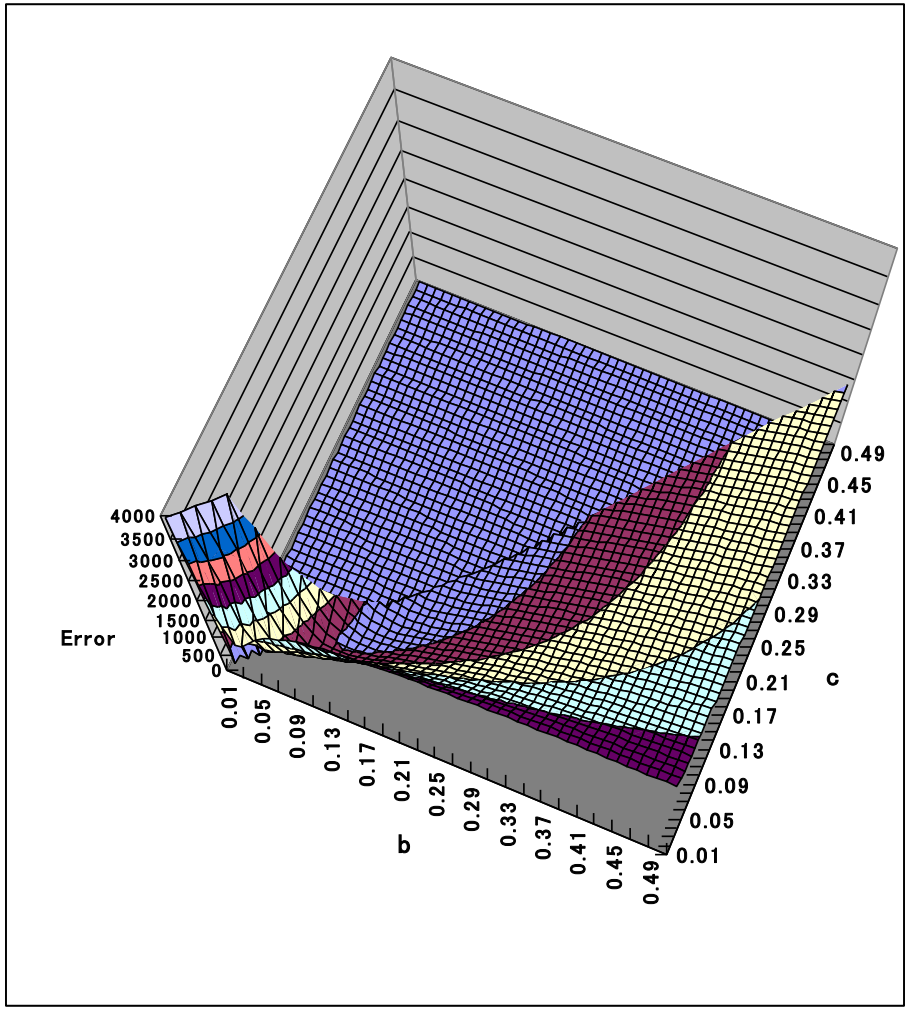


結果



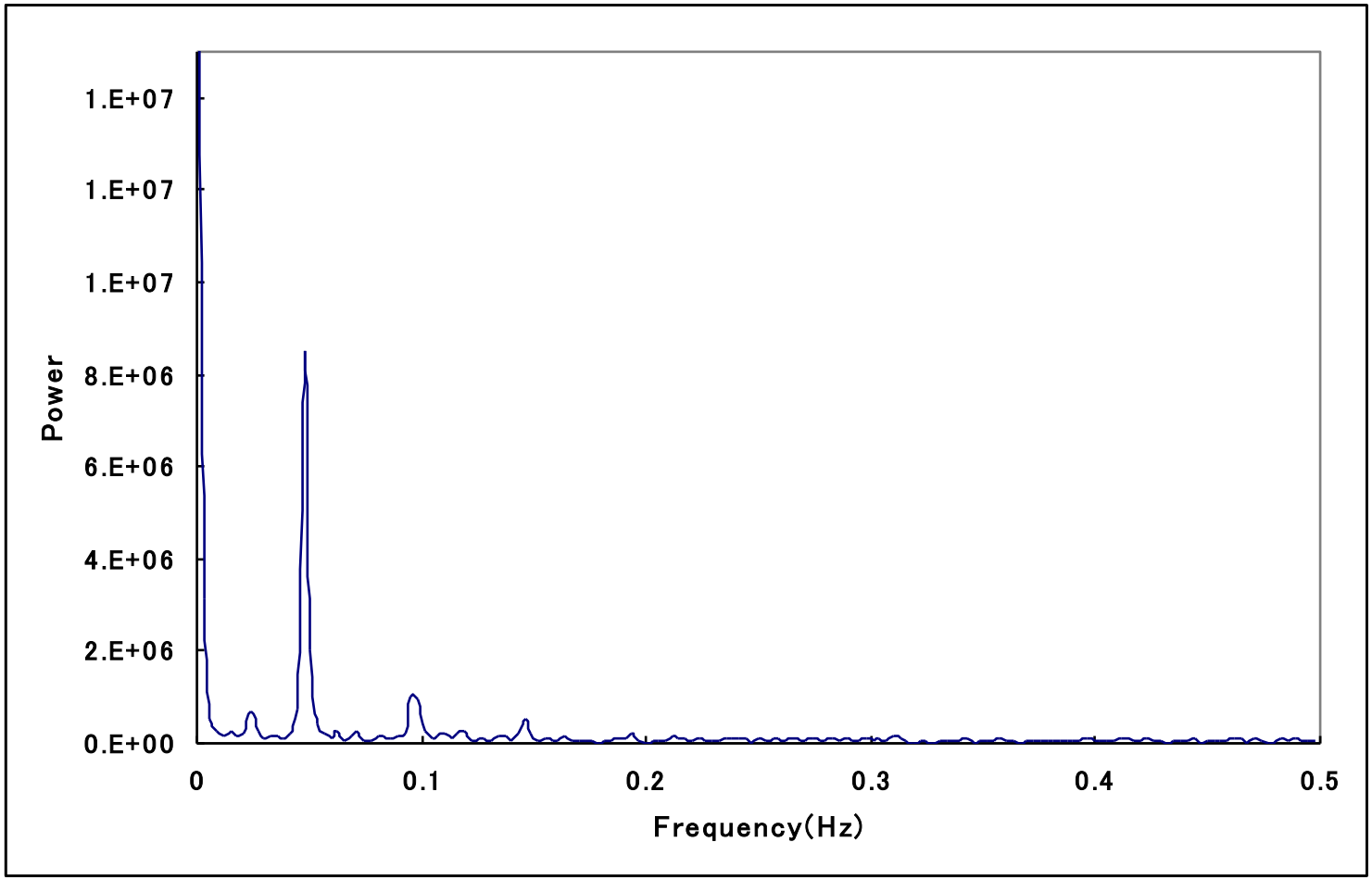
天球上の回転軸方向に対するエラー分布

結果



3軸楕円体モデルの軸比に対するエラー分布(a=1)

結果



光度変化を高速フーリエ変換した結果。周期0.04766/secに強いピークがみられる。

結果

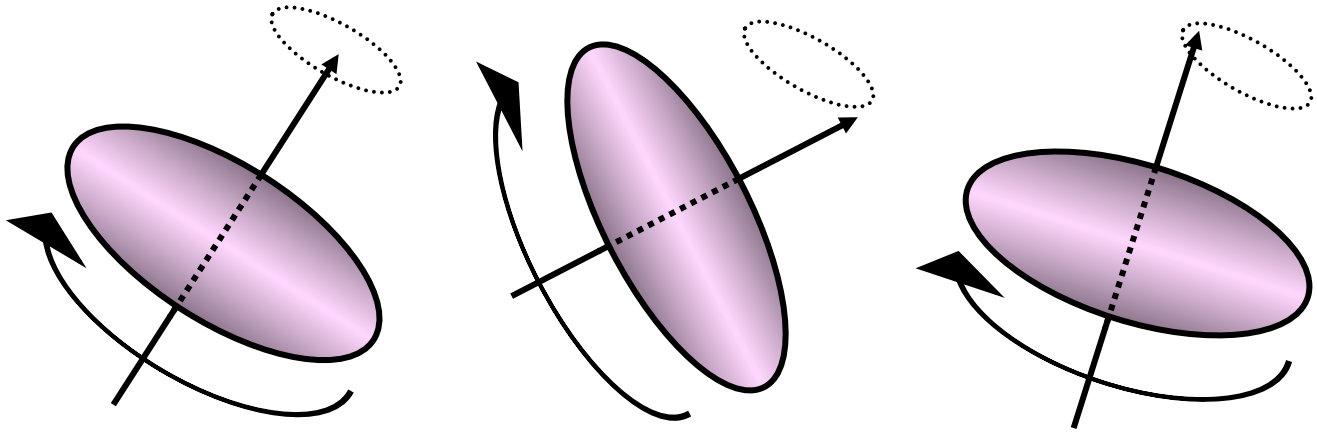
$$b = 0.18^{+0.61}_{-0.06} \qquad c = 0.18^{+0.19}_{-0.14}$$

$$R.A. = 305.8^{+37.1}_{-37.1} \qquad Dec. = 2.6^{+24.8}_{-24.1}$$

$$T_C = 41.0 \pm 0.68\,\mathrm{sec}$$

解析2

解析1で得られた回転軸方向のエラーが大きい。主軸回転のみではなく、歳差運動も考慮してみる。



結果

$$b = 0.18^{+0.030}_{-0.027} \quad c = 0.18^{+0.153}_{-0.102}$$

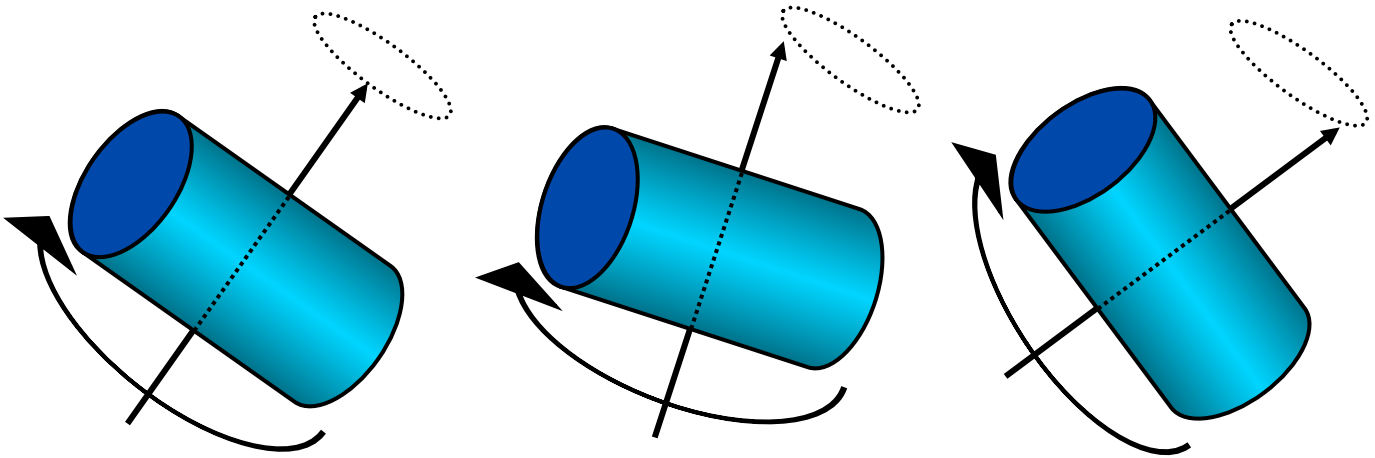
$$RA_0 = 302.9^{+8.46}_{-6.66} \quad Dec_0 = 5.4^{+6.00}_{-5.61}$$

$$D = 30.5^{+6.84}_{-7.08}$$

$$T_p = 1764.0 \pm 0.14\,\mathrm{sec}$$

解析3

より現実的なモデルを適用する。3軸楕円体ではなく円筒モデルを採用。底面（及び上面）の側面に対するアルベド比Rを定義。



2nd stage of Zenit2 rocket

D:3.9m　L:10.4m

結果

$$R = 0.60^{+0.21}_{-0.18}$$

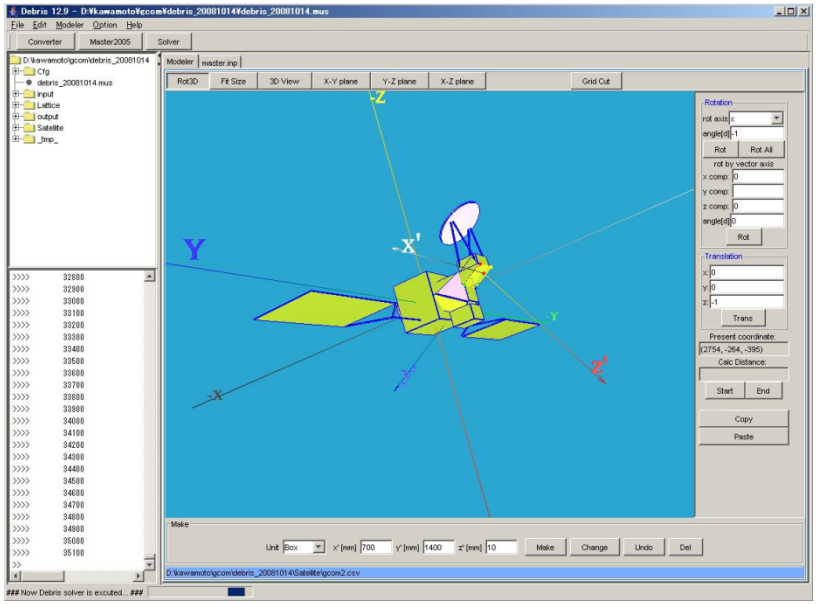
$$RA_0 = 301.6^{+5.16}_{-6.03} \qquad Dec_0 = 7.3^{+3.75}_{-4.11}$$

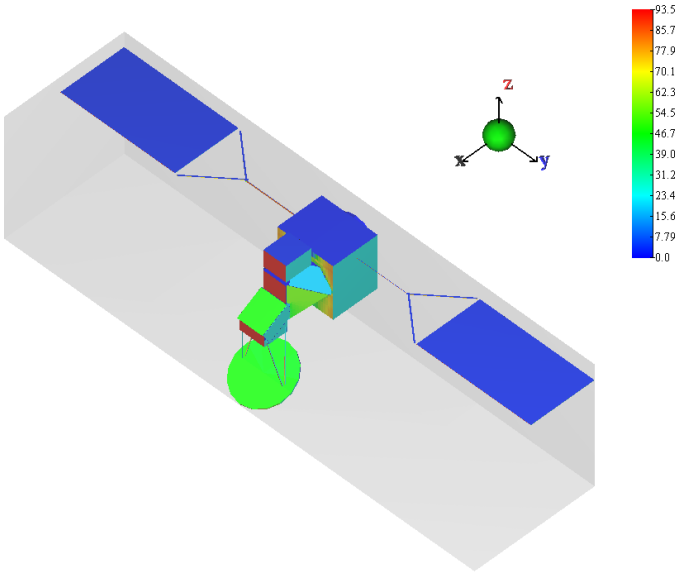
$$D = 29.5^{+6.87}_{-5.73}$$

$$T_p = 1764.0 \pm 0.07\,\mathrm{sec}$$

衝突リスク解析ツール

- 目的
  - 宇宙機の形状、姿勢も考慮して各部位へのデブリ衝突確率を計算
  - 弾道限界式を使用して損傷リスクを評価
    - デブリ衝突頻度の低い位置にクリティカル機器を配置、あるいは構造物などで隠蔽
    - デブリ衝突による損傷リスクを低減する宇宙機の姿勢を評価
- 現在JAXAプロジェクトで試験運用中





防御技術の研究

二段式軽ガス銃:

7mm以下の模擬デブリを
7km/secまで加速できる。

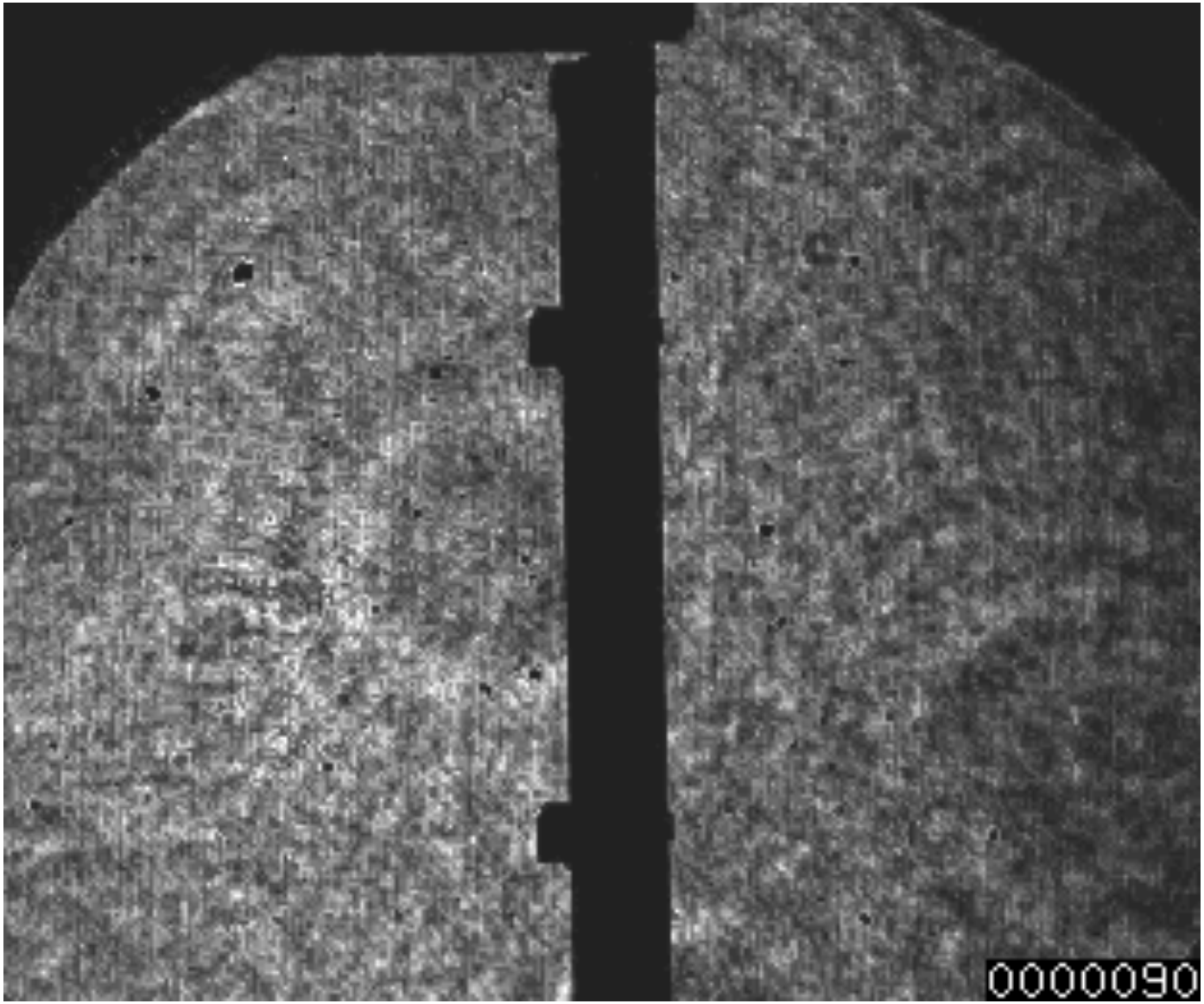
防御技術の研究

成形爆薬：

10mm程度の模擬デブリを
11km/secまで加速できる

現在開発中の技術

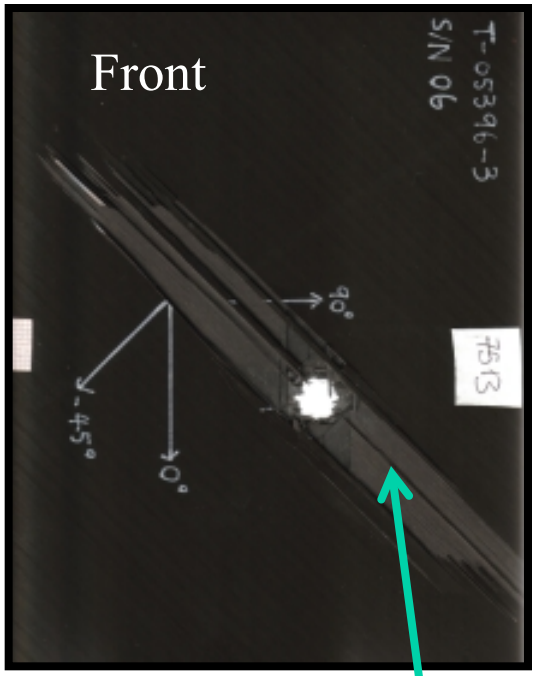
防御技術の研究

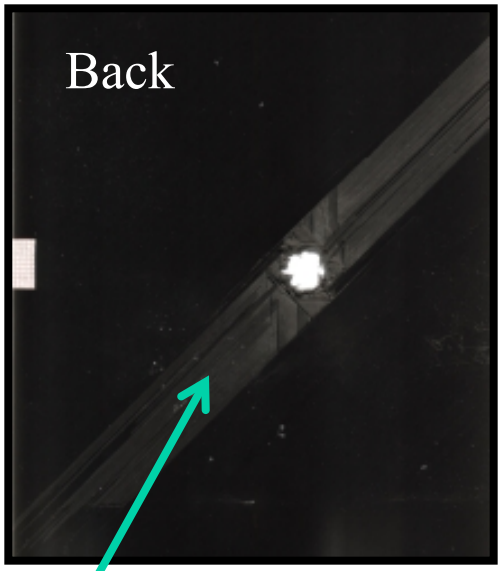


防御技術の研究

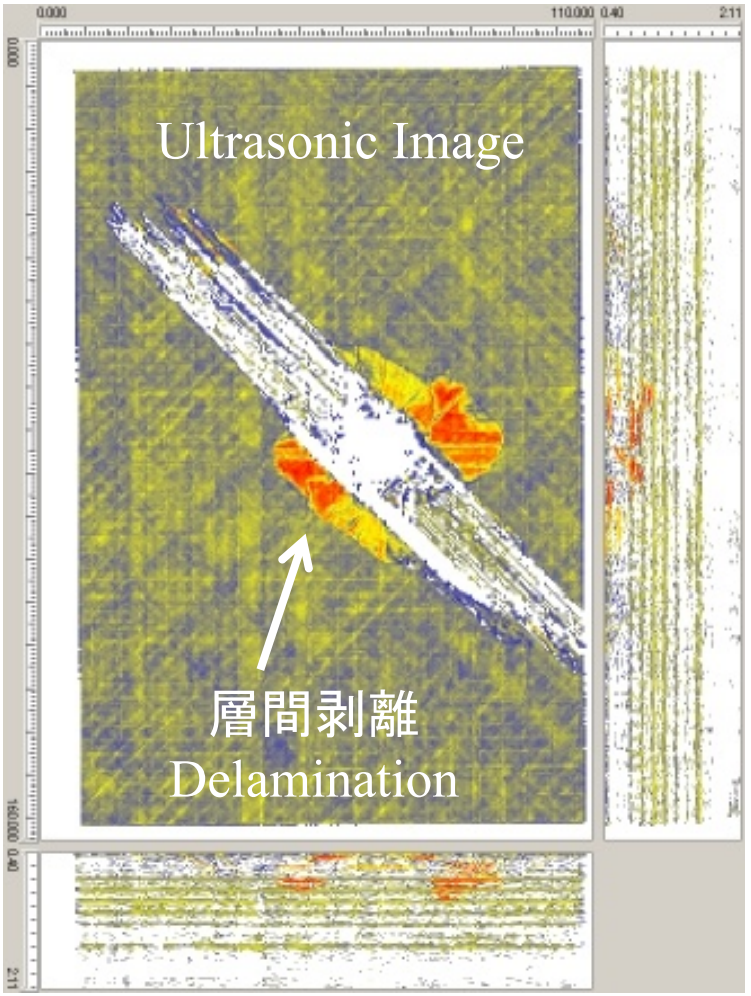
試験後の供試体: 貫通

CFRP, t = 4.6mm (32ply)
AL sphere, ϕ2.3mm, 4.85km/sec





繊維方向に沿った表面剥離
Peeling along fiber direction

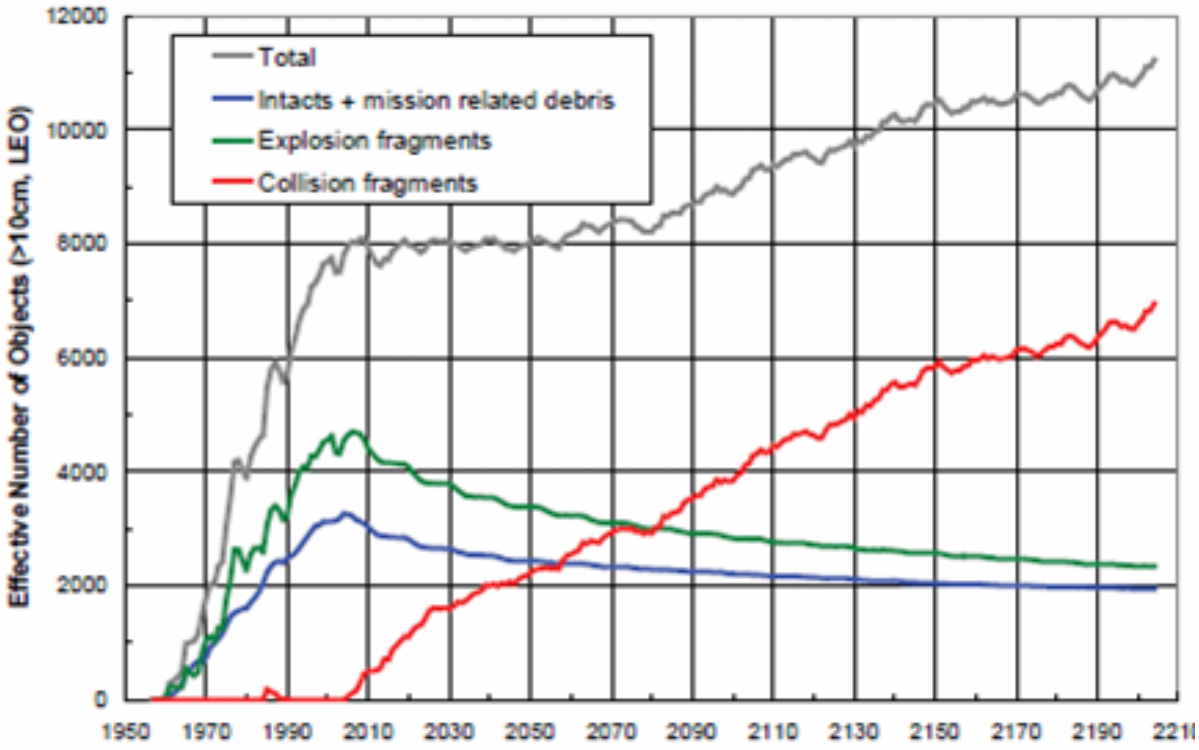


デブリ除去技術の研究

デブリ除去の必要性

低軌道では既存デブリ同士の衝突により、今後打上を行わない場合でもデブリが増加していくことが各国の研究により指摘。

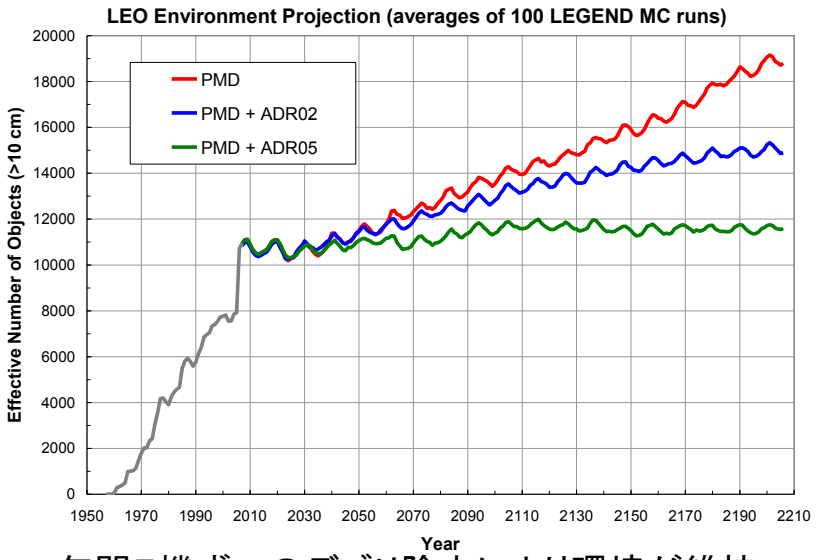
デブリ発生低減だけでは不十分で、デブリ除去が唯一の解決策



NASAの推移モデルLEGENDによる予測。2005年以降打ち上げが行われないとしても衝突によりデブリが増加する。
NASA 2006

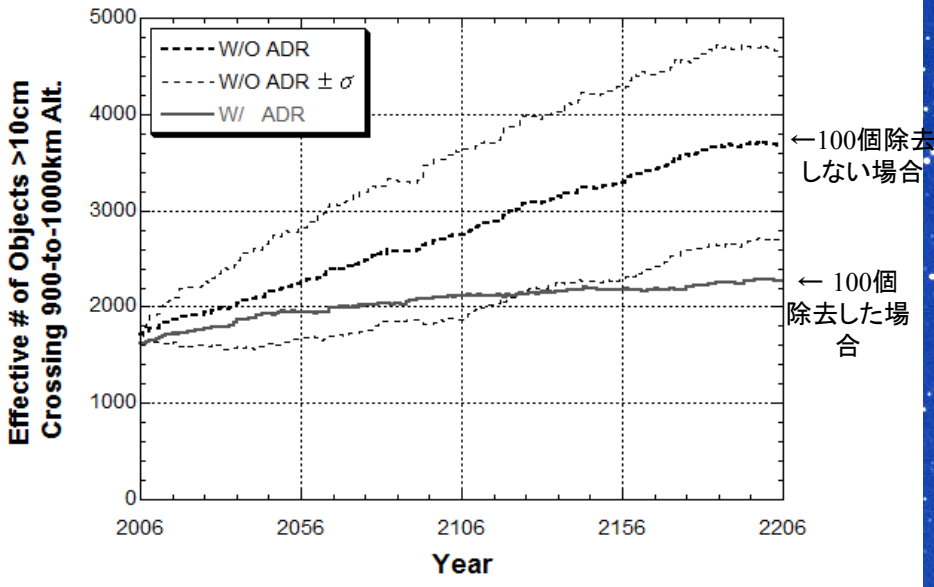
デブリ除去の必要性

- 低軌道の混雑軌道の大型デブリを年間5個程度、あるいはトータル100-150個程度除去する方針が効果的
- 太陽同期軌道の数トン級デブリあるいは高度900-1000km・軌道傾斜角83度の800-1400kgデブリ群がデブリ除去の対象となる
- デブリ除去には、1.除去衛星によるデブリ捕獲・軌道外投棄、2.地上からのレーザー照射、3.sweeperなどがあるが、大型デブリを除去できるのは現状1.のみ
- 技術的だけでなく、コスト的、法的な問題点も考慮する必要がある



年間5機ずつのデブリ除去により環境が維持できると予測。NASA

PMD: Post Mission Disposal, ADR: Active Debris Removal



高度1000km、83度付近の100個のデブリを除去した場合の推移予測（九大）

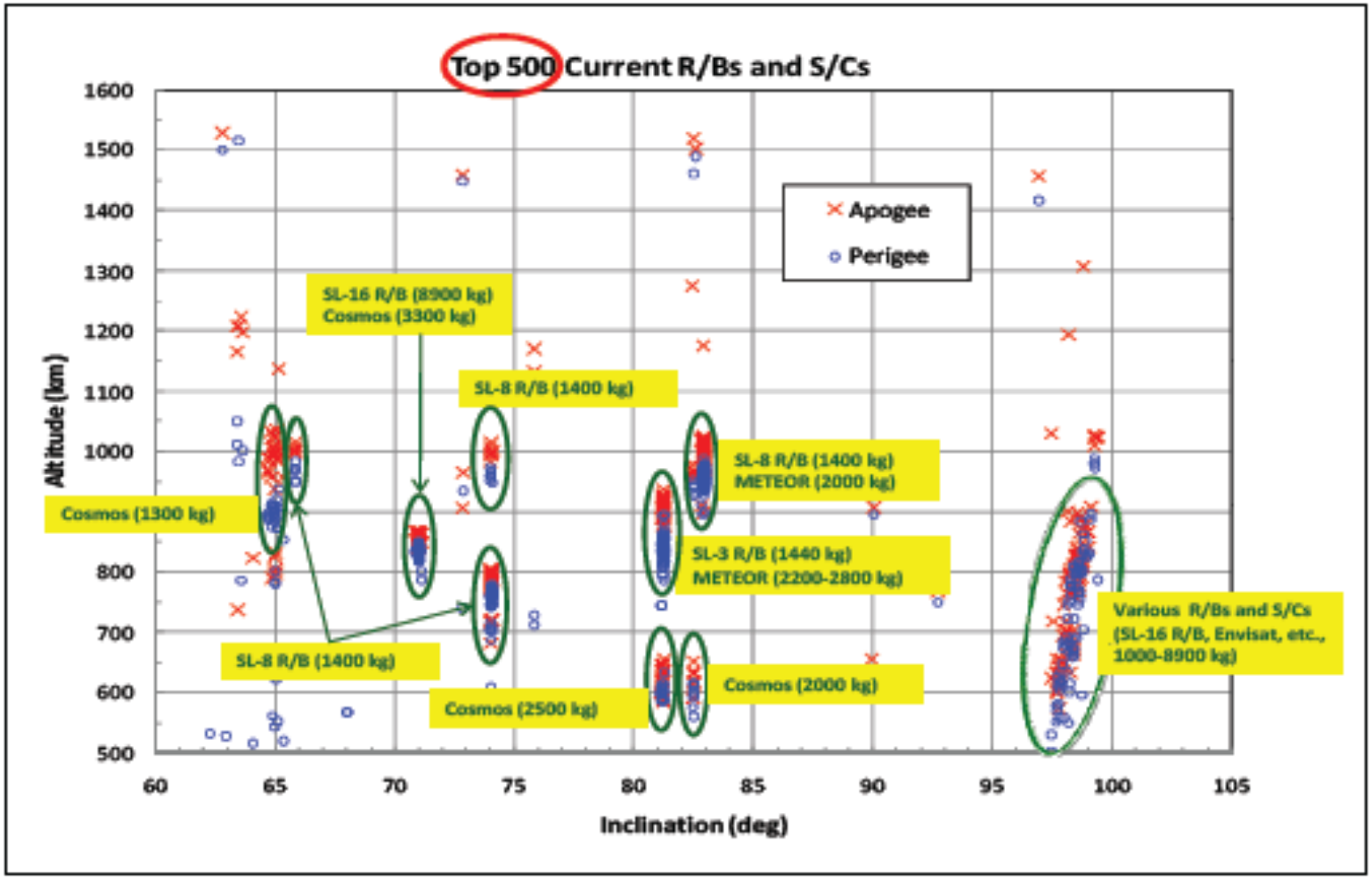
デブリ除去早期実現の必要性

- 今後も5-10年に一度程度は衝突事故が発生すると予測されるので、出来る限り早くデブリ除去を開始する必要がある。
  - 一度の衝突により、数千個の10cm級以上の物体、数十万個の1cm級デブリが発生しうる。1cm級デブリは宇宙機に壊滅的な被害を与えるが、現状防御手段はない

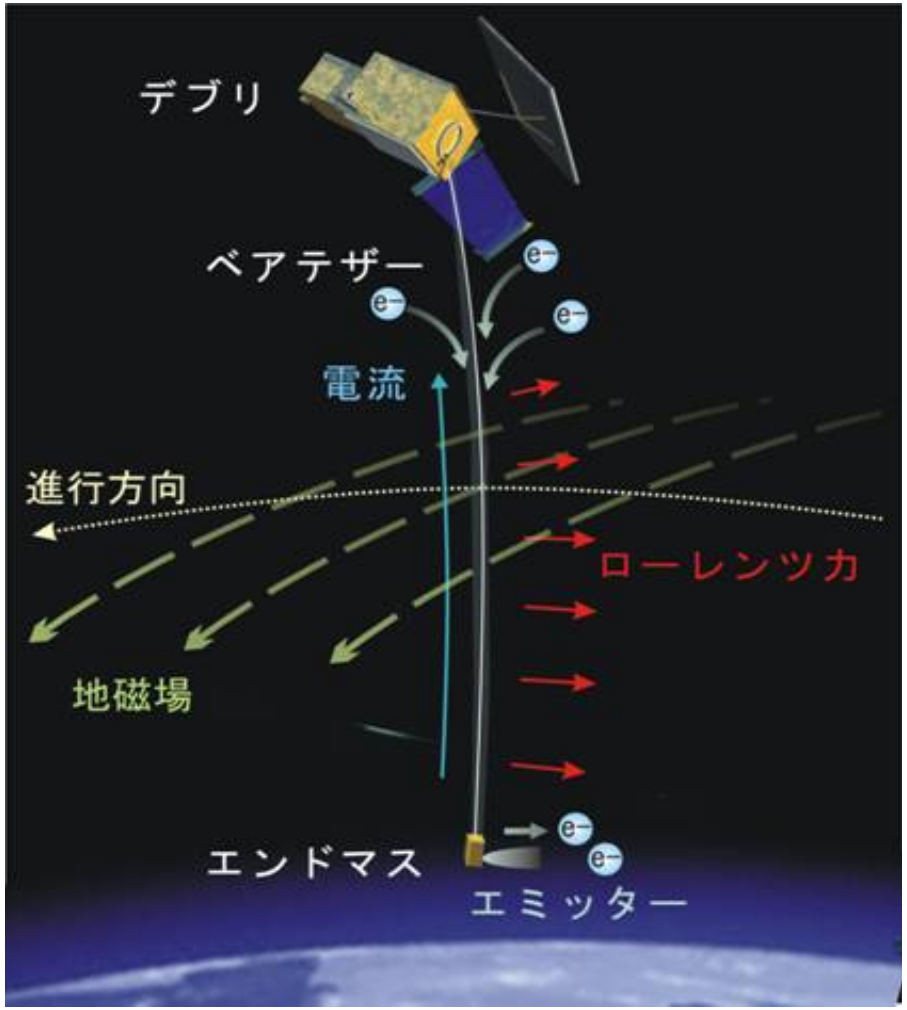
除去開始は早ければ早いほど良い。遅れれば遅れる程負担が増大！

- 日本が早期に実施する必要性
  - IAA（International Academy of Astronautics）、IADC（国際機関間デブリ調整会議）などでデブリ除去の議論が開始。米、露、欧がデブリ除去会議を開催など、世界的に技術や、実施の枠組み等の検討が開始
  - 世界的に必要とされている技術の研究開発を日本の得意技術を基に進め、世界に先駆けて実証する。その分野のビジネス化の可能性もあり、その場合には先行的に実証した技術がデファクトスタンダード化するものと予測している
  - 宇宙基本計画にもデブリ除去措置の記述

デブリ除去の必要性


Top 500 Current R/Bs and S/Cs
Apogee
Perigee
SL-16 R/B (8900 kg)
Cosmos (3300 kg)
SL-8 R/B (1400 kg)
SL-8 R/B (1400 kg)
METEOR (2000 kg)
SL-3 R/B (1440 kg)
METEOR (2200-2800 kg)
Cosmos (1300 kg)
SL-8 R/B (1400 kg)
Cosmos (2500 kg)
Cosmos (2000 kg)
Various R/Bs and S/Cs
(SL-16 R/B, Envisat, etc.,
1000-8900 kg)
Altitude (km)
Inclination (deg)
1600
1500
1400
1300
1200
1100
1000
800
700
600
500
60
65
70
75
80
85
90
95
100
105

JAXAが提案するデブリ除去の原理



- EDTの原理：テザーが地磁場を横切ることにより生じる誘導起電力を利用し、テザーに電流を流す。電流と地磁場との干渉で発生するローレンツ力を推力（減速力）として利用する

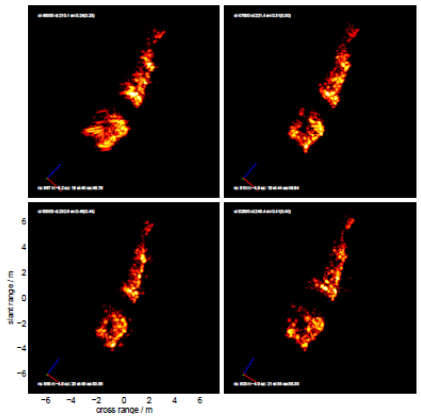
  誘導起電力：　$E = L \cdot (V \times B)$

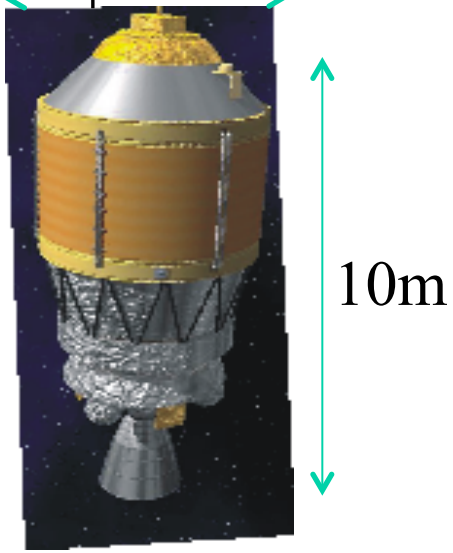
  ローレンツ力：　$F = L \cdot (J \times B)$

- 主な特徴
  - 燃料を必要とせずに軌道降下が可能
  - 軌道降下と同時に発電も可能
  - 微小推力のためデブリへの取付が容易

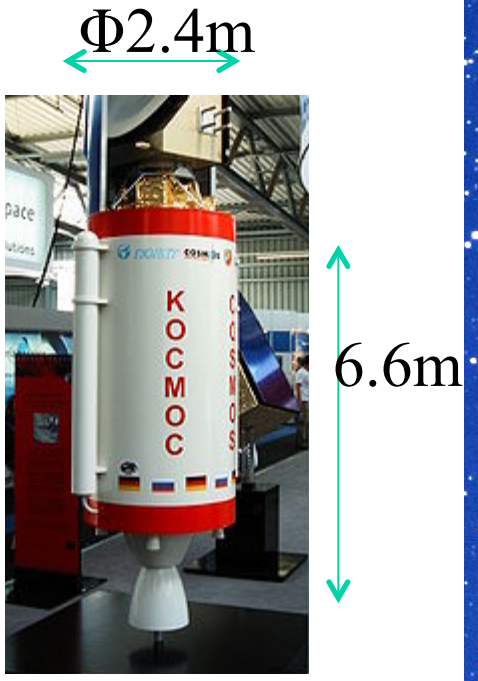
対象デブリの種類

- ロケット上段を対象と想定
- ロケット上段の方が技術的に容易と考えられるため
  - 衛星に比べどれも形状が比較的同一
  - 衛星に比べ機密性が低い（他国のデブリを除去する場合に問題になりにくい）.
  - 円筒状で，レーザ等の反射が期待できる
  - 重心から遠く突き出た長いパドル等がないため，除去機との予期せぬ衝突の危険性が低減できる.
  - 軸対称のため，タンブリング運動ではなくフラットスピンなど姿勢運動が単純
  - 磁場との干渉で回転が止まっているとの予測もある





H-IIAサイズイメージ



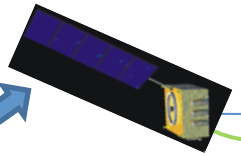
COSMOS 3M (SL-8)
サイズイメージ

除去シーケンス

導電性テザーを利用した
既存デブリ除去衛星のイメージ

観測衛星への相乗り等による打ち上げ

軌道投入

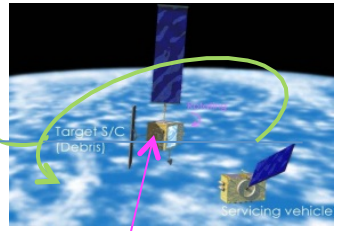


接近開始

非協力接近

・接近軌道制御
・自律的光学捕捉
・物体視による相対位置
推定、姿勢推定

運動推定

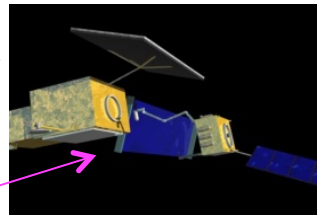


混雑軌道の
既存デブリ

・運動推定
・角運動量除去
・対象運動に応じた軌道制御
・近距離用センサ
・捕獲手法

近傍作業

推進系取付

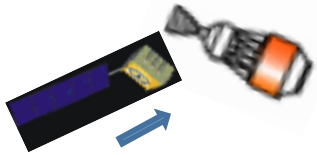


**導電性テザーによる
デオービット**

・ベアテザー/伸展
・電子源
・システム

デブリはテザーごと
大気圏に再突入して消滅へ

近傍にある次
のデブリへ



まとめ

JAXAのデブリに対する研究活動の一部を紹介した。人類の宇宙活動を継続するためにはデブリ問題の解決が必須である。今後は各国と協力しつつリソースを有効活用しながらこの問題に対処していきたい。

おしまい

ご静聴ありがとうございました。

質問・議論があればどうぞ。