

Tomo-e Gozen による STARS-Me2 観測と光跡検出の取り組みについて

山本 泰生¹ 能見 公博² 酒向 重行³

¹静岡大学情報学部 ²静岡大学工学部 ³東京大学

木曾シュミットシンポジウム2026

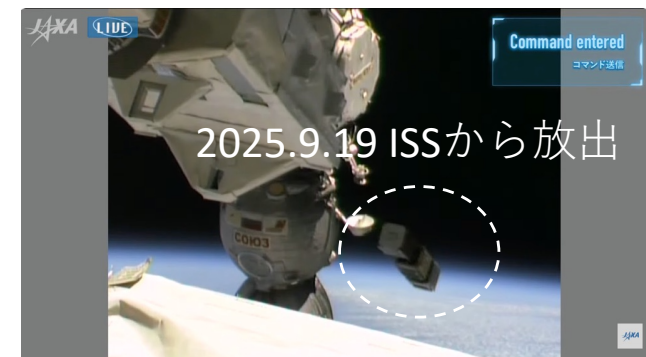
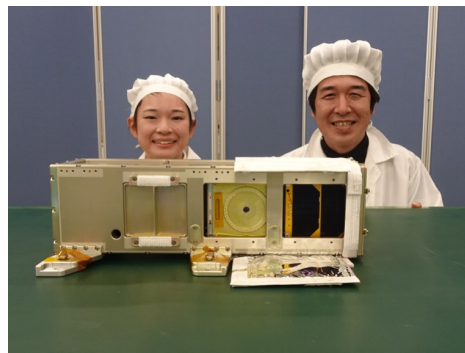
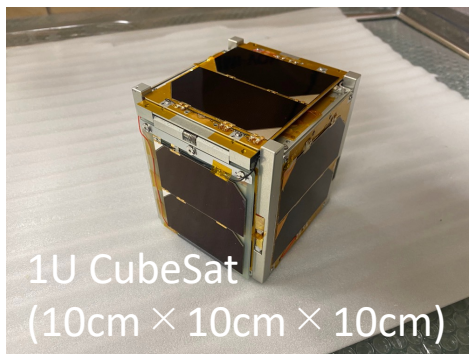
6月3日

発表内容

- CubeSat観測と解析パイプライン構築の検証報告

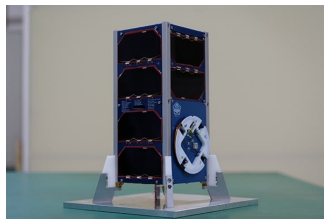
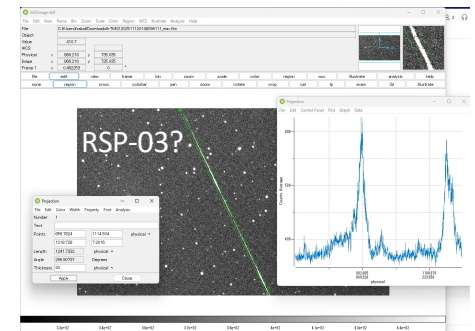
STARS-Me2 (静大衛星) の光学観測トライ

- 光跡検出・TLE照合の課題
- ISSによる検証
- 3月再トライの結果
- まとめと今後の予定

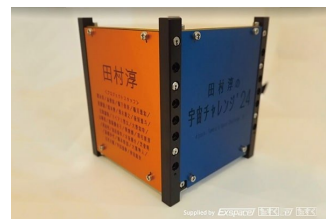


CubeSat観測の経緯

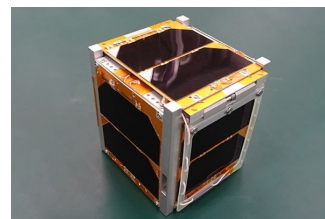
- 静大衛星: ISSから同時放出されたCubeSat群の一つ
- 放出後、CubeSat群と通信が確立しない事態となる..
- Tomo-e Gozen による待受観測実施 (2025.10-2026.3)
- 観測の履歴
 - 10/15~10/17: 準備 (Starlink観測)
 - 11/10~12/02: CubeSat群の初期観測
 - 12/10~12/16: STARS-Me2候補 (XK) 観測
 - 02/13: ISSの観測結果から移動角・速度の誤差検証
 - 03/01: XK観測の再トライ, 光跡候補の発見
 - 03/02~03/07: 大気圏突入直前のXK観測



Dragonfly
XH-65729



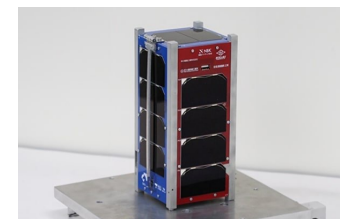
Atsushi space challenge
XJ-65730



STARS-Me2
XK-65731



RSP-03
XL-65732



GHS-01
XM-65733

観測・解析パイプライン

最新TLEの取得
(celestrak API利用)



観測時刻の決定
夜間・高度・地球影の条件を満たす
時刻を検索 (Skyfield利用)



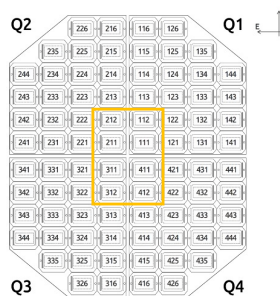
RA/Decの決定
(PreviSat利用)



見かけ速度・トラック角の算出
観測時刻と微小時間後のRA/Decの差分
を元に算出 (Skyfield 利用)



待受観測用レシピの作成
2分連続露光 (240f)x2回撮影
det211を中心に8カメラ利用
観測時刻-5.5minにレシピ投下



mdxからFITS動画の取得
1動画2.17GB (1衛星: 8カメラx2回=16動画)
5衛星: 80動画



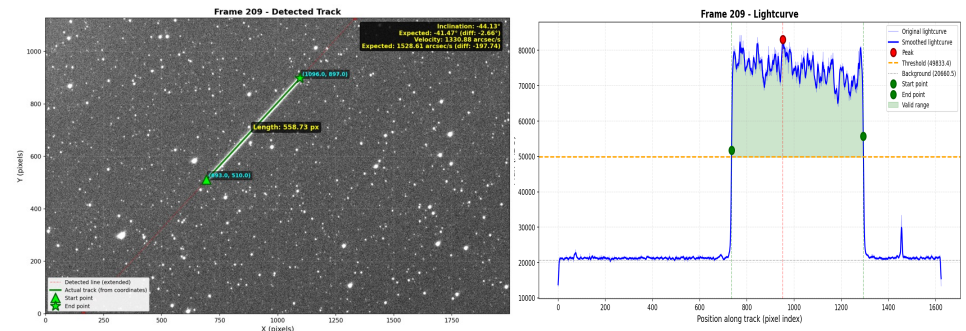
FITS動画の光跡チェック
max画像を元に動画をチェック
光跡の含むフレームの洗い出し



光跡の移動速度・移動角の算出
各フレームの直線検出 (OpenCV; エッジ
検出&ハフ変換), 端点・移動方向を特定



候補の絞り込み
見かけ速度・トラック角との差 &
カメラ位置をもとに検証



光跡の移動速度・移動角の算出

- FITS画像の光跡検出

前処理: 参照画像, 差分画像の作成, ガウスフィルタ

線分検出: エッジ検出+ハフ変換 (OpenCV)

エッジ割合が一定になるよう自動調整

移動方向: フレーム間の端点の変化から算出

移動速度: 線分長から算出

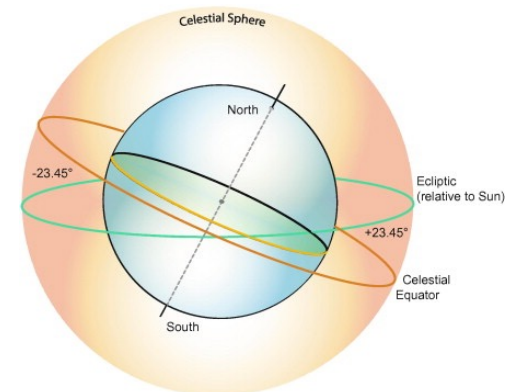
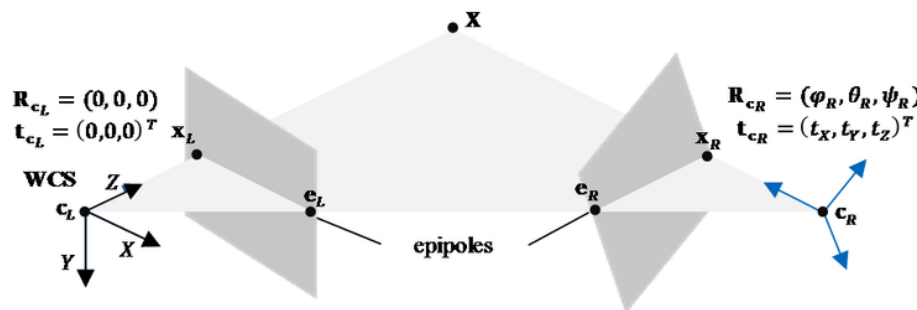
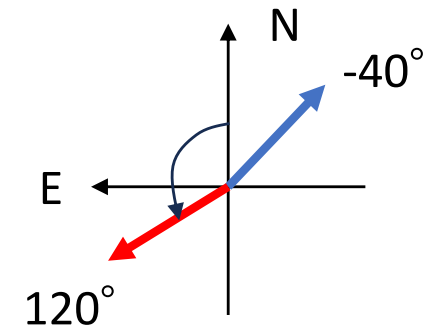
移動角度: 天球座標上での光跡の移動方向

- TLEから推定値算出

対象FITS画像の時刻 t の推定

時刻 t と 単位秒後の時刻 t' の対象衛星の天球座標 (RA/Dec) を算出

座標間の差分から見かけ速度と天球上の移動角度を算出



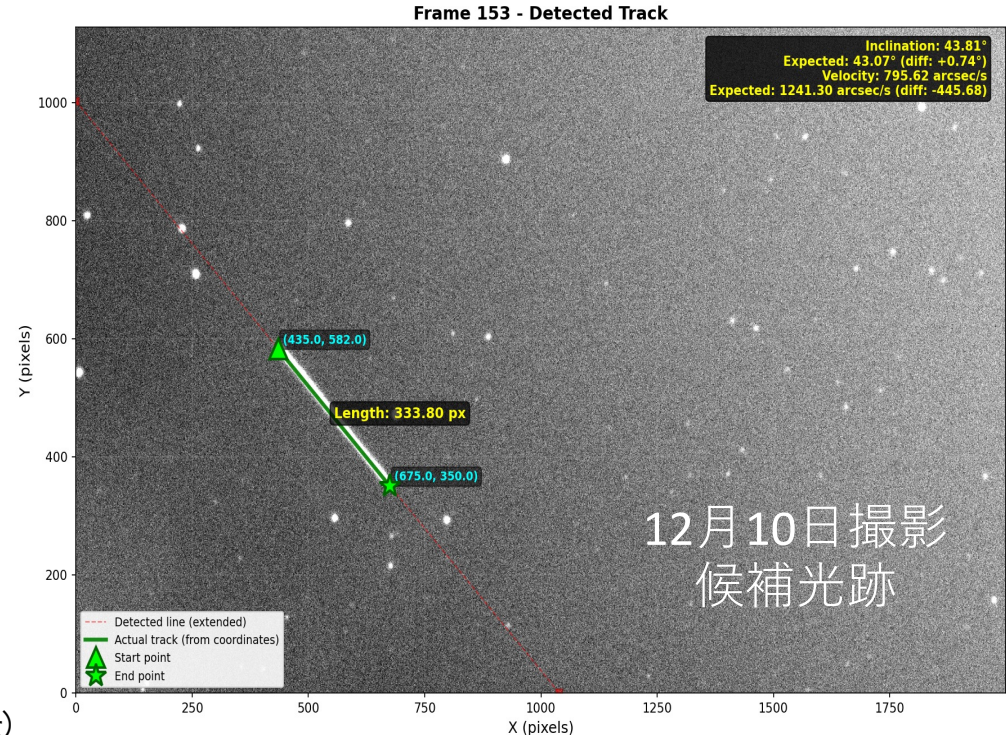
観測トライ~12月

- 11月: XK, XJ, XM, XH, XLを対象に複数回観測
- 12月: XK (STARS-Me2候補) に対象を絞って観測
10日撮影分で det211 に近い光跡が見つかる
角度: 実測 $43.4^\circ \leftrightarrow$ TLE推定 43.07°
速度: 実測 13.07 arcmin/sec $\leftrightarrow$ TLE推定 20.71 arcmin/sec

➡ 角度は合うが速度が合わない...

観測対象	11/10	11/11	11/12	11/28	12/2
XK	5 (18.5)	6 (34.5)		9 (12.2)	
XJ	6 (20.4)	6 (31.4)			
XM	18 (31.4)				
XH	21 (18.5)		10 (54.1)		12 (16.9)
XL		23 (44.4)	13 (18.6)		

確認された光跡数 (不鮮明なものを除く), カッコは高度 (deg)



ISS観測による誤差検証

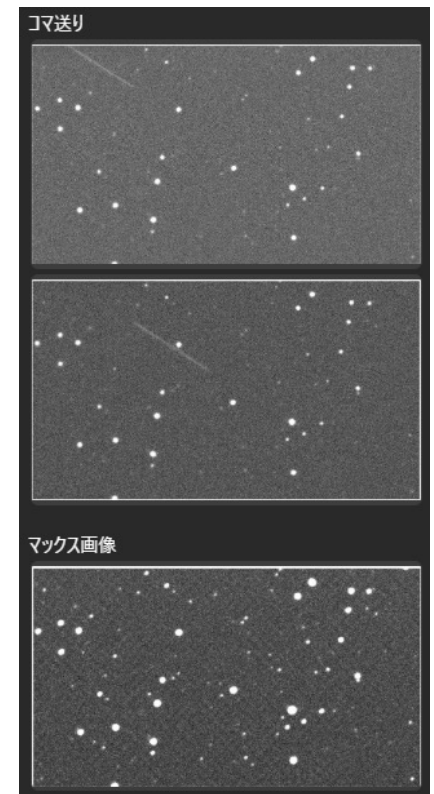
- 12月観測で見えた課題
 - 微弱光跡の見逃し: max画像で埋もれるものがある
 - ➡ **人力**チェック (コマ送りして見逃しを防ぐ)
 - 対象衛星の同定: **Tomo-e**広視野に多数の人工衛星が映る
 - ➡ 時刻・位置・角度・速度・明るさから判定
- 観測・計算系のキャリブレーション
 - 確実に同定できるISS観測でチェック
 - 角度: 実測 23.0° ↔ 予測 22.81°
 - 速度: 実測 26.81 arcmin/sec ↔ 予測 25.91 arcmin/sec



TIPS

1秒ではなく0.5秒差分で速度を算出する (2fpsなので)

PreviSat (RA/Dec計算で用いる) と速度算出プログラムの座標系を揃える (J2000 → of-date)

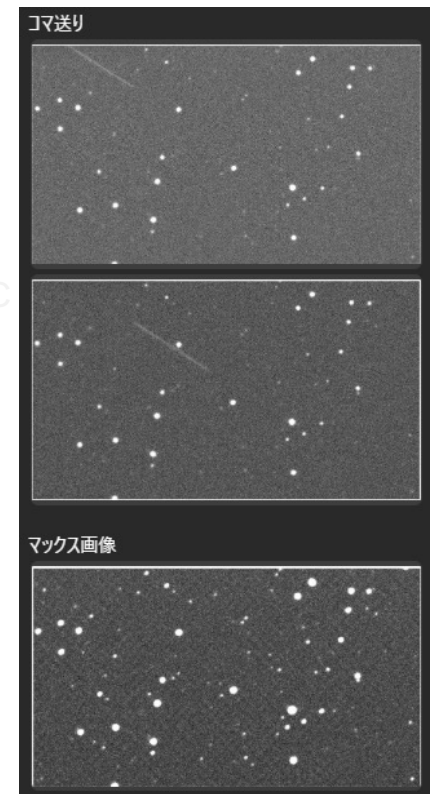


ISS観測による誤差検証

- 12月観測で見えた課題
 - 微弱光跡の見逃し: max画像で埋もれるものがある
 - ➡ 人力チェック (コマ送りして見逃しを防ぐ)
 - 対象衛星の同定: Tomo-e広視野に多数の人工衛星が映る
 - ➡ 時刻・位置・角度・速度・明るさから判定
- 観測・計算系のキャリブレーション
 - 確実に同定できるISS観測でチェック
 - 角度: 実測 23.0° $\leftrightarrow$ 予測 22.81°
 - 速度: 実測 26.81 arcmin/sec $\leftrightarrow$ 予測 25.91 arcmin/sec

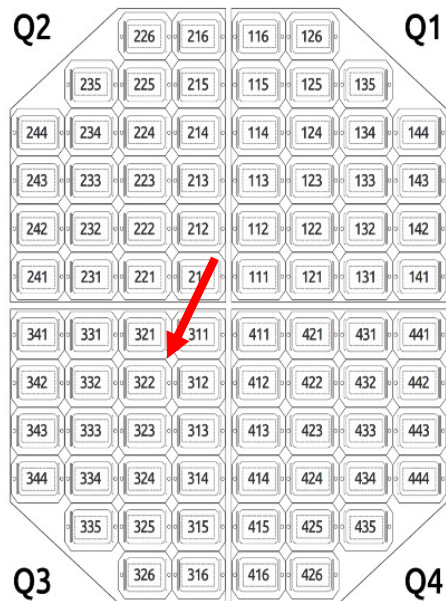
ISS観測から得られた誤差の目安

- 進行と垂直方向: 大きなズレなし
- 進行方向: 30 arcmin 程度のズレ
- 通過時刻: 待受位置に対して約1秒早い
- 速度差: $1\sim2 \text{ arcmin/sec}$
- 角度差: 0.19 deg

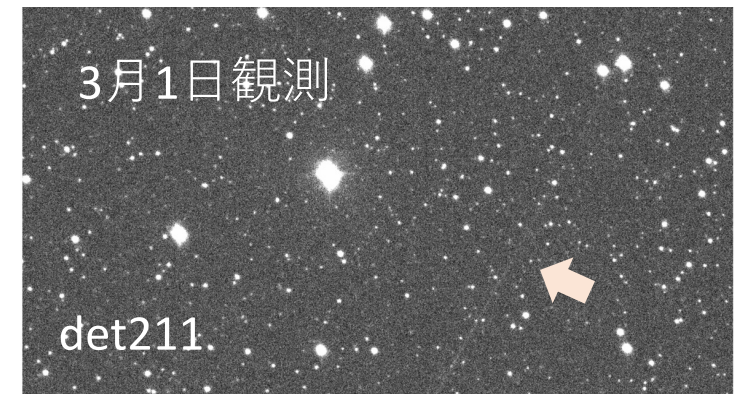
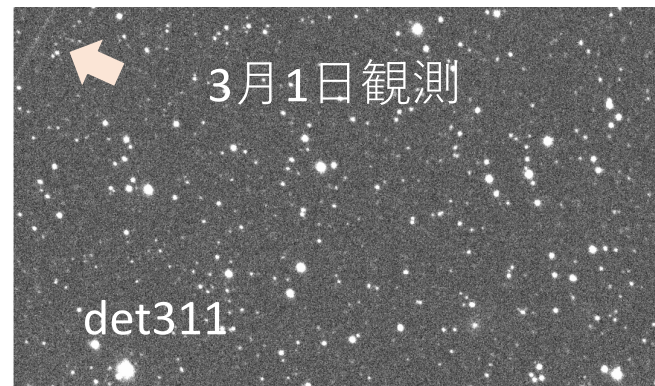
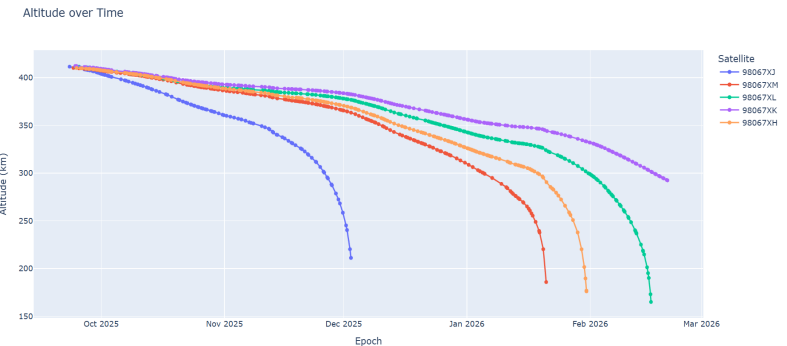


XK観測の再トライ~3月

- 3月1日の観測結果
det211 (待受位置) 通過時刻: 5:06:58.32
予想5:07:00に対して1.6秒早い時刻に通過
角度: 実測 $150.7^\circ \leftrightarrow$ 予測 150.53°
速度: 実測 33.4 arcmin/sec $\leftrightarrow$ 予測 35.09 arcmin/sec
➡ 予測に近い微弱な候補光跡を確認
- 3月10日: 大気圏突入
7日観測: 明確に一致する光跡は見当たらず
要因候補: 微弱光跡の検出限界, 軌道変化



再突入直前の軌道変化により誤差が大きくなった?
(TLE更新が追いついてない)



まとめと今後の展開

できたこと

- Tomo-e GozenによるCubeSat待受観測のトライ
- 光跡検出・TLE推定値照合の解析プログラム
- ISSで観測・計算系の誤差確認
- 推定値に近い候補光跡の取得

残課題

- 直線検出の安定化と高速化
- 微弱光跡に強い線分検出法
- 光跡マッチング (全衛星TLEとの照合)

次回に向けて: STARS-X

- 6月10日打ち上げ予定
- 50cm/50kg級衛星 (テザー進展1km)
- STARS-Me2より明るい光跡が期待
- 姿勢情報とライトカーブの照合

