

2021年11月24 -26日 (オンライン開催)  
第12回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ

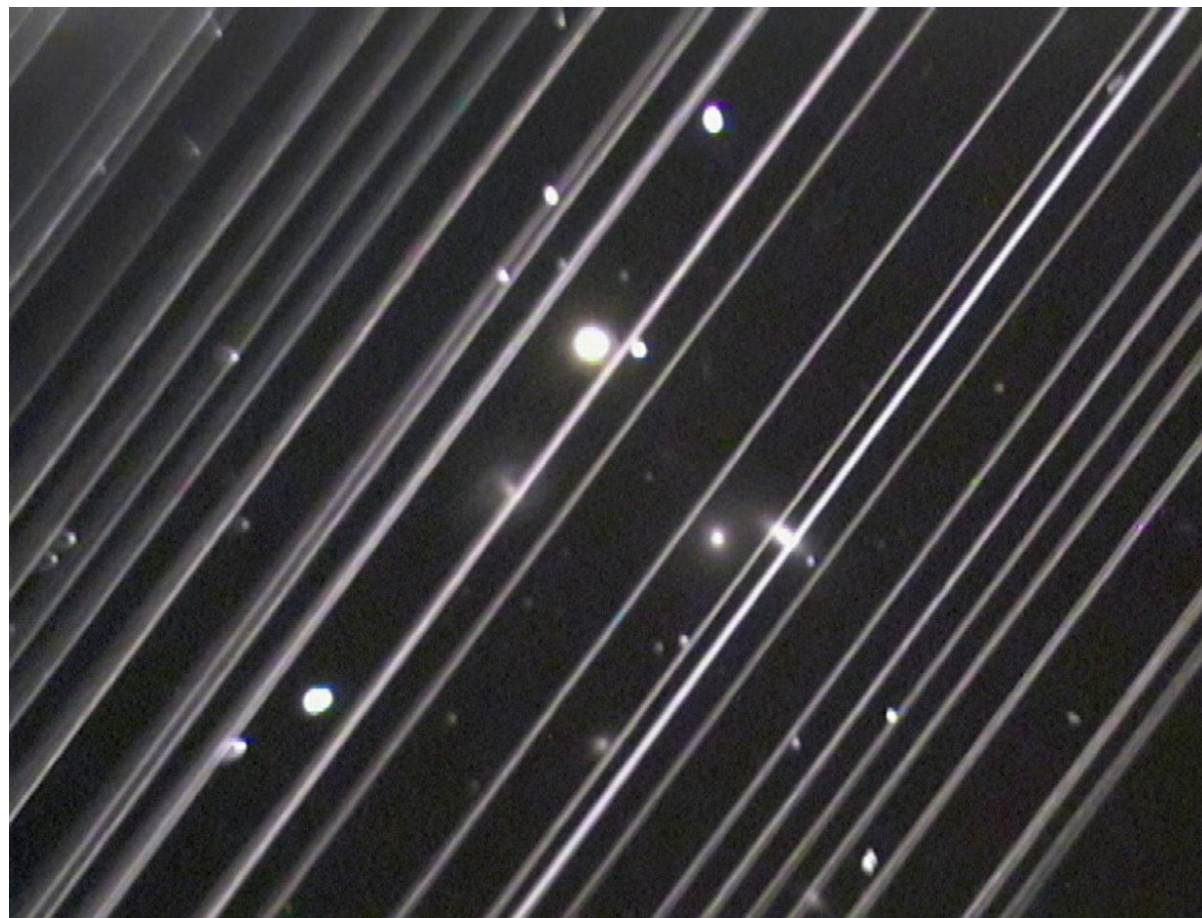
# OISTER観測による多波長でのVisorsat の等級測定

国立天文台 天文情報センター 石垣島天文台  
特任研究員 堀内 貴史

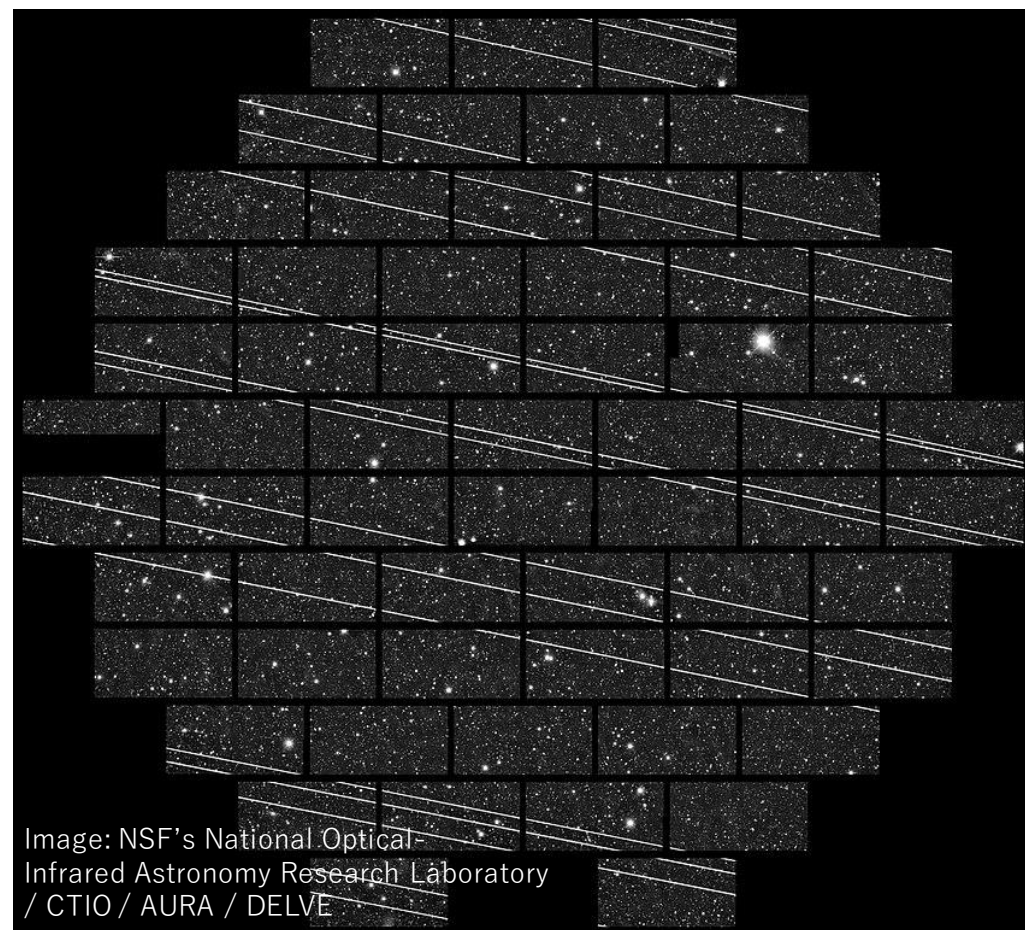
## 共同研究者

花山 秀和, 大石 雅寿, 小野里 宏樹 (国立天文台), 中岡 竜也 (広島大学), 高橋 隼 (兵庫県立大学), 山中 雅之, 反保 雄介, 伊藤 潤平, 野上 大作 (京都大学), 村田 勝寛, 細川 稜平, 高松 裕, 今井 優理, 伊藤 尚泰 (東京工業大学), Schramm Malte, 大出 康平, 金井 昂大, 竹内 媛香, 大朝 由美子 (埼玉大学), 高木 聖子, 大野 辰遼 (北海道大学), 他 OISTER team collaborations

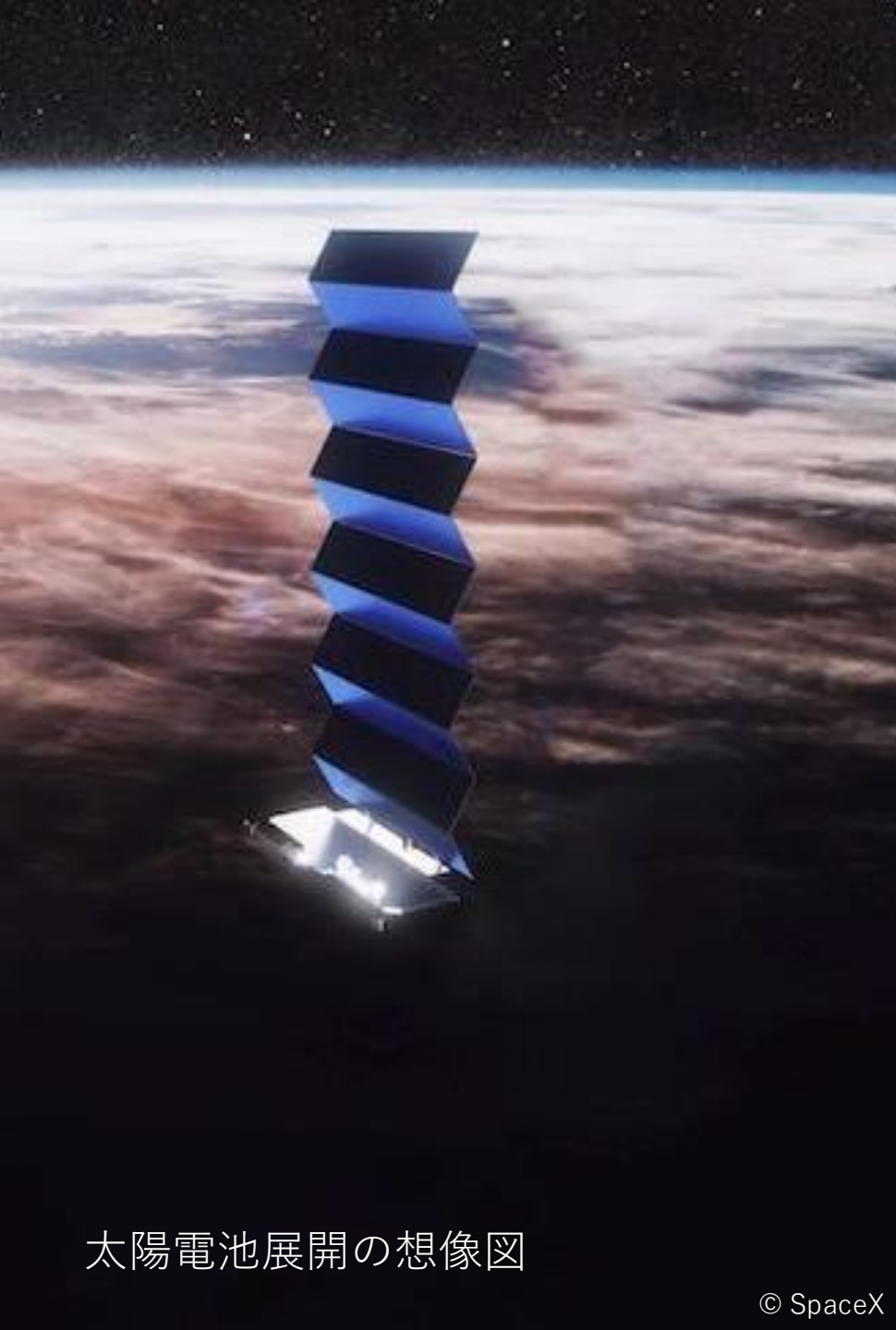
# 観測中に現れた人工衛星の斜線群



超新星爆発の観測中に現れたスターリンク衛星の一群  
(クレジット: Victoria Girgis / Lowell Observatory)



広視野観測への影響も懸念される. 写真の視野は  
2.2°



# スターリンク衛星による 巨大衛星通信網

---

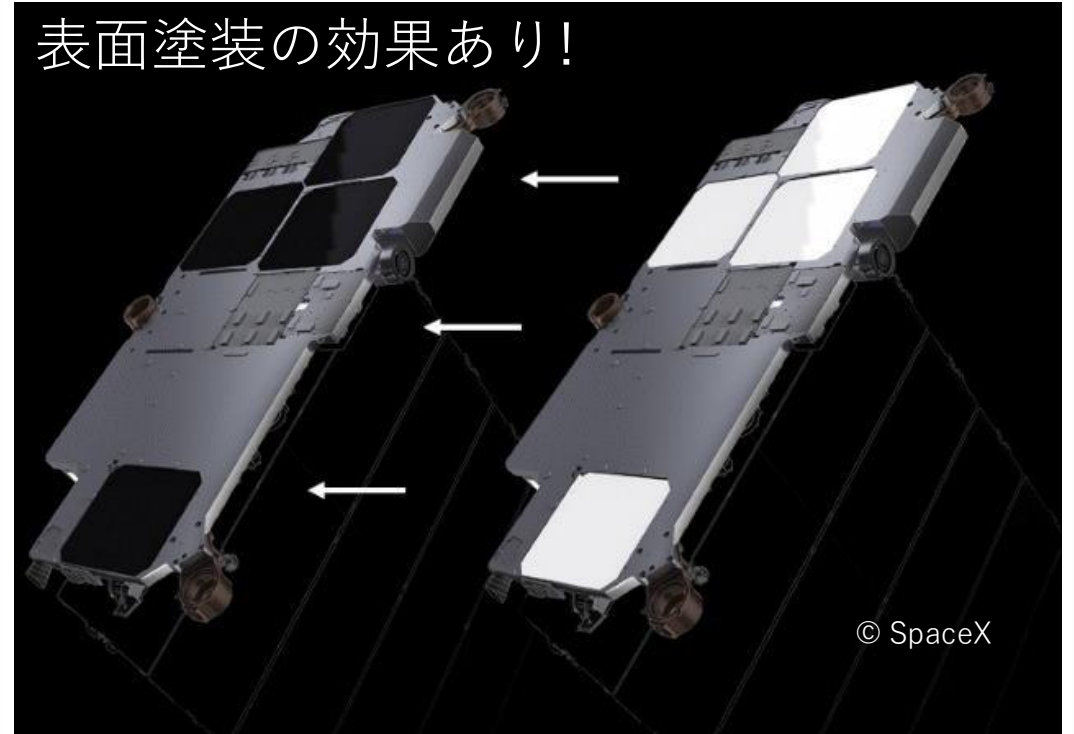
- アメリカ合衆国のSpaceX社は巨大衛星通信網を利用した, 高速インターネットサービスの提供を目的に, スターリンク衛星の打ち上げを行った.
- 最初の60機が2019年5月に打ち上げられ, 現在の総打ち上げ数は2000機近く.
- 将来的には総計12,000機(+ 30,000機追加する計画で42000機)に達する予定

# 天文観測等への懸念と SpaceXでの対策

- 人工衛星は太陽光を反射するので、天体観測や景観等へ影響が懸念されている(IAUの声明等).
- これを受けてSpaceXは衛星表面に黒色塗装を施したDarksatを試験機として1機だけ開発.
- Horiuchi+2020, Tregloan+2020b等の多色観測による結果：
  - 1) Darksat(6-7等)は無塗装スターリンク(5-6等)より反射光フラックスが**2倍小さい**.
  - 2) 長波長ほど明るい傾向となる.

無塗装スターリンク衛星(右)  
Darksat(左)

表面塗装の効果あり!



衛星サイズ:  $3 \times 3 \times 0.2 \text{ m}^3$  の直方体  
太陽光発電パネル:  $7 \times 3 \times 0.05 \text{ m}^3$

# Visorsatの開発と等級測定

- SpaceXはアンテナ部分に庇を取り付けたVisorsatも制作し, 第1号(STARLINK-1436)を2020/6/3に打ち上げた. 2020年8月の衛星57機は全てVisorsat.

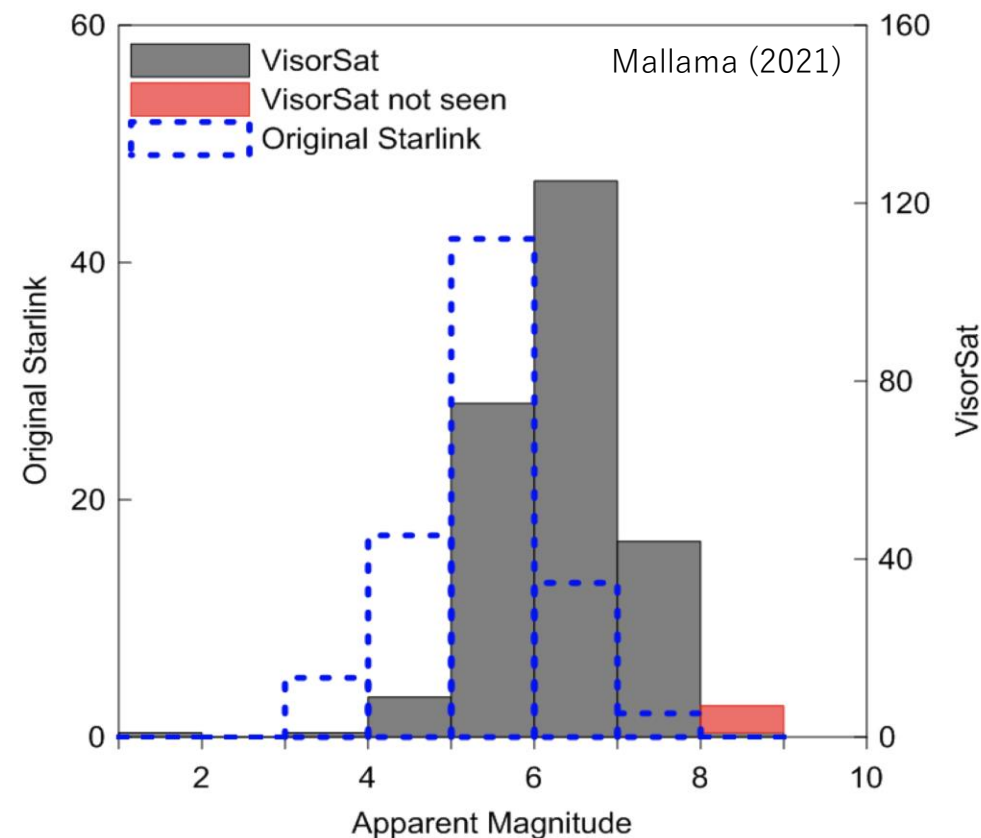
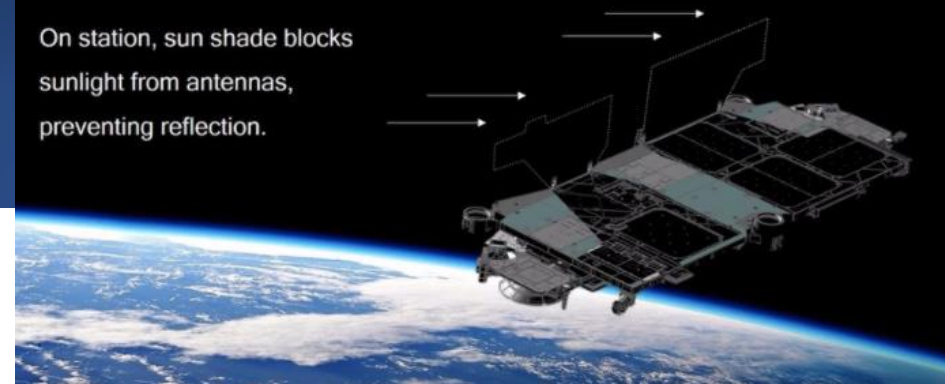
- Mallama (2021)による等級(V)の見積もり:

6等後半から7等中盤が多く, 通常のスターリンク衛星より1等程暗い傾向にあるが, 単一波長だけでは詳細がわからない. → 多波長観測が不可欠.

- 紫外/可視・近赤外でVisorsatの観測結果は未出版  
→ 光・赤外大学間連携(OISTER)にて観測を遂行

## VISORSAT ANTENNAE MITIGATION ON STATION

On station, sun shade blocks sunlight from antennas, preventing reflection.



# OISTER観測での参加機関と望遠鏡



© OISTER Web

OISTERの機関として7つの観測所が参加し, STARLINK-1436(Visorsat)と無塗装スターリンクの多色観測を実行中. 周辺の星との相対測光で衛星の等級を評価.

観測期間	望遠鏡/装置	使用したフィルター
石垣島天文台	105 cm むりかぶし望遠鏡/MITSuME	$g'$ , Rc, Ic
広島大学	1.5m かなた/HONIR	V, J, H
西はりま天文台	2.0 m なゆた/NIC	J, H, K
京都大学	0.4 m 望遠鏡	B
明野観測所	0.5 m MITSuME	$g'$ , Rc, Ic
埼玉大学	0.55 m SaCRA/MuSaSHI	r, i, z
北海道大学	1.6 m ピリカ望遠鏡/MSI	U (航跡映らず)

観測の達成度は70%程度

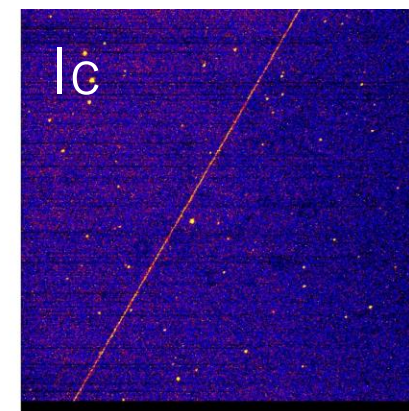
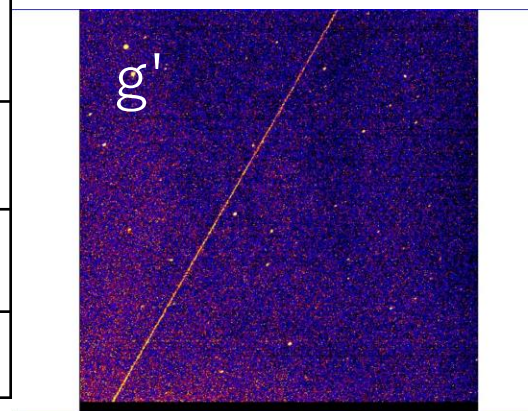
済

済

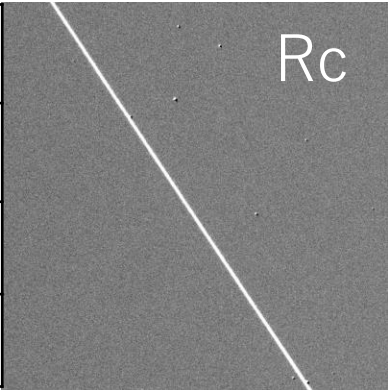
# Visorsatの等級の測定結果1 <石垣島天文台>

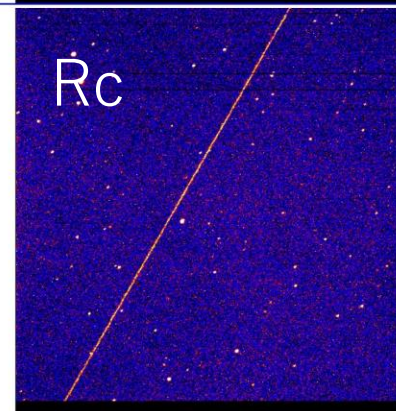
- Visorsat：概ね5-6等中盤で観測波長が長いほど明るくなる。

バンド (等級は 運用高度550kmで規格化)	2021/02/14	2021/3/14
g' band	6.95 ± 0.06 mag	6.44 ± 0.08 mag
Rc band	5.61 ± 0.05 mag	5.59 ± 0.04 mag
Ic band	5.21 ± 0.06 mag	5.09 ± 0.06 mag



- 無塗装スターリンク：Visorsatより1等以上明るい

	2021/2/5	
g' band (運用高度550km で規格化)	5.12 ± 0.17 mag	
Rc band (規格化)	4.40 ± 0.08 mag	
Ic band (規格化)	4.04 ± 0.12 mag	



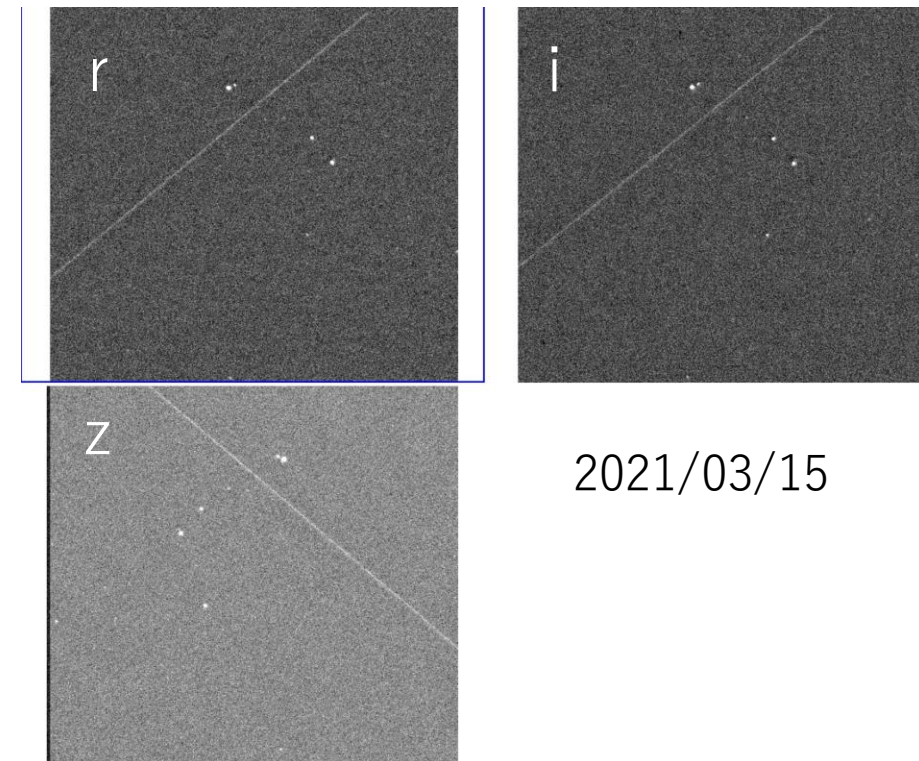
Visorsat  
2021/2/14

# Visorsatの等級の測定結果2 <埼玉大学>

- 位相角(太陽-衛星-観測者)が2回の観測でほぼ同じ( $\sim 110^\circ$ )でも等級に1等近く差が出るという結果になる.

## SaCRA/MuSaSHIで取得したVisorsatの解析結果

	2021/03/11	2021/03/15
r band (運用高度550kmで規格化)	$7.52 \pm 0.08$ mag	$6.55 \pm 0.04$ mag
i band (規格化)	$7.20 \pm 0.06$ mag	$6.28 \pm 0.06$ mag
z band (規格化)	$6.93 \pm 0.09$ mag	$6.24 \pm 0.11$ mag





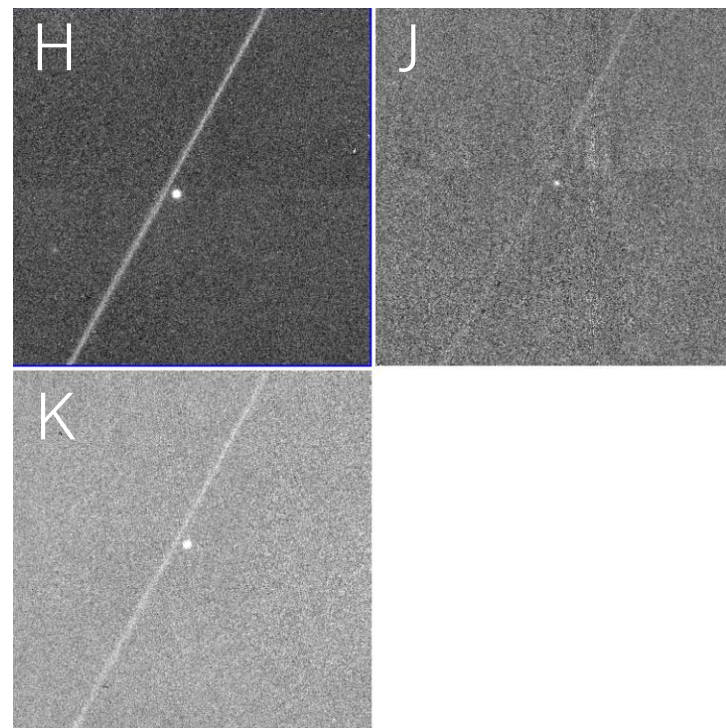
# Visorsatの等級の測定結果3 <西はりま天文台>

- 無塗装スターリンク衛星のJ,K bandの等級は先行研究(Tregloan-Reed+ 2020b)と同程度.
- Visorsatと無塗装スターリンクで同程度だが, 無塗装の方は位相積分(太陽-衛星-観測者のなす角に依存した球面反射成分)の値が小さいことがわかった.

## Nayuta/NICの解析結果

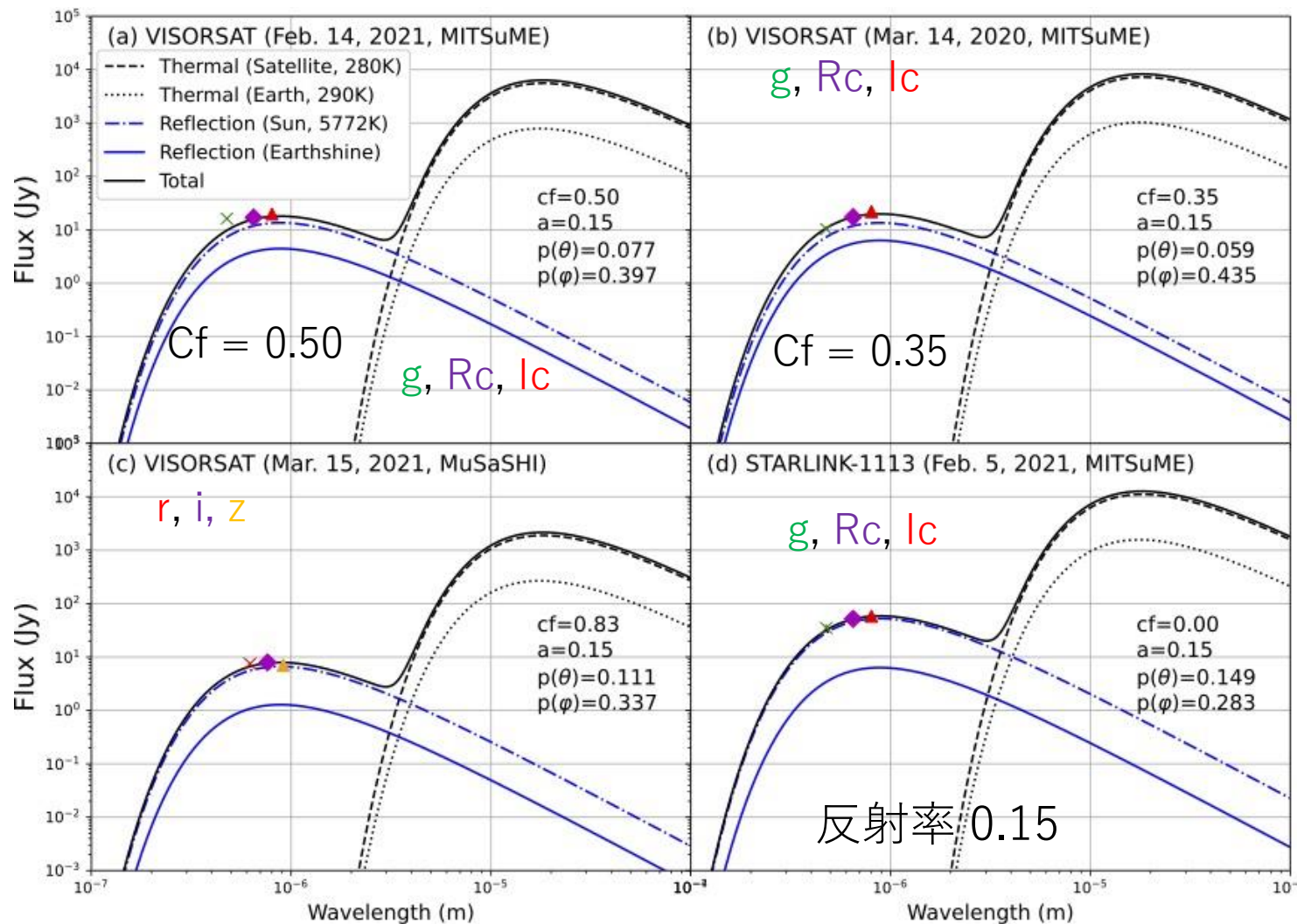
	Visorsat	STARLINK-1113 (無塗装)
J band (運用高度550kmで規格化)	$3.80 \pm 0.24 \text{ mag}$	$3.70 \pm 0.08 \text{ mag}$
H band (規格化)	$3.38 \pm 0.07 \text{ mag}$	$3.46 \pm 0.05 \text{ mag}$
K band (規格化)	$3.65 \pm 0.11 \text{ mag}$	$3.54 \pm 0.07 \text{ mag}$

## Visorsatの飛跡



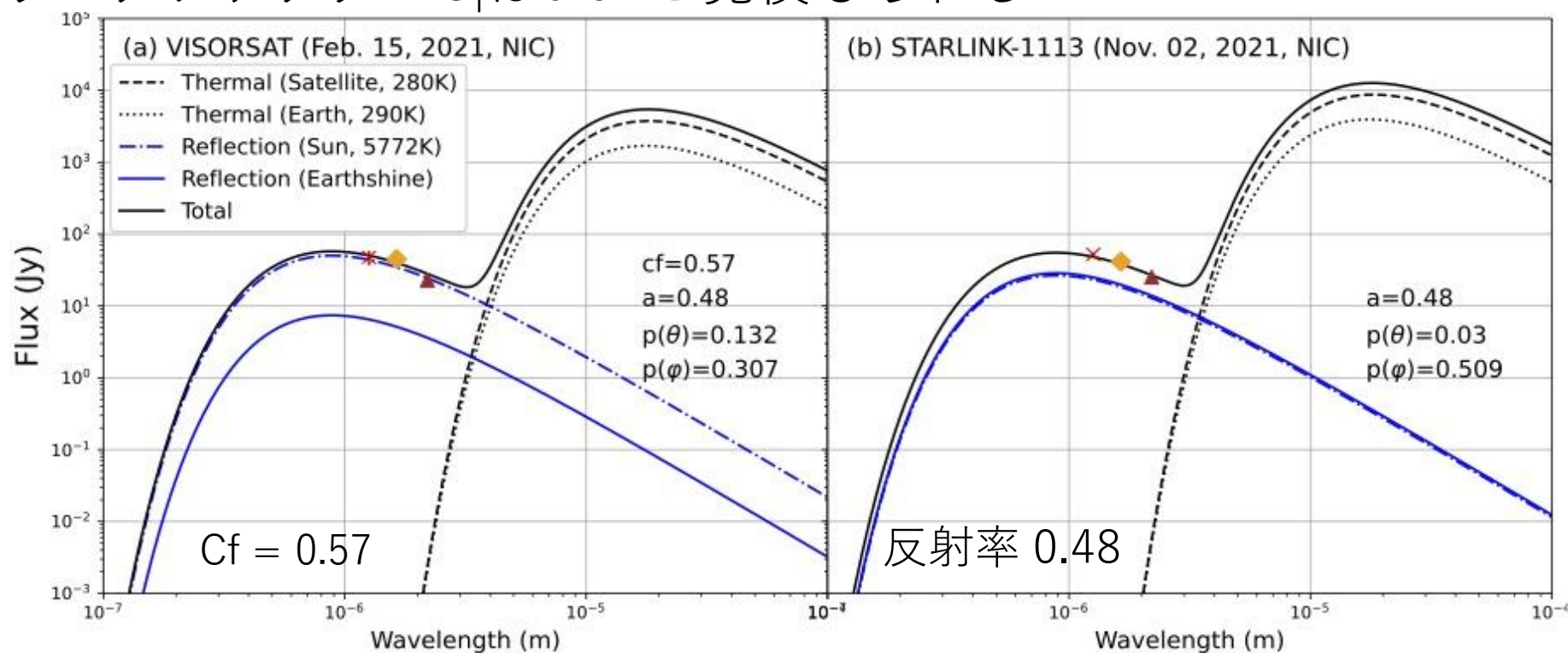
# 反射率と庇のカバー率 (g, Rc, lc, r, i, z band)

- 黒体放射モデルから無塗装スターリンク衛星の反射率 $a$ を求め  
る  $\rightarrow a = 0.15$
- 反射率が求めたら、Visorsatの庇のカバーリングファクター( $0 \leq C_f \leq 1$ )を見積もる.
- $C_{f\_g, R, l} = 35 \sim 50$  %程度.



# 反射率と庇のカバー率 (J, H, K band)

- J, H, K band (Nayuta/NIC)においても黒体放射モデルでフィット可能であることを確認.
- カバーリングファクター $C_f$ は0.57と見積もられる.

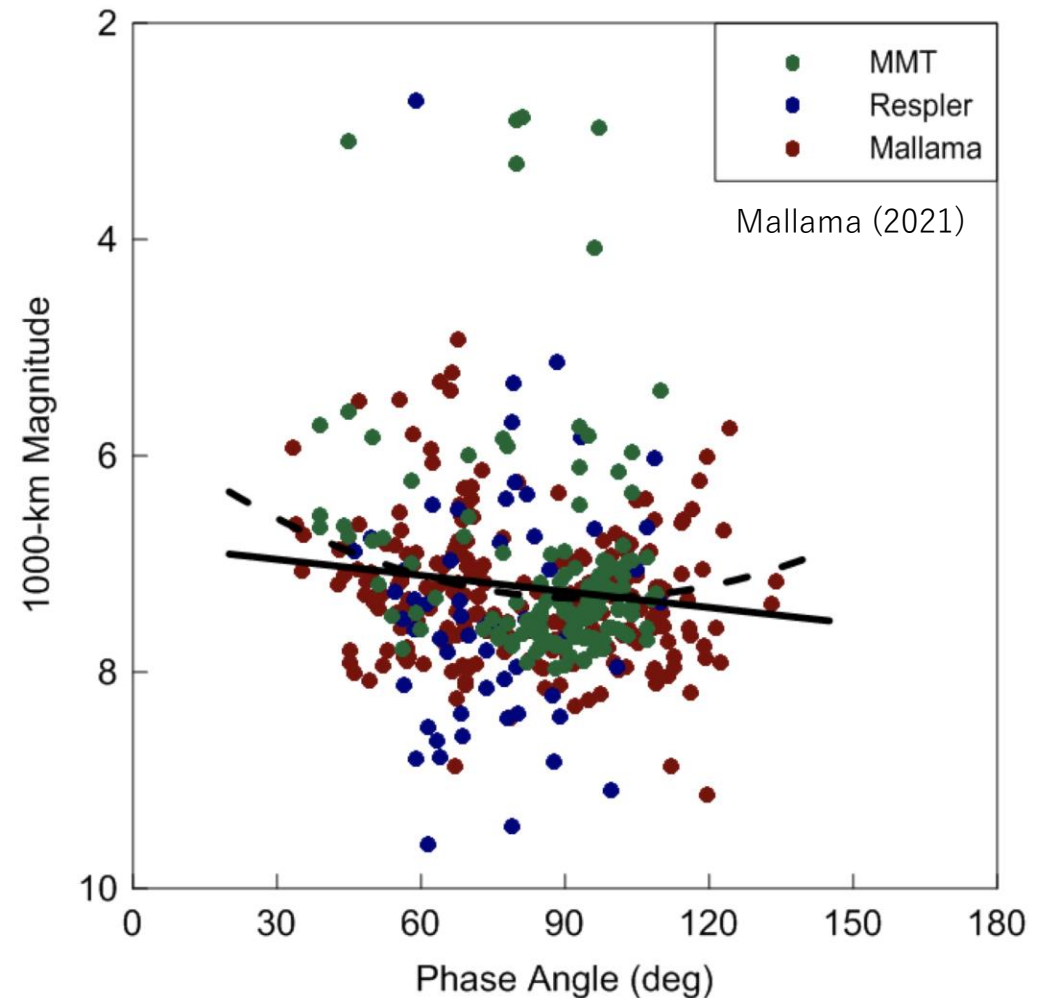


# まとめと展望

- Space Xは2020年6月3日に、太陽光反射を軽減すべく、機体本体に庇を取り付けたVisorsatを打ち上げた。
- 単色での測定結果(Mallama 2020)では6-7等(見かけ)で無塗装の衛星より1等級ほど暗いが、多色での測定結果は報告されていないのでOISTERに観測を依頼。
- 多色でのVisorsatの測定の結果、無塗装スターリンク衛星より1等程度暗く、2機とも観測波長が長くなるほど明るくなることがわかった。
- 黒体放射モデルから、反射率と衛星本体に対する庇のカバー率を見積もった ( $0.35 < C_f < 0.6$ )。
- 観測の達成度は70%程度。今後も位相角依存性などを詳細に探るべく引き続きデータの取得を行い、カラータームを用いた補正も検討し解析を進める。

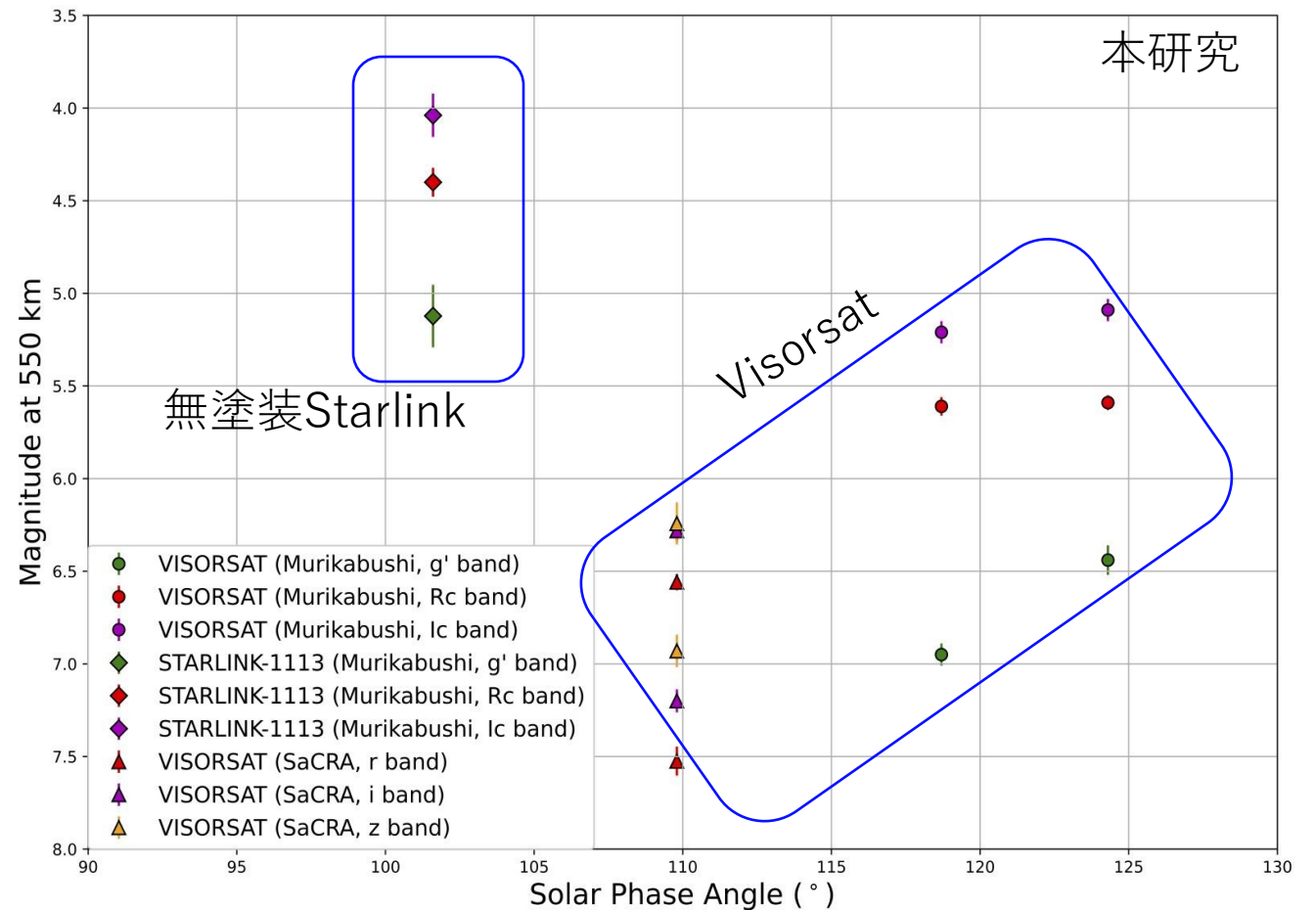
# 位相角(太陽-衛星-観測者)との関係

- バラついているが, 二次関数フィッティングでは位相角が $90^\circ$  付近で最も暗く観測される傾向にある (Mallama 2021).



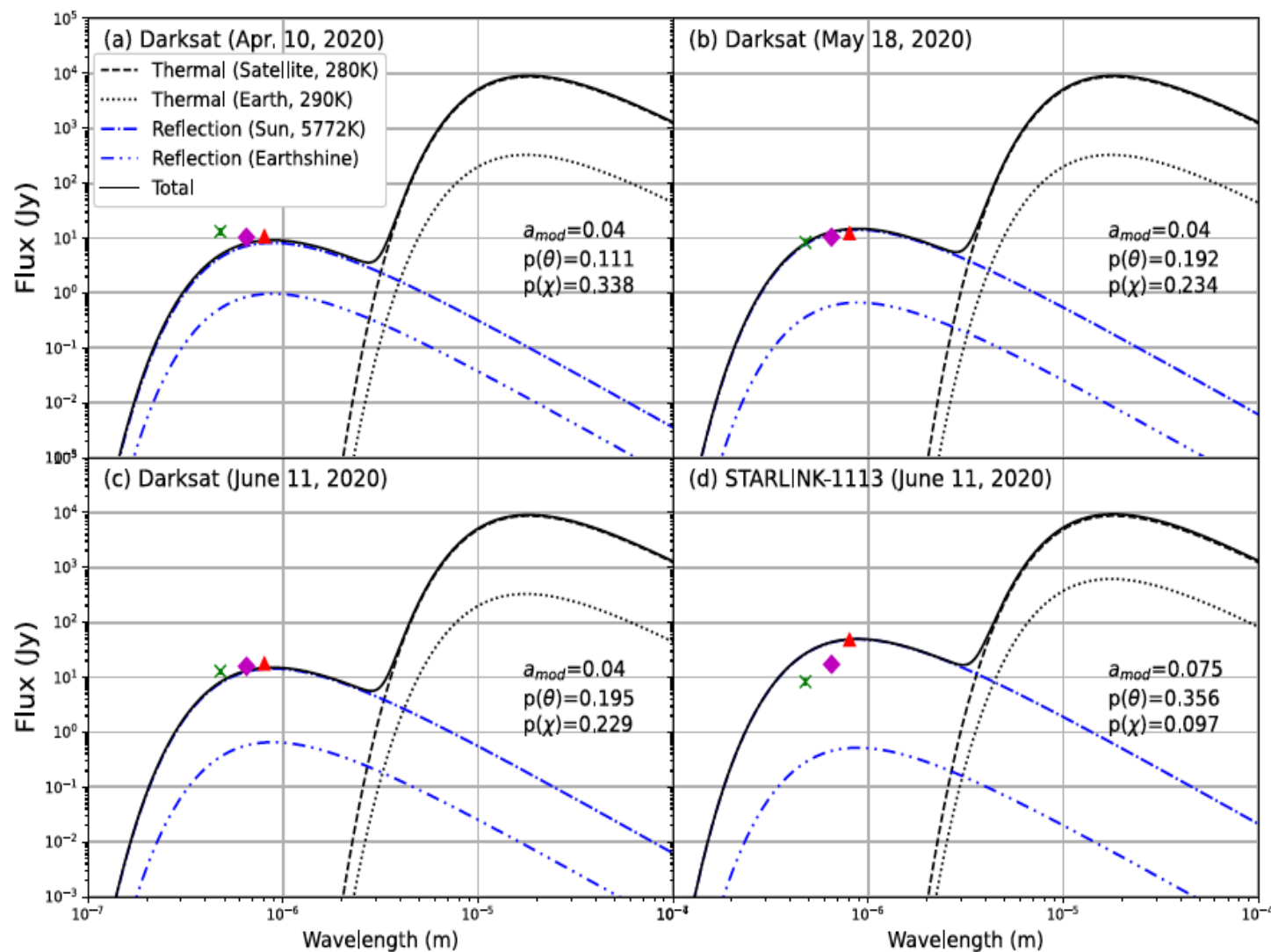
# 位相角(太陽-衛星-観測者)との関係

- 位相角が $90^\circ$  付近で最も暗く観測される傾向(Mallama 2021).
- 本研究においても今後データ数を増やすことで, 同様の傾向を示すことが期待される. カラーには位相角依存性あり?



# VisorsatとDarksatどっちが暗い？

- A：まだ決着はついておらず，検証中．データを増やすことが大事だが，今のところ同等の明るさ(6-7等台，同様のフラックス値)をもつという認識．



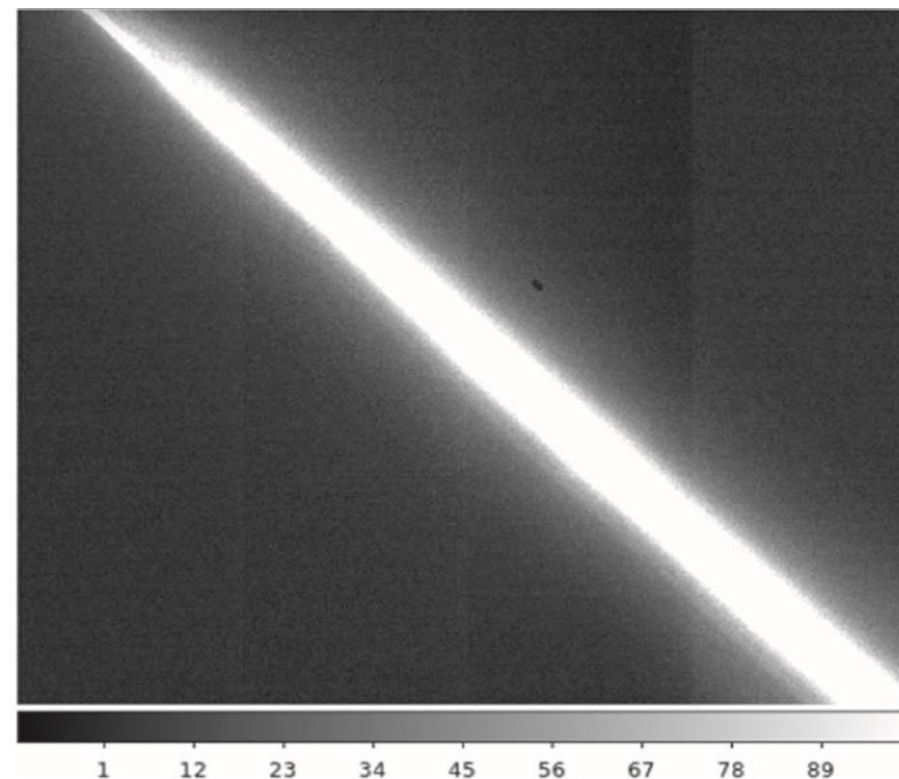
# 大型望遠鏡への影響 (LSSTに関するシミュレーション)

- Tyson+(2020)によるシミュレーション
  - 大型望遠鏡では右の写真のような影響が出ることが想定される(無塗装Starlinkでは $g \sim 15 \text{ mag/arcsec}^2$ ).
  - アルゴリズムでも差し引きが難しい
- 衛星はtwilightで見られることが多いが、たまに25時台にも観測可能な位置に航行している。

**Table 2**  
Five Starlink Satellites Imaged in *g* Band with DECam on the Blanco 4 m in 2020 March

Starlink	Time (UTC)	Phase Angle (deg)	Airmass	PSF FWHM (arcsec)	Background (mag arcsec <sup>-2</sup> )	Trail FWHM (arcsec)	Raw trail (mag arcsec <sup>-2</sup> )	Corrected trail (mag arcsec <sup>-2</sup> )	Speed (deg s <sup>-1</sup> )	Stationary (mag)	Zenith (mag)	<i>d</i> (km)	Size (m)
1102	00:05	56.2	1.03	1.35	19.0	2.43	19.98	14.78	0.77	5.21	5.15	565	3.84
1073	00:15	56.4	1.15	1.35	19.2	2.04	19.96	14.76	0.70	5.49	5.18	625	2.34
1130	00:30	60.1	1.55	1.20	18.9	2.12	21.31	16.11	0.54	7.08	6.13	810	5.58
1112	00:30	60.1	1.55	1.18	19.0	1.87	20.06	14.86	0.54	5.97	5.02	810	4.02
1084	00:35	61.2	1.71	1.33	18.8	1.82	20.27	15.07	0.50	6.29	5.13	878	3.47

**Note.** All exposures are from 2020 March 6 UTC with a 120 s exposure time. The distance to the satellite *d* and derived satellite size “Size” correspond to *d* and *D*<sub>satellite</sub> from Equation (1), respectively. Starlink-1130 is DarkSat.

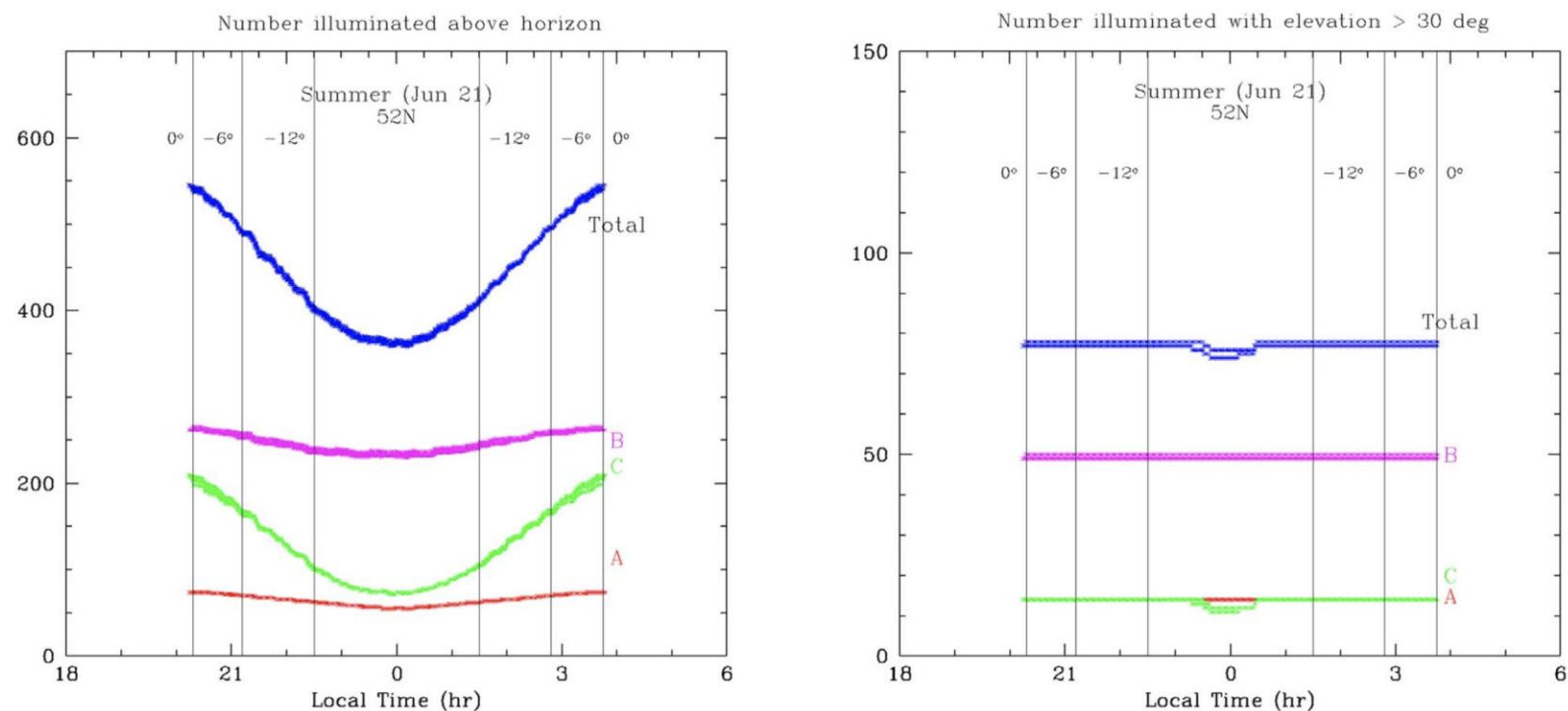


**Figure 11.** Top: the image that results when an artificial satellite trail at the level corresponding to v0.9 Starlink satellites (bright, but below pixel saturation) is projected onto a e2v CCD in the laboratory. Four of 16 channels of a single raw CCD image are shown, and six crosstalk stripes induced by the main trail are visible. Below: the same image after a preliminary nonlinear crosstalk correction algorithm has been applied (see Section 7.1). While the crosstalk trails are nearly removed, the remaining trail itself is several hundred pixels wide and has a surface brightness  $\sim 1000$  times that of important astrophysical signals.



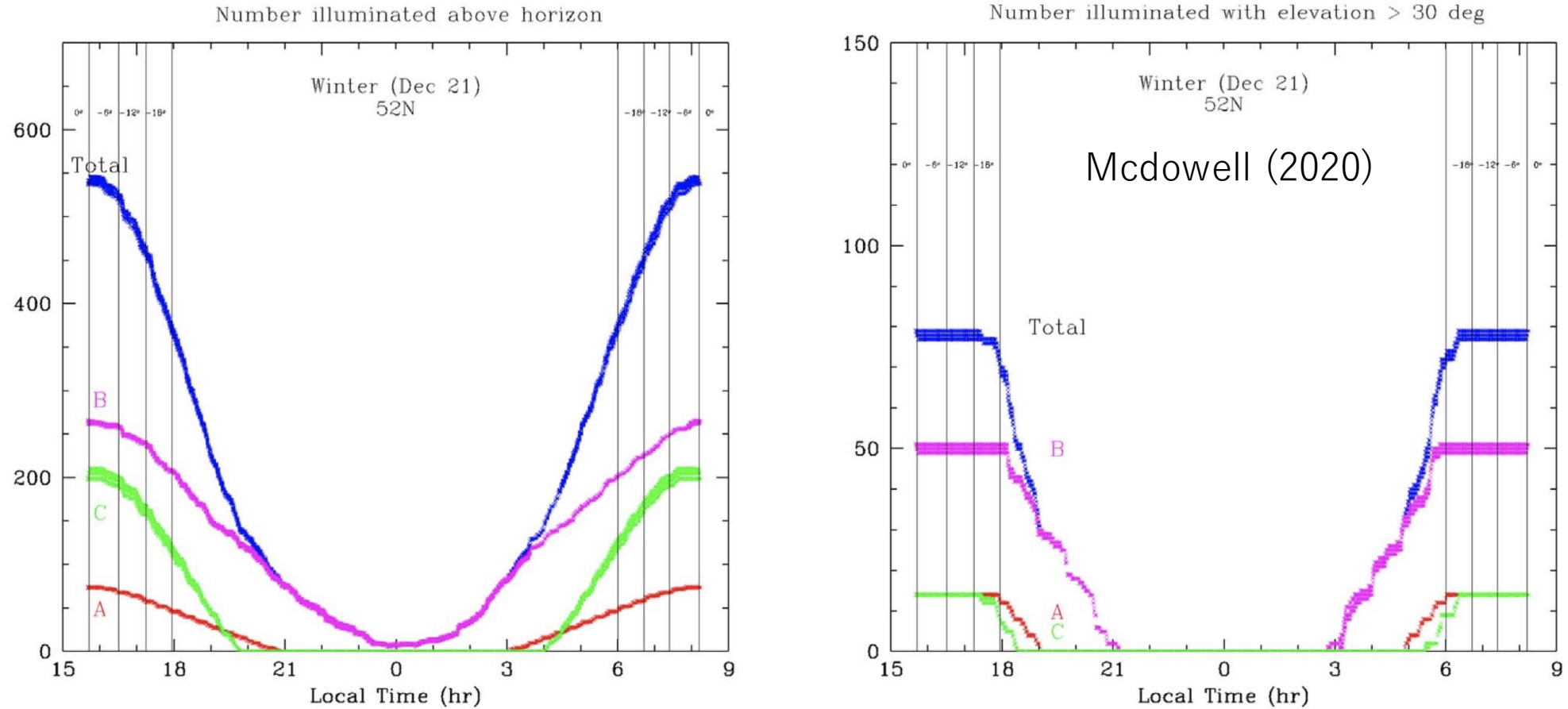
# ロンドンでの機体数の時間依存性 (シミュレーション, 夏)

- ロンドンでのシミュレーション結果は (Mcdowell 2020)  $V = 7.5$  が dominant.



**Figure 6.** Starlink satellites visible from London (52N) in summer vs. time of night. Number above the horizon (left); number above 30° elevation (right). Vertical lines indicate the times at which the Sun reaches elevations 0°, -6°, and -12° for the ground observer. In these and subsequent figures, the separate contributions from layers A, B, and C are shown as indicated. The main contribution is from fainter layer B satellites ( $V \sim 7.5$ ; see Section 4). Nevertheless, the model suggests of the order of 25 bright layer A ( $V \sim 5.5$ ) and C ( $V \sim 4.5$ ) objects visible at high elevations at all times through the summer night with a further 75 close to the horizon.

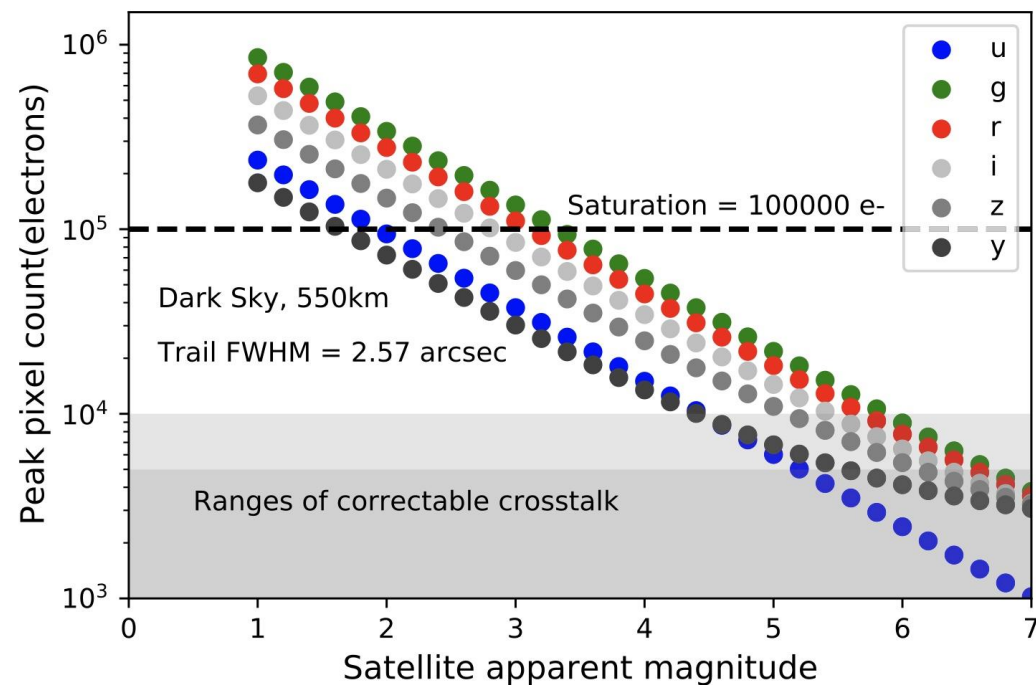
# ロンドンでの機体数の時間依存性 (シミュレーション, 冬)



**Figure 7.** Starlink satellites visible from London (52N) in winter vs. time of night. Number above the horizon (left); number above 3° elevation (right). Vertical lines indicate the times at which the Sun reaches elevations 0°, -6°, -12°, and -18° for the ground observer. The sky should be free of naked-eye satellites in the middle of the night, but there will up to 200 near the horizon during twilight.

# 大型望遠鏡への影響 (LSSTに関するシミュレーション)

- 見かけの等級が何等でサチるか, 見積もられている (Tyson+2020).



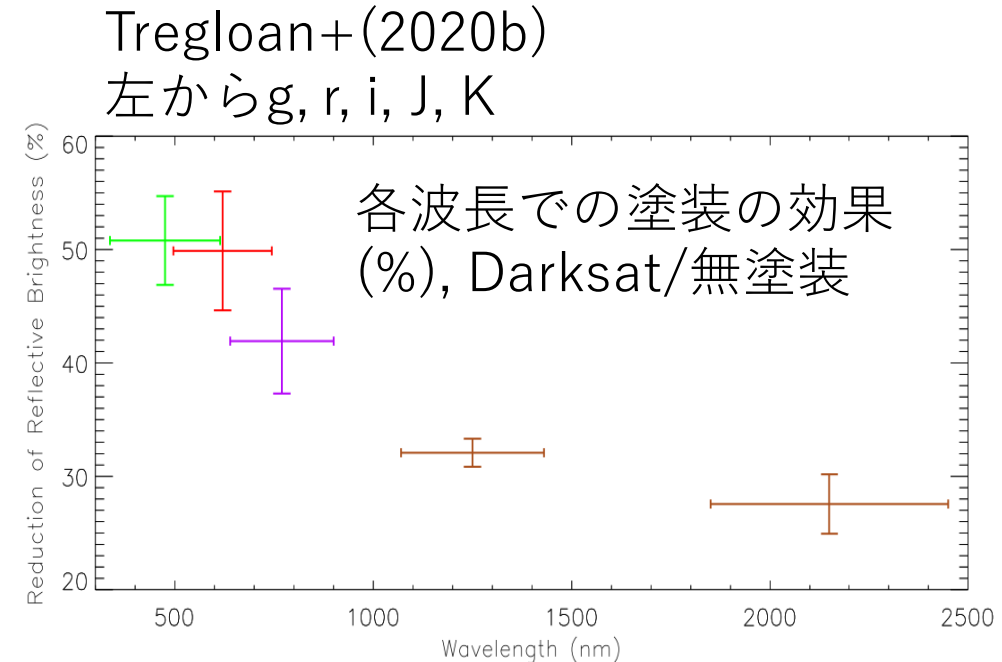
**Figure 5.** The peak trail brightness in  $e^-$  per pixel for a Starlink satellite at 550 km as a function of apparent AB mag as seen by Rubin Observatory. Colors correspond to the six different LSSTCam filter bands. The approximate saturation level of an LSSTCam CCD is indicated. The approximate dynamic ranges over which camera crosstalk artifacts can be corrected down to below the noise level, using our current algorithm, are shown in the shaded regions (see Section 7).

# 近赤外 (J, H, K) への影響に関して

- Tregloan+ (2020b)はJ, KバンドでのDarksatの等級などを測定
- VisorsatとDarksatの明るさは同程度?

**Table 3.** Estimated magnitudes of Darksat and STARLINK-1113 for each passband after correction for the solar incident and observer phase angles, then normalised to a range of 550 km (one airmass), including the observed range and solar phase, incident, and observer phase angles.

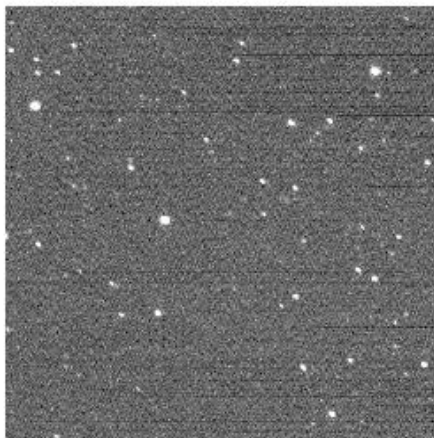
Starlink satellite	Obs. range (km)	Solar phase angle (°)	Solar incidence angle (°)	Observer angle (°)	Passband	Est. scaled mag.	Trail mag. arcsec <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
1130 (Darksat)	866.39	107.7	73.3	45.1	r'	5.63 ± 0.07	24.69 ± 0.04
1130 (Darksat)	991.73	128.4	77.4	51.9	i'	5.00 ± 0.03	24.03 ± 0.02
1130 (Darksat)	1063.91	126.8	75.5	54.8	J	4.21 ± 0.01	23.22 ± 0.01
1130 (Darksat)	1146.11	115.2	78.2	57.7	Ks	3.97 ± 0.02	23.02 ± 0.01
1113	718.89	62.7	72.0	35.9	r'	4.88 ± 0.05	23.87 ± 0.04
1113	880.06	123.2	79.3	48.9	i'	4.41 ± 0.04	23.36 ± 0.03
1113	1004.76	118.7	76.7	51.8	J	3.79 ± 0.01	22.76 ± 0.01
1113	885.43	109.5	81.4	49.8	Ks	3.62 ± 0.02	22.53 ± 0.01



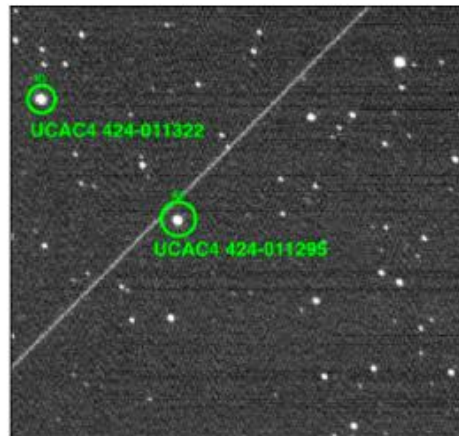
# 観測/解析に関して

## 観測等に関して2

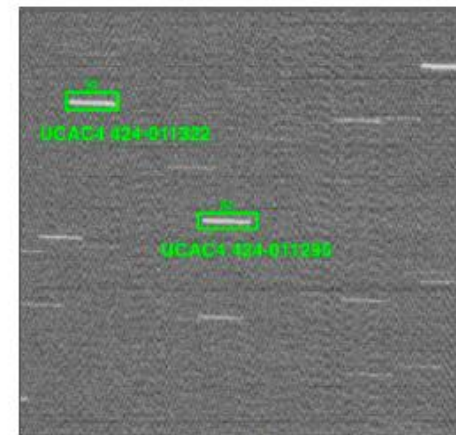
- ・ 予報位置(複数個の参照星あり)・時間における待ち受け観測では, 露出時間を5秒とする.
  - 1) 事前(あるいは後)に予報位置を5秒間撮影 (画像1)
  - 2) 衛星の撮影中央時刻が10:00:00 (UT)なら, 撮影開始時刻が9:59:57.5になるように撮影 (画像2).
  - 3) 望遠鏡を止めて周辺の星像を伸ばして5秒撮影. これにより衛星の飛跡と測光のやり方を統一する (画像3).
  - 4) 一次処理, スカイ引きをしたfitsがあれば幸いです. WCS較正は必ずしもなくて良い.



画像1



画像2



画像3