

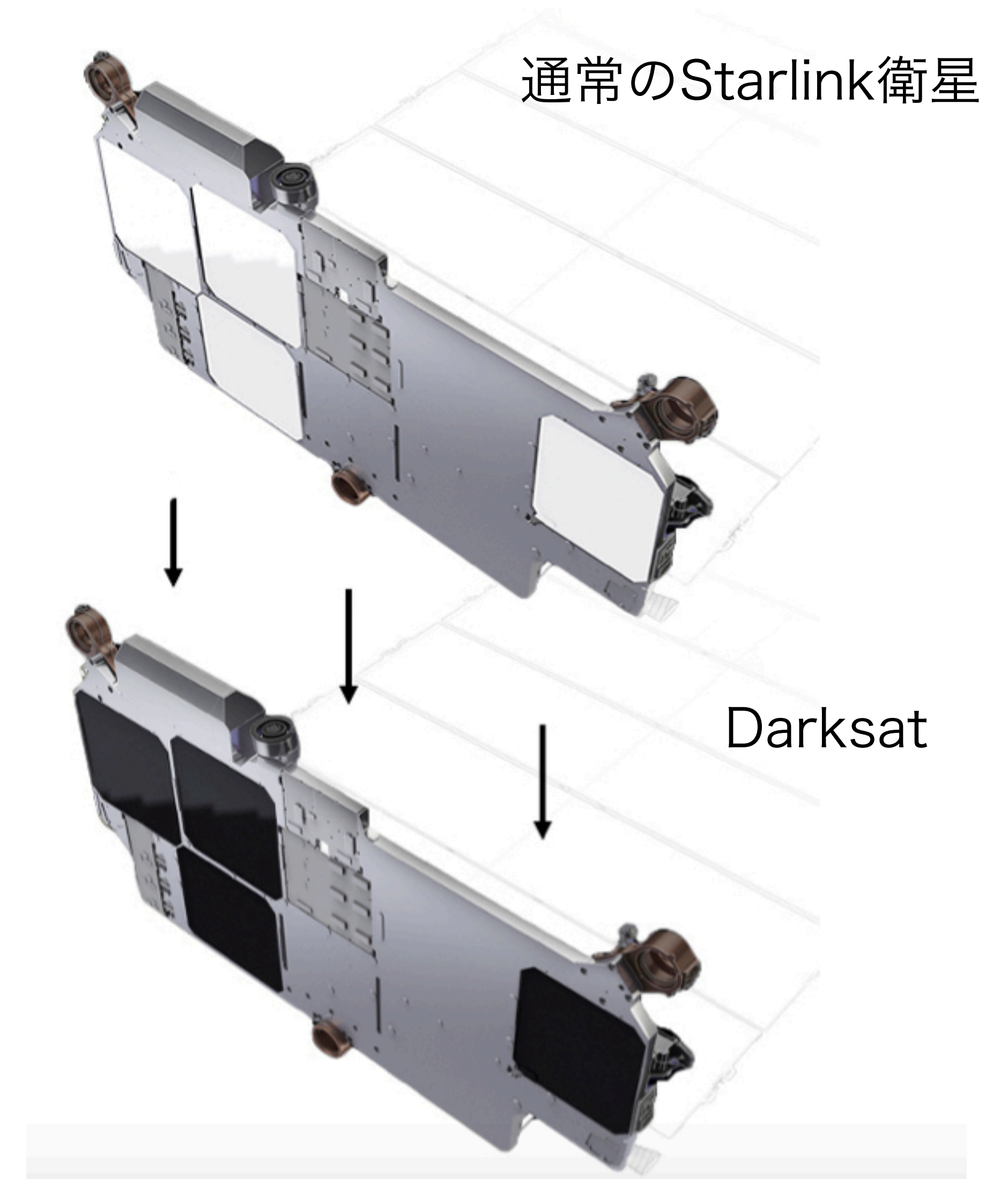
第11回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ 2020年11月10日(火)～12日(木)

多地点・多色同時撮像による Starlink衛星の観測的影響の調査

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

Introduction

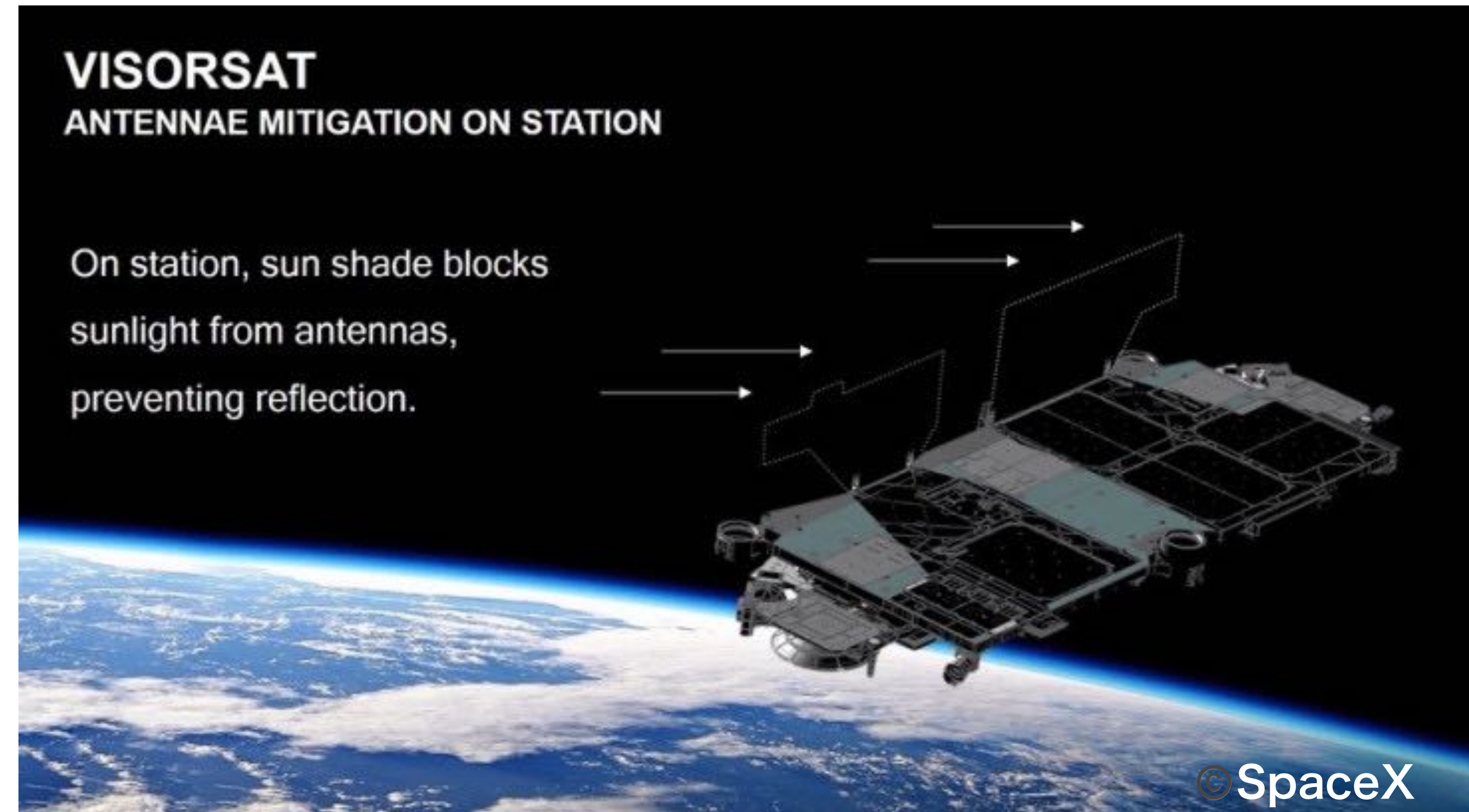
- アメリカ合衆国のSpaceX社は2019年5月より60機のStarlink衛星の打ち上げを開始した. 2020年代中頃までに総数42,000機の運用を予定している.
- 近年, 観測研究や景観への影響が指摘されており, IAUや国立天文台をはじめとする世界各国の天文台が声明を発表した. また, 先行研究により大規模サーベイ等への影響が評価されている (e.g. Hainaut & Williams 2020).
- これを受け, SpaceXは反射光を軽減させるための塗装を施したDarksat (STARLINK-1130)を今年1月に, 庇を装着したVisorsatを今年6月に打ち上げた.



Tyson et al. (2020)

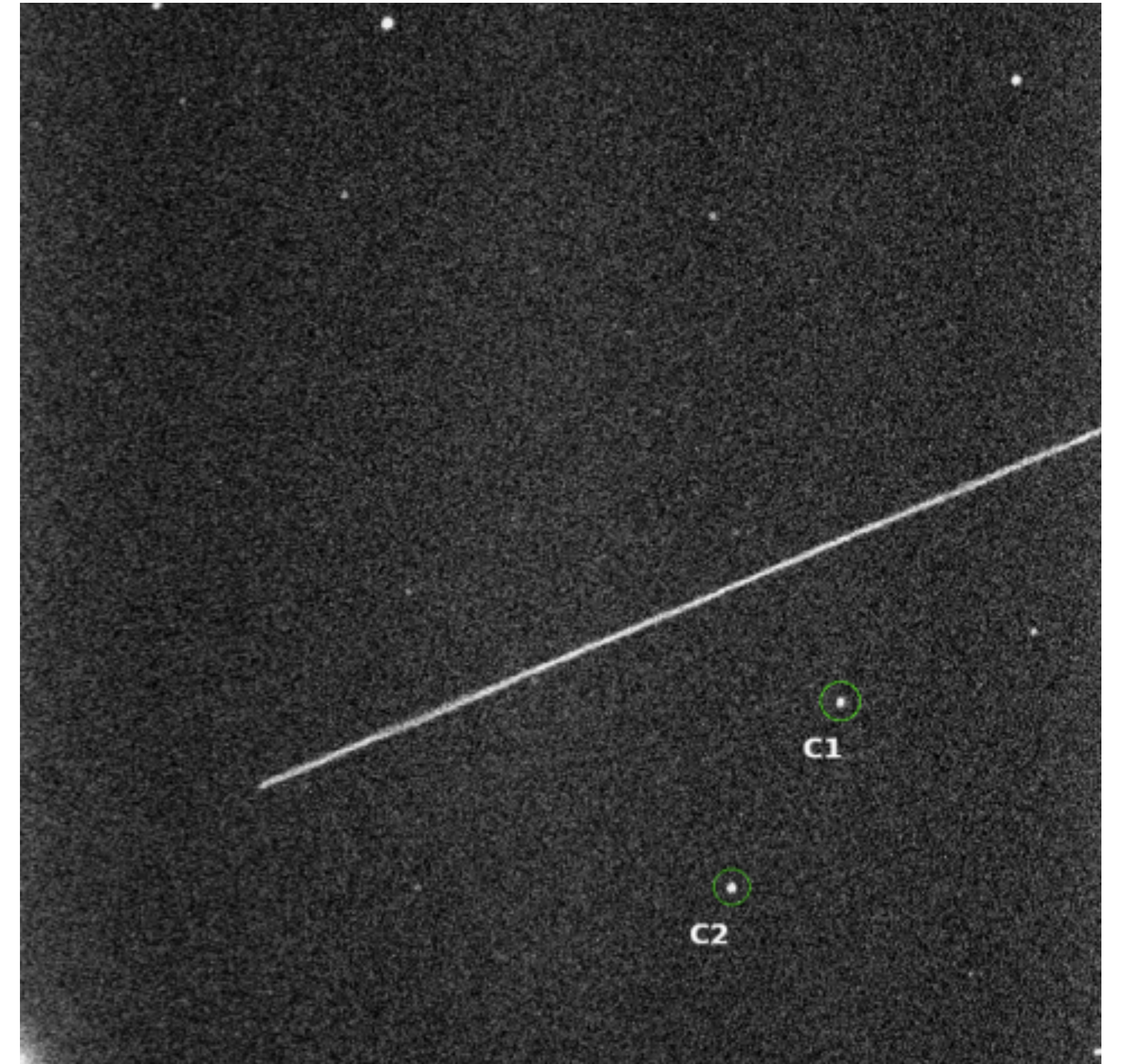
Introduction

- アメリカ合衆国のSpaceX社は2019年5月より60機のStarlink衛星の打ち上げを開始した。2020年代中頃までに総数42,000機の運用を予定している。
- 近年、観測研究や景観への影響が指摘されており、IAUが声明を発表した。また、先行研究により大規模サーベイ等への影響が評価されている (e.g. Hainaut & Williams 2020)。
- これを受け、SpaceXは反射光を軽減させるための塗装を施したDarksat (STARLINK-1130)を今年1月に、庇を装着したVisorsatを今年6月に打ち上げた。



先行研究での報告 (1)

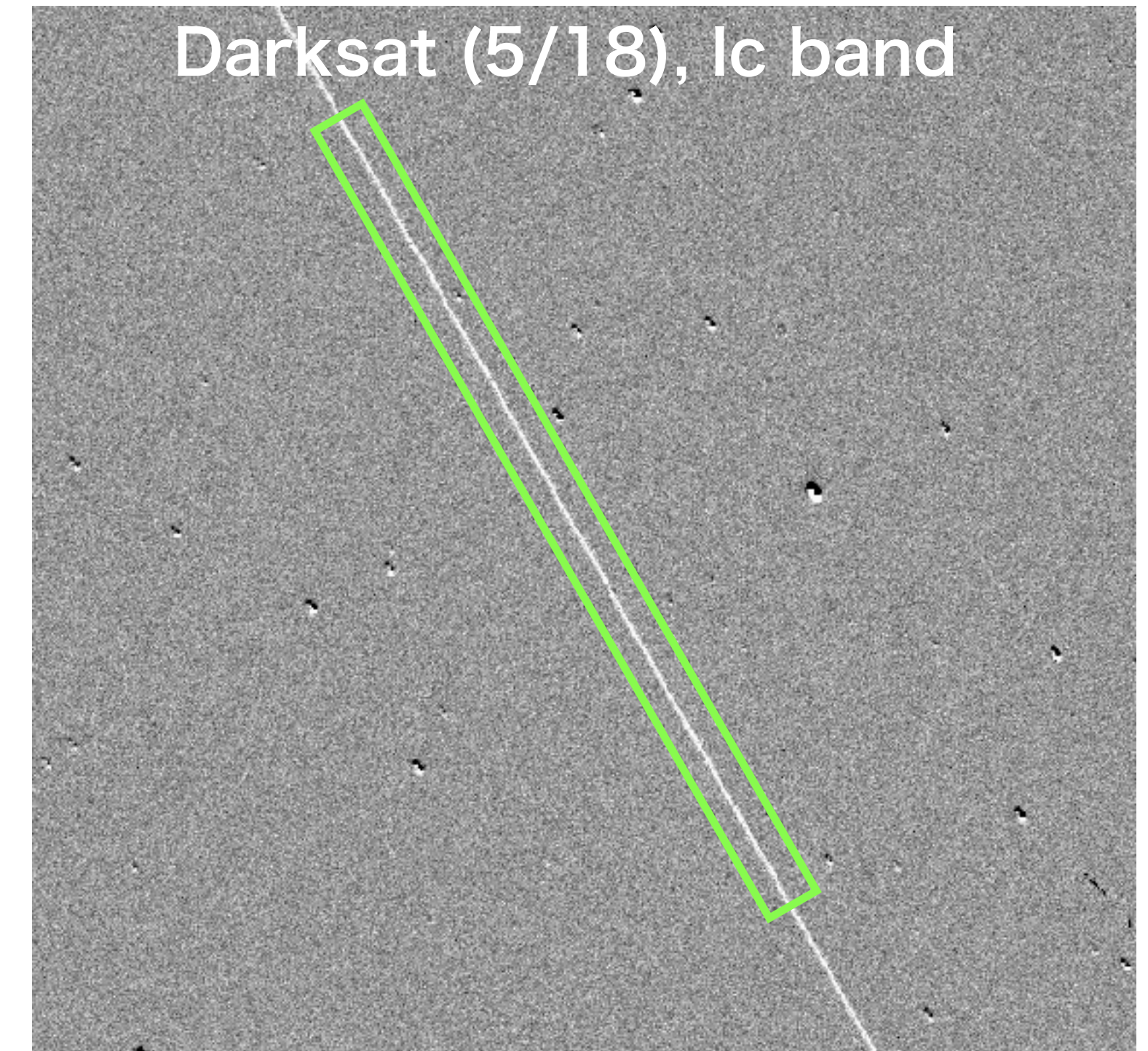
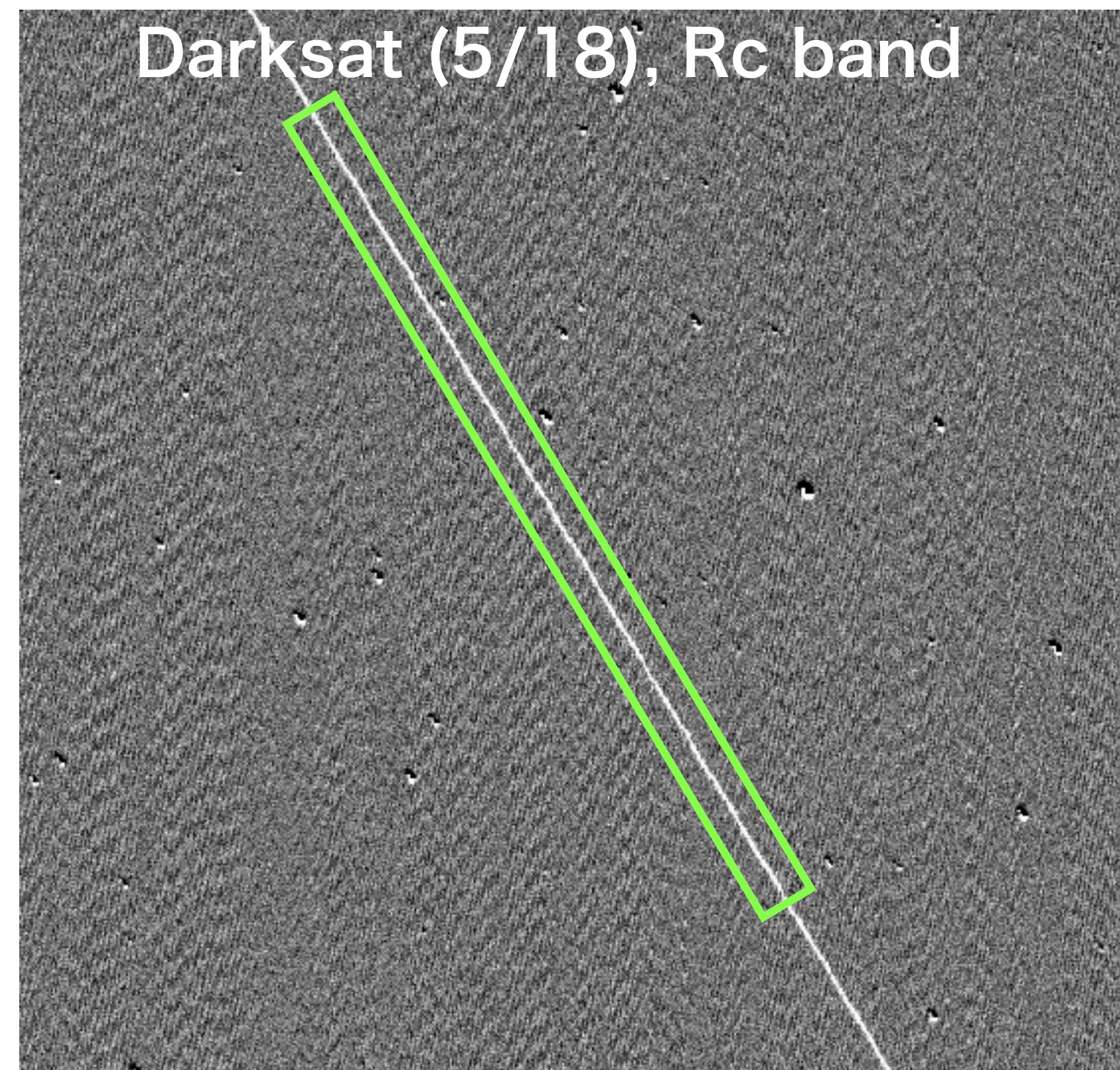
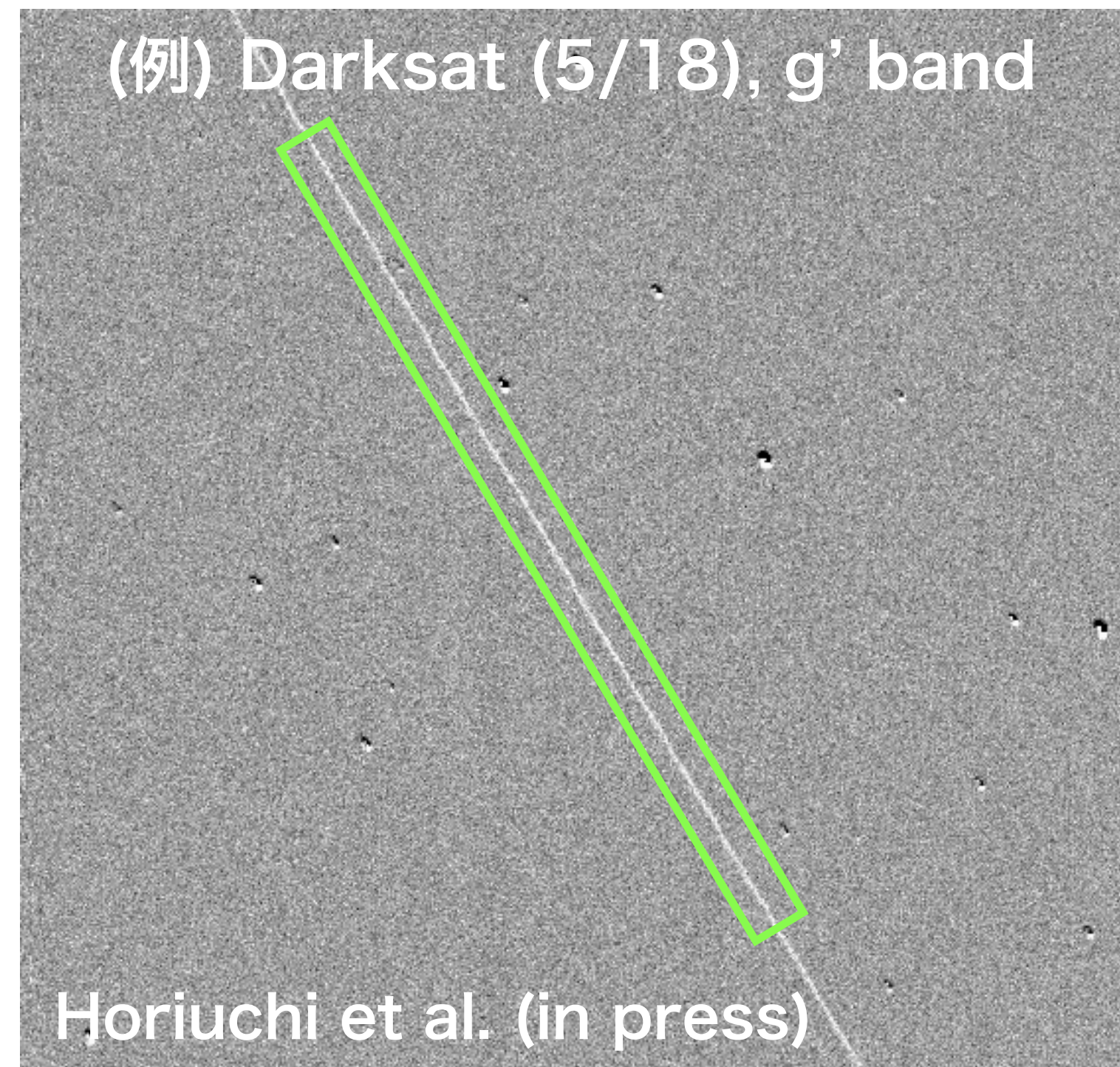
- Tregroan-Reed et al. (2020; 以下Tr20)では Darksatと通常のStarlink衛星, STARLINK-1113の等級の測定(g' band)を行ない, その見かけの等級はそれぞれ7.46 及び6.59等であった.
- Darksatは眼視での確認は困難であるが, 観測研究への影響は無視できないものとなっている.



Darksatの光跡 (Tr20)

先行研究での報告 (2)

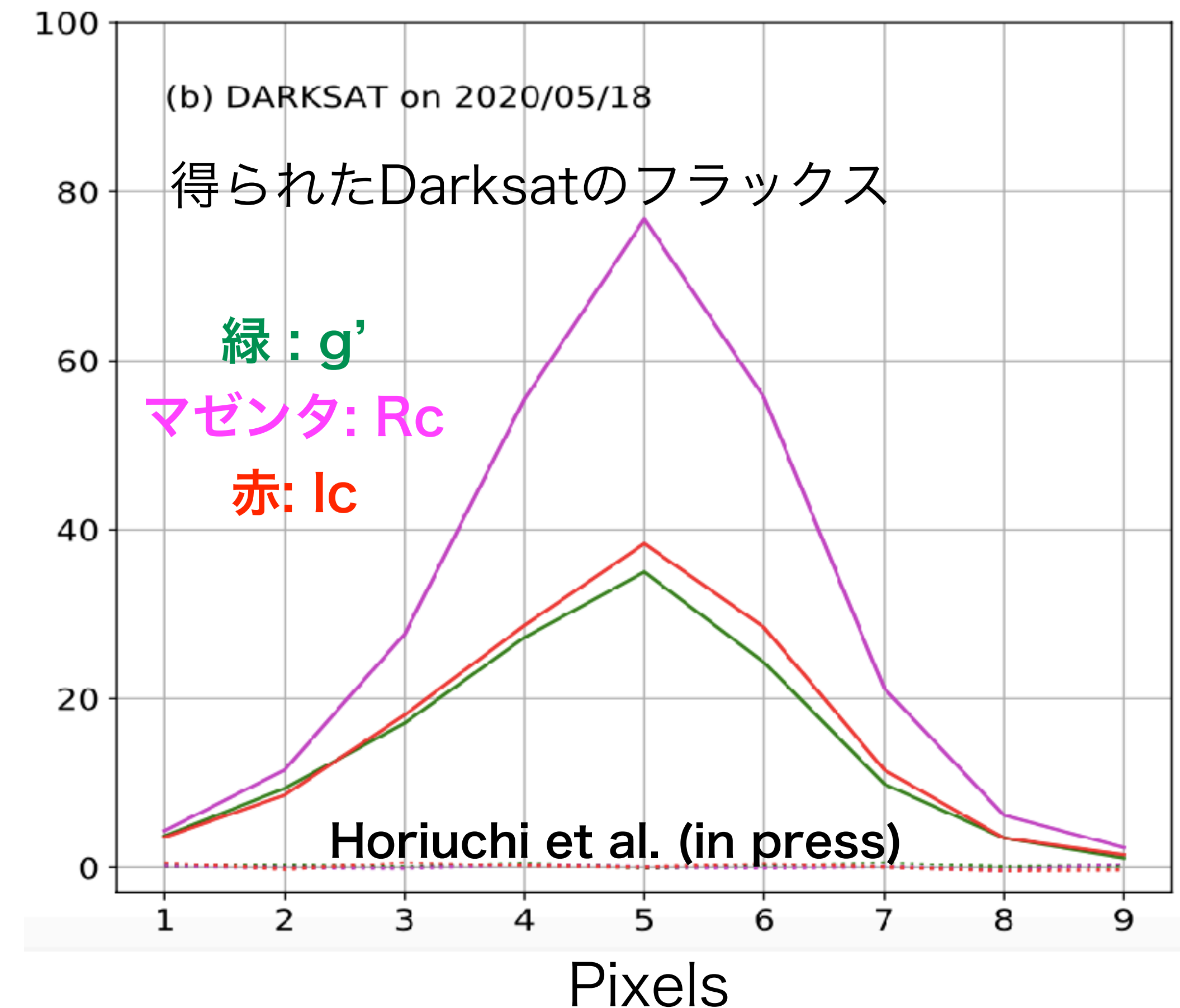
- Horiuchi et al. (in press)ではむりかぶし望遠鏡/MITSuMEの3色同時撮像で Darksatと STARLINK-1113の等級評価を行った. その結果, 1) これらの長波長ほど明るく, 2) Darksatの反射率(アルベド)はSTARLINK-1113の半分程度であった.
- <観測> 衛星は非常に速く (~ 1000 arcsec/s)追尾が困難なため, 予報位置に待ち受け観測を行う.



データ解析

- SAO DS9のProjectionを用いて, Starlink衛星の矩形領域のフラックス f_{sat} を評価する(下図). この時, 周囲の星像を伸ばしたフレームも用意し同様の矩形測光で参照星のフラックス f_{star} も求める→ 光跡と参照星との相対測光によって等級 m_{sat} を評価する.
- フラックスは衛星の角速度 V_{sat} に反比例するのでその効果も加味して以下の式で等級を算出する.

$$m_{\text{sat}} = m_{\text{star}} - 2.5 \log \left(\frac{V_{\text{sat}}}{V_{\text{star}}} \frac{f_{\text{sat}}}{f_{\text{star}}} \right)$$



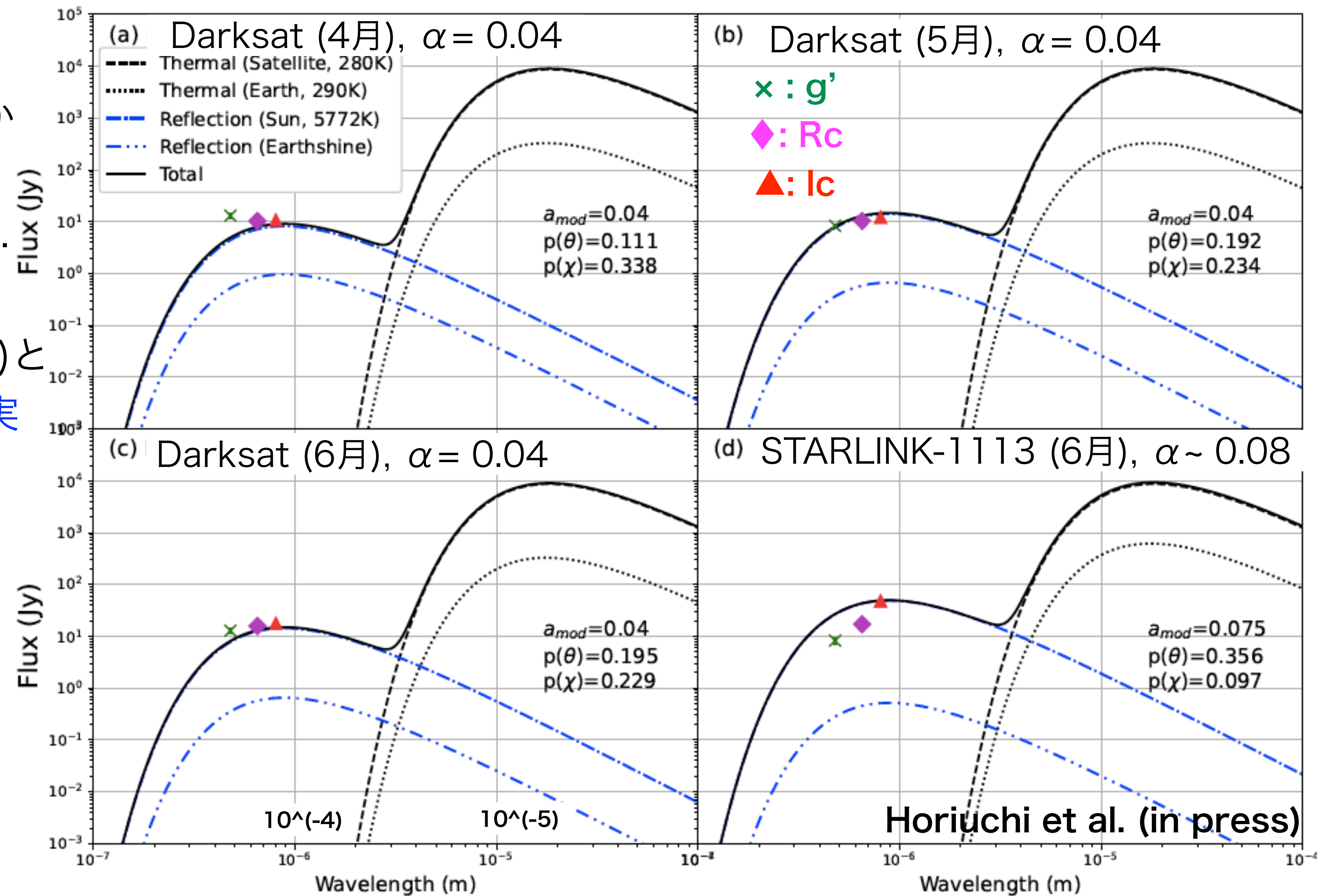
DarksatとSTARLINK-1113の等級

- むりかぶし望遠鏡/MITSuMEで測定したDarksatとSTARLINK-1113の見かけの等級を右の表に示す.
- Darksatのg'バンドの等級はTr20と同等(各月の平均は7.37等).
- 傾向として, 長波長ほど明るい.

衛星	日付け	g' (mag)	Rc (mag)	Ic (mag)
Darksat	2020 4/10	6.95±0.11	6.92±0.04	6.64±0.07
Darksat	2020 5/18	7.52±0.07	6.99±0.06	6.59±0.07
Darksat	2020 6/11	7.65±0.11	7.13±0.04	6.77±0.04
STARLINK- 1113	2020 6/11	7.69±0.16	6.61±0.06	5.25±0.07

黒体放射による等級のモデリング

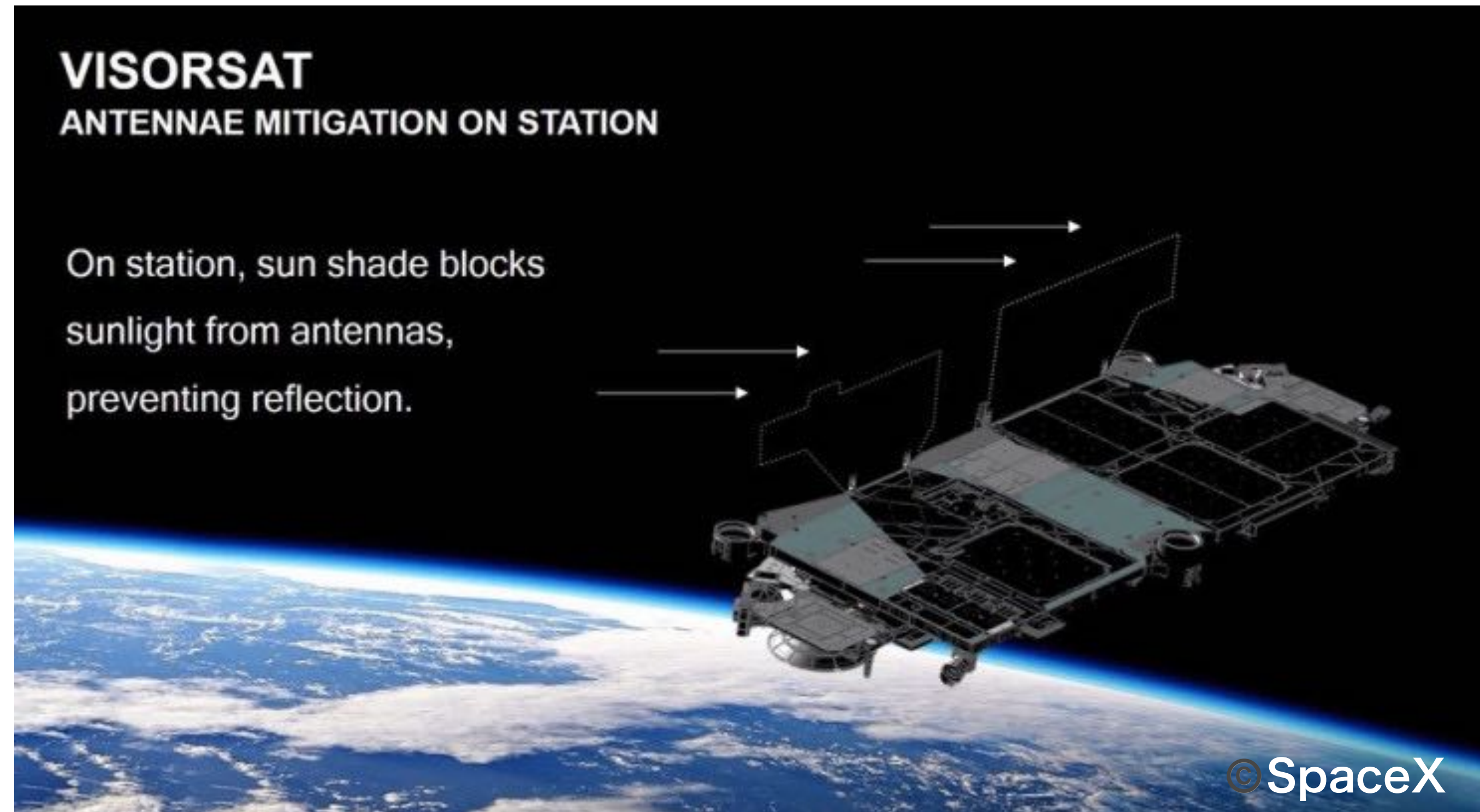
- Darksat, STARLINK-1113の見かけの等級から、黒体放射によるフラックスのモデリングを行なった。
- 衛星と地球の熱放射(黒破線, 点線)と太陽光反射, 地球照反射(青鎖線, 実線)の4つの成分を加味した。
- Darksatの反射率はSTARLINK-1113の半分程度
→ 黒色塗装の効果を実証



- 衛星温度 $T=390$ K, 衛星反射率 $\alpha=0.04, 0.08$, 衛星半径 $r = 1.5$ mでのモデリングは、可視域では反射成分が、中間赤外線では熱放射成分が支配的であることを示唆する。

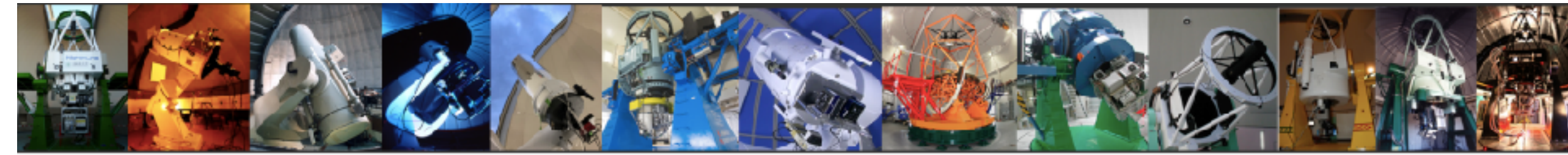
Visorsatの多地点・多色同時観測

- SpaceX社は底を装着した Visorsatを2020年6月3日に打ち上げた.
- Darksatよりも反射光低減の効果が見込まれるが, Visorsat, 通常のStarlink衛星を含めて多波長同時観測(光・赤外大学間連携)での多角的な検証が求められる.

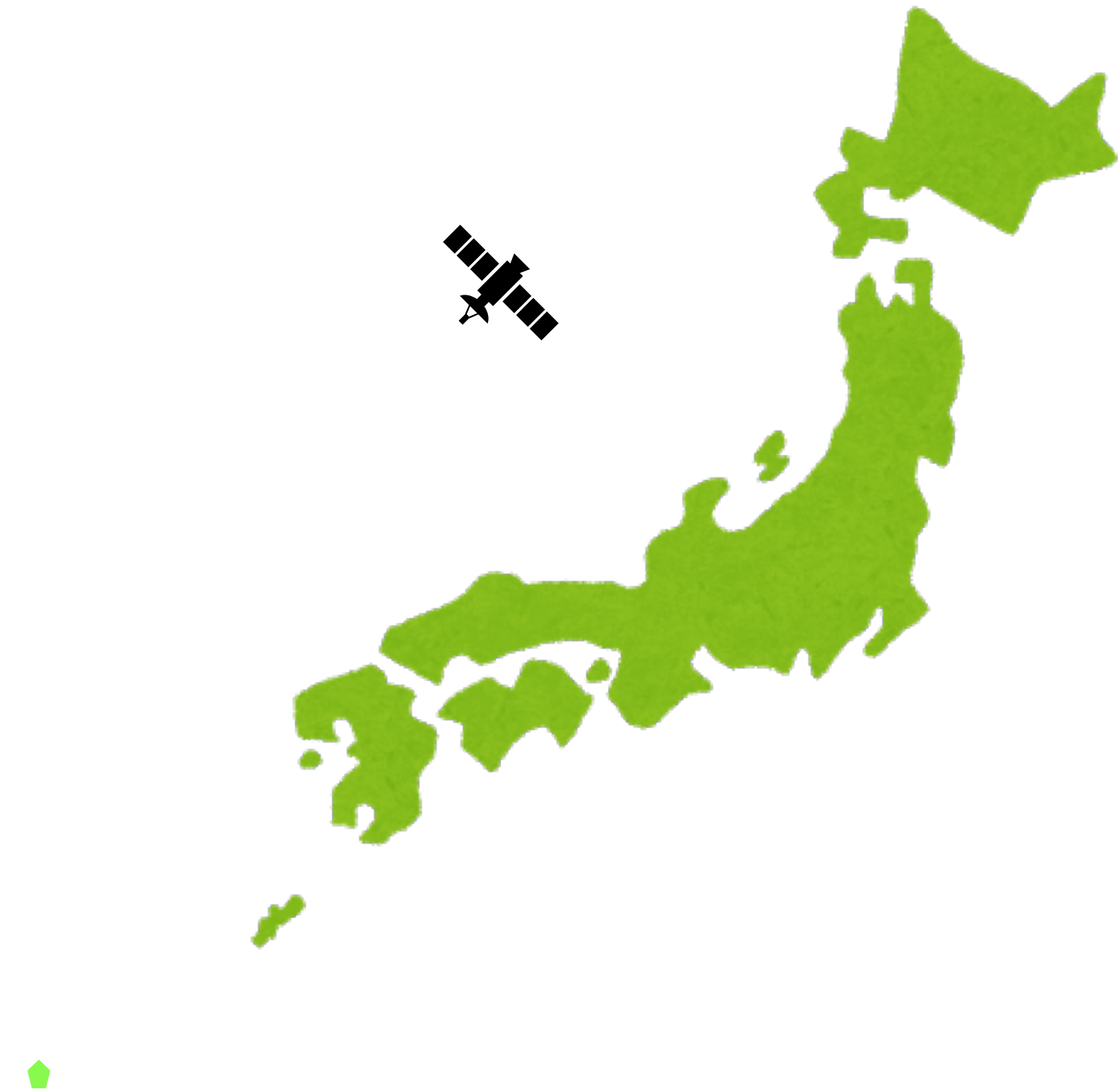


多地点・多色同時観測のメリット

- 1) 多バンド同時観測ゆえに、通常のStarlink 衛星, Visorsat の等級をそれぞれ詳細に比較し、どの波長帯にどれだけの影響が及ぶかを精密に調査できる.
- 2) 多地点観測なので、これらの衛星の影響が位相角(太陽-衛星-観測者のなす角)によってどのように等級に差がでるか詳細に検討可能.
- 3) 多バンドにおける反射光フラックス密度を黒体放射による理論モデルと比較することによって、各波長帯での反射率(アルベルト)を詳細に見積もることが可能である.



© OISTER



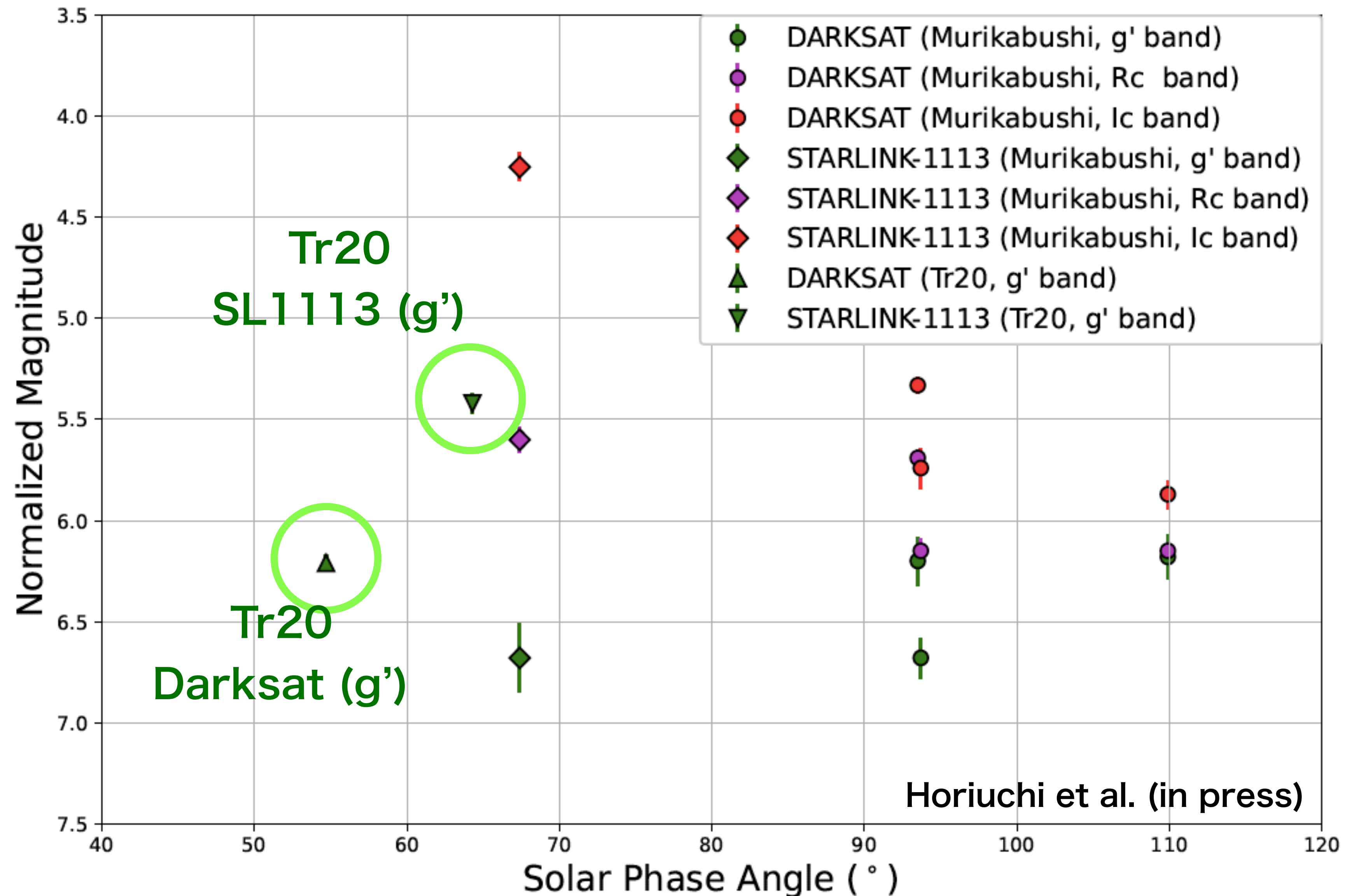
この観測は国内外の光赤外ネットワークへの影響を調査する上で重要である.

観測等に関して

- ターゲットはVisorsat, STARLINK-1113 (通常のStarlink衛星), 波長は紫外・可視から近赤外までとする. これによりVisorsatと通常のStarlink衛星とで多色で等級を比較できる.
- 観測時の高度は30度以上. 衛星は非常に速く移動するので(~ 1000 arcsec/s以上など), 追尾ではなくHeavensatによる予報位置を周知した上で, 待ち受け観測とする.
- 全連携機関で同時刻観測は不可能. ここで述べる「同時」とは, 1) 同日, 2) 部分的な多色同時観測(MITSuMEやHONIR)を意味する. 基本的には各機関リレー形式での観測となる.
- 位相角(太陽-衛星-観測者のなす角)の依存性を詳細に調べるために複数回観測

等級の位相角依存性 (Darksat等の場合)

- 等級の位相角(太陽-衛星-観測者のなす角)の依存性を検証した (右図).
- この時, 等級の距離依存性を考慮し一定距離(衛星高度550 km)で等級を規格化してある.
- 明確な位相角依存性は確認されず, Darksatのg'等級はTr20と同程度.



まとめ

- Starlink衛星による観測研究などへの懸念に関してIAUや国立天文台などの世界の天文台は声明を発表した.
- 先行研究(e.g., Tregloan-Reed et al. 2020, Horiuchi et al. in press)によってDarksatと通常のStarlink衛星の等級や反射率が評価されており, Darksatにおける黒色塗装の効果を実証している.
- Visorsatについては連携観測による詳細な等級評価がまたれる.
- 連携機関全箇所で同時刻観測は不可能なので, リレー形式で観測を行う計画である.