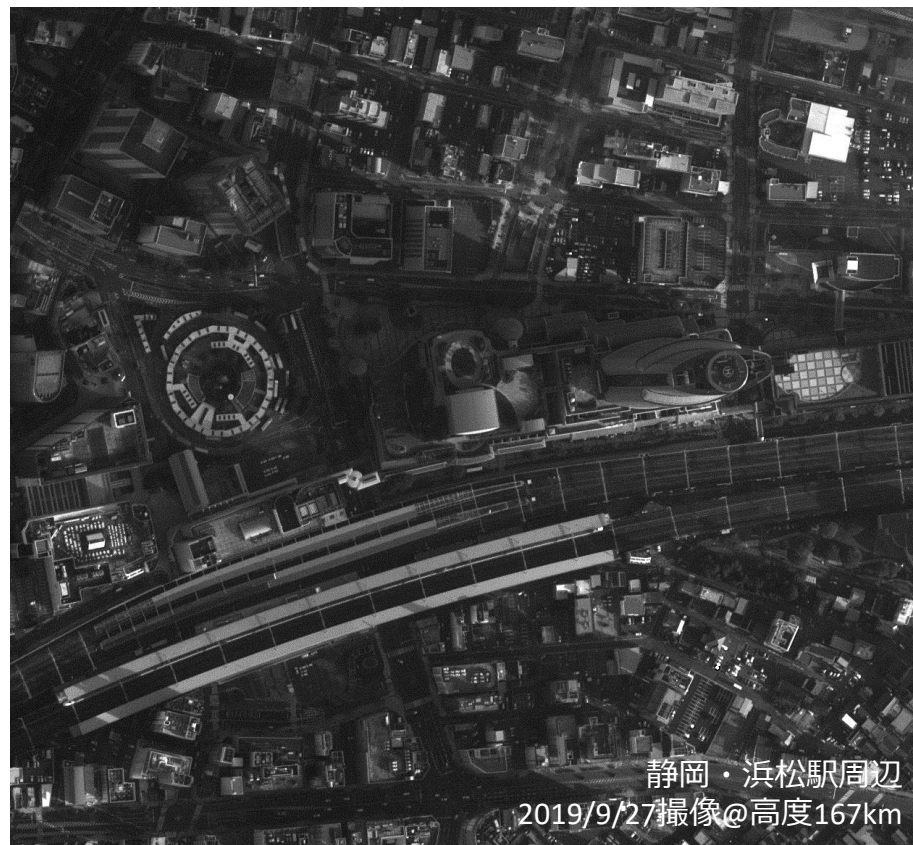
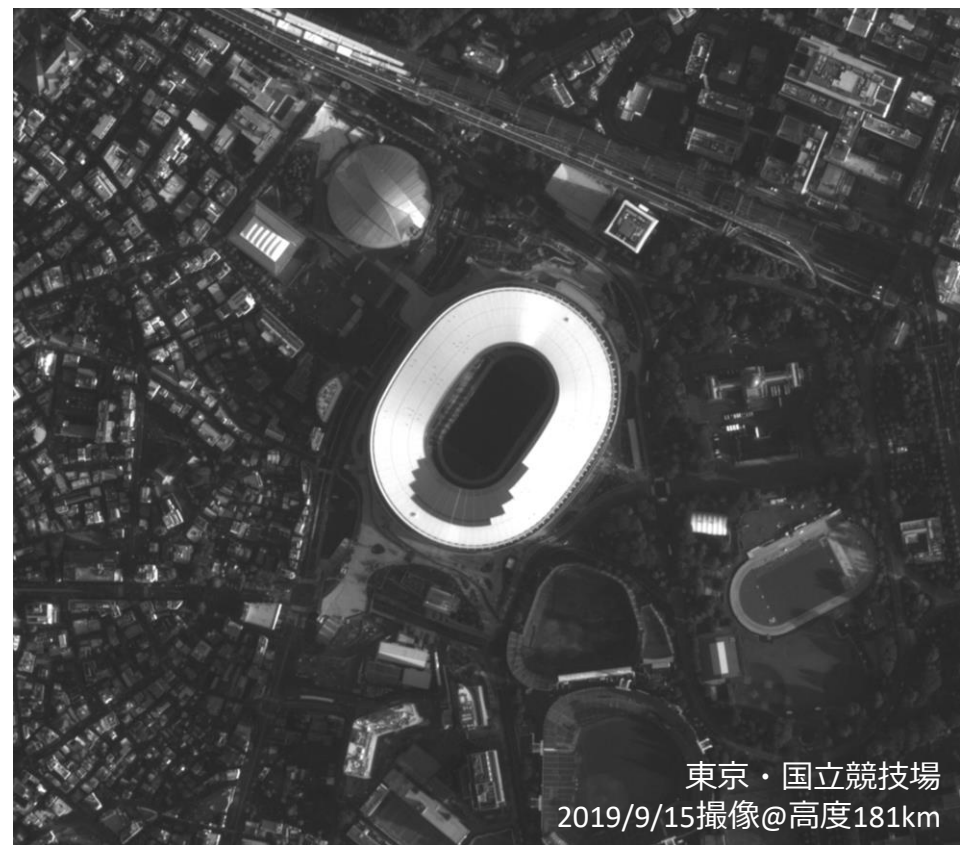


小型高分解能光学センサ (SHIROP) の 軌道上運用成果



2020年 1月 24日
JAXA 第一宇宙技術部門
SLATS プロジェクトチーム
此上 一也

1. 超低高度衛星による光学観測
2. 小型高分解能光学センサ(SHIROP)の概要
3. つばめの軌道プロフィールとSHIROP実験計画
4. SHIROPの主な軌道上評価項目と成果
5. まとめ

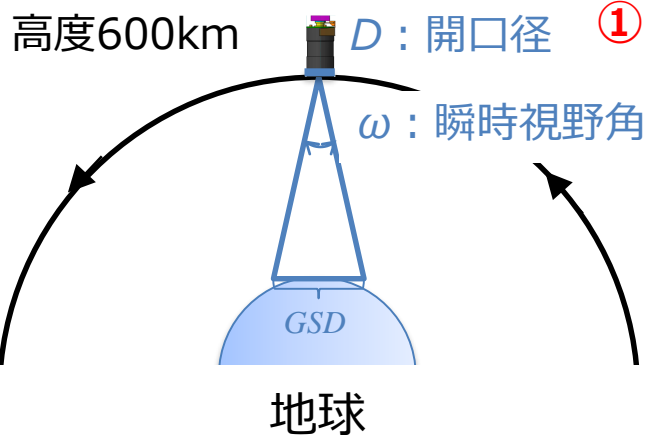
1. 超低高度衛星による光学観測

光学衛星の高分解能化の手段

衛星の軌道高度(H)と開口径(D)・地表分解能GSD (回折限界) の関係式：

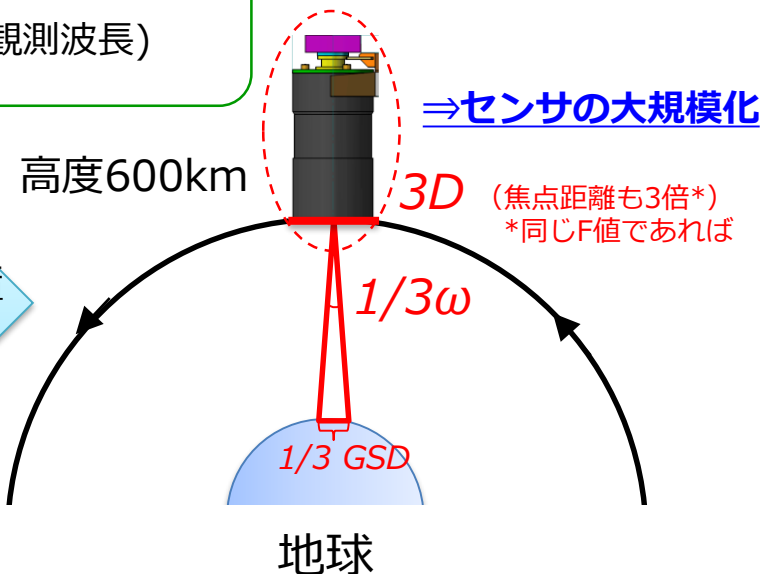
$$GSD = 1.22 \times \lambda \times \frac{H}{D} \quad (\lambda: \text{観測波長})$$

GSDを1/3にするには・・・



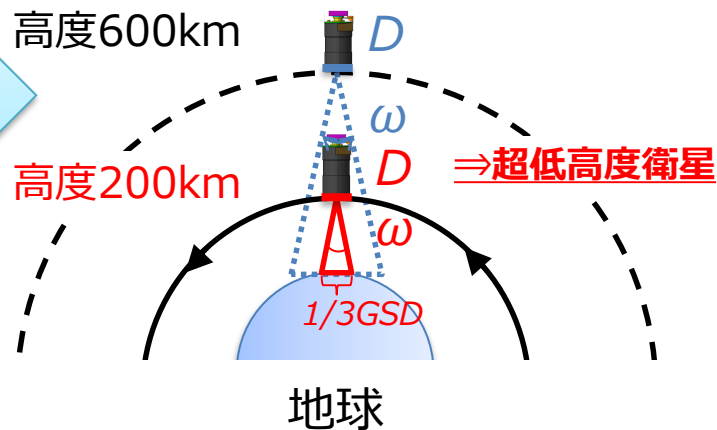
① 同一高度にて口径を3倍
 (焦点距離を3倍*)

Dを3倍



② 高度を1/3に低下
 (口径は同じ)

Hを1/3倍



超低高度衛星において光学観測は、②の高度低下による高分解能化のメリットが期待される。SLATS搭載光学センサは、このメリットを実証するのが目的である。

「つばめ」(SLATS) は超低高度軌道からの地球観測を実証することで、地球観測における新たな利用の可能性を拓くことを目的とし、下記のミッションを実施する。

SLATS のミッション

① 超低高度衛星技術の実証

超低高度域でのイオンエンジンによる軌道保持などの衛星運用を軌道上実証。

② 大気密度・原子状酸素に関するデータの取得

超低高度域での衛星軌道の変動に基づく大気密度データ、原子状酸素 (AO) の環境や材料劣化に係るデータを取得し、大気密度モデルの精度向上や原子状酸素への対策など将来の超低高度衛星を実現するための設計基準への反映。

③ 小型高分解能光学センサによる撮像実験

超低高度域にて衛星の軌道や姿勢と協調して撮像する実験。



小型高分解能光学センサ (SHIROP)

高分解能の小型光学センサを用いて地表面の観測を行う。信号対雑音比を向上させる撮像技術と大気抵抗、イオンエンジン噴射等との影響評価を行う。



センサ (望遠鏡部) 外観



撮像制御実験

大気抵抗やエンジン推力を受けた状態の画像を分析し、センサや姿勢制御系の設計に反映

- 将来の超低高度光学観測衛星を実現するための事前実証として、小型高分解能光学センサSHIROP (Small and High Resolution Optical Sensor) を開発し、「つばめ」(SLATS)に搭載した。
- 光学観測の高分解能化に伴い、センサへの受光量が減少するため、SNR向上技術として衛星の姿勢制御と協調したTDI(Time Delay Integration)撮像を行う。
- 超低高度軌道からのTDI撮像を行い、**大気抵抗やイオンエンジン噴射が画質に与える影響を評価**する。

SHIROP の諸元と外観を示す。

項目	仕様
光学系方式	カセグレン望遠鏡 + 補正レンズ系
光学系有効開口径	20cm
検出器	エリア CCD (6576px × 4384px)
撮像方式	スナップ撮像 (連続 2 シーン) シングルショット ・ TDI撮像 (最大64段)
観測波長	パングロマチック (可視域)
瞬時視野角(IFOV)	2.7μrad 高度271km直下にてGSD73cm 高度217km直下にてGSD59cm 高度181km直下にてGSD49cm
観測視野(FOV)	17.7mrad(CT)×11.8mrad(AT) 高度217km直下にて3.8km(CT)×2.5km(AT)
撮像高度範囲	500km (SLATS投入軌道高度) ~160km
撮像周期	可変 (上記高度対応範囲において)
量子化ビット数	12bit
軌道上総合MTF	0.08以上
撮像機能	即時撮像・予約撮像 (時刻) ・ 自律撮像 (緯度)
質量	19.4 kg 光学部 16.9 kg 電気部 1.9 kg
サイズ	光学部 270 × 540 × 270 mm 電気部 125 × 225 × 95 mm
消費電力	33 W 保温用ヒータを含む



MLI装着前



MLI装着後
(a) SHIROP-S (光学部)



(b) SHIROP-E (電気部)

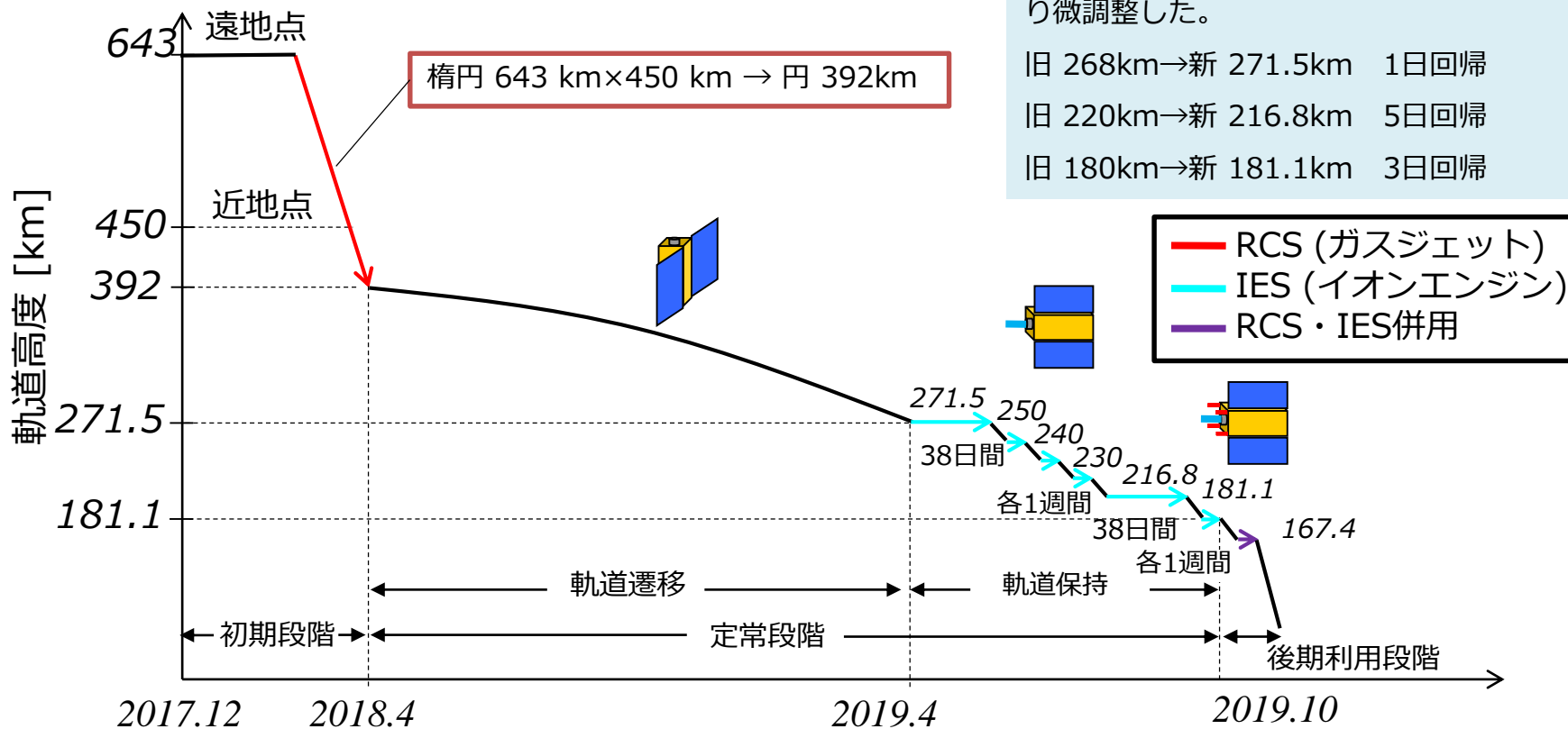
3. つばめの軌道プロフィールとSHIROP実験計画 (1/2)

つばめの投入軌道高度は643kmであり、ミッション終了時には高度167km以下に高度を低下させたが、SHIROPはすべてのフェーズにおいて光学観測を実施した。

(各高度において、対地速度にあわせた撮像周期(露光時間)、および観測時刻に応じたTDI段数を設定し、観測を実施。)

投入軌道傾斜角98.3degと地上の観測回帰性を考慮し、当初計画から保持高度を以下の通り微調整した。

旧 268km	→新 271.5km	1日回帰
旧 220km	→新 216.8km	5日回帰
旧 180km	→新 181.1km	3日回帰



SHIROP光学性能評価

- 撮像最適温度調整(焦点調整)
- 画質評価(GSD、MTF、TDI効果等)

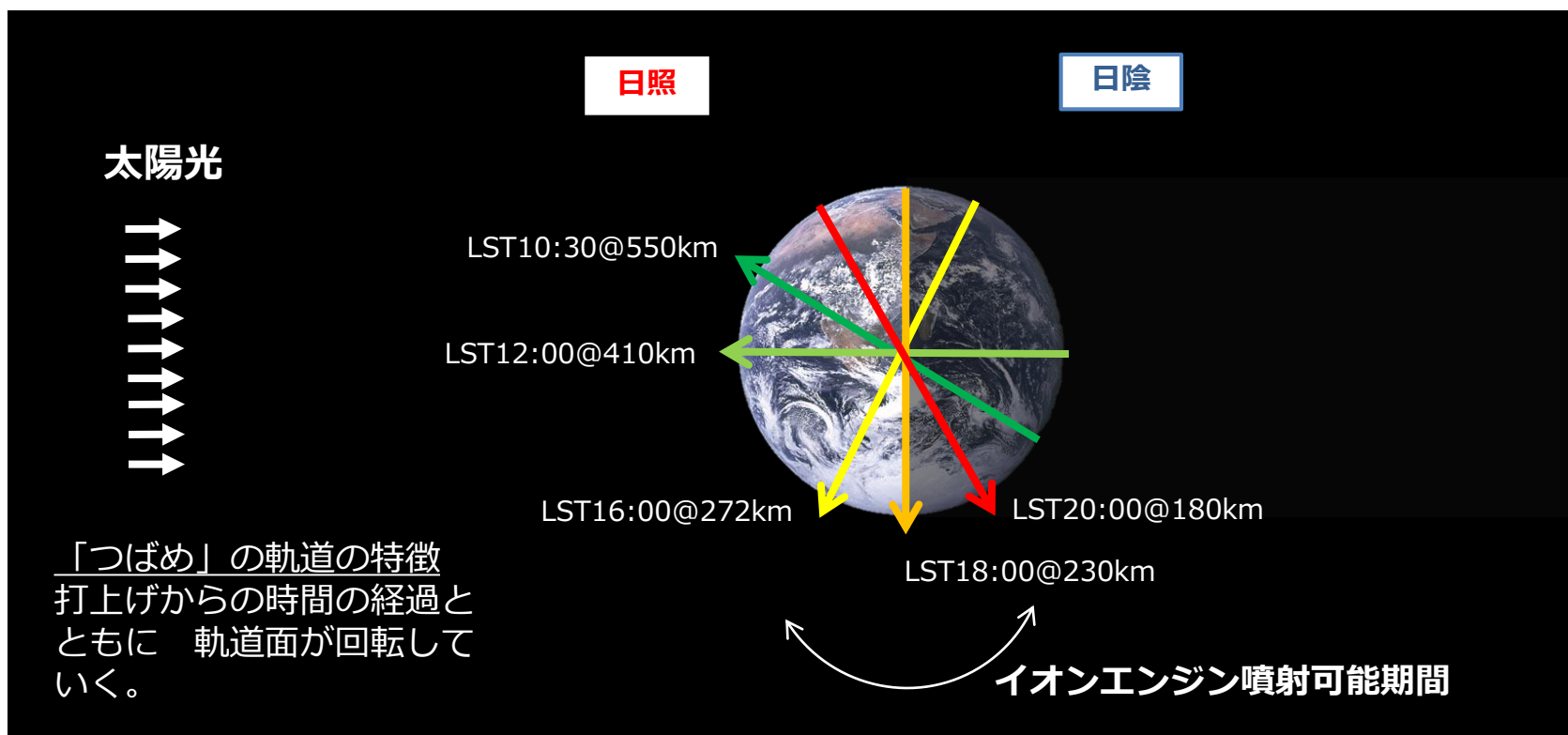
SHIROP高高度撮像運用

SHIROP超低高度撮像運用

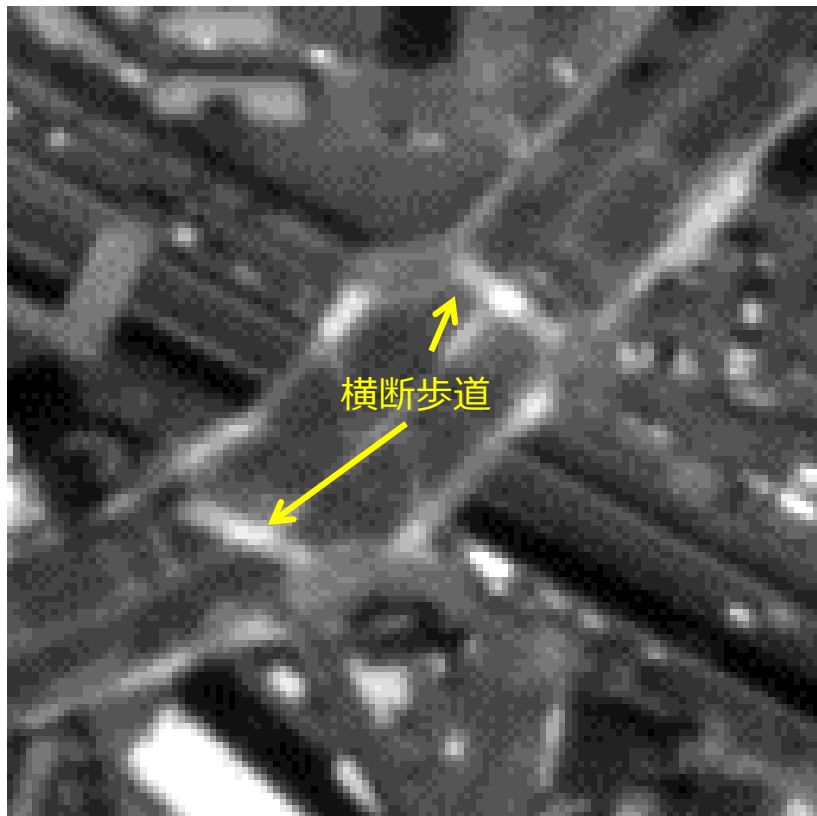
- 大気抵抗・イオンエンジン噴射影響評価等

4. SHIROPの主な軌道上評価項目

- ① 軌道高度低下による画質向上効果
- ② テストパターン撮像に基づいた画質評価（分解能、MTF、SNR）
- ③ TDI撮像によるSNR向上効果
- ④ イオンエンジン噴射が画像に与える影響評価
- ⑤ 多様な観測時刻（LST）における撮像画像の評価（つばめは太陽非同期軌道であり、撮像する地表面のLSTが次第に夕方に向けて遷移する）
- ⑥ 暗時撮像によるノイズ評価
- ⑦ 幾何精度の評価
- ⑧ 完全回帰軌道からの定点観測



◇ 210kmの高度低下の例（大阪市浪速区/西成区 中開3丁目北交差点）



約140m

GSD 106 cm @366.2km 2018/9/19 13:40



約140m

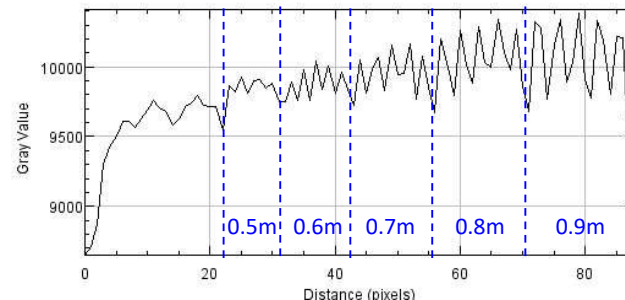
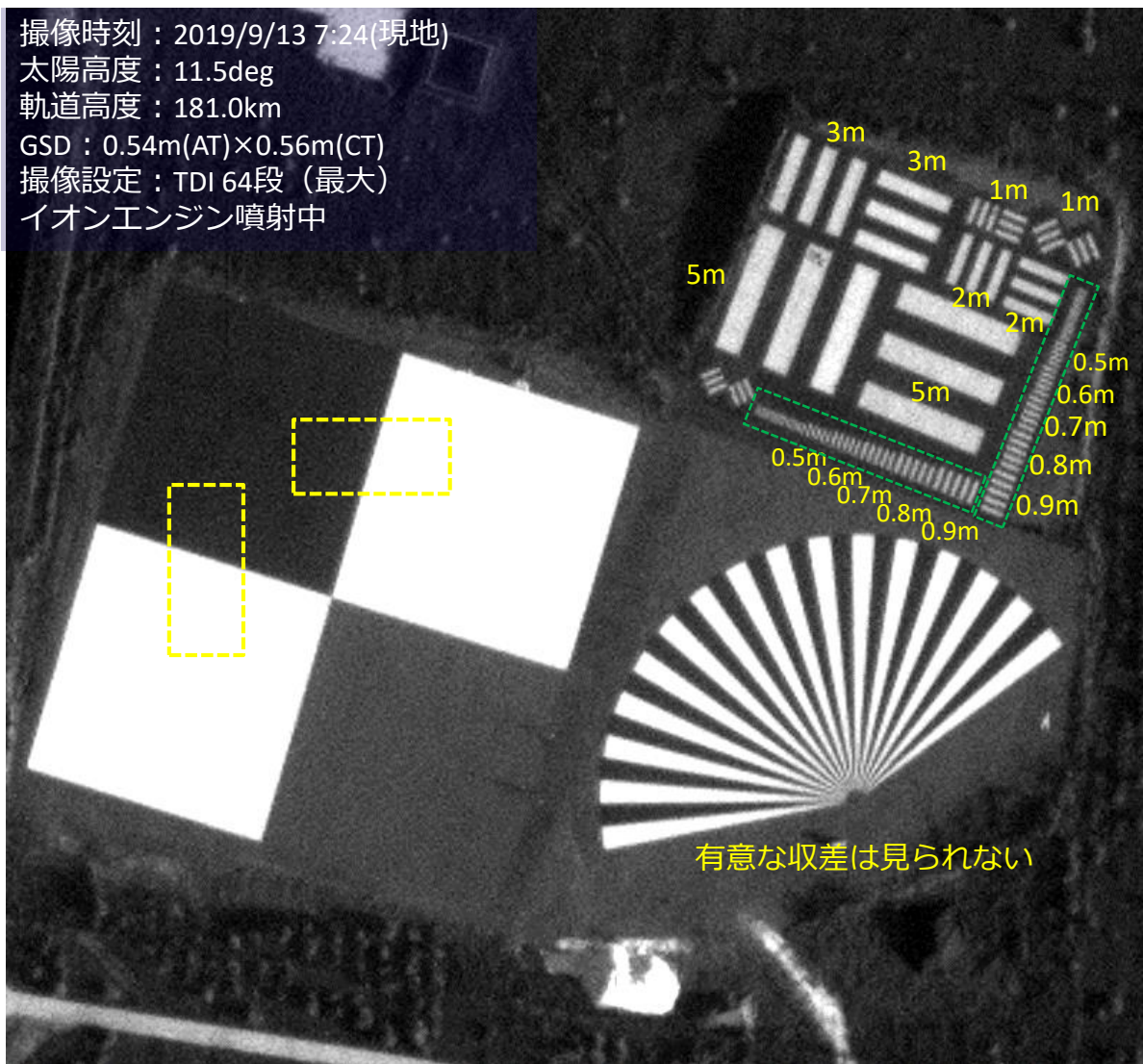
GSD 47 cm @155.5km 2019/10/1 7:03

- 高度155kmからの画像では、45cm間隔の横断歩道が識別可能な個所を確認できる。

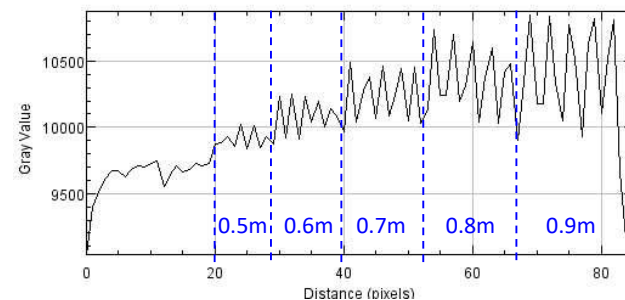
- 高度低下により、高解像度の画像が得られることを確認した。
 （口径20cmの小型光学系でGSD50cm以下を達成）

分解能/MTF の評価 (テストパターン撮像画像評価)

撮像時刻 : 2019/9/13 7:24(現地)
 太陽高度 : 11.5deg
 軌道高度 : 181.0km
 GSD : 0.54m(AT)×0.56m(CT)
 撮像設定 : TDI 64段 (最大)
 イオンエンジン噴射中



バターゲット(AT)



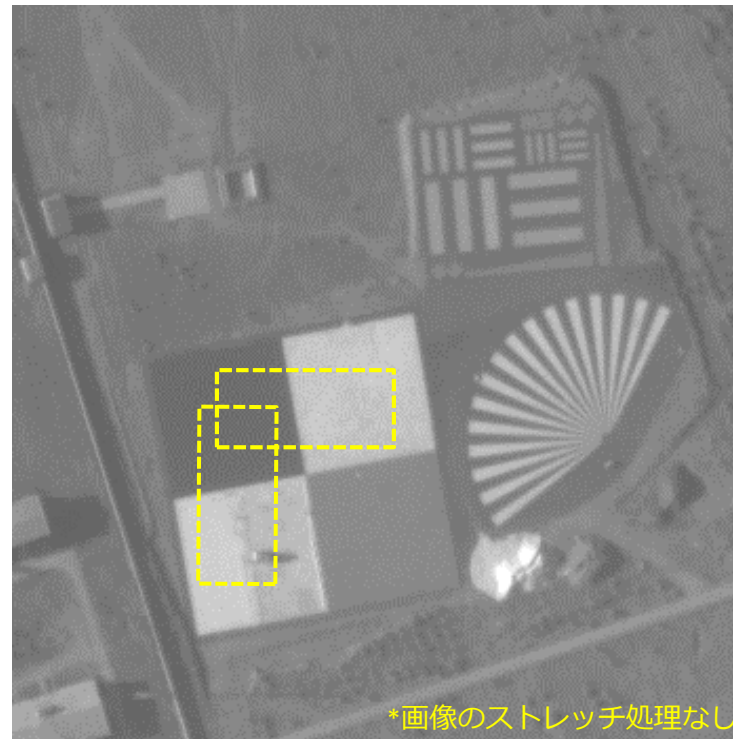
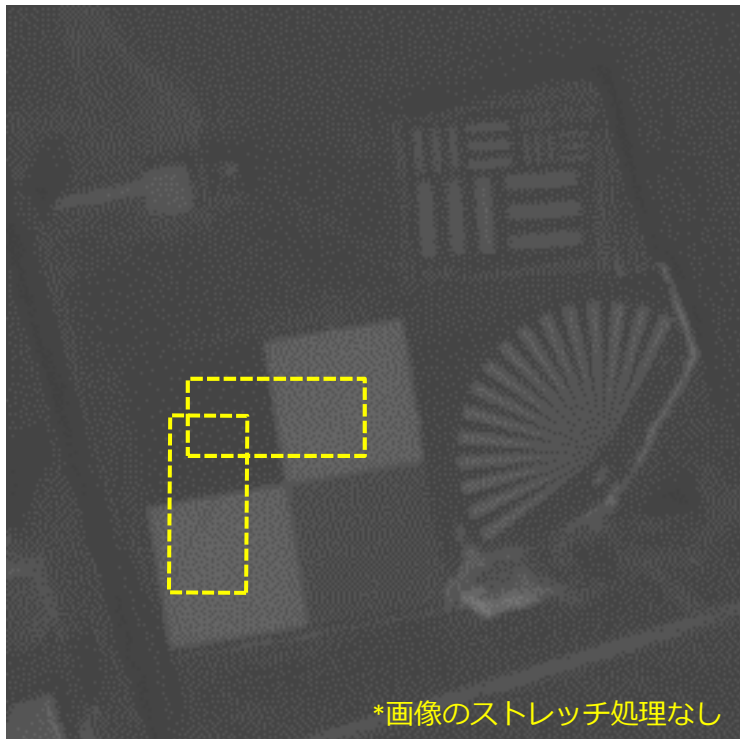
バターゲット(CT)

左記のテストパターン画像から、

分解能 0.5~0.6m
 MTF 0.10(AT)/0.14(CT)
 SNR 70.4(DN平均値)

と評価した。

TDI撮像評価 (テストパターン撮像画像評価)



撮像時刻 : 2018/12/17 15:38
 太陽高度 : 13.4°
 測位高度 : 322.1km
 □ール角 : -12.2°
 GSD: 0.91m(AT)×0.94m(CT)
TDI24段

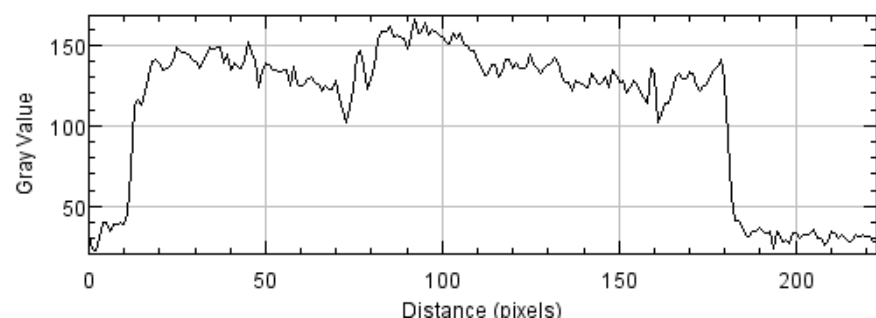
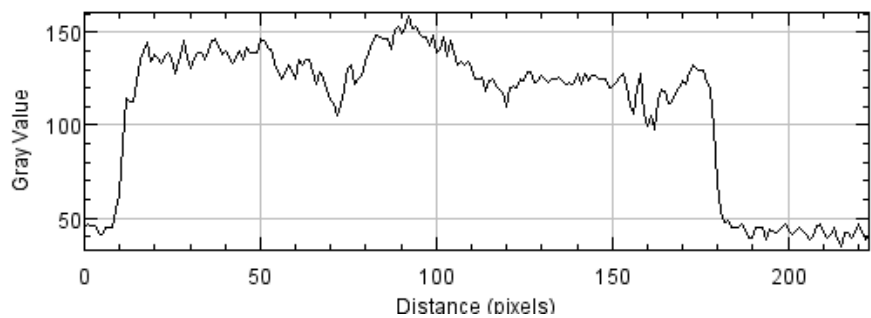
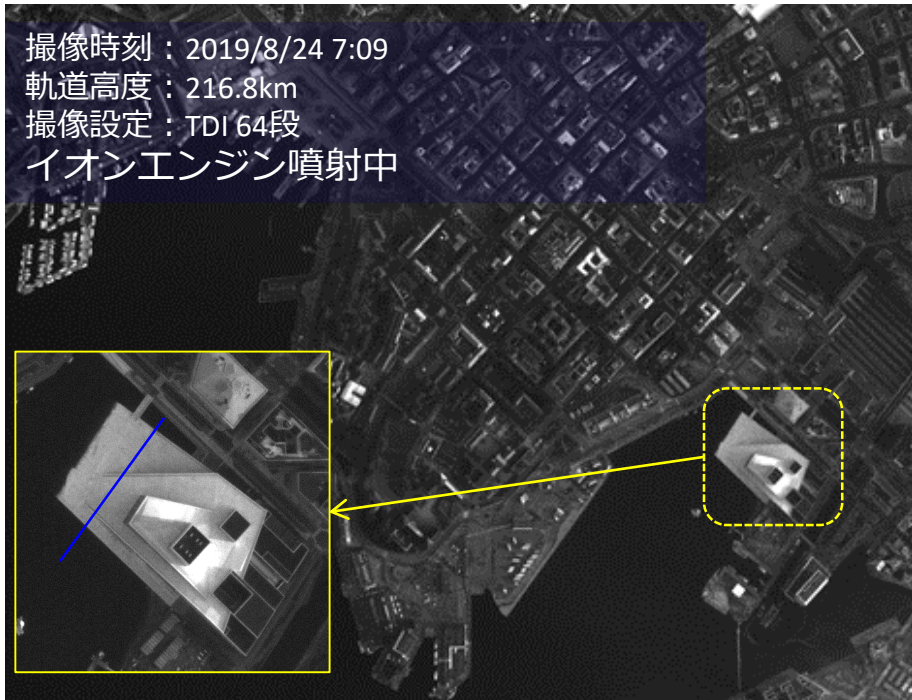
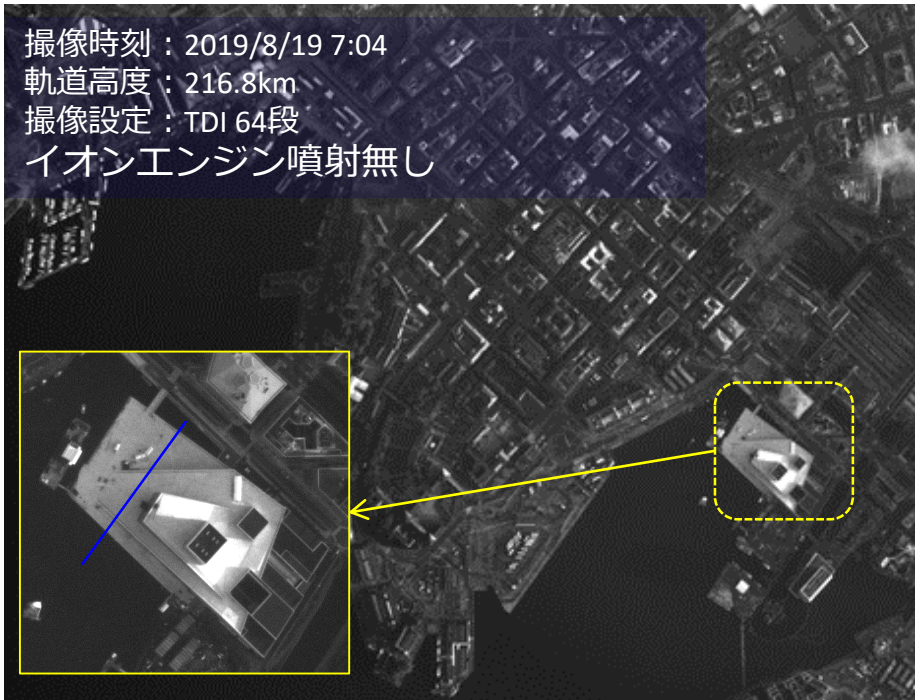
撮像日 : 2019/5/28 18:23
 太陽高度 : 16.5°
 測位高度 : 252.2km
 □ール角 : 14.9°
 GSD : 0.73m(AT)×0.76m(CT)
TDI64段

MTF 0.14(AT)/0.14(CT)
 SNR 77.1(DN平均値)

MTF 0.11(AT)/0.14(CT)
 SNR 108.0(DN平均値)

- TDI段数増加に伴い、SNRが向上していることを確認した。
- TDI段数増加に伴い、AT方向MTFが若干劣化することを確認した。

◇ ノルウェー オスロ市の例 (高度216.8km 5日回帰)



- イオンエンジン噴射による有意な差が見られないことを確認した。

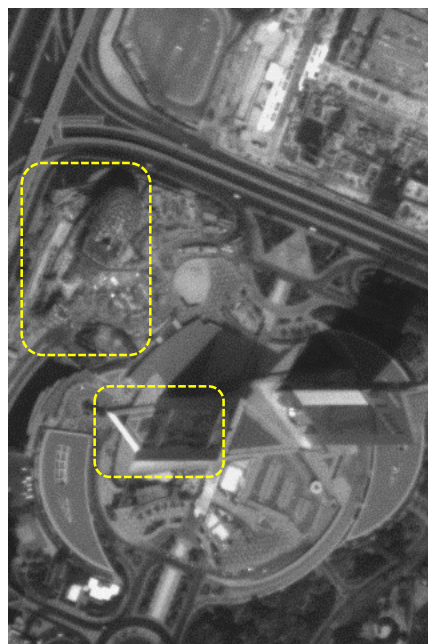
観測時刻 (LST) の変化の例 (UAE ドバイ エミレーツタワー付近)

撮像時刻：2018/2/4 11:09
 測位高度：523.6km
 TDIなし
 GSD: 1.4m(CT)×1.4m(AT)

撮像時刻：2018/8/25 13:36
 測位高度：376.6km
 TDI18段
 GSD: 1.1m(CT)×1.1m(AT)

撮像時刻：2019/2/10 16:00
 測位高度：295.2km
 TDI24段
 GSD: 0.8m(CT)×0.9m(AT)

撮像時刻：2019/6/18 18:07
 測位高度：244.8km
 TDI64段
 GSD: 0.66m(CT)×0.66m(AT)

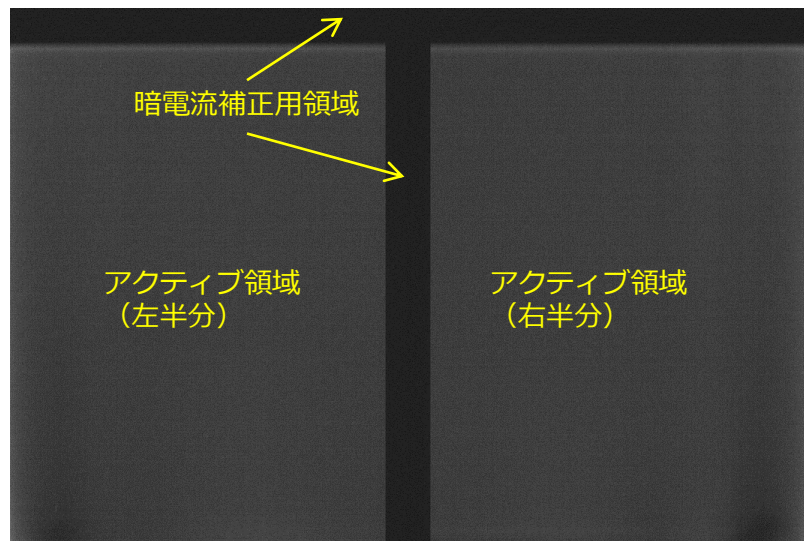
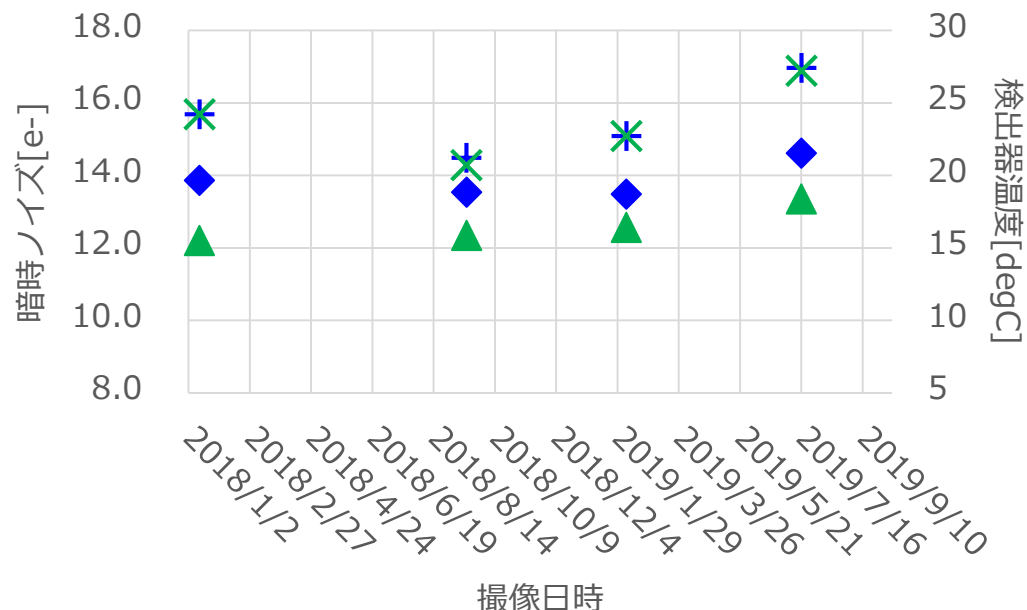


- 観測時刻 (LST) を変えることで異なる時間帯の地上の状況または変化を観察できる。
- LSTの変化に伴い、影の伸びる方向が変化する。高層ビルの周辺は長い影が生ずることから、各種のLSTにて同一地点を観測することで、高層ビル周辺の状況をより詳細に観察できる。

画像のノイズ評価

- 深宇宙方向を撮像し、検出器のアクティブ領域（撮像画像として有効な領域）のノイズ量評価を実施。
- SHIROPでは、検出器のダーク領域（オーバクロック領域）を用いて、アクティブ領域の暗電流分の出力補正を行っている。（左下図）
- アクティブ領域のノイズ量は、約1年半の間でほとんど変化していない。若干の変動は、検出器温度の変化に伴うものと想定される。（右下図）
- 検出器の劣化に伴う有意なSNR低下は確認されておらず、出力補正が有効に作用したと判断できる。

◆ ノイズ量(TDI64) ▲ ノイズ量(TDI24)
+ 検出器温度(TDI64) × 検出器温度(TDI24)

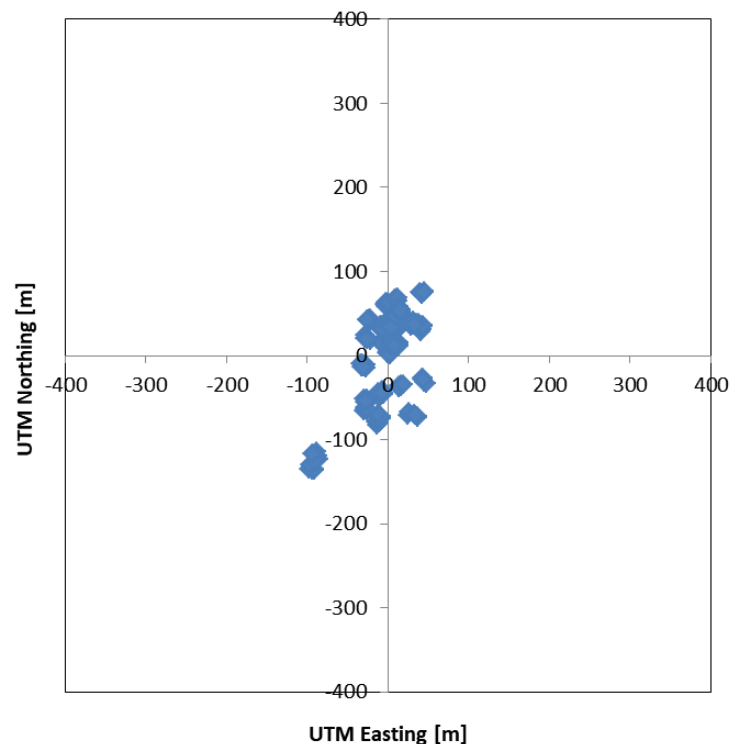


暗時撮像画像の例

軌道上での暗時ノイズ量のトレンド

自律撮像の位置決定精度評価

- 幾何データ（SHIROPセンサモデル、衛星軌道データ、衛星姿勢データ）を用いた画像の地上投影に基づき、GCP及び基準参照画像を用いて画像の幾何精度を評価し、幾何パラメータの校正を実施した。（ALOS/PRISM校正用に整備されたGCPデータを活用）
- 39地点の画像について幾何精度を評価し、パラメータ校正を行った。
- 校正前後の幾何誤差RMSについて、以下の通り改善することができた。
 - 約83m -> 約30m @南北方向
 - 約157m -> 約52m @東西方向



SHIROP自律撮像の幾何精度（GCPなし位置決定精度）

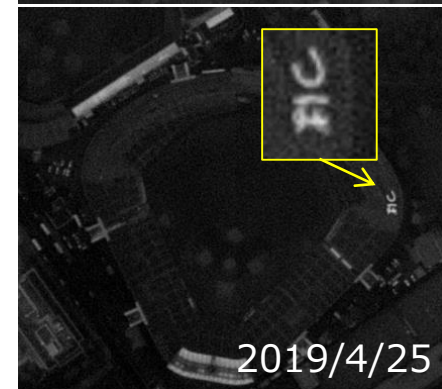
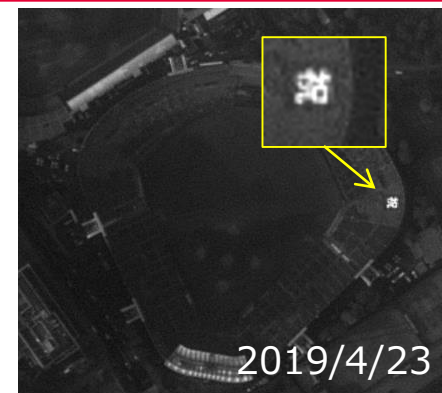
	average	std.dev.	rms	max	min
Easting	-2.82	30.10	30.23	48.02	-97.65
Northing	-1.41	52.28	52.30	76.86	-136.72

- SHIROPでは、GPSRを用いた自律撮像機能（目標緯度）、および前日の軌道予測に基づいたロール角（目標経度）を設定し、撮像目標地点を定めたが、比較的高い幾何精度を実現することができた。
- 今後、画像の利用に係る汎用性を鑑みて、オルソ投影画像として提供する予定。

2019/4/2から5/10の38日間に渡り、**世界初の超低高度(271.5km)からの高分解能定点観測**（毎日ほぼ同時刻・同地点直下観測）を実現。
 期間中、**毎日同じ視点からの撮像**に成功。（ロール角 $+1.6 \pm 0.1 \text{deg}$ ）

東京の定点観測画像一覧(4/2~5/10)

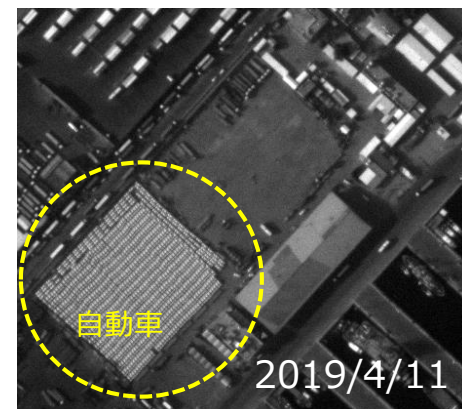
日	月	火	水	木	金	土
	4月1日	4月2日	4月3日	4月4日	4月5日	4月6日
4月7日	4月8日	4月9日	4月10日	4月11日	4月12日	4月13日
4月14日	4月15日	4月16日	4月17日	4月18日	4月19日	4月20日
4月21日	4月22日	4月23日	4月24日	4月25日	4月26日	4月27日
4月28日	4月29日	4月30日	5月1日	5月2日	5月3日	5月4日
5月5日	5月6日	5月7日	5月8日	5月9日	5月10日	5月11日



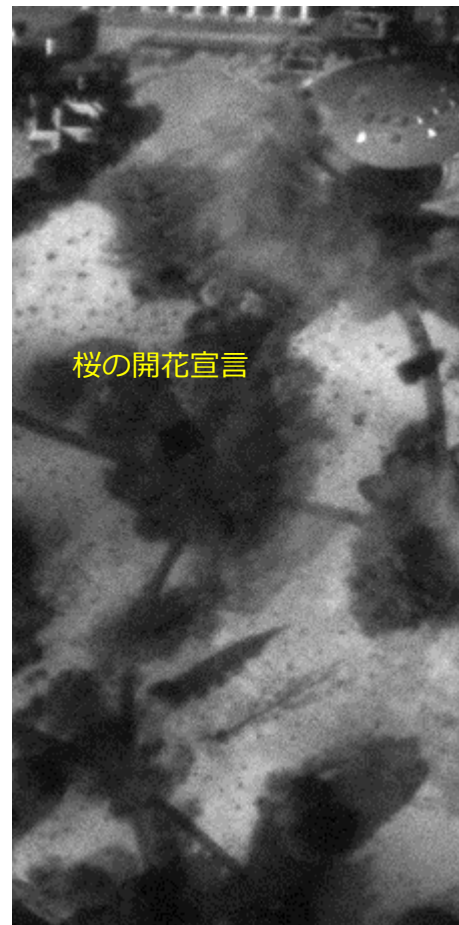
ヤクルトスワローズ
 コラボ企画（神宮球場）
 4/22~5/8のナイター前 15

クウェート（港湾部）の定点観測画像一覧(4/2~5/10)

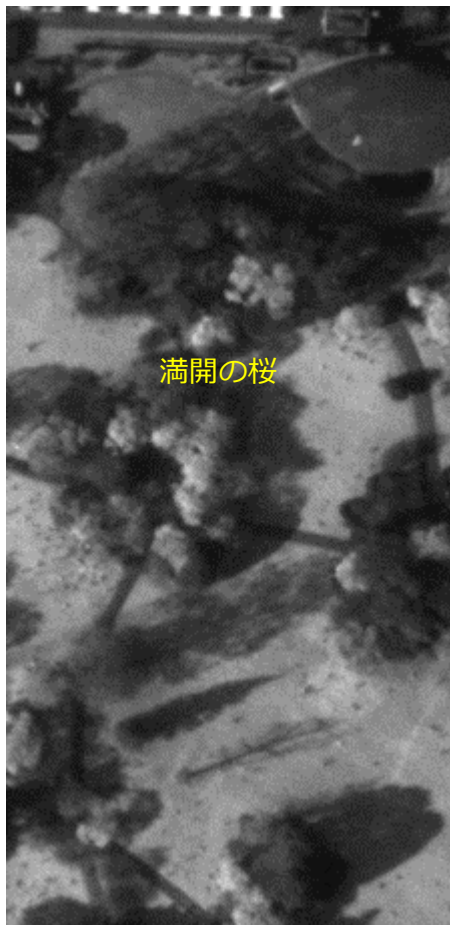
日	月	火	水	木	金	土
	4月1日	4月2日	4月3日	4月4日	4月5日	4月6日
4月7日	4月8日	4月9日	4月10日	4月11日	4月12日	4月13日
4月14日	4月15日	4月16日	4月17日	4月18日	4月19日	4月20日
4月21日	4月22日	4月23日	4月24日	4月25日	4月26日	4月27日
4月28日	4月29日	4月30日	5月1日	5月2日	5月3日	5月4日
5月5日	5月6日	5月7日	5月8日	5月9日	5月10日	5月11日



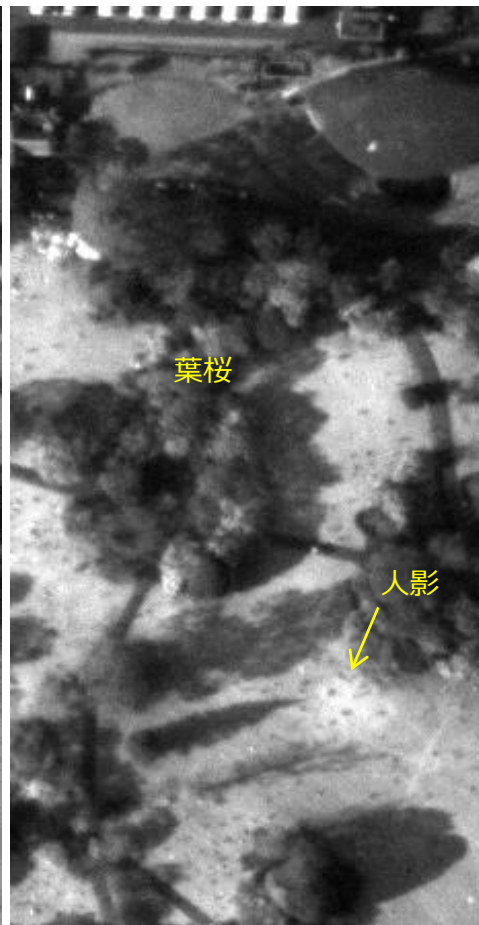
- 港湾に停泊した船舶上や敷地に置かれたコンテナや自動車等の貨物の配置や数量の変化を連日同じ視点から観察が可能。



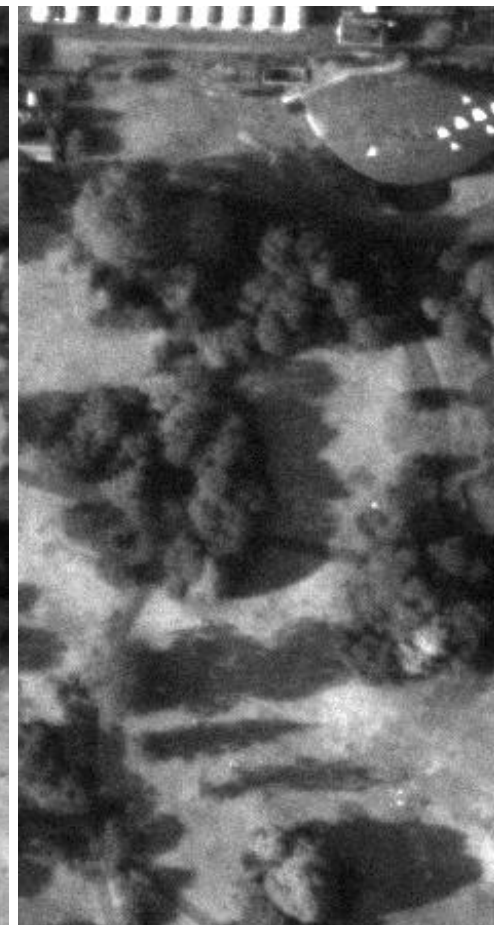
撮像日時：3/21 16:00



撮像日時：4/4 16:20



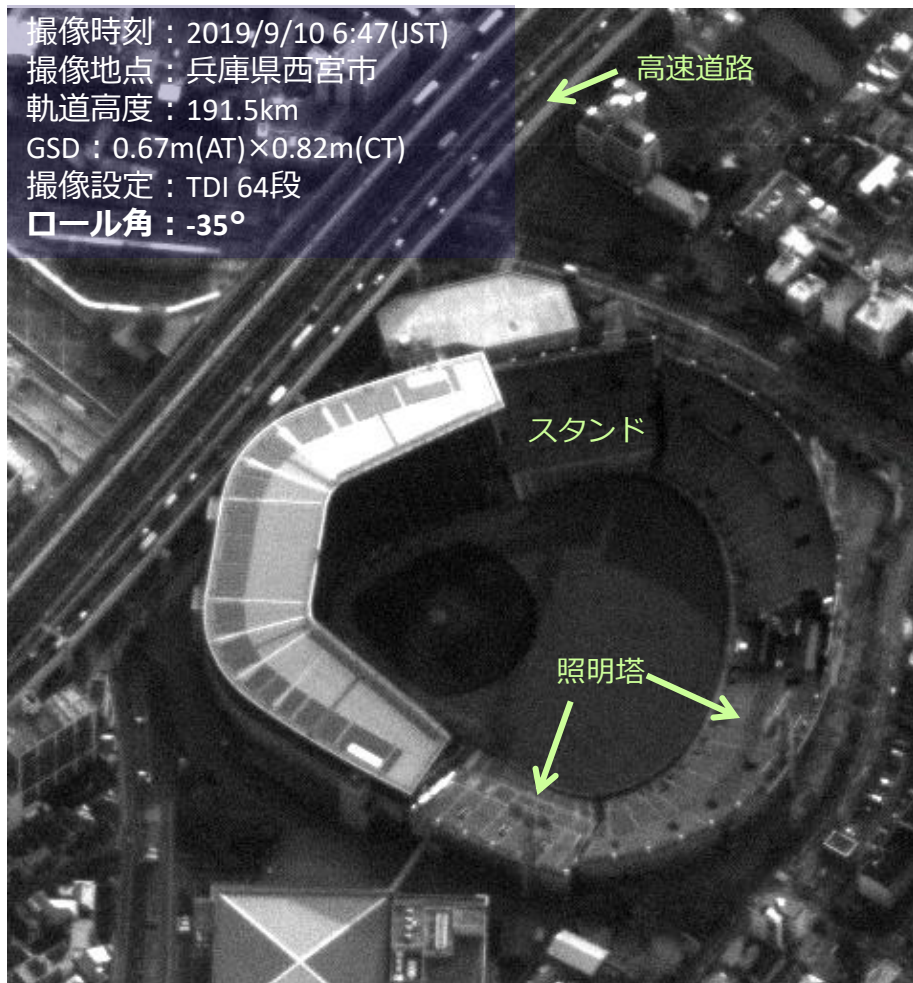
撮像日時：4/13 16:29



撮像日時：5/2 16:48

- 桜（ソメイヨシノ）が開花後、満開となり、その後、葉桜となっていく様子や落葉樹の陰の画像から葉が次第に茂っていく様子を観察できる。
- 夕方の撮像のため、影が長いことから人の存在を推定でき、人影らしきものを数えることで集客状況を観察できる。

* 西側から見た図



阪神甲子園球場付近



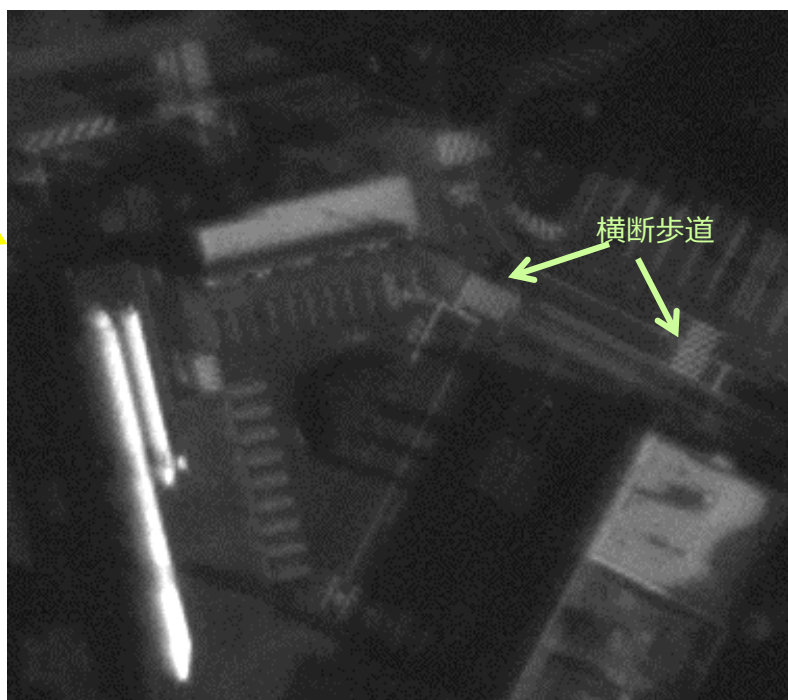
西宮ジャンクション付近

- 高度低下に伴い斜め撮像時のGSDも向上し、被写体を立体的に、より精細に捉えていることが確認できる。
- 直下撮像では確認できない箇所や建物の高さ情報を確認することができる。

撮像時刻：2019/9/12 6:21(JST)
撮像地点：つくば
軌道高度：187.5km
GSD：0.53m(AT) x0.53m(CT)



静止衛星用アンテナ



総合案内所裏駐車場付近

GSD50cm級画像の例（つくば市②駐車場・テニスコート）



乗用車の形状（フロントガラス等）が明らかに確認できる

マンション駐車場



テニスコート（白線等）が明らかに確認できる

二の宮公園テニスコート

高度167.4km保持運用時(2019/9/25) 静岡県浜松市

撮像時刻 : 2019/9/25 6:52(JST)
撮像地点 : 静岡県浜松市 (浜松駅付近)
軌道高度 : 167.4km
GSD: 0.52m



駐車場

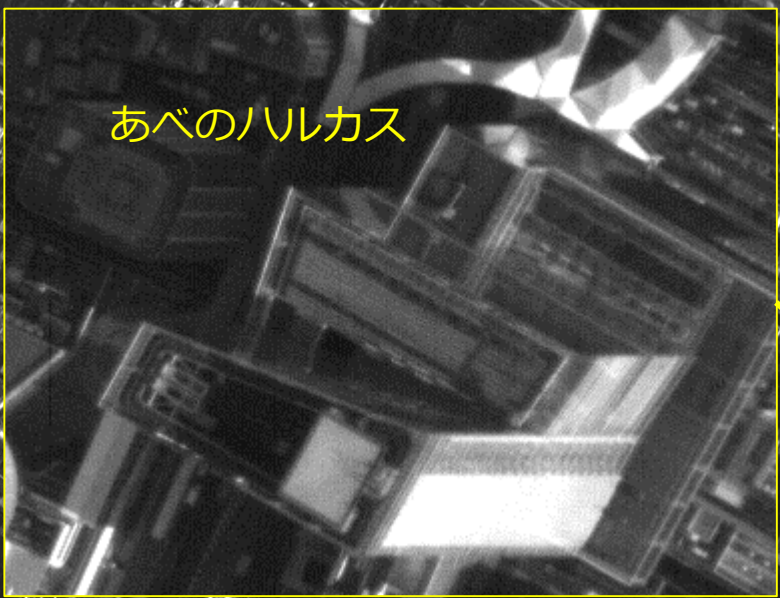
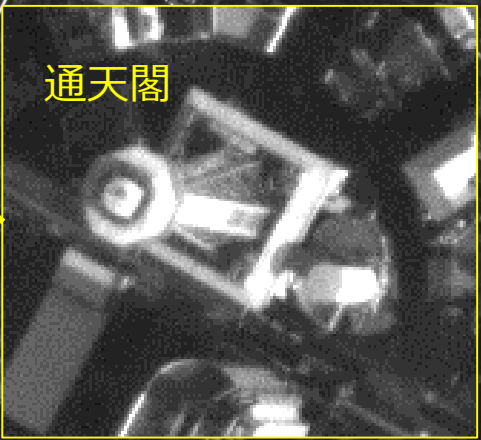
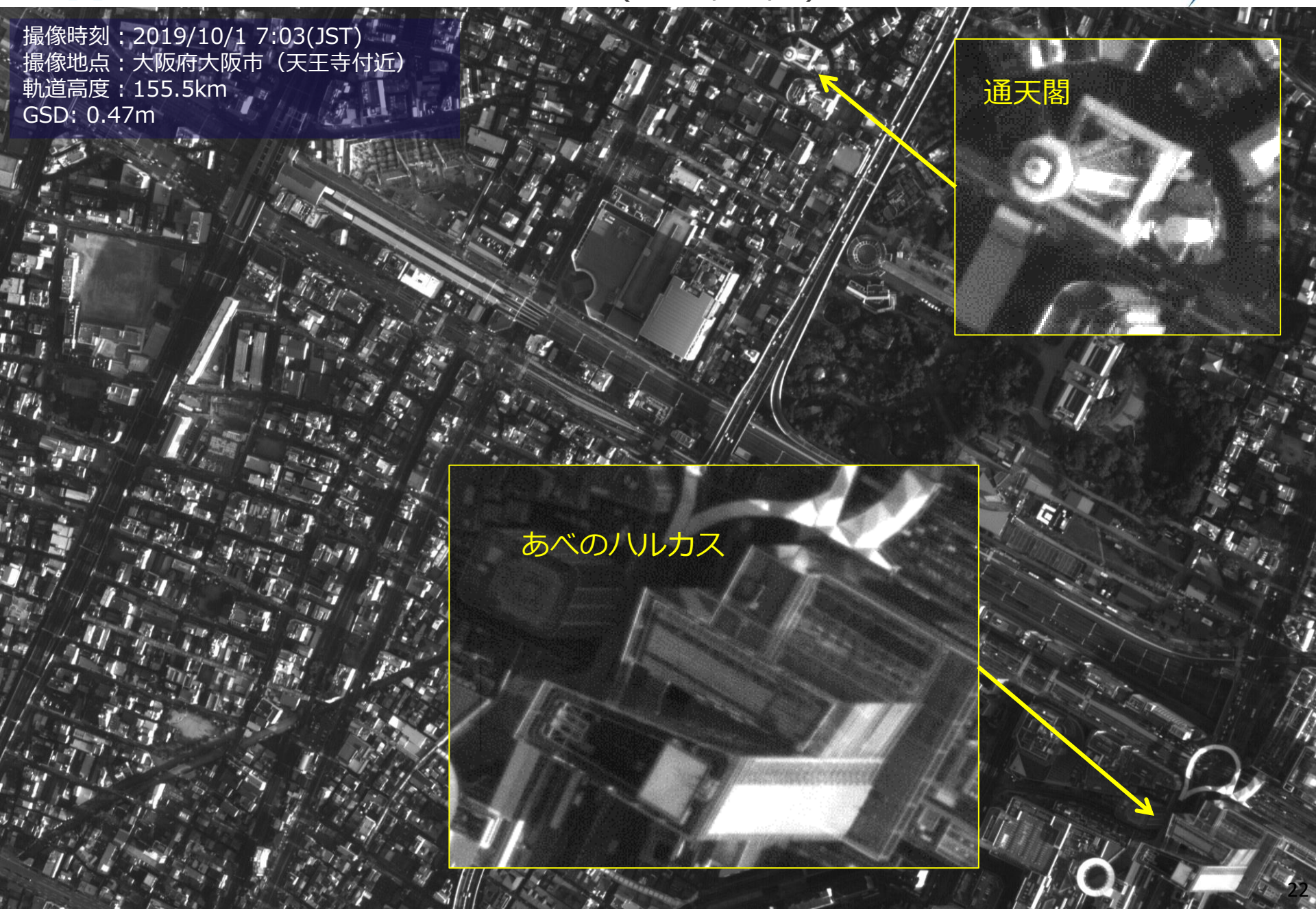
交差点

浜松駅

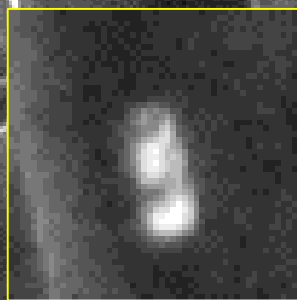
新幹線

つばめ最後の国内撮像(2019/10/1) 大阪府大阪市

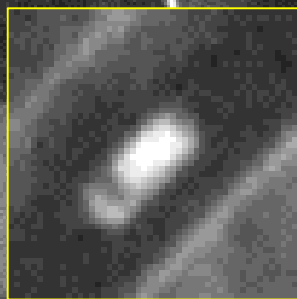
撮像時刻 : 2019/10/1 7:03(JST)
撮像地点 : 大阪府大阪市 (天王寺付近)
軌道高度 : 155.5km
GSD: 0.47m



車種の識別が可能 (NIIRS Level 6を達成)



セダン



ステーションワゴン

サウジアラビア・ダンマーム 高速道路(Dhahran Jubail Expy)

GSD 46cm@軌道高度150.3km

つばめ/SHIROPの成果

- ① SHIROP は開口径20cm の小型光学系、民生品を最大限に活用した低コスト光学センサでありながら、超低高度軌道からGSD1m以下の高分解能観測を実施し、超低高度からの光学観測の有用性を実証した。
- ② センサは、打ち上げから運用終了まで非常に良好な性能を発揮した。
- ③ 早朝から夕方までの様々な観測時刻での光学観測を実証した。
- ④ 完全回帰軌道を高精度に保持し、目標地点を毎日観測することで、日毎の変化抽出が可能となり、定点観測の有用性を実証した。

今後の展開

- ① 「つばめ」撮像画像について、画像利用の汎用性が高いオルソ補正を行った上で、アーカイブ画像として公開予定。
- ② 取得した定点観測画像をもとに、気象条件の影響による識別精度の変化に係る分析、人流データ等の各種地上データとの感度分析等、今までにない新たなデータ利用の実現に向けて継続して検討中。
- ③ 「つばめ」後継ミッション（特に、小型軽量・短期開発・低コスト光学観測ミッション）への成果反映について検討中。

JAXAサテライトナビゲーター つばめ(SLATS)

<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/slats/>

SLATSで撮像した画像については、twitterおよびTellusで公開しています。

JAXAサテライトナビゲーターTwitterアカウント @satellite_jaxa

https://twitter.com/satellite_jaxa

Twitter公開画像一覧

<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/slats/captured/>



さくらインターネット 衛星データプラットフォーム Tellus

<https://www.tellusxdp.com/ja/>

