

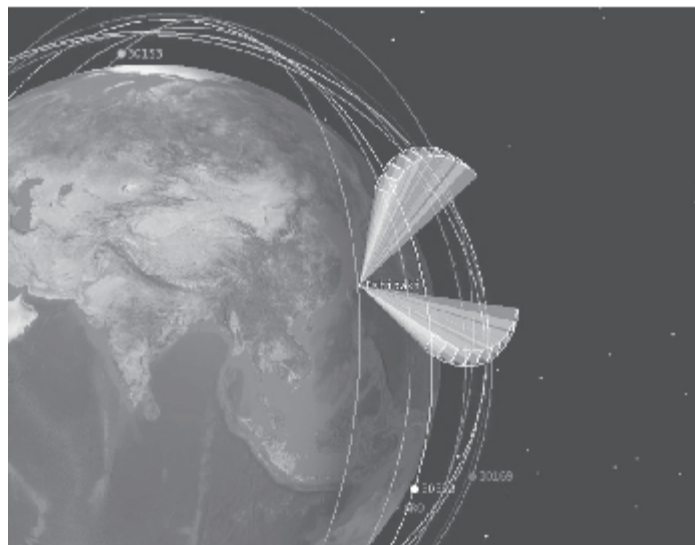
F3

低軌道デブリ地上光学観測システム Ground-based Optical Observation System for LEO Debris

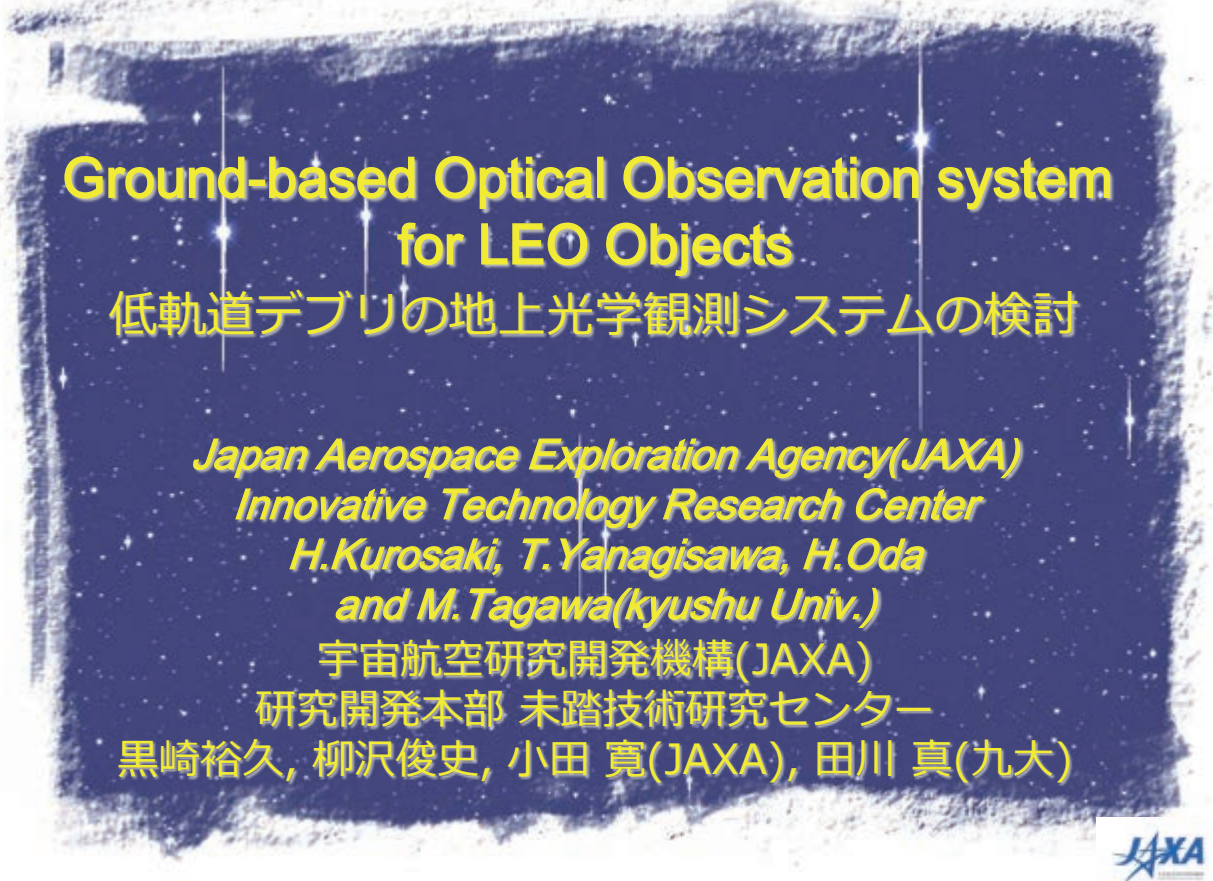
○黒崎裕久, 柳沢俊史, 小田寛(宇宙航空研究開発機構), 田川真(九州大学)
○Hirohisa Kurosaki, Toshifumi Yanagisawa, Hiroshi Oda (JAXA)
and Makoto Tagawa (Kyushu Univ.)

我々は広大な空をカバーするために、たくさんの光学センサを使う低軌道物体を監視するための地上光学観測システムを提案している。この研究でシステム評価は STK ソフトウェアを用いて実行した。この結果は、サーベイのために二つの経度方向に離れたサイトと両極域の二つの追跡サイトで TLE オブジェクトの 60% 以上検出してそれらの軌道を維持できることを示す。提案したシステムは、近い将来、宇宙状況認知のような低軌道物体監視のための現在のレーダー観測システムを補完するか置き換えることができるかもしれない。

We are proposing a ground-based optical observation system for monitoring LEO objects which uses a lot of optical sensors to cover the vast sky. In this study, the system evaluation was carried out using STK software. The results shows that two longitudinally separate sites for survey and two tracking sites located in both polar regions were able to detect more than 60% of TLE-objects and maintain their orbits. The proposed system may complement or replace the current radar observation system for monitoring LEO objects like a space situation awareness in the near future.



6th Debris Workshop




**Ground-based Optical Observation system
for LEO Objects**

低軌道デブリの地上光学観測システムの検討

*Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA)
Innovative Technology Research Center
H.Kurosaki, T.Yanagisawa, H.Oda
and M.Tagawa(kyushu Univ.)*

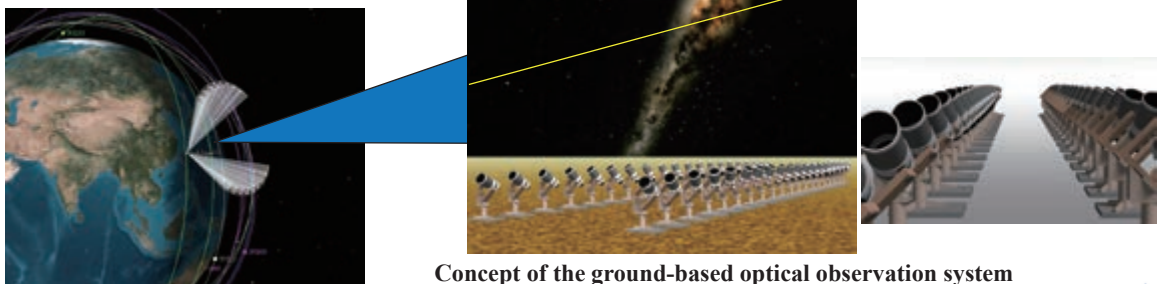
宇宙航空研究開発機構(JAXA)
研究開発本部 未踏技術研究センター
黒崎裕久, 柳沢俊史, 小田 寛(JAXA), 田川 真(九大)



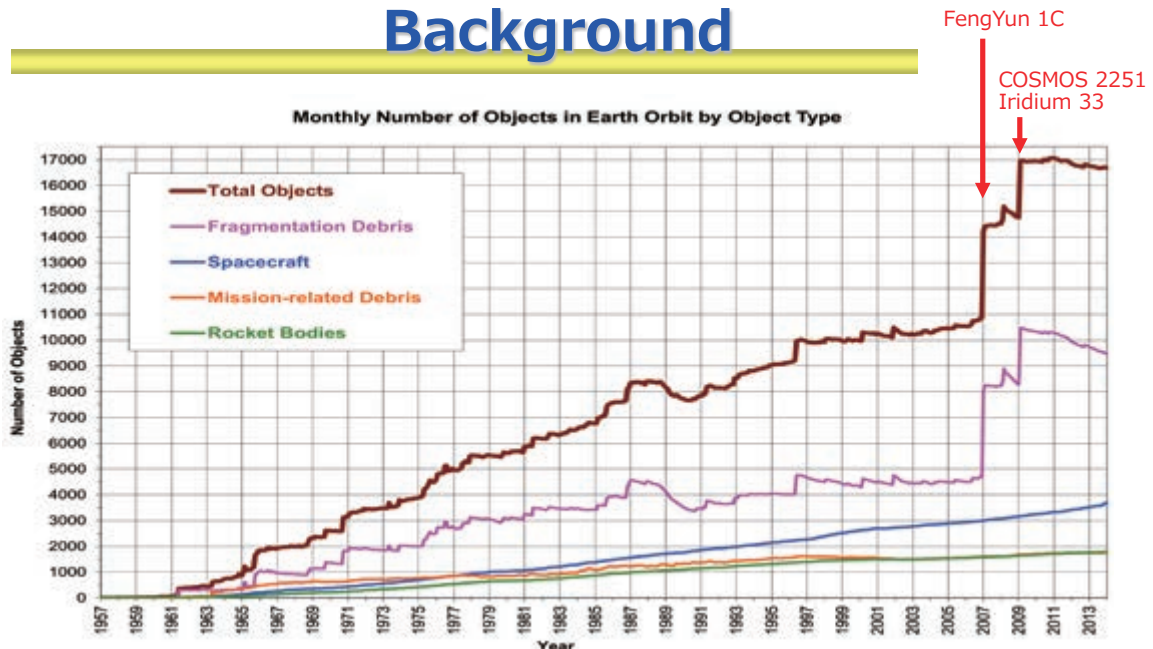
Abstract

We are proposing a ground-based optical observation system for monitoring LEO objects which uses a lot of optical sensors to cover the vast sky. In this study, the system evaluation was carried out using STK software. The results shows that two longitudinally separate sites for survey and two tracking sites located in both polar regions were able to detect more than 60% of TLE-objects and maintain their orbits. The proposed system may complement or replace the current radar observation system for monitoring LEO objects like a space situation awareness in the near future.

我々は広大な空をカバーするために、たくさんの光学センサを使う低軌道物体を監視するための地上光学観測システムを提案している。この研究でシステム評価はSTKソフトウェアを用いて実行した。この結果は、サーベイのために二つの経度方向に離れたサイトと両極域の二つの追跡サイトでTLEオブジェクトの60%以上検出してそれらの軌道を維持できることを示す。提案したシステムは、近い将来、宇宙状況認知のような低軌道物体監視のための現在のレーダー観測システムを補完するか置き換えることができるかもしれない。



Background



Space environment is deteriorated with space debris especially in LEO region recently.

低軌道の環境は年々悪化の一途をたどっている。(衛星破壊実験、衛星同士の衝突等)

Dead zone problem. (a few mm to 10cm)

観測限界が10cmであるのに、宇宙機が防御できるサイズは数mm

Inaccuracy of TLE

軌道要素(TLE)の精度が悪い。

→ **Observation ability of LEO objects must be reinforced.**
低軌道デブリの観測能力を強化する必要



Background



Observation methods of LEO objects

① **Radar observation:** SSN of USA. 24-hour and 365-day observation is possible.

Enormous cost is needed to construct and maintain.

レーダー観測:米国のSSN。24時間365日。天候に左右されにくい。建設及び維持運用費がかかるという欠点

② **Optical observation:** ISON network of Russia. Observable time is limited by lighting condition of the sun and weather. Very cost effective.

光学観測:ロシアのISONネットワーク。1日数時間の観測、天候の影響を受ける。建設及び維持運用費が安い。

● **Optical Sensors(CCD, CMOS) are improving** 光学センサー(CCD, CMOS)の発展、高性能で廉価

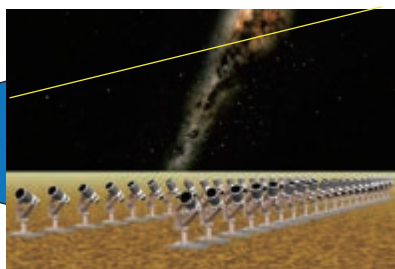
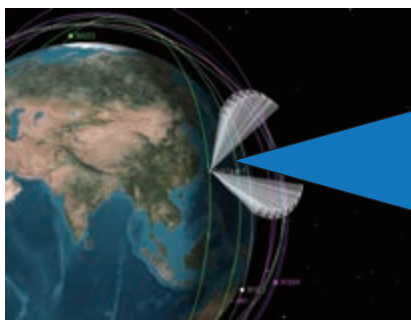
● **PC performances are improving** 計算機能力の著しい向上



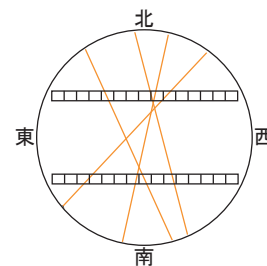
Cost-effective ground-based optical observation system of LEO objects which is used for SSA will be possible.
廉価な低軌道デブリ用の地上光学観測システムを構築でき、宇宙状況監視にも貢献。



Ground-based optical observation system



複数台によるLEOデブリ監視システム



- About 40 optical sensors are installed to one site. 1サイトで40台の光学センサ
- 2 regions of the sky are monitored to get long arc. 長いアーチを得るため天球上の2領域を観測
- 2 consecutive passes should be observed for accurate orbital determination.

For this reason, 2 longitudinally separated sites are considered.

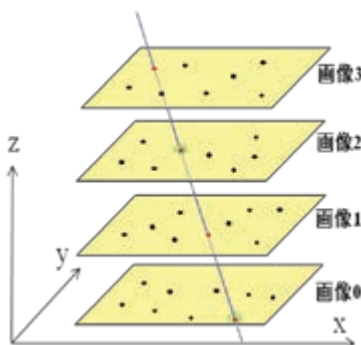
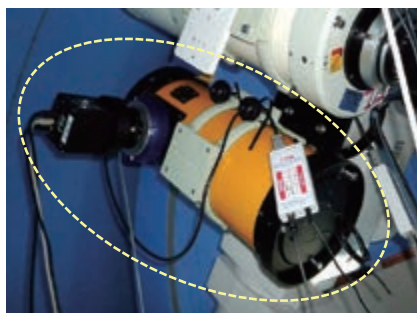
2回の連続する2パスを観測→精度よい軌道決定が可能。経度の離れた2か所に観測サイトを配置。



1. Detection abilities and 2. orbital determination possibilities are investigated



Observation equipments and Data analysis



Many frames

↓

Candidates are searched using a threshold and a shape parameter
閾値、形状パラメータを利用して候補を探す

↓

Candidates which creates a straight line are detected as a moving object
直線上にのる移動物体を検出

Observation equipments:

- Takahashi ε180ED (D:180mm)
- FLI CCD camera ML23042 (Back Illuminated 2Kx2K)
- FOV : 3.5 × 3.5-degree

Data analysis software:

The linear motion detection algorithm
等速直線運動検出アルゴリズム

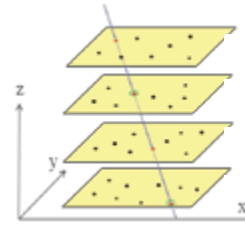
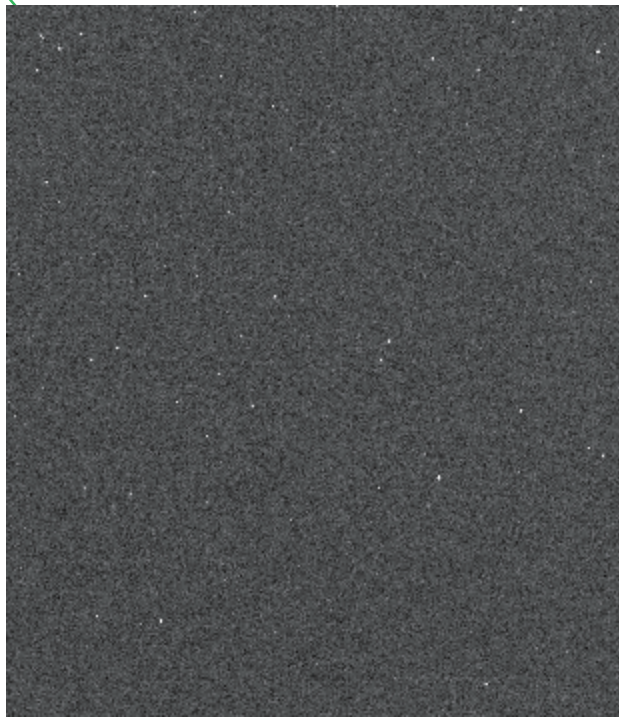
Survey observation was carried out using these equipments and software

本観測装置及び解析ソフトを利用、サーベイ観測を実施



検出能力

Detection abilities

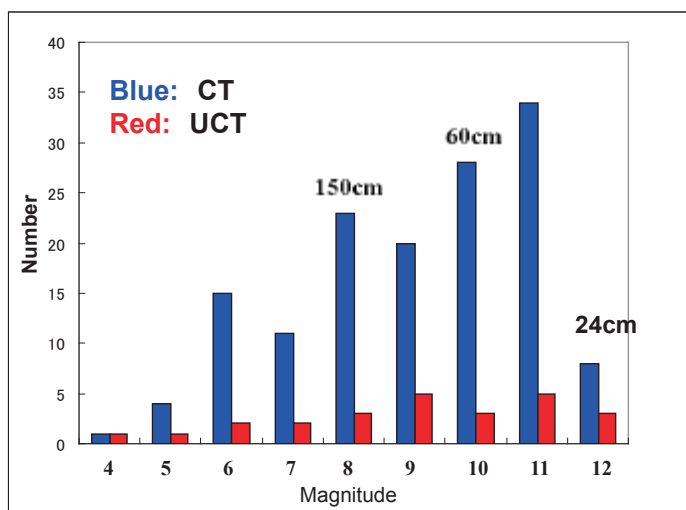


17525(MOMO-1)
exposure time : 50msec
interval : 1.5 sec



検出能力

Detection abilities



Diffuse reflection with
90-degree phase angle
and albedo 0.1

拡散反射、位相角90°
反射率10%を
仮定したサイズ

Result of 16 days' survey
16日間のサーベイ結果

About 30cm LEO objects are detectable

約30cmサイズの低軌道物体の検出が可能

About 15% of detected objects are un-cataloged

検出物体のうち約15%が未カタログであった。



軌道決定能力 Orbital Determination Possibilities

-Observation Simulation-

Observation sites:



Ishigakijima Observatory (Okinawa)

Observation equipments:



Takahashi €180ED

Observation equipments:



FLI ML4240

× 40



Observation date and time: **Apr/11/2012 8:40-11:40(UT) Rikubetsu**
Apr/11/2012 10:20-13:20(UT) Ishigaki

20セット一列をAz 0°, El 50°
 20セット一列をAz 180°, El 50°
 各セットが東西に一列になるように指向。

Targets: 14574 TLEs of Apr/11/2012 distributed at Space Track web site.

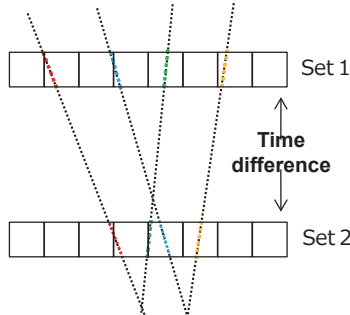
Observed coordinates(RA and Dec) of each object at each site are calculated every second using STK(Satellite Tool Kit) software.

軌道計算ソフトSTKを用いて各サイトで観測される物体のID (SSC番号)、観測位置 (赤経、赤緯) を一秒間隔で計算。

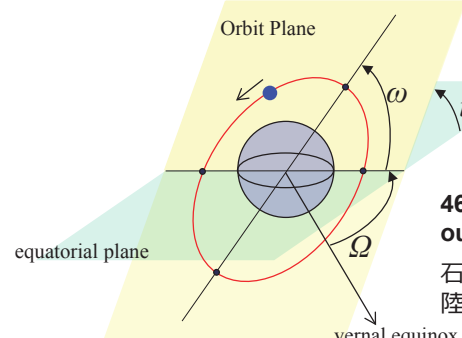


軌道決定能力 Orbital Determination Possibilities

-Observation Simulation-



Step1. Identification at each site
各局での同一物体の対応付け



用いた軌道要素14574の物体のうち

石垣 セット1で872物体、セット2で636物体が検出。
両方で検出されたものは473物体。

陸別 セット1で916物体、セット2で934物体が検出。
両方で検出されたものは458物体。

Identification conditions
対応付け条件

- ①Difference of observation times: Less than 700-sec
観測時間差 700秒以内
- ②Change rate of circular radiuses: Less than 0.1
円軌道の軌道半径変化率 10%以下
- ③Difference of inclinations: Less than 1.0-degree
円軌道の軌道傾斜角の差 1.0°以下
- ④Difference of RAANs: Less than 1.0-degree
円軌道の昇交点赤経の差 1.0°以下
- ⑤Difference of direction cosines at the middle of observation
両セットの観測中央時刻での両軌道の方向余弦の差 5°以下

↓

465 objects out of 473 ones at Ishigaki (98.3%) and 454 objects out of 458 ones at Rikubetsu (99.1%) are identified.

石垣の473物体中465物体 (98.3%)、
陸別の458物体中454物体 (99.1%) が対応付けできた。



軌道決定能力 Orbital Determination Possibilities

-Observation Simulation-

Step2. Identification at both sites

観測時間差

Ishigaki

Rikubetsu

石垣で対応付けされた465物体、
陸別で対応付けされた454物体のうち
両サイトで観測されたものは154物体。

Identification conditions
対応付け条件

- ① **Difference of observation times: 5600-7700-sec**
観測時間差 5600-7700秒
- ② **Change rate of circular radii: Less than 0.05**
円軌道の軌道半径変化率 5%以下
- ③ **Difference of inclinations: Less than 1.5-degree**
円軌道の軌道傾斜角の差 1.5°以下
- ④ **Difference of RAANs: Less than 1.0-degree**
円軌道の昇交点赤経の差 1.0°以下
- ⑤ **Difference of direction cosines at the middle of observation time of either of the two sites: Less than 90-degree**
どちらのサイトでの観測中央時刻での両軌道の方角余弦の差 90°以下

↓

143 objects out of 154 ones (92.9%) are identified
154物体中143物体 (92.9%) の対応付けができた。

Same object identifications out of many observation data taken at 2 sets of observation units at 2 sites are possible.

Which means objects coordinates separating about 80-degree of 2 passes are available. Therefore, accurate orbital determinations will be carried out.

- 2局の観測サイトそれぞれにある2つの観測装置のセットのデータから同一物体を高い確率で対応付けできることが分かった。
- 2回のパスについて天球上の数十度離れた位置情報を得ることが可能になり、精度良い軌道決定が可能となる。



軌道決定能力 Orbital Determination Possibilities

-Test Observation-

Observation sites:

Ishigakijima Morita Observatory (Okinawa)

Rikubetsu Observatory (Hokkaido)

Observation equipments:

Canon 200mm F2 + FLI ML23042

Canon 300mm F2.8 + FLI ML4240

Track of LEO objects

Observation date and time: Jul/27-28/2012 after dusk and before dawn

Targets: 4 TLE-objects (14521, 13589, 20720, 21574)

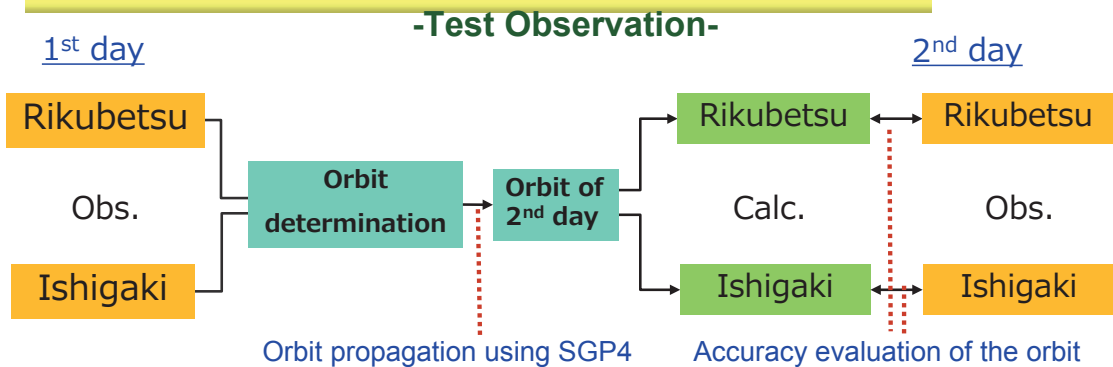
In order to mimic the observation using the optical array system described before, some TLE-objects were observed assuming one of the sensor of the system detects those objects with no TLE information. Each object was observed at 2 separate sky regions on each site. The first day's data was used for orbit determination and the second day's was for evaluation of the accuracy of the orbit determination.

観測を模擬するため、いくつかの明るいTLE物体を経度の離れた2局において連続する2パスをそれぞれ1つの観測ユニットで観測した。各局ではTLE物体の通過位置2か所をTLEを基に計算して待ち受け観測を実施、得られた観測データ（時刻及び位置情報）をシステムの1台のユニットが観測したものと仮定する。2晩このような観測を各局で実施し1晩目のデータは軌道決定に、2晩目のデータは軌道決定精度の評価に利用した。



軌道決定能力

Orbital Determination Possibilities



Result of the accuracy evaluation(Obs. – Calc.) 軌道決定精度評価結果

SSC番号	14521	13589	20720	21574
Rikubetsu dRA(arcsec)	181.19	34.99	19.62	199.27
Rikubetsu dDec(arcsec)	186.08	33.06	11.08	246.91
Ishigaki dRA(arcsec)	96.23	10.84	N/A	195.52
Ishigaki dDec(arcsec)	339.20	14.22	N/A	491.74

FOV
□7.65°

The result shows the orbit determinations are accurate enough to track objects next day in spite of quite limited observation data. In the case of the objects of 13589 and 20720, the differences are less than 0.01-degree. These facts indicate the proposed optical observation system is quite useful for orbit determination of un-cataloged LEO objects.

評価結果から少ない観測数にも関わらず、翌日の追跡には十分な軌道決定の精度を達成していることがわかった。特に13589、20720では計算と実際の観測の差異が0.01°=36arcsec以下と極めて良い精度であった。これらの事実から提案する低軌道デブリ光学観測システムは未カタログのLEO物体の精度良い軌道決定に有効であることがわかる。



運用効率

Operational efficiency

今後、CMOSセンサーの開発、解析手法等の向上により、10cm級を検出できると仮定。本システムでいくつの軌道上物体を検出、軌道決定ができるかをSTKを使って調査。

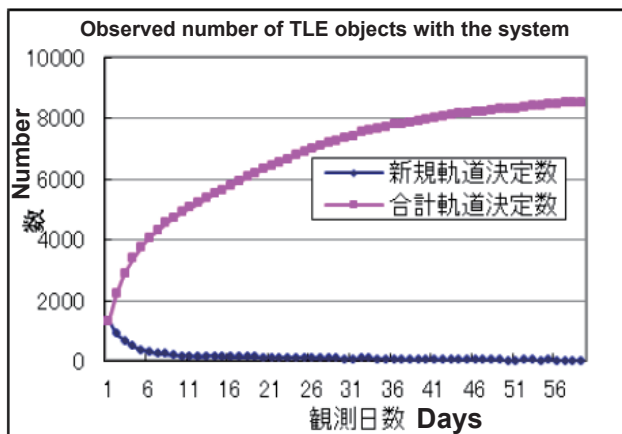
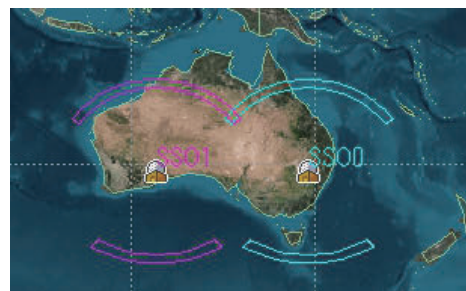
観測周期は？ 追跡望遠鏡は必要？何個、どこに？

Sites: 豪州Siding Springs Observatoryと
経度が25°離れた架空の観測サイト

Equipments: 18cm Telescopes + Optical Sensors 40sets (each sites)

Objects: TLE (About 14900)

Date and time: 2014/1/1 - 4 months



●4ヶ月後には9100個(TLE全体の約60%)でほぼ一定となった。

●天候の影響は考慮していない。

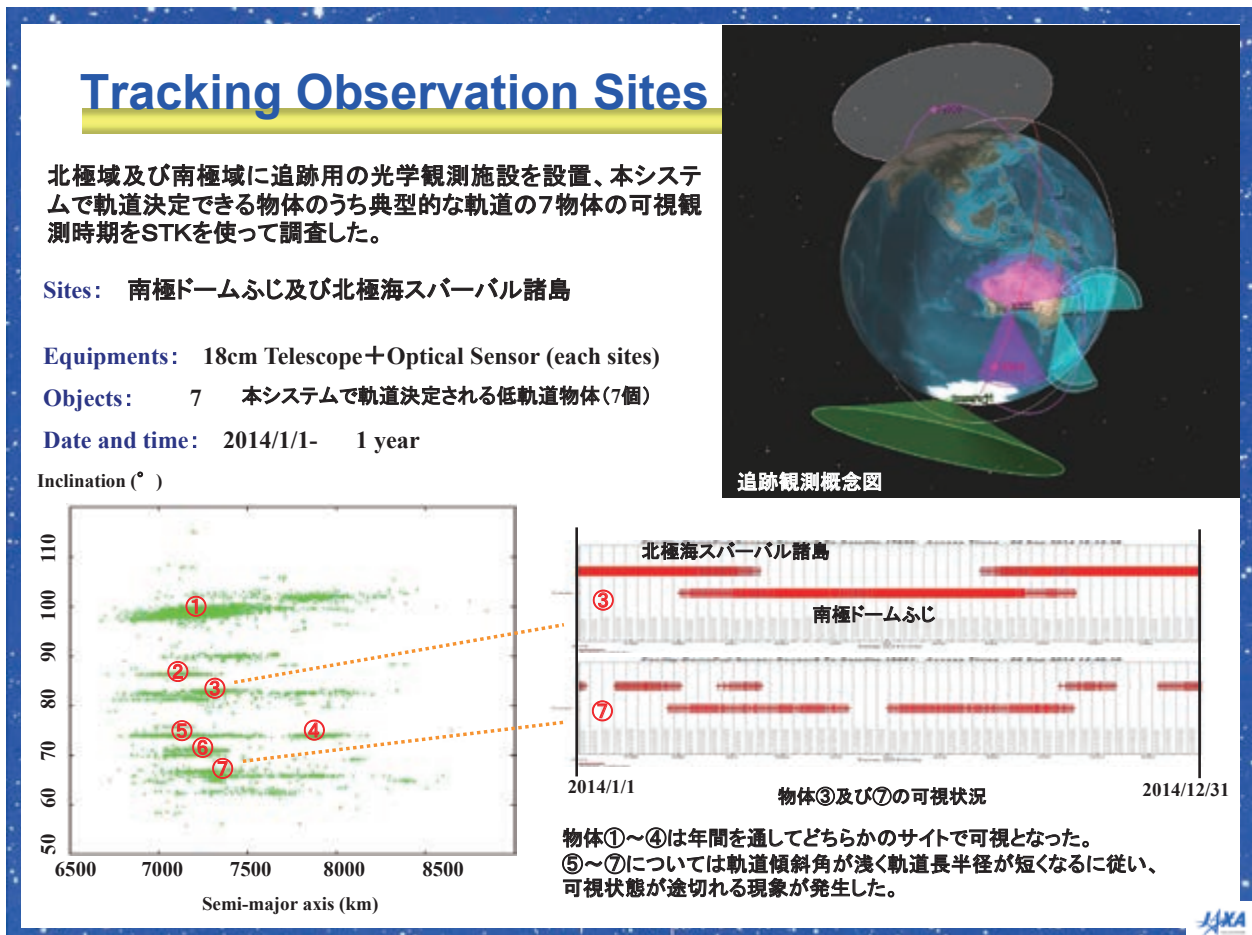
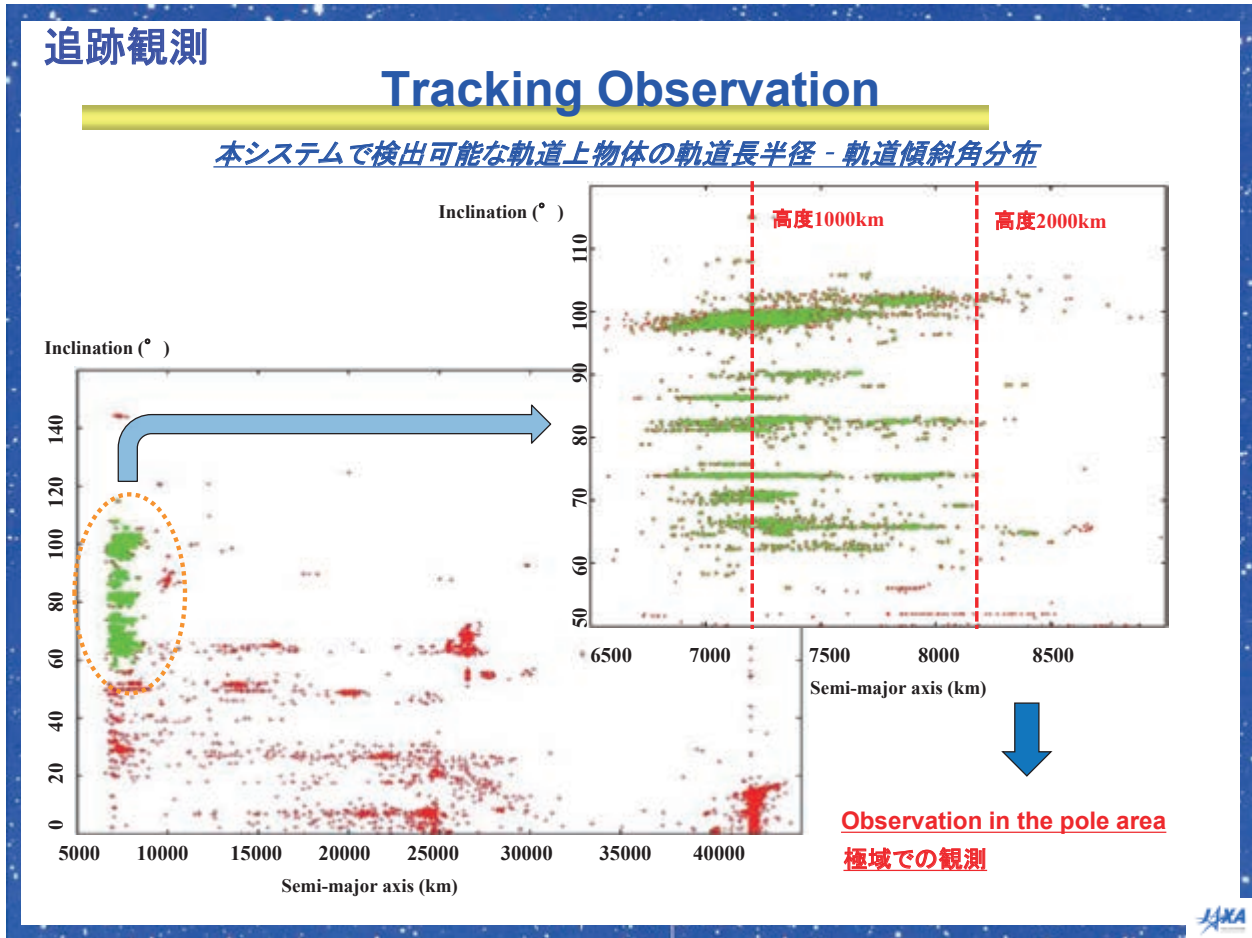
●検出、軌道決定の頻度は各物体で様々

- ・ほぼ毎日
- ・10日程度の空白期間を置いて数日
- ・数日観測された後は全く観測されない



追跡観測の必要性





Summary

We are proposing a ground-based optical observation system for monitoring LEO objects which uses a lot of optical sensors to cover the vast sky. In this study, the system evaluation was carried out using STK software. The results shows that two longitudinally separate sites for survey and two tracking sites located in both polar regions were able to detect more than 60% of TLE-objects and maintain their orbits. The proposed system may complement or replace the current radar observation system for monitoring LEO objects like a space situation awareness in the near future.

低軌道物体を監視するため、多数の光学センサーを利用して天球上の広い領域をカバーする地上光学観測システムを提案している。STK softwareを利用したシステム検討から経度方向に離れて設置した2局のシステムにより公開されている軌道物体の約60%の軌道決定が独自で可能であり、さらに南北の極域にそれぞれ1局ずつ追跡観測施設を設置することにより軌道決定した物体の多くを追跡可能であることが分かった。提案システムは将来、宇宙状況監視において現在米国が運用しているレーダー観測網を補完するような機能を持ちうる。



The logo for JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), featuring the letters "JAXA" in a stylized font with a blue and white color scheme.