

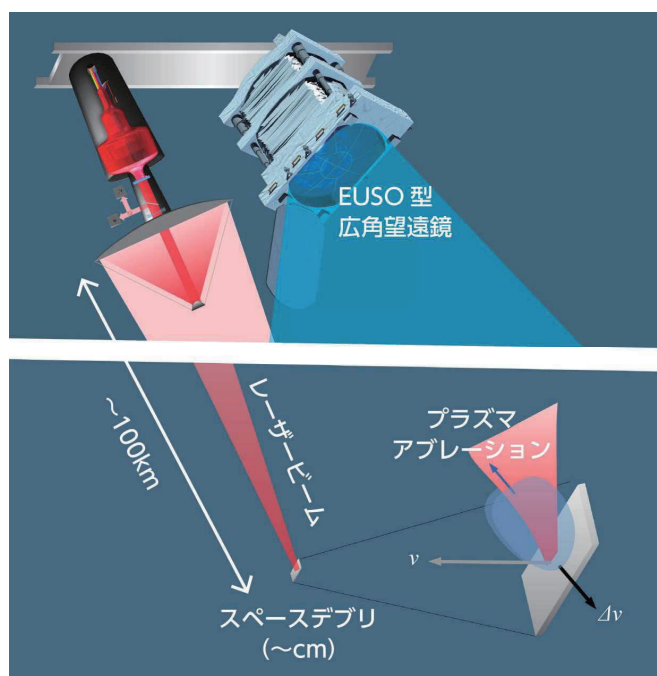
E6

レーザーによる宇宙デブリ脱軌道 Deorbiting of Space Debris by Laser Ablation

○戒崎俊一, 和田智之 (理研), 佐宗章弘 (名古屋大)
○T. Ebisuzaki, S. Wada (RIKEN), A. Sasoh (Nagoya University)

レーザーアブレーションによる脱軌道は、センチメートルサイズのスペースデブリの除去に有効なおそらく唯一の方法として近年注目を集めている。Ebisuzaki et al. (2014)によると、この脱軌道オペレーションは三段階に分かれる。まず、超広角望遠鏡によりスペースデブリからの太陽反射光を検出し、その位置と運動方向を大雑把に決める。超広角望遠鏡には、超高エネルギー宇宙線の検出用に開発した技術を転用して用いる。次に、決められた位置・運動情報をもとに、宇宙デブリの方向に探索レーザービームを照射し、反射帰還光子信号を使って、位置と速度を正確に決定し、距離情報も得る。最後に、高輝度のレーザービームを照射し、宇宙デブリ上に収束させてアブレーションを起こし、その反力で減速し、脱軌道に導く。本講演では、このミッションの技術的課題を整理し、その実現に向けての段階的技術実証のプロセスを提案する。

Deorbiting by the laser ablation attracts increasing attentions as almost unique effective method to remediate cm-sized space debris. According to Ebisuzaki et al. 2014, the deorbiting operation is divided into three steps. First, a super-wide field telescope detects the reflection signal of the solar light by a space debris and roughly determines its position and moving direction. Second, laser beams are ejected to the directions of the debris to determine the position and velocity precisely as well as its distance. Finally, high intensity laser beams are focused onto the debris surface to induce laser ablation on the surface. The reaction force of the ablation leads the debris to deorbiting to the Earth's atmosphere. In this talk, we will discuss the technical challenges to achieve the mission and propose a step-by-step approach for the technical demonstration of the mission.



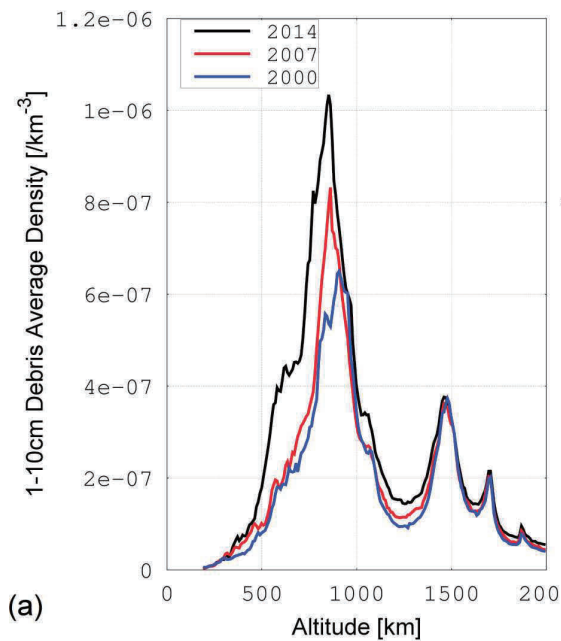


レーザーによる 宇宙デブリ脱軌道

戎崎俊一、和田 智之(理研)
佐宗章弘(名古屋大学)

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

スペースデブリの脅威



(a)

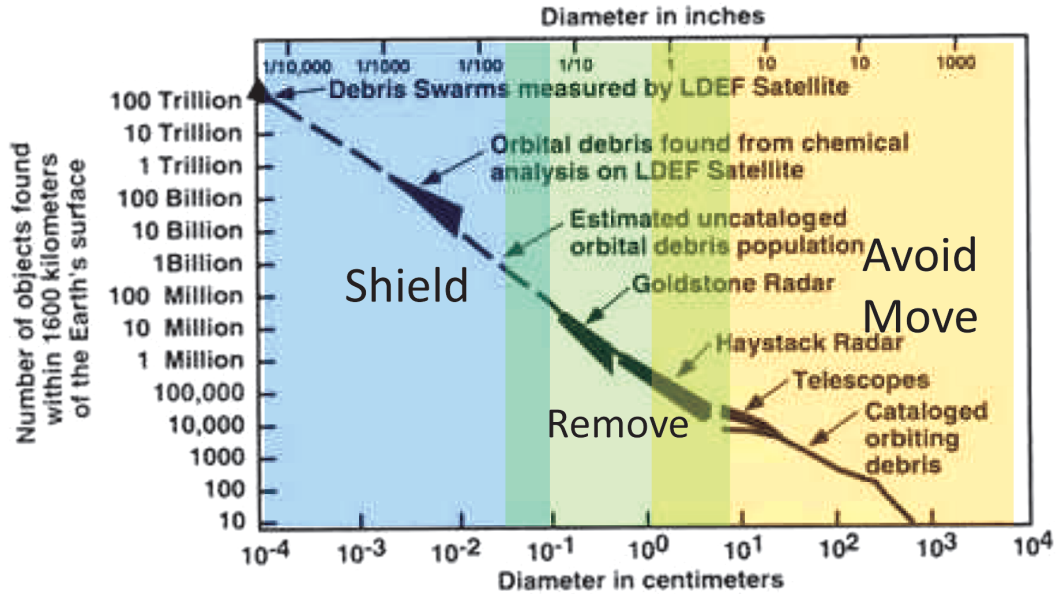


GRAVITY

※スペースデブリ: 地球衛星軌道を周回する不要な人工物体

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

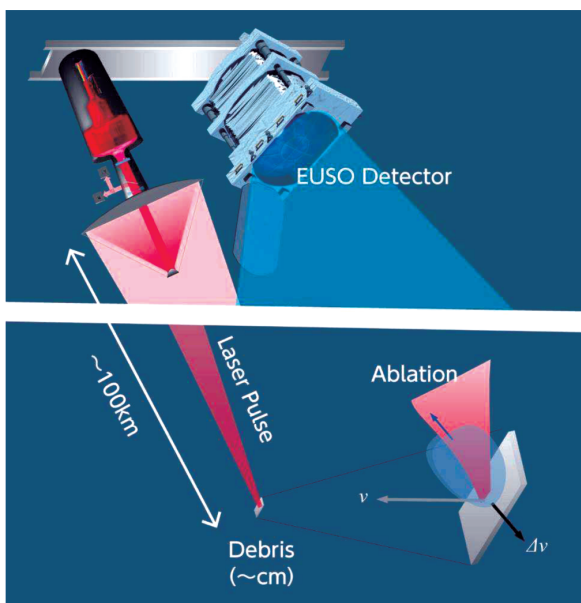
Debris population



第7回スペースデブリワークショップ
20161019

3

レーザーによるデブリ脱軌道



- 超広角望遠鏡
 - 太陽反射光
 - 検出
 - 位置と速度の粗決定
- CANレーザー
 - 探索ビーム
 - 位置と速度の精密測定
 - アブレーション※

(※固体の表面が蒸発・浸食によって分解する現象)

JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module) : 地球での「宇宙起因の瞬間発光現象」を観測し、検出器が装着された宇宙ステーションを含む地球全体を使う新しい天文台

4

Ebisuzaki et al. 2015

世界で初めて、原理的にデブリを取り除くことが不可能ではないことを論文化



Demonstration designs for the remediation of space debris from the International Space Station



Toshikazu Ebisuzaki^{a,*}, Mark N. Quinn^b, Satoshi Wada^d,
Lech Wiktor Piotrowski^d, Yoshiyuki Takizawa^d, Marco Casolino^{a,c},
Mario E. Bertaina^{c,d}, Philippe Gorodetzky^e, Etienne Parizot^e,
Toshiki Tajima^{b,f}, Rémi Soulard^b, Gérard Mourou^h

^aRIKEN, 2-1, Hirasawa, Wako 351-0198, Japan

^bIZEST, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau, France

^cINFN, Structure of Rome Tor Vergata, Via della Ricerca Scientifica 1, Rome, Italy

^dUniversity of Torino, Via P. Giuria, 1 10125 Torino, Italy

^eAPC-CNRS/Paris7 University, 1 rue A. Doméril L. Duquet, 75013 Paris, France

^fDepartment of Physics and Astron, University of California at Irvine, Irvine, CA 92697, United States

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

5

メディアの反応：海外を中心に100以上

Space Station lasers to shoot down junk in orbit

Irish Independent - Apr 22, 2015

Scientists want to fit huge lasers to the International Space Station (ISS) and use them to blast away the estimated 3,000 tons of space debris that flies around the Earth and could be putting it in danger.

International Space Station could be fitted with huge lasers to shoot down space ...

The Independent - Apr 20, 2015

When that spots a piece of dangerous debris, a laser would be used to fire at bits of space junk until it goes out of orbit and burns up as it goes back towards the Earth. The plan is one of a number of proposals for dealing with the huge amounts of "space junk" ...

Scientists propose to blast space junk with ISS-mounted laser

Delhi Daily News - Apr 18, 2015

To tackle the increasingly dense layer of miscellaneous space debris and dead satellites that are covering our planet, a team of researchers led by Japan's Riken research institute has put forward what might be the most ambitious plan to date.

Laser's blast could destroy space debris

Las Vegas Review-Journal-Apr 22, 2015

Space debris poses a threat because the objects can collide with space infrastructure like the International Space Station and satellites, ...

The Mad Plan to Clean Up Space Junk With a Laser Cannon

Wired-May 12, 2015

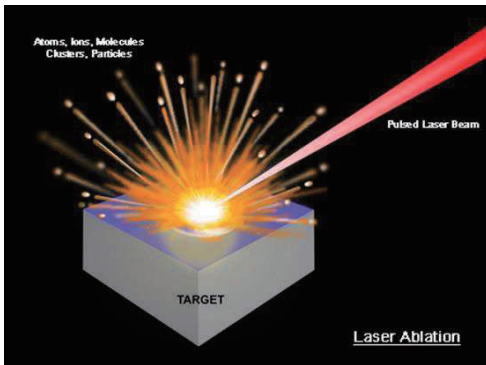
The mother of all laser cannons, in Star Wars: Episode IV - A New Hope. ... A team of astronomers at Japan's RIKEN, a network of basic-research ... Kessler began the field of studying orbital debris and lends his name to ...

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

6

レーザーアブレーション

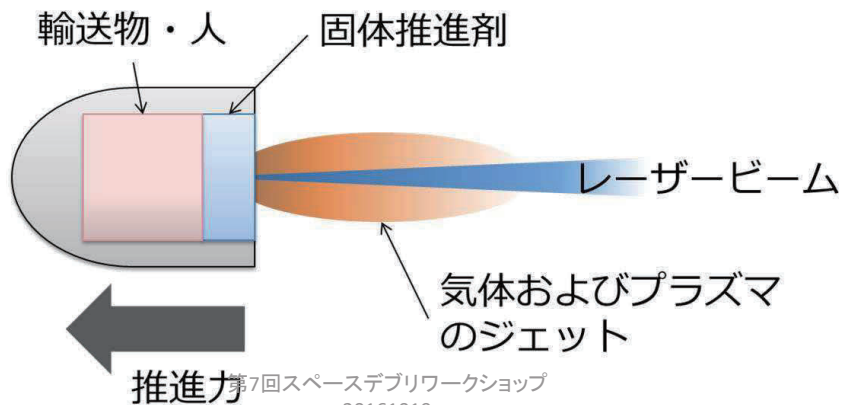
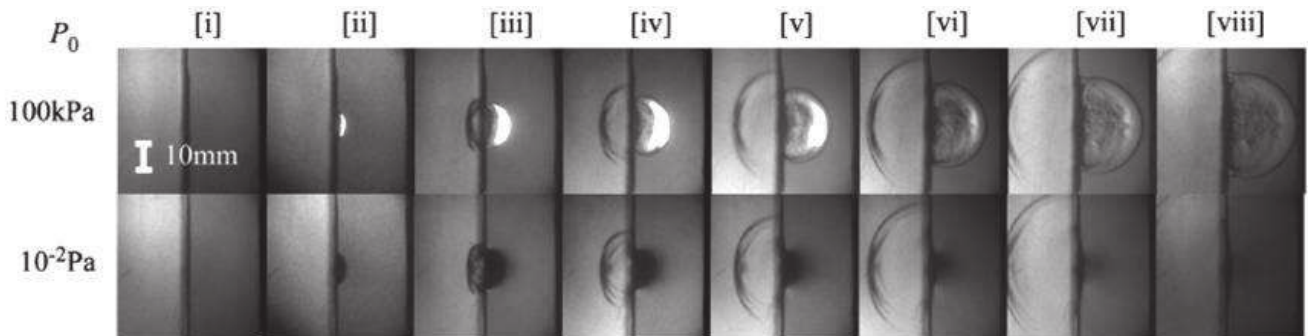
- 高輝度のレーザーを表面に照射
- 表面物質がプラズマ化して噴き出してくる
- レーザーで切断や溶接



第7回スペースデブリワークショップ
20161019

7

プラズマアブレーションによる宇宙推進



第7回スペースデブリワークショップ
20161019

8

光圧 v.s. アブレーション反力

- 光圧
 - $F = E/c \sim 3 \times 10^{-9}$ N (1W)
- アブレーション反力
 - $F_A \sim E/v_A \sim 10^{-4}$ N (1W)
 - $v_A \sim 10^{3-4}$ m s⁻¹ $\ll c = 3 \times 10^8$ m s⁻¹
- パルスレーザーでは敷居強度が下がる
 - 敷居レーザー強度 $\sim 10^4$ Wm⁻² ($\Delta t < 1$ ns)

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

9

連続 v.s. パルス

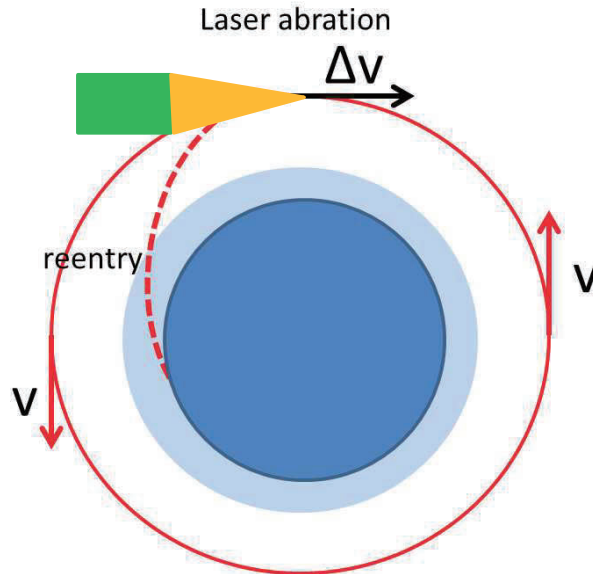
- アブレーションを起こすための敷居
 - $\sim 10^4$ J m⁻²
- 連続レーザーだと困難
- パルスレーザー
 - ピークパワー \gg 平均パワー



第7回スペースデブリワークショップ
20161019

10

アブレーション反力による再突入



第7回スペースデブリワークショップ
20161019

11

宇宙デブリ脱軌道の三段階

$a=0.5-10$ cm, $d\sim 100$ km, $v_{rel}\sim 1-15$ km

1. 検出 (<1 秒seconds)
 - 超広角望遠鏡 $\pm 30^\circ$
 - 位置 ($\Delta\theta < 0.07^\circ$) と運動方向を決定 (1%)
2. 追跡 (~ 1 秒)
 - カセグレン光学系 (1.5m)
 - 探索ビーム照射 ($\Delta\varphi \sim 0.07^\circ$, $\Delta\tau \sim 1$ ns)
 - 高精度の位置決定 ($\Delta\theta < 10^{-6}$ rad, $\Delta R \sim 1$ km)
3. 高輝度レーザー照射 (~ 10 seconds)
 - $E_p \sim 10$ J, $R_p \sim 5 \times 10^4$ Hz

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

12

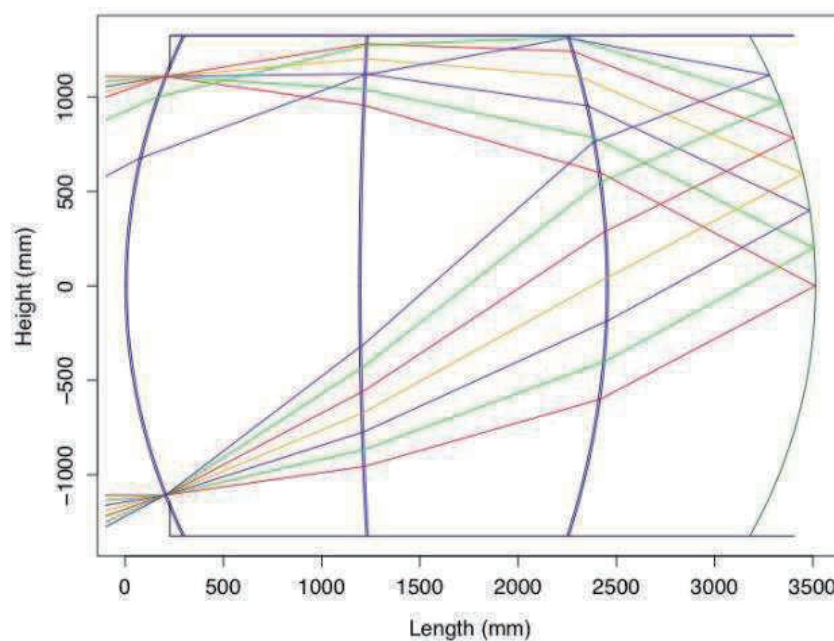
超広角望遠鏡

- 超高エネルギー宇宙線観測用に開発された紫外線望遠鏡
- 超広視野: ± 30 度
 - 屈折光学系: 三枚のフレネルレンズ(理研大森素形材工学研究室)
- 超高速: $2.5\mu\text{s}$
 - 位置検出型光電子増倍管(浜松ホトニクス)

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

13

超広角望遠鏡光学系($\pm 30^\circ$)

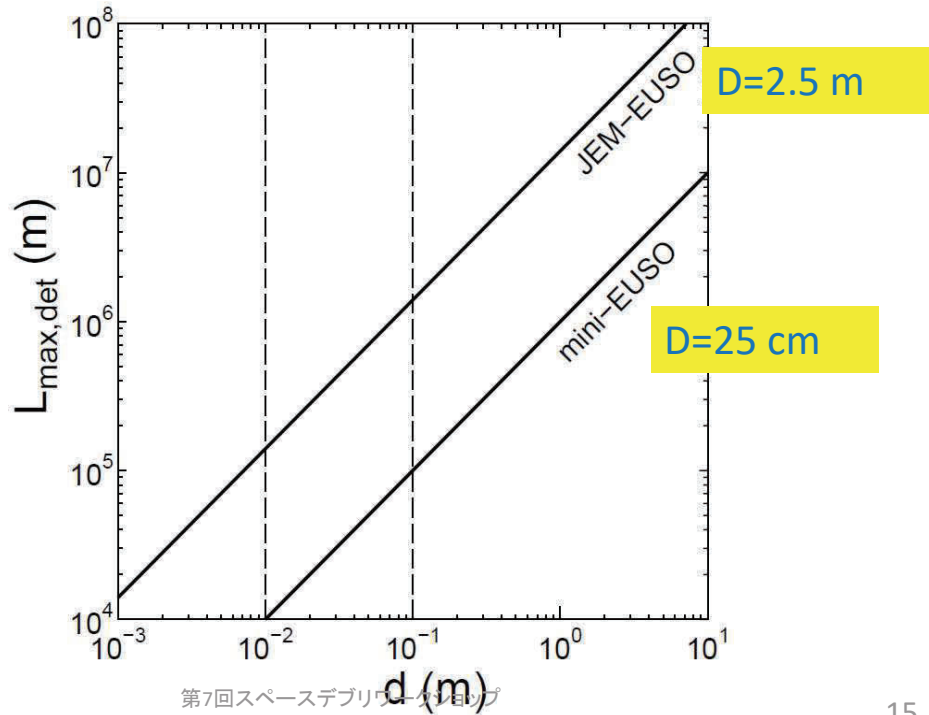


Two Double sided curved Fresnel Lens + Diffractive Optics

20161019

14

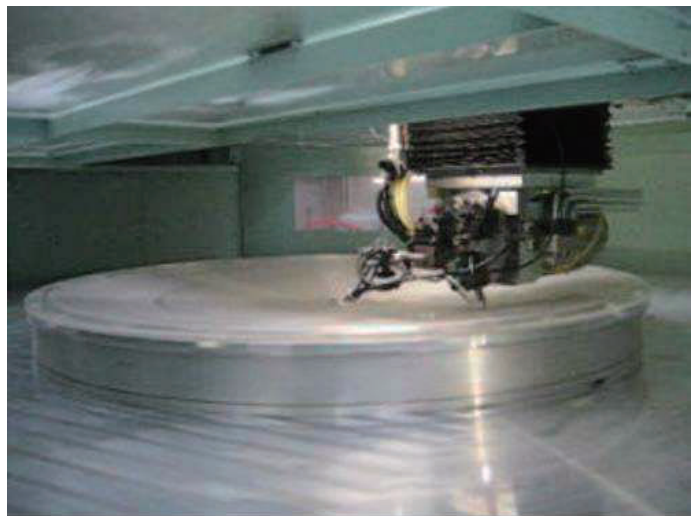
検出限界: 太陽光の反射



大規模フレネルレンズ製作(up to 3m)

Cutting condition

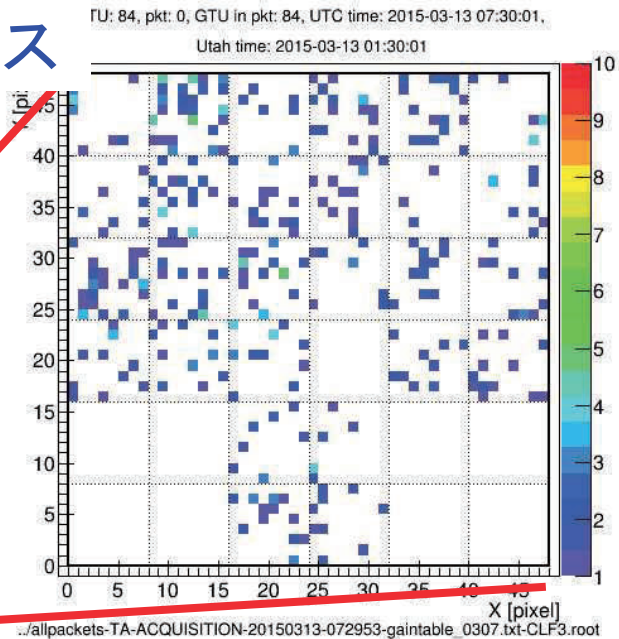
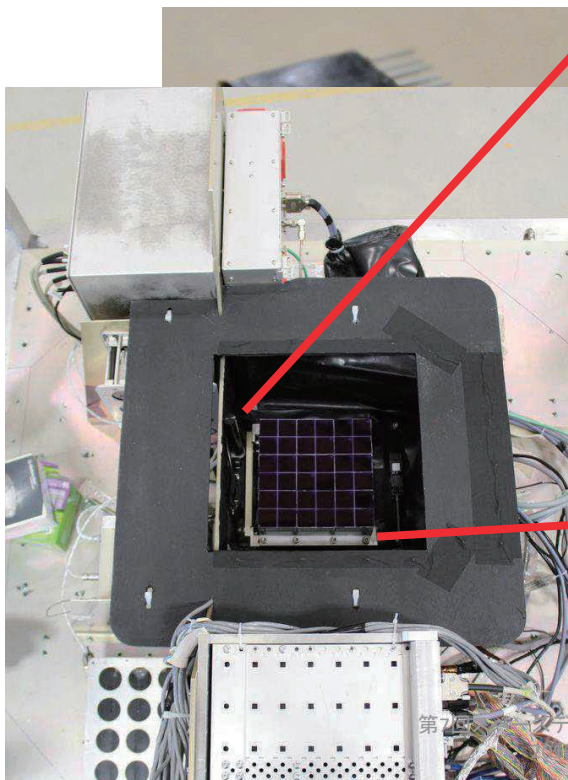
Tool radius	R0.5mm
Work speed	50rpm
Feed Speed	0.2mm/min
Depth of cut	0.005mm/pass
Work piece	PMMA



cutting concave surface

EUSO 技術 2

検出器: 浜松ホトニクス



GTU = 2.5 μ s

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

17

Ground telescope

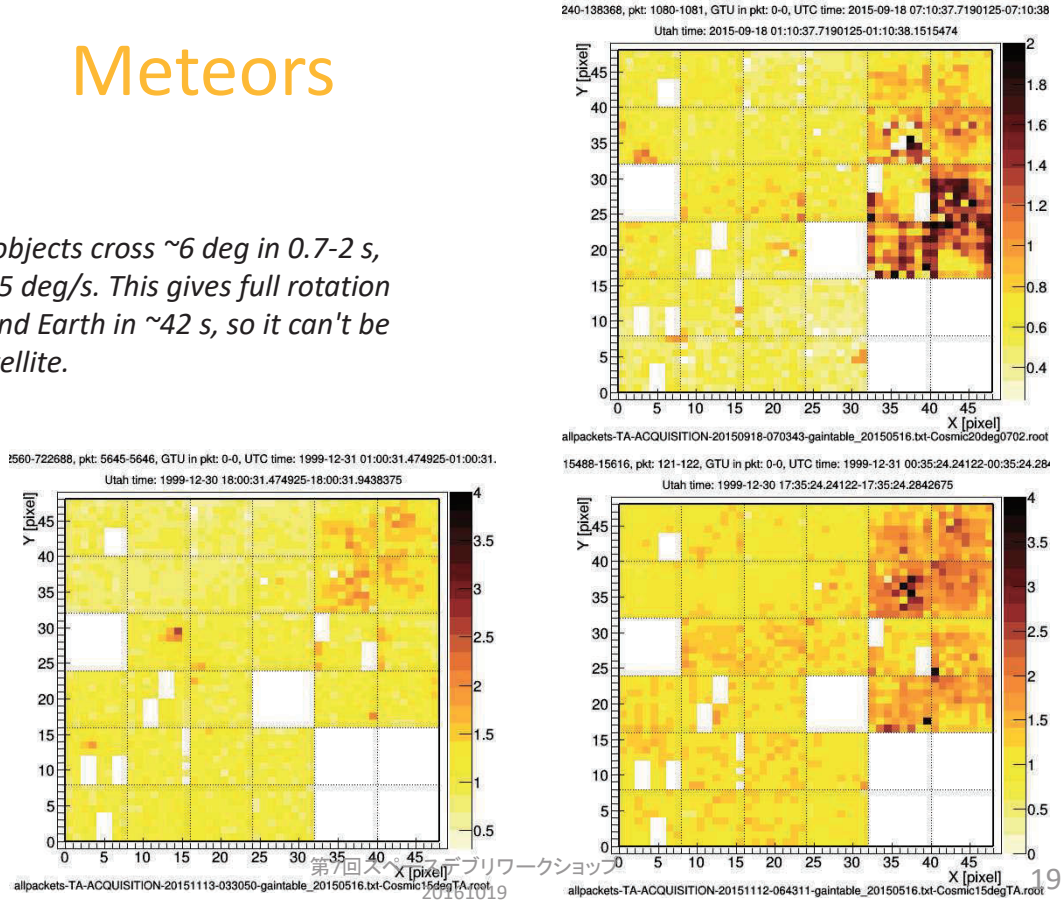


第7回スペースデブリワークショップ
20161019

(C) Oscar Larsson

Meteors

The objects cross ~6 deg in 0.7-2 s, so 8.5 deg/s. This gives full rotation around Earth in ~42 s, so it can't be a satellite.



CAN (Coherent Amplification Network) Laser System

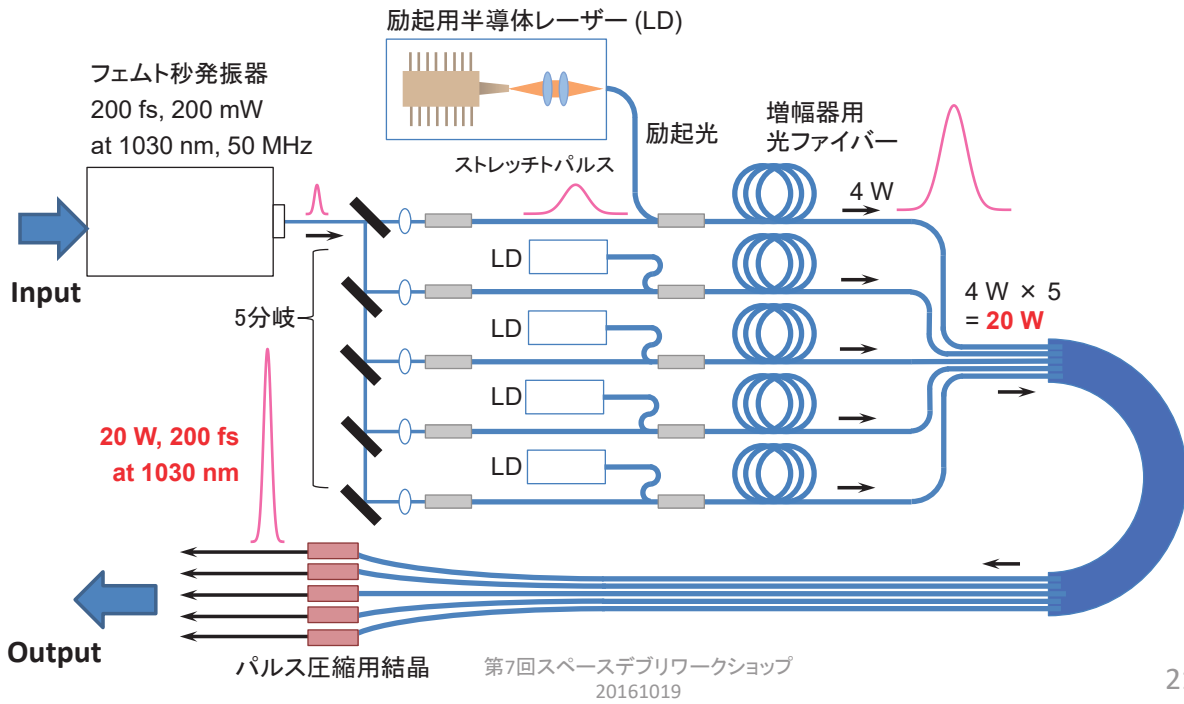
多数個 of ファイバーレーザーを並列に位相を合せて発振する



Photonics Control Technology Team, RIKEN Center for Advanced Photonics, RIKEN

20 W, 200 fs, 1030 nm ファイバーレーザー

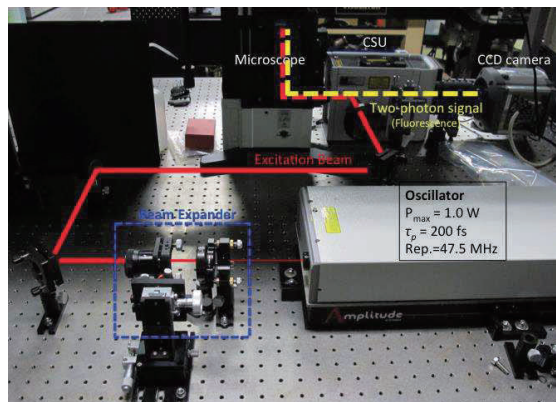
新しいレーザーの開発と導入



Photonics Control Technology Team, RIKEN Center for Advanced Photonics, RIKEN

マルチファイバーレーザーの開発

高出力 フェムト秒近赤外 マルチファイバーレーザー



Yb:YAG Laser

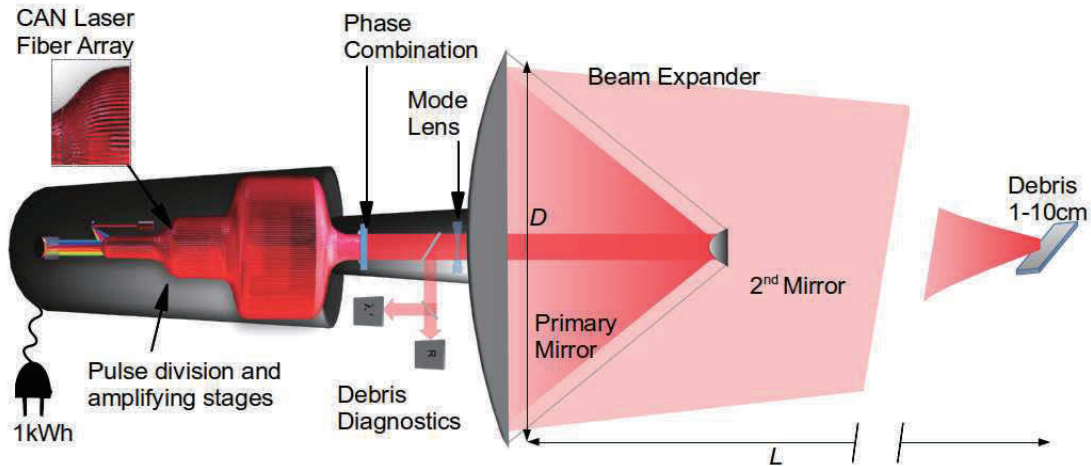
Ave. Power: 20W

Pulse width: 200fs

Rep. Rate: 50 MHz

Space CAN laser system

CAN=Coherent Amplify Network



第7回スペースデブリワークショップ
20161019

23

デブリ除去への道

1. 25cmクラス 望遠鏡(国際宇宙ステーション)
 - デブリ検出の技術実証
 - 25 cm 紫外線望遠鏡
 - 日本・イタリア・ロシア+の協力
 - 2017年打ち上げ確定

2. 2.5mクラス広角望遠鏡
 - 2.5 m 広角望遠鏡
 - 日本・イタリア・ロシア+の協力で協議中
 - +CANレーザーで軌道変更の技術実証?
3. 専用脱軌道ミッション
 - 超広角望遠鏡+CANレーザー
 - 高度100-700kmの極軌道

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

24

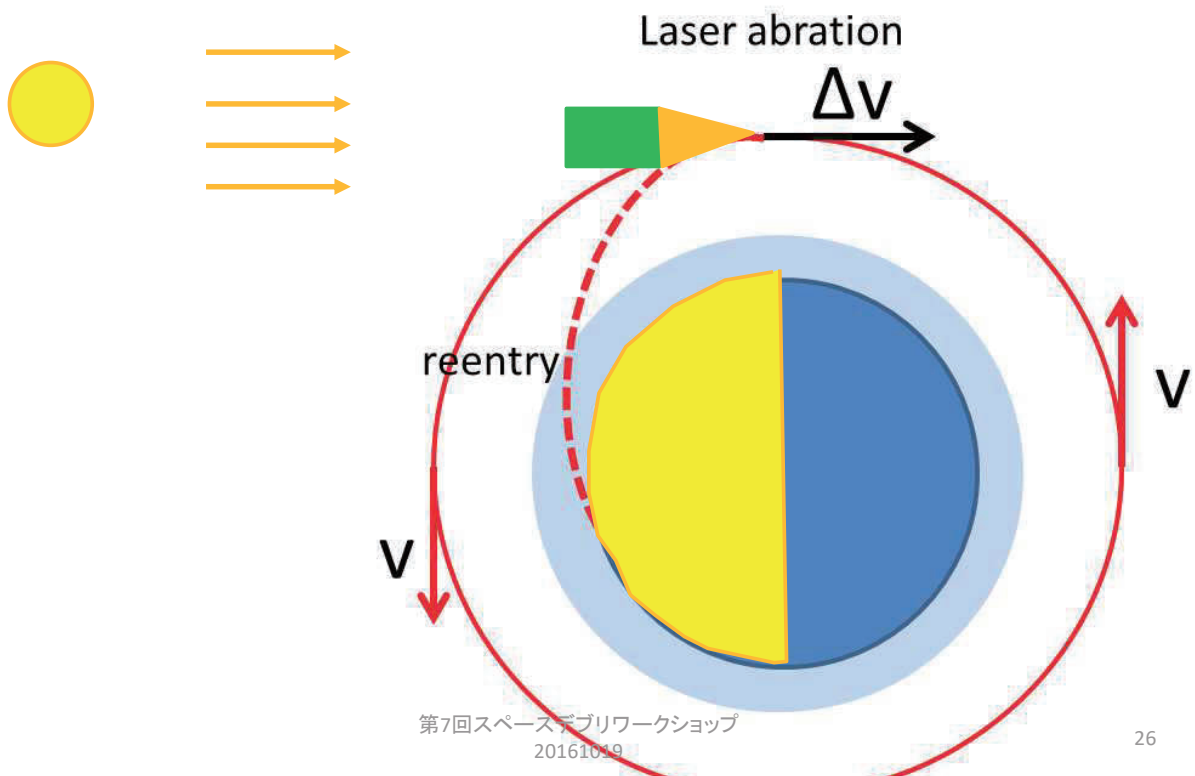
専用脱軌道ミッション

- 高度900-600 km楕円軌道
- $i=98.3$ 度の太陽同期軌道
- 常に薄明帯を飛行
太陽反対用方向を観測する
- 2.5 m 超広角望遠鏡
+ Space CAN laser (500 kW)
- 動作距離: 100km
- 10^3 (backward)- 10^5 (forward) operation
- ~5年で大部分のデブリ (0.5-10 cm)を脱軌道

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

25

太陽同期軌道



第7回スペースデブリワークショップ
20161019

26

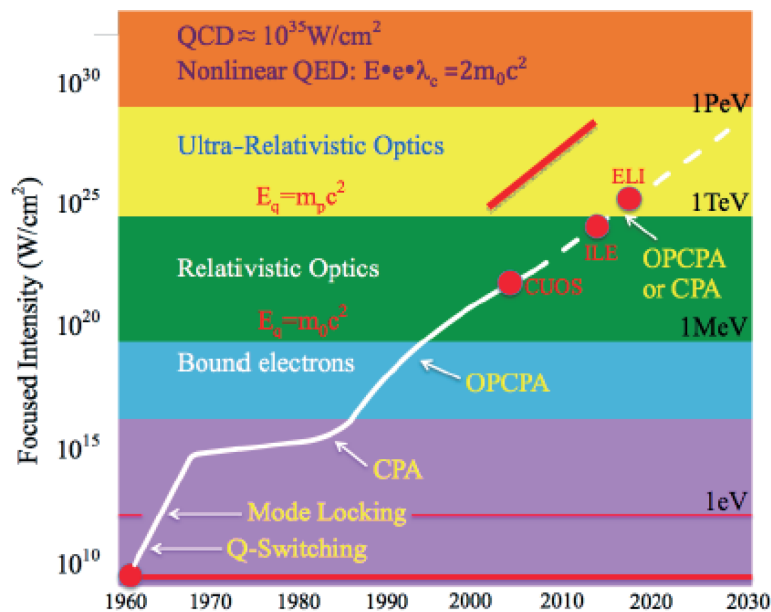
技術開発要素(1)

- 高輝度パルスレーザーの開発
 - 平均レーザーパワー500 kW
 - 高効率: ~30%
 - パルス幅: ~0.1 ns
 - 高繰り返し頻度: ~50 kHz
 - 波長: 355nm
- 電力とバッテリー
 - 500 kW ビームを10秒バースト照射
 - 200秒に一回10秒
 - 10MJ程度のバッテリー
 - 発電能力(国際宇宙ステーション: 130 kW)

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

27

Mourou Diagram



The 14-th International JEM-EUSO meeting
Dec. 2-6

技術開発要素(2)

- 検出用広角望遠鏡
 - 観測方向と軌道
 - 軌道決定
 - 属性決定
- レーザー射出光学系
 - 回折限界望遠鏡 (口径=1.5m 波長=355nm)
 - 高速回転に耐える高剛性 (数度/秒)
 - 高輝度耐性

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

29

技術開発要素(3)

- ソフトウェア (完全自動)
 - 検出から照射まで
 - 性格づけ(照射してよいかどうか)
- 安全性
 - 射線に運用衛星はないか？
 - 脱起動中のデブリの運用衛星への被害？
- 宇宙法・国際法
 - 所有権と司法権
 - 所有者の特定
 - 除去のための国際的な合意

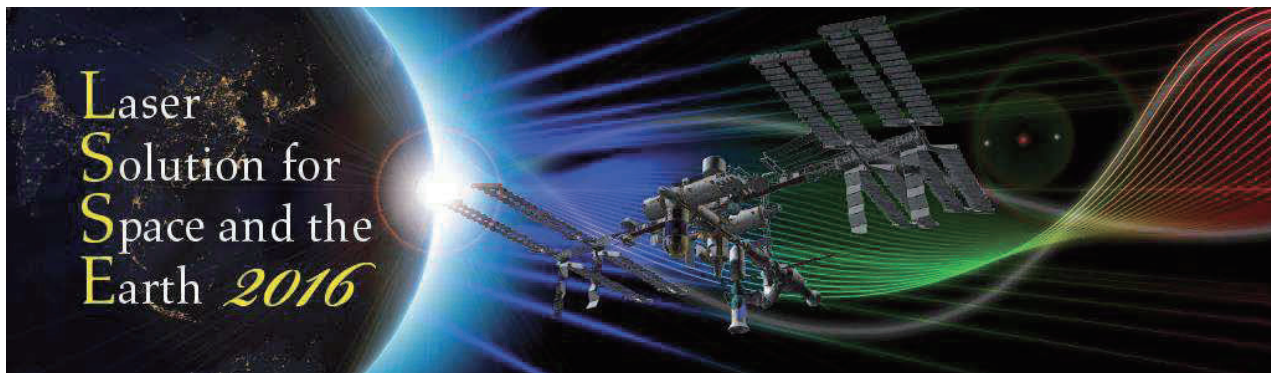
第7回スペースデブリワークショップ
20161019

30

まとめ

- レーザーアブレーションによる再突入: 1-10 cm
- 宇宙機からレーザー照射
 - 超広角望遠鏡による検出
 - 超広角($\sim 60^\circ$), 高速(\sim マイクロ秒)
 - 追跡と脱軌道
 - 1.5 mカセグレン望遠鏡とCANレーザー
355nm UV laser
- 多くの開発要素
 - 高輝度レーザー
 - 広角望遠鏡
 - 射出工学系
 - 安全性と所有権の問題

参考



• Apr., 19-21, Yokohama Japan

International Advisory Board

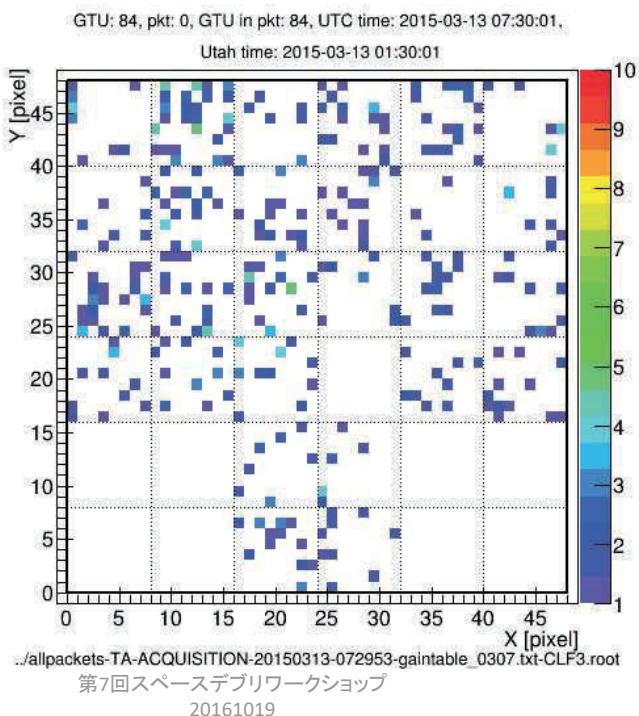
- Prof. R. Li (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, China)
- Prof. G. Mourou (Ecole Polytechnique/IZEST, France)
- Prof. T. Tajima (UC Irvine, USA)
- Prof. H. Yamakawa (Kyoto University, Japan)
- Prof. X. Yan (Peking University, China)

Science Organizing Committee

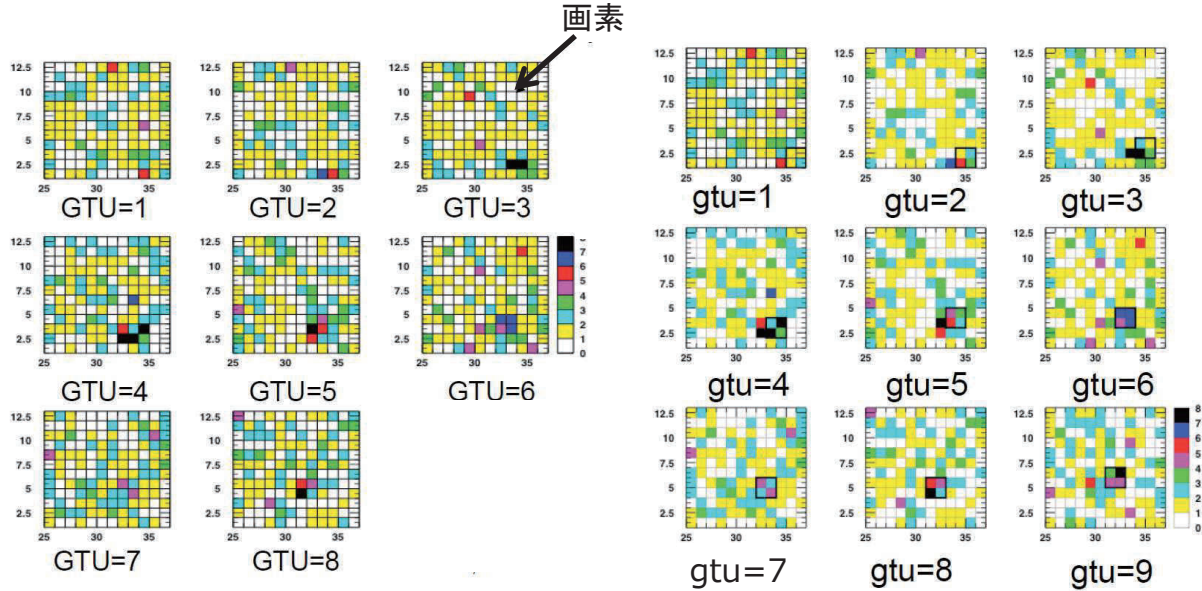
- S. Aoki (Keio University, Japan)
- H. Daido (JEA, Japan)
- T. Ebisuzaki (RIKEN, Japan), Chair
- T. Fujii (CRIEPI, Japan)
- K. Fujita (The Graduate school for the Creation of New Photonics Industries, Japan)
- Y. Kitazawa (JAXA, IHI, Japan)
- H. Lu (Peking University)
- C. Phippes (Photonics Associates, USA)
- M. Quin (Ecole Polytechnique, France)
- A. Sasoh (Nagoya University, Japan)
- M. Vasile (University of Strathclyde)
- S. Wada (RIKEN, Japan)
- T. Yanagisawa (JAXA, Japan)

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

TA Central Laser Facility



線形トラック法：輝点を追いかける 直線運動物体を高感度検出

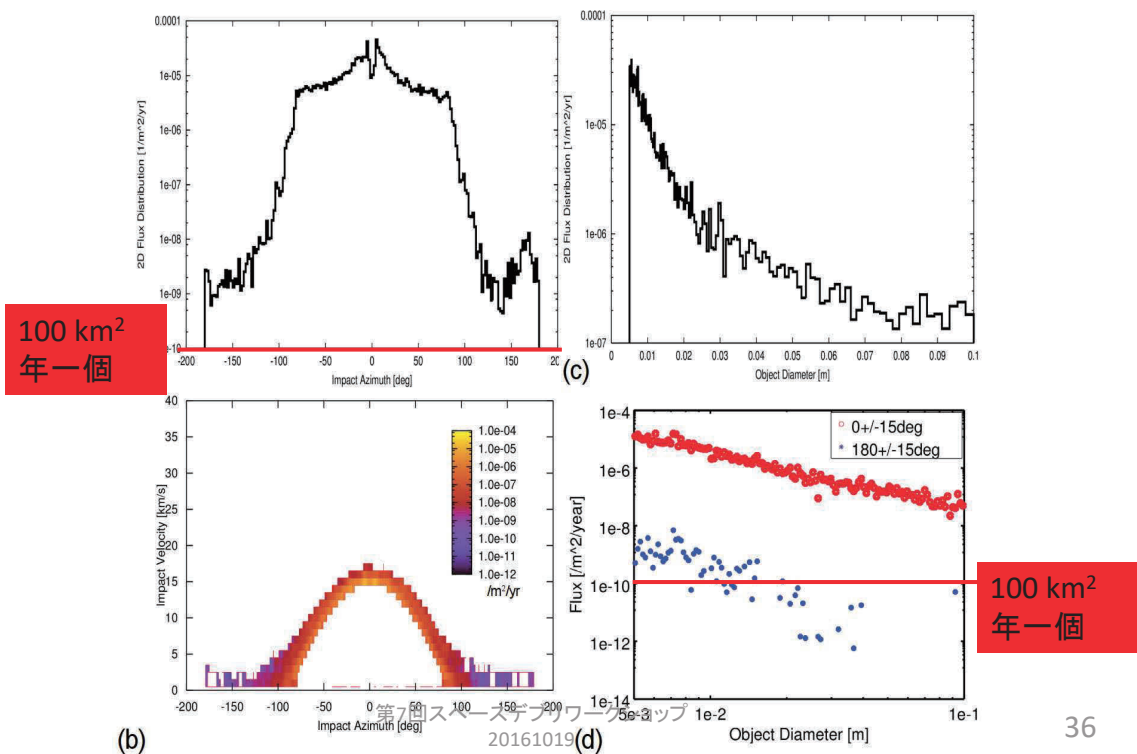


第7回スペースデブリワークショップ
20161019

速度を仮定して積分窓を移動
全ての速度について試す

35

Polar orbit (~800 km)



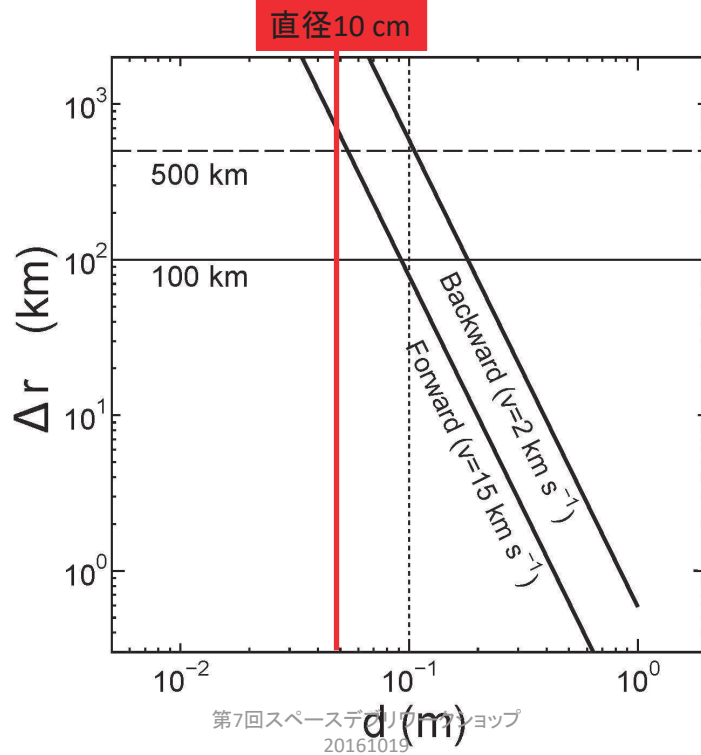
(b)

(d)

第7回スペースデブリワークショップ
20161019

36

専用ミッションによる 近地点高度の変化



Parameters of Systems

	Prototype on ISS	Technical Demonstrator on ISS	Dedicated system
Target Debris Size (cm)	>1	10>a>0.5	10>a>0.5
Target Debris Distance (km)	10-100	100	100
EUSO Aperture (m)	0.25	2.5	2.5
EUSO FoV	±14°	±30°	±30°
Tracking Optics (m)	0.1	1.5	1.5
Laser system	Solid state	10 ⁴ fibre	10 ⁴ fibre
Pulse Energy (J)	0.1	10	10
Pulse Duration (ns)	1	0.1	0.1
Repetition rate (Hz)	0.1	10000	50000
Average power (kW)	0.001	100	500
Event per year	20-30 (detection) 2-3 Irradiation	10 (backward) 300 (forward)	10 ⁵ (forward) 10 ³ (backward)

デブリ脱軌道技術実証衛星(1)

- レーザー：
 - $E_p=1\text{J}$, $\tau_p=100\text{ps}$, $N=100\text{Hz}$, $P=100\text{W}$, $\lambda=1\mu\text{m}$
- 射出光学系:0.1m 回折限界光学系
 - ビーム角度= $10^{-6}/0.1=10^{-5}$ rad
 - 1 kmの距離のビーム直径:0.01 m
 - アブレーション閾値を超える
- 検出光学系:0.25cm
 - 直径0.1mの中空球を射出してレーザー追尾
 - $C=10^{-4}$ N/W: $F=C*P=0.01$ N
 - $m=0.1$ kg $\rightarrow a=10^{-1}$ ms⁻²
- 人工衛星に対する追尾実験
- 1-10 cmのデブリに対する追尾・照射実験

宇宙デブリのサイズ分布(800km)

