

## 宇宙デブリ観測・防御の研究 R&D on Space Debris Observation and Protection

宇宙先進技術研究グループ スペースデブリサブグループ  
Advanced Space Technology Research Group, Space Debris Subgroup

中島厚、柳沢俊史、星野健、永尾陽典  
Atsushi Nakajima, Toshifumi Yanagisawa, Takeshi Hoshino and Yosuke Nagao

### Abstract

About fifty years have passed since the first launch of the artificial satellite in the earth orbit. During the time, several thousand rockets and satellites have launched and the total mass will be estimated several thousand tons. These expensive rockets and satellites turn out debris when they finish their missions. Many of the debris still move around the earth, which brings increased anxiety of collision with the satellites in service or the International Space Station(ISS) under construction. Therefore, in the Institute of Space Technology and Aeronautics(ISTA), JAXA, the debris problem has been investigated comprehensively from the viewpoint of observation, protection and prevention of occurrence. This paper describes the results of the observation and protection research area.

### 1. はじめに

人類がロケットや人工衛星による宇宙活動を開始して以来、多くの使用済みロケットや人工衛星、或いは爆発したこれらの残骸(総称して宇宙デブリ)が多数軌道上に存在し、今後の宇宙活動に支障をきたす段階になりつつある。静止軌道においては、ミッション終了後の衛星はリオービットにより軌道高度を変えて衝突を回避しているが、過去の爆発により発生した多数の微小デブリは、運用衛星に対する衝突危険性は依然存在する。現在、軌道が確定されている静止軌道近傍のデブリの大きさは 50cm 程度であるが、国際的にも 20cm サイズのデブリ検出が必要とされている。一方、高度約 1,500km 以下に存在する低軌道デブリは、特に太陽同期軌道に関してはデブリ同士の衝突の確率が最も高い軌道であり、将来的には能動的な除去の必要性も出てくるものと思われる。低軌道デブリは一般にレーダー観測により軌道決定が行われており、決定可能な最小のデブリサイズは 10cm 程度である。又、落下間近のデブリの軌道決定・落下予測も重要な課題であり、高度が低いことから多数の観測サイトのデータにより予測精度を向上させる必要がある。更に国際宇宙ステーション ISS の運用において、極微小デブリに関してはバンパーにより防御しているが、より大きなサイズのデブリに対する防御技術の開発も緊急を要している。

本研究においては、これら静止高度の微小デブリの検出を可能にし、又、低軌道デブリに関してもその観測可能性を明らかにすると共に、デブリに対する防御技術の確立のために、超高速射出試験装置の開発と CFRP 板をターゲットとした超高速衝突実験による衝突痕解析等を行っている。





と、CFRP 板をターゲットとしてデブリを模擬したアルミを超高速衝突させ、その現象を実験的・解析的に調べることで宇宙機用の複合材料構造設計、特にデブリ防御構造の設計指針を得るデータを取得する事とを目標としている。なお複合材への衝突試験についてはイタリアのパドバ大学との共同研究を行っている。

### 3. 成果の概要

#### 3. 1 光学観測技術の研究

平成 15 年度における光学観測技術は以下の 3 項目を研究目標とし、計画に沿って実施した。

##### 3.1.1 微小静止デブリ検出技術の開発

光学望遠鏡による静止デブリ観測の手法は、望遠鏡を固定して静止軌道付近を比較的短時間露光(5 秒~10 秒)してデータを取得する。恒星は線像となり、運用中の静止衛星は点像となる。静止デブリは若干の軌道傾斜角を持っているため恒星とは別の線像(点像に近い)として区別される。しかしながらこの方法では、検出能力は望遠鏡の口径に依存し、検出限界をあげるためにより大型の望遠鏡が必要となる。本研究では、多数の画像を重ね合わせ、S/N を上げると共にデブリを自動検出するソフトを開発中である[7]。図 2 はその原理で、短時間露光の画像を数百枚取得し、デブリの動きに併せて画像を重ね合わせ、メジアンをとって画像処理を行うことにより、1 枚の画像では見つけれない暗いデブリの検出が可能となる。現在、標高約 1,800m にある入笠山光学観測所の口径 35cm の望遠鏡(図 3 参照)により画像を取得し、解析を実施中。尚、本手法を取り入れて、小惑星や彗星等の移動天体を自動的に検出するソフトウェアを実用化に向けて開発している(技術移転推進課題)。

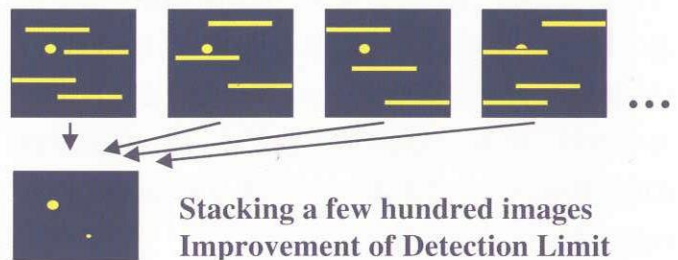


Fig.2 Stacking method for faint debris detection



Fig.3 Equatorial-mount 35cm telescope at Nyukasa-yama

##### 3.1.2 高速読み出し大型CCD カメラの開発

検出器としては、観測の効率化を図るためにも広視野で高速読み出し・書き込みの必要性があり、更に、将来のリモート観測のためにはメンテナンスフリーの検出器冷却技術が必要である。これまでのペルチェ冷却による 1K×1K あるいは 2K×2K CCD カメラの代わりに、2K×4K 素子を 2 枚並べた 4K×4K(1600 万画素)モザイク CCD カメラを試作(図 4 参照)し、冷凍機冷却によるノイズレベル低減を実現した。素子の

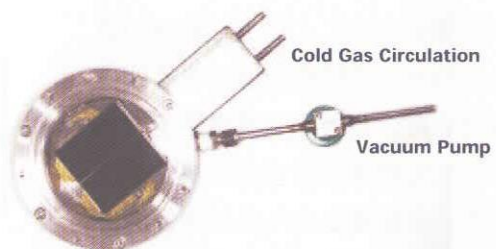


Fig.4 4K×4K CCD camera



サイズは、 $15\mu\text{m}\times 15\mu\text{m}$  で望遠鏡焦点面での大きさは  $61.4\text{mm}\times 61.4\text{mm}$  に達する。2ch 読み出しで、読み出し・書き込みは約 10 秒である。平成 16 年度に機能評価を行って実用化を目指す。

### 3.1.3 低軌道デブリ光学追尾観測技術の開発

低軌道衛星追跡装置（図 5 参照）は、口径 35cm、焦点距離 3910mm のシュミットカセグレン望遠鏡を搭載し、低軌道の衛星やデブリを追尾しながら画像を取得し、その形状や姿勢運動を地上から推定することが可能である。本装置により、既に大気圏に突入したミール宇宙ステーションや現在構築中の ISS の姿を鮮明に捉えている。より高度の高いデブリに対しては、その光度変化から回転運動を推定することが可能である。図 6 は高度約 800km の COSMOS 2082R/B (1990-046B) の光度変化を示したもので、図中①は明け方の順光時、②以降は夕方の逆光時のデータである。これにより約 43 秒周期で回転していることが分かる。

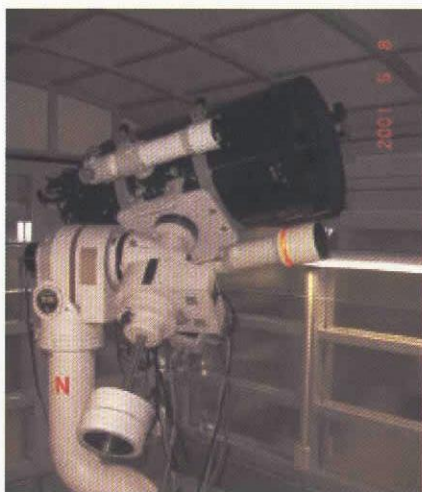


Fig.5 LEO debris tracking facility

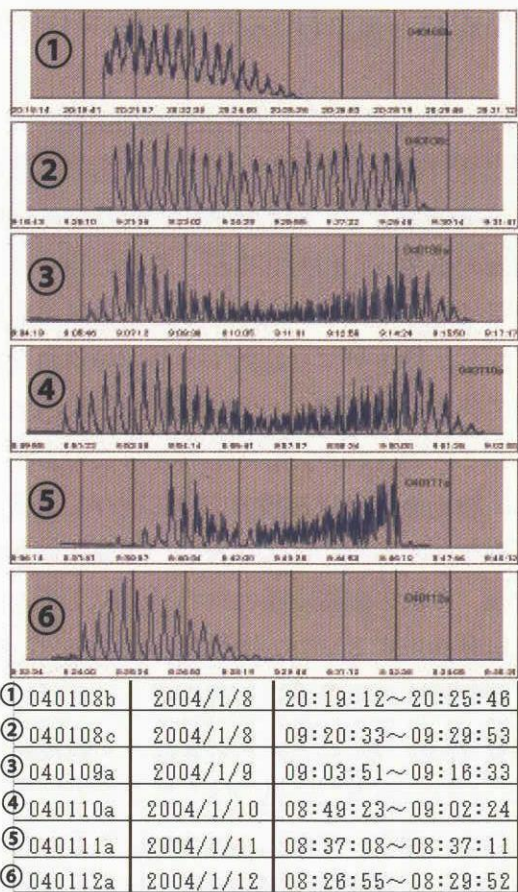


Fig.6 Large debris attitude motion

## 3. 2 防御技術の研究

防御技術としては、本年度、以下の 2 項目について研究を行った。

### 3.2.1 超高速射出装置に関する研究

成形爆薬方式により 1 g 程度の質量を 7.5km/s で超高速射出する技術を確認した。合わせて質量測定方式についても昨年度までの方式に改良を加え、質量算出のための画像解析プログラムも改修した。また、今回行った試験結果と衝撃解析ソフトを

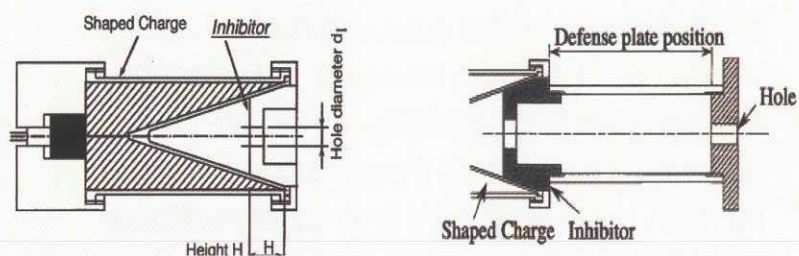


Fig.7 Section view of conical shaped charge



用いて得られたジェット生成解析結果とを比較し、解析上の課題を明らかにした。図7は、成形爆薬装置の射出体分離装置で、試験を実施しながら最適なインヒビタ形状を求めた。射出試験ではインヒビタの円錐部高さをパラメータとした試験を実施し、先端ジェット形状が最適となるインヒビタ形状寸法を求めた。フラッシュ X 線画像によるジェットと質量算定用アルミブロックを図8に示す。既知の質量との比較を行いその分析結果が妥当であることを確認することができた。

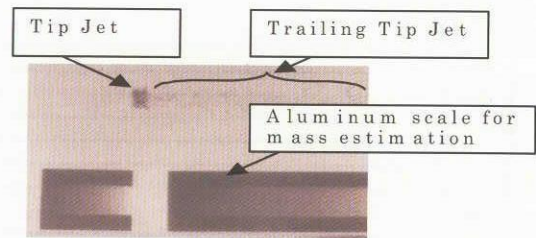


Fig.8 Flush X-ray image of tip jet

### 3.2.2 複合材料等の衝突データベースに関する研究

本研究では、板厚の異なる CFRP に対し直径、速度の異なるアルミ製のプロジェクティルを2段式軽ガスガンで射出し、衝突するプロジェクティルと CFRP の状態との相関を把握するデータベースを蓄積した。昨年度までに製造した CFRP 板を用いて、イタリアのパドバ大学で超高速衝撃試験を実施した。その後これらの供試体を日本に返送して非破壊検査を行い内部の損傷状況データを取得し、衝突エネルギーと損傷範囲との関係を明らかにした。図9はパドバ大学の2段式軽ガスガンを用いた衝突実験で、速度 2km/s, 4km/s, 5km/s、アルミ製のプロジェクティル直径 0.8mm, 1.5mm, 2.3mm、CFRP の板厚 2.2mm, 3.3mm, 4.3mm をパラメータにして 27 回射出実験を行った。解析には、超高速衝撃解析ソフト AUTODYN を整備し、複合材超高速衝突解析手法の研究に着手している。

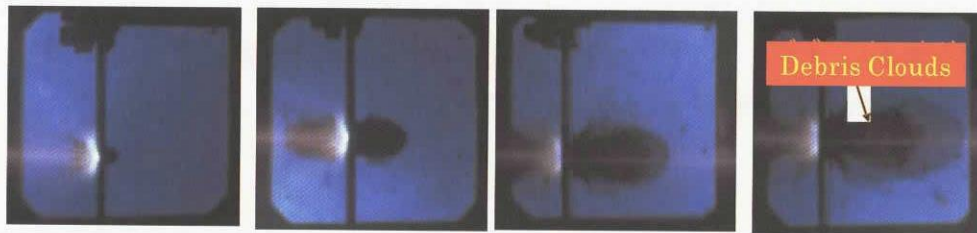
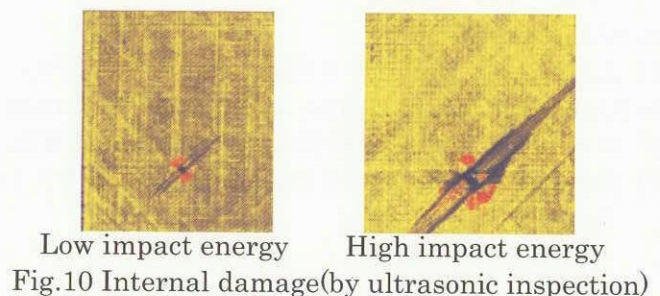


Fig.9 Hypervelocity impact test shadowgraph image  
(Target:32ply(4.3mm), Projectile:  $\phi$  2.3mm, Velocity:5km/s)

超高速衝突試験を行った全ての供試体については超音波による内部損傷データを取得した。その結果の一例を図10に示す。損傷の状況はプロジェクティルのエネルギーの増加に伴って損傷域も広がるが、内部剥離は衝突面と裏面ともに、表面層の近い部分の剥離面積が大きいとの新しい知見が得られた。



Low impact energy High impact energy  
Fig.10 Internal damage (by ultrasonic inspection)

衝撃エネルギーと損傷面積との関係を図11に示す。その結果は以下の通りである。

#### (1) プロジェクティルが貫通しない場合

- ・ 損傷面積は板厚に依存しない。
- ・ 衝突面と裏面とでは損傷様相は異なる。

#### (2) プロジェクティルが貫通する場合

- ・ 損傷面積は板厚に依存する。
- ・ 衝突面と裏面との損傷様相はほぼ同様となる。



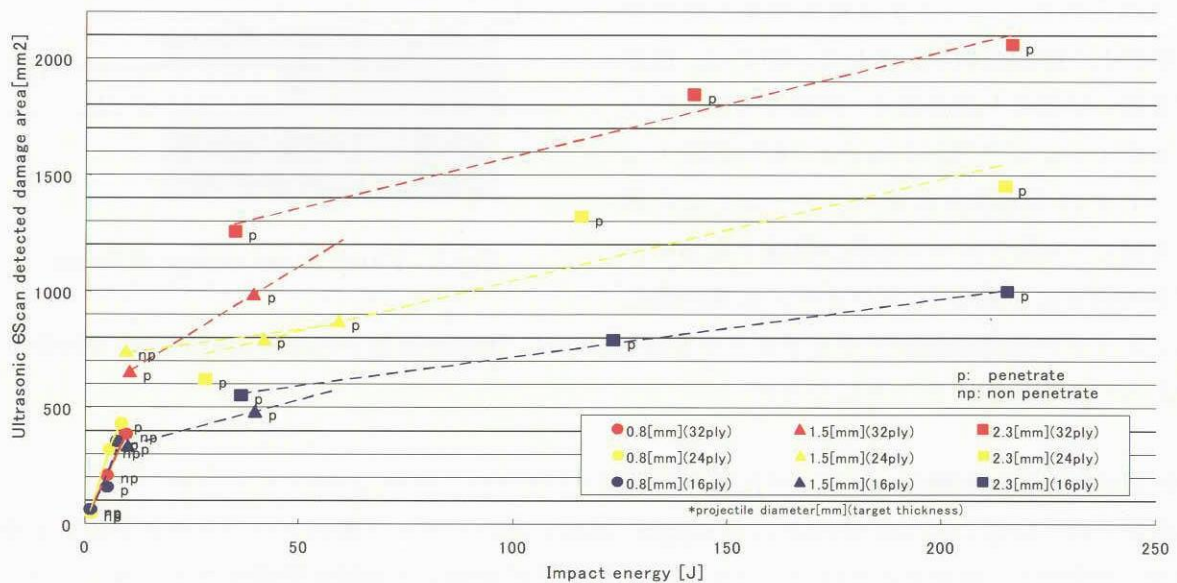


Fig.11 Relation between damaged area and impact energy

#### 4. まとめ

宇宙デブリの光学観測に係る研究は、その観測技術の向上により、より微小デブリの検出が可能になり、データベースの構築を行って事前に衝突回避マヌーバを立案することが可能になる。従来は米欧に依存してきたデブリ観測・カタログ化作業も、本成果を反映させることにより、わが国も国際協調の一端を担うことが可能となる（IADC キャンペーン観測への参加等）。他方、防御技術の研究では、超高速衝突実験装置を開発し、実験を行うことにより、構造体の内部損傷、残留強度についてデータを蓄積し、より軽量で強固な防御装置の開発へと発展させることが可能となる。

#### [参考文献]

- [1] 中島厚他：光学望遠鏡によるデブリ観測システム、第 45 回宇宙科学技術連合講演会 01-3B10、2001 年 10 月
- [2] 木村武雄他：低軌道衛星自動追尾装置の概要、第 45 回宇宙科学技術連合講演会 01-3B11、2001 年 10 月
- [3] SACMA SRM 2R-94
- [4] 先進複合材データベース構築に関する調査研究、日本複合材料学会、2004
- [5] Report on Orbital Debris, by Interagency Group for National Security Council, USA, Jan. 1989
- [6] 青木他：第 45 回構造強度に関する講演会講演集, pp.102-104(2004)
- [7] 柳沢俊史他：重ね合わせ法による微小静止デブリの検出、日本航空宇宙学会論文集第 51 巻第 589 号、2003 年 2 月号