

**ABSTRACT** Optical technique is currently used for detection of small space debris at a high altitude of more than 6,000 kilometers, in place of its microwave radar detection. This paper addresses technical aspects of space debris optical observation systems and gives preliminary discussions on detection capabilities which should be further improved to both establish and update space debris distribution models based on precise observation data.

### 1. はじめに

人類の宇宙活動の発展に伴い、地球軌道上には人工衛星を始めとする人工物体が無数に存在するようになってきている。これらは、現在使用されている通信衛星等のように実用に使われているものもあるが、他に使用済みとなった人工衛星や使い捨てられた上段ロケット、さらには、軌道上で爆発した人工衛星の破片等大部分は不用の物体（デブリ：Debris）である。

近年、これらの物体が人工衛星やスペースシャトルに衝突し危害を加えることが問題になってきている。米国の宇宙司令部（USSPACECOM：United States Space Command）ではこれらの物体を常時監視し、人工衛星やスペースシャトルの打上げの際に問題が起きないようにしている<sup>1-2)</sup>。現在、約6,500個が追跡されている。しかし、小さかったり遠かったりで探知できていないデブリはかなりの数（数万個以上）に昇ると予想されている。また、実用化が進んでいる高度36,000kmの静止軌道の近くでは2,000個程度の追跡できていない不用物体があると言われている。

ここでは、電波レーダに比べてより高い高度及び小さい物体の追跡に適する光学観測の現状と課題について概略を述べる。

### 2. スペースデブリの光学観測

地球の周囲をまわる物体のうち高度6,000km以上の物体に対しては、望遠鏡による光学観測がUSSPACECOMのGEODSS(Ground-based Electro-Optical Deep Space Surveillance)と呼ばれるネットワークによって行われている<sup>1-2)</sup>。このシステムには高感度テレビカメラとビデオ録

画システムが用いられており、高度6,000kmにおいて識別可能な最小の物体の大きさは10cm程度とされている。図1はこの宇宙監視網の能力を、物体の直径の関数として探知可能な高度で表したものである。明らかに、高高度の物体追跡のためには光システムの方がレーダシステムよりも適している。レーダシステムでは観測距離の4乗で受信電力が減少するのに比べて、光システムでは太陽の散乱光を観測するため受信光強度が観測距離の2乗で減少することが大きな理由である。

光システムによる観測では、晴天の夜に限られること、それと同時にデブリが太陽に照らされていることという基本的な制約がある。また、地上からは観測仰角が制限され、軌道の一部分

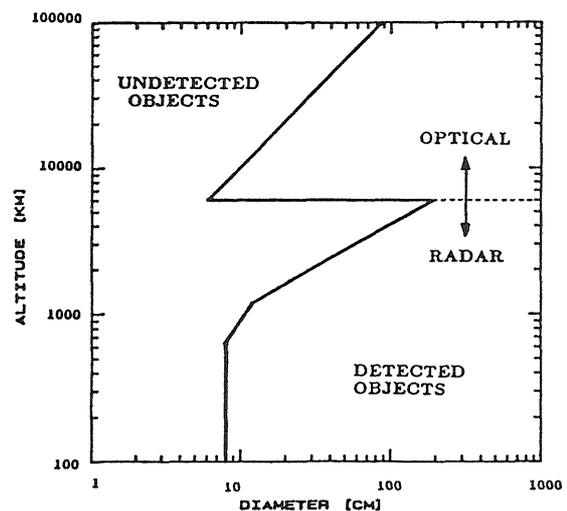


Fig. 1. Detection Capabilities of the Space Surveillance Network

Table 1. Example of space debris observation parameters

|                            |                 |                              |          |  |
|----------------------------|-----------------|------------------------------|----------|--|
| Debris Diameter            | d               | (m)                          | 0.5      |  |
| Scattering Cross Section   | $\sigma_d$      | (m <sup>2</sup> )            | 0.0196   | Albedo 0.1, Perfect spherical diffuser   |
| Detection Range            | R               | (km)                         | 40,000   |  |
| Wavelength                 | $\lambda$       | ( $\mu$ m)                   | 0.55     |  |
| Sun Irradiance             | $P_s$           | (W/m <sup>2</sup> · $\mu$ m) | 195      | $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$   |
| Debris Irradiance          | $H_s$           | (W/m <sup>2</sup> · $\mu$ m) | 3.9E-16  | $H_s = \sigma_d \cdot P_s / (2\pi R^2)$  |
| Visual Magnitude           | $M_g$           |                              | 19.9     | $M_g = -2.5 \cdot \log [H_s / 3.64E-8 \text{ (W/m}^2 \cdot \mu\text{m)}]$                |
| Atmospheric Transmissivity | $\eta_A$        |                              | 0.5      |  |
| Telescope Diameter         | D               | (m)                          | 1.5      |  |
| Optics Efficiency          | $\eta_o$        |                              | 0.1      |  |
| Filter Bandwidth           | $\Delta\lambda$ | ( $\mu$ m)                   | 0.2      |  |
| Quantum Efficiency         | $\eta$          |                              | 0.5      | Si-CCD   |
| Readout Noise              | $N_r$           | (ct.)                        | 20       | LN <sub>2</sub> -Cooled Type   |
| Pixel FOV                  | $\theta_p$      | ( $\mu$ rad)                 | 3.3      | Total FOV of 1.2x2(mrad <sup>2</sup> )   |
| Image Degradation          | $\eta_i$        |                              | 0.05     | Image blurring over 20 pixels  |
| Integration Time           | $\tau$          | (sec)                        | 60       |  |
| Received Power             | $P_r$           | (W/pixel)                    | 3.45E-19 | $P_r = H_s \cdot \pi D^2 / 4 \cdot \Delta\lambda \cdot \eta_A \cdot \eta_o \cdot \eta_i$ |
| S/N                        | $S_n$           | (dB)                         | 2.1      | $S_n = \eta \cdot \tau \cdot P_r / (h\nu) / N_r$   |

だけが観測されることになる。静止軌道の場合仰角30度以上で東京から見える軌道範囲は東経100度から180度までである。さらに、低高度軌道の観測では物体の角速度が大きいため観測の時間と感度が大幅に制限される。このような制約の中で、将来にわたってデブリ分布の作成、更新のために有効なデータを取得するには、米国に見られるような観測ネットワークの強化を始めとし、高感度観測装置、高速・大容量のデータ処理装置の開発と維持が重要になる。

### 3. 光学観測における課題

現状では、図1からわかるように観測能力の限界から小さい物体、暗い物体の観測情報が不足している。重大な影響を与え得るデブリの検出が残されているわけで、特に光学観測では静止軌道近傍を飛行する微少デブリの観測が大きな課題になると思われる。表1は、通信総研宇宙光通信地上センターの1.5m望遠鏡と高感度CCDカメラを組み合わせたシステム<sup>3)</sup>を想定したときの静止軌道近傍のデブリ観測パラメータの例を示している。デブリのアルbedo、形状などに依存するが、数cm程度のデブリの観測を行うには種々改善すべき点が多くある。

観測能力の向上の方法としては、広視野高解像度のCCDカメラを用いるシステム<sup>4)</sup>、大気の影響を補正するアダプティブ光学系の利用が考えられる。さらに軌道上における光学観測、

レーザーダによるデブリ探査が将来必要になると思われる。低高度軌道では光と電波の共同観測により、デブリの軌道、デブリの大きさと形状に関するより詳細な情報が得られると期待される。

### 4. おわりに

デブリ光学観測技術の現状と課題について概要を示した。宇宙空間におけるデブリの分布についてはまだ観測が十分でない。日本における定常的な観測体制は無いが、観測技術の向上という面から国際的な貢献が可能であると思われる。また、国内における光学観測施設の有効な利用方法、電波観測との共同観測など今後検討を進めていくことが課題と考えられる。デブリについては、世界的に重要な問題として扱われるようになってきており、今後、多くの面で国際的協力が必要となろう。

#### [参考文献]

- 1) U.S.Congress, OTA: "Orbiting Debris: A Space Environmental Problem - Background Paper", OTA-BP-ISC-72, Sep. 1990.
- 2) W. Wirin: "Space Debris: Can Policy Avoid Disaster", AIAA 90-3774, Sep. 1990.
- 3) 有本他: "高感度光学追跡システムの開発とその応用", 信学技報, SANE 90-5, 1990.
- 4) 有本他: "静止軌道近傍を飛行するデブリの光学的観測", 第34回宇科連, 3H12, 1990.