

デブリ環境モデル(MASTER-2005, 2001, ORDEM2000)の比較 —宇宙機設計適用プロセスの国際規格化に向けて—

○福重進也 (九工大・院), 赤星保浩 (九工大), 北澤幸人(JAXA), 五家建夫(JAXA)

Comparison of debris environment models (MASTER-2005, 2001, ORDEM2000)
-For international standardization of process based implementation of meteoroid and debris environmental models-
Shinya Fukushige, Yasuhiro Akahoshi, Yukihito Kitazawa, Tateo Goka

Department of Mechanical Engineering, Kyushu Institute of Technology
1-1, Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu, Fukuoka, 804-8550, Japan
e-mail e584102s@tobata.isc.kyutech.ac.jp

Abstract

Space agencies of some countries have space debris environment model for design of spacecrafts. These models can estimate debris flux as a function of the size, relative impact velocity, and impact angle in a spacecraft orbit. However, it is known calculation results of models are not always consistent with each other. Therefore, international common implementation process of debris environment model is required. In this paper, as the first step of international standardization of implementation process of debris environment model, we compared estimation results of debris impact flux in low Earth orbit calculated by available three debris environment models, namely NASA's ORDEM2000, ESA's MASTER2001 and MASTER2005.

Key Words: Space Debris Environment Model, International Standard

1. 緒言

近年、宇宙開発の進展に伴いスペースデブリ問題が顕在化してきている。スペースデブリとは、現在ならびに将来にわたって有用な役割を果たさない人工物体のことで、ミッションを終えた人工衛星やロケットの上段部、それらが破砕して生じた破片や塗料片などである。スペースデブリの大部分は地球に落下してこないまま、軌道に蓄積され続けており、宇宙における環境問題となっている。現在、地球軌道上を周回している人工物体はカタログ化されているもの(直径10 [cm]以上)で約10000個¹⁾、数ミリメートルサイズのものまで含めると4000万個程度²⁾存在している。信頼性のある宇宙機を設計するためには、このようなデブリ環境を考慮し、デブリの衝突頻度や影響度を正しく評価する必要がある。そのため、各国の宇宙機関では、デブリの衝突確率や衝突速度を推定できるデブリ環境モデルを開発しており、代表的なものとして、NASA(米国防空宇宙局)のORDEM、ESA(欧州宇宙機関)のMASTER、RSA(ロシア宇宙庁)のSDPAモデルがある。しかし、これらのモデルから得られる結果は必ずしも一致しないことが知られている。現状では、どのモデルを選択するかによって、デブリの衝突flux(単位年間で単位面積に衝突する個数)や衝突速度、角度分布の評価結果が異なるため、宇宙機を設計する際に統一的な信頼性が確保できない恐れがあり、国際的に共通なプロセスで評価することが求められている。このような要請から国際規格案がJAXAを中心として作成されようとしている³⁾。本研究は、その第一歩として、入手可能であったNASAのORDEM2000、ESAのMASTER2001及び最近公開されたアップグレード版であるMASTER2005について低軌道におけるデブリの衝突fluxを比較した。また、実際の宇宙機において構体

の貫通限界を超えるデブリの衝突fluxを評価し、比較した結果について報告する。

2. デブリ環境モデル

2-1 ORDEM2000⁴⁾

ORDEM2000は地上からの観測データや軌道上からの回収物体の表面検査の結果に基づいた経験的なモデルである。地上からの観測データとしては、SSN(Space Surveillance Network)による軌道上物体のカタログデータ、Haystack radar, HAX(Haystack Auxiliary radar), Goldstone radarによる観測結果が用いられており、軌道上から回収され、表面検査されたものとしては、LDEF(Long-Duration Exposure Facility), EuReCa(European Retrieval Carrier), HST(Hubble Space Telescope)の太陽電池、スペースシャトルの窓とラジエータ、SFU(Space Flyer Unit)の構体、Mir宇宙ステーションに設置された曝露装置のデータが反映されている。ORDEM2000には主に2つの機能がある。ひとつは指定した軌道上のデブリを評価するためのものであり、もうひとつは地上の望遠鏡やレーダから見えるデブリの情報を与えるものである。これらのうち、指定した軌道におけるデブリを評価する機能では、デブリの衝突flux、相対衝突速度分布、衝突角度分布を計算することができる。ORDEM2000の適用可能範囲は、高度200~2000 [km]、デブリ直径10 [μm]~1 [m]である。

2-2 MASTER2001⁵⁾

MASTER2001は全ての主要なデブリの発生源から発生したデブリの軌道伝播を考慮した準決定論的解析に基づいている。各デブリ発生源に対応する質量/直径分布、デブリ発生時に付加された速度、方向の分布に関して発生モデルが開発され、軌道上の伝播が予めシ

ミュレーションされて参照データとなっている。考慮されているデブリの発生源は、使用済みのペイロードやロケットの上段部等のカタログ化されている物体、軌道上の衝突や爆発による破砕、固体ロケットモータから発生するダストやスラグ、RORSAT 衛星からのナトリウムカリウム冷却液の漏洩、原子状酸素や放射線、熱サイクルによる宇宙機表面の劣化から生じる塗料片等の粒子や、微粒子が宇宙機表面に衝突する際に二次的に生じる ejecta、電波通信実験のために軌道上に放出された West Ford needles と呼ばれる銅針である。MASTER では、メテオロイドについても考慮することができる。MASTER2001 はデブリの flux を短い計算時間で評価するための"STANDARD"と高分解能の flux の計算結果を得ることができる"ANALYST"から構成されている。"STANDARD"と"ANALYST"の結果の違いは±25%である。MASTER2001 では、デブリの衝突 flux、相対衝突速度分布、衝突角度分布の他、空間密度分布や将来のデブリ対策によるデブリ発生頻度を考慮して予測を計算することができる。MASTER2001 の適用可能範囲は、高度 186 ~ 38786 [km]、衝突物直径は 1 [μm] ~ 100 [m]である。

2-3 MASTER2005⁶⁾

MASTER2005 は MASTER2001 のアップグレード版である。MASTER2001 における"STANDARD"と"ANALYST"は統合されている。考慮されているデブリの発生源に変更は無いが、破砕モデルの変更により 1 [mm]以下のデブリの area to mass ratio が再定義されたり、固体ロケットモータにおいて、ノズル直径と放出されるスラグの依存性がモデルに導入されたりするなど、それぞれのデブリの発生モデルが改良され、MASTER2001 とは個々の発生源から生じたデブリのサイズ分布や速度分布に違いがある。

ORDEM2000, MASTER2001, MASTER2005 について各モデルの特徴をまとめたものを Table 1 に示す。

3. デブリ環境モデルの比較

3-1 衝突 flux の評価

各モデルの違いを評価するために、高度 300 [km] ~ 2000 [km]についてデブリの衝突 flux を計算した⁷⁾。デブリ直径 > 10 [μm], > 100 [μm], > 1 [mm], > 1 [cm], > 10 [cm], > 1 [m]について累積 flux の計算結果を Fig. 1 に示す。また、flux は高度による変化に比べて軌道傾斜角による変化が小さいことから、各モデルの比較を

容易にするために Fig. 2 に軌道傾斜角 100 度における結果を示す。

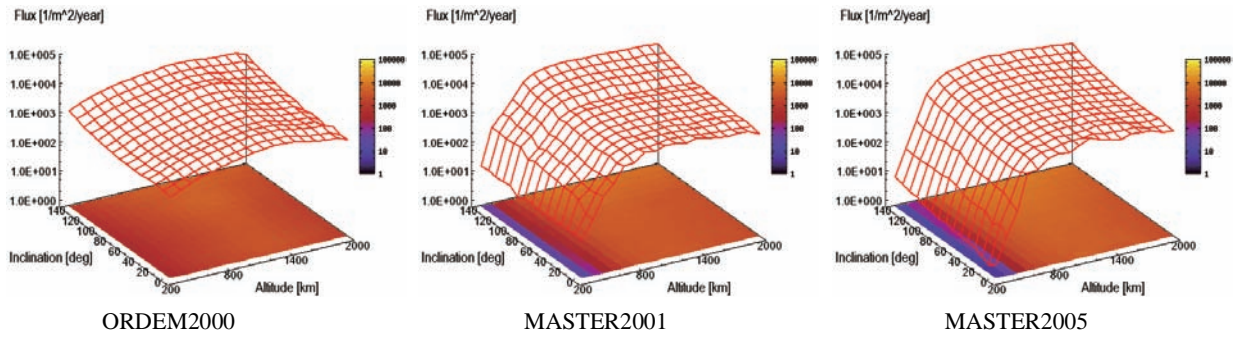
直径 > 10 [μm]の衝突 flux は、高高度では比較的良好に一致しているが高度の低いところでは ORDEM と MASTER の違いが大きくなっている。これは、考慮されている大気による減速の影響の差であると考えられる。このサイズのデブリであれば、衝突 flux が大きいことから、今後、実軌道上からの回収物の表面検査によって校正していくことが可能であると考えられる。

直径 > 10 [cm]の比較的大きなデブリでは、各モデルがよく一致していることがわかる。このサイズはレーダによる地上観測が有効であるため、各モデルとも実際の観測データを基にしていることから、差が生じないものと考えられる。高度 800 [km]付近は通信衛星がコンステレーション運用されており、また、高度 900 [km]付近は、地球観測用の太陽同期軌道衛星によって利用されている軌道であるため、使用頻度が多いことから、それらに関連するデブリにより flux がピークになっている。高度 1400 [km]付近のピークは通信用のコンステレーション衛星及び、デルタロケットが破砕して生じたデブリによるものである。10 [cm]以上のデブリについては地上からの観測により軌道を同定できること、また、数が比較的少なく衝突 flux が小さいことから、通常の宇宙機のミッションで問題になることはないと考えられる。

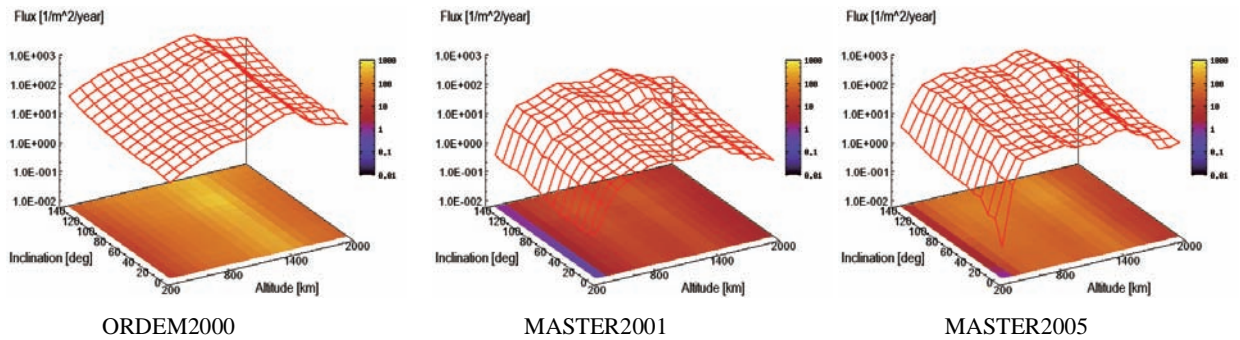
直径 > 100 [μm], > 1 [mm], > 1 [cm]で各モデル間の差が大きい。特にデブリ直径 > 100 [μm]で ORDEM2000 と MASTER2001 間の差異が最大となり、デブリ直径 > 1 [mm]で ORDEM2000 と MASTER2005 及び、MASTER2001 と MASTER2005 の差異が最大となっている。このサイズで各モデル間の差が大きくなっている理由は、この範囲の観測データが欠落しているためであると考えられる。地上からの観測では 1 [cm]以下のデブリに対して観測が難しくなる。また、100 [μm]以上のデブリは衝突頻度が小さくなるため、軌道上からの回収物に対して表面検査を行っても、衝突数が少ないため統計的に意味のあるデータを得ることができない。そのため、モデルによる計算結果を検証する手段がなく、どのモデルが正しいかを判断するのは困難である。しかし、宇宙機への影響度が問題になってくるのは直径 100 [μm]以上のデブリであり、また、モデル間の衝突頻度の差が最も大きく、最大 100 倍近く差がある 1 [mm]以上のデブリは衛星構体を貫通する可能性があるため、その衝突 flux は、衛星の生存確率に直接関わる。

Table 1 Model characteristics

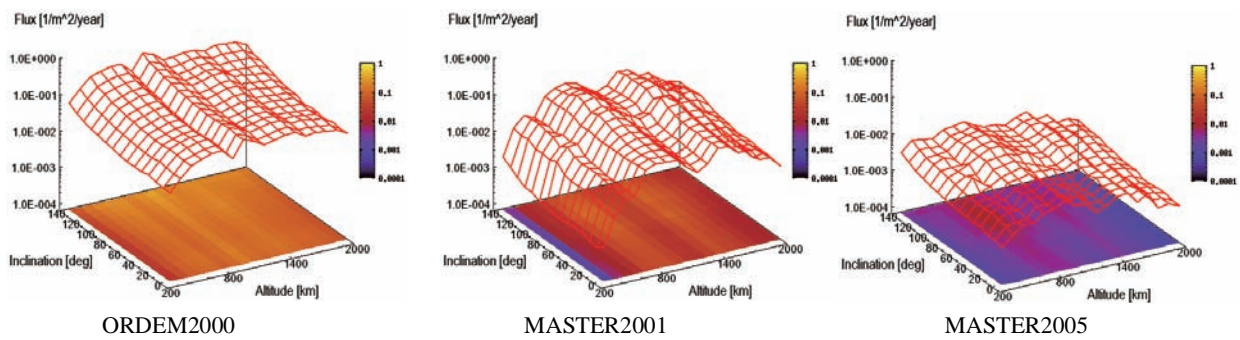
		ORDEM2000	MASTER2001	MASTER2005
Size range		> 10 μm	> 1 μm	
Altitude range		200 - 2000 km	186 - 38786 km	186 - 36786 km
Time range		1991 - 2030	1958 - 2050	1957 - 2055
Objects source terms	TLE background	All sources together	Yes	
	Fragments		Yes	
	SRM dust/slag		Yes	
	NaK droplets		Yes	
	Paint Flakes		Yes	
	West Ford Needles		Yes	
	Meteoroids	None	Yes	
Modeling approach		Measurement data	Semi deterministic analysis	



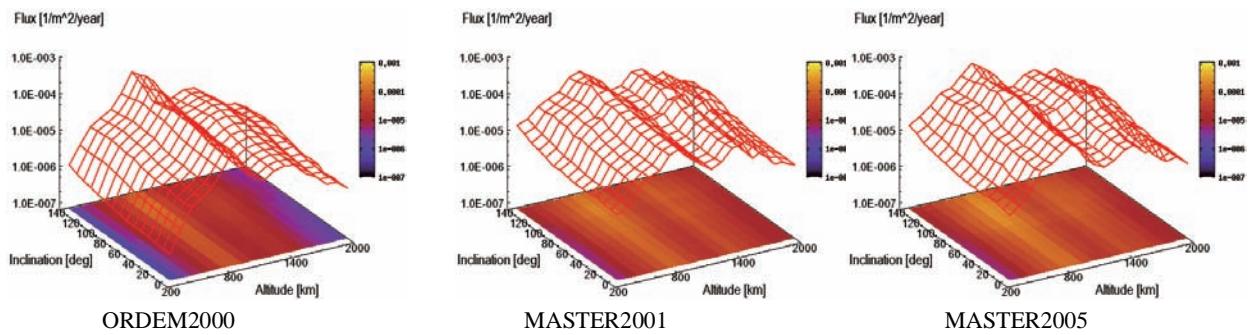
(a) Debris diameter > 10 μm



(b) Debris diameter > 100 μm



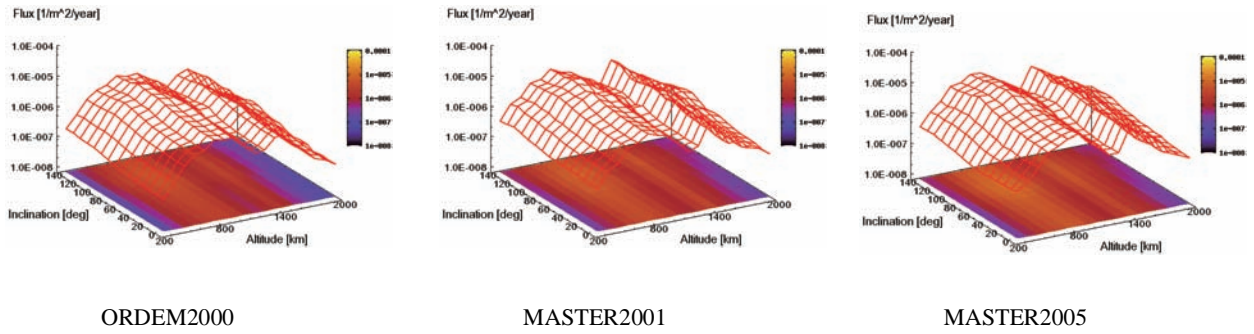
(c) Debris diameter > 1 mm



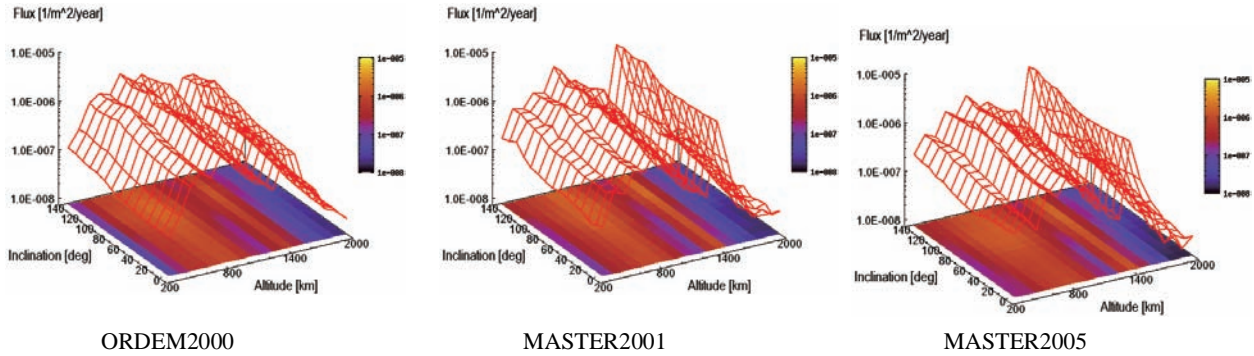
(d) Debris diameter > 1 cm

Fig. 1 Flux calculation results of three models against altitude and inclination

(Continued on the following page)



(e) Debris diameter > 10 cm



(f) Debris diameter > 1 m

Fig. 1 Flux calculation results of three models against altitude and inclination

(Continued from the previous page)

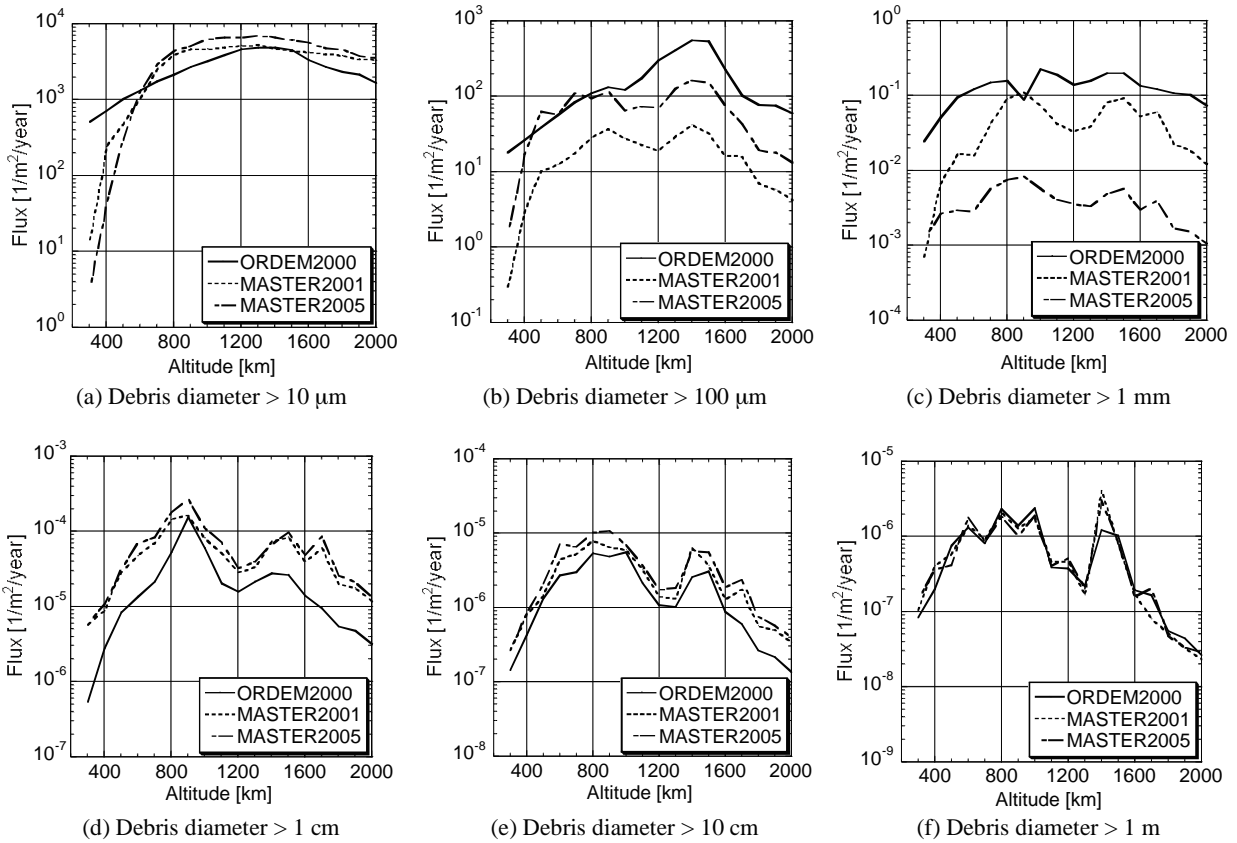


Fig. 2 Flux against altitude at inclination 100 deg

4. デブリ環境モデルの適用例

宇宙機に対するデブリ環境モデルの適用例として、ORDEM2000, MASTER2001, MASTER2005 を用いて実衛星の軌道における構体の貫通リスク評価を行い、結果を比較した。

4-1 衝突構体の貫通限界

衛星構体の貫通限界は、衝突するデブリのサイズと相対衝突速度に依存する。Frank Schäfer らは ENVISAT の構体に用いられている CFRP ハニカムサンドイッチパネルに対して超高速衝突実験を行っている⁸⁾。この結果によれば、CFRP ハニカムサンドイッチパネルの貫通限界は、衝突物直径 1 ~ 1.5 [mm], 衝突速度 5 ~ 7 [km/s]である。そこで、本研究では B 衛星の貫通限界を衝突物直径 1 [mm], 衝突速度 5 [km/s]とする。

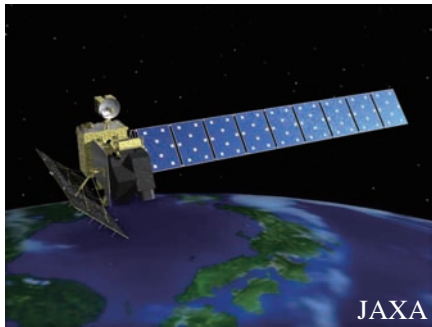


Fig. 3 DAICHI

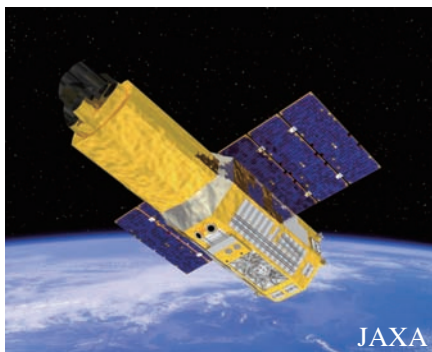


Fig. 4 SUZAKU

4-2 デブリ環境モデルを用いた貫通リスク評価

本研究では、地球観測のために利用する衛星数の多い太陽同期軌道の代表例として「だいち(大地)/DAICHI」と名づけられた陸域観測技術衛星(ALOS: Advanced Land Observation Satellite)と科学衛星の代表例として「すざく(朱雀)/SUZAKU」と名付けられた X 線天文衛星(ASTRO-E2)に対してデブリ貫通のリスク評価を行った。「だいち」の外観と諸元を Fig. 3, Table 2 に、「すざく」の外観と諸元を Fig. 4, Table 3 に示す。

「だいち」と「すざく」の軌道におけるデブリサイズに対する衝突 flux を各モデルにより計算した結果を Fig. 5 と Fig. 6 に示す。1 [cm]以下のデブリの衝突 flux に着目すると、MASTER による計算結果に比べて ORDEM2000 の計算結果が大きめの評価であることがわかる。

Table 2 Specifications of DAICHI⁹⁾

Launch	24 January 2006
Lifetime	3 - 5 years
Size	Satellite body 6.5 x 3.5 x 4.5 [m] Solar array paddle 3 x 22 [m]
Orbit	Sun synchronous sub recurrent Altitude 692 [km] Inclination 98.2 [deg]

Table 3 Specifications of SUZAKU¹⁰⁾

Launch	10 July 2005
Lifetime	5 years
Size	Satellite body 6.5 x 2.0 x 1.9 [m] Solar array paddle 5.4 [m]
Orbit	Altitude 560 [km] Inclination 32 [deg]

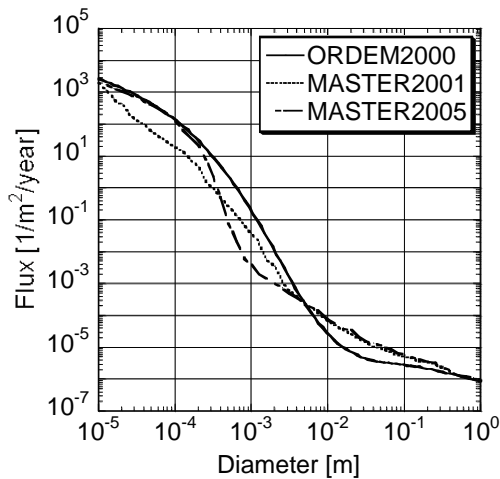


Fig. 5 Flux against diameter in the DAICHI orbit

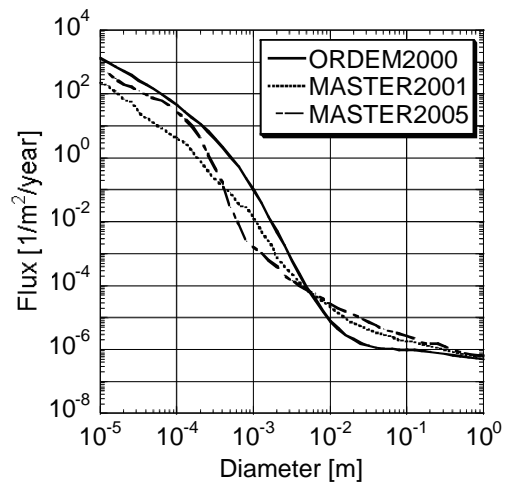


Fig. 6 Flux against diameter in the SUZAKU orbit

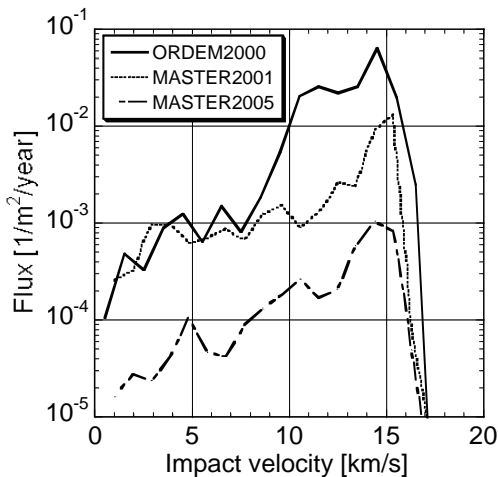


Fig. 6 Flux against impact velocity in the DAICHI orbit (debris diameter > 1mm)

前節に従って、ここでは衛星構体の貫通限界をデブリ直径 1 [mm]とし、「だいち」と「すざく」の軌道において、直径 1 [mm]以上のデブリの相対衝突速度に対する衝突 flux を計算した結果を Fig. 7 と 8 にそれぞれ示す。まず、「だいち」の軌道における衛星構体の貫通リスクを評価するために、Fig. 7 に対して相対衝突速度 5 [km/s]以上の累積 flux を求めると、ORDEM2000 の評価結果は 1.9×10^{-1} [1/m²/year]、MASTER2001 の評価結果は 3.5×10^{-2} [1/m²/year]、MASTER2005 の評価結果は 3.7×10^{-3} [1/m²/year]となる。この結果について MASTER2005 を基準として比較すると、衛星構体を貫通するデブリの衝突 flux が ORDEM2000 では 52 倍、MASTER2001 では 9.5 倍大きく見積もられていることがわかる。次に、「すざく」の軌道に対しても同様に衛星構体の貫通リスクを評価するために、Fig. 8 において相対衝突速度 5 [km/s]以上の累積 flux を求めると、ORDEM2000 の評価結果は 5.8×10^{-1} [1/m²/year]、MASTER2001 の評価結果は 1.4×10^{-2} [1/m²/year]、MASTER2005 の評価結果は 1.1×10^{-3} [1/m²/year]となる。この結果について MASTER2005 を基準として比較すると、衛星構体を貫通するデブリの衝突 flux が ORDEM2000 では 52 倍、MASTER2001 では 13 倍大きく見積もられていることがわかる。

以上の結果から、デブリ衝突リスクの評価結果はどのモデルを採用するかによって大きく異なることが確認できた。したがって、宇宙機設計時のモデルの適用プロセスを国際的に取り決めておくことは、非常に重要であるといえる。

5. 結言

地球低軌道のデブリの衝突 flux を代表的なデブリ環境モデルである ORDEM2000、MASTER2001 および MASTER2005 を用いて計算し、比較した結果、宇宙機の設計上重要となるデブリサイズである 100 [μm]以上の衝突 flux において、各モデルの差異が顕著に現れることがわかった。また、デブリ環境モデルによるデブリ衝突リスク評価の例として「だいち」と「すざく」について衛星構体を貫通するデブリの衝突 flux を計算した結果、MASTER2005 に比して ORDEM2000 は約 50 倍、MASTER2001 は約 10 倍大きな値となり、モデル

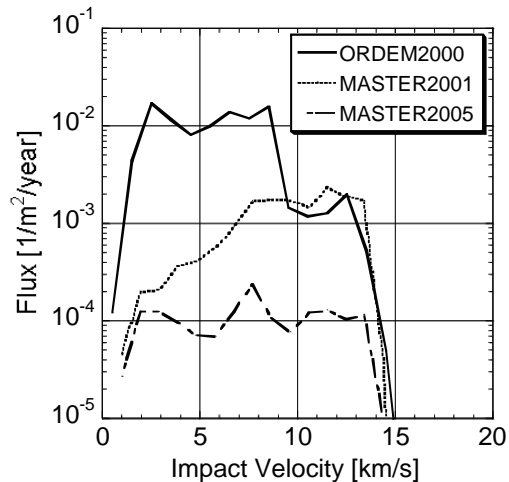


Fig. 7 Flux against impact velocity in the SUZAKU orbit (debris diameter > 1mm)

間で評価結果が大きく違うことがわかった。したがって、宇宙機に対して、国際的に共通の信頼性を確保するためには、設計時においてどのデブリ環境モデルをどのように適用するのかといった適用プロセスを取り決めておく必要があり、早急な国際規格化が望まれる。

参考文献

- [1] The NASA Orbital Debris Program Office, "The Orbital Debris Quarterly News Volume 10, Issue4", 2006
- [2] R. Walker, C. Martin, H. Stokes, J. Wilkinson, H. Sdunnus, S. Hauptmann, P. Beltrami, and H. Klinkrad, "Upgrade of the ESA Space Debris Mitigation Handbook Executive Summary", 2002, http://www.esa.int/gsp/completed/execsum00_N06.pdf
- [3] John R. Davey, Emma A. Taylor, Yukihito Kitazawa, and Tateo Goka, "ISO STANDARDS: THE NEXT STEP FOR ORBITAL DEBRIS MITIGATION", The 25th International Symposium on Space Technology and Science, 2006, 2006-r-2-25, to be published
- [4] Jer-Chyi Liou, Mark J. Matney, Phillip D. Anz-Meador, Donald Kessler, Mark Jansen, and Jeffery R. Theall, "The New NASA Orbital Debris Engineering Model ORDEM2000", NASA/TP-2002-210780
- [5] J. Bendisch, K.D. Bunte, S. Hauptmann, H. Sdunnus, R. Walker, P. Wegener, and H. Klinkrad, "MASTER2001 Software User Manual Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference Model", 2002
- [6] Sebastian Stabroth, Peter Wegener, and Heiner Klinkrad, "Software User Manual MASTER-2005", 2006
- [7] Pablo Beltrami, Mark Matney, Andrey Nazarenko, and Heiner Klinkrad, "Comparison of Debris Flux Models", Final Report of Action item 19.2. raised by 19th IADC meeting, held in Cologne, Germany, 2005
- [8] Frank Schäfer, Eberhard Schneiber, and Michel Lambert, "Review of Ballistic Limit Equation for CFRP Structure Walls of Satellites", Proceedings of the 5th International Symposium on Environmental Testing for Space Programmes, 2004, ESA SP-558
- [9] <http://alos.jaxa.jp/index-e.html>
- [10] <http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/index.html.en>