

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

SSPS組立軌道のデブリ解析



2004年3月

宇宙航空研究開発機構

宇宙航空研究開発機構研究開発資料
JAXA Research and Development Memorandum

SSPS組立軌道のデブリ解析
Debirs Analysis for SSPS Assembly Orbit

歌島 昌由
Masayoshi UTASHIMA

技術研究本部 システム解析・ソフトウェア研究開発センター
System Analysis and Software Laboratory, Office of Research and Development

2004年3月
March 2004

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

1. はじめに	1
2. デブリ環境の概要	1
3. 10cm 以上のデブリ解析（高度 400 km、傾斜角 0 度）	5
4. 1cm 以上のデブリ解析（高度 400 km、傾斜角 0 度）	10
5. 1mm 以上のデブリ解析（高度 400 km、傾斜角 0 度）	13
6. デブリ衝突速度の大きさと方向のまとめ	16
7. 分割輸送によるデブリ衝突削減の可能性	17
8. おわりに	18
9. 付録（ランダム回転の凸多面体の平均断面積）	19
10. 参考文献	20

SSPS 組立軌道のデブリ解析

1. はじめに

将来のエネルギー供給の一翼を担うべく、宇宙太陽発電システム(SSPS : Space Solar Power Systems)の検討が宇宙開発事業団を中心に行なわれている。SSPS は、国際宇宙基地(ISS:International Space Station)のサイズを一桁以上も上回る超大型の宇宙機であり、スペースデブリとの衝突を検討しておく必要がある。

SSPS は、現状では、LEO(Low Earth Orbit)において約 6 ヶ月間で組み立てられ、更に約 6 ヶ月を掛けて静止軌道(GEO : Geostationary Earth Orbit)に運ばれ、そこで約 30 年の間、運用に供されると想定されている。この事を考慮して、以下に示す 3 つのフェーズに対して、デブリとの衝突の検討を行なう必要がある。

- (1)LEO における組立フェーズ(6 ヶ月間)
- (2)LEO から GEO への軌道間輸送フェーズ
- (3)GEO における運用フェーズ

本資料では、(1)LEO における組立フェーズ(6 ヶ月間)に対して、デブリ衝突の検討を行なう。

デブリの衝突頻度と衝突速度の検討には、ESA が開発した MASTER-2001¹⁾を主に用い、NASA Johnson Space Center が開発した ORDEM2000²⁾も比較のために使用する。ORDEM2000 は高度 2000km までしか解析できないが、MASTER-2001 は静止高度までの解析が可能である。更に、MASTER-2001 は、地球指向や太陽指向などの姿勢を維持する面に対するデブリ衝突の解析を行なう機能も持っている。これらのソフトは、現時点における解析だけでなく、将来のデブリ環境における解析も行なう事ができる。将来のデブリ環境は、デブリを増やさないための色々な方策がどの程度実施されるかにも依存する。MASTER-2001 では、将来のデブリ対策のシナリオとして、標準シナリオ(デブリ削減策を採らないで、1990 年代と同様の宇宙活動が続くと仮定)、中程度の削減シナリオ(2010 年以降は宇宙機等の爆発を防止する施策や固体モータの slag 排出を防止する施策も実施)、完全な削減シナリオ(中程度の削減シナリオに加えて、ミッションを終えた衛星の適切な廃棄も 2010 年以降に実施)の中から選択する事ができる。本解析では、標準シナリオを用いた。ORDEM2000 では標準シナリオのみが可能である。

2. デブリ環境の概要

2.1 デブリ源のサイズ分布

デブリ源毎のサイズ分布を図 2-1 に示す¹⁾。Needles は 1960 年代の初めに高度 3600km の極軌道に投入された多数の銅製の針であり、通信実験を目的としたものである。Surface Degradation は、そのメカニズムは明確ではないが、原子状酸素や紫外線などによって衛星などの表面が劣化して発生するデブリである。Ejecta は、小さいデブリが衛星などに衝突して発生するデブリである。Al₂O₃ Dust と SRM Slag は、固体モータの燃焼によって発生するデブリである。Nak Droplets は、旧ソ連のレーダー偵察衛星(RORSAT)に搭載された原子炉の冷媒である液体金属が放出されたものである。RORSAT は任務を終えた後、原子炉部分が切り離されて高度 900~950km の軌道に投入され、更に炉心部分が切り離された。その時、冷媒の NaK が放出されたものと考えられる。Fragmentation Debris は、軌道上での衛星等の爆発と衝突によって発生したデブリである。Catalogue は、北米航空宇宙防衛司令部(North American Aerospace Defense Command; NORAD)が把握している 10cm 以上のデブリである。

MASTER-2001 は、将来 epoch での解析は、1mm 以上のサイズのデブリのみ可能であり、本解析では 1mm 以上のサイズのデブリを対象とする。図 2-2 から判るように、1mm 以上のサイズでは、人工デブリの数が meteoroids を凌いでおり、本解析では meteoroids は扱わない。

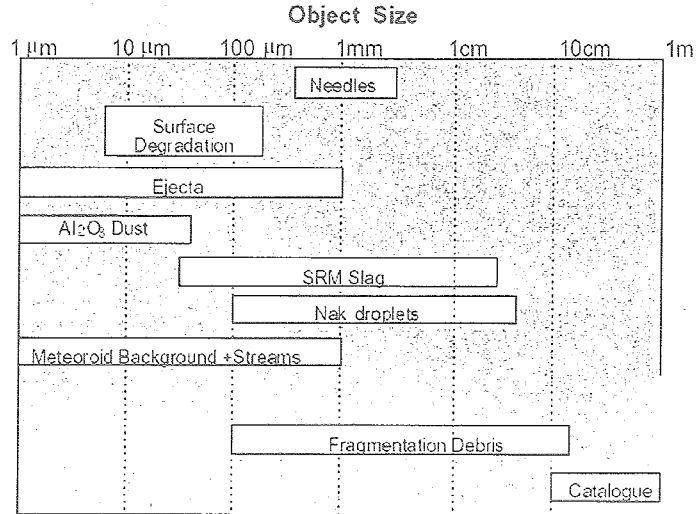


図 2-1 デブリ源のサイズ分布

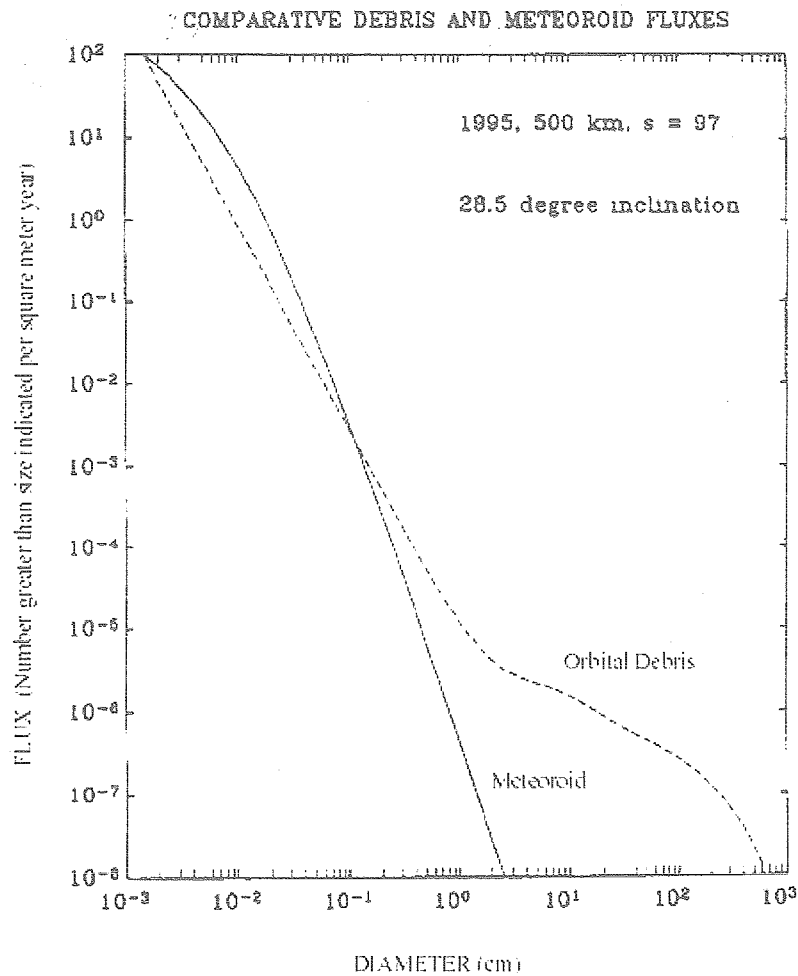


図 2-2 人工デブリと Meteoroid のフラックスの比較(文献 3)

2.2 LEO～GEO のサイズ毎のデブリ空間密度

文献 1)から、LEO～GEO におけるサイズ毎のデブリ空間密度を図 2-3 に掲げる。対象の宇宙機がほぼ円軌道を運動する場合、デブリ空間密度に円軌道速度を乗ずれば、近似的にデブリ flux を求める事ができる。表 2-1 に、幾つかの高度におけるサイズ 10cm 以上のデブリ flux を示す。

高度 2000km 付近を過ぎると、急速にデブリ flux は減少し、静止軌道においては、LEO の約 1/170 となる。高度 19000km 付近は、GPS の軌道である。

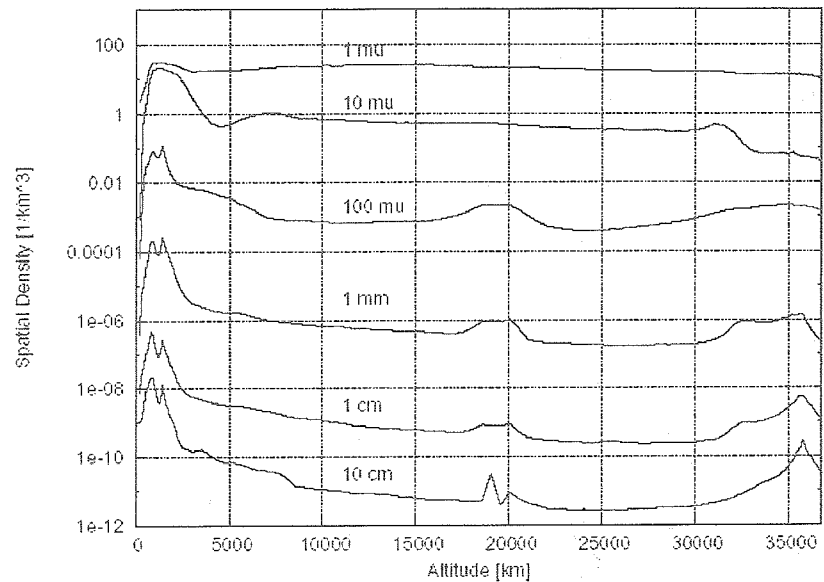


図 2-3 サイズ毎のデブリ空間密度

表 2-1 10cm サイズのデブリ flux の比較

高度(km)	デブリ空間密度(1/km³)	円軌道速度(m/s)	デブリ flux(1/m²/yr)	デブリ flux の相対値
900	2×10^{-8}	7400	5×10^{-6}	1
19000	3×10^{-11}	3963	4×10^{-9}	0.0008
25000	3×10^{-12}	3564	3×10^{-10}	0.00006
36000	3×10^{-10}	3067	3×10^{-8}	0.006

SSPS の断面積は ISS のそれより 2 桁大きく、GEO における SSPS のデブリ環境は、LEO における ISS のそれとほぼ等価である。

2.3 高度 2000km までのデブリ flux

高度 2000km までのデブリ flux を図 2-4 に示す。傾斜角 0 度の円軌道を飛行する球状の宇宙機に対するものであり、標準シナリオにおける 2030 年の予測値である。

比較のために、MASTER-2001 と ORDEM2000 の両方で計算した。MASTER-2001 の結果を●で、ORDEM2000 の結果を○で示す。10cm 以上と 1cm 以上のデブリは、MASTER-2001 が多めになっている。1mm 以上では逆に ORDEM2000 の方が多い。

表 2-2 に、MASTER-2001 の方の値を掲げた。本資料では、組立軌道として、高度 400km の円軌道(傾斜角 0 度)を想定する。

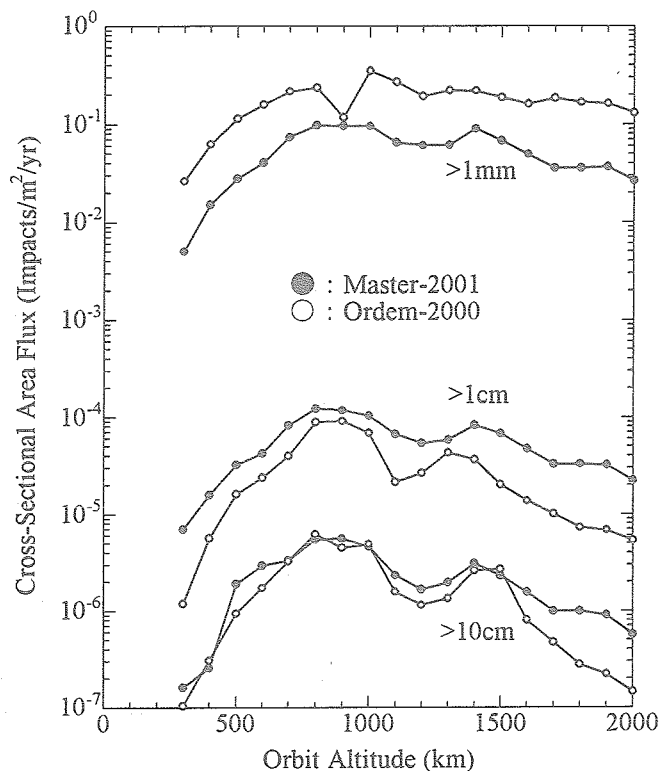


図 2-4 高度 2000km 以下のデブリ flux(傾斜角 0 度、2030 年)

表 2-2 2030 年における高度 2000km 以下のデブリ flux
(球に対する flux, by MASTER-2001)

高度 (km)	10cm 以上 (particles/m²/yr)	1cm 以上 (particles/m²/yr)	1mm 以上 (particles/m²/yr)
300	1.6251E-7	7.0282E-6	5.0675E-3
400	2.5819E-7	1.6005E-5	1.5193E-2
500	1.8989E-6	3.2491E-5	2.7899E-2
600	2.9667E-6	4.2800E-5	4.0740E-2
700	3.3523E-6	8.2972E-5	7.4051E-2
800	5.4876E-6	1.2292E-4	9.7833E-2
900	5.5595E-6	1.1843E-4	9.6665E-2
1000	4.6350E-6	1.0474E-4	9.5849E-2
1100	2.3437E-6	6.7175E-5	6.5219E-2
1200	1.6701E-6	5.4189E-5	6.0830E-2
1300	1.9721E-6	5.8752E-5	6.1006E-2
1400	3.0909E-6	8.3490E-5	9.0306E-2
1500	2.3286E-6	6.7941E-5	6.8485E-2
1600	1.5738E-6	4.7185E-5	4.9877E-2
1700	9.9357E-7	3.3110E-5	3.6227E-2
1800	9.9375E-7	3.3193E-5	3.6182E-2
1900	9.0691E-7	3.2595E-5	3.7410E-2
2000	5.6568E-7	2.2294E-5	2.6614E-2

3. 10cm 以上のデブリ解析(高度 400km、傾斜角 0 度)

本章では、SSPS が組立軌道に 6 ヶ月滞在している間の 10cm 以上のサイズのデブリ衝突を検討する。

デブリ衝突の対象として、2002 年 NASDA レファレンス・システムの発送電/廃熱部を想定する。その完成時の形状は半径 1km の円盤である。厚さを 100m と仮定する。SSPS の組立軌道と平均断面積を以下に記す。

- ・平均高度:400km
- ・傾斜角:0.0 度
- ・完成時の平均断面積:173 万 m^2 (S_{\max} と記す)

この値は、SSPS の発送電/廃熱部が組立フェーズにおいてはランダム回転の状態にあると仮定した場合のものであり、平均断面積として発送電/廃熱部の表面積の 1/4 を使用した(付録を参照)。 S_{\max} 値は、組立フェーズの最後におけるものであり、平均断面積 $S(t)$ は時間に比例して増大すると近似する。

平板状の宇宙機は、その面の法線方向を地心に向ける地球指向姿勢を採用する事により、デブリに対する断面積を大幅に小さくする事ができる。初めに、ランダム回転と仮定した場合のデブリ衝突頻度を検討した後、地球指向姿勢を採用した場合の衝突頻度も検討する。

3.1 ランダム回転の場合の衝突頻度

高度 400km でのデブリ Flux(10cm 以上) F は、表 2-2 より、約 $2.58\text{E-}7$ Impacts/ m^2/yr である。

組立軌道 6 ヶ月間の大型デブリ(10cm 以上)との衝突頻度 P は次式で近似できる。

$$P = \int_0^{0.5} S(t) F dt \quad (3-1)$$

$S(t)$: 平均断面積

t : 時間(単位:年)

$S(t)$ は、 S_{\max} を用いて次式で近似する。

$$S(t) = 2 S_{\max} \times t \quad (3-2)$$

従って、6 ヶ月間の衝突頻度は、

$$P = \int_0^{0.5} S(t) F dt = \int_0^{0.5} 2 S_{\max} F t dt = \frac{1}{4} S_{\max} F \quad (3-3)$$

となる。 S_{\max} と F に値を代入すると、 $P=0.112$ となる。 $P=0.112$ という事は、10 基の SSPS を組み立てる間に、1 回の大型デブリとの衝突が発生するという頻度である。実際には、近傍をデブリが通過する場合も退避行動をする事になろう。そのような事象は上記の衝突頻度の 10 倍程度と考えられる(この倍率は、デブリ予報の精度に依存する)。従って、1 基の SSPS の組立期間中に、発送電/廃熱部は 1 回程度の退避軌道制御が必要となろう。SSPS には、発送電/廃熱部とほぼ同じサイズのコンポーネントが以下の様に計 5 個存在する。

- (1) 発送電/廃熱部(2km ϕ)
- (2) 1 次ミラー(2.5km \times 3.5km)が 2 個
- (3) レンズ(2km ϕ)が 2 個

よって、1 基の SSPS の組立期間中に、5 回程度のデブリからの退避マヌーバが必要になると考えられる。

3.2 地球指向姿勢の場合の衝突頻度

図 3-1 に、10cm 以上のデブリの衝突速度(SSPS に相対的な速度)の上下角分布を示す。MASTER-2001 の出力である。衝突速度の上下角と方位角の定義を図 3-2(文献 1)に示す。上下角 0 度付近に flux が集中している事が判る。高度 500km では、400km の時以上に、0 度付近に集まっている。従って、円盤型の宇宙機は、広い面を地球に指向させる姿勢を維持すれば、デブリ flux を小さくできる。

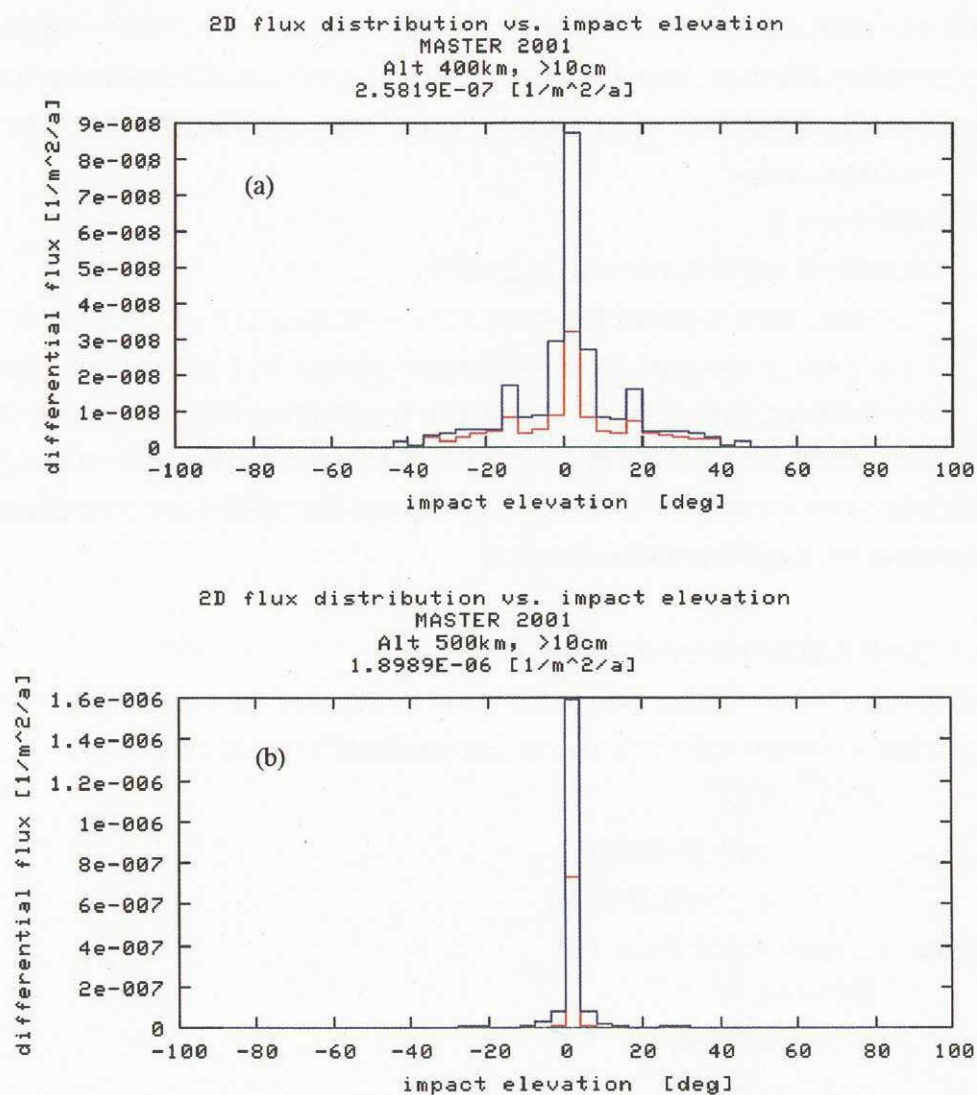


図 3-1 衝突速度の上下角分布

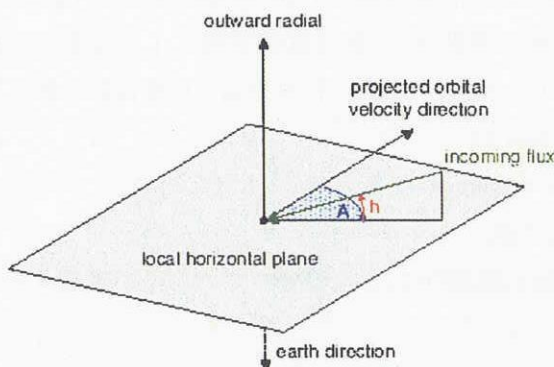


図 3-2 衝突速度の上下角と方位角の定義(文献 1)

MASTER-2001 では、地球指向姿勢の宇宙機の6面を図3-3の様に定義している。SSPS の発電電/廃熱部は円盤型であり、面2と4の面積は円の面積で良い。1, 3, 5, 6の各側面の面積は、円盤(厚さ 100m と仮定)の全周にわたる側面積の 1/4 と近似する。よって、

面 2, 4 の各面積 : 314.2 万 m²

面 1, 3, 5, 6 の各面積: 15.71 万 m²

となる。

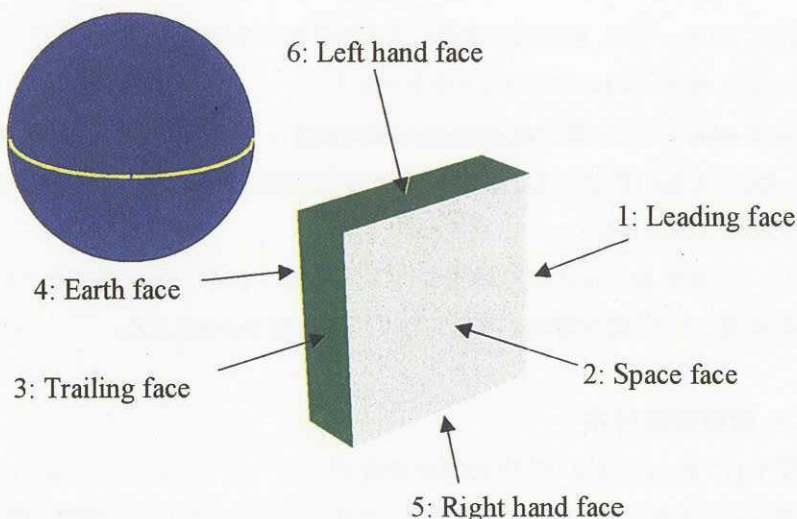


図 3-3 地球指向姿勢の宇宙機の 6 面の定義

高度 400km の場合

高度 400km の場合の計算結果を表 3-1 に示す。最後の列の値は、組立期間中の面積の増大が時間に比例すると近似して、個数/yr の値を 1/4 にしたもの。衝突頻度は、ランダム回転の場合の 0.112 に対し、約 4 割の 0.0454 になっている。

表 3-1 地球指向姿勢の発電電/廃熱部のデブリ衝突頻度(組立軌道 6 ヶ月、10cm 以上のデブリ)

面	面積(万 m ²)	球に対する flux 比	デブリ flux(個数/m ² /yr)	個数/yr	組立軌道 6 ヶ月の衝突数
1	15.71	0.2809	7.251E-8	0.01139	0.00285
2	314.2	0.0771	1.991E-8	0.06256	0.01564
3	15.71	0.2296	5.928E-8	0.00931	0.00233
4	314.2	0.0838	2.163E-8	0.06796	0.01699
5	15.71	0.3544	9.150E-8	0.01437	0.00359
6	15.71	0.3932	1.015E-7	0.01595	0.00399
計	691.2			0.18154	0.04539

高度 500km の場合

高度 500km の場合の計算結果を表 3-2 に示す。衝突頻度は、ランダム回転の場合の 0.8213 に対し、約 18% の 0.152 になっている。

表 3-2 地球指向姿勢の発電電/廃熱部のデブリ衝突頻度(組立軌道 6 ヶ月、10cm 以上のデブリ)

面	面積(万 m ²)	球に対する flux 比	デブリ flux(個数/m ² /yr)	個数/yr	組立軌道 6 ヶ月の衝突数
1	15.71	0.5077	9.640E-7	0.15145	0.03786
2	314.2	0.0175	3.331E-8	0.10465	0.02616
3	15.71	0.0304	5.780E-8	0.00908	0.00227
4	314.2	0.0179	3.399E-8	0.10679	0.02670
5	15.71	0.3893	7.392E-7	0.11613	0.02903
6	15.71	0.3961	7.521E-7	0.11815	0.02954
計	691.2			0.60625	0.15156

高度 500km では、地球指向姿勢による衝突数の削減効果は大きいですが、高度 400km と比較すると、3.3 倍の衝突数となり、高度 400km の方がより安全である。

高度 400km では、発送電/廃熱部の衝突頻度は 0.04539 であり、衝突/ニアミスの頻度は 10 倍の 0.454 程度となる。SSPS の他の部分もほぼ同じサイズの平板形状と近似できるので、SSPS 全体では、6 ヶ月間の衝突/ニアミス頻度は約 2.3 回となる。

よって、高度 400km の組立軌道で、6 ヶ月を掛けて発送電/廃熱部などの主要コンポーネントを完成させる場合、2 回程度、デブリ衝突警報が発せられて回避行動が必要となる。

3.3 衝突速度分布

図 3-4 に 10cm 以上のデブリの衝突速度の大きさの分布を示す。3km/s 付近にピークが存在するが、9～12km/s 付近も多い事が判る。

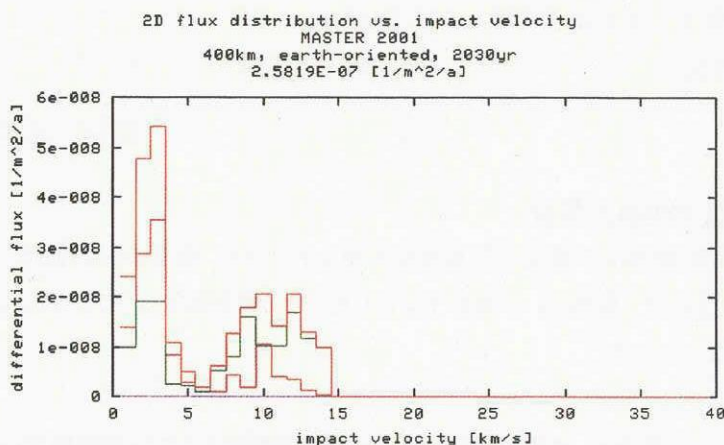


図 3-4 衝突速度の大きさ分布(10cm 以上のデブリ)

図 3-5 に、衝突方向の方位角分布を示す。約 -30 度～35 度の方向からは殆ど衝突はない。

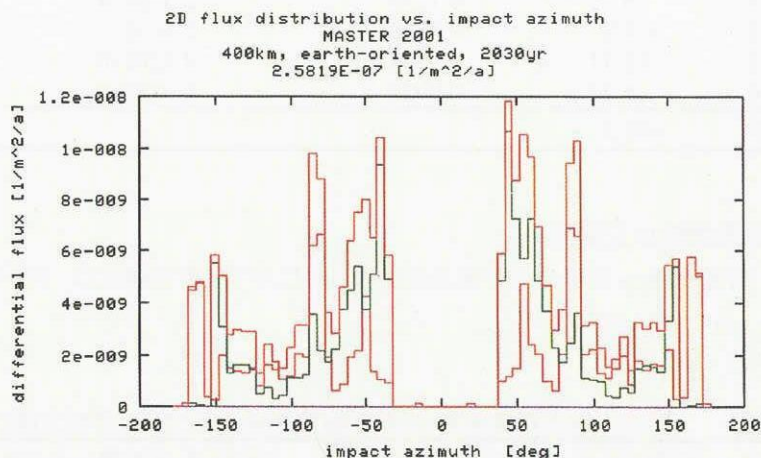


図 3-5 衝突速度の方位角分布(10cm 以上のデブリ)

以上は、MASTER-2001の結果であるが、ORDEM2000の結果を図3-6に示す。衝突速度は10.5km/s付近にピークが存在し、衝突方位角は、約-80度~-40度と、40度~80度の領域に限られている。

衝突速度の大きさ分布のピーク値がMaster-2001とORDEM2000で大きく異なる事が判る。どちらの結果が正しいかは判らないが、10cm以上のデブリの衝突は避けねばならない。

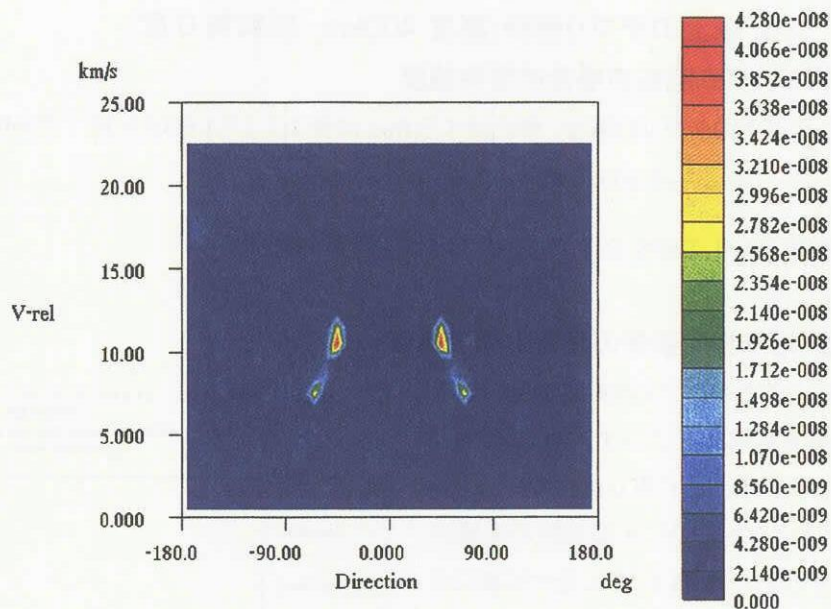


図 3-6 衝突速度分布(10cm 以上のデブリ, ORDEM2000)

4. 1cm 以上のデブリ解析(高度 400km、傾斜角 0 度)

4.1 ランダム回転の場合の衝突頻度

1cm 以上のデブリの場合、球に対する flux は表 2-2 より 1.6005×10^{-5} であり、発送電/廃熱部には 6 ヶ月間に

$$P = \frac{1}{4} \times 1.6005 \times 10^{-5} \times 173 \times 10^4 = 6.92 \text{ (個)}$$

の衝突があり、SSPS 全体では、約 35 個の衝突が有り得る。

4.2 地球指向姿勢の場合の衝突頻度

1cm 以上のデブリの衝突速度の上下角分布を図 4-1 に示す。10cm 以上のデブリよりも、上下角 0 度に集中している。小さくなるほど、大気抵抗の影響が大きくなり、軌道が円に近づく事による。

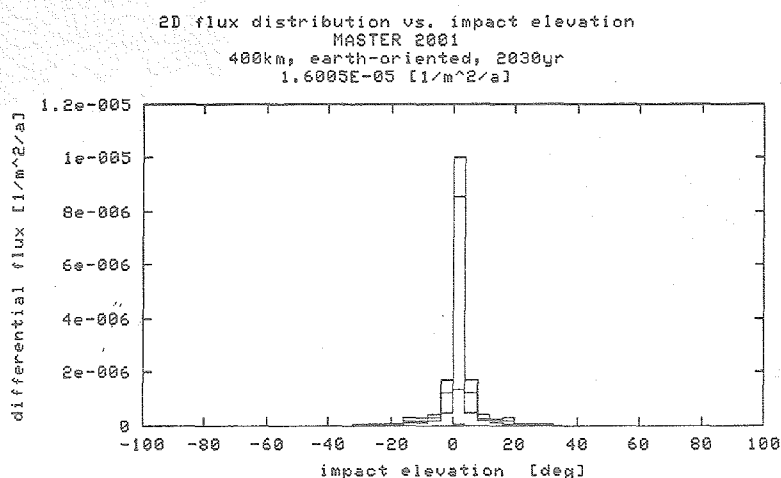


図 4-1 衝突速度の上下角分布(1cm 以上のデブリ)

地球指向姿勢を採用した発送電/廃熱部の各面に対する 1cm 以上のデブリの衝突頻度を表 4-1 に示す。6 ヶ月間の衝突数は、ランダム回転の場合の 6.92 に対して、約 22% の 1.51 に低下している。

表 4-1 地球指向姿勢の発送電/廃熱部のデブリ衝突頻度(組立軌道 6 ヶ月、1cm 以上のデブリ)

面	面積(万 m ²)	球に対する flux 比	デブリ flux(個数/m ² /yr)	個数/yr	組立軌道 6 ヶ月の衝突数
1	15.71	0.2945	4.714E-06	0.7406	0.1851
2	314.2	0.0281	4.494E-07	1.4120	0.3530
3	15.71	0.0522	8.348E-07	0.1311	0.0328
4	314.2	0.0298	4.772E-07	1.4994	0.3748
5	15.71	0.4428	7.086E-06	1.1132	0.2783
6	15.71	0.4523	7.240E-06	1.1374	0.2844
計	691.2				1.5084

地球指向姿勢を採用すると、1cm 以上のデブリは 6 ヶ月間に発送電/廃熱部に約 1.5 個、SSPS 全体では約 7.5 個衝突する。太陽電池セル面には、約 0.37 個衝突する。

4.3 衝突速度分布

図 4-2 に、1cm 以上のデブリの衝突速度の大きさの分布を示す。衝突速度は、7～9km/s のものが多い。

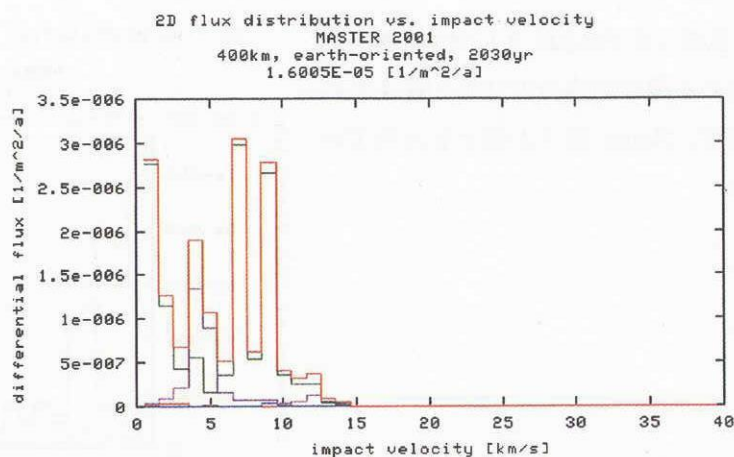


図 4-2 衝突速度の大きさ分布(1cm 以上のデブリ)

図 4-3 に衝突方向の方位角分布を示す。約±60 度～±90 度に限定されている事が判る。

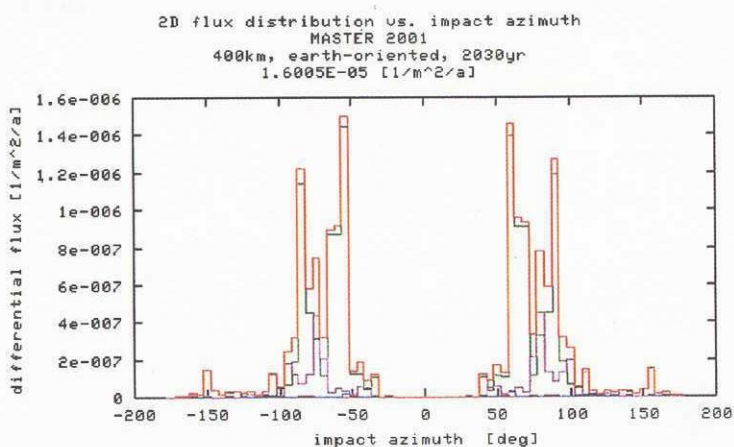


図 4-3 衝突速度の方位角分布(1cm 以上のデブリ)

図 4-4 に、ORDEM2000 の結果を示す。MASTER-2001 の結果とほぼ一致している。

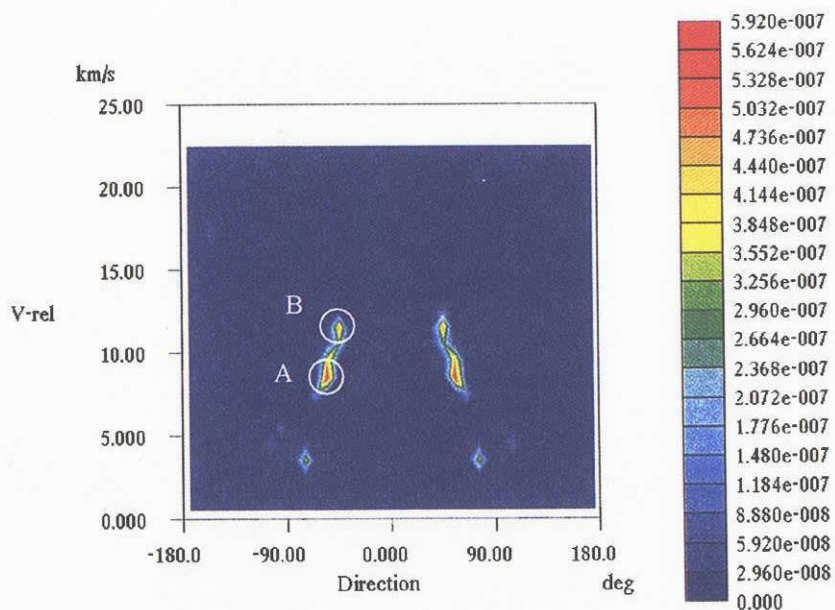


図 4-4 衝突速度分布(1cm 以上のデブリ, ORDEM2000)

重要な面である面 2 に対する衝突速度の法線方向成分の分布を図 4-5 に示す。5km/s 以下が殆どを占めている。

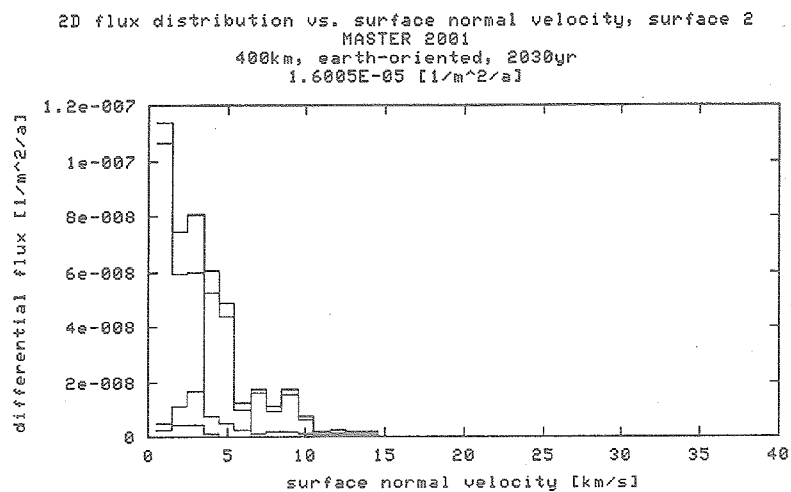


図 4-5 衝突速度の法線方向成分の分布(面 2)

5. 1mm 以上のデブリ解析(高度 400km、傾斜角 0 度)

5.1 ランダム回転の場合の衝突頻度

1mm 以上のデブリの場合、発送電/廃熱部には

$$P = \frac{1}{4} \times 1.5193 \times 10^{-2} \times 173 \times 10^4 = 6571$$

の衝突があり、SSPS 全体では、3 万個以上の衝突が有る。

5.2 地球指向姿勢の場合の衝突頻度

1mm 以上のデブリの衝突速度の
上下角分布を図 5-1 に示す。1cm 以
上の場合よりも更に 0 度付近に集中
している。

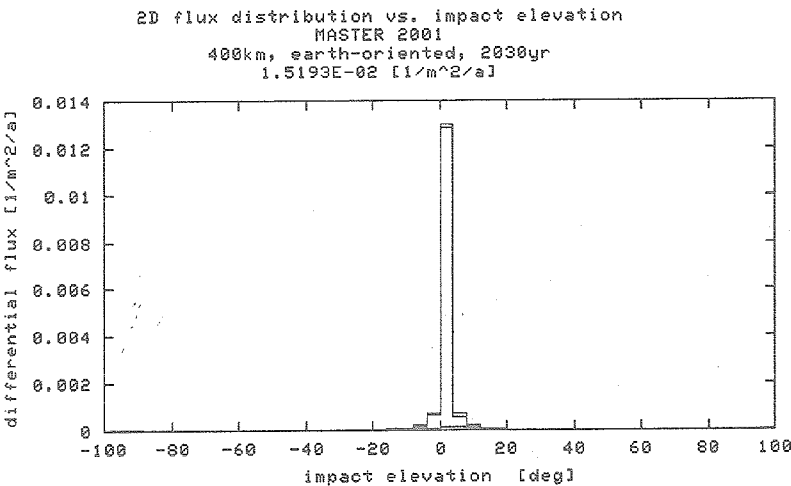


図 5-1 衝突速度の上下角分布(1mm 以上のデブリ)

地球指向姿勢を採用した発送電/廃熱部の各面に対する 1mm 以上のデブリの衝突頻度を表 5-1 に示す。6 ヶ月間の衝突数は、ランダム回転の場合の 6571 個に対して、約 16.5%の 1087 個に減少している。

表 5-1 地球指向姿勢の発送電/廃熱部のデブリ衝突頻度(組立軌道 6 ヶ月、1mm 以上のデブリ)

面	面積(万 m ²)	球に対する flux 比	デブリ flux(個数/m ² /yr)	個数/yr	組立軌道 6 ヶ月の衝突数
1	15.71	0.4711	7.157E-03	1124.	281.1
2	314.2	0.0125	1.895E-04	595.4	148.9
3	15.71	0.0125	1.897E-04	29.80	7.450
4	314.2	0.0118	1.797E-04	564.6	141.2
5	15.71	0.4461	6.778E-03	1065.	266.2
6	15.71	0.4058	6.165E-03	968.5	242.1
計	691.2				1087.

地球指向姿勢を採用すると、1mm 以上のデブリは、6 ヶ月間に発送電/廃熱部に 1087 個、SSPS 全体では 5400 個余り衝突する。太陽電池セルの面には、150 個程度衝突する。これは 145m 四方に 1 個の割合である。

5.3 衝突速度分布

図 5-2 に、1mm 以上のデブリの衝突速度の大きさの分布を示す。衝突速度は、9km/s 付近にピークがある。

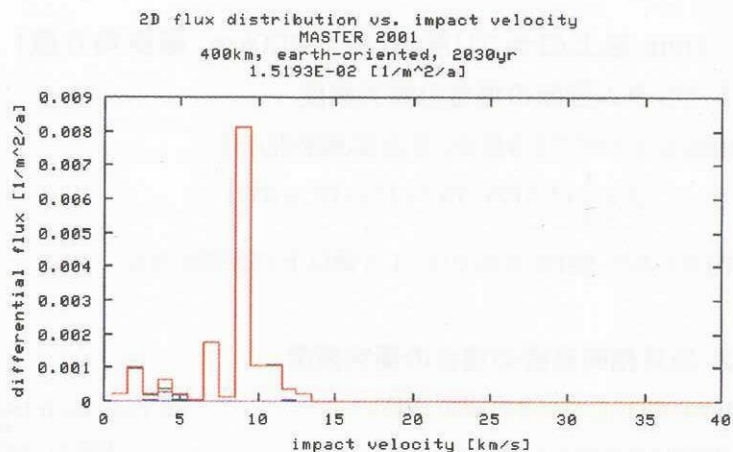


図 5-2 衝突速度の大きさ分布(1mm 以上のデブリ)

図 5-3 に衝突方向の方位角分布を示す。衝突方向は 1cm 以上の場合よりも更に狭くなり、 ± 60 度付近に限定されている。

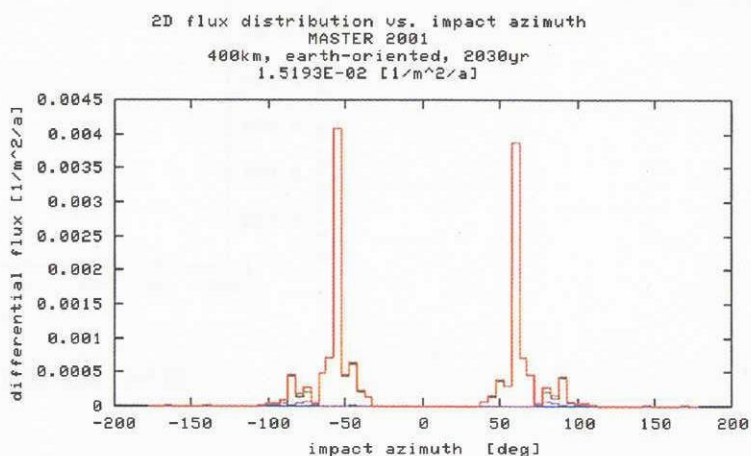


図 5-3 衝突速度の方位角分布(1mm 以上のデブリ)

図 5-4 に ORDEM2000 の結果を示す。この図では、衝突速度 4.5km/s 付近にピークがあり、方位角は ± 105 度付近にピークがある。両モデルの結果の違いは大きい。

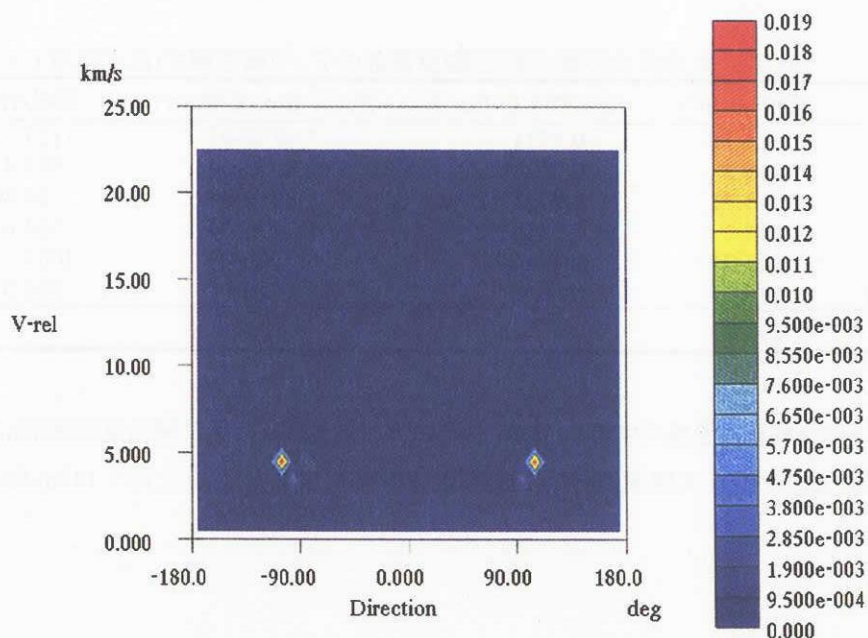


図 5-4 衝突速度分布(1mm 以上のデブリ, ORDEM2000)

面 2 に対する衝突速度の法線方向成分の分布を図 5-5 に示す。9km/s 付近にピークがある。6ヶ月間に約27個がこの面に9km/s の法線速度で衝突する。

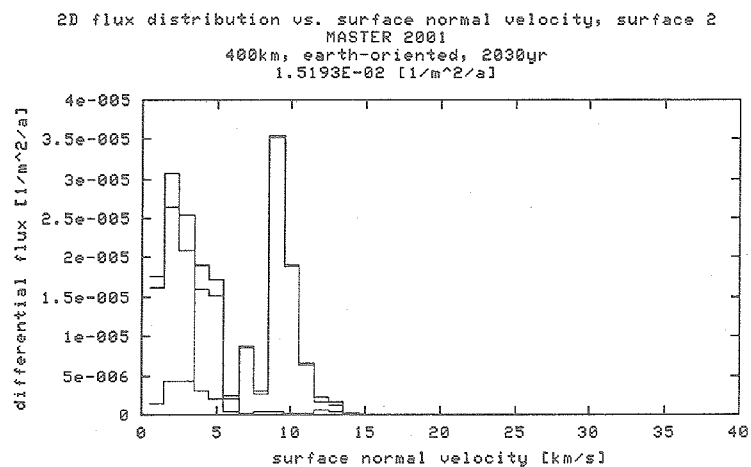


図 5-5 衝突速度の法線方向成分の分布(1mm 以上, 面 2)

6. デブリ衝突速度の大きさと方向のまとめ

本章では、各サイズのデブリの衝突速度の大きさと方向(方位角)を整理し、MASTER-2001 と ORDEM2000 の結果の違いを明示する。図 6-1 に MASTER-2001 の結果を、図 6-2 に ORDEM2000 の結果を示す。

1cm 以上のデブリの衝突速度は、両ソフトではほぼ一致している。10km/s 前後の大きな相対速度で衝突して来るだけでなく、地上では把握できないため、最も危険なサイズである。

1mm 以上のデブリは、flux も図 2-4 に示すように両ソフトで 4, 5 倍の違いがあり、衝突速度の大きさと方向も両ソフトでかなり異なる。一致しているのは、衝突の方位角が狭い範囲に限定されていると言う事である。

10cm 以上のデブリの衝突速度分布は、両ソフトでほどほどに合っていると言える。

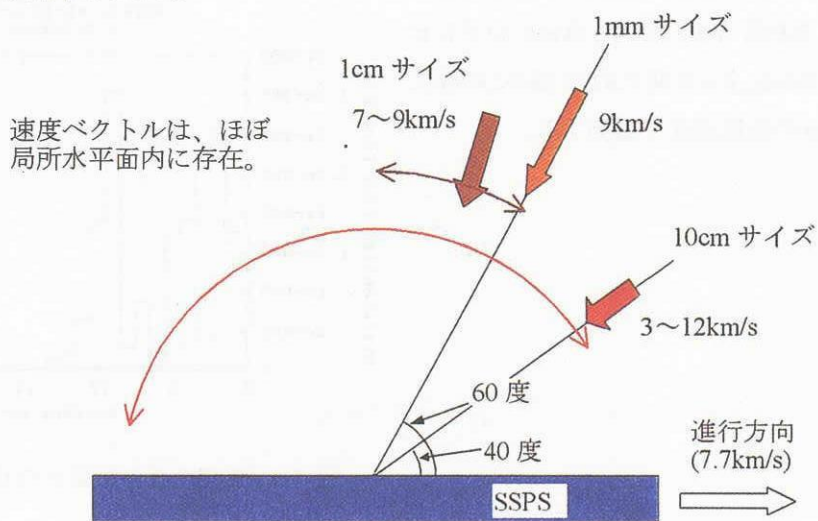


図 6-1 SSPS へのデブリ衝突の模式図(MASTER-2001 による)

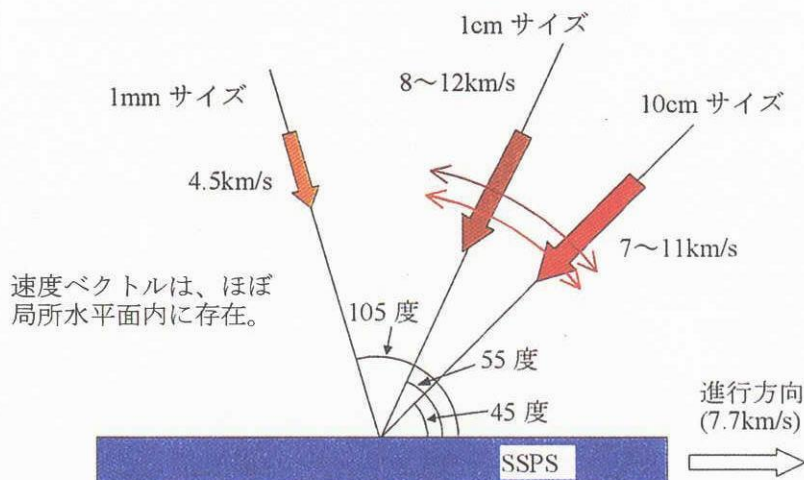


図 6-2 SSPS へのデブリ衝突の模式図(ORDEM2000 による)

7. 分割輸送によるデブリ衝突削減の可能性

組立軌道 6 ヶ月間の SSPS にとって、10cm 以上のデブリからの退避制御が 6 ヶ月間に 2 回程度必要になる事、いつ衝突するか判らない 1cm 以上のデブリが 6 ヶ月間に 10 個近く衝突する事、が特に問題と考えられる。これらの頻度を少なくとも 1/10 以下にする必要がある。

組立軌道の高度を変更せずに衝突頻度を小さくする方法として、分割輸送が考えられる。今までは、発電電/廃熱部などの 5 つの大きなコンポーネントは、組立軌道で完成させて静止軌道に輸送すると考えて来た。ここでは、組立軌道では完全には完成させず、各コンポーネントを $1/N$ だけ組み立てたら、すぐに静止軌道に輸送し、静止軌道で各コンポーネントを完成させる事を考える。すると、個々の断面積は $1/N$ になり、組立軌道上の滞在期間も $1/N$ になるため、デブリ衝突数は $1/N^2$ になる。各コンポーネントは、これが N 個から成るので、全体としてデブリ衝突数は $1/N$ に削減される。上記の様に、衝突数を 1/10 以下にするには、各コンポーネントを 10 以上に分割すれば良い。

組立軌道フェーズだけを考えるのであれば、各コンポーネントを 10 以上に分割すれば良いが、実は、静止軌道への軌道間輸送フェーズ中のデブリ衝突が、衝突数の下限を規定する事になる。この事を説明する。

図 2-3 より、デブリ空間密度は高度 2000km までが支配的である。図 2-4 の 1cm 以上のデブリ flux (MASTER-2001 の結果)を高度 400km~2000km の範囲で平均すると、高度 400km の値の 3.75 倍となる。次に軌道間輸送で高度 2000km に達するまでの日数を評価する。文献 4)の図 3-2 より、高度 2000km までに約 27 日を要する事が判る。従って、高度 400km の組立軌道 6 ヶ月間に受けるデブリ衝突に比べて、軌道間輸送フェーズにおいては、

$$3.75 \times \frac{27}{180} = 0.56 \text{ 倍}$$

以上のデブリ衝突を受ける事が判る。各コンポーネントを何分割して輸送しても、上記の 0.56 倍という値は小さくならない。

ここで注意すべきは、組立軌道フェーズの平均断面積は完成時の 1/2 である事である。これを考慮すると、軌道間輸送中のデブリ衝突数は、第 3 章～第 5 章に記した組立軌道での衝突数と殆ど同じになる。従って、各コンポーネントを分割して輸送しても、デブリ衝突数は減少しないという結果が得られる。

但し、全く組み立てる事をせず、再使用型宇宙往還機(RLV)で高度 400km の軌道に打ち上げた形状のまま、すぐに電気推進系で静止軌道に輸送すれば、断面積が非常に小さいために衝突数を十分小さくできよう。これは、組立軌道を静止軌道にする事を意味する。

よって、組立軌道の高度を 400km 付近にしたままで、分割輸送によってデブリ衝突数を減らす試みは成功しない事が判る。

8. おわりに

SSPS の組立軌道 6 ヶ月間のデブリ衝突を検討した。組立軌道は、高度 400km で傾斜角 0 度の円軌道とした。ESA の開発した MASTER-2001 を用いて解析し、比較のために NASA の ORDEM2000 も用いた。解析の時期は、2030 年とした。組立軌道での姿勢は、デブリに対する断面積が最小となる地球指向姿勢を仮定する。

10cm 以上のデブリとの衝突/ニアミスは、SSPS 全体では 6 ヶ月間に約 2 回あり、その度に退避制御を行なう必要がある。1cm 以上のデブリは、SSPS 全体では 6 ヶ月間に 10 個近く衝突する。衝突速度は 7~9km/s と大きい。1mm 以上のデブリは、SSPS 全体では 6 ヶ月間に約 5400 個衝突する。衝突速度は 9km/s 程度である。発送電/廃熱部の太陽電池セル面には、6 ヶ月間に約 150 個が衝突し、その内、約 27 個はセル面に対する法線速度が 9km/s にもなる。

組立フェーズだけを考えれば、SSPS を多数に分割して軌道間輸送する事で、デブリ衝突を少なくできるが、軌道間輸送中の高度 2000km までのデブリのために、分割してもデブリ衝突数は小さくならない。

以上の検討より、LEO で組み立てて静止軌道に運ぶシナリオは、デブリ衝突の観点からは、かなり厳しい事が判った。デブリ衝突を避けるだけならば、組立軌道の高度を 2000km 以上にすれば良い。しかし、放射線による太陽電池セルの劣化も避ける必要のある事を考えると、バンアレン帯内帯の陽子線 fluence がピーク値の 1/100 程度に下がる高度 12000km 以上で組み立てる必要がある。

注)MDS-1 で軌道上実証された CI(G)S セルは放射線に非常に強いが、そのセルが必要とするインジウムは、資源寿命が 20 年足らずと言われている⁵⁾。従って、現状では、放射線による劣化を受けるシリコン・セルを想定する。

9. 付録(ランダム回転の凸多面体の平均断面積)

ランダム回転している平板の平均断面積は、片面への衝突に対して、 $S/4$ である。 S は平板の面積(片側の面積)とする。この事を 9.1 節で導出する。なお、平板の両面への衝突を対象とすると、平均断面積は $S/2$ となり、平板の表面積 $2S$ に対する比は、 $1/4$ となる。半径 r の球の場合、表面積は $4\pi r^2$ 、断面積は πr^2 なので、平均断面積は表面積の $1/4$ となり、ランダム回転の平板の結果と同じとなる。更に、9.2 節に述べるように、一般の凸多面体(球、平板を含む)がランダム回転している時の平均断面積は、表面積の $1/4$ となる。

9.1 ランダム回転平板の平均断面積

図 9-1 のように、平板に対して上下角 θ で入射する flux に対する断面積は、

$$S \sin \theta$$

である。flux が図の微小面積要素を通過する確率は、球の全表面積 4π に対する比

$$d\sigma / 4\pi$$

に等しい。 $d\sigma$ は次式で表される。

$$d\sigma = \cos \theta \, d\theta \, d\phi$$

従って、平板の片面に入射する flux に対する平均断面積は、

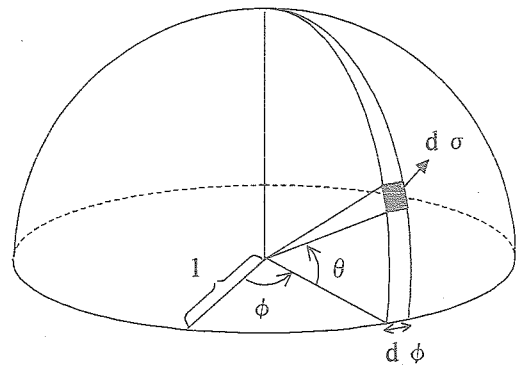


図 9-1 ランダム回転平板の平均断面積

$$S_{ave} = \int_{\text{半球}} S \sin \theta \frac{d\sigma}{4\pi} = \frac{S}{4\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta \, d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = \frac{S}{4} \int_0^{\pi/2} \sin 2\theta \, d\theta = -\frac{S}{8} [\cos 2\theta]_0^{\pi/2} = \frac{S}{4}$$

となる。

9.2 一般の凸多面体がランダム回転する時の平均断面積

ランダム回転している一般の凸多面体を考える。その各面の平均断面積は、9.1 節の議論より、その面積の $1/4$ であり、一般の凸多面体がランダム回転している時の平均断面積は、表面積の $1/4$ に等しい事が判る。

10. 参考文献

- 1) J.Bendisch, K.D.Bunte, S.Hauptmann, H.Sdunnus, R.Walker, P.Wegener, "Master 2001 Software User Manual," December 2002.
- 2) Jer-Chyi Liou, Mark J. Matney, Phillip D. Anz-Meador, Donald Kessler, Mark Jansen, Jeffery R. Theall, "The New NASA Orbital Debris Engineering Model ORDEM2000," NASA/TP—2002-210780, May 2002.
- 3) Space Station Program Natural Environment Definition for Design, Revision B, February 8, 1994.
- 4) 歌島, "SSPS 軌道間輸送の新しい制御法—ピッチ角ゼロ固定による最適制御—," システム解析・ソフトウェア研究開発センター資料 GLA-02052, 2002 年 11 月.
- 5) 筑波大学 物理工学系 環境半導体研究室のホームページ
<http://www.bk.tsukuba.ac.jp/~ecology/lab/Beta-FeSi2/kankyo.htm>

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-03-005

発行日 2004年3月25日
編集・発行 独立行政法人宇宙航空研究開発機構
〒182-8522
東京都調布市深大寺東町七丁目44番地1
TEL 0422-40-3000 (代表)
印刷所 株式会社 ビー・シー・シー・
東京都港区浜松町2-4-1

©2004 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

