

カンタベリーから(3)

## 第1回ヨーロッパ・スペースデブリ学術会議

矢野 創<sup>1</sup>

1957年のスプートニク1号以来、人類は3500以上のロケットを打ち上げ、人工物体を宇宙空間に放出し続けてきた。地上から追跡できる人工物体は、現在地球周辺に7000以上存在している（第1図）。これらのうち400余りが稼働中の人工衛星で、残りは全て「スペースデブリ」と呼ばれる不要な物体群である。将来の宇宙利用・開発・研究にとって、増加の一途を辿るデブリは避けて通れない重大な問題である。この問題を国際的な枠組みで研究し、解決を図ることを目的として、1993年4月5-7日、ドイツ・ダームシュタット（Darmstadt）にて「第一回ヨーロッパ・スペースデブリ学術会議」（The First European Conference on Space Debris, 以下「デブリ会議」）が、伊、英、独、仏の四ヶ国の宇宙機関の協賛を得て、ESAによって主催された。本稿では、まずスペースデブリとそれが抱える問題を定義し、次にデブリ会議のプログラムに沿って、デブリ研究の総論と各論

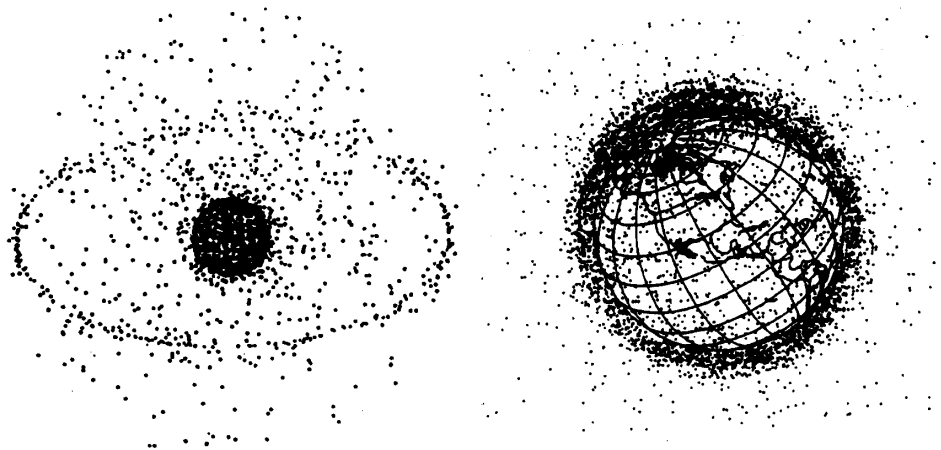
それぞれの実態と今後の展望について解説する。またデブリ研究と惑星科学の関連性や、将来の宇宙科学研究におけるその意義についても考察する（第1図）。

## 1. スペースデブリとは

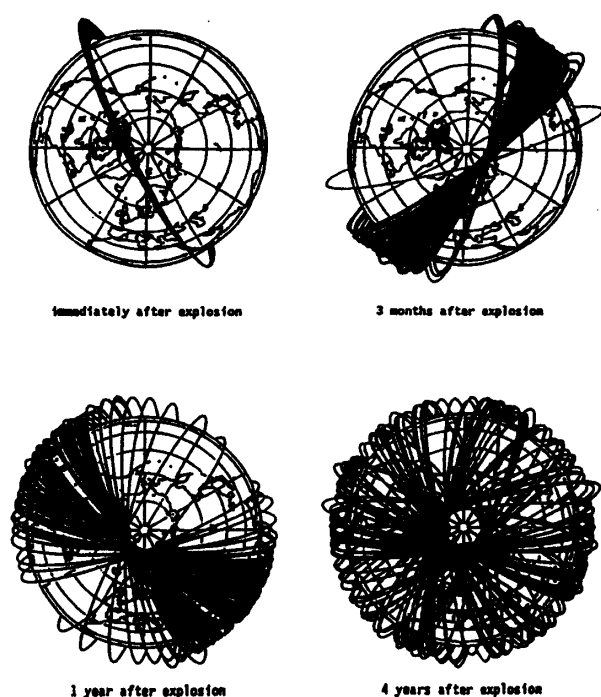
スペースデブリ（Space Debris）とは、人工飛翔体の衝突・爆発やロケット噴射等で宇宙に放出された破片並びに既に運用が終了した人工飛翔体等、宇宙空間に存在する不要な人工物質の総称である。宇宙機器の材質はその大半がアルミニウムであり、ロケット燃料の酸化剤にも多くアルミ粒が用いられるため、宇宙で検出されるデブリの90%はアルミである。まれに機体表面の塗料や電子部品や宇宙服の破片の発見例がある。

サイズの分布は人工衛星そのものから数 $\mu\text{m}$ のものまで幅広く、大きさに対数的に反比例してその数が増加すると考えられている。小さいサイズのデブ

第1図 カタログ化されたデブリの1991年末のスナップショット。右がLEO、左がGEOの様子を示す。各点はデブリを表すがサイズは表現されていない。（提供:ESA）



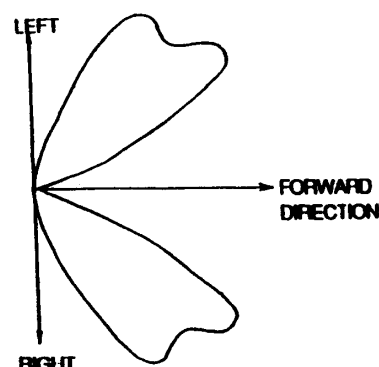
<sup>1</sup> ケント大学カンタベリー校



第2図 アリアン V-16 上部ステージから排出されたデブリの拡散。左上が爆発直後、右下が四年後の軌道を示している。(提供:独・ブラウンシュバイク技術大学)

りであっても平均衝突速度は速く(秒速数kmから十数kmのオーダー), 運動量は破壊的に大きい。例えば直径1cmのアルミ製デブリが13km/sで人工衛星に衝突する時のエネルギーはおおよそ $10^5$ – $10^6$ Jである。これは二台の乗用車が一般道の法定速度で正面衝突する時のエネルギーに等しい。

発生した初期のデブリの軌道は母体とほぼ同じだが, 短期間で通過した軌道上に拡散する(第2図)。人工衛星には軌道面に水平に衝突する。衝突の方向性は, 東(進行方向)を中心として南北に蝶が羽を広げた様な分布を見せる(第3図)。これは東西からのデブリ衝突が少ないためであり, 天然のメテオロイドの衝突と区別する一つの根拠となっている。なぜならばデブリが人工衛星に正面から衝突するには衛星より低速であり, 近地点も低いため, 短期間のうちに大気圏に突入してしまう。真後ろは逆に衛星に追いつく速度を保った



第3図 軌道角 $30^\circ$ で地球を周回する宇宙機へのデブリの衝突頻度を各方向の立体角毎に合計した。中心から離れるほど衝突数が増えるように表現すると, 進行方向に向かって蝶が羽を広げたような形になる。

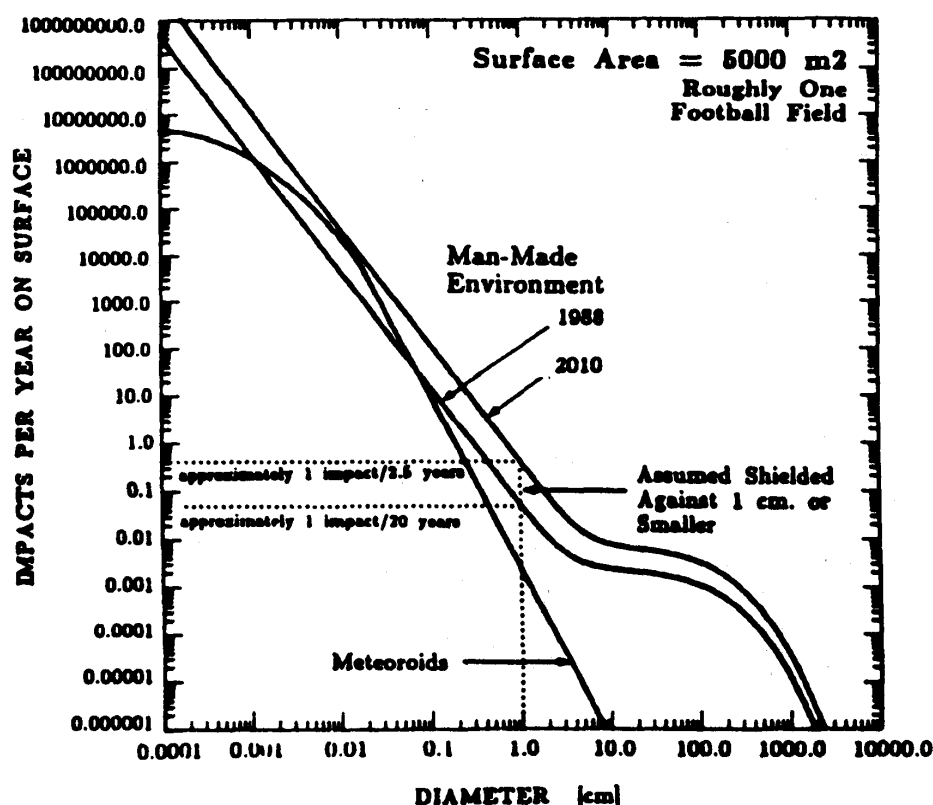
めに遠地点が高くてはならず, これも少ないからである。

1993年のペルセウス座流星群の極大期に, ESA オリンパス衛星がメテオロイドの衝突が原因と思われる突然の姿勢制御不能に陥り, その運用が放棄された[1]。デブリ・メテオロイド共に地球周辺環境の分布とその経年変化について十分に把握されないまま, 宇宙開発が進行しているのが現実である。オリンパスのように運用中の人工衛星が微粒子の衝突によって故障する例はまだ確率的には低いが, 現実には起きるとその科学技術的・経済的損失は極めて大きい。今後も現状通りの割合でデブリが増加していくとすると, 西暦2010年までに地球低軌道(LEO (Low Earth Orbit))上のデブリの総数は, 全てのサイズの範囲でメテオロイドの総数をしのぐと言う試算もある(第4図)[2]。

## 2. デブリ会議の目的と反響 —デブリ研究・総論—

こうした近未来に起こるスペースデブリの危険から宇宙開発利用を守ることが, 今回開催された第一回ヨーロッパ・スペースデブリ会議の究極の目標であり, 具体的には, (1) 世界各国のデブリ

第4図 宇宙ステーション・フリーダム旧案にデブリまたはメテオロイドが衝突する頻度とサイズの関わりを示すモデル。2010年にデブリが全てのサイズでメテオロイドの総数を上回った時、直径1cm以上のデブリによる壊滅的衝突は2.5年に一回の頻度で起こり得る。



研究の成果を発表するフォーラムを提供し、(2) 今後の研究の方向性を定め、(3) デブリの管理方法を特定し、(4) その規定と政策方針を議論し、そして(5) この分野での国際協力を促進させることであった。17ヶ国より集まった251名の参加者は、科学者、エンジニア、宇宙機関幹部、政府高官、国際政治・法学者、軍関係者等の多岐の分野にわたり、スペースデブリが国際的かつ学際的問題であることを証明していた。

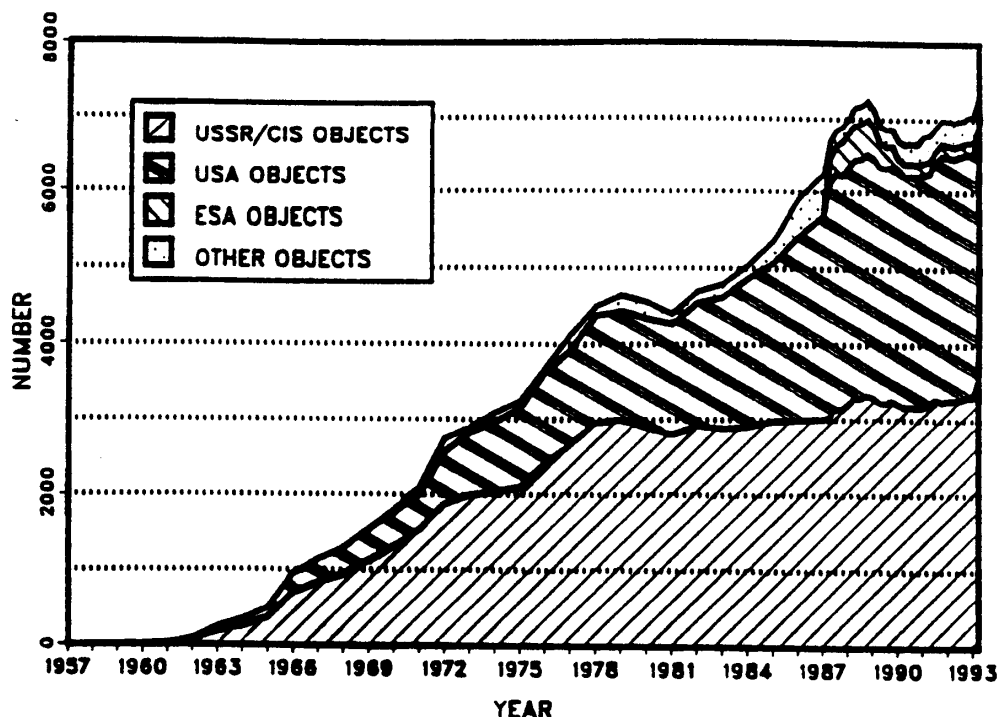
### 3. 会議プログラム —デブリ研究・各論—

以下の各章では、セッション毎にその概略を紹介する。他にポスター・セッションや幾つかの専門者会議が催されたが、主な内容は適切なセッションに組み入れてまとめた。

#### 3.1. 各国・各地域の対デブリ活動

会議冒頭の全体セッションでは、アメリカ合衆国、独立国家共同体 (CIS)、日本、ヨーロッパ宇宙機関・加盟国の各代表が、それぞれの対デブリ活動を紹介した。

米国は1988年1月、レーガン大統領 (当時) が発表した宇宙政策に基づき、NASAはLEOと地球静止軌道 (GEO (Geostationary Orbit)) 両方のスペース・デブリの測定、モデル化、緩和、防御、政策開発、国際協力に関する長期的計画の開発に着手した。同大統領は、「全てのセクターはスペースデブリ排出の削減を目指すこと。宇宙での試験、実験、システムらの設計と運用にあたっては、各ミッションの要求条件と対経費効果を満たしつつ、デブリの累積の緩和に努めること。」と宣言した [3]。具体的には、後述の地上観測網とLDEF (Long Duration Exposure Facility) 等で得た宇宙での直接測定に基づく分布モデルの作成、超高速衝突実験と防御壁の開発、得られた知見の宇宙ステ



第5図 DISCOS に記録された人工物体の起源とその経年変化. 1980年代に入ると, 旧ソ連によるデブリはほぼ一定に保たれるようになった.

ーション計画への応用等が活発に推進されている.

ESAでは1986年にスペースデブリ・ワーキンググループが発足し, 1989年には以下の研究課題を決定した. (1) デブリの増加の抑制, (2) リスクの解析・検討, (3) デブリ数のモデル作成, (4) 超高速衝突の地上実験, (5) デブリ・データベース「DISCOS」(Database and Information System Characterising Objects in Space)の作成と運用, (6) 宇宙から回収した衛星部品や実験装置を使った研究(LDEF, EuReCa (European Retrievable Carrier), HST (Hubble Space Telescope)), (7) 任意の宇宙機へのデブリ及びメテオロイドの衝突ダメージを推定するコンピューター・ソフトウェア「ESABASE/DEBRIS」の開発. 特に(5)-(7)はヨーロッパ独自の活動として注目された. ESA/ESOCのDISCOS管理センターには, 1993年秋までに米国の地上観測網のデータを含む百万件

の軌道要素が収録されている.

CISはソビエト連邦時代から欧米並みのデブリ研究が進められていたが, その成果が包括的に国際会議で紹介されたのは今回が初めてであった. 特にCIS独自の地上観測網とデータベースを欧米のシステムとインターフェイスする構想や, サリュートやミール宇宙ステーションで得られたデブリ・メテオロイドに関する宇宙実験の成果, また過去の宇宙探査機のために開発された防御壁の性能等が注目を集めた. 過去にCISはコスモス1275衛星のような, 確認された142件のデブリを排出した事故のうち96件を招いた. しかし今回, 各デブリ軌道の追跡結果を発表し, 全体の6割以上が短期間で大気圏に再突入し, 現在のデブリ総数への寄与は米国の事故に因るものよりも少ないと主張した(第5図)[4].

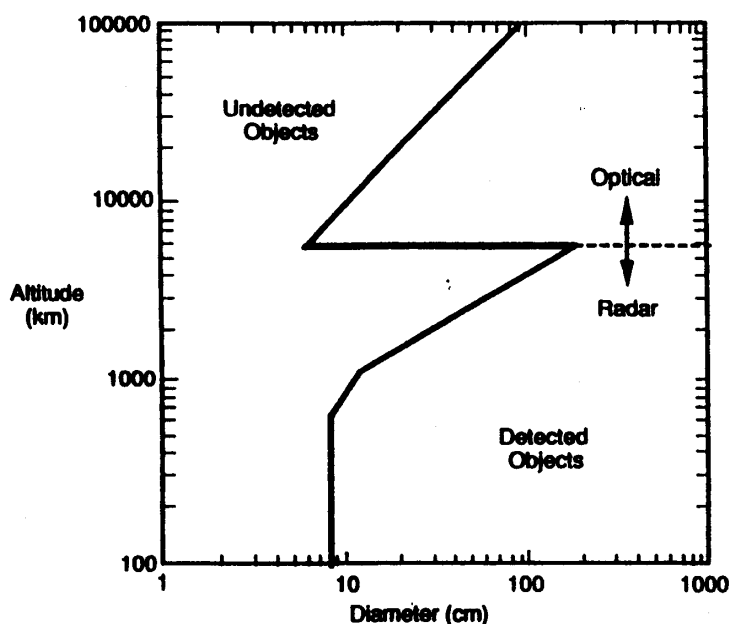
翻って, 日本には現在までデブリに関する明文

化された政策は存在しない。日本航空宇宙学会内のスペースデブリ研究会が、平成4年度にNASDAの業務委託として「スペースデブリに対する宇宙機と軌道環境の保全に関する検討」を完成させた[5]。同会は、各国の活動との重複を避け、かつ補完的に有効な検討課題として、以下の項目を含む提言を行なった。(1) 日本各地の光学望遠鏡や干渉計のネットワーク化、(2) 全国の研究機関の超高速衝突実験装置の相互協力、(3) 経済効果が配慮されるGEOでのデブリ観測技術及び運用終了後の人工衛星の軌道離脱技術の研究開発、(4) SFU (Space Flyer Unit) 及びJEM (Japan Experiment Module) を用いた地球周辺環境の観測と衝突現象の研究、(5) 宇宙開発委員会内にデブリ政策を検討する組織を創設し、日本国としてのデブリ政策を明文化する。

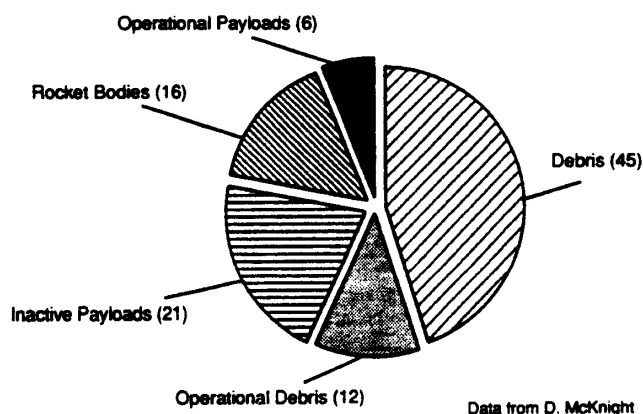
### 3.2. デブリ・メテオロイドの測定

地上からの光学またはレーダーによるデブリ観測の現在の主力は、米国のUSSPACECOM (United States Space Command) のSSN (Space Surveillance Network) とロシアのRSSS (Russian Space Surveillance System) である。これらは元来、両国の領土上空に飛来する大陸間弾道ミサイルに備えた軍事施設だが、人工衛星の軌道追跡にも用いられてきた。その感度はLEOで直径10cm以上である(第6図)。

現在のロケットは多段式がほとんどで、目標高



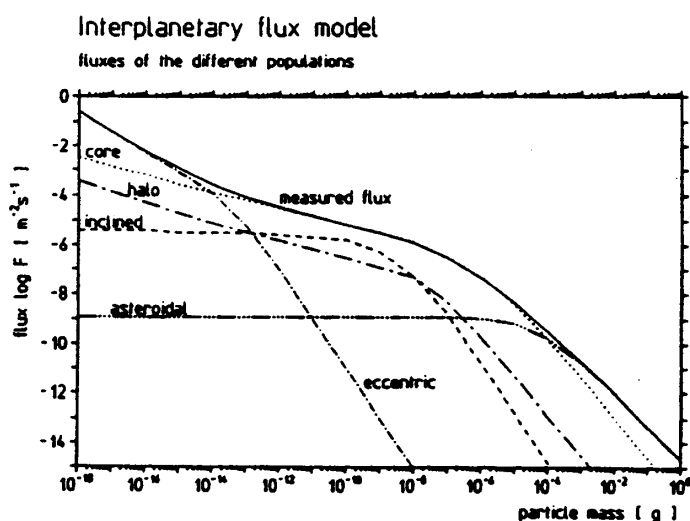
第6図 地上からの光学及びレーダー観測で確認できる物体のサイズ。(提供: NASA / JSC)



第7図 地球周回軌道上で追跡された人工物体の内訳。(提供: D. McKnight)

度・軌道に合わせて各ステージを噴射させ、その後不要になった燃料タンクや部品を切り離して余分な質量を捨てていく。一方1979年オーストラリアの砂漠に落下したスカイラブのように、宇宙ステーション等のLEO上の大構造物は運用終了後、対策を講じなければいずれ地球に「帰還」する運命にある。

これまで地上から確認されたこれら地球近傍の物体は22000に上り、その内15000は大気圏に再突入して消滅した。残された7000のうち6%余り



第8図 IAU の黄道面上における惑星間塵のフラックス分布への五つのサブグループの寄与。(提供:N. Divine)

が稼働中の人工衛星で、残りは全て「廃棄物」である(第7図)。地上からは探知できないより小さなデブリは、ロケットのステージの燃料タンクの爆発やデブリの相互衝突で「鼠算式」に生み出される。ESAの試算によると、直径1-10cmのデブリは17,500、0.1-1cmの範囲では350万ものデブリが存在していると予測される[6]。

LDEFやEuReCaの表面には直径数ミリの衝突クレーターが発見されているが、宇宙ステーションと圧部の外壁の防御壁は、構造と質量の制限から、平均的衝突速度を持つデブリはせいぜい1cmのサイズまでしか防げない。しかし宇宙開発利用が年々増加する現代でも、10cm未満のデブリを観測・追跡し、衝突を回避又は破壊を防止する科学技術は、まだ確立されていない。ここにデブリ対策の最大の問題点がある。従って今後は観測感度を少なくとも1-10cmサイズまで向上させることが必要である。そのために、米国ではUSSPACECOMを管轄する空軍の協力で、マサチューセッツ工科大学のヘイスタック・レーダーに新型レーダーを増設する計画がある。また欧米各地からも地上か

らの光学観測の提案と成果が発表された。赤外線天文衛星IRASを用いた観測結果も報告された。

### 3.3. 超高速衝突:実験加速器と防御壁デザイン

超高速衝突時の物理現象の解明は、デブリ・メテオロイドから宇宙機を守る防御壁の開発に不可欠である。今回は米、英、仏、独の研究者達の実験加速器の成果が発表された他、様々な材質・厚さ・構造の実際の標的もポスター・セッションにて展示された。またハイドロコードによるコンピューター・シミュレーションの発表も多かった。

特に米ニューメキシコ州アルバカーキのサンディア国立研究所は、加速器実験の蓄積で得た状態方程式をハイドロコードに応用し、実験では到達が難しい速度12km/sでの衝突によるバンパー防御壁(複数の薄膜が間隔を開けて並ぶ防御壁)の防御効果を報告して、注目を集めた[7]。

他には宇宙ステーションと圧部外壁の防御壁の構造デザインとその模擬実験がNASAとESAの双方から出された。衝突痕の形状やサイズの計測とそれらを導出する実験式の比較検討も行なわれた。変わり種としては、レーザーによってデブリを宇宙空間で掃討する、スター・ウォーズまがいの「アクティブ・シールド」という概念も米、独から二件提案された。

### 3.4. デブリ・メテオロイドのモデル作成

地球周辺環境の固体微粒子の分布のモデル作成に当たっては、(1)起源-人工のスペースデブリか天然のメテオロイドか、(2)時間変化-短期的変化と長期的変化、(3)軌道-LEOとGEOのそれぞれを区別する必要がある。惑星間空間と地球近

傍のメテオロイドの分布についてはN.Divineがレビューを行ない、過去の惑星間塵のデータを、推定される起源によって五つのサブグループに分けることを提唱した(第8図)。一方デブリの分布モデルの先駆者D.Kesslerは、今までの地上観測結果にLEDFで取得したデータを加えて、モデルの修正を示唆した。さらにD.McKnightは、人工衛星の破壊を衝突・爆発等のケース毎に分類し、デブリ雲がどのように発生、拡大、分布していくのかをモデル化した。

他にはデブリ分布変化の数学モデルや、1992年9月にロシアのPION衛星二基の大気圏再突入の機会を捕えて、英、仏、独が各々のデブリの追跡能力を試した結果も報告された。

### 3.5. デブリ・メテオロイド宇宙実験:宇宙より回収された物質の分析

1990年にスペースシャトルによって回収された実験衛星LEDFには、数種類のデブリ・メテオロイドの測定と捕集のための実験装置が搭載されていた。この会議では各実験の主な成果がほぼ出揃い、分布フラックス、衝突クレーターの形状・サイズ(第9図)、衝突物の残骸の化学分析等が複数の実験者によって発表された。特にLEDFの南北面でのフラックスの非対称の原因究明や、フラックス分析における二次的クレーターの選別の必要性、化学分析の実効性、楕円形クレーターによる衝突の方向性を探る方法について活発な議論が交わされた。

100 $\mu$ m-0.2 $\mu$ mサイズの微粒子の分布の時間変化を1年間記録したLEDF唯一の実験装置、IDE(Interplanetary Dust Experiment)の成果についてはS.F.Singerが発表した。最大のフラックスは1984年6月4日に軌道角65°のデブリ雲に遭遇した時に起きた。通常衝突は平均50/日の割合で起きた

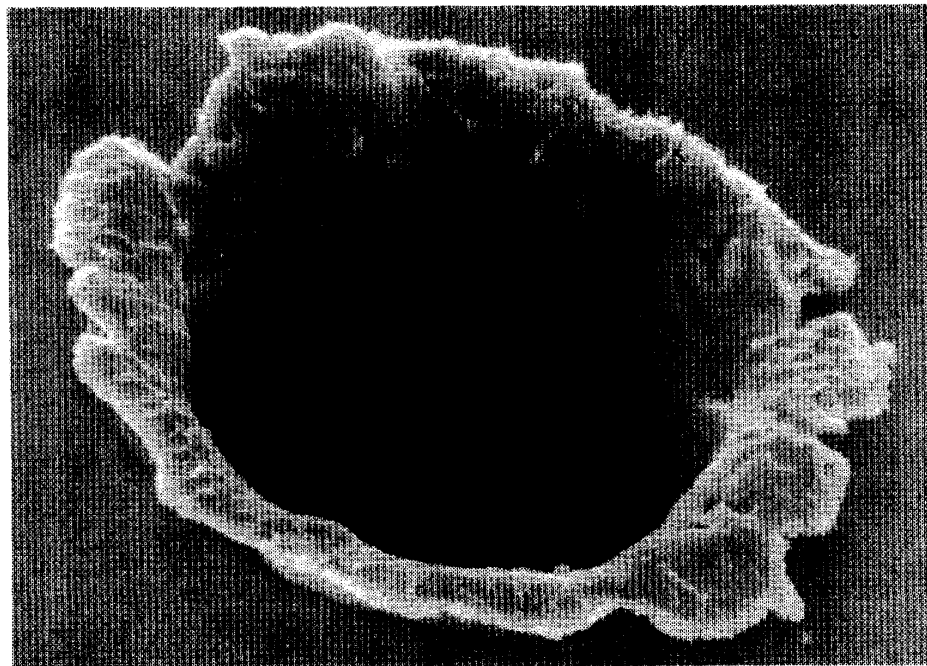
が、この日は地球を周回して同じ地点に来る度に高いピークを記録した。最大のピークのフラックスは、平均値の一万倍以上も高く、ミクロンサイズのデブリはランダムに分布しているとする従来の仮説を修正した[8]。

LEDF以外にも、月周回衛星「ひてん」に搭載されたダスト計測機Munich Dust Counter(MDC)によるフラックス測定、複数のスペースシャトル・ミッション(STS-32,44,46,52)に搭載されたエアロジェルや微細孔フォームによる微粒子の非破壊捕集の成果、ミール宇宙ステーションでの実験とLEDFでの比較、新しいデブリ・メテオロイドの衝突測定装置と捕集装置の開発研究も報告された。ESAからは、EuReCa実験衛星本体(1993年6月回収)とHSTの太陽電池パネル(1993年12月回収)の飛行後検査プログラムが発表された。これらは暴露面積と時間の積が大きいので、微粒子の衝突痕が多く発見されるため、LEDF以後のフラックスの変化の調査やさらなるデータの集積に大きな役割を果たすと考えられている。EuReCaはフロリダでの一次検査の後、現在も太陽電池パネルとラジエーターの検査がケント大学を中心としたグループによって進められている。回収された一枚のHSTのパネルも今年春から夏にかけて検査が実施される予定である。

### 3.6. デブリ緩和策と政策課題

このセッションではまずデブリの発生を緩和するためのアイデアを、宇宙機関や民間企業が出した。米モトローラ社のIRIDIUM計画におけるデブリ対策や、アリアン4型ロケットの第三ステージのオペレーションの工夫が紹介された。(1)燃料タンクが爆発しないように、各ステージの切り離し後に液体を徐々に抜く、(2)LEOからの安全な落下軌道、GEOからの「墓場軌道」(Graveyard

第9図 LDEF 上の厚さ  
5 $\mu\text{m}$  の真鍮製薄膜を貫通  
した超高速衝突。口径は  
20 $\mu\text{m}$ 。(提供:H. Yano)



Orbit) への軌道変更, (3) テザー衛星 TERESA (Tether Remover Satellite) による運用終了後の衛星の移動等である。

次に国際的合意に基づくデブリ削減のための人工衛星の設計, 打ち上げ, オペレーション, 運用終了まで全体を通じた規定・ガイドライン作りの提唱とその私案が NASA と ESA から出された。国際航空宇宙学会 (IAA (International Academy of Astronautics)) の「安全・救助・品質向上部会」は以下の方針をまとめた。(1) 地球周辺環境への継続したデブリの排出は全人類の将来の宇宙利用に対する重大な過失であると認識する, (2) 国際共同体がデブリ問題に取り組む際の明確なガイドラインを確立する, (3) この問題への対応の国際的合意を形成する議論や科学技術研究の協力を拡大する。

法的には「1975 年登録協約」の拡大解釈によって, 国家・国際機関・私的団体はデブリ問題に格別の配慮をすることが求められている。この協約を発展させて, 危険なペイロード, ミッションの

打ち上げに法的責任を寄与させる案も検討されている。政策的には「1967 年外宇宙条約に基づき, NASA, ESA, 日本, ロシアらの宇宙機関による「デブリ問題協議会」が定期的に開催されている。1992 年には国際法協会が「宇宙活動を原因とする被害からの環境保護」に関する仮国際文書を承認した。しかし国際法上の最も困難な課題は, 宇宙でのデブリの衝突や地上への落下による被害が起きている, デブリ発生源とそれを所有する機関を特定することが困難な点である。そこで現在, 人口衛星やロケットの製造者及び打ち上げ機関の責任を明文化する案や, 世界中の打ち上げ機関が打ち上げた物体の質量と危険度に比例した資金を徴収・管理する国際基金を創立し, 事故発生時の被害額をまかなう案が検討されている。

### 3.7. 衝突危険度の解析

今まで述べてきた地上観測, 地上衝突実験, コンピューター・シミュレーション, 宇宙実験研究の集大成の一つは, LEO での宇宙機の衝突確率や

各コンポーネントの非破壊確率を算出し、実際の宇宙活動の危険度解析に応用することである。ESABASE/DEBRISによるLDEFとコロンバス与圧部のメテオロイドとデブリ双方の衝突頻度がG.Drolshagenによって発表された(第10図)[9]。

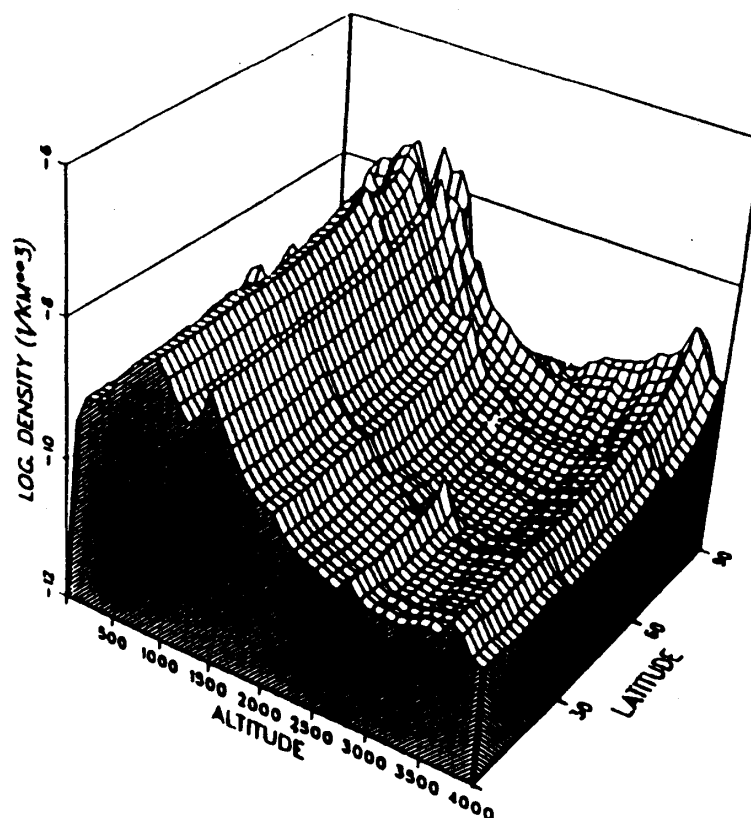
一方危険度の緩和の方策も論じられた。例えば1cm以上のサイズのデブリ衝突によって、宇宙ステーションで「破滅的故障」(通常、クルーまたは宇宙機の損失を意味する。)を引き起こす危険のある重要なコンポーネントを特定し、そこにより強固な防御壁を配置する。また地上から追尾されている大型のデブリについては、ステーションの軌道・高度を調節して積極的に衝突を回避する。NASAは現在までに数度、USSPACECOMが追尾するデブリが、スペースシャトル・オービターの周囲 $2\text{km} \times 2\text{km} \times 5\text{km}$ の楕円球状の「誤差範囲内危険空域」を通過した時に、その軌道・高度を変更してきた。

ESAは、コロンバスの与圧部の外壁や循環水パイプ、電気・情報ケーブル等が損傷した非常時には、クルーはシステムの閉鎖や緊急避難以外に、事故の原因究明と圧力や温度低下を最小限に食い止める修理を行なう可能性を研究した。ロシアでは原子力発電衛星へのデブリ衝突を特に懸念しており、現在カタログ化されている高度800–1500kmの軌道にある56基の衛星に対して、西暦2000年のデブリ数に抑えたとしても300年間で二回の破滅的衝突があると推算した。

### 3.8. 地球静止軌道のデブリ対策

36,000kmの高度では、LEOで起こる大気の抵抗によるデブリの軌道低下と摩擦燃焼は望めないもので、デブリ数の増加は衝突危険度の恒常的増加を意味する。地上観測の困難さと宇宙から帰還した実験装置がないため、GEOのデブリ分布のカタログ・モデル化はLEO程進んでいない。しかし将来

第10図 ESABASE / DEBRIS によって予測された EuReCa に衝突する直径 $10\mu\text{m}$ 以上のデブリの分布。



の全地球的規模の衛星通信ネットワーク（例えば「IRIDIUM計画」）にとって、GEOは既に過密なリング帯であり、その有効な空間利用と安全性の確保はLEOよりもはるかに深刻な問題である。

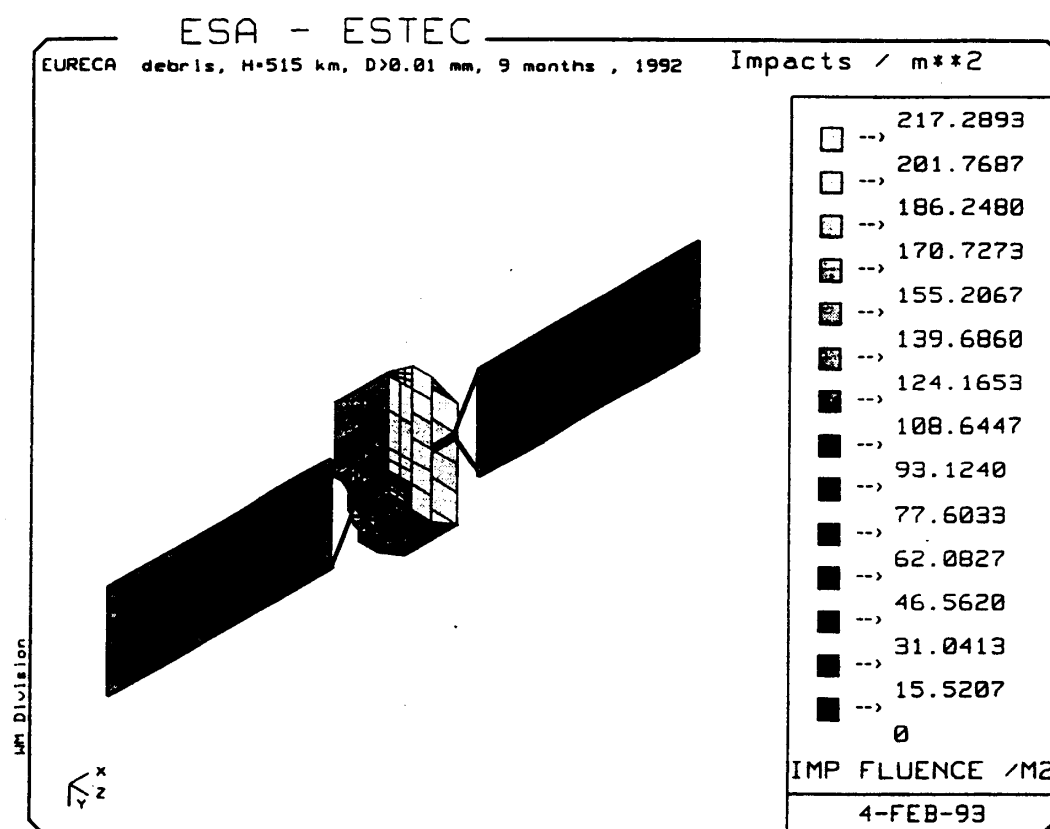
対策の一例として、運用期間が終了したINTELSAT通信衛星は、残りの推進剤を用いて、運用軌道よりも少なくとも150kmは高い墓場軌道に移動させる方針が紹介された。しかしその後の姿勢、高度、軌道の制御についてはまだ技術的課題が多い。人工衛星の燃料質量も増えるので基本設計も変更させねばならない。またロケットの各ステージや固体燃料の塵が多く残されていると思われる「移行軌道」は、LEOやGEOに交差する際に被害を及ぼすと考えられ、その軌道のカタログ化の必要性も指摘された。

## 4. デブリ会議・共同宣言

最終日に円卓会議が開催され、この会議の総括として以下の共同宣言が採択された。

(1) レーダーと光学望遠鏡による地上観測の結果、直ちに危険を及ぼすことは確率的に低いですが、約7000の物体が地球近傍に存在することが確認された。しかし有人・無人宇宙活動へのデブリの脅威を安全範囲に抑えるには、適切な対策を今から講じなければならない。長期的視点に立って最も対策が必要な高度は、既に多くの人工衛星が利用している900-1500kmのLEOと36000kmのGEOである（第11図）。

(2) 既に存在しているデブリの除去は、技術的にも経済的にも現実的ではない。従ってデブリ対策の中心は、新たなデブリ発生の防止でなくてはな



第11図 カタログ化された人工物体の高度、黄緯を関数とした分布。（提供:ESA）

らない。使用済みロケット上部ステージの燃料の放出による爆発防止や、運用が終了した人工衛星のGEOから墓場軌道への移動等、幾つかの手段が検討されている。

(3) スペースデブリ問題は、国際協力なくして効果的な解決は不可能である。1987年以後、この問題に関する二国間協議が宇宙機関の間で行われてきた。このデブリ会議を機に、米、ロ、欧、日を中心とした初の多国間協議が開かれ、今後の協力強化を確認した。

こうして時代のニーズを受けた初のスペースデブリ国際会議は好評のうちに閉幕した。閉幕に当たって、ESAは二年後には各分野の新しい成果を持ち寄った第二回のデブリ会議を開催したいと発表した。

## 5. 惑星科学とデブリ研究の関連

デブリ会議の全貌の概略は以上で終わる。ここでデブリ研究は惑星科学研究とその関連技術にどのような利益をもたらすのか考えてみたい。

まず地上からの光学とレーダーの観測網は、流星物質の探知や地球近傍の小天体の発見・追跡にも利用できる。赤外線によるデブリ観測も元来は黄道光の観測の応用である。

また宇宙空間で実験衛星に衝突してくる微粒子はメテオロイドとデブリが混合している。現在それぞれの衝突物の起源は、地球に回収した後の化学分析に依らねば分からない。その分析方法は成層圏、海底泥、極地氷床から摘出される宇宙固体微粒子の手段を踏襲している。宇宙空間での非破壊捕集は、地球表面の各収集場所が持つ試料の選別効果（サイズ、鮮度、化学・物理的変成等）がなく、最も母体の情報を残した試料が得られる。惑星科学者はそこにメテオロイドを発見して喜び、宇宙開発のエンジニアはスペースデブリを確認し

て納得する違いしかない。つまり宇宙での微粒子の直接観測・捕集実験は、一つの手法で科学とエンジニアリング双方のニーズを満たすことが出来る。副次的には研究開発費が二つのチャンネルから期待できるとも言えよう。さらに連続観測によって特定の流星群を超源とする衝突を発見し、そのメテオロイドを捕獲・回収できれば、地球にしながらにして母彗星の成分についての知見を得ることが出来る。これは小惑星や彗星、隕石の諸研究に刺激を与え、将来の小天体探査ミッションの基礎研究としても有益であろう。

さらに太陽系の進化を解明する上で重要な物理現象である超高速衝突の研究にとっては、実際の宇宙空間でのデータが豊富に獲得できる。宇宙での衝突痕を、地上実験やコンピューター・シミュレーションと比較することで、超高速衝突の物理への理解がより正確になるだろう。

## 6. 終わりに—環境問題としてのスペースデブリ—

スペースデブリは人類が直面しつつある「宇宙環境問題」の一例である。今世紀の人類は地球上の環境問題に直面して、被害が顕在化してからの環境改善・保全がいかに困難であるかを学んだ。デブリについても同様に、今から長期的な対策を立てなければ、来世紀初頭にはあらゆる宇宙活動が被害を被ることになるだろう。例えば、ようやく修理を終えて本来の性能を回復したHSTや将来の宇宙ステーション・アルファ等、天文学・宇宙科学のための軌道上施設は暴露面積よりも大きく、運用期間も長い。これらがデブリの被害を受けることは先のオリンパス衛星よりも確率的に高い。

またデブリは国際的かつ学際的な協同なくしては解決が望めない点で地球上の環境破壊に類似している。従って宇宙開発先進国は、自らの経済利

益の確保という狭い立場に留まらず、外宇宙条約に記された「全人類の共有財産」としての宇宙環境の保護という認識に立って、この問題に取り組むべきだろう。我々惑星科学を志す者も、宇宙を研究対象にしている立場から、積極的な貢献をすべきではなかろうか。

## 参考文献

- [1] McDonnell, J. A. M., McBride, N., Green, S.F., Zarnecki, J. C. and Taylor, A., 1993 : The Olympus Satellite Anomaly : Hypervelocity Impact Effects and Meteoroid Collision Assessment. Contract Study Report to ESA and British Aerospace.
- [2] Kessler, D., 1991 : Orbital environment for spacecraft in Low Earth Orbit. *J. Spacecraft and Rockets*, 28, No.3.
- [3] Levin, G. M., 1993 : An overview of the NASA orbital debris program plan. *Proc. First European Conf. Space Debris*, ESA-SD-01, 7-13.
- [4] Utkin, V.F., Lukyashchenko, V. I., Dolgih, V. N., Emelyanov, V. A., Yakovlev, M.V and Krasnov, A. B., 1993 : The state-of-the-art in research of technogenic space debris in Russia : Proposals for international cooperation. *Proc. First European Conf. Space Debris*, ESA-SD-01, 15-18.
- [5] 日本宇宙航空学会・スペースデブリ研究会編 (戸田勲委員長), 1993: スペースデブリに対する宇宙機と軌道環境の保全に関する検討 (その2). 宇宙開発 事業团委託業務成果報告書, MRC92-0215, 496 ページ.
- [6] Zarnecki, J. C. and Computing Laboratory and Unit for Space Sciences, University of Kent at Canterbury, 1990 : Space Debris Database DISCOS Final Report. Contract Study Report to ESA, 8173 / 89 / D / MD.
- [7] Hertel, Jr., E. S., 1993 : Simulation of orbital debris impacts on bumper shields. *Proc. First European Conf. Space Debris*, ESA-SD-01, 413-418.
- [8] Singer, S. F., 1993 : Orbiting particle clouds- Properties, prevention and protection. *Proc. First European Conf. Space Debris*, ESA-SD-01, 143-146.
- [9] Drolshagen, G., 1993 : Meteoroid / debris impact analysis application to LDEF, EuReCa and Columbus. *Proc. First European Conf. Space Debris*, ESA-SD-01, 515-522.