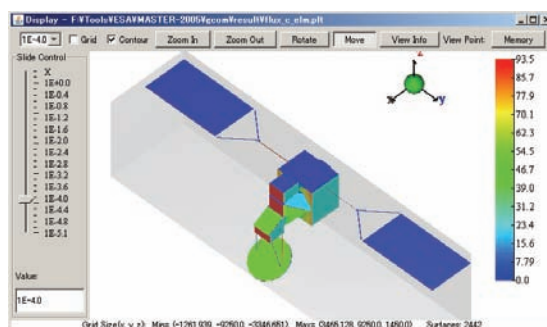


デブリ衝突解析について

○河本聡美、東出真澄（JAXA 研究開発本部未踏技術研究センター）

近年デブリの増加により、デブリ衝突による宇宙機の損傷リスクはすでに無視できないレベルに達している。JAXA 研究開発本部未踏技術研究センターでは、デブリモデル・解析研究の一つとして、宇宙機の形状、姿勢も考慮して各部位への衝突率、損傷発生確率を評価するための「デブリ衝突損傷解析ツール」(図)を開発し、JAXA プロジェクトに提供、支援している。本ツールは、宇宙機の開発時にデブリ衝突損傷発生確率を考慮して衛星構造や重要機器の配置を検討したり、流星群通過時などの損傷リスクを低減するための宇宙機の姿勢変更について検討することができる。また、デブリ発生防止標準の適合を支援するための「デブリ発生防止標準支援ツール」はデブリ衝突確率の簡易解析の他、宇宙機の軌道上寿命や地上落下溶融解析の簡易評価等が可能なツールであり、JAXA プロジェクトの他、JAXA 外部にも提供されている。本講演ではこれらツールについて紹介する。



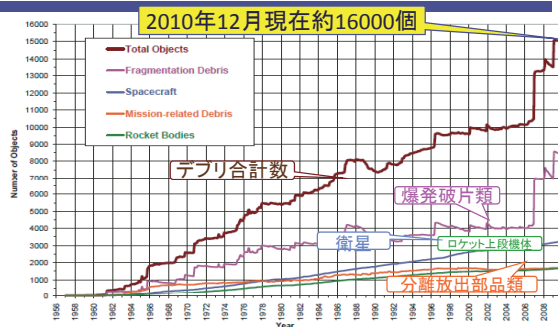
デブリ衝突解析について

○河本聡美、東出真澄
(JAXA研究開発本部未踏技術研究センター)

第4回スペースデブリワークショップ 2010.12.17

JAXA 背景

- ◆ デブリ衝突による損傷リスクは、特に低軌道ではすでに無視できないレベルに達している
- ◆ 1mm以下のデブリでも、場所によってはミッションに影響を及ぼす
- ◆ 防御設計が必要



カタログ化物体数の変化 NASA

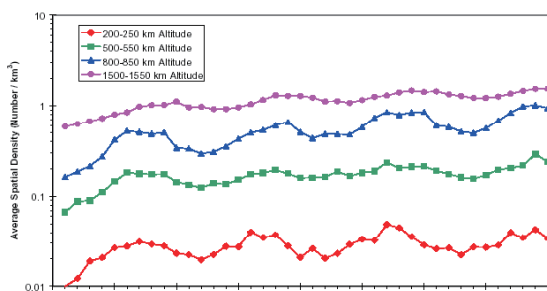
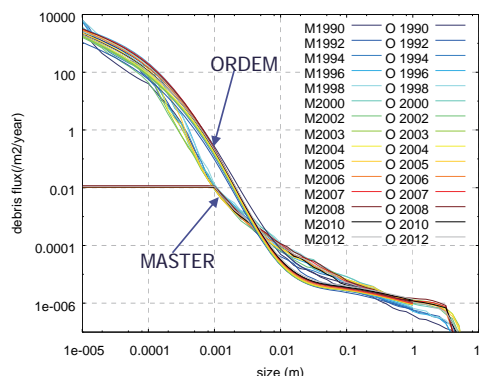


Figure 4.5-10. The ORDEM2000 spatial density variation between 1991 and 2030 for debris >100 μm in size.



(補足)

JAXA デブリ衝突が与える被害と衝突頻度

表 衝突デブリサイズと衝突被害

衝突デブリ寸法	0.1 mm	0.1~1cm	1~10cm	> 10cm
衛星の被る被害	太陽電池セルの損傷等	ミッション能力の部分的喪失	致命的な損傷 (全壊)	完全なる破壊
衝突頻度 (高度700km、20m²で10年寿命の低軌道衛星)	25680 個	1.9 個	0.015 個	0.0012 個

表 シャトルミッション関係の損傷限界デブリサイズ

被害の程度	貫通限界デブリ径	発生頻度 (高度700kmと仮定した場合)
オービターの窓ガラスの交換	0.04mm	多数
宇宙服の貫通	0.1mm	0.015 個/時間/m²
オービターの放熱パイプの貫通	0.5mm	0.0032 個/週間/m²
オービターの翼のリーディングエッジの貫通	1.0mm	0.00018 個/週間/m²
オービターの熱保護システムタイルの貫通	3~5mm	0.000012 個/週間/m²
オービターの搭乗員キャビンへの貫通	5.0mm	0.0000046 個/週間/m²
ペイロードベイの損傷	1~10mm	0.00018 個/週間/m²

出典: Space Shuttle Program Pre-Flight Meteoroid/Orbital Debris Risk and Post-Flight Damage Assessments, George M Levin, NASA, Feb. 1997



リスク管理マトリクスによる低軌道衝突リスク評価

		衝突の影響度			
		軽微: 機能劣化	局所的: 機能喪失	重大: 全壊	破局的: 爆発的破壊
衝突の可能性(回数/寿命期間5年)	1以上	0.1mm級デブリ衝突⇒ 防御設計等 で対処			デブリ衝突リスク解析が不可欠
	10 ⁻¹		1mm級デブリ衝突⇒ 防御設計等 で対処		
	10 ⁻²			1cm級デブリ衝突⇒ 観測不能、防御不能	
	10 ⁻³				10cm級デブリ衝突⇒ 接近監視、回避操作

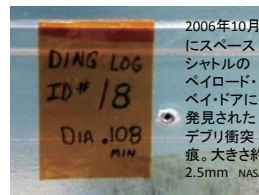
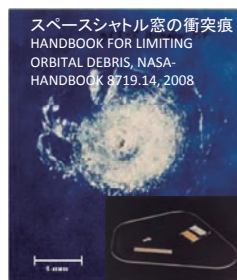
注: 衝突リスク(衝突で被害を受けること)は、(衝突の可能性) × (衝突の影響度) で評価される。

ここでは、20m²の大型衛星の(重大)な被害を10⁻³以下未満に抑えることを基準に評価している。



微小デブリの衝突事例

- ISSやスペースシャトルの衝突痕
- スペースシャトルの窓
 - 0.04mm以上のデブリ衝突で交換
 - 1992~2000年までの43フライトで76枚交換
 - そのうちデブリ32、メテオロイド17、不明27
- HSTのデブリ衝突痕
 - 1993年からの暴露で2.2 × 0.8mのエリアに約20、最大1cmの衝突痕
 - STS-61で観測されたハイゲインアンテナの1.9 × 1.7cmの衝突痕



↑ハッブル宇宙望遠鏡ラジエータの衝突痕 NASA ODOQN13-3

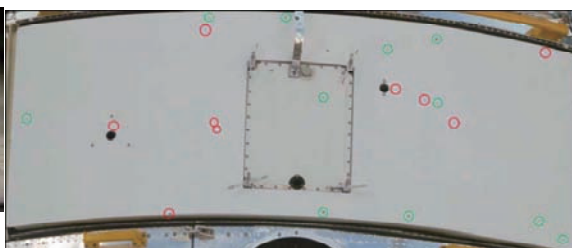


Figure 2. Large, visible MMOD impacts on the WFOC2 radiator. The largest damage area is about 1 cm across. Red circles: features identified from the 2002 HST Servicing Mission 3B image survey. Green circles: new features identified from the 2009 HST Servicing Mission 4 image survey. (NASA Photos 125400695)



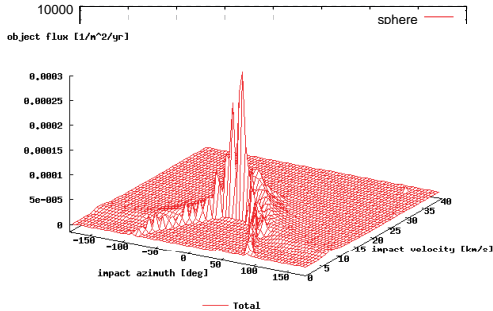
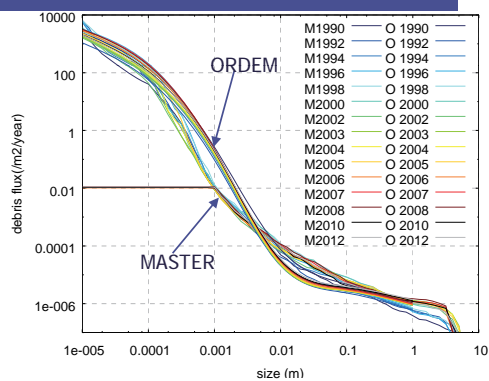
デブリ・メテオロイド衝突可能性のある不具合例

- ◆ 微小デブリ・メテオロイド衝突が原因である可能性のある不具合例
 - 2007.5 欧気象衛星Meteosat-8
軌道が突然変化し東西方向の位置制御スラスターの1つが破損
 - 2006.3 露通信衛星Express-AM11
突然外的な力が加わり、熱制御システムが減圧、冷却液が噴出。衛星の姿勢が失われ機能不全に
 - 2009.6 すざくASTRO-E2
CCDに不具合。微小デブリ・メテオロイドが衝突した可能性がある
 - 2003.10 みどり2 ADEOS-II
太陽電池パドルのハーネス破断により運用を廃棄。微粒子衝突起源の暗電流により回路が故障した可能性がある
 - 1994.9 MSTI-2
通信途絶。ワイヤーにデブリが衝突し、ショートしたのではないかと推測されている
 - 1993.8 欧通信実験衛星Olympus
ペルセウス流星群極大期に姿勢制御系が故障して運用を廃棄
- ◆ その他
 - デブリの軌道周期が変化して爆発、破片を放出などデブリ衝突が疑われる事例は近年急増中



デブリ環境モデルについて

- ◆ ESAおよびNASAのデブリモデルが使用可能
- ◆ ESAのデブリモデルMASTER2005
 - 衝突速度、方向、デブリ種類などの詳細なデータを出力できるが、2005年5月1日以降の1mm以下の解析はできない
 - 近くMASTER2009が公開予定
- ◆ NASAのデブリモデルORDEM2000
 - 2005年以降でも1mm以下の解析ができるが、詳細情報が出力できない
 - 来年春頃にはORDEM2010が公開予定
- ◆ ORDEM2000の数百 μm ～数mmのフラックスはMASTER2005に比べ大きい
 - 環境標準では最大フラックスを出力するモデルを使うことを推奨
- ◆ 衝突でも角度、速度が異なるため、一律に衝突頻度だけで評価はできない

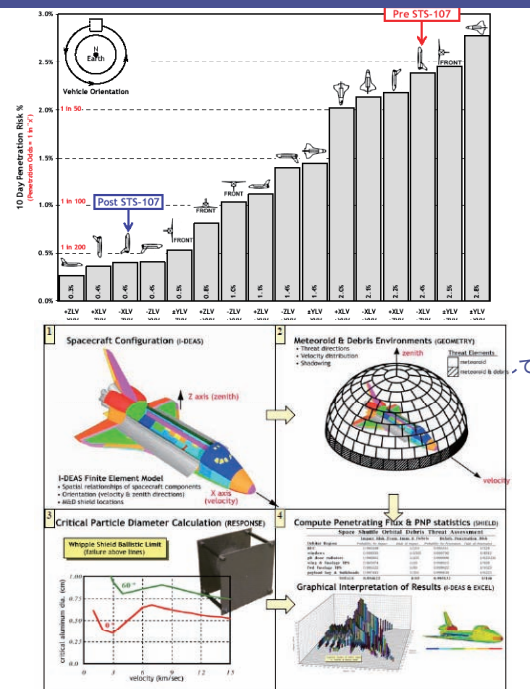


デブリ衝突角度、速度 (MASTER2005)



デブリ衝突損傷リスク解析

- ◆ 宇宙機形状、隠蔽、衝突角度・速度等を考慮した「デブリ衝突損傷リスク解析ツール (TURANDOT, Tactical Utility for Rapid ANalysis of Debris on Orbit Terrestrial)」を開発
- ◆ 隠蔽、速度・角度を考慮しないデブリフラックスのみでの評価は過大評価の恐れ
- ◆ 欧米はデブリ防御設計、宇宙機の姿勢変更などデブリ防御運用をすでに実施しているが、解析ツールは非公開



BUMPER-IIIによる解析例(NASA)

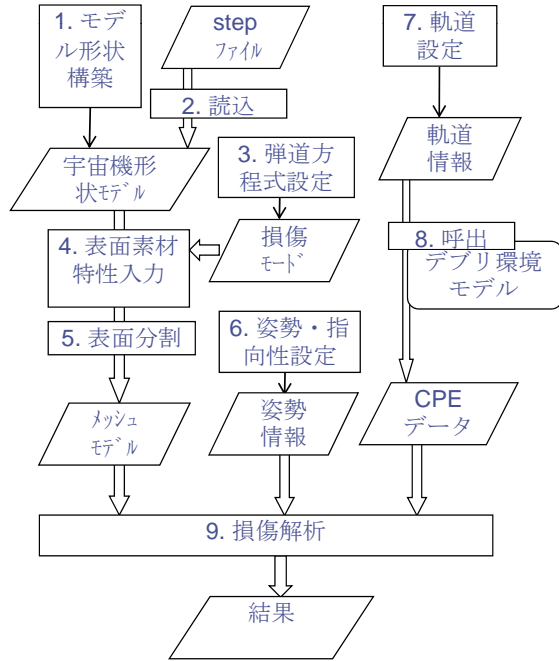


損傷解析ツールの使用例

- ◆ 宇宙機の開発時に、デブリ衝突損傷評価を実施して構造や配置を検討する
 - 損傷発生確率をより正確に評価できる
 - クリティカル機器の配置、防御構造などのデブリ防御対策の有効性について、重量コスト等と比較しつつ定量的な評価ができる
- ◆ 運用を開始した後に、損傷リスクを低減するための宇宙機の姿勢変更について検討する
 - スペースシャトルは同等ツールを使用してデブリ損傷確率の低い姿勢に変更。ハッブル宇宙望遠鏡は流星群通過時に姿勢を変更
- ◆ 宇宙機不具合に、損傷確率がどのくらいあったか事後解析し、原因究明に役立つ

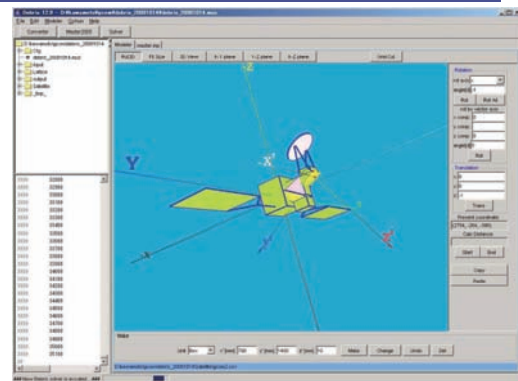
JAXA 解析ツールの流れ

1. 三次元モデル構築 あるいは
2. STEP形式ファイルのインポート
3. 損傷モード、弾道方程式の設定
 - 既存の弾道方程式を読みあるいは新規設定が可能
4. 表面素材特性入力
 - 宇宙機各部位に損傷モードの関連付け
5. 表面分割
6. 姿勢・指向性設定 (地球指向、慣性指向、太陽指向から選択)
7. 軌道・時期設定
8. MASTER2005 実行、CPE データを出力
9. 損傷解析 (CPEデータを解析し、各メッシュへの衝突頻度、損傷発生確率を、他の部位による隠蔽も考慮しながら積分)

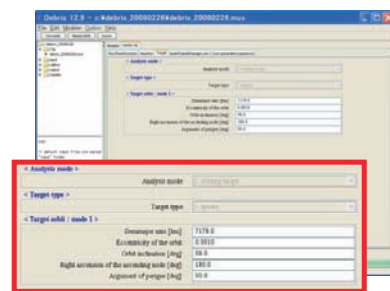


JAXA モデル構築およびパラメータ設定

- ◆ 宇宙機形状モデル構築
 - GUIでモデルを構築あるいはSTEP形式で読み込み
 - ◆ 正角錐/柱、直方体、球、パッチの作成が可能
 - ◆ 作成後モデルの非正角錐/柱への修正も可能
- ◆ 軌道、姿勢、エポック、デブリモデル等の解析パラメータを設定
 - デブリモデルの選択、補正の設定が可能



宇宙機形状モデル構築例



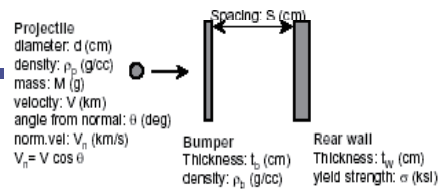
軌道設定画面



損傷発生 の 判定

- ◆ デブリ衝突損傷はある損傷モードを引き起こすデブリのサイズを表す式(弾道方程式)で判定される

- デブリ密度、速度、衝突角度、および宇宙機材料特性値の関数
- 損傷モードとは、構造の貫通/非貫通、ハーネス切断、深さp[mm]以上のクレーターの発生、など

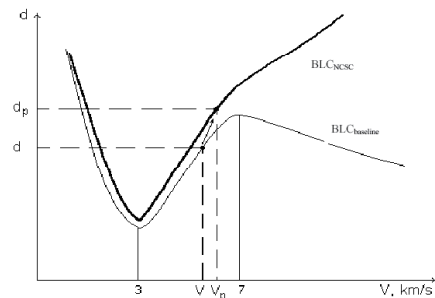


for $V_n \geq 7$,
 $d_c = 3.919 t_w^{2/3} S^{1/3} \rho_p^{-1/3} \rho_b^{-1/9} (\sigma/70)^{1/3} (V \cos \theta)^{2/3}$ (1)

for $3 < V_n < 7$,
 $d_c = 1.071 t_w^{2/3} S^{1/3} \rho_p^{-1/3} \rho_b^{-1/9} (\sigma/70)^{1/3} (V \cos \theta / 4 - 0.75) + ((t_w (\sigma/40)^{0.5} + t_b) / (1.248 \rho_p^{0.5} \cos \theta))^{1/8} (1.75 - V \cos \theta / 4)$ (2)

for $V_n \leq 3$,
 $d_c = ((t_w (\sigma/40)^{0.5} + t_b) / (0.6 (\cos \theta)^{5/3} \rho_p^{0.5} \sqrt{2/3})^{1/8} (1.75 - V \cos \theta / 4)$ (3)

for $\theta \geq 65^\circ$, $d_c = d_c$ (at $\theta = 65^\circ$) (4)



Whipple bumperの弾道方程式
 国際機関間デブリ調整会議 (IADC) のプロテクションマニュアル



損傷モード、弾道方程式の設定

- ◆ 弾道方程式を選択あるいは新規設定
 - ◆ 変数、パラメータを登録しFortranで記述
 - ◆ グラフで確認が可能

損傷モードはタブで管理

損傷モード関数中で使用する固定パラメータ

損傷モード関数中で使用するユーザー変数

方程式表示

入力欄。引用文献、出処など。

関数本体プログラム記述欄
 左欄で定義した変数を使う。

JAXA 損傷モードマッピング

◆ 宇宙機モデルに損傷モードをマッピング

損傷モードマッピング
登録した損傷モードの色に応じて色分けされる。複数の損傷モードがある場合には黒で表示

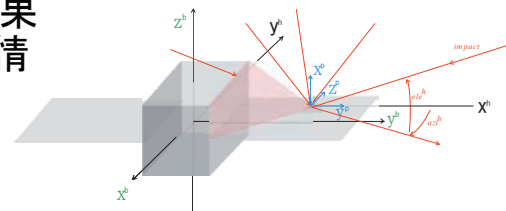
損傷モードを選択

物体プロパティおよび損傷モード表示画面

クリックして半透明になった部分の損傷モードを表示(この図ではSAP)

JAXA 損傷発生確率の解析

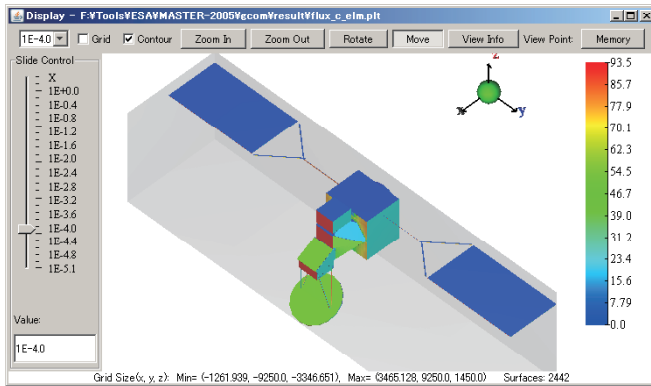
- ◆ ESAのデブリモデルMASTER2005のCell Passage Events (CPEs) ダンプ機能を使用
 - ◆ デブリの種類、サイズ、衝突速度、方向などの全情報が含まれるため、それらを積分
- ◆ すべてのデブリ衝突イベントについて、他の部位による隠蔽を考慮して各部位への衝突/非衝突を判定
- ◆ 損傷モードが発生するか否かを判定して積分することにより、損傷発生確率を計算
- ◆ NASAのデブリモデルORDEM2000および最近の中国の破碎実験等による環境悪化分を考慮して結果を補正。補正デブリモデル等の情報を表示



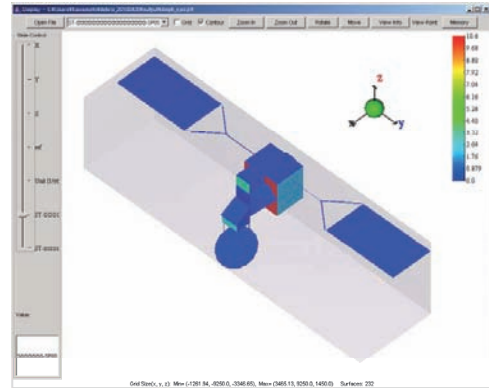


損傷解析ツールの出力(1)

- ◆ 3次元モデルの各部位、各機器の損傷リスクを、確率に応じて色分けして表示



衝突頻度解析結果例



損傷発生解析結果例(構造の貫通)



損傷解析ツールの出力(2)

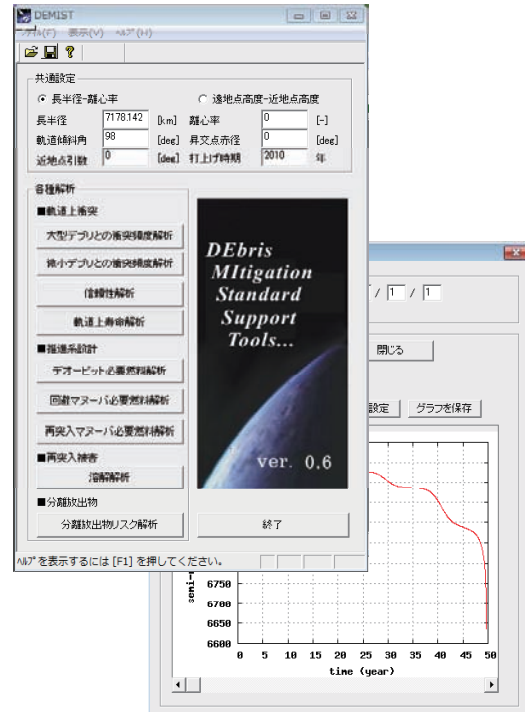
- ◆ 各構成、軌道、姿勢における、全損、機能Nの喪失、機器Nの損傷モード1発生確率を解析可能

機器名称	損傷モード	機能の喪失				機器喪失	全損	発生確率
		構造	電源	推進系	...			
ハーネス	切断		○			○	○	0.0003
	放電		○			○		0.0006
	...							
...						○		
機器1の喪失								0.0012
機能1の喪失								0.0025
...								
全損								0.003



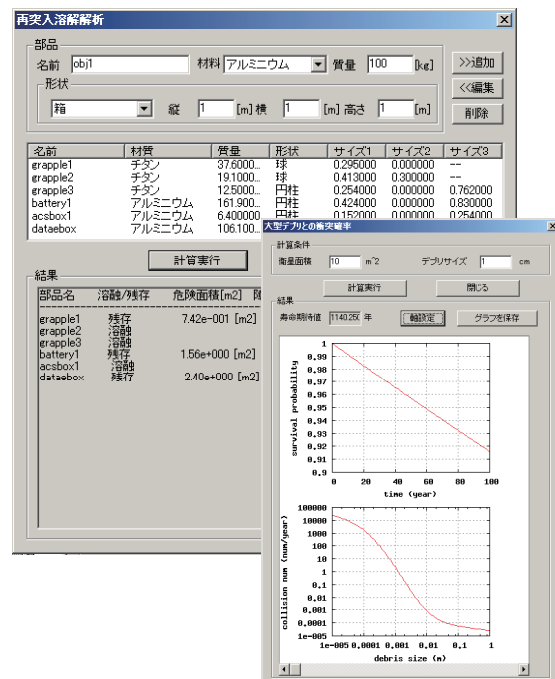
デブリ発生防止標準支援ツール

- ◆ デブリ発生防止標準支援ツールDEMIST Ver.0.6配布中
- ◆ 目的
 - JAXAデブリ発生防止標準JMR-003との適合性を確認
 - デブリリスクの簡易評価
- ◆ デブリフラックスとしてNASAのORDEM2000を使用
- ◆ Microsoft Windows 2000/XPで動くGUIを持つプログラムを配布



デブリ発生防止標準支援ツール

- ◆ 以下の解析が可能
 1. 大型デブリ衝突頻度解析
 2. 微小デブリ衝突頻度解析
 3. 全体としての信頼度解析
 4. 軌道上寿命(滞在時間)解析
 5. デオービット(・リオービット)必要燃料解析
 6. 回避マヌーバ必要燃料解析
 7. 再突入マヌーバ必要燃料解析
 8. 再突入溶解解析
 9. 分離放出物リスク解析



 **まとめ**

- ◆ 微小デブリ衝突による損傷は無視できないレベルに達しており、デブリ防御設計が必要
- ◆ 宇宙機形状、隠蔽等を考慮して、デブリ衝突頻度や損傷の発生確率を評価可能な「衝突損傷解析ツール(*TURANDOT*)」を開発、プロジェクト支援を開始している
- ◆ デブリ発生防止標準 JMR-003との適合性評価のための「デブリ発生防止標準支援ツール(*DEMIST*)」も配布中