

外部汚染環境解析ソフトウェアの開発

Development of Japanese Spacecraft Induced Contamination Environment Analysis Software(J-SPICE)

マテリアル・機構技術グループ
(Mechanical and Materials Engineering Group)

矢野 敬一、馬場 尚子
Keiichi Yano, Naoko Baba

Abstract

Outgassed contaminants, emitted from a spacecraft and stick to sensitive surfaces, may give adverse effects on thermal characteristics and sensor performance. A contamination analytical software was developed as a powerful tool for contamination management. It estimates the magnitude of contamination on spacecraft surfaces based on mathematical models, and the analytical results can be utilized for the contamination management of spacecraft surfaces. In this report, the development status of the Japanese Spacecraft Induced Contamination Environment Analysis Software(J-SPICE) is described. The thruster plume sticking analytical function was added to the J-SPICE, analytical results of the J-SPICE was roughly corresponding to reliable analytical results.

1. はじめに

軌道上の宇宙機材料から放出されるアウトガスやスラスタ噴射によるスラスタプルームが宇宙機表面に付着すると、熱特性やセンサ性能に悪影響を与える。しかし、国内ではこれまで設計時に宇宙機の汚染状況を予測した例はほとんど無く、解析する場合でもツールは海外製に頼っていた。そこで、宇宙機表面に付着する汚染物質の付着量及び付着率の予測解析を行うことにより、宇宙機的设计段階において材料選定、温度制御、機器配置、汚染回避等の検討を実現する外部汚染環境解析ソフトウェア(J-SPICE:Japanese Spacecraft Induced Contamination Environment Analysis Software)の開発を進めてきた。ここではJ-SPICEの開発状況及び宇宙機設計への適用可能性について報告する。

2. 開発の概要

宇宙機に悪い影響を与える汚染物質の宇宙機表面への付着現象は、宇宙機を構成している機器形状、使用されている材料の種類、放出面及び付着面の温度により異なってくる。J-SPICEでは、これらの情報を入力パラメータとして汚染解析を行い、付着量及び付着率を出力する。これまでに、宇宙機表面からのアウトガスの放出、輸送、付着の各現象をモデル化して宇宙機表面への汚染付着解析を行い、アウトガスレート試験結果との比較評価を実施してきた。以下、これまでに実施したアウトガスレート試験による検証結果の概要と、平成16年度の研究概要について述べる。

2.1 アウトガスレート試験による検証

平成15年度までに実施したアウトガスレート試験のシュラウド内部の概要をFigure 1に示す。同図の水晶振動子(QCM:Quartz Crystal Microbalance)のうちQCM2及びQCM3を -40°C の等温に設定し、試料セルとQCM2及びQCM3の位置関係が異なるように設置した。試験は、シュラウド冷却有り・無しの場合を実施した。Table 1に示したようにシ

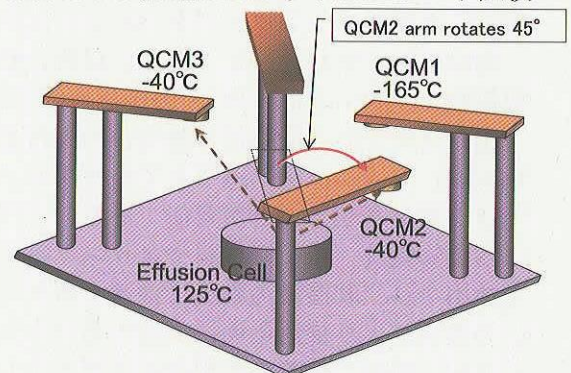


Figure 1 Configuration of ground test

ユラウドを冷却しない場合の QCM への付着量は、シュラウドからの多重反射の寄与が無視できないほど大きくなること、J-SPICE の付着レート解析では 5 次反射まで考慮した場合、試験結果より低い値となること等がわかった。解析結果では反射回数に伴い付着レート比が増加しており、反射回数の増加に伴い試験結果に近づくことと推測される。

Table 1 Ratio of sticking rate(QCM2/QCM3)

	Ratio of sticking rate	Condition
Measured	0.5	Cool(Shroud)
	0.6-0.7	No Cool(Shroud)
Estimated	0.39	Direct flux
	0.44	Direct flux + 5 order multiple reflection

2.2 平成 16 年度の研究概要

(1) スラスタプルームによる汚染

宇宙機のスラスタ噴射による宇宙機表面へのプルーム付着現象をモデル化し、スラスタプルーム解析機能として J-SPICE に追加した。追加した機能は、主に人工衛星で使用されている一液式スラスタ及び ISS や Progress 等で使用されている二液式スラスタをモデル化したプルーム付着解析機能である。この解析結果を宇宙機の設計開発において実績のある Boeing の解析結果と比較し、評価を行った。

(2) Boeing の解析結果との比較評価

宇宙機の設計開発に実績のある Boeing の解析結果との比較評価を実施していなかったため、平成 16 年度は、J-SPICE の検証を Boeing の解析結果を用いて行った。アウトガスモデルに関しては、ISS/JEM (International Space Station / Japanese Experiment Module) の使用材料のアウトガスレート計算を行い、直接フラックス・リターンフラックスについては、汚染解析を行う宇宙機形状として ISS/JEM を使用し、汚染付着解析を実施した。また、二液式スラスタプルーム付着解析は、ISS 米国太陽電池アレイ (左舷・内側・後方 (PIA)) の形状を使用して解析を行った。これらの解析結果と Boeing の解析結果を比較し、評価を実施した。

3. ソフトウェアの概要

J-SPICE は、宇宙機の形状、放出面及び付着面の温度、材料の種類、軌道、被汚染面の汚染源から見た視野を表す形態係数を入力情報として汚染解析を行い、付着量及び付着率を出力する。

J-SPICE で使用する宇宙機形状モデルは、NEVADA 形式のフォーマットデータを使用しており、このフォーマットは 8 種類の基本形状が使用可能である。形態係数は、宇宙機形状モデルを入力データとして Thermal Desktop ソフトウェアを用いて算出する。J-SPICE の主要スペックおよび解析に必要なソフトウェアを Table 2 に示す。

Table 2 に示した形状、温度、材料、軌道、形態係数を J-SPICE に入力し、汚染付着解析を行う。

出力結果である汚染付着量及び汚染付着率は、Thermal Desktop ソフトウェアを使用し、グラフィック表示させることが可能である。

汚染物質は、宇宙機材料やスラスタ噴射によって放出され、直接被汚染面に到達するケース、宇宙機表面との反射を繰り返して到達するケース、大気との衝突により被汚染面に到達するケース等の輸送経路を経て被汚染面に付着する。J-SPICE は、これら放出、輸送、付着の各現象をモデル化しており、各現象について以下に示す。

Table 2 J-SPICE Information

Software	Thermal Desktop / AutoCAD
Element numbers	5000 (Maximum)
Input parameters	Shape Temperature Material Orbit / Atmospheric density View factor
Shape elements	Polygon / Rectangle / Sphere / Disk Ellipse / Cylinder / Cone / Paraboloid
Shape model	NEVADA
Analysis function	Production model - Outgassing model - Thruster plume model Transport model - Direct flux - Multiple reflections - Return flux - Collisions Sticking model
Analysis results	Condensable outgassed mass [g/cm ²] Condensable outgassing rate [g/cm ² /sec]

- ①放出
 - ・材料からのアウトガス
 - ・スラスタ噴射によるスラスタプルーム
- ②輸送
 - ・直接フラックス : 直線的な汚染物質の輸送
 - ・多重反射 : 宇宙機表面での反射
 - ・リターンフラックス : 自然大気と汚染物質の衝突散乱
 - ・自己散乱 : 汚染物質間の衝突散乱
- ③付着
 - ・アウトガス及びスラスタプルームの付着

4. 成果の概要

4.1 アウトガスによる汚染付着解析

J-SPICE のアウトガスモデルとして、3 種類のモデルについて比較検討を行った。

- ①べき乗モデル : $M(t)=a \cdot t^b+c$
 - ②自然対数モデル : $M(t)=a \cdot \ln(t)+c$
 - ③指数モデル : $M(t)=a \cdot [1-\exp(-t/b)]+c$
- M : t=0 からのアウトガス量[g/cm²]
 a,b,c : 材料固有のモデル定数
 t : 時間[sec]

Boeing はアウトガスモデルとして自然対数モデルを採用している。同モデルを用いて解析結果の比較評価を行ったところ、Boeing の解析結果に概ね一致しており、J-SPICE によるアウトガスモデル化のは妥当性が確認できた。残差二乗和をアウトガスモデルのトレードオフの指標とすると、これまでと同様にべき乗モデルが他のモデルよりもアウトガスレート試験結果によく一致することが確認できた。

4.2 直接フラックスによる汚染付着解析

ISS/JEM に関する J-SPICE を用いた直接フラックス汚染付着解析結果を Figure 2 に示す。この解析結果を Boeing の解析結果と比較すると約 30%の差があるが、この差異は解析に用いた JEM 形状データの違いに起因するものと推測される。従って、J-SPICE と Boeing の解析結果は、概ね一致しており、この直接フラックスによる汚染付着解析は、人工衛星の汚染予測解析に適用可能と思われる。

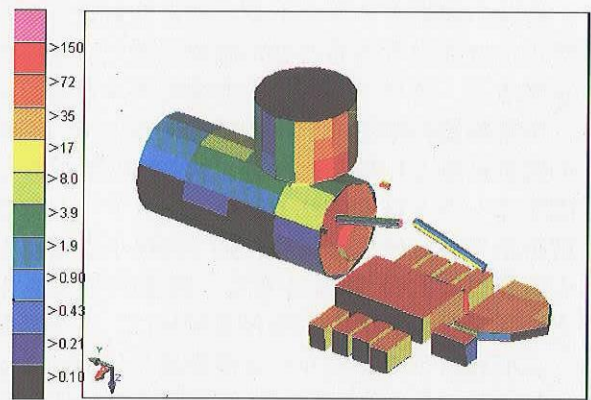


Figure 2 Results of direct flux analysis

4.3 リターンフラックスによる汚染付着解析

ISS/JEM に関する J-SPICE を用いたリターンフラックス汚染付着解析結果は、Boeing の解析結果（汚染解析ソフトウェア：NASAN2）と比較すると入力データの相違も含め、約 70%程小さな値になるが、Table 3 に示したように 1 年間の汚染付着量は、水分子の直径 (3.3 Å) より小さく、物理的な大差はないと推測される。

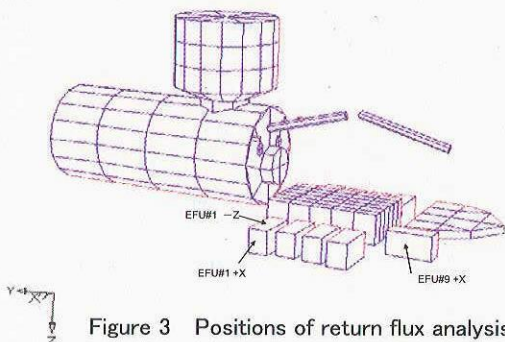


Figure 3 Positions of return flux analysis

Table 3 Results of return flux analysis

Sensitive Surface	J-SPICE	NASAN2	Difference
	[Å/year]	[Å/year]	[%]
	a	b	$\frac{b_{\text{average}} - a_{\text{average}}}{b_{\text{average}}}$
EF1 +X	0.20	0.51-0.67	67
EF1 -Z	0.10	0.23-0.30	63
EF9 +X	0.27	0.51-0.67	54

4.4 二液式スラスタプルームによる汚染付着解析

Figure 4 に示した ISS 米国太陽電池アレイ（左舷・内側・後方（PIA:Port-Inboard-Aft））の形状及びスラスタ位置の情報を用いて、二液式スラスタ（Progress）噴射による ISS 米国太陽電池アレイ（左舷・内側・後方（PIA））へのプルーム付着解析を実施した。J-SPICE による解析結果を Figure 5 に示す。この解析は直接フラックスのみを対象としているが、Boeing の解析結果とは良好な一致を示した。汚染付着量の大きいノードについては最大約 10%の差があったが、これは PV アレイの展開角度データの差異に起因するものと推測される。

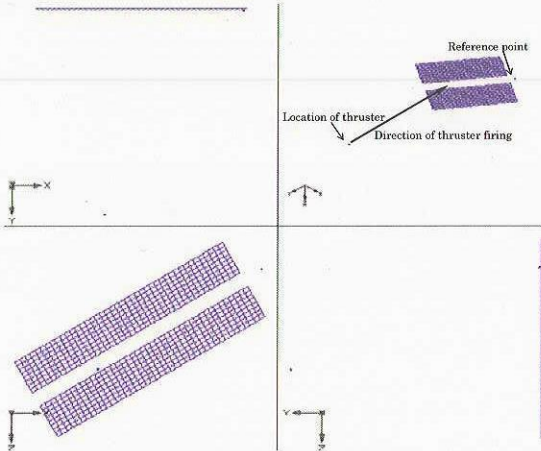


Figure 4 Position of PIA and thruster

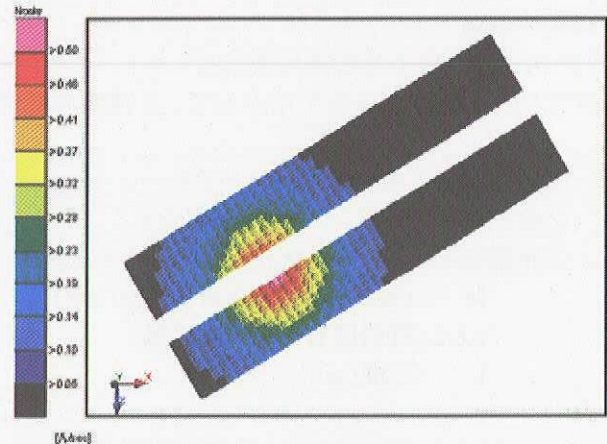


Figure 5 Results of bipropellant thruster plume deposition analysis

5. まとめ

今回の成果よりアウトガスの自然対数モデル解析結果は、Boeing の解析結果と概ね一致するため、モデル化は妥当であることが確認できた。これまでと同様な方法で残差二乗和を基に各モデルの定数を決定すると、アウトガスのべき乗モデルが最もよく一致した。

汚染物質の輸送モデルの解析について、直接フラックスによるアウトガス汚染付着解析結果を Boeing の解析結果と比較した場合、約 30%の差があるが、この差異は解析に用いた JEM 形状データの違いに起因するものと推測される。また、リターンフラックスによるアウトガス汚染付着解析結果を Boeing の解析結果と比較した場合、約 70%程小さな値となるが、解析結果である 1 年間の汚染付着量は、水分子の直径 (3.3 Å) より小さく、物理的な大差はないと推測される。このことから直接フラックス及びリターンフラックスの汚染付着解析は、人工衛星の汚染付着解析に適用可能である。

二液式スラスタプルーム解析結果は、Boeing の解析結果に対して汚染付着量の大きいノードについては最大約 10%の差があったが、良好な一致を示した。

以上のことから J-SPICE は、人工衛星の開発設計においてアウトガスおよびスラスタプルームの汚染付着解析に適用が可能である。