

JIEDI ツール開発上の課題と 2007 年度の活動方針

船 木 一 幸*, 中 野 正 勝**, 中 山 宜 典***, 梶 村 好 宏****

Technical Issues Associated with the Development of the JIEDI Tool and Plan for 2007

By

kkoh FUNAKI*, Masakatsu NAKANO**, Yoshinori NAKAYAMA***,
and Yoshihiro KAJIMURA****

Abstract: A two-year plan for the development of the first stage of the JIEDI tool (JAXA Ion Engine Development Initiative 1, JIEDI-1) is proposed. In order to circumvent the heavy calculation cost associated with the three-dimensional analysis of multiple holes, JIEDI-1 focuses on the analysis of only one pair of grid holes. Aside from some new code developments and related research activities by the workshop members, JAXA will support the grid erosion evaluation code, which was developed by Nakano, for the purpose 1) to share a recipe how to produce a grid erosion code, 2) to evaluate the accuracy of the code, and 3) to check the effect of input parameters such as plasma characteristics, neutral particle density, and sputtering/deposition yield. Related technical issues, which are summarized in this paper, are also discussed in the next workshop in January 2008 to complete the development of the first generation of JIEDI tool (JIEDI-1 tool) in 2009.

Key words: Ion Engine, Grid Erosion Analysis, $\mu 10$, JIEDI tool, Plan for 2007

1. はじめに

本稿は、2007年1月19日宇宙輸送シンポジウム期間中に開催されたJIEDIワークショップにおける3つのコメント(イオンエンジン開発者の立場から、コード開発者の立場から、そして、ツール整備の上で重要な解析メッシュ生成の立場からのコメント)、ならびに、オープンディスカッションにおける議論を整理して、2007年度のJIEDI活動方針をまとめるものである。

2. JIEDI ツールにもとめられるもの(イオンエンジン開発者サイドから)

イオンエンジンの開発は、ミッション要求を満たすように諸元設計・初期設計し(～BBM)、その作動について性能評価確認・実証を行う(～PM/PFM)ことによって進められる。イオンエンジンの推進性能・耐用寿命を大きく左右するグリッドシステムにおいては、

* ISAS/JAXA

** Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology

*** National Defense Academy

**** Kyushu University

- (1) 位置設定誤差：グリッドの平行ずれ・平行度ずれ，グリッド間距離等
- (2) 加工誤差：グリッド間距離，グリッド孔径・真円度・エッジ丸み・孔間距離等
- (3) プラズマ不均一性

等，イオンエンジン単体に付随する不可避な条件と，

- (4) 複数の作動条件（流量・電力等），およびその揺らぎ（リップル）
- (5) 作動による発生熱の影響
- (6) 宇宙環境条件と実験環境条件の相違（背景圧力・温度等）

等，作動に伴う条件を含め，多大な条件（ケース）に対して評価を行う必要がある。宇宙機への搭載においては高度な信頼性（ $3\sigma = 99.7\%$ 程度で性能保証。有効数字3桁以上で推進性能や耐用寿命を求めることではない）が要求されているため，グリッドシステムの長時間耐久性確認・実証には多大なコスト（時間・実験器材調達等）を要する。

JIEDI ツールが有意となるには，上記の条件を含めて解析できること，および上記のコストを軽減できること，の2つが求められる。開発期間の制約を考慮すれば，性能保証に寄与できる十分な精度，かつ1日1ケース以上の求解速度が求められよう。性能評価確認・実証段階で性能向上の指針を得るならば，JIEDI ツールにはさらに迅速に求解できることが求められる。また認定ツールとして，どのイオンエンジンの，どのグリッドシステムに対しても求解できること，さらにどの開発者においても利用できるようにユーザーフレンドリーなインターフェースを併せ持つことも求められよう。

しかしこのような JIEDI ツールを速やかに開発することは非常に困難である。したがって，上述の JIEDI ツールを最終達成目標（JIEDI-X）に据えながら，精度や求解速度を現段階における妥当レベルとした，第1段階のツール（JIEDI-1）を設定し開発していくことが必要であろう。計算機の計算速度向上は今後も進むと考えられるため，開発した JIEDI-1 は JIEDI-X の礎となるだけでなく，JIEDI-X 開発時にはイオンエンジングリッドシステムの初期設計ツールとして利用できるようになる。したがって JIEDI-1 の仕様決定に際しては，ツール利用者であるイオンエンジン開発者サイドとコード開発者との緊密な意見交換・調整が必要である。

3. JIEDI ツールへの期待（コード開発者サイドから）

コード開発者の持つ技術を提供し，イオンエンジン開発に役立つツールを創り出す場として，JIEDI ツールの開発に期待している。

ツール開発においては計算結果と実験値との比較が必要となる。実験値をそのものずばり再現できる計算結果が出るのが理想ではあるが，現実はそのようではなく，実験値と計算値との間のギャップを埋める作業が必要となる。そのためには

- グリッド形状
- プラズマ密度，中性粒子密度
- 衝突断面積，損耗率，再付着率

等の計算を行うために必要な入力データとともに，計算結果の検証のために

- 加速グリッド電流
- 損耗形状，損耗量

が必要になる。これらのデータがスムーズに利用可能となることに期待している。

また，JIEDI ツール開発では，イオンエンジンのグリッド耐久性性能評価に焦点を当てているが，イオンエンジン以外にも，電気推進の研究開発全般に使用可能な物性値データを整備するいい機会となる。例えば，

- 電荷交換衝突，弾性散乱等の衝突断面積
- スパッタ率，再付着率

などは，ホールスラスタなど他の電気推進機の開発においても重要なデータとなる。これらの物性値は，各研究者がそれぞれデータを探し出して用いているのが現状であり，様々なデータのうち妥当性が高いものを整備すれば今後の研究開発においてその利便性は図りしれない。

4. 解析メッシュ生成技術

4.1. 概要

JIEDI ツールの開発にあたり、イオンビーム軌道や、電荷交換、グリッド損耗などを模擬する物理モデルの開発に並んで、解析メッシュの生成も重要であると考えた。エンジニアリングツールとして、開発過程においてさまざまな形状のグリッドに対する解析メッシュを容易に生成することや、数値計算過程において、グリッドの損耗・堆積結果をメッシュに反映させ、計算メッシュのクオリティを保つ為に、メッシュを再生成することなどが求められる。本章では、初期の解析メッシュについて、メッシュ数やサイズ、局所的な粗密などのメッシュクオリティをコントロールすることに加え、メッシュ生成の簡易化、効率化、自動化などの要求を実現できるようなツール開発について記述する。

4.2. 要求仕様

JIEDI ツール開発の当面の方向性として、中野正勝氏の開発した解析コード（以降、中野コード）をベースに各研究者がブラッシュアップする方法を用いた開発が考えられている。これを受け、中野コードとの連成を行う為、コード内のメッシュに関連する部分を調査し、以下のような仕様のもとで、メッシュ生成ツールを開発する。

- ① 中野コードで使われている六面体メッシュ（ヘキサ）が生成可能であり、メッシュのテキスト情報が出力可能であること。
- ② 容易にメッシュサイズ、粗密などのクオリティがコントロール可能であること。
- ③ 中野コード内においてメッシュ生成（または再生成）に関連する部分の自動化が、バッチ処理、マクロなどを用いて可能であること。
- ④ 開発に当たっては、期間短縮の為、すでに市販されているメッシュ生成ツールを選定し、カスタマイズして中野コードとの連成を行うこと。

現在、市販のメッシュ生成ツールにおいて、自動、あるいは半自動で生成可能なツールのほとんどが三角錐（テトラ）メッシュの生成を対象としたものである。例えば、I-deas や CATIA などの CAD ツールから中間ファイル（モデルの表面データ）を出力し、自動メッシュ生成ツールに読み込ませ、メッシュを作成する場合、テトラのメッシュに限定されてしまう。この場合、現在の中野コードの大幅な改良を必要とする。よって、今回は、ヘキサ生成ツールに限定し、マクロやバッチ処理を用いて、自動化処理を行うことができるツール開発を行った。

4.3. 選定ツールとメッシュ生成プロセス

上記の仕様を満足することができるツールとして、株式会社シーディ・アダプコ・ジャパンが販売する pro-STAR（プロスター）を選択した。pro-STAR は汎用流体解析ソフトウェア：STAR-CD に付属するメッシュ生成ツールである。メッシュ生成プロセスについて、フローチャートを図1に示す

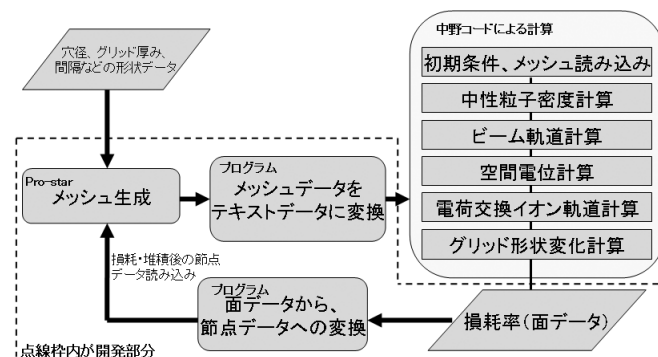


図1：解析のフローチャート

4.4. メッシュ生成パラメータと生成例

図2に解析モデル図を示す。グリッド孔の対称性を利用した30度の三角柱領域を解析空間とした。図2の右図のように面を7つに分け、解析領域を41個のブロックに分け、それぞれのブロックにおいてメッシュの大きさ、壁面付近の粗密（レシオ）をコントロールできるように開発を行った。メッシュの生成に当たっては、22個のパラメータを指定し、マクロプログラムを実行することによって、自動的にメッシュを生成する。図3に粗いメッシュ例（左）と細分化し壁面付近を細かくしたメッシュの例（右）を示す。メッシュの生成時間は両者とも十数秒のオーダーである。

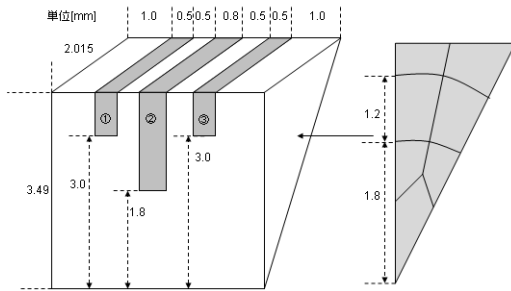


図2：解析モデル図

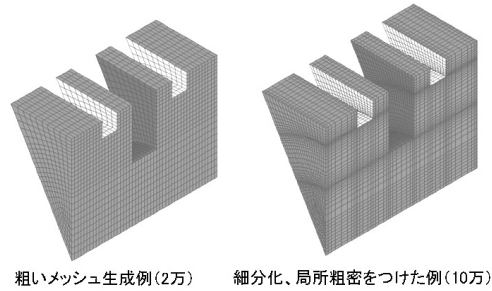


図3：解析メッシュ生成例

4.5. 3万時間後のメッシュ図と再生成後のメッシュ

図1のフローチャートに示したように、メッシュ生成後、フォートランプログラムによって中野コードへのメッシュデータをコンバートし、計算が開始される。今回は、本生成メッシュを用いて、中野コードから単位時間当たりの各面における損耗・堆積量 [mm/hour] を出力し、3万時間後の損耗・堆積結果をメッシュデータに反映させた。図4に、境界面の節点のみを移動させたメッシュを示す。この状態では、境界面付近のメッシュのクオリティが悪い。そこで、図4のデータを基に、メッシュ生成ツールを用いてメッシュ再生成を行った結果を図5に示す。損耗・堆積を考慮後において、メッシュのクオリティが改善（丸印）されていることが分かる。

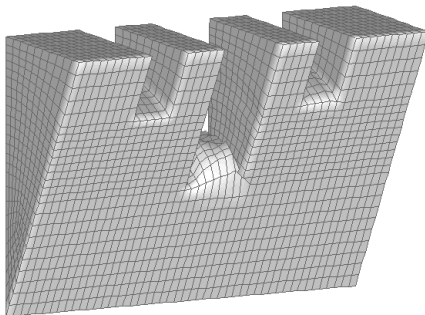


図4：表面の節点のみを移動させたメッシュ

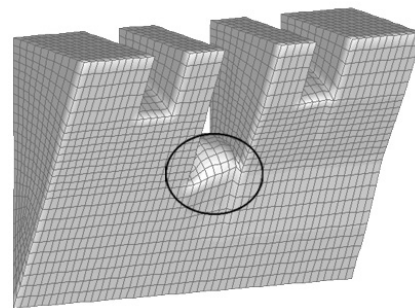


図5：メッシュ再生成図

4.6. まとめ

メッシュの種類については、中野コードベースであればヘキサメッシュが現状で妥当であると考えられる。テトラメッシュの方が、形状の対応等において柔軟性があるが、使用するには中野コードの大幅修正が必要となる。メッシュの違いによる精度については、コードに依存する問題である。メッシュツールについては、バッチ処理などを使えば、proSTARで仕様を満足できる。しかし、境界の節点移動量が大きくなり、メッシュ再生成が困難になってくれば、テトラメッシュを用いる自動メッシャーを選択する余地が出てくる。今後、本ツールを使うのか、テトラメッシュを対象に考えるのか、議論が必要である。本開発は、(株)シーディー・アダプコ・ジャパン、西日本技術グループ 児玉大二郎様、営業部 西畑吉悦様にご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

5. 2007 年度の活動方針

JIEDI ツールの具体的な開発目標（ターゲット）と開発体制についてイオンスラスター・コミュニティ内で議論することが、2006 年度のワークショップの目的であった。開発ターゲットをイオンエンジン全体、すなわち、 $\mu 10$ ではおよそ 800 個のグリッド孔があるが、これら全てをターゲットとして同時解析・損耗を評価するのは、計算コストの問題から不可能である。このため、複数孔の解析が実現したとしても、たかだか数孔の解析に限定されるであろう。逆に、もしも 1 孔だけのグリッド（これは、広い面にたった 1 つの孔があいたグリッドでも良いし、あるいは、多数のグリッド孔から抽出した 1 孔について、対称性を考慮して実施しても良い）であったとしても、表 1 に整理したように様々な課題があることがわかった。

5.1. JIEDI ツール開発上の課題

数値解析コード開発者の立場からは、数値解析手法の選定（PIC 法または Flux Tube 法のどちらを選択するか、など）や、解析およびプログラム開発に必要なコスト、比較のための実験データ（耐久試験（グリッド損耗の時間履歴）データ）の不足や、材料データ（特にスパッタされた粒子の再付着率データ）の不足などが指摘された。

耐久試験（グリッド損耗の時間履歴）データと数値解析との比較は、グリッド損耗解析コード評価のために必須である。JIEDI では $\mu 10$ の損耗履歴データや試験前後のグリッド形状との比較を検討しているが、比較を行うためには、グリッドの設計幾何形状データの他に、各グリッド孔上流のプラズマパラメータ・中性粒子密度データと、温度や背圧等の実験環境を特定する必要がある。これらの各種データを $\mu 10$ グリッドについて JAXA から提示する予定である [1] が、イオンエンジン動作中のプラズマパラメータ・中性粒子密度データの取得は難しく、測定精度も制約されるであろう。これに加えて、孔毎のばらつきもあることから、実験データのばらつきを考慮した比較が必要である。

データのばらつきの問題は、数値解析でも生じる。数値解析におけるばらつきは、1) プラズマパラメータや材料物性データのばらつきなど、入力データ・境界条件のばらつきによるもの、と、2) 有限幅の格子（メッシュ）の特性や解析用粒子の個数に制約される数値解析上の誤差、の 2 種類に分類されるであろう。損耗量以外のビーム解析については、例えば、JAXA 調布の beamlet 実験 [2] とグリッド電流を比較することで、コードを検証することができる。

5.2. JIEDI-1 と JIEDI-2 : 2 ステップのツール開発

JIEDI では、数値解析コードの開発（コーディングや数値解析手法の問題）のみならず、数値計算の精度保証や、実験データとの整合性をどのように考えていくかも重要である。表 1 に整理した課題を段階的に解決し、更に、Hayabusa-2 など直近のイオンエンジン搭載ミッションに対応するため、2 ステップに分けたツール開発（JIEDI-1 と JIEDI-2、図 6）を提案する。JIEDI-1 は、各グループにおける自由な研究開発と、現在最も進んだグリッド解析ツール（中野コード）[3] を共有した上での課題解決とを並行して進め、1 孔グリッド（対称境界条件）に限定して解析精度保証可能なツールを完成させる、というものである。中野コードについては、基盤（共有）ツールとしての整備を速やかに進めた上で、数値解析精度の検討や、材料データ等が解析精度へ与える影響の評価を進める。スパッタ等の実験データ（データベース）の整理と取得、スパッタリングの新しいモデル化についても、緊急度の高い作業項目である。その他、メッシング技術の共有化、放電室プラズマモデルや熱構造モデルとのリンク、コード管理の方策などをとりまとめた上で、2008 年 1 月にワークショップを開催して、JIEDI-1 の全容が明らかになるよう、研究開発を進めていく予定である。

表 1 JIEDI ツール開発上の課題

数値解析手法の選定

- ・プラズマ粒子（イオンビーム，電荷交換イオン，電子）の解析手法については，PIC, Hybrid, Flux tube があり，コード開発のコストや，計算コストの違いからトレードオフを実施
- ・メッシュ生成に直交座標系を用いるか，それとも，グリッド変形にあわせた一般座標系を用いるか
- ・計算負荷の大きい電位計算（Poisson Solver）をどうするか

数値解析モデルの選定

- ・多孔モデルとするか，一孔モデルとするか
- ・シースにおいて電子は Maxwellian として良いか（解析手法と関連）
- ・中性粒子分布は無衝突近似するか，DSMC で解析するか
- ・グリッド材料物性データ
 - スパッタ率データは，低エネルギー側が不足している
 - 再付着率は，ほとんどデータが存在しない

数値解析精度の評価

- ・メッシュの影響
- ・ビーム解析の精度
- ・損耗解析の精度は，ビーム解析の精度と，プラズマ・物性データ等のばらつきの影響を受ける

実験との比較（ビーム電流，損耗率，損耗履歴）

- ・ある試験条件における各グリッド電流・ビーム電流と比較（ビーム計算の検証）
（単体性能試験，beamlet 実験，可視化実験，その他）
- ・耐久（損耗）試験との比較
（ $\mu 10$ グリッド損耗データ，その他）
- ・耐久（損耗）加速試験との比較
- ・実験と数値解析との比較においては，入力パラメータ（プラズマ，中性粒子，形状等）のばらつきに注意する必要がある

コード開発体制

- ・コード管理と開発目標の確実な達成の観点からは，1 機関でとりまとめるのがベスト
- ・多機関で開発する場合，その管理方法やまとめ役が問題になる

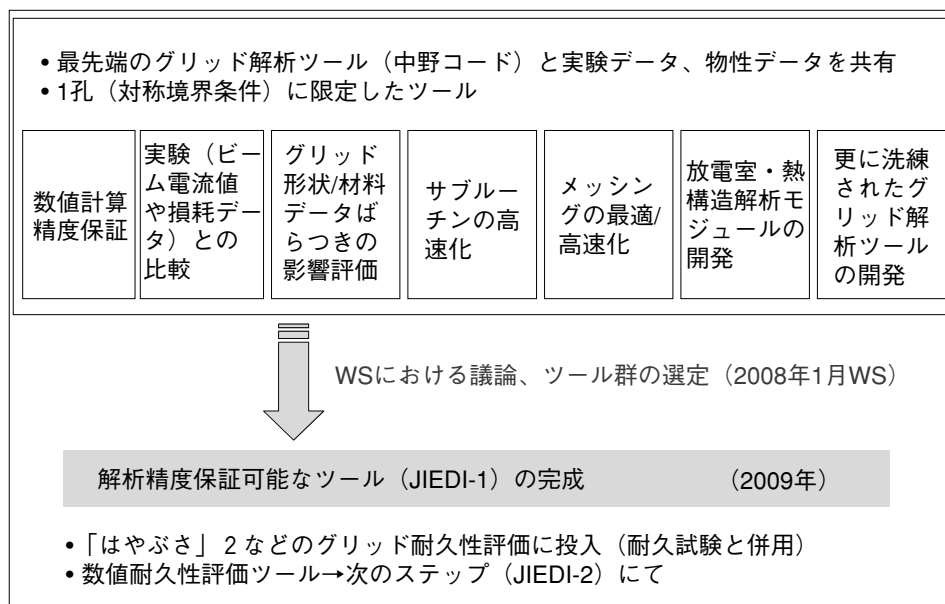


図 6 2ステップのツール開発：JIEDI-1 と JIEDI-2

謝 辞

「イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI (JAXA Ion Engine Development Initiatives) ツールの研究開発ワークショップ」を支援して下さった JAXA 情報システム部, JAXA 情報・計算工学 (JEDI) センター, および, ワークショップへご出席の全ての皆様へ感謝の意を表します.

参 考 文 献

- [1] 碓井美由紀・國中均, イオン加速グリッドの損耗形状測定, JAXA-SP-06-019, イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI ツールの研究開発ワークショップ 2006 年度報告書, pp.28-31.
- [2] 早川幸男, 多孔電極イオン抽出系グリッドレット上の電流分布測定, JAXA-SP-06-019, イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI ツールの研究開発ワークショップ 2006 年度報告書, pp.20-27.
- [3] 中野正勝, イオンエンジンのグリッド損耗評価コードの改良, JAXA-SP-06-019, イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI ツールの研究開発ワークショップ 2006 年度報告書, pp.47-53.