



## 小特集 最近の核融合中性子工学の進展

# 3. CAD データからの自動変換による核解析

## 3. Nuclear Analysis by Automatic Conversion of CAD Data

佐藤 聡, 近藤 恵太郎

SATO Satoshi and KONDO Keitaro

\* 日本原子力研究開発機構

(原稿受付: 2015年9月16日)

ITER や核融合 DEMO 炉, IFMIF 等の核解析では, 近年, 変換コードにより 3 次元 CAD データから自動的に作成した MCNP の形状入力データを用いて放射線輸送計算が行われている. 本章では, CAD データから MCNP の形状入力データへの変換コード開発の現状及びその適用例を紹介する. 併せて, MCNP の計算結果の可視化方法に関しても紹介する.

### Keywords:

CAD/MCNP conversion code, Boolean operation, GEOMIT, MCAM, McCaD, DAG-MCNP

### 3.1 はじめに

ITER 等の核融合炉の核設計では設計裕度が小さく, 核解析において, 高い精度の計算値が要求される. 正確な幾何形状入力データを用いて, MCNP [1] 等のモンテカルロコードで放射線輸送計算を行うことにより, 高い精度の計算値を得ることが可能である. しかしながら MCNP ではこれまでのところ, 幾何形状データを表現するのに, 境界面の方程式 (面データ) の組み合わせ (ブーリアン演算) で立体 (セルデータ) を表現する方法が用いられており, 核融合炉のような大規模で複雑な構造に対する形状入力データを作成するには, 非常に莫大な作業が必要になる. 本課題を解決するために, 自動的に正確な形状入力データ作成を実現することを目的として, 各国で, 3 次元 CAD データから MCNP の形状入力データを自動的に作成する CAD/MCNP 変換コードの開発が行われている. 日本では日本原子力研究開発機構と MHI ニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリングが共同で GEOMIT [2], 中国では Institute of Nuclear Energy Safety Technology が MCAM [3], ドイツでは Karlsruhe Institute of Technology が McCaD [4], 米国では Wisconsin 大が DAG-MCNP [5] を開発している. 次節にて, 各々のコードの概要を紹介する.

### 3.2 CAD/MCNP 変換コード

#### 3.2.1 GEOMIT

GEOMIT の主な特徴は以下の通りである [6].

- ① CAD/MCNP 変換の際には, CAD データには存在しない曖昧面の面データを新たに作成する必要がある. 曖昧面が必要な CAD データの形状を予めコード内に設

定し, それらの形状に合致する CAD データに関しては, CAD 面同士の交点等を計算することにより, 自動的に曖昧面の面データを設定している.

- ② CAD/MCNP 変換後のセルデータの二重定義や未定義による形状エラーを削減するために, 複雑な形状の CAD データ (凹面を有するセルデータ) を単純な形状 (凸面のみで形成させるセルデータ) に自動分割したのち, MCNP 形状入力データに変換している. 凹面を有するセルに対しては, 多数の面データを用いての非常に複雑なブーリアン演算が必要であるが, 凸面の場合, 少数の面データの単純な組み合わせによるブーリアン演算でセルデータを構成できる.
- ③ CAD データでは, ブラケットやコイル等の物体に関するデータのみ存在しており, 非物体 (空間) 領域は通常 CAD データには含まれていない. したがって, CAD/MCNP 変換コードでは, 非物体 (空間) 領域を新たに設定することが必要である. GEOMIT では, 直方体の指定範囲から物体領域に関する MCNP セルデータの補集合を定義することにより, 非物体 (空間) 領域に関する MCNP セルデータを作成している. MCNP では, セルを構成する面データの数に制限があり, 制限数以下になるよう直方体を自動的に細分割しながら, 非物体 (空間) 領域の MCNP セルデータを作成している.
- ④ 任意の許容値以下で同一と見做せる複数の面データを一つの面データにすることにより, 重複面データを削減している.

図 1 及び図 2 に, GEOMIT コードを用いて, CAD データを MCNP 形状入力データに変換した例を示す. 図 1 には

\* 現在の所属: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

corresponding author's e-mail: sato.satoshi@qst.go.jp

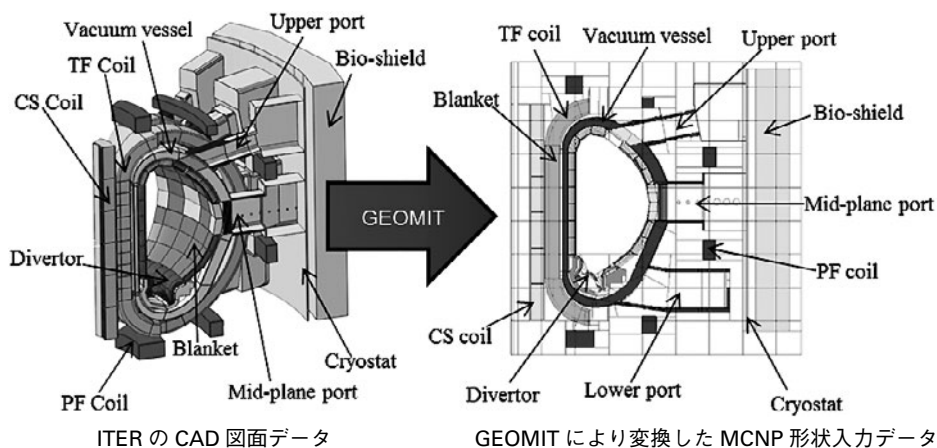


図1 GEOMIT を用いて ITER の CAD データを MCNP 形状入力データに変換した結果の一例。

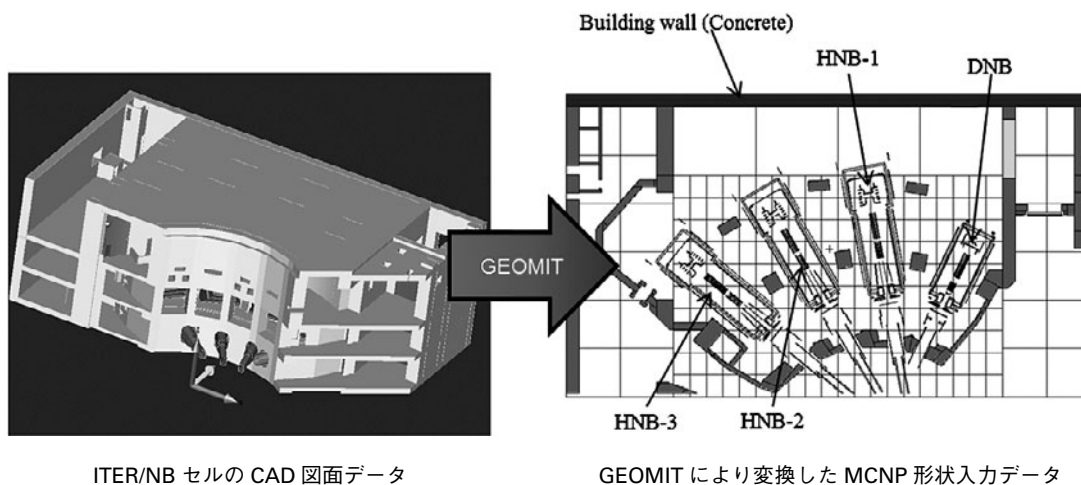


図2 GEOMIT を用いて ITER/NB セルの CAD データを MCNP 形状入力データに変換した結果の一例。

CAD/MCNP 変換コードベンチマークテスト用の ITER の40度セクターモデルの変換結果[2, 6], 図2には ITER の NB セルの変換結果[7]を示す。

### 3.2.2 MCAM

MCAM は、同種のツールの中では最も多くのリソースを投入して開発が進められていると考えられており、ユーザーインターフェースやコードの安定性などの点では最も進んだコードと見なされている。ITER 核解析においても、MCAM が多く使われているようである。MCAM に特有の機能としては、MCNP データから CAD データへの逆変換機能、MCNP だけではなく、フランスのCEAが開発しているモンテカルロ計算コード TRIPOLI[8] の形状入力データへの変換機能などが挙げられる。また、スプライン関数等の MCNP コードで定義不可能な形状を MCNP で取り扱える形状の方程式に置き換えて近似的な変換を行う機能の開発が進められている[9]。

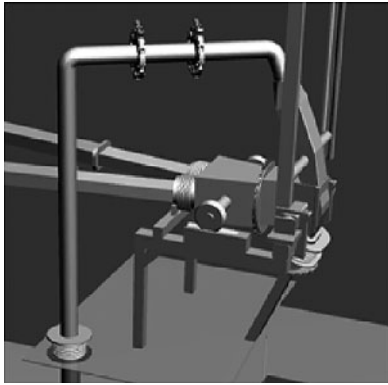
### 3.2.3 McCad

McCad は、変換アルゴリズムの点では GEOMIT, MCAM コードと大きな差はないが、Linux を動作 OS として開発されており、プリアン演算に用いる 3次元形状演算ライブラリとして Open Cascade テクノロジー (OCCT) を用いるなど、全てオープンソースのソフトウェ

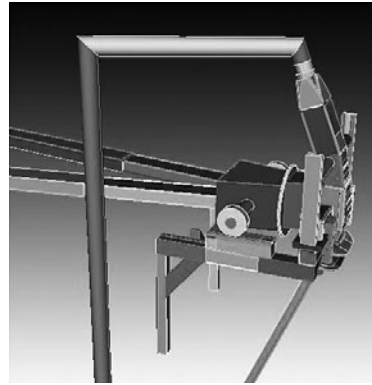
アを用いて開発されている点が大きな特徴である[10]。ユーザーインターフェースに関しては GEOMIT や MCAM に後れを取っていたものの、近年は数値計算用のオープンソースプラットフォームである SALOME をインターフェースとすることで、操作性の改良や、流体解析、構造解析ソフトウェアとのデータ連携をめざした開発が続けられている[11]。これまでの使用例としては、ITER の一部機器の核解析において使用されているほか、2013年に完了した IFMIF の工学設計活動 (EDA) では全面的に McCad が用いられ、IFMIF の照射セル、照射モジュールの MCNP 形状入力データが作成され、施設の核解析に用いられた[12]。図3に、McCad コードを用いて、IFMIF の CAD データを MCNP 形状入力データに変換した結果の一例を示す。

### 3.2.4 DAG-MCNP

DAG-MCNP は、他のコードと仕組みが大きく異なっており、CAD データから MCNP 形状入力データへの変換を行うのではなく、CAD ソフトウェアの 3次元形状演算エンジンを MCNP の一部として組み込むことで、直接 CAD データの形状表現を使用して MCNP 計算を行う。その為、MCNP コードで定義不可能な方程式が存在する CAD データに対しても計算可能である。コードの導入に手間がかか



ターゲットアセンブリーのCADモデル



McCadにより変換したMCNP形状入力データ

図3 McCaDを用いてIFMIFのCADデータをMCNP形状入力データに変換した結果の一例。

り、また、粒子の追跡方法が複雑になるため、計算時間は通常のMCNP計算に比べて大幅に伸びる一方、CADデータの修正が必要ないという大きな利点がある[13]。

### 3.2.5 ベンチマークテスト

ITERの設計活動において、図1に示す共通のCADデータに対して、上述した各コードにおいてMCNP形状入力データを作成し、そのデータを使って以下の項目を計算し、計算結果を各コード間で比較した。

- ① 中性子壁負荷のポロイダル方向の分布。
- ② トロイダルコイル核発熱のポロイダル方向の分布。
- ③ 複雑な形状であるダイバータ中の中性子束分布。
- ④ 水平ポートからのストリーミングによる中性子束分布。

各コード間での計算結果は概ね一致しており、各コードの変換機能の妥当性が検証されている[2, 13]。

### 3.3 計算結果の可視化方法

MCNPには、メッシュタリーと呼ばれる中性子束などの物理量の3次元空間の分布を計算する機能が実装されているが、可視化については2次元分布を描画する機能しか備わっておらず、3次元分布を描画するためには、何らかの外部ソフトウェアを用いる必要がある。3次元座標つきの数値データを可視化すること自体はそれほど難しくはないが、MCNPの形状モデルを重ねて描画することが難しかった。近年、核解析においては上述したようにCADデータからMCNP形状入力データを作成することが多くなっており、可視化ソフトウェア上でCADデータを描画することができれば、上記の問題を解決することができる。一例として、Paraviewというオープンソースのアプリケーションを用いる方法がある[14]。MCNPで計算した核発熱分布を、Paraviewを用いて可視化した例を図4に示す[15]。

### 3.4 まとめ

主としてITER設計活動において、CADデータからMCNP形状入力データへの変換コードの開発が各国で進められ、非常に複雑なCAD形状をMCNP形状入力データへ自動変換することが可能になり、以前は手作業で数ヶ月から数年を要していたMCNP形状入力データの作成を大幅に短縮することが可能になった。また以前では、簡素化

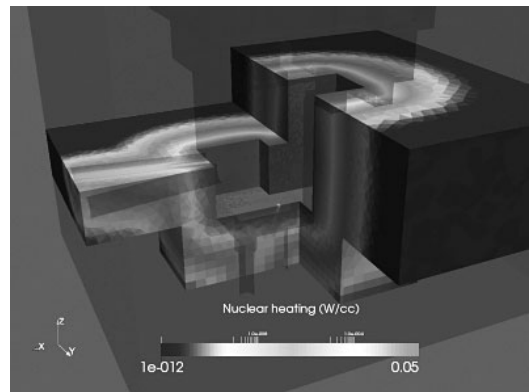


図4 Paraviewを用いてMCNPの計算結果を3次元で可視化した例[15]。

してモデル化した形状入力データを、詳細にモデル化した形状入力データを用いての核解析が可能になった。但し、CAD/MCNP変換コードの使用に際しては、CADデータを適宜修正することが必要であり、これらの作業にはCAD操作の技能も必要で、相当の時間を要する。また、現状で完全に自動変換可能なコードは存在しておらず、著者らが開発を進めているGEOMITを含めて、本章で紹介した変換コードの更なる向上が必要である。

### 参考文献

- [1] MCNP Team, LA-UR-05-8617 (2005).
- [2] S. Sato *et al.*, Nucl. Tech. **168**, 843 (2009).
- [3] Y. Wu *et al.*, Fusion Eng. Des. **84**, 1987 (2009).
- [4] H. Tsige-tamirat *et al.*, Fusion Eng. Des. **75-79**, 891 (2005).
- [5] M. Wang *et al.*, Fusion Sci. Tech. **47**, 1079 (2005).
- [6] 日本原子力学会：放射線遮蔽ハンドブック-基礎編-, 4.4.9 (4), (2015).
- [7] S. Sato *et al.*, Proc. 24th IAEA-FEC ITR/PI-02 (San Diego, USA, 8-13 Oct. 2012).
- [8] O. Petit *et al.*, CEA-R-6169 (2008).
- [9] G. Wang *et al.*, Prog. Nucl. Sci. Tech. **2**, 821 (2011).
- [10] L. Lu *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 1885 (2014).
- [11] Y. Qiu *et al.*, Fusion Eng. Des. **96-97**, 159 (2015).
- [12] K. Kondo *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 1758 (2014).
- [13] P.P.H. Wilson *et al.*, Fusion Eng. Des. **83**, 824 (2008).
- [14] D. GroBe *et al.*, Fusion Eng. Des. **88**, 2210 (2012).
- [15] K. Kondo *et al.*, Fusion Eng. Des. **98-99**, 1998 (2015).