

大型ヘリカル装置における有限要素法シミュレーション業務の紹介

○村瀬尊則、増崎貴、時谷政行、西浦正樹、宮澤順一、坂本隆一

自然科学研究機構 核融合科学研究所

概要

本稿では大型ヘリカル装置（以下、LHD）の周辺装置設計の際に行われる解析業務の紹介を行う。

1 汎用有限要素法解析ソフト『ANSYS』

LHD および関連する計測装置などに投入される技術は複雑かつ高度であるため、装置の設計段階で検証すべき物理現象も広範囲で難易度の高いものへと広がりを見せている。そのため、今日では事前のコンピュータシミュレーションによる検証は装置開発の全工程で不可欠である。本研究所は、汎用有限要素解析ソフト『ANSYS』（図1）を3ライセンス取得しており、構造・振動・伝熱・電磁場・圧電・音響・熱流体・落下衝突などの物理現象や、それらを組み合わせた連成問題を、目的に合わせて柔軟に解析することが可能である。これまで様々な解析を実施しており、各種計測装置の設計だけではなく、プラズマ実験で取得したデータの解析にも大きく寄与している。



図1. 汎用有限要素解析ソフト『ANSYS』（ANSYS Web ページより[1]）

2 日常業務とのすみ分け

技術部では、主にLHDや計測装置、およびそれらを支える架台などの設計検討段階において、必要に応じて応力解析を実施している。加えて研究部からの要請により、装置の健全性確認や性能評価を目的とした、各種シミュレーションも実施している。しかし、技術部の主たる業務は、LHDやこれに付随する基幹設備の運転・保守であるため、主要業務に支障のない範囲で解析業務を実施している。また計算に時間がかかる場合には、依頼者に予め解析に必要なおおよその期間を提示し、了解を得たうえで依頼を受けている。しかし会議や打ち合わせのため、まとまった時間を解析作業に充てることができず、どうしても作業が細切れになってしまうのが実状である。

3 解析業務の紹介

ここでは、我々が行っている解析業務を紹介する。解析は大きく、構造・伝熱解析、電磁場解析、流体解析の3つに分けられる。

3.1 構造・伝熱解析

LHD の真空容器内にはおよそ 1700 枚ものカーボン製の受熱タイルがステンレス製の真空容器を保護するため設置されており、LHD の高温高密度プラズマから漏れ出したプラズマが当たらないようになっている。そのため受熱タイルは高い熱負荷を受け止めることになる。これらの受熱タイルの正確な熱負荷を評価する目的で、ANSYS による熱負荷解析を依頼された。図 2 は熱負荷試験装置での実験の様子である。このような既知の熱負荷を印加する実験と ANSYS による熱解析との比較を行い、受熱タイルの熱伝導率など、実際の物性値を明らかにした上で、LHD のカーボンタイルの解析を行った。

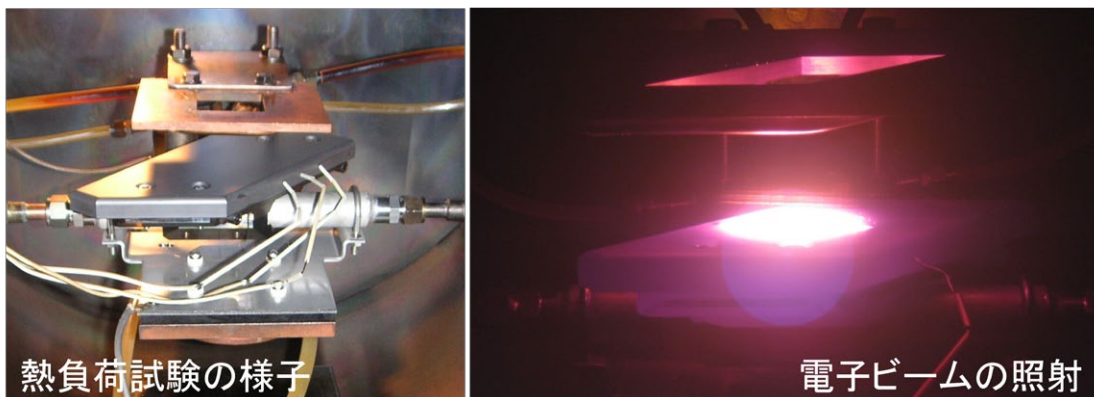


図 2. 熱負荷試験の様子

解析には、モデル化・計算格子生成・材料物性設定・境界条件設定・解析実行・結果表示の工程が必要となるが、本解析にはモデル化と計算格子生成のステップに多くの時間を費やしている。複雑なモデル化には CAD の知識が必要となり慣れている人なら比較的短時間でモデル化できるが、使い始めの時期には最も時間のかかる作業となる。ただ計算モデルは詳細に作るほど計算格子が膨大になることが多く、計算時間がかかるばかりか、メモリー不足で解析が途中で中断してしまうことがあるため、効率よく解析するためにはある程度簡略化してモデル化するか、結果を予測して熱勾配の大きい箇所には細かい格子を配置し、そうでない箇所には大きな格子を配置するなどの工夫が必要となる。また解析は材料物性設定や境界条件設定を間違えなければ問題なく実行できるが、入力する物性値は単位系を必ず統一することが必要であり、得られた解が明らかに誤っている場合、この「単位系の統一」が原因であることが多い。そのため状況に応じて簡単なテストケースを実行して、単位系の確認をすることが必要である。

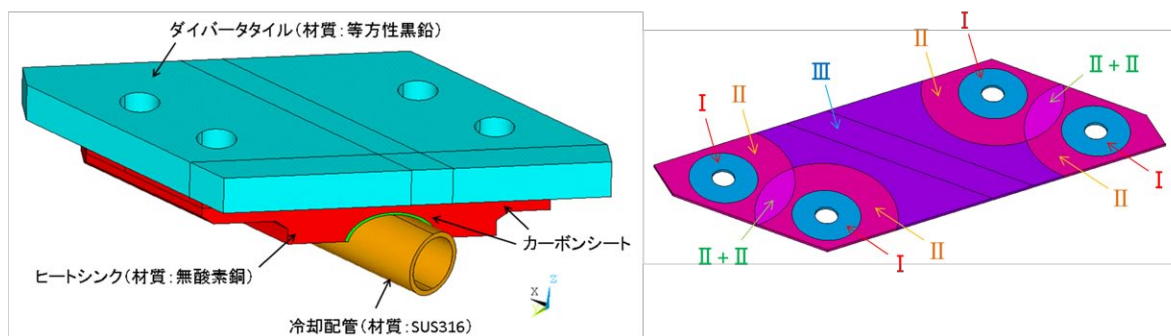


図 3. 計算モデル

本解析のようにタイルが高温になり、輻射を無視できない場合の解析には、モデル化した後、別に「輻射面」を作成してモデルに貼り付けるという設定が必要である。また、図3のように、カーボンとヒートシンク、ヒートシンクと冷却管の間には熱接触を向上させるためにカーボンシートが挿入されている。挿入されたカーボンシートの熱伝導率はカーボンタイルを締め付けるボルト周りで高く、離れるに従って落ちてくる。そのため、カーボンシートをモデル化する際にも、エリア分けして異なる熱伝導率を設定できるようにしている。熱の入射パターンを場所や入射時間を変えて複数ケース実施した。計算時間は1ケースあたり1時間ほどを要する。

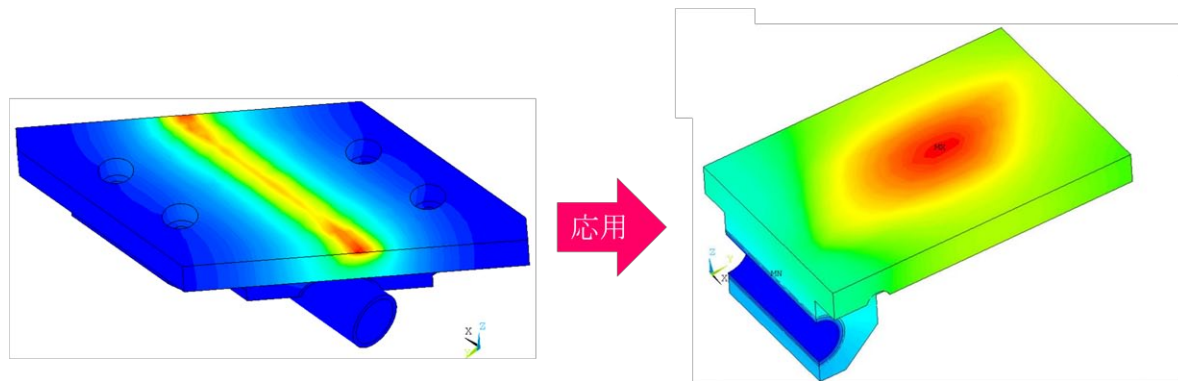


図4. 解析結果を設計に反映させる

ANSYS では温度分布はもとより熱の流れる様子が分かる熱流束のベクトル表示も可能であり、熱の逃げにくい箇所の特定に利用できる。これらの解析から得た知見を、新たに開発するタイル形状の検討に反映させることによって、より熱除去能力の高いタイルの設計に寄与することができた (図4)。

3.2 電磁場解析

LHDでは超電導コイルによる磁場にプラズマを閉じ込めており、その磁場を利用した計測機器の設計や、逆に磁場の影響を極力無くしたいといった依頼もあり、電磁場解析についても需要が高い。ここでは重イオンビームプローブ (以下、HIBP) イオン源のプラズマ生成に使用されているマルチカスプ磁場解析について紹介する。図5に概要を示す。イオン源のチャンバーの周りに16個の永久磁石を配置しマルチカスプ磁場を形成する。新たに開発中のイオン源では、およそ0.5Tの磁場に共鳴するような高周波を入射するため、この共鳴層にプラズマが生成されることになる。この生成されるプラズマからチャンバーへの熱的影響を出来る限り小さくするため、共鳴層をチャンバーから離れた位置に設計することがシミュレーションの目的である。

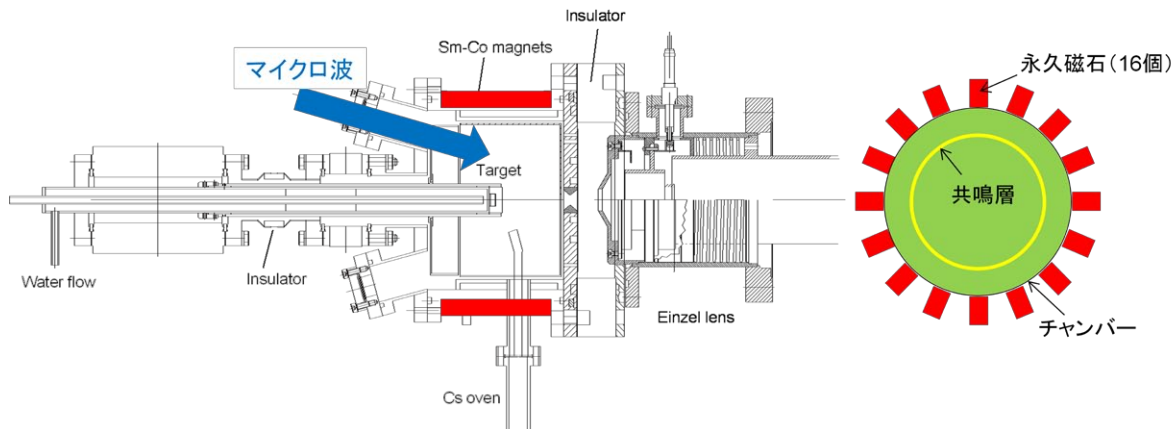


図5. HIBP イオン源の概要

磁石のサイズや配置などを変化させて解析した結果 (図6)、永久磁石から最大で10mm内側に共鳴層を形成できるという結果を得た。現在、この解析をもとに装置の設計を進めている。

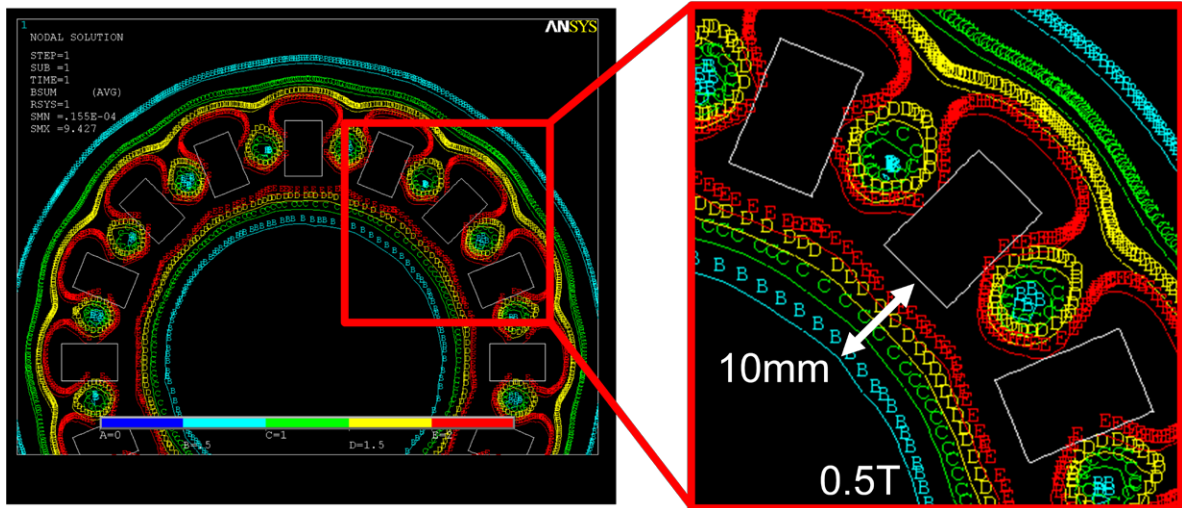


図 6. 磁場計算結果

通常このような研究に関連した磁場計算は研究者が独自にプログラムを組んだりしながら検討するが、開発期間が短期間であったり比較的容易な解析の場合には技術部に依頼されることがある。本解析は 3. 1 の解析とは違い、2次元解析であるため、モデル化には計算リソースの節約などの配慮はしていない。また、計算時間も 1 ケースあたり 10 分程度と比較的短い。

3.3 流体解析

LHDでプラズマへ燃料を供給するため、水素やヘリウムなどのガスをピエゾバルブやソレノイドバルブから供給する「ガスパフ装置」および水素を固体化させた水素ペレットを圧縮ガス（ヘリウム）により射出する「ペレット入射装置」を使用している。プラズマへの燃料供給は、燃料の速度が速ければ速いほど、プラズマ中心に近い位置へ燃料を供給でき、中心密度の高いプラズマの生成に有利となるため、ガスパフ装置やペレット入射装置には、さらなる高速化が求められている。一方 ANSYS では流体パッケージが用意されており、これを利用して LHD の様々な流体解析を行っている。

ガスパフ装置では燃料ガスの供給用ノズルの形状を超音速ノズル（ラバルノズル）に変更するため、ANSYS 流体パッケージを用いて、複数の超音速ノズルについて流体解析を実施し、ノズル変更後における入射ガスの速度向上と収束性の向上を確認した（図 7）。これをもとに新たに超音速ノズルを製作し、LHD 実験に供している。

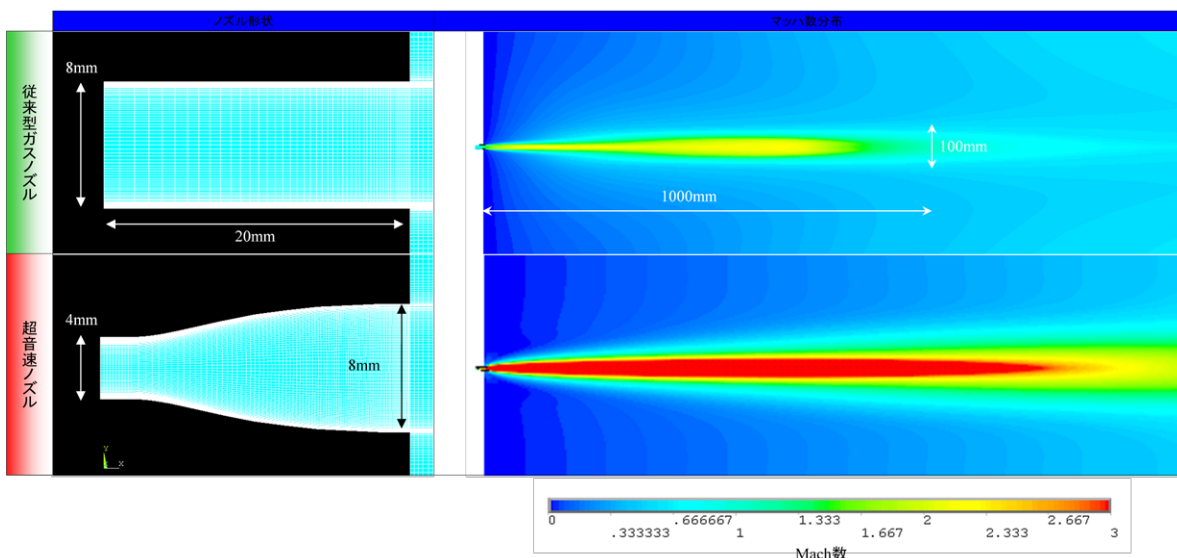


図 7. ガスパフ入射時の速度分布

本解析では現状のノズル形状も含めて、様々な形状のラバルノズルをモデル化して解析することにより、プラズマに到達する燃料ガスの速度や収束性を比較したが、実際には LHD 内は真空状態であり、容器内の気体は連続体としてではなく、固体分子が衝突を繰り返して形成される分子流として扱わなければならない。しかし、ANSYS では分子運動を考慮した流体解析は扱えないため、あくまでも同じ条件で様々なノズルを比較して、ノズル性能を評価する解析であると理解を得た上で、打合せを重ねながら解析を進めた。また流体の解析は時々刻々変化する現象を捉えるため、少しずつ時間を進めながら解析を重ねる。そのため、希望する時刻まで解を得ようとするとき非常に時間がかかる場合が多い。本解析の場合、モデルを簡素化し、計算格子も流れを解像するための必要最低限に抑えているが、それでも 1 ケース 2 日程度を要する。それは、ガスの速度が音速を超えるため、計算の時間ステップを $0.1 \mu\text{s}$ 程度に設定しており、イタレーション数（繰り返し数）が膨大になるのが原因である。

次にペレット入射装置の解析では水素ペレットの速度を解析し、新たに製作するペレット入射装置の設計に寄与することを目的とした。またペレット射出管を出来る限りコンパクトに設計することも検討した。

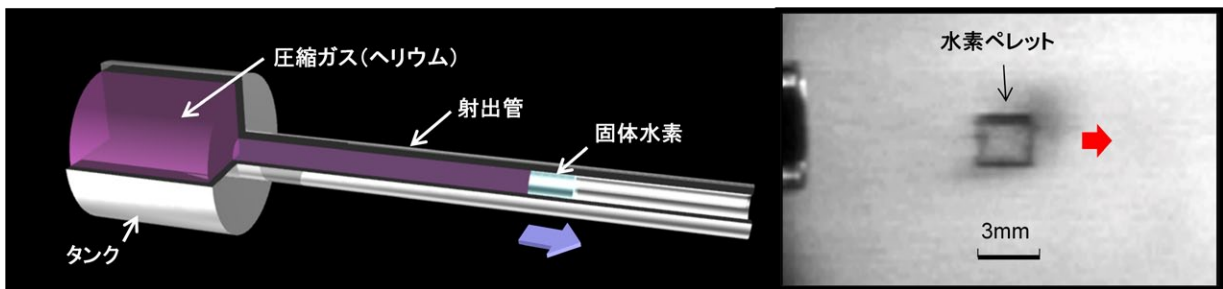


図 8. パイプガンペレットの概要

計算リソース節約のため、射出管全体をモデル化するのではなく、円筒形を 10° にカットしたモデルを解析することとした (図 9)。そのため、カットした境界面から流出した物理量がもう片方の境界面へ流入するという『周期境界条件』を適用している。また水素ペレットの表面温度は、水素の融点である 13[K] に固定することを条件として付加している。加えて、水素ペレットが移動するにつれてペレット前方・後方の計算領域におけるメッシュ構造が変化するという設定『メッシュモーフィング機能』を適用している。その結果、加速用ガス圧 (タンク圧) に対するペレット移動速度を実験と計算結果とで比較すると、ほぼ一致している。

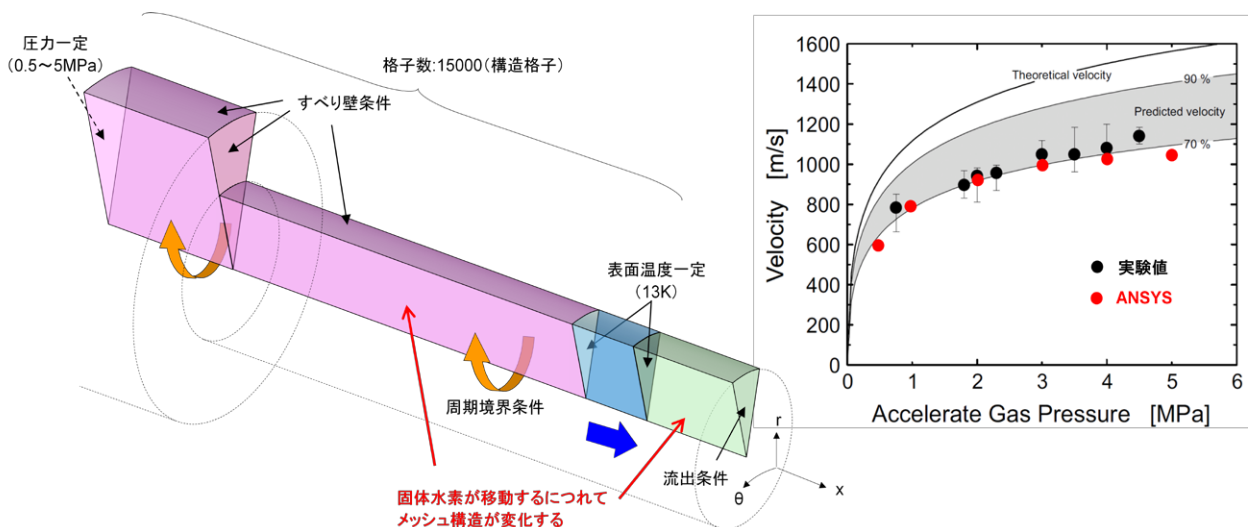


図 9. 解析モデルと解析結果

このように実験とシミュレーションの比較をし、解析の妥当性を検証したうえで、新たに設計するパイプガンペレット入射装置の射出管長さを選定する。図 10 に射出管内でのペレット移動速度を示す。グラフより

射出開始からおよそ 60cm 移動するとペレット速度に大きな変化が見られないことから、設計する射出管の長さを 60cm に選定した。

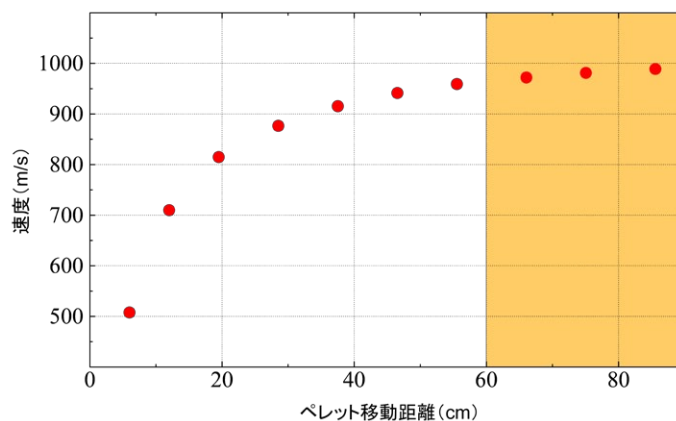


図 10. 射出管内でのペレット速度

4 今後の予定

技術部における解析業務として、構造解析・電磁場解析・流体解析などを研究者と相談しながら実施しているが、ライセンスは申請すれば所員なら誰でも ANSYS を使用することができるにも関わらず、実際に解析業務を行っている職員は数人程度であり、解析業務が集中してしまうことがある。このような状況を解消するため、ANSYS を始めてみたいという研究者や技術職員がいれば、一緒に解析を進めながら習得してもらうことも検討している。しかし、ANSYS を一から覚えるには、それ相応のまとまった時間が必要であり、実験装置の作業や打ち合わせ、および会議などで集中してトレーニングできないことが多く、なかなか実を結ばないのが実状である。その他、実際の装置の設計や解析を目的にした解析作業の技術交流も実施しており、こちらは今後も適宜続けていく予定である。

参考文献

- [1] <http://www.cybernet.co.jp/ansys/>