

# NEXT計画とBA CSCを利用した 理論・シミュレーション研究

## NEXT Project and Theory/Simulation Research in BA CSC

(独)日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門  
矢木 雅敏

### 1. はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・先進プラズマ研究開発ユニット・プラズマ理論シミュレーショングループでは、平成8年より数値トカマク (NEXT) 計画を推進してきた。この計画は、超並列計算機をはじめとした近年の計算科学の著しい発展を背景に、プラズマの振る舞いを規定している基礎方程式にできるだけ忠実に従うことにより、プラズマ中で展開している現象を計算機上に再現し、核融合プラズマの複雑現象の物理的解明を図ることを目的としている。重要課題である閉じ込め輸送過程、電磁流体力学過程、および境界層・プラズマダイバータ過程の研究を中心としてこれまで研究を展開してきた。一方、幅広いアプローチ (BA) 活動がITER (国際熱核融合実験炉) 計画の支援や原型炉に向けた技術基盤の構築を行う目的で日欧協力のもと展開している (平成19年6月1日協定発効)。この活動においては国際核融合エネルギー研究センター (IFERC) 事業、国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動 (IFMIF/EVEDA) 事業、サテライト・トカマク事業の3つのプロジェクトが青森県六ヶ所村と茨城県那珂市において実施されている。今後、プラズマ理論・シミュレーショングループはIFERC事業のひとつとして建設が進められている核融合計算機シミュレーションセンター (CSC) に設置予定のスーパーコンピュータ (平成24年1

月稼働予定) を有効利用してNEXT研究を展開していくことになるだろう。

本稿では、これまでプラズマ理論・シミュレーショングループが取り組んできたNEXT計画の研究開発の成果の一部を紹介するとともに、第二期中期計画 (平成22年4月～) で目指す研究開発計画についても言及する予定である。

### 2. NEXT計画

第一期中期計画 (平成17年10月～平成22年3月) では、プラズマ理論・シミュレーショングループのミッションはNEXT計画を柱として「炉心プラズマの乱流構造の解明を進めるとともに、プラズマの磁気流体的な挙動に関わる理論・数値計算手法を開発し、閉じ込め・安定性制御のための理論的指針を取得する」ことにあった。これに基づき、MHD研究においては高ベータ定常トカマク (先進トカマク) の実現に係わる周辺MHD安定性、抵抗性壁モード、ディスラプション (抵抗性MHDモードの非線形発展) に対して、制御パラメータとしてのプラズマ回転の可能性を明らかにすること、乱流輸送シミュレーション研究においては、新古典輸送を実装した長時間シミュレーションによる分布形成過程の解明を目指した。

周辺MHD研究においては、トカマクプラズマにおいてトロイダル回転の効果を考慮した理想MHDモード安定性解析コードMINERVAを開

発した [1-3]。トロイダル回転を考慮するとエルミート性が保障されなくなるので固有値問題として解く従来の手法を単純には一般化できない。またモードがノーマルモードであるという保障もなくなるのでMINERVAにおいては固有値問題と初期値問題の両方の方法を用いてFrieman-Rosenbluth方程式 [4] を解き、安定性の評価を行っている。このコードは原子力機構で開発された変分原理に基づく理想MHD安定性解析コードMARG2D [5-6] を基に定式化が行われている [7]。図1

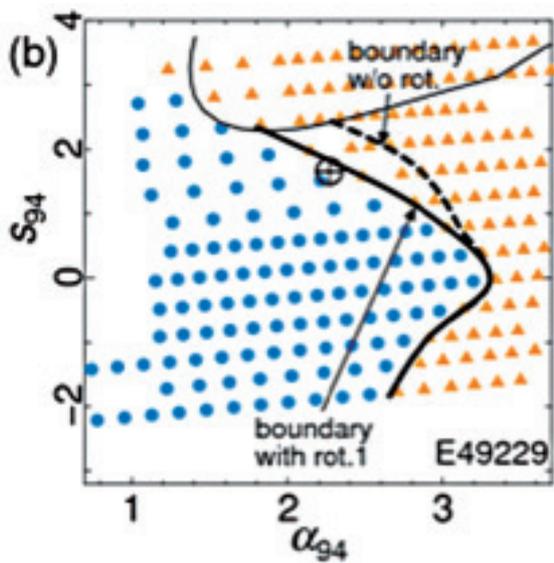


図1 MARG2DによるMHD安定境界（波線）とMINERVAによるMHD安定境界（実線）。実験データを+で記す。

にMARG2D（トロイダル回転なし）とMINERVAで計算したMHDモードのs-aダイアグラムにおける安定境界の比較を示す。コードの妥当性を調べるためJT-60Uの実験データ（ELMy-Hモード）をあわせて示す。トロイダル回転を考慮したMINERVAの方が実験データをよく説明できることがわかる。また、シミュレーションにより、トロイダル回転チャーは周辺に局在化するMHDモードを不安定化する傾向があることが判明した。解析の結果、この不安定化は固有モードの周波数とプラズマのトロイダル回転周波数の差に起因することが明らかとなった。MINERVAは周辺に局在するMHDモード解析において優れたコードであり、今後、JT-60SAの安定性解析コードとして整備される予定である。

JT-60SAに代表される高性能定常トカマクでは、ベータ限界は抵抗性壁モード（Resistive Wall Mode）により制限されるため、その安定化および制御は重要な研究課題である。図2にJT-60SAがターゲットとするオペレーション領域を示す。本グループでは、RWMに対するプラズマ回転の効果を理論的に研究するため回転プラズマにおける接続問題の再定式化 [8] や正準形式に基づく固有・連続モードの波の作用の定式化 [9] によりプラズマ回転による安定化機構の理論

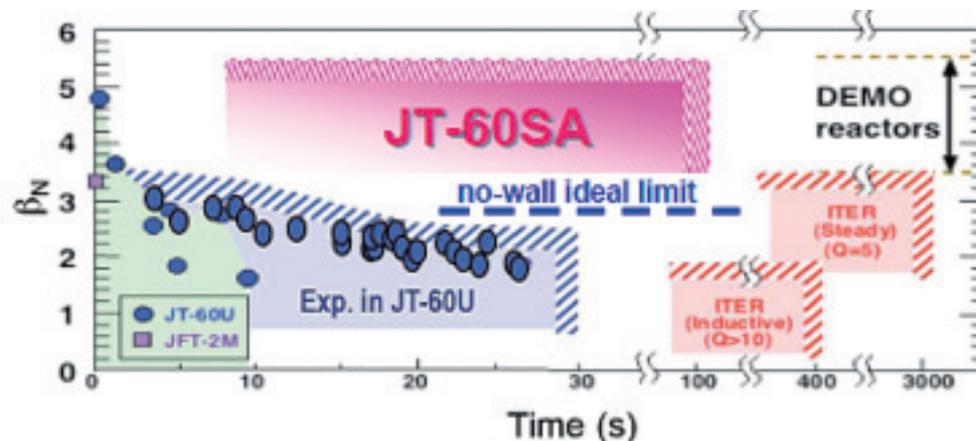


図2 JT-60SAのオペレーション領域

的解明をめざしている。さらにMARG2Dコードを拡張し、RWM解析コードRWMaCの開発を行っている [10]。図3にプラズマの回転がない場合のRWMの成長率に対するRWMaCコードとNMAコードのベンチマーク結果を示す。今後は接続問題を解けるようRWMaCを拡張し、回転や運動論効果を取り入れ、JT-60SA解析コードとして整備していく予定である。

JT-60SAにおいては高性能プラズマ閉じ込めを達成するため、反転磁気シャーププラズマ配位を検討している。一方、JT-60Uの実験によれば、この配位においては低プラズマ圧力領域でディスラプションが観測されている。図4にその様子を示す。このため、低プラズマ圧力領域におけるディスラプション機構の解明と回避方法の確立が重要な研究課題である。

これまで、反転磁気シアプラズマの低 $\beta$ ディスラプションは、同一の $q$ -値を持つ内外2つの共鳴面に磁気島が発生するダブルティアリングモード (DTM) の非線形不安定化過程で説明されてきた。本グループでは、回転効果及び外部揺動効果を含むダブルティアリングモード (DTM) の非線形MHDシミュレー

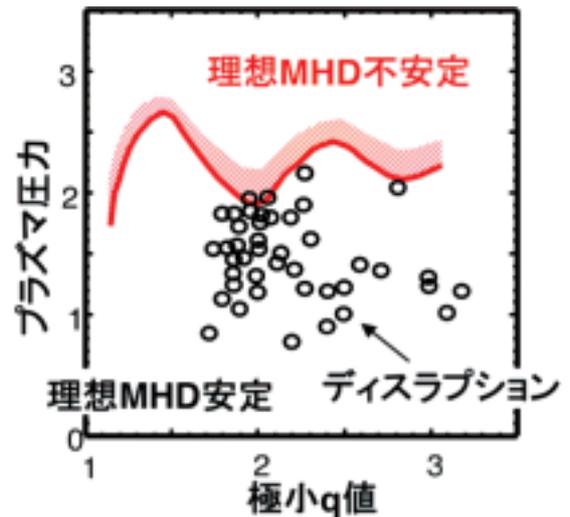


図4 限界プラズマ圧力の極小 $q$ 値依存性。理想MHD不安定性境界より低圧力領域でディスラプションが頻発している。

ション研究を行い、従来の理論モデルでは説明できなかった実験結果を説明できる新しいモデルを提案した [11]。まず、回転の無いティアリング安定な反転磁気シアプラズマに、プラズマ端で外部揺動を加え、外部駆動DTMの時間発展を調べた。その結果、外部駆動DTMも遅い時定数を持つ前駆振動から速い時定数を持つディスラプション現象への

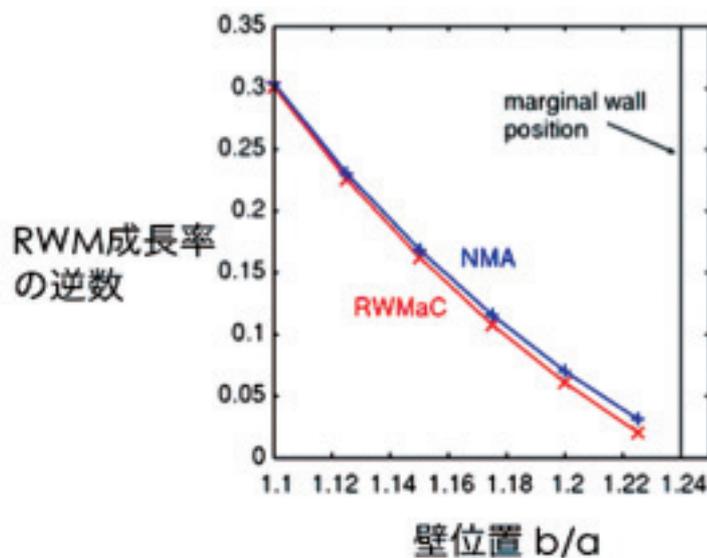


図3 RWMaCコードとNMAコードによるRWM (プラズマ回転無し) のベンチマーク

遷移を起こすことを明らかにした。外部駆動DTMの基本特性を明らかにした後、回転効果を含む反転磁気シアプラズマでの外部駆動DTMの成長を調べた。一般的に、プラズマ端、内・外側共鳴面の間での差動回転は有限であるため、プラズマ端での外部揺動はそれぞれの共鳴面で侵入が阻止される。その結果、初期には、外側共鳴面においてのみ磁気島が成長し、外側共鳴面近傍で回転が減衰する。外側磁気島幅が広がると内側共鳴面と相互作用が始まり、内側共鳴面でも磁気島が成長し始める。内側磁気島の成長に伴い、内側共鳴面での回転も減衰する。その結果、内外の磁気島間の差動回転が小さくなり、回転が無い場合の自発的DTMと同じモード構造を持ち、外部駆動DTMは爆発的に成長する。図5に磁気島幅の時間発展を示す。

プラズマ回転効果を考えることにより、反転磁気シアプラズマの低 $\beta$ ディスラプションで観測される複数の現象、1) 遅い時定数を持つ前駆振動から速い時定数を持つディスラプション現象へ遷移する、2) 同一の安全係数値( $q$ 値)を持つ共鳴面のうち、外側共鳴面でのみ前駆振動が観測される、3) プラズマ端領域でのMHD現象とプラズマ内部領域のディスラプション間の相関関係が観測され

る点を単一の物理モデルで説明することに成功した。さらに、外部加熱による差動回転の維持を模擬した非線形MHDシミュレーションより、DTMが発生しても差動回転を維持することによりディスラプションに至る過程を回避できる事を見出した。

NEXT研究の重要な研究テーマとしてプラズマ乱流研究があげられる。本グループではこれまで第一原理計算に基づく乱流シミュレーションを行うためジャイロ運動論モデル[12]に基づくfull-f5次元プラズマコードGT5Dの開発を行ってきた[13]。このコードの特徴は無散逸保存形を保障する有限差分スキームに基づいており、安定性もよくロバストで高精度の乱流シミュレーションが可能である。これまでプラズマ乱流の研究のためにノイズの軽減を目的でdelta-fに基づくPICコードが多く開発されてきたが、加熱項や衝突項を考慮した開放系のシミュレーションを行うには不向きであった。また、長時間シミュレーションを行うとエネルギーの保存性が低下する問題もあった。GT5Dは長時間シミュレーションに対してもエネルギーの保存性がよく、新古典輸送とプラズマ乱流が共存する系をシミュレーションすることが可能である[14]。温度勾配を固定するdelta-fによ

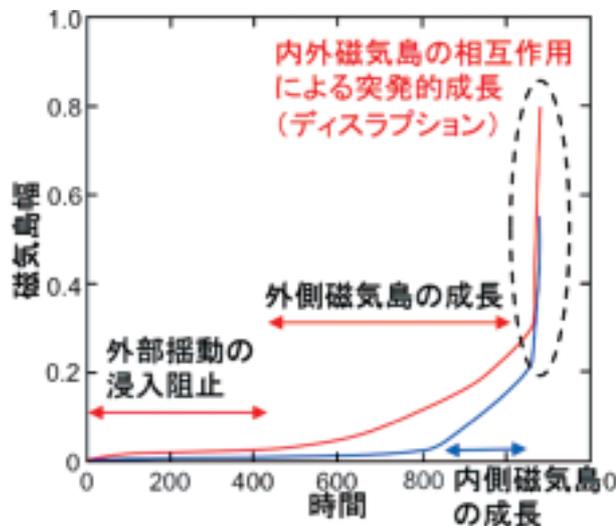


図5 磁気島幅の時間発展

るフラックスチューブシミュレーションでは乱流の飽和レベルはドリフト波が生成する帯状流に大きく左右されるが、full-fに基づくグローバルシミュレーションでは温度分布が緩和し、臨界値へ向かうので帯状流の効果はソースが存在する領域とソースが存在しない領域では当然異なる。ソースが存在する領域では温度勾配が維持される傾向があるので定常的な帯状流が生成され、delta-fシミュレーションの描像に比較的近いが、ソースの存在しない領域では乱流輸送は間欠的なアバランチに支配され、等価的にはボーム輸送を呈する。GT5Dコード開発により温度勾配固定のシミュレーションではカバーできない物理過程の解明が可能となった。現在、運動量輸送に関してもシミュレーション研究を進めており、大局的な径電場生成機構の解明が期待される [12,14]。

反転磁気シアープラズマやトカマク周辺領域で形成される輸送障壁は急峻な圧力勾配と強いプラズマ流を伴っているため、標準的なジャイロ運動論モデルをそのまま適用することはできない。本グループでは微分幾何学的手法を用い、強いプラズマ流の取り扱いが可能なジャイロ運動論モデルの導出に成功した [15]。今後、新しいジャイロ運動論モデルをもとにコード開発を進め、輸送障壁形成・崩壊の物理機構を解明する予定である。

さらにNEXT計画では、プラズマ設計グループとの協力のもと、輸送コードとダイバータコードの統合化研究も推進している [16]。原子力機構で開発されたSONICコード [17] をモジュール化し、MIMD (Multiple Instruction stream, Multiple Data stream) 型で実行可能なように改良を行っている。統合化コードでは、並列化効率が異なるさまざまなモジュールを連動させるため、MIMD型の並列計算が必須であり、その技術開発は重要な研究課題となっている。また、コードの統合化によりつじつまのあったHモードのシミュレ-

ーション研究が可能になると期待される。

### 3. IFERC CSCに向けたシミュレーション計画

第二期中期計画においてプラズマ理論・シミュレーショングループのミッションは「核燃焼プラズマの最適化及び制御のための理論的指針を取得する」ことにある。このため、今中期計画では核燃焼プラズマをターゲットとしたシミュレーション研究を展開していく予定である。MHD研究においてはプラズマ回転を考慮した高エネルギー粒子駆動MHD安定性解析コードの開発を進めるとともに核融合科学研究所との共同研究により高エネルギー粒子を粒子コードでバルクプラズマを流体コードで解くMEGAコードを導入し、高エネルギー粒子輸送の研究を進める予定である。乱流研究においてはGT5Dを拡張し、多種イオン・電子系グローバル静電乱流シミュレーション研究を展開する予定である。さらに第3の柱としてマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション研究を立ち上げ、ディスプレイ研究を進める予定である。計算資源としては2010年より、原子力機構のBX900 (200TF) とFX1 (12TF) が稼働しており、2012年1月にはBA-CSC (~1PF) が稼働予定である。さらに2014年後半には次世代スーパーコンピュータ (~10PF) も共用を開始する予定である。GT5Dを用いたイオン系乱流の場合を例にあげると、解析対象とする装置サイズに応じて必要とされるメモリーや計算機量が増える。BA-CSCではJT-60U級の装置 (炉心体積60m<sup>3</sup>、メモリー14TB、計算量750TF・day) が、また次世代ではITER級の装置 (炉心体積800m<sup>3</sup>、メモリー量147TB、計算量7PF・day) がシミュレーション対象になるであろう。参考のため米国のFSP (Fusion Simulation Project) で検討された計算機能力とターゲットシミュレーションを図6に示す [18]。Virtual Disruptionに

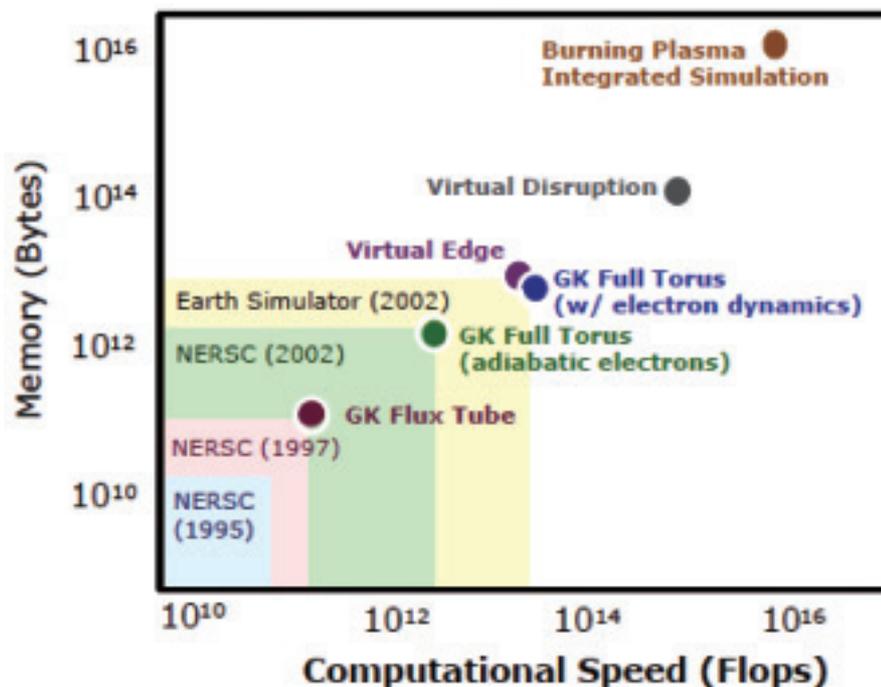


図6 核融合シミュレーションに要求されるコンピュータリソース。文献 [18]のFigure II.1より引用

関しては、我々のグループでも今中期計画で研究対象として考えている。Burning Plasma Integrated Simulationは、統合コード [16,19] をベースにした核融合炉シミュレータを想定していると考えられるが、次世代計算機のフルスペックでも実現困難で、エクサスケールの計算機が必要となる。今後、我々のグループでも核融合シミュレータの検討を行うとともに、エクサスケールの計算機で必要とされるシミュレーション手法の要素研究もあわせて行っていく予定である。

#### 参考文献

- [1] N. Aiba, S. Tokuda, M. Furukawa, N. Oyama, T. Ozeki, Effects of a sheared toroidal rotation on the stability boundary of the MHD modes in the tokamak edge pedestal, Nucl. Fusion **49** (2009) 065015.
- [2] N. Aiba, S. Tokuda, M. Furukawa, P. B. Snyder, M. S. Chu, MINERVA: Ideal MHD stability code for toroidally rotating tokamak plasmas, Comput. Phys. Commun. **180** (2009) 1282.
- [3] N. Aiba, M. Furukawa, M. Hirota and S. Tokuda, Destabilization mechanism of edge localized MHD mode by a toroidal rotation in tokamaks, Nucl. Fusion **50** (2010) 045002.
- [4] E. Freiman, M. Rotenberg, On Hydrodynamic Stability of Stationary Equilibria, Rev. Mod. Phys. **32** (1960) 898.
- [5] N. Aiba, S. Tokuda, T. Ishizawa, M. Okamoto, Extension of the Newcomb equation into the vacuum for the stability analysis of tokamak edge plasmas, Compt. Phys. Comm. **175** (2006) 269.
- [6] S. Tokuda, T. Watanabe, A new eigenvalue problem associated with the two - dimensional Newcomb

- equation without continuous spectra, Phys. Plasmas **6** (1999) 3012.
- [7] S. Tokuda, Bilinear Formulation of the Freiman-Rosenbluth Equation, Plasma and Fusion Res. **74** (1998) 503.
- [8] J. Shiraishi, S. Tokuda and N. Aiba, A matching problem revisited for stability analysis of resistive wall modes in flowing plasmas, Phys. Plasmas **17** (2010) 012504.
- [9] M. Hirota, Energetics of resistive wall modes in flowing plasmas, Plasma Science and Technology **11** (2009) 409.
- [10] J. Shiraishi, M.S. Chu, S. Tokuda, N. Aiba, and M. Furukawa, Numerical Analysis of the 2D Newcomb Equations for the Resistive Wall Modes (RWMs), 49<sup>th</sup> APS - DDP, November 2007, Orlando, Florida.
- [11] Y. Ishii, A.I. Smolyakov, M. Takechi, Plasma rotation effects on magnetic island formation and the trigger of disruptions in reversed shear plasma, Nuclear Fusion **49** (2009) 1.
- [12] X. Garbet, Y. Idomura, L. Villard and T.H. Watanabe, Topical Review Gyrokinetic simulations of turbulent transport, Nucl. Fusion **50** (2010) 043002.
- [13] Y. Idomura, M. Ida, T. Kano, N. Aiba, S. Tokuda, Conservative global gyrokinetic toroidal full - f five - dimensional Vlasov simulation, Computer Physics Communication **179** (2008) 391.
- [14] Y. Idomura, H. Urano, N. Aiba and S. Tokuda, Study of ion turbulent transport and profile formations using global gyrokinetic full - f Vlasov simulation, Nucl. Fusion **49** (2009) 065029.
- [15] N. Miyato, B. D. Scott, D. Strintzi, S. Tokuda, A Modification of the Guiding-Centre Fundamental 1-Form with Strong  $E \times B$  Flow, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 104501.
- [16] 矢木雅敏、核融合プラズマにおけるマルチスケールシミュレーション、プラズマ・核融合学会誌 **84** (2008) 918.
- [17] H. Kawashima, K. Shimizu, T. Takizuka, S. Sakurai, T. Nakano, N. Asakura and T. Ozeki, Development of Integrated SOL/Divertor Code and Simulation Study in JAEA, Plasma and Fusion Res. **1** (2006) 031.
- [18] Final Report of the FESAC ISOFS Subcommittee, Dec. 1 (2002).  
[http://www.isofs.info/FSP\\_Final\\_Report.pdf](http://www.isofs.info/FSP_Final_Report.pdf)
- [19] 福山淳、矢木雅敏、核燃焼プラズマ統合コード構想とその進展、J. Plasma Fusion Res. **81** (2005) 747.