講座

トロイダルプラズマの輸送解析の基礎

6. まとめ

山田 弘 司, 白井 浩¹⁾, 竹永 秀 信¹⁾,
渡邊 清 政, 田中 謙 治
(核融合科学研究所, ¹⁾日本原子力研究所)

Summary

YAMADA Hiroshi, SHIRAI Hiroshi¹⁾, TAKENAGA Hidenobu¹⁾,
WATANABE Kiyomasa Y. and TANAKA Kenji
National Institute for Fusion Science, Toki 509-5292, Japan

¹⁾Naka Fusion Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki 311-0193, Japan

Abstract

A series of lecture notes on bases for transport analysis of toroidal plasmas are summarized. A part of insufficiency is compensated. Unresolved and emerging issues on transport are described. Concluding remarks by each author are presented.

Keywords:

toroidal plasmas, transport analysis, transient transport, high energy particle, source, non-linearity, off-diagonal term, poloidal asymmetry

6.1 はじめに

核融合炉心をめざした磁場閉じ込めトロイダルプラズマのパラメータは輸送で決まっていると言ってよく、その解明は直接、核融合開発に寄与するところ大である。並べて、高温プラズマは一見複雑極まりない一方、集団現象としての輸送の秩序を司る物理機構の解明は学術的好奇心を十分に駆り立てるものである。この講座は、その輸送に関してなるべく具体的な解析法の平易な入門たることを目的とした。

本講座をまとめるに当たって、執筆者4名(山田, 白井, 竹永, 渡邊)と担当編集委員(当時, 田中)が集まって議論を行った。この他にも稲垣 滋氏を始めとする読者から有益なコメントをいただいた。本章はその要約であり、紙面と能力の制限によって残った今後の宿題という態である。多分に、一種のプレインストーミングである
author's e-mail: hyamada@lhd.nifs.ac.jp

るので、稚拙な点は執筆者の責であるがご勘弁願いたい。宿題は元より執筆者が引き取るべきものであるが、読者の方にもご一考いただければと期待する。また、本講座がどの程度、お役に立つものであったか、また不足の点など読者のコメントをご連絡いただければ、執筆者一同、誠意を持って対応したい。

6.2 本講座で網羅されなかった点

6.2.1 輸送について

(1)高エネルギー粒子の輸送

高エネルギー粒子については、熱、粒子、運動量などの源としての扱いをし、いわゆるバルクプラズマの輸送とは切り離した。高エネルギー粒子自体の輸送が新古典的描像からずれないとすれば、このモデルは良い近似である。高エネルギー粒子の平均自由行程は大きく、異常

輸送をもたらすような揺動のスケールを感じないとすれば、通常は新古典的なクーロン散乱だけ考えればよい。幸い、これまでの多くの実験ではこの描像と合う、もしくは高エネルギー粒子の異常度はバルクプラズマよりもかなり小さいということが示されている。しかし、Toroidal Alfvén Eigen (TAE) モードによって高エネルギー粒子の分布関数が増加することも観測されており[1]、その変化の過程(一種の輸送)は良くわかっていない。近い将来の核燃焼プラズマではアルファ粒子の輸送を緻密に詰めることが、その後の核融合炉の性能予測には不可欠となろう。現在のところは、源を実際に計測し、仮定したモデルと辻褄が本当に合っているかを確かめるということが重要であるのだが、この源の計測法が確立できているとは言いがたく、不確定要素が大きい。例外的に、ECHによる電子加熱については電子の緩和時間が閉じ込め時間よりもはるかに短いことと、加熱技術としても閉じ込め時間よりも十分短い時間での変調あるいは on/off を行うことが可能であるので、実験において十分に速い加熱変調による温度分布の変化から加熱吸収分布を精度よく求めることができる[2]。NBI の場合は高速イオンの減速時間が閉じ込め時間と同程度であるため、ECH のように簡単にはいかない。バルクプラズマの輸送解析の観点からは、これらの源の不確実性による影響を軽減させるために、源に依存しない、あるいは鈍感な解析法を用いることも肝要である[3]。

(2) ダイバータ・SOL 中の輸送

次に、ダイバータやスクレイプオフ層 (Scrape-Off Layer: SOL) の輸送は扱わなかった。この領域では中性粒子の役割が大きく、その原子過程や輸送は磁気面構造を基盤とした 1 次元輸送解析で満足に記述できない。本講座ではこの領域についてはシミュレーション計算を頼りとして、バルクプラズマの輸送解析のための境界条件を与えるものとした。この領域はトカマク H モードのペデスタル形成のように劇的な変化もあるので、バルクプラズマとダイバータ・SOL を矛盾なく結合させた解析や物理モデルが求められている。近々、本学会誌でこのあたりの小特集が組まれるとのことであり、楽しみにしている。

6.2.2 解析法について

(1) 過渡応答

過渡応答は単なる輸送係数の導出に留まらず、分布構造形成や非局所輸送という研究分野を拓きつつある[4]。また、後述する理論モデルの検証という課題に対して強力なツールとなっている。本章では、その解析法につい

て、一部第 4 章と重なるが、大事な点であるので、ここで加筆したい。詳しくは文献[5]、さらには[3]を参照されたい。

閉じ込め時間、言い換えれば拡散輸送の時間スケールよりも十分短く、かつ空間としても限られた場所で発生した熱または粒子の擾乱がどのように拡散していくかを観察することによって輸送が議論できる。この方法の大きな特長は拡散係数と勾配との積で表される拡散項と、それ以外の対流項を独立に求めることができることである。特に対流項が大きな役割を果たす粒子輸送については、第 4 章 4 節で取り上げている。熱輸送に関しても、トカマクプラズマのコア部で生じる鋸歯状振動 (Sawtooth Oscillation) によって吐き出された熱が周辺部へ伝播する現象を利用して熱拡散係数を求めることが、かなり古くからなされている[6]。このほか、ペレット入射やレーザーを用いて不純物を溶発させて入射するレーザーアブレーション(不純物輸送研究の手法でもある)によってプラズマが局所的に冷やされ、その冷却部が伝播する(コールドパルス伝播)様子を見ることにより、熱拡散係数を見積もることができる。インパルス的に与えられた電子温度擾乱の伝播は次の式で記述される。

$$\frac{3}{2}n_e \frac{\partial}{\partial t} \delta T_e = \nabla \left(n_e \chi_{tr} \nabla \delta T_e - \frac{3}{2} n_e V_{tr} \delta T_e \right) \quad (1)$$

χ_{tr}, V_{tr} はそれぞれこの過渡応答 (Transient response) から得られる熱拡散係数と熱ピンチである。式(1)を中心に注目する半径まで積分し、

$$y = \frac{1}{n_e \delta T_e} \int \frac{3}{2} n_e \frac{\partial}{\partial t} \delta T_e r dr, \quad x = \frac{\nabla \delta T_e}{\delta T_e}$$

と置くことによって

$$y = \chi_{tr} x - \frac{3}{2} V_{tr}$$

と表すことができる。インパルス応答が伝播する時間を追うことにより、 (x, y) 平面上に、軌跡として直線を描くことができた場合は傾きより熱拡散係数、 y 切片から熱ピンチを求めることができる。

さて、ここで、拡散項を除いた残りを引き受ける V_{tr} の解釈であるが、 $\chi_e = f(T_e, \nabla T_e, \dots)$ となる熱輸送係数の温度勾配依存性を考慮して、定常的な熱流束を $q_e = -n_e \chi_e \nabla T_e$ とすると、過渡応答に対して

$$\chi_{tr} = \chi_e + \frac{\partial \chi_e}{\partial \nabla T_e} \nabla T_e, \quad V_{tr} = -\frac{2}{3} \frac{\partial \chi_e}{\partial T_e} \nabla T_e$$

の関係が与えられる。この例では熱ピンチは熱輸送係数の温度勾配依存性という非線形な性質によるものと説明され、過渡的な輸送係数 χ_{tr} は定常的な輸送係数 χ_e と必ずしも一致しない。あるいは、第1章でも触れたように、温度とは異なる物理量による影響も考えられる。例えば、密度勾配や電場を取り上げて $\chi_{tr} = \chi_e$, $V_{tr} = V_e = f(\nabla n_e, \nabla \phi, \dots)$ とおくことによって $q_e = -n_e \chi_e \nabla T_e + \frac{3}{2} n_e V_e T_e$ を満足することができる。この場合は、輸送方程式を行列で書いたときに非対角項となる部分が熱ピンチを生むと解釈される。ここでの議論は熱輸送を例としたが、粒子や運動量の輸送でも同じことである。上の2つの解釈は物理的に全く異なるのだが、ここで述べた解析法からピンチ（定常的な温度勾配に比例するものを除いた残り）がどちらによるのかはその判別ができない。非対角項と対角項を分離する方法としては複合的な過渡応答を統合して解く方法がある。また、対角項（拡散）ではない部分が仮定した物理モデルで説明できるとするアプローチの仕方もある。例えば密度のピーキングがトロイダル電場による Ware pinch によるものかどうかという問題が長く議論されている。

異なった輸送が連関する問題として、運動量（流れ）の輸送が径電場の形成を通じて熱・粒子輸送に影響することがある。このように、磁力線に平行方向の輸送と磁力線に垂直方向の輸送を連携させて解析する方法としてもこの過渡応答は強力な手段となる。

(2)理論物理モデルとの比較やそれに基づいて分布を再現することについて

理論として完成された新古典拡散との比較がまず、重要である。トロイダルプラズマにおいて、一般的には磁力線に平行方向の輸送（抵抗、ブートストラップ電流、流れなど）は新古典拡散であるか、異常度は小さい。一方、垂直方向の輸送（熱、粒子など）は新古典拡散を無視できるほど異常度が大きいとされている。トカマクの内部輸送障壁に見られる異常輸送が非常に抑制された状態や、磁気軸付近でのブートストラップ電流のシードともなるポテト粒子軌道[7]の影響を議論するために、粒子軌道の幅が勾配のスケール長よりも十分小さいと言いたいケースや、流れ・電場が存在する場合などについて新古典拡散理論を修正し、実験と比較する必要がある[8]。ヘリカル系においては新古典拡散が大きくなりえるので、特に無衝突領域での定量的精度にすぐれた解析

が求められる。理論的なアプローチとしてはモンテカルロシミュレーション[9]によるものが考えられるが、実験解析との広範な比較を短いターンアラウンドで進めるためには計算効率の高い定式化が望まれる。

輸送解析で求めた輸送係数を議論するのではなく、第一原理となる物理モデルによって時間発展シミュレーションを行い、実験で観測された分布構造や時間変化を再現できるか否かという手法が米国を中心に盛んである。ここでは、ドリフト波による揺動がもたらす異常輸送がターゲットとなっている。ドリフト波乱流にはさまざまな種類がある[10]。その中でも特にイオン温度勾配モード（ITGモード）は古くから研究されており[11]、不安定性のしきい値が存在するため密度の尖頭度が大きくなるショット（例えばベレット入射など）における閉じ込めの改善や分布の stiffness を説明する候補として多くの人々によって研究され、輸送モデルのための定式化が行われて来た。それらを用いて様々な閉じ込めモードにおける密度分布・温度分布の時間発展シミュレーションと実験データとの比較がなされてきたが、近年では径電場シアによる安定化効果も取り入れられ、個性溢れるモデラーによって輸送係数の表式がますます複雑に進化している。ITGモードに基づく輸送係数の定式化では、しばしばモードの波数を決めているが、大規模なジャイロ流体シミュレーションによって、より高い波数のモード（ETGモード）がITGモードの特性に影響を及ぼすという結果が得られている[12]。今後はこのような数値シミュレーションで得られた知見を、より簡便な輸送コードで実行できるように輸送係数としてうまく定式化し、一歩踏み込んだ輸送物理研究とする努力が必要であろう。

6.2.3 その他

0次元量の観測と輸送との関連については興味を持たれた方が多いかもしれない。詳細な1次元解析を行うことができる実験プラットフォームは国内ではJT-60U, LHDなどに数が限られている。一方、0次元の観測は小規模な実験でも直接、間接に比較的容易に行うことができる。あるいは空間解像度がなくとも、ある幅を持って局所的な物理量を観測することはよく行われる。これらの観測を説明する輸送を考察する上でも、本講座は利用していただけるであろう。エネルギー閉じ込め時間と熱輸送係数については第2章で述べたが、プラズマ電流[13]、抵抗、プラズマ回転などについても、小規模な実験から学ぶ点は多い。

今回の講座は解析手法に重点を置いたため、不純物輸

送については、新古典理論で予測される中心部への不純物の蓄積[14]およびネオンやアルゴン等の不純物ガスをプラズマに入射したときに観測される高放射損失を伴う閉じ込め改善モード (Radiative Improved mode : RI-mode) [15] との関わりについて記述ができなかった。内部輸送障壁を伴うプラズマでは、アルゴンや金属等の重不純物の蓄積を伴う場合が多く、その回避手法の確立が重要視されている[16]。また、RI モードに関しては、不純物による ITG モードの抑制効果等が調べられており[17]、輸送低減機構の観点から興味深い結果が得られている。

不純物だけでなく、複数の荷電粒子が存在する (核燃焼プラズマでは、少なくとも、電子、D、T、He イオンの4種) 状況下での輸送解析について、全く矛盾のない手法はまだ確立できていないと言えない。また、TFTR と JET において行われた DT 実験に関して、トリチウムをトレーサーとして用いた粒子輸送解析はユニークな実験であり、文献[18,19]を参照されたい。

6.3 輸送解析に当たって不足や疑問を感じている点について

6.3.1 流束の分解

熱や粒子の源とそれらが損失する場所は普通、異なるので、これらをバランスさせる流束が生じ、これを輸送と称して研究対象としている。この流束を拡散項と対流項に分けて議論することにどれだけの価値があるのか、読者の方々にも考えていただきたい。もともと熱拡散係数自体がプラズマパラメータの非線形関数になっているようなので、勾配だけを特別扱いすることはどうか。対流項の係数が $3/2$ か $5/2$ かという問題も対流項の物理的背景に依存している。理論との比較という意味からは、拡散項、対流項、はたまた、その対流項を分類したものを別々の対象とするより、流束自体を比較していくべきではないだろうか。否、理論的に幾つかの異なった物理機構によって流束が発生することが予測されているのだから、それぞれの寄与を分離して議論できる実験をして比較すべきであるという議論もある。また、異なった装置間や同じ装置でも異なるプラズマパラメータの元での実験を比較する場合は、流束自体よりも、それがやはり何によっているかという観点で比較することの方がイメージは作りやすい。

6.3.2 ポロイダル非対称性

本講座では磁気面を横切る輸送を対象としており、言い換えれば磁気面平均量というものを扱っている。新古

典拡散理論の枠組みでは、補足粒子の衝突が担う流束にはポロイダル非対称性があるが、軌道の局所性によって1次元化して記述できることが保証されている。一方、異常輸送を担うとされる揺動はポロイダル方向に不均一であることが実験観測として報告されている[20,21]。すると揺動による流束は磁気面上不均一であろうが、これを磁気面平均する妥当性は保証されているのだろうか。

6.4 最後に

(1)トロイダルプラズマの輸送解析は、本講座を通して読まれた方が散漫に感じられたと思いますが、大変多岐に渡ったモデルの組み合わせから成っています。それぞれのモデルは必ずしも確信があるものではありません。一人の人間でカバーできるものではありませんが、包括的というか統合的な視点がなければ、蜻蛉に逃げ込んで非常に局所的な満足に終わってしまいます。個々のモデルの最適化は、それらを組み上げた輸送解析の最適化と必要十分ではありません。解析の目的と全容をつかみつつ、各モデルの精度に気を配っていただきたいと思います。自戒をこめて。 (山田弘司)

(2)輸送コードはその大きさの割には手軽に使えるツールですので、機会があれば一度使ってみて、粒子補給や加熱などの外部入力に対するプラズマの応答についての感触を得て欲しいと思います。ただし、輸送コードの根幹になっている異常輸送のモデルには決定版があるわけではありませんし、またプラズマ性能の向上や計測法の進展に伴って輸送物理として新たに検討すべき項目もどんどん増えています。輸送コードの保守・整備を行う立場からは、これらの物理を扱えるようにコードの能力を高めてゆくのは勿論のことですが、実験・理論を問わずユーザーの側から、これらの物理を簡潔に定式化するモデラーが1人でも多く輩出することを願っています。 (白井 浩)

(3)外国の研究者と話をしていると、「研究の分野は？」と聞かれて「粒子輸送」と答えると、「難しい分野だね。」とよく言われます。解析方法が難しいという意味合いもありますが、粒子輸送の解明がまだまだ不足している表れでもあります。しかし、逆に言えば、これからまだまだ大きく発展させることができる分野でもあり、そこに研究のおもしろさがあります。特に、核燃焼プラズマでは核融合出力制御の観点から、粒子輸送の理解が非常に重要になってきます。この講座を機に粒子輸送研究に携わる人が増え、早く「難しい分野」になればと思いま

す。

(竹永秀信)

(4)輸送研究、特に輸送シミュレーションでは、任意パラメータが無数にあり、限られた現象のみを説明しようとすると説明は数多くあります。したがって、輸送研究を行っている人は、真の説明に近づいているのか、単に思考実験を楽しんでいるだけなのかが容易にわからない状態に陥るかもしれません。そんな時は、必ず現在の研究手法と実験結果あるいは第一原理の整合性、関係を確認するよう心がけることが、物理現象の真の説明から離れずに研究を進める方法だと考えます。輸送特性は炉の大きさや経済性等のパラメータに支配的な寄与をすると思えるので、上記のことを注意しながら、多くの方が輸送解析ツールをうまく利用し、輸送特性の研究に参加すれば、核融合炉開発研究が大きく進展すると思います。

(渡邊清政)

(5)今回の講座は私自身が輸送の体系的な知識を身に付けたい、自分の知識を確認、補足（または修正）したいと思ったのが企画の動機です。基礎知識の習得、確認と輸送研究の概観（現在何に注目されて研究されているか。）を把握するには格好の材料に仕上がったと思います。輸送研究は日々進展しています。本講座で記述された知識、情報を理解していれば最新の国内、国際会議での発

表、研究論文の理解もより深まると期待しています。

(田中謙治)

参考文献

- [1] K. Shinohara *et al.*, Nucl. Fusion **42**, 942 (2002).
- [2] M. Rome *et al.*, Plasma Phys. Contr. Fusion **39**, 117 (1997).
- [3] N.J. Lopes Cardozo: Plasma Phys. Control. Fusion **37**, 799 (1995).
- [4] 岸本泰明編：「小特集 プラズマの非局所輸送現象と様々な構造形成」プラズマ・核融合学会誌 **78**, 857 (2002).
- [5] 東井和夫：プラズマ・核融合学会誌 **77**, 627 (2002).
- [6] G. Jahns *et al.*, Nucl. Fusion **18**, 609 (1978).
- [7] K.C. Shaing and R.D. Hazeltine: Phys. Plasmas **4**, 4331 (1997).
- [8] K.C. Shaing and R.D. Hazeltine: Phys. Fluids B **4**, 2547 (1992).
- [9] A. Wakasa *et al.*, J. Plasma Fusion Res. SERIES Vol.4, 408 (2001).
- [10] J.W. Connor and H.R. Wilson, Plasma Phys. Control. Fusion **36**, 719 (1994).
- [11] B.B. Kadomtsev and O.P. Pogutse, Review of Plasma Physics, (ed. M.A. Leontovich, Consultants Bureau, New York) Vol. 5, p. 249 (1970).
- [12] Y. Kishimoto *et al.*, 19th IAEA Fusion Energy Conf. 2002 Lyon, IAEA-CN-94-TH/1-5.
- [13] M. Zarnstorff and P.C. Prager: Phys. Rev. Lett. **53**, 454 (1984).
- [14] G. Fussmann *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **33**, 1677 (1991).
- [15] R.R. Weynants *et al.*: Nucl. Fusion **39**, 1637 (1999).
- [16] H. Takenaga *et al.*, submitted to Nucl. Fusion.
- [17] M. Z. Tokar *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 895 (2000).
- [18] P.C. Efthimion *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, 85 (1995) 85.
- [19] JET Team, Nucl. Fusion **39**, 1891 (1999).
- [20] A. Fujisawa *et al.*, Nucl. Fusion **36**, 375 (1996).
- [21] C. Watts *et al.*, Phys. Rev. Lett. **76**, 2274 (1996).