



研究グループ紹介

東京大学大学院新領域創成科学研究所 吉田・比村研究室

1. はじめに

東京大学は、本郷、駒場、柏の3キャンパスにおいて、それぞれ特徴ある教育・研究を展開するという構想に基づいて不断の改革を進めています。新キャンパスである柏は「知の冒険」の場として位置づけられ、学問的新領域に挑戦しようという研究者が集う空間となります。柏キャンパスの中核を担うのが、平成11年度に立ち上がった大学院新領域創成科学研究所（Graduate School of Frontier Sciences）であり、教官数約180人、大学院生は4年後に約900人の規模となります。工学系、理学系をはじめとした、ほとんど全ての部局から教官が集まっており、科学の最前線を俯瞰することができますが、むしろ網羅的になるのではなく、特定のフロンティアに集中した教育・研究をめざす方針です。その重要な領域の一つがプラズマ理工学であり、東京大学の核融合プラズマ関係の人たち全員が、これに投入されています（一部の教官は、平成11年度に設置された高温プラズマ研究センターに所属し、大学院と両輪を構成します）。現在は、本郷キャンパスで旧部局に間借りしていますが、2002（平成14）年頃に柏新キャンパスへ移転する予定です。

2. プラズマ理工学講座

私たちの研究室は、先端エネルギー工学専攻・プラズマ理工学講座という組織名称です。吉田善章、比村治彦、龍野智哉、Vazha Berezhiani（客員教授）、Muhammad Iqbal（パキスタン出身）、近藤重雄、Francesco Volponi（イタリア出身）、伊藤淳、中島千博の博士課程学生5人、柴山学久、田原慈、大崎秀一、沼田龍一、八木圭太、Mira Savkovic（ユーゴスラビア出身）の修士課程学生6人の所帯です（平成11年度）。いろいろな国籍、出身大学の人たちからなる極めて heterogeneousな集団ですが、この「るっぽ」から新しい学問が生まれることを期待しています。

現在の実験室は、かつて工学部におられた内田岱二郎先生、井上信幸先生から受け継いだもので、中核実験装置の一つであるREPUTE-1は、15年ほど前に、井上信幸先生と宮本健郎先生（当時理学部）が中心となって建設されたものです。私たちは、小川雄一教授（高温プラズマ研究センター）の研究室と共同で研究をしており、柏キャンパス移転にあわせて研究内容の刷新を図るべく、新たな実験装置の設計などを協力しながら進めています。以下では、最近の研究内容を簡単に紹介します。

author's e-mail : yoshida@k.u-tokyo.ac.jp homepage : <http://www.k.u-tokyo.ac.jp/ae/plasma>

3. 研究内容

私たちは、理論研究と実験研究を分離しないでプラズマ物理を捉えることを重視しています。現在は、プラズマの流れに関する諸問題を中心に、数学的な理論から実験、装置設計に至るまでを総合的に研究しています。

(1) 非中性プラズマとプラズマ流の物理

通常「プラズマ」というと、電離した気体を意味し、したがって、平均すると電気的に中性の荷電粒子多体系を指します。核融合研究に関連して進歩してきた高温プラズマの物理も、主として中性プラズマを対象としたものです。しかし、プラズマ物理の学理は、電磁力によって相互作用する多粒子系の「集団現象」にかかわる非線形科学として深化し、一般的な基礎学術へと発展しています。なかでも、中性条件を取り除いた「非中性プラズマ」の研究は、プラズマ物理の視界を格段に広げるとともに、さまざまな分野が関連する新領域の創成に道を開くものと期待されます。非中性プラズマでは、中性条件下で縮退していた物理的效果が発現し、新たな特性が見出されます。とくに、自己電場によって起こるプラズマ流にかかわる物理は難しく、また魅力に富みます。応用としては、反物質を閉じ込めて作る反物質プラズマが注目されています。私たちは、さらに、非中性化したプラズマを用いて、超高ベータ ($\beta > 1$) 平衡を作り、先進的核融合($D - ^3He$ などの核融合) を実現することを考えています。

(2) カオスの応用

予測が困難なダイナミックスである「カオス」が起こる系では、わずかに異なる条件に対する運動が全く異なったふるまいをします。このような系では、ある一つの条件に対して得られた運動によって現象の「普遍的な特徴」を代表することができなくなります。私たちは、個々の運動がカオスを起こすような系の「集団現象」に注目しています。これまでの物理学では、確率過程として扱われる衝突過程や、粒子運動と集団運動の共鳴による「ランダウ減衰」という2つの基本的な散逸過程（エントロピー生産）が明らかになっていますが、カオスによるエントロピー生産は第三の拡散や加熱のメカニズムであるといえます。具体的には、磁場のヌル点で起こる電子運動のカオスを調べています。下記の実験装置で、ヌル点を流れる電流の電気抵抗を計測すると、カオスによって起こる無衝突電気抵抗があることが示され、我々の理論的な予測が実験的に裏づけられました。

この現象は、次項で述べるように、非中性プラズマを生成する

ための基本的な原理として応用されています。また、無衝突の電子加熱が起こるので、低ガス圧で動作できる高性能プラズマ源に応用できます。実は、この現象は、内田岱二郎先生が開発された磁気中性線放電（NLD）プラズマ源の動作原理を研究していくみつかったものです。カオスによる無衝突抵抗は、宇宙・天体プラズマで起こる磁気リコネクションにおいて観測される「異常抵抗」の発生原理でもあると考えています。

(3)PROTO-RT 実験装置

非中性プラズマの生成・閉じ込めを行うために、私たちは独自の概念に基づくトーラス型非中性プラズマトラップ装置（PROTO-RT）を設計・製作し、基礎実験を行っています。この装置は、内部導体をもつことが特徴であり、ポロイダル磁場とトロイダル磁場、垂直磁場を組み合わせことで、さまざまな磁場配位を定常的に生成することができます。

現在は、電子銃によって電子プラズマ（非中性プラズマ）を生成する実験を行っています。トーラス系の閉じた磁気面内に荷電粒子を入射することは、角運動量の保存のために、容易ではありません。そこで、前記のカオスの効果を応用します。カオスとは無限周期を意味するので、粒子の軌道長が極めて長くとれます。このために、非断熱効果を与えやすく、磁気面を横切る粒子拡散を起こしやすくなるというアイデアです。PROTO-RTの原理は、電場を使う通常の直線型閉じ込め方式とは異なる「純磁場閉じ込め」をはじめて可能とするものです。この方法が確立すると、高エネルギーの粒子を予備減速することなく直接トラップすることができる、電荷の符号が異なる異種粒子を同時に閉じ込められるなどのメリットがあり、高効率の反物質プラズマ生成が可能になると期待されます。

同じ方法を用いて、中性プラズマをターゲットとして電子を入射して非中性化し、次項で述べる高ベータプラズマ閉じ込めを行うことを計画しています。

(4)シア流の物理（自己組織化）

プラズマに限らず、一般の渦ダイナミックス系で、Beltrami/Bernoulli 平衡という概念を導入して自己組織化現象について



前列左から 森川、龍野、吉田、比村、バシャ、
中島、近藤、八木、大崎、ミラ、
小澤、沼田、伊藤

研究しています。Beltrami 条件とは、渦と流れが平行になることをいい、Bernoulli 条件とは（普通の意味からは拡張していますが）エネルギー密度が空間的に一様になることをいいます。両条件は、渦ダイナミックスの平衡状態ではいつも同時に成立し、緩和した状態を表すと考えられます。Beltrami/Bernoulli 条件を満たす渦・流れ場は、いろいろな渦ダイナミックスで自己組織化されます。例えば、逆転磁場ピンチ（RFP）や極低 q (ULQ) などでできる常磁性場平衡は Taylor relaxed state と呼ばれますですが、これは MHD 系の Beltrami/Bernoulli 平衡です。

私たちは、非中性化プラズマの Beltrami/Bernoulli 平衡に注目しています。MHD 系に二流体効果を加えると、電子流体とイオン流体それぞれに Beltrami/Bernoulli 条件を与えることができ、この場合の平衡は 2 つの異なる Taylor relaxed state を重ね合わせたもの（線形結合）になることが示せます。この線形結合で張られる状態空間は、Taylor の常磁性から完全反磁性（Meissner 効果）までの極めて広範な状態を含むことがわかつてきました。反磁性は高ベータ平衡を与えるので魅力的です。しかし、二流体効果は通常の状態では小さな項で表される「特異摂動」です。これを発見させるためには、プラズマの流れを駆動する必要があります。前記のように、流れを駆動することは、プラズマを非中性化することと等価です。したがって、非中性化されたプラズマでは、反磁性の平衡を自己組織化によって生み出すことができると考えられます。

(5)シア流の物理（非エルミート・ハミルトニアン系の数理）

シア流をもつ系では、線形理論においてすでに深い問題を含んでいます。流れのない場合には、線形 MHD 方程式は自己共役性（エルミート対称性）をもっており、いわゆる Von Neumann の定理によってスペクトル解析が可能です。しかし、シア流が加わると非エルミート系になります、スペクトル解析の常識はすべて覆されます。これは、数学的にも全く未解決の深遠な問題であり、学問的な興味の尽きないところです。物理としても、揺らぎの安定性や統計的性質が、厳密理論の立場からは、ほとんどわからない難問であり、しかも応用において重要な問題です。非エルミート系では、モード間の相互作用（エネルギー輸送）が起こり、例えば共鳴的なエネルギー輸送は secularity を生じるよう振る舞いをします。この意味で、非線形系にも共通する問題（renormalization など）になります。私たちは、非モード的手法とスペクトル理論の両面から数学的な構造を調べています。また、磁気シアと流れのシアの関係について、前記の実験とも対応を取りながら体系的に研究を進めています。

4. 研究室のこれから

ここに紹介した以外にも、銀河の渦巻き構造に関する非線形理論、プラズマの揺らぎに関する統計物理、電子ビーム系に見られる離散構造に関する実験と理論など、集団現象・非線形科学のフロンティアを開拓する意気込みで新しい研究に挑戦しています。今後も、さまざまな分野との交流を通じて、大学の研究室らしい雰囲気を作っていくたいと考えています。

（文責：吉田善章）

（2000年3月23日受理）