

講座

プラズマ・核融合科学者として君たちはどう生きるか

How do You Live as a Plasma and Fusion Scientist ?

1. はじめに

1. Introduction

池添竜也

IKEZOE Ryuya

九州大学応用力学研究所

(原稿受付：2021年2月22日)

大家や権威と呼ばれるような科学者の一生には、論文等、世に現れた成果物の他にも参考となる知識・経験・教養等が沢山付随するものです。そのような蓄積の一部は指導教員と学生という関係で系譜として引き継がれたり、共に研究をしたチーム内において伝わったりしていることが多いと推察されます。

J.J.トムソンの下で放射線の研究を始めたアーネスト・ラザフォードが数多くの放射線に関する研究を行い、自身がノーベル賞を受賞すると共に多くのノーベル賞学者を育てた話は有名です。他の分野を含め身近なプラズマ・核融合分野においても、優れたチームから優れた結果なり優秀な研究者が数多く生み出されている例を思い浮かべることができます。ここには単なる研究の流行等では説明できない『不思議な力』が作用しているように思えます。その力は研究チームの雰囲気の中で生み出される相互作用なのかもしれないし、知識・経験・教養なりの伝播なのかもしれません。

もし本当にそのような『不思議な力』があるのであれば、そしてわずかかもしれませんが文章で伝わるものがあれば、とそうした思いから、本講座の立案に至りました。本講座では、プラズマ・核融合分野を牽引されて優れた功績を残されると共に教育にも多大な貢献をされた優れた科学者に、これまでに伝えきれなかったメッセージ等を自伝的なエピソードに含めて綴っていただきました。成功・失敗談は最良の教科書になることは言を俟たないですが、その他、ある科学者の研究人生をその科学者自身の文章から垣間見て感じることは、座学では決して学ぶことができない貴重な体験になるでしょう。何かの縁で聞かせていただ

た昔話の中には大変参考になるお話も実際に多いです。ところが、そのような体験の享受は限られた人に訪れる限られた機会であり、大勢の人に伝わらないので勿体ないと思います。人はそれをただただ縁と呼ぶのかもしれませんが、

従来の講座とは趣を異にしており少し奇抜に思われるかもしれませんが、若手に役立つという講座の意図からは逸脱していません。調べようと思っても調べるのでできない読み物の価値は意外と高いのではないのでしょうか。本講座はとりわけ大学生や研究の道を歩み始めた若手をターゲットに据えています。科学者に憧れている高校生等にとっても、プラズマ分野を例とした科学者像を知るのに適しています。

本講座では上記の目論見の下、『不思議な力』を発する6名の先生方に、重い金の筆を起こしていただきました。

タイトル：執筆者（五十音）

『プリンシプル』：伊藤公孝先生

『プラズマと生きて50有余年』：犬竹正明先生

『強靱な物質：プラズマ』：田島俊樹先生

『プラズマ統合モデリングへの道』：福山 淳先生

『プラズマ・核融合研究を原点とした応用展開』：間瀬 淳先生

『核融合プラズマに耐える炉内材料のつぶやき』：吉田直亮先生

先生方のご経歴についてはここでは記載を控えますので、各記事から読み取っていただければ幸いです。まだ研究を続けられ、後輩たちへ様々なご示唆を与え続けてくださっている先生もおられますが、蓄えられている知識・経

験・教養を是非とも多くの若手に届けるために、金の筆を執っていただきました。突然の依頼であり、また、書きにくいであろう内容を強いてしまうにも関わらず、プラズマ・核融合分野の発展への助力としてご承諾いただいた先生方には心より感謝申し上げます。

読者の皆さんの今後の研究人生において、記事中の何かのメッセージが反復して想起され役立つことがあれば幸い

ですし、直接的なメッセージ以外からも様々なことを感じ取っていただけることを期待します。さあ、どのような研究人生を歩みましょうか。

本講座は分野の史実を残すことを意図していないため、記事中の史実関係の正確性については担保しておらず、著者からのメッセージとしてお読みいただければ幸いです。



いけ ろえりゅう や
池添 竜也

九州大学 応用力学研究所 准教授。2010年 京都工芸繊維大学 博士(学術)。筑波大学 プラズマ研究センターを経て2018年より現職。MHD 緩和現象, ICRF 波動加熱やマイクロ波を用いた波動計測, 高エネルギーイオンと波動との相互作用に関する研究を行い, 最近ホイスラー波~EC 波帯の高周波と高エネルギー電子のダイナミクスに着目した研究展開を図っています。阪神・淡路大震災, 東日本大震災と近くで経験し, 九州に逃れてきました?が, 九大の近くにも断層があるようです。今後, 人類は複雑系と呼んできた事象を紐解く必要がありますが, プラズマがそのための鍵となればいいなと思う今日この頃です。



2. プリンシプル

2. Principle

伊藤 公孝¹⁻⁴⁾

ITOH Kimitaka¹⁻⁴⁾

¹⁾中部大学先端研究センター, ²⁾中部大学ミュオン理工学研究センター,

³⁾九州大学極限プラズマ研究連携センター, ⁴⁾自然科学研究機構核融合科学研究所

(原稿受付: 2020年11月22日)

読者の皆さんが今後研究者の道に進むにしろもっと広い世界で活躍するにしろ, 自分のスタイル・自分の生き方を身につけて貫くことは, 身につけることを求められるたくさんの「生きるすべ」の要素の中で, とても価値あることだと思います。役に立つとは断言しませんが価値があります。皆が同感するかどうかは別にして, そんな立場からのメッセージです。お代は見てのお帰りの気持ちでお読みください。

Keywords:

principle, selection of problems, mentor and friend

2.1 プリンシプル

スタンダールの作品を昔から好んで読んだ。この作家の名作は, 最後の跋語に"to the happy few"と書いて閉じられる。生きた・書いた・恋した, と墓碑に刻んだこの人物が人生の大きなものをかけて書いたものが, ごく少数の人がわかってくれればいいのだというプリンシプルに貫かれていることに強い印象を受けた。歴史を見ると, 信念をあからさまにいう人や内に秘める人など様々であるものの, 人の心を打つ生き方には, プリンシプルを持った生き方があると思うようになった。

2.2 私のプリンシプルとの出会い

物理学者になりたくて大学に入って師・友・伴侶(早苗)と出会い, 私の学生生活はそこから始まっている。大学に入って考えたことは

- 専門を選ぶ(もう, 物理学の最前線全部を一人の碩学—ランダウ・ファインマン・高橋秀俊……—が描けるような時代は過ぎていた)

- 自分のプリンシプルを作る

ことであった。

専門については, 「縁」という他ない経緯でプラズマ物理や関係する問題になった。

そこで, 自分のプリンシプルはどうするか。何年かかけて, 二つのプリンシプルを選ぶことになった。行きがかりといえは行きがかり, 不可避といえは不可避と言える。

2.2.1 プリンシプル①へ

- ①「自分は実験家のデータを見て新しい理論を作る研究者になりたい。」

もともと, ずっと物理の実験は好きだった。それで, 大

学の卒業研究も実験を選んで, 相棒と一緒に装置を組み立てさせてもらい実験して学位をもらった。長いガラス管をもらってきて片棒を担いで相棒と一緒に慎重に実験室に運び込む役には立った。実験装置を組み上げて(二つの鏡の光軸揃えてレーザー発振させる)二人で工夫をいろいろしたが装置は働かない。気分転換に, 伊豆半島の戸田海岸に行って物理学科の同級生たちと「戸田ゼミ」を開くことにしてゼミを満喫した。東京に帰ると, なぜか実験装置は動いていて実験はうまく進んでいた。(大変残念ながら)それまで私がしていたことは相棒の足を引っ張っていただけだということ露骨に思い知らされた。

人間には向き不向きがある。が, 実験との付き合いは思い切れない。それなら自分は実験家のデータを見て新しい理論を作る研究者になればいい, というのがとても良い思いつきに思われ, それで行こうと決めた。私のプリンシプル①である。

もちろんそれは甘い考えである。ある時, 大河千弘先生に「君はどうしたいんだ」と尋ねられた折に「自分は実験家のデータを見て新しい理論を作る研究者になりたい」とお答えした次第。大河先生は「それは誰もが夢見るけれども, 実に困難な厳しい道なのだ」と(ご自身が成し遂げられた経験を踏まえ)諭されたのをハッキリ覚えている。その時「やめろ」とは言われなかったんだからこれでいこうと決めた[1]。

2.2.2 プリンシプル②へ

もう一つは

- ②「人の仕事のいいところが見えるような眼力を養おう」

というものである(読者諸君, 「日頃あんな厳しいことを言う伊藤が何を言うか」と原稿を投げ出さないでくださ

author's e-mail: itoh@isc.chubu.ac.jp

い、本当だと言う証人もいるのですから)。

こちらは、吉川庄一先生の言葉に誘発されたもの。ある日、庄一先生が「他人の仕事の間違いを見つけて批判するのは、批判された仕事をするよりずっと楽なんですよ。」と言われたことがある。毀誉褒貶にさらされた庄一先生らしい言葉に深く納得して、それでは僕は人のいいところを見る眼力を磨こうと腹に決めた。

こういう経緯から、二つのプリンシプルを持って、大学院を卒業し、世の荒波に踏み出した。

2.2.3 さらにプリンシプルとの出会い

人生の伴侶となった故伊藤早苗のプリンシプルはもっとハッキリしていた。二つを再録する。

- ③「どうなるか、ではなく、どうするか。」
- ④「解ける問題ではなく、解かなければいけない問題にチャレンジする。」

この二つで一生を貫いた。こっちもこっちで、夢見るかもしれないけれども困難な道である。①・②より③・④は、一層 high-risk/high-return 路線である。

H-mode 分岐理論が初めてできたのはこのプリンシプル③・④の賜物である。早苗は Wagner 先生からガルヒンに3ヶ月来ないかと招聘された。研究所に到着して Wagner のオフィスについて挨拶するや開口一番、早苗は「H-mode の理論を作る」と公言して、招聘した Wagner も一緒に着いた私[2]もとても驚いた。

理論ができてしまったのはもっと驚きだが、それについては、私のプリンシプル②も生きている。Weihestephan の庭のベンチで早苗が「径電場があってそれが分岐するのが L-H 遷移」と言った時に「それはいける」とすぐに言ったこと(そして地面に式と図と一緒に書いたこと)が私の功績である。庄一先生のテーゼ「他人の仕事の間違いを見つけて批判するのは、批判された仕事をするよりずっと楽」の予言通り、その理論モデルが発表されたのち、褒めたのは殆ど私一人(それに論文を通してくれたレフェリー)、素直に「正しいかどうかよくわからない」と言ってくれた方が少数、(嘲笑から論理的風なものまで含め)多数の人が批判した。当時の対応の記録がある(諸氏の名誉のために特に秘す)。結局、居田克巳さん(NIFS)、三浦幸俊さん(原研)たちが JFT-2M トカマクのプラズマで強い電場が生まれることを実験的に発見してくれて、嘲笑は終了。

2.3 応用

話は前後するが、①のような考えを持って生きようとする、自分が考えることが実際に観測できるかということが問題になる。最初、ドリフト波やそれにまつわる輸送などを手掛かりに研究を始めたが、その当時、実験観測はまだまだ手の届かないところにあった。そのため、波とプラズマの応答を定量的に考える為には、人為的に制御された波を対象にせねばと思い、その勉強のため、波動加熱の専門家福山淳さん(当時岡山大学)に入門して一緒に仕事を始めた。福山さんは、非線形波動やカオスの発生などを

テーマにエレガントな理論を作り際立っていた。波動加熱の話の皮切りに、プリンシプル④の解かなければいけない問題に取り組もうという意図から様々なテーマに3人で邁進した[3]。仲間も少しづつ増えていった。

2.3.1 核融合科学研究所にて

核融合科学研究所が発足してそこに加わった時、旧名古屋大学プラズマ研究所の建物に移った。当時、理論家は本館の4階に居たが、私は実験家が溜まっている新館の5階に部屋をもらった。例のプリンシプル①で行くためである。

そのフロアに腰を据えた功德は色々あった。目論見通りになって良かったこととして、藤澤彰英さんがそのフロアに居たことを例として挙げさせていただこう。私の部屋とエレベーターを行き来する途中に藤澤さんのオフィスがあって、彼がよく実験結果を見ている。HIBP(重イオンビームプローブ)を使ってCHS装置のポテンシャルを精密計測していた藤澤さんのデータには、世界初公開のものがあって exciting だった。ある時、一枚のグラフを見て首を傾げている。「急にポテンシャルが増えて短時間で元に戻るんですよ。」と言う。パッと見て、これはいけるよ、ヘリカル系の電場が分岐することを実証した発見だから速くPRLの論文にしよう、と声をかけた。それはそれで上手くいって、その後の機会に部屋を覗くと、別のグラフを見ながらニコニコしている。データを見ると、例のポテンシャルの急増・急降下のペアが、次々に継続して捉えられている。本人曰く「この間是一つしか見えず、自信はあったけれど、これだけたくさん出れば間違いではなかったと安心した」と喜んでいる。パッと見て、話が違うよ、遷移が自律振動として自己形成されると言う、別の新しい大きな発見だから、速く論文書かなきゃ、と激励した。皆が「ヘリカル系プラズマは定常だから」とぼんやり考えていた思い込みに対し、大域的で大規模な自律的動的変動があることを実証した重要な成果だと思う(今や藤澤さんはプラズマ実験学の世界的権威ですが、駆け出し時代のエピソードです。この成果を喧伝したおかげでHIBPをもう一台設置してもらえたのだから昔話を紹介しても勘弁してください[4,5])。

そもそも核融合科学研究所に加わったのは、大学の大型計画LHDの選択の結果と言える。1980年代を迎え、多角化した核融合研究の次にステップをどうするか、文部省の学術審議会・核融合部会(部会長早川幸男先生)は、「学術審議会特定領域推進分科会核融合部会第2次作業会」(主査 宅間宏先生、1984年12月から1985年5月)を発足させ、科学的アセスメントを求めた。私は当時原研にいたが、求められて作業会に参加した。作業会の委員には亡くなられた方も引退した方も多し。最も若い委員(32歳)だったので、若い読者の皆さんにお伝えする責務もあろう。自問したことは、10年先には3大トカマクの成果が出ているだろう。その中で、世界最先端の学術的研究を行うためには、研究目的はどうあるべきか?それはどのようにアプローチ出来るか?私は、外部導体系をえらび「トラスプラズマの総合的理解」が旗印だと考え、説明した。Minority opin-

ionであることは自覚していたが自分のプリンシプル②からそう考えた。

この考え方を受け入れていただき、作業会の結論は「次期大型装置としてHS系を選び、トカマクを含む環状系の諸問題を解決するための研究を行う。外部導体系の持つ炉工学的な長所を利用して定常運転炉を実現する可能性を探ることも、重要な研究課題となることは言うまでもない」[6]となった(HSはhelical systemの略)。

なお、決まってみれば、ヘリカル炉開発だという人たちの声が大きかった。「トラスプラズマの総合的理解」は、minority opinionであることの自覚を30年心に抱いたが、そのビジョンはそんなに間違っていなかったと思う。私のプリンシプル①の流儀で仕事を行い、実験家諸氏の力もあって、世界的な学術的発見(CHS/LHD)をもたらすことができたと思う。例えば、順不同で行くが、帯状流・帯状磁場の発見(Fujisawa)、輸送ヒステリシスの発見(Inagaki)、Tongueの突発による崩壊トリガーの発見(Ida)、非線形結合によるGAMの突発現象の発見(Ido)、電場勾配による乱流抑制の実証(Fujisawa)、電場曲率による乱流変化の実証(Tokuzawa)、内部輸送障壁の発見(Fujisawa)、電場パルセーションの発見(Fujisawa)、不純物ホール発見(Ida)、磁気面破壊と運動量輸送増大の発見(Ida)、…等々。トカマクにもたくさん波及効果が生まれた。(リストに挙げきれなかった実験家の皆さんすみませんお許しを。)パラダイムシフトに結びつく発見や、ITERの動向に迄インパクトを実証し(「ITERは $Q=5$ に達しない」・「帯状流があれば大丈夫」、といった論争が20世紀末に起こったが、帯状流はここに述べたように日本で実験的に発見された)、世界最先端の学術的研究実績を挙げたことができたと思う。

今や、日本学術会議で「マスタープラン」を作成し(学術会議会員の早苗が尽力した)、文部科学省の大型プロジェクト作業部会が「ロードマップ」を作って(こちらは飯吉厚夫先生の先導)、大型学術研究を推進する体系ができあがって10年近く機能している。こうした今日、1985年当時の「トラスプラズマの総合的理解」を凌駕する、学問的に包括的であり現代的にチャレンジングな旗印を鮮明にすることは、プラズマ・核融合研究者界にとって一段と重要になっている。プリンシプル②・④は読者のみなさんにとってますます重要になっている。

2.3.2 九州大学にて

早苗は縁あって1992年に九州大学応用力学研究所に移った。そこで例のプリンシプル③・④で仕事を進めていって、プラズマ乱流とプラズマ乱流輸送を根本的に考えようと、研究の舵を切った。

「異常輸送」と名前をつけて遣り取りしてわかった気持ちになり、なんぞと言うとKadomtsev formula $D \sim \gamma_1/k^2$ に準拠すると言うのでは、学問としては進歩がない。(Kadomtsev先生の名誉のために付言すれば、ご本人は、'Mixing length estimate is correct if you know the correct mixing length' といっている。) Correct mixing length をみつけようというのは、プリンシプル④では尤もだけれど、

勝ち目の保証はどこにもない。私たちは、福山さんと矢木雅俊さんと非線形不安定性を重視して、Diamondさんたちとも一緒になって「多スケール乱流理論」という考え方に発展していき、漕ぎ出した航海を難破せず続けてきた。

学生の頃から、多くの人が「プラズマは非線形性の宝庫」といっておられたが、それを実験的に解明した研究は少ない。先に述べたような未熟な状態と比べれば実験観測に進展はあったが、プラズマ乱流の非線形性を直接測ってみようと言うのは、早苗流であり、例のごとくうまくいく保証はどこにもない。まず理論の方法論では、非線形不安定性をくり込む方法を自己流に考えたが、それが乱流物理の体系の中でどう位置付けられるか勉強が必要であり、back to the studentで吉澤徹先生(東大)の押しかけ弟子になってその世界の方々に揉んでいただいた。実験研究も、幸い、伊藤早苗を代表者とする特別推進研究「乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究」(平成16-20年度)や基盤研究(S)「乱流プラズマの動的応答と動的輸送の統合研究」(平成21-25年度)が予算措置された。九州大学からのサポートもあり、プラズマ乱流研究の世界的拠点ができた。そして、めざす乱流プラズマの中の揺動成分同士の非線形結合強度を実測することに成功した。一言でいえば、大量に時空データを取り、高次統計解析を行いその収束を論じると言う方法論ができた。その道筋では、上に述べた実験家に加え、九大の永島芳彦さん・山田琢磨さんなど手が加わって、年間何百TBのデータを集め(当時CERNのデータが年間何十PBだったから、志としては負けていない)、GAMや帯状流やstreamerやドリフト波の非線形結合を定量的に測ったりして、「プラズマ乱流実験学」の創生に皆で尽力した。研究に次々に加わった学生さんたちもその線で多くの成果を上げてアカデミアの第一線で活躍している。

2.4 源流

こんな調子で突っ張って、早苗と象牙の塔に籠って一生やってこられたのは心ある仲間や若い後進がプリンシプルに共感してくれたからだと思う。繰り返しになるが、プリンシプル①で述べたように自分のスタイルを意識する上では大河先生の指南に負うところが多かった。大河先生ご自身、物理学の道に進むきっかけとなった仁科芳雄先生との出会いをお話くださったことがある。戦時中、理研の仁科研究室の宇宙線研究のグループが金沢に疎開してきて、金沢育ちの大河先生は学徒動員でそこに参加なさり、その折のこととして「仁科先生は時折いらっしやると、お茶と菓子を囲んでコペンハーゲン時代の話をしてくれました。理研のサイクロトロンを空襲から守った話も誇らしくお話しされたのを思い出します。」と仰っておられた。その意味で、私たちがコペンハーゲンの精神の系譜に連なっている。

プリンシプル①-④とともに生きたことは楽しい研究生生活に繋がっただけでなく、研究者界にも多くのベネフィットをもたらしたと思う。

2.5 これからの私

突然の転変で、生涯の伴侶を亡くし長く暮らした象牙の塔から"new life"に放り出された。戸惑う日々にあって、助けてくれる友に支えられ、そして心に響くプリンシプル「どうなるか、ではなく、どうするか」を考えて new life へ向かいつつある。

智に働けば角が立ち、意地を通せば窮屈で、同調圧力の強い日本にいて、プリンシプルを持って生きるが良いか、それ無しが心地よいか、それは人によるでしょう。

あなたのプリンシプルはなんですか？

献 辞 本稿を故伊藤早苗に捧げる。

参考文献

[1] 実験家の立場になってみれば、自分が手に入れた虎の

子のデータを「見せてくれ」と言われても簡単に見せてくれないほうが自然であろう。そんな当たり前なことも気にならないところが無知の力である。

- [2] 1986年のIAEA京都会議での休憩時間に、Wagnerさんが早苗に来年の夏3ヶ月ガルヒンに来ないか、と招聘下された。早苗は二つ返事で諾と答えた。その休憩時間中に、全く独立に飯吉先生から私に、来年3ヶ月の在外研究員として推薦する可能性がある、と言う話をいただいた。二つ返事で受諾。小説なら「ご都合主義」だと言われる話の運びで、ドイツへの出張が決まった。
- [3] このトリオ研究については、別の機会に譲る。
- [4] その「もう一台」が後日 zonal flow (帯状流) の発見に大活躍する。
- [5] この現象についてはのちに登田慎一郎さん (NIFS) が理論モデルをまとめた。
- [6] 宅間 宏：核融合研究 55, 47 (1986). 当時 (今も) 「『言うまでもない』なら言わないでくれ」と思ったけれど。



いとう きみ たか
伊藤 公孝

中部大学 総長補佐, 特任教授, 九州大学客員教授, 核融合科学研究所フェロー. 専門はプラズマ物理学など. 昭和27年2月7日生まれ, 昭和54年3月 東京大学大学院理学系研究科物理学専門課程博士課程修了・理学博士. 原研, 京大, 核融合科学研などを経て現職となった歩みの一端は本稿にある通り.



講座 プラズマ・核融合科学者として君たちはどう生きるか

3. プラズマと生きて50有余年

3. Fifty-Odd Years Living with Plasmas

犬竹 正明

INUTAKE Masaaki

東北大学名誉教授

(原稿受付：2021年3月8日)

4つの大学を移りながら様々なプラズマを生成し、多くの研究者と共同研究を進めてきました。「自らを知り、人を知る」ことの大切さと難しさを痛感しています。「世界一をめざす競争的研究から地球生命の持続をめざす協創的研究」へ価値観を転換しつつ、プラズマ・核融合により地球および宇宙におけるエネルギー問題と環境問題を解決したいと強く願っています。プラズマ・核融合研究者の個人的体験ですが、人生のさまざまな事態に直面する若い人の参考になれば幸いです。

Keywords:

plasma, fusion, MPD arcjet, Alfvén wave, collisionless shock wave, tandem mirror, MHD stability, electric-field shear, fluctuation, plasma propulsion

3.1 “追いつき追い越せ”時代にプラズマ研究へ

3.1.1 プラズマから固体壁への熱伝達の研究 (大学学部)

「これからは宇宙。宇宙から地球を見れば世界観が変わる」という思いで、定員数名の宇宙専修コースが創設された東大工学部航空学科に進学しました。当時、糸川英夫先生は固体ロケット“カップー”を開発中でしたが、アメリカでは“10年以内にソ連追越し宣言”の下、アポロ計画が強力に進められていました。彼我のロケット関連技術と開発予算の差は歴然で、数年後の1969年にアポロ11号が月面着陸。“一人の人間には小さな一歩だが、人類にとって偉大な飛躍だ”の第一声に心が躍りました。この翌年(1970)に日本初の人工衛星“おおすみ”がラムダロケットで打ち上げられました。

当時の日本は「欧米に追いつき追い越せ」の高度成長時代。私もその時代潮流に飲み込まれ、米ソへの競争意識を燃やしました。「まだ米ソが成功していない先端科学技術は何か?」と模索し、“プラズマ”に辿りつきました。当時の専門書はL. Spitzerの教科書だけでしたので、電気や物理学のプラズマ講義を聴講しました。卒業研究は木村逸郎研究室の神沢 淳助手(現・東工大名誉教授)の指導で、「大気圧アークプラズマから固体壁への熱伝達の研究」でした。

大学院は東大宇宙航空研究所の佐藤 浩研究室に所属。佐藤先生は、谷一郎先生と共に「層流から乱流への遷移」研究を先導されていましたが、「乱流の研究はこれ以上やっても実りが少ない。これからはプラズマ流体が重要だ」と表明され、1960年頃からプラズマ(電気)推進の研究を始めていました。その後、助手の栗木恭一先生(JAXA宇宙科学研名誉教授, 元・宇宙開発委員会委員)が

中心となり、“はやぶさ”イオンエンジンにつながる電気推進研究が本格化しました。

3.1.2 衝突支配プラズマ中のラングミュアプローブ(修士課程)

イオンと中性粒子衝突の平均自由行程とプローブの大きさの比(クヌッセン数)に対するプローブ特性への依存性を検証しました。予算がなく流れて安定化したグロープラズマ装置を始め測定器類はすべて手作りでした。最近、大気圧プラズマ応用が盛んですが、粒子衝突が支配的になるプラズマのプローブ測定に重要です。1973年の電離気体現象国際会議で初めて口頭発表しました。

3.1.3 プラズマ風洞建設とMPDアークジェット開発(博士課程)

博士課程3年の頃、栗木先生が助教授に昇任され、300万円の研究設備予算を獲得されました。栗木先生と相談の結果、地球磁気圏周辺の無衝突衝撃波の実験室実験を目的とした「超音速プラズマ風洞」を開発することになりました。

実験中の背景ガス圧を低く保つため、直径1.5メートル、長さ2.5メートルの真空容器に決定したが、某一流真空機器メーカーの製作見積もり額は1200万円。予算の4倍にもなり途方にくれました。数社から相見積もりを精査し、某ボイラーメーカーに、「真空試験は当方で責任を持つ」条件で値引き交渉、真空排気ポンプを含め予算内に収まりました。後年、この装置は日本初の宇宙実験室“スペースフライヤー”に搭載した電気推進機の地上試験や、“はやぶさ”イオンエンジンの初期開発研究にも愛用されました。古い航空研のレンガ造りの建物に搬入できず、窓を壊して入れた大失敗をしました。超音速プラズマ風洞のプラズマ源には、大推力の電気推進機として開発されつつあった

author's e-mail: inutake2@ecei.tohoku.ac.jp

Magneto-Plasma-Dynamic Arcjet (MPDA) を強磁場中、準定常パルス (1 ms), 大電流 (10 kA) で作動するように改良。余分な背景ガスの影響を極力減らすため高速作動 (立上り・立下り 100 μ s) の準定常 (1 ms) ガス噴射機構に工夫を凝らしました (M. Inutake)。このプラズマ源の開発経験はその後の研究に大いに役立ちました。

3.1.4 プラズマ流中アルヴェン波実験とアルヴェン博士の講演

1942年に、スウェーデンの Hans Alfvén 博士は磁場の強さに比例し、密度の平方根に反比例する速度で伝搬する横波の存在を理論的に予言。このアルヴェン波 (AW) の検証実験は、パルス放電プラズマを用いて1959年に T.K. Allen 等が、また1960年に東北大の長尾重夫教授等が行っています。

多彩な振る舞いをする AW の研究はこの原理実証実験以後ほとんど進んでいませんでした。その理由は比較的周波で長波長の AW 研究に適した高電離度・高密度・準定常 (1 ms 程度) の再現性のよい磁化プラズマがなかったためです。

1972年に完成したプラズマ風洞で AW の励起・伝搬実験を試み、アルヴェン速度よりも速いプラズマ流 (アルヴェン・マッハ数 $M_A > 1$) の場合上流に波が伝搬できず、 $M_A < 1$ の場合には上流・下流にドップラーシフトした波の伝搬を観測 (M. Inutake, 1973)。さらに磁化プラズマ流れに垂直な波面を持ち、イオンの平均自由行程 (100 cm) より薄い密度と速度のジャンプ層 (10 cm ~ ion skin depth c/ω_{ci}) を有し、Rankine-Hugoniot の関係式を満たす無衝突電磁衝撃波の形成を観測しました (K. Kuriki, 1973/M. Inutake, 1974)。当時、衝撃波の形成位置が何で決まるかは不明でしたが、プラズマ源からの僅かな噴出放電電流の存在とジャンプ層近傍で垂直磁場が観測されていました (M. Inutake, 1975)。最近のハイパワーレーザによる対向プラズマ流中の無衝突衝撃波形成機構である Weibel 不安定 (H. Takabe, 2008) との関連を調べてみる必要があります。

なお、1973年3月に Hans Alfvén 博士が来日し、東大宇宙航空研でも講演。天体プラズマに関する電磁流体力学理論の功績によりの1970年ノーベル物理学賞を受賞された後でした。講演で開口一番「日本には、“アルフヴェン”という人がいるようですが、私は“アルヴェン”です」と言っていました。

3.1.5 国際会議に初参加と大学等の訪問 (ポストドク時代)

修士・博士時代の研究成果を、1972年米国ワシントンで開催の電気推進国際会議に、また、1973年プラハで開催の電離気体現象国際会議で発表しました。この二つの国際会議の終了後、3週間ほど、コーネル大、コロロンビア大、プリンストン大、メリーランド大、NASA、海軍研究所など、また、カラム研、マックスプランク研、アーヘン原子力研、シュツツガルト宇宙航空飛行研究所、ローマ大、フラスカティ研究所など、欧米の主要大学や研究機関を栗本先生と訪問し、電気推進と核融合の現状を調査できたことは、その後の進路や研究の選択に役立ちました。当時1ドル

300円超で、欧米への団体割引でも航空往復運賃は60万円近くでした。旅費等すべて自前で、科研費などによる援助が期待できる現在とは隔世の感がします。

2年間のポストドク期間中は、学術振興会奨励研究員やホンダ財団の作行会奨励金で過ごしながらかつての就職先を探しましたが、なかなか見つかりませんでした。この頃結婚、子どもも生まれたものの、自活できないふがいなさを強く感じていました。英国への留学が決まった直後の1月に、名古屋大学プラズマ研究所の基礎実験部門の助手公募があり、幸い4月15日付で准教授池地弘行研究室の助手に採用されました。

3.2 新領域プラズマの基礎研究 (名古屋大学プラズマ研究所)

3.2.1 新領域プラズマの装置開発と共同研究の推進

赴任の翌年、突然池地先生から「ベル研に移籍するよ」と伝えられ、びっくりしました。この頃プラ研は本格的な核融合研究に向かう議論が盛んなときでした。「助手一人が残され、基礎実験部門はどうなるだろう」と途方にくれました。池地先生に「勉強は学生時代で終わり。自分のやりたいことをやればよい。一人でやっていけるよ」と激励され、一念発起しました。その後、新領域プラズマに興味を持つ大学の研究者10数人に共同研究の声をかけると共に、複数の新しい実験装置の予算申請、設計、開発、実験を必死に遂行しました。助手一人に共同研究の企画から実行までさせてもらったことは、全国共同利用研究所であればこそでした。故・佐藤徳芳東北大教授、故・板谷良平京大教授、故・勝俣五男阪市大教授、故・高山一男プラズマ研所長、故・池上英雄教授、藤原正己教授をはじめ、多くの所内外の先生方から基礎実験への理解と支援と共に、岸本茂氏の技術補佐があったから遂行できたことであり、深く感謝しています。

院生時代は、一人で考え、実行すればよかったのですが、共同研究は様々な研究者との意見交換が必須です。自分の成果としてではなく、共同研究として世界初の成果を出せればよいと心に決めました。この考え方に従えば、お互いの得意面を生かしながら世界初の成果を短期間に出せます。残念ながら、最近では大学毎の資金獲得額や論文業績数などの獲得競争に駆り立てられ、大学間共同研究を進め難い状況になっています。

3.2.2 磁化高密度プラズマ装置建設と共同研究推進

当時、世界的にイオン音波や電子プラズマ波などの静電波動の研究が盛んでしたが、電磁波動は未踏分野でした。そこで、AW 研究用の磁化高密度プラズマに重点を置いた TPH (Test Plasma with High density) 装置を開発しました。プラ研内の古い磁場コイル、電源、真空ポンプなどを集め、機械工場で作成容器を製作し、改良版 MPDA をプラズマ源としました。

TPH 装置を使った共同研究は多岐にわたりました。分光や赤外線レーザー干渉計による高密度測定法の開発やプラズマレーザー反転分布の検証 (K. Matsunaga/A. Nishizawa/T. Hara), AW 励起用アンテナ開発 (K. Saeki/T. Watari),

非軸対称アンテナによる AW 励起の常磁性 (Y. Osawa/T. Tajima), 2 種 AW 間のモード変換 (H. Amagishi), 電流駆動 AW 不安定性とミラー磁場中高ベータプラズマのバルーニング不安定, さらにドリフト AW 不安定性 (R. Hatakeyama), 多段ミラーによるプラズマ閉じ込め (A. Komori) など, 世界初の成果を挙げました。

“金属壁で囲まれた円柱プラズマ”では AW は一層複雑な振る舞いをします。圧縮性 AW はある周波数以下では伝搬できなくなります (カットオフ)。しかし, プラズマと容器壁の間に真空領域がある (有限円柱) プラズマの場合には, 円周方向の波のモード数 $m = +1$ (右回り) の波には伝搬できます。“不均一密度”の有限円柱プラズマでは, 圧縮性 AW は平均密度できまるアルヴェン速度で伝搬し, 磁力線に沿って伝搬していくシア AW は半径毎の密度で決まる局所的アルヴェン速度で伝搬することが実験的に確認できました。当時プラ研に滞在中の長谷川晃先生 (Bell 研) の示唆もあり, 周期構造のアンテナを用いて磁力線方向の波数を固定し, ある半径位置の AW を共鳴的に励起できました (A. Tsushima)。

京大板谷研の博士院生秋津哲也氏 (現・山梨大名誉教授) との共同研究で, 1 MHz のデジタイザを 2 チャンネル手作り, 1 ms の準定常パルス揺動の高速フーリエスペクトル解析による相関測定が可能になりました。沿磁力線電流により駆動される磁場揺動は, ドリフト AW の低周波数からイオン・サイクロトロン周波数まで広がった広帯域のシア AW と同定されました (T. Akitsu/R. Hatakeyama)。この TPH 装置は, 6 年後, 静岡大学に移管され, AW の表面波共鳴, グローバル AW, AW への中性粒子の効果, さらに散逸性プラズマ中における AW の群速度など, 数々の AW 研究が遂行されました (Y. Amagishi)。

この他, TPD (Test Plasma with Direct-current) 装置での直流高密度プラズマ源 (I. Katsumata) や大口径定常プラズマ TPL (Test Plasma with Large diameter) 装置でホイッスラー波の非線形性 (I. Sugai), さらに DP (Double Plasma) 装置では電子ホール (K. Saeki) などの共同研究が進められました。なお, 1990 年頃に米国 UCLA で, ホイッスラー波 (L. Stenzel) や, 大口径, 大型 (直径 75 cm, 長さ 18 m) の定常プラズマ装置 LAPD (Large Plasma Device) が製作され, 運動論的 AW (A. Hasegawa) などの基礎実験 (W. Geikelman 等) が盛んになりました。

3.2.3 超高压 (UHP) 装置製作と縮退・強結合プラズマ (i) プラズマの相転移

プラズマの密度を高くしていくとプラズマ結晶ができるか? この頃, 日米でレーザー核融合研究が開始され, “新領域プラズマ”として相転移は魅力的な研究テーマでした。密度が高くなるに従い, 太陽内部のプラズマ, レーザー爆縮プラズマ, 木星や白色矮星内部の結晶や縮退プラズマ, 圧力電離, 宇宙創成時の“クオーク・グルオンプラズマ”などが想定されます。イオン間のクーロンエネルギーと熱運動エネルギーの比であるイオンの結合係数は強結合プラズマと弱結合プラズマの境界の目安で, また, 電子のフェルミエネルギーが熱エネルギーより大きくなる

と, フェルミ縮退した金属内電子のように振る舞います。

(ii) 超臨界点近傍の水銀の金属-非金属遷移と音速測定

水銀の臨界点は 1500 気圧, 1480°C であり, 超臨界領域では液体と気体の一次相転移を起こさず, 原子間距離が連続的に変わります。このとき金属-非金属転移は気液相転移のように不連続的に起きるのか, 電気伝導度や音速の測定による解明が目標です。このため, 定常的に高圧・高温状態を維持する UHP (Ultra-High-Pressure) 装置の製作と共に, 新しい超音波入射・検出法を模索・確立しました。難しい技術への挑戦が好きな故・藤若節也技官の支援により, 2 年余り掛けて压力容器等が完成, 高圧ガス取締法の検査も無事合格しました。電気伝導度測定は京大の速藤裕久教授, 辻和彦助手 (現・慶大教授), 院生の八尾誠氏 (現・京大教授), 理論は米沢富美子京大准教授 (故・慶大名誉教授) (K. Tsuji)。また, 音速測定は, 大気圧アークプラズマ中の音速測定の経験がある東大教養の鈴木賢次郎助手 (現・東大名誉教授) を共同研究に誘い, 臨界点近傍の音速測定に世界で初めて成功。金属 (電子縮退プラズマ) から非金属 (誘電体) に変化させたときの連続的な音速変化が広範囲に測定でき, さらに臨界点近傍の音速の異常減衰を観測 (K. Suzuki)。1980 年 4 月に名古屋で開始された第 1 回プラズマ理工学国際会議の招待講演として発表 (M. Inutake)。この他, アーク駆動衝撃波管により, 結合係数 1 程度のプラズマ生成と電気伝導度測定に成功しました (S. Hashiguchi)。

近年, レーザー核融合分野では固体密度の 1000 倍近い爆縮が達成され, 超高密度プラズマの物性研究が国際的に進展しています。また, ロシア (当時のソ連) では爆薬を使った金属水素などの強結合・縮退プラズマ実験が続けられています。液体ヘリウム液面上の電子結晶の実証や帯電微粒子 (ダストプラズマ) 結晶の理論的予測がなされました (H. Ikezi)。このダストプラズマ結晶は世界各国で実験的に観測され, 定期的に国際会議が開かれるほど活発化 (N. Sato/Y. Hayashi/Y. Watanabe/O. Ishihara) しました。さらに, レーザー冷却によるイオン結晶も観測されるようになりました。

3.3 ミラー磁場核融合研究 (筑波大学プラズマ研究センター)

3.3.1 タンデムミラー核融合実験装置“ガンマ10”の建設

1980 年 5 月に筑波大学プラズマ研究センターに赴任しました。3 月下旬に筑波でミラー核融合国際会議, 4 月上旬に名古屋で第 1 回プラズマ理工学国際会議の招待講演, またプラ研共同研究の整理と善後策, さらに研究室と家の引越などが重なり多忙を極めました。5 月の連休に筑波に引越しましたが, センターの概算要求作業のため引越しの片づけは一切任せ。名古屋で小学 1 年に入学した長男は 1 ヶ月後に筑波に転校, 2 歳と生後 3 カ月の娘を含め家族も大変でした。

センター長の三好昭一教授は, 開口一番「君に新しい装置の設計の一切を任せる。好きに設計してよい。装置名は筑波山の四六のガンマに因んで“ガンマ10”とする」とこの

と。私自身はミラー核融合の経験が全くなく、「どうすればよいか」途方にくれました。一任された責任の重さと米ソに負けない装置を作らなければとの競争意識のプレッシャは相当ありました。しかし、トカマクなどの環状系磁場閉じ込めに比べ、開放端系であるミラーは将来の宇宙プラズマ推進機としての魅力があるし、「やるしかない」と腹を括りました。

赴任当初、大きな装置を搬入可能な X 線シールド扉、高マンガン鋼による非磁性床梁筋、軸対称性を損なうエラー磁場を少なくする磁場コイル巻き線法開発など、実験建屋と装置の詳細設計および建設を進めながら、筑波大におけるミラー研究 (K. Yatsu) と米ソの研究の経緯を調査しました。1 年後、「これなら米ソに負けない」と確信できるガンマ10装置の設計が固まり、1981年にトリエステで開催された核融合エネルギー春の学校で発表されました (S. Miyoshi)。装置製作中の1982年の年初、米国リバモア研究所に2週間滞在し、ガンマ10設計概念の説明と米国の装置の現状について意見交換。1982年中頃の装置本体完成に続いて、1984年に加熱装置や計測装置も完成。1984年ロンドンで開催のIAEA国際会議に出発する前日まで実験を続け、発表に漕ぎつけました。

1980年当初のセンター専任者は助手の片沼伊佐夫氏と私の2人だけでしたが、プラズマ研の上村鉄雄氏に計算機シミュレーションのご協力をいただきました。年々スタッフが増え、5年後には助教授の坪内傳次、際本泰士、間瀬淳、故・北條仁士の各氏をはじめ、講師・助手・技官など総勢10数人ほどに増えました。しかし、米国リバモア国立研究所の100人と比べると一桁少ない人数でした。

3.3.2 タンデムミラーガンマ10装置の特徴

ガンマ10装置の特徴の第1は、極小磁場を有するアンカー部を、軸対称ミラー磁場であるプラグ部とセントラル部の間に設置したこと。これによりプラグ・サーマルバリア電位が形成されない場合でも極小磁場で安定化されたセントラル部のミラープラズマが維持でき、タンデムミラーの各部の役割を順次実験的に確認、積み上げができます。第2は、初期プラズマ生成に高電離・高密度のMPDAを採用したため、余分な中性粒子との荷電交換エネルギー損失が抑制され、高周波によるイオン加熱によりアンカー部に高ベータプラズマを生成でき、巨視的に安定なミラープラズマを維持できること。第3は分割エンドプレートを予め設置し、プラズマ電位の径方向分布制御が可能なことです。ガンマ10では、電氣的に絶縁したエンドプレートの浮動電位は、接地電位である容器壁に対して負になります。これによりセントラル部のプラズマ電位は低く抑えられ、径方向電場で駆動される回転不安定などが抑制されると共に、極小磁場に起因する測地線曲率による径方向ドリフトが相殺され、実効的軸対称化が達成されることが期待されています。

以下では、私が役割担当だった初期プラズマ入射、高周波イオン加熱と巨視的・微視的安定性、エンドプレートによるプラズマ電位制御と乱流制御について述べます。

3.3.3 ガンマ10の巨視的安定性とアルヴェン波イオン加熱

巨視的安定化には、磁力線が「良い曲率」を有するアンカー部のイオンを加熱し高ベータプラズマ生成が必要です (M. Ichimura)。セントラル部で励起した「圧縮性」AWでアンカー部イオンが加熱されるという謎は、セントラル部励起の非軸対称 (右回り周方向モード数 $m = +1$) の「圧縮性」AWが楕円断面 ($m = \pm 2$) の磁力管内をアンカー部に伝搬していく途中で $m = -1$ の「シアAW」にモード変換し、アンカー部イオンがサイクロトロン共鳴加熱 (ICRH: Ion Cyclotron Resonance Heating) されるためであることがわかりました (M. Inutake/H. Hojo)。また、磁力線に垂直方向に強く加熱された非等方プラズマの場合には、アルヴェン・イオン・サイクロトロン (AIC) 不安定性が自然に励起され、それによるイオンのピッチ角散乱も観測されました (M. Ichimura/M. Mase)。これらの結果、RF (Radio Frequency) 加熱による巨視的に安定なプラズマを維持した状態で、プラグ部へのマイクロ波入射による電位形成とその閉じ込め効果の検証が可能となりました。

3.3.4 ガンマ10におけるプラズマ消失現象の解決

ガンマ10実験における最大の難題は、プラグ部のECH (Electron Cyclotron Heating) 出力を大きくすると、セントラル部とアンカー部のプラズマ全体が突発的に消えてしまう (プラズマ消失現象) ことでした。このため、プラグ部ECHで電子の加熱とプラズマ生成をする「ECHモード」と、セントラル部/アンカー部のイオン加熱とプラズマ生成をする「RFモード」のいずれかのモードを別々に実験、あるいは一方の加熱電力を大きくし、他の電力は小さく絞った実験を数年間続けざるを得ませんでした。

プラズマ消失の原因は“真空壁に吸着されている不純物ガスの放出である”と確信し、“24時間連続運転”の放電洗浄が続けられましたが、事態は好転しませんでした。この事態を打開するために、年に1~2回の大気開放の機会に真空容器内に可動リミターや周辺静電プローブ群を取り付けました。これらを容器内に挿入・設置すると不純物発生につながりプラズマ性能が劣化することを危惧し、禁じられていました。しかし、プラグ部とアンカー部の間に設置した可動リミターの径方向位置をミリ単位で微調節することにより、このプラズマ消失が劇的に抑制されました。装置設計者としての積年の重圧から解放された瞬間でした。これはプラグ部ECH入射による非軸対称電場の影響を軽減できたためと推察されます。直線磁場閉じ込めの場合には、回転変換のあるトラス磁場閉じ込めと異なり、加熱系の軸対称性にも細心の注意が必要です。

こうして強いECH入射によるプラズマ電位形成とアンカー部イオン加熱の共存により、本来のタンデムミラーの電位閉じ込め実験が可能になりました。さらに、ECH電子加熱により、低温電子との衝突によるイオンエネルギー損失 (電子ドラッグ) が軽減された結果、セントラル部で1億度のイオン加熱が達成されました。このイオン温度は、実験で使用している水素に微量の重水素を混入させ、高温のD-D反応により生成された中性子の測定から確認 (Y.

Kiwamoto) されました。こうして海外のタンデムミラーよりも高性能のガンマ10プラズマを達成でき、その違いの原因を掴むため米ソの研究者が頻りに来学し、議論が重ねられました (T. Tamano)。

なお、アンカー部の高温イオンなどにより巨視的安定性が維持されない場合、ECHで生成したプラズマの密度分布はリミターまで広がり、本来の閉じ込め実験には適しません。また中性ビーム入射 (NBI: Neutral Beam Injection) はトカマクのような大口径の高密度プラズマへの入射でない場合には、中性ガス圧が増え荷電交換損失が増大するため有効なイオン加熱になりません。

3.3.5 タンデムミラープラズマの電位制御と乱流抑制

ガンマ10装置のエンド部に設置したリング状の分割電極板に種々の電圧を印加し、径方向のプラズマ電位分布を制御することにより、プラズマ揺動が抑制されることが観測されました (A. Mase)。径方向“電場”あるいは“電場シア”への依存性はドリフトモードとフルートモードでは異なります。閉じ込め全体にどの揺動が最も大きく影響しているかを見極める必要があります (M. Inutake)。

3.3.6 大型プロジェクト研究の難しさ

ガンマ10は比較的大きなプロジェクト的研究であり、スタッフと学生併せて40-50人が、センター長の大方針の下に、発電機系、ヘリウムクライオポンプ系、初期プラズマと高速ガスパフ入射系、RF・ECH・NBIの加熱系、さらにビームプローブ電位測定器・軟X線検出器・マイクロ波反射計などの特殊計測系、データ収集系などを、学生も含め幾つもの小グループに分かれて分担します。

このような大人数での実験の場合、電位や温度など解析に時間がかかる測定法の結果についてはグループ全体の議論がなされず、担当グループの判断だけで学会発表や論文投稿することが多くなります。グループ全体で合意できる測定データと解析結果の開示ルールを決めておくことは必須です。

誰もが各々の役割を懸命に果たしており、誰もがまじめに間違えます。ルールで規定しきれない事態に大切なのが、研究者同士の率直な意見交換であり、“変えられるのは他人ではなく、自分自身である”ことの認識であり、最後は一人ひとりのモラルです。

3.4 高速プラズマ流の物理と宇宙推進機への応用 (東北大学大学院電気・情報系)

3.4.1 “宇宙・地球・生命”のためのプラズマ・核融合

大学院重点化により1994年に東北大学大学院電気・情報系に新設の“高温電磁流体工学分野”に赴任しました。東北大には、プラズマ基礎実験の世界的な草分けである元・佐藤徳芳 (前・畠山力三, 現・金子俊郎) 教授の研究室、および立体磁気軸核融合閉じ込め概念を追求した元・長尾重夫 (前・笹尾真美子) 教授の研究室がありました。したがって、研究分野の重複を避け、電磁加速プラズマ流の物理解明を重点課題に掲げました。

私事ですが、この転任の2年ほど前、娘が急性白血病になり、一旦寛解 (治癒) しましたが、赴任後まもなく再発

し、17歳少し前に亡くなりました。この試練を通して、目に見える業績第一主義・利己主義から、「いのち」や「人との関わり」など、目に見えないものを大切にすることに気付かされました。従来関わりを切ってきた不登校学生等の悩みにじっくり耳を傾け、励まし、研究第一と避けてきた他人事にも積極的に関わっていくように変わりました。

このような生き方の転換の結果、学外活動としては、プラズマ・核融合学会の理事・出版委員長に就任し、初の単行本「プラズマの生成と診断」の執筆を50人の専門家をお願いし、4年後の2005年に出版に漕ぎつきました。日本学術会議 (SCJ) 物理学研究連絡委員会のIUPAP (International Union of Pure & Applied Physics) の16委員会 (C-16: Plasma) 委員 (2000-2005) を務め、アインシュタイン論文100年記念として2005世界物理年に開催された「発展途上国の持続発展への物理学の貢献」に関する南アフリカ国際会議のプログラム企画委員として日本提案のまとめと発表、また2005年のSCJ改革以降は連携会員としての活動、さらにITER誘致問題やLHD計画の検討委員会など目白押しでした。一方、学内的には、研究室のビジョンに“宇宙・地球・生命のための高速プラズマ流の基礎と応用”を掲げると共に、教務委員長、運営委員長、評議員、東北大サイエンス・カフェ立上げのための工学研究科世話人など、積極的に活動してきました。

この結果、研究室における教育・研究に関する時間が少なくなり、教員スタッフ (当時、安藤 晃助教授、服部邦彦助手) に多大な負担をおかけしました。ご協力に深く感謝します。研究室ではそれまでの任地におけるさまざまな体験を踏まえ、独自の発想に基づく研究テーマ選択と自由闊達な討論を促すと共に、私自身は「大きな耳と小さな口」、「聞く・聴く・訊く」を心掛けました。しかし、「自らを知り、人を知る」大切さと難しさを痛感しています。

3.4.2 “電場”と“電場シア”の制御とプラズマ乱流の抑制

ガンマ10の高温プラズマ中ではプローブ計測が使えず、径方向電位分布制御と揺動の抑制の物理的解明は十分にはできませんでした。そこで、“電場”と“電場シア”を独立に広範囲に変化させた基礎実験を遂行した結果、ドリフト波の揺動レベルは“電場”と“電場シア”の両者の組み合わせで決まり、“電場シア”を増やせば安定化されるわけではなく、“イオンのドリフトシア”による安定されていることが実験的に判明しました (M. Yoshinuma)。

3.4.3 高速プラズマ流のアルヴェン波加熱と磁気ノズル加速

有人火星探査や深宇宙探査、さらには小惑星の軌道偏向には現在のイオンエンジンの推力より格段に大推力の電気推進機が必要です。その開発と物理機構の解明のために電磁流体実験装置を製作しました。高電離度のMPDAにより生成したプラズマを磁場ノズル中で膨張させると共に、ノズルの途中に設置したヘリカルアンテナによりAWを励起。磁場ノズル中ICRH加熱後に再膨張させ、プラズマ流の追加速に成功しました。この結果を2005年アメリカ物理学会で招待講演 (A. Ando) として発表。米国NASAではヘリコン波で生成したプラズマのイオンをICRHで加熱す

る VASIMR (VARIABLE Specific Impulse Magnetoplasma Rocket) 計画が進められています。ヘリコン波による生成プラズマの密度や電離度が低い場合、中性粒子との荷電交換損失が大きくなるので、イオン加熱には大容量の真空クライオポンプなどの設置が必須です。

さらに、宇宙ジェットを想定した電磁加速プラズマジェットのヘリカル不安定 (A. Imasaki), MPDA の電磁加速機構 (H. Tobari), 医療工学への応用をめざした流れ安定化大気圧グロープラズマ生成や水中放電による水質改善 (K. Hattori) などの基礎研究を進めました。磁気ノズル中のイオン音波、磁気音波、AW 速度などの3種の特性速度と超えるときの種々の衝撃波発生の有無や、将来の核融合ロケットの磁気ノズルからのプラズマ脱離現象の基礎研究などが残された課題です。幸い、私の定年退職後、安藤 見教授と高橋和貴准教授の研究室でプラズマ推進機の基礎研究も続けられています。

3.4.4 人命救助用合成開口レーダーの開発(電気通信研究所)

2007年の定年退職直前、32年前に渡米、サンディエゴに在住の池地先生から「人命救助用合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) の共同開発をしませんか」との国際電話がありました。すぐ行動した結果、予期せぬ支援もあり、幸い東北大学電気通信研究所の客員教授に就任できました。

その後2年間、様々な企業を訪問し、SAR 開発のファンを探中、国土交通省の公募研究に採択されました (M. Inutake)。九大の間瀬 淳教授や近木祐一郎助手 (現・福工大教授) をはじめ、国内の大学と企業の旧知の研究者10名余の共同研究チームを組織し、4年間で我が国初の小型 (25 kg)・高分解能 (10 cm) の Ku バンドマイクロ波 (16 GHz 帯) を用いた「スポットライト合成開口レーダー “Live SAR”」を開発できました。小型軽量のため有人・無人のヘリコプタ等に搭載でき、昼・夜、雨・雪などにかかわらず、リアルタイムで画像収集や移動体検出ができ、全天候型の災害観測・防災監視・人命救助に有用です。残念

ながら2011年の東日本大震災発生時は、開発途上2年目のため活用できませんでした。さらに、大型レーダー群を地球各地に設置できれば、この合成開口の原理の適用により、地球衝突小惑星の位置と速度を、光学望遠鏡観測よりはるかに正確に把握できるはずでした。

3.5 将来に向けて

日本の研究者による60年余りの懸命の努力の結果、プラズマの基礎と応用をはじめ、核融合やプラズマエンジンなどの先端科学技術分野で、米国、ロシア、欧州を凌ぐまで成長してきました。しかし、アフターコロナの時代において、日本は、政治・経済・科学技術の世界的覇権獲得をめざすのではなく、“一繋がり生命共同体 (ガイア)”である地球の絶滅を回避するための国際的連携活動を先導していくべきです。

核融合反応エネルギーを利用した発電と水素生成は、地球温暖化等の環境問題の解決に大きく貢献することが期待されていますが、民間宇宙旅行時代を迎えつつある今日、“地上”ばかりでなく、“宇宙”における「環境問題」(宇宙デブリ除去と小惑星衝突回避)と、「エネルギー問題」が深刻です。

太陽光が弱くなる深宇宙における活動や大電力が必要となる月面や火星居住用のエネルギー源として「先進核融合発電炉」が期待されると共に、地球衝突小惑星の軌道偏向用の「大推力プラズマ推進機」やアブレーション用「ハイパワーレーザー」のエネルギー源としても重要です。相当な開発期間が必要ですが、今から人類が一丸となって立ち向かうべき必須の開発課題です。若い人には、世界のフロントランナーとしての誇りを持って、安全・安心な宇宙・地球・生命の維持のために活躍してほしいと願っています。

プラズマと生きて50有余年、多くの方々に出会い、助けられて、今があります。末筆ながら深く感謝いたします。



いぬ たけ まさ あき
犬竹正明

東北大学名誉教授。東京大学工学系研究科博士取得、名古屋大学プラズマ研究所助手、筑波大学物理工学系助教授、東北大学大学院工学研究科教授を経て2007年3月定年退職。高速プラズマ流の生成と宇宙推進機への応用、新領域プラズマの基礎実験、オープン系核融合実験に従事。退職後、旧知の共同研究者と民生用合成開口レーダーを開発。将来の宇宙活動に核融合エネルギーが最適であり、スペースデブリ除去や小惑星軌道偏向のため大量のプラズマ生成が可能となります。地球生命保全の夢を抱きつつ、週末早朝テニスで健康維持に努めています。



4. 強靱な物質：プラズマ

4. The Robust Matter: Plasma

田島 俊樹

TAJIMA Toshiki

カリフォルニア大学アーバイン校ノーマン・ロストカー 主席教授

(原稿受付：2021年2月27日)

プラズマは、よく多体系物質のなかで固体と違い、ブヨブヨで不定形で多くの不安定性を持ち容易に乱流化しカオスに至るとされる。一方、プラズマはこれ以上破壊され得ない物質とも呼ばれる。私はこの性質に立脚して、プラズマは比類なき強靱な物質という側面を持つ可能性のある物質であり、その条件とは何かを研究することを私のライフ・ワークとした。その一端を紹介しよう。

Keywords:

plasma, collective force, wakefield, field reversed configuration, feedback stability, beam-driven fusion

私は1968-9年頃、大学理学部の学部生として何をしたいか考えていたが、当時は湯川秀樹先生のノーベル賞の興奮の醒めやらぬ頃で物質の素を一粒まで遡って研究する「素」粒子物理が流行していたところ、統計物理学の講義で久保亮五先生に出会った。久保先生はこの講義の中で、粒子を多数個（多体系という）集めると、その粒子の個性を超越して、多体系としての固有の物質の特性が出現するのであると説かれた。1957年[1,2]に有名な揺動散逸定理などを証明されたばかりの先生の権威（威光か？）は凄く、先生が黒板で証明を始められると、ノートを見ることもなく30-40mの黒板は数式で埋まり、最後にq.e.d.(証明了)と書かれて終わる。私は、その強い論理、明晰な解析、比類稀な概念的説得力に感服した。私は、多体系の物理が未開拓で激烈な新領域の物理として我々を待っていることを知り、多体系の典型としてのプラズマを研究することを志したのである。

プラズマは、固体や気体と異なり、電子とイオンで構成される原子生成の拘束力を破って生成されるので、それ以上破壊されない物質たるのである。こうしてイオン化されたプラズマは、それ以外にも他の物質がいつもそうするように、プラズマの個々の粒子間で、一粒子・一粒子間の相互作用を有する。衝突力はその典型である。この物理は、固体物理でも変わらない。一方、プラズマは、原子をなしていた電子とイオンの結合を破壊し、原子と原子の量子力学的結合の原理を失ってしまったので、固体形成などの構造形成原理なしに、上記したように、ブヨブヨで（血液プラズマがそうであるように）不定形であり、様々な電磁不安定性を有する。恐らく千を超える不安定性が発見されており、私のテキサス大時代の上司のRosenbluth所長は、そうした業績で「プラズマの教皇」と呼ばれていた。

一方、プラズマの構成員は、原子ほど粘着性のない個性にも欠ける電子とイオンの2種しかないが、ある一定の構造原理でプラズマの構成員に「号令」を掛けると、電子やイオンがある程度固まりをなすことはあり得る。こうしてN個の構成員が固まりをなすと、N個の集団力を発揮するようなことがあり得る。何千年もの昔に現出し、今も我々にその威力を語りかけてくるものとしてエジプトのピラミッドがあるが、それを成す巨大な各岩は、一人の人間では動かせなくてもN人の集団力で行えば可能だということは、エジプト人自身が彼らの文書や図で現代の我々に教えてくれている(図1を参照)。集団力を上手く組織化できると、集団運動が現れることがある。集団運動で N_e の荷電が N_e の荷電と相互作用すれば、その相互作用力は1粒子と他の1粒子の衝突のときの強さの N_e^2 倍になる。ただ、Rosenbluth教授らが何度も証明したように、プラズマはこうした不安定性で、いずれは乱流化したり、熱化(エントロピー増加)してしまうことが多い(大抵といっても良い)。

各論は避けるが、一定の条件を満たせば、こうした集団力を強く励起し、更にそれらが容易に不安定化しないような条件や構造を作ることが可能である(何事にも一定の時間(や空間)のスケールがあることは最初から注意しておきたい)。例えば、良く知られているようにCERNの大型加速器には、エネルギーの極めて高いイオンが詰まっている(特殊な例ではあるがこれもプラズマの一種である)。以下にも出てくるが、加速器はプラズマ内にエネルギー的に安易に且つ安定性を(比較的)高く確保するのに大変適した装置であり、この手法については、前に別の記事でも触れた[3]。加速されたイオンのビームを強くすればするほど、このイオンのリングは安定化していく。これは、自転車の車輪が、その回転を早めれば早めるほど安定化しく

Norman Rostoker Chair Professorship, University of California at Irvine Irvine, CA 92697, USA

author's e-mail: tajima@uci.edu

らつかなくなるのと同じである。また大きな回転半径を持つ系では、不安定性を齎す揺動を平均化するので、安定化に寄与している。また、加速器では一般的に用いられているように、リング・ビームのフィードバック制御による安定化が一般的である。こうした回転リングのフィードバック制御による安定化は、自転車の制御・運転に不可欠である(図2を参照)。我々は、こうした高い回転リングほど安定へ寄与することや、フィードバック制御を入れたAIによる安定性の確保を原理としてより強いプラズマを生成することができる。思えば、人類というのは2足歩行の生物であり、2足歩行はフィードバックによる制御なしでは不安定な歩行方法であるが、人類はそれを選択し、成功した(ただ、人類は2足歩行から逃れ、ソファーに反りくり返って長い時間休むのも好きだ)。我々は、人類の先輩を見習い、プラズマのフィードバック制御による安定化を当然の道として取り入れるべきであろう。

このような考え方で核融合プラズマの構造を考えて見よう[3]。^{ラフト}甲虫が強い甲冑を被り外界への強い防御を獲得した一方、人類は強さを皮膚の表面には求めず、強靱だが屈伸可能な背骨とそれが齎す敏捷性で世界の王となった。FRCというプラズマの配位[3,4]は、外部からの磁場は比較的柔く、これがむしろ高いエネルギーを持つ加速器からのリング・ビームを「骨格」として受け入れ、これがシステム全体を人の体がそうであるように、敏捷で強靱にする。また、リングに支えられたシステムであるので、本源的にフィードバック可能となる。更に、加速器にとり300 keV や MeV といったエネルギーは医療加速器のそれより低い容易いものではあるが、それを温度に比すれば熱核プラズマのそれを簡単に上回りうる[4]。

さて、ここで航跡場の安定性について述べておこう。航跡場は、その出版の時に査読者が不安定化するのではと言ったがそうしたことは起きなかった。それは、光速(ないしはそれに近い速度)で走る航跡場は、背景の電子系の熱速度から位相空間上(実空間ではない)隔離されているからである[5]。更に、強い航跡場の場合、加えて相対論的コヒーレンスが航跡場の安定性を強化する[5,6]。航跡場が安定であるのは未来永劫ではないが、加速に必要な時間に比べ、それが劣化する時間は遥かに長いのである。最近、航跡場が炭素ナノ・チューブなど、ナノ粒子を介してより容易に且つよりコンパクトで強靱なものができることがわかってきた[5]。更に、ナノ粒子はレーザーとの結合を上記した集団運動として強化することがわかっていたが[2,7,8]、こうした効果が取り上げられ、最近では、レーザー駆動でより効果的なEUV光源(次世代リソグラフィ)へ発展している[9]。

以上にプラズマの類い稀な強靱性の幾つかの例を挙げてみた。実は我々の宇宙の主な可視物質であるプラズマが、ブヨブヨで不定形で不安定で乱流でカオスなのを見せつけ、この世は単に構造も何もないノッペリした物だけの宇宙、という訳ではないことに我々は薄々気が付いているのではないか。私は、宇宙にカオスが存在しないと言っているのではない。それしかないという訳ではなく、宇宙には

色々の興味深い構造が形成されているのではないかと問っているのだ。私が1990代に研究した時には、既にプラズマが織りなす宇宙の構造は、実にあたかも曼荼羅の複雑な構造のような気がしたものであった[10]。最近さらに、そうした構造(例えばブラックホールの降着円盤とかジェット)が極めて一般的な構造であるのみならず、こうした構造から、ユニークな天からのメッセージが送られて来ていることがわかってきている。例えば、時空構造のない宇宙線やガンマ線だけでなく、ブラックホールから降着円盤やそのジェットという宇宙の航跡場加速器から紡ぎだされた空間の決まった一点や降着円盤の動力学に同期した宇宙線やガンマ線が観測で同定され始めているのである[5,6]。

図3には最近観測された宇宙での航跡場生成するガンマ線などによる活動的宇宙の現場写真を示す[6]。こうした宇宙の構造はプラズマでできているが、そのプラズマは丁度より早い自転車がより堅固であるように、動的で安定で途轍もなく強い電磁構造を有していることがわかってきている。こうした宇宙が途轍もなく強靱なプラズマをいま我々に見せ始めていて、それに気が付いたことを我々はとても幸いに思う。一方、こうした強靱で小型のプラズマ加速器は医療へも貢献するかもしれない。主流哲学「プラズマ×ビーム=不安定」からの孤立を恐れぬ学問態度を恩師ロスコー先生が示された様に[3]、新たな独自の学説を追求する諸君らの将来を期待したい。

宇宙の構造はプラズマでできているが、そのプラズマは極めて堅固で途轍もなく強い電磁構造を有していることがわかってきている。我々はこうした宇宙が途轍もなく堅固な強靱なプラズマをいま我々に見せ始めていて、それに気が付いたことをとても幸いに思う。



図1 集団力(エジプトのピラミッドでの)。



図2 自転車「操業」:操舵によるフィード・バック制御。自転車の漕ぎが十分でない場合は、図で示す様な安定な自転車操業はできず、自転車は不安定になり倒れる。

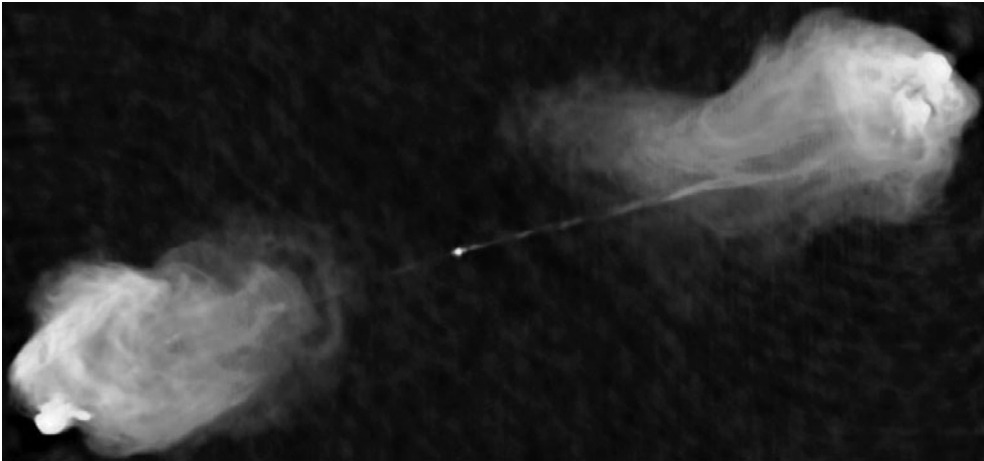


図3 「天空にはレーザーなし?」: 白鳥座 A から発生したジェットとそのなかで形成された航跡場による電子加速で、電波やガンマ線が発生 (Credit: NRAO/AUI).

参考文献

- [1] R. Kubo, JPSJ 12, 570 (1957).
- [2] R. Kubo, JPSJ 17, 975 (1962).
- [3] T. Tajima, JPFR 93, 21 (2017).
- [4] R. Magee *et al.*, Nat. Phys. 15, 281 (2019).
- [5] T. Tajima, X.Q. Yan and T. Ebisuzaki, RMPP 4, 7 (2020).
- [6] CERN Courier, January/February p. 11 (2021).
- [7] M. Mori *et al.*, J.A.P. 90, 3595 (2001).
- [8] Y. Kishimoto, Y. and T. Tajima, *Strong Coupling between Clusters and Radiation, High Field Science*, eds. T. Tajima, K. Mima, and H. Baldis (Kluwer, NY, 2000) pp. 83-96
- [9] A. Endo, JPFR 79, 240 (2003).
- [10] T. Tajima and K. Shibata, *Plasma Astrophysics* (Addison-Wesley, 1997).



た じ ま と し き
田 島 俊 樹

カリフォルニア大学アーバイン校 (UCI), ノーマン・ロストカー主席教授, TAE Technologies 社 CSO (最高科学責任者). 1975年 UCI 博士課程修了 (Ph.D in physics). レーザー航跡場加速の提唱, ビーム駆動の核融合など, プラズマのプロポヨ性を脱却し, 強い物質として用いる方法を生涯にわたり研究.



講座 プラズマ・核融合科学者として君たちはどう生きるか

5. プラズマ・核融合研究を原点とした応用展開

5. Application Development based on the Plasma and Fusion Research

間瀬 淳

MASE Atsushi

九州大学グローバルイノベーションセンター／福岡工業大学エレクトロニクス研究所

(原稿受付：2021年4月30日)

筆者は学部学生および大学院生の時からプラズマ・核融合の研究に携わってきたが、所属大学の異動により研究分野が推移し、この20年は、主として大学における重要な役割の一つに位置付けられ、研究成果の社会還元を寄与することを目的とした産官学連携に基づく研究を進めてきた。様々な研究課題の実施にあたり、プラズマ・核融合研究で培った物理的、工学的成果が大いに役立っていることが印象深い。本章ではこの研究分野の推移に伴い進めてきた技術的工夫とともに、プラズマ・核融合の若手研究者に心がけていただきたいことを記述する。

Keywords:

plasma, fusion, diagnostics, microwave, millimeter-wave, radar, reflectometry, imaging, industrial application

5.1 はじめに

本講座の目的は、プラズマ・核融合研究に携わる、特に大学院生を含めた若い世代を対象として、彼らが意欲をもって研究を進めていく際の参考になるであろうことを期待し、年長者の経験や意見を掲載することと聞いている。

ここで気になるのは、私が大学院生の時代（1968–1973年）、および博士課程修了後就職するに当たっての状況が、現在と大きく異なっているため、様々な点で当てはまらないことが多いことである。その当時、特に理工学系では、学部学生のうち半数近くが大学院修士課程に進学、また、そのうちの約半数足らずが博士課程に進学し、そのまま研究室で助手として残ることが可能で、国立の研究所や他大学において期限付きでない研究職を得ることも少なくなかった。

現在では、修士課程に進学する学生は相変わらず多いが、博士課程に関しては、大学における定員の拡張および定員充足率の維持が奨励されているにもかかわらず、進学希望者は減少しているようである。その大きな要因は後述するように、特に博士課程修了後のキャリアパスの制限によると考えられている。すなわち、特に博士課程学生を対象とした場合、周辺状況に大きな違いがあり、我々の時代の考え方や研究生活がマッチするかは疑問がもたれる。

ただ、日頃持ち続けていた研究上の心構えや目標、およびそのために努力してきたこと、研究環境がシフトしていく際の研究課題やその方向性の決定などは、大きく変わっていると考えられないため、私の限られた経験を振り返り、感じたことを紹介することにした。プラズマ核融合研究を課題とする学生および大学院生や、既に社会に足を踏み入れた若手研究者に期待する研究上あるいは将来への方

向性の決定および心構えについて、私のつたない経験が何かの参考になれば幸いである。

5.2 研究課題の選択

1990年代から始まった大学院重点化計画によって大学院の定員が増加した結果、特に博士号取得者が増加し続けた。その一方、大学や研究所の定員の増加がないことや、博士号取得者の企業側の受け入れも進まないことから、修了後安定した研究職を得ることは困難となっている。博士号取得者の受入れ先を補う形として、ポストドクター（PD）支援計画が始まり、その人数は大幅に増加した。我が国では、米国などのようにPD終了後のキャリアパスが十分に整備されていないことから、研究機構や大学に職を得ようとする際、いわゆる狭き門をくぐり抜けなければならない状態が続いている。企業に就職する場合はもとより、PDとして大学等プロジェクトに属する場合にも学生時代の研究の直接的継続性が期待できないことが多い。

一方、プラズマ・核融合研究は、現在その研究内容の拡がりから、理学および工学から医学、生物学にわたり、様々な分野に関連している。企業も含め研究職に応募する場合、自分の研究内容と直接結びついた課題の募集があれば幸いであるが、そうでない場合も何らかの形で研究してきた内容を活かすことができる時代となっている。

私自身は、若手研究者にとって最も重要なことは、様々な課題に幅広く手を付けることより、中心となる研究テーマを選択することと考えている。そこに集中することにより、その分野に関して優位性および信頼性を示すことができ、将来の展開も自ずと広がっていくことになる。

筆者自身も、学生時代から、指導教官（築島隆繁先生）の

教えにより、プラズマのマイクロ波計測の研究に携わってきた。所属機関の異動により、放電プラズマから閉じ込めプラズマの計測、産業応用への展開と、内容が推移してきたが、学生時代に習得してきた知識は未だに頭から離れず、アンテナおよびデバイスの開発、計測システムの応用に関する新しいプロジェクトの構築に大きな役割を果たしてきた。次節では、これらの内容、および、課題の設定について考察してきたことを記述する。

5.3 電磁波を用いた計測法とその応用展開

5.3.1 プラズマ計測

筆者は1964年に名古屋大学工学部に入学した。当時工学部の単位取得数は極めて多く、所属研究室(研究分野)、を決定するのは4年生になってからであり、正式な卒業研究の時間として与えられるのは、週2時間のみであった。第一希望分野は、当時盛んになりつつあった医用電子工学であったが、工学部には該当する研究室は存在していなかった。プラズマ・核融合研究に興味を持ったのは、同時期にまたま読んだ教養書、小林茂樹訳(イェ・パラバノフ著)「核融合とプラズマ」(東京図書、昭和40年11月)に基づいている。卒業研究として選択した研究室が、武田・築島研究室であった。研究室では、当時普及しつつあったプラズマの電磁波(マイクロ波)計測の研究が進められていた。これがマイクロ波計測(工学)の研究に入るきっかけになっている。修士課程1年時に最初に与えられた課題は、空洞共振法(周波数4GHz)を用い、ヘリウム陽光柱において不安定性励起によるQ値の低下からプラズマの異常抵抗を導出するものであった。修士2年からプラズマのマイクロ波散乱(周波数10-35GHz)の研究に携わるようになった。同法は、非接触でプラズマ中の不安定波動の $k-\omega$ (波数一周波数)スペクトルの同定が可能である。この計測法は、現在核融合プラズマ実験への適用が広がっている。

電磁波計測では、対象とするプラズマが低密度($10^{16}-10^{17} \text{ m}^{-3}$)の場合、プラズマ中の透過性および伝搬時にもたらす情報量を考慮すると、いわゆるマイクロ波領域(波長1-10cm)が適当であるが、高密度プラズマ($10^{18}-10^{19} \text{ m}^{-3}$)になると、ミリ波(波長1-10mm)領域が必要になる。現在の閉じ込め装置のようにさらに高密度になるとサブミリ波ないし遠赤外線領域(波長0.1-1mm,いわゆるテラヘルツ帯)が必要となる。それに伴い、1975年頃よりサブミリ波プラズマ計測の研究が盛んになってきた。

筆者もこの方向に関連し、1978-1980年カリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)でPDとして研究する機会を得た。研究課題であったミリ波・サブミリ波デバイス(発振器および検知器)の開発とプラズマ計測に関連した先端技術の習得とともに、その際に得られた研究者との交流が、その後の40年以上にわたる無二の友人関係の構築、その後のプロジェクト研究の展開に大きな影響を与えてきた。昨年からのCOVID-19の流行により、国際交流の形態は大きく変化しているが、プラズマ・核融合分野では日米科学技術協力やその他の国際協力を通し、交流の機会は少

なくない。それらを積極的に利用していくことが望ましい。

電磁波のプラズマ中の透過を利用する場合は、上記のようにサブミリ波(遠赤外線)帯が必要で、システムを構成する発振器、検知器、および導波路の整備が容易でなく、プラズマ装置への接近性やメンテナンスの点で様々な問題があり、常時稼働する計測システムの製作・運転には多額の予算・人手が必要である。一方、プラズマの高密度化とともに、マイクロ波・ミリ波がカットオフ周波数に対応するようになり($f_c = 8.98\sqrt{n_e} [\text{Hz}]$, n_e は電子密度 $[\text{m}^{-3}]$)、通信、車載レーダなど応用分野の拡がりから発展しつつあったミリ波デバイスを利用した反射計が1990年前後より発展していくことになる。

反射計は、干渉計のように視線方向積分値の情報でなく、カットオフ層近傍の情報をもたらし、密度および密度揺動の空間分解測定が可能という特長を有しており、様々な物理情報を与えるプラズマ計測法として発展してきた。

一方、サイクロトロン放射の周波数も閉じ込め装置の高磁場化に伴いミリ波領域に分布するようになり、反射計とほぼ同様な周波数帯となっている。

密度の傾きや閉じ込め磁場の分布に伴う、カットオフ周波数ないしサイクロトロン周波数の変化から、経路方向の電子密度あるいは電子温度分布を空間分解良く測定できることが、プラズマにおけるマイクロ波・ミリ波反射計(放射計)の特長であり、揺動計測にも適用できるため、豊富な物理課題を提供している。

筆者は、米国から帰国後(1981年)、筑波大学プラズマ研究センターに異動し、ガンマ10装置のプラズマ計測部門を担当した。その際、透過型のマイクロ波・ミリ波計測である干渉計および散乱測定、さらには電子サイクロトロン放射計測とともに、反射計、さらにこれらのイメージング計測への適用を図ってきた。1999年九州大学への異動により、産官学連携推進というセンター設立の趣旨もあり、プラズマ・核融合の研究からシフトしていくことになる。

5.3.2 プラズマ計測からの波及効果

筆者が所属したセンターでは、当時大学の方針の一つとして重要視されていた産官学共同研究によるプロジェクトの推進を目的とすることになるが、外部資金獲得のためには、比較的短期間(〜3年)で結果が得られる課題が必要で、プラズマの研究を進めていくことは困難となり、眼に見える結果が得られやすい課題(産業応用)を中心にしていくことが必要であった。具体的な課題の選択は本人の自由であったため、プラズマ・核融合研究(プラズマ計測)で習得してきた技術課題を活かし、マイクロ波・ミリ波デバイスおよびシステムの開発と計測応用に関するテーマを中心として進めていくことになった[1]。

計測工学は、物理量の正確な測定のため、光源およびセンサを含めたシステムの開発を行い、測定誤差の検証なども行うものである。計測システム性能評価の主要ポイントの一つに空間分解および時間分解がある。

プラズマ計測では、カットオフ周波数を境界とした透過

あるいは反射特性を利用し、入射波がプラズマ中を伝搬する際の位相変化を利用することが基本的な原理であり、マイクロ波・ミリ波計測が不可欠な手法となってきた。空間分解については、レンジ方向（入射波の伝搬方向）では、密度および磁場分布から受動的に決定され、短所とならない。アジマス方向（レンジと直交する方向）では、長波長は短所となるが、揺動測定を対象にした場合、逆数である波数分解の良さに繋がることは特記すべきである。一方時間分解能に関しては、検知器および受信回路の応答時間およびディジタイザの時間分解能に依存し、他の手法、例えば、可視光～X線計測あるいは粒子計測と比較して遜色はない。

異なる測定対象に目を向けた場合、マイクロ波・ミリ波帯電磁波は、次の特長を有している。

- i) 透過性に優れている：例えば、誘電体を対象とした場合、媒質を透過し誘電率が不連続な面で反射するという性質がある。雨雲の存在する大気中での伝搬損失が小さい。
- ii) 低エネルギーである：レントゲンに使用されているX線はエネルギーが高く、DNAの遺伝子損傷の可能性があるが、マイクロ波～ミリ波は、低エネルギーであり、照射電力に依存する加熱の影響を抑制することができれば非侵襲な計測法となる。

一方、欠点として挙げられるのは、波長の大きさに起因する空間分解の問題である。それを改善すべく検討されてきたのが、レンジ方向に対しては、広帯域周波数幅（短パルスマイクロ波に対応）の利用、アジマス方向では、実効的大口径アンテナの効果を利用する合成開口（SA: Synthetic Aperture）処理の適用である。筆者らはこれらを考慮しつつ、応用展開を図ってきた[2]。

5.3.3 産業応用への展開

可視光等に比較し、透過特性に優れている性質を利用し、非破壊検査およびリモートセンシングの研究を産官学連携で進めてきた。空間分解の向上に関して、レンジ方向では、入射波の周波数帯域を総務省で許可される範囲とする。または微弱電波と見做される範囲に電力を抑制し、十分な帯域を確保する。アジマス方向では、近距離（屋内）測定では、適切な送受信アンテナを製作し、さらにプローブビームの整形も容易で、レイリーの回折限界（ $\sim 0.61\lambda$ ）に近い空間分解を得ることが可能となる。遠距離（屋外）測定では、プローブビームの集光に限界があり、それを補償するものとして合成開口処理を適用する。応用分野として、建築物（コンクリート）内部の剥離検査、食品中の異物検査、防災を目的とした地表面検査などに適用してきた。

低エネルギーに起因する非侵襲特性は、生体計測に適している。特に反射計を用いたプラズマの揺動測定に類似した応用として、反射面の揺らぎを評価するバイタル信号測定がある。ここでは、プラズマの揺動解析に適用してきた、相関測定（一次、二次相関）、ウェーブレット解析、最大エントロピー法等を用い、心拍変動（HRV）の揺らぎを評価し、精神的ストレス評価や、心房細動の診断にも適用分野を広げている[3]。

なお、最初に携わった空洞共振法が、0.01–0.1 mmの微小金属の検出に適用できたことも印象深い。上記適用例は、いずれも特許登録がなされている。まとめを図1に示した。

5.4 プラズマ・核融合研究に携わる若手研究者へ

5.4.1 日常生活における心構え

前記の課題遂行にあたり筆者が日常の研究生活で心がけてきたことは次のようである。

- 1) 新鮮かつ興奮できる日常生活：週の始まり、ないし一日の始まりに当たって、新しい課題や研究計画を設定することが重要である。日常の研究再開に当たって、以前の反省に基づき、何をすべきか考察することにより、常に新鮮な気持ちをもって研究をスタートすることができる。
- 2) 自分へのプレッシャー：高いプレッシャーを自分自身に課することにより研究遂行に緊張感を持ち続けること。国内学会ないし国際会議等での発表を積極的に行っていくこと、後述のプロジェクト申請もその一例である。
- 3) 研究のまとめ：研究の遂行に当たって、主要課題が応用研究である場合はもとより、基礎研究に対しても、一つの課題に対しては通常3–5年の周期をもって進めることになるが、少なくとも1年毎に研究のまとめを行うことが重要で、研究の進展を着実に進めていくことに寄与する。可能なら論文文化が望ましい。論文文化について一点伝えておきたいことは、近年、国際会議発表に伴い提出される原稿（プロシーディング）が英文雑誌に掲載されることが多い。業績の積み上げとしては手っ取り早いですが、査読のレベルがどうしても高くなく比較的容易に出版される。正規の査読システムを経由する論文投稿を進めていくことも重要である。

5.4.2 研究者として努力すべきこと

修士課程ないし博士課程の学生や、若手研究者に対して研究者としてのスキルアップを図る上で重要と考えられることについて記述する。

- 1) 他分野研究者との交流：異なる分野の研究者との積極的な交流、例えば、医学分野や他の工学分野、また、実験研究者の場合、理論研究者とのつながり（あるいはその逆）を持ち続ける。このことは互いの研究の展開、特に研究の新規性の発見に役立つことが多々ある。筆者の場合、理論

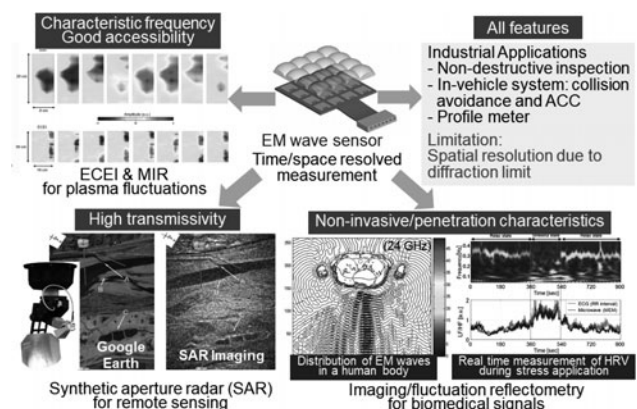


図1 マイクロ波レーダ（反射計）の応用展開（文献[2]より引用）。

シミュレーションに携わっていた北條仁士先生との繋がりが、九州大学に異動後も共同研究を進めた。彼はミリ波計測シミュレータを用いることにより実験を予測し、新規課題の妥当性を証明することに貢献した。

2) 外部資金の獲得：科学研究費は勿論のこと、JST や省庁が募集しているプロジェクトの申請を積極的に行っていくことが重要である。若手研究者を対象とする大型プロジェクトの募集は、我々の時代とは比べものがないほど増加しており、最近では7年以上にわたるプロジェクトの募集が昨年度から始まっている。これらの採択率はそれほど高くはないが、申請しなければ始まらないことを念頭に置くことが必要である。



ま せ あつし
間 瀬 淳

九州大学名誉教授。福岡工業大学エレクトロニクス研究所研究員。名古屋大学工学部、筑波大学プラズマ研究センター、九州大学先端科学技術共同研究センター、同産学連携センターを経て、2009年3月定年退職。現在は、九州大学グローバルイノベーションセンターにおいて産学共同研究に携わり、プラズマ計測の研究で得られた経験をもとに、新しいミリ波計測システムの開発とその実用化・製品化をめざした仕事を進めている。応用分野は、生体計測、非破壊検査、リモートセンシング等。

5.5 まとめ

筆者が学生の時から携わってきたプラズマ核融合の研究、その波及効果として展開を図ってきた内容、そこに至るまでに努力してきたこと等を中心に記述した。

参考文献

- [1] 間瀬 淳：プラズマ・核融合学会誌 82, 441 (2006).
- [2] A. Mase *et al.*, Adv. Phys.: X 3, 633 (2018).
- [3] A. Mase *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 91, 014704 (2020).