



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“カッパー”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大学等へ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、機械工場で真空容器を製作し、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 年余り掛けて圧力容器等が完成, 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」とこのこ

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、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。