



## 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すため、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ルの時間分解に依存し、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。それを改善する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

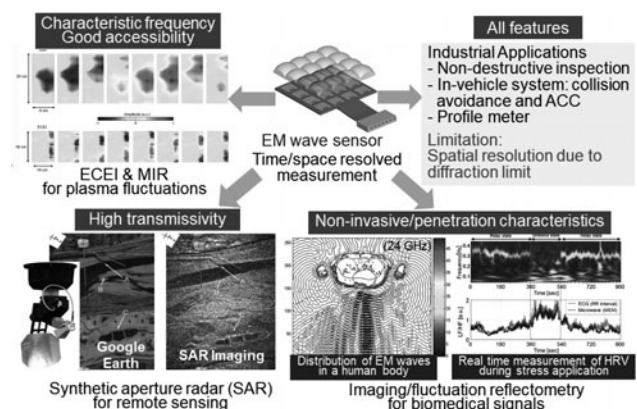


図1 マイクロ波レーダ（反射計）の応用展開（文献[2]より引用）。

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必要がある。



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).