



## 講座 今日からはじめる磁場閉じ込めプラズマ実験

# 4. プラズマのいろんなパラメータを測るよ！

## 4.1 センサーを使ってプラズマを診る！

### 4.1 Basis of Plasma Measurement

山本 聡

YAMAMOTO Satoshi

京都大学エネルギー理工学研究所

(原稿受付：2014年7月13日)

プラズマ実験・研究において、プラズマの諸量を測定することはプラズマを実験的に理解する上で必須の行為です。また、安全にプラズマ実験をする上でも重要です。プラズマ研究では多くの知るべきプラズマパラメータがある一方、それぞれに特性をもつ多くの計測原理・計測機器が存在します。プラズマをよりよく知り、よりよい閉じ込めを得るためには、プラズマ計測の基本的な原理を理解し、それらを応用するとともに多種多様な計測機器を組み合わせる必要があります。これからプラズマ実験を初める初心者を対象に、プラズマ計測の基礎的概念について紹介します。

#### Keywords:

plasma diagnostic, Langmuir probe, magnetics, photo diode, image sensor

#### 4.1.1 はじめに

エアリークなく真空容器内を排気装置で高真空にし、加熱装置を使ってプラズマが無事点いたら、次はどんなプラズマができていないか測定してみましょう。プラズマ実験では、プラズマを如何に制御するか、如何に加熱するか、そして如何に計測するかに懸かっており、加えて、その制御・加熱・計測の三者は互いに密接に関わっています。三者はどれも重要ですが、どういったプラズマが生成されたかの理解なくして、制御や加熱による高性能プラズマの生成・保持は期待できませんし、個々の興味ある物理現象の解明も難しいでしょう。プラズマ計測は大雑把には二つの役割を担っているといえます。一つはある未解明の物理現象を解明するため、そして、もう一つはプラズマ実験を安全に実施する上で必要であると共に、多くの研究の基盤となるようなモニター的な役割です。前者に関しては、ある物理現象を解明するために知るべき物理量が決まり、計測手法や機器が無い場合には新規開発の必要性が生じ、物理機構解明に十分な機器仕様が決定され、そして作成、測定、改良されていくような先進計測機器が該当します。一方で後者は、一般的には枯れたレガシイ的な計測手法・機器ではありますが、安全な実験実施のためであったり、どの研究にも必要な基盤をなすプラズマパラメータの計測であったりするために、高い安定性と信頼性が必要とされている重要な計測機器であります。このように、プラズマ計測では上記二つの役割を果たすよう多種多様な原理・機器が開発されてきたわけですが、そこには多くの計測原理・

機器に該当する共通かつ基本的な考え方が幾つか存在します。それら基本的概念を知ることは、プラズマ実験を安全かつ適切に実施する上で必要ですし、今後、新たな計測機器を開発し、未開の物理現象の解明に挑む際にも役立つものと思われます。本節ではプラズマ計測の基盤を成す概念や計測法に関して、これからプラズマ実験を行う学生を主な対象にプラズマ計測の概要を紹介していきたいと思しますので、本章で概要を掴んだのであれば、次に個々の興味ある計測を調べて理解を深めていってください。各計測原理や計測機器の詳細は例えば、本学会から出版されている参考文献[1-4]に代表されるような参考書、そして本学会誌講座[5]や Review of Scientific Instruments (American Institute of Physics) などの学術雑誌をご参考ください[6]。プラズマ実験では、プラズマ-壁相互作用などの研究において化学的特性を調べることも重要となりますが、本章ではプラズマの物理的特性を調べることに焦点を当てることを予め断っておきます。

#### 4.1.2 プラズマ計測

プラズマ実験では運転や研究に必要なプラズマパラメータは複数存在するため、複数の計測機器を組み合わせて用いる必要があります。加えて、例えば電子密度の計測であっても幾つかの計測手法があり、それぞれの計測機器が異なった時間分解能、空間分解能、ダイナミックレンジ(測定限界)、測定可能領域などの特性をもつため、個々の計測器がもつ特性をよく理解し、運転や研究に必要な特性

を有する計測機器を利用する必要があります。

そもそも計測器は大雑把にいったしまえば、ある物理機構に基づいた物理量を電気信号（電圧や電流）に変換する機器です。そして、その物理機構から計測手法を大別すると、プラズマは電子とイオンである荷電粒子から構成されるために、電氣的、磁氣的、粒子的特性を有します。また、幾つかの物理機構により電磁波を放射するとともに電磁波と相互作用する電磁波的特性を有します。ですので、このプラズマの電磁氣的特性、電磁波的特性、そして粒子的特性に着目した測定手法がプラズマ計測に利用できます。更に、真空容器内には中性粒子が存在しプラズマと相互作用するため、その特性を活用することも可能です。物理機構による分類とは別に、能動計測であるか受動計測であるかの計測法、局所計測か大域計測（視線・空間積分計測）かの空間分解能、高応答性か低応答性かの時間分解能などの大別もできるでしょう。計測器から得られる信号が電圧か電流かの違いや、時間微分や時間積分、そしてパルス波高値の形で信号が得られるかの違いもあります。

では、プラズマ実験において、どういったプラズマパラメータを計測できるか考えてみましょう。磁場閉じ込めプラズマ実験では、プラズマ着火前に何かしらの磁場が立ち上がっているはずですが、プラズマは磁場によって閉じ込められるので、設定通りの磁場ができていないかを知る必要が有ります。磁場の計測は、電磁氣的特性を利用した磁気プローブ（4.1.3.2節）で行うことができます。磁気プローブとは小型のソレノイド状コイルのことで、コイルを貫く磁束密度の時間微分を電圧として測定でき、信号を時間積分することで局所的な磁束密度を知ることができます。そして磁気プローブを多数並べることで磁束密度分布を測定でき、磁場配位が想定通りになっているか調べることができます。実験で得られた信号は、次章で述べられるようにアナログ-デジタル変換器（ADC）でデジタル信号に変換後、PCなどによって収集・保存されます。信号の積分はデータ収集後には数値的にデジタルで、実験中にリアルタイムで必要ならば、CR回路やオペアンプによる積分器でアナログに行うことができます（4.1.6.1節）。

磁場配位が無事想定通りに形成されていれば、必要に応じて予備電離を行いつつ、円環プラズマを貫く磁束変化に依るトロイダル誘導電場（オーミック加熱）やRF波などの電磁波加熱によりプラズマが無事着火され、真空窓からの可視光によりプラズマが確認できるはずですが、可視光測定は無電極放電においては（電極放電では電極電流など）、プラズマの有無を示すようなモニターになり、電磁波特性を利用した最も簡単なプラズマ計測といえ、フォトダイオード（4.1.4.1節）を用いて簡便に行えます。フォトダイオードは入射してきた光子を電子-正孔対に変化する素子ですので、入射光に応じた電流が得られます。ただし、電流はノイズの影響を受けやすいですし、一般にADCは電圧信号を変換するため、すぐに抵抗やオペアンプを用いた電流アンプ（電流電圧変換器）で電圧に変換・増幅し、伝送する必要があります（4.1.6.2節）。単なる可視光計測でよければフォトダイオードや電流アンプがパッケージと

なっており、電圧として出力される商品もあるので利用するとよいでしょう。単に一つのフォトダイオードを置くだけでは空間の情報がありませんので、フォトダイオードを複数台並べたり、1次元のフォトダイオードアレイやCMOSなどの二次元イメージセンサー（4.1.4.2節）を用いたりし、ピンホールやレンズなどの光学機器と組み合わせることでカメラを構成すれば、全可視光の空間分布が測定できます。この様な全可視光計測であっても実験時のプラズマ・装置監視用モニターには有益で、プラズマの大凡の形状やその変化、プラズマ-壁相互作用による発光の確認ができるため、大型装置であっても実験用モニターとして利用されています。

ただし、この全可視光計測は、可視光の発生機構が複数有るために、発光源が空間的に限定された特殊な実験条件でない限り運転モニター以上の利用は困難です。このことから分光の必要性が生じます。プラズマからの電磁波放射は、制動放射、線スペクトル放射、再結合放射、サイクロトロン放射がありますが、例えば燃料である水素やヘリウム、そして代表的な不純物の挙動を調べるために、それらの代表的な線スペクトルのみを分光や干渉フィルターにより抜き出し、半導体素子や光電子増倍管（4.1.4.3節）などで観測する必要があります。同様に能動的な電磁波計測では、ある特定の波長帯の電磁波のみを受光する必要があります。そして、CCD（4.1.4.2節）などの二次元イメージセンサーを用いれば波長と空間情報とを二次元に並んだ素子を用いて同時に測定できますので、画期的に粒子挙動の情報が得ることが可能です。なお、半導体素子で受光する前に、真空窓、光ファイバー、分光器などの光学部品を電磁波（光）が通りますので、各部品の波長に対する透過特性を合わせる必要があります。計測対象が真空紫外やX線などの短波長電磁波の場合には、遮蔽を防ぐためにすべての機器を真空中に入れ計測する必要があります（シンチレータで可視光に変換することも可能です）。

他にも磁気計測を用いることでプラズマ蓄積エネルギーやプラズマ電流などが、電子密度に応じて入射マイクロ波の位相が変化することから電子密度が、電子温度に応じた電子サイクロトロン放射の計測から電子温度を測定することができます。表1に筆者が普段実験を行っているヘリカル装置ヘリオトロンJにおいて、実験中に常時確認している計測機器の一部を紹介しておきます。これらは実験モニターであるとともに、筆者が研究している電磁流体力学的（MHD）平衡・安定性の解析にも欠かせないものです。では、計測原理の特性による大別を基に、計測原理ならびに計測機器についてももう少し具体的に紹介していきます。

### 4.1.3 電磁気計測

電磁氣特性を利用する代表的な計測器として二種類のものが知られています。一つは電氣的特性を利用するもので、プラズマ中に電圧を印加した電極（探針）を挿入し、プラズマの応答として得られた電流-（印加）電圧特性から電極挿入位置の空間電位、電子温度、電子密度とそれぞれの揺動を測定可能な静電プローブ（ラングミュアプローブ

表1 ヘリオトロンJの代表的なモニター計測機器の一例.

計測機器名	測定原理	測定量	受/能	空間	信号種	備考	節
磁気プローブ	磁場計測	磁束密度	受動	局所	電圧	時間微分信号	4.1.3.2
反磁性ループ	磁場計測	プラズマ蓄積エネルギー	受動	大域	電圧	時間微分信号, 数値積分	4.1.3.2
ログスキーコイル	磁場計測	トロイダルプラズマ電流	受動	大域	電圧	時間微分信号, 数値積分	4.1.3.2
ワンターンループ	磁場計測	トロイダル周回電圧	受動	大域	電圧		4.1.3.2
可視カメラ	電磁波計測	プラズマの可視光放射 (2D)	受動	大域	電流	フィルターなし, 接線画像	4.1.4.2
可視モニター	電磁波計測	プラズマの可視光放射 (1D)	受動	大域	電流	フィルターなし, 線積分値	4.1.4.2
Ha/Da モニター	電磁波計測	H <sub>2</sub> /D <sub>2</sub> (燃料) の線スペクトル	受動	大域	電流	フィルター, PD	4.1.4.2
CIII/OV モニター	電磁波計測	C, O (不純物) の線スペクトル	受動	大域	電流	分光器, PMT	4.1.4.3
SX アレイ	電磁波計測	プラズマの X 線放射 (1D)	受動	局所	電流	Al(1 μm) フィルター, 線積分値	4.1.4.2
ECE	電磁波計測	電子サイクロトロン放射	受動	局所	電圧	ラジオメータ	-
静電プローブ	電気計測	イオン飽和電流	受動	局所	電流	印加電圧挿引可能	4.1.3.1
マイクロ波干渉計	電磁波計測	電子密度	能動	局所	電圧	要位相検出, 線積分値	-

ブ)です。もう一つは磁気的特性を利用するもので、磁気プローブやログスキーコイルなどコイルと鎖交する磁場の時間変化から、磁場や電流が計測できる磁気計測です。これらは小型化により、静電プローブや(ケースに収められた)磁気プローブの融解が問題と成らない低温プラズマにおいては、安価かつ非常に強力な計測手段となります。例えば、プラズマ中の局所的な粒子束を求めるには、電位と電子密度それぞれの揺動を同一箇所ですべて同時に測定する必要がありますが、(トリプルプローブ法を用いた)静電プローブが粒子束を求められる希少な計測機器です。一方、プラズマ中の局所的な磁場やその揺動も磁気プローブだけが容易に計測可能です。

4.1.3.1 電気特性を利用した計測機器

プラズマ中に電圧を印加した電極を挿入すると、電極近傍の電子やイオンは電極の電位に応じて電極へと侵入し電流が計測されます。この得られた電流 - 電圧特性から、電極挿入位置の空間電位、電子温度、そして電子密度とそれぞれの揺動を測定できるのが静電プローブです。静電プローブの形状や計測法には多種多様なものが存在し活用されていますが、ここでは磁場閉じ込めプラズマでよく用いられる、小さな円筒状の導電体を探針として用いた際のシングルプローブ法を紹介します。静電プローブの詳細は参考文献[7,8]をご覧ください。

プラズマ中に一本の電極を挿入し、基準電極を真空容器などにとり、両電極間に電圧を印加し挿引すると図1のような電流 - 電圧特性が得られます。便宜上、縦軸の電流値は電子電流方向 ( $I < 0$ ) を正としています。図1はプラズマ空間電位  $V_s$  と電流が零となる浮遊電位  $V_f$  を境として、三領域に分類することができます。プローブ電位とプラズマ空間電位が同電位の場合には、電子とイオンそれぞれの熱運動による熱拡散電流がプローブに流入し、以下の式でそれぞれ表すことができます。

$$I_{te} = \frac{1}{4} n_e \langle v_e \rangle S = \frac{1}{4} n_e \left( \frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} S, \quad (1)$$

$$I_{ti} = \frac{1}{4} n_i \langle v_i \rangle S = \frac{1}{4} n_i \left( \frac{8kT_i}{\pi m_i} \right)^{\frac{1}{2}} S. \quad (2)$$

ここで、 $n_e$  と  $n_i$  は電子およびイオンの密度、 $\langle v_e \rangle$  と

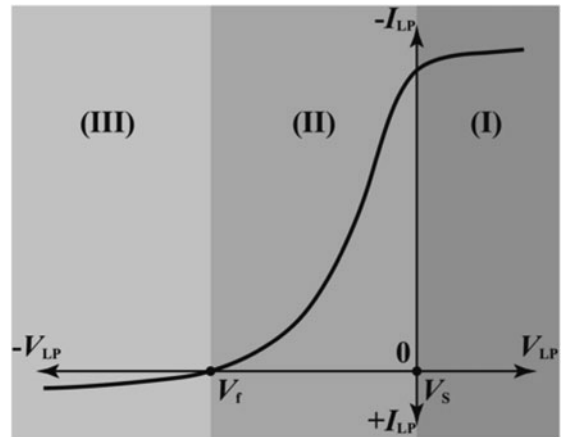


図1 シングルプローブの電流電圧特性.

$\langle v_i \rangle$  は電子とイオンの平均熱速度、 $S$  はプローブ表面積、 $k$  はボルツマン定数、 $T_e$  と  $T_i$  は電子とイオンの温度、 $m_e$  と  $m_i$  は電子とイオンの質量です。電子とイオンの温度と密度が同じ場合には、 $I_{te}/I_{ti} \propto (m_e/m_i)^{1/2} \sim 42.8$  であることから  $I_{te} > I_{ti}$  であり、結局、電子電流が流れることになります。プローブ電位が空間電位  $V_s$  より高くなると、プローブ表面からイオンが追い返されると共に電子が引き寄せられるために電子シースが形成され、電圧増加に伴って電子電流が増加していきます。これが領域 (I) の電子飽和領域です。領域 (II) は電子反発領域と呼ばれ、印加電圧を空間電位  $V_s$  とすることで、プローブ表面から電子が追い返され電子電流が減少していきますが、逆にイオン電流は増加します。しかしながら、電子電流のほうがイオン電流より大きいため、計測される電流は電子電流方向に流れることになります。そして、浮遊電位  $V_f$  において電子電流とイオン電流がバランスして、計測される電流が零となります。更に電圧を低下させていくとイオン電流は増加していき、この領域がイオン飽和領域 (I) と呼ばれます。図1の領域 (II) や (III) のような印加電圧が空間電位  $V_s$  より小さな領域で電子電流は、

$$I = I_{te} \exp\left(-\frac{eV}{kT_e}\right), \quad (3)$$

で表されるので、式(3)両辺の自然対数を求め、 $V$  で微分

し整理すると、電子温度は次式で与えられます。

$$T_e = -\frac{e}{k} \left( \frac{d \ln I_e(V)}{dV} \right)^{-1}. \quad (4)$$

よって、計測で得られた電子電流を片対数表示し、その傾きから電子温度を求めることができます。ただし、測定で得られるのはイオン電流も含めた電流となるので、イオン電流を推定して電子温度を求める必要があります。

次に電子密度を求めます。電子密度は電子電流、イオン電流双方から求めることができます。電子電流から求める際には式(1)に、測定した電子の熱拡散電流  $I_{e0}$  と電子温度  $T_e$  を適用することで求めることができます。一方、イオン電流から求める際には、空間電位  $V_s$  から  $T_e$  の半分に相当する電位になるとイオンシースが形成され、その際のイオン電流が式(5)で表されることから、式(5)を変形して式(6)より電子密度が求められます。式(6)で  $z$  はイオンの電荷数です。

$$I_i = \exp\left(-\frac{1}{2}\right) n_e z e \left( \frac{k(T_e + T_i)}{m_i} \right), \quad (5)$$

$$n_e = \frac{\exp(1/2) I_i}{z e^{3/2} S} \sqrt{\frac{m_i}{T_e + T_i}}. \quad (6)$$

そして、空間電位  $V_s$  は領域 (I) と領域 (II) の電流電圧特性曲線に対して接線となるように直線を描き、その交点から求めることができます。以上、静電プローブ計測の基本となるシングルプローブ法について紹介しましたが、この手法では印加電圧挿引が必要であるために、電圧挿引中はプラズマが変化しない必要があります。逆にいえば、揺動計測はできません。そこで考案されたのがトリプルプローブ法であり、それは最低三本の探針を同時に用いて、プローブ間に定電圧を印加し、プローブから得られる電流ともう一本の接地点から浮かしたプローブ間の電圧から、電子温度、電子密度、空間電位を同時に得る手法であります。当然ながら、三本の探針は同じプラズマパラメータを有する位置に存在しないといけませんが、本手法により粒子束も計測可能となります。なお、注意点として、ここで紹介した手法は、電子・イオンの速度分布関数がマクスウェル分布に従うときに適用できる方法であり、高速電子や高速イオンが存在する際には注意が必要です。プローブ(電極部)の材料としては融点の高いタンゲステン、タンタル、モリブデン、炭素、銅などの導電性物質が用いられます。カバー部としては、電極部同様、高融点の金属材料が用いられますが、その際にはアルミナなどによる各信号線間の絶縁が必要となります。また、窒化ボロンやセラミックス(例えばマシナブルセラミックス)などの高融点かつアウトガスの少ない絶縁材料を用いることも可能です。結局のところ融解による破損が問題ですので、入熱と伝熱で決まる静電プローブの熱が重要であり、計測可能なプラズマのパラメータ領域は温度( $< 50$  eV)と密度( $< 10^{20} \text{ m}^{-3}$ )と時間( $< s$ )の三重積で決まることに注意ください。

#### 4.1.3.2 磁気特性を利用した計測機器

磁場閉じ込めプラズマ実験において閉じ込め磁場強度分

布の計測は必須であり、プラズマ閉じ込め装置の製作後、真空容器の気密性確認と並んでプラズマ実験前に行われるべき作業です。また、プラズマ実験時に閉じ込め磁場は、プラズマに起因した磁場で変化するので、閉じ込め磁場強度の分布計測により MHD 平衡や安定性に関する情報を、プラズマの反磁性を利用することでプラズマの蓄積エネルギーを、誘導加熱に関してトロイダル方向の誘導起電力を、そして電流が磁場を生み出すことからプラズマ電流を計測することができます。それら磁場の計測は、図2の模式図に示した様な形状や大きさの異なるコイルを用い、磁気計測 (Magnetics) と呼ばれます。

コイルを用いた磁場の計測原理を考えてみましょう。計測原理の基本はファラデーの法則であり、 $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$  を面積分し、ストークスの定理より

$$v = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = -NS \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (7)$$

となります。ここで、 $v$  はコイルの両端間の電圧、 $\mathbf{B}$  はコイルと鎖交する磁束密度、 $S$  はコイル面積、 $N$  はコイルの巻数です。すなわち、この電圧信号  $v$  を時間積分することにより、磁場(磁束密度)を測定することができます。この原理より、測定する磁場が何に起因するかに依存して、その原因となるプラズマパラメータが測定できる訳です。ただし、計測原理から定常磁場は測定できず、その際にはホール効果を利用したホール素子が必要となります。

#### (1) 磁気プローブ

MHD 平衡や MHD 不安定性を調べる際には、局所的な磁束密度の分布測定が有効であり、磁場の空間変化スケールに比べて十分小さな小型のコイルである磁気プローブを用います。低温プラズマなら磁気プローブを溶損防止の金属ケースに入れプラズマ中に挿入することで、内部の磁場計測が可能でしょうし、中型・大型装置でプラズマ内に挿入できない場合でも、プラズマ外かつ真空容器内に設置することで磁場が閉じ込め領域から減衰しながら伝搬するので MHD 研究に利用できます。特に、磁気プローブは時間微分計測であるため周波数応答に優れ、MHz 帯までの高周波磁場揺動を容易に計測可能ですが、高周波用の磁気プローブを作成する際には、コイルを含む測定系が LCR 回路であるために共振が存在することに注意が必要です。測定周波数において平坦な周波数特性を得ようとする際には、共振周波数を上げるか、平坦化させる必要があります。LCR

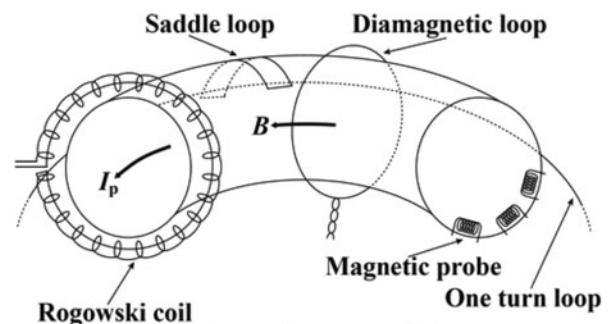


図2 様々な磁気計測機器の模式図。

回路の共振周波数は  $1/\sqrt{LC}$  ですから、磁気プローブの自己インダクタンス  $L$  ならびにケーブルのキャパシタンス  $C$  を下げる必要があります。キャパシタンス  $C$  を下げるにはケーブル長を短くすることが考えられます。自己インダクタンス  $L$  に関しては、 $L$  は巻き数  $N^2$  に比例して、コイル面積  $S$  に反比例するため、 $N$  を減らし、コイルサイズを大きくすることで、コイル感度  $NS$  を落とすことなく共振周波数を上げることが可能です。ただし、小型装置の場合は、コイルの大型化は局所磁場計測にそぐわなくなることも有りますので最適なサイズを見つけてください。また、周波数特性の平坦化は整合抵抗の導入によって可能です[5]。加えて、高周波揺動の計測では、磁気プローブのケースが金属である際には、交流磁場により渦電流が発生し一種の磁気シールドとなりますので注意が必要です。磁気プローブはボビンと呼ばれる筒に線を巻いて作成しますが、小型装置においてはチップインダクタ（ただし空芯）と呼ばれる超小型のインダクタの利用が有効です。

(2) 反磁性ループ

一巻きのコイルを閉じ込め磁場に垂直かつプラズマを取り囲むよう巻くことで、プラズマの反磁性効果によって減少する閉じ込め磁場が測定でき、その変化分からプラズマの蓄積エネルギーを測定することができます。

(3) ロゴスキーコイル

プラズマ電流が流れている際には、プラズマ電流に起因する磁場を測定することで電流の総量が計測可能で、同様の方法が非接触型の市販の電流プローブなどでも用いられています。（定常磁場も計測可能なホール素子タイプもあります）

他にもトロイダル方向の周回誘導起電力を測定するためのワンターンループや、MHD 平衡・安定性のためのサドルループなどがよく知られています（図2参照）。得られた信号は前述のように微分信号であるため、磁束密度を得るためには積分が必要となりますが、積分回路については4.1.6.1節をご覧ください。

4.1.4 電磁波計測

電磁波計測は、プラズマからの電磁波放射を受動的に計測する手法と、能動的にマイクロ波やレーザーを入射し、干渉、偏光、反射、散乱、屈折などプラズマとの相互作用により変化した入射光を計測する手法が挙げられます。また、能動的に中性粒子ビームを入射し、ビームとプラズマとの相互作用による発光を利用する手法もあります。これら電磁波計測の原理は多種あるものの、受動的であれ能動的であれ、電磁波の計測という意味では多くの場合、共通の原理・機器が用いられます。本節ではそれらについて紹介していきたいと思います。

電磁波は粒子性と波動性の二面性をもち、波長の違いから幾つかに分類されますが、波長が長い領域では波動性が強く、波長が短くなってくると粒子性が強くなっていきます。プラズマ計測では、ミリ波領域からγ線領域に至る幅広い波長領域の電磁波が計測に用いられています。図3に各波長（合わせて各光子エネルギー）領域でよく用いられる電磁波検出器を示します。長波長（図3の右端）のミリ波・マイクロ波帯では、電磁波の電界を検波できるSBD（ショットキーバリアダイオード）がよく利用されています。赤外線領域からはダイオードが利用可能となり、水銀カドミウムテルル（MCT/HgCdTe）半導体などを用いた光としての計測以外にも赤外線放射は熱放射ですからボロメータなどの熱計測が利用できます。可視光から紫外線領域になるとシリコンフォトダイオードや光電子増倍管が利用でき、特にフォトダイオードはX線領域まで利用可能です。また、紫外線・X線領域ではシンチレータによって紫外線・X線を可視光に変換し、可視光計測するといった手法が利用できます。

以上のように、プラズマからの幅広い周波数帯をもつ電磁波をそれぞれ対応する検出器を用いて測定し、プラズマパラメータを得るわけですが、電磁波の発生源であるそれぞれの物理機構は電磁波の周波数帯がそれぞれ異なりますし、その周波数スペクトルを知ることが重要になるため、分光したり、フィルターにより特定の周波数帯成分だけを抜き出したりする必要があります。なお、前述のように放

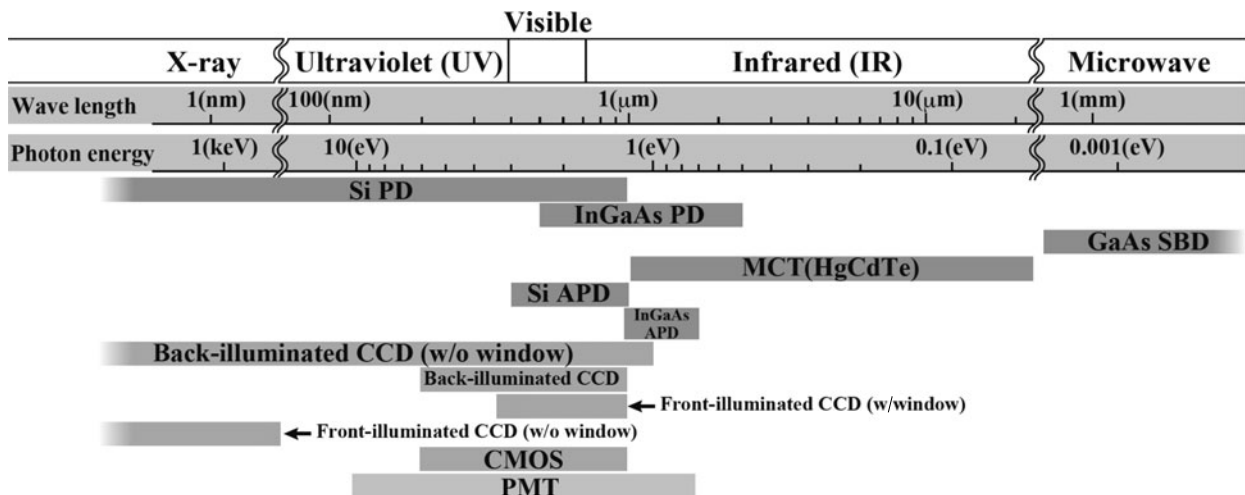


図3 代表的な受光素子の利用可能領域。参考文献[13]などを参考に作成。

電モニターとして用いる際や検出器特性から分光やフィルターを用いず、単にフォトダイオードや CCD/CMOS などのイメージセンサーでプラズマからの発光を測定することもあります。では、次節から特に赤外領域から X 線領域の電磁波計測に関して、大凡のシステム構成と検出器について紹介します。電磁波計測についても具体的な計測原理・計測機器に関しては、全般的には参考文献[1-6]を、レーザー応用の計測は参考文献[9]、マイクロ波から遠赤外線領域に関しては参考文献[10,11]、そして可視光から紫外線は参考文献[12]などを参照ください。

#### 4.1.4.1 電磁波測定システムの構成

プラズマからの電磁波を測定する際に、ピンホールやレンズを使ってカメラを構成すれば空間分解能をもたせることができます。X 線などの短波長の電磁波では効率のよいレンズが存在しないため、基本的にはピンホールカメラとして計測を行います。計測機器として S/N 比を上げ精度の高い信号を得るためには、明るい光学系とするのがよいため、レンズが利用できる波長ではレンズを用います。図 4 にピンホールカメラ状の X 線検出器とレンズを用いた可視分光計測器の概念図をそれぞれ示します。図 4 (a) の X 線検出器は主に MHD 平衡や安定性を調べるために用いられ、真空中に計測機器を設置します。ピンホールにより空間分解能を得て、ベリリウムフィルターにより X 線領域の電磁波だけを通過させ、最終的にフォトダイオードで X 線を検出する仕組みです。一方、図 4 (b) は可視光領域の分光計測に用いられる計測系の概念図で、真空容器外 (大気中) に設置します。図 4 (b) では、真空容器ポートに真空窓を設置し、対物レンズを用いて可視光は光ファイバーに集められて伝送され、グレーティングなどを用いた分光器や光学フィルターに導入され、最終的にそれぞれ特定の波長のみの可視光がフォトダイオードや光電子増倍管で、または分光された光が CCD などの二次元イメージセンサーで電気信号に変換されます。本手法は磁場の影響を受けやすい検出器を装置から離して、磁場の弱い箇所で利用できる利点があります。

#### 4.1.4.2 半導体素子 (1D) を用いた電磁波計測

半導体を用いた受光素子は原理こそ異なるものの、マイクロ波領域から X 線領域までの電磁波計測に対応可能です。プラズマ計測で用いられる代表的な半導体受光素子は単体もしくは二次元アレイとしてはフォトダイオード (PD) が、そして二次元イメージセンサーとしては CCD や CMOS が挙げられます。

フォトダイオードには、n 型半導体と p 型半導体とを接合させた PN 型 PD や p 型と n 型半導体との間に真性半導体 (i) を挟んだ PIN 型 PD、そしてアバランシェ効果を利用したアバランシェ PD (APD) などがあります。電磁波検出の原理は、電磁波の粒子性である光子が p-n 接合部のキャリアの少ない空乏層またはその近傍に入射されると、光起電効果により電子-正孔対が生成され、PN 型であれば空乏層内部の電場により加速されて電流が生み出されます。光起電効果が起こる最低の光子エネルギーは半導体材料のバンドギャップにより決定され、理想的にはシリコン (Si) で

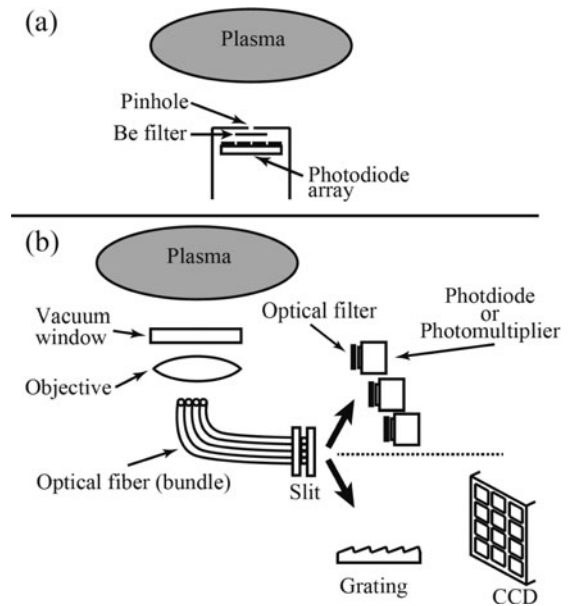


図 4 電磁波の分光計測の一例。

は 1.12 (eV)、ゲルマニウム (Ge) では 0.67 (eV)、そして化合物半導体材料のインジウムガリウムヒ素 (InGaAs) では組成比に依存しますが大凡 0.5 (eV) 程度となります。すなわち、波長が 1 ( $\mu\text{m}$ ) より長いような近赤外線の検出に Si は感度がなく、InGaAs を利用する必要があります (図 3 参照)。PN 型半導体素子の利点は、前述のように空乏層の内部電場のために原理的に外部からバイアス電圧を必要とせず計測できる点です。ただし、高応答性を必要とする際には逆バイアスを印加し空乏層を拡大させることで実現できます。更に、PIN 型はキャリアが非常に少ない i 型を p 型 n 型間に含むため、逆バイアス印加により大きな空乏層が形成され高応答性が期待できます。しかし、バイアス印加は暗電流の増加も導きノイズ増加にも繋がるという点に注意が必要です。逆バイアスを更に増加させると結晶格子との散乱頻度増大により電流は飽和しますが、更に逆バイアス電圧を大きくすると、一次の衝突を免れ加速された高エネルギーのキャリアが結晶格子と衝突し、新たな電子-正孔対が生成されます。この現象が雪崩式に起こることで、電子-正孔対生成の倍増が起こります。この原理を用いて微弱光の検出を実現したのが APD です。

PD は各社から様々な特性をもったものが多数販売されていますが、購入時に注意すべき特性は、(1)量子効率の周波数特性、(2)ノイズ特性、(3)時間応答性、(4)受光部面積が挙げられます。量子効率とはある波長での光子から電流への変換効率であり、測定する周波数帯での量子効率が高くないと十分な信号強度が得られません。ノイズに関しては抵抗体の熱雑音電流、暗電流や光起電流に起因したショットノイズが考えられます。時間応答性はパッケージ容量と PD 接合容量の和で決まり、接合容量は受光面積に比例し空乏層幅に反比例するため、揺動計測のように高応答性が必要となる際には注意が必要です。そして大きな受光面積は明るい光学系のために必要となりますが、時間応答を悪化させる原因でもあります。これら特性を吟味



し、研究にあったPDを選ぶ必要があります。APDの利用に関しては、アバランシェ効果による増倍率が温度依存性をもつため（結晶の格子振動が熱運動に由来）、素子温度によって逆バイアスを変化させるか、素子温度を一定に保つ必要があります。

以上、赤外線領域から軟X線領域まで利用できる光起電効果型での電磁波計測について述べましたが、赤外線領域では電磁波入射に伴う抵抗の減少を測定に用いる光導電効果型の素子も利用可能であり、特性を理解した上で場合に依りて利用すればよいでしょう。PIN型PDに硬X線や $\gamma$ 線などの高エネルギー光子が入射した際には、前述の光起電効果ではなく、電子との相互作用により電子-正孔対が生成されます。この電子-正孔対の生成数は入射光子数ではなく、入射光エネルギーに依存するため、発生電子数をカウントし、そのイベントの発生回数をカウントすることで、エネルギースペクトルを得ることができます。このような手法をパルス波高分析（PHA）と呼びます。

#### 4.1.4.3 半導体素子(2D)を用いた電磁波計測

受光素子を二次元に構成したものがCCD/CMOSです。CCDとCMOSの大きな違いは発生した電荷の転送方法です。CMOSでは個々のMOSにアンプや信号用電極が組み合わされたモジュール構造で構成されており、モジュールごとにデータを得ることができますが、モジュール間にばらつきがあったり、量子効率が低かったりすることから、高速カメラと呼ばれるような、比較的明るい像を高速で撮影するような場合に用いられます。例えばプラズマからの発光を二次元で撮影し、揺動の空間情報を得ようとする際などです。一方、生成されたキャリアを電界の井戸に一時的に貯め、順次、隣の受光素子（MOSが用いられる）にバケツリレー方式で電荷を電極部まで伝送する方式がCCDです（CCDは正式には電荷伝送の仕組みをいいますが、CMOSなども含め二次元の半導体受光素子全般をCCDということが多いのも事実です）。CCDには転送方式に関して幾つかの種類が存在しますが、受光部と蓄積部を共用するフルフレーム転送型CCDでは、外部シャッターを用いることで、転送時の受光素子への新たな光子入射を防いでいます。受光方式としては、表面（全面）入射型と裏面（背面）入射型があり、前者は電極部がある表面側から受光する方式で一般に用いられますが、電極部があるために量子効率が低下してしまう問題があります。後者は電極部がない裏面から受光する方式で広い波長領域に対して高い量子効率が得られます。近年ではこの裏面入射型がプラズマ計測で用いられるようになってきました。この二次元イメージセンサーであるCCDを用いることで、計測対象である電磁波の計測位置と波長の二次元同時計測が可能となり、高い量子効率が求められる分光計測でよく用いられています。

#### 4.1.4.4 光電子増倍管を用いた電磁波計測

光電子増倍管（PMT）は真空管状の素子で、外部光電効果によりアルカリ金属などの受光部において入射してきた光子が電子に変換され、更にその電子を基にダイノード部で次々と二次電子が増幅されることで高い増幅率が得られ

ます。ダイノード部には二次電子を加速させるために電圧印加が必要であり、外部から高電圧を供給する必要があります。逆にいえば、増幅率は外部供給電圧により制御できます。近年、PMTが磁場の影響を受けることやAPDの高性能化により、より扱いが楽なAPDが用いられることもあります。計測可能波長領域が広い、増幅率が高い、S/N比が高いことなどから、必要に応じてPMTが用いられています。

### 4.1.5 粒子計測

4.1.3.1節で紹介した静電プローブは粒子計測とも言え、得られた電流を電荷で割ることで粒子数を得ることができます。ただし、電極部に荷電粒子が入射された際には二次電子放出が起こり、正確に粒子数が判断できなくなるために、電極周辺部にバイアス印加したグリッドを設置して、二次電子を電極に戻す工夫が必要となってきます。このような計測器をファラデーカップと呼びます。なお、二次電子放出は静電プローブでも考慮すべき問題ではありますが、マイクロチャンネルプレート（MCP）の様に繰り返しの二次電子放出により高増幅率を得ることに応用可能です。また、4.1.4.2節で紹介したPHAは高エネルギー粒子に対しても同様に利用可能です。

### 4.1.6 積分回路と電流アンプ

#### 4.1.6.1 積分回路

4.1.3.2節で説明した磁気計測では、原理的に、得られる電圧は磁束密度の時間変化に比例することを述べました。そのため、磁束密度を得るためには磁気計測機器の出力を時間積分する必要があります。積分はデータ取得後にはデジタル処理により数値的に実現できますが、リアルタイムで知るためにはアナログで電気回路を用いて積分する必要があります。入力信号を積分する電気回路はRC回路やオペアンプを用いた回路がよく知られています。図5に両者の電気回路図を示します。

図5(a)はRC積分回路です。この回路は低域通過フィルターでもあり $1/(2\pi RC)$ で表される周波数より高い周波数の入力を積分します。時定数とゲインはそれぞれ $RC$ と $1/(RC)$ であり、低周波入力に対して高いゲインが期待できませんので、後段に合わせて増幅用のアンプが必要となることもあります。一方、図3(b)は高ゲインのオペアンプを用いた反転増幅回路による積分回路です。帰還素子にコンデンサーを用いることで積分を行います。理想的にはオペアンプの入力は高インピーダンスですが、実際には異なる

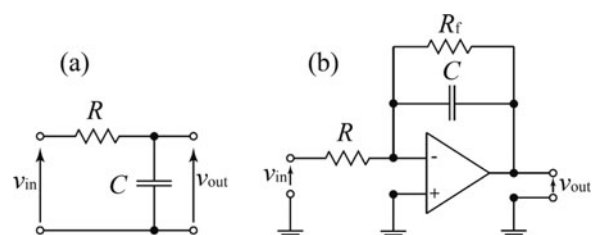


図5 (a)RC回路と(b)オペアンプを用いた積分回路図。

るために入力がなくとも出力が発生するドリフトが起きることがあります。そこで、コンデンサー  $C$  に貯まった電荷を放電するために、並列に高抵抗の  $R_f$  を付け逃してやることでドリフトを避けることができます。

#### 4.1.6.2 電流アンプ (電流電圧変換器)

4.1.4.2節や4.1.4.4節で説明した電磁波計測では、得られる信号が電流となります。電流は電圧と比してノイズの影響を受けやすいですし、ADCによりデジタルに変換される信号は電圧ですので、電流電圧変換が必要となります。電流を電圧に変換する最も簡単な方法は抵抗を計測器に直列に入れ、その抵抗の両端の電圧を測定することです。また、測定系のインピーダンスを変化させないように小抵抗のものをを用いる必要があります。ただ、この方法では増幅が行われないために、半導体素子からの  $\mu\text{A}$  程度の微弱電流に対して向いていません。ですので、電流電圧変換でもオペアンプを用いた反転増幅回路で電流を電圧に変換する方法がよいでしょう。電気回路は図5(b)の抵抗  $R$  を外したものです。このオペアンプを用いた反転増幅回路では、増幅率が  $R_f$  倍される一方、時定数が  $R_f C$  となるために高い増幅率とすると高周波での周波数特性が悪化します。特に揺動計測では問題となりますので注意が必要です。

#### 謝 辞

執筆にあたって、京都大学エネルギー理工学研究所門信一郎氏との議論は大変有意義なものでありました。感謝いたします。ヘリオトロンJ実験グループの先生方には執筆に対して多くのご助言をいただきました。お礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] プラズマ・核融合学会編：プラズマ診断の基礎 (名古屋大学出版, 名古屋, 1990).
- [2] プラズマ・核融合学会編：プラズマの生成と診断 - 応用への道 - (コロナ社, 東京, 2004).
- [3] プラズマ・核融合学会編：プラズマ診断の基礎と応用 (コロナ社, 東京, 2006).
- [4] I.H. Hutchinson, Principles of Plasma Diagnostics (Cambridge University Press, Cambridge, 1987).
- [5] 池澤俊治郎編：プラズマ・核融合学会誌, 講座「プラズマ実験入門」69, 451 (1993).
- [6] K.M. Young, *et al.*, Fusion. Sci. Technol. 53, 281 (2008).
- [7] 雨宮 宏他：プラズマ・核融合学会誌 81, 482 (2005).
- [8] 堤井信力：プラズマ基礎工学増補版 (内田老鶴圃, 1995).
- [9] 村岡克紀編：プラズマ・核融合学会誌, 小特集「磁場閉じ込め高温プラズマにおけるレーザー応用プラズマ計測の最近の進展」76, 842 (2000).
- [10] 間瀬 淳編：プラズマ・核融合学会誌, 講座「ミリ波・サブミリ波計測の基礎と応用」71, 49 (1995).
- [11] 間瀬 淳編：プラズマ・核融合学会誌, 小特集「大型装置計測のためのミリ波技術の開発」74, 1382 (1998).
- [12] 後藤基志編：プラズマ・核融合学会誌, 講座「プラズマ分光入門」79, 1287 (2003).
- [13] 浜松ホトニクス編：光半導体素子ハンドブック. [http://www.hamamatsu.com/jp/ja/hamamatsu/overview/bsd/solid\\_state\\_division/related\\_documents.html](http://www.hamamatsu.com/jp/ja/hamamatsu/overview/bsd/solid_state_division/related_documents.html)



やまもと さとし  
山本 聡

京都大学エネルギー理工学研究所, 助教.  
2003年名古屋大学大学院工学研究科・博士  
(工学). 長野県出身. 御嶽山と木曾駒ヶ岳  
に挟まれた木曾谷で生まれ, 育ちました.

主な研究分野はトロイダルプラズマにおけるMHD平衡・安定性の実験とありますが, 最近はほとんど低磁気シアヘリカルプラズマでの高速イオン励起MHD不安定性とそれの高速イオンへの影響を実験や数値解析により研究しています. 最近の趣味は温泉めぐり (特に硫化水素系) です. 好物はビールとソーセージと生ハム.