



小特集 原子・分子過程によって支配されるプラズマの複雑性と構造形成

7. 原子・分子物理とプラズマ物理の新たな接点を求めて

岸本 泰明, 加藤 進¹⁾

京都大学エネルギー科学研究科, ¹⁾産業技術総合研究所

(原稿受付: 2008年7月18日)

7.1 はじめに

岸本) 本小特集の「1.はじめに」でも触れましたが、2006年は、Benjamin Franklin (1706-1790) の生誕300年にあたります。放電・雷は、中性媒質からプラズマが生成されるとき物質が必ず通過する普遍的な状態であり、人間が自然科学の壮大さに接する最初の事象でもあります。Franklinに対する親しみと尊敬はそれに由来するのでしょうか。しかし、それらが示す予測困難な突発的な発生やそれに付随する微細な構造は因果関係を問うことが困難なほど多様性と複雑性に満ちています。これらは、構造の起源を問う物理学の根幹に関わる問題であると思われませんが、原理的な解明には至っていないようです。プラズマは、固体、液体、気体に続く「物質の第4の状態」といわれていますが、固体から液体、液体から気体への状態変化は「相変化」として物性論の観点から長い研究の歴史がありますが、プラズマ生成過程については、そのように位置づけて研究を行う土壌は必ずしも強くなかったように思います。一方、本小特集でも様々な事例が示されましたが、放電・雷を含め、中性媒質からプラズマが生成される過程は、時間的(雪崩現象や突発現象、時定数の急激な変化や揺らぎの増大など)にも空間的(突起構造や複雑な樹枝状構造、自己相似性やフラクタル性など)にも顕著な特性を示しています。この領域はプラズマ物理と原子・分子物理の双方が関与した分野横断領域に位置していますが、小特集の最後は、このようなプラズマ生成に関わる分野の学術としての魅力やパラダイム、あるいは今後めざすべき方向などに関して、なるべく自由に語っていただくことを目的に、座談会形式で意見交換の場を企画してみました。議論も尽きないと思われしますので、本小特集の執筆者も含め様々な分野の方からいただいた意見を記述し、本小特集のまとめとしたいと思います。

7.2 「原子・分子物理とプラズマ物理の新たな接点を求めて」についての執筆者からの意見

7.2.1 コメント1(高村秀一/愛知工業大学, 長崎百伸/京都大学)(2.1章執筆)

(1) 高いガス圧力下における放電

放電路のシャープさが際立っているのが印象的である。

7. Toward New Cross between Atomic/Molecular Physics and Plasma Physics

KISHIMOTO Yasuaki and KATO Susumu

拡散過程が重要ではなく、重いイオンの空電荷によって発生する電場中を電子が電離しながら走る対流運動が主要なであろう。その際、確率・統計的に放電路が決まることが構造の美しさをもたらしている。プラズマだけではなくガスとの混合流体が静電的な力を互いに及ぼし合い、帯電した流体のように振る舞う現象があると考えられる。電離ガスの静電流体力学的側面も新しいのではないか。ミクロな素過程のみが挙動を支配するのではなく、熱平衡になくとも例えばエンタルピー(あるいは比熱)のような熱力学的な物性値が放電の最終形態や分岐・選択に影響を及ぼすのではないか。

(2) 気相だけでなく固体壁も放電にとって重要

アーク放電は固体表面を通して行われる。アークにおける陰極点付近はプラズマ物理・放電物理の宝庫である。電場と磁場が絡み合っている。50年来完全な解明を拒んでいる単極アークにおける retrograde 運動はそろそろ秘密のヴェールから解き放たれねばならない。電場と磁場とプラズマの圧力そして電子放出に伴う Whisker の加熱などそのトリガリングと併せてシミュレーションの格好の課題であろう。金属表面に跡付けされた放電路の統計性(wondering)と指向性は気相におけるストリーマと同じ造形美を形成している。

(3) 核融合プラズマにおけるプラズマ生成

論文ではプラズマが第2高調波 ECH によってプラズマが立ち上がった後の現象について実験的に調べたが、中性ガスの状態から如何に放電が開始されるかの物理を「相転移」という観点から調べるためには、 H_{α} 光が見え始める前にどのようなことが中性ガス中で起きているのかを調べる必要がある。計測システムの能力や精度に依っているとところもあるものの、プラズマ生成のためのパワー入射直後では、見た目には何らかの変化が起きているようには見えない。実験条件によっては、電子の加速時間や磁場中でのバウンス時間よりも十分に長い数十 msec 程度という長い時間が経ってからプラズマが立ち上がることもある。この間、種となる電子は加速され、一部は磁気面内にとどまっているはずであるが、実際にどのような振る舞いをしているのだろうか？

超伝導トカマクでは十分なループ電圧がとれないため

corresponding author's e-mail: kishimoto@energy.kyoto-u.ac.jp

に、プラズマ生成ではECHのアシストが重要となっており、また、球状トカマクにおいてもオーミック電流なしでECHのみでのプラズマ立ち上げの研究が盛んに行われている。ヘリカル系では、高ベータプラズマ実験のために第2高調波よりもさらに高い高調波を用いたプラズマ生成が試みられてきている。こうした応用面から、いかに安定した信頼性の高い初期プラズマの生成が行えるかという実用的な観点から研究が進められているが、放電開始の予測を行うために重要となる点の一つに、原子・分子過程を含めたどういったモデル化をするかということがあげられる。原子・分子過程を含んだモデル化、また、電子分布関数の時間発展の解析などが理論面で進展していることから、今後、実験結果との比較を進めていきたいと考えている。

7.2.2 コメント2 (金澤誠司/大分大学) (2.3章執筆)

実験屋の立場としては、岸本先生がシミュレーションされているなかで、放電の構造形成におけるストリーマの連結にも興味をもっています。すなわち、ストリーマが連結することでさらに複雑な構造へ発展することは、非常に興味がありますし、産業応用的に見ても注目すべき点だと思います。私の経験した範囲では、通常の棒対平板電極では、アクティブな棒電極からのストリーマは平板電極で到達して、そこで終わりになるだけであるが、平板を同じ棒状にすることで、ストリーマが接近すると新たにアース側からもストリーマが進展して、放電が合体するように、違う構造形成になる。これは雷放電ではよく知られてことであるが、このような違いをしっかりと認識しておくことが大事だと思います。実験条件の設定にも注意する必要があります。

今後はさらに、放電という確率的な要素が多いものの中に、シミュレーションと実験で得られる知見をつぎ込み、制御する方法が求められると思います。その場合、例えば、雷に関して言えば、ロケット誘雷は外部からの制御ですが、内部からの制御（そのようなことができるかどうかは別として）ができればすごいと思います。また、産業応用のための放電についても同様で、効率はもちろんのこと、電極の耐久性、放電の安定性、ロバスト性などが意図したように設計（プラズマのデザイン）できることが次の課題だと思います。

使える放電の確立も非常に重要だと思います。すなわち実験で観測された現象の理解だけでなく、今後さらにそれらの知見を生かした実際に使える放電の開発を行う必要があります。これまででも多くの研究が行われているが、ガス処理、水処理等だけでなく生体なども対象にした、放電発生技術の構築が重要と思われます（すでに生体についても先駆的な試みが行われている）。プラズマの影響、安全性の議論も必要で、マイナスイオンのような偽科学の轍を踏まないことも大切です。

放電の規模、すなわち大きさと時間スケールにおいて、プラズマディスプレイパネル内の数百 μm 以下のギャップ中でのストリーマから、数百 km にもおよぶスプライトまで、大きなスケールの違いがありますが、形成されるストリーマ一つに注目すると、放電のギャップとストリーマの

直径の間には、相似則が適用できると考えられます。これは、一つの見方ですが、複雑に構造形成された放電プラズマを分解して見ていくことで、新たな関係と共通する物理があるように思われます。

従来行われてきた流体モデルに加えて、近年では、粒子モデルについてもストリーマの解析に用いられるようになってきました。それぞれの特徴を明確にして複雑なプラズマの解析に挑んでほしいと思います。また、シミュレーションと実験の比較を行い、どこまでがシミュレーションで可能なのか、どこまで両方の条件が歩み寄れるのか、さらには、シミュレーションで得られた興味ある現象が実験で実際に観測されるのか、または、その逆についても、検討していくべきだと思います。両者の関係を密接なものにしていく必要があると考えます。

7.2.3 コメント3 (遠藤琢磨/広島大学) (3.1章執筆)

大阪大学の激光XII号という大型レーザーを外部レーザーも使えるようになったのをきっかけにレーザー駆動デトネーションに関する基礎実験を始めました。それが何の役に立つのかと問われれば、航空宇宙工学におけるレーザー推進の基礎研究であると答えることはできるのですが、個人的な興味はもっと別のところにあります。通常、デトネーションというのは燃焼の分野の用語で、化学的な発熱反応と衝撃波とがカップルして媒質中を超音速で伝播する現象を指します。この現象の面白いところは、化学反応が進行する特性時間が流体運動の特性時間に対して無視できないため、化学反応の分子過程と流体運動とが強くカップルし、その結果、衝撃波面の擾乱は非線形な領域にまで成長し、独特の多次的な波面構造を形成するところとあります。化学燃焼駆動デトネーションの分野で扱う温度領域では、輸送効果は現象の主役とはならず、輸送を無視した数値シミュレーションでも現象の本質的な部分は正しく計算されています。そこで、興味が出てくるのは、プラズマのような輸送効果の顕著な媒質中におけるデトネーションの流体力学的な安定性という問題です。レーザー駆動デトネーションでは、数十 eV 程度のプラズマがデトネーション内部に現れますので、このような問題に対する実験的アプローチが可能です（レーザー駆動デトネーションの場合、レーザー吸収によるプラズマ加熱と中性気体中を伝播する衝撃波とがカップルします）。

レーザー駆動デトネーションに関する実験データの解析や数値シミュレーションで厄介なのは、電離反応が有限の速度で進行するという扱いをせねばならない点だと思っています。つまり、プラズマの状態を計算するのに、LTEやCREといった平衡モデルが使えず、状態変化を表すレート方程式を、流体運動を支配する方程式と結合させて解いていかねばならないということです。宇宙機の大気圏突入といった分野ではこうした計算が行われているようですが、通常の高温プラズマ物理に加えて、そのような面倒な計算もやらねばなりません。しかも、流体力学的な不安定性を調べるのですから、最低でも2次元、できれば3次元で計算しなければいけないことになります。私は実験屋です。そのような数値シミュレーションに挑戦してくれ

る人の出現を待ち望んでいる今日この頃です。

7.2.4 コメント4 (土屋晴文/理化学研究所) (4.2章執筆)

元来、我々のグループは、宇宙において地上の加速器では未だに作りだせない高エネルギー粒子（宇宙線）がどうやって生み出されているのかということに興味がありました。よく知られていますように、宇宙における粒子加速の主役は磁場と衝撃波です。磁場によってある領域に閉じ込められた粒子が、衝撃波という波に乗ることで効率的に加速されると説明されています。ここで宇宙の粒子加速器の内部を考えますと、そこにはプラズマが豊富にあり、磁場と相互作用することで、その内部で誘導電場が発生していると容易に想像できます。この誘導電場がいったい粒子加速にどれほどの寄与をしているのかということは、実はこれまであまり調べられていません。というのも観測的に宇宙の電場の様子を知ることが難しいからです。

こうした中、近年、地球で発生する雷が粒子加速器であるという観測的示唆が得られるようになりました。そこで、宇宙の粒子加速器の仕組みをより理解するために地球の雷をターゲットとする実験を始めました。小特集(4.2)でも書きましたように、我々は雷放電ではなく、雷雲の準定常的な電場が、1分にわたり電子を10 MeV以上に加速でき、その結果、雷雲中で相対論的な電子が制動放射でガンマ線を発生させていることを突き止めました。ところが、この観測によっていくつかの疑問を持つようになりました。

まずは、なぜ1分という長い間、雷雲の中で電子が加速され続けるのかというものです。次に、雷雲の中で電子はいったいどれほどまで加速され得るのかです。簡単な計算から、電子の最高エネルギーを決めるのに重要なパラメータは、電場の強さと電子が走る距離になります。これらの疑問は実は雷雲の中の電荷の構造やその持続時間に大きく依存しています。たとえば、雷雲の電場領域(鉛直方向)が1 kmほどあれば、500 keVの電子でも45 MeVほどに加速されます。このような電場領域が数分でも持続されれば、今回のようなバーストは原理的に発生します。というわけで、大気電気分野の研究者の方々と一緒に雷雲の電荷構造や電場の強さを観測できれば、自分たちのガンマ線観測で得られた謎は解決すると期待できます。また、観測だけでなく、それをできるだけ実際の大气に模擬した実験やモンテカルロシミュレーションで検証できればとも思います。とくに、後者のモンテカルロシミュレーションは、これまで雷放電に同期するミリ秒以下の継続時間を持つX線の発生起源をうまく説明できています。ところが、我々の観測したような長い間続くガンマ線の起源の説明には成功していないというよりも、まったく範囲外のこととして考えられてもいません。そこで、プラズマ分野および計算機分野の研究者の方々と広く意見を交換し、この謎をぜひとも解明したいと願っています。

上記の謎に加えて、そもそも、なにがバーストをトリガーしているのかといった根本的な問題があります。このトリガーとしては、宇宙線に由来する電子と大気中のラドン崩壊に由来する電子が現在考えられています。しかし、

どちらが正しいのかは観測的にはまったく不明です。

これを解決できれば、雷放電の発生メカニズムについても理解が深く進むと期待できますので、大気電気分野やプラズマ分野の方々はもちろん、宇宙線分野などの方々をも巻き込んで、議論をしていければと思います。

最後に、冬の雷雲だけでなく夏の雷雲も粒子加速器なのかどうかにも興味があります。一般に、冬の雷雲は高度1-3 kmで発達する一方で、夏の雷雲は、高度3-10 kmで発達します。それゆえ、もし夏の雷雲でガンマ線が発生したとしても地表の検出器で捉えることは困難です。したがって、必然的に高山へ観測を展開していかなければなりません。高山での観測は、宇宙線観測の基本で、個人的には、大学院生のころから、乗鞍岳(2770 m)やチベット羊八井高原(4300 m)にさんざん行っていますので、地の利を生かして、早急に始めたいと思います。聞くところによりますと、ポリビアのチャカルタヤ山(5250 m)では、現地の夏(北半球の11月-2月)に非常に雷が多いそうです。そこには、行ったことはありませんが、つてを頼りにそこにも装置をおければと思います。こうして、世界規模で冬観測のみならず夏観測も行うことで、雷雲ガンマ線のなぞを解明していこうと考えています。

7.2.5 コメント5 (犬塚修一郎/京都大学) (5.2章執筆)

星間ガス中での乱流の励起・散逸過程においては熱的不安定性の効果を定量的に決定することが必要であり、物理学的にも興味深い。しかし、最新の研究によれば、星間ガスの実効的プラントル数の大きさが重要であることが示唆されている。そのため、電離度が0.1%~10%程度の弱電離プラズマにおける熱伝導係数と粘性係数を定量的に求めることが重要である。しかし、これらの係数は磁場の強さと方向に依存しているため、輸送係数に対する実用的な理論の構築が求められている。もし理論の実験的な検証が可能となれば、我々の理解は急速に進むと考えられるので、弱電離プラズマ中での輸送係数を調べる実験等が発展することを期待している。また、星間プラズマ中でのガスの加熱・冷却過程においては、原子・分子ガス粒子の輻射場との直接的な相互作用と塵粒子から光電効果で放出された電子による衝突加熱等が重要である。特にこの後者の効果を定量的に決定することは難しいが、今後のダストプラズマの分野の発展にもなって得られるであろう新しい知見には興味を持たれる。

7.3 「原子・分子物理とプラズマ物理の新たな接点を求めて」 座談会

7.3.1 座談会の目的について

岸本) 本日はお集まりいただきありがとうございます。放電や雷は、様々な要因で「初期状態」が形成され、それが小さな摂動でトリガーされて、大域的な構造へとエネルギーが伝達・開放する現象という見方もできるのではないかと思います。何らかの示強変数(例えば電場など)が変化していったときに、微小な摂動により静的な状態から動的な状態へと変化を引き起こしています。本特集では、このような中性媒質から突発的なプラズマ状態への変化をプ

ラズマへの「相転移」とそれにもなう「臨界現象」と見ること、プラズマ生成に関わる複雑なダイナミクスや構造形成の過程をより普遍性のある学術として理解できないか考えています。今回の座談会ではまず、「初期状態の形成」、「トリガーと連鎖のダイナミクス」、「構造発展とパターン形成」という観点から研究を解釈することは可能か、そのあたりから議論できればと思います。また、そのような見方をすることが適切かどうか、ご意見をお聞かせください。

7.3.2 座談会での議論

金澤) 針平板電極間のような不平等電界中での放電において突発性に至る初期状態の形成は、電子なだれや光電離作用による2次電子群の生成などに基づくと考えております。それらは古くから放電の教科書にも記載されていることですが、本当の理解のためには最新の計測によってもう一度、放電初期過程からの観測が必要であると考えております。また、トリガーと連鎖のダイナミクスに関しましては、それらがストリーマなどプラズマ状態に転換することと捉えることができますが、その形状や分岐の条件など、これらはまだまだ踏み込めていない領域と思われる。

藤井) 超短パルスレーザーにより生成されたフィラメントを用いた放電制御研究を行っています。このフィラメントというのは、超高強度レーザーを大気中で照射すると非線形光学効果によって、自己収束と発散を繰り返し、極めて長い距離にわたってレーザー光をフィラメント状の高い強度の束として伝播させられるものです。これまでこのレーザー生成フィラメントによる長尺放電制御を行ってまいりましたが、レーザーの照射から放電の形成までに特徴的な時間遅れがあることがわかりました。レーザーの照射によって空間に供給された電荷が、ある条件では接地電極に達するストリーマを形成することで長尺の絶縁破壊がトリガーされた可能性があります。このように超高強度レーザー生成フィラメントを用いることで、任意の時間、空間に初期状態を形成することができるので、放電の初期状態の制御が可能となります。このため、このようなレーザー伝播を用いた実験は本研究に対して有用なのではないかと考えております。

河崎) 雷放電の時空間微細構造と素過程の研究を行っています。明らかにしたいことは放電の開始機構と放電の進展機構であり、それらを独自開発の広帯域干渉計、広帯域レーダーを用いて観測して、最終的には「非静力学モデルによる雷嵐発生の数値予報」をめざしております。雷雲は典型的には真ん中がマイナスで上下がプラスに帯電しておりますが、その中で生じる雷放電から放射される電磁波を観測することでその時間進展を3次元的に見ることができます。しかしこの現象はプラズマ相転移というよりも、水が氷になる相転移とその帯電と捉えています。放電現象のミクロな理解がこの研究につながるかもしれないが、雷はキロメートルのスケールを有する現象であるので、単純に類似性があるとは考えにくい面もあります。

土屋) 雷雲から放射されるガンマ線の観測を通じて雷雲や雷放電中における逃走電子のトリガー、維持、発展過程

の解明をしたいと考えております。この10 MeVに及ぶエネルギーを有するガンマ線は雷雲中に形成された逃走電子から放出されたと考えられますが、その逃走電子の形成のためには、トリガー問題として数百KeV以上のエネルギーを有する電子が必要となります。しかし、その起源はいまだによくわかっておりません。さらに放射源の空間的構造など、詳細な観測とモデリングが必要とされております。加藤) 放電における構造形成、特に分岐構造の起源の解明を目指してシミュレーションコードを開発するためには、原子分子過程から、電子ボルツマン、連続体とミクロなプロセスを積み上げていくアプローチと、フラクタルによるモデリングなど構造から考えるアプローチが考えられます。それぞれ、長所、短所があるため実験との比較検討を繰り返すことで適切なモデルを選び出すことになるでしょう。

山極) レーザーの長距離伝播におけるフィラメンテーションのシミュレーションを通じてプラズマ中の構造形成メカニズムの理解をめざしております。雷・放電現象はその時空間におけるランダムな発生特性がプラズマのその場観測を困難にしているため、レーザーによるトリガー制御が有用な方法であると思われる。この理論シミュレーション研究により雷・放電に対するレーザーによるトリガー、および制御について理論的指針を得ることができれば、誘雷研究の高度化、雷診断研究の高精度化等につながるかと期待しております。

古谷) レーザーによる着火を用いた高効率エンジンの開発研究を行っています。このレーザー着火によるエンジンは従来のスパークを用いたエンジンよりも効率が良いことは既に示され、その実用化をめざし、近年小型レーザーの開発などが急速に進められております。しかし、エンジンというのは極めて動作過酷な環境であり、プラズマを形成する場としての初期値の制御、トリガーに関する理解を進め、レーザーの仕様に対する要求を少しでも緩和していく取り組みは極めて重要なことと考えております。

小紫) マイクロ波放電プラズマは非常に特徴的な構造を発生します。その構造は放電するガスの条件やマイクロ波の集光条件によっても変化し、ストリーマ放電とも類似性がある反面、伝播速度では大きく異なるなどの特徴を持ちます。このプラズマを形成する初期状態の形成、トリガーに関しては、近年、このRFプラズマの進展に対して紫外光がトリガーを作っているのではないかと考えられており、非常に興味深い研究対象となっております。

7.3.3 今後の展望

宅間) この研究で扱うプラズマは、数ミリメートルから数キロメートルと非常にスケールの範囲が広く、大変興味を持って聞かせてもらいました。異文化交流において極端な例では医学と物理の間など、飛躍的な進歩が生じる余地があると考えております。これまでの研究では、それぞれの範囲のスケールだけで考えてモデリングが進められておりましたが、この研究では非常に違うスケールものを視野に入れて、別な視点からモデル化していくという努力をされるということで、飛躍的な発展の可能性を感じました。

しかし、最近の研究評価の仕組み、海外との競争・連携、緊急性が求められる状況なかでは、このようなユニークな取り組みは評価されにくい側面があるのも事実です。

根本) 電力事業の立場からは、雷・放電現象は電力流通部門における最大の課題のひとつであり、その中で例えば、塩分を含んだ雪が付着したガイシの放電問題は古くて新しい課題です。それら放電を基礎からシミュレーションする必要性は、応用サイドからも理解される状況下にあります。

河崎) 放電泥沼論というものもあるが、この考え方は「木に竹を接ぐ」ような発想だから良いと思う。そのような話でないと、新しい学理の創成になるような研究課題とはならない。それをちゃんと生きた竹にするのがわれわれの仕事かと思う。対流圏の観測の研究とシミュレーションの橋渡しをちゃんとしたいと思う。

根本) あと電力への応用の立場からいうと、雷というと落雷の頻度マップに加えて電流値、エネルギーがわかると雷のリスクをマネジメントできるという考え方がある。落雷頻度というマップはあるが、雷雲やそのエネルギーがシミュレーションでわかるようになるとハザードマップが作成できて、その対策をすることができるようになるので、別の応用の話が出てくるのではないか。

岸本) 従来このような雷頻度や工学モデルなどのシミュレーションに関して、実績は既にかなりあるのですか？

河崎) 根本さんの立場では、雷雲がどうやって起こってきくというシミュレーションは、残念ながらできていないということ。要するに、長期予報はできるけど、短期予報はまだできない、そういう意味で言うとメソスケールの予想はできていないので、そこが必要とされているということ。我々としても気象庁の非静力学数値モデルを改良してやりたいと思っている。

岸本) そのようなシミュレーションがどのようなもので、どこまでできているのかに関して我々も是非知りたいところですので、次の機会にお願いいたします。

7.3.4 最後に

岸本) 最終的には突発性の起源を解明するというところで、一般性・普遍性の高い概念につながるのではないかとこの印象を持ちました。その一例として、広島大学大学院医歯薬学総合研究科の秀道広教授から、放電・雷の発生と人間の体でしばしば起きる蕁麻疹(じんましん)は類似性があるとのコメントをいただきました。つまり蕁麻疹は「皮膚に突然痒みを伴う隆起性の発疹が現れ、数時間で消える疾患であるが、しばしば皮膚の一点に現れ、急速に拡大する。この病気では、一見正常のように見える皮膚が実は高い活性化状態にあって、体の内外からごく小さなトリガーが加わることによって一気呵成に発疹が出現する。そのため、蕁麻疹の仕組みを解明するにはトリガーとともにまだ発疹が現れていない皮膚の状態を調べなくてはならない。」ということです。このような「突発性の科学」の観点から放電や雷現象を見れば、重要で普遍性の高い科学フロンティアと言えるのではないのでしょうか。放電・雷研究が、(蕁麻疹の研究も含め)突発的なダイナミクスや構造が本質的な役割を果たす幅広い学術分野の交流の場となれば幸いです。

執筆者および発言者

岸本泰明(京都大学)、高村秀一(愛知工業大学)、長崎百伸(京都大学)、遠藤琢磨(広島大学)、大塚修一郎(京都大学)、金澤誠司(大分大学)、藤井隆(電力中央研究所)、河崎善一郎(大阪大学)、土屋晴文(理化学研究所)、山極満(日本原子力研究開発機構)、加藤進(産業技術総合研究所)、古谷博秀(産業技術総合研究所)、小紫公也(東京大学)、宅間宏(電気通信大学)、根本孝七(電力中央研究所)

謝辞 秀道広教授(広島大学)には、異分野の立場から有益な議論とコメントをいただきました。心より感謝申し上げます。

小特集執筆者紹介



かとう すずむ
加藤 進

1993年大阪大学工学研究科電磁エネルギー工学研究科博士課程修了。博士(工学)。現在、独立行政法人産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門パワーレーザーグループ主任研究員。主な研究分野は、大気圧プラズマ、レーザープラズマ相互作用のシミュレーション。



たか はし えい いち
高橋 栄一

1994年筑波大学博士課程物理学研究科修了、同年工業技術院電子技術総合研究所に入所、現在は独立行政法人産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門主任研究員。主な研究分野は、レーザープラズマ相互作用、エキシマレーザーから近年は放電現象そのものに興味を持っている。趣味はバドミントン



ささき あきら
佐々木 明

工学博士(東京工業大学)、所属は、日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門。EUV～X線領域の光源を対象とした、レーザー生成プラズマのシミュレーション研究を行ってきたが、最近、ますます高速化されるコンピュータの性能を生かして、複雑な放電プラズマの構造を解明することに関心を持っている。