反応性プラズマ中の電子衝突について： 理論的側面から

解説

キーワード

反応性プラズマ，電子-分子衝突，電子励起，振動回転励起，ボルン近似，
Close Coupling 法，衝突断面積，共鳴，ラジカル反応，データベース

季 村 峯 生
山口大学

1. はじめに

放電プラズマを利用したプラズマプロセスによる半導体・薄膜生成技術は現代産業の発展をささえる基幹技術である⁽¹⁾。

放電プラズマ中でのさまざまなプロセスは，まず電子を数 eV のエネルギーに加速し，室温程度の温度に保った親ガス分子との衝突を誘起することから始まる。電子-親ガス分子衝突反応を利用し親ガス分子の励起（電子，振動，回転），そして励起分子の解離（分解）によるイオン種，ラジカル（中性解離）種の生成をし，これら活性種と試料表面との化学反応を利用しさまざまなプロセス（デポジション，エッチングなど）を行う。このプラズマ種を核融合プラズマと区別をつける意味で“低温反応性プラズマ”とも呼ばれている。放電プラズマの役割は電子-親ガス分子衝突過程によるプロセスのもとになる反応性イオン種，ラジカル種の生成，およびこれら解離種の試料表面への輸送ということになるが，プロセスの高速化，高精度化に伴い，プロセス過程の厳しい再現性，安定性が要求されている。このため，電子-分子衝突過程で生成される反応生成種の種類，密度，運動エネルギー分布などを原子・分子のレベルでの現象を理解し，かつ，過程を最適に調整制御する必要がある。本解説では素過程としての電子・イオン・原子衝突現象について理論の立場から，一見異なった現象のように見えるさまざまな過程のその共通の物理について概観し，現在理解されていること，また今後に残されている課題などについて述べてみたい。この論文を次号掲載予定の田中・末岡による実験面からの電子衝突の解説⁽²⁾と併せ，お読みいただきたい。

2. 反応性プラズマ中の電子-分子衝突過程

電子と分子との衝突過程といっても標的分子の種類（構成原子種，分子構造など）が無数にあるため，非常に多種・多様な反応過程が可能となる。そのうえ標的分子の内

図 1

部量子状態（電子状態，振動回転状態）も無限にあり，常温以上の温度では分子はさまざまな振動回転励起状態に分布していると考えられる。量子状態の種類によっては，電子-分子の反応性は著しく異なることが最近明らかになってきており，したがって標的分子種および内部状態によって全く異なる過程も可能になり，ここでは分けて考える必要がある。まず最初に，比較的良好に理解（反応機構，反応断面積の大きさおよびその衝突エネルギー依存性などについて）されていると思われる N_2 分子の基底状態からの衝突について詳しく考えてみる。そして応用上重要なフッ素原子を含んだ多原子分子の場合について，我々の理解の現状，問題点について概観する。

2.1 二原子分子： N_2

電子- N_2 分子衝突により起こるさまざまな素過程の反応断面積の例を電子の衝突エネルギーの関数として図 1 に示す⁽³⁾。なお，図に含まれているデータは実験および理論の両方によって求められ，かつ，その妥当性について評価されたものが載せてある。ここで，衝突反応断面積の大きさについての感じをつかんでおこう。原子の大きさ（長さ）はおおよそ 10^{-8} cm のオーダーで，水素原子では 0.5×10^{-8} cm，これよりたくさん電子をもち“はるかに大きい”と思われる鉄原子，ウラン原子でもせいぜい $2 \sim 3 \times 10^{-8}$ cm の大きさしかない。水素原子が二つ結合してできる水素分子になっても原子核が 2 個の電子に引き寄せられるため，水素原子より少し大きい 0.7×10^{-8} cm 程度でし

Electron-Molecule Scattering Processes and Radical Reactions as Secondary Processes in Low-Temperature Plasma: Theoretical Aspects.
By Mineo Kimura (School of Medical Sciences Yaguchi University).

かない。したがって、ほとんどの原子、2原子分子の大きさはだいたい 10^{-8} cm のオーダーの大きさと思ってよいであろう。これら原子・分子の幾何学的断面積は単純に長さの2乗をとると 10^{-16} cm² のオーダーになる。したがって、衝突断面積の大きさとして、かなり大きな値をもつ弾性散乱断面積では原子分子の種類にそれほど関係なく、衝突エネルギーが 100 eV 以下で $10^{-15} \sim 10^{-16}$ cm² のオーダーと思ってほぼ間違いはない。非弾性散乱はこれよりはるかに起こりにくい過程であるので、断面積の値はだいぶ小さくなる。この小さくなる傾向は、原子分子の種類および過程の種類によって非常に異なり、原子分子の“個性”が顕著に現れることになる。また、それにかかわってくる物理的機構、原子分子の物性などの解明が基礎物理の興味深い問題となっている。ここで、 k を電子衝突で起きる過程の反応速度定数とすると、 k は衝突断面積 σ_m と電子の速度 v_e の積を電子の速度分布で平均した量、 $k = \langle v_e \cdot \sigma_m \rangle$ (cm³/s) で表される。

衝突エネルギーが 0.001 eV から 1,000 eV の範囲で起こる素過程は衝突エネルギーの高いほうから：

などがある。(1a)式や(1f)式で作られる分子イオンや(1c)式での電子励起状態の分子は通常不安定なものが多くある短い寿命の後、最終的に解離をし中性原子分子や原子イオンを生成する過程を経るケースが多い。また、共鳴状態と呼ばれ分子の場に入射電子が一時的に捕まり複合状態を作ることがある。入射電子が分子のそばにしばらく滞在するために分子内の電子密度が変化をし、電子と分子の原子核との相互作用が大きくなり、特に分子の振動励起の断面積がある特定のエネルギーのところで何桁も大きくなる現象を起こす。例えば図1の2.8 eVあたりに見られる鋭いピークは、この共鳴による効果と考えられている。共鳴のような現象が起こらなければ断面積は衝突エネルギーの関数としてだいたい滑らかな形をしている。普通しきい値を超えたエネルギーから急激に断面積は増加をし(図1のイオン化断面積参照)しきい値の少し上(2~3倍)のエネルギーで極大をもつ(いわゆる Massey criteria)。これ以上高いエネルギーで電子が入射すると、今度は電子が分子との相互作用をする時間が短くなり断面積が減少し出す。こ

の低いエネルギー領域の衝突はボルン (Born) 近似法などの摂動論で取り扱うことが一般的にでき、いくつかの例を除き大まかな断面積の大きさ、エネルギー依存性の予測は可能と考えられている⁽⁴⁾。ボルン近似などの摂動論の多くは標的分子の電子状態についての波動関数の情報のみを必要とし、それを用い異なる電子状態間の相互作用(マトリックス要素)を計算する方法である。従って、入射粒子の性質(つまり電子か陽子かあるいは重イオン粒子など)によらないことになり、電子入射の場合も陽子入射の場合も特定の過程については同じ衝突速度では、同じ断面積を与えることになる。衝突エネルギーが低くなってきて10~20 eVより下がると電子・分子相互作用が強くなり分子のいろいろな電子状態への励起、それに伴う振動励起が同時に起き、またその量子状態間でも強い相互作用を起こす。この強い相互作用の領域では相互作用の影響を受ける状態(電子的、振動回転)をすべて考慮に入れる必要がでてくる。いわゆる close coupling 法⁽⁴⁾という理論が必要になる。しかしこの計算法は多くの状態を同時に計算に入れるため、普通かなり大がかりな計算となり、今の大型計算機をもってしてもあまり多くの例について実行されていない。

10~20 eVより低い衝突エネルギーでは、さきに述べた分子の場に入射電子が一時的に捕まる共鳴状態を起こすことが、ある特定の衝突エネルギーで起きやすくなる。これは分子が作るポテンシャルに入射電子がうまく捕まったり(ポテンシャル形状共鳴)、あるいは入射電子が分子内電子を励起し、自分はその抜けた空殻に落ち込む(フェッシュバッハ共鳴)などの現象がもとで起きると考えられている。図1の2.8 eV近傍に見られる $v=0 \rightarrow 1$ の振動励起の鋭いピークはこのポテンシャル形状共鳴による効果である。共鳴による断面積の急激な変化(数 eV の間で3桁ほどの変化)、そしてエネルギー依存性などを理論的に精度良く計算するのは分子のポテンシャルを高精度で求め、かつ、エネルギー的に近くにある他の量子状態の影響も考慮しなければならず、かなりやっかいな問題である。なお、2~3 eVに見られる櫛状の構造は分子の振動状態に対応している。

振動励起のしきい値(~0.1 eV)より低い衝突エネルギーでは回転励起過程が唯一の非弾性散乱過程となる。回転励起断面積の形はしきい値(~0.001 eV)で急激に増加し、あとは衝突エネルギーが大きくなるにつれて、他の過程と比較すると非常に緩やかに減少する。回転励起は電子励起、振動励起過程に付属して常に起きることによる。回転の励起エネルギーは非常に小さい(~1 meV)ので、多くの場合実験の分解能が悪く実験的に断面積を求めるのは困難である。回転励起過程は入射電子が分子にトルクを与えることにより起きる。しきい値より少し上の衝突エネルギーでは、分子と電子の長距離相互作用による弱い相互作用を受けて起きるので、摂動論によるボルン近似で、ある種の分子については割合うまく説明できる。0.1 eV 以

下では分子の内部状態は変化しないが、入射電子の運動量が大きく変わる運動量移行過程が重要になる。

衝突エネルギーが0近傍、あるいは0の極限ではもちろん弾性散乱のみが可能で、理論的には散乱長理論⁽⁴⁾と呼ばれる方法でうまく記述できることが知られている。

最後に、ある種の希ガス原子 (Ar, Kr, Xe) および CH₄ など球状の対称性の良い原子分子では、弾性散乱断面積にすどい極小値を衝突エネルギー 0.1 eV 以下あたりにもつ場合があり、この極小値を発見者にちなんで Ramsauer-Townsend (RT) minimum と呼ぶ。これは標的が作るポテンシャルの引力部分と斥力部分がうまく打ち消し合い、見掛け上入射電子に何も起こらなかったように見える現象である。RT minimum は電子熱中性化に大きく寄与し応用に重要な現象である。参考例を図2に示す。図中に電子と He, Ne, Ar, Kr, Xe 分子との弾性散乱断面積が衝突エネルギーの関数としてプロットしてある。He, Ne では RT minimum は存在しない。つまりこれらの原子による入射電子に対する斥力が強く RT minimum ができないのである。Ar, Kr, Xe には明らかな RT minimum (1桁以上小さい値をもつ) が見られるが、その minimum を与える衝突エネルギーは原子の種類によってだいぶ異なっている。

以上で衝突エネルギーが高い所から低い所まで、種々の過程に対する断面積の形、エネルギー依存性、そしてだいたい大きさなどについてのおおよその物理についての感じはつかめていただけたかと思う。また、これら断面積の特徴を決定するダイナミカルな機構、そして現象への理論的アプローチの方法についても大ざっぱに述べた。一つ誤解をまねかないように注意しておく必要がある。上に述べたことから、例えば N₂ 分子についての電子衝突過程すべてについて実験的・理論的に理解されているかという、残念ながらそれはとんでもない間違いで、実は図1で示した結果の80%ぐらいについての物理は実はまだよく分かっていない、ということである。H₂, N₂ や O₂ のようにさまざまな応用分野で重要な分子でさえ多くの素過程について、広いエネルギー範囲で精度良く断面積は求められておらず、次節で述べるように、他の多原子分子についての

研究はまだほとんど手つかずの状態といってもよい⁽¹⁾。

2.2 多原子分子

多原子分子と前節で議論した N₂ など、2原子分子との本質的な違いは分子中の原子の数が多くなるにつれ、分子の運動の自由度が増え、電子、振動、回転励起のモード数が著しく増加するので、それに伴い多種多様な状態の可能性が増える。また、分子の作るポテンシャル場も複雑になり、さきに述べたポテンシャル形状共鳴の数も増え、多様性が更に増す。そして分子のイオン化、電子励起、あるいは電子付着過程を経て起きる分子解離による解離種の種類も、さまざまなイオン種、中性活性分子種 (ラジカル種) となり、2原子分子の場合に比べ著しく増加する。これらすべての解離種の同定、そしてその量子状態の決定は簡単な3原子分子 (H₂O, NO₂ など)、あるいはよく調べられている CH₄ 分子においてさえ、ほとんどなされていない。特にラジカル種の同定は非常に困難で、ほんの数えるほどの研究グループが世界でも存在するに過ぎない。

ここでは、プラズマプロセッシングで重要な CF₄ 分子を例にとり、上で述べた2原子分子との違い、多原子分子の特徴についてもう少し詳しく述べてみよう。更に、CF₄ と幾何学的には同じ形をしている CH₄ との断面積の違いについて比較検討してみるのも、また別の物理が見えてくるので、それも後で行う。

プラズマプロセスは2段階過程と考えられており、まず (i) 放電による電子は中性気体分子と衝突反応をし、さまざまなイオン種、中性ラジカル種を生成する。次に (ii) これらイオン種、ラジカル種を固体表面に導き表面と反応を起こさせ、表面原子を選択的に取り除いたり (エッチング)、表面に吸着したり (デポジション) する。

これら表面でのエッチング、デポジションを制御する効率は気相反応 (i) によるイオン、ラジカル種生成をいかに制御できるかにかかっている。そこでプロセス分子である CF₄ の過程についてはかなり古くより電子-分子衝突過程の相互作用、その断面積を放電のモデリングを通していろいろ調べられてきた。

図3に最近 Christophorou ら⁽⁵⁾ が作り上げた電子-CF₄ 分子衝突過程の断面積のデータセット (実験値、理論的およびモデリングによる考察から最適と思われる断面積の値を決めた) をあげてある。もう一度述べるが、これらのデータのほとんどは実はよく理解されていない過程ばかりで、断面積の大きさについては実験あるいは理論に基づいた確かなデータはほとんどなく、早急に信用性のあるデータの決定が望まれる。

高エネルギー側で起きるイオン化 (σ_i)、振動励起 (σ_{vib}) など素過程断面積の振舞い (しきい値の少し高いエネルギーで断面積が急激に大きくなり、そして極大をもち、エネルギーが更に大きくなると緩やかな減少傾向を示す) は大まかには、図1で示した N₂ の場合に似ている。ただし、電子励起過程についてのデータが不足しているため、この過程の断面積についてはあまり言及されていない。これら

図 2

図 3

非弾性散乱過程のダイナミクスは N₂ 分子や他の分子の場合とほぼ同じであるが、電子の数、分子内での電子分布の様子、またその電子が作る場による核の運動の様子などの違いから、分子一つずつそれぞれ異なるダイナミクスを示し、またそれが断面積の大きさに反映している。電子付着過程による鋭い断面積が約 7 eV の所に見られる。そして、この電子付着によって誘起される振動励起が大きな断面積をもって同じエネルギーに現れているのが分かる。

前述したように、多原子分子と 2 原子分子との大きな違いの一つは解離分子種の著しい多種多様性があることである。ここでもう少し詳しくこの問題についてふれてみたい⁽⁶⁾。放電プラズマ中の電子の平均エネルギー領域では電子との直接の衝突性解離 (図 3 中の σ_{diss}) が最も高い率で起きると考えられ、

と表せる。これは分子が電子に直接たたかれ壊れる過程である。

これより少しエネルギーが高い所 ($E > 15 \text{ eV}$) ではイオン化を経由したイオン種・ラジカル種生成が主に起きると考えられている。つまり、

イオン化より少し低いエネルギー ($4 < E < 10 \text{ eV}$) では解離性電子付着過程を経由したイオン種・ラジカル種生成が主な解離過程になると考えられており、それらは、

放電ガス中ではいわゆるチェインリアクションが起き、ラジカル種が電子と新たに反応し、

などの過程が起きる。これらの過程は主に一時的な電子付着 (共鳴状態)、電子励起を経て解離を起こす。また、(2c) 式で作られた F⁻ イオンは電子剥離過程、

で中性 F 原子を生成する過程になる。

また、このような放電環境中ではさまざまなラジカ

(a)

(b)

図 4

ル・ラジカル、イオン・ラジカル、イオン-イオン反応が大きな確率で起き、これらの反応は特定のラジカル種・イオン種の生成あるいは消滅、つまりラジカル、イオン種の分布、それらのエネルギー分布に寄与するため、これら中性種どうしの反応についてもきちんと理解しなければならない。

これら重粒子衝突過程についても後の章で述べる。

図 4(a), (b) に電子-CF₄ 衝突によるイオン種、ラジカル種生成の断面積を衝突エネルギーの関数として示す⁽⁷⁾。イオン種生成 [(a) 図] において高い衝突エネルギー (>60 eV) では、CF⁺、CF₂⁺、CF₃⁺ の順に多く作られることが分かるが、エネルギーが低くなるにつれ (<40 eV) CF₂⁺ イオン種がいちばん多く生成され、次に CF⁺、CF₃⁺ の順になる。更にエネルギーが下がると実験、理論ともデータは存在しないが CF₄ 親分子の電子、振動(核)の運動が複雑に強くからみ合い (強いカップリング) 生成種についての情報は簡単に予想できない。分子の電子状態、振動状態、かつ、それらの間の相互作用については量子化学的手法により分子の三次元断熱ポテンシャルを求め、そのポテンシャルからダイナミクス (反応) を決めるのが一般的である。しかし、多原子分子の場合の精度の高い量子化学計算は相当やっかいである。

中性ラジカル種生成 [(b) 図] では、高いエネルギー領域での実験結果は CF₃、CF、CF₂ の順に生成されることを示しているが、エネルギーが低くなるにつれ生成確率も下がり、生成種のできる順も変化しているように見える。とにかく、多原子分子の場合電子、振動状態の可能な数が 2 原子分子の場合に比べはるかに増え、それらの間でのカップリングも衝突エネルギーに非常に微妙に依存し、作られ

るイオン種、ラジカル種、またその量も微妙に変化する。明らかに非常に多種のイオン種、ラジカル種が作られることが分かる。また生成されるイオン種、ラジカル種は電子的、振動回転励起された状態で作られる場合が多く、この励起解離種どうしの反応は基底状態にあるこれら分子種に比べ種類によっては桁が異なるほど速く進むことが知られており、生成分子（イオン）種の量子状態についての情報もきちんとつかんでおく必要がある。

今までは親ガス分子が基底状態にある例を述べてきたが、もし親ガス分子（ CF_4 ）がもともと電子的励起（この場合不安定な分子がほとんどであるが）、あるいは振動励起状態にある場合、電子散乱素過程のうちのある種の過程は親分子が基底状態にある場合に比べ非常に速く反応が進行し、図3にあげた全過程の断面積とははるかに異なる強度あるいはエネルギー依存性をもつ断面積をもつことが予想されるが、電子励起あるいは振動励起状態にある分子と電子との衝突過程の研究はほとんどない。

特に親分子の振動状態が大きく影響する過程として、電子付着、そしてそれを經由する解離イオン化、中性種生成過程があるが、これらについての統一的組織的な理解が早急に望まれる。この例⁽⁸⁾として、図5に電子とHClの衝突での電子付着による解離からの Cl^- の生成について、親分子HClの振動状態依存性について調べた結果を示した。つまり親分子HClが電子と衝突する際、どのような振動状態にあるかによって Cl^- イオンのでき方がどのように変わるかを、電子の衝突エネルギーの関数として調べたものである。この分子の場合、振動励起エネルギーはせいぜい0.4 eV程度であるが、分子が振動励起状態になるに従い分子の平衡核間距離が大きくなり、それとともに電子分布が異なり解離のポテンシャルと強く相互作用をする可能性が起きる。これにより、親分子の振動状態が基底状態（ $v=0$ ）から第一振動励起状態（ $v=1$ ）に一つ変わっただけで、 Cl^- 生成断面積が2桁も大きくなり、また、その衝突エネルギー依存性も非常に変化したのが分かる。振動状態が更にもう一つ（ $v=2$ ）上がると、 Cl^- 生成断面積は更に1桁大きくなる。わずかの振動励起エネルギーの差でこれだけ大きな断面積の違いが出ることは覚えておく必要があるだろう。

図 5

半導体製造現場では放電プラズマ中の親分子ガスの温度はほぼ常温（ ~ 300 K）を使う場合が多いようであるが、この温度だとほとんどの分子は電子状態、振動状態は基底状態にあると考えてよい。しかし温度を400 $\sim$ 500 K程度に上げると親分子種にもよるが、第一振動励起にある分子の存在が20 $\sim$ 30%にもなる。また、回転状態はもっと高い励起状態（ $J>10$ ）にあると考えられ、この温度によるさまざまな素過程への影響、特に上に見た解離性過程は無視できない。励起状態からの素過程についても組織的研究が早急に必要である。

比較のため図6に電子と CH_4 分子による衝突素過程の断面積をのせた⁽⁹⁾。 CF_4 の場合と比べその相似性、相違性について少し考えてみることにする。

CF_4 と CH_4 の違いは、四つのHがすべてFに置き変わっただけで、分子の幾何学的形、大きさはそれほど変化していない。しかし、分子の全電子数は CH_4 の10個から CF_4 の42個に増え、電子分布は大きく変化している。 CH_4 も CF_4 も0.1 $\sim$ 0.2 eVあたりに大きなminimumがあり、これはさきに述べたRT-minimumである。最も大きな違いは、 CF_4 で見られる強い電子付着過程（ ~ 8 eVあたり）が CH_4 では弱くしか見られないこと、また、振動励起過程の大きさ、衝突エネルギー依存性の違いなどであろう。これらは分子の形よりも、分子内電子分布により敏感な量であるためである。イオン化、電子励起断面積もこれに依存する量であるので、断面積の大きさ、エネルギー依存性とにいくらか違いが見られることが分かる。

3. 重粒子衝突過程（イオン-ラジカル、ラジカル-ラジカル反応、表面反応）

今まで述べてきたように電子衝突により種々のイオン種・ラジカル種が生成される（第一段階）が、これらの生成種どうし衝突し反応する。そして、これらの反応により更に新しいイオン種・ラジカル種が生成されるし、その結果第一段階で生成されたこれらの解離種の密度分布、エネルギー分布も変化する（第二段階）。この第二段階の重粒子衝突過程についても、正確なダイナミクスと断面積の知識はたいせつであるが、電子衝突の場合よりも更に情報は

図 6

少ない。しかしどのような過程がどういう理由でたいせつかを、著しい数の第二段階反応のうちから、そのほんの一部のF原子の生成・消滅について見てみよう。

上に述べた電子と親分子との直接相互作用によりF原子が作られるが、これとは別にまた第二段階でもF原子ができる。つまり、Fが他のラジカル種との衝突の結果、はぎ取り反応を起こし、

となる。また逆にこのFの消滅として、

などがある。ここで、Mは反応には直接関与しない第3体である（不純物、他のラジカル種、装置の壁など）。この第3体が余分なエネルギーを吸収して、反応生成体の安定化に重要な役割を果たす。

また、イオン種とラジカル種との衝突では化学反応はもちろんのこと、電子がラジカルからイオンに飛び移る、電荷移行過程が熱エネルギー程度の低エネルギーでも重要になる。イオン化されたラジカルは更に分解し、また別の解離種イオン、ラジカルとなる可能性が大きい。このイオン-分子反応についての知見も重要である⁽¹⁰⁾。

これらすべての重粒子衝突反応について理論的にはいわゆるポテンシャル面（三次元の相互作用ポテンシャル）を高精度で量子化学的に決定し、そのポテンシャル面上での重粒子の衝突ダイナミックスの計算をし、電子移行、化学反応など、起こりうる過程すべての断面積を求めることになる。しかし、これも非常に大がかりな計算となり、今のスーパーコンピュータをもってしても容易には実行できない計算量である。実験的にもいくつか非常に限られた過程について、そして非常に限られた衝突エネルギーについての測定値が得られているのみである。

最後に、これらイオン種、ラジカル種を固体表面上に導入し、イオン-固体表面、ラジカル-固体表面衝突を起こさせ、反応（エッチング、デポジションなど）を誘起するのであるが、この領囲での衝突ダイナミックス、断面積の決定についての研究もやっと端についたばかりである。

4. 将来の展望

プラズマプロセスにおける電子-分子衝突過程について考えてきた(i)電子-分子衝突、(ii)イオン-ラジカル、ラジカル-ラジカル衝突、(iii)イオン、ラジカル-固体表面衝突の三つの領囲のうち、(i)の電子-分子衝突についての機構と断面積についての情報はなかでもいちばんそろっていると思われるが、それでもまだまだすべての機構の正確な知見を得、高い精度での断面積の決定、そしてさまざまな手法で得られたデータの評価、データ収集についての努力は続けてなされていかなければならない。(ii)の重粒子衝突、(iii)の粒子-表面反応についてのデータの構築、反応機構の理解ははるかに遅れている。これら(i)~(iii)領

囲についての共同研究は今後ますます不可欠となる。特に基板上での加工技術が原子分子レベルでの制御が要求されつつある現在、電子分子衝突に初まりラジカル種-表面衝突までの正確なダイナミックス、断面積の知識を早急に確立する必要がある。特に我が国の原子分子研究者層は薄く、かつ、各個人、グループがあまり横のつながりがなく、バラバラに研究を実施しているきらいがある。これからは密な共同研究体勢を確立し、原子分子研究者のみならず、表面研究者、および関連電気工学研究者も含めた統一的・組織的な研究を行っていく必要が大いにあると考える。半導体産業を含むエレクトロニクスインフォメーションテクノロジーが21世紀の産業構造を支配すると言われ、この分野での世界的な規模で熾烈な国際競争を勝ちぬくためにも早急に産・学・官の統一組織の確立をすべきときと考える。欧米では、既にデータ収集についていくつかのセンターが国立研究所、大学内に産、官の補助を受けできあがり、活動を開始している。そして着々とプラズマプロセスなど基礎科学のためのデータ集を発行したり、あるいは定期的にデータ収集の国際会議を開催したり、と活発な活動を行っている。日本では新たなデータセンターを作り欧米諸国センターと競合するよりも、むしろこれら先行しているデータセンターに日本のユニークな研究で何らかの寄与をしていく方向で考える必要があるであろう。

本解説を書くにあたり北海道大学 酒井先生、上智大学 田中 大先生、山口大学 末岡先生にはたいへん有益な助言をいただいた。ここに謝辞を述べます。

(平成9年7月14日受付)

文 献

- (1) L. G. Christophorou, Ed: *Electron-Molecule Interactions and Applications*, Vols 1 and 2, Academic Press, NY (1984)
- (2) 田中 大・末岡 修: 電学誌, 117, No. 12 (平9-12)
- (3) Y. Itikawa, M. Hayashi, K. Onda, K. Sakimoto, K. Takayanagi, M. Nakamura, H. Nishimura & T. Takayanagi: *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 15, 985 (1986)
- (4) 高柳和夫: 電子原子分子の衝突 (平6) 培風館
- (5) L. G. Christophorou, J. K. Olthoff & M. V. V. S. Rao: *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 25, 1341 (1996)
- (6) 田中 大・Ludwig Boesten・旗野嘉彦: 応用物理, 65, 568 (平8)
- (7) H. Sugai, H. Toyoda, T. Nakano & M. Goto: *Contrib. Plasma Phys.*, 35, 415 (1995)
- (8) W. L. Morgan: JILA Data Center Report, No. 34 (1991)
- (9) M. Kurachi & Y. Nakamura: Proc. of the Thirteenth Symp. on Ion-Sources and on Assisted Technology, ISAT-90 (1990)
- (10) R. B. Bernstein: *Chemical Dynamics via Molecular Beam and Laser Techniques*, Oxford University Press, NY (1982)

季 村 峯 生

1981年カナダ・アルバータ (Alberta) 大学大学院博士課程修了。ミズーリ大学物理学科助教授、天体物理共同研究所 (JILA) 研究員、アルゴンヌ国立研究所研究員を経て、山口大学医療技術短期大学部助教授。原子物理および凝縮系物理の理論的研究に従事。Ph. D.