

小特集

ミクロ反応場の生成と応用

—マイクロプラズマ研究の現状と将来展望—

Generation of Micro-Scale Reactive Plasmas and Development
of Their New Applications

—Present and Future of Research and Development on Microplasmas—

(Received 19 July 2004)

1. はじめに

数年前になるが、「マイクロプラズマ—基礎から応用まで—」という小特集の序文を本誌に寄稿した[1]。そのときに、微小な空間に制限されたプラズマについての研究の新規性として強調したことは以下の3点に要約できる。①プラズマと境界としての電極や器壁との相互作用の重要性と、放電プラズマの維持におけるその相互作用の積極的な利用。②高密度媒質中でのプラズマの新規な物性の発掘と具体的な発現の方法。③ミクロな反応場としての特性を利用した新しい応用技術の開拓。その後、このような視点で新しい研究分野を構築していくことを目標に、文部科学省の特定領域研究に申請をしてきたが、3回目で漸く採択され、平成15年度から5年間のプロジェクト研究「プラズマを用いたミクロ反応場の創成とその応用」(略称：マイクロプラズマ)が発足した。研究組織は、Fig. 1に示すように、各班3件ずつ計9件の計画研究に、今年度から17件の公募研究を加えて、26のグループで構成されている。本小特集では、そのプロジェクトで目指すところと、それを実現するための具体的な研究計画や方法を紹介し、できるだけ多くのプラズマ研究者に、この分野への新たな参画や成果の活用を募っていきたい。

プラズマは本来の性質として、高い反応性、発光性、誘電・導電性を有しており、それを媒質とすることによって、材料プロセスや高輝度短波長光源、スイッチングデバイス、電磁波制御デバイスなどの応用に用いられてきている。プラズマ中では、電子衝突や重粒子間の衝突によって電離・励起・解離・再結合・放射などの反応(原子分子過程)が起こっており、媒質そのものが反応場であると考えられる。一般に、気相の均一化学反応系では、媒質の密度(あるいは圧力)、温度、滞在時間(あるいは流速)などが支配パラメータであり、表面が介在する不均一反応系では表面の温度や性状、体積と面積の比などのパラメータが加わる。空間的スケールが微小になるにつれて表面の影響が

大きく現れ、バルクのパラメータ自体も表面との相互作用の影響を受ける。そのような支配パラメータの組み合わせによって、従来と違った新しい特性の反応場が創成できるか否かが、マイクロプラズマが新しい科学技術の分野を開拓できるかどうかという課題の鍵となる。

空間スケールが1 mm~1 μ mのマイクロプラズマでは、パッシェンの法則からも予測されるように、最適な動作圧力は大気圧近傍からそれ以上になり、場合によっては超臨界状態[2]から液体[3]や固体[4]を媒質とすることもある。したがって、その密度は 10^{18} ~ 10^{22} cm $^{-3}$ の領域に広がり、電離度が 10^{-6} ~ 10^{-4} 程度に低い場合でも、 10^{13} cm $^{-3}$ 以上の電子密度 n_e が簡単に得られ、キャピラリー放電や直線ピンチプラズマのような場合には、 10^{18} cm $^{-3}$ 以上に到達することが期待されている[5]。実際の例として、プラズマディスプレイパネル(PDP)の単一セルの中での放電では、0.5気圧付近のNe-Xe混合気体を用いており、電流のピーク値は数百 μ A程度であるが、そこでの n_e はシミュレーション[6]やトムソン散乱による診断[7]によって、 10^{13} cm $^{-3}$ のオーダーであると推定されている。

このように、空間サイズに対してプラズマ特性を表す指標の代表として n_e を用いると、Fig. 2に示すように、マイクロプラズマは従来の低圧プラズマや、特殊な条件での超高密度プラズマ(例えば固体薄膜をフェムト秒レーザーで照射して生成した非定常プラズマなど[8])とは違った領域に存在することがわかる。図中ではそれをメゾエキゾチック領域と表している。さらにその座標の上で、それぞれの目的に応じたプラズマ特性を追求していくことによって、新しい科学や応用技術が展開できる可能性がある。ここでのいう微小性の中には、空間的なサイズだけでなく時間的な微小性を含めて、母ガスや反応活性種の反応場での滞在時間の制御、さらに放電によるエネルギー伝達時間の微小性や過渡性を利用して、反応場のパラメータ領域を制御していくことも必要であり、それがきわめて有効であると考えら

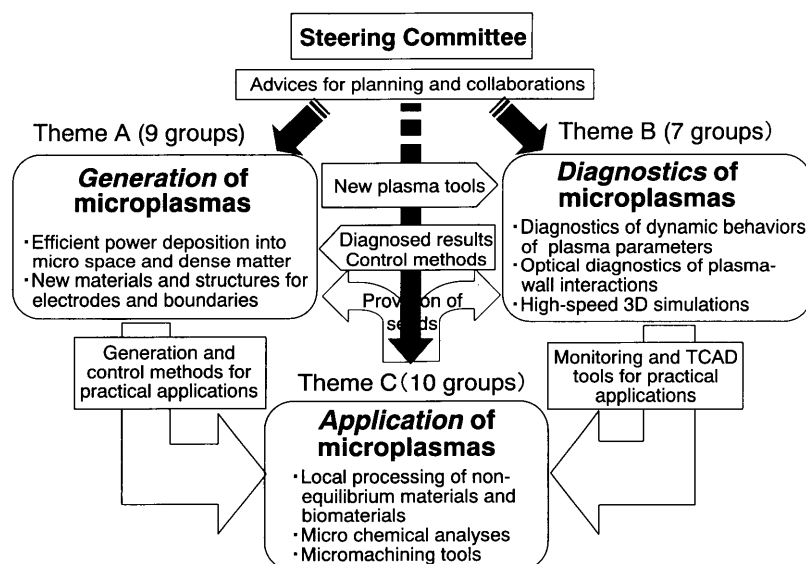


Fig. 1 Formation of the microplasma research project under the support of Grant-in-aid for Scientific Research on Priority Area.

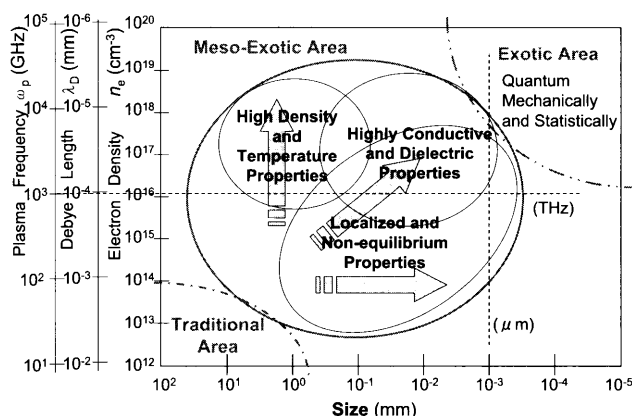


Fig. 2 Territory of the research field of microplasmas in the parameter region represented by spatial scale and plasma density.

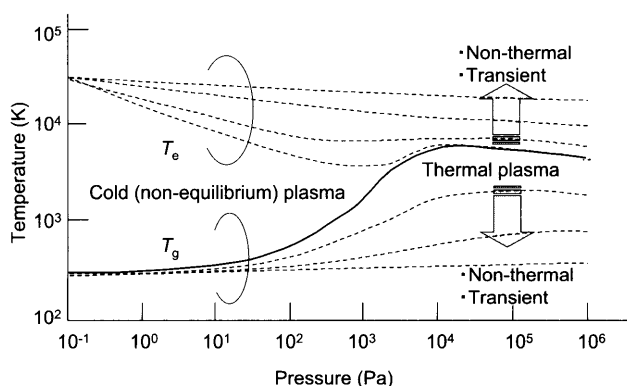


Fig. 3 Characteristic dependence of gas temperature T_g and electron temperature T_e on gas pressure.

れる。

さらに、プラズマ中ではガス温度 T_g に対して電子温度 T_e (あるいはもっと正確には電子エネルギー分布関数 EEDF) が重要な反応場パラメータとなる。Fig. 3 に示すよ

うに、低気圧では $T_e \gg T_g$ の非平衡状態であるが、高気圧になるにつれて中性ガス分子との弾性・非弾性衝突の頻度がきわめて大きくなるため、定常状態では T_e は T_g に近づいて 1 eV 以下に低下すると推定される。しかし、高速のパルス放電や加熱によって、過渡的に高い T_e あるいは EEDF の高エネルギー尾部を生成することができ、放電プラズマの維持や反応場の非熱平衡化を促進することができる。

このように、マイクロプラズマをマイクロ反応場として捉え、そのパラメータを特徴づけること、さらに、高密度性、微小性、非平衡性などの特性の新規な組み合わせを工夫していくことによって、新しいプラズマ科学の方向やその応用への展開が見えてくるものと期待している。この小特集がそのような研究の糸口になれば幸いである。

なお、特定領域研究に関するいろいろな情報は以下の URL に逐次掲載されている。http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/~tokutei429/

(京都大学工学研究科 橘 邦英)

- [1] K. Tachibana, J. Plasma Fusion Res. **76**, 435 (2000) in Japanese.
- [2] T. Ito, H. Fujiwara and K. Terashima, J. Appl. Phys. **94**, 5411 (2003).
- [3] S. Katsuki, H. Akiyama, A. Abou-Ghazala and K.H. Schoenbach, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insulat. **9**, 498 (2002).
- [4] T. Yokoyama, T. Kuraoka, K. Takano, S. Ibuka, K. Yasuoka and S. Ishii, IEEJ Trans. FM **124**, 80 (2004).
- [5] 堀田和明：レーザー研究 **29**, 638 (2001); (最新の研究状況については、EUVA ホームページ <http://www.euva.or.jp> を参照)。
- [6] J.P. Boeuf, J. Phys. D: Appl. Phys. **36**, R53 (2003).
- [7] Y. Noguchi, A. Matsuoka, K. Uchino and K. Muraoka, J. Appl. Phys. **91**, 613 (2002).
- [8] P. Renaudin *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 075002 (2003).