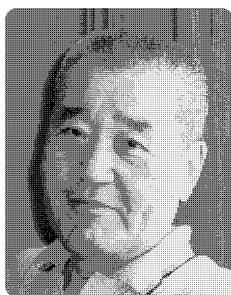


||||||| やあこんには |||

「カーボン」のジレンマ

いな がき みち お
炭素材料学会 元会長 稲垣 道夫



稲垣 道夫
炭素材料学会 元会長
北海道大学名誉教授

「炭素」あるいは「カーボン」と聞いてまず何を思われるだろう。地球温暖化という言葉の思い浮かべられる方が多いのではないだろうか。長年カーボン材料の研究に携わってきた私にとっては実に残念である。せめてカーボンナノチューブ、フラーレンを思い浮かべていただくと有り難い。カーボンファイバーあるいは炭素繊維を挙げていただくと非常にうれしいが、そのような方はカーボン材料にかかわっている方に限られるのかもしれない。

最近、地球温暖化を危惧させる現象が数多く報告され、その大きな原因が、二酸化炭素 (CO₂) ガスの増加であることは明らかであり、CO₂ ガスの発生を抑えるための多くの努力がなされている。この問題は地球全体で考え、対処する必要がある、1997年12月の気候変動枠組条約第3回締結会議 (京都) でCO₂削減のためのプロトコルがなされ、そのとき調印された削減目標実現の期限が来年に迫っている。2008年の洞爺湖サミットではCO₂削減が主題となり、2050年までに、CO₂の発生量を現在の半分とする目標が掲げられた。CO₂ガス発生量はそれに含まれる炭素 (カーボン) 量に換算して示される。そこで、CO₂の発生をより少なくするためのキャンペーンや排出規制の実現のために、「低炭素社会」「カーボンニュートラル」「カーボンオフセット」などの言葉が使われるようになった。また、日常頻繁に使っている食品あるいは物品について、それらを生産する過程でどれほどのCO₂を発生させているかを認識させるために、それぞれの品物に「カーボンマイレージ」といわれる指標を付ける運動も始まろうとしている。このようなCO₂発生削減に真剣に取り組むことが必要であることは改めていう必要もなからう。

しかし、カーボン原子からできているカーボン材料は、天然に産出するダイヤモンド、グラファイト (黒鉛) から人工的につくられる人造ダイヤモンド、人造黒鉛、炭素繊維、ガラス状カーボン、フラーレン、カーボンナノチューブなどの名前が付けられて、広い範囲にわたっている。そして、それらのカーボン材料が我々の家庭から工場の中まで広く使われ、さらに宇宙空間にまでその用途を広げるとともに、ナノテクノロジーを支える重要な材料の一つとなっている。日常使い慣れている家庭内の各種機器、たとえば冷蔵庫の中の脱臭剤、浄水器、空気清浄機には活性炭が、コンピュータのキーボードやエアコン、テレビ、扇風機用コントローラのスイッチには黒鉛を使ったメンブランススイッチが、掃除機、洗濯機などを動かすためのモータの中にはカーボンブラシが使われている。ほとんどの携帯電話の電源にはリチウム二次電池が使われるが、その電池はグラファイトを電極材とすることによって実用化された。また、自家用車をはじめバス、トラックの中にも、モータを動かすためのカーボンブラシ、車内の空気清浄のための活性炭はもちろん、タイヤには大量のカーボンブラックが使われている。クリーンエネルギーといわれる風力発電や太陽光発電にも、発生電力を貯蔵するためのデバイスとしてキャパシタやリチウム二次電池が欠かせないが、その電極には活性炭やグラファイトが使われている。工業でも多種多様なカーボン材料が使われている。鉄を作るためにはコークスや人造黒鉛電極が重要な役割を果たしている。発電用原子炉の多くは黒鉛のブロックを積み重ねて作られている。旅客機などの航空機はカーボンファイバーを使った複合材を使うことによって軽量化、燃料の節約が図られている。天然ガスボンベ、救急医療に欠かせないガスボンベなども同じような複合材で作ることによって軽量化が図られている。宇宙飛行用のロケットの先端などは高い温度に耐える必要があり、カーボンファイバーをカーボンで固めた複合材 (C/C複合材) が使われている。カーボン製の人工心臓弁はすでに100万個以上が移植され、血管の拡張のためのステントにダイヤモンドライクカーボンを被覆することによって血液の凝固 (血栓の生成) を防いでいる。さらに、今後重要なナノテクノロジーにおいても、カーボンナノチューブは不可欠な材料として注目されているのみならず、将来の地球規模での資源、エネルギーそして環境問題に対してカーボン材料が大きな貢献をしようと期待されている。

このように、我々の日常生活そして最先端技術の中で使われ、役立っている多くのカーボン材料が、CO₂削減を呼びかけるための「低炭素社会」などの標語によって、人々に誤解されることを懸念している。CO₂量をカーボン量に換算しなければならない理由も判然としないが、換算することが一般的になってしまった今、これを変えることは難しいとしても、カーボン材料を理解していただくとともに、「炭素税」という言葉だけは使わないでほしいと切望している。

目次

- 01 やあこんには
・「カーボン」の
ジレンマ
稲垣道夫
- 02 トピックス1
・マイクロ波のプラズマ-シース境界伝播を利用した高密度プラズマの金属沿面生成技術-細穴内面プラズマ処理・DLCコーティング法への応用
名古屋大学大学院
上坂裕之
- 05 トピックス2
・低価格ガラスキャピラリーによるマイクロビーム生成
理化学研究所
池田時浩
- 08 ご案内/To the Overseas Members of MRS-J



名古屋大学

■トピックス1

マイクロ波のプラズマ-シース境界伝播を利用した 高密度プラズマの金属沿面生成技術 —細穴内面プラズマ処理・DLC コーティング法への応用—

名古屋大学大学院工学研究科 機械理工学専攻 生産プロセス研究グループ 准教授 こうきか ひろゆき 上坂 裕之

1. はじめに

DLC (Diamond-Like Carbon) は低摩擦、耐摩耗性などの優れた機械特性を有している^{1),2)}。また、DLCは耐腐食性に優れているため、腐食環境に晒される部品の表面保護膜としても有用である^{1),2)}。これらの長所を生かして、様々な分野・製品にDLCの応用が拡大しようとしている。ただし、そのような優れた特性を有するDLCは、一般にプラズマやイオンの創りだす非平衡な反応場を利用して合成される。

DLC成膜では、プラズマやイオンを被成膜面の形状に沿って均一に供給する方法が必要となる。したがって、それが困難となるような形状へのDLCの適用はあまり進んでいない。一方、機能部品、特に機械部品の表面は様々な内面、曲面、凹凸面を有するため、それら立体面へのDLC成膜が求められる場合が少なくない。したがって、DLC成膜の形状自由度を向上するような研究開発が強く望まれている。

プラズマやイオンを用いたプロセスが不得手とする形状の典型例として、内径がミリメートルサイズ以下の細穴の内面が挙げられる。その一例が、精密な機械加工を施された小型の金型(図-1)や噴射ノズルの内面であり、付加価値が高いこれらの部品の耐久性を向上するために、内面にDLC成膜を行いたいというニーズがある。

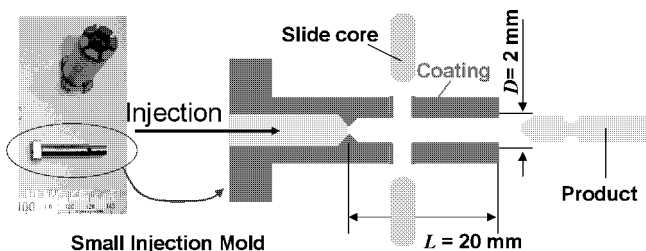


図-1 射出成型用の小型精密金型

また、化学反応装置のバルブや配管の内面に耐腐食性を付与するためにDLCを成膜したいというアイデアもある。

例示したような細長い穴の内面へのDLC成膜は、従来法では困難であった。そこで我々は、マイクロ波のプラズマ-シース境界伝播を利用した新しい高密度プラズマ生成法を応用し、ミリメートルサイズの細穴内面へのDLC成膜が可能なプラズマCVD技術を開発した。

2. ミリメートルサイズの細穴内面への成膜を行うプラズマに求められる要件

プラズマCVD技術によって穴内面へDLC成膜を行うためには、対象とする内面形状に沿って可能な限り均一な分布のプラズマを用いることが望ましい。プラズマを外部から穴内部へ向けて輸送するような方式では、内面での再結合によってプラズマの濃

度が軸方向に指数関数的に減少してしまう³⁾。よって現実的には、処理対象となる穴内面で直接プラズマを生成できること(要件①)、が用いるプラズマ生成法の必須要件となる。

要件①を満たすプラズマ生成法として、内面に挿入された電極と穴内面との間にDCやRFの電圧を印加し、グロー放電によってプラズマを生成維持する方式がある⁴⁾。しかしながら同方式によって生成されるプラズマの電子密度は一般に低く(n_e が約 $10^8 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)、1 cm程度より小さい幅の内面で安定的に存在できない。これは、典型的な成膜条件下において、プラズマと被成膜面との間に形成されるシースの幅が数mmになり、内面の幅と近くなってしまふからである(詳しくは参考文献5参照)。したがって、ミリメートルサイズの細穴内面へのDLC成膜には、上述のような電圧印加方式を用いることができない。

ミリメートルサイズやそれ以下のサイズの内面で安定してプラズマを生成維持するためには、より小さなシース幅となるようなプラズマ生成手法が必要である。チャイルド則⁶⁾からは、シース幅 d が(1)式のようにシース電圧 V_s 、電子温度 T_e 、電子密度 n_e によって変化することが導かれる。

$$d \propto V_s^{3/4} T_e^{-1/4} n_e^{-1/2} \quad (1)$$

(1)式は、電圧を下げる、電子温度を上げる、電子密度を増加させる、のいずれかで d を小さくすることができることを示している。ただし、電圧や電子温度をシース幅を調整するためのパラメータとすることは実際にはほとんど不可能であり、実質的に調整が許されるのは n_e のみである。

シース幅が n_e の平方根の逆数に比例することを考えると、 n_e を 10^{10} cm^{-3} から 10^{12} cm^{-3} まで2桁程度増加させれば、シース幅は1桁減少する。その場合、典型的な成膜条件下において、シース幅は概ね数百 μm 程度となり、ミリメートルサイズの内面幅より十分に小さくなる。即ち、 n_e が約 10^{12} cm^{-3} 程度のプラズマであれば、ミリメートルサイズの細穴内面で安定に存在することができる。したがって、穴内面で n_e が約 10^{12} cm^{-3} 程度の高密度プラズマを生成できること(要件②)が、ミリメートルサイズの細穴内面への成膜を行うためのプラズマに求められる要件となる。

3. MVP法について

電子密度は概ねパワー密度とともにリニアに増加するため、細穴内面に高いパワー密度でエネルギーを供給できるようなプラズマ生成法が、要件②を満たす方法である。我々は、要件①、②を満たすプラズマ生成法として、マイクロ波のプラズマ-シース境界伝播を利用した高密度プラズマ生成法を提案している。

我々の提案する方法は、原理的には表面波励起プラズマ生成法の一つである。表面波励起プラズマとは、表面波モードの電磁波が、ある一定値以上の高密度プラズマ(2.45 GHz の電磁波の場合、 $n_e > 10^{11} \text{ cm}^{-3}$)を自己生成しながら伝播する現象を利用して、誘電体の形状に沿って生成されるプラズマ(図-2(左))のことである^{7),8)}。

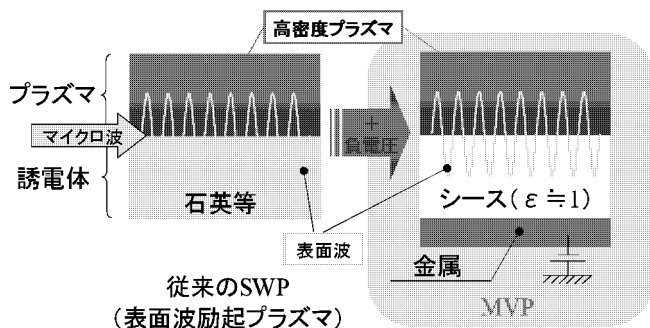


図-2 従来のSWP (Surface Wave-excited Plasma) と新しく開発した MVP (Microwave-sheath Voltage combination Plasma) の比較

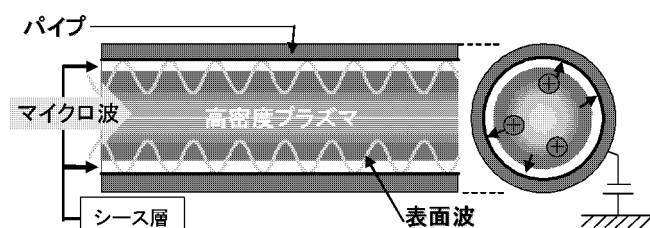


図-3 マイクロ波とシース電圧の協働効果によって生成される MVP (Microwave-sheath Voltage combination Plasma) とその細穴内面プラズマ生成への応用の模式図

マイクロ波のように周波数がGHzに達する電磁波にとっては、電子が著しく少ないシース層は比誘電率1の誘電層とみなすことができる。よって理論的には、プラズマと金属が接する境界において、マイクロ波がプラズマ-シース境界に沿って表面波モードで伝播することができる⁹⁾。ただし自然発生するシースの幅は非常に小さく、表面波をガイドする誘電体層として実質的に機能しない。そこで我々は、シース幅をバイアスによって適切に拡大すれば、表面波モードのマイクロ波がプラズマ-シース境界に沿って長い距離を伝播し、その結果金属面にそって高密度プラズマを生成するのではないかと考えた (図-2 右)。そのアイデアを実験的に実証し^{10),11)}、MVP (Microwave-sheath Voltage combination Plasma) 法と名づけた。MVP法において2.45 GHzのマイクロ波を用いると、金属面に沿って、容易に n_e が約 10^{12} cm^{-3} 程度の高密度プラズマが得られる¹²⁾。

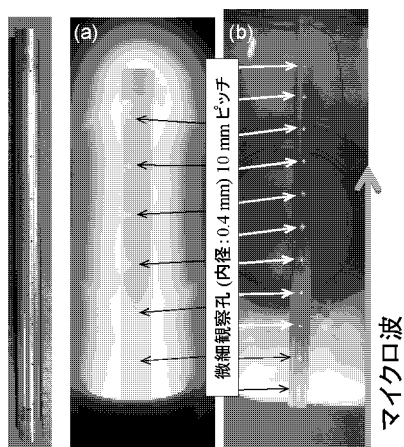


図-4 1/4インチステンレス鋼製パイプ内面 (内径: 4.4 mm) でのプラズマ生成。パイプ側面にあけた微細観察孔からの漏洩光によって内面でのプラズマ生成が確認できる。(a)パイプ長: 75 mm の内外面でプラズマが生成されている、(b)パイプ長: 150 mm の内面のみでプラズマが生成されている

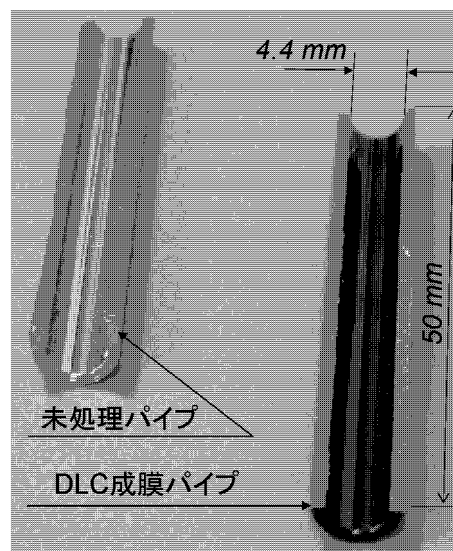


図-5 1/4インチステンレス鋼製パイプ内面 (内径: 4.4 mm、長さ: 50 mm) へのDLC成膜

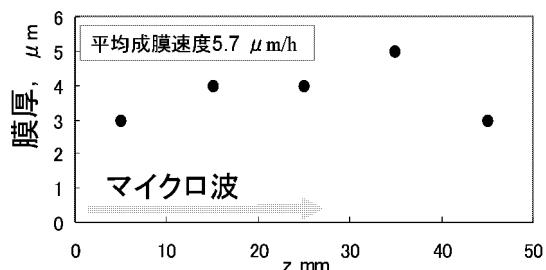


図-6 1/4インチステンレス鋼製パイプ内面 (内径: 4.4 mm、長さ: 50 mm) に成膜されたDLC膜の軸方向膜厚分布

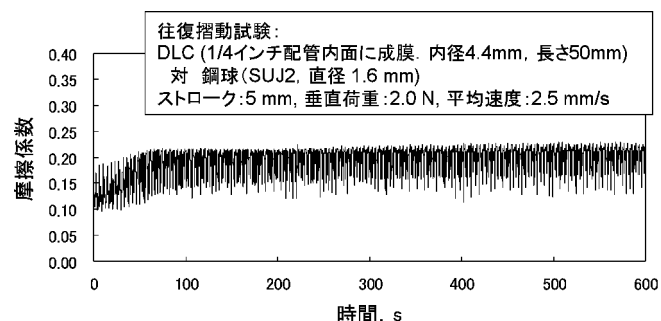


図-7 得られたDLC膜の往復摺動試験による摩擦係数測定結果

4. MVP法による細穴内面でのプラズマ生成とDLC成膜への応用

MVP法を用いれば、電子密度が 10^{12} cm^{-3} を超える高密度プラズマを金属面に沿って生成できる。よって、処理対象となる部材に負バイアスを印加しながら、内面に沿ってマイクロ波を伝播させれば、ミリメートルサイズの細穴内面でプラズマを生成維持することが可能となろう (図-3)。そこで、プラズマを生成したい小径配管として1/4インチのステンレス鋼製パイプ (内径4.4 mm、長さ75~150 mm、SUS 304) を真空チャンバー内に設置し、マイクロ波投入とパイプへの負バイアス印加を同時に行ったところ^{13),14)}、図-4のように配管の内面でのプラズマ生成が確認された。

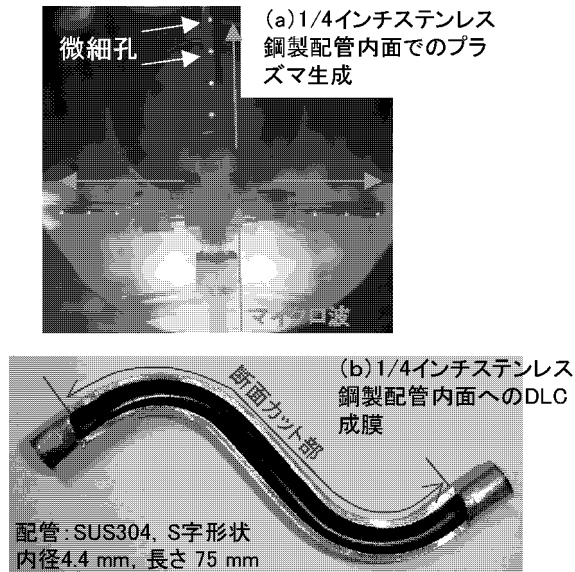


図-8 本稿で紹介する新開発手法による、1/4インチステンレス鋼製配管内面における(a)プラズマ生成、および(b)DLC成膜の結果。(a)においては、微細孔から漏洩する発光により内面プラズマの生成が確認される。新開発手法は分岐や曲がりにも対応する

次に、同じチャンパー構成で、ガスをメタンとテトラメチルシラン、アルゴンの混合ガスに変え、細穴内面へのDLC成膜を行った¹⁵⁾。成膜を終えてカットされたパイプ試験片を図-5に示す。図中左は成膜前、右は成膜後のパイプ内面写真である。DLCを成膜したパイプを $z=5, 15, 25, 35, 45$ mmにおいて切断し、断面をSEMで観察することで図-6に示すような膜厚の軸方向分布を得た。その結果、各点の膜厚は $3\sim 5$ μm の間でばらついており、平均膜厚は 3.8 μm であった。皮膜のラマン分光分析を行った結果、典型的なDLC膜において見られるGピークとDピークよりなるブロードなスペクトルが計測された。同じ箇所の硬度を超微小硬さ試験機(エリオニクス社製、ENT-1100 a)によって計測したところ、押し込み荷重 10 mgfで平均して 10 GPaの硬度が得られた。DLC膜とSUJ2球($\phi 1.6$ mm)との往復摺動試験を、垂直荷重 2.0 N、往復距離 5 mm、平均ストローク速度 2.5 mm/sで 600 s間行ったところ、摩擦係数は約 0.20 であった(図-7)。

5. まとめ

本稿で紹介したMVP法による細穴内面へのDLC成膜技術には、現時点では、摩擦係数が 0.2 程度とあまり低くないことや、密着性が工業レベルに達していないなどの解決すべき問題がある。しかしながら従来法では困難であったミリメートルサイズの細穴内面でのプラズマ生成やDLC成膜が容易に行えるという点は大きな利点である。さらに、紹介した手法を用いて、十字に分岐した細穴の内面でのプラズマ生成やS字に曲がった細穴の内面へのDLC成膜なども可能であり(図-8)、紹介した手法の形状自由度は大変高い。今後上記の課題の解決を図っていくのと併せて、MVP法の細穴内面プラズマ処理・成膜法としての普及を図っていくつもりである。後者のために、開発した細穴内面へのマイクロ波インジェクター一式を、モジュールとして共同研究先企業から製造販売することを検討している。

謝辞 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(平成19、

20年度若手研究(B)、19740343)および東海広域ナノテクものづくりクラスターからの助成を受けて行われました。また、図5~図8の成果は、(有)CCS、岐阜大学、東京エレクトロン(株)との共同研究において得られました。よってここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 池永 勝, 鈴木秀人: ドライプロセスによる超硬質皮膜の原理と工業的応用(日刊工業新聞社, 2000).
- 2) 斎藤秀俊, 大竹尚登, 中東孝浩: DLC膜ハンドブック(NTS, 2006).
- 3) 電気学会・プラズマイオン高度利用プロセス調査専門委員会: プラズマイオンプロセスとその応用(オーム社, 2005) pp.71-73.
- 4) S. M. Malik, R. P. Fetherston and J. R. Conrad: *J. Vac. Sci. Technol. A*, **15**, No. 6, 2876-2879 (1997).
- 5) 上坂裕之: 第11回「トライボコーティングの現状と将来」シンポジウム予稿集, pp. 5-13.
- 6) M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg: *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (Wiley-Interscience, New York, 1994).
- 7) M. Moisan, C. Beaudry and P. Leprince: *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **PS-3**, 55-59 (1975).
- 8) Yu. M. Aliev, H. Schlüter and A. Shivarova: *Guided-Wave-Produced Plasmas* (Springer, Berlin, 2000).
- 9) N. A. Azarenkov, I. B. Denisenko and K. N. Osterikov: *J. Plasma Phys.*, **50**, 369-384 (1993).
- 10) 日本国特許, 第4152135号(発明者/出願人: 上坂 裕).
- 11) H. Kousaka, N. Umehara, K. Ono and J. Xu: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, L 1154-L 1157 (2005).
- 12) H. Kousaka and N. Umehara: *Trans. Mat. Res. Soc. Japan*, **31**, No. 2, 487-490 (2006).
- 13) 上坂裕之, 飯田 斉, 梅原徳次: *真空*, **49**, No. 3, 183-185 (2006).
- 14) 上坂裕之, 門脇慎之介, 梅原徳次: 電気学会プラズマ研究会資料集, **PST-08-26~36** (2008) pp. 53-56.
- 15) 上坂裕之, 田村 登, 進藤豊彦, 梅原徳次, 近藤明弘: トライボロジー会議 2008 秋名古屋予稿集, pp. 187-188.

■連絡先: 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻
生産プロセス工学研究グループ 准教授 上坂裕之
E-Mail kousaka@mech.nagoya-u.ac.jp
Tel/fax: 052-789-2787

■IUMRS 関連会議

- ▽Materials Research Society of Singapore 主催、the 5th ICMAT, June 28-July 3, 2009, the Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre (SICEC)
- ▽E-MRS 主催、The E-MRS 2009 Spring Meeting, June 8-12, 2009, Congress Center, Strasbourg, France,
- ▽Brazil-MRS (SBPMat) 主催、ICAM 2009-11th International Conference on Advanced Materials, September 20-25, 2009, Rio de Janeiro, Brazil
- ▽C-MRS, E-MRS, MRS, IUMRS 共催、Second World Materials Summit on Advanced Materials in Energy Applications and Sustainable Society Development, October 12-15, 2009, Suzhou, China

低価格ガラスキャピラリーによるマイクロビーム生成

——低速多価イオン照射マイクロパターンングと
培養液中の生細胞オルガネラ照射に向けて——

独立行政法人 理化学研究所 山崎原子物理研究室 専任研究員 いけだ ときひろ 池田 時浩

1. はじめに

イオンビームを細く絞ってサンプルに照射するにはこれまでスリットやアパーチャ、そして電場/磁場を用いたレンズが主に使われてきた。このビーム集束方法には長年にわたるノウハウの蓄積があるが、レンズ系は高価であり位置や方向の微調整にも細心の注意が必要である。我々のグループが提案するイオンビーム集束用ガラスキャピラリーは、もともとは生物・医学分野で生細胞用の注射針（低価格なガラスピペット）として知られていたものである。本研究では、その注射針にビームを通し先端の細い穴からビームを取り出しマイクロビームとして照射に用いている。

ガラスは絶縁体であり帯電することを嫌ってイオンビーム光学素子としては積極的に使われることはなかったが、ここ数年、原子物理学的観点からイオンビームの絶縁体表面との相互作用の研究が進み、絶縁体細管（キャピラリー；100 nmφ~100μmφ）にもビームを通せることが示された。特に帯電ポテンシャルより低い運動エネルギーのビームには、むしろその帯電をビームガイドとして使ってしまうという逆転の発想が注目されている。一方、それより高い運動エネルギーのビームにはガラス表面での小角散乱を利用する。

この知見を更に実用的なツールにまで高めるために、我々のグループでは、低コストでマイクロビームを提供するだけでなく、ガラスキャピラリーの利点を生かした照射法をも開発している。本稿では①ポテンシャルスパッタリングに有利な低速（<10 kV 加速電圧）多価イオンビームの集束、さらに②高速（>MV 加速電圧）の陽子線、He イオンビームを生きた細胞内の望む位置、望む深さにμmの精度で局所的にダメージを与える技術について概説する。

2. ガラスキャピラリーの作製

我々が使用しているガラスキャピラリーは、borosilicateのガラス管（外径2 mmφ、内径0.8 mmφ、長さ90 mm）の中心付近を加熱し、両端に張力をかけて切れるまで引き伸ばすことで作製している。borosilicateの組成は、SiO₂:80.9%、Al₂O₃:2.3%、B₂O₃:12.7%、Na₂O:4.0%、K₂O:0.04%、などとなっており、比重は2.23である。線膨張率は32×10⁻⁷/°Cで、石英ガラスに次いで小さく、理化学器具にはよく使用されており材料費も安い。主に医療や生物実験で用いられているマイクロインジェクション用の注射針や神経電位測定用の電極針の作製ツール（pullerと呼ばれる）が市販されており、borosilicateのガラス管を空气中に設置したコイル状のヒーター内に置くことで加熱するタイプを使用している。図-1(a)のようにテーパを含んだ全体の長さが5 cm程度のものを要求する場合、①軟化点（=821°C）および②加熱後に空冷されていく速度、の2点で、borosilicateという材質はかなり適していると考えている。キャピラリーのテーパ角はビーム通過特性を大きく左右するが、その制御には温度と張力が主要なパラメータである。一方、ビームのナノサイズ化という点では、この材質で、ビーム出射口内径が約100 nmφのキャピラリーも作製可能で、80 nmφの出射口も確認されている

（図-1(d)）。また、ナノサイズではなく、ミクロンサイズの出口径を得るには光学顕微鏡の下で、先端付近の希望の内径になっている部分で切断すればよい（図-1(c)）。

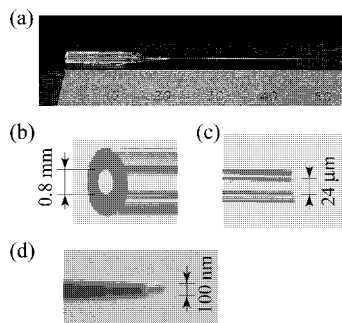


図-1 (a)ガラスキャピラリーの全体像、(b)ビーム入口付近、(c)ビームサイズが24 μmφになるように切断された出口付近、(d)pullerで作製された直後の出口付近

3. 低速多価イオン照射マイクロパターンニングへ向けて

サンプル表面を加工、改質する方法としてイオンビーム照射が利用されている。加速電圧が数100 Vから数十kV（我々は「低速」と呼ぶ）の多価イオンビームは物質表面と衝突してもほとんど内部に進入することができず、その内部エネルギーを物質表面に付与するので、物質表面にのみ大きな影響を与えることができる。また、内部エネルギーはイオン種やその価数を選択することで制御可能である。例えば、Ar⁸⁺であれば、約600 eV（電子ボルト）で、U⁹²⁺ともなると約800 keV、すなわち電子の質量の1.6倍にも達する。それゆえ、物質表面を改質したり、表面の原子・分子をスパッタリングさせることで微量分析をしたりするなど応用的研究も進んでいる。実際、Si(001)-F表面のF-Si結合の方向を、低速多価イオン照射によって飛び出したF⁺イオンの3次元運動量分布から再構成した例がある²⁾。また、graphite³⁾⁻⁵⁾やAl₂O₃表面³⁾の衝突箇所には多価イオン1個につき1個の照射痕（ナノドット）が生成され、そのドットサイズは多価イオンの価数によることが報告されている。さらに、このナノドットにのみ選択的に分子吸着をさせられることも知られている。こうなれば、多価イオンビームを絞って微細パターンに沿って照射したり、特定の微小領域内の分析に利用したりするという要求が高まってくる。ビーム径を小さくするにはスリットやアパーチャ、レンズが利用されてきた。スリットを用いた場合、強度が著しく下がるだけでなく多価イオンはスリット内壁表面で荷電変換やエネルギー損失を起こしてしまう。また、レンズを使う場合はエミッタンスが良いことが要求される。そこで我々はスリットやレンズを使用せずビームをナノサイズ化して粒子密度も向上させる方法として、ガラスキャピラリーに着目した。

その通過原理を図-2に示す。キャピラリー内壁が帯電していない状態でビームをONにすると、その直後はキャピラリーに入射したイオンは内壁に衝突することで停止してしまうが、そのイオンの電荷などにより内壁表面は帯電する（図-2(a)）。同じ場所に来た次のイオンは、内壁の帯電により内壁に近づくことができず前方に散乱される。この散乱を1回または複数回繰り返す

ことで、ある確率でイオンはキャピラリー出口から抜け出すことができる(図-2(b))。出口の内径が入口より小さければビームは集束し(集束効果)、結果的に出射ビーム径はキャピラリー出口に等しいと考えられる。また、必ずしも内壁とビームの間の角度を厳密には要求していないことから、ビーム軸とキャピラリー軸が完全には一致してなくてもビーム通過が起こる(ガイド効果)。ここで、ビーム照射による入口付近の単なる帯電では必ずしもビームをどこか特定の方向へ輸送できるわけではない。ポテンシャルを利用してビームを輸送するには、多くの場合、人為的にポテンシャルを生成および操作する必要がある。その意味で、ここで扱う自己組織化された帯電には、ビーム自身による表面の帯電部分が時間を追うごとに、あたかも自らビームを特定の方向にガイドしていくように帯電分布が形成されていくという特長がある。最近の国際会議では“guiding”と“capillary”というキーワードで発表が増えてきており、この自己組織化帯電現象の注目度の高さがうかがえる^{6),7)}。

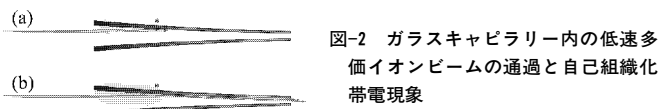


図-2 ガラスキャピラリー内の低速多価イオンビームの通過と自己組織化帯電現象

図-3 は 8 keV (1 kV 加速) の Ar⁸⁺ ビームに対する照射真空槽内 (4×10⁻⁵ Pa) でのキャピラリー通過イオンのカウント数である。通過強度の立ち上がりに 50 秒くらい要しており⁸⁾ (T=0~50 秒)、この 50 秒間が自己組織化帯電分布の形成に費やされたと考えられる。通過ビーム強度を維持するためには帯電だけでなく適度な放電も必要であるため、キャピラリーの入口に近い部分ではキャピラリー外周に金属箔が巻かれている。入口には 1.5×10⁵ 個/秒のイオンが入射されており、通過イオン数の最大値は 1,600 個/秒で、出口 (24 μmφ) と入口 (0.8 mmφ) の単位面積当たりの出射および入射イオン数を比較すると、入射密度に対して出射密度は約 10 倍となり、集束効果を有することが示された⁸⁾。

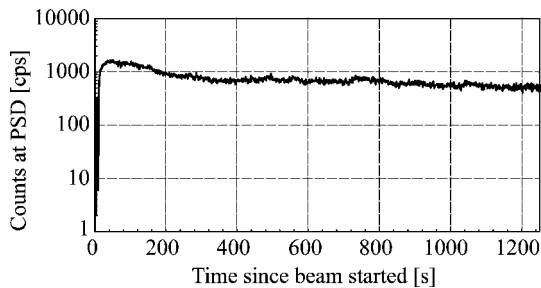


図-3 通過イオンビーム強度の時間変化(出口径 24 μm)。通過強度の立ち上がりに 50 秒くらい要しており、この 50 秒間が自己組織化帯電分布の形成に費やされたと考えられる

キャピラリー内壁付近でイオンが反射されるのであれば、キャピラリー入口を中心に水平または垂直に本体を少し回転させてもビームは通過するはずである。キャピラリーの 10 cm 下流に位置敏感型粒子検出器 (Position Sensitive Detector: PSD) を置き、出射ビームスポットの大きさと位置を測定した。図-4 内左上のインセットに、キャピラリーを -5° (= -87 mrad) から +5° まで 1° ステップで水平回転させた時の通過ビームの PSD 上でのプロファイルを示す。回転角度に応じて左から右へスポットの移動が確認された。図-4 のグラフは横軸がキャピラリーを回転させた角度で、縦軸は PSD 上でのスポット位置を回転角度に変換したものである。y=x の直線に沿っていることから、キャピラリー内壁付近での反射によってビームが偏向され、キャピ

ラリー軸の方向に出射していることが分かる⁸⁾。ここで、通過ビームに電場をかけると Ar の 8 価未満のイオンを PSD 上で分離することができるが、実際は入射時の価数 (8 価) 以外のスポットは見られず、99%以上の通過イオンは荷電変換をしていない、すなわち、内壁に触れることなく通過したといえる⁸⁾。ちなみに、出射ビームの角度拡がりは ±5 mrad であった。

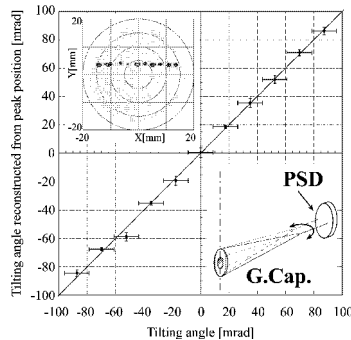


図-4 キャピラリーをティルトさせることでビームを偏向させることができる

このようにガラスキャピラリーを用いた集束素子は荷電変換を起こさず、集束効果があり照射時には顕微鏡下でキャピラリー先端を照射領域に向けるだけで、ビーム軸から少し反れていてもマイクロビーム照射を実現できる。多価イオンは衝突時の反応性が非常に高いため大気中での照射はできず、それゆえ、サンプルは全て真空槽に入れて照射を行っている。現在、1 μm 前後の線幅での表面改質による描画、および、50~100 μmφ で 100 pA 以上の出射ビームを使った改質または分析の準備を進めている。

4. 培養液中の生細胞オルガネラへの照射

ひとつの細胞内の微小な構造物の機能を探るための「細胞(セル)手術(サージェリー)」これは、例えばたった一つの細胞内小器官(オルガネラ)だけを標的とし、他の細胞内小器官を傷つけることなくイオンビームを照射し、その機能を止めてしまう方法である。

液体中で培養されている細胞へのビーム照射は、真空中で細く絞込まれたビームを、ビーム取出し口に張られた薄い耐圧膜に透過させた後、空気層を経て、細胞へ打ち込むことで行われている。この場合、ビームの加速エネルギーを数百 MeV 程度に設定する。もうひとつの方法として、この耐圧膜上に細胞を密着させることもある。こちらの場合では加速エネルギーは数 MeV から数十 MeV に減らすことも可能であるが、これらの方法では以下の点を考慮する必要がある。

①エネルギーが数百 MeV あると、細胞内の標的にダメージを与えることはできるが、細胞内をビームが貫通するため、標的の手前および背後にも同等のダメージが与えられてしまう。つまり、照射は細胞内小器官に対してピンポイント的ではなく、細胞内のビーム軌跡に沿って、円筒状に照射したことになる。

②ビームが真空領域を飛び出すときから、標的の細胞内小器官に到達するまでの間に、耐圧膜、空気層、培養液の層などを通過しなければならぬため、ビーム内のイオンが散乱され、細く絞られていたビームが太くなってしまふ。

③細胞や細胞内小器官は止まっているとは限らず、標的位置をリアルタイムでモニターし続ける必要があり、それに従ってビーム方向またはサンプル位置を制御することになる。ただし、これをミクロンオーダーで行うことはかなりのノウハウが必要で容易ではない。

①~③を回避するため、我々のグループではキャピラリー(出口径: 数百 nmφ ~ 数 μmφ) のビーム出口にガラス製の蓋を付け

たものを開発した(図-5(a))。ただし、蓋厚はビームが貫通できるように1 μm厚程度である。その照射方法は顕微鏡下でのマイクロインジェクションとほとんど同じで、インジェクションピペット(テーパ型ガラスキャピラリー)の先端からイオンビームが出てくるという格好(図-5(b))である。この方法には以下の利点がある。

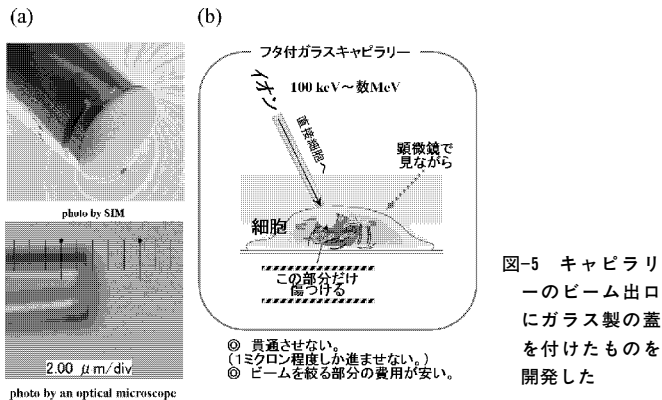


図-5 キャピラリーのビーム出口にガラス製の蓋を付けたものを開発した

①低いビームエネルギー(数 MeV)を使用することで、キャピラリーの蓋を貫通して出てきたビームが細胞内で100 nm~数 μm程度しか進まないようにしておく。これにより細胞を貫通することはない。加速器は小型(低い加速エネルギー)のものが使えるというメリットがある。低い加速エネルギーと言っても低速多価イオン通過のときよりは高く、キャピラリー内壁の帯電ポテンシャルエネルギーより高いため、ビームは内壁表面に触れることが可能で小角散乱にて前方へ進んでいく。

②キャピラリー先端を細胞に触れさせ数ミクロン先のオルガネラを狙うか、マイクロインジェクションのように細胞に突き刺してオルガネラに接近できる。

③顕微鏡下で細胞を観察しながら照射できるため、細胞や細胞内小器官をリアルタイムで容易に追跡することが可能となる。またステージ上の細胞の状態に応じて標的をその場で変更することもできる。

蓋を貫通してからイオンが停止するまでの距離はビームのエネルギーやイオン種による。本方法ではオルガネラ標的の位置にブラックピークを設定しているため、標的に至るまでの部分への影響は非常に小さい。この蓋付キャピラリーと4 MeVのHe²⁺ビームを用いた細胞核への照射実験を図-6に示す。照射前(図-6(a))と照射後(b)を比較すると核内で光っていたGFPが約10 μm径のビームの照射により、核の一部分のみで褪色している⁹⁾。

蓋があれば、キャピラリーを細胞に挿入しても、細胞の中身がキャピラリーに流入することはない。すなわち、細胞以外の液相中、気相中サンプルへの照射が可能で、温度や濃度などサンプル

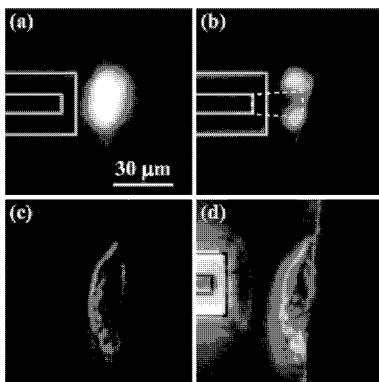


図-6 ヒストンとGFPの融合タンパク質でラベルされた核をもつHeLa細胞への照射前と後の写真: 蛍光イメージによる照射前(a)と照射後(b)、および位相差顕微鏡でのイメージによる照射前(c)と照射後(d): (d)では、照射が終了してガラスキャピラリー先端を細胞から離れたところ。また、(b)の点線領域はSRIM-2006によるシミュレーションで予測した被照射領域

条件を容易に変更できるということである。また今まで液体に進入させるため高い加速エネルギーが要求された実験に対しても蓋を薄くしていけば、加速エネルギーを小さくすることができ、かつ、深さの制御もしやすい。細胞以外のサンプルにはビーム強度も要求されるが、取り出しビーム電流の密度向上率は100から1,000倍に達することが確認されており、レンズと同様の集束効果がある。この集束効果に対しては、陽子線やヘリウムイオンビームだけでなく、分析にも使える素粒子のひとつであるミュオン¹⁰⁾や陽電子¹¹⁾ビームについても取り組んでいる。

5. おわりに

ビーム集束装置としてガラスキャピラリーを使用すれば、キャピラリー支持部とサンプル周辺部を既存の加速器施設に持ち込んで実験をすることも可能となり、非生物系の測定にも初期投資の圧縮ができると考えており、量子ビームの応用が広がることを期待している。最後に表-1にメリットをまとめた。

表-1 ガラスキャピラリーのメリット

1. 100 nm オーダーのビーム径が容易に実現
2. 集束(粒子密度向上)できる
3. 出射ビーム拡がり mrad 程度に抑えられる
4. 集束させてもサンプル付近は電場/磁場フリー
5. ビームをガイド(偏向)できる
6. ビーム出射口位置が容易に確認できる
7. 低価格
8. 初期ビームのエミッタンスは良い必要なし
9. 様々な荷電粒子に適用可能
10. 気体/液体中のサンプルに照射可(蓋付)
11. サンプル中のビーム停止位置を制御可(蓋付)

謝辞 本研究は理化学研究所の金井保之、小島隆夫、岩井良夫、山崎規、小林知洋、前島一博、今本尚子、高知工大・成沢忠(敬称略)を主要メンバーとする共同研究で進められている。

参考文献

- 1) <http://www-ap.riken.jp/nanobeam/>
- 2) N. Okabayashi, K. Komaki and Y. Yamazaki, *Nucl. Instr. Meth.*, **B 205**, 725 (2003).
- 3) C. Gebeshuber, S. Cernusca, F. Aumayr and H. Winter, *Int. J. Mass Spectrometry*, **229**, 27 (2003).
- 4) N. Nakamura, M. Terada, Y. Nakai, Y. Kanai, S. Ohtani, K. Komaki and Y. Yamazaki, *Nucl. Instr. Meth.*, **B 232**, 261 (2005).
- 5) M. Terada, N. Nakamura, Y. Nakai, Y. Kanai, S. Ohtani, K. Komaki and Y. Yamazaki, *Nucl. Instr. Meth.*, **B 235**, 452 (2005).
- 6) N. Stolterfoht, J. -H. Bremer, V. Hoffmann, R. Hellhammer, D. Fink, A. Petrov and B. Sulik, *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 133201 (2002).
- 7) Y. Kanai, M. Hoshino, T. Kambara, T. Ikeda, R. Hellhammer, N. Stolterfoht and Y. Yamazaki, *Phys. Rev.*, **A 79**, 012711 (2009).
- 8) T. Ikeda, Y. Kanai, T. M. Kojima, Y. Iwai, T. Kambara, M. Hoshino, T. Nebiki, T. Narusawa and Y. Yamazaki, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 163502 (2006).
- 9) Y. Iwai, T. Ikeda, T. M. Kojima, Y. Yamazaki, K. Maeshima, N. Imamoto, T. Kobayashi, T. Nebiki, T. Narusawa and G. P. Pokhil, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 023509 (2008).
- 10) T. M. Kojima, D. Tomono, T. Ikeda, K. Ishida, Y. Iwai, M. Iwasaki, Y. Matsuda, T. Matsuzaki and Y. Yamazaki, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76**, 9, 093501 (2007).
- 11) N. Oshima, Y. Iwai, T. M. Kojima, T. Ikeda, Y. Kanazawa, M. Hoshino, R. Suzuki and Y. Yamazaki, *Mater. Sci. Forum*, **607**, 263 (2009).

連絡先: 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

(独)理化学研究所基幹研究所 山崎原子物理研究室 専任研究員
池田時浩
Tel: 048-462-1111 (ext. 3645) Fax: 048-462-4644
tokihiro@riken.jp
<http://www-ap.riken.jp/nanobeam/>

ご 案 内

■第19回日本MRS 学術シンポジウム
—エコイノベーションを切り拓く先進材料研究—
セッションテーマ募集

日 程 平成21年12月7日(月)~9日(水)
会 場 横浜開港記念会館(横浜市中区本町1-6)
横浜情報文化センター(横浜市中区日本大通り11)

総合テーマ;「エコイノベーションを切り拓く先進材料研究」
本シンポジウムでは、産業の活性化と地球環境問題を両立させるための革新的な技術を創出するため、新規機能の探索、新規材料の創製、新規シンプルプロセスに関する分野横断的なテーマについて討論します。多様な材料の専門家が領域融合的な情報・技術交換を行いながら、エコイノベーションの創造につなげることを目指します。
・12月7日(月):一般セッション、国際セッション
・12月8日(火):一般セッション、国際セッション、懇親会
・12月9日(水):一般セッション、国際セッション
応募先・問合せ先
第19回日本MRS 学術シンポジウム企画幹事(横浜国立大学大学院環境情報研究院) 鈴木淳史
事務局担当 田島くらら E-mail: mrsj-s@ynu.ac.jp
〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

■Transaction of the MRS-J
▽Vol. 34, No. 1, March (2008)

一般投稿論文 2 報
IUMRS-ICA 2008 シンポジウムから
・Symposium A Reactivity of Solids 1 報
・Symposium B Development of Oxide Nanocomposites-Bulks, Thin Films and Nano-structures 3 報
・Symposium I Structure Induced Giant Nature 7 報
・Symposium P Advanced Ferrous Materials: Processing, Characterization and Device Application 15 報
・Symposium V Ceramic Materials for Biomedical Applications 4 報
・Symposium LL Materials Frontier 8 報 合計 40 報
出版・事務体制については、出版事務局を未踏科学技術協会に移す。出版委員長を神奈川工科大学工学部応用化学科 伊熊泰郎教授(ikuma@chem.kanagawa-it.ac.jp)に依頼する。またTrans. MRSJが論文誌として適正な扱いを受けるよう、出版に至るまでの方式を若干変更するなどが、2008年12月9日の理事会で承認されました。論文投稿・査読に関する不具合・疑問等は出版事務局 日本MRS出版事務局(E-mail: mrs-j@sntt.or.jp)までお問い合わせください。



To the Overseas Members of MRS-J

■Dilemma of “Carbon”p. 1
Ex-President of Carbon Society of Japan, Professor Emeritus of Hokkaido Univ., Dr. Michio INAGAKI

Global warming problem becomes serious. Reduction of CO₂ emission has to be urgently performed, which is usually evaluated by the amount of carbon. Therefore, various slogans are used, such as “low carbon society”, “carbon neutral”, etc. However, the materials consisting of carbon atoms have a long history since pre-historical era and now using in our daily lives, from water purification to key boards of computers and controllers, and in various industries, steel refining, semiconductor production, aero space and even medical care. I am very much afraid that these slogans for the reduction of CO₂ emission might lead the people to misunderstand carbon materials which are very useful for the people.

■High-density plasma generation along metal surface by using microwave propagation along plasma-sheath interfacesp. 2

Associate Professor, Dr. Hiroyuki KOUZAKA, Department of Mechanical Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University

We have proposed a novel method of microwave plasma generation for the surface treatment and coating of small parts of metal parts where the inner diameter of hole is millimeter size. The newly proposed method takes advantage of a physical phenomenon that electromagnetic waves propagate as

surface waves along the interface between plasma and ion sheath bounded by metal which is electrically biased to a negative voltage against plasma. By using the proposed method with 2.45-GHz microwaves, we conducted the DLC coating to a stainless-steel pipe with a length of 75 mm and an inner diameter of 4.4 mm.

■Production of Microbeam with Low-cost Glass Capillaryp. 5
Dr. Tokihiro IKEDA, Atomic Physics Laboratory, RIKEN

Tapered glass capillary has been used to produce micro/nano-meter sized beams of both keV-energy highly charged ions and MeV-energy proton or helium ions. We have employed this low-cost technique to realize micro-patterning on the sample surface by efficient potential sputtering of slow highly charged ion microbeams and cell surgery aiming at the dysfunction of a single organelle in a living cell by proton or helium ion microbeams.

■The 19th MRS-J Academic Symposium will be held in Yokohama. A wide range of topics of contemporary importance for science, engineering and technology of materials will be highlighted.

The main interests will be focused on “advanced materials researches breakthrough to innovation.”

For further information please contact to MRS-J: E-mail: mrs-j@sntt.or.jp, http://www.mrs-j.org/

編集後記
本年も第2号を発行することができました。御多忙中にもかかわらず快くご執筆をお引き受け頂いた先生方に深く御礼申し上げます。寒い日が続き大いに桜が長持ちしたと思えば、夏日で水遊びする子らの姿が報道される四月上旬でした。同じ新聞の一面に、科学技術予算の拡充、前代未聞の総額という与党案が紹介されておりました。最先端の研究者何名かに多額の資金を支給して研究を遂行させるとのことです。MRS-J 会員の中からもスター研究者が誕生するのでしょうか。(小林記)

©日本MRS 〒105-0003 東京都港区西新橋 1-5-10 新橋アマノビル 6F 社団法人未踏科学技術協会内

Tel: 03-3503-4681; Fax: 03-3597-0535; http://www.mrs-j.org/ E-mail: mrs-j@sntt.or.jp

2009年日本MRS ニュース編集委員会 第21巻2号 2009年5月10日発行

委員長: 中川茂樹(東京工業大学大学院理工学研究科、nakagawa@pe.titech.ac.jp)

委員: 寺田教男(鹿児島大学大学院理工学研究科)、小棹理子(湘北短期大学情報メディア学科)、川又由雄(芝浦メカトロニクス)、富田雅人(コーニング研究所)、岩田展幸(日本大学理工学部)、Manuel E. Brito((独)産業技術総合研究所)、松下伸広(東京工業大学応用セラミックス研究所)、小林知洋((独)理化学研究所)、伊藤 浩(東京工業高等専門学校)

顧問: 山本 寛(日本大学理工学部)、大山昌憲(ダイバージェンス)、岸本直樹((独)物質・材料研究機構)

編集: 清水正秀(東京CTB) 出版: 株式会社内田老鶴圃/印刷: 三美印刷株式会社



日本 MRS The Materials Research Society of Japan (MRS-J)

設立：1989年3月16日

目的：先進材料に関する科学・技術の専門家の横断的・学際的研究活動を通じて、その学術・応用研究および実用化の一層の進展を図ること。

事業：①学術シンポジウム、研究会、講演会の開催
②内外の関連諸機関との連携協力
③ Transactions・会誌・図書の刊行
④その他

役員：(2009)

会 長 岸本直樹
副 会 長 鈴木淳史、澤井伸一
常任理事 伊熊泰郎、杉 道夫、鶴見敬章、小田克郎、須田敏和、山本節夫、原田幸明、野間竜男、木村茂行、井奥洪二、岡部敏弘、高原 淳、加藤隆史、節原裕一、斉藤永宏、Manuel E. Brito、森 利之、中川茂樹、香山正憲
監 事 山本 寛
常任顧問 宗宮重行、堂山昌男、増本 健、高木俊宜、山本良一、梶山千里、吉村昌弘、岸 輝雄、高井 治、山本 寛
顧 問 長倉三郎、井上明久
理 事 正畑伸明、石崎幸三、北條純一、高梨弘毅、小椋理子、緒方 潔、寺田教男、下田達也、和田 仁、小関敏彦、片山幹雄、篠原嘉一、松本睦良、原 一広、寺嶋和夫、高崎明人、中野貴由

事務局：〒105-0003 東京都港区西新橋 1-5-10

新橋アマノビル 6階

(社)未踏科学技術協会内

Phone: 03-3503-4681 Fax: 03-3597-0535

E-mail: mrs-j@sntt.or.jp

URL: <http://www.mrs-j.org/>

会員：総数 906 名 (3.31.2008 現在)

うち、個人会員 519、学生会員 47、S 会員 317、法人会員 11、名誉会員 5、顧問 5、準会員 7

年会費：法人会員：(事業所単位) 100,000 円

個人会員：6,000 円

学生会員：2,000 円

海外会員：OECD 加盟国籍者 5,000 円

その他の国籍者 2,000 円

会員の特典：学術シンポジウム等への割引価格での参加

会誌「日本 MRS ニュース」の無料配布

ジャーナルの無料配付

論文誌 Transactions of the MRS Japan 等の割引配布

日本 MRS の設立経緯と活動状況：

独創的研究開発の重要性はますます高まっており、技術革新と新材料創成とが相互に因となり果となって進展していることはご

高承のとおりであります。また、現在人類が直面している環境問題等複雑に絡み合った多様で困難な問題を解決し、持続可能な経済社会と生活を得るためにも、新材料・新素材の発展が強く求められています。

このような新しい材料の研究開発のあたっては、従来の金属・有機・無機材料、あるいは構造・機能材料といった材質ないし用途別の、また化学工業・鉄工業・機械工業・食品工業・医療・運搬・通信といった業種・職種別の縦割の既成概念を超えて、横断的、学際的にあらゆる分野の専門家が連携協力することが有効、かつ不可欠であると考えます。

日本 MRS (The Materials Research Society of Japan) は、1988 年 5 月池袋サンシャインシティで開催された MRS International Conference on Advanced Materials を契機として、上記観点に立ち、材料に関する横断的、学際的学術研究団体として 1989 年 3 月に発足いたしました。(当初名称、先進材料科学・技術研究会 Advanced Materials Science and Engineering Society 1990 年、日本 MRS に改称)

以来、関連諸機関と連携協力しつつ、IUMRS-ICAM 93 ('93.8、池袋)、IUMRS-ICA 97 ('97.9、幕張)、10 周年記念学術シンポジウム ('99.7、東京)、IUMRS-ICAM 2003 ('03.10、横浜) 等、約 50 回のシンポジウム、講演会を開催し、2008 年 12 月には IUMRS-ICA 08 を名古屋で 1800 名の参加者を迎え、盛大に開催しました。また、「日本 MRS ニュース」及び「Transactions of the Materials Research Society of Japan」を定期的に刊行致して参りました。このように IUMRS (International Union of Materials Research Societies) の創設メンバーとして国際的に活躍していることも、当研究会の特色です。

日本 MRS は細分化され専門化されすぎた科学・技術を再統合し、学術理論から産業面・社会生活面での応用に至る、また、素材開発・加工技術・応用技術の各分野に亘る材料に関する専門家から、広く市民や政策担当者に対して、物質・材料を巡るあらゆる問題を議論する場を提供し、研究成果・データ等を共有財産としつつ材料科学・技術と発展に寄与したいと考えております。学際的あるいは横断的分野の材料についての全ての問題をタイムリーに取り上げ討議する場として、この日本 MRS を位置付けたいと思います。多方面から多数の方々積極的にご参加と、ご支援をお願い申し上げます。

参考：IUMRS (International Union of Materials Research Society) は、学術的材料研究の振興を共通の関心とする学術団体から構成される国際機関です。詳細はインターネットの the IUMRS Homepage (<http://www.iumrs.org>) をご覧ください。加盟機関 (2008 年 4 月現在、13 機関)：

MRS of Argentina (MRS-A), MRS of Australia (A-MRS), Brazil MRS (B-MRS), Chinese MRS (C-MRS), European MRS (E-MRS), MRS, MRS of India (MRS-I), MRS of Japan (MRS-J), MRS of Korea (MRS-K), MRS of Mexico (MRS-M), MRS of Russia (MRS-R), MRS of Singapore (MRS-S), MRS of Taiwan (MRS-T)

原理・装置の組み立て・データ解析法から各種材料への応用まで、
X線反射率法のすべてがわかる待望の解説書。

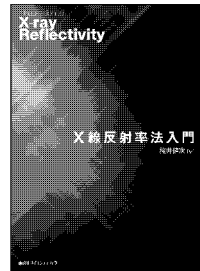
X線反射率法入門 **新刊**

桜井 健次・編

A5・318頁・定価5,775円(税込)

ISBN 978-4-06-153268-7

- ・表面・界面におけるX線の全反射現象の基礎をていねいに解説。
- ・モデルフィッティングによる解析だけでなくモデルフリー解析によるデータ解析法についても詳述。
- ・微小角入射蛍光X線分析法、微小角入射X線回折法などのX線反射率法の拡張技術についても記述。
- ・金属・半導体などの無機材料だけでなく有機材料、液体表面などの応用例を紹介。



主な内容

1.X線反射率の基礎 X線反射率法の特徴／膜密度はどのように決まるか／膜厚はどのように決まるか／膜の表面・界面粗さはどのように決まるか／結晶からの反射率／共鳴磁気反射率／コヒーレンス／実際の測定とデータ解析の基礎
2.X線反射率の測定装置と測定方法 X線反射率測定装置に必要な条件／X線反射率測定装置の実際／反射率の測定方法／散漫散乱測定 **3.X線反射率のデータ解析法①** X線反射率のデータ解析の前に／最小二乗法解析の手順／単層膜の解析と精度の評価／多層膜積層体の解析と精度の評価／多波長X線反射率法／2波長法による多層膜構造解析／3波長法による多層膜構造解析 **4.X線反射率のデータ解析法②** 大域的最適化の重要性／モデルフリー解析の重要性／Hilbert phase法／フーリエ変換法／ウェーブレット変換法 **5.X線反射率法の高度化** 迅速・ライブ計測／微小領域分析・ビジュアライゼーション(可視化)／新たな情報の質の獲得を目指して **6.X線反射率法と併用すると有意義な関連技術** 微小角入射蛍光X線分析法／微小角入射X線回折法／GISAXS法 **7.X線反射率法の応用** 半導体・電子デバイス用薄膜／磁性体多層膜／X線光学用多層膜／有機薄膜／液体の表面、界面、単分子膜
 エピローグ X線反射率の100年 付録A C++によるX線反射率計算プログラム 付録B 有用なWebサイト、書籍など 付録C X線に関する法令、実験のための手続きなど

東京都文京区音羽2-12-21
<http://www.kspub.co.jp/>

講談社

編集部 ☎03(3235)3701
 販売部 ☎03(5395)3622

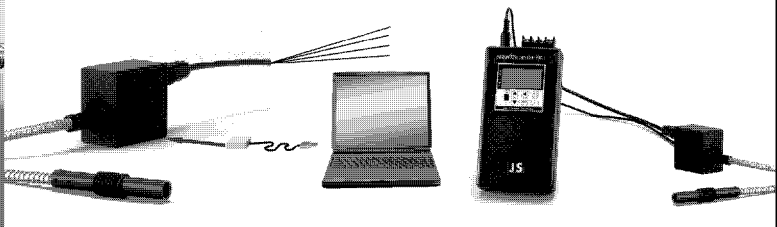
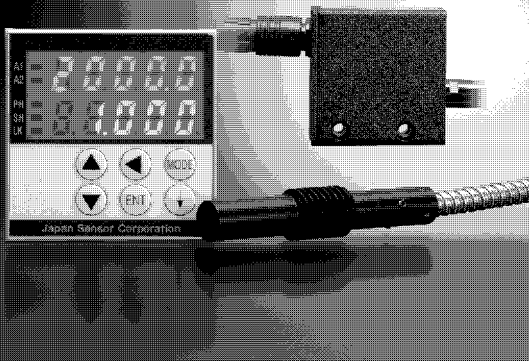
非接触 金属の熱処理温度測定制御に最適 ファイバ型 赤外線放射温度計

FTZ9シリーズ

応答時間:1msec

温度範囲:220~5000℃

パソコンからパラメータ設定とデータ収集ができる
 ソフト付きパラメータ設定セットもございます。



js ジャパンセンサー株式会社
<http://www.japansensor.co.jp>

本社営業部 東京都港区港南2-12-27 イケダヤ品川ビル6F
 〒108-0075 TEL.03-6716-8877 FAX.03-6716-8879
 大阪営業所 TEL.06-6304-7335 FAX.06-6304-7698