タテからヨコへ

日本MRSニュース

For the Interdisciplinary Materials Research

Vol.26 No.2 May 2014

MRS-J The Materials Research Society of Japan

発行 © 一般社団法人 日本 MRS 事務局
〒231-0002 横浜市中区海岸通 3-9
横浜ビル 507D
http://www.mrs-j.org/

|||||||| やあ　こんにちは ||||||||

リケ爺

東京工業大学名誉教授　安田（やすだ）　榮一（えいいち）

安田榮一
東京工業大学名誉教授
元日本セラミックス協会会長
元学振第 117 委員会「炭素材料」委員長
元日本複合材料学会副会長

マサチューセッツ工科大学（MIT）の Walter H. G. Lewin 名誉教授の白熱教室のテレビを観て感激した。大学の講義ではあるが、一般公開して子供たちにも分かりやすいように実験して体感させる講義である。例えば、重力とエネルギー保存則では、天井から吊るした 4 kg の鉄球を顔の位置から放して戻ってきた玉が顔に当たるのではないかとハラハラさせたり、静電気で長髪の女性の髪の毛を逆立たせたり、ハイポに硫酸を加え硫黄のコロイド粒子を発達させながら光を当てて教室内で青空から夕日が沈むまでを再現したり、虹の詳細を解説したり、いずれも感激して見入ってしまった。特に、虹に関してどこに何度の角度に虹は見えるか、色の配列は、副虹とは、副虹の色の配列は、虹の何処が明るく何処が暗いか、について一つ一つ丁寧に説明してくれた。水滴内での屈折現象である程度は知っていたが、厳密に考えた事が無く、42 度の位置に見える理由が屈折角の最大値、副虹の配列は主虹と逆である等、目からうろこであった。

子供たちの理科教育に尽力している東京理科大学学長の藤嶋昭先生は、科学に関する絵本の図書館を作ったり、小学生新聞に「科学の不思議」の連載記事を書かれたりして居られる。先日お会いした折には空がなぜ青いか、夕日はなぜ赤いかをガラス管の中の水に少量のコロイド（カルピスでも良いが、Ti コロイドが最適と仰っていた）を分散させ、端から懐中電灯で照らし、手前の方は青く、距離が長くなると赤くなる事で見せてもらった。早速、Ti コロイドを頂戴し、小学校 3 年の孫に実験して見せた。オーディエンスが少しいた方が良いので、家内と娘に参加してもらったところ、孫は勿論家内も娘も感激してくれた。お爺ちゃんの株を大いに上げさせてもらった次第である。

科学技術立国日本を育てるためには、子供たちにどれだけ「科学って面白いね」と思わせられるかが重要ではないだろうか。それも高校生ではなく、幼児期から小学生までの間に。受験勉強が始まると、「理科実験のような余計な事はさせないで」とお叱りを受けることになってしまう。理科にも政治にも経済にも興味を持てる大人になり、日本を支えて欲しい。

かなり以前の話であるが、平野眞一元名古屋大学総長が、「理科の好きでない先生が子供たちに理科の面白さを教えられるのか？」と言っておられた。ごもっともな話しである。独立行政法人科学技術振興機構（JST）と国立教育政策研究所が小学校 380 校の教員 935 名に対して実施した「平成 20 年度小学校理科教育実態調査」[1]において「学級担任として理科を教える教員の 5 割は、理科の指導に苦手意識を感じており、そのなかでも教職経験が 10 年未満の教員では、6 割を超えている」という調査結果が出ている。JST は理科教育のサポートとして、理科大好きボランティア支援事業を実施していたが、民主党政権時代の事業仕分けに会って、その制度が廃止になってしまったと聞く。

さて、小学校の理科教育について少し調べてみると、3 年生から理科の教科が始まり、6 年生迄の 4 年間で、物理が 145 時間、生物が 140 時間、地学が 84 時間、化学が 31 時間の時間が割かれている[2]。化学が極端に少ないのは、上述の実態調査で、理科の実験道具の購入経費不足と実験の危険が伴うためのリスク回避であろうか。以前の JST が行っていたような経費のサポートと理科教育支援ボランティアの開拓が重要であろう。

昔の職場の若い先生方に聞いたところでは、最近のパパは子供の教育に積極的に携わっているようだが、私達の頃は、自分の子供達の教育に携わらなかった親が多かった。私も、子供達の教育に殆ど携わらなかったと家内に責められている。退職して自由になり、今ごろになってせめて孫達に還元しようと思って、少しずつではあるが実験の面白さを味わわせる努力をしている。

例えば、昔子供の頃、雪の日にアイスキャンデーを作った事を思い出し、先日の大雪の日にバケツに入れた雪に塩を入れてアイスキャンデーを作って孫達と楽しんだ。冷凍庫が各家庭に有る現在、昔ほどの感激はないが、孫の記憶に残ってくれることを期待したい。これまでにやった実験は、熱の伝わり方、太陽電池で発電、太陽熱に依る熱気球、コイルを巻いて磁石を作る、青空と夕焼け、浮沈子、等である。幸い植物と昆虫は幼稚園の頃から好きで、畑作りで収穫等を一緒に楽しんでいる。次なる実験は、断熱圧縮で綿花に火を着ける事（キットを売っているらしいが高価なので自作？）を試し、逆過程の断熱膨張と合わせてエアコンの原理を説明出来ればと思っている。

いずれにしても、理科教育をサポートできるのは、シニア集団ではないだろうか。MRS-J の会員の皆様は材料研究のプロであり、「リケ爺」「リケ婆」の資格を有している。理系のシニア集団は、せめてご自分の孫達に理科の面白さを教えてやって欲しい。優しく教える事は大変難しく、惚け防止には大いに役立つというバイプロダクトも期待できる。

目　次
01 やあ　こんにちは
リケ爺
安田　榮一

02 研究所紹介
あいちシンクロトロン光センターの現状
田渕　雅夫

05 トピックス
プロトンマイクロビーム描画によるテフロンの新しい微細加工法
喜多村　茜

08 To the Overseas Members of MRS-J

参考文献
1）http://www.jst.go.jp/cpse/risushien/elementary/cpse_report_004.pdf
2）http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/senseiouen/1304651.htm

■研究所紹介

あいちシンクロトロン光センターの現状

名古屋大学シンクロトロン光研究センター 特任教授 田渕 雅夫（たぶち まさお）

1. はじめに

愛知県に建設された「あいちシンクロトロン光センター（あいち SR）」は、2013 年 3 月から一般の利用者による共同利用が開始されたばかりの新しい放射光利用施設です。この「あいち SR」は科学技術交流財団に所属する施設ですが、私の所属する、シンクロトロン光研究センター（SR 研究センター）は、この施設の建設と呼応して名古屋大学に組織されました。SR 研究センターは、あいち SR の加速器そのもの、あるいはシンクロトロン光を利用する各ビームラインの建設や立ち上げに協力し、日常的な運用と利用者の実験・研究を支援しています。このような組織の中で、私は主に硬 X 線領域の XAFS（X-ray absorption fine structure）測定を行うビームライン BL5S1 の立ち上げに協力し、現在ではその運用を支援しています。

本稿では、このような立場から、放射光利用施設としてのあいち SR の基本的な能力の紹介と、一般利用が開始されて 1 年が経過した現状について、私が担当するビームラインを中心に紹介させていただきたいと思っています。

2. あいち SR の概要

あいち SR は、愛知万博跡地の一角に建設された「知の拠点あいち」の敷地内にあります。その立地は、愛知県のリニモ東部丘陵線陶磁資料館南駅からは徒歩数分の距離にあり、JR 名古屋駅からも地下鉄と「リニモ」を乗り継いで 1 時間弱でアクセスできます。日本国内の他の放射光利用施設と比較したとき、このような立地の良さは、それだけでも一つの特徴として挙げることができるかもしれません。また、あいち SR は、おなじ敷地内にある「あいち産業科学技術総合センター」（科学技術交流財団）と連携し、幅広い研究活動を総合的に支援することを目指しています。

あいち SR の核となる加速器は、メインの 1.2 GeV 電子蓄積リング（シンクロトロン）の内側に、電子銃、50 MeV の直線加速器、ブースターシンクロトロンが配置されたコンパクトな構成をとっています（図-1）。ブースターシンクロトロンを備えているため、共同利用開始当初から 300 mA の一定電流値で運転するトップアップ運転が実現されました。これによって、運転時間中を通じて強度変動のない安定した光を使った実験が可能になっています。

あいち SR の加速エネルギー 1.2 GeV は、例えば SPring-8 の 8 GeV やフォトンファクトリーの 2.5 GeV と比較すると低めですが、5T の超伝導偏向電磁石（4 基ある）を光源とするラインでは 20 keV を越える硬 X 線領域の X 線が利用可能になっています（図-2）。また 8 基ある常伝導電磁石を光源とするラインは真空紫外域から数 keV の軟 X 線を利用するラインになっています。加えて直線部の一つに設置されたアンジュレーターを光源とする真空紫外を担当するラインがあります。図からも分かるように、あいち SR の偏向電磁石で利用可能な光は、強度ではフォトンファクトリーの光よりも少し弱い程度、臨界エネルギーもほぼ同じです。

アンジュレーター以外の光源では複数のポートを設けて複数のビームラインに光を導くことができ、あいち SR では、ポートの数だけを考えると 20 ライン以上のビームラインが建設可能なキャパシティーを持っています。現状では、アンジュレーターラインを含めて六つのラインが建設され稼働しています。この 6 本のビームラインにはそれぞれ分担が有り、硬 X 線領域の XAFS 測定を行うライン（BL5S1）、軟 X 線領域の XAFS 測定を行うラ

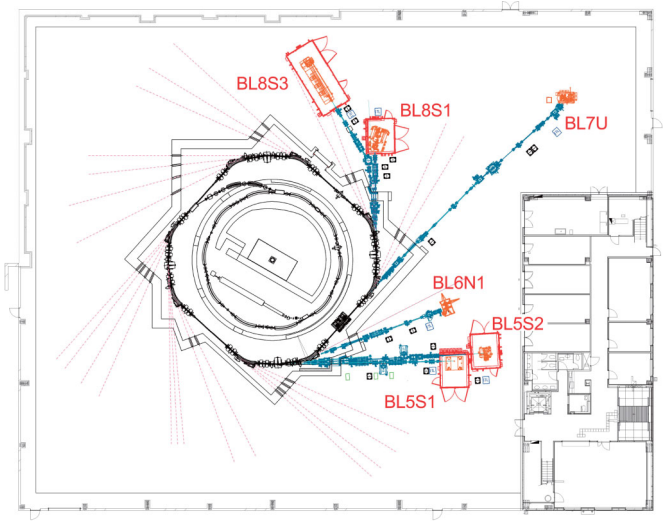

図-1 あいち SR の施設平面図。実験ホールは一辺およそ 50 m の正方形で、直径約 20 m のシンクロトロンの中に電子銃、直線加速器、ブースターリングがコンパクトにまとめられている。図の中でシンクロトロンの上下左右の辺の中心に超伝導電磁石が配されており、現在 6 本のビームラインが稼働している。

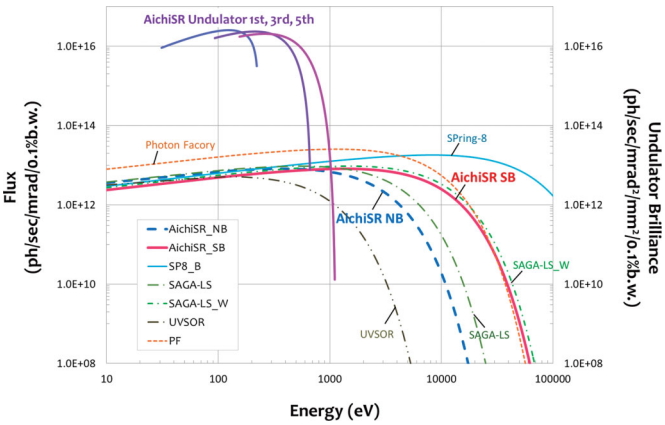

図-2 あいち SR で利用可能な光のスペクトルと、他のいくつかの施設で利用可能な光のスペクトルの比較（計算値）。図の左上アンジュレーターのスペクトルは、図の右軸（輝度）の単位で、その他のスペクトルは図の左軸（フラックス）の単位で描かれている。あいち SR 超伝導電磁石（図の AichiSR SB）では 20 keV 以上まで、常伝導電磁石（図の AichiSR NB）は 5 keV 程度まで十分な強度の光が得られることがわかる。

イン（BL6N1）、真空紫外から軟 X 線領域の XAFS および光電子分光測定を行うライン（BL7U）、X 線小角散乱測定を行うライン（BL8S3）、粉末 X 線回折を主とし硬 X 線領域の XAFS 測定も可能なライン（BL5S2）、汎用の X 線回折測定および X 線反射率測定を行うライン（BL8S1）となっています。別の言い方をすると、分光測定を主に行うラインが 3 ライン（BL5S1、BL6N1、BL7U）と散乱・回折実験を主に行うラインが 3 ライン（BL5S2、BL8S1、BL8S3）整備されています。

3. 硬 X 線 XAFS 測定ライン（BL5S1）

あいち SR の中で私が主に関わっているビームラインは硬 X 線領域での XAFS 測定を行うライン、BL5S1 です。XAFS 測定は、シンクロトロン無しに行うことは難しく（実験室用の測定装置もありますが）、シンクロトロンを使って行われる測定の代表的なものと言えます。それだけに、シンクロトロンを利用したことのない人には馴染みの薄い測定手法だとも言えますので、ここではまず XAFS とは何かを説明したいと思います。

3.1 XAFS : X-ray absorption fine structure

XAFS という言葉は X-ray absorption fine structure の略で「X 線吸収スペクトルに現れる微細構造」を意味します。通常、X 線領域のエネルギーを持った光は、エネルギーが増大するほど物質を透過する能力が大きくなります。このため、可視光で行う吸収測定と同様に、X 線のエネルギーを変えながら吸収スペクトルの測定を行うと、吸収係数は基本的には単調に減少していきます。ところが、可視光の測定で電子のバンド間遷移の励起に相当するところで吸収スペクトルに特徴が出るのと同様に、X 線領域では、物質に含まれる元素の内殻の電子の励起エネルギーに相当するエネルギーで、吸収係数が階段状に増大します。このようなエネルギーを各元素の吸収端（absorption edge）と呼びます。XAFS 測定で着目するのは、この吸収端近傍とそれを越えた高エネルギー側のスペクトルです。通常、このスペクトルには振動構造が観察され、その微細な振動構造を XAFS スペクトルと呼びます（**図-3**）。

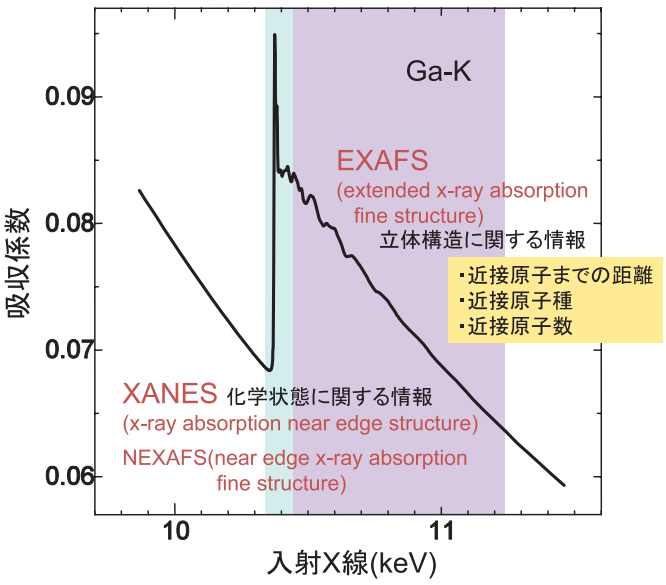

図-3 XAFS スペクトル凡例。横軸を入射 X 線のエネルギー、縦軸を吸収係数にとってグラフを描くと右下がりのなだらかな曲線の途中に、特定の原子の吸収端に対応した階段状の変化が現れる。この階段状に変化したスペクトルに乗った細かな構造が XAFS スペクトルである。吸収端からのエネルギー範囲によって XANES、EXAFS と呼ばれるそれぞれの領域に違った種類の情報が含まれている。

XAFS の中でも、特に吸収端に近い数十 eV のエネルギー範囲のスペクトルとそれより高エネルギー側のスペクトルは構造が現れる起源が違うと考えられていて区別されます。吸収端近傍のスペクトルは XANES（X-ray absorption near edge structure または NEXAFS : near edge X-ray absorption fine structure）と呼ばれ、このエネルギーを越えて 500～1000 eV 程度の広いエネルギー範囲に見られる振動構造は EXAFS（extended X-ray absorption fine structure）と呼ばれます。

XANES は主に束縛状態間での電子遷移に対応しており、測定した吸収端に対応する元素が物質の中でどのような化学状態をとっているか（電子軌道や価数など）を反映して変化します。従って、XANES スペクトルを解析すると、こうした化学状態に関する情報が得られます。XANES の利用法の例をいくつか挙げると、材料研究の分野では、材料に添加された遷移金属や希土類元素の価数を調べることに利用されます。これは例えば電池材料の研究にとっては重要な情報です。また、触媒化学の分野では、化学反応中の触媒物質や反応に関与する物質の価数変化を見ることが行われたり、環境学や生物学の分野では、環境中や生物試料中で特定の元素が何価のイオンの形で存在しているかを調べることにも用いられるなど、幅広い分野に利用されています。

一方、EXAFS は内殻電子が連続状態に遷移するときのスペクトルで連続状態にあって波として伝わり散乱される電子波の干渉によってスペクトルの構造が生まれます。このため EXAFS 領域でのスペクトルは、吸収端に対応する元素の周辺の局所的な原子配置（種類、数、距離、時には方位）を反映して変化します。従って、EXAFS スペクトルを解析すると、こうした局所構造に関する情報が得られます。例えば、触媒を用いて化学反応が進行するとき、触媒元素の周りの原子配置を調べることができます。材料研究では、材料中の微量元素がどのようなサイトにあって他のどのような元素とともに安定構造を作って機能を発現しているかを議論することができる強力な手段です。さらに、環境や地質、生物の分野では汚染物質を始めとした様々な元素がどのような状態で存在するのか、安定なのか不安定なのか、など多くの情報を得ることに利用されます。

3.2 あいち SR の硬 X 線 XAFS 測定ライン（BL5S1）

前節で述べたように XAFS を用いた実験・研究は非常に応用範囲の幅が非常に広く、様々な分野の人々が様々な元素の吸収端を対象に測定を行うことになります。そこで、あいち SR の硬 X 線 XAFS 測定ライン（BL5S1）では、多様な利用者の多様なニーズに応えられるようにビームラインの整備を行うのが一つの目標になっています。

多様なニーズに応えるためには、まず最初に幅広いエネルギー範囲の光を利用できることが重要です。この点、あいち SR は先にも述べたように 1.2 GeV の加速電圧と超伝導電磁石の組み合わせで 20 keV を越える硬 X 線の利用が可能な光源になっています。この幅広いエネルギー範囲の光を利用する際、一つの光学系で全てのエネルギー範囲をカバーすることはできません。あいち SR に分光実験を主目的としたビームラインが 3 本あるのはそのためです。

硬 X 線領域の XAFS 測定を担当する BL5S1 では、通常の状態で、おおよそ 5～20 keV の範囲の X 線を使った実験が可能です。これは元素の吸収端で言えば V～Mo（原子番号 23～42）の K 吸収端、もしくは Cs～U（原子番号 55～92）の L 吸収端をカバーしていますので、重要な金属元素の多くが測定できることを意味します。その際のビーム強度（光子束）はピークで 5×10^{10}

（photos/sec）程度あることが実測されています。これは通常の試料のXAFS測定には十分な光の強度です。試料位置でのX線スポットサイズは0.5 mm×0.3 mm（$W \times H$）程度まで絞られています。また必要に応じて、スポットサイズを20 μm程度に集光する光学系も準備されています。

BL5S1では、XAFS測定の手法として、試料に入射するX線の強度と透過したX線の強度を測定する基本的な透過法の測定の他に、蛍光法による測定、転換電子収量法による測定などをサポートしています。蛍光法は、試料がX線を吸収したときその緩和過程で蛍光X線が発生することを利用した測定で、測定対象元素の濃度が低い場合や、試料が厚くてX線を透過しない場合などに有効です。転換電子収量法はやはりX線吸収の二次過程として表面から放出される二次電子の強度を測定する方法です。蛍光法と同様に試料がX線を透過しない場合に有効な方法ですが、それ以上に非常に表面敏感な測定ということが特徴です。このため試料内部と表面を区別して測定したい場合などに用いられます。

さらにBL5S1では、多様な測定環境をサポートすることも重要視しています。例えば、試料を600℃程度まで加熱しながら測定する為のヒーター、10 K程度まで冷却しながら測定する為の冷凍機、試料を適当なガス雰囲気中において測定する為のガス供給ラインなどを標準的に備えていて随時利用可能です。また、試料の位置や姿勢を精密に制御して測定を行うため、多軸の並進・回転軸を備えた試料台も準備されており、2次元スキャンを行って測定位置を決めたり、試料表面に低角・全反射条件でX線を入射して測定を行うことも比較的簡単にできます。先に述べた20 μmの集光系と組み合わせると、この解像度でのX線透過像、蛍光像を得ることも難しくありません。

4. ま と め

これまで述べてきたように、あいちSRでは多様な実験を効率よく行えるようビームラインの整備が進められています。このため、シンクロトロン光の利用経験の無い方を含めた多数のユーザーに利用して頂けると期待しています。あいちSRはその光源性能からも、最先端の実験や、最高レベルのデータを追及することは難しいですが、使いやすく確実に実験を行えることが特徴です。利用制度の面からも、実験室の測定装置に近い感覚で、使いたいと思ったとき、他の施設ほどの待ち時間や手続きの手間がなく利用できるのも大きな魅力だと思われます。

私は、施設の経営に関わる人間では無いのですが、ビームラインの整備に関わった人間の一人として、熟練放射光ユーザーには手軽な施設として、初心者には入門実験の場として、より多くの方々に利用して頂ければ幸いです。

■連　絡　先
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
名古屋大学シンクロトロン光研究センター 特任教授　田渕雅夫
e-mail : m.tabuchi@nusr.nagoya-u.ac.jp　　Tel : 052-789-5430

ご　案　内

■IUMRS関係会議

▽IUMRS-ICA Fukuoka 2014
日時・場所　2014年8月24日（日）～30日（土）、福岡市・福岡大学
Important dates
25 Jun. 2014 Early bird registration deadline
12 Aug. 2014 Online registration close
詳　　細
IUMRS-ICA2014 Secretariat, MRS-JOffice, 507D, YokohamaBldg., 3-9 Kaigan dori, Naka-ku, Yokohama, 231-0002 Japan
Tel : +81-45-263-8538　Fax : +81-45-263-8539
E-mail : iumrs-ica2014@mrs-j.org
プログラム（oral/poster）

A. Technologies for the Environment and the Sound Material-Cycle Society
A-1 Analytical and Assessment Methods in Materials and Environmental Technologies
A-2 International Symposium on the Social Acceptance of Engineered Nanomaterials
A-3 Materials Technology Inspired by Natural Phenomena and Natural Materials
A-4 Advances in the Application of Biomass
A-5 Materials for Living—Environment・Energy・Medicine—
A-6 Autonomous Micro Systems for Life, Green and Safety
A-7 Design of Advanced Fuel Cell Materials, Devices and Systems
A-8 Photocatalytic Materials and Applications on Energy and Environment
A-9 Cutting-edge Thermoelectric Materials for Heat-to-Electricity Direct Conversion
A-10 Environmental Friendly Carbon Films and their Deposition Technology
A-11 Sustainable Mobility Materials

B. Technologies for Human-Friendly Materials
B-1 Biomaterials and Biomimetic Materials
B-2 Ceramic Materials for Biomedical Applications
B-3 Materials in Biomechanics and Biotribology
B-4 Nano-biotechnologies on Interfaces
B-5 Advanced Study in Science and Technology for Soft Matter
B-6 Advanced Liquid Crystals
B-7 Soft Actuators and Related Energy-Conversion Materials
B-8 Chemical Sensing and Sensor Devices for Chemical Space Information
B-9 Next-generation Organic Electronics Aiming towards Energy Harvesting
B-10 Molecular Thin Films
B-11 Energy and Green Materials
B-12 Functional Self-Organized Materials

C. Advanced Materials for Eco-technology
C-1 Magnetic Materials and Spintronics
C-2 Mechanical Properties of Steels
C-3 Nitride and Diamond Semiconductors
C-4 Innovation for Highly Reliable Advanced Ceramics
C-5 Damage and Failure Mechanics of Engineering Materials
C-6 Frontiers in Plasmonic Nanomaterials
C-7 Graphene
C-8 Advanced Oxide Materials-Bulks, Thin Films, and Nanostructures
C-9 Recent Advances in Superconductivity-Materials, Processing, and Applications
C-10 Advanced Ferroic Materials : Processing, Characterization and Device Application
C-11 Nano-Scale Functional Materials : Advanced Syntheses, Characterization, Functions, and Applications

D. Fabrication, Processing and Characterization Technologies for Advanced Materials
D-1 Innovative Material Technologies Utilizing Ion Beams
D-2 Frontier of Nano-Materials Based on Advanced Plasma Technologies
D-3 Synthesis, Processing and Characterization of Nanoscale Functional Materials
D-4 Fabrication of Thin Films
D-5 Control of Interfaces and Materials Processing for Nanoelectronics
D-6 Novel Functionalities by Cooperative Excitations
D-7 Functional Surface Science & Engineering
D-8 Three-dimensional Microfabrication and MEMS
D-9 Scientific Basis of the Nuclear Fuel Cycle II
D-10 Innovative Imaging Technologies Using X-ray Scattering and Atom Probe Microscopy
D-11 Development of Environmentally Friendly Processes and Materials-Including Solution Processes and Their Applications-
D-12 Advances in Computational Materials Science and Technology
D-13 Advanced Nanoparticles-Synthesis, Characterization and Applications

E. Interdisciplinary Field
E-1 Materials Frontier

F. Education of Materials Sciences and Technologies
F-1 Materials Science and Education

G. Special Symposium
G-1 Crystallography in Materials Science & Engineering—Memorial for IYCr2014

■トピックス

プロトンマイクロビーム描画によるテフロンの新しい微細加工法

独立行政法人日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所　喜多村（きたむら）　茜（あかね）

1. はじめに

日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設（Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application；TIARA）は、AVF サイクロトロン及び 3 台の静電加速器（3MV タンデム加速器、3MV シングルエンド加速器、400 kV イオン注入装置）を有し、材料科学及びバイオ技術の開発を中心とする量子ビーム応用研究に適したイオンビームの技術開発を行っている[1]。

多岐にわたる利用分野に対応するため、H から Bi まで様々な元素のイオンを、数十 keV から数百 MeV のエネルギー範囲で加速することが可能である。照射形態も多様であり、AVF サイクロトロンでは、通常のスポットビーム照射の他に、ラスタースキャン方式により面積 10 cm×10 cm、均一度 ±5% の大面積照射が可能である。

さらに広い照射野全体を多重極磁場により同時に一定のフルエンス率で照射できる大面積均一照射システム[2]、高安定イオン源の開発[3]、ビーム位相幅のバンチング効果を持つサイクロトロン中心領域の開発[4]など、これらの照射技術の向上に必要な技術開発を進めている[5]。

一方、静電加速器では、3 台それぞれから生成したイオンビームの同時照射が可能なビームラインを有するほか、3MV タンデム加速器からは重イオン、3MV シングルエンド加速器からは軽イオンを引き出し、それらを直径 1 μm 以下に集束させたイオンマイクロビーム形成技術も有する[6]。

本稿では、後者のイオンマイクロビームのビーム走査に着目して得た新しい微細加工技術を紹介する。

2. 軽イオンマイクロビームの応用

TIARA では、3MV シングルエンド型静電加速器に接続させたサブミクロンマイクロビーム形成装置を用い、数 MeV 級のプロトン及びヘリウムイオンを 250 nm という世界最高レベルの細さに集束させることができる[7]。

形成したプロトンマイクロビームの応用には、粒子励起 X 線分光（Particle Induced X-ray Emission Analysis；PIXE）やラザフォード後方散乱分析（Rutherford Backscattering Spectrometry；RBS）、核反応分析（Nuclear Reaction Analysis；NRA）などの高分解能局所分析や、プロトンビーム描画（Proton Beam Writing；PBW）と呼ぶ微細加工技術がある[6]。

PBW 技術は 1997 年頃より国立シンガポール大学イオンビーム応用センター（NUS）の Watt らによって開発され[8]、TIARA のプロトンマイクロビームを使用した成果としても、芝浦工大の西川らとの共同研究によって高いアスペクト比を持つ微細構造の作製を報告している[9]。

PBW 技術で構造体を得るプロセスでは、プロトンマイクロビームで描画した後に、化学薬品による現像処理を行う必要がある。

マイクロビームによって局所的に材料の内部を分解/架橋させた部分を、化学薬品で溶解/残留させるため、加工の対象となる材料はポジ型/ネガ型のレジストである。

3. PBW の技術拡大に向けて

PBW 技術の主な課題は、加工の微細化・高精度化、加工面積の広範囲化である[10]。これらの課題は着実に達成されつつあり、更なる PBW の技術拡大が求められるようになった。そこで私たちは、加工対象をレジスト以外の材料にも発展させることを目指し、新たな課題を設けた。

従来の加工プロセスで必要な、化学薬品を使った現像処理を行うことなく、プロトンビーム描画だけで構造体を得ることができれば、レジスト以外の材料を加工対象とするプロトンビームを使った新しい微細加工技術となる。

まず私たちは、現像処理が不要なことを示せる材料として、耐薬品性が非常に高いテフロン®（デュポン社の商標で代表的なフッ素系高分子材料）を加工対象とした。テフロンは、分子構造に強固な C-F 結合を持つため、いかなる酸およびアルカリ、有機薬品に対して安定であり、溶けることも、膨潤することもない[11]。

一方で、ガンマ線などの放射線を照射すると簡単に分解して劣化する。この特性を利用し、近年、シンクロトロン放射（SR）光やイオンビームなどによる微細加工の実例が報告されている[12~14]。

したがって、私たちはテフロンを使って、プロトンマイクロビームのみを使用した現像処理を用いない PBW の微細加工技術の開発に取り組んだ。

4. プロトンビームによるテフロンの微細加工

プロトンマイクロビームの特徴は、前述のビームの材料透過性が非常に高いこと、及びビームが直径 1 μm に集束していることに加え、その集束ビームをコンピュータ・プログラムによって任

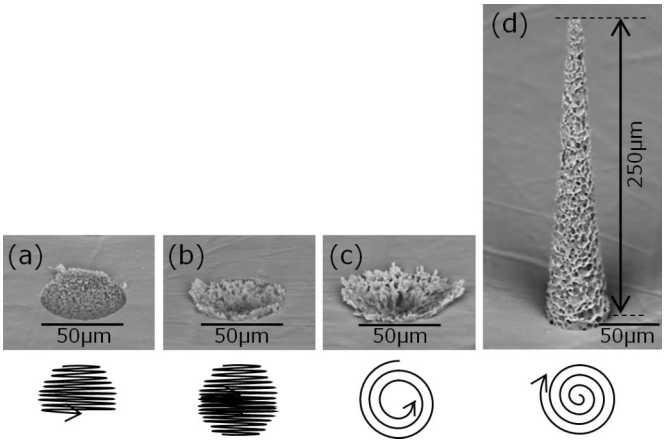

図-1　プロトンマイクロビームのビーム走査経路（下段）と表面 SEM 像（上段）。(a) 水平走査で一方向のみ、(b) 水平走査で往復、(c) 外側からの螺旋走査、(d) 中心からの螺旋走査

意に走査できることがある。照射によるテフロン内部の分解や温度上昇は、ビームの走査軌跡に沿って発生する。

私たちは、パターン照射を行うに当たり、同じパターンでも、ビームを走査する経路が異なれば、当然テフロン内部で生じる分解・温度上昇の分布や程度も異なってくると考えた。そこで、エネルギーと照射量という放射線を使った加工の一般的なパラメータに加え、走査経路も考慮して構造体の作製手法を検討した。直径50 μm の円内を照射した時に得られる構造を一例として紹介する。同様の照射を従来の PBW 技術の手法で行う場合、図-1 の(a)水平走査(ラスタースキャン方式)を使って、円内を塗りつぶす。

私たちはいくつもの走査経路で検討した結果、走査経路によって得られる構造体の形状も異なってくることが分かった。最も分かりやすい 4 例を**図-1** に示す。走査経路は、図-1(a)および(b)が従来の PBW で用いる水平走査、図-1(c)及び(d)は通常 PBW では用いられない螺旋走査で、私たちのアイディアである。これらはいずれも、3 MeV で直径 1 μm に集束させたプロトンマイクロビームを、電流値 200 pA/μm^2 で円内の照射量が同じとなるよう走査しており、重ね書きはしていない。

使用したテフロンは、最も一般的なポリテトラフルオロエチレン（polytetrafluoroethylene；PTFE、$(CF_2\text{-}CF_2)_n$）である。3 MeV のプロトンビームは、SRIM の計算結果ではテフロンの内部 90 μm にまで侵入する[15]。

図-1 の SEM 像から一目で判別できるように、中心から周囲に向かって螺旋走査（図-1(d)）を行ったときのみ、元の表面から上方に向かって円錐が形成される[16]。この表面形状は、他の走査経路のような荒れた表面とは全く異なる。得られる円錐は、ビーム走査の起点が頂点となっており、中心から一辺 50 μm の正方形となるよう螺旋走査すれば、**図-2** のような四角錐が形成できる。また、ビーム走査経路を制御することによって、複数の円錐を同一平面にすることも可能である（**図-3**）。

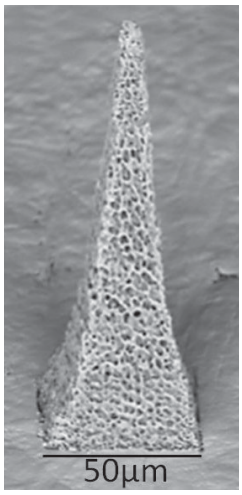

図-2　中心から一辺 50 μm の正方形状に螺旋走査したときに形成された四角錐

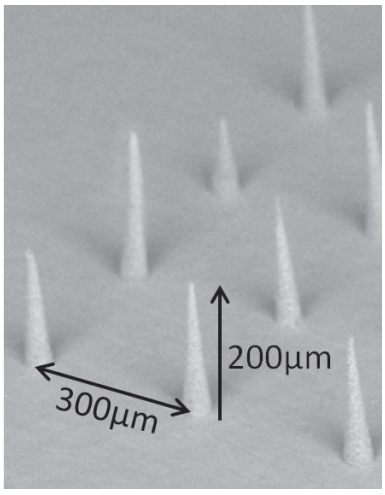

図-3　複数の円錐を配置させたときの表面 SEM 像

照射量が高すぎると、円錐が折れたり、形成すらされず、ただ表面が削られるものの、照射量によって円錐の高さは制御できることも分かっている[17]。また、この円錐は多孔質構造となっている（**図-4**）。それゆえ、円錐の形成過程は、プロトンの飛跡に沿って PTFE 内部で分解ガスが発生し、その発泡現象によって、内部から表面に向かって泡のように PTFE が盛り上がると考え

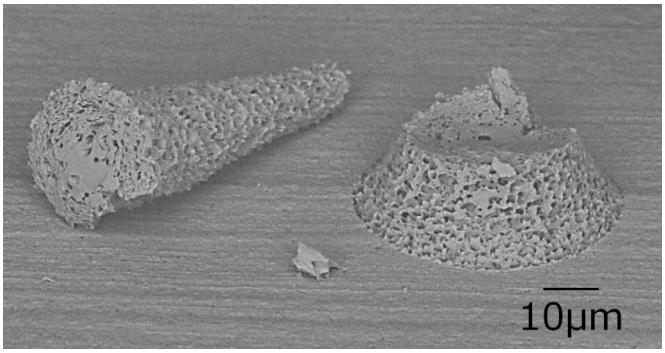

図-4　根元付近を折った円錐の断面及び側面

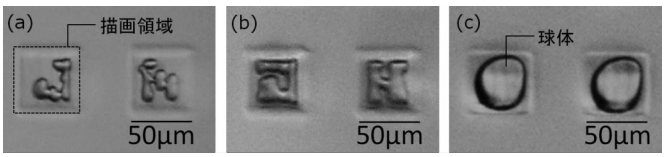

図-5　水平走査で内部の形状を変化させたテフロン。(a)照射直後、(b)(a)を 250℃で加熱した 30 秒後、(c)さらに 30 秒加熱したときの光学顕微鏡像

ている。PTFE 表面を「掘削する」微細加工技術は、既に SR 光や集束イオンビーム（FIB）を使って高い精度で実証されている[12,13]。それと対照的に、表面を「隆起させる」本手法は、PTFE の全く新しい微細加工技術であり、かつ化学薬品を使わないため、PBW 技術としても新しい。また、この研究の過程から、分解ガスを内側に残留させる手法も見出した。一例を**図-5** に示す[18]。図-4 は光学顕微鏡像であり、材料はテフロンの一つであるテトラフルオロエチレンとヘキサフルオロプロピレンの共重合体（Fluorinated-ethylene-propylene；FEP）である。FEP の融点は 260℃で、327℃の PTFE に比べて低いが、構成元素は PTFE と同様に C 原子と F 原子のみであり、化学的、電気的及び機械的な特性も PTFE とほとんど差がない[11]。そして白濁した PTFE とは異なり、FEP は光透過性が非常に高い透明な材料であるため、図-5 のように光学顕微鏡での試料内部の観察が可能である。

図-5(a)は、3 MeV のプロトンビームを一辺 50 μm の正方形となるよう水平走査した直後である。図中の不定形状の部分が、内

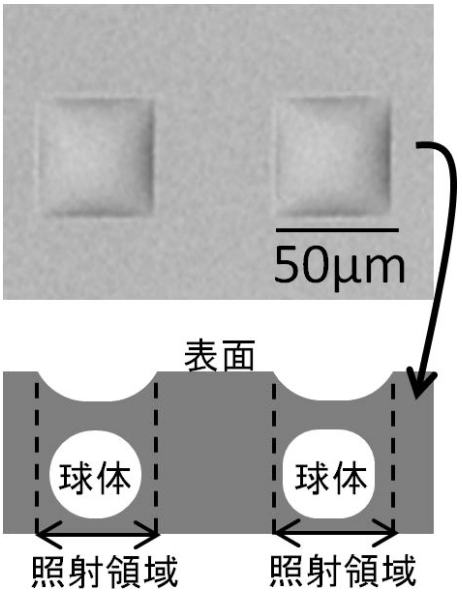

図-6　図-5(c)の表面 SEM 像（上段）及び断面模式図（下段）

部で発生した分解ガスの残留によって形成された構造であり、表面から深さ約 40～90 μm に広がっていた。図-5(b)及び(c)は、(a)の試料を 250℃で 30 秒加熱後、そしてさらに 30 秒追加で加熱した後の変化である。不定形状が加熱によって徐々に一つの球体へと変化していることが分かる。しかも、水平走査直後の図-5(a)の表面形状は照射前と同じ平面であるが、加熱後（図-5(c)）では**図-6** に示すように照射部分の表面が凹状へと変化する。これは、「テフロンの内部のみ」を加工する技術は、SR 光や FIB を使った「表面掘削技術」や、イオン穿孔のトラックエッチング技術を使った「貫通孔形成技術」、前述の「表面隆起」に加わる新規の微細加工法である。

5. おわりに

私たちは、プロトンマイクロビームの高い材料透過性やビーム走査の任意性を利用し、難加工性のテフロン（フッ素系高分子材料）に対して有効な微細構造技術の開発を進めてきた。産業分野で価値の高い材料であるがゆえに、有効な微細加工法の開発は経済効果が高いと考えられる。

今後は本手法による加工の自由度と精度を向上させるとともに、他材料に対してもイオンビームによる特異な照射効果を利用した微細加工法を開発し、応用拡大を目指す。

参考文献

1) K. Yamada *et al.*, *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 271 (2011).
2) Y. Yuri *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, A 642, 10-17 (2011).
3) K. Yoshida *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, 81, 02A312 (2010).
4) N. Miyawaki *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, A 636, 41 (2011).
5) T. Yuyama *et al.*, *Proceedings of the 19th International Conference on Cyclotrons and their Applications*, MOPCP019 (2010).
6) T. Kamiya *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, B 269, 2185-2186 (2011).
7) M. Fukuda *et al.*, 08 Applications of Accelerators, Technology Transfer and Industrial Relations, UO_2 Materials Analysis and Modification, 588 (2007).
8) F. Watt *et al.*, *National University of Singapore Materials Today*, 10, 20-29 (2007).
9) N. Uchiya *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, B 260, 405-408 (2007).
10) 西川宏之，集束プロトンビーム描画技術，放射線利用技術データベース，010310 (2007).
11) 里川孝臣（編集），ふっ素樹脂ハンドブック，日刊工業新聞社，214-279 (1990).
12) N. Miyoshi *et al.*, *Radiat. Phys. Chem.*, 80, 230-235 (2011).
13) H. Tsubokura *et al.*, *Radiat. Phys. Chem.*, 92, 37-42 (2013).
14) A. Kitamura *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, B 203, 2406-2409 (2009).
15) J. F. Ziegler, *Nucl. Instrum. Methods*, B 219-220, 1027-1036 (2004).
16) A. Kitamura *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, B 307, 610-613 (2013).
17) A. Kitamura *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, B 306, 288-291 (2013).
18) A. Kitamura *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, B 314, 81-85 (2013).

■連　絡　先
〒370-1297 群馬県高崎市綿貫町 1233
独立行政法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部 ビーム技術開発課　喜多村　茜
e-mail : kitamura.akane@jaea.go.jp　　Tel : 027-346-9419

ご　案　内

■第 24 回日本 MRS 年次大会

日　時：2014 年 12 月 10 日(水)～12 日(金)
場　所：横浜開港記念会館（横浜市中区本町 1-6）
言　語：日本語をシンポジウムの公式言語とします。ただし、国際セッションは原則英語とします。
発表方法：口頭（招待・一般）およびポスター
Web と論文出版：論文出版は、例年通り Trans. Mat. Res. Soc. Japan を利用致します。
▽シンポジウム公募のお知らせ：
本年次大会のシンポジウムは組織委員会での企画とともに公募を受け付けます。シンポジウムを提案して下さる方は、シンポジウム名、数名のシンポジウムオーガナイザー（代表オーガナイザー 1 名、連絡オーガナイザー 1 名を含む）、シンポジウムのスコープ（日本語 500 字および英文 200 語以上）、予想される発表件数（口頭、ポスター）をつけて、5 月 20 日までにシンポジウム事務局に e-mail（meetings@mrs-j.org）にてお申し込み下さい。
なお、①シンポジウムオーガナイザー構成が国際的である、②プレゼンテーションを英語で行う、の要件を満たすセシンポジウムは、「国際シンポジウム」として実施いたします。該当する場合は、お申し込みの際に「国際シンポジウム希望」と明記して下さい。
なお、国際シンポジウムを開催頂く場合は、通常のシンポジウム開催の場合より、招聘費等の用途で年次大会本部より多く補助金が支給されます。

■IUMRS 関連会議

▽IUMRS-ICEM 2014, June 10 to 14, 2014, Taipei World Trade Center Nangang, Taipei, Taiwan, IUMRS-ICEM Organizing Committee c/o Vice Dean Jinn P. Chu National Taiwan University of Science and Technology, Email : icem2014@mail.ntust.edu.tw

■MRS-J 協賛会議

▽「環境を考慮した材料の循環使用に関するシンポジウム」、主催：日本学術会議材料工学委員会材料の循環使用検討分科会、日時：2014 年 4 月 24 日(木)13：20～17：00、会場：東京都港区・日本学術会議、参加費：無料、東京大学生産技術研究所・前田研究室（担当：高田・佐々木）、Tel : 03-5452-6297, 03-5452-6298
▽「ここまでできる、計算材料科学入門」、日時：2014 年 8 月 21 日(木)9：30～16：45、場所：東工大蔵前会館（東京工業大学大岡山キャンパス）ロイヤルブルーホール、主催：日本金属学会関東支部、協賛：日本 MRS ほか、申込先：〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1、東京工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻 日本金属学会関東支部事務局・多賀三千代、E-mail : jim-kanto@mtl.titech.ac.jp, Tel : 080-4833-3136
▽EcoBalance 2014 – the 11th International Conference on EcoBalance, October 27 to 30, 2014, Tsukuba, Japan, The Institute of Life Cycle Assessment, Japan, 2014 secretariat Tel. +81-3-3503-4681, Fax. +81-3-3597-0535, E-mail : ecobalance2014@sntt.or.jp

■日本 MRS 研究会活動制度発足！

日本 MRS では 2014 年より、研究会活動制度（研究会）をスタートすることになりました。
研究会は、先端領域または学術領域における研究を効率的に推進することを目的に設置するものです。これは、広範な先進材料の科学技術分野での専門・学際活動の必要性から、会員の要請によって設置され、独自の活動を行うことを目的としています。研究会は 2 種設置されます。1 号研究会は会費は徴収せず、日本 MRS 会員で運営するものとし、2 号研究会は会費を徴収し、日

本 MRS 会員を中心に運営されるものとなります。研究会の規約は、HP（http://www.mrs-j.org/info/sec9.php）をご覧下さい。
会員の皆様からの積極的なご提案をお待ちしております。

■日本 MRS 会員各位―会員管理事務の移行について

会員の皆様におかれましては益々ご健勝のこととお慶び申し上げます。平素より、日本 MRS の活動にご協力を賜り誠にありがとうございます。

さて、本年 4 月 1 日より、日本 MRS 会員管理事務局が当学会事務局本部に移行致しました。入退会・会費・登録情報変更等についてご不明な点がございましたら何なりと下記までお問い合わせ下さいますようお願い申し上げます。

詳　細　〒231-0002 横浜市中区海岸通 3-9 横濱ビル 507D
一般社団法人日本 MRS 事務局
Tel : 045-263-8538　Fax : 045-263-8539
E-mail : membership@mrs-j.org

■新刊紹介

Transactions of the MRS-J, vol. 39, No. 1, 2014、が出版されました。以下に、年度別、セッション別、搭載された論文数を示します。

2011 年
▽Session G　Development of Alternative Materials for Replacing with Maximum Use of Nanotechnology and its Properties 1; Session M　Recent Progress in Nano-structured Materials-Structure, Function and Applications 1
2012 年
▽Sympo. A-1　Solar Cells and Related Materials 2; Sympo. A-5　Materials for Living-Environment, Energy, Medicine-1; Sympo. A-6　Alternative Materials Development Utilizing Advanced Nanotechnology 3; Sympo. A-7　Environmental Friendly Technologies for Thin Film Growth 1; Sympo. A-9　Materials Frontier 1 ▽Sympo. C-10　Frontier Surface Technology for Electronic Materials and New Advancements 1 ▽Sympo. D-10　Synthesis, Processing, and Characterization of Nanoscale Functional Materials 1
2013 年
▽Sympo. I　Recent Progress of Functional Fine Particle Related Technologies Toward Environmental Friendly Process and Function 1 ▽Sympo. L　Fabrication, Characterization and Application of Molecular Thin Films-Structural Analysis and Control Toward the Realization of Novel Functions 9

To the Overseas Members of MRS-J

■Rike-jii（Science Grandpa） ……p. 1
Dr. Eiichi YASUDA, Emeritus Professor, Tokyo Institute of Technology

To establish a national economy based on science and technology, education of science for schoolchildren is very important. Unfortunately, more than 50% of schoolteachers are poor at science teaching. The author is now trying to making experiments with my grandson as ice candy making by snow and salt, thermal conductivity using wax melting order, electric fan by solar cell, thermal balloon, blue sky and sunset using colloidal Ti, sink and float test etc. Senior member of MRS-J have to make science teaching to your own grand children at first and support schoolteachers.

■Present Status of the Synchrotron Facility, Aichi, Japan …p. 2
Professor Dr. Masao TABUCHI, Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

AichiSR is a newly built synchrotron facility in Aichi Prefecture, Japan. Although the acceleration energy 1.2 GeV is not so high, it can provide photons in the region of hard X-ray of which energy is up to 20 keV or higher by using superconducting-bending magnets of 5T as light sources. One of the six ready beam-lines for X-ray spectroscopic, diffraction and scattering measurements is picked up to show the detail, which are specialized for the XAFS（X-ray absorption fine structure）measurements in the hard X-ray region.

■Microfabrication of Teflon® Using Proton Microbeam Writing ……p. 5
Dr. Akane KITAMURA, Japan Atomic Energy Agency

Proton beam writing（PBW）is one of the mask less lithography methods which make used of a focused MeV-energy proton beam. Fine-patterned shapes can be formed on a resist material after a development of an irradiated sample. A new technique of PBW was developed at the TIARA facility of JAEA. A prominence was produced on a Teflon® surface only by a spiral scanning of a proton microbeam. The structure was porous and likely grew up by inflating the sample from the inside.

編後記

2020 年の東京オリンピックを境に首都圏でも人口減少に転じるという記事を目にし、ついにここまで来たかと感慨にふけりました。40 年ほど前、日本でも人口抑制が真剣に議論されたことは事実で、将来の予想など全く当てにならないことは百も承知ですが、こればかりは避けようがない気がしています。科学業界も激減する若者の取り合いの場に否応なしに引きずり出される訳で、その参戦準備をしなくてはと安田先生の巻頭言を拝読して思いました。今回も御多忙中にも関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。（小林記）

©日本 MRS　〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1　東京工業大学大学院理工学研究科　中川茂樹研究室内
http://www.mrs-j.org/　E-mail : nakagawa@pe.titech.ac.jp
2014 年日本 MRS ニュース編集委員会　第 26 巻　第 2 号　2014 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）
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(株)）、岩田展幸（日本大学理工学部）、Manuel E. Brito（山梨大学クリーンエネルギー研究センター）、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（(株)共立）、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