加速器駆動コンパクト中性子源の産業・医療への利用

福島 喜章¹, 熊田 博明², 佐藤 馨³, 田中 浩基⁴, 清水 裕彦⁵

¹(公財)特殊無機材料研究所(〒982-0252 仙台市太白区茂庭台2-6-8)

²筑波大学 医学医療系(〒305-8575 茨城県つくば市天王台1-1-1)

³JFEテクノリサーチ(株)(〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1)

⁴京都大学 複合原子力科学研究所(〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西2丁目)

⁵名古屋大学 大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻(〒464-8602 名古屋市千種区不老町)

Applications of Accelerator-driven Compact Neutron Sources

Yoshiaki FUKUSHIMA,¹ Hiroaki KUMADA,² Kaoru SATO,³

Hiroki TANAKA,⁴ and Hirohiko SHIMIZU⁵

¹Advanced Institute of Materials Science, 2-6-8 Moniwadai Taihaku-ku Sendai 982-0252

²Faculty of Medicine, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai Tsukuba Ibaraki 305-8575

³JFE Techno-Research Corporation, 1-1 Minamiatarida-cho, Kawasaki 210-0855

⁴Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University,

2 Asashiro-Nishi, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494

⁵Graduate School of Science Division of Particle and Astrophysical Sciences, Nagoya University,

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602

(Received July 25, 2018)

Recent topics of applications of compact neutron sources and expected possibilities of a laser-driven neutron source for industrial and medical uses are discussed. The laser-driven neutron would be suitable for neutron resonance absorption imaging because of its point source with narrow pulsed width. A boron neutron capture therapy (BNCT) using an accelerator have been confirmed as an efficacious radiation treatment for cancers. Compact neutron facilities and those at J-PARC are useful tools for researches and development in industries such as steel, tire rubber and automobile companies. Although the laser driven one is also expected to be applied for these applications, collaborative works of laser and neutron scientists and medical and industrial sites should be necessary.

Key Words: Compact neutron source, Neutron resonance absorption imaging, BNCT, Steel industry, Industrial application

1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)が本格的に稼働を始め、中性子産業利用推進協議会の先駆的活動等により、産業界による中性子利用が大きく広がっている。一方、J-PARCや大型原子炉を用いなくても、回折実験や中性子イメージングなどは小型中性子源でも必要な情報が得られることは、東北大学核理研LINAC、北大LINACあるいは京大原子炉などで示されていた。しかし、理化学研究所において開発された理研小型中性子源システム(RANS)は小型中性子源が、産業界にとって使い勝手の良い解析手段の一つとなることを再認識させた。また、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)などの医療分野への応用の可能性も小型発生源利用で、その実現性が期待出来る状況となっている。

レーザー駆動も小型加速器とともに、産学の区別なく材料分析あるいは医療のための中性子発生源として期待されている。さらに、レーザー駆動では発生源が小さくでき中性パルス幅が狭い特徴を有する。これらの特徴を活かし、他の中性子源にはないレーザー駆動ならではの利用の可能性を示唆する結果もJ-PARCや北大加速器で得られている。

2. レーザー駆動独自の特徴を活かした応用 ～共鳴吸収イメージング～

中性子の透過像による構造物の内部を観測する手法は材料の欠陥観察や機械部品の設計に広く活用されている。加速器等を駆動源とする小型中性子の開発が望まれており、理化学研究所において開発された理研小型中性

子源システム(RANS)¹⁾が注目されている。RANSで実施されている中性子イメージングによる社会インフラ点検への応用²⁾については、本特集号にも紹介されているので本報での重複は避ける。また、インフラへの応用以外にも広く展開されている鉄鋼産業における応用³⁾については、本報4節で紹介したい。レーザーを駆動源とする小型中性子源はレーザースポットと同程度のポイントソースである特徴を活かすことにより、イメージング装置そのものの小型化あるいは高い空間分解能が実現する可能性を持つ。

レーザー駆動では中性子源のポイント化に加えて、パルス幅が非常に狭くできる。中性子と原子核との共鳴現象を飛行時間(T-O-F)法により観測する手法との組合せにより新たな展開が期待される。共鳴現象による中性子の吸収、共鳴吸収のエネルギーは原子核種固有であり核種の断面積と密度が吸収係数と定量的に関連付けられる。パルス中性子源を利用した中性子イメージングでは中性子共鳴分光法(Neutron Resonance Absorption Spectroscopy)⁴⁾との組合せによる共鳴吸収イメージング⁵⁾により、物質中の元素(原子核種)分布定量が可能となる。すなわち、Fig. 1(a)に示したように、パルス中性子の通り道に置かれた試料の中性子透過度を二次元中性子検出器で測定し、さらに中性子源から検出器までの飛行時間を分析することにより得られる共鳴吸収スペクトルから元素の種類と組成が求められることになる。この共鳴吸収に伴い発生する γ 線を検出するFig. 1(b)の即発 γ 型でも元素分布や組成を観察することが出来る。即発 γ 型で分布を得るためには中性子ビームを走査する必要がある。二次元検出器と中性子飛行時間分析の組合せによる透過型が効率的と言える。この吸収エネルギーは中性子反応断面積を収録した評価済核データライブラリJENDL-4⁶⁾を参照し求められる。

甲斐ら⁵⁾による0.01 mm厚のAuを10 mm厚のFeの中性子の透過率を比較した測定例をFig. 2に示す。通常の中性子ラジオグラフィに利用される100 meV以下の熱中性子に対し、0.01 mm厚のAuに対して厚さが千倍のFeの透過率が圧倒的に大きい。これは、Fe中のAuの検出は不可能に近いことを意味している。しかし、Auの共鳴吸収エネルギーの一つである4.9 eVでは0.01 mm厚のAuの透過率は10 mmのFeのそれより大きく、このエネルギーに注目して解析すればFe中のAuの分布が強調されて観

Fig. 2 Energy Dependence of Neutrons for Fe (10 mm¹) and Au (0.01 mm¹).⁵⁾

測できることを示している。水素を除いて大半の元素は共鳴を持つため、そのエネルギーを選ぶことにより元素の感度を高めた中性子イメージングが可能となる。主要な共鳴吸収エネルギーは本特集号冒頭に示してある。レーザー駆動で得られる点光源中性子を利用することにより特徴ある実験系の構築が期待される。

現在J-PARCのパルス中性子源を用い、1~30 eV程度の比較的高エネルギー領域の中性子を用いた予備実験が実施されており、約100 mm × 100 mm × 15 mmのLi-二次電池陽極の10²~10³ eVに共鳴吸収を持つMnやCoなどの二次元分布を約150 μ m程度の分解能で可視化できることが確認されている⁷⁾。さらに、本特集号冒頭の解説の図に示されているように、比較的高エネルギーに共鳴吸収を持つ元素が多くある。中性子減速材の影響が無い、あるいは少ない条件でレーザー駆動の点光源と短いパルス幅を活かした実験も視野に入れることができる。しかし、Fig. 2の例に示したように共鳴吸収は特徴的な吸収のほかに高エネルギー領域に多くの吸収を持つ。そのため、共存元素の存在とそれらの共鳴吸収スペクトルを考慮に入れた注意深い解析を必要とする。したがって、共鳴吸収に伴う γ 線の発生を検出する即発 γ 線型Neutron Resonance Capture Analysis (NRCA) も同時に実施し共存元素の同時検出ができることが望ましい実験系となる。また、高エネルギー中性子は飛行速度も速いため高時間分解能の測定系の開発が必須となる。中性子検出器周辺の γ 線遮蔽と併せて、非常に挑戦的な研究開発が今後必要となるであろう。

3. 小型中性子源に適した応用～BNCTガン治療～

ホウ素中性子補足療法(Boron Neutron Capture Therapy)はFig. 3に示したように、熱中性子に対して大きな反応断面積を持つホウ素(¹⁰B)を含有する化合物を予めガン細胞に集積させ、中性子との反応により生成する⁴He原子核(α 線)と⁷Li原子核によりガン細胞を破壊する手法であり、新しい放射線治療の一つとして期待されている。この手法ではガン細胞近傍の健全な細胞への放射線の影響を最小限に出来るため、脳腫瘍など従来の放射線治療では困難な部位の治療に適している。1936年にケンブ

Fig. 1 Conceptual diagram of (a) Neutron Resonance Transmission Imaging⁵⁾ and (b) Neutron Resonance Capture Imaging.

Fig. 3 Conceptual sketch of boron neutron capture therapy. (a) Incident epithermal neutrons are modified to thermal neutrons, and (b) The thermal neutrons are react with ^{10}B at the cancer cell.

リッジ大学のJ. Chadwick教授により提案された⁸⁾この手法は1950年代から本格的な検討⁹⁾が開始された。わが国でも同時期に東海村の実験用原子炉JRR-1を用いて検討された。しかし、中性子に伴う γ 線による影響や熱中性子の強度不足、ガン細胞に選択的に集積する薬剤などの課題のために満足できる治験が得られなかった。その後、1970年代以降腫瘍への集積度の高いホウ素化合物¹⁰⁾が発見され、さらに γ 線の少ない高品質で $6 \times 10^9 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 程度の熱中性子束の施設が京大原子炉(KUR)に整備されるなどにより著しく進展した。

治療に適した約20 meV程度のエネルギーの熱中性子は生体内の血液などの主要構成元素である水素による散乱のため、体内のガン細胞に到達する間に減衰するという課題があった。しかし、Fig. 3 に示したように、0.5 eVから40 keVの熱外中性子を照射することにより、皮膚からガン細胞までの生体物質が減速材の役割をするため標的細胞位置で十分な熱中性子量が得られることが明らかにされ、京大原子炉や日本原子力研究機構の実験用原子炉を用いて脳、皮膚、肺、肝臓などへの多くの治験が得られるようになった¹¹⁾。

ここまでは実験用原子炉での試みが中心であったが、ホウ素薬剤注入や患部への集積の確認のための陽電子放射断層撮影、Positron Emission Tomography (PET)あるいはその他医療設備の整備されている、中核病院内あるいはその近隣で薬事登録可能な医療機器として設置可能な小型中性子源が望まれていた。この要望に応えるため、陽電子加速器などとBNCTに最適な標的物質を組み合わせた設備の開発が京都大学原子炉研究所、住友重機工業、筑波大学¹²⁾などで行われた。京都大学原子炉研究所と住友重機工業との共同開発では、サイクロトロンにより30 MeV、1 mAに加速した高エネルギー陽子を5.5 mm厚のベリリウム標的に入射して得られた高エネルギー中性子を、アルミニウムとフッ化カルシウムを組合せた減速材によりFig. 4 に示したようなBNCTに適したエネルギー分布を持つ熱外中性子を発生させることに成功し

Fig. 4 Epithermal neutron energy distribution from the reactor (KUR) and an accelerator.¹²⁾

た¹²⁾。一方、筑波大学では線形陽子加速器を用い、比較的低い加速エネルギー(8 MeV)、高電流(平均 10 mA)の条件を選定し¹³⁾、茨城県東海村のいばらき中性子医療研究センターに設置された。

レーザー駆動もBNCTのための中性子として、コンパクトな中性子源の候補一つとして応用が期待される。放射線治療の場合、患部の詳細な位置や広がり等の確認後立てられる綿密な治療計画の基で照射が実施される。特に中性子の場合はほかの放射線と異なり、体内で複雑な反応による熱中性子へのエネルギー変化や γ 線の発生など単純には治療計画は決定できない。また、数回に分けて照射する γ 線治療と異なり、中性子照射は一回で完了することが多いため、放射線に影響を受けた周囲の健全な細胞の治療中の回復は期待できない。そのため、治療計画立案にあたってはモンテカルロ法を基本としたシミュレーションで照射条件を決定されている¹⁴⁾。そのシミュレーションに必要な発生源での熱外中性子のエネルギー分布と強度の正確なデータと通常1時間程度の照射時間内の安定性と再現性が、他の用途以上に厳しく要求される。これらの要求を満足した十分な強度の熱外中性子源のための研究開発が必要である。

4. 中性子産業利用の現状と小型中性子源への期待

理化学研究所における小型中性子の開発と産業界との積極的な共同研究、北海道大学加速器中性子源、京都大学の関西原子炉における特徴ある研究開発は、中性子の一部専門家による特殊な解析手段から、汎用解析装置として認識されるようになってきている。しかし、X線などと比較した場合、中性子はそのビーム強度は低いいため本格的な構造解析や本質的解析のためには大型施設に頼らざるを得ないことも否定できない。産業利用においては種々の課題の本質的解析と理解ばかりではなく、現実の生産工程や材料特性との関連づけのため、迅速な分析が必要になることが多い。そのため、大型施設と小回りの利く小型施設の適切な使い分けが必要である。このような観点から、早くから中性子の利用を積極的に研究開発に取り入れてきている鉄鋼分野での取り組みから、

小型施設の利用の可能性を、またJ-PARC等の大型施設における産業利用の具体的成果から大型施設と小型施設との相補利用の必要性について議論する。

4.1 鉄鋼分野における中性子利用

世界の鉄鋼生産量は中国を除いてほぼ横ばいであるが、我国の鉄鋼メーカーからは着実な研究開発と品質管理により高品質なオンリーワン商品が、供給されている¹⁵⁾。鉄鋼協会では中性子利用に関する産学官プロジェクト「中性子利用鉄鋼評価技術の基礎検討に係る研究」(2006～2008年度)をはじめ、「小型中性子源ブラッグエッジイメージングによる結晶相体積分率の高精度トモグラフィ評価・分析・解析」(2018年度)、「パルス中性子を用いたマイクロ組織の定量評価およびイメージング技術の開発」(2017年度)、「中性子線による高温オーステナイト組織の動的微細組織変化のその場観察」(2016年度)など若手研究者への研究助成、さらに「新世代中性子源を利用した鉄鋼元素機能分析」(2009～2012年度)や「小型中性子源による鉄鋼組織解析法」(2014～2016年度)などの研究会を通して中性子利用を積極的に取り入れ、多くの成果を挙げている。

鉄にわずか(0.8 wt%以下)の炭素が固溶した鉄鋼には低温相であるフェライトと高温相のオーステナイトが存在する。高温で安定なオーステナイト相が冷却過程でフェライト相に変態する際に炭化物などのナノメートルサイズの粒子を析出させることにより、高強度かつ加工性も確保された鉄鋼材料が製造されている¹⁵⁾。このように、鉄鋼材料は複数の相で構成され、その相の割合や大きさ組織などを熱処理や加工などにより、最終製品の特性が制御される。そのため、原子レベルでの結晶構造と欠陥、数nmレベルの析出物、数 μm の結晶粒や相構成といった組織の階層構造を総合的に観察・解析する必要がある。構造解析の空間分解能の観点からは電子線やX線が優れているが、それらは表面近傍あるいは薄膜の情報に限られている。電子線は数十nm、実験室のX線では数十 μm 、高エネルギーX線でもサブmm程度であるのに対して、熱中性子はFig.5に示したように数cmの厚さの試料の観察が可能である¹⁶⁾。中性子観察なしでX線や電子顕微鏡での観察のみでは、“木を見て

Fig. 5 Decay curve for High Energy X-ray and Neutron.¹⁶⁾

森を見ず”となってしまう、生産工程の管理や商品の品質や特性に間違った情報を提供してしまう危険を伴う¹⁶⁾。鉄鋼材料の中性子を利用した解析では、加工や熱処理による材料の残留応力¹⁷⁾、試料中の結晶方位分布を解析手えられる極点図¹⁸⁾、塗膜下の鋼材の腐食挙動のイメージング観察¹⁹⁾、パルス中性子イメージング装置におけるブラッグエッジ法による相分布、残留応力分布および結晶粒形分布解析²⁰⁾、さらに小角散乱法による析出物の大きさや形状分布の解析^{21,22)}、転位などの格子欠陥評価²³⁾などの成果が報告されている。

これらの成果のうち、残留応力、イメージング、小角散乱は小型中性子源(理研-RANS等)で測定、解析が可能であることが確認されている。中性子小角散乱では自動車産業や土木建築分野における革新的材料である高張力鋼(ハイテン)²⁴⁾の開発に重要な情報が提供された²²⁾。フェライト相とオーステナイト相の微細組織により制御されていた鉄鋼材料に、Ti(-Mo)Cのnmサイズの析出物をその粒形や母相中での分散構造を巧妙な熱処理技術で制御し、さらにその析出過程で実施される加工技術により、複雑な形状への加工を実現したNANOハイテン[®]が開発された¹⁵⁾。nmサイズの析出物はX線小角散乱や電子顕微鏡観察でも解析であるが、材料全体の平均構造把握のためには中性子による解析は不可欠であった。Ti添加炭素鋼(0.045%C-1.8%Mn-0.2%Ti-0.004%N-0.003%S)の1250℃処理後の冷却過程での一定温度での5時間の保持温度の上昇(550℃-650℃)に伴い、板状TiC析出物の厚さは約1nmから2nmに、大きさが4nm-8nmに変化することが中性子小角散乱で確認された²⁴⁾。鋼材の引張強度は析出物の大きさとFig.6に示したような相関関係があることが確認され、より微細な析出物の実現によるさらに高強度の1180 Pa級NANOハイテン[®]の開発につながっている¹⁵⁾。この実験は実験用原子炉JRR-3の小角散乱装置を用い15mm×15mm×2mmの試料に10mm Φ の

Fig. 6 Schematic diagram of a Relation between Carbide precipitates Size and Tensile Strength.²²⁾

中性子ビームを用いて実施²²⁾されたが、北海道大学の小型中性子源を用いても6時間程度で将来的には1時間程度で、同等の実験が可能であると試算されている²⁵⁾。

鉄鋼材料では複雑な熱処理による相分離や析出の制御により優れた特性を持つ材料が製造されている。このような処理過程での構造や組織の変化や残留応力を時分割することも試みられている²⁶⁾。このような解析には高強度パルス中性子源が必要である。低合金(2 Mn - 0.2 C)鋼の冷却過程での変態の様子を高エネルギー加速器研究所の5 kWのパルス中性子源ではステップ的な加熱・冷却により1時間毎に得られた粉末回折プロファイルにより解析された²⁶⁾が、500 kWのJ-PARCのパルス中性子源を用いれば1分毎の測定で十分なデータが得られることが確認されている²⁶⁾。これらの結果は、大型施設での実験のための準備あるいは予備実験に小型中性子源の活用が有効であることも示唆している。

4.2 大型施設との連携利用

J-PARCの中性子施設が2008年末から共用運転を実施し、当初は茨城県が建設運営を担当した茨城県材料構造解析装置(iMATERIA)が積極的に産業利用課題を受け入れ、前節の鉄鋼分野や電池材料などで成果が得られた。震災復興後から2016年にかけてエネルギー分析型中性子イメージング装置(RADEN)などの他の装置の整備が進められ、多くの産業利用課題が実施された。2012年度から運用を始めた共用ビームラインにおいても、産業利用課題が実施された。共用ビームラインには非弾性散乱、準弾性散乱、高圧下回折、小角散乱、単結晶解析、反射率、イメージングの装置が準備され、2012~2016年度の間に、Fig. 7に示したように自動車や電池などのエネルギー関連産業からの課題に加え、タイヤゴム、樹脂、化粧品、食品関連などの有機系素材に関連する課題が増加

Fig. 7 Industrial Use of Neutron Public Beam Line at J-PARC.

の傾向を示している。nmスケールの構造に着目した小角散乱の結果を踏まえた非弾性や準弾性散乱、反射率測定が実施されている例が多い。

住友ゴム工業(株)における低燃費タイヤの開発においては、Spring-8におけるX線小角散乱²⁷⁾や大型コンピューター「京」によるシミュレーション、J-PARCの中性子による小角散乱²⁷⁾、準弾性散乱²⁸⁾、反射率などの実験を有効に活用し、大幅に燃費が改善された自動車用タイヤが開発された^{11,12)}。このような研究開発における解析や観測の多くは大型施設の高強度中性子源により実現されたものが多い。しかし、その過程においてシミュレーションとの比較検討の際や大型施設の有効な実験計画立案のための小角散乱や反射率実験が機動的に実施可能な小型中性子源の必要性が改めて認識されている。

5. 結 言

小型中性子源あるいはレーザー駆動中性子源独自の産業、医療分野への応用の可能性について展望した。しかし、これらは“これまでのレーザー駆動中性子の予備実験結果や他の中性子源の成果をもとに、さらに計測器や中性子源としての挑戦的な研究開発が成功したら”という、未だ“たら～れば”の期待の上では幅広い産業応用が広がるであろうという希望的観測の域を出ていない。今後、レーザー科学と中性子科学との連携ばかりではなく、ユーザである材料科学や産業界との連携の下に、対象を絞った装置の研究開発の開始が必要であろう。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、甲斐 哲也(日本原子力研究機構)、大竹 淑恵(理化学研究所)、鬼柳 善明(名古屋大学)各氏からの情報と示唆助言は不可欠であった。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 大竹 淑恵, 山田 雅子, 竹谷 篤, 須長 秀行, 中山 武典: ISOTOPE NEWS **722** (2014) 8.
- 2) 大竹 淑恵, 須長 秀行: JACIC情報 **110** (2014) 62.
- 3) 山田 雅子, 大竹 淑恵, 竹谷 篤, 須長 秀行, 山形 豊, 若林 琢巳, 河野 研二, 中山 武典: 鉄と鋼 **100** (2014) 429.
- 4) K. Kaneko, T. Kamiyama, Y. Kiyonagi, T. Sakuma, and S. Ikeda: J. Phys. Chem. Solids **60** (1999) 1499.
- 5) 甲斐 哲也: Isotope News **727** (2014) 16.
- 6) K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, et al.: J. Nucl. Sci. Technol. **48** (2011) 1.
- 7) T. Kai, K. Hara, Y. Matsumoto, J. Parker, K. Hiroi, M. Segawa, T. Shinohara, H. Hayashida, S. Zhang, K. Oikawa, et al.: 7th Workshop of NEUTRON Wavelength-dependent imaging (NEU-WAVE-7) (Mito Japan, 2015) (Oral presentation).
- 8) J. Chadwick: Proc. Royal Society of London, A. **136** (1932) 692.
- 9) L. E. Farr, J. S. Robertson, and I. Stick: Proc. National Academy of Sciences of the USA **40** (1954) 1087.
- 10) K. Ishiwata, T. Ido, M. Kawamura, K. Kubota, M. Ichihashi, and Y.

^{†1}住友ゴム工業(株) 他: Spring-8 ホームページ (2015): http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2015/151112/

^{†2}住友ゴム工業(株) 他: J-PARC ホームページ (2015): <https://www.j-parc.jp/ja/topics/2015/Press151112.html>

- Mishima: Int J. Rad. Appl. Instrum. B **18** (1991) 745.
- 11) T. Aihara, N. Morita, N. Kamitani, H. Kumada, K. Ono, J. Hiratsuka, and T. Harada: App. Radiation and Isotopes **88** (2014) 12.
 - 12) 田中 浩基: Radioisotopes **64** (2015) 29.
 - 13) H. Kumada, A. Matsumur, H. Sakurai, T. Sakae, M. Yoshioka, H. Kobayashi, H. Matsumoto, Y. Kiyanagi, T. Shibata, H. Nakashima, *et al.*: Appl. Rad. Isotopes **88** (2014) 211.
 - 14) 熊田 博明: Radioisotopes **64** (2015) 37.
 - 15) 佐藤 馨, 村上 琢哉: NanotechJapan Bulletin **7** (2014) 1.
 - 16) 友田 陽: まてりあ **56** (2017) 14.
 - 17) Y. Tomota, S. Daikuhara, S. Nagayama, M. Sugawara, N. Ozawa, Y. Adachi, S. Harjo, and S. Hattori: Metall. Mater. Trans. A **45** (2014) 6103.
 - 18) T. Tomida, M. Wakita, M. Yasuyama, S. Sugaya, Y. Tomota, and S. C. Vogel: Acta Mater. **61** (2013) 2828.
 - 19) 山田 雅子, 大竹 淑恵, 竹谷 篤, 須長 秀行, 山形 豊, 若林 琢巳, 河野 研二, 中山 武典: 鉄と鋼 **100** (2014) 429.
 - 20) Y. H. Su, K. Oikawa, S. Harjo, T. Shinohara, T. Kai, M. Harada, K. Hiroi, S. Zhang, J. D. Parker, H. Sato, *et al.*: Mater. Sci. Eng. A **675** (2016) 19.
 - 21) Y. H. Su, S. Morooka, M. Ohnuma, J. Suzuki, and Y. Tomota: Metall. Mater. Trans. A **46** (2015) 1731.
 - 22) 安原 久雄, 佐藤 馨, 田路 勇樹, 大沼 正人, 鈴木 淳市, 友田 陽: 鉄と鋼 **96** (2010) 545.
 - 23) S. Harjo, T. Kawasaki, W. Gong, I. Aizawa, Y. Tomota, and Z. Shi: CAMP-ISIJ (Current Advances in Materials and Processes-The Iron and Steel Institute of Japan) **28** (2015) 264.
 - 24) 船川 義正, 藤田 毅, 山田 克美: JFE技報 **30** (2012) 1.
 - 25) 大沼 正人, 佐藤 馨: 精密工学会誌 **79** (2013) 326.
 - 26) 友田 陽: まてりあ **56** (2017) 70.
 - 27) R. Mashita, H. Kishimoto, R. Inoue, and T. Kanaya: Polymer Journal **45** (2012) 57.
 - 28) R. Mashita, R. Inoue, T. Tominaga, K. Shibata, H. Kishimoto, and T. Kanaya: Soft Matter **13** (2017) 7862.