

CONTENTS

P1 巻頭言 P2 日本刀の量子ビームを用いた研究 P6 水素液化用磁気冷凍物質 HoB_2 の巨大磁気熱量効果と磁気構造 P8 中性子反射率測定用調温調湿システムの開発と展開 P9 ISSE2022
P10 MuSR2020 P11 日本中性子学会第22回年会/令和4年度中性子イメージング研究会 P12 第26回CROSSroads Workshop P13 J-PARC MLF情報/研究会・講習会 P14 お知らせ

ミューオン科学の将来

高エネルギー加速器科学研究機構
物質構造科学研究所・ミューオン科学研究系・研究主幹
下村浩一郎

本季報の読者の多くの方々には初めてご挨拶申し上げます。J-PARC MLFで中性子施設の隣に設置されています、ミューオン施設の下村と申します。さて本来なら、読者のみなさまにミューオン施設を紹介し、次いで現施設での産業利用研究例などを述べさせていただくのが筋なのかもしれません。しかしながら、幸いなことにここ2～3年、中性子産業利用報告会等でミューオンを用いた研究例が定期的に紹介される状況となっています。また本季報の44号では、現日本中間子学会会長の久保さんが、負ミューオン利用研究の魅力について簡潔に語っていらっしゃいます。そこでここでは未来の話、あるいはミューオン科学を推進している研究者たちが現在夢見ていることを、いくつか紹介したいと思います。これらは2022年11月9日～11日に行われた「中間子科学の将来検討会」によっています。関係者に感謝します。なお本検討会は日本学術会議の「未来の学術振興構想」に応募するために開催されました。

夢の壱 もっと低速でもっと高輝度のミューオンビームがほしい。

通常のミューオンビームは、大強度の陽子ビームを炭素標的に照射することによって原子核反応で発生するものをそのまま利用します。このためエネルギーが高くビームサイズも直径数センチメートルとなり、微小な試料あるいは材料の表面付近の情報を得ることは困難です。我々の施設ではこの問題を解決するため、ナノメートルの深さに止めることのできる超低速ミューオンビームを開発してきました。ようやくビームも安定し、2023年の1月から本格的なミューオンスピン回転測定が始まろうとし

ています。この超低速ミューオンビームを再加速して透過能を上げることにより、生きたままの細胞を観察できる「透過型ミューオン顕微鏡」も実現します。

夢の弐 もっと大強度のミューオンビームがほしい。

現状のJ-PARCではすでに世界最高強度のパルスミューオンビームが得られています。MLF第2標的ステーションが実現すれば、さらに2桁大強度のミューオンビームが得られます。前の項で述べた高輝度ビームを用いて、多くの反応過程や生命現象などの様々なダイナミクスをリアルタイムで追っていくことが可能になるでしょう。

加えて核消滅処理やミューオンを触媒とした核融合などの基礎的な研究も継続されています。これらの実用化を目指して、従来の強度を6～7桁上回るミューオン源も構想されており、将来が楽しみです。

夢の参 どこでも使えるミューオンビームがほしい。

みなさまもどこかで宇宙線ミューオンを用いた、火山やピラミッド、原子炉などの透視技術をお聞きになったことがあると思います。もし可搬型のミューオン源ができればこのような透視技術を様々な社会インフラの安心安全分野に適用することが可能となります。30年後に、船やトラックにこのような可搬型ミューオン源が積み込まれて、社会の様々な場面で活躍する様子を想像することは研究者冥利に尽きます。

以上ほら話にもみえるような夢を書き綴りましたが、30年前にはほら話だったことがいま次々と実現するのを見るにつけ、努力を続ければこれらの夢も実現するのではないかとも思います。みまさまにもミューオン科学の進展を暖かく見守っていただければと願っています。言うまでもありませんが、現有施設での研究を進めていただくことは引き続き大歓迎です。

北海道大学名誉教授
鬼柳 善明

1. はじめに

日本刀は、おおよそ1100年の歴史を持った日本の優れた鉄鋼製品であるとともに文化財である。刀表面だけでも色々な表情があり、その独特の魅力は多くの人を惹きつけている。それだけではなく、折れず、曲らず、良く切れると言われるように、刀としての性能も優れている。しかし、使われている鉄がどのようになっているか、内部の構造がどうなっているか、どのように製作されたかなどについては、口伝であったためもあり、はっきりと分かっていないことがいまだにある。

日本刀の金属学的特性は、個々の日本刀の特性を調べる上で重要であるとともに、日本刀の製造過程を考察する上でも有用と考えられる。日本刀内部の研究は、長い間、破断片を観察するという方法を用いて行われ、鉄の組成、介在物、炭素量分布などが調べられてきた[1-3]。しかし、破断測定では貴重な刀剣を破損することになり、多くの刀剣を調べることはできない。日本刀をはじめ、貴重な文化財を調べるためには非破壊測定が強く望まれる。中性子は透過力が強いので、センチメートルオーダーの鉄を透過して結晶組織構造を調べることができる。そのため、日本刀の研究にも中性子回折が使用されてきた[4-7]。中性子回折では、ポイント・ポイントの結晶組織構造解析を詳細に調べることができるが、広い面積を調べるのにはあまり向かない。一方、パルス中性子を用いたブラッグエッジ透過法では、広い面積に渡って一度にデータが得られるので[8]、日本刀のように結晶組織構造が場所によって変化するものに対しては有力な方法である。その特徴を生かして、日本刀の研究が行われており[9-14]、今も継続中である。この解説では、日本刀の概要、測定手法の概要、ブラッグエッジ透過法による結果にミュオンによる結果も加えて備前刀の研究の一例を報告する。

2. 日本刀について

古代には直刀と言われる反りのない真っ直ぐな刀が作られた。聖徳太子の肖像画に見られるような刀である。これは上古刀と言われ平安中期(900年頃)までその製作が続いた。その後、武士の台頭に伴い、馬上で

の戦いに向けた反りのついた刀(湾刀^{わんとう})が作られるようになった。刃を下向きにして腰から下げるように佩くもので、これを太刀と言う。さらに、徒^{かち}による戦闘になると、同じ反りがある刀でも刃を上に向けて帯に差すようになる。これを刀(打刀)と言う。室町時代中期以降に見られる差し方である。太刀と刀は銘を入れる場所に一般に違いがあるが、必ずしもその通りになっているわけではないので厳密には区別が難しい所がある。さらに、日本刀の時代区分があり、平安中期から慶長(1596年)になるまでに作られた刀を古刀という。この時期は地域毎に鋼が作られていたと考えられている。この古刀の時代に、大和(奈良県)、山城(京都府)、備前(岡山県)、相州(神奈川県)、美濃(岐阜県)に五箇伝と呼ばれる刀剣の主要生産地ができた。日本の歴史の展開と軌を一にして発展してきたことが分かる。その後、1763年までに製作された刀を新刀と言う。この時代には全国的に均一な鋼が流通するようになった。また、鎖国のために外国からの鉄の輸入が途絶えたという変化もあった。1781年からの刀を新々刀と言ひ、古刀への復帰の動きが見られた。この時代が1876年の廃刀令まで続く。廃刀令以降の日本刀を現代刀と呼び、現在まで続いている。日本刀と呼ばれる刀は狭義の定義では彎刀以降の刀を言う。その歴史のなかでも、古刀の時代が最も長く約700年、新刀約170年、新々刀約100年となっている。

日本刀の作り方は、おおまかに以下のようになっている[15, 16]。それを図1に示す。

- (1)ヘシ鉄：たたら製鉄で作った玉鋼((a)参照)を砕いて、割れやすい炭素の多い鉄と割れにくい炭素の少ない鉄を分ける。これをヘシ鉄と呼ぶ。
- (2)積み沸かし：ヘシ鉄を図1(b)のように梃子棒先端に10数層積み、それを高温圧着して一塊にして日本刀素材の原型を作る。
- (3)折り返し鍛錬：この塊を加熱・高温圧着・打ち伸ばし・半分に折り返すという行程を繰り返す(図1(c))。
- (4)素延べ：刀の仕上がり寸法になるように日本刀の形に打ち延ばしていく(図1(d))。
- (5)火造り：断面が細長い六角形である日本刀独特の形状に打ち出していく(図1(e))。その後、センと呼ばれるカンナで表面のスケールを削る。
- (6)焼入れ：刀に土置きをし、乾燥後、高温まで加熱してから水につけて急冷し、刃に焼入を施す。図1(f)

に示すように、急冷前(1)は真っ直ぐだった刀が、この時に反りがはいる(2)。また、土の置き方で刀の波紋が変わる。

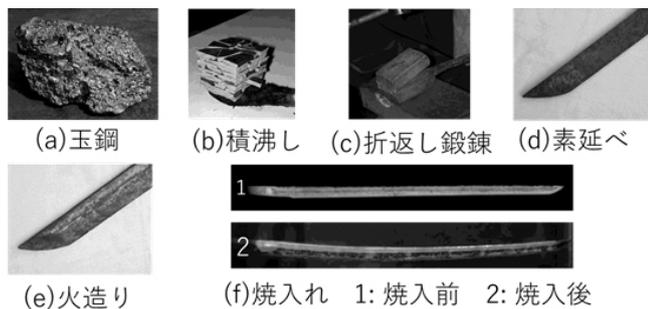


図1. 日本刀の製造過程概略 [15]

この後、焼き鈍し熱処理や反り調整を行い、鍛冶研ぎをして銘をいれる。一方、日本刀の作り方には、図2に示すように、炭素量が適度に高い硬い鉄だけで作る無垢鍛えと、炭素量が少ない柔らかい鉄と炭素量の多い硬い鉄を層状に重ねて作るものがある。中心に軟い鉄を心鉄(灰色)として使い、外側に硬い鉄(茶系色)を皮鉄として用いている甲伏せと本三枚の例を示す。このような造込みがどうなっているかを知ることも製造方法を明らかにするために重要である。

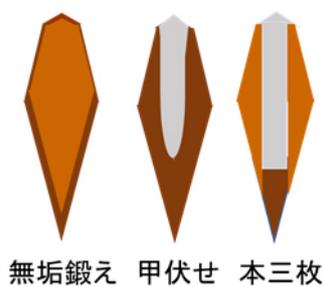


図2. 造込みの例 [19]

3. 日本刀研究のための非破壊測定法

素材鉄の成分は鋼の特徴を知る上で重要であるが [4]、非破壊で成分分析を行うのは困難である。一方、日本刀内部の介在物、結晶組織構造も刀剣類の特性や製法を考える上で重要な情報であり、これらの情報は非破壊で測定できる。介在物測定にはX線と中性子線を使うことができる。特に、放射光の高エネルギーX線を用いた高位置分解能測定では数 μm の空間分解能で測定が可能であり、非常に小さな介在物の存在まで明らかにできる [17]。但し、このような高位置分解能測定では、一般に視野が狭いため、全体の情報を得るためには、多くの測定回数が必要となる。一方、中性子では、通常数 $10\mu\text{m}$ より大きな空間分解能であるが大きな面積の測定が可能である。中性子透過測定は、X線のような高エネルギーではなく、回折が起きるエネルギー領域で行うため、X線とは異なった情報が得

られることがある。図3はX線と中性子による透過画像の例を示したものである [18]。中性子は焼入部に対応する波紋が見えている。これは肉眼では見えていなかったものであり、X線透過画像にも表れていない。また、CTを行うことによって、内部の構造についてより詳しい情報が得られる。

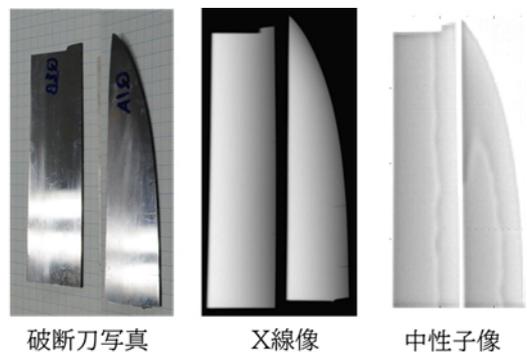


図3. X線と中性子線の透過像 [18]

日本刀内部の結晶構造測定については、透過力が強い中性子がX線と比べて圧倒的に有利である。そのため、中性子回折を用いた測定がこれまでは主流であった。測定範囲は比較的狭いポイントになるが、結晶子サイズ、歪み(残留応力)、炭素量、配向などの情報が得られている。一方、パルス中性子の特性を利用したブラッグエッジ透過法は、透過方向の平均にはなるが、結晶組織構造情報を広い面積で一度に測定できるという特長を持つ。日本刀のような鉄の性状の位置依存性があるようなものの測定に向いている。その測定原理を図4に示す [19]。J-PARC MLFのようなパルス中性子源で発生された中性子(図中 I_0 で示されているスペクトル)が試料を透過した場合、試料の結晶組織構造に依存した中性子波長依存の透過スペクトル(I)が得られる。それから透過率 I/I_0 を求めるが、その例を刃側と中央部分の2つについて示した。結晶のブラッグの式 $\lambda=2d_{hkl}$ に対応する波長で透過率のジャンプが起きる。これをブラッグエッジと呼ぶ。このエッジの位

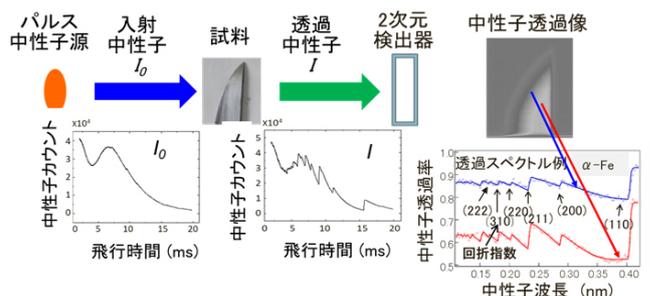


図4. ブラッグエッジ透過法の原理 [19]

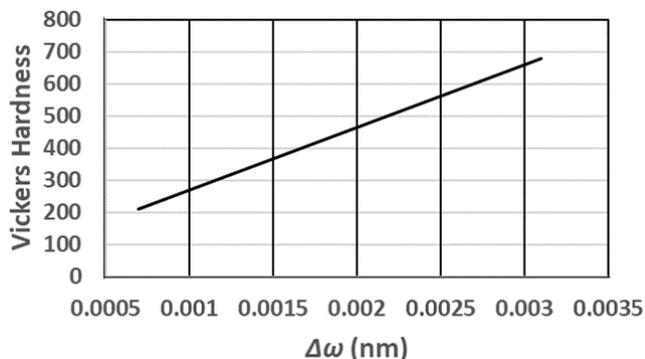


図5. ブラッグエッジの広がり $\Delta\omega$ とビッカース硬さの関係 [20]

置で面間隔の、また、そのずれで歪みの情報がえられる。エッジ強度は結晶子サイズに依存し、結晶子サイズが大きくなると透過率が大きくなっていく。また、エッジの形は配向によって変化し、図4の透過率で中央部のもの(赤)は刃側のもの(青)と比べて丸みを帯びており、配向が強いことを示している。さらに、焼入部ではマルテンサイト変態によって、ブラッグエッジの傾きが緩やかになるという現象がある。これによるブラッグエッジの広がり $\Delta\omega$ とビッカース硬さ H_v との間には図5に示すような線形関係があることが分かっている [20]。このようなブラッグエッジの変化を、RITS コードを用いて解析して種々の結晶情報の定量値を得る [8]。

一方、最近、大阪大学の二宮先生、国際基督教大学の久保先生達が、負ミュオンの寿命が、炭素の方が鉄より大幅に長いという性質を利用して、鉄中の炭素濃度を測定するという方法を開発した。中性子回折ではセメントタイトの存在量で炭素濃度を調べることができるが、ミュオンの方法は炭素の存在形態によらない。また、ミュオンの運動量を変えることによって測定深さを調整できるという長所もある [19]。

4. 日本刀解析結果

日本刀の測定でどのような情報が得られるかを、これまで色々な測定を行ってきた室町期の備前刀を例にして紹介する。銘は備州長船則光である。

則光の写真を図6に示す。刃渡りは45.4cmで脇差しと呼ばれる短い刀である。柄にあたる部分を茎(なかご)、茎と刀身の境で刃側を刃区(はまち)、棟(峰)側を棟区(むねまち)と言う。また、図2の造りの断面で一番厚くなっているところを鎧(しのぎ)と言う。四角の枠は測定した部位を示す。この検出器の視野は10cm角であった。



図6. 日本刀備州長船則光 [9]

図7に透過像、結晶子サイズ、結晶配向の分布を示す。(a)は透過画像で、厚い所ほど濃くなるので、棟から鎧にかけて厚くなっていること、刃先付近では鎧部分が特にはっきりしていることが分かる。全体にムラがない厚さ分布となっている。(b)は結晶子サイズの分布である。この刀の結晶子サイズは棟側が大きく、刃側に向かうと小さくなる傾向があった。これまで測定した備前刀でも似たような傾向が見られた。しかし、刀によって結晶子サイズ分布は異なっており、刀全体が比較的小さな結晶サイズになっているものもあった。結晶子サイズは炭素量が小さいと大きくなるという報告があり [3]、備前刀では棟側が炭素量の少ない鉄でできている可能性がある。(c)は結晶配向の様子を示す。1が等方的で、それから離れるほど異方性が強くなる。棟側で配向が強くなり、中央部分で等方的な部分が表れ、刃側でまた非等方性が少し強まる傾向が見られる。茎では等方的な領域が多い。このように、非等方性についても場所によって異なった傾向を持っている。非等方性は鍛造や熱処理によって変化する。鍛造が強い場合、配向が強くなることも考えられるので、この刀は棟側の鍛造が強かった可能性がある。これまで測定した他の刀も程度の違いはあるが、棟側の配向が強い傾向が見られている。しかし、この点の解釈についてはさらに検討が必要である。

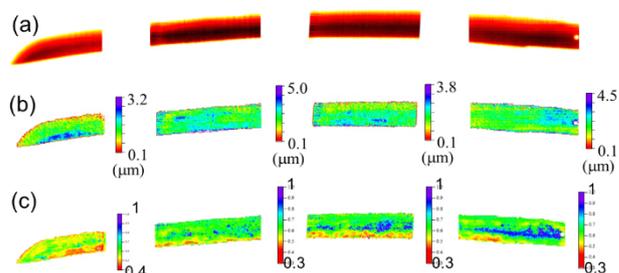


図7. ブラッグエッジ透過データ [9]
(a)透過強度分布、(b)結晶子サイズ、
(c)結晶配向

次に、刃側の焼入について見てみる。焼入によってマルテンサイトができ、結晶面間隔が変化しc軸が延びる。そのため、ブラッグエッジで測定した面間隔も大きくなる。また、先に述べたようにエッジ幅が広

がって見える。その結果を図8に示す[14]。高位置分解能の測定ができる検出器を用いたので、これまでのデータと異なった視野、1インチ直径となっている。上図が結晶面間隔、下図がエッジ幅から求めたビッカース硬さである。刃先から焼入が入っており、刃区で少し幅が狭くなっていることが両方のデータから分かる。茎では無くなっている。ビッカース硬さは、おおよそ700-800位であり、これまで知られている刀と同程度の硬さになっている。これらの結果から、この刀は焼入がきちんと入っていることが分かる。

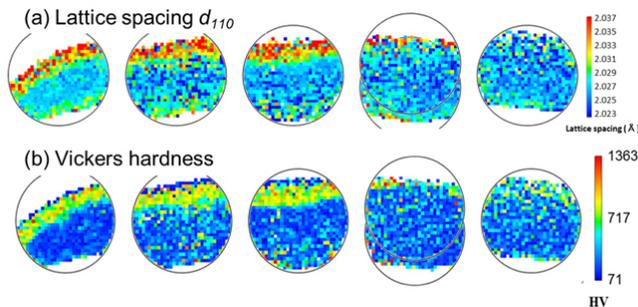


図8. 焼入の状態
(a) 格子面間隔分布、
(b) ビッカース硬さ分布 [14]

中性子透過画像による介在物の存在についても見てみた[9]。このデータはブラッグエッジ透過法で得られたデータを積分することによって得られる。この測定の空間分解能は55 μ mである。図9は左から刃先部分、中央部分、茎に近い部分の透過像である。刃先と茎に近い部分は均一な分布になっているが、中央部分には中に黒点が見られる。これは、粗大粒の存在を示すものである。ブラッグエッジスペクトルと合わせて見ると、対応する領域のスペクトルは小さなディップが多数発生しており、単結晶的な鉄の粒子がある向きを持って存在していることが分かった。

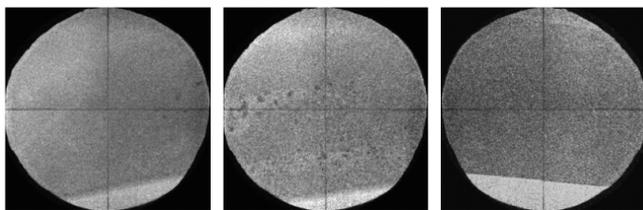


図9. 刀身中の介在物 左から、刃先部分、中央部分、茎に近い部分 [9]

また、この刀の刃先の部分には、図10の左側の図に示すように、透過率が高い白い部分が見られた[9, 18, 19]。これは鉄が鍛接された所に、たまたまでき

た空隙であることが分かった。このことは、心鉄と皮鉄が、このあたりで鍛接されていることを示唆している。それを明らかにするために、ミュオンを使って鉄の炭素量を測定してみた[19]。おおよそ鎬のあたりに

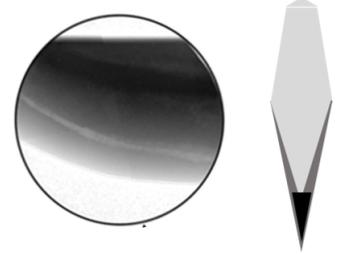


図10. 刃先の透過像(左)と造込み(右) [18]

よそ鎬のあたりにビームが当たるようにした。その結果、炭素濃度は、ミュオンの運動量40MeV/c (侵入深さ約0.75mm)で0.10%、50MeV/c (約1.6mm)で0.057%となった。皮金の濃度は破壊測定で0.7%位の値が得られており、測定部位は心鉄であると考えられる。従って、この刀の造りは甲伏せに近いが、それほど深く皮鉄が被さっていない構造をしているのではないかと想像される [18, 19]

5. まとめ

ブラッグエッジ透過法、CTなどを利用して、これまで、10本近い刀や槍などを測定してきた。結晶組織構造が異なっているもの、造込みが違うと思われるものなどがあり、測定してみなければ分からないことが多い。新たな結果が、実験データの解釈を深めるのにも役だっている。色々な時代、地域の特徴を明らかにしていくために、今後も、系統的な測定を進め、それぞれの刀剣類の金属学的特性の歴史の変遷を明らかにするために研究を進めて行きたい。そのためには、新しい刀剣類の確保がさらに重要となってくる。

謝辞

日本刀の結果に関する記述は、名古屋大学(現金属技研)の塩田佳徳氏、北海道大学(現JAEA)の長谷美宏幸氏とともに行った研究に加え、現在、日本刀研究を一緒に行っている、JAEA/J-PARCの及川健一氏、S. Harjo氏、篠原武尚氏、甲斐哲也氏、CROSSの松本吉弘氏、九大の渡辺賢一氏、北大の佐藤博隆氏、島根大の大庭卓也氏、森戸茂一氏、P. H. Anh氏、元同大特任教授の伊藤正和氏、熊本大の峯洋二氏の皆様との議論を元にして頂いている。貴重な議論を頂いたことに対して謝意を表します。破断刀を提供頂いた瑞泉鍛刀所佐々木刀匠、則光を提供頂いた元名大(現KEK)の広田氏に感謝します。また、中性子実験はJ-PARC MLF実験課題2014P0601、ミュオン実験は2020B0330で実施されたものです。

参考文献

- [1] 俵國一、日本刀の科学的研究（日立評論社）（1953）。
- [2] 高橋恒夫、村上雄、岡田千里、藤井則久、鉄と鋼、71, 1818 (1985)。
- [3] 北田正弘、室町期日本刀の微細構造（内田老鶴圃）（2008）。
- [4] F. Grazzi, et al., *Microchem. J.*, **125**, 273 (2016)。
- [5] F. Salvemini, et al., *Mater. Res. Proc.* **2**, 443 (2016)。
- [6] S. Harjo, et al., *Materialia*, **7**, (2019) 100377。
- [7] K. Oikawa et al., *JPS Conf. Proc.* **33**, 011062 (2021). DOI: 10.7566/JPSCP. 33. 011062。
- [8] H. Sato, et al., *Mater. Trans.* **52**, 1294 (2011)。
- [9] Y. Shiota, et al, *Phys. Procedia*, **88**, 128 (2017)。
- [10] K. Oikawa, et al., *Mater. Res. Proc.*, **15**, 207 (2020)。
- [11] H. Sato, et al., *ibid.*, **15**, 214 (2020)。
- [12] Y. Matsumoto, et al., *ibid.*, **15**, 221 (2020)。
- [13] K. Ohmae, et al., *ibid.*, **15**, 227 (2020)。
- [14] Y. Kiyonagi, *Handbook of Cultural Heritage Analysis*, Chap. 14 (Springer Nature Switzerland AG, 2022)。
- [15] 佐々木直彦(刀匠銘：胤成)、平成20年度室蘭工業大学博士論文「伝統的鍛錬工程における日本刀素材の炭素量変化とそのメカニズム」
- [16] 佐々木直彦、材料学会誌「材料の科学と工学」、**59**, 6 (2022)。
- [17] 田中眞奈子、日本分析化学会機関誌「ぶんせき」、**10**, 533 (2021)。
- [18] 鬼柳善明、及川健一、松本吉弘、渡辺賢一、日本中性子科学会「波紋」、**32**, 86 (2022)。
- [19] 鬼柳善明、物理学会誌、**77**, 93 (2022)。
- [20] H. Sato, et al., *Mater. Trans.*, **56**, 1147 (2015)。

水素液化用磁気冷凍物質 HoB_2 の巨大磁気熱量効果と磁気構造

物質・材料研究機構
北澤 英明、寺田 典樹

世界的な気象異常を背景にカーボンニュートラル社会実現加速に向けた取り組みと世界的なエネルギー供給逼迫問題が相まって、究極のクリーンエネルギー源としての水素に世界からの関心が高まっています。カーボンニュートラルを考慮すると水素は太陽光や風力などの再生可能エネルギーによって製造されることが期待されていますが、水素ガスを作るためには余分なエネルギーを消費するため、エネルギーロスやその製造コスト等が普及を阻んでいる要因の一つとなっています。一方、水素に注目してみると液体水素は気体水素の1/800の体積であるため、大量輸送、大量供給、大量貯蔵、省スペース等の特長があり、水素エネルギーの本格的な普及には欠かすことができないエネルギーキャリアの一つとして認知されています。液体水素を広く普及させるためには、水素自体の製造コストはもちろんのこと、液化に関しても大幅なコストダウンが求められており、液化の高効率化が不可欠となっています。既存の気体冷凍方式による水素液化機は、圧縮機や液化方法に原理的な非効率性が内在しており、50%を超える液化効率の達成は容易ではありません。一方、磁気冷凍は、磁性体内の磁性原子が持っている

スピンを磁場で磁化(消磁)を行う事で、発熱(冷却)を行っています。磁気冷凍は気体冷凍のよう大型のコンプレッサー等を使わないため、原理的に50%以上の高い液化効率が期待できます。

我々はJST未来社会創造事業大規模プロジェクト型「磁気冷凍技術による革新的水素液化システムの開発」(研究代表者：西宮 伸幸NIMS招聘研究員、2019年度～最大10年間)に取り組んでおり、2022年度からより本格的な応用フェーズに入っています。これまで、我々は具体的なテーマの1つとして20 K (水素液化温度)～77 K (窒素液化温度)の温度範囲で大きな磁気エントロピー変化($-\Delta S_{\text{mag}}$)を示す材料探索を行ってきました。すでに磁気冷凍物質 Ho_5Pd_2 に関して、本誌でも紹介させていただきました[1]。本稿では上記プロジェクトで新たに発見された磁気冷凍物質 HoB_2 に関する中性子実験の結果をご紹介します。

さて、従来の物質探索はもっぱら研究者・技術者の経験と勘によるところが大きく、偶然にも新しい物質が発見されるとその周辺をくまなく探すという手法が常套手段であったように思います。NIMSでは高野らを中心に、これまでの古典的な探索手法とは異なるデータベースを基にした機械学習により、結晶構造と磁気転移温度は既知であっても $-\Delta S_{\text{mag}}$ の報告のない物質群から、大きな磁気熱量効果を示す候補物質を絞

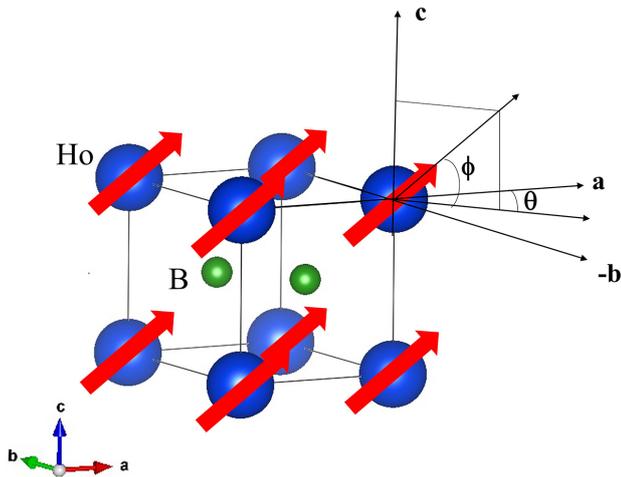


図1. HoB₂の中性子回折実験によって決定された磁気構造[4]

り込みました。候補の1つとして選ばれたAlB₂型結晶構造(P6/mmm)を示すHoB₂(図1)に関して、15 Kで0と5 Tの磁場において $-\Delta S_{\text{mag}} = 40.1 \text{ J/kgK}$ (0.35 J/cm³K)という大きな磁気熱量効果を示すことが実験で確かめられ、20 K付近において、二次転移を示す物質の中では最高値を有していることが分かりました[2]。我々が、水素液化に適した磁気冷凍材料のベンチマークとして考えているHoAl₂の $-\Delta S_{\text{mag}}$ が28.8 J/kgK[3]であることを考えても、HoB₂が如何に大きな $-\Delta S_{\text{mag}}$ を有していることが分かると思います。また、HoB₂の比熱の温度変化(図2(c))を見ると、15 K

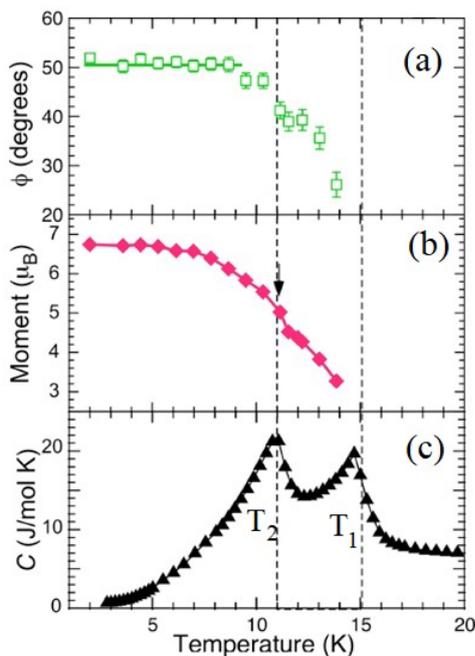


図2. Ho¹¹B₂多結晶試料の中性子回折実験より得られた(a)磁化のab面内からc軸への角度φの温度変化、(b)磁化の大きさの温度変化及び、(c)比熱の温度変化[4]。

(T₁)と11 K (T₂)に二次転移で良く見られるピークが2つ存在することがわかり、単純な強磁性体ではないことは明らかです。そこで、我々は水素液化用の磁気冷凍材料としての可能性を秘めたHoB₂に対して、その磁気構造を調べるため、ILL (フランス・グルノーブル)の中性子施設にある2軸回折計D1Bで中性子回折実験を行いました[4]。天然のホウ素の中には、¹⁰Bと¹¹Bがそれぞれ約20%、約80%含まれています。ホウ素¹⁰Bは熱中性子吸収断面積が大きいため、同位体¹¹Bで濃縮されたホウ素を原料として、アーク溶解炉によって、Ho¹¹B₂多結晶試料を用意しました。

図2にHo¹¹B₂の中性子回折実験から得られた磁化の方位及び大きさの温度変化とともに比熱の温度変化を示します。比熱の高温側のピークを示す温度T₁ = 15 Kから、低温に向かって磁化の大きさが増加するとともに、比熱の低温側のピークを示すT₂ = 11 Kで明らかに折れ曲がり観測されています。中性子粉末パターンをRietveld解析した結果、磁気波数ベクトルkは(0 0 0)で、結晶構造と同じユニットセルを有します。さらに、磁化ベクトルの向きが六方晶ab面内からc軸方向に角度φ立ち上がった状態で、磁化ベクトルがある方向に強磁性的に揃った磁気構造モデル(図1)で説明できることがわかりました。但し、一方向に揃った磁化ベクトルのab面内の角度θの値に関しては、実験上決定することはできませんでした。少なくとも11 Kの転移温度以下で、磁化ベクトルが温度の減少と共に傾き、結果としてφと磁化ベクトルの大きさが変化したとみることができます。つまり、強磁性転移温度T₁に接近したスピン再配列転移温度T₂の存在のおかげで、この温度付近で大きな磁気エントロピー変化を生み出していると解釈することができます。さらに詳しく中性子回折パターンのバックグラウンドの温度変化を調べると、強磁性転移温度T₁の2倍以上の40 Kから低温に向かって短距離秩序に起因した散漫散乱の成分の増加が見出されました。同様に $-\Delta S_{\text{mag}}$ の温度変化も40 Kから低温に向かって増加することから、高温から発達する短距離秩序の存在が大きな $-\Delta S_{\text{mag}}$ の原因になっていると考えられます。

希土類金属間化合物の磁性において、伝導電子を介した間接的な交換相互作用(RKKY相互作用、希土類金属イオン間の距離に応じて、強磁性(F)的交換相互作用と反強磁性的(AF)交換相互作用が振動する)が支配的であることが知られています。つまり、ある希土類イオンに注目すると、最近接の希土類イオンと第二近接、第三近接・・・の希土類イオンからの交換相互作用の符号や大きさが異なり、様々な磁気構造

が温度に依存して出現するようになります。さらに、同じ結晶構造を有する希土類金属間化合物では、希土類イオン R^{3+} が有する全軌道角運動量 J の大きさによって、相転移温度 T_c は、 $4f$ 電子数の増加に伴って de Gennes 因子 $(g_J - 1)^2 J(J + 1)$ (g_J は希土類イオンの Landé の g 因子)でうまく説明できる場合が多いことも知られています。ところが、 HoB_2 と同じ結晶構造を有する二ホウ化希土類金属間化合物 RB_2 の場合、 $R = Tb$ から $R = Yb$ に $4f$ 電子数が増えるに従って、強磁性転移温度 T_c が前述した de Gennes 因子で期待される T_c よりも大きく減少し、 $R = Yb$ になると反強磁性転移に転ずるなど、強磁性(F)的交換相互作用と反強磁性的(AF)交換相互作用の大きさが拮抗しているように見受けられます。 RB_2 で観測される相転移温度の低下や HoB_2 で観測された高温から発達する短距離秩序の存在は、符号の異なる複数の交換相互作用が競合している度合いが高いことを示唆します。

また、 HoB_2 で観測された2段転移に関しては、 HoB_2C_2 で見出されている磁気秩序と四極子秩序の共存の例[5]にあるように、 Ho^{3+} が有している四極子秩序の可能性が考えられます。 HoB_2 の結晶場に関しては、すでに寺田らによってJ-PARCで実験が行われており、近いうちにその結果が公開されることになると思います。

HoB_2 が水素液化に適した温度領域でなぜ大きな

$-\Delta S_{mag}$ を有しているのかの原理解明は、いかにして大きな $-\Delta S_{mag}$ を示す材料を見つけることができるかの探索指針確立につながると期待されます。このように磁気冷凍材料研究は磁性物理の基礎研究が社会貢献へと発展する可能性を秘めており、我々は中性子がその一翼を担う非常に重要なツールであると確信しています。

謝辞

本研究は、JST未来社会創造事業、JPMJMI18A3の支援を受けたものです。本研究の実施に際しては、JST未来社会創造事業と一緒に研究開発をされているメンバーに大きなご支援いただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 北澤英明、中性子産業利用推進協議会 季報【19年・冬】 vol.45, p7 (2019).
- [2] P. Baptista de Castro *et. al.*, NPG Asia Mater. **12**, 35 (2020).
- [3] P. J. von Ranke *et. al.*, J. Magn. Magn. Mater. **226-230**, 970 (2001).
- [4] N. Terada *et. al.*, Phys. Rev. B **102**, 094435 (2020).
- [5] T. Ohmori *et. al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 80 (2002).

中性子反射率測定用調温調湿システムの開発と展開

総合科学研究機構 中性子科学センター
宮田 登

中性子をプローブとした実験を行う利点の一つに軽元素への感度の高さがある。特に水の機能の解明に関する期待が大きい。例えばソフトマター材料の高機能化などでは、高温高湿のような過酷な環境下での水の挙動の評価は重要である。このため、調温調湿環境下で中性子実験が可能なシステムへの要望が高まっていた。

そこで、特に薄膜材料の膨潤、偏析などの構造評価に向けて、MLF BL17中性子反射率計「SHARAKU」で調温調湿環境の構築を行った[1]。SHARAKUには大型の試料ステージが設置されていて、ユーザーが独自の試料環境を構築するのに便利である。調温調湿環境の実現には、大きく分けて飽和塩法および水蒸気導入

法の2手法がある。本システムでは、湿度を任意の値に設定可能な水蒸気導入法を採用した。全体は大まかに水蒸気発生装置と温調可能な測定槽で構成されている。

水蒸気発生装置については、当初は単独で運転していた。しかし機能性高分子コンソーシアム(FPC)等とも協力してアップグレードを進め、MLFの装置制御フレームワークであるIROHA2による制御を可能とした。この結果、反射率の測定後に自動的に湿度を変更させる等の実験の自動化が進んだ。

測定槽の導入当初は試料を一つしか収納できなかった。しかし、多連装の測定槽を導入して実験の省力化を進めたり、IROHA2を改良すると共に改良版IROHA2で制御可能な温調器を導入して実験の自動化を進めた。

このような整備を進めた調温調湿システムは一般課

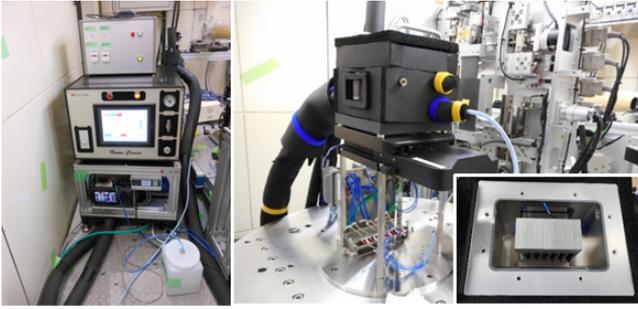


図1. 整備の進んだ調温調湿システム

題(14課題、2020A期～2022B期、BL17)、長期課題などで広く使用され、学術利用と産業利用の双方で成果を上げている [2,3]。

水蒸気発生装置は比較的コンパクトで、BL17だけでなくMLFの他装置でも使用可能である。実際に産業界から多くの要望のあるBL02、BL15、BL16等の装置でも使用実績がある。IROHA2が導入されている装置であれば、測定と連動した運転、制御も容易である。一方、最近2台目の水蒸気発生装置を導入した。こちらは2つの飽和槽(軽水用及び重水用)を持ち、両者を同時に動作させることで、任意の比率で軽水と重水を混合させることができる。今後の利用への期待が高まっている。

さらに、セル開発グループにより開発された温調器は本システムの測定槽だけでなく、固液界面セルの温調など他の試料環境機器にも対応可能である。標準仕様のIROHA2で制御するので、他装置にも比較的容易に導入できる。加えて内部開発機器であるため、実験環境の急な変更によるトラブルからの復旧にも容易に対応ができる。本開発を通じて調温調湿環境の提供だけでなく、MLFの試料環境全般の底上げにも一定の貢献ができたものと自負している。今後の研究展開が楽しみでもある。

本開発には青木裕之氏(JAEA/KEK)、有馬寛氏(CROSS)、宮崎司氏(京大/CROSS)の各氏、CROSSのセル開発チーム、FPCの学術担当の先生方、参加企業の方々を始めとする数多くの方からご支援、ご協力いただきました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

- [1] H. Arima-Osonoi et al., Rev. Sci. Instrum., 91, 104103, (2020).
- [2] T. Miyazaki et al., Langmuir, 35, 11099-11107, (2021).
- [3] A. Izumi et al., Macromolecules, 53, 4082-4089, (2020).

11th International Workshop on Sample Environment at Scattering Facilities (ISSE2022)

今年の8月28日(日)から9月1日(木)、栃木県那須町のリゾートホテルラフォーレ那須において、中性子及び放射光施設の試料環境(SE)に関する第11回国際ワークショップISSE2022を開催しました。このワークショップは、もともと中性子施設でSEに従事する技術者や研究者が新しい技術開発等について情報交換をする場となっていましたが、近年はその対象を放射光施設にも拡げています。今回は初のアジア開催

で、コロナ禍による2度の延期を経ての日本開催となりました。来日できない施設もいくつかありましたが、11か国から87名の方にご参加いただきました。

午前・午後に口頭発表、8月29、30日の夕方にポスター発表が行われ、各施設のSE全般に関する報告の他、低温、磁場、圧力、自動化、ソフトウェア等の開発に関する報告がなされました。夜間には、ワークショップ開催の母体である国際学会 International



集合写真(左)。口頭発表セッションの風景(中)。企業展示には11社が参加(右)。

Society for Sample Environment (ISSE) のBoard meeting、Committee meeting、総会が行われました。通常、このワークショップでは、ホスト施設のサイトツアーも行われますが、今回はサイトツアーの代わりに、J-PARC MLF、JRR-3、KEK-PF、SPring-8の試料環境を紹介するバーチャル施設見学を行い、施設を訪れたことのない海外参加者の高い関心を集めていました。さらに、コロナ禍で各施設が通常と異なる利用者実験対応を余儀なくされたり、ロックダウンで施設が稼働停止になったりした経験をもとに、自動化・遠隔化技術や国際協力のあり方も議論しました。

多くの参加者が開催ホテルに共に宿泊し、交流を深めながら毎日密度の濃い議論ができたことは、とても有意義でした。また日本国内からの参加も多く、今後の国内のSEコミュニティの発展に繋がることを願っています。最後に、ワークショップ開催にあたりご協力下さった、ISSE2022実行委員会をはじめすべての方々に感謝申し上げます。

(J-PARCセンター／ISSE2022実行委員長
河村 聖子)

第15回ミュオンสปิน回転・緩和・共鳴の国際会議(MuSR2020)報告

2022年8月28日から9月2日にかけてイタリア パルマ大学にて第15回ミュオンสปิน回転、緩和、共鳴(μ SR)の国際会議が現地開催された。本来、この会議は2020年9月に開催される予定だったが、Covid-19の影響を受け開催が延期されていた。様々な国際会議がオンラインで実施されていく中で、現地実行委員会の「対面会議実現」への強い熱意により、2年遅れでパルマでの開催となった。会議のトピックスは、「エネルギー材料」、「分子化学・物理化学」、「半導体」、「スピン液体」、「強相関電子系」、「超伝導」、「新実験手法」、「ミュオン位置計算」、「施設報告」と多岐にわたった。会議の名称から明らかなように、本会議は μ SRという実験手法で括られているのだが、今回の会議では、新測定手法として、「ミュオンX線非破壊元素分析法」がトピックスに加わった。これは最近

のJ-PARCと英国ISISにおける負ミュオンを用いた多くの実験成果を反映している。

局所磁場プローブである μ SR手法のユニークさから、強相関電子系、超伝導、スピン液体、半導体などに関する発表件数が多い中、「エネルギー材料」に関する講演は、招待講演、口頭発表及びポスター発表を含めて18件(全206件)あった。その内訳をみると、電池関連が一番多く、Liイオン電池及びNaイオン電池に関する発表が13件、太陽電池3件、燃料電池1件であった。そのほか、水素貯蔵などに関する発表が行われた。これまで μ SRというと、正ミュオンを用いた μ^+ SR実験が主であったが、上述したようにJ-PARCでの大強度負ミュオンを用いた実験が活発になり、負ミュオンを用いた μ^- SRに関する発表も多かったことが、今回の会議の特徴の一つだった。



図1. 会議の集合写真。



図2. 会議の様子。会場では、発表者と質問者はマスクを外すことが許されたが、聴衆はマスク着用が義務付けられた。(ウイルス拡大の観点からは、発表者がマスクをすることが推奨されると感じたのは著者のみか?!)

本国際会議は3年に1度開催されてきたが、今回は2年延期しての開催となった。このためか(?)、現地実行委員の思いと同様に、現地参加を希望する人が多く、参加者数は約180名と通常開催時とほぼ変わらない規模だった。次回は3年後の2025年開催で、カナダTRIUMFが実行委員を務める。また、本国際会議を主催する国際 μ SR分光学会(ISMS)の総会にて、CROSSの杉山氏が次期会長に選出された。

(総合科学研究機構(CROSS) 中性子科学センター
大石 一城)



図3. ポスター会場の様子。熱気ある議論が毎日行われた。

日本中性子科学会 第22回年会 開催報告(2022年10月26日~28日)

日本中性子科学会 第22回年会在2022年10月26日から28日まで幕張メッセにて開催された。本年の実行委員会は、東京大学物性研究所が担当した。今回の年会では、基調講演2件に加え、JRR-3の運転再開を記念したシンポジウム「JRR-3の復活」(招待講演3件)、中性子装置の開発・運営に携わる研究者に焦点を当てた「装置担当者シンポジウム」(招待講演

9件)を開催した。日本中性子科学会年会の現地開催は3年ぶりであったが、152名の方から参加登録があり、一般口頭発表は38件、ポスター発表は92件、企業展示ブースは24件と活況であった。

(東京大学 眞弓 皓一)

令和4年度中性子イメージング研究会(2022年9月14日~15日)

本研究会は、中性子イメージングに関連する研究の最新の状況を共有するとともに、さらなる技術開発と応用研究の発展に向けた議論の場を提供することを目的として開催されました。

14日は J-PARC、JRR-3、KUR の施設紹介の後、J-PARC の中性子イメージング装置 RADEN を用いた研究成果が3件報告されました。また、「中性子を用いた文化財研究」のセッションで3件の講演がありました。

15日は、企業研究者による中性子イメージングの応用事例が4件紹介されました。最後のパネルディスカッションでは、鬼柳善明氏(北海道大)、瀬戸山大吾

氏(株式会社豊田中央研究所)、犬飼潤治氏(山梨大学)、酒井一泉氏(ENEOS 株式会社)、篠原武尚氏(原子力機構)、原田久氏(ヤマハ発動機株式会社)の6名をパネリストに迎え、産業界における中性子イメージング技術の活用に関して議論が行われました。

2日間の参加者はのべ260名でした(14日:146名(現地25名、WEB 121名、うち協議会会員企業23名、一般企業26名、大学教員20名、学生5名、研究機関52名、不明6名、講師14名)、15日:114名(現地20名、WEB 94名、うち協議会会員企業24名、一般企業22名、大学教員14名、学生1名、研究機関35名、不明4名、講師14名))。

第26回 CROSSroads Workshop「データ解析ソフトウェアの紹介パート2」開催報告

2022年10月14日(金)、Zoom会議によるオンライン研究会として、第26回 CROSSroads Workshop「データ解析ソフトウェアの紹介パート2」を開催し、51名の方々にご参加いただきました。これまで先導的利用研究の促進として、総合科学研究機構では、本CROSSroads Workshopを実施してきましたが、近年ユーザーから解析支援の情報提供の要望が多くなったことから、昨年、新しい試みとして、各共用ビームラインで測定されたデータをどのように可視化・解析・論文化するかについて、中性子散乱またはミュオンについて知識はあるものの、J-PARCの初めて目的のビームライン装置を使う利用者に向けて、YouTube配信(Youtubeチャンネル「CROSS neutron」)も利用したソフトウェア紹介を第25回 CROSSroads Workshop「データ解析ソフトウェアの紹介」として行いました。関連ビームラインは、共用ビームラインに限らずBL01、02、08、09、11、12、14、18、20、21、23、S1、D1と多岐にわたりましたが、共用ビームラインにもかかわらず、紹介されていなかったビームライン装置もありました。今回のWorkshopでは、新たにBL15、17、22といった共用ビームラインを加え、それ以外にも、08、09、11、18、20、21といったビームラインでも役に立つソフトウェアの紹介を各講師の先生方に紹介していただきました。そして、本ワークショップでは、研究機関の研究者34名をはじめ、大学から9名、企業から8名の方々にご参加いただき、測定対象を限定しない質の高い質問や議論が行われました。なお、これまでの講演動画と講演資料をご希望の方は、YouTube「CROSS neutron」チャンネルにご登録後、総合科学研究機構(CROSS) 中性子科学センター 利用推進部(E-mail: suishin-event@cross.or.jp)までご連絡ください。これまでの講演動画を活用して、利用者の皆様には、新しい測定手法に挑戦したり、論文作成に役立てたり、J-PARC MLFへの課題申請書の作成に利用したりと、活用していただければと思います。

第26回 CROSSroads Workshop「データ解析ソフトウェアの紹介パート2」講演リスト

PLANETで取得した高圧結晶・非晶質散乱データの解析 服部高典(JAEA)
空蝉を用いた大観におけるデータリダクション 大石一城(CROSS)
中性子反射率法の原理とデータ解析ソフト『Motofit』 阿久津和宏(CROSS)
磁性薄膜の偏極中性子反射率データ解析 花島隆泰(CROSS)
RMC++(非晶質構造解析) 森一広(KEK)
GUI-RITS(ブラッグエッジイメージング解析ソフト) 及川健一(JAEA)
VESTA(磁気構造の可視化) 門馬綱一(国立科学博物館)
全体討論(ユーザーからの要望と最新のソフトウェアの展開) 稲村泰弘(JAEA)

第25回 CROSSroads Workshop「データ解析ソフトウェアの紹介」講演リスト

空蝉(中性子非弾性散乱測定データ処理ソフトウェア) 稲村泰弘(JAEA)
SpinW(HORACE)(スピン波計算) 社本真一(CROSS)
QENSfit(中性子準弾性散乱解析) 山田武(CROSS)
STARGazer(単結晶データ解析) 中尾朗子(CROSS)
FullProf(磁気構造解析) 萩原雅人(JAEA)
musrfit(ミュオンスピン回転緩和解析ソフト) 杉山純(CROSS)
パワポでできる簡単な3D作図(論文・発表用利用方法) 家田淳一(JAEA)
ユーザーからの要望と最新のソフトウェアの展開例 稲村泰弘(JAEA)

(総合科学研究機構 中性子科学センター
サイエンスコーディネーター
社本 真一)

J-PARC MLF 情報

J-PARC MLFでは2022Bの一般利用課題(短期)公募を2022年4月18日～5月11日に行いました：<https://mlfinfo.jp/ja/user/proposals/2022B/> 結果、中性子成果公開課題については291件の申請があり、審査の結果、そのうち114件が採択されました。

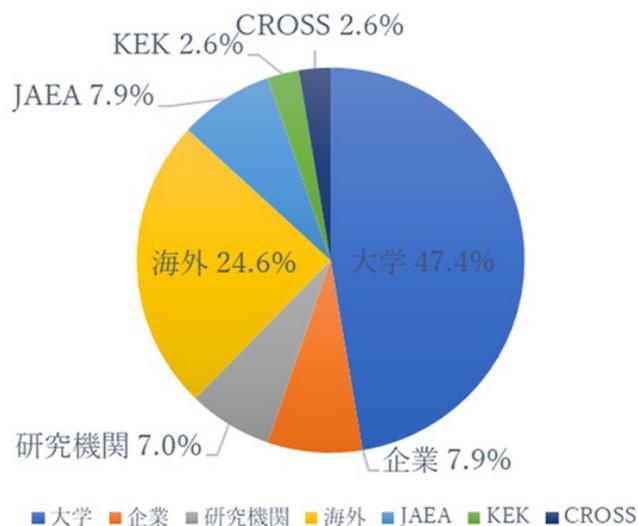


図1. 2022B採択 成果公開課題 114件の申請元分類

このうち、民間企業からの申請は20件で、9件が採択されました。この採択率は45%です。採択課題全体の申請元による分類を図1に、利用装置別の分類を図2に示します。

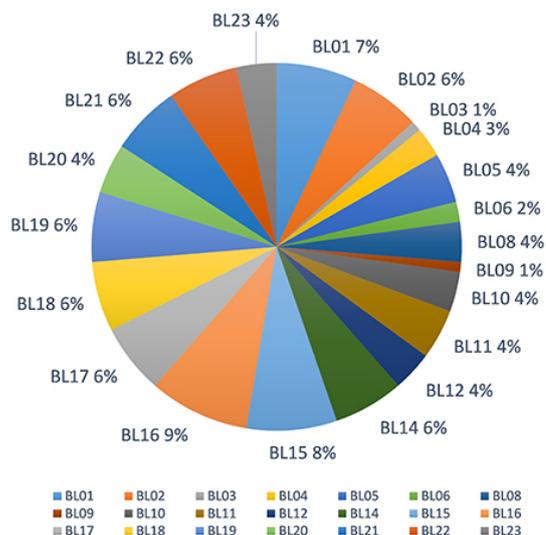


図2. 2022採択 成果公開課題 114件の利用装置分類

研究会・講習会開催

◆中性子実験技術基礎講習会(レベル1講習会)を開催

中性子実験技術の初心者の方を対象に中性子実験技術の基礎的事項を紹介し、中性子実験施設(J-PARC MLF、JRR-3 等)での実験計画立案や課題申請に役立てていただくことを目的として、中性子実験技術基礎講習会(レベル1講習会)を、10月7日にオンラインで開催した。今年度は66名の方々にご参加いただくことができた。参加者内訳は大学教員：9名、学生：18名、研究機関：8名、中性子産業利用推進協議会会員企業：23名、一般企業：8名である。今回も昨年度と同様に開催後、アクセスを参加者のみに制限したウェブサイト上に講演の録画を置き、再生することで参加者が後日に復習できるようにした。

◆金属材料研究会を開催

中性子産業利用推進協議会参加企業の研究者と関連する大学および中性子施設研究者のみが出席して現地開催方式で9月26日に開催した。新しい中性子解析手法について企業及び施設間で活発な議論が交わされた。

◆有機・高分子材料研究会を開催

アンケートで要望の多い中性子反射率法についての研究会を10月17日にオンライン開催し、16名の方々(協議会会員企業5名、一般企業2名、大学教員1名、研究機関6名、講師2名)に参加いただいた。

お知らせ

日時	会議名	場所	URL
1月11日	令和4年度 磁性材料研究会	オンライン開催	
1月19日 ～20日	J-PARC Workshop 2022, Deuterium Science Entering a New Phase	AQBRC	https://neutron.cross.or.jp/ja/events/20230119-20-2/
2月28日 まで	2022年度中級者向けZ-Code講習会	オンデマンド開催	https://j-neutron.com//posts/activity12.html
3月13日 ～15日	2022年度量子ビームサイエンスフェスタ 第14回 MLFシンポジウム、第40回PFシンポジウム	つくば国際会議場(エポカル) ハイブリッド開催	https://www2.kek.jp/imss/qbsf/2022/
3月16日	令和4年度 液体非晶質研究会 (2022年量子ビームサイエンスフェスタサテライトミーティング)	高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパス	
3月20日 ～23日	ECNS2023	Technical University of Munich at Garching	http://www.ecns2023.eu/
5月22日 ～25日	MLZ Conference "Neutrons for Biomaterials"	Munich, Germany	
6月25日 ～30日	Gordon Research Seminar "Neutron Scattering for a Sustainable Society".	Four Points Sheraton/Holiday Inn Express (California, USA)	https://www.grc.org/neutron-scattering-conference/2023/
7月14日	令和5年度中性子産業利用推進協議会総会	秋葉原コンベンションホール	
7月14日 ～15日	第2回中性子産業利用報告会	秋葉原コンベンションホール	
11月13日 ～17日	Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering (AOCNS) 2023	Royal Garden Hotel, Dalang Town, Dongguan City, Dongguan, China	http://aocns2023.ihep.ac.cn/

◆リンクのご案内

中性子・ミュオン利用ポータルサイトJ-JOIN : <https://jrr3ring.jaea.go.jp/jjoin/>
 J-PARC : <http://j-parc.jp/c/index.html>
 J-PARAC MLF (Meet @ MLF) : <https://mlfinfo.jp/ja/>
 J-PARAC MLF (Meet @ MLF)パンフレット : <https://mlfinfo.jp/ja/reports/published.html>
 J-PARCセンターユーザズオフィス : <http://is.j-parc.jp/uo/ja/index.html>
 茨城県中性子ビームライン : <https://www.pref.ibaraki.jp/sangyo/kagaku/tyusei/bl-top.html>

J-PARC MLF 成果検索 : <https://mlfinfo.jp/ja/publications.html>

JRR-3 : <https://jrr3.jaea.go.jp/>

JRR-3 Twitter : https://twitter.com/JAEA_JRR3

JRR-3 ユーザズオフィス : <https://jrr3uo.jaea.go.jp/>

(一財)総合科学研究機構(CROSS)中性子科学センター : <https://neutron.cross.or.jp/ja/>

J-PARC MLF 利用者懇談会 : <http://is.j-parc.jp/MLFuser/>

いばらき量子線活用協議会 : <http://www.ibaraki-quantum.com/>

日本中性子科学会 : <https://www.jsns.net/>

日本中性子科学会「国内の中性子実験施設」 : <https://www.jsns.net/facilities/>

日本中間子科学会 : <http://jmeson.org/>

季報「四季」編集委員会

委員長 杉山 純(CROSS)

委員 勅使河原 誠(J-PARC)、佐野 亜沙美(J-PARC)、水沢 多鶴子(CROSS)、
久米 卓志(花王)、松井 高史(富士フイルム)

事務局 小室 又洋、綿引 美知枝(中性子産業利用推進協議会)

※「四季」のバックナンバーは下記のサイトでご覧いただくことができます : <https://j-neutron.com/siki.html>

中性子産業利用推進協議会(IUSNA) 季報「四季」【22年・冬】Vol.57

発行日 2022年12月22日

発行元 中性子産業利用推進協議会

〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方162-1 いばらき量子ビームセンター D201

TEL:029-352-3934 FAX:029-352-3935 E-mail:info@j-neutron.com

<https://j-neutron.com/>(2022年2月1日よりURLを変更しました)

本誌掲載物の著作権は著者が保有します。本誌の複写、転載等に際しては著者の許可が必要です。