2023 DECEMBER

国立研究開発法人
量子科学技術研究開発機構
高崎量子応用研所

第68号

高崎研だより

役立つ科学　鉄表面の特異な磁性の研究

日本/世界見聞録　SDGs 先進国フランス

My favorite　ふろ活

研究装置紹介　示差走査熱量測定計

Dec.

高崎研だより問い合わせ先：量子技術基盤研究部門　高崎量子応用研究所（TEL)027-346-9232
e-mail：taka-soumu@qst.go.jp　ホームページ：https://www.qst.go.jp/site/taka

高崎研　検索

役立つ科学

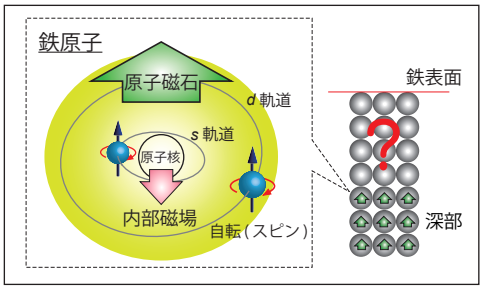
鉄表面の特異な磁性の研究

量子機能創製研究センター　境　誠司

Q1. 鉄表面には、磁石としての何か特別な特徴があるのでしょうか？

鉄の磁力の源はその原子構造にあります。鉄の原子は、原子核の周りを電子が自転しながら公転しています。この電子の自転が「スピン」と言われるもので、鉄の磁力を生み出します。加えて、電子の公転によっても磁力が生み出されます。このように、鉄は原子核の周りにある電子の運動によって磁力が生み出され、原子磁石として働くのです。

私達が普段目にする磁石は、無数の鉄の原子が規則的に並んでいるため、磁石の内部では鉄の原子磁石はその強さや向きが一定になり、均質な磁石として振る舞います。しかし、半導体に代わる次世代メモリの心臓部として、ナノスケールの領域に情報を記録するナノ磁石の応用等が注目されるようになると、ナノ磁石では表面にある鉄原子の割合が大きくなりますので、原子の並びが途切れる鉄の表面は、その内部と同じ磁性を示すのかという疑問が生まれました。

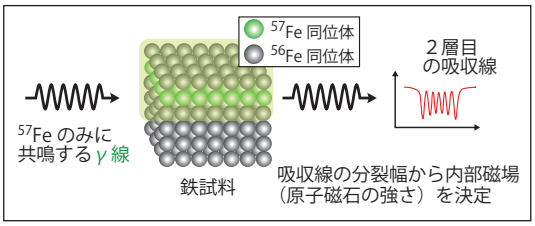


鉄原子の原子磁石と内部磁場の模式図

このような状況下、著名な理論研究者が、鉄表面では原子磁石の強さが表面からの深さとともに原子層毎に増減する「磁気フリーデル振動」の存在を予言しました。その後 40 年にわたり数多くの科学者が実証を試みましたが、未解明のままでした。本研究は、この予言を解き明かすものです。

Q2. 鉄の原子層毎の磁力は、どのように測定するのでしょうか？

特定のエネルギーを持つγ線が、鉄の同位体 ^{57}Fe（自然界の鉄に 2%程度含有）の原子核にだけ共鳴し（鉄の他の同位体には共鳴しない）吸収される現象を利用して、鉄の原子層毎の磁力を測定します。本測定法は、メスバウアー分光と呼ばれます。濃縮した ^{57}Fe を磁力を調べたい層に含ませた試料にγ線を照射して、^{57}Fe 原子核の周りの電子により生み出された磁力が原子核に及ぼす磁場（内部磁場）の大きさや向きを、原子核によるγ線の吸収強度の変化から知ることができます。この内部磁場の情報から、原子磁石の磁性を調べることができます。



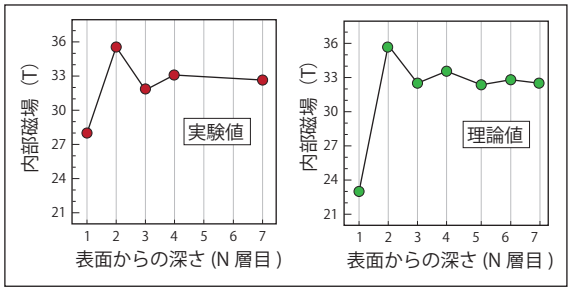
メスバウアー分光による内部磁場計測

このメスバウアー分光による原子層毎の磁力の測定は、放射光から大強度のメスバウアーγ線を発生させる技術と測定時の鉄表面の酸化を抑制する超高真空技術により成し得たものです。

Q3. 1 原子層ごとに磁性の違いはあったのでしょうか？

今回の研究では、メスバウアー分光では検出されない ^{56}Fe 原子からなる鉄の磁石を作り、その表面から特定の深さ（1 ～ 7 原子層目）にメスバウアー分光で検出される ^{57}Fe 原子の層を埋め込み、^{57}Fe 原子核の内部磁場を計測しました。

その結果、表面からの深さに応じて内部磁場の大きさ、すなわち鉄の原子磁石の強さが変化することを発見しました。右図に示すように、内部磁場の大きさは鉄の表面に露出している 1 原子層目では小さいのですが、2 原子層目になると大きく増大し、3 原子層目で再び減少、4 原子目で再び増大、7 原子層目になると深部とほぼ同じ大きさになりました。



鉄表面から 7 原子層までの内部磁場変化

この現象は、まさに 40 年以上前に理論的に予言された「磁気フリーデル振動」そのもので、私達の研究により長年の謎であった鉄表面の磁性が解き明かされました。今後はこの研究をさらに推し進め、原子レベルで磁性を制御したこれまでにない優れた特性のナノ磁石やこれを用いた次世代メモリの開発に繋げていきたいと考えています。

インタビュアー（広報事務局）

日本/世界見聞録

SDGs 先進国フランス

2023 年 9 月上旬にフランス南東部のリヨンで、電気化学関連の国際会議が開催されました。全 16 セッションに対し、欧州を中心に 52 か国 1,800 名ほどの研究者が集まり、私は燃料電池や水電解装置に関するセッションで発表しましたが、このセッションでの登壇希望者の 4 割はポスター発表に変更せざるを得ないほど盛況でした。

リヨンはミシュランの星を獲得した 20 店舗ほどを含む多くのレストランが軒を連ねる美食の首都と呼ばれていて、旧市街がユネスコ世界文化遺産に登録されているフランス第 2 の都市です。リヨン市民の移動手段は、建造物保全のため基本的に個人所有のコンパクトカーか、街中を縦横無尽に走ることができるシェアサイクル・シェアキックボードです。環境のみならず、歴史ある文化遺産に対しても気を配るフランスの意識の高さを感じます。

ノートルダム寺院が建つフルヴィエールの丘からのリヨンの街並み

サンミッシェル教会の寄付もできるクレジット端末

その一方で、クレジット決済ができない所はないほどデジタル IoT が浸透していて、歴史と伝統を重んじながらも、新たなシステムを柔軟に取り入れて発展している文化の一端を感じました。近隣都市のグルノーブルやディジョンでも、近代的なビルが建つ通りから少し逸れるとブラウン基調の屋根と白壁が際立つ歴史的な街並みが現れ、新旧文化を肌で感じることができます。

最近の世界情勢のため慣れない航空会社を利用しましたが、なんとかスケジュール通り帰国できました。しかし、乗り継ぎのイスタンブールではロストバゲッジになり、研究同様一筋縄にはいかないと強く感じる出張でした。

茂木　俊憲（先端機能材料研究部）

My favorite

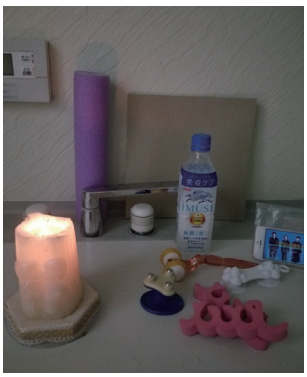
ふろ活

みなさんは何か推し活はありますか？　私の推しは、ズバリお風呂『ふろ活』です。ドはまり中です。最近よく「沼に浸かる」という言葉を耳にしますが、私の場合風呂に浸かっています。

我が家は 5 人家族。なぜかリビングに全員集まり、テレビ正面の 3 人掛けのソファーめがけて争奪戦が繰り広げられる毎日。一日があわただしく過ぎ去るので、自分の時間は皆無です。それが当たり前の日常でした。ところが、長男の就職を皮切りに次男も就職、三男は進学と次から次へと家から巣立ち、想定外だった主人まで単身赴任。たちまち一人ぼっちになってしまったのです。

心地よい炎のゆらぎ

初めて訪れた一人暮らし。狭いと感じた家は広すぎて、物音ひとつしない寂しい家になってしまいました。そんな中見つけた『ふろ活』。照明はアロマキャンドルの灯りのみ。揺らぐ炎を見つめていると心が落ち着きます。ゆったり湯舟に浸かっていると汗がジワジワと出てきて、そのうち流れ出します。たっぷり汗をかくと気分は爽快。そして冷えた水を飲む。この世で水が一番美味しいと感じる瞬間です。『ふろ活』は日々アップデートし、過ごし方はいろいろです。



ふろ活を彩るグッズたち

休日の午後は明るいうちからお風呂に入り、入浴しながら映画を観たり、スポーツ観戦をしたりとリビング状態です。毎日楽しくぬるま湯に浸かっています。さらなる充実の『ふろ活』を目指して、現在お風呂で使用する電気式の筋肉刺激トレーニングマシーンを購入するか検討中です。

おふろ大好きまろまろまろん　（ペンネーム）

研究装置紹介

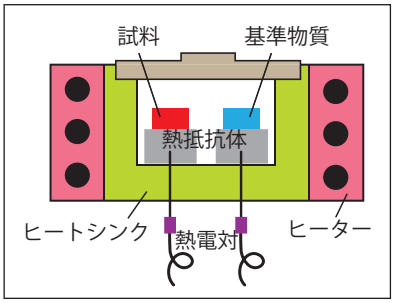
示差走査熱量測定計

先進ビーム利用施設部　長澤　尚胤

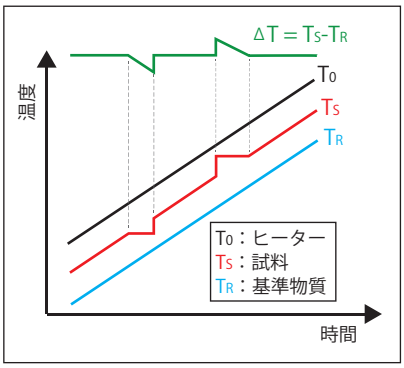
【原理と特徴】

示差走査熱量測定計（DSC：Differential Scanning Calorimetry）は、測定試料と基準物質の吸熱・発熱に伴う単位時間あたりの熱エネルギーの出入り（熱流）の変化を計測し、物質の融解、ガラス転移、結晶化などの相転移や熱変性、比熱などを調べる装置です。

DSC は、プログラムにしたがって温度を変化させながら、①試料と基準物質の温度差を検出して熱流に換算する熱流速型と、②試料及び基準物質の温度が等しくなる様に両者に加えた熱流を計測する入力補償型の 2 種類があります。現在一般的に広く利用されている熱流速型の構成を右図に示します。測定試料、基準物質と温度制御されたシートシンクの間に熱抵抗体を設け、この 2 つの熱抵抗体の温度差を検出して、熱流に換算します。熱流の単位は W（ワット）または W/g です。



熱流速型 DSC の構造



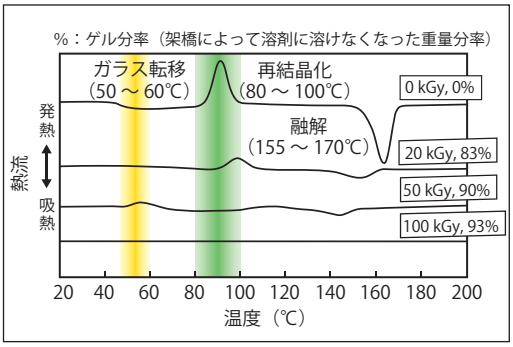
ヒーター加熱と試料温度

例として、ある試料を測定したときの温度変化を左図に示します。ヒーター（T_0）の加熱に伴い、最初は試料（T_S）及び基準物質（T_R）ともに温度上昇します。その後試料はまず吸熱し、温度上昇が一定となりますが、吸熱が終了すると再びヒーターの昇温速度に追随します。さらに今度は発熱反応を起こし、ヒーターの昇温速度以上に温度上昇し、反応が終了するとまたヒーターの昇温速度に追随します。この測定における試料の温度と基準物質の温度の差（ΔT）を換算して熱流を求めます。一般的に、吸熱ピークは融解、発熱ピークは結晶化、硬化・架橋、酸化・分解などが考えられます。

【実際の分析例】

ポリ乳酸は、植物由来のでんぷんや糖を原料とし、微生物によって水と二酸化炭素に分解されるため、環境負荷の少ない材料として期待されています。しかし、ポリ乳酸は、他のプラスチックに比べ耐熱性が弱い、白濁化するなどの課題があります。そこで、電子線照射で架橋したポリ乳酸の熱的性質を DSC で評価しました。

未照射試料（0 kGy）では、熱変形の原因となるガラス転移の温度が 55℃付近、白濁に関係する再結晶化の発熱ピークが 80 ～ 100℃、融解による吸熱ピークが 160℃付近に観測されます。一方、照射した試料では吸収線量が増加するにしたがい、これらのピークが小さくなり、100 kGy 照射で架橋したポリ乳酸は、加熱しても透明性を保持し、熱変形もないことが分かりました。



電子線架橋したポリ乳酸の DSC 挙動

Q メッセージ

ある大学の先生が、多くの学生は数式を解くと分かった気になるが、大切なのは数式が意味する現象をグラフなどできちんと表せるかであり、講義ではそれを伝えているとおっしゃっていました。最近、量子科学の理論研究者の話を聞く機会がありました。難解な現象を理論的にどう解釈するかなど説明は非常に分かり易く、大変勉強になりました。12 月は QST サイエンスフェスタが開催されます。量子技術を理解していただくため、分かり易い研究成果の発信に心がけたいと思います。

（量子機能創製研究センター長　大島　武）

PUBLIC RELATIONS

師走になりました。毎年年末には高圧洗浄機で家周りをきれいにしているのですが、ここ 2，3 年サボっているので、前倒しで玄関の敷石やブロック塀などをきれいにしました。家の中の掃除も気になるところですが、まずは X’mas ケーキと年越しそばの予約を片付けます。