

N氏の新たな冒険

中性子(Neutron)と、それに魅せられた仲間たち
















日本中性子科学会

<http://www.jsns.net/jp/>

進め、N氏が拓く「新世界」へ!

中性子(第1のN氏)は、研究の対象としてあるいはツールとして、多くの科学者・研究者を魅了してきました。この冊子はより多くの方に中性子科学の魅力を知っていただくため、物質・材料科学、地球科学、生命科学などのサイエンスから、工業、農業、食品など産業利用や医療利用の分野など、バラエティに富む分野それぞれの第一線の研究者(第2のN氏=中性子に魅せられた人々)に寄稿を求め、サイエンスや産業の最前線での中性子利用の「今」と「これから」が俯瞰できるような構成しました。ぜひあなたもN氏とともに、あるいはあなた自身がN氏となって、未知未踏の世界への旅に挑戦してみませんか? これから開かれるページの中に、あなたの冒険のヒントが埋まっているかもしれません。

-  **01** N氏の旅のはじまり
-  **02** 超伝導の謎を解き明かす
-  **03** 「磁性とは何か」いう問いに挑む
-  **04** 地球内部の高温高压状態を地上に作り出す
-  **05** 中性子で探る「ソフトマター」の強さの秘密
-  **06** タンパク質の“生き生きした表情”を読み取る
-  **07** 水から読み解く「おいしさ」とは?
-  **08** 生命を司る水の「見える化」

-  **09** 最悪のがん「神経膠芽腫」を中性子で狙い撃つ
-  **10** 「エンジンの可視化」のその先に見える世界
-  **11** 高性能バッテリーの開発を目指して
-  **12** 生命を、産業を、文明を支える鉄をナノからトンまで理解する
-  **13** 中性子パワーで半導体をつくる
-  **14** 中性子で原子を観る複雑な装置のシンプルな原理
-  **15** 中性子レンズや中性子ミラーで思いのままにビームを操る
-  **16** 中性子が教えるありのままの磁場の姿
-  **17** 全長15mの小型中性子源 さらなる小型化で広がる用途
-  **18** N氏の道のり
-  **19** N氏に会える場所
-  **20** N氏の旅の途中に
-  **付録** 未来を拓く中性子

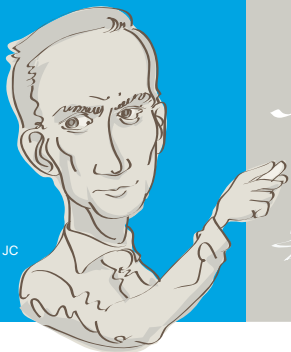
姿を変えるN氏(中性子の単位換算表)

	超冷中性子			極冷中性子		冷中性子		熱中性子		熱外中性子				高速中性子		
運動エネルギー (eV)	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
温度 (K)	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}
速度 (m/s)		1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{13}	10^{14}
波長 (m)	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}	10^{-15}	10^{-16}	10^{-17}	10^{-18}	10^{-19}	10^{-20}	10^{-21}

N氏の旅のはじまり

「N氏の新たな冒険」のプロローグとして、現代によみがえったお二人の先生にご登場いただきます。まず中性子の発見で1935年にノーベル物理学賞を受けた、英国のジェームズ・チャドウィック先生(Sir James Chadwick, 1891-1974年)。そして、その中性子を使って物質の内部を見る方法を編み出した(1994年ノーベル物理学賞受賞)、パーティことバートラム・ブロックハウス先生(Bertram Brockhouse, 1918-2003年、カナダ)です。「N氏の旅」のはじまりから新

たな冒険へと続く壮大なストーリーの一端と、そのストーリーを紡いできた多くの研究者をご紹介します上でもっともふさわしく、また現代の日本の事情にもなぜかお詳しい、お二人の先生に語っていただきます。



JC



BB

ジェームズ・チャドウィック先生(以下、JC) みなさんは、わたしたちのからだの半分が中性子でできていることをご存じでしょうか。臓器や骨は細胞から、それらを構成するタンパク質や脂肪の分子は、原子が集まってできていますね。そして電子とともに原子を構成している原子核は、プラスの電荷を持つ「陽子」と電荷を持たない「中性子」とがほぼ同じ数だけ集まってできています。バートラム・ブロックハウス先生(以下、BB) 中性子と陽子の重さはほぼ同じですから、ものの重さの半分は中性子ということになりますね。

JC 世界の半分は中性子だ、というのはそういうことです。その中性子は、普通は原子核に閉じ込められていて外には出て来ることはなく、なんとか取り出すことができても不安定なので15分ほどで壊れてしまいます。でもその15分間、正確にはわずか887秒のうちに、取り出した中性子をうまく利用する技術が長年かけて築き上げられてきました。多くの科学者、技術者がこれに関わり、また大変に注目してくれています。

プロローグ

BB サー・チャドウィック、中性子発見の前夜について聞かせてください。

JC 電磁波の存在が予言され(1861年マックスウェル)、その後発見

(1886年ヘルツ)され、19世紀末頃までに古典物理学は完成していました。しかし20世紀初頭に新しい物理学の夜明けを迎えます。古典物理学にほころびが見つかりはじめていたんですよ。

BB ちょうどライト兄弟がはじめて飛行機で空を飛んだり(1903年)、発明王エジソンが活躍した時代ですね。

JC 当時は陰極線などの研究がさかに行われていましたが、特筆すべきはレントゲンの発見(1895年)でした。彼は未知のビームをX線と名付け、最初のノーベル物理学賞を受賞しています(1901年)。

BB 最初に撮られた手指の骨と指輪が映ったX線写真は、レントゲンの奥さんのものだったそうですね。

JC X線の発見はまたたく間に世界中に伝わりました。物理学にとっても、古典物理学を脱却して量子力学や原子核物理へ道を拓く大きな出来事でした。その後、J.J.トムソンによる電子の発見(1897)(1906年ノーベル物理学賞受賞)、キュリー夫妻によるラジウムの発見(1903年ノーベル物理学賞受賞)、プランクの量子論(1918年ノーベル物理学賞受賞)と大きな発見が続きます。わくわくするようなエピソードが一杯あり、今日ぜんぶお話できないのが残念です。

BB レントゲンは後にミュンヘン大学に移るんですよ。

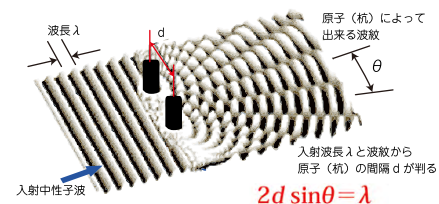
JC ええ、そこでラウエの同僚になりました。このことがラウエによる

X線回折の発見(1912年)(1914年ノーベル物理学賞受賞)や、ブラッグ親子による「ブラッグの法則」の発見(1913年)(1915年ノーベル物理学賞受賞)につながっていきます。ブラッグの法則は、高校で物理を学んだ人は聞いたことがあると思います。

◆ 規則的に原子が配列している「結晶」に、X線の波がぶつかると散乱した波が干渉をおこし、強い干渉縞をつくるようになります。これを「回折」と呼びます。強い干渉縞の位置(回折線の位置)は、波長 λ 、結晶の格子面の間隔 d と波の散乱角の関係式

$$\lambda = 2d \sin \theta \dots\dots (\text{ブラッグの式})$$

で表すことができます。これがブラッグの法則です。



◆ レントゲンによる未知のビームの発見は、またたく間に日本にも伝わりました。翌年には日本でも研究がスタートし、X線装置も普及しはじめました。文豪・夏目漱石との親交で知られ多数の随想も著した寺田寅彦は、X線装置を用いて回折実験を行い、ブラッグ親子と同時期に『Nature』で発表しています。残念ながらノーベル賞は取れませんでした。日本が100年前から世界の第一線で活躍していたのがわかる例です。

JC もっとも強調したいのは、回折線の位置と強さを解析すると、物質中の「原子の配列」を知ることができる点です。そしてラウエやブラッグ親子や寺田らの研究が、結晶学という学問分野のはじまりとなりました。その後、散乱理論や結晶の対称性が体系化され、電子線や、放射光、中性子利用実験技術が著しく発展し、DNAの二重らせん構造の発見や準結晶の発見など数多くの成果を生み出しています。

BB 彼らの発見が相次いだ時期からちょうど100年目を祝って、2014年が「世界結晶年」と定められたんですね。

中性子の登場と、粒子と波の二重性

BB 1910年代にはラザフォードらにより α 線や β 線などの多数の原子核実験が行われます(1908年ノーベル化学賞受賞)。ラザフォードは中性子の存在も予想していましたが、中性ゆえになかなか観

測されませんでしたね。

JC 1930年になって、ボーテとベッカーがベリリウム線を発見します。ボーテたちもジョリオ・キュリー夫妻も「ベリリウム線は γ 線だ」と考えましたが、私は「 γ 線だと運動量保存則、エネルギー保存則、高い透過能などを説明できない」と思っていました。これらを説明する存在として、「中性で質量が陽子と同じ粒子=中性子」に行き着いたので(1932年)(1935年ジェームズ・チャドウィックノーベル物理学賞受賞)。

BB この頃には量子論が進展し「物質には粒子としての性質と、波としての性質がある」ことが受け入れられるようになりました。中性子発見の少し前に、電子が波として回折現象を起こすことが明らかになっています(1927年)(1937年G.P.トムソンノーベル物理学賞受賞)。当然、中性子も回折現象を起こすはずだと考えられ、実際に1936年に確認されました。

JC 中性子の波長と、粒子としての運動量はド・ブロイ波の式で結びつけられます(1929年ド・ブロイノーベル物理学賞受賞)。

BB 高校の物理の教科書では「中性子の発見」「物質の波動性」「電子線の回折現象」あたりまでの説明で終わっていますね。

JC 波としての中性子が新たな世界を広げていくここから、実は面白いところなんですよ!

BB まったくそう思います。

中性子を利用した科学へ

波としての性質を持つ中性子に、新たな道が開けます。

「N氏の冒険」の第二幕です。

JC 中性子の持つ「波としての性質」を使って物質を調べはじめたのがエルネスト・ウォランです。1944年に米国オークリッジ国立研究所(テネシー州)の原子炉で最初中性子回折実験が行われ、X線回折と同じように物質中の原子配列を調べることができることを示しました。

BB 第二次大戦後、ウォランの研究にクリフォード・シャルが合流しましたね。

JC シャルは原子の違いによる中性子の散乱を丁寧に調べていくとともに、中性子が持つスピン(磁気モーメント)を利用して、磁性体のスピン配列(磁気構造)を直接観測します。さらに、中性子スピンの向きがそろった中性子(偏極中性子)を作りだし、物質中のスピン密度分布を調べる方法(偏極中性子回折)の基礎を築きました(1994年ノーベル物理学賞)。シャルの研究は、入射した中性子と散乱された中性子のエネルギーが等しい弾性散乱でした。

JC さてパーティ、シャルとノーベル賞を分けあったあなたの研究を説明してもらいましょうか。

BB はい。カナダのチョークリバー国立研究所（オンタリオ州）で私が開発したのは「非弾性散乱法」です（パートラム・ブロックハウス、1994年ノーベル物理学賞）。散乱の過程で中性子が物質からエネルギーを受け取ったり、物質にエネルギーを与えたりするので“非弾性”散乱なのです。

JC 弾性散乱、非弾性散乱も高校の物理で出てきます。散乱の前後で運動エネルギーが変化しないのが弾性、変化するのが非弾性ですね。

BB 「熱中性子」を用いると中性子の持つエネルギーと波長が、物質中の素励起（基本的な運動）の観測にちょうどよいため、物質物理学の研究にはなくてはならない手段となりました。観測の対象にふさわしい目盛りが刻まれた“物差し”なんです。

JC それにしても熱中性子という言い方は面白いです。室温の熱エネルギー- $k_B T$ 程度（ k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度）のエネルギーを持つ中性子という意味ですね。高い方は熱外、少しエネルギーが低いと冷、さらに低いと極冷、超冷などと呼ばれます。光の色のようにそれぞれの範囲が厳密に決まっているわけではありませんが、エネルギーに応じていろいろな呼び名がついたんですね。※冒頭ページ下段の表「姿を変えるN氏」をご覧ください

JC これらの研究がもとになり、1950年代から1970年代初頭にかけて世界各地で「研究用原子炉」が建設されるようになりました。発電用に比べパワーが1/10～1/100程度のものですが、日本では日本原子力研究所（現 日本原子力研究開発機構（原子力機構））が1957年に最初の原子炉を作っていますね。

BB その後50年間で、さまざまな実験装置や手法が開発されてきました。原子力機構のJRR-3研究用原子炉（茨城県東海村）には、全国の大学や研究所から利用者が集まり、物質構造や磁気構造、ダイナミクスを調べる研究がすすめられています。

もうひとつの道へ

研究用原子炉に頼らずに、中性子を発生させる装置が登場し、中性子利用の新たな道が開けます。

JC ラザフォードの実験がきっかけとなって、荷電粒子を加速する装置が登場します。それが「加速器」です。1930年代には高周波電場を利用した線形加速器「リニアック」や磁場を使った円型加速器「サイクロトロン」が生まれました。中性子そのものは電荷を持たないので加速することはできませんが、そのかわり、加速した電子や陽子をターゲットに衝突させることで、ターゲットの原子核から中性子を取り出すことができます。

BB 戦後、基本原理や技術が革新され、加速エネルギーは飛躍的な進歩を遂げていますね。加速器そのものも医療用を中心に、身近な場所で多数存在しています。加速器を用いた中性子の発生と利用の分野では、日本がパイオニアとして世界を牽引していますね。

JC 1967年、東北大の電子リニアック施設（仙台市）で、中性子の利用研究がスタートします。これが成功を取り、1980年からは高エネ機構の陽子シンクロトン施設（茨城県つくば市）で本格的な中性子の利用研究が行われました。

BB 同じ頃、ヨーロッパ、アメリカでの研究も活発になり、世界中で利用者が増え続けました。まさに中性子科学の拡大期と言えるのではないですか。

JC 同時に、さらに大型の中性子源への期待も高まりましたね。ちょうど機が熟したころ、ヨーロッパ、アメリカ、日本でほぼ同時に、新しい陽子加速器中性子施設が建設されました。これまで見たことがないようなたくさんの中性子を取り出せるようになったのが、ここ数年のことなのです。先に述べた原子炉とあわせ、世界で約1万人を超える科学者・技術者やその卵たちが中性子施設を利用する時代を迎えています。

BB 日本の施設は大強度陽子加速器施設J-PARC（茨城県東海村）と呼ばれていますね。この続きのお話は、この冊子の本編をご覧くださいいただくことにしましょう。

新たな旅立ちに備えて皆さんの冒険の助けとなるよう、中性子科学の基礎知識をおさらいし、続く本編の記事のテーマを紹介します。

飛行時間法

JC 粒子と波の二重性のところで述べましたが、質量 m 、速さ v で運動する粒子は、波長 $\lambda = h/mv$ を持つ「ド・ブロイ波」

とみなせます（ h はプランク定数）。

加速器を用いると中性子の発生時刻がわかります。検出器に到達するまでの飛行時間（time-of-flight：TOF）と距離がわかれば、中性子の速度がわかり、ド・ブロイの式から波長が求められます。この方法は「飛行時間法」と呼ばれ、原子核物理の研究で用いられてきました。J-PARCでは、もっぱら飛行時間法が使われています。

BB 飛行時間法は小学校の算数で簡単に理解できます。図1の横軸は時間、縦軸は距離を表しますので、傾きが速さになります。L1にある試料に当たって散乱された中性子の速さが変わらなければ傾きは変わらず、弾性散乱になります。一方、速さが変わっていたら、そこで「試料と中性子の間で、何らかのエネルギーのやり

とりがあった」こととなりますから、非弾性散乱になります。弾性散乱か非弾性散乱かの違いや、どの程度のエネルギーのやりとりがあったかなどが、飛行時間法を使うとたちどころに明らかにできるのです。

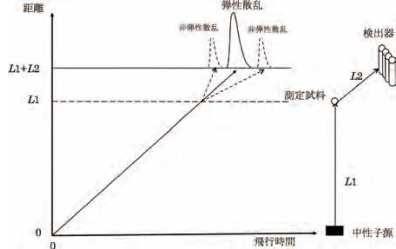


図1. 飛行時間法は“算数”で簡単に理解できる(本文参照)

中性子の利用シーン

JC 中性子の利用シーンは大きく2つに分けられます。その第1は「対象物の性質を変える」というものです。がん治療や中性子照射による材料改質があります。

BB 前者では1950年代には医療用原子炉が建設され、盛んにがん治療が行われました。この方法は世界中に広まりましたが、原子炉が必要になるため制約もありました。現在では加速器を使う新しい段階に入りつつあり、記事09にその話が出てきます。後者の例は、核変換を用いたシリコンへのリンのドーピングです。半導体製造の分野で技術として定着し産業化しています。記事13で最新情報をお届けします。

JC 第2の利用シーンは「材料を中性子で調べる」というものです。さらにこの中には、「元素分析」「ラジオグラフィ」「散乱」という三つの手法があります。

BB 元素分析では即発ガン線分析や中性子放射化分析により数重量%からppbに至る分析を非破壊で行うことができます。

JC 一方、中性子の大きな透過能を利用するのが、中性子ラジオグラフィです。生体材料や物質材料を透過した中性子を計測すると、材料中の中性子の吸収の違いで透過画像に濃淡が生じ、いわば“中性子によるレントゲン写真”を得ることができ、X線では見えない世界が見えてきます。この例が記事8や記事10です。

BB 「材料を調べる」という第2の利用シーンの中でもっとも比重の大きいのが、中性子散乱です。散乱された中性子は、原子の配列や運動を反映し相互に干渉します。規則的な原子配列や規則的な運動があると干渉縞が生じます。散乱波を丁寧に解析することで原子の配列やナノ構造、それらの動的な姿を知ることができるんです。

JC 中性子回折とX線回折を比較しながら説明してもらえますか。

BB はい。X線は電子により散乱されます。電子が多いもの、つまり

周期表の下のほうの原子番号の大きい元素ほど、強くX線を散乱します。電子の少ない水素やリチウムなどの元素は、あまりX線を散乱しません。したがって、ニッケル水素電池中のわずか数%の水素の出入りや、リチウムイオン電池中の数%のリチウムの出入りをX線で調べることは困難なんです。

JC 軽量で高性能な電池は誰もが求めるものですが、水素やリチウムが見えないのでは、充放電の様子を原子レベルで知ることはできない、というわけですね。

BB これに対し、ある元素が中性子を散乱する能力は、周期表と無関係でバラバラなんです。そして水素やリチウムは、中性子を強く散乱します。

図2は、X線と中性子を用いて、リチウムイオン電池の正極材料の結晶構造を調べたものですが、中性子だとマンガン原子だけでなく、酸素原子やリチウム原子までははっきり見えています。つまり、中性子を用いると、リチウムイオン電池中の数%のリチウムの出入りも「よく見える」のです。

JC 「見えている」なら、研究開発の歩みも確かなものになりますね。この図で、リチウム原子やマンガン原子は青くなっていますが、これにも意味があるんですね。

BB これは散乱時に位相が反転し負になっていることを示します。また、中性子を用いると同位体（原子番号＝電子の数＝同じで、

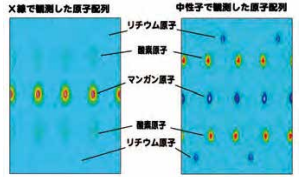


図2. X線回折と中性子回折で得られた散乱の強さ

中性子の数だけが違う原子）を見分けることもできます。こうした中性子散乱を使ったさまざまな利用例を紹介しているのが、記事02～07や、11、12です。

JC 科学の進歩は計測技術の進歩なくしては語れませんね。

BB 中性子計測技術の最近の話題を記事14（チョッパー分光器）、15（レンズ）、16（磁場）、17（小型中性子源）でご紹介しています。中性子は、超伝導や磁性、生命などの謎に挑み、新しい物質科学、生命科学、テクノロジーを生みだそうとしています。新しい旅のはじまりです。

JC より多くの方に、この旅の面白さを知っていただき、加わっていただきたいと思います。

神山 崇（高エネ機構物構研・J-PARC・総研大）
藤井 彦彦（東大名誉教授）

超伝導の謎を解き明かす

1911年、オンネスにより水銀で発見された超伝導現象は、1986年に大きな進展を見せました。液体窒素で冷やせば超伝導状態に遷移する「高温超伝導体」のフィーバーが起り、中性子実験で構造が決定されました。21世紀はじめには金属間化合物 MgB_2 のフィーバーもありました。次なるブームでもおそらく、新物質の構造決定やメカニズムの解明に中性子実験は重要な役割を果たすことでしょう。



写真提供：物質・材料研究機構

はじめに

ラウエやブラッグ親子（日本人では寺田寅彦、西川正治ら）による100年前のX線回折研究は結晶学を生み、放射光や中性子等の大型施設の建設にも繋がりました。これを用いた物質構造研究が発展していきました。100年の間に物質構造や性質に関する理解が著しく進展した結果、物質科学は社会に大きな影響を与えるようになりました。一方、科学者のあり方や社会との関係について、科学者が問われ自問する機会が増えてきています。世界結晶年である本年は科学の発展と社会との関わりを見つめ直す機会でもあります。

これまで、科学の発見が分野を超え社会を巻き込んでフィーバーとなる事が何度ありましたが、1987年に始まった酸化物超伝導体フィーバーは最も大きく世界的な広がりを持っていたこともあり、その後のフィーバーに対する科学者や社会の反応を準備した面があります。連日、テレビや新聞が酸化物超伝導体の特集を組み、超伝導の勉強会が開催され、YBCO ($YBa_2Cu_3O_7$)の合成を目的とする愛好会さえつくられました。多くの研究者が参入し、直ぐに論文にしないとならない雰囲気があったため、玉石混交の論文が多数掲載されたりもしましたが、日本の物質科学研究は国際社会の中でリーダーシップを発揮していくことに繋がりました。又、応用への道筋が見えないにも関わらず、多数の企業が参入し、基礎研究で

成果を上げました。

YBCOの発見と超伝導フィーバー

ブームの直前、ベドノルツとミュラーが $(La,Ba)_2CuO_4$ 系超伝導体を発見したかもしれないというニュースが話題になり、その後、田中昭二らが検証に成功すると、「何か大変なことが始まっている」という感触が学生にも伝わってきたものでした。1987年2月中旬、チューらが液体窒素温度以上で超伝導を示す新物質を発見したというニュースが伝わると、超伝導以外の研究者たちさえ、いてもたってもいられなくなり、どんどん参入していきました。情報をファックスで配信する全国的なネットワークが主要大学や研究所間に構築され、大学や研究所内では各研究室に配信する仕組みが作られました。

しかし、YBCOの詳細はなかなか明らかにされず、色が緑色であるとか、成分にYbを含むとかのいろいろな噂が流れるようになったのもこの頃です。有名な理論家の先生が陶芸の趣味を生かして即座に新しい超伝導体を合成したとの報道があり、素人もつくりましょう、という風潮が高まりました。さらに、3月初めに金材研(現物質・材料研究機構)がTc(超伝導転移温度)の世界記録を達成し、合成組成を明らかにした、とテレビと新聞がこぞって伝えました。

誰が構造を決定するか

次は誰がYBCOの構造決定一番乗りになるか、どこがさらに高いTcの物質を作り出すか、が興味的でした。

1980年に5台の装置でスタートした高エネ研(現高エネルギー加速器研究機構)の中性子散乱実験施設KENSは、4年後粉末中性子回折装置HRPを設置し、やっと順調に動き出したタイミングで超伝導体フィーバーに遭遇したのです。共同利用を一時中断し、それぞれのグループ員の周辺で酸化物超伝導体試料が集められました。

1987年3月、金研の試料等が立て続けに測定されましたが、構造解析には至りませんでした。この時点では正しい組成が明らかになっておらず、金材研が報告した組成も $Y:Ba:Cu = 0.4:0.6:1$ とずれていました。正方晶と斜方晶の共存は十分には認識されていなかった点も、解析がうまくいかなかった理由でした。次のマシントイムは5月の連休明けにははずでしたので、高エネ研は構造決定レースに敗北したかに思われました。

臨時のマシントイム

しかし、高エネ研の西川所長(当時)が大きな決断をしました。図2の新聞記事にあるように、無機材研所長(現物質・材料研究機構)と相談して、加速器を3月24~26日の2日間だけ臨時運転したのです。加速器は中性子だけで使っているのではなく、原子核物理、素粒子物理など多くの研究者が利用しています。海外から利用に来ている人も多くいました。したがって加速器の運転スケジュールの突然の変更はそう簡単なことではありません。このようなことは30年後の現在に至るまで全く無く、当時のフィーバーぶりを語るうえのひとつのエピソードになっています。

合同記者会見

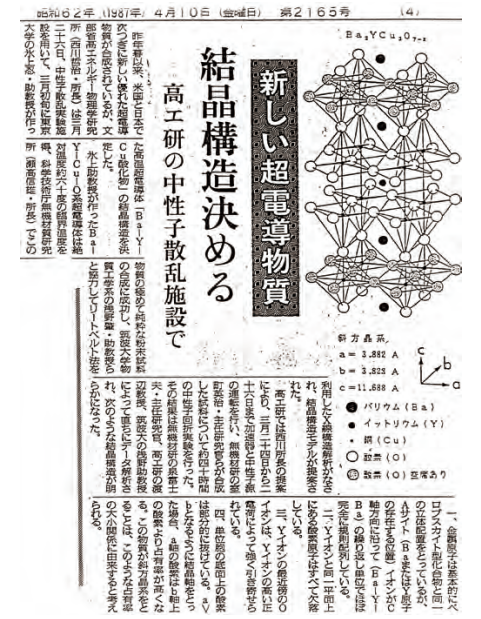
実験は重圧の中で順調に実施され、実験の前からセットされていた高エネ研、無機材研、筑波大の合同記者会見が3月27日に行われました。研究学園都市における省庁の壁を越えた共同研究の将来性を示したことが特に強調されました。この結果は翌朝の新聞紙上はもちろん、暫くは話題をさらうことになりました。その後、研究成果は28日の物理学学会年會、応用物理学会英文論文誌などであいついで発表されました。

超伝導研究がもたらしたもの

その後、多数の新しい超伝導体が合成され、ブームは去ります。しかし、そもそも何故そのような高いTcが実現するのがさっぱ

りわからず、研究者たちは、こつこつと機構解明を続けていきました。この間に、試料合成技術、実験技術が著しく進展し、様々な理論が構築され検証されました。その中で、強相関電子系の物理の重要性が認識され、新しいパラダイムを築いていきました。新しいパラダイムは超伝導以外の分野に波及し、新しい物理を次々と生み出すようになります。すなわち、超巨大磁気抵抗、マルチフェロイック、スピン液体、軌道波、量子スピンスピン、ヒッグス転移等です。強相関電子系は今も新しいトピックスの宝庫なのです。日本は国際社会の中で、強相関電子系の物理でリーダーシップを発揮し続けています。

神山 崇(高エネ機構構構研・J-PARC・総研大)



結晶構造決定を報じる当時の新聞(科学新聞 昭和62年4月10日)

「磁性とは何か」という問いに挑む

中世ヨーロッパで魔術的な力とされた磁力。その探求は近代物理学の誕生に深く関わっているといえます。

それ自身が磁気モーメントを持つ中性子は、いわば最小の磁石です。物質の磁気構造の解析を通して強力な永久磁石の開発に役立つばかりでなく、古(いにしえ)から続く「磁性とは何か」という根本的な問いの答えに迫るツールでもあります。



磁石が、鉄やニッケル等の一部の物質を引き付けたり、他の磁石と引き合ったり反発したりする現象は古くから知られています。磁石に働く力(磁力)の多くの現象は、電磁気学で説明されています。しかしながら、ある物質が何故磁石になり、他の物質が磁石になり得ないかの基本的問題は、物質を構成する原子のレベルまで掘り下げなければ理解ができません(詳しくは、現代物理学の礎を形成している量子力学の助けが必要となります)。現在では、ある特定の物質が磁石になるためには、その物質が強磁性と呼ばれる状態になければならないことがわかっています。強磁性とは、物質を構成する原子の少なくとも一部(例えば鉄原子)が、ミクロな磁石としての性質(磁気モーメント)を持ち、これらが極性をそろえて(S極同士、あるいはN極同士)、物質の中で一定方向に並んだ状態を言います。これを模式的に表すと、図1(1)のようになります(ここでは簡単のために磁気モーメントの配置を2次元平面状に表しました。ただしどのような原子(元素)でもミクロな磁石になれるわけではなく、鉄(Fe)やニッケル(Ni)などの遷移金属元素あるいは、ネオジウム(Nd)などの希土類元素に限られています。これは、これらの限られた元素のみが、原子として磁気モーメントを持つ条件を備えているからです。ところで、物質中の原子がミクロな磁石となると(このような原子を磁性原子という)、強磁性だけではなく、様々な配列をし、それに応じて多彩な性質を示します。

例えば、反強磁性は、図1(2)に示す様に、1種類の磁性原子が互いの極性を反転させながら並んだもので、全体として磁気モーメントはキャンセルされ磁石にはなれません。これらのすべての磁気的状態も、ある一定の温度以上で、ある一定の規則的な配列(秩序)が取れなくなり、各磁気モーメントの向きがバラバラな常磁性状態(図1(3))に転移します。これらの現象は、古典的な電磁気学では説明不可能で、その理解には量子力学を必要とします。さらに実際の物質(磁性体)においては、物質を構成する多数の磁性原子間に様々な相互作用が働いているため、現れる現象(磁性)は多彩です。このような現象を理解するために、多くの研究がなされており、このような研究(磁性研究)は物質研究の大きな分野となっています。

他方、中性子は、それ自身が磁気モーメントを持つので、物質に入射すると原子の磁気モーメントとの相互作用により散乱されます(磁気散乱)。その際、中性子は波としての性質を持つので、物質中に原子の磁気モーメントの配列があると、その配列に応じた散乱波の干渉パターンが生じます。その散乱パターンを解析することにより、その物質中の磁気モーメントの配列の仕方(磁気構造)を得る事ができます。さらに、中性子が散乱される際に生じる運動エネルギーの変化を解析することにより、物質中の磁気モーメントの運動(向きの時間的変動)についての情報を得ることができま

る。このように、中性子の磁気散乱による研究は、原子の磁気モーメントを直接観測することができるので、磁性研究の中でも特に大きな役割を果たしています。次に、中性子ビームを使った永久磁石に関する研究例を紹介します。

磁石(永久磁石)は、磁場をなくしても磁化された状態を保ち、逆方向にある程度の磁場を印加しないと磁化の向きが反転しません。現在最も強力な永久磁石は、いわゆるネオジウム(ネオジウム)磁石で、ハードディスクなどから始まって、ハイブリッドカーなどのモーターや発電機に至るまで、小型で強力な磁力が必要なあらゆる分野で使われています。その基本の成分は、Nd₂Fe₁₄Bと表される金属間化合物ですが、この物質は磁性原子のNdとFeおよび非磁性の硼素(B)が、図2に示すような複雑な構造を作り、Nd原子は2種類、Fe原子は6種類の異なる磁気状態にあることが知られています。さらに、室温付近で、Ndの磁気モーメントとFeの磁気モーメントが、図2の各磁性原子の位置に矢印で示したように、同一方向に整列した強磁性構造をとり、全体として大きな磁気モーメントを持ちます。さらに磁性原子のまわりの原子配置の特殊性により、磁気モーメントを結晶の一定方向(c軸方向:図2の

縦方向)に向ける力(磁気異方性)が強いので、強い磁力を持つ永久磁石としての特性を示すことができるわけです。

実際に永久磁石としての性能を發揮させるためには、磁気モーメントの大きさや磁気異方性といった物質そのものの性質だけではなく、純粋なNd₂Fe₁₄Bに対して、種々の添加物や冶金学的な工夫が必要です。現状のネオジウム磁石は、本来の性質を100%發揮しているわけではなく、また温度が上がると性能が大幅に低下する等の問題があります。永久磁石の性能を上げることは、省エネルギーにも直結するため、Nd₂Fe₁₄Bや関連物質の研究が重要となっています。物質の磁性に敏感な中性子ビームの利用はその有効な手段です。図2に示したNd₂Fe₁₄Bの各磁性原子の磁気モーメントの大きさは、最近日本の研究グループが、J-PARC MLFのiMATERIAという中性子回折実験装置を用いて測定したNd₂Fe₁₄Bの中性子回折パターン(図3にその一部を示す)を解析して得られたものです。このような研究を積み重ねるなかで、より強力な磁石の開発が期待されています。

神木 正史(首都大客員教授)

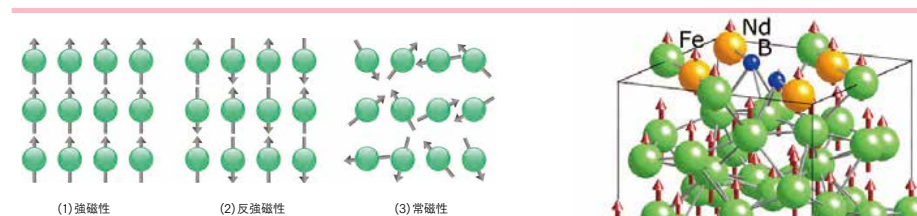


図1. 典型的な磁気構造の例 磁気モーメントを磁性原子(球体)に貫く矢として表しました。矢の向きと長さがそれぞれ磁気モーメントの向きと大きさを表します。

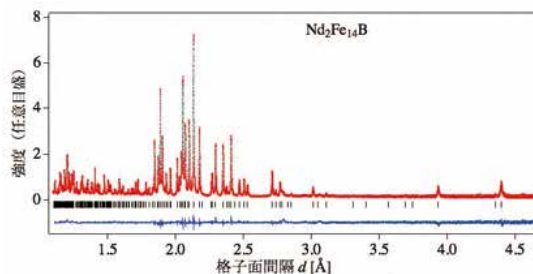


図3. Nd₂Fe₁₄Bの回折パターンの一例(小野寛太ほか、2014) 縦軸は干渉の強さ、横軸は格子面間隔に相当する

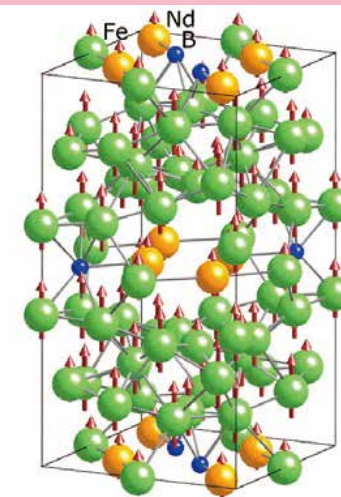


図2. Nd₂Fe₁₄B(ネオジウム磁石)の結晶構造と磁気構造

深宇宙より遠い地球深部を "PLANET"で再現

3億km彼方の小惑星イトカワの試料回収が話題になりましたが、サンプル採取の難しさでは、地球深部のほうが深宇宙(惑星間空間)よりもはるかに「遠い」場所となります。そこで登場するのが地球深部の超高温超高压を再現する装置「圧姫」。これを核とした中性子実験システム「PLANET」ならば、地球深部を「見る」ことができます。岩石やマグマに含まれる水や水素をミクロに観察し、マクロなマントルのダイナミクスまでを解き明かすのが狙いのひとつ。研究が進めば、地球にとどまらず惑星形成の謎にも迫れると、期待がふくらみます。



地球内部の水素

「水素」というと「軽い燃える気体」、あるいは最近では「クリーンなエネルギー源」といった言葉が浮かび、「えっ、地球の中にも水素があるの?」と思われる人がほとんどでしょう。しかし水素は太陽系でもっとも多い元素で、地球にも水あるいは含水鉱物といった形で多量に含まれています。そして水素はわずか数%存在するだけで、鉱物や金属の融点を大幅に下げたり、相関係を変化させるなど、その物性を大きく変化させます。

これまで地球深部における物質の振る舞いを明らかにする有効な手段は、高温高压下のX線実験でした。シンクロトン放射光の発展と共にこの高压X線実験技術はここ30年ほどの間に長足の進歩を遂げ、今や地球の中心部に対応する360万気圧、5000°Cといった超高温高压条件下でも精密なX線実験が可能になりました。この実験技術を使って、我々が直接見ることのできない地球深部を構成するさまざまな高密度鉱物の存在が明らかにされ、研究されてきました。しかしX線では水素はほとんど見ることができません。一方、中性子は水素を見ることができますが、今までは線源が弱く、3万気圧程度までの実験が精一杯でした。

「PLANET」の建設

そこで強力なパルス中性子を発生できるJ-PARCの建設が始まった2000年頃から、若手の地球学者が中心になって、何とか地球深部と同じような高温高压の条件下で中性子実験を行える装置を作りたい、という機運が高まりました。それ以来10数年の年月をかけて、ふたつの大きな科研費プロジェクトを獲得し、MLFのBL11に高压実験に特化した専用ビームライン「PLANET」が完成しました。ふたつのプロジェクトに関わったメンバーは約40名。高压実験やX線には詳しいものの、中性子に関しては一から勉強する人がほとんどでした。中性子のプロに教えてもらいながら光学系や遮蔽体の設計から始め、途中小東日本大震災による約1年間の中断もありましたが、何とか完成に漕ぎつけ、最近ようやく面白いデータも取れ始めました。図1はメインとなる高压高温発生装置「圧姫」で、出力500トンの油圧シリンダーを6個組み合わせ、中心に置かれた立方体を圧縮します。図2はプレス中心部の拡大図で、真ん中に見える立方体は6個のアンプルと呼ばれる超硬合金で作った高压発生部と、1辺が15mm程度の圧力媒体を組み合わせたものです。試料はその中心にヒーターや試料カプセルと共に埋め込まれ、高温高压状態にすることができます。中性子は正面に見るスリットを通り、ふたつのアンプルの間隙を通過して試料に到達し、試料から90度方向に回折された中性子を検出器で測定します(図

3)。左右に見えている縦長の箱状のものはラジアルコリメーターというスリットの一種で、3mm角程度の試料からの回折線だけが検出器に入るように工夫されています。

高压下での中性子回折パターン

図4はPLANETで得られた回折パターンの一例で、高压下でのみ安定な、水素や炭素を含む鉄です。この実験で使われた出発試料は純鉄と含水ケイ酸塩の混合物でした。約7万気圧で1500°Cまで加熱すると含水ケイ酸塩が分解し、水素が鉄に溶け込んで、1気圧下では決して生成しない水素化された鉄が生成します。この実験は地球生成の初期に起きたであろう、隕石が集積してできたような原始地球がマントルとコアに分離した過程に関連した研究の一部ですが、とても高压下とは思えないようなきれいな回折パターンが取れるようになったことがお分かり頂けると思います。一緒にプロットされている黒や青のパターンは、バックグラウンドを正確に決めるためのリファレンスとなるデータです。

PLANETを使って

このようにして、PLANETビームラインはようやく動き始めました。まだ解決すべき問題は種々ありますが、まずは期待通り高い精度とSN比を持った中性子パターンが10万気圧といった超高压下でかつ高温でも取れることが分かり、今まで未知だった地球深部の水素の振る舞いを原子レベルから見ることが可能になりつつあります。さらに、PLANETでは他のさまざまな種類の高压装置も使用可能で、高温だけでなく低温での高压実験も行うことができます。高压下における水素など軽元素の振る舞いは最近、地球科学だけでなく惑星科学や物理、化学、材料科学、など広い学問分野で大変重要な研究対象になっています。この新しい高压中性子実験装置は、今後こうした広い分野で、水素エネルギーの問題などさまざまな研究の役に立つことでしょう。

八木 健彦(東大・理)



図1. PLANETに装備された高温高压プレス「圧姫」

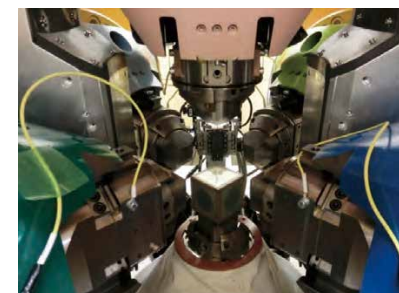


図2. 高压プレスの中心部。6つのアンプルとともに仕込まれた試料(図中央部の立方体)を、六方向から加圧します。

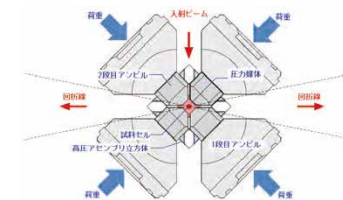


図3. 試料位置での断面図。圧力媒体の中に装填された試料は、2段目アンプルを介して油圧シリンダーに取り付けられた1段目アンプルで加圧されます。試料情報を取得するための中性子ビームはアンプルの間隙を通過して試料に入射され、その回折線が90°方法から取り出されます。

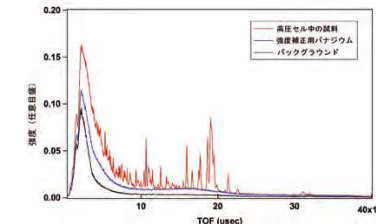


図4. 高压下で測定された中性子回折パターン。(赤)高温高压下から室温にクエンチした後の約5万気圧での試料のパターン。(青)強度補正用のバナジウムのパターン。(黒)空の高压セルを用いて取得されたバックグラウンド。

「ソフトマター」の強さの秘密

鋼よりも軽く強靱なファイバー、ぺちゃんこに潰しても何事もなかったかのように復元するゲル。

中性子で解明された分子レベルの構造から、強さの秘密が明らかになってきました。来るべき「ソフトな素材革命」に、中性子は欠かせない役割を果たします。



ソフトマターとは我々の身近にあるプラスチック（スーパーのレジ袋やポリバケツなど）、液晶（テレビや電卓の表示画面など）、ゲル（寒天など）や生体分子（蛋白質、DNA など）など、金属などに比べて柔らかい物質のことをいいます。これらの物質を研究して、これまでに無い性能や機能を開発する研究が進んでいます。その開発に、中性子が一役買っているのですが、その一端をご紹介します。

何の変哲もないスーパーのレジ袋を思い浮かべてください。これはポリエチレンという高分子からできているのですが、そんなに強いとは誰も思いませんよね。ところが、ポリエチレンの分子をうまく並べてやると、なんと鉄より強い糸を作ることができるのです（図1）。中性子散乱は、重水素化ラベル法を用いることにより、ポリエチレンの中のポリエチレンの構造を調べることができます。一方、X線は結晶構造と結晶していない構造を見分けることができます。その力を利用して、強いポリエチレンの構造の秘密を探りました。図2に長い（分子量が大きい）高分子を少量（約3%）だけ混ぜた試料の中性子とX線の散乱図を示します。この結果から、長いポリエチレンが少量混じっている場合には、シシケバブ構造（図3）を取り易いことが分かり強い糸を作ることができる秘密が明らかになりました。

もう一つ、ソフトマターのスーパーマンをご紹介します。皆さんはおやつに食べる寒天ゼリーをご存知でしょう。海藻のテングサなどから抽出し、お湯に溶かしてから冷やすと固まり、ゼリーになります。これをゲルと言います。固体のようですが、80～90%もの水を含みます。しかし、これらは押し潰すと簡単に壊れてしまいます。ところが四つ足の蛸のような構造をもつポリエチレングリコールという高分子を使ってそれぞれの足をつなげた様な構造のゲルを作ると、ものすごく強いゲル（テトラベグゲル）ができることが分かりました。どのぐらい強いかというと、写真（図4）に示すようにプレス機でぺちゃんこにしても潰れず、また元にもどるのです。なぜ、このような強いゲルができるのかを中性子で調べました。ゲルを圧縮していくときの変形量（横軸）と応力（縦軸）を調べ（図5）、それぞれの変形量での中性子散乱を測定しました。すると、図6に描いてあるように、このゲルの網目には全く欠陥がなく、全体がたくさんのバネでできている構造であるため、非常に強いことが分かりました。これ以外にも、新しい医療材料や摩擦をほとんどゼロにする表面を持つ材料など新たな材料開発が進んでいて、その開発に中性子は大きな貢献をしています。

金谷 利治（京大化研）

柴山 充弘（東大物性研）

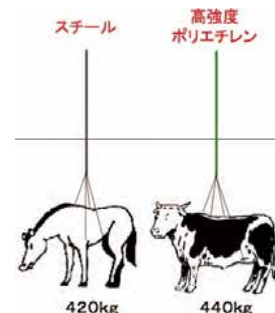


図1. スーパーのレジ袋と同じ素材のポリエチレンをうまく並べて糸にすると、鉄よりも強くなる。

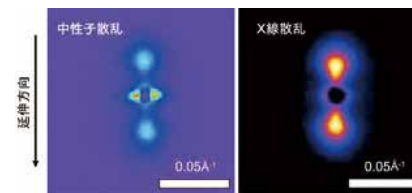


図2. 分子量が大きい高分子を約3%だけ混ぜたポリエチレン試料の中性子散乱像とX線散乱像。

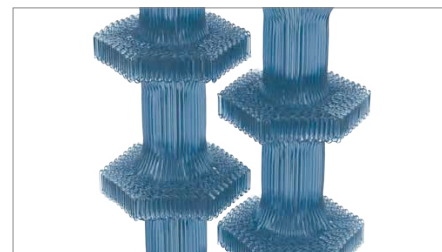


図3. 長さの異なる高分子が伸展き（トルコ料理のシシケバブ）の様な構造をつくること強さの秘密であることが分かりました。

シシ：串部分（伸張鎖結晶） ケバブ：具材部分（折り畳み鎖 ラメラ結晶）

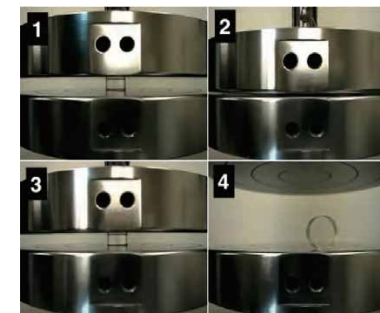


図4. テトラベグゲルをプレス機で押しつぶしている様子。押しつぶしても（2番）、プレス機を上げると元に戻る（4番）。

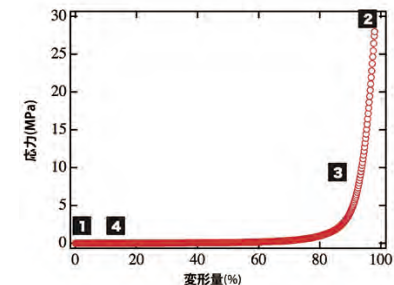


図5. テトラベグゲルを圧縮していくときの変形量（横軸）と応力（縦軸）。グラフの番号は、図4での、それぞれの状態を表している。

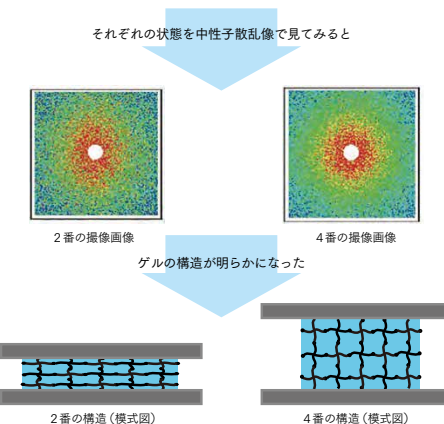
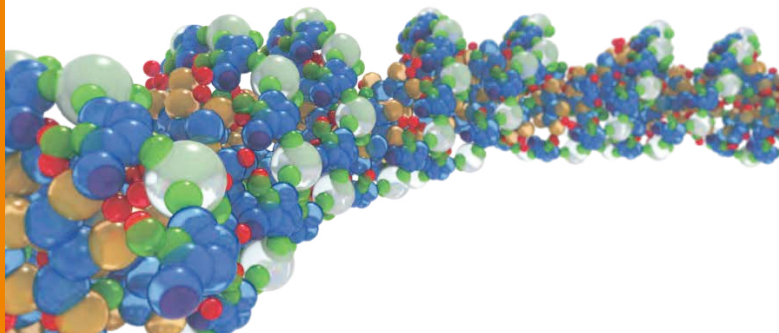


図6. それぞれの状態の中性子散乱像とゲルの構造模式図

タンパク質の “生き生きした表情”を読み取る

「百聞は一見に如かず」である以上に、動画は写真を圧倒します。対象のビビッドな動きが、見る者に多くの情報だけでなくインスピレーションをも与えてくれるからです。中性子線の大きな特徴は、やわらかな高分子が「ゆらぐ姿」を、いわば動画でとらえることができる点。タンパク質の生き生きした表情を知ること、機能の解明が大きく進むと期待されています。



中性子は1932年にチャドウィックによって発見されて以来、X線との違いを利用して無機物質の磁気構造解析や低分子化合物の水素原子の位置決定などに用いられてきました。同じ波長領域でX線と比較してみますと、構造解析の対象の動きに大きな違いを見出すことができます。X線では対象物の静的な像を観測するのに対して、中性子は対象物の動的な挙動も捉えることができます。中性子のエネルギーに着目しますと、構造解析に利用される中性子のエネルギーは数 meV ~ 数十 meV の範囲にあり、このエネルギーはタンパク質分子や原子の熱エネルギーと同程度です。したがって、タンパク質分子と入射中性子との間でエネルギーが授受されて、散乱される中性子のエネルギー（速さと波長）が変化します。したがって、このような中性子の散乱（非弾性散乱）を測定しますとそのエネルギー変化からタンパク質分子の動的な情報が得られますので、この特長をタンパク質研究に利・活用できれば、構造生物学の最重要課題であるタンパク質の構造と機能の関連を明らかにする研究に大きく貢献できます。

タンパク質は結晶構造からイメージされるような静的で硬いものではなくて、軟らかくて常に揺らいでおり、この軟らかさと揺らぎがタンパク質の機能発現に不可欠です。さらに、近年、単独ではポリペプチド鎖が大きく揺らいた変性状態として存在しますが、ターゲット分子と相互作用するとターゲット分子に依存した特定の立

体構造が誘起される天然変性タンパク質が発見されて、タンパク質の構造・機能研究の新しいターゲットとして注目されています。

大腸菌由来のタンパク質 EcoO109I を例に挙げます。EcoO109I は二重鎖 DNA を塩基配列特異的に切断する制限酵素です。この酵素の結晶構造は二重鎖 DNA との複合体とともにわれわれの研究室で決定され、図1に示されているような2つのサブユニット（それぞれ青色と黄色で表示）が会合して機能することが明らかにされました²⁾。しかし、図1の左右2つの構造（リボン図）を比較してみると、直径20Åの二重鎖DNAがEcoO109Iの活性部位に入り込むためには2つのサブユニット間の距離（Distance）がさらに大きく広がるとともに、DNAが結合して切断するときにはその距離が大きく狭まる必要があります。したがって、DNAが結合していないEcoO109I分子は常に2つのサブユニット間の距離を大きく変化させながら水溶液中で揺らいでいることが示唆されます。そこで、DNAが結合していないEcoO109Iの全原子を用いて150 nsの分子動力学計算（MDシミュレーション）を行い、2つのサブユニット間の距離（Distance）をシミュレーション時間に対してプロットしてみました。その結果、2つのサブユニット間の距離は大きく変動し（図2（a））、その変動の過程で二重鎖DNAがEcoO109I分子の活性部位に入り込んで切断されることが明らかになりました。したがって、EcoO109Iが制限酵素として二重鎖DNAを特異的に

切断するためには、水溶液中で大きく揺らいでいる必要があり、X線結晶構造解析の結果は揺らぎの1つのスナップショットを捉えているだけで、X線結晶構造解析だけでは明らかにできないタンパク質の重要な性質（挙動）があることがわかりました。われわれは、MDシミュレーションの結果はあくまでも計算結果で、最終的にこの結果を実験的に明らかにする必要があると考えています。150 nsのMDシミュレーションで計算されたそれぞれ1 psのスナップショットの原子座標からタンパク質分子表面の水和水を正確に考慮してX線溶液散乱強度 $I(Q)$ を理論的に計算してみますと（図2（b））、 $Q = 0.13 (\text{\AA}^{-1})$ 付近の $I(Q)$ の変化が2つのサブユニット間の揺らぎを大きく反映していることが示されました。したがって、今後はこの Q 領域で中性子の非弾性散乱を測定し、タンパク質分子の動的な挙動を実験的に明らかにしていきたいと考えています。以上、X線にはない中性子の特長を利・活用したタンパク質の

構造と機能の研究について、簡単に紹介してきました。中性子の特長は水素原子の位置が正確に決定できることだけではありません。生命科学の分野では生体高分子の機能に関係した動的な挙動も捉えることができる点でも大きく貢献できると思います。今年はラウエやブラッグ親子らが築いた近代結晶学の誕生から100年の記念すべき年（世界結晶年）です。次の記念すべき年は中性子が発見されてから100年が経過する2032年だと思えます。もう少し先ですが、それまでに、X線と中性子のそれぞれの長所を最大限に伸ばし、それらを統合してタンパク質に代表される生体高分子の構造と機能の関係を明らかにしていく研究を深化させていく必要があると思います。

佐藤 衛（横浜市立大院・生命ナノシステム）

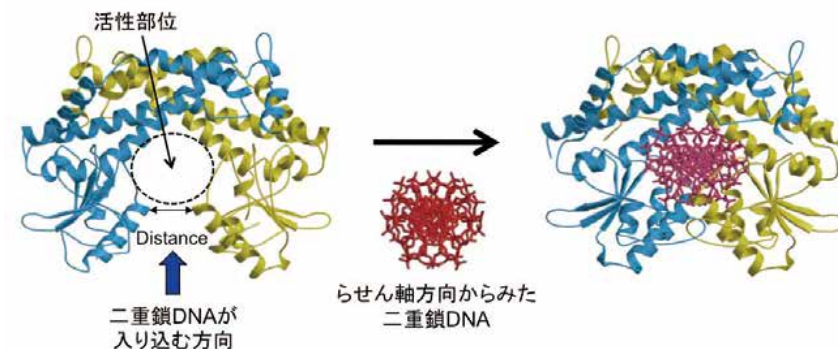


図1. 大腸菌由来の制限酵素EcoO109Iの構造（左）と二重鎖DNAが結合したEcoO109Iの構造（右）。2つのサブユニットはそれぞれ青色と黄色のリボンで表示されている。点線の丸で表示されている部分が酵素の活性部位（DNAが切断される場所）。

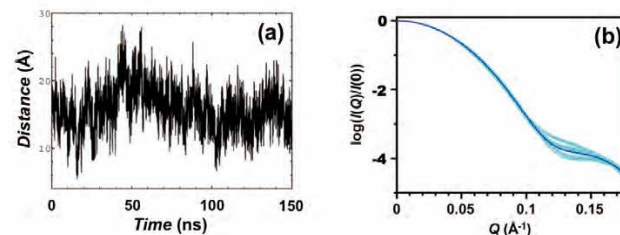


図2. 150 nsの分子動力学シミュレーションの結果。(a) 2つのサブユニット間の距離（Distance）をシミュレーション時間に対してプロット。(b) 1 psのスナップショットの原子座標からX線溶液散乱強度 $I(Q)$ を理論的に計算し、そのプロファイル変化（淡青）を表示。濃青のプロファイルは淡青で描かれた $I(Q)$ プロファイル変化を平均したものである。

1) <http://www.tsurumi.yokohama-cu.ac.jp/IDP/index.html>

2) Hashimoto, H.; Shimizu, T.; Imasaki, T.; Kato, M.; Shichijo, N.; Kita, K.; Sato, M. J. Biol. Chem. 280, 5605-5610 (2005)

水から読み解く「おいしさ」とは？

電子線でもX線でもつかめない水分子(H₂O)のふるまいを、中性子線が明らかにします。茨城県産「干し芋」のしっとりした食感、保存性とおいしさの絶妙なバランスで成り立っています。単純な水分量だけでなく、どのような状態で水分子が物質と結合しているかが、おいしさや保存性を左右するとされています。「中性子非弾性散乱」は蛋白質やDNAの解析だけでなく、おいしさや食の安全に関わる新たな知見を蓄積しつつあり、大きな期待を寄せられています。



中性子科学などのわが国の原子力科学研究の拠点となっている茨城県東海村は、全国的に干し芋の産地としても有名です。日本を代表する保存食である干し芋は、最近では、しっとりとした食感を持つ嗜好品として好まれていて、1年の中でも冬場だけの食品として食されています。しかし、嗜好品としての干し芋は、美味しさ追求するために乾燥しすぎないようにしており、カビが発生しやすいという欠点があります。保存食としての役割に重点が置かれた昔ながらの干し芋は、乾燥度合いが強くなる食感は失われ硬くなりますが、カビや腐敗には強くなるのです。

一般に、食品中の水は食品の保存性に関係していて、食品の品質劣化の原因となりますが、一方で水分は食品にソフトで口当たりの良い食感を与えます。また、多くの伝統的な乾燥食品や最新の技術による冷凍食品などは、ガラス化という食品の物理化学的な変化を利用することによって保存性を高めています。ガラス化は食品自体が持つ性質だけでなく、そこに含まれる水分の影響も強く受け、例えばかつおぶしのような乾燥食品では水分量を減らすことでガラス状態になっていることが知られています。

食品中の水は「水和」と呼ばれる状態で食品と結合しています。この水和水は、強く結合して停留しているものから、流動的に食品中を拡散しているものまで様々です。この水の動きはナノ秒、ナノメートル(ナノ=10億分の1)という非常に速く小さな動きであり、

私たちの日常の感覚では到底分かりません。このような水和のミクロな現象を捉えられるのが、中性子非弾性散乱です。この実験法では、分子との衝突による中性子のエネルギー変化(非弾性散乱)を分析することで、分子の運動が分かります。食品における水の研究では、水分子の運動性や水分子・水分子集合の存在状態に関する情報が中性子非弾性散乱で得られます。食品の腐敗の原因となる微生物は、結合力の弱い水を使って増殖すると考えられていて、食品と水の結合状態や水和水の分子運動を観測することは、食品の品質を理解するために重要となっています。

このように、食品の品質と水の関係を考えるとき、食品に含まれる水分量だけでなく、水分の状態が重要です。食品科学では、1950年代に導入された水分活性という値が、水分の熱力学状態を表す良い指標とされており、特に食品の保存性をよく説明できることが経験的に知られています。食品中の水は、水分活性の大きさによって、自由水や結合水といった用語で分類されることが多いのですが、実際には水分活性が意味する水の状態には未解明な点も多く残されています。これまでの私たちの蛋白質を用いた研究では、水和水が水素結合を介してネットワーク構造を形成することが水和水の分子運動と密接に関わることが新たに分かりました。中性子非弾性散乱でしか分からない食品中の水の状態を明らかにすることによって、現在広く用いられている食品分析法の物理化学

的な根拠を与えることができれば、教科書を書き換えるような革新的な成果が期待できます。

2012年、白菜の浅漬けによる大腸菌O157の集団食中毒がございましたが、塩分濃度の高い伝統的な漬物ではこのような食中毒は起きていません。伝統的な漬物は塩分により水分量の割には水分活性が低く、雑菌や大腸菌の繁殖が抑えられているのです。実際に塩が食品中の水の分子運動を抑制するような効果を持っていることを示すようなデータが私たちの中性子非弾性散乱実験で得られてきています。集団食中毒の原因となった浅漬けは野菜を調味液に漬けただけで、塩分濃度が低いために水分活性が高いのです。近年、消費者の減塩志向もあり、浅漬けが消費者のニーズともマッチして広く流通しています。漬物に限らず広く食の安全を守るためには、食品中の水の状態をよく理解することが必要です。

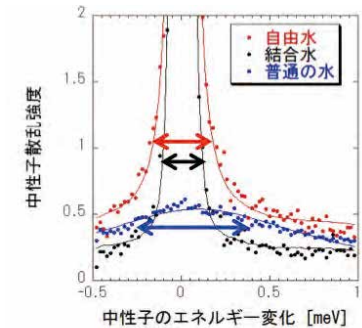
中性子非弾性散乱は歴史的に物性物理学の研究分野で発展してきた研究手法ですが、近年の実験装置や解析技術の進展とともに、蛋白質やDNA分子の水と解析を目的とした生命科学研究でも積極

的に用いられるようになってきました。東海村では世界最強の中性子源J-PARCが本格稼働し、これまでにあまり適用されてこなかった食品中の水の研究という思わぬ活用が期待できるようになってきています。2013年にユネスコ無形文化遺産に登録された和食は、世界的にも注目されています。食品の乾燥処理や塩漬けは和食の代表的な調理法の一つといえます。和食文化としてのその独特の調理法や保存技術は、伝統的な知恵によるものとされますが、海外に和食のすばらしさを伝えるとき、その調理法や保存法の科学的背景を明らかにすることはインパクトが大きくなります。食品を分析する実験手法のひとつとして、中性子非弾性散乱実験は大きな可能性を秘めているのではないのでしょうか。食の保存や美味しさを実現する伝統的な知恵と技術の秘密を、最先端の量子ビームテクノロジーによって解き明かそうとする研究は、まだ始まったばかりです。

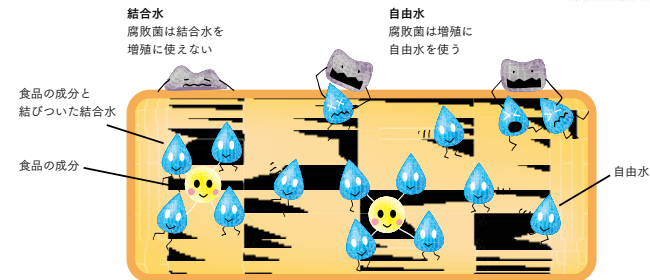
中川 洋 (原子力機構 JAEA・量子ビーム、JST・さきがけ)
片岡 幹雄 (奈良先端大院)



伝統的な食品加工の知恵と技を中性子科学で解き明かす



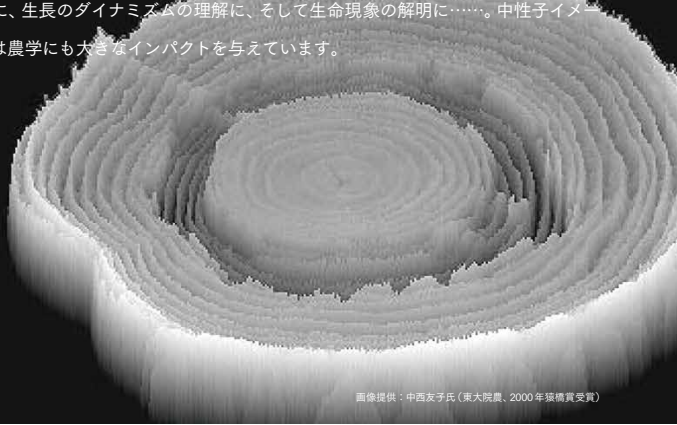
食品に含まれる水分



水が食品と強く結合するほど、散乱曲線の幅が狭くなります。

生命を司る水の「見える化」

1998年に発表されたこの写真は、輪切りの木材(厚さ1cmの杉小口材)に含まれる水の量を中性子で「見える化」した先駆的な仕事でした。さらに研究は進展し、植物内部の水の「量」だけでなく「流れ」をも見るできるようになっています。栽培作物の品種改良に、生長のダイナミズムの理解に、そして生命現象の解明に……。中性子イメージングは農学にも大きなインパクトを与えています。



画像提供：中西友子氏(東大院員, 2000年環境賞受賞)

水は植物の中を動き、根から吸収した生長に必要なミネラルを届け、光合成で作られた糖の貯蔵場所である球根等に運びます。しかしそれだけではありません。葉から水を蒸発させる蒸散によって体温を調節しています。このように多くの働きを持つ水は植物にとって生命維持に欠かせないものです。植物は動物と違って、生息している場所から簡単に移動することができません。ところが、生息場所の環境が突然変わることがあります。たとえば、日照りになって土壌の水が少なくなり、根から水が吸収できなくなっても、植物は生きていくために必要な水を何とか取り入れなければなりません。また、水不足の時は、得られた僅かな水をいかに効率的に利用するかがその生存、生長戦略上重要になります。

植物中の水分分布を観る

植物の中にある水の状態を観察することで、その植物の健康状態を知ることができます。ちょうど、医師が患者の血圧を測るようなものですが、植物には動物にある拍動がありません。また、水は植物の内部を流っているため直に見ることもできません。どのようにして植物内部の水の流れを観測すればよいでしょう？ 私たちは、植物内部の水分布を画像で観察することができます。中性子イメージングを用いています。中性子線はレントゲン写真で用いられるX線と同じ放射線の一種で、重い元素ほど濃い透過画像が得ら

れるX線とは異なり、水素(H)などの軽元素でも濃い透過画像が得られるという性質を持っています。すなわち、水素を含む化合物、例えば水(H₂O)などがよく写る透過画像、言ってみれば植物内部の水の「レントゲン写真」が得られるのです。また、植物を回転させながら撮影することで、3次元の画像を得ることができます(図1)。カーネーションの花が萎む前後の画像を比較することで、どのように水分分布が変化するかを観察できます。萎んだ後は花卉から水が失われますが、種をつける機能を持つ子房は逆に大きくなり水分も増加しました。花が萎む現象は単純に花卉が萎れるだけではなく次世代を育てるためのものであることが解ります。このように、植物内部の水分分布を観察することで、植物の水利用に関わる様々な事柄を解明することができます。

植物内を流れる水

植物内部の水分布を画像にする中性子イメージングですが、そのままでは根や茎を流れる水の動きを画像にすることはできません。植物の中を常に水が流れている場合はその水分には変化が現れないためです。そこで、水の流れを観察する役割をもつ「トレーサー」が必要になります。トレーサーは、液体等の流れを追跡するための位置マーカーとなる微量な添加物質です。私たちは、植物の水移動を中性子イメージングで観察するためのトレーサーとして

重水(D₂O)を選択しました。水と重水は化学的性質がほとんど同じなのですが、中性子イメージングでの透過画像の濃さが大きく異なるためにトレーサーとして利用することができます。さて、重水トレーサーをトマト苗に与えると、重水が植物の中に取り込まれて茎を上がっていく様子を透過画像上の濃度変化で観察できます(図2)。植物の根は地中にあるので観察が難しいのですが、中性子イメージングでは透過画像で観察することができます。

水の移動 - 土壌と根の関係

中性子イメージングでは、水を吸収した土壌と植物根を区別するのは難しいのですが、根の写真と中性子イメージングを組み合わせると、土壌中の水分分布と根の分布との関係を知ることができます。もみ殻培地(この場合、植物を育てるための土壌に換わる土台のこと)でコマツナを栽培コンテナの下部5cmの高さまで灌水

して栽培し、培地の中性子イメージングと培地内に発達した根の写真撮影しました。水の供給を中断した乾燥状態と灌水後の湿潤状態での培地中の根の周辺の水分分布の変化が、この観察により解析できました。これらの研究は、例えば、まず植物の根が活発に水を吸収する部分を中性子イメージングで見つけ出し、その後その部分に効率的に灌漑水を与える方法の研究、あるいはその部分の遺伝子を解析しなぜ水を効率的に吸うのかを調べ、品種改良を行う研究などに役立てることができるでしょう。このように、植物中の水の動きなど、目に見えないものを観る研究は意外なことを発見することができ楽しいものです。これからも私たちは、農業に関わる「目に見えないものを観えるようにする」方法を開発し続けていきたいと考えています。

松嶋 卯月(岩手大・農)

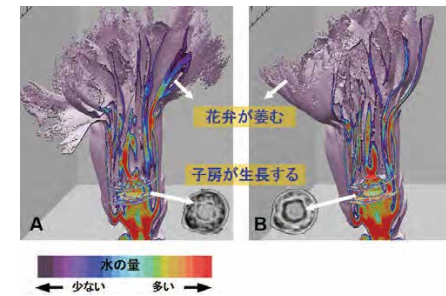


図1. カーネーション切り花の中性子イメージング
萎む前の花卉(A)の中に水が、萎んだ後(B)ではほとんど無くなり、逆に子房部分では水分が増えています。

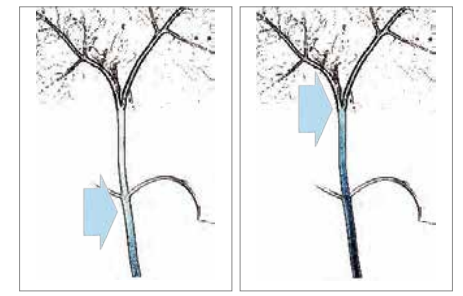


図2. トマトの茎の中を重水トレーサー(紺色)で観察することにより水分が植物体内に吸収されて行く様子が観察されます。

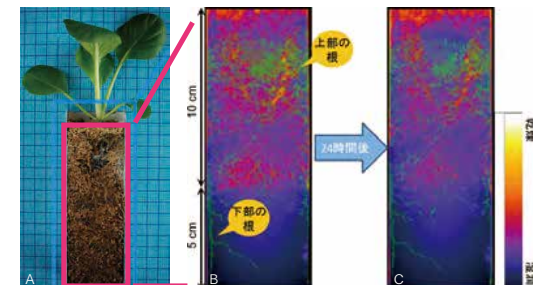
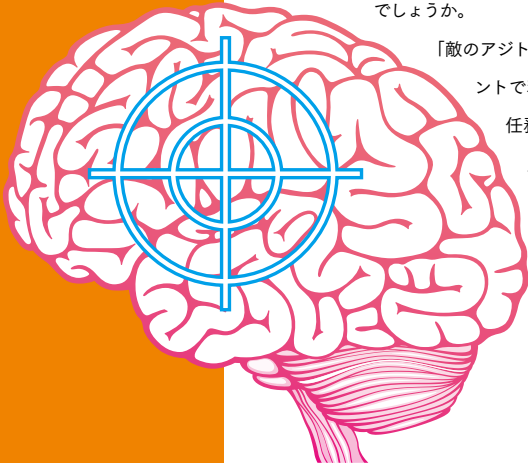


図3. 灌水栽培を行ったコマツナの栽培培地(根系を緑のレイヤーで示した)
(A) 根系と培地
(B) 24時間乾燥させた培地の中性子イメージ
(C) 5cm深さで灌水して24時間後の中性子イメージ

最悪のがん「神経膠芽腫」を 中性子で狙い撃つ

最悪のがんのひとつと言われる脳腫瘍「神経膠芽腫」。こうしたがんを中性子で叩く「BNCT」と呼ばれる治療法のメカニズムを、アクション映画で例えてみるとこんなふうでしょうか。



「敵のアジトに潜入した作員がターゲットをマーク。ピンポイントで精密爆撃し、周囲にはいっさいダメージを与えず、任務を完了」

原子炉ではなく小型の加速器から中性子を得られるようになったことで、BNCTの新たな展開が見えつつあります。

中性子とがん治療

中性子を使ったホウ素中性子捕捉療法（Boron Neutron Capture Therapy, BNCT）は従来の放射線治療で対処できなかった「がん細胞に対する選択的粒子線治療」という課題に挑戦しています。BNCTは、ホウ素同位体 B-10 の薬剤を患者に投与し、病巣部に中性子線を照射してがん細胞内で ^{10}B (n, α) ^7Li 反応を起こさせ、放出される 2 つの粒子：アルファ線とリチウム原子核によってがん細胞を選択的に破壊するものです。放出される 2 つの粒子の飛程は $10 \mu\text{m}$ 弱と短く、がん細胞を破壊して止まり、隣接する正常細胞への影響は最小限に抑えることができます。

見える相手から、見えない相手の放射線治療へ

手術、抗がん剤、放射線治療はがん治療の 3 本柱とされていて、手術で切除できる早期がん、抗がん剤の効果が大きい急性白血病などの一部のがんは治癒が期待できるようになってきました。しかし、手術での完全摘出ができないがん、放射線や抗がん剤に対する反応が良くないがんも数多くあり、新しい治療法の研究が進められています。

悪性脳腫瘍の膠芽腫（こうがしゅ）は、中枢神経である脳組織に発生し細胞レベルで周囲に広がる性質を持っています。最新の手術機器を使った外科治療や放射線治療は MRI や CT 検査で「見

える」がんの塊に対してはとて精度の高いものです。しかし、膠芽腫は放射線が効きにくいうえ、治療の計画に使う MRI 検査でも細胞レベルでの周囲への広がりが「見えない」ため神経障害をきたしやすい脳内の治療には限界があり、難治性がんの代表格となっています。

こういった状況では周りにある正常組織を障害せずに強力な効果を発揮する新しいタイプのがん治療法が必要で、BNCT の領域では当初から膠芽腫が対象となってきました。筑波大学でおこなった BNCT の臨床研究では 1 年強とされてきた平均的な生命予後が 2 倍に延びる優れた臨床成績を収めています。さらに、運動機能や容姿の障害を重視する観点から、悪性黒色腫などの手足や顔に発生するがん、再発がんのような 2 度目の放射線治療時に副作用のリスクが高いがんも BNCT の治療対象となっています。海外ではイタリア、イギリス、アルゼンチン、フィンランド、アメリカ、スウェーデン、台湾などの研究グループが臨床研究を行っていて、効果的で安全な治療条件が明らかになってきています。

中性子捕捉療法は新しい段階へ

BNCT は中性子線を用いるため、従来研究用原子炉を使った基礎・臨床研究が行われてきました。初期の BNCT は、当時の中性子のエネルギー特性に関係して全身麻酔下に関頭手術を行って、

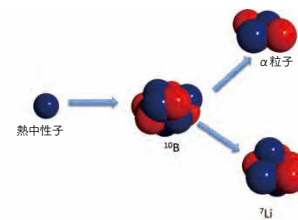
脳を直接照射するという大がかりなものでした。現在では熱中性子ビームにより、患者は麻酔や手術を必要とせず BNCT が行えます。

しかし病院外である原子炉で BNCT を行うには、不便さや患者の負担、医療上のリスクが避けられません。現在の原子力関連の規制法のもと BNCT 用に原子炉を病院内に建設することは不可能で、2011 年の東日本大震災で日本原子力機構（東海村）の研究炉が停止してからは、国内での BNCT 実施は京都大学原子炉実験所（熊取）だけとなりました。

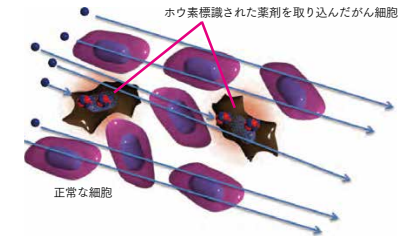
このような状況の中、京都大学の研究施設で世界初の加速器中性子を使った BNCT の安全性を審査する研究が始まっています。加速器を使った BNCT 装置は、陽子ビームをベリリウム等の標的

に入射させて中性子を発生させます。筑波大学の装置を例にあげると、高速中性子混入低減を考慮した BNCT 専用リニアック、ベリリウム標的、モデレータ部分（中性子の減速調整）、コリメータ部分（熱中性子を集中）、シールド部分（患者の被ばく低減）から構成されます。また、総合南東北病院、国立がんセンター、東京工業大学の各研究グループでも加速器 BNCT のプロジェクトが進行中で、研究用原子炉で行われてきた BNCT は加速器中性子源の実用化に向け新たな一歩を踏み出しました。加速器中性子源が普及すれば、BNCT によるがん治療がどこでも手軽に行えるようになります。中性子が、多くの難治性がんの治療に新たな夜明けとなることを期待します。

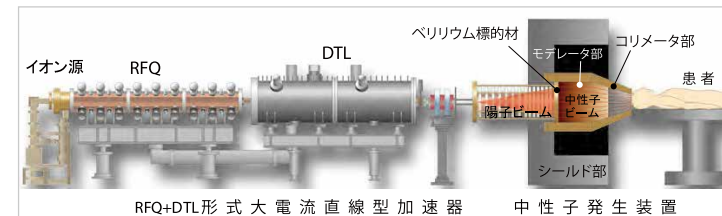
山本 哲哉（筑波大学附属病院）



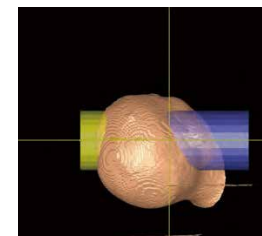
中性子をホウ素に反応させ、α線とリチウム原子核を発生させる



ホウ素を含んだ薬剤はがん細胞だけに取り込まれており、発生したα線とリチウム原子核によって選択的にがん細胞だけを破壊することができる



筑波大学で開発中の BNCT 用加速器中性子源（現在は京都大学原子炉実験所にて治療が行われています）



CG による事前のシミュレーションと、中性子による治療前の風景

エンジン内を駆け巡る オイルを可視化する

レシプロエンジン内奥のオイルの挙動をスローモーションで捉えた画像は、大きな驚きをもって迎えられました(日産自動車、原子力機構。2008年)。

あくまで「予想」にすぎなかったコンピュータ・シミュレーションに「正解」を与えることで、世紀を超えて蓄積されてきたエンジンに関する知見をさらに一歩進めることができました。理論と実験の両輪で発展する理工学の象徴的な成果と言えるかもしれません。さらに、こうした研究をベースに3D撮像や元素識別など、新たな中性子イメージングの世界が広がっています。



中性子イメージング技術を使うと他の技術では難しい、例えば運転中のエンジンの中の潤滑油の動きを見たり、測ったりすることができます。エンジン性能を決定するオイルの振る舞いは、工夫して設計されている内部構造物によって回転数などの変化に対応して時々刻々と変化する事が予想されていました。しかし、これまでその様子を実験によって確認する術がありませんでした。図1は、日産自動車と共同して得られた車用エンジン実験の結果を示しています。エンジン内部を研究用原子炉 JRR-3 と高感度化した高速度カメラを組み込んだ専用装置を用いて、数千分の1秒毎のスローモーションで中性子透過像を撮影して、オイル分布を測定したりしました。一連の実験によって得られたスローモーション動画データは大変貴重な情報を含んでおり、低燃費エンジンの開発に寄与しています。ここでは、破壊検査ができない古文化財や運転中の機械部品などの内部を見たり、内部状態が分からない対象物内の現象を解明したり、内部の冷却材などを測定したりすることを目的として開発されてきた中性子イメージング技術について、基礎と利用例、そしてパルス中性子を利用した最先端技術について紹介します。

中性子イメージングの基礎と利用例

研究用原子炉や加速器で発生させた中性子ビームをエンジンなど対象物に当て、ビームの下流側に中性子撮像システムを置きま

す。すると、物質の種類と厚み、また当てた中性子のエネルギー毎に違った濃淡となる中性子透過像を記録することができます。類似の技術としてX線イメージングがあります。中性子は軽元素を、X線は重元素を可視化し易い特長があり、両技術は相補的な関係となる非破壊検査技術であると言えます。中性子イメージングは、特にアルミニウムなど中性子を良く透過する材料でできた機械部品の中に、水・オイル・樹脂など中性子を透過しにくいものが入っている対象物の可視化や計測を得意とします。このため、機械部品内の冷却材等の流体計測技術の一手法として注目され、技術開発と応用がなされてきました。例えば、熱交換器内の冷媒の流動、流動層内の粉体の流動、人工衛星用エンジン内の液体燃料の流動、液体金属二相流内のガスと液体金属流の可視化や計測に利用されています。

中性子3次元CT技術による立体的観察と3次元測定

中性子3次元CT(コンピュータ断層撮像技術)は、中性子ビームを使って対象物の内部を立体的に観察・測定するために開発されてきた技術です。対象物を回転させながら透過像を記録して、画像再構成処理により立体データに変換しています。この技術は、コンクリートの亀裂から水がしみ込みコンクリート内を拡散する現象の研究、原子力機器内の沸騰流を立体的に可視化し、蒸気の3

次元分布データベースを整備する研究、燃料電池内の水の移動現象の立体的現象把握研究などに利用されています。ユニークな技術として、マルチビーム中性子4次元CT技術があります。この技術は、液体金属流の3次元速度分布の時間変化データを計測する目的で開発されました。これらの研究や産業利用は、国外ではスイスの研究所(PSI)にある加速器中性子源や研究用原子炉が利用されており、古文化財、化石、機械部品などの内部の可視化や産業利用、そして混相流の測定が実施されています。国内では、主にJRR-3と京都大学の研究用原子炉KURが共同利用施設として利用されてきました。なお、JRR-3は東日本大震災の影響を受けて現在は停止中です。

最先端技術：パルス中性子イメージング

J-PARCなど加速器中性子源は、中性子をパルス状に発生させる特徴があります。利用者は、このパルス中性子と飛行時間法を組み合わせる事により、高エネルギーから低エネルギーまでの幅広い中性子領域の中から利用したい特定のエネルギー領域だけを選択できます。

まず高エネルギー領域を利用する場合は、中性子の共鳴吸収エネルギーが元素の種類によって違うことを利用して、材料の元素識別2次元イメージング、元素識別型中性子3次元CT、温度分布イメージングなど従来技術では実現できなかった事が可能となります。また、低エネルギー領域では、ブラッグ散乱を利用した材料組織イメージングにも大きな技術的飛躍が期待されています。

これらの新技術は今後の産業利用や学術利用へ向けた応用が期待されており、大学や原子力機構により積極的に技術開発が進められています。現在、2014年度未完成を目指して、J-PARCの物質生命科学実験施設内に共用の中性子イメージング専用ビームラインである「物質情報3次元可視化装置(螺鈿)」の整備が進められています。本装置は、世界最高強度のパルス中性子ビームを使って世界最高の空間分解能で記録できるように設計されています。完成後、利用者は目的に適した撮像システムを選択して、機械部品等の従来型イメージングのみならず、元素識別型イメージング、金属組成イメージング、その他磁場のイメージングなど従来技術とは異なる新しい物理量の可視化や測定を試みる事ができる予定です。

呉田 昌俊(原子力機構 JAEA・基礎工)

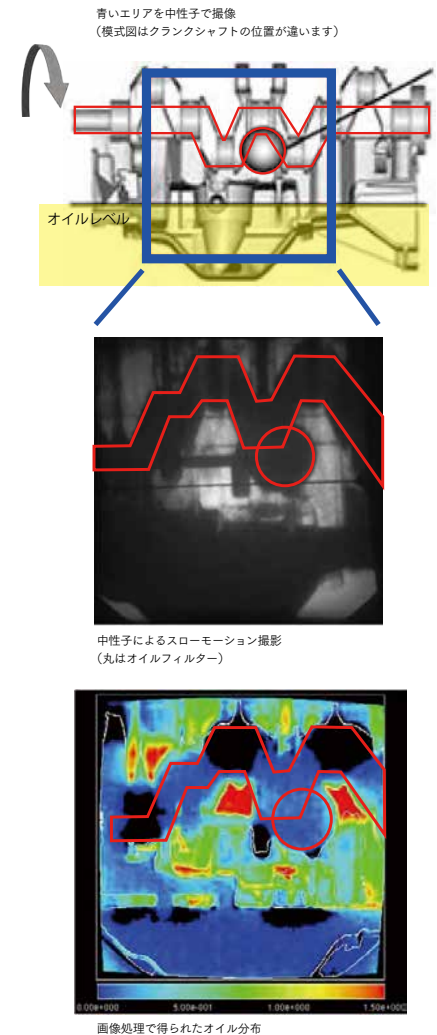


図1 運転中のエンジンを中性子で撮影

高性能バッテリーの開発を目指して

有用なものを貯蔵し、必要なときに取り出して使う技術を人類は磨き続けてきました。縄文土器や正倉院宝物殿も、あるいは巨大なダムや超低温の冷凍庫も……。そして電気を貯める高性能バッテリーもその系譜に連なります。

リチウムイオン充電電池をさらに高性能にする研究開発に、中性子だからこその貢献があるので。



未来の技術？ 古い技術？

科学技術は日進月歩で進みますね！ でも、ひとつひとつ見ていくと、停滞することもあるし、何かきっかけで急に進んだりするんですよ。

電気自動車は、まさに、それです。

電気自動車と聞くと、クリーンでワクワクするような未来技術が詰まっている印象ですが、実は、その歴史は古く、20世紀に入る直前、ガソリンエンジン車やディーゼルエンジン車と同じ頃に登場したのです。電気自動車は構造が単純で、製造も運転もメンテナンスも容易だったので、最初は一挙に普及したそうです。1900年のパリ万博で出品されたのは有名な話です。図1の写真は、あのポルシェが開発したハイブリッド車！で、運転者はもちろんフェルディナンド・ポルシェ博士。

一方、ガソリン車は、エンジンの構造が複雑であるため、技術的課題の克服に長い時間がかかり、また、ユーザも、エンジン始動時のクラック操作や走行時のギアシフトと、運転には技術が必要でした。結果として、100年前にはガソリン自動車よりも電気自動車の方が普及していたのです。

ところが、南北戦争を終えて、急速に発展を遂げつつあったアメリカでは、その広大な国土における移動手段として、電気自動車の航続距離の悪さが大きな問題でした。容量が大きくコンパクトで軽いバッテリーがなかったからです。発明王のエジソンがバッテリーの開発に取り組んでいたという話がありますが、当時の技術では、

そのようなバッテリーを作ることができませんでした。それに対して、ガソリン車は、20世紀に入りエンジンの技術が進歩し、フォードが1908年に有名な「T型フォード」を発売し、爆発的にヒットします。いつのまにか、電気自動車は忘れ去られてしまいました。

リチウムイオン電池の登場

1990年代に入って、状況は一変します。背景には地球温暖化問題の深刻化がありますが、ニッケル水素電池やリチウムイオン電池の登場が大きいです。これらの電池は、まずモバイル機器への利用で急速に普及するとともに、高性能化が進みました。20歳代以上の方は、ニッカド電池が急速に置き換わっていったことを覚えているかもしれませんね。

リチウムイオン電池はニッケル水素電池よりも、さらにエネルギー密度が高く、普及に拍車がかかります。そして、安全面など、大型化に向けた課題を克服し、ついにリチウムイオン電池をバッテリーとして搭載した電気自動車が開発・販売されるようになりました。それが、2009年発売の三菱自動車「i-MiEV」であり、2010年発売の日産自動車「リーフ」です。「i-MiEV」は、電池総電力量16kWhで、航続距離120km、「リーフ」は、同じく24kWh、228kmだそうです。電気自動車の開発研究は、ガソリン車並みの航続距離を実現することを目標として現在も精力的に行われています。しかし、航続距離をガソリン車並みにあと3倍延ばすのは容易なことではありません。

電池の中で何が起きているの？

図2および図3はそれぞれ、リチウムイオン電池の充電と放電の原理を示しています。充電時には、図2に示すように電池を外部電源に接続し、正極にプラスの高い電圧をかけます。そうすると、リチウムイオンは正極物質（たとえばコバルト酸リチウム）から電解液中に抜け出し、電解液を通過して、負極（例えば炭素）に挿入されます。これをインターカレーションといいます。この時、電子は正極から外部回路を通過して負極に移動します。一方、放電時には、図3に示すように充電時とは逆向きに、イオンや電子が自発的に動きます。リチウムイオンは負極から出て、電解液を通過して、正極に流れ込みます。同時に電子は、負極から正極に向かって外部回路を流れる（電流は正極から負極に向かって流れる）ため、外部回路の途中にある負荷（電球やモーターなど）に仕事をさせることができます。

充電によりエネルギーが蓄積されるのは、電圧をかけることで正極物質を酸化（たとえばコバルト原子の酸化数が増大）し、化学的に不安定な状態にするからです。一方、放電では、還元（コバルト原子の酸化数は減少）し安定な状態に戻るため、蓄積されていたエネルギーが放出されます。電池とはこのように、酸化還元反応により、化学エネルギーを電気エネルギーとして取り出す装置なのです。

充電・放電の反応の進行に伴い、リチウムイオンが動き、酸化・還元しますので、原子配置が刻々と変化しているはずですが、急速充電と緩やかな充電で反応の仕方や原子配置が違うかもしれません。もしかしたら、充電と放電ではそもそも反応の仕方が違うかもしれません。しかし、電池の中で起こっている変化を誰も見たこと

がありません。バッテリーは密封されているからです。

中性子の役割

リチウムは電子が少なく、あまりX線を散乱する力がありませんが、中性子はリチウムで強く散乱されます。さらに、中性子は透過能が高く、バッテリーの容器の中の化学反応を原子レベルで見ることができ、つまり、充電や放電が起きている時に、内部で何が起きているか、見ることができるのです。もう少し詳しく言うと、数%の電流が流れ、数%のリチウムの出入りがあった時に、結晶の原子配置のどこに何個のリチウムが入り出したか、定量的に知ることができるのです。

自動車用バッテリーの課題は？

現在の電気自動車の航続距離は、エネルギー密度の高い液体燃料を使っているガソリンエンジン車やディーゼルエンジン車にはまだ及びません。バッテリーのエネルギー密度を上げるためには、正極・負極とも、リチウムイオンの吸蔵・放出量が充分大きい材料が必要です。正極・負極物質は、電子もイオンも、容易に流れる必要がありますが、電解質は、電子を流さず、リチウムイオンだけが流れる材料でなければなりません。材料としては、何度も繰り返し吸蔵・放出しても壊れない材料が求められています。以上のような様々な要求を満たす材料を開発し、より高性能なバッテリーを実現していくためには、“電池の中でどのような変化が起きているのか”を“実際に電池を作動させながら”測定する技術が必要となります。

神山 崇（高エネ機構構構研・J-PARC・総研大）



図1. ポルシェが開発したハイブリッド車
© ウィキメディア・コモンズ

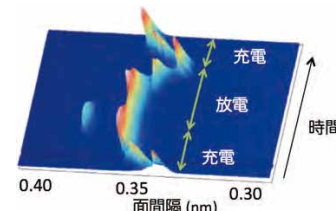


図4. 実際の電池を充電・放電をさせながら中性子回折測定結果。ピークはブラッグ反射に対応するので、これを解析すれば充電・放電とともに原子配列がどう変化したかが解明できる。

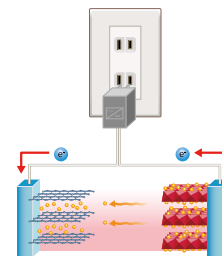


図2. リチウムイオン電池の充電反応。外部電源に接続し、正極に高いプラスの電圧をかけることで、リチウムイオンは正極から抜け出して負極へ挿入され、エネルギーが蓄えられる。この反応をインターカレーション反応という。

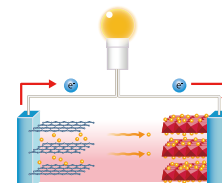
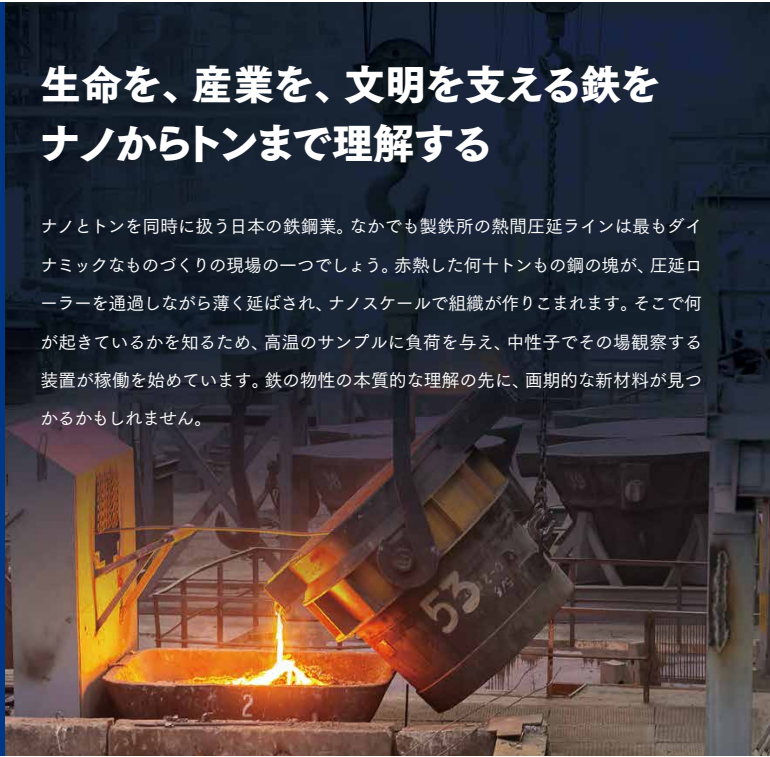


図3. リチウムイオン電池の放電反応。充電とは逆向きのインターカレーション反応は自発的に起こり、リチウムイオンは負極から抜け出して正極へ挿入される。このとき、電流が外部回路を正極から負極に向かって流れるので、途中にある負荷（図では電球）に仕事をさせることができる。

生命を、産業を、文明を支える鉄を ナノからトンまで理解する

ナノとトンを同時に扱う日本の鉄鋼業。なかでも製鉄所の熱間圧延ラインは最もダイナミックなものづくりの現場の一つでしょう。赤熱した何十トンもの鋼の塊が、圧延ローラーを通過しながら薄く延ばされ、ナノスケールで組織が作りこまれます。そこで何が起きているかを知るため、高温のサンプルに負荷を与え、中性子でその場観察する装置が稼働を始めています。鉄の物性の本質的な理解の先に、画期的な新材料が見つかるかもしれません。



地球は鉄の星

鉄 (Fe) は地球全質量の 35% を占め、地殻の元素存在割合を示すクラーク数では酸素、シリコン、アルミニウムに続いて第 4 位 (4.7%) の元素です。鉄鋼 (Fe に他の元素を加えて特性を向上させた合金) は豊富な資源量、利用の容易さと優れた特性のために社会基盤材料の中心であり、世界の金属総生産量の 95% を占めています。同時に、Fe は血液の重要な成分であり体内で酸素を運ぶ大切な働きをしています。我々が生活する地球は水と空気と鉄の星であり、鉄鋼は「溢れてそのありがたみを知らず」と思われがち存在です。

世界の粗鋼生産量の推移と今後の展望

国・地域の社会成熟度は一人あたりの鉄の使用量が図 1 のどこに位置するかでわかると言われます。交通機関、建物等都市基盤の整備が進むと鉄の使用量が増え、社会が成熟してくると一人あたり年間約 300kg の鉄鋼を消費しています。一方、現在までの世界の鉄鋼生産量の推移を示す図 2 を見ると、第二次大戦後に大きく増加し、しばらく停滞した後、中国、インド、ブラジル等の生産量が急増して年間生産量は 15 億トンにも達しています。しかし、世界の人口と図 1 を参照すると、地球上ですべての人類が文化的な生活を送るためには、鉄鋼生産量はまだまだ不足しています。

鉄鋼の高機能化と鉄資源循環 (リサイクル) 向上に向けた研究の重要性

1889 年 (パリ万博) に完成したエッフェル塔 (324m、7300t の鉄鋼) はベッセマー法の導入による鉄の大量生産時代幕開けの象徴でした。日本では 1958 年に高度成長の象徴となる東京タワー (333m、4200t の鉄鋼) が建設されました。エッフェル塔で使われた半分近くの量で建設が可能となったのは鉄鋼の強度・靱性 (ねばさ) が大きく向上したからです。その後、研究が進みさらに 2~3 倍の強度を示す加工熱処理鋼板が登場して、2012 年には 634m の東京スカイツリーが溶接構造物として完成したのです (先の 2 つの塔はリベット構造でした)。その加工熱処理工程では原子レベル (0.00000001 (ナノ) m) の組織制御を 1~100 m 単位で実現しています。

一方、豊富な鉄資源も無尽蔵ではなく、その鉱石品位は年々劣化しています。また、現在の製造プロセスでは鉄鉱石から鉄鋼 1 トンを生産する工程で約 2 トンの二酸化炭素を排出するという問題もあります。環境負荷低減製鉄プロセスの開発や高度なリサイクル技術 (通常はカスケード利用と呼ばれリサイクルにより再生される製品は低品質用途に限られる) の開発が急がれています。現在、鉄鋼の低環境負荷・高機能化の最先端技術において、日本は世界をリードし続け、自動車等の日本の産業競争力を支えているのです。

鉄鋼強靱化・信頼性向上研究における 中性子ビーム実験の有効性

鉄鋼の特性を向上させるには、合金元素の添加と組織制御が鍵となります。合金元素添加はきわめて有効ですが、資源枯渇が懸念される希少元素の使用を減らす必要があります。元素戦略の対象であるニオブ、タングステン、ニッケル等を最も多量に使っているのは鉄鋼業なのです (ごくわずかな量の添加でも生産量が多いからです)。今後は、希少元素の利用を避けてリサイクル性に優れた高機能鋼を低環境負荷で製造することが目標となります。そのためには、種々な特性とマイクロ組織の関係を解明し高度な組織制御を行う必要があります。鉄鋼は結晶構造の異なる多くの粒子から構成される複雑な組織を示します。マイクロ組織が変わると強度が変わります。図 3 は高強靱性を発現する鋼のマイクロ組織の例で、観察倍率を変えると段階的であることがわかります。「1000°C 近傍の塑性加工において鉄鋼のマイクロ組織や力の分布がどのようになっているのか?」は最も知りたいことですが、これまで直接調べる方法がありませんでした。中性子ビームはマイクロ因子の探査子として透過能や元素識別能に優れ、この難題を解決してくれようとしています。中性子ビームの散乱回折現象を利用すると、たとえば熱間圧延で生じるマイクロ組織変化をその場で測定できます。温度及び塑性加

工履歴を変化させながら、試料内部で生じる加工硬化、回復、再結晶、析出、相変態等の組織形成過程が回折プロファイルから追えるようになるのです。最近の実験の様子を図 4 に示します。ここでは加速器中性子回折装置に加熱炉と負荷装置を組み込んで、加工熱処理中のその場測定によって新しい鉄鋼材料を創造する基礎研究が進められています。ごく最近、元素戦略の国家プロジェクトによって、本格的な加工熱処理シミュレーターが茨城県東海村の J-PARC 工学材料回折装置に導入されましたので、他国の追従を許さない鉄鋼研究が加速することでしょう。

「安全に使われてこそ構造材料」ですが、強いはずの鉄鋼が破壊することがあります。鉄鋼のマイクロ組織は人体の組織に似ているところがあり、うまく遣り込み、病気になるように保守点検補修する必要があります。まだ原因が解明されていない破壊現象が多くあります。その解明において破壊の要因となる残留応力分布、欠陥や水素の存在等を物体内部まで非破壊で調べられる中性子実験は有力な研究手法になるでしょう。中性子のこのような工学的利用は始まったばかりの未開拓分野であり、今後の発展が期待されます。

友田 陽 (茨城大・工)

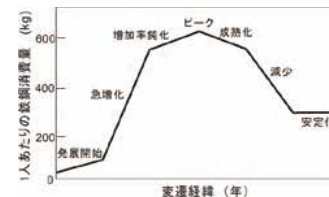


図 1 社会基盤の整備に伴う一人あたりの年間鉄鋼消費量の推移
 引継: 転換点に立つ日本の鉄リサイクル (2001) 日鉄技術情報センターより

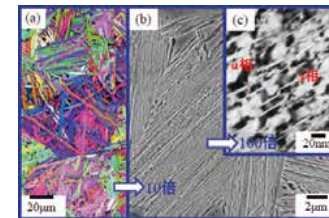


図 3 高強度 (2GPa)・高靱性を発現する鉄鋼の階層的マイクロ組織: (a) 結晶方位をカラー表示した SEM/EBSD による IPF マップ、(b) SEM イメージ、(c) 透過電子顕微鏡組織 (異なる結晶構造の α 相と γ 相で構成されている)。

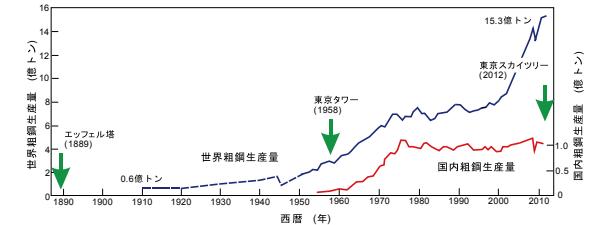


図 2 世界の鉄鋼生産量の推移
 世界の粗鋼生産量の推移: よゝら Vol.19 (2014), No.1, p.79 ほかを用いて作成

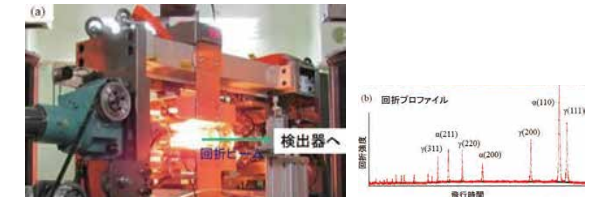


図 4 加工熱処理に伴う組織変化の中性子回折その場測定: (a) 実験装置 (入射ビームが後方から入り 90 度方向から回折ビームを検出)、(b) 回折プロファイルの例 (α 相と γ 相の比率の変化等がわかる)。

中性子パワーで半導体をつくる

計測や解析ではなく、ものづくりのために「核変換」が利用されているレアな事例をご紹介します。

純シリコン (Si) に不純物を添加するドーピングの工程は、半導体製造の出発点であり品質に大きく影響します。外から不純物を加えるのではなく中性子を照射することで、結晶格子を構成する物質を他の元素に変身させ(核変換)、シリコン中にリン(P)が均一にドーピングされた良質の半導体をつくる手法が中性子ドーピング法です。日本はシリコン単結晶の最大の供給国であり、作られる製品は高耐電圧特性が求められるパワー半導体として省エネルギーに大きく貢献します。

中性子照射によるシリコンドーピングの原理と特徴

シリコン単結晶に中性子を照射すると、シリコン中に均一に存在する²⁸Si(同位体比3.1%)は中性子を捕獲し³¹Siとなります。生成した³¹Siは不安定であるため、β-崩壊(半減期2.6時間)によって安定核種である³¹Pとなります。つまり、生成した³¹Pがシリコン中に均一に添加(ドーピング)されたn型の半導体となります。このように、中性子を利用してドーピングを行う手法を中性子核変換ドーピング(Neutron Transmutation Doping: NTD)と言い、NTD法でドーピングしたシリコンをNTDシリコンと言います。NTDシリコンの照射では、後述するように、シリコンインゴットを回転、上下反転させて照射することにより、シリコンインゴット全体を均一に中性子照射します。このことから、NTD法ではリン(P)を均一にドーピングさせたn型半導体シリコンを製造することが可能となります。

NTD法の原理は1951年にKarl Lark-Horowitzによって提案され、1961年にベルテレフォン研究所のTanenbaumらによって実験的に示され、実用的なシリコン照射は1970年代に開始されました。NTDシリコンは他のドーピング手法に比べて均一にドーピングされていることから、高耐圧特性に優れています¹⁾。NTDシリコンは、高耐圧の絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)等のパワー半導体に主に使用されています。

パワー半導体は電力を制御するもので、家電から電車等まで幅広い機器のインバータ等において使用されています。特にNTDシリコンを使用した高耐圧のパワー半導体は、電車やハイブリッド自動車等で活用されています。

他のドーピング手法の1つにガスドーピング法があります。この方法は結晶生成時にドーパントガスを吹き付ける方法です。NTD法に比べてドーピングの均一性は劣りますが、NTD法のように研究炉の稼働状況に関係なく、より安価に生産できることから、近年ドーパント量の多い低抵抗品についてはNTD法からガスドーピングへの移行が進んでいます。

原子力研究開発機構におけるNTD-Si照射設備と照射実績

日本においては、日本原子力研究開発機構(前の日本原子力研究所)が昭和50年、シリコン材料メーカーからの依頼により研究炉におけるNTDシリコンの製造に関する実験を開始し、昭和52年から実用照射を行ってきています。NTDシリコンの生産を行っている研究炉JRR-3は熱出力20MWのオーブンプール型の研究炉で、シリコン照射孔は炉心周りの重水反射体領域に設けられ口径6インチ(及び5インチ)、長さ60cmのシリコンインゴットの照射が可能です。NTDシリコン照射装置は、原子炉の径方向の中性子束分布に対しては、照射試料を一定速度で回転させながら、また、

軸方向の中性子束分布については、照射途中でインゴットを上下反転させて径方向・軸方向の均一照射を実現しています。直近の平成22年度において年間約4トンのNTDシリコンを生産しています。平成23年度以降は、東日本大震災の影響により研究炉JRR-3は停止していることから、日本におけるNTD-Siの生産は止まっています。

世界のNTDシリコン生産

世界のNTDシリコン生産量の調査結果によると総重量で約184トン(2012年、中国を除く)と推定²⁾されています。この重量は、2004年³⁾の総重量約131トンの140%に相当します。インゴット口径毎の需要量は、現在のところ6インチ径が最も多く、それに次いで5インチ径となっていますが、今後は、5インチの需要量は減っていくものと考えられています。

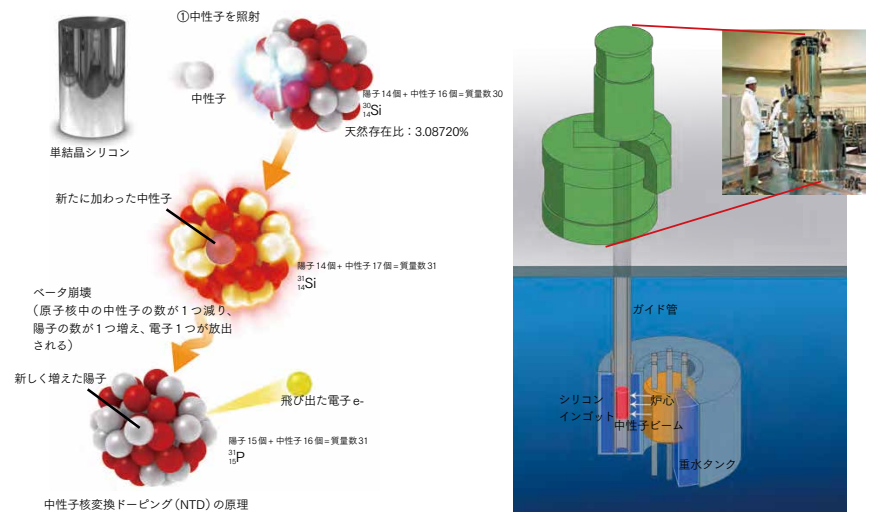
日本のNTDシリコン生産は、世界生産重量の約2~3%にすぎませんが、NTDシリコンの需要の多くは日本企業によるものであるため³⁾、国内での生産量増加が期待されています。韓国のHANARO炉、オーストラリアのOPAL炉、ドイツのFRM-II炉及びベルギーのBR-2炉では、8インチ口径のNTDシリコンについても生産しています。

NTDシリコンの今後の動向

経済状況、他技術の進展状況等が関係することから、今後のNTDシリコンの需要動向を予想することは難しいですが、一般的に低抵抗(100Ω・cm程度以下)のNTDシリコンについてはガスドーピング等への移行が進んでいるため、需要量は今後減少傾向にあると考えられます。高抵抗品のNTDシリコンは電車等の社会インフラで使用されており、この分野の需要は今後も安定して続くものと考えられています。現在、日本でNTDシリコンを生産しているのはJRR-3のみであり、安定供給の観点等から、将来複数の原子炉による生産が望まれます。

シリコンIGBTに代わる高電圧パワーデバイスとして、シリコンカーバイド(SiC)の技術開発が近年盛んに進められています。SiCはSi-IGBTに比べて低損失であり、高温にも強いという特長を有していることから高耐圧パワー半導体として有望視されています。しかし、SiCは製造コストが高いという問題を抱えていることから、NTDシリコンを用いたSi-IGBTの需要は今後も続くものと考えられています。

米田 政夫(原子力機構JAEA・研究炉加速器管理部)
川崎 幸三(放振協 RADA)



1) UCS半導体基板記述研究会編;シリコン科学、リアライズ社(1966)
2) IAEA; Neutron Transmutation Doping of Silicon at Research Reactors, TECDOQ-1681
3) NTD技術検討会; 研究炉等(JRR-3, JRR-4 and JMTR)を用いた中性子核変換ドーピングSi半導体(NTD-Si)製造機能拡充の検討、JAEA-Review(2005-006)

中性子で原子を観る 複雑な装置のシンプルな原理

「チョッパー分光器」とは、いってみれば穴から押し出されるパスタを同じ長さに切り揃える回転刃のような装置。また「単色化用結晶」は角度によって目の粗さが変わる篩（ふるい）のようなもの。いずれも特定の波長（エネルギー）の中性子を選別する役割を果たします。

1994年にノーベル物理学賞を受けた「中性子三軸分光器」。J-PARCで活躍中の「中性子チョッパー分光器」。これらのきわめてシンプルな原理と装置の概要を紹介します。



物質中の原子やマイクロな磁石（スピン）が、空間的にどのような構造を持っているか、また時間とともにどのように変化していくか（⇔時空間相関）、を知るために中性子散乱は大変役立ちます。ここでは、代表的な二種類の中性子実験装置について説明します。

中性子三軸分光器

中性子が試料に散乱される際に、散乱前後での中性子の方向とエネルギーの両方を測定することにより、物質のマイクロな運動を観測することができます。図aのように、試料の前には弾性散乱実験の場合と同様に特定のエネルギーの中性子を取り出すための中性子単色化用結晶を配置します。単色中性子は、試料に入射すると、その一部は原子を振動させることによりエネルギーを失います。このエネルギー変化を、試料の後ろに配置されたアナライザ結晶により検出することができます。これにより、中性子が試料に与えた運動量とエネルギーを知ることができるので、試料中の原子がマイクロにどのような運動（振動）するかを知ることができます。この実験装置は、中性子三軸分光器と呼ばれていて、物質の熱的性質や誘電的性質を、マイクロな視点から理解するために用いられます。さらに、中性子のスピンとしての性質に着目すると、磁性体のマイクロなスピンの運動を観測することが可能となります。パートラム・ブロックハウスは中性子非弾性散乱実験に用いる三軸分光器の先駆的

開発が評価されて、クリフォード・シャルとともに1994年にノーベル物理学賞を受賞しました。米国に帰化した白根元博士は、この分光器を駆使して、磁性体や誘電体の理解に大きな貢献をしました。現在では、集光型単色化用結晶などを用いることで、短時間の測定が可能となるような工夫がほどこされ、回折実験と非弾性散乱実験の両方に使用可能な汎用分光器として広く用いられています。

中性子チョッパー分光器

J-PARCなどのパルス中性子源に設置されている最新のチョッパー分光器（図b参照）を用いると、原子やスピンのマイクロな運動を効率的に観測することができます。図bに示されるように、中性子源から周期的に発生するパルス中性子は、高速で回転しているチョッパー（穴の空いた回転体）を通過します。このとき、中性子が発生する時刻と中性子源とチョッパーの距離が分かっているので、チョッパーの回転速度と位相（周期運動の過程でどの点にあるかを示す変数）をコントロールすることで特定の速度の中性子を選別し単色化することができます。次に、中性子は試料に散乱され様々な速度が変化します。この散乱中性子は、弧状に配置された2次元検出器で検出され、各場所における到達個数と時間が記録されます。到達時間から散乱中性子の速さが計算され、エネルギーが求

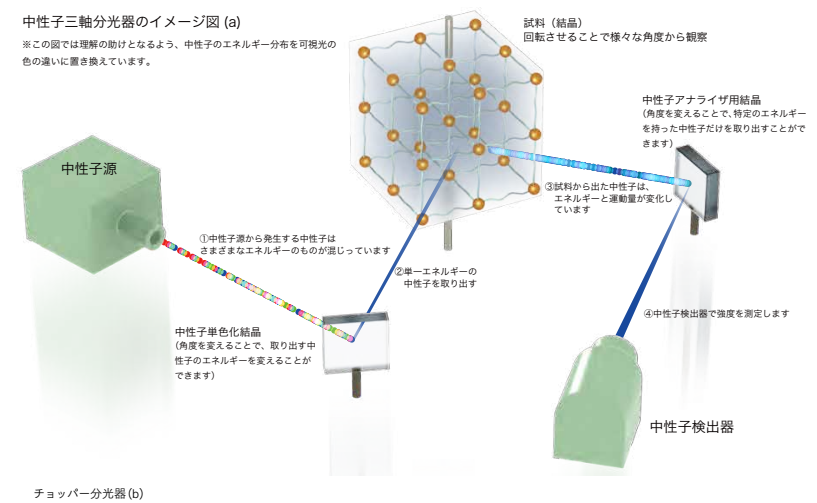
められます。三軸分光器では、アナライザ結晶で特定のエネルギーの散乱中性子のみを取り出し、それ以外の中性子は捨てていたのに対して、チョッパー分光器では全ての散乱中性子を測定している点で効率的になっています。実際の実験では、図cに示されるよう

な、運動量とエネルギーの散乱中性子マップがいつでも測定され、マイクロな運動の詳細が明らかにされます。物質の新しい状態や性質の解明に役立つことが期待されています。

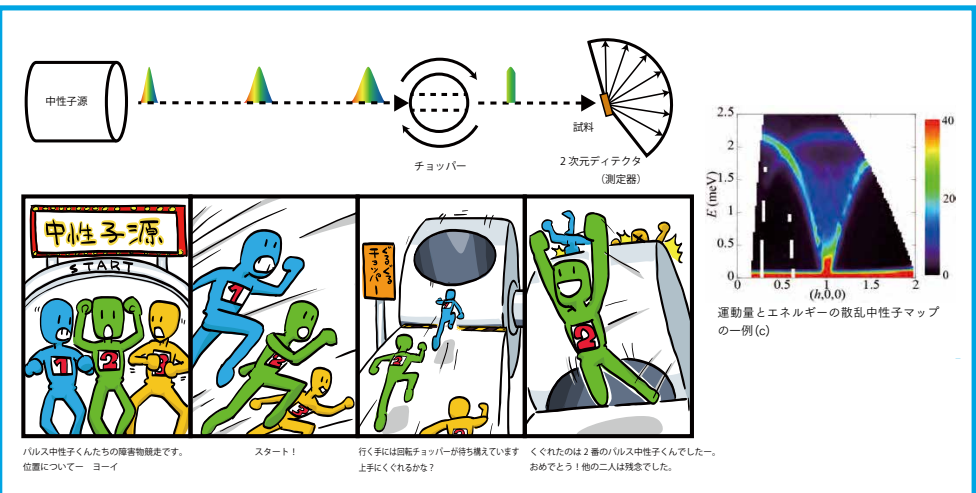
益田 隆嗣（東大物性研）

中性子三軸分光器のイメージ図 (a)

※この図では理解の助けとなるよう、中性子のエネルギー分布を可視光の色の違いに置き換えています。



チョッパー分光器 (b)



中性子レンズや中性子ミラーで 思いのままにビームを操る

どんなに軽くて丈夫でも、加工できない材料は使えません。どんなに優れていても、制御できないビームはやはり使えません。中性子線のひとつの特徴はその強い透過力にあります。同時にそれは中性子線が制御の難しいビームであることを意味しています。しかし困難ではあっても不可能ではありません。中性子利用がこれほど進んだのは、その可能性を信じた多くの研究者がエネルギーを注いだからなのです。そしてその努力は「宇宙のはじまり」や「素粒子の誕生」など、根源的な謎に迫る基礎物理の研究に重なっていきます。



大型中性子施設 J-PARC の完成で大強度中性子ビームの利用が可能になってきました。それでもまだビーム強度が充分とは言えない測定も多いのです。こうした状況を補うのが中性子光学です。可視光線を鏡やレンズを利用して集光させるのと同様に、特殊な鏡やレンズを使って中性子線を反射屈折させ中性子の利用効率を上げる技術です。中性子は電荷を持たない粒子なので簡単には軌道を曲げる事はできないのですが、中性子の性質を詳しく研究することで制御可能になってきました。以下、中性子の軌道を曲げる方法について、中性子の性質を交えて紹介していきます。

中性子は速度ごとにさまざまな名前と呼ばれます（冒頭ページの表参照）。研究に利用するのは、主に熱中性子及び冷中性子、そして時に極冷中性子及び超冷中性子です。量子力学によれば、粒子性と波動性は表裏一体で、中性子も波動として振る舞い、その波長はド・ブロイ波長と呼ばれます。遅い中性子ほどド・ブロイ波長は長く、熱中性子付近では固体中の原子間隔に近い値になります。

中性子は電荷を帯びていない棒磁石です

中性子は電荷がないので電場からの力を受けませんが、スピンの方向にスピンの方向に磁気双極子能率（棒磁石のような性質）を持っています。中性子は、磁場 1T あたり約±60neV のポテンシャルエネルギー（位置エネルギーのこと）を感じます。複号はスピ

ンが磁場に平行な場合に正、反平行の場合に負を意味します。平行スピンの中性子は 1T の磁場の中に入り込むために、速度 3.4m/s が必要になります。速度が 3.4m/s よりも小さいと磁場に入ることができず、押し返されます。熱中性子や冷中性子は、この反射の限界速度よりもはるかに速いので、正面から磁場に入るとはほぼ影響を受けません。ところが、かするように斜めに入るとすると、中性子は押し返されて軌道が曲げられます。一方で、反平行スピンの中性子の場合にはそのまま通過します。むしろ磁場でわずかに加速されます。つまりスピンの方向によってビームを振り分けることができます。

四極磁石や六極磁石などは軸から離れるにつれて磁場が強くなる構造です。平行スピンの成分は軸に引き寄せられ、反平行成分は軸からはじかれますので、スピンの方向に応じて集束レンズ及び発散レンズを作る事が可能になります。

中性子は原子核から強い力を受けます

物質を構成する原子は原子核と電子でできています。しかし、原子核の体積は原子のおよそ 1000 兆分の 1 ですので、力の影響は大幅に薄められ、弱いポテンシャルエネルギーを感じるのみとなります。これをフェルミポテンシャルと呼びます。ニッケルはフェルミポテンシャルが大きな元素の代表格でおよそ 250neV です。

この坂を駆け上がってニッケルの内部に入り込むためには速度 7m/s が必要です。表面に浅い角度で当たった場合には、中性子は反射されます。まさに鏡のように反射するので、中性子ミラーと呼ばれます。

フェルミポテンシャルが負になる物質もあり、チタンの場合はおよそ -50neV です。ニッケルとチタンの薄い層を、互い違いに繰り返し積みあげたとしましょう。対層の厚みが 25nm だとすると、ド・ブロイ波長が 25nm の中性子は屈折を受けて反射されます。この波長を中性子速度に換算すると 14m/s です。つまりニッケル表面の反射限界を超えていても反射できるわけです。対層の厚みを徐々に変えながら丹念に積み上げて、反射限界を大幅に改善した鏡をスーパーミラーと言います。

中性子ミラーの形状を楕円体面にすれば点から点への集光光学系が作れ、放物面にすれば平行中性子ビームを点に集光する光学系が作れます。また磁場を内包する物質でミラーを作ると、特定方向のスピンの持つ中性子だけを反射する鏡を作ることができます。

中性子を屈折させるレンズも作れます

中性子は、物質の境界面を通過する時に法線方向に減速（或いは加速）されるので、屈折されます。屈折角は遅い中性子ほど大きくなり、速度 400m/s の中性子について、およそ 0.004° 程度になります。これを 100 枚積み重ねると 0.4° も曲がり、実用的なレンズとして使えます。

中性子を検出する装置

中性子は電荷がないので物体を透過し易く計測は難しいのですが、特定の物質と強く反応する性質を利用することで可能になります。例えば ^3He というガスは中性子を吸収して陽子と 3 重水素という荷電粒子を放出します。この 2 つの粒子を計測することで間接的に中性子の検出を行うことができます。

素粒子物理学においても重要な中性子

宇宙を形作る素粒子は途方も無い高温にあった初期宇宙で誕生しました。多くの謎に包まれた宇宙の歴史を紐解くには、初期宇宙での素粒子の性質を知らねばなりません。現在の宇宙は低温ですが、量子力学的効果を通じてごく僅かに現れる高温状態の影響を観測することが可能です。ただし、その効果はあまりにも小さく、電気を帯びていると簡単にかき消されてしまいます。中性子は電気を帯びておらず、なおかつ寿命が長く、また光学的に制御できるため、素粒子物理学においても重要な役割を果たしています。

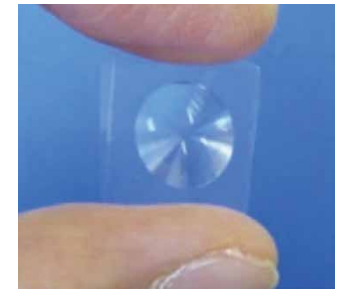
清水 裕彦（名古屋大・理）



強力な永久磁石で組み上げた Halbach 型磁極構造の六極中性子磁気レンズです。



金属板の上に作られた最新型の回転楕円面形状の中性子スーパーミラーです。



フッ素樹脂で作られたフレネル形状の中性子収束レンズです。厚みは 100 μm で、積み重ねて使います。

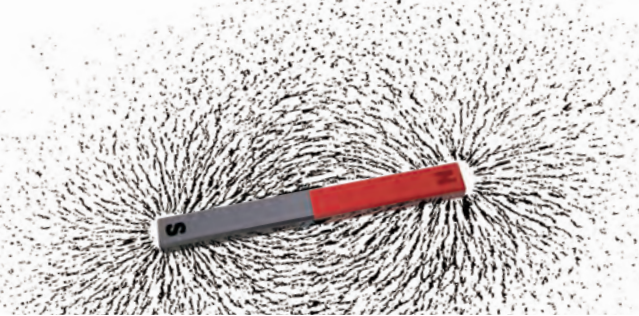


中性子計測用の検出器です。どの位置で検出されたか識別できる構造になっています。

中性子が教える ありのままの磁場の姿

砂鉄を板にまいて磁力線を可視化するように、中性子線を使って空間中の磁場を直接観察する技術の開発が進んでいます。

「熱伝導」や「応力分布」や「電波伝搬」も、かつては不可視の現象でした。しかしそれらの解析ツールは現在、機器開発の現場で当たり前に使われています。磁場解析もそうならないはずがありません。直接観察の先には、より性能の高い磁気関連機器開発や、新たな磁気材料創成の可能性が広がっています。



身の回りにはたくさんの磁気を使用した機器があります。たとえば、家電製品の中にはたくさんの電気モーターが使われていますし、パソコンの中に入っているハードディスク、クレジットカード、携帯電話のバイブレーターやマイク、スピーカーなど、日常生活において磁気を扱う機器は非常に重要な役割を果たしています。とりわけ電気モーターは、近年では電気自動車に使用されていることから、その高性能化は、省エネルギー問題の解決に大きく貢献すると考えられています。磁気に関する現象や磁気を利用した機器の性能を理解する上で、磁場を観察することはとても重要です。磁場の観察と言って多くの方が思い出すのは、磁石の周りに砂鉄を振り撒くと磁力線の模様が浮き上がってくる実験ではないかと思います。この実験自体はとても単純なものです。目に見えない磁力線の模様を目に見えるように「可視化」することが磁気を直感的に理解する上で便利であることがよくわかると思います。そのため、様々な磁場の可視化手法がこれまでに開発されていますが、ここでは中性子を用いた磁場の可視化技術について説明します。

中性子は、陽子と共に原子核を構成する粒子ですが、1/2のスピンの持つため、原子核と同じ程度の大きさの非常に小さな磁石のように振る舞います。そして、この中性子が磁場のある空間の中に入ると、ちょうどコマが回転しながら首を振るように、中性子のスピンも磁場の中で同じような首振り運動を始めます。これをラーモア

歳差運動と言います。この歳差運動の仕方は、中性子が感じる磁場に依存しますので、中性子のスピンのような歳差運動をしたかを調べることによって、中性子の周囲にある磁場の「強さ」や「向き」を知ることができます。また、中性子は電気的に中性のため、電子による散乱をほとんど受けることが無く、高い物質透過能力を持ちます。そのため、光や磁場センサー等を使った他の手法では可視化できない物質の内部の磁場を調べることが、中性子を使うことで可能になります。つまり、中性子のスピンの状態を場所ごとに調べることができれば、物質の内部や空間中の磁場がどのような分布をしているかを知ることができるようになります。

さて、この中性子を用いた磁場の可視化実験では、中性子ビームの1つのスピン成分のみのスピン偏極した中性子ビームを利用します。そして、観察対象にこの中性子ビームを照射し、磁場の空間を透過した後の中性子スピンの状態の変化を検出し、中性子ビームが感じた磁場の強さや向きを調べます(図1)。この方法を利用して、トランスの鉄心に使われている磁性材料の中に発生している磁場の分布を調べた結果が図2です。ここでは、入射する中性子スピンの方向を3次元的に制御することによって、試料内部の磁場ベクトルについて水平方向と垂直方向、試料の厚さ方向の各成分について解析した結果が図示されています。この結果から、材料内部の磁場は、平均的には垂直方向を向いているが、場所ごとに水

平方方向、厚さ方向の磁場の向きが違っていることがわかりました。

さて、中性子を用いた磁場の可視化技術の大きな利点は、上述のように中性子の持つ高い物質の透過能力を持つことと、空間中の磁場そのものを検知する能力を持つことです。前者の利点を活用することで、コンピュータトモグラフィ(CT)の技術を応用し、磁場の断層像の再構築することが可能になります。これは現在開発中の技術ではありますが、これまでの磁場の観察手法では成しえなかった材料深部の磁場の分布を知るための有力な技術になると期待されています。そして、この技術が実現することで、より高性能な磁石(より強力な磁石、より熱的に安定な磁石)の開発につながると考えられます。一方、後者の利点は、電気モーターなどの磁気を利用した産業機器の高性能化に役立つと期待されています。これらの機器の開発において、最適な磁場分布の設計が非常に重要

となりますが、実際にその内部の磁場を観察する方法はこれまでありませんでした。せっかく高性能な磁石を開発してもそこから発生する磁場を上手に使うことができなければ、機器としての性能を向上させることはできません。このとき、空間中の磁場を直接観察し、設計値と実際の製品において発生する磁場との間の違いを正確に把握し、設計にフィードバックすることができれば、機器の効率をよりいっそう高めることにつながります。

中性子を用いた磁場の可視化技術の本格的な開発は世界的にもまだ始まったばかりですが、これまで述べてきたように、身近な技術開発に大きく貢献する可能性を持ちます。将来的にはこの手法を利用して、新しい磁気材料の開発や高性能な磁気関連機器の開発に取り組んでいきたいと考えています。

篠原 武尚(原子力機構 JAEA・J-PARC)

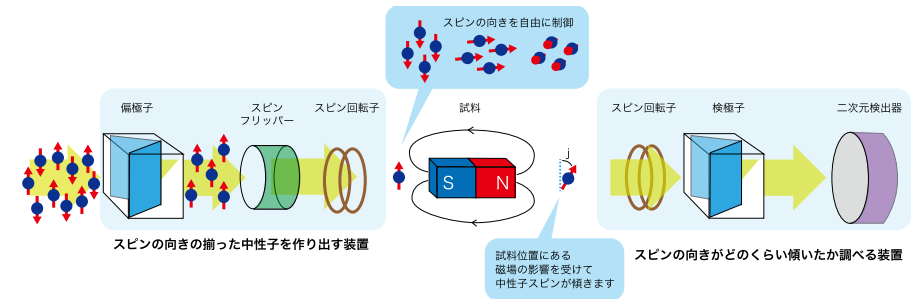


図1 中性子スピンを用いた磁気イメージングのしくみ

磁場は、本来、「強さ」と三次元的な「向き」の情報を持つため、ベクトル量で表すことができます。砂鉄をまいた実験では二次元な磁場の分布はわかりますが、各場所での磁場の強さと三次元的な向きはわかりません。中性子を使うと、これらすべてを検出することができ、磁場を正確に理解することができます。

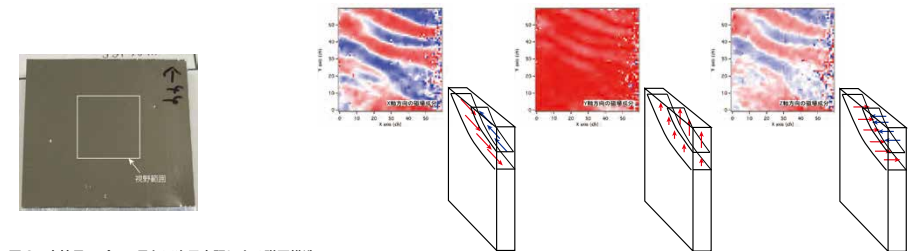


図2 中性子スピンで見た三次元表記による磁区構造

磁性材料の中を細かく見ると、「磁区」とよばれる、磁化方向がそろった微小な領域に分割されています。はじめは、磁区それぞれがもつ磁化方向がばらばらなため、全体としては磁石としての性質を示しません。しかし、強い磁場のもとにおくと、これらの磁区がすべて同じ方向を向くようになり、全体として磁石としての性質を示すようになります。

全長15mの“小型中性子源” さらなる小型化で広がる用途

小型化して普及し世界の様相を変えたのは、電卓やコンピュータだけではありません。理化学研究所が取り組む小型中性子源“RANS”（ランズ）は、線形の陽子線加速器を使った全長15mのコンパクトなシステムです。将来は車載できるほど小型化された中性子源で、橋梁の劣化を素材レベルから検知するシステムなども考えられています。

ナットのかみ合わせまで見える

中性子線の特徴はなんといっても金属に対して透過能が高いことです。たとえば、図1のような、金属の“ボルトとナットのかみ合わせがどうなっているか”を中性子線で透かし撮りした結果を示します。中性子線では鋼製のナット部分が半透明になっているので、かみ合わせがきれいに見えています。

このように中性子は便利な性質がありますが、これまで主に研究用原子炉や大型加速器を有する大規模な施設でしか中性子線を利用することができない状況でした。図1の画像も日本原子力研究開発機構にある研究用原子炉 JRR-3 の MUSASI というビームポートを使用して撮影したものです。一般に大型施設では非常に精度の高い測定ができる反面、利用機会や利用できる環境に限られ、測定する試料もサイズ・重量・材料面で多くの制約を受けます。こうした状況のため、近年になって小型で手軽に使える中性子源に対する希望が増えてきました。

世界をリードする技術開発

実は中性子線を用いた測定や技術開発において日本は世界をリードする存在です。世界に先駆けて東北大学で加速器を用いた中性子利用施設が作られました。また北海道大学に構築された電子線形加速器を用いた中性子源 HUNS では、中性子に関わる多くの

測定方法や関連装置の開発が進められました。北海道大学 HUNS で開発された新しい中性子源やイメージングの技術は近年建設された大型施設 J-PARC にも生かされています。

私たち理化学研究所では、「手で役に立つ中性子線」を目指した小型中性子源システム RANS（ランズ、RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source）を開発研究しており、2013年1月に中性子線の取り出しに成功しました。図2が現在の RANS の概観です。全長約15m幅5mほどの部屋の中に中性子線を発生する装置と、測定試料を計測できる検出器などが収まっています。

この装置を用いて、世界で初めて異なる種類の塗膜鋼板内部の腐食（さび）と異種鋼板での水の出入りの違いの可視化に成功しました。鉄の板と合金の塗膜された鋼板に人工的に成長させた腐食が水を含んだのち、乾燥していく様子を中性子線により非破壊で観察した様子が図3（図1右横）です。合金鋼は2時間で水が消えている様子が中性子線によって明確に示されました。

小型化で拓ける新たな用途

こうした中性子線源の小型化は、企業内部、工場内部の非破壊検査などに利用される産業利用だけではなく、さらに軽量化を実現することにより、現在日本で直面している大きな問題、例えば橋梁などのインフラの予防保全に役立てることが出来ると期待されてい

ます。図4は、近い将来超小型の中性子源と、橋梁用の検出器を車載した橋梁非破壊健全性診断システムの構想図です。日本の法律で4メガ電子ボルト未満の直線加速器は橋梁検査に使用することが可能となっております。私たちは、小型中性子源システムをさ

らに高度化し、日本の社会の安全安心に使えるような新しい装置の実用化を目指しています。

大竹 淑恵（理研）

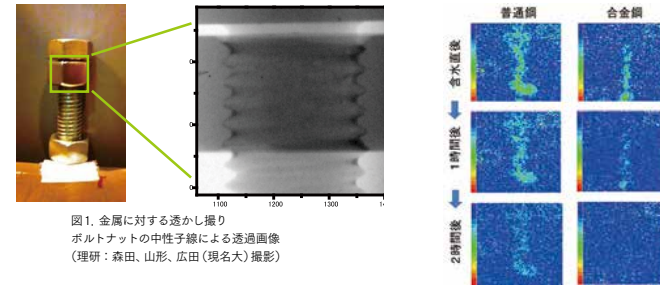


図1. 金属に対する透かし撮り
ボルトナットの中性子線による透過画像
(理研：森田、山形、広田（現名大）撮影）

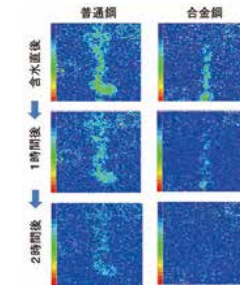


図3. 塗膜下腐食水の出入りの様子（中性子線観察）人工的に腐食を発生させた普通鋼（鉄の鋼板）と合金鋼（合金の鋼板）を水で浸し（含水させ）、乾燥させた。1時間後、2時間後の中性子線による画像。真中のシミの部分が水分を示しており、減少していく様子が分かる。2時間後に合金鋼はほぼ完全に水分が無くなっており、普通鋼では水が残っていることが分かる。

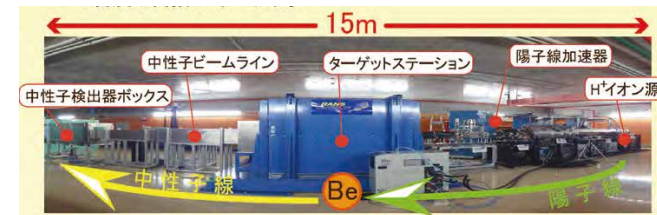


図2. 理研小型中性子源システム RANS（ランズ）陽子線線形加速器（右）で7MeVに加速された陽子が真中の青いターゲットステーション内（中央）の金属ベリリウムターゲットに衝突して中性子を発生する。その中性子は検出器ボックス（左）内に置かれた試料を通過して中性子カメラによって検出されます。



図4. 超小型の中性子源を使った橋梁診断車（構想図）全長5m以下、重量5トン未満の橋梁点検車に車載可能な小型中性子源。アームで橋の下に保持される約1平米の中性子検出器により橋梁の床板内部の水、鋼材の破断が観察され、健全性が診断される様子。

START

N氏の道のり

国内の出来事

世界の出来事

GO TO FUTURE

1915



Bragg父子が「ブラッグの式」考案と結晶構造解析によりノーベル物理学賞受賞

1914



LaueがX線回折像を観測し、ノーベル物理学賞受賞

1932



Chadwickが中性子を見出し、ノーベル物理学賞受賞

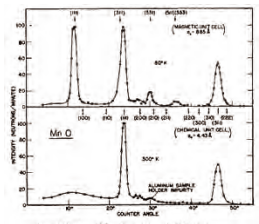


FIG. 1. Neutron diffraction patterns for MnO at room temperature and at 80 K.
世界で初めての中性子磁気散乱データ (Shull 1946)

1938



Fermiが熱中性子を用いた原子核反応を発見し、ノーベル物理学賞受賞

1946

Shullらにより、世界で初めて磁気散乱を観測

1957

国内初の研究用原子炉 JRR-1が初臨界に到達



日本初の中性子回折計ND-1 (1960完成)

1960

研究用原子炉 JRR-2が初臨界に到達



星基 禎男 (1926~2004)
我が国の中性子結晶学のパイオニア

1962

国産技術で初の研究用原子炉 JRR-3が稼働



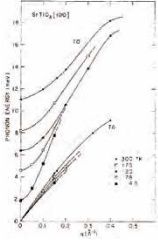
國富 信彦 (1924~)
我が国の中性子による磁性研究第一人者

1965

国内初の冷中性子源を備えた京都大学原子炉 (KUR) が完成



白根 元 (1924~2005)



ソフトフォノンの観測 (山田&白根 1969)

1967

東北大学原子核理学研究所にてパルス中性子発生




木村 一治 (1909~1995)



世界初の本格的パルス中性子粉末回折計 (木村サブトニック)

1974



Floryが高分子の物理化学研究の基礎の構築により、ノーベル化学賞を受賞



石川 義和 (1929~1986)



渡辺 昇 (1934~2015)

1980

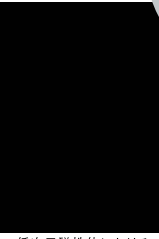
世界初の本格的パルス中性子利用施設 KENS が初ビームを発生



平川 金四郎 (1924~)

1983

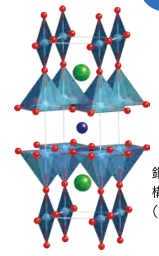
文部省(東大物性研)・科学技術庁(原研)と米国エネルギー省の間で日米科学技術協力事業「中性子散乱」開始



低次元磁性体における磁化の温度変化がオンサーガーの式と一致することを示した (平川&池田1973)

1990

改造 JRR-3稼働開始



銅酸化物高温超伝導体 YBa₂Cu₃O_{7-x} の構造を世界に先駆けて決定 (浅野ら1987)

1994



ShullとBrookhouseが中性子散乱技術開発の先駆的貢献により、ノーベル物理学賞を受賞

1991

de Gennesがソフトマターの相転移研究により、ノーベル物理学賞を受賞

2001

日本中性子科学会の設立

2008

J-PARC 初中性子ビーム発生

1987

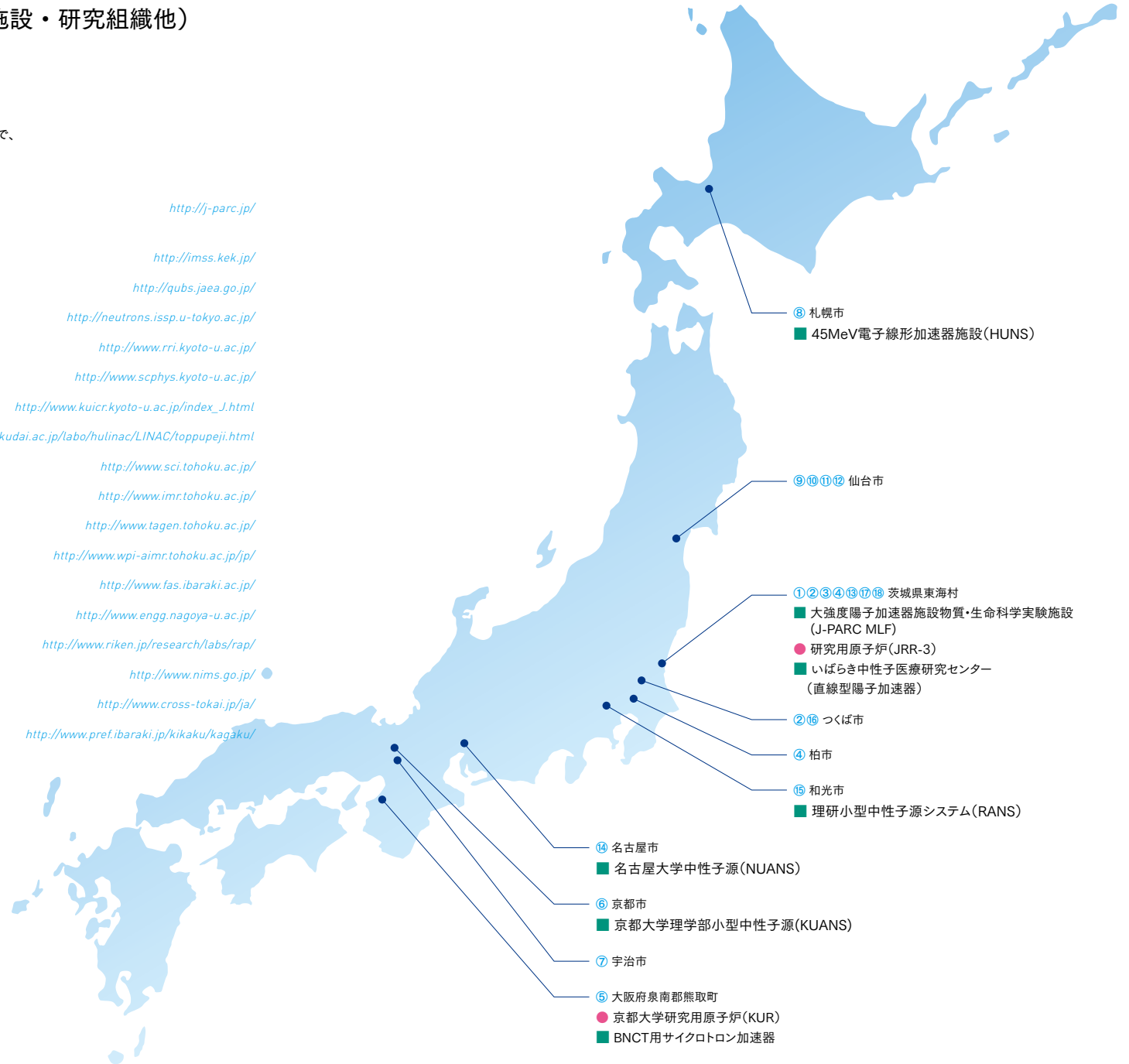
BednorzとMüllerが、銅酸化物高温超伝導体を見出し、ノーベル物理学賞を受賞

N氏に会える場所

(日本の主な中性子実験施設・研究組織他)

日本における主な中性子実験施設(●原子炉、■加速器)および研究組織は次の通りで、この特別号「N氏の新たな冒険」の制作にご協力いただきました。

- ① 大強度陽子加速器研究施設J-PARC <http://j-parc.jp/>
(高エネルギー加速器研究機構KEK・日本原子力研究開発機構JAEA)
- ② KEK物質構造科学研究所 <http://imss.kek.jp/>
- ③ JAEA原子力科学研究部門量子ビーム応用研究センター <http://qubs.jaea.go.jp/>
- ④ 東京大学物性研究所附属中性子科学研究施設 <http://neutrons.issp.u-tokyo.ac.jp/>
- ⑤ 京都大学原子炉実験所 <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/>
- ⑥ 京都大学大学院理学研究科・物理学第二教室 <http://www.scphys.kyoto-u.ac.jp/>
- ⑦ 京都大学化学研究所 http://www.kuicr.kyoto-u.ac.jp/index_J.html
- ⑧ 北海道大学電子線形加速器施設 <http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/hulinac/LINAC/toppupeji.html>
- ⑨ 東北大学大学院理学研究科 <http://www.sci.tohoku.ac.jp/>
- ⑩ 東北大学金属材料研究所 <http://www.imr.tohoku.ac.jp/>
- ⑪ 東北大学多元物質科学研究所 <http://www.tagen.tohoku.ac.jp/>
- ⑫ 東北大学原子分子材料科学高等研究機構 <http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/jp/>
- ⑬ 茨城大学フロンティア応用原子科学研究センター <http://www.fas.ibaraki.ac.jp/>
- ⑭ 名古屋大学大学院理学研究科・工学研究科 <http://www.engg.nagoya-u.ac.jp/>
- ⑮ 理化学研究所光量子工学研究領域 <http://www.riken.jp/research/labs/rap/>
- ⑯ 物質・材料研究機構量子ビームユニット <http://www.nims.go.jp/>
- ⑰ 総合科学機構東海事業センター(CROSS東海) <http://www.cross-tokai.jp/ja/>
- ⑱ 茨城県いばらき量子ビーム研究センター <http://www.pref.ibaraki.jp/kikaku/kagaku/>



N氏の旅の途中に

2012年7月の国際連合総会において、2014年を「世界結晶年」とすることが宣言されました（International Year of Crystallography; 略して IYCr2014）。これは、100年前の1914年にラウエ（独）が結晶によるX線回折現象を発見したことによりノーベル物理学賞を受賞したことを記念するものですが、翌年1915年にはブラッグ父子（英）がその現象を利用して物質の原子配列（結晶構造）を決定する手法を開発したことにより同じくノーベル物理学賞を受賞しています。この近代結晶学の幕開けとなったX線回折手段を用いて、この一世紀の間に結晶学が科学技術を大いに発展させて日常生活を豊かにしていることを理解し、今の若い世代に結晶学の魅力を紹介し、世界中の皆さんの結晶学に対する興味をさらに深めてもらうための国際的なイベントとして IYCr2014 が意義付けられています。

X線は光と同じ電磁波ですが、電子線や中性子線などの粒子線も同じように結晶により回折現象を示すことが発見されました。そして、それぞれ結晶内の原子の配列や運動状態に関する独自の情報を得られることが明らかになりました。

日本中性子科学会として IYCr2014 に協賛して発行するこの特別号「N氏の新たな冒険」では、中性子（Neutron ニュートロン）の特性を活かして物質内部の状態を観測する「中性子回折・散乱、あるいは中性子イメージング」という計測手法や核反応を利用する「核変換」技術が、基礎的な学術分野から産業・医療分野で広く利用され、いかに皆さんの生活に役立っているかを、皆さんと一緒に各分野を冒険しながら紹介してきました。まだまだ旅の途中でこれからも挑戦的な冒険は続きますので、近い将来皆さんと再会したいと思っています。

「波紋」 IYCr2014 特別号 ゲスト・エディター

藤井保彦

（東京大学名誉教授・元日本中性子科学会長）

神山 崇

（KEK 物質構造科学研究所・大強度陽子加速器施設 J-PARC・総合研究大学院大学）

「波紋」編集委員会

現委員長 坂口佳史

（総合科学研究機構東海事業センター）

前委員長 北澤英明

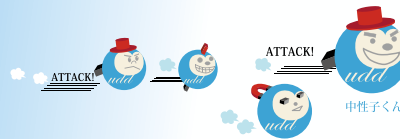
（物質・材料研究機構 量子ビームユニット）

編集協力：森田大介、喜多充成

イラストレーション：宮崎 剛



最先端の科学技術 未来を拓く 中性子



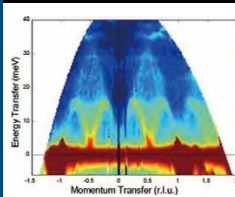
中性子は我々の身の回りにある沢山の技術や製品の開発に役立っています！

中性子ビームはX線と並んでとてもパワフルな「モノを見る道具」です。分厚い鉄の中を壊さずにのぞいたり、磁石の構造を目で見たりすることができます。原子や分子のようなナノレベルでモノを観る・創る・治すことができる最先端の技術には不可欠な道具です。

AROUND YOUR LIFE
あなたの身の回りで

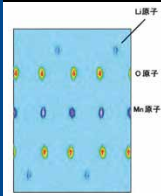


中性子非弾性散乱



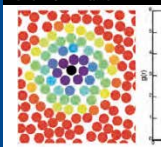
左図は、中性子非弾性散乱によって測定された結晶の磁気スピン運動の様子です。磁石としての性質を持つ中性子を用いることで、材料中の磁気モーメントの配列（磁力の流れ）を明らかにすることができます。

中性子回折



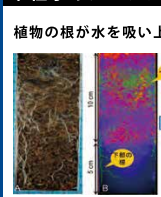
中性子回折測定によって、結晶の中で原子がどのように規則正しく配列しているのかを調べることができます。左図は、中性子回折で測定したリチウムイオン二次電池の正極材料中の原子配列です。中性子を用いることで、X線では観測が困難な軽元素であるリチウムの位置を精度良く決定することができます。

中性子全散乱



中性子全散乱という手法では、原子がきちんと配列していない液体やガラスの構造（左図）を二体分布関数（右図）として測定することができます。中性子を用いれば、原子が規則正しく配列している結晶でも、そうでない液体・アモルファスでも関係なく構造を調べることができます。

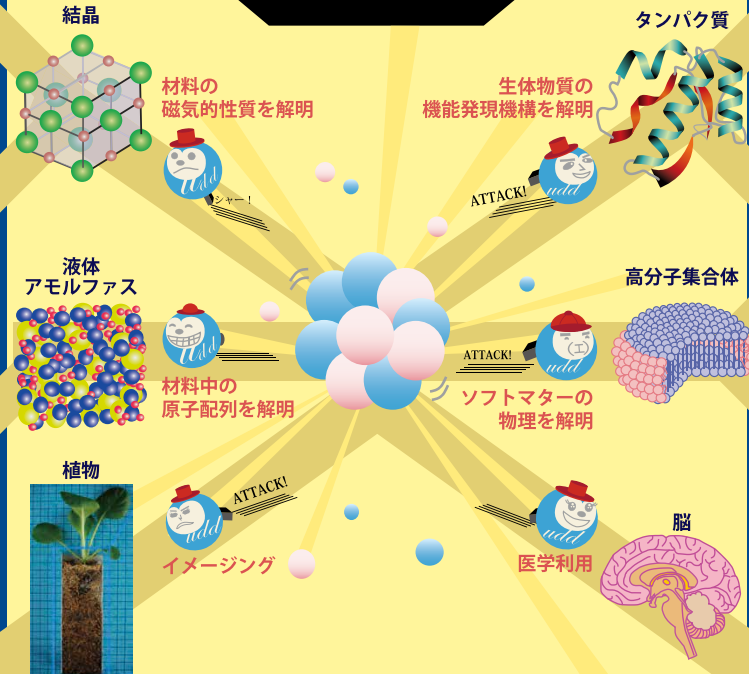
中性子イメージング



中性子の物質を透過する性質を利用することで、物質の内部を透視できます。例えば、中性子イメージングでは生きた植物の中を流れる水の様子を観察することができます。

モノを見る「道具」としての 中性子

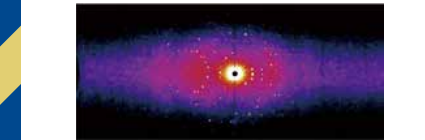
多彩な実験手法で
物質の様々な性質を測定・解析



基礎科学から生まれる成果は、いわば人類の知的財産。基礎科学における発見や検証、発明から生まれる先端技術は、イノベーションによる新しい価値創造を促進し、直接的・間接的に社会の発展に寄与しています。

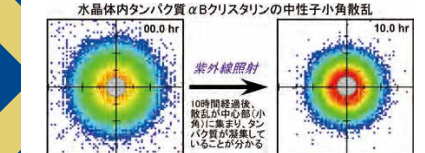
タンパク質結晶構造解析

中性子を用いることで、タンパク質のような沢山の原子を持つ物質中の原子の位置、特に水素の位置を明らかにすることができます。

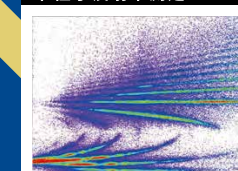


中性子小角散乱

大きな分子に中性子を当てて、あまり曲がらない中性子を測定するとその分子の大きさや形を調べることができます。

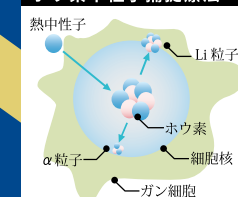


中性子反射率測定



物質の表面は様々な反応が起こる場所で、表面構造を知ることは反応を制御するため重要です。中性子反射率測定では、その表面の構造を測定できます。左図は、表面に周期的なナノサイズの凹凸を施した重水素化ポリスチレンからの中性子干渉縞です。反射率計により中性子の波長（横軸）に応じて表面の凹凸に由来する干渉縞の周期が変化している様子が観測されています。

ホウ素中性子捕捉療法



中性子はホウ素によって捕捉され、 α 線を発生する性質があります。ホウ素化合物を取り込ませたガン細胞に中性子を照射することによって、発生する α 線でガン細胞だけを破壊することができます。

AROUND YOUR LIFE
あなたの身の回りで

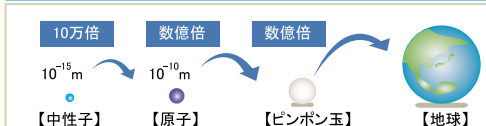


中性子って何？



原子は、初めは1つのかたまりだと思われていましたが、研究が進み原子のまん中に原子核があることがわかりました。さらに原子核はプラスの電気を持っている陽子と、電気を持たない中性子という粒の固まりであり、その周りをマイナスの電気を持つ電子が取り囲んでいることがわかりました。中性子は、1932年にイギリスのチャドウィック博士が発見しました。（ノーベル物理学賞を受賞）

中性子の基本的性質



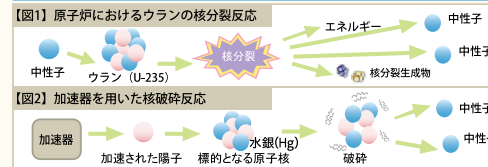
- ・大きさ：およそ 10^{-15} m
- ・電荷はゼロ（電氣的に中性）
- ・平均寿命は約15分
- ・磁気モーメント $\mu = -9.6491783(18) \times 10^{-27}$ J/T (小さな磁石として働く)

【モノを見る道具としての特徴】

- ・軽い元素（水素やリチウム）が良く見える
- ・磁性（磁石としての性質）が調べられる
- ・物質中の原子・分子の運動状態を調べられる



とっても小さな中性子、一体どうやって取り出すの？

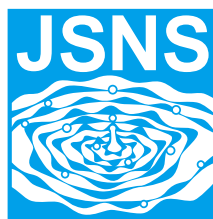


中性子は主に上記2つの方法によって取り出すことができます。【原子炉と加速器 両者の相違点】原子炉においては定期的に一定の強度の中性子ビームを取り出すことができます。一方、加速器を用いて中性子を取り出す事もできます。代表的なものとして大型のバリス陽子加速器を使い原子核を破砕瞬間的に非常に強い中性子ビームを作り出す方法があります。また、逆に小型の加速器を使って中性子を作り出す小型中性子源（小さな体育館にも入ります）の開発も進められています。

どんな所で研究してるの？



制作：西尾佳子
監修：杉山正明、小野寺陽平（京都大学原子炉実験所）



【複写される方へ】 Notice about photocopying

本会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写して下さい。但し（社）日本複写権センター（同協会より権利を再委託）と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません。

（社外頒布用の複写は許諾が必要です。）

権利委託先：一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F

TEL.03-3475-5618, FAX.03-3475-5619, E-mail : info@jaacc.jp

なお、著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、（社）学術著作権協会では扱っていませんので、直接発行団体へご連絡ください。

また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.

222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, U.S.A.

TEL. +1-978-750-8400, FAX. +1-978-646-8600

波紋 Hamon Vol.24 特別号

編集：日本中性子科学会（問い合わせ先）

319-1116 茨城県那珂郡東海村舟石川駅西 3-10-11

（株）トータル・サポート・システム 本社内

TEL: 029-282-0040, FAX: 029-287-2284

E-mail: sec@jsns.org

印刷発行：（株）マックグラフィックアーツ

発行：2014年11月