「核理研, KENS, J-PARC, 将来を見据えた強相関電子系（磁性）研究」についてー 技術開発の立場からー

新井 正敏

(欧州核破砕中性子源, 欧州研究基盤連合)

A History of Studies on Highly Correlated Electron System through Tohoku-Linac, KENS, J-PARC from the View Point of Instrument Development

Masatoshi Arai

European Spallation Source, ERIC

ABSTRACT

Pulsed neutron scattering technique was started at the Nuclear Physics Laboratory (NPL) of Tohoku University 50 years ago. In this article, we overview the development of instruments from NPL, KENS, ISIS to J-PARC, which have been mainly used for studying highly correlated electron system. Deployment of the position sensitive detector is a most significant aspect to enhance the ability of instruments at pulsed neutron source. Also, chopper instruments have been a main contributor to the relevant scientific development.

Keywords: *Pulsed neutron, Tohoku-Linac, KENS, J-PARC, ISIS, Chopper, PSD*

1. はじめに

茨城大学の新村先生から今年は核理研のパルス中性子が発生してから 50 年だと聞いた時、時の経つのを深く感じずにはいられなかった。特集号ということで、これまでのパルス中性子の我が国の発展について記憶にとどめておくことが大事だと、どなたかが仰っておいりましたので、記事は必ずしも科学的な解説というよりも、現場から遠ざかりつつある老兵の思い出話を要望されていると勝手に解釈し、昔の記憶をたどりつつ筆を認めることにする。

2. 核理研時代

私が核理研で仕事を始めたのは、1978 年であった。修士課程に入った時であり、すでに山田さんや、当時金研の福永さんらの大先輩が先生方とともに多くの先進的仕事をされていた。私は理学部の石川先生の学生であったが、デンマーク帰りの新進気鋭の核理研の新村先生の指導を受けることになった。新村先生は東大物性研の星塾先生の元で強誘電体の研究をなされ、核理研ではそのパルス特性を活用し、誘電双極子の実時間緩和現象ですでに優れた仕事をなされていたが、私がお会した時には、デンマークで生物物質研究の重要性と将来性を実感して帰国され、「僕はこれから生物の勉強を始める」と言っておられ、多くの関連図

書の購入をされていたのを覚えている。しかしながら、私が新村先生と開発を行うことになっていた技術は世界で初めて位置敏感検出器とパルス中性子技術（飛行時間法）を結合した単結晶回折技術確立することであった。すでに、位置敏感検出器は英国原子力公社 Harwell から直径 1 インチ（長さが 60cm 位）のものが輸入されており、これに CANBERRA 製のプリアンプ、メインアンプがつながることが決まっていた。しかし、一番重要な技術革新は、位置を決定し飛行時間のスペクトラムに変換する技術であった。今でも明瞭に思い出すのは、非常に優秀な技官の窪田さんや工藤さんがハードウェア、ソフトウェアの開発の中心であったことである。私も 4 年生時にコンピュータの機械言語やアセンブリ言語を使い、ハードウェアの制御の開発を卒業研究としていたのだが、彼らと私は完璧なプロと全くの素人ほどの差があった。実験専用計算機 (OKITAC) のデータは直径が 40cm ほどの磁気ディスクに蓄えられ、そのカートリッジを手で取り外して、データ解析専用の東芝製計算機 TOSBAC に移し替え（メインメモリーが多分 256K ワード程度）、解析を行った、プログラミングはまず タイプライター・パンチャーで紙テープをパンチして作る。パンチパターンは各文字のビットパターンであった。プログラムは数千行であったかと思うが、直径 25cm ほどの

紙テープロールになる。うち違いがあると紙テープを切り貼りしたり（まさに Cut & Paste）、手で修正のパンチを入れたりして、それだけで相当な作業時間がかかった。デバッガーがなかったので、読み込んだ後にプログラムが思ったように動かない時にはどこに間違いがあるのか知るのに相当時間を費やしたのを覚えている。今では当たり前のことになったことだが、位置敏感検出器と飛行時間法を結合すると、Fig. 1 のような逆格子空間の三日月領域が一挙に観測できる。この手法は特に散漫散乱の観測に非常に有効であることから、すでに同種の散乱が確認されていた Cu_3Mn 単結晶の観測で実証実験がなされることとなった。この物質は当時一世を風靡したスピングラスの有名物質であり、海外の強力な原子炉でも実験が開始されていた。Fig. 1 は散漫散乱の強度を図形のサイズの違いでイメージ的に表したものである。解析から、原子炉で精密に観測された結果と同等であることを実証した[1]。当時、実験を行ってはいろいろな問題にぶつかった。その度に徹夜実験中に新村先生や他の先生方と議論をしたのが懐かしい。さらに論文を探そうにも関連論文がないことに気づき、自分たちが世界初の技術開発を行っていることを学生ながらに実感したのもこの頃であった。「Pulse Neutron Scattering」の著者の Colin Windsor 先生が来日され[2]、共同作業を行えたことも大変励みとなった。

Fig. 1. Observable region with PSD-TOF method and diffuse scattering of Cu_3Mn .

さて、この物質の散漫散乱は Mn 上の磁気モーメントと伝導電子間の散乱で生ずるフリーデル振動で解釈されていたが、これは、今でこそ鉄系超電導物質の基本的物理であるフェルミ面のネスティングの最も基本となる考え方であった。

実験は毎月 2 日ほどであったと思うが、この 2 日間はほとんど徹夜で実験を行った。夜間の加速器運転はもっぱら学生が行った。夕刻になると当時金研所長であった鈴木先生が必ずと言って良いほど慰問に来てくれて（自宅とは反対方向の核理研に来てくれて）、実験の様子を見ながら意見交換をしてくれたのを嬉しく感じた。

3. KENS での時代

3.1 世界で初めてのパルス中性子小角散乱装置

丁度修士が終わった 1980 年、つくばの高エネルギー中性子源（KENS）が稼働することになった。KENS 建設のために核理研より一足先に KEK 教授として赴任されていた渡辺昇先生を中心に建設がなされた。また、すでに亡くなられた三沢正勝先生や当時金研の職員であった富吉先生、甲斐先生らがその設計に大変貢献したと伺っている。我々学生はすでに完成した実験室に実験装置を建設し、その調整後実験を行う重要な役割を与えられていた。初めて山田さんと実験室に到着した時に驚いたのは、実験室の大きさであった。実験室の床がただただ広々としていたのを覚えている。実験室で初めて北大の井上先生や鬼柳先生らとお会いしたのもこの頃であった。東北大、北大の教官と学生が中心となって、まずは 5 台の装置の建設が開始された。それらは LAM (アナライザー型分光器)、HIT (全散乱装置)、SAN (小角散乱装置)、MAX (アナライザー型単結晶分光器)、TOP (偏極中性子透過型装置) であった。LAM は北大が担当し、HIT は東北大金研、SAN、MAX、TOP は東北大理学部で担当であった。私が古坂氏とともに任されたのは SAN の建設であった。新村先生と神木先生は当初全体のデータ集積・処理系を担当しておられた。私は SAN の解析系も含めその助手のようなものであった。SAN は核理研で実証した位置敏感検出器を備えた小角散乱装置であった。検出器系統は真空中で動作できるよう、さらなる開発が古坂氏を中心に東大との協力がなされた。私が主に任された研究は石川先生がすでに研究を開始されていた $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeTiO}_3$ 系列のスピングラスであった。しかしながら、実験装置がきちっと立ち上がるまでに博士課程の 2 年間を費やすことになり、実験研究自体は最後の 1 年だけであった。しかしながら、アルバイト的に行わされた MnSi は当時は結晶構造の空間反転対称性欠如により生ずる Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用によるヘリカル構造を有していると捉えられていたのだが、現在ではスカーミオンとして新たな物理現象として再研究されており、石川先生と共著の論文が最近多く引用されていることは感慨深いものがある[3]。当時、KENS のパワーは 1kW にも満たないものであ

ったかと思うが(その後 Linac の高度化がなされ、90 年代には 3kW のデザインとなった),特に MnSi の実験は低温のオーダー相ではものの 5 分から 15 分もあれば容易に行え、SAN の高性能さが印象に残っている[4]. Fig. 2 は、臨界温度 (29K) 付近の相図と小角散乱分布を示したものである。当時 Phase A', A'' と呼ばれていた領域は空間異方性をなくす領域で、今ではスカーミオン相と解釈され、その動きやすさから高速メモリーへの応用が検討されているようである。小角散乱は高分子等の等方散乱を持つ物質に多く利用されているが、単結晶に対して磁場を印加し、異方性も含めた研究がパルス中性子で初めて行われたことは今日においても高く評価されているようだ。そして、これら KENS での実験技術開発の結果、鈴木氏らにより今日より複雑な物理現象の観測に発展していると言って良い[5].

Fig. 2. Phase diagram of MnSi and its SANS patterns.

3.2 パルス中性子チョッパー型分光器 と日英協力事業

当時、KENS と同じ時期に稼働を始めていた米国アルゴンヌ国立研究所 IPNS (Intense Pulsed Neutron Source) では、そのシャットダウンに伴い CP5 原子炉から移動した LRMECS チョッパー型分光器の稼働も進められていた[6]. 国内にこの技術の導入を図り、KENS においても本格的な非弾性散乱実験を可能にするために神木先生を中心に INC 分光器の建設が計画されていた。私はその技術習得のために博士課程終了後 IPNS にポストドクターとして送られた。一方、1985 年に英国 ISIS 施設が稼働し始め、技術的協力が模索されており、INC の開発は ISIS の協力のもとに開始された[7]. 1987 年には正式に日英協力事業が石川義和先生 (1986 年に逝去後渡辺先生に引き継がれた) と

ISIS 施設長の Alan Leadbetter 教授により開始され、MARI チョッパー型分光器の設計が開始された (Fig. 3) [8]. 両装置建設がほぼ並行して進められていたことから、日英双方の優れた技術が結集される形となり、その後展開された研究にもまして、人材育成 (大友, 大山, 伊藤, 長壁の各氏) と KENS の技術力の向上をもたらす結果となった。

Fig. 3. MARI spectrometer (in operation since 1990).

当時はパルス中性子源の分光器は単結晶の計測には不向きであることが常識であった。実際、MARI の設計においても 1987 年に英国側が示した設計原案は結晶の対称性を無視した検出器配置となっていた。MARI は我国の中性子関係者が主導する海外で初めての本格的な非弾性散乱実験装置となることから、多くの関係者が大きな期待を持って、MARI でなされるべき研究について真剣な議論を行った (Fig. 4). 金属磁性における Stoner 励起の観測も期待された研究であったが、低次元磁性体の観測が非常に重要であることが特に遠藤先生より指摘されていた。量子効果による低次元磁性体のスピン連続励起領域の存在が 1970 年代に理論的に指摘され、実験的にも当時の世界最強の Brookhaven 国立研究所の原子炉で遠藤先生が 1974 年に観測した例はあったが[9], その詳細は全く不明であった。一方、1986 年の酸化物高温超伝導体の発見に端を発し、その関連物質である CuGeO₃ が秋光先生により発見され、単結晶の作りやすさから、その計測が MARI によってなされた。とは言え、当時まだパルス中性子による単結晶の測定は聡明期であり低次元系の実験条件設定において手探り状態であった。その中でも伊藤氏・加倉井氏が選んだ方法は一次元系の計測に大変向いていることが示された[10]. そして、優秀な若手 (藤田氏) の助けもあり、世界で初めてスピン連続励起領域のほぼ完全な観測に成功することになった (Fig. 5) [11]. それまで、中性子非弾性散乱のデータは鉛筆でグラフ用紙に手書きでプロットするイメージのもでしかなかったが、このデータを皮切りにグラフィック・カラープロット表示の重要性と、広角を覆う検出器配置の重要性が認識されることとなった。このデータは世界を駆け巡

り、パルス中性子の重要性を強く認識させることとなり、米国 SNS 計画推進の大きな動機付けの一つとなったと聞いている[12].

その後、1990 年代に酸化物高温超伝導体の機構解明にチョッパー型分光器が多用されたことは言うに及ばない（例えば砂時計型励起の発見[13]）。磁性と超伝導が絡んだこの問題は現在においても鉄系超伝導体で取りざたされていることであるが、根本的に関係する電子間の相互作用が短距離であることから、散乱データは広範な運動量・エネルギー空間に微弱信号として広がることになる。広角度をカバーする検出器配置と単色中性子利用により極限まで低減されたバックグラウンド性能を兼ね備えるチョッパー型分光器が非常に有用であるのはこのためである。

This figure has been removed from the online version for privacy protection.

Fig. 4. Discussion on studies with MARI in 1987.

チョッパー型分光器が単結晶の測定に予想を遥かに超える性能があることが MARI（位置敏感検出器ではない）で示されたことから、位置敏感検出器の設置の重要性が指摘され、ISIS に MAPS が 2000 年から稼働した（当初 KENS の PSD 技術の導入も検討された）。また、同時期は J-PARC の建設開始時期に重なり、それまでの知見、経験、将来の可能性を考慮して、J-PARC の実験装置の設計が進むことになった。ここで、日英協力の経験が J-PARC の建設に非常に大きな力となったことを特筆したい。

4. J-PARC と将来に向かって

上記の経緯もあり、我が国はすでにチョッパー型分光器の技術と利用研究には相当な蓄積があった。そこで、J-PARC では「四季」「AMATERAS」「HRC」の建設に当初着手した[14]。今では、当然の技術となった位置敏感検出器を配備するだけではなく[15]、多重エネルギー入射技術の初めての採用[16]、そして、それを実現するためのチョッパーシステムと Event-Recording データ集積系の適用（中性子分野では SNS と並び初めての技術であり[17]、KEK 回路室の安氏、佐藤氏、大友氏と中谷氏の貢献は大変高いものがある。）を実現した。

そして、現在においては、単結晶を連続的にゆっくり回転させながら、運動量とエネルギーの 4 次元空間を切れ目なく、それも異なる幾つかの入射エネルギーで計測することが常套手段となりつつある。これは、考えはしたもののその 10 年後に実現できるとは想像できなかったことである。そして、この計測技術の開発は稲村氏、梶本氏、中村氏、中島氏を中心に現在も進行しつつある[18]。著名なノーベル賞物理学者である P.W. Anderson が述べた「More is Different」は固体物性を言い表すのに非常に有名な言葉であるが、いわゆる平均場で記述できる現象や構造、機能は 20 世紀にほぼ理解できたと言って良い。そして、酸化物高温超伝導体の世界的なフィーバー研究によって、個々の電子、異なる原子の特徴から局所的に生ずる相互作用の特異性が新奇な現象や機能を生み出すことが示されることになった。つまり、平均像から個々の異なる特徴に問題がクローズアップしていった。これらの現象を認識するために中性子散乱に今後要求されることは何であろうか？私見ではあるが、実空間の知見をきちっと示すことだと考えている。個々の違いによる現象は散乱データとして散漫散乱や Fig. 5 にあるように位相空間に広く広がったものになる。ましてや空間的な不均一性（例えばドーピング）によって観測量は非常に複雑なものになる。そう考えた時、4 次元 PDF、つまり、位相空間での観測量を如何に実空間像に焼き直すかが非常に重要になってくるのではないだろうか。そして、そのためには解析技術開発の推進と装置設計の見直しも必要になる。このような発想の元、現在、川北氏や菊池氏らによって開発が進行している。また、海外においても同様な動きがあることを加筆しておく。

Fig. 5. Spin continuous excitation region from one-dimensional antiferromagnet CuGeO_3 .

5. 最後に

核理研で手作りで始まった実験装置。その性能向上の 40 年に及ぶ開発と変遷を経験できたことは、人生にとってかけがえのないものであった。しかし、中性子実験装置のコストは原子核実験装置程度に高いものになってきた。此処 ESS では一台あたり 20 億円するものが普通である。当然、広い研究分野を賄うために 10 台あるいは 20 台の異なる種類の実験装置が必要で、相当な予算を使うこととなる。一方、素粒子物理学実験や重力波物理では、全世界で単一の研究目標を設定し、地球規模の研究組織により、人員の集中と予算の集中により最適な実験装置が建設され研究がなされてきた。今後、中性子分野でも一部の装置については同様な動きが必要かもしれない。例えば、30 年前に始まった酸化物高温超伝導機構の解明は未だに決着の付いていない問題であるが、今後、世界規模での協力研究、装置建設や利用体制の構築が必要かもしれない。その解決は大きな知的財産を人類にもたらすだけでなく、その後続く応用技術の発展とそれによる恩恵を社会に与えることになる。中性子実験施設にしても ESS の建設予算は 3000 億円に迫ろうとしている。この額を上回る中性子実験施設は今後どの国も賄えるものではない。コンパクト中性子源により利用層の拡大を図ることは大変大事であるが、最先端の科学的な研究遂行にはどうしても高輝度の高性能中性子源・装置が必要である。しかし、今後、その実現はこれまでと同じ発想で進ませることは不可能となろう。独国ユーリッヒ研究所や仏国サックレー研究所が計画しているように、対をなして最適化した新型中性子源と実験装置の考えも一つかもしれない [19]。中性子分野の将来のために関係者の英知の結集が今こそ必要である。

謝辞

これまでの執筆者への研究協力と支援に対し、また本稿に関わる中性子科学会での公演発表や本稿執筆において多大な支援を物構研山田和芳氏よりいただきました。ここに心より深く感謝いたします。また 40 年に及ぶ申請者の活動を支えてくれた皆さんに大変感謝いたします。さらに、本稿に記述できなかった非常に多くの方々の支援がありました。重ねて御礼申し上げます。

登場人物のリスト（語音順、当時の所属.）

個人情報保護のためにこのリストはオンライン版から削除されました。

参考文献

- [1] N. Niimura, T. Kubota *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. **173**, 517 (1980).
- [2] C. G. Winsor, Pulsed Neutron Scattering, Taylor & Francis (1981).
- [3] Y. Ishikawa and M. Arai, J. Phys. Soc. Jpn. **53**, 2726 (1984).
- [4] Y. Ishikawa, M. Furusaka, N. Niimura *et al.*, J. Appl. Cryst. **19**, 229 (1986).
- [5] S. Takata, J. Suzuki *et al.*, JPS Conf. Proc. **8**, 0036020 (2015).
- [6] J. M. Carpenter and D. L. Price, Phys. Rev. Lett. **54**, 441 (1985).
- [7] M. Arai, M. Kohgi *et al.*, ICANS Proc., IOP Conf. **97**, 297 (1988).
- [8] M. Arai, A. D. Taylor *et al.*, in Recent Developments in the Physics of Fluids, eds. W.S. Howells, A. K. Soper (Adam Hilger, Bristol, 1992), pp. F321-328.
- [9] Y. Endoh, G. Shirane, R. J. Birgeneau *et al.*, Phys. Rev. Lett. **32**, 170 (1974).
- [10] S. Itoh, Y. Endoh, K. Kakurai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 2375 (1995).
- [11] M. Arai, M. Fujita *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77**, 3649 (1996).
- [12] J. Finney, U. Steigenberger, Physics World, **10** (12), 27 (1997).
- [13] M. Arai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83**, 608 (1999).
- [14] 藤井保彦, 新井正敏, 応用物理 第 78 巻, 758 (2009).
- [15] S. Satoh *et al.*, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **600**, 103 (2008).
- [16] M. Nakamura, R. Kajimoto *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 093002 (2009).
- [17] T. Nakatani, Y. Inamura *et al.*, PPC12 Proc. **1**, 014010 (2014).
- [18] Y. Inamura, T. Nakatani *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, SA031 (2013).
- [19] U. Rücker *et al.*, Eur. Phys. J. Plus **131**, 19 (2016).