

大阪大学におけるパルス強磁場研究と低温環境生成のあゆみ

大阪大学 大学院理学研究科 附属先端強磁場科学研究センター 鳴海 康雄

1. はじめに

先端強磁場科学研究センターの前身となる超強磁場実験施設が大阪大学理学部に設置されたのは1980年である。しかし、初代施設長の伊達宗行・本学名誉教授がパルス磁場開発に着手したのは1960年代中頃であることから¹⁾、大阪大学における強磁場研究は50年を越える歴史の上に築かれているとも言える。本稿では、黎明期で活躍した伊達式パルスマグネットから現在の主力となっている金道式パルスマグネットへ移行する過渡期を経験した筆者が、物性実験に不可欠な低温装置と強磁場物性測定という視点で、大阪大学におけるパルス強磁場研究のあゆみを振り返っていききたい。

2. 伊達式パルスマグネット

強い磁場を発生させるには、空芯コイル(導線)に大電流を流せば良い。その基本となるパルス磁場のアイデアは低温研究でノーベル賞を受賞したロシアの物理学者ピョートル・カピッツァによって提唱された²⁾。しかし、その実現はそれほど容易では無い。磁場発生時のコイルには径を広げようとする応力(フープ力)が働き、時としてその力は導線の機械的強度を凌駕する。また、導線の抵抗に起因するジュール発熱も深刻で、金属が融解する温度に達する場合もある。伊達式マグネットでは、超強力鋼の中でも最高水準の引っ張り強度(約2 GPa)を誇るマルエージング鋼製コイルによってフープ力に対抗し、さらにLC回路の振動電流の半周期を切り出すことで、電流印加を約0.4 msecの短時間に抑え、発熱の低減を図っている^{3,4)}。その結果、2層式マグネットにおいて19φの室温空間に60 Tの磁場を非破壊で発生する事が可能となった。

量子効果の研究にとって、熱揺らぎによる擾乱を抑えるための低温環境は極めて重要である。しかし、パルス磁場中の導体には発熱や破壊につながる渦電流が誘起されるため、一般的な金属製低温装置を組み込む事はできない。そこで、試料空間6φの石英ガラス製4重管Heデュワー(英光社製、廃業)を用いることで、液体Heの減圧による1.3 Kの低温を実現している。さらに、磁場空間の広い1層式マグネットでは、大口径のガラスデュワー内にガラス製の³Heクライオスタットを組み込んで、約0.5 Kの極低温も達成している⁵⁾。

3. 金道式パルスマグネット

強磁場研究が広がりを見せる中、非破壊60 Tを誇る伊達式パルスマグネットだが、運用上2つの課題が浮かび上がっていた。その一つが、60 Tを4回発生する毎に行うオーバーホールである。この作業では、応力によって劣化した絶縁材の入れ替えを行っている。誘導法による磁化測定では、試料有りバックグラウンド測定用に2回の磁場発生が必要で、標準的な4.2 Kと1.3 Kの温度で測定を行うと、試料毎に1つのマグネットの準備が必要となる。当時、非破壊で60 Tの磁化測定が出来る施設は大阪大学だけであり、測定依頼が増加する中、メンテナンスフリーで繰り返し磁場発生が可能なマグネットの登場が求められていた。もう一つの課題が1 msecを切る短いパルス幅である。渦電流の問題は、測定試料についても当てはまる。つまり、渦電流による磁場遮蔽効果によって試料内の磁場と印加磁場に不一致が生じる。さらに、ジュール発熱により試料温度が磁場とともに変化する、といった問題も懸念される。そのため、バルク結晶で信頼に足る60 T測定ができるのは主に導電性の悪い試料に限定されていた。

このような背景のもと、1980年代後半に最大磁場40 T、パルス幅約40 msecのCu-Cr-Zr合金線を用いた巻線式マグネットが開発され、金属試料の磁化測定や磁気抵抗測定への利用が進んでいた。そして1990年代後半に登場したのが金道式パルスマグネットである⁶⁾。金道式では引っ張り強度約900 MPaのCu-Ag合金線による多層型巻線コイルを採用し、コイル単独では不十分な強度を繊維強化プラスチック(FRP)とマルエージング鋼による外部補強によって補っている。その結果、60 Tの磁場を30分以下の間隔で100ショット以上繰り返し発生することが可能となった。マグネットは液体窒素により冷却されており、77 Kで18φの磁場空間が確保された。そのため、液体窒素シールドが不要となり、試料空間10φのパイレックス製2重管Heデュワーの利用が可能となった。詳細は述べないが、この60 Tマグネットの内側に中間補強を施した1層コイルを追加することで70 Tの磁場下でもHe温度域の実験が可能である。

これにより、先に述べたように、高導電性バルク試料に対する60 T領域の実験が日常的に実施可能となった。測定手法の多様化につながったこ

とも重要な成果である。試料空間に熱浴の導入が可能となったことで、制御が難しい 4.2 K から 77 K の中間温度域における精密な温度依存性実験が可能となった。金属材料の利用範囲も拡張され、電磁波を試料に照射するための金属製ライトパイプを組み込んだクライオスタットを用いて、テラヘルツ領域の電子スピン共鳴実験が可能となった。さらに、金属製ピストンシリンダー型圧力セルを用いた高圧複合極限環境の研究も進展している。

4. パルス磁場用希釈冷凍機

金道式マグネットの運用を重ねる中で培われた信頼性を担保に、かねてから切望されていたミリケルビン領域の強磁場開拓を目指し、可能な限り金属材料を排した希釈冷凍機の開発に大陽東洋酸素（現、大陽日酸）と共同で着手し、世界に例の無い 70 mK の極低温と 60 T の強磁場を両立した複合極限環境の実現と磁化・磁気抵抗測定に成功した⁷⁾。強磁場にさらされる主要部品は肉薄の FRP を用いて製作し、渦電流を避けるために銅細線を束にした輻射シールドと裁断したスーパーインシュレーションを用いて、液体窒素からの熱侵入、渦電流による発熱とノイズを抑制している。磁化検出コイルは混合液と触れることの無い真空槽に配置することで、測定による発熱と熱侵入を抑えている。近年は、³He の希少性を鑑み、³He を使用しない極低温生成方法として、断熱消磁法とパルス強磁場を組み合わせた低温環境開発も大阪公立大学との共同で進めている。

5. ガラスデュワー

大阪大学にガラス工作室（当時は化学工作室）を含む工作センターが設置されたのは 1964 年のこと。阪大強磁場におけるマグネット開発の歴史とともに、低温実験を支えてきた様々なタイプのガラスデュワーはこのガラス工作室（現コアファシリティ機構・工作支援部門・ガラス工作メインショップ）で製作されてきた（図 1）。パルス磁場の長時間化により金属材料の利用が拡大しているとはいえ、低温容器としての高い信頼性、電氣的・磁氣的ノイズがゼロ、製作費等を考えると、ガラスデュワーに勝る低温容器は無いと筆者は考えている。金属製容器が広く普及する中、液体 He を肉眼で見ることが出来るガラスデュワーは教育的価値も高い。歴史を紐解くと、ノーベル賞につながったハイケ・カメルリング・オネスによる He

の液化と Hg の超伝導発見の影に、ジェイムズ・デュワーが開発した魔法瓶（デュワー瓶）が貢献していることも忘れてはならない。

但し、残念ながら、現在パルス強磁場が求める仕様に応えられるガラスデュワーを製造出来る民間企業は極めて少ない。また国内最大のパルス強磁場設備を有する東京大学物性研究所のガラス工作室は 2018 年に閉鎖された。このような状況で、低温環境を支える阪大のガラス工作室は、強磁場コミュニティにとってもより一層欠くことのできない重要な施設となっている。

最後になりますが、阪大強磁場スタッフを代表して、歴代のガラス工作室スタッフの貢献に対して感謝の意を表するとともに、引き続きご支援賜りたくお願い申し上げます。

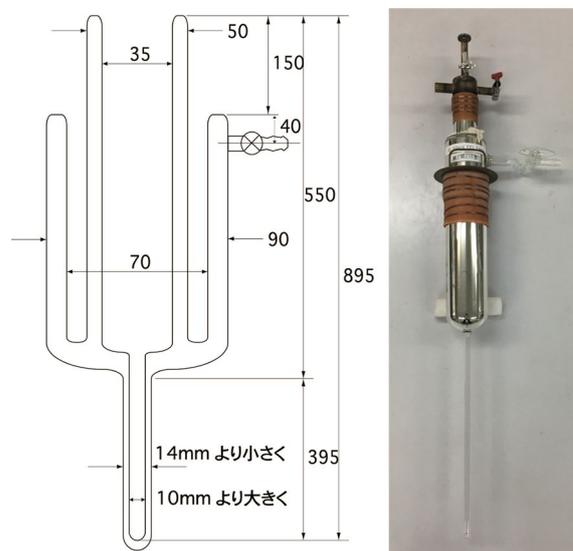


図 1 阪大ガラス工作室製作のパルス磁場用ガラスデュワーの概略図（左）と写真（右）

6. 参考文献

- 1) 伊達宗行：物性 5 (1964) 645.
- 2) L. Kapitza : Proc. Roy. Soc. Ser. A **105** (1924) 691.
- 3) M. Date : J. Phys. Soc. Jpn **39** (1975) 892.
- 4) A. Yamagishi and M. Date : High Field Magnetism, ed. M. Date (North Holland, Amsterdam, 1983) 289.
- 5) T. Yoshida : High Field Magnetism, ed. M. Date (North Holland, Amsterdam, 1983) 305.
- 6) K. Kindo : Physica B **294-295** (2001) 585
- 7) Y. Narumi, et al. : Proceedings of the VIIIth International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, World Scientific Pub., (2004) 262.