

室内発生世界最高磁場 1200 テスラを記録 未知なる強磁場科学の幕開け

1. 発表者：

嶽山 正二郎（東京大学物性研究所 教授）
松田 康弘（東京大学物性研究所 准教授）
澤部 博信（東京大学物性研究所 技術専門職員）
中村 大輔（東京大学物性研究所 助教）
池田 暁彦（東京大学物性研究所 助教）

2. 発表のポイント：

- ◆新規導入した電磁濃縮（注1）超強磁場発生装置が完成し、これを用いて1200テスラ（注2）という強力な磁場を発生させ、それを高い信頼性で計測することに成功しました。
- ◆1000テスラを優に超えた超強力な磁場が発生可能であること、また、1000テスラ領域での極限的な超強磁場環境での物性計測が安定して行えることが示されました。
- ◆物性測定の新たなプローブとなり、強磁場科学の次世代に向けて新しい段階に踏み出しました。

3. 発表概要：

東京大学物性研究所の嶽山正二郎教授と松田康弘准教授の研究グループ（澤部博信技術職員、中村大輔助教、池田暁彦助教）は、文科省最先端研究基盤事業「次世代パルス最強磁場発生装置の整備」計画の下に物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設で整備してきた1000テスラ級電磁濃縮超強磁場発生装置を完成させました。これを用いて1200テスラという強力な磁場を発生し、高い信頼性で計測することに成功しました。室内での実験、かつ高度に制御された磁場として、これまでの世界最高記録730テスラ（2011年、同研究グループ）、および985テスラ（2018年、同研究グループ）を大幅に更新し、遂に1000テスラを遥かに超えて1200テスラに到達しました。

これまで同程度の時間空間スケールでの1000テスラ超の磁場生成は爆縮法（注3）でしか得られておらず、磁場の安定性や計測の困難さから、物性測定には不向きでした。これに対し、電磁濃縮法による発生磁場は空間的にも時間的にも高い精度で制御可能であり、超強力な磁場が安定して発生できること、高精度の物理計測が容易であることを示しました。今後、超強磁場での物性計測に加え、高圧や極低温など他の極限物理環境と組み合わせての利用が期待されます。

1000テスラ超の磁場では電子の運動が制限され、原子近傍で強い相互作用をする電子の性質を調べることで、物質の未知の機能を発見する事ができると期待されます。本手法による超強磁場下では、さまざまな信頼性ある物理計測が可能のため、半導体、ナノマテリアル、有機物質、超伝導体、磁性体で未解明の固体物理量子現象の解明により強力な手段を手に入れたこととなります。人知による強磁場発生の世界で新たな歴史の一ページを開きつつあると言えます。

本成果は、測定技術および装置開発の分野での世界トップの権威ある科学誌である American Institute of Physics(AIP) 出版局が刊行する科学誌「*Review of Scientific Instruments*」9月17日版に掲載されました。この論文は *Review of Scientific Instruments* の Featured Article に選ばれ、また AIP の Scilight にも掲載されました。

4. 発表内容：

① 研究の背景

磁場は精密制御が可能な物理環境の一つであり、電子の軌道とスピンに直接働きかけることができるので、磁性、超伝導、半導体、その他様々なナノ物質などの固体電子物性研究には欠かせません。1000テ

スラ領域の磁場では、物質中の電子の運動を1ナノメートルスケールに閉じ込めたり、非常に重たい電子を磁場で制御できるため、新規な機能を解明するプローブとして、また物性研究の未知の領域開拓のため、物性測定が可能な強磁場発生装置が求められていました。

強磁場発生の方法には、大きく「磁束濃縮法」と「一巻きコイル法(注4)」があります。「磁束濃縮法」は、予め発生させておいた磁束を濃縮して超強磁場を得るもので、濃縮のために爆薬を用いるものを「爆縮法」、電磁気的手法によるものを「電磁濃縮法」と言います。「一巻きコイル法」は、一巻きのコイルに大電流を瞬時に流して超強磁場を発生させるものです。この方法は簡便ですが磁場の発生最高値が300テスラ程度が限界です。他に、プラズマフォーカス(注5)やパルスレーザー(注6)の強力な電磁場を用いる方法などもありますが、磁場発生時間及び空間が極端に制限されるため物性研究の実用には不向きです。現在のところ、300テスラ以上の磁場を発生するには磁束濃縮法しかなく、同研究グループは、これを採用しました。

電磁濃縮法による超強磁場発生は、クネール(E. Cnare、1966年)により最初に提案されたものですが、当時136kJのコンデンサバンクを用いて210Tの超強磁場の発生が報告されています。原理は、ライナーと呼ばれる金属円筒リング(図2)をその円周方向の電流を使って高速に圧縮し、比較的大きな空間(直径10-20cm)に予め発生させておいた数テスラの初期磁場を濃縮することにより、最終的に小さな空間(直径10mm程度)に超強磁場を発生させるというものです。信頼性と精度の高い物性計測に応用するには磁場発生空間の大きさは重要で、最低数ミリ、できれば10mm程度の直径及び長さ方向の空間が必要です。本手法の実質的な開発と展開は世界で唯一、物性研究所で行われてきました。

物性研究所では1970年代からパルス法による超強磁場発生とこれを用いた極限的環境での物性物理学への応用研究に向けた開発を行って来ました。同研究グループは、2011年に始まった文科省最先端研究基盤事業「次世代パルス最強磁場発生装置の整備」計画の下、1000テスラ級電磁濃縮超強磁場発生装置を物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設に新規導入、整備し、2018年1月に全システムを完成させました。

② 研究内容

電磁濃縮による超強磁場発生は、主コイルとその中にセットした金属ライナー、初期磁場の3つから構成され、主コイルに瞬間的に大電流を流す事で実現されます。

今回、瞬間的放電能力を引き上げるべくコンデンサ電源(Kashiwa-II、図2)を新しく作り上げ、主コンデンサバンクの最大充電電圧を50kVに引き上げました。コンデンサバンクから放電された電流は、480本の高電圧ケーブルによって集電板に集められ、主コイルへ導かれます。主コイルは超強磁場を発生させるためのもので、2011年に嶽山教授によって開発された銅内張りコイルを用いました。本研究では、主コンデンサバンクの充電エネルギーは3.2MJ(8ユニット、45kV)で、初期磁場の大きさは3.2テスラとしました。発生した磁場強度は、ピックアップコイルによる電氣的計測とファラデー回転(注7)による光学的計測を同時に行いました。

得られた磁場値の時間変化を図3に示します。ライナーの収縮に伴って、放電開始から40.3 μ 秒後に600テスラを超え、40.7 μ 秒後あたりで1200テスラに達しているのが明確に捕らえられています。詳しい解析の結果ライナーの収縮速度が5km/秒にも達していることが分かりました。また、1200テスラが発生できた磁場空間の、ボア径はシミュレーションから3mm程度と推定されます。

装置全体の最適化された設計によりコンデンサ電源からコイルへのエネルギー伝達効率が上がり、コイル電流の立ち上がり速度が大幅に改善されたことで発生磁場の大幅な強度増大を実現できました。

③ 社会的意義・今後の予定

これまで1000テスラの磁場は、複雑な構造で構成される爆縮法でしか達成できませんでした。これは野外実験でのみ実現可能で、しかも、再現性や磁場発生の制御などとても望めないものでした。

この度完成させた次世代型超強磁場発生装置では、磁場発生効率が格段に改善され、1000 テスラ以上の超強力な磁場を安定して発生できるようになりました。これにより今後、1000 テスラ領域での極限的な超強磁場環境での物性計測が安定して実現可能であることを示しました。

本装置で創られる 1000 テスラの磁場は発生時間および空間を制御できるため、さまざまな物理計測が可能になります。1000 テスラでは物質の中の電子の運動を 1 ナノメートルスケールに閉じ込めたり、非常に重たい電子を磁場で制御できるため、新規な機能の解明に貢献することが期待されます。半導体、ナノマテリアル、有機物質、超伝導体、磁性体で未解明の固体物理量子現象の解明により強力な手段となり、1000 テスラ超強磁場科学の次世代に向けた新しい階段の第一歩を踏み出したと言えます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：*Review of Scientific Instruments*. **89**, 095106 (2018) (9月17日オンライン掲載)

論文タイトル：Record indoor magnetic field of 1200 T generated by electromagnetic flux-compression

著者：D. Nakamura, A. Ikeda, H. Sawabe, Y. H. Matsuda, S. Takeyama*

DOI 番号：10.1063/1.5044557

アブストラクト URL：<https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.5044557>

6. 問い合わせ先：

【研究内容について】

東京大学 物性研究所

教授 嶽山 正二郎 (タケヤマ ショウジロウ)

TEL：04-7136-3335

E-mail：takeyama@issp.u-tokyo.ac.jp

【報道に関すること】

東京大学物性研究所 広報室

TEL：04-7136-3207

E-mail：press@issp.u-tokyo.ac.jp

7. 用語解説：

注1：電磁濃縮法

鉄製の一卷きコイル（主コイルという）内に金属筒（ライナーと呼ぶ）をセットし、主コイルに大電流を瞬時に流す時の電磁誘導によりライナーに電磁応力を発生させて超高速に収縮させる。これにより磁束を超高速に濃縮して超強磁場を発生する方法。

注2：テスラ

磁場（磁力、磁界）の強さを表す単位、T で表記される。磁場の強さは磁力線の密度で示される。昔はテスラの代わりにガウスが使われていた。1 T=10,000 ガウス。地磁気の強さがおよそ2万分の1テスラ程度であるので、1200 Tはその2千4百万倍に相当する。

注3：爆縮法

超強磁場を得るのにエネルギー源として爆薬を用いる方法。ライナーと呼ばれる金属筒を用いてその中に閉じ込めた磁束を超高速に収縮することで超強磁場を得る。TNT（トリニトロトルエン）高性能爆薬が使用される。100 kg の TNT 爆薬を用いて 2,800 テスラの発生が報告されているが、正式な記録ではなく再現もされていない。1kg の TNT 爆薬が 4 百万ジュールに相当するので、4 億ジュールを用いたことになる。爆破力が大きいので、旧ソ連、ロシアのシベリア平原や米国ロスアラモスの野外で行なわれていた。再現性がなく精密物性測定には適さない。

注4：一卷きコイル法

電気エネルギーを蓄積したコンデンサから、銅の一巻きのコイルに大電流 (2-4 百万アンペア) を瞬時に流して、超強磁場を発生させる方法。コイルが外に向けて変形する前に電流を流しきり、磁場の発生を終える。一巻きのコイルの内径 (3-18 mm) に依存して 100 テスラから 300 テスラの超強磁場が発生できる。磁場発生直後にコイルは爆発的に破壊するが、全て外向きに破壊が広がるので、コイルの中に入れた試料ホルダや試料は無傷で残るので、同じ試料で何度も繰り返し再現性のある精密物性実験を行うことができる。物性研究所では磁性体、半導体、超伝導体など 100 テスラ超の極限物性物理への応用で多くの成果を上げている。

注 5：プラズマフォーカス法

コンデンサからの大電流でガス状のプラズマを発生させ 2,000 テスラの超強磁場発生の記事もあるが、発生時間が一千万分の 1 秒と非常に短いので磁場の立ち上がりが速すぎて物性計測には適さない。

注 6：パルスレーザー法

パルスレーザー強電場を用いて 1 mm 径ほどの一巻きの細線ワイヤーに一瞬にして超強磁場を発生させる。キロテスラの発生が報告されているが、磁場の立ち上がりが一億分の 1 秒と早すぎて磁場測定さえままならない。また、磁場の空間均一性は全くないと言ってよい。強力な電磁波の発生と言うべきである。物性物理などへの応用は不可能であり、何らかの応用は報告されていない。

注 7：ファラデー回転

光の電場成分を一定方向に揃えたものを直線偏光という。石英やガラスなど光を透過する物質は光の侵入方向と平行に磁場をかけると、入射した光の直線偏光がある角度傾いて透過してくる。これをファラデー回転という。そして、傾いた角度をファラデー回転角という。石英などではこのファラデー回転の角度は印加した磁場の強さに比例するので、磁場の強さを測定するのに利用する。

8. 添付資料：

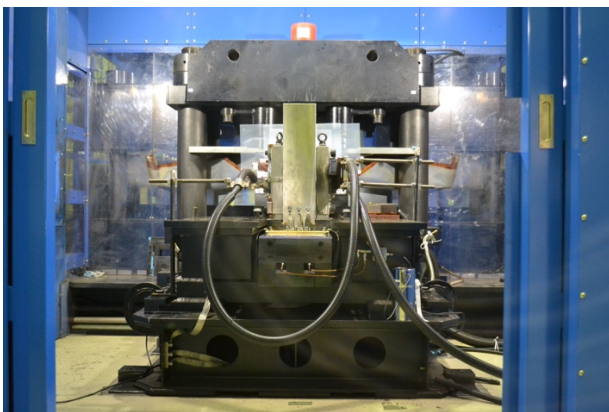


図 1 電磁濃縮超強磁場発生装置 (左) と磁場発生瞬後の様子 (右)

超強磁場発生には爆発を伴うため、装置全体を防護箱 (右写真の青い壁面) で覆い、磁場発生装置の制御及び計測は離れたシールドルームで行う。強磁場発生の際には、強力なマクスウェル応力が伴い、1000 テスラで $4 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ (4 百万気圧) に達し、その瞬後に爆発を引き起こす。

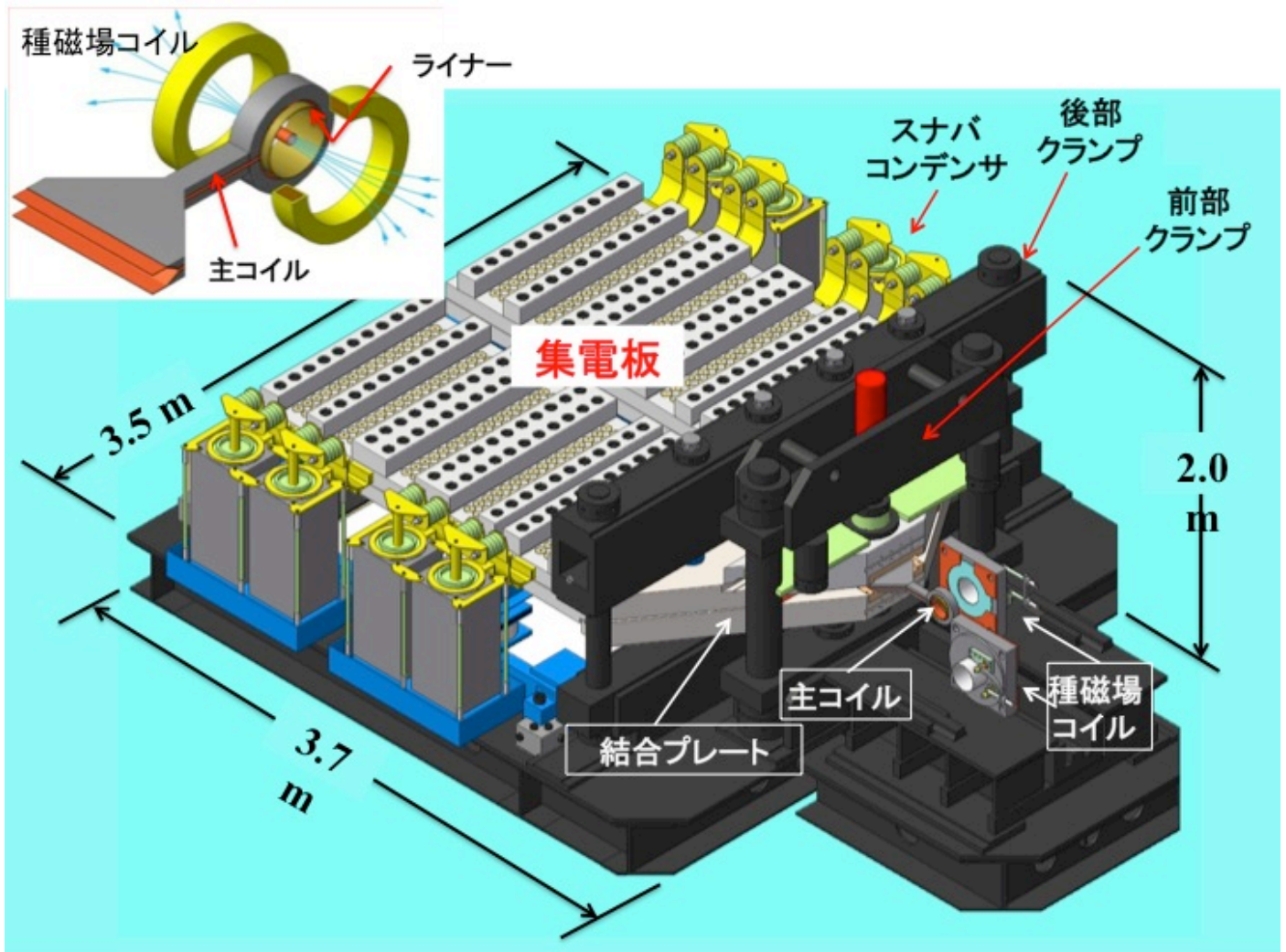


図2 電磁濃縮超強磁場発生装置の模式図

コンデンサに充電した電気が瞬間的に放電され、480本の高電圧ケーブルによって集電板を経て主コイルへ導かれる。電磁誘導によってライナーにも電流が発生し、主コイルとの反発力により収縮する。

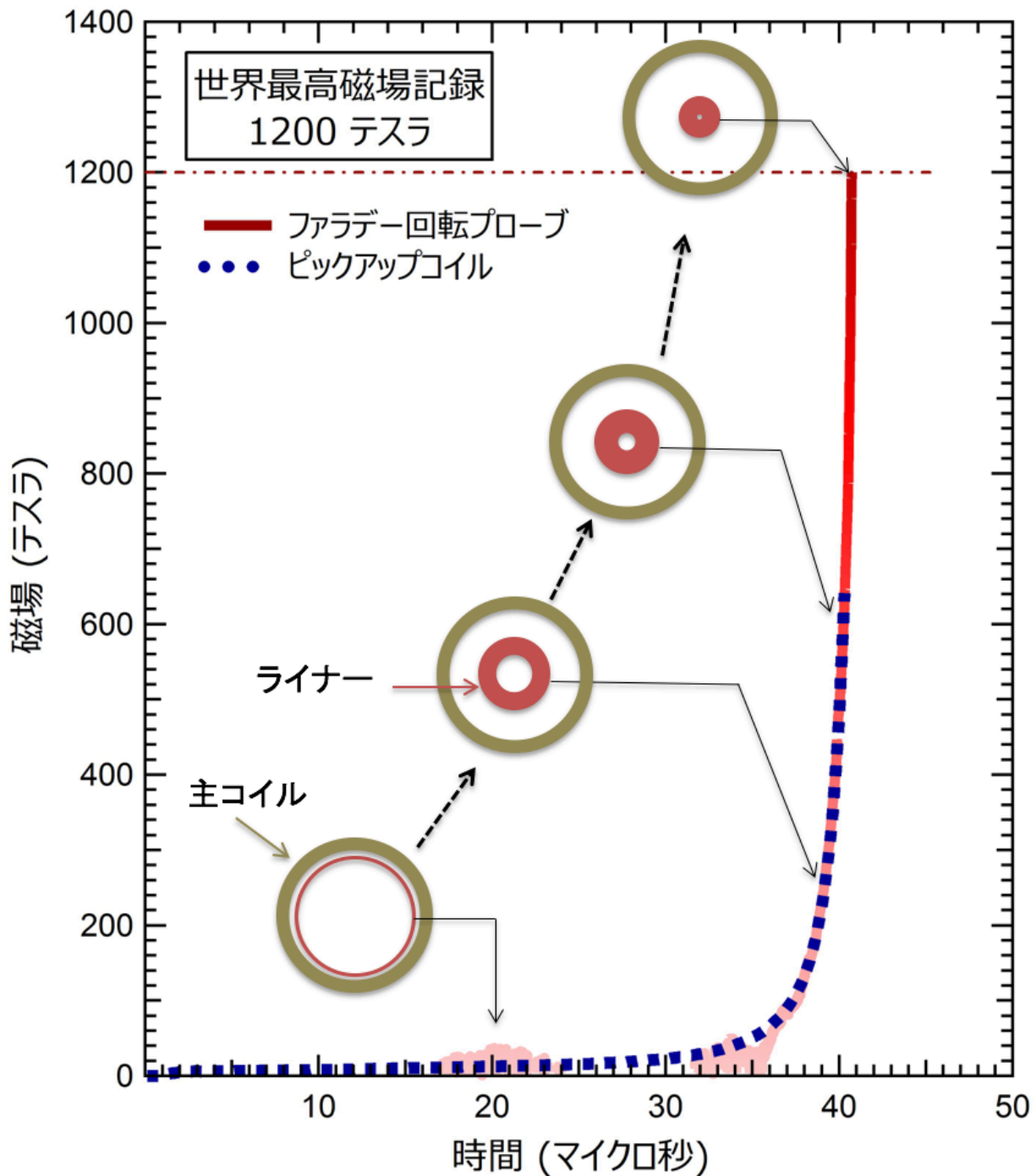


図3 発生した磁場の時間変化とライナー収縮

挿絵、内側のリングが時間とともに収縮するライナー断面の時間変化を示す。ライナーは初期磁場を閉じ込めたまま高速に収縮するため、最終的に直径1 cm程度の小さな空間に強磁場が発生する。ライナーの収縮速度は5 km/秒にも達する。

コンデンサから放電した時刻を0秒とし、コイル中心部の磁場をピックアップコイルによる電氣的計測結果（破線）とファラデー回転による光學的計測結果（実線）を示す。両者がよく一致していることから計測の信頼性が裏付けられる。40.7 μ 秒あたりで、最高強度の1200テスラを記録した。