

## 磁場変化の大きいパルス磁場中での NMR 緩和率測定に世界で初めて成功

～極限的な強磁場下での精密測定に期待～

### ポイント

- ・ NMR 測定装置の高度化により 0.03 秒という短時間磁場パルス中での NMR 測定に成功。
- ・ デジタル無線技術を応用し、限られた時間幅で周波数掃引 NMR スペクトルの高速測定に成功。
- ・ 低コストかつ小型の NMR 測定装置による、広範な産業利用に期待。

### 概要

北海道大学大学院理学研究院の井原慶彦講師らの研究グループは、東京大学物性研究所の博士課程神田朋希氏、松井一樹博士、金道浩一教授、小濱芳允准教授らと共同で、デジタル無線技術<sup>\*1</sup>と磁場のフィードバック制御技術<sup>\*2</sup>を応用した装置開発を行い、3/100 秒程度の非常に短いパルス磁場<sup>\*3</sup>発生時間中に NMR 信号を観測することに成功しました。

パルス磁場技術は一般的に用いられている定常磁場の限界 (20 テスラ<sup>\*4</sup>程度) をはるかに超える磁場を発生させることができる画期的な技術ですが、磁場発生時間が短く、また磁場発生中は磁場強度が激しく時間変動するため NMR 測定<sup>\*5</sup>のような精密測定はこれまでほとんど実現されていませんでした。

研究グループはパルス磁場発生中に磁場強度をフィードバック制御することで磁場の時間変動を 100 ppm<sup>\*6</sup>以下まで抑制し、またデジタル無線技術を応用した NMR 測定装置を開発することで、限られた測定時間の中で高密度な NMR 信号の取得を可能にしました。これらの先進技術を組み合わせることで、世界で初めてパルス磁場中での周波数掃引 NMR スペクトル測定と NMR 緩和率測定に成功しました。

NMR 測定技術は、これまでに複数の分野で何度もノーベル賞の受賞対象になっていることからわかるように、基礎科学から産業応用まで広く人類社会に根付いた科学技術です。

これまでは強磁場を得るために液体ヘリウムの供給を必要とする超伝導電磁石が用いられてきましたが、これらを必要としないパルス磁場中での NMR 測定に成功したことで測定装置の低コスト化、小規模化が可能となり、より多様な場面で産業に応用されることが期待されます。また、定常磁場では到達不可能であった強磁場領域での基礎科学研究が進むことも期待されます。

なお、本研究成果は、2021 年 11 月 12 日 (金) 公開の Review of Scientific Instruments にオンライン掲載されました。

## 【背景】

計測・通信機器の高度化・高速化に伴い、極限的な環境下においても精密な測定が可能になってきています。なかでもパルス強磁場発生技術を用いた強磁場中での測定技術は近年急速に発展しており、世界的にも開発競争が激化しています。瞬間的に磁場を発生させることでエネルギー消費を抑えるパルス磁場技術は、超伝導電磁石を用いて到達可能な 20 テスラ程度までの磁場範囲をはるかに超える 100 テスラ級の極限的な強磁場環境での測定を可能にします。しかし、磁場発生時間が 0.001 秒から長くても 0.1 秒程度と非常に短いため、パルス磁場中での物性測定は高速に行う必要があります。さらに、この短時間に 100 テスラ級の磁場が発生し消失するという劇的な磁場変化が起こるため、精密測定は非常に困難でした。

これらの課題を克服するために、欧米の強磁場施設では磁場発生装置を大型化し、磁場を発生できる時間を延長する試みが行われてきました。磁場変化が緩やかになった結果、パルス磁場中においても磁場掃引の NMR スペクトル測定は実現しており、これを用いた量子物性研究も報告されています。

しかし、磁場変化を完全に抑制することはできないため、高い磁場安定度が必要な周波数掃引の NMR スペクトル測定や NMR 緩和率測定は実現されていませんでした。強磁場により誘起される電子の多彩な磁氣的性質を解明する上で必要不可欠な、これら高度な NMR 測定を実現することが課題となっていました。

## 【研究手法】

磁場発生用のマグネットを大型化し、パルス磁場の時間幅を延長する欧米の研究方針とは対照的に、研究グループでは測定技術の高速化・高度化を推進することで 3/100 秒程度の短時間パルス磁場中での精密測定を行いました。これは欧米で主流となっているパルス磁場下 NMR 測定法と比べて、およそ 10 倍の速さでの高速測定に相当します。ここでは、瞬間的に発生するパルス磁場の磁場強度を高速にフィードバック制御する最新技術を用いて、磁場発生中の 4/1,000 秒間だけは磁場変化を 100 ppm 以下まで抑制し、定常磁場と同等の磁場環境を準備しました。

次に、磁場強度をフィードバック制御しているタイミングに合わせて信号を観測できる NMR 装置を開発し、わずか 4/1,000 秒の時間幅における高度な NMR 測定に挑戦しました。しかし、これまでの一般的な NMR 装置では、磁場制御が可能な一瞬の間にさまざまな周波数の高周波信号を発生させる必要がある周波数掃引スペクトル測定は実現が困難でした。

そこで、新たに開発した NMR 装置には、高速な周波数変調が可能な最新のデジタル無線技術を取り入れ、周波数掃引スペクトルや NMR 緩和率測定といった高度な NMR 測定を可能としました。

## 【研究成果】

高速磁場制御の最新技術を用いることで、4/1,000 秒間の一定磁場、さらには一定の変化率で磁場が変化していく傾斜磁場を作り出し、動的に制御されたパルス磁場中で高度な NMR 測定を実現しました。これにより、磁場変化の大きいパルス磁場中では実現不可能と考えられていた NMR 緩和率測定に世界で初めて成功しました。

また、デジタル無線技術を取り入れた NMR 測定装置の高度化を行ったことにより、限られた時間幅の中でも周波数掃引 NMR スペクトルを測定することに成功しました (図 1)。

これらの研究成果により、パルス磁場中においても定常磁場中と同等の NMR 測定が実現可能であることを示しました。

## 【今後への期待】

パルス磁場中において高度な NMR 測定を実現したことで、定常磁場では到達が難しかった極限的な強磁場領域に出現する量子物性の起源解明が可能となりました。強磁場中で顕著になる電子の量子性が生み出す量子物性は、現在急速に発展している量子情報技術に応用される可能性があります。パルス磁場 NMR 測定によりその起源を解き明かすことで量子情報技術の進展が期待されます。

また、超伝導電磁石と比べて、高価な超伝導線材と電磁石を冷却するための液体ヘリウムが不要となるパルス磁場は、大幅なコスト削減や磁場発生装置の小規模化が可能になります。これらのメリットを持つパルス磁場が NMR 測定に利用可能となったことで、NMR 技術がさらに広い場面で産業応用されていくことが期待されます。

## 論文情報

論文名	Nuclear magnetic resonance measurements in dynamically controlled pulse field (動的制御パルス磁場中での NMR 測定)
著者名	Yoshihiko Ihara <sup>1</sup> , Kaoru Hayashi <sup>1</sup> , Tomoki Kanda <sup>2</sup> , Kazuki Matsui <sup>2</sup> , Koichi Kindo <sup>2</sup> , Yoshimitsu Kohama <sup>2</sup> ( <sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院, <sup>2</sup> 東京大学物性研究所)
雑誌名	Review of Scientific Instruments (測定装置開発の専門誌)
DOI	10.1063/5.0067821
公表日	2021年11月12日(金)(オンライン公開)

## お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院 講師 井原慶彦 (いはらよしひこ)

T E L 011-706-4426 F A X 011-706-4926 メール yihara@phys.sci.hokudai.ac.jp

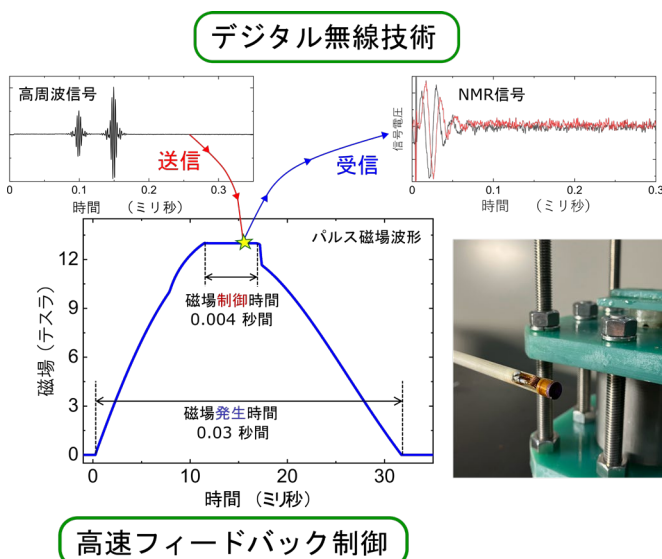
U R L <https://www2.sci.hokudai.ac.jp/faculty/researcher/yoshihiko-ihara>

## 配信元

北海道大学総務企画部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

## 【参考図】



デジタル無線技術と高速フィードバック制御の融合により実現するパルス磁場中 NMR 測定の概略図。パルス磁場波形上で磁場が一定になる星印の瞬間に合わせて高周波信号の送受信を行うことで NMR 信号を観測する。写真はパルス磁場発生用の電磁石 (右奥) と NMR プローブの先端部分 (左手前)。

## 【用語解説】

- \*1 デジタル無線技術 … 高周波信号を高速にデジタル情報へと変換することで、ソフトウェアの柔軟さで高周波信号を処理できる先進技術のこと。
  
- \*2 フィードバック制御技術 … 試料位置での磁場の計測結果に応じて、磁場変化を相殺する補償磁場の大きさを瞬時に計算し、これを発生させる磁場制御技術のこと。
  
- \*3 パルス磁場 … コンデンサに貯めた電気エネルギーを一気にコイルに流すことで瞬間的に非常に大きな磁場を発生させる磁場発生技術のこと。超伝導電磁石を用いた定常的な磁場発生法と比べて、はるかに大きな磁場を発生可能であるほか、超伝導線材の代わりに安価で取り扱いが容易な銅線または銅合金線を利用できるという特徴がある。また、超伝導電磁石では線材の超伝導性を保つための冷却材として消費される液体ヘリウムが不要であることも大きなメリットである。液体ヘリウムを利用する冷却装置が不要となることで装置全体を小規模化することが可能になる。
  
- \*4 テスラ … 磁場強度の単位のこと。ネオジウム磁石では1テスラ程度の磁場が発生できる。発生可能な磁場強度は超伝導電磁石では10テスラ程度、パルス磁場では100テスラ程度であり、パルス磁場を利用することで、より1桁高い磁場スケールでのNMR測定が可能となる。
  
- \*5 NMR測定 … 物質や人体を構成する原子核が持つ核スピン（小さな磁石のような性質）をマイクロな磁気プローブとして利用し、物体内部の磁気情報を観測する非破壊的な計測手法のこと。Nuclear Magnetic Resonance（核磁気共鳴）の略称。具体的な測定技術としては、一定の磁場中で送信周波数を様々に変えながらNMR信号強度を観測することで得られる周波数掃引NMRスペクトル測定や、NMR信号を出す原子核スピンの熱平衡状態へと緩和するまでに必要となる特徴的時間を観測するNMR緩和率測定などがある。一般的には、超伝導電磁石を用いた時間変動の非常に少ない定常磁場中で測定が行われている。
  
- \*6 ppm … 百万分率のこと。1 ppm = 1/1,000,000