

コインに磁場をかけると、どうなる？

池田 暁彦 〈東京大学物性研究所 ikeda@issp.u-tokyo.ac.jp〉

松田 康弘 〈東京大学物性研究所 ymatsuda@issp.u-tokyo.ac.jp〉

1. 自然は強磁場を嫌う

「自然は真空を嫌う」と言ったのはアリストテレスである。有名な言葉ではあるが、宇宙に出れば真空はありふれているし、場の量子論における真空の存在は肝心である。¹⁾ 「自然様」が真空を嫌っているというのは言い過ぎかも知れない。

一方で「自然は強磁場を嫌う」という言葉がある。²⁾ これは名言だ。強い磁場を発生するのには大変な困難を伴う。地磁気や永久磁石による磁場は身の回りにあふれている。しかし、これらよりも強い磁場を発生すると、自然界では、とにかくそれを解消しようとする向きに作用が生じるので

ある。強磁場は自然に嫌われているとしか思えない。

例として二本の平行な導線を考えよう。この導線に反対向きの電流が流れている場合、ご存じの通り、一方の電流に誘起された静磁場ともう一方の電流間に働くローレンツ力により反発相互作用が生じる。別の見方として、磁力線の密度に着目して考えてみよう。導線に垂直な面内に発生する磁力線を考えると図1(上図)のようになる。導線の間には磁力線が密な領域(=磁束密度が高い=磁場が強い)が発生している。マクスウェルによれば、磁力線同士はマクスウェル応力という反発力を感じており、磁力線が密な領域には磁場のエネルギーが蓄積される。このときもし図1(下図)のように導線間の距離が離れば、磁力線の密度は減少し磁場のエネルギーは下がる。このように、磁場の強い領域には磁場のエネルギーが蓄積されており、そのエネルギーを下げるために力学的な作用が生じるのである。自然は強磁場が嫌いというわけである。

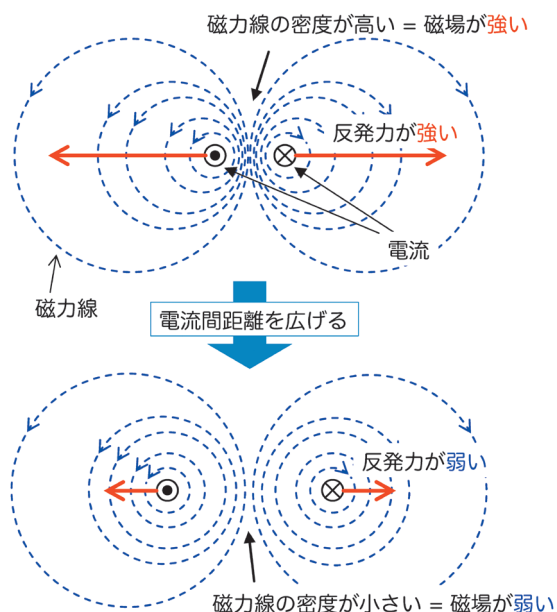


図1 平行で逆向きの電流周辺に発生する磁力線と電流同士に働く反発力の模式図。電流間の距離を離すことで、磁場のポテンシャルエネルギーは減少し、電流間の反発力は緩和する。

2. コインに磁場をかけてみよう

本稿ではコインに強い磁場をかける実験を紹介し、磁場によって発生する非日常的に強いマクスウェル応力をデモンストレーションしたい。³⁾ 電磁石で強い磁場を発生すると、コイルの直径を広げるマクスウェル応力が生じる。電流にかかる力は磁場の二乗に比例して大きくなり、極限的に強い磁場では、どんなものでも変形・破壊できるほどの力が発生する。

実験に使用したパルス磁場発生回路の概略図を図2に示す。コンデンサに電気エネルギーを蓄積する充電回路と、これを一気に放電し、コイルに大電流を流す高速放電回路からなる。今回の充電電圧は最大13 kVである。コイルは銅製の一卷きコイルを使用し、磁場がコインを面直に貫く

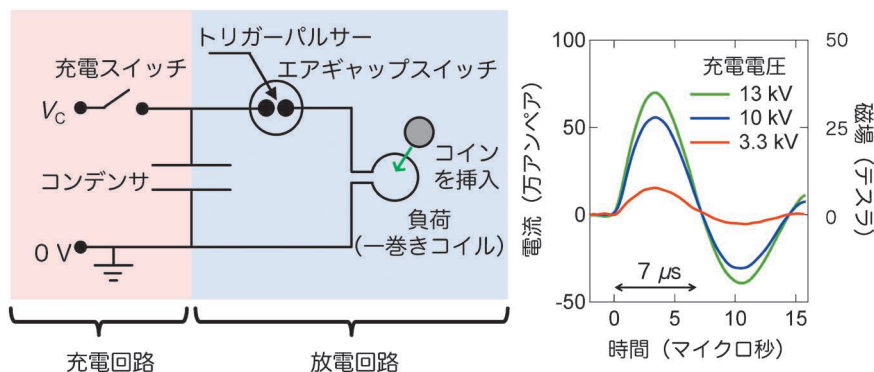


図2 高速パルス磁場発生装置の充放電回路(左図)。コインを挿入したコイルに流れた電流の時間変化(右図)。

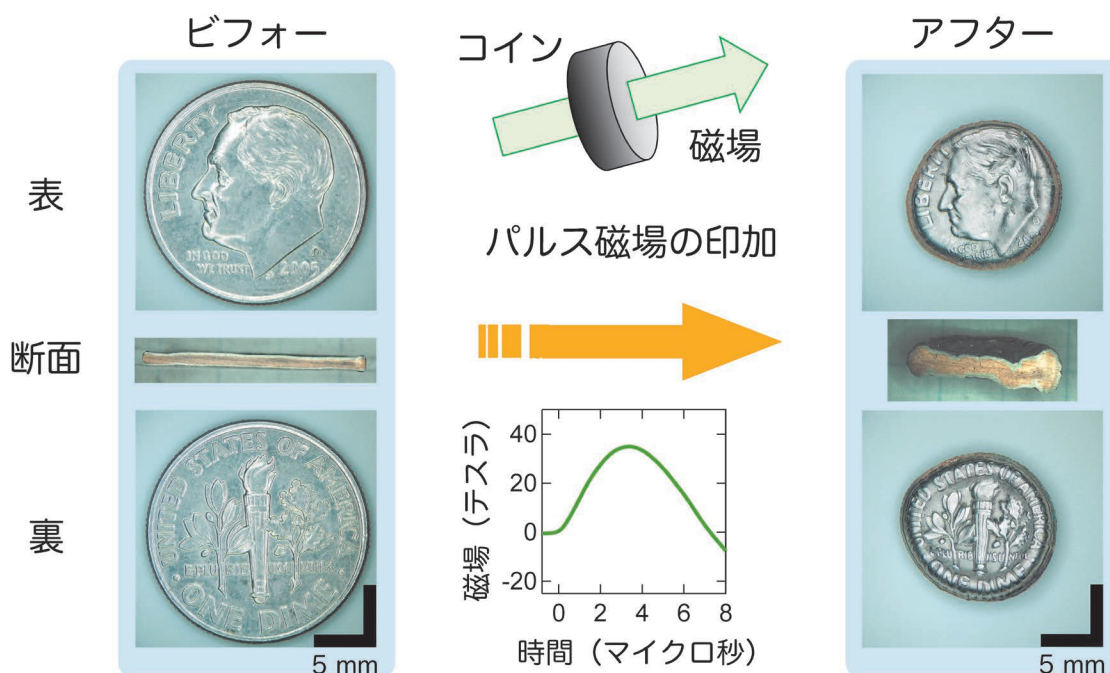


図3 磁場の印加前のコインの写真(左)と13 kV充電により発生したパルス磁場印加後の変形したコインの写真(右)。コインはアメリカ合衆国の10セント硬貨(One dime)である。変形前のコインの直径・厚みはそれぞれ17.9 mm, 1.4 mmであったが、変形後には、11.8-12.7 mm, 1.9-3.5 mmに変化した。一方で重量は2.27 gのままで変化しなかった。

ようコインを配置した。また、コインが軸方向に飛び出さないように、プラスチック製治具を用意して両側から押さえ込んだ。

まず3 kV充電して放電してみた。20万 A程度の電流が流れ数テスラの磁場が発生したが、コイルの変形はこの磁場では起こらなかった。今度は10 kVから13 kV程度充電して、放電を行ったところ、最大55万-70万 A程度の大電流が発生した。このときの充電エネルギーは8 kJから13.5 kJ程度(チョコ粒=1 gくらいのエネルギー)である。コインの置かれた場所には磁場として30テスラ程度発生していると考えられる。

さて強いパルス磁場をかけたコインに何が起こったか？結果を図3に示す。コインは縮んでいた。しかもコインの図案はそのまま小さくなっている。文字もそのまま読める。人物の顔はふっくらして、心なしか優しい表情になった。磁場印加直後のコインは触れないほど熱くなっている。これはコインに大きな誘導電流が流れたことを示唆している。重さは変わらず、軸方向には若干厚くなっている。

コイルとは言えば無傷ではなく、ショットごとに若干内径が広がっていつている。この実験ではコイル部の外側に鉄の補強を入れて用いたが、それでも、コインを縮める力の反発力がコイルにかかり、鉄の補強材共々変形が起こった。とはいえ破壊するほどではないので、繰り返し使用できた。

3. どうしてコインがつぶれるの？

コインが小さくなったのは何故だろう。これには2つの要素を考える必要がある。一つは動的な電磁誘導の法則で

話題 コインに磁場をかけると、どうなる？

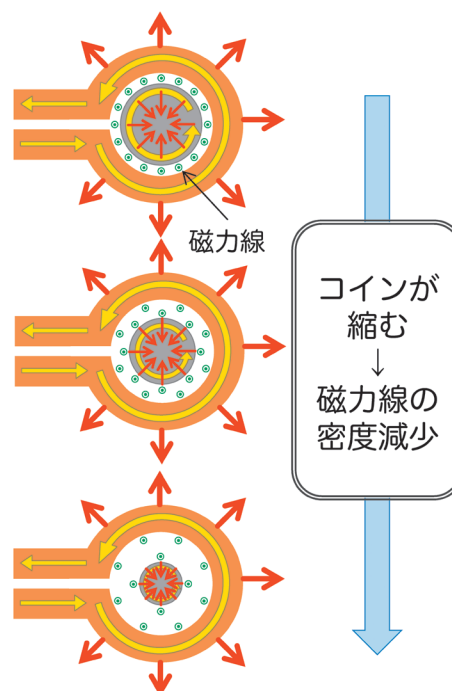


図4 コインとコイルに流れる電流・誘導電流の向き、かかる力、磁束密度の模式図。電流間の電磁気力により、コイルには外側に、コインには内側に圧縮するマクスウェル応力が印加する。コインが変形することで磁束密度が低下し、磁場のエネルギーが減少する。

ある。もう一つは冒頭で紹介した、電流間の静的な反発力である。

まずコイルに電流を流すと、コイル内に磁場が発生し、磁束がコインを貫こうとする。ところが今回用いたパルス磁場は非常に速く時間変化している(図2)。電磁誘導の法則によれば、金属に時間変化する磁場を通そうとすると、

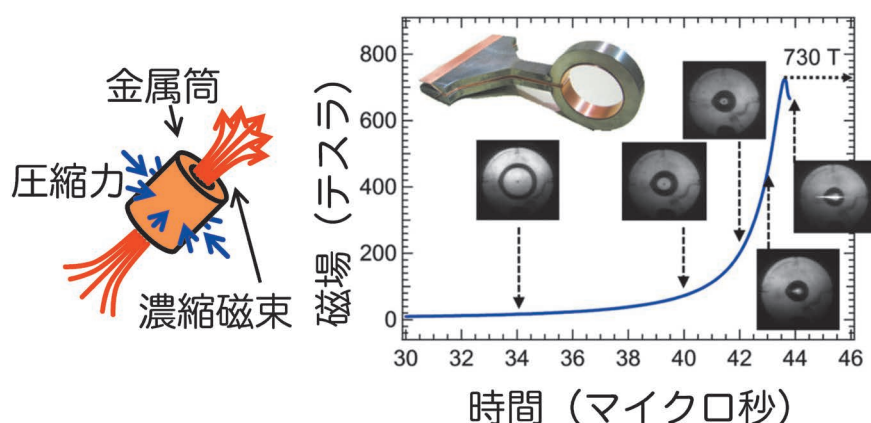


図5 磁束濃縮法の概念図(左図). 圧縮力をマクスウェル応力により発生する場合、電磁濃縮法という。電磁濃縮法による室内世界最高磁場の波形(右図). インセットは使用された銅内張コイル(一次コイル)の写真と、各時刻における変形した金属筒の高速写真。文献4より許可を得て転載。

その磁場を打ち消そうとして、導体内に円電流が流れるのであった。これは誘導電流と呼ばれる。

次にコインを流れる誘導電流の向きを確認してみよう。図4に示すとおり、コインを流れる誘導電流はコイルの電流とは逆向きであることが分かる。逆向きの電流同士には反発力が働くのであった。このときコインには内側に圧縮する力がかかり、コイルには外側に押し広げられる力がかかることが分かる。

別の見方による説明としては、磁力線の密度を小さくしようとする力がある。図4で、コインとコイルの間に磁束密度が発生している様子が描かれている。コインが縮むにつれて、この磁力線の密度が減少する様子が見て取れる。磁力線同士はマクスウェル応力で反発しているため、この反発力を緩和するために、コイルは外側に膨らみ、コインは内側に縮むのである。

4. 最強磁場の発生法

見てきたとおり、非常に強い磁場の発生には必ず非常に強い力の発生が伴う。マクスウェル応力は磁場の二乗に比例し、100 テスラ程度でほぼすべての導線材料の引っ張り強度を超えるため、電磁石の限界はここにあると考えられている。

しかし裏技はどこにもあるもので、超強磁場とよばれる100 テスラ以上の磁場発生は「破壊型パルス磁石」で達成できる。物性計測に利用できる室内世界最強磁場の発生に用いられる電磁濃縮法では、マクスウェル応力を逆にとり、マクスウェル応力によって磁束を濃縮する。実はこれは今回紹介したコインの圧縮と同じ原理による。具体的には今回紹介したコインの代わりに、金属筒(ライナー)を用い、これを高速圧縮する。圧縮されたライナーが、内部の種磁束を濃縮し、中心部分に超高密度磁束状態を発生するのだ(図5)。これまでに500-700 テスラまでの室内最高磁場が達成され⁴⁾、液体ヘリウム環境下でのフラストレート磁性体⁵⁾やカーボンナノチューブ⁶⁾の物性計測に提供された。

また、今回コインを圧縮した一巻きコイルでは、充電電

圧を40-50 kVにあげることで、100-300 テスラのパルス磁場が発生できる。マクスウェル応力でコイルが破壊するには、10 マイクロ秒程度の時間がかかる。それよりもすばやく大電流を流して、一瞬だけ超強磁場を発生するのだ。うまくマクスウェル応力の限界を迂回しているのである。一巻きコイル法は電磁濃縮法よりも簡便で、最近でも多くの物性計測の実績がある。⁷⁻⁹⁾ これらの手法のより詳しい解説として文献10を挙げる。

5. おわりに

コインに強い磁場をかけて縮める実験を紹介した。コインがつぶれる様子から、強い磁場を発生すると同時に強い力が発生することをデモンストレーションした。また、この効果をうまく逆手にとることで、物性計測に用いる超強磁場環境が生み出されていることを紹介した。

本実験は東京大学柏キャンパス一般公開で物性研究所強磁場施設における企画展示として行ったものである。ご協力頂いた当時の研究室メンバーである厳正輝氏、安井伸氏、寺島拓氏、野村和哉氏、秋元昂氏、市川俊和氏、清水歩実氏、都築崇氏、中村大輔氏、澤部博信氏、嶽山正二郎氏(敬称略・順不同)に厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 一つ目の「真空」は工業的真空(=大気圧よりも気圧の低い状態)、二つ目の「真空」は場の量子論において $|0\rangle$ と書かれる粒子数ゼロの状態のことである。
- 2) 石川義和、三浦 登編著、『磁性物理学とその応用』(裳華房、1984)、3章に近角聰信の言葉であるとの記述がある。
- 3) T. Gray 著、高橋信夫訳、『Mad Science—炎と煙と轟音の科学実験54』(オライリージャパン、2016)。
- 4) S. Takeyama and E. Kojima, J. Phys. D **44**, 425003 (2011).
- 5) A. Miyata et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 207203 (2011).
- 6) D. Nakamura et al., Phys. Rev. B **91**, 235427 (2015).
- 7) Y. H. Matsuda et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 137204 (2013).
- 8) T. Nomura et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 247201 (2014).
- 9) A. Ikeda et al., Phys. Rev. B **93**, 220401(R) (2016).
- 10) 嶽山正二郎、日本物理学会誌 **67**, 170 (2012)—電磁濃縮法による室内世界最高磁場発生と物性物理への応用。

(2018年1月4日原稿受付)