

機関番号：14301

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20685002

研究課題名（和文）磁気アルキメデス浮上と NMR の融合

研究課題名（英文）Unification of magneto-Archimedes levitation and NMR

研究代表者

武田 和行（TAKEDA KAZUYUKI）

京都大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号：20379308

研究成果の概要（和文）：

本研究課題の目的は、原子核に起因する磁性が磁気浮上物体の力の釣り合いに及ぼす影響を検証することにある。磁気アルキメデス浮上している水の中に存在するプロトンによる磁化を、核磁気共鳴（NMR）の技術によって操作するために、試料空間を 1 MPa まで酸素ガスで加圧可能な NMR プローブを開発した。これを縦型の 14 T 超電導電磁石に挿入することにより、水滴の磁気アルキメデス浮上に成功した。また、浮上物体中のプロトンスピンの対して、磁化の反転操作を行い、物体の運動を観察した。

研究成果の概要（英文）：

The subject matter of this work is to study the effect of nuclear magnetism to the balance of forces in magnetically levitating bodies. In order to manipulate the nuclear magnetization in a levitating water drop, an NMR probe was built with a sealed sample container, in which oxygen gas up to 1 MPa can be supplied and liquid water can be injected. Magneto-Archimedes levitation was successful in the fringe field of a wide-bore 14 T superconducting magnet. Also, a tuned saddle-coil is placed inside the sealed container, so that rf irradiation can be applied to the proton spins. The proton magnetization was inverted in the levitating body, and the event was monitored with a CCD camera placed inside the magnet.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	11,500,000	3,450,000	14,950,000

研究分野：核磁気共鳴

科研費の分科・細目：基礎化学・物理化学

キーワード：スピン化学・核磁気共鳴

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 水滴等の反磁性物体は、負の磁化率を持ち、不均一磁場を発生する磁石中に置くと、磁石から遠ざかる方向に反発力を受ける。縦型の超電導電磁石の上部では、反磁性物体は鉛直上方向の力を受け、磁場勾配が十分大きければ重力と釣り合って空中に浮上する。水滴の場合、重力と釣り合うために必要な磁場勾配は、およそ 1400 T/m であり、これまでに蛙や林檎等の浮上実験が報告されている。ただし、これだけ強力な磁場勾配を実現できる磁石は普及しておらず、反磁性磁気浮上実験を行うことができる研究機関は限られている。

(2) 一方、常磁性を示す流体を媒質として用いることで、市販の超電導電磁石を使って磁気浮上を実現できることが最近示されている。たとえば酸素ガスは基底状態で常磁性を示し、反磁性物体とは逆に磁場勾配の存在下で磁石に吸い寄せられる傾向にある。超電導磁石の内部では、酸素ガスの濃度に勾配が生じ、浮力が通常下よりも飛躍的に増大する。これは、アルキメデスの原理により、物体が押しのけた媒質の重量に相当する浮力がはたらくためである。浮力は、酸素ガスの圧力を調整することにより、制御可能であり、反磁性物体だけでなく常磁性物体をも浮上させることができる。常磁性媒質を利用した磁気浮上は、磁気アルキメデス浮上として知られている。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究課題の目的は、これまでは考慮されていなかった、磁気浮上物体における原子核の磁性の効果を検証することにある。たとえば、水や有機物には水素原子が含まれている。水素の原子核すなわちプロトンは、スピンと呼ばれる磁性を持ち、プロトンスピンのマクロスコピックな集合は、熱平衡下でキュリーの法則に従う常磁性を示す。したがって磁気アルキメデス浮上している水滴には、重力・反磁性力・浮力の他にもプロトンスピンの起因する常磁性力が働いているはずであり、浮上している状態では、図 1 に示すように、3 種類ではなく 4 種類の力が釣り合っているはずである。

(2) 本研究では、核磁化を操作・観測することができる核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic



図 1. 磁気アルキメデス浮上物体における力のつり合い。

Resonance: NMR) 分光法を、磁気アルキメデス浮上物体に適用することで、核磁化の寄与を検証することを目標とした。

### 3. 研究の方法

(1) 図 2 (上) に、水の磁気アルキメデス浮上条件の式を示す。ここで  $\chi_w$  および  $\chi_a$  は水と空気の磁化率、 $\rho_w$  および  $\rho_a$  は水と空気の密度、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $g$  は重力加速度である。本研究課題では、核磁化の寄与を図 2 (下) のように修正することを提唱している。新たに核の磁化率  $\chi_p$  が導入されている。

(2) 原子核のスピンの状態は、NMR 分光法で確立されている手法により反転することが可能である。すなわち図 3 に示すように、熱平衡状態における常磁性核磁化を反転さ

$$\frac{\chi_w - \chi_a}{\mu_0} B \frac{dB}{dz} = (\rho_w - \rho_a) g \sim \rho_w g$$

$$\frac{\chi_w - \chi_a + \chi_p}{\mu_0} B \frac{dB}{dz} \sim \rho_w g$$

図 2. (上) オリジナルの磁気アルキメデス浮上条件。(下) 今回提唱している、核磁化の寄与を考慮に入れた修正版の磁気アルキメデス浮上条件。

せて、核の反磁性状態を作ることができる。これにより、力のバランスがずれて、釣り合い条件が変化するはずであると予想した。また、磁化を何度も反転させて核スピンの働く力を上下方向に変調させて、その周期を力学的共振周期と同調させることで、物体の運動を増幅させることができるはずである。よって、核磁化を反転させつつ浮上物体の様子を観測することを計画した。

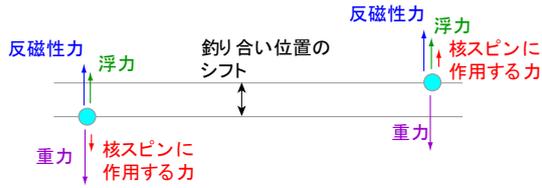


図3. 熱平衡状態 (左) とスピン反転時 (右) における4種の力。核磁化の反転により、釣り合いの位置がシフトすることが予想される。

(3) 図4に、実験装置の概略を示す。縦型超電導電磁石中に測定物を入れた密閉容器を挿入し、酸素ガスを注入する。その濃度を制御することにより浮力を調整して磁気アルキメデス浮上を実現する。また、容器中の物体の様子を観察するために、アクリル製の透明な窓を用意し、CCDカメラで遠隔モニターを行うことにした。さらに浮上物体のNMRを行うために、容器の内部にサドル型コイルを配置し、機密性を保ったまま外部に配線し、当該周波数でインピーダンス整合をとるようにした。

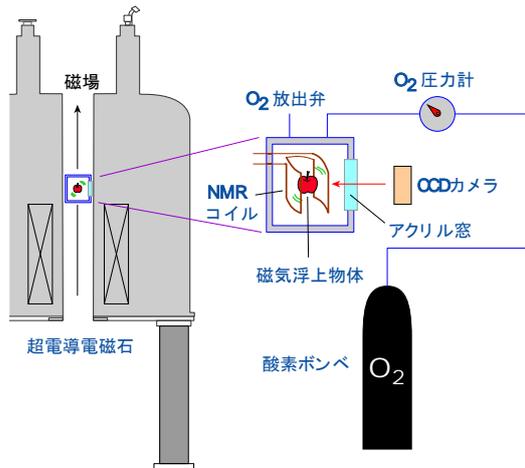


図4. 実験システムの模式図。

(4) 磁気浮上実験を行うために、JASTEC社製の14テスラ超電導電磁石を用いることにした。磁石ボア内における、磁場の位置依存性を図5 (左) に示す。ここから、浮上条件に寄与する磁場×磁場勾配を図5 (中央) のように算出した。また、水を浮上させるのに必要な酸素ガスの圧力を図5 (右) に示す。

(5) 常温で熱平衡にある水のプロトンの磁化率  $\chi_p$  は  $4 \times 10^{-9}$  である。図2 (下) の式より、プロトン磁化を反転させたときには、力

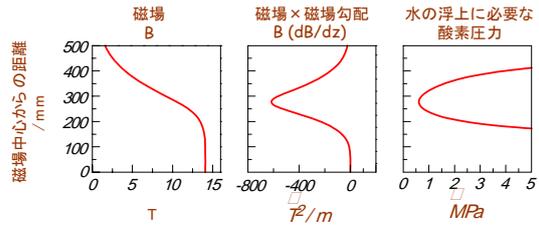


図5. 研究に用いた JASTEC 製 14 テスラ超電導電磁石のボア内の磁場の位置依存性 (左) と、磁場と磁場勾配の積 (中央)、および水を磁気アルキメデス浮上させるのに必要な酸素ガスの圧力 (右)。

のつり合い条件が因子  $2\chi_p/(\chi_w - \chi_a)$  だけ変化することが期待される。常温における水の磁化率  $\chi_w = 9.03 \times 10^{-6}$  および圧力依存する酸素の磁化率  $\chi_a$  を考慮して、釣り合い位置のシフトを計算し、図6 (左) の依存性を得た。B (dB/dz) が極大となる、磁場中心から約 275mm の位置においては釣り合いが不安定であり、そこから 1 cm 程度ずれた点においてシフトは 0.1mm のオーダーであり、使用した CCD カメラで検出可能であると予測した。

(6) 磁場と磁場勾配の積 B (dB/dz) を、釣り合い位置  $z_0$  の近傍で 1 次関数を用いて  $a(z-z_0)$  と近似することにより、浮上物体の運動を調和振動子で記述可能であることを見出した。その固有振動数  $f_c$  を、

$$f_c = [a|\chi_w - \chi_a|/\mu_0\rho_w]^{1/2}$$

と導出した。 $f_c$  の釣り合い位置依存性を図6 (右) に示す。 $f_c$  に同期してプロトンスピンの反転を繰り返すことにより、浮上物体を強制振動できると考えた。

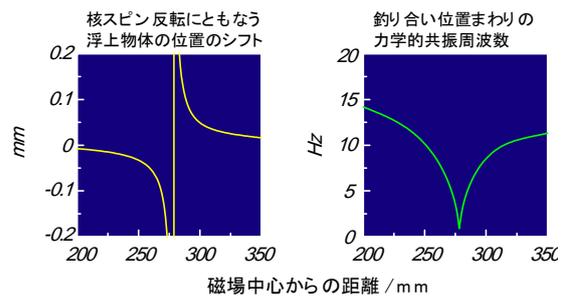


図6. (左) 磁気浮上水滴中のプロトンの磁化を反転させた際に予想される、浮上位置のずれ。(右) 釣り合い位置まわりの、力学的共振周波数。

#### 4. 研究成果

(1) 図7に、使用した超電導電磁石と酸素ガスポンベの写真を示す。また図中のディスプレイには、この磁石内で磁気アルキメデス浮上しているナンテンの実が表示されている。



図7. 磁気アルキメデス浮上実験に用いた超電導電磁石。

(2) 図8には、磁気アルキメデス浮上と NMR 実験を同時に行うために開発したプローブを示してある。アルミニウムブロックを削りだして作った耐圧容器に、アクリル製の透明な窓を取り付け、内部をモニターできるようにした。窓の取り付け部には O リングが挟んであり、内部圧力 10 気圧程度までの気密性を

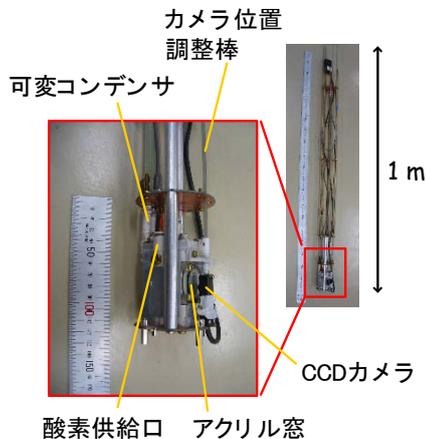


図8. 磁気アルキメデス浮上実験と NMR 実験を同時に行うために開発したプローブ。アルミニウムブロックを削りだして作った耐圧容器に、アクリル製の透明な窓を取り付けてある。窓の取り付け部には O リングが挟んであり、気密性を維持できる。容器内に配置したサドル型 NMR コイルの電線も、気密を維持したまま容器外に引き出してインピーダンス整合できるようにした。

を維持できることを確認した。NMR 実験を行うために、容器内にはサドル型コイルを配置した。コイル電線も、気密を維持したまま容器外に引き出してあり、可変コンデンサで 400~500MHz の周波数範囲でインピーダンス整合できるようにした。また整合時の高周波回路の Q 値は 60 であった。

(3) 開発した実験システムのコンソール部分を図9に示す。浮上物体にプロトンの NMR に相当する周波数のラジオ波パルスを照射するために、最近研究代表者が設計した FPGA 集約型 NMR 分光計を製作した。NMR コンソールソフトウェアがインストールされたコンピュータの隣には、CCD カメラでとらえた画像を表示するためのコンピュータを置き、静止画や動画がキャプチャ可能になっている。

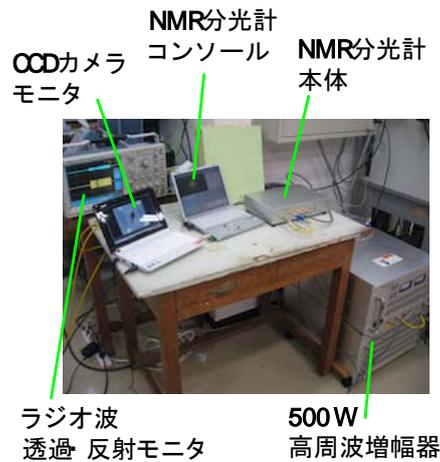


図9. 実験システムコンソール部。

(4) 浮上試料が感じるラジオ波磁場の振幅を見積もるために、磁場強度の送信信号パワー依存性を測定する予備実験を行った。図7のプローブ内部に、水を入れた試験管を配置し、プローブを均一な 9.4 テスラ磁場中に入れ、プロトン NMR の nutation 実験を行い、図10に示すデータを得た。

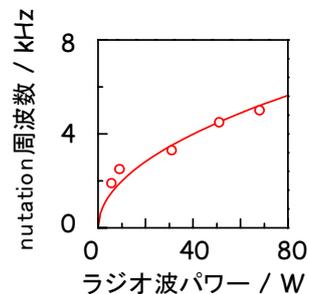


図10. 製作したプローブにおける、プロトンスピンの nutation 周波数のラジオ波パワー依存性。

(5) 製作した装置を用いて、磁気アルキメデス浮上実験を行うことが可能となった。図 11 (左) に、浮上したデラウエアぶどうの実を示す。また、圧力容器内にスポイトを導入して、水滴を滴下・浮上させることにも成功した (図 11 (右))。

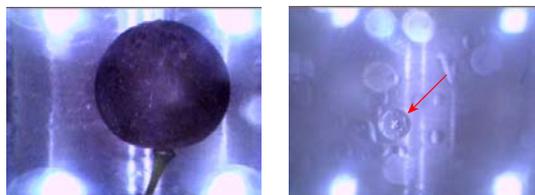


図 11. (左) 磁気アルキメデス浮上したデラウエアぶどうの実。四隅の明点は照明用 LED の光がアルミニウム壁面で反射したことによる。  
(右) 磁気アルキメデス浮上した水滴 (矢印)。他に見られる円形は、アクリル窓の内壁に付着した水による。

(6) ①次に、磁気アルキメデス浮上とプロトン NMR を同時に行い、浮上物体中のプロトンスピンを反転させる実験を行った。試料にはクロガネモチの実を用いた。図 12 に実の運動の様子をストロボスコープに並べた写真を示す。ここでは、0.14 秒ごとに撮った映像が 400 枚並べてある。浮上時の酸素圧力は 0.8MPa で、力学的共振の周期は 1 秒であると見積もられた。

②浮上位置におけるプロトンスピンのラーモア周波数は 435 MHz で、2.6 MHz/mm の勾配があると見積もられた。周波数 433-437MHz にわたって断熱掃引を行い、プロトンスピンを反転させた。反転操作は 1 秒毎に 20 回行った。

③プロトン磁化の反転操作によって浮上した実が釣り合い位置まわりに振動する様子が確認された。これが核磁化の反転によるものであるかどうかを確かめるために、ラジオ波の照射周波数を、プロトンスピンの共鳴周波数からずらしてラジオ波の照射を行ったところ、同様に浮上物体が振動を始めた。よって、磁気浮上物体における核磁化の寄与を実証するには、さらなる検証を要すると考えている。たとえば、ラジオ波を照射することによる容器内の酸素ガスの温度の変化と、浮力への影響の可能性が考えられる。

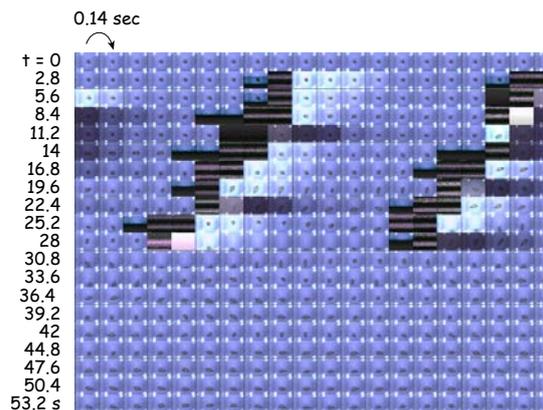


図 12. 磁気アルキメデス浮上したクロガネモチの実に対してプロトン NMR を行った時の様子のストロボスコープ写真。CCD カメラの映像が乱れているのは、照射ラジオ波がカメラデバイスに干渉したことによる。

(7) 今回行った実験の条件下では、核の磁化率は酸素ガスや水の磁化率に比べて 4 桁のオーダーで小さい。一方最近、動的核偏極の研究開発の発展が著しく、核スピンの偏極率を飛躍的に高めることが以前より容易になりつつある。たとえば偏極率を 4 桁増大できれば核スピンの非平衡磁化率は酸素や水と同程度になり、磁気浮上物体における核磁化の影響がより顕著に表れると考えられる。

(8) 上記の提案、装置開発、および実験の考察は学会や論文で外部に発表した。磁気浮上は、容器なしで流体を保持できるユニークな特徴をもつ。本研究課題で磁気アルキメデス浮上と NMR の同時実験を可能にしたことで、今後当該分野に新たな展開をもたらすきっかけを作ったと考えている。当初計画に入れていたものの現時点では実現に至らなかった、浮上液滴中の流体ダイナミクスを MRI により観測することができれば、無容器液相での化学反応・合成に関する重要な知見が得られるはずである。課題期間終了後もこの研究を推進していくことを考えている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Kazuyuki Takeda, Highly customized NMR systems using an open-resource, home-built spectrometer, Annual Reports on NMR spectroscopy, 査読有, Vol. 74 (2011) 掲載決定

[学会発表] (計 3 件)

- ① 武田和行、磁気アルキメデス浮上物体における核磁化の力学的寄与、第 47 回 NMR 討論会、2008.11.12-14、筑波大学 (茨城県つくば市)
- ② Kazuyuki Takeda, Can nuclear spins shake a macroscopic body to which they belong? , 50<sup>th</sup> Experimental Nuclear Magnetic Resonance Conference, 2009.3.29-4.3, Asilomar Conference Grounds, Pacific Grove, CA, (USA).
- ③ Kazuyuki Takeda, On the force acting on nuclei in a magnetically levitating body, ISMAR Conference 2010, 2010.7.4-9, Florence (Italy).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

武田 和行 (TAKEDA KAZUYUKI)  
京都大学大学院理学研究科・講師  
研究者番号：20379308

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし