

シングルボードコンピュータを用いた地磁気キャンセル装置の開発

福田 京也*

井上 天翔†

黒星 ころこ†

郷司 悠斗†

Development of geomagnetic cancellation system using a single board computer

Kyoya FUKUDA*

Tenshou INOUE†

Kokoro KUROBOSHI†

Yuto GOJI†

Currently, superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometers are used in weak magnetic measurements such as biomagnetism. Typically, magnetic shields made of high permeability materials are used for such weak magnetic measurements. We have developed a system that cancels external environmental magnetic fields such as geomagnetism using three Helmholtz coils and a triaxial magnetic sensor. The current through the three coils was controlled by a single-board computer. The magnetic flux density in each axis, which was approximately $30 \mu\text{T}$, could be suppressed to less than $\pm 0.5 \mu\text{T}$. We also observed the effect on the resonance spectrum of cesium atoms when the current in one Helmholtz coil was varied. The applied magnetic field was estimated from the change in the resonance frequency of the atoms, and the measurement accuracy was less than $0.1 \mu\text{T}$.

1. はじめに

現在、生体からの極微弱な磁気計測には超伝導量子干渉素子 (SQUID) 磁束計が用いられている [1]。SQUID 磁束計を用いると、脳や心臓からの微弱な磁気を検出可能であり、その測定感度は非常に高い。心臓疾患の早期発見には心電図計測よりも心臓磁場計測が有効であるが、SQUID 磁束計のような心臓疾患を非侵襲で精密に検査可能な装置を導入している施設は、現状では大病院に限られているため、誰もが心臓のチェックを簡便に行える高感度な生体計測機器の実現が望まれている [2]。SQUID 磁束計の普及のネックになっている点として、高感度計測のためのノイズ対策や地磁気対策等により、装置自体が非常に高価であること、超伝導素子を液体ヘリウムで冷却し続ける必要があり、コストやメンテナンスの負担が大きく、冷却容器や冷却部の断熱及び真空系を要するため、装置が大型になること、等が挙げられる。

この世の中で最も精度良く測れる物理量は周波数である。原子は固有の共鳴周波数を持ち、この周波数はゼーマン効果により原子に加わる磁場によって変化する。従って、原子の共鳴周波数を精密に測定すれば、原子に印加された磁場を精度よく測定することが可能となる [3][4]。我々の研究グループでは、これまでにレーザー光による光ポンピング技術を用い

た Coherent Population Trapping (CPT) 共鳴による高感度磁場センサを開発し、心臓などから発する数 100pT 程度の微弱な生体磁場を高感度に計測するための要素技術の開発を行っている [5]。光ポンピング磁気センサは、SQUID 磁束計の性能を超える可能性が示されており、装置の低コスト化、コンパクト化が期待されている。原子を用いた微弱磁気計測においても、地磁気など $30\sim 50 \mu\text{T}$ 程度の外部環境磁場の影響が非常に大きいため、高透磁率材料で遮蔽した空間を作る磁気シールドを作成し、その中で測定を行うのが一般的である。しかしながら、磁気遮蔽率を高くするために開口部を小さくする必要があり、シールド内に設置したセンサ用原子セルに対するレーザ光源の光軸調整が難しいこと、また被測定対象サンプルの様子を確認できない等の問題点があった [6]。

そこで我々は、シングルボードコンピュータ及び3つのヘルムホルツコイルと三軸磁気センサを用いて地磁気などの外部環境磁場をキャンセルする装置を開発した。近年、安価で汎用性のあるシングルボードコンピュータの利活用が注目を集めており、本校は新居浜市 IoT 推進ラボに参画、新居浜市と連携し、市内の高校生、高専生に対する IT 教育の場を提供するとともに、企業の技術者向けにシングルボードコンピュータ (Raspberry Pi) を用いた IT や AI に関する基礎知識に関する勉強会やワークショップを実施 [7]、地域の DX・

令和4年10月1日受付 (Received Oct. 1, 2022)

* 新居浜工業高等専門学校電子制御工学科 (Department of Electronics and Control Engineering, National Institute of Technology (KOSEN), Niihama College, Niihama, 792-8580, Japan)

† 新居浜工業高等専門学校専攻科電子工学専攻 (Electronic Engineering Program, Advanced Engineering Course, National Institute of Technology (KOSEN), Niihama College, Niihama, 792-8580, Japan)

IT人材育成に貢献している。これまでに我々の研究グループでも、光学実験への応用を念頭に、汎用樹脂ブロック (LEGO mindstorm & NXT) やレゴよりも安価でハード面・ソフト面ともに ICT 活用技術が要求されるシングルボードコンピュータの一種である Raspberry Pi を用いたプログラミングと教育教材の開発を行ってきた [8][9]。これまでに蓄積したノウハウを活用し、磁気シールドを使用するのではなく、3つのヘルムホルツコイルに流す電流を Raspberry Pi によって制御することで外部環境磁場をキャンセルし、この装置が原子を用いた高感度磁場計測に利用可能であることを確認するとともに、その計測精度を評価する。

2. 実験装置

地磁気キャンセル装置は、主にシングルボードコンピュータ周辺回路、3つのヘルムホルツコイル、三軸磁気センサから構成されている。装置の概略を図1に示す。

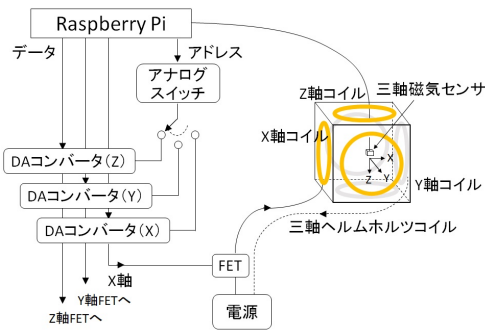


図1 地磁気キャンセル装置の概略

2-1 シングルボードコンピュータ周辺回路

シングルボードコンピュータとして Raspberry Pi 3B を用いた。コイル電流をコントロールするため、DA コンバータ (12ビット電圧出力型 MCP4726) を使い、Raspberry Pi と I²C で接続し、デジタルデータをアナログ電圧に変換する。その出力電圧を FET (2SK213) のゲートに印加し、コイル電流 (FET のドレイン電流) を制御する。周辺回路を図2に示す。

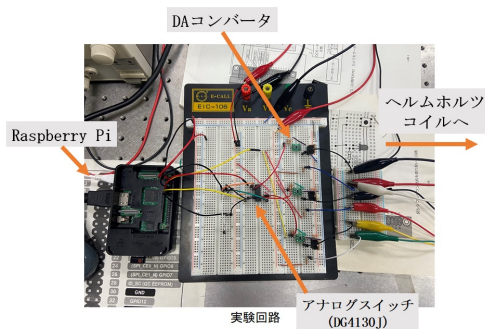


図2 Raspberry Pi と DA コンバータ

3つのヘルムホルツコイルの電流をそれぞれ制御するため、DA コンバータも3つ使用した。今回用いた DA コンバータ

の I²C アドレスは固定されていたため、一つの Raspberry Pi で制御する際にアドレスの競合を生じた。この問題は、Raspberry Pi からの SDL 信号をアナログスイッチによって切り替えることで解決した。

2-2 ヘルムホルツコイル

中心軸が互いに直交した3つのヘルムホルツコイル [10] を図3に示す。3D プリンタによって立方体 (一辺 10cm、中心部空洞) のコイルポピンを作成した。1つのコイル巻き数は30、2つのコイルを 10cm 隔てて配置し、1つ (一軸) のヘルムホルツコイルとした。コイル中心部には原子封入ガラスセル等の被測定サンプルを設置できるようになっている。

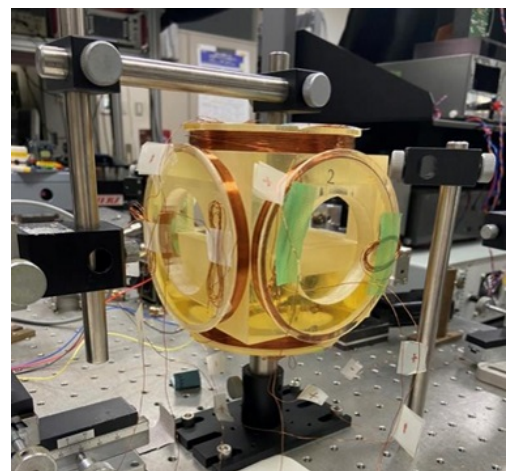


図3 3つのヘルムホルツコイル

2-3 三軸磁気センサ

3つのヘルムホルツコイル内に設置した三軸磁気センサ (デジタルコンパスモジュール HMC5883L) を図4に示す。センサは 1cm×1cm の小型基板に実装されており、Raspberry Pi と I²C インターフェースで接続し、三軸 (X 軸 Y 軸 Z 軸) の磁束密度を取得する。デジタル分解能 (mG/LSb) は 7.3 μ T (0.73mG) である。このセンサ値が 0 になるように DA コンバータの出力電圧を変化させる。

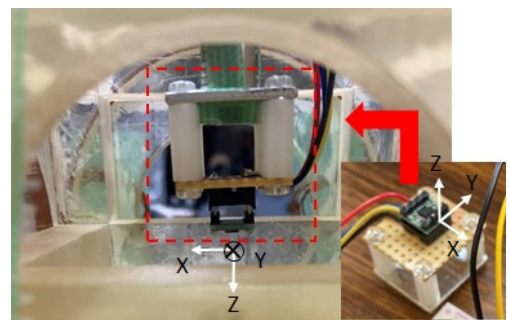


図4 三軸磁気センサ (ヘルムホルツコイル上部からセンサを挿入したとき、Y 軸正方向を見た図)

3. 実験結果

3-1 磁場計測の予備実験

最初に、三軸磁気センサの動作確認を行った。ヘルムホルツコイルに電流を流していないときの磁束密度の測定値を図5に示す。測定間隔は1秒とし、約30分間の測定データである。磁気センサはガウス(G)単位の数値を表示するため、縦軸の値はG単位となっている。各軸の磁束密度の値は50~300mG (5~30 μT)程度であることがわかる。このことから測定された磁束密度は主に地磁気であると判断できる。また、数mG程度の磁束密度の長期変動(周期1000秒程度)と短期変動(数十秒程度)が現れていることも確認できた。

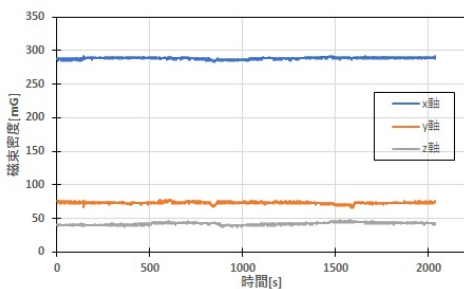


図5 三軸磁気センサの磁場測定値

次に、大きな電流が流れ、モーターの駆動とともに鉄製の籠の移動を生じるエレベータの昇降時の研究室における磁場変化を測定した。我々の研究室は電子工学科棟5階に位置し、エレベータ乗降口から西へ約6mの距離にある。エレベータの籠が1階にあるときと5階にある場合の磁気センサによる測定値を図6に示す。

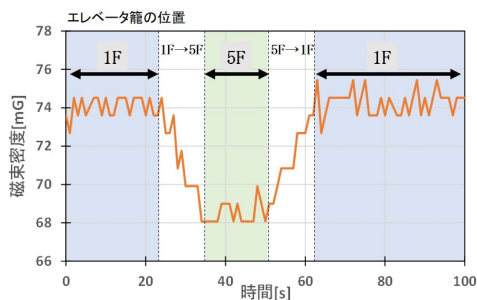


図6 エレベータの籠が1階から5階、再び1階へ移動したときのY軸方向磁場変化

図6は三軸磁気センサの測定値の一つ(Y軸、西→東方向を正)の時間変化である。エレベータの籠が1階にあるときと5階にある場合で約6mG (0.6μT)の磁場変化が観測され、有意な差を確認できた。このことから、図5においてY軸方向の数mGの磁束密度変化はエレベータの昇降によるものと推測した。

3-2 外部磁場のキャンセル実験

3つのヘルムホルツコイル内に設置した三軸磁気センサの測定値が0になるように、それぞれのヘルムホルツコイルに流す電流をFET及びRaspberryPiで制御した結果を図7に示す。測定のサンプリング時間は1.6秒とし、時刻0秒から制御を開始した。コイルに流す電流の制御量を制限しているため、測定値が0になるまでに数十秒かかっているが、三軸とも磁束密度が0近傍になっていることが確認できた。また、0近傍を拡大すると、±5mGの範囲に磁束密度の値が収まっていることもわかった。測定のサンプリング時間はRaspberryPiのプログラムによって変えることができ、0.35秒に設定した場合、約20秒で磁束密度を0近傍に制御できることを確認した。

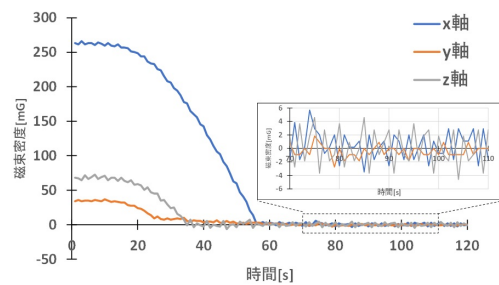


図7 地磁気キャンセル時の三軸磁気センサ測定値 (insetは測定値の0近傍を拡大)

次に、故意に外部磁場を変化させたときの三軸磁気センサ測定値の時間変化を図8に示す。時刻0秒から地磁気キャンセルを開始し、その後60秒あたりでZ軸(上下方向)から約8cm離れた位置に直径20mm、厚さ3mmの円盤型永久磁石を置いた。磁気センサ測定値に最大で約80mGの磁束密度変化が生じたが、磁石を置いた後20秒程で磁束密度を0近傍に制御することができた。

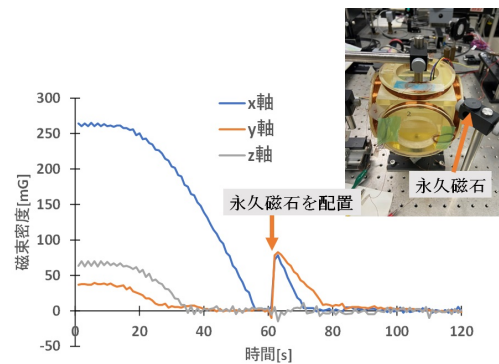


図8 外部磁場を変化させたときの三軸磁気センサ測定値

3-3 原子共鳴スペクトル観測

次に、本研究で作成した地磁気キャンセル装置を用いて、原子の共鳴スペクトルを観測した。ヘルムホルツコイルによる地磁気キャンセルの有無で原子の共鳴スペクトル観測という実用に耐えるかどうかを確認した。

3-3.1 セシウム原子の飽和吸収スペクトル観測

セシウム (Cs) 原子は SI の基本単位の一つである「秒」の定義に使われる元素であり、最外殻に電子 1 つの Hydrogen like な原子である。空気中の水分と激しく反応するアルカリ金属であるため、Cs 原子はガラスセル (直径 34mm、厚さ 5mm の円筒型 pyrex ガラス容器) に真空封入し、実験に用いる。3 つのヘルムホルツコイル内にこの Cs 原子ガラスセルを設置し、原子の共鳴波長に同調したレーザー光を照射し、その透過光強度を測定する。実験概略を図 9 に示す。

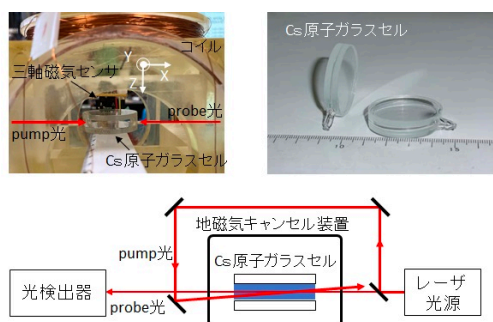


図 9 Cs 原子の飽和吸収分光 (pump-probe 分光) スペクトル観測実験概略

レーザー光源には DFB 型可変波長半導体レーザー (Toptica DL100) を用い、半導体の注入電流を変えてレーザー発振波長 (発振周波数と等価) を変化させる。光源からの光を probe 光 (14uW) と pump 光 (3.4mW) の二つに分ける。Cs 原子ガラスセルを透過した probe 光を光検出器 (Newfocus model2001) によって電圧に変換する。光強度の強い pump 光は probe 光の反対方向からガラスセルに照射し、原子に飽和吸収を生じさせる [11]。レーザー光周波数を変えたときのガラスセル透過光 (probe 光) 強度変化と Cs 原子のエネルギー準位図を図 10 に示す。

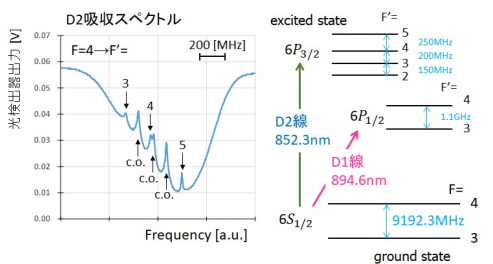


図 10 Cs 原子の飽和吸収スペクトル (地磁気キャンセル無) と Cs 原子エネルギー準位図

Cs 原子は近赤外領域に 2 つの吸収波長を持ち、それぞれ D1 吸収線 (894.6nm) 及び D2 吸収線 (852.1nm) と呼ばれている。図 10 は D2 吸収線の透過光スペクトルである。原子の吸収線には原子核スピンと電子軌道・スピン角運動量との相互作用により超微細構造があり、D2 吸収線スペクトルには 2 つの大きな吸収 (852.338nm 及び 852.358nm 近傍) のピークが現れる。図は 852.358nm 近傍の吸収スペクトルであり、飽和吸収による光強度増加ピークが 6 箇所、すなわち励起状態

の 3 つのエネルギー準位 $F'=3,4,5$ に対応するピークが 3 つ、ドップラー効果により 3 つの準位の間周波数で生じる交差共鳴 (c.o.:cross-over resonance) が 3 つ、それぞれ確認することができた。

図 10 において、励起準位の $F'=4$ 及び 5 の飽和吸収信号に着目し、地磁気キャンセルの有無を比較した結果を図 11 に示す。地磁気キャンセル有、無、X 軸方向 (pump 光進行方向) に 100mG 一定の磁場強度が印加するように制御 (Y 及び Z 軸は地磁気キャンセル) した飽和吸収スペクトルである。磁場による変化は、 $F'=5$ のピークではほとんど生じていないように見える。 $F'=4$ のピークでは信号強度変化として若干現れているように見える。

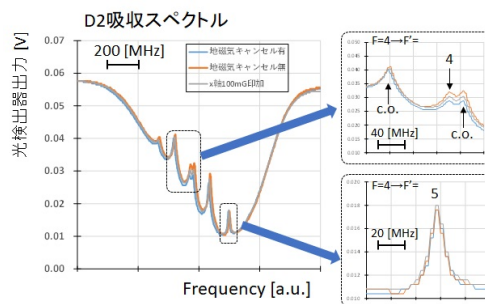


図 11 Cs 原子の飽和吸収スペクトル (地磁気キャンセル有無及び X 軸 100mG 磁場印可)

原子に磁場を印可した場合の原子スペクトル変化はゼーマン効果として現れる [12]。一つのピークに見える飽和吸収信号は、全角運動量子数 F の値によって $2F+1$ 個のスペクトル信号に分裂する。この分裂の周波数間隔は、Cs 原子に 1G の磁場印可の場合で約 350kHz である。図 11 において、 $F=4-F'=5$ のスペクトル幅は約 10MHz であり、300mG 程度の地磁気によるゼーマン分裂は 0.1MHz 程度である。そのため顕著なスペクトル形状変化が生じていないと考えられる。

3-3.2 セシウム原子の CPT 共鳴信号の観測

飽和吸収信号よりも共鳴線幅の狭い CPT 共鳴信号を用いて、本研究で作成した地磁気キャンセル装置の性能を評価した。図 12 に CPT 共鳴観測のための実験配置と Cs 原子のエネルギー準位図を示す。

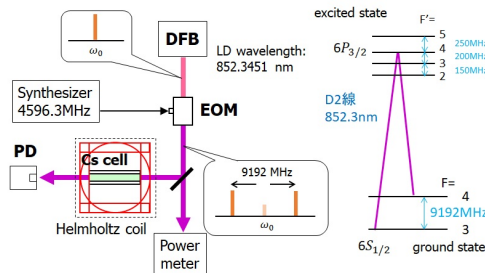


図 12 Cs 原子の CPT 共鳴信号観測実験配置とエネルギー準位図

エネルギー準位図で示す三準位 (基底状態 $F=3, 4$ 、及び励起状態 $F'=4$) において、位相変調器 (EOM: Electro-Optical

Modulator, Newfocus 4431) によって発生させた二つのレーザー成分によって三準位の波動関数の混合 (Δ 形共鳴) を生じさせる。すると二つの基底状態は光と結合する状態 (Coupled state) と結合しない状態 (Non-Coupled state) で表すことができる [13]。光と結合しない状態は暗状態 (dark state) と呼ばれ、二つのレーザー成分によるコヒーレント相互作用により、原子分布が暗状態にトラップされることになる。これが CPT 共鳴現象である。暗状態にトラップされた原子はレーザー光を吸収しないため、CPT 共鳴が生じると Cs 原子ガラスセルを透過する光強度は増加する。CPT 共鳴信号は、レーザー光源 (DFB 型光源) の発振波長を二つの基底状態の中間位置から励起状態 $F'=4$ に調整し、EOM に加えるマイクロ波シンセサイザ (Agilent E8257D) の周波数が 4596.3MHz (二つのレーザー成分の差の周波数が基底状態間の周波数差の 9192.6MHz) になったときのみ、レーザー光の透過光強度増加という形で生じる。図 13 に実際に観測した CPT 共鳴スペクトルを示す。

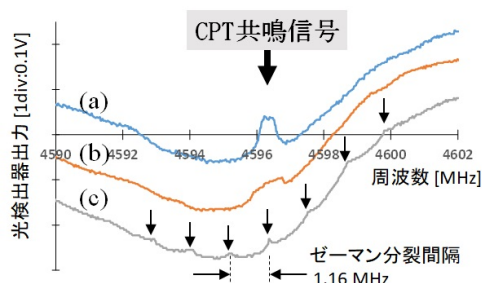


図 13 Cs 原子の CPT 共鳴信号、(a) 地磁気キャンセル有、(b) 地磁気キャンセル無、(c) X 軸コイルに 400mA の直流電流 (矢印の位置にゼーマン分裂によるピーク)

横軸は EOM に加えたマイクロ波周波数であり、縦軸は光検出器 (PD:photodetector) 出力である。CPT 信号には信号に寄与しないレーザー光による大きな直流成分を含むため、図 13 では直流分をカットしてスペクトル形状を見やすくしている。地磁気キャンセル有の場合 (図 (a))、透過光強度が大きくなったスペクトルが現れ、そのピーク周波数は 4596.3MHz であり、これは二つの基底状態 ($F=3$ と 4) の周波数間隔 9192.6MHz のちょうど半分になっていることがわかる。地磁気キャンセル無の場合 (図 (b)) はスペクトル幅が広がっている。これは地磁気によるゼーマン効果によりスペクトルの分裂が生じているためと考えられる。CPT 共鳴スペクトル幅は原子のコヒーレンス時間 (原子が暗状態に滞在する時間) とレーザー光強度に依存する。今回の実験で観測されたスペクトルの線幅は 1MHz 程度であり、実験条件から推測される値と辻褃の合う結果である。

また、X 軸方向のヘルムホルツコイルに 400mA の電流を流し、一定の磁場強度を印加したときの CPT 共鳴スペクトルを図 (c) に示す。ゼーマン効果による基底状態と励起状態の磁気副準位間における 7 つの CPT 共鳴 (Δ 型共鳴、図 (c) 中の 7 つのピーク) を観測することができた。スペクトル信号の分裂間隔周波数 1.16MHz から印加磁場を計算し、3310mG の磁束密度が印加されていると推測した。

4. まとめ

3 つのヘルムホルツコイルに流す電流をシングルボードコンピュータによって制御することで地磁気等の外部環境磁場をキャンセルする装置を作成し、高感度磁場計測に用いられる Cs 原子の CPT 共鳴スペクトルの観測に成功した。原子のゼーマン効果による共鳴スペクトルの分裂間隔から、印加された磁束密度を 1mG (0.1 μ T) の精度で求めることができた。これは従来の磁気シールドを用いた場合と同程度の結果であり、本研究で作成した地磁気キャンセル装置の有効性を示すものである。また、従来の磁気シールドを用いる実験に比べ、被測定サンプルの視認性を格段に向上させることができた。今後の課題として、磁気センサを小型化して被測定サンプルを設置する場所の自由度を高めることやコイル電流制御の高速化、制御対象領域の磁場均一性向上などが挙げられる。

参考文献

- [1] Sternickel, K.; Braginski, A. I. "Biomagnetism using SQUIDs: Status and perspectives". *Superconductor Science and Technology* 19 (3): S160 (2006).
- [2] 東北大学ニュース "心臓の微弱な生体磁気情報を日常生活環境下において簡便に検出する技術を開発 ～生体磁場情報の広範な利用に道筋～," (2020).
- [3] A. Nagel, L. Graf, A. Naumov, E. Mariotti, V. Biancalana, D. Meschede, R. Wynands "Experimental realization of coherent dark-state magnetometers". *Europhysics Letters*, 44 (1) 31 (1998).
- [4] S. Groeger, G. Bison, J.-L. Schenker, R. Wynands, A. Weis "A high-sensitivity laser-pumped Mx magnetometer". *The European Physical Journal D*, 38, 239 (2006).
- [5] 福田京也 "薄いガラスセルを用いた超高感度磁気センサの開発," 基盤研究 (C)16K06401 科学研究助成事業研究成果報告書 (2019).
- [6] 在間亘佑 "新居浜高専電子制御工学科平成 29 年度卒業論文," (2018).
- [7] 新居浜市 I o T 推進ラボ実施事業ワークショップ (2021).
- [8] 曾我部一貴 他 "LEGO リサジュー曲線描画装置の開発," 秋季第 78 回応用物理学会講演会 6a-PA1-21 (2017).
- [9] 松木亮磨 他 "シングルボードコンピュータを用いた半導体レーザー光源の制御," 秋季第 79 回応用物理学会講演会 19a-PA1-11 (2018).
- [10] 後藤祐真 "新居浜高専専攻科電子工学専攻システムデザイン工学演習報告書," (2018).
- [11] D. A. Smith, I. G. Hughes "The role of hyperfine pumping in multilevel systems exhibiting saturated absorption". *American Journal of Physics*, 72, 631 (2004).
- [12] J. Vanier, C. Audoin "The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards". Adam Hilger, Philadelphia, 34-37(1989).
- [13] 福田京也 "CPT を用いた超小型周波数標準". *レーザー研究* 35 巻 4 号, 222-227(2007).