

強定常磁場内の生体に対する磁気作用の基礎的研究

湯ノ口 万友

(鹿児島大学工学部生体工学科)

1 はじめに

近年、MRIなどの普及により、人体が磁場に曝露される機会が増加している。それに伴い、磁場が生体に及ぼす影響についての関心が非常に高まってきている。超伝導技術の発達により、数Tオーダーの強磁場が比較的簡単に手にはいるようになってきたため、強磁場の生体への磁気作用についての研究が広く行われ、次第にそのメカニズムについても明らかになりつつある。しかし、その影響については、明確な結論が出ていないのが現状である。その理由として、磁場以外の環境因子が影響を及ぼしている可能性がある。さらに研究者によって、実験条件としての磁場強度、磁場曝露時間、磁場の周波数、波形などが異なることなどがあげられる。また、対象となる実験材料についても様々であり、単純に結果を比較評価できないこともあげられる。

我々の研究室では、東芝製の超伝導マグネット（中心での磁場5T、ボア直径30cm、ボアの長さ60cm、図1）を用いて、磁場曝露下での生体影響を調べる研究に着手した。手始めに、貝割れ大根の発芽に対する影響を調査し、磁場中で発芽率に変化があるという結果を得た^[1]。その際、超伝導マグネットボア内での温度がボア外と異なることがわかり、結果が磁場によるものであるかどうか疑わしくなってきた。そこで、本研究では超伝導マグネットボア内の温度変化とその発生原因を検討することを目的とした。

これまでに行ってきた実験は以下の通りである。温度分布の計測は主としてT

熱電対を用いた。

1. 強磁場中での貝割れ大根の発芽実験
 2. ロウソクの燃焼実験
 3. 超伝導磁石ボア内の温度分布測定
- 実験において得られた種々の現象について報告する。

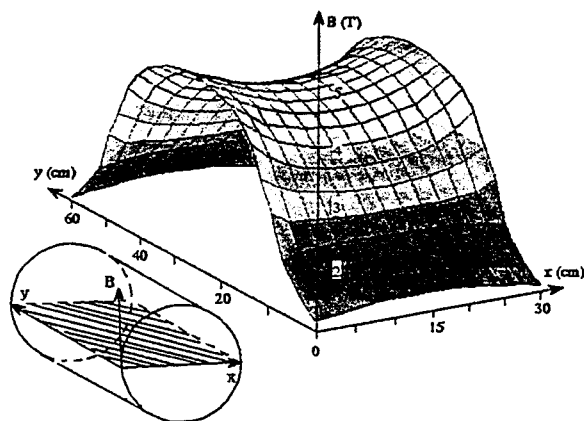
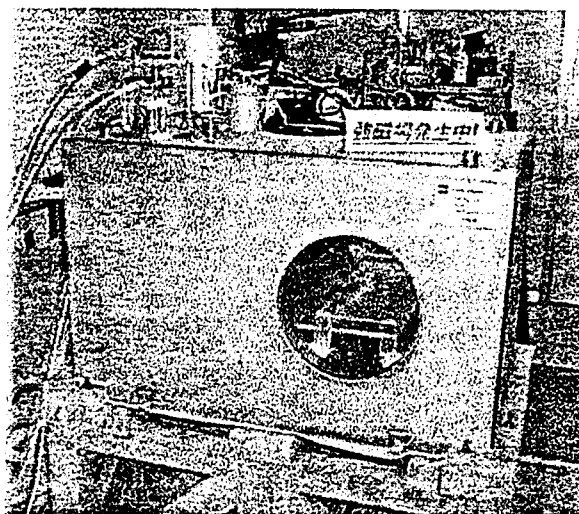


図1 超伝導マグネットと中心部の磁場分布

2 植物の発芽に対する磁場影響

まず、強磁場が生体に与える影響を研究する基礎段階として、今回の実験では、貝割れ大根の発芽に着目し、統計的手法を用いて磁場曝露群と非曝露群において有意差があるかどうかを調査した。

2.1 実験方法

実験に用いた強磁場発生装置は、超伝導マグネットTM-5H30を用いた。

3種類のシャーレを用意し、その上に脱脂綿を敷く。それぞれに貝割れ大根の種子を30個ずつつまみ、シャーレの1つを磁場暴露しないコントロールとして(以下control)、他の1つを磁場の中心に置き(以下center)、最後の1つを磁場勾配が大きい位置、つまり、磁石中心と開口端との中間に置いた(以下gradient)。図2に実験概要図を示す。貝割れ大根への磁場曝露時間は2時間とし、中心での磁場強度が最大5Tとなったときにボア内に置いた。温度変化の影響を避けるために室内のエアコンで室温をおよそ18℃に保ち、シャーレ内の水温もおよそ18℃となったときに種をまいた。光の影響も取り除くために、マグネットの穴の両端には覆いをし、コントロールは箱の中で光を遮断するようにした。磁場曝露開始から24時間後、発芽した種子の個数を計測した。統計解析は、統計解析ソフトStatView J-4.5を用いて、有意水準5%でt検定を行った。

2.2 実験結果

表2に検定の結果を示す。これを見ると、centerとgradientのP値が0.047(<0.05)であり、有意な差があった。他の比較に対しては、P値がそれぞれ0.19、0.2(>0.05)で有意差がなかった。

2.3 考察およびまとめ

実験は、貝割れ大根の発芽の数に着目して行った。その結果、centerとgradientの位置に置いた種子の発芽の数に変化があるという結果であった。しかしながら、controlと比較すると有意差が見られなかった。今回の実験においては、温度管理がエアコンのみであったため、ボア内の温度変化までは管理することができて

いなかった。その後の実験で超伝導マグネットボア内では、温度低下することが確認され、ボア内の位置によっても温度差が生じることも明らかとなった。このことより、centerとgradientの発芽数の有意差は温度が異なることによる原因も考えられる。他の研究者によっても種子の発芽に対する磁場影響についての報告がなされている^[2]。本実験のように強磁場中(5T)であるが、centerとgradientの発芽の差を比較したものは少ないように思われる。実験の結果は、温度管理が不十分であったため、磁場の影響かどうかは疑わしいものとなった。温度管理を徹底して実験することにより、種子の発芽に対する磁場影響(磁場の強さ、磁場の勾配、あるいはその積)を明らかにできるものと思われる。また、強磁場内の温度分布の変化を明確にすることで、強磁場による生体影響の研究にも役立てることができると考える。

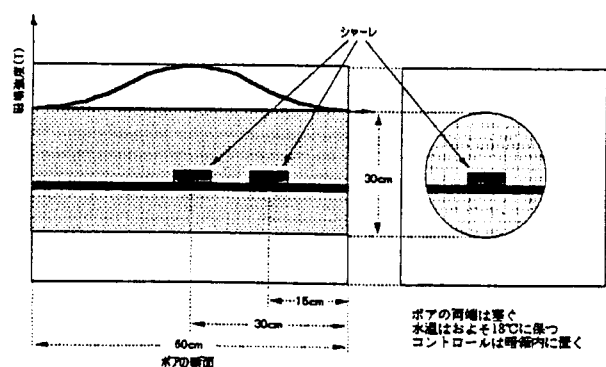


図2 種子の発芽実験システム

表2 t検定による発芽率

	n	t value	p value
center, gradient	18	2.205	0.0407*
center, control	18	1.362	0.19
gradient, control	18	-1.329	0.2004

level of significance $\alpha=0.05$

*: significantly different

3 強磁場内でのロウソクの燃焼実験

強磁場内でのロウソクの炎の測定について、図3に測定位置とその座標系を示す。各測定点は5cm間隔に設定している。有効な測定装置がないために、今回は定規を用いてx, y, z方向のそれぞれの長さを測定した。測定精度は0.5cmである。また、ロウソクは測定中常に短くなっていくので、一回の測定が終了する毎に新しいロウソクに変え、測定点を逆順で測定した。今回の結果は、計4回の測定値を平均してアローマップに示した。

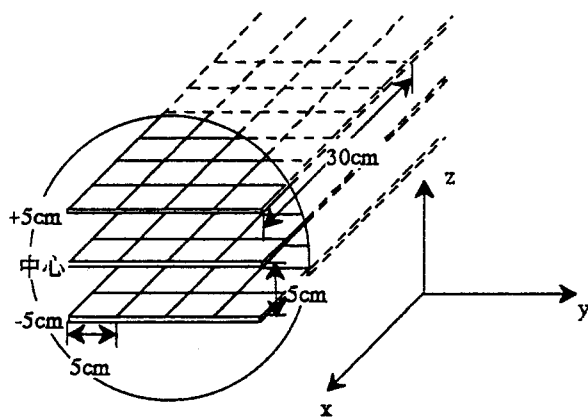


図3 測定点および座標軸設定

3.1 強磁場内での炎の燃焼結果

図4、5に中心、+5cmの平面内での、それぞれの炎の向きをアローマップに描いたものを示す。ボア内の磁場分布が左右対称であると考えられるために、中心から半分だけを測定した。図5から、炎は中心部を除いては外を向いて燃焼している。また、その傾きは中心から外に向かっていくにつれて次第に大きくなっていき、ボアの

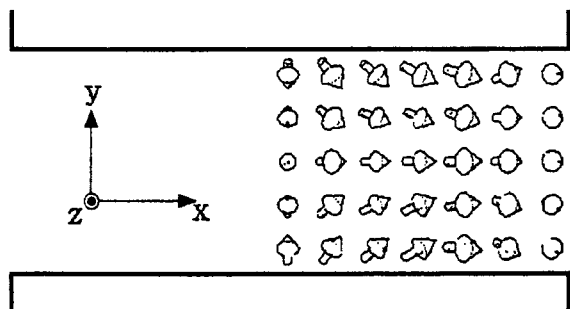


図4 炎の向きのアローマップ (中心)

端に近づくにつれて小さくなっている。炎の長さについても磁場勾配が最も大きいところで最大となり、その変化の割合は炎の傾きと同じ傾向であった。

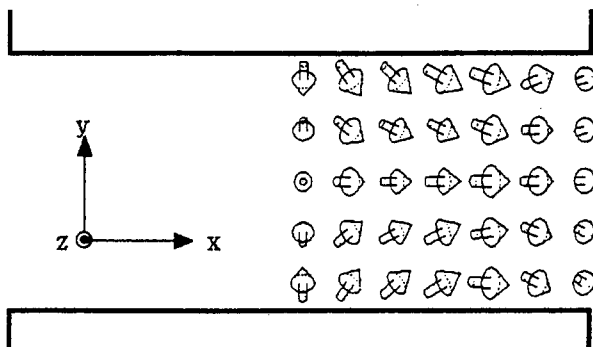


図5 炎の向きのアローマップ (+5cm)

3.2 炎の燃焼に対する考察

これまでも磁場による気体の流れについての研究は報告されている^{[3]-[5]}。今回、気流の変化による温度変化の可能性をみるためにロウソクを用いた炎の燃焼実験を行った。しかし、測定結果から、気流の変化はそれほど大きくないことが判った。その理由として、炎の向きに変化は見られたが、常にボアの外に向かって燃焼し、中心付近ではボアの円の中心に向かって傾いていること、しかも、炎の向きは左右対称の変化を示したことがあげられる。これらのことより、ロウソクの炎は磁場により力を受けて変化していると言える。

図6は、中心平面上での等磁束密度線に炎の向きを重ねて表示したものである。この図から、等磁束密度線に垂直に炎が向いていることがわかる。つまり、磁場勾配に対して垂直に向いていることを示し

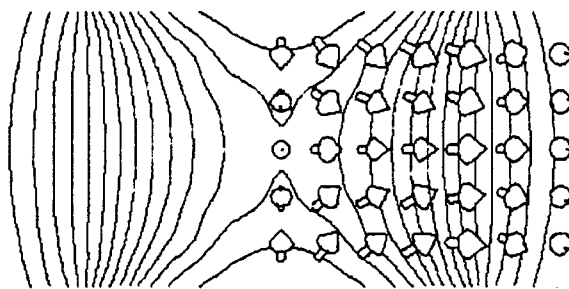


図6 等磁束密度線と炎の向き

ている。さらに、磁場の高いほうから低いほうに向かって炎は傾いている。従って、ロウソクの炎は、磁場の高いほうから低いほうに磁場の勾配に垂直方向に傾いていると思われる。図3に示した+5cm および-5cmの平面での測定結果は、ほぼ同様の変化を示した。

炎の長さの変化について、ロウソクの炎はある程度は一定しているが、ばらつきが見られた。今回の測定については4回の測定値の平均であるが、単純に長さを評価することは難しい。しかし、磁場の傾きが大きいところでは炎が長くなっている。従って磁場勾配の大きさによって炎の長さが変化することを確認した。

4 超伝導磁石ポア内の温度分布

生体を用いた実験において、温度管理は重要である。これまでに超伝導マグネット内における物理化学現象の変化や生体影響に関する多数の報告がある^[6-17]。以前より超伝導マグネットポア内では温度が変化することは知られているが、温度変化を詳細に報告したものや、その原因についての報告は少ないようである。

実際、超伝導マグネットを用いて実験を行うときには、温水を循環させ温度を一定にするなどの工夫がなされている。しかしながら、超伝導マグネット内での温度変化のメカニズムについては、あまり検討されていない。また、強磁場中でのマクロ的な物理化学現象を調べることは、強磁場の生体影響を明らかにするのに役立つものと考えられる。

実験には超伝導マグネット TM-5H30を用いた。温度変化は、種々の状況下で1)サーモビューア、2)T熱電対を用いて測定した。両実験中とも、実験室内の温度は、エアコンを用い一定となるように調節した。

4.1 サーモビューアによるポア内外の温度測定

実験に用いたサーモビューアは、富士通社製インフラアイ1200Aである。またこの装置は、液体窒素を用いる必要がない。温度分解能は0.1度~1.1度である。図7のようにマグネットポア内に生理食塩水の入ったピーカーを置き、図に示す測定点の表面温度を測定した。磁場強度は5Tで室温はエアコンで約25度に設定し、エアコンの風が直接ピーカーに当たらないように工夫した。測定は15分間隔に行い、磁場上昇中の1時間、磁場安定中の2時間、磁場下降中の1時間、そして温度が測定開始時の温度に回復するまでの計6時間30分測定を行った。

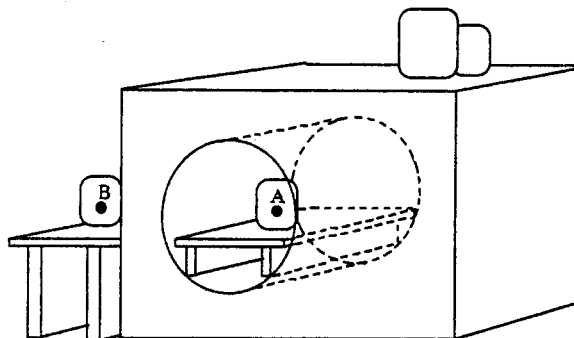


図7 温度測定点

4.2 熱電対を用いた温度測定法

熱電対はゼーベック(Zebeck)効果により発生した熱起電力を電圧計で測定する温度測定機器である。室温などの温度範囲での測定に適していると考えられる

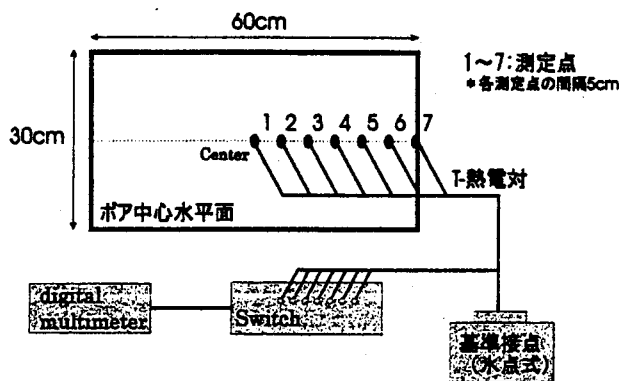


図8 測定点

T熱電対を用いて測定を行った。熱電対の基準接点は氷点式基準接点を用いた。図8に測定点を示す。

4.3 結果及び考察

4.3.1 ポア内外の温度測定

図9に磁場の変化と温度変化のグラフを示す。測定は15分毎であったが、グラフには30分毎のデータを示した。磁場を立ち上げた直後からポア内外の両測定点A,Bともに温度が低下しはじめ、磁場が安定している間も低下している。さらに、磁場が低下している途中まで低下し、磁場が0に戻ったところで温度が上昇しはじめている。磁場が0になって約90分経過して両測定点の温度が測定前に戻っている。ここで、pointAとpointBの最大温度差は0.5℃、温度の変化量は、pointAで1.5℃、pointBで1.0℃となり、pointAで温度低下が大きいことがわかる。

磁場を立ち上げることでポア内外の温度が変化することがわかった。今回の測定では、磁場強度5Tで安定させた時間は2時間であったが、その時間中、温度が低下し続けている。磁場安定の時間をさらに長くすることで温度の低下がより大きくなることが考えられ、ある温度で安定することが考えられる。磁場の何らかの影響によって温度が変化していることが考えられるが、pointA、Bともに温度が低下し、磁場印加の停止で温度が上昇す

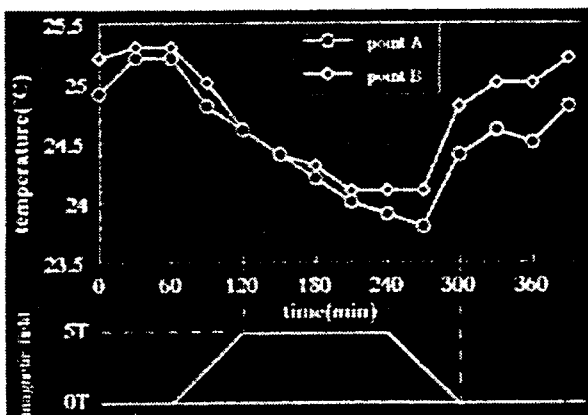


図9 磁場の状態および温度変化

ることを考えると、温度変化は磁場の影響だけではないと思われる。つまり、室温の変化、磁場、マグネットの機械的な作用などの様々な要因により温度が変化することが考えられる。この要因について、ポア内の温度分布、さらに温度分布変化などを詳細に測定することは磁場の生体影響を解明する上で意義があると思う。

現在までに超伝導マグネットを用いた強磁場の磁気作用に関する報告がなされているが、これらは恒温水循環ポンプや恒温室を用いて実験を行っている。今回の測定結果は、これらの装置を用いて実験を行う場合でも、室内とマグネット内で温度が変化するため、温度管理が重要であることを示している。

4.3.2 熱電対による温度測定

1) 温度測定結果 (ポア端開放)

ポア端を開放したときの温度測定結果を示す (図10)。測定開始時の温度を基準にそこからの温度差として表している。磁場を上昇させるにつれてすべての測定点において温度が低下を開始している。さらに、磁場が最大値の5Tになり安定してからも温度低下が継続している。その後、磁場を低下させることにより温度が上昇を始め、0磁場となった後約100分経過し測定時の温度に戻った。測定点7において最大の温度変化を示し、約0.9度の温度低下であった。

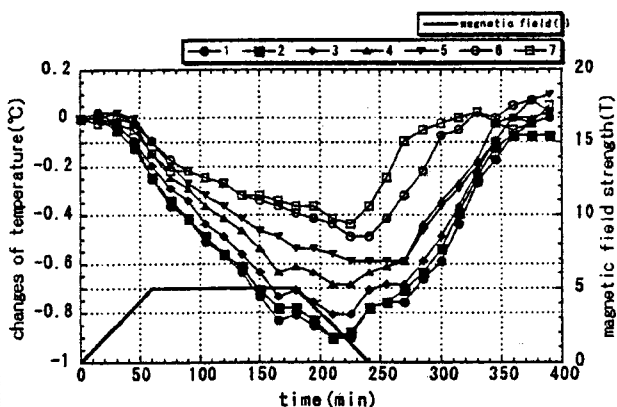


図10 温度変化 (ポア端解放)

2) 温度測定結果 (ボア端閉鎖)

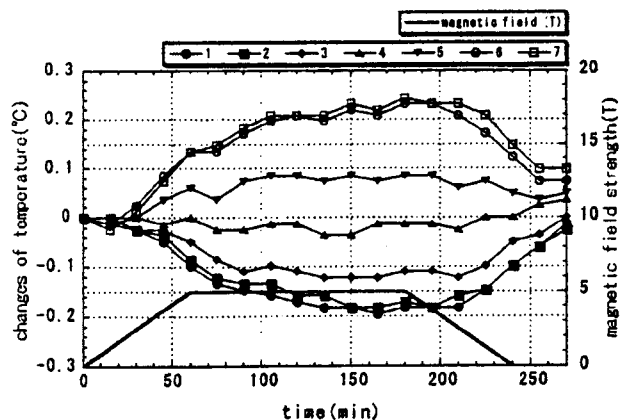


図 11 温度変化 (ボア端を閉じる)

ボア端を閉じて測定を行った時の温度変化を図 11 に示す。ボアの中心部に近い測定点 (測定点 1-3) においては、温度が低下している。一方、ボア端に近い測定点 (測定点 5-7) では、温度が上昇していることがわかる。また、温度の最大変化量もボア端を解放しているときとは異なり、測定点 7 においておよそ 0.2 度の温度低下、測定点 1 においておよそ 0.2 度の温度上昇を示した。

上述したようにボア端を開放したときとボア端を閉じたとき、さらにサーモピューアを用いて温度測定を行ったが、すべての測定において共通していることとして、ボア中心部での温度が低下することがあげられる。そこで、我々はこの原因の一要因としてボア表面からの温度輻射を考えた。超伝導マグネット内では、液体ヘリウムが入っており、コイル部の温度はおよそ 4K である。ボアとコイル部は真空断熱してあるとはいえ、わずかながらでも温度輻射があるのではないかと考えた。そこで、ボア内を真空にしたときや、窒素ガスを充填したときの温度分布についても詳細な検討を行った。その結果、強磁場暴露下では輻射によらない温度低下が起こることを確かめている。これらの実験結果については、別の機会に報告する。

5 まとめ

今回の測定を通じて、超伝導マグネットのボアの内外で温度が変化し、さらに、その温度差が室温 25°C、磁場強度 5 T においては約 0.5°C、さらに温度変化量がボア内では約 1.5°C、ボア外では約 1.0°C あることを確認した。このことは、超伝導マグネットを用いた磁場の影響について実験を行う際、厳しい温度管理が必要であることを示唆している。

次に、温度変化の原因解明のために、炎の燃焼の変化を測定したが、原因を解明することはできなかった。しかし、ロウソクの炎は、磁場の高いほうから低いほうに向かって磁場勾配に垂直に向いて傾くことが明らかとなった。ボア内だけで気流が生じていることを示唆している。

今後は、温度分布変化の測定により、温度変化の原因の解明をおこない、また、ロウソクの向きと長さの測定を正確に行い、磁場と炎の向きと長さに関する理論的な解析を行いたいと考えている。

参考文献

- [1] 内田、湯ノ口；強磁場のかわれ大根の発芽に及ぼす影響；日本 ME 学会九州支部学術講演会抄録集 (1998)
- [2] Ryoichi Kato, Hiroshi Kamada, et al. ; Plant Cell Physiology ; 30(4), 605 (1989)
- [3] 上野、江口、岩坂；日本応用磁気学会誌；17, 597 (1993)
- [4] N. I. Wakayama; IEEE Transactions on Magnetism ; 31, 897 (1995)
- [5] 植竹、中川、廣田、北沢；メカ部を持たない磁気送風；SNMS-'97；43 (1997)
- [6] Kazuhiro Nakamura, Kazumasa Okuno, et al. ; Bioelectrochemistry and Bioenergetics ; 43, 123 (1997)
- [7] R. R. Raylman, Anaira. C. Clavo, et al. ; Bioelectromagnetics ; 17, 358 (1996)