

居室における中間周波電磁界に関する研究

～動物研究班～

分担研究者 牛山 明

国立保健医療科学院生活環境部快適性評価室長

研究要旨

IH 調理器の普及に伴って、国民が中間周波電磁界にさらされる機会が増加している。それに伴い、IH 調理器は家庭内で妊婦を含む一般人が日常的に使用していることから、その健康影響が懸念されている。また、WHO においても、IH 調理器が使用する中間周波電磁界の健康影響についての研究が不足しているという指摘もある。したがって中間周波電磁界の生体影響について科学的知見の蓄積が早急に必要である。本研究課題では、中間周波電磁界の生体影響に関する実験動物を用いた研究をレビューし、次年度以降の研究の方向性について検討を行った。

A. 研究目的

本分担研究ではIF電磁界の動物に対する影響の有無を明らかにし、リスク評価に資することを目的とする。本年度は研究班としては細胞実験を先行して進めるため、動物実験は次年度以降の本格開始に向け、資料の収集や今後のばく露条件の検討などを行った。過去に報告されたIF電磁界の主な動物実験については、PubMedや各種報告書等を網羅的に調べ、とりまとめを行った。具体的には、IH調理器で使用されているような、波形が正弦波のIF電磁界に関するデータは少ないためビデオディスプレイターミナル（VDT）から漏洩するパルス波型のIF電磁界を想定した実験研究も含めることとした。

B. 方法

IF電磁界を用いて動物実験を行っている研究を、PubMedや、EMF-Portal（ドイツアーヘン大学が行っている電磁界研究データベースのポータルサイト）、そのほかの関連サイトから収集し分析した。

C. 結果と考察

これまで発刊されている論文を総合すると、影響を認めたという報告も散見されるが、いずれもパルス波による結果である。今後、正弦波で研究を進めるに当たっては、パルス波で報告されている指標について慎重に検討が必要であることがわかった。以下に関連論文の要旨を抜粋する。

Huuskonen ら⁽¹⁾は、妊娠したWisterラットを使用し、胎児発生への影響を調べた。ばく露条件は、20kHzのパルス波で磁束密度15μT（p-p: peak to peak 値）、20日の連続ばく露であった。他の条件としては50Hz、35.6μTの20日間ばく露も行った。研究では、胚および胎児の体重、骨格、生殖能への影響を調べているが、50Hzの群のみに、胎児数の増加が見られ、マイナーな骨格奇形の発生率が上昇は、20kHz、50Hzの両方の群で有意に増えていると報告している。

Frolen ら⁽²⁾は、20kHzパルス波15μT(p-p)のばく露実験をおこなった。実験にはCBA/sマウスを用いて最大19日間のばく露を行い、胚、胎児への影響、体重、奇形、死亡例等を検討し、吸収胎児率が有意に高いと報告したが、他の系統のマウスではその影響は見られないことからマウスの

系統に関係していると結論している。これに引き続き、Svendenstal ら⁽³⁾は、20kHz のパルス波、15 μ Tp-p をマウス CBA/S にばく露を行う実験をしたが、この研究では、初期胎児の死亡の増加は見られなかった。しかし、胎児の体長と体重は、5.5 日間ばく露したマウスにおいて有意に減少していたと報告している。

これらの研究の再現実験として、Juutilainen ら⁽⁴⁾は、20 kHz パルス波で 15 μ Tp-p を 8 日間ばく露を行い影響を調べた。動物は CBA/Ca と CBA/S マウスを使用した。その結果、CBA/Ca マウスでは差がなく、CBA/S マウスでは 20kHz のばく露群で胎児消失率に差が見られるとした。これらよりマウスの系統が影響の有無に大きく寄与していると結論している。

Huuskonen ら⁽⁵⁾は同様に再現実験を試みた。実験ではマウス CBA/Ca を利用し、20kHz パルス波、15 μ T p-p を妊娠 0 日～18 日までばく露を行い影響を検討した。結果としては母獣の血液学的な変化は見られず、胎児への影響は、外見上の奇形は見られなかった。しかしながら、少なくとも 3 カ所の骨格異常が見られた胎児数がばく露群で有意に多かったと報告している。

Svendenstal ら⁽⁶⁾は 20kHz パルス波、15 μ Tp-p、でマウスに対して 20 日～60 日の長期ばく露を行った際の影響を調べた。マウスは CBA/Ca と CBA/S の 2 系統を使用し、体重、体長、臓器重量を指標にした。その結果、同時に行った 50Hz ばく露では影響がみられたが、20kHz のばく露では影響を認めなかったと報告している。

同じく、Svendenstal ら⁽⁷⁾は、20kHz パルス波、15 μ Tp-p の条件で、同様にマウス、CBA/S、CBA/Ca を利用し最大 60 日間の連続ばく露を行った際の血液学的検査による影響も調べている。その結果によると、一部で特定の血球数等に変化が見られるが、筆者らは特に強い影響を与えないと結論づけている。

Kyung ら⁽⁸⁾は、20kHz の鋸歯型波形によるマウスの発情周期について検討をおこなった。ばく露は生後 3 週の ICR マウスの雌に対し、6.25 μ T、1 日 8 時間のばく露を 6 週

間にわたり行った。その結果、対照群に比べてばく露群において、発情前期と後期の延長が見られたとしているが、これが生殖能にどの程度影響を与えるかについては今後も検討が必要であるとしている。

ほ乳動物を用いた実験について最近の報告では、韓国の Lee YS らのグループによる一連の研究^{(9) (10) (11) (12) (13)}がある。彼女らは 20kHz で 6.5 μ T (ICNIRP のガイドライン) の鋸歯型波形を持つ磁場でラットをその影響を調べている。彼らの報告によれば、1 日 8 時間のばく露を妊娠期間中におこなっても、仔数の変化や仔の奇形に影響はなかった⁽⁹⁾。また、同様のばく露を、90 日、12 ヶ月、18 ヶ月おこなっても、体や臓器のサイズ、尿や血液の生化学的指標に差がないことを示した^{(10) (11)}。さらに、DMBA の塗布で誘発された乳がん、肺がん、皮膚がんのプロモーション効果について検討し、上記のばく露では影響がないことを示した⁽¹²⁾。また、しかしながら一部の実験では、好中球やリンパ球数の変化があり検討が必要であると指摘している。

最近の研究⁽¹³⁾においては、ICR マウスを用いて、最大 30 μ T のばく露を行い、妊娠マウスの胎児の発生、ならびに性別等には全く影響を与えなかったことを示している。彼らの実験での波形は IH 調理器からの電磁界の波形と異なることと、長時間ばく露とはいえ、その強度がそれほど高くないこと考慮すると、IH 調理器の生体影響評価にそのまま適用することは妥当ではない。しかしながら、白血球系細胞への影響と発生への影響に着目して研究を進めるという点で、大いに参考になると考えられた。

Svendenstal⁽¹⁴⁾らは、マウスのリンパ腫に対する 200kHz の磁界と X 線の複合作用の有無を調べた。実験では、CBA/S マウスに 5.24Gy の X 線をばく露しその後 15 μ T、200kHz のパルス波磁界を生涯ばく露してリンパ腫の発生に対する磁界の影響を調べたが、X 線のみをばく露に比べて、X 線+磁界ばく露がリンパ腫を有意に増加させることはなく、また磁界ばく露のみの群は対照群と差が見られなかった。

以上の研究報告は、20kHz に代表される

IF 磁界の実験ではあっても、パルス波、鋸型波の研究であり、IH 調理器で使用される正弦波による影響と同一に考えることはできないことに注意が必要と思われる。これまで正弦波を用いた動物実験はあまり進んでいないのが現状であるが、これまでの報告について以下にまとめる。

Robertson ら⁽¹⁵⁾は、10kHz の正弦波をばく露した際のマウスを用いた毒性試験の結果を報告している。この研究では、B6C3F1 マウスを用いて、短期実験は 14 日、長期実験は 90 日間のばく露を行った。ばく露に用いた磁束密度は最大 1mT である。評価はばく露中の体重変化、観察症状、活動量、血液学的評価、生化学的評価、組織病理学的評価により行った。結果は一部の血液学的評価項目で有意な変化が見られたが、その差は非常に小さいため深刻な生物影響を示唆するものではないと考えられた。そのほかの多くの項目においては統計的に有意な差は見られなかった。

また、茅野ら⁽¹⁶⁾は、ラットの腸間膜より摘出した小動脈を用いて、その血管径へ与える IF 磁界の影響について検討した。実験は、市販の IH 調理器を用いて、作動状態の調理器から 25cm の場所に血管を配置し、血管径の変化をビデオカメラで撮影し解析した。ばく露状態の電磁環境は測定器で計測し、24.05kHz を中心とする磁界とこの高長波を含むもの、1~400kHz の複合磁界は約 7.8 μ T であると報告している。ばく露時間は 10 分ばく露、10 分休止を繰り返し 3 回行った。実験の結果、ばく露により、有意な血管径変化はないと報告している。しかしながら、市販の IH 調理器を使用している点から、ガイドラインよりも強い環境での影響は不明である。

電力中央研究所の Nishimura ら⁽¹⁷⁾は、鶏卵に対して、20kHz (正弦波) の鉛直磁界を最大 1.1 mT (rms) の磁束密度でふ卵開始から最大 11 日間ばく露を行い、発生毒性を評価した。磁界ばく露実験は、1 群約 60 個の有精卵を用いて行った。その結果、胚の発生段階、嘴長、翼指長、脚指長および実体顕微鏡下で観察した総異常 (骨格異常を含む形態異常と死亡) の出現率に関し、偽ば

く露群とばく露群間に統計学的な有意差は認められず、磁界影響はないと報告している。

電力中央研究所の Shigemitsu ら⁽¹⁸⁾は、IF 電磁界の生体影響を探索する目的のために、動物実験に用いるばく露施設を設計制作した。この施設は、5.3 m x 4.5 m の部屋 (高さ 3 m) の一室に 1.6 m x 1.6 m x 1.6 m のコイルを設置したものである。そのコイル内部の 1 m x 1 m x 1 m の空間で、20kHz (正弦波) の鉛直磁界を、最大 200 μ T (\pm 5%) の磁束密度で発生することができる。この装置を用いて、西村らは 20kHz の正弦波をばく露した際の妊娠ラットへの影響を調べている。その報告⁽¹⁹⁾によると、10 週齢 Crl:CD(SD)雌ラットに、妊娠 7~17 日 (着床から胎児の硬口蓋閉鎖) まで 20 kHz、0.2 mT (rms) の正弦波、垂直磁界を 1 日 22 時間、連続ばく露をおこなった。ばく露終了後、妊娠 20 日まで無ばく露で飼育したのち雌親を解剖し、胎児を摘出して生殖発生への影響を盲検法にて検査した。その結果、雌親については、ばく露期間中の体重増加、着床数、内臓異常の出現率、血液学的検査、血液生化学的検査において、ばく露群と対照群で差がなかった。また、胎児については、着床後の胚および胎児の死亡率、低体重児の出現率、雌親当りの胎児数や胎児の性比に、対照群とばく露群間で統計学的有意差はなかった。胎児の外表異常、内臓異常、骨格異常の出現率にも、両群間で統計学的有意差はなかった。以上の結果から 20 kHz、0.2 mT (rms) の正弦波、垂直磁界をラットの器官形成期にばく露しても生殖発生に関わる異常が再現性を持って発生することはなく、ラットの胚や胎児の正常な発生過程に影響を与えないことが示唆されている。本研究は、ラットの全身ばく露影響を検討した結果であり貴重な知見である。この結果を踏まえ、我々は、妊娠ラットの腹部局所に強い磁界をばく露した際の影響を調べることで、不足している知見を補うことが可能であると判断した。今後、私たちの研究班においてはラット腹部局所に対して、数 mT 程度の IF 電磁界ばく露を検討していく計画である。

生殖以外の影響として、電力中央研究所ではラットへの急性影響を検討し、以下の報告を行っている⁽²⁰⁾。1 群 12 匹の 7 週齢、雌雄 Cri:CD(SD)ラットに 20 kHz、0.20 mT (rms)あるいは 60 kHz、0.10 mT (rms)の正弦波、垂直磁界を 1 日 22 時間、14 日間ばく露した。研究では雌雄ラットにおいてばく露期間中の体重増加と一般状態の異常の出現頻度、剖検所見での内臓異常の発生、臓器重量および体重比で表わした臓器重量、血液学的検査と血液生化学的検査について評価したが、全評価項目に関し、対照群とばく露群間で再現性のある統計学的有意差はなく、20 kHz 磁界の影響は認められなかった。また 60 kHz も同様であった。しかしながら、上記研究では、免疫担当細胞の機能に関する検討を行っておらず、今後、一般的な免疫毒性評価を含めた免疫機能への影響を調べることも必要である。私たちの研究班において細胞研究のために開発したシステムを改良し、2mT 程度の磁束密度での全身ばく露が可能であるので、その磁束密度における全身ばく露を行い、これら免疫毒性について今後調べていくこととする。

D. 結論

これまでの先行研究においては、パルス波や鋸状波の IF 磁界ばく露の報告は多いが、IH 調理器で使用されている正弦波の IF 磁界の影響を動物実験で調べた例は少なく、今後、精力的に正弦波磁界の動物へのばく露の影響を検討することで、リスク評価に向けての科学的なエビデンスを提供できると考えられ、国民の健康を守る重要な知見となることが期待できる。

E. 参考文献

1. Huuskonen H, Juutilainen J, Komulainen H. Effects of low-frequency magnetic fields on fetal development in rats. *Bioelectromagnetics*. 1993;14(3):205-13.
2. Frolen H, Svedenstal BM, Paulsson LE. Effects of pulsed magnetic fields on the developing mouse embryo. *Bioelectromagnetics*. 1993;14(3):197-204.
3. Svedenstal BM, Johanson KJ. Fetal loss

in mice exposed to magnetic fields during early pregnancy. *Bioelectromagnetics*. 1995;16(5):284-9.

4. Juutilainen J, Huuskonen H, Komulainen H. Increased resorptions in CBA mice exposed to low-frequency magnetic fields: an attempt to replicate earlier observations. *Bioelectromagnetics*. 1997;18(6):410-7.
5. Huuskonen H, Juutilainen J, Julkunen A, Maki-Paakanen J, Komulainen H. Effects of low-frequency magnetic fields on fetal development in CBA/Ca. *Bioelectromagnetics*. 1998;19(8):477-85.
6. Svedenstal BM, Johanson KJ. Effects of exposure to 50Hz or 20kHz [corrected] magnetic fields on weights of body and some organs of CBA mice. *In Vivo*. 1998 May-Jun;12(3):293-8.
7. Svedenstal BM, Johanson KJ. Leukocytes and micronucleated erythrocytes in peripheral blood from mice exposed to 50 Hz or 20 kHz magnetic fields. *Electro Magnetobiol*. 1998;17(2):127-43.
8. Jung KA, Ahn HS, Lee YS, Gye MC. Effect of a 20 kHz sawtooth magnetic field exposure on the estrous cycle in mice. *J Microbiol Biotechnol*. 2007 Mar; 17(3): 398-402.
9. Kim SH, Song JE, Kim SR, Oh H, Gimm YM, Yoo DS, et al. Teratological studies of prenatal exposure of mice to a 20 kHz sawtooth magnetic field. *Bioelectromagnetics*. 2004 Feb;25(2):114-7.
10. Kim SH, Lee HJ, Choi SY, Gimm YM, Pack JK, Choi HD, et al. Toxicity bioassay in Sprague-Dawley rats exposed to 20 kHz triangular magnetic field for 90 days. *Bioelectromagnetics*. 2006 Feb;27(2):105-11.
11. Lee HJ, Kim SH, Choi SY, Gimm YM, Pack JK, Choi HD, et al. Long-term exposure of Sprague Dawley rats to 20 kHz triangular magnetic fields. *Int J Radiat Biol*. 2006 Apr;82(4):285-91.
12. Lee HJ, Choi SY, Jang JJ, Gimm YM, Pack JK, Choi HD, et al. Lack of promotion of mammary, lung and skin tumorigenesis by 20

- kHz triangular magnetic fields. *Bioelectromagnetics*. 2007.
13. Lee HJ, Pack JK, Gimm YM, Choi HD, Kim N, Kim SH, et al. Teratological evaluation of mouse fetuses exposed to a 20 kHz EMF. *Bioelectromagnetics*. 2009 May;30(4):330-3.
14. Svedenstal BM, Holmberg B. Lymphoma development among mice exposed to X-rays and pulsed magnetic fields. *Int J Radiat Biol*. 1993 Jul;64(1):119-25.
15. Robertson IG, Wilson WR, Dawson BV, Zwi LJ, Green AW, Boys JT. Evaluation of potential health effects of 10 kHz magnetic fields: a short-term mouse toxicology study. *Bioelectromagnetics*. 1996;17(2):111-22.
16. 茅野功, 望月精一, 小笠原康夫. 中間周波磁界曝露によるラット小動脈血管径への影響評価. 生体医工学. [原著論文]. 2009 2009.12;47(6):508-12.
17. Nishimura I, Imai S, Negishi T. Lack of chick embryotoxicity after 20 kHz, 1.1 mT magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics*. 2009 Jun 3.
18. Shigemitsu T, Negishi T, Yamazaki K, Kawahara Y, Haga A, Kobayashi K, et al. A newly designed and constructed 20 kHz magnetic field exposure facility for in vivo study. *Bioelectromagnetics*. 2009 Jan; 30(1): 36- 44.
19. 西村泉, 今井節夫, 根岸正. 中間周波磁界の生物影響評価 -20kHz 磁界のラット胚・胎児の発生に関する生殖発生毒性評価 -: 財団法人 電力中央研究所 2008 Contract No.: V07003.
20. 西村泉, 今井節夫, 根岸正. 中間周波磁界の生物影響評価 -ラットを用いた 20kHz および 60kHz 磁界の急性毒性評価 -: 財団法人 電力中央研究所 2008 Contract No.: V08003.

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策研究事業）

分担研究報告書

居室における中間周波電磁界に関する研究

～電気工学班～

分担研究者	鈴木敬久	首都大学東京・都市教養学部	准教授
	和田圭二	首都大学東京・都市教養学部	准教授
	酒井泰二	独立行政法人情報通信研究機構	専攻研究員

研究要旨

今年度電気工学班では主にばく露指標の検討と細胞用ばく露装置の設計手法の構築とばく露装置開発を行った。ばく露指標に関しては ICNIRP ガイドラインにおける参考レベル（磁界強度）を基準とし、同時に基本制限である内部誘導量（誘導電流密度分布、内部誘導電界分布）を評価できるようなシステムを構築することになった。細胞用ばく露装置の開発において、電源装置と磁界ばく露用コイルをトータルシステムとして設計できる手法を構築した。この設計手法を利用し、150mm×150mm×150mm の空間内に20kHz の入射磁界を短時間運転であれば実効値で最大3.4mT（一般公衆における参考レベル(6.25 μ T)の約540倍）、連続運転時の場合最大2mT（一般公衆における参考レベル(6.25 μ T)の320倍）の均一磁界（ばく露空間内の磁界強度の偏差が $\pm 5\%$ 以内）としてばく露可能な細胞用ばく露装置を開発し、細胞ばく露実験の試験運用を行った。アーチファクトに関する検討としては、磁界ばく露時のコイルの温度上昇の測定を行い、ばく露時の温度環境に関する基礎的な知見を得た。

A. 目的

本研究において電気工学班は物理工学的な視点から中間周波（intermediate frequency, 以下IFと略）電磁界における生体影響について検討する。本年度は特に細胞ばく露に必要なばく露条件の検討と細胞

用ばく露装置の開発を目的とし研究を行っ

た。また、アーチファクトに関する基礎検討として、磁界発生コイルに起因する温度上昇測定を目的とした。

B. ばく露指標に関する検討

生物学的な影響を評価するためにばく

露指標に関する検討を行っておく必要がある。本研究では、ICNIRP ガイドラインにおける参考レベルである入射磁界強度を指標に考える。つまり、装置に関しては入射磁界量を明らかにする。また、基本制限である内部誘導量（誘導電流密度及び誘導電界）も同時に評価できるようにする。

細胞ばく露実験では IF 磁界と細胞との相互作用の基礎検討を行うので、入射磁界を以下のように考える。(1)Dose-Response の観察のため住環境レベルから可能な限り強いレベルの磁界ばく露を行得るような装置とする。(2)入射磁界は 20kHz 付近の単一周波数とする。(3)入射磁界分布は可能な限り一様とする。-内部誘導量依存性に関しては容器のサイズを変更することで対応する。これらのことを考慮しばく露装置の設計指標として、以下の項目を達成することを目的とする。

(1)周波数：20kHz。

(2)最大入射磁界：短時間運転時：3.4mT（参考レベル（一般公衆）の約540倍），連続運転時：2.0mT（参考レベル（一般公衆）の約320倍）。

(3)細胞用のばく露空間は最低限 150mm×150mm×150mm とし、その領域内では磁界強度の偏差を±5%以内とする。

(4)容器のサイズを変更することにより、内部誘導量（誘導電流密度，誘導電界）の条件を変更可能。

以下に、目標とする指標を達成するための装置設計について述べる。

C. 関連研究

本章では、磁界発生装置の研究例を述べる。ここでは関連研究を2例示す。磁界発生用コイルに関する研究、磁界発生用コイルとしてMerritt 4コイル、電源部に汎用交流電源を用いた装置開発例、ソレノイドタイプの磁界発生用コイルと電源部にインバータを用いた装置開発例の検討を行う。過去の開発例の特徴を理解することで、本研究の設計指針を明確にすることが目的である。

1. 磁界発生用コイルに関する研究例

磁界発生装置を開発する上で、まず検討しなければならないのが磁界発生用コイル設計である。コイル設計次第で磁界強度・分布は勿論、電源回路部の設計も異なって

くる。ここで示す2つの研究例は、均一磁界分布領域を比較対象として、最も均一磁界を出力できるコイル構造を検討したものである。コイル設計による分布の違いが示されているだけでなく、各コイルの詳細な設計法に関する説明も述べられている。文献⁽¹⁾は、磁界ばく露においてよく用いられる Helmholtzコイルに代わる均一磁界出力に優れたコイル構造を検討したものである。

ここでは、図1に示す6種類のコイルの均一磁界領域について検討している。また、図1に示すような非常に細い電線から構成されるコイルの磁界分布について示されている。各コイルのパラメータは表1に示す通りである。ここで各コイルについて説明する。

まず、図1コイルAは、古典的な2台の円形型コイルからなる Helmholtzコイルである。表1に示すように、コイル中央に対して線対称に配置される。また、配置座標はコイル直径に依存し、各コイルのアンペアターン比は1:1である。Helmholtzコイルの特徴は、均一磁界がコイル中央の限定され

た領域のみとなり、結果としてある程度の均一磁界領域を得るためにはコイルが非常に大型化してしまう。Helmholtzコイル内部の磁界分布を図2Aに示す。図2はコイル中心軸方向の断面図である。図中の輪郭線は、均一度0.02%、0.2%、2%、20%を示す境界線である。黒く塗りつぶした領域は0.02%以内の領域を示す。他のコイルに比べ均一磁界領域が極端に狭いことが確認できる。また、出力磁界強度も表1に示すように他のコイルに比べて非常に小さい。

コイルBは、Lee-Whiting⁽²⁾が提案したコイルであり、4台の同半径円形型コイルを同軸上に配置させたコイル構造である。また、外側のコイルと内側のコイルの最適電流比は、2.2604となり、ターン比は9:4:4:9（最適値との誤差0.5%以内）となる。コ

イル中央に対し線対称に配置され、コイルの直径によって配置座標が決定する。コイル内部の磁界分布を図2Bに示す。

Helmholtzコイルと比較すると、コイルBの均一度0.02%の領域がコイルAにおける2%の領域と同等であり、さらにコイルBの2%の領域がコイルAの20%の領域に相当する。

コイルBは、そのアンペアターン比が簡単なことから、小さい均一磁界領域が求められる場合に有効である。

コイルCは、Merritt et al.⁽³⁾によって提案されたコイル構造であり、3台の1辺の長さが等しい四角型コイルから構成される。内側コイルに対して線対称に配置され、配置座標はコイル1辺長によって決定する。また、内側コイルに対する外側コイルの最適電流比は、1.950である。最適値との誤差0.5%以内の各コイルのターン比は、33:17:33となる。コイル内部の磁界分布を図2Cに示す。4台及び5台用いるコイルと比較すると、やや均一磁界領域は小さいことが確認できる。しかし、表1に示すように、6種類の中で最も出力磁界強度が大きい。ただし、ターン比が他と比べて複雑なため製作面におけるメリットはない。

コイルDは、コイルBを拡張して、その電流比が整数となるようなコイル設計を行ったものである。また、他のコイルと異なる点として、内側コイルが外側コイルの1辺長より若干大きいことである。各コイルのターン比は21:11:11:21である。コイル内

部の磁界分布を図2Dに示す。コイルC、コイルFより、均一分布に優れているが、次に示すコイルEの方が均一分布に優れていることが確認できる。

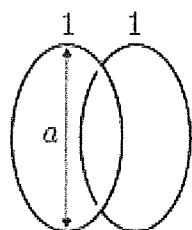
コイルEも、Merritt et al.⁽³⁾によって提案されたコイル構造であり、1辺の長さが等しい4台の四角型コイルから構成される。内側コイルに対して線対称に配置され、配置座標はコイル1辺長によって決定する。また、内側コイルに対する外側コイルの最適電流比は、2.3612である。最適値に対し誤差0.1%以内となるターン比は26:11:11:26であり、0.05%以内では59:25:25:59、0.004%以内となるのは85:36:36:85である。コイル内部の磁界分布を図2Eに示す。他の磁界分布と比較すると、コイルEが最も均一磁界出力に優れたコイル構造であることがわかる。

最後にコイルFでは、5台の1辺の長さが等しい四角型コイルから構成される。各コイルは等間隔で配置され、配置座標は1辺の長さによって決定される。各コイルのアンペア・ターン比は19:4:10:4:19である。コイル内部の磁界分布を図2Eに示す。コ

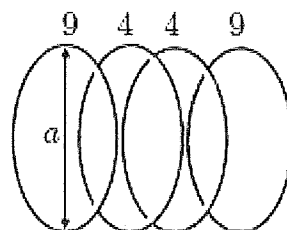
イルC, D, Eと比較し, 均一度0.02%の領域が極端に小さいことがわかる。

結論として, Merritt et al.⁽³⁾によって提案されたコイルEが最も均一磁界分布に優れており, 尚且つ4台のコイルが同1辺長であるため製作面を考慮しても磁界発生用コイルとして実現性のあるコイルと言える。

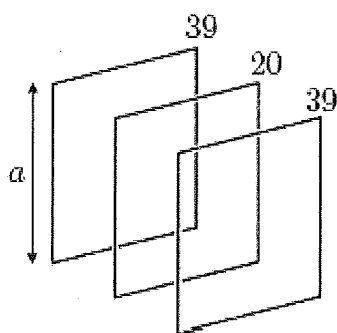
しかし, ここで検討されているのは非常に細い電線から構成されるコイルであり, 実設計するには電線径×巻数分のコイル長を考慮する必要がある。コイル長を考慮した磁界発生用コイルの実設計に関しては, 次章に詳細を述べる。なお, 以降ではコイルEをMerritt4コイルと呼ぶ。



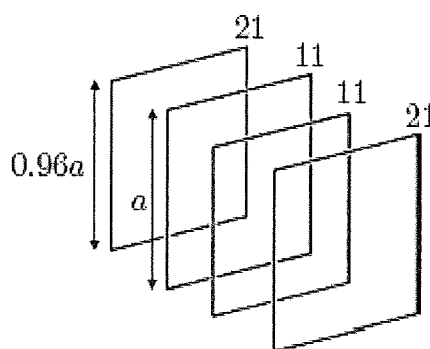
A. Helmholtz



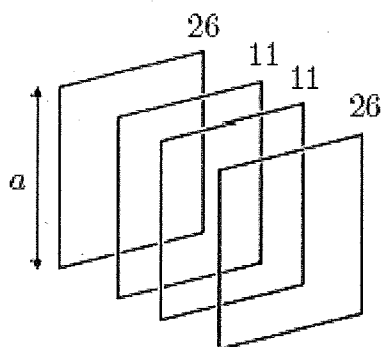
B. Lee-Whiting 4 Coil



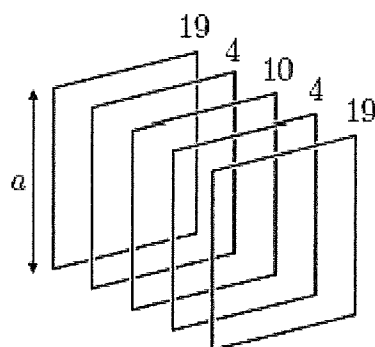
C. Merritt et al. 3 Coil



D. Alldred and Scollar 4 Coil



E. Merritt et al. 4 Coil



F. Rubens 5 Coil

図1 均一磁界発生のためのコイルの配置の検討

表1 In Vivoばく露装置のためのコイル仕様の比較

Coil design	Coil shape	Number of coils	Coil length or diameter [m]	Coil spacing WRT center of system	Ampere-turn ratio	Central field [μ T/A]
A	circular	2	a, a	$\pm 0.2500a$	1:1	$1.798/a$
B	circular	4	a, a, a, a	$\pm 0.1216a, \pm 0.4704a$	9:4:4:9	$17.96/a$
C	square	3	a, a, a	$0, \pm 0.4106a$	39:20:39	$68.21/a$
D	square	4	$0.96a, a, a, 0.96a$	$\pm 0.1281a, \pm 0.5254a$	21:11:11:21	$40.29/a$
E	square	4	a, a, a, a	$\pm 0.1281a, \pm 0.5055a$	26:11:11:26	$46.65/a$
F	square	5	a, a, a, a, a	$0, \pm 0.25a, \pm 0.5a$	19:4:10:4:19	$35.69/a$

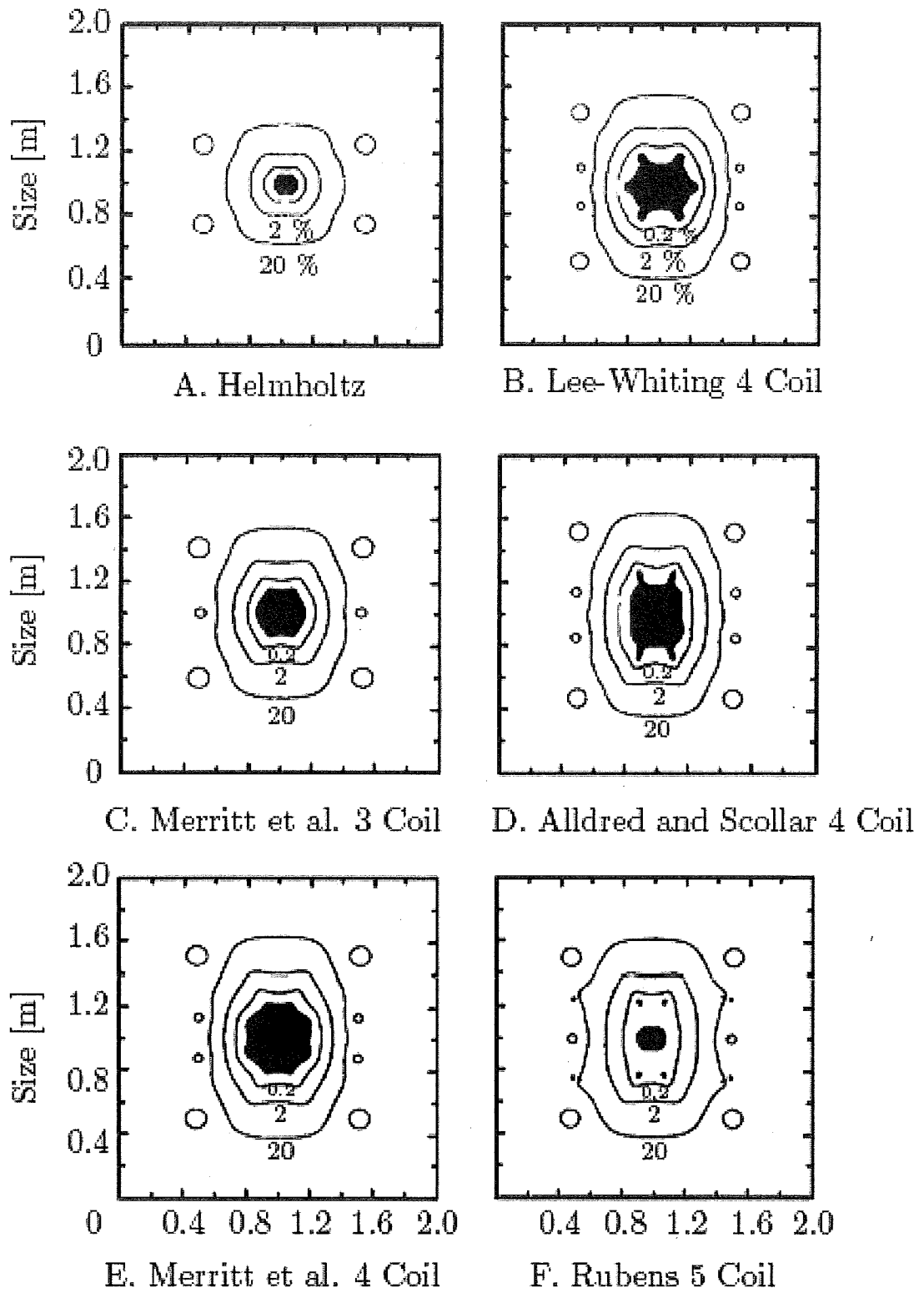


図2 数値計算によるコイルの発生する磁界分布の比較

2. Merritt 4 コイルと汎用交流電源を用いた 開発例

前項でMerritt4コイルが最も均一磁界分布に優れたコイルであることがわかった。ここでは、Merritt4コイルを磁界発生用コイルとして用いた開発例を示す。

文献^{(4), (5)}は、電源部にファンクションジェネレータ (DF1906, NF Corporation, Tokyo, Japan) と電力増幅器 (4510, NF Corporation, Tokyo, Japan) を用いた磁界発生装置の開発例が示されている。試験対象が動物であるため、1 m×1 m×1 mという均一磁界領域 (偏差±10%) が求められる。それゆえ、非常に大型のMerritt4コイル (1.6 m×1.6 m×1.616 m) が必要となる。しかし、先述したような汎用交流電源 (定格出力電流8 Arms) を用いているため、最高出力磁界強度は200 μT (20 kHz) となっている。装置の仕様詳細は表2, 表3に示す通りである。図3に本装置の磁界発生用コイ

ルを示す。

なお、ここで示した文献^{(4), (5)}では、磁界発生装置の設計法に関しては述べられていない。あくまでも、試作した1台の磁界発生装置に関する磁界分布検証や実験環境について記されているのみである。

表2 動物用ばく露装置の開発例：仕様

Exposure coil	1.6 m × 1.6 m × 1.6 m
Exposure space	1 m × 1 m × 1 m
Uniformity	Within±10 % deviation to center
Field direction	Vertical
Maximum field	200 μT at 20 kHz
Output wave form	Pure sinusoidal wave
DC-magnetic field	35 - 47 μT

表3 動物用ばく露装置の開発例：電磁
気的特性

Winding turn ratio	26:11:11:26
Total number of turns	74 turns
Coil inductance	7.2 mH at 20 kHz
Coil (DC) resistance	3.6 Ω

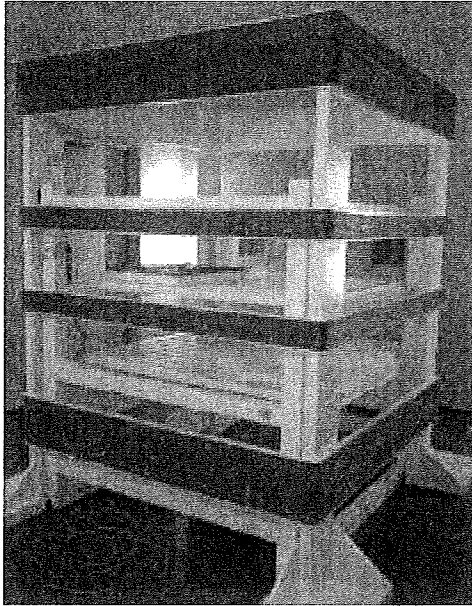


図3 動物用ばく露装置の開発例：装置の
写真(文献⁽⁴⁾より引用)

3, ソレノイドコイルとインバータを用いた 開発例

ここでは、ソレノイドタイプの磁界発生用コイルと電源部にインバータを用いた開発例⁽⁶⁾を示す。装置仕様は表4に示す。本装置は、非常に限定的な領域において最高6.25 mT (23 kHz) を出力することができる。ただし直径100 mm, 高さ20 mmのシャーレを4台しか設置できない。なお、ばく露領域には偏差±5%の交流磁界が分布する。また、各シャーレ中心の温度を30秒毎に測定し、インキュベータ稼働時において

36.5±0.5 °Cに保持できる。

また本装置は、図4に示すような5つのパーツから構成されている。それぞれ、(1)インキュベータ：内部にコイルを設置、(2)電源部：IH 調理器 (KZ-MS32A, Panasonic, Osaka, Japan) のインバータを改良し、コイルに19 Arms (23 kHz) を供給、(3)温度測定システム：ばく露エリアの温度を測定、(4)コイル冷却システム、(5)インキュベータ温度制御部、を示している。磁界発生用コイルの仕様詳細を表5に示す。コイル電流に対して磁界出力効率の良いソレノイドコイルとなっている。最高磁界出力時は、電流密度は約5 A/mm²となる。本文献は、ソレノイドコイルを用いた磁界発生装置の仕様詳細を述べたものである。一方で、設計法に関しては全く述べられておらず、設計指針を示すのみとなっている。

表4 文献⁽⁶⁾におけるばく露装置の仕様

MF generated	~6.25 μ T
MF frequency	23 kHz
MF distribution	4.8 %
THD	1 % or less
Temperature variation	36.5 \pm 0.5 $^{\circ}$ C
Exposure period	2 h
Number of available Petri dishes	100 mm Petri dish \times 4
Coil shape	Solenoid
Shielding	
Magnetic field	Ferrite, aluminum rings
Electric field	Carbon paper shield
Environmental MF	0.25 μ T _{rms}
MF leakage	
50 Hz	0.59 μ T
23kHz	0.37 μ T

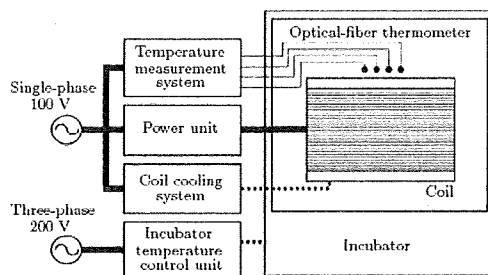


図4 ばく露装置のシステム概略図（文献⁽⁶⁾より引用）

表5 文献⁽⁶⁾におけるコイルの仕様

Coil shape	Solenoid
Number of coil turns	96
Coil inductance	2.5 mH
Coil resistance (23 kHz)	Approximately 1 Ω
Coil loss	400 W at coil current of 19 A _{rms}
Coil wire	
Constitution	50 μ m diameter insulated copper wires \times 1920
Entire diameter	Approximately 3.5 mm
Length	Approximately 1.2 \times 10 ⁵ mm
Outer diameter	450 mm
Inner diameter	290 mm
Height	Approximately 350 mm
Weight	Approximately 20 kg

4. まとめ

本章では、磁界発生装置の研究例を2例

示した。磁界発生用コイルに関しては詳細な設計法が示されており、Merritt4コイルが最も均一磁界分布に優れていると結論づけられている。しかし、検討されているのは非常に細い電線から構成されるコイルであり、実設計するには電線径 \times 巻数分のコイル長を考慮した設計が求められる。

1.2に示した開発例では、電源部に汎用交流電源を用いているため、最高出力磁界強度は200 μ Tにとどまっている。また、設計法に関しては述べられていない。

1.3では、ソレノイドコイルと電源部にインバータを用いた開発例を示した。本装置は、非常に限定的な領域において最高6.25mT（23 kHz）を出力することができるが、シャーレを4台しか設置できない。

また、出力磁界波形が多少ひずんでいることが確認された。そして、装置の詳細仕様は示されているが、設計法に関しては全く示されていない。

磁界発生装置は、使用者の実験仕様に合わせた装置設計がなされている。しかし、磁界発生装置の設計法を取りまとめた研究例は、ここで示した装置開発文献以外にお

いても、著者の知る限り存在しない。装置使用者が要求する磁界強度、均一磁界分布領域から瞬時に装置設計指針が示せるような設計法の確立は非常に有意義なことであると考えられる。次章以降に設計法の詳細を示す。

D. 磁界発生装置設計

本章では、磁界発生装置構成と設計指針について述べる。本磁界発生装置は電源部に単相フルブリッジインバータとLC直列共振回路を用いている。また、装置全体を考慮した設計指針を示す。

1. 装置構成

図5に示すように、本磁界発生装置は、フルブリッジインバータとLC直列共振回路から構成されている。表6に製作したインバータの仕様を示す。パワーデバイスにIGBTを用いており、直流定格電圧280 V、交流出力電流2Aである。本インバータは、スイッチング素子SW. 1, SW. 4とSW. 2, SW. 3を交互に20kHzでオン・オフすることで矩形波電圧 v_{INV} を出力させ、正弦波電流 i_L を生成している。インバータのデューティ比は一定(50%)であるため直流電源

の出力電圧 V_{DC} の振幅を調整することにより i_L を可変できる。ここで、 L は磁界発生用コイル、 C は共振用コンデンサ、 R は電線抵抗である。

図6に示すように、空芯状の磁界発生用コイル L に20kHzの正弦波交流電流を流し、シャーレ(試験細胞)に対して空間的に均一な磁界を発生させる。空芯コイル内部に発生する磁界は電流 i_L とコイル形状によって決まる。つまり、磁界発生装置の実用設計を構築するには、電流 i_L とコイル形状の関係を明確にすることが求められる。同時に、共振用コンデンサの耐圧など電氣的制限も同時に考慮する必要がある。

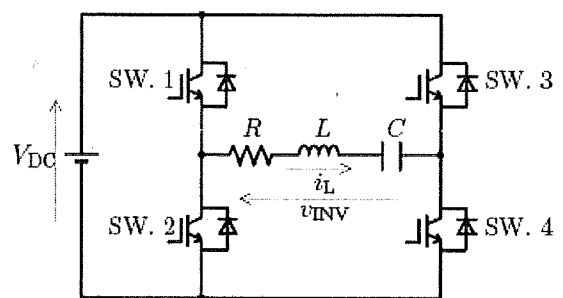


図5 回路構成

表6 インバータ回路の回路パラメータ

Rated input voltage	DC280V
Output frequency	18 kHz~22 kHz
Rated output current	25 A
Dead time	3.5 μ sec
Output waveform	Square (50 % Duty)

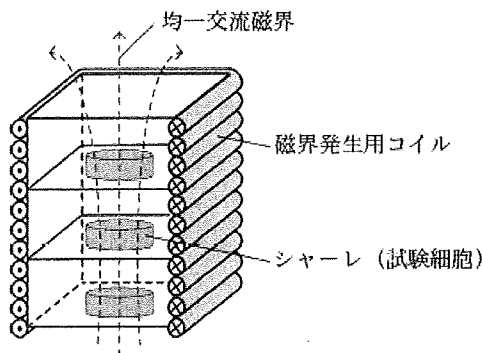


図6 細胞用ばく露装置の概念図

2. 設計指針

ここでは、磁界発生装置の設計指針を示す。次に示す4点を設計指針として磁界発生装置開発を行う。

- ・ 広範囲の均一磁界領域
- ・ 高磁界出力
- ・ ひずみの少ない20kHz交流磁界を発生
- ・ 長時間連続駆動

まず、ばく露を行う細胞に対して空間的に均一な磁界を発生させる必要がある。また、より多くの培養容器を設置できることが求められるため均一磁界領域の拡大が1

点目の設計指針となる。磁界発生用コイルの詳細設計を行うことで均一磁界領域の拡大を目指す。

出力磁界強度の高出力化を2点目の設計指針とする。前章に示したように、広範囲均一磁界と高磁界を両立させることは難しい。しかし、今までに磁界発生装置の詳細設計を示した文献は見当たらない。そのため、空間的に均一に磁界を発生させる場合、実現可能な出力磁界強度がどの程度なのか明らかにされていない。そこで、本研究では磁界発生用コイルの詳細設計だけではなく装置全体を考慮した設計法の構築を目指している。また、電源部に汎用交流電源ではなく単相フルブリッジインバータを用いることで消費電力に対する出力磁界強度の高効率化を図る。

ばく露環境統制のために、ひずみの少ない20kHz正弦波交流磁界を発生させる必要があり、これを3点目の設計指針とする。本磁界発生装置の電源部はLC直列共振回路で構成される。そして共振周波数を20kHzに設定、共振周波数周辺でスイッチングさせることで正弦波電流をコイルに流

し、ひずみの少ない交流磁界が発生可能である。

また、生体影響を調査するため長時間（数時間～数日間）にわたる連続駆動が求められる。そこで、実際に長時間駆動させた場合のコイル発熱に関して検討する。

なお、設計法の妥当性を確認するために磁界発生装置を試作し、実験と計算より確認する。

3. まとめ

本章では、磁界発生装置の構成と設計指針を示した。電源部は単相フルブリッジインバータとLC直列共振回路で構成される。共振周波数20kHzで設計し、共振周波数付近で駆動させることでひずみの少ない正弦波交流磁界を出力させる。また、高磁界かつ広範囲の均一磁界を出力可能な磁界発生用コイルの設計が求められる。電源回路部の耐圧を考慮し、実現可能性を含めた設計法の構築を目指す。

E. 磁界発生用コイル設計

本章では、ソレノイド型及び四角型磁界発生用コイル設計について述べる。まず、

各コイル型の出力磁界強度計算法を示す。

20k～100kHzの交流磁界は静磁界と同様の計算で求められる。続いて、コイルインダクタンスの計算法を示す。また、Merritt4コイルの実現可能性を含めた詳細設計法も本章で述べる。なお、磁界及びインダクタンス計算については文献⁽¹⁾⁽⁷⁻⁹⁾を参考としている。

1. 四角型コイル

本節では、四角型コイル設計について述べる。磁界計算、インダクタンス計算の順に示す。

1.1 磁界計算

四角型コイルの出力磁界計算は、ビオ・サバルの法則を用いることで求めることができる。図7に示すような正方形コイルABCDに電流 I を流したとき、任意の点 $P(x, y, z)$ における磁界強度を求める。四角型コイルが発生する磁界を求めるには、1辺それぞれが発生する各方向成分ごとの磁界を足し合わせればよい。ここでは、 z 軸方向成分について示す。まず、辺ABが点 P に作る磁界は、ビオ・サバルの法則より

$$B_{AB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_{AB}} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (1)$$

$$r_{AB} = \sqrt{(\alpha - y)^2 + z^2} \quad (2)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{\alpha + x}{\sqrt{(\alpha + x)^2 + (\alpha - y)^2 + z^2}} \quad (3)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{\alpha - x}{\sqrt{(\alpha - x)^2 + (\alpha - y)^2 + z^2}} \quad (4)$$

となる。ここで、 r_{AB} は辺ABから点Pまでの距離、 θ_1 及び θ_2 は頂点A、Bから点Pを望む角度である。同様に B_{BC} 、 B_{CD} 、 B_{DA} を求めることができる。 B_{AB} と B_{CD} はy軸とz軸方向成分のみをもち、 B_{BC} 及び B_{DA} はx軸、z軸方向成分のみをもつ。合成磁界は、各方向成分ごとの和になるので、図8に示

す B_{AB} 、 B_{CD} の合成磁界を考える。図8は、正方形コイルABCDをx軸方向から見た側面図である。AB、CDから点Pを望む角度をそれぞれ θ_{AB} 、 θ_{CD} とすると、 B_{AB} 、 B_{CD} のy軸、z軸方向成分 $B_{AB(y)}$ 、 $B_{AB(z)}$ 、 $B_{CD(y)}$ 、 $B_{CD(z)}$ は、図8のように分解することができる。そこでz軸方向に関して

$$B_{AB(z)} = B_{AB} \times \cos \theta_{AB} \quad (5)$$

$$B_{CD(z)} = B_{CD} \times \cos \theta_{CD} \quad (6)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{\alpha - y}{\sqrt{(\alpha - y)^2 + z^2}} \quad (7)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{\alpha + y}{\sqrt{(\alpha + y)^2 + z^2}} \quad (8)$$