

低周波電磁環境の定量化と
評価に関する研究

2011 年

田中 賢治

名古屋工業大学博士論文
甲第762号(課程修了による)
平成23年3月23日授与

目次

第1章 序論

1.1 緒言	1
1.2 これまでの電磁界の実態調査	1
1.2.1 家庭用電気機器の発生する電界・磁界	2
1.2.2 電力設備の発生する電界・磁界	4
1.2.3 生活環境における電界・磁界	5
1.2.4 低周波磁界の小生物への影響	7
1.3 国内外の電磁界プロジェクトの動向	8
1.4 本研究の目的と内容	12
1.5 結言	14
第1章参考文献	15

第2章 家庭用電気機器の発生する低周波磁界の定量的評価

2.1 緒言	19
2.2 合成磁界の測定および評価	19
2.2.1 測定方法	19
2.2.2 測定結果および検討	22
2.3 家庭用電気機器の負荷電流の周波数成分解析	37

2.3.1 測定方法	37
2.3.2 測定結果および検討	38
2.4 結言.....	40
第2章 参考文献.....	41
第3章 生活環境における低周波磁界の定量的評価	
3.1 緒言.....	43
3.2 磁界測定器装着位置の検討.....	43
3.2.1 検討方法および被験者	43
3.2.2 測定結果および考察	44
3.3 生活環境における低周波磁界の測定.....	48
3.3.1 測定方法および被験者	48
3.3.2 測定結果および考察	48
3.3.3 場所ごとの磁界の解析	52
3.4 ばく露量推定可能性の検討.....	56
3.5 結言.....	60
第3章 参考文献.....	61
第4章 電力設備周辺における低周波電界・磁界の実態調査	

4.1 緒言	63
4.2 測定実施場所	63
4.3 測定方法	63
4.3.1 定点測定.....	63
4.3.2 連続測定.....	68
4.4 定点測定結果	69
4.4.1 変電所内.....	69
4.4.2 送電線下.....	72
4.5 連続測定結果	75
4.5.1 変電所内.....	75
4.5.2 送電線下.....	77
4.6 考察	78
4.6.1 定点測定による最大観測値の比較.....	78
4.6.2 連続測定における電界・磁界の累積値.....	81
4.7 結言	81
第4章 参考文献	82
第5章 低周波磁界がショウジョウバエの寿命や遺伝に及ぼす影響調査	
5.1 緒言	85

5.2 供試小生物の選択	85
5.3 実験方法	88
5.3.1 磁界レベルの設定.....	89
5.3.2 忌避行動（急性毒性）調査.....	91
5.3.3 寿命（慢性毒性）調査.....	92
5.3.4 突然変異（遺伝的な影響）調査.....	94
5.4 調査結果と統計的評価	96
5.4.1 忌避行動（急性毒性）調査.....	96
5.4.2 寿命（慢性毒性）調査.....	98
5.4.3 突然変異（遺伝的な影響）調査	103
5.5 結言.....	107
第5章 参考文献.....	109
第6章 結論	
6.1 本研究で得られた成果.....	111
6.2 今後の課題.....	113
謝辞	116
研究業績	117

第1章 序論

1.1 緒言

1879年にトーマス・エジソンが炭素フィラメントの白熱電球の実験に成功し、電気というエネルギー媒体が広く社会に受け入れられるようになってから130年以上が経過した。今や、電気は日常の生活空間から航空宇宙設備に至るまで殆どすべての環境下で使用され、人類の生活にとってはなくてはならない存在となっている。さらに、最近の地球温暖化対策として叫ばれているCO₂削減の要請とも合いまった電気自動車の実用化の動きや再生可能エネルギーの活用など、環境に対する人々や社会の関心の高まりにより、電気はクリーンなエネルギーとして、その重要性はますます大きくなっている。

一方で、電界や磁界が人の健康に影響を与えるかもしれないという議論がある。発端は1972年にCIGREで当時のソ連が発表した論文で、開閉所で働く作業員に疲労感、頭痛が見られるというものであった⁽¹⁾。1979年に米国でウェルトハイマー・リーパーが磁界と小児がんに関する疫学研究の結果を発表し、配電線近傍に住む子供に白血病の発生率が高いこと、1992年にはスウェーデンのカロリンスカ研究所のフェイチング・アールボムが磁界と小児白血病の関連性を示唆した⁽¹⁾。その後、世界各国の研究機関で研究が進められ、マスコミでもその内容が紹介されるようになり、社会の関心を集めるようになった。例えば米国では住民の反対により学校など公共施設近傍を通過する送電線などの電力設備の建設の遅延やルート変更を余儀なくされたケースもある⁽²⁾。

このように電磁界の健康影響に関する社会的関心は高くなっており、電気というエネルギー媒体の重要性とその多様性が今後一層増していくと思われる中、それに付随して発生する電磁界の実態を継続的に調査し、評価することは極めて重要である。しかしながら、商用周波数を主体とした低周波電界・磁界の定量化は十分に行われているとは言い難く、本研究では実態調査により定量化を行う。尚、本論文では磁界と磁束密度は同義語として取扱う。

1.2 これまでの電磁界の実態調査

日常生活において受ける電界・磁界の特性を把握することは、生体影響を検討する上でも極めて重要である。電界・磁界は自然界にも存在するが、電気を扱う全ての機器・設備からも発生する。

本研究で対象とする低周波数を考えると、発生源が特定できるものとして、家庭用電気機器、産業用機器、電力設備、電気鉄道などが挙げられる。一方、発生源は必ずしも特定できないが、居住環境など日常生活において人は電界・磁界を受ける。本節では、本研究で対象とする機器・設備などについて、従来の報告内容をまとめる。

1.2.1 家庭用電気機器の発生する電界・磁界

家庭用電気機器の使用電圧は一般に 100V あるいは 200V 程度と低いため、機器の発生する電界は問題とされることはほとんどなく、電界に関する報告は見当たらない。

一方、磁界は 50Hz あるいは 60Hz の商用周波成分が主体であるが、高性能化や省エネルギー化のための電子制御に伴う高調波成分を含む機器もある。電磁誘導加熱 (IH) 調理器では、数 kHz から数 10kHz の中間周波磁界を発生する機器もある。

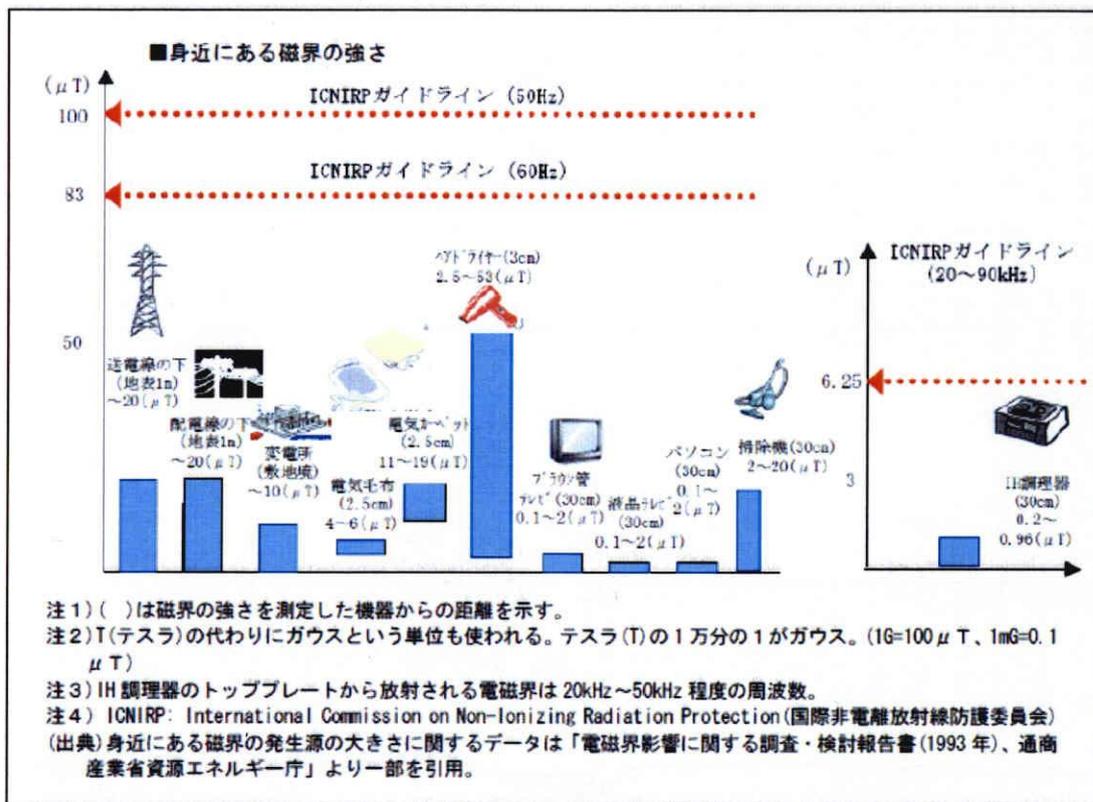
家庭用電気機器の発生する磁界の実態調査結果は散発的に報告されている⁽³⁾⁻⁽⁷⁾が、80年代半ばから90年代前半に報告されたものが多く、サンプル数も少ないようである。85年に報告された米国での調査結果⁽⁴⁾を抜粋して表1-1にまとめる。多くの機種を対象とした調査が行われおり貴重なデータではあるが、20年以上前のものである。近年では省エネルギー化や環境への配慮などにより機器の構造や材料の変更や改良が行われている。日本でも図1-1⁽⁸⁾や表1-2⁽⁹⁾に示すような報告がなされているが、限定された機器を対象にした少ない機種・サンプル数での測定が殆どのようなものである。このような状況に鑑み、最近の家庭用電気機器を対象にできる限り多くのサンプル数で調査を行う必要があると考えられる。

近年、機器をこれと等価な磁気モーメントに置き換え、磁界分布を求める方法も検討されている⁽¹⁰⁾。機器周辺の磁界が距離の3乗に反比例することが多いことに着目し、機器周辺の数点で磁界測定を実施して磁気モーメントの大きさと位置を推定し、他の場所における磁界を計算するものである。各種機器への適用と有効性の検討が行われている。家庭用電気機器周辺の磁界分布の実測には時間と労力が必要となるため、本手法が確立されれば家庭用電気機器の発生磁界の評価に有効な手段となると考えられる。

表 1-1 米国での電化製品が発生する磁界測定結果⁽⁴⁾

Table 1-1. Magnetic field measurements on household appliances in USA.

電化製品	磁界 [μT]	測定距離 [cm]
電気毛布	4~6	2.5
電気カーペット	11~19	3
テレビ	0.2~0.6	30
ヘアドライヤー	0.08~2.6	30



(図中の ICNIRP ガイドラインは 1998 年発行の文献⁽³⁴⁾による。)

図 1-1 身の周りにおける設備・電化製品からの磁界レベル⁽⁸⁾

Fig. 1-1. Magnetic field levels generated from electric equipments and household appliances.

表 1-2 家電製品における磁界レベルの測定結果例⁽⁹⁾

Table 1-2. An example of magnetic field measurement on household appliances.

家電製品名	測定距離[cm]	測定結果[μ T]
ブラウン 管テレビ	0 30	最大 69.6 最大 1.2
こたつ	0	最大 36.2
電気カーペット	3	最大 19
扇風機	0 50 (IEC 規格) 50	最大 339 最大 2.27 0.922
掃除機	0 30	最大 14 最大 0.546
電子レンジ	0 30 (IEC 規格) 30	最大 288 最大 15.7 3.97 * 電子レンジで使用される 2.45GHz のマイクロ波は含まれていない。
I H調理器	0 30 (IEC 規格) 30	最大 347 最大 11.3 1.3

1.2.2 電力設備の発生する電界・磁界

電力設備の発生する電界・磁界に関しては、測定を実施できる場所が極めて限られることや労力を伴うことから実態調査結果の報告は少なく、各種条件を想定して求めた計算結果の報告がなされている。例えば、送電線⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾や変電所^{(14), (15)}、その他電力設備周辺^{(16), (17)}の商用周波電磁界の計算結果が報告されている。さらに磁界の緩和方法についても、計算により検討が行われている⁽¹⁸⁾。

日本における実測結果の例⁽⁸⁾を、表 1-3 に示す。外国におけるフィールド調査の実施例も報告されている^{(19), (20)}。それぞれの国の中での測定であり、同一の研究者が複数の国で同一の測定器、同一の手順で変電所内や送電線下などで実態調査を実施した報告は、なされていないように思われる。しかしながら、このような系統的な実態調査は重要であり、測定値と国際あるいは国内の基準値との比較・評価も必要と考えられる。

表 1-3 電力設備周辺での磁界測定例⁽⁸⁾

Table 1-3. An example of magnetic field measurement around power facilities.

対象設備	測定地点	測定地点	最大値 [μ T]	測定日時	測定ポイント
架空 送電線	500kV	87	8.97	2004/ 9/ 1 11:28	地表 1.5m
	275kV	100	10.07	2004/ 7/28 14:24	
	220kV	6	0.79	2004/ 7/ 5 14:04	
	187kV	39	5.76	2005/ 8/23 14:56	
	154kV	59	7.47	2005/ 8/29 13:40	
	110kV	10	1.81	2004/ 7/13 9:56	
	77kV	64	3.27	2004/ 8/10 9:57	
	66kV	197	3.47	2004/ 9/ 2 9:45	
地中 送電線	275kV	5	2.72	2003/ 9/25 15:06	地表 0m
	154kV	11	3.89	2004/ 8/ 4 15:30	地表 0.5m
	77kV	16	13.4	2003/ 9/24 13:49	地表 0m
橋梁 添架	154kV	3	9.28	2003/ 9/17 12:00	地表 1m
	77kV	2	16.4	2004/ 9/10 10:08	地表 0.5m
架空 配電線	22kV, 6.6kV	11	1.13	2003/10/ 1 13:36	地表 1m
変電所	66/22kV, 66/6.6kV	13	3.99	2004/ 7/22 13:06	敷地境界、 地表 1m
路上 変圧器	-	63	124.4	2003/ 8/27 9:54	設備表面、 地表 0.5m
ケーブル立 ち上がり部	6.6kV	14	144.0	2003/ 8/27 16:14	ケーブル表面、 地表 1.5m

1.2.3 生活環境における電界・磁界

国内における生活および職業環境下の低周波磁界の体系的な実態調査は、国内外ともほとんど実施されておらず^{(1), (9), (21)}、十分な情報が得られているとは言えない状況にある。我が国において一般公衆の受ける商用周波磁界の規制値導入の検討が進められている⁽⁸⁾ことも考え合わせると、生活環境における低周波磁界の定量的評価は重要と考えられる。

送電線や配電線など屋外にある発生源からの電界は建物により遮蔽されるため、建物内の電界の発生源は屋内配線あるいは家庭用電気機器となる。いずれも 100V あるいは 200V と低電圧のため、一般的には電界は問題とならない。ま

た、建物内で低い電界を正確に測定することは困難を伴う。このようなことから、アメリカでの実測結果として、住居や事務所内の商用周波電界⁽⁵⁾は5~10V/m、子供部屋内では7.5±9.8V/mとの報告⁽²²⁾がなされている程度である。

居住環境における磁界の発生源は、主として屋内配線と家庭用電気製品である。しかしながら、建物には磁界遮蔽効果がないため、建物外にある発生源の影響を受けることもある。磁界は発生源の種類、発生源からの距離、時刻などに依存するため、測定値のばらつきは大きくなる。

アメリカの住居内の部屋の中央付近での磁界は0.092~0.115μT⁽²³⁾、測定値の95%は0.29μT以下⁽⁴⁾などの報告がある。台所の中央では50%値が0.07μT、寝室では0.05μT、全部屋の平均値は0.06μTとの報告⁽⁴⁾もある。部屋内の磁界の空間分布を測定した結果⁽²⁴⁾では、家庭用電気機器の有無や種類などにより相関係数に違いがあるものの、部屋の中央における磁界をその部屋の代表値としても支障はないことが示されている。日本における実測結果として、磁界の値が0.2μT以下となるのは、259家屋の居間の93.1%、254家屋の子供部屋の95.3%と報告されている⁽²⁵⁾。

職業環境における低周波磁界の調査結果も散見されるが、電力関連事業従事者を想定したものが多し。1989年から1992年にイギリスで実施された調査では、職種による違いよりも同じ職種内の個人差による違いの方が大きいことが示唆されている⁽²⁶⁾。アメリカのEMF RAPID計画では、多種の職業者に対する磁界のばく露調査が行われている⁽²⁷⁾。この調査から得られた男性被験者に対する50%値の例を表1-4に示す。日本で実施された40人のばく露量調査から得られた平均値として、睡眠時を除く在宅時0.0715μT、睡眠時0.0446μT、外出時0.1313μTが報告されている⁽¹⁾。

表 1-4. 各職種環境における磁界⁽²⁷⁾

Table 1-4. Magnetic fields measured under various working environments

職 種	算術平均値 [μT]	標準偏差 [μT]
電話線架線作業員	0.26	0.14
作家・著述業	0.25	0.28
情報処理機器修理者	0.25	0.18
組立工	0.25	0.41
薬剤師	0.25	0.03

1.2.4 低周波磁界の小生物への影響

工学的側面からの研究とともに、生物学・医学的側面からのアプローチもこの分野の研究として極めて重要である。生物実験が行われる背景としては、ヒトを対象とした実験は倫理的に実施困難であること、疫学研究では十分な症例数が得られないことが挙げられる。これまでも低周波磁界の小生物への影響に関する研究は数多くなされているが、依然として不明な点が多くマクロ的に有意な結果は得られていない⁽²⁸⁾。

本研究で対象としたショウジョウバエに関しては、例えば、図 1-2 に示すように磁界と遺伝子異常に関する実験例⁽³⁾があるが、実験で採用された磁界レベルは実際の生活環境で経験する値に比べてはるかに大きい。

ショウジョウバエに及ぼす低周波磁界の影響に関し、これまでに実施された研究例をまとめて表 1-5 に示す。実験に用いられた磁界レベルが比較的高いものが多く、日常生活環境や職業環境における磁界レベルを考慮した広い範囲での実験がさらに必要と考えられる。

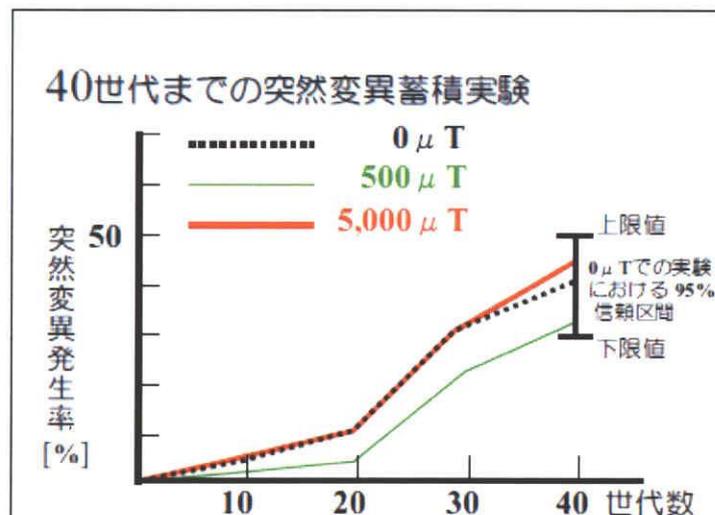


図 1-2 ショウジョウバエを用いた磁界と遺伝子異常の実験例⁽³⁾

Fig. 1-2. An experimental example of genetic toxicity on fruit flies under magnetic field.

表 1-5 これまでのショウジョウバエの磁界影響に関する論文まとめ⁽¹⁾

Table 1-5. Summary of papers with respect to effects of low frequency magnetic field on fruit flies

研究者	目的	対象	磁界強度とばく露特性	結果
Graham 2000 ⁽²⁹⁾	ショウジョウバエの成長に対する磁界曝露の影響	・ショウジョウバエ卵 ・表現形ずれ ・剛毛、翅脈	・60 Hz ・1.5, 80 μ T	磁界は成長に影響する。低磁界では一定の成長過程をとり、影響は見られない。
Kikuchi 1998 ⁽³⁰⁾	ショウジョウバエの多世代繁殖に対する磁界曝露の影響	ショウジョウバエ	・50 Hz ・0.5, 5 mT ・40世代	磁界曝露による劣性致死突然変異頻度、生存度には影響ない。
Koana 2001 ⁽³¹⁾	ショウジョウバエの変異原性に対する磁界曝露の影響	ショウジョウバエ	・50 Hz ・20 mT ・24 Hr	・曝露群で体細胞組替え、染色体末端欠失に由来する変異スポットが有意に増加。 ・誘導電流による変異スポット誘発を示唆。
Michel 1999 ⁽³²⁾	ショウジョウバエの発生に対する磁界曝露の影響	・ショウジョウバエ ・lacZレポータ遺伝子	・50 Hz ・100 μ T ・熱ストレス (34~37°C)	磁界と熱ストレスの相乗作用では奇形がみられ、また成長が遅くなる。

1.3 国内外の電磁界プロジェクトの動向

これまで、WHOをはじめ主要な国際機関や公的機関で電磁界の健康影響に関する総合的な調査や評価が行われている。表 1-6 に主な国際電磁界プロジェクトの動向のまとめを示す。1996年にWHOは国際電磁界プロジェクト⁽³³⁾を発足させ、ICNIRP（国際非電離放射線防護学会）は1998年に時間変動する電磁界ばく露制限ガイドラインを提案した⁽³⁴⁾。2010年に改訂が行われ、一部ガイドライン値が見直され⁽³⁵⁾た。表 1-7 に米国 IEEE でのスタンダードとともに現在のガイドライン値を示す。

ICNIRP ガイドラインでは短時間のばく露によって即時的な健康影響を起こすばく露量を見定め、さらに安全係数を考慮して参考値として決められたものである（図 1-3 参照）。ここでいう即時的健康影響とは

- 1) 抹消神経および筋肉の刺激
- 2) 導電性物体に触れることによって生じる感電及び熱傷
- 3) 電磁界ばく露中のエネルギー吸収の結果生じる生体組織温度の上昇等。

である。しかしながら長期間のばく露に関してはまだ科学的な結論が得られていないため、このガイドラインでは考慮されていない。

また、2001年に環境保健クライテリア EHC238⁽³⁶⁾で、IARCが表 1-8 で定義される超低周波磁界を「ヒトに対して発がんがあるかもしれない」と分類（表 1-9 参照）し、2007年にWHOはこれを追認している。即ち、EHC238での結論として、

- ・ 超低周波磁界の急性影響については国際ガイドライン（例えば ICNIRP ガイドライン）がありこれは確立している。
- ・ 慢性の健康影響では弱い超低周波磁界による小児白血病のリスク増加が疫学上関連ありとされるが、超低周波磁界が如何なるメカニズムで生体に影響するかは判っておらず疫学結果だけを根拠に制限値を設定することはできないとし、これについてなんらかの「念のための方策」precautionary measure を示唆するに止めている。

表 1-6 日本および国際電磁界プロジェクト動向に関する年表 ^{(28), (35), (37)}

Table 1-6. Chronology of activities on domestic and international projects in conjunction with electromagnetic field (EMF).

年	動向
1969	IARC (International Agency for Research on Cancer) 発足 (WHO の下部組織)
1976	日本、電気設備技術基準で 3 kV/m 以下の電界強度を規定化。
1977	国際非電離放射線委員会 (INIRC) 設置 (国際放射線保護学会 (IRPA) の下部組織)
1992	INIRC は IRPA から独立し ICNIRP (国際非電離放射線防護委員会) となる。
1996	WHO、国際電磁界プロジェクトの発足
1998	ICNIRP、電磁界ばく露制限ガイドライン提案
2001	IARC のよる発がん性評価 (935 種) で、超低周波磁界がグループ 2B (発がん性あるかもしれない), 静磁界、静電界、超低周波電界がグループ 3 (発がん性を分類できない) と評価された。(詳細は 2002 年に IARC のモノグラフ第 80 巻として刊行)
2005	IEC 62233 (電子、電気機器より発生した電磁界に対する人体ばく露に関する測定および計算方法に関する標準規格) 制定
2007	EHC238 (環境保健クライテリア: Environmental Health Criteria) 発刊。WHO No. 322 (Fact Sheet) の発表。WHO は IARC が超低周波磁界を「ヒトに対して発がんがあるかもしれない」と分類したが、これを追認。
2008	原子力安全・保安部会 電力安全小委員会電力設備電磁界対策ワーキンググループ (報告書) →日本における一般公衆対象の磁界規制値の導入の提言
2009	IEC62110 (交流電力システムから発生する電界および磁界レベル - 人体ばく露を考慮した測定手順) 制定。電力設備の発生する電界・磁界の測定手順に関する規格を日本から提案し、日本が主導的立場で制定。 ICNIRP、静磁界に関するガイドラインを発行。
2010	ICNIRP、1Hz-100kHz の電磁界ばく露制限ガイドライン値の一部見直し。

さらに、「念のための方策」のひとつとして、政府および産業界は、超低周波磁界ばく露の健康に関する科学的根拠における不確実性を減らすための研究プログラムを推進すべきであると勧告している。

このような状況において、表 1-10 に示すように、ドイツ、フランスなど幾つかの国においては ICNIRP 参考レベルに基づいた低周波磁界の規制値が既に導入されている。その他、多くの国でも規制値導入に向けて検討中である。日本では、表 1-5 にあるように、電界に関しては世界に先駆けて 1976 年に規制値として 3 kV/m を制定している。磁界については、2008 年に原子力安全・保安部会 電力安全小委員会電力設備電磁界対策ワーキンググループから、一般公衆対象の磁界規制値の導入が提言されている⁽²¹⁾。

表 1-7 電界および磁界への公衆ばく露に関する ICNIRP ガイドラインと IEEE スタンドアード^{(34), (35)}

Table 1-7. ICNIRP Guideline and IEEE standard on limits of exposure to electric and magnetic fields.

周波数	一般公衆の電界の制限値[kV/m]		一般公衆の磁界の制限値[μT]	
	ICNIRP ガイドライン	IEEE スタンドアード	ICNIRP ガイドライン	IEEE スタンドアード
50Hz	5 (10)	—	200 (1000)	—
60Hz	4.2 (8.3)	5 (20)	200 (1000)	904 (2710)

注： () 内は職業者の場合

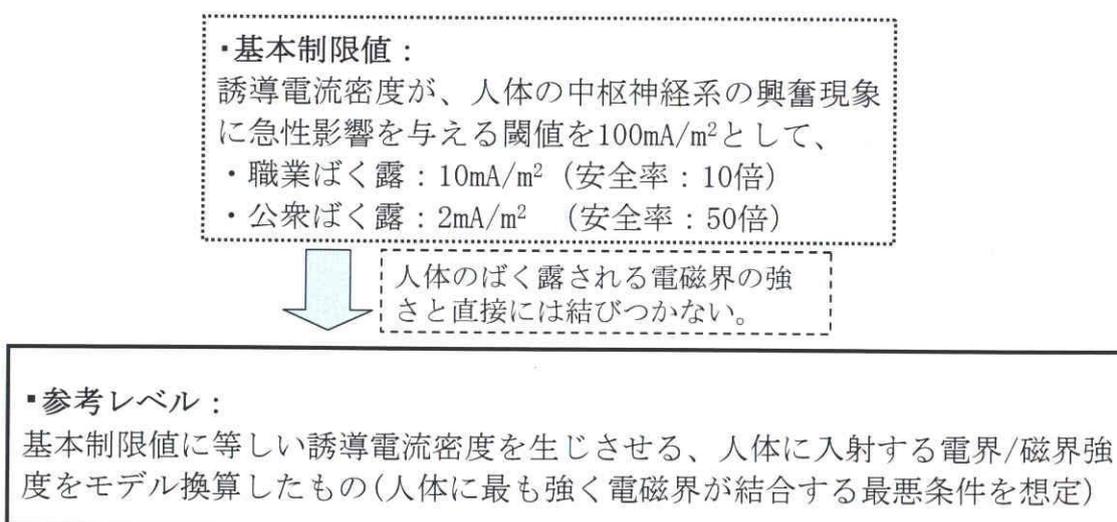


図 1-3 1998 年発行の ICNIRP 参考レベルの考え方⁽³⁴⁾

Fig. 1-3. Concept of ICNIRP reference level.

表 1-8 対象電磁界の定義⁽³³⁾

Table 1-8. Definition of EMF.

種類	用語または英略語	周波数, Hz
静電磁界	定常、直流	0
超低周波電磁界	ELF (Extremely low frequency)	>0-300
中間周波電磁界	IF (Intermediate frequency)	>300-10M
無線周波電磁界	RF (Radio frequency)	>10M-300G

表 1-9 IARC による発がん性に関する分類と分類基準⁽³⁸⁾

Table 1-9. Category of carcinogenic risk.

分類および分類基準		既存分類結果例
グループ 1 : 発がん性ある	ヒトへの発がん性を示す十分な証拠がある場合	カドミウム、ダイオキシン、たばこ、X線など
グループ 2A : おそらく発がん性ある	ヒトへの発がん性を示す証拠は限定的であるが、動物実験での発がん性に対して十分な証拠がある場合	PCB、ホルムアルデヒド、ディーゼルエンジン排ガス、紫外線など、
グループ 2B : 発がん性あるかもしれない	ヒトへの発がん性を示す証拠は限定的であるが、動物実験での発がん性に対して十分な証拠がない場合	クロロホルム、鉛、コーヒー、ガソリン、ガソリンエンジン排ガス、 <u>超低周波電磁界</u> など
グループ 3 : 発がん性を分類できない	ヒトへの発がん性を示す証拠は不十分であり、動物実験での発がん性に対しても十分な証拠がない場合	カフェイン、原油、水銀、お茶、静磁界、静電界、超低周波電界など
グループ 4 : おそらく発がん性はない	ヒトへの発がん性がないことを示唆する証拠がある	カプロラクタム (ナイロンの原料)

表 1-10 国内外の一般公衆に対する低周波磁界に関する規制・ガイドライン⁽²⁸⁾、⁽³⁵⁾

Fig. 1-10. Status of guideline or restriction of ELF level to environment in several countries.

		制定年	電界		磁界	
			kV/m	区分	μT	区分
国際 レベル	ICNIRP (参考)	1998	5.0 (50Hz)	ガイドライン	100 (50Hz)	ガイドライン
			4.2 (60Hz)		83 (60Hz)	
	ICNIRP	2010	5.0 (50Hz)	ガイドライン	200 (50Hz)	ガイドライン
			4.2 (60Hz)		200 (60Hz)	
国 レベル	日本	1976	3	規制	—	—
	ドイツ	1997	5	規制	100	規制
	イタリア	2003	5	規制	100	規制
	スイス	2000	5	規制	100	規制
	オーストリア	1994	5	ガイドライン	100	ガイドライン
	フランス	2001	5	規制	100	規制
	スウェーデン	2002	5	勧告	100	勧告
	英国	2004	5	ガイドライン	100	ガイドライン

注：米国には国レベルの規制はなく、州レベルで規制を設けているケースがある。

1.4 本研究の目的と内容

1.2節でも述べたように、これまでも低周波電界・磁界に関する各種実態調査は実施されているが、さらに次に挙げる調査・研究が必要と考えられる。

- 1) 生活環境において特定できる発生源からの低周波磁界の定量化
- 2) 生活環境において発生源が特定できない磁界も含めた人が受ける磁界の定量化およびばく露量の検討
- 3) 同一の測定器・手順に基づく系統的な電力設備周辺の電界・磁界の同一研究グループによる実態調査
- 4) 日常生活環境や職業環境における磁界レベルを考慮した生物実験

本論文は、これら課題認識を踏まえて実施した実態調査および実験ならびに考察により得られた結果をまとめたものである。本論文の構成と各章の概要は、以下の通りである。

第1章では、序論として、低周波電磁界に対する実態調査における現状と健康影響に関する国内外の動向を概説し、課題認識を整理し、本研究の意義と目

的について述べる。

第 2 章では、生活環境における磁界発生源として特定のできる家庭用電気機器を対象として、実態調査および解析を行った結果について述べる。90 年代前半から 00 年代半ばまでに製造されたブラウン管型テレビ、デスクトップ型パソコンなど 11 種類、合計 200 台以上と、これまでの報告に比べてはるかに多くのサンプル数を確保し、発生磁界の距離依存性、磁界と消費電力との関係を明確にし、さらに機器の負荷電流の高調波成分の測定結果について述べる。

第 3 章では、日常生活において人が不特定の発生源から受ける低周波磁界の定量化を行う。学生、電気保守工事従事者、医師など職業の異なる計 64 人の被験者に磁界測定器を装着してもらい、一日に受ける低周波磁界の時間変化を記録することにより職業による差異を検討する。また、得られたデータと行動記録とを照合し、家庭内、事務所内、自動車内などの行動場所における磁界の特徴を抽出する。さらに、磁界とその磁界を受ける時間との積の積分値であるばく露量を推定するモデルについて、実測結果と比較しつつ検討する。

第 4 章では、低周波電界・磁界発生源として電力設備を対象として、電界および磁界の定量化を行う。電力設備近傍の実態調査結果はこれまでも報告が散見されるが、それぞれひとつの国だけで測定が実施されている。また、測定器や測定手順が統一されておらず、結果の比較は必ずしも容易ではない。同一測定器を使用して同一手順で同一グループが複数の国の電力設備近傍で測定を行うことが極めて重要であるとの観点から、本研究では、7ヶ国、計 23ヶ所の公称電圧 110kV から 500kV の変電所内および送電線下で実態調査を実施した。その結果について述べる。送電線下の電界および磁界については、計算値と実測値との比較検討も行う。

第 5 章では、低周波磁界がショウジョウバエに及ぼす影響を調査した結果について述べる。生物学・医学的観点からのアプローチは、第 2 章から第 4 章に述べた工学的観点からの研究とともに重要である。一般に生物を用いる実験は、工学者には技術的あるいは専門的観点から難しく実施に制約が伴うことが多いため、医学専門家のご指導の下でショウジョウバエを飼育・繁殖させ、忌避行動、寿命、突然変異に関する実験を実施した。これまでの報告では比較的高い磁界のショウジョウバエへの影響が検討されており、使用されている磁界レベルの幅が狭い。日常生活環境や職業環境における磁界レベルを考慮した広い範囲での実験が必要と考えられるため、前章までの実態調査で得られた結果に基づいて決定した 5 つの磁界レベルで実験を行った結果について、統計的観点から考察を行う。

第 6 章では、本論文の結論として、本研究で得られた知見と今後の課題をまとめらる。

1.5 結言

本章では、低周波電磁界に対する実態調査における現状と健康影響に関する国内外の動向を概説し、課題認識を整理して本研究の意義と目的を明確にした。次章以降で成果を詳細に述べる。

第1章 参考文献

- (1) 電磁界生体影響問題調査特別委員会、第Ⅱ期報告書：「電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題」、電気学会，2003.
- (2) 丸山真弘：「米国における電磁界に関する訴訟動向の整理」、電力中央研究所研究報告書 No. Y97022, 1997.
- (3) J. R. Gauger: “Household appliance magnetic field survey”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, pp.2436-2444, 1985.
- (4) National Research Council: “Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields”, National Academy Press, 1996.
- (5) 富田誠悦、竹下和磨、須田和孝：「家庭内電気製品からの磁界強度とその周波数分布」、電力中央研究所研究報告 T90054, 1991.
- (6) 電磁界影響調査検討会：「電磁界影響に関する調査・検討報告書」, 1993
- (7) 技術関連委員会、家電製品から発せられる電磁波検討ワーキンググループ：「平成19年度 家電製品から発せられる電磁波（10Hz～400kHz）測定調査報告」、財団法人 家電製品協会、2007.
- (8) 原子力安全・保安部会 電力安全小委員会：「電力設備電磁界対策ワーキンググループ（報告書）、経産省資料、2008年6月.
- (9) 環境省調査業務報告書：「平成16年度生活環境中電磁界に係わる調査業務報告書」、独立行政法人国立環境研究所、2005.
- (10) K. Yamazaki and T. Kawamoto: “Simple estimation of equivalent magnetic dipole moment to characterize ELF magnetic fields by electric appliances incorporating harmonics”, IEEE. Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol.43, pp.240-245, 2001.
- (11) K. Isaka, N. Hayashi, Y. Yokoi and M. Okamoto: “Characteristics of ground-level electric and magnetic fields generated by ac power transmission lines”, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol. 2, pp.511-514, 1989.
- (12) E. Tzinevrakis, D. K. Tsanakas and E. I. Mimos: “Analytical calculation of the electric field produced by single-circuit power lines”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 23, No. 3, pp.1495-1505, 2009.
- (13) G. Mazzani: “The role played by current phase shift on magnetic field established by ac double-circuit overhead transmission lines - Part I: Static analysis”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.32, No.2, pp.939-948, 2006.

- (14) N. Hayashi, K. Isaka, H. Kume and Y. Yokoi: "Power frequency magnetic field in a 187/66-kV electric power substation", International Symposium on Electromagnetic Compatibility, vol. 2, pp. 505-510, 1989.
- (15) 後藤直樹、宇賀雄次、加藤克巳、清水雅仁、吉田篤哉、大久保仁: 「電力線電流条件に基づいた 77kV 変電所構内磁界環境の定量化に関する検討」、電気学会論文誌 B, 121 巻, 7 号, pp. 874-880, 2001.
- (16) Qingmin Li and Joseph D. Yan: "Computational Investigation of the magnetic-field distribution in a 145-kV/40-kA rotary-arc circuit breaker", IEEE. Trans. on Power delivery, Vol. 21, No. 1, pp. 135-141, 2006.
- (17) B. W. Jaekel: "General description and assessment concept for magnetic field distributions caused by switchgear installation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp. 167-177, 2007.
- (18) J. A. Brandao and M.E. Almeida: "Accurate calculation of magnetic-field intensity due to overhead power lines with or without mitigation loops with or without capacitor compensation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 2, pp. 951-959, 2007.
- (19) Magne, F. Audran, E. Mayaudon, D. Clement, F. Deschamps: "50 Hz electric and magnetic field measurements in high voltage substations", International Colloquium Power Frequency Electromagnetic Fields ELF EMF, Sarajevo 2009, Paper 20, 2009.
- (20) D. Clement, F. Deschamps, I. Magne, M. Burceanu: "Inter-laboratory 50 Hz EMF measurement", BioEM 2009, P-194, 2009.
- (21) 富田誠悦、高須和彦、竹下和磨: 「交流磁界暴露実態と磁界暴露モデル」、電力中央研究所研究報告書 No. T91090, 1992.
- (22) S. J. London et al.: "Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia", American Journal of Epidemiology, Vol. 134, pp. 923-937, 1991.
- (23) M. Silva, N. Hummon, D. Rutter and C. Hopper: "Power frequency magnetic fields in the home", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, pp. 465-478, 1989.
- (24) D. C. Renew, J. C. Male and B. J. Maddock: "Power-frequency magnetic fields: Measurement and exposure assessment", CIGRE, pp. 36-105, 1990.
- (25) 兜: 「我が国における電磁界と小児がんの疫学研究(1999-2001)」、第 3 回電磁界の健康影響に関するワークショップ、pp. 50-53, 2001.
- (26) D. P. Loomis et al.: "Organization and classification of work history

- data in industry-wide studies, An application to the electric power industry”, American Journal Industrial Medicine, Vol. 26, p. 418, 1994.
- (27) NIEHS Working group report: “Assessment of health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields”, pp. 61-72, 1998.
- (28) 電磁界 (EMF) に関する調査研究委員会 : 「超低周波電磁界の健康影響-WHO 環境保健クライテリアの意味するもの-」、財団法人 大阪科学技術センター、2009年1月。
- (29) Graham C. and M. R. Cook, et al. : ”Multi-night exposure to 60Hz magnetic fields: effects on melatonin and its enzymatic metabolite”. J Pineal Res 28, pp.1-8, 2000a.
- (30) Kikuchi T. and M. Ogawa, et al. : ”Multigeneration exposure test of Drosophila melanogaster to ELF magnetic fields”. Bioelectromagnetics 19, pp. 335-340, 1998.
- (31) Koana T and O. Okada, et al. : ”Involvement of eddy currents in the mutagenicity of ELF magnetic fields”. Mutat Res 476, pp. 55-62, 2001.
- (32) Michel A. and H. O. Gutzeit: ”Electromagnetic fields on combination with elevated temperatures affect embryogenesis of Drosophila. Biochemical & Biophysical Research Communications. 265, pp. 73-78, 1999.
- (33) <http://www.who.int/peh-emf/en/>
- (34) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, Health Physics, Vol. 74, pp. 494-522 , 1998.
- (35) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 Hz)”, Health Physics, Vol. 99, No. 6, pp. 818-836, 2010.
- (36) World Health Organization (WHO), Environmental Health Criteria, Vol. 238: “Extremely low frequency fields.” Geneva, 2007.
- (37) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: “Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields”, Health Physics, Vol. 96, No. 4, pp. 504-514 , 2009.
- (38) International Agency for Research on Cancer, Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. IARC monograph on

the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol.80. Lyon,
International Agency for Research on Cancer, 2002.

第2章 家庭用電気機器の発生する低周波磁界の定量的評価

2.1 緒言

第1章でも述べたように、近年、低周波磁界の生体影響に対する社会的関心が高まっている。ICNIRP（国際非電離放射線防護委員会）は、時間変動する磁界に対する基本制限と参考レベルを示しており⁽¹⁾、ドイツ、フランスなど幾つかの国においては参考レベルにもとづいた商用周波磁界の規制値が既に導入されている⁽²⁾。日本をはじめ多くの国でも規制値導入に向けて検討が進められている⁽²⁾。このような基準を設定する際には、疫学調査や生物研究の結果は重要な情報を与えるが、生活環境において人が受ける磁界の大きさやその時間積分値を定量的に把握することも重要と考えられる。

生活環境には種々の磁界発生源があるが、一般家庭に広く普及している電気機器を無視することはできない。家庭用電気機器の発生する磁界の実態調査結果は散発的に報告されている⁽³⁾⁻⁽⁶⁾が、80年代半ばから90年代前半に報告されたものが多く、また、限定された機器を対象にしてサンプル数が少ないものが殆どであるように思われる。

家庭用電気機器の発生する磁界の測定法に関しては、IEC 62233 が2005年に制定されており⁽⁷⁾、人体へのばく露を考慮した評価法を規定している。本章では、人体へのばく露ではなく家庭用電気機器の発生する磁界の特徴を把握することを目的として、できる限り多くの家庭用電気機器の種類・機種を対象とし、それらの発生する合成磁界の距離依存性を測定し、磁界と消費電力との関係を調べた。さらに、機器に流れる負荷電流の周波数成分解析を行った。尚、ここでは商用周波を含む800Hz以下の低周波磁界を対象としており、電磁調理器など明らかに中間周波数を発生する機器は測定対象から除外した。

2.2 合成磁界の測定および評価

2.2.1 測定方法

測定対象の家庭用電気機器は、90年代前半から00年代半ばまでに製造されたブラウン管式テレビ、デスクトップ型パソコンなど11種類、合計200台以上の日常生活で使用する機器とした。機器の定格電圧は、いずれもAC100Vである。

それぞれの機器で、製造者や消費電力等が異なる多機種を選定した。各機器のサンプル数、最大消費電力、測定位置をまとめて表 2-1 に示す。例えばドライヤーの温風・冷風、強・弱のように、機器の動作モードが複数ある場合には消費電力は動作モードに依存するが、表には機器銘板に示されている最大消費電力を示した。

テレビなど据置きタイプの機器は壁際に設置されるため、その正面中央を測定位置とした。一方、ドライヤーなどハンディまたはポータブルタイプの機器については、電熱線やモータ部近傍など機器表面付近で磁界が最大となる点を測定位置として選んだ。

表 2-1 測定対象の家庭用電気機器

Table 2-1. Household appliances for magnetic field measurement.

家庭用電気機器	試料数	消費電力 * [W]	測定位置	
据置き型	テレビ	41	45~200	画面中央
	PC	15	33~204	画面中央
	トースター	24	475~1000	正面
	電気ポット	16	395~1000	正面
	電気扇風機	31	38~55	ファン正面およびモーター付近
	冷蔵庫	15	101~300	正面
	洗濯機	7	140~455	正面
	卓上ランプ	32	15~60	ランプ部付近
携帯型	電気カミリ	10	3~6	カミリ部付近
	ヘアドライヤー	27	700~1200	ニコム線付近
	電気掃除機	13	500~1000	モーター付近

注) *: 定格電圧: AC 100 V

磁界の測定には、IEEE 基準⁽⁸⁾に準拠した EMDEX II (Eneritech Consultants 製) を使用した。図 2-1 および 2-2 にそれぞれ測定器の外観写真とブロック図を示す。40Hz あるいは 100Hz 以下および 800Hz 以上の成分を減衰させることにより 40~800Hz の広域周波数帯の合成磁界 (R_p) および 100~800Hz の高周波数帯の合成磁界 (R_h) を測定し、商用周波数帯を含む合成磁界を求めることができる。本測定器は 3 軸磁界計であり、それぞれ x, y, z, 軸方向の成分を同時測定し、式 (2-1) により合成磁界 B_R を求めている。尚、各センサコイルの位置はそれぞれ 3~4cm 離れている。

$$B_R = ([B_x^2 + B_y^2 + B_z^2])^{1/2} \dots\dots\dots (2-1)$$

ここで、 B_x , B_y , B_z は磁界の x, y, z 方向成分である。

測定対象の電気機器以外の磁界発生源の影響を極力除外するため、対象以外の電気機器の電源は照明を含めて切り、屋内配線から離れた場所において測定を実施した。全ての電気機器の電源を切った状態で測定した磁界は R_b , R_h ともに $0.01\mu\text{T}$ 未満であり、バックグラウンドノイズはこのレベルと考えられる。



図 2-1 EMDEX II の外観

Fig. 2-1. Overview photo of EMDEX II.

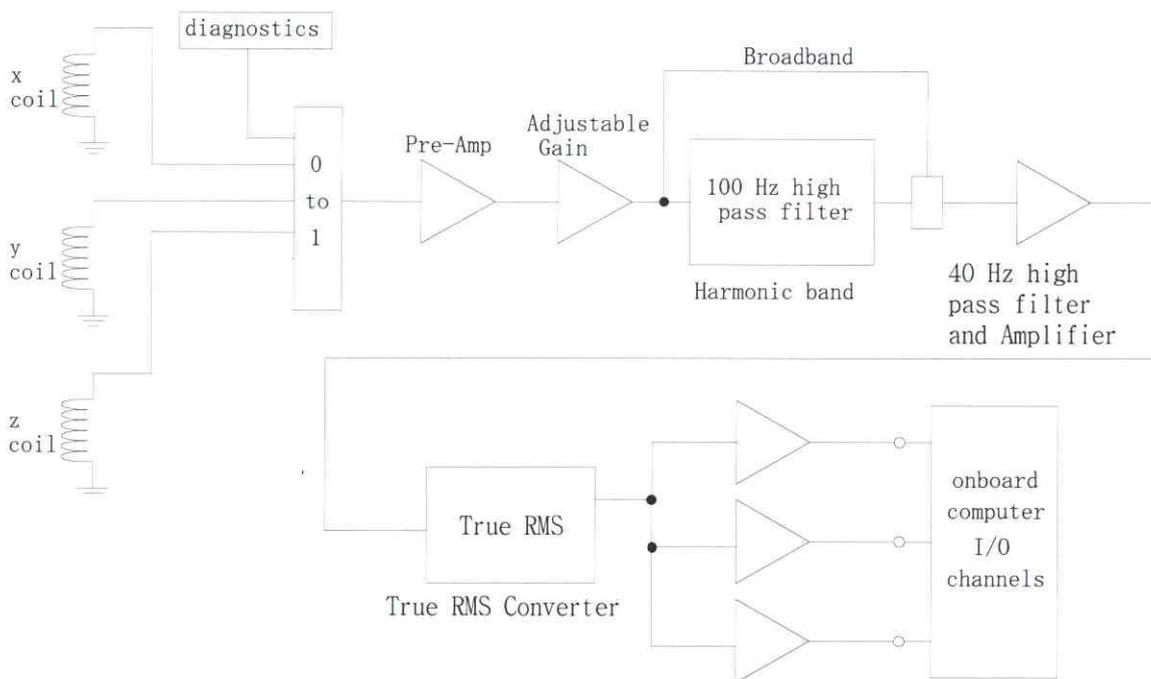


図 2-2 EMDEX II のブロック図

Fig. 2-2. Block diagram of EMDEX II.

2.2.2 測定結果および検討

日常的に最も頻繁に使用されると考えられる据置き型機器の一つであるブラウン管型テレビの発生する磁界の距離依存性の代表例を図 2-3(a), (b)に示す。ここで、(a), (b)はそれぞれ 40~800Hz の広域周波数帯の合成磁界(R_b)および 100~800Hz の高周波数帯の合成磁界(R_h)を示す(以下同様)。画面近くの磁界は、機種によりばらつきが大きく最大 4 倍程度の違いがある。機種により内部構造が異なるためと推定される。しかしながら、画面から離れるにつれて磁界は急激に減衰して機種間の差が小さくなる。磁界が距離の $-n$ 乗に比例すると仮定した場合の n の値は、0.5~0.8 である。30cm 離れた点における磁界は $1\mu\text{T}$ 以下、より使用環境下に近い 60cm 離れた点ではその 1/3 以下となる。

ヘアドライヤ(温風時)、掃除機、扇風機などは、機器近傍で比較的大きな磁界を示す。ここでは、一般に至近距離で使用されるヘアドライヤ(温風時)の発生する磁界の距離依存性の代表例を図 2-4(a), (b)に示す。機器表面付近では他の家庭用電気機器に比べると比較的大きいが、距離に対する磁界の減衰を表す n の値は 1.3~2.0 であり他の機器と同様に距離が離れると磁界は急激に減衰する。また、図 2-5~2-9 にそれぞれ扇風機(モーター付近、回転部正面)、トースター、ポット(保温時、沸騰時)の発生する磁界の距離依存性の代表例を示す。表 2-2 に距離に対する磁界の減衰を表す n の値をまとめる。

図 2-10 にブラウン管型テレビ画面から 3cm の点における 40~800Hz の広域周波数帯の R_b 磁界と消費電力との関係を示す。テレビやパソコンのディスプレイは、一般に、画面サイズが大きくなるほど消費電力は大きくなる傾向にあるが、発生する磁界と消費電力の間には明確な相関が認められない。温風時のヘアドライヤにおいても、図 2-11 に示すように 3cm の点における R_b 磁界と消費電力との明確な相関はない。今回の測定対象の家庭用電気機器においてはトースターのみ、図 2-12 に示すように発生する磁界と消費電力との間に相関係数 0.6 の相関が認められた。機器の構造が簡単であり機種における構造の違いも少なく、消費電力(電流)の増加が磁界の増加として検出されたためと考えられる。扇風機(モーター付近、回転部正面)、ポット(保温時、沸騰時)の 3cm の点における R_b 磁界と消費電力との関係をそれぞれ図 2-13~2-16 に示す。

各家庭用電気機器の測定結果を、40~800Hz の広域周波数帯の合成磁界(R_b)および 100~800Hz の高周波数帯の合成磁界(R_h)ごとにそれぞれ表 2-3 および表 2-4 にまとめて示す。扇風機のモータ部など至近距離では比較的大きな磁界を発生する機器もあるが、機器から離れるに従って磁界は急激に減少する。60cm 離れた点では $0.1\mu\text{T}$ 程度以下となる機器がほとんどを占める。ポットや炊飯器などでは沸騰、炊飯時など通電電流が大きいときに大きな磁界が発生しているが、

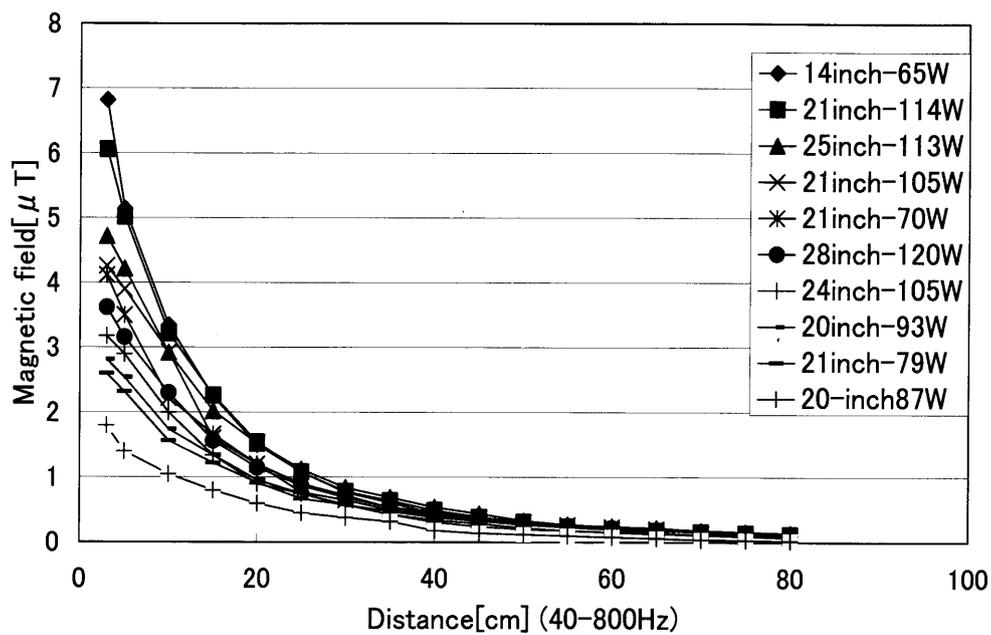
保温時には発生磁界は非常に小さくなり、使用状態によって発生磁界が大きく変動する。同種の機器でも発生する磁界にばらつきがあるが、電流のみならず導体の設置場所（機器容器からの距離）、コイルの巻数、シールドの有無などの機器の構造の違いに依るものと推定される。

表 2-3 および表 2-4 の結果から、磁界の低周波成分 (R_f) を計算する。使用した磁界測定器の取扱説明書によれば、 R_f は式 (2-2) で与えられる。

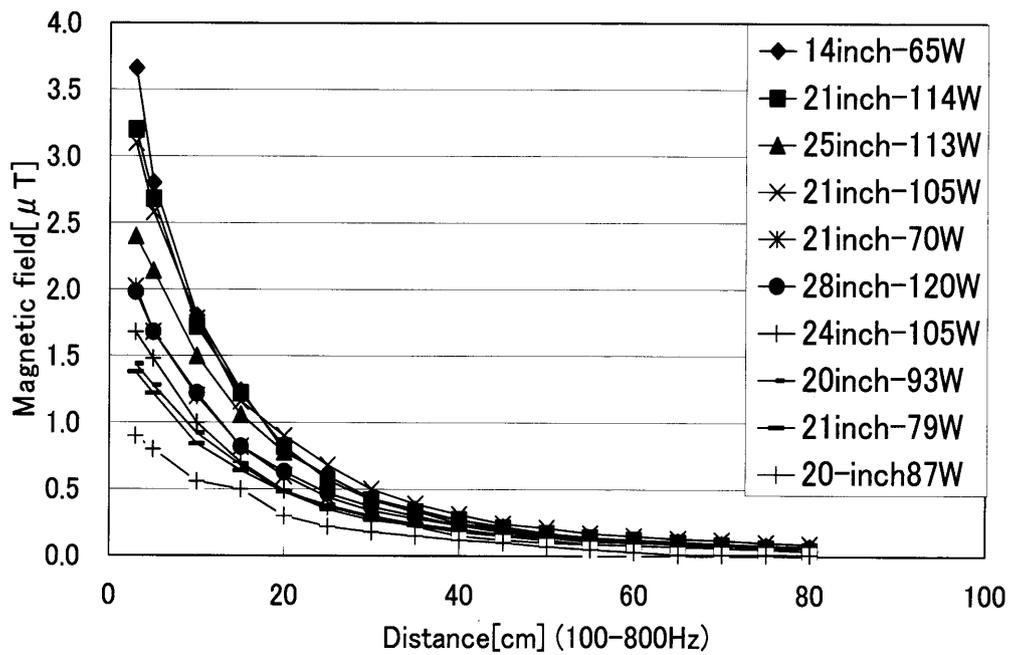
$$R_f = (R_b^2 - R_h^2)^{1/2} \dots\dots\dots (2-2)$$

R_b および R_h として、各機器から 3cm 離れた点における平均値を使用して求めた R_f を表 2-5 に示す。ヘアドライヤ、トースター、電気ポット、扇風機などは低周波成分がほとんどである。ヘアドライヤ、トースターおよび電気ポットではニクロム線付近の磁界を測定しているため低周波成分が主体となると考えられるが、扇風機のモータ近傍で測定した磁界の低周波成分が多い理由ははっきりしない。他の機器では高調波成分が多く含まれることがわかる。

家庭用電気機器の発生する磁界に関する報告は散見されるが、米国の測定結果⁽³⁾ は多くの種類の機器を対象としている。本論文で測定対象とした機器について、1985 年に発表された米国のデータを表 2-6 に示し、今回の測定結果と比較する。米国のデータは、特製サーチコイルにより測定された 60Hz の磁界である。測定対象の機器の構造や動作状態、測定場所などが不明であり、単純な比較はできないが、今回得られた測定値の方が低い。一方、日本の報告例⁽⁶⁾ では、合致する測定対象機器の種類が少ないが、機器から 3cm 離れた点での商用周波磁界はブラウン管テレビで 1.5~5.4 μ T、ヘアドライヤで 2.5~5.3 μ T となっている。今回の測定結果と比較すると、テレビは同程度、ヘアドライヤ（温風時）は 1/5 程度の値である。これら報告値との違いは、機器の構造や定格電流に依るところが大きいと考えられる。



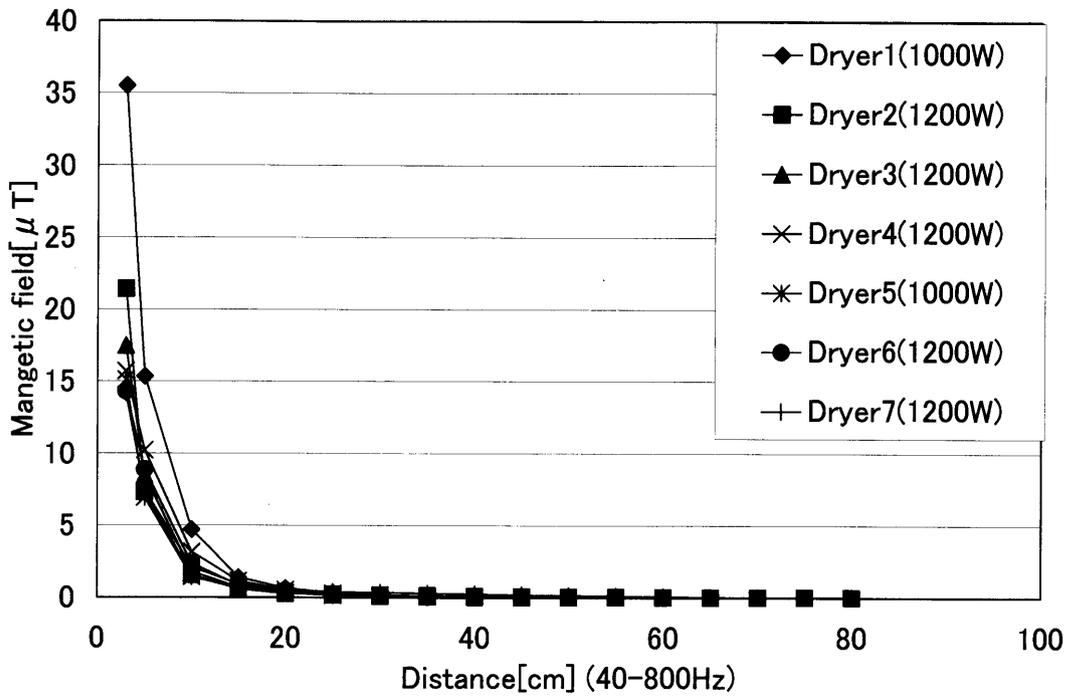
(a) 40-800Hz broadband range magnetic field, R_b .



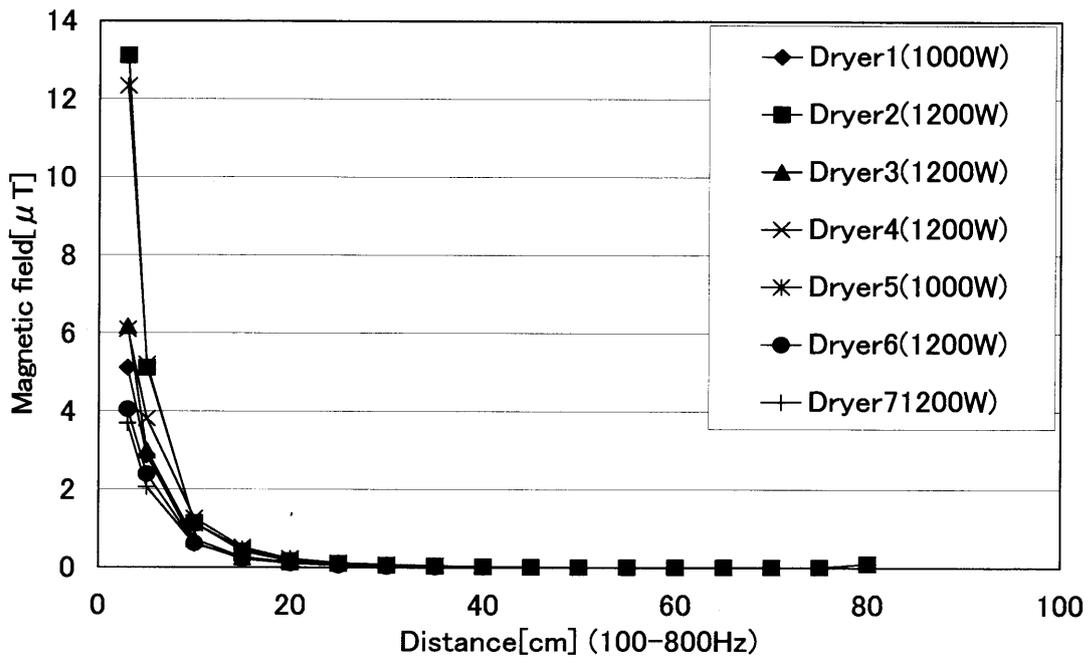
(b) 100-800Hz harmonic range magnetic field, R_h .

図 2-3 ブラウン管型テレビの発生する磁界の距離依存性

Fig. 2-3. Magnetic field generated by tube type TV sets as a function of distance from them.



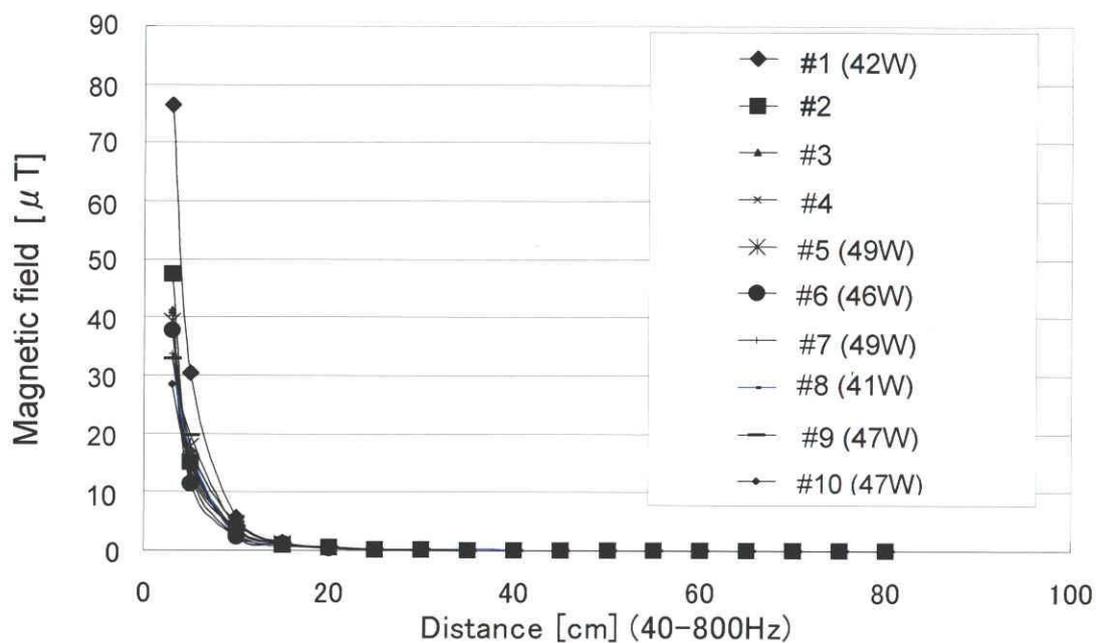
(a) 40~800Hz broadband range magnetic field, R_b .



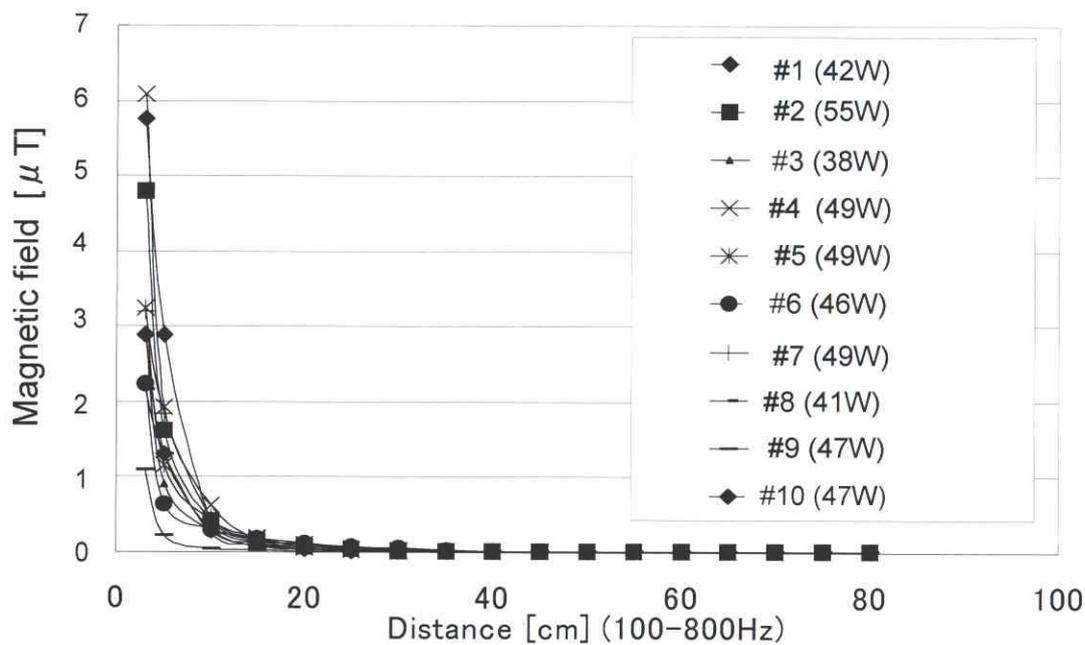
(b) 100~800Hz harmonic range magnetic field, R_h .

図 2-4 ヘアドライヤ (温風時) の発生する磁界の距離依存性

Fig. 2-4. Magnetic field generated by hair dryers (warm mode) as a function of distance from them.



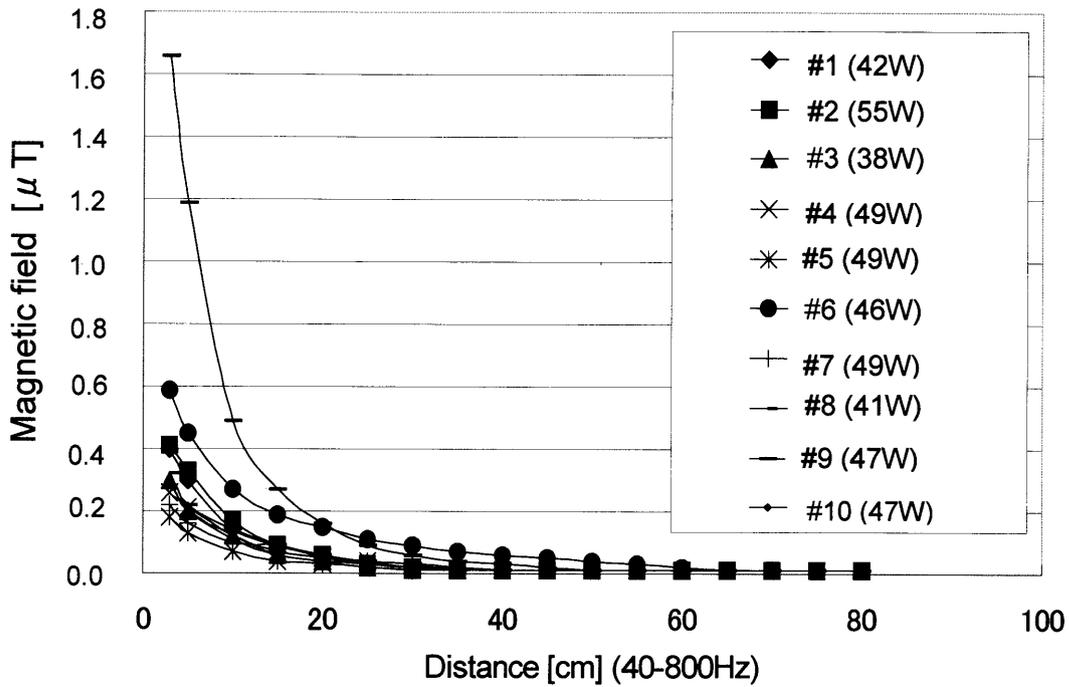
(a) 40~800Hz broadband range magnetic field, R_b .



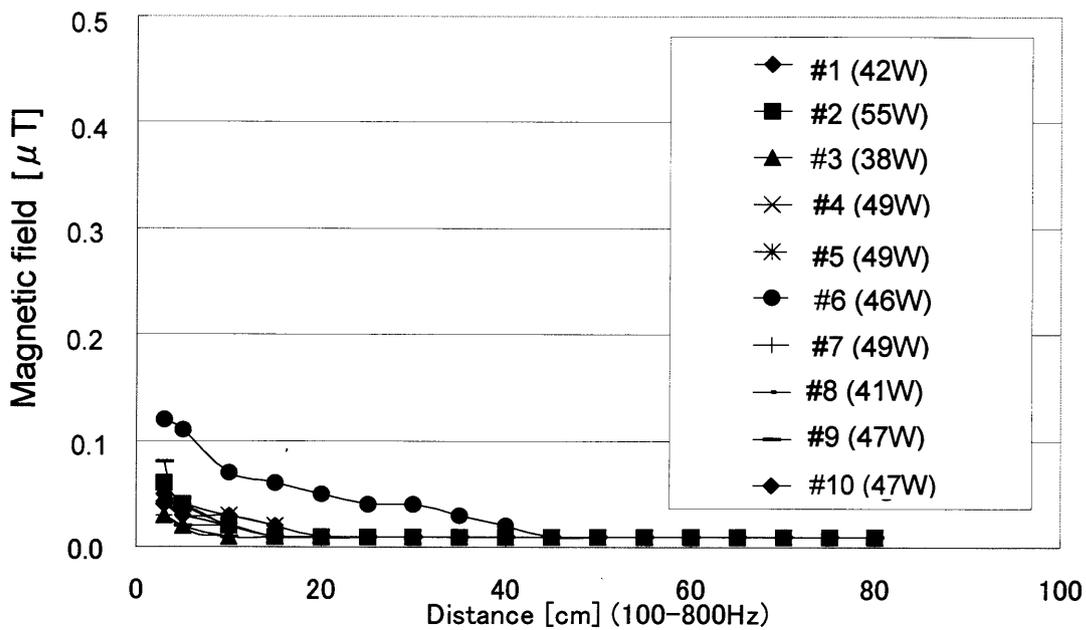
(b) 100~800Hz harmonic range magnetic field, R_h .

図 2-5 扇風機(モーター付近)の発生する磁界の距離依存性

Fig. 2-5. Magnetic field generated by electric fans (close to motor) as a function of distance from them.



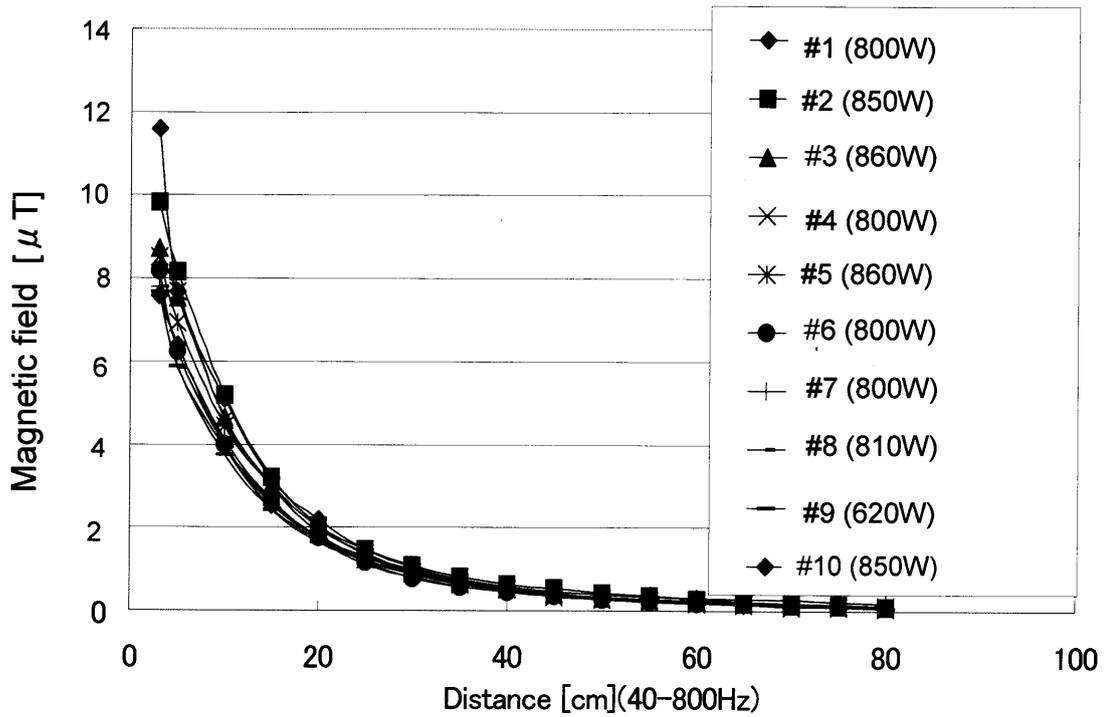
(a) 40~800Hz broadband range magnetic field, R_b .



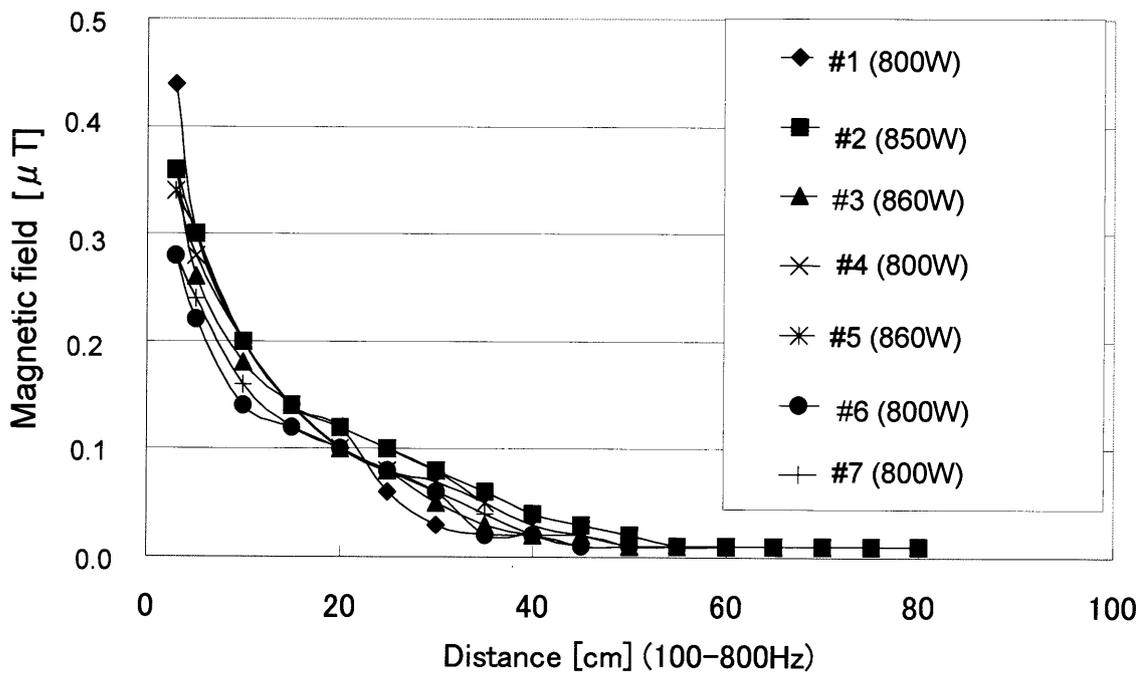
(b) 100~800Hz harmonic range magnetic field, R_h .

図 2-6 扇風機(回転部正面)の発生する磁界の距離依存性

Fig. 2-6. Magnetic field generated by electric fans (in front of fan) as a function of distance from them.



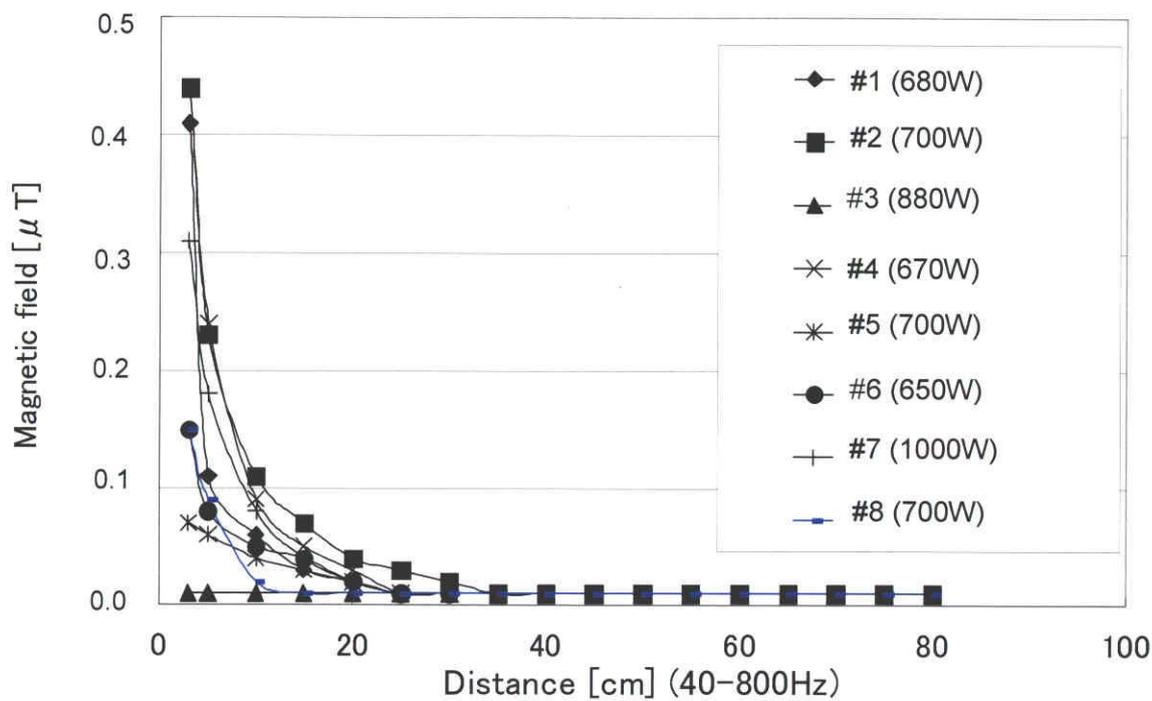
(a) 40~800Hz broadband range magnetic field, R_b .



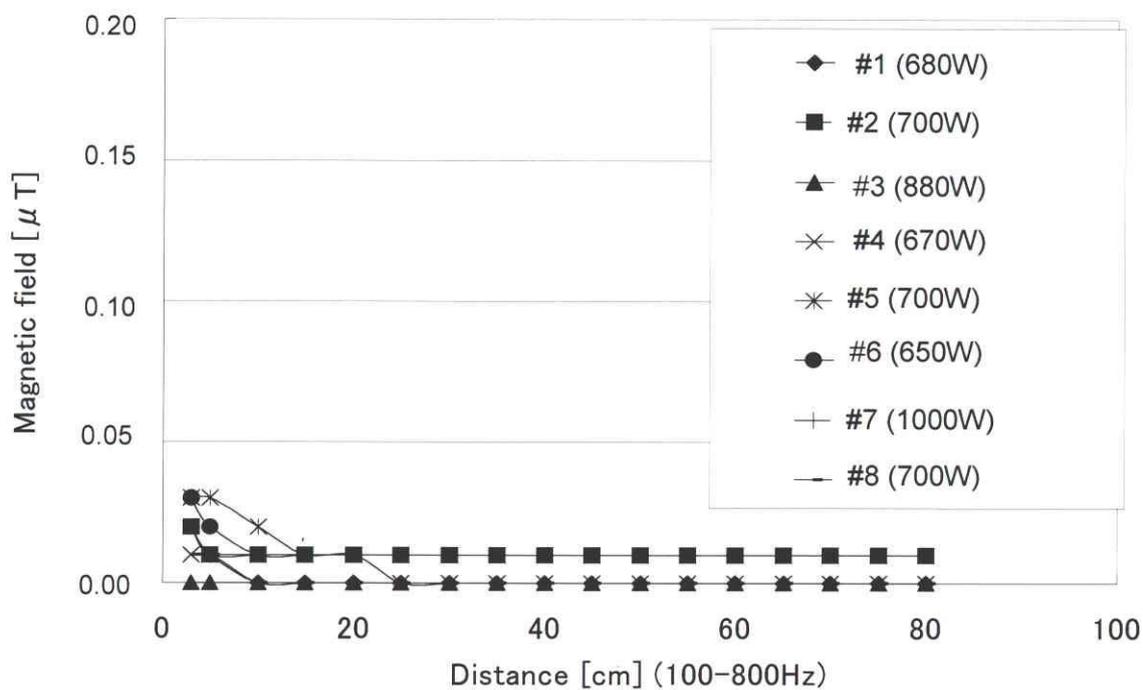
(b) 100~800Hz harmonic range magnetic field, R_h .

図 2-7 トースターの発生する磁界の距離依存性

Fig. 2-7. Magnetic field generated by toasters as a function of distance from them.



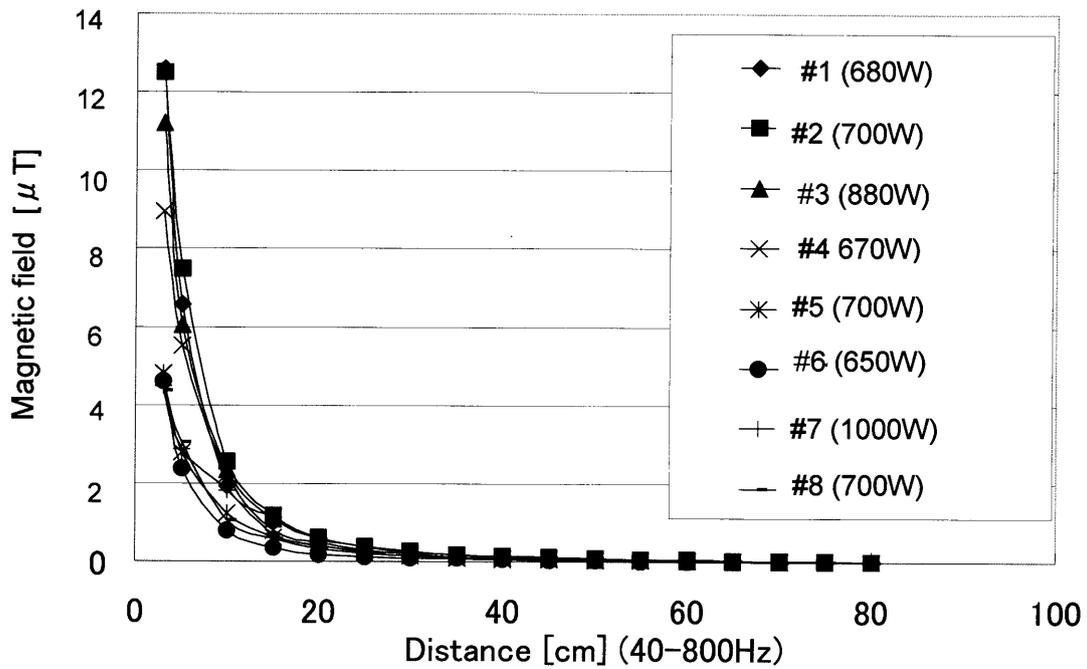
(a) 40~800Hz broadband range magnetic field, R_b .



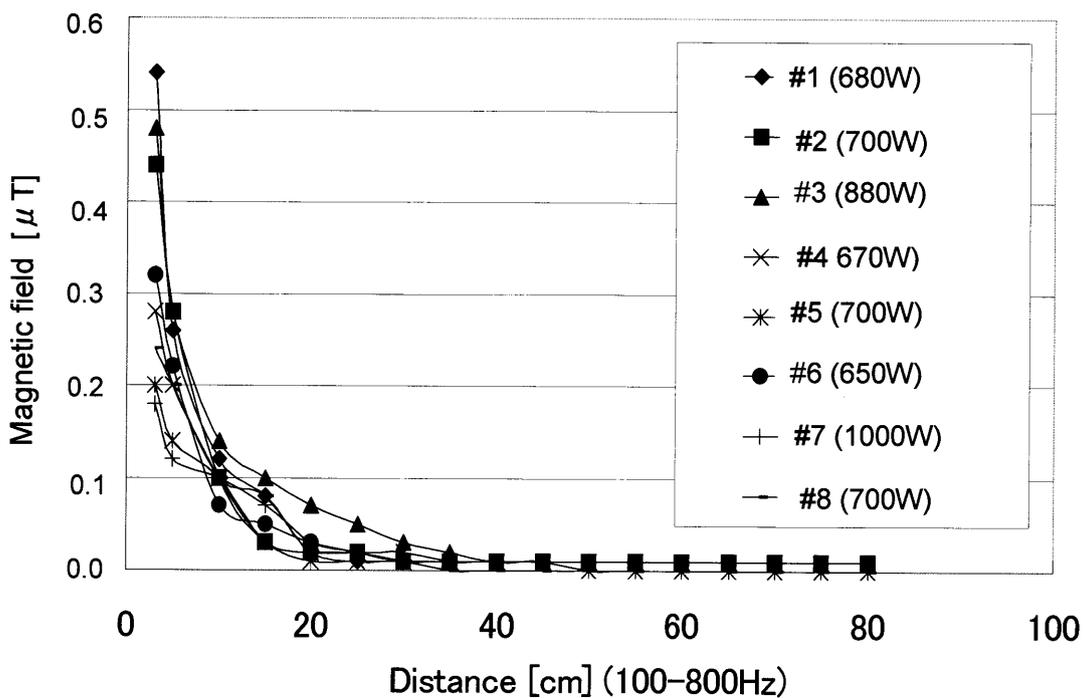
(b) 100~800Hz harmonic range magnetic field, R_h .

図 2-8 ポット(保温時)の発生する磁界の距離依存性

Fig. 2-8. Magnetic field generated by electric pots (normal mode) as a function of distance from them.



(a) 40~800Hz broadband range magnetic field, R_b .



(b) 100~800Hz harmonic range magnetic field, R_h .

図 2-9 ポット(沸騰時)の発生する磁界の距離依存性

Fig. 2-9. Magnetic field generated by electric pots (boiling mode) as a function of distance from them.

表 2-2 距離に対する磁界の減衰を表す n 値のまとめ

Table 2-2. Summary of attenuation constants, n -value relating to distance.

家庭用電気機器	n 値
ブラウン管型テレビ	0.5~0.8
ヘアドライヤ (温風時)	1.3~2.0
扇風機 (モーター付近)	1.8~2.1
扇風機 (回転部正面)	0.8~2.8
トースター	0.6~0.9
ポット (保温時)	0.6~1.2
ポット (沸騰時)	0.9~1.4

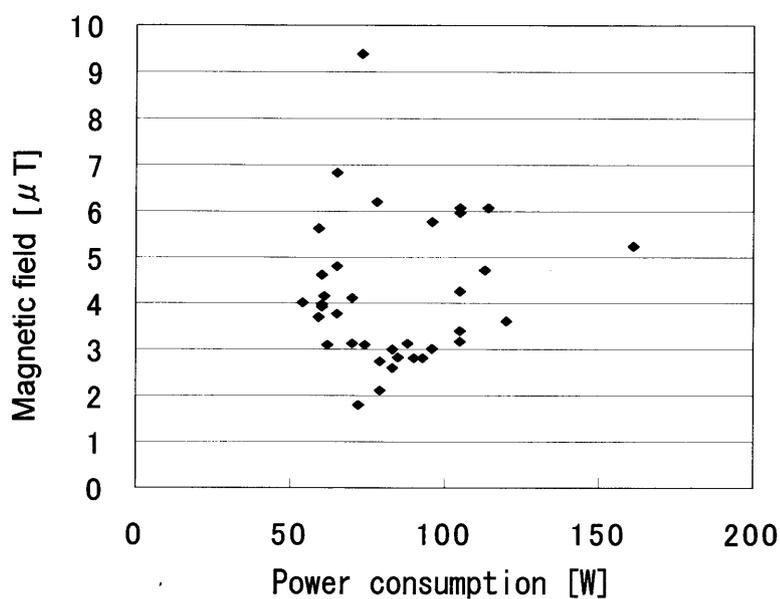


図 2-10 ブラウン管型テレビの発生する磁界と消費電力との関係 (機器から 3cm の点における値)

Fig. 2-10. Relation between magnetic field generated by tube type TV sets and their power consumption (at 3cm distance from appliances).

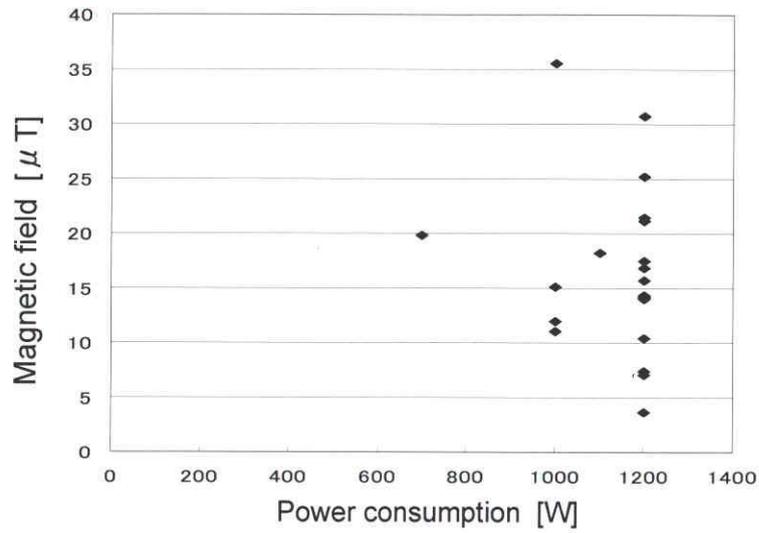


図 2-11 ヘアドライヤ（温風時）の発生する磁界と消費電力との関係（機器から 3cm の点における値）

Fig. 2-11. Relation between magnetic field generated by hair dryers (warm mode) and their power consumption (at 3cm distance from appliances).

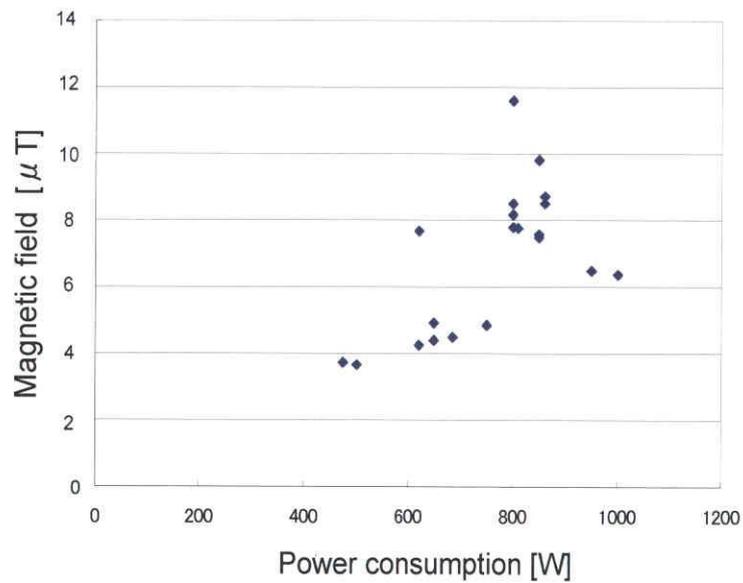


図 2-12 トースターの発生する磁界と消費電力との関係（機器から 3cm の点における値）

Fig. 2-12. Relation between magnetic field generated by toasters and their power consumption (at 3cm distance from appliances).

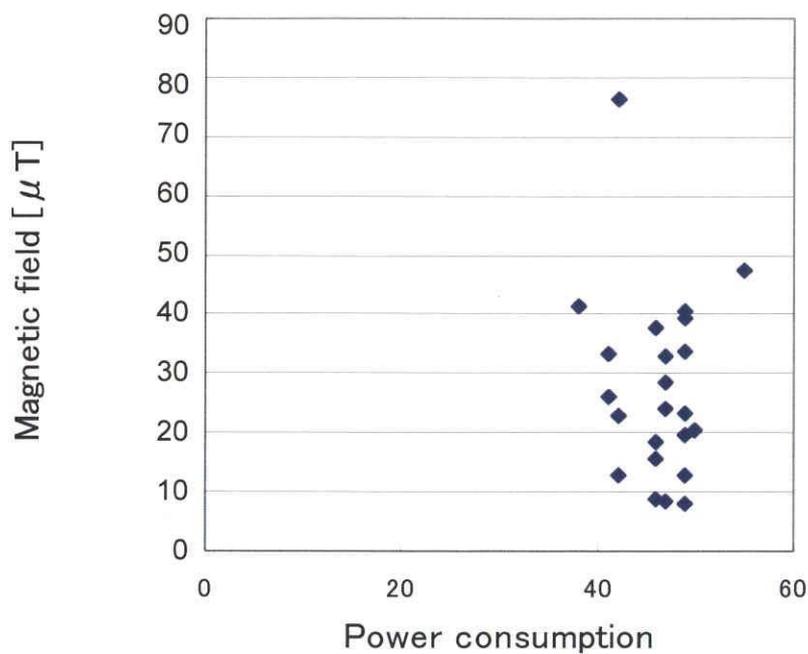


図 2-13 扇風機（モータ付近）の発生する磁界と消費電力との関係（機器から 3cm の点における値）

Fig. 2-13. Relation between magnetic field generated by electric fans (close to motor) and their power consumption (at 3cm distance from appliances).

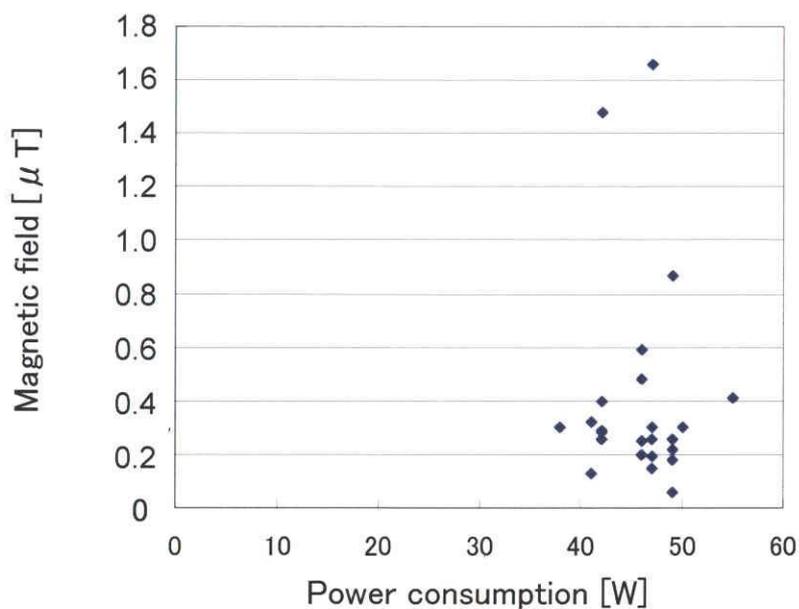


図 2-14 扇風機（回転部正面）の発生する磁界と消費電力との関係（機器から 3cm の点における値）

Fig. 2-14. Relation between magnetic field generated by electric fans (front of fan) and their power consumption (at 3cm distance from appliances).

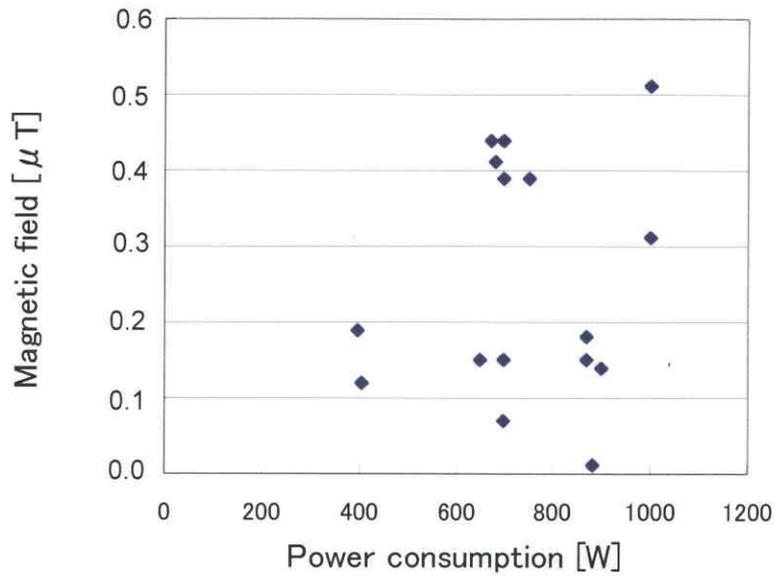


図2-15 ポット(保温)の発生する磁界と消費電力との関係(機器から3cmの点における値)
 Fig. 2-15. Relation between magnetic field generated by electric pots (normal mode) and their power consumption (at 3cm distance from appliances).

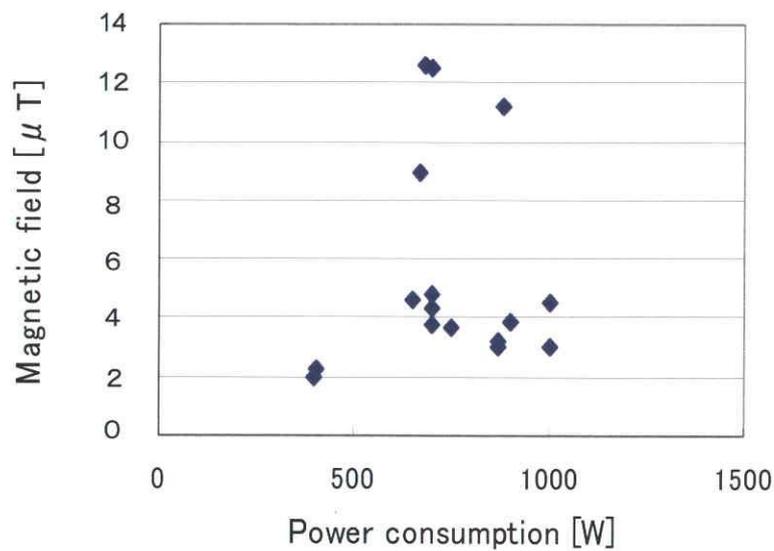


図2-16 ポット(沸騰)の発生する磁界と消費電力との関係(機器から3cmの点における値)
 Fig. 2-16. Relation between magnetic field generated by electric pots (boiling mode) and their power consumption (at 3cm distance from appliances).

表 2-3 家庭用電気機器から発生する広域周波数帯磁界の距離依存性

(単位 μT 、 R_b : 40~800Hz)

Table 2-3. 40~800Hz broadband range magnetic field, R_b as a function of distances from household appliances (Unit: μT).

家庭用電気機器	電気機器からの距離					
	3[cm]		30[cm]		60[cm]	
	測定値	平均値	測定値	平均値	測定値	平均値
ブラウン管型テレビ	1.80~9.40	4.09	0.36~0.98	0.62	0.08~0.30	0.18
PC	1.00~2.00	1.34	0.13~0.30	0.18	0.01~0.06	0.03
電気カミシ	0.63~6.40	1.58	0.02~0.03	0.02	0.01	0.01
トースター	3.72~11.7	6.73	0.38~1.08	0.63	0.08~0.31	0.17
ヘアードライヤー (温風)	7.06~35.52	16.34	0.04~0.22	0.16	0.01~0.05	0.02
ヘアードライヤー (冷風)	3.66~14.64	6.38	0.03~0.35	0.08	0.01~0.03	0.01
電気ポット (保温)	0.01~0.51	0.25	0.01~0.11	0.04	0.01	0.01
電気ポット (湯沸し)	1.96~12.60	5.52	0.06~0.26	0.16	0.01~0.04	0.01
扇風機 (ファン正面)	0.06~1.66	0.40	0.01~0.28	0.04	0.01~0.06	0.01
扇風機 (モーター付近)	3.78~76.48	26.32	0.04~0.54	0.12	0.01~0.13	0.02
洗濯機	0.13~1.70	0.56	0.06~0.51	0.14	0.01~0.05	0.02
電気掃除機	7.44~26.56	15.98	0.78~1.06	0.97	0.02~0.06	0.04
卓上ランプ	0.01~29.44	2.60	0.01~0.18	0.03	0.01	0.01
冷蔵庫 (モーター駆動時)	0.98	0.98	0.28	0.28	0.1	0.1
冷蔵庫 (通常)	0.01~0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

表 2-4 家庭用電気機器から発生する磁界の高周波数帯磁界の距離依存性
(単位 μT 、 R_h : 100~800Hz)

Table 2-4. 100~800Hz harmonic range magnetic field, R_h as a function of distances from household appliances (Unit: μT).

家庭用電気機器	電気機器からの距離					
	3[cm]		30[cm]		60[cm]	
	測定値	平均値	測定値	平均値	測定値	平均値
ブラウン管型テレビ	0.90~4.90	2.16	0.18~0.50	0.33	0.03~0.15	0.09
PC	0.47~0.97	0.64	0.07~0.16	0.13	0.01~0.03	0.02
電気カミソリ	0.57~6.32	1.51	0.02~0.03	0.02	0.01	0.01
トースター	0.20~1.58	0.54	0.03~0.15	0.07	0.01~0.02	0.01
ヘアードライヤー (温風)	2.76~13.12	5.53	0.02~0.08	0.05	0.01~0.02	0.01
ヘアードライヤー (冷風)	2.88~11.14	5.36	0.03~0.09	0.05	0.01~0.02	0.01
電気ポット (保温)	0.01~0.18	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
電気ポット (湯沸し)	0.10~0.54	0.28	0.01~0.03	0.01	0.01	0.01
扇風機 (ファン正面)	0.02~0.74	0.07	0.01~0.04	0.01	0.01	0.01
扇風機 (モータ付近)	0.64~6.08	2.43	0.01~0.06	0.03	0.01~0.02	0.01
洗濯機	0.01~1.03	0.23	0.02~0.29	0.06	0.01	0.01

表 2-5 家庭用電気機器の発生する低周波磁界 R_f
(単位 μT 、機器から 3cm の点における値)

Table 2-5. Power frequency magnetic field, R_f generated by household appliances (Unit : μT , at 3cm distance from household appliances).

家庭用電気機器	距離 3 cm での R_f 値 ($= (R_b^2 - R_h^2)^{1/2}$)	(参考)	
		R_b	R_h
扇風機 (モータ付近)	26.2	26.32	2.43
ヘアードライヤー (温風)	15.4	16.34	5.53
トースター	6.7	6.73	0.54
電気ポット (湯沸し)	5.5	5.52	0.28
ブラウン管型テレビ	3.5	4.09	2.16
ヘアードライヤー (冷風)	3.5	6.38	5.36
PC	1.2	1.34	0.64
洗濯機	0.5	0.56	0.23
電気カミソリ	0.5	1.58	1.51
扇風機 (ファン正面)	0.4	0.4	0.07
電気ポット (保温)	0.2	0.25	0.01

表 2-6 家庭用電気機器の発生する 60Hz 磁界の日米データの比較
 Table 2-6. Comparison of US and Japanese data of 60Hz magnetic field generated by household appliances.

家庭用電気機器	距離 3 cm での磁界 [μ T]	
	米国でのデータ ⁽³⁾	今回得られたデータ (40-800Hz)
ブラウン管型テレビ	2.5~50	1.80~9.40
電気カミシ	1.5~150	0.63~6.40
ヘアドライヤー	0.6~200	7.06~35.52 (温風時)
卓上ランプ	4~40	0.01~29.44

2.3 家庭用電気機器の負荷電流の周波数成分解析

2.3.1 測定方法

磁界測定器の制約から磁界の周波数成分解析が困難であるため、家庭用電気機器に流れる負荷電流の周波数成分解析を行った。負荷電流の周波数特性と機器の発生する磁界のそれとは必ずしも一致しないが、機器の特徴を把握するには有用と考えられる。

テレビなど 20 種類、合計 77 台の家庭用電気機器を測定対象とした。機器を AC100V 電源に接続し、負荷電流を電流センサ (CT) によりパソコンに取り込み、高速リアルタイムスペクトラムアナライザ (Wave Spectra) を用いて周波数成分の解析を行った。図 2-17 に測定系の概略図を示す。

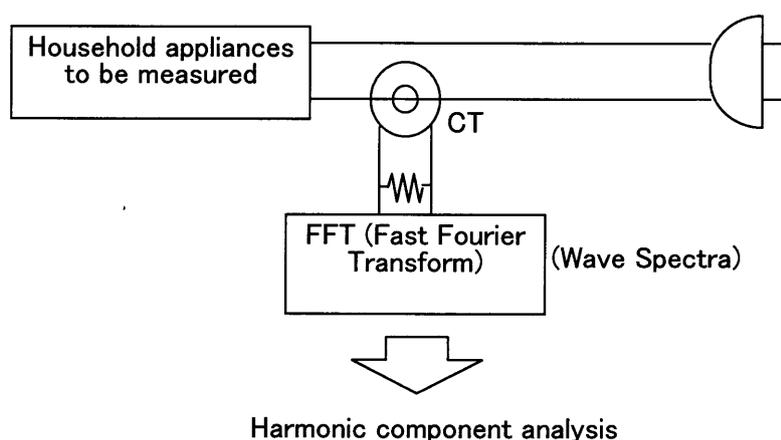


図 2-17 負荷電流の周波数成分解析の測定系

Fig. 2-17 Measurement diagram for harmonic component of load current.

2.3.2 測定結果および検討

図 2-18 には、測定した 5 台のテレビの負荷電流の基本波成分 (60Hz) をそれぞれ 100 として規格化した第 2～第 9 高調波の割合を示す。機種により当該高調波での比率に多少のばらつきはあるもののほぼ同じ周波数成分の分布を有することがわかる。偶数次高調波成分は小さく、奇数次高調波成分が大きい。また、第 3 高調波成分は基本波成分とほぼ同程度であり、第 5 高調波成分が基本波成分の 8 割程度の機種もある。

負荷電流の周波数成分解析結果を、第 3 次高調波の最大含有率が高い順に並べて表 2-7 に示す。基本波の値を 100 として、基本波に対する第 2 高調波から第 9 高調波の割合を表示した。ビデオなどのように高調波成分が大きい機器もあれば、ヘアドライヤなどのように高調波成分が比較的小さな機器もあることがわかる。電気こたつのように抵抗性の回路のみと考えられる場合には高調波成分が少ない傾向があるが、他の機器では制御回路を含めて回路構成素子が複雑であるため高調波成分が大きいと推測される。同じ電気機器でも機種によってばらつきがあるのは、機器の構造や内蔵回路、シールドの有無およびその周波数特性などの違いなどによるものと考えられるが、詳細検討は今後の課題としたい。

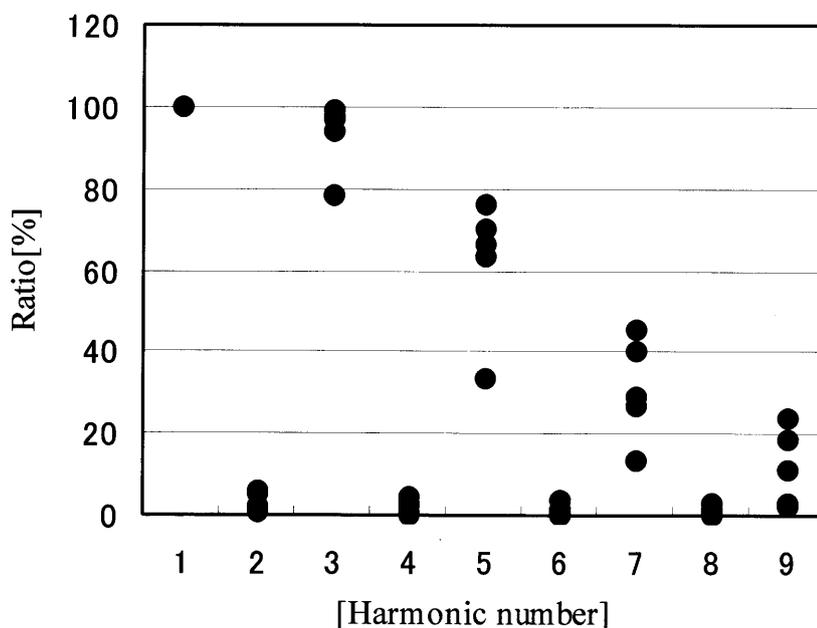


図 2-18 ブラウン管型テレビの負荷電流の高調波成分

Fig.2- 18. Harmonic components of load current of tube type TV sets.

表 2-7 家庭用電気機器の負荷電流の高調波成分含有率[単位 %]

Table 2-7. Harmonic component ratio in load current in household appliances. (Unit %).

	試料数	第2次高調波	第3次高調波	第4次高調波	第5次高調波	第6次高調波	第7次高調波	第8次高調波	第9次高調波
プリンター	4	0.9~11.6	108.9~221.8	0.7~10.5	89.8~227.2	0.3~9.3	57.0~193.1	0.0~7.0	24.1~137.6
スキャナー	2	2.0~7.9	127.1~160.0	1.6~5.0	127.1~142.8	1.4~7.1	97.9~110.7	1.0~6.4	47.2~83.6
電気炊飯器	3	0.2~4.5	0.1~150.0	0.0~8.3	2.9~62.5	0.0~4.5	0.8~87.5	0.0~4.5	0.3~62.5
ビデオ	4	1.3~6.2	109.1~129.7	1.1~9.7	94.3~124.1	0.9~9.7	69.8~108.3	0.7~9.7	42.8~84.8
モニター	3	2.2~6.9	96.3~122.8	3.0~4.9	63.4~115.6	2.1~3.7	29.9~90.5	2.7~2.9	21.4~59.3
充電器	6	0.0~74.5	101.5~122.3	0.0~101.8	68.6~104.3	0.4~69.1	44.2~86.5	0.0~45.5	0.7~79.8
ノートブックパソコン	2	0.3~0.8	100.5~116.6	0.3~0.5	73.4~81.9	0.3~0.6	36.2~44.2	0.4~0.6	13.5~31.0
電気ポット(保温)	2	0.0~2.2	1.3~118.2	0.0~1.7	5.0~81.8	0.0~1.2	0.9~54.5	0.0~0.9	0.7~63.6
洗濯機	4	0.4~121.7	4.1~113.3	0.2~115.0	1.6~111.7	0.2~90.0	1.2~105.0	0.0~90.0	0.3~95.0
PC	3	0.7~1.1	80.9~102.8	0.4~1.9	33.9~75.9	0.4~1.5	17.0~41.6	0.1~0.9	8.1~14.9
ブラウン管型テレビ	5	0.8~5.7	78.2~99.3	0.1~4.5	33.3~75.9	0.1~4.0	13.5~45.6	0.0~2.8	2.1~23.6
電灯	2	0.3~1.1	4.7~96.6	0.1~1.0	7.0~64.3	0.0~0.5	3.2~36.5	0.1~0.5	3.5~33.5
掃除機	2	0.5~9.1	15.1~95.3	0.1~7.3	2.6~64.1	0.0~4.5	1.7~31.5	0.0~3.5	0.4~14.9
電子レンジ(待機)	5	2.6~27.5	31.7~66.0	0.0~11.5	28.5~62.3	0.0~12.3	3.8~18.9	0.0~1.2	5.7~9.3
コンポ	3	0.5~2.4	21.8~55.4	0.6~1.7	20.6~35.3	0.7~1.3	5.6~10.2	0.3~0.3	3.9~8.5
スピーカ	2	0.6~0.7	38.4~54.8	0.0~0.2	27.2~55.8	0.1~0.7	4.6~26.5	0.0~0.1	5.3~17.3
電子レンジ(使用中)	5	0.3~3.4	15.3~40.9	0.3~2.0	7.2~18.2	0.3~1.1	1.5~5.9	0.2~0.9	0.9~3.5
電気ポット(湯沸し)	2	2.0~5.3	0.6~35.3	0.4~5.1	3.1~21.6	0.0~4.3	1.3~15.0	0.2~4.7	0.2~11.0
冷蔵庫	5	0.2~2.3	3.2~28.5	0.0~2.1	1.9~24.6	0.0~2.3	1.5~24.1	0.0~2.6	0.0~21.3
電気コタツ	3	0.2~4.1	0.3~16.8	0.0~1.1	1.9~3.5	0.0~0.0	0.7~1.7	0.0~1.0	0.2~0.2

2.4 結言

本章では、生活環境に存在する磁界発生源として代表的な家庭用電気機器を対象に、発生する磁界の測定と負荷電流の周波数成分解析を行った。得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) 至近距離では比較的大きな磁界を発生する機器もあるが、機器から離れると急激に減衰する。磁界が距離の $-n$ 乗に比例すると仮定した場合の n 値はブラウン管型テレビの場合で0.5~0.8、ヘヤドライヤで1.3~2.0である。同じ種類の機器でも機種により磁界の大きさは多少異なるが、これは電流の違いやシールドの有無など機器の構造によるものと推定される。
- (2) 今回測定したほとんどの機器において、発生する磁界と機器の消費電力との間に相関は認められない。
- (3) 広域周波数帯と高周波数帯の合成磁界の比較から、ドライヤやトースターなど抵抗性の機器では、商用周波成分が主体となる場合が多いことがわかる。他の種類の機器の発生する磁界には、第3および第5高調波を主体とした高調波成分が基本波成分と同程度に含まれる場合もある。
- (4) 負荷電流の高調波成分の大きさは機器により大きく異なるが、奇数次高調波が偶数次高調波に比べて大きい。機器の負荷電流の周波数成分と発生磁界の周波数成分との関連は、今後さらに詳細に検討を進める必要がある。

第2章 参考文献

- (1) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, Health Physics, Vol. 74, pp. 494-522, 1998.
- (2) 原子力安全・保安部会、電力安全小委員会：「電力設備電磁界対策ワーキンググループ（報告書）」, 2008.
- (3) J. R. Gauger: “Household appliance magnetic field survey”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, pp. 2436-2444, 1985.
- (4) National Research Council, Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields, National Academy Press, 1996.
- (5) 富田誠悦、竹下和磨、須田和孝：「家庭内電気製品からの磁界強度とその周波数分布」、電力中央研究所研究報告 T90054, 1991.
- (6) 電磁界影響調査検討会：「電磁界影響に関する調査・検討報告書」, 1993.
- (7) IEC 62233: “Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure”, 2005.
- (8) IEEE Standard: “Procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from ac-power lines”, No. 644, 1994.

第3章 生活環境における低周波磁界の定量的評価

3.1 緒言

近年の低周波磁界の生体影響に対する社会的関心が高まりにより、数多くの疫学、細胞学の研究や小動物を用いた実験・検討が実施されている⁽¹⁾。一方、低周波磁界を定量化するため、送電線や変電所など主として電力設備の発生する商用周波磁界の測定結果や計算結果の報告がなされている⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。しかしながら、国内における生活および職業環境下の低周波磁界の体系的な実態調査はほとんどなく^{(7),(8)}、十分な情報が得られているとは言えない状況にある。我が国において一般公衆の受ける商用周波磁界の規制値導入の検討が進められている⁽⁹⁾ことも考え合わせると、生活環境における低周波磁界の定量的評価は重要と考えられる。

第2章では、家庭用電気機器の発生する磁界の定量的評価結果について述べた。本章では、生活環境における低周波磁界の測定および解析を行った結果について述べる。

種々の場所における磁界の測定にはスポット測定が一般的であるが、公衆の往来する場所では測定器をある程度の時間にわたって設置することが難しく、また、空間分布を測定するには多大な労力と時間を要する。そこで、本研究ではスポット測定の代わりに測定器を被験者に装着して磁界を連続測定し、被験者の行動記録と照合して滞在場所毎の磁界を求めることにした。この方法は定点測定ではないため、固定点における磁界の時間変化は得られないが、場所は異なるものの同じような環境（例えば事務所内）における特徴抽出や、磁界の累積確率分布を得るには有効と考えられる。

3.2 磁界測定器装着位置の検討

3.2.1 検討方法および被験者

被験者に磁界測定器を装着して磁界を測定する場合、装着場所により記録される磁界は変わる。装着場所の影響に関しては、頭部で測定される磁界は胸部や腰での測定値より20%程度高いとの米国での調査結果⁽¹⁰⁾がある。頭部や胸部への測定器の常時装着は日常生活に制約を与えることを考慮して、今回は腰に測定器を装着することとした。

まず、左右の腰で記録される磁界の違いを評価するため、2台の同一磁界測定器を被験者の左右の腰に装着して磁界を同時に測定した。サンプリング時間は3秒とし、原則として起床時から就寝前まで測定を実施した。測定器の床または地面からの高さは、被験者の身長により異なるが、被験者が立った状態で70～100cmであった。被験者は大学生3名、情報処理従事者3名、電気機器保守従事者1名であった。測定器には、IEEE規格⁽¹⁾に準拠したEMDEX II (Enertech Consultants製)を使用した。本測定器は3軸磁界計であり、 x 、 y および z 軸方向の成分 B_x 、 B_y 、 B_z を同時測定し、次式で定義される合成磁界 (Resultant magnetic field) が得られる。

$$B_R = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2} \dots\dots\dots (3-1)$$

40～800Hzの広域周波数帯の合成磁界 (R_b) および 100～800Hzの高周波数帯の合成磁界 (R_h) の同時測定が可能であり、40～100Hzの低周波数帯の合成磁界 (R_f) を次式で求められる。

$$R_f = (R_b^2 - R_h^2)^{1/2} \dots\dots\dots (3-2)$$

3.2.2 測定結果および考察

大学生の左右の腰で同時測定された磁界の時間変化の例を、図3-1に示す。左右の腰で測定された磁界に多少の差が認められる時刻もあるが、時間変化のパターンはほぼ同じである。測定結果の統計量を、他の2人の大学生で得られた結果とともに表3-1に示す。左右の腰での最大磁界の差は大学生#1の場合に0.5μT程度となるが、自宅滞在時に得られていることから家庭用電気機器に近づいた状況と推定される。磁界の平均値や中央値は、3名の被験者ともに左右の腰でほぼ同程度となっている。

情報処理従事者の左右の腰で同時測定された磁界の時間変化の例を図3-2に、3名の測定結果の統計量を表3-2に、それぞれ示す。電車での通勤時に磁界の最大値を記録しており、左右の腰で0.5μT程度の差が認められるが、平均値および中央値は左右の腰でほぼ同じである。

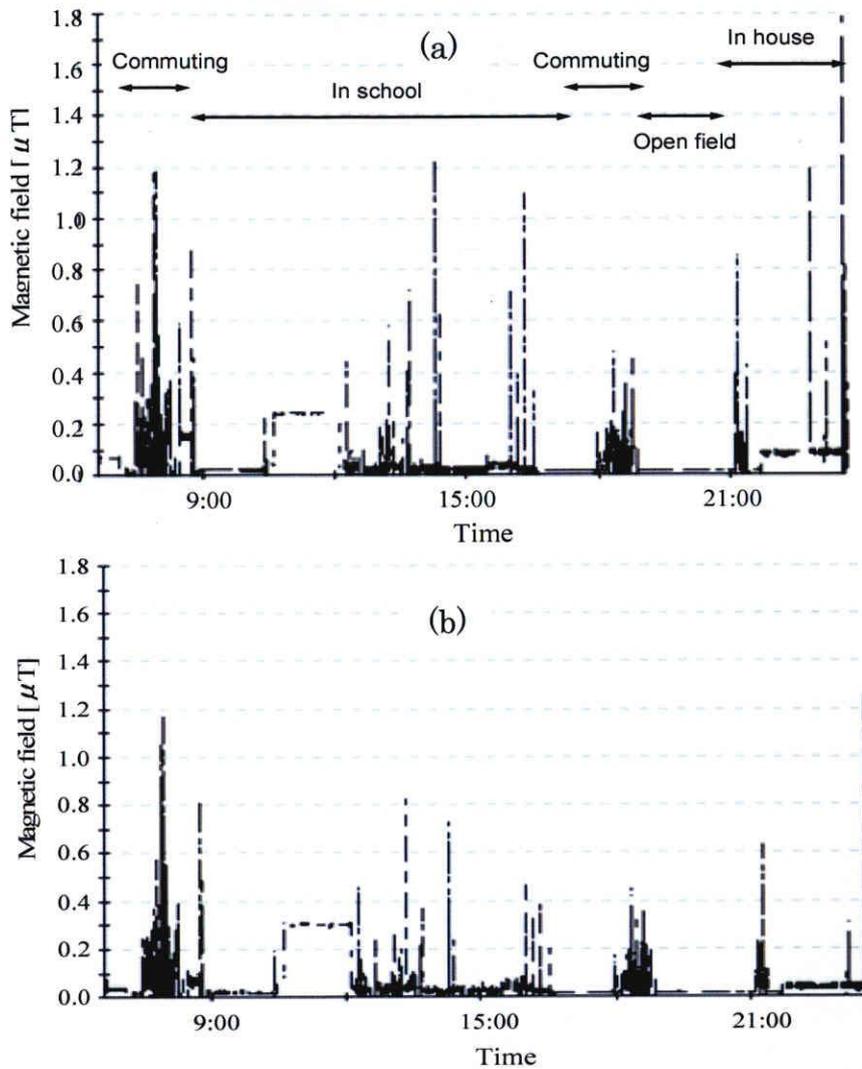


図 3-1 大学生の(a)右腰および(b)左腰で記録された磁界の時間変化
 Fig. 3-1. Time lapse of magnetic fields recorded on (a) right and (b) left sides of waist of a university student.

表 3-1 大学生の左右の腰で記録された磁界の統計量 [μT]

Table 3-1. Statistical data of magnetic fields in μT recorded on right and left sides of waist of university students

被験者		最小値	最大値	平均値	中央値	標準偏差
#1	右	0.001	1.792	0.057	0.076	0.023
	左	0.001	1.267	0.054	0.084	0.024
#2	右	0.001	0.988	0.038	0.051	0.026
	左	0.001	1.021	0.038	0.052	0.024
#3	右	0.001	1.274	0.038	0.052	0.023
	左	0.001	1.122	0.037	0.060	0.026

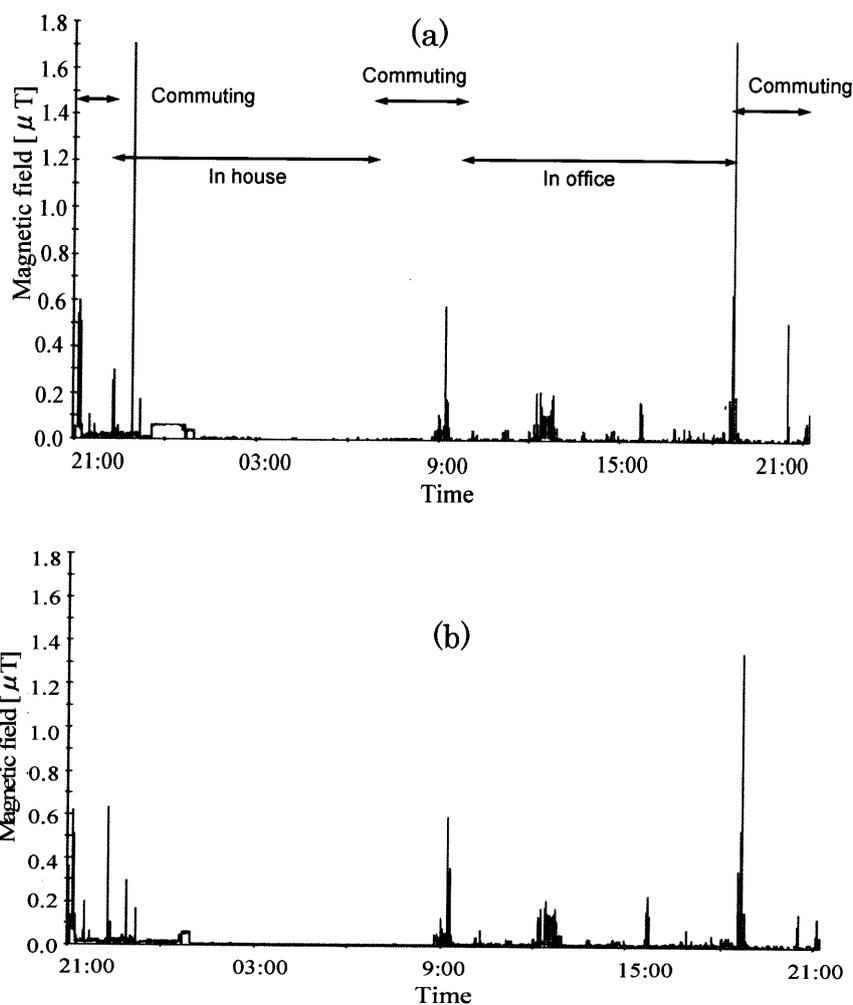


図 3-2 情報処理従事者の(a)右腰および(b)左腰での記録された磁界の時間変化

Fig. 3-2. Time lapse of magnetic fields recorded on (a) right and (b) left sides of waist of an expert in information technology.

表 3-2 情報処理従事者の左右の腰で記録された磁界の統計量 [μT]

Table 3-2. Statistical data of magnetic fields in μT recorded on right and left sides of waist of experts in information technology.

被験者		最小値	最大値	平均値	中央値	標準偏差
#1	右	0.001	1.725	0.017	0.011	0.031
	左	0.001	1.355	0.016	0.011	0.027
#2	右	0.001	1.621	0.023	0.018	0.035
	左	0.001	2.096	0.022	0.018	0.033
#3	右	0.001	1.661	0.045	0.021	0.048
	左	0.001	1.238	0.034	0.023	0.029

図 3-3 には電気機器保守点検従事者の左右の腰で同時測定された磁界の時間変化を、表 3-3 にその統計量を、それぞれ示す。被験者が作業のため電源に近づいた時に磁界の最大値が記録されており、左側の測定値は 165.3 μT と右側の約 2 倍となっている。測定器から電源までの距離が左右で異なるためと推定される。最大磁界を受ける時間が短いため、磁界の平均値や中央値における左右の差は最大値の差に比べて小さくなる。しかしながら、比較的大きな磁界を生じる発生源に接近する機会のない大学生や情報処理技術者と比較すると、磁界の平均値の左右差は大きい。

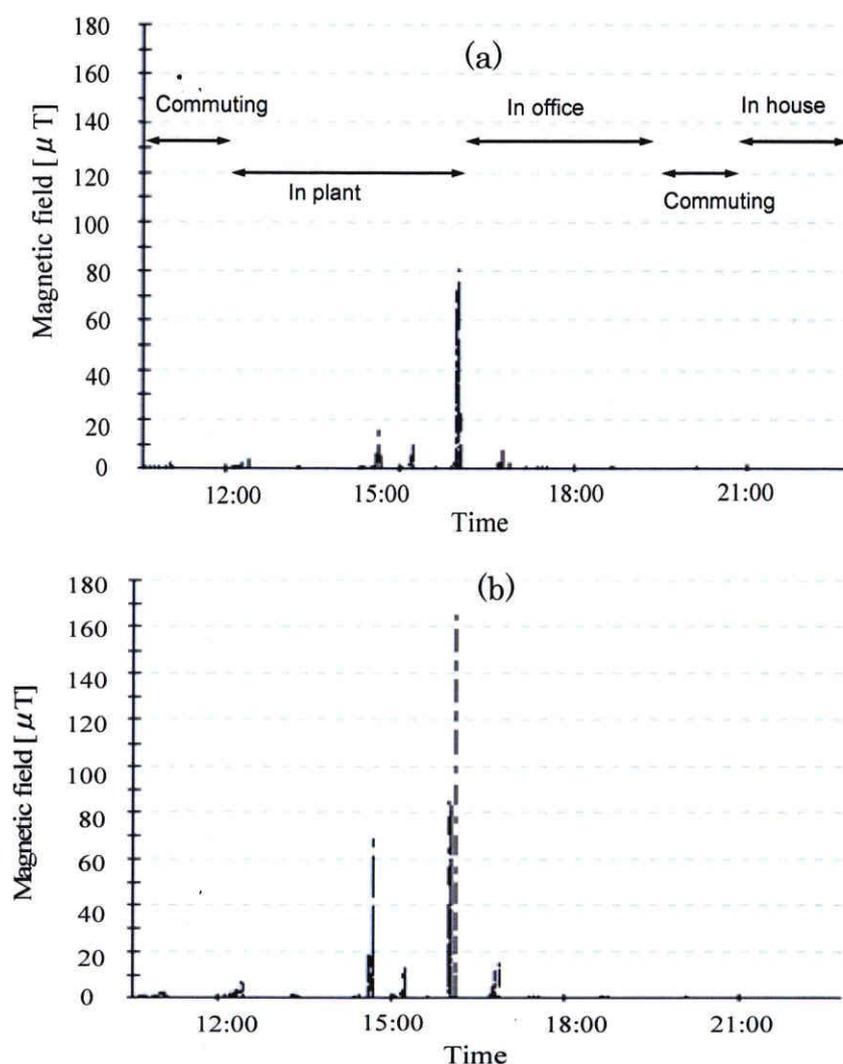


図 3-3 電気機器保守点検従事者の(a)右腰および(b)左腰で記録された磁界の時間変化

Fig. 3-3. Time lapse of magnetic fields recorded on (a) right and (b) left sides of waist of an electrical maintenance worker.

表 3-3 電気機器保守点検従事者の左右の腰で記録された磁界の統計量 [μT]
 Table 3-3. Statistical data of magnetic fields in μT recorded on right and left sides of waist of an electrical maintenance worker.

測定器場所	最小値	最大値	平均値	中央値	標準偏差
右	0.001	80.8	0.213	0.036	1.671
左	0.001	165.3	0.338	0.034	3.248

以上述べた測定結果から、比較的高い磁界を発生する発生源に近づく機会のある被験者の場合には複数個の測定器で磁界を測定することが望ましいが、そうでない一般の場合はひとつの測定器を用いて実測することが許容されると考えられる。

3.3節で述べる実態調査においては、強力な磁界発生源に近づく被験者が少ないと想定されること、日常生活における行動制約を最小限にすることから、1台の測定器を腰に装着して行うこととした。

3.3 生活環境における低周波磁界の測定

3.3.1 測定方法および被験者

3.2.1節で述べた EMDEX II を被験者の左右いずれかの腰に装着し、原則として起床時から就寝前までの間、広域周波数帯および高周波数帯の磁界を3秒毎に同時測定し、時系列データとして3秒毎に測定器のメモリに記録した。式(3-2)より低周波数の合成磁界を求めた。

被験者は大学生、事務職員、電気機器保守/工事従事者、主婦、大学病院医師の計64人とした。測定は平日に実施した。被験者は普段と同様の行動をしており、学校や職場だけではなく車や電車等での移動時や自宅などにおける測定も含まれている。

3.3.2 測定結果および考察

被験者の職業別に代表的な測定結果を示す。

事務職としてのパートタイム業務を持つ主婦の受ける磁界を、図3-4に示す。業務中のパソコン作業時も含め、磁界は殆どの場合 $1.0\mu\text{T}$ 未満であった。最大値は $1.9\mu\text{T}$ で、車での移動時に記録されている。

図3-5はある大学生の受ける磁界の測定結果例である。最大値は大学構内で観測されているが、その発生源は特定できなかった。別の大学生の場合には、

電車での通学時に磁界の最大値を記録している。殆どの場合、前述の主婦同様に磁界は $1.0\mu\text{T}$ 未満である。

電気機器保守点検従事者の測定結果の例を、図 3-6 に示す。最大値は $43.9\mu\text{T}$ であり、工場内での作業中に観測された。これは作業中に電源などの磁界発生源に近づいたためと考えられるが、発生源付近での作業時間は極めて短い。業務中の殆どの時間を事務所で過ごしているが、この時の磁界は $0.4\mu\text{T}$ 程度であった。

ある放射線科医師の測定結果を図 3-7 に示す。勤務中はほとんどの時間を大学病院内で過ごしており CT 室においては最大 $2.9\mu\text{T}$ の磁界を受けているが他の場所における磁界は $1.0\mu\text{T}$ 未満であった。

職業の異なる被験者の測定結果の代表例を、表 3-4 にまとめて示す。電気機器保守点検従事者の場合には、他の職業者と比べ磁界の最大値は大きい。しかしながら、今回の測定範囲内では電源や機器などの磁界発生源付近での作業時間が限られているため、平均値や中央値における他の職業者との差異は最大値ほど大きくはならない。

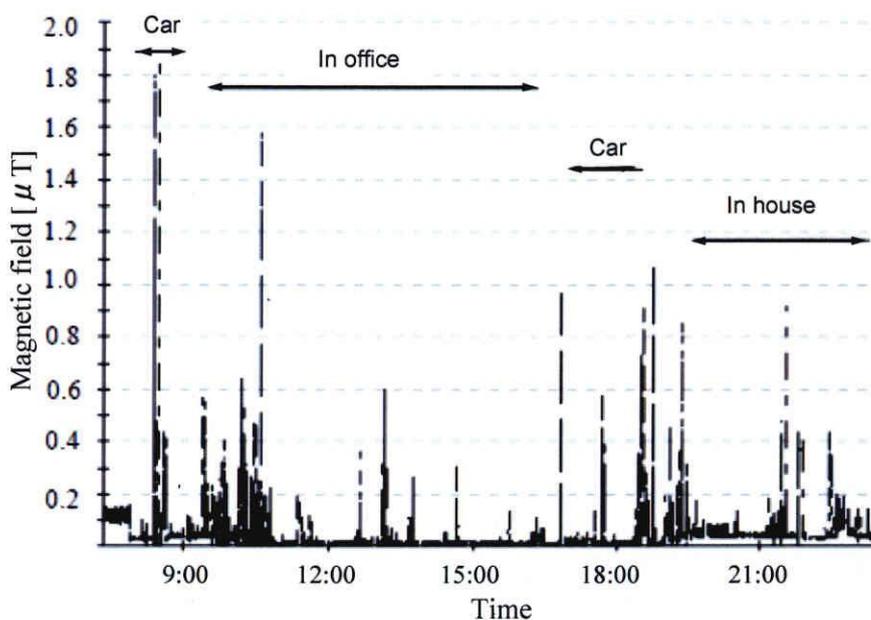


図 3-4 主婦の腰で記録された磁界の時間変化

Fig. 3-4. Time lapse of magnetic field recorded on a waist of a homemaker.

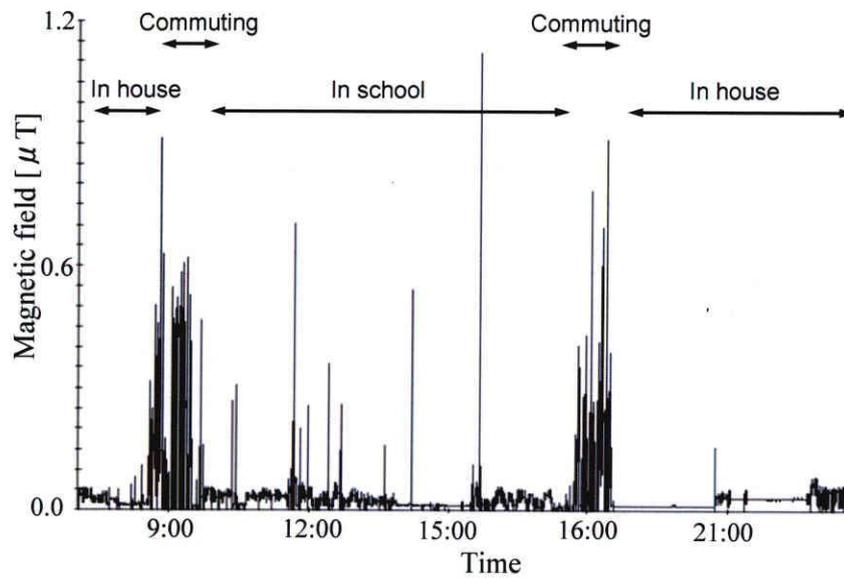


図 3-5 大学生の腰で記録された磁界の時間変化

Fig. 3-5. Time lapse of magnetic field recorded on a waist of a university student.

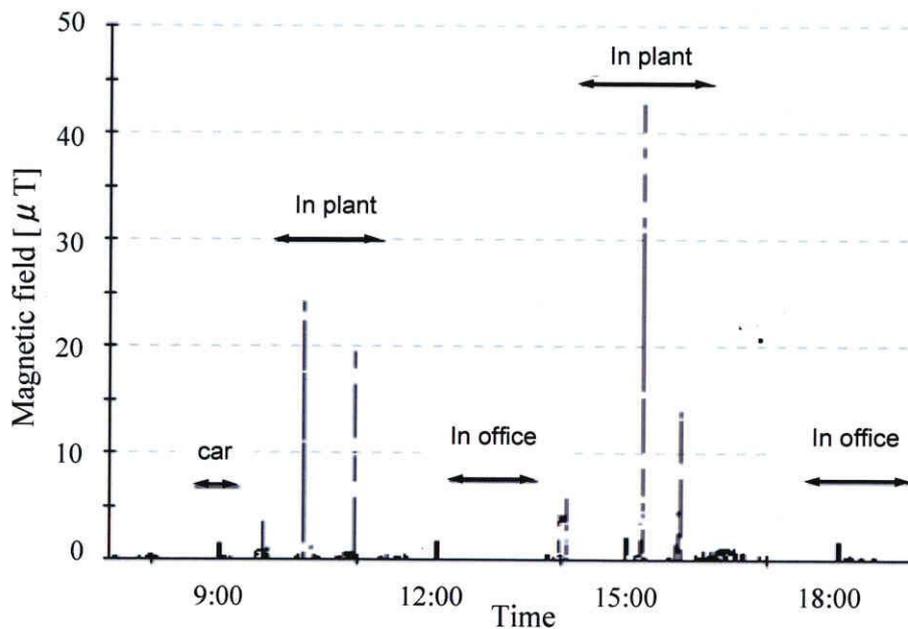


図 3-6 電気機器保守従事者の腰で記録された磁界の時間変化

Fig.3-6. Time lapse of magnetic field recorded on a waist of an electrical maintenance worker.

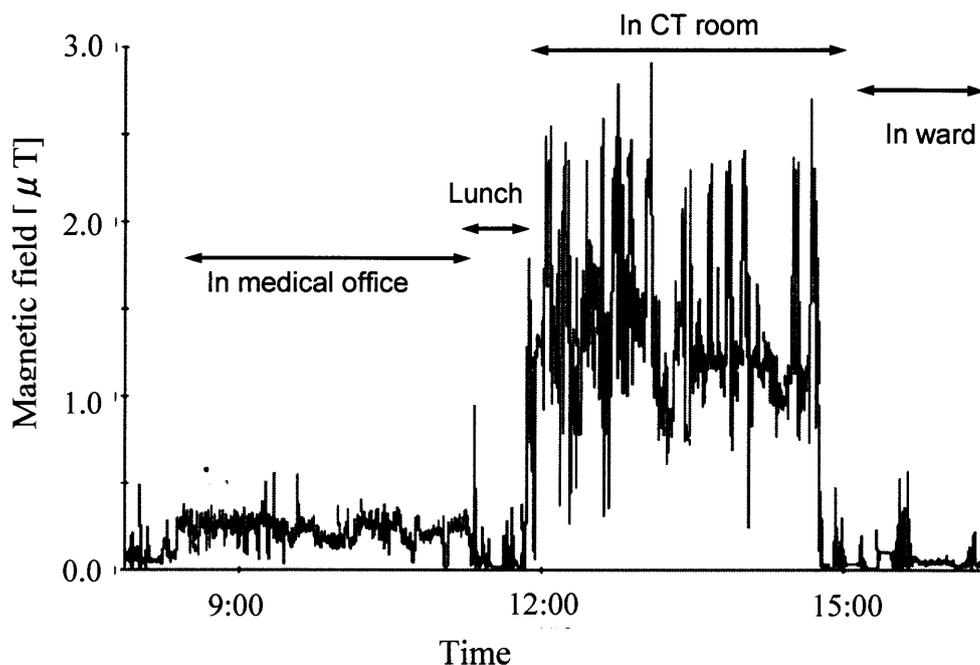


図 3-7 放射線科医師の腰で記録された磁界の時間変化

Fig. 3-7. Time lapse of magnetic field recorded on a waist of medical doctor during stay in hospital.

表 3-4 被験者の測定結果の例 [μT]

Table 3 - 4. Examples of measurement results [μT].

被験者	最小値	最大値	平均値	中央値	標準偏差
大学生 1	0.001	1.232	0.024	0.018	0.022
大学生-2	0.001	4.130	0.040	0.021	0.131
大学生-3	0.001	2.410	0.054	0.024	0.109
大学生-4	0.001	4.870	0.052	0.028	0.096
事務員-1	0.001	12.830	0.059	0.031	0.212
事務員-2	0.001	8.550	0.054	0.023	0.155
機器保守点検者-1	0.001	43.916	0.184	0.018	1.101
機器保守点検者-2	0.001	31.390	0.408	0.048	1.696
機器保守点検者-3	0.001	23.190	0.116	0.049	0.348
機器保守点検者-4	0.001	15.970	0.048	0.023	0.221
電気工事従事者-1	0.001	1.3550	0.016	0.011	0.027
主婦-1	0.001	1.890	0.042	0.026	0.062
主婦-2	0.001	1.306	0.045	0.032	0.063
医師-1	0.001	1.190	0.074	0.057	0.082
医師-2	0.001	0.902	0.033	0.030	0.060
医師-3	0.001	2.915	0.565	0.243	0.656

3.3.3 場所ごとの磁界の解析

代表的な場所における磁界を評価するため、3.3.2節で示した時系列で記録された磁界のデータを、被験者の行動記録に基づいて幾つかの場所毎に分類して解析・評価を行った。

図 3-8 は、電車（直流駆動）内およびホームにおける磁界の測定結果を示す。ホームでは電車が通過する時に磁界がやや上昇する。車内における磁界は車両の種類や乗車場所に依存するが、 $1.1\mu\text{T}$ 程度の値が観測された。エアコンやモータに流れる電流による磁界と推定される。

ガソリンエンジン搭載の普通乗用車を運転中の磁界を、図 3-9 に示す。高速道路走行中の磁界はそれほど高くはなく、時間変動は小さい。送電線下を通過した時にはその他の走行時よりも高い磁界が記録されている。サービスエリアで駐車してエンジンを停止した状態では磁界は $0.01\mu\text{T}$ 程度であり、バックグラウンドノイズと同程度となる。一方、市中の一般道では磁界は頻繁に変動しており、自動車の速度または加速度に関係しているようである。磁界発生源の特定は困難であるが、エンジンを停止した状態では磁界は発生しておらず、また、磁界が走行状態に依存していることから、自動車に搭載されている装置が磁界発生源と推定される。

ある大学の校舎ビル地下一階に設置された $1,630\text{kVA}$ の 6.6kV 屋内変電所内で記録された磁界を、図 3-10(a) および (b) に示す。この場合のみ、定点測定を実施した。同図 (a) は負荷の少ない朝、(b) はピーク時における磁界である。負荷ピーク時には最大 $14.5\mu\text{T}$ を観測し、朝の倍程度になっている。図 3-11 は測定時の使用電力量を示す。負荷ピーク時であっても常に磁界が高い訳ではなく、変電所内の変圧器にタップやフィーダーの切替えにより電流の流れや大きさに変化があるためと思われる。変電所に隣接する部屋内の磁界は、 $0.1\sim 0.7\mu\text{T}$ 程度であった。発生源からの距離が離れているため磁界が減衰していることがわかる。

図 3-12 の (1) は、大学病院の放射線科医師 4 人の勤務中に記録された磁界の累積確率分布を示したものである。場所は診察室、ポジトロン検査室、CT 室、病院内などである。一方、図中の (2) は、筆者が測定器を装着して、MRI の準備および運転中に医師とほぼ同じ場所で測定した結果である。場所は MRI 設置室および制御室であるが、MRI 運転中には MRI 設置室立入りは禁止されている。MRI 区域で記録された磁界は (1) と比較するとやや高いが、絶対値はそれほど大きくない。MRI 近傍ではなく操作室で測定していること、磁気シールドがあること、がその理由と考えられる。

表 3-5 は、64 人の被験者から得られた測定データのうち、1 万個以上のデータ

が得られた場所について磁界を整理したものである。また、場所毎の磁界の累積確率分布を、図 3-13 に示す。家庭用電気機器に近づいた場合や、電車車両内での磁界が、他の場所と比べて若干高い。この場合を除くと、測定された磁界の 80% が 0.2 μT 未満となる。

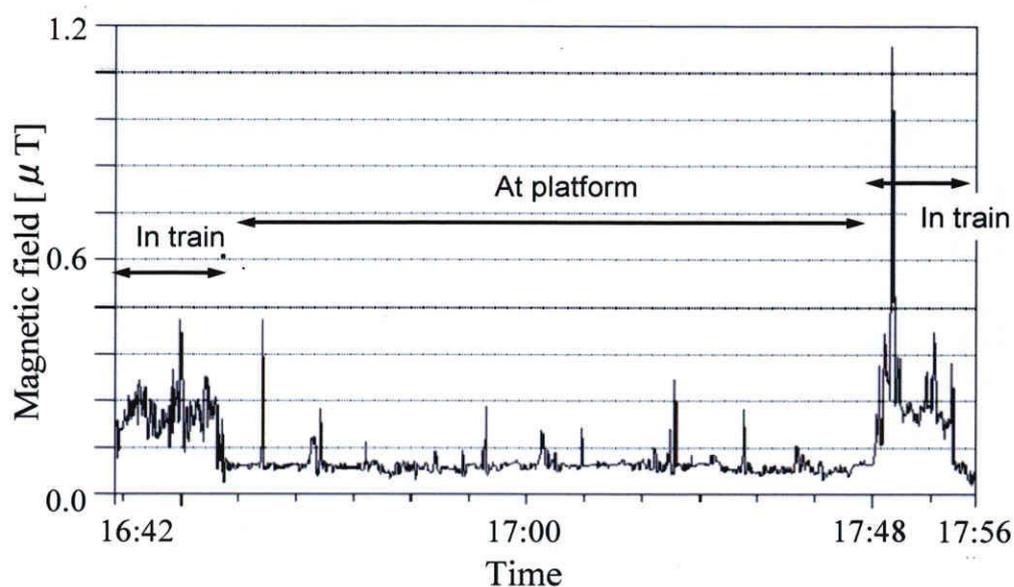


図 3-8 電車またはプラットフォームでの磁界の時間変化

Fig. 3-8. Time lapse of magnetic field recorded in rolling stocks and on a platform.

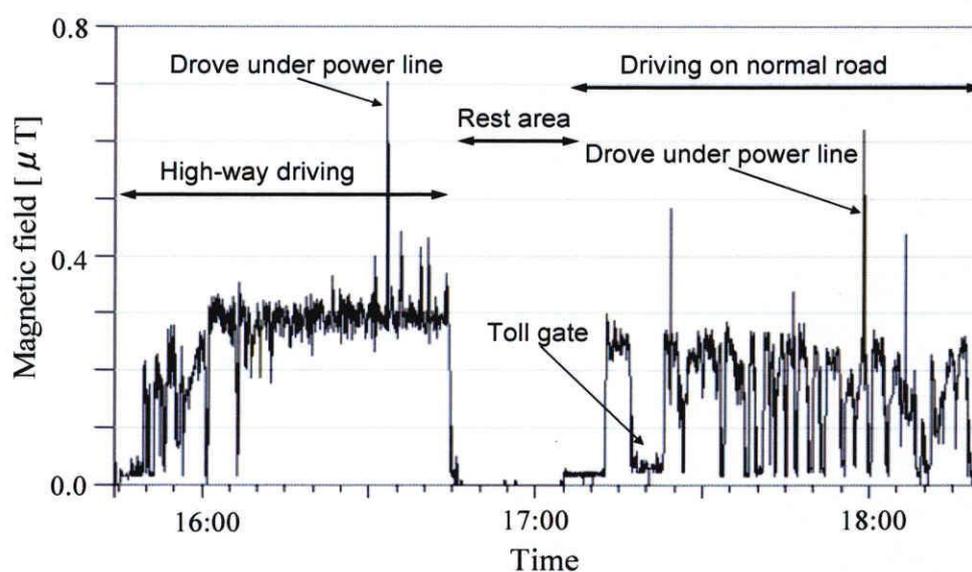


図 3-9 自動車内における磁界の時間変化

Fig. 3-9. Time lapse of magnetic field recorded in an automobile.

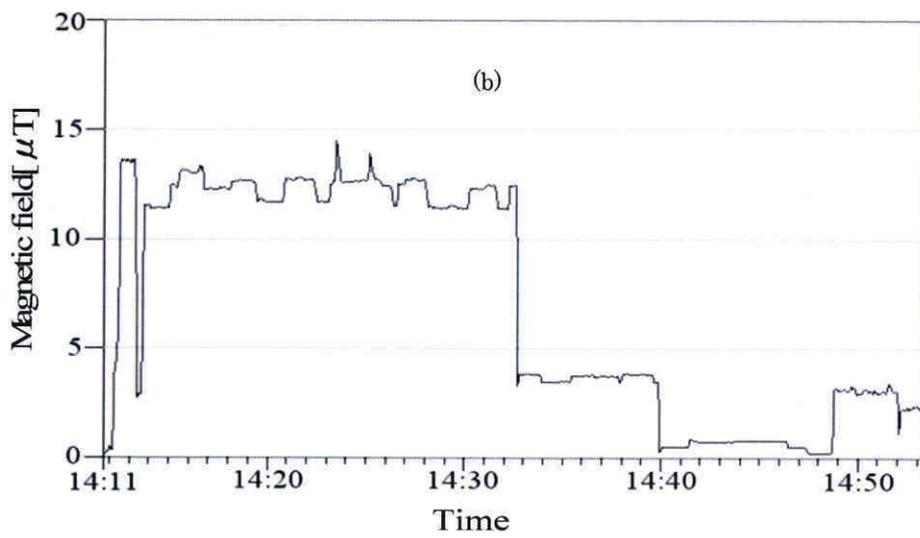
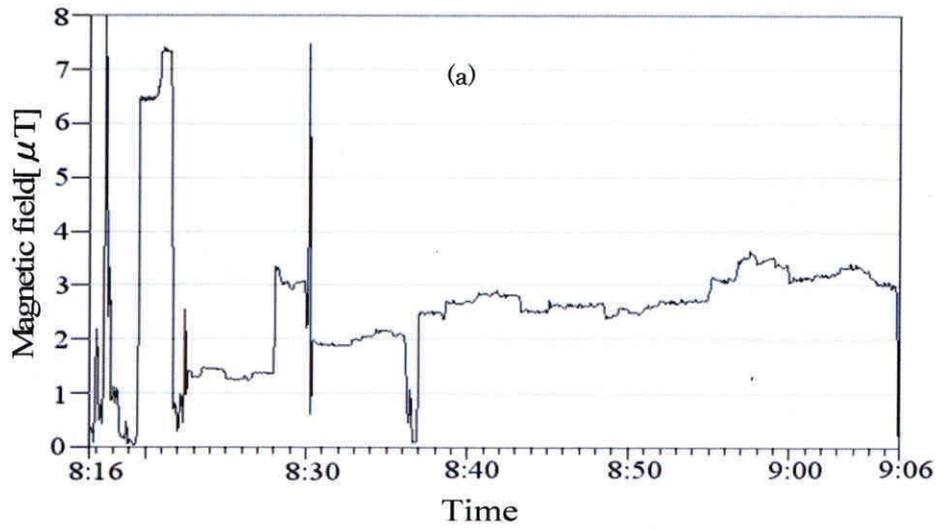


図 3-10 大学構内の屋内変電所での (a)朝と (b)負荷ピーク時の磁界の時間変化
 Fig. 3-10. Time lapse of magnetic fields recorded (a) in the morning and (b) at a peak time at indoor substation in a university.

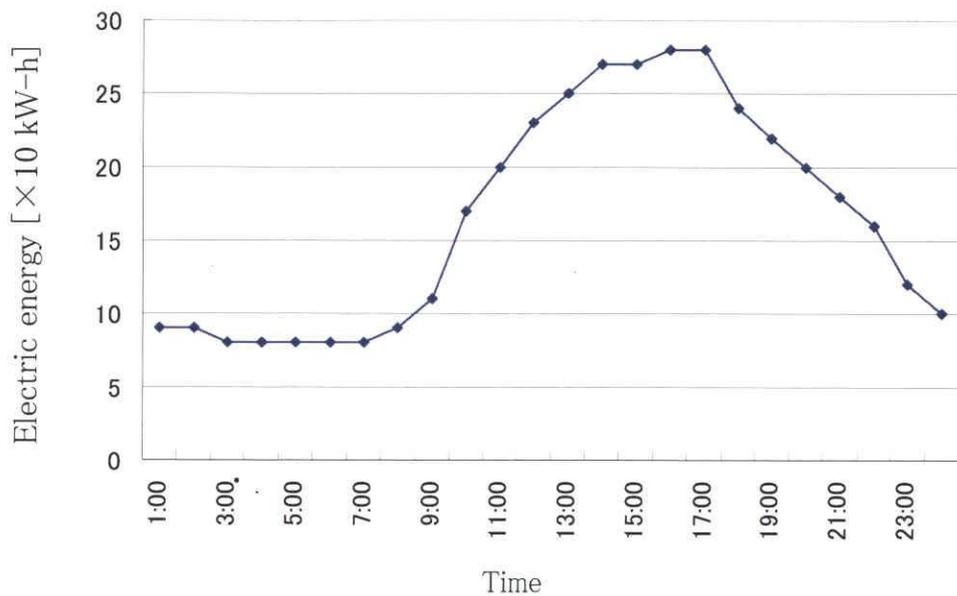


図 3-11 大学構内の屋内変電所の電力使用量

Fig. 3-11. Electric energy consumption of indoor substation in a university.

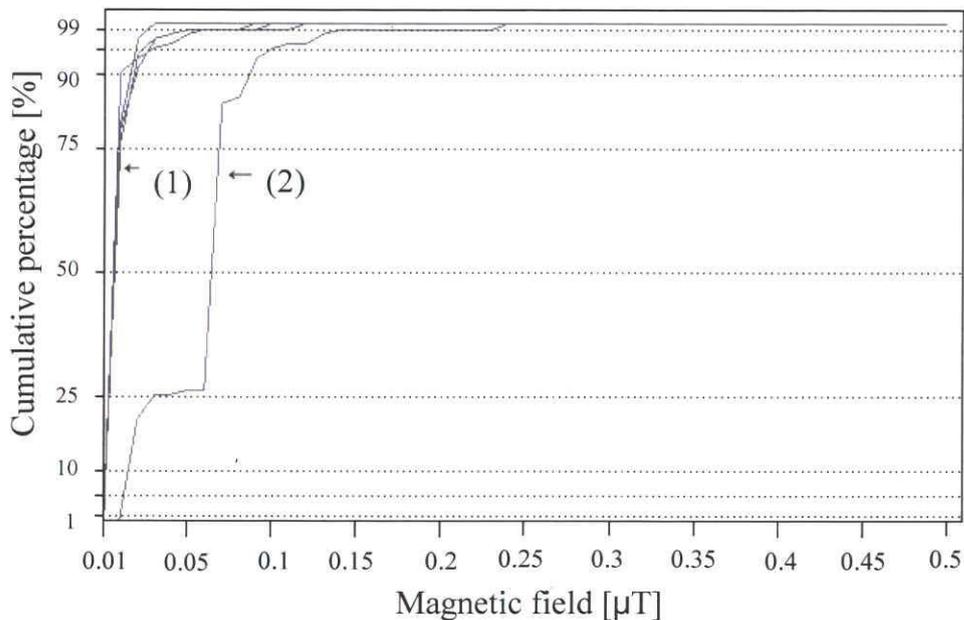


図 3-12 病院内の磁界の累積確率分布 (1)非 MRI 区域、(2)MRI 区域

Fig. 3-12. Cumulative probability curves of magnetic fields of (1) non-MRI and (2) MRI zones.

表 3-5 場所ごとの磁界 [μT]

Table 3-5. Magnetic fields in various locations [μT].

場所	被験者数	データ数	最大値	平均値	中央値	標準偏差
住居内	55	472,118	0.615	0.026	0.020	0.021
家庭用電気機器付近	42	25,749	11.01	0.195	0.104	0.291
事務所内	48	304,779	12.32	0.024	0.014	0.045
工場内	22	93,038	165.3	0.298	0.043	1.767
建物内	38	113,220	1.976	0.050	0.023	0.073
電車内	36	48,491	7.637	0.230	0.134	0.373
自動車内	21	13,977	1.232	0.087	0.061	0.092
屋外	52	79,919	7.549	0.044	0.018	0.097

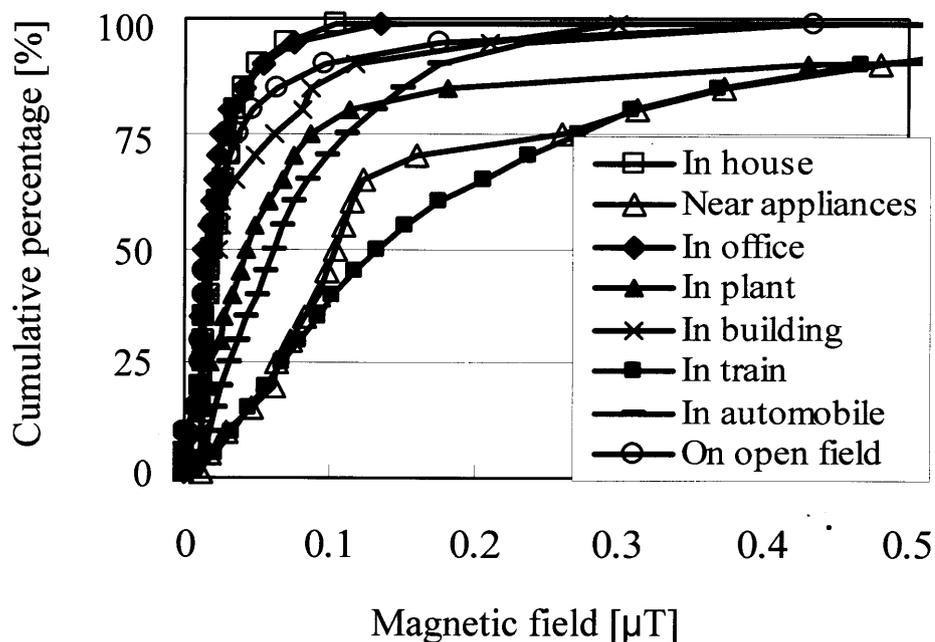


図 3-13 場所ごとの磁界の累積確率カーブ

Fig. 3-13. Cumulative probability curves of magnetic fields in various locations.

3.4 ばく露量推定可能性の検討

日常生活において人が受ける磁界の時間積分値（ばく露量）は、次式で定義され、磁界と同様に重要な物理量である。

$$\text{ばく露量} = \sum_i^n B_i \times t_i \dots\dots\dots (3-3)$$

ここで、 B_i (μT) は磁界、 t_i (h)はその磁界を受ける時間である。

磁界ばく露の長期的影響に関しては、疫学研究から居住環境磁界ばく露と小児白血病との間に弱いながらも統計的な関連性があることが報告されているが、生物学的研究では影響を及ぼす再現性のある結果波得られていない⁽¹²⁾。従って、磁界の長期ばく露の制限値に関する国際的なガイドラインはないが、ここでは時間を考慮した1つの指標として検討を行なった。

一般に、ばく露量は磁界を連続記録する測定器を身につけて行動することにより求められる。しかしながら、測定器装着により行動が制約される可能性があること、行動パターンが変わる度に実測が必要となることなどの問題点がある。そこで、ここでは図 3-13 に示した各場所における磁界とその場所に滞在する時間とを用いて、ばく露量の推定の可能性を検討する。このような推定は以前にも試みられている⁽⁷⁾が、今回はより多くのデータに基づいた推定と考えられる。

ある被験者に対して得られたばく露量の実測値と、図 3-13 に基づくばく露量の推定値との比較を行う。表 3-6 は実測値であり、8箇所場所に分類して滞在時間とその場所におけるばく露量を示している。磁界はサンプリング速度 3 秒で記録されているため、3 秒毎に記録された磁界に 3 秒を掛けて積算した値をばく露量の実測値としている。

表 3-6 ばく露量評価のため実測データ

Table 3-6. Results of a measurement for evaluation of exposure.

場所	滞在時間 (h)	ばく露量 ($\mu\text{T}\cdot\text{h}$)
住居内	6.61	0.232
家庭用電気機器付近	0.24	0.020
事務所内	4.55	0.098
工場内	2.30	0.059
建物内	0.09	0.002
電車内	0.81	0.073
自動車内	0.50	0.051
屋外	0.90	0.026
合計	16.01	0.562

一方、ばく露量の推定値は、次の手順で計算した。

- (1) 図 3-13 に示した累積確率曲線から、それぞれの場所における磁界を 10%毎に求める。
- (2) それぞれの場所での滞在時間は、表 3-6 に示した実際の滞在時間とする。
- (3) 磁界 (10%値から 90%値まで 10%毎) と滞在時間の積を、その場所におけるばく露量とする。総ばく露量は、全ての場所におけるばく露量の和とする。

ばく露量の実測値と推定値との比較を、表 3-7 にまとめて示す。例えば、自宅におけるばく露量の 50%値である $0.134 \mu\text{T}\cdot\text{h}$ は、図 3-13 における住居内の磁界の 50%値 $0.0202 \mu\text{T}$ と滞在時間 6.61 時間の積で計算されている。表中の各行の網かけの欄は実測値が含まれる範囲を表しており、いずれの場所においても、推定により求めた 20-80%値の範囲内に実測値があることが分かる。総ばく露量は、各場所におけるばく露量の実測値と推定値との差が相殺され、磁界の 50%値に基づいた推定値が実測値に近くなる。他の被験者のデータについても、同様の傾向が認められた。しかしながら、場所毎のばく露量の推定値精度の向上が必要である。このためには、より詳細な場所の分類と各場所における一層の磁界実測データの蓄積、各場所における磁界の時間変動と滞在時刻などが必要であり、今後検討を進める。

表 3-7 ばく露量の推定値と実測値との比較 [μT-h]

Table 3- 7. Comparison of estimated and measured exposures [μT-h].

場所	滞在 時間 (h)	磁界レベルの累積確率分布に基づくばく露量推定値									ばく露量 実測値
		10%値	20%値	30%値	40%値	50%値	60%値	70%値	80%値	90%値	
住居内	6.61	0.072	0.072	0.093	0.119	0.134	0.156	0.200	0.233	0.338	0.232
家庭用電気 機器付近	0.24	0.007	0.015	0.017	0.022	0.025	0.028	0.039	0.075	0.115	0.020
事務所内	4.55	0.000	0.050	0.050	0.064	0.065	0.086	0.107	0.014	0.246	0.098
工場内	2.30	0.026	0.041	0.060	0.074	0.098	0.131	0.175	0.262	0.992	0.059
建物内	0.09	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.007	0.011	0.002
電車内	0.81	0.027	0.046	0.064	0.083	0.108	0.143	0.192	0.250	0.378	0.073
自動車内	0.50	0.009	0.013	0.018	0.025	0.031	0.038	0.049	0.066	0.088	0.051
屋外	0.90	0.000	0.010	0.010	0.010	0.016	0.021	0.028	0.042	0.087	0.026
合計	16.01	0.142	0.142	0.313	0.399	0.479	0.605	0.794	0.949	2.255	0.562

3.5 結言

本章では、生活環境における低周波磁界の定量化を行った。主たる成果を以下にまとめる。

- (1) 測定器を身に付けて磁界を測定する場合、測定される磁界は機器装着場所に依存する。左右の腰に機器を装着して同時測定をした結果では、比較的大きな磁界を生じる発生源に近接する機会がほとんどなければ、両者で記録される磁界に大きな差はない。
- (2) 被験者の行動記録に基づいて、記録された磁界の時系列データを解析し、特定の環境や場所における特徴を抽出するとともに、その場所における磁界の累積確率分布を得た。
- (3) 電気機器保守点検作業時など磁界発生源に近づく場合などには磁界は高くなるが、その他の場所においては磁界の測定値の80%が0.2 μT 未満であった。
- (4) 各場所における磁界の累積分布とその場所における滞在時間とから、ばく露量の推定可能性を検討した。総ばく露量は実測値と推定値が概ね一致したが、各場所における両者には違いが認められる。場所の細分化とその場所における磁界実測データのさらなる蓄積、各場所における磁界の時間変化の把握などにより、ばく露量推定値の精度向上が可能になると考えられる。

第3章 参考文献

- (1) 電気学会電磁界生体影響問題調査特別委員会、第Ⅱ期報告書、「電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題」、pp.79-199, 2003.
- (2) N. Hayashi, K. Isaka, H. Kume and Y. Yokoi, “Power frequency magnetic field in a 187/66-kV electric power substation”, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, vol. 2, pp.505-510, 1989.
- (3) K. Isaka, N. Hayashi, Y. Yokoi and M. Okamoto, “Characteristics of ground-level electric and magnetic fields generated by ac power transmission lines”, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol. 2, pp.511-514, 1989.
- (4) 清水雅仁、長江敏広、加藤克巳、早川直樹、匹田政幸、大久保仁：「送電線周辺磁界に及ぼす電力線電流条件の影響」、電気学会論文誌B、118巻、4号、pp.437-443, 1998.
- (5) 後藤直樹、宇賀雄次、加藤克巳、清水雅仁、吉田篤哉、大久保仁：「電力線電流条件に基づいた77kV変電所構内磁界環境の定量化に関する検討」、電気学会論文誌B、121巻、7号、pp.874-880, 2001.
- (6) T. Ando, K. Naito, Y. Mizuno, M. Moreno, G. Aponte, H. Cadavid, M. Castro, “Power frequency electric and magnetic fields measurements in Japan and Latin-American countries”, EMC Europe, Paper No. OE-5, 2002.
- (7) 富田誠悦、高須和彦、竹下和磨：「交流磁界暴露実態と磁界暴露モデル」、電力中央研究所研究報告書No. T91090, 1992.
- (8) 電気学会電磁界生体影響問題調査特別委員会、第Ⅱ期報告書、「電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題」、pp.41-47, 2003.
- (9) 原子力安全・保安部会、電力安全小委員会：「電力設備電磁界対策ワーキンググループ（報告書）」、2008.
- (10) M. Siva, N. Hummon, D. Rutter and C. Hooper, “Power frequency magnetic fields in the home”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, No. 1, pp. 465-478, 1989.
- (11) IEEE Standard: “Procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from ac-power lines”, No.644, 1994.
- (12) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 Hz)”, Health Physics, Vol. 99, No.6, pp.818-836, 2010.

