

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

これまでも多くの送電線⁽¹⁾⁻⁽³⁾や変電所^{(4), (5)}、その他電力設備周辺^{(6), (7)}の商用周波電界・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などについてもその計算結果が報告され⁽⁸⁾、実際のフィールド調査の実施例も紹介されている^{(9), (10)}。しかしながら、同一のグループによる同一の測定装置、同一の手順での電力設備の内部やその周辺の電界・磁界の調査例は少ないように思われ、系統だった電力設備付近の実際の電界・磁界の測定は重要なものと考えられる。また、それら測定で得られた値と電界・磁界に関する国際規制値や各国の国内標準値との比較・評価も重要である。

このような状況の中、海外での調査を計画し、幾つかの国の協力を得て同一の測定器を用いて同一の測定方法で電界・磁界の測定を実施した。

ここでは、日本、コロンビア、キューバ、インドネシア、メキシコ、タイ、そして米国、計7ヶ国での110kV, 115kV, 220kV, 230kV, 275kV, 400kV, そして500kVの電力設備周辺の電界・磁界を測定した結果をまとめる。

4.2 測定実施場所

表4-1に、今回測定を実施した場所のリストを示す。7ヶ国の110kVから500kVまで、計23ヶ所の電力設備での電界・磁界の測定を実施した。

4.3 測定方法

前述したように、測定箇所が広く各国にまたがる場合には、同一の測定器で同一の測定手順で実施するよう取計らうことが肝要である。測定方法には、定点測定と連続測定があり、本研究ではその両方で実施した。

4.3.1 定点測定

定点測定とは測定器をある決められた場所に固定し、電界、磁界を測定する方法で、その一点におけるある時刻におけるデータが得られる。今回の定点測定では、古河電工製の電界強度計、Enertech製磁束密度計を用いた。これら測

定器の仕様は表 4-2 に示すとおりである。測定された磁界（磁束密度）は、実効値である。地上より 1m の高さの位置で測定した。図 4-1 と図 4-2 に、それぞれ電界測定器と磁束密度計の構造を示す。

変電所内での電界・磁界の観測では、図 4-3 に示すように垂直に位置する 2 つの直線に沿って 1m ごとに定点測定を実施した。また、送電線下の測定では、図 4-4 のように、電線の地上高が最も低い最大弛度の地点で送電線に垂直方向の直線に沿って 1m ごとに定点測定を実施した。送電線下での測定は IEEE 規格 644-1944^[11] の表 4-3 に示すガイドラインに従って実施した。

表 4-1 測定場所リスト

Table 4-1. Locations of measurement.

国	対象電力会社	場所	線路電圧, kV
コロンビア	Empresa de Energia del Pacifico S.A、 Interconexion Electrica S.A	変電所構内	500
			230
		送電線下	500
			115
キューバ	Empresa de Construccion de la Industria Electrica	変電所構内	220
			110
		変電所構内	220
			110
		送電線下	220
インドネシア	PLN	変電所構内	500
		送電線下	500
日本	中部電力	変電所構内	500
		送電線下	275
メキシコ	メキシコ電力庁、 首都電灯電力公団	変電所構内	400
		変電所構内	400
		送電線下	400
		送電線下	400
タイ	EGAT	変電所構内	500
		送電線下	500
米国	BPA	変電所構内	500
	Salt River Project	変電所構内	500
	BPA	送電線下	500
	Salt River Project	送電線下	500

表 4-2 定点測定用測定器の仕様

Table 4-2. Specifications of instruments for spot measurements.

	電界強度計	磁界密度計
型番	EFM-309	EMDEX-II
センサー配置	10cm 間隔の 2 枚の金属板 (10cm ²)	3 方向法コイル
測定成分	鉛直方向成分のみ	3 軸方向および合成
測定範囲	0 - 9 kV/m	0.01 - 300 μT
絶縁棒	アクリル樹脂	-----
構造	図 4-1	図 4-2
メーカー	古河電気工業(株)	Enertech Consultants

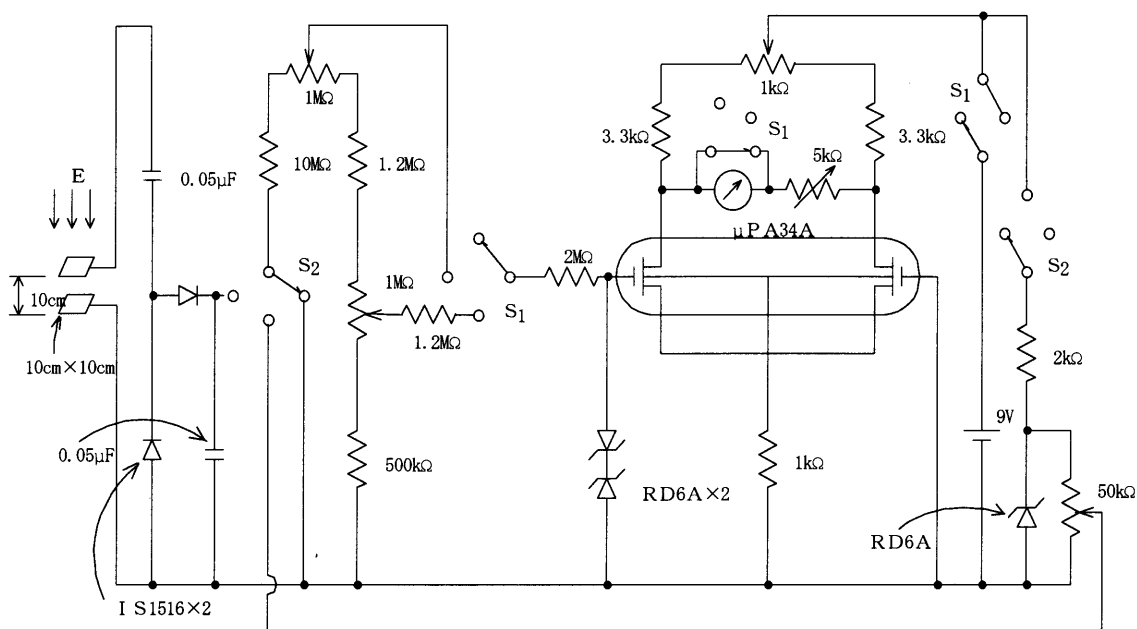


図 4-1 EFM-309 型電界強度計の回路図

Fig. 4-1. Circuit diagram of EFM-390 electric field strength meter.

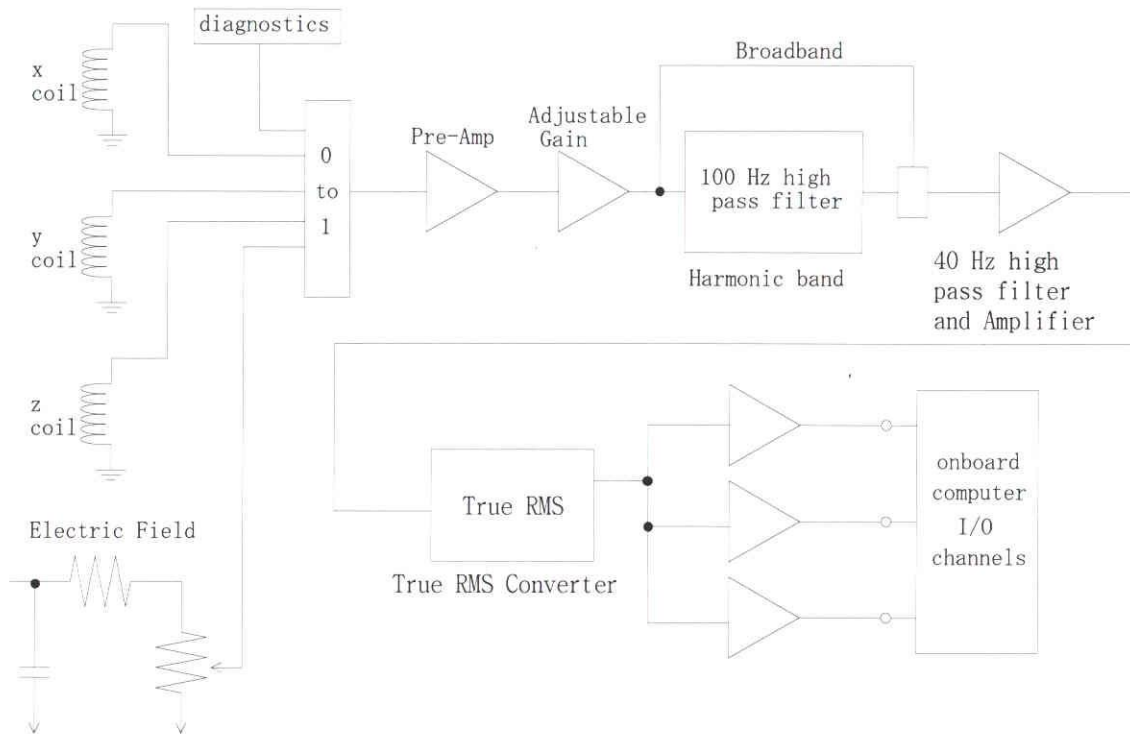


図 4-2 EMDEX II ブロック図
 Fig. 4-2. Block diagram of EMDEX II.

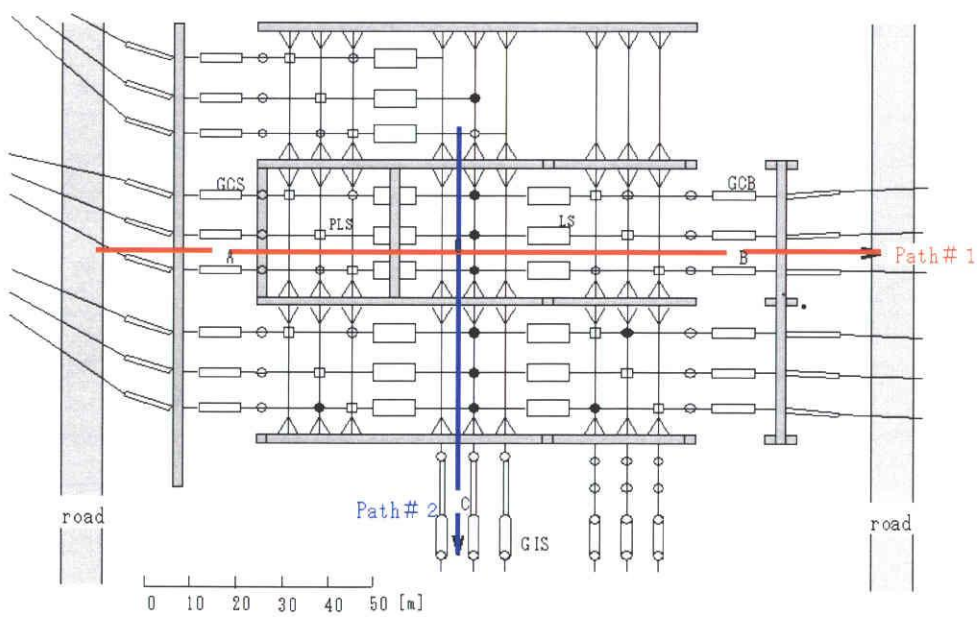


図 4-3 500 kV 変電所内の定点測定の測定パスの例
 Fig. 4-3. An example of spot measurement paths in a 500-kV substation.

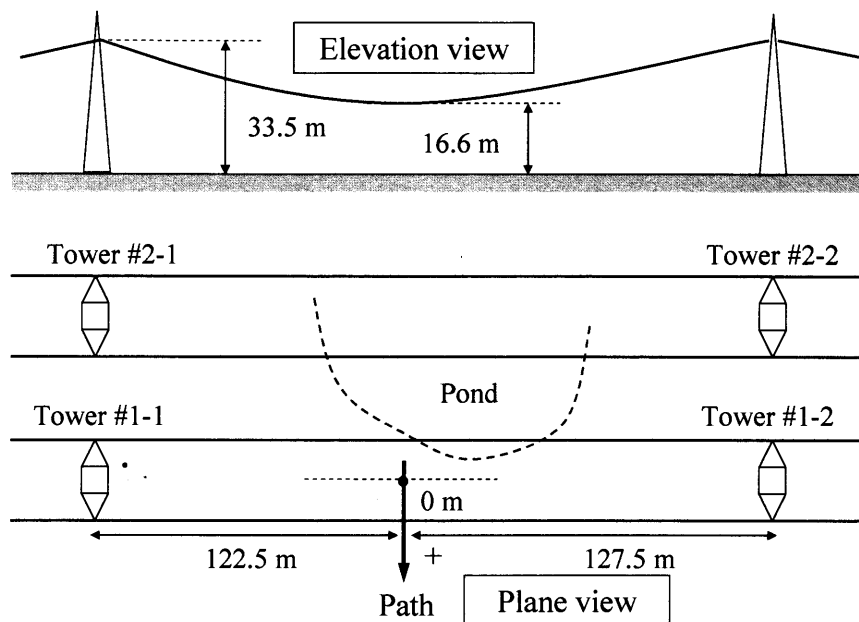


図 4-4 500 kV 送電線下の定点測定のための測定パスの例

Fig. 4-4. An example of spot measurement path under 500-kV transmission lines.

表 4-3 IEEE 規格 644-1994, “Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines” の測定方法の概要

Table 4-3. Summary of measuring method in IEEE Standard 644-1994, “Measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines”.

項目	主な内容
電界強度測定	鉛直方向成分を測定する。 地上高 1m の値を測定する。 測定時、測定者は測定器から 2.5m 以上離れる。 近傍接地物に注意して測定する。
磁束密度測定	一次元成分最大値か三次元成分の合成値を測定する。 地上高 1m の値を測定する。 電力設備以外の周囲の磁界発生物の影響を受けないように測定する。

4.3.2 連続測定

連続測定は、作業者が通常の点検業務を行う場合を想定し、業務に従事している間に受ける磁界の評価を目的として実施した。従って、定点に測定器を固定して電界あるいは磁界の時間変化を記録するのではなく、測定者の体に測定器を装着させ測定者が対象場所を歩いて測定するため測定器は小型軽量が好ましい。本測定では、ポータブル性、電界と磁界が同時に測定できること、専用のデータ解析ソフトが付属されていることから EMDEX-II を測定器として選んだ（図 4-2 参照）。その仕様を表 4-4 に示す。但し、電界測定用のセンサについては、ポータブルなものが市販されておらず、図 4-5 に示すような測定者が肩に固定して測定できるようなステンレス製のメッシュ形状のセンサを製作し電界を測定した⁽¹²⁾。肩の高さでの電界値は高めに観測されるので、補正は地上高 1m の高さに換算した。この場合、バスバーのような架空設備からの電界が殆どであると想定し⁽⁹⁾、測定の簡便さを考慮し、定点測定と同様に垂直方向の電界を測定した。水平方向の電界の測定については今後の課題である。磁界については、地上約 1m の位置の測定者の腰に固定された測定器で直接測定される。電界、磁界ともに 3 秒ごと測定され保存される。測定終了後、測定器に保存されたデータは PC に移し、専用のソフトで解析した。

このように測定者は肩に電界センサ、腰に EMDEX-II を固定させて測定した。

表 4-4 連続測定用測定器の仕様

Table 4-4. Specifications of instrument for continuous measurements.

型	EMDEX II	
	電界	磁界
測定対象	電界	磁界
大きさ、 mm	170×70×40	
重量、 g	340	
センサ	メッシュ	コイル（三方向）
測定成分	一方向	合成
測定範囲	1 - 200 kV/m	0.01 - 300 μT
測定単位	誘導電流	磁束密度

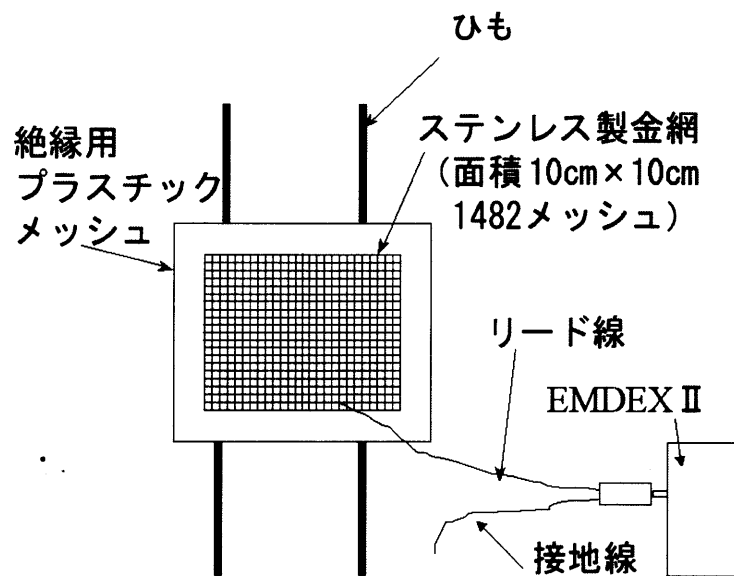


図 4-5 EMDEX II とともに連続電界測定用に使用されたセンサ

Fig.4-5. A sensor used for continuous measurement of electric field together with EMDEX II.

4.4 定点測定結果

4.4.1 変電所内

図 4-6 および 4-7 に 500 kV 変電所での代表的な電界・磁界の測定結果を示す。図 4-6 は図 4-3 の変電所の測定箇所パス # 1 の測定結果で、図 4-7 はパス # 2 の測定結果である。ブスバー下で 9 kV/m の電界が観測され、GCS, GIS 付近では 21 μ T の最大磁界が観測された。

図 4-8 および 4-9 は従来の機器が設置された図 4-10 に示す別の 500 kV 変電所のそれぞれパス # 1、パス # 2 の電界・磁界の測定結果である。ガス絶縁機器が使われた変電所と比べ磁界が低い理由は、機器との絶縁離隔距離の違いによるものと思われる。

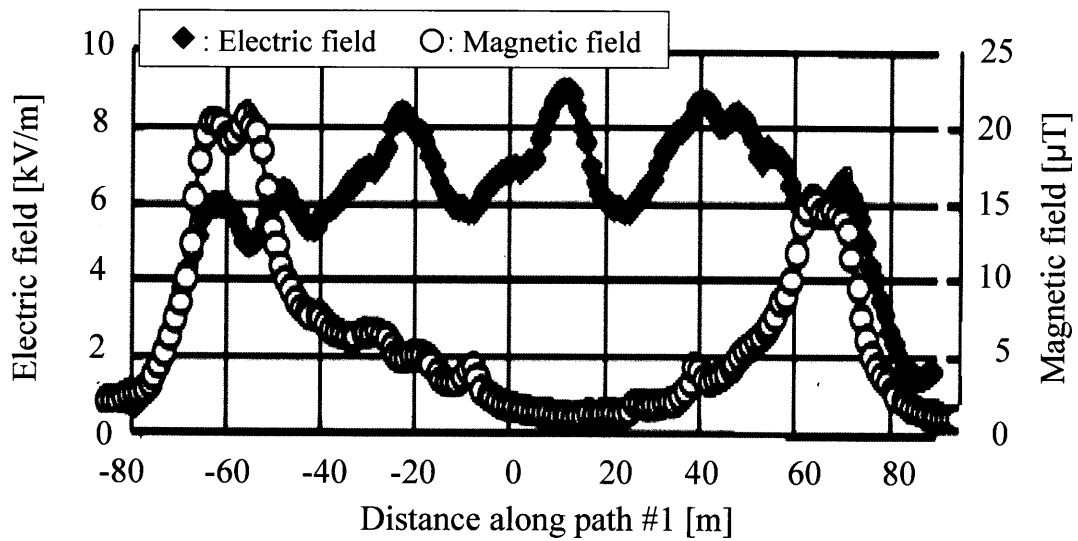


図 4-6 500 kV 変電所内の電界・磁界の定点測定値 (図 4-3 中のパス#1 に沿った値)

Fig. 4-6. Electric and magnetic field profiles inside 500-kV substation obtained by spot measurement along Path 1 in Fig. 4-3.

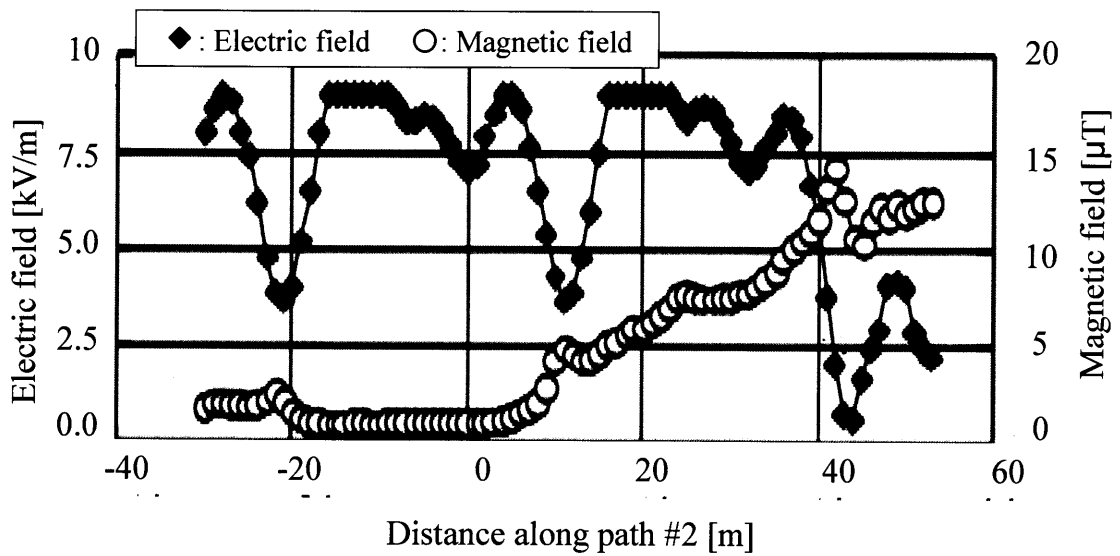


図 4-7 500 kV 変電所内の電界・磁界の定点測定値 (図 4-3 中のパス#2 に沿った値)

Fig. 4-7. Electric and magnetic field profiles inside 500-kV substation obtained by spot measurement along Path 2 in Fig. 4-3.

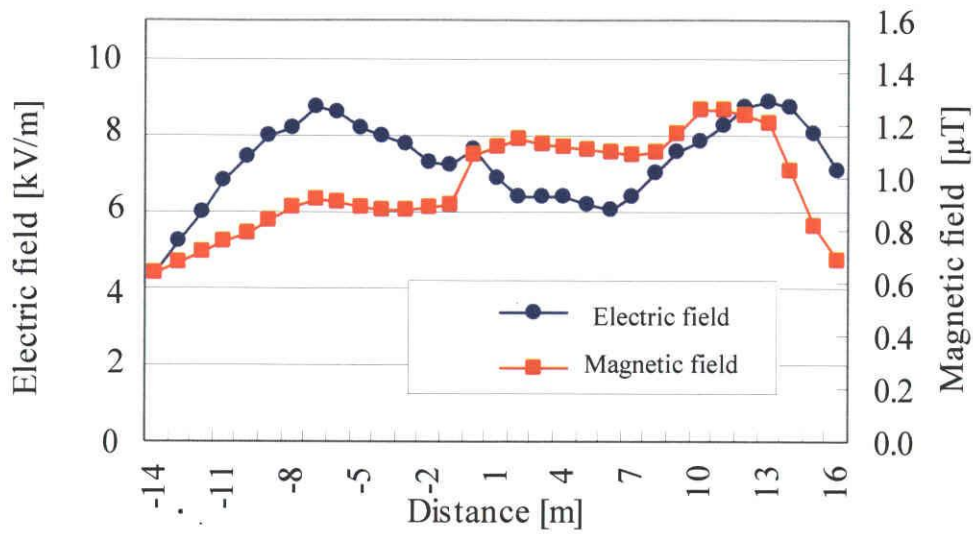


図 4-8 他の 500 kV 変電所内の電界・磁界の定点測定値（図 4-10 のパス 1 に沿った値）

Fig. 4-8. Electric and magnetic field profiles inside another 500-kV substation obtained by spot measurement along Path 1 in Fig. 4-10.

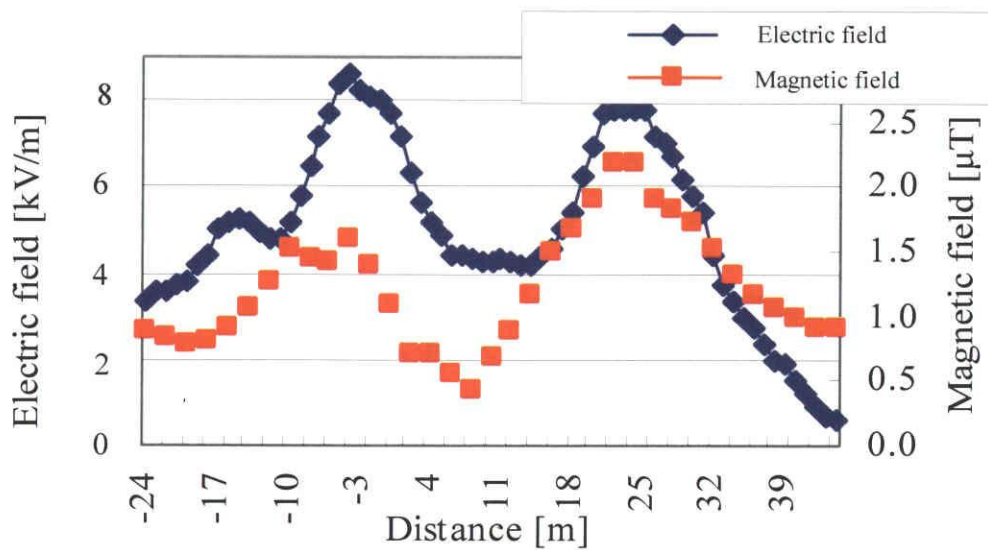


図 4-9 他の 500 kV 変電所内の電界・磁界の定点測定値（図 4-10 のパス#2 に沿った値）

Fig. 4-9. Electric and magnetic field profiles inside another 500-kV substation obtained by spot measurement along Path 2 in Fig. 4-10.



図 4-10 図 4-8 および 4-9 で示した 500 kV 変電所内の定点測定の測定パス
Fig. 4-10 Spot measurement paths in a 500-kV substation shown in Figs. 4-8 and 4-9.

4.4.2 送電線下

図 4-11 および 4-12 は、図 4-4 に示した 500 kV 送電線下のそれぞれ電界と磁界の測定結果である。併せて、それぞれ電位係数、アンペールの法則に基づいて求めた電界、磁界の計算値も示した（付録 A 参照）。測定はゴルフコースにある水平に走る 2 回線送電線下で実施した。この場合、平行してもう 1 つの 2 回線 500 kV 送電線が走っている。この場合、最大電界で 23 V/cm、最大磁界で $2.0 \mu\text{T}$ の値が電線下で観測された。計算値は電界、磁界とも実測値に近い値が得られた。

図 4-13 は他の 500 kV 送電線下の電界・磁界測定結果と計算値である。電線の配置は図に示すように、一回線での三角配置で、50 V/cm の最大電界が最下相電線の下で観測されている。この場合も、実測値と計算値はよく一致している。

図 4-14 および 4-15 は、275 kV 送電線下でのそれぞれ電界と磁界の測定値と計算値を示したものである。この場合も上述の 500 kV 送電線での測定と同様、実測値は計算値とよく合致している。

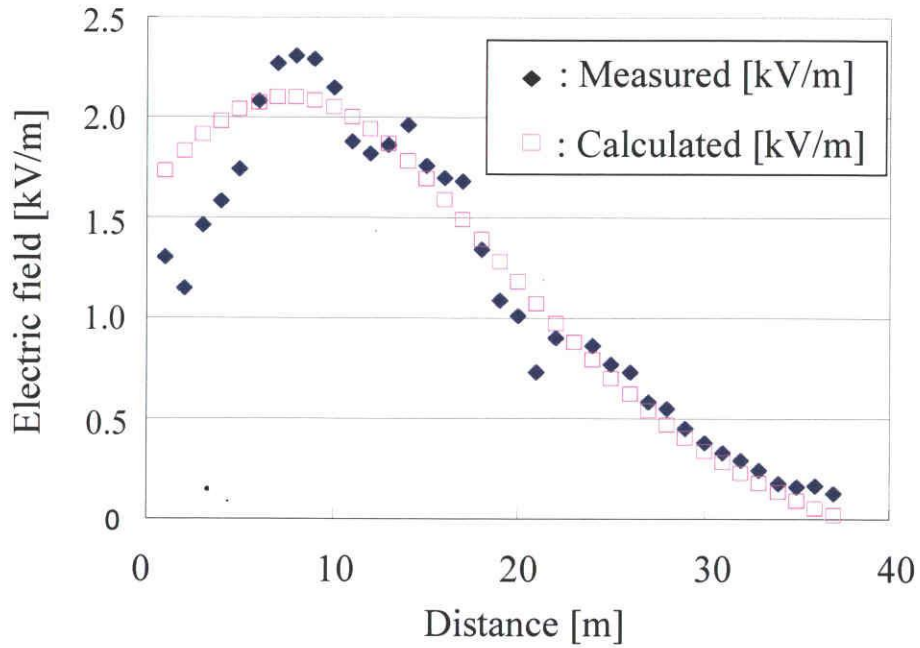


図 4-11 500 kV 送電線下の定点測定電界と計算値 (図 4-4 中のパスに沿った値)

Fig. 4-11. Electric field profiles under a section of 500kV transmission line by spot measurement along Path in Fig. 4-4.

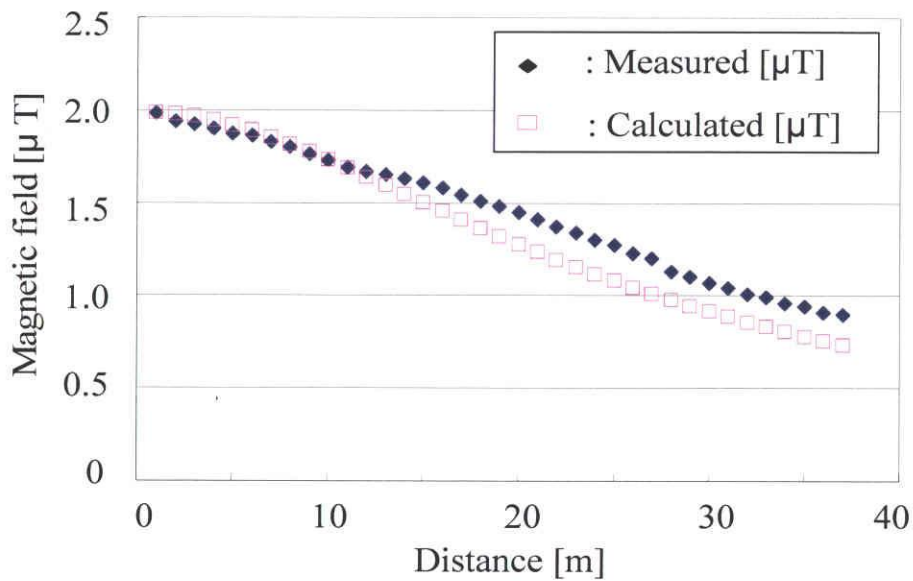


図 4-12 500 kV 送電線下の定点測定磁界と計算値 (図 4-4 中のパスに沿った値)

Fig. 4-12. Magnetic field profiles under a section of 500-kV transmission line by spot measurement along Path in Fig. 4-4.

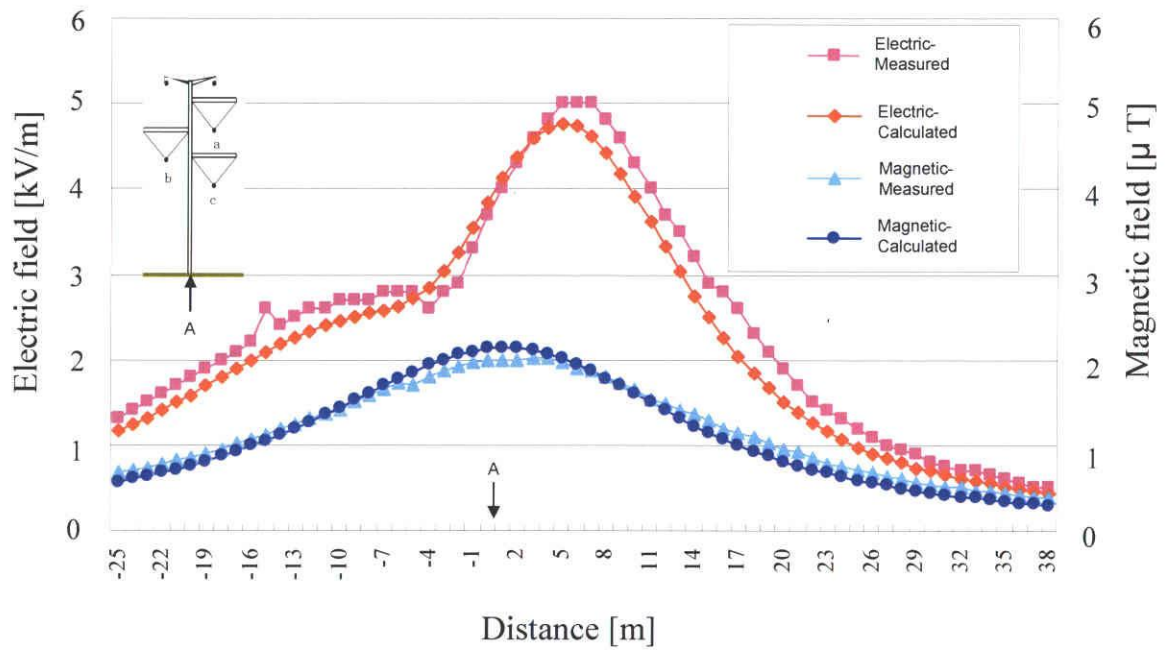


図 4-13 500 kV 送電線下の電界・磁界観測値と計算値例

Fig. 4-13. Example of electric and magnetic fields under a 500 kV transmission line.

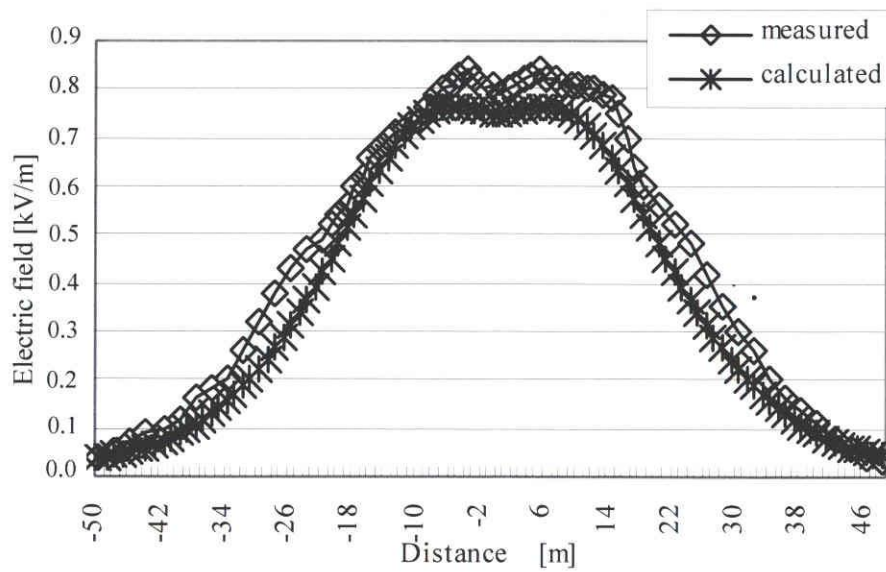


図 4-14 275-kV 送電線下の定点測定電界と計算値

Fig. 4-14. Electric field profiles by spot measurement and its calculated values under a section of 275-kV transmission line.

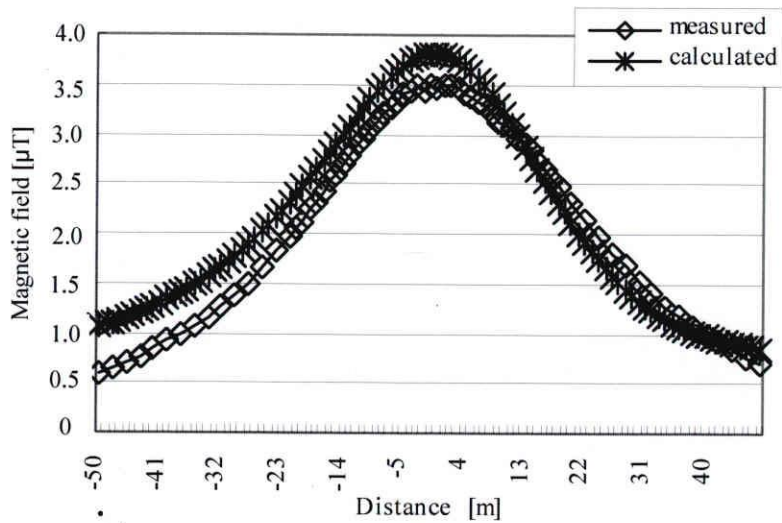


図 4-15 275-kV 送電線下の定点測定磁界と計算値

Fig. 4-15. Magnetic field profiles by spot measurement and its calculated values under a section of 275-kV transmission line.

4.5 連続測定結果

4.5.1 変電所内

図 4-16 および 4-17 はそれぞれある 500 kV 変電所内での電界と磁界の連続測定結果である。先にも述べたようにこのデータは固定点で得られたものではなく、測定者が通常の点検業務を想定して変電所内を歩き回って観測されたものである。測定の高さは地上から約 1m である。

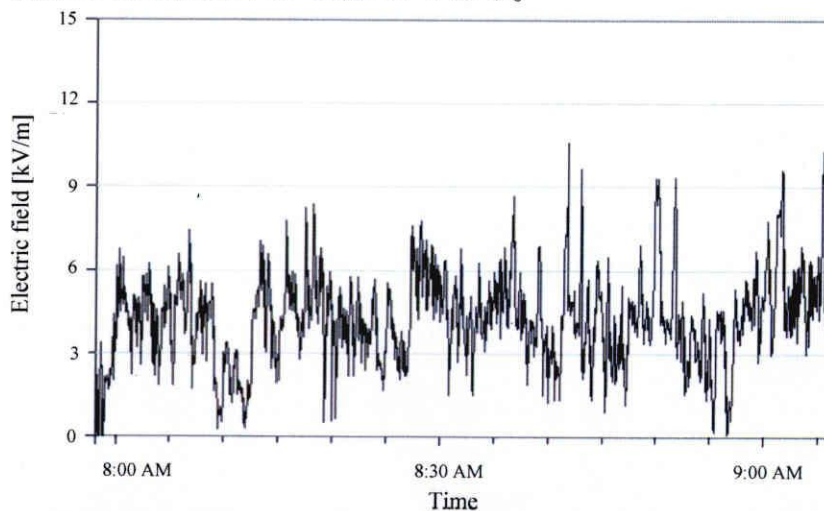


図 4-16 500 kV 変電所内で電界の連続測定値の時間変化例

Fig. 4-16. Example of time variation of electric field obtained by walking around inside a 500-kV substation.

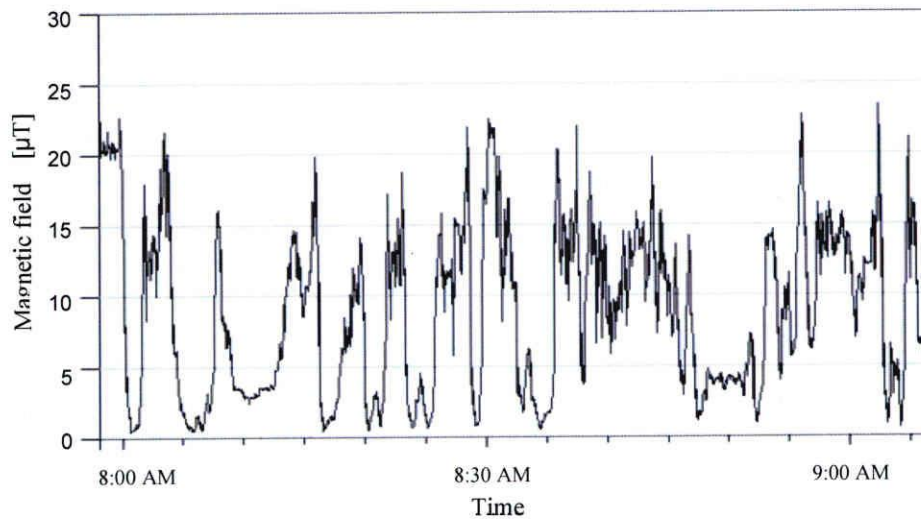


図 4-17 500 kV 変電所内で磁界の連続測定値の時間変化例

Fig. 4-17. Example of time variation of magnetic field obtained by walking around inside a 500-kV substation.

図 4-18 および 4-19 に、それぞれ、各変電所内で連続測定で得られた電界と磁界の累積頻度をまとめる。電界に関しては線路電圧の依存性は認められるが磁界では認められない。磁界は電力設備に流れる電流の大きさに依存するためと考えられる。

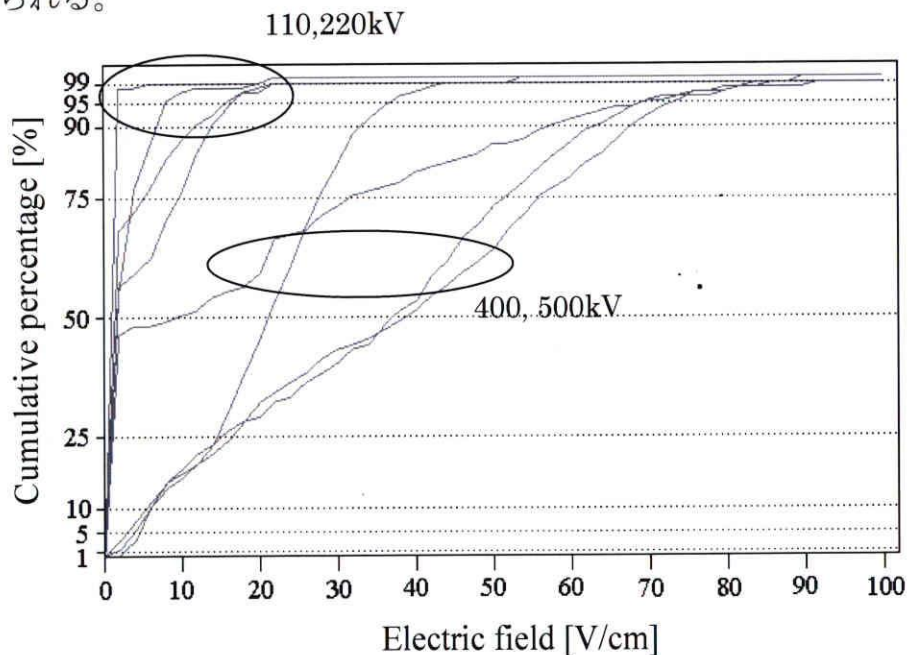


図 4-18 変電所内での連続測定による電界の累積頻度の比較

Fig. 4-18. Comparison of cumulative percentage of electric field obtained by continuous measurement in substations.

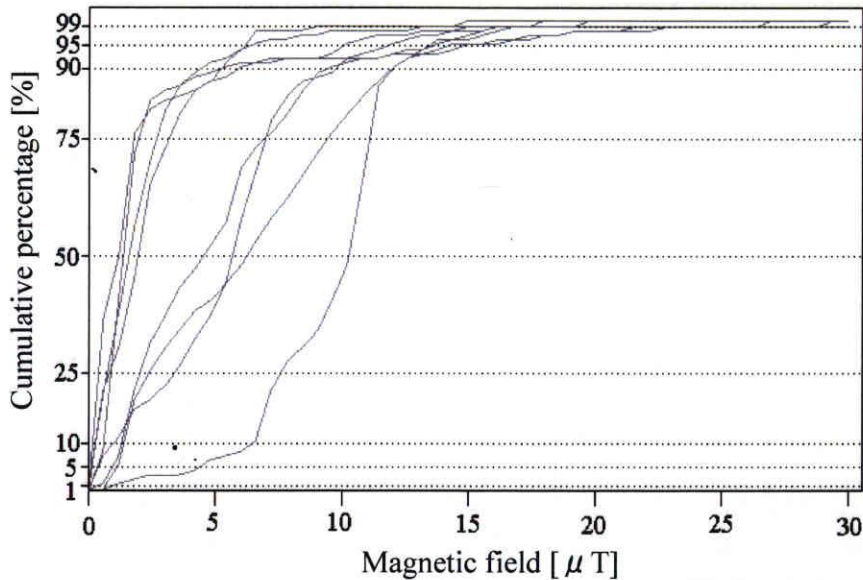


図 4-19 変電所内での連続測定による磁界の累積頻度の比較

Fig. 4-19. Comparison of cumulative percentage of magnetic field obtained by continuous measurement in substations.

4.5.2 送電線下

送電線下での電界・磁界の連続測定についても変電所内での測定と同様の方法で実施した。図 4-20 および 4-21 に 500 kV 送電線下での、それぞれ電界、磁界の測定結果例を示す。

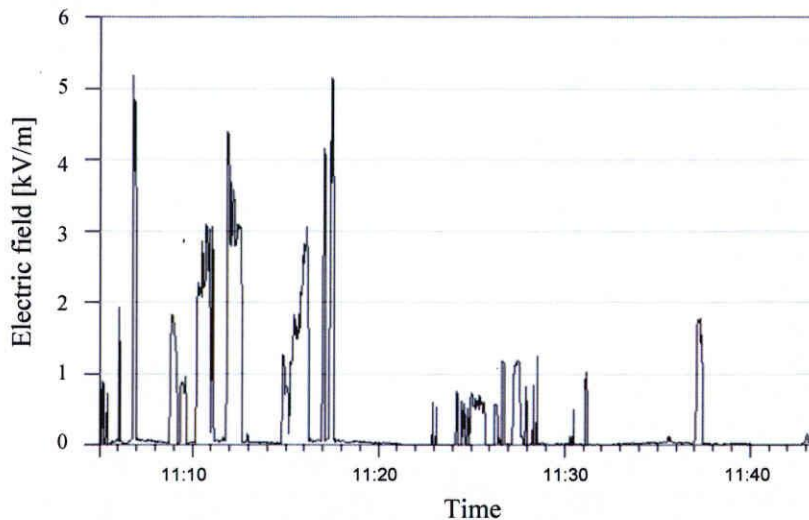


図 4-20 500 kV 送電線下で電界の連続測定値の時間変化例

Fig. 4-20. Example of time variation of electric field obtained by continuous measurement under 500-kV transmission line.

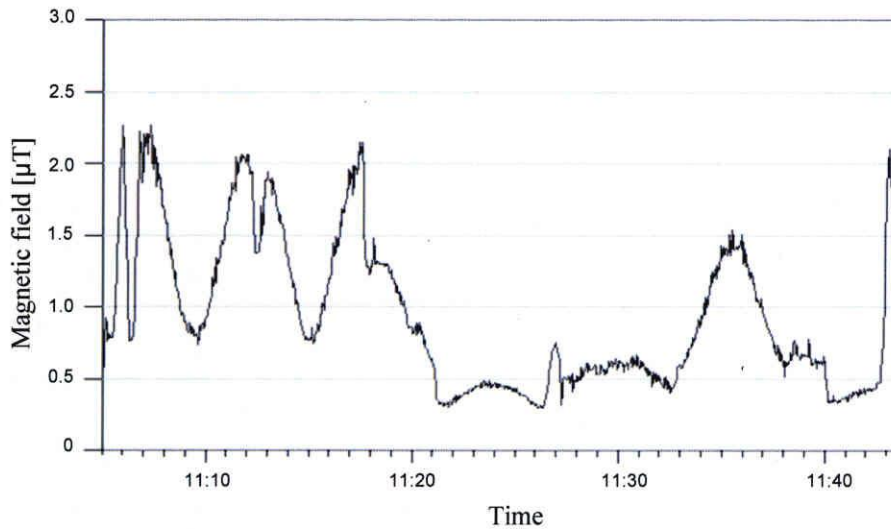


図 4-21 500 kV 送電線下で磁界の連続測定値の時間変化例

Fig. 4-21. Example of time variation of magnetic field obtained by continuous measurement under 500-kV transmission lines.

4.6 考察

4.6.1 定点測定による最大観測値の比較

図 4-22 および 4-23 は、それぞれ変電所内で定点測定により測定された最大電界と最大磁界をまとめたものである。また、図 4-24 および 4-25 は、それぞれ送電線下で定点測定により測定された最大電界と最大磁界をまとめたものである。尚、これら図中で、青色の棒グラフは線路周波数が 60Hz、白抜き棒グラフが 50Hz のデータである。

変電所内で測定された最大電界は、線路電圧が高いほど大きい傾向がある。これに対し、送電下の最大電界は線路電圧が低くても大きい場合がある。これは、電線の地上高が低いためである。これに対し、磁界は機器あるいは送電線に流れる電流に依存するため、変電所内および送電線下いずれにおいても線路電圧との関係は認められない。

測定された最大電界および最大磁界を、国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) が示す職業的ばく露に関する参考レベル⁽¹³⁾と比較してみる。変電所内、送電線下の殆どの場合において、最大電界は参考レベルより低い。わずかに変電所内の変圧器近傍など限られた箇所で、電界が参考レベルをわずかに上回る場合がある。通常の業務において、保守作業者などがその場所に長時間に亘って滞在することは考えにくい。

一方、磁界については、変電所内、送電線下ともに今回得られた全てのデータが ICNIRP の職業ばく露に関する参考レベル (50Hz, 60Hz とともに $1000\mu\text{T}$) に比べ、はるかに小さい値である。変電所においては電流経路からの距離が確保されており、また、送電線の地上高が高いため、磁界の測定値は低目になったと考えられる。

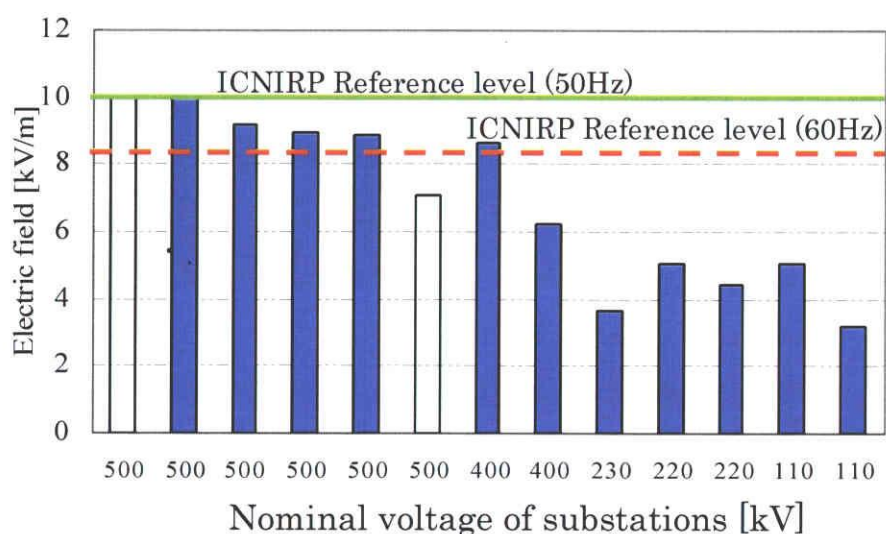


図 4-22 変電所での定点測定による最大電界

Fig. 4-22. Maximum electric field obtained in substations by spot measurement.

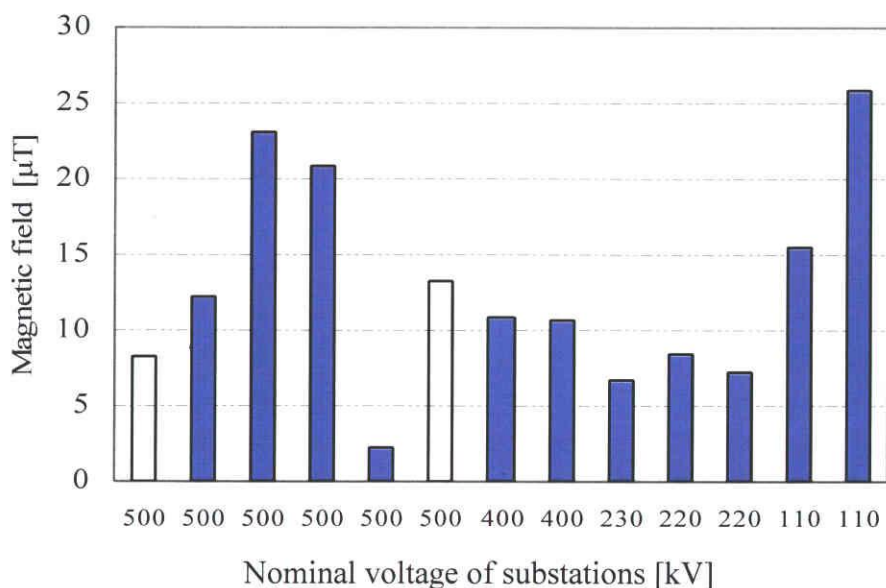


図 4-23 変電所での定点測定による最大磁界

Fig. 4-23. Maximum magnetic field obtained in substations by spot measurement.

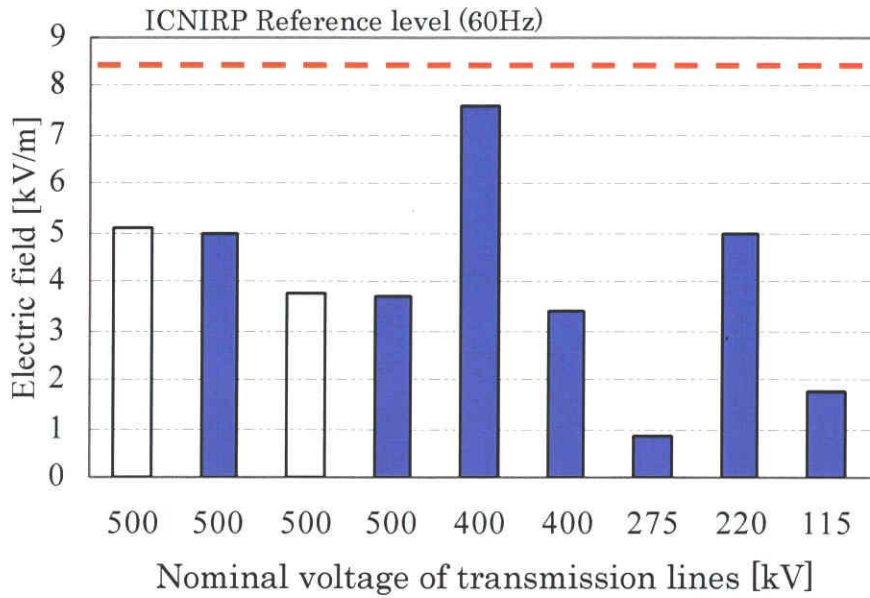


図 4-24 送電線下での定点測定による最大電界

Fig. 4-24. Maximum electric field obtained under transmission lines by spot measurement.

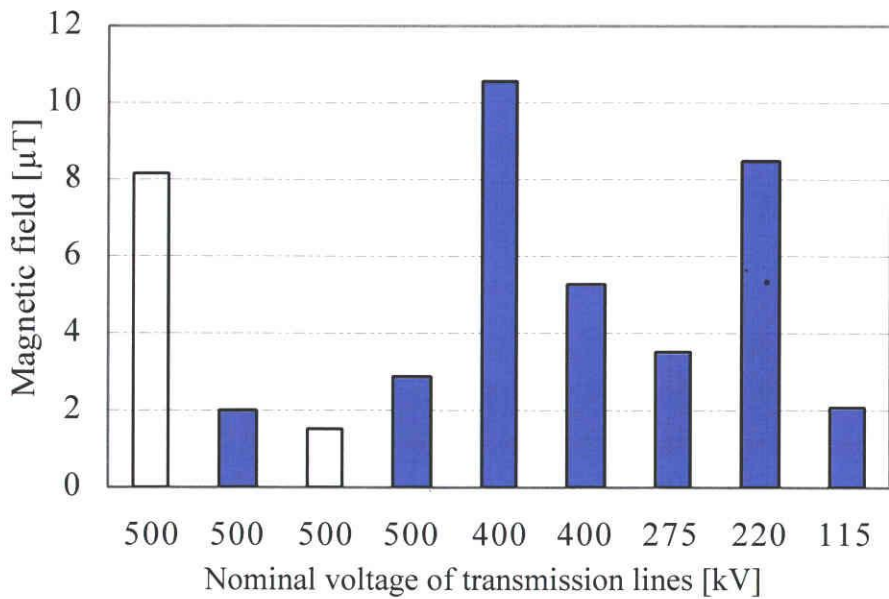


図 4-25 送電線下での定点測定による最大磁界

Fig. 4-25 Maximum magnetic field obtained under transmission lines by spot measurement.

4.6.2 連続測定における電界・磁界の累積値

連続測定で得られた電界、磁界についても、4.6.1 節で述べた定点測定の結果と同様な傾向が認められた。

連続測定は、人が受ける磁界の時間積分値（ばく露量）を求めるのに有効な方法である。表 4-5 に図 4-16 および 4-17 に示した 500-kV 変電所で連続測定された累積電界・磁界値を示す。累積値は下記式より求めた。X は累積値（単位は、電界の場合は、kV/m-h、磁界の場合は μT-h）、 F_i は測定値、 N はサンプル数、 ΔT は測定時間間隔である。

$$X = \sum_{i=0}^N F_i \Delta T \dots\dots\dots (4-1)$$

図 4-5 連続測定による 500-kV 変電所での累積電界・磁界値

Table 4-5. Time Integrals of electric and magnetic fields exposed to volunteer at a 500-kV substation by continuous measurement.

	電界 [kV/m-h]	磁界 [μT-h]
測定値	4.78	99.27

4.7 結言

本章では、わが国を含む 7 ヶ国において 110kV から 500kV の変電所内および送電線下における商用周波電界・磁界の実態調査を行った結果をまとめた。主な成果を次に示す。

- (1) 同一の測定器を用い同一の測定手順に従って電界および磁界を定量化した。これにより、結果の比較が比較的容易にできるようになった。
- (2) 変電所内では、電界および磁界ともにほとんどの測定値は ICNIRP の職業的ばく露に関する参考レベルを下回った。しかし、極めて限られた箇所においてのみ電界が参考レベルをわずかに上回った変電所もあった。
- (3) 送電線下の電界および磁界は、ICNIRP の示す職業的ばく露に関する参考レベルと比べ、はるかに低い値であった。

第4章 参考文献

- (1) 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.
- (2) A. 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 後藤直樹、宇賀雄次、加藤克己、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) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.951-955, 2007.
- (9) I. 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.
- (10) D. Clement, F. Deschamps, I. Magne, M. Burceanu, “Inter-laboratory 50 Hz

- EMF measurement” , BioEM 2009, P-194, 2009.
- (11) ANSI, “IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power lines” , ANSI/IEEE Std. 644-1994, 1994.
 - (12) Y. Mizuno, N. Matsubara, K, Naito, “Development of Portable Electric Field sensor for Time-Integrated Electric Field Measurement” , Seminar on Effect of EMF on Biological Systems in Indonesia: focusing on EMF quantities, Bandung, Indonesia, March 5, 1997.
 - (13) 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.

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

前章までに、身近にある磁界発生源としての家庭用電気機器などを対象として発生磁界の特性を、また、発生源は特定できないものの生活環境において受ける磁界の特性を、それぞれ定量化するとともに評価を行った。さらに、電力設備近傍における電界・磁界の定量化および結果の相互比較のために、同一測定器および同一手順による測定を提案し、変電所内および送電線下の電界・磁界を実態調査により定量化した。

このような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。これまでに磁界の生体への影響調査のために、疫学研究や生物を用いた研究が鋭意行われてきた。しかしながら、依然として不明な点が多く、引き続き調査研究が行われている。

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。しかしながら、工学者が生体影響に関する研究を行うことも価値があると考え、医学専門家と相談の上、比較的取り扱いの容易なショウジョウバエを用いた実験を行うことにした。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表 5-1 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必要と考えられる。

そこで、本章では第 2 章から第 4 章で述べた実態調査結果を踏まえて設定した $0.05\mu\text{T}$ から 60mT の間の 5 つのレベルの 60Hz 磁界が、ショウジョウバエに及ぼす影響を実験的に評価し、さらに統計的検討を加えた結果について述べる。

5.2 供試小生物の選択

今回、供試小生物として下記理由から、図 5-1 の外観写真に示すようなキイロショウジョウバエ (*Drosophila melanogaster*) (以下、ショウジョウバエ) を用いた。全長が $1.5\sim 4.0\text{mm}$ で、一般にメスの方がオスと比べ大きい。

- (1) 寿命が短く、短期間で何世代に亘る実感が可能。
- (2) 一回の実験で多くの個体数を評価できる。
- (3) 繁殖力が強い。
- (4) 飼育が容易である。

尚、本研究で供試サンプルは、東京医科歯科大学医学部法医学教室から、1992年に優性遺伝の赤眼のハエを、1993年に劣性遺伝白眼（詳細は後述）のハエを分譲してもらい、専門家の指導の下、飼育・実験を実施した。

表 5-1 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⁽²⁾

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

研究者	目的	対象	磁界強度と曝露特性	結果
Graham 2000 ⁽³⁾	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	・60Hz ・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 ⁽⁴⁾	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	・50Hz ・0.5, 5mT ・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 ⁽⁵⁾	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	・50Hz ・20mT ・24hr	・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 ⁽⁶⁾	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レポーター遺伝子	・50Hz ・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。

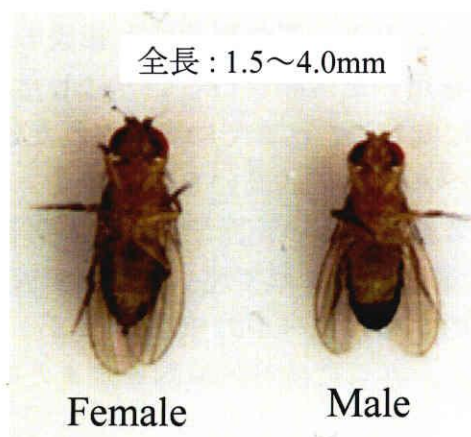


図 5-1 キイロショウジョウバエ外観

Fig. 5-1. Appearance of fruit flies

図 5-2 はショウジョウバエの発育の時間的段階を示したもので、完全変態の昆虫であるので発生段階としては、卵、幼虫、さなぎ、および成虫の4期に大別できる⁽⁷⁾。羽化は適切な条件下(25°C、十分な栄養)で、産卵後約10日で完了し、寿命は40~50日である。また、純血種(purebred strains)であり⁽⁸⁾、卵の段階から容易に管理ができる。ショウジョウバエの寿命は周囲環境、特に温

度の大きく影響されるので、実験にあたっては図 5-3 および図 5-4 に示すエアコン付きの環境実験装置を準備した。本実験装置の内部は、610 x 1,500 x 860 mm の寸法で温度 25.8~26.7°C に保たれている。図 5-5 に温度管理チャートの一例を示す。

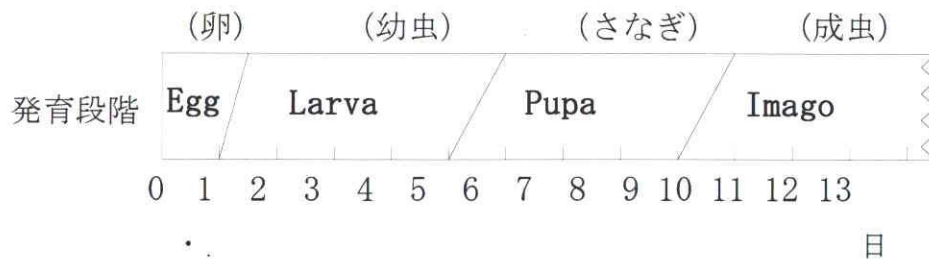


図5-2 ショウジョウバエの発育段階

Fig.5-2. Stage of development of fruit flies.



図 5-3 環境実験装置の概観写真

Fig. 5-3. Photo of the environmental chamber.

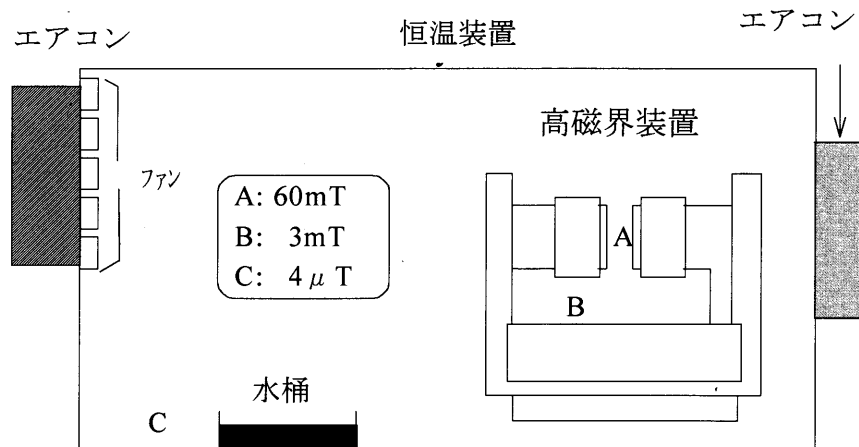


図 5-4 環境実験装置構成図

Fig.5-4. Illustration of the environmental chamber.

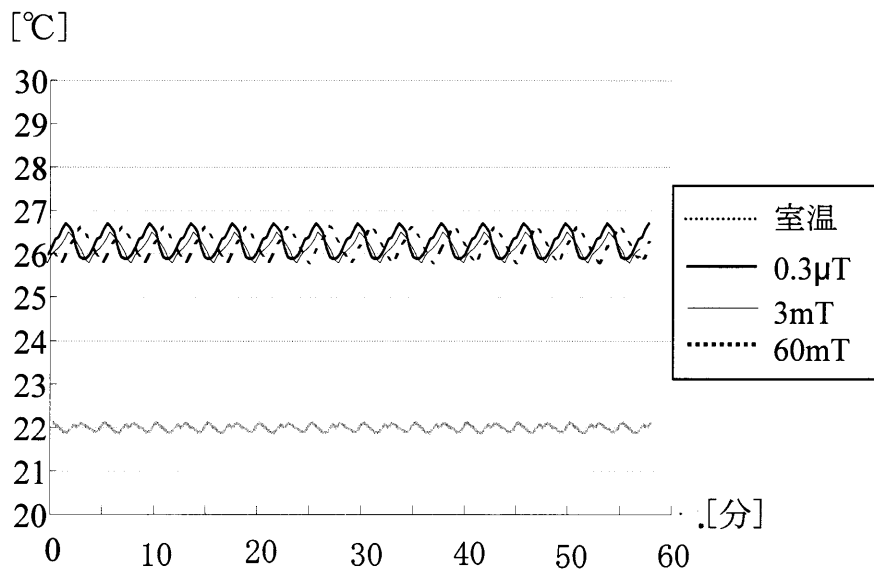


図 5-5 環境実験装置内の温度変化

Fig. 5-5. Typical ambient temperature variation with time in the environmental chamber.

5.3 実験方法

一般に生体影響は、急性影響（忌避行動など短期的な影響）、慢性影響（寿命など長期的な影響）および遺伝的影響（突然変異など世代にまたがる影響）の3つに分類されるため、これら3つの影響に関する実験を実施した。

5.3.1 磁界レベルの設定

環境実験装置は2台用意され、その内、1台の実験装置の中には鉄心磁気回路のギャップ方式による高磁界発生装置を設置した。ギャップ寸法は75 x 75 x 70 mmで、そのギャップ間にショウジョウバエを入れた試験管を置けるだけのスペースを確保した。磁界は60Hzの励磁電流を変えることにより調整した。その回路図を図5-6に示す。回路中のコンデンサは進相コンデンサで、コイル成分を補償している。また、発生交流100Vの電源であるため、高磁界発生装置から発生する電界は実質的に零と考えられる。他方、もう1台の同じサイズの実験装置には高磁界発生装置設置はなく、極力低い磁界レベルでの実験を行うため、500 x 550 x 520 mmの磁気シールドボックスを設置した。これら環境実験装置の緒元をまとめると表5-2のようになる。

ショウジョウバエにばく露した磁界レベルは、0.05 μ T、0.3 μ T、4 μ T、3mT、60mTで、図5-7に示すように生活・職業環境の実態をカバーした広い磁界測定範囲を選んだ。0.05 μ T、0.3 μ Tの磁界レベルについては、内部に高磁界発生装置が設置されていない実験装置で実現された。この場合、0.05 μ Tはさらにシールド箱内で得られている。一方、4 μ T、3mT、60mTについては図5-4の高磁界発生装置が設置された実験装置内のそれぞれA、B、Cの箇所で達成された。図5-8は高磁界発生装置が設置された実験装置内部の磁界分布を示したものである。また、図5-9は高磁界発生装置のギャップ付近の磁界分布を示したもので、日常経験する磁界と比べ極めて高い60mTの磁界が発生していることが確認される。これら磁界分布はGauss/TESLA METAR (F.W.BELL社製、MODEL 4080:ホール素子計測器)によって実測したものである。

表5-2 環境実験装置の特性緒元

Table 5-2. Characteristics of environmental chambers

	Chamber #1	Chamber #2
内部寸法	約 610 x 1500 x 860 mm	
温度	25.8° C ~ 26.7° C	
ばく露磁界	4 μ T, 3 mT, 60 mT	0.05 μ T, 0.3 μ T
備考	高磁界発生装置設置	シールドボックス設置

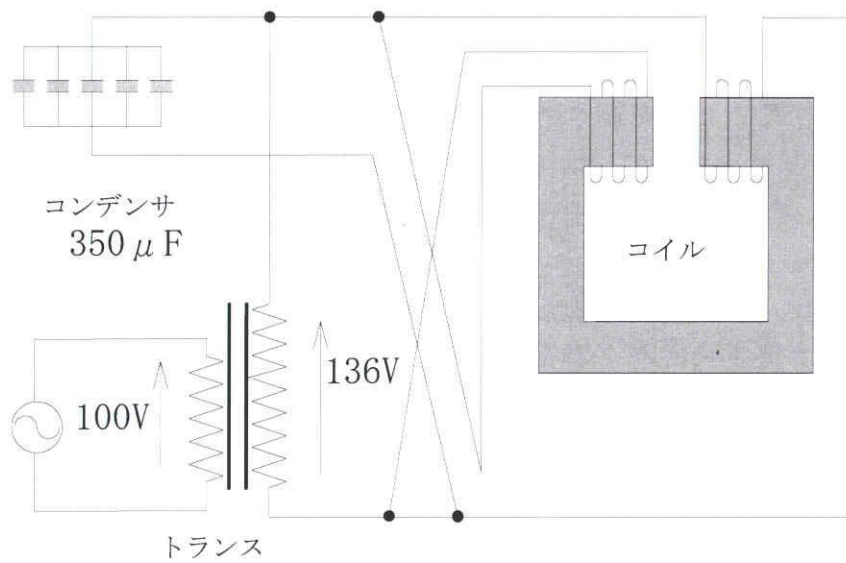


図5-6 高磁界発生回路

Fig. 5-6. Electric circuit diagram of the magnetic field generator.

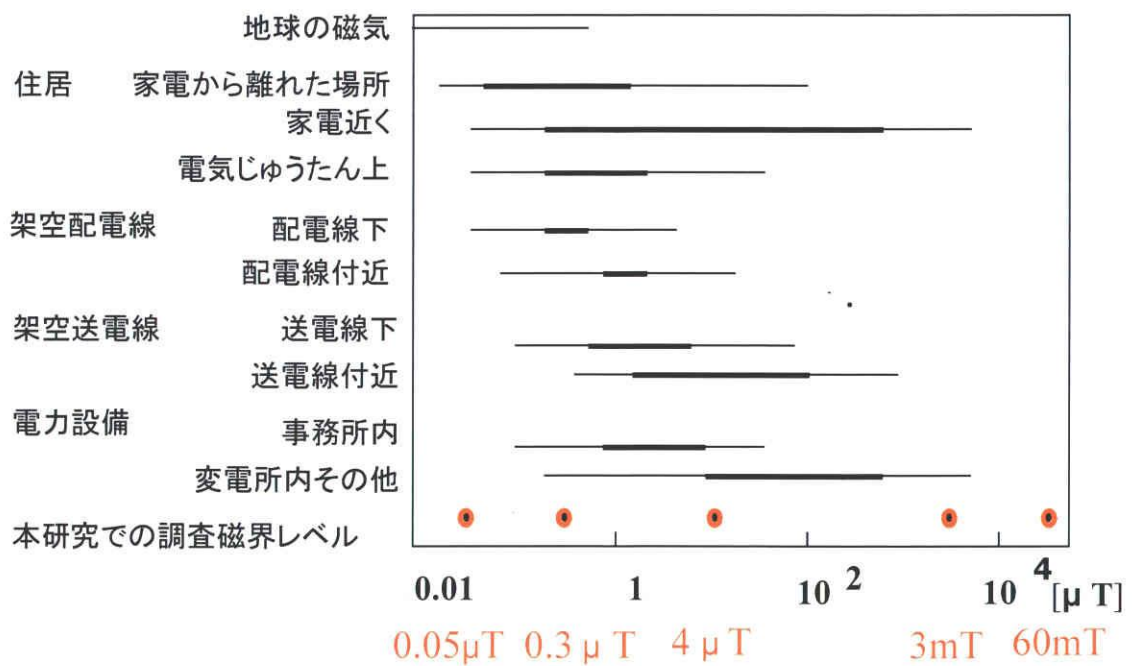


図 5-7 各種環境下での磁界レベル

Fig. 5-7. Magnetic field levels of various environments

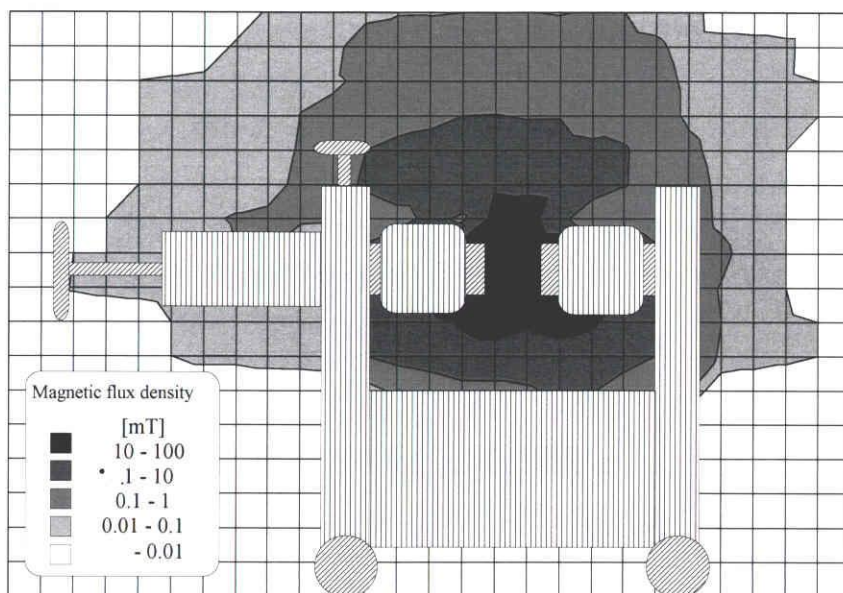


図 5-8 環境装置内の磁界分布

Fig. 5-8. Magnetic field distribution in the environmental chamber.

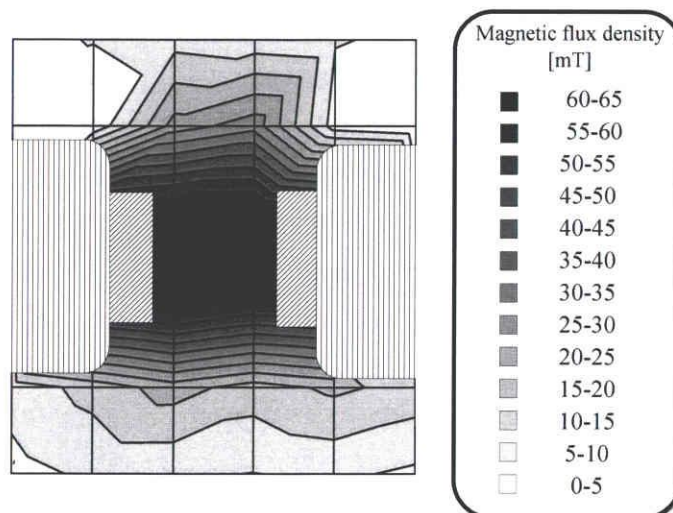


図 5-9 高磁界発生装置のギャップ部の磁界分布

Fig. 5-9. Magnetic field distribution at the gap portion of the environmental chamber.

5.3.2 忌避行動（急性毒性）調査

低周波磁界によるショウジョウバエの忌避行動への影響調査のために、図

5-10 に示すような向流分配装置⁽⁹⁾を用いて実験した。図中の試験管はすべて透明なプラスチックでできている。#0-#3 試験管と#0'-#2' 試験管はスライドできるようにになっており、位置が合わさった場合の試験管開口部での移動の障害はない。ここでは優性遺伝の赤眼のショウジョウバエを供試試料とした。実験の手順は次の通りである。

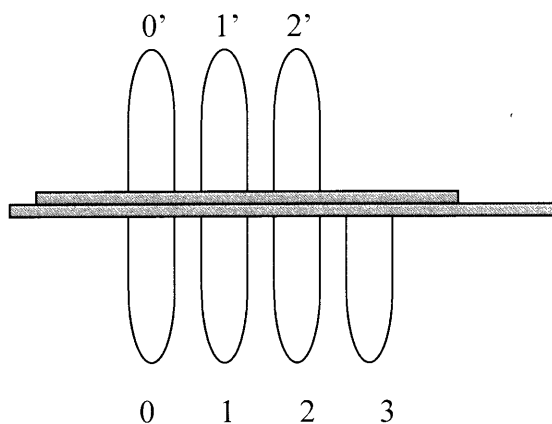


図 5-10 向流分配装置

Fig. 5-10. Counter-current distribution tubes.

まず、#0 試験管に 100 匹のすべての供試試料を入れた。次に #0-#3 側の試験管に所定の磁界、#0'-#2' 側の試験管にそれ以下の磁界にばく露されるように向流分配装置を配置した。この場合、ショウジョウバエは走光性があるので天井の室内灯の影響をなくすため試験官は水平に固定した。磁界は 30 秒間ばく露した。もし、ショウジョウバエに磁界に対し忌避行動があれば、この間ショウジョウバエは #0 から #0' の試験管に移動する。磁界ばく露後、位置を一つずらして、#0'-#2' の試験管はそれぞれ #1-#3 の試験管の位置に合わせた。そして、#0' 試験管に移動したショウジョウバエを #1 試験管に強制的に移動させる。このような作業を 3 回繰返し、最終的に #0-#3 の試験管のショウジョウバエの数を数えた。即ち、#0 試験管のショウジョウバエの数は、3 回の磁界ばく露で 1 回も移動しなかった数、#1 試験管のショウジョウバエの数は 3 回の磁界ばく露の内 1 回移動したハエの数ということになる。#2、#3 試験管の場合も同様である。

5.3.3 寿命（慢性毒性）調査

図 5-11 に示すような 30-40 匹のショウジョウバエを飼育するのに十分な大きさの透明のプラスチックの試験管を使用した。実験では 1 本の試験管に 20 匹、

オス、メス、それぞれ4本の試験管、計80匹づつを同時に所定の磁界にばく露させた。試験管は所定の磁界に水平に固定した。表5-3に試験条件を示す⁽⁹⁾。ばく露は羽化3日後から開始し、餌の交換や死亡数の確認ための時間（約15分/日）を除き生涯にわたって続けた。羽化3日後からばく露を開始する理由は、もともと弱っているショウジョウバエを排除するためである。また、オス、メスの試験管は交互に配置した（図5-12参照）。60mT ばく露の場合は、高磁界発生装置のギャップに設置した試験管の配置を毎日ローテーションで変更した。ここでは優性遺伝の赤眼のショウジョウバエを供試試料とした。

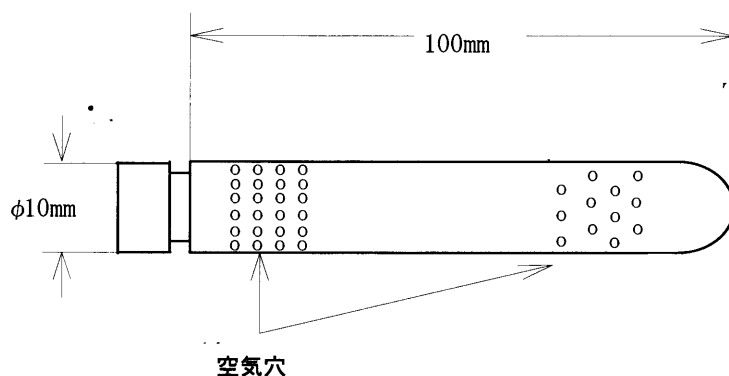


図5-11 磁界ばく露に使用したプラスチック製試験管
Fig. 5-11. Plastic tube used for exposure to magnetic field.

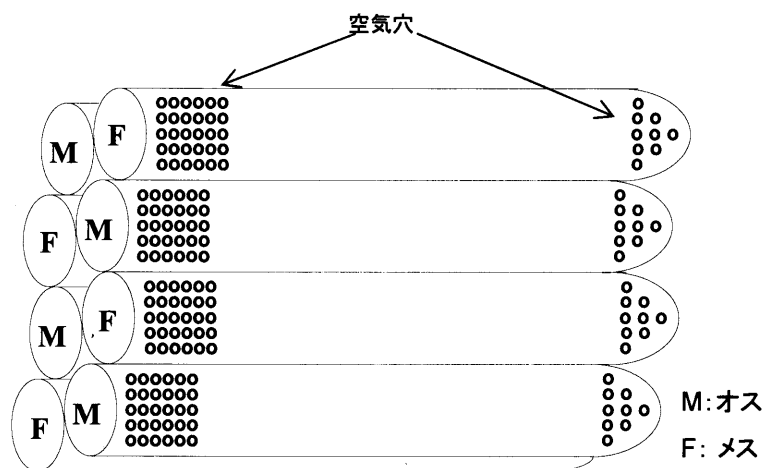


図5-12 試験管配置
Fig. 5-12. Arrangement of the tubes.

表 5-3 寿命評価試験条件

Table 5-3. Testing conditions for longevity

項目	説明
ばく露時間	羽化3日後から、餌の交換や死亡数の確認のための時間（約15分/日）を除く時間。
試験管	φ10x100cmの透明なプラスチック製。0.7mmφの空気穴が約200個あり。週1回交換。
餌	水 1000ml、粉末寒天 10g、ドライイースト 80g、蔗糖 50g、プロピオン酸 5ml、10%ボウキニン 5mlの混合液を試験管フタ内面に塗布。毎日交換。
供試空間	試験管は常に水平に固定。オス、メスの試験管は交互に配置（図5-12参照）。60mT照射の場合は、試験管の配置を毎日ローテーションで変更。

5.3.4 突然変異（遺伝的な影響）調査

ショウジョウバエの場合、眼の色、羽、足、触角の形など多くの突然変異の種類がある⁽¹⁰⁾。羽や足など形による突然変異は作業時に誤って損傷を与える可能性があり、本研究では眼の色だけに注目し、X染色体上にある伴性劣性遺伝である白眼をもったショウジョウバエを試料として選んだ。即ち、図5-13に示すように白眼をもったショウジョウバエの両親から生まれたハエが赤眼（優性遺伝）をもった場合、その個体は遺伝的に突然変異ということになり、容易に突然変異が確認できる。自然界での突然変異率は数10万匹に1匹と言われている⁽⁹⁾、⁽¹⁰⁾。

実験の手順としては、図5-14にあるように、まず、羽化直後にオスとメスを分け、オス、メス各100匹のハエを図5-12に示すように、それぞれ4本の試験管に分配した。この場合、分配作業は8時間以内に終える必要がある。これは次の理由による。ショウジョウバエは羽化後約8時間を過ぎると、生殖能力を持つようになり、生殖活動を行うようになる。突然変異体（赤眼の個体）が発生した時に変異体と正常な個体（白眼の個体）から隔離しなければ、変異体との生殖活動を行ってしまった場合、伴性劣性遺伝の関係上、次世代はその個体から優性形質の赤眼の個体しか発生しなくなり、突然変異体の発生する確率を調べる実験を継続出来なくなる恐れがある。

オス、メスを分配した試験管に所定の磁界を5日間、水平の位置に固定し、ばく露する。この間のハエの飼育は5-3-3節で述べた方法と同じである。磁界ば

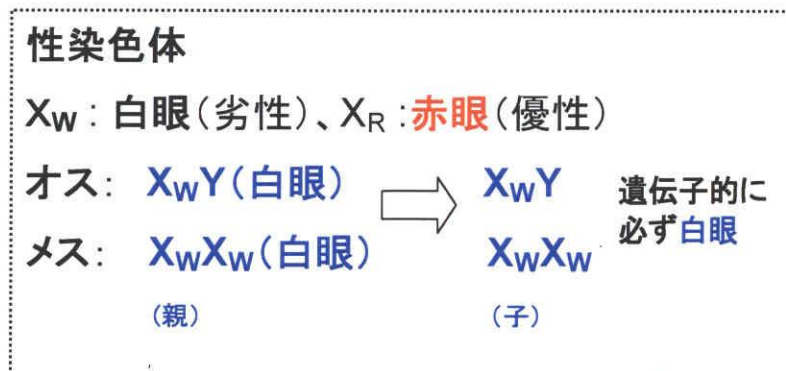
く露の開始した時期と期間の設定理由は、

- ① 卵、幼虫、さなぎの時期は脆弱であり、ばく露実験のための環境を最適な状態に整えておくのは非常に難しく、例え、これらのステージでの磁界ばく露によって、突然変異率が変わったとしても磁界によるものかどうか判断しづらいこと。
 - ② 羽化後、一週間くらいで生殖活の最盛期を迎える。従って、それ以前の期間にばく露を行うことにより、次世代への影響が大きくなること。
 - ③ ハエの寿命から考えて、5日間はヒトの10年に相当し、ハエに対するばく露期間としては十分と思われること。
- があげられる。

磁界へのばく露後、それぞれ100匹のオス、メスのハエは図5-15に示すようなガラス製の飼育管の一緒に入れて環境実験室内で飼育した。飼育管は水平に固定され、図中の綿の栓を通して飼育管内が換気される。飼育管は5日おきに清潔なものと交換した。

それぞれ100匹のオス、メスのハエから、約5,000匹のハエが孵化した。卵から孵化したときに総新生個体と突然変異による赤眼新生個体の数を確認した。

以降、同様に試験を繰り返しデータの蓄積を行った。



この場合の突然変異(赤眼)とは
即ち、 $X_R Y$ 、 $X_R X_R$ 、または $X_R X_W$
の遺伝子を持ったハエ

図5-13 ショウジョウバエの伴性劣性遺伝(白眼)
Fig. 5-13 Sex-linked inheritance of fruit flies (*White(W)*)

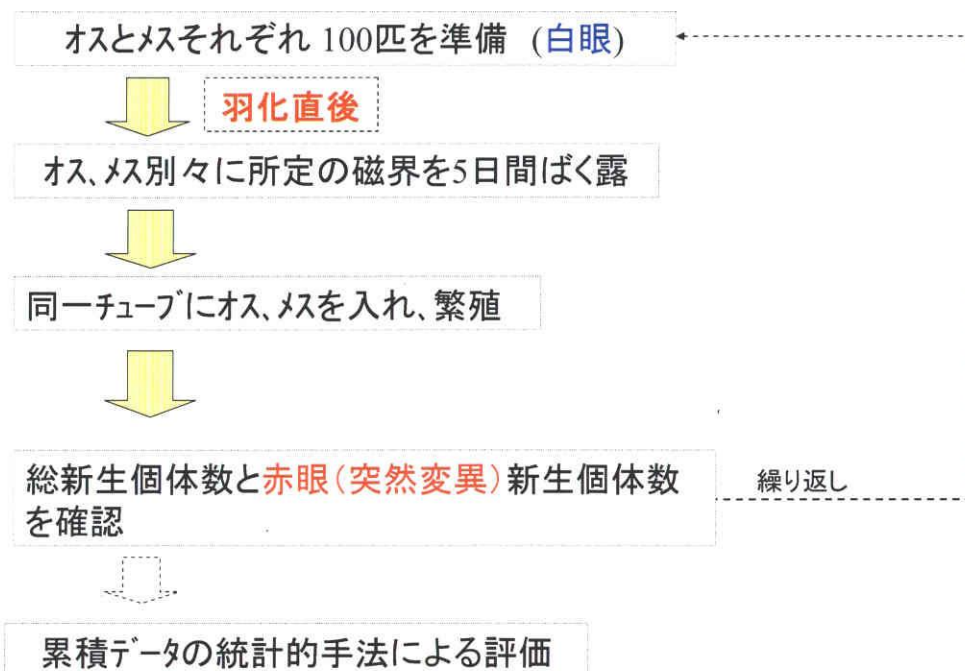


図5-14 磁界ばく露による突然変異調査手順

Fig. 5-14. Procedure for mutation investigation due to exposure to magnetic field.

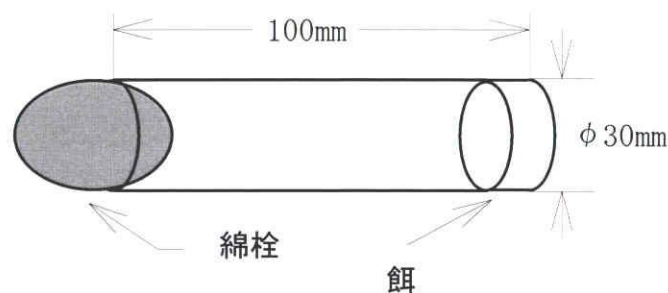


図 5-15 ガラス製飼育管

Fig. 5-15. Glass breeding tube.

5.4 実験結果と統計的評価

5.4.1 忌避行動（急性毒性）調査

図 5-16 に 5.3.2 節で述べた磁界下での忌避行動の実験結果として向流分配器内のショウジョウバエの個体数の分布例を示す。表 5-4 はこれら実験結果をまとめたものである。実験はそれぞれの磁界レベルで 5 回実施し、ショウジョウバエの平均移動回数と標準偏差を求めた。磁界レベルによる差は実験結果に特に見られなかった。また、実験中、どの磁界においても、磁界に対し近づこうとしたり遠ざかろうとする挙動は見受けられなかった。

これらの結果に対し、磁界レベルによる忌避行動の差の有無を統計的に評価した。それぞれの磁界レベルにおいてショウジョウバエの移動回数の平均値に差はないとの帰無仮説に対し、式(5-1)のt分布を用いて実施した仮説検定の結果を表5-5に示す。

$$Z = \frac{|X_i - X_j|}{\sqrt{(s_i^2/n_i) + (s_j^2/n_j)}} \dots\dots\dots (5-1)$$

ここで、 i, j は磁界レベルを示し、 X_{ij} はそれぞれ磁界 i, j での平均移動数、 s_{ij} は標準偏差、 n_{ij} は供試数を示す。

表5-5からもわかるように有意水準5% (棄却限界値 $Z(0.05)=1.96$) において、帰無仮説 H_0 : 「それぞれの磁界中におけるショウジョウバエの移動回数の平均値に差はない。」はオス、メスに関係なく棄却されない。即ち、低周波磁界がショウジョウバエの行動に影響があるとは言えない。

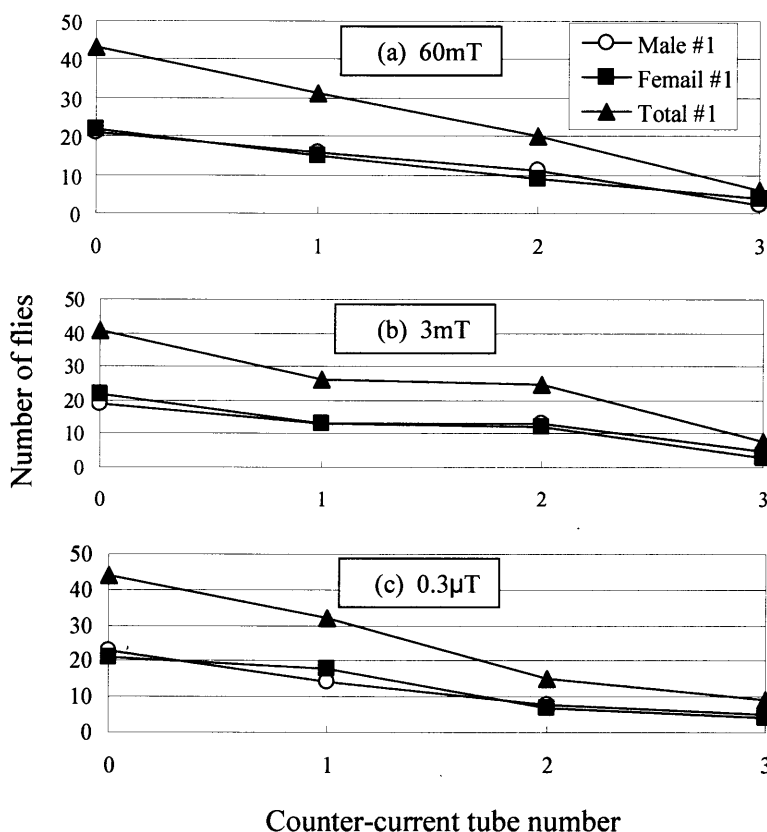


図 5 - 16 磁界下での向流分配器内のショウジョウバエの個体数の分布例 (a) 60mT、(b) 3mT、(c) 0.3μT (実験番号 : 1)

Fig. 5-16. A typical example of counter-current distribution curves of fruit flies transferred under magnetic fields of (a) 60mT, (b) 3mT and (c) 0.3μT (Sample #1).

表 5-4 磁界下でのショウジョウバエの平均移動回数

Table 5-4. Average number of transfer of fruit flies under magnetic field

実験 番号	磁界					
	60mT		3mT		0.3μT	
	平均移動 回数	標準 偏差	平均移動 回数	標準 偏差	平均移動 回数	標準 偏差
#1	0.89	0.93	0.89	0.97	1.00	0.99
#2	1.00	1.12	0.98	1.08	0.92	1.07
#3	0.89	0.98	0.92	1.00	0.94	1.01
#4	1.03	1.06	0.98	1.06	0.94	1.06
#5	1.05	1.04	0.99	1.03	0.99	1.03

表 5-5 各磁界間における平均移動回数についての t-検定値

Table 5-5. T-test results on number of transfer under magnetic fields

実験 番号	検定値								
	60mT と 3mT			60mT と 0.3μT			3mT と 0.3μT		
	オス	メス	総数	オス	メス	総数	オス	メス	総数
#1	0.15	0.15	0.00	1.48	0.15	0.81	1.26	0.30	0.79
#2	0.50	0.26	0.13	0.63	0.40	0.51	0.13	0.65	0.39
#3	0.27	0.75	0.21	0.70	1.46	0.36	0.40	0.74	0.14
#4	0.39	0.28	0.33	0.39	1.65	0.60	0.76	1.45	0.27
#5	0.70	0.13	0.41	1.59	0.65	0.41	0.87	0.79	0.00

5.4.2 寿命（慢性毒性）調査

図 5-17、18 はそれぞれ 80 匹のオス、メスのショウジョウバエの 0.3μT、3mT、60mT の磁界下での寿命分布を示している。分布の形状に磁界による大きな違いは見受けられないが、より定量的な評価のため統計的な分析を行なった。

これら分布は正規分布には従っておらず、Kaplan-Meier product limit 法と一般化 Wilcoxon 検定 (the generated Wilcoxon test) ^{(11)、(12)} を採用した。

Kaplan-Meier product limit 法は死亡発生ごとに生存率を計算するので、少数例の場合にも正確な生存率を求められるのが特徴である。その方法は以下の通りである。

- 1) 寿命の長い順に n 個の全てのデータを並べる。
- 2) i 番目のショウジョウバエが死んだ時間 t_i の時の生存率 p_i を次式で定義する。

$$p_i = \frac{n-i}{n-i+1} \dots\dots\dots (5-2)$$

- 3) t_i 時の累積生存率, P_i とその標準誤差 $SE(P_i)$ は次式で求める。

$$P_i = \prod_{j=1}^i p_j \dots\dots\dots (5-3)$$

$$SE(P_i) = \sqrt{P_i^2 \sum_{j=1}^i \frac{1}{(n-j)(n-j+1)}} \dots\dots\dots (5-4)$$

図 5-17、18 から式 (5-3) を使って求めた生存率曲線を図 5-19、20 に示す。

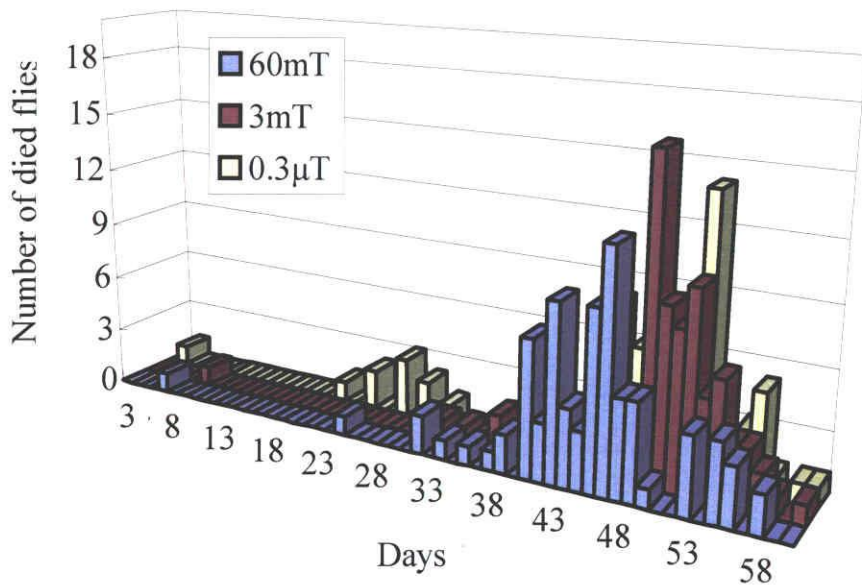


図5-17 オスのショウジョウバエの磁界下の寿命分布
 Fig. 5-17. Mortality of male fruit flies under magnetic fields.

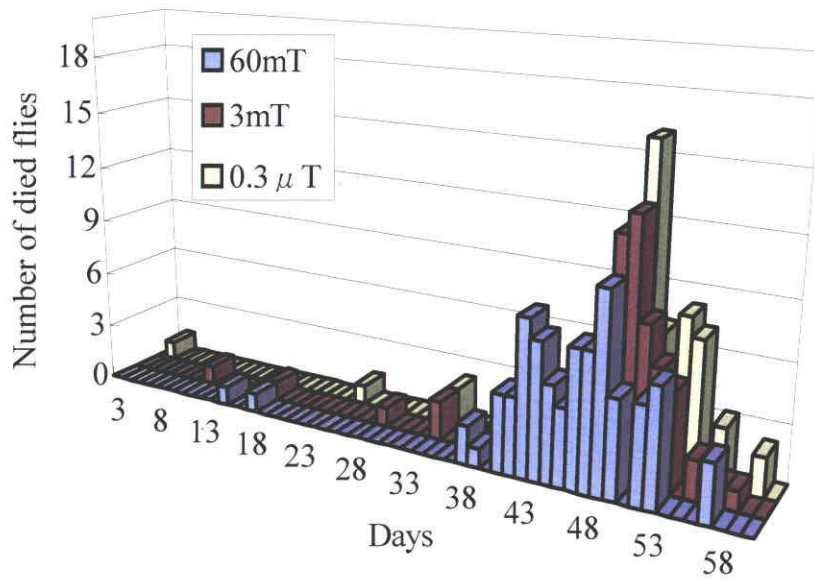


図5-18 メスのショウジョウバエの磁界下の寿命分布
 Fig. 5-18. Mortality of female fruit flies under magnetic fields.

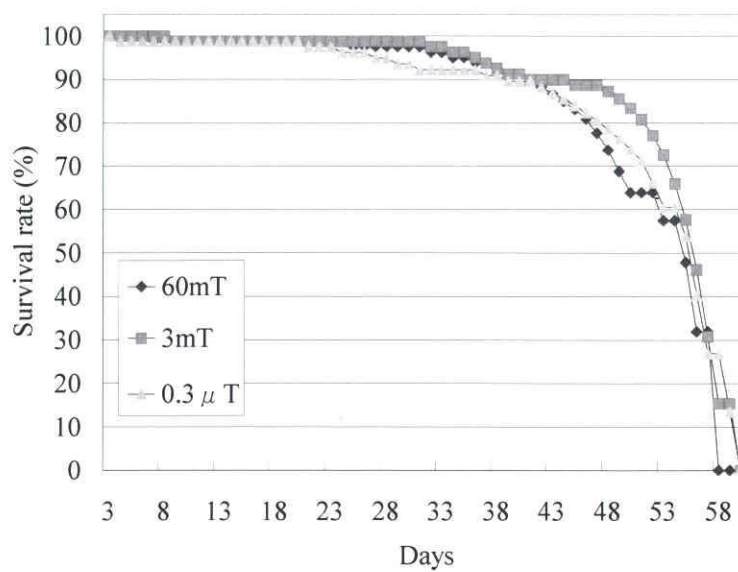


図5-19 磁界下でのオスのショウジョウバエの生存率曲線
 Fig. 5-19. Survival rate of male fruit flies under magnetic fields.

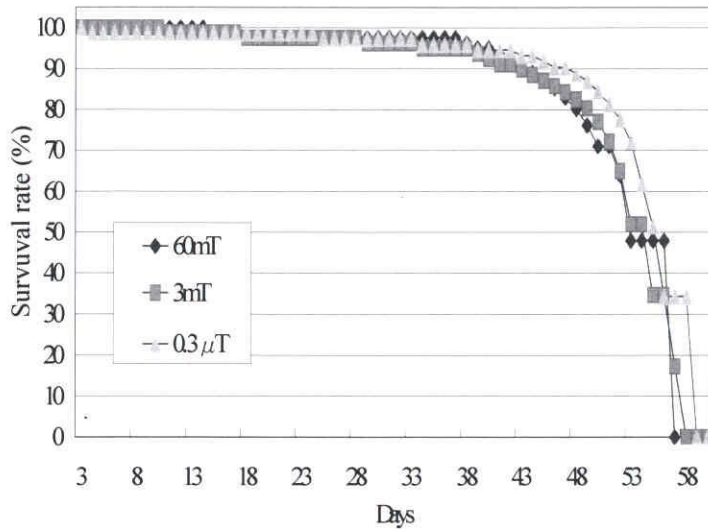


図5-20 磁界下でのメスのショウジョウバエの生存率曲線
 Fig. 5-20. Survival rate of female fruit flies under magnetic fields

次に、2群の生存期間に差があるかどうかの検定として、一般化 Wilcoxon 検定を行なった。以下にその方法を述べる。

まず、それぞれ W , $Var W$ を式 (5-5), (5-6) のように定義し、計算する。

$$W = \sum U_{ij} \dots\dots\dots (5-5)$$

$$VarW = \frac{n_1 n_2 \sum_{i=1}^{n_1+n_2} U_i^2}{(n_1 + n_2)(n_1 + n_2 - 1)} \dots\dots\dots (5-6)$$

ここで、 n_1, n_2 はそれぞれグループ 1, 2 の試料数である。また、 x_i, y_i はグループ 1, 2 の寿命で、 $x_i < y_i$ の時は $U_{ij} = -1$ 、 $x_i = y_i$ の時は $U_{ij} = 0$ 、 $x_i > y_i$ の時は $U_{ij} = 1$ になる。ここで、式 (5-7) で定義される検定値 Z は平均が 0 で標準偏差が 1 である正規分布従う。

$$Z = \frac{|W|}{\sqrt{VarW}} \dots\dots\dots (5-7)$$

この一般化 Wilcoxon 検定を図 5-19, 20 の生存率曲線に当てはめる。即ち、帰無仮説を「異なる磁界レベルにおいて生存率曲線に差はない」とすると、5% 有意水準で、式 (5-7) で定義される Z が $Z > 1.96$ であれば、その仮説は棄却される。表 5-6 にそれぞれ 2 群の磁界レベル間の Z 値の計算結果を示す。この表からも判るようにどのケースも 1.96 を越えるものはなく、仮説は棄却されず、これらどの磁界レベル間でも生存率曲線に有意差があるとは云えない。

表 5-6 各磁界間での生存率曲線における一般化 Wilcoxon 検定値の計算結果
Table 5-6. Results of the generalized Wilcoxon test of survival rate under magnetic field.

	オス	メス
60 mT - 3 mT	0.01	1.37
60 mT - 0.3 μT	0.67	0.73
3 mT - 0.3 μT	1.08	0.50

さらに、表 5-7 に、0.05μT、4μT、3mT、そして 60mT の磁界下での、それぞれ各 60 匹づつのオス、メスのショウジョウバエの寿命調査から得られた平均寿命と標準偏差を示す。一般自然環境下を想定した 0.05μT と、その他の磁界レベルとに平均寿命に有意差があるかどうかを評価するために、式 (5-8) で与えられる χ^2 分布を用いて適合度の検定を行なう。

$$T = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} \dots\dots\dots (5-8)$$

ここで、 T は検定統計量、 n_i は観測度数、 e_i は 0.05μT の値と同等と推定される期待度数である。この場合、自由度は、 $k = 3$ である。帰無仮説を「0.05μT とその他の磁界レベルにおいて平均寿命に差はない」とすると、1%、5% 有意水準での式 (5-8) の計算結果は表 5-8 のようになる。その結果、オス、メスとも、いずれの有意水準を下回っており、仮説を棄却することはできない。すなわち、0.05μT とその他の磁界レベルにおいて平均寿命に差があるとは言えない。

表 5-7 各磁界下におけるショウジョウバエの平均寿命とその標準偏差

Table 5-7. Average longevity and its standard deviation of fruit flies at several magnetic field levels.

磁界	オス		メス	
	平均寿命、日	標準偏差、日	平均寿命、日	標準偏差、日
60 mT	44.21	7.58	35.80	7.05
3 mT	45.38	7.22	37.17	6.87
4 μ T	43.32	6.97	35.41	7.31
0.05 μ T	43.62	6.58	36.83	6.70

表 5-8 磁界下におけるショウジョウバエの寿命に関する適合度の検定結果

Table 5-8. Result of test statics regarding longevity of fruit flies under magnetic field.

	検定統計量, T	1% 有意水準	5%有意水準
オス	0.079	11.34	7.81
メス	0.087	11.34	7.81

5.4.3 突然変異（遺伝的な影響）調査

図 5-21 に 0.05 μ T, 0.3 μ T, 4 μ T, 3mT そして 60mT の磁界下で実験に供したショウジョウバエの累積数と世代数を示す。表 5-9 にこれまでに得られている突然変異の発生数のまとめを示す。0.05 μ T については実験開始時期が遅かったため、他の磁界での試料数と比べ少ない。突然変異である赤眼のショウジョウバエの発生数はどの磁界も 0-4 匹で、自然条件下でのそれと同等と思われる。

この結果を統計的に評価するために、適合度検定⁽¹³⁾と区間推定⁽¹⁴⁾を行なった。まず、一般には、磁界下でのばく露実験における突然変異の発生数は統計学的に二項分布に従うと考えられるが、下記理由から二項分布はポアソン分布に近似することができるので（二項分布において、 $n \rightarrow \infty$ 、 $np \rightarrow 0$ がポアソン分布に相当）、本研究では、ポアソン分布に従うものとして検討した。

- (1) 試料数が非常に多い。
- (2) 突然変異の発生率は極めて低い。
- (3) 突然変異は独立した事象である。

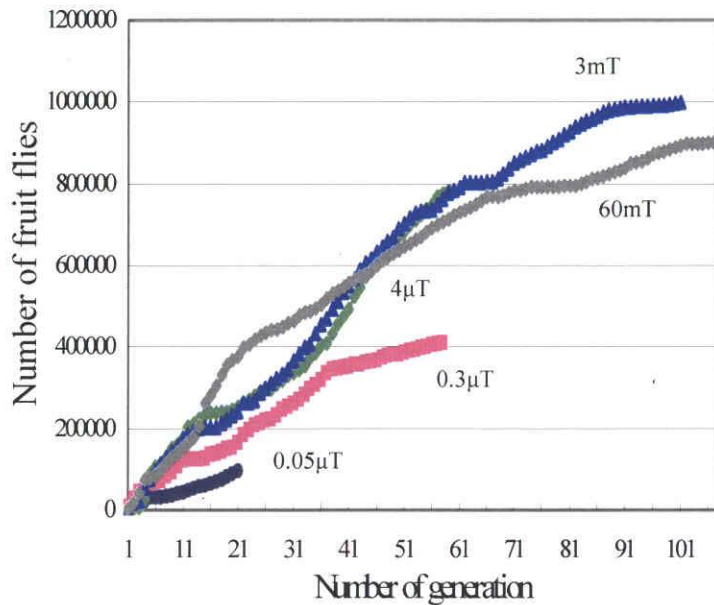


図 5-21 磁界ばく露による突然変異調査に供されたショウジョウバエの累積数
 Fig. 5-21. Cumulative number of specimen fruit flies tested for mutation check after exposure to magnetic field.

表 5-9 磁界ばく露による突然変異（赤眼）の発生個体数

Table 5-9. Number of fruit flies with red eyes (mutation) appeared after exposure to magnetic field.

	白眼	赤眼(突然変異)	合計
60 mT	906, 974	2	906, 976
3 mT	1, 002, 000	4	1, 002, 004
4 μT	783, 199	1	783, 200
0.3 μT	418, 085	0	418, 085
0.05 μT	142, 345	0	142, 345
合計	3, 252, 603	7	3, 252, 610

(1) 適合度の検定

実験値と自然状態における期待値との有意差の検討を行なうために χ^2 分布を用いた適合度検定を行った。帰無仮説を「本実験での磁界下での突然変異率は自然状態における値と同じである」とする。0.05μT では試料数が少なく未だ突然変異が観測されていないため、突然変異の発生率を文献^{(9), (10)}にもとづき、数 10 万に 1 匹と推定した。この場合、0.05μT の磁界レベルを考慮に入れず自由度を k=3 とし、統計検定量は式 (5-9) で与えられる。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^3 \frac{(y_i - \lambda_0 \times n_i)^2}{\lambda_0 \times n_i} \dots\dots\dots (5-9)$$

ここで、 y_i は、磁界レベル*i*にばく露された突然変異の個体数、 n_i は磁界レベル*i*での総試料数、 λ_0 は自然状態における突然変異率である。5%有意水準を考えると、 χ^2 が7.82未満であれば仮説は棄却されない。図5-22に推定突然変異率を変化させた場合の式(5-9)の計算結果を示す。これより自然状態での突然変異率がおよそ1/170,000から1/800,000であれば、磁界にばく露された場合の突然変異率は自然状態での変異率と差があるとは云えないと結論される。

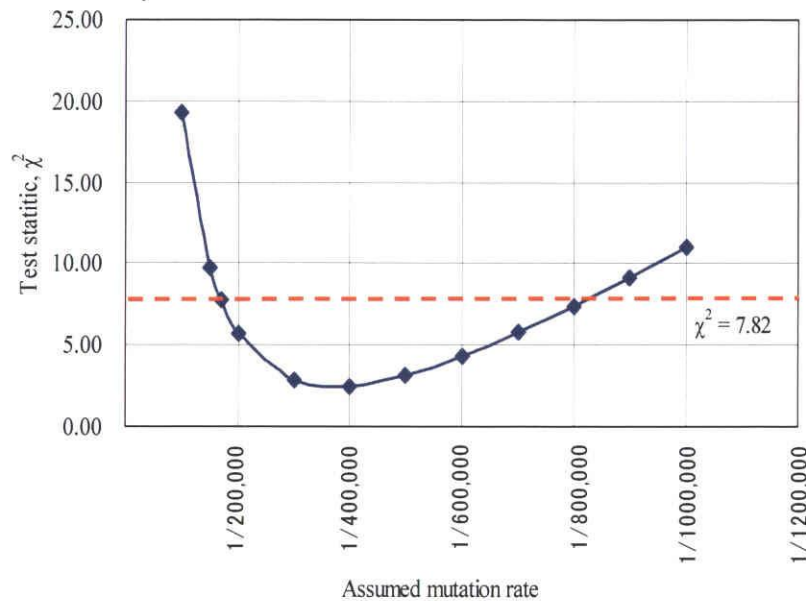


図 5-22 突然変異率を変化させた場合の χ^2 検定の計算結果
 Fig.5-22. Calculated results of χ^2 goodness-of-fit test varying mutation rate.

(2) 区間検定

突然変異の期待頻度にもとづく区間検定による統計的解析も行った。ポアソン分布を前提に5%有意水準での突然変異個体の母平均の期待値は式(5-10)で与えられる。

$$0.025 < \sum_{x=0}^X \frac{m^x e^{-m}}{x!} < 0.975 \dots\dots\dots (5-10)$$

ここで、 m は突然変異の期待頻度、 x は今回の実験で得られた突然変異個体

数である。この不等式より期待頻度 m (整数) の範囲が求められる。その結果を表 5-10 にまとめる。期待値は総試料数に推定突然変異発生率 (A:40 万分 1、または B:20 万分の 1) を掛けて求めた。推定突然変異発生率はともに区間推定の間にあり、本実験で得られた突然変異率は自然条件下でのそれと同等と結論付けられる。

表5-10 突然変異発生数の区間検定の計算結果

Table 5-10. Results of interval estimation on expected frequency of mutation.

		母平均の区間推定の計算結果		計算による平均の期待値
		下限	上限	
60 mT	A	0	5	2.27
	B	4	14	4.53
3 mT	A	0	5	2.51
	B	4	16	5.01
4 μ T	A	0	4	1.96
	B	3	13	3.92

注) 自然状態での推定突然変異発生率、A : 1/400,000, B : 1/200,000

(3) オッズ比

さらに、疫学的アプローチとして、95%信頼区間でのオッズ比⁽¹⁵⁾を評価した。表 5-11 のモデルから、オッズ比 (相対危険) O は式(5-11)で表すことができる。

$$O = \frac{a/(a+b)}{b/(a+b)} \bigg/ \frac{c/(c+d)}{d/(c+d)} = \frac{ad}{bc} \dots\dots\dots (5-11)$$

また、信頼区間は、式(5-12)のロジエット推定⁽¹⁶⁾から求めた。

$$\log O_u, \log O_l = \log O \pm z \sqrt{(1/a) + (1/b) + (1/c) + (1/d)} \dots\dots\dots (5-12)$$

ここで、 O_u 、 O_l はそれぞれの区間の上限、下限で、 z は正規分布、 $z = 1.95$ ($\alpha = 5\%$ の場合) である。

今までのところ、0.05 μ T、0.3 μ T の磁界では突然変異は発生していないので、4 μ T を基準レベル (対照) として選択し、分析した。その結果を、表 5-12 にまとめる。磁界 60mT、3mT とともに、オッズ比は 1 より大きい。しかしながら、95% 信頼区間の下限はともに 1 よりも小さく、統計的に有意ではない。即ち、偶然

でも突然変異は起こることを示し、磁界の大きさが突然変異発生率に影響を与えているとは言えない。

但し、もともと自然状態での突然変異の発生率は極めて低く、ショウジョウバエへの低周波磁界の遺伝的影響について最終的な結論を出すためにはより一層のデータの蓄積が必要であろう。

表5-11 磁界ばく露(患者・対照)と突然変異(疾病)数との一般モデル
Table 5-11. General model for magnetic field exposure and mutation number.

	突然変異(疾病)		計
	あり	なし	
磁界ばく露あり	a	b	a + b
基準レベル(対照)	c	d	c + d
計	a + c	b + c	N

表 5-12 4 μ T に対するオッズ比と 95%信頼区間

Table 5-12. Odds ratios to 4 μ T and their 95% confidence interval.

磁界	オッズ比	95% 信頼区間
60 mT	1.73	0.16 - 19.0
3 mT	3.13	0.35 - 30.0

5.5 結言

本章では、低周波磁界下でのショウジョウバエの忌避行動と寿命に関する実験結果について述べ、また、低周波磁界が遺伝(突然変異)に与える影響についても評価した。下記に今回の結果に対する統計的評価をまとめる。

- (1) 磁界下での忌避行動に関する実験結果の t 検定の評価から、磁界がショウジョウバエの忌避行動に影響を与えないと云えない。
- (2) 磁界下での寿命に関する実験結果の Kaplan-Meier product limit 法と一般化 Wilcoxon 検定の評価から、磁界がショウジョウバエの寿命に影響を与えないと結論づけられる。
- (3) 磁界下での突然変異に関する実験結果に対する適合度検定、区間推定、オッズ比の評価から、磁界がショウジョウバエの突然変異率に影響を与えないということが結論づけられる可能性が高い。但し、現時点では自然状態での供試数が他の磁界条件と比べ少なく未だ実験で突然変異が発生していないため、最終的な結論付けはできない。

磁界の大きさやばく露時間、温度などの実験条件が異なるため、今回得られた結果と表 5-1 に示した従来の報告⁽³⁾⁻⁽⁶⁾との単純比較はできないが、磁界が影響を及ぼすとは言えないという点において矛盾はないと考えられる。

尚、今回の実験は熱平衡状態での実験であり、今後の課題としてより実際の環境下を模擬した非平衡状態での実験も必要と考えられる。さらに、体細胞試験、DNA 修復試験、眼色復帰試験、翅毛スポットテスト等遺伝子レベルの高感度の実験⁽¹⁶⁾も将来の実験課題として検討していく必要がある。

第5章 参考文献

- (1) 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.
- (2) 電磁界生体影響問題調査特別委員会: 「電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題、第II期報告書」、電気学会、2003.
- (3) Graham C., 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.
- (4) Kikuchi T., M.Ogawa, et al. : " Multigeneration exposure test of *Drosophila melanogaster* to ELF magnetic fields" , Bioelectromagnetics 19, pp.335-340, 1998.
- (5) Koana T, O.Okada, et al.:" Involvement of eddy currents in the mutagenicity of ELF magnetic fields" , Mutat Res 476 , pp. 55-62, 2001.
- (6) Michel A., H.O.Gutzeit: " Electromagnetic fields on combination with elevated temperatures affect embryogenesis of *Drosophila*" , Biochemical & Biophysical Research Communications 265, pp.73-78, 1999.
- (7) T.Okada : "Systematic study of *Drosophilidae* and allied families of Japan" , Vil.183, Gihodo, Tokyo, 1956.
- (8) Yonemura, T.Motoyama, H.Hasekura : "Evidence of major genes controlling longevity in *Drosophila melanogaster*" , Proc. Japan Academy, Vol.62, Ser.B, pp. 41-44, 1986.
- (9) 森脇大五郎:「ショウジョウバエの遺伝実習 - 分類・形態・基礎的実験法」、培封館、1979.
- (10) M. Kato: "Biological effect of electromagnetic field from medical point of view -mainly of commercial frequency" , Meeting Document, No.1816, Besco, July 16, 1992.
- (11) 石居進:「生物統計学入門 - 具体例による解説と演習」、培風館、1975.
- (12) 柳川洋:「医療・保健のための臨床統計」、診断と治療社、1998.
- (13) 阿部剛久、都築みさを:「理工・医歯薬系の統計学要論」、共立出版、1990.
- (14) L.マゼル 著、佐藤平八 訳:「確率・統計・ランダム過程」、森北出版、1980.
- (15) 柳川洋:「疫学マニュアル」、南雲堂、1996.
- (16) 藤川和夫:「ショウジョウバエを用いる化学変異原検出法の新たな展開」、食品衛生学雑誌、29巻、2号、pp.115-124、1998.

第6章 結論

6.1 本研究で得られた成果

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。それに付随して発生する電磁界の実態を調査し、評価していくことは学術的観点から極めて重要であるとともに、電磁界の健康影響に関心のある人々への情報提供という社会的使命を果たすことにもなる。

本研究では、身近にある磁界発生源としての家庭用電気機器の発生する磁界、また、発生源は特定できないものの生活環境において受ける磁界、さらに電力設備近傍における電界・磁界を定量化するとともに評価を行った。これらの結果に基づいて設定した磁界レベルが小生物に及ぼす影響の検討も行った。

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

第1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。

第2章では、家庭用電気機器の発生する低周波磁界を定量的に評価した。11種類、合計 200 台以上の日常生活で使用する機器を対象とし、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や、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も述べた。以下に得られた結果をまとめて示す。

- (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ことを示した。さらに、磁界が距離の $-n$ 乗に比例すると仮定し、各機器に対する n 値が $0.5\sim 2.0$ となることを明らかにした。
- (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ことを明らかにした。
- (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を示した。他の種類の機器では、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ことも明らかにした。
- (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ことがわかった。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3章では、生活環境における低周波磁界を定量化し、統計的解析を行った結果について述べた。職業の異なる計64人の被験者が日常生活で受ける低周波磁界を一日間連続的に測定した。行動記録との照合により行動場所毎の磁界の累積確率分布を求め、それに基づいてばく露量推定モデルの検討を行った。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、記録される磁界は測定器装着場所に依存するが、左右の腰に同一測定器を装着して同時測定を行い、比較的大きな磁界を生じる発生源に近接する機会がなければ、両方で記録される磁界の統計量に大きな差はないことを明らかにした。この結果を踏まえ、また測定器装着による行動の制約を極力避けることも考慮し、一台の測定器を腰に装着して受ける磁界の連続測定を実施した。
- (2) 記録された時系列データを被験者の行動記録と照合することにより、特定の場所における磁界の特徴を表わす累積確率分布を求める手法を提案した。各場所に測定器を設置して磁界の時間変化を測定することや、その場所の磁界の空間分布を測定することは、実質的に不可能と考えられるため、本手法は極めて有効な手法と考えられる。
- (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 未満であることを、累積確率分布に基づき明らかにした。
- (4) 各場所における磁界の累積確率分布とその場所における滞在時間とから、ばく露量を推定する方法を提案し、一日の総ばく露量の実測値と推定値が概ね一致することを示した。しかしながら、各場所における両者には違いが認められることが判明した。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、推定値の精度向上が可能になることを指摘した。

第4章では、従来の電力設備周辺の電界・磁界の実態調査が研究者の居住する国内だけで行われていること、それぞれの別の測定器を用いそれぞれの測定手順に従って実施されていることの問題点を指摘した。これを踏まえて、7ヶ国、計23ヶ所における公称電圧110kVから500kVの電力設備周辺の電界・磁界の実態調査を同一測定器・同一手順で行った結果について述べた。得られた成果を次に示す。

- (1) 同一の測定器を用い同一の測定手順に従って電界および磁界の実態調査を実施した。これに伴い、従来難しかった結果の比較が容易にできるようにな

った。

- (2) 変電所内では、電界および磁界ともにほとんどの測定値は ICNIRP の職業的ばく露に関する参考レベルを下回ることを明らかにした。しかし、極めて限られた箇所においてのみ電界が参考レベルをわずかに上回った変電所もあることを示した。
- (3) 送電線下の電界および磁界は、ICNIRP の示す職業的ばく露に関する参考レベルと比べ、はるかに低い値となることを明確にした。

第5章では、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との観点から、ショウジョウバエの急性毒性（忌避行動）、慢性毒性（寿命）および遺伝毒性（突然変異）に及ぼす低周波磁界の影響を実験的評価し、統計的観点から考察を行った。従来の研究では比較的高い磁界が用いられているのに対し、本研究では第2章から第4章までの成果に基づいた日常生活環境や職業環境における5つの磁界レベルを用い、以下の知見を得た。

- (1) 磁界にばく露されたショウジョウバエの忌避行動に関する実験結果の t 検定の評価から、磁界が忌避行動に影響を与えとは云えないことを示した。
- (2) 磁界下での寿命に関する実験結果の Kaplan-Meier product limit 法と一般化 Wilcoxon 検定の評価から、磁界がショウジョウバエの寿命に影響を与えとは云えないと結論づけた。
- (3) 現時点では対照群の供試数が少なく未だ突然変異が発生していないため最終的な結論付けはできないものの、突然変異に関する実験結果に対する適合度検定、区間推定、オッズ比の評価から、磁界がショウジョウバエの突然変異発生率に影響を与えとは云えないと結論づけられる可能性が高いことを示した。

6.2 今後の課題

携帯電話、インバータ制御機器や電気自動車の普及などライフスタイルの変化により、生活環境や職業環境における磁界レベルも時とともに変化していく可能性がある。今後とも継続的にさまざまな環境下での実態調査による定量化を実施していく必要がある。以下に、今後の課題をまとめる。

本研究で実施した家庭用電気機器の発生する磁界の定量的評価では、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。今後はこのような機器についての評価も必要である。また、今回実施した磁界発生源としての家庭用電

気機器の特性評価だけでなく、IEC62233 で規定されている人体ばく露を考慮した家庭用電気機器の発生磁界の測定法に準拠した測定・評価も今後必要と考えられる。

家庭用電気機器は社会的要請により省エネ化や環境への対応などがなされ、また制御回路など技術的にも年々進歩しているものもある。従って、例えば10~15年毎に多数のサンプルを対象とした定期的な実態調査を行うことは、有用と考えられる。

本論文で提案した、生活環境下で記録された磁界の時系列データと行動記録から各場所における磁界の累積確率分布を求める方法は、ばく露量推定に必要な情報を得るために有益な手段である。

人が受ける磁界の時間積分値であるばく露量は磁界レベルと同様に重要な物理量であるが、実測するには測定器を常時携帯する必要がある。行動の制約やデータ取得の大変さを考えると、各場所における磁界の累積確率分布とその場所の滞在時間からばく露量を推定する手法は単純であるが、極めて有効と考えられる。推定精度向上のためには、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が必要である。

本論文で提案した同一測定器・同一測定手順により電力設備周辺における電界・磁界の実態調査をさらに多くの国で実施し、一層のデータ蓄積することが必要である。変電所内の電界はブスバーのような架空設備からの電界が殆どであると想定し、測定の手軽さを考慮し鉛直方向の電界を測定してきたが、設備周辺では水平方向の電界も含めた3次元での測定が必要である。また、実測値との比較により、変電所内の電界・磁界の計算手法を確立することも重要と考えられる。

電力設備の発生する電界・磁界に関する測定手順は、送電線下を対象としたIEEE Std. 644 で規定されているだけであった。しかし、2009年8月に一般公衆がアクセス可能な電力システムから発生する電界・磁界の測定手順が、IEC62210 で規定された。送電線のみならず、送配電線の地中化に伴い設置される電力ケーブルや地上置き機器などもIEC62110の対象に含まれている。これらの機器の発生する磁界の実態調査は従来ほとんど行われておらず、規格に準拠した実態調査を早急に行い、主として磁界の定量化をすることが必要である。

一方、職業環境における電界・磁界の測定手順はIEC106の優先課題になっているが、作業状態が多岐にわたることもあり、測定手順に関する規格はまだ制定されていない。このような職業環境における電界・磁界の測定手順の国際規

格化が期待される。

小生物に与える低周波磁界の影響調査では、ショウジョウバエの突然変異に及ぼす影響については、自然状態での供試数が他の磁界条件と比べ少なく未だ実験で突然変異が発生していないため、最終的な結論付けはできておらず供試数の蓄積が課題である。

また、今回の実験は熱平衡状態での実験であり、今後の課題としてより実際の環境下を模擬した非平衡状態での実験も必要と考えられる。さらに、体細胞試験、DNA 修復試験、眼色復帰試験、翅毛スポットテスト等遺伝子レベルの高感度の実験も将来の実験課題として検討していく必要がある。

日本では、3kV/m の電界規制値が 1976 年に制定されている。磁界規制値は、1998 年 6 月に発行された原子力安全・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」の報告書で導入の提言がなされているが、諸般の事情によりパブリックコメント募集が遅れており、現時点では設定されていない。一方、ICNIRP では 1Hz から 100Hz の電磁界に対するガイドラインの改訂が行われ、2010 年 11 月に公表された。このような世界あるいは国内の動向も踏まえた上で、生活環境および職業環境における実態調査を行うことが必要であろう。

謝辞

・本研究の遂行、論文作成にあたり、終始熱心にご指導ご鞭撻を賜りました名古屋工業大学大学院工学研究科機能工学専攻教授 水野幸男先生に衷心より謝辞を表し、厚く御礼申し上げます。

本論文作成にあたり、貴重なご意見、ご助言を頂戴致しました名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻教授 藤原修先生、名古屋工業大学大学院工学研究科機能工学専攻教授 市村正也先生に深く感謝いたします。

本論文作成のきっかけを与えていただき、研究の遂行ならび論文作成に当たり貴重なご意見をいただきました(株)ニシワキ（元名古屋工業大学工学部電気情報工学科および名城大学理工学部電気電子工学科教授） 内藤克彦氏に心よりお礼申し上げます。

電力設備近傍での電磁界測定やショウジョウバエの実験実施にあたり多大のご協力、ご指導をいただいた日本はじめ各国の関係各位の方々に厚く御礼申し上げます。

本研究に対し貴重な御意見と多大な御協力をいただいた水野研究室ならびに旧内藤研究室の皆様心より御礼申し上げます。

最後に本研究の遂行に関しご理解とご協力を賜った日本ガイシ(株)上司、同僚の皆様、そして家族に深く感謝いたします。

研究業績

学会誌論文

- (1) 田中賢治、水野幸男、内藤克彦：「家庭用電気機器の発生する低周波磁界の定量的評価」、電気学会論文誌 A、129 巻、9 号、pp. 627-632、2009.
(第 2 章内容を公表)
- (2) 田中賢治、水野幸男、内藤克彦：「生活環境における低周波磁界の定量的評価」、電気設備学会誌 2010 年 9 月号 Vol. 30, No. 9, pp. 794-800, 2010. (第 3 章内容を公表)
- (3) Kenji Tanaka, Yukio Mizuno, Katsuhiko Naito: “Effect of Power Frequency Magnetic Field on Acute, Chronic and Genetic Toxicities of Fruit Flies”, IEEJ Trans. on Fundamentals and Materials, Vol. 130, No. 12. (電気学会論文誌 A), pp. 1053-1059, 2010. (第 4 章内容を公表)
- (4) Kenji Tanaka, Yukio Mizuno, Katsuhiko Naito: “Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields nearby Power Facilities in Several Countries”. (IEEE PES Trans. on Power Delivery 掲載決定, 第 5 章内容を公表)

国際会議

- (1) Kenji Tanaka, Yukio Mizuno, Katsuhiko Naito: “Field Survey of Power Frequency Magnetic Field under Living and Business Environments”, EMC Kyoto, Paper No. 23S2-1, Kyoto, Japan, July 20-24, 2009.
- (2) Kenji Tanaka, Yukio Mizuno, Katsuhiko Naito: “Effect of Power Frequency Magnetic Field on Chronic and Genetic Toxicities of Fruit Flies”, Power Tech, Paper No. 245, Bucharest, Romania, June 28-July 2, 2009.

国内口頭発表

- (1) 田中賢治、伊藤勇一、水野幸男、内藤克彦：「生活環境における商用周波磁界の実態調査」、平成 21 年電気学会全国大会、論文番号 1-157.
- (2) 田中賢治、山本有摩、水野幸男、内藤克彦：「生活環境における商用周波磁界の実態調査 (第 2 報)」、平成 21 年度電気関係学会東海支部連合

大会、論文番号 0-312.

- (3) 田中賢治、伊藤勇一、水野幸男、内藤克彦：「生活環境における低周波磁界の実態調査（その3）」、平成 22 年電気学会全国大会、論文番号 1-146.
- (4) 田中賢治、山本一樹、水野幸男、内藤克彦：「各国における 500-kV 送電線下の商用周波電界・磁界の実態調査」、平成 22 年電気関係学会東海支部連合大会、論文番号電気学会全国大会、論文番号 Po2-3.
- (5) 田中賢治、山本一樹、水野幸男、内藤克彦：「各国における電力設備周辺の低周波電界・磁界の実態調査」、平成 22 年 11 月 1・2 日、電気学会電磁環境研究会資料 EMC-10-033.