

原 著

## 低周波電磁波のマウスへの影響

— 水晶体を中心として —

富岡 敏也<sup>1)</sup> 松崎 広栄<sup>2)</sup> 宮田 幹夫<sup>3)</sup>  
宇賀 茂三<sup>4)</sup> 石川 哲<sup>1)</sup>

1) 森下記念病院眼科

2) 広瀬病院眼科

3) 北里大学医学部眼科学

4) 北里大学医療衛生学部視覚機能療法学

## Effect of low frequency electromagnetic waves on mice lens

Toshiya Tomioka<sup>1)</sup> Hiroe Matuzaki<sup>2)</sup> Mikio Miyata<sup>3)</sup>  
Shigekazu Uga<sup>4)</sup> Satoshi Ishikawa<sup>1)</sup>

1) Department of Ophthalmology, Morishita Memorial Hospital

2) Department of Ophthalmology, Hirose Eye Hospital

3) Department of Ophthalmology, School of Medicine, Kitasato University

4) Department of Orthoptics and Visual Science, School of Allied Health Sciences Kitasato University

## 要約

低周波電磁波の水晶体への影響を BALB/c マウスを用いて検討した。マウス (10匹) に100kHz (300V/m, 30 nT) の電磁波を全身的に6ヶ月間連続曝露し、水晶体を組織学的に検討し、水晶体中の Na, K, Ca 及び、還元型グルタチオンを測定した。発育体重曲線には有意差はなかったが、対照群と比べて曝露群では体毛の乱れと角膜反射の乱れが著明であった。曝露群の水晶体は組織学的には水晶体赤道部で bow 構築の著しい配列の乱れと線維の膨化が認められ、前皮質線維、後囊下線維の膨化も認められた。また生化学的には Na と K は対照群と曝露群で有意差はなかったが、曝露群で Ca が有意に増加し、還元型グルタチオンは有意に減少していた。

以上の結果から100kHz (300V/m, 30nT) の低周波電磁波の長期曝露では BALB/c マウスの水晶体に混濁を引き起こすことが明かになり、立毛筋異常によると考えられる、体毛の乱れ、光沢の消失などから、電磁波は眼のみではなく全身的にも影響を与える可能性が強いと考えられた。

(臨床環境7 : 80~86, 1998)

## Abstract

The effect of low frequency electromagnetic waves on the ocular lens was investigated using BALB/c mice. Unexposed group was served as a control (10 mice) .

Other ten mice were exposed to an electromagnetic wave of the frequency with 100kHz, electric field of

受付 : 平成10年8月19日 採用 : 平成10年9月14日

別刷請求宛先 : 富岡 敏也

〒228-0811 相模原市東林間4-2-18 森下記念病院眼科

Received: August 19, 1998 Accepted: September 14, 1998

Reprint Requests to Toshiya Tomioka, Department of Ophthalmology, Morishita Memorial Hospital, 4-2-18, Higashirinkan, Sagami-hara, Kanagawa 228-0811 Japan

300Volts/meter, with the intensity of 30 nano Tesla, respectively, for a period of 6 months. The exposed group was investigated by histopathologically, and several biochemical parameters; Na, K, Ca and glutathion were measured. These were compared with the controls. There were no significant differences between exposed and control groups in the body weight against time. The treated group showed abnormal array of the hair as well as abnormal function of the erector muscles of the hairs with reduced luster of the hair. The eye showed an irregular reflex on the surface of the cornea compared with smooth and uniform reflex of the control group.

Histologically, the following findings were seen in exposed group; the bow configuration was disarrayed, and the fibers especially at the bow-structure area were swollen. Anterior cortical fibers and subcapsular lens fibers in posterior cortex were also found to be swollen. Biochemical analyses of the lens were made. There were no significant differences in the concentration of Na and K. However, a significant increase of Ca and a significant reduction of glutathion were seen in the exposed group.

From above results, it was obvious that a prolonged exposure with the low frequency electromagnetic wave produced a definite lens opacity in BALB/c mouse. The electromagnetic wave of low frequency (100 Hz) produced eye lesion.

It was not only existed in the eye but also produced the systemic influences of the body such as reduced luster of the hair and erector muscles of the hairs. (Jpn J Clin Ecol 7 : 80~86, 1998)

---

《Key words》 low frequency electromagnetic waves, electromagnetic field, lens, calcium, glutathion

---

## I. 緒言

近年、テレビなどから発生する微弱な低周波電磁波の生体への影響についての研究が進められている。これまでブラウン管 (CRT cathode ray tube) あるいは VDT (visual display terminal) を使用する、いわゆる VDT 作業従事者に眼科的、整形外科的、精神神経科的、内科的障害が起きることは知られてきた。眼科領域では画面を長時間固視することによって起こる調節異常<sup>1)</sup>、瞬目回数の減少<sup>2)</sup>、それに伴う涙液の減少<sup>3)</sup>などが報告されている。しかし樋口<sup>4,5)</sup>はマウスを用いたブラウン管画面の曝露で角膜上皮障害が生じたと報告しており、その原因としてテレビから漏洩する低周波電磁波の可能性を強調している。また堀内ら<sup>6)</sup>は周波数別に長波領域の曝露実験を行い、100kHz でモルモットの実験的アレルギー性結膜炎が最も増悪したと報告している。今回、我々は低周波電磁波の眼への影響を調べる目的で、100kHz の電磁波をマウスに長期間継続曝露し、水晶体への影響について検討したので報告する。

## II. 材料と方法

### 1. 実験動物及び曝露方法

実験動物は6週齢の BALB/c 雄性マウスを用いた。対照群10匹、電磁波曝露群10匹とし、5匹を1群として両群とも2つのプラスチックケージに収容し、飼育条件は室温24℃、明暗周期は12時間に維持された別々の空調動物室内で飼育した。飼料は固形型普通食を与え、水とともに自由に摂取させた。2週間馴化した後、曝露実験を開始した。

電磁波曝露装置として太さ0.5mmの銅線で一辺が50cmの四角形のコイルを作製し、Leader Electronics 社製 Audio Generator27A に接続した (図1)。

100kHz の電流を流した時のコイル内の電場、磁場を測定した。電場の測定は Genitoron 社製 E/M instrument を、磁場の測定は Combinoba 社製 MFM-1000を使用した。実測した電場は300V/m、磁場は30nTであった。前述の BALB/c 雄性マウスを6ヵ月間コイル内で飼育し、電磁波を曝露した。曝露終了後、頸椎脱臼し、すみやかに死亡させ、両眼球を摘出した。摘出眼球は後極側から強

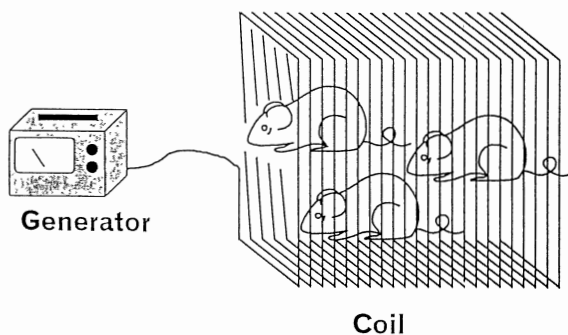


図1 電磁波暴露装置の模式図

膜を切開し、水晶体を摘出した。この操作で破囊した水晶体は検体から除外した。水晶体中の Na、K、Ca、還元型グルタチオン（以下 GSH と略す。）を測定し、任意の3眼について組織学的に検討した。

## 2. 水晶体の組織学的検査

摘出した水晶体を4%グルタルアルデヒドで3日間以上固定後、0.1M リン酸緩衝液 (pH7.4 ~ 7.6) で洗浄し、1%オスミック酸で後固定した。エタノール系列、プロピレンオキサイドで脱水し、ケトール812で包埋し、60℃で重合させた。超ミクロトームで厚さ0.5 $\mu$ mの切片を作り、トルイジンブルー染色し、顕微鏡で観察した。

## 3. 水晶体中の Na、K、Ca の測定

摘出した水晶体の湿重量を測定した後、真空乾燥させ、0.1N硝酸100 $\mu$ l を加え、80℃、1時間で灰化させた。純水4ml に溶解し、3ml を Ca の測定に供し、残りの1ml をさらに4倍に希釈し、Na、Kの測定に供した。測定には日立社製180-80型原子吸光度計を使用した。Na、K、Ca の各測定条件は表1の通りである。

表1 原子吸光度計の各測定条件

	Na	K	Ca
lump current (mA)	10.0	10.0	10.0
wave length (nm)	589.0	766.7	422.7
slit width (nm)	0.4	2.6	2.6
burner type	standard type		
burner height	7.5	7.5	12.5
oxidant air (kg/cm <sup>2</sup> )	1.69	1.69	1.60
fuel C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	0.25	0.30	0.40

## 4. 水晶体中の GSH の測定

電解質測定と同様の手順で水晶体を摘出し、湿重量を測定した。GSH の測定は Saxena ら<sup>7)</sup>の方法に準じた。すなわち、摘出した水晶体に10mM リン酸緩衝液 (pH7.0) 1ml を加え、ホモゲナイズし、4℃、18,000r/min で30分間遠心分離し、得られた上澄みを測定に供した。上澄み500 $\mu$ l に1-クロロ-2, 4-ジニトロベンゼン (0.5M in 50 $\mu$ l ethanol) 20 $\mu$ l とグルタチオン-S-トランスフェラーゼ (50UI/ml) 10 $\mu$ l と10mM リン酸緩衝液 (pH 7.0) 270 $\mu$ l を加えて、25℃で10分間反応させ、発色させた。日本分光社製 Ubest-50型吸光度計を用いて、反応前後の吸光度を測定波長340nm で測定し、その差を反応量とし、検量曲線から算出した。

対照群と曝露群との比較検討には統計学的に un-pared t- 検定を用い、危険率5%未満を有意とした。

## III. 結果

### 1. 成長曲線及び体毛の状態

曝露開始後から1ヵ月ごとに両群の体重を測定し、比較した (図2)。2群間に有意差は認められなかった。しかし曝露3ヵ月過ぎより、曝露群では体毛が粗造なマウスがみられ、曝露6ヵ月には10匹中7匹の体毛が粗造で、2群間で体毛に明

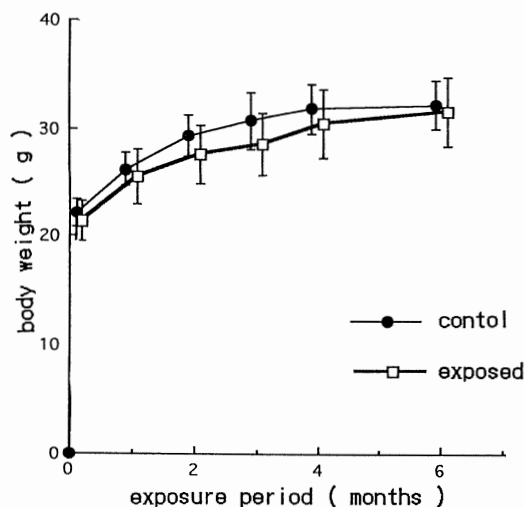


図2 体重曲線

曝露期間中、2群間に有意差はなかった。

らかな差がみられた (写真1)。

## 2. 前眼部の観察

前眼部の観察では、曝露群で角膜反射の乱れと軽度の水晶体の混濁を認めた (写真2)。

## 3. 水晶体の組織学的検査

曝露群では組織学的に変化が認められた。前皮質では対照群と比較して水晶体上皮細胞の一部欠落を認め、前皮質線維は膨化と液化を生じていた (写真3)。水晶体赤道部では、対照群も若いマウスの水晶体と比べると bow 構造の配列に幾らか乱れが認められたが、まだ比較的配列は保たれていた。しかし曝露群では、線維細胞の核が上皮側に偏位し、bow 構造の配列は著しく乱れ、線維の顕著な膨化も認められた。また赤道部水晶体上皮に明るい細胞と暗い細胞の混在が認められた (写真4)。後皮質では後囊下線維の膨化と変性を認め、走行の乱れも認められた (写真5)。

## 4. 水晶体中の Na, K, Ca

水晶体湿重量は、曝露群では $10.8 \pm 1.34$ mg、対照群では $11.5 \pm 0.76$ mg で2群間では有意な差は認められなかった。

水晶体中の電解質については、Na は曝露群で $216.5 \pm 55.1$ nmol/lens、対照群では $186.9 \pm 19.9$ nmol/lens で2群間では有意差はなかった。Kは曝露群で $576.4 \pm 23.1$ nmol/lens、対照群では $584.4 \pm 20.3$ nmol/lens で2群間では有意差はなかった。しかし水晶体中の Ca については曝露群で $8.675 \pm 2.125$ nmol/lens、対照群では $6.500 \pm 1.475$ nmol/lens で統計学的に曝露群で Ca の有意な増加を認めた (表2)。

## 5. 水晶体中の GSH

水晶体中の GSH は、曝露群で $37.04 \pm 4.85$ nmol/lens で、対照群では $45.68 \pm 7.37$ nmol/lens で統計学的に曝露群で GSH の有意な減少を認めた (表2)。

## IV. 考察

電磁波はその波長によって大まかには $\gamma$ 線、X線、紫外線、可視光線、赤外線、マイクロ波、ラジオ波、長波、超長波に分けられる。300MHz から300GHz の電磁波はマイクロ波と呼ばれ、誘電

表2 水晶体中のNa, K, Ca, GSHの測定結果

測定項目	対照群	曝露群
体重	$32.2 \pm 2.3$	$31.5 \pm 3.2$ (g)
水晶体	湿重量	$11.5 \pm 0.76$
	Na	$186.9 \pm 19.9$
	K	$584.4 \pm 20.3$
	Ca	$6.500 \pm 1.475$
GSH	$45.68 \pm 7.37$	$37.02 \pm 4.85^*$ (nmol/lens)

\* ;  $p < 0.05$

加熱効果があり、眼に対しては水晶体で吸収され、熱作用によって白内障を引き起こすことが知られている<sup>8,9)</sup>。しかしさらに周波数の低い、ラジオ波、長波、超長波などの低周波域での眼に対する影響を検討した報告は少ない。

樋口<sup>4,5)</sup>はブラウン管画面露曝によってマウスの角膜上皮に脱落などの障害が起きることを報告し、実験に用いたブラウン管画面の波長エネルギー特性を測定し、超長波から短波領域に強い電磁波が検出されたことから低周波電磁波の角膜障害の可能性を強調している。また堀内ら<sup>6)</sup>は各周波数別に長波領域の電磁波曝露実験を行い、モルモットの実験的アレルギー性結膜炎が100kHzで最も増悪したと報告している。数100MHzから数100GHzのマイクロ波領域での水晶体に対する影響については多くの報告があるものの、我々の検索した限りではさらに低い周波数での水晶体への影響を検討した報告はみられないため、堀内らの報告を参考に100kHzの曝露条件を設定し、長期間の曝露を試みた。

水晶体が混濁すると組織学的には水晶体上皮細胞が欠落し、bow 構築の配列が乱れ、また前皮質、後囊下の水晶体線維細胞の膨化や液化がみられることが知られている<sup>10)</sup>。さらに生化学的には水晶体中の  $\text{Na}^+$  と  $\text{Ca}^{2+}$  は増加し、 $\text{K}^+$  と GSH は減少することも知られている<sup>11)</sup>。

今回の研究から低周波電磁波を長期間曝露すると水晶体の混濁が進行することが組織学的に明らかになった。生化学的には水晶体中の Na, K の変動は認められなかったが、Ca の増加と GSH の減少は水晶体の混濁に伴う有意な変動と考えられた。

低周波電磁波がどのような機序で生体に影響を及ぼすかということは未だ明かにはなっていない。これまで低周波電磁波の細胞レベルでの実験では、主に  $\text{Ca}^{2+}$  などのイオンに対する影響<sup>12,13)</sup> や細胞膜に対する影響<sup>14)</sup>、酵素活性に対する影響<sup>15)</sup> などが報告されている。 $\text{Ca}^{2+}$  については Bawin ら<sup>12,13)</sup> は *in vitro* で鶏の雛の脳組織を用いて低周波電磁波を曝露し、 $\text{Ca}^{2+}$  の流出を認めたと報告している。一方で、Lindstrom ら<sup>16)</sup> は低周波電磁波を *in vitro* でTリンパ球に暴露し、細胞内  $\text{Ca}^{2+}$  が増加したと報告している。今回の結果が示したように、低周波電磁波暴露が、細胞内  $\text{Ca}^{2+}$  代謝に影響を及ぼすと主張する報告はきわめて多い。

ところで水晶体膜の能動輸送系としては  $\text{Na}^+$ - $\text{K}^+$  ポンプと  $\text{Ca}^{2+}$  ポンプの存在が知られており<sup>17,18)</sup>、特に遊離  $\text{Ca}$  は膜の選択的透過性の維持や膜の構造安定化に重要で、細胞内の物質の輸送、代謝にも関与している。また水晶体中の  $\alpha$ -クリスタリンや高分子量タンパク質と  $\text{Ca}$  が会合し、凝集が進むことで、水晶体中に  $\text{Ca}$  が増加し、水晶体の透明性が損なわれてくる<sup>19)</sup>。今回の研究では水晶体中の  $\text{Ca}$  は増加しているものの、 $\text{Na}$ 、 $\text{K}$  は大きな変動はなかった。このことからこれまでの報告に見られるように低周波電磁波が  $\text{Ca}^{2+}$  の代謝、特に  $\text{Ca}^{2+}$  ポンプに何らかの影響を及ぼしたのではないかと推察された。また GSH は水晶体膜の-SH 基を酸化障害から守る、いわゆるラジカルスカベンジャーの役目を果たしている。老人性白内障では GSH が有意に減少することが知られており<sup>20)</sup>、今回の結果から水晶体は低周波電磁波によって酸化ストレスをうけていたと考えられた。

今回の研究では、全身の臓器については詳細な検討は加えていないが、角膜、皮膚の変化は外見からも著明であった。前眼部の観察では角膜反射の強い乱れを認め、均一な反射は消失していた。これは角膜上皮障害を示唆し、樋口の報告と一致する。また体毛の粗造化は皮膚の異常と、特に立毛筋の異常収縮を示唆していると考えられた。*in vivo* での曝露実験では Ossenkopp ら<sup>21)</sup> は60Hz の低周波電磁波をかたつむりに曝露すると対照群

に比べ、寿命が短かったと報告している。これらのことから、低周波電磁波は、水晶体のみならず、広く、全身に何らかの影響を及ぼすことが予想された。

今回我々が設定した周波数は、ブラウン管画面から漏洩している電磁波からも測定される周波数帯域である。Weiss ら<sup>22)</sup> は8機種のブラウン管画面から漏洩する電磁波について10kHzから18GHzまでと紫外線とX線について測定を行い、100kHz前後で比較的高いエネルギーが検出された結果を報告している。ブラウン管画面から漏洩する電磁波については多くの報告があり<sup>23)</sup>、ほとんどの報告でマイクロ波、X線は検出されなかったとしている。そのうえでブラウン管画面曝露は生体には影響ないとされているが、今回の研究からマイクロ波未満の低周波数の電磁波でも長期間の被曝では水晶体をはじめ、全身に影響を及ぼす可能性があることが明らかとなった。

## V. 結語

低周波電磁波(100kHz)のマウス水晶体に対する影響を検討した。組織学的に曝露群でbow構築の配列の乱れや、上皮細胞の欠落、前皮質および後囊下線維の膨化が認められた。水晶体中の $\text{Na}$ 、 $\text{K}$ に有意な変動は認められなかったが、 $\text{Ca}$ は曝露群で有意に増加し、GSHは減少していた。以上から低周波電磁波の長期曝露はマウスの水晶体に影響を及ぼし、水晶体の混濁を引き起こすことが明らかとなった。また、体毛の粗造化からは全身的にも影響を与えていると推測された。

## 文献

- 1) 石川 哲、青木 繁：VDT とくに作業者の調節および瞳孔所見について、日本の眼科 58：840-844、1987
- 2) 岩崎常人、栗本晋二、他：VDT 作業による眼精疲労と涙液産生能との関係、臨眼39：172-173、1985
- 3) 八木沼康之、山田宏圓、他：VDT 作業に伴う涙液量と瞬目数の経時的変化について、臨眼42：848-849、1988

- 4) 樋口裕彦：電磁波による角膜障害の可能性に関する実験的研究。日眼会誌69：933-940、1992
- 5) 樋口裕彦、市邊義章、他：電磁波の生体におよぼす影響－角膜上皮－。臨床環境医学1：89-94、1992
- 6) 堀内浩史、難波龍人、他：環境因子の眼アレルギーへの影響－電磁波の影響について－。日眼会誌95：225、1991
- 7) Saxena M, Singhal SS, et al: A specific, sensitive and rapid method for the determination of glutathione and its application in ocular tissues. *Exp Eye Res* 55: 416-468, 1992
- 8) Guy WA, Lin CJ, et al: Effect of 2450-MHz radiation on the rabbit eye. *IEEE transaction on microwave theory and techniques* 23: 492-498, 1975
- 9) Stewart-Deehan JP, Creighton MO, et al: In vitro studies of microwave-induced cataract: separation of field and heating effects. *Exp Eye Res* 36: 75-90, 1983
- 10) 増田寛次郎、猪俣 猛、他：眼科学大系第2巻B。中山書店、1993、pp15-26
- 11) Kuck FRJ, Kuck DK: The emory mouse cataract: Loss of soluble protein, glutathione, protein sulphhydryl and other changes. *Exp Eye Res* 36: 351-362, 1983
- 12) Bawin MS, Adey RW, et al : Ionic factors in release of  $^{45}\text{Ca}^{2+}$  from chicken cerebral tissue by electromagnetic fields. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.* 75: 6314-6318, 1978
- 13) Bawin MS, Adey RW: Sensitivity of calcium binding in cerebral tissue to weak environmental electric fields oscillating at low frequency. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.* 73: 1999-2003, 1976
- 14) Marron TM, Goodman ME, et al: Low frequency electric and magnetic field have different effects on the cell surface. *FEBS letters* 230: 13-16, 1988
- 15) Hiraki Y, Endo N, et al : Enhanced responsiveness to parathyroid hormone and induction of functional differentiation of cultured rabbit costal chondrocytes by a pulsed electromagnetic field. *Biochem Biophys Acta* 931: 94-100, 1987
- 16) Lindstrom E, Lindstrom P, et al: Intracellular calcium oscillations induced in a T-cell line by a weak 50Hz magnetic field. *J cellular physiology* 156: 395-398, 1993
- 17) Hightower KR, Reddy DVN: Metabolic studies on calcium transport in mammalian lens. *Curr Eye Res* 1: 197, 1981
- 18) Iwata S: Process of lens opacification and membrane function. *Ophthalmic Res* 6: 138, 1974
- 19) 鈴木克直、岩田修造：水晶体タンパク質に対するカルシウムイオンの親和性と結合能。あたらしい眼科1：112-114、1984
- 20) 岩田修造：水晶体－その生化学的機構－。メディカル葵出版、1986、pp135-136
- 21) Ossenkopp KP, Kavaries M, et al: Increased mortality in land snails (*Cepaea nemoralis*) exposed to powerline (60Hz) magnetic fields and effects of the light-dark cycle. *Neurosci Lett* 22: 89-94, 1990
- 22) Weiss MM, Petersen RC: Electromagnetic radiation emitted from video computer terminals. *Am Ind Hyg Assoc J* 40: 300-309, 1979
- 23) 富永洋志夫、張 振祥：VDT 作業の電磁環境の実態。労働科学67: 57-63, 1991



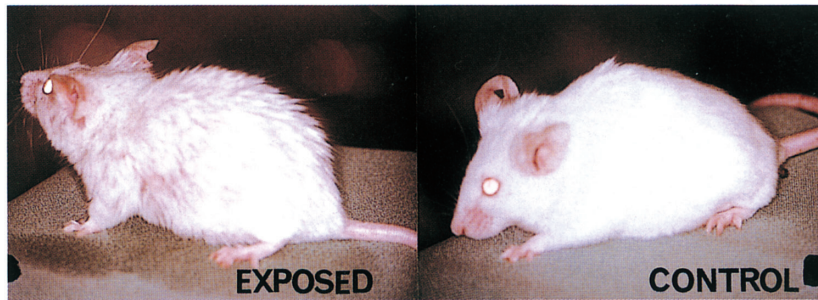


写真1 マウスの全身写真  
曝露群のマウスの体毛は対照群と比較して粗造である。

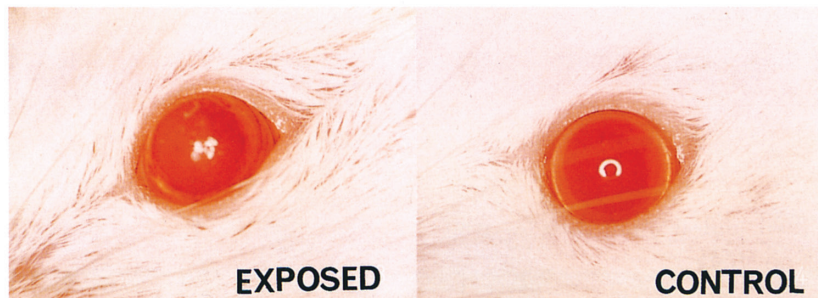


写真2 マウスの前眼部写真  
曝露群では角膜反射は乱れ、水晶体も対照群と比較して軽度の混濁を認める。

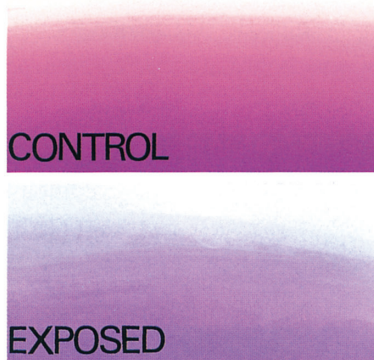


写真3 水晶体前皮質  
曝露群では水晶体上皮細胞の一部欠落、水晶体線維の膨化と液化を認める。(100倍)

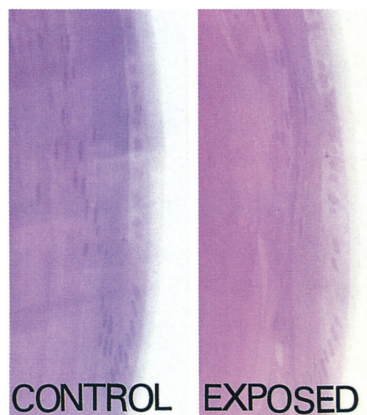


写真4 水晶体赤道部  
曝露群では、bow構築の配列の乱れが著しい。(100倍)

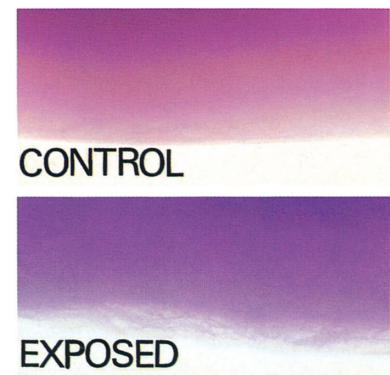


写真5 水晶体後皮質  
曝露群では後嚢下線維の膨化と変性を認める。(100倍)