資料14-1

眼球に関する研究動向について

金沢医科大学総合医学研究所 環境原性視覚病態学研究部

小島 正美

ミリ波ばく露による眼障害の報告

	周波数	実験条件	動物	結果
Rosenthal (1976)	35 GHz 107 GHz CW	 <50 mW 15~80 分 麻酔 + 瞬目抑制 ボーンアンテナを眼部に接触 	家兎	 107 GHz: immediate corneal stromal damage, it was gone by next day. (急性角膜実質障害が出るが、翌日消失) 35 GHz: persistent corneal damage, almost always present the next day. (ばく露翌日にも持続する角膜障害)
Kues (1999)	60 GHz CW	・10 mW/cm ² ・8 hr 単回ばく露 ・4 hr×5 days ・ 円形ホーンアンテナ	家兎 & サル	Neither microscopic examinations nor the diagnostic procedures performed on the eyes of acute and repeatedly exposed rabbits found any ocular changes that could be attributed to millimeter-wave exposure at 10 mW/cm ² . (10 mW/cm ² で眼障害なし)
Chalfin (2002)	35 GHz 94 GHz PW	 0~11 J/cm² 麻酔+ 2 W/cm² 35 GHz:1.5~5.0 s 94 GHz:2.0~4.0 s ~8W/cm², 1.0 s 切り離し導波管よりばく露 瞬目反射保持 	サル	The threshold of the cornea injury (epithelial edema, fluorescein staining) 角膜障害(上皮細胞浮腫、蛍光染色)閾値 • 35 GHz: 7.5 J/cm ² (2000 mW/cm ² , 3.8 s) • 94 GHz: 5 J/cm ² (2000 mW/cm ² , 2.5 s) • 角膜内皮の細胞密度に変化なし

眼障害重篤度の指標(Rosenthal, 1976)

- Injury of corneal epithelium evidenced by positive staining (蛍光染色陽性所見 論文に図表なし)
- Injury of corneal stroma evidenced by altered corneal transparency (角膜実質の障害は角膜の透明性で判定 論文に図表なし)

Scale(スケール)	Symptom(症状)
0.0-0.9 (論文に基準の記述なし)	Epithelial injury(上皮障害)
1.0 (Slightly glazed appearance) (微かなもや、かすみ)	Stromal injury(実質障害)
2.0 (Opaque cornea : 角膜混濁)	Opaque cornea(角膜混濁)



蛍光染色(-) 蛍光染色(+)



眼障害重篤度の指標 (Chalfin, 2002)

Table 1. Injury severity grading scale. (細隙灯で判定とあるが、写真の提示なし)

Grade		Description	
	0 1 2 3 4	None Epithelial fluorescein stain Grade 1 plus epithelial ede Grade 2 plus epithelial det Grade 3 plus stromal eden	^{ling} 上皮蛍光染色 ema Gr.1+上皮浮腫 ^{fect} Gr.2+上皮欠損 na Gr.3+実質浮腫
倍率 40倍	ばく露眼	細隙灯顕微鏡の 観察倍率(40倍) 写真は金沢医大	正常
倍率 400倍		上皮浮腫を観察するには 400倍程度の倍率が必要	

細隙灯では観察不能 写真は金沢医大

ばく露眼

正常眼



> 実験動物の忌避反応抑制



▶ 家兎の瞬目回数の報告

瞬目の間隔は6.3~20分毎に1回と様々な 報告があるが、6分程度瞬目抑制の影響は 家兎にはそれ程ない(対照眼に障害なし)

- ばく露時に瞬目の抑制をしない条件では、 眼部の障害の閾値は皮膚障害の閾値に 帰属する?
- 高強度の眼瞼ばく露で角膜障害が発生することが後に判明(高温・高温度で顕著)

- 例 : 75 GHz 150 mW/cm² 6分ばく露)
- ▶ 実験動物の瞬目抑制なし



ばく露眼

非ばく露眼



眼瞼ばく露60 GHz 200 mW/cm² 6 分ばく露@ 45C, 80%



眼障害診断方法

従来の蛍光染色方法

S.W. Rosenthal, 1976 S. Chalfin, 2002

金沢医大方式

M. Kojima, et al., Health Phys. 2009



- Rosenthal
- 蛍光励起フィルタのみ使用
- 2% フルオレセイン1滴
- 余剰の蛍光を生食で洗浄
- Chalfin (詳細記載なし)



正常

微かな混濁

細隙灯顕微鏡 観察のみ ↓ 微かな混濁 判別困難



0.45 mm

- 蛍光励起フィルタ+
- 励起光カットフィルタ
- 0.05 % フルオレセイン
 25 µl ピペットで点眼



• 余剰の蛍光を生食で洗浄

OCTで角膜厚を定量



例:75 GHz 150 mW/cm² 6分ばく露)



ばく露

前

ばく露

ばく露 1日後

ばく露 2日後

ばく露 3日後



眼障害(DD)発生率(10%、50%、90%)



40,75,95 GHzの眼障害閾値論文を基準に同一手法で 以下の実験を実施した

162 GHz実験

眼障害判定時期 162 GHz 480 mW/cm² 6分ばく露後所見



周波数により眼障害のピークが異なることが判明

ミリ波ばく露による眼障害の判定はばく露1日後に決定

162 GHz 6分ばく露による眼障害閾値

162 GHz ぱく露1日後	角膜表面温度¹ (℃)	角膜上皮障害 (蛍光染色所見)	角膜混濁 (矢印)	角膜浮腫 (矢印)
600 mW/cm²_6 min	51.2	障害 +(2/2)	障害 +(2/2)	障害 +(2/2)
480 mW/cm²_6 min	48.4±1.2	障害 +(10/10)	障害 +(10/10)	障害 +(10/10)
360 mW/cm²_6 min	45.5±1.0	障害 + (6/8)	障害 +(4/8)	障害 + (4/8)
330 mW/cm²_6 min	45.1±0.5	障害 + (3/3)	障害 +(2/3)	障害 + (3/3)
300 mW/cm²_6 min	44.4±0.8	障害 + (4/5)	障害 +(2/5)	障害 + (4/5)
240 mW/cm²_6 min	42.9±1.8	障害 + (4/9)	障害 +(1/9)	障害 + (4/9)
120 mW/cm²_6 min	37.6±0.7	障害なし(0/6)	障害なし(0/6)	障害なし(0/6)
60 mW/cm²_6 min	34.3±0.8	障害なし(0/3)	障害なし(0/3)	障害なし(0/3)

眼障害閾値は240 mW/cm²≦~≦360 mW/cm²の範囲内

60 GHz実験

60 GHz vs162 GHz 6分ばく露による眼障害推移の比較

60 GHz 400 mW/cm² @24[°]C \ 50%

162 GHz 480 mW/cm² @24°C、50%



60 GHzと162 GHzの眼障害の推移には基本的に大差はない

60 GHz 6分ばく露による眼障害閾値

60 GHz After 1 day Exposure	Corneal surface temperature	Corneal epithelium damage	Corneal opaque	Corneal edema
600 mW/cm²	19.4°C	Damage + (2/2)	Damage + (2/2)	Damage + (2/2)
500 mW/cm ²	20.3°C	Damage + (1/1)	Damage + (1/1)	Damage + (1/1)
400 mW/cm ²	16.5±1.5℃	Damage + (13/13)	Damage + (12/13)	Damage + (13/13)
300 mW/cm²	15.9±1.8°C	Damage+ (6/7)	Damage + (6/7)	Damage + (6/7)
200 mW/cm²	10.2±0.9°C	Damage+ (2/6)	Damage+ (2/6)	Damage+ (2/6)
100 mW/cm ²	6.5±0.1°C	No damage (0/2)	No damage (0/2)	No damage (0/2)

眼障害閾値は200≦~≦300 mW/cm²の範囲内

28 GHz実験

28 GHz vs 60 GHz 6分ばく露による眼障害推移の比較

28 GHz 400 mW/cm² @24°C、50%

60 GHz 400 mW/cm² @24°C \ 50%



28 GHz 6分ばく露による眼障害閾値

28 GHz After 1 day Exposure	Corneal surface temp. (ΔT)	Corneal epithelium damage	Corneal opaque	Corneal edema
600 mW/cm ²	19.7 °C	Damage + (3/3)	Damage + (3/3)	Damage + (3/3)
500 mW/cm ²	16.7 °C	Damage + (2/2)	Damage + (2/2)	Damage + (2/2)
400 mW/cm ²	16.3 °C	Damage + (8/8)	Damage + (8/8)	Damage + (8/8)
380 mW/cm ²	13.8 °C	Damage+ (1/4)	Damage + (0/4)	Damage + (2/4)
350 mW/cm ²	14.1 °C	Damage+ (2/3)	Damage+ (0/3)	Damage+ (0/3)
300 mW/cm ²	12.4 °C	No damage (0/3)	No damage (0/3)	No damage (0/3)
200 mW/cm ²	8.9°C	No damage (0/3)	No damage (0/3)	No damage (0/3)

・眼障害閾値は350≦~≦380 mW/cm²の範囲内
 ・28 GHzは40-162 GHzと比較して眼障害出現の有無が鋭敏

ミリ波帯閾値の周波数特性(28 GHz-162 GHz)



75 GHz付近で眼障害閾値は極小値となる
28 GHzは閾値が最も高い

100 GHz以上は閾値が上がる傾向にある

電波ばく露による眼障害 発生と室温、相対湿度 との関連

電波ばく露による眼組織内温度と温・湿度の関係

湿度の相違による組織温度の 差異湿度20% vs 80%@室温45℃





- ▶ 皮膚温度は湿度にかかわらず徐々に上昇
- ▶ 湿度20%環境では角膜、水晶体の温度変化は大きくない
- ▶ 湿度80%環境では皮膚と同様に徐々に温度上昇が見られた



電波ばく露による眼内熱輸送と周波数の関係



- 標準環境では28 GHzを含むミリ波による熱輸送形態は同一
- 高温・高湿度環境下では60 GHzと異なり熱輸送形態が若干異なる
- 60 GHzと40, 75, 95, 162 GHzの熱輸送形態には大差はない
 28 GHzばく露による発熱量は他の周波数より低いが、眼部に 広範囲にばく露されるため熱輸送形態が異なる

• 28 GHzと60 GHzの動物ばく露実験に関する電磁界解
 ・析の実施とばく露評価



- 28 GHzおよび60 GHz電磁界照射時 の前眼部のSAR分布
 - ✓ 周波数が増加するのに依存してビームの半値幅が狭まるため、28 GHzの条件では広範囲に電力吸収が見られる



● 角膜内のSAR分布: 28 GHzと60 GHzの比較
 ✓ 60 GHzは28 GHzよりも減衰が大きく
 侵入長が浅くなる

周波数の違いに依存した電力吸収分布の違いは p.16の感温液晶マイクロカプセルの結果と定性的 に一致する結果である。

眼部周辺皮膚とその他の皮膚の比較

眼部、眼瞼皮膚及び体部皮膚に係る障害閾値の比較



28、60 GHzばく露による表面温度上昇は角膜より皮膚が高い
 ・眼瞼に電波をばく露する実験で眼瞼皮膚障害を比較すると28
 <60 GHzであるが、眼球では28>60 GHzであった

まとめ及び今後の課題

- ➤ ミリ波帯(28-162 GHz)の眼部ばく露実験の眼障 害実験結果および眼が鋭敏な忌避反応を持つこ とから、現行の電波防護指針は安全側にあると 考える
- ▶ 今後の課題として、6-18 GHzのシミュレーションに よるデータの補完が必要と考える
- ▶ ヒトの瞬目時間(0.1-0.3秒)内のばく露される 波高値の高いパルス波実験が必要と考える



前房深度の比較 _{ヒトモデル}



家兎モデル



Fig 2

MMW sham exposure

IR exposure

Before exposure



10 min after exposure



One day after exposure



眼表面(角膜)の解剖と眼障害



- ▶ 角膜上皮障害は上皮細胞の脱落により神経が露出するために強い痛み がある
- ▶ 労働衛生(溶接等に伴う紫外線上皮障害)では、避けるべき重要障害と されている(労働安全衛生所 www.jniosh.go.jp/publication/doc/srr/...)
- ▶ 我が国の防護指針では、「一過性の障害は電磁波を照射しなくても検出 される程度のもので重大なものではない。」とされている

金沢医大では角膜上皮障害は避けるべき眼障害として取り扱っている

2.45 GHz 300 mW/cm² ばく露による眼障害の推移



ばく露3日後

ばく露1カ月後

2.45 GHzばく露による白内障は後嚢下混濁から生じ、時期を置いて皮質白内障を発症した

眼全体温度の時間発展画像(100 mW/cm 環境温度 40℃ 相対的に高湿度)





家兎

ヒト

• まぶたが閉じている状態のモデルの開発



- 今回のモデルではまぶたの厚みを1 mmと仮定した
- 本資料では家兎の解析結果を示す



▶ 60 GHz表面付近に分布が集中しているのが特徴的



- ▶ まぶた有りの場合ほぼまぶたで電力が吸収される (28 GHzは少し角膜に漏れる)
- ▶ 60 GHzの方が相対的に電力吸収が大きい(28 GHzの4倍程度)
- ▶ 28 GHzはまぶた無しの方がピーク値が大きく, 60 GHzではまぶた有りの方がピーク値が大きい