

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所

小島 正美

電波の人体への影響についての考え方

- 我が国の電波防護指針

- 人体に影響を及ぼさない電波の強さの指針値
(電波防護指針の在り方に関する検討作業班: 資料7-1)

- ICNIRPガイドライン

- 健康への有害な影響とは、ばく露を受けた人または子孫の健康に確認可能な損傷を与えるもの
(時間変化する電界、磁界及び電磁界によるばく露を制限するためのガイドライン(300 GHzまで))

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	<ul style="list-style-type: none"> • <50 mW • 15~80 分 • 麻酔 + • 瞬目抑制  <ul style="list-style-type: none"> • ホーンアンテナを眼部に接触 	家兔	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • 10 mW/cm² • 8 hr 単回ばく露 • 4 hr × 5 days • 円形ホーンアンテナ 	家兔 & 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	<ul style="list-style-type: none"> • 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 <ul style="list-style-type: none"> • 35 GHz: 7.5 J/cm² (2000 mW/cm², 3.8 s) • 94 GHz: 5 J/cm² (2000 mW/cm², 2.5 s) • 角膜内皮の細胞密度に変化なし

ミリ波帯の防護指針(300 GHzまで)

- 補助指針：不均一または局所的にさらされる場合
- 一般環境(諮問第38号「電波利用における人体の防護指針、平成2年6月」)
 - ✓ 体表面の入射電力密度： 10 mW/cm²以下
 - ✓ 眼への入射電力密度： 10 mW/cm²以下

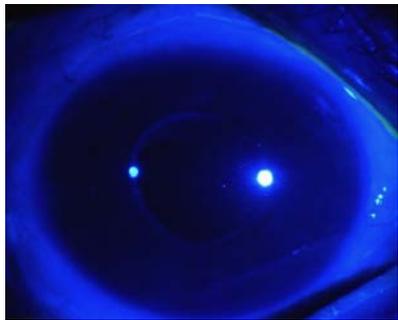
根拠：家兎の角膜上皮に対する35, 107GHzばく露の影響は、一過性障害が10-50 mW/cm²で観察され、100 mW/cm²以上では不可逆性の障害となる(Rosenthal, 1976年)

「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。」

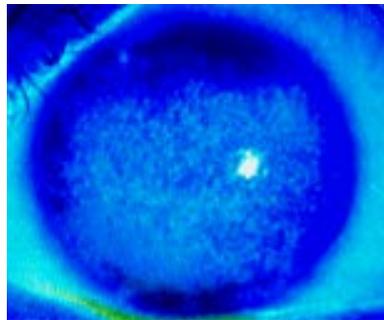
- 管理環境(諮問第89号「電波利用における人体の防護指針、平成9年4月」)
 - ✓ 体表面の入射電力密度： 50 mW/cm²以下
 - ✓ 眼への入射電力密度： 10 mW/cm²以下
- 一般環境(諮問第89号「電波利用における人体の防護指針、平成9年4月」)
 - ✓ 体表面の入射電力密度： 10 mW/cm²以下
 - ✓ 眼への入射電力密度： 2 mW/cm²以下

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)
- 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)



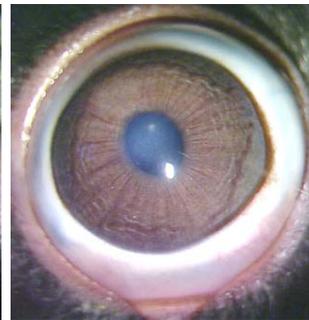
蛍光染色(-)



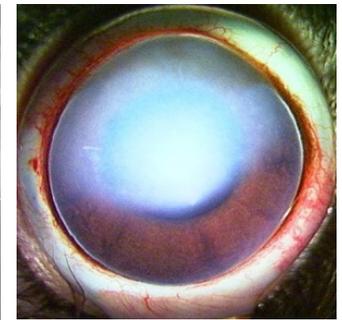
蛍光染色(+)



正常



微かな混濁



混濁

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)

総務省受託研究

- 総務省生体電磁環境研究（～2014年）

- 18-40 GHz

Characteristics of ocular temperature elevations after exposure to quasi- and millimeter waves (18-40 GHz)

M. Kojima, Y. Suzuki, C-Y, Tsai, et al., J. Infrared MILLM. TE (2015)

- 60 GHz

Acute ocular injuries caused by 60-GHz millimeter-wave exposure.

M. Kojima, M. Hanazawa, Y. Yamashiro, et al., Health Phys. (2009)

- 40, 75, 95 GHz

Ocular effects of exposure to 40, 75, and 95 GHz millimeter waves. (投稿中)

本研究の電波ばく露条件 (例: 150 mW 6分ばく露)

▶ 実験動物の忌避反応抑制



▶ 実験動物の瞬目抑制なし

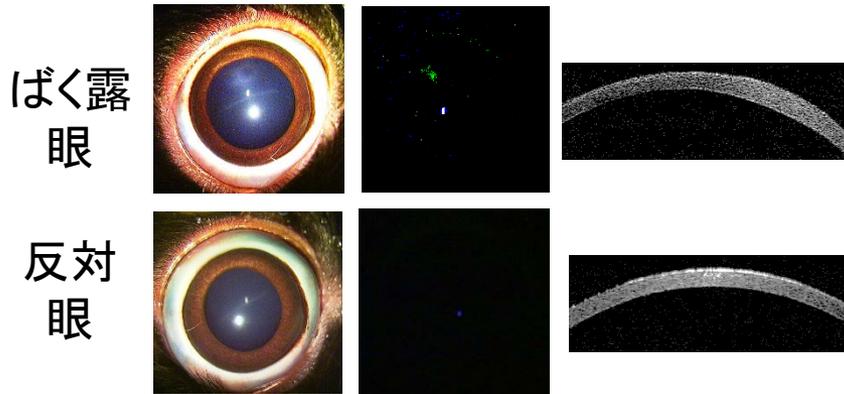


ばく露眼

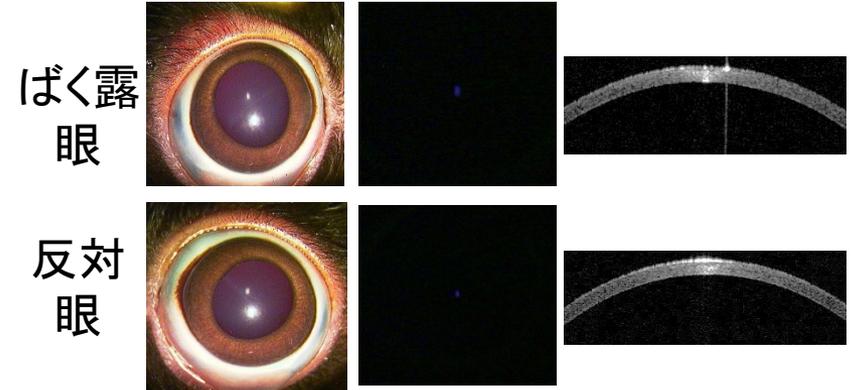


非ばく露眼

▶ 閾値以上のばく露で眼障害発生



▶ 眼瞼皮膚の障害は発生するが 眼組織の障害はない



▶ 家兎の瞬目回数の報告

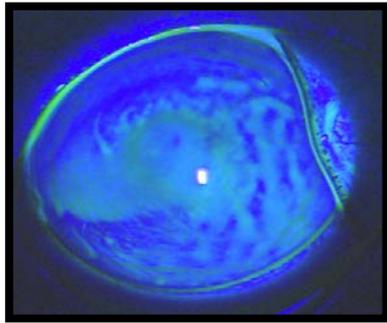
瞬目の間隔は6.3~20分毎に1回と様々な報告があるが、6分程度瞬目抑制の影響は家兎にはそれ程ない(対照眼に障害なし)

▶ **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**

眼障害診断方法

従来の蛍光染色方法

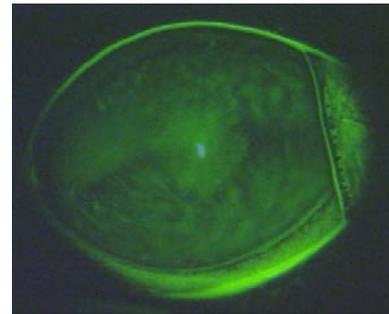
S.W. Rosenthal, 1976
S. Chalfin, 2002



- 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)

金沢医大方式

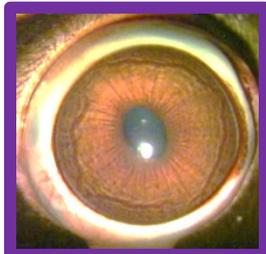
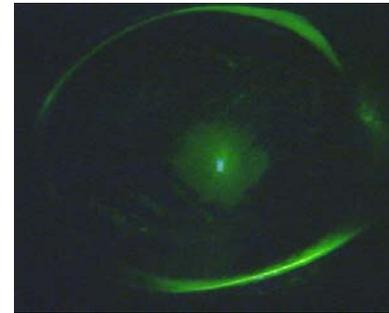
M. Kojima, et al., Health Phys. 2009



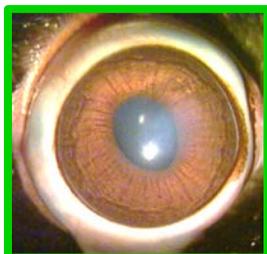
- 蛍光励起フィルタ+
- 励起光カットフィルタ
- 0.05% フルオレセイン
25 μ l ピペットで点眼



- 余剰の蛍光を生食で洗浄



正常

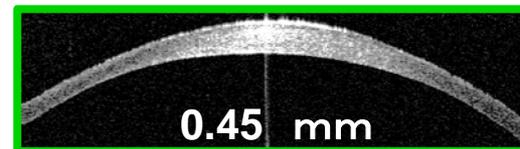
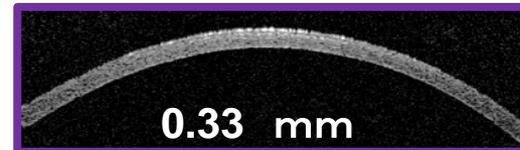


微かな混濁

細隙灯顕微鏡
観察のみ



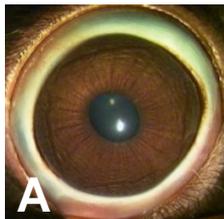
微かな混濁
判別困難



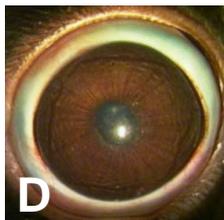
OCTで角膜厚を定量

前眼部所見

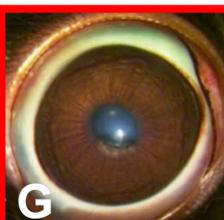
ばく露
前



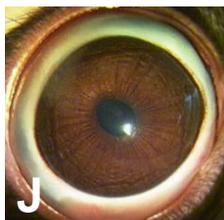
ばく露
10分後



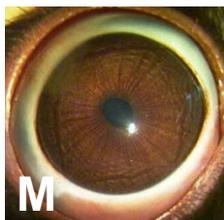
ばく露
1日後



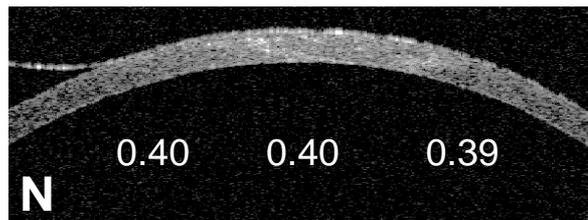
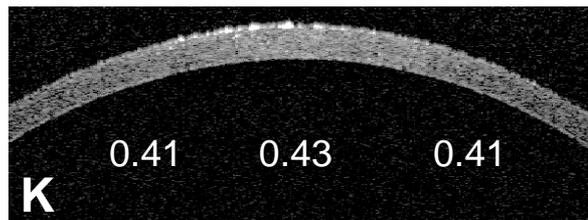
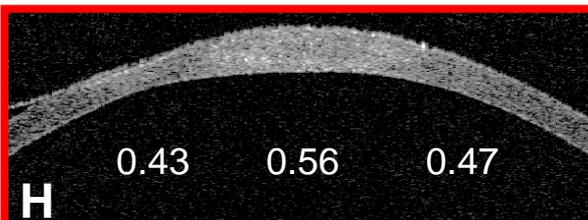
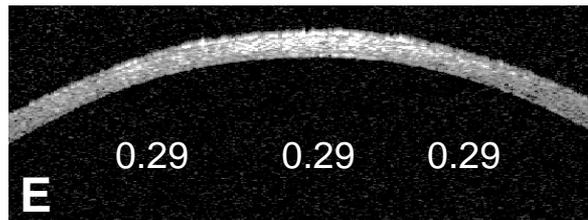
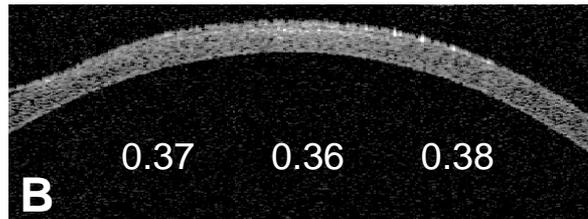
ばく露
2日後



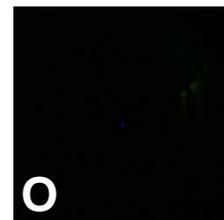
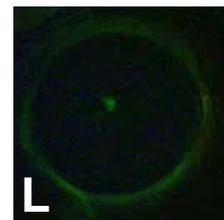
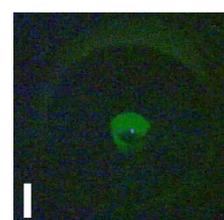
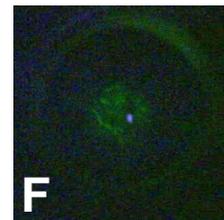
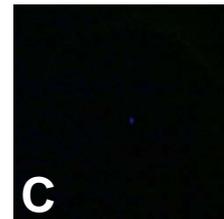
ばく露
3日後



OCTによる角膜断面像

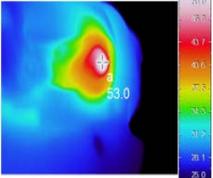
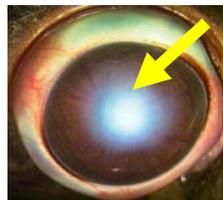
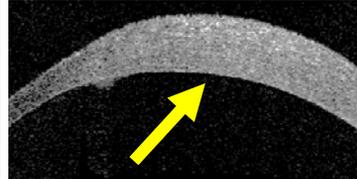


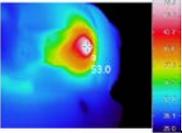
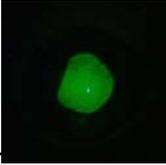
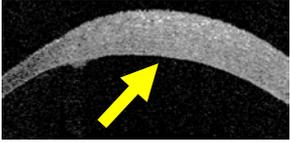
蛍光染色



角膜実質障害(眼炎症)

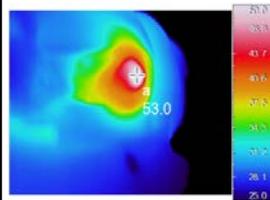
角膜上皮細胞障害(眼表面)

40 GHz ばく露1日後 (入射電力密度)	角膜表面温度 (°C) 	角膜上皮障害 	角膜混濁 	角膜浮腫 
400 mW/cm ² _6 min	43.9±3.6	Damage + (6/8)	Damage + (5/8)	Damage + (5/8)
300 mW/cm ² _6 min	41.3±1.3	Damage + (5/6)	Damage + (1/6)	Damage + (1/6)
200 mW/cm ² _6 min	41.3±1.5	Damage+ (2/4)	No damage (0/4)	No damage (0/4)
100 mW/cm ² _6 min	37.1±2.7	Damage+ (1/7)	No damage (0/7)	No damage (1/7)
50 mW/cm ² _6 min	33.6±1.8	No damage (0/8)	No damage (0/8)	No damage (0/8)

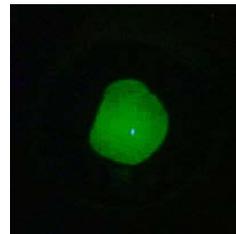
75 GHz ばく露1日後 (入射電力密度)	角膜表面温度 (°C) 	角膜上皮障害 	角膜混濁 	角膜浮腫 
300 mW/cm ² _6 min	50.7±1.9	Damage+ (3/3)	Damage+ (3/3)	Damage+ (3/3)
200 mW/cm ² _6 min	43.8±4.9	Damage+ (14/15)	Damage+ (13/15)	Damage+ (13/15)
150 mW/cm ² _6 min	43.1±1.9	Damage+ (3/6)	Damage+ (3/6)	Damage+ (3/6)
100 mW/cm ² _6 min	40.2±0.5	Damage+ (1/12)	Damage- (0/12)	Damage- (1/12)
50 mW/cm ² _6 min	37.6±1.5	Damage- (0/7)	Damage- (0/7)	Damage- (0/7)
300 mW/cm ² _30 min	52.7±2.5	Damage+ (5/5)	Damage+ (5/5)	Damage+ (5/5)
200 mW/cm ² _30 min	49.9±1.5	Damage+ (4/4)	Damage+ (4/4)	Damage+ (4/4)
100 mW/cm ² _30 min	42.7±1.8	Damage+ (3/4)	Damage+ (3/4)	Damage+ (3/4)
50 mW/cm ² _30 min	37.1±0.8	Damage+ (5/5)	Damage+ (1/5)	Damage+ (1/5)
10 mW/cm ² _30 min	33.7±1.0	No damage (0/3)	No damage (0/3)	No damage (0/3)

95 GHz
ばく露1日後
(入射電力密度)

角膜表面温度
(°C)



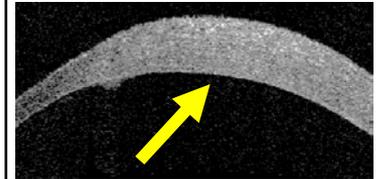
角膜上皮障害



角膜混濁



角膜浮腫



300 mW/cm²_6 min

46.5±1.3

Damage+ (3/3)

Damage+ (2/3)

Damage+ (1/3)

200 mW/cm²_6 min

43.7±1.7

Damage+ (11/13)

Damage+ (5/13)

Damage+ (6/13)

100 mW/cm²_6 min

37.0±3.3

Damage+ (1/9)

Damage+ (0/9)

Damage+ (0/9)

50 mW/cm²_6 min

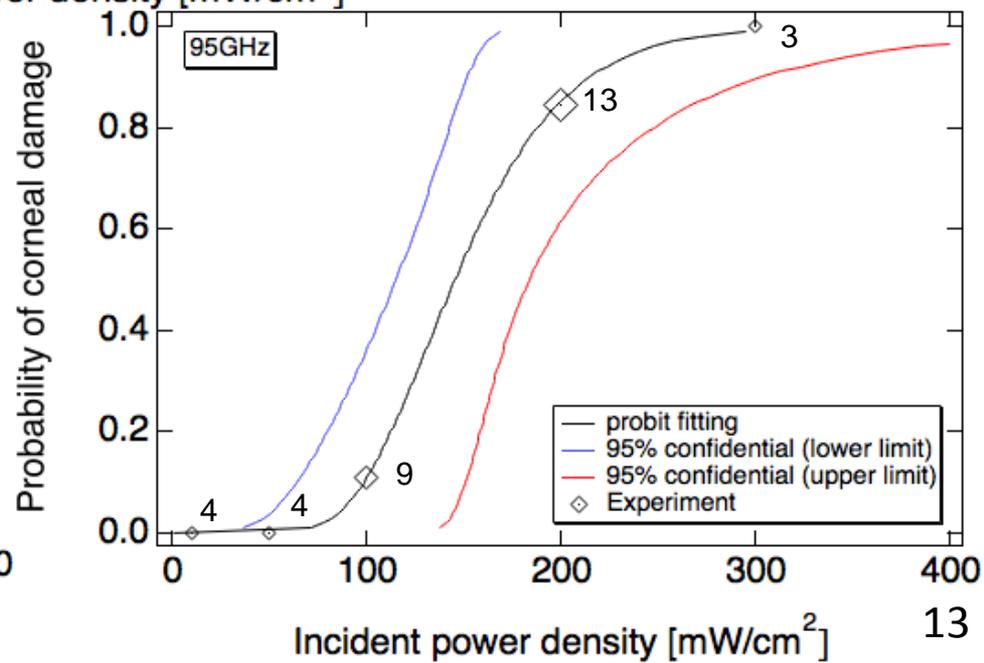
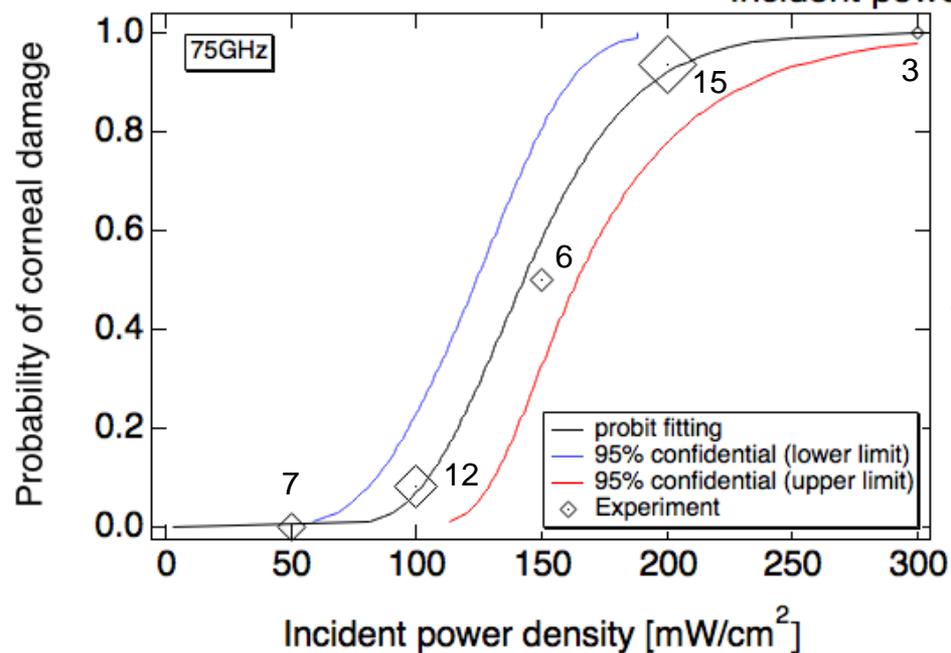
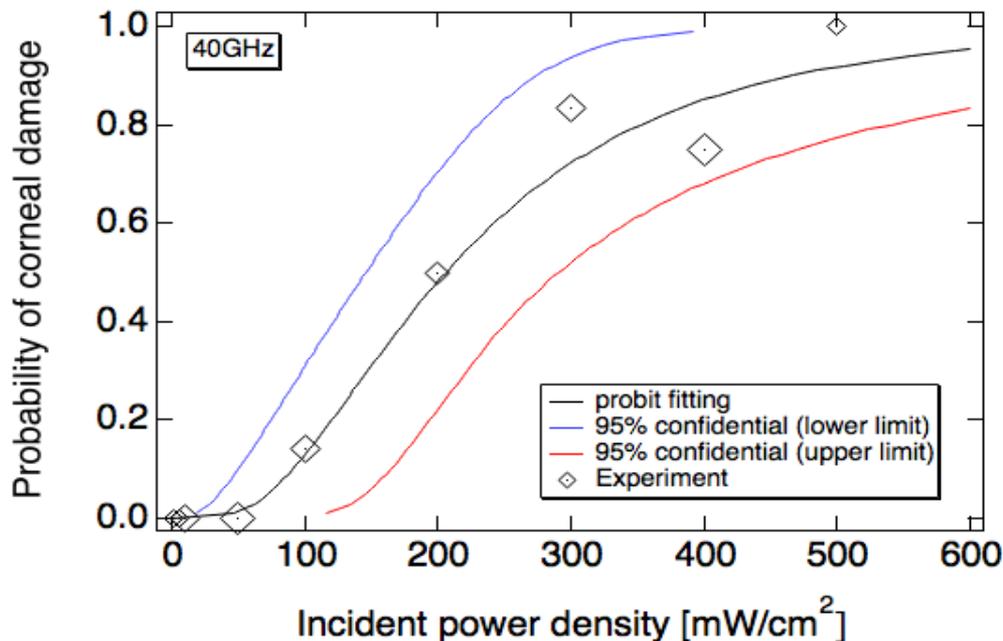
34.1±2.3

No damage (0/4)

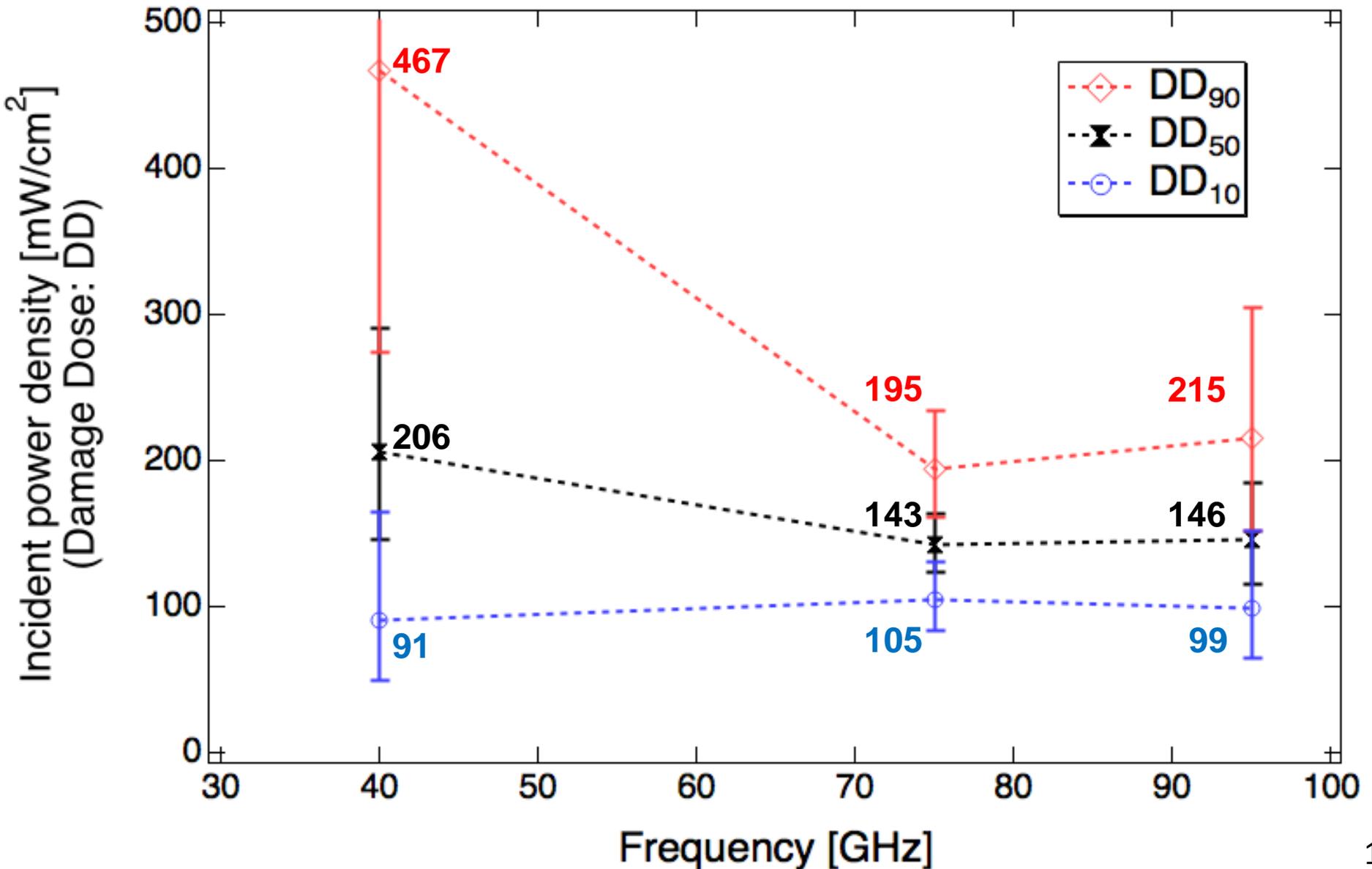
No damage (0/4)

No damage (0/4)

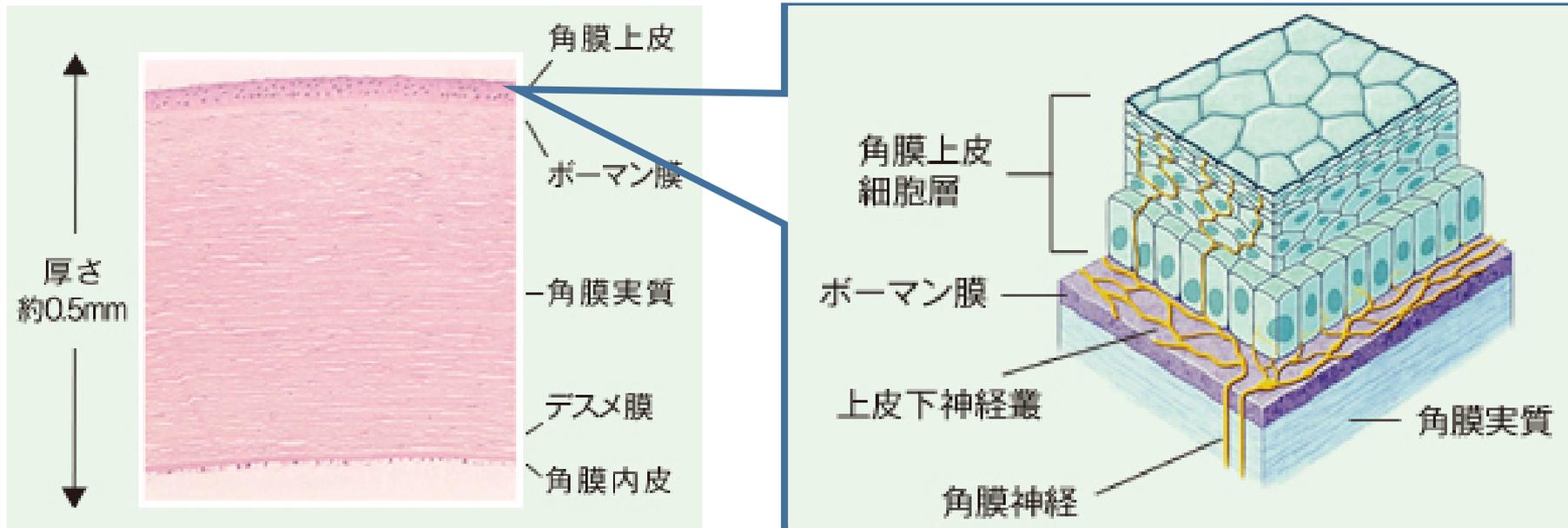
一般化線形モデル(プロビット法)による回帰分析



眼障害 (DD) 発生率 (10%、50%、90%)



眼表面（角膜）の解剖と眼障害

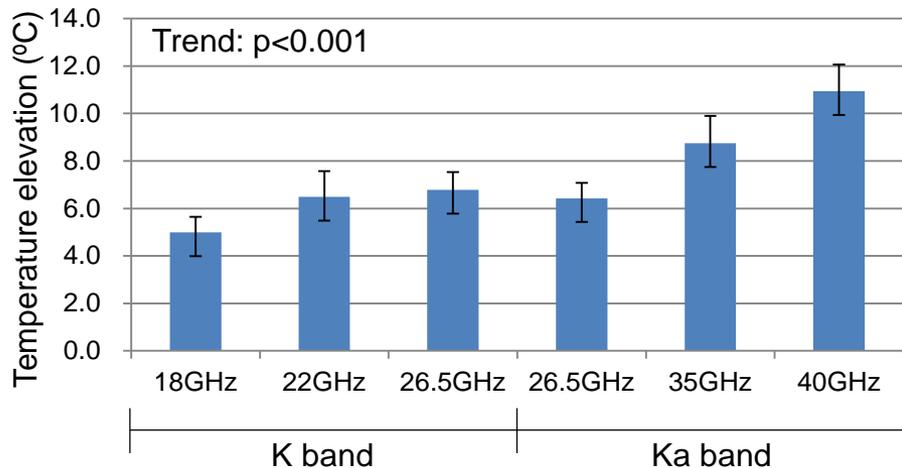


- 角膜上皮障害は上皮細胞の脱落により**神経が露出するために強い痛み**がある
- 労働衛生（溶接等に伴う紫外線上皮障害）では、**避けるべき重要障害**とされている（労働安全衛生所 [www.jniosh.go.jp/publication/doc/srr/...](http://www.jniosh.go.jp/publication/doc/srr/)）
- 我が国の防護指針では、「**一過性の障害は電磁波を照射しなくても検出される程度のもの**で**重大なものではない。**」とされている

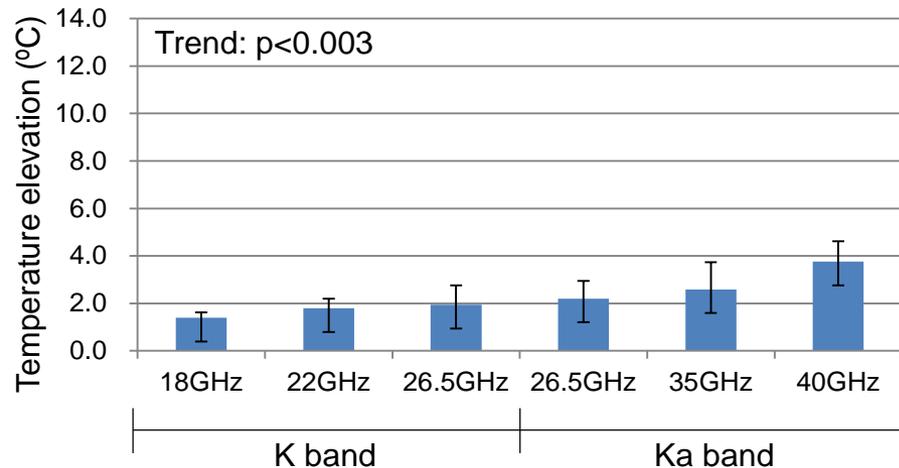
ミリ波ばく露中の眼組織温度の周波数による相違

(200 mW/cm²ばく露(ホーンアンテナ)、マイクロプローブ法)

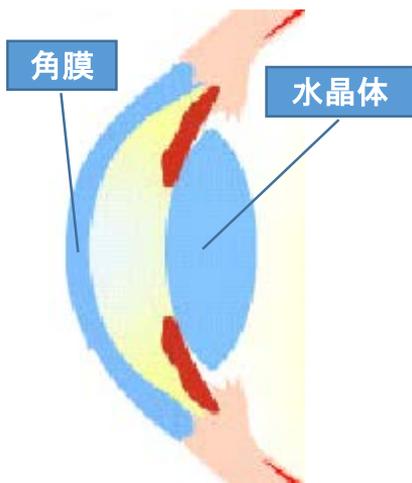
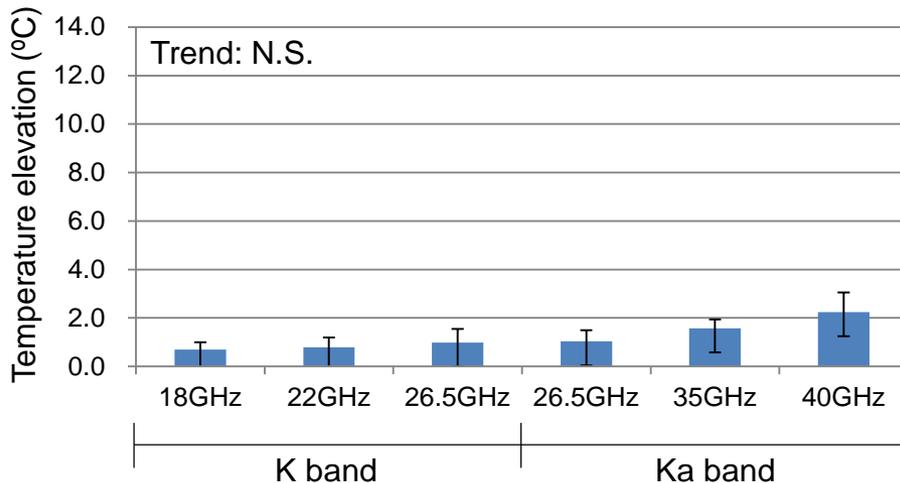
Cornea



Lens

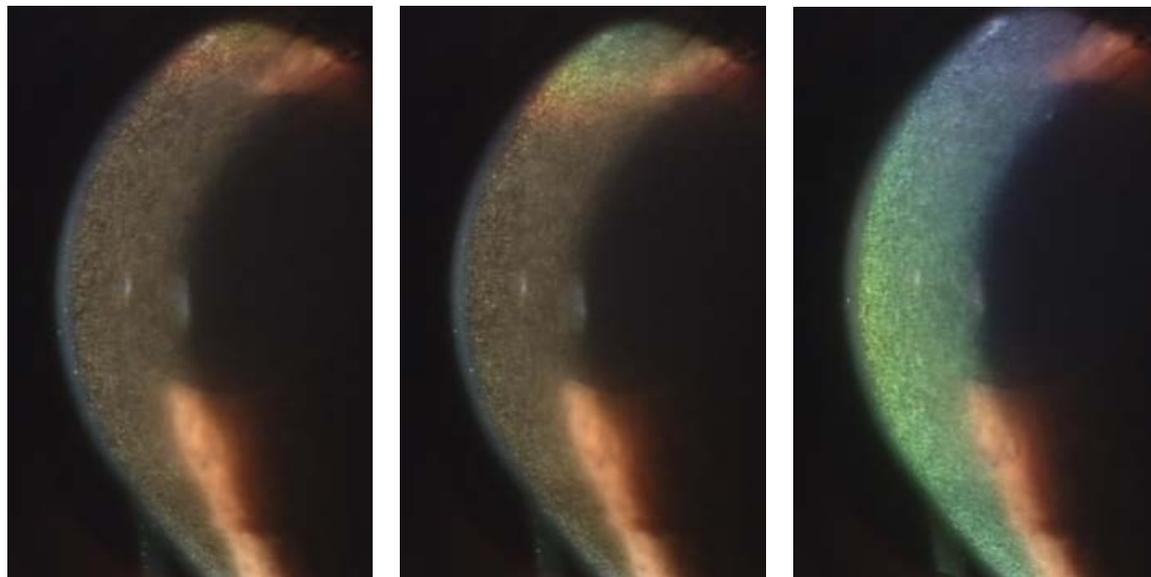
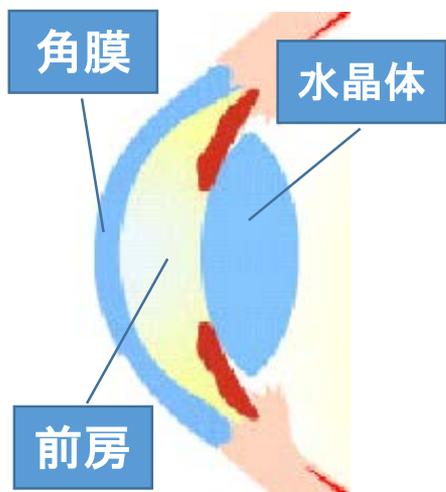


Vitreous



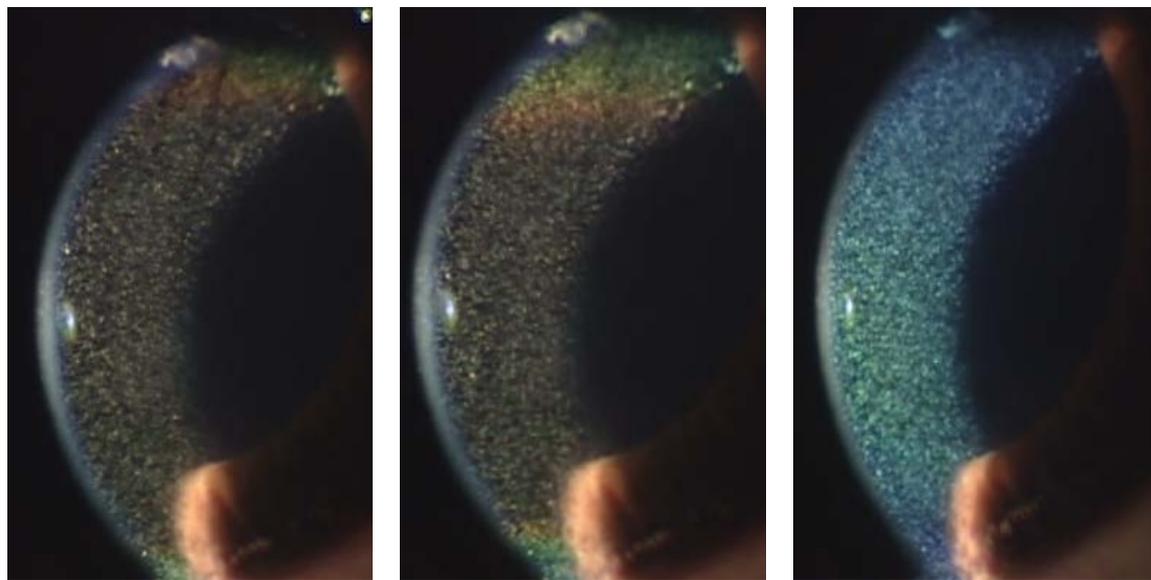
感温液晶カプセルによる18、40 GHzばく露中の眼内温度の相違

18 GHz
200 mW/cm²



34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 °C

40 GHz
200
mW/cm²



まとめ及び今後の課題

- 40-95 GHzのミリ波帯の眼部ばく露実験の熱作用による眼障害発症率と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
- 18, 22, 26.5, 35, 40 GHzばく露による眼組織温度測定結果は、18-40 GHzミリ波帯では周波数依存的に眼組織温度の上昇がみられたことより、18 GHzは40 GHzに比して、より安全側にあると推測される。
- **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**