

皮膚へのミリ波集束ビームばく露における温度上昇および 温熱知覚

2018.4.20

東京工業大学工学院

西方敦博

背景

ミリ波の利用拡大（ミリ波通信、ミリ波レーダ等）

ミリ波の利用拡大で公衆の
ミリ波ばく露機会が増大するため
人体の安全性の確保が重要



電波防護指針に従う

課題

電波防護指針の
ミリ波における根拠データの
さらなる蓄積

香西らの実験(60GHz, 2010)



総務省委託研究(H27-H29)
ミリ波ばく露時の温熱知
覚閾値に関する研究

- 福島県立医大：実験
- 東工大：装置の開発

香西らの実験

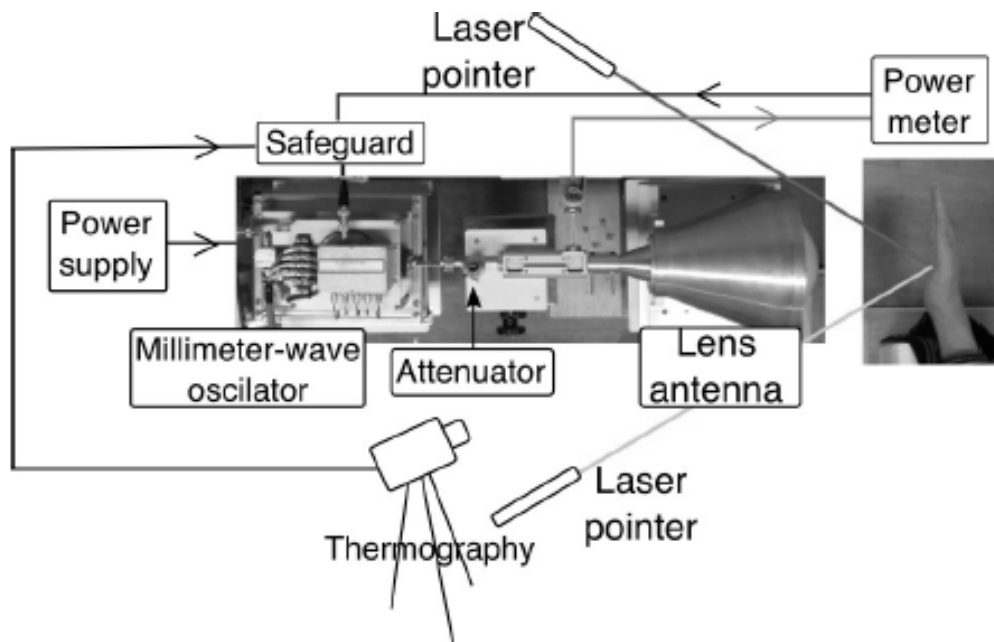
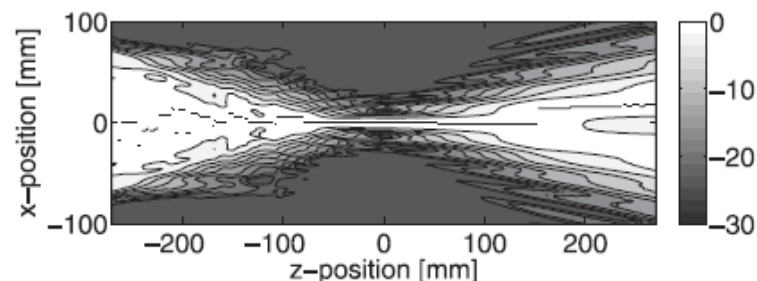


図 5 60 GHz ミリ波曝露装置

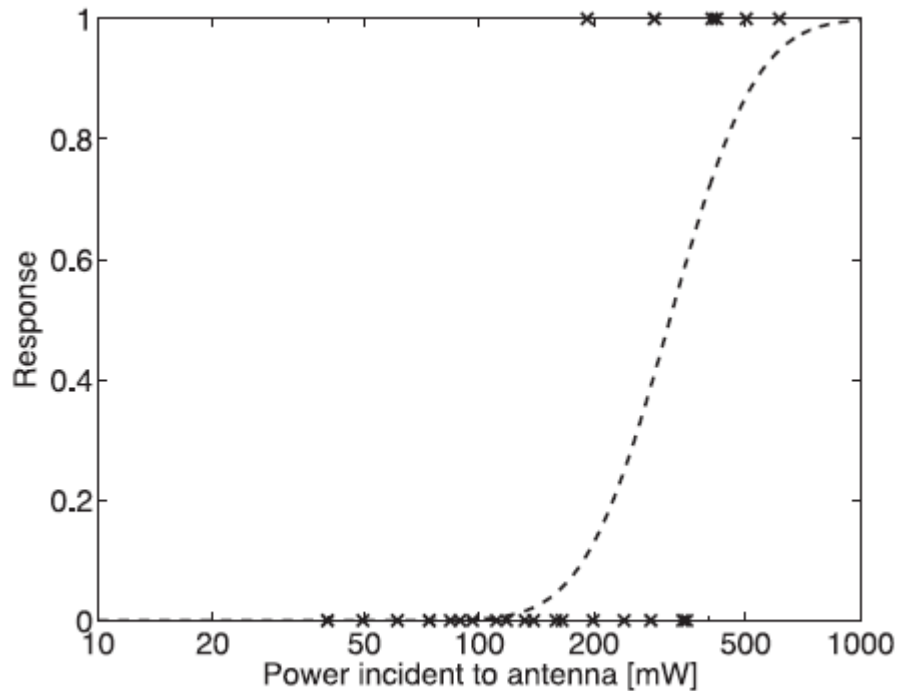
- 周波数：60GHz
- ばく露部位：手のひら
- ばく露時間：10秒
- ばく露面積：
0.34, 0.57, 1.99 cm²

集束ビーム



香西将樹ほか、`60GHzミリ波集束ビーム曝露による掌の温熱感しきい値の測定`、
電子情報通信学会論文誌Vol.J93-B, No.10, pp.1456-1465, 2010.

50%知覚閾値の推定



- 取得データは知覚の有無
- 累積正規分布で最尤推定
- 知覚確率50%を与える刺激の大きさ

図 8 各入射電力に対する知覚の有無と心理測定関数の例

知覚閾値のばく露面積依存性

最大電力密度

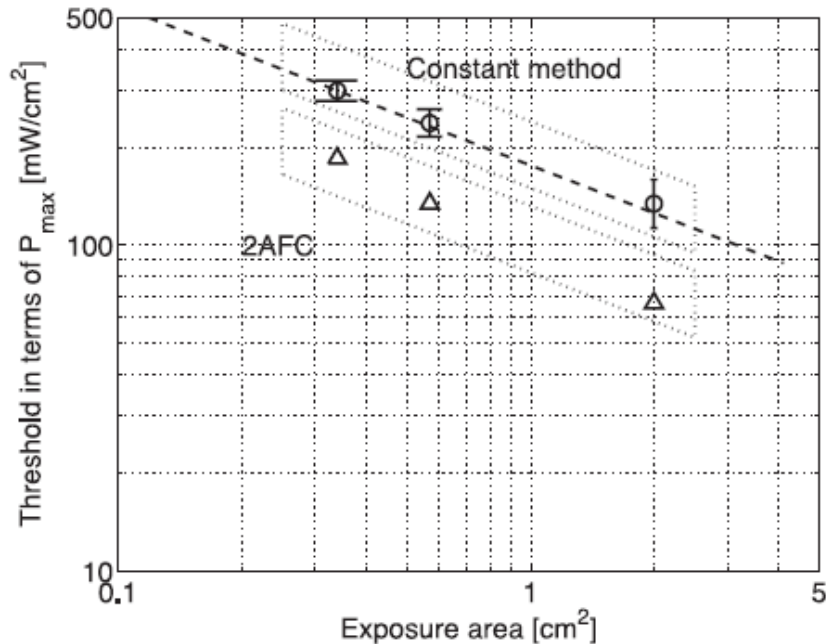


図 9 皮膚表面における最大入射電力密度を基準としたミリ波曝露による温感しきい値の面積依存性

ばく露面積が大きいほど
知覚しやすい

電力

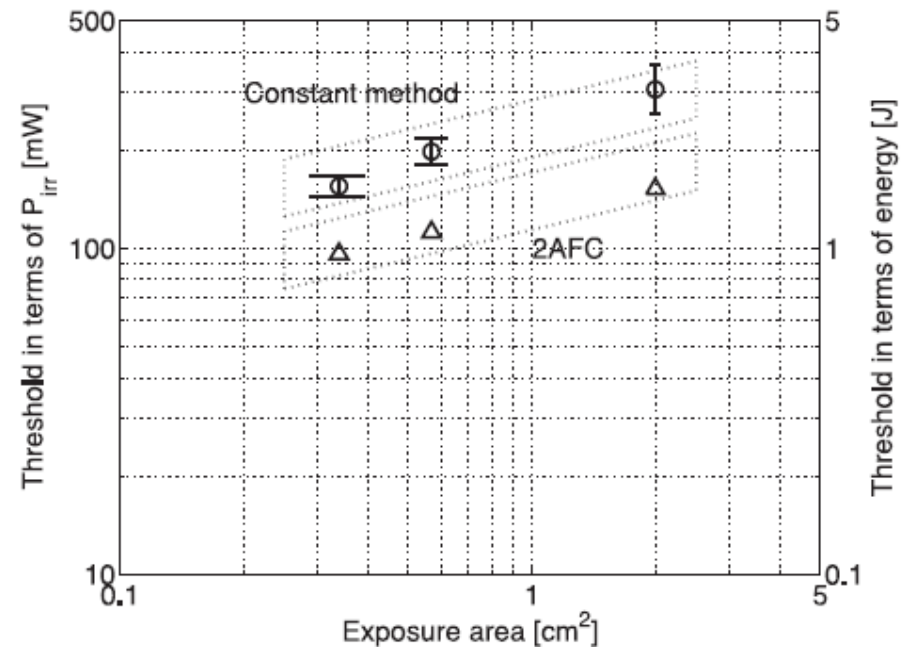


図 10 掌への照射電力を基準としたミリ波曝露による温感しきい値の面積依存性

ばく露面積が小さいほど
知覚しやすい

Blickらの結果との比較

被験者数

exposure position	A	B	C
1st	20	20	2
2nd	13	3	13
Total	33	23	15

回帰直線

$$P_{th}(S) = P_{th0} \left(\frac{S}{1\text{cm}^2} \right)^\nu$$

$$P_{th0} = 176 \text{ mW/cm}^2, \nu = -0.49$$

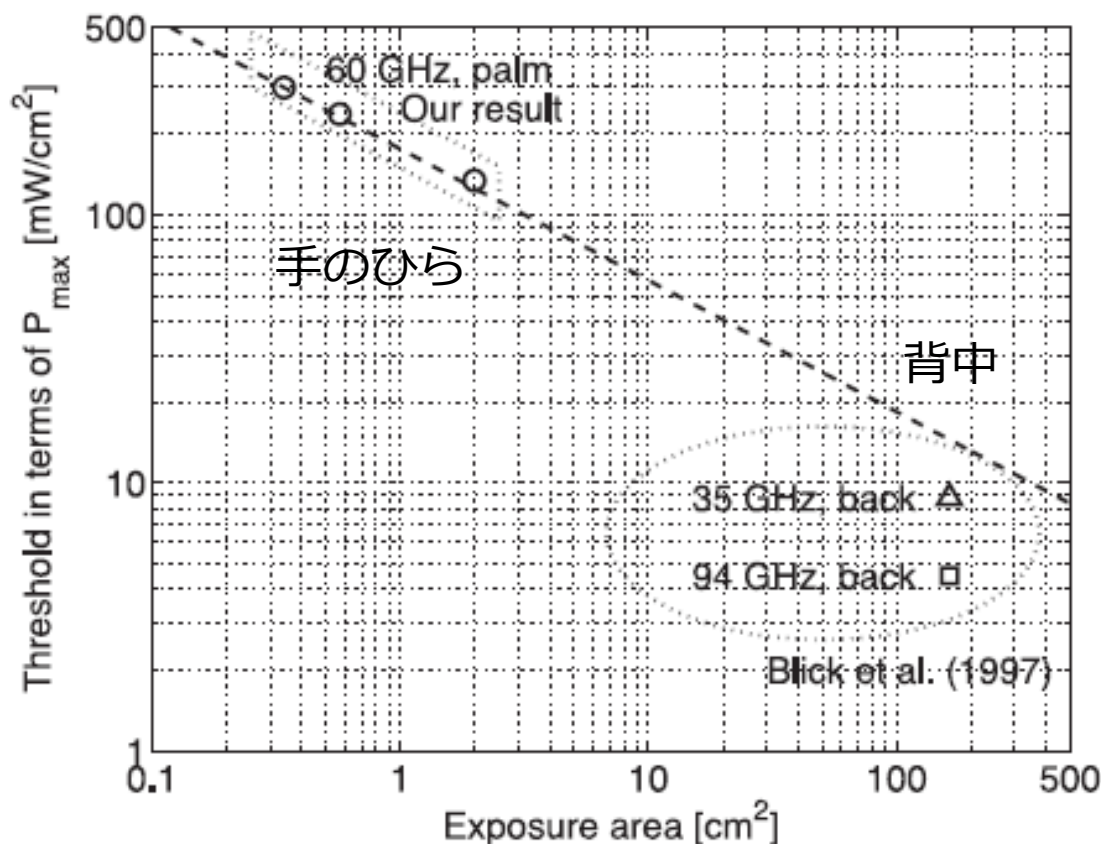
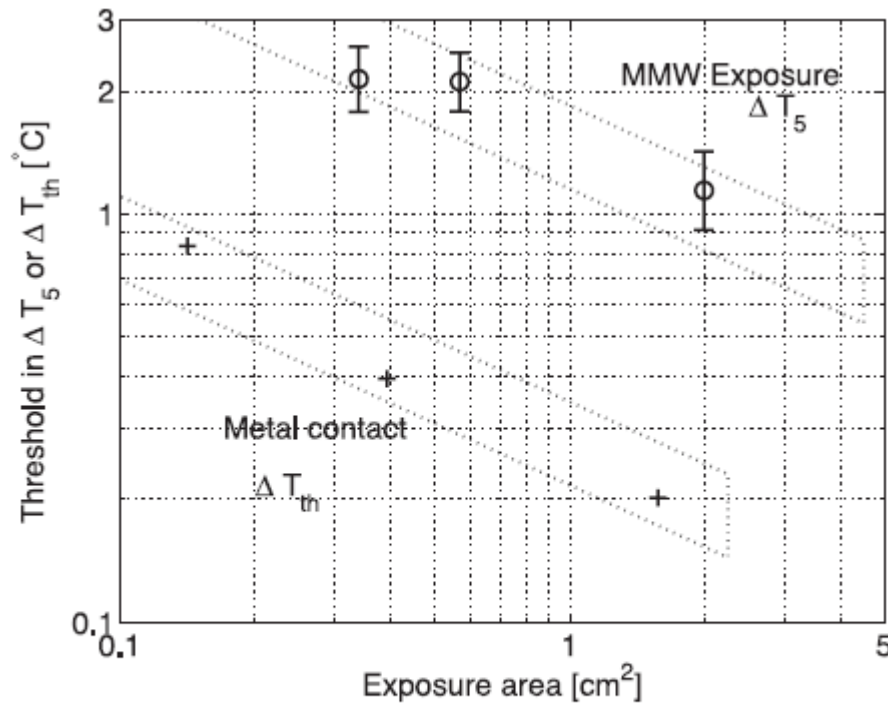


図 11 温感しきい値の Blick ら [7] による実験値との比較

- [7] D.W. Blick, E.R. Adair, W.D. Hurt, C.J. Sherry, T.J. Walters, and J.H. Merritt, "Thresholds of microwave-evoked warmth sensations in human skin," Bioelectromagnetics, vol.18, no.6, pp.403-409, 1997.

温度上昇で表した知覚閾値



- 5秒間で1~2°C上昇すると知覚

図 12 5 秒間のミリ波曝露による温度上昇 ΔT_5 でみた温感しきい値の面積依存性及び金属接触によるしきい値 ΔT_{th} との比較

■ 総務省委託研究(H27～H29)

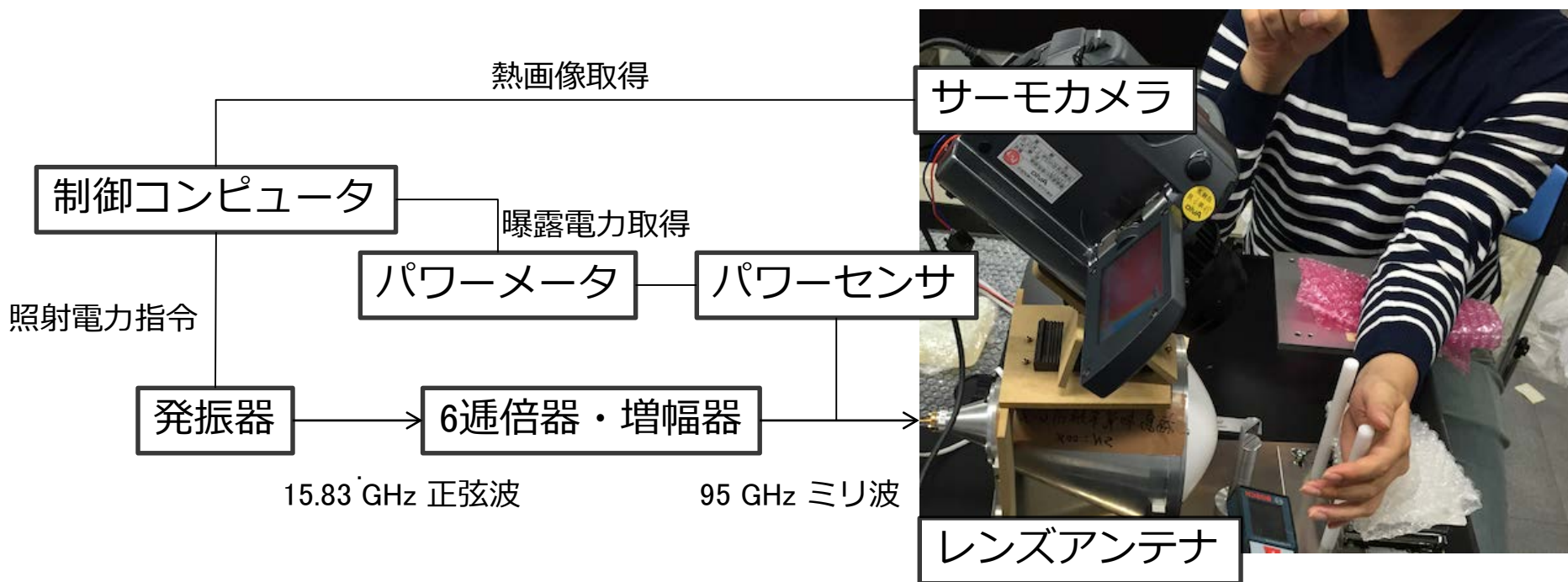
- 60GHz以外の周波数では？
- 10秒以外のばく露時間では？
- 年齢による差、性差は？



- 95GHz, 40GHzで実験
- 反応時間を取得
- より多くの被験者

ミリ波ばく露実験 (95GHz)

ミリ波ばく露実験装置



- サーモカメラで手のひらの温度監視
- パワーメータでばく露電力監視

実験手順

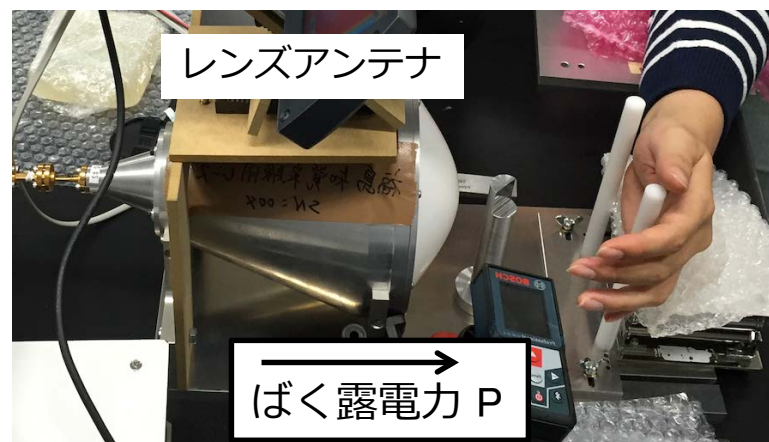
ばく露位置
保持装置

一定電力のミリ波を被験者の
手のひらに照射

制限時間以内に被験者が温熱感を
知覚した場合スイッチを押す

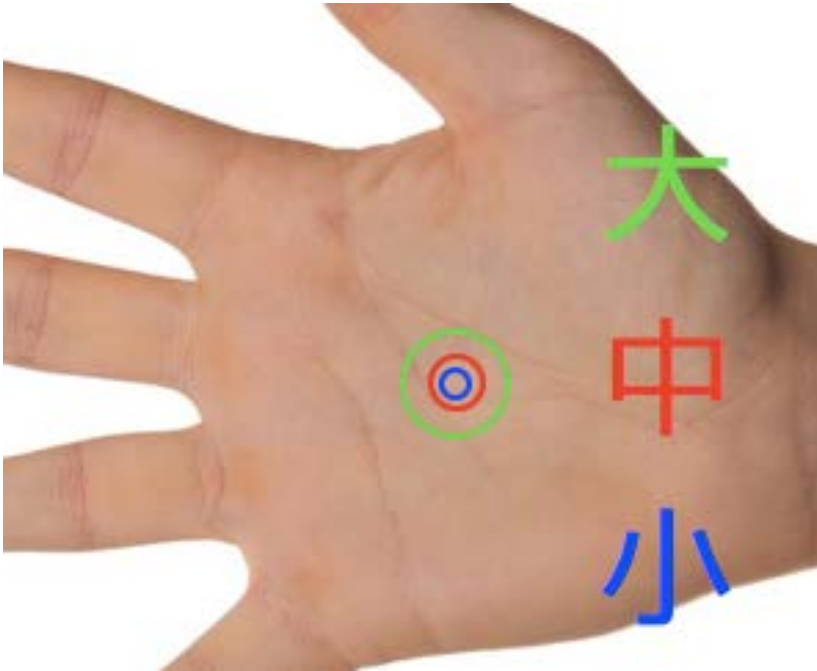
試行を ↓ 繰り返す

ばく露電力 P における
ばく露開始からスイッチを押すまでの
反応時間を取得



知覚したときに押すスイッチ

ばく露面積(95GHz)



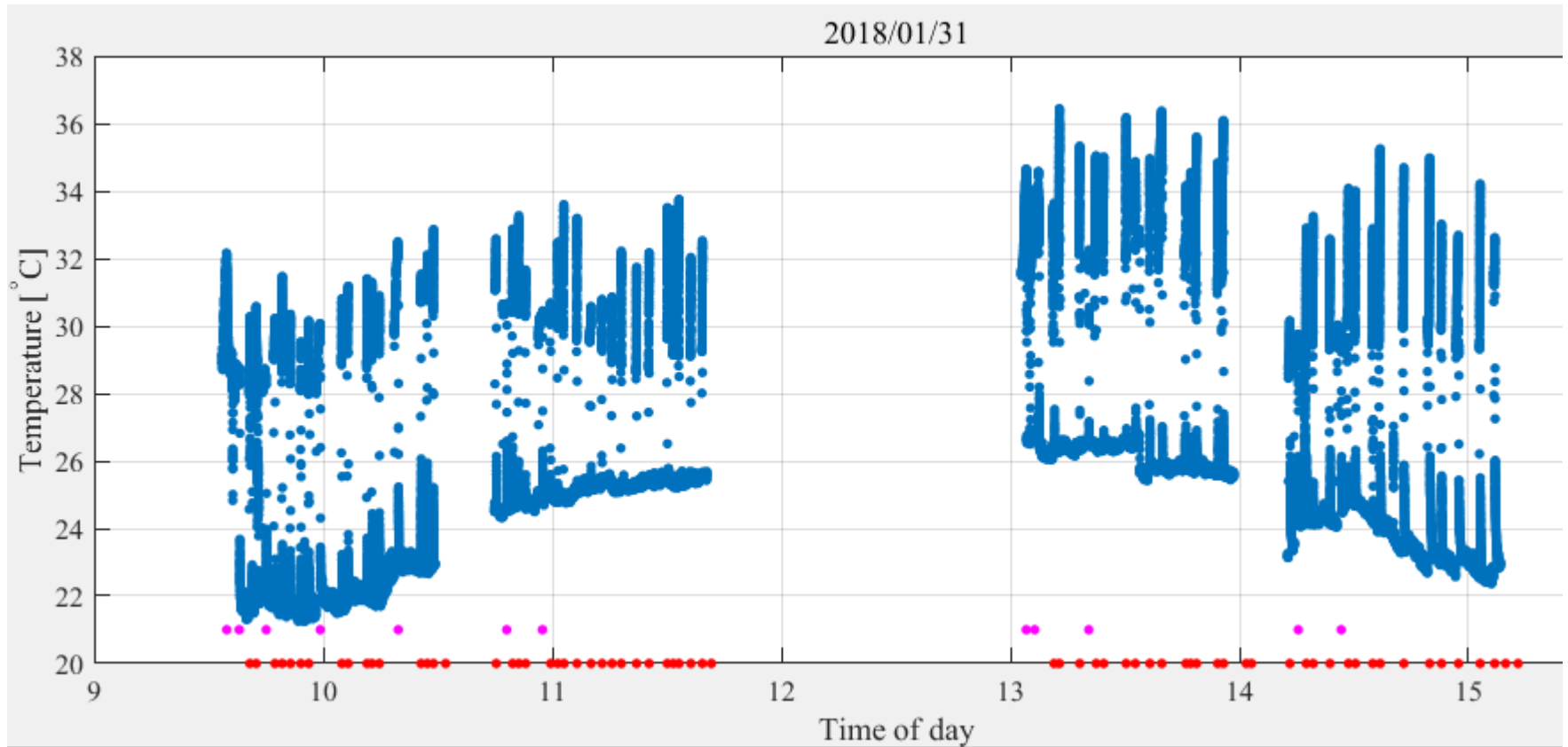
95GHzでは60GHzよりも
波長が短いため最小ばく
露面積は小さくなる

(ばく露面積の定義は
60GHzのときと同じ)

小 : 0.151 cm^2 中 : 0.522 cm^2 大 : 2.02 cm^2

(60GHz: $0.34, 0.57, 1.99 \text{ cm}^2$)

取得データの例



ばく露開始時の皮膚温度と知覚

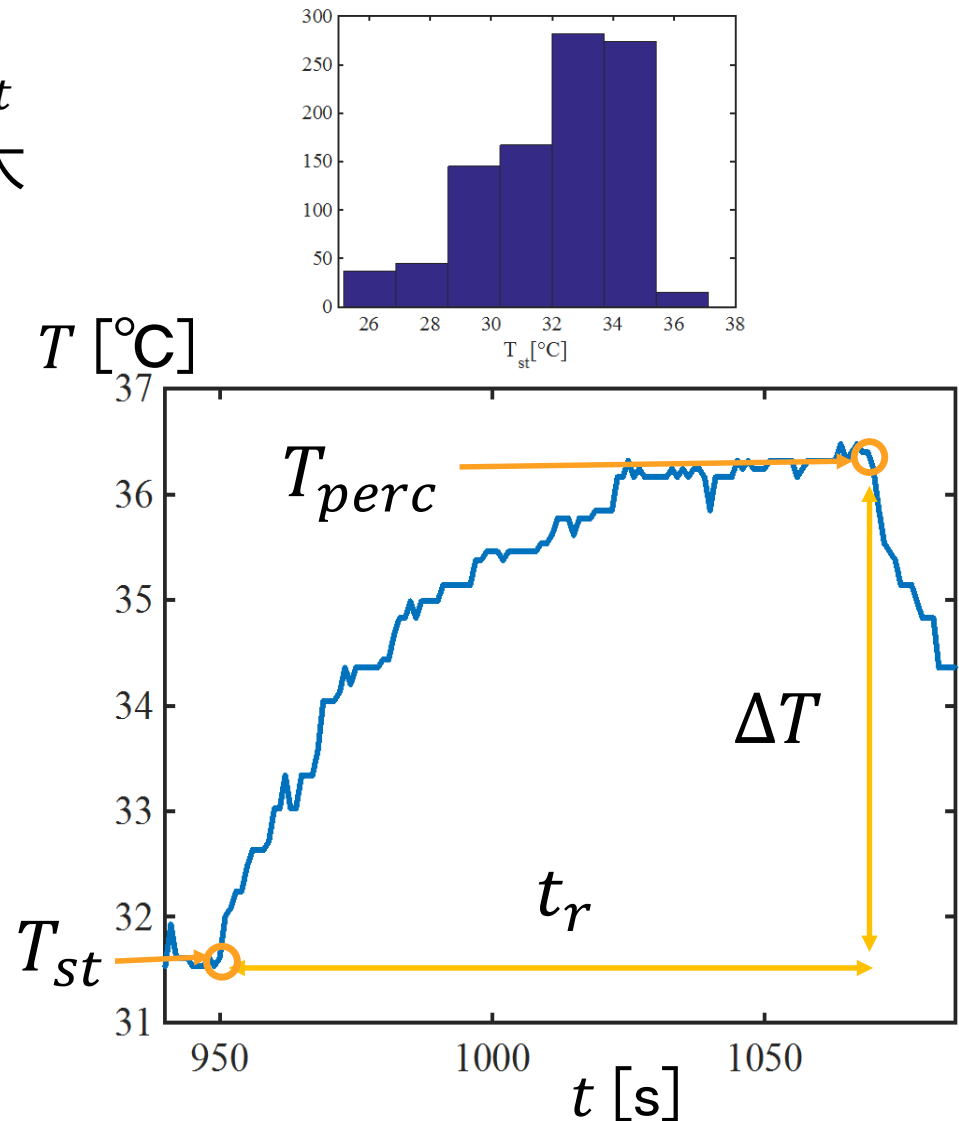
ばく露開始時の表面温度 T_{st}
ー ばく露ごと・個人差が大

→ 温熱感知覚に
影響するか？

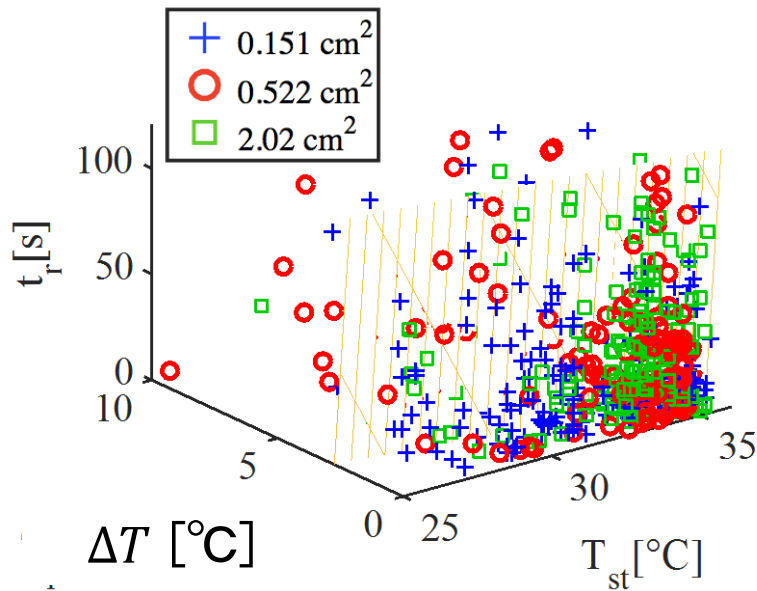
皮膚表面温度と反応時間

- ばく露開始時の温度 : T_{st}
- 反応時の上昇温度 : ΔT
- 反応時間 : t_r

これらを
各ばく露試行で取得



平面回帰



$$\Delta T = a T_{st} + b t_r + c$$

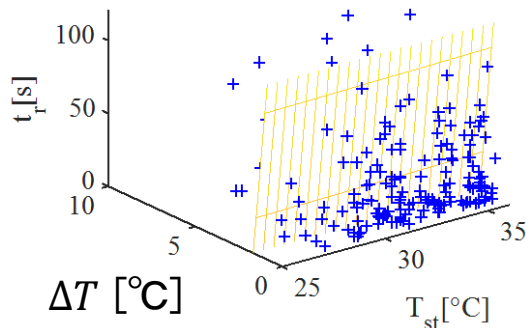
の平面で回帰

→ a と b を抽出

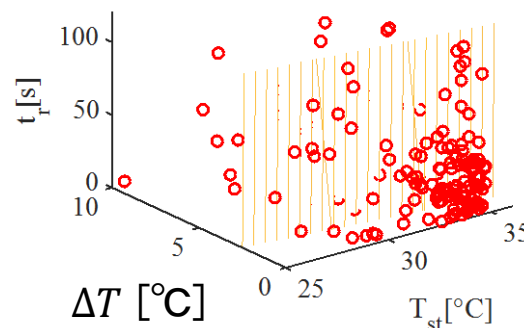
- a : ΔT と T_{st} の関係
- b : ΔT と t_r の関係

3 種類のばく露面積で平面回帰

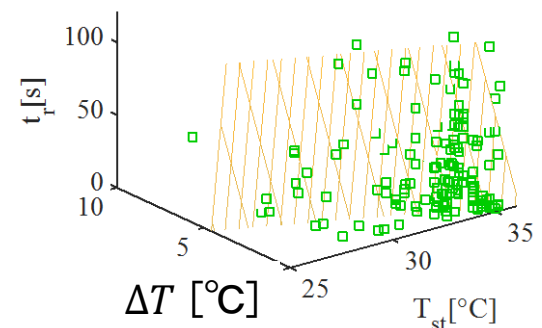
小



中

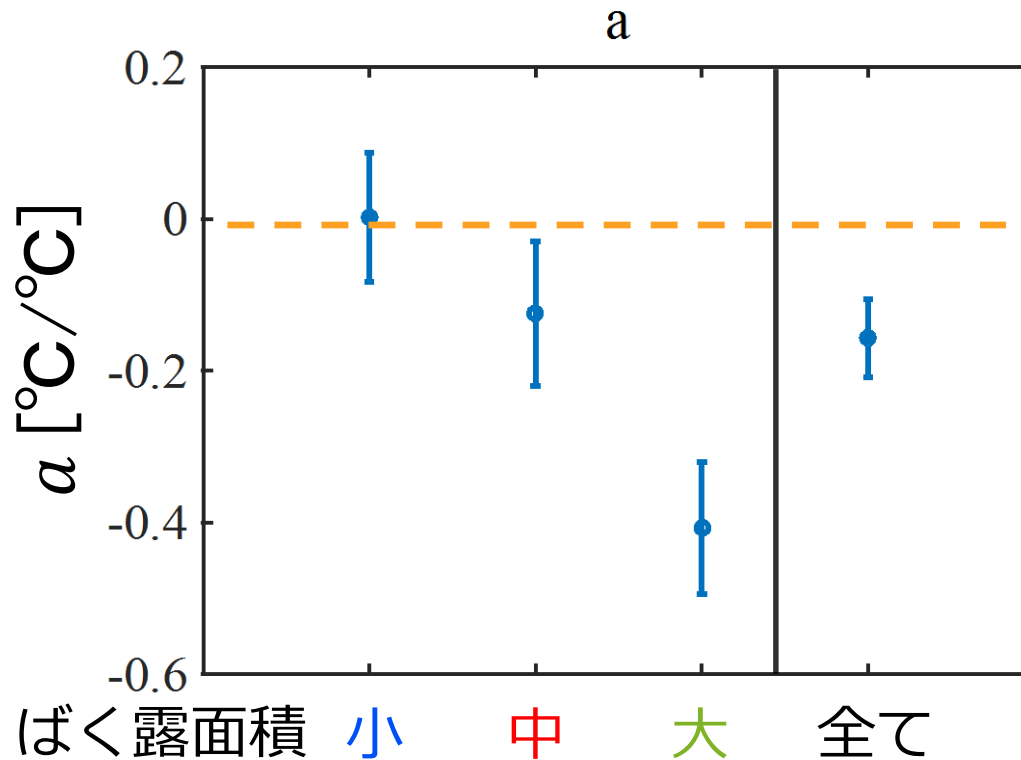


大



$a : \Delta T$ と T_{st} の関係

$$\Delta T = a T_{st} + b t_r + c$$



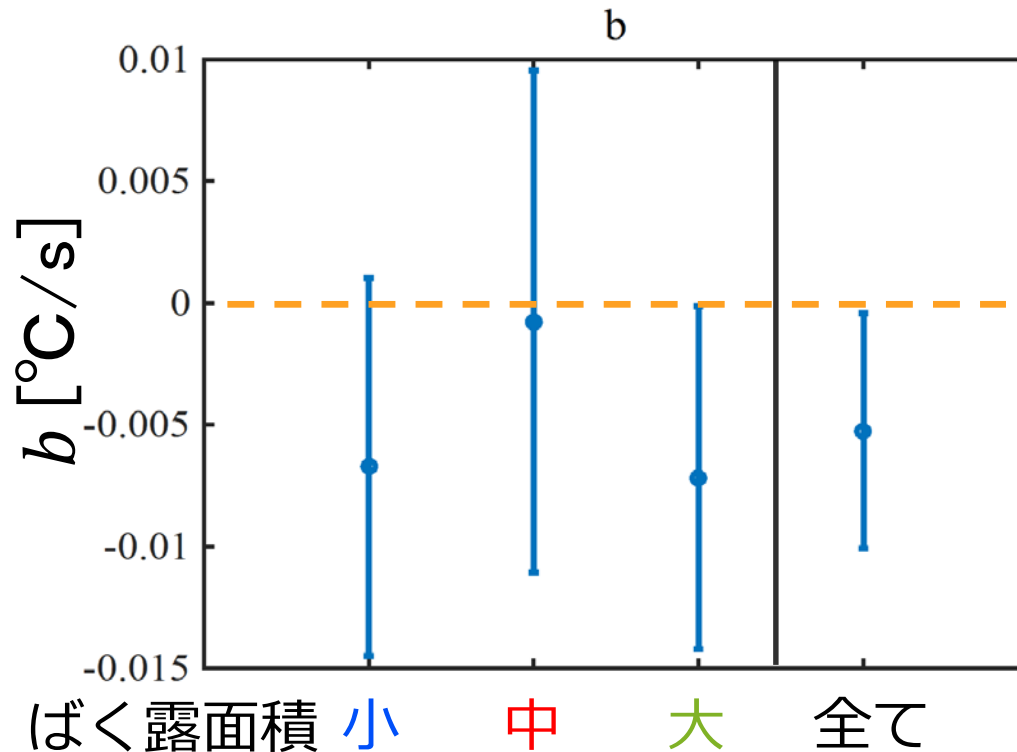
T_{st} が 10 °C 高いと
 ΔT が 0 ~ 4 °C 下がる



T_{st} が高いほど
温度上昇に対して敏感

$b : \Delta T$ と t_r の関係

$$\Delta T = a T_{st} + b t_r + c$$

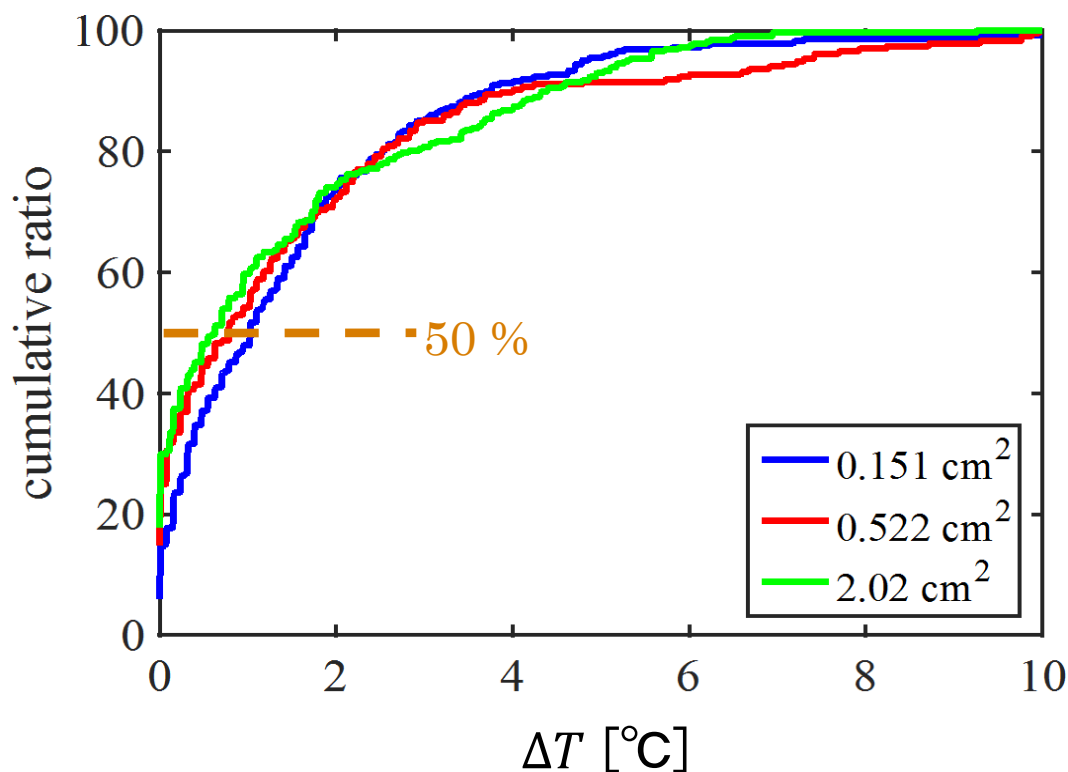


t_r が 1 s 増加あたり ΔT が
約 0.005 °C とわずかに低下



ΔT は反応時間 t_r に
ほとんど依存しない

温度上昇と知覚



累積知覚確率

累積知覚確率 50 % となる
 ΔT は各ばく露面積で

{ 1.03 °C @ 小 (0.151 cm²)
0.784 °C @ 中 (0.522 cm²)
0.627 °C @ 大 (2.02 cm²)

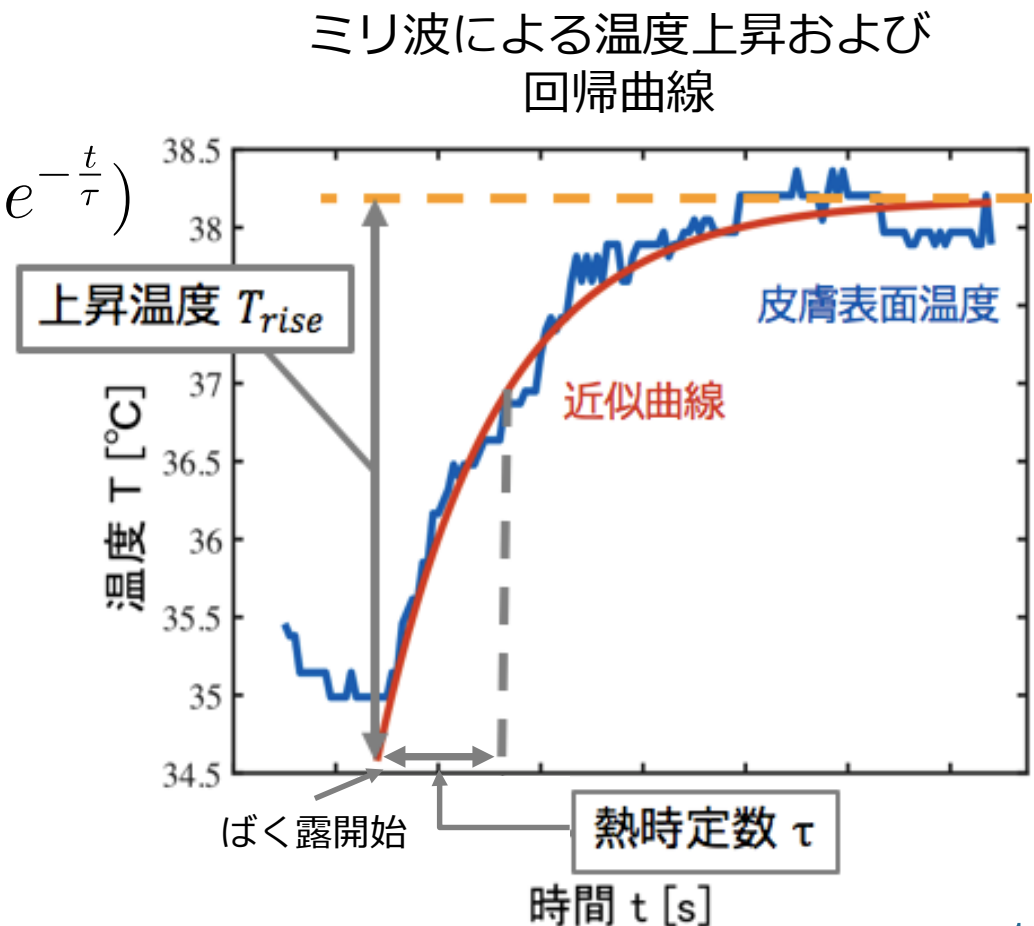
温度変化の曲線回帰

- 各ばく露試行中の上昇温度を一次遅れ系で曲線回帰

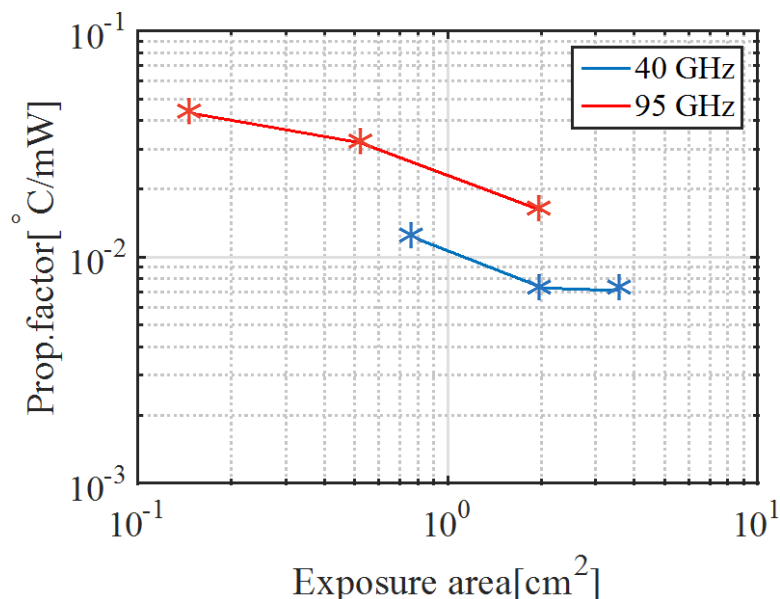
ばく露時間

$$\frac{T(t) - T(0)}{\text{上昇温度}} = T_{rise} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

- 二つのフィッティングパラメータを抽出
 - 上昇温度 T_{rise}
 - 熱時定数 τ



比例係数の比較（検討中）



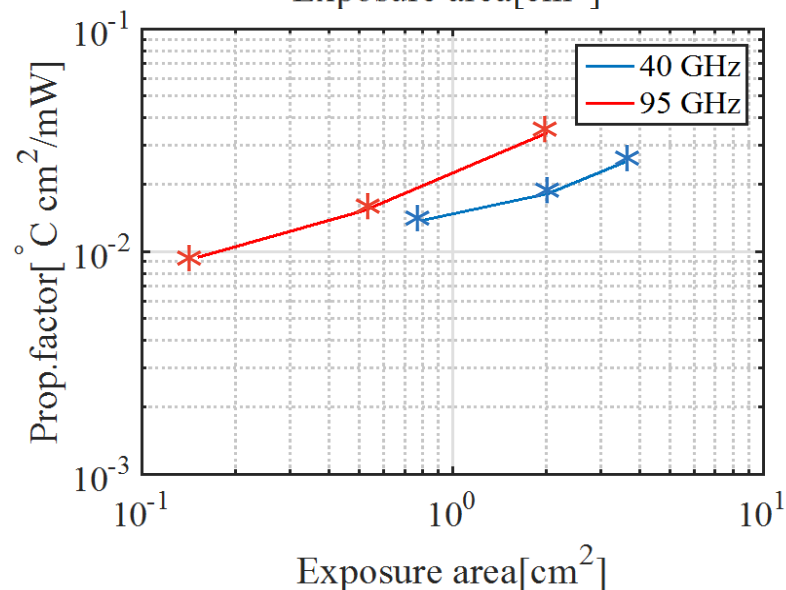
上昇温度 対 電力

$$T_{rise} = a P$$

左上がり。その解釈は、

ばく露面積:小

↓ 電力が局所に集中することで
最大温度が高くなる



上昇温度 対 最大電力密度

$$T_{rise} = a S_{max}$$

右上がり。その解釈は、

ばく露面積:大

↓ 加熱領域が広がることで
熱拡散による温度上昇抑制が減少

温度変化の曲線回帰の問題点

- 抽出されるパラメータのばらつきが大
- 一次遅れモデルの当てはまりがよくない場合がある



- ばらつきの原因究明
- 熱解析にもとづくモデルの改良

まとめ

- ミリ波集束ビームばく露実験の概要を述べた
- 60GHz実験(2010)、95GHz, 40GHz実験(H27～H29)
- 温熱知覚閾値および温度上昇について分析

課題

- 温熱知覚閾値の年齢差、性差の検討
- ばらつきの分析（個人差、手の動き、手の角度、など）
- 熱解析にもとづく温度変化モデルの改良