

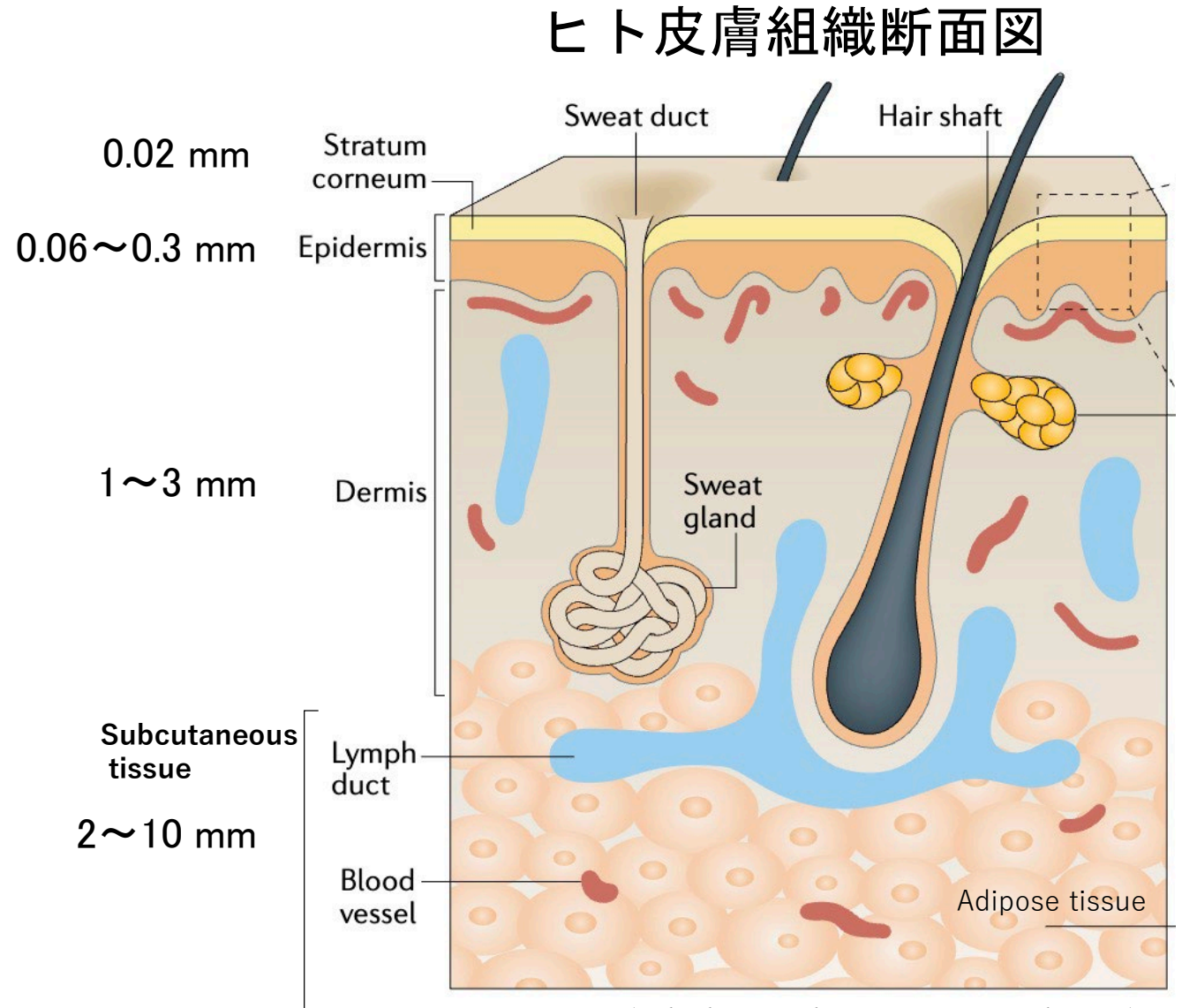
# 皮膚に対する研究動向について

1. 6～300 GHz電波ばく露の特徴
2. 皮膚ばく露に対するICNIRPガイドライン
3. 基本制限が抱える課題
4. 皮膚影響に関する生体指標
5. 総務省研究で得られている知見
6. まとめ・今後の課題

# 6-300 GHz電波の標的となる生体組織

電磁界周波数が高くなるにつれて、身体のおよびその結果生じる加熱はより表面的になり、約6 GHzを超えると、この加熱の大部分は皮膚内部で生じます。たとえば、6 GHzおよび300 GHzにおいて、電力の86%はそれぞれ表面から8 mmおよび0.2 mm以内で吸収されます (Sasaki et al. 2017)。

ICNIRPガイドライン2020 (電磁界情報センター翻訳版) より引用



(Kabashima et al., Nat. Rev. Immunol., 2019)

図1 皮膚組織の構造

# ICNIRPガイドライン2020 (6~300 GHz)

## 局所

- **41°C以上の局所温度**をもたらす高周波電磁界ばく露を潜在的に**有害**として扱う
- 正常体温条件下でその領域の温度に基づいて**2つの組織タイプ**を定義

## 全身

- 深部体温1°C上昇の値を健康への悪影響の運用上の閾値として採用している (ACGIH2017)

深部体温が1 °C上昇すると、かなりの生理学的変化が生じる可能性があることに注意することが重要です。このような変化は、身体の正常な体温調節反応の一部であり（例えば、Van den Heuvel et al. 2017）、それ自体は健康への悪影響を表すものではありません。

# ICNIRPガイドライン2020 (6~300 GHz)

表1 組織タイプと基本制限

組織タイプ	ばく露部位	正常体温時 温度	運用上の 閾値	左記温度上昇に必要なAPD値		低減係数 (安全率)	基本制限				
				6-300 GHz (/6 min · 4 cm <sup>2</sup> )	> 30 GHz (/6 min · 1 cm <sup>2</sup> )		局所ばく露		全身ばく露 (30 min)		
							職業ばく露	一般公衆 ばく露	職業ばく露	一般公衆 ばく露	
タイプ1	上腕	33°C未満～ 36°C	dT = 5°C	200 W/m <sup>2</sup> (20 mW/cm <sup>2</sup> )	400 W/m <sup>2</sup> (40 mW/cm <sup>2</sup> )	職業ばく露： x 1/2  一般公衆 ばく露： x 1/10 ※職業レベル のさらに x 1/5	100 W/m <sup>2</sup> (10 mW/cm <sup>2</sup> )	20 W/m <sup>2</sup> (2 mW/cm <sup>2</sup> )			
	前腕										の全ての組織
	手										
	太も										
	脚										
	足										
	耳介										
	眼の角膜・前房・虹彩										
	表皮・真皮組織										
	脂肪組織										
筋組織											
骨組織											
タイプ2	頭部	38.5°C未満	dT = 2°C								
	眼										の全ての組織 (ただしタイプ 1の部位を除 く)
	腹部										
	背部										
	胸部										
	骨盤										
全身	平均深部 体温37°C	dT = 1°C	全身平均SARで4 W/kg	職業：x1/10 公衆：x1/50			0.4 W/kg	0.08 W/kg			

# 課題①：生物学的根拠の不足

## ICNIRPガイドライン2020で指摘されていること

- 熱による健康影響を引き起こすほど十分に大きな電力を使用した高周波ばく露を用いた研究の不足。
- ばく露（および結果として生じる温度上昇）が重度の傷害を引き起こすことを示した論文が時折あるが、それに付随して示されるべき傷害に必要な最低ばく露についての証拠が文献内で欠落。
- 非常に低いばく露レベル（＜ICNIRP-1998基本制限）に関しては、発生する熱の量が傷害を引き起こすほど十分な大きさではないことを示す広範な証拠がある一方、この基本制限レベルを超過したばく露レベルに関する研究は限定的。

# 課題②：数値解析結果の立証 (資料13-4参照)

## ICNIRPガイドライン2020の基本制限

- 基本制限のベースは計算により概算。
- 人体モデルを用いた数値解析によって、吸収電力密度 (APD) (Funahashiら 2018) を新たに定義、時間 (Morimotoら 2017)、温度上昇 (Sasakiら2017、Hashimotoら2017) の関係を推定。
- 基本制限の設定には、熱調整系機能を考慮せずに概算しているため、人体皮膚を対象とする実測による確認が必要。



# 皮膚影響に関する生体指標 (ガイドライン補強に向けて)

表2 電波ばく露の及ぼす皮膚影響を検討する上で着目しておくべき生体指標

アプローチ	現状と課題		生体指標例	評価可能性	
	概要	対象		実験動物	人体
生物学的 アプローチ	①人体および実験動物共に、照射表面 (<8 mm) にエネルギーが集中する超高周波電波ばく露に関する知見が乏しい。  ②超高周波電波ばく露時の各部位の体温上昇に関する基礎データすら不足している。	皮膚および深部を含む体温に関するデータが不足 (眼球のそれはあり)。	体温変化	○	○
		組織温度上昇への寄与が考えられる血流 (血行動態) に関するデータはない。	皮膚血流変化	○	○
		皮膚に対する組織レベルおよび細胞レベルでの影響評価に関するデータが不足 (対放射線・UV・薬品は存在)。 ※従来の熱損傷とは機序が異なる可能性あり	皮膚組織損傷	○	×
			細胞動態	○	×
			タンパク質・遺伝子発現	○	×
		体内ホルモン変化など、体温上昇や組織変化に起因する2次的な生体反応に対する全身性の影響評価に関するデータが不足。	免疫・炎症系ペプチド (サイトカイン等)	○	×
			炎症系プロスタグランジン	○	△
			ストレス系アミノ酸誘導体 (アドレナリン・ノルアドレナリン等)	○	○
			発汗	×	○
			心拍変動	○	○
		感覚に対するデータが不足。	呼吸数	○	○
			温感	×	○
			熱感	×	○
		痛覚	△	×/△	

# 人体前腕皮膚に対する局所ばく露実験

- ◆対象：人体前腕皮膚（第1選択肢として）
- ◆電波：周波数 28 GHz  
吸収電力密度（APD）0-900 W/m<sup>2</sup>
- ◆時間：12分間
- ◆環境：温度 26.5±0.5°C，湿度 45±10%

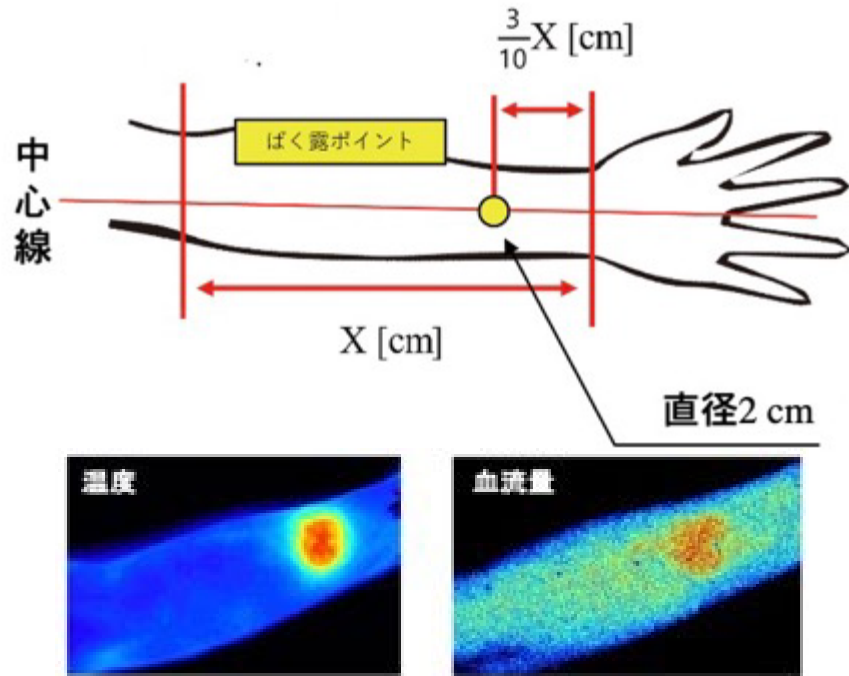


図2 人体前腕局所電波ばく露実験方法

表3 実験対象者と実験回数

成人層（20～39歳）

	応募（人）	同意（人）	参加（人）	実験回数	年齢（歳）
男性	30	26	19	108	27±6
女性	31	26	19	104	28±7
合計	61	52	38	212	28±6

高齢者層（60～79歳）

	応募（人）	同意（人）	参加（人）	実験回数	年齢（歳）
男性	10	10	8	56	70±5
女性	14	12	7	54	64±4
合計	24	22	15	110	67±5



# 結果①：人体皮膚の温度上昇

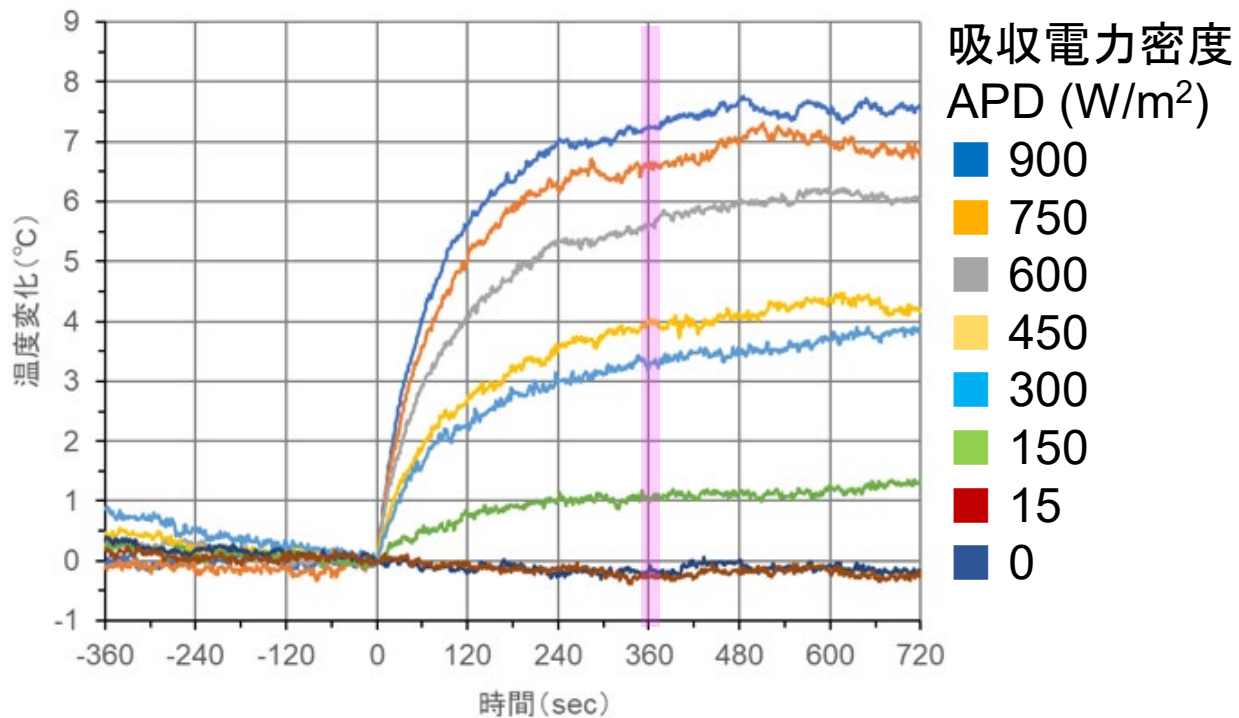


図3 28 GHz電波局所ばく露時の成人前腕皮膚の温度変化

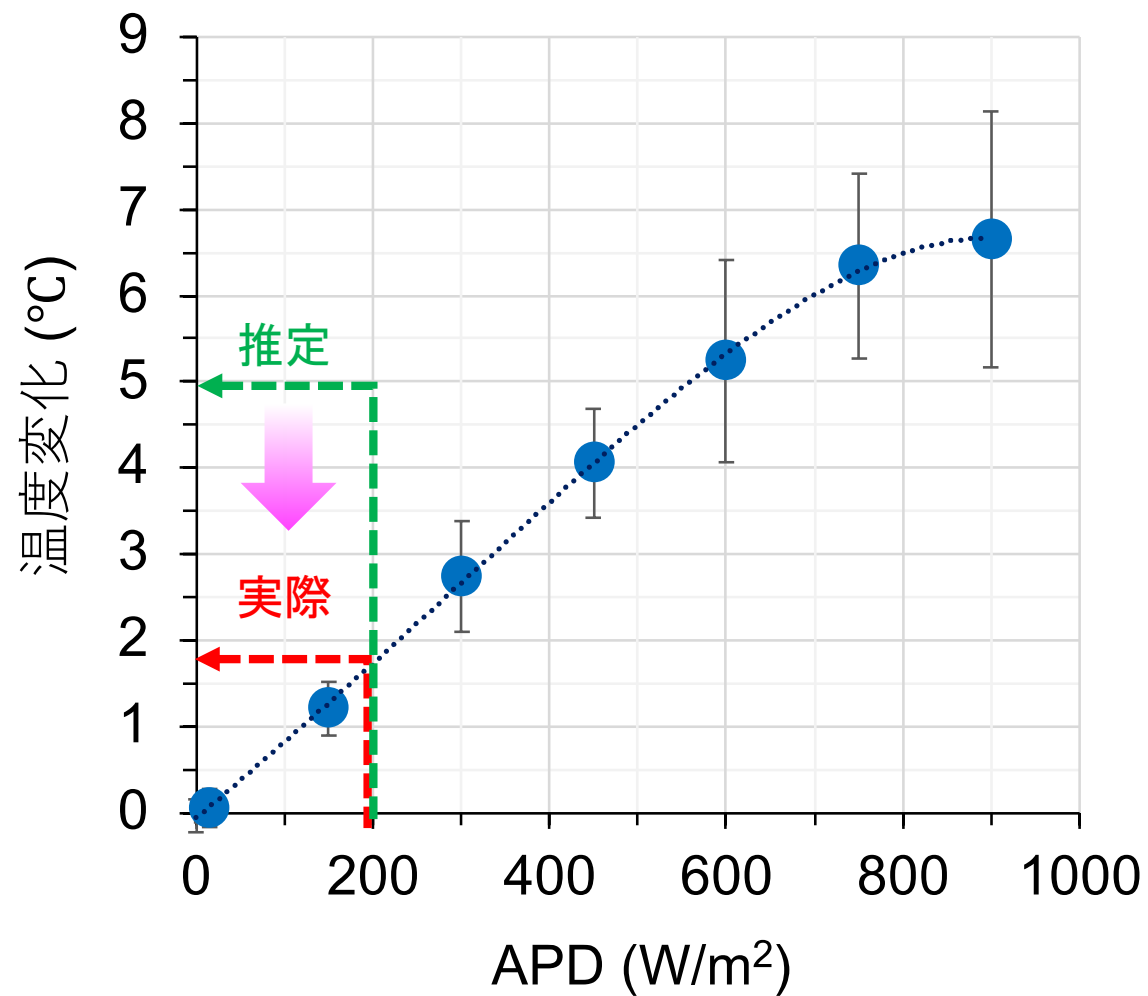


図4 ばく露6分後の温度変化とばく露強度との関係

# 結果②：人体皮膚の血流上昇

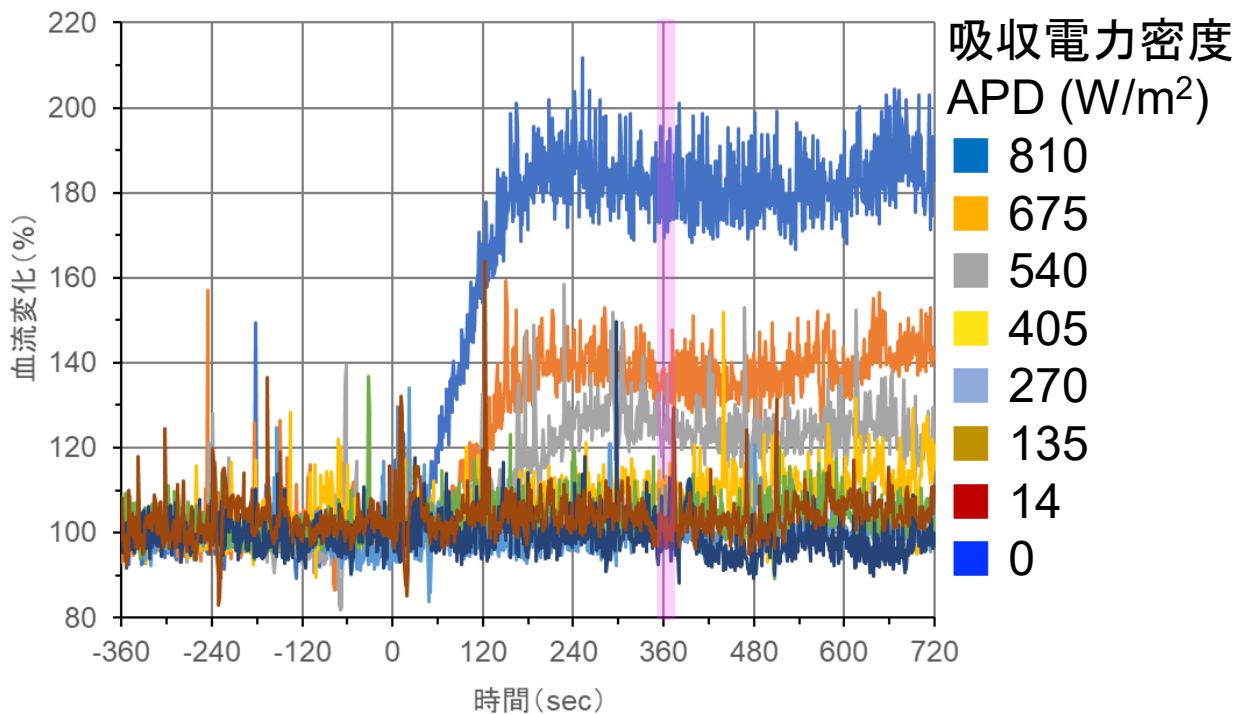


図5 28 GHz電波局所ばく露時の成人前腕皮膚の血流変化

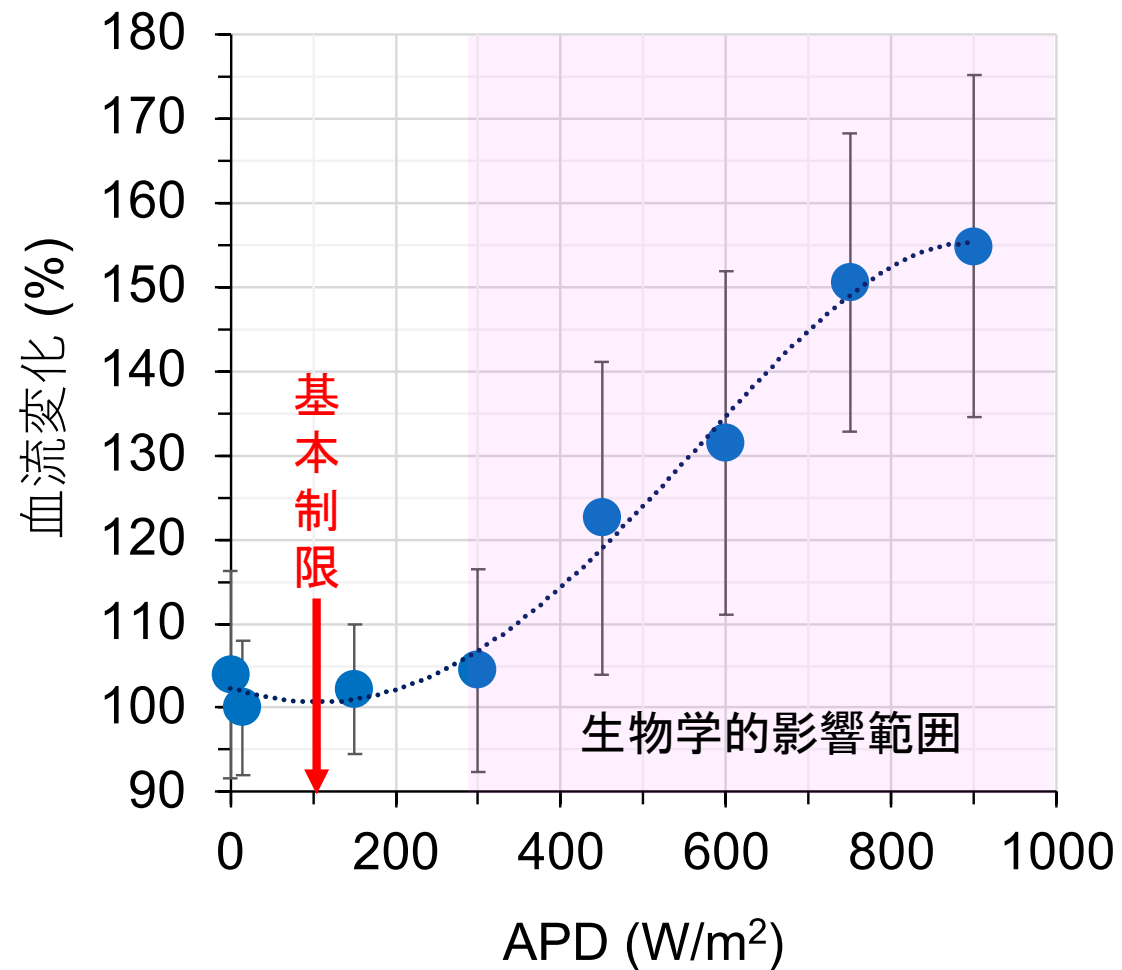
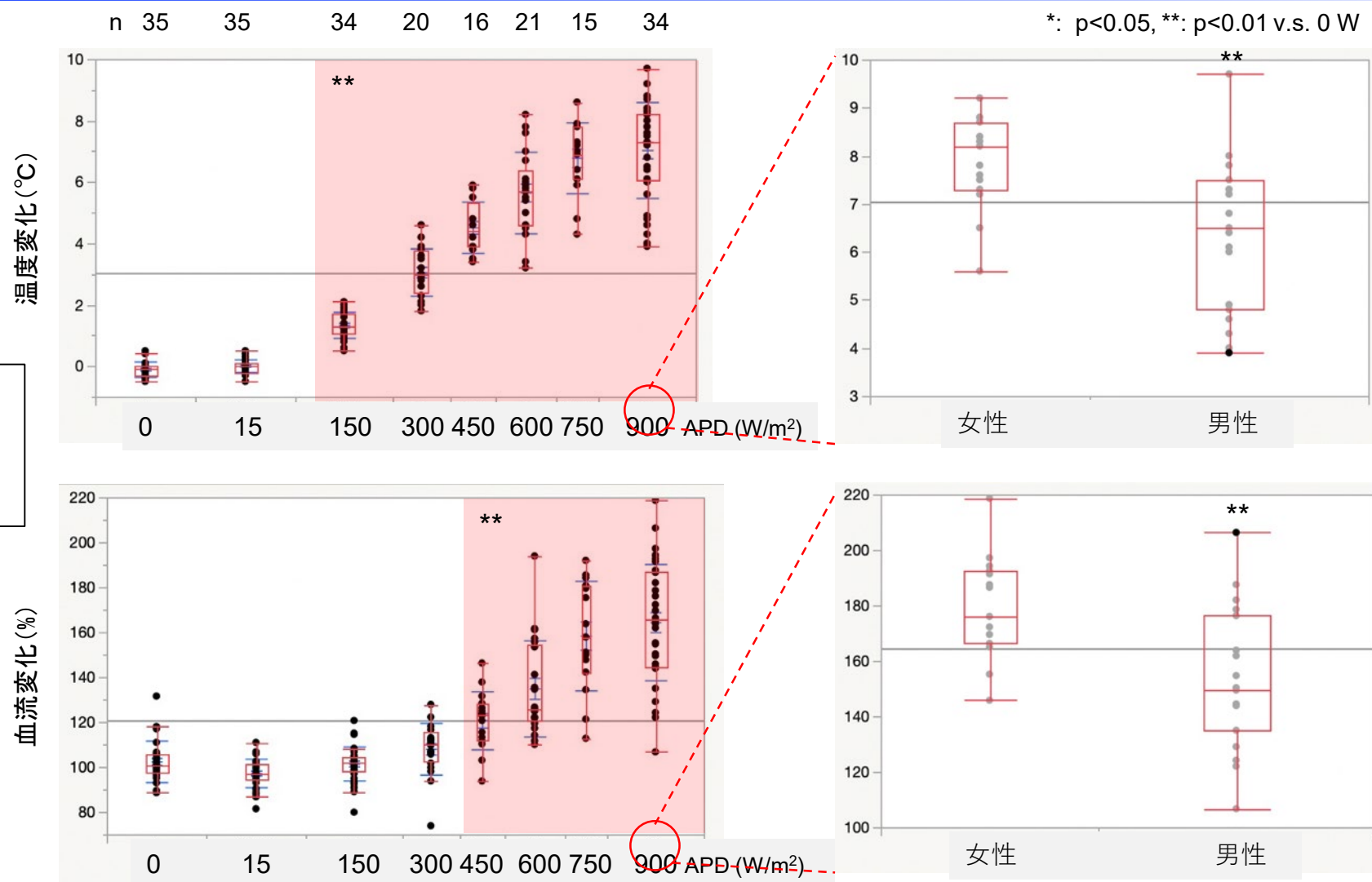


図6 ばく露6分後の血流変化とばく露強度との関係

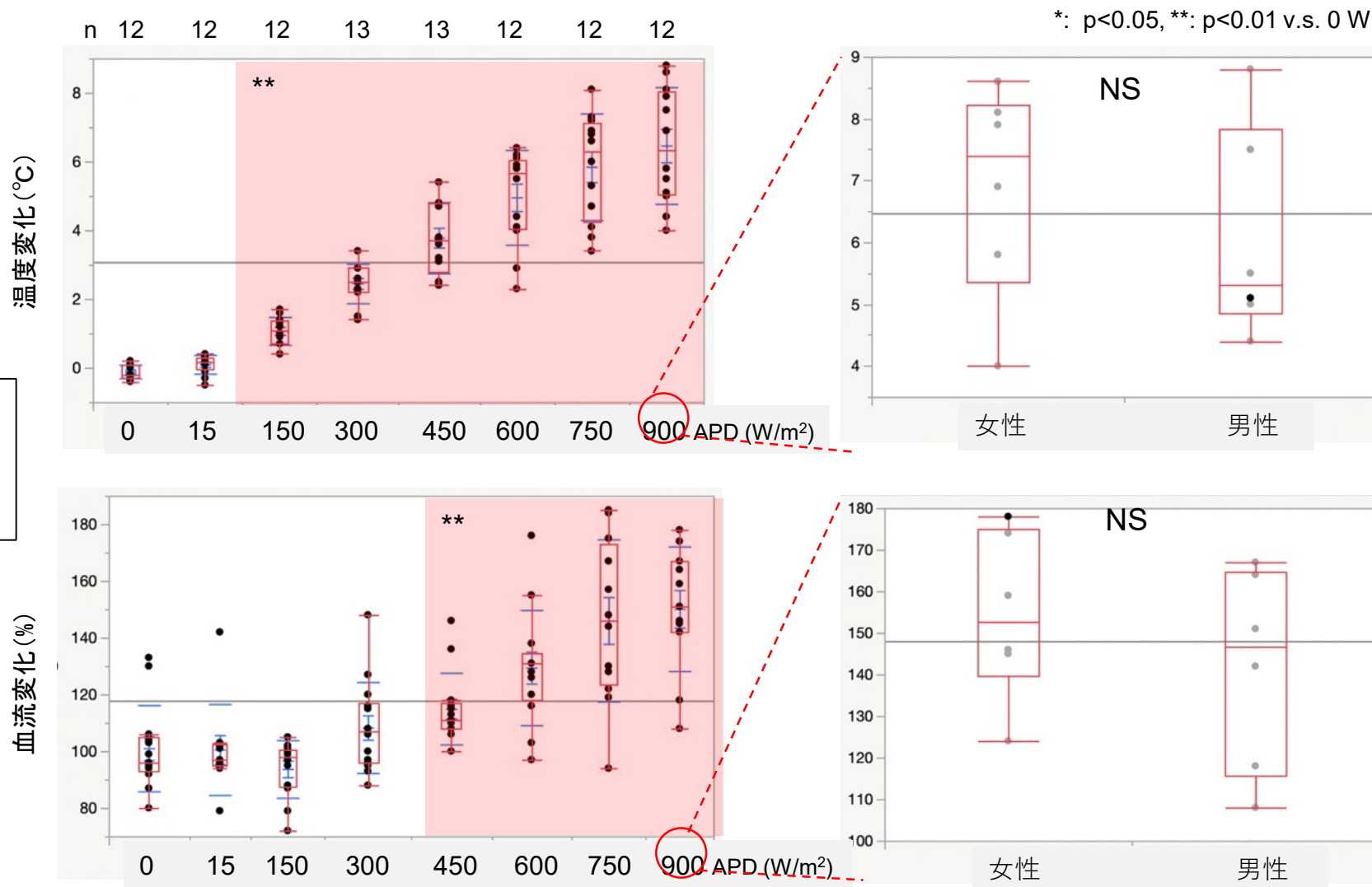
# 結果③：成人における反応閾値と性差



皮膚温度は150 W/m<sup>2</sup> (90 s <) で、皮膚血流は450 W/m<sup>2</sup> (180 s <) で有意に上昇

図7 28 GHz電波局所ばく露12分後の成人前腕皮膚の温度と血流変化

# 結果④：高齢者における反応閾値と性差

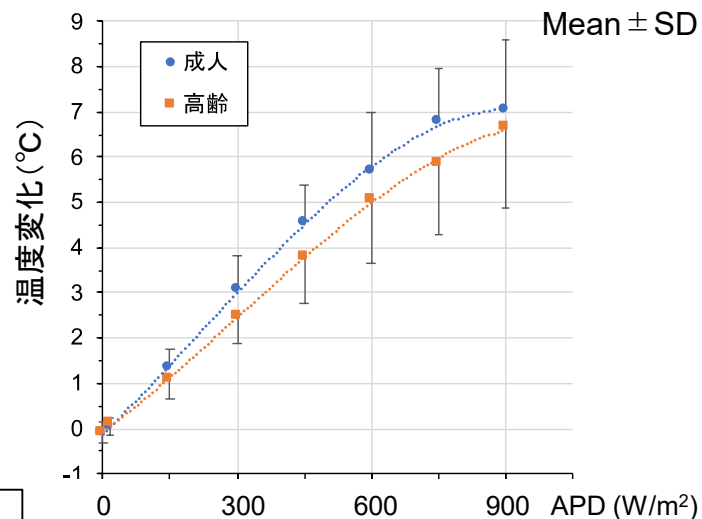


皮膚温度は150 W/m<sup>2</sup> (90 s <) で、皮膚血流は450 W/m<sup>2</sup> (180 s <) で有意に上昇

性差なし

図8 28 GHz電波局所ばく露12分後の高齢者前腕皮膚の温度と血流変化

# 結果⑤：年齢による差異



成人 > 高齢者

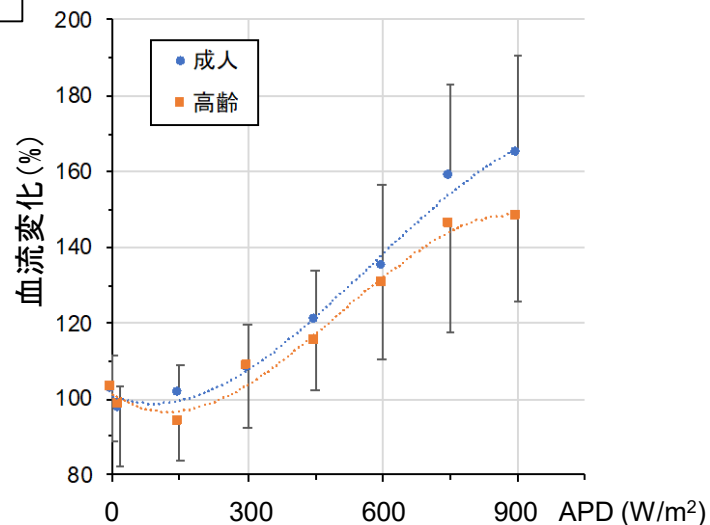


図9 28 GHz電波局所ばく露12分後の皮膚温度と血流の年齢による違い

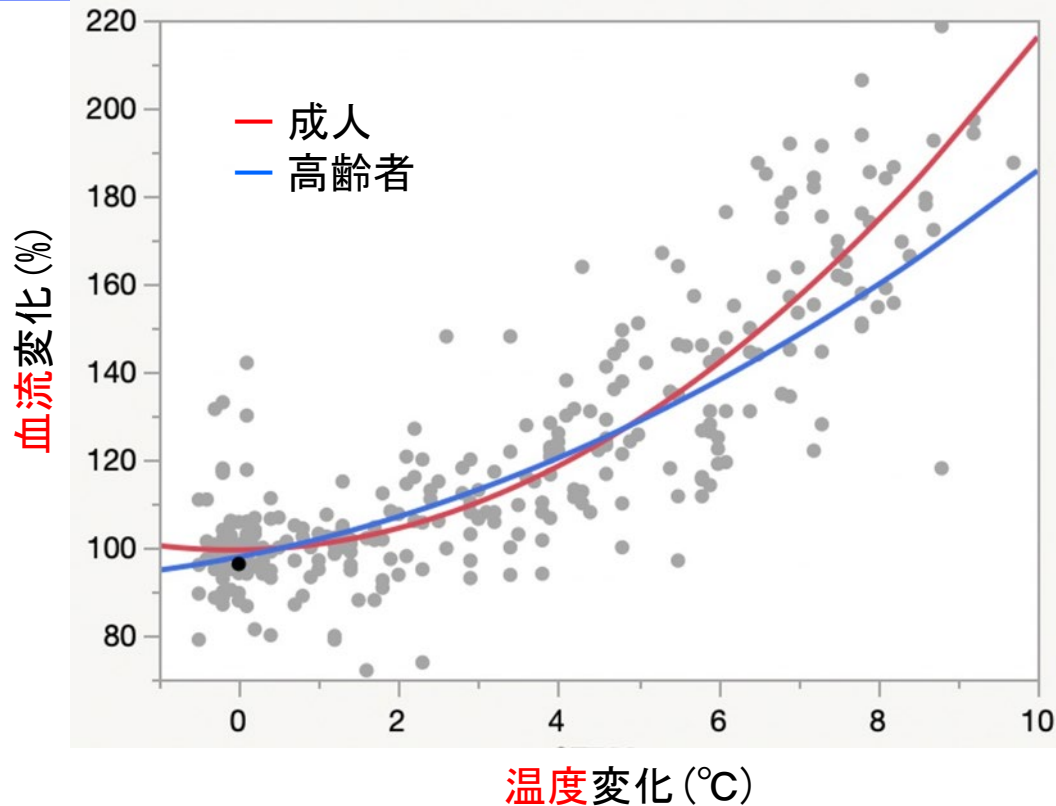
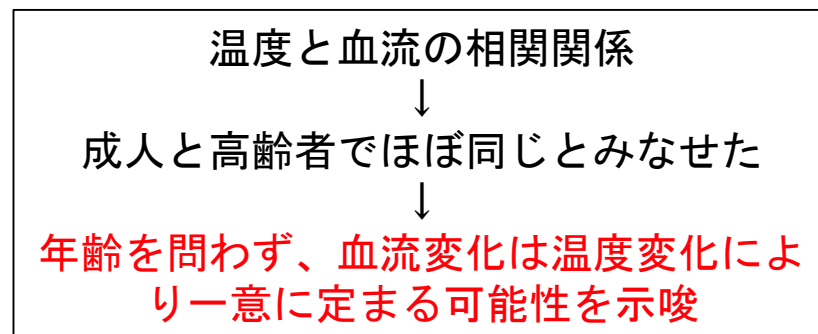


図10 電波ばく露中の温度に対する血流増加



# 動物背部皮膚に対する局所ばく露実験

- ◆対象：ラット背部皮膚
- ◆電波：周波数 26.5 GHz  
吸収電力密度 (APD) 0-500 W/m<sup>2</sup>
- ◆時間：18分間
- ◆環境：温度 23.0±0.5°C, 湿度 50±10%

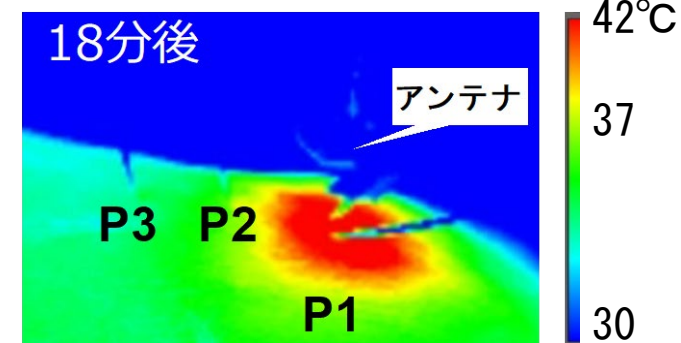
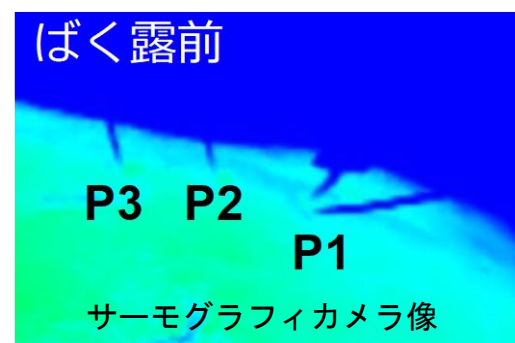
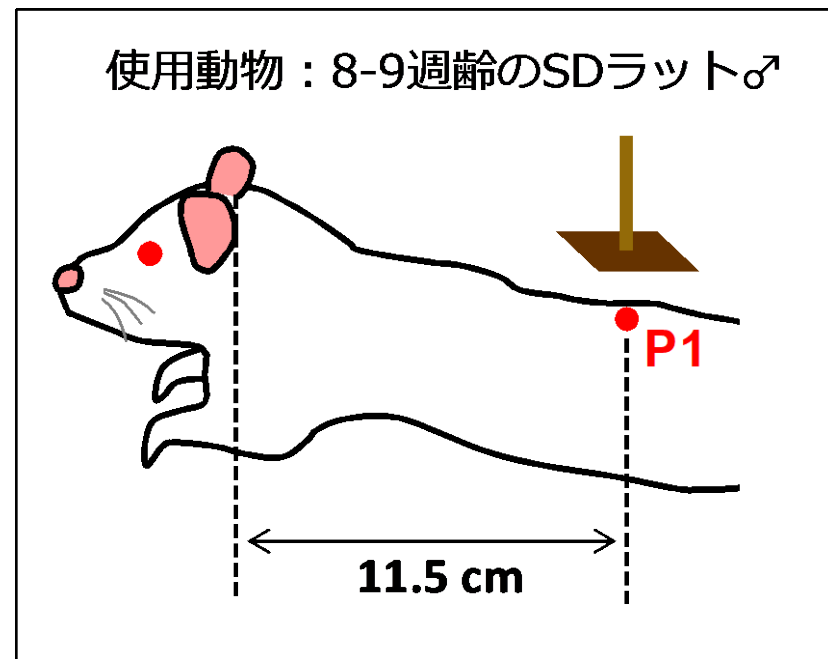
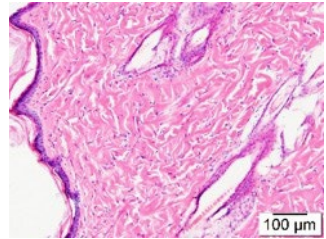
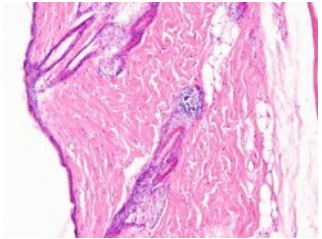
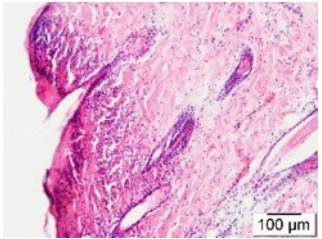
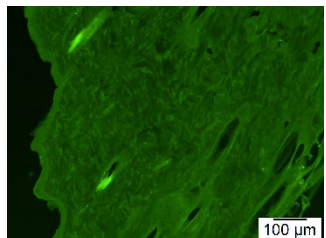
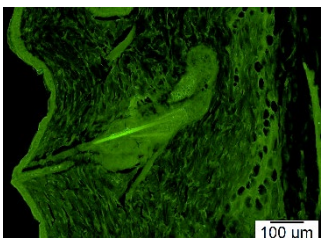
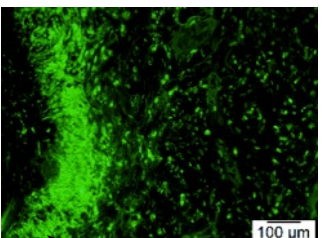


図11 ラット背部皮膚への電波局所ばく露実験方法



# 結果①：ラット皮膚の組織変化

表4 HE染色およびiNOS抗体を用いた免疫組織化学染色による評価結果

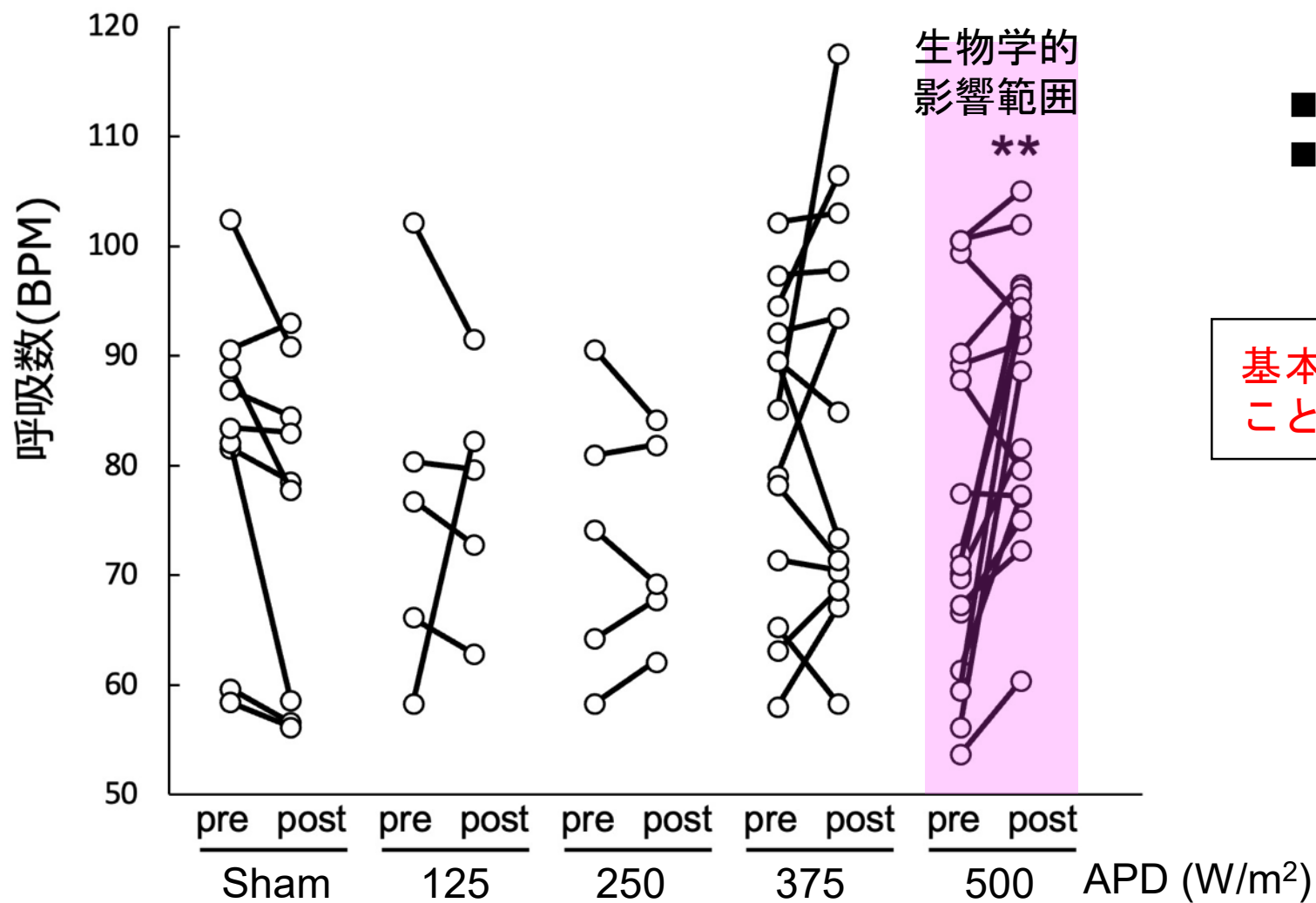
	ケージコントロール	375 W/m <sup>2</sup>	500 W/m <sup>2</sup> ←APD
HE染色	 100 μm	 Day3では表皮の肥厚	 100 μm 真皮層～脂肪層に浮腫 好中球の集積 表皮の肥厚 肉芽形成
iNOS	 100 μm 陽性細胞なし	 100 μm 陽性細胞なし	 100 μm iNOS：緑で標識 誘導性の炎症マーカー ばく露部位周辺に陽性細胞あり

ばく露1日後の皮膚をサンプリング→凍結切片を作成→HE染色およびiNOS抗体を用いた免疫染色を行い、組織形態や炎症性細胞の確認を行った。

- 250 W/m<sup>2</sup>以下では、組織学的変化は認められなかった
- 375 W/m<sup>2</sup>以下ではiNOS陽性細胞は確認できなかった

基本制限100 W/m<sup>2</sup>では組織変化は生じないことを示唆

# 結果②：呼吸への影響



- 呼吸数はAPD 500 W/m<sup>2</sup>で優位に増加
- 375 W/m<sup>2</sup>では増加傾向



基本制限100 W/m<sup>2</sup>では呼吸変動は生じないことを示唆

図12 ラット背部皮膚局所ばく露に伴うの呼吸変動

ばく露前 (pre) とばく露終了直前 (post) の各6分間の中央値を示す。ウィルコクソン符号付順位検定 (n=5-17)、\*\* : p<0.01

# 皮膚感覚/感受性に関する実験結果 (初期データ)

温感・熱感・痛み、さらに電磁波過敏症を検討する上で重要



主観による影響を受けるため、温度等の物理量やストレスホルモンレベル等に関連付けた客観的評価も必要と考える



本格的研究を目指し基礎データを収集中

部位や照射面積等により閾値が異なる可能性あり

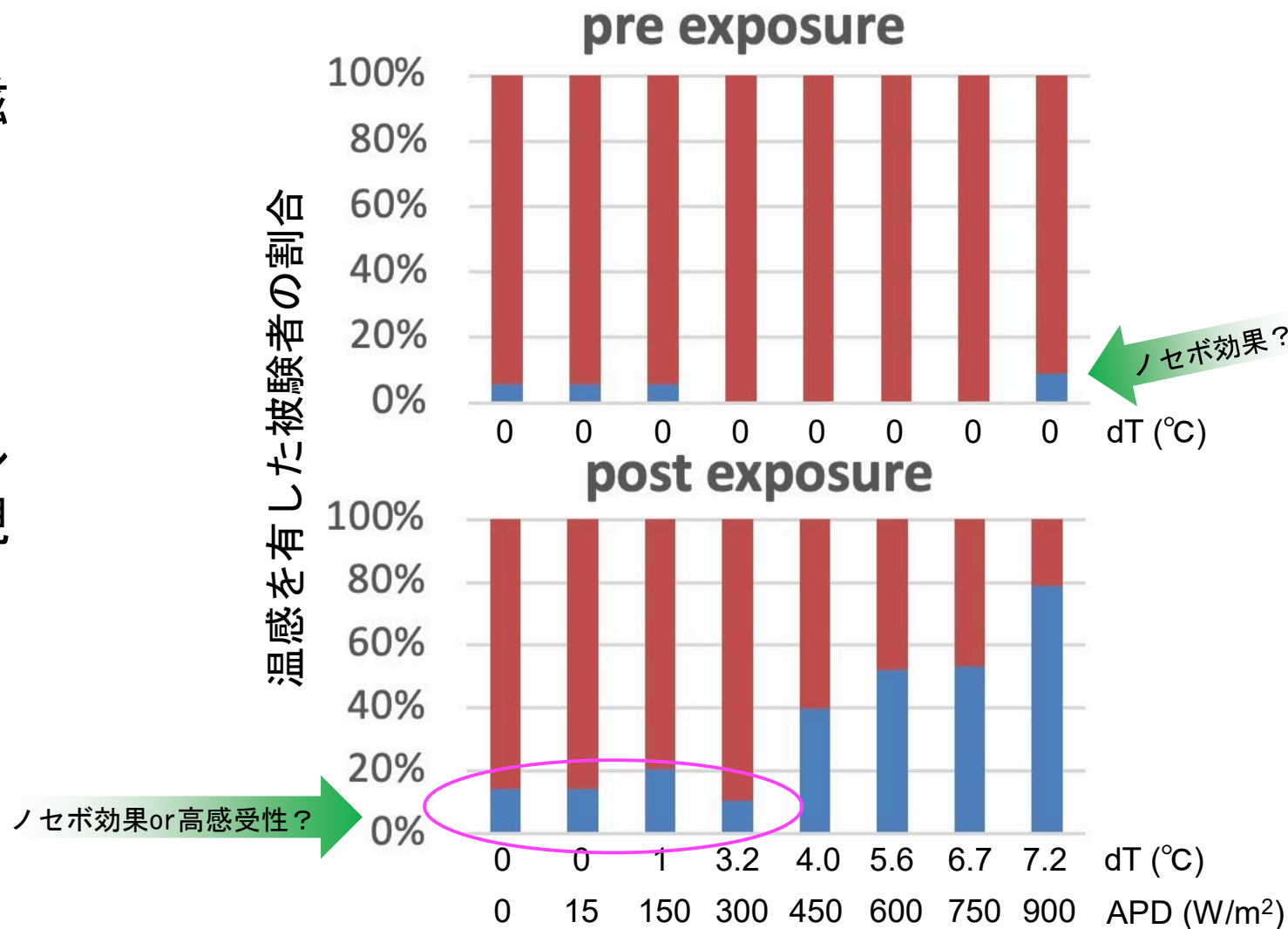


図13 人体前腕皮膚局所ばく露時の温感反応

# まとめ

- 6～300 GHz電波ばく露では電力の約9割が主として皮膚に吸収されるため、皮膚組織への影響に着目する必要がある。
- ICNIRPガイドライン2020では皮膚局所ばく露時の基本制限は吸収電力密度により100 W/m<sup>2</sup>（職業ばく露）および20 W/m<sup>2</sup>（一般公衆ばく露）と定められている。
- 一方、生物学的根拠の不足が指摘されており、これを補うための知見が求められている。（特に皮膚組織において）
- APDと温度上昇の関係について、前腕皮膚においては、計算値よりも実測値のほうが下回る可能性が示唆された。
- 皮膚血流・皮膚組織損傷・呼吸数を評価した結果、ばく露強度が基本制限よりも下まわっていれば影響惹起の可能性は低いことが示唆された。
- 人体（皮膚温度と血流）については性および年齢による差異を考慮しても基本制限は維持できるものと考えられた。

# 今後の課題

- 遺伝子発現・体内ホルモン・感覚/感受性等、皮膚に関連する生体反応について更に検討が必要である。
- 異なる局所電波ばく露条件（時間・繰り返し・照射面積・温湿度環境等）による影響についても考慮する必要がある。
- 眼球・細胞を対象とした従前研究の結果を含め、吸収電力密度を基準に各種生体影響に関する知見を総合的にレビューすることも重要と考える。

今後も再現性のある知見（閾値）を取得しておくことが望まれる。