

# 電波の人体への安全性 に関する評価技術

国立研究開発法人情報通信研究機構

# 研究内容

## ① 適合性評価技術の開発

- 最新無線通信端末のための簡便かつ高速なSAR評価手法の確立
- 最新無線通信端末に対し、較正・不確かさ評価による適合性評価方法の信頼性向上
- WPTシステム等の中間周波数帯電波利用機器の適合性評価手法の確立

## ② 高精度ばく露評価技術の開発

- 長波帯からTHz波帯における数値人体モデル・計算システム等の開発
- 基本的なばく露条件下における人体ばく露量の評価
- 様々な電波利用機器の実利用状況を考慮した人体ばく露量の評価

# 中間周波数帯におけるばく露評価技術

# 中間周波数帯の電波防護指針

- 電波防護指針で考慮されている影響

- 刺激作用(10 kHz～10 MHz)
- 熱作用(100 kHz～)
- 間接的な作用

接触電流など

- 電波防護指針の構成

- 基礎指針, 基本制限

ばく露による作用に直接関連する物理量で規定

- 管理指針

基礎指針等に対応する測定可能な物理量

(電界強度、磁界強度、磁束密度、電力密度、電流及び比吸収率)

電磁界強度指針

補助指針

局所吸収指針

電磁放射源が十分遠方にある場合を想定し、入射電磁界と体内のばく露量に一定の関係があるとみなして導出され、当該空間の安全性評価に利用可能

近傍波源により身体の一部が局所的にばく露される場合を想定し、基礎指針に従った詳細評価に利用可能(100 kHz以上)

# 電波防護指針(10 kHz – 10 MHz)

- 基本制限

瞬時

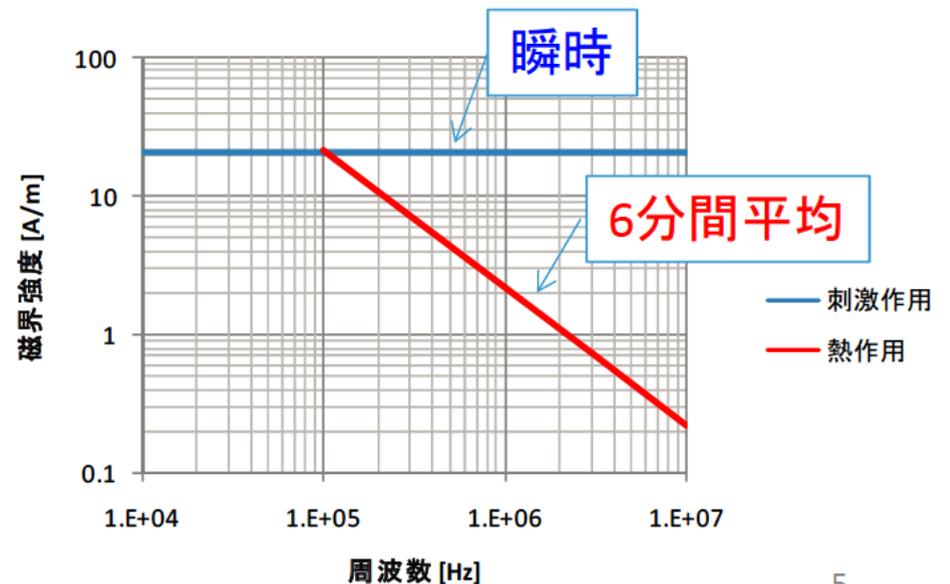
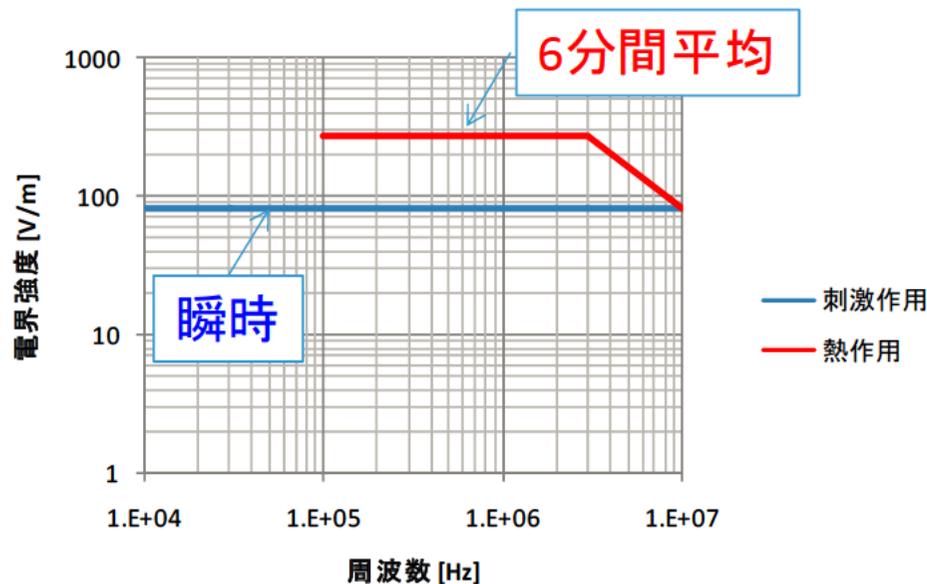
	刺激作用に基づく指針値
	頭部と体部の全組織 V/m
10 kHz – 10 MHz	$1.35 \times 10^{-4} f$

- 局所吸収指針

6分間平均

	熱作用に基づく指針値		
	全身平均SAR W/kg	10g局所SAR(頭部と体部) W/kg	10g局所SAR(四肢) W/kg
100 kHz – 10 MHz	0.08	2	4

- 電磁界強度指針



# 電波防護指針への適合性を考える 上での課題

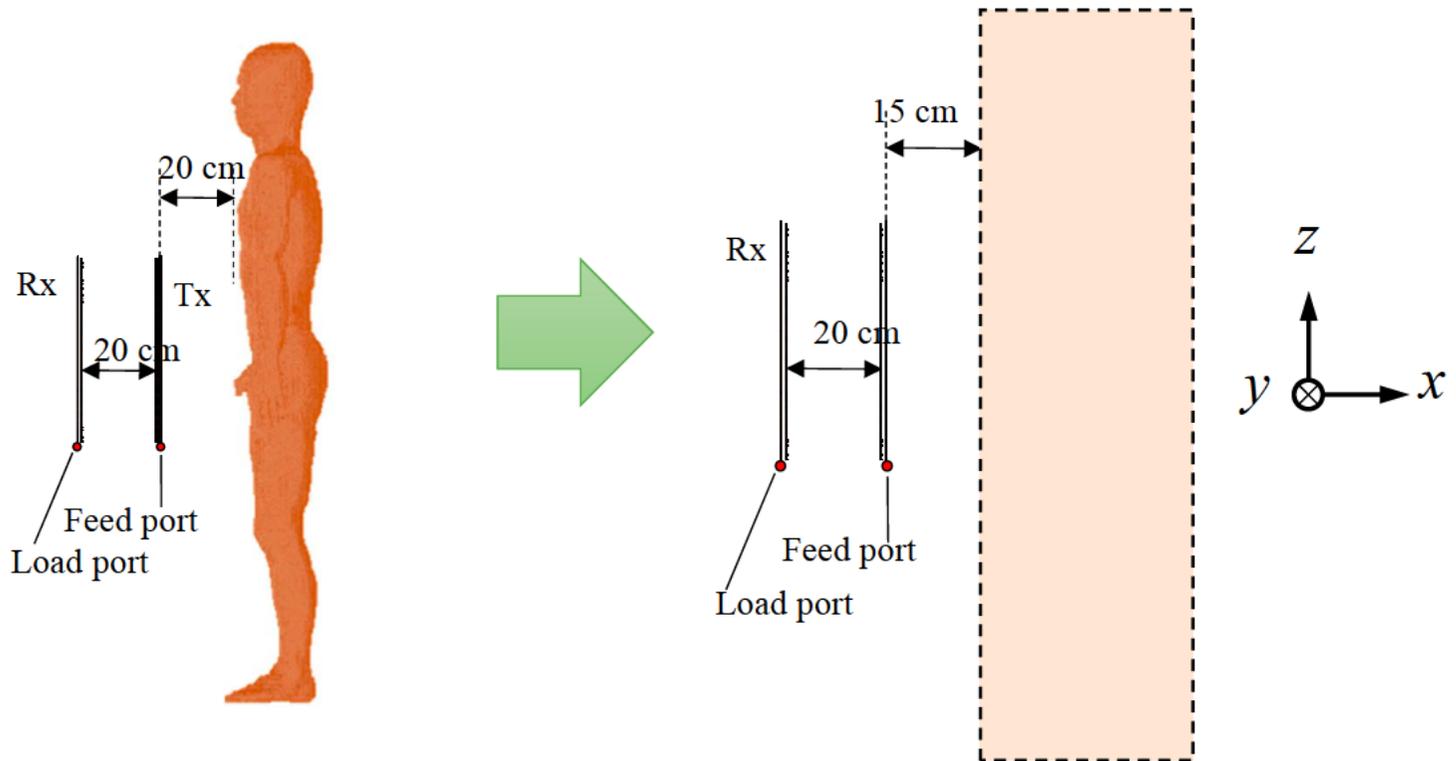
周波数	基礎指針
100 kHz以下	内部電界
100 kHz – 10 MHz	内部電界とSAR
10 MHz以上	SAR

The diagram shows two boxes on the right side of the table. The top box, labeled '瞬時' (Instantaneous) in blue, has arrows pointing to the '内部電界' (Internal electric field) in the 100 kHz以下 row and the '内部電界とSAR' (Internal electric field and SAR) in the 100 kHz – 10 MHz row. The bottom box, labeled '6分間平均' (6-minute average) in red, has arrows pointing to the '内部電界とSAR' in the 100 kHz – 10 MHz row and the 'SAR' in the 10 MHz以上 row.

- SAR
  - 30MHz以下の測定法
- 内部電界
  - 評価法
  - 瞬時の定義
- 実際の電波利用機器のような局所ばく露時の現実的な評価法
- 接触電流

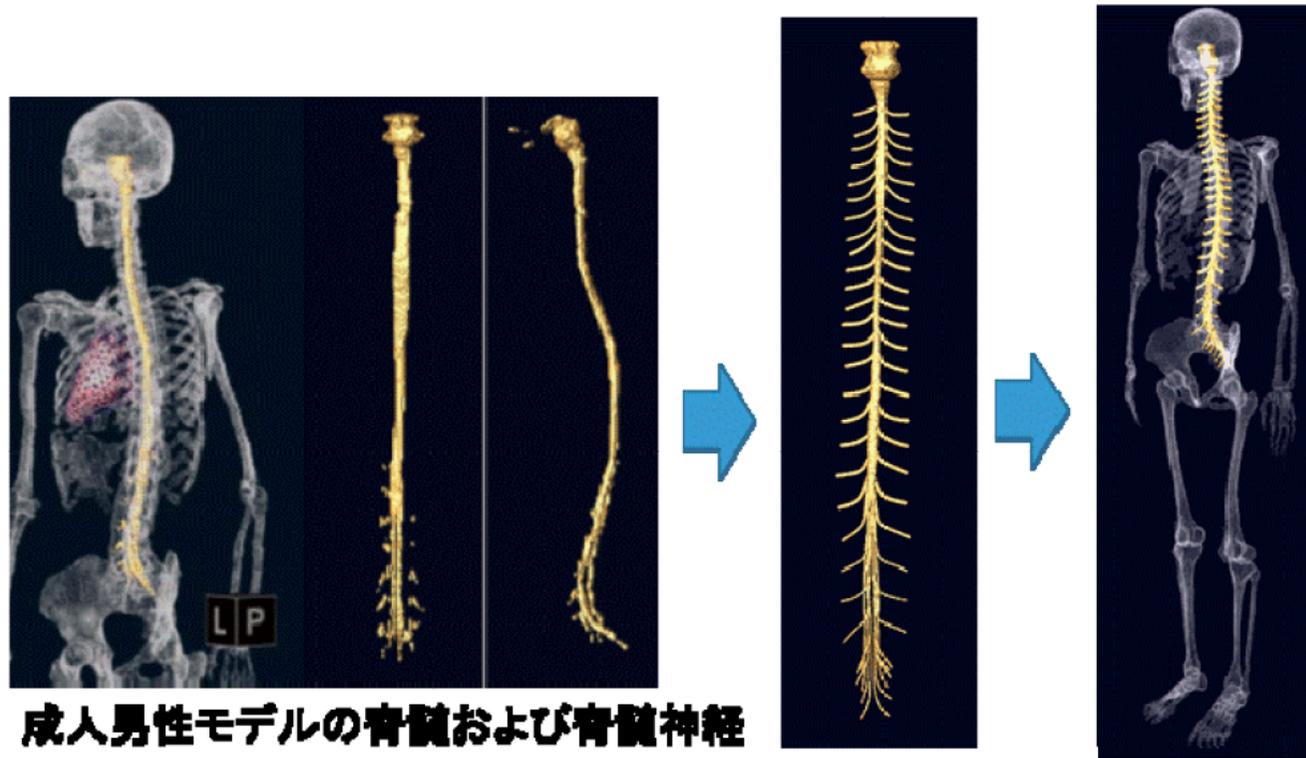
# 実環境における体内誘導量評価

- ✓ 機器近傍の人体内のばく露評価
  - 数値人体モデル
  - 生体組織の電気定数
  - 機器近傍の電磁界計測
  - 数値解析法波源への人体の影響有無



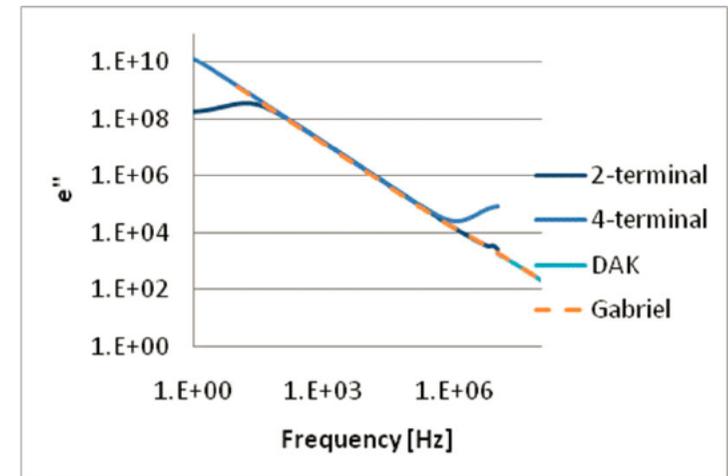
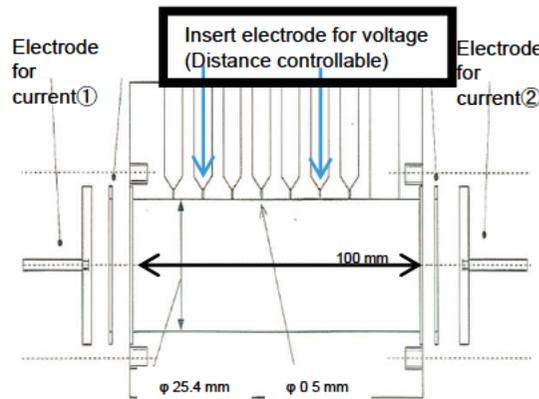
# 中枢神経系改良モデルの開発

✓空間分解能0.5 mm

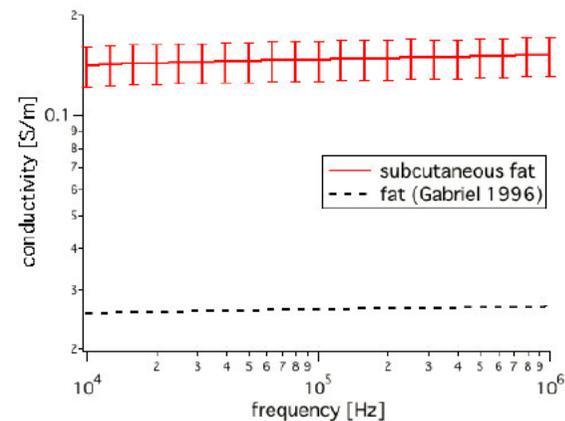
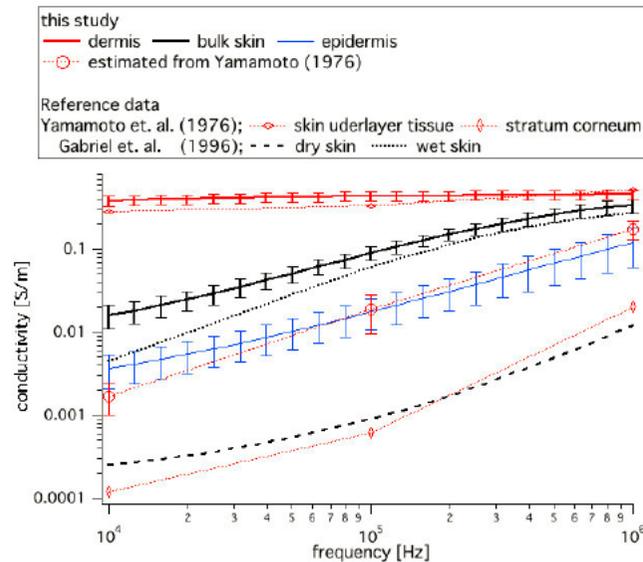


# 生体組織の電気定数測定

✓ 2端子法および4端子法を用いた測定システムの開発



✓ 皮膚層構造を考慮した評価



# 近傍電磁界測定

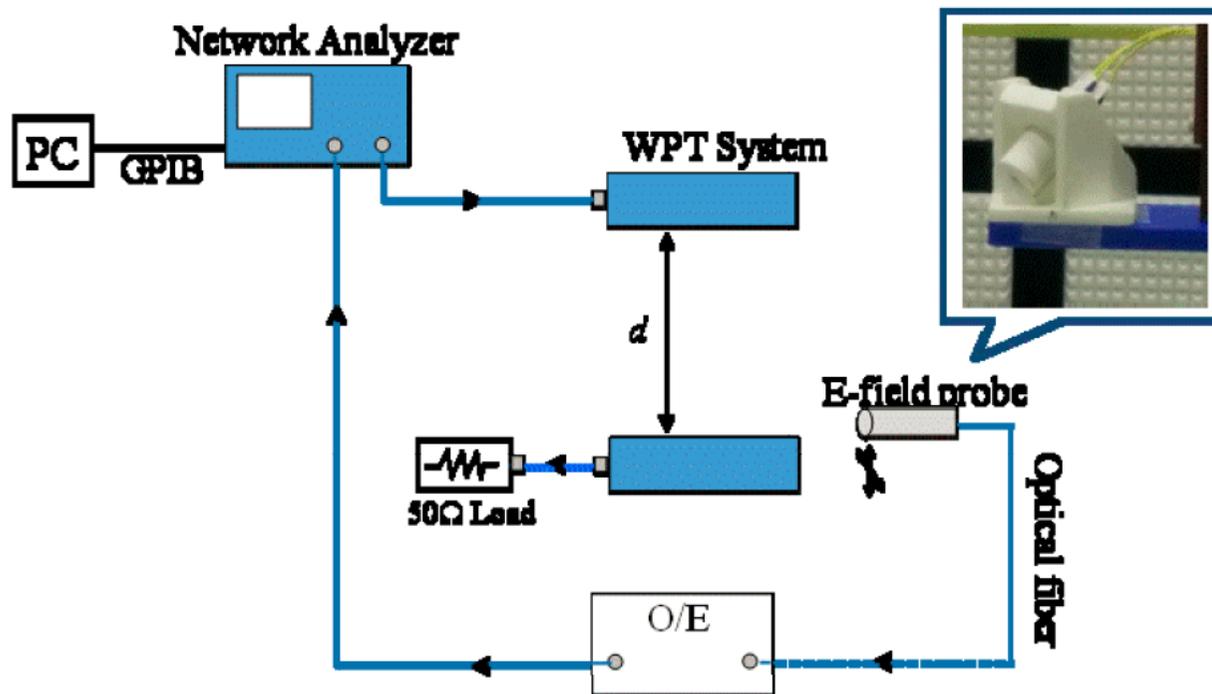
## ✓電界測定システム

VNA: Agilent, E5071C

Port1: WPTシステムに給電

Port2: 電界センサの出力

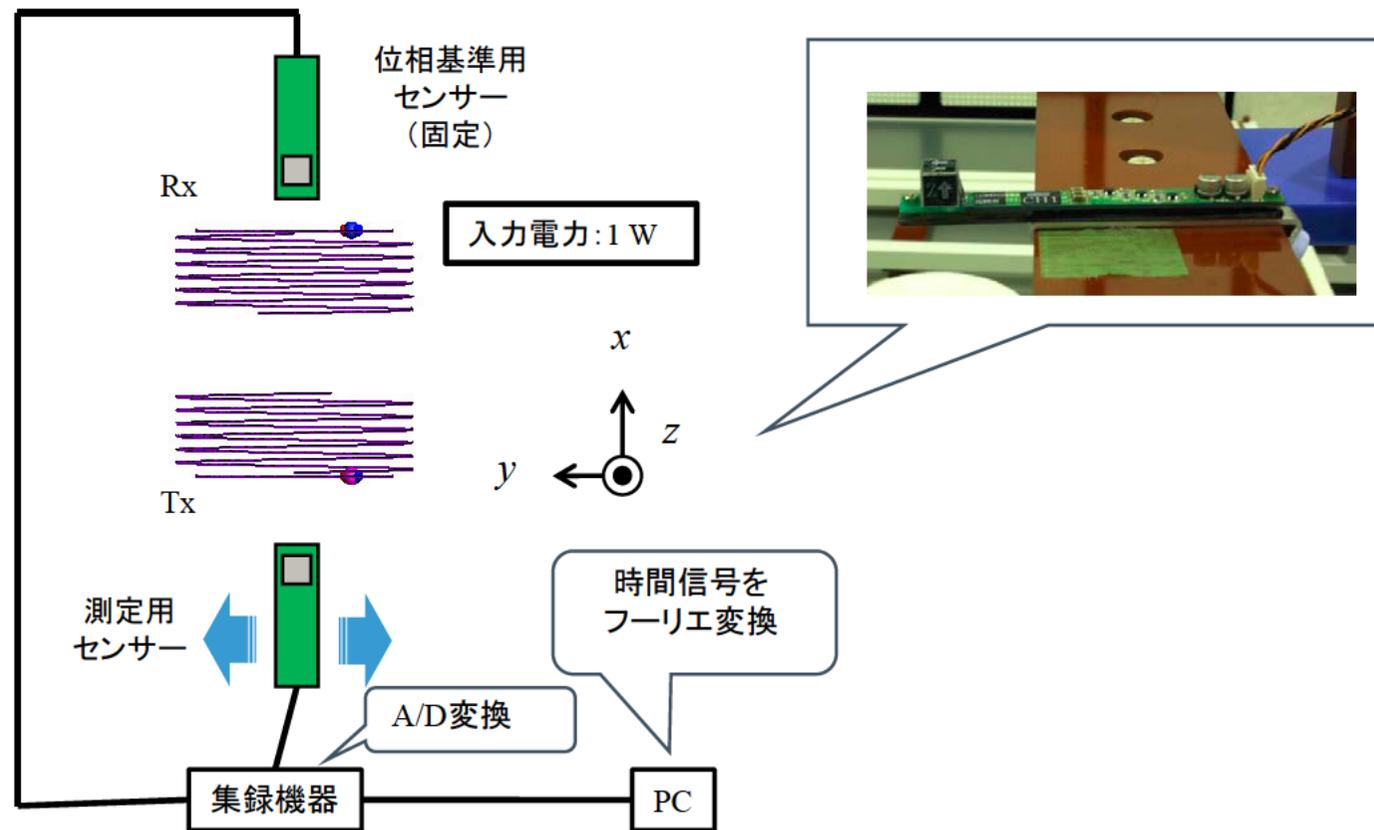
S21の強度と位相を測定



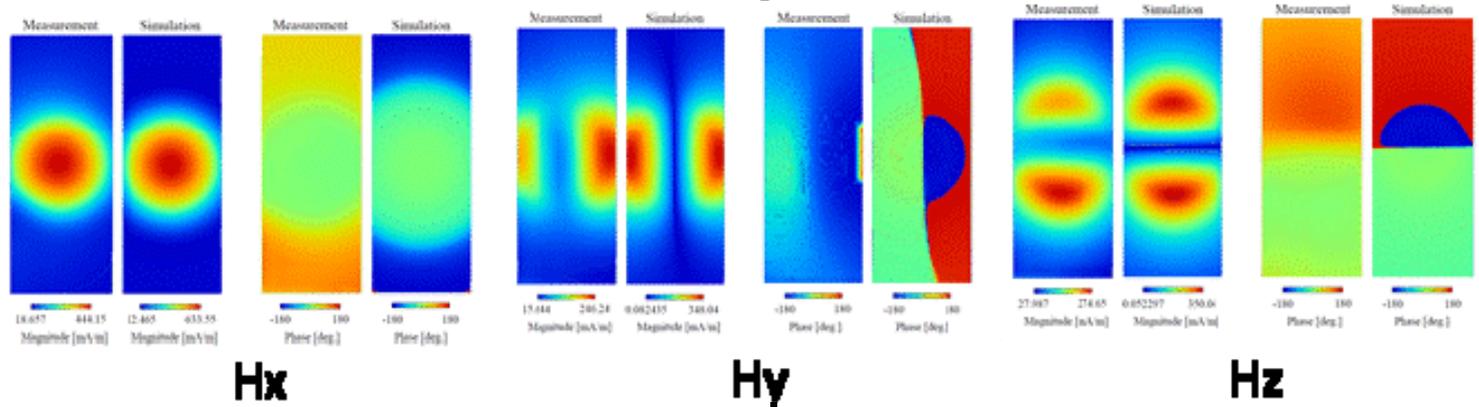
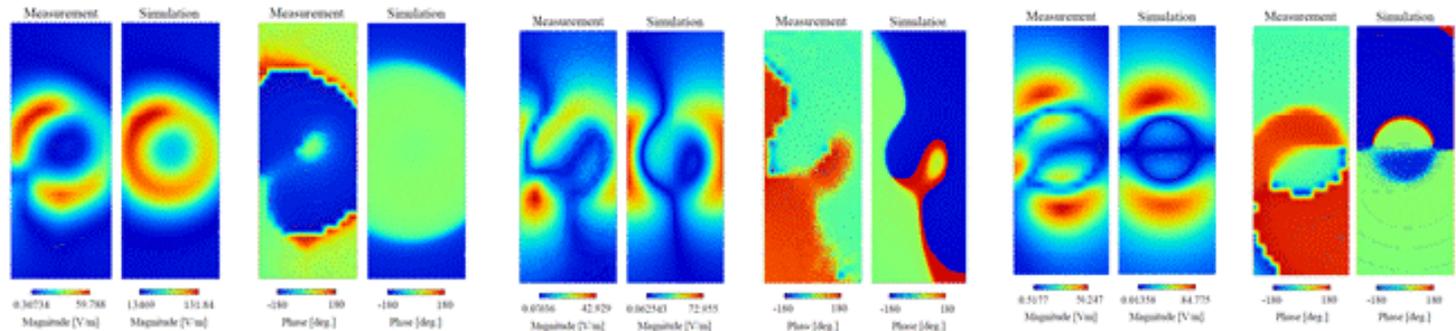
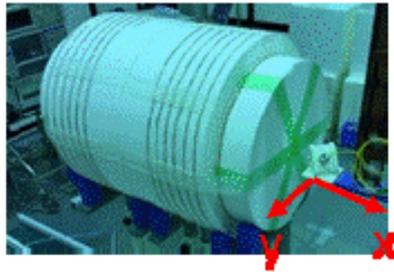
	仕様
周波数	100 kHz – 3 GHz
強度	0.06 – 100 V/m (<300 MHz) 0.002 – 100 (>300 MHz)
等方性	± 1 dB
センサヘッド サイズ	φ 30 mm × 90 mm

# 近傍電磁界測定

## ✓磁界測定システム

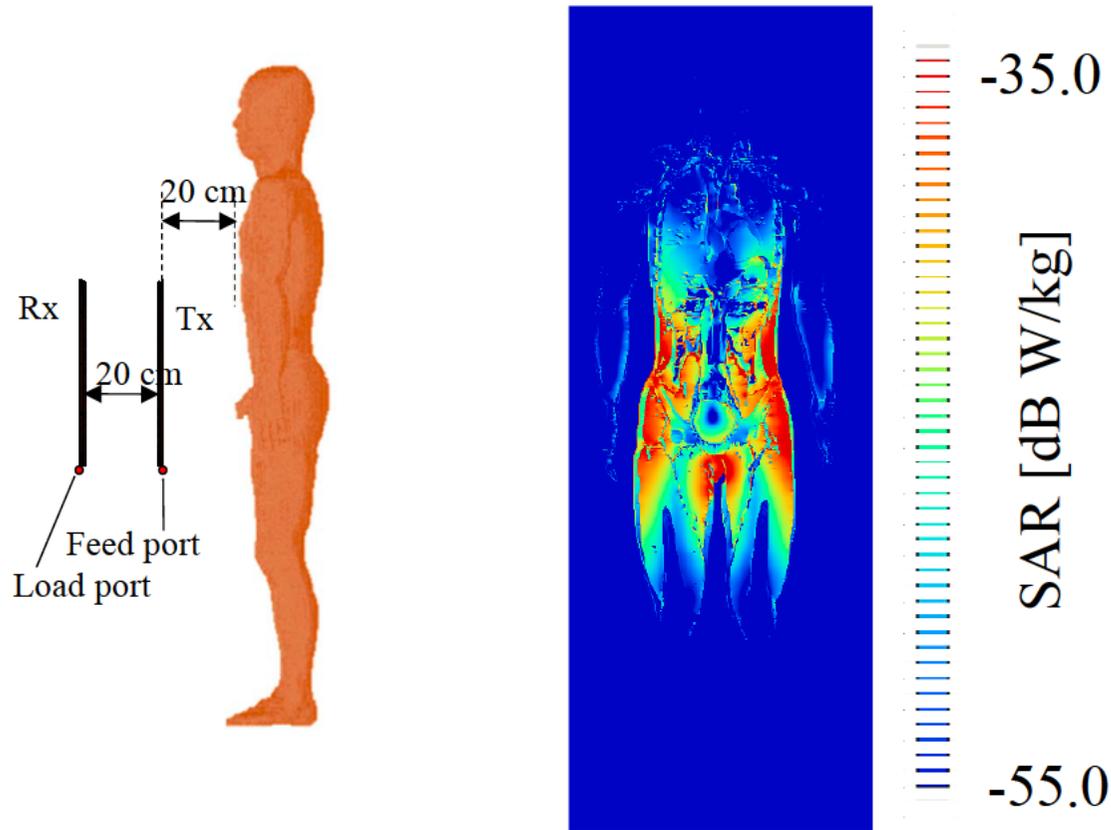


# 近傍電磁界測定例



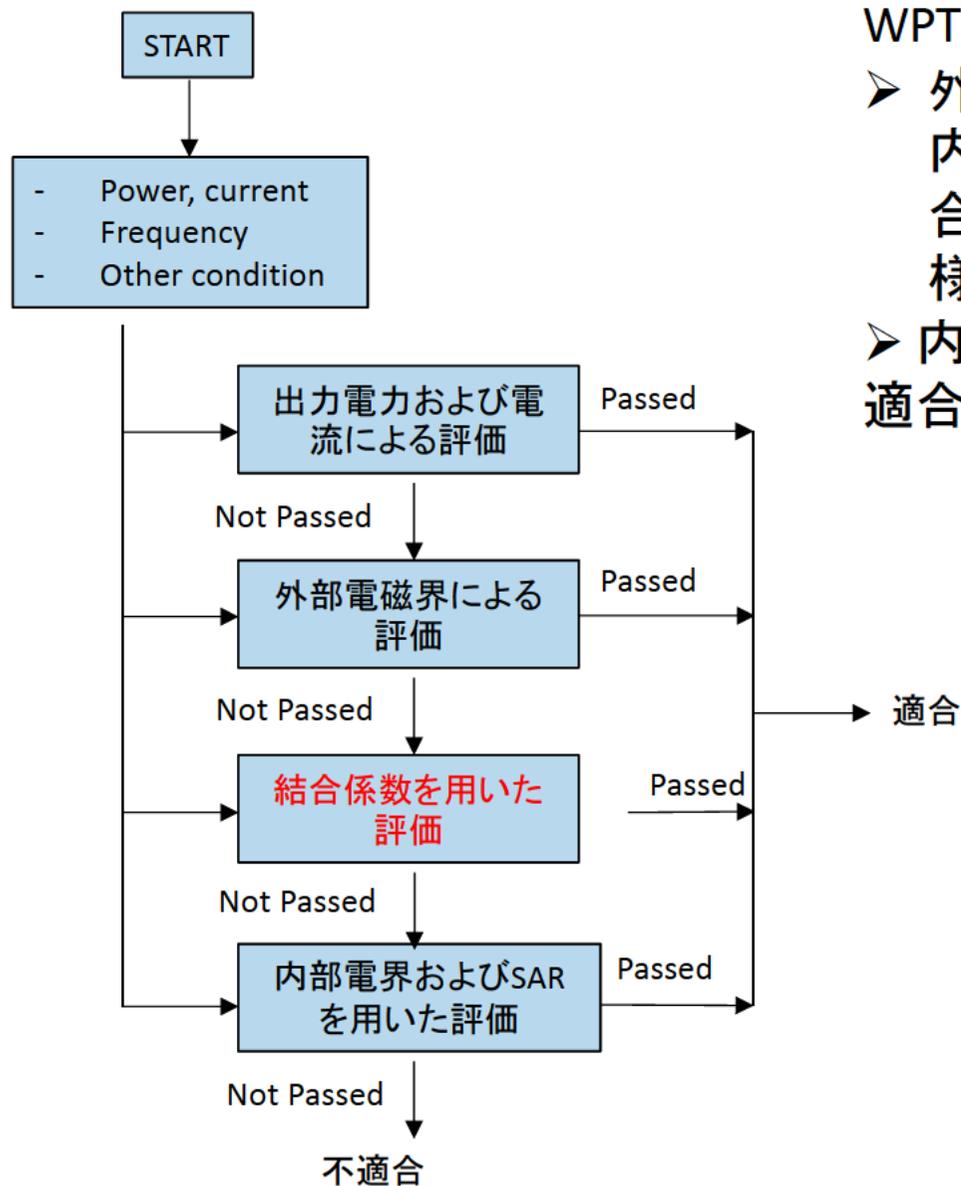
✓電界磁界各方向成分の強度と位相を測定可能に

# 数値解析に関する検討



- 波源と人体のカップリング
- 入射電界の影響

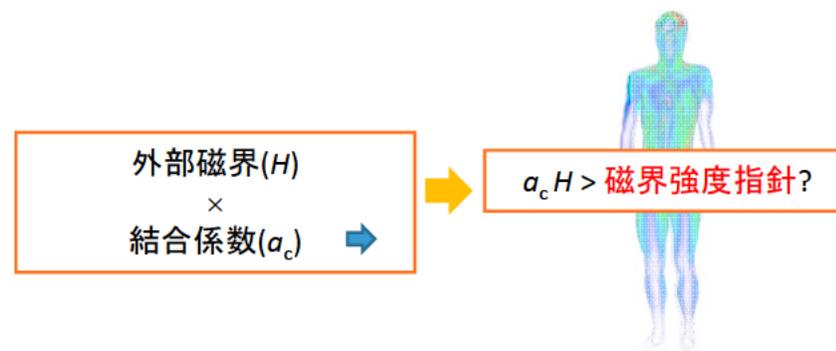
# WPTに対する適合性評価方法の提案



WPT等からのばく露は局所的

- 外部電磁界は電磁界強度指針を越えても、内部電界やSARは基礎指針以下である場合がある(電磁界強度指針は全身への一様ばく露を想定して算出)
- 内部電界やSARの直接的な評価を用いた適合性評価は困難

## 結合係数を用いた評価



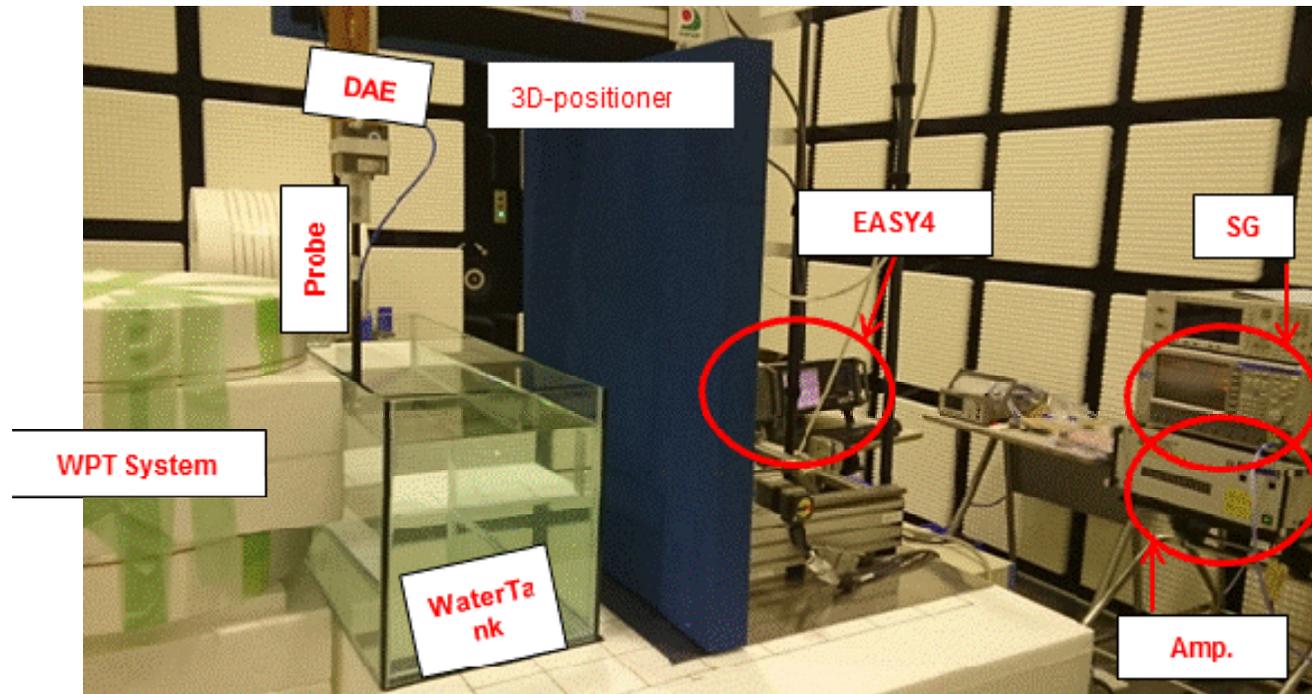
結合係数( $\alpha_c$ ) < 1 制限の緩和

# 生体内SAR分布の実測法

SAR probe  
SPEAG, ET3DV6



Calibrated at 6.78 MHz using  
temperature elevation



# SAR分布実測例

Input power : 10 W

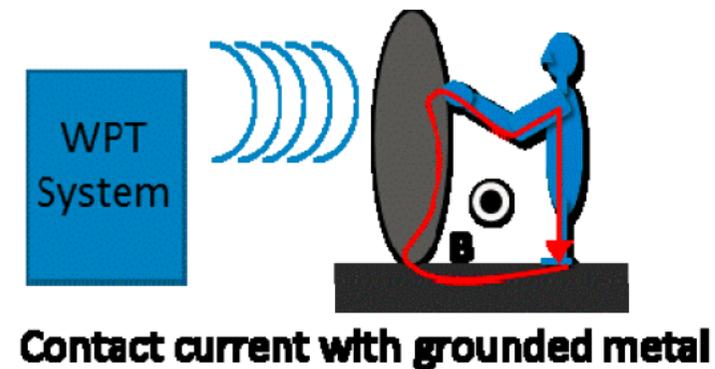
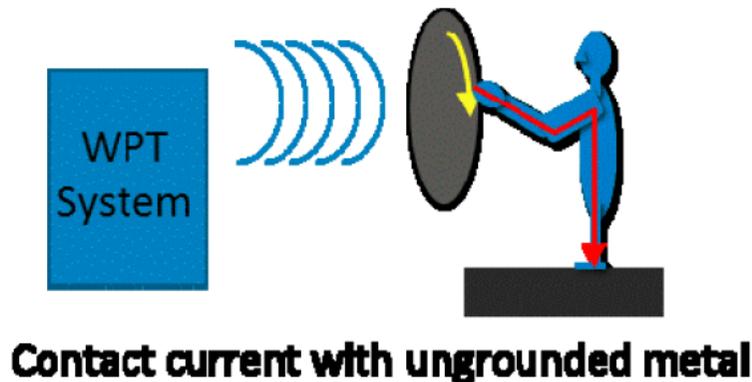
Flat-Spiral-Type WPT System

Solenoid-Type WPT System

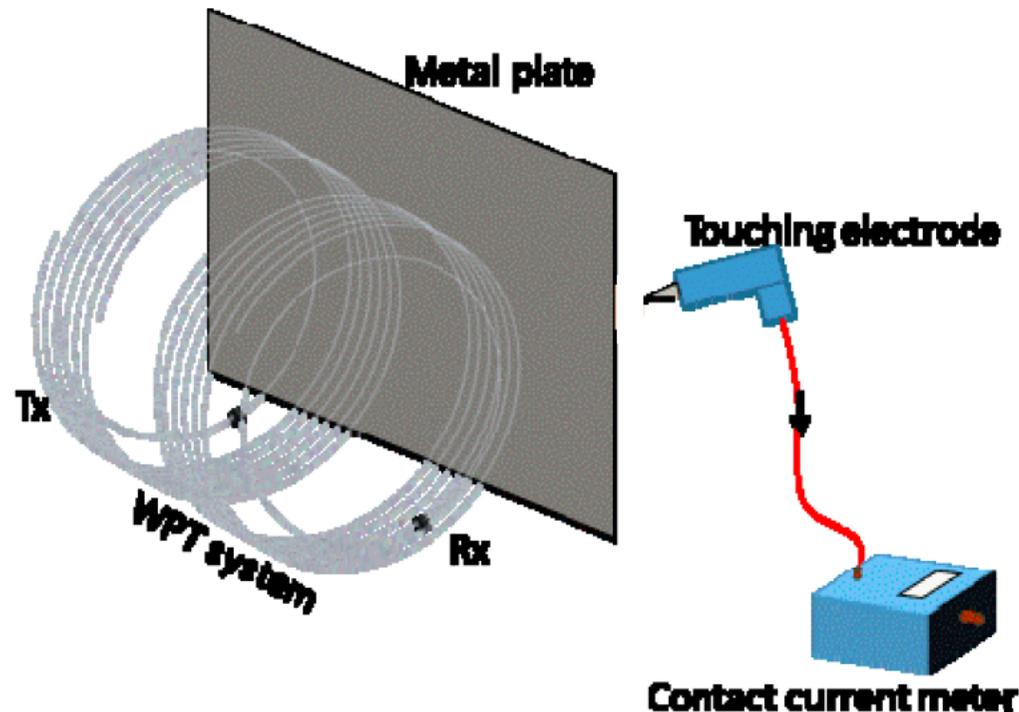
- Measurement results of SAR distribution are in good agreement with those of numerical results obtained by using MoM

# 接触電流評価法

- ✓ 非接地金属体への接触だけでなく、接地金属体への接触により人体に流れる電流を考慮



# 接触電流測定



- Contact current meter
  - ✓ Narda 8870
  - ✓ TRC (equivalent circuit of human impedance of Japanese population)
- Metal plate (200 cm × 100 cm, 120 cm × 120 cm, ...)
  - ✓ Ungrounded (spacing of 7.5 cm from ground to metal plate)
  - ✓ Grounded

# 接触電流測定例

# 電波防護指針への適合性を考える 上での課題

周波数	基礎指針
100 kHz以下	内部電界 ← 瞬時
100 kHz – 10 MHz	内部電界とSAR ← 6分間平均
10 MHz以上	SAR ← 6分間平均

- SAR
  - 30MHz以下の測定法
- 内部電界
  - 評価法
  - 瞬時の定義
- 実際の電波利用機器のような局所ばく露時の現実的な評価法
- 接触電流
  - 評価法
  - 接触電流と入射電磁界の関係

# 準ミリ波・ミリ波帯における ばく露量評価技術

# 次世代電波利用システムに対する 安全性評価研究

- 10 GHz以上の周波数を対象とした人体安全性評価技術の開発・研究が求められている。
  - ✓ 100 GHz以下は移動体端末での利用(5G、WiGig)が想定されている
- ミリ波帯における電波ばく露では表面組織における電力吸収が支配的
  - ✓ 体表組織(皮膚・眼部)での温度上昇による影響
- 電波ばく露に対するガイドラインでは電力密度を指標として指針値を定めている
- 10 GHz以上の周波数において、各機関(IEEE, ICNIRP, FCC)で指針値の不一致性について指摘されている

# 電波ばく露に対するガイドライン (一般環境)

	電波防護指針 補助指針	ICNIRP(1998)	IEEE Std C95.1-2005 IEEE Std C95.1a <sup>TM</sup> -2010	
周波数 範囲	3 GHz—300 GHz	10 GHz—300 GHz	5 GHz—30 GHz	30 GHz—100 GHz
	10 W/m <sup>2</sup> (人体を占める 領域で平均)	10 W/m <sup>2</sup> (20 cm <sup>2</sup> 平均)	10 W/m <sup>2</sup> (100 λ <sup>2</sup> 平均) (波源より0.2 m 以上遠方の空間)	10 W/m <sup>2</sup> (100 cm <sup>2</sup> 平均) (波源より0.2 m 以上遠方の空間)
局所 ばく露 に対する 指針	100 W/m <sup>2</sup> (体表) <b>20 W/m<sup>2</sup> (眼部)</b> (波源より0.1 m以 上遠方の空間)	200 W/m <sup>2</sup> (1 cm <sup>2</sup> 平均)	$18.56f^{0.699}$ W/m <sup>2</sup> (空間ピーク値)	200 W/m <sup>2</sup> (空間ピーク値)
平均化 時間	6 min.	$68/f^{1.05}$ min. 120 sec.@30 GHz 55 sec.@60 GHz	150/f min. 300 sec.@30 GHz	$25.24/f^{0.476}$ min. 220 sec.@60 GHz

# 電波ばく露に対するガイドライン (一般環境)

周波数 範囲	電波防護指針 補助指針	ICNIRP(1998)	EEE Std C95.1-2005 EE Std C95.1a™-2010	
	100 kHz—300 GHz	100 kHz—300 GHz	30 GHz	30 GHz—100 GHz
ばく露 に対する 指針	$10 \text{ W/m}^2$ (平均) (波源より0.2 m以上の空間)	$10 \text{ W/m}^2$ (平均) (波源より0.2 m以上の空間)	$10 \text{ W/m}^2$ (平均) (波源より0.2 m以上の空間)	$200 \text{ W/m}^2$ 空間ピーク値)
平均化 時間	6 min.	$68/f^{1.05}$ min. 120 sec.@30 GHz 55 sec.@60 GHz	$150/f$ min. 300 sec.@30 GHz	$25.24/f^{0.476}$ min. 220 sec.@60 GHz

- 各指針値での平均化領域・時間の不一致
- 補助指針は国際ガイドラインと比較して低い(安全側)

# 電波ばく露による人体安全性に関する調査・研究

- 10 GHz以上における先行研究は少なく、詳細な検討は実施されてこなかった

## ✓ 人体ばく露特性の明確化

- ばく露量と表面組織での温度上昇の関係

## ✓ 医学・生物学的評価

- *in vivo* 実験による閾値調査
- *in vitro* 実験による非熱作用の有無の調査

## ✓ 適合性評価技術の開発研究

- 実際の無線技術に対する評価技術

電波防護指針の改定  
に向けた調査・検討

適合性評価  
(国際標準化)  
に向けた調査・検討

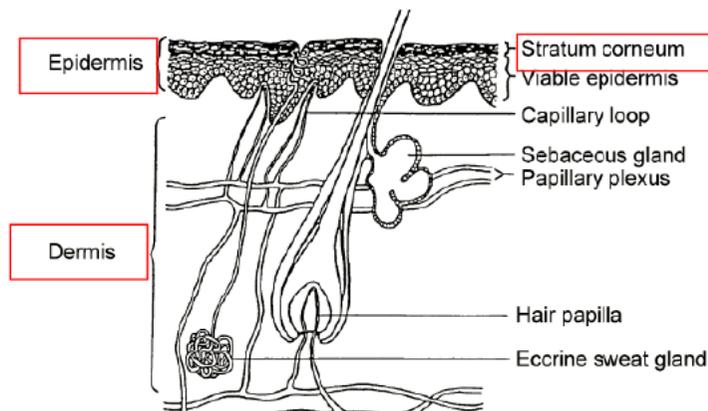
# ばく露量と表面組織での温度上昇の 関係に関する調査研究

温度上昇とばく露量(入射電力密度・比吸収率)の相関を明らかにすることで、電波ばく露による安全を担保するための条件(平均化領域や平均時間)を明らかにする

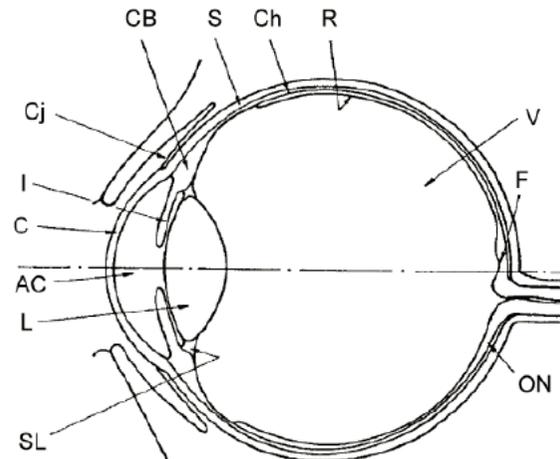
- 生体組織の電気定数
  - ✓ 組織・周波数ごとの電気的な材料定数の把握
- 人体ばく露量の評価技術
  - ✓ 均一なばく露と不均一なばく露
  - ✓ 波源から比較的近い領域と遠方でのばく露
  - ✓ 実験・解析による評価技術
    - 実験・解析の比較による相互の妥当性検証
    - 適合性評価技術の基盤技術

# 生体組織電気定数データの更新

- ばく露量評価を実施する上で、人体を構成する各組織の電氣的な物理定数(電気定数)を把握する必要
  - 従来の電気定数データベースは20 GHzまでの測定に基づいている
- 準ミリ波・ミリ波帯における電気定数が報告されている
  - 皮膚組織; ~ 3 THz
    - 表皮 (*in vivo*, human); 0.1 THz-3 THz
    - 角質およびその下部組織 (*in vivo*, human); 37 GHz-74 GHz
    - 表皮・真皮 (*in vitro*, pig); 0.5 GHz-110 GHz
  - 眼球組織; ~ 100 GHz
    - 角膜, 光彩, 水晶体, 強膜, 硝子体 (*in vitro*, rabbit), 前房水 (*in vitro*, pig)

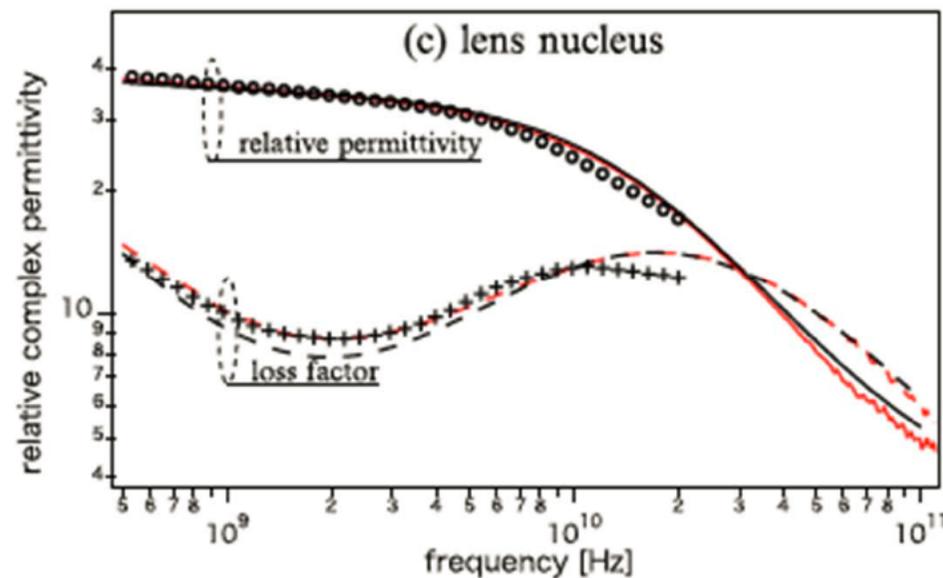
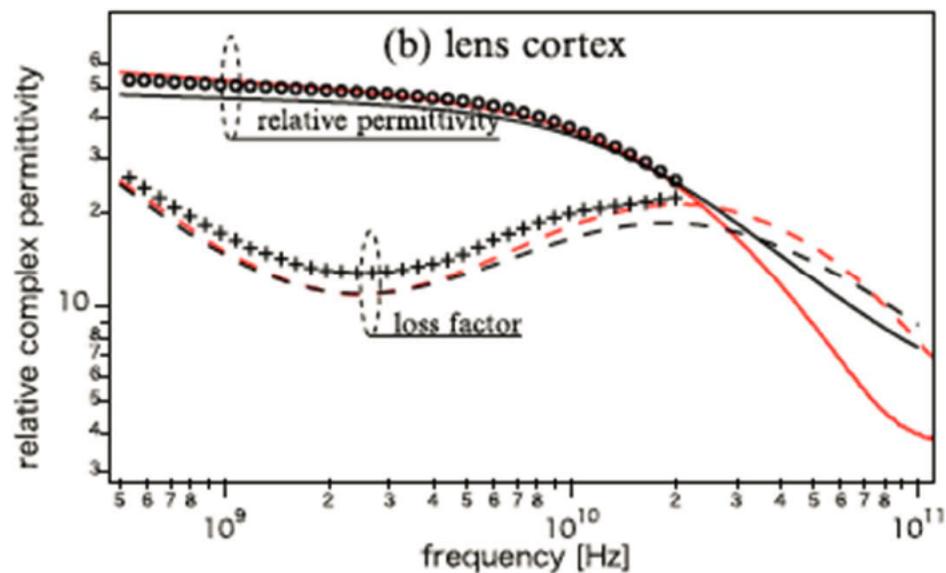
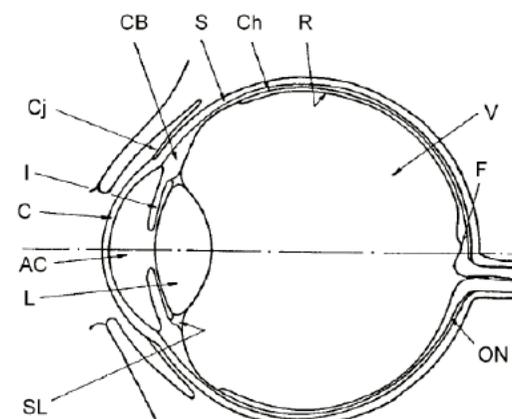
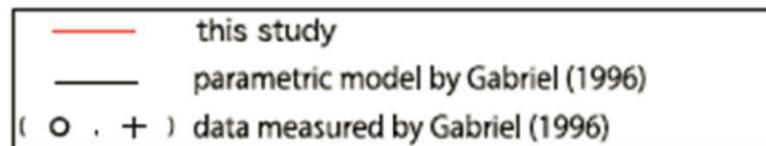
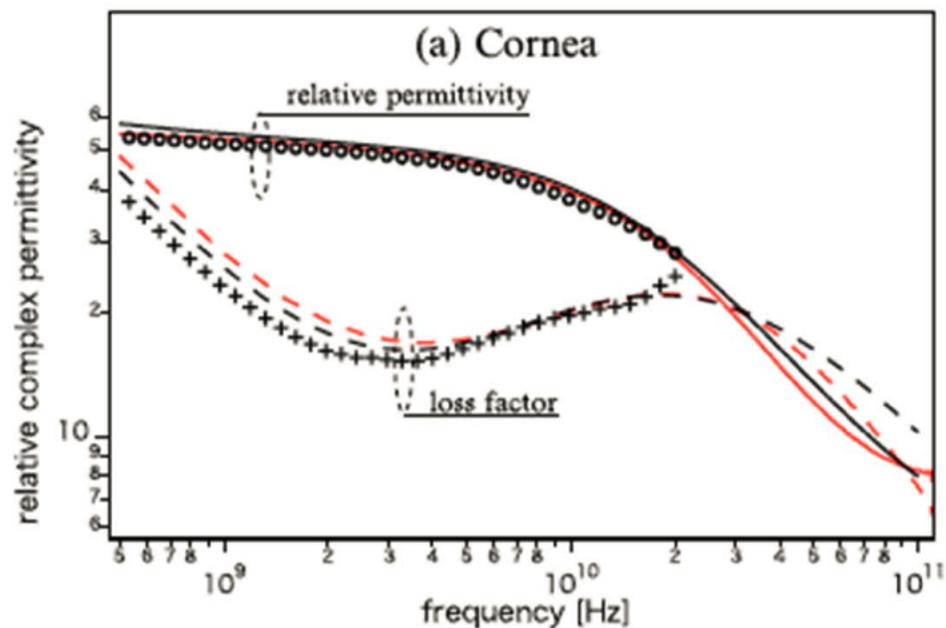


皮膚の構造



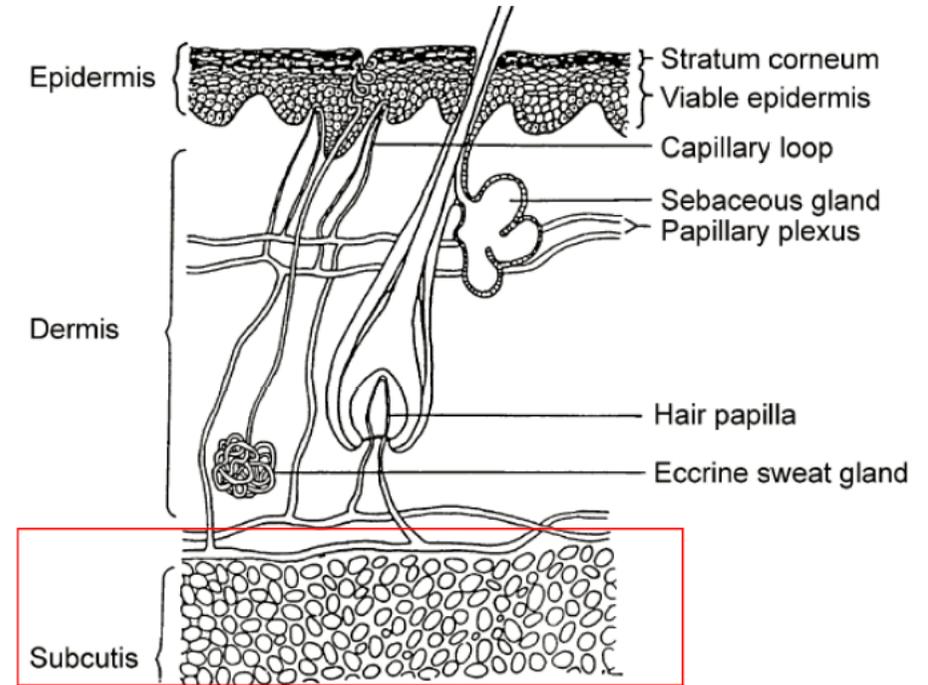
眼部の構造

# 生体組織電気定数データの更新(眼部)



# 生体組織電気定数データの更新 (脂肪)

- 脂肪系組織の電気定数が組織が有する水分量で大きく変化することが明らかとなった。
  - 脂肪系組織の水分量は部位により異なる
  - 電気定数だけではなく、水分量も取得・把握する必要



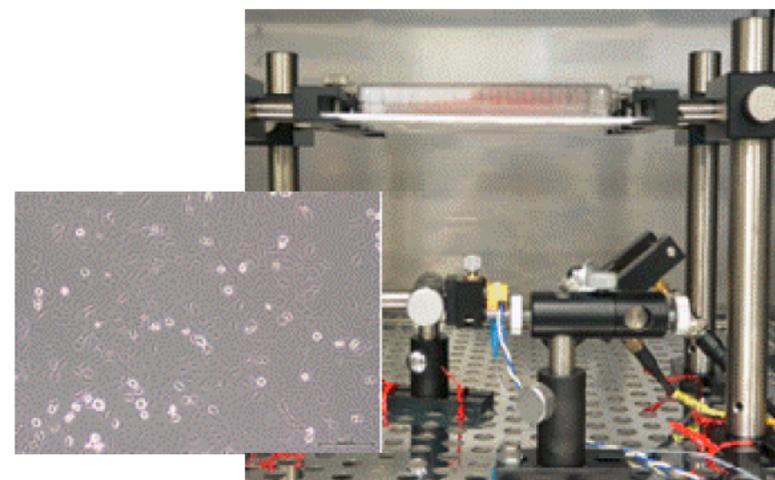
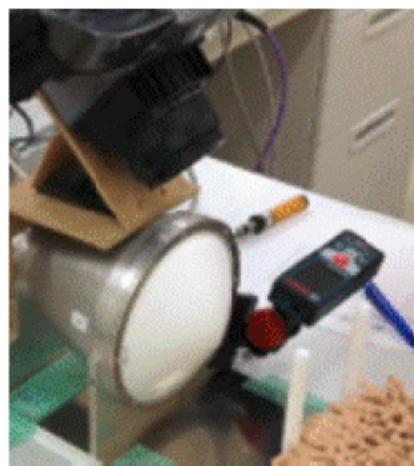
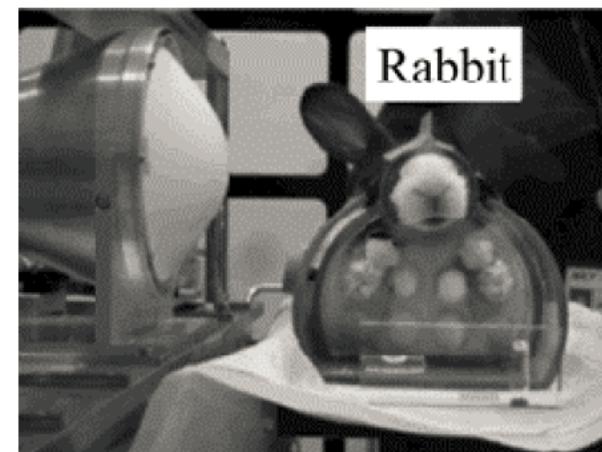
# 入射電力密度と温度上昇の相関例 (波源から比較的離れた場合のばく露)

# 電波ばく露に対する安全性を担保する上での課題

1. 不均一な電磁界ばく露条件下におけるばく露量評価
  - 温度上昇とばく露量(入射電力密度・比吸収率)の相関
    - ✓ 平均化領域や平均時間
2. 全身へのばく露条件下におけるばく露量評価
3. 電波ばく露量の測定技術開発
  - 生体内のばく露量(温度上昇・電力吸収量等)の計測技術
  - 解析値との比較による相互の妥当性検証は特に少ない
4. 熱傷・知覚(温熱・痛覚)閾値のモデル化
  - 実験(動物実験・被験者実験)データに基づき、周波数・ばく露時間・ばく露面積等の条件に対して閾値を補間するモデル

# 総務省委託研究

- ✓ 100 GHz以下のミリ波帯における眼障害閾値の調査研究 (H23～H26)
  - 金沢医大, 首都大, 京大
- ✓ 超高周波の電波ばく露による影響の調査 (H25～H27)
  - 理研・京大・首都大
- ✓ 温熱知覚閾値の調査 (H27～)
  - 福島医大, 東工大



# 総務省委託研究（H27～）

- 超高周波の電波ばく露による眼部等の人体への影響に関する定量的調査
  - ✓ 金沢医科大学, 首都大学東京
- 局所吸収指針の拡張のための生物学的根拠に関する調査
  - ✓ 名古屋工業大学, 東京農工大, 久留米大学
- テラヘルツ波等における非熱作用の有無に関する調査
  - ✓ 理化学研究所, 京都大学

# 電波ばく露に対する安全性を担保する上での課題

- 1. 不均一な電磁界ばく露条件下におけるばく露量評価**
  - 温度上昇とばく露量(入射電力密度・比吸収率)の相関
    - ✓ 平均化領域や平均時間
- 2. 全身へのばく露条件下におけるばく露量評価**
- 3. 電波ばく露量の測定技術開発**
  - 生体内のばく露量(温度上昇・電力吸収量等)の計測技術
  - 解析値との比較による相互の妥当性検証は特に少ない
- 4. 熱傷・知覚(温熱・痛覚)閾値のモデル化**
  - 実験(動物実験・被験者実験)データに基づき、周波数・ばく露時間・ばく露面積等の条件に対して閾値を補間するモデル