

生体電磁環境に関する 過去20年間の工学面からみた研究動向と 2040年を見据えた研究の方向性について

藤原 修

電気通信大学/名古屋工業大学

ドシメトリ/人体組織電気定数/人体数値モデル/電磁波スペクトル/生体影響/ガイドライン

ドシメトリ研究の動向

WHO/ICNIRP/電波防護指針の動向

生体電磁環境に関する研究状況

電波利用の拡大と想定される課題

ドシメトリ研究の方向性

ドシメトリ研究の進展と予測

今後に取り組むべき研究課題(案)

今後 5-10年間の研究課題例

ドシメトリ

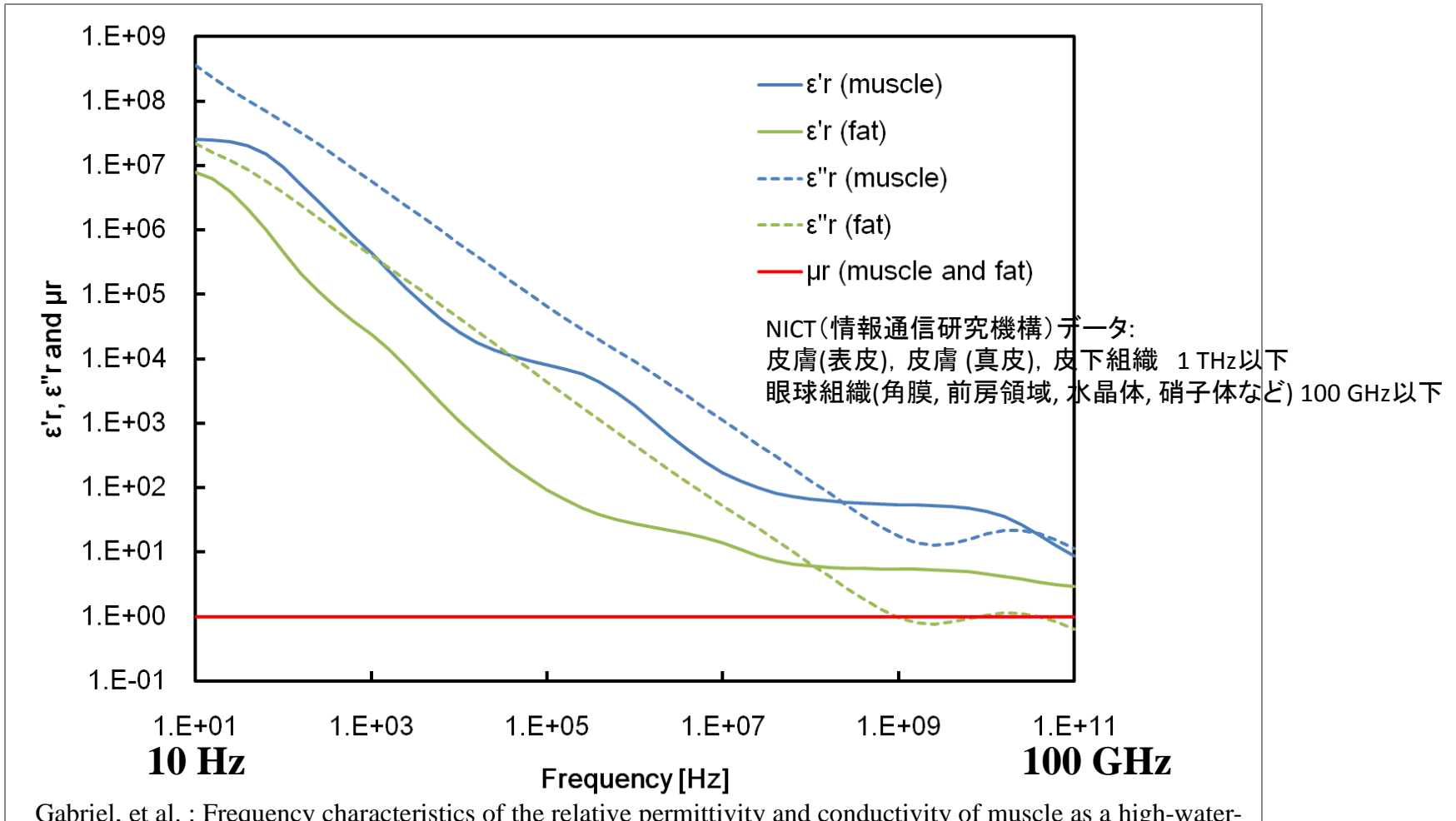
- **Dosimetry:** 電磁界にばく露したヒトまたは細胞，動物における体内電界強度または誘導電流密度，または比吸収率[†] (SAR)分布を測定，または計算によって決定することをいう。

[†] SAR (Specific Absorption Rate [W/kg]): Dose rate, 単位質量あたりの生体組織に吸収される電磁界エネルギーの時間率.

- ドシメトリに不可欠な情報：
 - 人体組織電気定数
 - 人体数値モデル
 - 電磁界の解析，他の場との連成解析，数値計算技法

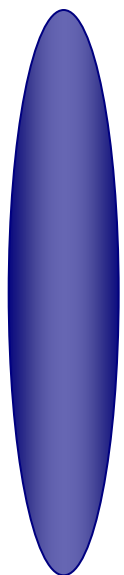
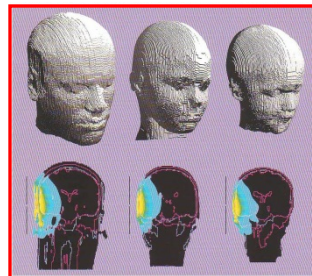
人体組織電気定数

Soichi Watanabe: ICNIRP 7th International NIR Workshop, Edinburgh, United Kingdom, 9-11 May 2012

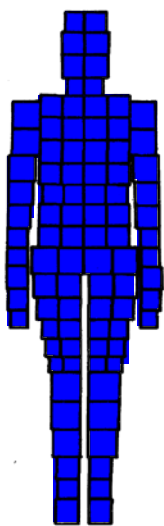


Gabriel, et al. : Frequency characteristics of the relative permittivity and conductivity of muscle as a high-water-content tissue and fat as a low-water-content one, Brooks AFB Report, 1996.

人体数值モデル



C.H. Durney, et al.,
1975

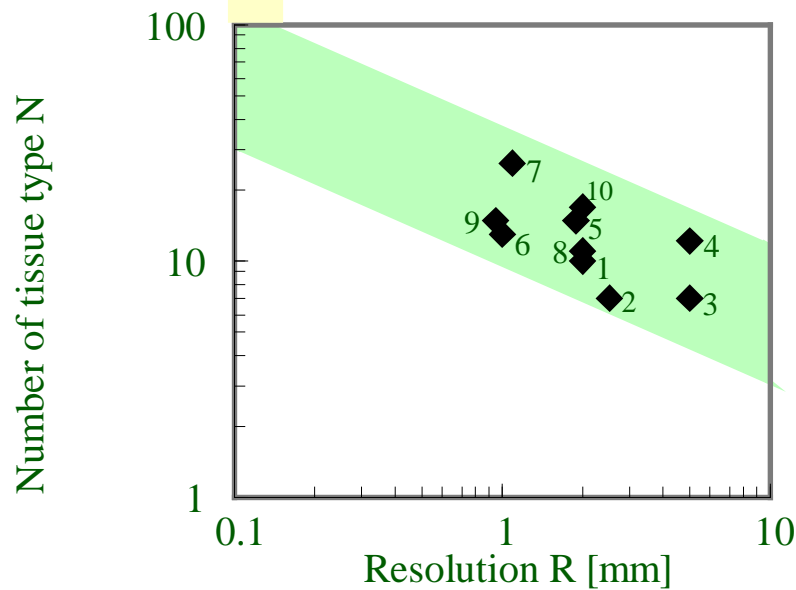


M.J Haggmann, et al.,
1979

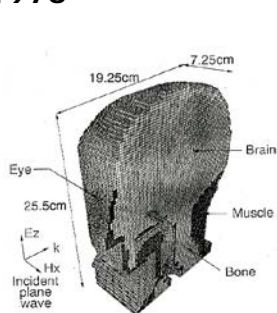


NICT, 2002

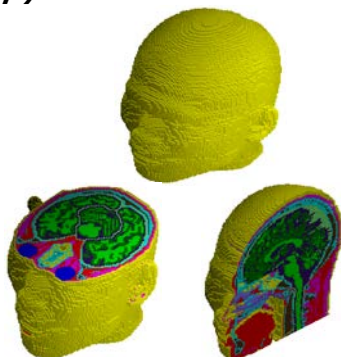
- | | |
|------------------------------|----------------------------|
| 1 Dimbylow, NRPB, 1994 | 6 Kuster, ETH, 1996 |
| 2 Fujiwara, NIT, 1994 | 7 Yale Univ., 1996 |
| 3 Gent Univ., 1995 | 8 NORMAN, NRPB, 1997 |
| 4 Bernardi, Roma Univ., 1996 | 9 Gandhi, Utah Univ., 1998 |
| 5 Gandhi, Utah Univ., 1996 | 10 Fujiwara, NIT, 1999 |



Maximum frequency f_m for numerical analysis [MHz]



名工大(NIT), 1994



名工大(NIT), 1999

人体数値モデル - 続き



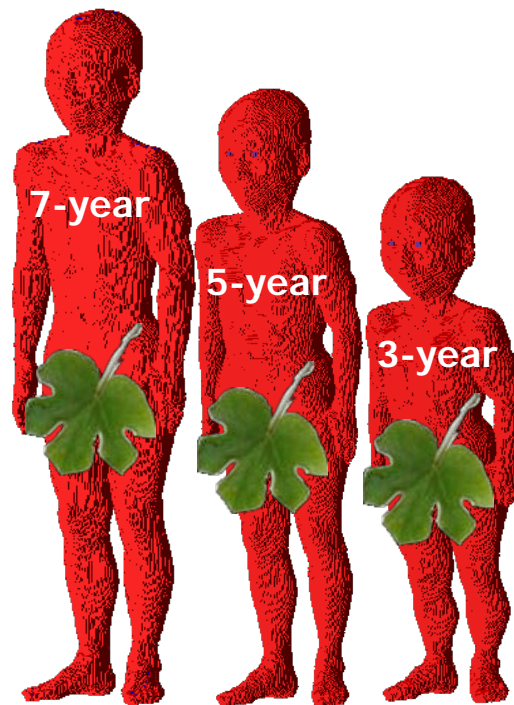
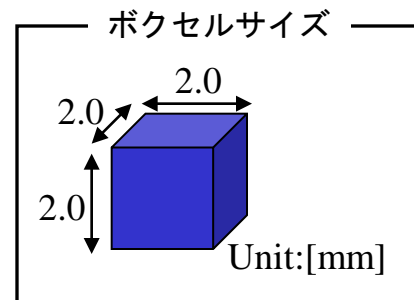
Visible model, 2000
184.2 cm/ 106 kg/ 42



NORMAN model, 1995
176 cm/ 73 kg/ 37

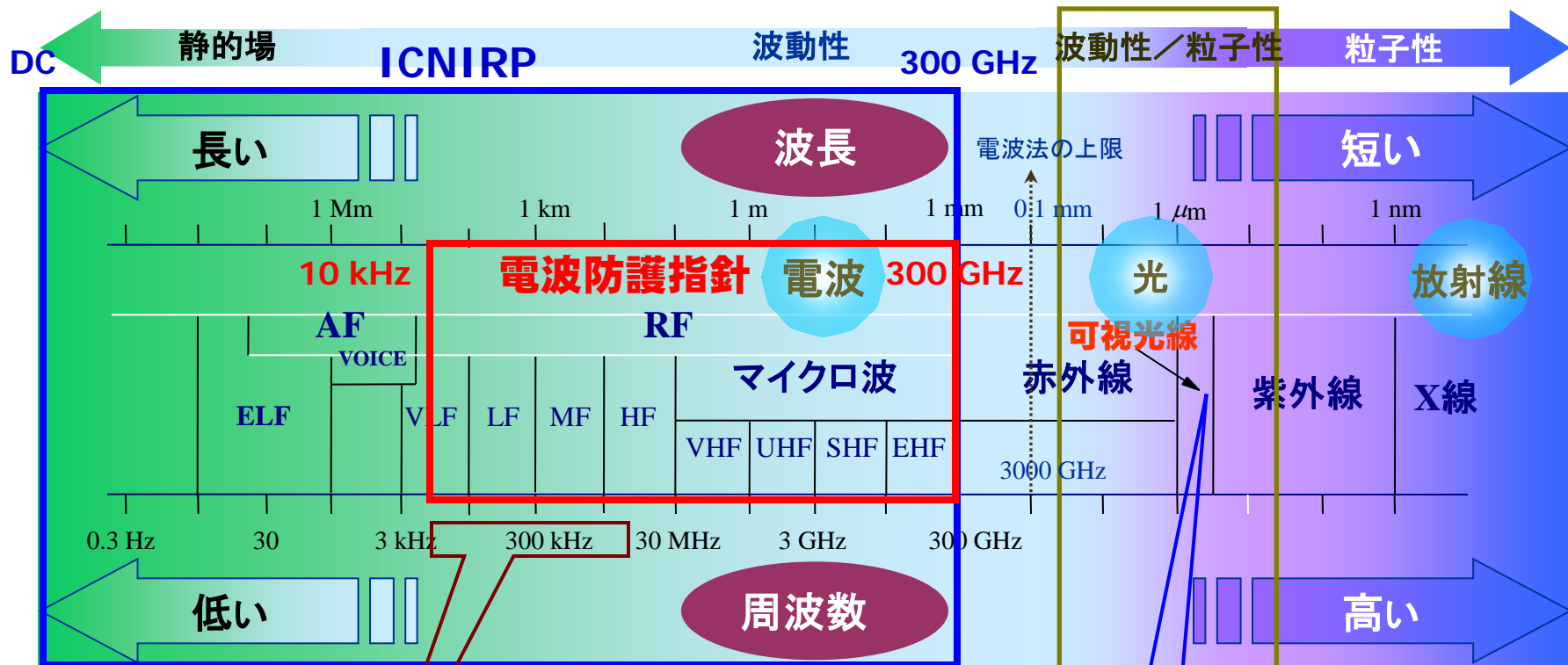


TARO model, 2002
173 cm/ 65 kg/ 51



Child model, 2005

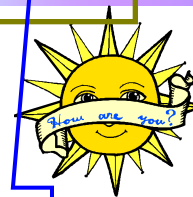
電磁波スペクトル



ワイヤレス電力伝送



ブルーライト



電磁波の生体影響

電流

体内電磁界による誘導作用
100 kHz以上でジュール損による発熱作用
(体温上昇), 100 kHz以下で電流の刺激作用
(神経細胞・感覚器の興奮)

SAR (比吸収率)

E (体内の電界強度)

<2010年 ICNIRPガイドライン改定以降>

Bioeffect

人体が電磁波を浴びて体内に誘導された
電磁界が引き起こす生物学的反応

非電離紫外線, 赤外線などの
共鳴振動による刺激作用
紫外線の殺菌効果, 視細胞や
温受容細胞の興奮

光

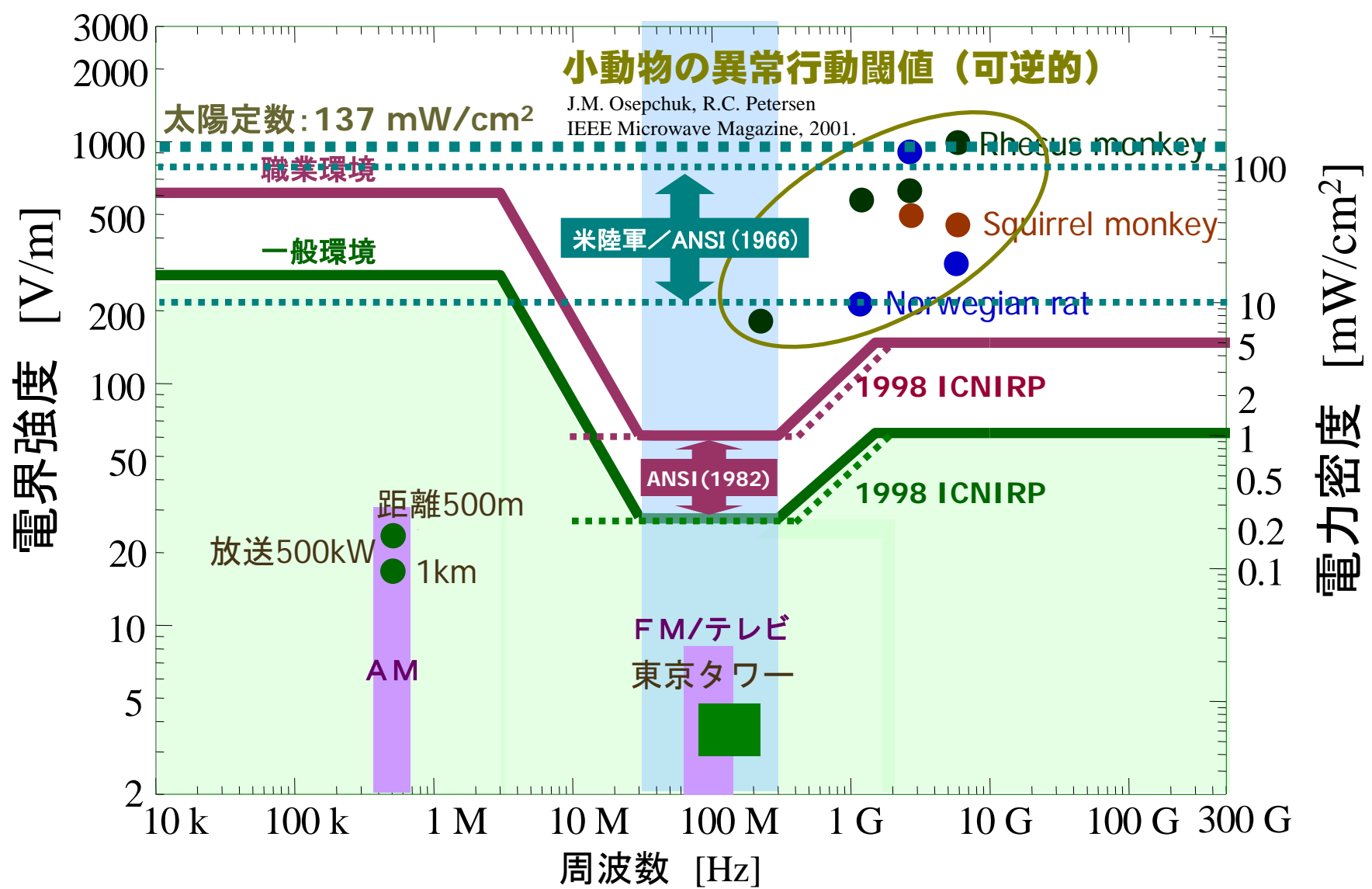
電離

×線, 遠紫外線などの電離放射線
生体組織の構成分子や原子を破壊

SARガイドライン(一般環境)

	総務省諮問 第89号答申	ICNIRP	FCC FCC92-326	IEEE C95.1-2005
公表	1990	1998	1996	2005
周波数	1997年局所吸収指針 100kHz – 3GHz	100kHz – 10GHz	100kHz – 6GHz	100kHz – 3GHz
	6GHz@2011年改正			
局所平均 SAR	2 W/kg@10g 4 W/kg@四肢10g	2 W/kg@10g 4 W/kg@四肢10g	1.6 W/kg@1g 4 W/kg@四肢1g	2 W/kg@10g 4 W/kg@四肢10g
全身平均 SAR	0.08 W/kg	0.08 W/kg	0.08 W/kg	0.08 W/kg
規定時間	6分	6分	30分	6分
平均組織	立方体	同質組織	立方体	立方体

電磁界強度ガイドライン



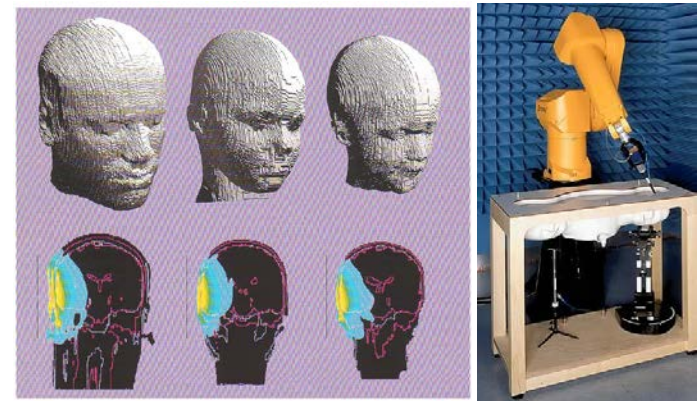
ドシメトリ研究動向1 1999-2006

携帯電話に対する小児/成人ドシメトリ評価

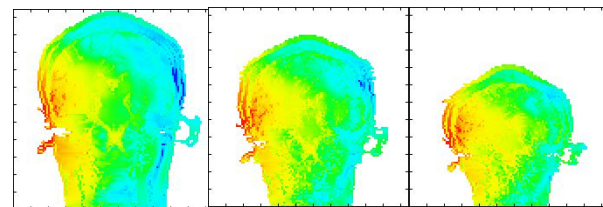
- 小児頭部SAR増大の有無に関する論争
→ 米国, スイスグループの結果の矛盾
→ 日本からその原因を解明
- 多国間の比較検証
日本, 韓国, 米国, フランス, イタリア, ドイツ, スイス, オランダ, スウェーデン, トルコ, カナダ, ブルガリアの12カ国参加
→ 日本開発の幼児頭部モデルを使用
論争の終結に貢献
IEEE EMC Vol.48 No.2 2006 (論文著者:20名)
- 液体ファントムにおける電界プローブ走査式SAR測定法が確立
- 解剖学頭部モデルに対する温度上昇の計算
日本初, 10グラム平均SARと高い相関を解明
→ IEEE, ICNIRP局所SAR基準の統合に導いた
Akimasa Hirata, Masaki Fujimoto, Takayuki Asano, Jianqing Wang, Osamu Fujiwara, Toshiyuki Shinozawa: IEEE EMC Vol.48 No.3 2006



O.P. Gandhi, G. Lazzi, C.M.Furse: IEEE MTT-44 1996



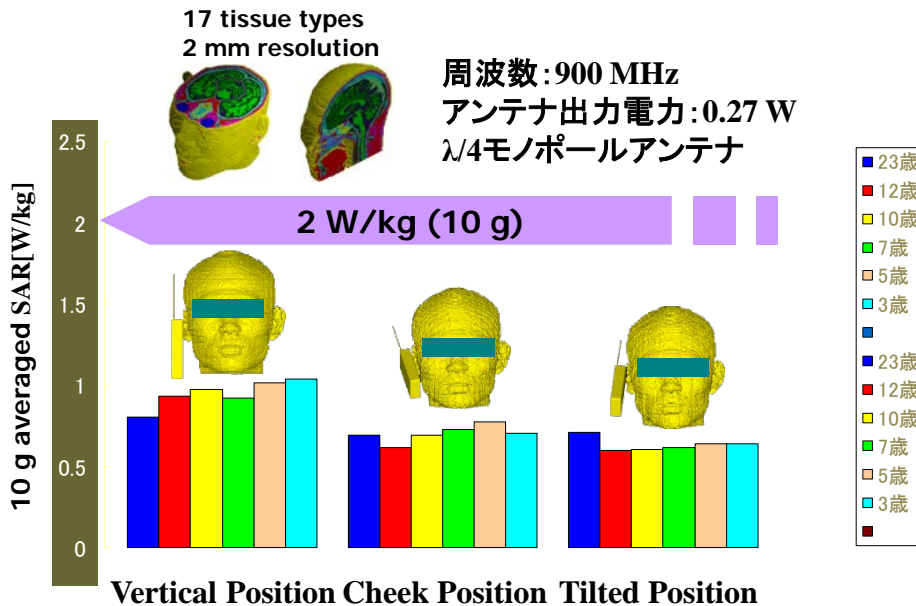
F. Schoenborn, M.Burkhard, N.Kuster: Health Physics1996



Jianqing Wang and Osamu Fujiwara: IEEE MTT-51, 2003

ドシメトリ研究動向2 1999-2007

10グラム局所平均ピークSAR



藤原修, 王建青, 久田智視, 渡辺聡一, 山中幸雄: 電子情報通信学会誌, Vol. J86-B, No. 7, pp. 1219-1224 2003年7月

Electromagnetic fields (EMF)
Radio Frequency fields: Environmental Health Criteria Monograph (Draft). Consultation on the scientific review for the upcoming WHO Environmental Health Criteria. The consultation was open until 15 November 2014

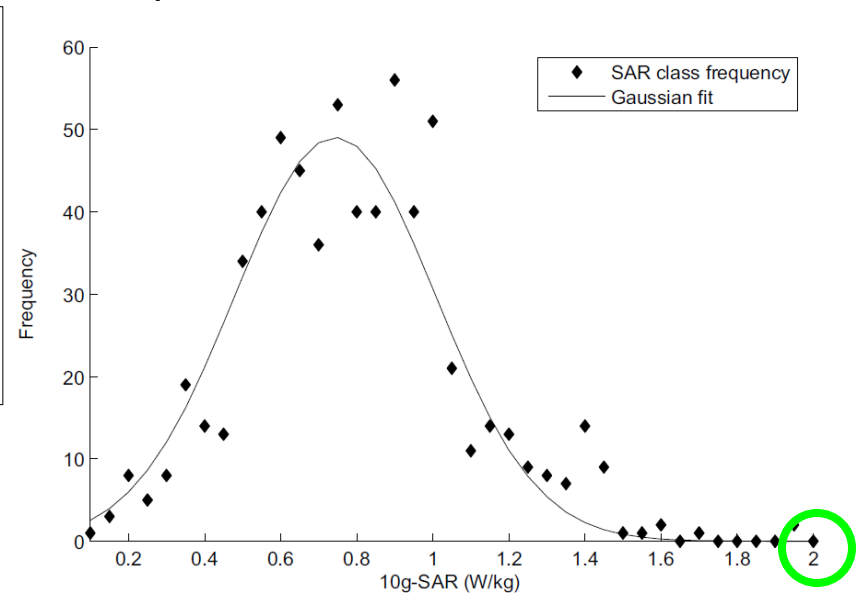
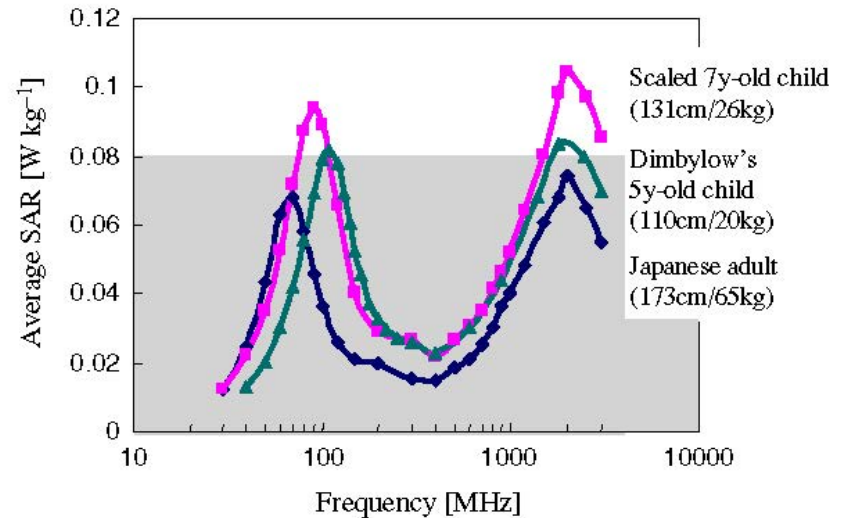
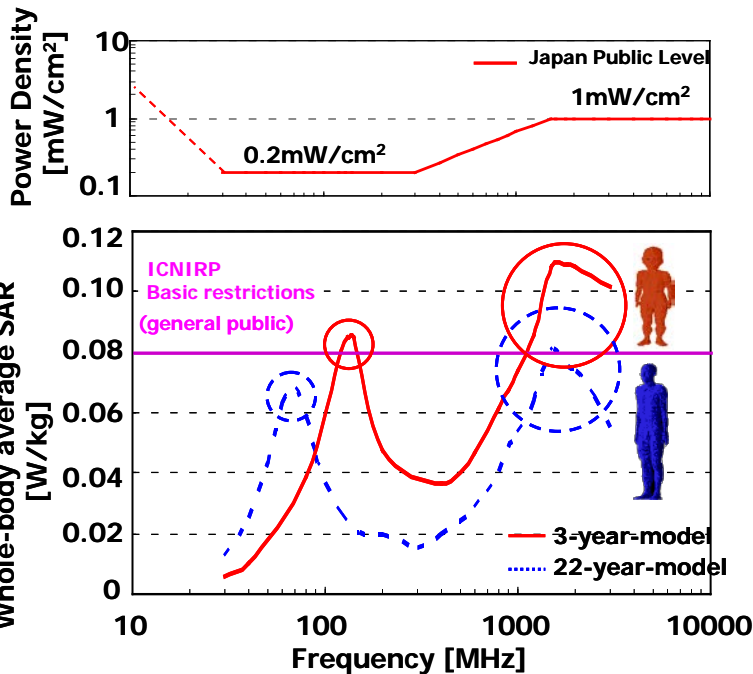
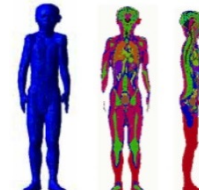
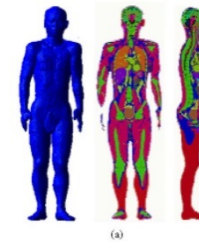


Figure 2.20. Statistical distribution of maximum 10 g averaged measured for 668 mobile phones according to 1185 standard EN50361 (CENELEC, 2001). Data from German Federal Office for Radiation Protection, in Kühn & 1186 Kuster (2007).

ドシメトリ研究動向3 2006-2012

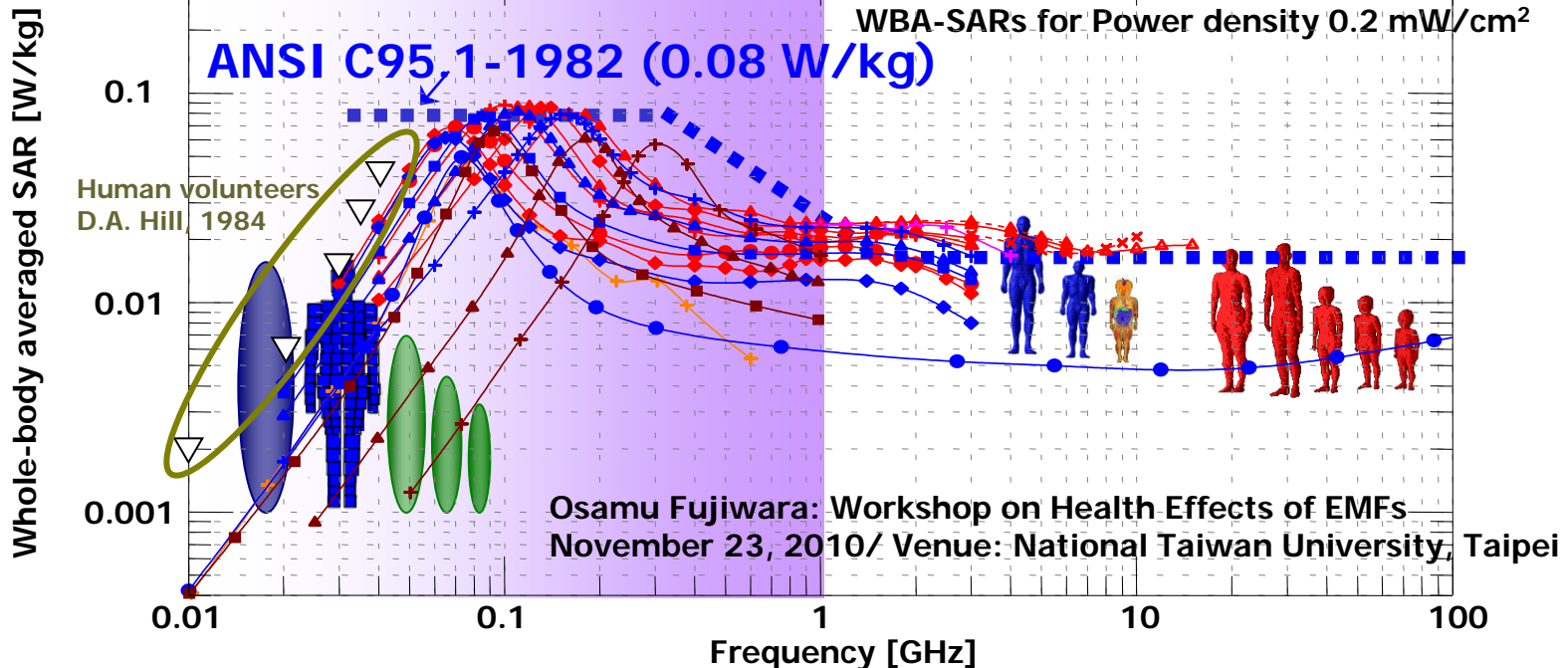
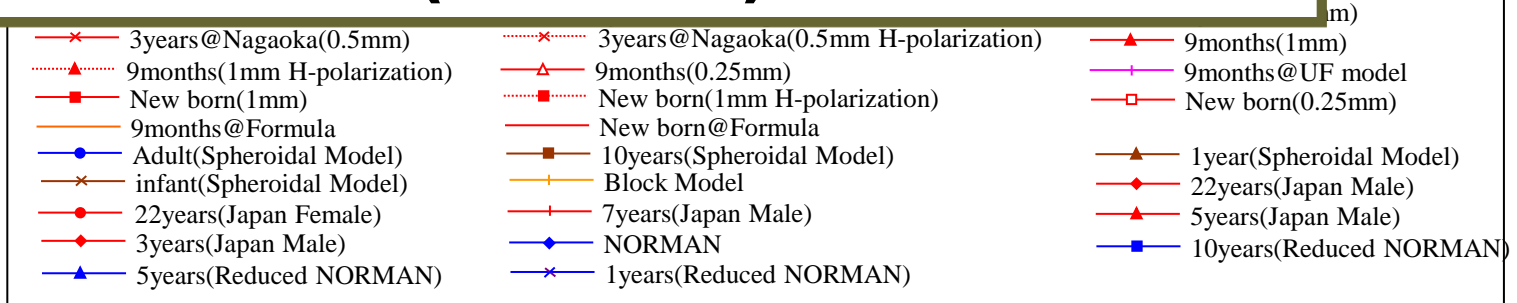
全身平均SARの共振特性

- 解剖学人体モデルに対するSAR周波数特性の計算
 → 日本, 英国から, 共振周波数における小児全身SARの問題提起
 国際的安全指針の妥当性向上に寄与



ドシメトリ研究動向4 2006-2012

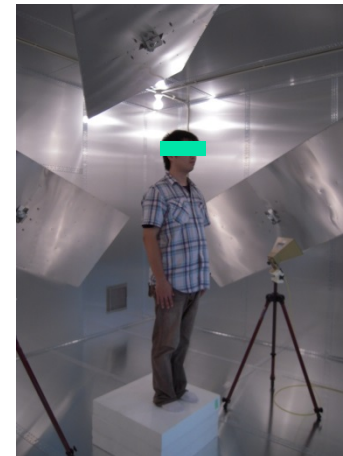
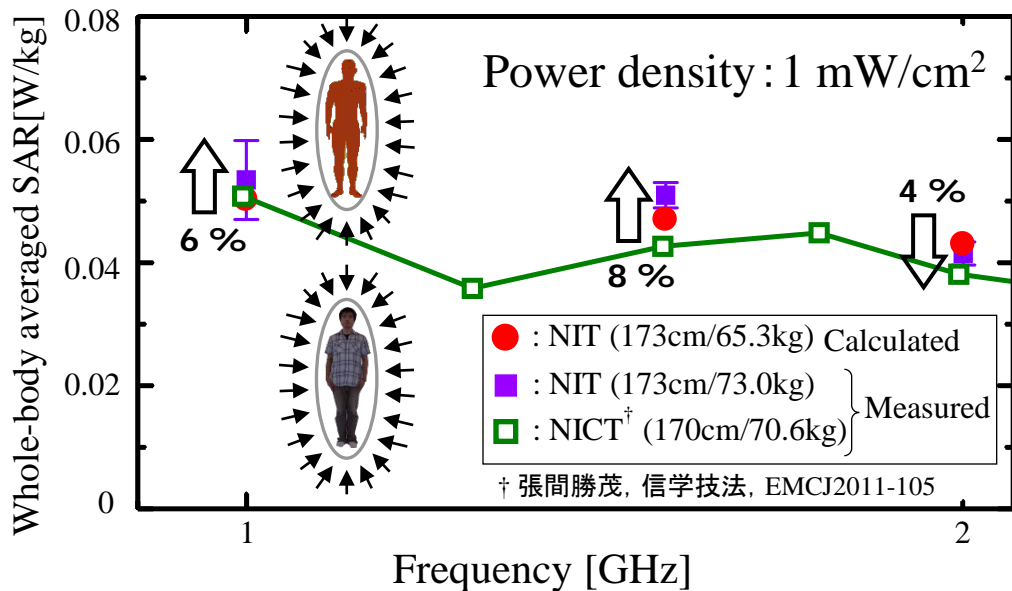
全身平均SAR(一般環境)の周波数依存性



ドシメトリ研究動向5 2006-2012

反射箱による全身平均SARの測定

- 反射箱を用いたボランティアに対する全身平均SAR測定
→ GHzで世界唯一の実測データ
MHz帯における36年前の米国の測定データ以来

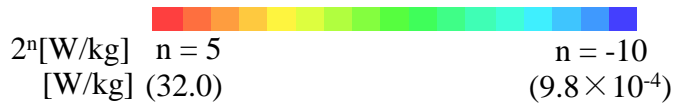


ボランティア実験

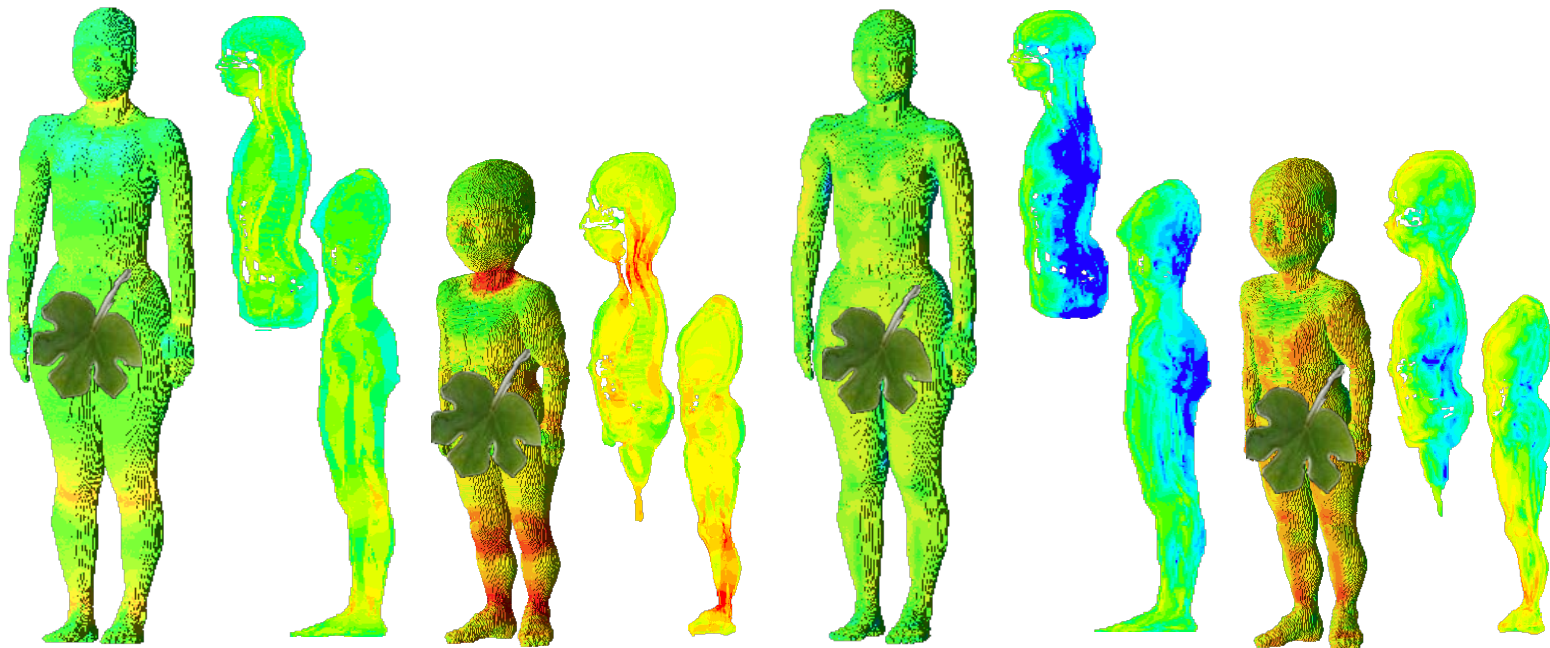
† J. Wang, T. Suzuki, O. Fujiwara and K. Harima, Phys. Med. Biol., vol.57, pp.7893-7903, 2012

ドシメトリ研究動向6 **2006-2012**

SAR(一般環境)の体表・体内分布



全身平均SAR : 0.08W/kg



Female
70 MHz

3-years
130 MHz

Female
2.0 GHz

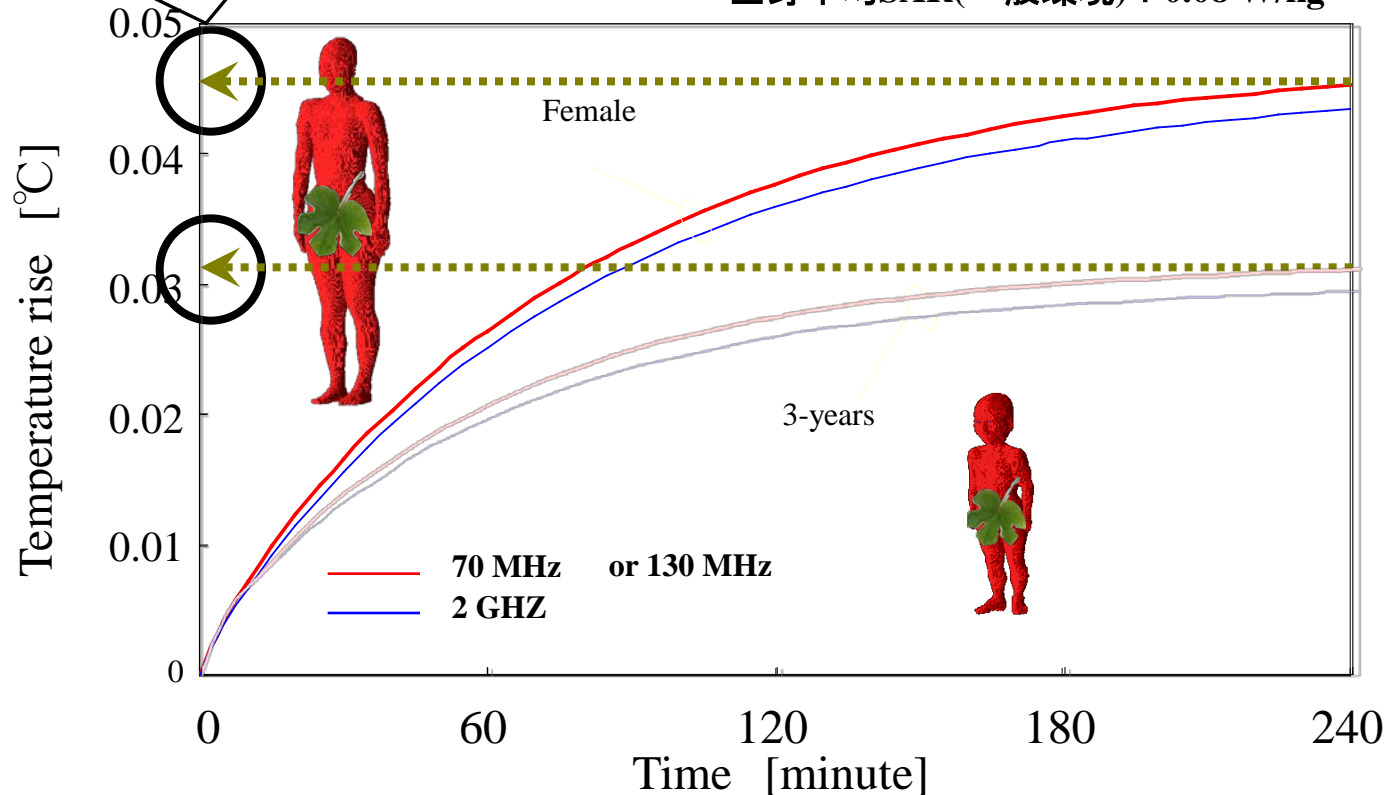
3-years
2.0 GHz

ドシメトリ研究動向7 2006-2012

体内深部温度上昇

基礎代謝からの推定値：0.04 ~ 0.08 °C

全身平均SAR(一般環境)：0.08 W/kg



ドシメトリ研究動向8 2000-2016

小動物ばく露装置のドシメトリ設計

- ラットへの2時間の携帯電話電波照射で血液脳関門 (BBB)透過性に影響
→ 非熱効果の存在の論争
- 熱影響を引き起こさない頭部へ局所的高ばく露装置の設計理念の提唱と実践
- 米国, フランスとの共同研究を含め, 一連の動物実験を通じて, 熱効果と解明, WHOデータベースに採録
- 動物全身ばく露実験
反射箱型ばく露装置が主流: 米国国家毒性プログラム(NTP), フランス, 韓国
日本→2GHz, 6GHz, 10GHz実施

J. Shi, J. Chakarothai, J. Wang, K. Wake, S. Watanabe and O. Fujiwara:
IEICE Trans. Commun., vol.E98-B, no.7, pp.1164-1172, July 2015

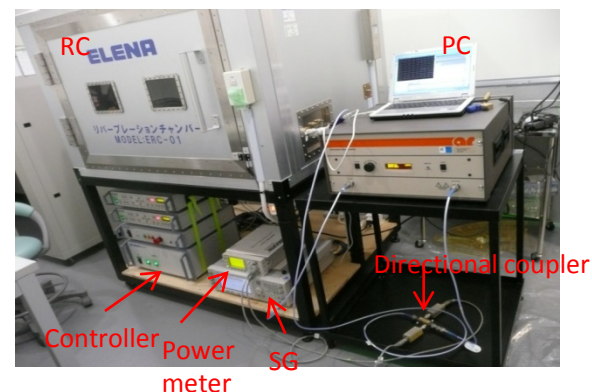
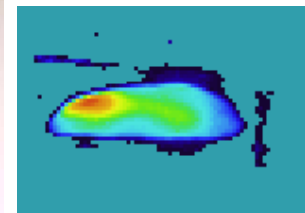
反射箱内におけるドシメトリ技術として,

- 電界測定+数値解析のハイブリッド法
- Sパラメータ測定法
- MoM数値解析法

3種類を提案・検討, 世界で初めて**妥当性を実証**

J. Chakarothai, J. Shi, J. Wang, O. Fujiwara, K. Wake and S. Watanabe:
IEEE EMC Magazine, vol.4, no.1, pp.57-66, Feb. 2015

→ 今後の全身ばく露実験(NTP検証実験を含め)に有用



WHO/ICNIRP/電波防護指針の動向

平成

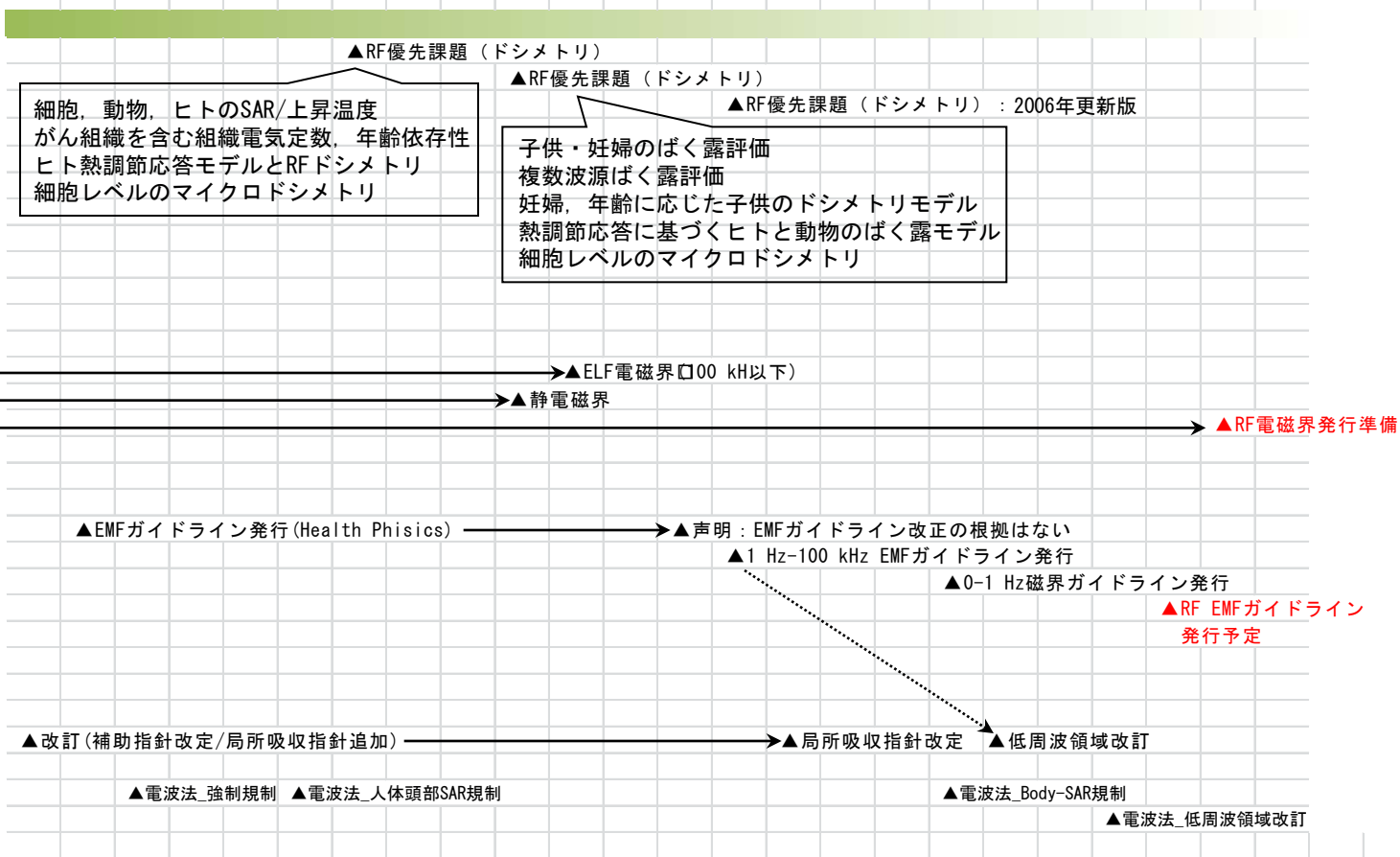
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

WHO
国際電磁界プロジェクト
(1996年発足)

WHO環境保健クライテリア (EHC)
1984: ELF電磁界
1987: 静的ELF磁界
1993: RF電磁界

ICNIRP

電波防護指針
(1990年6月制定)



生体電磁環境に関する研究状況

平成

9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

▲発足 ▲中間報告 ▲終了(23回)

- ◎ヒトへの短期的影響
- ◎疫学研究
- ◎発がんへの影響
- ◎脳微小循環動態への影響
- ◎脳組織・脳機能への影響
- ◎眼球への影響
- ◎細胞生物学的影響評価
- ◎生体ラジカル
- ◎ドシメトリ

- ▲WHO優先課題を考慮した研究すべき抽出課題：
 - ・ヒトへの影響：電磁過敏症を含む
 - ・長期ばく露の疫学調査：小児、若年期、成人の携帯電話使用と健康
 - ・動物実験：免疫系、局所ばく露、複数電波ばく露、ミリ波の眼球ばく露
 - ・細胞実験：機構解析、免疫細胞、神経膠細胞のマイクロ波ばく露影響
 - ・ばく露評価実験：子供に対するSARと体内深部温度上昇、電磁界強度指針の妥当性評価

- ・小児/成人モデルの人体全身平均SAR
- ・パルス電波の生体安全性評価

▲発足 ▲第一次報告

- ◎生体影響のリスク評価：疫学調査、ヒトへの影響、動物実験、細胞実験
- ◎電波の安全性評価技術：高精度吸収解析、熱応答解析、小動物ドシメトリ
ドシメトリ：小児に対する人体全身平均SARと体内深部温度
複数電波複合ばく露の生体影響
中間周波数帯電磁界と人体との間接結合の影響

◎埋め込み型医療機器への影響調査

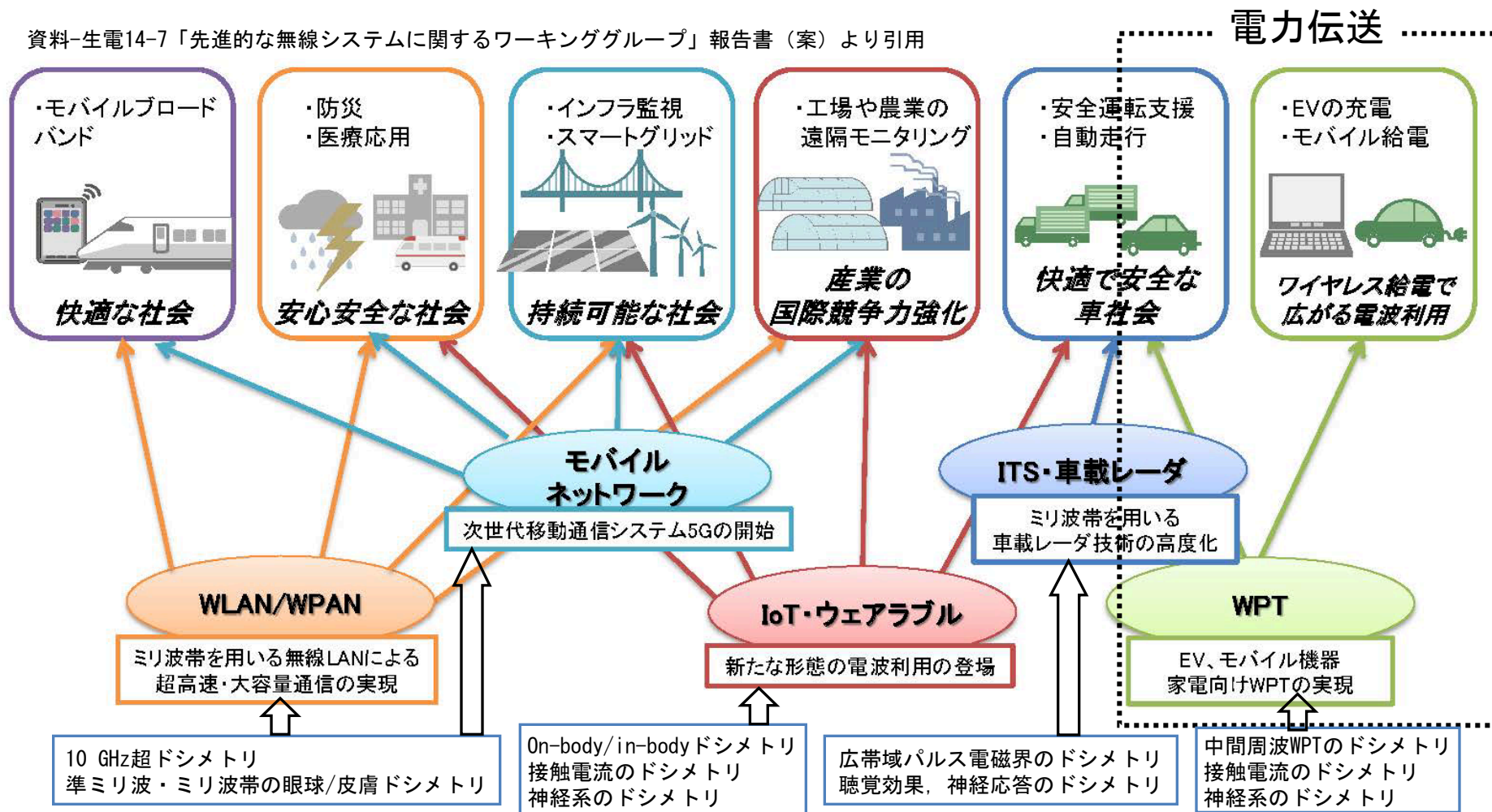
- ◎ミリ波ばく露温熱知覚閾値
- ◎電波ばく露のリスク評価
- ◎中間周波帯の非熱的作用
- ◎眼部等の超高周波ばく露
- ◎局所吸収指針の生物学的根拠
- ◎テラヘルツ帯の非熱作用有無に関する調査
- ◎準ミリ波・ミリ波ばく露の生体作用調査
- ◎中間周波に係る疫学調査
- ◎中間周波の神経作用の調査
- ◎細胞レベルでの電波の影響調査

生体電磁環境研究推進委員会
座長：上野照剛先生

生体電磁環境に関する検討会
座長：大久保千代治先生

電波利用の拡大と想定される課題

資料-生電14-7「先進的な無線システムに関するワーキンググループ」報告書（案）より引用



複数周波源ドシメトリ/準ミリ波・ミリ波帯の細胞/小動物ばく露装置のドシメトリ設計/
 年齢別ヒト組織電気定数のデータベース化/メッシュタイプ人体数値モデル（胎児，妊婦，小児，成人，老人）

ドシメトリ研究の方向性

- 電波防護指針の改訂とICNIRP(IEEE)/WHOとの整合性
- 電波防護指針値に対する適合性評価
- 電波防護指針の根拠のさらなる明確化
 - ヒト組織電気定数のデータベース化
 - 高精度人体数値モデルの開発
 - 細胞膜を考慮した人体数値モデルの開発
 - 細胞・小動物ばく露装置の開発, 標準ばく露評価系
 - IoT/ウェアラブル医療センサ/医療機器の安全性評価技術

ドシメトリ研究の進展と予測 1

	高周波帯解析計算	温熱解析	人体モデル
1980	解析解	—	球体, 楕円体など
1990	FDTDと解析解の併用	—	人体形状
2000	FDTD大規模電磁界解析 (1 GHz)		詳細人体ボクセルモデル : 数mm
2010	FDTD大規模電磁界解析 (主に~6 GHz以下)	大規模熱解析	詳細人体ボクセル/メッシュモデル : 数mm以下
2020	FDTD大規模電磁界解析 (100 GHz以下)	大規模熱解析+全身温熱生理解析+局所温熱解析	詳細人体ボクセル/メッシュモデル : 1 mm以下 現実的な組織厚など
2030~	新たな大規模電磁界解析 (光領域との整合)	大規模熱解析+全身温熱生理解析+局所温熱解析	詳細人体ボクセル/メッシュモデル : 0.25 mm以下

FDTD: Finite-Difference Time-Domain

ドシメトリ研究の進展と予測 2

	中間周波帯解析計算	神経応答解析	人体モデル
1980	解析解	—	球体, 楕円体など
1990		—	人体形状
2000	SPFD・インピーダンス法など大規模電磁界解析: 1日～数時間		詳細人体ボクセルモデル: 数mm, 但し、誤差2-3倍 (reduction factor)
2010	計算の高速化: 1時間以内, 誤差の補正方法	末梢神経系の応答	詳細人体ボクセル/メッシュモデル: 数mm以下
2020	細胞膜を考慮した組織ごとの高精度なドシメトリ	中枢神経系脳応答, 刺激閾値調査	詳細人体ボクセル/メッシュモデル: 1 mm以下, 現実的な組織厚など
2030～		神経網を考慮したドシメトリ(人種差, 年齢差など)	詳細人体ボクセル/メッシュモデル: 0.25 mm以下

SPFD: Scalar Potential Finite-Difference

今後に取り組むべき研究課題(案)

平成

27 28 29 30
2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027 2028 2029 2030 2031 2032 2033 2034 2035 2036 2037 2038 2039 2040

2008年発足

- ◎ミリ波ばく露温熱知覚閾値
- ◎電波ばく露のリスク評価
- ◎中間周波帯の非熱的作用
- ◎眼部等の超高周波ばく露
- ◎局所吸収指針の生物学的根拠
- ◎テラヘルツ帯の非熱作用有無に関する調査
- ◎準ミリ波・ミリ波ばく露の生体作用調査
- ◎中間周波に係る疫学調査
- ◎中間周波の神経作用の調査
- ◎細胞レベルでの電波の影響調査

- 人体組織電気定数/人体数値モデル/数値技法/測定法
- 年齢別ヒト組織電気定数の広帯域データベース化
- メッシュ構造人体数値モデル(胎児、妊婦、小児、成人)
- 低周波・中間周波帯の細胞膜を考慮した人体数値モデル

- ばく露装置/測定法
- 細胞・小動物ばく露装置のドシメトリ設計、標準ばく露評価系

生体電磁環境に関する検討会
座長：大久保千代治先生

電波防護指針の改訂/整合化

- 6/10 GHz超の局所吸収指針
- 10 GHz超電力密度の平均化面積/時間
- 10 cm未満の電波放射源に対する適用性
- 局所SARの平均化組織形状

- 30 GHz超のばく露ドシメトリ/適合性評価
- サブミリ波の眼球/皮膚ばく露ドシメトリ/適合性評価
- 広帯域パルス電磁界のばく露ドシメトリ/適合性評価
- テラHz・光ガイドラインとの整合性

電波防護指針根拠の明確化

- 6/10 GHz超のばく露ドシメトリ(SARと電力密度との整合性)
- on-bodyドシメトリ評価
- 低周波/中間周波数帯WPTドシメトリ評価
- 間接作用のばく露評価(多周波接触電流)
- 準ミリ波・ミリ波の眼球/皮膚ドシメトリ評価
- 広帯域パルス電磁界のドシメトリ評価
- 複数周波源ドシメトリ評価
- 神経系のドシメトリ評価
- 生体医療機器の安全性評価技術

- 300 GHz超のばく露ドシメトリ
- on-body/in-bodyばく露適合性評価
- 中間周波/マイクロ波のWPTばく露ドシメトリ/適合性評価
- 間接作用のばく露適合性評価(多周波接触電流)
- サブミリ波の眼球/皮膚ばく露ドシメトリ/適合性評価
- 広帯域パルス電磁界のばく露適合性評価
- 複数周波源からのばく露適合性評価
- 神経網のドシメトリ評価

今後5-10年間の研究課題例1

5G(6GHz/28GHz帯)電波ばく露評価

【背景・特徴】

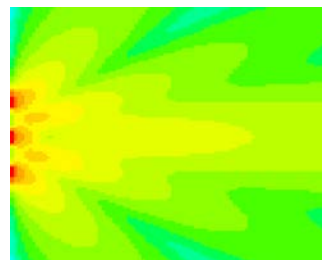
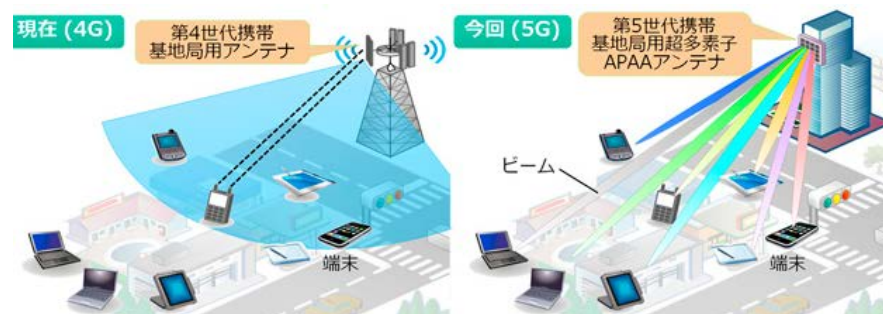
- アレーアンテナシステムによるビーム状ミリ波の人体ばく露
- 電波は人体内部へ侵入せず、皮膚表面が強くばく露

【課題】

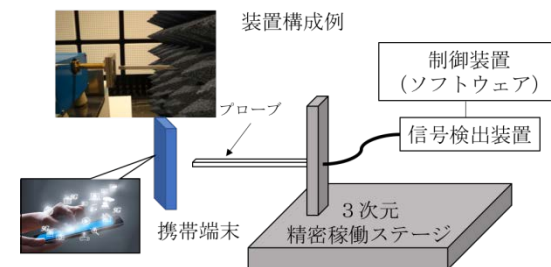
- 5Gの新しい電波利用環境での健康リスクの解明
- 電波防護指針値に対する適合性評価技術の確立

【具体的内容】

- (1) 次世代基地局による電波ばく露の生体影響調査
 - 長期間動物実験, 細胞実験による生体影響の解明
 - 高精度な**ばく露形態を模擬した電波ばく露装置**の開発
 - 無用な論争を引起こさないためのばく露装置設計が肝心
- (2) 人体ばく露量を評価するための測定法の構築
 - 従来のSAR測定法に代わる技術の開発
 - **電界・電力密度測定, 平板ファントム**
- (3) 人体に対する疫学調査



ばく露形態



ばく露測定法

今後5-10年間の研究課題例2

低周波/中間周波ドシメトリ

【背景・特徴】

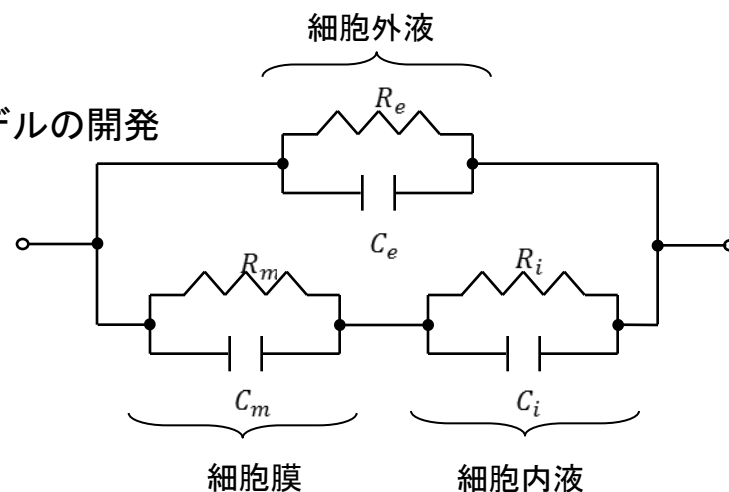
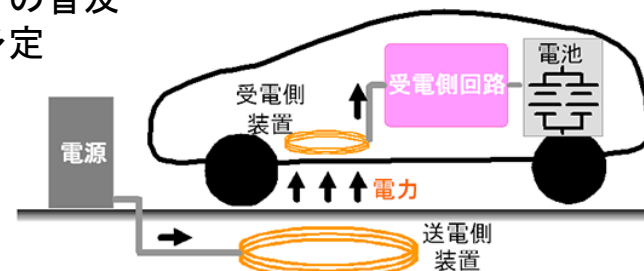
- ワイヤレス給電（自動車の80kHz，消費者電子機器の6.8MHz等）の普及
- 生体影響調査のための細胞実験，動物実験が実施中，または実施予定
- ドシメトリ評価は，従来の高周波数値モデルを流用

【課題】

- ドシメトリ技術の妥当性評価は十分か
- 人体数値モデルは妥当か
→細胞膜は高周波領域で $1/\omega C$ で無視できるが，
低周波・中間周波で無視してよいか

【具体的内容】

- (1) 低周波・中間周波におけるドシメトリ解析用人体数値モデルの開発
→細胞膜の効果を考慮
→その妥当性実証のための実験また理論解析
- (2) 上述数値モデルに適する数値ドシメトリ解析技術の確立
→これまでの解析結果との比較検証
- (3) 動物実験におけるばく露量設計・評価への適用
→国際的問題提起，合意得ること



今後5-10年間の研究課題例3

広帯域パルス電磁界の電波ばく露評価

【背景・特徴】

- 数百MHz/数GHz広帯域，超広帯域通信方式の普及
- 自動車を含むパルスレーダーの多用
- 電磁パルスを用いた病気治療への注目
→神経系刺激効果/熱効果の**複数の生体影響が同時に存在**

【課題】

- 生体影響解明のためのパルス波ばく露装置の開発
- 神経系の刺激電流測定技術，数値評価技術の確立
- SA/SAR測定，数値計算による適合性評価技術の確立

【具体的内容】

- (1) 各種パルスばく露の生体影響の検討を可能とするべく露装置の開発
→**国際的に合意が得られる汎用ばく露装置の確立**が重要
- (2) 実験動物や細胞における刺激電流の測定手法の確立
→生体影響の定量化に不可欠
- (3) パルス信号に対する数値ドシメトリ技術の確立
→適切な細胞モデル，人体数値モデルの開発
→刺激電流計算技術，SA計算技術，SAR計算技術の確立
- (4) パルス電磁界に対する適合性評価系の構築

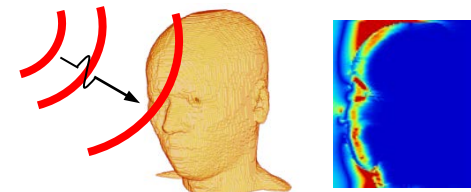


レーダによる車間距離測定(イメージ)



レーダによる周囲監視(イメージ)

自動車レーダ



パルス電波ばく露のドシメトリ評価

今後5-10年間の研究課題例4

IoT/ウェアラブル生体医用機器の安全性評価技術

【背景・特徴】

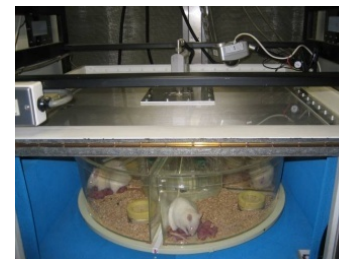
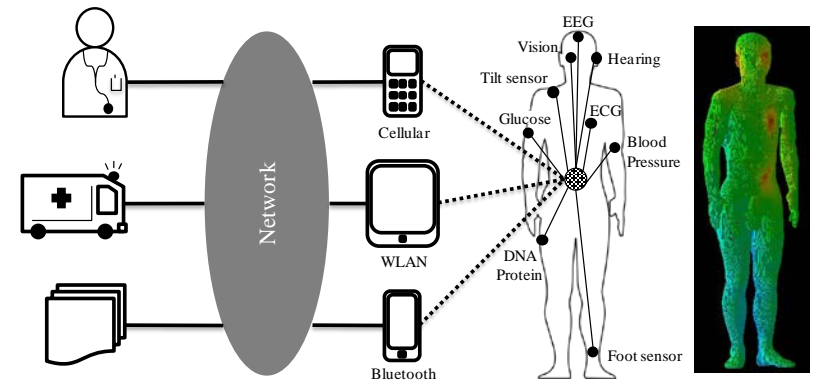
- 人体周辺，体表，体内に無線通信機能を有するセンサが多数分布
- 単一周波ではなく，**複数周波 (MHz~GHz)**，多様な変調方式
- 1日24時間の長期間ばく露
- **自動運転**に伴い各種の車載センサーにも展開

【課題】

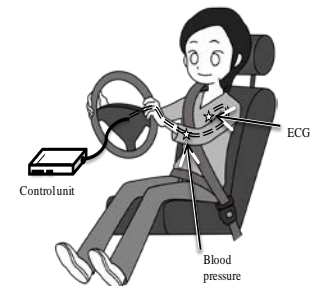
- 複数周波に対する生体影響の解明のためのばく露装置の開発
- 生体センサ・生体機器の誤動作可能性の評価
- 複数周波ばく露に対する適合性評価技術の確立

【具体的内容】

- (1) 長期複数周波による電波ばく露の動物実験，細胞実験
→これまでの実施例†は日本の1件(名市大・白井先生)だけ
→**国際的に合意が得られる汎用なばく露装置の確立**が重要
→体内ばく露と体外ばく露との異なる影響の可能性を解明
- 生体センサ・機器電子回路の電波ばく露による誤動作の機構解明，イミュニティ向上策の検討(EMC研究課題)
- 広帯域複数周波同時ばく露に対する適合性評価法の構築
→各々の周波数の評価だけで十分かを解明



複数周波ばく露装置



† T. Shirai, J. Wang, M. Kawabe, K. Wake, S. Watanabe, S. Takahashi, O. Fujiwara:
Journal of Radiation Research, DOI: 10.1093/jrr/rrw085, Sept. 2016.

ご清聴ありがとうございました