

生体電磁環境に関する研究戦略検討会(第4回)

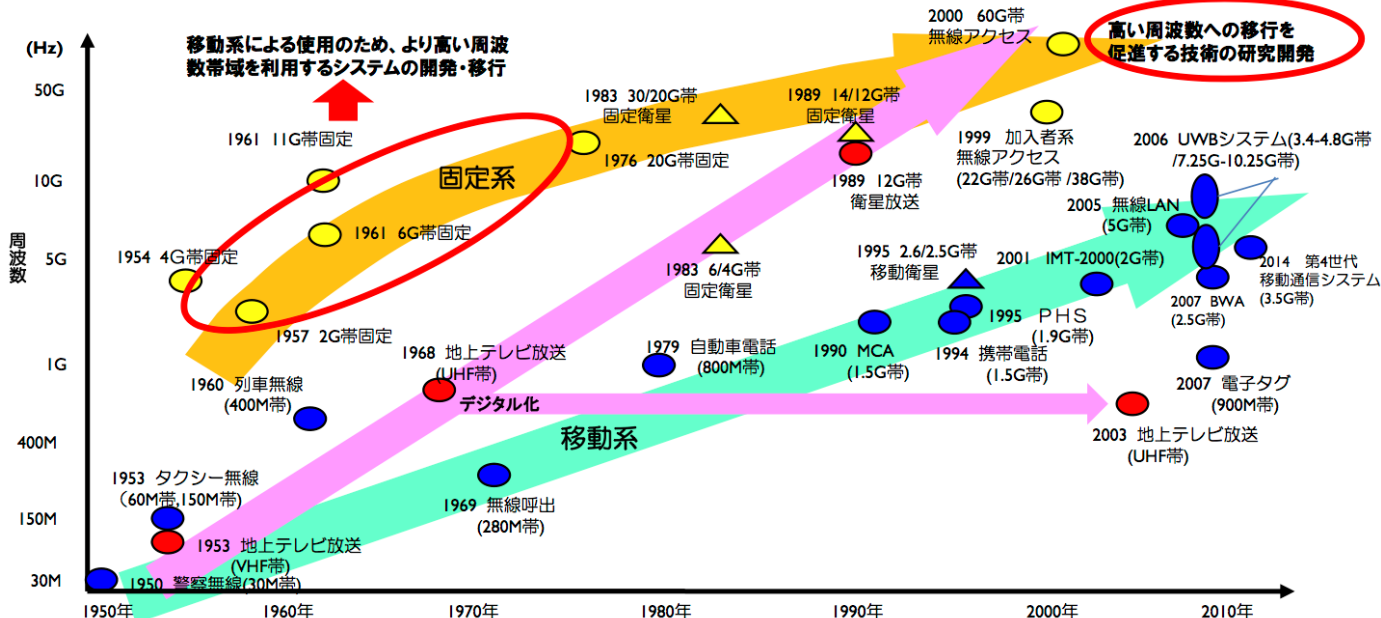
領域「超高周波」・分野「動物」

首都大学東京・理工学研究科

鈴木敬久

2018年3月12日

周波数利用の変遷とミリ波帯の電波を利用した応用技術の例



周波数利用の変遷[1]

● 現在の応用技術の例

- 5Gシステム 例:28GHz帯
- 無線LAN(WiGig) 例:60GHz帯
- 自動車衝突防止システム(ミリ波レーダー) 例:77GHz
- ミリ波ボディースキャナ 例:70-80GHz

→近年身の回りで100GHz以下の周波数帯の応用技術が広まりつつある。

● さらに300GHz帯(0.3THz)の無線通信技術が開発されつつある。

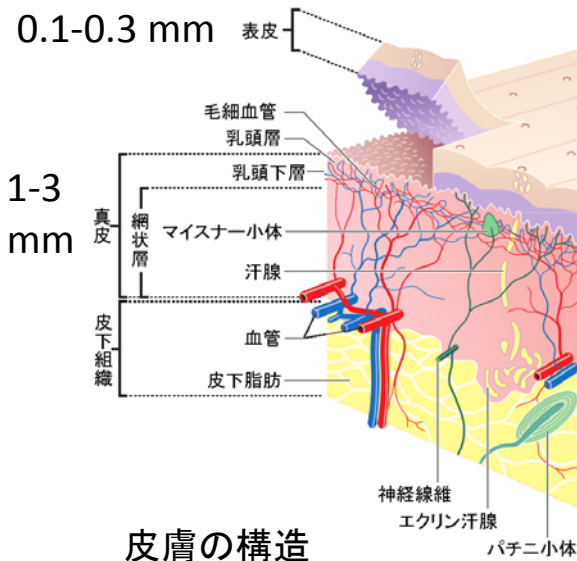
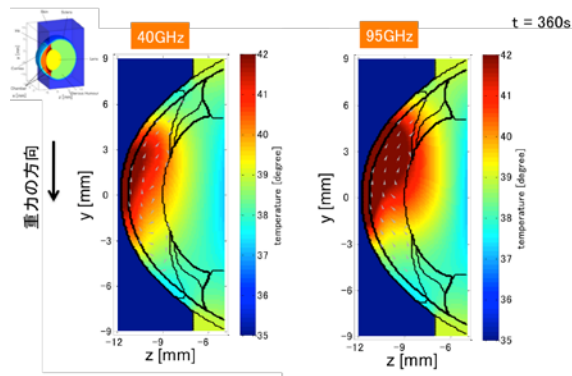
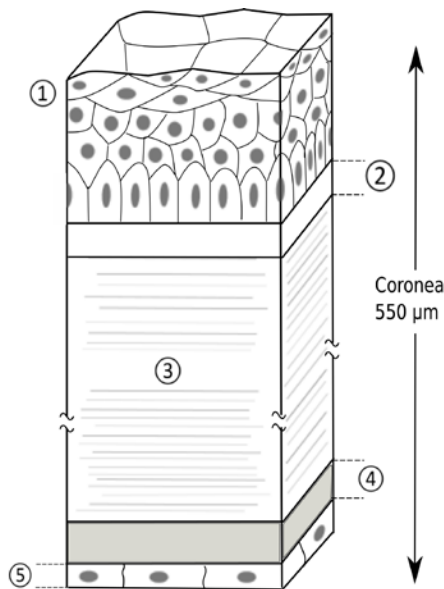
- 電波資源拡大のための研究開発(総務省 総合通信基盤局)

→新技術の円滑な導入にあたっては、安全性の検討が重要である。

[1]出所：総務省MRA国際ワークショップ2016 資料

<http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/equ/mra/pdf/27/04.pdf>

体表組織のスケールと周波数（波長）の関係



角膜の構造[2,3]

- ①角膜上皮: 50 μm (全体の 1/10)
- ②Bowman膜: 10 μm
- ③実質: 400~450 μm (全体の9/10)
- ④Descemet膜: 4~15 μm
- ⑤内皮: 4~6 μm

(複素誘電率は H_2O の値を使用)

周波数	100 GHz	300 GHz	1 THz	5 THz	10 THz
体内波長 [μm]	1079.0	430.8	132.7	26.6	13.3
侵入長 [μm]	246.0	177.5	85.0	18.0	29.0

- ◆ 角膜の組織的な構造と生体内波長、侵入長などのオーダーが近くなる
- ◆ 熱輸送範囲はmmのオーダー(ただし眼球は房水があるので複雑な熱輸送)

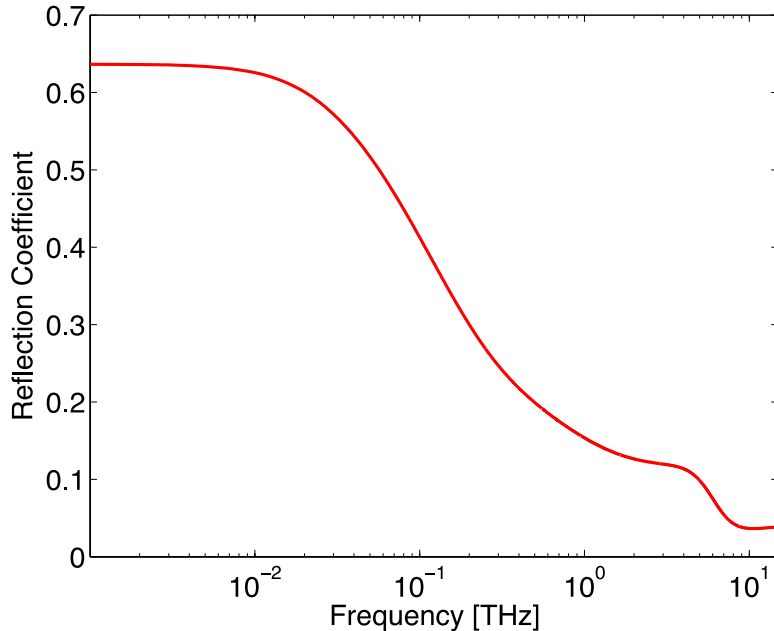
[2] 出所: L. A. Levin, S. F. E. Nilsson, J. Ver Hoeve, S. M. Wu, "ADLER'S PHYSIOLOGY OF THE EYE", ELSEVIER, 2011

[3] 出所: 澤口昭一他, "標準眼科学 第11版", 医学書院, 2011

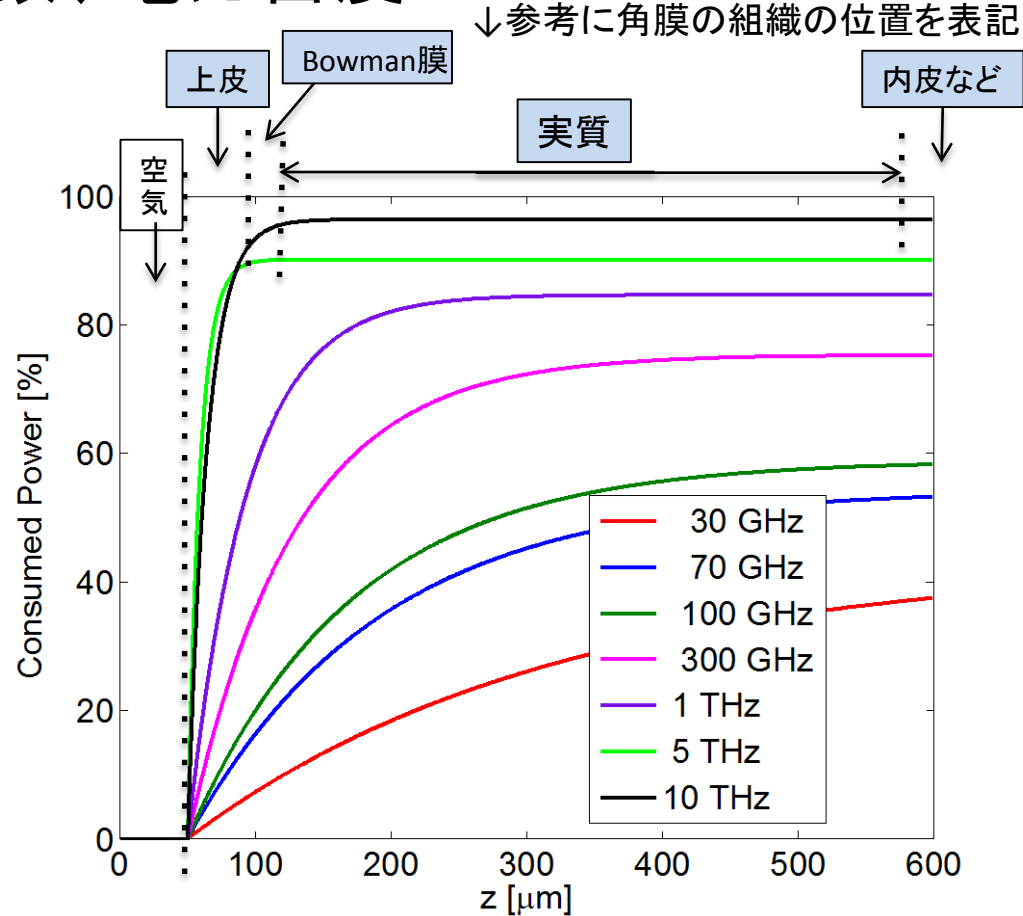
空気 - 水の2層モデルの理論解析

反射係数、電力密度

➤ 角膜の厚さ(550 μm 程度)を想定



周波数と反射係数の関係

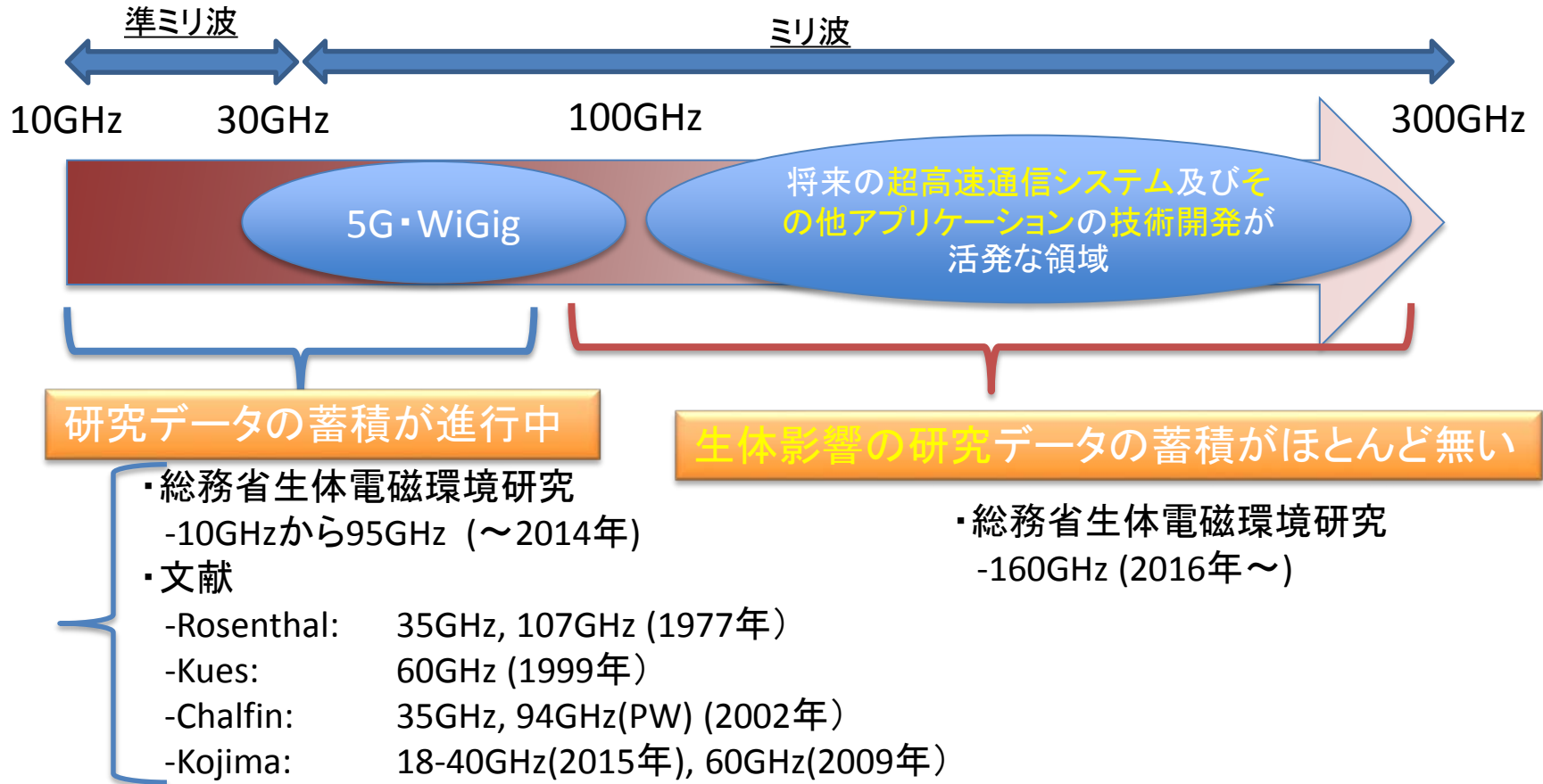


吸収される電力密度と深さの関係(入射電力密度で規格化)

- ミリ波・THz帯では電力の反射が急激に変化

300 GHz以上では体表から200 μm 程度の深さまでに電力吸収が集中
 →体表面組織である皮膚・角膜について考慮することが重要

ミリ波帯動物研究(熱作用)に関する過去の研究と現状



- ・準ミリ波領域～100GHz程度までの研究データの蓄積は進みつつあるが、他の周波数帯と比較すると少ない
- ・100GHz超のデータはほとんどなくこの領域の「実験」データの蓄積は重要
- ・眼に関する研究が多く、皮膚に関する研究がほとんどない。

国際動向（超高周波数帯・動物）

- SCENIHRレポート(2015)
 - リスク評価に資する実験に基づいた**生物学的な知見はほとんどない**。
 - 推奨研究
 - 皮膚：**長時間・低レベル**ばく露の影響の研究
 - 角膜：**高強度・短時間**ばく露の研究
- WHO RF電磁界研究アジェンダ
 - 優先順位の高い研究
 - 発達と行動に対する出生後早期および胎児期の RF ばく露の影響
 - **加齢**と神経変性疾患に対する RF ばく露の影響

超高周波・動物実験の研究視点

- 10年後、20年後に**利用周波数帯がさらに高い周波数**まで広がる可能性を考慮する(～300GHz、～1THz)
- 超高周波数帯の電力吸収は体表面で生じるため、動物実験による**皮膚、及び角膜(眼球組織)**を含めたばく露による影響の総合的な検討が必要
 - **眼部に関する研究は日本がリード**、研究を推進することにより強みを出せる。
 - **動物実験とドシメトリ技術を密接に連携**することにより、動物実験倫理における**3Rの理念**(Replacement(代替), Reduction(削減), Refinement(改善))に**配慮**することが可能
 - 超高周波数帯の非常に**広い周波数範囲**(約10GHz-300GHz)についてコンピュータシミュレーションを含む**高度ICT技術**のサポートで使用する**動物を最小限に抑える**
 - 動物の実験を**ヒトへ外挿**するための**ドシメトリ技術の高度化の推進**
 - **皮膚の研究を組み合わせることにより、総合的なリスク評価が進む**
→日本の防護指針、国際ガイドライン改訂などに大きく貢献ができる。

超高周波・動物実験の研究課題(1)

- 健康影響に関する知見の収集
 - － 環境依存性
 - 外気温、湿度、風など→ガイドラインにおける低減率の検討
 - － 高強度・短時間ばく露
 - 熱影響
 - 高強度波源を用いた時間要因に関する知見の収集
 - 高い周波数帯(～1THz)
 - 皮膚の急性影響に関する知見の収集
 - － 低強度・長時間ばく露
 - 熱的影響、非熱的影響、複合ばく露
 - 加齢変化に依存した影響調査
 - － 幼弱期のばく露・成熟期のばく露などステージによる依存性

研究課題名:「5G電波の皮膚ばく露の及ぼす生体影響とその反応閾値の実験的評価」

【研究分野】

1. 中間周波の影響(①細胞実験、②動物実験、③ヒト実験研究、④疫学研究)
2. 高周波の影響(①細胞実験、②動物実験、③ヒト実験研究、④疫学研究)
3. 超高周波の影響(①細胞実験、②動物実験、③ヒト実験研究、④疫学研究)

【対象周波数】28GHz – 60 GHz

【研究目的・全体概要】

5G電波は皮膚吸収特性が高いことから、電波ばく露に対する皮膚の生体影響に関して動物実験により調査すると共に、未だ明らかになっていない反応惹起の電波強度閾値を推定する。

【現状・課題】

- ・ 国内外において第5次移動通信の普及および関連するインフラの整備が進められているが、当該電波の及ぼす生体影響に関する知見が不足している。また、現状では5Gの仕様が確定しておらず、故にその実利用が見えてくる平成31年度以降、動物実験を実施することは有効である。
- ・ 第3世代移動体通信で使用される電波においては、疫学調査により各種疾患が増加傾向にある、あるいは少数の研究グループではあるものの、生物学的実験においても生体影響の存在が報告されている。5G周波数帯においても多角的な検討をする必要がある。

【具体的内容】

実験動物に5G電波をばく露し、ばく露時の皮膚温度及び生理学的指標の変化を調査する。また、ばく露後に皮膚の炎症レベルを評価する。さらに、取得したデータから汎用性の高いシミュレーション用モデルを構築する。

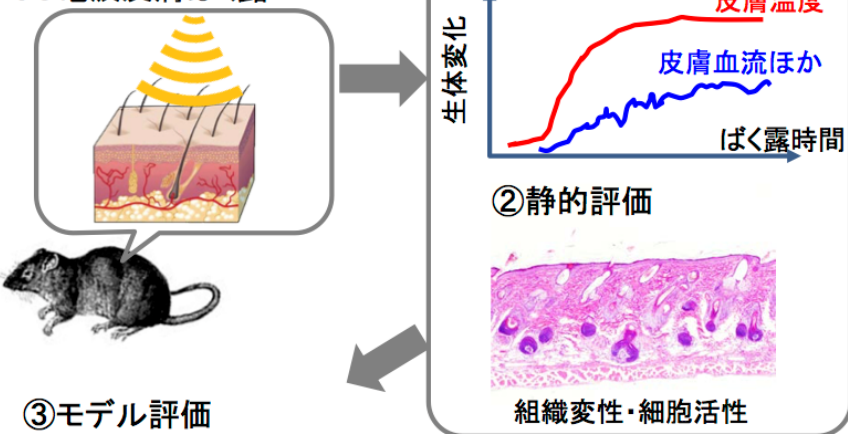
【想定される研究成果】

- ・ 皮膚の生理反応惹起に関する電波ばく露強度およびその時の皮膚温度の用量反応関係が明らかになる。
- ・ 高出力ばく露下における皮膚炎症惹起のばく露強度閾値が明らかにできる(人体では検討ができないレベル)。

【期待される効果】

国内外を通して未だ明確になっていない5G電波の安全性評価の基礎知見が蓄積されるとともに、今後策定される電波防護指針、さらにはWHO基準の策定に向け、炎症反応を考慮した基準値の基礎資料となることが期待される。

5G電波皮膚ばく露



$$B(\mathbf{r}, t) = \left[B_0(\mathbf{r}) + F_{HB} \Delta T_H + F_{SB} \overline{\Delta T_S} \right] \cdot 2^{\Delta T(\mathbf{r}, t)/6}$$

研究課題名：「国際的な環境条件に合致する電波による眼障害閾値検索」

【研究分野】

1. 中間周波の影響(①細胞実験、②動物実験、③ヒト実験研究、④疫学研究)
2. 高周波の影響(①細胞実験、②動物実験、③ヒト実験研究、④疫学研究)
3. 超高周波の影響(①細胞実験、②動物実験、③ヒト実験研究、④疫学研究)

【対象周波数】18 GHz～95 GHz

【研究目的・全体概要】

・国際的なガイドラインの策定の根拠とされるデータは実験室環境で行われた実験データであるため、グローバル環境の視点からはガイドラインが合致していない。グローバルな環境に合致するガイドラインの根拠となるデータを提示し、改訂される国際ガイドラインの方向性をリードする。

【現状・課題】

- ・国際的な電波防護に関するガイドラインは改訂の時期を迎えている。
- ・現在のガイドラインは、一般的実験室でのデータから策定されている。
- ・現行の国際ガイドラインにおいて、高温・多湿環境の影響は十分考慮されていない。

【具体的内容】

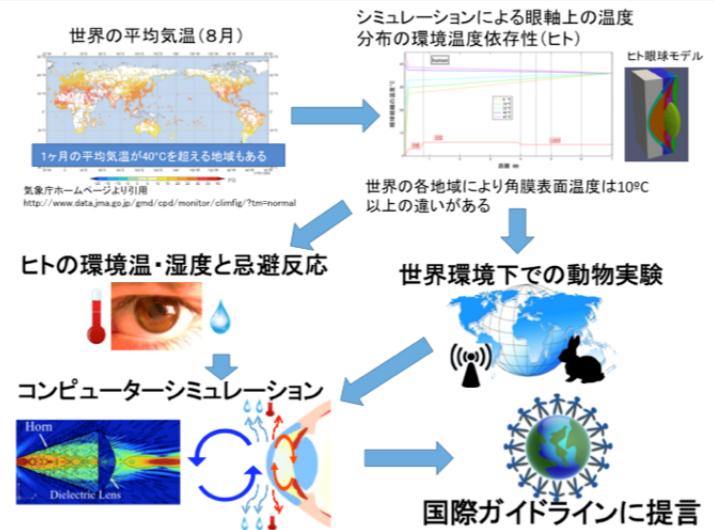
- ①ヒト眼部の忌避反応と環境因子の関連究明
- ②世界レベルでの環境温・湿度状況での電波による眼障害の閾値検索
- ③シミュレーションによるグローバル環境に合致する眼障害閾値の提言

【想定される研究成果】

- ・5G、WiGigで使用されるミリ波の高温・高湿度での眼障害閾値策定
- ・環境条件によるヒトの忌避反応相違の有無の明確化
- ・シミュレーションによる現行国際ガイドラインの再検討

【期待される効果】

- ・世界的環境条件に合致する実験条件で電波による眼障害実験をおこなうことにより、国際的なガイドラインの改定時に根拠となる実験データを提供することが可能となる。
- ・今後策定が期待されるWHO基準などにおいて、低減係数の設定に関する有用なデータとなり得る。



研究課題名:「時間要素を考慮した超高周波数帯電磁界の急性影響探索」

【研究分野】

1. 中間周波の影響(①細胞実験、②動物実験、③ヒト実験研究、④疫学研究)
2. 高周波の影響(①細胞実験、②動物実験、③ヒト実験研究、④疫学研究)
3. 超高周波の影響(①細胞実験、②動物実験、③ヒト実験研究、④疫学研究)

【対象周波数】100GHz~300GHz~(500GHz)

【研究目的・全体概要】100 GHzから300 GHz(または500 GHz程度)までの周波数帯高強度電波が発振可能な波源を利用し、これまで得られたことのない300 GHzまでのばく露時間要素を考慮した急性影響域値に関するデータを世界に先駆けて取得する。それにより超高周波数帯のガイドライン改定の方角性をリードする。

【現状・課題】

- ・総務省の「電波資源拡大のための研究開発」などでは「ミリ波・テラヘルツ波システム」として100 GHz超のミリ波帯の新しい無線通信システムが積極的に研究開発されている。一方で、新技術の円滑な導入にあたっては、生体安全性の検討が重要とある。
- ・提案周波数帯ではこれまで急性影響について探索できる強度のばく露装置が国内外で存在せず、正確な域値の実験の評価がなされていない。
- ・ガイドラインにおけるばく露の平均化時間の検討が十分でなく、ばく露時間-強度ダイヤグラムに基づいた適切な平均化時間の策定が必要である。
- ・最新の欧州委員会SCENIHRの意見書(2015)に記載されているように、リスク評価に資する生物学的な知見はほとんどない。

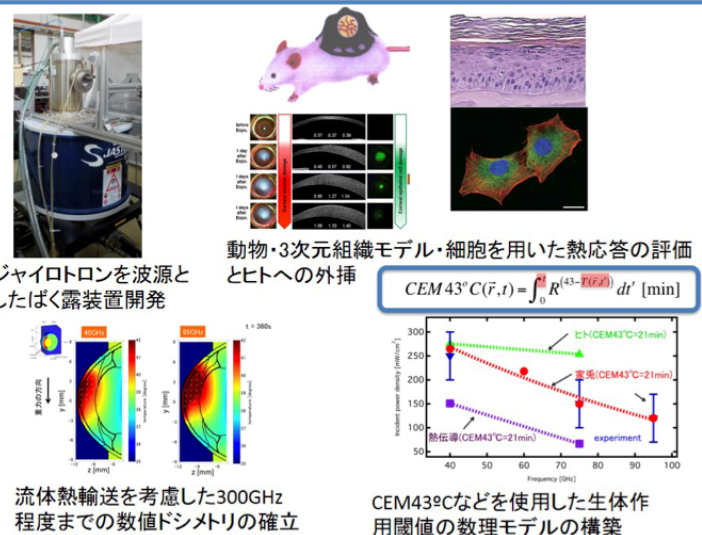
【具体的内容】

・研究内容: ジャイロトロンを利用した100-300 GHzの体表面組織(皮膚・角膜)ばく露システムの開発とばく露評価手法の確立。動物実験及び動物3次元細胞モデルに基づいた、体表面の組織(皮膚・角膜)の時間-ばく露強度の生体作用応答ダイヤグラムの作成。

【想定される研究成果】

- ・超高周波数帯の高強度ばく露データの取得。
- ・ばく露時間を考慮した100 GHz超の障害域値の明確化。
- ・定量的な域値推定シミュレーションシステムによるリスク評価。

【期待される効果】これまで調べられなかった超高周波数帯電波の生体作用に関して、ICNIRP、WHOに向けて、独自の先進的研究成果を日本から発信。マイクロ波帯と赤外領域とのガイドラインの調和を行うデータ提供。我が国の電波防護指針の検証、電波防護指針の改定などのための安全性評価の方向性の明確化。



超高周波・動物実験の研究課題(2)

【ロードマップ】

- 現在~2025年あたりまで
 - 環境条件を考慮した影響評価
 - 皮膚に関する研究
 - 日本の環境(高温多湿)およびグローバル環境視点を考慮した研究(その他VR技術・複合ばく露等を考慮)
 - 日本の電波防護指針、国際ガイドラインに資する研究
- 2020~2030年
 - 300GHzまでの周波数を視野に入れた研究
 - 熱影響、非熱影響、時間要素の考慮(高強度波源を持つばく露装置の開発)
 - 赤外領域の人体防護ガイドラインとの調和
- 2030~2040年
 - 現在想定されていない電波利用技術が現れる可能性
 - 300GHz以上の周波数の想定が必要?