

入射電力密度について

佐々木 謙介

準ミリ波・ミリ波帯電波ばく露

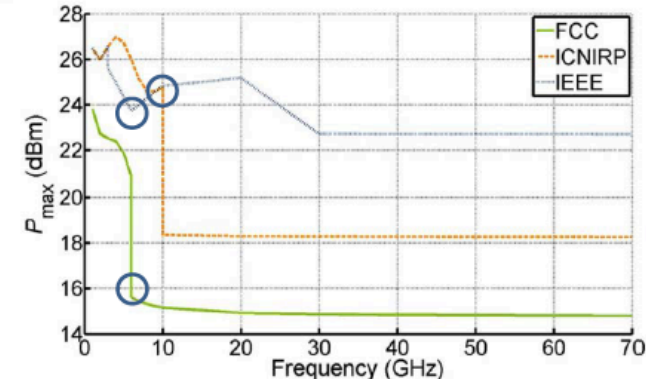
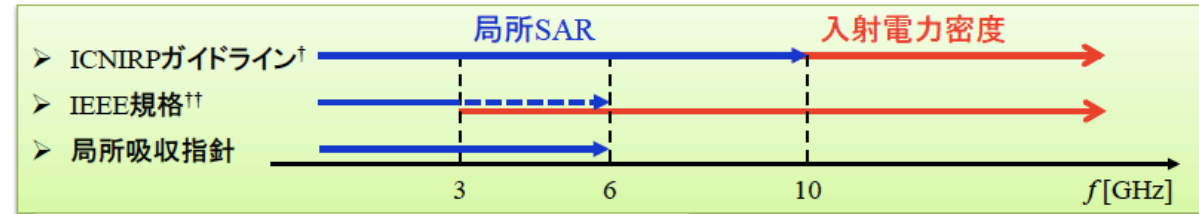
- 6GHz超の周波数で動作する無線機器の実用化へ向けた技術開発・研究の活発化
 - 5Gシステム、WiGig、車載レーダー
- 人体へ入射する電力密度が指標として利用されている。
 - 電波ばく露による人体のエネルギー吸収は体表組織において支配的なため
- 現在、電波ばく露による人体防護のための、各国際ガイドラインにおいて、局所SARから電力密度への遷移周波数(6 GHzまたは10 GHz)における不整合について指摘されている。



新しい電波利用技術を安全かつ安心して利用するためには、科学的根拠に基づき、適切なばく露指針値を規定する必要

✓ 局所SARと入射電力密度とのギャップ

- SARは**体内**誘導物理量である一方で、入射電力密度は**体外**物理量
- SARと比較して、入射電力密度の規定に関する根拠は十分ではない



入射電力密度および平均化面積を、科学的根拠に基づいて検討する必要性

D. Colombi et al, IEEE Antenna & Wireless Propagat. Letts., 2015.

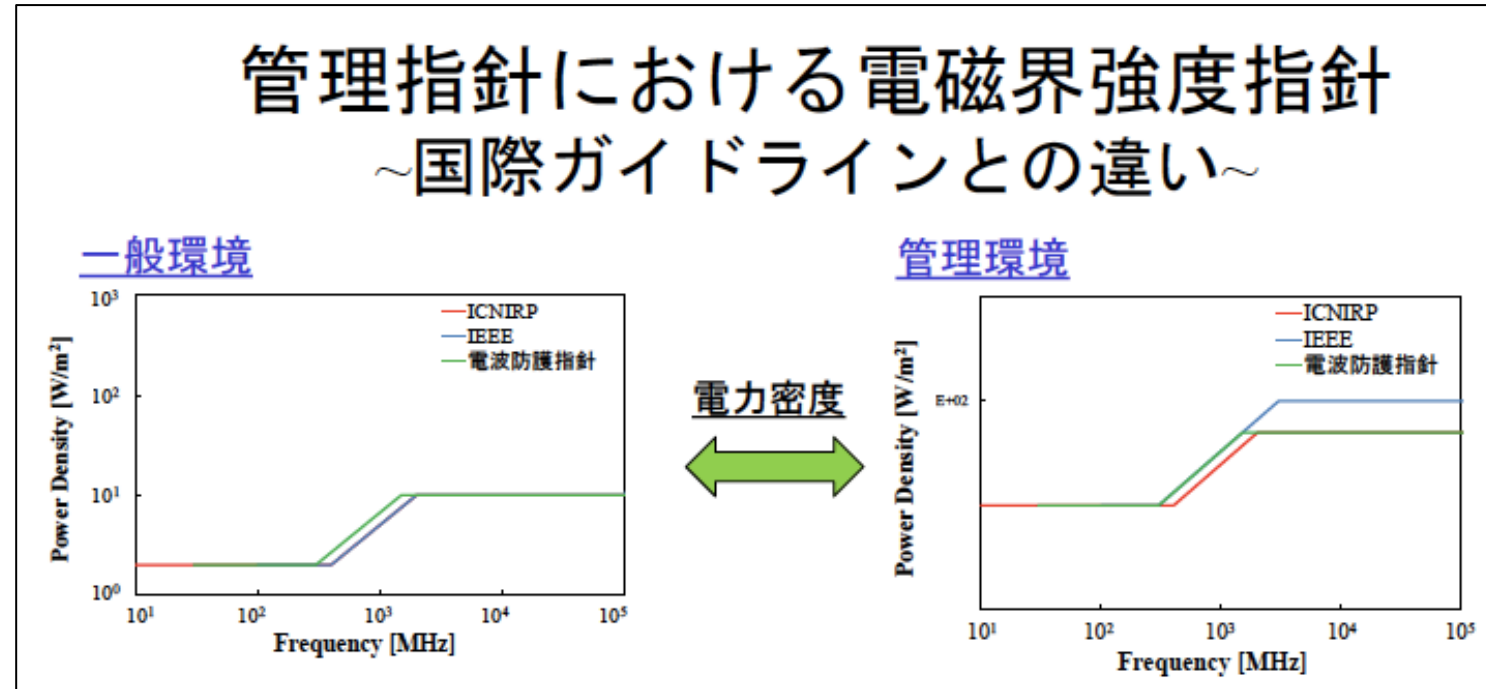
[†] ICNIRP: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz)", Health Phys., vol.74, pp.494-522, 1998.

^{††} IEEE C95-1: "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz", 2005.

ICNIRPおよびIEEE/ICES/TC95の動向

- ICNIRPおよびIEEE/ICES/TC95
各国際ガイドラインの改訂作
業が進行中

- ICNIRP: 2018年6月以降に高周波ガイ
ドライン改定案に対する意見募集の実
施を予定
- IEEE/ICES/TC95: 2018年に発行予定



情通審情報通信技術分科会

電波防護指針の在り方に関する検討作業班 資料8-4より

- 各国際機関の準ミリ波・ミリ波帯電波ばく露による影響について、熱作用を根拠として採用している点について、一致している。
- 2017年GLORE会合では、体内の物理量である浸透（または透過）電力密度を考慮し、各国際機関におけるガイドラインの改訂を実施する可能性を示唆*。

*2017年12月GLORE会合でのICNIRP、IEEE/ICESからの報告に基づく

準ミリ波・ミリ波帯での人体ばく露特性[1]

- 多層平板モデルへの平面波入射時の電波ばく露量を評価
 - 人体へ透過する電力密度
 - 体表での温度上昇(定常状態)
- 組織厚はアジア人に対する測定データ(統計値)[2][3]を利用
 - 表皮、真皮は[4]の成人の組織厚をカバー

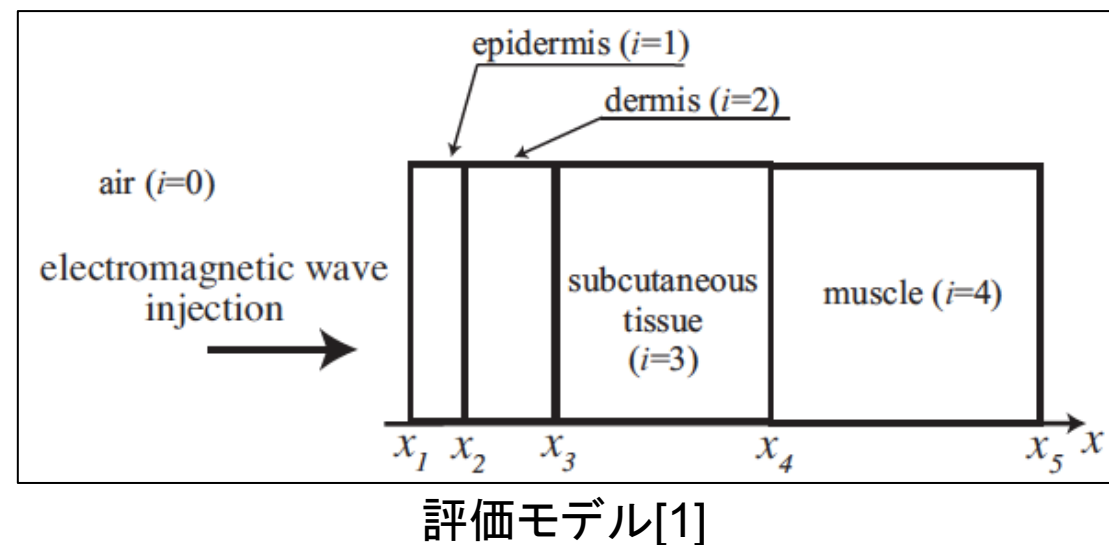


表. 各部位(前腕、上腕、大腿、腹)の組織厚(平均値および標準偏差)[2][3]

body parts ($x_{i+1} - x_i$)	epidermis ($i = 1$) [μm]	dermis ($i = 2$) [μm]	subcutaneous tissue ($i = 3$) [mm]	muscle ($i = 4$) [mm]
forearm	102 ± 34	1080 ± 160	3.89 ± 1.40	23.3 ± 4.3
triceps	83.5 ± 36.2	1030 ± 330	8.65 ± 4.28	34.8 ± 10.5
quadriceps	94.8 ± 23.6	1220 ± 320	9.35 ± 4.17	50.5 ± 4.2
abdomen	79.4 ± 33.9	1250 ± 260	14.3 ± 7.5	14.4 ± 3.5

[1] K. Sasaki et. al., 2017, Phys. Med. Biol. 62, 6993–7010

[2] Y. Ishida, et. al., 1992, Am. J. Hum. Biol. 4 511–20

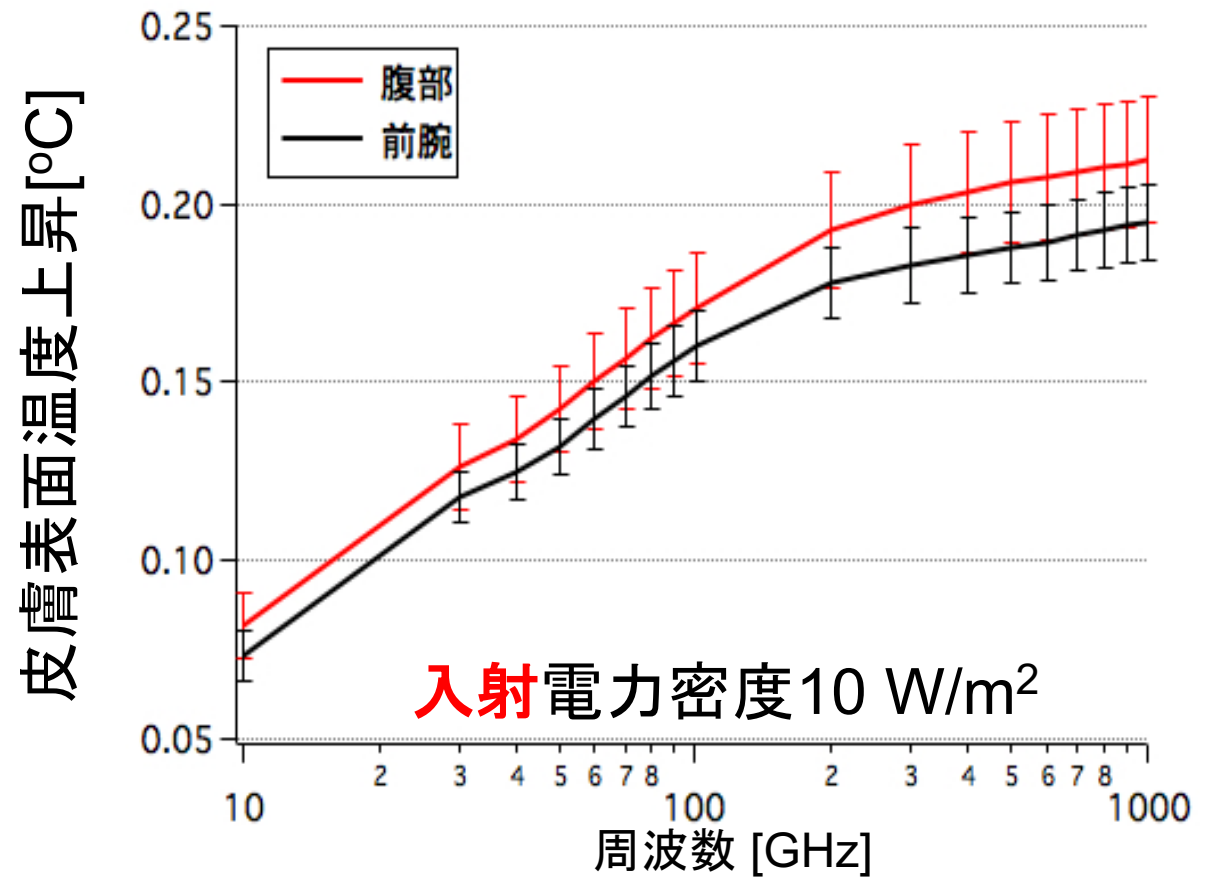
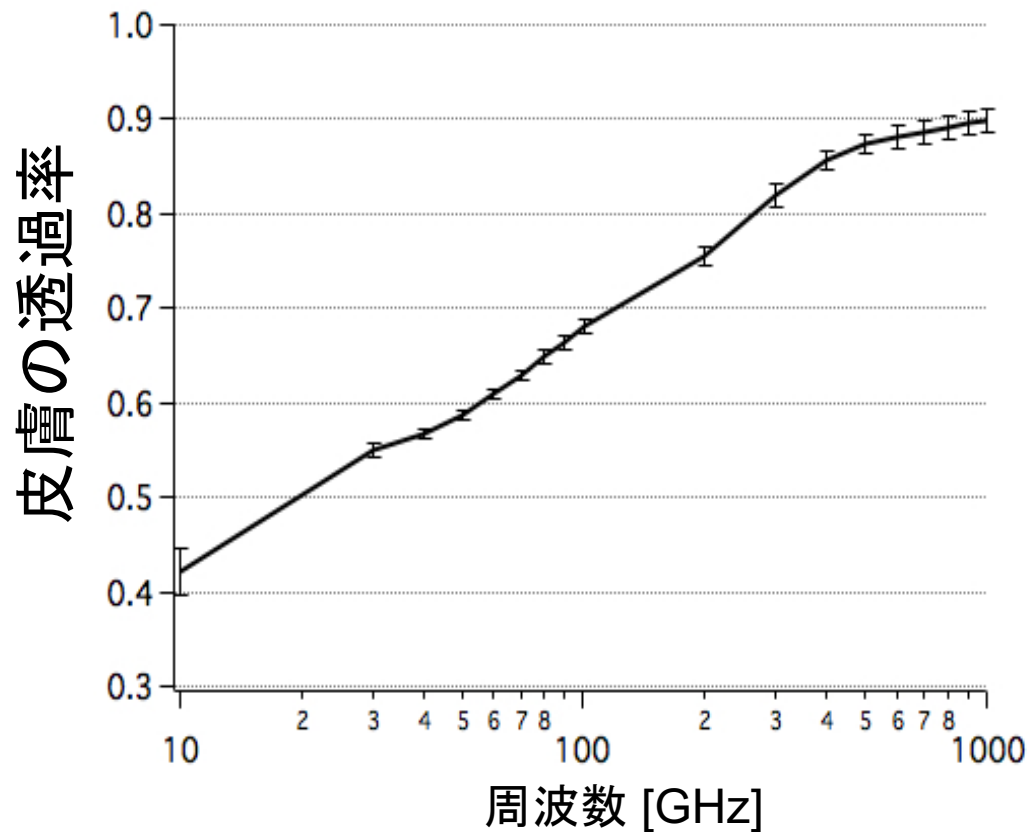
[3] Y. Lee and K. Hwang, 2002, Sur. Radiol. Anat. 24 183–9

[4] ICRP, 2002, ICRP Publication 89

準ミリ波・ミリ波帯での人体ばく露特性[1]

皮膚への透過率: 入射電力密度に対して、人体へ透過する電力密度の割合
($1-|R|^2$, $|R|$ は皮膚での反射係数の大きさ)

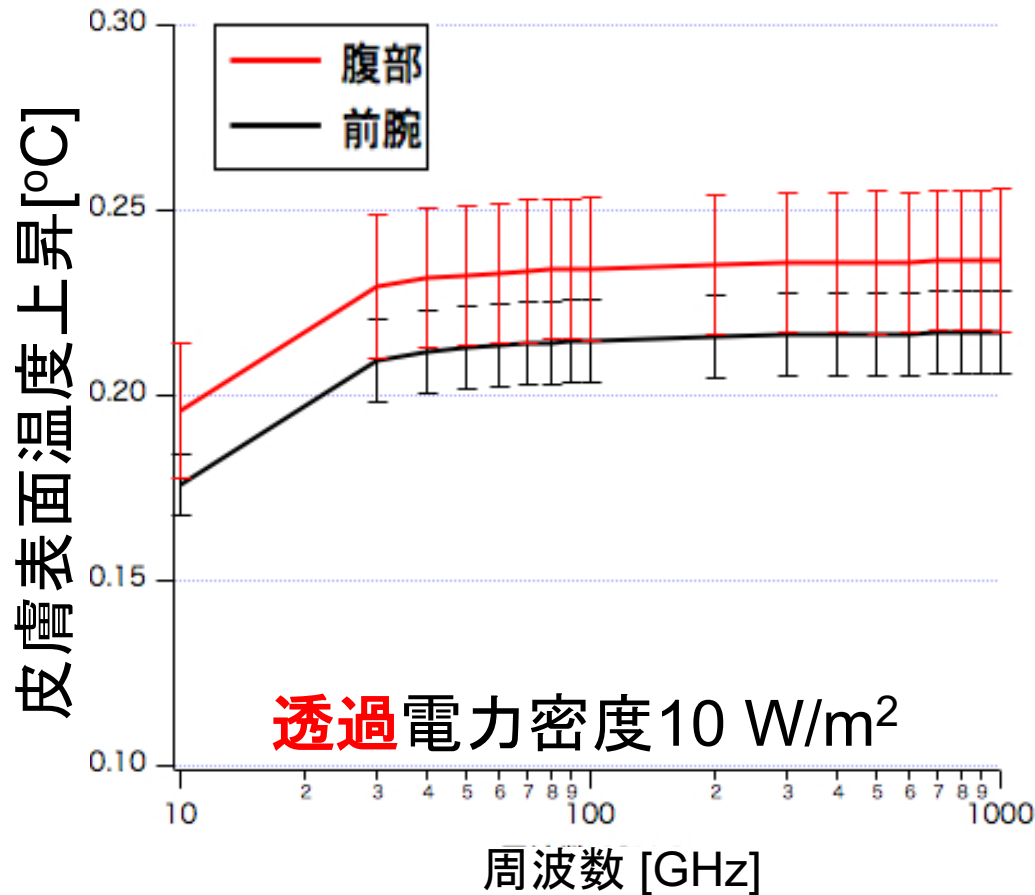
*図中のエラーバーは組織厚のバラツキの透過率・表面温度上昇への寄与



透過率と体表温度上昇は共に周波数に対して単調増加の傾向を示す。

準ミリ波・ミリ波帯での人体ばく露特性[1]

*図中のエラーバーは組織厚のバラツキの表面温度上昇への寄与



(透過電力密度)

$$=(入射電力密度) \times (皮膚への透過率)^*$$

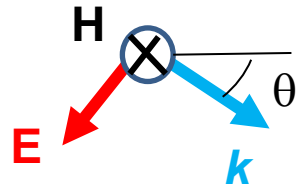
*生体電磁環境に関する検討会 資料-生電14-8および

Y Hashimoto, et. al., Phys. Med. Biol. 62 (2017) 3124–3138参照



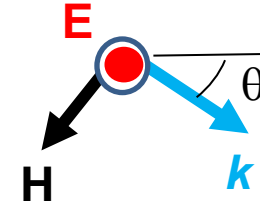
透過電力密度と表面温度上昇は共に
周波数に対して周波数に依存しない特性

様々な入射角による皮膚への電波ばく露

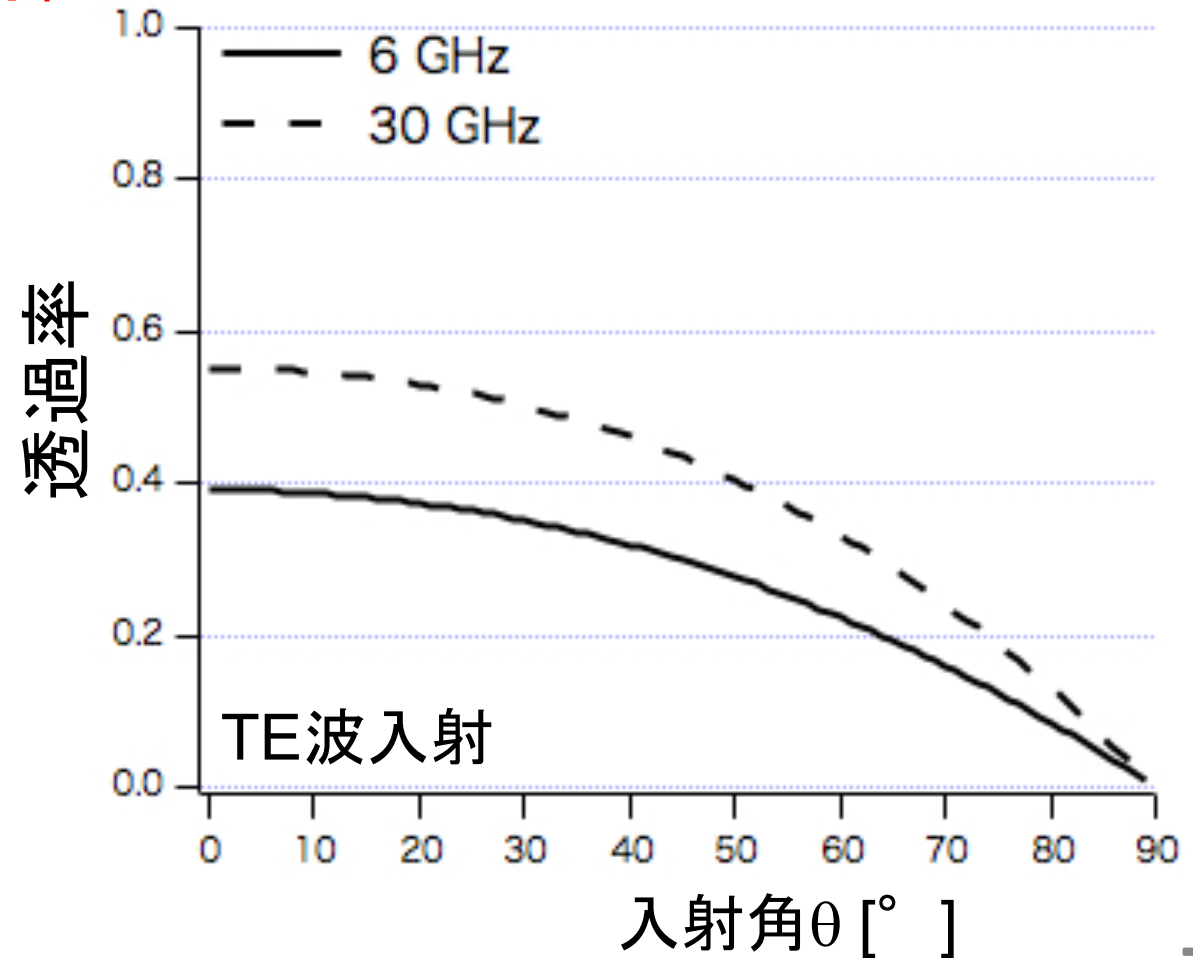
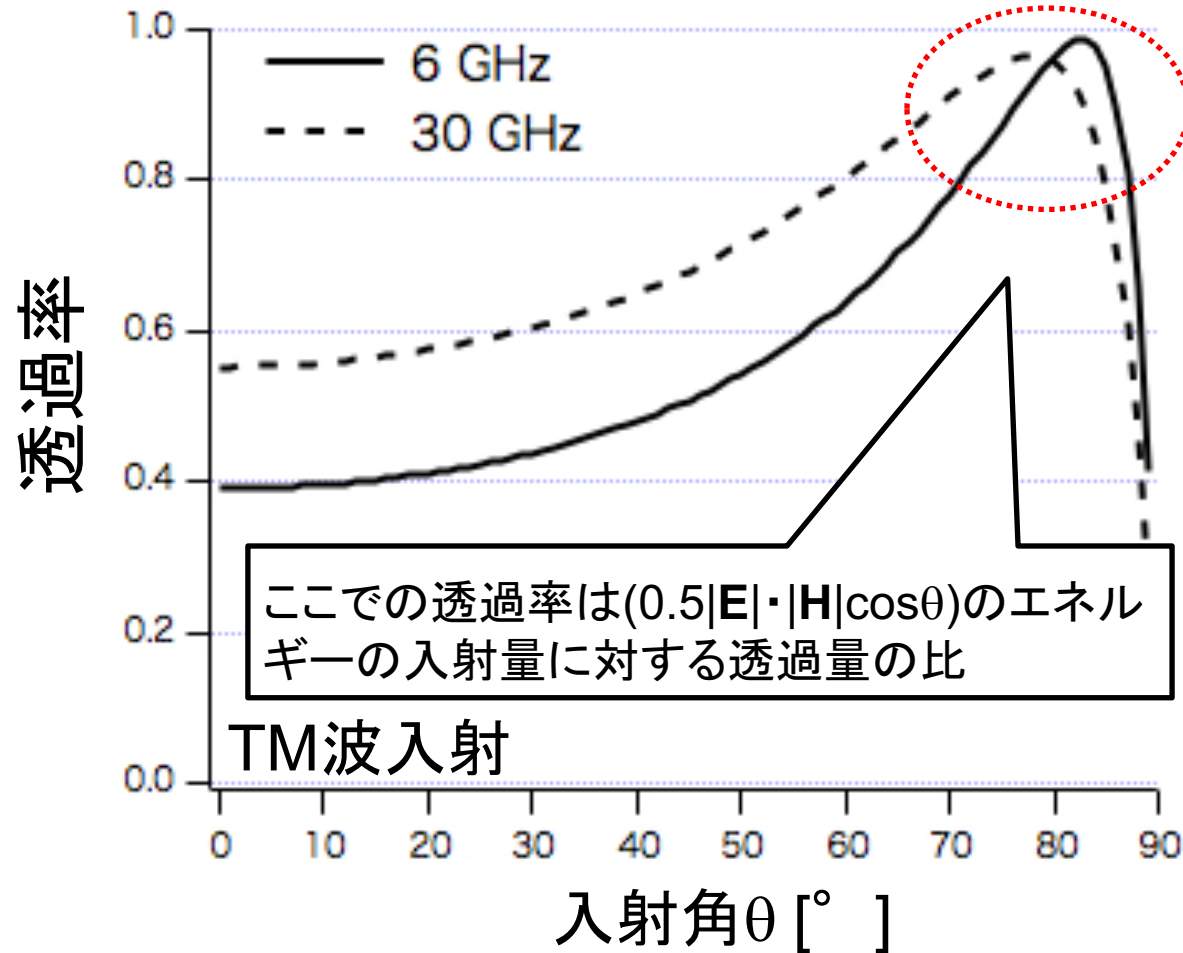


皮膚

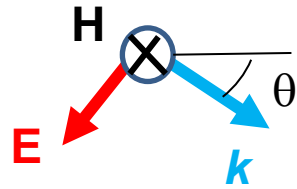
Brewster効果



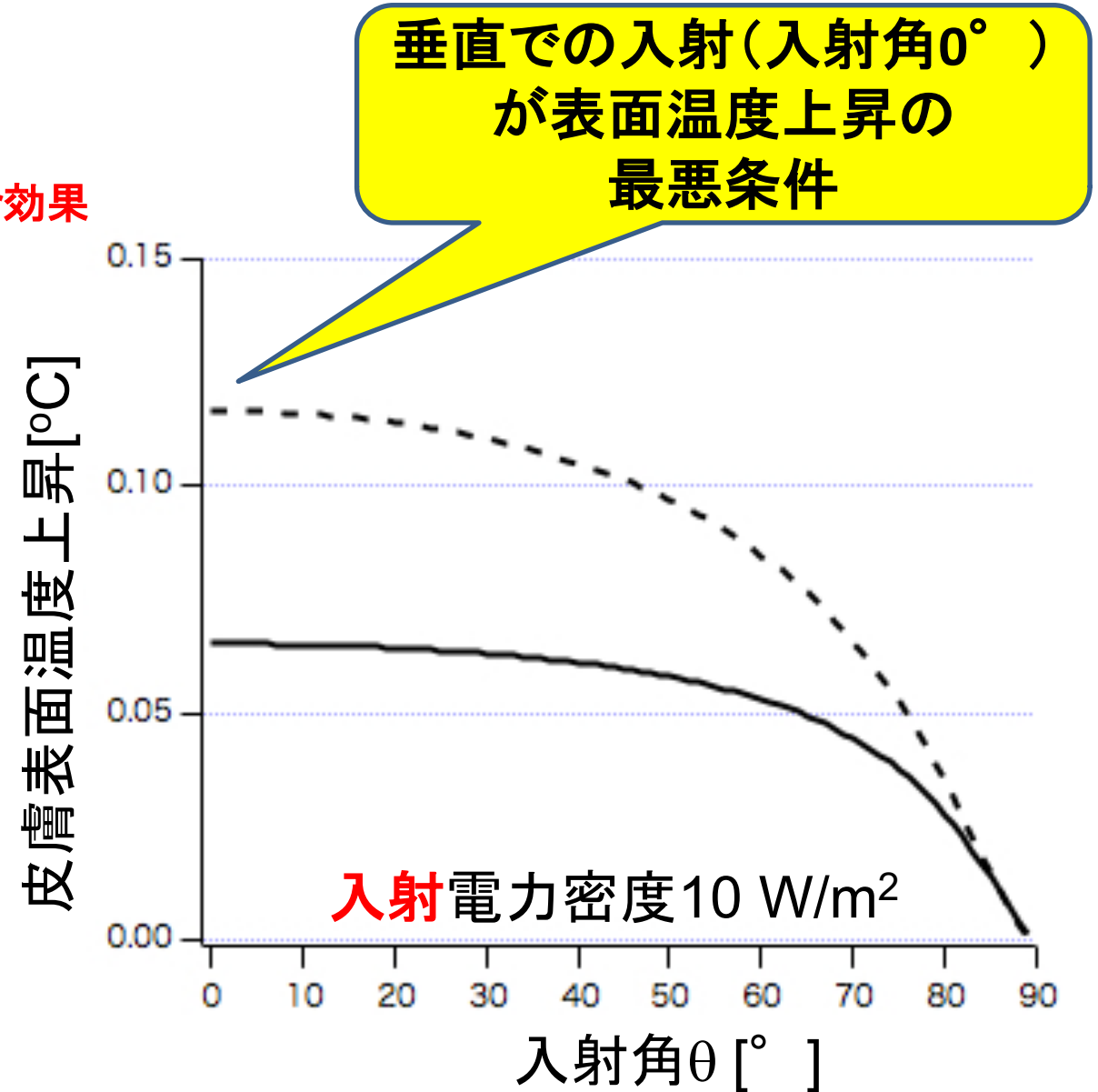
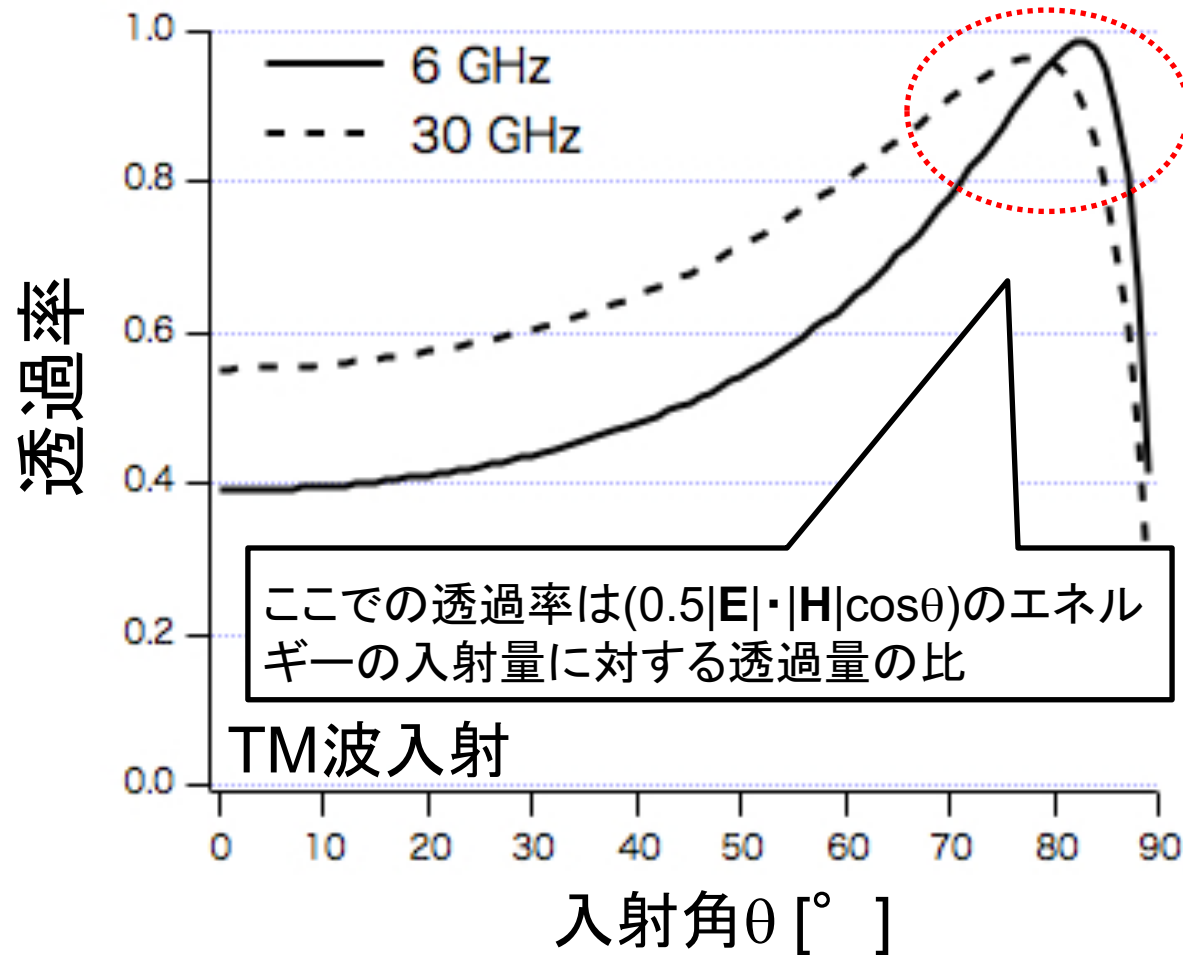
皮膚



TM波入射によるBrewster効果について



Brewster効果



むすび

～6 GHz以上の周波数での指標について～

- 数値シミュレーションに基づいた検討では、皮膚内部へ浸透（または透過）する電力密度は、体表での温度上昇と優れた相関を示す。
 - 実際、人体内部での浸透（または透過）電力密度を指標とし、電波ばく露による人体防護のための指針値を規定する国際動向も見られる。
 - 我が国での導入にあたっては実験等による検証が必須であるが、当該指標への計測技術は無い。
- 測定法の観点より、実測可能な物理量である、人体への入射電力密度に対する指針値は必要である。
- 入射電力密度の指針値を定めるに当たって、皮膚への垂直入射を基準とすることが適当と考えられる。
 - 様々な偏波、角度で人体がさらされる可能性が考えられるが、体表への加熱特性は垂直入射を考慮することで、安全側の指針値の推定が可能と考えられる。
- 指針値を定めるにあたり、科学的根拠に基づく、適切な平均化面積・時間を規定する必要

【参考】近年の準ミリ波・ミリ波帯での人体ばく露 量評価に関する文献

- M C Ziskin et.al., Tissue models for RF exposure evaluation at frequencies above 6 GHz., [Bioelectromagnetics](#). 2018 Apr;39(3):173-189.
- K R Foster, et. al., Thermal Response of Human Skin to Microwave Energy: A Critical Review., [Health Phys](#). 2016 Dec;111(6):528-541
- K R Foster, et. al., Thermal Modeling for the Next Generation of Radiofrequency Exposure Limits: Commentary,
• [Health Phys](#). 2017 Jul;113(1):41-53
- Y Hashimoto, et. al., On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz, *Phys. Med. Biol.* 62 (2017) 3124–3138
- R Morimoto, et. al., Time constants for temperature elevation in human models exposed to dipole antennas and beams in the frequency range from 1 to 30 GHz. *Phys. Med. Biol.* 2016; 62 (5): 1676-99.
- K Sasaki, et. al., Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz. *Phys. Med. Biol.* 2017; 62 (15): 6993-7010.