## 吸収電力密度の平均化面積について

### 第14回

電波防護指針の在り方に関する検討作業班

日景 隆(北海道大学) 小寺 紗千子(名古屋工業大学)

資料14-3

## はじめに

- ICNIRPガイドラインおよびIEEE/ICES規格における吸収電力密度
  - - 電波ばく露による体表での温度上昇に基づき 6 GHz以上において用いられる電力密度の指針値 入射電力密度:参考レベル 吸収電力密度:基本制限
  - 6 GHz 以下の周波数における局所ばく露の評価指標 SAR(W/kg)では10g平均の空間最大値が用いられる。 入射電力密度(W/m<sup>2</sup>)および吸収電力密度(W/m<sup>2</sup>)で は、<u>面積平均の空間最大値</u>が用いられている

  - 平均化に用いる面積は、科学的知見に基づき、 30GHz以下であれば4 cm<sup>2</sup>、それ以上の周波数では より狭いスポットでのばく露を想定し、1 cm<sup>2</sup>の面積で 平均化することにより(許容値は2倍)、最大温度上 昇の指標になり得ることが示されている

	ICNIRPガイドライン(2020) IEEE/ICES規格(C95.1-2019)
入射電力密度 (参考レベル)	>6–300GHz 20-40 W/m <sup>2</sup> @4cm <sup>2</sup>
	>30–300GHz 40-80 W/m <sup>2</sup> @1cm <sup>2</sup>
吸収電力密度 (基本制限)	>6–300GHz 20 W/m <sup>2</sup> @4cm <sup>2</sup>
	>30–300GHz 40 W/m <sup>2</sup> @1cm <sup>2</sup>

#### ICNIRPガイドラインおよびIEEE/ICES規格における記載

ICNIRP 2020 <sup>[1]</sup> :	Table 2. Basic re	strictions for electroma	gnetic field exposure fron	n 100 kHz to 300 GHz	, for averaging inter	vals ≥6 min. <sup>a</sup>
Absorbed Power Density	Exposure scenario	Frequency range	Whole-body average SAR (W kg <sup>-1</sup> )	Local Head/Torso SAR (W kg <sup>-1</sup> )	Local Limb SAR (W kg <sup>-1</sup> )	Local S <sub>ab</sub> (W m <sup>-2</sup> )
	Occupational	100 kHz to 6 GHz	0.4	10	20	NA
	Concretentie	>6 to 300 GHz	0.4	NA	NA	100 NA
	General public	>6 to 300 GHz	0.08	NA	4 NA	20
$S_{ab} = \iint_{A} dx dy \int_{0}^{Z_{max}} \rho(x, y, z) \cdot SAR(x, y, z) dz/A,$ $S_{ab} = \iint_{A} \operatorname{Re}[\mathbf{S}] \cdot d\mathbf{s}/A = \iint_{A} \operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^{*}] \cdot d\mathbf{s}/A,$	<sup>a</sup> Note: 1. "NA" signifies "n 2. Whole-body aver: 3. Local SAR and S 4. Local SAR is to b 5. <u>Local Sab is to be</u> exposure averaged of	ot applicable" and does no age SAR is to be averaged ab exposures are to be aver be averaged over a 10-g cu averaged over a square 4 over a square 1-cm <sup>2</sup> surface	ot need to be taken into accou over 30 min. raged over 6 min. bic mass. -cm <sup>2</sup> surface area of the bod ce area of the body is restrict	int when determining cor y. Above 30 GHz, an add ted to two times that of th	npliance. litional constraint is in he 4-cm <sup>2</sup> restriction.	nposed, such that
IEEE Std C95.1 2019 <sup>[2]</sup> :		Table 6—Lo	cal exposure DRL	.s (6 GHz to 300	GHz)	
IEEE Std C95.1 2019 <sup>[2]</sup> : Epithelial Power Density	Card	Table 6—Lo	cal exposure DRL Epith	s (6 GHz to 300	GHz) (W/m²) <sup>a,b,c</sup>	
IEEE Std C95.1 2019 <sup>[2]</sup> : Epithelial Power Density (EPD)	Cond	Table 6—Lo	cal exposure DRL Epith Persons in unrestri environments	s (6 GHz to 300 elial power density cted Per	GHz) (W/m <sup>2</sup> ) <sup>a,b,c</sup> sons permitted in environmen	restricted ts
IEEE Std C95.1 2019 <sup>[2]</sup> : Epithelial Power Density (EPD)	Cond Body surface	Table 6—Lo	cal exposure DRL Epith Persons in unrestri environments 20	s (6 GHz to 300 elial power density cted Pers	GHz) (W/m <sup>2</sup> ) <sup>a,b,c</sup> sons permitted in environmen 100	restricted ts
IEEE Std C95.1 2019 <sup>[2]</sup> : Epithelial Power Density (EPD)	Cond Body surface <sup>a</sup> Epithelial pow	Table 6—Lo	Cal exposure DRL Epithe Persons in unrestri environments 20 surface is averaged over 0	elial power density cted Pers	GHz) (W/m <sup>2</sup> ) <sup>a,b,c</sup> sons permitted in environmen 100	restricted ts
IEEE Std C95.1 2019 <sup>[2]</sup> : Epithelial Power Density (EPD)	Cond Body surface <sup>a</sup> Epithelial pow <sup>b</sup> Averaged over a square at surfa	Table 6—Lo         litions         rer density through body         r any 4 cm <sup>2</sup> of body surface of the body).	Cal exposure DRL Epithe Persons in unrestri environments 20 2 surface is averaged over of face at frequencies between	s (6 GHz to 300 elial power density cted Person 5 min. a 6 GHz and 300 GHz	GHz) (W/m <sup>2</sup> ) <sup>a,b,c</sup> sons permitted in environment 100 (defined as area in th	restricted ts

1. ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)", Health Phys., 118(5), pp. 483–524, 2020.

2. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz, IEEE Std., C95.1, 2019.



吸収電力密度(Absorbed Power Density)/上皮電力密度(Epithelial Power Density) :単位面積当たりにおいて吸収される電力密度 [W/m<sup>2</sup>]

ICNIRPガイドライン (2020)  $S_{ab} = \frac{1}{A} \iint_{A} \int_{0}^{z_{max}} \rho \cdot SAR \, dz \, dx dy$   $S_{ab} = \frac{1}{A} \iint_{A} Re[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^{*}] \cdot ds$   $SAR = \frac{\sigma |\mathbf{E}|^{2}}{\rho}$ 注)  $z_{max}$ は電波の侵入長に対して十分に長い深さとする

#### <u>IEEE/ICES規格(2019)</u>

The power flow through the epithelium per unit area directly under the body surface (i.e., in stratum corneum of the skin or corneal epithelium of eyes).



# 平均化面積の基本的考え方と評価

吸収電力密度と入射電力密度において、平均化面積の基本的考え方は同じ



4素子パッチアレイアンテナの電力密度分布と平均化面積



図:異なる平均化面積(a)1cm<sup>2</sup> (b)4cm<sup>2</sup> (c)9cm<sup>2</sup> (d)20cm<sup>2</sup>で正規化した入 射電力密度における体表温度上昇<sup>[1]</sup> Hashimotoら [1]は、4素子からなるダイポールアンテ ナを、均質媒質の人体頭部を模擬した多層直方体モ デル近傍(15-40 mm)に配置した場合の異なる平均化 面積に対する入射電力密度と皮膚温度上昇値の関係 を調査

左図:平均化面積を4cm<sup>2</sup>とした場合に、温度上昇を 面積平均の入射電力密度で除した割合は、平面波が 均質媒質に入射する状態を想定した1次元解析の値 に比べて、約 30GHz までは小さい

Fosterら[2]は、2次元の皮膚単層モデルを用いて理論 解析を行い、皮膚温度上昇と相関の取れる電力密度 の空間平均値は、血流の影響を受けばらつきがある ものの、1-4cm<sup>2</sup>の範囲にあると算出

最大温度上昇とよく相関する4 cm<sup>2</sup> の平均化面積(6 - 300 GHz)が提案された。 30 GHz以上で、狭ビームのばく露を考慮し、1cm<sup>2</sup>の平 均化面積に対する指標が追加で設定された

- 1. Hashimoto Y, Hirata A, Morimoto R, Aonuma S, Laakso I, Jokela K, Foster K R. On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz. Phys. Med. Biol. 2017; 62(8): 3124-38.
- 2. Foster K R, Ziskin M C, Balzano Q. Thermal modeling for the next generation of radiofrequency exposure limits: commentary. Health Phys. 2017; 113(1): 41-53.

# 吸収電力密度の計算評価例

#### ┗ 吸収電力密度と平均化面積の評価例<sup>[3]</sup>



IEEE ICES TC95の第6小委員会にて、6 GHz以上の吸収 電力密度の空間平均に対する異なるスキームの影響を 調査・定量化するためIntercomparison Study(11機関で 相互比較研究)を実施

ダイポールアンテナを使用した被ばくシナリオにおいて、優れた一致。ダイポールアレーを用いたケースでも、周波数10、30、90 GHzでそれぞれ42.55%, 29.55%, 16.7%

#### 平均化面積と吸収電力密度の関係評価





図:アンテナ間距離d を変化させた際の30 GHzにおけるダイポール、2×2、4×4ダイ ポールアレイの吸収電力密度(平均化面積:1 cm<sup>2</sup> および 4 cm<sup>2</sup>)

3. Li K et al., Calculated Epithelial/Absorbed Power Density for Exposure From Antennas at 10–90 GHz: Intercomparison Study Using a Planar Skin Model. IEEE Access, 2023, 11: 7420–7435.

### 平均化面積と吸収電力密度許容量の関係

- Fosterら[2]は、理論的熱モデルに基づき、電波の照射面積を小さくし局所化した場合の 最大表面温度上昇が、生体内熱拡散により面積が大きい場合よりも小さくなることを示 した(局在化したばく露に対し、温度上昇は平均化面積の平方根で小さくなる)
- Funahashiら[4]は3次元人体およびアンテナモデルによる数値計算から、
   2倍の許容出力が可能であることを確認
- これらが、平均化面積1cm<sup>2</sup>とした場合の閾値2倍の根拠となっている





**FIGURE 5.** The ratio of the surface temperature elevation to the TPD averaged over 4 cm<sup>2</sup> and 1 cm<sup>2</sup> for the four elements dipole antenna and patch antenna array.

\*TPD(透過電力密度)は、吸収電力密度と等価. \*塗りつぶしマーカは平均化面積4 cm<sup>2</sup>中の特性、 白抜きマーカは平均化面積1 cm<sup>2</sup>の温度上昇特性 を示す.



**FIGURE 8.** Permissible output power for dipole antenna and dipole antenna array when SAR or TPD restricted to the exposure limit.

- \*SAR(局所比吸収率).
- \*実線はダイポールアンテナ、点線はアレーアンテナ の許容出力特性.

### まとめ

- 電力吸収が表層組織になる6GHz超の周波数領域では、吸収電力密度が最大温度上昇と相関がよい
- 30 GHz以上の周波数帯での非常に狭いビームばく露に関する制限(平均化面積1 cm<sup>2</sup>)により補完されるのであれば、
   300 GHzまでの周波数において、4 cm<sup>2</sup>の平均化面積は妥当。
- 平均化面積1 cm<sup>2</sup>は、遠赤外線ガイドライン(>300GHz)との 連続性も確保される



- 1. Y. Hashimoto, A. Hirata, R. Morimoto, S. Aonuma, I. Laakso, K. Jokela, and K. R. Foster, "On the averaging area for incident power density for human exposure limits at frequencies over 6 GHz," Physics in Medicine and Biology, vol. 62, pp. 3124–3138, 2017.
- 2. K. R. Foster, M. C. Ziskin, and Q. Balzano, "Thermal modeling and the next generation of radiofrequency limits: Commentary," Health Physics, vol. 113, pp. 41–53, 2017.
- K. Li, S. Kodera, D. Poljak, Y. Diao, K. Sasaki, A. Susnjara, A. Prokop, K. Taguchi, J. Xi, S. Zhang, M. Yao, G. Sacco, M. Zhadobov, W. El Hajj, A. Hirata, Calculated Epithelial/Absorbed Power Density for Exposure From Antennas at 10–90 GHz: Intercomparison Study Using a Planar Skin Model. IEEE Access, 2023, 11: 7420–7435.
- 4. D. Funahashi, A. Hirata, S. Kodera, and K. R. Foster, "Area-averaged transmitted power density at skin surface as metric to estimate surface temperature elevation," IEEE Access vol.6, pp.77665-77674, 2018.