

低周波電磁界のばく露評価に関する研究動向

情報通信研究機構

和氣 加奈子

背景

- ばく露評価とは、電磁界へのばく露により体内に生じる体内誘導量を、測定や計算により求めること。
- 低周波帯(ここでは100 kHz以下)の確立された作用は、電磁界に体内に誘導される電界や電流による、神経や筋への刺激作用であるという考えに基づき、電波防護指針やICNIRPガイドラインが定められている。
 - * 電波防護指針においては熱作用に関する指針値が100 kHz以下にも適用される。
- 指針において、基準となる体内誘導量から、対応する測定可能な量である外部電磁界が定められている。

電波防護指針

基礎指針

- ① 全身平均SARの6分間での平均が0.4 W/kg以下
- ② 10kHz – 100 kHzで誘導電流密度が $0.35 \cdot 10^{-4} f$ (Hz) mA/cm²以下
- ③ 10kHz – 100 kHzで接触電流が $10^{-3} f$ (Hz) mA以下

電磁界強度指針

表 2 (a) 条件Pの電磁界強度（6分間平均値）の指針値

周波数 f	電界強度の実効値 E[V/m]	磁界強度の実効値 H[A/m]	電力密度 S[mW/cm ²]
10kHz – 30kHz	614	163	
30kHz – 3MHz	614	$4.9f(\text{MHz})^{-1}$ (163 – 1.63)	
3MHz – 30MHz	$1.842f(\text{MHz})^{-1}$ (614 – 61.4)	$4.9f(\text{MHz})^{-1}$ (1.63 – 0.163)	
30MHz – 300MHz	61.4	0.163	1
300MHz – 1.5GHz	$3.54f(\text{MHz})^{1/2}$ (61.4 – 137)	$f(\text{MHz})^{1/2}/106$ (0.163 – 0.365)	$f(\text{MHz})/300$ (1 – 5)
1.5GHz – 300GHz	137	0.365	5

表 2 (b) 条件Pの低周波領域における電磁界強度（平均時間 < 1 秒）の指針値

周波数 f	電界強度の実効値 E(V/m)	磁界強度の実効値 H(A/m)
10kHz – 100kHz	2,000	163

電界強度指針の根拠(条件p)

表2(a)について(3MHz以下)

- 低周波領域の電界については、基礎指針②と③の考えを6分間平均値にも取り入れることによって、予期できない状況での大きな電撃及び誘導電流による障害を防ぐこととした。このため、3MHz以下の周波数の電界強度の6分間平均値は「614V/m(100mW/cm²相当)」を上限としている。

電界強度指針の根拠(条件p)

表2(b)について

- Hill(Hi85b)等によれば、接地状態にある人体がその長軸に平行な低周波電界にさらされたとき、人体を流れる電流の大きさは次式で表される。

$$I = 275 \times 10^{-9} f(\text{Hz}) E(\text{V/m}) \text{ mA} \quad [60\text{Hz} \sim 200\text{kHz}]$$

基礎指針③により電流を $I \leq 10^{-3} f(\text{Hz}) \text{ mA}$ とすると、電界強度は次式。

$$E \leq 3,636 \text{ V/m} \quad [10\text{kHz} \sim 100\text{kHz}]$$

測定上の不確定さを考慮し、電界の上限を実効値で2,000V/m(安全率1.8)とした。平均時間は、基礎指針に基づき1秒以下とした。

- 基礎指針②により誘導電流密度を $J \leq 0.35 \times 10^{-4} f(\text{Hz}) \text{ mA/cm}^2$ とすると、これに相当する磁界強度は、Bernhardt(Be79)より

$$H \leq 280 \text{ A/m} \quad [10\text{kHz} \sim 100\text{kHz}]$$

電界強度の場合と同様に測定上の不確定さを考慮して同程度の安全率を設け、磁界の上限を実効値で163A/m(安全率は1.7)とした。

Bernhardt(Be79)

The Direct Influence of Electromagnetic Fields on Nerve- and Muscle Cells of Man within the Frequency Range of 1 Hz to 30 MHz

- 人体を球でモデル化し、外部電磁界強度と内部電流密度の関連付けを実施。
- 脳や筋肉等価の等方性の球を扱う。細長い回転楕円体や円柱の方が人体のより良い近似となる場合もあるが、球でもオーダーは合うと想定。
 - 半径7.5 cm、脳(10 kHz以下で0.8 S/m)
 - 半径25cm、筋肉(10 kHz以下で0.1 S/m)

Bernhardt(Be79)

- 入射界の波長が球に比べて小さい場合、準静近似が成り立ち、空間中をz方向に伝播する平面波で電界の偏波がx方向のとき、内部電界は以下の式で表される。

$$\bar{E}_i = \left[\frac{3\bar{E}_0}{2 + \varepsilon^*} + \frac{j\omega}{2} (\bar{B}_0 \times \bar{r}) \right] e^{-j\omega t}$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$$

$$E_i = \left[\frac{3\varepsilon_0 \omega}{\sigma} E_0 + \frac{j\omega}{2} B_0 z \right] e^{-j\omega t}$$

- 電界の寄与による内部電界は一様で球の大きさに依らない。
- 磁界の寄与による内部電界はサイズに依存する。ドーナツ状。

Bernhardt(Be79)

- J_e : 電界寄与による成分 ($J=1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 0.1 , 1 , $3 \text{ mA}/\text{cm}^2$ となる電界)
- J_m : 磁界寄与による成分 (7.5 , 25 cm 球、 $J=1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ と $J=1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ となる磁界)

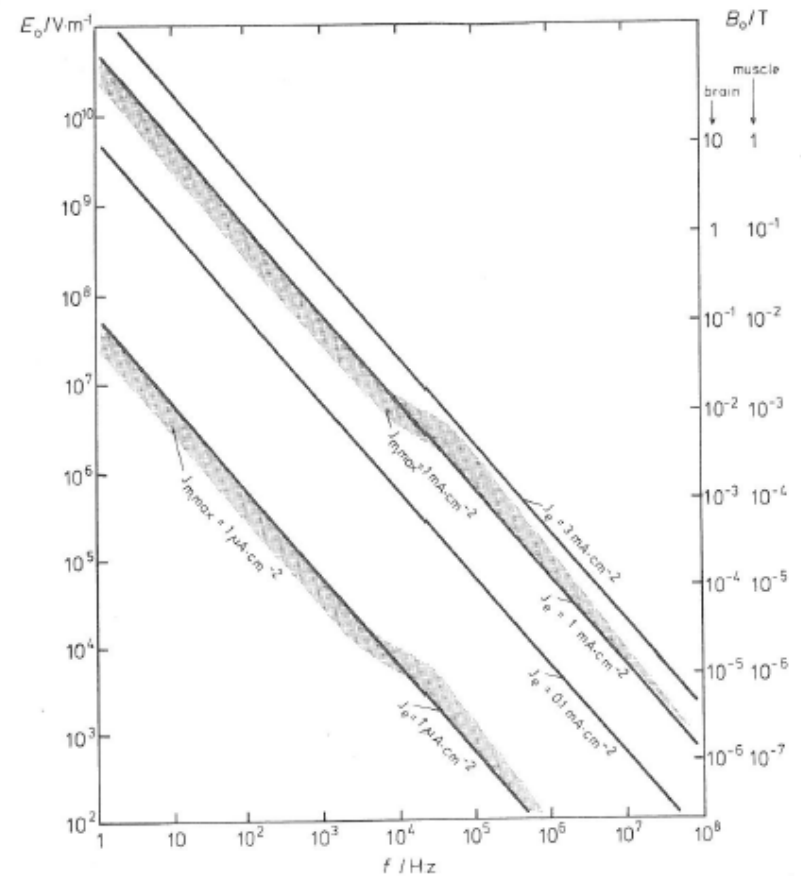


Fig. 1. Electrically and magnetically induced current densities in spheres. The four straight lines show the frequency dependence of the external electric field (left ordinate) which induces the given current densities. Both the dotted ribbons are related to the maximum values of the current densities, induced magnetically either in a 7.5 cm sphere with brain conductivities or in a 25 cm-muscle sphere. The values for the external magnetic flux density, needed to cause these current densities, are shown on the right ordinate

Bernhardt(Be79)

- 時間変化する電界に平衡に配置された細胞膜の電位差の推定
- 興奮性細胞のアクションポテンシャルの推定

I: 長さ1mmの細胞

II: 長さ10mmの細胞



- 限度値の推定 (upper and lower)
10⁴ Hz以上では熱作用も考慮

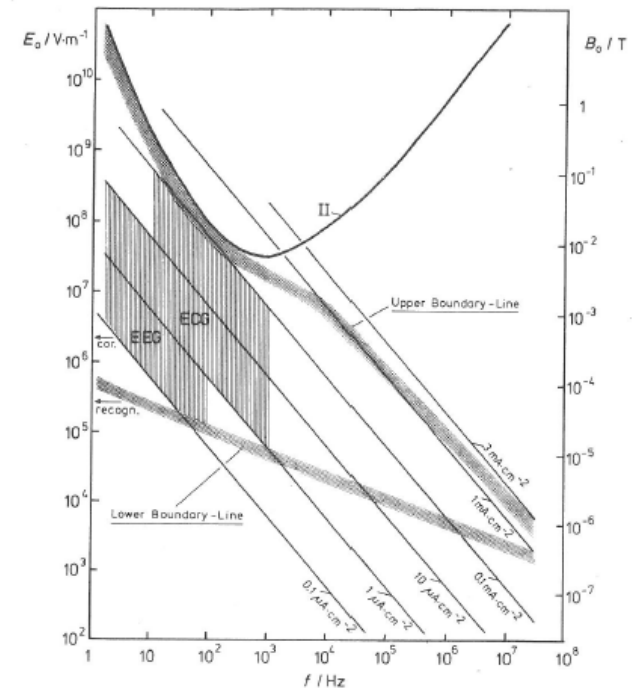


Fig. 3. Curve II, the upper boundary-line and current density lines are replotted from Fig. 2. In addition, the hatched areas show the approximate current densities which exist naturally due to the brain's and to the heart's electrical activity. The B_0 -scale should only be used for statements with regard to peripheral areas of a 25 cm-muscle sphere. The lower boundary-line gives lower threshold values for the electric or magnetic field strengths as well as for current densities for which a direct influence on the nerve- and muscle tissue is unlikely

ICNIRP低周波ガイドライン改訂

- 体内誘導量の指標： 誘導電流密→内部電界
- 評価部位： 頭部中枢神経系組織(CNS)
それ以外の組織(PNS)
- 平均化領域： 2mmの立方体。平均化領域に他の組織を含む場合は除く。網膜や皮膚については周辺組織を含める。99パーセンタイル値。

ICNIRP低周波ガイドライン改訂の根拠

ドシメトリの最近の進展

- 以前は身体を均一で等方性の導体として扱い、円形導体ループモデルや楕円体モデルが用いられてきた。
- 近年、解剖学的な精密人体モデルを用いた計算が実施されている。

Dimbylow 2005, Bahr 2007, Hirata 2009, Nagaoka 2004

Dimbylow	Norman, Naomi, Pregnant	SPFD
Bahr	Visible Human Model	FDTD
Hirata	Taro, Hanako	qs FDTD
Nagaoka	Taro, Hanako	FDTD

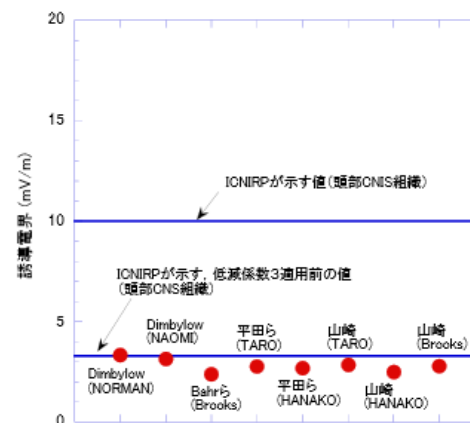


図2 各種人体モデルに対する一様磁界(50 Hz, 0.1 mT)ばく露時の脳組織における誘導電界(全身のボクセルの99パーセンタイル値)の比較ならびにICNIRPガイドラインの換算との比較。カッコ内は数値人体モデル名を表す。

山崎, “ドシメトリ研究の動向”, 電気学会電磁界生体影響問題調査特別委員会

ICNIRP低周波ガイドライン改訂の根拠

外部電磁界が均一なとき、電界による内部電界は向きが体軸に平行なとき、磁界による内部電界は向きが垂直(前後)のときに最大となる。

- 50 Hzにおける磁界の場合

脳: 1 mTの場合に23-33 mV/m

皮膚: 1mTの場合に20-60 mV/m (末梢神経への変換係数は不明なので、皮膚をワーストケースと考える)

- 50 Hzにおける電界の場合

脳: 1 kV/mの場合に1.7 – 2.6 mV/m

皮膚: 12 – 33 mV/m

ICNIRP低周波ガイドライン改訂の根拠

参考レベルの導出における身体のパラメータの影響やドシメトリによる不確かさを考慮して安全側となるよう考える。

実際にはDimbylow 2005, 2006を考慮し、

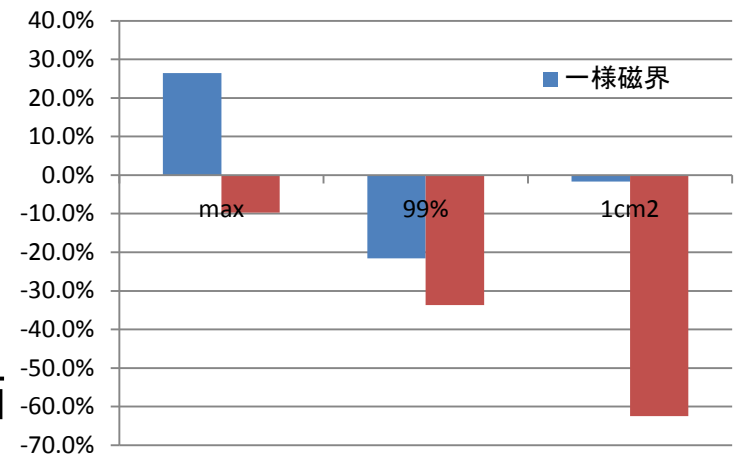
CNS: 50 Hz, 1 T, 33 V/m

PNS: 50 Hz, 1 T, 60 V/m

ドシメトリの不確かさから低減係数3を適用

シミュレーションにおける値の導出に関する問題点

- ICNIRP: 99パーセンタイル値
- 電気学会「電磁界による体内誘導電界・電流調査専門委員会」において比較計算を実施
 - 均一球
 - 50 Hz
 - 一様磁界／磁気ダイポール
- 一様ばく露においては99パーセンタイル値は妥当であるが、局所的なばく露に対しては99パーセンタイル値は過小評価との報告がある。
- Hirataらの報告によれば、局所的なばく露に対しては、99.9パーセンタイル値がより妥当



Laakso and Hirata, PMB, 2013

接触電流

- 電磁界中に置かれた接地されていない金属体が帯電し、それに接触した際に人体に電流が流れる。
- 電波防護指針やICNIRPガイドライン等で接触電流に関する規定がある。
- 指針値レベルの接触電流により体内に生じる電流や電流の大きさが近年解析されている。
 - T. W. Dawson et. al., “Electric fields in the human body resulting from 60-Hz contact currents”, IEEE Trans. on Biomedical Engineering, vol. 48, pp. 1020-1026, 2001.
 - N. Hayashi et. al., “Numerical characterization of dosimetry, human body resistance and heart current resulting from power-frequency touch current for an anatomically realistic human model”, IEEJ Trans., vol. 4, pp. 523-533, 2009.
 - H. Tarao et. al., “Effects of tissue conductivity and electrode area on internal electric fields in a numerical human model for ELF contact current exposures”, Phys. Med. Biol., vol. 57, pp. 2981-2996, 2012.
 - K. H. Chan et. al., “Computational dosimetry for grounded and ungrounded human models due to contact current”, Phys. Med. Biol., vol. 58, pp. 4001-4003, 2013.

ワイヤレス電力伝送(WPT)

- 近年、無線で電力を送るワイヤレス電力伝送技術に関する研究が進んでいる。
- 国内でもWPT作業班において検討が実施中。
 1. EV 100 kHz帯 磁界結合
 2. 家電① 7 MHz帯 磁界結合
 3. 家電② 100 kHz以下 磁界結合
 4. 家電③ 400-500 kHz 電界結合
- WPTを想定したシミュレーションも近年実施されている。
 - A. Christ et. al., “Evaluation of Wireless Resonant Power Transfer Systems With Human Electromagnetic Exposure Limits”, accepted to IEEE Trans. on EMC.
 - I. Laakso et. al., “Evaluation of SAR in a human body model due to wireless power transmission in the 10 MHz”, Phys. Med. Biol., vol. 57, pp. 4991-5002, 2012.
 - I. Laakso et. al., “Evaluation of the induced electric field and compliance procedure for a wireless power transfer system in an electrical vehicle”, Phys. Med. Biol., vol. 58, pp. 7583-7593, 2013.
 - Park et. al., “Incident Electric Field Effect and Numerical Dosimetry for a Wireless Power Transfer System Using Magnetically Coupled Resonances”, IEEE Trans. on MTT, vol. 61, pp. 3461-3469, 2013.

ワイヤレス電力伝送(WPT)

WPTに関する解析における課題

- 利用可能性のある周波数範囲が広いため、準静的近似が適用可能な領域の見極め

Park et. al., “Calculation Errors of the Electric Field Induced in a Human Body Under Quasi-Static Approximation Conditions”, IEEE Trans. on MTT, vol. 61, pp. 2153-2160, 2013.

- 波源近傍の人体が近づくことも想定されるため、人体の存在による波源への影響？
- システム近傍の電界および磁界の双方を考慮する必要があるか？どちらか支配的な界が決められるか？

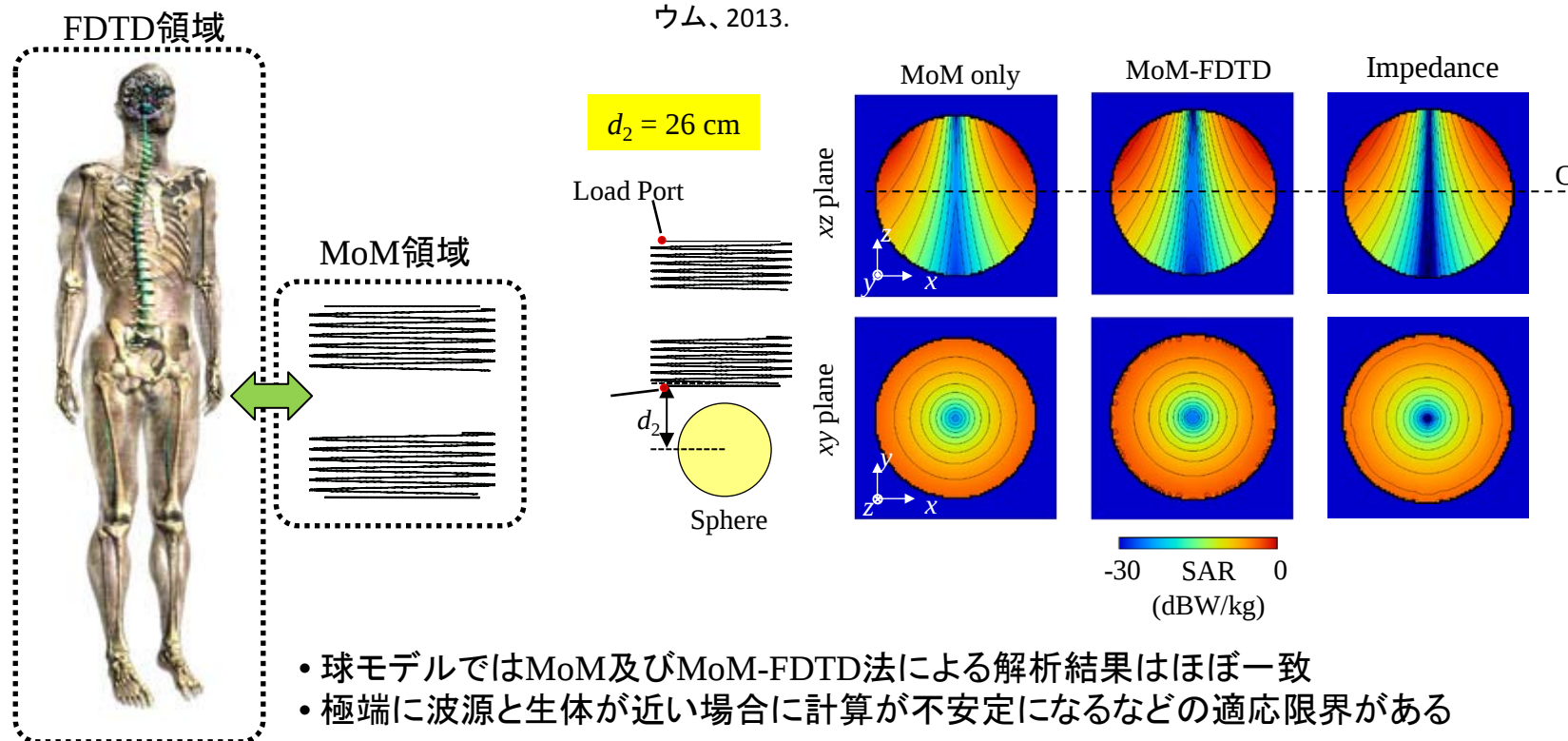
A. Hirata et. al., “Confirmation of quasi-static approximation in SAR evaluation for a wireless power transfer system”, Phys, Med. Biol., vol. 58, pp. N241-N249, 2013.

- 上記を考慮したシミュレーション方法

ワイヤレス電力伝送 (WPT: 10MHz)

WPTシステム領域をMoM法で人体領域をFDTD法で、混成させて解析する方法が検討されている。

チャカロタイ ジェドヴィスノプ他、“MoM-FDTD法による無線電力伝送システムのばく露評価の一検討”、第6回医用生体電磁気学シンポジウム、2013.



まとめ

- 電波防護指針は人体を模擬した球に対する解析により電磁界強度指針を求めている。
- 詳細な数値人体モデルを用いた解析が進み、改訂版のICNIRPガイドラインに取り入れられている。(一様ばく露を想定し99パーセンタイル値を採用)
- WPTシステムなどの新たな技術に伴う解析が行われている。
- 新たな技術に伴い、局所的な界へのばく露に対する99パーセンタイル値の妥当性や接触電流についての評価も必要となってきた。