

サーマクール FLX の RF 加熱理論

準静的近接場としての RF 加熱と配向分極緩和・誘電損失

Perla Clinic Jingumae / technical draft

本資料は、サーマクール FLX の加熱理論説明のうち、「準静的近接場としての RF 加熱」と「配向分極緩和と誘電損失」に関する専門的解説部分を抜粋・整形したものです。

RF 加熱を「導電加熱か、誘電加熱か」という単純な二分法で扱うのではなく、損失性媒質における複素電気応答、境界条件、電場分布、熱輸送の連成として記述します。

3. 準静的近接場としての RF 加熱

サーマクール FLX のような一桁 MHz 帯の RF 治療では、組織内の電磁場を、遠方界の平面波伝搬としてではなく、電極配置と境界条件に支配される準静的近接場として扱う方が実態に近いと考えられます。

準静的近似の範囲では、組織内の電位分布は概念的に以下の式で表されます。

$$\nabla \cdot [(\sigma + i\omega\epsilon_0\epsilon^*)\nabla\phi] = 0 \quad (1)$$

ここで、 σ は導電率、 ω は角周波数、 ϵ_0 は真空の誘電率、 ϵ^* は複素比誘電率、 ϕ は電位です。

電場は、

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi \quad (2)$$

で与えられます。

時間平均発熱密度は、概念的には以下のように表されます。

$$q = \frac{1}{2}\text{Re}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}^*) \quad (3)$$

損失項を導電率と誘電損失成分に分けて書くなら、

$$q \simeq \frac{1}{2}(\sigma + \omega\epsilon_0\epsilon'')|\mathbf{E}|^2 \quad (4)$$

となります。

ただし、この分解は絶対的なものではありません。導電損失を複素誘電率の虚部へ含めて記述することもでき、逆に複素導電率として一括して扱うこともできます。

すなわち、RF 工学的に本質的なのは、「導電加熱か誘電加熱か」という二分法ではなく、損失性媒質内で電場に対する複素電気応答がどのように生じ、どの空間分布で電磁エネルギーが熱へ変換されるかです。

Gabriel らの生体組織誘電特性モデルでも、組織の周波数依存性は Cole–Cole 型分散と静的イオン導電率項を含めて記述されており、生体組織の電気応答を単純な単一機序へ還元することはできません。

4. 配向分極緩和と誘電損失

交流電場中の極性媒質では、外部電場に応じて配向分極が生じます。しかし、分極応答は電場に完全には同相で追従せず、媒質の緩和スペクトルに応じた位相遅れを伴います。

この位相遅れに対応する損失成分が、狭義の誘電損失です。

線形応答の範囲では、分極は

$$\mathbf{P}(\omega) = \varepsilon_0 \chi(\omega) \mathbf{E}(\omega) \quad (5)$$

と書けます。

ここで、 $\chi(\omega)$ は複素感受率であり、

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega) \quad (6)$$

と表されます。

このうち $\chi''(\omega)$ は、外部電場から媒質へ不可逆的に移行するエネルギー、すなわち吸収・散逸に対応します。誘電損失とは、電場に対する分極応答が完全に同相ではなく、有限の緩和時間により位相遅れをもつことに由来する損失です。

Debye 型の単一緩和で近似すれば、

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} \quad (7)$$

であり、誘電損失成分は、

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (8)$$

となります。

この式が示すように、配向分極緩和に由来する誘電損失は、 $\omega\tau \simeq 1$ 付近で最大となり、 $\omega\tau \ll 1$ では分極は電場変化にほぼ追従し、位相遅れに由来する損失は小さくなります。

サーマクール FLX の周波数は 6.78 MHz です。この周波数帯は、バルク水の主要な配向分極緩和が問題となる GHz 帯から大きく離れています。したがって、サーマクール FLX の生体組織加熱を、バルク水の配向分極緩和に由来する狭義の誘電損失加熱として説明するのは適切ではありません。液体水の主要な Debye 緩和は、25°C 付近でおよそ 19 GHz、緩和時間として約 8 ps 程度に対応すると報告されています。

また、生体組織では自由水だけでなく、結合水、水和層、細胞膜、細胞外基質、脂肪小葉、線維隔壁、血管などが複合的に存在します。したがって、実際の電気応答は単一の Debye 緩和ではなく、Cole–Cole 型の分散、Maxwell–Wagner 型の界面分極、イオン伝導、温度依存導電率などを含む複合応答として理解する必要があります。

したがって、サーマクール FLX の発熱を記述するうえで本質的なのは、損失性媒質としての生体組織における複素電気応答と、その空間分布です。

参考文献・情報源

1. Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Phys Med Biol.* 1996;41(11):2271–2293. PMID: 8938024.
2. Gabriel C, Gabriel S, Corthout E. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. *Phys Med Biol.* 1996;41(11):2231–2249.
3. 液体水の Debye 緩和については、温度・モデル・界面条件により値が変動しますが、25°C 付近のバルク水では概ね GHz 帯、緩和時間は ps オーダーとして扱われます。