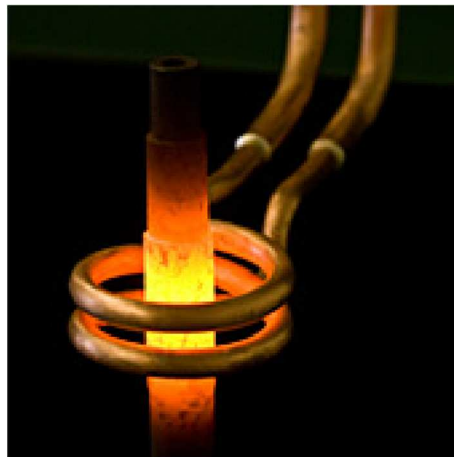


パワーエレクトロニクス機器

高周波誘導加熱

高周波誘導加熱を利用した設備を検討する際に必要な「表皮効果と電流の浸透深さ」、「金属の種類と電流浸透の深さ」や「誘導加熱に必要な電力」など技術者向けの理論や計算式を紹介いたします。



従来、高周波誘導加熱方式では加熱ができなかった用途や環境にやさしい誘導加熱方式への転換により、新しい誘導加熱方式の用途が広がっています。

目次

誘導加熱の原理

誘導加熱による表皮効果と電流の浸透深さ

誘導加熱による金属の周波数と電流浸透の深さ

誘導加熱に必要な電力計算

誘導加熱による放射電力損計算

誘導加熱による金属の放射率表

誘導加熱による主要金属の物理定数表

高周波誘導加熱の原理

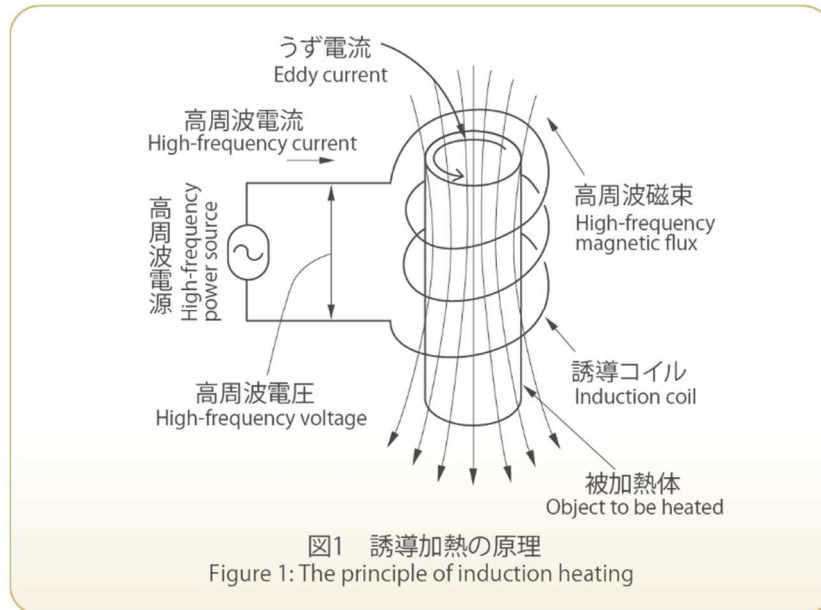


図1に示すように、丸棒状の金属（被加熱物）の周りにコイルを巻いて、この加熱コイルに交流電流を流すと、被加熱物の表面から加熱されて赤くなっていきます。

これは高周波電流によってできる高周波磁束が、被加熱物を貫通して非常に密度の高い電流（うず電流と呼ばれる）を誘導し、これによって被加熱物の表面が加熱されるからです。

このように、コイルからはなれて置かれた金属に電流が誘導され、金属が加熱される現象を誘導加熱といいます。このうず電流は被加熱物の表面に近いほど強く、内部にいくにつれて、指数関数的に弱くなります。これを表皮効果といいます。

下式はこの表皮効果を示したものです。うず電流が表面における強さの 0.368 倍に減少した点までの深さを電流浸透深さと呼び、誘導加熱を利用する上で非常に重要な数値となります。電流浸透深さは、普通 δ で示します。

$$\delta = 5.03 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\rho / (\mu \cdot f)} \quad (\text{cm})$$

ρ : 被加熱材の体積抵抗率 ($\Omega \cdot \text{m}$)

μ : 被加熱材の比透磁率

(磁性材では $\mu > 1$ 、非磁性材では $\mu = 1$)

f : 周波数 (Hz)

$$\delta: \text{penetration depth } \delta = 5.03 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\rho / (\mu \cdot f)} \quad (\text{cm})$$

ρ : volume resistivity of the material to be heated ($\Omega \cdot \text{m}$)

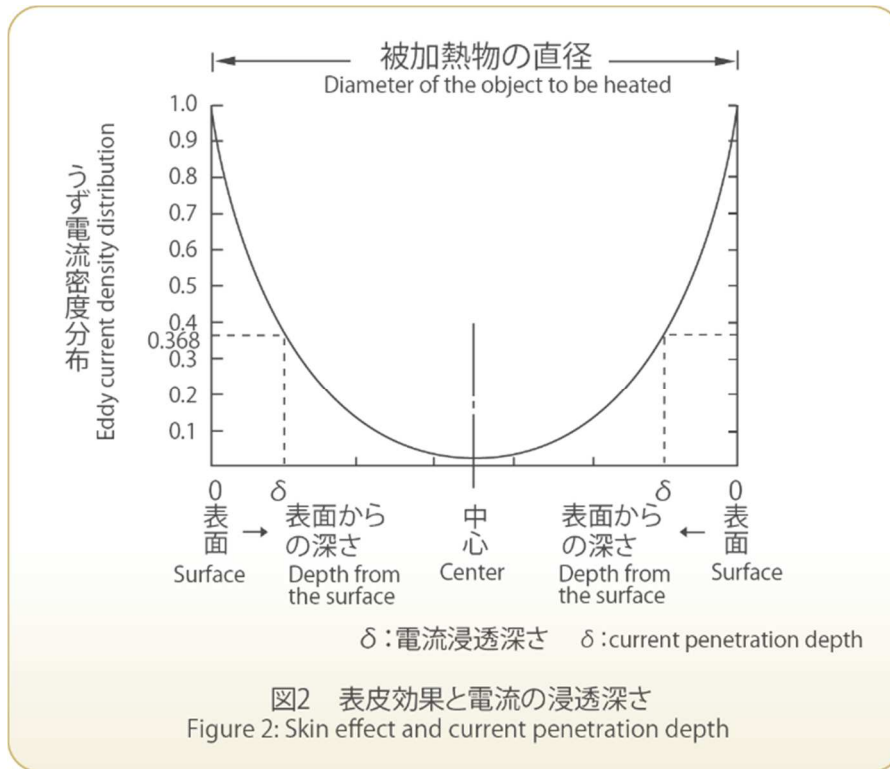
μ : relative permeability of the material to be heated

(for magnetic material $\mu > 1$, for non-magnetic material $\mu = 1$)

f : frequency (Hz)

浸透深さの計算式

高周波誘導加熱による表皮効果と電流の浸透深さ

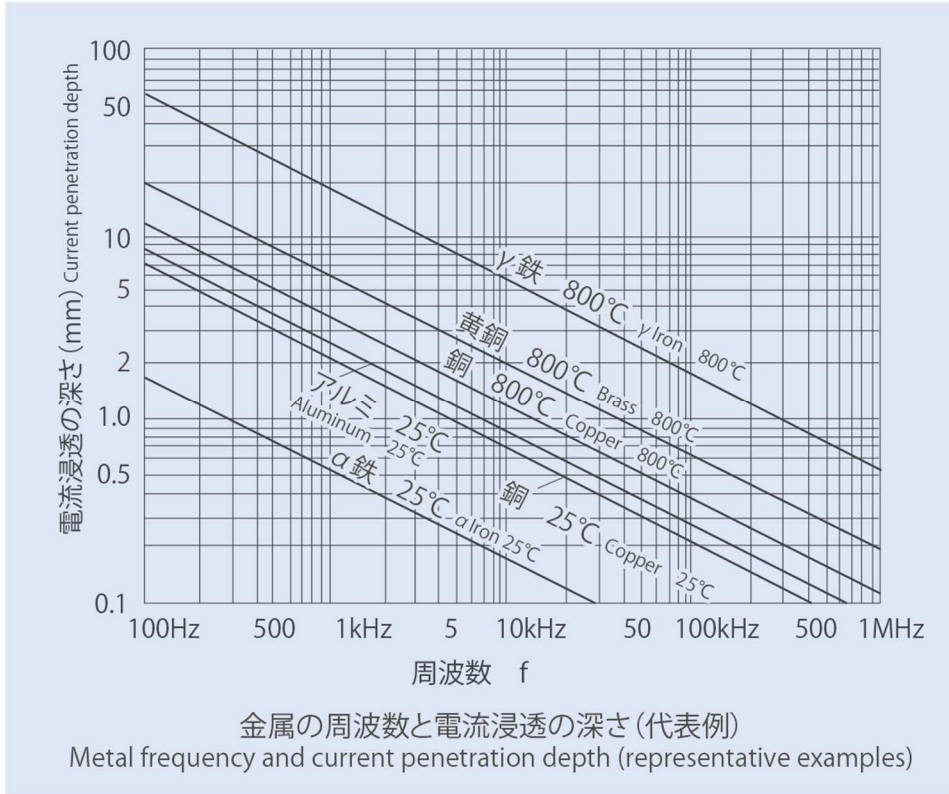


浸透深さの計算式から、材質が同じものを誘導加熱すると ($\rho/\mu = \text{一定}$ のとき) 周波数が高いほど δ は小さくなり、発熱部が表面近くに集中されることがわかります。

表面焼入れの場合は、周波数を高くして電流浸透深さを浅くし、さらに加熱時間を短くすることにより、表面に発熱部を集中させてからすぐに冷却する必要があります。

一般的に表面の電力密度は $1 \sim 5 \text{ kW/cm}^2$ となります。これに対して、全体の均熱加熱の場合は周波数を低くして、電流浸透深さを被加熱物の直径の $1/3 \sim 1/7$ 程度とし、加熱時間も比較的長くとります。

高周波誘導加熱による金属の周波数と電流の浸透深さ（代表例）



γ鉄はキュリー点以上の温度の時で、 $\rho=1.25 \times 10^{-6}$ 、 $\mu=1$ とした場合、黄銅は約 800℃の場合で $\rho=1.5 \times 10^{-7}$ 、 $\mu=1$ とし、銅は約 800℃の場合 ($\rho=5 \times 10^{-8}$ 、 $\mu=1$) と常温の場合 ($\rho=1.7 \times 10^{-8}$ 、 $\mu=1$) を示しています。また α鉄は常温の場合で $\rho=10 \times 10^{-8}$ 、 $\mu=100$ として示しています。

高周波誘導加熱に必要な電力計算

高周波誘導加熱に必要な電力計算被加熱物の温度にするために必要な電力の計算です。

加熱に必要な電力 The power required to heat an object

$$P_0 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5$$

P_1 = 被加熱物へ吸収される電力

P_2 = 熱の放射電力損

P_3 = 熱対流電力損

P_4 = 熱伝導電力損

P_5 = フィーダーロス、CTロス

$$P_0 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5$$

P_1 = electric power absorbed to the object to be heated

P_2 = heat radiation power loss

P_3 = heat conduction power loss

P_4 = heat transmission power loss

P_5 = feeder loss, CT loss

$$P_1 = \frac{M \cdot C \cdot \Delta T}{\text{sec}} \quad (\text{W})$$

M : 被加熱物の質量 (kg)

C : 被加熱物の比熱 (J/(kg·K))

ΔT : 加熱前後の温度差 (°C)

$$P_1 = \frac{M \cdot C \cdot \Delta T}{\text{sec}} \quad (\text{W})$$

M : weight of the object to be heated (kg)

C : specific heat of the object to be heated (J/(kg·K))

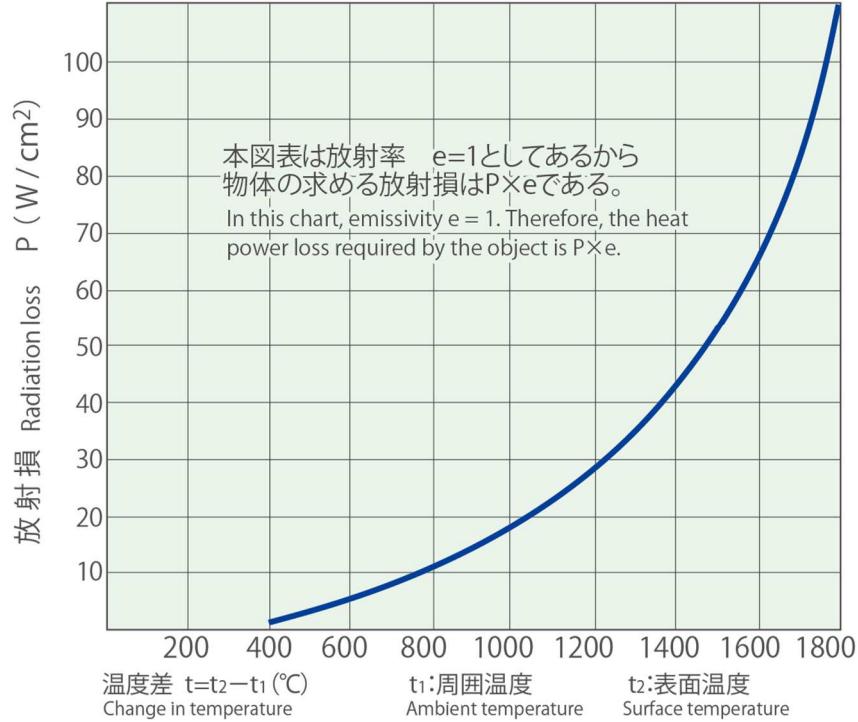
ΔT : temperature difference before and after heating

■ 被加熱体にかかる電力 (発熱量) はその材料の体積抵抗率、透磁率及び周波数のルートに比例します。

■ The electric power (heating value) to the object to be heated is proportional to the volume resistivity, permeability, and root frequency of the material.

高周波誘導加熱による放射電力損計算

$$P_2 = 5.67e \times \left[\left(\frac{273+t_2}{1000} \right)^4 - \left(\frac{273+t_1}{1000} \right)^4 \right] (\text{W/cm}^2)$$



高周波誘導加熱による金属の放射率

金属名 Metal	温度 (°C) Temperature (°C)	磨面 Facet	酸化面 Oxidized surface
アルミニウム Aluminum	200~600	0.04	0.2~0.3
銅 (磨き) Copper	200~600	0.02	0.57
銅 (光沢無) Copper	200~600	0.04	0.79
銀 Silver	200~600	0.035	—
黄銅 Brass	50~350	0.13~0.4	0.02
ニッケル Nickel	200~600	—	0.37~0.48
モーネルメタル Monel metal	200~600	—	0.41~0.46
炭素 Carbon	125~600	—	0.79~0.81
タンタラムフェラメント Tantalum filament	1200~3000	—	0.194~0.31
タングステンフェラメント Tungsten filament	27~3300	—	0.032~0.35

高周波誘導加熱による主要金属の物理定数表

金属名 Metal	記号 Symbol	原子量 Atomic weight	密度 Density (kg/m ³)	融点 Melting point (°C)	沸点 Boiling point (°C)	比熱 Specific heat (J/(kg·K))at 20°C	熱伝導率 Thermal conductivity (W/(m·K))at 20°C	体積抵抗率電気抵抗率 Volume resistivity (electrical resistivity) (Ω·m) at 100°C	体積固有抵抗の温度係数 (0-100°C) Volume resistivity temperature coefficient
亜鉛	Zn	65.37	7.13×10 ³	419.58	907	384	121	7.8×10 ⁻⁸	4.2×10 ⁻³
アルミニウム	Al	26.98	2.70×10 ³	660.37	2520	903	237	3.55×10 ⁻⁸	4.2×10 ⁻³
イリジウム	Ir	192.2	22.42×10 ³	2443	4437	129	147	6.8×10 ⁻⁸	4.5×10 ⁻³
黄銅 (C2801)		-	8.5×10 ³	905	-	375	123	8.74×10 ⁻⁸	4.1×10 ⁻³
金	Au	96.96	19.32×10 ³	1064.43	2857	131	315	2.88×10 ⁻⁸	4.0×10 ⁻³
銀	Ag	107.86	10.5×10 ³	961.93	2162	235	427	2.08×10 ⁻⁸	4.1×10 ⁻³
グラファイト		-	2.25×10 ³	-	-	712	24	8×10 ⁻⁶	-
クローム	Cr	51.99	7.2×10 ³	1857	2682	462	90.3	1.61×10 ⁻⁷	2.7×10 ⁻³
硅素	Si	28.08	2.33×10 ³	1412	3266	680	148	0.639	-
軟鋼 (S400)		-	7.8×10 ³	1500	-	502	46	1.9×10 ⁻⁷	2.0×10 ⁻³
硬鋼 (S45C)		-	7.8×10 ³	1400	-	502	46	2.0×10 ⁻⁷	2.0×10 ⁻³
コバルト	Co	58.93	8.9×10 ³	1495	2930	416	99	9.5×10 ⁻⁸	7.0×10 ⁻³
錫	Sn	118.69	7.31×10 ³	231.97	2603	227	67	1.58×10 ⁻⁷	4.2×10 ⁻³
SUS430 (磁性)		-	7.7×10 ³	1470	-	460	26	1.98×10 ⁻⁶	28.7×10 ⁻³
SUS304 (非磁性)		-	7.92×10 ³	1430	-	499	16	7.76×10 ⁻⁷	0.97×10 ⁻³
セレン	Se	78.96	4.79×10 ³	220.2	684.9	353	-	-	4.5×10 ⁻³
タングステン	W	183.85	19.3×10 ³	3407	5555	134	178	7.3×10 ⁻⁸	4.9×10 ⁻³
炭素	C	12.01	3.51×10 ³	-	3370	693	24	3.5×10 ⁻⁵	0.9×10 ⁻³
タンタル	Ta	180.94	16.65×10 ³	2985	5510	143	55	1.67×10 ⁻⁷	3.6×10 ⁻³
チタン	Ti	47.9	4.54×10 ³	1666	3289	521	22	2×10 ⁻⁸	3.47×10 ⁻³
鉄 (純鉄)	Fe	55.84	7.9×10 ³	1810	3273	452	80	1.47×10 ⁻⁷	6.5×10 ⁻³
銅	Cu	63.54	8.96×10 ³	1084.5	2571	399	398	2.23×10 ⁻⁸	4.4×10 ⁻³
トリウム	Th	232.03	11.72×10 ³	1750	4789	14	49	2.08×10 ⁻⁷	4.1×10 ⁻³
鉛	Pb	207.19	11.35×10 ³	327.5	1750	129	35	2.7×10 ⁻⁷	4.1×10 ⁻³
ニッケル	Ni	58.71	8.90×10 ³	1455	2890	441	90	1.03×10 ⁻⁷	6.6×10 ⁻³
白金	Pt	195.09	21.45×10 ³	1769	3827	132	71	1.36×10 ⁻⁷	3.9×10 ⁻³
ベリリウム	Be	9.01	1.848×10 ³	1287	2472	1890	147	5.3×10 ⁻⁸	8.9×10 ⁻³
マグネシウム	Mg	24.31	1.74×10 ³	650	1095	1013	156	5.6×10 ⁻⁸	4.2×10 ⁻³
マンガン	Mn	54.93	7.44×10 ³	1246	2062	479	8	-	-
燐青銅		-	8.86×10 ³	1060	-	380	84	-	-
ロジウム	Rh	102.9	12.41×10 ³	1960	3697	248	88	6.2×10 ⁻⁸	4.4×10 ⁻³

※従来単位との換算については、密度 1kg/m³=1×10⁻³g/cm³、比熱 1J/(kg·K)=1/(4.18605×10³)cal/g·°C、熱伝導率 1W/(m·K)=1/(4.18605×10²)cal/(s·cm·°C)、体積抵抗率 1Ω·m=1×10⁶μΩ·cmとなります。