

熱に関する設計・解析・評価技術の向上

竹中智哉*・清水慎吾**

*電磁力担当・**機械担当

Improvement of thermal design, analysis and evaluation technology

Tomoya TAKENAKA*・Shingo SHIMIZU**

* Electromagnetic Section・**Machinery Section

要 旨

平成 29 年度現在，県内企業から熱課題に関する技術相談を多く頂いている．相談内容を分析すると，熱を設計段階からマネジメントすれば，CAE 解析や実機評価の負担を軽減し，短期間・低コストで課題を解決できるケースが少なくない．県内企業への技術支援を強化するため，平成 28～29 年度に，熱設計技術の向上を図り，併せて CAE 解析や実機評価のノウハウを蓄積した．産業界の基盤技術として広く利用され，県内企業においても活用されている高電圧パルスパワー装置を事例とし，一部に CAE 解析を取り入れながら，伝熱基礎式を用いた熱計算式による設計法と過渡解析や空間的な分布予測が可能な熱回路網法による熱設計を行い，実機評価を行った．

1. はじめに

電子機器における熱設計の目的は，機能・性能および寿命，安全性の確保にある．近年，電子機器の高機能化に伴い，各モジュールの小型化や大容量化，高周波化などが求められ，熱のマネジメントが困難になっている．県内企業からの技術相談も多い．熱課題に対しては従来から，試作機による実機評価やシミュレーション解析の結果から熱対策をトライアンドエラーで繰り返すアプローチがよく行われている．これらの手法では，検証が先行しており，対策が後手に回る．これに対して，設計段階で，熱的要因（目標温度や発熱量）を見積もり，冷却に寄与する冷却構造（形状や冷却部品）を予測（仮説立案）後に検証を行えば，手戻りが減り，短期間・低コストで課題解決に近づく可能性が高い．そこで，高電圧パルスパワー装置を事例とし，熱設計技術の向上を図り，併せて CAE 解析や実機評価のノウハウを蓄積することとした．

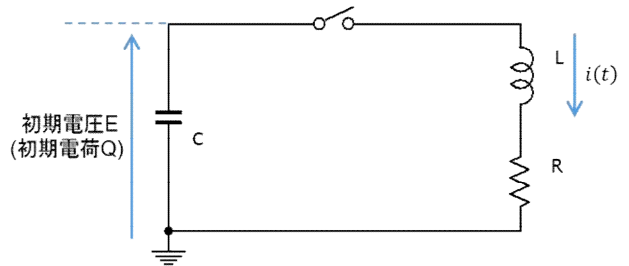


Fig. 1 コンデンサ放電回路 等価回路

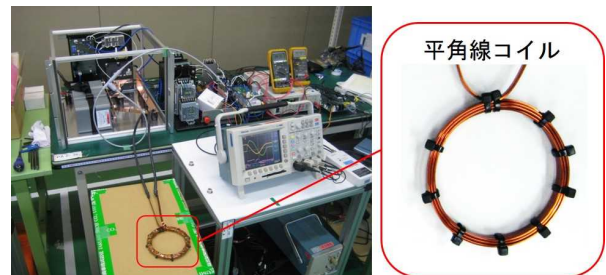


Fig. 2 高電圧パルスパワー発生装置試作機 外観

2. 被試験装置 DUT(device under test)の概要

本研究で取り組んだ高電圧パルスパワー装置について説明する．本装置は，受動部品の検査工程など，産業界の基盤技術として広く利用され，県内企業においても活用されている．本装置で基本となるコンデンサ放電回路を試作し，繰り返しパルスでコイルに発生する熱を予測することとした．(Fig.1, Fig.2)

電源装置とコイルの仕様を Table 1 に示す．コイルは，平角銅線を2層×3巻の構成で6巻したものを試作し，LCRメータを用いて抵抗値を実測した．

Table 1 DUT仕様

電源装置	パルス幅 $T \approx 300 \mu s$ ，周波数 $f_s \approx 13 \text{ Hz}$ 設定初期電圧 $E : 200 \sim 220 \text{ V}$ コンデンサ $C = 300 \mu \text{ F}$
コイル	円形，内径 $\phi 10 \text{ mm}$ ，6 巻(2 層×3 巻) コイル抵抗 $8.23 \text{ m}\Omega @ 3.275 \text{ kHz}$ 直列抵抗 $8.84 \text{ m}\Omega^* @ 3.275 \text{ kHz}$ ※電流検出用抵抗，配線を含む実測値 <線材> ・ $2 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ AIW(ポリアミドイミド)平角銅線 ・皮膜厚さ: $0.04 \sim 0.05 \text{ mm}$ 以上

3. 熱設計・解析

温度を予測するための3つのアプローチ方法を示す。

①伝熱基礎式の合成

基礎方程式を単純な境界条件で解いて求めた伝熱基礎式を組み合わせて、熱エネルギー保存（定常状態では発熱量＝放熱量）となる温度を推定する。式から設計変数が結果（定常状態）に及ぼす影響を把握できる。しかし、計算できる未知数は1つで、対象の定常状態における平均温度しか算出できない。このため、簡易設計や設計方向性の当たりを付ける際に用いる。

②熱回路網法

伝熱基礎式を組み合わせて、熱等価回路を作成し、節点方程式を解く。全ての未知数を計算でき、空間的、時間的な分布を把握できる。また、節点は座標を持たず、論理モデルを作成可能で、冷却方式や構造を決める概念設計に向けたモデルを作成できる。しかし、熱抵抗を計算する必要があり、設定の労力が大きい。このため、最適設計を行うなど、本格設計の際に用いる。

③数値解析ソフト

偏微分方程式である基礎方程式を解き、近似解を求める。市販品も多数あり、当センターはANSYS(米国、ANSYS社製)を導入している。他の手法に比べ、比較的前処理（形状モデル作成、メッシュ分割・境界条件設定）が容易で簡単に結果を得られる。しかし、目標温度を条件（インプット）として、充足する形状（冷却方式や構造）を出力できない。また、簡単に解析結果を得られる反面、誤差要因が多く、正確な結果を得るためには解析スキルや熟練したノウハウや経験が必要となる。このため、スキルや経験を積み、設計を検証するツールとして利用するのが望ましい。

平成29年度現在、当センターのANSYSには熱流体を解析するオプションが含まれておらず、熱伝導以外の解析は難しい。

上記のアプローチ法により、DUTの温度を予測した。

3.1 伝熱基礎式の合成

本手法では、まず発熱量を見積もる。今回は、コイルに発生する熱を予測するため、コイルでの消費電力 P [W]を求める。コンデンサ C [F]、コイル L [H]、抵抗 R [Ω]の直列等価回路であるFig.1の回路方程式を求めると下式となる。

$$\frac{1}{C} \int i(t) dt + L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = 0 \quad (1)$$

R はコイル、配線の抵抗成分 R_{coil} と、それ以外の抵抗成分（スイッチ素子、電流測定用センス抵抗など） R_s の総和になる。本回路にはパルス電流が流れるため、 R には交流抵抗値を代入する必要がある。さらに連続パルスを印加する場合には、温

度上昇 ΔT [$^{\circ}\text{C}$]による抵抗値の上昇を考慮する必要があり、次式のように表現できる。

$$R = R_s + R'_{coil} \quad (2)$$

$$R'_{coil} = R_{coil} \times (1 + K\Delta T) \quad (3)$$

K は温度係数で銅の場合には 4.33×10^{-3} である。 R と C 、 L の関係によって3つの放電モードがある。今回は、減衰振動モード $R^2 < 4L/C$ となるように設計した。この場合、電流 $i(t)$ は下式で表される。

$$i(t) = \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (5)$$

また、電流の刺激パルス幅 T [s]は下式となる。

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (6)$$

式(4)から RL 直列部にかかる電圧 $v(t)$ は、下式になる。

$$v(t) = \frac{E}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \gamma) \quad (7)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{2L\omega_0}{R} \right) \quad (8)$$

式(4)、式(7)から RL 直列部の消費電力 $p(t)$ は、下式になる。

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (9)$$

$$p(t) = \frac{1}{2} I_p V_p e^{-2\alpha t} \{ \cos \gamma - \cos(2\omega_0 t + \gamma) \} \quad (10)$$

$$I_p = \frac{E}{\omega_0 L}, \quad V_p = \frac{E}{\omega_0 \sqrt{LC}} \quad (11)$$

式(7)からパルス電流の平均消費電力 \bar{P}_p は、下式になる。

$$\bar{P}_p = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (12)$$

$$= \frac{1}{2} R I_p^2 \times \frac{1}{2T\alpha} (1 - LC\alpha^2) (1 - e^{-2T\alpha}) \quad (13)$$

ここで、 $(1 - LC\alpha^2) \cong 1$ より、コイルにおける平均消費電力 \bar{P} は、下式になる。

$$\bar{P} = \bar{P}_p \times T \times f_s \quad (14)$$

$$= \frac{1}{2} R'_{coil} I_p^2 \times f_s \times \frac{1}{2\alpha} (1 - e^{-2T\alpha}) \quad (15)$$

次に、放熱量（熱流量） Q [W]を伝熱基礎式の組み合わせで算出する。下記のとおり対流、放射に分けて熱コンダクタンス C [W/K]を定式化し、合計値として算出する。ここで、 S_{xx} ：各面の表面積[m²]、 L 、 H ：代表長さ（壁面の流れ方向の長さ）[m]、 σ ：ステファンボルツマン定数（ $=5.67 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴]）、 ε ：放射率、 T_{∞} ：環境温度[K]、 T_s ：コイル表面温度（ $T_s = \Delta T + T_{\infty}$ ）[K]である。

$$Q = \sum C_n \Delta T \quad (16)$$

対流（コイル上面） $C_{top} = S_{top} \times 2.51 \times 0.54 \times \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{0.25} \quad (17)$

対流（コイル側面） $C_{side} = S_{side} \times 2.51 \times 0.56 \times \left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{0.25} \quad (18)$

対流（コイル底面） $C_{bottom} = S_{bottom} \times 2.51 \times 0.27 \times \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{0.25} \quad (19)$

放射 (コイル表面) $C_{top} = S_{total} \times \sigma \varepsilon (T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty)$ (20)

対流 + 放射 (配線) $C_{wire} = S_{wiretotal} \times \left\{ 2.51 \times 0.56 \times \left(\frac{\Delta T}{L_{wire}} \right)^{0.25} + \sigma \varepsilon (T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty) \right\}$ (21)

このように、発熱量および放熱量の式に未知数である温度上昇 ΔT を含むため、 ΔT の初期値を仮定し、発熱量=放熱量となる収束演算を行えば、熱平衡状態における ΔT が求められる。そこで、EXCEL で収束演算を行えるマクロを作成した。これにより、コイルにおける平均温度上昇値を算出できる。

3.2 熱回路網法

本手法には、形状が決まっていない状態で行う論理モデルの解析と、ある程度形が決まった状態で行う物理モデルの解析がある。今回は、形状が決まっているので物理モデルを作成した。(Fig. 3)

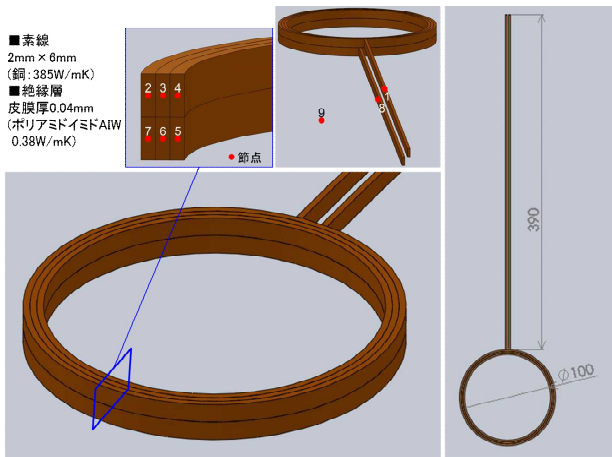


Fig. 3 コイル物理モデル

Fig. 3 に示すように、モデルを解析したいサイズのセルに分割し、重心位置に節点を配置する。節点はセル内の温度を代表する点であり、セル内の温度は均一と考えた計算を行う。そして、物理モデルに基づいて、節点間を熱抵抗で結び、熱回路モデルを作成して熱抵抗値を計算する。(Fig. 4)

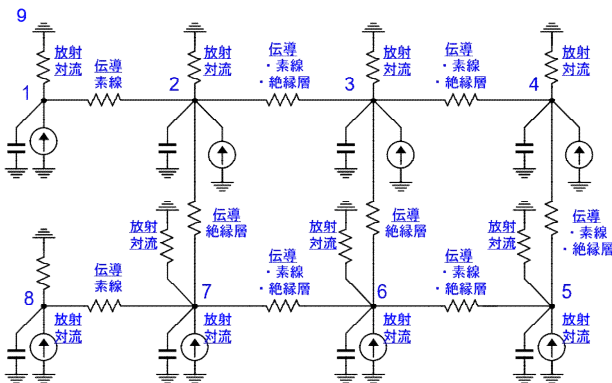


Fig. 4 コイル熱回路モデル

形状が決まっていない論理モデル解析では、熱回路モデルからの計算となる。Fig. 4 をもとに、節点に成り立つエネルギー保存則から下式の節点方程式を未知数分立てて、連立方程式を解く。

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{R_{ij}} (T_i - T_j) = Q_i - \frac{C_i}{\Delta \tau} (T_i - T_i') \quad (22)$$

ここで、 R_{ij} は N_i と N_j を結合する熱抵抗 [K/W], Q_i は節点 N_i の発熱量 [W], $T_i \cdot T_j$ は接続される節点の現在の温度 [K], T_i' は 1 ステップ前の時間の温度 [K], $\Delta \tau$ は計算時間のステップ幅 [sec], 節点 N_i の熱容量 [J/K] である。ここで用いる熱抵抗および発熱量は、伝熱基礎式の合成で求めた方法と同様にして算出する。ただし、伝熱基礎式の合成で求めた発熱量はコイルでの発熱量の総量であるため、熱回路網法では各節点の体積割合で分割する。また、熱抵抗は熱コンダクタンスの逆数で求められる。

節点方程式は連立一次方程式となるため、ガウスの消去法(掃き出し法)などで解ける。そこで、EXCEL を用いて、各節点における過渡応答値が算出できるマクロを作成した。

3.3 数値解析ソフト

熱伝導解析のみ可能な ANSYS を用いて解析した。本手法は形状を決定し、発熱量と熱伝達率を入力する。入力パラメータは、伝熱基礎式の合成で求めた値を用いた。今回の解析形状はコイルの断面としたので、配線部からの放熱分を除いた発熱量で解析した。

4. 実機評価

4.1 温度測定環境の検証

DUT の温度を実測するにあたり、最適なセンサを予備実験により選定した。候補として K 熱電対 素線径 $\phi 0.1\text{mm}$ (理化学工業製, チノー製), 測温抵抗体 (pt100) のシリコンゴムモールド品 R060-33 (チノー製), 銅円板樹脂モールド品 R060-38 (チノー製) を検討した。結果, K 熱電対が最も正確に温度測定できた。測温抵抗体は, 本 DUT に対してセンサ寸法が大きく空間分解能が低くなってしまい, スプレッド効果により K 熱電対よりも温度を低く計測してしまう結果となった。(R060-33 については 10°C 程度低い結果となった。)

次に, K 熱電対について補償電線タイプ (理化学工業製) と素線タイプ (チノー製) の比較を行った。結果, 有意な差はなく, 同等に評価できることを確認した。

そして, K 熱電対の貼付 (設置) 方法についても検討し, 接着テープで固定する方法とアルミテープで固定する方法を比較した。結果, 熱伝導率のよいアルミテープ固定の方が正確に温度測定できた。

最後に, 発熱源となりうる蛍光灯や人, 計測機器 (サーモグラフィなど) の影響を検討した。実験を行った部屋の環境で

は、十分な広さが確保されており、測定結果に対する影響は無視できることがわかった。(発熱源がある場合には、ない場合に比べ約 2℃高い測定結果となったが、周囲温度も 1℃上昇しており、温度上昇値 ΔT で考えると 1℃の差となり測定誤差範囲に収まった。)

以上の予備実験の結果から、K 熱電対(素線径 φ0.1mm, 補償電線使用・未使用問わず)をアルミテープで固定し、測定者立ち合いやサーモグラフィの併用を可として、温度測定を行うこととした。(Fig. 5)

周囲温度の測定については、IEC-J60950-1 温度上昇試験の測定方法を参考に、DUT から水平に 50cm 離れ 15cm 高い位置で環境温度 T_{∞} となる気中温度(CH1)を測定した。CH1 には測温抵抗体 pt100 を用いた。CH2~5 には K 熱電対を使用し、CH2~3 はコイル上面 (CH2 は配線部付近)、CH4~5 はコイル内部を測定した。また、熱電対での表面温度測定の外に、コイルの平均温度上昇試験で用いられる抵抗法による測定を同時に行った。



Fig. 5 実機評価風景

4.2 実機評価結果

温度測定結果を Fig.6~8 に示す。

周囲温度 20℃@計測開始→22.7℃@熱平衡状態(34min.)
コイル内部 CH4 20.7℃→95.5℃

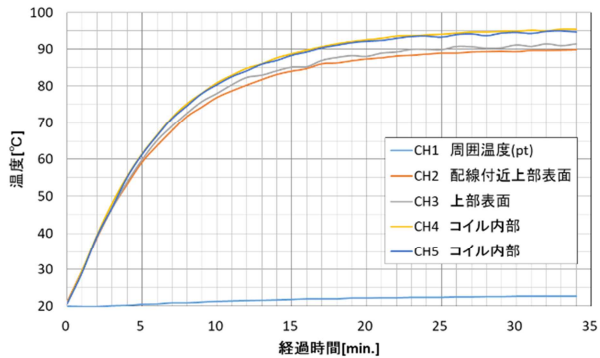


Fig. 6 コイル温度 過渡応答(実測)

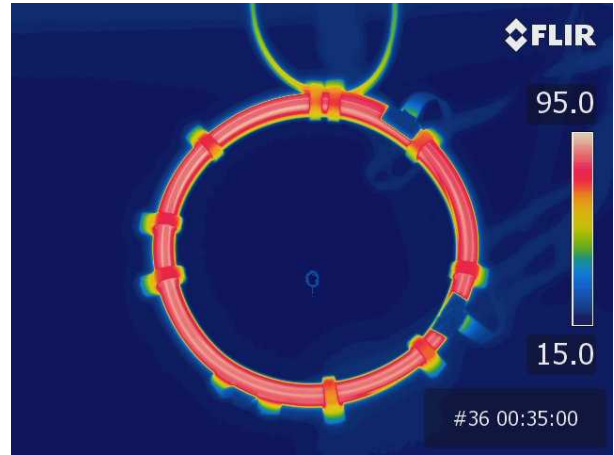


Fig. 7 熱平衡状態におけるコイル上部の温度分布 (サーモグラフィ測定結果)

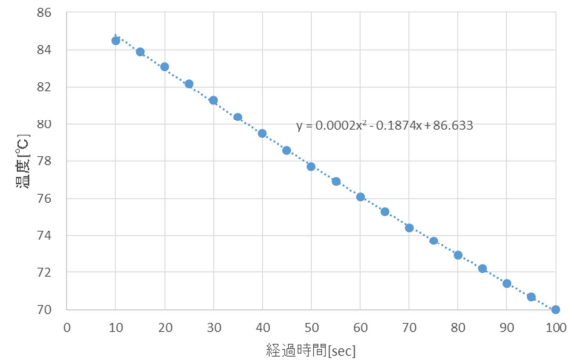


Fig. 8 抵抗法 試験結果

コイル上面温度 CH3 は測定開始時の 20.8℃から熱平衡状態では 91.5℃まで上昇した。配線部からの放熱の影響を受ける位置 CH2 は 89.9℃と 1.6℃低い結果となった。サーモグラフィでも同様の温度分布が確認できた。(Fig.7)コイル内部 (CH4) は 95.5℃で、コイル上面よりも温度が高かった。コイル内部は下層 2 巻目銅線の放熱量が小さい影響で温度が高かったと考えられる。

抵抗法により求めたコイルの平均温度は 86.6℃となった。抵抗法は DUT の動作停止直後から抵抗値を測定し、時間対抵抗値曲線を描いて動作停止瞬間の抵抗値を求める方法であり、抵抗温度係数を利用すれば平均温度上昇値を測定できる。今回はコイルの平均温度を測定するため、測定端子接続箇所をできるだけコイル近くに配置し、配線による冷却の影響を抑えた。(Fig. 5)

4.3 設計・解析結果と実機評価結果の比較検証

設計・解析結果と実機評価結果の比較を Fig.9, Fig.10, Table2 にまとめる。

Table2 の消費電力の実測では、オシロスコープを用いてコイル端電圧およびパルス電流を計測して算出した。実験上の都合で 200V よりも低い設定電圧 E:197.8V とし、連続パルス

ではなく単発パルスで測定を行った。結果、パルス電流はピーク値が1.17kApeak、パルス幅Tが約317μsとなり、パルス電流の平均消費電力 \bar{P}_p 、コイルの平均消費電力 \bar{P} を計算すると、4.8kW、19.78Wとなった。単発パルス出力時で平均消費電力の比較検証を行うと、ほぼ同程度の値で、発熱量を見積もる消費電力設計式が妥当であることを確認できた。

次に、温度上昇について比較する。伝熱基礎式の合成による設計見積では、配線部を含むコイルの平均温度を算出することになる。したがって、実機評価の抵抗法で求めた値と近い値になると考えられる。しかし、今回の抵抗法測定では、配線部を含まずコイル平均温度の測定をしたため、抵抗法による実測の方が約10℃高くなった。別のコイルを用いて配線部を考慮して実測した際には、実測の方が約3℃高い結果となった。これらの結果から伝熱基礎式の合成により作成した熱計算マクロは実用上問題ない精度であると考えられる。

熱計算マクロにて熱平衡状態時における放熱量[W]の割合を求めると、Table3 のようになる。配線部で約6割を放熱している。また、自然対流ではコイル側面からの放熱量が多いことがわかる。

熱回路網法による設計見積と実機評価の比較では、最大発熱点(設計見積:節点6, 実機評価:CH4)におけるコイル温度上昇の過渡応答が同じように推移している。(Fig. 9)そして、熱平衡時の温度上昇値が約72℃で、ほぼ同程度の値であり、熱回路網法による設計見積も実用上問題ない精度であることが確認できた。サーモグラフィでの実測結果や伝熱基礎式の合成による設計見積のとおり、配線部である節点1は、放熱への寄与が大きく、熱平衡時の温度上昇値は約38℃との見積結果となった。

Table 2 設計・実機評価結果の比較

項目	設計見積		実機評価
	伝熱基礎式	熱回路網法	
温度上昇 ΔT @熱平衡時	53.52℃※1	72℃	コイル内部:72.8℃ 抵抗法:63.93℃※2
平均消費電力 \bar{P}	単発パルス時:23W		単発パルス時: 19.78W
	熱平衡時:27W	28W	

※1 配線部を考慮した平均温度上昇
※2 配線部含まず

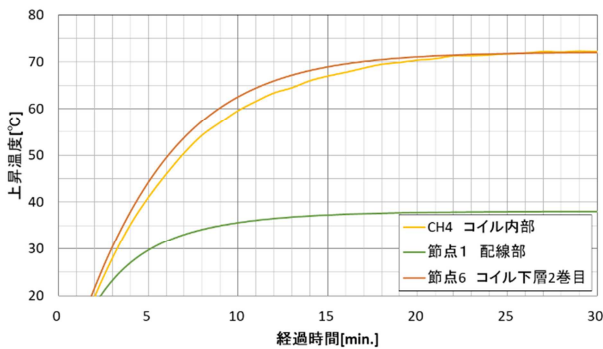


Fig. 9 コイル上昇温度 過渡応答比較(実測と設計見積)

最後に、ANSYS での解析結果と比較した。下層2巻目のコイル温度が高くなることを確認でき、コイル温度上昇値は約67.6℃で、熱回路網法による設計見積、実機評価と同様の結果が得られた。(Fig. 10)

Table 3 放熱割合 (伝熱基礎式による見積)

放熱項目	放熱量 [W]	割合 [%]
対流:コイル上面	1.4	5.1
対流:コイル側面	4.8	17.8
対流:コイル底面	0.7	2.6
放射:コイル全面	4.0	15.2
配線:対流+放射	15.8	59.3
放熱量 合計値	26.7	100.0

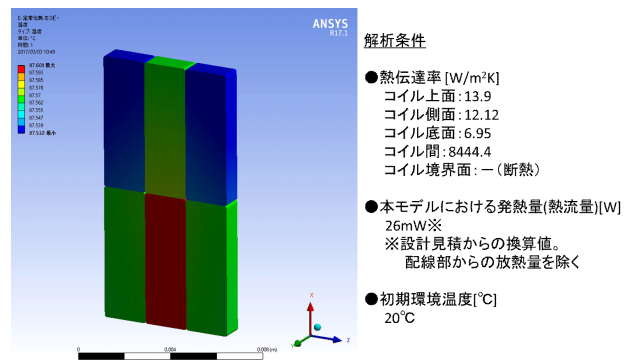


Fig. 10 ANSYS 解析結果

5. まとめ

高電圧パルスパワー装置において、熱設計、解析、実機評価を行い、結果が一致することを確認できた。熱設計においては、発熱量を見積もり、伝熱基礎式の合成と熱回路網法によるアプローチを用いて、熱平衡状態における温度上昇と過渡応答を予測するマクロを作成し、実用上問題のない精度であることを検証した。解析では、設計値をパラメータに代入することで、モデルの簡略化を行っても実用上問題のない精度で解析できることを確認した。実機評価では、環境要因を評価することで、電気電子機器の測定において精度の高い実機評価を行えるノウハウを構築した。

現在、本研究で得られた熱設計の知見を活かし、県内の複数の企業と共同で電磁力応用機器や車載用パワーデバイス半導体の開発に取り組んでいる。今後も企業からの技術相談に対応する中で、ノウハウを蓄積し、熱設計技術を向上させて県内企業の競争力強化に繋げる。

謝辞

高電圧パルスパワー装置の試作など、本研究に多大なる支援を頂いた株式会社デンケン(由布市)に心より御礼を申し上げます。