

スイッチング電源における電力変換効率に影響を与える
因子に対しての高精度設計と品質改善
—5 源主義手法による分析と VE 手法による新機構アイデアの抽出—
High-Precision Design to Factors that affect Power Conversion Efficiency
in the Switching Regulator
—Extraction of Novel Ideas using the GOGEN-SHUGI-Based
Analysis and VE Method—

本間 義章 (岩手県立産業技術短期大学校), 吉見 登司一 (TCS),
佐藤 健一, 小野 大樹 (富士通テレコムネットワークス福島)
Yoshiaki Honma (Iwate Industrial Technology Junior College),
Toshiichi Yoshimi (TQM & Community Supports),
Kenichi Sato and Daiki Ono (Fujitsu Telecom Networks Fukushima)

This paper is contents that cooperated with companies implement. Student is contents that worked as issues of ORDER-MADE-CURRICULUM. The author student teaching basic knowledge of the power supply design. We carry out analysis of factors that affect estimating the Efficiency of the electric power conversion rate characteristics of the switching power supply and efficiency and IQ (improved quality) to the factor. We used the GOGEN-SHUGI in resolve problems. The GOGEN-SHUGI is a method to identify factors from source for production processes by analyzing the actual product. We carried out improvements in function in addition using VE (Value Engineering) method. We applied functions of switching power, and fabricate reform measures and checked effect.

Key Words : ORDER-MADE-CURRICULUM、Switching Power、IQ、GOGEN-SHUGI、VE

1. はじめに

岩手県立産業技術短期大学校の産業技術専攻科 (応用短期課程: 定員 10 名、1 年課程) は、短大 (専門課程) からの進学者と、企業からの派遣者で構成される。「オーダーメイドカリキュラム」を導入し、個人ごとに生産現場が実際に抱える生産工程で生じている課題を研究テーマとして設定し、企業 (内定先及び派遣元) と連携した共同人材育成としての位置付けで、課題解決、課題達成に向けた生産現場力を修得する課程である。そこで、それらを具体的に実践するための手法として、「品質保証技術 (5 源主義手法、IE (Industrial Engineering)、QC (Quality Control)、VE (Value Engineering)、SE (Simultaneous Engineering))」を導入し、実践教育を行っている。

本稿は、短大からの進学者 (現 株式会社富士通テレコムネットワークス福島) が、電源設計の基礎知識を修得し、スイッチング電源の電力変換効率特性の推定を行い、その影響に対する高精度設計と品質改善を実践した内容である。

2. スイッチング電源について

本テーマの実践に際し、スイッチング電源について基礎知識を整理した。以下にリニア電源との比較によるメリット、デメリットを示す。

■メリット

- ・損失が少ないため、効率的である。
- ・スイッチング電源では、高周波への変換が行われることで、トランスが不要となり、小型化・軽量化が可能である。

■デメリット

- ・高速スイッチングのため、ノイズが発生する。
- ・回路が複雑である。

対象として製作したスイッチング電源の仕様を以下に、外観を図 1 に示す。

出力電圧可変範囲	DC2.3V~12V
入力電圧	DC17V~40V
出力電流	最大 6A

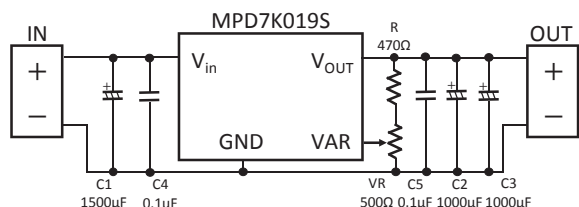


図1 製作したスイッチング電源と回路図

3. 電力変換効率の推定

設計段階にて正確な電力変換効率を推定できれば、開発コストや期間の低減を図ることができる。今回製作したスイッチング電源の電力変換効率推定を行い、効率に影響を及ぼす損失発生部品や、損失発生メカニズムの理解を進めた。

3.1 損失推定

3.1.1 最大/最小デューティサイクルの決定

$$D_{min} = \frac{V_{omin}}{V_{imax}} \quad (1)$$

$$D_{max} = \frac{V_{omax}}{V_{imin}} \quad (2)$$

D_{min} : 最小デューティサイクル

D_{max} : 最大デューティサイクル

V_{imin} : 最小入力電圧[V]

V_{imax} : 最大入力電圧[V]

V_{omin} : 最小出力電圧[V]

V_{imax} : 最大出力電圧[V]

3.1.2 スイッチング周波数の決定

スイッチング周波数は、最小デューティサイクル比と電流制限コンパレータの伝達遅延に基づくことから、ハイサイド MOSFET のオン時間は 300[ns]より長くないなければならない。

$$F_{sw} = \frac{D_{min}}{T_{on}} \quad (3)$$

F_{sw} : スイッチング周波数[Hz] (仕様より)

T_{on} : ターンオン時間[s]

3.1.3 各部品の損失

部品のデータシートと回路図から各パラメータを決定した。

①ヒステリシス損 : P_h [W]

$$P_h = k_h \times F_{sw} \times B_{max}^{1.6} \quad (4)$$

k_h : ヒステリシス係数[A/m](材料特性より)

B_{max} : 飽和磁束密度[T](材料特性より)

②渦電流損 : P_e [W]

$$P_e = k_e \times (d \times F_{sw} \times B_{max})^2 \quad (5)$$

k_e : 渦電流係数[Wd/m²]

d : 磁性体の厚さ[m]

③コイルの銅損 : P_L [W]

$$P_L = R_L \times I_o^2 \quad (6)$$

R_L : コイルの巻線抵抗[Ω](仕様より)

I_o : 出力電流[A](仕様より)

④コンデンサによる損失 P_{esr} [W]

$$P_{esr} = ESR \times \Delta I_c \quad (7)$$

ESR : Equivalent Series Resistance

コンデンサの等価直列抵抗[Ω](仕様より)

ΔI_c : コンデンサに流れるリップル電流[A_{rms}]

⑤ターンオフ損とターンオン損 : P_{sw} [W]

図2に MOSFET の ON/OFF 切り替え時のターンオンとターンオフの近似波形を示す。ハイサイド MOSFET と同期整流型 MOSFET どちらも式(8)で求める事が出来る。

$$P_{sw} = f_{sw} \int_0^{T_{sw}} V_{ds}(t) \times i_d(t) dt$$

$$= \frac{1}{6} \times V_{ds} \times I_d \times T_{sw} \times F_{sw} \quad (8)$$

V_{ds} : ドレインソース間電圧[V](仕様より)

I_d : ドレイン電流[A](仕様より)

T_{sw} : スイッチング時間[s](仕様より)

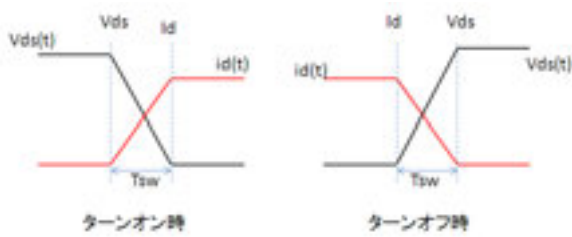


図2 ターンオン時とターンオフ時の近似波形

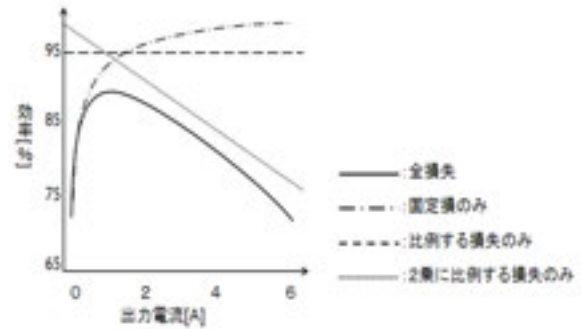


図3 各種電力変換効率のグラフ

⑥ハイサイド MOSFET の導通損: P_{swc} [W]

$$P_{swc} = R_{sr} \times D \times I_o^2 \quad (9)$$

P_{swc} : メインスイッチの導通損[W]

I_o : 出力電流[A]

D : 入力電圧に応じたデューティサイクル

R_{sr} : オン抵抗[Ω] (仕様より)

⑦同期整流型 MOSFET の導通損: P_{src} [W]

$$P_{src} = R_{sr} \times (1 - D) I_o^2 \quad (10)$$

P_{src} : 同期整流型スイッチの導通損[W]

⑧回路パターン抵抗による損失: P_{pc} [W]

$$P_{pc} = R_{pc} \times I_o \quad (11)$$

R_{pc} : 回路パターン抵抗[Ω]

3.1.4 損失のパターン分け

図3には、損失がそれぞれ後述する P_c 、 P_1 、 P_2 の項のみの場合を考えたときの電力変換効率グラフの一例を示す。

①出力電流に関係しない固定損 P_c [W]

(ヒステリシス損、渦電流損など)

②出力電流に比例する損失 P_1 [W]

(ターンオン損、ターンオフ損など)

③出力電流の2乗に比例する損失 P_2 [W]

(コイルの銅損、導通損など)

3.1.5 各損失パターンの損失係数

式(13)と式(14)にて損失係数を求める。また、損失係数から入力電圧に応じた全損失を求める式を導出する。

$$P_{loss} = P_c + P_1 + P_2 \quad (12)$$

$$K_1 = \frac{P_1}{I_o} \quad (13)$$

$$K_2 = \frac{P_2}{I_o^2} \quad (14)$$

$$P_{loss} = P_c + K_1 \times \Delta I_o + K_2 \times \Delta I_o^2 \quad (15)$$

P_c : 固定損[W]

P_1 : 出力電流に比例する損失[W]

P_2 : 出力電流の2乗に比例する損失[W]

P_{loss} : 全損失[W]

K_1 : 出力電流に比例する損失係数

K_2 : 出力電流の2乗に比例する損失係数

ΔI_o : 出力電流変化[A]

3.1.6 効率の計算

出力電流と出力電圧、全損失から効率を求める式(16)が導出できる。

$$\eta = \frac{(V_o \times \Delta I_o) - P_{loss}}{V_o \times \Delta I_o} \quad (16)$$

V_o : 出力電圧[V]

η : 効率[%]

3.2 損失推定でを使用したパラメータと計算結果

使用部品のデータシートよりパラメータを決定した。表1に主なパラメータを示す。今回の計算では、過渡応答やサージの影響によりリップルの推定が困難であったため、リップルは基準電圧または基準電流に対して限りなく小さいと仮定した。損失の計算結果を表2に示す。

表1 使用パラメータ

出力電圧	5[V]	飽和磁束密度	6.394×10^{-9} [T]
入力電圧	24[V]	ヒステリシス係数	8[A/m]
出力電流	最大6[A]	渦電流係数	0.25[Wd/m ²]
デューティ比	0.5246	パターン抵抗	0.035[Ω]
スイッチング周波数	270[kHz]	オン抵抗	16×10^{-3} [Ω]
ターンオフ時間	22×10^{-9} [s]	コイルの巻線抵抗	0.00371[Ω]
ターンオン時間	14×10^{-9} [s]		

表2 計算結果([W])

ヒステリシス損	0.0104	ターンオフ損	0.1426
渦電流損	0.081	ターンオン損	0.0907
銅損	0.1337	ハイサイドMOSFET導通損	0.3125
回路パターン抵抗の損失	0.0198	同期整流型MOSFET導通損	0.2738

3.3 計算値と計測値の比較

スイッチング電源の実測値を表3に、理論値を表4に示す。さらに図4には理論値と実測値の負荷効率曲線を示す。

理論値を比較したところ、負荷効率曲線の傾向はほぼ等しかった。また、サーモグラフィにより計測された発熱温度は部品の規格値内であり、今回の損失推定の信頼性は高いと言える。

表3 スwitchング電源の実測値

負荷	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
入力電圧	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00
入力電流	0.14	0.27	0.39	0.52	0.65	0.79	0.92	1.05	1.19	1.32
入力電力	3.25	6.38	9.45	12.57	15.70	18.87	22.08	25.29	28.50	31.77
出力電圧	4.99	4.98	4.96	4.95	4.95	4.93	4.92	4.90	4.89	4.85
負荷電流	0.60	1.20	1.80	2.40	3.00	3.60	4.20	4.80	5.40	6.00
出力電力	2.99	5.97	8.93	11.87	14.84	17.76	20.65	23.52	26.38	29.12
効率	0.92	0.94	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92

表4 スwitchング電源の理論値

入力電圧	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00
出力電圧	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
負荷電流	0.60	1.20	1.80	2.40	3.00	3.60	4.20	4.80	5.40	6.00
損失	0.25	0.37	0.52	0.69	0.91	1.16	1.44	1.77	2.13	2.53
電力	3.00	6.00	9.00	12.00	15.00	18.00	21.00	24.00	27.00	30.00
効率	0.92	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92

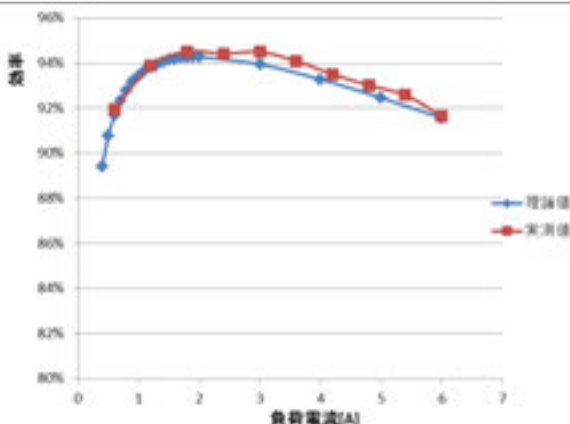


図4 負荷効率曲線

しかし、本計算で使用したパラメータは全て定常状態であり、周囲温度や周波数の変動は無いものとしている。そのため、実際の設計では、コイルの表皮効果や回路上

の寄生容量などを考慮する必要がある。

4. 5源主義手法による現物分析

4.1 5源主義手法について

品質とは、同一条件下における「平均値」と「ばらつき」と定義し、品質の改善を行なっている。以下に流れを示す。

- ① 三現主義により現物の徹底的な科学的分析を行ない、相手を特定し、事実を証明する。
- ② 動作メカニズムの解明のため、工程の IN から OUT までの分析を行ない、発生の瞬間を捉え、因子を特定する。
- ③ 最適条件抽出実験により、因子の水準（条件）を検定することにより、よいものづくりの条件を抽出する。
- ④ 効果の確認として工程能力指数（C_{pk}）を求める。
- ⑤ 管理限界線のある管理図により傾向管理を行なう。

4.2 現物分析

スイッチング電源に対して部品温度の測定を実施した。図5に示すように、サーモグラフィを用いて発熱部品の特定を行った。この結果からコイルと MOSFET の発熱温度が大きい事が分かった。

その後、熱電対による各部品の温度測定を行った。測定結果からコイルによる発熱が最も高いという結果が出た。

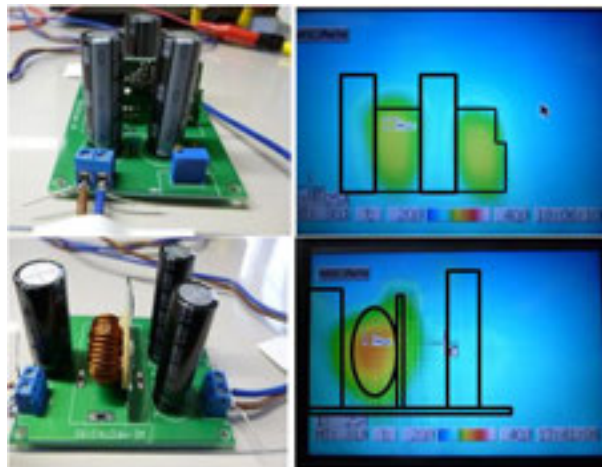


図5 サーモグラフィによる分析

4.3 流動解析

スイッチング電源の3次元モデルを作成し流動解析を実施した。図6にケース内の熱伝達による空気の移動を流跡線で熱の移動を断面プロットで示す。流跡線を見ると発熱部品によって暖められた空気から上昇気流が生まれ、ケース内上面にぶつかり横の通気孔から空気が放出されていた。断面プロットを見ると熱はケース内に蓄積されており、熱が効率的に拡散していないことがわかった。

そこで、本研究では品質改善として、ディレーティングに取り組んだ。

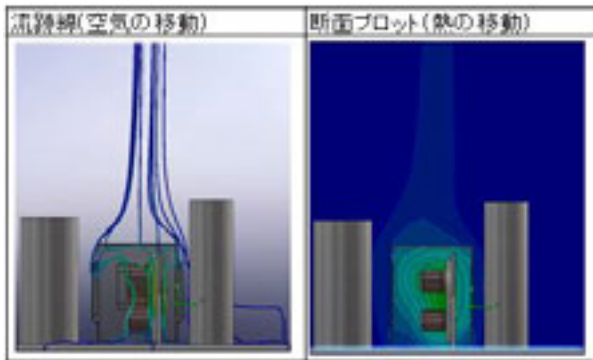


図 6 流動解析画像 (Solid Works)

5. VE 手法による機能の改善

5.1 VE 手法について

V (Value : 価値) = F (Function : 機能) / C (Cost : コスト) と定義し、装置の「基本機能」の「ばらつき」に着目し、機能展開により改善案のアイデアを選出し、設計・製作を行なう。以下に改善の流れを示す。

- ① LP 加工設備の部品展開及び基本機能の確定
- ② 機能展開による機能の体系化
- ③ 調和的革新案 (TT-HS (Three Thinking and Harmonic Selection) 法) によるアイデアの選出と選定評価
- ④ 新機構の設計・製作
- ⑤ 効果の確認

5.2 部品展開及び機能展開

図 7 に示すように「熱を拡散させる」を「基本機能」とし、機能展開図と部品展開図を作成した。

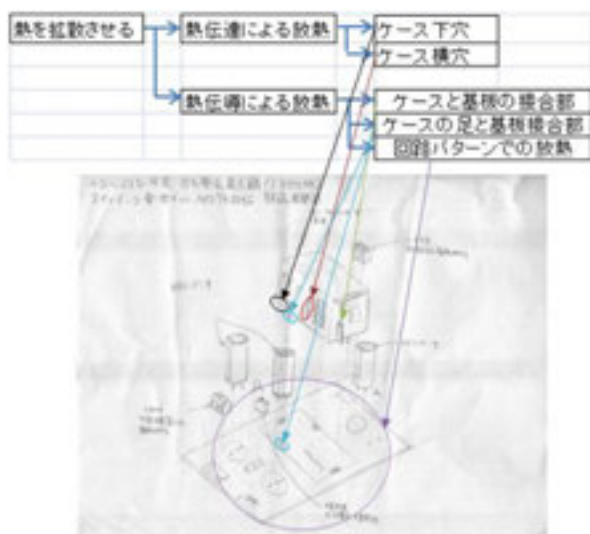


図 7 機能展開図と部品展開図

5.3 TT-HS 法によるアイデアの抽出

自然冷却に流体力学の考えを取り入れ、効率的に放熱するための方法を考えるために TT-HS 法を導入した。

発熱部品によって暖められた空気により上昇気流が発生する。その上昇気流をコントロールすることで効率的にケース内部の熱を拡散できるのではないかと考えた。

そこで図 8 に示すように、永久機関であることを条件に、TT-HS 法を用いてアイデアの体系化を行った。その中から、3 案の選択を行った。選択基準を以下に示す。

- A 案 : コスト重視は、発熱部品の真上に穴を開け上昇気流が出ていく通気口を製作した。
- B 案 : ファンネル方式は、吸気口の形状をラッパ状にすることで吸気口の面積を広げ、吸気抵抗を少なくし、吸気量や流入速度を上げる方式で、ファンネルをケース上面に取り付けた。
- C 案 : サイクロン方式は、動力のない扇風機の羽根をケース上面に取り付けてケース内部から発生した上昇気流を渦状にして、熱の拡散を効率的に行う方式である。イメージとしては、ペットボトルの水抜きであり、ペットボトルに水を入れ逆さまにすると水は排出される、この際、ペットボトルの中の水が、渦を巻くようにペットボトルを振り続けると、単純に逆さまにするより水の排出速度が速くなるという原理を応用したものである。

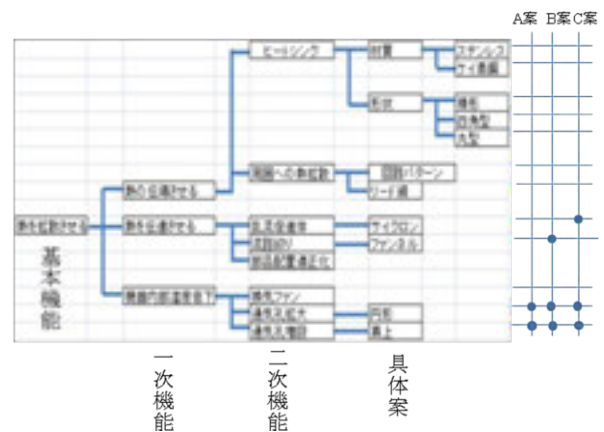


図 8 TT-HS 法によるアイデアの体系化

5.4 アイデアのモデリング

図 9 に各案の 3 次元モデリングを示す。また、図 10 には排気方式として、B 案のファンネルと C 案のサイクロンのモデリングを示す。



図 9 アイデアの 3 次元モデル

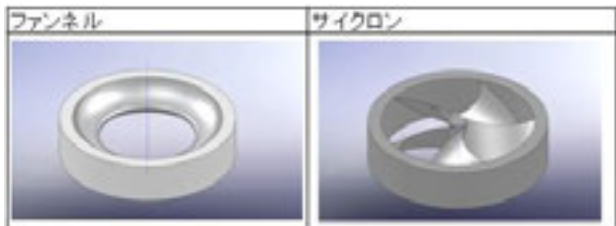


図 10 排気方式の 3次元モデル

6. 新機構の製作と効果の確認

6.1 流動解析による評価と装置製作

作成した 3次元データを用いて流動解析を行った。解析結果を図 11 に示す。解析の結果から C 案のサイクロン方式が、内部の熱を効率的にケース外部に伝達することを確認した。

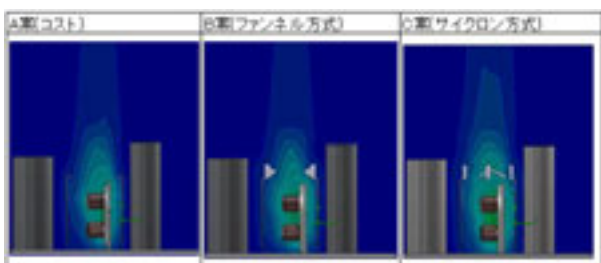


図 11 定常状態での流体の熱分布

そこで、最も効果が見込めるサイクロンを 3次元造形機により ABS 樹脂 ($\phi 19\text{ mm}$) で製作した。製作したサイクロンを図 12 に示す。また、スイッチング電源に取り付けた状態を図 13 に示す。



図 12 製作したサイクロン



図 13 サイクロンを取り付けたスイッチング電源

6.2 効果の確認

改善前 (図 14) と改善後 (図 15) についてサーモグラフィにより比較を行った。室温 24°C にて通電開始 20 分

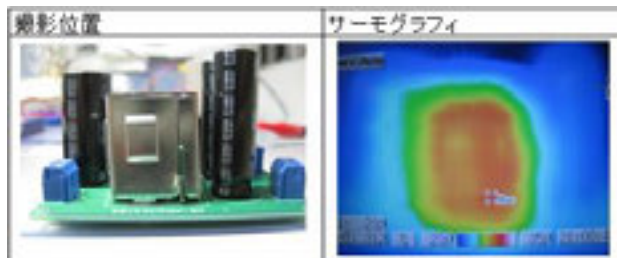


図 14 改善前 (入力 24V 出力 5V 3.6A)

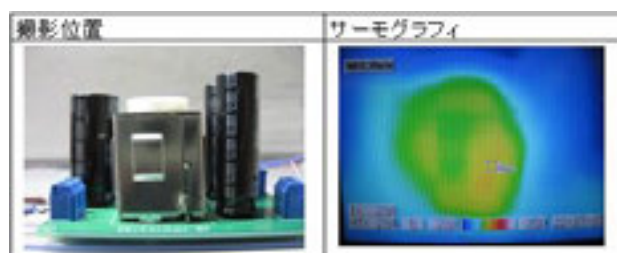


図 15 改善後 (入力 24V 出力 5V 3.6A)

経過後のケース側面最大温度の測定を行った。温度上昇は改善前 7.2°C で改善後は 5.4°C と 1.8°C の違いがあり、25%の温度上昇の低減が図れた。

7. あとがき

本研究では、スイッチング電源の電力変換効率に及ぼす影響を 5 源主義手法で発熱のメカニズムを分析し、VE 手法により熱を拡散させる装置の製作を行った。

結果として、25%の温度上昇の低減を実現した。今後は実用化に向け企業と連携・協同していく。

また、産業技術専攻科として、地域を牽引し、活躍できる将来的なモノづくりリーダーの育成を目指していく。

参考文献

1. 小浜輝彦, 田原照久: 低電圧降圧型コンバータにおける電力変換効率特性の推定, 福岡大学工学集報 第 87 号, 2011.
2. HEXFET Power MOSFET IRLZ34N, International Rectifier, datasheet, 1997.
3. スwitchング電源用フェライト オリジナルコア, TDK, datasheet, 2007.

(原稿受付 2015/1/16、受理 2015/4/30)

*本間義章

岩手県立産業技術短期大学校, 〒028-3615 岩手県紫波郡矢巾町大字南矢幅 10-3-1 email:Yoshi@iwate-it.ac.jp

Yoshiaki Honma, Iwate Industrial Technology Junior College, 10-3-1
Minami-Yahaba, Yahaba, Shiwa, Iwate 028-3615

*吉見登司一

TCS, 〒023-0401 岩手県奥州市胆沢区南都田字広表 181-3
email:tyosimi@mug.biglobe.ne.jp
Toshiichi Yoshimi, TCS(TQM and Community Supports in
Production Innovation), 181-3 Hiroomote, Minaminatsuta, Isawa,
Osyu, Iwate 023-0401

*佐藤健一

株式会社通テレコムネットワークス福島, 〒963-8304 福島県石

川郡古殿町松川大作 50 email:satou.kenich-12@jp.fujitsu.com
Kenichi Sato, Fujitsu Telecom Networks Fukushima Limited, 50
Matsukawa-Daisaku, Furudono, Ishikawa, Fukushima 963-8304

*小野大樹

株式会社通テレコムネットワークス福島, 〒963-8304 福島県石
川郡古殿町松川大作 50
Daiki Ono, Fujitsu Telecom Networks Fukushima Limited, 50
Matsukawa-Daisaku, Furudono, Ishikawa, Fukushima 963-8304