

# モーダルウェーブレット解析を用いて DC/DC コンバータの非破壊検査

白田 優、早野 誠治、齋藤 兆古  
法政大学大学院工学研究科

我々は電気・電子機器周辺の熱分布を可視化し、電気・電子機器の非破壊検査を行う方法を研究・開発している。また、電子機器の小型・軽量・高性能が進みことは電気・電子回路の高集積化を意味し、事実上、故障時における故障箇所の特定を不可能にしている。本論分では電源回路に着目し、正常動作時と異常動作時、それぞれの赤外線画像の相違をモーダルウェーブレット変換の解析方法を赤外線画像へ適用し、抽出する試みを行った結果を報告する。

## 1. 緒 論

映像情報による診断は医学などで見られるように、極めて具体的な現実の状態把握を可能にする。たとえ言語が異なる民族ですら、映像情報で意志伝達を行えば誤解無く伝わる。このように人間の視覚情報処理は全地球人類共通の強力な知的機能である。

医学での可視化は診断する時に X 線から始まり核磁気共鳴を利用した MRI 画像を用いられる。工学・物理学では、電子顕微鏡や X 線結晶構造解析法が発明され、この結果、材料中の物理現象に関する因果関係が明らかにされた。また、製造業でも品質管理、品質保証ため赤外線カメラを用いた非破壊検査の技術が実用化されている。

エレクトロニクス技術、特に半導体技術では第 2 次大戦後、ベル研でのゲルマニウム接触型トランジスタやウェスタンエレクトリック社の電界効果トランジスタなどが開発され、この半導体技術の進歩により、パーソナルコンピュータや携帯電話などの精密機器だけでなく、冷蔵庫や炊飯器などの白物家電にもマイクロコンピュータを搭載した電子回路が組み込まれている。また、電子機器の小型・軽量し・高性能が進みことは電気・電子回路の高集積化を意味し、事実上、故障時における故障箇所の特定を不可能にしている。

限られた地球資源の有効活用が必要される今日、極めて広範に普及している電子機器の故障診断と修復技術は環境工学の基幹技術と言える。

このような社会的背景に臨み、筆者らは極めて緻密に作られたプリント基板回路を非破壊的に検査する方法を検討してきた。電子回路の故障や欠損部分を特定する方法は電子機器の駆動中における周辺磁界分布を可視化する方法が最適と考える。これは電子機器を駆動することで動作の健全性が評価され、逆に異常な動作をする場合、可視化された周辺磁界分布から回路の故障部位の特定が原理的に可能であるためである。

近傍電磁界測定による電子機器の健全性や故障診断は原理的には有望であるが現実には実現が遅れている。この理由は磁界や電界ベクトル、すなわち、電磁界の測定技術が未熟な点にある。さらに電磁界ベクトルは周辺電磁ノイズに弱い本質的な問題点もある。このような問題点を解決する手段として、電子機器を構成する電子回路そのものに流れる電流や電圧分布を直接可視化することを考える<sup>4)</sup>。

電子回路中の電流や電圧は電子回路中しか存在しないとする拘束条件があるにも拘らず、それぞれを独立にか

しかすることは簡単な装置では難しい。このため、電流と電圧の内積である電力を可視化することを考える。当然、電力も直接可視化は出来ないが、熱分布として間接的に赤外線を用いて可視化可能である。<sup>5)</sup> 本稿ではフィルム変圧器を用いた DC/DC コンバータの赤外線画像を撮影し、この赤外線画像が可視化電力分布画像として非破壊検査に有効であるかを吟味する。

## 2. 電子機器の赤外線可視化画像診断

### 2.1 赤外線カメラ

赤外線カメラは、非接触の温度測定法として従来の接触式温度計にはなかった種の優れた特性を持っているため、特に電力設備の加熱監視炉、プラント設備の異常熱源検知、工場排水管理など保安・省エネルギーでの利用のほか、電気・電子機器、部品検査などにも有効に利用されている。

これら従来の利用法は対象物が持つ表面温度分布をそのままの状態とらえるため対象物に温度差がないような場合には、赤外線カメラが有効に活用できず、利用範囲には自ら限界がある。しかし、近年の小型軽量電子機器は印刷技術をプリント基板からなり、発熱減である電力が薄膜面上に分布するため、赤外線カメラは回路の健全性を機器が動作中に直接監視可能と考えられる。

### 2.2 試供電子回路

小型軽量電子機器は必ず機器の動作に必要なエネルギーを供給する電源部門と信号の流れをする信号回路からなる。電子機器の小型化で問題点は電源部門にあり、特に磁気エネルギーを蓄積するトランスやリアクトルの小型化が難しい。トランスやリアクトルの小型化を行う一方法は電源部の高周波化であり、高周波特性の良いアモルファス磁性体の普及とともにかなりの小型化が推進された。

本稿では、試供電子回路として最も構造が簡単なフライバック型 DC/DC コンバータを取り上げる。このコンバータでは究極の高周波トランスとしてプリント基板技術を用いて作製された空芯フィルム変圧器を磁気素子として採用する。

このフィルムトランスの動作原理は高周波で導体中の電流分布が表面へ集中する表皮効果を利用して変圧器としても磁氣的結合を維持する点にある。このため、一次コイルと二次コイルは平行に並べ、駆動周波数の増加とともに変圧器として機能するように設計される。Fig.1(a)は 1、2 次コイルを同心円状に並べて平面上にフィルムトランスを構成した例である。このトランスでは外側とフィルム中心部に 1、2 次コイルの端子を持つため、

形状は平面的でも配線が立体的になる。1、2次コイルの端子をフィルムの外側へ出すために、Fig.1(b)に示すようにフィルム変圧器の表面と逆パターンで1、2次コイルを接続したフィルム変圧器を裏面に装着し、基本ユニットのフィルム変圧器とする。Fig.1でa、dは一次コイル端子で、c、eは二次コイル端子である。Fig.2は実際に試作したフィルムトランスの写真を示す。

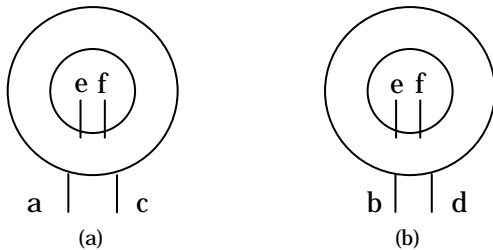
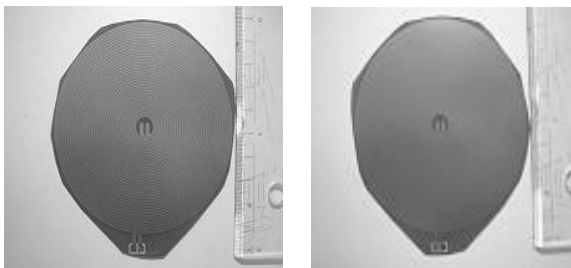


Fig.1 Primal unit of the film type transformer



(a)Front side (b)Back side  
Fig.2 test film transformers

### 2.3 試供フライバック型 DC/DC コンバータ

Fig.3 にフライバック型 DC/DC コンバータの回路を示す。フライバック型 DC/DC コンバータの動作は Power MOS FET のソースとゲート間に小電流を通電すると、ドレインとゲート間が通電し電源  $V_1$  に起因する電流  $I_1$  が流れる。すなわち、Power MOS FET のスイッチング動作で一次電流が流れ、この電流によってトランスの一次コイルに磁気エネルギーが蓄えられる。Power MOS FET が OFF の期間にこの磁気エネルギーは逆極性に接続された二次コイルを通じて負荷  $R_L$  へ電力を供給する。すなわち、Power MOS FET のスイッチング動作で直流電圧が断続され、断続して流れる電流に起因して誘起する二次電圧をダイオード D で整流して二次直流負荷電圧が得られる。

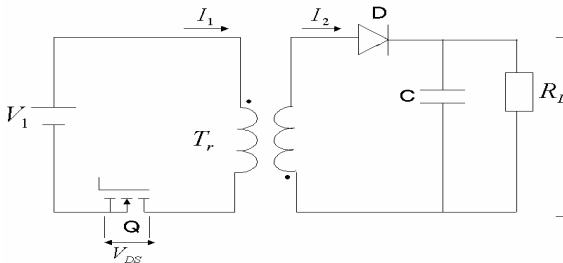
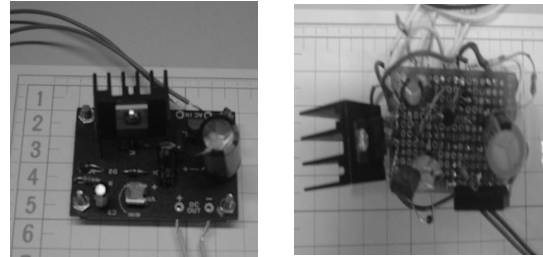


Fig. 3 DC/DC Converter

Fig.4 に単相電源の整流回路を含めて試供した試供 DC/DC コンバータの外観を示す。二台の DC/DC コンバータを製作した。一方は単純な Fig. 4 に示す OP アンプを用いた電圧可変型コンバータ (78 シリーズ) であり、他方はフライバック型コンバータ (2SD2552) である。



(a) Test Circuit A (b) Test Circuit B  
Fig.4 Primal unit of the film type transformer

### 2.4 実験

Fig.5 に赤外線画像の撮影法を示す。実験手順は以下の通りである。

- (1) 検査位置の確認 試験回路と赤外線カメラの位置を確認する。
- (2) 電源投入 試験回路に電流を通電し、一定時間経流す。
- (3) 熱画像の記録 電源を OFF にし、一定時間経過後に回路表面の温度分布を赤外線カメラで記録する。
- (4) 評価試験回路の健全性は回路が駆動した後の余熱分布評価で行う。これは試験回路を駆動する電源回路の発熱が試供回路に与える影響を避けるためである。

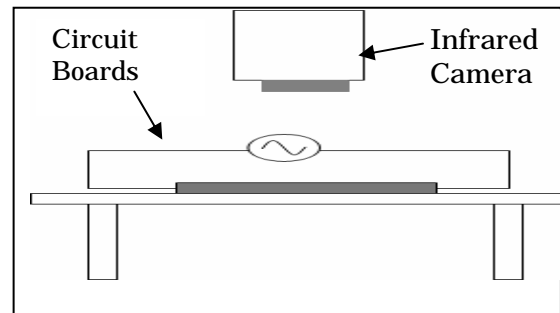
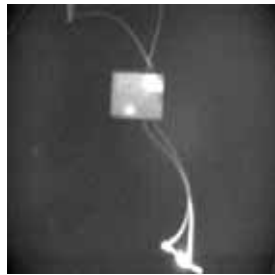


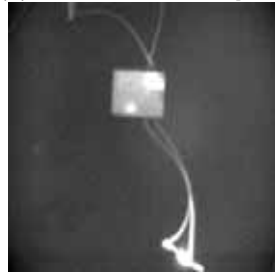
Fig. 5 Principle figure

### 2.5 実験結果

Fig.6、7 は DC/DC コンバータへ抵抗負荷を付けて温度が飽和点に達するまで駆動し、駆動停止の 5 秒後に撮影した赤外線画像である。Fig.6(a) 試供コンバータ B が正常に運転した場合の画像である。Fig.6(b) は試供コンバータ B が正常に運転した場合の画像である。どの画像も負荷抵抗で熱として消費されるエネルギーとスイッチング損失を伴うレギュレータに熱が集中していることがわかる。Fig.6(c) は試供コンバータ B が無負荷運転した画像である。負荷抵抗が無大であるため、コンバータ内の電流は無効電流であり、熱損失はスイッチングが存在するレギュレータに集中する。



(a) Converter A at t=5[sec]



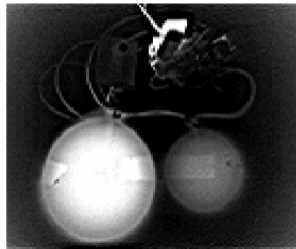
(b) Converter B at t=5[sec]



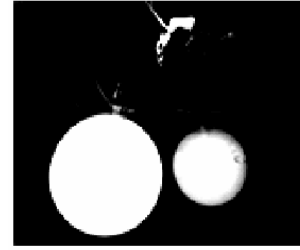
(c) Converter C at t=5[sec]

Fig.6 Infrared Images focused on converter

Fig.7 はコンバータで磁気エネルギーを蓄積するフィルムトランス部分を強調して撮った赤外線画像である。Fig.7(a)はコンバータ D が正常に動作した後の5秒後の画像であり、エネルギーの大部分が Power MOS FET のスイッチング損失となることがわかる。特にフィルムトランスの励磁電流損失は小さいことがわかる。Fig.7(b)は Power MOS FET のスイッチングが失敗し、ON 動作のままになった結果、フィルムトランスの一次側コイルがオーバーヒートした状態である。



(a) Converter D t=5[sec]



(b) Converter E t=5[sec] image

Fig.7 Infrared Images focused on Film Transformers

## 2.6 モーダルウェーブレット解析方法による画像処理

DWT(Discrete Orthogonal Wavelets Transform、以下、DWTと略記)の変換行列 $M$ の代わりにモーダル行列 $Z$ を採用し、波形や画像データの多重解像度解析や画像圧縮等を行う方法をモーダルウェーブレット変換(Modal

Wavelets Transform、以下、MWTと略記)と定義する。<sup>7)</sup> MWT の具体例として、1 次元境界値問題の2 階微分方程式を考え、両端の境界をゼロ固定条件とし、3 点有限差分法を採用して得られるシステム行列のモーダル行列 $Z$ を採用する。Fig.8 にモーダル行列 $Z$ の周波数特性を示す。

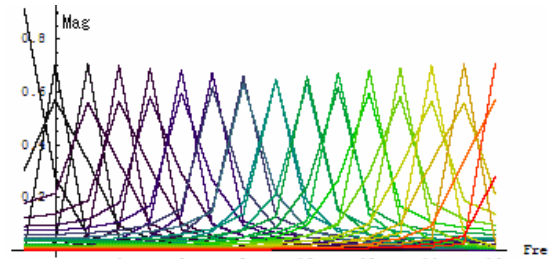


Fig.8 Frequency characteristic Of a sample modal matrix

Fig.8 に示すモーダル行列 $Z$ を(4)式のDWT 変換行列の代わりに用いて、Fig.7(a)にConverter Dのサンプル画像をモーダルウェーブレット変換するとFig.9にMWT スペクトラムが得られる。Fig.9、Fig.10 からDWT と同様に原点近傍に比較的振幅の大きなスペクトラムが集約されることが判る。Fig.8 に示すモーダル行列 $Z$ を(1)式のDWT 変換行列の代わりに用いて、Fig.7(a)、(b)に示すConverter Dのサンプル画像をモーダルウェーブレット変換するとFig.9、Fig.10に示すConverter Dに対するMWT スペクトラムが得られる。Fig.9から原点近傍に比較的振幅の大きなスペクトラムが集約されることが判る。<sup>8)</sup>

$$M' = W_m \cdot M \cdot W_n^T \quad (1)$$

$W_m$ 、 $W_n$ をそれぞれ $m$ 、 $n$ 次のウェーブレット変換行列とし、モノクロ画像データを要素とする $m$ 行 $n$ 列の行列を $M$ とすれば(1)式でウェーブレットスペクトラム行列 $M'$ が得られる。

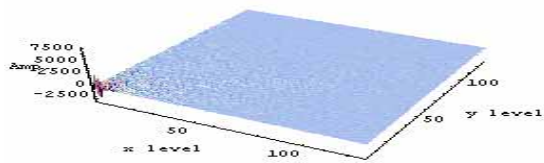


Fig.9 Modal wavelets transform spectra of the sample image shown in Fig. 7(a)

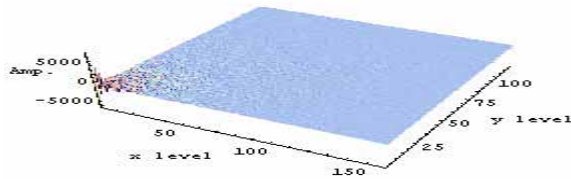
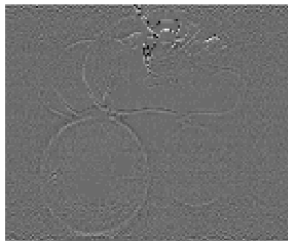
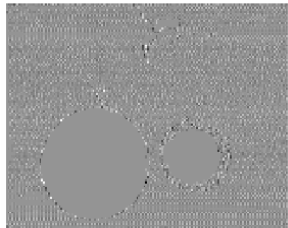


Fig.10 Modal wavelets transform spectra of the sample image shown in Fig. 7(b)

Fig.8はMWTを用いて動的分布の変化部分のみを取り出して描いた画像である<sup>5)</sup>。なFigs.8(a)、(b)はコンバータを駆動開始からの熱分布の立ち上がり状態の赤外線画像から得た。大部分の熱は負荷抵抗へ集中しており、コンバータが正常に動作していることがわかる。



(a) Converter B at t=5[sec]



(b) Converter B at t=5[sec]

Fig.8 Dynamic Parts of Thermal Distribution Extracted by MWT

## 7.まとめ

本研究ではフィルムトランスを用いた超軽量・小型のスイッチング電源の開発を究極の目標としている。フィルムトランスを用いた DC/DC コンバータ及び電源回路の熱分布の可視化を検討した。その結果、フィルムトランスにおける励磁電流損失は少なく、スイッチング電源の根源的問題である Power MOS FET のスイッチング損失がコンバータの効率を決定することが確認された。また、コンバータが異常動作になった場合、明確に熱分布が異なり、容易に故障診断が可能となることが判明した。

本来の目的である MWT の有用性を示すためにまだ、データ・試料が不足でした。次回の課題にする予定です。

## 参考文献

- 1) 緑川洋一:小型・軽量磁気素子の開発とそのスイッチング電源への応用に関する研究、1997年度法政大学博士論文
- 2) 緑川洋一:高周波薄型変圧器とその応用に関する研究、1994年度法政大学修士論文
- 3) 増田則夫、緑川洋一、斉藤兆古、遠矢弘和:電子回路基板の電流分布推定に関する研究、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-97-128、1997.7、pp 13-18
- 4) T.Doï, and et al: "Current Distribution Analysis on Printed Circuit Board, " INVERSE PROBLEMS IN ENGINEERING MECHANICS (M.Tanaka, G.S.Dulikravich, Eds Elsevier)、pp.495-501、( Mar.1998 )
- 5) 河村憲作、早野誠治、斉藤兆古、堀井清之:「赤外線画像から熱伝導率の推定」、第32回可視化情報シンポジウム公演論文、2004 vol.24 Suppl.No.1 p219-p226
- 6) 白田優、早野誠治、斉藤兆古、堀井清之:「フィルムトランスを用いた電源周辺磁界分布の可視化」、第32回可視化情報シンポジウム公演論文、2004 vol.24 Suppl.No.1 p259-p262
- 7) H.Endo, I.Marinova, S.Hayano, Y.Saito and K. Horii, 「Modal-Wavelets and Its Applications」 *Proceedings of 2<sup>nd</sup> Japan-Australia-New Zealand Joint Seminar*, 24-25 January, Kanazawa, The Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics (2002)
- 8) 斉藤兆古、「知的可視化情報処理」、日本AEM学会誌Vol10, No.2 (2002)、解説

## キーワード

赤外線カメラ、電源回路、熱分布、非破壊検査

-----

## Summary

### Nondestructive Inspection of DC/DC Converter by Modal Wavelets Analysis

Yu Usuda    Seiji Hayano    Yoshifuru Saito  
Department of Electrical and Electronic Engineering Hosei University

Modern microelectronics has made it possible to work out a lot of many small electronics, such as electronic, calculator, radio, notebook computer and so on. As a result, electronics circuits have become small integrated circuits. This means that precise micron level inspecting technique should be exploited to produce the highly reliable electronics products.

In this paper, we apply the thermal infrared image method to the electronic circuit boards inspection. Our infrared dynamic image method plans to work out the extraction of fault parts from dynamic infrared image by applying modal wavelets transform. As a first step of this project, this paper demonstrates the usefulness of dynamic infrared image method to the nondestructive inspection of power supplies utilizing film type transformer.

## Keywords.

Dynamic Infrared Image、 Film type Transformer、 Nondestructive Inspection