

# フィルム変圧器の試作

Film Transformers

緑川 洋一、 早野 誠治、 斎藤 兆古  
Y. Midorikawa, S. Hayano and Y. Saito

法政大学 工学部  
College of Engineering, Hosei University

## 1. まえがき

半導体素子の高集積化技術の進歩と普及は、ワードプロセッサや携帯電話などの小型電子機器の開発のみならずデジタル計算機のダウンサイジングを促し、従来の技術では製造不可能であった多くの小型電子機器の開発を可能とし、活用されている。

小型電子機器が具備すべき条件として、

- 1) 小型であること、
- 2) 携帯性に優れるため軽量であること、
- 3) 衝撃に強く頑丈で高い信頼性を有すること、
- 4) 量産が容易で低コストであること、

などであろう。これらの条件の中で、1)と2)の小型・軽量化の条件は電源部の小型化・軽量化が大きな解決ポイントとなる。また、3)と4)の高信頼性と低コスト化は構造が簡単で、且つ量産化しやすいことが解決のキーポイントなるが、信号処理を行う半導体部分はほぼ極限に達していると考えられる。このため、3)と4)の問題点解決も電源部の改善に依存することとなる。このように小型電子機器のさらなる小型・軽量・低コスト化は電源部の小型・軽量・低コスト化に依存するといっても過言ではない。

さて、電源部の小型・軽量化を拒む大きな要因は、小型・軽量化の困難な磁気素子、主として変圧器にある。このため、動作周波数を上げて極力変圧器の鉄心部分を小さくする方向で小型・軽量化が図られているのが現状である[1-3]。動作周波数の増加は、確かに変圧器自身の小型・軽量化につながる。しかし、他方、半導体素子のスイッチング損失の増加や高調波ノイズの増加を促し、結果として、スナバ回路や共振用コンデンサ、ソフトスイッチング用リアクトルの追加などを余儀なくし、逆に部品数の増加と回路の複雑化が高信頼性と低コスト化の障害となりつつある。

筆者等はこのような現状を鑑み、鉄損が全く存在しないため高周波での効率が極めて高い空心変圧器を提案し、更に部品数が少ないフライバック式DC/DCコンバータに実装し、十分に実用化が可能であることを報告した[4-6]。また、液体窒素冷却(-196℃)により大幅に低周波特性が改善され、液体ヘリウムを使用した超電導化によって、現在の大型汎用計算機やスーパーコンピュータの冷却部を含む電源部が大幅に小型化される可能性を示唆した[7]。

本稿では、筆者等の開発した空心変圧器の究極の軽量化と生産性の向上を意図したフィルム変圧器に関する構造、特性等について報告する [ 8 ]。

## 2. フィルム変圧器

### 2. 1 基本構造

フィルム変圧器の基本構造は、1枚のフィルム基盤上に一次・二次コイルをエッチングまたはリングラフなどで図1 ( a ) , ( b ) に示すような同心軸状に作成し、図1 ( a ) と逆のパターンの ( b ) の二層を積層し、中心部で図1 ( a ) と ( b ) のパターンのフィルム基盤を接続し、一次・二次端子共に基盤の外側に取り出す構造である。これがフィルム変圧器の基本ユニットである。

変圧比を変更する場合、例えば1 : 2の変圧比を得るには図2 ( a ) ( b ) に示す2枚のフィルム基盤を中心部で接続して作成するか、図1のユニットを2個接着し、一次を並列、二次を直列に接続する。

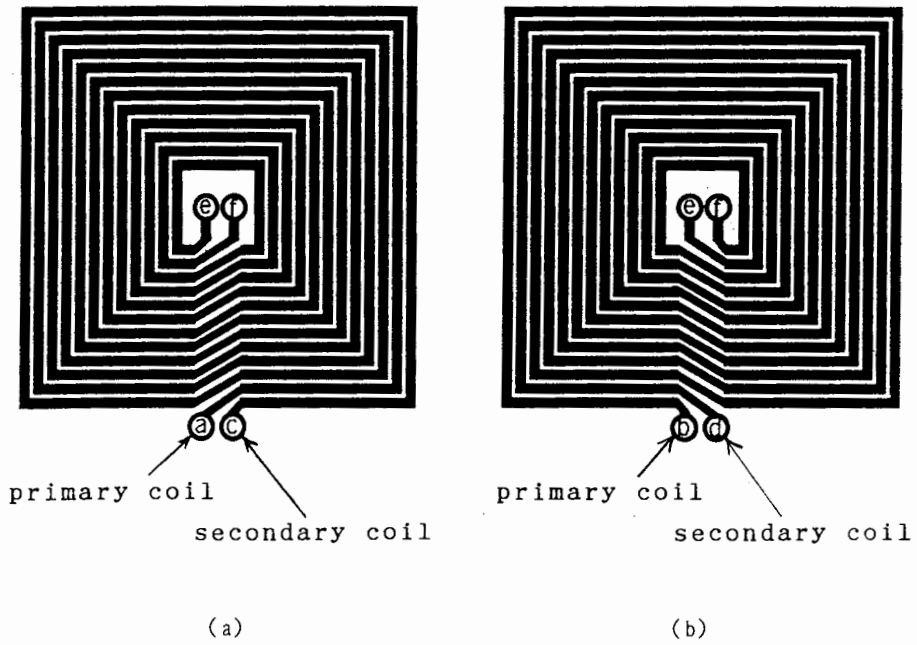


図1. フィルムトランスの基本ユニット：左右コイルの中心部で、同じ記号 ( e , f ) を接続し、端子 a と b が一次コイルの端子、端子 c と d が二次コイルの端子を形成する。

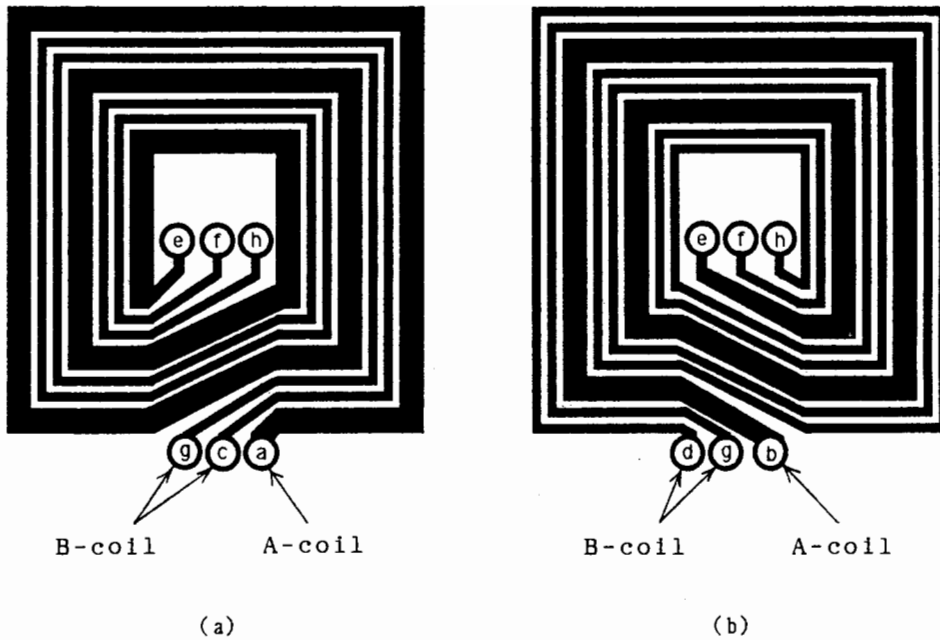
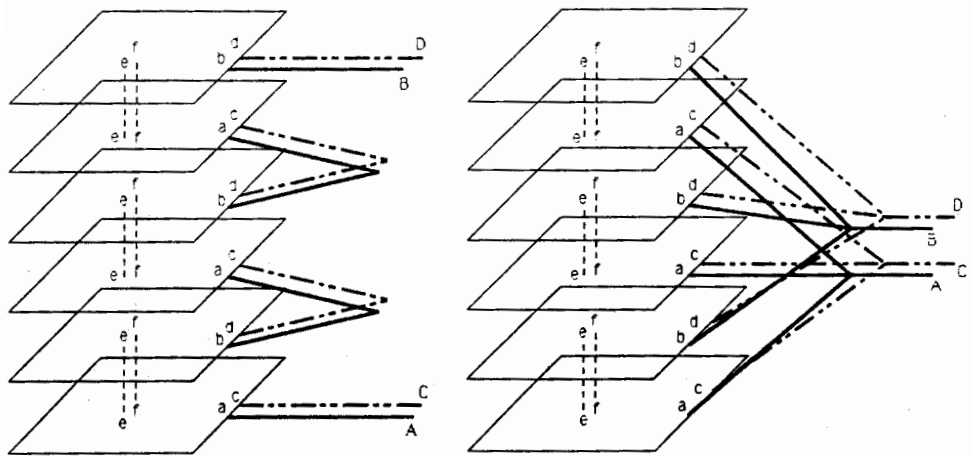


図 2. 1 : 2 の変圧比を得る基本ユニット : 左右のコイルの中心部と外側で、同じ記号 ( e , f , h , g ) を接続し、端子 a と b が一次コイルの端子、端子 c と d が二次コイルの端子となる。

## 2. 2 動作原理

基本的な動作原理は、筆者等が既に報告した空心変圧器と同様に高周波における電流の表皮効果を利用することにある [ 4 - 6 ]。従来、筆者等の提案したツイストコイルを用いた空心変圧器では、ツイストコイルを更にソレノイド状に巻くことでソレノイド内を通過する一次・二次コイルに共通な磁束を利用し、一次・二次間の結合の増加を図っている。これに対し、フィルム変圧器では、基本ユニットを積層し図 3 に示すように結線する。その結果、積層枚数が増加するに従い、フィルムトランスの外部に接する部分が減少し、外部の漏れインダクタンスの減少を促す。いま、二次回路が解放されているとすれば、図 4 ( a ) に示すように低周波駆動では、一次導体内に電流が分布し、一次コイルを取り囲む内部ループが形成される。このため、一次コイルの内部漏れ磁束が大きく、一次・二次間の結合が低い。しかし、図 4 ( b ) に示すように、高周波駆動では、表皮効果により一次電流が一次導体表面に集中し、一次導体間の間隔が充分接近していれば、内部ループのモードが変化し、二次コイルを取り囲むループとなり、一次・二次間の結合が高められると考えられる。

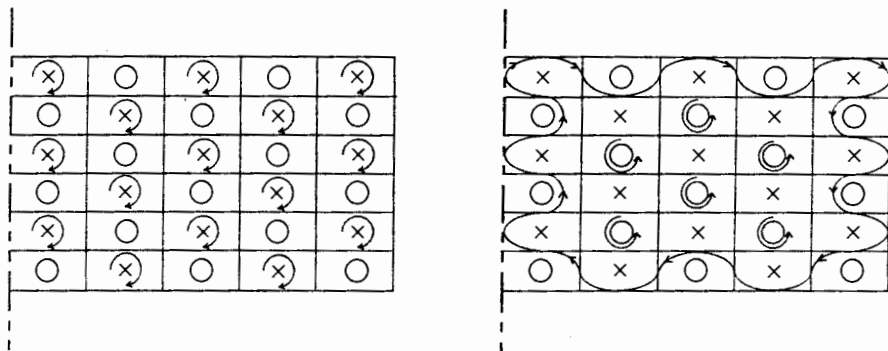


A-B: primary coil  
C-D: secondary coil

(a) 直列結線

(b) 並列結線

図3. フィルムトランスの積層と結線方法



(a) 低周波駆動

(b) 高周波駆動

図4. 二次開放時の内部磁束分布、軸対称の断面図

×印は一次導体、○印は二次導体

### 2.3 実験

(a) 試作変圧器 試作したフィルム変圧器は、図5(a) - (d)に示す丸形、角形、L形及び角形で1:2の変圧比をもつパターンであり、それぞれ厚さ50 $\mu$ mのポリイミド上の35 $\mu$ mの銅箔膜にフォトリソグラフィを施し一次・二次コイルを作成した。

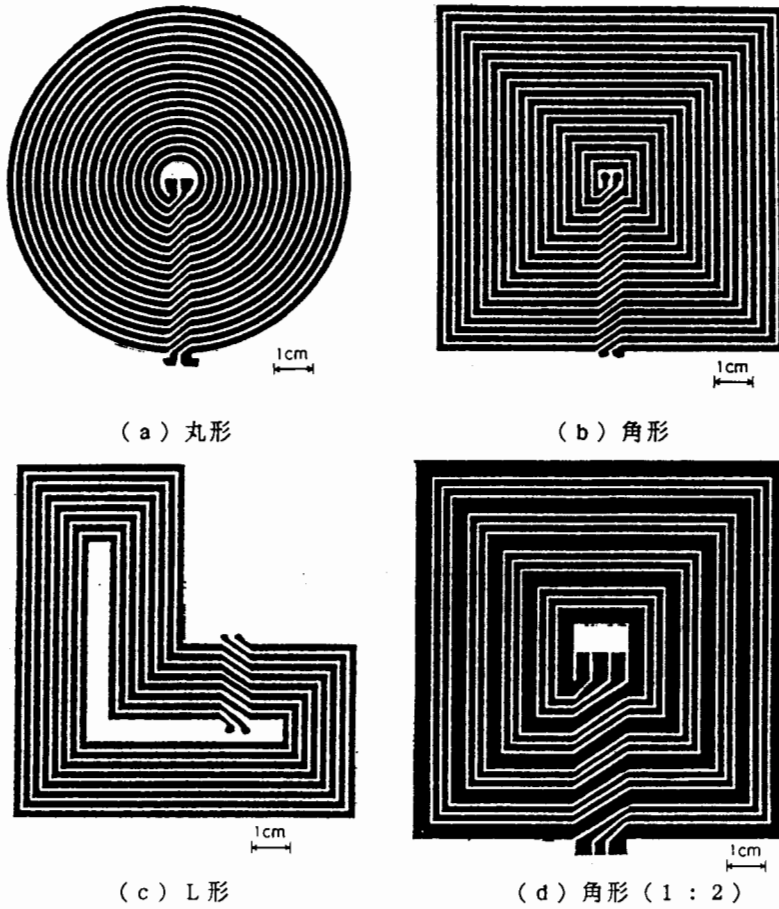


図5. 試作フィルムトランス

(b) 変圧比 二次回路が開放されているとき、変圧比1:1のトランスで、二次誘起電圧 $V_2$ は、 $r_1$ 、 $L_1$ 、 $M$ 、 $\omega$  ( $= 2\pi f$ 、 $f$ :周波数)をそれぞれ一次抵抗、一次インダクタンス、一次・二次間の相互インダクタンスおよび角周波数とすると、

$$\begin{aligned}
 V_2 &= \omega M V_1 / \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2} \\
 &= (M/L_1) V_1 / \sqrt{1 + [r_1 / (\omega L_1)]^2}
 \end{aligned} \tag{1}$$

が成り立つ。ここで、 $V_1$ は一次電圧であり、角周波数 $\omega$ が充分大きいとき、変圧比 $T_r$ は、

$$\begin{aligned}
 T_r &= (V_2/V_1) \\
 &\approx (M/L_1) \\
 &= k
 \end{aligned} \tag{2}$$

であるから、高周波においては、変圧比 $T_r$ は一次・二次の結合係数 $k$ に等しい。

各試作トランスの変圧比  $T_r$  対周波数  $f$  の実験値を図6に示す。図6の結果から、常温 (20°C) に比較して液体窒素温度 (-196°C) においては導電率の増加により表皮効果の影響が大きく、約一桁近く低い周波数で立ち上がることがわかる。通常Skin depth  $S_d$  は導電率  $\kappa$  と周波数  $f$  に対して

$$S_d \propto 1/\sqrt{\kappa f} \quad (3)$$

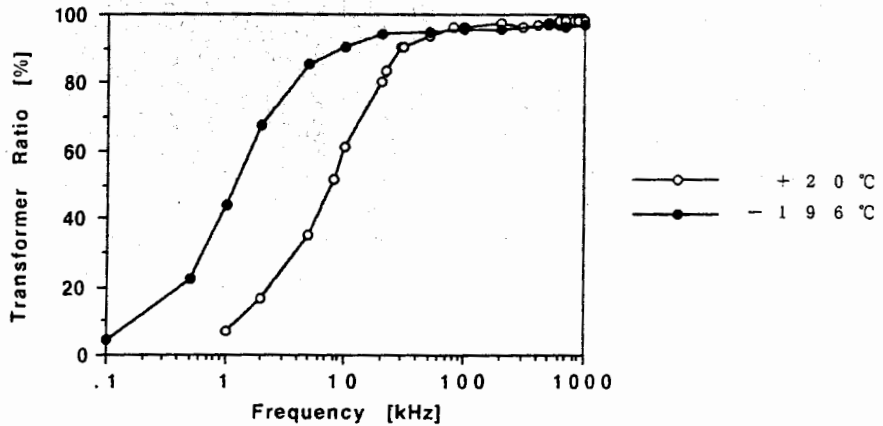
の関係が成り立つ。また、導電率は、 $\kappa'$  を室温 (20°C) の導電率として温度  $t$  に対して

$$\kappa = [(234.5+20)/(234.5+t)]\kappa' \quad (4)$$

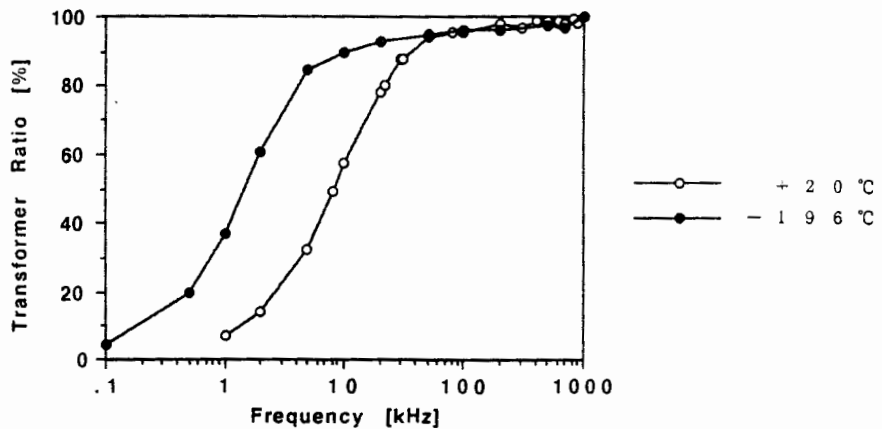
と近似できるとすれば、液体窒素温度  $t = -196^\circ\text{C}$  では、

$$\kappa \approx 6.6\kappa' \quad (5)$$

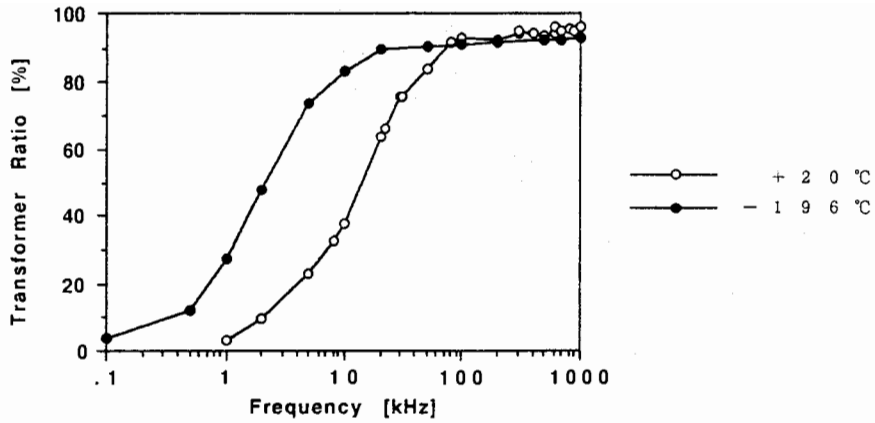
となるから、理論上周波数  $f$  を6.6倍程度増加した効果が液体窒素によって得られることとなる。このことから、銅箔膜の代わりに鉛箔膜を使い液体ヘリウム温度に保てば、理論上導電率  $\kappa$  は無限大となり、極めて低周波から高い変圧比、すなわち高い結合が実現出来ることとなる。



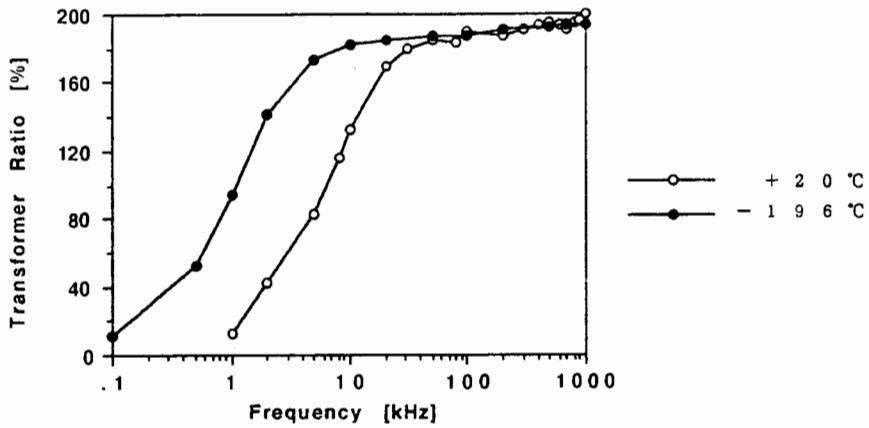
(a) 丸形



(b) 角形



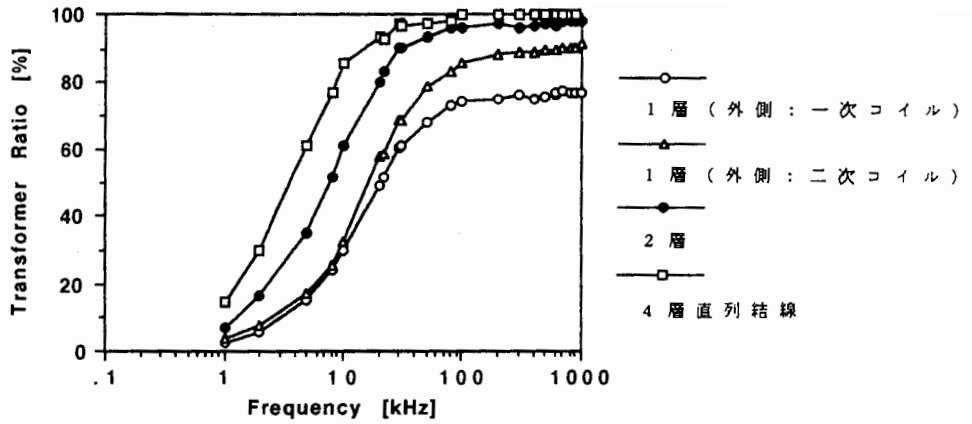
(c) L形



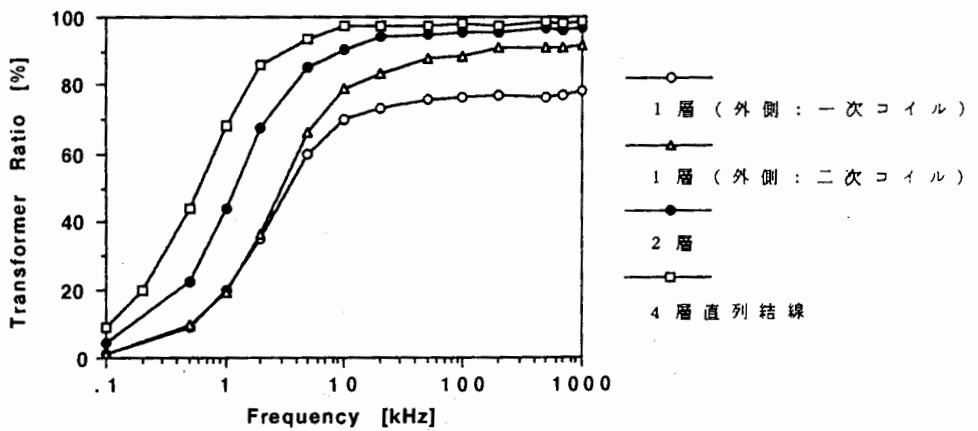
(d) 角形 (1 : 2)

図6. 変圧比  $T_r$  - 周波数  $f$  特性、基本ユニット：20°Cは室温での測定値、-196°Cは液体窒素温度での測定値。

図7は積層枚数の効果を調べた結果である。理論上、積層枚数が増加するに従い、フィルムトランスの外部に接する面が減少することと内部ループ磁束モードの変化に起因して、変圧比は低周波で立ち上がり、一次・二次間の結合がよくなる。このことが図7の結果によって検証されている。



(a) 常温 (20°C)



(b) 液体窒素温度 (-196°C)

図7. 積層枚数の効果、丸形直列

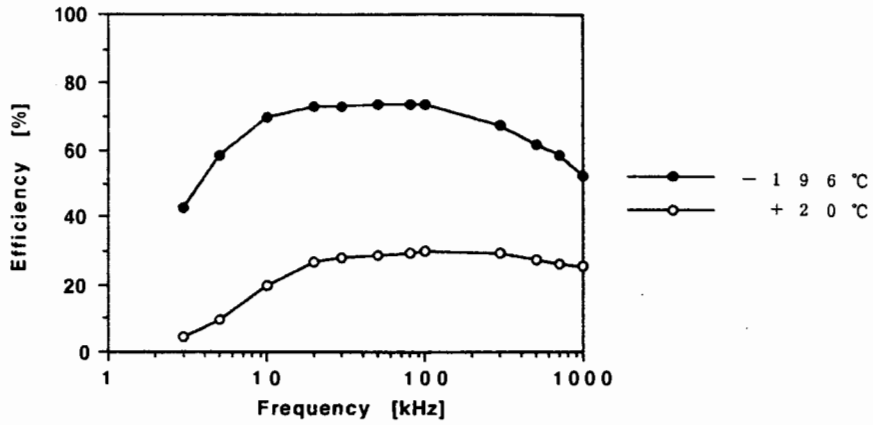
(c) 効率 図8に次式で定義される効率

$$\varepsilon = [\text{出力} / \text{全入力}] \times 100 \quad [\%] \quad (6)$$

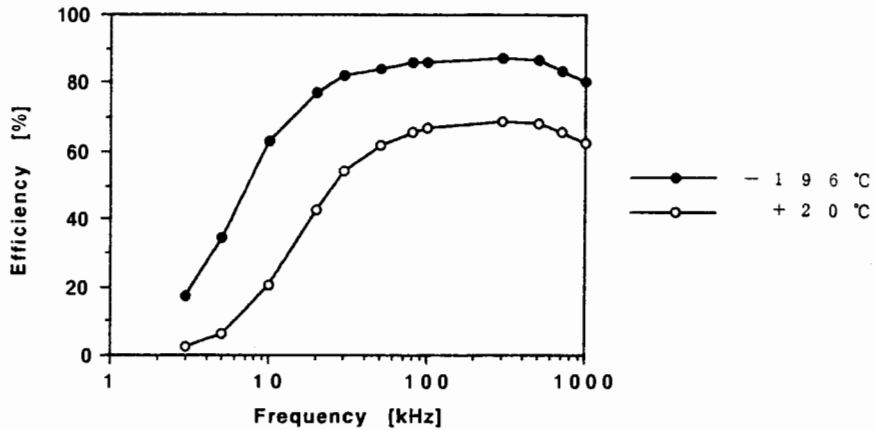
を純抵抗負荷 ( $R_L = 1.7 \text{ } [\Omega]$ 、 $10.0 \text{ } [\Omega]$ ) に対して測定した例を示す。尚、供試トランスは丸形4層直列結線を用いた。

図8から、明らかにフィルムトランスは表皮効果のため、抵抗やインダクタンスが周波数  $f$  の関数となり、負荷とのインピーダンスマッチングが存在することがわかる。比較的低周波ほどトランスの内部抵抗が小さく、低抵抗でマッチングするが、漏れインダクタンスが大きく効率が低いことがわかる。しかし、液体窒素冷却を行うと漏れインダクタンスを減少させ、効率が增加することがわかる。





(a)  $R_L = 1.7 \text{ } [\Omega]$



(b)  $R_L = 10.0 \text{ } [\Omega]$

図8. 効率-周波数特性：純抵抗負荷、供試トランスは丸形4層直列。

### 3. まとめ

本稿では、筆者等が以前提案したツイストコイル型空心変圧器をより発展させたフィルム変圧器を提案した。フィルム変圧器の諸特性を実験的に吟味した結果、高周波変圧器として充分実用性の有ることが検証された。また、動作原理は表皮効果の応用に基づくことが、積層効果と冷却効果によって確認された。

## 参考文献

- [ 1 ] K. Harada and T. Nabeshima, " Application of magnetic amplifier to high-frequency DC to DC converter," Proc. IEEE Vol. 76, pp. 353-361, April 1988.
- [ 2 ] F. C. Lee, "High-frequency quasi-resonant converter technology," Proc. IEEE Vol. 76, pp. 377-390, April 1988.
- [ 3 ] T. Sano, A. Morita and A. Matsukawa, "A new power ferrite for high frequency switching power supplies," Proc. 3rd Annual High Frequency Power Conversion Conference, San Diego, CA., MAG1-5, 1988.
- [ 4 ] S. Hayano, Y. Nakajima, H. Saotome and Y. Saito, " A new type high frequency transformer," IEEE Trans. Magn. MAG-27, No. 6, pp. 5205-5207, Nov. 1991.
- [ 5 ] 小川、早野、斎藤、"高周波空心トランスを用いたDC/DCコンバータの負荷特性"、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-92-132、1992年7月17日。
- [ 6 ] 小川、早野、斎藤、"空心変圧器を用いたDC/DCコンバータの近似過度解析"、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-92-274、1992年12月18日。
- [ 7 ] 小川、斎藤、"空心変圧器の一考察"、電気学会研究会資料、MAG-93-132、1993年8月2日。
- [ 8 ] S. Hayano, Y. Midorikawa, Y. Saito, "The film transformer," Elsevier Studies in Applied Electromagnetics in Materials, in press.

原稿受付日

平成5年8月2日