

導体間の分布容量を用いた 共振回路の実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY OF THE RESONANT CIRCUIT
USING THE CAPACITANCE BETWEEN CONDUCTORS

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

小型・軽量電子機器の開発は、電子回路の高集積化に伴い極めて強力に推進されている。しかしながら、信号伝達や処理に関する電子回路の集積化はほぼ限界に達している。現在、電源部の小型・軽量化が重要な課題となっている。電源部の小型・軽量化のため、比較的大きなスペースをしめ且つ、重量の重い部品であるリアクトルや変圧器を小型・軽量化する努力がなされている。リアクトルや変圧器の小型化の最も容易な方法は高周波化であり、このため高周波動作に耐えられる磁性材料の開発が精力的に行われている〔1-3〕。

筆者等は、このような現状に鑑み変圧器の究極の小型・軽量化の方途としてツイストコイルを用いた空心変圧器を開発し、約7gの重量の変圧器で15W程度の出力が得られるDC/DCコンバータの実現が可能であることを報告した〔4-7〕。さらに極薄型化のためにフィルム状の変圧器の開発も行い、その実用化を急いでいる〔8, 9〕。

空心変圧器は、その動作原理が導体の表皮効果に基づくため、比較的高周波で動作することが前提で開発されている。このため、高周波動作時の導体間分布容量の影響が懸念され、特にフィルム型空心変圧器では、フィルム積層に伴う導体間キャパシタンスの影響が顕著となることが指摘されている。

本稿では、

- 1) 絶縁体をはさむ導体間では必ずキャパシタンスは存在する。しかし、キャパシタンスには、電位差が加わらない限り、その影響は大きくない、
 - 2) 導体間に電位差を加えることでキャパシタンスの効果が発揮でき、磁氣的結合と合まって並列共振回路が形成できる、
 - 3) 導体間のキャパシタンスと磁氣結合を利用した共振型フィルタの提案、
- を行い、その実験的検討から共振型変圧器やノイズフィルタとして充分実用化が可能であることを報告する。

2. 導体間の分布容量を利用した共振回路

2.1 動作原理

いま、 a 、 ω 、 μ 、及び ρ をそれぞれ導体の半径、角周波数、透磁率、及び抵抗率とすれば、

$$k = a\sqrt{\omega \mu \pi / (2\rho)} \quad (1)$$

として、 $k > 1$ の周波数で電流が図1(a)の各導体軸を中心として対称に分布しているとすれば、図1(a)のインダクタンス L 、相互インダクタンス M 、抵抗 R 、及びキャパシタンス

スCはそれぞれ、導体1個当たり、

$$L=L_i+L_o$$

$$\approx (\mu l/2) \{ (1/k) - (1/64)(1/k^3) \} + \{ \mu l / (2\pi) \} \{ \ln(2l/a) - 1 \} \quad (2a)$$

$$M \approx \{ \mu l / (2\pi) \} \{ \ln(2l/(a+d)) - 1 \} \quad (2b)$$

$$R \approx R_d \{ (1/4) + k + (1/64)(1/k^3) \} \quad (2c)$$

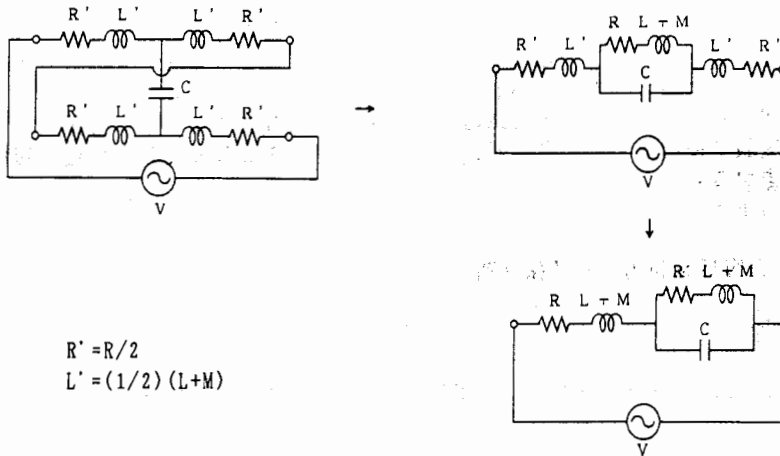
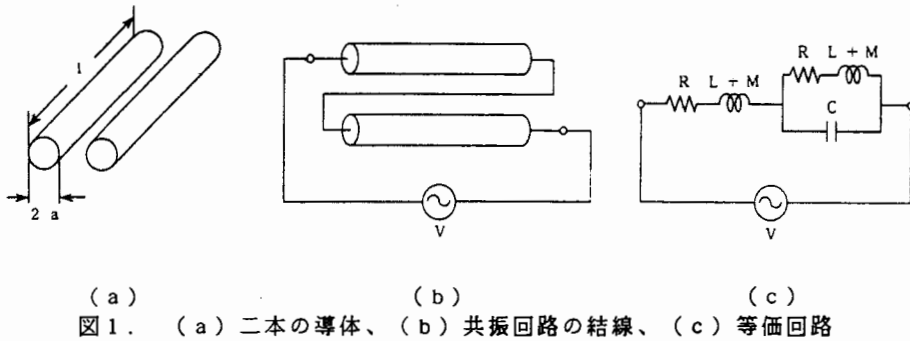
$$C \approx \epsilon \pi l / \ln((a+d)/a) \quad (2d)$$

となる。但し、 ϵ 、 d はそれぞれ導体間の絶縁体の誘電率と厚さであり、 R_d は直流抵抗で、

$$R_d = \rho l / (\pi a^2) \quad (3)$$

とする。

図1(a)の導体を図1(b)のように結線すれば、導体間の電位差は左端から右端まで同じ電位差 $V/2$ [V] であり、電流の方向は同方向である。従って、図1(b)の結線は図2のプロセスから図1(c)の等価回路で表されることとなる。図1(c)または図2から明らかに図1(b)の結線は共振回路を形成することがわかる。



2.2 実験

<a>空心コイル：図1（b）の結線によって実際に共振回路が形成できるかどうかを検証するため表1に示すコイルを作成した。

表1. 試作した空心コイル

No.	形 式	コイル径[mm]	全コイル長[m]
1	並列コイル有限長ソレノイド	0.2	10.0
2	ツイストコイル有限長ソレノイド	0.2	10.0
3	フィルム型1（1層）	2.0	2.8
4	フィルム型2（1層）	1.0	5.6
5	フィルム型1（2層）	2.0	5.6
6	フィルム型2（2層）	1.0	11.2

図1（c）の等価回路で共振角周波数 $\omega_r (=2\pi f_r)$ と共振時のインピーダンス Z_r は、それぞれ

$$\omega_r = 1/\sqrt{(L+M)C} \quad (4a)$$

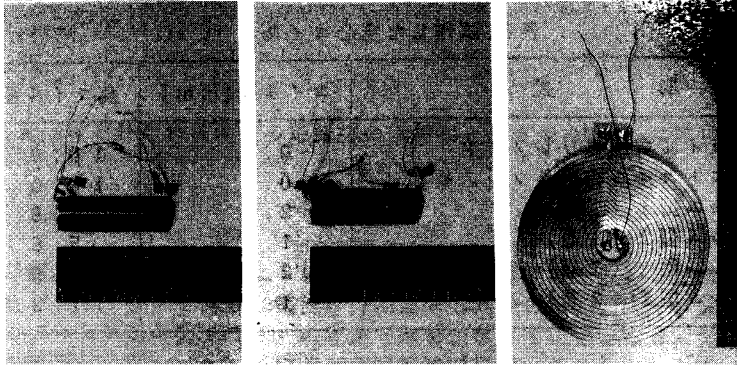
$$\begin{aligned} Z_r &= R + \{(L+M)/(RC)\} \\ &= R + \{1/(R\omega_r^2 C^2)\} \end{aligned} \quad (4b)$$

で与えられる。(4a)式から共振周波数の低減はインダクタンスを増加するか、キャパシタンスを増加するかのいずれかである。また、共振時のインピーダンスは、インダクタンスを増加すれば大きくなり、キャパシタンスを増加すると小さくなる。従って、共振周波数を低く、且つ共振時のインピーダンスを増加するにはインダクタンスを増加することが最も好ましいことが明白である。このことから、表1に示すように、試作した空心コイルで、銅線を用いて作成したものはソレノイド型として並行するコイルに共通の磁束を作りインダクタンスを増加するように作成した。また、フィルム型は1枚、および、2枚を積層しインダクタンスの増加を図ったものを試作した。また、フィルム積層型は磁束が加わるように中央部で上下層を接続してある。

図3（a）に試作したコイルNo.1の外形、図4（a）に共振回路のインピーダンスと位相特性、及び同じコイル長で試作した単純ソレノイドのインピーダンスと位相特性を示す。図3（b）～（f）、図4（b）～（f）は図3（a）、図4（a）と同様、共振と非共振結線をしたものである。

図4（a）～（d）の結果から、単純なソレノイドの共振周波数に比較して、約1桁程度共振周波数が低下していることがわかる。また、フィルム型〔図4（c）、（d）、（e）、（f）〕の結果から、コイルの長さが長い程共振周波数の低下がわかる。これは（2a）～（2d）式で、インダクタンスもキャパシタンスもコイル長に比例するため（4a）式の共振周波数がコイル長に反比例して低下するためである。

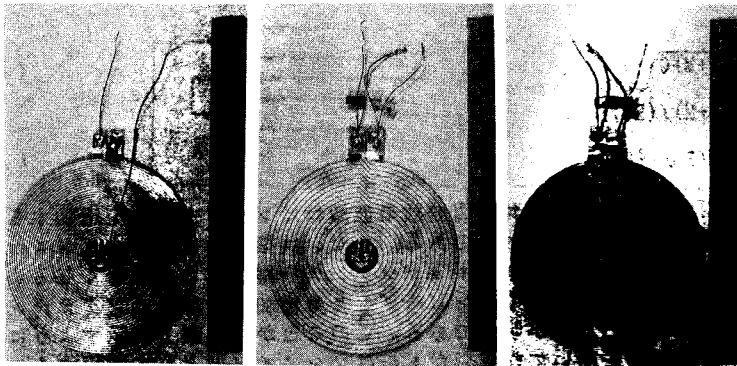
積層フィルム型〔図4（e）、（f）〕は、共振回路結線にしても非共振型の単純な結線にしても、同じ周波数に主共振周波数が存在している。このことは、フィルムを積層した場合、上下の線間容量が支配的であることを意味している。また、非共振型の単純な結線は、パターンを外側から内側に行くにしたがって電位差が異なるため共振周波数が複数個存在する。



(a)

(b)

(c)

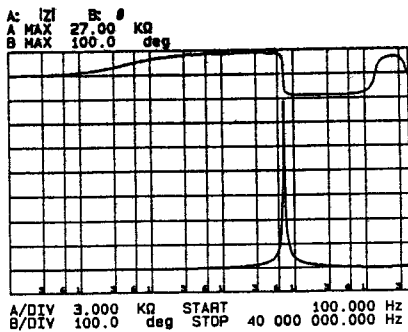


(d)

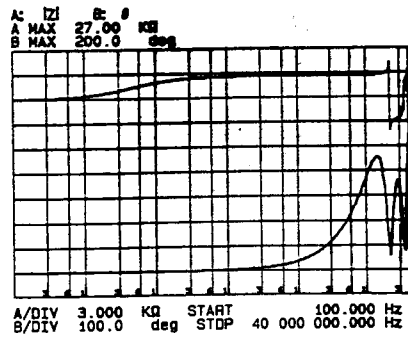
(e)

(f)

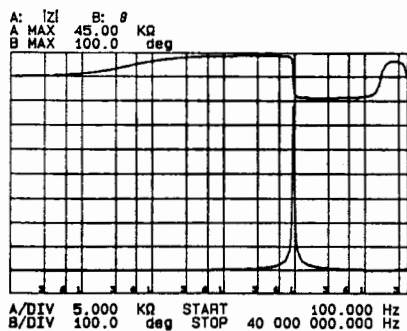
図3. 試作空心コイルの外形：(a)～(f)は、それぞれ表1のNo.1～No.6に対応する。



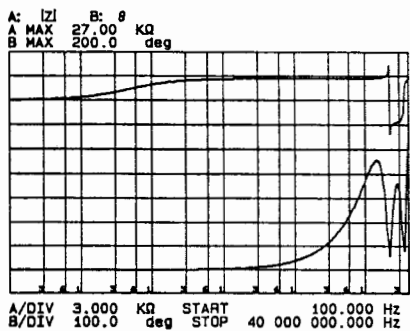
(a-1)



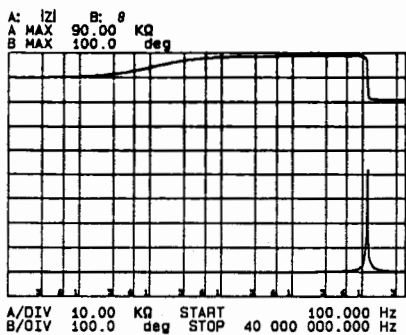
(a-2)



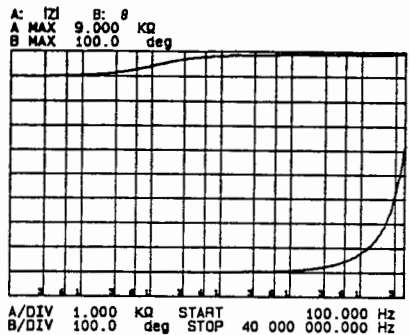
(b - 1)



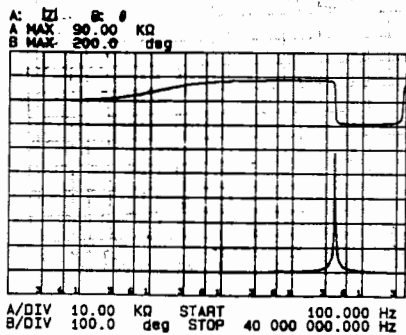
(b - 2)



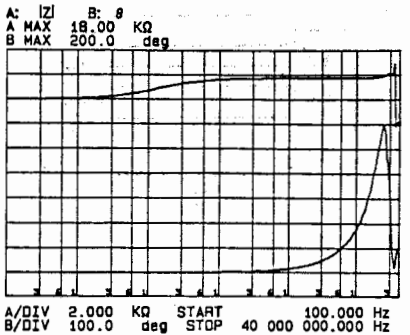
(c - 1)



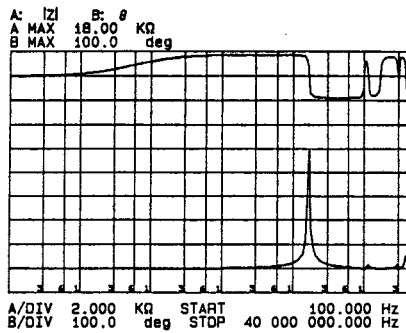
(c - 2)



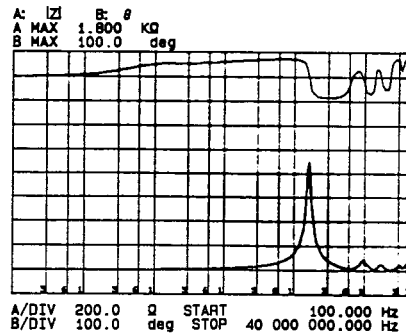
(d - 1)



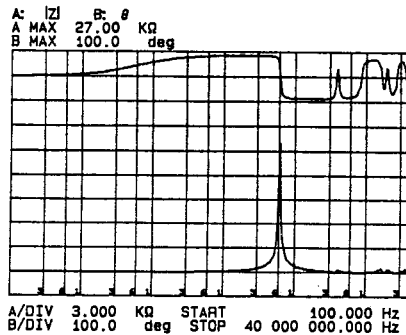
(d - 2)



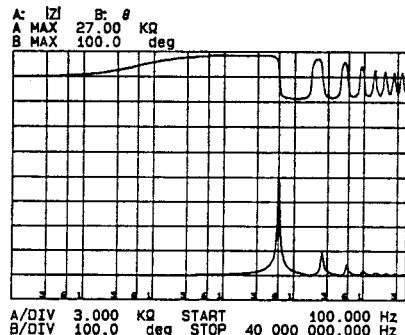
(e - 1)



(e - 2)



(f - 1)

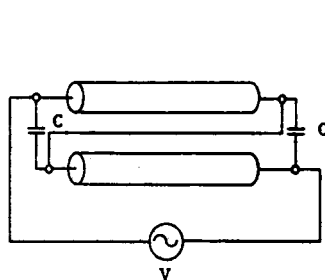


(f - 2)

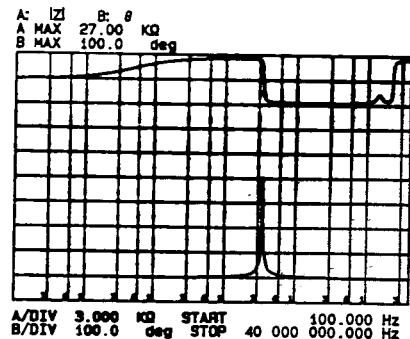
図4. 試作空心コイルの特性：(a)～(f)は、それぞれ表1のNo.1～No.6に対応する。(a-1)～(f-1)は共振回路形成時、(a-2)～(f-2)は単純ソレノイド。

< b > コンデンサを付加したコイル：(4 a)式から、共振周波数を低下するには、キャパシタンスを増加すれば良いこととなる。これを検証するために、表1 No.1のコイルに図5 (a)のようにコンデンサ ($C = 1.8 \text{ nF}$) を付加した時のインピーダンスと位相特性を測定した。その結果を図5 (b)に示す。

図4 (a-1)、図5 (b)の結果から、共振周波数の低減と共振時のインピーダンスの減少が明らかであり、この実験から(4 a)、(4 b)式の理論の妥当性が検証された。



(a)

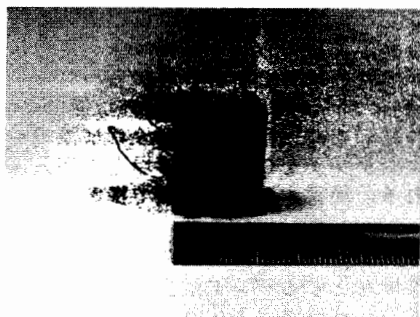


(b)

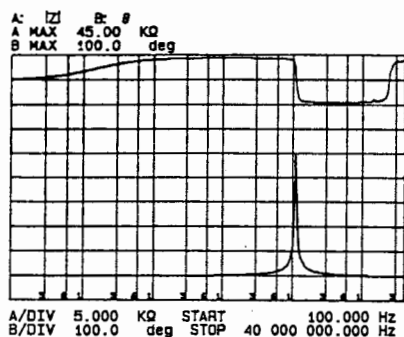
図5. (a) コンデンサ付加回路結線 (b) インピーダンス、位相特性

<c>磁性体を用いたコイル：(4 a)、(4 b)式から、共振周波数を低下し、共振時のインピーダンスを増加するには、インダクタンスを増加すれば良いこととなる。これを検証するために、1個の共振結線コイルについて、空心時のインピーダンスと位相特性およびEE型フェライトコアの中央脚にコイルを巻いた時のインピーダンスと位相特性を測定した。その結果を図6に示す。

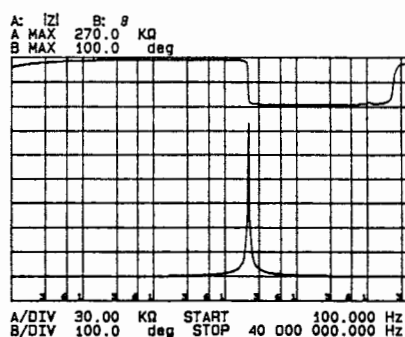
図6の結果から、磁性体を併用することによって、共振周波数の低減と共振時のインピーダンスの増加が明らかであり、この実験から(4 a)、(4 b)式の妥当性が検証された。



(a)



(b)



(c)

図6. (a) コイルの外形(並列ソレノイドコイル、導体径0.3 mm、導体長3 m \times 2)、(b) 空心時の特性、(c) EEフェライトコア装着時の特性

3. 応用

並行する導体間のキャパシタンスと磁氣的結合を利用してコンデンサを付加することなく共振回路が実現できることを示したが、ここでは、このコンデンサ無し共振回路の応用例を述べ、その中でフィルタとして応用した場合の特性について吟味する。

3.1 応用例

導体間の分布容量を利用すれば、コンデンサの付加無しに、共振回路が実現できるため、表2に示すような応用が考えられる。

平滑リアクトルは多くの場合磁性体を用いているが、結線を本稿で提唱する方式に変更することで特定の周波数に対して有効な効果を発揮する。特に、整流回路等では、最

も大きい高調波成分に共振周波数を設定すれば、従来の単純なリアクトルに比較して大きな効果を期待できる。換言すれば、結線を変更するだけでリアクトルの小型・軽量化が可能となる。

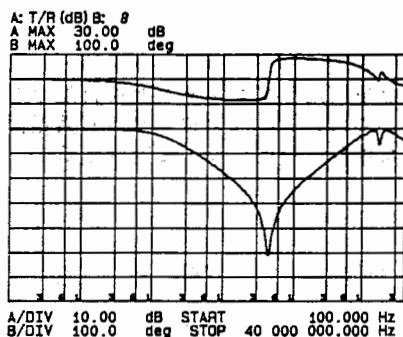
共振型変圧器は、例えば、DC/DCコンバータに使われる変圧器等で、一次回路を共振型の結線とすれば二次回路に伝達される成分は共振周波数のみとなり、ノイズの阻止が可能となる。また、一次・二次回路共に同一周波数で共振させればより効果的であろう。磁性体の非線形性を利用する鉄共振型周波数変換器では、二次側を共振させることによって、所望の周波数成分を取り出せることとなる。

スナバ回路は、DC/DCコンバータだけでなく、電気回路を開閉するコンタクトにも多く使われている。特に、線路中に蓄えられる磁気エネルギーに起因してコンタクトに発生するアーク放電を阻止するためにRCスナバ等が使われている。このRCスナバ等の代わりに、コンタクトに直列にコイルを装着し、ON状態では、単なる直列コイル、OFF状態に入る前にコイルの結線を共振回路に変更すれば通電電流が減少し、アークの発生が低減できる。また、コンタクトをONにする場合の突入電流サージも共振回路の高インピーダンスで低減される。換言すれば、本稿で提案するコイルを用いてソフトスイッチングが可能となる。

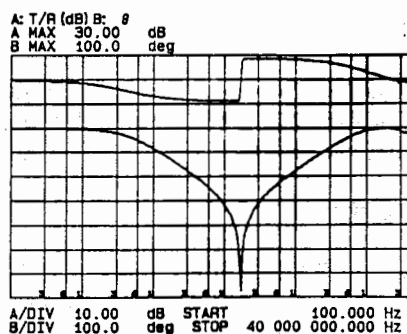
フィルタは、ローパス、ハイパス、バンドパス型に分類されるが、本稿で提案するコイルを用いれば、共振周波数を中心とするバンド阻止型のフィルタが実現できる。図7に図6(a)に示すEEコアを用いたコイルを、フィルタとして用いた場合の特性を示す。

表2. 代表的応用例

応 用	作 用
平滑リアクトル	共振型の結線をするにより、特定の周波数成分を阻止できる。
共振型変圧器	一次回路のみ共振型の結線をすることで、特定の周波数のみ二次回路へ伝達できる。 二次回路のみ共振型にすることで、一次または、磁性体の非線形性に起因する各種の周波数成分の中から任意の周波数成分を取り出すことが可能である。
スナバ回路	電気回路のスイッチングを行う場合に発生する、漏れインダクタンスに起因するスパイク状電圧または、アーク放電、突入サージ電流等を共振時の高インピーダンスで低減する。
フィルタ	並列共振を利用して、コンデンサ無しのノイズフィルタが実現できる。



(a)



(b)

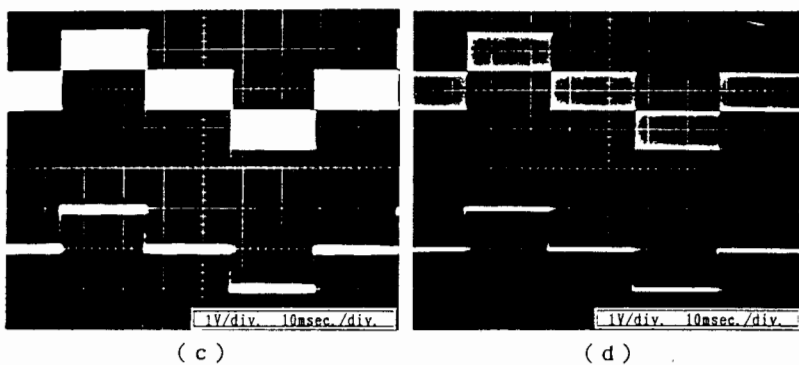


図7. 図6 (a) に示すEEコアを用いたコイルをフィルタとして用いた場合の特性: (a) ノーマルモード、(b) コモンモード、(c) ノーマルモードの時、12.5 Hzの階段波に100 kHzの正弦波をノイズとして重ねた場合の波形、上図が入力、下図が負荷(純抵抗 $R = 50 \Omega$) 端波形、(d) コモンモードの場合で、条件は(c) 図と同様である。

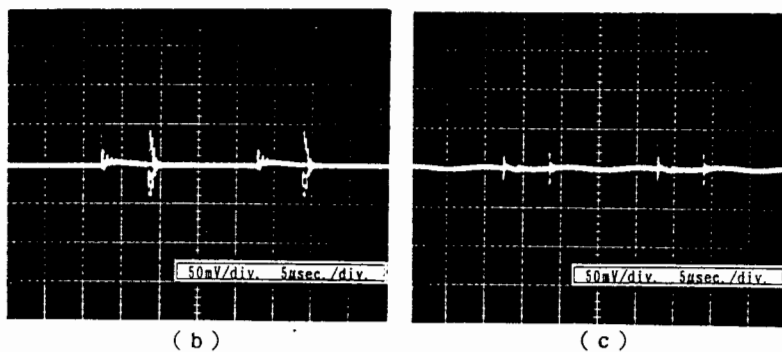
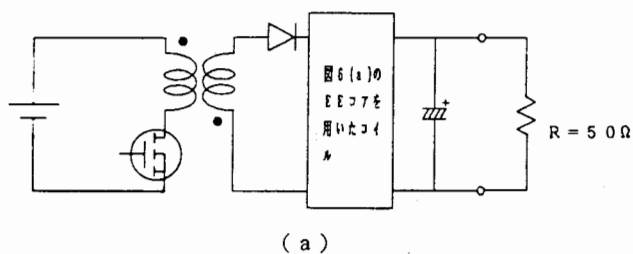


図8. DC/DCコンバータへ図6 (a) のEEコアを用いたコイルをフィルタとして用いた場合の実装例: (a) フライバック型DC/DCコンバータ回路、(b) 共振コイル(図6 (a)) 無し、(c) 共振コイル有り。

図8は、フライバック型DC/DCコンバータの平滑フィルタとして実装した例を示す。

図7、8の結果から、コンデンサを用いなくても、共振コイルのみで十分なフィルタが実現できることが明らかである。

4.まとめ

本稿では、導体間の分布容量を利用することで、共振回路が形成できることを報告した。また、具体的な応用例として、DC/DCコンバータにフィルタとして実装した結果、充分に実用が可能であることが検証され電源の小型化に寄与できることを示した。

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"、電気学会マグネティックス研究会資料、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.
- [9] 緑川、早野、斎藤、"フィルム変圧器の試作"、電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-93-168、1993年9月3日。

原稿受付日

平成6年2月8日