



## 2. 実験方法

### 2.1 インダクタの設計の考え方

従来品で用いられているNi-Zn系のフェライトからなるドラム型インダクタは、そのコアの形状から巻き線工程での自動化が行い易いこと、Ni-Zn系材料にある高電気絶縁性の性質から特別な絶縁処理は必要とせずに直接コアに巻き線が可能であること、そのため安価であること、等の理由により種々の電子回路に用いられるはん用的な磁性部品である。このインダクタ部品のDC-DCコンバータ回路における役割は、電圧変換のために高周波に脈流化された電圧及び電流をコンデンサーとともに平滑化し、直流電圧、直流電流に変換するフィルターとしての働きをすることである。その原理は断続的な電気エネルギーを、巻き線を介して磁気エネルギーとしてインダクタに蓄積する動作にある。しかしながら、ドラム型コアは磁気回路的な観点から見ると、コア自身が磁化するのを反対極の磁気ダイポールを形成し自分で妨げる構造、言い換えると反磁界係数が大きな構造である。このため蓄えられる磁気エネルギーは形状の大きさの割に小さく、部品の小型化には向かない構造であった。更にコアから発生する磁束は空気中を通して磁気回路を構成するため、その漏れ磁束が隣接する他の電子部品を誤動作させるなどの悪影響を及ぼすこともあった。そのため電子機器に組み込む際には、配置に特別な配慮が必要であった。

そこで筆者らは、インダクタの設計に当たり、以下の考え方に基づいて行うことにした。

(インダクタの設計の考え方)

- (1) 小型化に不利なドラム型構造に変えて、低漏洩磁束化も期待できる閉磁路型でかつコンバータへの実装が容易な低背構造をしたインダクタ形状に設計すること。
- (2) 小型化を達成するため、Ni-Zn系フェライトではなく、表1に示すように透磁率、飽和磁束密度に優れたMn-Zn系フェライトに材質を変えること。
- (3) 更に試作設計を短期間で行うために新日本製鐵先端技術研究所新材料研究部で独自に開発された磁界解析ソフトを用いて、インダクタの寸法を一度の設計で決定すること。

表1 酸化物の軟磁性材料

材料	比透磁率 $\mu_r$ (at 100kHz)	飽和磁束密度 $B_s$ (mT)	抵抗率 $\rho$ ( $\Omega\text{cm}$ )
Mn-Zn系フェライト	2 300	400~500	1~10
Ni-Zn系フェライト	1 600	300~400	$10^4$

(3)の磁場解析ソフトは、三次元有限要素法を用いた電磁場解析用ソフトである。その特徴を簡単に説明すると、広く用いられる節点要素法ではなく、高速計算に向けた辺要素法を取り入れていること<sup>6)</sup>、またコンバータの設計の際に要求されるインダクタンス値の直流重畳特性を計算できること<sup>7)</sup>である。節点要素法とは、有限要素法において未知変数を離散化した要素の節点に置いて計算する方法であるが、辺要素法とは未知変数を要素の辺に置いて計算する方法で、要素間の物理量の連続性を節点要素法に比べ正確に表現でき、それにより最終的に解くべきマトリックスが主対角優勢行列となるため、マトリックスの計算自体も速くなる特徴を有する。また磁場解析有限要素法で得られる解は通常磁束密度や磁場強度であるが、インダクタの設計では回路設計上必要な値、直流電流が重畳し

たインダクタンス値(直流重畳特性値)として算出することが要求される。そこで有限要素法の物性値に、直流重畳特性に相關する増分透磁率を入力し、計算された磁束密度、磁場強度からインダクタンスを算出する手法を考案し、上述した辺要素法に加えインダクタの設計に必要な三次元磁場解析ソフトを完成させた。

またインダクタンス値は巻き数の二乗に比例する。従って小型で高インダクタンス値を得るには巻き線をどのように構成するかが小型化のポイントの一つであった。そこで通常の導線ではなく小型化に有利と思われる、融着性絶縁導線を用いた巻き線構造、又はプリントコイルの適用を考え、双方を比較実験した。融着性絶縁導線とは、モータの巻き線等に用いられるもので、導線の表面に絶縁層、その上に融着層を持つ導線で、巻き線の後加熱処理することで互いに融着し一体のコイルとなり、巻き枠(ボビン)を必要としない。またプリントコイルとはプリント基板上に銅板をフォトリソ加工して、巻き線パターンを形成したものである。

これらの計算、実験から従来型ドラム型インダクタと比べ、直流重畳特性、磁気ノイズ特性(低漏洩磁束)に優れ、目標厚さ4mmのインダクタを試作した。次に、従来品と直流重畳特性及び磁気ノイズ特性を比較した。直流重畳測定はLCRメータ(日本HP社製、4284A型及び4284A1型)を用いて周波数50kHz、振幅1mAの正弦波交流に直流0~1.6Aを重畳印加して行った。また、漏洩磁束はガウスメータ(電子磁気工業社製、GM-1120型)を用いて測定した。

### 2.2 薄型インダクタを搭載したDC-DCコンバータの特性評価

試作したインダクタと高効率化した回路基板をそれぞれ放熱器の各面に固定することにより、最大出力電流1.0AのDC-DCコンバータを試作した。回路は直流入力電圧を降圧する自動方式降圧チョップ型の非絶縁電源である。次に、従来品と効率、出力ノイズ、及び発熱特性を比較した。発熱特性は各部品の表面温度を熱飽和後、熱電対により測定し、周囲温度との差である温度上昇値 $\Delta T$ を求めた。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 薄型インダクタのコア形状

試作した薄型インダクタの構造を図1に示す。厚さ1mmの、融着性絶縁導線を巻線後固着したコイル又はプリントコイルを、ER型及びI型(板状)の扁平なMn-Zn系フェライトコアで挟んで成る。

ER型とI型を合わせたフェライトコアのサイズは $17 \times 13 \times 4$ (厚さ)mm<sup>3</sup>であり、ドラム形従来品の $18$ (直径) $\times 14$ (厚さ)mm<sup>2</sup>と比べ、直

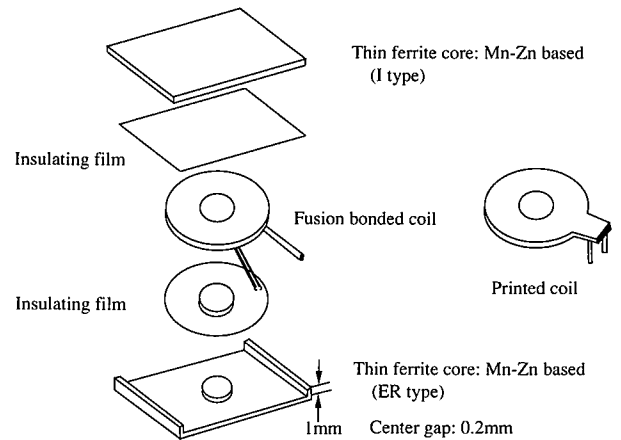


図1 薄型インダクタの構造

流重量特性は同じで体積、厚さともに小さくできた。

磁場解析ソフトで解析に用いた要素分割図及び磁束密度分布を図2に示す。磁場解析ソフトを用いた設計では、局所的に高い磁束密度の部位が発生しないように注意した。局所的な高磁束密度部分が存在すると、そこでの損失が大きくなり、ヒートスポットを形成するからである。扁平フェライトコアの肉厚は1.5mm、巻線部分の間隔1mm、中脚部分のセンターギャップ0.2mmである。原理的には肉厚を薄くすることでコアの高さは更に低くできるが、フェライトの脆性を考慮すると肉厚を余り薄くすることはできない。また肉厚を薄くすることで、コアの磁路断面積が低下し、それを補うためにコアの平面上のサイズが大きくなることにもなる。この理由から最適肉厚を1.5mmと決定した。

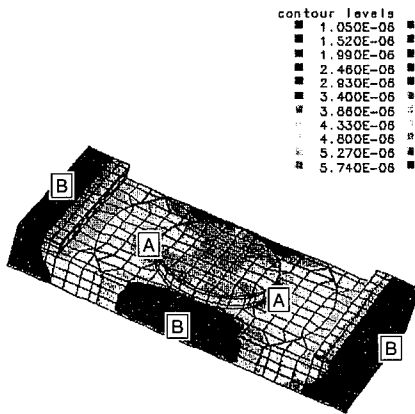


図2 薄型インダクタコアの要素分割及び磁束密度分布 (A点は磁束密度が最も高い部分、B点は最も低い部分)

### 3.2 インダクタの巻き線試作

次に試作した巻き線について述べる。

融着性絶縁リボン導線は銅線断面が平角状(幅0.8×厚さ0.07mm<sup>2</sup>)の被覆導線の上に、更に融着性被膜を焼付けた二層構造の被覆導線である。この導線を巻枠に沿って26ターン巻き、熱風加熱により固着後、巻枠から外すことによりコイルを作製した。断面が平角状のリボン導線は、扁平フェライトコアの巻線部分に、断面積が同じ導線を巻く場合、円状の丸導線より隙間を少なく、密に巻けるため、巻数を増やすことができ、高いインダクタンスを得るのに有利であった。ただしコアはMn-Zn系のフェライトを用いているため、そのままコアと巻き線の組み合わせでは十分な電気絶縁性を保てない。そこで融着コイルと扁平フェライトコア間に厚さ100 $\mu$ mの絶縁フィルムを設けることにより、コンバータ部品として必要とされる直流500Vの耐圧試験を満足することができた。

プリントコイルは両面の銅張フレキシブルプリント配線板をフォトリソエッチングすることにより、断面が幅0.8×厚さ0.07mm<sup>2</sup>のスパイラル状平面コイルを形成し、絶縁層を介して、3ターンを6層、すなわち18ターン積層した。平面コイル間はスルーホールを介して、Cuめっきにより電気的に直列に、各平面コイルに同方向の電流が流れるように接続し、また積層体の両面は塗布絶縁層で覆った。

### 3.3 インダクタの特性評価

インダクタンスの直流重量特性を従来品も含めて比較した結果を、図3に示す。薄型インダクタにおいて、融着コイルを用いた方が、プリントコイルに比べ、高いインダクタンスが得られ、DC-DC

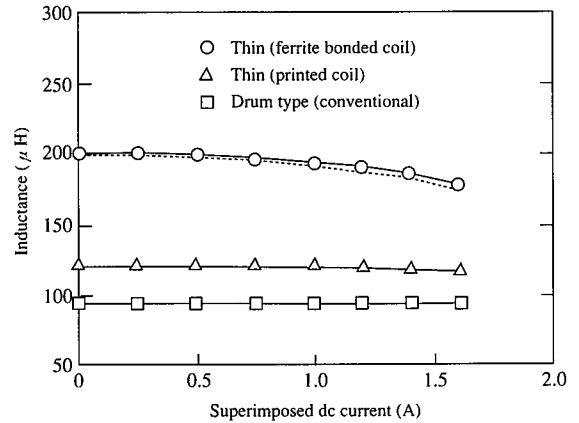


図3 薄型及び従来のインダクタの直流重量特性(点線は計算値)

コンバータのリップルを小さくするのに有利であった。この差は導線巻数の違いによるものである。プリントコイルの場合、導線の層間厚みはフレキシブルプリント配線板の絶縁フィルムの厚さ約75 $\mu$ mであるが、融着コイルでは20 $\mu$ m程度にすることができ、銅線を密に巻けたためである。ドラム形従来品は直径0.7mmの丸銅線を37ターン巻線してあるが、反磁界係数が大きな構造のためインダクタンス値は小さい。

また、磁場解析ソフトによる計算値を点線で示したが、実測値と良好な一致を示しており、計算ツールが特性の予測に有効であったのが分かる。

次に漏洩磁束について述べる。

漏洩磁束を従来品と比較して図4に示す。ただし、漏洩磁束はコイルに1Aの直流を流し、ドラム形従来品については貫通孔上部、薄型インダクタについては中脚部分上部のコア表面からの距離との関係で測定した。薄型インダクタからの漏洩磁束は、磁束がフェライトコア中で閉ループ化したため、ドラム型と比べ1/10程度に低減で

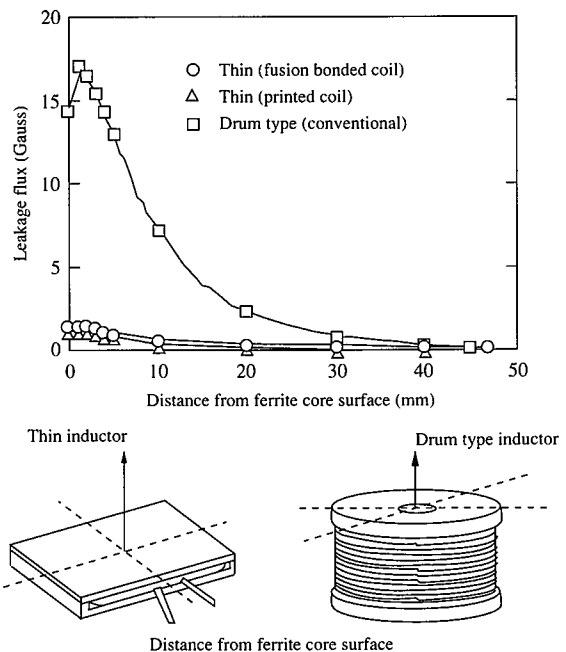


図4 薄型及び従来のインダクタの磁気ノイズ特性 (直流電流1Aを流したとき)

きた。融着コイルに比べ、プリントコイルを用いた方が漏洩磁束が若干小さいのは、巻線数が少ないため励磁磁界自体が小さいからである。なお、ドラム型従来品の貫通孔上部は厚さ14mm、薄型インダクタのコア表面は厚さ4mmの位置からの測定であるため、フェライトコア底部からの距離で比較すると、漏洩磁束の低減効果は更に顕著化する。

漏洩磁束の磁場解析ソフトによる計算結果を図5に示すが、薄型インダクタからの漏洩磁束はドラム形従来品と比べ、測定結果と同等に小さいのが分かる。開発した磁場解析ソフトにより、漏洩磁束は事前に予測され、低磁気ノイズ設計にも有効である。漏洩磁束の低減は、電子機器中のIC部品や回路の誤動作を防止し、高密度実装が可能のため電子機器の小型化に有利である。

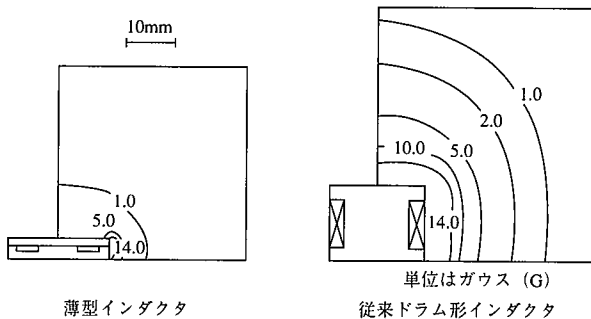


図5 薄型及び従来のインダクタの漏洩磁束の磁界解析結果 (左図が本試作インダクタ, 右が従来型ドラムインダクタ)

### 3.4 DC-DCコンバータへの搭載及び従来品との比較

薄型インダクタを搭載したDC-DCコンバータ試作品の構造と外観写真をそれぞれ図6、写真2に示す。固定部材を用い、片面に薄型インダクタ、他面に回路基板と放熱フィンを固定して成る。表2に示すように試作品は従来品と比べて、厚さ、体積ともに1/2以下に小型化できた。

回路は自励式降圧チョップ型レギュレータであり、図7に等価回路を示す。動作原理を簡単に説明する。出力電圧 $V_{out}$ を抵抗 $R_1$ ,  $R_2$ で分圧した電圧 $V_+$ がコンパレータ $Z_1$ のマイナス入力 $V_-$ よりも低い場

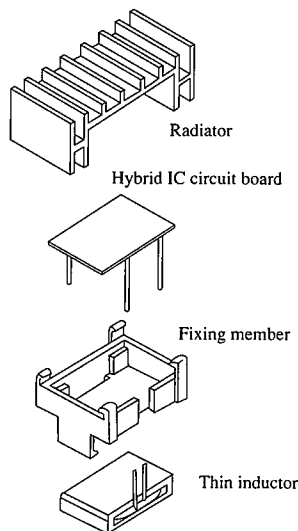


図6 薄型コンバータ試作品の構造

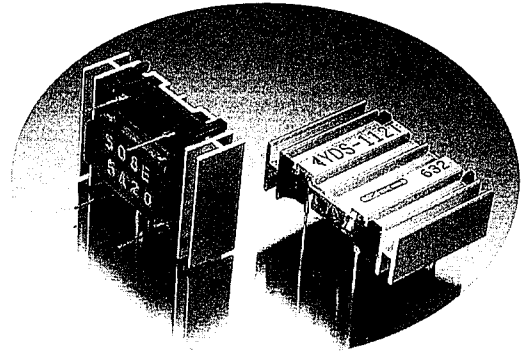


写真2 薄型コンバータ試作品の外観写真 (写真提供：(株)ユタカ電機製作所)

表2 試作品と従来品の寸法

	寸法 (縦×横×厚さ) (mm)	体積 (mm <sup>3</sup> )
試作品	32×23×12.2	8 979.2
従来品	28×27.5×26	20 020.0

合、 $Z_1$ の出力はローとなり、主スイッチ素子 $Q_1$ のエミッタ・ベース間が順方向にバイアスされてオン状態となり、 $L_1$ と $C_{out}$ のLCフィルタを通り、出力電圧を更に上昇する。次に、 $V_+$ が $V_-$ よりも高くなったとき、 $Z_1$ の出力はハイとなり、 $Q_1$ はオフする。このとき、オン時に $L_1$ に蓄えたエネルギーは、フライホイールダイオード $D_1$ を通して負荷側に放出され、出力電圧は徐々に低下する。以上の動作を繰り返すことにより、出力電圧は安定化される。自動方式のため発振器を持たず、入力電圧、出力電力により、発振周波数は自己制御される。 $R_3$ ,  $Q_3$ の回路は出力電流の過電流保護回路である。

従来回路との変更点は、PNP型半導体からなる主スイッチ素子 $Q_1$ のベースとエミッタとの間に挿入されている抵抗をNPN型半導体からなる小型のオフ用スイッチ素子 $Q_2$ に置き換え、主スイッチのターンオフ時間を早めることによって、回路内部の損失を少なくし、変換効率の向上を図った点にある。

バイポーラトランジスタではオン状態のときにベース・エミッタ領域に少数キャリアが蓄積されており、ベース電流がゼロになってもオフ状態になるまでには、蓄積電荷を放電させる時間が必要となる。従来回路において、主スイッチ素子 $Q_1$ はベースとエミッタ間の抵抗による逆バイアス電圧のみでオフするため、 $Q_1$ のターンオフ時間はオン時のベース・エミッタ間の蓄積電荷の自然消滅時間に依存しており、 $Q_1$ のターンオフするタイミングが遅く、その瞬間に生じるスイッチ電圧とスイッチ電流の積であるスイッチング損失が大きかった。

これに対し、主スイッチ $Q_1$ のPNP型半導体と異なるNPN型半導体のバイポーラトランジスタを抵抗と置き換えてオフ用スイッチ素子 $Q_2$ とすることにより、 $Q_1$ がオフした瞬間に $Q_2$ がオンして蓄積電荷を強制的に引き抜くことで、 $Q_1$ のターンオフ時間を短縮することができ、高効率化が図れた。

試作したDC-DCコンバータは入力電圧10~40V、出力電圧5, 12V(入出力電圧差4V以上)で動作する。一例として、入力電圧24V、出力電圧12Vで動作させた場合の変換効率とリップルを従来品と比較して、図8に示す。従来品と比べ、変換効率は向上し、リップルも低減できた。リップル低減はインダクタのインダクタン

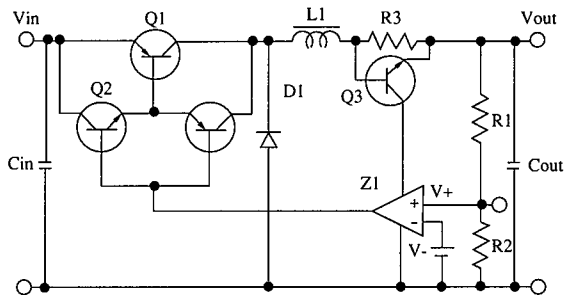


図7 薄型コンバータ試作品の等価回路図  
(ただし、Cin, Coutは外付け)

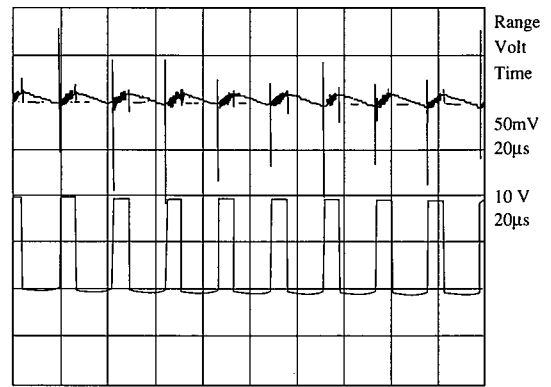


図9 薄型DC-DCコンバータの出力及びスイッチング後の電圧波形  
(入力: 24V, 出力: 12V, 1.0A, 熱飽和後)

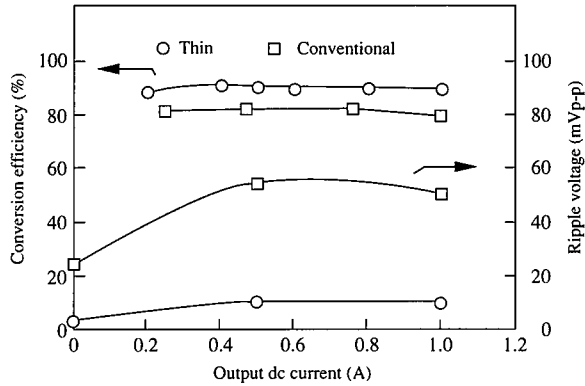


図8 薄型及び従来のコンバータの電気特性  
(入力: 24V, 出力: 12V)

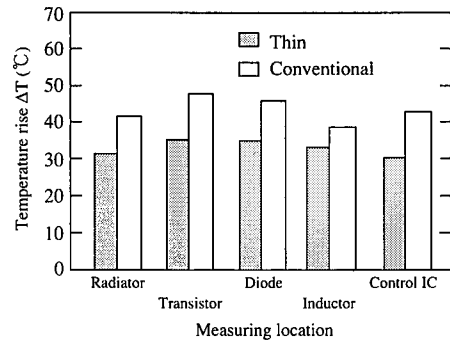


図10 薄型及び従来のDC-DCコンバータの発熱特性

スを大きくできたことに依存している。

1.0A出力させた場合、熱飽和後の出力電圧波形をスイッチング後の波形とともに、図9に示す。発振周波数は約50kHzであった。

次に、1.0A出力させた場合の熱飽和後の各部品の温度上昇値 $\Delta T$ を従来品と比較して、図10に示す。1/2以下に小型化したにもかかわらず、各部品の温度上昇を従来品以下に抑えることができた。

#### 4. 結 言

ドラム形インダクタを搭載したオンボード型のDC-DCコンバータ従来品を、厚さ、体積ともに1/2以下に小型、薄型化できた。小型化にかかわらず、電気特性(変換効率, リップル), 発熱特性及び磁気ノイズ特性(低漏洩磁束)は従来品に比べ優れる。開発のポイントは以下の3点である。

- (1) 独自開発した磁場解析ソフトを駆使することにより、ドラム形従来品と比べ、直流重畳特性、磁気ノイズ特性に優れる厚さ4mmの薄型インダクタを設計できたこと。
- (2) 導線断面が平角状の融着性絶縁導線を巻線後固着した融着コイ

ルを用いることにより、扁平フェライトコアの間隔1mmの巻線部分に密に巻線でき、高インダクタンス値を得られたこと。

- (3) 従来回路に対して主スイッチ素子のエミッタとベースとの間に小型のスイッチ素子を挿入し、主スイッチの蓄積電荷を高速に引き抜き、主スイッチの損失を抑えたことで高効率化し、放熱器を小さくできたこと。

#### 参考文献

- 1) 陳: JIEC 세미나資料「SW電源トランスの開発と高周波化技術」. 88(1993)
- 2) 笹田, 原田, 小林, 能登原, 坂本: 電気学会マグネティクス研究会資料. MAG-92-162(1992)
- 3) 山本, 松本, 松木, 村上: 日本応用磁気学会誌. 11,371(1987)
- 4) Tanigawa,K., Hirano,H., SatoT., Tanaka,N.: J. Appl. Phys. 75(10), 5788(15 May 1994)
- 5) 吉岡: トランジスタ技術. 26(6), 497(1989)
- 6) 岩田: 日本応用磁気学会誌. 18, 607(1993)
- 7) 平野, 岩田, 佐藤: 平成4年電気学会全国大会. 1565, 14-46(1993)