

# プリント基板上に形成したコイルの導体分割による交流抵抗抑制

野本 俊作, 日下 佳祐 (長岡技術科学大学)

## Splitting Conductors of Coils on PCB for Reducing AC Resistance

Shunsaku Nomoto, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

Inductors built on printed circuit boards (PCBs) have been widely used for transformers and inductors because it has the advantages of downsizing and consistency for mounting components on PCBs. However, copper loss caused by skin and proximity effects takes a large proportion of the total loss of the inductors at high-frequency regions. Therefore, reducing copper loss is one of the significant issues for the inductors. This paper proposes a method to suppress copper loss (ac resistance) due to skin and proximity effects by splitting patterns of an inductor and swapping them at the corner of the inductor. The simulation results demonstrate that by using a 12-corner coil shape and splitting the pattern into three sections, the proposed method suppresses the resistance value by 16.7% compared to a spiral coil and improve the Quality Factor by 10.9%.

キーワード : 表皮効果, 近接効果, スパイラルコイル, プリント基板

Keywords : Skin effect, Proximity effect, Spiral coil, Printed circuit board (PCB)

### 1. はじめに

近年, 一部の電力変換回路において, プリント基板上のパターンを用いてコイルを形成した磁気部品 (インダクタ, トランス) が用いられている<sup>(1-5)</sup>. これらの磁気部品は, プリント基板上のパターンを用いており, 通常の巻き線と比較して小型化, 実装の容易さの観点から有利である. しかし, 高周波でこれらの磁気部品を使用する場合, 表皮効果や近接効果によりパターンの交流抵抗が増大し, 損失が増大する問題がある. 本問題を解決するために, コアのギャップやパターンの配置を工夫することで交流抵抗の増加を抑制する手法が提案されている<sup>(6-7)</sup>. しかしながら, これらの手法では, コアのギャップやパターンの配置に強い制約があり, コアに巻くことのできるパターンの空間が減少するという問題点がある. また, パターン配置をリッツ線のように撚るような構造とすることで, 交流抵抗を抑制する手法も提案されている<sup>(8-9)</sup>. しかし, その構造を実現するために, 導体長が長くなる特徴があり, 直流抵抗の増加が懸念される.

本論文では, PCB 上のパターンを分割し, それらの配置を入れ替えながらコイルを形成することで交流抵抗を低減する手法を提案し, 電磁界解析によりその有用性を明らかにする.

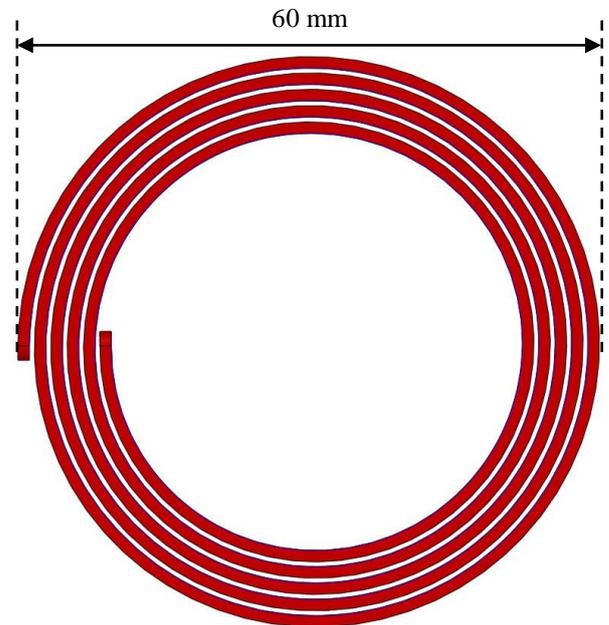


Fig. 1. Conventional spiral structure coil.

### 2. コイル構造

〈2・1〉 提案構造と従来構造の比較条件 Fig. 1 に従来構造における PCB コイルの上面図を示す. 巻き線は PCB 上にパターンを用いて形成され, 上下から磁性コアを挟み込むことでインダクタもしくはトランスの一部となる. 本

Table 1. Parameters of the spiral coil.

Outer diameter of the inductor	60 mm
Copper thickness	0.5 mm
Pattern width	1.2 mm
Number of turns	5

コイルを基準モデルとし、提案構造による交流抵抗低減効果を検証する。本コイルのパラメータを Table 1 に示す。

〈2・2〉 提案コイル Fig.2に提案するコイルのモデルを示す。本構造では、円形コイルを多角形のパターンで構成し、各線分を並行する複数のパターンに分割する。また、パターンが多角形の角に到達したタイミングで分割したそれぞれのパターンの位置を入れ替える。パターンの入れ替えのため、分割した巻き線はそれぞれ異なる導体層に構成する必要がある。なお、このコイルのパラメータは Table 1 に示したスパイラルコイルと等しく、分割したパターンの幅の和は元のパターン幅と同一とする。また、コイルの外接円の直径が 60 mm として比較を行う。

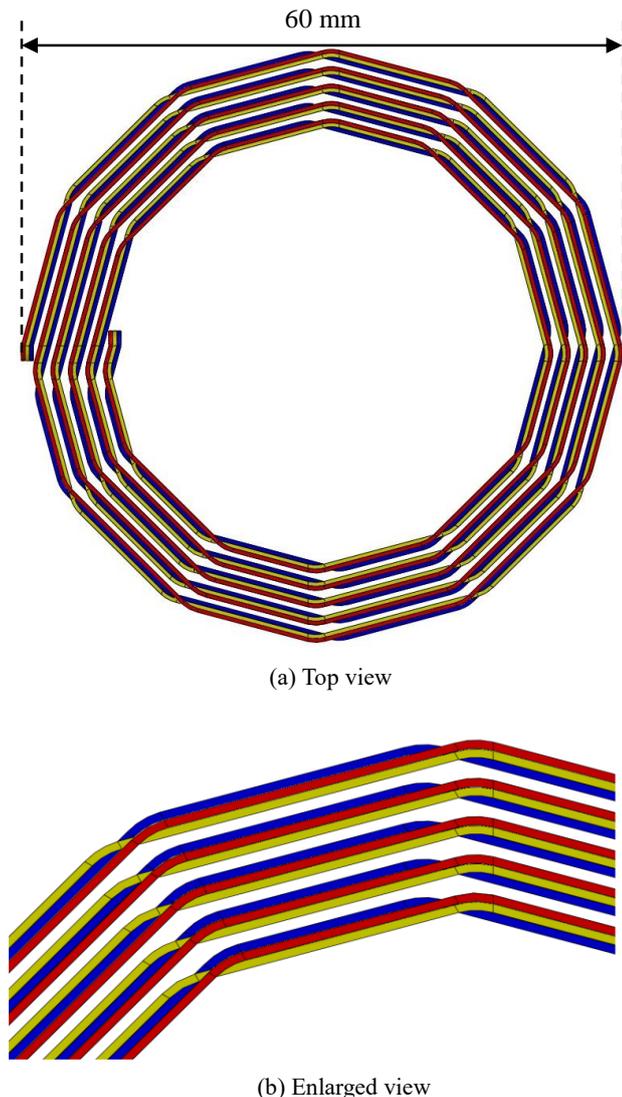


Fig. 2. The model of the proposed coil (Dodecagon).

ルの外接円の直径が 60 mm として比較を行う。

Fig. 2 (b)にパターンの拡大図を示す。パターンが多角形の角に到達した際、コイルの内側から外側にパターンの位置を入れ替える。なお、分割したパターンはそれぞれ別の導体層に配置していることから、入れ替え時に干渉が発生しない。

### 3. シミュレーション結果

〈3・1〉 パターンの分割数の検討 効果的にコイルの表皮効果を抑制できる分割数を明らかにするために、コイルの形状を 12 角形に固定して、パターンの分割数を変化させたときの交流抵抗の変化を電磁界解析により解析した。なお、シミュレーション条件は、周波数 100 kHz, 電流 28 A とした。なお、コイルの性能評価指標として、コイルの品質を表す Q 値(Quality Factor)を用いた。Q 値の定義式を式 (1)に示す。

$$Q = 2\pi fL/R \quad \text{.....(1)}$$

ここで、 $L$ : インダクタンス,  $R$ : コイルの等価直列抵抗,  $f$ : 周波数である。Q 値が高いほど高周波用コイルとして優れた特性を持っているといえる。

Fig. 3 に、電磁界解析によって解析したパターンの分割数を変化させたときの交流抵抗の変化を示す。なお、電磁界解析のモデルを簡易化するため、コイルの巻き数を 1 回とした。

Fig. 3 より、交流抵抗を最も抑制できる分割数は、パターンを 4 分割した場合であることがわかる。しかし、インダクタンスは分割数が増加するにしたがって、減少する。そのため、Q 値は 3 分割時に最大となり、高周波における特性が最も優れているのは 3 分割となる。パターンを分割しない場合と 3 分割した場合の抵抗値を比較するとパターンを 3 分割の方が抵抗を 10.6%以上抑制できる。一方、パターンを 5 分割した際には、3 分割の際と比較して抵抗値が増加していることが確認できる。これは Fig. 4 に示した

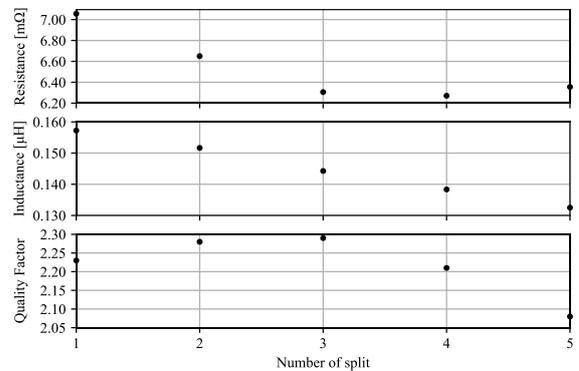


Fig. 3. Relationships between resistance, inductance, and quality factor of the inductor and split.

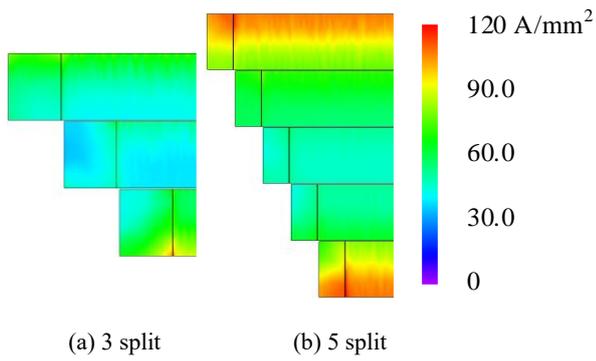


Fig. 4. Current density distributions of the single-turn coils.

パターンの分割数が 3, 5 のときのコイル断面の電流密度分布から説明できる。パターンの分割数が増えるほど、パターンを異なる導体層に配置する必要が出てくることから全体の厚みが増し、厚み方向に近接効果の影響を受け始める。したがって、分割数の増加に伴って最上層と最下層のパターンに電流が集中し、交流抵抗を増加させる要因となる。

〈3・2〉 電流密度分布 Fig. 5 に提案コイルとスパイラルコイルの電流密度分布を示す。電磁界解析の条件は、電流 28 A, 周波数は 100 kHz とした。なお、パターンの分

割数は前節の検討に基づき 3 とした。また、提案コイルの形状は 6, 12, 24 角形の 3 種類とし、交流抵抗の比較を行った。

Fig. 5 はコイルを 1/4 に分割した中の 1 部分の電流密度分布を表している。Fig. 5 より、スパイラルコイルと比較して提案コイルの電流密度分布の偏りが小さいことがわかる。また、多角形の角数が増加するほど、電流密度分布の偏りが軽減されていることもわかる。提案コイルの構造として、表皮効果の抑制のみを考えていたが、Fig. 5 より、パターン間の近接効果も抑制できていることがわかる。

〈3・3〉 周波数特性 Fig. 6 及び 7 に提案コイルとスパイラルコイルの抵抗とインダクタンスの周波数特性を示す。ここで、電流は 28 A, Spiral はスパイラルコイル, 6, 12, 24c はそれぞれ提案コイル 6, 12, 24 角形である。スパイラルコイルの外径と提案コイルの外接円を等しく設定したため、スパイラルコイルのパターンの長さは提案コイルよりも長い。そのため、スパイラルコイルの方がパターンの長さの差分だけ抵抗、インダクタンス値が大きくなる。なお、多角形の角数を増やすほど円に近づくため、その差分は小さくなる。

抵抗値の周波数特性に着目すると、10 kHz まではどの形状においても抵抗値の変化は小さく、表皮効果や近接効果

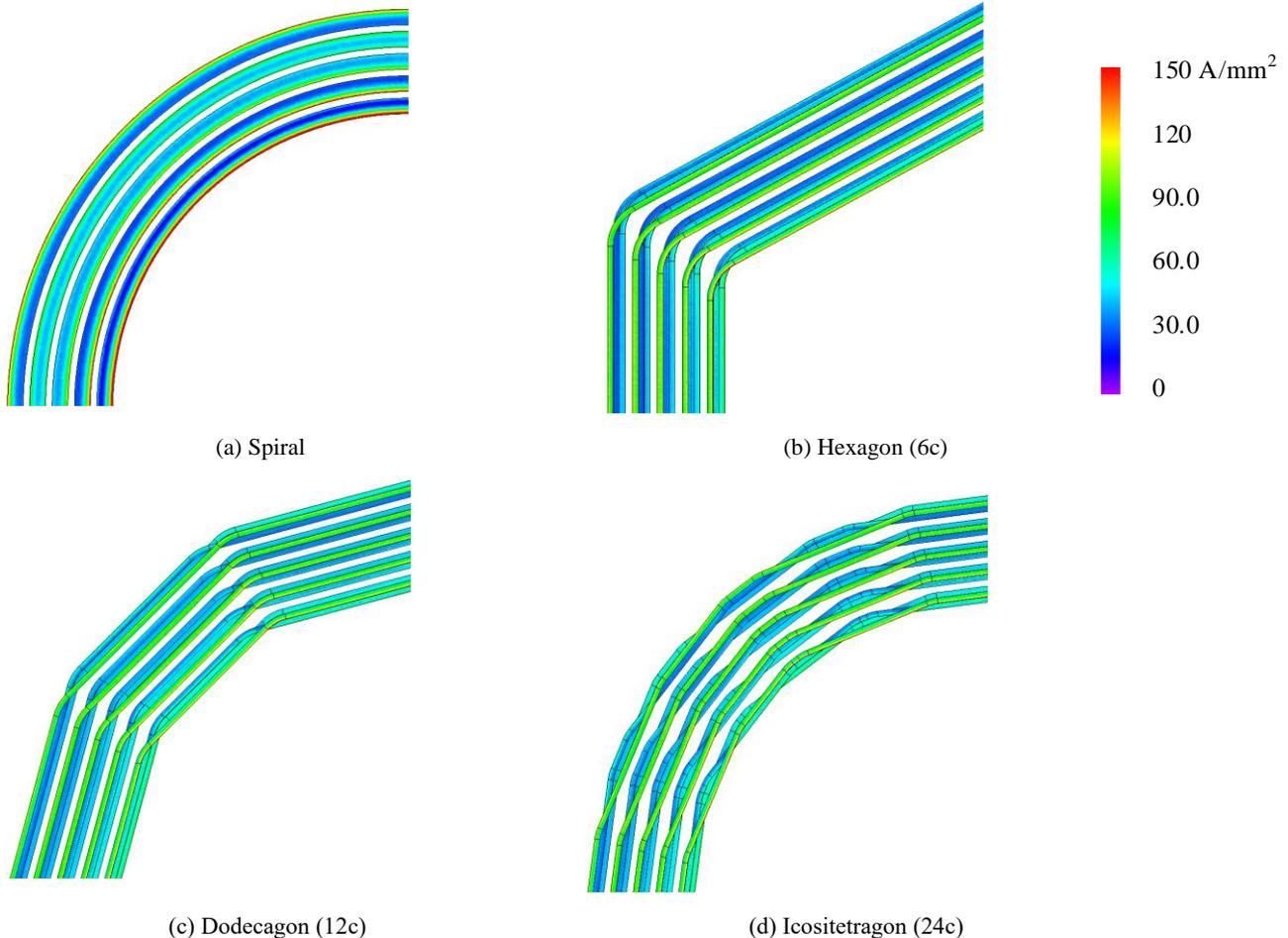


Fig. 5. Current density distributions of the five-turn coils.

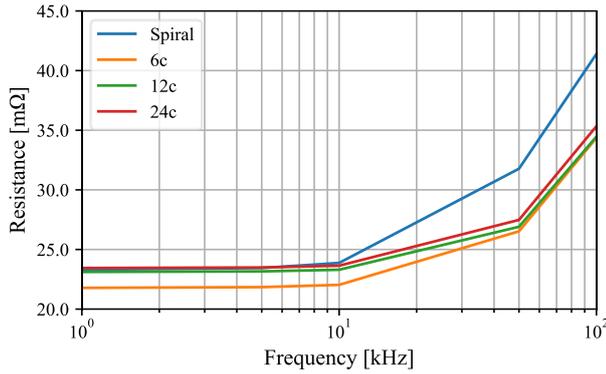


Fig. 6. Resistance of the coils.

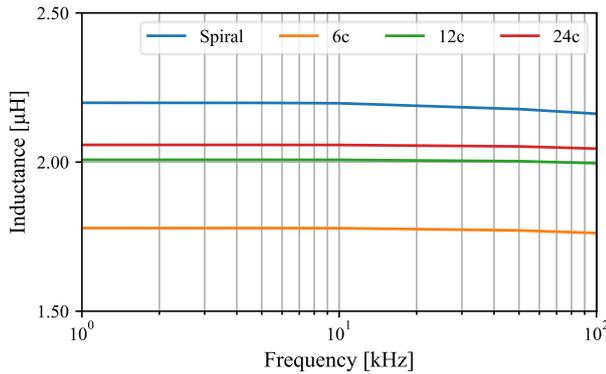


Fig. 7. Inductance of the coils.

の影響は見られない。一方、周波数が 10 kHz を超えると、表皮効果や近接効果の影響が強くなり、それぞれのコイルの抵抗値が増加しはじめる。しかし、増加割合はスパイラルコイルと提案コイルで異なっており、提案コイルの方が交流抵抗の増加を抑制できる。また、提案コイルの中でも 6 角形と 12, 24 角形の抵抗値を比較すると、12, 24 角形の方が効果的に交流抵抗を抑制していることがわかる。周波数 100 kHz 時には、提案構造を有する 12 角形コイルはスパイラルコイルに比べて 16.7%以上抵抗値を低減できる。

Fig. 7 から、どのコイルのインダクタンスも周波数によらずほぼ一定の値となっていることがわかる。また、コイルの形状が円に近づくほど、インダクタンスが大きくなることが確認できる。

〈3・4〉 Q 値 Fig. 8 にコイルの形状を変化させた場合における Q 値の電磁界解析結果を示す。図中において横軸がコイルの角数を表しており、0 はスパイラルコイルである。

Fig. 8 より、提案コイル 12 角形の Q 値が最も高いことがわかる。したがって、4 つのコイルの中で 12 角形が高周波において最も優れた特性を持っているといえる。スパイラルコイルと比較すると、12 角形の Q 値は 10.9%以上高い値をとる。

#### 4. まとめ

本論文では、プリント基板上に形成するコイルの交流抵

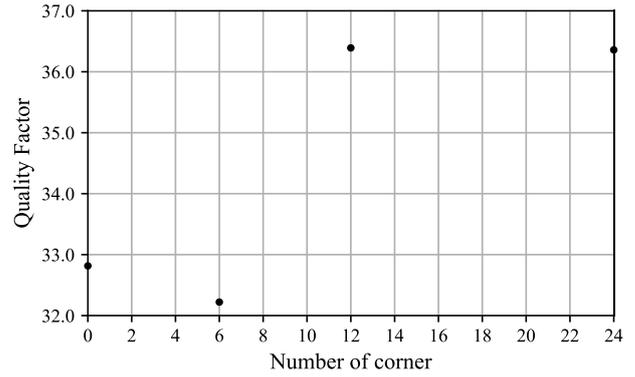


Fig. 8. Quality Factor of the coils.

抗を抑制する手法を提案した。提案構造では、コイルを構成するパターンを幅方向に分割し、コイルの形状を多角形とした。加えて、コイル(多角形)の角で分割したそれぞれのパターンの位置を入れ替えることで、表皮効果および近接効果を抑制した。シミュレーション結果より、コイルの形状を 12 角形、パターンを 3 分割することで、スパイラルコイルよりも抵抗値を 16.7%以上抑制することができ、Q 値を 10.9%改善できることを電磁界解析により示した。

#### 文 献

- (1) Z. Zhang, K. Xu, Z. -W. Xu, J. Xu, X. Ren and Q. Chen, "GaN VHF Converters With Integrated Air-Core Transformers," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 4, pp. 3504-3515, April 2019
- (2) S. R. Cove, M. Ordonez, F. Luchino and J. E. Quaioco, "Applying Response Surface Methodology to Small Planar Transformer Winding Design," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 2, pp. 483-493, Feb. 2013
- (3) L. A. R. Tria, D. Zhang and J. E. Fletcher, "Planar PCB Transformer Model for Circuit Simulation," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, pp. 1-4, July 2016
- (4) S. C. Tang, S. Y. Hui and H. S. . -H. Chung, "Characterization of coreless printed circuit board (PCB) transformers," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, no. 6, pp. 1275-1282, Nov. 2000
- (5) W. Lee, D. Han, D. Bobba and B. Sarlioglu, "Design of Single-Turn Air-Core Integrated Planar Inductor for Improved Thermal Performance of GaN HEMT-Based Synchronous Buck Converter," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 2, pp. 1543-1552, March-April 2020
- (6) Z. Yu *et al.*, "A Novel Pyramid Winding for PCB Planar Inductors With Fewer Copper Layers and Lower AC Copper Loss," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 10, pp. 11461-11468, Oct. 2022
- (7) S. Mukherjee and P. Barbosa, "Design and Optimization of an Integrated Resonant Inductor With High-Frequency Transformer for Wide Gain Range DC-DC Resonant Converters in Electric Vehicle Charging Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 5, pp. 6380-6394, May 2023
- (8) I. Lope, C. Carretero, J. Acero, R. Alonso and J. M. Burdío, "Frequency-Dependent Resistance of Planar Coils in Printed Circuit Board With Litz Structure," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 12, pp. 1-9, Dec. 2014
- (9) S. Kanno, S. Ogasawara and K. Orikawa, "Winding Structure of Air-Core Planar Inductors Capable of Reducing High-Frequency Eddy Currents," *2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition - Asia (ECCE-Asia)*, Singapore, Singapore, 2021