

5章 技術ロードマップ

1節 受動素子の設計とその課題

1.1 磁性材料と回路設計パラメータの関係を考慮した統合的な議論に基づく材料開発

キーワード: 磁性材料パラメータ, 回路設計パラメータ, モデルベース最適化

パワーエレクトロニクスにおいて回路設計者・研究者と磁気部品および磁性材料の開発者・研究者では、同じ磁気部品の設計、性能に関して異なるパラメータによる議論が行われており、相互の間では必ずしもそれらのパラメータの関係を考慮した統合的な議論がされていない。このことは、今後の材料開発の指針を議論するうえで好ましいこととは言えない。

磁性材料の特性を示すパラメータは多数あるが、回路設計と磁気部品としての性能に直接影響を与えるものとして「透磁率 μ_r 」, 「飽和磁束密度 B_s 」, 「単位体積当たり磁心損失 P_{cv} 」が代表的なパラメータと言えよう。これに加え、例えば保磁力 H_c , 抵抗率 ρ など重要なパラメータであるが、ここでは P_{cv} に内包されると考える。一方回路設計では、インダクタにおいては「インダクタンス L 」, 「最大電流 I_p 」, 「磁心損失 P_c 」が主要なパラメータである。変圧器においては「容量 S 」, 「励磁インダクタンス L_m 」, 「磁心損失 P_c 」が主要なパラメータである。磁性材料パラメータと回路設計パラメータをつなぐパラメータとしては、インダクタにおいては「磁心形状」, 「ターン数」, 「ギャップ長」があり、変圧器においては「磁心形状」, 「ターン数」, 「周波数」があると言える。回路設計者または磁気部品設計者がこれらのパラメータを決めることで、磁性材料のパラメータと回路設計のパラメータの関係が決定する。しかし、このパラメータの決め方には多数の自由度があり、設計者の経験などに基づいて決まることも多く、一意には決まらないものであるため見通しがよくない。

1.1.1 簡易的な磁気部品モデルを用いた回路設計パラメータから磁性材料パラメータへの変換

そこで本節では、磁性材料パラメータと回路設計パラメータをつなぐことで回路システム側からの要求を磁性材料性能への要求に落としこみ、今後の磁性材料開発の方向性を議論できることについて変圧器を例にして示すこととする。ここでは、磁性材料パラメータと回路設計パラメータの関係を広範にわたり見通しよく示すことを目的とすることから、実際に製作可能かにはとらわれず（すなわち磁心形状については市販されているかどうかは問わないなど）、なるべく単純で客観的に決定可能なモデルで磁気部品を規定する。具体的な手順としては図 5.1.1.1 に示すような手順で、与えられた回路側の仕様を満たす磁気部品（この例は変圧器）について、さまざまな周波数 f と使用する最大磁束密度 B_m を総当たり式で設定し、単純なモデルで磁気部品設計と磁気部品としての性能評価を行い、ある種の最適設計を選択する。最適性能を実現する設計を磁性材料パラメータに変換し、現有の性能と実際に必要だった性能との差を比較することなどを行う。

この手法では総当たり式に磁気部品の設計と性能評価を行うため、単純な計算のみでその体積や損失などを計算できるモデルが必要である。ここでは市販の形状にこだわらず自由に寸法を設計できる EI コアを仮定し、その窓面積、磁心断面積を与えられた回路仕様と f および B_m で表現する。磁心断面積 A_c は、1 次巻線にかかる電圧の実効値 V_{rms1} , ターン数 N_1 を用いて

$$A_c = \frac{\sqrt{2}V_{rms1}}{2\pi f N_1 B_m} \quad (5.1.1.1)$$

と表される。また巻線断面積 A_w は、1 次巻線の定格電流実効値 I_{rms1} , ターン数 N_1 を用いて

$$A_w = \frac{N_1 I_{rms1}}{J_m K_u} \quad (5.1.1.2)$$

と表される。 J_m は仮定する電流密度、 K_u は仮定する 1 次巻線の導体断面積が窓面積に占める占積率である。 A_c および A_w は、いずれも N_1 を含んでいるため設計には任意性がある。例えば N_1 を大きくして A_c を小さくする設計や、 N_1 を小さくして A_w を小さくする設計がある。商用周波数変圧器や回転機の設計では、これまでの設計例から統計的に得られた情報をもとにこれらの「装荷」を分配して設計する手法などがあるが、ここでは本検討の目的に鑑み最も単純に、窓および磁心断面

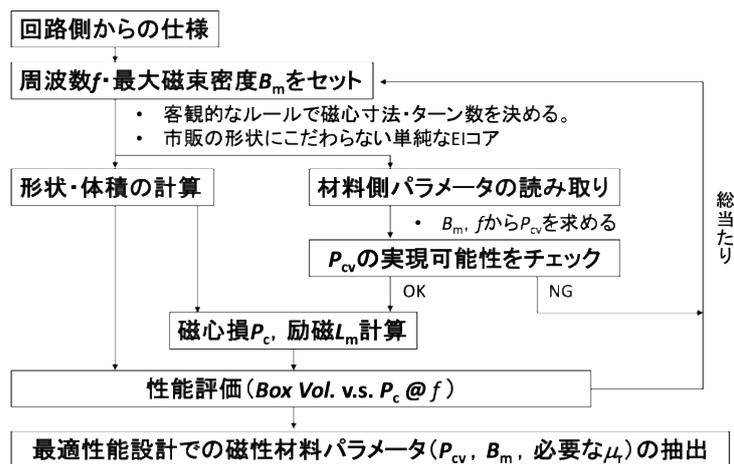


図 5.1.1.1 回路設計パラメータから磁性材料パラメータへの変換フローチャート

の形状はいずれも正方形とし、また $A_c = A_w$ となる N_1 に決定することとする。ここまでで磁心の形状が決定し磁心体積 V_c と磁路長 l を求め、また巻線も窓面積を断面とする口の字状の形状であるとすれば、Box Volume (磁心と巻線の形状を内包できる最小の直方体の体積) を求めることができる。

磁心損失についても同様に、単純に計算できるモデルが必要であるから、ここでは Steinmetz 法を使って f および B_m から単位体積当たり磁心損失 P_{cv} を求めるものとする。これに V_c をかけて磁心損失 P_c を求める。また簡便のためギャップなしとし、 l と材料の透磁率 μ_r より巻線のインダクタンスを求めることができる。これを励磁インダクタンス L_m とする。

P_c と Box Volume が磁気部品としての性能を表しているとする、この2変数を最適化する設計は一意には決まらない。ここでは簡易的な方法として、周波数 f を与え、その中で Box Volume を最小にする設計を評価することにする。すなわち、基本的には B_m を B_s に対し、一定のマージンを設定したうえで最大とする。ただし、 P_{cv} は磁心の発熱密度であるため、ある一定値以下にするという制約があり、この制約を満たす実現可能な設計を選択する必要があるから、場合によってはより小さい B_m が選択される。 L_m についても、小さすぎると励磁電流が過多となるから実現可能性に関する制約となる場合もある。

上記で求めた周波数 f に対する最適設計点において P_{cv} , B_m , L_m を抽出する。 L_m は励磁電流に関係するため、負荷電流に対し励磁電流を一定の割合以下にするなどの適切な条件を課すことで、必要な μ_r で表示することもできる。これらのパラメータと、仮定した磁性材料が現に持っている P_{cv} , B_s , μ_r を比較することで、これらのうちどれがこの応用・変換器仕様において過剰であったのか、またどのパラメータがボトルネックになっているのかを議論できる。

1.1.2 フェライトを用いた高周波変圧器におけるケーススタディ

一例として、Mn-Zn フェライト (TDK 社 N87) を用いた高周波変圧器の設計例を示す。表 5.1.1.1 に検討する高周波変圧器の仕様を、表 5.1.1.2 に仮定する巻線設計条件、表 5.1.1.3 に仮定したフェライトの材料特性を示す。占積率、電流密度は要求される絶縁能力や使用周波数、リッツ線の使用有無などに大きく影響を受けるが、ここでは一律に定数として仮定する。2次巻線については巻数比によらずアンペアターンは同じであるから、窓面積に占める割合は1次巻線と変わらないとして規定しない。なお、磁心損失の計算では磁束密度は時間的に正弦波状に変化するものとし、Steinmetz 法により計算する。使用する最大磁束密度は 0.3 T、単位体積当たり磁心損失として 300 kW/m² (300 mW/cc) を制約条件として与えた。

表 5.1.1.1 検討する高周波変圧器の仕様

電力容量	4.75 kVA
1次電圧	1767 V
1次電流	2.687 A
2次電圧	規定せず
2次電流	規定せず

表 5.1.1.2 仮定した巻線設計条件

電流密度 J_m	3 A/mm ²
1次巻線占積率 K_u	0.1

表 5.1.1.3 仮定した磁心材料特性

飽和磁束密度 B_s	0.41 T
初透磁率	2200
Steinmetz 係数 k	1.69E-01 W/m ³
Steinmetz 係数 α	1.6349
スタインメッツ係数 β	2.2527

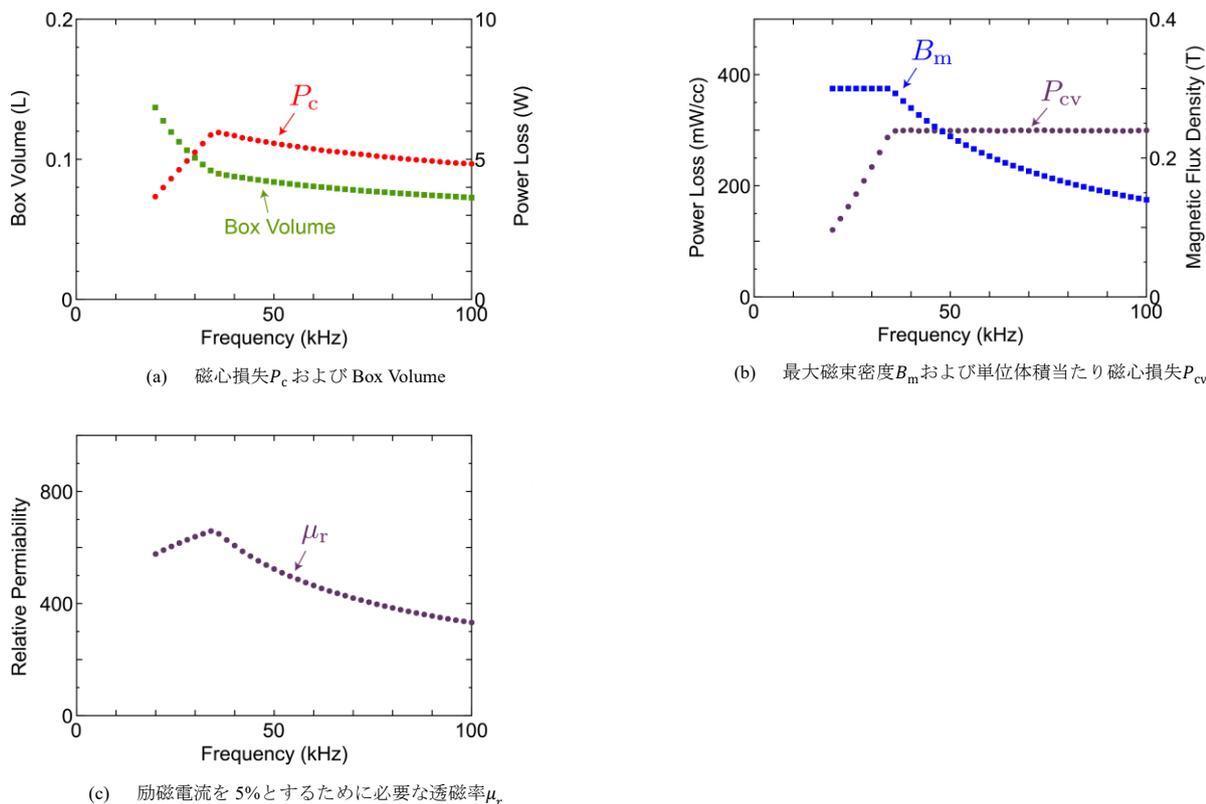


図 5.1.1.2 回路設計パラメータから磁性材料パラメータへの変換結果の例

図 5.1.1.2 に、この条件における簡易的な最適設計の結果とその設計を実現する磁性材料のパラメータを示す。図 5.1.1.2(a)には磁気部品の性能として磁心損失 P_c と Box Volume を示す。基本的に周波数が高くなるほど Box Volume は小さくなる。図 5.1.1.2(b)に示すように、周波数が低い領域では B_m は設計上限値の 0.3 T に達したが、35 kHz 以上では P_{cv} の制約条件により 0.3 T よりも小さい B_m が選択された。このことにより、35 kHz 以上では周波数を上げていくと体積の減少により磁心損失 P_c は減少することとなった。すなわち銅損を全く考えない場合に限るが、今回のケースでは 100 kHz 以上にしても体積と損失はいずれもさらに減少するため、磁気部品としての最適設計は 100 kHz 以上の点にあることになる。しかし、実際には高周波化により巻線の近接効果や表皮効果の影響で損失は大きく増加すると思われる。

励磁インダクタンス L_m に関しては、今回のケースでは 0.1 H 以上と非常に大きいものとなった。これを各周波数におけるリアクタンスに変換し、1 次巻線の電圧をかけた時に流れる励磁電流を求めたところ、想定している 1 次電流に比べ 1% 程度であり、一般的には 5% 程度は許容できるものであるから非常に小さい値となった。このことは、この材料の透磁率は十分に高いことを表している。そこで逆に、励磁電流が負荷電流の 5% となるような L_m を求め、そこから必要な μ_r を求めて図 5.1.1.2(c)に示した。これによれば、今回のケースで使用した材料の初透磁率 2200 に比べ、その 1/3 以下まで低い μ_r でも所定の機能は実現できることになる。周波数が高い場合には特にそうである。

1.1.3 磁性材料パラメータへの変換結果を用いた求められる材料特性の議論

このケーススタディの結果は以下のように考えることができる。図 5.1.1.3 の左側のチャートが示すように、このケースの 35 kHz 以上の領域では P_{cv} が磁気部品の性能を律速しており、仮定した材料が持つ P_{cv} の性能を最大限使っていると言える。一方、 B_s と μ_r については仮定した材料が持つ性能の一部しか使っていないことになる。今回のケースに限らずほとんどの場合で、いずれか 1 つのパラメータが全体を律速するパラメータとなり、他のパラメータは十分使っていないという状況であると考えられる。

このことを考えると図 5.1.1.3 の右側のチャートが示すような材料があれば、最適設計の性能はよりよくなると考えられる。このケースにおいてはより P_{cv} が小さいものであって、そのトレードオフとして B_s と μ_r はやや低いものであってもよい、ということである。磁性材料パラメータが大きく変わると最適設計が変わるので、改善された磁性材料を用いても必ず同じ傾向になることは保証されないが、現時点で仮定した材料からの、性能向上の方向性を示すことはできる。

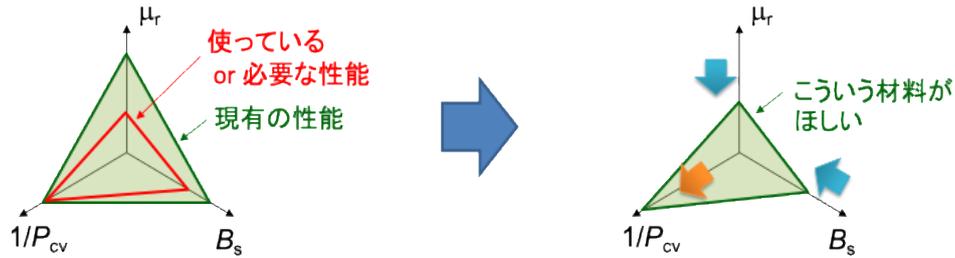


図 5.1.1.3 磁性材料パラメータの活用程度と回路設計側が求める材料特性のイメージ

本節では1つのケースについて、かつ大幅に簡略化されたモデルでの議論を行ったが、実際には応用ごと、容量ごとに多数のケースを検討することや、モデルの改良により損失、体積の評価をより正確にする必要がある。特に本ケーススタディでは検討に含めなかったが、高周波による交流抵抗の増加は応用先によっては影響が大きく、これを考慮したモデルによる損失、体積の評価と最適化は必要である。しかし、近年研究が進んでいるモデルベースでの設計最適化のために磁気部品のモデリング技術は進歩しており、より正確な評価は可能になっていると言える。これらのモデルベース最適化で培われたモデリング技術を使い、既存の材料特性から最適設計を得るだけでなく、逆向きに利用することで、本節で述べたような材料特性の開発の方向性まで議論することが今後必要になってくると考えられる。 [磯部高範]

1.2 磁気素子の技術動向（鉄窒素を除く）

キーワード： Fe 基アモルファス合金材料，ナノ結晶合金材料，高飽和磁束密度

1.2.1 はじめに

パワーデバイスのさらなる進展のためには、さまざまな条件下で動作可能な小型かつ高性能な磁気素子が求められている。このような素子の実現のためには、高飽和磁束密度 (B_s) を有し、低損失な軟磁性材料が必要不可欠である⁽¹⁾⁽⁶⁾。これらの材料は、広範な温度および周波数領域において安定した基本特性を維持できることが必要である。十分な機械的強度を持ち、加工性（例：切断、巻き取り、焼鈍）に優れている、すなわち工業生産に適した加工のし易さなどの特性を有していることも必要である。また、環境耐性（例：腐食安定性）に関しても、長期的な信頼性を確保するために不可欠な特性である。

従来、Fe-Ni、Fe-Si-Al、フェライト、および Co 系アモルファス合金がこれらの要件を満たす材料として用いられてきた。最近では、Fe 基アモルファス合金材料およびナノ結晶合金材料が高 B_s で低損失を兼ね備えていることから、従来材に替わる有望な代替材料として注目されている。アモルファス合金材料は急冷凝固法によって製造され、遷移金属 (Fe, Co, Ni など) とメタロイド (Si, B など) を主成分とし、アモルファス構造を安定化させるために、Nb, Mo, Zr, Hf などの難融性金属を少量添加する場合がある。一方、ナノ結晶合金材料は、アモルファス前駆体の制御された結晶化により形成され、微細なナノ結晶が残留アモルファス母相内に分散する独特な微細構造を有する。これらの材料では、現在アモルファス合金の加工性、ナノ結晶材料の結晶化プロセスの制御、環境負荷の少ない組成の材料開発などの研究課題に取り組んでおり、さらなる性能向上と応用範囲の拡大を目指している。

上述してきたように、Fe 基アモルファス合金材料およびナノ結晶合金材料は、従来の軟磁性材料と比べて B_s が高く、これらの材料からなる磁心はより強い磁界中で磁気飽和せずに利用することができる。また、従来の軟磁性材料に比べて損失が低く、優れた高周波磁気特性を有している。これらの特長から、小型で高出力密度の磁気素子の実現が期待されている。

1.2.2 学術科学的・技術的課題

Fe 基アモルファス合金材料およびナノ結晶合金材料は優れた軟磁気特性を有しているものの、固有の科学的・技術的課題を抱えている。科学的課題に関しては、Fe 基アモルファス合金材料の場合、主に二つある。一つ目は、加熱により結晶化が進行し、磁気特性が著しく劣化することから、如何にアモルファス状態を維持できるようにするかである。もう一つとしては、磁性元素を置換することにより磁歪を低減しようとする、材料自体の飽和磁束密度の低下を招くことから、低磁歪と高飽和磁束密度を両立することである。一方で、ナノ結晶合金材料の場合には、通常、Cu, Nb, Zr などを含む多元系合金が用いられるので、熱的および磁氣的な繰り返し負荷下での粒径安定性の確保が不可欠であり、粒成長が進行すると軟磁性が損なわれる。このことから、均一な結晶核生成を促進し、粒成長を抑制する合金設計である。

技術的課題として、Fe基アモルファス合金材料は、ビッカース硬度が900 Hv程度と比較的高いが、脆く加工性に乏しいことから、打抜き法を行う際に高い硬度を有する使用工具と精密な加工条件の管理が求められる。また、金型の摩耗も顕著であり、工具寿命が短くなる。したがって、打抜き法を使わずに加工できるデバイスの開発や、材料そのものの改良、打抜き時の加工の効率化の施策など、より広範囲で用いるための開発が必要である。さらに、鑄造状態では、内部に残留応力が発生しており、多くの場合軟磁気特性の改善やB-H曲線の形状制御を目的に熱処理を施すことがある。この際の温度管理は重要であり、適温よりも低い場合には応力緩和が不十分なために、また適温よりも高い場合には過剰な脆化や場合によっては結晶化のために、所望の磁気特性が得られなくなることがあるので注意が必要である。

一方で、アモルファス相を熱処理して得られるナノ結晶合金材料は、上記の薄帯形状のアモルファス合金材料と同様の課題を有するとともに、熱処理による脆化の進行が、加工をより困難にしている。基本的にナノ結晶化後に金型を用いて加工を加えることは現状では困難であり、レーザーなど金型以外の加工方法の開発や熱処理前に打抜き加工を施すなど、工程の開発が必要になる。また、ナノ結晶合金材料では、アモルファス状態で得られた材料を熱処理することにより、結晶相の析出を介してナノ結晶を得る。その際、ナノ結晶相と残留アモルファス相の体積分率は、熱処理温度と熱処理時間に代表される熱処理条件に依存するため、所望の磁気特性（例えば、磁歪や透磁率など）を得るために、厳密な温度管理が必要となる。この熱処理の際、アモルファス相から結晶粒が析出する際に発熱反応となり、温度管理はこの状況を考慮して行う必要がある。アモルファス相からナノ結晶相になる際に、体積収縮が起きるので、デバイスによってはこの点の考慮も必要となる。さらに、ナノ結晶合金材料では粒径維持のために精密な熱処理が求められる。いずれも高価あるいは希少な合金元素に依存しており、量産性や持続可能性の観点から課題が残る。

さらに、Cu, Nb, Zrといった主要元素の環境負荷や資源の制約が問題視されており、リサイクル技術の開発が進められている。将来的な高周波・小型電子機器への応用においては、薄膜形成、三次元構造化、マイクロパターニングといった先端加工技術との適合性が必須となる。そのため、従来の薄帯ベースの製造法に加え、マイクロファブリケーション技術と整合性のある新規プロセスの開発が不可欠である。

なお、材料開発に関しては、原料のコストも考慮する必要がある。磁気素子の選定では、その性能要件とコストとのバランスを考慮する必要がある。また、パワーエレ回路システム全体のコストに対して磁気素子のコストも影響を与える。このことから、コストパフォーマンスの最適化が重要な要素の一つである。 [グエンマイフォン, 太田元基, 岡本聡, 遠藤恭]

文献

- (1) Giselher Herzer : "Modern soft magnets: Amorphous and nanocrystalline materials", Acta Materialia, Vol.61, pp.718-734, DOI: 10.1016/j.actamat.2012.10.040 (2013)
- (2) J. Petzold : "Advantages of soft magnetic nanocrystalline materials for modern electronic applications", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.242-245, pp.84-89, DOI: 10.1016/S0304-8853(01)01206-9 (2002)
- (3) Dewei Chu, Hamid Lashgari, Yifeng Jiang, Michael Ferry, Kevin Laws, Shishu Xie, Huande Sun and Sean Li : "Recent progress in high B_s and low H_c Fe-based nanocrystalline alloys", Nanotechnology Reviews, Vol.3, pp.153-159, DOI: 10.1515/ntrv-2013-0030 (2014)
- (4) Kiyonori Suzuki : "Recent advances in nanocrystalline soft magnetic materials: A critical review for way forward", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.592, p.171677, DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.171677 (2024)
- (5) Xuesong Li, Jing Zhou, Laiquan Shen, Baoan Sun, Haiyang Bai and Weihua Wang : "Exceptionally High Saturation Magnetic Flux Density and Ultralow Coercivity via an Amorphous-Nanocrystalline Transitional Microstructure in an FeCo-Based Alloy", Advanced Materials, Vol.35, p.2205863, DOI: 10.1002/adma.202205863 (2023)
- (6) Zexuan Huo, Guoqing Zhang, Junhong Han, Jianpeng Wang, Shuai Ma and Haitao Wang : "A Review of the Preparation, Machining Performance, and Application of Fe-Based Amorphous Alloys", Processes, Vol.10, p.1203, DOI: 10.3390/pr10061203 (2022)

1.3 コンデンサの技術動向

キーワード：導電性高分子固体コンデンサ、PEDOT:PSS、高耐電圧、高耐熱

1.3.1 セラミックコンデンサ

一般的に、セラミックコンデンサは耐熱性に優れ、誘電率が比較的大きいため積層化により小型大容量化が可能で、さらに低ESRのために周波数特性に優れているという特徴がある。そのため、主に平滑コンデンサやスナバコンデンサの用途、また優れた周波数特性を利用して高周波共振コンデンサで使用されている。

特に積層セラミックコンデンサにおいては、スマートフォン等の情報端末の薄型化や高性能化、また電子機器や自動車等の高性能化の進展による使用員数の増加により、さらなる小型大容量化が求められ、それを実現するために誘電体を含む構成部材とプロセス技術の開発が進められている。また異なる技術トレンドとしては、LSIの高周波化に伴う高周波対応、パワーエレクトロニクス向けの高電圧・大電流・大電力容量対応等がある。パワーエレクトロニクス用途においては、強誘電体であるBaTiO₃系材料のDCバイアス特性（電圧印加により誘電率が低下する特性）が課題であったが、誘電体材料組成の改良によ

り改善が進められている。また異なる方策として、強誘電体ではなく、反強誘電体材料を使用した積層セラミックコンデンサが提案され実用化されている。これは反強誘電体の正バイアス特性（電圧印加により誘電率が增加する特性）を利用しており、DC バイアス電圧下でも大きな実効静電容量が得られる特徴がある。いずれの用途においても大きな実効静電容量が求められるため、今後もさらなる誘電体層の薄層化と高信頼性の実現を目指し、材料とプロセス技術の開発が進められると考えられる。なお現在、定格電圧 125 V AC または 250 V DC 未満のコンデンサの誘電セラミックに対する鉛の仕様は RoHS 指令の規制対象となる⁽¹⁾。高電圧下におけるセラミックコンデンサの絶縁破壊による短絡故障はパワーエレクトロニクス装置の信頼性に大きく影響するため、その防止は極めて重要な課題である。しかし、セラミックスの絶縁破壊は物質それ自身の本質的な特性だけでなく、欠陥や粒界などの種々の要因が絡み合った複雑な現象である。したがって、その解決は新材料開発によるアプローチのみでは困難である。構成元素の選択によってエネルギーバンドギャップを広くすることで物質の本質的な絶縁破壊強度を極力高め、それより十分に低い定格電圧を設定して使用するという方針もあり得るが、その場合にはエネルギーバンドギャップと誘電率の間の逆比例関係のために誘電率が犠牲となる。そのため、セラミックコンデンサにおける短絡故障の問題を解決するためには、高電圧下でのコンデンサの逐次的劣化を意図的に生じさせる特殊な電極パターンのデザインや、あるいは絶縁破壊の前駆現象を検出するための新技術の開発など、絶縁破壊を事前に回避する新方式の創出と組み合わせた多角的な取り組みが必要であると考えられる。

[谷口博基, 萩原学, 廣瀬左京]

1.3.2 フィルムコンデンサ

誘電体フィルムにポリプロピレン (PP) フィルムを用いたフィルムコンデンサは、優れた電気特性（低損失、温度特性安定性など）、高い信頼性を有するものの、使用可能な上限温度はそれほど高くない。現状、PP フィルムコンデンサは、上限コンデンサ内部温度 85°C（産業用途）、105°C（自動車用途）で使われることが多い。

近年、装置の小型化、高密度化により、フィルムコンデンサも小型化による高エネルギー密度化や SiC 等の次世代半導体の使用による使用環境の高温化が進み、フィルムコンデンサの高耐熱、低損失、高放熱化のニーズが高まってきている。これまで、PP フィルムの耐熱性及び耐電圧を向上させ、フィルムコンデンサの設計により発熱抑制、放熱の見直しなどで、高耐熱ニーズに対応してきたが、フィルムコンデンサのさらなる使用温度範囲の拡大ニーズは、大きくなってきている。

PP フィルムは、結晶性の有機高分子材料が使われている。結晶性高分子は、結晶部分と非結晶部で構成されており、温度が上がっていくと最初に非結晶部の分子運動が活発になり、さらに温度が上がると、結晶部の分子運動も活発になっていき、最終的には、結晶部分が壊れて流動性（融点：160～170 °C）を持つようになる。

PP フィルムコンデンサとして使用する場合、結晶状態が安定している温度領域での使用が必要である。これまで、PP フィルムの改善が進み、コンデンサとして使用できる温度上限は上がってきている。フィルムコンデンサの使われ方（使用電圧、負荷電流、期待寿命など）により、耐用温度は変わるが、短時間であれば 115°C 程度までの対応が可能になりつつある。

今後のフィルムコンデンサの課題は、さらなる高耐熱、高耐電圧化となる。現在、最も誘電体フィルムとして使用されている PP フィルムの融点は 160～170°C ということもあり、誘電体フィルムとして PP フィルムを用いる場合、さらなる高耐熱化は限界に近付いており、125°C 超の高温領域では、PP フィルム以外の高耐熱フィルムが必要となる。

高耐熱フィルムについては、近年各社から提案されているが、PP フィルムの特長となる低損失、高耐電圧、良好なセルフヒーリング機能などを比較すると、いずれかの性能で見劣りするため、高耐熱と高耐電圧化等がフィルムコンデンサの使われ方と合った誘電体フィルムの開発が期待される。パワーエレクトロニクス用途で使用されるフィルムコンデンサの使用電圧範囲（数百～数千 V）は幅広いいため、使われ方に応じて、高耐熱フィルムの特性を踏まえた誘電体フィルムの選択が今後必要になるかもしれない。また、フィルムコンデンサ以外の材料（外装材など）についても、同様に高耐熱、高耐電圧対応が必要となる。

[小山隆平]

1.3.3 電解コンデンサ

電解コンデンサは、パワーエレクトロニクス機器をはじめとする多様な分野で使用される重要な受動素子である。しかし、その性能にはいくつかの根本的な課題が存在する。特に、耐電圧および耐熱性の限界は、高電圧動作や高温環境動作が求められる次世代での応用において克服すべき重要な技術的課題である。このため、電解コンデンサの高耐電圧化・高耐熱化を目指した研究開発が国内外で活発に進められており、今後の技術動向を見極めるうえで極めて重要なトピックとなっている。以下に、その動向と展望を概観する。

(1) 導電性高分子の高耐電圧化への期待

各種コンデンサの中で、アルミニウム電解コンデンサは、高電気容量という大きな特徴がある。アルミニウム電解コンデン

サは用いる電解質によって①電解液タイプ、②導電性高分子タイプ、③電解液と導電性高分子のハイブリッドタイプの3種類に大別される。電解液タイプは、駆動中においても誘電体のアルミナに生じる欠陥を自己修復できることから、高耐電圧化に有利であり、500 V を超える耐電圧のコンデンサが市販されている。一方、用いる電解液の抵抗が大きいことから、等価直列抵抗 (ESR) が大きく、リップル電流許容度が低いという課題がある⁽²⁾。

高電気伝導率の導電性高分子を電解液の代わりに用いる導電性高分子固体コンデンサは、導電性高分子の電気伝導率が電解液よりもけた違いに大きいことから、ESR を低減できる高周波特性に優れた新規コンデンサとして 1990 年代に開発されている⁽³⁾⁽⁴⁾。このコンデンサは、1970 年代に発見された導電性高分子の代表的実用例であり、その市場も 3,000 億円を超えるまでに発展している。導電性高分子固体コンデンサは電解液タイプの故障原因となる液漏れのリスクがなく、導電性高分子の耐熱性も優れていることから、高耐熱コンデンサとしての期待も高い。しかしながら、導電性高分子固体コンデンサの耐電圧は低く、量産品での定格電圧は 50 V に留まっている。

導電性高分子固体コンデンサの優れた高周波特性を維持しつつ、耐電圧の向上を目指して、ハイブリッドタイプのコンデンサが 2010 年ころに開発された。これは電解質として電解液と導電性高分子を複合して用いたものであり、導電性高分子と同等の電気伝導率を持ちながら、電解液が存在するために耐電圧の向上が可能となっている。しかしながら、ハイブリッドタイプでも量産品の定格電圧は 100 V 程度であり、インバータなどのパワーエレクトロニクス機器に利用される平滑コンデンサに求められる 400 V を超える耐電圧とはギャップが大きい。導電性高分子固体コンデンサは、液体を用いないことから、液漏れに由来する故障がなく、高耐久化が期待できること、また、電解液を用いないことから耐熱性の向上という点でも有利である。INNOPEL において、耐電圧 450 V 以上の導電性高分子固体コンデンサの開発が進められている。さらに、電気自動車 (EV) などのモビリティ分野や太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを用いた電力変換分野においては、1 kV を超える耐電圧のコンデンサのニーズも予想される。誘電体の自己修復性は導電性高分子固体コンデンサの課題の一つとされてきたが、同コンデンサにおいてもその特性が発現するとの報告がある⁽⁵⁾。このことは、パワーエレクトロニクス分野における導電性高分子固体コンデンサのさらなる可能性を示唆している。本稿では以下の観点から本タイプのコンデンサの展望を記載する。

(2) 電解液タイプの電解コンデンサと同等の耐電圧を持つ導電性高分子固体コンデンサの可能性

文部科学省「革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業」における導電性高分子固体コンデンサの開発において、電気伝導率を制御した新規導電性高分子の導入および誘電体表面への高抵抗層の導入というアプローチにより、450 V の耐電圧を有する導電性高分子固体コンデンサの可能性が見えてきている。Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS) 系の導電性高分子の電気伝導率はその結晶性と相関があり、PEDOT:PSS へのアルキル基の導入とそのアルキル基の種類、PEDOT と PSS の比率などで結晶性および電気伝導率の制御が可能である。また、PEDOT:PSS に加える多価アルコール添加剤も耐電圧に大きな影響を与える⁽⁶⁾。このような導電性高分子の最適化により、500 V を超える耐電圧を示す導電性高分子固体コンデンサの可能性がさらに広がるものと期待される。

一方、誘電体と導電性高分子の界面設計も耐電圧向上に重要であることが明らかとなってきている。アルミニウム電解コンデンサの誘電体はアルミニウム素地のホウ酸水溶液などの電解液中におけるアノード酸化によって形成するが、その生成中においても生成電圧が上昇すると絶縁破壊が生じる。アノード酸化中の絶縁破壊電圧 (E_B) は次式(5.1.3.1)のように電解液の抵抗 (ρ_e) の対数に対して直線的に上昇することが古くから知られている⁽⁷⁾。

$$E_B = A + B \log \rho_e \quad (5.1.3.1)$$

この知見を基に、アルミニウムのアノード酸化時の絶縁破壊電圧は、アノード酸化表面に高抵抗層 (水和した多孔質アルミナ層) を導入することでも絶縁破壊電圧が 1500 V 以上となる結果も 2018 年に報告されている⁽⁸⁾。このようなアノード酸化時の絶縁破壊に関する挙動は、導電性高分子固体コンデンサの駆動時における耐電圧の向上にも有効である。最近、Quintero らは、水和処理後のホウ酸水溶液中のアノード酸化で生成した結晶性アルミナ誘電体皮膜を再水和処理することで誘電体表面にナノボイド分散層を形成し、その後 PEDOT:PSS 導電性高分子を塗布すると、ナノボイド分散層に少量の PEDOT:PSS が浸透した高抵抗層が形成されることを見出している⁽⁹⁾。この高抵抗層の誘電体/導電性高分子界面への導入はアノード酸化電圧を超える絶縁破壊電圧の実現に至っており、この界面設計の重要性が見出されている。

以上のような、導電性高分子からのアプローチと界面設計のアプローチから導電性高分子固体コンデンサの耐電圧は現状の量産品 (≤ 50 V) と比べてはるかに高い電圧まで到達する可能性が技術的には高まってきている。一方、1 kV 級の導電性高分子固体コンデンサの実現には新たな課題も生まれうる。その一つは電極箔のエッチピットサイズの制御がある。例えば、1 kV の耐電圧を有するコンデンサでは、誘電体形成のためのアノード酸化電圧は、1.2 kV 以上となる必要がある。この時ピット内に形成する誘電体アルミナ層の厚さは 1 μm を超え、結果としてピット内に導電性高分子を充填できる細孔を確保できなくなる恐れがある。ピットサイズはある程度溶解処理等により大きくすることも可能であるが、その場合隣接するピットとの融合が起き、エッチド箔を利用して十分な拡面倍率の増大が生じない、つまり、必要な電気容量が得られなくなる恐れがある。

この対策として二つのアプローチが考えられる。一つは誘電体をアルミナ以外に変え、1 kV の電圧に耐える誘電体の膜厚を薄くすることである。その候補はシリカである。結晶性アルミナが1 V の電圧を保持するのに必要となる膜厚は1 nm 程度であるが、シリカの場合は0.39 nm とアルミナの半分以下となる⁽⁹⁾。実際、アルミニウムにゾルーゲル法でSiO₂ コーティングをしたのちに、アノード酸化した試料の誘電体膜厚はアルミナ単独膜よりも薄くなり、電気容量も増大することが報告されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。薄い誘電体で高い耐電圧を保持できれば、現在のエッチド箔を今後も活用して1 kV 級のコンデンサの作製も可能となる。もう一つのアプローチは、アルミニウムのエッチングに代わる新たな電極箔の開発である。最近、金属粉末を用いた三次元積層技術の開発が進んでいる。国内では、東洋アルミニウム㈱が粉末積層箔を開発しており⁽¹²⁾、今後コンデンサへの用途が拡大することが予想される。また、中国においても、粉末積層箔を用いたコンデンサの開発が進んでいる⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。今後この技術開発がさらに進むことで、高耐電圧コンデンサに最適な多孔質構造を持った電極箔の開発につながることを予想され、この積層技術はアルミニウムの溶解を伴うエッチング技術に対して環境負荷の低減という意味でも利点がある。

(3) 耐熱性コンデンサへの挑戦

PEDOT:PSSは大気中では100 °C 以下の温度で熱劣化して電気伝導率が低下する⁽¹⁵⁾が、不活性ガス中では、良好な熱安定性が報告されている⁽¹⁶⁾。したがって、大気を遮断できる環境で利用する限り、PEDOT:PSS は優れた耐熱性を示し、導電性高分子固体コンデンサも高い耐熱性を発現することが期待される。一方、耐電圧という点では、PEDOT:PSS の結晶性を下げて電気伝導率を下げる方向に調整したほうが望ましく、これは PEDOT:PSS の熱安定性を低下させることを意味する。したがって、耐電圧を上昇させる方向と耐熱性を上げる方向の導電性高分子の調整は互いに相反する方向となり、求める耐電圧や耐熱性に応じて PEDOT:PSS の最適化をする必要がある。

現状想定されるコンデンサの耐熱性は150~200 °C であるが、将来的にさらなる高温耐熱性が求められる場合は、導電性高分子代替の導電性材料の開発も必要になる。電極箔のピット内にも充填可能な低コストで耐熱性のある無機系の水系ナノ粒子インクが一つの候補となると予想されるが、このような材料研究のブレークスルーが待たれる。 [幅崎浩樹]

文献

- (1) https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/rohs-directive_en
- (2) J. Toriki, C. Joubert, A. Sari : "Electrolytic capacitor, Properties and operation", Journal of Energy Storage, 58 (2023). 10.1016/j.est.2022.106330
- (3) 工藤康夫:「機能性高分子コンデンサーの現状と展望」, 応用物理, 71, pp.429-432(2002) 10.11470/oubutsu1932.71.429
- (4) J. Yoo, J. Kim, Y.S. Kim: Liquid electrolyte-free cylindrical al polymer capacitor review, Materials and characteristics, J. Power Sources, 284. pp.466-480(2015). 10.1016/j.jpowsour.2015.03.023
- (5) D. Quintero, H. Matsuya, M. Iwai, S. Kitano, K. Fushimi, H. Habazaki: Controlling dielectric film defects to increase the breakdown voltage of conductive polymer solid capacitors, ACS Appl. Mater. Interfaces, 16, pp.1737-1748(2024). 10.1021/acsami.3c14078
- (6) 若林寿樹, 勝沼将人, 奥崎秀典: PEDOT:PSS アルミ固体電解コンデンサの電気特性における多価アルコール添加効果, 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌), 140, pp.48-53 (2020). 10.1541/ieejfms.140.48
- (7) S. Ikonopisov, A. Girginov, M. Machkova: Electrical breaking down of barrier anodic films during their formation, Electrochim. Acta, 24, pp.451-456(1979). [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(79\)87034-6](https://doi.org/10.1016/0013-4686(79)87034-6)
- (8) J.-H. Cao, Y. Sato, D. Kowalski, C. Zhu, Y. Aoki, Y. Cheng, H. Habazaki: Highly increased breakdown potential of anodic films on aluminum using a sealed porous layer, J. Solid State Electrochem., 22, pp.2073-2081 (2018). 10.1007/s10008-018-3913-3
- (9) J.P.S. Pringle :, The anodic oxidation of superimposed metallic layers: Theory, Electrochim. Acta, 25, pp.1423-1437 (1980)
- (10) K. Watanabe, M. Sakairi, H. Takahashi, K. Takahiro, S. Nagata, S. Hirai: Formation of composite oxide films on aluminum by sol-gel coating and anodizing - for the development of high performance aluminum electrolytic capacitors, Elechem., 69, pp.407-413 (2001)
- (11) K. Watanabe, M. Sakairi, H. Takahashi, K. Takahiro, S. Nagata, S. Hirai :, Anodizing of aluminum coated with silicon oxide by a sol-gel method, J. Electrochem. Soc., 148, pp.B473-B481(2001)
- (12) https://www.toyal.co.jp/assets/rd/tech_report/pdf/haku_material/tr_hkm2013_030-ja.pdf
- (13) G. Bai, C. Wang, F. Wang, Y. Ren, X. Xu: Tunable electrical and mechanical properties of anode foils for aluminum electrolytic capacitors prepared by additive manufacturing technology, Journal of Materials Research and Technology, 30, pp.9647-9655 (2024). 10.1016/j.jmrt.2024.06.053
- (14) X. Zeng, J. Bian, L. Liang, Q. Cao, L. Liu, X. Chen, Y. Wang, X. Xie: G. Xie, Preparation and characterization of anode foil for aluminum electrolytic capacitors by powder additive manufacturing, Powder Technol., 426 (2023). 10.1016/j.powtec.2023.118602
- (15) E. Vitoratos, S. Sakkopoulos, E. Dalas, N. Paliatsas, D. Karageorgopoulos, F. Petraki, S. Kennou, S. Choulis: Thermal degradation mechanisms of pedot:Pss, Organic Electronics, 10, pp.61-66 (2009) . 10.1016/j.orgel.2008.10.008
- (16) E. Vitoratos, S. Sakkopoulos, N. Paliatsas, K. Emmanouil, S.A. Choulis: Conductivity degradation study of pedot: Pss films under heat treatment in helium and atmospheric air, Open Journal of Organic Polymer Materials, 02, pp.7-11 (2012). 10.4236/ojopm.2012.21002

2 節 将来の課題

2.1 磁歪の理解

キーワード：磁歪，磁歪計測法，異常増大，励磁音

磁性材料に磁界を印加して磁化させると，わずかに外形が変化する現象を磁歪（磁気ひずみ）という。磁歪による外径変化は，材料自体の寸法の約 10,000 分の 1 から 1,000,000 分の 1 である。軟磁性材料の磁歪は材料組成にともない大きく変化する。この材料に依存した変化にあたる磁歪が受動素子の特性に大きな影響を与えている。本節では，代表的な軟磁性材料の磁歪量，受動素子における磁歪の問題，磁歪の計測法，磁気部品の騒音，音の原因，構造および材料が与える影響，回路動作との関係，騒音低減に向けた設計手法について概説する。

2.1.1 材料の磁歪と受動素子における磁歪の問題

代表的な軟磁性材料の飽和磁歪を表 5.2.1.1 に示す⁽¹⁾⁽²⁾。純鉄は -7 ppm，Ni-Fe 合金（78 パーマロイ），Fe-Si-Al 合金（センダスト）や Co 系アモルファス合金材料はほぼゼロ，Fe 系アモルファス合金材料やナノ結晶材料は 15-30 ppm 程度，スピネル系フェライト材料（Mn-Zn 系および Ni-Zn 系）はほぼゼロである。これらすべての飽和磁歪はいずれもバルクか薄帯形状の材料の物性値である。一方，圧粉磁心材料においては，微粒子自体の磁歪はバルクや薄帯形状のものと同程度であるという取り扱いとなっているものの，実際には微粒子単体の磁歪計測ができておらず不明である。また，樹脂や巻線等で受動素子を形成する場合には，軟磁性材料に内部応力がかかるために，材料自体の磁歪から大きく変化することが予想される。

また，磁歪は受動素子の特性に大いに影響を与えている。すなわち，軟磁性材料からなる変圧器やインダクタといった受動素子では，通電して交流磁界が発生すると，磁心の磁歪特性によりその外形寸法が変化して機械振動が引き起こされる。それによって異常損失（過剰損失）が増大する。

表 5.2.1.1 代表的な軟磁性材料の飽和磁歪⁽¹⁾⁽²⁾

材料	飽和磁歪 $\lambda_s (\times 10^{-6})$
純鉄	-7
Ni-Fe 合金 (78 パーマロイ)	~0
Fe-Si-Al 合金 (センダスト)	~0
Fe 系アモルファス合金	20-30
Co 系アモルファス合金	~0
Fe 系ナノ結晶合金	15-30
スピネル系フェライト	~0

2.1.2 磁歪計測

磁歪計測法に関しては、主にひずみゲージ法、キャパシタ法、応力負荷型インダクタンス法が挙げられる。ひずみゲージ法（図 5.2.1.3(a)）は、試料にひずみゲージを張り付け、試料の伸縮によって変化したゲージの電気抵抗変化から磁歪を計測する方法である。この方法は安価で簡便であるものの、ゲージの貼り付けの反作用の正確な補正がしにくいことが欠点である。キャパシタ法（図 5.2.1.3(b)）は、可動電極と固定電極を設置し、可動電極の背面に試料を取り付けて、試料の伸縮によって可動電極の位置が変化することで生じる、固定電極との間の電気容量変化から磁歪を計測する方法である⁽⁹⁾。この方法は高精度な計測が可能である。また、応力負荷型インダクタンス法（図 5.2.1.3(c)）は、試料の一端に異なる応力を加えて、インダクタンスの異なる応力による磁界変化から磁歪を計測する方法である。この方法は比較的簡便で高精度であるものの、脆弱な試料の測定が困難である⁽¹⁰⁾。これらの計測法による測定対象は、いずれもバルク形状もしくは薄帯形状の材料である。したがって、粉末形状の材料における磁歪を計測する方法を開発することが課題となっている。

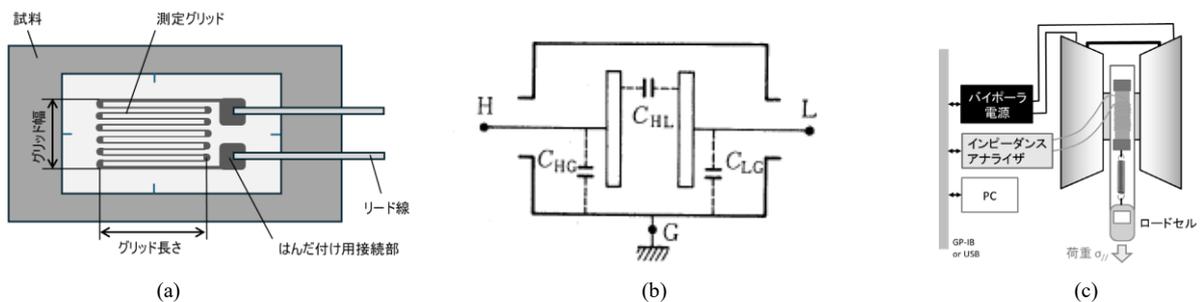


図 5.2.1.3 磁歪計測法 (a)ひずみゲージ法, (b)キャパシタ法（三端子容量法）⁽⁹⁾, (c)応力負荷型インダクタンス法

以上に述べてきたように、磁歪は軟磁性材料やその材料からなる受動素子を開発していく上で避けて通ることのできない重要な磁気特性の一つである。今後の課題として、圧粉磁心材料もしくは微粒子単体における磁歪計測法の開発、受動素子での磁歪特性の理解などが挙げられる。

[遠藤恭]

2.1.3 騒音

(1) 磁気部品の騒音

高効率・高密度化が進むパワーエレクトロニクス機器では、高周波で動作する磁気部品（変圧器・インダクタ）の小型化・高電流化が進んでいる。一方で、可聴周波数帯（20 Hz～20 kHz）に近いスイッチング動作によって、磁気部品が振動し「唸り」や「鳴き」といった音響ノイズを発生する現象が問題となっている⁽¹⁴⁾。これらの騒音は製品の音響品質低下やユーザー不快感を引き起こす。下記に、変圧器・インダクタ騒音の物理的発生原理、設計上の影響因子、そして制御および構造による低減手法について簡潔に述べる。

(2) 音の原因

変圧器・インダクタから音が出る主な原因は、図 5.2.1.4 に示すように磁歪（magnetostriction）とマクスウェル応力（Maxwell stress）にある⁽¹⁵⁾。特に磁歪は正弦波励磁時には磁束の 2 倍周波数で振動する成分が現れる⁽¹⁴⁾。マクスウェル応力は、ギャップ部や巻線近傍における電磁力により磁心断片間や巻線自身が相互に引き付け合い、構造的な変形を生じさせる⁽¹⁵⁾。これらの振動が構造共振と一致すると音として放射され、結果的に「鳴き」が発生する。

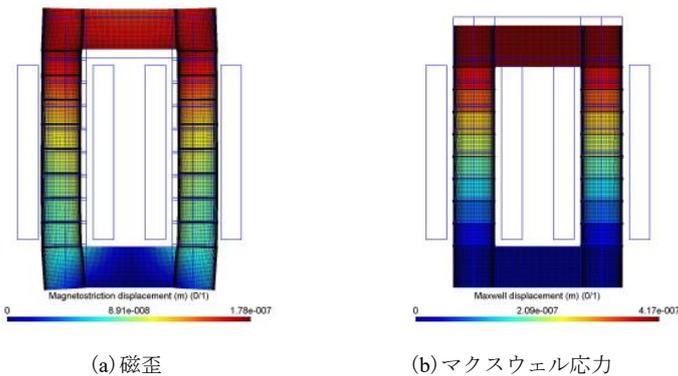


図 5.2.1.4 ギャップ付き UU コアにおける磁歪とマクスウェル応力の解析例, Reprinted from [15], © 2015 IEEE

(3) 構造および材料が与える影響

変圧器・インダクタの構造や材料は、騒音の大きさと周波数特性に直接的に影響する。磁心構造としては、トロイダル型は磁路が閉じており電磁応力が分散しやすいため比較的静音性に優れる。一方、E型やU型などギャップを持つ構造ではギャップ近傍に電磁力が集中し、局所的な振動が発生しやすい⁽¹⁵⁾。使用材料としては、磁歪定数の小さい粉末磁心（例：Sendust, Fe-Si-Al 系）やナノ結晶合金が有効とされる⁽¹⁵⁾。アモルファス材は高周波特性に優れるが、磁歪が大きく騒音源となる場合がある。さらに、含浸樹脂や緩衝材によって機械的振動の伝播を抑える設計も有効である⁽¹⁶⁾。

(4) 回路動作との関係

変圧器・インダクタの音響応答は、回路のスイッチング波形や制御方式にも強く依存する。PWM 制御では、スイッチング周波数が可聴帯域内にある場合（10～20 kHz 程度）において、2 次高調波や側波帯成分がインダクタを励振することで、可聴ノイズが発生する⁽¹⁷⁾。また、軽負荷時に採用されるバーストモードや PFM 制御では、周期的なスイッチングの ON/OFF に伴うクリック音や断続的な音が問題となることがある⁽¹⁸⁾。これに対し、ランダム PWM や拡散スペクトラム制御（spread spectrum）を用いることで、人の耳に特に不快に感じられやすい特定の周波数成分が卓越して現れるノイズ音（tonal noise）を広帯域化し、耳障りな成分を感じにくくする対策が取られている。

(5) 騒音低減に向けた設計手法

変圧器・インダクタ騒音の低減には、構造・材料・制御の 3 要素を統合的に設計することが重要である。構造的には、振動しやすい部分の補強、ギャップ位置の最適化、封止樹脂による振動伝播の抑制などが行われる⁽¹⁶⁾。材料面では、低磁歪材料の選定が有効である⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁹⁾。制御手法としては、スイッチング周波数を可聴帯域外へ移動する、拡散 PWM でスペクトルを拡張する、もしくはバースト間隔を一定かつ高周波数に制御するなどの手段がある⁽¹⁸⁾。加えて、磁界解析と構造応答解析を連成させた有限要素法（FEM）を活用し、騒音源の予測や設計段階での評価が進められている⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。 [松盛裕明]

文献

- (1) Robert C. O'Handley: "Modern Magnetic Materials Principles and Applications", John Wiley & Sons, inc., pp.357-390 (2000)
- (2) 太田元基: 「高 Bs ナノ結晶合金コアの開発と中周波応用」, 日立金属技報, Vol.34, pp.18-23 (2018)
- (3) K. Kondo, T. Chiba, S. Yamada and E. Otuki: "Relationship between Power Loss and Magnetization Process in Ni-Zn Ferrites", Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, Vol.47, No.2, pp.185-188, DOI: 10.2497/jpspm.47.185 (2000)

- (4) E.G. Visser: "Analysis of the complex permeability of monocrystalline MnZnFe^{II} ferrite", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.42, Issue 3, pp.286-290, DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(84\)90110-0](https://doi.org/10.1016/0304-8853(84)90110-0) (1984)
- (5) K. Inomata, M. Hasegawa, T. Kobayashi and T. Sawa: "Magnetostriction and magnetic core loss at high frequency in amorphous Fe-Nb-Si-B alloys", Journal of Applied Physics, Vol.54, No.11, pp.6553-6557, DOI: 10.1063/1.335010 (1983)
- (6) K. Suzuki, A. Makino, A. Inoue and T. Masumoto: "Low core losses of nanocrystalline Fe-M-B (M=Zr, Hf, or Nb) alloys", Journal of Applied Physics, Vol.74, No.5, pp.3316-3322, DOI: 10.1063/1.354555 (1993)
- (7) H. Tsukahara, H. Imamura, C. Mitsumata, K. Suzuki and K. Ono: "Role of magnetostriction on power losses in nanocrystalline soft magnets", NPG Asia Materials, Vol.14, 44, DOI: 10.1038/s41427-022-00388-2 (2022)
- (8) H. Huang, H. Tsukahara, A. Kato, K. Ono and K. Suzuki: "Origin of excess core loss in amorphous and nanocrystalline soft magnetic materials", Physical Review B, Vol.109, No.10, 104408, DOI: 10.1103/PhysRevB.109.104408 (2024)
- (9) A.J.Moses: "Measurement of magnetostriction and vibration with regard to transformer noise", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.10, No.2, pp.154-156, DOI: 10.1109/TMAG.1974.1058301 (1974)
- (10) E. Reiplinger: "Assesment of grain-oriented transformer sheets with respect to transformer noise", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.21, No.2, pp.257-261, DOI: 10.1016/0304-8853(80)90469-2 (1980)
- (11) A. J. Moses, P. I. Anderson, T. Phophongviwat, and S. Tabrizi: "Contribution of magnetostriction to transformer noise", 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010 (2010)
- (12) 荒井賢一, 津屋昇: 「磁歪測定法の現状」, 日本応用磁気学会誌, Vol.2, No.1, pp.5-9 (1978)
- (13) 遠藤恭, 島田寛, 森修, 佐藤茂行, 内海良一: 「新規磁性薄帯用磁気ひずみ評価法の開発」, 第44回日本磁気学会学術講演概要集, p.55 (2020)
- (14) J. Miihlethaler, M. Schubiger, U. Badstübner and J. W. Kolar: "Acoustic noise in inductive power components", 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, pp.1-8, DOI: 10.1109/EPE.2013.6634420 (2013)
- (15) M. Rossi and J. Le Besnerais: "Vibration Reduction of Inductors Under Magnetostrictive and Maxwell Forces Excitation", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.51, No.12, pp.1-6, Art no. 8403406, DOI: 10.1109/TMAG.2015.2469643 (2015)
- (16) TDK ソリューションガイド, 対策技術解説: パワーインダクタの音鳴き対策, (2017)
<https://product.tdk.com/ja/techlibrary/solutionguide/acoustic-noise.html>
- (17) K. -Y. Yoo, B. K. Lee, and D. -H. Kim: "Investigation of Vibration and Acoustic Noise Emission of Powder Core Inductors", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.34, No.4, pp.3633-3645, DOI: 10.1109/TPEL.2018.2849371 (2019)
- (18) L. Zhang, R. Born, X. Zhao, B. Gu, J. -S. Lai, and H. Ma: "A Parabolic Voltage Control Strategy for Burst-Mode Converters With Constant Burst Frequency and Eliminated Audible Noise", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.31, No.12, pp.8572-8580, DOI: 10.1109/TPEL.2016.2535304 (2016)
- (19) P. Shuai and J. Biela: "Investigation of acoustic noise sources in medium frequency, medium voltage transformers", 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, Lappeenranta, Finland, pp.1-11, DOI: 10.1109/EPE.2014.6910949 (2014)

2.2 実装技術の現状と今後の課題

キーワード: 電力密度, 高密度実装, 三次元実装, 絶縁距離, 放熱, EMI

2.2.1 概要

インバータやコンバータなどのパワエレ回路の電力効率, 体積 (あるいは重量) 電力密度, 部品の発熱にともなう温度上昇, ノイズは重要な評価指標であり, これらの指標をクリアするためには, 各部品の電気特性の向上 (例えば, 低損失) と回路設計に加えて, 部品実装も重要な技術である。

パワエレ回路実装については, 加柴⁽¹⁾による解説記事に記述されており, 詳細はそちらを参照されたい。以下に, パワエレ回路におけるパワーデバイス, 受動素子の実装技術について, 高密度実装, 放熱, ノイズの観点で述べ, 電力密度向上に向けた技術課題についても触れる。

2.2.2 パワエレ回路における実装技術

(1) パワーデバイスの実装技術

a. パワーデバイスパッケージ

パワーデバイスの実装形態はモールド型, ケース型, 表面実装型に分けられる。図 5.2.2.1 はモールド型とケース型の構成を示すものである。モールド型は比較的小電流の用途に用いられ, リードフレーム上にパワーデバイスを搭載した後, AI ワイヤを配線し, モールドした構造であり, 下部の Cu プレートは回路基板への熱伝導の役割を持ち, 放熱性能を確保している。パワーデバイスの性能向上による電力損失の低減, パッケージ内の熱抵抗の低減によってパッケージの小型化が進展している。一方, ケース型は両面に銅板を張り付けた DBC 基板 (DBC; Direct bonded copper) のような基板の上にパワーデバイスを複数搭載し

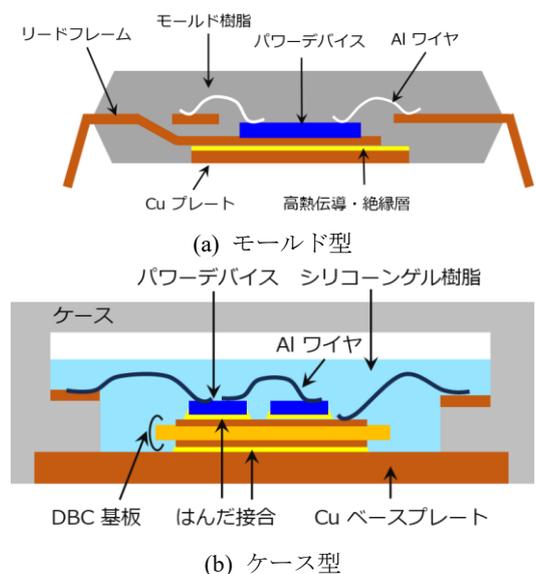


図 5.2.2.1 パワーデバイスの実装, 文献(1)をもとに作成

た後（パワエレ回路で多用されるハーフブリッジ型ではハイサイドとローサイド用の 2 個のパワーデバイスを搭載）、シリコーン樹脂封止した構造であり、配線抵抗の低減のために複数の Al ワイヤが用いられるが、Al リボンが用いられる場合もある。下部の Cu ベースプレートはパワーデバイスの熱をヒートシンクに逃がす役割を担っている。

SiC、GaN などのワイドバンドギャップパワーデバイスは高速スイッチング特性を有し、スイッチング時の電圧サージやリソングを抑制するためにパッケージならびにモジュール内の配線インダクタンスの低減が必須であり、配線長の短縮や隣接配線間の負の相互インダクタンスを利用した低インダクタンス化技術が採用されている⁽²⁾。また、低耐圧用途では超低インダクタンスの表面実装型パッケージの SiC や GaN パワーデバイスが上市されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

b. 高放熱実装技術

近年、樹脂封止型パワーデバイスの高放熱実装技術が大きく進展し、両面冷却⁽⁵⁾、直接水冷⁽⁶⁾、両面直接水冷⁽⁷⁾等の新構造が開発され、EV や PHEV 向けの直接水冷型両面冷却モジュールによる小型高出力インバータが開発された⁽⁸⁾。

(2) 受動素子実装技術

a. コンデンサ

図 5.2.2.2 に示すように、円筒型の電解コンデンサやフィルムコンデンサでは、部品のリード端子を回路基板の穴に差し込みはんだ接合する挿入実装が用いられる場合が多く、回路基板への放熱は期待できない。一方、表面実装型コンデンサは回路基板に直接接触するため放熱面積を確保でき、高密度実装にも適する。リップル電流の大きい用途では ESR（Equivalent Series Resistance；等価直列抵抗）による温度上昇の懸念があり、放熱は重要である。

b. 変圧器、インダクタ

絶縁型パワエレ回路の変圧器には、アモルファスやナノ結晶薄帯カット磁心、EE や EI 型のフェライト磁心などが用いられ、電力損失による温度上昇を避けるためにヒートシンクが併用される場合もある。これらは磁心の一部が回路基板と直接接触するため放熱面積を一定程度確保できるが、フェライト磁心変圧器の場合、100℃以上で熱暴走するリスクがあるため、冷却用ファンによる強制空冷が用いられる場合もある。また、図 5.2.2.3 のように、多層プリント基板の内層配線を巻線に利用した薄型 EE 型フェライト磁心プレーナ変圧器は回路基板との一体化を図れる点で電源の薄型に貢献するが、DC-DC コンバータモジュールに採用した例では⁽⁹⁾、発熱による温度上昇の影響を避けるために周囲温度によって出力電力が定格からディレーティングされるため、放熱性の課題があり、ヒートシンクを用いて冷却しようとする薄型のメリットが消失する欠点がある。

パワーデバイスのゲート回路用絶縁型 DC-DC コンバータに用いられる MHz 以上の小容量高周波変圧器⁽¹⁰⁾を除けば、表面実装型の変圧器はほとんどなく、バルク型変圧器が大半を占めており、変圧器の実装技術の進展はパワーデバイスに比べて遅いのが実情である。

トロイダル磁心を用いた内鉄型インダクタは回路基板に対して垂直あるいは水平に配置して実装される形態があり、いずれも放熱性に劣る。一方、外鉄磁心型に分類される EE 型磁心インダクタは放熱性に優れ、車載充電器用としての応用が検討されている⁽¹¹⁾。表 5.2.2.1 はトロイダル磁心インダクタと EE 型磁心インダ

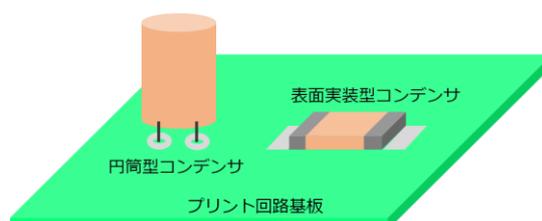


図 5.2.2.2 円筒型コンデンサ、表面実装型コンデンサの回路基板への実装

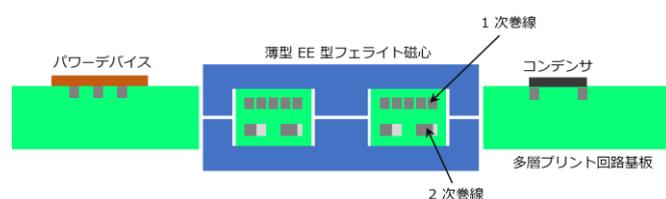


図 5.2.2.3 多層プリント基板と薄型 EE 型フェライト磁心を用いたプレーナ変圧器

表 5.2.2.1 トロイダル磁心インダクタと EE 型磁心インダクタの比較、文献(11)をもとに作成

	トロイダル磁心	EE 型磁心
磁心形状		
磁心材料	フェライト、圧粉磁心	
エアギャップ	磁心加工が必要	ギャップ調整が容易
放熱性	劣る	磁心から基板へ放熱
巻線	磁心に直巻き	ボビンを利用することでアセンブリが容易

クタの比較を示すものであり、EE型はトロイダル型に比べてメリットが多い。

巻線を磁心に埋め込んだ表面実装型インダクタは大電流用途を含め、多くの製品が上市されている⁽¹²⁾。

なお、磁性体から磁心への実装については、「2章1.3 圧粉磁心・微粒子コンポジット磁心」などに詳しく記載されている。

c. 部品の基板内蔵、三次元実装

基板内蔵や三次元実装用のコンデンサとしては、誘電体薄膜コンデンサ⁽¹³⁾やシリコン基板を用いたトレンチ型コンデンサ⁽¹⁴⁾が開発されている。特に、トレンチ型コンデンサは高アスペクト比のトレンチ構造を多数配置することで、単位面積当たりの静電容量を大きくできる利点がある。薄膜コンデンサもトレンチ型コンデンサも耐電圧を高くすることが困難で、専ら、Buckコンバータトポロジーを有する低電圧出力DC-DCコンバータの出力平滑用として用いられる。

パワエレ回路用磁気素子の基板内蔵の事例は多くない。動作周波数1MHz以上、出力電力100W以下のコンバータ用のインダクタでは、三次元実装用マイクロインダクタアレイ(MIA; Micro Inductor Array)⁽¹⁵⁾や、有機インターポーザに微粒子コンポジット磁心インダクタを内蔵したPCB上面にCMOSスイッチや制御系チップを表面実装した三次元実装コンバータモジュールが報告されている⁽¹⁶⁾。

2.2.3 体積（あるいは重量）電力密度向上に向けた技術課題

パワエレシステムに対する小型軽量化は従来から継続的に推進されてきた。小型軽量化を一層進めるための実装技術の今後の技術課題を以下に述べる。

(1) 絶縁距離

パワエレ回路における絶縁距離については、JIS C 62477-1では「半導体電力変換システム及び装置に対する安全要求事項」⁽¹⁷⁾において最小空間距離と最小沿面距離が規定されており、動作電圧と周波数が高くなるほど要求される絶縁距離が大きくなる。パワエレ回路の体積（あるいは重量）電力密度の向上を実現するには、高密度に部品を実装する必要があり、必然的に部品間の距離が短くなるので、部品間の電位差を考慮して部品配置を決定し、空間絶縁や沿面絶縁を確保する必要がある。とりわけ、500V以上の高電圧、1MHzを越える高周波動作の場合は最小沿面距離が10mmを越え、部品の高密度実装が制約され、電力密度の向上が絶縁距離で制限されることに留意する必要がある。

(2) 放熱対策

受動素子においては表面実装型やプレーナ型が空中への放熱性に優れるが、パワーデバイスと同様に、今後は受動素子にも熱伝導経路としてCuプレートの採用が必要となり、回路基板においても導体による熱伝導経路の確保が必要になると考えられる。熱伝導経路における熱抵抗は熱伝導の障害となり、特に、異種材料間の界面熱抵抗の影響が大きい。パワエレ回路の電力密度の向上に向けては、熱伝導解析に基づいて部品レイアウトを決定する必要があり、後述するEMI対策と併せて部品実装を最適化することが必要である。パワエレ回路の電力効率を向上させずに電力密度を増大させようとすると発熱密度が増大し放熱が困難になるため、並行して主回路部品の低損失化が必要であることは言うまでもない。

(3) EMI対策

a. 磁気素子のEMI対策

磁気素子からの高周波漏れ磁束は隣接素子や配線に不要な電磁ノイズを誘導するとともに損失の発生にも繋がる。漏れ磁束の低減には高透磁率磁心による閉磁路構造が有利であり、正負対称励磁動作する変圧器には有効であるが、エネルギー蓄積用インダクタのように、磁路にエアギャップを有する場合は漏れ磁束が空間を広く渡るため、回路基板への部品配置によって発生ノイズが異なるなどの影響がある。ギャップ付きインダクタでは、ギャップ形状を最適化して漏れ磁束を局所化するなどの対策が求められる(2章1.5 変圧器・インダクタ, 図2.1.5.49参照)。

b. パワエレ回路の寄生インダクタンス、寄生容量

パワーデバイスパッケージやモジュールの寄生インダクタンスは、前述のように、ノイズ発生の要因となるが、それ以外にも主回路におけるパワーレール配線やパワーデバイスのゲート回路ループの寄生インダクタンスもパワーデバイスのスイッチング動作にともなってノイズを誘導する。さらには、隣接部品間や配線間の電磁界カップリングも寄生成分を発生させ、ノイズ発生の要因となる。したがって、パワエレ回路の電力密度向上を実現するには、回路基板への部品配置に加えて、回路配線のレイアウトについてもノイズ低減のためのEMI対策を講じる必要がある。回路基板を含む大規模な電磁界シミュレーションにもとづく設計手法の確立が望まれる。

[佐藤敏郎]

文献

- (1) 加柴良裕：「パワーエレクトロニクスの実装技術」, スマートプロセス学会誌, Vol.9, No.6, pp.250-254, doi.org/10.7791/jspmec.9.250 (2020)
- (2) 高尾和人, 京極真也：「超低インダクタンス化により高速スイッチングを可能にしたSiCパワーモジュール」, 東芝レビュー, Vol.75, No. 5, pp.48-51 (2016)
- (3) 東芝ホームページ：https://toshiba.semicon-storage.com/jp/company/news/news-topics/2025/08/mosfet-20250828-1.html

- (4) EPC ホームページ : <https://epc-co.com/epc/about-epc/gan-talk-blog/post/25872>
- (5) 坂本善次, 平野尚彦: 「車載用パワーエレクトロニクス製品の紐解きと, 両面放熱パワーモジュールの実装技術」, 溶接学会誌, Vol.80, No.4, pp.294-298, doi.org/10.2207/jjws.80.294 (2011)
- (6) 吉松直樹, 碓井修, 井本裕児, 石山祐介: 「自動車用パワー半導体モジュール J1 シリーズのパッケージ技術」, 三菱電機技報, Vol.88, No.5, pp.43-46 (2014)
- (7) 木村隆志, 斎藤隆一, 久保謙二, 中津欣也, 石川秀明, 佐々木要: 「ハイブリッド電気自動車向け高電力密度インバータ」, 日立評論, Vol.95, No.11, pp.42-47 (2013)
- (8) 日立製作所ホームページ : <https://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2022/03/0323.pdf>
- (9) Vicor ホームページ : https://www.vicorpower.com/documents/datasheets/DCM4623xD2H53E0yzz_ds.pdf
- (10) 川崎淳, 志村和大, 川田奈波, 佐藤光秀, 曾根原誠, 佐藤敏郎, 水野勉, 宮地幸祐: 「Fe 系ナノ結晶扁平粉末と Fe 系アモルファス球形粉末を用いた 10MHz 帯絶縁プレーナトランスの検討」, 電気学会基礎・材料・共通部門マグネティクス/産業応用部門リニアドライブ合同研究会資料, MAG22-047/LD22-030, pp.5-10 (2022)
- (11) 鄭曉光, 伊志嶺朝之, 山本伸一郎, 徳岡輝和, 大橋神悟, 藤川裕之, 早崎俊克: 「圧粉磁心による車載充電器用小型, 高放熱型チョークコイルの開発」, SEI テクニカルレビュー, Vol.181, pp.58-64 (2012)
- (12) 例えば, Vishay ホームページ : <https://www.vishay.com/search/?searchChoice=part&query=Inductor>
- (13) 齊田仁, 井上弘康, 吉田健一, 荻谷 隆: 「基板内蔵用薄膜キャパシタ」, 第 35 回エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, 19B1-02, pp.1-4, doi.org/10.11486/ejiso.35.0_19B1-02 (2021)
- (14) 小幡進, 佐野光雄, 樋口和人: 「MacEtch 法を適用した Si キャパシタの高容量化技術」, 東芝レビュー, Vol.71, No.6, pp.48-52 (2020)
- (15) Malavarayan Sankarasubramanian, Kaladhar Radhakrishnan, Yongki Min, William Lambert, Michael J Hill, Ashay Dani: “Magnetic Inductor Arrays for Intel® Fully Integrated Voltage Regulator (FIVR) on 10th generation Intel® Core™ SoCs”, 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp.399-403, DOI:10.1109/ECTC32862.2020.00071 (2020)
- (16) Takanobu Fukuoka, Yuki Karasawa, Tomoki Akiyama, Ryoutaro Oka, Shu Ishida, Tomohiro Shirasawa, Makoto Sonehara, Toshiro Sato, Kousuke Miyaji: “An 86% Efficiency, 20MHz, 3D-Integrated Buck Converter with Magnetic Core Inductor Embedded in Interposer Fabricated by Epoxy/Magnetic-Filler Composite Build-Up Sheet”, Proceedings of the 34th Applied Power Electronics Conference and Exposition 2019 (APEC2019), pp.1561-1566 (2019)
- (17) 日本工業規格 JIS C 62477-1 : <https://kikakurui.com/c60/C62477-1-2017-01.html>

2.3 鉄窒素系磁心の開拓⁽¹⁾

キーワード: α -Fe₁₆N₂ 粉末, 酸化皮膜, 気固反応

次世代半導体デバイスは, パワーエレクトロニクス機器全体の高効率化および省エネルギー化の鍵である⁽²⁾⁽³⁾。動作周波数の高周波化およびスイッチング特性制御に対応するため, 回路システムを構成する受動素子の一つであるインダクタでは DC から MHz 帯での特性向上が不可欠である。このような背景から軟磁気特性と大振幅での励磁応答線形性が担保された理想に迫るインダクタはどこまで作製可能かという興味は尽きず, 飽和磁化の高い金属磁性粉からなる渦電対策を施した圧粉磁心インダクタの開発が注目されている。

ユビキタスな元素から合成できる高飽和磁化 (σ_s) 金属磁性材料としては, 体心立方構造 (body-centered cubic (bcc)) の Fe の c 軸に沿って格子間に N 原子が侵入した体心正方構造 (body-centered tetragonal: bct) を有する α -Fe₁₆N₂⁽⁴⁾⁽⁵⁾ が知られている。 α -Fe₁₆N₂ 粉末に関する過去の報告によると, σ_s としては 200~226 emu/g⁽⁶⁾⁽¹²⁾ の値が実験的に得られている。一方保磁力は数 kOe と高く軟磁気特性は導出されていない。これは α -Fe₁₆N₂ 相が本質的に有する 9.6×10^6 erg/cm³ という高い一軸結晶磁気異方性エネルギーのためと考えられており, α -Fe₁₆N₂ を圧粉磁心材料として用いるためには結晶磁気異方性エネルギーを低減することが課題である。一方圧粉磁心インダクタの渦電流損失を抑制するためには, 微小寸法の金属磁性粒子を絶縁体で被覆することが有効である。絶縁被覆法としては磁性粉に対して後工程で樹脂コーティングを施す手法が一般的であるが, 皮膜が厚く不均一となりやすく, 耐熱性に乏しいことが課題である。

以上の課題を考慮すると, 極薄均一絶縁皮膜を有する高飽和磁化窒化鉄系軟磁性粉を開発することは, 次世代パワエレ用インダクタの軟磁性材料の開発方針を展望する一つの方策として意義深い。本項では軟磁性化と極薄皮膜形成を目的として試行した気相・固相反応プロセスによる窒化鉄系磁性粉の合成例を紹介するとともに, 合成した粉末を用いて作製した圧粉磁心の鉄損と透磁率の測定結果から本技術の今後の開発方針を展望する。試作対象が圧粉磁心のため, インダクタとしての展望となり, 変圧器には必ずしも適用できないのでご了解頂きたい。

2.3.1 絶縁皮膜付きナノ寸法窒化鉄系磁性粉の合成コンセプト

一般に気固反応では材料表面の清浄性の担保が重要である。そこで大気に開放しない一連の気固反応により皮膜付き窒化鉄系磁性粉を合成する方法として, 酸化鉄原料粉を還元してから窒化・炭化し表面酸化する手法を採用した (図 5.2.3.1)。原料粉の酸化鉄には数ミクロン寸法の Co, Al 含有マグネタイトを選択した。数ある酸化鉄の中からマグネタイトを選定した理由は, 飽和磁化を増強する元素である Co と皮膜形成のための被酸化元素である Al の両元素を原料粉に含有させるために, 2 価と 3 価の 2 種類の Fe サイトを持つマグネタイトが好都合であることによる。これを水素ガス雰囲気中で還元して Fe-Co-Al 合金粉を得る。この還元反応の際には酸素が抜けることによる体積縮小, ならびに逆スピネル相 (マグネタイト) から体心立方

晶相 (Fe 系合金) への結晶系変化を伴うため、結晶子径の細分化が期待される。続いて窒化相の合成とその軟磁性化のために、アンモニアガスおよびアセチレンガス雰囲気中熱処理により格子中への浸窒・浸炭を図る。最後に粒子の表面に極薄絶縁皮膜を設けるために窒素ガスで希釈した乾燥空気を用いて粒子を穏やかに酸化する。なお、bcc-Fe 粒子への窒素・炭素の共添加により軟磁性化が図られる事象は薄膜において知られており文献 (13)を、還元 Fe 粉の窒化・炭化の順序については文献 (14)を参照されたい。

2.3.2 α' 相磁性粉の合成と皮膜形成との両立

α' -Fe₁₆N₂ 相の磁性粉を得るためには、 γ -Fe₄N 相を形成させずに bcc-Fe 粒子に窒素を侵入させることが肝要である。実際には還元後の bcc-Fe 粒子に対し 160°C~170°Cのアンモニアガス雰囲気下で低温長時間の熱処理を施すことにより γ 相の形成を抑制しつつ α' 相の形成を促進できることが知られている⁽⁶⁾⁻⁽¹²⁾。したがって前述のコンセプトの検証では、Co や Al が含有した Fe 基合金還元粉にも窒素を侵入させて α' 相を形成できるのか、また α' 相合金粒子内から Al を表面に拡散させて Al の絶縁酸化膜を形成させうるのかが鍵となる。図 5.2.3.2 に微量の Al と

Co を含有した Fe 基合金還元粉に対し、先に酸化皮膜形成プロセスを実施してから窒化・炭化プロセスを行った場合 (プロセス A)、および先に窒化・炭化プロセスを実施してから酸化皮膜形成プロセスを行った場合 (プロセス B) について、合成される磁性粉の XRD プロファイルを示す。プロセス A で作製される磁性粉には bcc 相のみが形成されており、初めに酸化皮膜を設けるとその後のプロセスでの窒素・炭素の格子侵入が抑制されてしまうことがわかる。一方プロセス B による試料では正方晶に起因する回折線が観測されており、磁性粉に窒素・炭素が侵入したと判断できる。ただし正方晶が単相で形成されている場合、結晶対称性から 51° 近傍の回折線である bct (101), (011) と bct (110)との強度比はおおよそ 2:1 になるはずであるが、プロセス B の試料の回折線強度はこの比に至っていない。これは bcc(110)と bct(110)の回折線が重畳していること、すなわち未窒化/未炭化な bcc 相が残存していることを示唆している。加えて γ 相からの回折線も観測されており試料内には過窒化/過炭化相の形成も認められる。低温長時間で均一な気固反応プロセスの確立が求められる。なお、規則線が観測されれば α' 相形成の査証となるが、今回の検討試料ではバックグラウンドの回折強度に対し規則線の回折強度が弱いため、窒素と炭素の侵入サイトが規則化されているか否かまでは検証できていない。図 5.2.3.3 には図 5.2.3.1 に示したプロセスのうち、最後の酸化皮膜形成プロセスの温度を変化させた場合の磁性粉の抵抗 (ρ), 15 kOe 印加時の磁化 (σ_{15k}), 保磁力 (H_c), 結晶子寸法 (D_c) を

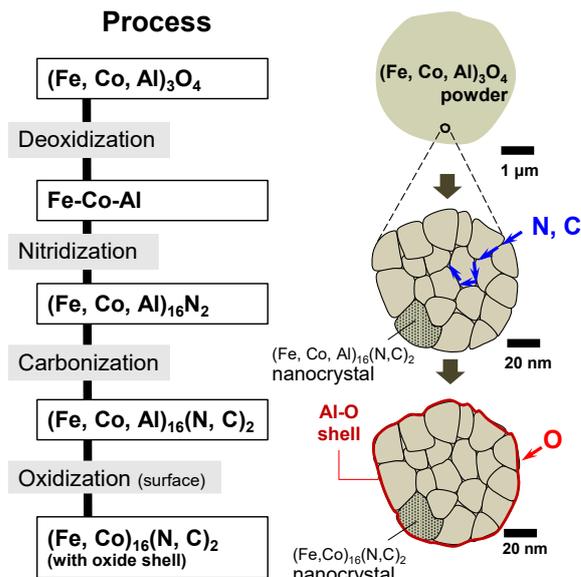


図 5.2.3.1 マグネタイトから絶縁皮膜付き窒化鉄系磁性粉を合成する際の気固反応フローと組織イメージ

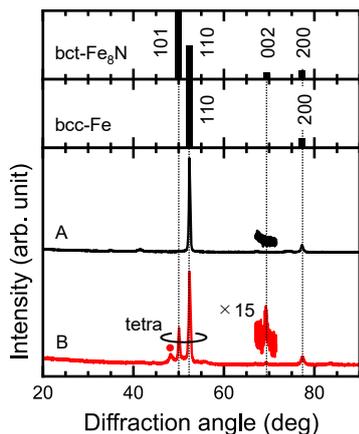


図 5.2.3.2 Al と Co を含有した Fe 基合金還元粉に対し、先に酸化皮膜形成プロセスを実施してから窒化・炭化プロセスを行った場合 (プロセス A)、および先に窒化・炭化プロセスを実施してから酸化皮膜形成プロセスを行った場合 (プロセス B) の磁性粉の XRD プロファイル (Co-K α 線源)

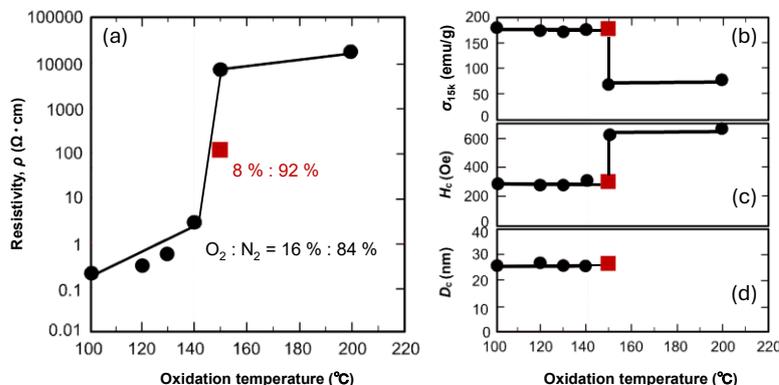


図 5.2.3.3 酸化皮膜形成プロセスの温度を変化させた場合の磁性粉の抵抗 (ρ), 15 kOe 印加時の磁化 (σ_{15k}), 保磁力 (H_c), 結晶子寸法 (D_c)。丸と四角マークは酸化プロセス時の酸素と窒素のガス流量比をそれぞれ (16 : 84), (8 : 92)としたもの

示している。酸化温度を 140°C から 160°C に上昇させると抵抗が 3 桁増大し σ_{sk} が半減しているため、この温度範囲で磁性粉の酸化が進行することがわかる。したがって徴候が現れ始める 140°C 程度の温度で酸化すれば、合金粉よりは 1 桁抵抗を高めつつ飽和磁化をそれほど低下させない磁性粉、すなわち極薄酸化皮膜付きの磁性粉が形成できると推察される。

2.3.3 圧粉磁心の作製と励磁特性

図 5.2.3.4 に今回圧粉磁心の作製に用いた窒化鉄系磁性粉の磁化曲線を示す。(a) は磁化曲線全体、(b) は原点付近の拡大曲線である。保磁力は 473 Oe であり、事前に微量の原料粉により窒化・炭化条件を詰めて得られていた 100 Oe よりかなり大きかった。これは磁心作製に必要な 2.5 g の皮膜付き窒化鉄系合金粉を得るため、原料収納容器内の出発粉量を増量したことや、反応炉内に容器を複数個並べてバッチ処理したため生じた反応むらが生じたためと考えている。この窒化鉄系磁性粉を以下の要領で圧粉成形した。まず 2.5 g の磁性粉と約 0.2 g のバインダー（フェノール樹脂）を混合した。次にこの混合物を外径 13 mm、内径 8 mm の金型に充填し、10 ton/cm² で高さ約 6 mm のトロイダル状に成形した。最後にこのトロイダル成形品を 150°C で 45 分間加熱し、粉末とフェノール樹脂とを結合させた。

今回作製した窒化鉄系圧粉磁心の磁心断面の中央付近の組織を観察・分析した結果を図 5.2.3.5（走査型電子顕微鏡：SEM）および図 5.2.3.6（走査型透過電子顕微鏡：STEM）に示す。SEM 観察の結果によると多少の空隙は見られるが、10 μm 程度の視野ではほぼ均一な充填組織となっていることがわかる。STEM 観察では (a) には明視野像、(b), (c), (d) には (a) と同一視野の Fe, Al, O の特性 X 線像を示した。O と Al は富 Fe 領域の外側に nm 厚さで偏在しており、視野中の全ての磁性粒子の外側に Al の酸化皮膜が形成されたこと、ならびに圧粉成形時には塑性変形は生じなかったことがわかる。図 5.2.3.7 に作製したトロイダル成形品に 1 次および 2 次コイルをそれぞれ 20 回巻した圧粉磁心の励磁特性 ((a) 鉄損 P_{ev} , (b), (c) 実効複素透磁率の実部 μ' と虚部 μ'') を励磁振幅 (B_{ex}) と励磁周波数 (f_{ex}) に対して等値線図として示す。比較のために (d), (e), (f) には市販のセンダスト合金粉（山陽特殊鋼社製、平均粒径 2 μm）を用いて同様に作製したトロイダル状圧粉磁

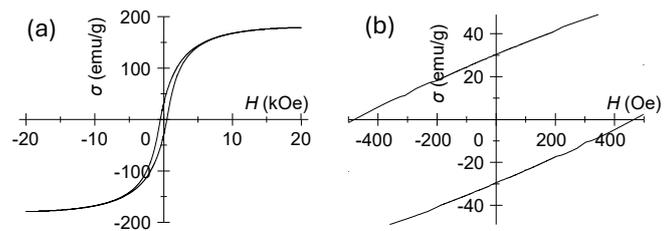


図 5.2.3.4 (a) 酸化温度 140°C で作製した磁性粉の磁化曲線 (b) その原点付近を拡大した磁化曲線

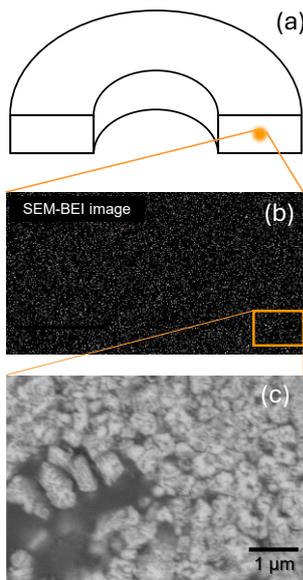


図 5.2.3.5 SEM 反射電子像による窒化鉄系圧粉磁心の組織観察結果 (a) 観察部位 (b) 磁心断面の中央付近の組織 (c) 空隙近傍の拡大図

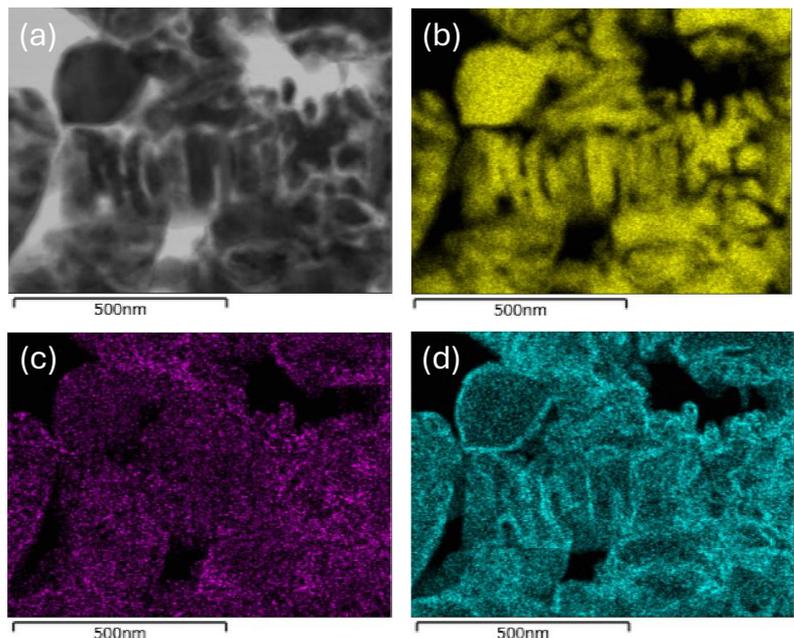


図 5.2.3.6 STEM による窒化鉄系圧粉磁心の断面中央付近の組織観察結果 (a): 明視野像 (b), (c), (d): Fe, Al, O の特性 X 線マップ

心の励磁特性も示した。センダスト磁心については、 μ' は励磁条件によらず 81 程度の大きな値をとる。 μ'' は f_{ex} のみに依存し、 f_{ex} の増加に対してわずかに増加する。 P_{cv} は f_{ex} と B_{ex} の増加とともに増加し、 $(f_{ex}, B_{ex}) = (2 \text{ MHz}, 20 \text{ mT})$ の励磁条件のときに 1236 kW/m^3 に達する。一方、今回作製した窒化鉄系圧粉磁心では、 μ' は f_{ex} のみならず B_{ex} にも依存しており μ' と μ'' の大きさは Fe-Si-Al 磁心よりも 1 桁小さい。 P_{cv} は Fe-Si-Al 磁心と同じ傾向を示すが値は 1 桁大きく、 $(f_{ex}, B_{ex}) = (2 \text{ MHz}, 20 \text{ mT})$ の励磁条件で $24,590 \text{ kW/m}^3$ の大きさに達する。これらの結果は、窒化鉄系圧粉磁心の軟磁気特性が実用材に対してまだ比較できる段階にないことを意味している。

2.3.4 展望

大気に開放しない一連の気固反応プロセスによりマグネタイト系出発粉から絶縁酸化皮膜付きの窒化鉄系磁性粉を合成し、この磁性粉を用いてトロイダル状圧粉磁心を作製して励磁特性を評価した結果を紹介した。本合成法の利点はプロセス中に数十から数百 nm 寸法の磁性粒子に対し浸窒・浸炭や酸化皮膜形成が比較的容易に実現できることである。中でも浸窒・浸炭については皮膜構成元素が含有した合金（今回の例では Al 微量含有 Fe）であっても反応が進むこと、ならびに皮膜形成についてはわずか 140 程度の低温処理で全ての磁性粒子の外側にシングル nm 厚さで均一に設けられることが特筆される。一方で各気固反応のプロセス条件はシビアであり、特に同一条件の磁性粉を大量合成する場合のプロセス均一性の担保が必須となる。この観点では反応炉が重要であり、今回紹介した試料の作製炉である試料固定型のバッチ式炉に替わり、試料回転型のキルン炉の採用が期待される。

理想に迫るインダクタを展望する上では、軟磁気特性と大振幅での励磁応答線形性のある程度実現する必要があるが、この観点では今回合成した窒化鉄系磁性粉は不十分であった。薄膜において実現できている「窒素と炭素の共添加による α' 相の一軸結晶磁気異方性エネルギーの低減」という手法を粉体に適用したが、粉体では窒素の炭素への置換が十分にはなされなかったものと推察している。近年ではミネソタ大学の研究グループが「minnealloy」と称して、尿素を添加した浮遊溶解 Fe を急冷凝固し熱処理により γ 相を α' や α'' 相に変態させる方法⁽¹⁵⁾や、メルトスピニング法で Fe-C 急冷薄帯を作ってアンモニア雰囲気下で窒化する⁽¹⁶⁾により bcc-Fe を炭窒化させる方法が報告されている。いずれも α' や α'' 相の単相試料は得られていないが、高い飽和磁化と良好な軟磁気特性を両立するバルク手法として注目される。以上、軟磁性化に際し真性的な結晶磁気異方性を低減する方策を述べた。この方策以外に、ナノクリスタル効果の活用、すなわち結晶軸方向が異なるナノ結晶を数十 nm 寸法にクラスタ化して接触粒界面積を増やし結晶磁気異方性エネルギーを相殺しつつ粒間交換結合を支配的に発現させる方策も有効ではないかと考えられ、合成法の開発が期待される。

[斉藤伸]

文献

- (1) A. Nishikura, H. Nakashinden, Y. Kato, M. Miyazawa, M. Tobise, and S. Saito : "Synthesis of Iron Nitride-Based Magnetic Powder with Oxide Shell by Gas-Solid Reaction and its Application to Magnetic Powder Core", Journal of Magnetics Society of Japan, Vol.49, No.5, pp.71-75, DOI: 10.3379/msjmag.2509R002 (2025)
- (2) H. Ohashi : "Power devices now and future, strategy of Japan", 2012 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, pp.9-12 (2012)
- (3) D. Neumayr, D. Bortis, and J. W. Kolar : "The Essence of the little box challenge-part B: Hardware demonstrators & comparative evaluations", CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, Vol.5, No.3, pp.251-272, DOI: 10.24295/CPSSPEA.2020.00022 (2020)
- (4) K. H. Jack : "The occurrence and the crystal structure of α' -iron nitride; a new type of interstitial alloy formed during the tempering of nitrogen-martensite", Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, Vol.208, No.1093, pp.216-224, DOI: 10.1098/rspa.1951.0155 (1951)
- (5) T. K. Kim and M. Takahashi : "New Magnetic Material Having Ultrahigh Magnetic Moment", Applied Physics Letters, Vol.20, No.12, pp.492-494, DOI: 10.1063/1.1654030 (1972)
- (6) T. Hattori, N. Kamiya, and Y. Kato : "Magnetic Properties of Fe₁₆N₂ Fine Particles", Journal of Magnetics Society of Japan, Vol.25, No.4-2, pp.927-930, DOI: 10.3379/jmsjmag.25.927 (2001) (in Japanese)

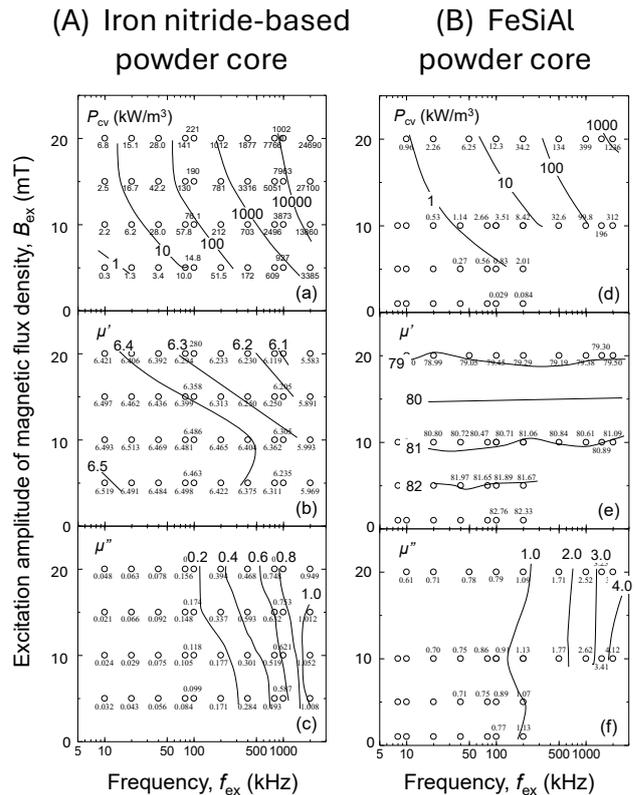


図 5.2.3.7 (A) 窒化鉄系圧粉磁心, (B) FeSiAl 圧粉磁心の励磁特性 ((a) 鉄損 P_{cv} , (b), (c) 実効複素透率の実部 μ' と虚部 μ'') の励磁振幅 (B_{ex}) と励磁周波数 (f_{ex}) に対する等値線図

- (7) S. Kikkawa, A. Yamada, Y. Masubuchi, and T. Takeda : "Fine Fe_{16}N_2 powder prepared by low-temperature nitridation", Materials Research Bulletin, Vol.43, No.12, pp.3352-3357, DOI: 10.1016/j.materresbull.2008.02.008 (2008)
- (8) K. Yamanaka, Y. Onuma, S. Yamashita, Y. Masubuchi, T. Takeda, and S. Kikkawa : "Humidity effects in Fe_{16}N_2 fine powder preparation by low-temperature nitridation", Journal of Solid State Chemistry, Vol.183, No.9, pp.2236-2241, DOI: 10.1016/j.jssc.2010.07.045 (2010)
- (9) C. Wehrenberg, B. Zande, S. Shimizu, R. T. Obermyer, S. G. Sankar, and N. Thadhani : "Shock compression response of α' - Fe_{16}N_2 nanoparticles", Journal of Applied Physics, Vol.111, No.8, p.083522, DOI: 10.1063/1.4868295 (2014)
- (10) S. Yamashita, Y. Masubuchi, Y. Nakazawa, T. Okuyama, M. Tsuchiya, and S. Kikkawa : "Crystal structure and magnetic properties of α' - Fe_{16}N_2 containing residual α -Fe prepared by low-temperature ammonia nitridation", Journal of Solid State Chemistry, Vol.194, pp.76-79, DOI: 10.1016/j.jssc.2012.07.025 (2012)
- (11) M. Tobise, T. Ogawa, and S. Saito : "Morphology and magnetic properties of α' - Fe_{16}N_2 nanoparticles synthesized from iron hydroxide and iron oxides", Journal of Magnetics Society of Japan, Vol.41, No.3, pp.58-62, DOI: 10.3379/msjmag.1704R003 (2017)
- (12) T. Ogawa, Y. Ogata, R. Gallage, N. Kobayashi, N. Hayashi, Y. Kusano, S. Yamamoto, K. Kohara, M. Doi, M. Takano, and M. Takahashi : "Challenge to the Synthesis of α' - Fe_{16}N_2 Compound Nanoparticle with High Saturation Magnetization for Rare Earth Free New Permanent Magnetic Material", Applied Physics Express, Vol.6, No.7, p.073007, DOI: 10.7567/APEX.6.073007 (2013)
- (13) M. Takahashi, Y. Takahashi, K. Sunaga, and H. Shoji : "New soft magnetic material of α' -Fe-C with high B_s ", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.239, No.1, pp.479-482, DOI: 10.1016/S0304-8853(01)00661-8 (2002)
- (14) M. Tobise, Y. Nomura, M. Kodama, T. Murakami, and S. Saito : "Proposal of New Co-Addition Method for α' - $\text{Fe}_{16}(\text{N}, \text{C})_2$ Particles by Gas-Solid Reactions", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.58, No.8, pp.1-5, DOI: 10.1109/TMAG.2022.3151109 (2022)
- (15) M. Mehedi, Y. Jiang, P. K. Suri, D. Flannigan and J.-P. Wang : "Minnealloy: a new magnetic material with high saturation flux density and low magnetic anisotropy", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol.50, No.37, pp.37LT01-1-37LT01-6, DOI: 10.1088/1361-6463/aa8130 (2017)
- (16) W. Echtenkamp, A. S. Padgett, S. R. Bishop, P. F. Weck, T. C. Douglas, C. J. Pearce, D. R. Lowry, L. F. Schnebly, and J.-P. Wang : "Assessment of minnealloy fabrication via three routes", AIP Advances, Vol.15, pp.035008-1-035008-6, DOI: 10.1063/9.0000910 (2025)

2.4 リサイクル・リユース

キーワード: リサイクル, リユース, ライフサイクルアセスメント

2.4.1 はじめに

パワーエレクトロニクス技術はエネルギー効率向上や再生可能エネルギー導入の要として、気候変動対策に不可欠な役割を果たしている⁽¹⁾。しかし、近年では電力変換器自体の製造・使用・廃棄に伴う環境負荷にも注目されている⁽²⁾。従来は性能指標として電力変換効率(%)や電力密度(kW/m^3)が重視されてきたが、持続可能な電力変換システムには製品ライフサイクル全体での環境負荷(例:温室効果ガス排出量や資源消費)の低減が求められる。製品や技術の環境負荷を定量的に評価するライフサイクルアセスメント(LCA)は、こうした目的に有効な手法である。近年、LCAを設計段階に統合し、環境負荷を考慮した設計・最適化を行うアプローチがパワーエレクトロニクス分野で注目を集めている。本項では、環境負荷の事例、製品設計段階へのLCA統合、多目的最適化(エネルギー効率・材料効率・温室効果ガス排出など)の活用事例に焦点を当てる。また、IEEE Power Electronics Magazinに掲載された「Energy Efficiency is Not Enough!」⁽²⁾を中心に参照し、その事例を紹介するだけでなく、大手企業によるLCA活用、エコデザイン(環境配慮設計)、サーキュラーエコノミー推進に関する近年の取り組みや発表内容をまとめ、研究と産業界の動向を結び付けて考察する。

2.4.2 研究動向

近年の研究では、パワーエレクトロニクス機器の環境負荷にLCAを適用し、従来のエネルギー効率指標だけでは捉えきれない設計上のトレードオフが議論されている。文献⁽¹⁾では、「エネルギー効率だけでは不十分」であり、環境負荷を新たな性能指標として設計最適化に組み込む必要性が提案されている。この研究では、10 kW級のパワーエレクトロニクス回路を例に、製品製造時の炭素排出(Global Warming Potential, GWP)と動作時のエネルギー損失による排出を統合的に評価している。その結果、将来の電力網の低炭素化が進んだシナリオでは、使用段階の

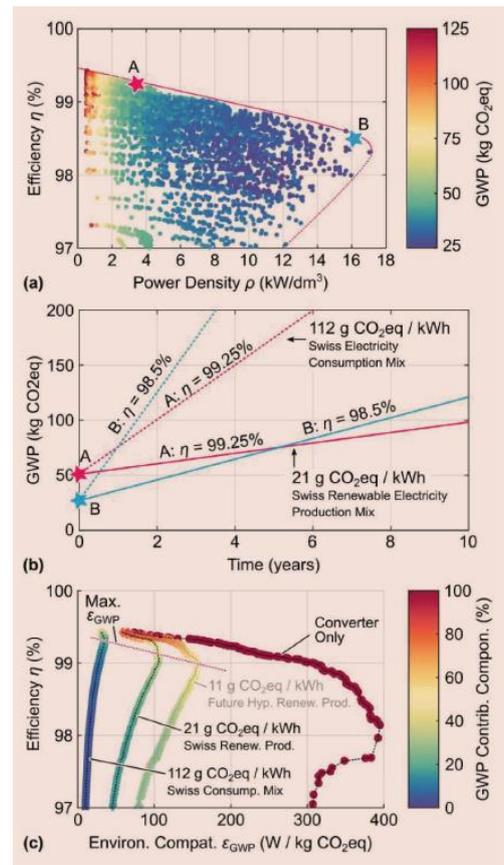


図 5.2.4.1 電力変換器設計におけるエネルギー効率と環境適合性指標(ϵ_{GWP})のトレードオフ

CO₂ 排出を低減するために変換効率を最大化することよりも初期製造時の GWP 低減を重視した設計の方がライフサイクル全体で環境負荷が高くなることを明らかにした。すなわち、電力がクリーンになるほど「最高効率=最善」ではなくなる。同様に、使用時間の短い機器（例えば 1 日 1 時間程度しか使わないスマートフォン充電器など）では、多少効率が低くても製造時の環境負荷が小さい設計の方が総合的に有利となる。

図 5.2.4.1 は、電力変換器設計におけるエネルギー効率と環境適合性指標 (ϵ_{GWP}) の関係を示す。ここで、図 5.2.4.1(a) は効率と電力密度の関係、図 5.2.4.1(b) は使用段階 (10 年・8 時間/日稼働) を考慮した場合の各設計の GWP 比較を、図 5.2.4.1(c) は異なる電力供給シナリオでの効率-環境適合性指標 (ϵ_{GWP}) 間のパレトフロントをそれぞれ示す。図 5.2.4.1 より、初期 GWP が大きくても高効率設計 (A) は、低効率・低 GWP 設計 (B) より長期的には総 GWP で優位に立つ場合があることがわかる。つまり、将来の低炭素電力では最大効率追求の有利性が減少し、GWP 低減の重要性が増すことがわかる。さらに、文献⁽¹⁾では、環境負荷の影響指標を設計段階に統合する試みとして、LCA を従来の最適化問題に組み込み、効率・出力密度・環境影響の多目的最適化を実施した。その手法では、各種コンポーネントの環境フットプリントデータを用いて、設計毎にライフサイクル全体の環境影響を見積もり、効率など他の性能指標との関係を解析している。図 5.2.4.2 では、2 レベル (2L) と 3 レベル (3L) のインバータ回路構成を比較した検討では、3L 方式は電力変換効率とパワー密度で優位であるが、半導体素子数が増えるため製造段階の GWP が高く、使用条件によっては ϵ_{GWP} で 2L 方式を下回ることを明らかにした。具体的には、1 日あたり 4 時間の使用環境では部品点数の少ない 2L 方式の方がライフサイクル環境負荷が小さい (つまり、 ϵ_{GWP} の最大値が大きい) が、8 時間以上の連続使用環境では高効率な 3L 方式の方が有利となり、設計最適解は使用条件に依存することが示されている。これは、初期コストと運用コストの折り返しを見るトータルコストオブオーナーシップ (TCO) の概念に環境負荷版の視点を導入したものと言える。さらに、多くの研究者が環境負荷の影響評価を単一指標 (例えば CO₂ 排出量) にとどめず多面的に評価する重要性を指摘している。GWP (気候変動影響) だけでなく、国際的に広く使われている ReCiPe 2016 手法による複数の環境負荷の影響カテゴリ (資源消費, 生態系影響, 人の健康影響など) で 2L vs 3L 設計を比較し、設計によってカテゴリ毎に異なる傾向が現れることが示されている。

これに加えて、GaN や SiC といったワイドバンドギャップ半導体デバイスの製造プロセスを対象に LCA を行い、従来の Si デバイスとの環境負荷比較や製造工程中の分析を行った報告もある。文献⁽²⁾では、GaN-on-Si パワーデバイスについて初の包括的 LCA を報告し、製造プロセスでの電力・クリーンルーム需要、PFC ガス排出、貴金属使用 (例: 金)、有機溶剤の使用が環境負荷の主因であることを示した。また、Si・GaN・SiC 各デバイスの比較では、ワイドバンドギャップ素子は使用段階での高効率化ポテンシャルが大きい一方、製造段階の環境負荷が無視できないことが指摘されている。

これらの研究は、新素材・新技術導入に際して「エネルギー効率向上と製造時環境負荷の関係」を定量的に評価し、真に持続可能な技術選択を促している。さらに、欧州を中心にエコデザイン指令や循環経済政策への対応として、電気電子機器の設計段階で耐久性・リユース・リサイクル容易性といった循環性 (サーキュラリティ) を高める研究も進展している。例えば、欧州委員会のエコデザイン規則策定に向けて、モータードライブシステムの素材効率や循環経済性に関する標準化検討が報告されており⁽³⁾、また電気電子産業における「Design for Circularity (循環性設計)」のガイドライン提案や、業界全体の動向を整理したレビュー研究も登場している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これらは LCA の観点から製品設計指針を示すもので、部品のモジュール化による再利用機会の拡大や、製品寿命終了後の資源回収性向上など、具体的な設計戦略が議論されている。総じて、2020 年以降の研究動向としては、LCA を「事後評価ツール」から「事前の設計意思決定ツール」へと昇華させる潮流が顕著になっている。従来は製品開発後に環境負荷を評価・報告する用途が主だったが、現在は開発初期から環境負荷を他の性能と並列に考慮し、より包括的な最適化や設計トレードオフの検討に活用する方向へシフトしている。その際の課題として、必要となる部品ごとの環境データの精度・整合性が指摘されており、研究者らは「コンポーネントの環境フットプリントに関する信頼性あるデー

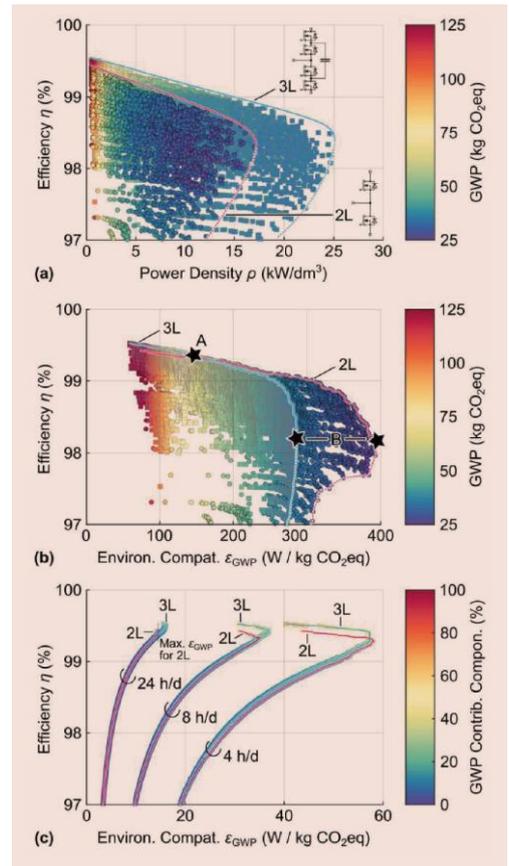


図 5.2.4.2 電力変換器の回路構成(レベル数)の違いにおけるエネルギー効率と環境適合性指標(ϵ_{GWP})の関係

データベース整備」や「環境負荷の情報を含むスマートデータシート」の必要性を訴えている。実際、現状では詳細な設計段階 LCA（いわゆる a priori LCA）はデータ不足により不確実性が高くなる傾向がある。このため、研究コミュニティや業界全体でのデータ共有・標準化、および効率的な推計手法の開発が今後の重要課題とされている。

2.4.3 企業の動向と実践事例

研究の進展に呼応する形で、産業界でもパワーエレクトロニクス製品のライフサイクル環境負荷低減やサーキュラーエコノミー（循環経済）推進の取り組みが活発化している。ここでは Infineon, ABB, Siemens, 三菱電機の最近の動向を概観する。

(1) Infineon Technologies⁽⁶⁾⁽⁷⁾

Infineon は、自社製品の環境性能向上と循環型ビジネスモデルの構築に積極的である。同社は製品ライフサイクル全体における環境負荷低減を掲げ、製造プロセスでの CO₂フットプリントの算定と削減目標を設定している。例えば、製造時のエネルギー使用削減や温室効果ガス排出削減プログラムを実施するとともに、製品中の材料組成情報を公開しリサイクル業者への情報提供や有害物質不使用を徹底している。さらに、循環経済の 6R コンセプト（Reduce, Reuse, Repair, Refurbish, Recycle, Reliability）を製品設計・運用に取り入れている。具体例として、電子部品認証技術を活用し、交換部品の真正性検証を行うことで製品の修理・再利用を支援し、欧州で進展する「修理する権利」規制への対応や製品寿命延長に貢献している。また欧州の共同研究プロジェクトへの参画を通じ、電子機器の材料循環やリサイクルプロセスの改善にも取り組んでおり、電子廃棄物削減と持続可能なサプライチェーン構築を目指している。Infineon は、半導体製品がエネルギー消費削減に寄与するだけでなく、その製造から廃棄に至るまでの環境負荷にも責任を負うとの方針を示し、LCA やエコデザイン手法を経営戦略に組み込んでいる。

(2) ABB⁽⁸⁾

ABB は、自社製品・ソリューションの環境負荷を客観的に示すため、LCA と環境製品宣言（EPD）を積極的に導入している。ABB では製品設計時に循環経済原則を組み込むことを推進しており、製品ライフサイクルのあらゆる段階（設計・調達・製造・使用・廃棄）で資源を循環利用する戦略を掲げている。具体的な取り組みとして、同社は「EcoSolutions」と銘打った製品認証プログラムを展開し、循環性基準を満たした 20 以上の製品群を認定している。これら認定製品には ISO 標準に沿った環境製品宣言（EPD）が付与され、第三者検証済みのライフサイクル環境データが公開される。EPD 取得には製品ごとの詳細な LCA 実施が前提となっており、LCA 実施件数が年々増加していることが報告されている。こうした透明性向上の取り組みは、自社製品の環境負荷の改善だけでなく、顧客が設備導入時に環境負荷の影響を考慮して選択できるよう支援する狙いもある。また、低炭素社会への貢献として原材料調達から見直しを進めている。例えば、スウェーデンの Boliden 社と提携し、自社の電動機や攪拌装置に用いる銅を低炭素フットプリント銅に切り替えることで、製品 1 台あたりの CO₂ 排出を平均 200 kg 削減する試みを行っている。同様に、高炉での再生鉄スクラップ利用や再生プラスチック材料の採用によって、電力機器の製造段階排出を数十%削減する成果も報告している。加えて、同期リラクタンズ電動機等の新製品では希少材料（例：希土類磁石）不使用と高効率化を両立し、製品寿命延長やリサイクル容易性を高めている。このように LCA データに基づく設計改善とサプライチェーン改革を両輪に、環境負荷低減と循環経済への移行を図っている。

(3) Siemens⁽⁹⁾

Siemens では、エコデザイン（環境配慮設計）を全社戦略の柱に位置付け、製品開発プロセスに持続可能性基準を組み込んでいる。2021 年より「Robust Eco Design (RED)」プログラムを本格導入し、まずハードウェア製品を対象に環境効率評価を開始、のちにソフトウェア・サービスにも拡大している。エコデザインアプローチでは、責任ある製品開発（開発段階でのエコデザイン適用）、クリーンなサプライチェーン（再生資源の活用と有害物質削減）、自社拠点の効率向上（生産現場の省エネ・廃棄物削減）という 3 分野に重点を置いている。製品開発プロセスでは、各事業部門の主要製品について代表モデルの LCA を実施し、その結果を環境負荷の性能目標の設定や設計改善にフィードバックする仕組みを整えている。具体的には、製品ごとの「カーボンフットプリント（製造から廃棄までの CO₂ 排出量）」を算定し、必要に応じて社内外向けに EPD として開示するとともに、得られた知見を用いて素材の変更、エネルギー効率化、モジュール化設計などの改善策を講じている。このような LCA 駆動の設計最適化により、自社および顧客の双方でコスト削減と環境負荷低減を両立できると強調している。例えば、製品の再製造やリース・サービス化による長期利用モデルは、原材料調達コストや廃棄コストを削減しつつ新たな収益機会にも繋がるとしている。また、サプライヤーや業界団体とも協調し標準化やデータ共有を推進中で、製品環境情報をエンドユーザーまでシームレスに伝達する「EcoTransparency」というプラットフォームを開発している（製品ごとに LCA モデルを接続し動的にフットプリント算出する試み）。これらの取り組みからうかがえるように、LCA を経営と技術開発の意思決定に組み込み、環境負荷を競争力に転換する戦略を取っている。

(4) 三菱電機⁽¹⁰⁾

図 5.2.4.3 に示すように、三菱電機も自社製品のライフサイクル CO₂ 排出「見える化」を通じた設計を推進している。環境負荷のデータを一元管理する社内システム「e-Pro システム」を構築し、各製品の年間エネルギー消費量、製品質量（材料別）や出荷先情報などを入力することで、製品ごとのライフサイクル CO₂ 排出量（LC-CO₂）を自動計算・集計している。この仕組みにより、数多くの製品について迅速に LCA 相当の評価を行い、必要な環境情報を社内外に開示できる体制を整えている。さらに、製品グループごとに 2030 年・2050 年を見据えたカーボンニュートラルおよび循環経済対応の目標を設定し、e-Pro で得られた各製品の環境負荷データを設計部門へフィードバックしてエコデザイン（環境配慮設計）の促進に役立てている。例えば、ある製品の製造段階 CO₂ が多ければ部材の見直しや製造プロセス改善を検討し、使用段階エネルギーが多ければ省エネ機能強化や運用提案を行う、といった PDCA サイクルを構築している。また、環境負荷のデータの外部要求（顧客や規制当局からの問い合わせ）にも効率的に対応できるようになり、第三者認証取得（エネルギースター等）やグリーン調達にも効果を上げている。さらに循環経済への対応として、製品の長寿命化や再資源化にも注力している。例えば、社内にプラスチック廃棄物の 100%有効利用目標（2036 年度まで）を掲げ、各製作所で廃プラ排出源の見える化・削減やリサイクル企業との連携を進めている。このように、自社開発の LCA 管理システムと組織的な目標設定により、設計から廃棄まで一貫した環境負荷低減を実現する取り組みを展開している。

e-Proシステムの全体像

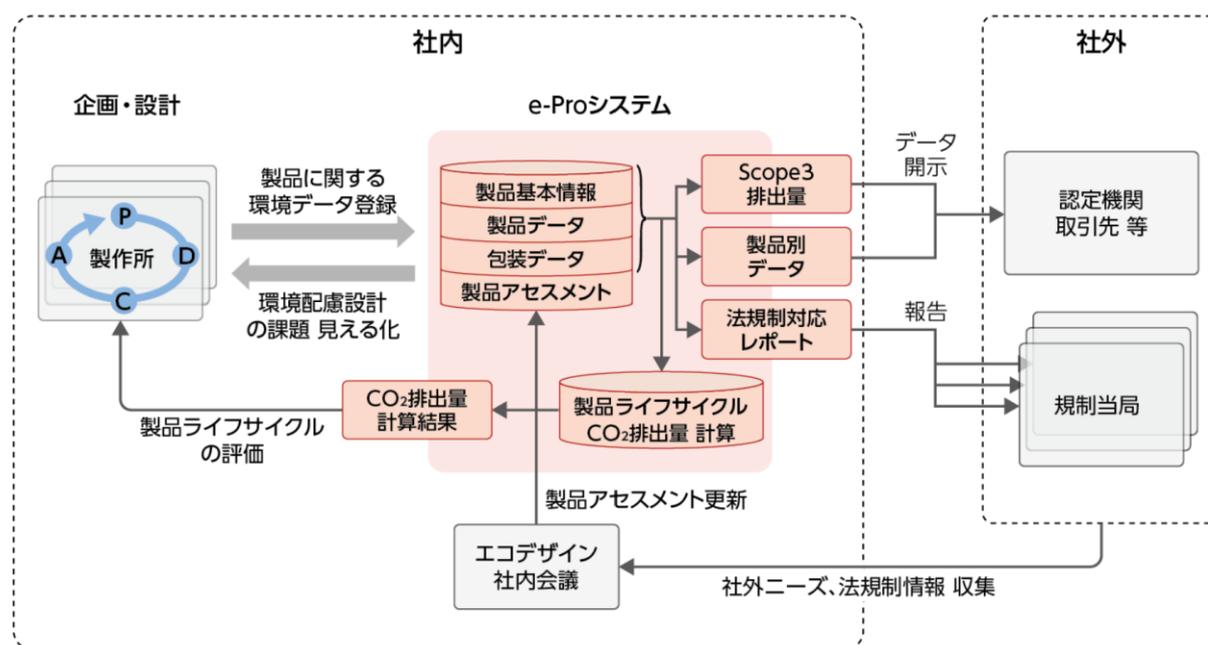


図 5.2.4.3 三菱電機の環境負荷データ管理システム「e-Pro」の概要

2.4.4 モータを対象としたライフサイクルと CO₂ 評価⁽¹¹⁾

2025 年電気学会全国大会シンポジウム「モータの Life Cycle における CO₂ の評価」に基づき、モータおよびその周辺材料に関するリサイクル・リユースの現状が報告された。

国内では JAMA（日本自動車工業会）が LCA ガイドラインを改定し、素材製造段階を上工程・下工程に分けた基準原単位の設定、従来の重量ベースに加えエネルギーベースの算定導入、廃棄・リサイクル段階の控除を CFP（カーボンフットプリント）で評価する方針を示しており、国際調和を視野に高度化している。これらの動向は、モータを含む電動化製品に対して、設計・調達・製造・回収の各プロセスで定量根拠に基づく改善と開示を同時に進めることを強く促すものである。

材料別の CO₂ 原単位を見ると、実務上のインパクトが大きい論点が明瞭である。電磁鋼板については、鋼 1 トン当たり約 2.3 トン CO₂ という平均値が示され、その約 8 割が高炉による製鉄工程に由来する。すなわち、電炉比率の拡大や将来の水素製鉄の進展が、モータ鉄心の製造段階 CFP を左右する。工程別エネルギーバランスのデータは、還元プロセスの支配性を裏付けている。銅・マグネットワイヤでは、ワイヤ 1 kg あたり約 3.10 kg-CO₂ の代表値が示され、電気鋼からワイヤロッドに至る前段工程の寄与が大きい。巻線はモータ材料インベントリで占有率が高く、巻線材の選択と歩留まり、被覆・焼付等のプロ

セス効率化が製造段階の削減余地になる。アルミニウムでは国内で用いられる新地金は約 12 kg-CO₂/kg で、その 8 割が電解精錬、すなわち電力起因で占められる。一方、グリーンアルミは約 4kg-CO₂/kg、再生地金は約 0.4 kg-CO₂/kg と、新地金比で 97%の削減効果が示されており、再生材・低炭素電力由来材の指定がモータ筐体等の材料調達における最も実効的な対策となる。ただし、国内資源循環の仕組み不足とスクラップの海外流出が課題として顕在化しており、サーキュラーな供給網設計が不可欠である。希土類永久磁石は、現状の想定値として約 40 kg-CO₂/kg が用いられている。精錬工程の案分手法や製品形状による加工歩留まりの違いが算定結果を大きく左右することから、標準化が進められている。磁石はモータ製造段階のインパクトドライバであり、解体・回収・再利用を視野に入れた設計とサプライチェーン上のトレーサビリティが鍵となる。

用途別の LCA 知見として、産業用 2.2 kW クラスモータでは、使用段階の CO₂ 排出が全体の九割台後半を占め、効率が最も高い PMSM（永久磁石モータ）がライフサイクル排出の最小となる。評価式はモータ出力、効率、使用時間、電力係数に基づく形で示され、我が国の CO₂/kWh 係数 0.40~0.42 を用いた場合、PMSM が最小、IM（誘導電動機）が最大となる。

日本における kWh 当たりの CO₂ 排出係数が 2020 年度比で約 45%低減するシナリオが提示されており、電源の脱炭素化は使用段階の支配性を弱め、製造段階や材料選択の相対重要度を押し上げる可能性がある。したがって、将来係数をパラメータとした最適設計、すなわち効率・材料 CO₂・リサイクル容易性の三者を同時最適化する設計論が必要である。

空調分野の事例では、圧縮機用 IPMSM とファン用モータを対象に、材料インベントリから製造時の CO₂ を算出する枠組みが示されている。室外機・室内機の構成や機種ごとのモータ形式が整理され、現実のシステム構成に即して材料別寄与を評価しており、設計・機種選定段階での CFP 見積りを具体化するベースになる。

以上より、パワーエレクトロニクス分野のリサイクル・リユース推進は、短期には「材料指定と調達」の最適化が効果的である。具体的には、アルミニウムについて再生地金・グリーンアルミの採用を標準に位置付け、部品管理に材料 CO₂ 原単位を明示して設計段階での管理を徹底すること、電磁鋼板は高炉材から電炉材への切替や将来の水素製鉄動向を想定した代替性評価を行うことが挙げられる。永久磁石は標準化の確立途上にあり、解体・回収を前提とした構造とプロセスの開発、ならびにトレーサブルなデータ管理が、製造段階の不確実性低減と資源循環の両面で決定的に重要になる。

中長期には、規制・市場の要請に耐えるデータ連携の仕組み、すなわち CFP プラットフォームを設計・調達・製造・回収の業務フローに統合し、上工程・下工程別の原単位、エネルギーベース算定、CFP による控除評価を一貫管理する体制が求められる。これにより、個別機種・市場ごとに電力係数の将来値を織り込んだ設計手法（効率×材料 CO₂×リサイクル性）を提示し、政策側の CO₂ 係数低減と企業側の設計最適化を連成させることが可能になる。モータ分野のリサイクル・リユースは、使用段階の CO₂ 排出が支配的でありながらも、材料選択と設計変更で製造段階の削減を着実に積み上げる局面にある。効率向上による使用段階の削減と、アルミ再生材・低炭素材の調達、磁石の標準化・回収前提設計の三本柱である。今後、電力の脱炭素化が進むほど製造段階の比重は増すため、CFP の高解像度化とデータ連携、ならびに解体・回収容易性を織り込んだ設計指針の具体化が、パワーエレクトロニクス産業全体のカーボンニュートラル実現に直結する。

2.4.5 考察と今後の課題

以上のように、多くの企業では LCA 手法や環境データ活用によって製品設計・製造・サービスを見直し、脱炭素・循環型のビジネスモデルへの転換を図っている。Infineon は自社デバイスの製造段階に焦点を当てつつ、デバイス活用先での循環性向上にも踏み込んでいる。ABB や Siemens は、幅広い製品ポートフォリオ全体にエコデザインを組み込み、LCA に基づく環境情報を顧客に提供することで市場のグリーン化をリードしている。三菱電機も、産業界全体で「環境負荷の見える化」と「設計・サプライチェーンへの統合」が進んでいる点が共通している。

近年の研究および企業実践から、パワーエレクトロニクス分野における LCA 活用は新たな段階に入ったと言える。すなわち、単なる環境負荷の事後評価ではなく、設計目標の一つとして環境負荷低減を位置付けるパラダイムへの転換である。この動向は「Energy Efficiency is Not Enough!」の指摘に象徴されている⁽²⁾。エネルギー変換効率の向上余地が小さくなりつつある現在、次なる性能指標として製品の環境負荷（例：単位出力あたりの CO₂排出や資源消費）がクローズアップされている⁽¹⁾。研究の場では多目的最適化に環境負荷を組み入れることで、新しいトレードオフの発見や設計解の探索が進んでいる。一方、企業の現場では LCA データに基づく製品開発や環境情報開示が競争力やコンプライアンス上も重要となっている⁽⁶⁾⁽⁹⁾。しかし、このような潮流をさらに前進させるには克服すべき課題も多く残されている。

第一に挙げられるのがデータの信頼性と標準化である。設計段階で迅速かつ正確な LCA を行うには、部品材料や製造プロセスに関する環境負荷データが必要だが、現在利用可能なデータにはソース間でばらつきがあり比較困難な場合がある。このため、研究者からは LCA 手法やデータベースの標準化、ならびにサプライヤーによる環境データ提供（例えば「スマートデータシート」への環境負荷の項目追加）の重要性が提言されている⁽²⁾⁽⁶⁾。業界横断的な協調により、信頼性の高いデータベースを構築していくことが今後の基盤となりえるだろう。

第二に、製品ライフサイクル全体を見据えた設計判断におけるトレードオフへの対処が重要である。高効率化や高性能化を

追求すると部品点数や複雑さが増し、結果的に製造・廃棄段階の負荷や修理困難性が增大するというジレンマがある。例えば、電力変換器の高集積・小型化は動作時のメリットが大きい反面、分解修理やリサイクルは難しくなる。このため、長寿命化・モジュール化と性能最適化との折り合いをどう付けるかが課題となる。将来的には、「リユース・リペアを前提にした設計」や「製品寿命延長のための予知保全技術」の重要性が増加し、信頼性工学や保全技術との統合も含めた包括的な検討が必要である。また、使用後段階では有害廃棄物の低減や希少資源の回収も考慮すべきであり、これらは従来の電力変換回路設計とは異なる学際的課題となる。

第三に、設計支援ツールや意思決定プロセスの整備も課題として挙げられる。マルチドメイン最適化で多数の設計候補を評価するには計算負荷が大きく、結果の解釈も複雑になる。近年は AI 技術の応用や設計自動化が進展しており、大規模なデータベースから有望解を見出す手法が登場している⁽²⁾。将来の設計環境では、AI を組み込んだ最適化プラットフォーム上で電気的性能と環境負荷を同時に評価し、設計者がリアルタイムにトレードオフを可視化できるようになることが期待される。実際、Siemens 等が提供し始めた製品カーボンフットプリント計算ツールや、各種 CAD/CAE ソフトへの LCA モジュール統合など、デジタルエンジニアリングと LCA の融合が進みつつある⁽⁹⁾。

技術者が環境負荷低減を考慮した設計に取り組むためには、従来の電気工学知識に加えて LCA やサステナビリティに関する理解が求められる。製品開発部門だけでなく、調達・生産・サービス各部門が連携してライフサイクル視点で問題解決に当たる体制構築が、真に環境負荷の少ない製品実現には不可欠である⁽¹⁰⁾。

以上を踏まえると、パワーエレクトロニクス分野は次なる発展ステージとも言うべき局面に差し掛かっている。すなわち、半導体技術の進歩や革新的トポロジーによる性能向上に続き、環境負荷と循環経済対応を新たな競争軸とする段階である。この移行を成功させるためには、学界・産業界・標準化団体が協働してデータや知見を共有し、包括的最適化の手法と実践知を蓄積していくことが求められる。パワーエレクトロニクス技術が持つ本来の使命——すなわちエネルギーの有効活用と電力インフラの革新——を維持しつつ、その技術基盤自体が持続可能であるよう、今後も不断の改善とイノベーションが期待される。

[和田圭二]

文献

- (1) R. Singh, P. Paniyil and Z. Zhang: "Transformative Role of Power Electronics: In solving climate emergency", *IEEE Power Electronics Magazine*, Vol.9, No.2, pp.39-47, June. (2022)
- (2) J. Huber, L. Imperiali, D. Menzi, F. Musil, and J. W. Kolar: "Energy efficiency is not enough! Environmental impacts as new dimensions in multi-objective optimization of power electronic systems", *IEEE Power Electronics Magazine*, Vol. 11, No. 1, pp.18-31, Mar (2024)
- (3) L. Vauche, G. Guillemaud, J.-C. L. Barbosa, and L. Di Cioccio: "Cradle-to-gate life cycle assessment (LCA) of GaN power semiconductor device", *Sustainability*, Vol.16, No.2, Art. No.901, Jan. (2024)
- (4) M. Patra, Th. Cormenier, A. Louise, and P. Murlon: "European ecodesign material efficiency standardization supporting circular economy aspects of power drive systems for sustainability", in *Proc. EEMODS 2022 – Energy Efficiency in Motor Systems*, pp.473-494. Nov. (2024)
- (5) A. Berwald, G. Dimitrova, T. Feenstra, J. Onnekink, H. Peters, G. Vyncke, and K. Ragaert: "Design for circularity guidelines for the EEE sector", *Sustainability*, Vol.13, No.7, p.3923, Apr. (2021)
- (6) Infineon Technologies AG: "Company homepage", [Online]. https://www.infineon.com/about/company/sustainability/environmental-sustainability-and-climate-protection/circular-economy/Partnerships-for-a-more-circular-company_operations [Accessed: Jul. 20, 2025].
- (7) Sheryl Miles: "Infineon spearheads sustainable solutions in the circular economy", *Electronics Specifier*, Nov. 2023. [Online]. https://www.electronicsspecifier.com/industries/alternative-energy/infineon-spearheads-sustainable-solutions-in-the-circular-economy?utm_source=chatgpt.com [Accessed: Jul. 20, 2025].
- (8) ABB Ltd.: "From linear to circular: rethinking waste to save resources", [Online]. <https://global.abb/group/en/stories/sustainability/circular-economy>. [Accessed: Jul. 20, 2025].
- (9) Siemens AG: "Ecodesign: Scaling Impact, Shaping the World", White Paper, 2022 [Online]. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid/f7d929ad-971f-44df-ac51-7783cc28dac7/Ecodesign-WP.pdf>. [Accessed: Jul. 20, 2025].
- (10) 三菱電機: 「グリーン社会の実現に向けて (カーボンニュートラルとサーキュラーエコノミー施策)」三菱電機グローバルサイト 環境活動, [Online]. https://www.mitsubishielectric.co.jp/ja/sustainability/environment/greening/?utm_source=chatgpt.com [Accessed: Jul. 18, 2025].
- (11) 赤津颯, 深山義浩, 高橋朋平, 相曾浩平: 「モータの Life Cycle における CO₂ の評価 —総論: LCA 調査専門委員会活動内容—」2025 年電気学会全国大会 S18-1

2.5 レアマテリアル

キーワード: レアマテリアルの機能性, 高性能軟磁性材料, 世界市場動向

2.5.1 はじめに

レアマテリアルは、磁気素子を構成する軟磁性材料の基本特性を向上させる上で極めて重要な役割を担っている。代表的なレアマテリアルとしては、主にホウ素 (B), ニオブ (Nb), コバルト (Co), バナジウム (V), ジルコニウム (Zr), モリブデン (Mo) が挙げられる。これらのレアマテリアルを軟磁性材料に添加することによって、機械特性、磁気特性や熱処理時

の構造の安定性や組織制御が著しく向上する。その結果、パワーエレクトロニクスに不可欠な、高効率で小型、かつ熱安定性の高い磁気素子の開発が可能となる。また、電動化、小型化、持続可能性に対する世界的需要の高まりにともない、レアメテリアルを含むサプライチェーンの問題は、持続可能性や先端材料のさらなる可能性に対する重要な課題となりつつある。

この項では、磁気素子を構成する軟磁性材料に添加されるレアメテリアルとその機能性、世界市場動向、および課題について記述する。

2.5.2 レアメテリアルとその機能性

高飽和磁束密度、低保磁力、熱安定性、耐食性といった基本特性を有する新たな軟磁性材料を開発するためには、レアメテリアルの添加が極めて重要である。表 5.2.5.1 に代表的なレアメテリアルの添加先、機能性と添加後の合金をまとめた⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

ホウ素 (B) に関しては、Fe 基合金や Co 基合金をアモルファス化する上で重要な元素である。B を添加することによってアモルファス化し、結晶磁気異方性を低下させることによって保磁力を低減でき、その軟磁気特性を改善できる。主に Fe-B, Fe-B-Si や Fe-Co-B などの合金に用いられ、それらの結晶粒を微細化でき、幅広い周波数帯で安定した高周波磁気特性を得られる。ニオブ (Nb) は、Fe-Si-B-Nb-Cu に代表されるナノ結晶合金材料に不可欠な元素である。この元素は、熱処理中に超微細構造を安定化させ、材料自体のロバスト性と耐環境性を著しく向上できる。コバルト (Co) は、Fe と組み合わせることによって飽和磁束密度を著しく向上させることができる元素である。なお、銅 (Cu) は、レアメテリアルではないが、Nb と同様にナノ結晶化する上で重要な元素であり、合金の熱処理過程でナノ結晶化を制御する役割を担っている。バナジウム (V) は、飽和密度の高い Fe-Co 合金への添加元素として用いられている。この元素を添加することにより、相安定性および耐熱性を向上できる。ジルコニウム (Zr) は、主にアモルファス金属の一種である金属ガラスに使用される元素である。この元素を用いると、耐酸化性に優れ、かつ軟磁気特性を向上できる。また、モリブデン (Mo) は、Fe-Ni 合金に添加すると、保磁力の低下と電気抵抗率の上昇によって渦電流損失を低減できる元素である。なお、巻線材料 (Cu) についても高周波化で磁気素子を小型化することで線材を減らす研究開発が活発化している⁽⁶⁾。

これらの元素を Fe 基合金や Co 基合金と組み合わせることで、軟磁気特性と高周波磁気特性を調整することが可能である。

表 5.2.5.1 代表的なレアメテリアルの添加先、機能性および添加後の主な合金

レアメテリアル	添加先	機能性	添加後に形成される主な合金
ホウ素(B)	アモルファス合金材料 ナノ結晶合金材料	結晶粒の微細化 (アモルファス相の促進)	Fe-B, Fe-Si-B, Fe-Co-B, Fe-Ni-Si-B
ニオブ(Nb)	ナノ結晶合金材料	熱安定性および 耐食性の向上	Fe-Si-B-Nb-Cu(e.g, FINEMET®), Fe-Si-B-Nb
コバルト(Co)	高機能合金材料	飽和磁束密度の向上	Fe-Co, Fe-Co-V
銅(Cu)	ナノ結晶合金材料	結晶粒の核生成	Fe-Si-B-Nb-Cu, Fe-Si-B-P-Cu, Fe-Si-B-P-Cr-Cu
バナジウム(V)	アモルファス合金材料	軟磁気特性の向上・安定性、 損失の改善	Fe-Co-V
ジルコニウム(Zr)	アモルファス合金材料	結晶粒の形成、 軟磁気特性の改善、 耐食性(酸化抑制)	Zr-based bulk metallic glass
モリブデン(Mo)	ナノ結晶合金材料	低保磁力化、 電気抵抗率の上昇	Fe-Ni-Mo

2.5.3 レアメテリアルの世界市場動向

軟磁性材料に用いられるレアメテリアルの市場は、電力変換効率の高い電子デバイス、再生可能エネルギー、EV 等へのこれらの材料の採用が加速する中で急速に拡大している。それぞれのレアメテリアルは特有の優れた特性を有することから、機能的需要と戦略的供給の制約によって図 5.2.5.1 に示すように個々の市場が形成されている⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾。

ホウ素 (B) に関しては、市場規模は 6000 万米ドルと小さいが、アモルファス材料における重要な元素であり、EV や航空宇宙といったモビリティ分野での軽量・高密度磁気素子の需要拡大にともなって、2030 年には 1 億米ドル規模へ成長する可能

性がある。ニオブ（Nb）に関しては、FINEMET®などに用いられており、EVおよび産業自動化の成長によって、その市場規模は2024年時点での29億米ドルから2030年には40億米ドルに達する見込みである。コバルト（Co）に関しては、Fe-Co合金における飽和磁束密度の向上に不可欠な元素であり、その市場規模は2030年には2024年（122億米ドル）と比較して約1.5倍程度に膨らみ、197億米ドルへ成長することが予測される。なお、銅（Cu）は、ナノ結晶合金材料からなる磁心のみならず電気全体のバリューチェーンとして幅広い用途で利用される。したがって、市場規模としては最も大きく、2024年時点で約2400億米ドルであり、世界規模での電動化の進展にとともに今後も拡大が見込まれ、2030年には3400億米ドル規模へ成長することが予測される。バナジウム（V）に関しては、高性能センサやアクチュエータの需要にとともに、その市場規模は2024年時点で34億米ドル、2030年には45億米ドルを超える規模へ成長することが予測されている。ジルコニウム（Zr）に関しては、耐酸性を有するバルク金属ガラスの重要な元素であり、その市場規模は2024年時点で18億米ドル、2030年には27億米ドルへ成長することが予測される。モリブデン（Mo）に関しては、Fe-Ni-Mo系における高周波損失（鉄損）の低減に寄与することから、その市場規模は2024年時点で47億米ドルであるのに対して、2030年には61億米ドルまで成長が期待されている。

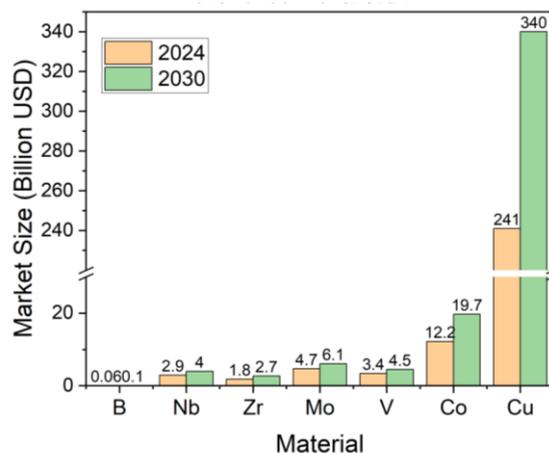


図 5.2.5.1 レア金属の市場規模

また、図 5.2.5.2 に示すように、アジア太平洋地域が世界全体の約 50% を占めている⁽¹²⁾⁻⁽¹⁵⁾。この地域の優位性は、中国、日本、韓国に大規模な電子機器と EV の製造拠点があることに起因する。北米と欧州がアジア太平洋地域に続き、それぞれ市場シェアの約 20% を占めている。これらの地域では、航空宇宙、再生可能エネルギー、産業用電力システムにおける最先端の研究開発とそれらの応用に注力していることによる。また、その他の地域は残りの 10% を占めており、地域ごとの電動化イニシアチブによって将来的に成長する可能性がある。

レア金属における市場の展望は、技術的な進展とサプライチェーンへの配慮との融合により形成されている。レア金属の調達に関連する地政学的な問題意識の高まりが、環境や規制強化と絡み合っ、代替サプライチェーンの開拓や、リサイクルと持続可能な調達技術への投資の戦略的重要性を浮き彫りにしている。また、レア金属を添加して優れた基本特性を有する軟磁性材料の創製が、小型かつ高効率な電力変換システムを世界的に推進していく上で重要な違いを生み出せることを示唆している。

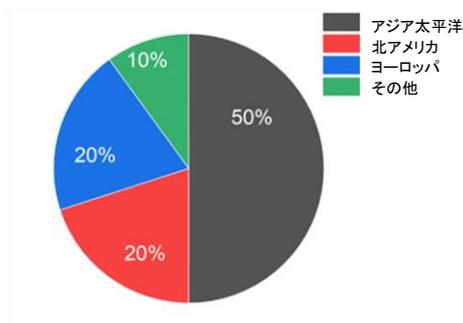


図 5.2.5.2 レア金属の地域別消費率(2024)

この競争環境は、レア金属に対する現在進行中の研究開発投資、戦略的な調達、世界的な需要の増加に対応するための生産能力拡大によって定義される (表 5.2.5.2)。

表 5.2.5.2 レア金属に関係する主な企業と事業

企業 (国名)	事業
プロテリアル (日本)	EVや産業システムで利用されるFINEMET®ナノ結晶磁心を提供
VACUUMSCHMELZE (VAC) (ドイツ)	優れた高周波応答を有するVITROPERM材料を提供
TDKエレクトロニクス (独/日)	フェライト磁心とパワーエレ用先端材料を世界中に提供
Metgras Inc. (米国)	配電変圧器やEMI対策に利用されるアモルファス磁性合金に注力
Advanced Technology & Materials Co., Ltd. (AT & M) (中国)	ナノ結晶薄膜と磁心の製造を急速に拡大

2.5.4 課題と今後の方向性

レアマテリアルを利用することによっていくつかの課題がある。一つ目としては、一部のレアマテリアルが高価格で入手しにくいことである。これによって拡張性が制限され、最終的な製品の価格が上昇することが起こりうる。二つ目としては、レアマテリアルを軟磁性材料に添加することによって、材料作製工程において急冷や熱処理などの複雑な技術が必要となり、材料の大量生産が困難となりうることである。また、三つ目としては、レアマテリアルの採掘と廃棄に関連する環境問題が、規制と持続可能性に対する課題である。

その一方で、今後の方向性としては、レアマテリアルにおけるリサイクル技術の開発と持続可能な元素の調達戦略に取り組んでいる段階である。また、わずかな資源への依存度を低減するために、対価格効率のよい非金属と少量の高性能なレアマテリアルを組み合わせた複合系軟磁性材料の研究開発が進められている。 [グエンマイフォン, 岡本聡, 遠藤恭]

文献

- (1) Giseller Herzer : “Nanocrystalline soft magnetic materials”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.157–158, pp.133–136, DOI: 10.1016/0304-8853(95)01126-9 (1996)
- (2) Y. Yoshizawa, S. Oguma and K. Yamauchi : “New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure”, Journal of Applied Physics, Vol.64, pp.6044–6046, DOI: 10.1063/1.342149 (1988)
- (3) Y. Yoshizawa, : “Nanocrystalline Soft Magnetic Materials and Their Applications”, In: Liu, Y., Sellmyer, D.J., Shindo, D. (eds) Handbook of Advanced Magnetic Materials. Springer, Boston, MA. DOI: 10.1007/1-4020-7984-2_35 (2006)
- (4) R. Skomski and J.M.D. Coey : “Permanent Magnetism”, Taylor & Francis, DOI: 10.1201/9780203743829 (1999)
- (5) Tadeusz Kulik : “The influence of copper, niobium and tantalum additions on the crystallization of FeSiB-based glasses”, Materials Science and Engineering: A, Vol.159, pp.95-101, DOI: 10.1016/0921-5093(92)90402-M (1992)
- (6) J. W. Kolar, J. Huber, L. Imperiali and U. Drofenik : “Are We Falling Off the « Net Energy Cliff » and Running Out of Critical Raw Materials?”, Keynote Presentation at the 9th IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC 2024), Brisbane, Australia, December 5, (2024)
- (7) Nanocrystalline Soft Magnetic Materials Market – Global Industry Analysis and Forecast 2024 to 2034, Fact.MR, 2024. Nanocrystalline Soft Magnetic Material Market Size | 2033
- (8) Zirconium-Based Amorphous Alloys Market Outlook and Forecast, QY Research 2024. Zirconium-Based Amorphous Alloy - Global Market Share and Ranking, Overall Sales and Demand Forecast 2024-2030 - QYResearch
- (9) Cobalt and Molybdenum Market Data, Statista, 2024. <https://www.statista.com>
- (10) Copper Market Size, Share & Trends Analysis Report by Application (Electrical & Electronics, Construction), and Segment Forecasts, 2024–2030, Grand View Research, 2024
- (11) Hitachi Metals. FINEMET® Nanocrystalline Soft Magnetic Material. <https://www.hitachi-metals.co.jp>
- (12) VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG. (n.d.). VITROPERM® Technical Datasheets. Nanocrystalline Material - VITROPERM | VAC
- (13) Metglas Inc. Amorphous Metal Cores for Transformers and Power Applications. Learn about Magnetic Materials from Metglas®, Inc.
- (14) TDK Corporation. Ferrite Cores and Soft Magnetic Components Catalog. <https://product.tdk.com>

3 節 まとめで代えて

3.1 回路システム領域と受動素子領域との協調

キーワード：高速半導体パワーデバイス, 受動素子, 損失, モデリング, データ科学, 統合的アプローチ

以上本ロードマップを通して説明したように、パワーエレクトロニクス装置の高電力密度化に向けて、GaNをはじめとする高速半導体パワーデバイスの研究開発が進展し、高周波スイッチングによる磁気素子やコンデンサなどの受動素子の小型・高効率化が期待されている。しかし実際には、受動素子の発熱や小型化の限界などのボトルネックが明らかになりつつあるため、回路システムと材料・素子開発の統合的アプローチが求められている。

そこで本節では、これまでの各章で論じてきた内容を踏まえつつ、磁気素子やコンデンサに関する材料・素子技術の課題に加え、損失発生機構の理解、計測・観察・モデリングの高度化、さらにはデータ科学や AI/ML を取り入れた設計手法など、受動素子と材料をめぐる多面的な論点を改めて取り上げ、その技術的到達点と残された課題を整理する。この過程で、材料物性が素子性能としてどのように現れ、それが回路システムの要求とどのようにつながるのかを、材料側と回路側が共有すべき視点として位置づけて、本ロードマップのまとめに代える。本ロードマップを契機とした国際ロードマップへの展開についても簡潔に触れる。

3.2 磁気素子における発展的課題

キーワード：高周波変圧器，低 B_s ・低損失材料，周波数-体積スケーリング，圧粉磁心，透磁率チューニング

3.2.1 変圧器とその材料

高電力密度化を実現するためには、伝統的に高飽和磁束密度 (B_s) と低損失を両立する材料の創出が求められ、18 μm 厚 Co-Pd 置換 FINOMET 組成ナノ結晶合金異方性薄帯リボンや、熱処理の高度化によるナノメット系垂直磁気異方性薄帯材料などが INNOPEL により創出された⁽¹⁾。今後の主要な課題は、Co や Nb など稀少元素の安定供給と、高い加工性・脆化抑制技術の確立などである。高周波変圧器用材料については、次の 3.2.2 を参照して頂きたい。

電磁鋼板は日本の強い技術であり、世界最高水準の高級鋼の生産に特化し、方向性および無方向性とも高い付加価値を生み出している。最近では、環境負荷の低減を志向して例えば水素還元製鉄等への取り組みが進んでいる。

フェライト材料は日本で発明され世界に普及した安価で形状設計の自由度が高い実用材料であり、今後もパワエレの主力材料となる。高速パワーデバイスの普及に対応して、高周波帯における損失発生機構を解明し、さらに低損失化を図ることが不可欠である。特に、磁区構造の視点から損失メカニズムを解明する取り組みが重要である。

なお、一般に渦電流損失は板厚の 2 乗に反比例するため、板厚 10 μm 以下まで薄い合金薄帯では、高周波帯における渦電流損失が小さい利点がある。しかし材料系に依らず、低占積率のため磁心としての飽和磁束密度は低く、また磁心成型上のハンドリングが困難かつ形状自由度が低いいため、パワエレ用途は限定的である。

3.2.2 高周波変圧器用低 B_s ・低損失材料への期待

数 10 kHz 以上で動作する高周波変圧器では、磁性材料の要件として飽和磁束密度が高いことよりも低損失であることが求められることが多い⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。これは温度上昇を規格内に収め、体積と効率を目的に合わせてバランスさせるための上位要件である。しかしながら材料開発者にとってこの要件は、「どの程度の高周波帯で低磁束密度材料が有用なのか」が見通しにくく、材料開発の基本指針や市場規模の予測が立ちにくい。このため、従来の開発指針である高 B_s ・高 μ ・低損失の同時追求から脱却できず、高周波変圧器に適した低 B_s ・低損失材料の研究はほとんど行われていない。今後 GaN などの高速スイッチングデバイスに対応した高周波変圧器の需要が拡大すると見込まれることから、回路側と材料側の連携をいっそう強化し、低 B_s ・低損失材料の開発が望まれる。

その際、磁気素子の体積 V と周波数 f との関係を一般化できるとよい指標になるが、実機ではあまり一般化できない。これは、損失や温度上昇の許容値、冷却条件とその許容体積などが機器毎に異なるためである。参考のために周波数-体積スケーリングに関する粗い数値を挙げれば、まず周波数 f に対して動作磁束密度 B_m を一定とし、かつ一切の損失を無視すれば、ファラデーの電磁誘導則によって磁心断面積 A_c を周波数に反比例させてよい ($A_c \propto f^{-1}$) から、 $V \propto A_c \propto f^{-1}$ (周波数の -1 乗) となる。この関係は電磁気学の基礎に基づく理想的で分かりやすい関係であるが、実機に適用するには程遠い。次に、磁心断面積 A_c と磁心窓面積 A_w の積を表すエアプロダクト $A_p = A_c \cdot A_w$ と磁心体積 V との間には、1970 年代から $V \propto A_p^{3/4}$ という関係が知られている⁽⁶⁾⁽⁷⁾ から、これと前文で述べた磁心断面積 $A_c \propto f^{-1}$ を組み合わせると、 $V \propto f^{-3/4}$ (周波数の -0.75 乗) が得られる。この関係が確からしいのは数 kHz までと指摘されている⁽⁸⁾。最後に、多数の実機に関する統計的報告が 2007 年にあり、「電力密度は 1970 年以降おおむね 10 年で 2 倍」と「その間にスイッチング周波数は 10 倍」と述べられている⁽⁹⁾。この 2 つの要因を単純に組み合わせると、 $V \propto f^{-0.3}$ (周波数の -0.3 乗) となる。以上の 3 例は、いずれも高周波化により磁気素子を小型化できることを示しているが、得られる指数が -0.3 から -1.0 まで大きく振れることから分かるように、周波数と体積の関係は用途や前提条件に強く依存する。このことが、低 B_s ・低損失材料の開発にあたり、回路側と材料側の連携が強く望まれる理由である。

3.2.3 インダクタとその材料

INNOPEL では鉄基ナノ結晶材料の板状粉末及び偏平粉末を用いた圧粉磁心、熱間成型等による高密度充填を実現したナノメット系圧粉磁心が開発された。これらの圧粉磁心では、粒子径のバラツキと材料の磁気特性、デバイス特性の関係等を明らかにして、量産化への課題抽出とその解決を目指す必要がある。

また一般に圧粉磁心では、磁性粒子間の隙間をサブミクロンサイズの磁性微粒子で埋めると高飽和磁束密度と低損失化を促進できる。材料の組み合わせ、サブミクロン磁性微粒子の工業的生産法、均一分散法の構築などが課題である。圧粉磁心における透磁率チューニングについては、次の 3.2.4 を参照して頂きたい。

一方 INNOPEL ではバルク α 窒化鉄系材料が試作され、初めて磁心として鉄損計測が可能となった。今後も引き続き、結晶磁気異方性を零とするブレイクスルーを大胆に探索し、究極の高飽和磁化磁性材料として将来のパワエレ用磁性材料の可能性を探求する必要がある。
[山口正洋]

3.2.4 圧粉磁心における透磁率チューニング

パワーエレクトロニクス用途のインダクタにおいて、圧粉磁心は低損失特性、電磁特性の等方性、および複雑な三次元形状成型への自由度から、広く利用されている。その透磁率を所望の値に制御（チューニング）できれば非常に有用であり、その精度が最終製品の性能と信頼性を直接左右する。透磁率チューニング技術の指針は、まず磁性粒子の体積充填率（密度）の制御であり、古くから磁性粒子と絶縁層が均質であると仮定した Ollendorff の公式が知られている⁽¹⁰⁾。

$$\bar{\mu}_r = 1 + \frac{\eta(\mu_r - 1)}{1 + N(1 - \eta)(\mu_r - 1)} \quad (5.3.2.1)$$

ただし、 $\bar{\mu}_r$ は圧粉磁心の平均比透磁率、 η は磁性粒子の体積充填率、 μ_r は磁性粒子の比透磁率、 N は反磁界係数である。

最近では、圧粉磁心が高い成型圧で圧縮されると、粒子間の絶縁層が局所的に破れ、粒子同士が磁氣的（非接触の静磁氣的結合）または電氣的に接触し、このうち磁氣的接触により反磁界係数 N が減少して、圧粉磁心の平均比透磁率を著しく増加させることが見出されている⁽¹¹⁾。これを図 5.3.2.1 に示す。図中、一般的な圧粉磁心における体積充填率は 0.8~0.9 の範囲にあり、この範囲では、僅かな体積充填率の変化で透磁率が大きく変化することが重要である。圧粉磁心の飽和磁束密度は体積充填率にはほぼ比例するため、飽和磁束密度をほぼ一定に保ったまま透磁率を制御できる特徴がある。Fe-Si-Al 材料や Fe-Si 材料⁽¹²⁾では、低透磁率範囲で透磁率をチューニングした磁心がラインナップして市販されている。

INNOPEL では、Fe 基ナノ結晶圧粉磁心について密度の変化率 8%に対して、透磁率の変化率は 34%を実現している。また図 5.3.2.2 に示したように、Fe-Si-Al（センダスト）圧粉磁心について、比透磁率を 60.6~94.5 の範囲でチューニングすることも実証している。この場合は、密度の変化率 6%に対して、透磁率の変化率は 36%まで広範囲である。本技術は、市販の高密度圧粉磁心の製造工程において成型圧力を下げること基本とする技術のため、磁性粒子や粒界の損傷がなく、磁性粒子間の絶縁を良好に保つことができ、渦電流損失の増加もないため、高周波帯向けインダクタとして有用と思われる。

今後は、磁氣的接触により透磁率を高めることにより、さらに広範囲な透磁率のチューニングを可能とすることが考えられる。ただし、磁氣的接触だけでなく電氣的接触も発生すると、特に高周波域で粒子間に過剰な渦電流損失が発生し、圧粉磁心の最大の利点である低損失性を損なう可能性がある。したがって、「狙った透磁率を達成しつつ、渦電流損失を許容範囲に抑制する」という二律背反の条件を同時に満たす材料・プロセス設計が重要な課題となる。

[國枝良太, グェン マイ フォン, 吉田栄吉]

3.2.5 磁性体の損失発生機構の解明

損失要因のより詳細な解明に向けた研究が進展し、INNOPEL では、イタリア国立計量標準研究所 (INRiM) の知見に立脚して、多くのパワエレ実用材料について損失が磁化回転（可逆）および磁壁移動（不可逆）の磁化反転成分に分離できることを明らかにし、パワエレ帯域では 100kHz 以上の高周波まで磁壁移動成分の寄与が大きいことが判明した。

この磁壁移動に関わる損失として、今後は磁歪起因損失を明らかにし、その知見に立脚して新しい低損失パワエレ用磁気素

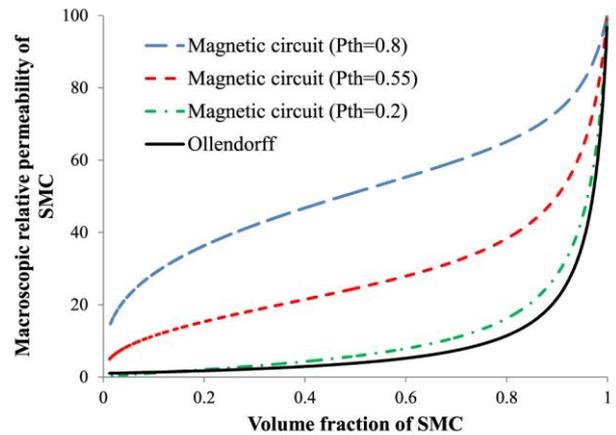


図 5.3.2.1 圧粉磁心における磁性粒子の体積充填率と平均比透磁率の関係⁽¹¹⁾

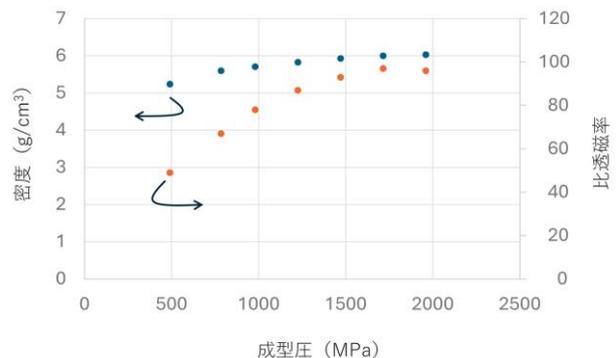


図 5.3.2.2 圧粉密度と比透磁率の成型圧力依存性

子を開発したい。

3.2.6 計測・観察・モデリング

鉄損計測では、材料が低損失になるほど計測が困難となるジレンマがあったが、小電力であればパワエレ素子開発上十分な精度が得られるようになった。今後は 10 kW 以上の大電力計測と高周波化、および PWM 等の実動作に対応した計測法の開発が課題であり、さらにロスマップの構築や機械学習の教師データ取得のため、大量の鉄損データ等を効率的に計測してデータベース化し利活用する方法の構築も必要である。

磁区観察法では、時間分解ベクトル（3次元）磁区観察装置が開発され、MHz 以上に及ぶ広帯域で、感度と空間分解能が格段に向上した。前人未踏のフェライト材料の磁区観察にも成功している。今後、周波数や磁束密度に対する磁区挙動の変化を明らかにし、前項で述べた損失発生機構に関する知見との相乗効果により、長年未解明で残されている異常渦電流損失や残留損失の発生機構を解明し、低損失材料の新しい開発指針を構築できると期待される。

モデリングでは、物理的な素過程から回路モデルまで、それぞれが進展している。今後はそれらを繋ぎ合わせ、材料・素子開発からパワエレ回路とそのシステム実装法まで一貫したプラットフォームの構築を目指すとともに、パワエレ回路システムが望む受動素子の特性や材料の具備すべき条件を指標として提示する逆問題的アプローチへの貢献が期待される（4章 2.4 参照）。

文献

- (1) 文部科学省 革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業（INNOPEL），https://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/kankyouene/mext_00001.html（2025.12.4 閲覧）
- (2) Tomoyuki Ishimine, Asako Watanabe, Tomoyuki Ueno, Toru Maeda, Terukazu Tokuoka : “Edevelopment of low-iron-loss powder magnetic material for high-frequency Applications,” SEI Technical review, No.72, pp.117-123 (2011)
- (3) David J. Perreault : “Opportunities, Progress and Challenges in High-Frequency Power Conversion,” APEC2024 (2024), https://apec-conf.org/wp-content/uploads/2024/05/David-Perreault_-Opportunities-Progress-and-Challenges-in-High-Frequency-Power-Conversion.pdf (2025.12.4 閲覧)
- (4) 赤津観：「SST 用変圧器」，本ロードマップ 1 章 3.3 (2026)
- (5) 磯部高範：「磁性材料パラメータへの変換結果を用いた求められる材料特性の議論」，本ロードマップ 5 章 1.1.3 (2026)
- (6) Colonel W. T. McLyman : “Spacecraft Transformers and Inductor Design,” JPL Publication 77-35, Chapter II C, Reproduced by National Technical Information Service (1977)
- (7) 井淵貴章：「材料損失特性の優劣比較と磁気素子損失特性の優劣比較との違い」，本ロードマップ 1 章 1.5.2 (2026)
- (8) Johann W. Kolar, Jonas E. Huber : “Solid-State Transformers,” IPEMC2016/ECCE Asia Tutorial No. 9 (2016), https://www.ams-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/ECCE_Asia_2016_kolar_huber_Solid-State_Transformer_Tutorial_WEBSITE.pdf?utm_source=chatgpt.com (2025.12.4 閲覧)
- (9) Johann W. Kolar, Uwe Drofenik, Juergen Biela, Marcelo Heldwein, Hans Ertl, Thomas Friedli, Simon Round : “PWM Converter Power Density Barriers,” IEEE Trans. IA, Vol.128, No.4, pp.468-476 (2008)
- (10) F. Ollendorff : “Magnetostatik der massekerne,” Arch. Elektrotechnik, Vol.25, No.6, pp.436-447 (1931)
- (11) Yasuhisa Ito, Hajime Igarashi, Michiaki Suzuki, Yoshiki Iwasaki, Kenji Kawano : “Effect of Magnetic Contact on Macroscopic Permeability of Soft Magnetic Composite,” IEEE Transaction on Magnetics, Vol.52, No.3, 9400804, DOI: 10.1109/TMAG.2015.2489227 (2016)
- (12) 「金属系ダストコア」，マグプロスト社カタログ，<https://www.magprost.jp/product/#dust> (2025.12.3 閲覧)

3.3 コンデンサにおける発展的課題

キーワード：高耐圧化，高耐熱化，導電性高分子，薄膜化，常誘電体，DC バイアス特性，誘電率

3.3.1 電解コンデンサ

アルミ電解コンデンサは、大容量・安価という特長を有し、PWM インバータなどに広く利用されている。以前は低寿命で損失も大きいと指摘されたが、近年の技術開発により解消され、105°C 10,000 時間品や、車載向けの 135°C 品の製品化を実現している。また、機能性高分子とのハイブリッド化により 80 V までが製品化されており、アルミ電解コンデンサの電解液による温度特性が克服されて、DC-DC 電源の DC リンク（平滑）回路などに利用されている。

INNOPEL では、導電性高分子タイプ電解コンデンサについて、ESR が小さく高周波特性に優れる特長に加えて、高耐圧化・高耐熱化に取り組み、誘電体電極皮膜へのナノボイド分散層導入や、アルキル基導入 PEDOT:PSS 高分子開発により、450 V 150°C の積層型コンデンサの性能検証が進んでいる。今後は、EV 等への需要に応えるためさらに高耐圧化（1000 V）を推進する必要がある。

3.3.2 フィルムコンデンサ

車載用主機インバータの直流電源接続用 DC リンク回路、スナバ回路、数 10 Hz～数 kHz のフィルタ回路・共振回路に使用されている。特長としては、数 10 kHz 程度の周波数帯域でのインピーダンス特性が優れ、自己保安機能（セルフヒーリング）があり、可燃性の電解液を有しておらず、故障モードがオープンであるため安全性が高く、寿命も長いことが挙げられる。その一方で、温度特性が低いと指摘されることがあるが、近年の技術開発により 125°C 高耐熱品も製品化されている。直流用途のフィルムコンデンサには、誘電体としてポリプロピレンを使うことが主流であったが、10 年～20 年先を考えると薄膜化への限界が近づいている。今後は、素子内での空間電荷分布を均一化することで絶縁破壊箇所を減らすこと、耐熱性が高く、誘電率の高い新しい誘電材料の開発が必要である。

3.3.3 セラミックコンデンサ

数 kHz～数 10 MHz の共振回路、フライングキャパシタ、カップリング、デカップリングなどに使用されている。特長としては、小型、高信頼性（長寿命）、低 ESR である。DC を印加すると静電容量が減少する DC バイアス特性に課題があったが、誘電材料として従来の BaTiO₃ に加えて CaZrO₃ も製品化されて課題が解消されつつある。

INNOPEL では誘電率は低いが高温でも安定してかつ DC バイアス特性が良い常誘電体に着目し、異価数元素置換を施したルチル型 TiO₂ およびチタン石系酸化物を見出し、有望組成における積層セラミックコンデンサのプロトタイプ素子の作製と特性評価を実施中である。

情報端末の薄型化や高性能化、また電子機器や自動車等の高性能化の進展による使用員数の増加により、さらなる小型大容量化が求められているため、今後も大きな実効静電容量を実現するために、誘電体層の薄層化と高信頼性の実現を目指し、材料とプロセス技術の開発が必要である。

3.4 データ科学の利活用

キーワード： パワエレ AI、サロゲートモデル、非線形特性、統合最適化、大規模言語モデル、逆問題

最近急速に発展しているデータ科学の利活用について、今後は目的に応じた AI（パワエレ AI）と物理実装（素子や回路）とをセットで開発する指針が有効と思われる。従来の回路設計プロセスでは、要件定義からトポロジー選定、部品値の決定、熱設計、信頼性評価まで多岐にわたり、熟練設計者の経験に基づく試行錯誤が必要であったが、AI/ML の導入により自動化と設計サイクルの短縮が進んでいる。特に、計算コストの高い高精度回路シミュレーションや物理モデルに対してサロゲートモデルが有用であり⁽⁴⁾、例えば回路出力性能、および半導体素子の接合部の温度変動や年間劣化予測が高速で見積もられている。磁性部品の特性は電流電圧や周波数に対する非線形な依存性を持ち、従来の物理モデルでは十分な再現が困難であったため、受動素子の非線形特性の精密予測や、回路設計・材料開発間の統合を最適化し、逆問題の解決を実現する上で AI/ML は中心的な役割を担うと考えられる。

また、AI/ML はリアルタイム制御、故障予知、トポロジー選択や多目的最適化（効率・コスト・環境負荷の同時最適化）など、パワエレシステムのライフサイクル全般にわたり大きな潜在力を持ち、今後は大規模言語モデル（LLM）の活用もさらに進むであろう。

3.5 IEEE 連携国際技術ロードマップへの展開

キーワード： パワーエレクトロニクスのための磁気素子ロードマップ、IEEE Technology Roadmaps Committee

本ロードマップで繰り返し述べたように、最近日本では、INNOPEL がひとつの契機となってパワーエレクトロニクス機器をパワーデバイス、回路システムと受動素子・材料の協働によって統合的にまとめあげるといった新しい枠組みが形成されつつある。材料側と回路側が相互理解を深めながら研究開発を進めることにより、新材料・観測手法・モデリング・材料活用など多方面で新たな価値が生まれ、その成果は国内だけでなく国際的にも共有されつつある。

その一端として、INNOPEL が示した「材料と回路が協働して要求仕様と材料特性の関係を再定義する」という体系的アプローチが IEEE Magnetics Society (MagSoc) と IEEE Power Electronics Society (PELS) の双方から高い関心を集めており、両 Society はこれを国際ロードマップへ発展させる意義を認めている。一方、INNOPEL 受動素子技術ロードマップは学術的視点を中心に構成されており、世界各地固有の動向や産業界リンク、標準化動向などをスコープ外としている。MagSoc と PELS

は、これらの状況を踏まえてスコープを拡張し、IEEE が定義する International Technology Roadmap に見合うパワーエレクトロニクスのための磁気素子ロードマップを策定する方向で議論を進めている。主要アプリケーション（データセンター、EV、再エネシステムなど）が要求する磁気受動素子の仕様を回路側から明確化し、従来一般化され過ぎていた要求（高 B_s ・高 μ ・低損失の同時追求）の妥当性を再検討するという姿勢も、こうした体系化の一部として盛り込みたい意向である。

INNOPEL ロードマップから IEEE ロードマップへの展開は 2025 年 4 月に発案され、同年 8~9 月には MagSoc および PELS それぞれの Administrative Committee (AdCom) 会議で Intersociety 事業として（仮称）Magnetic Passive Components for Power Electronics を策定する方向性が承認された。両 Society および INNOPEL からリーダーチームのメンバーが推薦されており、今後の協議によってロードマップの方向性を固める方針が確認されている。2026 年 3 月頃までに IEEE Technology Roadmaps Committee へ正式申請を行い、承認後に両 Society の活動が正式に開始され、ロードマップ策定が本格化する見込みである。INNOPEL ロードマップの国際的影響は磁気素子にとどまらず、コンデンサおよびその材料、さらにはパワーデバイスの研究開発を含む幅広い領域へと展開し、パワーエレクトロニクス全体に新たな展望を開く契機となることが期待される。

[山口正洋]

受動素子技術ロードマップ Version 1

非公開版、2026年2月16日

編者 文部科学省革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業
受動素子技術ロードマップワーキンググループ

発行者 文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課 半導体エレクトロニクス推進室
(メールアドレス: kankyou@mext.go.jp 電話番号: 03-6734-4159)

※本書の無断転載・複製等を禁じます
