

電動化ソリューションを支える高機能材料

High Performance Material for Supporting Electrification Solutions

相馬 憲一 谷川 茂穂 馬上 伊三雄
Souma Kenichi Tanigawa Shigeho Moue Isao
菊池 英行 岩崎 富生
Kikuchi Hideyuki Iwasaki Tomio

1910年に日立製作所第1号製品となる5馬力モータが完成した。これが日立モータの第一歩である。絶縁技術も重要な課題となり、1912年から研究を開始し、1914年には電気絶縁ワニスが完成した。モータを中心に据えた構成材料自主開発の開始である。モータの原理自体は、ここ100年間変わっていない。しかし、材料やその利用技術、それを裏打ちする計算科学、精密計測技術などに支えられて大きく改善されてきた。今後もモータは、産業機械、自動車、家電をはじめとして幅広く利用され、地球温暖化対策に貢献する重要な部品であり続けるはずである。

1. はじめに

日立グループでは「持続可能な社会をめざして」地球温暖化の防止、資源の循環的な利用、生態系の保全に取り組んでいる。特に、地球温暖化の防止では、二酸化炭素排出量の少ないエネルギーインフラをつくることと、エネルギー消費の少ない製品をつくることを推進している。

日本の電力消費状況を経済産業省資源エネルギー庁の「電力需給の概要」などから概観すると、およそ年間9,990億kWh(2005年)である。その内訳を機器別に見ると約57%がモータであり、残りは照明が14%、ヒータが10%などとなり、モータ動力の消費低減が大きな課題である。また、石油資源の枯渇問題から、自動車分野ではハイブリッド自動車や電気自動車への展開が加速してきている。これらの背景から高効率モータへの需要が拡大しつつあり、その一つとしての永久磁石モータへの展開も急進している。

ここでは、モータの損失低減や環境負荷低減の観点から、主要構成材料として永久磁石、コア材料、電線、ワニスの課題と最新技術について述べる。

2. モータの主要構成材料における課題

永久磁石は、1917年に本多光太郎博士が「KS鋼」を発

明後、アルコニ磁石、バリウムフェライト磁石、マンガンアルミ磁石、サマリウムコバルト磁石などが日本、アメリカを中心に開発、工業化されてきた。その後、ネオジム焼結磁石(Nd-Fe-B)が1982年に日本で発明された。この磁石は他の磁石に比べて磁気エネルギーがはるかに強力で、小型高効率モータに適しており、自動車用モータでは必須の磁石である。一方で、この磁石材料の原料であるNd(ネオジム)や磁石の耐熱性能向上に必要なDy(ディスプロシウム)は中国やモンゴルなどに偏在していることから戦略材料になっており、価格の安定性や供給確保などが大きい課題である。

モータのコア材料には、電磁鋼板が使われる。電磁鋼板は磁力線を通しやすい物質であり、1900年に英国のR.A.ハドフィールドによって鉄にケイ素を加えることで損失を少なくできる鋼板として発明された。ここで言う損失とは鉄損と呼ばれ、磁化したときに磁気エネルギーにならず、主に熱になる損失である。省エネルギーには鉄損低減が必要であり、ケイ素の添加や薄鋼板化などの技術が進展してきた。また、これらの電磁鋼板に比べてさらに鉄損が小さく、透磁率が高いアモルファス金属材料の開発、実用化も進んできており、モータ用材料としても期待されている。

電線はいわゆるエナメル被覆線である。モータの小型化、高効率化により、耐熱性のあるエナメル線の開発が重要課題である。また、電線を巻く作業ではスロット溝にできるだけ多くの線を巻く、あるいは挿入することになり(これを高占積率化と呼ぶ)、このとき被覆が損傷してしまわないような被覆表面強度が要求される。さらに、モータ駆動に用いられる電気制御系から発生するサージ(短時間の高電圧パルス)による絶縁破壊対策への要求も厳しくなっている。そのため、アミドイミド材やエステルイミド材、

それらにナノシリカを加える検討が実用化してきている。

モータ用ワニスの主な役割は、スリット溝に巻いたり、挿入した電線どうしの摩擦や、電線とコア材料との摩擦により、絶縁用のエナメルが剥(はく)離することを防止することにある。これをワニスによるコイルの固着と呼ぶ。固着ワニスにはコイルの隙(すき)間への浸透性や接着力、耐熱性などが求められ、コイルから発生する熱を逃がしたり、水やダストからコイルを保護する重要な役割もある。

一方で、環境対応としてVOC (Volatile Organic Compounds:揮発性有機化合物)の低減が求められている。VOCは、光化学オキシダントの原因物質の一つであり、揮発性を有して大気中で気体となる有機化合物の総称である。通常、ワニスは薄め液などで粘度を下げて、モータ、ステータ、あるいはロータ対象全体を浸漬する工程、あるいは特定のスリット部への滴下工程を経て、その後乾燥硬化工程となる。この工程で、薄め液が気化してVOCが発生する。トルエン、スチレン、キシレンなどが含まれる。そのため、今後は薄め液を使わない無溶媒ワニスへの転換が必要である。省資源の考え方から、必要などころに必要な分量だけを適正に供給できる滴下法への移行も現在の潮流である。さらに、工程全体の省エネルギーのため、低温短時間硬化ワニスも望まれている。

ワニス作業はモータ製造では後段の工程になる。ここで、電線エナメルと固着ワニスの相性が課題になる。モータの小型化や巻線作業の短時間化などの要請で、エナメル線を巻きやすくするために、表面を滑りやすくする滑材がエナメル側に含有するようになってきている。この材料は、場合によっては固着ワニスをはじいたり、あるいは接着力を下げる新たな課題が生じてきた。実験的には、長期耐久性試験などで確認が必要になるが、量子力学とニュートン力学を駆使することで、銅線エナメルと固着ワニス間の接着力を計算科学で見積もる方法も検討されている。

3. 磁性材料

3.1 永久磁石

永久磁石は、モータ性能を決める重要な構成材料の一つである。永久磁石の特性(最大エネルギー積)向上の推移を図1に示す。この中で特に本質的に高エネルギー積であるNd-Fe-B焼結磁石の高保磁力化(高耐熱化)により、この磁石がモータ用途に適用可能となったことが、永久磁石モータの小型・高効率化に大きな寄与を果たしている。

Nd-Fe-B焼結磁石の高保磁力化(高耐熱化)は、従来DyやTb(テルビウム)などの材料自体の異方性磁界を向上させる重希土類元素を添加することによって実現されている。しかし、これら重希土類元素の持つ自発磁化は、

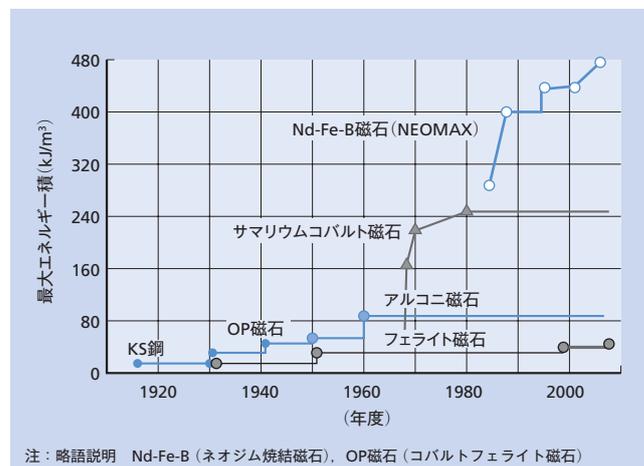


図1 | 永久磁石材料の特性推移

Nd-Fe-B焼結磁石の高性能化が、モータの小型化、高効率化に大きく寄与している。

$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 結晶格子中でFeの自発磁化と反平行に結合するため、耐熱性と最大エネルギーはトレードオフの関係にある。

Nd-Fe-B焼結磁石の特性を図2に示す。

日立金属株式会社は、さまざまな顧客要求に対応するために湿式プロセスに代表される種々の独自のプロセス技術を展開することにより、世界最高水準の品質のNd-Fe-B焼結磁石を提供している(図3参照)。

しかし、ハイブリッド自動車の駆動モータ用やエアコンのコンプレッサモータ用などにNd-Fe-B焼結磁石が大量に利用されるようになった昨今、機器の小型軽量化・低コスト化のため、Nd-Fe-B焼結磁石のさらなる高性能化および低コスト化に対する顧客の根強い期待がある。

Nd-Fe-B焼結磁石の高性能化においては、従来の制約(エネルギー積を上げると耐熱性が低下)を克服した新しいプロセスの開発が必要である。また、希土類原料の供給元が現在は中国一極に集中しているため、政治的要因などによ

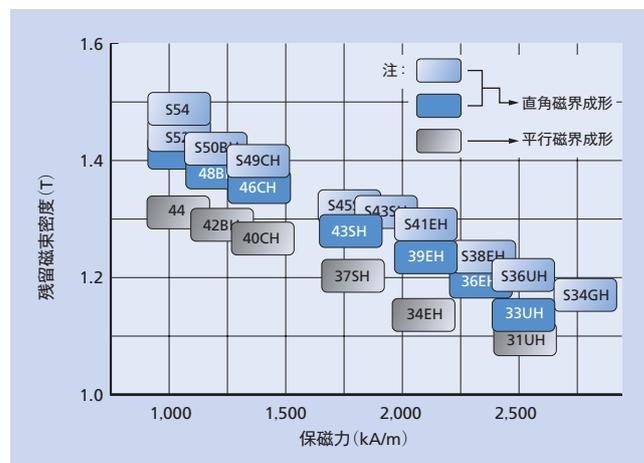


図2 | Nd-Fe-B焼結磁石の特性マップ

顧客の多様なニーズに対応するため、さまざまなグレードの材質をラインアップしている。



図3 | Nd-Fe-B焼結磁石
顧客要求に合わせた形状の磁石を提供可能である。

り価格変動が激しいという問題もある。このような状況から希土類元素、特に重希土類元素 (Dy) の使用量を低減することがNd-Fe-B焼結磁石を顧客に安定供給するための大きな課題となっている。

日立金属では、Nd-Fe-B焼結磁石の磁化反転機構および希土類元素の拡散挙動に着目し、永久磁石内におけるDyの分布を制御することにより、省Dy化と高性能化の両立を可能とした(図4, 図5参照)。この独自のDy拡散プロセスによる省Dy型Nd-Fe-B焼結磁石は磁石厚さや比表面積に制約があるものの保磁力を従来プロセス対比で、約25%改善できる。そのため従来プロセスと同じ残留磁束密度(Br)を維持しつつ、熱減磁特性を大幅に改善することが可能となった。また、このプロセスは熱減磁特性を従来プロセス磁石と同等とし、高エネルギー積化する手段として活用することも可能である。

現在、このDy拡散法による磁石を一部の用途に量産適用を開始している。希土類資源の地球上の存在量は、量的には必ずしもまれとは言えない。しかし、磁石資源として活用できる鉱山の存在地域はかなり限定されており、価格変動や供給不安の原因となっている。日立グループは、希

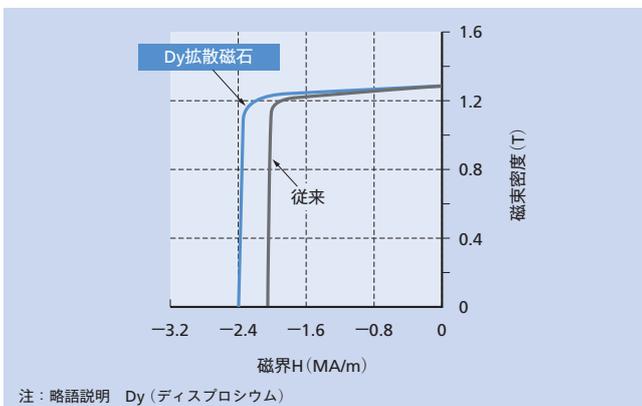


図4 | Dy拡散磁石の減磁曲線
Dy拡散法により、保磁力(減磁耐力)が向上する。

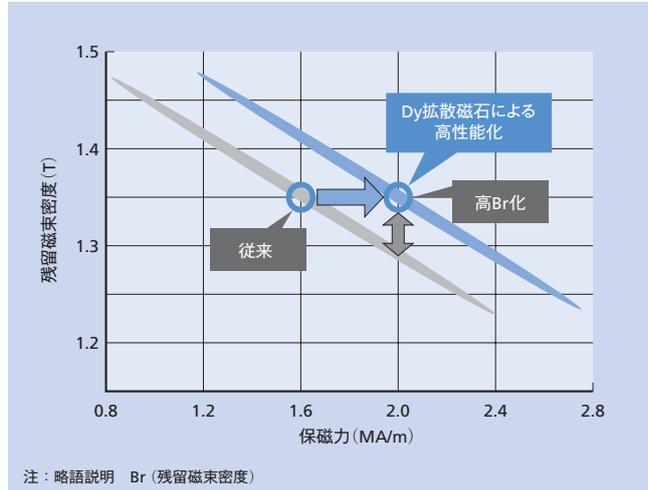


図5 | Dy拡散プロセスによる高性能化
Dy拡散法は高Br(高エネルギー積)化手段としても有効である。

土類資源の有効活用と磁石の安定供給という観点から、モータから磁石を回収し、希土類資源を再利用するリサイクル技術の開発を現在進めている。

3.2 軟磁性コア材料(アモルファス)

アモルファス材料は、電磁鋼板に比較して鉄損が小さく、この特性を生かして配電用高効率変圧器に巻き磁心として応用されている(図6参照)。しかしアモルファス材料は板厚が約25 μm と薄く、硬度(Hv)が約900と高いため、打ち抜き加工して積層磁心とすることが困難である。そこでアモルファス材料の低鉄損という特長を生かし、巻き磁心としてモータに適用することを検討した。巻き磁心をステータとして回転機に適用するうえで、回転磁界に対する渦電流損失の影響を抑えるためラジアルギャップ構造に替わりアキシアルギャップ型構造を採用した。アモルファス材料の特性を電磁鋼板と比較し、表1に示す。

アモルファス材料の1.3 T/50 Hzでの鉄損は、標準的な無方向性電磁鋼板に対し $\frac{1}{10}$ 以下である。これは、アモルファ

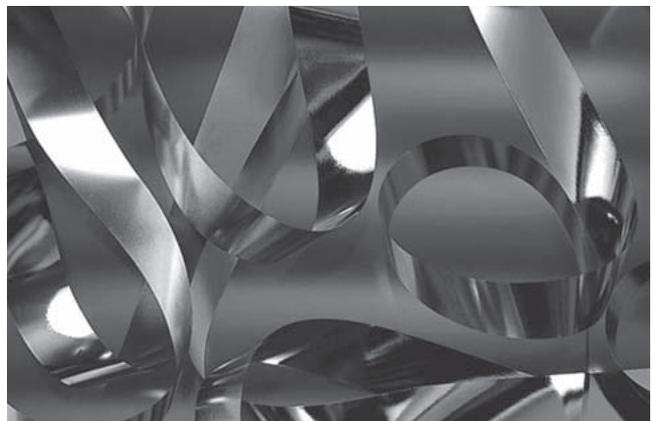


図6 | アモルファスリボン
生産性に優れたメルトスピニング法によるFe基アモルファス広幅リボンである。

表1 | 材料特性の比較

Fe基アモルファスは、低保磁力、高電気抵抗率のため、電磁鋼板に比較してヒステリシス損失、渦電流損失がともに小さく鉄損特性に優れる。

	Fe基アモルファスSA1	電磁鋼板35A300
高飽和磁束密度 (T)	1.56	2.10
保磁力 (A/m)	6	45
鉄損 (W/kg)*	0.07	1.90
抵抗率 ($\mu\Omega\text{m}$)	1.30	0.5
板厚 (mm)	0.35	0.025
引張強度 (GPa)	1	0.52
硬度 (Hv)	900	187

*鉄損は1.3 T/50 Hzの値

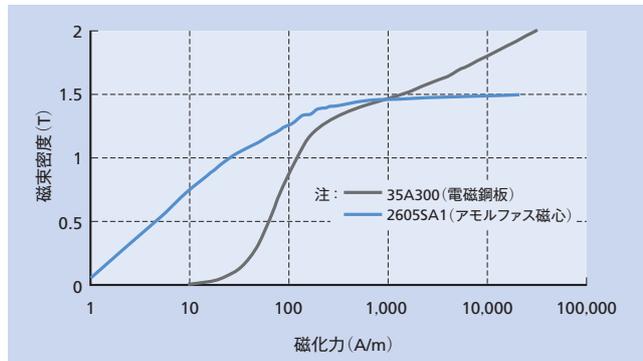


図7 | アモルファス材料と電磁鋼板の励磁性能の比較
アモルファスコアは低励磁磁場で磁束を飽和させることができる。

ス材ではヒステリシス損を支配する材料の保磁力が低く、かつ渦電流損を支配する抵抗率が電磁鋼板に比較して2倍強高いことによる。アモルファス積層コアと電磁鋼板の励磁性能との比較を図7に示す。

開発したモータの仕様を表2に示す。8極12ステータ構造でアモルファスコアの占積率を考慮し、三次元FEM (Finite Element Method) 解析を行い、フェライト焼結磁石を回転子に採用して所望のトルクが得られることを検証した。開発したアキシシャルギャップモータの構造を図8に示す。試作モータでは定格時85%の高効率を得られた(図9参照)。また、試作モータ構造を改良し、コギングトルクの低減とさらなる高効率を達成した。開発モータの出力特性を図10に示す。現在、日立グループの技術を結集し、アモルファスモータの製品化を進めており、アモルファスの優れた鉄損特性を生かした革新的なモータの実用化が期待されている。

表2 | 開発モータの仕様

既存の希土類磁石を用いたラジアルギャップモータと同等の体格、出力、効率を得ることをめざし、仕様を決定した。

相数	3
ステータ数	12
ロータ極数	8
モータ形状 (mm)	$\phi 100 \times 60$
定格回転数 (rpm)	3,000
定格トルク (N・m)	0.64
出力	200
ロータ磁石	焼結フェライト

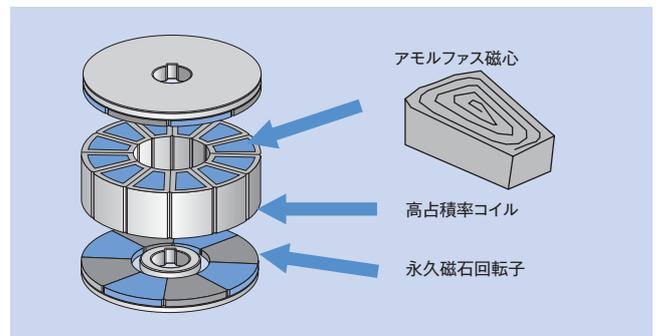


図8 | アキシシャルギャップモータ構造

アモルファス巻きコアとフェライト焼結磁石のダブルロータによるアキシシャルギャップ型を採用した。

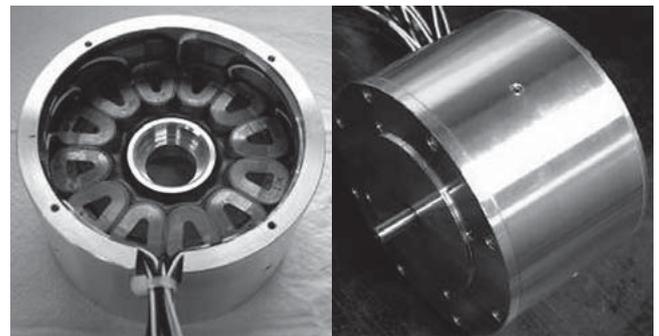


図9 | 開発モータの外観

アモルファス巻きコアを周方向に12個配置し、組み立て容易な構造としている。

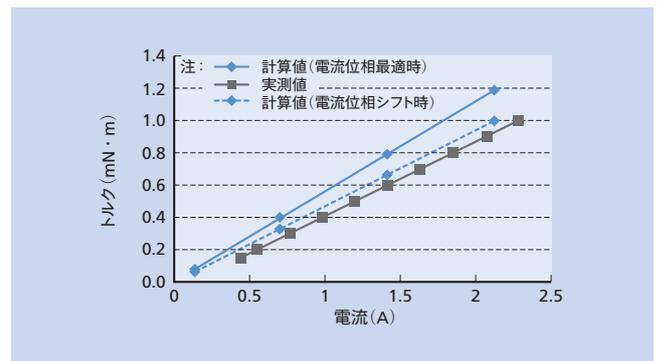


図10 | 開発モータの出力特性

試作モータで、設計時のシミュレーションと同等のトルク特性が得られた。

4. モータ用電線材料

21世紀を迎え、地球環境問題への意識の高まりから、モータは省エネルギー化のため、小型・高効率化が進められている。これに用いられる耐熱エナメル線には、スロット内占積率の向上(高占積率化)、含浸ワニスとの接着性向上、インバータ制御時の高電圧駆動対応などが求められる。

日立マグネットワイヤ株式会社では、このような状況に対応するため、これまでの材料技術をさらに発展させたエナメル線を開発し、顧客の電動化技術深化の支援を行ってきた。今後もいっそう使いやすく高度な製品の開発を図っていく予定である。

(1) 耐熱自己潤滑エナメル線のコイル挿入性向上と含浸ワニスとの接着性の向上

モータの高効率化のため、占積率を高くしていくとコイ

ル挿入時に皮膜が損傷を受けやすくなる。また、高出力のため、含浸ワニスとの接着性が高度に要求される。これらの課題に対し、高度な表面解析技術を駆使して二つのタイプの自己潤滑アミドイミド塗料を開発。これを皮膜の上層に用いた一般タイプ、低挿入力タイプ（開発品）の新しい自己潤滑耐熱エナメル線を開発している。

自己潤滑アミドイミド線での主な特性例を表3に示す。一般タイプはコイル挿入性と含浸ワニス接着性にバランスしており、低挿入力タイプは含浸ワニスとの接着力にはやや劣るが、コイル挿入力が低く集中巻きなどの過酷な巻線に適している。今後、さらに低挿入力タイプをベースに含浸ワニスとの接着力の向上を図る予定である。

(2) 耐インバータサージ性に優れた耐熱エナメル線

機器の省エネルギー化によるインバータ制御化や自動車モータでの高電圧駆動によるサージ電圧の発生に対し、部分放電によるエナメル線皮膜の侵食防止が必要である。

部分放電抑止は一般に無機材料が優れているが、硬くもろいため可とう性が劣る。そこでシリカナノ粒子をエステルイミド樹脂(EI)やアミドイミド樹脂(AI)とナノコンポジット化することにより、可とう性と耐サージ寿命の両立を図ることができた。特にエステルイミドベース系耐インバータサージ性エナメル線「KMKED-20E」は、国内で最も早く2000年から産業用モータで実用化している。皮膜構造は、耐サージ層の上層に自己潤滑アミドイミドを焼き付けしたものである。皮膜中におけるシリカナノ粒子の分散状況を図11に、V-t寿命を図12にそれぞれ示す。本系エナメル線は一般の耐熱線(AIW, EI/AIW)と比較し1.1 kVpで1,000倍以上の寿命を示し、自己潤滑アミドイミドを上層に焼き付けているため、巻線性も良好である。

今後は、さらなる高占積率化への対応のための平角エナメル線の高信頼性化、コイルエンド縮小に向けた高可とう性化、および自己潤滑線のさらなる機械強度/ワニス接着性向上など、信頼性や機能性の向上に向けて開発・実用化を進めていく。

表3 | 新しい耐熱自己潤滑線の主な特性例 (φ0.82 mm, 0種)

低挿入力タイプは含浸ワニスとの接着力にはやや劣るがコイル挿入性に優れる。

項目	新しい自己潤滑アミドイミド線 (KMK-22A)		アミドイミド線 (AIW)	備考
	一般タイプ	低挿入力タイプ (開発品)		
静摩擦係数	0.045	0.045	0.12	傾斜法
コイル挿入力 (指数)	100	70	>120	占積率68%
含浸ワニス接着力 (指数)	90	60	100	不飽和ポリエステル, NEMA法

注：略語説明 NEMA (National Electrical Manufacturers Association)

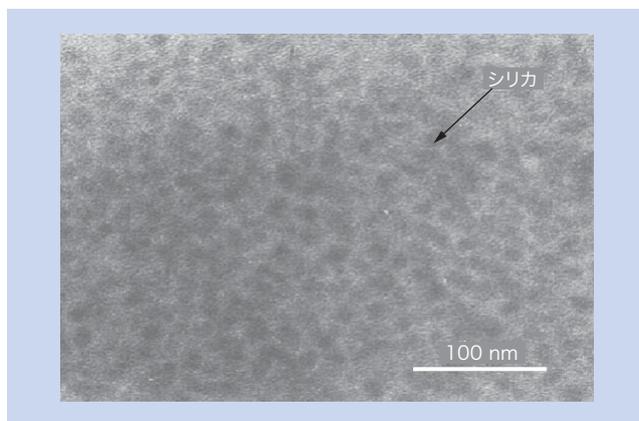


図11 | ナノシリカの分散状況
エステルイミドベースの透過型電子顕微鏡画像を示す。ナノシリカが均一に分散していることがわかる。

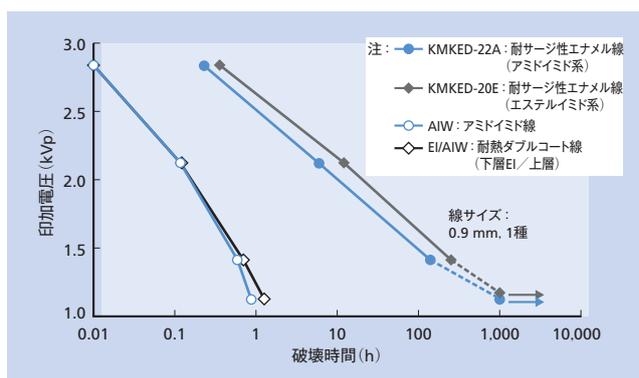


図12 | 耐サージ性エナメル線のV-t寿命 (正弦波)
耐サージ性エナメル線は、一般の耐熱線に比べ1.1 kVpで1,000倍以上の寿命を示す。

5. 絶縁ワニス材料

主なモータ用絶縁材料は次のとおりである。

- (1) エナメル線用被覆材
- (2) 含浸ワニス
- (3) 仕上げ用ワニス
- (4) 粉体塗料
- (5) 注型レジン
- (6) 絶縁紙/絶縁フィルム
- (7) 絶縁テープ/口出し線被覆チューブ/コイル縛り糸

モータの要求仕様に応じて適切な材料が使用されているが、ここでは、含浸ワニスについて述べる。

含浸ワニスは、コイルの固着、振動の抑制、熱放散、水分・ダストからの保護、および補助的な絶縁を目的として行われる。処理方法としては、浸漬法、滴下法などがあり、予熱して水分を除去した後にワニス処理が行われる。

日立化成工業株式会社の含浸ワニスの展開内容を表4に示す。

同表のように、耐熱性、耐湿性、速硬化、高強度、耐薬品性、環境対応などの技術動向に応じて、各種含浸ワニスを設定してきた。

特に、最近では環境負荷低減の要求が強いことから、モー

タ用低VOCワニスを設定した。VOCは、揮発性を有し、大気中で気体状となる有機化合物の総称であり、大気汚染を起こす原因物質の一つとなっている。そのため、昨今の環境対応に関する法規制（VOC排出規制）および、事業者の自主的な取り組みによって、効率的な排出抑制が望まれている。

電気絶縁材料の分野でも、ワニス処理時に発生するVOCの排出を抑制するため、ワニス処理設備に触媒燃焼装置などを付設し、外部への飛散防止処理が行われている。

しかし、一部はVOCとして大気中に飛散する場合があります、ワニスの低VOC化が求められている。

また、自動車の発電・駆動モータや、産業機器用モータなどは、高出力化・コンパクト化がますます進行し、動作時のコイル温度がより高くなるため、使用される各材料には、より高い耐熱性が要求されてきている。

そこで、日立化成工業は、環境へ配慮したモノづくりをめざし、ワニス処理時に発生するVOCを現行品の $\frac{1}{10}$ 以下に低減したモータ用低VOCワニス「WP-2008」を開発した。WP-2008は、現行品と比較して、低VOC化と高耐熱性（200℃）を両立している（表5参照）。今後、モータの高出力化・コンパクト化が強く求められる自動車分野などへの用途展開が期待できる。

表4 | 日立化成工業株式会社の含浸ワニスの展開内容

1912年の絶縁材料の研究開始をもって日立化成工業の創業としている。その後、多様な材料開発技術を駆使し、技術動向に対応した製品を設定してきた。

年度	展開内容
1912	日立製作所において、電気機器製品の国産化を図るために絶縁材料の自給が不可欠との判断を受け、研究開発を開始（日立化成創業）
1914	コイル含浸用ワニスの製造を開始 ・油性ワニス
1940	・フェノールワニス
1950	・フェノール変性油性ワニス
1960	・(UP) 不飽和ポリエステルワニス ・フェノール変性アルキドワニス ・シリコンワニス ・エポキシエステル ・メラミン変性アルキド
1965	・エポキシワニス
1970	・耐熱アルキド
1975	・可とう性、高強度UPワニス
1980	・UV硬化UPワニス
1985	・高耐熱UPワニス
1990	・速硬化UPワニス
1996	・硬化物低臭気UPワニス ・ハーメチックモータ用エポキシワニス ・マレーシアに絶縁ワニス製造工場が完成、生産開始
2000	・水溶性モータ用ワニス ・高熱伝導ファイラー入り耐熱ワニス
2004	・RoHS指令対応ワニス（脱鉛化など）
2005	・中国広東省に絶縁ワニス製造工場が完成、生産開始

注：略語説明 UP (Unsaturated Polyester)、UV (Ultraviolet)、RoHS (Restriction of the Use of the Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment)

表5 | 低VOCワニス「WP-2008」の特性

開発品「WP-2008」は、現行品の「WP-2820 (GN)」と比較して、VOCが大幅に低減しており、耐熱特性が優れている。

項目	開発品 WP-2008	現行品 WP-2820 (GN)
特長	低VOC・耐熱性	高接着性
主剤の種類	不飽和ポリエステル	不飽和ポリエステル
主剤の引火点 (°C)	180	31
硬化剤	CT-50、1.5%	CT-50、1.5%
VOC (%) *1	<1	40
耐熱温度 (°C, MW35C) *2	200	180
接着力 (N, 23°C) *3	680	630
ワニス処理方法	滴下	浸漬・滴下
硬化条件 (°C/h)	130/1	130/1

注：略語説明ほか VOC (Volatile Organic Compounds：揮発性有機化合物)
*1 ワニス5.0 gを金属シャーレ（直径60 mm）に採取し、硬化時の重量減少率を測定
*2 ツイストペア・ヘリカルコイルを用いた熱劣化促進試験
*3 ストラッカー法（直径2.0 mmAIW）

6. シミュレーションによる新材料設計

ここまで述べてきたような材料を設計する場合、従来は実験だけで材料の組成や構造を決定することが多かった。しかし、最近の計算科学と計算機能力の発展に伴い、電子が従う量子力学の基礎方程式（シュレーディンガー方程式）と原子が従う古典力学の基礎方程式（ニュートンの運動方程式）を解くことによって材料物性を予測できるようになってきたため、シミュレーションによる材料設計が試みられるようになってきた。例えば、モータ用磁性材料の磁気特性や、電線材料の電気特性も予測が可能となってきているが、ここでは感覚的に理解しやすい例として、エナメル線固着用ワニスと被覆エナメルの密着強度を例としてシミュレーションによる材料設計を試みた例について説明する。

近年、モータの小型化、高性能化を実現させるために、エナメル線を高密度に巻き付けるニーズが高まっている。しかし、高密度に巻き付けると、エナメル線に摩擦や傷が発生してしまうことが懸念されるため、被覆エナメルの表面に潤滑剤が自己析出するタイプのエナメル線が使われ始めている。そこで、固着ワニスを付着させる部分には潤滑剤が析出しているため、潤滑剤との密着強度が優れた固着ワニスを設計する必要がある。

シュレーディンガー方程式とニュートンの運動方程式を解くことによって得られた潤滑剤と固着ワニスの界面構造を図13に示す。図中の小さな球が原子を表し、赤い球が酸素原子、グレーの球が炭素原子、白い球が水素原子、青い球が窒素原子を表している。このように付着した状態の界面に引張力（エネルギー）を与えていき、どれくらいエネルギーで剥離した状態（図14参照）となるかを算出することで、密着強度を評価することができる。この剥離させるのに必要なエネルギーを剥離エネルギーと呼ぶ。例えば、図13を図14の状態にする際の剥離エネルギーは、

0.0885 J/m²である。一方、固着ワニスにオクタデシルメタクリレート（OMAC）を1%添加した場合の界面（図15参照）に対する剥離エネルギーは、0.121 J/m²と得られ、密着強度が約37%向上すると予測される。同図では、添加した分子（大きな球で表示した分子）は、メタクリレート基（酸素原子2個を含む官能基）を下にし、アルキル基（CH₂の鎖を含む官能基）を上にして析出することにより緻密な界面が得られ、図13では見られた界面の隙間が見られなく

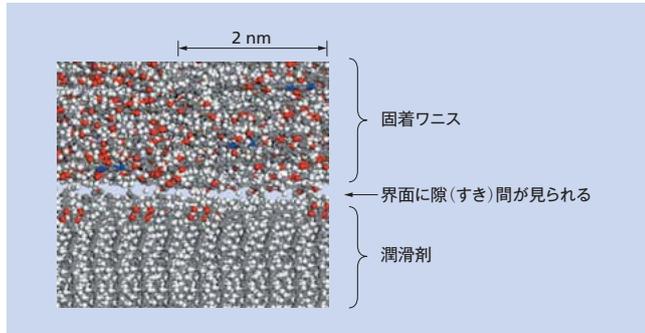


図13 | 被覆エナメル表面の潤滑剤と固着ワニスの付着界面
量子力学と古典力学の基礎方程式を解くことによって得られた界面構造を原子スケールで示している。

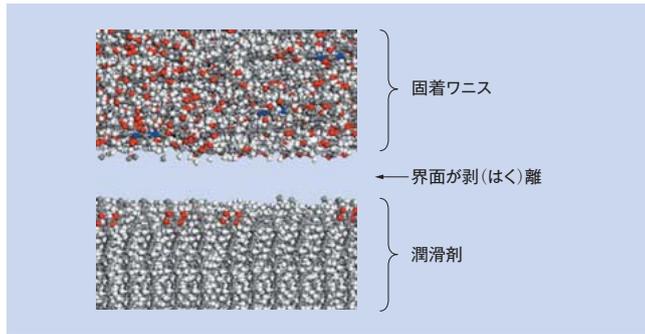


図14 | 潤滑剤と固着ワニスの界面が剥離した状態

図13の付着界面に引張力（エネルギー）を与えて界面を剥離させた状態を示している。

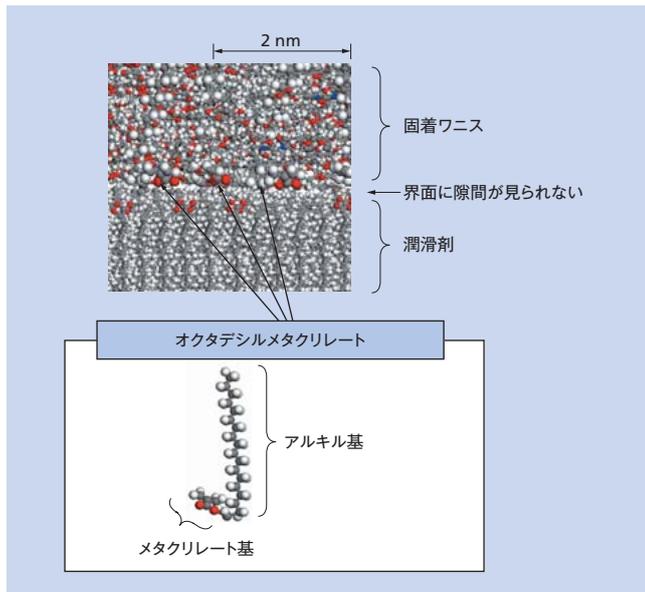


図15 | 固着ワニスに添加分子を付与した場合の界面
添加分子がメタクリレート基を下、アルキル基を上にして析出することによって図13よりも界面が緻密化している。

なっていることがわかる。

このように、シミュレーションでは、密着強度が数値的にどれだけ増加するかを把握できるうえに、原子スケールの表示から、どのようにして密着強度が向上するのかという詳細なメカニズムを把握することが可能になっており、今後さまざまな新材料探索に活用できるものと期待する。

7. おわりに

ここでは、モータの損失低減や環境負荷低減の観点から主要構成材料として永久磁石、コア材料、電線、ワニスの課題と最新技術について述べた。

モータの出力密度を考慮すると現状の約2.5 kW/kgから、今後、5年程度で3.5 kW/kg以上4.5 kW/kgが見通されている。これに伴い、モータ材料への耐熱性や加工性への要求も厳しくなる。高性能、高効率モータを支える材料会社が日立グループ内にあることから、各社連携し、適正な材料をモータ設計、製造部門へ提供できると考えている。

執筆者紹介



相馬 憲一
1981年日立製作所入社、電動応用統括推進本部 モータ事業本部 所属
現在、モータ用材料の開発、利用技術に従事
博士（工学）
日本化学会会員、日本機械学会会員



谷川 茂穂
1976年日立金属株式会社入社、情報部品カンパニー開発センター 所属
現在、軟磁性材料および応用部品の開発に従事
博士（工学）
日本磁気学会会員、電気学会会員、日本金属学会会員



馬上 伊三雄
1991年日立化成工業株式会社入社、機能材料事業本部 電気機能材料開発部 所属
現在、コイル含浸ワニスの新製品開発に従事
修士（工学）
高分子学会会員



菊池 英行
1988年日立電線株式会社入社、日立マグネットワイヤ株式会社 巻線開発部 所属
現在、巻線の開発、絶縁材料の研究開発に従事
電気学会会員



岩崎 富生
1990年日立製作所入社、機械研究所 高度設計シミュレーションセンター 所属
現在、分子シミュレーションを応用した材料設計技術の開発に従事
理学博士
日本機械学会会員、日本材料学会会員