

直流ブラシレスモータ用 バスリング樹脂モールド技術の開発

Development of a Plastic Mold Technology for Bus Ring for DC Brushless Motor

竹内 和夫*
Kazuo TAKEUCHI
堀江 達郎*
Tatsuro HORIE

田中 高太郎*
Kotaro TANAKA
岡村 明拓*
Akihiro OKAMURA

要 旨

HEV 用駆動モータの合理化、量産性向上をはかる目的で、複数の高電圧配電部品を樹脂絶縁材で一体化し、部品点数の削減、組み立て作業性の向上を検討した。従来の塗布型フッ素系絶縁樹脂と比較し、樹脂モールド化で不利となる部品寸法の大形化を最小限にとどめ、あわせて防水信頼性を高めることを目標とした。樹脂モールド部品の熱ひずみの実測に基づく材料選定および浮き成形によるフルモールド化で防水信頼性を確保し、また高電圧絶縁設計基準の検討により最小絶縁距離を明確にすることで、部品寸法を大きくすることなく量産性に優れたバスリングの一体化モールド技術を開発した。

ABSTRACT

To rationalize the layout and increase the mass productivity of HEV drive motors, integrated molding of high voltage distribution parts using plastic insulation material was investigated as a method to reduce the number of parts and increase ease of assembly. The enlargement of part dimensions occurring with the change to molding plastic from using the former cure coat-type fluoropolymer insulator material was minimized and waterproofing performance was increased. Selection of materials on the basis of measurements of heat strain in plastic molded parts and full molding using floating over molding ensure waterproofing. Study of the design basis for high-voltage insulation clarified the minimum insulation distance, enabling the development of an integrated bus ring molding technology which allows mass production without increasing the dimensions of the parts.

1. まえがき

近年、自動車の燃費向上に対する要求が高まるなか、更なる燃費向上技術としてハイブリッド自動車(Hybrid Electric Vehicle, 以下 HEV)の普及が期待されている。

HEVの本格的な普及を図るうえで、従来のガソリン車に対して追加システムとなる駆動用モータ、バッテリー等の小型化、軽量化および量産性向上が課題となっている。

また、HEV、EV、FCVではモータ駆動用電圧(一般に200V以上)が従来のガソリン車電装系電圧(12 ~ 24V)よりも高いため、電装系部品の高電圧に対する絶縁信頼性が重要となり、樹脂モールドにより絶縁を保証する場合には、樹脂材料の選定とモールド構造設計がその品質を決定する。そこで、DCブラシレスモータの駆動用電流配電機能を有する複数のバスリングを、射出成形樹脂で一体モールド成形し部

品点数を削減した上で小型化と量産性向上をはかることを検討した。また、一体モールド構造および成形技術についても検討を行ない、絶縁信頼性の高い、バスリングの一体樹脂モールド技術を開発したので報告する。

2. 開発のねらい

Fig. 1にホンダINSIGHTのIMA(Integrated Motor Assist)システムに用いられている DC ブラシレスモータの構成を示す。モータには3本の銅製導体(バスリング)が用いられており、モータ駆動用の18個のステータコイルに3相電流を配電する。

バスリングには配電機能だけでなく、各相間の絶縁および外部に対する絶縁機能が求められるため、塗布型の絶縁材料が用いられている。塗布型の絶縁材料には、一般的にエ

*栃木研究所

ポキシ系の焼き付け塗料が用いられるが、HEV用モータでは周囲がエンジンルームの高温環境であることから、耐熱性の高いフッ素系の焼付け樹脂被覆が用いられている。

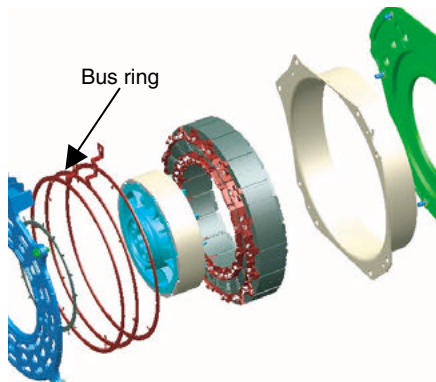


Fig. 1 Motor components and bus ring

フッ素系の焼付け樹脂被覆は、その原料コストが高いだけでなく、Fig. 2に示すようにプレス製銅導体のコーナエッジ部、バリ部位では被覆膜厚が薄くなり易い。さらに、ピンホール、導電性異物、塗膜はく離などの塗装不具合を生じることがあるため、絶縁性確保のためには、厳重な品質管理が必要であった。このため、歩留まりが悪く生産規模の拡大をはかることが困難であった。

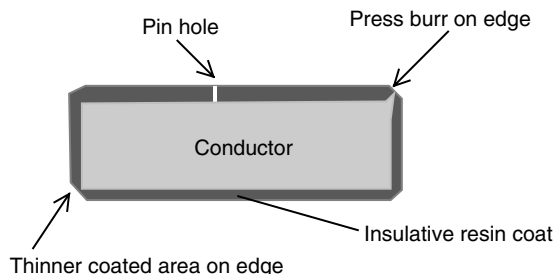


Fig. 2 Typical concerns of resin coated bus rings

本開発では、焼付け樹脂被覆に替わり、銅導体を汎用の射出成形用樹脂でオーバモールドし絶縁材として用いることで、量産規模の拡大に対応可能とすることを検討した。

3. 樹脂モールド化の技術課題

3.1. 樹脂モールド化の技術課題

樹脂でオーバモールドし絶縁材として適用する場合、歩留まりが向上することで量産規模の拡大が期待できる一方、以下の技術課題がある。

(1) 絶縁層の薄肉化

焼付け絶縁被覆では絶縁に必要な最低膜厚(数十 μm)を確保すれば良いのに対し、樹脂モールドでは成形時の樹脂流れ性を確保するために1 mm程度の肉厚を必

要とする。そのため、3本のバスリングを重ねて用いる場合には焼付け型の樹脂絶縁被覆に対し、積層厚さ方向でさらに5~6 mmのスペースを必要とする。

(2) 熱サイクルに対する耐久信頼性

焼付け樹脂被覆では、比較的柔軟な樹脂被覆を導体表面に薄く形成する。このため、樹脂被覆は銅導体との熱膨張差に追従し、熱ひずみを吸収することができる。これに対し、樹脂モールドでは、モールド樹脂が硬質で肉厚も厚いため、銅導体との熱膨張差を吸収できず、熱サイクルによりモールド樹脂にクラックが発生し水進入経路となることで絶縁性低下を引き起こすことがある。特に、樹脂成形欠陥のひとつであるウエルドラインは強度特性が低いため、熱サイクルによるクラックの起点になり易い。

3.2. 課題に対する対応手法

これらの課題を解決するため、以下の対応手法を検討した。

(1) 一体モールドによる小型化の達成

3本の銅導体それぞれを樹脂でモールドするのではなく、樹脂で3本の導体を一体モールドすることで小型化をはかる。同時に、一体モールド構造および成形方案を工夫するとともに、高電圧に対する絶縁設計の考え方を確立することにより絶縁信頼性も確保する。

(2) 熱サイクルに対する耐久信頼性の確保

熱サイクル時に樹脂に発生する熱ひずみを直接評価し、材料強度特性と比較することで最適樹脂材料を選定する。また、成形方案およびモールド構造の工夫により構造的に水進入を防止し、ウエルドラインなどの成形欠陥部位の強度特性低下を回避する。

4. 構造と成形方案の検討

4.1. 成形方案の検討

一体化した場合の樹脂モールド部の主要機能は、一体化する銅導体の各相間の絶縁および外部との絶縁である。したがって、絶縁性確保のためには、各導体間および外周モールド樹脂肉厚の精度確保が必須である。導体は樹脂モールド時に大きな樹脂充てん圧力を受けるため Fig. 3 のような導体の位置ずれが発生することがあり、このことが絶縁性能の低下原因となる。

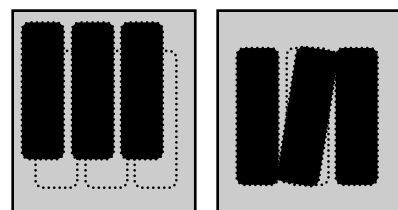


Fig. 3 Position shift in resin mold

一般的にモールド中でのインサート部材の位置ずれを防ぐために Fig. 4 に示すような成形方案が用いられる。

- a) モールドを2回に分けて成形する(2段階成形)。
- b) 金型支持ピンで金型内に固定し導体の位置ずれを防止する。

a)の2段階成形では、インサート部品を確実に保持できるというメリットがある。しかし、一次成形と二次成形に同一の樹脂材を用いても、二次成形時に一次成形体は既に固体状態まで冷却されており、射出ゲートから離れた位置では、界面の融合が不完全な状態(コールドジョイント)になり易い。コールドジョイントが部品の外面にできた場合は水の進入により絶縁機能を損なう原因となる。

一方b)金型支持ピンによる固定では、コールドジョイントは発生しないものの、防水の完全性を保証するため、Fig. 4 b)に示すように支持ピン跡部への防水ポッティング塗布などの追加工程を必要とする。

防水のための追加工程を必要としないシームレスなモールドを得る手法としては、成形過程で支持ピンを引き抜く浮き成形がある。しかし、樹脂充てん完了前に支持ピンが引き抜かれるため、成形時に樹脂の充てん圧力のバランスがとり難い複雑形状成形体では、インサートの位置精度を確保することが難しい。

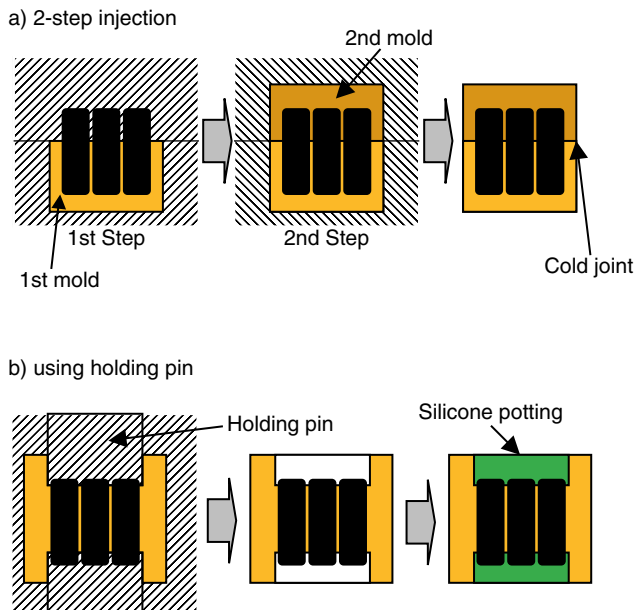


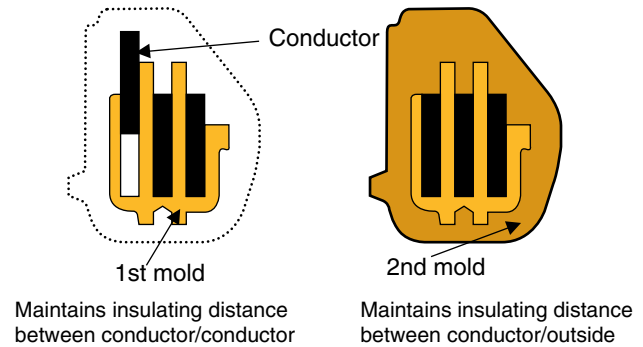
Fig. 4 Schematic drawing of full mold method

そこで、本開発では、Fig. 5に示すように、a) 2段階成形とb)浮き成形を組み合わせ、

- (1) あらかじめ成形してある一次成形体で銅導体を保持し、各相間の相対位置精度を確保した上で、全体をさらにオーバモールドする(2段階成形)。

- (2) 銅導体を保持した一次成形体を、浮き成形を用いてオーバモールドすることによりコールドジョイントを外面に発生させず、防水性を確保する(浮き成形)。ことで機能保証を分担する構造および成形方案とした。

(1) 2-step molding



(2) Floating mold

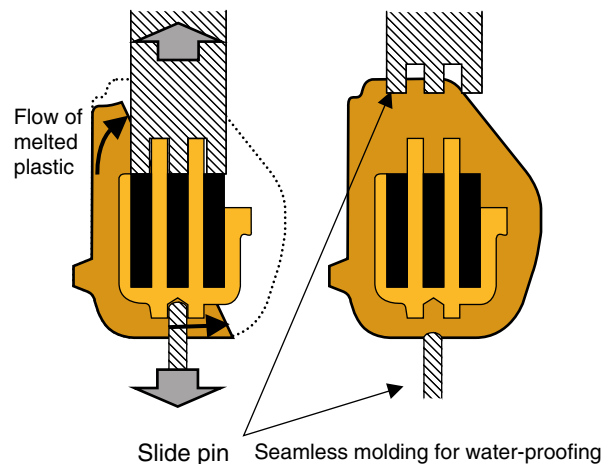


Fig. 5 Seamless molding method for bus ring

4.2. モールドバスリングの構造

樹脂モールドバスリングの基本構造を Fig. 6 示す。3本の銅導体を円筒状に曲げ、一次成形体(Holder)に保持し導体間の絶縁距離を確保したうえで、さらに全体を二次成形体(Over mold)でモールドし外部との絶縁と防水性を確保する。

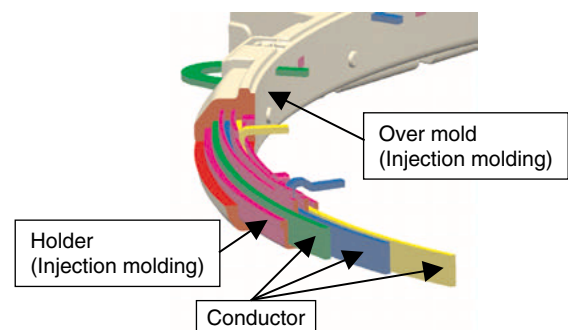


Fig. 6 Structure of plastic molded bus ring

5. 最適材料の選定

5.1. 検討材料の選定

本開発では、部品の使用環境温度が高く(150℃以上)、組付け時に部品としての形状精度・剛性が必要なことから、モールド材としてガラス繊維強化 PBT(以下 PGT-GF)、ガラス繊維強化 PPS(以下 PPS-GF)、およびガラス繊維/ミネラル強化 PPS(以下 PPS-GF/M)を検討した。PPS-GF/M は熱膨張の異方性を小さくした特殊グレードである。

これらの材料の熱膨張係数を Table 1 に示す。

Table 1 Thermal expansion coefficient of investigated materials

		PBT-GF	PPS-GF	PPS-GF/M
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ /K)	Flow direction	35	15	19
	Transverse to flow direction	80	51	29

5.2. 熱応力の評価

金属をインサート成形した樹脂成形部品では、その熱膨張差により温度変化の際に熱応力が発生する。この熱ひずみを評価し、材料の疲労強度特性と比較することで、材料を選定した。金属等の等方的な熱膨張挙動を示す材料では、熱ひずみを簡便に評価する手法として、自己温度保証ひずみゲージが用いられ、単純な熱膨張により発生する見かけひずみがある程度補正することが可能である。しかし、射出成形用樹脂では、樹脂の流れ方向と流れ垂直方向では大きく熱膨張挙動が異なる上に、ガラスファイバー等の異方性フィラーが入った樹脂の場合は更に異方性が大きくなるため、一般的には熱膨張による見かけひずみを補正することが困難であった。

本開発でも、銅導体との熱膨張差低減のために、一般的なガラス短繊維フィラー材と、異方性改善材と呼ばれるガラスフィラー+ミネラルフィラー材を検討した。しかし、異方性改善グレードにおいても、Table 1に示したように熱膨張挙動には異方性が存在する。

そこで、本開発では、2個のバスリングを同一条件で成形し、一方は切断して自由な熱膨張をする参照材とし、もう一方を部品形状での熱ひずみ評価に用いた。これらを同一温度で測定することで材料そのものの熱膨張の影響を排除した熱ひずみを測定することができる。

測定の手順を Fig. 7 に示す。

- 一方のバスリングにひずみゲージを貼りつけ、もう一方の切断状態のバスリングにも、同一部位にひずみゲージを貼りつける。切断状態のバスリングのひずみゲージをリファレンスとして2ゲージ法でブリッジを組む。
- 2つのバスリングの温度が同じとなるように温度を変

化させ、温度-ひずみ(measured strain)線図を得る。

- 常温で完成品バスリングの切断解放ひずみを測定し、その測定値を通るように、温度-ひずみ線図をシフトさせ補正した温度-ひずみ線図(calibrated strain)を得る。

得られた温度-ひずみ線図は、熱膨張差により発生する熱ひずみの各温度での絶対値を示す。

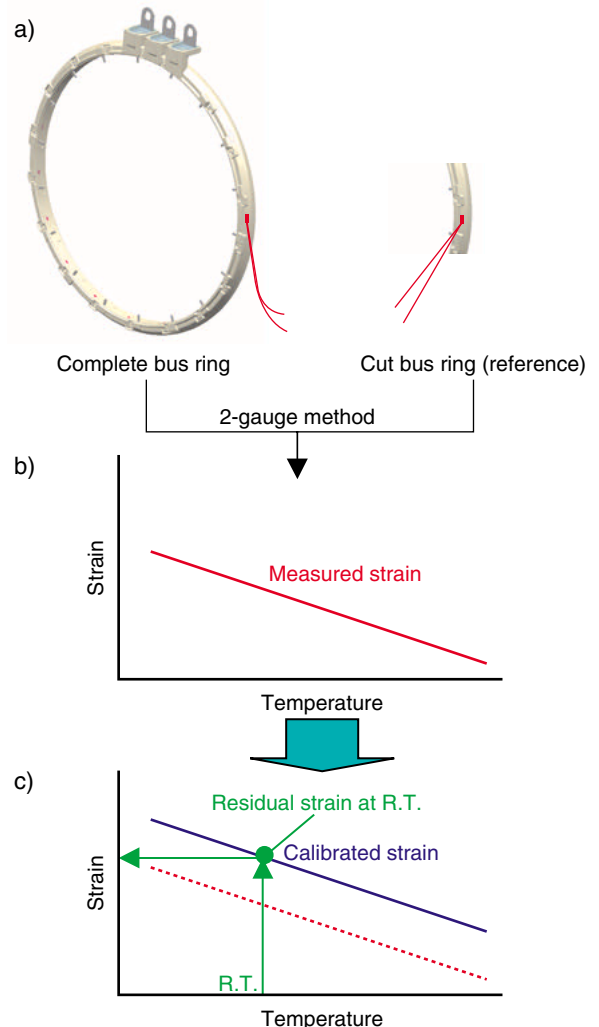


Fig. 7 Thermal strain measurement method

このようにして得られたバスリングの熱ひずみ評価結果の実例を Fig. 8 に示す。

バスリングに発生する熱ひずみは、その熱膨張挙動から予想されるとおり、樹脂の流動停止温度近傍ではほぼ0であり、低温になるとともにほぼ直線的に増加することが確認できた。したがって、バスリングの熱サイクル寿命は、熱ひずみ値が大きく、かつ樹脂の破断伸びが低下する低温側での疲労強度により支配されると考えられる。

また、材料別の比較では材料の熱膨張率から予想されるとおり、PBT-GF材に対し、PPS-GF一般グレード材が約30%、PPS-GF/M異方性改善グレードの熱ひずみが約40%小さいことが確認された。

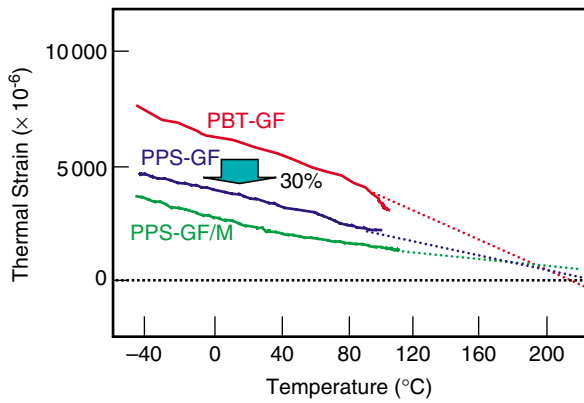


Fig. 8 Temperature dependence of thermal strain

本部品の低温側の保証温度限界は -40°C であることから、材料を選定するにあたり、 -40°C でのバスリング熱ひずみ発生量と、設定した目標サイクルでの疲労強度を測定し比較した。

Fig. 9 に示すように、PBT-GF ではテストピース材料強度とほぼ同等の熱ひずみが発生している。一般に実成形品では、材料のテストピース強度特性と比較して低い物性を示すウェルドなどの成形欠陥が生じることから、実成形品での安全率は1を切ることが予想される。一方、PPS-GF一般射出成形グレードおよびPPS-GF/M異方性改善グレードでは疲労強度(ひずみ値)に対し熱ひずみが十分小さく、熱サイクル寿命も十分確保できると予想された。

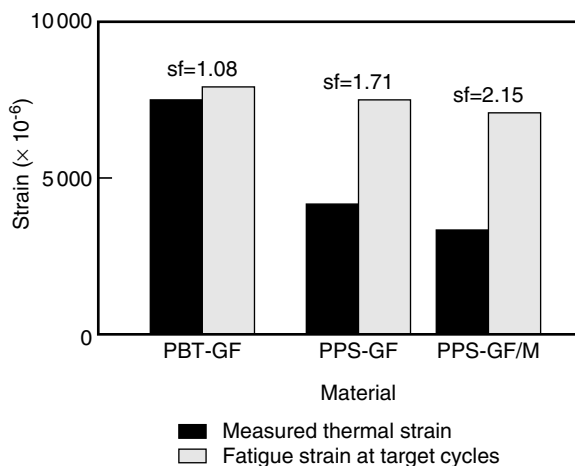


Fig. 9 Thermal strain and fatigue strain

実際に、それぞれの樹脂でモールドしたバスリングの熱サイクル寿命を Fig. 10 に示す。

発生熱ひずみが小さく、材料強度に対し十分な安全率をもつ PPS-GF 一般射出成形グレードおよび PPS-GF/M 異方性改善グレードの方が、実成形品でも PBT-GF 材より3倍以上の熱サイクル寿命を有することが確認できた。

このことから、モールド樹脂材には、一般的なPPS-GFの射出成形グレードを適用可能であることがわかった。

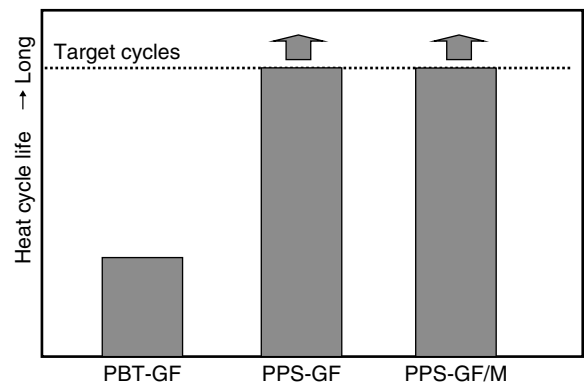


Fig. 10 Heat cycle life of bus ring

6. 絶縁設計技術

高電圧に対する絶縁信頼性の確保と部品の小型化を両立するため、絶縁設計の考え方を構築した。

本構造では、Fig. 11 に示すように絶縁破壊経路として以下の2つが考えられる。

- a) 一次/二次モールド界面での絶縁破壊
- b) 樹脂肉厚方向での絶縁破壊

これら2つの絶縁破壊経路に対するモデル実験をおこない、それぞれの絶縁経路に対する絶縁距離と絶縁破壊電圧の関係から、必要な絶縁距離を求めた。

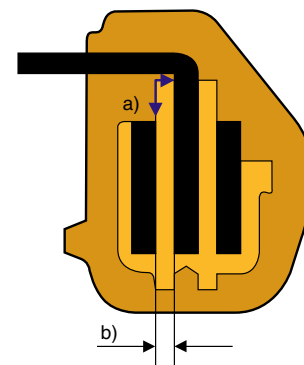


Fig. 11 Insulating distance a) interface, b) bulk

Fig. 12 にモールド樹脂として検討した、樹脂材料材のバルクおよび表面の絶縁距離と絶縁耐圧の関係を示す。

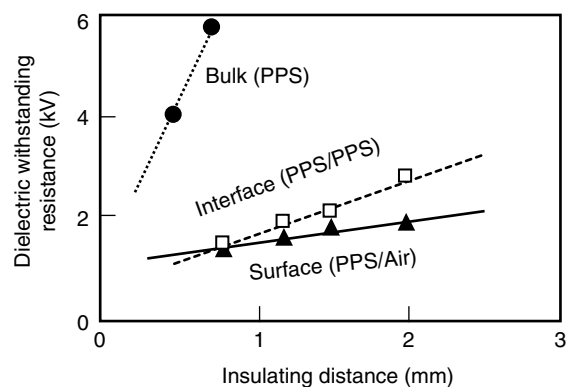


Fig. 12 Dielectric withstanding resistance

一般に樹脂の表面抵抗は、樹脂表面への水の吸着、および誘電率差による気体側への電界集中の影響⁽¹⁾で樹脂内部よりも低い。モデル実験の結果でも、樹脂のバルク絶縁抵抗は、樹脂界面および樹脂表面の絶縁抵抗より遥かに大きく、絶縁設計上は界面での表面抵抗に対しての絶縁距離設定がポイントとなることが分かった。

特に、a)の界面での絶縁保証に対しては、同一樹脂を用いても界面全体にわたっての融合を期待することができないため、界面の融合が無くとも絶縁保証のできる距離を設定する必要がある。

このことから、Fig. 13に示すように銅導体間の一次成形体と二次成形体の界面に沿っての距離(沿面距離)が絶縁性を保証する設計値となることが分かった。

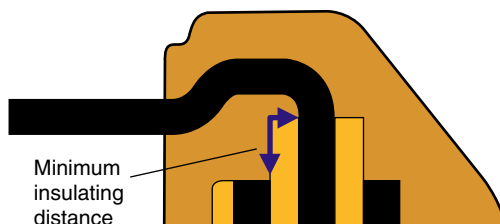


Fig. 13 Minimum insulating distance

7. 樹脂一体化成形技術

本開発では3本の導体を一体モールドするにあたり、以下の考え方を適用した。

- (1) 構造で導体間の相間絶縁を保証
- (2) 防水性の観点で界面を表面に露出させない

これを実現させるため、一次モールドで相間絶縁を保証し、二次モールドで外部との絶縁と防水性を確保可能な浮き成形技術を適用した。

7.1. 浮き成形の概要

浮き成形はシームレスな多層構造体を成形する技術であり、

- (1) 一次成形体を二次成形金型中にスライド支持ピンで保持
- (2) 二次成形樹脂充てん過程の適切なタイミングで支持ピンをスライドし、支持ピン跡をモールド樹脂で封止することで継ぎ目のない樹脂モールドを得る。

Fig. 14 に浮き成形プロセスの概要を示す。

一次成形体および銅導体は二次成形充てん時に高い樹脂充てん圧力(一般に 10 ~ 30MPa 以上)を受けるため、二次成形時に銅導体および一次成形体の変形と位置ずれを防止する必要がある。

本開発では、一次成形体および銅導体の形状保持と二次モールド中での位置精度を確保するため、一次成形体を二次成形金型の型割り方向に上下からスライドピンで支えることとした。

プロセスは、大きく分けて

- a) 一次成形体および銅導体を二次成形金型にセットし保持
- b) 二次成形樹脂を射出
- c) 適切なタイミングで一次成形体を支持するスライドピンを引き、スライドピン跡も絶縁樹脂で充てんの3つの段階に分けられる。

7.2. 支持ピン引き抜きタイミングの設定

Fig. 15 に充てん開始からのキャビティ内樹脂充てん割合、支持ピン抜きタイミングと銅導体シフト量および支持ピン引き抜き跡ウエルド実体強度の関係を示す。

一次成形体支持ピンスライドのタイミングが二次モールド樹脂充てんに対して早い場合は、一次成形体固定が不十分で二次モールド中で一次成形体および銅導体が射出圧に押されシフトし、二次成形体肉厚バラツキおよびそれに伴う成形体の反りが発生する。

遅い場合はピン引きぬき跡に流れ込む樹脂の温度/圧力が低下し、ピン部周辺の充てん不良およびウエルド強度低下の原因となる。

したがって、ピン引きぬきタイミングは、キャビティ内への樹脂充てんがある程度進行し、かつ一次充てん圧力がかかっている範囲内に制御する必要がある。

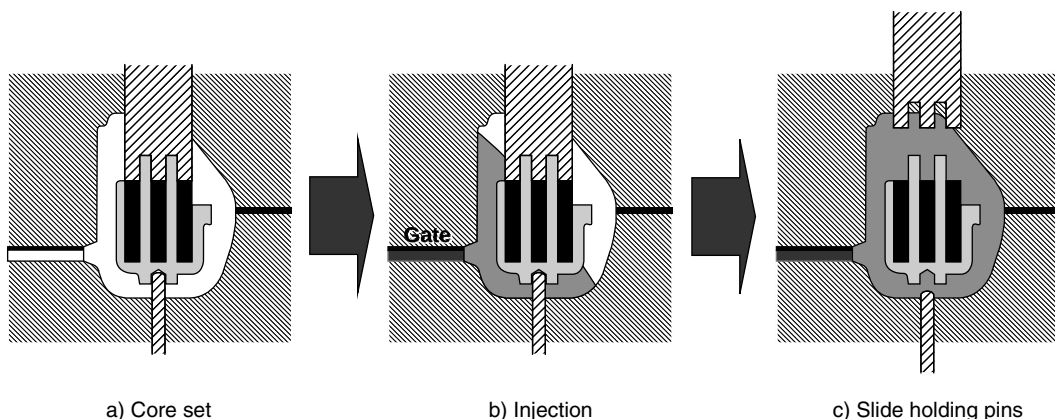


Fig. 14 Seamless injection molding process

参考文献

- (1) 宇都宮敏男ほか：電気工学辞典，東京，技報堂出版，1988, p.226
- (2) 小川博久，福田健児：Civic Hybrid 用モータの開発，Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.2, p.25-30 (2002)

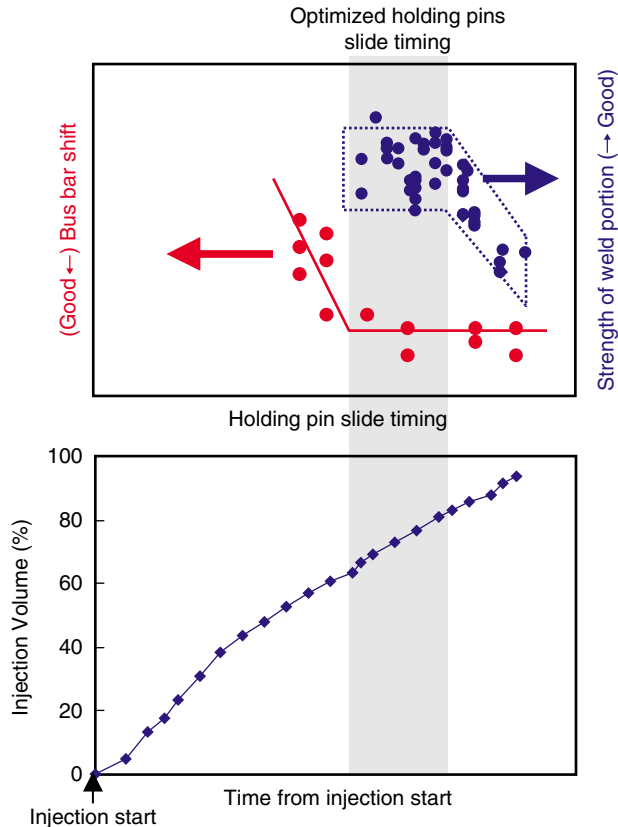


Fig. 15 Holding pin slide timing chart

8. まとめ

DC ブラシレスモータの量産性向上と小型化を同時に達成できるバスリングの樹脂一体モールド化技術を開発した。

- (1) 樹脂モールドバスリングに発生する熱ひずみを評価し，材料の疲労強度特性と比較することで，材料選定が可能となった。
- (2) 高電圧に対する絶縁設計技術を確立し，絶縁信頼性を確保しつつ，小型化を達成した
- (3) 浮き成形技術の活用と支持ピンスライドタイミングの最適化を図ることで，複数部品の一体化による合理化，組付け時間の短縮⁽²⁾と防水信頼性，強度信頼性の確保を同時に達成できた。

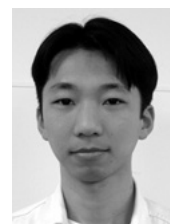
謝 辞

本開発を推進するにあたり，ご協力頂いた住友電装(株)部品事業本部，(株)アトライズヨドガワ，および黒田化学(株)に感謝します。

■ 著 者 ■



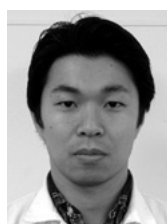
竹内和夫



田中高太郎



堀江達郎



岡村明拓