

●常温・速硬化可能な電磁鋼板用接着剤

Quick-curable adhesive at room temperature for stacking electromagnetic steel plates

荒井 美香子
Mikako Arai

Key Word : Anaerobic Adhesive, room temperature curing, oil surface adhesion, solvent free

1 緒言

近年、CO₂排出量削減を目的とし、自動車の電動化が加速している。2021年に30%以下であった全世界の電動車の割合は、2035年には60%を超えると予想されている¹⁾。

従来のガソリン車と電動車の大きな違いは駆動システムにある。ガソリン車は、エンジンにより駆動するが、電動車はモーターによって駆動するため、高性能かつ高効率なモーターが必要とされている。

モーター(図1)は、ローターとステータからなるモーターコアにより、電気エネルギーを磁気エネルギーに、さらに運動エネルギーに変換している。このローターやステータは、電磁鋼板と呼ばれる表面を絶縁処理した鋼板を積層することにより製造されている。一般的にモーターを高効率化するためには、電気エネルギーが磁気エネルギーに変換される際に発生する「鉄損²⁾」と呼ばれるエネルギーロスを低減することが必要である。鉄損はヒステリシス損と渦電流損からなり、鉄損を低減する策の一つとして電磁鋼板を薄くし、渦電流の発生を抑制することが有効である(式1³⁾)。

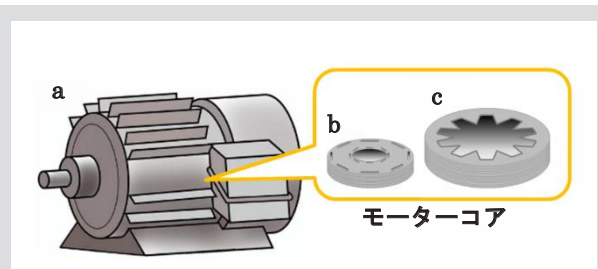


図1. モーターの構成

a : モーター, b : ローター, c : ステータ

$$P_e = k_e \frac{1}{\rho} (t f B_m)^2 \quad \dots (式1)$$

P_e : 渦電流損[W]
 k_e : 比例係数
 ρ : 鉄心の抵抗率[Ω・m]
 t : 板厚[m]
 f : 周波数[Hz]
 B_m : 最大磁束密度[T]

鉄損の発生は、電磁鋼板の固定方法によっても影響される。従来、積層された鋼板は、主にカシメやレーザー溶接によって固定されてきた(図2 a, b)。カシメは物理的に凹凸をつけるため、鋼板に歪が発生し⁴⁾、鉄損が発生する。さらに、鋼板の薄型化により歪の影響が大きくなること、加工が困難になることも大きな課題であった。また、レーザー溶接は絶縁被膜を溶かしてしまい、鋼板同士を導通させてしまうという問題があった⁵⁾。

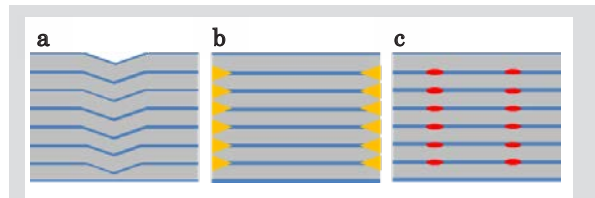


図2. 電磁鋼板の固定方法

a : カシメ, b : レーザー溶接, c : 接着

そこで、積層された電磁鋼板同士を接着剤で固定する接着積層法⁶⁾が注目されている(図2 c)。接着積層法では、カシメのような鋼板の凹凸が不要であるため歪が発生せず、溶接のように鋼板同士を導通させる懸念もない。鋼板の変形を伴わないことから薄型化された電磁鋼板にも適用可能であり、鉄損の低減に極めて効果的な手法であると言える。こうした背景を踏まえ、電磁鋼板用途向け接着剤の開発に着手した。

2 設計方針

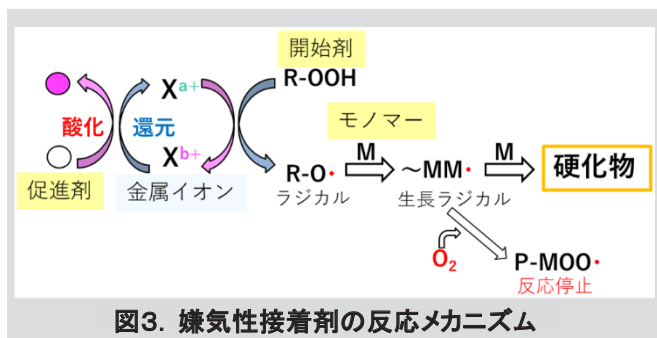
想定されるモーターコア製造方法や接着条件、使用条件から、接着剤は下記物性を有することが必須である。

- ・ 種々の絶縁処理がされた電磁鋼板への接着性
- ・ 油面接着性
- ・ 耐熱性
- ・ 常温、速硬化性

また、接着剤の硬化に UV や加熱を必要とするものは、UV 照射機や加熱炉等の設備導入のコスト、工程時間、CO₂ 排出

などの観点から望ましくない。そこで、常温速硬化可能であり、さらに耐熱性も期待できる嫌気性接着剤に着目した。

嫌気性接着剤とは、金属イオン存在下で酸素を遮断することでラジカル重合により常温硬化するアクリル系接着剤であり（図3⁷⁾、従来、ボルト・ナットの固着や嵌合用途で使用されてきた接着剤である。



当社は、1970年頃に上市した「嫌気性接着剤 アロンタイト®シリーズ」を有しているが、上述した必要特性である電磁鋼板への接着性、油面接着性、耐熱性、速硬化性のいずれも不十分であった。そこで、接着積層法によるモーターコア製造用途向けに、新たに「嫌気性接着剤 ATX シリーズ」を開発した。

3 開発品の概略

3-1 製品物性

嫌気性接着剤開発品 ATX シリーズを2種開発した。その代表特性値について表1に示す。

評価項目	ATX-HR1	ATX-SS1	備考
外観	淡褐色液体	淡褐色液体	目視
粘度 (mPa・s)	120	920	E型粘度計、25°C
ガラス転移温度 (°C)	103	90	粘弾性スペクトルより tan δ が最大となる点、2°C/min、1Hz
線膨張係数 (ppm/°C)	0~100°C	125	引張モード、5°C/min
	100~200°C	165	
	204	208	

いずれも塗布に好適な液状で、使用方法や要求特性に応じて選択可能である。

3-2 プライマー

上述した通り、嫌気性接着剤は金属イオン存在下で酸素を遮断することによってラジカル重合する接着剤であるため、電磁鋼板のような表面が被覆された基材や樹脂基材の接着には、別途金属イオンの供給が必要である。そのため、これらの基材を使用する際には、「AT クイッカ」と呼ばれる当社独自のプライマーを基材に塗布することで常温・速硬化が可能

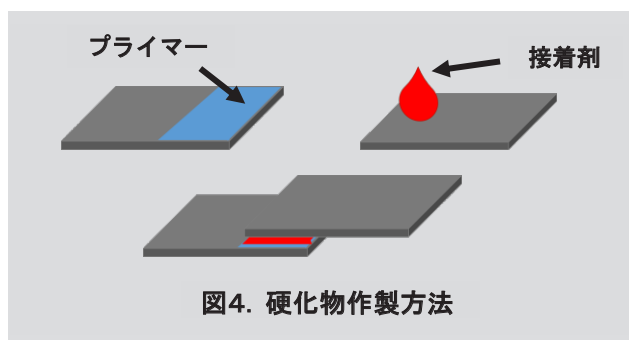
になる。また、金属基材の場合はプライマー無しでも基材から金属イオンが供給されるが、このプライマーを使用することで、より安定して速硬化性を実現できる。

3-3 硬化物作製方法

嫌気性接着剤の使用方法を図4に示す。

1. 基材片面にプライマーを塗布
2. 基材もう片面に接着剤を塗布
3. 上記2枚の基材を貼り合わせ、固定する

以上の工程により、固定後数分以内に強度が発現する。



4 開発品の特徴

3-3で記載した手法を用いて種々基材を接着し、各種条件においてせん断強度を測定した。

4-1 室温におけるせん断強度

開発品2種のせん断強度を SUS304、SPCC-SD（冷間圧延鋼板）、35H300L（電磁鋼板）の3種の基材を使用して測定した結果を表2に示す。

		ATX-HR1	ATX-SS1
SUS304 / SUS304	室温	7.3	12.2
	150°C × 100 h 後 常温	5.0	3.3
SPCC-SD / SPCC-SD	室温	7.2	12.0
	150°C × 100 h 後 常温	3.6	2.7
35H300L / 35H300L ^{b)}	室温	7.2	7.5
	150°C × 100 h 後 常温	7.3	6.6

a) 上記3-3の方法にて接着、24h以上静置後に測定
プライマーとして AT-Quicka VA を使用
引張速度 10 mm/min
b) 35H300L 使用時のみ工作油 G-6339F 使用

いずれの基材に対しても高いせん断強度を有しており、表面が絶縁処理されている電磁鋼板への油面接着性も有していることが示された。また、150°C × 100 時間加熱したサンプルを常温で測定しても大きな強度低下はみられず、高い耐熱性を有することが明らかになった。

4-2 立ち上がり強度

経時でせん断強度を追跡し、強度が発現するタイミングを評価した結果を図5、6に示す。

接着1～3分経過後には強度が発現しており、硬化速度が極めて速いことが分かる。また、プライマーを使用することにより、表面を絶縁処理されている電磁鋼板に対しても同様の硬化速度を実現可能であることが分かった。

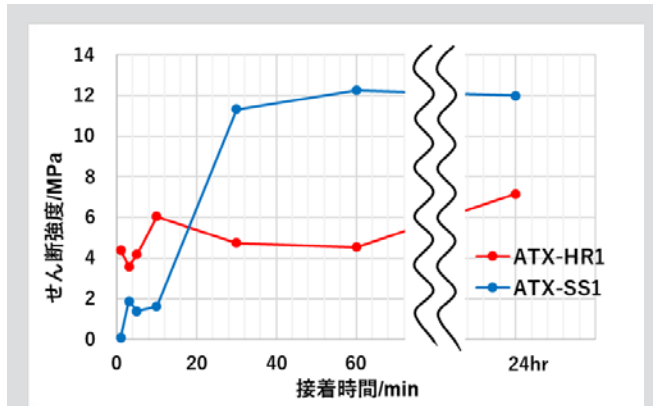


図5. SPCC-SD 立ち上がり強度

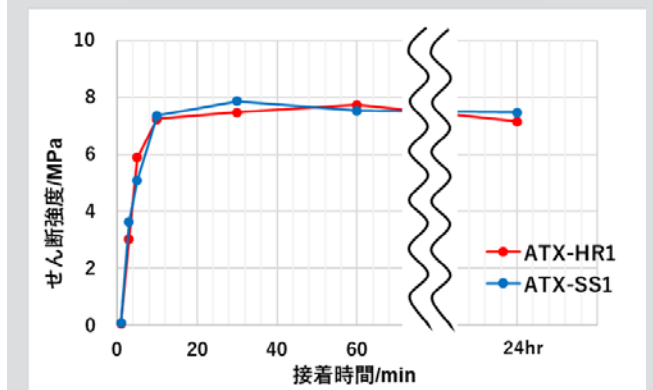


図6. 35H300L 立ち上がり強度

硬化速度は、接着剤の組成改良により顧客要望に応じて制御が可能である。

4-3 油面接着性

モーターコア製造工程において、電磁鋼板を打抜く際のかじり焼きを防ぐために、鋼板の表面には加工油が塗布されている。この加工油を拭き取ることなく鋼板を接着積層させるためには、高い油面接着性が必須である。そこで、接着剤塗布前の鋼板に加工油を塗布し、その有無が接着強度に与える影響を調査した結果を図7に示す。

市販品の嫌気性接着剤では、加工油を塗布することにより大幅に強度低下しており、いずれも基材界面で破壊していた。

一方で、開発品 ATX シリーズは加工油に影響されことなく強度や破壊形態に変化はみられなかった。これは、接着剤樹脂が加工油を吸収し、基材表面から除去することで、接

着剤と基材の密着性低下が抑止され、高い油面接着性が発現したと考えられ、当社独自の材料設計に起因するものである。

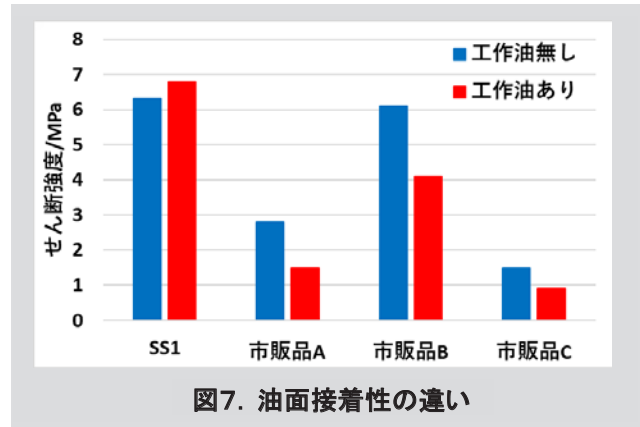


図7. 油面接着性の違い

4-4 ATF 耐性試験

モーターは動作中に熱くなるため、冷却のために ATF (Automatic Transmission Fluid) に浸漬される。このオイルはモーターコアに触れるものであり、接着強度の低下や接着剤の剥離による異物発生、接着剤成分の溶出によるオイル劣化の促進、周辺機器へのダメージなどが懸念される。これらの影響の有無を調査するため、接着剤試験片を ATF 有無で 150℃に加熱し、強度の推移を比較した (図8)。

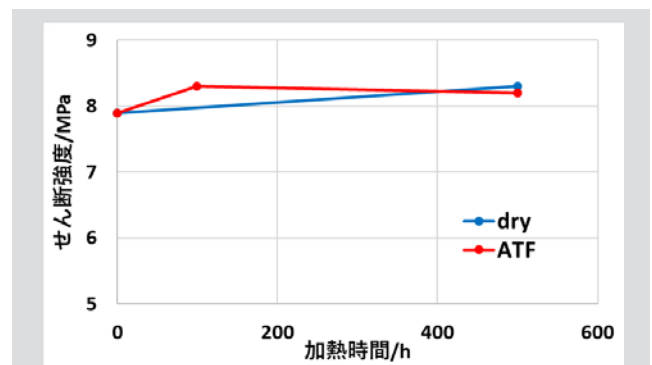


図8. ATF 耐性^{c)}

c) 基材：35H300L
接着剤：ATX-SS1

接着試験片を ATF に浸漬し、500 時間加熱しても強度低下は確認されなかった。また、使用した ATF についても接着剤成分の溶出や劣化の促進が無かったことを各種分析で確認している。以上のことから、当社接着剤はモーターコア使用環境においても安定に使用可能であることが分かった。

4-5 その他電磁鋼板への接着性

電磁鋼板の一例として 35H300L を使用し、評価した結果を示してきたが、その他に種々の表面処理がされた電磁鋼板で評価を行っても、いずれも同様に良好な結果が得られている。以上の結果より、嫌気性接着剤 ATX シリーズは、表面処

理の種類に関わらずあらゆる電磁鋼板に接着可能である。

pp.1010-1015 (1999)

- 7) 西川克江, 栢木浩之, 米野正博, 嫌気性接着剤, 接着の技術, **22**, No.4, pp.30-36 (2003).

5 まとめ

5-1 まとめ

開発した嫌気性接着剤 ATX シリーズは、以下に示す特性を満たすものであり、接着積層法によるモーターコア製造に好適に使用が可能である。

- ・プライマー併用による常温、速硬化性
- ・各種表面処理がされた電磁鋼板への高強度接着性
- ・極めて高い油面接着性
- ・耐熱性
- ・ATF 環境下における安定性

本稿で紹介した2グレード以外にも、粘度や接着特性に特徴を有する複数グレードのラインアップを拡充しており、様々な需要への対応が可能である。

5-2 今後の展望

現在まで、モーターコア積層用途向けで開発を進めてきたが、今後は常温、速硬化性や耐熱性を活かしたモーターコア以外の用途への幅広い展開を予定している。また、さらなる低環境負荷に向けた設計の改良も進める。

6 引用文献

- 1) X.Mosquet, Boston Consulting Group report (2022).
- 2) 西川幸男, 小島徹, 瀬川彰継, 谷本憲司, 小川登史, 金城賢治, 超低鉄損軟磁性材を用いた高効率モータ, Panasonic Technical Journal, **62**, No.2, pp.115-120 (2016)
- 3) 魚住智彦, “電磁鋼板と鉄損の測定 (第2回)”, TechEyes online (2022-8-17), <https://www.techeyesonline.com/article/tech-column/detail/Reference-ElectricalSteelSheet-02/>, (2023-8-10 参照)
- 4) 佐藤尊, 成瀬俊己, 葵生川幸嗣, 戸高孝, 熱的測定によるカシメ積層ステータコアの鉄損分布評価, 日本 AEM 学会誌, **27**, No.2 (2019).
- 5) 開道力, 茂木 尚, 半澤和文, モーター積層鉄心の性能に及ぼす層間短絡の影響, 電気学会論文誌 A, **123**, pp.857-862 (2003)
- 6) 開道力, 竹田和年, 脇坂岳頭, 溝上雅人, 接着電磁鋼板コアの諸特性について, 電気学会論文誌 D, **119**,