

アルミニウムろう付けにおける固形フラックスの開発概論

Introduction to the development of solid state flux in Aluminum brazing



田鶴 葵

森家智嗣

田鶴 葵 研究開発カンパニー研究開発センター電子材料開発室
AOI TAZURU Electronics Materials Development, R&D Center, R&D Company

森家智嗣 電子材料事業カンパニー ハリマテックチェコ
SATOSHI MORIYA Harimatec Czech, Electronics Materials Company

1 はじめに

近年の世界的な環境問題への関心の高まりから、自動車分野では排ガス規制や燃費規制等の取り組みが進められており、カーエアコン等の車載用熱交換器においても小型・軽量・効率化が求められている。そのため、車載用熱交換器を構成する部材はすべて軽量のアルミニウム製であり、アルミニウム部材同士を接合することによって製造されている(図1)。

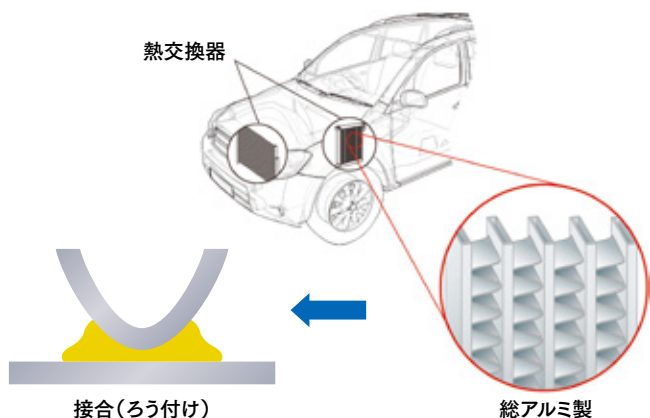


図1 車載用の熱交換器

アルミニウムの接合方法には、溶接・圧接・ろう付け・機械的接合法等さまざまあるが、車載用熱交換器の分野では、熱交換器の小型・軽量・効率化を図るため、①母材を溶かさないうことで寸法精度が高い、②複雑な形状、多点接合でも一度に接合することができ接合不良が起きにくい、③金属結合が形成されるため強度・熱伝導性・気密性が高い、④製造管理コストが低い、といった特徴があるノコロックフラックスろう付け法(NB法)が主流となっている(図2)。

NB法には母材であるアルミニウムより融点の低いAl-Si合金がろう材として用いられる。ろう材がアルミニウムの融点以下で熔融し接合したいアルミニウム同士の接触部分で濡れ広がることでアルミニウム同士を金属結合によって接合する。一方で、ろう材を単純に加熱しただけでは、アルミニウム同士を接合することはできない。それはアルミ

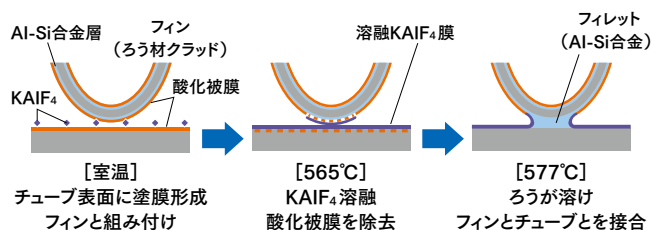


図2 NB法による接合時の概念図

ニウムの金属表面に酸化被膜が存在し、ろう材による接合を阻害するためである。NB法では、この酸化被膜の除去のためにフラックス(フッ化アルミン酸カリウム)が用いられる。部材にフラックスを塗布し加熱することで、565°Cでフラックスが熔融し酸化被膜を除去する。その後577°C付近でろう材がアルミ基材との接触部分にて熔融し濡れ広がることでフィレットが形成される。このように、NB法ではアルミニウムを接合するためにフラックスをアルミ合金表面に供給する必要があるが、フラックス自体は常温で不活性な粉末であり、単体でアルミ合金表面にフラックスを担持させておくのが難しい。このため、アッセンブリ工程等でアルミ合金表面にフラックスを担持させておくためにはバインダが必要である。

従来フラックスのバインダとしては合成樹脂が使用されており、フラックスと樹脂バインダと水(溶剤)を混合したフラックス塗料を、ロールコートや線幅の広いスプレーコートによってアルミ合金表面へ供給してきた。

図3に示すように車載用熱交換器は、冷媒の通路となる

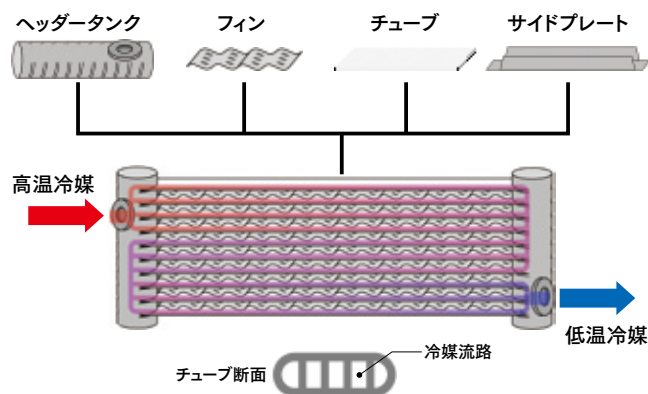


図3 車載用の熱交換器の製造プロセス

チューブ、熱交換させるためのフィン、これらを保持するためのタンク、サイドプレートを基本構成としており、カーエアコンでは、チューブ内部を通過する冷媒から熱を奪い、フィンを通して大気に放熱することが基本的な機能である。近年、熱交換器の小型・軽量・高効率化が求められる中で、アルミニウム部材の薄肉化が進められており、チューブは従来の押出多穴管（押出チューブ）から折り曲げた板材の間にフィン挿入したインナーフィンチューブに切り替わりつつある（図4）。このようなアルミパーツの製造プロセスの切り替えから、小型・軽量・高効率化が試みられている。一方で、ろう付け箇所の微細化や増加によりろう付けの難易度は上がっており、従来のフラックス塗料では、十分な品質のろう付けを行えないことがある。例えば図5のようにフィン部分にフラックス塗料を塗布しても液だれによって接合箇所からフラックスが流れてしまうことで、フラックスが足りない部分では接合不良となり熱交換効率の低下が生じたり、フラックスが過剰な部分ではフラックス残渣による品質の劣化が起きてしまう。また余剰なフラックス塗料中の有機物により環境へ排出するCO₂が多くなってしまふ。このため、複雑で精細な構造の車載用熱交換器部材へのフラックスの新しい供給方法を開発し、製品品質の向上や環境負荷の低減をすることが求められる。そこで今回、塗材が接触した場所へのみ塗布が可能な固形形態のフラックス供給の塗布システムを考案し開発を行った。本稿ではこの固形フラックスの実用化に向けた材料技術開発の概論について報告する。

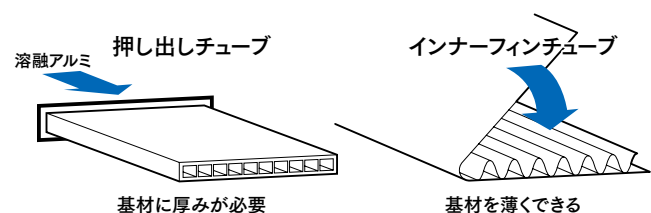


図4 押出チューブとインナーフィンチューブの差異

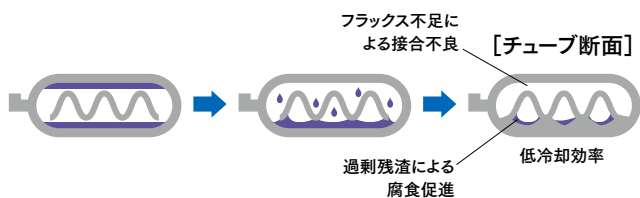


図5 フラックス塗料によるインナーフィンチューブ接合不良モード

2 開発コンセプト

今回の開発にあたり、精細塗布時にフラックス塗料で起きる現象を解決すべく、次のようなコンセプトで開発を進めた。①局所的に少量を塗布することが可能で塗布部を限定できる。②液だれが生じない。しかし、前述のとおり液体状態のフラックス塗材ではこれらの狙いの実現は難しい

ため、狙った場所のみへ固形材を塗布するという新たな発想で、固形材が接触した部分のみ塗膜が成膜されることで、精度が高く、環境負荷の小さい塗布プロセスの実現を試みた。

固形材の塗布を実現するためには塗布時の現象を改めて考える必要がある。固形材が別の基材に付着する際には固形材がアルミ基材に固着、外力により変形し、最後に破断することで固形材の一部が脱離し、破断した材料が基材側に定着することが必要である（図6）。

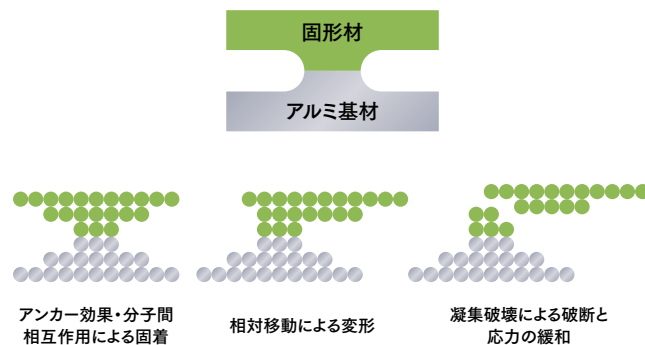


図6 理想的な固形材塗布モード

このため、塗布する固形材には、基材に固着し外力によって変形する粘弾性体の性質と、変形量が閾値を超えると破断（凝集破壊）する2つの性質が求められる。もし変形が起これないと、基材表面に固着することができない。また弾性体としての性質が強いと固着粒子の変形による内部応力が緩和できず、粒子が脱離してしまう。一方、凝集破壊を起こしにくい材料は、最終的に基材に定着できず脱離してしまう。

弾性変形は規則正しく分子が配列した状態から分子の配列がずれるような変化であり、凝集破壊は分子の配列が断裂してしまう変化である。このため、いずれの現象においても分子間の相互作用が小さいほど、変形しやすく、凝集破壊を起こしやすくなる。結晶を構成する相互作用には、相互作用が大きい順に金属結合>化学結合>水素結合>ファンデルワールス力がある。分子間の相互作用をできるだけ小さくするために水素結合やファンデルワールス力で結晶化している結晶性の有機物が固形材の塗布には適している。結晶性有機物としてワックスを例に挙げる（図7）。ワックスでは分子間相互作用はファンデルワールス力のみである。このため変形や凝集破壊を起こしやすく固形材の塗布に適した性質を持っている。

こうしてバイндаである結晶性有機物（以降、固形フラックスと略称）に塗布機能を持たせることを材料設計コンセプトとした。



図7 パラフィンワックス (C=18)

3 固形塗布について

固体を塗布するにあたり、まず理想的な塗布モデルを次のように設定した。①塗布量は変形量に比例する。②変形量は材料に与える力に比例する。③変形に使われる力は、接触部での材料と基材との相対移動および材料が基材に押し付けられる力によって決まる。ただしこれら3つはすべて同じ温度の場合に限定され、単位長さ当たりの塗布量が次の式1に当てはまる状態を理想的な塗布とした。

$$\text{式1} \quad \text{変形量 (塗布量+脱落量)} = \frac{\text{塗布係数} \times \text{材料に与える力I (荷重)} \times \text{材料に与える力II (搬送により材料に加わる力)} \times \text{接触面積}}{\text{材料の変形しにくさ(弾性率)}}$$

接触部が相対移動に伴うせん断破壊によって破断し、破断した分が基材への吸着および脱落量の総量になるというモデルである。ここで、材料固有の値である凝集破壊に要する力や接触面積(真実接触面積)といった項は塗布係数に置き換えられている。このモデルに基づいて固形材の種類を限定し、フラックスの濃度を変えることで硬さを調整した直方体状の試料を圧力をかけてこすり付けることで塗布を行いその塗布量の確認を行った。塗布装置の概略図を図8に、塗布結果を図9に示す。

図9のとおり、塗布量は荷重・接触面積に比例し弾性率に反比例することがわかった。

これにより基材と試料の相対移動と荷重により試料に力を与えることによって塗布量がコントロールできる理想的な塗布が可能な材料系であり塗布方法であることを確認した。

しかし一方で、図9の(b)にあるように弾性率が一定の

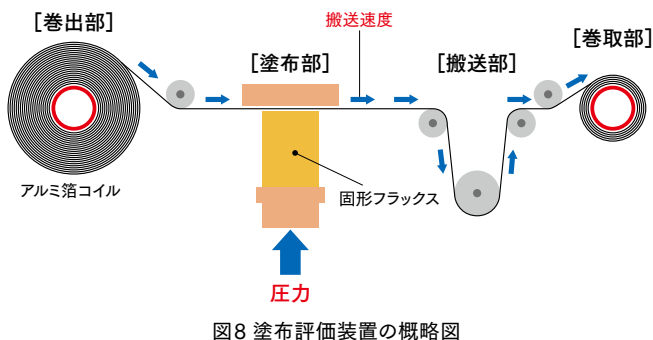


図8 塗布評価装置の概略図

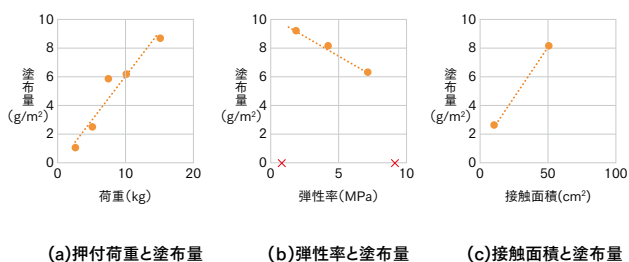


図9 直方体形状の固形フラックスの塗布挙動

値を超える試料を塗布しようとした際には、基材と塗布材との摩擦によりブレーキがかかってしまい塗布ができなくなる結果となっている。今回の検証では、弾性率が高い試料はフラックス濃度が高い試料である。フラックスの濃度が高いほど、固形フラックスの有効成分は高くろう付けには有利に働く。そのため弾性率の高い試料での塗布の可能性を探ることとした。そこで高弾性率試料が塗布できなかった原因の考察を行いながら解決を図った。

4 最適な試料形状の模索

高弾性率試料で搬送停止が起こってしまったのは、固形フラックスからの応力が基材を搬送するモーターの出力およびアルミニウムの破断強度を上回ってしまったためであると考えられる。アルミ基材が受ける固形フラックスからの応力を考えると次のようになる。

$$\text{式2} \quad \text{応力} = \text{材料固有の係数} \times \text{弾性率の関数} \times \text{相対移動速度} \times \text{荷重} \times \text{接触面積}$$

材料を変更することなく応力を小さくするためには、式2で接触面積をできるだけ小さくする必要がある。直方体の固形フラックスを塗布する際は、固形フラックスの板厚が薄くなるほど、接触面積は小さくなるため、より高弾性な試料の塗布が可能になる。しかし板厚が薄いとアルミ基材から受ける応力によって今度は固形フラックス自体が折れてしまう。これは、アルミ基材が相対移動する際に、材料の内部に圧縮応力と引っ張り応力という2種類の内力が生じ、曲げモーメントにより固形フラックスが折れ曲がってしまうためである。板状の固形フラックスがアルミの移動によって力を受けた際には、最も曲げモーメントの大きくなる板の固定端で折れてしまう(図10-1)。

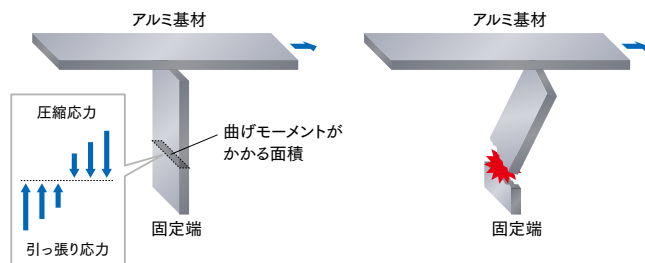


図10-1 固定端の曲げモーメントによる固形フラックスの破損

このことから、固定端の面積を大きくすれば、曲げモーメントに耐えることができると考えられる。そこで、円柱状の固形フラックスを円の中心部で固定して円柱の接触部分を回転でつねに変えることで、最小の接触面積を維持しつつ、固定端の面積を最大とすることとした(図10-2)。

これにより、弾性率8程度のものでしか塗布できな

った直方体形状に対して、直径が10cm程度の円柱固形フラックスでも弾性率の制限を受けることなく塗布することが可能となった。この方法であれば、変形するものであれば理論上のような硬さの固形フラックスも塗布が可能であり、接触面積の減少に起因する塗布量の減少も、固形フラックスの回転数で塗布量を調整することにより解決が可能となった。

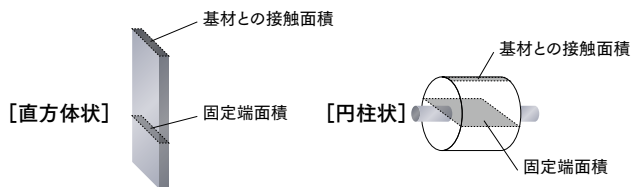


図10-2 直方体状固形フラックスと円柱状固形フラックスの接触面積と固定端面積

5 新たな問題

このようにして短時間塗布が可能になった固形フラックス塗布プロセスであるが、長時間塗布時には新たな問題が生じた。固形フラックスの塗布は固形フラックスが弾性変形し、変形量が閾値を超えたものが破断し、塗膜としてアルミ部材に定着している。すなわち、変形量が閾値を超えないものは破断せず試料表面に残っている。これにより、試料表面に残った「弾性変形した固形フラックス」は変形により熱を生じ、弾性変形熱が試料に蓄積されてしまう。この蓄積された熱によって固形フラックスの表面温度は上がり続け、弾性率は減少し、塗布量が増加してしまう。さらに長時間塗布すると固形フラックスの表面温度はいずれ結晶性有機物の融点に達し、熔融状態と非熔融状態化する。この状態では発生する熱量が安定せず、熔融量が安定しない（材料と基材とのクリアランスが安定しない）。その結果、塗布量はさらに不安定化してしまう（図11）。

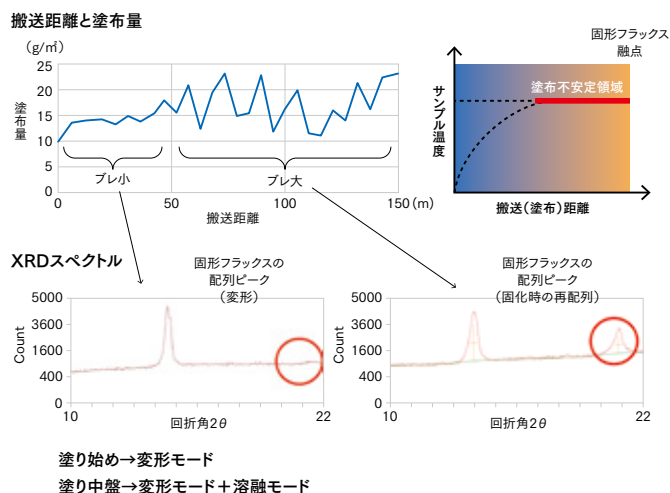


図11 長時間距離塗布時の塗布量ブレ

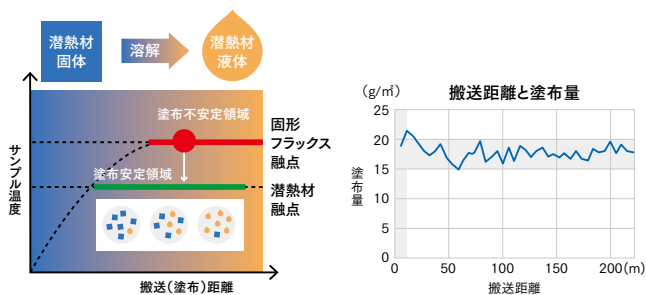


図12 固形フラックス内部の潜熱材の効果

長距離・長時間塗布時も塗布量を安定して制御し続けるためには、固形フラックスの塗布時の温度を制御する必要がある。加熱された材料の温度を制御するためには、変形により発生した熱を冷やすことが有効であるが、冷却機構を導入することは製造コストの増大を招き、環境負荷低減を目標とする今回の検討の目的にはそぐわない。そこで、固形フラックスの主剤より融点の低い潜熱材を配合することを試みた。潜熱材が融点近くで固形フラックスの温度を安定化させることで塗布量の安定化が望める。その結果を図12に示す。塗布時の温度は潜熱材の融点で安定させることができ、長時間塗布時の塗布量安定化を達成することができている。

6 おわりに

今回フラックスの新しい供給方法として固体状のフラックスの塗布の技術概論を述べてきた。この製造プロセスにより、クリーンな局所塗布が可能となり、製品品質の向上や環境負荷低減に貢献できると考えられる製造プロセスの礎を築くことができた。このようにして作成した塗膜を用いることで問題なくインナーフィンの接合も可能となった（図13）。

当社では固形フラックス以外にもアルミニウムのろう付けに必要な材料を種々取りそろえており、お客様の設計や工程に最適なるろう付け材料を提供することで、熱交換器をはじめとするアルミニウムろう付け技術の発展に貢献していく所存である。



図13 ろう付け後外観とフィン接合時のフィレット形成の様子(ハリマ試作品)