

自動車のマルチマテリアル化と異種材接着について

— 内部応力による諸問題の低減 —

Adhesive technology of different materials for automotive body.

— Reduction of problems caused by internal stress —

原賀 康介 (株) 原賀接着技術コンサルタント 専務取締役 首席コンサルタント

E-mail : haraga-kosuke@kcc.zaq.ne.jp

1 はじめに

CO₂削減による地球環境保護や電動車での走行距離向上を目的に、自動車の車体軽量化の動きが活発化している¹⁾。軽量化のためには、高張力鋼板、アルミ、樹脂、複合材料などが適材適所に使用される。そこでの課題は、異種材料の接合方法であり、摩擦攪拌接合による鋼板とアルミ板の接合¹⁾、金属表面にエッチングやレーザーなどで微細な凹凸を設けて成型樹脂を射出成形で凹凸に押し込んで接合する方法¹⁾など新たな接合方法の開発事例は枚挙にいとまがない。このような中で、接着剤による接合もマルチマテリアル化への対応方法として最近注目されているが、接着接合は以前から異種材接合に多用されてきた方法であり、今さらという感もぬぐえない。しかし、自動車車体では大型で複雑形状の部品も多く、強度や耐久性、信頼性、生産性への要求も高く、それらを満足させるためには、まだまだ解決すべき課題は多い¹⁾。異種材接着は、物性値が異なる二つの部品が、さらに物性値が異なる接着剤によって界面で結合しているという特異的な接合であるため、大きな課題の一つは、接着剤の硬化過程や使用中の温度変化で生じる内部応力によるさまざまな問題である。ここでは、異種材接着での内部応力と、それをいかに低減するかという点について説明する。

2 接着部に生じる内部応力^{2,3)}

2.1 硬化収縮応力

室温硬化接着でも加熱硬化接着でも、接着剤は硬化中に体積収縮を起し、接着層に硬化収縮応力が発生する。硬化収縮応力は、一般に、硬化後の弾性率が高い接着剤ほど大きい。加熱硬化接着で硬化温度が硬化した接着剤のガラス転移温度 (T_g) 以上の場合、 T_g 以上の温度では硬化した接着剤の弾性率は低いいため、硬化収縮応力は小さい。

2.2 加熱硬化後の冷却過程で生じる熱収縮応力

接着剤と両部品の線膨張係数は異なっており、接着剤の線膨張係数が最も大きい場合がほとんどである。また、接着剤と両部品は界面で結合しているため、加熱硬化の場合は、室温までの冷却過程で熱収縮応力が発生する。硬化温度が硬化した接着剤の T_g 以上の場合、硬化温度から T_g までは接着剤の弾性率が低いいため熱収縮応力は小さく、 T_g から室温までの間で大きな熱収縮応力が発生する。

2.3 使用中の温度変化で生じる熱応力

(1) 室温硬化接着の場合

図1²⁾に一例を示すように、室温状態では硬化収縮応力が働いているが、加熱されると温度の上昇に伴って接着剤が最も膨張するために硬化収縮応力は低減していき、ある温度 T_0 (図1では $T_0 = 70^\circ\text{C}$)で内部応力はゼロとなる。 T_0 以上に加熱されると接着剤はさらに膨張するが、高温では、一般に接着剤の弾性率が低下するため、大きな熱膨張応力は発生しない。逆に、使用中に低温になると、接着剤が最も収縮し、弾性率も高くなるため、新たに熱収縮応力が生じ、内部応力は硬化収縮応力+熱収縮応力となる。

(2) 加熱硬化接着の場合

室温では硬化収縮応力と硬化後の冷却過程で生じた熱収縮応力との内部応力が加わっている。使用中に温度が上がると接着剤の膨張により、熱収縮応力は低減していき、 T_g 以上では接着剤の弾性率が大きく低下するため、内部応力は非常に小さくなる。逆に、使用中に低温になると、接着剤が最も収縮し、弾性率も高くなるため、新たな熱収縮応力が生じ、内部応力は大きくなる。

(1)(2)のように、接着層の内部応力は低温使用時に最大となるため、低温時に問題が生じることが多い。なお、内部応力は、接着端部の界面で最大となるため、接着端部界面での接着性の向上は特に重要である。

3 内部応力による諸問題と解決策

3.1 低剛性部品同士の接着

加熱硬化接着の場合は、硬化のために加熱すると、線膨張係数が大きい部品の寸法が線膨張係数の小さな部品の寸法より大きくなる。この状態で接着剤が硬化して両部品が接着し、室温までの冷却過程では線膨張係数が大きい部品が大きく縮むため、部品に反りが生じる。室温硬化接着では反りは小さい。

室温硬化接着でも、接着剤の硬化収縮応力により接着面方向に圧縮力が加わるため、板の表面に皺が生じ意匠性を損ねることがある。加熱硬化接着の場合は、熱収縮応力も加わるので、一般に、室温硬化接着より皺が大きくなる。

加熱硬化接着での反りや皺を低減するためには、①

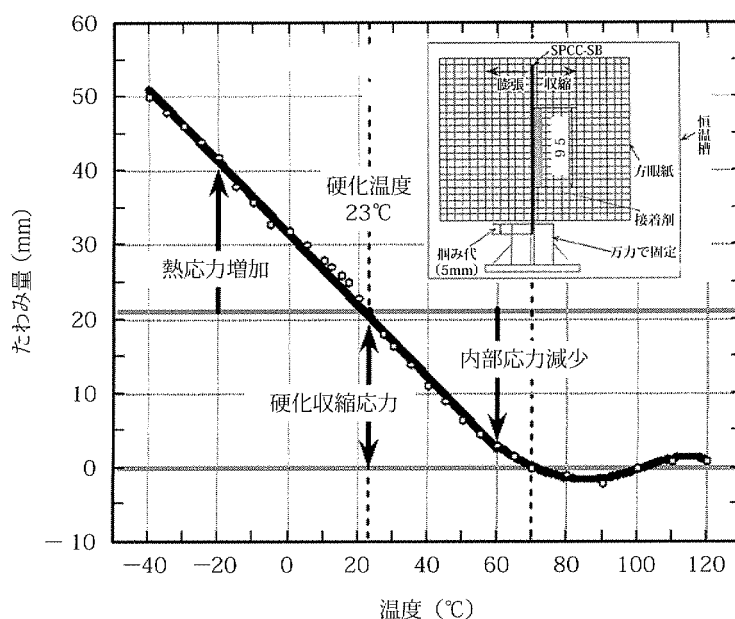


図1 室温硬化接着における温度とバイメタル撓み量の測定結果

T_g 以下での弾性率ができるだけ低い接着剤を用いる、②硬化温度をできるだけ低くする、③できるだけ T_g の低い接着剤を用いる、④硬化後の冷却速度を遅くして応力緩和をさせる、などが効果的である³⁾。接着層を厚くすると、応力値は小さくなるが、収縮力は大きくなるため逆効果となる。

3.2 高剛性部品同士の接着

室温硬化接着の場合は、接着剤の体積収縮による硬化収縮応力が接着部に作用するが、部品の剛性が高いため部品の変形で応力を分担することができず、硬化収縮応力は接着界面と接着層のみに作用する。接着端部の界面に作用する応力値が界面での結合力より高くなると、剥離を生じることとなる。内部応力による剥離を回避するためには、①弾性率の低い接着剤を用いる、②接着層の厚さを厚くして内部応力を低下させる、③硬化速度を遅くして硬化過程で応力を緩和させる、などが効果的である³⁾。短時間硬化では応力緩和は期待できない。

加熱硬化接着の場合は、室温や低温では、高い内部応力が働いており、室温硬化接着より剥離しやすい状態にある。内部応力による剥離を回避するためには、① T_g 以下での弾性率ができるだけ低い接着剤を用いる、②硬化温度をできるだけ低くする、③できるだけ T_g の低い接着剤を用いる、④硬化後の冷却速度を遅くして応力緩和をさせる、⑤接着層を厚くする、などが効果的である³⁾。

3.3 高剛性部品と低剛性部品の接着

図2に示すように、接着層の厚さが均一でない場合は、接着層が厚い部分で低剛性部品が接着剤の収縮によって接着層に引っ張られ、表面が凹んだ状態となる。低剛性部品表面の意匠性が低下するだけでなく、接着剤に引っ張られた部分では、部品のスプリングバック力が接着部にクリープ応力として作用するため、長期使用時のクリープ耐久性が問題となる。できるだけ柔らかい接着剤を用いたり、接着部全体にわたって接着層を厚くすることにより、凹みを低減できる。

図3に示すように、線膨張係数が大きな低剛性部品を線膨張係数が小さな高剛性部品にはめ込んで接着する場合、加熱硬化接着の場合は、加熱温度まで加温すると低剛性部品の膨張により部品が反り上がって接着層に欠陥が生じる。接着欠陥は強度低下だけでなく、水分の浸入による劣化や電食を引き起こすことにもなる。部品精度を考慮し、低剛性部品の寸法を小さくしておくなどの配慮が必要である。室温硬化接着を行えば、接着欠陥の問題を解消することができる。

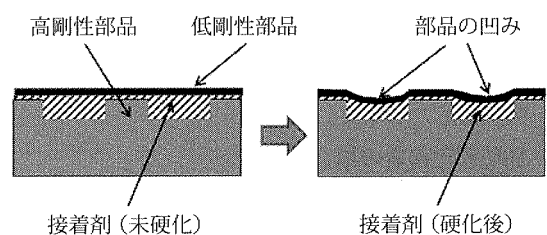


図2 接着層厚さの不均一による薄板の凹み

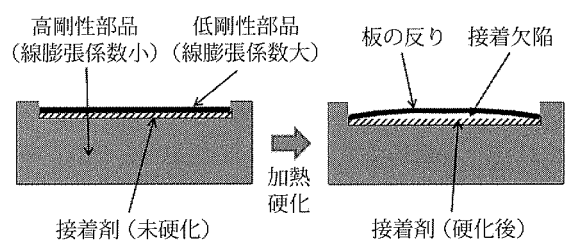


図3 はめ込み接着における反りと欠陥の発生

3.4 勘合接着²⁾

穴に軸を挿入して接着する勘合接着においては、接着層の厚さ(クリアランス)は穴径と軸径とで決まる。穴側部品と軸側部品の線膨張係数、接着剤の硬化温度により接着層の内部応力は大きく異なる。

(1) 穴部品の線膨張係数が軸部品の線膨張係数より大きい場合

図4(A)のように、室温硬化接着の場合は、使用中に高温になると、穴の内径の膨張は軸の外径の膨張より大きいためクリアランスは広がり、接着剤は径方向に引っ張られることとなる。接着界面や接着剤の引張り力

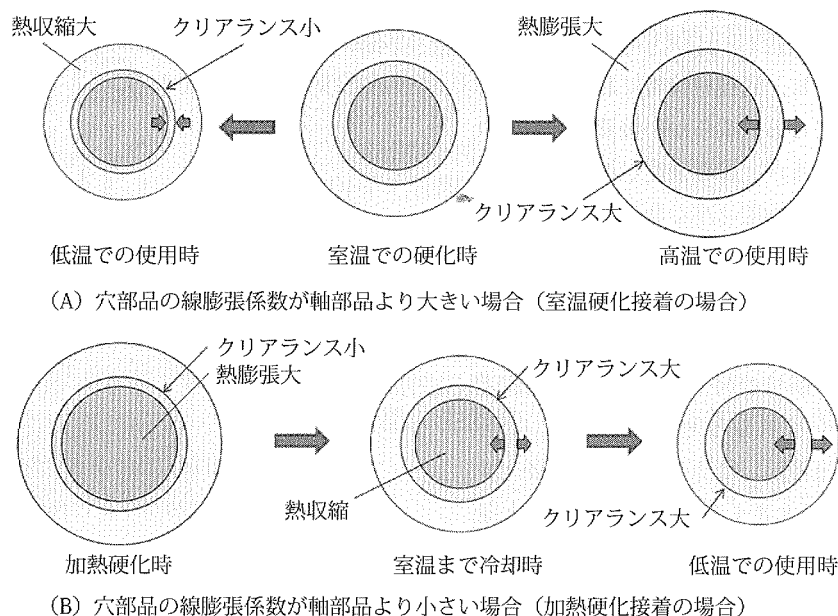


図4 接着層の厚さ方向に拘束された部品での内部応力

や接着剤の伸びがクリアランスの拡大による接着層への引張り力や径方向変位に耐えきれなくなれば接着部で破壊が生じる。低温では、クリアランスは小さくなり接着層には圧縮力が加わるので破壊の心配は無い。

加熱硬化接着の場合は、硬化温度でクリアランスが大きくなった状態で硬化して、冷却につれて接着層が圧縮されていくので、接着部の破壊の心配は無い。しかし、室温で接着剤を塗布して差し込んだ後に硬化温度まで加熱すると、クリアランスが広がるため、接着層に空気を引き込んで接着欠陥が生じることとなる。穴部品を予熱してクリアランスを拡げておいて、接着剤を塗布して差し込み、加熱硬化するのが適当である。

(2) 軸部品の線膨張係数が穴部品の線膨張係数より大きい場合

室温硬化接着の場合は、使用中に高温になると、軸の外径の膨張は穴の内径の膨張より大きいためクリアランスは狭くなり、接着層は圧縮されていくので、接着部の破壊の心配は無い。低温になると、クリアランスは大きくなるため、接着剤は径方向に引っ張られることとなる。

接着界面や接着剤の引張り力や接着剤の伸びがクリアランスの拡大による接着層への引張り力や変位に耐えきれなくなれば接着部で破壊が生じる。

加熱硬化接着の場合は、図4(B)のように、硬化温度でクリアランスが狭くなった状態で硬化して、冷却につれてクリアランスが広がっていくため、接着剤は径方向に引っ張られることとなる。接着界面や接着剤の引張り力や接着剤の伸びがクリアランスの拡大による接着層への引張り力や変位に耐えきれなくなれば接着部で破壊が生じる。

(3) 接着破壊を防止するためのクリアランス設計

温度変化に伴うクリアランスの増大によって接着剤の径方向に加わる引張り力や変位による破壊を防止するためには、破断伸びが大きな接着剤を用いれば良いが、硬くて強度が高い接着剤では破断伸びは大きくない場合が多い。このような場合は、クリアランスを大きく設計することによって、接着剤に加わる伸び率を小さくすることができる。

4 内部応力による諸問題の新しい対応策 —接着剤への物性傾斜の付与—

これまでに述べたように、異種材接着において内部応力は種々の問題を生じさせる。柔らかい接着剤を用いれば、内部応力を低減できるが、接着強度が低下する。硬い接着剤を用いれば、接着強度は高くなるが内部応力は増加し、破断伸び率も低下する。そこで、一種類の接着剤で、一つの接着箇所の中で硬い部分と柔らかい部分や破断伸び率が大きな部分を作り込むことができれば理想的である。二液エポキシ系接着剤や二液ウレタン系接着剤では、最適配合比からずれると硬化不良を生じるが、SGA（変性アクリル系接着剤）はラジカル反応で硬化するため、二液の配合比が大きく変化してもきちんと硬化する特徴がある。この点を利用して、硬い組成の液と柔らかくて伸びが大きな組成の液を組み合わせる配合比を連続的に変化させると、硬い接着部と柔らかくて伸びが大きな接着部を任意に連続的に作ることができる¹⁾。図5¹⁾に一例を示すように、部品の剛性、形状、要求機能に合わせて最適な物性配置を決めることにより、内部応力に起因する諸問題を大きく改善することができる。

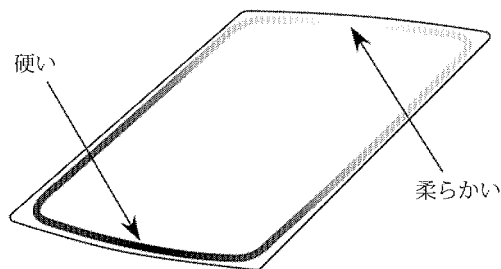


図5 熱適合傾斜機能継手によるルーフの接合

特性に対して接着のどのような因子がどのように影響するのかを考えて構造設計や接着剤に要求する物性値の設計を行う必要がある。

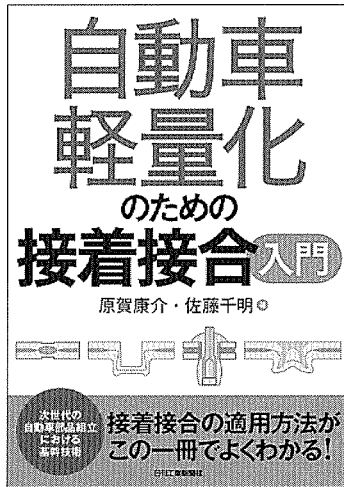
参考文献

- 1) 原賀康介, 佐藤千明著, “自動車軽量化のための接着接合入門”, 日刊工業新聞社刊, (2015年), P. 9, 28, 54, 57, 109, 124
- 2) 原賀康介, “高信頼性を引き出す接着設計技術—基礎から耐久性, 寿命, 安全率評価まで—”, 日刊工業新聞社刊, (2013年), P. 26, 50, 91, 182
- 3) 原賀康介, “高信頼性接着の実務—事例と信頼性の考え方—”, 日刊工業新聞社刊, (2013年), P. 162, 169

5 おわりに

異種材接着での内部応力による諸問題と、低減策について説明した。異種材接着を制するためには、接着の内部応力を制することが重要であり、加熱硬化接着にこだわらず、室温硬化接着の活用なども検討する必要がある。接着剤の選定が先にあるのではなく、要求される機能・

接着剤によるものづくりを行う技術者のための教科書

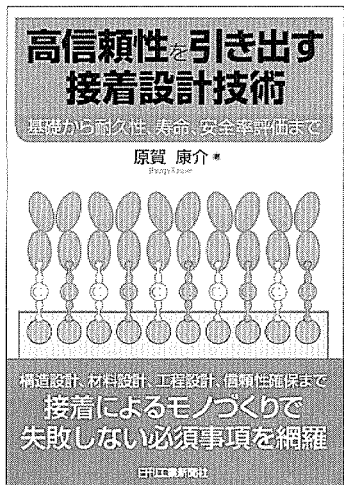


『自動車軽量化のための接着接合入門』

原賀康介，佐藤千明 共著
A5版216ページ
日刊工業新聞社刊（2015年）
¥2,700円（消費税込）

- 第1章 接着接合による車体軽量化への期待
- 第2章 接合法の種類
- 第3章 接着剤による接合・組立技術
- 第4章 自動車の材料多様化に対応する接着技術の課題
- 第5章 信頼性の高い接着接合を行うためのポイント
- 第6章 機能、生産性、コストを並立させる接着剤

内容詳細は、弊社ホームページをご覧ください。

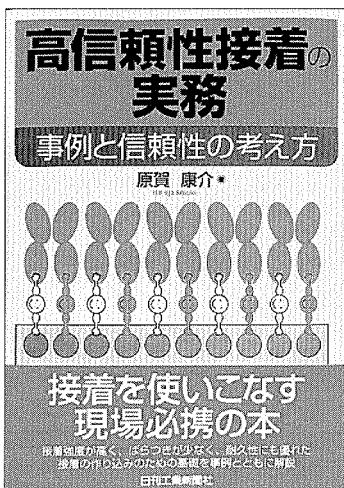


『高信頼性を引き出す接着設計技術 -基礎から耐久性、寿命、安全率評価まで-』

原賀康介 著
A5版272ページ
日刊工業新聞社刊（2013年）
¥2,808円（消費税込）

- 第1章 接着の基礎知識
- 第2章 接着強度や性能に影響する諸因子
- 第3章 接着強度のばらつきと製品の信頼性
- 第4章 接着耐久性に影響する諸因子と寿命評価法
- 第5章 設計基準と安全率
- 付 録 接着剤の種類と特徴

内容詳細は、弊社ホームページをご覧ください。



『高信頼性接着の実務-事例と信頼性の考え方-』

原賀康介 著
A5版240ページ
日刊工業新聞社刊（2013年）
¥2,592円（消費税込）

- 第1章 接着接合の特徴・機能と、事例に見る活用と効果
- 第2章 接着設計技術と接着管理技術
- 第3章 実際の高信頼性接着の作り込み

内容詳細は、弊社ホームページをご覧ください。



株式会社 原賀接着技術コンサルタント

<http://www.haraga-secchaku.info/>

MATERIAL STAGE

特集

自動車のマルチマテリアル化,
接合・密着性向上のための異種材料接着
ハードコート材料における耐候性・耐キズ性向上

ニュース&トピックス

- ・ LEC ; イオン液体を利用した次世代有機発光デバイス
- ・ プラスチック光ファイバケーブルの
動的粘弾性パラメータの温度特性

連載

労働安全衛生法改正に伴う化学物質のリスクアセスメント義務化 第3回
～続・エポキシ樹脂 CAS 番号物語～ 硬化剤 CAS 番号備忘録 第13回
台湾・韓国・中国における化学産業事情 第28回

3

2016◆Mar