



接着の科学

高田忠彦 (広島大学産学・地域連携センター 特命教授)

1) はじめに

接着は私たちの身の回りに多くみることが出来ます。私たちの生活と切ってもきれない密接な関係にあります。本日の講義では、私たちの身の回りで見られる接着について、やさしくお話ししてみたいと思います。

私は、企業（繊維会社）に37年間勤め、その中、31年間は研究所勤務でした。研究テーマは、ほとんど接着に関する技術開発でした。皆さんが毎日乗っておられるであろう自動車には、タイヤがついています。実は、タイヤはゴムと、ゴムを補強するタイヤコードで出来ています。そして、ゴムとタイヤコードは接着剤でくっついているのです。ゴムとタイヤコードがしっかり接着していないと、タイヤはその機能を発揮できません。皆さんの乗っておられる自動車にはほとんどラジアルタイヤが使われています。ラジアルタイヤには2種類のタイヤコードが使われています。ひとつはスチール繊維であり、もう一つは有機繊維（主としてポリエステル繊維）です。後ほど、この技術について少し詳しくお話ししますが、私はポリエステル繊維とゴムの接着技術を開発してきました。この分野の専門家と思っています。それでは、最近起こりました中央高速自動車道の笹子トンネルの天井板崩落事故を含めて、以下、接着について順を追ってお話ししていきます。



図 1 2012年12月18日 TSS文化大学で講演する筆者

2) 接着とは、接着剤とは何か？

接着とは、接着剤を使用して物と物（被着体という）とを接合することです。物と物とをくっつける接合法には、接着法の他にリベット、ボルト、釘などを使う機械的接合法、溶接法や組合せ法などがあります（図2）。接着法では、接着剤をうまく選択することによって金属とプラスチック、繊維とゴムなど異種材料との接着が可能であり、接着面が広く、力のかかり方（応力という）が均一であるために、疲労耐久性が優れています。また、耐振動性や耐絶縁性も良好です。被着体表面が平滑であり、意匠性（着色や模様を描けること）が良好であることも特長です。機械的接合法や溶接法に比較し、接着法はこのような特長を持っていますが、接着法にも課題や難点がありますので、種々の接合法の特徴を考えながら最適な接合法を選択していくことが大切です。



図2 接着の方法

接着剤は、一般的に接着成分を有機溶剤もしくは水に溶解もしくは分散させた常温で溶液状もしくはペースト状のものを言います。接着成分が常温では固体で、熱をかけて液状もしくはペースト状に変化させるものもあります。ホットメルト接着剤といわれます。液状もしくはペースト状の接着剤を被着体に塗布し、同種もしくは異種の被着体を接着後、溶剤もしくは水を飛散させることによって、接着成分を固化（硬化）させます。接着性は、被着体と接着成分が良くくっつくこと（相互作用という）と固化後の接着剤分が強いこと（凝集力という）に左右されます。

接着剤を使用する接着法は特長を持ちながらも、課題も多くあります。リベット、ボルト・ナットや釘を使う機械的接合法に比較すると、接着性発現まで、乾燥→固化の時間がかかります。接着剤は、高分子化合物である場合多く、そのために耐熱性が低いですし、経時的に性能劣化も懸念されます。性能劣化は、静的、動的な力のかかり方に依存します。また、被着体の種類（材質）により、最適な接着剤の選択が必要です。

均一で良好な接着性は、接着剤の塗布の均一性に依存します。接着剤の塗布のばらつきを減少させることが重要になります。これは、作業者の技術レベルにも依存します。また、接着剤には溶剤が使われている場合も多く、溶剤の揮発による環境や安全性の配慮も必要です。

3)接着剤の歴史

接着剤の歴史は極めて古く、既に旧約聖書にもその記載があります。接着剤の始まりは、天然アスファルト（鉱物性接着剤）だと言われ、ノアの箱舟、バベルの塔にも使われたそうです。その後、漆喰や石膏、膠、ゼラチン、カゼインなどの動物性接着剤、でんぷん、松ヤニ、天然ゴムなどの植物性接着剤など、使われる接着剤の種類も広がってきました。パピルスは紙（paper）の語源とも言われますが、繊維質のパピルスを縦横に交叉させ固着化させるのに“でんぷん”を用いたとのことでした。

日本においても天然アスファルトが最初の接着剤と言われています。約4000年前の縄文時代に、狩猟に用いる弓矢、やり、石鏃の接着に用いられました。平安時代には中国から膠が入り、ススを膠で固めて墨が作られたと言いますし、弓、鎧などの武具もこの接着剤を使って作られたと言います。漆は、植物の樹液で作られますが、奈良時代以降、金閣寺の金粉の接着や仏像制作に使われました。その後、接着剤は、紙、布、木材の接着にでんぷんが使われるようになりました。でんぷんは“ねまり”とも言われ、この言葉が“糊”

の語源とされています。松ヤニ、鳥もち、アラビアゴムなどの天然産の接着剤が数多く使用されました。

その後、合成接着剤の歴史が始まりますが、1938年、セルロースを原料としたニトロセルロースを酢酸エチルなどの溶剤に溶かしたものが日本で最初の合成接着剤とされています。現在は、1000以上の合成接着剤が開発されています。これらの接着剤が私たちの生活に役立っているわけです（図3）。

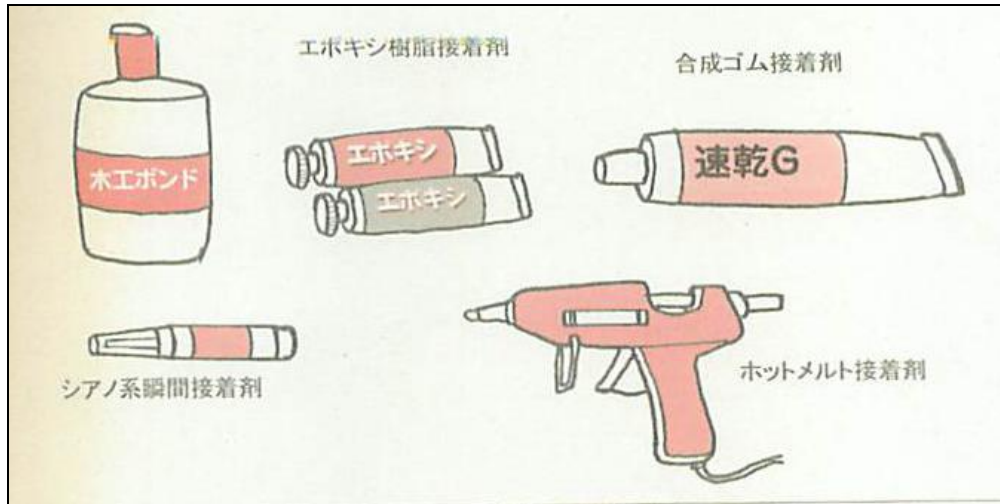


図3 接着剤の種類

4) 接着のポイント

被着体表面に液体、もしくはペースト状の接着剤を塗布することから接着プロセスは始まります。その際、接着剤が、被着体の表面を均一に濡らすことが大きなポイントとなります（図4）。斑付きや厚みが不均一な塗布状態では、良好な接着性能を得ることが出来ません。接着剤の塗布の次は、同種または異種の被着体同士を合わせ、溶媒（溶剤または水）を揮散（蒸発）させる為に乾燥させます。その際、接着成分が固化（もしくは硬化）します。硬化はエポキシ接着剤に代表的されますが、化学反応の一種で、接着成分が反応することにより、高分子量化すると同時に、分子間が結合（架橋という）し、接着成分が強くなること（凝集力が高まる）を言います。

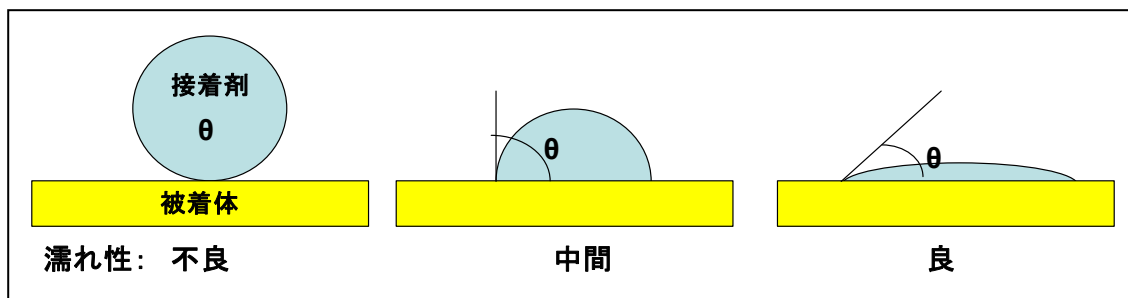


図4 接着剤の濡れ性

被着体表面に接着剤を均一に塗布できる、すなわち被着体表面が接着剤で均一に濡れるかどうかは、被着体表面の物理的、化学的な状態によります。接着剤を塗布する前に接着面を清浄化することも重要です。表面性質に合わせた接着剤の選定も重要です（図5）。

- 接着剤の溶媒（溶剤もしくは水）が揮散（蒸発）し、**接着成分が固化（硬化）**すること

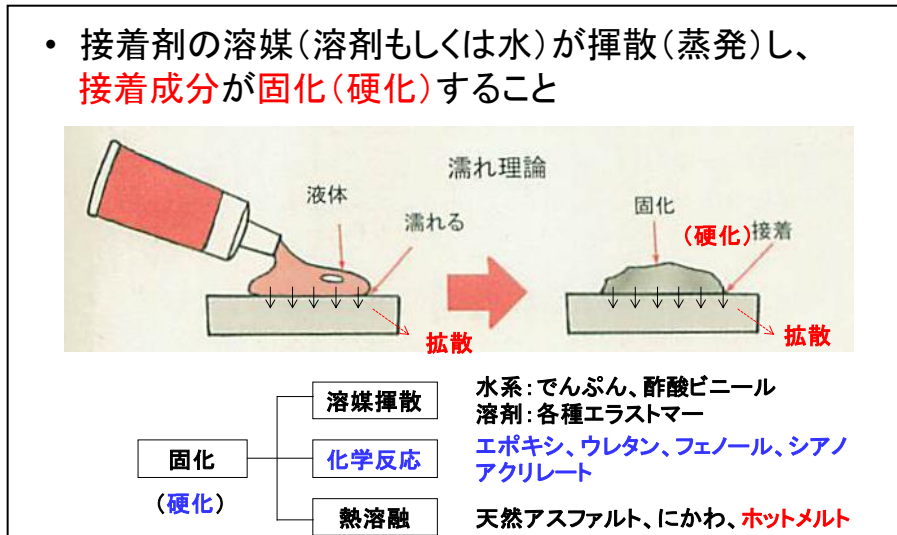


図5 接着剤の固化（硬化）

5) 接着強さ(接着力)は何で決まるか？

接着性を決めるポイントは、接着剤の濡れ性、即ち、接着剤成分と被着体表面の相互作用と接着成分の凝集力とのバランスに関係していると言いました。即ち、①接着成分固化後の強さ（凝集力）と②界面接着力、即ち、接着成分と被着体との相互作用です。従って、接着力は、①と②のバランスで決まります（図6）。

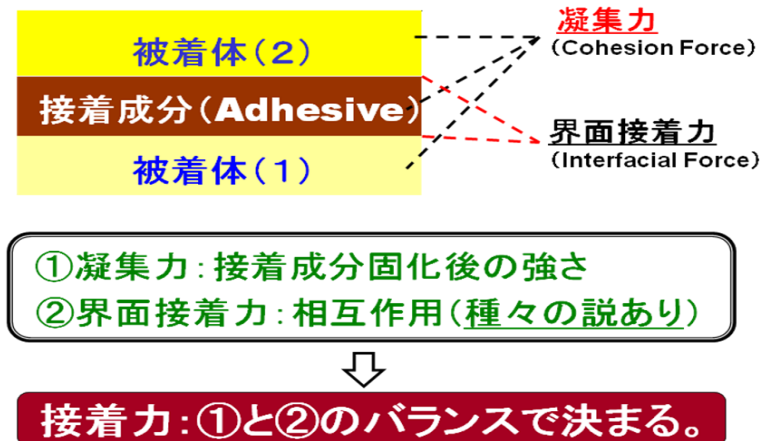


図6 接着強さの決め手

接着成分と被着体との相互作用については、もう少し説明しましょう。

この相互作用については、多くの理論・学説があり、まだ十分に解明されているとは言えませんが、図7に示すように、大きく分けて、①機械的結合 ②物理的相互作用 ③化学的相互作用の3つに分けられます。①の機械的結合は接着剤成分が、被着体の凹凸に入り込み固化することで発現します。この接着は、投錨効果（アンカー効果）と言われるものです。②の物理的相互作用は、接着成分と被着体表面を構成している分子が引き合う力によってくっつくというものです。接着剤の分子が、被着体に近づきますと、相互の分子に引き合う力が出てきます。これがファン・デア・ワールス力といわれるものです。この力は、水素結合よりも弱い力ですが、接着力に関係してきます。

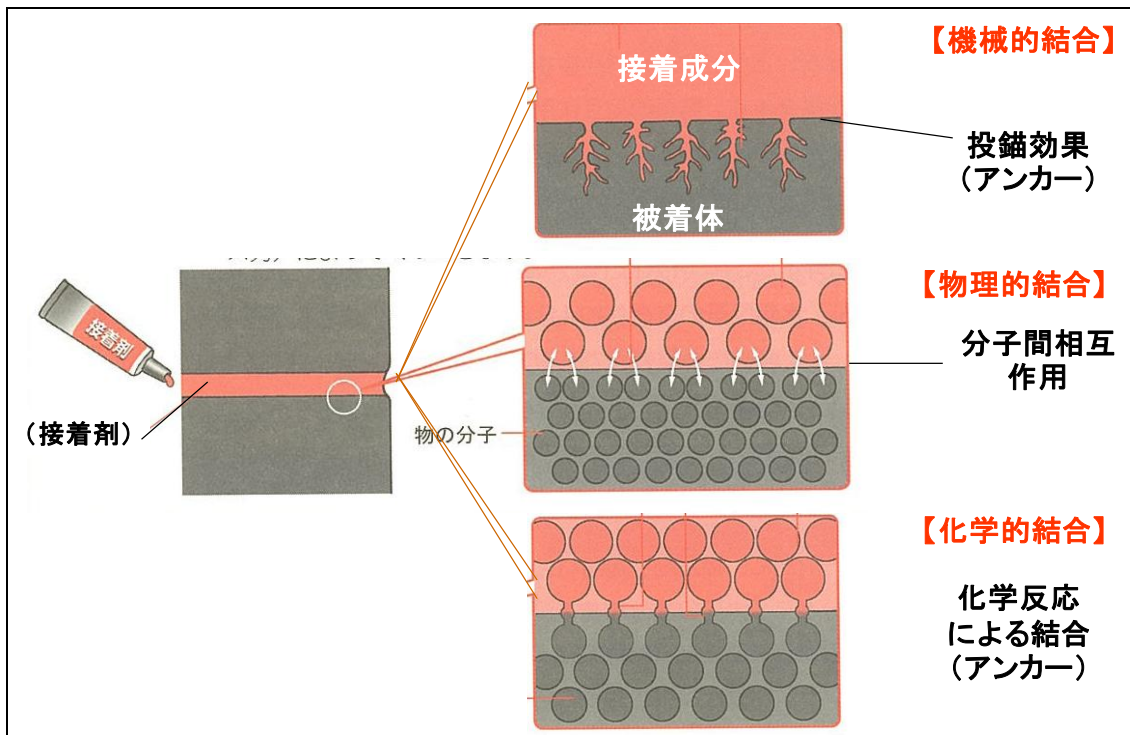


図7 接着の機構

接着成分と被着体分子が近づくためには、被着体を接着剤で十分に濡らすことが大事です。それ故、接着剤は溶液が多いのです。③の化学的相互作用は、接着剤分子と被着体分子と化学反応を起こしてひっつくという考え方です。接着力の発現は、これらが単独で発現するというより、むしろ複合的に絡み合っていると考えるべきです。また、③の化学的相互作用に関しても、接着剤と被着体が相互に反応して共有結合を起こすというより、むしろ水素結合のような相互作用を考えたほうが、後に述べる接着力の評価からも妥当ではないかと考えられます。接着力を向上させるには、接着剤と被着体の相互作用を高めることが重要になってきます。従って、被着体の表面のみを、その接着剤との親和性を向上させるように改質することが接着力を高める為の手法になってきます。即ち、濡れ性を高めることが最も大事になるということです。

6) 接着強さの評価法

これまで、接着強さあるいは接着力という表現をしてきましたが、実は、接着の真の強さは分らないのです。私たちは、接着力の強弱は、接着成分と被着体との破壊強さを測定して、この値を接着強さ（接着力）に代替しているのです。このことから、破壊させる方法によっても、その値は変わってくるだろうことは、容易に想像が付きまます。

確かに破壊強さを測定する方法は多くあります。確かに、評価法を替えることによって接着強さは変わってきます。また、接着強さは、測定値がばらつきまます。これらのことを十分認識しておくことが大事です。真の接着強さ評価法の開発も期待されています。

破壊強さの測定法には、①引張接着強さ ②圧縮・引張せん断接着強さ ③割裂接着強さ ④剥離接着強さ（90度、180度）等があります。接着強さは、破壊の方法によっても異なりますので、十分に注意する必要があります。引張せん断強さ、剥離接着強さを併用して評価する場合も多いようです（図8）。

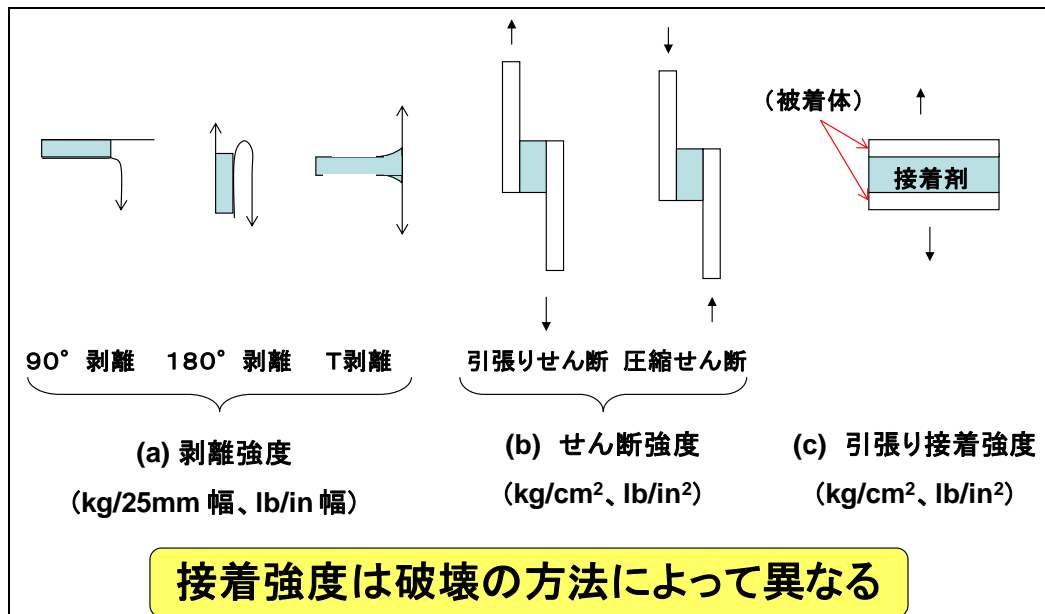


図8 接着強さの評価法

例えば、エポキシ樹脂で接着させた2枚の鋼板の接着力は、図8の(a)剥離強度(T剥離)では1.6kg/インチを示し、(b)せん断強度(引張せん断)では750kg/インチ²を示します。接着強度が破壊方法により異なった値を示す一つの例です。従って、接着させる場合には、どのような応力(剥離力か、せん断力か)がかかるかを十分に考慮することが大切です。また、図9からも明らかのように、接着強度は、評価法によって異なるだけでなく、接着剤の弾性率や接着成分の厚さ(接着剤付着量)によっても変化します。

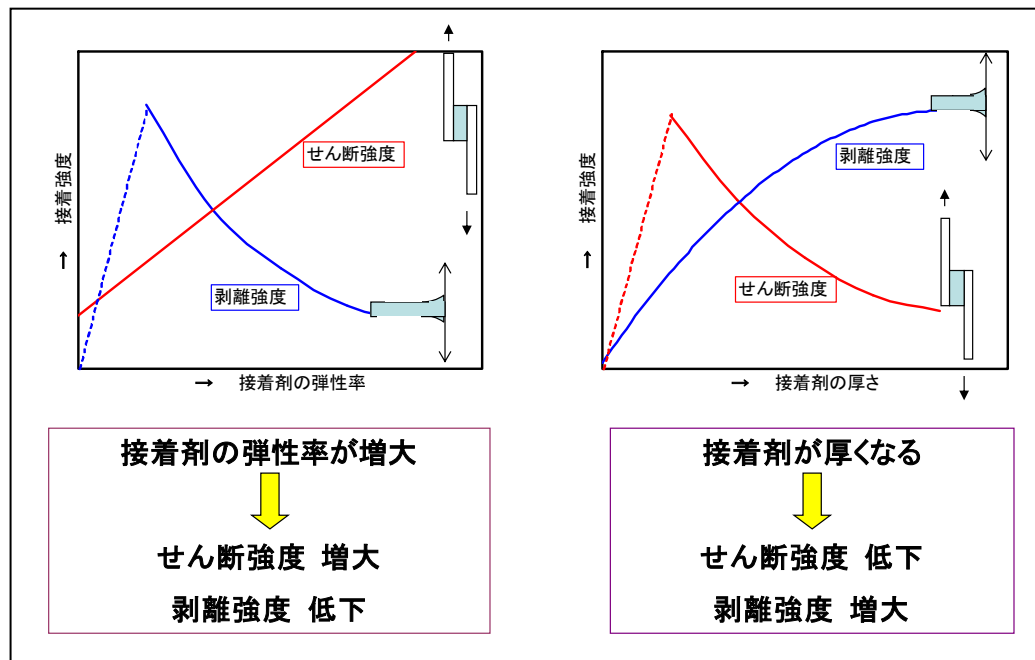


図9 接着強さに影響する接着剤弾性率及び厚さ

接着剤の選定には、細かな注意を払うことが肝心です。また、評価後の破壊の状況を観察することも必要です。接着成分と被着体の界面破壊、接着成分の凝集破壊、被着体の凝集破壊、それらの混合破壊か、破壊の形態はいろいろあります。

7) 接着剤の種類

私たちが使用している接着剤の数は、非常に多くあります。接着剤の分類方法はいろいろありますが、主として、①主成分の化学構造 ②化学反応 ③構造型、準構造型、非構造型から分けられています。化学構造による分類としては、接着剤は有機質系と無機質系に分けられ、有機質系の中も天然系と合成系に分類されますが、合成系接着剤が多く使われるようになってきています。また、合成系にも多くの接着剤があることが、図10からもわかります。用途に応じて、コストや性能から使い分けられているのが現状です。

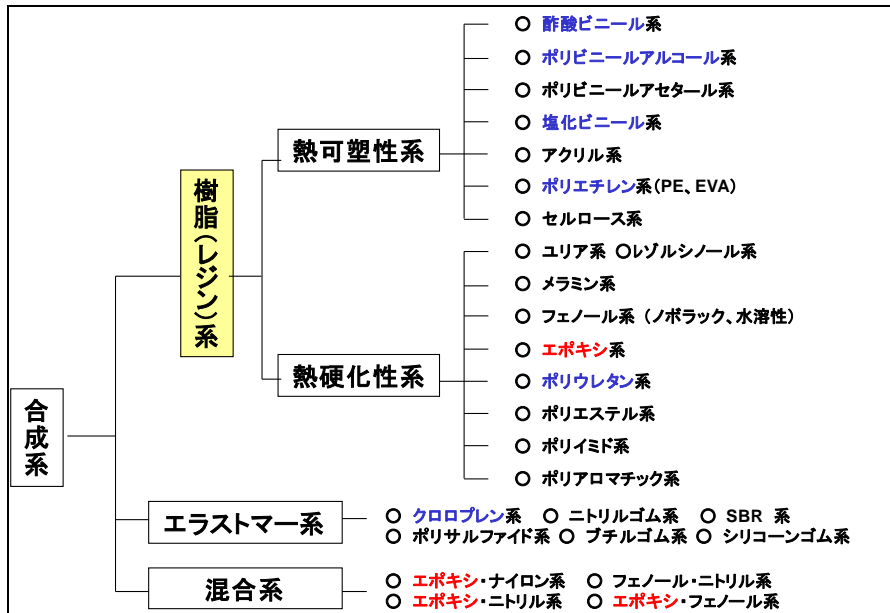
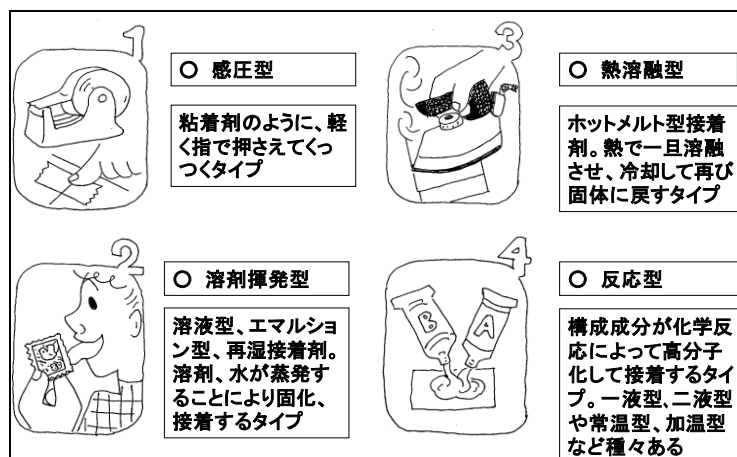


図10 合成接着剤の種類

また、接着に仕方による分類法もあります。図11に示す感圧型、溶剤揮発型、熱溶融型及び反応型の4種です。感圧型は、粘着剤のように軽く指で押さえて、くっつけるタイプです。熱溶融型は、ホットメルト接着剤とも言われ、熱をかけることによって一旦溶融させ、冷却して再び固体に戻すタイプです。接着芯地はホットメルト接着剤が塗布されており、熱をかけて、他の織物と接着させます。溶剤揮発型は最も一般的な接着法であり、溶媒型、エマルジョン型及び再湿型などがあります。再湿型接着剤の典型的な例は、郵便切手です。予め塗布された接着剤を湿潤させて接着させます。このことは皆さんが良くご存じのところですが、



反応型は、構成成分が化学反応 図11 接着の仕方による分類 です。一液型、二液型や常温型、加温型などいろいろなタイプがありますが、典型的な例は、エポキシ接着剤でしょう (図11)。

8) 接着はどこに使われているか？

身の回りに多くの接着剤が使われているとお話ししましたが、私たちは、昔、障子やふすまの張り替えを自宅でやっていました。でんぷん糊の接着剤が使われていたのが思い出されます。また、小学校、中学校の時代の工作の時間に模型の飛行機を作る際にも、接着剤を使っていました。このように、日常のいろいろなところで接着剤を使っていました。住宅の内装品、家電製品、輸送機器や土木建築などありとあらゆるところに接着剤が使われ、日常生活に役立っています。接着は、そのこと自体が目的ではなく、同種、異種の被着体をくっつけることによって、従来にない新しい機能を持たせる機能性中間材料として利用されているわけです。日本の接着剤の需要量は、2006年のデータでは約3500億円になるとのことです。

9) 複合材料用の接着技術

接着に関して、一通りのこととお話ししました。ここで、接着技術が重要な役割を果たしている複合材料について、ご説明したいと思います。

2つ以上の材料を組み合わせる新たな機能を有する材料を複合材料と言います。複合材料は、いろいろな用途に展開されており、高性能化と軽量化を狙っています。特に繊維と樹脂、ゴム、金属、コンクリート及びセラミックス等のマトリックスを組み合わせる複合材料は、金属代替の軽量化材料となり、航空、宇宙、自動車、建築部材及びスポーツ用品分野に展開され、省資源、省エネルギーの材料として期待されています。繊維は、高強度・高弾性率を有する高性能繊維が使われますが、これらの繊維はしばしば表面が不活性であり、接着にとっては不利な表面をもっていますので、マトリックスといかにかうまく接着させるかがポイントであり、接着技術がカギを握っていると言われていています（図12）。

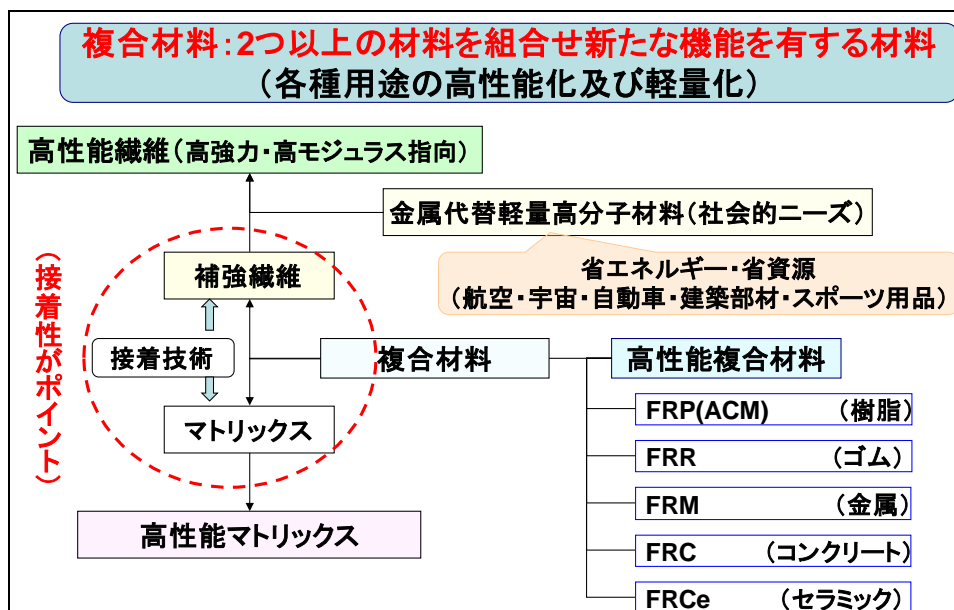


図12 複合材料の接着

代表的な例を2件ご紹介します。最近、ボーイング787（ドリームライナー）が国内でも就航しました。このジェット機には、カーボン繊維とエポキシ樹脂の複合材料（特に、高性能複合材料という）が総重量の50%使われています（図13）。軽量の複合材料が金属材料に代替し、燃費の向上に著しく寄与していると言われていています。また、床のハニカムパネル他、多くの接着技術が使われています。もう一つは、私の専門であります自動車のタイヤです。



図13 ボーイング 787

自動車のタイヤも多くの部品から出来ていますが、繊維とゴムの複合材料がメインを占めています。最近の自動車タイヤは高速走行に適したラジアルタイヤにほとんど100%変わっています。この場合にも、繊維とゴムの接着技術が大きな役割を果たしているのです。この技術は、特殊な接着剤を処理しており、補強繊維とゴムとが加硫時（生ゴムに硫黄を混ぜて加熱し、弾性をもたせる操作）に接着が発現します。

タイヤは保安部品であり、接着が不良であると走行時に大きな事故につながる恐れがあり、安定した接着の発現が極めて重要です。また、常に走行状態にありますので、繰り返し歪（即ち、ゴム及び繊維が伸長/圧縮）を受けますので、走行時の高耐久性が望まれます。ゴムと繊維の複合材料は、自動車部品として、伝動ベルト、ホースなどがあげられます。これらの用途はタイヤと同様、走行時に繰り返し歪を受けますので、走行耐久性が必要となります（図14）。

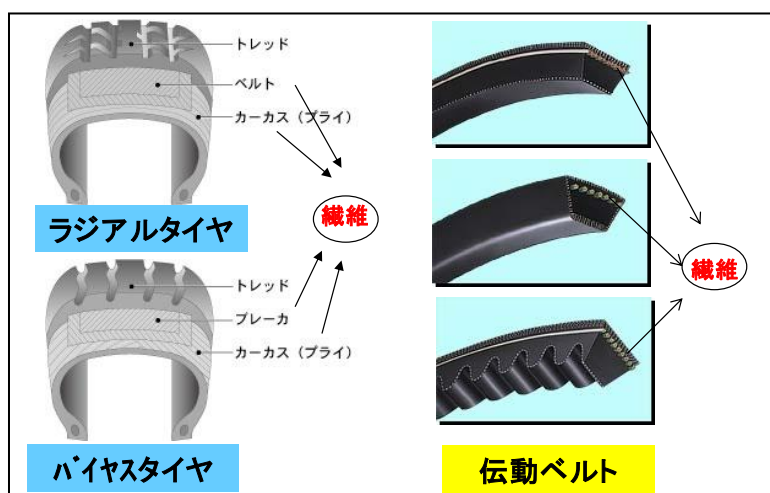


図14 ゴム複合材料

10) 粘着とは、接着との違い

これまで接着についてお話してきました。次に、粘着性についてお話ししましょう。

粘着性は、接着性とどのように違うのでしょうか？ 最近、この両者に大きな違いがないといわれるようになってきています。

接着は2つの被着体が化学的もしくは物理的な力で一体化することで、通常、液状の接着剤が固化するこ

とで生じます。しかし、粘着は、溶剤、熱などを一切使用しないで、わずかな圧力で他表面に接着します。但し、これを剥がす場合には、被着面に痕跡を残さずに容易に剥離出来ます。粘弾性体による感圧型接着とも言えます。図 15 に接着と粘着の違いを示しました。

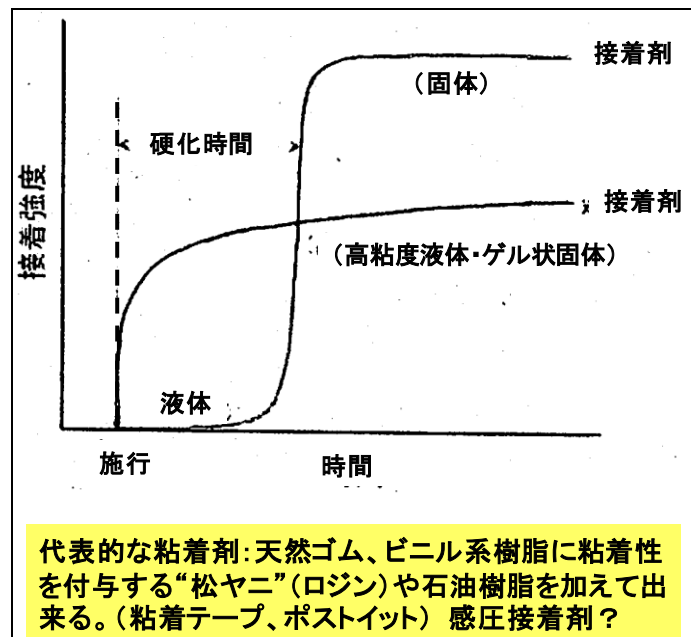


図 15 粘着と接着の違い

11) 接着の課題

冒頭にも申し上げましたが、接着剤の種類には、無機物もありますが、天然物や、合成物など、有機物が非常に多くあります。接着剤に使われる有機物は、ほとんど高分子化合物です。このような物質はたいてい経時劣化を起こします。また、固化した接着剤といえども、静的もしくは動的な力を受けると、被着体と接着剤界面の劣化を引き起こします。特に、被着体に接着剤が均一に付着していないと、繰り返し受ける応力が均一にかからず、不均一部分へ応力が集中することになります。

このような現象が起こることから、接着は信頼性が低いといわれます。それ故、接着寿命を予測することが非常に困難です。このことが、接着の最大の課題となっており、長寿命の信頼性の高い接着技術の開発が望まれています。また、このような課題があるからこそ、用途に応じた接着剤の正しい使い方が必要になってきます。

一例をご紹介します。昨年 12 月に発生しました中央自動車道“笹子トンネル”内の天井板崩落事故は、崩落の原因が完全に解明されたわけではありませんが、天井板を吊り下げている支柱を固定していたアンカーボルトの劣化ではないかと言われています。トンネル上部のコンクリートにねじ切りをした穴に、接着剤(エポキシ系)を挿入し、ついでこのアンカーボルトをねじ込み固定しているそうです。トンネル上部に支柱を吊り下げ、その支柱に天井板を固定しているために、当然、下向きの応力が常にかかった状態(即ち、静的な力)で固定されているわけです。もちろん、天井板の両サイドも固定されているでしょうが、トンネル内は、多くの車が通行していますから、常に振動を受けている。動的な力もかかっているといえます。長い期間が経過しますと、コンクリート、アンカーボルト及び接着剤の経時劣化に加えて、静的及び動的な劣化も加わり、耐久性が悪くなることは想像が付きまます。恐らく、単一の劣化ではなく、複雑に絡み合った要因により崩落したものと推定されるわけです。このような事故は、起こってから初めて原因究明されます。

劣化に対する予測は、ほとんどモデルテストによって行われ、実使用の真の寿命予測は極めて難しい状況にありますから、危険予知により、早め、早めの対応を取らざるを得ません。安全対策の経費は一般に多額で、なかなか費用をかけることが出来ないかもしれませんが、“安全を全てに優先する”という精神で対応しないと、事故は繰り返し起こることになってしまいます。

12)理想的な接着とは？

以上、接着についていろいろ述べてきました。接着は生活のあらゆるところに関連しています。私たちは、接着により便利さを得ていることも間違いのないところです。接着剤は必ず劣化し、接着力が低下することも十分に頭に入れ、用途に応じた正しい使い方をしなければなりません。

それでは、理想的な接着とは、どのようなことをいうのでしょうか？ひとつは、被着体が同種であれ異種であれ、被着体を接着する際に接着剤を使用しないで原子レベル、分子レベルで対応できる“清浄な表面”同士で直接的な結合力を作ることができれば、これがベストであり、理想的な接着といえます。そのためには、二つの被着体の表面をプラズマ処理等で徹底的に清浄化する技術が必要です。金属同士の接着においては可能かもしれません。

二つ目は、可逆性のある接着剤が挙げられます。粘着技術の高度なものと考えて良いでしょう。即ち、接着性が必要な期間は、耐久性高く接着しており、不要になれば、簡単に剥離する接着剤です。皆さんは“ヤモリ”の足が、住宅の垂直な窓ガラスに張り付いているのをご覧になったことはあるでしょう。決して、滑り落ちません。次の瞬間、足ははがれ、移動します。まさに、接着と剥離が交互に起こり進んでいきます。必要な時に接着し、不要になれば剥がれる。まさに、可逆性のある接着技術がここに見られるのです。

現在、“ヤモリ”“のこの現象を研究している科学者もいます。自然界には、お手本になることが一杯あります。“自然を模倣する”バイオミメティクスに関する研究が、これから益々進んでいくように思われます。

もうひとつは、傾斜配向性を有する接着剤です。例えば、金属とセラミックスの接着では、接着剤自身が、金属側が金属に近く、セラミックスの近くでは、セラミックスに近い性質をもつ接着剤です。また、ゴムと繊維は、弾性率が異なります。接着剤自体が、ゴムと繊維に近い弾性率を持てば、更に、耐久性の向上が期待できることとなります。

13)終わりに

接着剤を使って物と物とをくっつけることは、私たちが日常、頻繁にやっていることです。しかし、接着を系統的に学ばれたことはあまりないのではないかと思います。接着は経験的なことで学んでいく場合が多く、きっちりとした学説・論理があるというものでもありません。接着の理論については更なる進展が期待されます。

本日は、日常生活、産業用途にも多く使われている接着について、やさしくお話しすることを試みました。接着とは、接着剤とは何か、何故くっつくのかなどある程度ご理解いただけたのではないかと思います。有機物が多く、また、高分子化合物でもある接着剤は、経時により化学的な劣化を起こしますし、静的な力あるいは、動的な力が繰り返しかかることによっても劣化します。高耐久性や高寿命の接着剤が望まれていますし、接着寿命の予測法も喫緊の課題として期待されています。

本日のお話が、皆様方に少しでもお役に立てば、まことに幸いです。

長時間、ご清聴をいただき、まことにありがとうございました。

なお、接着に関しては、以下の解説書がありますので、ご興味のある方は、ご参考にされればと思います。

【参考資料】

- ① “接着の秘密” (本山卓彦) , 1978 年
- ② “高機能接着剤・粘着剤” (木村 馨、砂川 誠) , 1980 年
- ③ “接着とはどういうことか” (井本 稔、黄慶雲) , 岩波新書, 1980 年
- ④ “接着の科学” (竹本喜一、三刀基郷) , 講談社, 1997 年
- ⑤ “よくわかる接着技術” (セメダイン株) 日本実業出版社, 2008 年
- ⑥ “プラスチック接着の勘どころ” (柳原榮一) 日刊工業新聞社, 2009 年

本報告は、平成 12 年 12 月 18 日、TSS 文化大学で講演をした内容を若干加筆修正、概要として作成したものです。(最近、ご紹介したボーイング 787 は、リチウムイオン電池の事故により運航が停止されました。)

