特 集

溶 接 と 環 境

リサイクル性を考慮した接着技術*

永 田 宏 二**

Adhesive Bonding and Material Recycling*

by Hiroji Nagata**

キーワード：接着，マテリアルリサイクル，はく離技術，電磁接着，モジュール生産

1. はじめに

相当の強度を有する接着継手の欠点に解体の困難さがある。また非破壊検査は接着層の硬化状態、ボイドの存在は検出できても、接着剤と被着材（主に金属）との界面状態は検出できず、したがって接着強さの測定は不可能である。このため解体を前提とした接着技術は現時点では存在しないといっていよう。一方、軽接着の分野ではリサイクル形接着技術が開発され、実用化が始まっている。ゴミ問題が深刻な包装分野では、段ボール箱などの封かんに使用される粘着テープに水溶性粘着剤を用いた紙粘着テープが開発され、古紙再生の作業性が高まると期待されている。また、かさ高い発泡スチロールケースの封かん（接着シール）に使用される粘着テープに、支持体をポリスチレンフィルムとすることによって使用後、テープを剥がさずにリサイクルできる技術も開発された。粘着剤の残量は全体からみて無視できるレベルとの判断によるものであろう。

ここでは粘着レベルを参考にしながらも接着レベルでの可能性を探ってみたい。

2. 分離を考慮した接着技術

リサイクルを意識したとはいえないが、あとではがすことを前提にした接着技術が無かったわけではない。いくつかの例を紹介する。

(1) 衝撃はく離工法。金属小型部品の切削加工に

おいて、加工部品を定盤に接着し、加工後せん断方向に衝撃力を加えて分離する方法。瞬間接着剤といわれるシアノアクリレート接着剤を用いて、高接着力と衝撃への弱さを利用する。部品が軽薄短小化すると部品をセットした後、アセトンで薄めたシアノアクリレート接着剤を毛管作用で吸い込ませて接着し、加工後アセトンではく離する方法もある。はく離面に接着剤が残らない。

軸受の加工における半割メタルのバット継手に使用されていたはんだに代わって、接着剤の利用が現実化している。短時間（5分ないし30分）硬化形エポキシ接着剤を用いて接着、切削加工した後ハンマーで割り、接着剤の硬化皮膜を削り取る。24時間を要した加工時間が1時間で済むという結果を生んだ。仮止めの目的に使用する接着技術は他にもあるが、定量的研究の無いことが残念である。

(2) ピールアップ工法。建築物の長尺床仕上げシートの接着において下地に接着剤を塗付、シートを接着。汚損したシートをはり替えるときはピーリング（180度方向の力）によって接着剤はシート側に付着してはがれ、下地に残らず、次の接着作業にすぐ取掛かれるという作業利便性がある。せん断には強く、はく離（ピーリング）には弱いという特性とシート、下地への接着性の違いを折り込んだ品質設計によって可能となった工法である。合成ゴムラテックス接着剤が基本である。

(3) 荷崩れ防止システム。パレット積み荷物が運送中または立体倉庫などで荷崩れを起こすことを防止する接着剤の利用がある。段ボール箱や重包装袋の片側に接着剤を塗付、乾燥後積荷する。接着剤の

*原稿受付 平成5年7月14日

**セメダイン㈱

乾燥皮膜の摩擦抵抗によってせん断方向にはずれることなく、持ち上げるときの引張りにはゼロ抵抗という特性をもつ。ホットメルト形接着剤およびエマルジョン形接着剤で多点塗付、速乾性の条件を満たしたグレードで採用されている。

3. リサイクル法と接着剤の利用実態

リサイクル法は対象業種と製品についての内容を明示している。指定業種（再生資源の原材料としての積極的使用が望まれる業種）、指定副産物（再生資源として利用促進を図るべき副産物）、第1種指定製品（再生資源としての利用促進がとくに必要な製品）、第2種指定製品（分別回収のための表示が必要な製品）および第3種指定業種（指定副産物を原料として利用促進を図る）が示されているが、与えられた課題からいえば第一種指定製品が対象となる。自動車と家電である。勧告等の対象要件は年産2.5万台以上（原付自転車を含む自動車）、5万台以上（家電）で、判断基準は次のようである¹⁾。

自動車：＜製造事業者の場合＞①材料の選択、構造の工夫、分別の工夫（樹脂材料の表示等）②設計に際し、①に関する事前評価の実施・記録③技術の向上④安全性への配慮。＜修理事業者の場合＞①再生利用可能な交換部品の使用、使用済み部品の分別②技術の向上。＜両者＞①情報の提供

家電（ユニット型エアコン、テレビ、洗濯機、冷蔵庫）：①材料の選択、構造の工夫、分別の工夫（樹脂材料の表示等）②設計に際し、①に関する事前評価（評価項目、基準、方法の決定）の実施・記録③技術の向上④安全性への配慮（使用・処理）⑤情報の提供⑥包装材の工夫（再生資源の利用、発泡スチロールの分離容易化等）

自動車、電機で使用される接着剤・シーリング材は、表1に示すように出荷量全体に対しそれぞれ7.7%、0.9%である²⁾。乗用車1台当りに使用される

図1 ダイレクトグレージング断面

接着剤・シーリング材はおよそ2.5 kg、その38%を占めるポリウレタン系接着剤は窓ガラスを車体に直接接着（Direct Glazing 図1）するためのもので³⁾、廃車からガラスを回収するときに切除される。車体剛性の向上、視野の拡大に寄与するとともに厚みのある弾性体（ゴム硬さ Hs=50）の接着層は切除が容易である。リサイクルを考慮した接着技術の好例であるが、唯一の例でもある。接着剤・シーリング材は回収・再生は不可能であるから、ダストとして埋め立てられるか焼却される。

電機分野では多種多様な接着剤が部品レベルで使われている。家電リサイクル指定製品についていえばそう多いとは思われない。しかし、今後は解体容易性を考慮した新しい設計に接着剤が貢献することを期待したい。家電製品の筐体に利用されているプレコート鋼板は、塗膜によって接着性に差があったが最近になって一様な接着性を示すプレコート鋼板が開発され、接着継手の可能性が拡大した。解体には塗膜の付着力または塗膜強度を利用する。

4. リサイクルを考慮した接着技術のアイデア

第1種指定製品は輸出比率が高く、海外生産高も多いことから国内法だけでなく現地の法規制にも対応できなければならない。ゆりかごから墓場までの製品設計において、接着技術の果たす役割りを考えると今のところアイデアを提供し、当事者間で共同開発することが最善の策であり、実行を急ぐべき課題であると思われる。

接着剤・シーリング材を使用した製品のリサイクル性を図るには、前述したような判断基準の内容を検討しなければならない。被着材となる材料の選択は特に重要で、構造の工夫にも接着を意識したものであって欲しいと思う。この条件の明確化とともに接着剤・シーリング材には接着・シールという本来機能に加えて「特定の処理条件で剥がれやすい」または「被着材のリサイクル過程に混入しても支障がない」機能が要求される。

図2 破壊モード

表 1 1992 年 (1~12 月) 用途別出荷量

接 着 剤	(単位: トン)																
	合 板	二次合板	木 工	建築現場	建築工場	土 木	製 本	ラミネート	包 装	紙 管	織 維	ブロック加工	自動車	他の輸送機	靴履物	ゴム製品	電 機
ユリア樹脂系接着剤	331,225	5,651	4,388		5,444								1				
メラミン樹脂系接着剤	70,120	2,146	460								210						
フェノール樹脂系接着剤	20,824		698		1,371						12		160			175	
〔溶剤形接着剤〕																	
酢酸ビニル樹脂系溶剤形接着剤		94	18	10,530	250		140	197	246	53	1		22	9			311
その他の樹脂系溶剤形接着剤	7	1,471	2,330	1,527	1,084	8		1,274	570	53	125	21	3,230	9	17	127	1,727
C R 系溶剤形接着剤		56	7,062	8,907	6,345	175		20	25		48		252	1,856	644	1,224	1,488
その他の合成ゴム系溶剤形接着剤		156	27	3,735	836	302		59	735			24	3,537	129	64	590	902
天然ゴム系溶剤形接着剤				30	139	14		123					19		426	35	154
〔水性形接着剤〕																	
酢酸ビニル樹脂系エマルジョン形接着剤	2,326	15,724	41,665	14,999	6,017	2,166	640	5,647	20,531	20,975	1,619	166	4	2	7	60	98
酢酸ビニル共重合樹脂系エマルジョン形接着剤	21	40	595	979	1,462	120	148	91	3,655	82	182	74	1				12
E V A 樹脂系エマルジョン形接着剤	377	7,887	942	2,926	1,797	5,890	452	568	4,433	89	719	97	240		36		
アクリル樹脂系エマルジョン形接着剤	5	319	34	7,064	5,991	6,025	227	282	1,372		33,646	1,895	3,053				211
その他の樹脂系エマルジョン形接着剤	173	1,969	184	690	785	680	34	30	374	12	2,945	15	99			1,184	
水性高分子-イソシアネート系接着剤	44	1,231	5,161	940							5		16				3
合成ゴム系ラテックス形接着剤	677	230	1,139	25,807	180		28,655	57	104		11,822	1,000	1,826				
その他の水性形接着剤			1,190	2,507			3	225	759	152	180		4				
〔ホットメルト形接着剤〕																	
E V A 樹脂系ホットメルト形接着剤	2,374	7	1,816	1	796	2	12,350	2,400	17,517	63	1,350		214	13	51		122
合成ゴム系ホットメルト形接着剤	5	68	307		409		20	7	483		12,429		3,484		90	75	497
その他のホットメルト形接着剤	68		164		228	58		1,007	419		543		1,077				731
〔反応形接着剤〕																	
エポキシ樹脂系接着剤	102	665	474	11,081	2,077	6,679	10						2,113	42			1,024
シアノアクリレート系接着剤			52	11	51								52	3	2	7	57
ポリウレタン系接着剤	292	174	1,215	3,383	2,897	299	1	11,143	4,711		201	20	3,487	44	382	11	403
アクリル樹脂系接着剤				7	174								18	26			269
その他の反応形接着剤			1	158	181	150		1,362	1		72		45				15
〔感圧形接着剤〕																	
アクリル樹脂系感圧形接着剤			252	145				1,600	14,660				3,230				2,860
ゴム系感圧形接着剤				2,663	213				9,689								
その他の感圧形接着剤																	
〔その他接着剤〕	21	498	104	626	112	34	190						2,885			6	
〔工業用シーリング材〕				234	130	259							53,644	964			65
合 計	428,661	38,406	69,278	95,503	42,416	22,921	42,870	26,092	80,284	21,480	66,109	3,312	90,731	1,493	2,931	2,908	10,537
																	7,827
																	122,737
																	1,176,496

現在の接着技術からのアイディアを以下に示す。

(1)一定強度で剥がれる接着剤

あらかじめ破壊強さが分かっているればそれ以上の負荷を与えることによって分離できる接着剤。経年変化が未知の場合、使用中の負荷が小さく使用環境も温和で、製品寿命の比較的短い部品・製品に適している。経年変化が把握できれば逐次利用製品を拡大する。この接着剤は経年によっても必ず凝集破壊(図2)することが条件で、接着界面には左右されず、接着剤の材料強度、すなわち凝集力以上で破壊する。現在、該当する接着剤は無溶剤反応形弾性接着剤と呼ばれる一群で、接着強さは引張せん断で軟鋼板に対し11 MPa、エンブラには5-6 MPaで、これ以下のレベルの選択も容易である。凝集破壊でも被着材によって破壊強さが異なっているのは被着材の弾性率、板厚が引張せん断試験に影響しているためである。強度管理は接着剤の選択と接着層の厚さ、継手の設計による。せん断よりピーリングの力で剥がす方が効果的である。

フィルム状接着剤では支持体の選択で一定強度を確保することができる。この形態のものには繊維を支持体とする supported film と接着剤だけのフィルム unsupported film があるが、前者の支持体としてナイロン、ポリエステル繊維が航空機構造用には使用されている。これを強度の低い不織布とすることによって不織布破壊強度の接着層を得ることができる。金属用エポキシ樹脂フィルム状接着剤で実証済みである。

接着層を多層構造とすればいろいろな強度設計が可能であろう。

(2)特定処理条件で剥れる接着剤

加熱溶融塗付し、冷却によって固化するホットメルト形接着剤は、可逆的に軟化温度に達すれば溶融分離できる。溶剤形接着剤は使用溶剤に接触すれば溶解する。しかし、部品あるいは接着製品をそのような条件に暴露することはコスト的に現実的でない。リサイクルで常に問題となるプラスチックの接着には、電磁接着が有力な手段となる。ホットメルト形接着剤に導電性粉末を分散させ、継手形状に合わせてフィルム、シート、ストランド状あるいは成形品として適用し、誘導加熱によって接着剤のみを溶融して接着する。解体するときは誘導加熱場に設置すれば数秒から数10秒で分離できる。

高周波誘導加熱の効率からいえば、接着剤に混入する粉体は渦電流によるジュール熱損とヒステリシ

ス損の発熱を期待すれば導電性強磁性体がよく、昇温速度の速さからいえば鉄粉がよい。粉体の種類、粉体の大きさやアスペクト比の選択、混入率の最適化によって、接着剤を熱劣化させることなく接着および解体の工程条件に適合させることができるはずである。

電磁接着の考え方は古くからあり、EMA BOND PROCESS として米国で実用化され、化粧品容器の製作などに実績を残している⁴⁾。わが国でも実用化研究はあるものの成果は聞いていない。高周波共振装置とコイル形状、接着物との位置関係などから同一形状の大量生産品に向いており、デザインチェンジの多い日本の実情が設備投資を含めてちょうどしたためと思われる。リサイクル性を考慮したプラスチックの選択では力学的特性、寸法安定性および耐熱性からポリプロピレンがはん用性で優位に立っている。ポリプロピレンは接着の難しい材料で、プライマーを塗付して接着性を改善することが行われているがプライマーなしで接着できる接着剤はない。電磁接着はこれを可能とする。バインダー樹脂として同じポリプロピレンを用い、鉄粉を分散させて成形したものを接着剤とする。継手にセットし、軽く加圧して高周波を印加、冷却によって接着は完了する。同質材料の溶着であるから継手の信頼性は高い。他のプラスチックに対してもバインダー樹脂の選択で対応することができる。接着剤のセッティングに電磁石を利用して自動化することも可能であろう。継手の構造例を図3に示す⁵⁾。

(3)リサイクル過程に混入しても支障がないもの

接着剤は一般に薄層として機能し、組立物に占める重量・容積構成比ともほとんど無視できる程度である。したがって、リサイクル材料に有害な成分を

図3 接合部の構造例

含まない限り支障はないと考えられる。金属の接着には反応形接着剤が使用されることが多く、特にエポキシ樹脂接着剤のような熱硬化性樹脂は、不溶不融の性質から力学的な方法以外に解体手段はない。それでも現在の接着剤は全て高分子材料であるため耐熱限界は低く、400°Cの耐熱性が科学技術庁の技術予測課題となっているほどで、それも実現時期が先送りされて今世紀中の実現は不可能との予測結果になった。金属の溶解温度に比較すればはるかに低い温度で高分子接着剤は分解揮散する。微量でありハロゲンのような有害物質がなければ金属材料のリサイクルに問題はないだろう。

プラスチック材料の場合も同様である。高分子材料の接着の基本は「似たもの同士は溶け合う (like dissolves like)」という溶解理論を基本としているため、接着剤は被着材のプラスチックと同類であることが多い。例えば異質であっても量的に多くない範囲では混入による影響は少なく、しかも廃プラスチックのリサイクルは、再生利用を中心としたマテリアルリサイクルと焼却熱利用によるサーマルリサイクルの両面で研究が進んでおり、接着剤もその中で処理されることになる。廃プラスチックはまたアスファルトへの混入で道路塗装に使う道が開かれようとしている (建設資源リサイクル研究会の実験によれば、熱可塑性プラスチックは石と石を接着するアスファルトと同じ働きを、熱硬化性プラスチックは骨材の代わりとなって舗装道路の強度が大幅に向上するという)⁶⁾。

(4)他の結合方式との併用

接着技術の課題は初期結合力不足、接着システムの複雑性、コストアップそして接着技術の特殊性が指摘されている。自動車の場合、骨格構造における点溶接と接着の併用工法、ウェルドボンディングが車体剛性、制振性の向上から実用化されているのは点結合と面結合の相互補完技術としてのメリットが評価されたからにほかならない。鋼板対象の結合手段としてFA化が容易であった溶接は、新素材の適材適所使用には対応できない。プレコート、ポストコートを含め塗装済鋼板の溶接は困難である。樹脂化には全く手が出ない。生産方式として注目されているモジュラー・アセンブリはFA化に最も適した組み立て方式といわれる。フロントエンド、計器盤周り、ドアなど、それぞれが多くの部品で構成されるモジュールをあらかじめ作り、機能試験まで済ませておく。このモジュールを最後に組み上げて完成

図4 Opel Omegaのインパネモジュール

となるが、このモジュールの生産および最終組み立てに接着が貢献する。欧州ではすでにモジュール生産が始まっており、GM系の独Adam Opel社はOpel Omegaで接着構造を採用している。インストルメントパネルモジュールを車体とは別ラインで生産しておき、トリムラインで車体の一部であるダッシュパネルに接着剤とボルトで結合する。接着剤は湿気硬化形1液ポリウレタン、強度は接着剤にもたせ、ボルトは仮止めの役割をする (図4)⁷⁾。

一方、従来のモノコック構造に対してスペースフレーム構造が注目され始めた。車体剛性を骨格となるスペースフレームに支持させ、それに外板を張り付ける構造。いまのところ樹脂外板はねじ結合によっているが、点接合であることとFA化の困難性から接着技術が期待される。

異種材料との組み合わせに対応でき、寸法精度にこだわらない接着剤は100%固形分の反応形で、解体性を考慮したものとなるが、初期接着力がやはり課題である。このような場合、樹脂外板に鋼またはアルミの縁材を接着しておき、金属部分を点溶接する、あるいは樹脂ファスナを利用して外板に設けたチャンネルに、スライドはめ込み構造として接着でファスナを固定するなど他の接合方式との併用が現実的である。解体時には樹脂ファスナの破壊強度を利用する。スナップ・フィットの考え方が参考になる⁸⁾。

5. お わ り に

リサイクルを考慮した接着技術のアイディアを紹介した。従来はより強く、より耐久性のある接着を実現するための接着剤および接着技術の開発がテーマであった。この主流は不変であるがもう一つの流れが加わった。環境問題への対応である。化学製品

である接着剤はその取扱いについて多くの規制に囲まれている。国内だけでなく国際条約による規制もある。有機溶剤がその中心。そして接着製品のリサイクルが課題として浮上した。使用済み接着剤のリサイクルは不可能であるから、解体しやすい接着剤および接着技術、いままでと180度転換した考え方が必要である。接着構造の基本はせん断方向に負荷がかかるように、はく離（ピーリング）負荷は避ける設計である。負荷の方向によって破壊状態が変化することは継手設計に工夫の余地を与える。

接着のメリットは面接合による応力分散から、同じ強度を得るのに薄板が利用でき、軽量構造となる。すなわち省資源・省エネルギー技術であった。これから環境対応技術となりうるか？剛性接着剤に対して弾性接着剤が、無溶剤常温短時間硬化形で開発進行中である。関係者の共同作業によって新しい技術

が誕生することを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 永田勝也：「リサイクルを考えた製品設計」，第35回標準化全国大会報文集（1992）41-66
- 2) 日本接着剤工業会資料
- 3) 井出，田野井：「自動車における接着」，工業材料，1987年7月別冊，149-156
- 4) C. V. ケーグル編，永田宏二訳：接着接合事典，近代編集社，1977年，291-304
- 5) 岡田：「電磁誘導加熱によるプラスチックの接着」ポリファイル，24（6）24-27，1987
- 6) 朝日新聞，1992. 10. 20
- 7) 中俣：「自動車組立生産技術者から見た接着技術の展望と課題」，日本接着学会誌，26（6）30-36，1990
- 8) 鶴原：「リサイクルを目指した解体しやすい設計一部品を統合化し，結合法を工夫」，日経メカニカル，1991. 10.28，54-61

ステンレス鋼溶接施工技術並びに粉体肉盛技術の実際とその応用

平成5年12月7日（火）

於：九州地区溶接技術検定委員会（九州検定試験場）

主催 社団法人 日本溶接協会

1. 定 員 100名	12：50～13：40 溶接変形制御技術と設計・溶接施工面からの対策
2. 聴講料 25,000円	○中山 繁氏 古賀 信次氏
15,000円（特殊材料溶接研究委員会・粉体接合加工研究委員会会員・支部会員）	犬塚 雅之氏（川崎重工業）
※テキスト代・食事代を含む。	13：40～14：30 異材溶接技術（含むクラッド鋼）
3. テキスト 「ステンレス鋼溶接施工技術並びに粉体肉盛技術の実際とその応用」（A4判約60頁）	丸山 敏治氏（神戸製鋼所）
4. 講習会プログラム	（休 憩）
10：00～10：10 開会の挨拶	14：45～15：35 溶接施工時のトラブル事例とその対策
特殊材料溶接研究委員会委員長 中尾 嘉邦氏	川嶋 巖氏（石川島播磨重工業）
大阪大学工学部教授	15：35～16：15 多量の硬質粒子を含有する肉盛材の耐摩耗特性
10：10～11：00 ステンレス鋼溶接の基礎	林 洋一郎氏（住友重機械鋳鍛）
中尾 嘉邦氏（前掲）	16：15～16：55 粉体プラズマ溶接による各種材料の肉盛溶接
11：00～11：50 ステンレス鋼の溶接と溶接材料の実際	三木 義治氏（日本ウェルディング・ロッド）
三宅 聰之氏（日鐵溶接工業）	16：55～17：10 質疑応答
（昼 食）	17：10～17：15 閉会の挨拶 中尾 嘉邦氏（前掲）