

持続可能な社会を目指す

易解体性接着剤 接着技術の

開発、要求特性、評価、その応用

監修：若林 一民

執筆者紹介

第1章

第1節・第2節

若林 一民 エーピーエス リサーチ 代表、株式会社AndTech 顧問

第2章

第1節

野本 晃広 東京電機大学 非常勤講師（株式会社NEK 代表取締役）
博士（工学）

第2節

松本 章一 大阪公立大学 大学院 工学研究科 物質化学生命系専攻 客員教授
工学博士

第3節

所 千晴 早稲田大学 理工学術院 教授
東京大学大学院 工学系研究科 教授
博士（工学）

第4節

舘 秀樹 （地方独立行政法人）大阪産業技術研究所 主幹研究員
博士（工学）

第5節

田中 真人 新潟大学 名誉教授
博士（工学）

第6節

古谷 昌大 福井工業高等専門学校 物質工学科 准教授
博士（工学）

執筆者紹介

第7節

木原 伸浩 神奈川大学 理学部 教授
博士（工学）

第8節

西田 裕文 金沢工業大学 大学院工学研究科 高信頼ものづくり専攻 教授
博士（工学）

第3章

第1節

大槻 直也 株式会社スリーボンド 研究開発本部 技術マーケティング部
技術開発課 課長

第2節

大津 理人 DIC株式会社 R&D統括本部
アドバンストマテリアル開発センター マネジャー

第4章

第1節

内田 喬 株式会社アイセロ 商品開発本部 主査

第2節

土淵 晃司 リンテック株式会社 研究所 新素材研究部
デバイス材料研究室 主任

執筆者紹介

第5章

岩野 吉宏 トヨタ自動車株式会社 Lexus Int. Co. レクサス統括部
カンパニー総括室 室長
兼務主査
レクサスGT開発部&LE開発部&TOYOTA GAZOO Racing BR GT
開発室、博士（工学）

第6章

野村 和宏 NBリサーチ 代表

目 次

第 1 章 易解体性接着剤・接着技術と構成材、設計、加工、環境対応	001
第 1 節 易解体性接着剤・接着技術と接着剤の環境対応	002
	APSリサーチ 若林 一民
1.1 環境に優しい接着剤	002
1.2 接着剤に係る法規制の種類と分類	003
1.2.1 建築基準法（シックハウス症候群に関連する法律）への対応	003
1.2.1.1 住宅の居室に係る政令・告示の概要	003
1.2.1.2 建材から放散されるホルムアルデヒド放散量の測定方法	003
1.2.1.3 日本接着剤工業会の放散ホルムアルデヒドに関する認定制度	004
1.2.1.4 接着剤中のホルムアルデヒドを少なくする方法	005
1.2.2 VOCの自主管理制度（日本接着剤工業会）	007
1.2.2.1 大気汚染防止法の概要	007
1.2.2.2 日本接着剤工業会の4VOC自主管理制度 ¹⁾	007
1.2.2.3 4VOCを使用しない接着剤の調整 (エラストマー系溶剤形接着剤の場合)	008
1.2.3 RoHS規制、WEEE指令とは	009
1.2.3.1 鉛に関する指令とはんだ代替導電性接着剤について	010
1.2.3.2 臭素系難燃剤の規制	011
おわりに	011
第 2 節 易解体性接着技術・易解体性接着剤と環境対応	013
	APSリサーチ 若林 一民
2.1 易解体性接着技術・易解体性接着剤の種類	013
2.1.1 解体性接着剤用樹脂の理想的な弾性率変化	014
2.1.2 解体性接着技術の技術開発動向	014
2.1.3 分解性ポリマーの応用	015
2.1.4 はく離可能なホットメルト弾性シーリング接着剤	018
2.1.5 熱溶融エポキシ樹脂の硬化・溶融メカニズムの利用	019
2.1.6 高耐熱解体性接着剤	020
2.1.7 熱膨張性マイクロカプセル混入接着剤	021
2.1.8 膨張黒鉛による接着剤層のはく離	022

2.1.9 通電はく離接着剤「エレクトリリリース」	022
2.1.10 熱膨張性マイクロカプセルを利用した解体性接着技術	023
2.2 解体技術	024
2.2.1 高周波加熱による接着の解体	025
2.2.2 マイクロ波加熱による接着の解体	026
2.2.3 超音波加熱による接着の解体	027
2.2.4 最近の解体性接着剤（粘着テープを含む）	027
おわりに	028
第2章 易解体性接着剤・接着技術の研究開発動向	031
第1節 電磁誘導加熱を利用した解体性接着技術の特性と産業応用（住宅）	032
東京電機大学 野本 晃広	
はじめに	032
1. 電磁誘導加熱と解体接着	032
1.1 電磁誘導加熱	032
1.2 電磁誘導加熱の原理と解体	032
1.3 オールオーバー工法	033
1.4 オールオーバー工法用接着装置	036
1.4.1 小型電磁誘導加熱接着装置	036
1.4.2 コイル着脱式アプリケーション	037
2. 電磁誘導加熱装置の設計要素	038
2.1 被加熱物の形状による加熱範囲の違い	038
2.2 加熱コイルの電気的特性	039
おわりに	040
第2節 反応性高分子を用いる易解体性接着材料およびシステムの設計	043
大阪公立大学 松本 章一	
はじめに	043
1. 易解体性接着材料とシステムの開発概要	043
2. ポリペルオキシドの易解体性接着への応用	046
3. 2重保護型易解体接着システムの開発	048
4. BOC含有ポリマーの新規開発と熱酸発生剤の利用	049
おわりに	052

第3節 電気パルス法による接着解体技術とその応用・可能性 055

早稲田大学・東京大学 所 千晴

はじめに	055
1. 電気パルス法の応用事例	057
1.1 LiB正極材の接着界面剥離	057
1.2 太陽光パネルセルシートからの金属分離	058
1.3 CFRPの層分離やCF分離	059
2. 易解体接着構造および接着剤の検討	060
おわりに	061

第4節 分解性や剥離性を有する解体性接粘・接着技術の開発とその応用 065

(地独)大阪産業技術研究所 舘 秀樹

はじめに	065
1. ORISTにおける易解体性材料の開発	066
2. 超音波照射によって剥離可能となる易剥離粘着剤	067
3. 乾電池で剥離が可能となる電気剥離粘着テープ	068
4. 光照射によって解重合的に分解が進行し物性が変化する解重合性ポリマー	069
おわりに-これからの易解体性材料-	072

第5節 マイクロカプセルの刺激応答性と易崩壊性接着技術への応用 073

新潟大学 田中 真人

はじめに	073
1. マイクロカプセルの分類	073
1.1 マイクロカプセルの種類と粒径・構造	073
1.2 シェル材種と刺激応答性	074
2. マイクロカプセル調製法と実施例	075
2.1 懸濁重合法	076
2.2 界面重合法	077
2.3 <i>in-situ</i> 重合法	078
3. マイクロカプセル調製実施例	079
4. 総括	081
おわりに	082

第 6 節 熱的可逆反応を利用した解体性接着材料の研究	085
福井工業高等専門学校 古谷 昌大	
はじめに	085
1. 理想的な熱解体性接着剤とは	085
2. 分子レベルの熱的可逆変化	086
2.1 ガラス転移温度の制御	087
2.2 架橋構造の選択	087
3. SS結合交換反応を利用した熱解体性接着材料	090
3.1 分子設計および材料設計	090
3.2 接着強度および熱解体性の評価	091
4. 非共有結合形成を利用した熱解体性接着材料	091
4.1 分子設計および材料設計	091
4.2 接着強度および熱解体性の評価	092
おわりに	092
第 7 節 高い分解性と高い化学的安定性・機械的強度が両立する易解体性接着剤	095
神奈川大学 木原 伸浩	
はじめに	095
1. 酸化分解性ポリマー	096
2. 酸化分解性エポキシ樹脂	097
3. 酸化的脱架橋可能な架橋体とCFRP	099
おわりに	102
第 8 節 熱可塑性エポキシ樹脂を用いた易解体性接着技術と応用展開	105
金沢工業大学 西田 裕文	
はじめに	105
1. 熱可塑エポキシ樹脂の開発	106
1.1 材料設計	106
1.2 熱可塑エポキシ樹脂の重合	106
1.3 熱可塑エポキシ樹脂の機械特性	108
2. 熱可塑エポキシ樹脂の易解体性接着剤への応用	110
2.1 熱可塑エポキシ樹脂の接着性	110
2.2 易解体性	111
おわりに	112

第 3 章 易解体性接着剤・接着技術の開発・特性・応用	115
第 1 節 サーキュラーエコノミーを志向した易解体性接着剤の提案	116
株式会社スリーボンド 大槻 直也	
はじめに	116
1. サーキュラーエコノミー実現への課題	116
2. 易解体性接着剤の概要	118
3. 酸化剤解体型易解体性接着剤	122
4. 開発中の試作品	123
おわりに	126
第 2 節 易解体性を有するエポキシ系接着樹脂の開発と応用	129
DIC株式会社 大津 理人	
はじめに	129
1. エポキシ樹脂の設計	129
1.1 柔軟・強靱性の付与	129
1.2 エポキシ樹脂単独での反応誘発型相分離	130
2. 易解体性の付与	132
2.1 解体性付与の設計	132
2.2 接着力および解体機能の評価	132
2.3 易解体性発現のメカニズム	133
3. 解体手法の検討	134
おわりに	135
第 4 章 易解体性接着フィルム・シートの開発・特性・応用（企業編）	137
第 1 節 易解体性と耐久性を両立させた熱可塑性接着フィルムとその応用	138
株式会社アイセロ 内田 喬	
はじめに	138
1. 熱接着フィルム「FIXELON®」の概要	138
1.1 フィルム状接着材	139
1.2 VOCの低減	139
1.3 引張せん断接着強さと剥離接着強さの両立	140
1.4 異種材料との接着	141
1.4.1 ポリオレフィンとの接着	141
1.4.2 幅広い被着体との接着	141
1.4.3 異種材接合における課題点の改善	142
2. 接着方法について	143
2.1 熱板プレス装置	143

2.2	抵抗溶接装置	144
2.3	高周波誘導加熱装置	144
2.4	赤外線溶着装置	145
2.5	高周波誘電加熱装置	145
2.6	インサート成形装置	145
2.7	レーザー溶着装置	146
2.8	超音波溶着装置	146
3.	サーキュラーエコノミーへの貢献	146
3.1	FIXELON®の易解体性について	146
3.2	FIXELON®の耐久性について	147
4.	FIXELON®の採用事例	148
4.1	自動車内装部品採用例	148
4.1.1	ステアリングホイールの加飾部品	148
4.1.2	フラットサーフェスシャッター	148
4.1.3	フットレスト	148
4.2	その他用途例	148
4.2.1	アルミハニカムパネル	148
4.2.2	浴室化粧板	149
4.2.3	意匠性木材	149
5.	フィクセロンテクニカルセンターの開設	149
	おわりに	150
第2節 高周波誘電加熱接着シートの特徴、応用と易解体性		153
リンテック株式会社 土淵 晃司		
	はじめに	153
1.	高周波誘電加熱接着シートの設計	154
1.1	高周波誘電加熱と接着原理	154
1.2	誘電加熱適性付与における材料設計	154
1.2.1	発熱量と誘電特性値	154
1.2.2	ZnO粒子の含有量依存性	156
1.2.3	ZnO粒子の粒子径依存性	157
1.2.4	ZnO粒子の形状依存性	158
2.	高周波誘電加熱接着シートの特徴	159
2.1	易施工性	159
2.2	加工時間 — 外部加熱との比較 —	160
2.3	高周波誘電加熱接着シートの易解体性	161
	おわりに	161

第5章 自動車軽量化・マルチマテリアル化に向けた 異種材接着・接合技術の取り組み

165

トヨタ自動車株式会社 岩野 吉宏

1. 自動車業界の取り巻く環境	166
2. 軽量化を取り巻く変化	167
3. マルチマテリアルの動向	168
4. 樹脂・金属接合方法～接着剤・機械的な接合・溶接・機械的なクリンピング～	172
5. ナノ凹凸陽極酸化法の開発 (Nanostructured Anodic Oxidation Method)	176
おわりに	178

第6章 易解体接着剤の開発・市場動向

181

NBリサーチ 野村 和宏

はじめに	182
1. 易解体接着剤とは	182
1.1 易解体接着剤設計の考え方	182
1.2 解体のための作用	183
2. 易解体性接着剤のトリガーによる分類	183
2.1 熱エネルギーによる解体	183
2.1.1 熱による相転移	183
2.1.2 熱分解反応	186
2.2 光エネルギーによる解体	187
2.2.1 光による相転移	187
2.2.2 光分解反応	188
2.3 電気エネルギーによる解体	188
2.3.1 電気パルスによる解体	189
2.3.2 電気化学反応による解体	189
2.4 薬品添加による解体	191
2.4.1 酸化剤の添加	191
おわりに	192

第 1 章

易解体性接着剤・
接着技術と構成材、
設計、加工、環境対応

1.1 環境に優しい接着剤

環境保全・環境改善という言葉を目にしてから久しい。地球温暖化が社会問題になり、あらゆる産業及び地域社会において、廃棄物の削減やリサイクル運動が活発に行われている。環境改善には及ばないまでも、せめて環境保全くらいは達成したいものである。

そういった背景を踏まえて、我が国では地球温暖化対策について、温室効果ガスを2013年比で2030年までに45%削減するという高い目標を掲げて、環境省は、経産省などの他省庁との間で調整が進められている¹⁾。

接着剤業界に目を向けると、日本接着剤工業会に所属する接着剤メーカー、接着剤素材メーカーなど九十数社が結束して、大気へのVOC（Volatile Organic Compound：揮発性有機化合物）排出抑制自主行動計画を立案して実行に移している。

このVOC排出抑制自主行動計画とは、2000年のVOC総排出量（598t）を100重量部として、2010年までに30重量部の削減を実現しようとするものであったが、2008年には39.5重量部の削減をやったのけたのである。だが、その後の目標が定まらず、現在に至っているが今回の政府の動向を契機に仕切り直しが予想され、業界が特に注視するのは環境保全・環境改善への指針として、3R（削減—Reduce、再利用—Reuse、リサイクル—Recycle）が実行されるといわれている。

Reduceとは本来廃棄物をいかに削減するかという意味合いを持つが、接着剤の業界では、環境負荷材料の使用削減や使用中止を意味するものである。

ReuseおよびRecycleを考えると、被着材に挟まれた接着剤をどのようにReuseおよびRecycleすることができるのか、皆目見当がつかない。

しかし視点を変えてみると、接着部分を剥がすことができれば、被着材の分別や再利用、リサイクルは可能になる。

重要なことは、「剥がれる接着剤は歓迎できないが、必要に応じて剥がすことができる接着剤は大歓迎」である。ここで易解体性接着剤（Dismantable Adhesive）の存在がクローズアップされる。

本稿では接着剤のReduce対応例として、①シックハウス症候群対応としてのホルムアルデヒドの使用規制及び対策、②大気汚染防止法やシックスクール対応としての4VOC（トルエン、キシレン、エチルベンゼン、スチレン）の使用規制及びその対策、③RoHS規制（Restriction of the use of certain Hazardous Substances：特定有害物質使用規制）、WEEE指令（Act for Recycling of Electrical and Electronic Equipment and Vehicles：電気製品のリサイクル・リユース指令）対応のための鉛はんだ代替導電性接着剤について概説する。

そして被着材のReuse、Recycle対応が期待される易解体性接着剤については、「易解体性接着剤・接着技術」の項で取り上げたいと考える。

1.2 接着剤に係る法規制の種類と分類

日本において接着剤に関連する法律は、①消費者保護に関するもの、②化学物質安全対策に関するもの、および③環境保全・環境改善に関するものに分類できる³⁾。

ここでは環境保全に関する法令のみ紹介する。

環境保全に関する法令

- (1) 大気汚染防止法
- (2) 水質汚濁防止法
- (3) 悪臭防止法
- (4) 廃棄物の処理及び清掃に関する法律
- (5) 容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律
- (6) 特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律（PRTR法：Pollutant Release and Transfer Register）

1.2.1 建築基準法（シックハウス症候群に関連する法律）への対応

平成15年7月1日付けで施行された建築基準法第28条の2（シックハウス症候群に対応する法律）の主旨は以下の通りである。

居室を有する建築物は、その居室内において政令で定める化学物質の発散による衛生上の支障がないよう、建築材料および換気装置について政令で定める技術的基準に適合するものとしなければならない。

1.2.1.1 住宅の居室に係る政令・告示の概要

当面の規制対象物質は平成14年7月1日付けで厚生労働省より指針値が示された14物質（表1.1参照）の中で、クロロピリホスおよびホルムアルデヒドの2物質である。

この2物質のうちで、接着剤に係るものはホルムアルデヒドだけであるが、時を同じくして社会問題視されたのがシックスクール症候群で、規制対象物質はホルムアルデヒド、トルエン、キシレンである。

1.2.1.2 建材から放散されるホルムアルデヒド放散量の測定方法⁴⁾

①**デシケーター法**—JAS 普通合板、特殊合板などの各種合板及びフローリング等に適用される測定方法で、JIS A 1460-2001（建築用ボード類のホルムアルデヒド放散量の試験方法—デシケーター法）に規定されている。

②**逆デシケーター法**—デシケーター法の欠点を補い、気中濃度を合理的に測定する方法として提案されている方法で、試料の片面にデシケーターを密閉するように逆さまにかぶせ、この中に放置した蒸留水にホルムアルデヒドを吸収させる。試料の表面積はデシケーター開口部と同じになるので、蒸留

水もそれに対応した表面積と量にする。測定はデシケーター法と同じくアセチルアセトン法で行う。

③**小形チャンバー法**—JIS A 1901-2003（建築材料の揮発性有機化合物・VOC、ホルムアルデヒドおよび他のカルボニル化合物放散測定方法—小形チャンバー法）に規定されている。

ホルムアルデヒド濃度の測定は、規定経過日数後にチャンバー内のホルムアルデヒドをDNPHカートリッジに捕集して、高速液体クロマトグラフ（HPLC）にて測定する。

④**パーフォレーター法**—大がかりなETBラージ・チャンバー法に代わる試験方法で、ドイツのDIN EN120、イギリスのBS5669（パーティクルボードの規格）に規定の方法である。

⑤**ラージ・チャンバー法**—アメリカで実施されている測定方法で、ASTM E 1333に規定の方法である。

⑥ JIS K 0303（排ガス中のホルムアルデヒド分析法）に規定の測定方法

ホルムアルデヒドの測定にはAHMT吸光法、クロマトロープ酸吸光法、DNPH-GC法、DNPH-HPLC法、AHMT連続分析法が採用され、日本の衛生試験法や環境庁の大気汚染物質測定法指針で認定されている。

表1.1 厚生労働省より指針値が示された14物質

（平成14年7月1日）

化 合 物 名	室内空気中の濃度指針値 (大人の場合)	
	(ppm)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
ホルムアルデヒド	0.08	100
トルエン	0.07	260
キシレン	0.20	870
パラジクロロベンゼン	0.04	240
エチルベンゼン	0.88	3,800
スチレン	0.05	220
クロロピリホス	0.07	1
フタル酸ジ-nブチル (DBP)	0.02	220
テトラデカン	0.041	330
フタル酸ジ-2エチルヘキシル (DOP)	0.0076	120
ダイアジノン	0.023ppb	0.29
ノナナール (暫定)	(0.007)	(41)
アセトアルデヒド	0.03	48
フェノルカルブ	3.8ppb	33

1.2.1.3 日本接着剤工業会の放散ホルムアルデヒドに関する認定制度⁵⁾

日本接着剤工業会の接着剤皮膜からの放散ホルムアルデヒドに関する認定制度は、接着剤の等級分けの判断基準として表1.2（建材からのホルムアルデヒド放散量の基準値）を採用している。測定方法は小形チャンバー法である。

接着剤の種類は多く使用面積の制限なく使用できる接着剤は、

①ホルムアルデヒドの放散量が少なく、規制対象外の接着剤（放散量が $0.005\text{mg}/\text{m}^2\text{h}$ 以下）

②JISマーク表示品で、ホルムアルデヒドの放散量の分類がされている接着剤