

【産業競争力懇談会 2016年度 プロジェクト 最終報告】

【循環型社会を実現する革新的接合・分離技術】

2017年2月15日

産業競争力懇談会 **COCN**

【エグゼクティブサマリ】

1. 本プロジェクトの基本的な考え方

近年わが国では、自然災害への対応、健康長寿社会の実現、3R（リデュース、リユース、リサイクル）に基づく循環型社会の実現といった課題への対応が求められている。図1に本プロジェクトの基本的考え方の概要を示す。

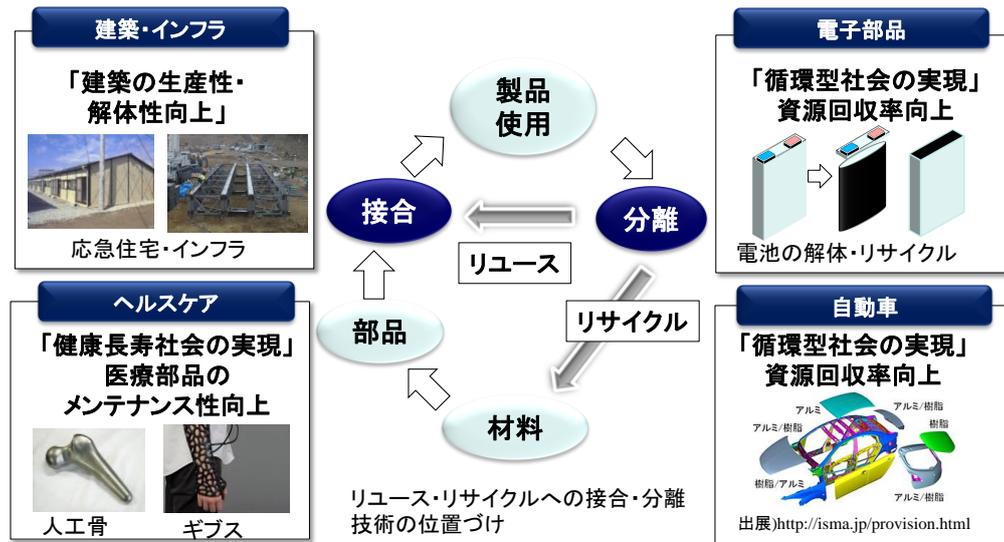


図1 本プロジェクトの基本的な考え方

これまで溶接や接着等ほとんどの接合技術は接合強度を最大限まで高め、永続的に接合状態が保たれることを目指して研究開発が続けられてきた。しかし、近年重要視されている環境調和、3Rの観点からは、リサイクル・リユースのコストを下げるため、接合部が容易に分離でき、製品が容易に分解できることが重要となる。

図2に接合技術を分離性と接合強度の観点からマッピングした。一般に接合強度の高い溶接や接着等の接合は分離性が低く、分離性の高い粘着剤等を用いた接合は接合強度が低い。分離性と接合強度を兼ね備えた接合技術は現時点ではほとんど存在しない。このような接合・分離を両立した「革新的接合・分離技術」が、建築、ヘルスケア、自動車、電子部品といった産業分野でどのような革新をもたらすかを議論する。

具体的なアプリケーションの検討は付録A1、A2に示すが、リサイクル・リユースを経済的に成り立たせるためには、分離コストの低減は避けて通れない課題であり、「革新的接合・分離技術」を製品設計段階で適用することが重要である。また、どのような技術で「革新的接合・分離」を成り立たせるかという技術の発掘も重要である。本報告では、接合分離技術の俯瞰表により整理し、開発すべき接合・分離技術を抽出した内容について述べる。

2. 検討の視点と範囲

接合分離技術の検討のため、接合・分離技術の俯瞰表を作成した。俯瞰表は、分離可能な接合と半永久的接合の両方について、産業分野ごとに適用または研究中の技術をまとめた。

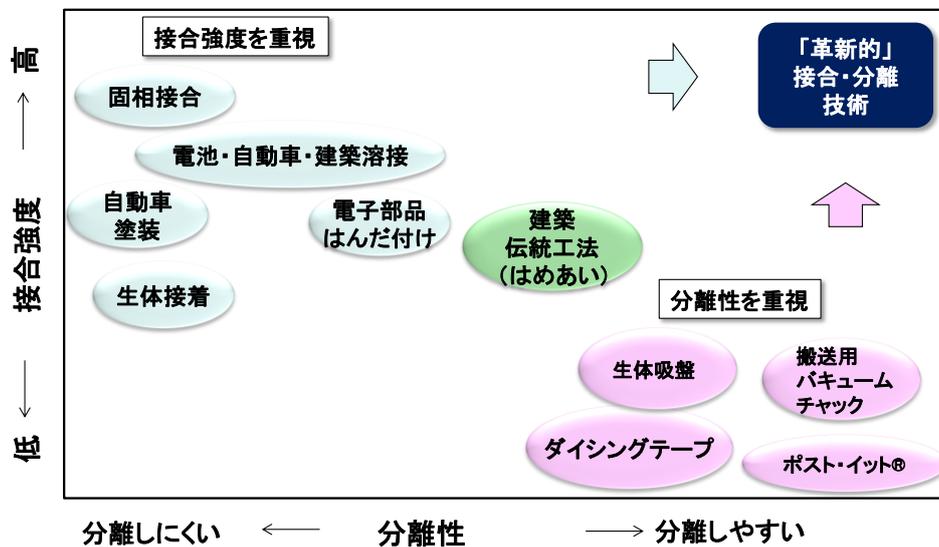


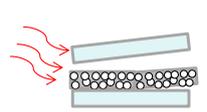
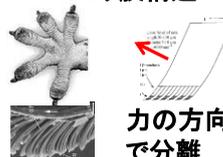
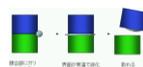
図2 接合技術のマッピング

表1 接合・分離技術の俯瞰表（抜粋）

	固定方法	自動車・航空宇宙	建築・インフラ・エネルギー	電気・電子部品	ヘルスケア	その他
分離可能	解体性接着	マイクロカプセル混入接着剤	★フロントガラス、プラスチック部品の接合	・壁紙、化粧シート	★実用化例あり、広く応用が見込める	
		通電剥離性接着剤	・センサーの一時的固定（航空機）		・盗難防止タグ	・センサーの固定（野生動物追跡）
	解体性粘着	せん断剥離テープ		・装飾部材固定	・モバイル機器用電池固定	・ポスターなど軽量物
		紫外線剥離テープ			・ウェハ加工時の固定	
	解体性接合	犠牲層導入接合			★ウェハ支持基板の固定	
		微生物腐食 液体金属脆化 (Ga塗布)	低分離コスト		★はんだ付け部解体	★アルミ層の剥離
半永久接合	生物模倣接合	面ファスナー（マジックテープ）	・パーティション取付け ・内装パネル止め、OAフロア固定	・電源コード結束バンド	・サポーター ・おむつカバー	・衣服、シューズ
	機械的	ヤモリの肢	低分離コスト & 広い用途	★ロボットの足（壁のぼり）	★部品把持 ★SEMサンプル保持	★粘着テープ ・分析機器内で試料の固定
半永久接合	溶接・接合	電気溶接（アーク、抵抗、高周波など）	・車体組立	・鉄骨溶接 ・構造体溶接 ・スタッド溶接	・金属部組立 ・電極接合	
		超音波溶接、レーザー溶接	・車体組立		・ワイヤボンディング ・電極接合	★研究開発中 ・実用化済
		FSW	・ロケット燃料タンク ・自動車アルミフレーム	・新幹線床材 ・橋梁床材	・液晶、半導体清掃装置	

表1に接合・分離技術俯瞰表からの抜粋を示す。俯瞰表から、広く応用が見込め、接合を分離するためのコストが低いという観点で、(1)マイクロカプセル混入接着剤、(2)微生物腐食、(3)液体金属脆化 (4)ヤモリの肢構造の4技術を選択した。その詳細を表2に示す。

表 2 俯瞰表より抽出した開発すべき技術

技術	接着・粘着	生物模倣接合	溶接・接合	
分類	高強度解体性接着	Dry adhesion	金属接合部分離	
接合分離	<p>マイクロカプセル混入接着剤</p>  <p>加熱により分離</p>	<p>ヤモリ肢構造¹⁾</p>  <p>力の方向で分離</p> <p>ナノ構造によるファンデルワールスカで接合</p>	<p>微生物腐食²⁾</p>  <p>硫酸塩還元菌などによる溶接部腐食</p>	<p>液体金属脆化 (Ga塗布³⁾)</p>  <p>Al, Sn, Agを溶解</p>
用途	<p>(自動車) フロントガラス接着 プラスチック部品接合 (建築・インフラ) 壁紙, 化粧シート</p>	<p>(建築・インフラ) 壁のぼりロボット足 (電気・電子部品) 搬送チャック機構 (ヘルスケア) 生体向け粘着テープ</p>	<p>(自動車) 車体接合分離 (建築・インフラ) 鉄骨溶接の分離 プラント解体</p>	<p>(電子部品) はんだ接合分離 アルミ接合分離</p>
課題の大きさ	<p>★ 低コストかつ簡便な加熱装置の開発</p>	<p>★★低コスト製造技術および用途に応じた微細構造設計技術開発</p>	<p>★★★ 適用対象・性能の基礎検証</p>	<p>★★★ 適用対象・性能の基礎検証</p>

1) Bhushan, B, Fuchs, H., Tomitori, M., “Applied Scanning Probe Methods X” Springer (2008)

2) <http://www.jfe-tec.co.jp/jfetec-news/31/5p.html>

3) <http://www.nims.go.jp/news/press/2004/02/p200402260.html>

これらの技術の車載リチウムイオン電池のリユース、リサイクルへの適用案を図3に示す。詳細は付録A1に記すが、車載リチウムイオン電池は今後、電気自動車の普及に伴い大量に使用済み電池が発生することが予想されており、低コストでリユース・リサイクルすることが重要である。

案では、電池セルをマイクロカプセル混入接着剤で接着固定し、電極端子をヤモリ肢構造のバスバーで接合している。解体時には、加熱で接着剤を分離し、特定方向に力を加えることでバスバーを外すことができる。さらに、資源リサイクルのため溶接による接合部にGaを塗布することで、溶接部を除去し、外装容器と内部電極を分離して取り出す。部品ごとに個別にリサイクルすることで、資源回収率を高めることができる。

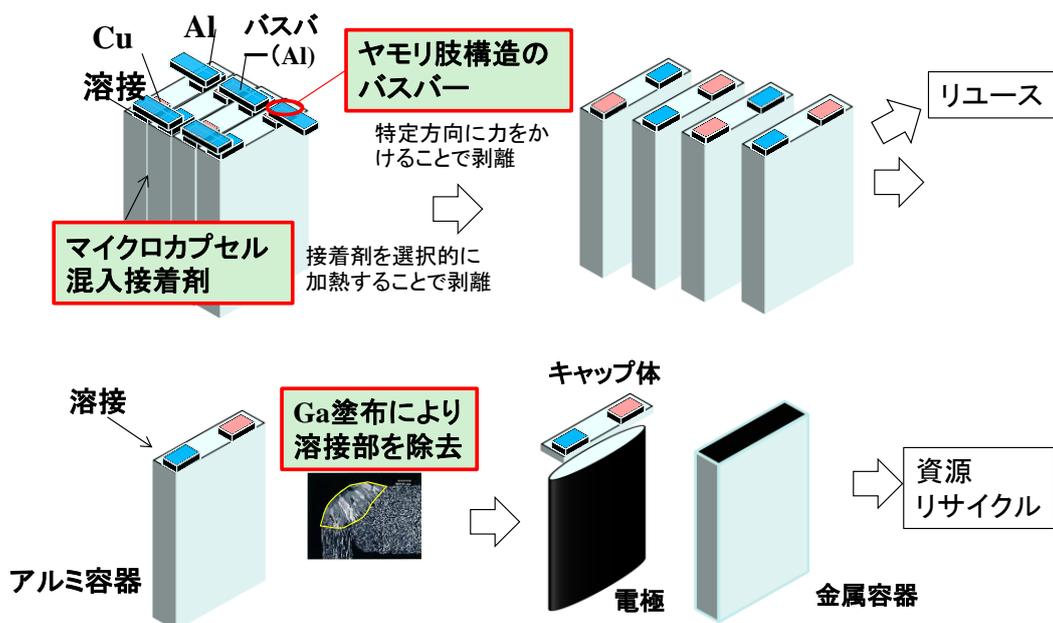


図3 リチウムイオン電池への適用案

3. 産業競争力強化のための提言骨子（案）

(1) 分離性接合技術は産業界に理解されているとは言いがたく、普及への障害の一つとなっている。本プロジェクトでは、現状の分離性接合技術と適用先を俯瞰表として整理した。今後様々な手段で、産業界に周知し、潜在的なニーズを探索する活動が必要である。

(2) 今後産業界にインパクトを与える技術として、以下の4技術を抽出した。

- A) マイクロカプセル混入接着剤による高強度接着
- B) ヤモリ枝構造による乾式粘着
- C) 微生物腐食による金属接合分離
- D) 熔融金属脆化（Ga 塗布）による金属接合分離

技術開発を進めることにより、製品の高性能化、工法の革新による生産性向上、リサイクル性の向上による環境負荷低減が期待できるため、国も積極的に支援すべきである。

これらの活動、技術の実現に向けては、(1)抽出した技術を実用化するにあたっての課題を整理し、課題解決のロードマップを作成すること、(2)電池のリサイクルや建築作業の生産性向上等のニーズに向けて、分離性接合技術の適用検討を進めることが必要である。

4. SDGs (Sustainable Development Goals) の17の目標 (Goal) との関連

「目標12: 持続可能な消費と生産のパターンを確保する」

電池を含め、これまで経済的原理でリサイクルされず廃棄されていた部品や材料を、コストを下げることでリユース・リサイクルに回せるようになるため、資源が有効活用される。

【目 次】

1. 革新的・接合分離技術による新産業・新サービス創出の推進.....	5
2. 革新的接合分離技術動向	7
2.1 俯瞰表	7
2.2 解体性接着・粘着.....	10
2.2.1 解体性接着.....	10
2.2.2 解体性粘着.....	13
2.3 生物模倣接合	14
2.4 解体性接合	18
3. 産業競争力強化に資する技術	23
3.1 高強度解体性接着.....	24
3.2 DRY ADHESION(乾式粘着)	27
3.3 金属接合部分離.....	28
3.4 車載リチウムイオン電池への適用案	30
4. 提言と今後の展開	31
(付録)	
A1. 車載リチウムイオン電池リユース・リサイクルへの適用.....	32
A1.1 車載リチウムイオン電池のリサイクル・リユースの現状.....	32
A1.2 リユース・リサイクルしくみの検討.....	35
A1.3 接合・分離技術の適用.....	41
A2 災害用応急住宅・インフラへの適用.....	46
A2.1 意義と目的.....	46
A2.2 軽量構造材について.....	47
A2.3 しくみと開発すべき技術.....	50
A2.4 開発すべき接合・分離技術.....	50

【はじめに】

溶接や接着といった接合技術は何千年という歴史がある古い技術です。その長い歴史に渡って、世界中の数多くの人々が研究開発に携わってきました。そして、その中のほとんどの人は、より強度の高い接合、欠陥がなく、疲労にも耐える信頼性の高い接合をひたすら目指して開発してきたのではないかと思います。接合部が「分離」することは悪いことであるという考えが支配的であったため、「分離」に着目した開発はあまり行われてきませんでした。

簡単に分離できる接合技術で成功した製品として「ポスト・イット®」があります。この製品は、1969年に3Mの研究者スペンサー・シルバーが強力な接着剤を開発していたところ、たまたま出来てしまった粘着力の弱い失敗作だったと言われています。決して、分離できる接着技術を開発しようとしていたわけではなく、このような大成功した製品でさえ、開発段階では「分離することは悪いこと」という考えからは抜け出していなかったと思われる。

接合部が分離することは良くないことでしょうか？高速道路や橋梁、トンネルといったインフラ構造物は永久に壊れないことを目指して作られています。しかし、現実には老朽化して、簡単に解体することもできず、問題になっています。軽量化のためアルミ、鉄、CFRP等複数の異種材料で作られた製品は、廃棄するときに、簡単に分離できないと資源リサイクルの際に問題になります。

日本の伝統的工法による木造建築は、釘等を用いず、簡単に分離することができました。接合しているときは地震にも耐え、分離するときは一箇所外せばすべて分離できるというすばらしい接合・分離技術であると思います。このように、接合しているときは十分な強度を持ち、分離したいときは簡単に分離できる技術が、「革新的接合・分離」技術であると考えています。技術も革新的ですが、接合の分離性を考慮するという考え方自体も革新的であると思っています。

我が国の産業競争力の源である「ものづくり」において、接合は電機、建築、自動車、航空・宇宙といった分野を支える基盤技術です。接合に分離性を加えることで、製品の解体が容易になり、リサイクル・リユースに根ざした新しい産業を生み出したり、住居やインフラが簡単に組み立てられたり、解体できたりすることで新しいライフスタイルを生み出し、日本の産業の活性化につながると考えています。

産業競争力懇談会
理事長
小林 喜光

【プロジェクトメンバー】

◆リーダー

岡田 直忠 (株)東芝 生産技術センター 光技術研究部

◆事務局

山森 直樹 (株)東芝 生産技術センター 生産技術企画部 技術企画担当

沖野 剛史 (株)東芝 技術統括部 技術企画室

◆オブザーバー

尾西 晃典 文部科学省 研究振興局

森田 孝治 文部科学省 研究振興局(現:物質・材料研究機構)

田村 泰嗣 文部科学省 研究振興局

中尾 秀信 文部科学省 研究振興局

◆メンバー

須賀 唯知 東京大学 大学院 工学系研究科 精密工学専攻

木下 裕介 東京大学 大学院 工学系研究科 精密工学専攻

藤野 真久 東京大学 大学院 工学系研究科 精密工学専攻

森 三樹 東京大学 生産技術研究所

佐藤 千明 東京工業大学 科学技術創成研究院

才田 一幸 大阪大学 大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻

大木 達也 産業技術総合研究所 エネルギー環境領域・環境管理研究部門

高木 秀樹 産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター

倉島 優一 産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター

細田 奈麻絵 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 構造材料基礎科学分野

石井 利昭 (株)日立製作所 材料イノベーションセンター

北條 房朗 (株)日立製作所 材料イノベーションセンター

木下 慶人 富士電機(株) 先端技術研究所 材料基盤技術研究部

小倉 英之 富士電機(株) 技術開発本部 技術統括センター

小勝 俊亘 日本電気(株) IoT デバイス研究所

宮本 潤一 日本電気(株) IoT デバイス研究所

中原 謙太郎 日本電気(株) IoT デバイス研究所

服部 美里 日本電気(株) 政策渉外部

竹内 正人 日本アビオニクス(株) 接合機器事業部

大口 達也 日本アビオニクス(株) 接合機器事業部 アプリケーション技術部

富岡 博 日本アビオニクス(株) 接合機器事業部 アプリケーション技術部

樋田 直也 本田技研工業(株) ビジネス開発統括部 スマートコミュニティ企画室

前田 直洋 本田技研工業(株) ビジネス開発統括部 スマートコミュニティ企画室

松嶋 稔郎 本田技研工業(株) ビジネス開発統括部 スマートコミュニティ企画室

新村 光一 (株)本田技術研究所 四輪R&Dセンター 第5技術開発室

森原 淳	三菱商事(株) 環境事業本部 環境R&D事業部
小林 修二	三菱商事(株) 環境事業本部 環境R&D事業部
清水 敦	JX リサーチ(株) エネルギー技術調査部
近藤 富士夫	東レ(株) ACM 技術部 産業・スポーツ技術室
石橋 壮一	東レ(株) ACM技術部 産業・スポーツ技術室
土谷 敦岐	東レ(株) オートモーティブセンター
永井 晃	日立化成(株) イノベーション推進本部 イノベーション推進センタ
廣田 憲史	三菱レイヨン(株) 研究開発統括部
日比野 浩	大成建設(株) 技術センター 建築技術研究所
森田 仁彦	大成建設(株) 技術センター 建築技術研究所 建築構工法研究室
筒井 雅行	飛鳥建設(株) 技術研究所 技術企画グループ
大堀 裕康	飛鳥建設(株) 経営企画室 新事業企画部
科部 元浩	飛鳥建設(株) 経営企画室 新事業統括室
西浦 和幸	飛鳥建設(株) 経営企画室
柳沢 崇	ライト工業(株) 施工技術本部 R&D センター 材料開発部
二見 肇彦	ライト工業(株) 施工技術本部 R&Dセンター 開発企画部
関 徹也	ライト工業(株) 施工技術本部 R&Dセンター 開発企画部
後藤 元晴	東芝環境ソリューション(株)
轟木 朋浩	東芝環境ソリューション(株) PCB事業部
小上 泰司	東芝環境ソリューション(株) 生産品質技術部 品質・技術企画担当
高橋 雅士	(株)東芝 エネルギーシステムソリューション社 電力・社会システム技術開発センター
中川 和明	(株)東芝 インフラシステムソリューション社 技術企画部
水上 朋子	(株)東芝 インフラシステムソリューション社 事業開発センター
稲垣 浩貴	(株)東芝 研究開発センター 機能材料ラボラトリー
久保木 貴志	(株)東芝 研究開発センター 機能材料ラボラトリー
大隅 清人	(株)東芝 生産技術センター 建設技術室
中川 泰忠	(株)東芝 生産技術センター
梶寄 隆	(株)東芝 生産技術センター 実装技術研究部
益永 孝幸	(株)東芝 生産技術センター 構造設計技術研究部

◆担当実行委員

須藤 亮 (一社) 産業競争力懇談会

◆担当COCN企画小委員

金枝上 敦史 三菱電機(株) 産業政策渉外室

◆COCN 企画小委員

五日市 敦 (株)東芝 技術統括部 技術企画室

佐藤 桂樹 トヨタ自動車(株) 未来創生センター 未来開拓室 産官学連携G

◆COCN 事務局

中塚 隆雄 (一社) 産業競争力懇談会

【本文】

1. 革新的・接合分離技術による新産業・新サービス創出の推進

近年わが国では、自然災害への対応、健康長寿社会の実現、3R（リデュース、リユース、リサイクル）に基づく循環型社会の実現といった課題への対応が求められている。これまで溶接や接着等ほとんどの接合技術は接合強度を最大限まで高め、永続的に接合状態が保たれることを目指して研究開発が続けられてきた。しかし、近年重要視されている環境調和、3Rの観点からは、リサイクル・リユースのコストを下げするため、接合部が容易に分離でき、製品が容易に分解できることが重要となる。

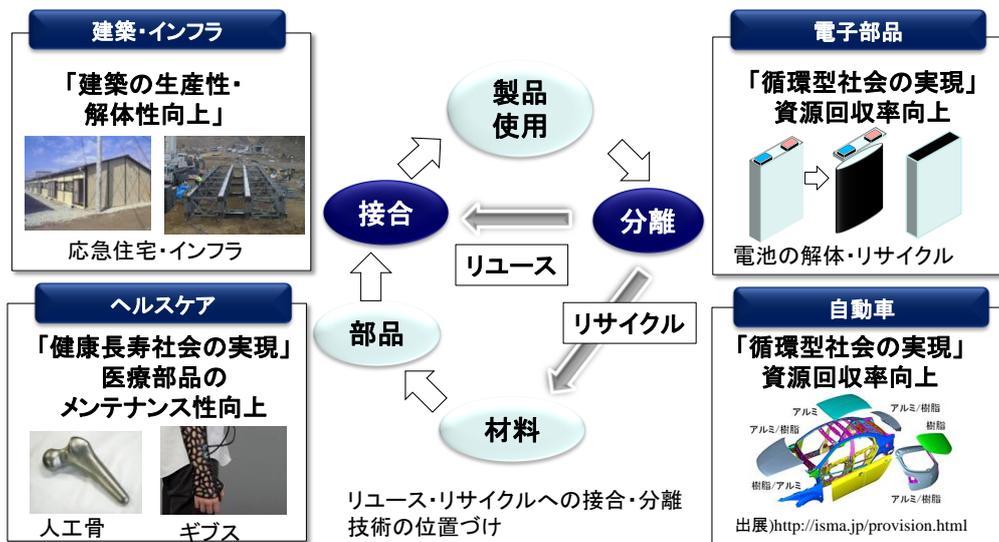


図 1.1 本プロジェクトの基本的考え方

図 1.1 に本プロジェクトの基本的考え方を示す。製品は、通常原材料を部品に加工し、接合により組み立てられて作られる。使い終わった製品は、分離され、リユースの場合は再度接合されて使用される。リサイクルの場合は、原材料まで分離された後、部品に加工され、接合されて使用される。このように、リユース・リサイクルには分離技術が重要で、分離のコストを下げることで、リユース・リサイクルコストを下げるができる。

建築・インフラ分野では、解体性に優れた災害用応急住宅や応急インフラや組立て・解体性に優れた足場などへの応用、ヘルスケアでは人工骨やギブスの人体への接合と取り外し、電子部品では車載リチウムイオン電池のリサイクルへの適用が考えられる。従来鉄鋼材のみで作られていた自動車も、鉄鋼材とアルミの異種接合技術により複合材の構造物となると、リサイクルの際には鉄鋼とアルミを分離しなくてはならない。

図 2.1 に現行の接合技術を、接合強度と分離性を軸としてマッピングした。接合強度が高い溶接や接着といった接合方法は分離が難しい。一方で、ポストイット®や、半導体ウエハのダイシング用の粘着テープでは、分離性に重点を置いた一時的接合技術が採用されているが、用いられている粘着剤は、分離性を確保するため接合強度を犠牲にしている。分離性を保持

したまま、より高い強度を持つ「革新的」接合・分離技術が開発されれば、より広い用途への適用が期待できる。

本プロジェクトでは、接合性と分離性を兼ね備えた革新的な接合・分離技術を提言し、その結果として、循環型社会の実現や、産業の生産性の向上を目指す。

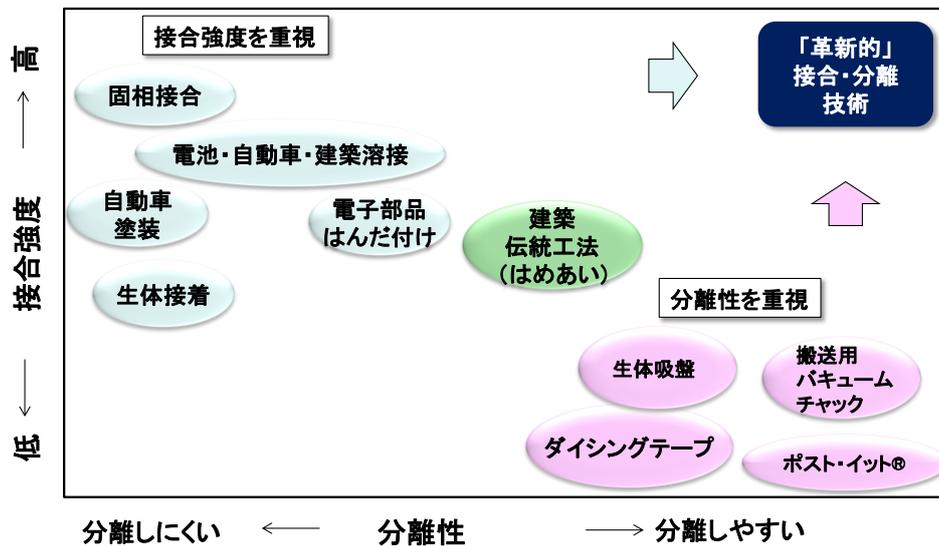


図 1.2 接合技術のマッピング

2. 革新的接合分離技術動向

2.1 俯瞰表

分離可能な革新的接合分離技術として、解体性接着・粘着技術、解体性接合技術、および生物を模倣した接合技術などが国内外の多くの研究機関において開発されている。しかし産業界において、これらの技術の活用事例は多くないのが実情である。この要因として次の2つのことが考えられる。

- ①産業界の技術者が、どのような革新的接合分離技術（技術シーズ）が開発されているのかを知らない。
- ②革新的接合分離技術の研究者が、産業界における接着・接合状況（技術ニーズ）を詳細には把握していない。

将来の産業競争力を高めていくためには、これらの技術シーズと技術ニーズのマッチングを行い、新たな適用先を発掘していくことが重要であると考えられる。

そこで、産業界の技術者が技術シーズを把握し、革新的接合分離技術の研究者が技術ニーズの把握することを目的とした接着・接合技術の一覧表を作成した。表 2.1 は接着・接合技術のうち「分解可能」な技術、表 2.2 は「半永久接合」技術についてまとめたものである。両表の縦軸は各種接合技術とし、横軸は適用分野とした。また表中の各適用先において、★印は研究開発中のものであり、・印は実用化済のものを意味している。

産業界の技術者は表 2.1 を俯瞰して、現状の半永久接合に適用可能な分解可能技術を検討することにより、リサイクル、リユース、リペア、生産性向上、およびコスト低減などの新たな価値を創造に活用することができる。

革新的接合分離技術の研究者は表 2.2 を俯瞰して、現状の産業界における接合適用事例を把握することにより、高強度化、分離性、ハンドリング性、およびコスト低減などの接合分離技術開発の方向性検討に活用することができる。

表2.1 現状の接着・接合技術（分解可能）

★：研究開発中、：実用化済

分離性	固定方法	自動車・航空宇宙	建築・インフラ	電気・電子部品	ヘルスケア	その他	
分離性	易剥離性接着剤	・ワーク固定		・ウエハ加工時の固定			
	熱可塑性接着剤			・表面美装部品のリワーク			
	解体性接着	膨張剤混入接着剤	★フロントガラス、プラスチック部品の接合	・壁紙、化粧シート			
		電磁誘導剥離性接着剤	★内装品の接合・固定	・間仕切り、天井			
		吸湿性樹脂混入接着剤			・インゴット加工時の固定	・化粧品瓶の解体	
		通電剥離性接着剤	・センサーの一時的固定（航空機）	・盗難防止タグ		・センサーの固定（野生生物追跡）	
	解体性粘着	ゼム断剥離テープ		・装飾部材固定	・モバイル機器用電池固定		・ボスターなど塗層物
		膨張剤混入粘着テープ			・電子部品加工時の固定		
		紫外線剥離テープ			・ヒートシートの固定		
		粘性層導入接合			・ウエハ加工時の固定		
解体性接合	微生物腐食			★ウエハ支持基板の固定			
	液体金属能化（Ga塗布）						
生物腐敗	面ファスナー（マジックテープ）	・人工衛星の断熱シート固定 （無重力、真空・無磁場で使用可能）	・パーティション取付け ・内装パネル止め、OAVフロア固定	★はんだ付け部の解体		★アルミ層の剥離	
	ヤモリの股			・電源コード結束バンド	・サポーター ・おむつかバー	・衣服、シューズ ・分析機器内で材料の固定 （導電性・耐熱性・無汚染、CNT使用）	
機械的	ボルト、ネジ	・車体組立、エンジン取付 ・バルブリー、タイヤ交換	★壁の底りボルトの足 ・アンカーボルト ・ロッドボルト	★軽量部品把持	★粘着テープ		
	スナップフィット			・部品組立	・医療用ネジ（インプラント）		
	ファスナー	・ロケット用サーモルカーテン ・宇宙服（気密性）		・部品組立		・衣服、カバン、スーツケース	
	真空チャック	・ワーク搬送		・部品把持、搬送（軽量部品、ウエハなど） ・機械加工時のワーク固定			
電磁氣的	静電チャック、マグネットチャック			・機械加工時のワーク固定			
	その他				・縫合	・ロープ、靴ひも	

表2.2.2 接着・接合技術の俯瞰（半永久接合技術）

★：研究開発中、・・：実用化済

分離性	固定方法	自動車・航空宇宙	建築・インフラ	電気・電子部品	ヘルスケア	その他	
半永久 接合	室温硬化性 (溶剤乾燥、触媒添加、湿気硬化、嫌 気硬化、紫外線硬化など)	・マスキング(外板と補強板の接合) ・ダイレクトレーシング(フロントガラス接着)	・新旧コンクリートの打継ぎ ・コンクリートの割れ補修、防水 ・窓、ガラス周りのシーリング	・LEDパネなどのパネル組立 ・半導体素子の実装 ・CDハードコート、DVD貼り合わせ	・歯科用接着剤 ・骨セメント ・生体用接着(止血、縫合補助)	・合板、木質ボード ・タイヤ(ゴムとタイヤコード)	
	熱硬化性 (一液エポキシ系など)	・ヘミング(接合部折り返し端部) ・ウエルトボンド(スポット溶接部)		・ICチップのダイボンド、パッケージ		・FRP(マトリックス樹脂と繊維)	
	接着・粘着	・ランブ型シール ・ガスケット類の取り付け		・部品組立		・梱包、パッケージング ・不織布貼り合わせ(紙おむつなど)	
		・サイモール取付け ・断熱材取付け	・床材貼付け	・部品組立	・医療用粘着(絆創膏、テープ)		
		・車体組立	・鉄骨溶接 ・スタッド溶接	・金属厚板組立 ・電線接合			
		・車体組立		・ワイヤボンディング ・電線接合			
		・ロケット燃料タンク ・自動車アルミフレーム	・新幹線床材 ・橋梁床材	・液晶、半導体清浄装置			
	溶接・接合	圧接、拡散接合	・カムシャフト	・積層成型 ・微細複雑流路			
		ろう付け、ほんだ付	・熱交換器	・空調機用熱交換器 ・電子部品実装			
		ウエルド接合、表面活性化接合	・宇宙用、対放射線フィルム接合	・電子デバイス接合 ・MEMSデバイス封止 ・フレキシブル、ガラスデバイス封止	・インシュラン注入マイクロレータ		
機械的	リベット	・航空機組立	・橋、鉄塔、船舶の接合				
	かしめ	・圧着端子		・圧着端子 ・電池缶		・飲料缶	
	焼きめ、冷やしめ	・ヘアリング取付	・ヘアリング取付	・モータ組立			
	その他						

2.2 解体性接着・粘着

2.2.1 解体性接着

接着剤は部材の接合を容易に実現することができることから広く普及している。しかし、通常の接着剤は接着後の分離が困難であり、リサイクルなど分離する要求に対しては問題となる。このため、使用後に接着部を容易に剥離させることが可能な解体性接着剤が開発されている。本項では現在適用中、および研究開発中の解体性接着技術について述べる¹⁾。

(1) 易剥離性接着剤

易剥離接着剤は、製造プロセスにおけるワークの仮固定用途に広く利用されている。例えば、図 2.2.1 に示すように、シリコンウェハの研磨工程においてウェハをポリッシングプレートに仮固定する際に易剥離接着剤が使用されている。この場合、ウェハの裏面に液状ワックスを塗布し、ベーキング後、過熱されたポリッシングプレートに押しつけ接合する。剥離は加熱、ならびに洗浄剤への浸漬で行い、ウェハに残存した接着剤は有機溶剤やアルカリ溶液への浸漬により洗浄する。このような製造プロセスにおいて使用される解体性接着剤は、接着剤をはく離させる力をコントロール可能なこと、および長期間の信頼性が不要なことなどから、高い接着強度を必要としない。



図 2.2.1 シリコンウェハ研磨工程における接着剤の使用²⁾

(2) 熱可塑性接着剤（ホットメルト接着剤）

熱可塑性接着剤は、所定の温度に加熱されると樹脂が軟化し、その後温度が下がると固まるという特性を利用した接着剤。冷却固化のため、短時間で接合でき作業性を向上させることができる。接着後も再加熱することにより樹脂が軟化するため、ワークを剥離させることが可能であり、表面実装部品のリワークなどに適用されている。

(3) 膨張剤混入接着剤

膨張性混入接着剤は、接着剤に混入させた膨張剤が外部刺激により膨張して接合部が分離し、解体が可能となる接着剤。この膨張剤には、加熱により発泡する熱膨張性マイクロカプセルが多く使用されており、この膨張力により接着剤層を膨らませ、接着界面に剥離を発生させ

る（図 2.2.2）。従来から低強度の粘着剤に使われてきたが、最近では住建用エマルジョン系接着剤やシリコン系弾性接着剤をはじめ、より高強度のエポキシ接着剤にもその適用が進んでおり、自動車のフロントガラスとフレームとの接合への検討がヨーロッパを中心として行われている。建築用途では、ユニットバスの壁材などの接着に、加熱によりマイクロカプセルが膨張剥離できる接着剤が開発されている。

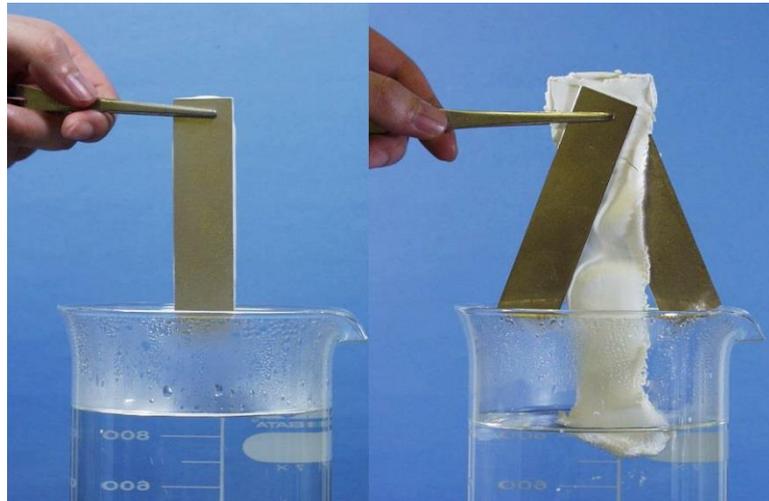


図 2.2.2 熱膨張性マイクロカプセル混入エポキシ接着剤³⁾

(4) 電磁誘導剥離性接着剤

電磁誘導剥離性接着剤は、アルミ箔を熱可塑性樹脂のテープで挟み込んだものであり、樹脂の軟化・溶融を電磁誘導加熱により行うところに特徴がある。このテープを被着体に挟み込み、ポータブルな電磁誘導加熱方式により外部から加熱することにより、接合と解体の双方を行うことができる。別名“オールオーバ工法”と呼ばれ、コンビニエンスストアなど短期間での施行が望まれる建築現場で使用されている（図 2.2.3）。また、被着体が金属であれば、アルミ箔なしのテープを用いることもできる。

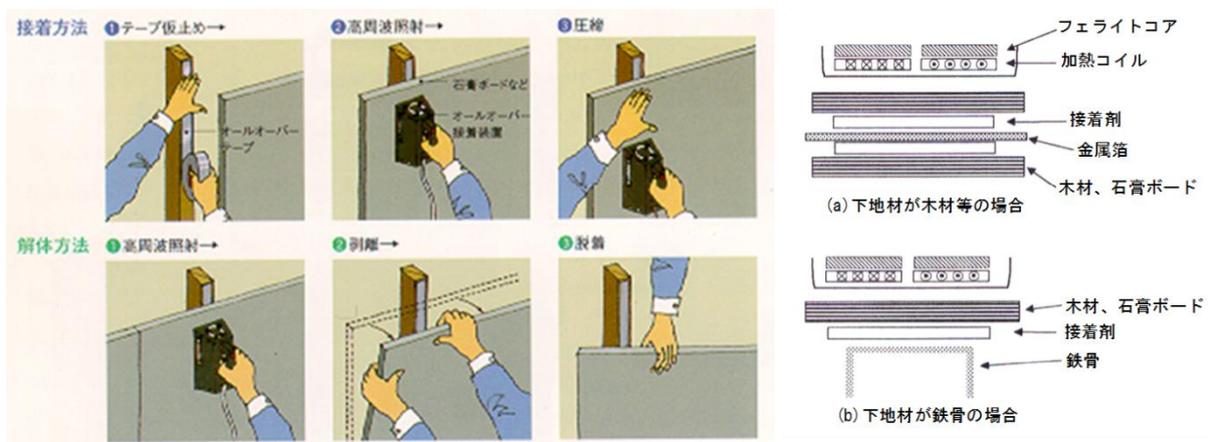


図 2.2.3 オールオーバ工法とその仕組み⁴⁾

(5) 吸湿性樹脂混入接着剤

吸湿性剥離接着剤は、吸湿による樹脂の軟化による接着界面強度の低下を利用したものである。温水への浸漬のみで解体可能であり、米国の化粧品ボトルの接着に適用されている（図 2.2.4）。米国では法規制により家庭で剥離できる必要があることに対応している。また、シリコンインゴットのスライス加工において、インゴットの固定用途にも広く用いられている。



図 2.2.4 吸湿性剥離接着剤の化粧品ボトルへの適用例⁵⁾

(6) 通電剥離性接着剤

通電剥離性接着剤は、界面における電気化学的変化とイオンの移動を利用して剥離を発生させる接着剤である。エポキシ樹脂基剤中にポリジメチルシロキサン、ポリエチレングリコールおよび特殊な塩が混入しており、硬化時に海島構造を生じる。含有している塩は、クラスター中のポリエチレングリコールを介して移動可能であり、電圧の印加によりイオンの移動が生じる。移動したイオンは陽極被着体表面で電気化学反応を生じ、界面剥離を引き起こす（図 2.2.5）。50V の通電で剥離する接着剤が米国で軍用に開発された。試作機の表面にセンサーを接着して、使用後に剥離する。野生生物の調査用途でセンサー接着に適応された例もある。

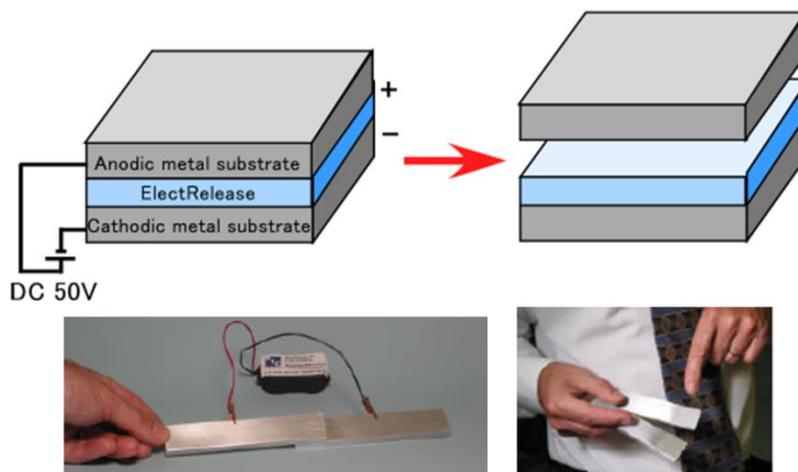


図 2.2.5 通電剥離接着剤（エレクトリリリース）⁶⁾

2.2.2 解体性粘着

高分子材料によって物を接合する材料として、接着剤の他に粘着剤がある。接着剤と粘着剤との違いは、接着剤が「使う前は液体で、貼り付けると固体になる」のに対し、粘着剤は「液体と固体の両方の性質を持ち、常に濡れた状態を安定して保っている」ことである。そのため、粘着剤はすぐ「つく」ことが可能であり、剥がすこともできる。しかし、粘着力を高くすると容易に剥がすことが困難になるため、リサイクルなど分離する要求に対しては問題となる。このため、粘着後に容易に剥離させることが可能な解体性粘着剤が開発されている。本項では現在適用中、および研究開発中の解体性粘着技術について述べる¹⁾。

(1) せん断剥離テープ

せん断剥離テープは、通常は粘着性が高いが、テープを引っ張って粘着剤をせん断変形させると粘着力が低下して綺麗に剥がすことができるテープである。剥がせるテープとして、3M社やテサ社が製品化している。ポスターなどの軽量物の粘着接合に主に使われており、高強度品ではモバイル機器のバッテリーと筐体との接着にも使われている。

(2) 膨張材混入テープ

膨張剤混入テープは、粘着剤に熱を加えると膨張するマイクロカプセルが混ぜてあり、熱を加えるとカプセルが膨張して粘着剤層の表面が凹凸になり、粘着力がなくなって被着体を剥がすことができるテープである（図 2.2.6）。電子部品の各種製造工程における自動化・省人化を目的として広く適用されている。

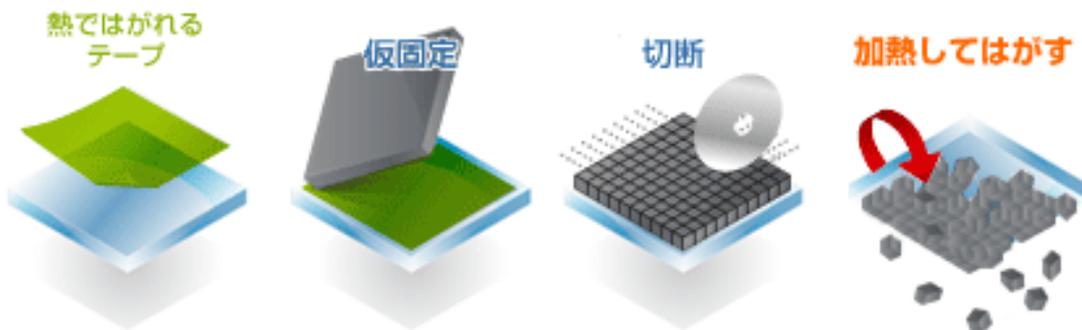


図 2.2.6 膨張材混入テープ⁷⁾

(3) 紫外線剥離テープ

紫外線剥離テープは、紫外線照射によりガスが発生することで、粘着剤層の表面が凹凸になり、粘着力がなくなって被着体を剥がすことができるテープである。半導体ウェハのダイシング加工など、加工中には強力な粘着力でワークを確実に固定し、加工終了後には紫外線照射により粘着力を弱め、剥離を容易にして加工品を容易に取り出すことができる（図 2.2.7）。

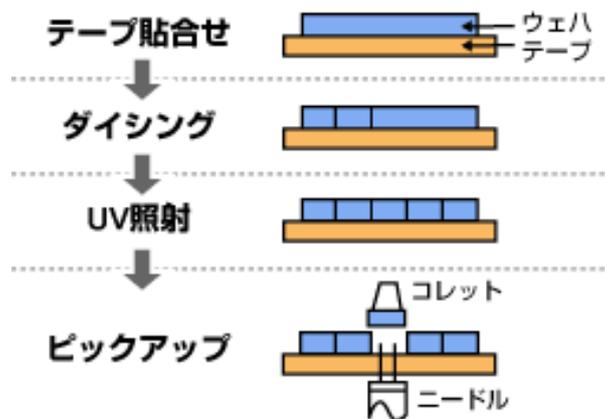


図 2.2.7 紫外線剥離テープ⁸⁾

参考文献

- 1) 佐藤千明、“剥がせる接着剤：解体性接着剤とその特徴”、日本接着学会誌 vol. 39 No. 8 (2003) 295-301
- 2) 日化精工株式会社、PRODUCTS GUIDE Vol. 8
- 3) Yuichi NISHIYAMA、 Nobuyuki UTO、 Chiaki SATO and Hiroaki SAKURAI、 Int. J. Adhesion and Adhesives、 23、 337 (2003).
- 4) 富田英雄、日本機会学会講習会資料集、No. 01-86 (2001)、pp. 13-16
- 5) 堀薫夫、日本機会学会講習会資料集、No. 01-86 (2001)、pp. 9-12
- 6) 太陽金網、エレクトリリース カタログ
- 7) 日東電工 WEB サイト、テープのひみつ館 熱ではがれるテープ、
<http://www.nitto.com/jp/ja/tapemuseum/guide/page01.html>
- 8) 古河電工 WEB サイト、半導体 UV テープとは？
<https://www.furukawa.co.jp/uvtape/jp/whatis.htm>

2.3 生物模倣接合

生物模倣技術は、生物や植物などの持つ機能や形状を模倣し、工業製品に応用するものであり、新幹線の先端の空力設計や蓮の葉の表面形状を模した撥水素材等が知られている¹⁾。生物模倣を可逆接合に活用した例として、面ファスナー(マジックテープ)、ヤモリの肢構造、落葉機構が挙げられる。

面ファスナーはゴボウの実の形状をヒントに 1950 年代にスイスで製品化されて広く実用化されている可逆接合である。図 2.3.1 に示すように、フック状に起毛した面とループ状に起毛した面を押し当てることで、フック部が絡み合って結合し、外力により剥がすことが出来る。接合機構は機械的嵌め合いである。分離機構がフック状の高分子繊維の弾性変形であるため、分離後にフック構造がもとの形状に戻るにより繰り返しの接合・分離が可能となる。普及した技術であるが、分離時に接合強度より強い力が必要でピール剥離が不可欠である

ため、剛体面と剛体面を接合した場合は解体が困難である。

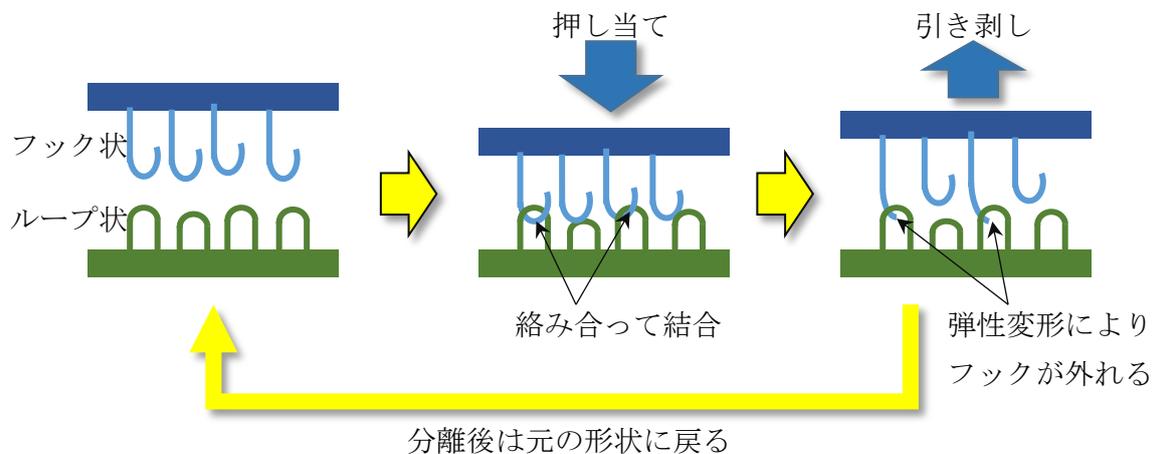


図 2.3.1 面ファスナーの接合・分離機構

ヤモリの肢の表面は、図 2.3.2 に示すように、直径数 μm の毛の先端が直径 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ の微細な毛で覆われ、毛の先端が一方向に折れ曲がって幅 $0.2\mu\text{m}$ 、長さ $0.5\mu\text{m}$ 程度のヘラ形状が形成されている²⁾。ヘラ形状を被着体に密着させた際に、微細な毛が斜めに押し当る構造であり、ファンデルワールス力によりヘラ形状が対象物に固着する。この構造は固着強度が外力の方向に依存し、肢を後ろにずらす方向の固着力が強く、肢を前にずらす方向の固着力が弱いことを利用して、固着と剥離を任意に繰り返すことが可能となる。微細な毛が対象物の微細な凹凸に追従して密着することでファンデルワールス力が発現して、垂直方向で 0.3MPa 程度の固着力が得られることが知られている。このようなヤモリの肢の機能は 2000 年頃に解明され、近年、このような特徴を模倣した非可逆接合の研究が進められている³⁾。図 2.3.3 にナノインプリント技術を活用した被着体の開発事例が報告されている。約 60 度に傾斜した直径 $0.5\mu\text{m}$ の樹脂の柱の先端にヘラ形状が形成されている。図 2.3.4 は、このような微細構造の固着力と引き剥し角度の関係を解析した事例である。引き剥し角度が鋭角なほど固着力が増加することから、傾斜した微細な毛を後ろにずらす方向の固着力が強く、肢を前にずらす方向の固着力が弱いことが説明できる。ヤモリの肢の構造は、力の方向を変えることで剥がれるため剥離力が小さくて済む、粘着剤が残らないという利点があり、分離可能な接合技術として期待される。一方で、コスト面を含めたサブミクロンの微細構造の加工技術が課題と考えられている。

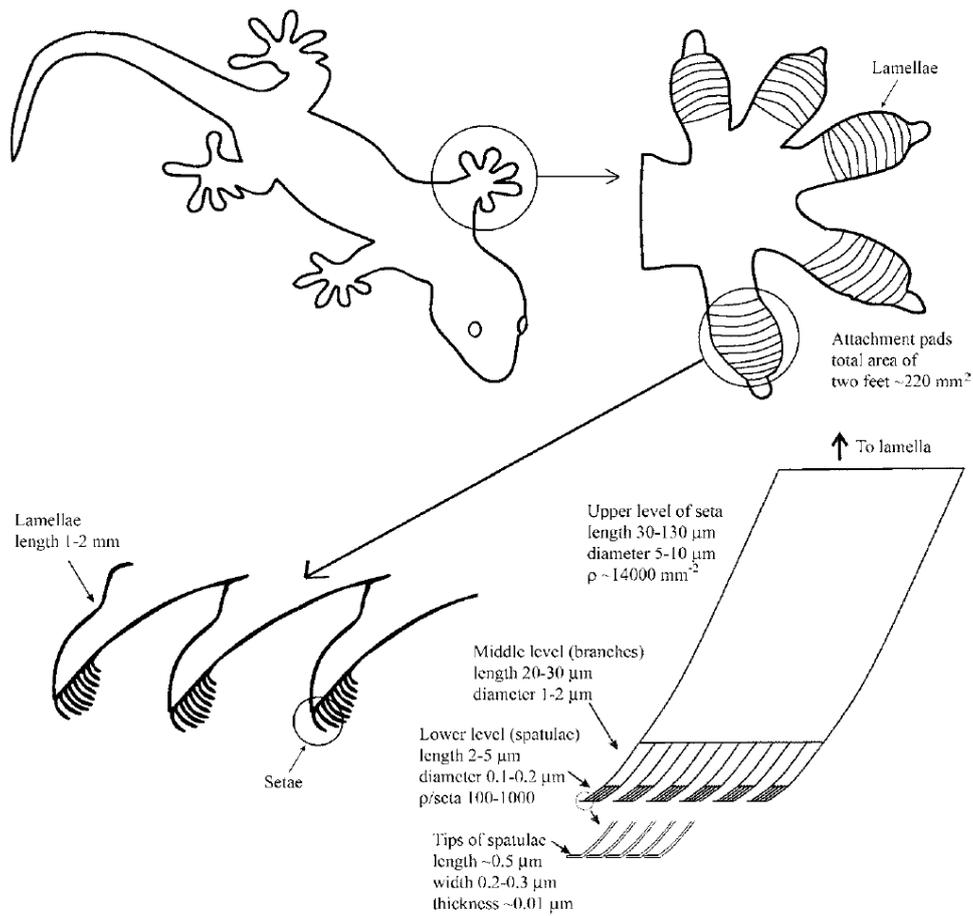


図 2.3.2 ヤモリの足の構造

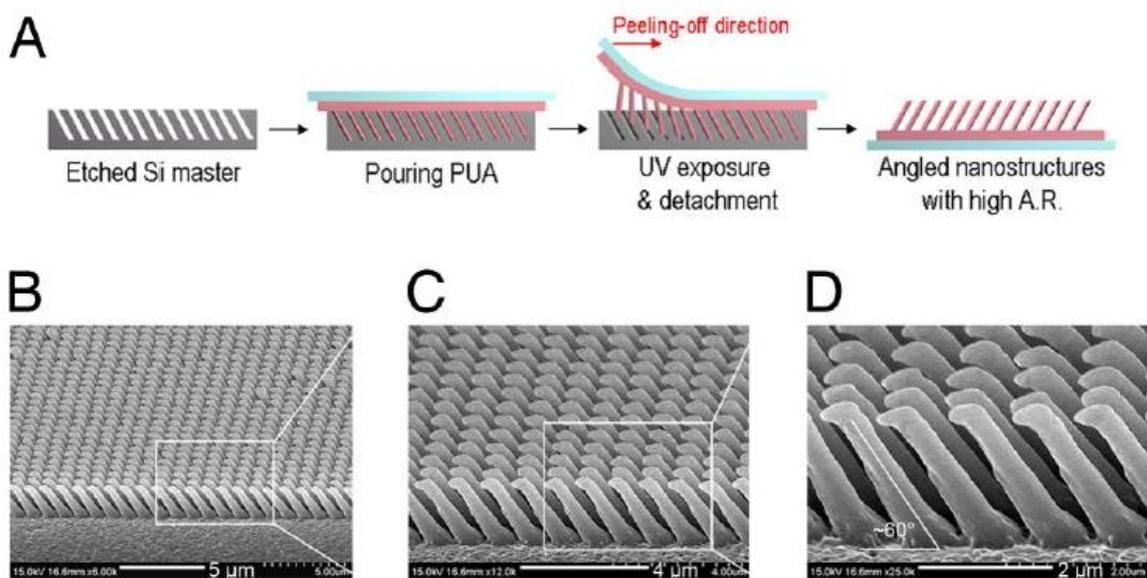


図 2.3.3 ナノインプリント技術による傾斜微細毛の作製³⁾

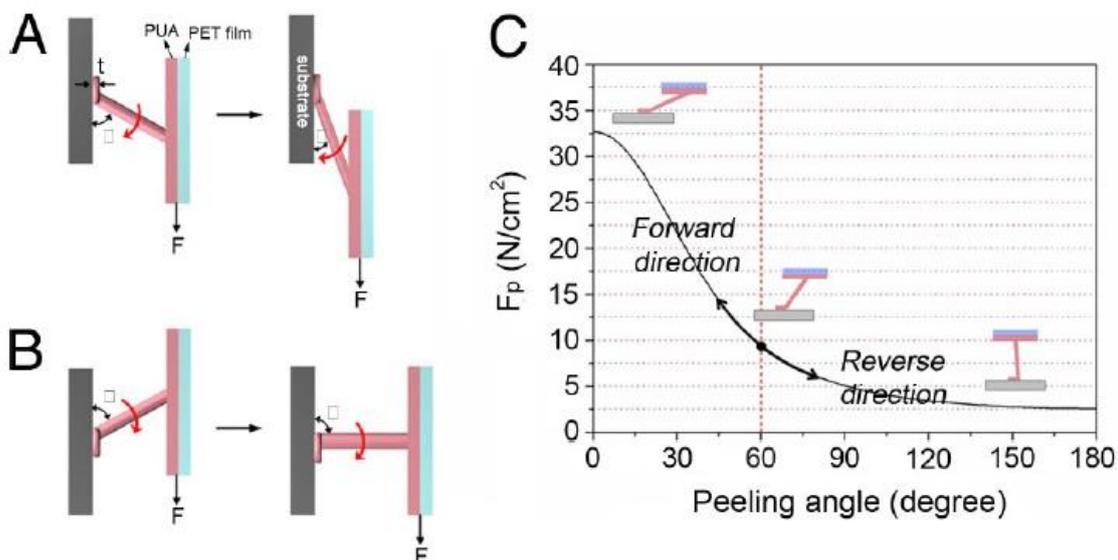


図 2.3.4 微細毛の固着力の解析事例³⁾

また、解体性接合に活用できる生物模倣技術として落葉の機構が知られている。落葉樹はあらかじめ葉柄と茎の間に剥離のための離層を内在した状態で成長し、秋の気温低下や乾燥による植物ホルモン濃度の変化することで離層が成長して落葉する。これを可逆的接合技術に応用して、図 2.3.5 に示すように、接合部に離層をあらかじめ形成しておき、周囲環境の変化により離層を成長させて自己剥離する手法が提案されている⁴⁾。離層の成長手法としては、接合部を加熱することで脆い反応層を成長させる、水素に反応して微粉化する反応層、液体金属による反応層の融解・脆化が提案されている。詳細は次項の「解体性接合」で説明する。

近年、低ダメージな電子顕微鏡技術を始めとした生物微細構造の観察技術と、半導体加工、ナノインプリント、カーボンナノファイバー等の微細加工技術の進展により、生物の微細構造や機能を取り入れた生物模倣技術の研究が加速している。自然界には低エネルギーで完全な循環系が数多く存在し、生物模倣接合は省エネルギーな循環型社会の実現に貢献する革新的技術の種として期待される。

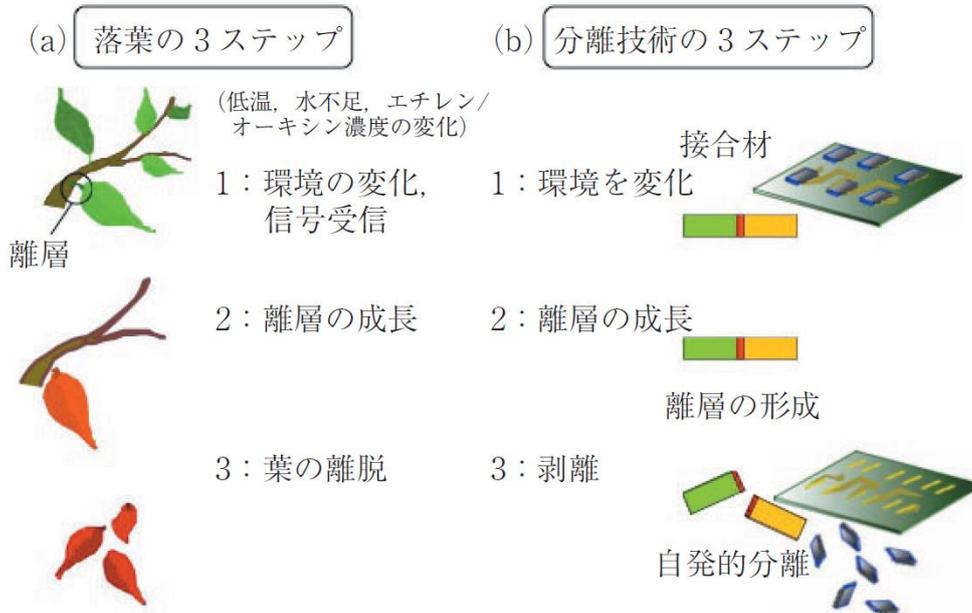


図 2.3.5 落葉の機構と応用⁴⁾

参考文献

- 1) 東レ経営研究所調査レポート No.15-09 「バイオミメティクスの新展開」
- 2) Bhushan, Bharat, and Robert A. Sayer. "Gecko feet: natural attachment systems for smart adhesion." Applied Scanning Probe Methods VII. Springer Berlin Heidelberg, 2007. 41-76.
- 3) Jeong, Hoon Eui, et al. "A nontransferring dry adhesive with hierarchical polymer nanohairs." Proceedings of the National Academy of Sciences 106.14 (2009): 5639-5644.
- 4) 細田奈麻絵. "バイオミメティクス製品の開発プロセス." 精密工学会誌 81.5 (2015): 389-392.

2.4 解体性接合

解体性接合は、接合部を分離解体することを前提とした接合技術である。接合部は使用時の信頼性を確保するために、母材と同等もしくは母材よりも高い接合強度が求められ、一般には分離解体が難しい。金属等の無機物の接合は熱、圧力により母材間に反応層を形成して接合することが一般的であり、反応層の熱的安定性と接合強度が高くなるよう設計される。従って、接合部を分離して再利用することは困難であり解体可能な可逆的接合ではない。従って、解体性接合の実現には、分離を前提とした接合技術を設計段階から導入することが不可欠である。

解体性接合を実現する手段として、図 2.4.1 に示すようなアクティブディスプレイアセンブリが提案されている^{1), 2)}。これは、接合部に解体機構やエネルギー変換機構を予め内在させることにより、低エネルギーで容易に接合部を分解するものである。接合界面を制御する方法としては、1) 結合状態の操作、2) 界面の内部応力を誘起、の2つの手法がある。

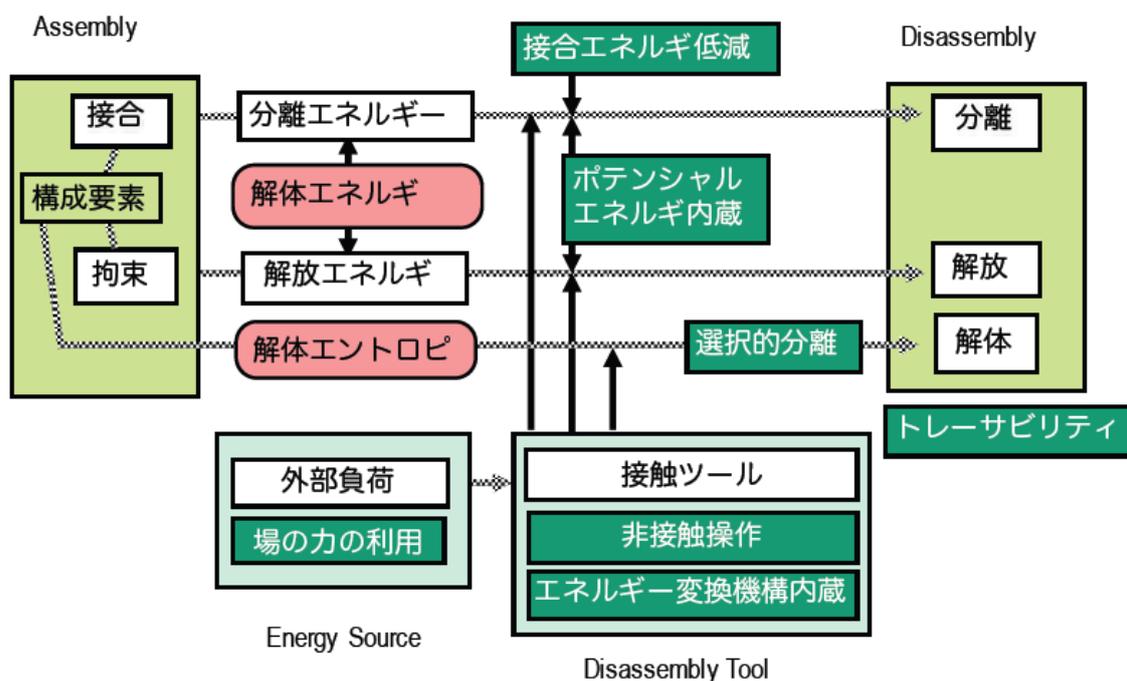
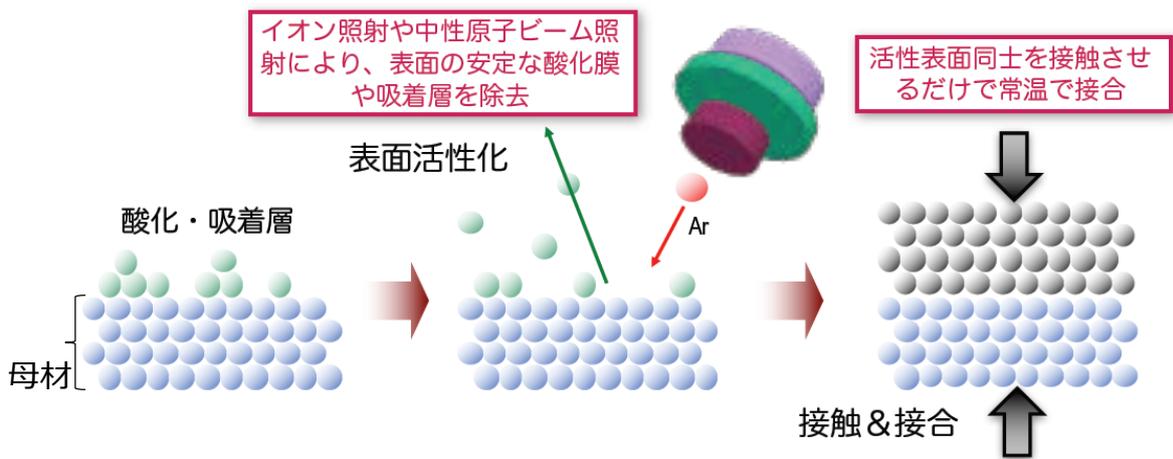


図 2.4.1 アクティブディスアセンブリ

結合状態の操作により接合界面を制御する方法としては、加熱、冷却などの相変態により反応層や結合界面を脆化させるもの、紫外線照射などにより高分子鎖を切断するもの等がある。事例として、常温接合を用いた可逆接合の例が報告されている。常温接合はイオン照射や原子ビーム照射により表面酸化膜や吸着層を除去して、活性表面同士を接触させることにより常温で接合する手法であり、金属、セラミック、半導体を常温で接合できることが知られている(図 2.4.2)。接合温度が低く反応層形成がほとんど進行しないため、分離による接合面の変質を抑制することが可能であり、解体した部材の再利用に適した接合手法である。図 2.4.3 の報告例では、ステンレスとアルミを常温接合することで高強度な接合が得られ、破断試験ではアルミ内部で破断する。この接合体は高温加熱(Ex. 550°C)すると脆い Al-Fe 系反応層が形成されて自己分離する。分離面を原子ビーム照射することで、再び常温接合することが可能となる^{2),3)}。また、ガラスと高分子フィルムの常温接合で、数 nm レベルの Si 密着層を導入することで、400°Cの高温処理に耐え、加熱処理後でも容易に剥離できる貼り合せ技術が報告されており(図 2.4.4)、有機フィルムデバイス製造工程への適用が期待されている⁴⁾。また、液体金属脆化を用いた分離手法として、図 2.4.5 に示すように、Al/Al 接合やプリント基板のはんだ接合面の結晶粒界にガリウム液体を浸透させて界面脆化により接合部を分離できることが報告されている⁵⁾。



接合対象：金属／金属、金属／セラミック・ガラス、
金属／半導体、半導体／半導体

図2.4.2 表面活性化を用いた常温接合

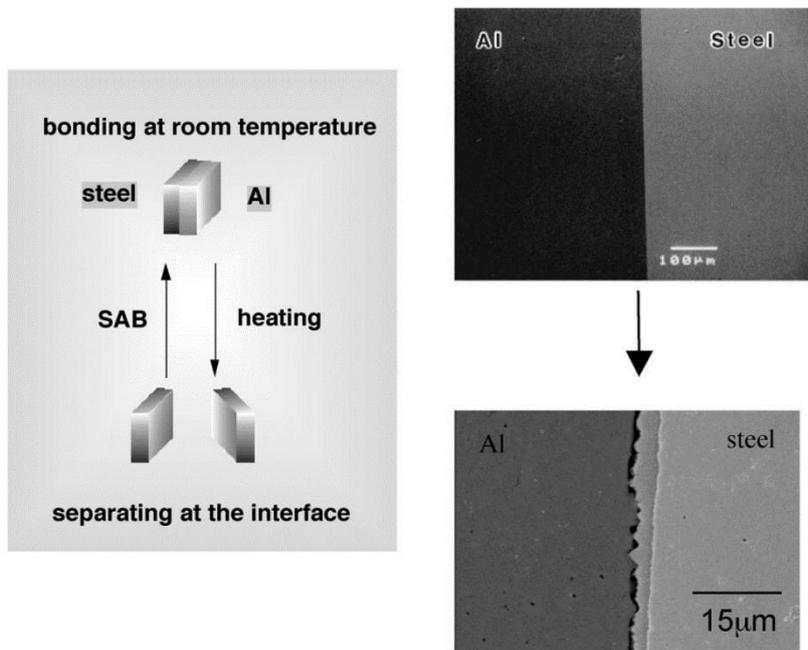


図 2.4.3 常温接合によるアルミ、ステンレスの解体性接合

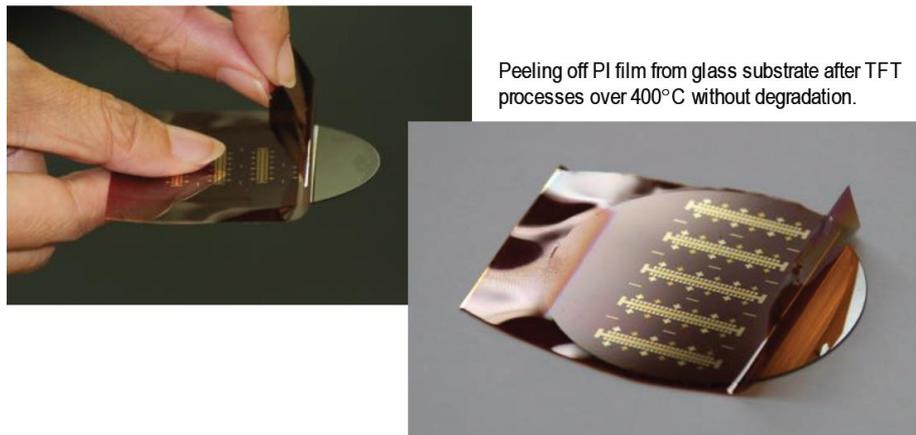


図 2.4.4 常温接合によるポリイミドフィルムとガラスの接合と分離

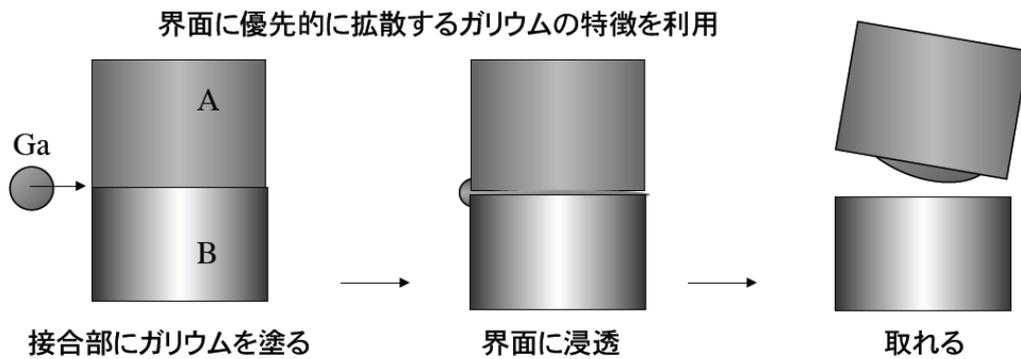
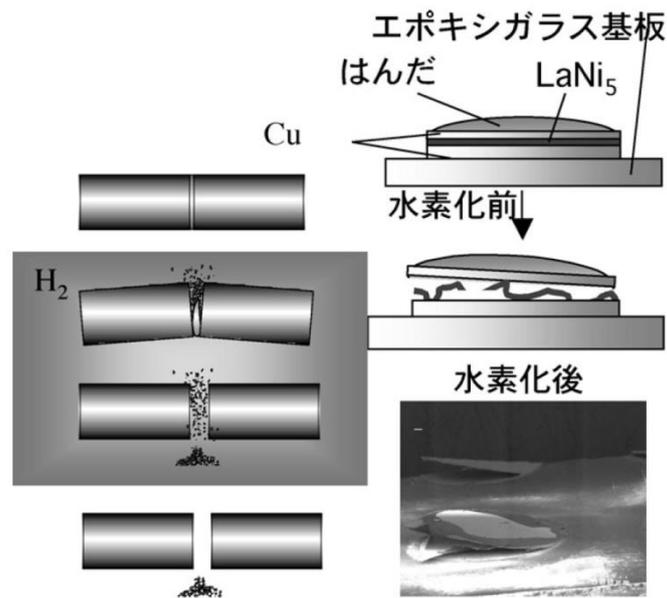


図 2.4.5 ガリウムによる金属接合界面の分離

界面の内部応力を誘起により接合界面を制御する方法としては、接合面に水素吸蔵合金層を形成する手法が報告されている。水素吸蔵合金は水素と反応すると体積膨張を起こして微粉化する特徴があり、解体機構に利用できる。本事例では図 2.4.6 に示すように、La-Ni 系合金を複合材料の界面に挿んだ構造を形成して、減圧下の水素雰囲気中で 80°C に加熱することで水素吸蔵合金層が微粉化して界面が分離できることと、水素が存在しない通常雰囲気化では 220°C の加熱に耐えることが報告されている 2), 6)。

以上のように、解体性接合は、新しい製造技術、およびリサイクル・リユースを推進による循環型社会を実現する技術として可能性が期待されている。解体性接合の実用化と普及には、製品のライフサイクルコストを含めた要求仕様に合致する接合技術の開発が望まれる。



水素吸蔵合金が微粉化して界面が分離^{16),17)}

図 2.4.6 水素吸蔵合金による界面の分離

参考文献

- 1) T. Suga and N. Hosoda, Active Disassembly and Reversible Interconnection, 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment 330-334
- 2) 細田奈麻絵、“分離を設計した接合技術”、エレクトロニクス実装学会誌 vol. 8 No. 5 (2005) 416-420
- 3) N. Hosoda and T. Suga, Reversible Interconnection by Control of Interface Reactions, EcoDesign '99 : First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 1012-1015, 1999
- 4) Kai Takeuchi, Masahisa Fujino, and Tadamoto Suga, Room Temperature Bonding and Debonding of Ultra-Thin Glass Substrates for Fabrication of LCD, 2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 1284-1289
- 5) N. Hosoda, T. Kimura, T. Suga : “液体金属を用いた界面の常温分離技術” 第5回 マイクロエレクトロニクスシンポジウム MES2005 MES2005 第5回 マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (2005) 209-212
- 6) 細田奈麻絵、北岡文也、荒船龍彦、須賀唯知、“可逆的インターコネクションー分離可能な接合法の開発”、エレクトロニクス実装学会誌、vol. 4 No. 2 (2001) 142-144

3. 産業競争力強化に資する技術

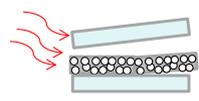
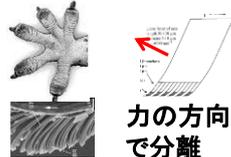
表 3.1 に接合・分離技術俯瞰表からの抜粋を示す。俯瞰表から、広く応用が見込め、接合を分離するためのコストが低いという観点で、(1)マイクロカプセル混入接着剤、(2)微生物腐食、(3)液体金属脆化 (4)ヤモリの肢構造の 4 技術を選択した。一覧を表 3.2 に示す。

マイクロカプセル混入接着剤は、実用化例があり、広く応用が見込める。微生物腐食は分離コストが低いが、現時点では分離向けに研究されておらず、対象製品も不明確であった。そこで、我々は、半永久接合で使われている鉄骨や構造体の溶接の分離を対象として選択した。液体金属脆化は分離コストが低く、アルミ接合の分離などに研究がなされている。ヤモリの肢構造は分離コストが低く、また広い用途が見込め、活発に研究開発がなされている。

表 3.1 接合・分離技術の俯瞰表（抜粋）

	固定方法	自動車・航空宇宙	建築・インフラ ・エネルギー	電気・電子部品	ヘルスケア	その他
分離可能	解体性接着	マイクロカプセル混入接着剤	★フロントガラス、プラスチック部品の接合	・壁紙、化粧シート	実用化例あり, 広く応用が見込める	
		通電剥離性接着剤	・センサーの一時的固定 (航空機)		・盗難防止タグ	・センサーの固定 (野生動物追跡)
	解体性粘着	せん断剥離テープ		・装飾部材固定	・モバイル機器用電池固定	・ポスターなど軽量物
		紫外線剥離テープ			・ウェア加工時の固定	
	解体性接合	犠牲層導入接合			★ウェア支持基板の固定	
		微生物腐食 液体金属脆化 (Ga塗布)	低分離コスト		★はんだ付け部解体	★アルミ層の剥離
生物模倣接合	面ファスナー (マジックテープ)	低分離コスト & 広い用途	・パーティション取付け ・内装パネル止め、OAフロア固定	・電源コード結束バンド	・サポーター ・おむつカバー	・衣服、シューズ
	ヤモリの肢		★ロボットの足 (壁のぼり)	★部品把持 ・SEMサンプル保持	★粘着テープ	・分析機器内で試料の固定
機械的	ボルト、ネジ	・車体組立、エンジン取付 ・バッテリー、タイヤ交換	・アンカーボルト ・ロックボルト	・部品組立	・医療用ネジ(インプラント)	
半永久接合	電気溶接 (アーク、抵抗、高周波など)	・車体組立	・鉄骨溶接 ・構造体溶接 ・スタッド溶接	・立降昇機組立 ・電極接合		
	超音波溶接、レーザー溶接	・車体組立		・ワイヤボンディング ・電極接合	★:研究開発中 ・:実用化済	
	FSW	・ロケット燃料タンク ・自動車アルミフレーム	・新幹線床材 ・橋梁床材	・液晶、半導体清掃装置		

表 3.2 俯瞰表より抽出した開発すべき技術

技術	接着・粘着	生物模倣接合	溶接・接合	
分類	高強度解体性接着	Dry adhesion	金属接合部分離	
接合分離	<p>マイクロカプセル混入接着剤</p>  <p>加熱により分離</p>	<p>ヤモリ肢構造¹⁾</p>  <p>力の方向で分離</p> <p>ナノ構造によるファンデルワールス力で接合</p>	<p>微生物腐食²⁾</p>  <p>硫酸塩還元菌などによる溶接部腐食</p>	<p>液体金属脆化 (Ga塗布³⁾)</p>  <p>Al, Sn, Agを溶解</p>
用途	(自動車) フロントガラス接着 プラスチック部品接合 (建築・インフラ) 壁紙, 化粧シート	(建築・インフラ) 壁のぼりロボット足 (電気・電子部品) 搬送チャック機構 (ヘルスケア) 生体向け粘着テープ	(自動車) 車体接合分離 (建築・インフラ) 鉄骨溶接の分離 プラント解体	(電子部品) はんだ接合分離 アルミ接合分離
課題の大きさ	★ 低コストかつ簡便な加熱装置の開発	★★ 低コスト製造技術および用途に応じた微細構造設計技術開発	★★★ 適用対象・性能の基礎検証	★★★ 適用対象・性能の基礎検証

1) Bhushan, B, Fuchs, H., Tomitori, M., “Applied Scanning Probe Methods X” Springer (2008)

2) <http://www.jfe-tec.co.jp/jfetec-news/31/5p.html>

3) <http://www.nims.go.jp/news/press/2004/02/p200402260.html>

3.1 高強度解体性接着

解体性接着技術として、易剥離性接着剤、熱可塑性接着剤、膨張剤混入接着剤、電磁誘導剥離性接着剤、吸湿性樹脂混入接着剤、および通電剥離性接着剤などが開発されている。解体性接着剤の現状の適用事例のほとんどは製造工程における一時的な接着用途となっている。その理由として解体性接着剤の接合強度が相対的に低いこと、および長期的な信頼性データが不足していることの2つの理由が挙げられる。今後、解体性接着技術の適用範囲を広げ産業競争力を高めていくためには、信頼性の高い高強度解体性接着技術を開発していく必要があると考えられる。本項では、高強度解体性接着技術として有望な接着剤、開発状況について述べる。¹⁾

(1) 膨張性マイクロカプセル混入接着剤

現状の各種の解体性接着技術における信頼性が高い高強度接着技術として、熱膨張混入接着技術の一つである膨張性マイクロカプセル混入接着剤が有望であると考えられる。2.2.1項で述べたように、膨張性マイクロカプセル混入接着剤は従来から低強度の粘着剤に使われてきたが、最近では高強度のエポキシ接着剤にもその適用が進んでおり、解体性接着の高強度化の研究開発が進められている。

図 3.1.1 に熱膨張性マイクロカプセルの一例を示す。このマイクロカプセルはポリビニルデンもしくはアクリル樹脂のシェルを持ち、内部に液状炭化水素が充填されている。直径はお

よそ $20\mu\text{m}$ である。加熱すると内部圧力が上昇し、かつシェルが軟化するため膨張を始め、温度の上昇に伴いその体積も増加する。膨張開始温度および体積増加量はマイクロカプセルのグレードによって異なり、接着剤の解体開始温度も選択できる。

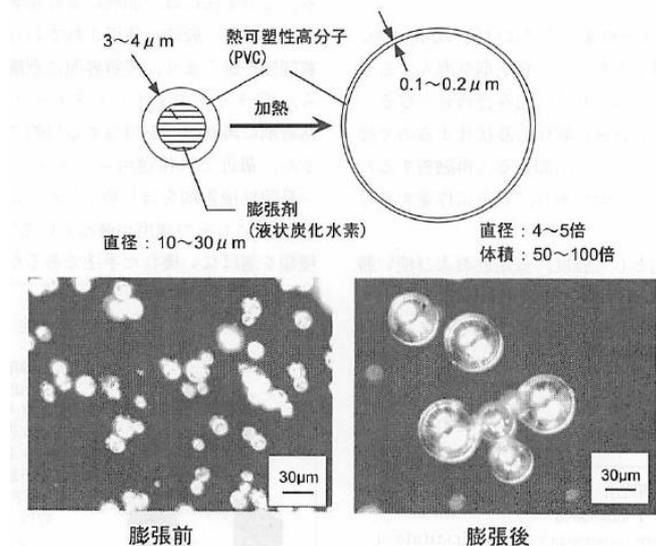


図 3.1.1 熱膨張性マイクロカプセル混入エポキシ接着剤²⁾

(2) ECODISM プロジェクト

ヨーロッパでは自動車業界を中心として高強度解体性接着の自動車への適用検討が 2008 年までプロジェクトとして進められていた。プロジェクト名は ECODISM (Ecological and economical development of innovative strategy and process for clean maintenance and dismantling further recycling of vehicle parts) であり、自動車部品の解体性やリサイクルを検討するプロジェクトである。このプロジェクトにおいて、自動車の窓ガラスとフレームとの接着剤として、膨張性マイクロカプセル混入接着剤が適用されており、実用化可能な段階まで開発されている (図 3.1.2)。現状の窓ガラス交換作業では接着剤層をワイヤで破断しているが、膨張性マイクロカプセルを適用することで容易に解体可能となる。



図 3.1.2 マイクロカプセル混入接着剤の自動車への適用

(3) 発泡剤の種類と特徴・特性

解体性付与のために混入する発泡剤は、物理発泡剤、有機系発泡剤、および無機系発泡剤に

大別される。物理発泡剤には熱膨張性マイクロカプセルが含まれ、材料の気化や軟化などの物理特性が発泡に利用される。この他、ワックスやパラフィンなど、比較的低分子量の炭化水素などもこの範疇に入る。

有機系発泡剤、例えば ADCA や OBSH などは、加熱を引き金として化学反応を生じ、同時に気体を発生する。プラスチックやゴムなどの発泡に使用される材料でありコストが低い。無機系発泡剤としては、膨張黒鉛が有名であり、ゴムの増量材として使用されている。接着剤の剥離力も大きいので注目されており、システムキッチンのステンレスシンク接合への適用が検討されている。天然鉱物に酸をインターカレーションしただけの単純な組成のため、コストも低い。図 3.1.3 に各種発泡剤と接合部解体の様子を示す。

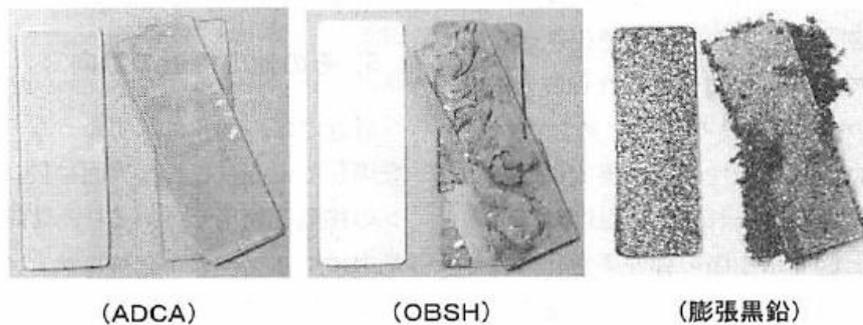


図 3.1.3 各種発泡剤と接合部解体の様子³⁾

(4) 高耐熱解体性接着剤

エポキシ樹脂の耐熱性を生かすために、マイクロカプセルよりも高温で発泡する膨張黒鉛と組み合わせた高耐熱解体性接着剤が開発されている。図 3.1.4 にこの接着剤で接合した CFRP-金属接合物と、その解体後の様子を示す。この接着剤では膨張黒鉛を 10wt% 混入しており、250°C、5 分間の加熱で解体が可能である。

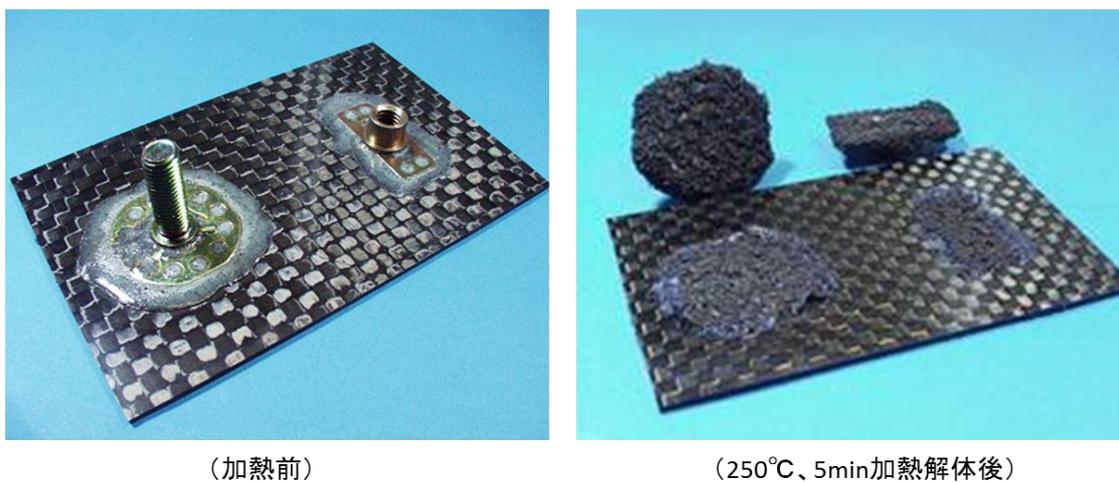
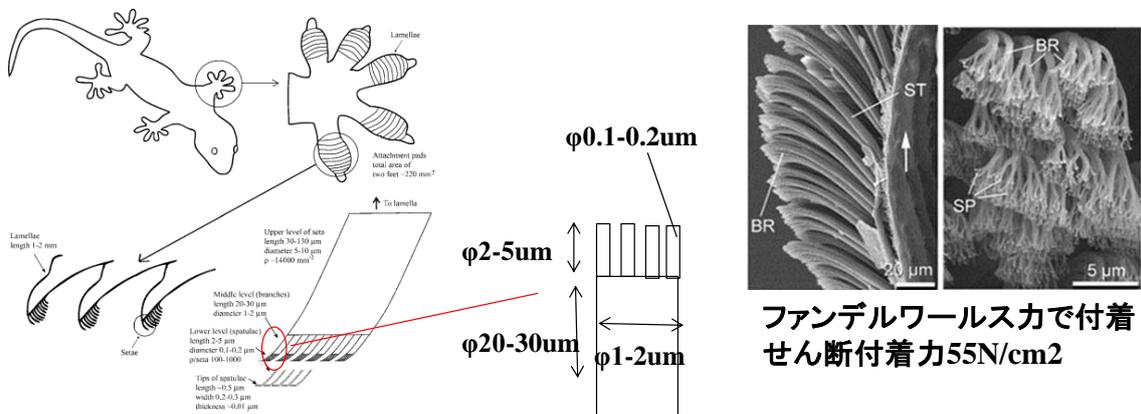


図 3.1.4 高耐熱解体性接着剤による異種材料接合物の分離 (CFRP と金属)³⁾

- 1) 佐藤千明, “剥がせる接着剤：解体性接着剤とその特徴”, 日本接着学会誌 vol. 39 No. 8 (2003) 295-301
- 2) 木田末男, 高分子, Vol. 40, No. 4 (1991), pp. 248-251.
- 3) 佐藤千明, “解体性接着技術 - 最近の進展 - ”, 日本接着学会誌 vol. 44 No. 4 (2008) 136-141

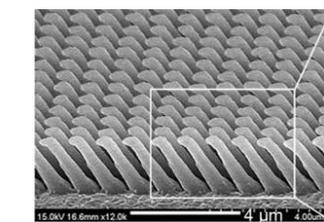
3.2 Dry Adhesion (乾式粘着)

Dry Adhesionに分類される生物模倣によるヤモリの肢構造を有望な技術として抽出した。ヤモリの肢構造は、先端が直径 100-200nm の微細なピラー構造である。この構造が、被付着物の微細な凹凸に倣い先端が近接するため強いファンデルワールス力が働き 55N/cm² という比較的高い付着力が得られる。



ファンデルワールス力で付着せん断付着力55N/cm²

図 3. 2. 1 ヤモリの肢構造¹⁾



ナノインプリントで作られた直径500nmのピラー²⁾
せん断付着力23N/cm²



木登りロボット³⁾

図 3. 2. 2 ヤモリ肢構造の工業的応用

この技術の応用としては、図 3. 2. 2 に示すようにナノインプリント等の方法で微細ピラーを作り、機械的な付着力を持たせたものが開発されている。この技術の応用展開を考察するにあたって、我々は、表 3. 2. 1 のように適用分野に対して機能を割り当てた表を作った。

2章の俯瞰表に記載されている応用は電子部品やヘルスケア分野で機能としては機械的強度を持たせたものであった。しかし、接合の機能として熱伝導、電気伝導、光学・音響結合といった分野を含めて考えると、様々な適用が可能であることがわかる。熱伝導機能では、グリースや半田付けが不要なヒートシンクとしての利用、電気伝導では超小型コンセントやバスバーとしての利用などが考えられる。

表 3.2.1 ヤモリ肢構造の応用検討

		適用分野			
		自動車	建築・インフラ	電子部品	ヘルスケア・他
機能	機械的強度	塗装フィルム (バンパーなど、 廃棄時にはがす)		<div style="border: 2px solid blue; border-radius: 15px; padding: 5px;"> <div style="background-color: #004a99; color: white; padding: 2px; border-radius: 5px; display: inline-block;">ロボット グリップ機構</div> <div style="background-color: #004a99; color: white; padding: 2px; border-radius: 5px; display: inline-block;">半導体支持基板</div> </div>	<div style="background-color: #004a99; color: white; padding: 2px; border-radius: 5px; display: inline-block;">センサー固定 (野生生物等)</div>
	熱伝導			<div style="border: 1px solid red; border-radius: 10px; padding: 2px; display: inline-block;">半導体チップ ヒートシンク</div>	
	電気伝導	<div style="border: 1px solid red; border-radius: 10px; padding: 2px; display: inline-block;">車載電池 バスバー</div>		<div style="border: 1px solid red; border-radius: 10px; padding: 2px; display: inline-block;">半導体チップ 実装</div> <div style="border: 1px solid red; border-radius: 10px; padding: 2px; display: inline-block;">超小型 コンセント/コネクタ</div>	
	光学・音響的接合		<div style="border: 1px solid red; border-radius: 10px; padding: 2px; display: inline-block;">超音波プローブ 接触</div>		<div style="border: 1px solid red; border-radius: 10px; padding: 2px; display: inline-block;">超音波プローブ 接触</div>

参考文献

- 1) Bhushan, B, Fuchs, H., Tomitori, M., “Applied Scanning Probe Methods X” Springer (2008)
- 2) Jeong, Hoon Eui, et al. “A nontransferring dry adhesive with hierarchical polymer nanohairs.” Proceedings of the National Academy of Sciences 106.14 (2009): 5639–5644.
- 3) <http://bdml.stanford.edu/twiki/bin/view/Rise/StickyBot>

3.3 金属接合部分離

溶接等の金属接合部の分離技術としては微生物腐食¹⁾と液体金属脆化を抽出した。

(1) 微生物腐食¹⁾

微生物腐食は微細藻類やバクテリア、菌といった微生物の存在し、その活動により発生する腐食のことである。微生物は腐食プロセスの反応速度を速くしたり、腐食メカニズムに引き込んだりする。微生物は、ピッティング、非合金化、侵食腐食、電気腐食、応力腐食割れ、

水素脆化等様々な腐食を引き起こす。微生物腐食はチタンや高クロム-ニッケル合金を除くほとんどの金属や合金で起こり、海水、真水、蒸留水、炭化水素燃料、食料などの環境にさらされた金属および非金属での事例が報告されている。微生物腐食は、発電、オイル製造、輸送、貯蔵、水配給などの事業で多大な損失を与えており、その防止については、様々な研究が行われている。

図 3.3.1 は微生物腐食が原因と見られる溶接部の腐食である。微生物腐食は図 3.3.2 に示すバイオフィルムの形成が大きな役割を果たしている。バイオフィルムは境界にできる微生物集合体である。微生物腐食には様々なメカニズムがあり、それぞれ多くの原因となる微生物があるが、バイオフィルム環境下で最も活発に作用する。代表的な微生物として、硫黄酸化、硫化物還元、金属酸化、金属還元細菌、酸生成細菌およびカビがある。微生物腐食が報告されている材料はステンレス、鉄鋼、銅、アルミ、コンクリートなどである。

我々は、微生物腐食が溶接部に選択的に起こる特性を利用し、溶接部の分離に使えるのではないかと考えている。微生物腐食を用いれば、特別な化学物質や熱等のエネルギーを外部から与えることなく分離ができる可能性がある。

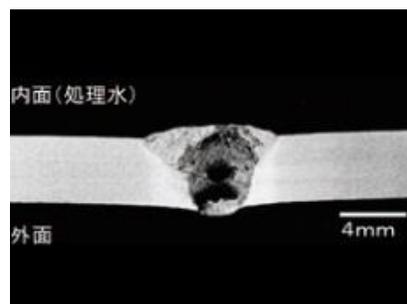


図 3.3.1 微生物による溶接部腐食²⁾

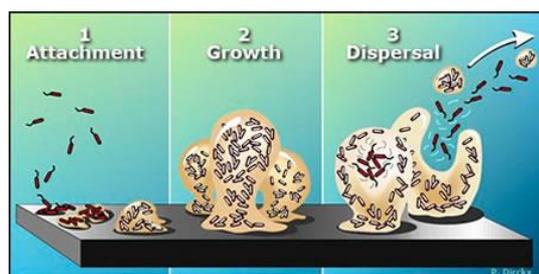


図 3.3.2 微生物腐食を引き起こすバイオフィルムのライフサイクル¹⁾

(2) 液体金属脆化 (Ga 塗布)

液体金属脆化を起こす主な元素としてガリウム (Ga)、水銀 (Hg)、亜鉛 (Zn) などが知られている。ガリウムは融点 29.8°C で室温付近で液体で、水銀に比べてはるかに毒性が低く人体に対してほとんど影響がない。常温で液体ガリウム脆化が期待できる固体としては、銀、アルミニウム、インジウム、スズ、亜鉛がある。このうち、アルミニウムは様々な部品や構造物に用いられており、液体ガリウム脆化が適用できると考えられる。

ガリウムはアルミニウムの結晶粒界を拡散する性質がある。これを用いてアルミニウム配線を剥離させたり、アルミニウムとサファイアを常温接合したものを分離できることが報告されている。溶接部は結晶粒が細かい場合が多いため、ガリウムを添加することで溶接部を選択的に除去できる可能性がある。

参考文献

- 1) Brenda J. Little, Jason S. Lee, “Microbiologically Influenced Corrosion (Wiley Series in Corrosion)” Wiley-Interscience (2007)
- 2) <http://www.jfe-tec.co.jp/jfetec-news/31/5p.html>

3.4 車載リチウムイオン電池への適用案

これらの技術の車載リチウムイオン電池のリユース、リサイクルへの適用案を図 3.4.1 に示す。詳細は付録 A1 に記すが、車載リチウムイオン電池は、今後電気自動車の普及に伴い、大量に使用済み電池が発生することが予想されており、低コストでリユース・リサイクルすることが重要である。

案では、電池セルをマイクロカプセル混入接着剤で接着固定し、電極端子をヤモリ枝構造のバスバーで接合している。解体時には、加熱で接着剤を分離し、特定方向に力を加えることでバスバーを外すことができる。さらに、資源リサイクルのため溶接による接合部に Ga を塗布することで、溶接部を除去し、外装容器と内部電極を分離して取り出す。部品ごとに個別にリサイクルすることで、資源回収率を高めることができる。

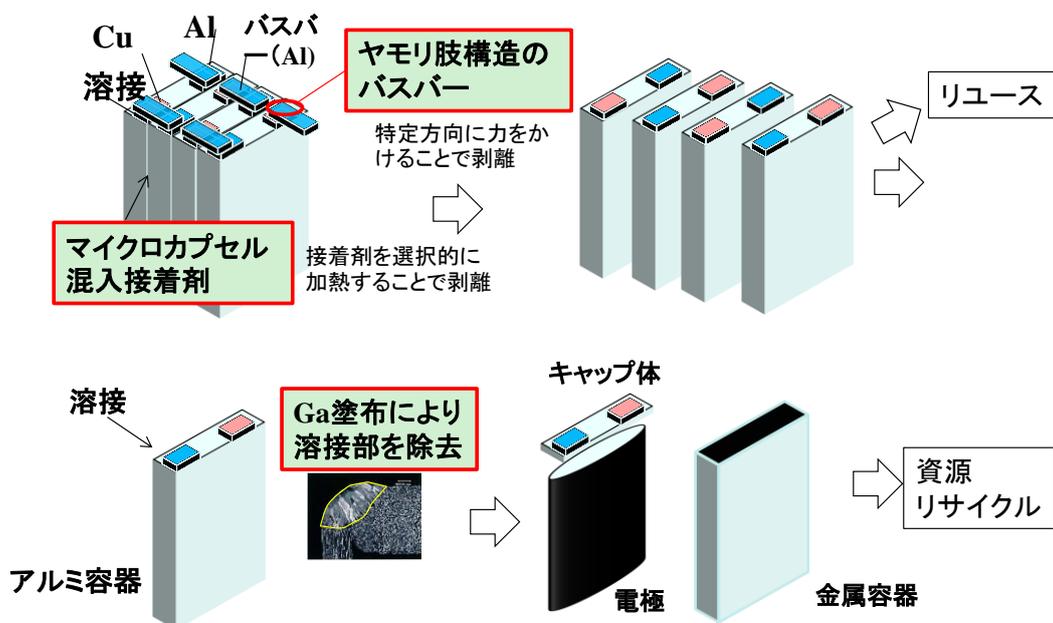


図 3.4.1 リチウムイオン電池への適用案

4. 提言と今後の展開

(1) 分離性接合技術は産業界に理解されているとは言いがたく、普及への障害の一つとなっている。本プロジェクトでは、現状の分離性接合技術と適用先を俯瞰表として整理した。今後様々な手段で、産業界に周知し、潜在的なニーズを探索する活動が必要である。

(2) 今後産業界にインパクトを与える技術として、以下の4技術を抽出した。

- (i) マイクロカプセル混入接着剤による高強度接着
- (ii) ヤモリ肢構造による乾式粘着
- (iii) 微生物腐食による金属接合分離
- (iv) 溶融金属脆化 (Ga 塗布) による金属接合分離

技術開発を進めることにより、製品の高性能化、工法の革新による生産性向上、リサイクル性の向上による環境負荷低減が期待できるため、国も積極的に支援すべきである。

今後の取り組みとしては、これらの活動、技術の実現した技術を実用化するにあたっての課題を整理し、課題解決のロードマップを作成すること、(2)電池のリサイクルや建築作業の生産性向上等のニーズに向けて、分離性接合技術の適用検討を進めることが必要である。

また、このテーマはSDGs(Sustainable Development Goals)の17の目標(Goal)のうち、「目標12：持続可能な消費と生産のパターンを確保する」と関連がある。電池を含め、これまで経済的原理でリサイクルされず廃棄されていた部品や材料を、コストを下げることでリユース・リサイクルに回せるようになるため、資源が有効活用される。

(付録)

革新的接合分離技術の適用先として検討した内容を付録として記す。

A1 車載リチウムイオン電池リユース・リサイクルへの適用

A1.1 車載リチウムイオン電池のリサイクル・リユースの現状

(1) 概要

2012 年頃から容量 20-30kWh 前後の電池を搭載した電気自動車が市販されるようになってきた。当初の市場予想に比べると売り上げ台数は低調とされているが、それでも国内では年間 1 万台以上が売れている。家庭用定置蓄電池の容量は 6kWh 前後であるため、電気自動車 1 台で 4 戸分の電源容量となる。電気自動車が 10 年前後の寿命を終えたとき、発生する中古電池は現在の電気自動車販売台数でも年間 4.8 万個分にもなる。

図 A1.1.1 に廃車となる自動車から回収される電池の予想を示す。これは、各種電気自動車 (EV) の売り上げ予想から、耐用年数 10 年として算出した。2014 年までの自動車売り上げは実績値を使用している。電気自動車の売り上げ予想が強気であることにもよるが、2020 年から回収電池は増え始め、2030 年には 4,600MWh/年、家庭用定置蓄電池で 77 万個分/年と予想されている。

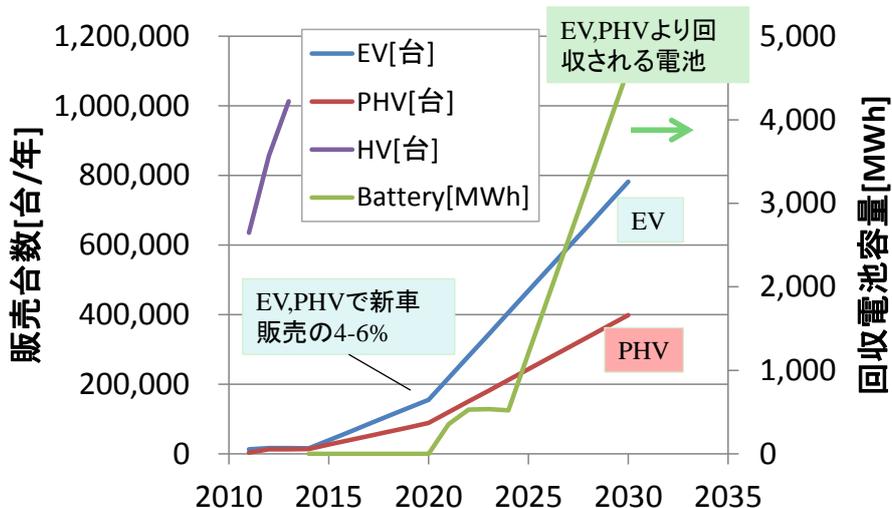


図 A1.1.1 EV・PHV 販売予測に基づく、回収電池量予測 ¹⁾

回収される電池はほぼ全量リチウムイオン電池であると考えられる。リチウムイオン電池に限らず、これだけの量の回収電池はこれまでに経験がなく、低コストで大規模な資源リサイクルを可能とする技術およびしくみの確立や、リサイクルに回す電池を減らすため電池のリユースのしくみを構築することが急務である。

図 A1.1.2 に現在のリサイクル法に基づく車載電池の回収スキームを示す。

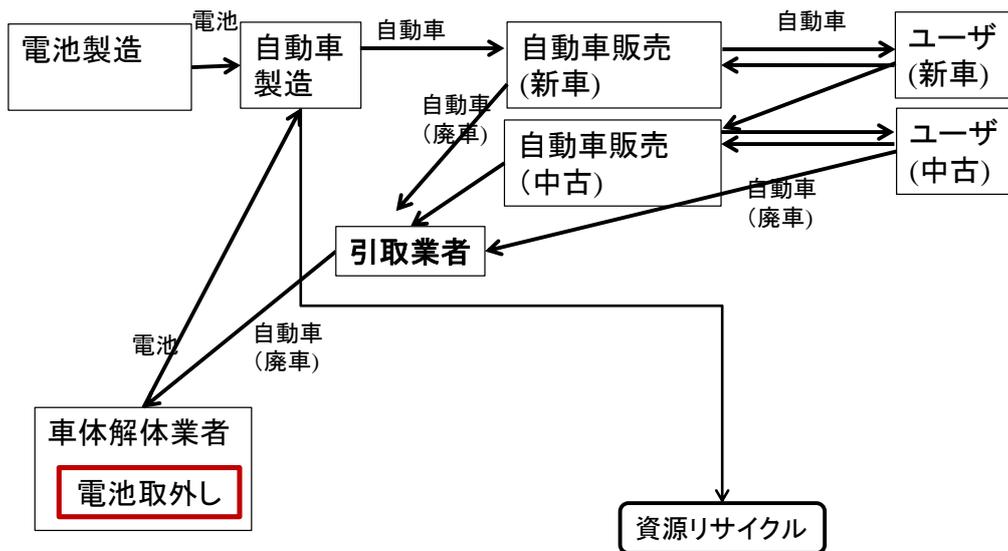


図 A1. 1. 2 車載電池の現状の回収フロー（リサイクル法）

現在のしくみでは、廃車となった自動車は引取業者に集まる。引取業者は車体解体業者に車を引き渡し、車体解体業者が電池を取り外す。取り外した電池は自動車製造業者に送られ、自動車製造業者がリサイクル業者に引き渡すというしくみである。電池のリサイクルに関する費用は、リサイクル料には含まれておらず、現時点ではプラグインハイブリッド車や電気自動車の電池のリサイクル費用は自動車製造者が負担することになっている。

(2) 車載電池リユースの課題

中古の車載電池の有力な用途として、定置向け電源が考えられているが、2025年での予想（富士経済）では発生する中古電池の10%程度しか需要がない。したがって、中古電池の需要を増やすために適用先の開拓が必要である。自動車向けの補修パーツとしての需要は一定量あると思われるが、充分ではない。

個人向けには中古電池の販売は難しいと考えられるため、カーシェア、ライドシェアで用いられる超小型モビリティや産業用無人搬送車（AGV）等が有力な候補である。超小型モビリティのコストを下げることで、カーシェア・ライドシェアで利用する高齢者の負担を下げるができる。また、IoT技術と共に中古電池を用いた安価な無人搬送車を用いることで、倉庫や工場の生産性を高めることができ、日本の産業発展に繋がる。

電池のリユースで重要な技術となるのが、「電池の健全性診断」である。電池の健全性診断では、電池の容量、内部抵抗、安全性を診断する。この診断が、リユース時の流通価格を決めるため、信頼性と精度の高い手法での診断が必要である。また、電池の診断は電池を一旦自動車から外してしまうと、専用の充放電装置をそろえる必要があり、コストがかかるため、車載状態で診断できるようにする技術としくみが必要である。



図 A1. 1. 3 超小型モビリティ²⁾ および自動搬送車³⁾

電池の分離にかかるコストもリユースの妨げになる。図 A1. 1. 4 に示すように、定置向け電源に使う場合、最もコストが低いのは電気自動車そのまま定置向け電源として使う方法である。次に考えられるのは、電池のパックやモジュールを分解せずにそのまま用いる方法である。現在のプラグインハイブリッド (PHEV) や電気自動車 (EV) であれば、電池容量が 10-30kWh であるため、そのまま定置向けに使用することもできる。しかし、電気自動車の電池容量は航続距離を伸ばすため、数年後には 60kWh から 100kWh の容量が搭載される可能性が高い。ここまで大容量になるとそのまま使うのは難しく、電池をセル単位まで分解して再組立てしなくてはならなくなる。また、ハイブリッド (HEV) やアイドリングストップシステム (ISS) 向けに用いられる 1kWh 以下の小容量の電池の場合は、容量が小さすぎるため、容量を大きくするために再組立てする必要がある。

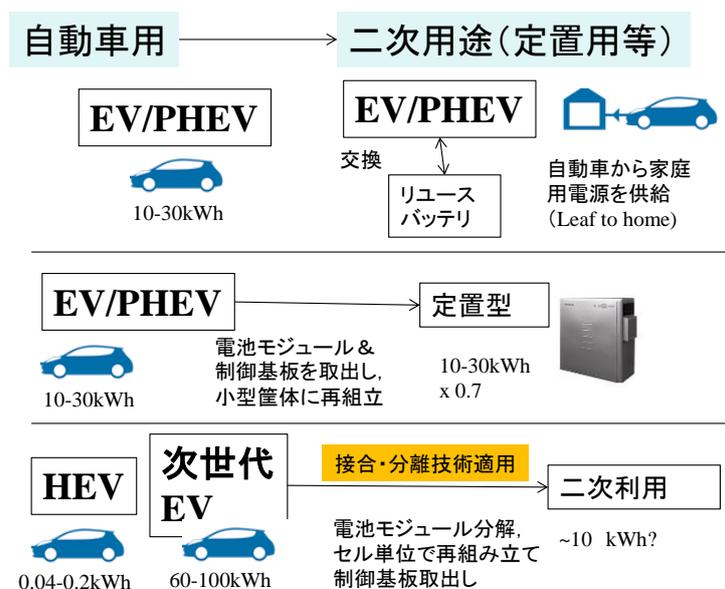


図 A1. 1. 4 電池のリユースの形態

(3) 電池リサイクルの課題

現在の情報機器向けの小型リチウムイオン電池のリサイクル手法は図 A1.1.5 に示すように、焼却後破碎する方法が主流である。



図 A1.1.5 車載電池の現状のリサイクル方法

焼却・破碎は、コストは安いがいいくつか問題点がある。1つ目は、破碎後選別をするため、金属間の分離が難しく、回収率も低くなる。二つ目は電解質として使われる LiPF_6 に含まれるフッ素の処理が難しい点である。 LiPF_6 は水と反応して弗酸となったりするため扱いが難しい、焼却・破碎をしてしまうと様々な金属と反応してしまい、処理が難しくなる。

参考文献

1) 2014年までの販売実績、『環境対応車普及戦略』平成22年3月（環境省・環境対応車普及方策検討会）および「EV・PHV ロードマップ検討会 報告書」2016年3月（経産省、EV・PHV ロードマップ検討会）より、電池容量 EV 30kWh、PHV 10kWh、耐用年数10年として算出（EV：電気自動車、PHV：プラグインハイブリッド、HV：ハイブリッド）

2) 日産ホームページ

http://www.nissan-global.com/JP/NEWS/2013/_STORY/131010-02-j.html

3) Amazon robotics ホームページ

<https://www.amazonrobotics.com/#/>

A1.2 リユース・リサイクルしくみの検討

(1) しくみの概要

電池のリユース・リサイクルのための分離技術を適用する前提として、リユース・リサイクルのしくみを検討した。検討の前提は、以下の通りである。

- EV 一台分の電池の廃棄処理費用として5-10万円かかり、マイナスの価値となる。したが

って、中古電池の価格は0円でもリユースすべきである。

- EV から発生する中古電池に対して、定置の需要は10%程度（2025年、富士経済予想）であるため、初期段階ではほとんど劣化していない電池を対象とし、表 3.2.1 に示すような用途で、制度を適用してゆく。その後、市場での実績や診断技術の信頼性が上がってきたところで、劣化した電池もリユースしてゆく。
- 車載以外の用途でリユースした電池を再度利用する三次ユースについては、リユースのしくみの対象外とする。

従って、電気自動車で使用していて20-30%容量が低下して新品と交換された劣化電池は資源リサイクルに回すこととし、リユースは当面考えない。

表 A1.2.1 リユース適用当初の電池残容量と用途の例

電池残容量	用途
90-100%	自動車パーツとしてリユース
	AGV(自動搬送車)等、産業用
	超小型モビリティ(カーシェア向け)
80-100%	定量向け
	輸出用
0-80%	廃棄(診断技術向上にともないリユース)

提言するリユース・リサイクルのしくみを図 A1.2.1 に示す。特徴を以下に列記する。

1. 自動車(EV、PHEV) (廃車) は自動車販売業者が回収する。
2. 第3者機関を設け、電池健全性(寿命推定、安全性)の診断手法の認定を行う。
3. リユース電池の販売業者が車載状態で、認定された手法で電池健全性診断を行う。
4. リユース・リサイクルの費用に充てるため、自動車販売時に搭載電池容量に応じて課金するなど、電池に対して課金する。
5. リサイクルコストの低減とリユースの用途拡大のため、電池の分離・分解技術を適用する。

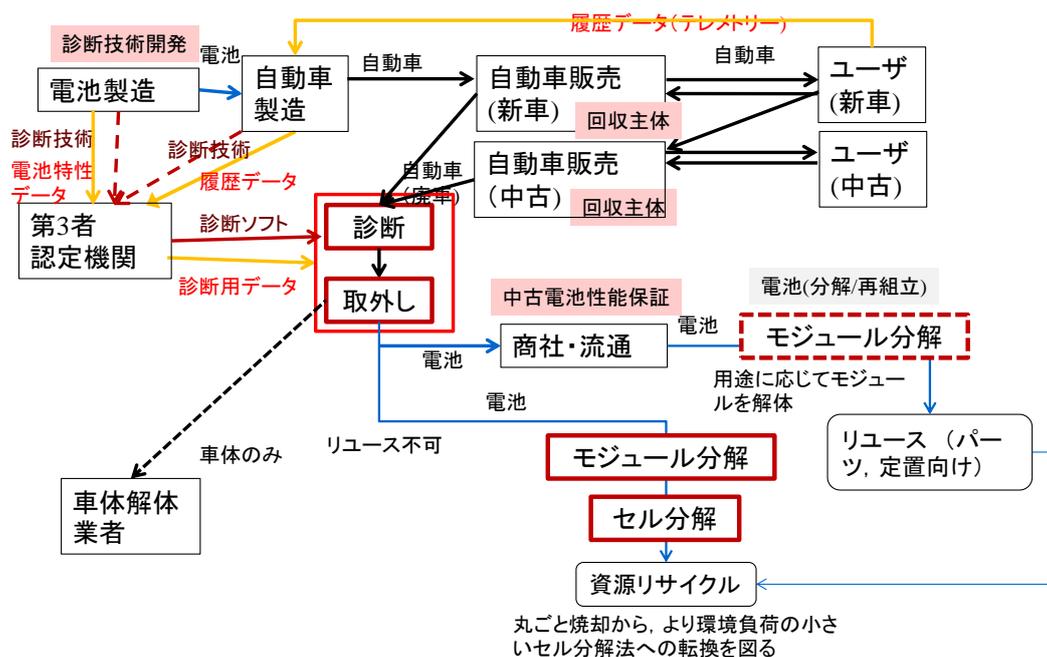


図 A1. 2. 1 車載リチウムイオン電池リユース、リサイクルのしくみ

電池製造者で製造された電池は、自動車製造に販売される。ここで自動車に搭載された状態で、自動車販売業者がユーザに販売する。新車、中古車に係わらず、ユーザは自動車を売却する際には販売業者に売却することとする。これにより、廃車となった自動車は自動車販売業者が回収することとなる。

回収主体である自動車販売業者は、自動車を「診断者」に渡す。診断の機能はあらかじめ自動車に搭載されている。「診断者」は電池の健全性の診断を車載の状態で行う。リユースする場合は電池を取り外して流通業者等の販売業者が販売する。電池を取り外された自動車は、車体解体業者に送られる。診断の結果、リユースせず資源リサイクルに回すと判断された場合は、電池を自動車から取り外し、資源リサイクルに回す。リユース、リサイクルに回された電池は、必要に応じて分解や再組立てが行われる。

電池の診断手法は、「第三者認定機関」が認定をする。電池製造者、自動車製造者、その他企業が診断方法を開発し、十分な精度や信頼性が得られる手法を第三者機関が認定する。「診断者」第三者機関が認定した手法を用いて、電池の健全性を診断する。

(2) 電池健全性診断

電池の健全性診断は、中古電池の安全性や商品価値を決めるものであり、大変重要である。電池健全性診断では、図 A1. 2. 2 に示すように、電池の現時点での状態を推定する。推定するのは電池容量や内部抵抗等である。そして、その診断情報を元に将来の劣化挙動を予測する。

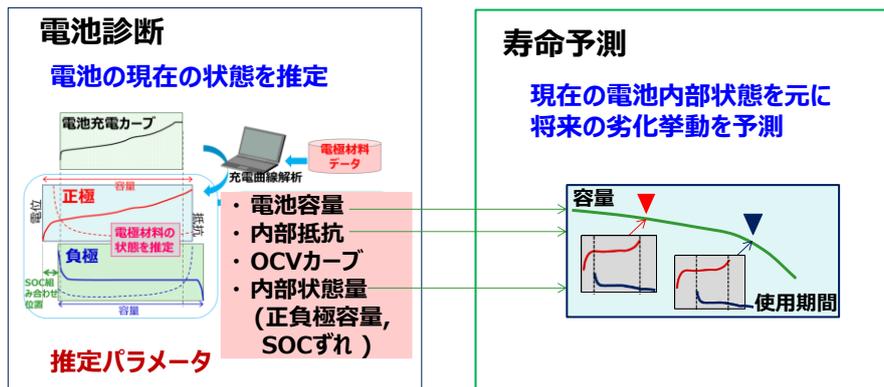


図 A1. 2. 2 電池診断の概要

表 A1. 2. 1 電池診断手法一覧¹⁾

名称 (仮称を含む)	電池使用履歴のデータベース構築	交流インピーダンス法	放電曲線解析法	充電曲線解析法
運用の主体	自動車メーカー	電池研究者	電池研究者	東芝
目的	車載電池の劣化把握	セル研究	セル研究	車載電池の残存性能評価
測定原理	EV搭載電池の環境条件と、充電や放電などの使用条件を劣化計測データとして網羅的に扱い、各電池の使用履歴から劣化状態を評価する。	周波数を変えて測定した交流インピーダンスの実数部と虚数部のグラフから、電池各部位の抵抗を求め、抵抗変化から電池劣化を評価する。	放電曲線を電圧で微分するなどにより特徴づけて、各活物質の容量変化を抽出する。	充電時のセル電圧変化 (充電曲線) に対し、閉回路電圧に基づき、各活物質の容量と内部抵抗値を変数とした回帰計算を行い、容量と抵抗を求める。
車載電池診断への適用性	ビッグデータに含まれるEV走行履歴情報には個人情報が含まれ開示が困難なため、公開を前提とした電池評価指標には適さない。	電池セル材料ごとの情報に基づいて、劣化成分を解析する必要があるため、現在のところ研究用に限定される。	車両では一定電流放電は困難なため、小電流放電を行う専用の測定装置が必要になる。	通常EVで用いる充電器による定電流充電 (普通充電と急速充電ともに適用可能) で、その場で計測できる。

診断手法は表 A1. 2. 1 に示すが、大別して電気自動車のユーザの使用履歴を用いる方法と、電池の特性を測定する方法がある。

使用履歴は自動車ユーザがデータの提供を拒否した場合収集できない。また、データの収集は通常無線によるテレメトリーシステムで行われるが、メーカーによってはテレメトリーシステムの投資ができない場合もあり、電気自動車以外のプラグインハイブリッドやハイブリッド向けには準備しない可能性が高い。したがって、使用履歴に依存せず電池特性の測定で診断をする方法が適用できるようにしておかなくてはならない。また、前述したように診断コストを下げるため、診断は車載状態で行う必要があるため、診断機能は自動車に搭載されている必要がある。

以上のことから、使用履歴に依存せず、電池特性の測定で診断ができる機能の、自動車への搭載を義務付ける必要がある。

電池診断に関するしくみの詳細を図 A1. 2. 4 に示す。複数の診断手法が第 3 者機関によって認定されている場合、診断者が診断方法を選ぶことができる。第 3 者機関は、診断者に対して診断方法に対応した診断ソフトウェアを提供する。診断者が、自動車のシリアル番号や電池のシリアル番号等のデータを認定機関に送付すると診断に必要なデータ (例えば自動車使用の履歴、電池の基本特性データ) が入手できる。診断者は、必要であれば電池の入出力特性等の測定を行い、電池の診断を行う。

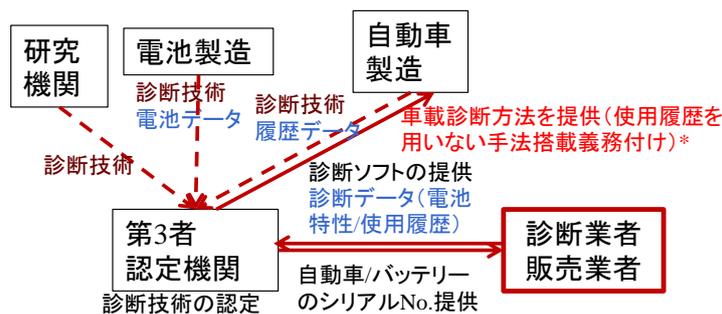


図 A1. 2. 4 電池診断のしくみ

電池の診断は、原則販売業者が行う。あるいは、販売業者が診断業者に業務を委託する。方法としては、図 A1. 2. 5 に示す 2 案がある。

ここで、想定する販売業者は、自動車保守用部品、リビルド品については、自動車販社やサードパーティ部品メーカ、自動車以外の用途では、商社、流通業者である。考慮すべき課題としては、リユース用途によって診断の仕方が異なること、販売業者の責任で診断をさせるということである。

案 1 は、販売業者が順次診断を行う方法である。最初に自動車を回収した自動車販売業者が診断を行い、自社の補修部品として使えるかどうかを判断する。使える場合は、電池を自動車から取り外し、自社の部品とする。使えないと判断した場合は、次の業者に自動車の状態で渡す。次に、自動搬送車向けの販売業者が診断をし、自動搬送車向けとして使えるかどうかを判断する。使える場合は電池を取り外し、そうでない場合は次の業者に自動車の状態で渡す。このように、順次自動車を販売業者に渡して販売業者の責任で診断をする。この方法は、複数の会社間での取り決めは不要であるが、診断の回数や輸送の回数が多く、効率は悪い。また、最初に診断を行う販売業者が良質の中古電池を入手する権利を手にする事になり、不公平感がある。

案 2 は、複数の販売業者が、診断業者に診断を委託する方法である。回収主体である自動車販売業者が診断業者に自動車を渡し、診断業者が複数の販売会社から指定された方法で診断を行う。この場合、一括で診断がされるため、どの業者が良質な中古電池を引き取るかが問題になる。中古車と同様に中古電池の値付けを行うオークション制度の導入などを考える必要がある。

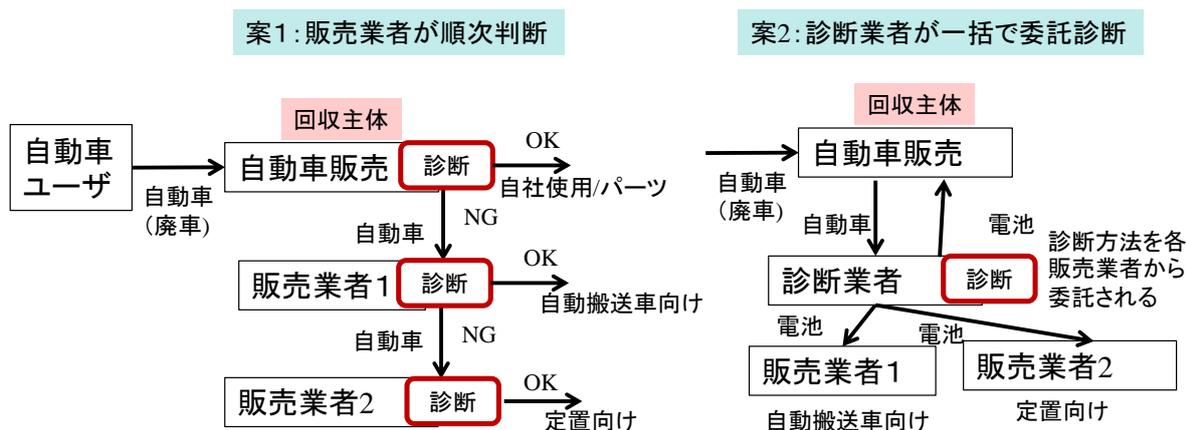


図 A1. 2. 5 電池診断の実施者と実施方法

(3) リサイクル費用

車載リチウムイオン電池のリサイクル料は、現在自動車メーカー負担となっている。今回提案したしくみでは、リユースのための診断費用、モジュールやセルの分解費用、資源リサイクル処理費用や第3者認定機関の維持費用を割り当てる必要がある。

リサイクル費用は自動車販売時または電池販売時に課金することが考えられる。電池製造者から自動車製造者への電池販売時に課金した場合、その電池が自動車に搭載されるかが不明確である。例えば、自動車の販売が予定を下回った場合、電池は自動車にされずに処分される場合がある。従って、自動車販売時に、自動車の電池容量に応じて税金等の形で課金することが望ましい。

得られたお金は、電池リユース・リサイクル基金として、電池の診断料、電池の分離・分解料、資源リサイクル費用に割り当てられる。第3者認定機関には、電池診断時に必要となる診断用データに対して、診断者が使用料を支払うこととする。また、第3者機関は診断者に提供したデータが電池製造者または自動車製造者から供与されたものである場合、それに対して対価を支払う。なお、第三者機関や電池製造者、自動車製造者に支払われる対価は「電池リユース・リサイクル基金」が診断料の一部として診断者に支払う。

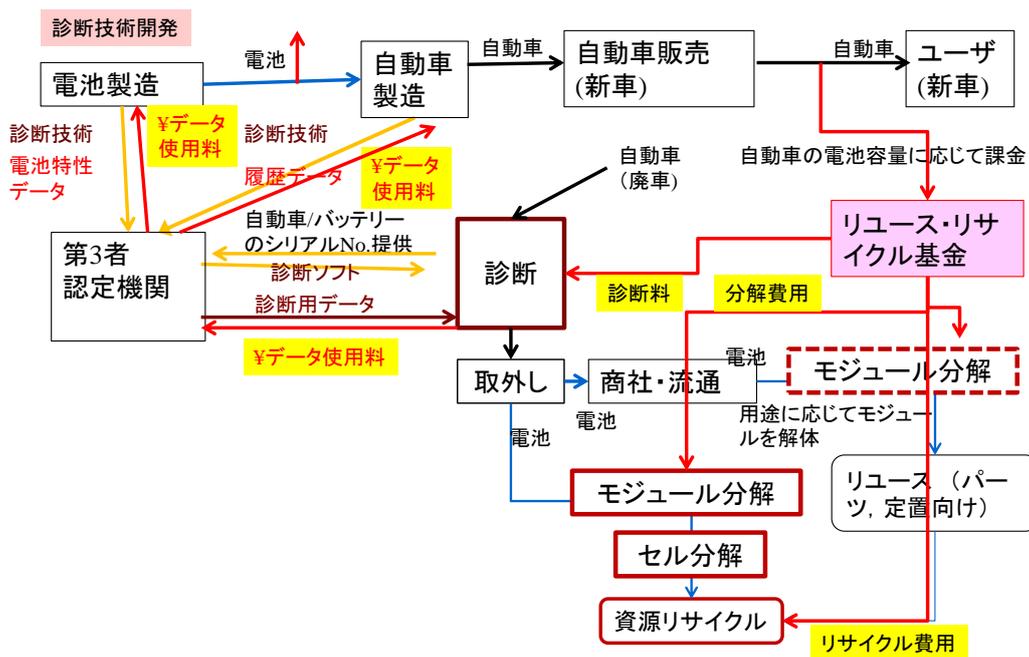


図 A1. 2. 6 リサイクル・リユース時のお金の流れ

参考文献

- 1) 星野、東芝レビュー, 60(10)p50(2013)

A1. 3 接合・分離技術の適用

車載リチウムイオン電池セルは樹脂と金属の積層フィルムで封止した「ラミネート型セル」とアルミ合金等の金属容器を用いた「ハードセル」に分けられる。封止には、溶接や溶着が用いられる。自動車には、これらのセルを複数束ねた「モジュール」や「モジュール」を束ねた「パック」という形で搭載される。モジュールでは、各セルが、溶接、ネジ止め、接着等の方法で接合されている。図 A1. 3. 1 にラミネート型セル、ハードセルの概略を示す。また、図 A1. 3. 2 にセルとモジュールを示す。

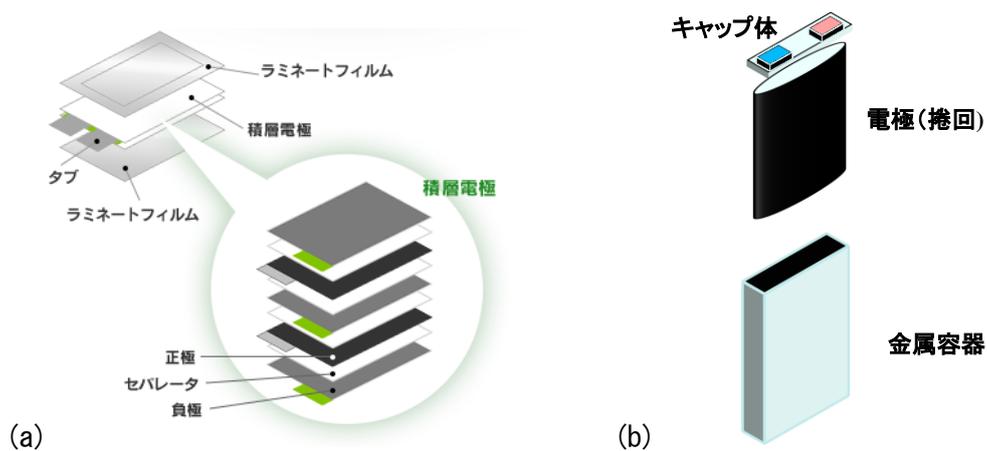


図 A1.3.1 ラミネート型セル(a)とハード（金属缶）セル(b) ¹⁾



図 A1.3.2 リチウムイオン電池（ハードセル）のセルとモジュール ²⁾

図 A1.3.3 に電池分離・分解部分のしくみを示す。中古電池を車載以外の用途でリユースする場合は、必要な電流・電圧・容量が異なるため、図 3.3.4 に示すようにモジュールをセル単位に分解して、再度モジュールに組みなおすことで、用途が拡大できる。モジュールはバスバーの部分がレーザ溶接等で接合されており、電池容器どうしの固定には接着剤が使われていたりする。溶接部を容易に分離できる技術や接着剤接合部分を容易に分離できる技術があれば、分離・分解のコストは大幅に下げることができる。

診断の結果劣化していない電池に限定してリユースする初期段階では、モジュールを分解した電池セル自体も劣化していないと考えられ、モジュールを再組立てして使用する場合のリスクも小さい。

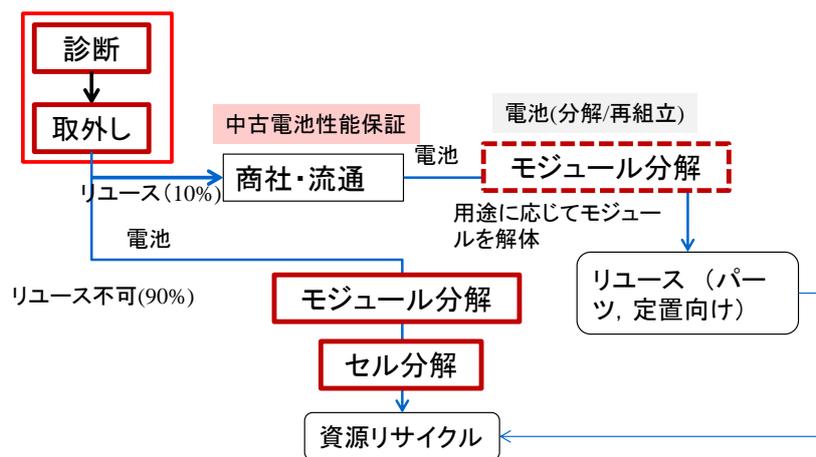


図 A1. 3. 3. 電池分離・分解のしくみ

今回のしくみでは想定していないが、劣化した電池もリユースする段階になった場合は、モジュールをセル単位に分解した後で、個々のセルに対して診断を行う必要が出てくる可能性がある。その場合は、大量の電池を自動処理しないとコスト的に成り立たないであろうと思われる。

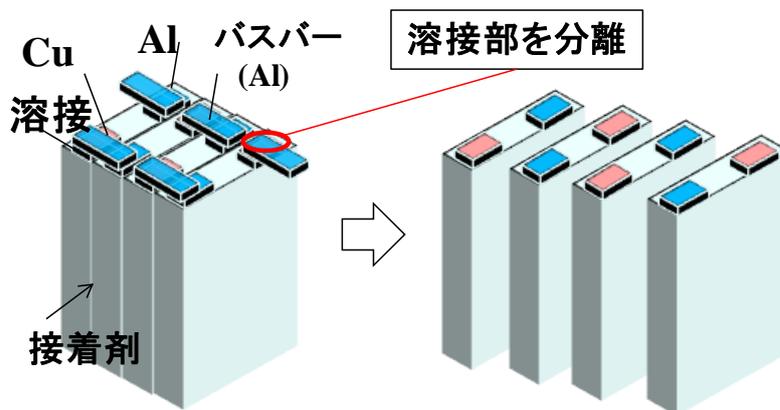


図 A1. 3. 4 リサイクル・リユースのためのモジュールの分解

電池セルのリサイクルでは、資源の回収率や安全性を高めるため、現在主流である焼却法から図 A1. 3. 5 に示すように電池セルを分解し、容器、電解液、電極に分離してからリサイクルを行う分解回収法への転換が望ましい。セルの分解コストを下げるためには、電解液の中和(無害化)、容器を分離し、電極を容易に取り出す機構の開発と標準化が必要である。図 A1. 3. 6 の H27 年度環境省事業でも、セル分解法が採用され、モジュール分解、セル分解の技術が重要であるとされている。

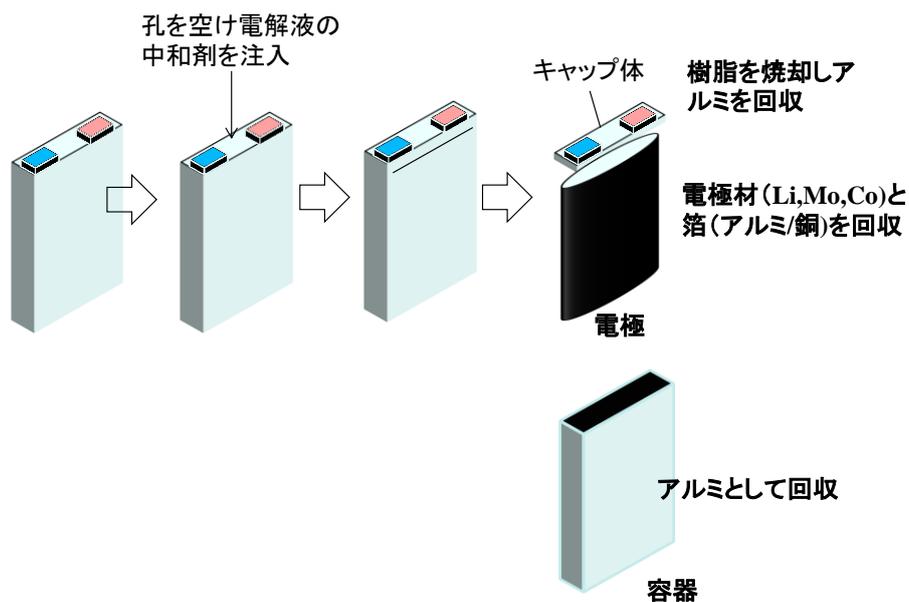


図 A1.3.5 リサイクルのためのセルの分解

リサイクル・リユースを経済的に成り立たせるためには、コストの低減が重要であり、分離・分解に関しても低コストであることが必須である。そのためには、分離・分解性に優れた接合技術を製品段階で採用することが重要である。

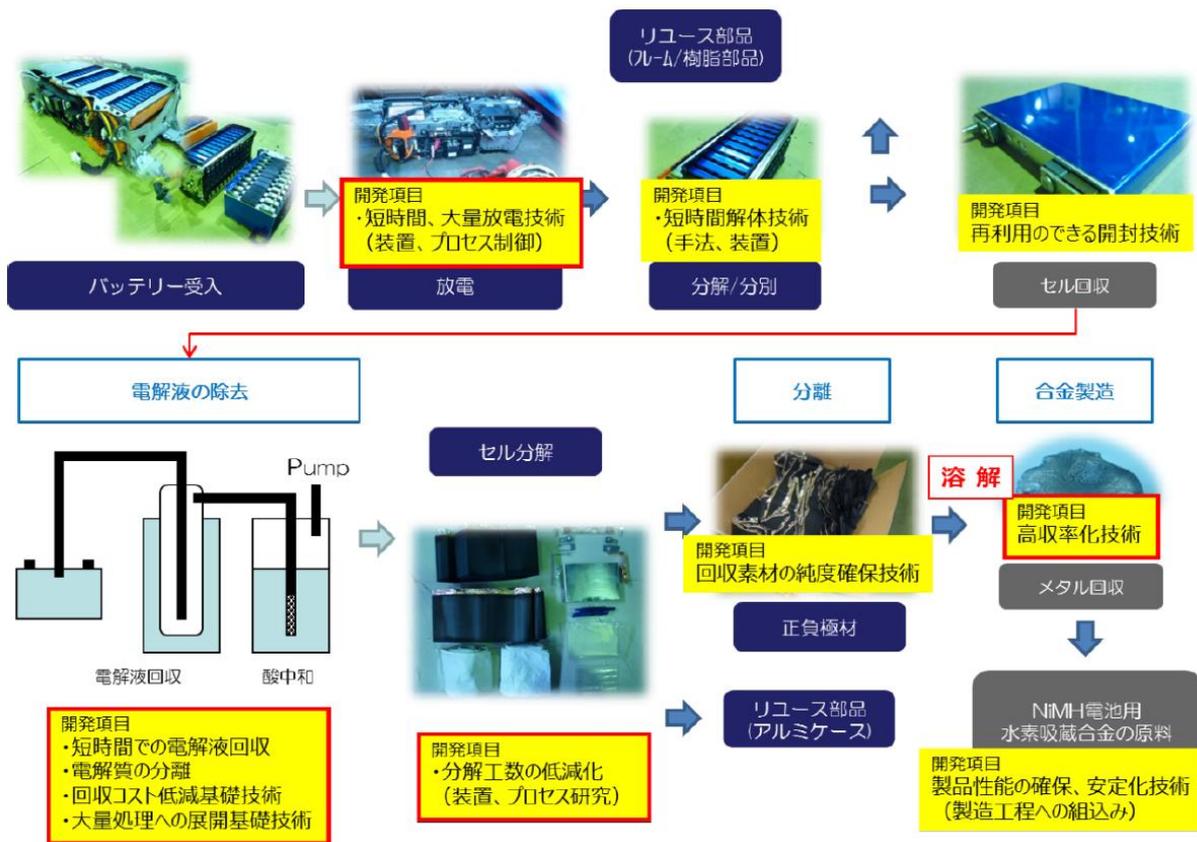


図 A1.3.6 平成 27 年度 新規採択課題 (H27~H28 : ホンダ/日本重化/東北大)
「リチウムイオン電池の高度リサイクル」¹⁾

参考文献

1) (a) AESC ホームページ

<http://www.eco-aesc-lb.com/randd/laminatocell/>

2) 東芝ホームページ

<http://www.scib.jp/product/>

3) リチウムイオン電池の高度リサイクル

https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/new_project/h27/pdf/3K152013.pdf

A2 災害用応急住宅・インフラへの適用

A2.1 意義と目的

日本は地震大国と言われており、1980年から2000年の20年で年平均被災死亡者数が世界第1位であり、その他にも年20~30回台風の影響もあるため、住宅や橋梁などの建築物も同様に破壊されている^{1)、2)}。そのため、災害に強い社会を構築していくことは我が国における課題であり、各地方自治体や各省庁で主要な施策が進められている。

大きな災害が起こった場合、住宅等が破壊され、公共の体育館などの施設での非難生活となるが、その後、応急住宅への入居が行われる。応急住宅が建てられるためには、土地の確保やインフラの整備などの問題もあるが、応急住宅を早期に建てることが求められる。早期に住宅を建てるには、住宅をストックしておき、早期に現地に運び出し、早期に用意に組み立てられ、利用期間が過ぎれば直ちに解体して、リユースできるようにしておくが良い。但し、輸送や保管のためのコストも掛かり、いつどのくらい使うか分からない住宅を確保するのはリスクが伴う。新規に応急受託を建設する場合は、必要な住宅材料の調達に始まり、住宅を建てる人財確保も大変である。

また、橋梁等のインフラ構造物においても同様の問題がある。

図A2.1.1に示しているのは、広島大学が中心で開発したモバイルブリッジというものである。わずか数分で20mの橋がかけられるものであるが、基礎工事が不要であることから高速で橋が架けられる。折りたたむと5.8×3mほどの大きさになり、トラックで運ぶことができ、僅かな人員で橋を渡すことができる。これはアルミ製であるが、比重は2.5から2.8程度である。CFRPでは1.5程度のももあり、更なる軽量化、長距離化も期待できる。

そこで、災害に強い社会を実現するために、以下の提案を行う。

まず、CFRP等の軽量材料を用い、規格化された部品で構成された住宅や橋梁を開発する。住宅においては、軽量材料を用いることで、既存での材料より軽量化することで輸送手段が拡がることに加え、1度に搭載する物量が多くなるという利点がある。例えば、空輸が可能となれば、日本国内に限らず、海外でも保管することが可能になる。また、折りたたみ等ができると、積載における効率化も可能となる。

次に、供給範囲についての提案である。現在は一般社団法人プレハブ建築協会を中心に応急住宅を供給しているが、災害の程度によりすべて賄うことが難しいことに加え、災害が起これば必要となることで需要が見込めず、ストックしておくことにリスクが伴う。そこで、軽量化され空輸が可能であることを生かして、海外での利用を進めながら稼働率を高めていくことが必要である。



図 A2. 1. 1 モバイルブリッジ(アルミ製)

参考文献

1) 世界各国の地震頻度・年平均被災死亡者数

<http://www2.ttcn.ne.jp/honkawa/4380.html>

2) 気象庁 台風の統計情報

<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/>

A2. 2 軽量構造材について

A2. 2. 1 建築・土木分野における CFRP (炭素繊維) の用途について¹⁾

軽量で強度に優れた炭素繊維の建築土木分野への利用は、建造物の補強技術を中心に広がっている。橋梁などコンクリート構造物へ炭素繊維シートを貼ることにより耐久性を高める技術は、効率的な耐震補強技術として認知が進んでおり日本を中心に世界各地で利用が広がっている。



図 A2. 2. 1 CFRP 適用例(1)

他方、建築材料として炭素繊維強化プラスチックを利用する技術も世界各地で積極的に開発が進められている。主要な構造材に炭素繊維強化プラスチックを採用した橋梁の建設計画が各地で進められている。コンクリートの緊張材、つり橋のケーブル、鉄骨代替材料としての利用も積極的に検討が進んでおり、未来の建築材料としての期待が高まっている。

将来的には、その導電性を利用した建物の電磁波シールド用途向けの利用や建造物の損傷を知らせる「インテリジェント材料」としての利用も期待されており、炭素繊維の建築土木分野での利用も今後大きく広がることが期待されている。



図 A2. 2. 2 CFRP 適用例 (2)

A2. 2. 2 建築・土木分野におけるセルロースナノファイバー (CNF) の用途について²⁾

セルロースナノファイバーは木材から得られる木材繊維 (パルプ) を 1 ミクロンの数百分の一以下のナノオーダーにまで高度にナノ化 (微細化) した世界最先端のバイオマス素材です。セルロースナノファイバーは植物繊維由来であることから、生産・廃棄に関する環境負荷が小さく、軽量であることが特徴で、弾性率は高強度繊維で知られるアラミド繊維並に高く、温度変化に伴う伸縮はガラス並みに良好、酸素などのガスバリア性が高いなど、優れた特性を発現する。

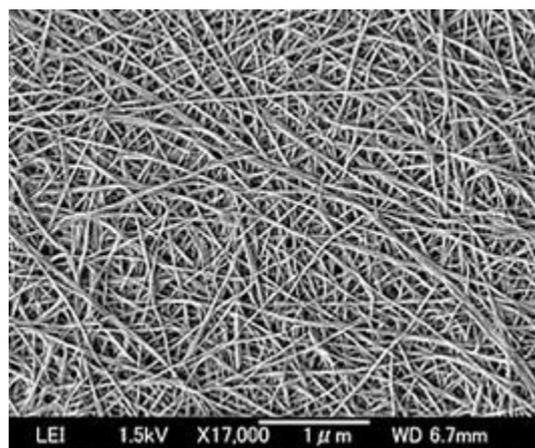


図 A2.2.3 樹木とセルロースナノファイバーの関係

環境省、経産省、農林水産省連携では、CNF 等の次世代素材活用推進事業を展開している³⁾。自動車、家電製品や住宅建材分野への活用を通じて、製造、使用、廃棄に関わる低炭素化の評価・実証等のモデル事業を実施する。特に、温暖化対策に資する分野への展開のための戦略を検討するとともに、材料供給から製造に至るステークホルダー参画のもと、事業評価性を評価していく。

参考文献

1) JCMA 炭素繊維協会 用途情報

<http://www.carbonfiber.gr.jp/field/building.html>

2) 日本製紙グループ HP

<http://www.nipponpapergroup.com/research/organize/cnf/>

3) 次世代素材活用推進事業(環境省、経産省、農林水産省連携)

<https://www.env.go.jp/guide/budget/h28/h28-gaiyo/042.pdf>

A2.3 しくみと開発すべき技術

プレハブ等の応急構造物について、現状の仕組みについて説明する。

既存のプレハブメーカーは各社での研究開発により、自社内で標準化された材料や寸法を規定し、工場での生産可能な住宅が作られており、各社で寸法等が異なっている。

日本は地震等の災害が多く、被災地の人々に迅速に快適な住宅や橋梁などのインフラを提供することは、災害に強い社会を実現する上で重要である。そこで、本プロジェクトでは、図 6.3.1 のように応急住宅のリユースのしくみについて検討した。図に示すように応急住宅やインフラは部品の状態でストックされ、短時間で輸送・組立が行われ、使用期間終了後は、速やかに解体、輸送、ストックされ、リユースに備えられるしくみを構築する。CFRP 等の軽量材料を用い、規格化された部品で構成された住宅・橋梁を開発する。軽量化で空輸が可能となり、海外を含むコストの低い場所で保管できる。国内だけでなく海外での災害や難民キャンプ向けにも供給することで稼働率を上げることができる。



図 A2.3.1 応急住宅のリユースのしくみ

A2.4 開発すべき接合・分離技術

CFRP や CNF 等の軽材料を利用する際は、分解性や運搬性を考えると、小さなユニット単位で構成されることが望ましい。小さなユニット単位であっても、ユニット毎の接合はねじ止めを中心とした接合が行われているが、容易に接合できる半面、振動に弱く、応力集中等の影響での信頼性低下に繋がる。

応急住宅、インフラ全体においても、それらは人手で簡単に接合でき、不要になった場合は簡単に分離できることが望まれる。やはり材料単体と同様に、ネジ締結は分離性に優れているが、点止めであるため接合強度が低い。高い接合強度を得るためには接合面積の大きい接着や融着が望ましいが、作業員による接合の容易さという点では、接着剤で信頼性の高い接合を実現することが重要である。さらに、分離する際には、外部からのエネルギーを、熱・電気・電磁波・弾性波等の形で与えることで容易に分離できる技術の開発が望まれる。また、CFRP 等の新素材を使うに当たっては必要な法改正が必要となる。そこで、構成部品標準化、最小体積で収納、接合部標準化を行うことで、低コストでリユースする仕組みを実現することで、循環型社会の実現また災害に強い社会をつくることができるようになる。また、これらの応急構造物を軽量材により組立・分解(現地での早期組立・解体対応、容易性)できることで、トータルコストを下げるようにする。

そこで本プロジェクトでは、面で固定できる接着・融着したものを分離する技術開発を提案したい。従来の接着剤では利用終了時に解体することが難しく、リユース・リサイクルできる仕組みとならないことから、以下のような接合・接着技術が必要ではないかと考える。

- ・ 建築基準法を満たす、強度が強い解体性接着剤の開発
- ・ 建築基準法を満たす、強度が強く、解体できるシート剤の開発
- ・ 複数の因子がないと接着が外れない接着剤の開発
- ・ 接着・融着したものを分離できる機能を有した接合技術開発

接着は、接着剤を介して物体を接合する技術である。熔融接合や固相接合では「点」や「線」で接合されるのに対して、接着は「面」で接合するため、接合体の剛性など強度が増大するという利点がある。また、接着する相手を選ばないケースが多い。一般に接着においては、接合の信頼性確保が他の接合方法に比べて難しいことが課題の一つに挙げられる。例えば、混合不良による信頼性劣化の課題に対しては、1液式でシート状の接着剤が開発され、高信頼性が要求される航空機の製造に適用されている。しかし、接着剤シートには保管温度管理が必要であり、使用期限が限定されているなど、他の接合方法よりも厳しい管理が要求される。さらに、接着剤の多くが有機物であるため、極低温や 300℃以上の高温条件では使用できないなど、適用範囲が限定されており、新しい接着剤の開発が必要である。

社会へのインパクトとしては、被災地の人々に迅速に快適な住宅や橋梁などのインフラを提供することで、災害に強い社会を実現できる。また、CFRP 等新素材の需要が増える。海外にも住宅・橋梁を供給することで日本の建設業の海外進出の手助けになると考える。

一般社団法人 産業競争力懇談会（COCN）

〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2 - 2 - 1

日本プレスセンタービル 4階

Tel : 03-5510-6931 Fax : 03-5510-6932

E-mail : jimukyoku@cocn.jp

URL : <http://www.cocn.jp/>

事務局長 中塚隆雄