

易解体接着の社会実装に向けた課題

はじめに

近年、使用済み製品の再活用や再生材利用への注目が高まっています。とりわけ欧州連合（EU）においては持続可能な製品の為のエコデザイン規則（ESPR）が施行されるなど、具体的な制度設計が進められています。易解体設計や材料の分別容易性といった機能が企業の自主的な努力目標ではなく法的に求められ、企業活動の条件となる未来が考えられます。こうした背景からスリーボンドでは、国内のいくつかのコンソーシアムに属し、社会の変化を捉えつつ、シール・接着剤への易解体性の付与技術の開発と社会実装への取り組みを行っています。本稿では開発中の易解体性シール・接着剤の紹介と、マテリアルリサイクル、リマニュファクチュアリングを想定したときの課題について述べます。

目

はじめに	1
1. 易解体性シール・接着剤開発の背景	2
2. 酸化剤解体型易解体性接着剤を用いた接着接合部の解体とマテリアルリサイクル、リマニュファクチュアリングの検討	2
2-1. 酸化剤解体型易解体性接着剤	2
2-2. 酸化剤解体型易解体性接着剤を用いた部材のリサイクル方法と課題	3
2-3. 酸化剤解体型易解体性接着剤を用いた部材の再組み立て時接着品質検証	4

次

3. 熱解体型易解体性接着剤を用いた接着接合部の解体とリマニュファクチュアリングの検討	6
3-1. 熱解体型易解体性接着剤	6
3-2. 熱解体型易解体性接着剤を用いた部材の再組み立て時接着品質検証	7
おわりに	8

1. 易解体性シール・接着剤開発の背景

レアメタルに代表される資源の需要増大や、供給が一部の地域に集中していることなどによる調達リスクの増大に加えて、廃棄物処理の課題やカーボンニュートラル実現への対応からサーキュラーエコノミーの考え方が広く浸透しています^{1,2)}。今後、地域差や移行期間が設けられることが考えられますが、サーキュラーエコノミーを考慮しない製品すなわち、設計段階で循環性を満たさない製品は市場へのアクセスが制限される可能性が高まっています。さらに、資源の回収・再資源化の産業では、高度な分離技術、効率的な資源の回収の仕組みなどが競争力の鍵と考えられます。

接着接合は面と面を安価、軽量に接合でき、異種材質の接合にも使われます。一方で、製品回収後のリサイクルプロセスでは、製品中の接着剤の存在がプロセスの妨げになることもあります。接着接合部を手作業で除いてから破碎・粉碎工程にまわすなどの工数がかかることがリサイクルコストを引き上げると考えられます。また、接着接合を有する製品を整備、再使用するときにも、接着接合部の存在が手作業を増やすことにもつながり、メンテナンスコストを引き上げます。

このような背景から、接着した状態では使用時の性能を維持し、特定の刺激（トリガー）を外部から与えることで接着強さが低下し、接着接合を解体することができる易解体性接着剤の開発を行っています。

2. 酸化剤解体型易解体性接着剤を用いた接着接合部の解体とマテリアルリサイクル、リマニュファクチュアリングの検討

ここでは、スリーボンドで開発中の易解体性接着剤の中で次亜塩素酸ナトリウムの様な非天然の酸化剤をトリガーに接着接合部が解体するタイプの酸化剤解体型易解体性接着剤について述べます。はじめに、この材料の特長を述べます。次に、現時点での課題と工程面からの課題解決提案、最後に、一度接着接合された部品から接着剤を取り除いて、再度接

着剤で接合する際の接着品質の検証について述べたいと思います。

2-1. 酸化剤解体型易解体性接着剤

スリーボンドではアシルヒドラジンの酸化分解反応（図-1）を利用した解体メカニズムに着目した易解体性接着剤の設計を行っています²⁾。

アシルヒドラジンは酸化剤として知られる次亜塩素酸ナトリウムによって酸化され、分解することが報告されています³⁾。このアシルヒドラジン構造を硬化後のネットワークポリマー中に有する酸化剤解体型易解体性接着剤は、次亜塩素酸ナトリウムの様な天然には存在しない薬剤を解体のトリガーとする点が特長です。熱や光といった天然に存在するトリガーと異なり、意図しないタイミングで接着接合の強度低下を生じさせるリスクが低くなります。また、次亜塩素酸ナトリウム水溶液は家庭で使う漂白剤であり、有機溶剤などと違って安価で、引火などのリスクがなく、貯蔵や使用に法的制限がありません。次亜塩素酸ナトリウム水溶液は解体用の浸漬液として取り扱いしやすい薬剤と考えています。こうしたことから、次亜塩素酸ナトリウムなどの酸化剤で解体する接着剤を開発しています。

接着剤の硬化物の分解は図-2の様に浸漬直後から窒素の発泡を伴い、分解反応が進行します。

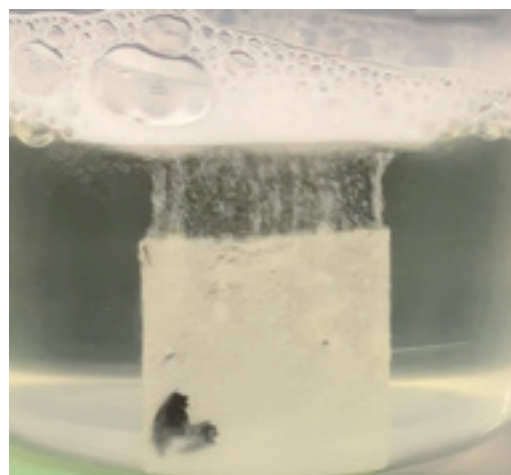


図-2 酸化剤解体型易解体性接着剤の硬化物を次亜塩素酸ナトリウム水溶液に浸漬したときの発泡の様子

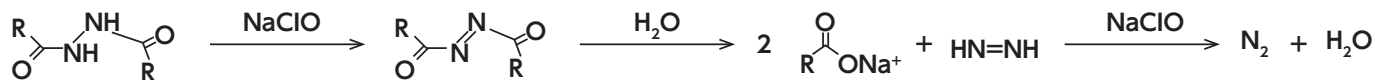


図-1 アシルヒドラジンの酸化分解反応

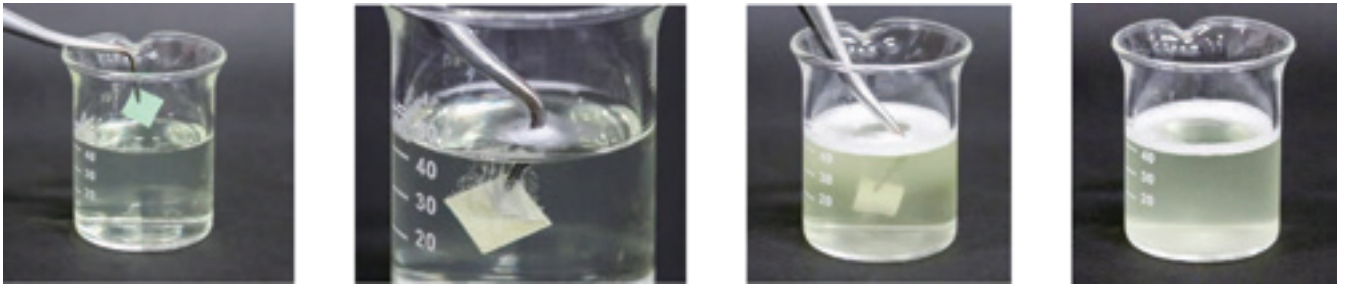


図-3 酸化剤解体型易解体性接着剤の硬化物を次亜塩素酸ナトリウム水溶液に浸漬したときの分解

10 × 10 × 0.5 mm 程度の大きさの硬化物であれば、数時間で次亜塩素酸ナトリウム水溶液（濃度 6%）中へ溶け出します（図-3）。

接着剤硬化物の分解は、次亜塩素酸ナトリウム水溶液に接触する表面から順に分解し、水中へ溶け出します。次に新たな表面が顔を出し、分解されるといったプロセスを繰り返して、接着剤の分解が進行すると想定しています。

この様に、接着剤が次亜塩素酸ナトリウム水溶液中に溶け出します。すなわち、プラスチックなどの接合にこの接着剤を用いると、硬化した接着剤を被着体から除去できるので、プラスチックをリサイクルできます。

2-2. 酸化剤解体型易解体性接着剤を用いた部材のリサイクル方法と課題

上述の通り、酸化剤解体型易解体性接着剤は次亜塩素酸ナトリウム水溶液へ溶け出します。一見すると速い化学反応で効率よく分解できている様に見えますが、接着剤は通常、貼り合わせて使われるため、次亜塩素酸ナトリウム水溶液と接触する面積が限定されます。このため、貼り合わせた状態で、次亜塩素酸ナトリウム水溶液へ浸漬した場合、接着接合体の解体に要する時間は塊の状態に比べ数倍以上に伸びます。貼り合わせ状態での分解速度を調べるために、一辺 30 mm の正方形のガラス同士を膜厚 70 μm で全面を貼り合わせ、硬化させた後、次亜塩素酸ナトリウム水溶液へ浸漬しました。接着剤の溶け出した対角線上の距離を時間ごとにプロットすると図-4 の様に、およそ 3 mm が溶け出すのに 8 時間を要します。ここに解体の遅さという課題があり、速度向上の検討を続けています。

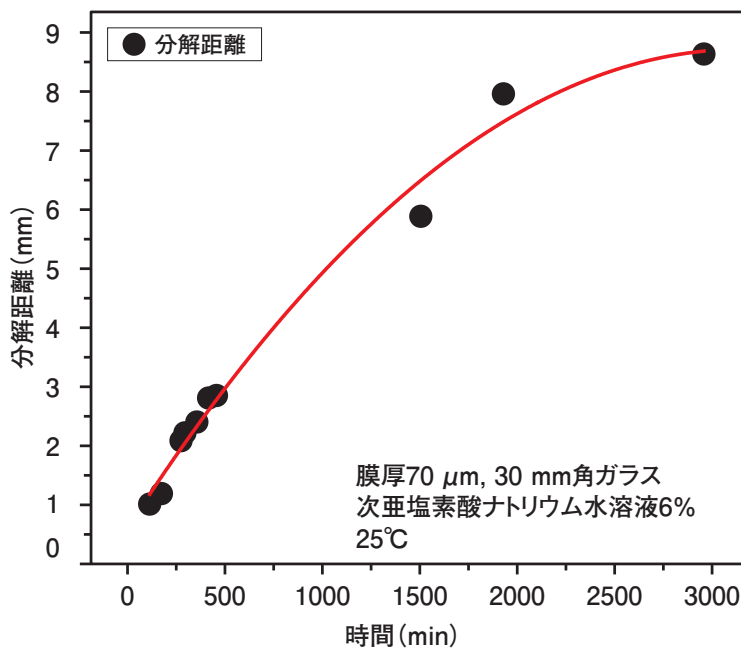


図-4 貼り合わせ時の酸化剤解体型易解体性接着剤の分解距離と時間の関係

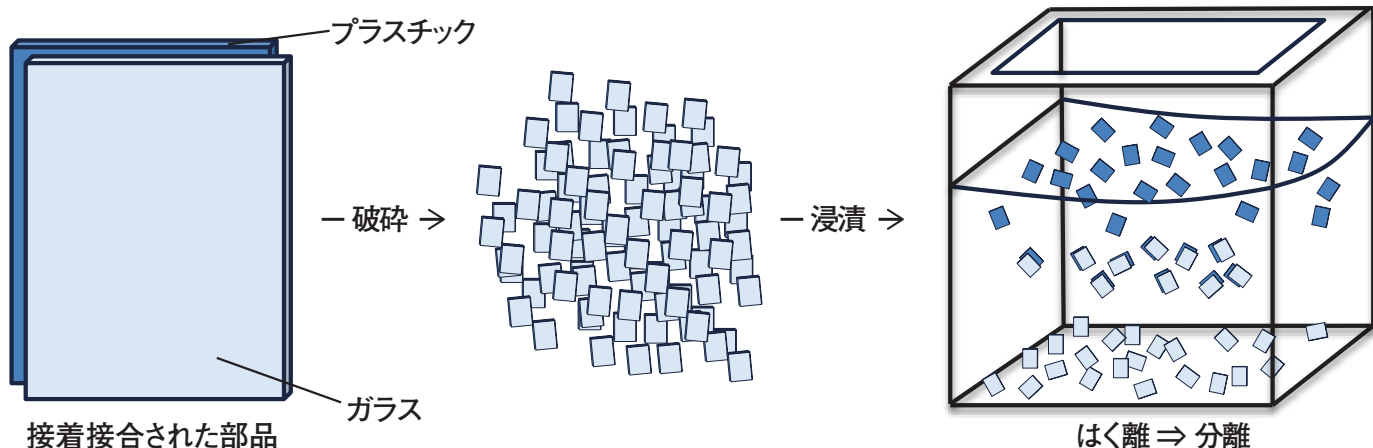


図-5 破碎と酸化剤解体型易解体性接着剤を組み合わせたマテリアルリサイクルの想定

一方で、マテリアルリサイクルのプロセスにおいて、接着接合された部品の破碎と、組み合わせれば解体速度が遅くてもプロセスが成り立つ可能性があると考えています。図-5に想定したプロセスを図示しました。例えば、ガラスとプラスチックの接合部がうまく破碎できた場合、細かく破碎すると接着層の露出面積が大きくなり、次亜塩素酸ナトリウム水溶液が接触しやすくなります。これにより解体時間の短縮が実現できます。加えて、浸漬中にガラスとプラスチックがはく離すると、比重差から材料の分離も合わせてできると想定しています。

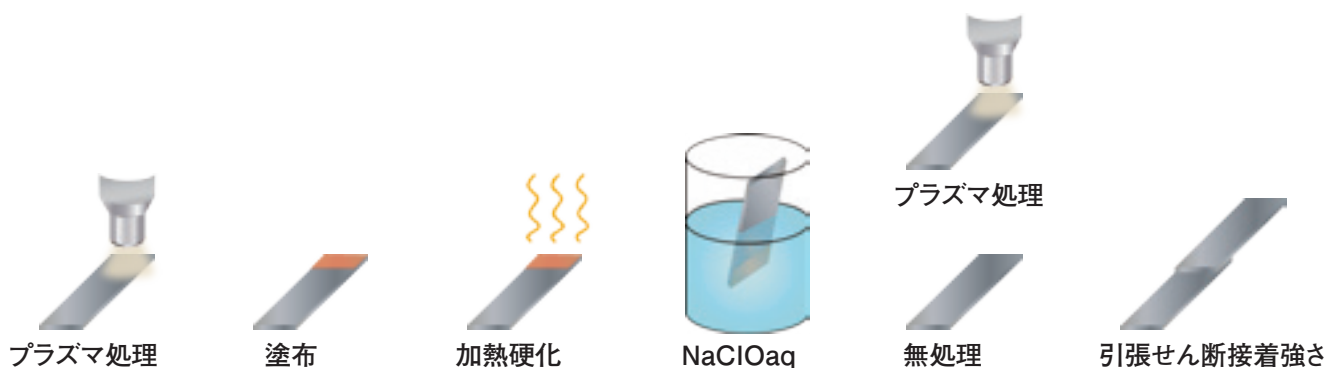
2-3. 酸化剤解体型易解体性接着剤を用いた部材の再組み立て時接着品質検証

次に、隅肉接着の様に、接着剤が露出している場合、次亜塩素酸ナトリウム水溶液が十分にアクセスできます。回収した部品を解体し、再組み立てするリマニュファクチャリングを想定した接着接合にも使える可能性が考えられます。ただし、一度目の

接着時と同様に再接着時にも接着強さが得られるのが課題です。特に、はく離面の表面状態が変化している可能性の考慮が必要です。

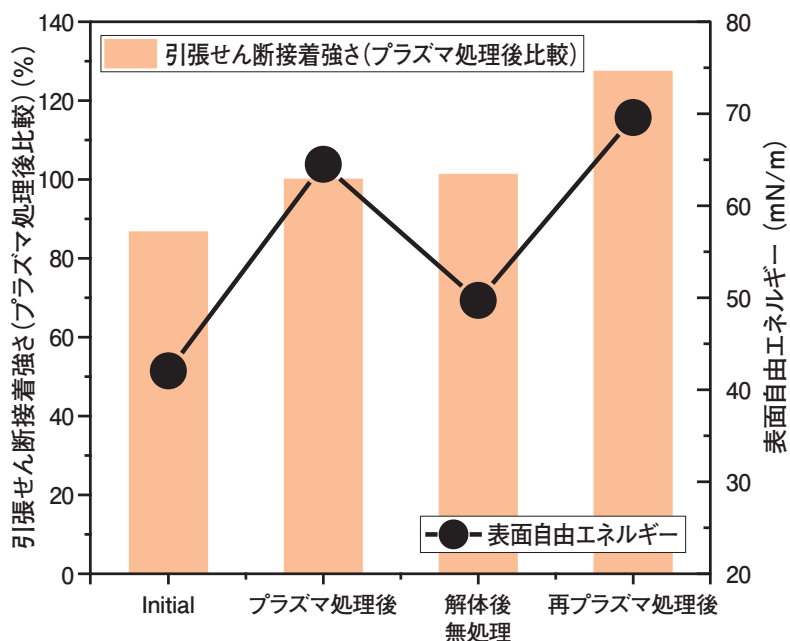
そこで、PPS（ポリフェニレンサルファイド）を被着体として、以下の検証を行いました。検証のプロセスを図-6に図示します。はじめに、PPSの接着面をプラズマ処理します。次に接着剤を塗布、加熱硬化した接着剤を次亜塩素酸ナトリウム水溶液に浸漬し、はく離させます。はく離面を再度プラズマ処理し、再接着します。これらの各段階の被着体表面の接触角測定（表面自由エネルギー算出）、引張せん断接着強さ測定を行い、それぞれのプロセスの効果の評価しました。

各段階の引張せん断接着強さ及び表面自由エネルギーの測定結果を図-7に示しています。なお、引張せん断接着強さは1回目のプラズマ処理後の引張せん断接着強さを100%とし、その他の水準はこ



被着体：PPS、プラズマ処理：プラズマトリート社、5 mm、100 mm/sec、硬化条件：150℃×30 min

図-6 被着体の再利用検証の実験フロー（酸化剤解体型易解体性接着剤）



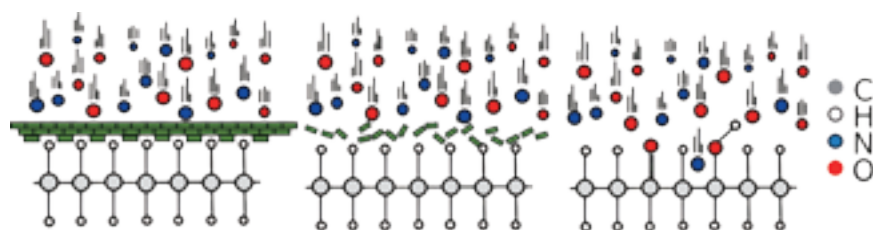
図一七 再接着前後の引張せん断接着強さと表面自由エネルギー(酸化剤解体型易解体性接着剤)

れの比として表現しています。また、表面自由エネルギーは水とジヨードメタンの接触角から、OWRK法で算出しています。

プラズマ処理を施すと3つの効果が期待できます(図一8)。1つ目は表面異物の除去です。2つ目は接着に寄与するとされる極性官能基が生成します。3つ目はアンカー効果が得られる様な表面の凹凸です。これらの効果から安定した接着接合が実現可能なため、特にエンジニアリングプラスチックではプラズマ処理を用いることが多くあります。

図一7の引張せん断接着強さ及び表面自由エネルギーの値の変化は次の様に考えられます。「Initial⇒プラズマ処理後」の変化は、上述したプラズマ処理の効果です。プラズマ照射によってPPSの表面が改質されたため、表面自由エネルギーが上昇し、これに伴って接着強さも上昇したと考えられます。次

に「プラズマ処理後⇒解体後」の変化は、接着強さの変化はないものの、表面自由エネルギーが低下し、Initialに近い値となっています。このとき、付着させた接着剤は次亜塩素酸ナトリウム水溶液中に溶け出し、のり残りはありませんでした。表面自由エネルギーの低下はプラズマ処理によって生成した極性官能基がバルクに埋没したためと考えています。プラズマ処理効果を詳細に調査した研究例では、ポリプロピレン表面に生成した極性官能基が時間の経過と共に表面から消失することが報告されています⁴⁾。PPSにおいてもこの研究例と同様にプラズマ処理によって表面に生成した極性官能基がバルクの内側へ潜り込んだことが要因と推定しています。一方で、プラズマ処理によってPPS表面に形成された凹凸は接着剤の硬化-接着接合体の解体を経ても消失しないので、アンカー効果によって接着強さが低下し



① 表面の異物の除去

② 極性官能基の生成

③ 表面凹凸の生成

図一八 プラズマ処理で期待できる効果

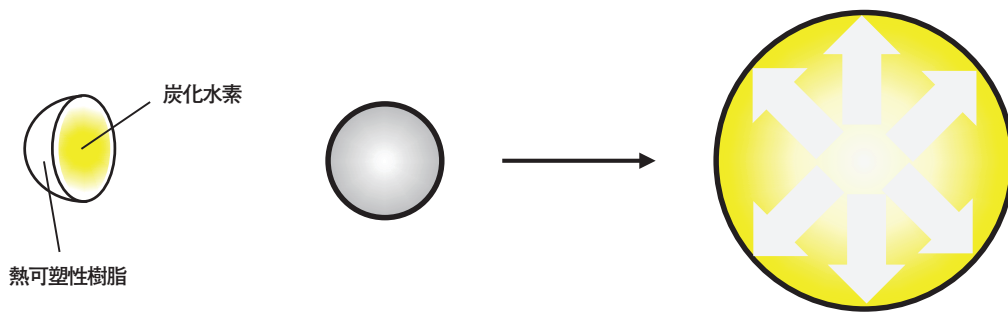


図-9 熱膨張カプセルの例

なかったと推定しています。さらに、「解体後⇒再プラズマ処理後」では、表面自由エネルギー、接着強さ共に上昇しています。これは、通算のプラズマ処理回数の効果によって、接着強さが向上したものと考えています。

InitialのPPSに対して、プラズマ処理を2回行ったときの表面自由エネルギー、接着強さを測定すると、それぞれ、1回処理よりも高く、再プラズマ処理後に近い値でした。

このことから、PPSの様なプラスチックの解体、再接着のプロセスにプラズマ処理を組み合わせると、再接着時も安定した接着接合を実現できることが示唆されます。

上述の通り、接着剤の設計だけでなく、マテリアルリサイクルプロセスやリマニュファクチャリングのための品質課題への検証をはじめています。広く多くの方とコミュニケーションをとりながら、社会実装に向けての活動を加速したいと考えています。

3. 熱解体型易解体性接着剤を用いた接着接合部の解体とリマニュファクチャリングの検討

ここでは、加熱することで、接着接合が解体できるタイプの易解体性接着剤について述べます。この材料の特長とリマニュファクチャリングにおける接着品質検証内容についても上述同様に説明します。

3-1. 熱解体型易解体性接着剤

熱を接着接合部に加え、解体する手法は2000年代から研究されています⁵⁾。例えば熱膨張カプセルを接着剤組成の中に加えておき、解体したいときに加熱すると、カプセルが膨張し、その圧力で、はく離が生じるといった手法があります(図-9)。スリーボンドではこれに類する手法を用いて、加熱時間1分で接着接合体を解体できる材料を開発しています。ここで重要となるのは、熱は天然に存在するトリガーであり、意図しないタイミングで解体するリスクが考えられます。そこで解体に要する温度を

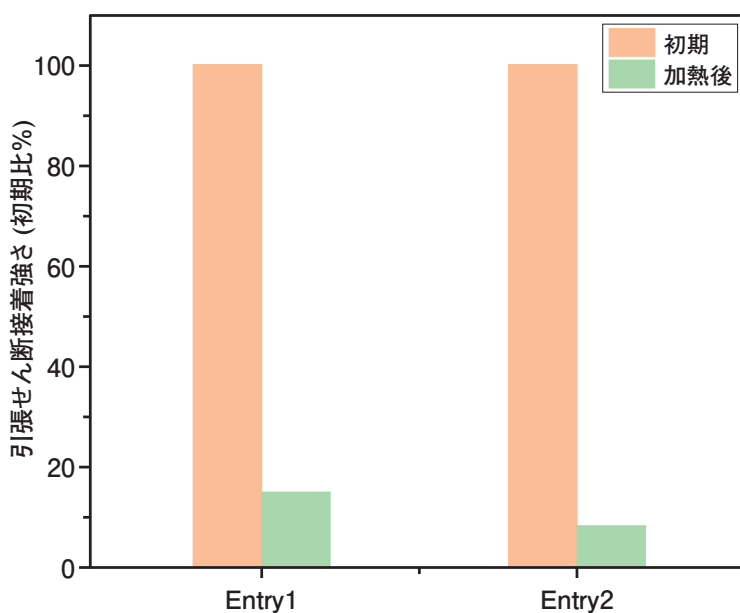
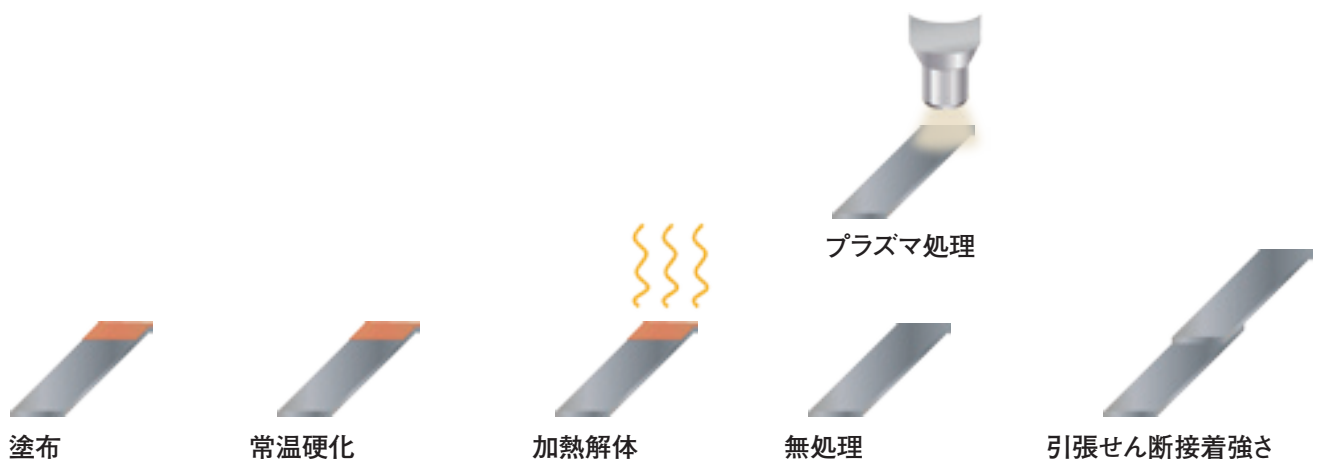


図-10 熱解体型易解体性接着剤の加熱前後の引張せん断接着強さ変化



被着体：アルミニウム A5052P, プラズマ処理：プラズマトリート社, 5 mm, 100 mm/sec, 硬化条件：RT 1 week

図-11 被着体の再利用検証の実験フロー(熱解体型易解体性接着剤)

部品の使用温度から大きく離すことで、このリスクの低減を図っています。この材料は、接着剤層の温度が約 300℃に到達すると解体する様に設計しています。図-10 に 2つの材料系での接着強さの変化を紹介します。1 分の加熱で引張せん断接着強さが 1/5 ~ 1/10 程度に低下します。この程度の速度で接着接合が解体できれば、製造ラインと同様に解体ラインとしても成立すると想定しています。

3-2. 熱解体型易解体性接着剤を用いた部材の再組み立て時接着品質検証

この材料についても、2-3 で述べたのと同様に、接着接合を熱で解体、再接着を試みた際の、前後

の接着強さと表面自由エネルギーを比較しましたので、その結果を述べます。

熱解体型易解体性接着剤では、図-11 の様な実験を行い、各段階における引張せん断接着強さと表面自由エネルギーを測定しました。この接着接合においても、再接合時の引張せん断接着強さは低下していません。(図-12) プラズマ処理を併用すると表面自由エネルギーも初期と同様の数値に変化しており、より安定した接着接合が再接合においても期待できます。

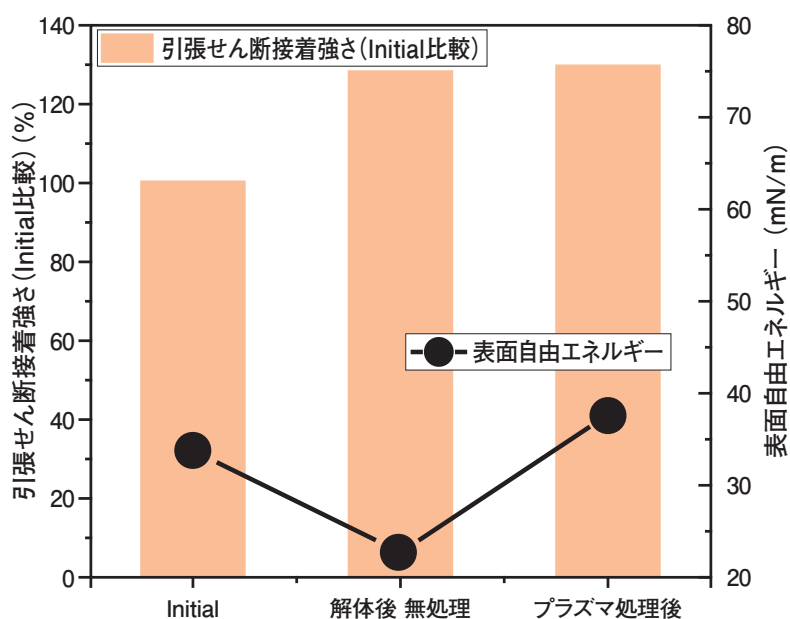


図-12 再接着前後の引張せん断接着強さと表面自由エネルギー(熱解体型易解体性接着剤)

おわりに

本稿では、スリーボンドで開発中の易解体性シール・接着剤、特に、非天然の刺激である次亜塩素酸ナトリウム水溶液を解体液とした酸化剤解体型易解体性接着剤と 300℃の加熱によって解体できる熱解体型易解体性接着剤について紹介しました。マテリアルリサイクル、リマニュファクチャリングを想定したこれら接着剤の使い方のアイデアや、接着接合体を解体した後の再接着プロセスの実現可能性について述べました。

易解体性シール・接着剤は材料単体では、サーキュラーエコノミーに資することはできません。循環型のバリューチェーンの中で、易解体設計された部品と組み合わせて使って頂くことで、はじめて価値が生まれます。本稿を読んでくださった皆様と広く意見交換し、社会に貢献できる材料を作りたいと考えています。

<参考文献>

- 1) 経済産業省 Web サイト , https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/resource_circulation/pdf/20250213_1.pdf (2026/3/17 閲覧)
- 2) 古川聖純, スリーボンド・テクニカルニュース, 104, (2024)
- 3) Oguri et al., Polymer, 99, 83 (2016)
- 4) Sato et al. Surface Science, 677, 93, (2018)
- 5) 佐藤千明, 日本接着学会誌, 39, 295 (2003)

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 大槻 直也



企画 株式会社 URC 編集室
編集 東京都渋谷区恵比寿1-18-15
スリーボンドビル2F
電話 03(5447)5333
発行 株式会社スリーボンド
東京都八王子市南大沢4-3-3
電話 042(670)5333 代