

1. 研究の要約

私たちは、クリアファイル切断時に断面が接着する原因を明らかにすることを目的として、接着条件を調べる実験や、接着面の観察、発熱を調べる実験などを行った。その結果、はさみなどの「せん断」動作をする道具でのみ接着することが分かり、断面の溶けている様子や、切断直後に表面に塗ったフリクションペンの色が消えていることから、切断時の材料の変形に伴う発熱により、熱溶着していることがわかった。

2. 研究の動機と目的

私たちは、クリアファイルを重ねて、はさみで切った際、図1のように切断面が接着することに気が付いた。接着剤などを用いずに、試料がくっつくことに驚くとともに、そのメカニズムについて疑問を持ち研究を始めた。本研究の現象は図2のように模式化した。研究を始める際の情報収集では、クリアファイル下部の凹凸のある部分には超音波溶着という、超音波で分子を振動させ、発生する摩擦熱で溶着する技術が採用されていることが分かった[1]。また、接着方法には、接着剤を使う接着法、熱で溶かす溶着法、リベットや釘を使う機械的接合法があること、接着原理には化学反応による化学的結合、分子間相互作用による物理的結合、投錨効果による機械的結合があると分かった[2]。

本研究では①切断時に接着する原因を明らかにするとともに、②この接着現象の活用方法を見つけることを目的とした。

3. 方法

本研究の接着現象については不明点が多くあったため、まずは接着強度や接着する材料や手段について調べた。

(実験1) 接着強度を調べる実験

- ①クリアファイルを2cm×1cmの大きさに切り取り試料とした。
- ②試料を2枚重ねて、図2のように中心部をはさみで切断した。
- ③切断後の試料はV字型になっており、V字の下部が接着していた。
V字の上部にそれぞれ糸をつけ、片方の糸は図3のようにフォースセンサに接続した。
- ④フォースセンサに接続していない側の糸を手で水平に引っ張り接着面をはがした。この時のフォースセンサの値を本研究では接着強度として記録した。なお、今回使用したフォースセンサは測定時間内の最大値が表示されるデジタルセンサーである。
- ⑤同様の操作を150回行った。

(実験2) 接着条件について調べる実験

- ①クリアファイルをはじめとした様々な材料を、2cm×1cmの大きさに切り取り試料とした。
- ②試料を2枚重ねて、図2のように中心部を様々な道具で切断した。
- ③切断後、試料を剥がして、剥離音(材料が剥がれる音)がしたものを接着したと判断して、接着の可否について測定した。

実験に使用した材料については、クリアファイルと同じPP(ポリプロピレン)でできた材料や、PS(ポリスチレン)、PVC(ポリ塩化ビニル)、PES(ポリエステル)、PET(ポリエチレンテレフタレート)等の他のプラスチックでできた材料、その他身の回りにあった物を使用した。道具については学校にあった「切断」することを目的とした道具を使用した。

〈使用した材料〉

- ・クリアファイル(PP 0.3mm、0.2mm)
- ・工作用プラシート(PP 0.5mm、PS 0.3mm)
- ・下敷き(PVC 0.8mm)
- ・ラミネートフィルム(PES 0.1mm)
- ・ペットボトル(PET)
- ・ティッシュペーパー
- ・アルミホイル
- ・ふりかけ袋

〈使用した道具〉

- ・はさみ
- ・手動せん断機
- ・カッター
- ・ニッパー
- ・剪定ばさみ
- ・金属ばさみ
- ・パイプカッター

(実験3) 材料ごとの接着強度を調べる実験

- ①(実験2)で接着した試料について(実験1)と同様の方法で接着強度を測定した。

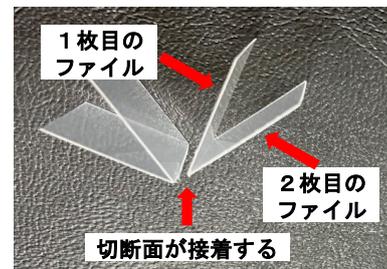


図1 切断面が接着する様子

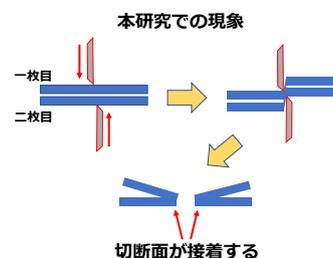


図2 接着現象の模式図

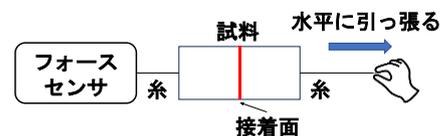


図3 接着強度を調べる実験方法

(実験1)～(実験3)を行う過程で、切断面が接着する原因として【Ⅰ.ファンデルワールス力をはじめとした分子間相互作用】、【Ⅱ.切断面の細かい凹凸による機械的結合】を考えた。この仮説を検証するために次の実験・観察を行った。

(実験4) 接着原因がファンデルワールス力か確かめる実験

- ①クリアファイルを適当な大きさに切り取り試料とした。
- ②試料を2枚重ねて、のみ、マイナスイオンドライバー、きりで強く押しつけた。
- ③押しつけた部分が接着したか確認した。

(観察1) 接着原因が機械的結合か確かめる観察

- ①せん断機、カッターを用いて2枚重ねたクリアファイルを切断した。
- ②切断面を光学顕微鏡(40倍)で観察して、接着面と非接着面の違いを調べた。

(観察1)で接着面を観察すると、プラスチックが熱で溶けたような跡が見られた。そこで、接着の原因として、【Ⅲ.切断時の発熱による熱溶着】を考えた。この仮説を検証するために次の実験を行った。

(実験5) 接着に熱が発生しているか調べる実験

- ①クリアファイルの間にレシートを挟んで、せん断機で切断した。レシートは感熱紙であるため、熱が発生していれば変色する。
- ②クリアファイル表面にフリクションペンを塗り、せん断機で切断した。熱が発生していれば、フリクションペンの色は消える。また、普通の水溶性ペンで塗ったクリアファイルも同様に切断した。

(実験6) 冷却で接着現象を抑制できるか調べる実験

- ①クリアファイルに冷却スプレーを吹き付けながら、せん断機で切断して、接着の可否を調べた。
- ②噴射量を変えながら接着の可否を調べた。接着しなかったものについては切断面を光学顕微鏡で観察した。また、凝縮したスプレーの液体成分が接着の邪魔をした可能性を排除するために、クリアファイルの間に水を挟んでも接着するか調べた。

(実験7) 熱溶着させるのに必要な熱量を調べる実験

- ①クリアファイルをイージーシーラー(110円:大創産業)で0.1秒挟み溶着するか確認した。
- ②イージーシーラーを室温に戻した後、時間を0.1秒増やしてクリアファイルを挟みこんだ。
- ③同様の操作を繰り返して、クリアファイルを溶着させるのに必要な時間を調べた。
- ④イージーシーラーの抵抗、電流を測定して、消費電力について計算した。③の結果を基に、クリアファイルを溶着させるのに必要な熱量を求めた。

本研究における接着現象が、上述のイージーシーラーの代わりとして代用できないかと考え、食べかけのお菓子の袋を接着させる実験を行った。

(実験8) お菓子の袋を接着させる実験

- ①開封済みのお菓子の袋をせん断器で切断した。
- ②切断箇所が接着できたか確認した。

4. 結果と考察

(実験1) 接着強度を調べる実験

図4に実験結果のヒストグラムを示す。接着強度の平均値は1.15Nであった。接着強度が3.0Nを超える大きい値を示すことも数回あったが、この差は接着面のはがれ方の違いだと考える。図5のように1.0Nの時は接着面の端からはがれる90°剥離強さであり、大きい値は、接着面全体が剥がれる引張接着強さであった[3]と考える。

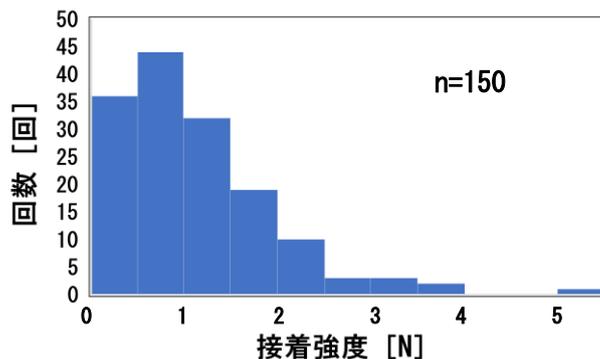
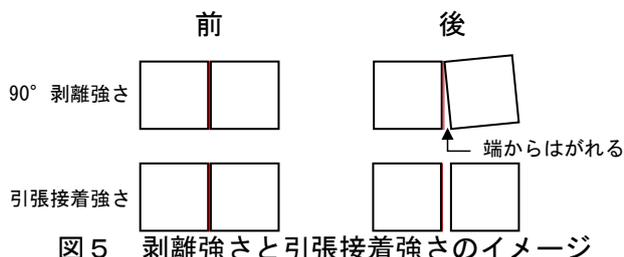


図4 クリアファイル0.2mmの接着強度

(実験2) 接着条件について調べる実験

表1に実験結果を示す。表内の○は切断後接着していたもの、×は接着していなかったもの示す。また、斜線はその道具で切断できなかったことを示す。厚さの違うクリアファイルや、クリアファイル以外の材料でも接着現象は発生することが分かった。また、はさみと手動せん断機のみで接着が発生することが分かった。このことから図6のように、材料をこすり合わせて切るような「せん断」動作が接着現象に関係しているのではないかと考える。「せん断」動作をする道具にも関わらず、剪定ばさみや金属ばさみでは切断や接着ができなかった。これは、剪定ばさみや金属ばさみが薄くて柔らかいものを切ることを想定しておらず、刃と刃の隙間が広がったことが原因である。

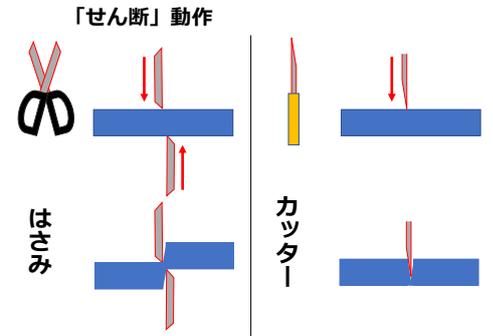


図6 はさみとカッターの切断の違い

表1 各材料と道具による接着結果

材料 道具	クリアファイル (0.3mm)	クリアファイル (0.2mm)	工作用プラスチック (0.5mm)	工作用プラスチック (0.3mm)	PVC 下敷き (0.8mm)	ラミネートフィルム (PET 0.1mm)	ペットボトル (PET)	ティッシュ ペーパー	アルミホイル	ふりかけの袋
はさみ	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×
手動せん断機	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○
カッター	×	×	×	×	/	×	×	×	×	×
ニッパー	/	/	×	×	/	×	×	×	×	×
剪定ばさみ	×	×	×	×	/	×	/	×	×	×
金属ばさみ	/	/	/	/	/	×	/	×	×	×
パイプカッター	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

(実験3) 材料ごとの接着強度を調べる実験

図6に実験結果を示す。(実験2)で接着したもののうち、10回連続で接着強度を測定できたものをまとめた。グラフ内の数値は10回の平均値である。同じクリアファイルの場合、厚いものの方が、強度が大きくなることが分かった。また、金属のアルミホイルはプラスチック素材に比べて強度が10分の1程度しかなかった。

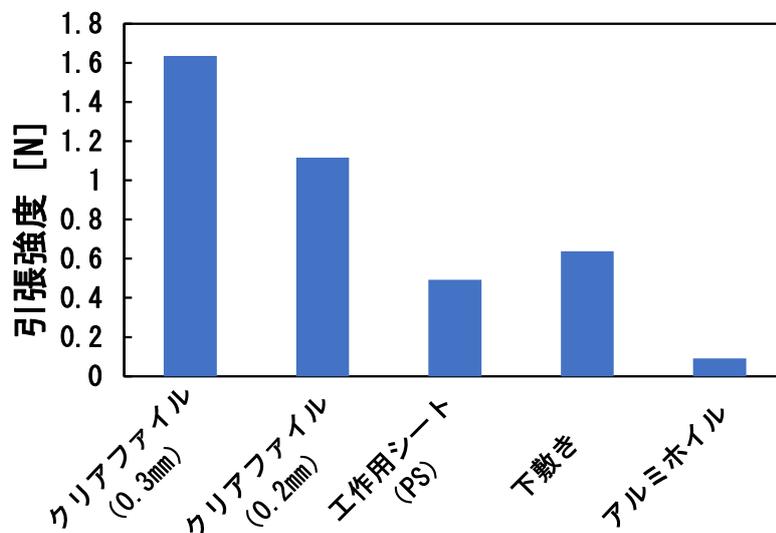


図6 材料ごとの接着強度

(実験4) 接着原因がファンデルワールス力か確かめる実験

3種類の道具どれを使っても接着は発生しなかった。材料間の距離を十分近づけた場合でも接着が発生しなかったことから、本研究の接着に関して、【I. ファンデルワールス力をはじめとした分子間相互作用】は大きく影響していないと考える。

(観察1) 接着原因が機械的結合か確かめる観察

図7にせん断機を用いた時の接着面、図8にカッターを用いた時の非接着面を示す。せん断機では接着しているため、接着面をはがして、片側の断面を観察した。図7、図8ともに、凹凸などが引っかかっている様子は観察できなかった。このことから、本研究の接着に関して、【II. 切断面の細かい凹凸による機械的結合】は大きく影響していないと考える。また、図7の断面ではプラスチックが溶けて、繊維状に糸を引いている様子が観察できた。このことから、接着現象の原因として【III. 切断時の発熱による熱溶着】を考えた。

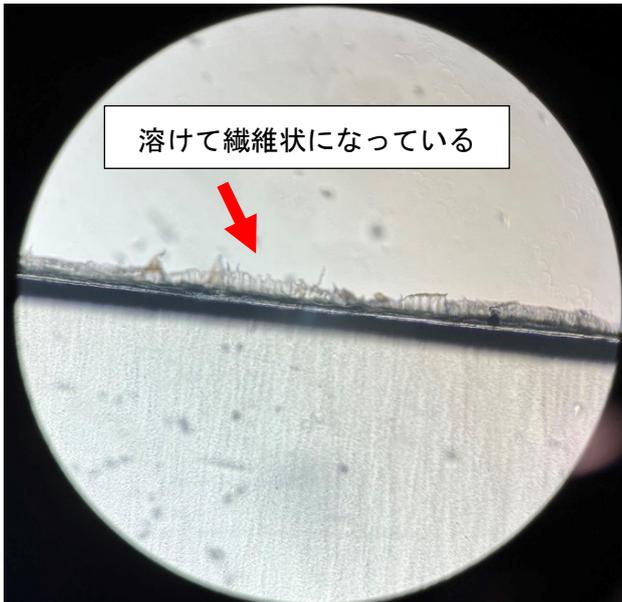


図7 せん断機を用いた時の接着面

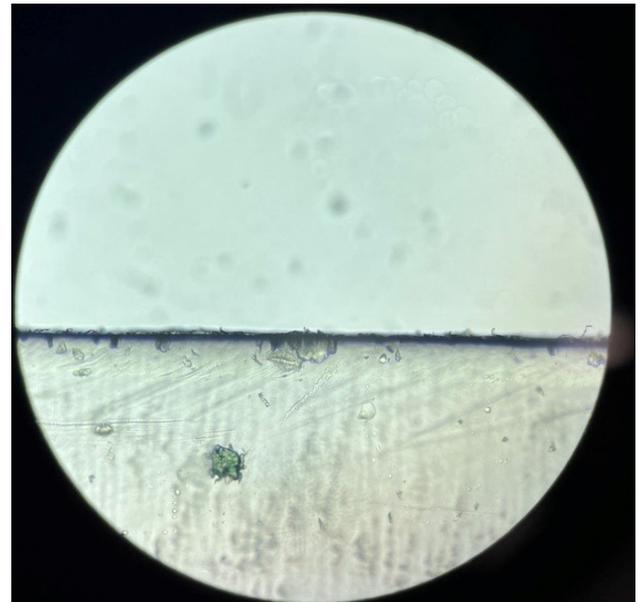


図8 カッターを用いた時の非接着面

(実験5) 接着に熱が発生しているか調べる実験

レシートを挟んで切断を行うと接着は発生したが、レシートの変色は見られなかった。図9にフリクションペンを塗った時の接着面、図10に普通の水性ペンを塗った時の接着面を示す。フリクションペンを塗った時、断面付近の色が消えていた。水性ペンを塗った時は色が消えていないことから、切断時にインクが擦れたわけではないことが分かる。フリクションペンの色が消えたことから、「せん断」動作で切断した時に、熱が発生していることが分かった。ただ、レシートが変色しなかったことから、周囲の温度はすぐに下がっており、切断後も周囲が高温になるほどの熱は発生していないと考える。

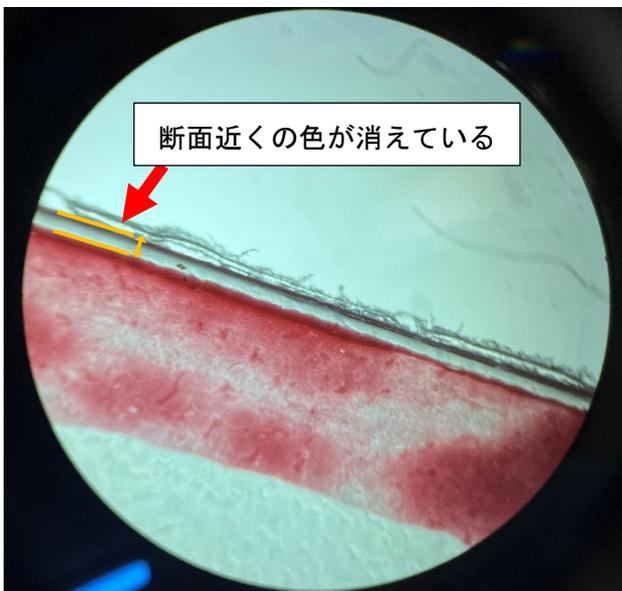


図9 フリクションペンを塗った時の接着面

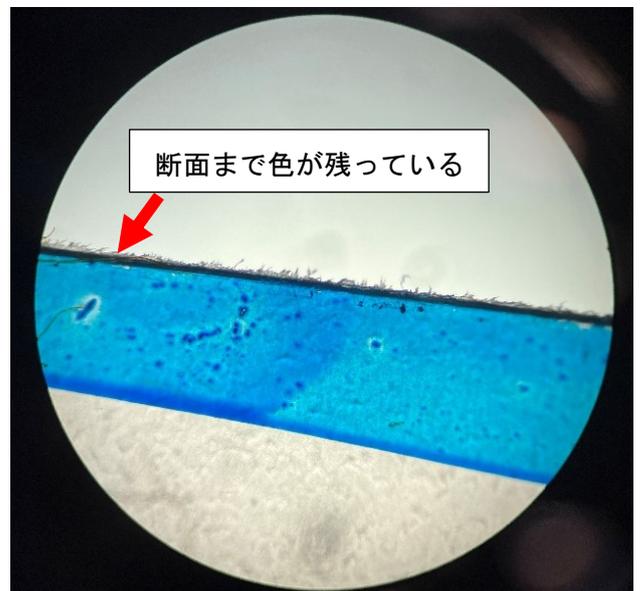


図10 普通の水性ペンを塗った時の接着面

(実験6) 冷却で接着現象を抑制できるか調べる実験

事前に冷却スプレーを噴射して試料を冷却した場合、切断面は接着した。切断中もスプレーを噴射し続けた場合、切断面は接着しなかった。その時の断面は、図11のように熱で溶けた様子が見られなかった。また、クリアファイルの間に水を挟みこんで切断した場合も接着したことから、液体成分がクリアファイルの間に満たされたことなどの影響はなく、冷却スプレーの冷却効果が接着の抑制に影響したと考える。(実験5)で熱が発生したこと、本実験の冷却スプレーによる気化熱で接着が抑制できた結果から、本研究の接着現象の原因として【Ⅲ. 切断時の発熱による熱溶着】は妥当であると考えられる。

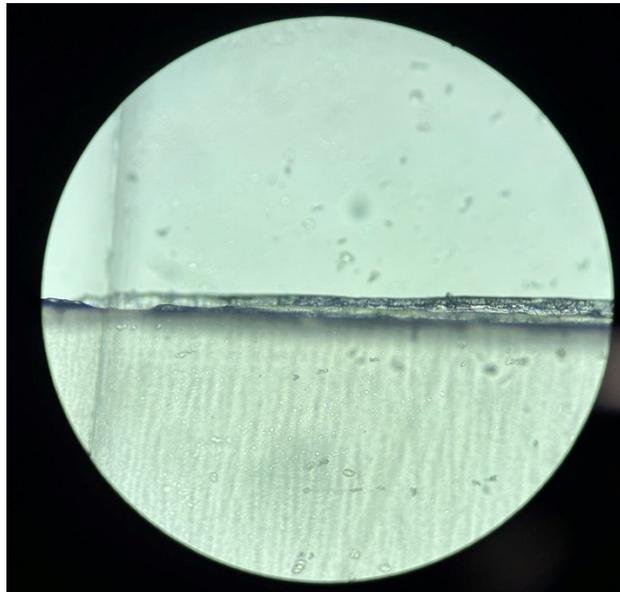


図11 冷却スプレーを噴射した時の非接着面

(実験7) 熱溶着させるのに必要な熱量を調べる実験

本研究の接着現象にどの程度の熱量が必要なのか検証した。イージーシーラーでクリアファイルを挟みこんだところ平均して2.0秒で接着した。また、イージーシーラーの電熱線部分の抵抗値は1.0Ω、電流値は1.76Aであった。次の式(1)から消費電力Pを求めた。

$$P = RI^2 \quad \dots (1)$$

計算した消費電力は3.10Wであった。消費電力が全て熱に変換され、クリアファイルに伝達されたと仮定して、次の式(2)から熱溶着に必要な熱量Qを求めた。

$$Q = Pt \quad \dots (2)$$

計算した熱量は6.2Jであった。クリアファイルの熱溶着は数Jの熱量でも可能であることが分かった。

上記の実験結果から本研究の接着現象についてモデル化を行い、切断に伴う接着現象に必要な熱量について考察した。(実験5)の変色範囲から、本研究の接着現象は図12の黄色で示す領域が起きていると考える。この領域の試料が切断時の「せん断」動作で変形して、それに伴う発熱でプラスチックが溶けて溶着したと考える。クリアファイル1枚あたりの領域の体積は、実験で用いた試料の幅を1.0cmとすると、

$$1[\text{cm}] \times 0.01[\text{cm}] \times 0.01[\text{cm}] = 1 \times 10^{-4}[\text{cm}^3] \quad \dots (3)$$

式(3)の領域が上下のファイルと、図2のように反対側の切り口と計4か所あるので、一度の切断で接着現象が発生する領域の体積は、

$$1 \times 10^{-4}[\text{cm}^3] \times 4 = 4 \times 10^{-4}[\text{cm}^3] \quad \dots (4)$$

となる。クリアファイルの(PP)の密度0.90g/cm³[4]を利用する領域の質量を計算すると、

$$4 \times 10^{-4}[\text{cm}^3] \times 0.90[\text{g}/\text{cm}^3] = 3.6 \times 10^{-4}[\text{g}] \quad \dots (5)$$

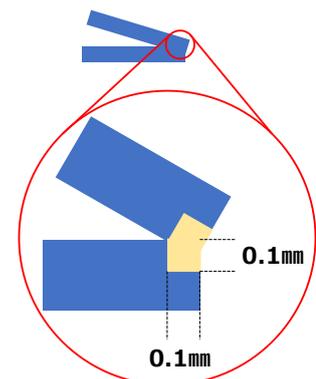


図12 接着現象が起きている範囲

となる。実験時の室温は空調で約 26 °C に設定されていた。クリアファイルの温度を 26 °C から PP の融点 168 °C [4] までに上げるために必要な熱量は、

$$Q = mc\Delta t \quad \text{より [5]}$$

$$3.6 \times 10^{-4} [\text{g}] \times 1.8 [\text{J}/\text{g} \cdot \text{K}] \times 142 [^\circ\text{C}] = 0.92 [\text{J}] \quad \dots (6)$$

となる。(実験 6) で計算した、6.2 J に比べると小さい値となったが、これは上記の計算が融解熱を考慮していないこと、(実験 6) で断熱環境を想定して計算したことが原因だと考える。幅 1.0 cm の範囲を接着するためには、1.0~5.0 J 程度の熱が必要であり、この熱の大きさは切断時に加える仕事の大きさより小さい。(実験 6) とモデル化による計算結果からも、【Ⅲ. 切断時の発熱による熱溶着】は妥当であると考えられる。

(実験 8) お菓子の袋を接着させる実験

(実験 7) を行っている時に、本研究の接着現象をイージーシーラーの代わりに使えないかと考えた。イージーシーラーは電熱線で包装袋を溶かして、開封済みの袋を再溶着する道具である。使用のためには、電池が必要で火傷の心配もある。本研究の接着現象は無電源で行えるため、切るだけで袋をとじられるのではないかと考えた。図 13 に開封後のお菓子袋を手動せん断機でとじた様子を示す。袋の開け口をとじることができた。ただ、強度あまり強くなく、放っておいても開かないが、袋を手で強く押すと、接着面が剥がれてしまった。これは、(実験 3) から分かるように、包装袋に使用されているアルミホイルの接着強度が弱いからではないかと考える。



図 13 開封後のお菓子袋を手動せん断機で切断した様子

5. 結論と今後の課題及び感想

1) 結論

本研究では①切断時に接着する原因を明らかにすることを目的に、断面の観察や、実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- ・切断時の接着はクリアファイル以外の材料でも起こる。
- ・切断時の接着は、はさみや手動せん断機などの「せん断」動作を行う道具のみで起こる。
- ・切断時の接着現象は、【Ⅲ. 切断時の発熱による熱溶着】である。

また②この接着現象の活用方法を見つけることを目的に、開封済みのお菓子袋を手動せん断機で切断した結果、接着強度は弱いですが、袋の口をとじることができた。

2) 今後の課題

今後の課題として、以下を挙げる。

- ①試料の厚さや切断速度、切断の仕方と接着強度との関係性を調べる。
- ②「せん断」動作によって発生する熱量を定量的に計算、測定する方法を考える。
- ③プラスチックやアルミホイルは熱溶着で説明できるが、ティッシュペーパーが接着したことを説明できないため、ティッシュペーパーが接着した原因について調べる。
- ④切断による接着現象を活用して、無電源で包装袋をとじる魔法のはさみを製作・実用化する。

3) 苦勞した点、工夫した点

切断条件を一定にするために加える力や切断速度をできるだけ一定にすることに苦勞した。接着強度に関しては、結果にばらつきが多かったので試行回数を増やす工夫をしたが、実験に時間がかかり苦勞した。また、接着条件を調べるために、試料や切断道具を数多く用意する工夫も行った。最も苦勞したのは発熱を証明する方法である。切断直後触っても熱くはないため、瞬間的な発熱であることは予想していた。サーモグラフィカメラで温度変化を調べる方法も考えたが、時間分解能が細かい製品は高価で入手することができなかった。どうにか発熱を証明できないかと考え、身近に存在するフリクションペンを利用する方法を思いついた。

4) 感想

資金と時間があまり無かったが、試行錯誤し実験・考察を行い私たちに有り意義な研究ができたと感じる。ただ、疑問点もあるので、さらに深く調べることができる良い研究テーマだと思う。何気なくクリアファイルをはさみで切断すると、くっついた。最初は偶然かと思ったが、何度やっても同じ結果になり、疑問に思ったので、この研究を始めた。身近な些細な遊びや暇つぶしが、ここまで深い研究に繋がるとは思っていなかった。研究の過程では、クリアファイル以外で何を試したら面白いのか、遊び半分で身の回りの物を選んでみた。プラスチックが接着することは予想していたが、ティッシュペーパーやアルミホイルも接着したのは意外であった。たくさん試料を用意して、切断していくのは大変だったが、結果が揃って傾向が見えてきたときは面白かった。身の回りには、気にしていない不思議な現象が多々あると思うので、今後も様々な現象を見つけて研究してみたいと感じた。

6. 参考・引用文献

- [1] 「クリアファイルの切り込み、形の理由」, (https://www.kasamart.jp/useful/clearfile_katachi/)
- [2] 高田忠彦, 「接着の科学」, (<https://masters.hiroshima-u.ac.jp/TSS-gakumon-sanpo/24-8-takada.pdf>)
- [3] 清水義憲「接着という現象の理解のために」, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 1, 1998年, 500-508
- [4] 「ポリプロピレン (PP) の物性と用途、特性について」, (<https://www.toishi.info/sozai/plastic/pp.html>)
- [5] 國友正和^{ほか}12名「物理基礎」, 数研出版株式会社, 2023年