基礎を学ぶ

第1章 溶接法および機器

1-6

プラスチックの接合法*

佐藤 功**

Joining of Plastic Parts*

by SATO Isao**

キーワード プラスチック，溶着，接合，機械的接合，摩擦溶着，超音波，接着剤

1. はじめに

プラスチック成形品の主要成形法である射出成形は様々な大きさの複雑な形状の部品を成形工程のみで作る能力を具えている。この成形技術は日本が世界をリードしていることもあり、我が国では部品を統合し、組立工程の負荷をできるだけ軽減しようとする指向が強い¹⁾。これが我が国製品の特徴である、高性能、高品質、低コストを大きく支えてきたと自負している。

しかし、最近は部品の要求性能・機能が一層高度化し成形のみでは対応できない分野が増えている。このような場合は分割した部品を成形し、接合する必要がある。このため、接合技術の重要性が以前より高くなっている。本講では主としてプラスチック部品同士の接合に活用されている接合技術を概観する。

2. プラスチックの特徴と接合法

プラスチック製品の組み立てには様々な手法が使われている。これらは表1に示すように機械的接合、接着剤接合、溶着の3種類に分けることが出来る。それぞれの大きな特徴、具体例を表に示しておいた。

表1 プラスチック組み立て法の比較

組み立て法	特徴	具体例
機械的	他材質可、分解可	ねじ止め、圧入
接着	他材質可	ゴム系、硬化系
溶着	信頼性高、生産性大	超音波、摩擦

*原稿受付 平成21年5月15日

** 佐藤功技術事務所 Consulting engineer

それぞれの接合法は他材料で使われているものとほぼ同じであるが、効率よく高性能な接合をするためにはプラスチックの特性に適応した手法、条件を選定する必要がある。たとえば金属で広く使われている機械的な組み立てではネジやリベットによる接合では強く締め付けることによって接合性能を確保している。この手法をプラスチックに適用するとクリープが起き、締め付け力の低下が問題になる場合がある。

加熱しても溶融しない熱硬化性樹脂には溶着は適用できない。また、電気絶縁抵抗が高いため、電気的な方法は使えない。また、完全溶融させないと分子運動が十分起きず金属のような圧接、鍛接は難しい。溶着挙動も金属などとはかなり違う。これは高分子であるため溶融粘度が高いためである。

接着ではプラスチックは表面が不活性なものが多く、活性化処理が有効である。一方、薬剤で軟化させたり溶解させたりすることが出来、溶剤接着が有効に使える場合がある。

いくつかの例を示したが、高性能な接合性能を得るためには材料の特性や要求性能を良く理解し、これに適合する接合法・条件を選ぶことが重要である。

3. 接合法各論

3.1 機械的接合²⁾

代表的な組み立て法であるネジ止めを考えてみよう。先にも触れたが、プラスチックは金属に比べ、クリープ特性が劣るため、使用中に締め付けトルクが少しずつ低下する。また、谷部への応力集中によるクラック発生も問題になる。このため、独特のネジ形状が使われることがある。

プラスチックの柔軟性を利用した結合要素も知られている。プラスチックファスナーと言われ、経済性、作業性が優れているため広く普及している。多様な形式のものがあるが、たとえば図1の例では足の部分(A)をたわませ

図1 プラスチックファスナーの例

図2 スナップフィットの例

ることにより、簡単に組み立て、取り外しをすることが出来る。

図2は特別の結合要素を使わないで、部品自体を変形させることによって結合させている。このような接合はスナップフィットと言われ、容器、包装分野などで広く使われている。

ここで例示した方式にとどまらず、プラスチックにはさまざまな機械的な接合法が使われている。また、機械的な接合は材料を選ばないため、金属など他材質の部品と接合する場合にも良く使われる。これらの多くは、くりかえし着脱可能を可能にすることが出来る。一方、溶着や接着剤接合に比べ、別部品が必要だったり、接合部をコンパクトにまとめにくいなどの制約もある。

3.2 溶着法

いわゆる熱可塑性プラスチックは加熱すると熔融するので、接合部を熔融させて溶着することが出来る。溶着は接合部に異物が介在せず、結合要素など他の部材も要らないため、安価で高性能の接合が出来る。プラスチックの溶着には様々な手法が知られているが、表2にこれらを整理した。この表では溶着を熱源によって分類している。溶着法の特質の多くは熱源によって規定されるため、この分類法は各溶着法の特性を把握しやすい。以下、主要なものを概説する。

3.2.1 波動によるもの

このグループの接合法は何らかの波動エネルギーを接合部に加え、熱に変換させることによって溶着する。このため、材質の熱変換特性が重要な因子になる。例えば超音

表2 プラスチック溶着技術^③

熱源	方法	材料	形状	性能	生産性	備考
波動	超音波	硬質材料	小型	並	優	
	高周波	PVC	薄物	並	優	
	レーザー	透過・吸収	任意	並	優	
	赤外線	輻射率	任意	並	並	
摩擦	スピン		円形	優	優	バリ
	往復	熱可塑性樹脂全般	任意	良	良	騒音
外部加熱	熱風		任意	良	並	材料劣化
	熱板		任意	良	並	バリ
(接着剤)		任意	任意	並	劣	バラツキ
(機械的係合)		任意	任意	任意	劣	脱着可能

表3 波動を利用した溶着法

熱源	発熱原理	適用材料	備考
超音波	振動の急激な減衰	振動伝搬の良い材料	接合部形状、精度
高周波	分極部の振動	分極性材料	実質PVCのみ
レーザー	分子振動励起	透過/吸収材料の組合	予組立が一般的
赤外線		光吸収性材料	多様な形態

波溶着では超音波振動の伝播特性が重要である。高周波は極性基の分子運動を励起し、発熱させる。極性の大きい材料としては塩化ビニールが知られており、高周波溶着は実質的に塩化ビニール専用の溶着法になっている。

レーザー、赤外線など光系の溶着では光線によって接合部の分子運動を励起させることで発熱しているため、光の透過、吸収特性が問題になる。

波動は通常、電気的な発振デバイスによって発生させる。発振デバイスの出力には制約があり、適用出来る接合部の大きさに限界がある。表3に波動エネルギーを利用した溶着法を比較してまとめた。

(1) 超音波振動溶着^④

超音波溶着では接合しようとする成形品同士の接合部を突き合わせて組み立てておく。この状態で一方の成形品に縦振動を与える。接合部では相手部品に振動が伝わりにくく、急激な減衰が起き、その分が熱エネルギーに変換し、接合部が熔融し、溶着が実現する。

このような経過を経て溶着が成立するため、効率の良い溶着をするためには、次のような要件を満たす必要がある。

- ①成形品の中を振動が確実に伝わること
- ②接合部に振動が集中すること
- ③接合部全体が均一に熔融すること

このうち①は成形品の材質にかかわる問題で、一般には硬質の材料ほど伝搬損失が小さい。柔軟な材料では振動が減衰し、接合部にエネルギーが到達しないのみならず、減衰した分のエネルギーは熱に変化するため、成形品全体が温度上昇してしまう。

②は接合部分の形状に関するもので、図3に示すように、融け始める前の接合部の接触面積を出来るだけ小さくし、接合部の変形を出来るだけ大きくする。こうすることにより出来るだけ速く熔融させる。いったん熔融が始まると、接合部に熔融樹脂が介在し、部品間の振動の伝搬は急減し、振動エネルギーの熱への転換効率は大幅に向上する。

③は接合部の寸法精度に関する問題である。接合部で強く当たっている部分ほど発熱が大きい。また、いったん溶融が始まるとその部分の発熱が一層促進する。これは接合性能確保上あまり好ましくない。このため、特に接合部の寸法精度をあげ、各部を同時に溶融開始させる必要がある。なお、接合部の接触ムラは治具が不適切である場合にも起きる。特に容器などシール性が必要な分野では治具の設計、管理も重要である。

(2) 高周波溶着

古くから軟質塩ビのシート分野で用いられている。塩化ビニルが極性高分子であることを利用したものである。分子構造に直接作用して発熱するため、内部発熱型であり、接合面を集中的に加熱することは難しい。この特性は厚肉製品では都合が悪く、応用分野に制約がある。

(3) レーザー溶着⁵⁾

レーザー溶着は透過性の材料と吸収性の材料を組み合わせ、予備組み立てをした後、溶着させることが多い。レーザービームを透過性の材料側から接合部に照射する。接合界面で相手材料に吸収され発熱し、界面付近を集中的に溶融させることが出来る。

レーザー光を吸収する添加剤が知られており、透過性の材料に添加して吸収性を付与することが出来る。レーザー

はビームが収束しているため、スキャンし接合面全面を加熱する。

(4) 赤外線溶着

赤外線溶着は赤外線 LED の効率が向上したためその応用として注目されている。光源には LED のほかにランプも使用されている。レーザーと異なり拡散光であるため、光学系を使って集光することが多い。利用形態は予備組立をしないで、接合面に直接照射する形式が多い。熱板、摩擦溶着などと組みあわせ、予熱工程として使う提案もある。材料との適合性もまだよく知られていない。今後の検討が進み、利用技術が蓄積され、適正な用途が確立されることを期待している。

3.2.2 摩擦溶着³⁾

摩擦溶着は、接合しようとする部品同士をこすり、発熱させて接合する。この方式の優れた点は、発熱が接合面で集中して起きる点である。このため、熱効率も極めて高い。なお、「摩擦」と言われているが、発熱の大部分は摩擦ではなく、接合部に発生した溶融樹脂のせん断による発熱である。このため、摩擦磨耗特性より、溶融粘弾性特性が発熱に関与する。実用的な特徴としては接合部が大きい場合に好都合であることが挙げられる。例えばスピノウエルドでは摩擦線速度一定と考えると、機械の回転数は接合部直径に反比例することになり、大型化すれば回転数を下げることが出来、溶接機的设计がかえって容易になる場合がある。

接合条件としては摩擦速度、加圧力、摩擦時間が考えられる。摩擦速度と加圧力の積のことを便宜的に「PV 値」と称され、摺動部品の負荷の程度を現す指標になっている。過酷な条件で部品が融けだしてしまう条件を「限界 PV 値」という。摩擦溶着の場合は必ず融ける必要があるので、「限界 PV 値以上」の摩擦速度と加圧力を確保する必要がある。安定して、効率よく溶着を行うためには限界 PV 値の数倍から 10 倍程度に設定されていることが多い。幸い、同材質同士は限界 PV 値がそんなに高くない。

(1) スピノウエルド

摩擦溶着は様々な摩擦運動形式のものがある。もっとも

図3 超音波溶着接合部形状例

図4 リニアウエルドの発熱模式図

図5 リニアウエルドの発熱分布

表4 摩擦溶着法の比較

種類	摩擦運動	摩擦速度	摩擦面積	接合部位発熱差
スピン	回転	一定	接合面全体	なし
リニア	直線往復	変化	変化	あり
アングュラ	円弧往復	変化	変化	あり
サーキュラ	平行小円	一定	変化	なし
横超音波	直線往復	リニアと同じ（高周波、小振幅）		

単純なものは回転円運動によるもので、スピンウエルドと言われている。回転速度が一定であり、かつ摩擦面（＝接合面）が全面にわたって絶えず摩擦発熱しており、熱効率の高い接合ができる。しかし、接合面が円環状のものにしか適用できないという制約がある。接合面が中実円の場合は中心の運動速度が0であるため、中心部の溶融が出来ず、あまり好ましくない。最近はデジタルモーターを活用して角位相を正確に制御出来るようになった。

(2) リニアウエルド

接合面が非円形のものには円運動以外の摩擦運動によって発熱させる。もっとも普及しているのは直線往復運動である。往復運動は位相により速度が異なり、図4に示すように、発熱量が変化する。特に頂点付近では溶融限界（限界PV値）を下回る。さらに、摩擦面端部では相手材との摩擦が途切れる範囲がある。この部分は発熱がないばかりか、接合部が大気に暴露され、放熱が起きる。したがって、スピンウエルドと比較すると熱効率はおとる。また、図5のように接合面の部位によって温度上昇に差が生じるため、接合強度が一定にならないリスクがある。

(3) その他の摩擦溶着

往復運動型ではアングュラと言われる、円弧往復運動が可能なものもある。この方式は直線往復方式と似ている。最近、サーキュラといわれる平行円運動のものが登場した。往復運動方式と機能上の違いは少ないが、摩擦速度が一定である点が有利になる。加速度一定であるため、その分装置設計が容易になる。

横振動タイプの超音波溶着も知られている。通常の縦振動型の超音波溶接とは発熱原理が全く異なり、往復直線運

動タイプの摩擦溶接と解釈できる。振幅が小さく、振動周期が高い。その結果、発熱むらなどの問題は軽減される。ただし、超音波発振子の出力限界があり、大容量のものは作れない。表4に摩擦溶着法を主として発熱の特性から整理した。

3.3 外部加熱溶着⁶⁾

外部加熱方式には固体間伝熱を利用する、熱板溶着と高温気体によって熱を供給する熱風溶着がある。いずれも伝熱速度がネックになるため、生産性はそれほど高くない。また、熱効率も低い。しかし、原理が単純で設備的にも安価なため、広く利用されている。

特に接合条件が管理しやすい熱板方式は、高い信頼性を得ることが可能なため、自動車部品やガス配管のような重要部品の接合にも使われている。容器包装分野で広く使われているヒートシールもこの接合法の一形態である。

熱風方式はエアガン方式の溶着機が手軽に入手できるため、特に現場施工の多いプラント、配管の分野で広く使用されている。この方式は接合法の特性上、気中に高温の接合部が露出するため、材料によっては劣化による着色や性能低下が問題になる。

3.4 接着剤接合⁷⁾

比較的コンパクトに仕上げる事が出来、異種材料でも接合可能だという点では優れている。しかし、性質の異なる物質が接合部に介在しているわけで、接着強度が高くて母材と均一な性能が確保できるわけではない。たとえば、接着剤が部品材料より柔軟な場合は変形が接着部分に集中し、変形限界を超え、破壊が起きやすくなる。反対の場合は接着部が固い場合は部品の接着部近傍が変形しにくくなり、過大な応力を受けることになる。このため、接合部の設計は接合部強度にかかわらず、慎重に行う必要がある。

工程上は接合部の形状、清浄管理に大変な労力が必要である。特別な前処理を行って、接合性能を向上させる場合もある。養生工程の管理も製造現場にとって大変な負担である。これらのノウハウレベルが低いと性能の信頼性が確保できない。また、多くの接着剤では溶剤による作業環境汚染の問題がある。コスト的な負担が大きいことも大きな問題として残っている。

接着剤は種類が多いが、大きく分けると化学反応を伴う反応系接着剤と接着成分を溶剤に溶解させた溶剤系接着剤とがある。前者は反応が確実に進むよう管理する必要がある。後者は接合部から溶剤を確実に気散させる必要がある。

接着剤の一種で加熱すると溶融するものがあり、ホットメルトを言われている。加熱溶融して接合部に塗布し、冷却すれば接合できるため生産性が高い。

4. 結 言

これまで述べてきたようにプラスチックの接合には様々な手法があり、どれを選択するかが重要なテーマにな

る。選択を誤ると生産性が損なわれたり、性能上の問題になる場合もある。選定に当たっては各接合法の特徴をよく理解し、多面的に検討することが望ましい。

もっと重要な課題は接合法を採用するか、しないかと言う選択である⁸⁾。射出成形で部品を作ることを想定すると、相当複雑な形状でも最近の成形技術を駆使すれば作ることが出来る。複雑な形状を成形するには複雑な金型が必要で、当然のことながら初期投資が大きくなる。我が国では複雑な形状のものを成形のみで作ることを指向してきた。しかし、昨今、商品寿命が短くなり、開発期間も短くなっている。そして、1モデルあたりの生産量が小さくなる傾向にある。このため、成形品形状を単純化して、金型負担や生産準備期間を短縮することが望ましい。このような場合、複雑な形状の部品は積極的に分割して成形後接合する方が有利になることが十分考えられる。製品が多機能化する中で、このような成形も含めた工程最適化の検討が重要になってきた。このような中で接合技術は必須の技術になる。

参考文献

- 1) 佐藤：射出成形空洞化阻止について，プラスチックエージ，54-10 (2008)，142.
- 2) 中村：プラスチックの接合・解体・再生ノート，日刊工業新聞 (2001)，61.
- 3) 佐藤：一歩進んだ射出成形技術，プラスチックエージ (2008)，125.
- 4) 辻野：高分子材料の超音波接合法，成形加工，20-7 (2008)，427.
- 5) 佐藤：レーザー溶着・融着，成形加工，16-4 (2004)，211.
- 6) 宮田：高分子材料の加熱接合メカニズム，成形加工，20-12 (2008)，874.
- 7) 中村：プラスチックの接合・解体・再生ノート，日刊工業新聞 (2001)，21.