

# 振動熱接合によるプラスチックへの金属ピンインサート加工

Insertion of Metal Pins in Thermoplastics by Vibro-thermojoining

横井 秀俊\*・荒川 博司\*\*  
Hidetoshi YOKOI and Hiroshi ARAKAWA

## 1. はじめに

プラスチックの精密成形といえば射出成形を想起するほど、射出成形は今日重要な役割を担っている。複雑形状の高精度一体成形に特長を有するこの方法も、多種少量生産時代への対応を迫られつつある。著者らは、従来実現の困難な、後工程での精密2次加工の開発にてこの問題に対処すべく、これまで常温加工と熱成形を融合させた振動熱成形<sup>1)</sup>の研究に取り組み、張出し成形<sup>2)</sup>、フランジ穴加工<sup>3)</sup>への適用実験を通じてその可能性を検討してきた。本報告では、こうした基礎に基づき、これまでロボットや手作業で型内に部品を一つずつインサートして成形していた金属インサート加工<sup>4)</sup>に注目し、1次加工後の2次加工により任意の位置に金属部品を挿入できる新しい金属インサート加工法を提案し、加工実験を通してその有効性を具体的に検証することとした。

## 2. 振動熱接合としての金属ピンインサート

プラスチックの同一領域を繰り返し変形すると、材料の熱伝導率が低いためその領域が局部的に温度上昇し、ついには熱軟化領域が出現する。これを加工に活用したのが振動熱接合<sup>5)</sup>であり、成形に活用したのが振動熱成形<sup>6)</sup>であった。現在までにこの原理に基づいて汎用精密せん断法の振動仕上げ抜き<sup>7)</sup>および斜め穴加工<sup>7)</sup>、張出し成形<sup>2)</sup>、フランジ穴加工<sup>3)</sup>、内ねじ成形<sup>8)</sup>と適用形態を拡張してきた。特にフランジ穴加工、内ねじ成形においては、樹脂の完全な流動と、その熱軟化樹脂への工具形状の高い転写効率が確認されている。この転写効率のよさを、接合加工へ生かす道はないか。これが金属ピンインサート加工開発の契機となる。すなわち、ポンチ側面形状の軟化樹脂への転写を、アングカットのあるピンまたは部品の溝部に樹脂が充填する過程と置き換えると、強固な引抜き強度の達成が予想できた。この方法は、振動熱接合の一形態とみなすことができよう。以下では基礎実験として、ピンに限定した実験を試みることにした。

\*東京大学生産技術研究所 第2部

\*\*(株)不二越

## 3. 実験方法概説

### 3.1 実験方法および実験条件

ピンインサート工程は図1に示すように、①上下の対向ポンチを同期させて振動させる樹脂の熱軟化工程と、②上ポンチを振動しながら下降させ樹脂を流動させる流動成形工程とにより構成される。実験装置は既報<sup>9)</sup>と同じとした。表1に供試材、表2に標準的な実験条件を示す。実験はPVCをベースに行い、適用材料範囲の検討として、ここではPC、PMMA、ABS、FR-PPを取り上げている。以下では特に断りのない限り、表2の実験条件によるPVCの成形実験を行うものとした。引抜き強度は、図2に示した2つの試験方法により、引張速度45 mm/minでの破断荷重にて評価した。使用したピンは図3の(a)-(c)の3種である。ただしこれらのピン端面には、変形域を広げる意味でいずれもR0.3を付与している。加工工程を図4に示す。それぞれの加工時間の $t_1$ と( $t_2+t_3$ )は、図1①、②におのおの対応している。

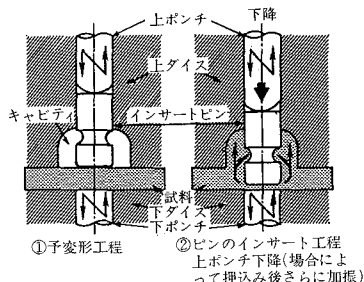


図1 ピンインサートの加工手順

表1 供試材

材料名	記号	製造会社	品番	せん断強さ τkgf/cm <sup>2</sup>	板厚Tmm
標準塩化ビニール	PVC	タキロン	TS608	5.0	3.1
ポリカーボネート	PC	三レイオン	ダイヤライト-P	6.1	3.1
ポリメチルメタクリレート	PMMA	三レイオン	アクリライト-L	8.4	3.0
ABS樹脂	ABS	三レイオン	3001M	3.4	3.0
アズデル	FR-PP	宇部日東化成	アズデル	8.0	3.8

研究速報

表2 標準的な実験条件

工具クリアランス(片側): 上側80, 下側10 $\mu$ m 工具材質: SKH51 ダイスによる板の初期拘束力: 3 kgf/mm <sup>2</sup> ポンチによる板の初期拘束力: 6.5 kgf/mm <sup>2</sup> 工具潤滑: なし 室温: 約25°C 下ダイス, 下ポンチR: なし	基本波形: 50Hz正弦波 片振幅: 0.35mm 工具形状(図3の記号参照): (a): ストレート, (b): R0.5 (c): 角幅1mm 上ポンチ押込み量 $a$ : 2.2mm
---	---

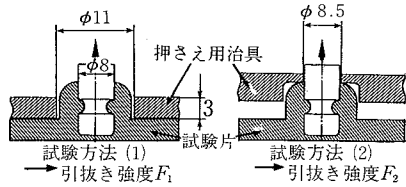


図2 引抜き強度の評価方法

3.2 フランジ部の形状設計

フランジ部形状はポンチによって押し出された材料が、フランジ部容積およびポンチ側面の溝部容積の和に等しいという制限を受けている。すなわち図5において  $V_1 = V_2 + V_3$  の関係が成立する。ここでピン先端  $r_2 = 0$  と仮定すると  $h = 1/4(dR + R^2)\{d(da + \pi R^2 - 4R^2 + 2\pi r_1^2) - 4/3(R^3 + 4r_1^3)\}$ 。一般に最大フランジ高さは  $h_{max} = f(d, R, r_1, r_2, h, a)$  とあらわされる。図6にこの関係を図示する。ここではこの結果によって求められる成形可能な範囲内より、 $R = 1\text{mm}$ ,  $d = 8\text{mm}$ ,  $h = 3\text{mm}$  の各値を用いることとした。

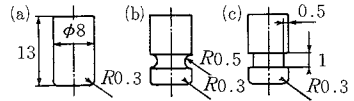


図3 各種インサートピンの寸法形状

4. 金属ピンインサート

4.1 PVCへの金属ピンインサート実験

まず既報<sup>(2),(3),(8)</sup>での主要な供試材であったPVCに、半丸溝付きピン(b)をインサートする実験を試みた。ここの課題は溝部への樹脂充填の可否である。 $t_1$ の増加に伴って上下ポンチ挟持部材料は急速に熱軟化し、ピンの押込み抵抗も大幅に低下する<sup>9)</sup>。引き続きピン押込みに伴って熱軟化樹脂が流動するようすは、白黒交互積層した熱圧着PVC板の成形サンプルを断面観察することで調べられる。図7に断面写真を、図8にそのモデルを掲げた。これより材料流動は、既報<sup>9)</sup>同様、i) 比較的熱軟化度が少なく初期に上方に押し上げられた図8 B部分と、ii) ポンチ挟持部Dが押し流されてフランジ部を形成するC部分とからなり、Cの一部が回り込みながら溝部を埋めていることが示される。また溝部樹脂には溝形状が正確に転写された(図9)。ピンと反対側の板表面は平坦となり、フランジ成形部側も図10のように透明となるなど、外観上も寸法の優れた特性が確認された。そこには、下穴なしで任意の位置に加工ができるという本法の利点もあわせて見いだすことができよう。

4.2 PVCへのインサートピン引抜き強度とその破断形態

図11に、 $t_1$ 増に伴う(a)(b)(c)各種ピンの引抜き強度  $F_1$  の変化 ((b)についてのみ  $F_2$  併記) を示す。引抜き試験による破断形態は大別して、図8領域BおよびCの境界b-gに沿うH型(図8の破断試験片断面を示した図12参照)、同d-gに沿うS型、両者混合のHS型の3つに分類される。これらは(流動方向への分子配向が強いb-g面の

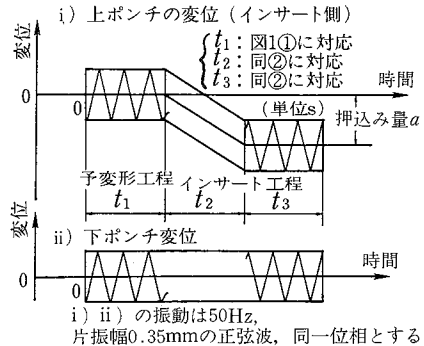


図4 上下ポンチの動作シーケンス

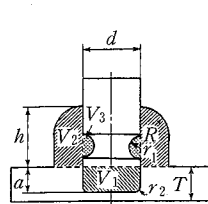


図5 フランジ、ピン各部の諸元

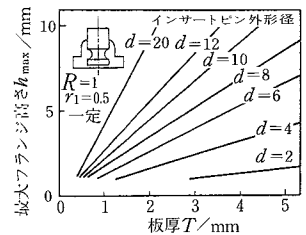


図6 板厚Tと最大フランジ高さの関係 (T=押し込み量aと仮定)

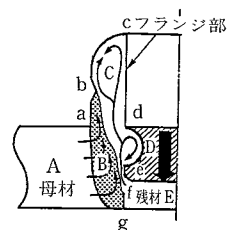


図7 積層板による樹脂流動観察 図8 流動状況のモデル図

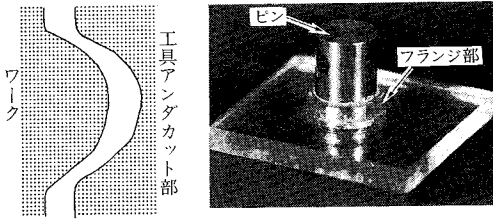


図9 工具形状の転写状況 図10 ピンインサート外観写真



図12 積層板を用いた引抜き試験  $F_1$  による破断例

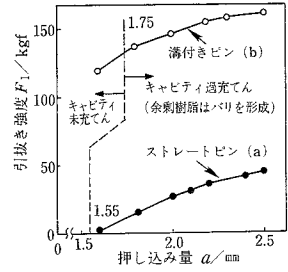


図13 押し込み量  $a$  と引抜き強度  $F_1$  の関係

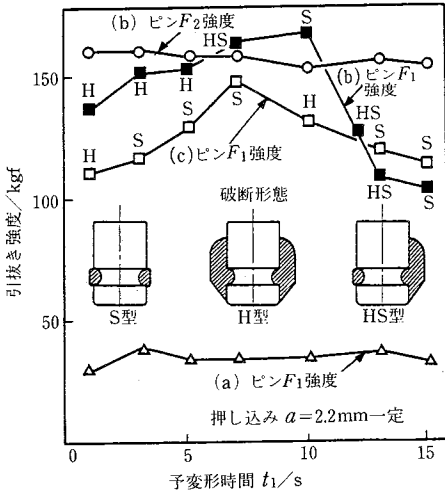


図11 各種ピンの引抜き強度と  $t_1$  の関係

破断強度  $f_1$  と、〔ピンのアンダカット部のせん断強度とピンのストレート部附着強度との和  $f_2$ 〕との大小関係により決定される。これらの記号による破断形態を図11に付記した。

ピン側面と樹脂の附着強度を示すピン(a)の  $F_1$  は、 $t_1$  によらず30-40kgf一定である。ピン(b)アンダカット部樹脂のせん断強度は、このピン側面の附着強度相当分をピン(b)の  $F_2$  (約160kgf一定) から差し引いた約130kgfとして計算される。この値はアンダカット部充填樹脂が母材強度を保持すると仮定した値125kgfにほぼ完全に一致し、これよりインサート時の発熱流動による樹脂の劣化はほとんどないものと想像された。溝付きピン(b)、(c)の  $F_1$  はいずれも  $t_1=7-10$ s にピークを有する曲線となり、 $t_1=10$ s以下では(b)は(c)を上方に30-35kgfシフトした値となっている。両者の差は溝部形状(溝部容積、ノッチ効果)の差異に基づき、明らかに半丸溝(b)の  $F_1$  が高く示された。(c)はすべてS型である一方、(b)はb-g面の強度  $f_1$  と前記  $f_2$  ((b)の  $F_2$  に相当)の大小関係によりH型 ( $f_1 < f_2$ )、HS型 ( $f_1 = f_2$ )、S型 ( $f_1 > f_2$ ) と変化している。ただし  $t_1 > 10$ s で、HS型にもかかわらず  $F_1$  が低下す

る理由は明らかでないが、 $t_1 < 7$ s で引抜き強度は160kgfにも達しており、本法により、金属ピンの高強度インサートを安定して実現されることが確かめられよう。

#### 4.3 引抜き強度 $F_1$ に及ぼす各種加工条件の影響

ピンの押し込み量  $a$  : 図5において、 $a$  は  $V_1$  を直接定義し、体積一定を仮定すれば  $h, d, r, R$  と一義的な関係式で結ばれる。しかし現実には、 $d$  とダイス穴径  $d'$  とのクリアランスが大きい場合には、樹脂がキャピタリ充填後もさらにピンを押し込むと、過充填樹脂が工具すき間から流出する。図13は、ピン(a)(b)について  $a$  と  $F_1$  の関係を求めたものである。両者の  $F_1$  はいずれも相似的に単調増加し、過充填後やや傾きが緩やかとなった。これより過充填後の  $F_1$  増加は、加圧によるピンストレート部の密着度の向上に加え、材料内部のポイド消失効果によるものと考えられた。あわせて生成バリは  $F_1$  に関与していないことも確かめられた。

ピンの押し込みタイミング: 総振動時間を5s、 $t_2=0.1$ sとして、 $t_1$  と  $t_2$  の割合が(b)の  $F_1$  に及ぼす影響を調査した(図14)。 $t_1$  を増大させる( $t_2$  を短くする)ほうが、 $F_1$  向上に有効であることが明らかとなる。

経時変化と保持温度: プラスチックの常温塑性加工では、寸法安定性が一つの重要な課題とされる<sup>9)</sup>。そこで本法においても、成形後の時間経過と、10分間の温水浸漬による  $F_1$  の変化を調査することにした。図15に経時変化と浸漬温度による影響を、また図16(一部図14に付記)に60°C、10分間浸漬による  $F_1$  の変化を示す。図15では3日経過以降、ならびに60°C以上浸漬にて125-130kgf(母材強度を有するアンダカット部せん断強度にほぼ等しい)に低下し、以後余り変化しない。これは図16の(a)(b)の比較から容易に理解されよう。すなわち、ストレートピンの側面保持強度は温水中で完全にゼロとなり、その結果(b)の  $F_2$  は、この35kgfのみ一律減少してアンダカット部母材せん断強度125kgfに帰している。図14の一律減少も同様の理由と考えられた。

適用材料: 本法をPC, PMMA, ABS, FR-PPの4種の

研究速報

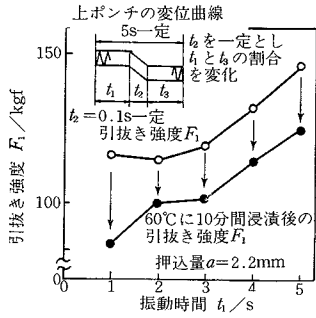


図14 引抜き強度 $F_1$ に及ぼす押し込みタイミングの影響

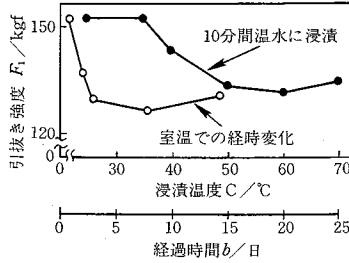


図15 温度および経時変化が引抜き強度 $F_1$ に与える影響

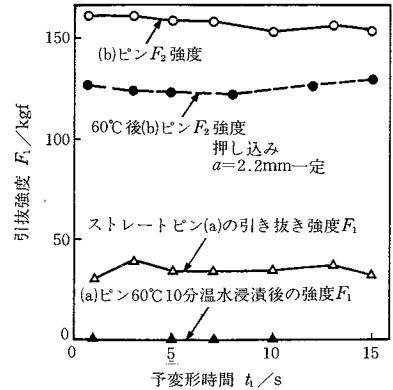


図16 温水浸漬による引抜き強度 $F_1$ の減少

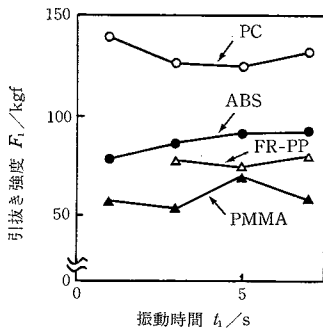


図17 各種材料の引抜き強度 $F_1$

材料に適用した(図17)。いずれもPVC同様の高い形状転写性が確認されたが、フランジ部、アングカット部の透明度はPVC、PC、PMMA、の順に低下した。引抜き強度は、 $t_1$ 増に伴って大きな変動は認められない。ここで、母材強度を仮定したアングカット部せん断強度との比較をすると、PC、ABSで90%以上と高強度を示す反面、ガラス繊維強化材のFR-PPや靱性の低いPMMAでは、30-40%にとどまっている。適用材料範囲については今後さらに検討が必要といえる。

4.4 引抜き強度を規定する因子

本法において引抜き強度 $F_1$ を規定する因子を以下に整理する。 $F_1$ は大別して、(I)幾何学的因子すなわち①アングカット部強度(寸法形状、ノッチ効果、材料強度など)と、②ストレート部密着力、および(II)内部欠陥因子すなわち、③材料劣化(分子配向、異物混入、ポイド生成など)、④残留応力、⑤フランジ外周部のシワ生成、に限定されていよう。このうち④は経時変化を惹起し②をゼロに帰する。結局、[強度設計により期待されたアングカット部強度が③の材料劣化によって減少した値 $p_1$ ]と、[本法の本質に起因した③の分子配向面強度が④⑤によって減少した $p_2$ ]との比較の中で、より小さいほうに $F_1$ は等しくなる。

5. ま と め

振動熱成形の思想を進展させ、新たに2次加工による金属ピンインサート加工を提案し、適用実験を通して以下の結果を得た。

(1) PVC( $t=3.1$ )への $\phi 8$  mm、溝幅1 mmの金属ピンインサートでは下穴加工なしに5s以内の短時間に150 kgf以上の高強度が容易に達成された。

(2) 引抜き強度に関しては、i) 樹脂が過充填となるピン押し込み量と、ii)  $t_1 > t_2$ にて高められること、iii) 三日以内または50°Cまでの温度範囲で著しい強度低下が認められそれ以降安定すること、iv) 特にPC、PVCで高強度、PMMA、FR-PPで若干低い強度となること、などが確認された。

(3) 引抜き強度は、アングカット部強度と、分子配向面強度の弱いほうにて規定されると考えられる。

本研究を通して、基本的な特性と問題点がほぼ明らかにされ、単にここでのピンインサート加工にとどまらず本法の特長を生かした適用形態の拡大、新たな用途開発が期待されていよう。

おわりに本実験遂行に御協力いただいた芝浦工大学生加藤衛君と材料をご提供くださいました三菱レイヨン(株)、タキロン(株)の両社に謝意を表します。

(1987年3月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 横井：生産研究，37-11，(1985)，35
- 2) 横井，小林：生産研究，37-11，(1985)，80
- 3) 横井，荒川：昭61春塑加講論，(1986)，519
- 4) プラスチック加工技術便覧，(1984)，173，日刊工業新聞
- 5) 横井，荒川，加藤：昭61精密工学会秋講論，(1986)，325
- 6) 横井，中川：塑性と加工，25-279 (1984)，335
- 7) 横井，小林：昭60春塑加講論，(1985)，483
- 8) 横井，荒川，加藤：昭61秋塑加連講論，(1986)，221
- 9) 前田：塑性と加工，21-239 (1980)，1015