

振 動 せ ん 断 加 工

Vibratory Shearing Process

横 井 秀 俊*・中 川 威 雄*

Hidetoshi YOKOI and Takeo NAKAGAWA

素材の繰り返しせん断に伴う局所的材料変形と発熱現象を活用して、新しい加工原理に基づいた接合加工、精密せん断加工を実現できる。これらを、対向ポンチによる各種振動せん断加工と総称している。ここでは振動せん断加工の基本的な思想を紹介し、振動仕上げ抜き、せん断圧接を中心とするいくつかの適用例をととして、各種振動せん断加工の実際とその可能性を概説する。

1. は じ め に

加工技術の開発手法は、新たな物理現象の応用から、他分野における普編技術の転用、既存技術の新しい組み合わせまで実に多岐にわたっている。なかでも異彩を放っているのが不良現象を逆利用しようとする手法である。整直作業時の棒の中心割れを中空棒の製造に結びつけたマンネスマンせん孔法、旋盤のセンターと加工物との焼き付きからヒントを得た摩擦圧接などは、こうした手法から生まれた加工技術である。しかしながらこうした逆利用の着想が加工技術にまで高められるためには、着想そのものの合理性と、実現される加工法の有用性が常に厳しく問われていた。

振動せん断加工は、一般に有害視されるせん断加工時の生成熱を増幅し、接合、精密せん断などに積極的に活用しようとするもので、前記加工法と同様、不良現象の逆利用を出発点としている。著者らは素材の繰り返しせん断に伴うせん断領域の局所的材料状態に注目し、この領域の持つ能力を何らかの加工法に活かすことを検討してきた。金属薄板のせん断圧接、プラスチックおよびプラスチック複合材料の振動仕上げ抜きなどは、こうした過程で開発された加工法である。以下では、まず繰り返しせん断現象とそれを加工に結びつける手法について解説し、つぎにいくつかの適用例を報告しながら、対向ポンチによる各種振動せん断加工の持つ可能性を明らかにする。

2. 繰り返しせん断現象に期待されるもの

せん断加工は、適当な工具を用いて板形状、棒状の素材の一部分にせん断変形を与え、その領域の局所的な塑性変形あるいはクラックの生成と進展による破壊現象を利用した分離加工法である。ここでは、板材の打抜きに伴うせん断現象を取り上げ、本稿の主題たる振動せん断加工を支える事柄について簡単に説明したい。

(a) せん断過程とせん断エネルギー : 板材のせん断過程では、ポンチが材料に食い込むと同時にせん断荷重の急増が示される。しかし両工具刃先近傍にクラックが生成、進展し始めると、せん断荷重は急激に低下する。クラックの生成は、このようにせん断に要する仕事量(せん断エネルギー)を著しく低下させる。

せん断エネルギーはその多くが加工中に熱エネルギーとして出現し、一部は塑性変形中の転位の増殖と点欠陥の増大などにより、被加工材料中に格子欠陥のひずみエネルギーの形で凍結される。その割合は明らかではないが、Farrenらは金属材料が塑性変形を受けたとき費やされる仕事の約90%が熱エネルギーとして現れることを報告しており、¹⁾熱エネルギーとして現れる率の高いことを示唆している。

(b) せん断領域の局所的材料変形と発熱 : せん断加工に伴う材料変形の広がり、一般にせん断線に沿うごく細長い領域にのみ限られる。たとえばベイナイト鋼板の精密打抜きでは、せん断面から板厚比10%以内の領域に加工硬化層が観察される。²⁾また、小さな工具クリアランス、大きな打抜き速度は、せん断線近傍への変形集中にきわめて有効であることが知られている。³⁾材料変形がせん断線近傍に局在化し、さらにそこでのせん断仕事熱として出現しやすいことは、必然的にせん断領域材料が局所的発熱することを物語っている。しかしせん断加工に伴う発熱現象は工具の軟化摩耗の進行、チップングのほか、製品精度の劣化をも惹起するため一般に有害視され、その対策を課題として、従来多くの研究者により温度測定、⁴⁾⁵⁾数値解析⁶⁾²⁾が試みられてきた。

打抜き時における工具の温度上昇については、古くはDiesが1955年に工具と被加工材料を熱電対として、切刃近傍平均温度の測定を行っている。⁴⁾せん断領域の材料内温度分布は、1982年に柳原らによって初めて実測され、⁵⁾最大30%低めの誤差を含むとしながら、図1の温

* 東京大学生産技術研究所 第2部

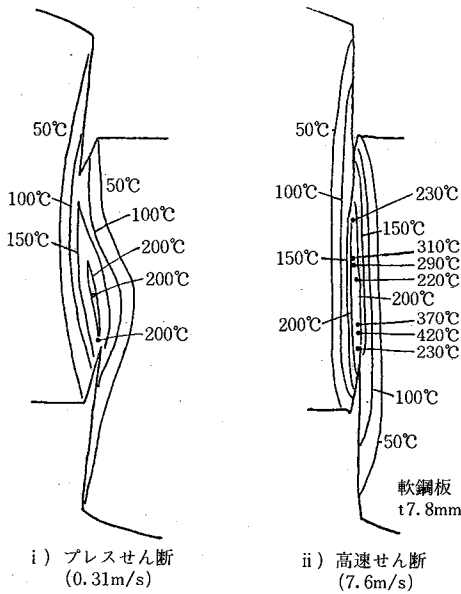


図1 セン断領域の温度分布(柳原ら)⁹⁾

度分布を得ることに成功している。この図はせん断線に沿うきわめて局所的な領域でかなりの高熱が発生していること、その温度上昇域が高速せん断において一層狭まることを、具体的に物語るものである。この実験では7.6 m/sの高速せん断に最高620°Cが記録されている。

(c) **せん断領域の応力状態と材料挙動** : せん断過程においてさらに特記すべきことは、工具面下の材料、とりわけ局所的発熱現象を伴うせん断領域が、せん断過程をとおして一般に高い圧縮応力状態に保持されることである。このようすは、大変形有限要素法による数値解析結果にめいりょうに示され、⁹⁾ また実際にこうした高圧縮応力状態を背景として、せん断加工時にせん断領域から遠ざかる方向へと、かなり材料が流動することも観察されている。^{9),10)}

(a), (b), (c)を総合するとつぎのように述べることができる。せん断加工中の素材は、高圧縮応力下で局所的材料強変形を受け、せん断領域に高いピーク値を持つ発熱現象が現れる。

その到達温度は加工条件により大幅に異なるものの、1ショット当たりの総発熱量はほぼ同等である。せん断エネルギーはいずれもきわめて微量であるが、ここではこれを増幅してみることを検討する。考えられる唯一の方法は、何回かのせん断現象を一ヶ所に重畳させること、すなわち同一領域の繰り返しせん断加工である。せん断エネルギーの蓄積効果を高めるためには、小さな工具クリアランスによる高サイクル打ち抜きと、き裂の抑制、工具ストロークの調整をはかることが要求されよう。こうした加工条件により局所領域に大量の加工エネルギー

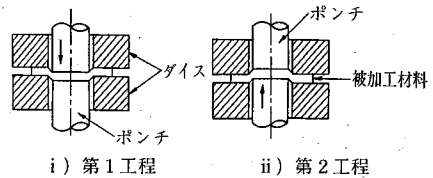


図2 上下抜き加工法(前田)¹⁶⁾

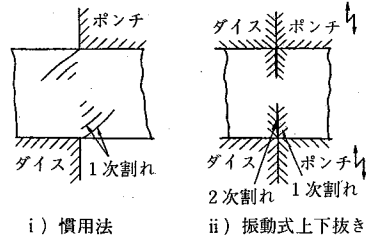


図3 振動式上下抜きの加工原理(北條ら)¹⁷⁾

を一時的にも蓄積できれば、何らかの加工に活用できそうな特殊な能力を、この領域から引き出せるものと期待される。

3. 振動工具を用いたせん断加工に関する従来の研究

材料に繰り返しせん断変形を与えるためには工具に振動を付与することが必要となる。振動工具によるせん断加工は日本を中心にいくつか研究が行われている。これについて以下に簡単に紹介しよう。

限部は超音波振動ドリル切削による多数穴あけの検討過程で、超音波振動ポンチによる打抜き加工を考案し、加温打抜きが一般的なフェノール樹脂積層板を、常温にて打抜くことに成功した。¹¹⁾ 山内らはこの研究を進展させ、詳細な実験に基づき、打抜き過程とその適用効果を明らかにしている。¹²⁾ 超音波振動打抜きは金属材料にも有効で、切口面のだけ量減少、せん断面増大、打抜き荷重の低下などの効果が確認された。¹³⁾ このほかナイフ刃工具の振動切断では、固体摩擦の等価的減少効果を利用して、軟質高分子材料¹⁴⁾、セラミックグリーンシート¹⁵⁾の高精度、高能率切断を実現している。

これらのせん断加工は、被加工材が常に同一方向に断続的にせん断される点で共通しており、素材の繰り返しせん断とは異なる加工原理に基づいていた。繰り返しせん断実現のためには、一度ある方向にせん断変形された材料を、逆方向にせん断し直す作業が必要となる。そのためには、それまでの振動ポンチに加え、もう一つの振動ポンチを対峙して設けなければならない。

こうした対向する2組のポンチとダイスにより最初に打抜き加工を行ったのは前田である。¹⁶⁾ すなわち図2のように第1工程の半抜き材料を第2工程で逆方向に打抜くことにより、板厚中央に破断面、その両側にせん断面のあるかえりのない切口を実現した。これが上下抜き加工法である。北條らはこの考え方を振動式上下抜き加工法へと発展させた。¹⁷⁾ この方法は微小な繰り返しせん断

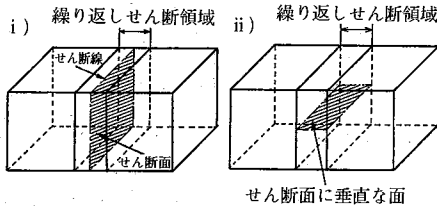


図4 繰り返しせん断領域の活用形態

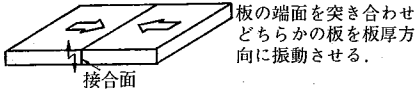


図6 突合わせ摩擦圧接の方法

変形による一次割れを図3のように交差させ、その際生成する、板面に垂直な二次割れを徐々に貫通させて分離をはかるもので、フェライトなどの脆性材料の精密せん断を可能とする。しかしながら、この方法も繰り返しせん断過程の発熱現象等を積極的に利用しているとはいえないものであった。

4. 振動せん断加工の研究

4.1 本研究における基本的な思想

本研究では前田、北條らによる上下抜き加工の手法を受け継ぎ、高周波数、高ストロークをもとに材料に積極的な繰り返しせん断変形を加え、そのせん断領域に短時間に集中的に高い加工エネルギーを供給することを考えた。それには対向工具で板を全面拘束してせん断過程から遊びを排し、上下ポンチを一定周波数、振幅にて振動させる振動せん断加工が最も合理的であろう。これによりせん断領域は高温、材料強変形、高圧縮応力状態に置かれる。これら3つの材料状態は互いに不可分の関係にあり、そのどれか、あるいはいくつかを主たる加工原理として活用することになる。ただし本研究の着想はせん断領域の局所的な発熱現象を起点としており、それは本研究をとおして常に中心に据えられるべきものである。その意味では本研究を、“振動せん断による局部発熱領域の活用”と単純に言い表すことも可能であろう。

局部発熱領域の利用形態にはおのずと大きな制約を伴っている。すなわち、面状の広がりを持つ局部発熱領域に対し、発熱直後に加え得る加工は、当然のことながら曲げでも絞りでもなく同一せん断工具によるせん断加工のみである。したがって発熱領域の利用方法は①その領域自身の持つ能力を生かした接合と、②その領域の変形能増大を活用した局部加熱せん断の2つに最終的に絞られてくる。ただし繰り返しせん断領域はある幅を持っているので、接合に関しては図4-i)のようにせん断面を介した通常の接合方法のほか、図4-ii)のようにせん断面に垂直な発熱面の広がりを利用する方法も考えられよう。

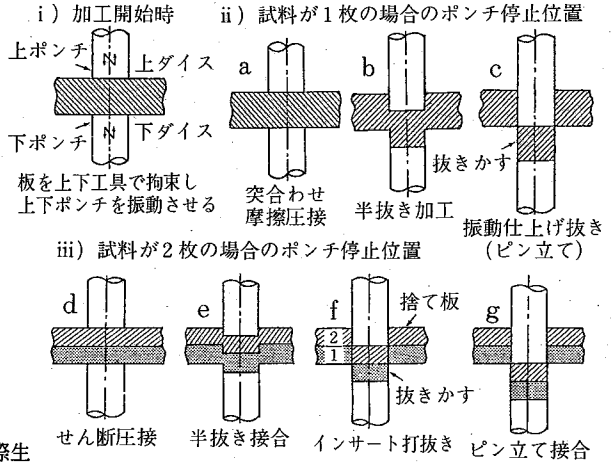


図5 対向ポンチによる各種振動せん断加工

本研究は、以上の基本的な認識に基づいて着手され、接合およびせん断分離加工における振動せん断加工の新たな可能性を追求したものである。

4.2 振動せん断加工の各種加工形態

振動せん断加工によって基本的にどのような加工が可能となるかを、その加工形態に沿って以下に紹介しよう。

図5は対向ポンチによる振動せん断加工の各種加工形態を分類したものである。いずれの加工形態もi)を出発点とし、この状態で上下ポンチを同一変位で振動させることにより、板に繰り返しせん断変形が加えられる。ここまでは同じ加工プロセスを経るが、その後、最終工程でのポンチ振動停止位置と、その際の被加工材の板枚数に応じて、全く別の加工目的を有するii), iii)の各加工形態に分岐する。

図5-ii)は、板が1枚における加工終了状態を示す。抜きかすを穴内に完全に戻してしまうaは、このままでは無意味な加工形態といえる。しかしその加工原理は図6の突合わせ摩擦圧接¹⁹⁾と全く同等と考えられた。ポンチ位置を少し下げ、抜きかすを途中で止めたbは半抜き加工¹⁹⁾さらにポンチを下降させて抜き落としたcは振動仕上げ抜き²⁰⁾またはピン立て加工²¹⁾となる。板を2枚としたiii)では、ポンチ位置をもとに戻すせん断圧接²²⁾が起点になる。ここから停止位置が下降するに伴って、まず半抜き側面を介して板接合をはかる半抜き接合e²¹⁾つぎに板の一部に別材料を埋め込むインサート打抜きf²¹⁾さらにピン立ておよびピン側面を介した板接合をはかるピン立て接合gが順次出現する。板が3枚以上のときも同様である。

著者らは、図7に示す門型振動フレーム構造の実験装置を用い、せん断圧接、振動仕上げ抜きを中心に、これら各種振動せん断加工の可能性を系統的に調査してきた。その詳細は既報に譲るとして、次節ではこの中から

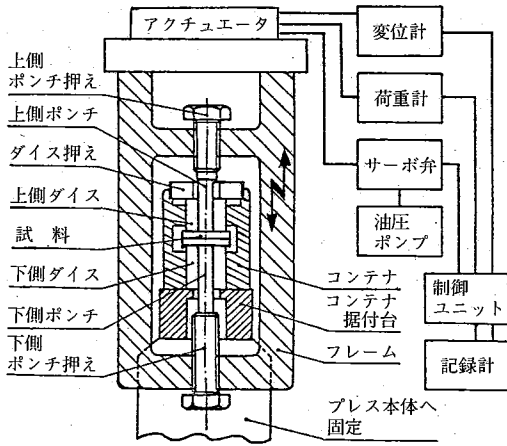


図7 実験装置の概略

二、三の適用例について、その概要を述べることにする。

5. 振動せん断加工の適用例

5.1 金属薄板のせん断圧接

薄板を重ね継手で接合するために、今日様々な方法が用いられているが、なかでもスポット溶接は最も一般的な方法として知られている。しかしスポット溶接の適用しにくい材料もまたいくらか存在している。特に電極などの電気材料として使用される機会の多い純銅は、高い電気および熱伝導度を持ち、抵抗溶接の最も困難な材料とされている。せん断圧接は、こうしたスポット溶接の困難な純銅のほか、一般に常温圧接性のよい金属を対象に開発された薄板の重ね継手接合法である。

まず接合しようとする2枚の薄板を図5-i)のようにクランプする。つぎに上下ポンチを一定回数振動させてiii) d)のように中立点に戻すと、せん断線に沿って帯状に接合領域が得られる。これがせん断圧接の方法である。繰り返しせん断領域の活用形態は、せん断面に垂直な面内での接合(図4-ii))であり、その接合力はせん断領域に含まれる板合わせ面をどこまで消失できるかにかかっている。

ここでは板厚2mmのタフピッチ銅(1/2H材)を用いて、工具径8mm(工具クリアランス0.01mm)、周波数10Hz、片振幅1.7mmにより接合実験を行った。図8にポンチ振動回数とせん断圧接強度の関係を示す。200回振動時の引張せん断強度は、一点接合にて8.4kN、はく離強度は3.2kNに達しており、高水準の接合強度が示される。²²⁾また周波数増により、1秒未満で上限の接合強度を実現できることも確認された。²³⁾図9は接合部断面(片側)の顕微鏡組織写真である。せん断線に沿ってe)のような微細結晶粒組織の流れが観察され、板a,bの合わせ面は完全に消失している。こうしたe)を介して2枚の板は強固に接合されている。²²⁾

また繰り返しせん断領域の潜在的な高接合性を背景と

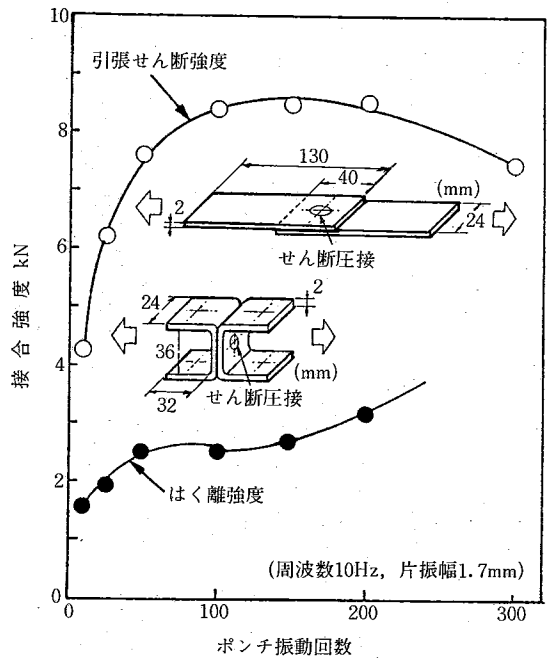


図8 せん断圧接の接合強度例²²⁾

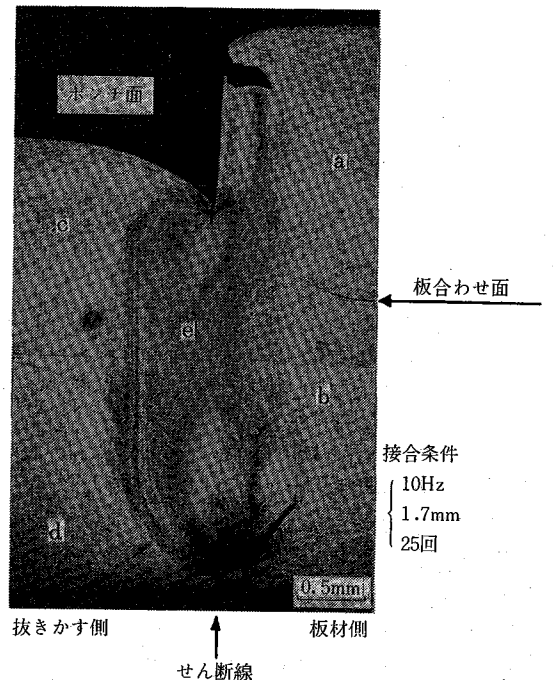


図9 せん断圧接部断面の顕微鏡組織写真(片側)²²⁾

して、純銅薄板の突合わせ摩擦圧接(図6)も試み、バリを全く生成させずに、母材強度以上の接合継手を実現することに成功した。¹⁸⁾

5.2 プラスチックおよびプラスチック複合材料の振動仕上げ抜き

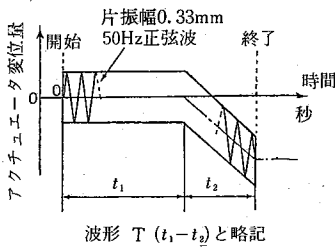
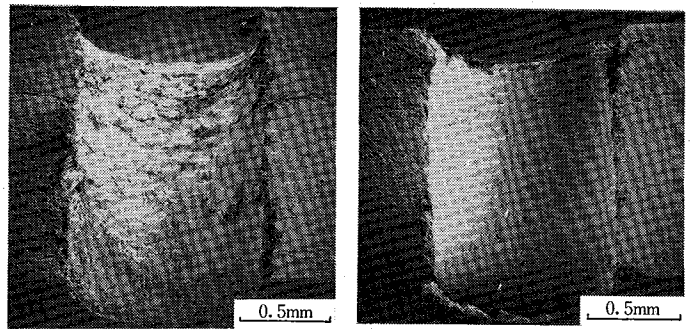


図10 振動仕上げ抜きの一一般的なポンチ振動波形



i) 慣用打抜き ii) 振動仕上げ抜き T (2.0-1.0)

近年脚光を浴びているプラスチック複合材料は、実用上切断、穴あけなど最低限の二次加工を必要とする。しかしプレス加工性がきわめて悪く、これまでせん断加工は精度を度外視した一部の加工分野にしか適用できなかった。今日、複合材料の大量使用時代を迎え、従来の切削加工中心では量産分野への対処が一層困難になりつつある。そのため、複合材料の高精度せん断を可能とする新しいプレス加工法の出現が強く求められている。すでにいくつかの試みがなされているが、^{24)~26)}これに応え得る汎用高精度せん断技術は、まだ確立されていない。こうした課題に挑戦を試みたのが振動仕上げ抜きである。

まず最初に、図5-i)での振動せん断により、繊維の完全せん断とせん断線近傍樹脂の熱軟化をはかる。つぎに図5cにてポンチを板に貫通させ、振動を停止する。これにより、せん断切口面の熱軟化樹脂が工具側面に接して冷却され、工具側面性状が切口面側に転写される。これが振動仕上げ抜きの方法である。

以下の実験では、ポンチ振動波形として図10の単純波形を用い、これを $T(t_1-t_2)$ (t_1, t_2 は秒単位) にて略記した。それ以外の周波数 $F(\text{Hz})$ 、片振幅 $A(\text{mm})$ では F, A の各記号により実験結果に付記する。工具クリアランスはいずれも片側 0.01 mm とした。

(a) **ガラス/エポキシ積層板への適用**²⁰⁾ 産業用、高級な民生機器用基板として近年多用されるガラス/エポキシ積層板に振動仕上げ抜きを適用し、スルホールめっき用穴あけを行った。供試材は板厚 1.6 mm の両面銅張ガラス/エポキシ積層板である。

慣性打抜きと本法とによる加工穴の外観を、図11に比較する。前者では、未せん断のまま抜け落ちた繊維が穴内面の随所に突き出し、打抜き方向に屈曲している。一方、本法ではこれら繊維は完全に消失し、穴内壁全体が均一な仕上げ面状を呈する。その内壁面あらさは、ドリル穴あけ以上の $R_{\text{max}} 4 \sim 7 \mu\text{m}$ に達し、光沢を有するまでの平滑度が得られている。図12は仕上げ面断面SEM写真で、荒れた破断面[A]上を粉々に破碎された繊維と樹脂との仕上げ層[B] (厚さ $0.05 \sim 0.15 \text{ mm}$) が覆い、その

図11 ガラス/エポキシ積層板の加工穴外観比較 ($\phi 1 \text{ mm}$, SEM)²⁰⁾

粉々のガラス繊維とエポキシ樹脂の付着層[B] 凹凸の破断面[A]

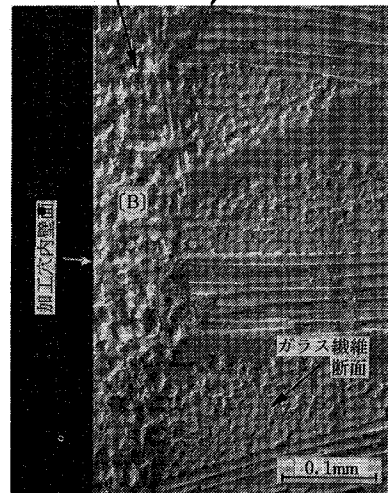
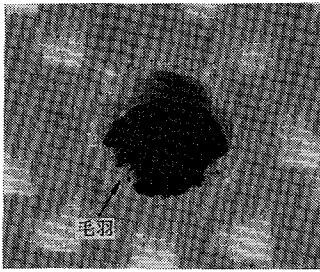


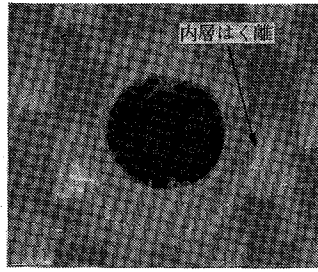
図12 ガラス/エポキシ積層板の振動仕上げ面断面拡大写真 (穴径 4 mm , SEM)²⁰⁾

表面にポンチ側面が転写されている。この[B]層はせん断領域温度が樹脂 T_g 点以上に達することによってはじめて形成され、強固な付着力を示す。

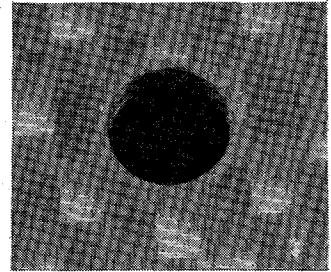
(b) **Kevlar-49/エポキシ積層板への適用**²⁷⁾ Kevlar-49 複合材は軽量、バランスのとれた諸特性のため、宇宙・航空機・一般産業分野などに広く用いられている。図13に各種方法による $\phi 4 \text{ mm}$ 加工穴外観写真を示す。供試積層板は朱子織クロス、板厚 2.4 mm である。この複合材をドリルで穴あけする場合には、加工条件を注意深く選定しないと、i)のように穴の出入口に、後加工を要するほどの毛羽やパルジが生成する。また慣用打抜きでは、ii)のように繊維が穴の出口側にひげ状となって残留し、穴周辺の広範な内層はく離、板面下部の脹みも観察される。これに対しiii)の振動仕上げ抜きでは、毛羽もはく離もほとんど生成せず、穴外周部の脹みも皆無である。穴内壁の断面形状は直線となり、その内面あらさもドリル



i) ドリル加工 (12000rpm, 当て板使用: 板の上面)



ii) 慣用打抜き (板の下面)



iii) 振動仕上げ抜き (T(0.6-0.2): 板の下面)

図13 各種方法による Kevlar-49/エポキシ積層板加工穴の外観比較 (板厚 2.4 mm, ポンチ径 4 mm)²⁷⁾

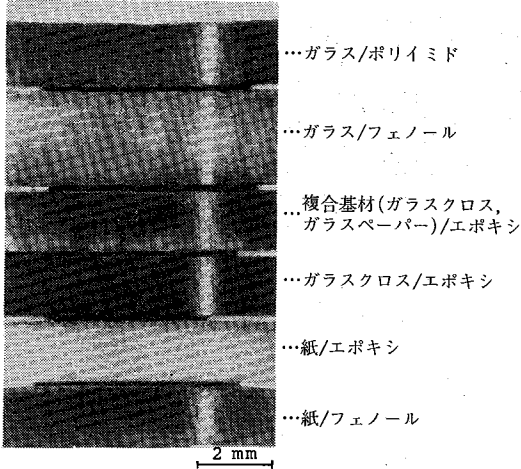


図14 振動仕上げ抜きによる各種プラスチック積層板の外形打抜き加工面(工具径 8 mm, ブランク側)

ルの約 1/3 に相当する R_{max} 8 μ m にまで仕上げられる。

(c) その他の各種積層板への適用²⁸⁾ ガラス/フェノール, ガラス/ポリイミド, 紙/フェノール, 紙/エポキシ, カーボン/エポキシ(CFRP)などの各種積層板の穴あけ, 外形打抜き加工 (ϕ 8 mm) に本法を適用し, ほぼ一様に R_{max} 3~8 μ m の平滑な仕上げ面を得ることに成功した。図 14 は外形打抜き面の外観写真で, 基材, 樹脂の種類によらず, いずれの材料でも光沢仕上げ面が得られている。図 15 には CFRP の切口面性状の一例を掲げる。ほぼガラス/エポキシ積層板と同様の加工特性が得られたが, 仕上げ効率は CFRP の方が若干高く示されている。²⁷⁾

(d) 各種熱可塑性樹脂材料への適用 樹脂の局部的熱軟化を基礎とする振動仕上げ抜きは, 上述の熱硬化性樹脂材料よりは, むしろ熱可塑性樹脂に最も適した加工法と考えられた。そこで打抜き性が悪いことで知られるいくつかの樹脂を取り上げ, 実際にその有効性を調査した。

アクリルは耐衝撃性が低く, 慣用打抜きでは図 16-i) のようにクラックが生じる。そのため打抜き不可能とされていたが, 本法により ii), iii) のように無理なく平滑

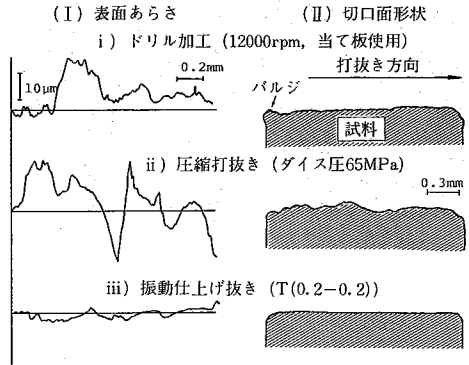


図15 各種方法による CFRP 加工穴の内面性状比較 (穴径 4 mm)²⁷⁾

にせん断できることが実証された。また切口面が図 17-i) のように劣悪となるポリカーボネイトも, ii), iii) のような射出成形面に近い完全に透明な切口を実現できる。ABS 樹脂も打ち抜きに伴う白化現象を回避することが可能となった。²⁹⁾ このように振動仕上げ抜きは優れた切口面改善効果を持つが, テフロン, ナイロン, 低密度ポリエチレン等の軟質材においては局部発熱がはかりにくいいため, 仕上げ効率は低く示されている。³⁰⁾

一方ガラス繊維強化の各種熱可塑性樹脂シート (樹脂: ナイロン, PBT, PP, PET など) も打抜き実験し, 繊維強化による高剛性を背景として, いずれも樹脂特性にあまり左右されることなく平滑度の高い切口面を実現している。

(e) 振動仕上げ抜きの寸法精度³⁰⁾ 図 18 に各種材料の振動仕上げ抜きブランク, 穴 (ϕ 8 mm) の寸法精度を示す。サンプル数各 10 個, 板厚は 1.6~3.8 mm とした。ナイロン系材料を除くと, 穴径, 製品径ともほぼ工具径に等しく, またそのバラツキ幅も一様に 20~50 μ m におさまっている。テーパもほとんど認められなかった。図 18 の結果は, 本法の打抜き寸法精度が金属の精密打抜きに匹敵するほどきわめて高いことを物語っている。

5.3 半抜き加工と半抜き接合

抜きかすを抜き落とさず, 図 5-b) のように半抜き状態

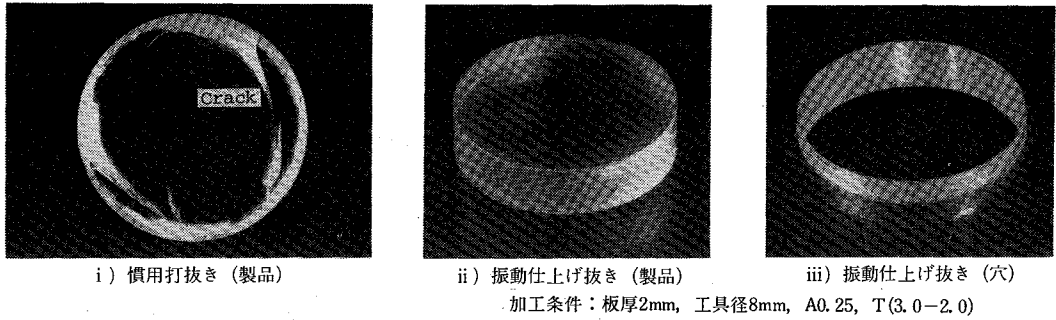


図16 アクリルの打抜きサンプル外観比較²⁹⁾

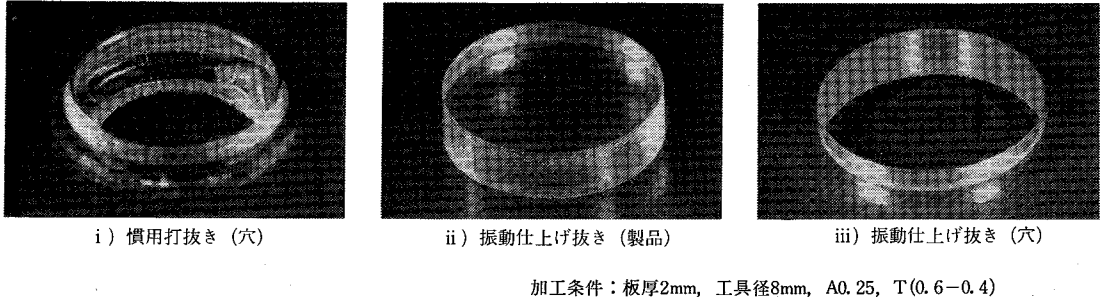


図17 ポリカーボネイトの打抜きサンプル外観比較²⁹⁾

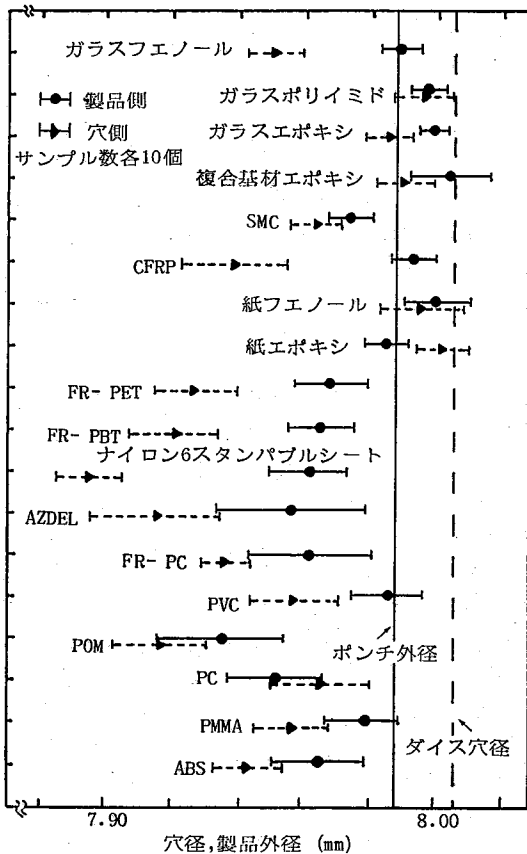


図18 振動仕上げ抜きの寸法精度³⁰⁾

で振動を停止することにより、抜きかすと板材とが再接合し、高精度半抜き加工が可能となる。図19にガラス/エポキシ積層板半抜き部の強度測定結果を、図20に半抜き部断面写真を掲げた。高い再接合強度と、シャープなボス形状とがこれより実証され、複合材料におけるこうした高精度、高強度半抜き加工のユニークな活用が今後大いに期待されよう。¹⁹⁾

板2枚の半抜き加工は、図21のように片側のボス側面を介して重ね継手接合を達成する。この半抜き接合は、超音波溶接でもほとんど不可能な異種プラスチックの高強度接合を可能とする。図22に接合強度の一例を示す。²¹⁾

最後に、主な振動せん断加工についてその特長と問題を整理し、表1に掲げた。

6. 振動せん断加工の概念

ここでは、4.での基本的な着想とそれに基づく5.の適用結果を踏まえたうえで、振動せん断加工の概念を総括的に述べることにする。

振動せん断加工では、高い圧縮応力下での局所的材料変形と、それによる発熱現象を加工に活用している。材料変形、発熱、高圧縮応力状態という、これらに3つの基本要素は、適用材料により加工プロセスでの役割を異にする。

金属材料の振動せん断加工：金属材料は熱伝導率が大きく材料特性の温度依存性も低いので、ひずみの集中現象(したがって更なる局所的高温化)が起こりにくい。

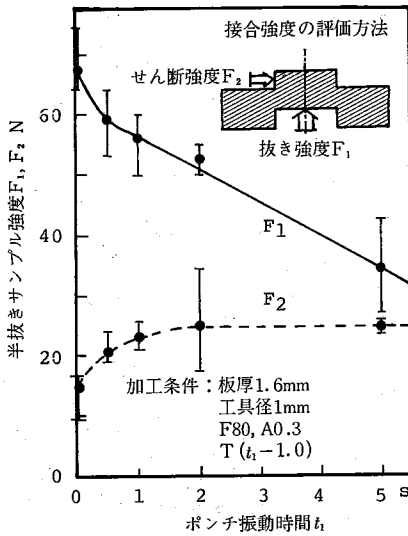


図19 ガラス/エポキシ積層板の半抜きサンプル強度例¹⁹⁾

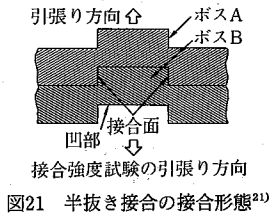


図21 半抜き接合の接合形態²¹⁾

しかし金属結合という特異な結合形式を有するため、供給されたエネルギーの一部が材料内に格子欠陥のエネルギーとして蓄積され、新たな能力を表すようになる。同時にひずみの集中のしにくさは変形域の拡大を意味し、活性化エネルギーの低減した領域は比較的広範となる。このような活性化領域は接合能力が増大しているため、金属における繰り返しせん断領域の活用は主として接合加工となる。この際材料変形は前記活性化作用のほか酸化被膜の破壊に、圧力は面の密着と材料押し出しに、熱は反応の促進に大きく関与する。これがせん断圧接、突き合わせ摩擦圧接において高強度の接合に成功した背景といえる。

プラスチック系材料の振動せん断加工：プラスチックは熱軟化点が低く、その熱伝導率も金属に比べて二桁ぐらい小さい。材料特性の温度依存性も非常に大きい。そのため、せん断領域の局所的発熱が局所的熱軟化を生みだし、ひずみの集中はいつそう加速される。こうして、流動状態も含む局所材料変形能の急増が短時間に達成され、せん断では分離工程を著しく容易とし、また接合加工では相互の溶け込みによる接合の確実さがもたらされる。材料変形は熱エネルギーへの変換プロセスのほか、複合材料では繊維の破碎を、また接合加工においては接合界面での相互攪拌に関与する。発熱現象は、上記変形

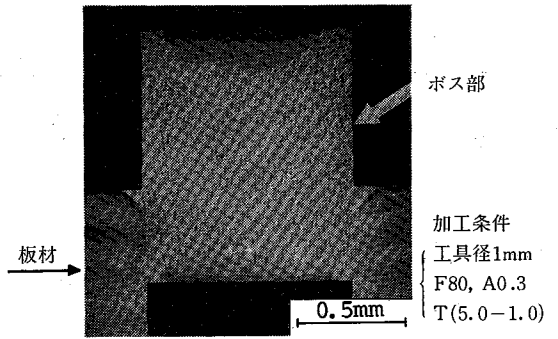


図20 ガラス/エポキシ積層板の半抜き部断面写真¹⁹⁾

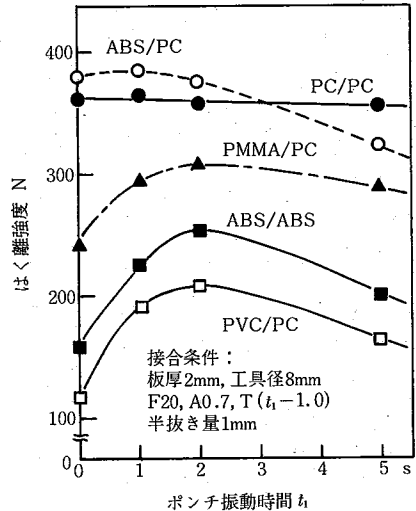


図22 半抜き接合の接合強度例²¹⁾

能増大のほか、樹脂そのものの接着性の向上に寄与している。そして圧力は、接合における面の密着の保証、割れの抑制、工具側面の転写効果の増大などに密接に関連している。

以上のように、繰り返しせん断現象の現れ方、その活用方法は、適用材料によりかなり相違するが、せん断領域が示し得るこれら特異な能力のレベルは、いずれも加工エネルギーの供給量に規定されている。振動せん断加工では、加工エネルギーは全て材料変形過程をとおしてのみその変形領域に供給される。すなわち、エネルギーの供給は、供給先の材料変形を抜きにしては語れず、さらにその供給量の増加は材料変形量の増大を意味していた。そこでいかにして材料変形エネルギーを確保するかが問題となる。

せん断加工は局所的大変形を付与するうえで最適な加工法であった。しかし材料き裂をも生成する不安定な現象に立脚しているために、エネルギー供給過程で新たな欠陥生成の可能性を持つ。変形エネルギーを大きくするにはせん断量を増やすことが有効だが、それに伴ってき裂も生成しやすくなる。き裂の生成は、逆に材料変形量

表1 各種振動せん断加工の主な特長と問題点

	加工形態	適用材料	特長	問題点
せん断圧接	接合	• 常温圧接性の高い金属 (一部のプラスチック)	• 簡便な重ね継手接合法 • 少ない熱影響域 • 常温圧接より圧痕生成が少ない • 一般に高強度の実現が可能 • バリ生成を伴わない	• 圧痕, 工具輪郭が残留 • 材料破断しやすい材料での強度のばらつき • 工具焼付きが懸念される
突合わせ摩擦圧接	接合	• 常温圧接性の高い金属 (一部のプラスチック)	• 従来にはない薄板の突合わせ接合の実現 • 熱影響域が小さくバリ生成を伴わない • 母材強度以上の接合強度が可能	• 材料拘束条件の実現がむずかしい
振動仕上げ抜き	せん断	• プラスチック • プラスチック複合材料	• 多くのプラスチック複合材料に汎用 • ドリル加工に匹敵する平滑で光沢を有する加工面 • 金属の精密打抜きレベルの寸法精度 • 穴あけ, 外形打抜きのいずれも可能	• 熱可塑性プラスチックでは加工面に熱ひずみが生成しやすい • 複合材料では工具摩耗の大きいことが予想される • プラスチック材料の一部に適用効果の少ない材料がある
半抜き加工	半抜き	• プラスチック • プラスチック複合材料	• 高い寸法精度 • シャープな形状 • 高い半抜き部強度	• 母材に対して接合部の強度が減少する • 極薄板での強度が出にくい
半抜き接合	接合	• プラスチック • プラスチック複合材料	• 異種プラスチック間接合が可能である • 簡便で確実な強度が得られる • 多数枚同時接合が可能である	• 極薄板には適用が困難 • 接合に際し, 製品に傷を残す

の急激な減少に直結する。その意味で振動せん断加工は、せん断変形量の増大とき裂の抑制という一般には相矛盾する要素のバランスの上に成り立っている。したがって工具拘束力を高めるなどのき裂抑制を配慮しつつ、許されるぎりぎりの範囲までせん断変形を増やし、なお不足するエネルギーを周波数で補うという形態が取られる。き裂の生成を抑制しつついかに高エネルギーを供給するかが、振動せん断加工の主要な課題であり、またその成否が本法の適用範囲の限界線を設定しよう。

7. おわりに

これまでの基礎的な研究をとおりて振動せん断加工の加工形態はほぼ出そろった感がある。今後は以上の研究成果を踏まえた実用化段階の研究がいっそう重要度を増してこよう。

すでに各種振動せん断加工の中でも汎用性、工業的有為性が極立つ振動仕上げ抜きを中心に実用化が検討されている。すなわちせん断圧接、振動仕上げ抜き両用の特殊振動プレスの開発研究⁹⁾を手はじめに、航空機材料のリベット、ファスナー用穴あけを対象とする振動仕上げ抜き実用プレスの試作に成功している。型寿命、型構造など克服すべき問題は多いが、まず特殊な複合材料加工を足がかりとして、一般的な複合材料、熱可塑性プラスチックへと実用化範囲を少しずつ拡張してゆきたい。振動せん断加工の真価が問われるのは、まさしくこれからであろう。

(1983年12月5日受理)

参考文献

1) Farren, W. S and Taylor, G. I.: Proc. Roy. Soc. Ser.

A, 107(1925), 422.

- 2) 中川, 鈴木, チュブカ: 生産研究, 24-8 (1972), 321
- 3) 中川: 塑性と加工, 10-100(1969), 367
- 4) Dies, R.: Werkstatt und Betrieb, 88-10 (1956), 651
- 5) 柳原, 斉藤, 中川: 塑性と加工, 23-252(1982), 71
- 6) 橋列, 斉藤, 奥谷: 同上, 14-151(1983), 621
- 7) 高石, 前田: 同上, 21-232(1980), 430
- 8) 岩田, 上田, 山田: 同上, 20-220(1979), 437
- 9) 春日, 堤, 森: 機論(第3部), 43-372(1977), 3142
- 10) 前田, 青木: 塑性と加工, 20-218(1979), 208
- 11) 隈部: 機論(第3部), 27-181(1961), 1418
- 12) 山内, 小牧: 塑性と加工, 10-99(1969), 261
- 13) 松居, 団野, 浅井, 竹内: 同上, 19-214(1978), 934
- 14) 石川, 横山, 津和: 精密機械, 46-2 (1980), 153
- 15) 西田, 横井, 中川: 昭58精機学会春講論集, (1983), 13
- 16) 前田: 機械の研究, 10-1 (1958), 140
- 17) 北條, 吉田, 増田: 塑性と加工, 5-38(1964), 203
- 18) 横井, 中川: 昭56塑性加工春季講論集, (1981), 371
- 19) 横井, 中川: 昭57精機学会秋季講論集, (1982), 871
- 20) Nakagawa, T and Yokoi, H: Proc. 9th NAMRC, (1981), 207
- 21) 横井, 中川: 第33回塑性加工連講論集, (1982), 271
- 22) 中川, 横井: 機論(C編), 47-42(1981), 1391
- 23) 横井, 中川: 機論(C編), 48-432(1982), 1293
- 24) 北條: 塑性と加工, 2-10(1961), 647
- 25) 松野, 村越: 第25回塑性加工連講論集, (1974), 407
- 26) 松野, 村越: 昭53塑性加工春季講論集, (1978), 145
- 27) Yokoi, H and Nakagawa, T: Proc. 4th ICCM, (1982) 1625
- 28) 横井, 中川: 第32回塑性加工連講論集, (1981), 389
- 29) 横井, 中川: 昭57塑性加工春秋講論集, (1982), 487
- 30) 横井, 中川: 第34回塑性加工連講論集, (1983), 427
- 31) 横井, 中川: 生産研究, 34-6 (1982), 185