



M. Murakawa

せん断加工のメカニズム解明および実加工における 進歩・展望

村川 正夫*

1. はじめに

せん断加工は基本的には一對のパンチとダイの工具間に被加工材をはさみ、プレスで押圧し、材料を破断にまで変形させるという単純な工程作業から実施できる。しかしながら、変形工程に破断すなわち破壊工程が含まれるために、そのメカニズムを解析的に解明するのは見かけほど容易ではない。一方その実加工への適用はせん断加工のずば抜けた高生産性の故に多様な用途へと発展した。すなわちせん断加工は理論より応用が完全に先駆けした典型的な加工法である。

本解説では、しかしながら物事の全体像をしっかりと把握するために、敢えてそのメカニズム解明の部分から記述を始めることとする。なお、本特集号はせん断加工の最新の加工技術を紹介するのが趣旨ではあるが、物事の順序として、当該技術がどのような歴史的経緯を経て出現してきたかについても出来るだけ触れることとする。

2. せん断加工のメカニズム解明

前田禎三のせん断加工理論を展望した記事¹⁾によると、せん断加工に初めて学術的な観察が入り、研究が始まったのは20世紀の初頭(1906)であり、E.G.Izodは特別にせん断試験機を作製し、きわめて純粋せん断に近い条件で各種材料のせん断試験を行い、せん断抵抗と引張り強さとの比を測定した²⁾(図1)。その結果 delta metal (一種の銅合金) における0.51から鋳鉄における1.51まで広範囲に変化することを明らかにした。また、神馬 敬の展望³⁾によると、せん断加工の力学的研究は1923年にBachが軟鋼板の穴あけについてパンチ食い込み初期に材料内に生ずる弾性応力を求めた⁴⁾(図2)のが始まりという。

その後1927年、Craneは、軟鋼のせん断加工においてクリアランスが適当であれば、パンチとダイの刃先より発生するクラック(き裂)がうまく会合し、切り口はきれいであるし、加工に必要な仕事量も最小になることを見出した⁵⁾。

これらの黎明期的研究を先駆として、せん断加工メカニズムについてのいわば具象論的研究・観察はその後日本、欧米で数多くなされ、せん断現象メカニズムの理解に多大の貢献をなしてきたのであるが、本格的な塑性力学的研究は前田禎三⁶⁾(1959)および神馬敬⁷⁻⁸⁾(1962-1965)を待たなければならなかった。研究の詳細な内容はそれぞれの論文に譲るとして、それらのエッセンスを述べると、前田は複刃によるせん断の過程を単純せん断期と薄層せん断期に分けたせん断模型を導入し、せん断特性の説明と塑性曲線からのせん断抵抗の算出を行った(表1)。この研究に次いで、神馬は打抜き過程を単純せん断期、せん断面成長期、陥没面成長期、せ

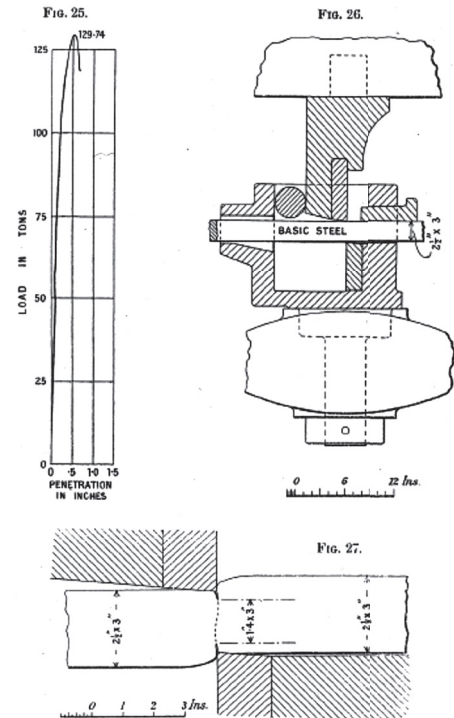


図1 $t=63.5\text{mm}$, $B=76.2\text{mm}$ の鋼板をせん断するための装置、最大荷重(130ton)までのパンチ食い込み量: 14mm, 仕事量: $1.7\text{m} \cdot \text{ton}$, 破断までのパンチ食い込み量: 16.5mm

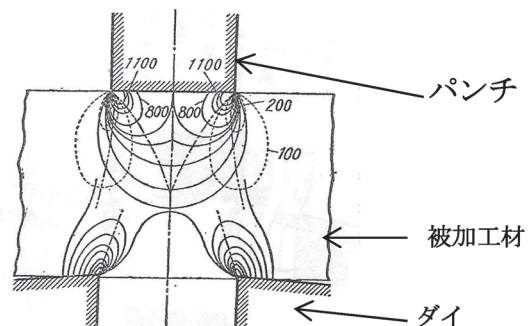


図2 打抜き初期において材料内に生ずる弾性応力分布 (Bach, 1923年, 単位: kg/mm^2 , 実線; 圧縮応力, 破線; 最大圧縮応力, 2点鎖線; 最大せん断応力)

ん断分離期の4段階に分類し、可容速度場による解析を行った。鉛の厚板を用いた実験の裏付けもあって、現実に近い結果を得ているが、だれの成長や引っ張り力による陥没面の生成を述べているのが特徴である⁹⁾(図3)。

*日本工業大学 名誉教授

表1 せん断抵抗の計算値と実測値（前田）（単位はkg/mm²）

材料	クリアランス	7% 板厚		12% 板厚		23.4% 板厚	
		計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値
1.0 黄銅		32.3	31.9	31.7	31.0	31.2	29.0
0.8 アルミ		13.4	13.5	13.1	13.0	13.0	12.4
2.0 銅		21.6	20.0	21.3	19.6	21.1	19.6
0.8 銅		18.6	17.9	18.3	17.2	17.9	16.4
0.7 鱗青銅		54.9	49.8	54.2	49.2	53.1	48.2
0.6 洋白		49.9	44.1	49.1	43.0	48.9	42.2
1.6 軟銅		25.5	29.0	25.0	28.7	24.3	28.1
0.9 軟銅		24.4	28.1	24.1	27.2	23.6	25.2
0.8 亜鉛		15.6	12.8	15.4	12.6	15.1	12.1

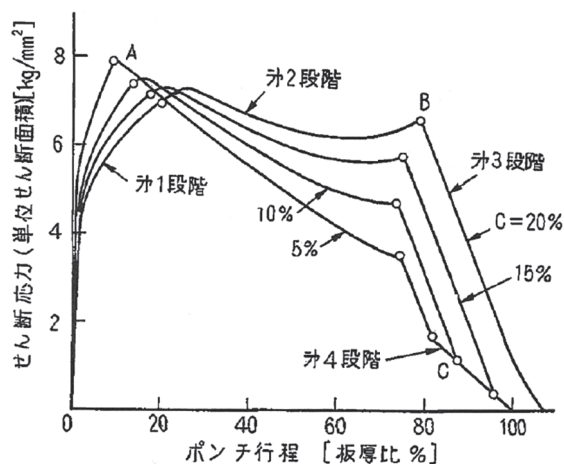


図3 アルミニウム板せん断力線図（理論）（神馬）

近藤一義はせん断加工を理解するためには、加工現象を総合的に整理理解する必要があると感じ、一連の研究を進めた^{10, 11, 12}。その結果、加工分離面の性状を主として支配している平滑せん断面の形成が塑性変形によって行われるものとして、刃角近傍の材料に働く静水圧の大きさを共通の尺度にとり、種々の加工条件が分離面性状に及ぼす影響を比較的一貫してまとめ得ることを確認し、これを新たに切削的平滑せん断面形成機構と名付けた（図4）。工具の視点から垂直方向に作用するせん断力のみならず、側方に作用する側力力がどの程度になるかを調べる事は重要である。斎藤博は円形パンチによる打抜きの際の工具に作用する側圧力を測定している¹³。クリアランスが小さい時に $m=35\%$ 程度となることがわかる（図5）。

これに次いで、前田禎三は平行複刃によるせん断の場合の諸材料支持条件下における側力力を測定している¹⁴。側力力のはさみ形で最大約 40% 程度となることがわかる（図6）。

前田禎三はせん断製品のわん曲についても理論的考察を行っている¹⁵。その結果、パンチ下の材料に作用する曲げモーメント G は $G=A \cdot P - B \cdot T - C$ の形で表せることなどを明らかにした（図7）。

せん断工具切り刃の摩耗についての研究は、加工条件の正しい選択により同工具の寿命を例えば 1.5~2 倍以上に向上することが出来れば、製品精度、経済的側面からも得られる利益は極めて大きい。

しかし、摩耗をその根元にまでさかのぼって考究するに際して、摩耗そのものの調査や測定が困難であり、研究に多くの労力と時間を要する。まずはその方法論であるが、これは

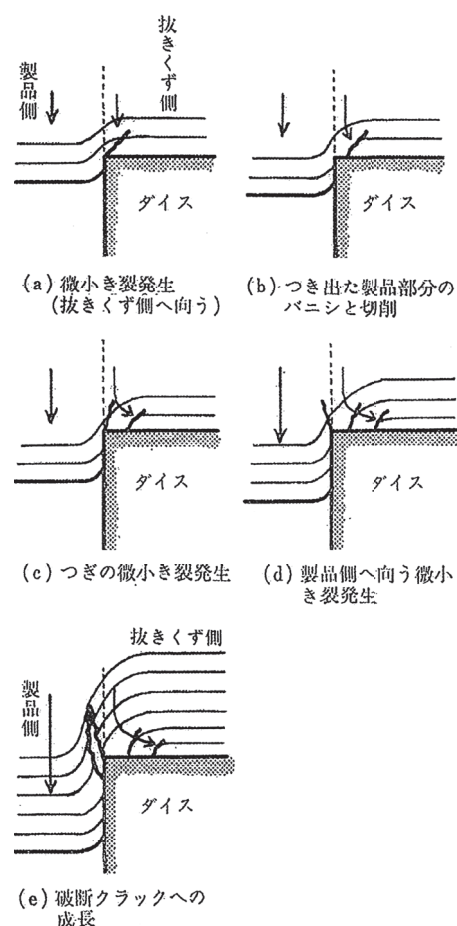


図4 切削的平滑せん断面形成機構の説明図

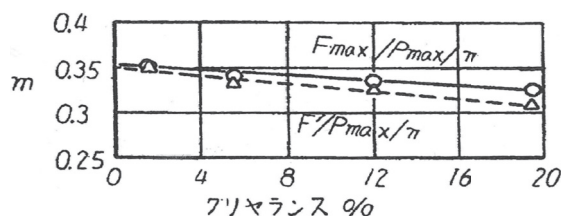


図5 円形パンチ打抜きにおける最大側圧力と最大打抜き力の比率 m

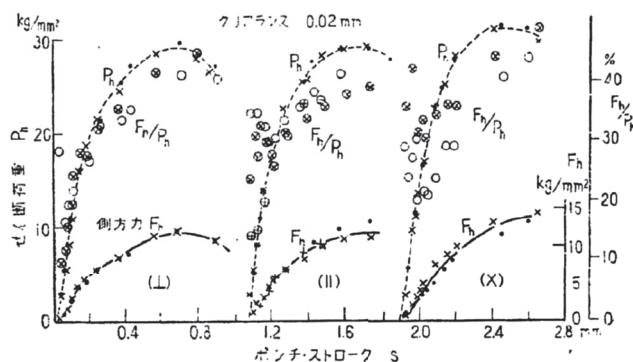


図6 平行複刃によるせん断時の側力力の測定結果（はさみ形, 1.6mm 軟鋼板, クリアランス : 0.02mm）

ドイツで利用が始まった表面粗さ計による摩耗の先駆的研究手法¹⁶が日本においても踏襲されている。

日本における先駆的研究としては、斎藤 博の研究¹⁷,

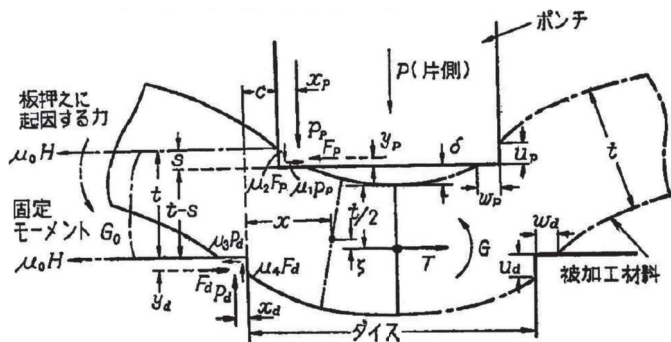


図7 セン断時に被加工材料に作用する力

前田禎三らの研究¹⁸⁾、斎田洋一の研究¹⁹⁾がある。

研究¹⁸⁾においては、せん断工具の摩耗の進行状況が打抜き数15万回まで示されている(図8)。研究¹⁹⁾においては、やはりケイ素鋼板($t=0.5\text{mm}$)を用い、工具として超硬合金を用いたときの、打ち抜き数100万回までの摩耗実験結果が示されている。その結論として、工具コーナー部には板厚の1/2以上の丸み(R)を付けるべきこと、特にコーナーRと直線との接続部の切り刃に生ずる大きな側面摩耗はクリアランスを小さくすると局部的な摩耗を抑制でき、切り刃各部の摩耗を均一化するのに役立つこと、側面摩耗を小さくするには潤滑剤を用いる事が極めて有効なことなど有用な知見を提供している。その後、青木 勇はせん断工具の摩耗について、そのメカニズムを総合的に説明・考察している²⁰⁾。彼の考えによれば、凝着摩耗の支配側(Holmの説)およびひっかき摩耗の支配側(Rabinowiczの説)よりせん断工具摩耗を究明しようとすれば、工具各部に作用する圧力Pと被加工材のすべり量l、及び工具材硬さ(Pm)、また工具と被加工

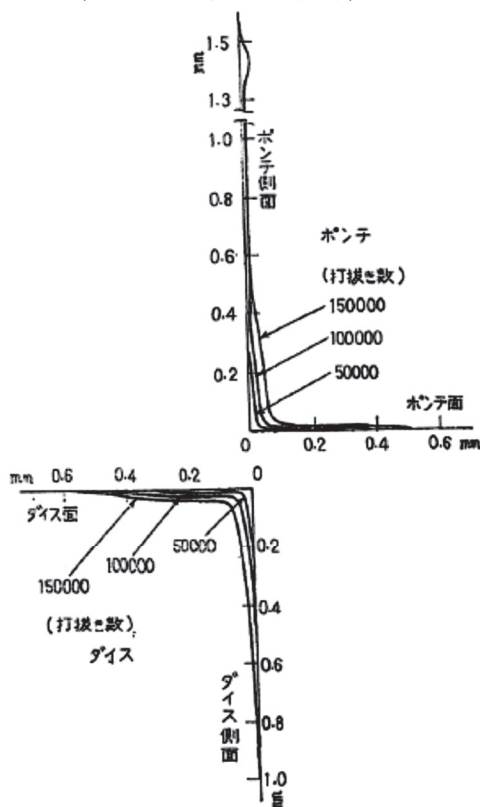
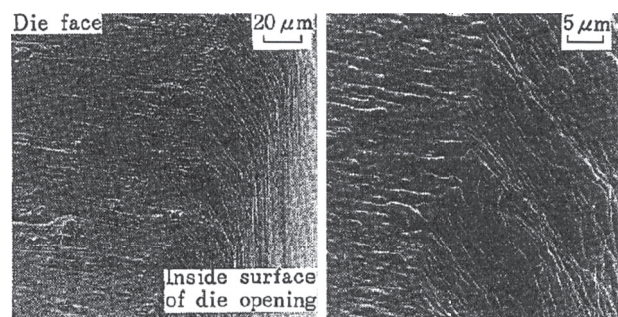


図8 切り刃の摩耗の進行状況(被加工材:ケイ素鋼板, $t=0.5\text{mm}$, クリアランス $=0.6\%$, 無潤滑)

材の組み合わせ、表面状態から検討されねばならない。かくして、せん断加工は工具切り刃が(相手材へ)新生面を創成するので凝着の問題を必ず引き起こす。さらには、被加工材は酸化被膜やけい酸被膜を有するものも多く、ひっかき作用も無視できない。摩耗のメカニズム解明において重要因子をなすも、これまで詳細に検討されてこなかったすべりの現象を①SEMによる工具摩耗面の観察を行い、あわせて②被加工材にビッカース圧痕をつけ、せん断変形前後の変位を精密測定することで、摩耗面の観察を材料流動の観察という観点から論じた点が特に先駆的だと思う。図9に示される刃先から端面にかけての大小の粒状流れと、同一部分のレプリカ観察により、材料はダイス穴無いへ食い込む一方、端面では外向きに滑っていることを知った。また(図示せぬ)ダイス上における被加工材のすべり量よりパンチの食い込みとともに最大せん断荷重点付近までは外向きに滑るが、これ以後分離までわずかに逆向きの滑りがあったことを結論づけている。



(a) View in low magnification

(b) View in high magnification

図9 10000回打抜き後の(SKD11)切り刃のSEM写真像(被加工材:ペーナイト鋼板(青仕上げ, $t=1\text{mm}$, クリアランス $=5\%$, 潤滑剤有)

その後のせん断加工のメカニズム解明に大きな力を発揮しているのが有限要素法(FEM)による研究である。著者はFEMの専門家ではないので、以下の解説・展望はあくまで主としてユーザの視点に立ったものであることを断っておく。

尾崎龍夫らは、1994年の時点で、せん断加工は極めて狭い領域に厳しい変形を生じさせる非定常加工であり、さらに加工後期には破壊をとまうため、厳密な解析は困難であるとしていた²¹⁾。高石和年らは1980年に弾塑性有限要素法を用い、せん断加工初期における、塑性域の進展などを調べた²²⁾(図10)。この図から降伏はパンチ刃角に接する要素から始まり、続いてダイ刃角に接する要素が降伏し、さらにパンチ行程が進むと両刃先を結ぶ薄い層に沿って塑性域が伝搬してゆく事がわかる。この研究はまだ有限要素法が確立していなかった時期の研究である。先駆的であり、図1のBachの研究を彷彿とさせる。

さてその後しばらくはFEMを利用したせん断加工メカニズムの研究は著者の知るところでは見当たらない。多分せん断加工がFEMの解析手法で十分にfeasibleとなるのには種々困難があり後回しになったのであろう。その後日本において鍛造法解析において木原茂文らにより剛塑性FEMを基本とするも、ユーザにとってわずらわしいリメッシュの必要

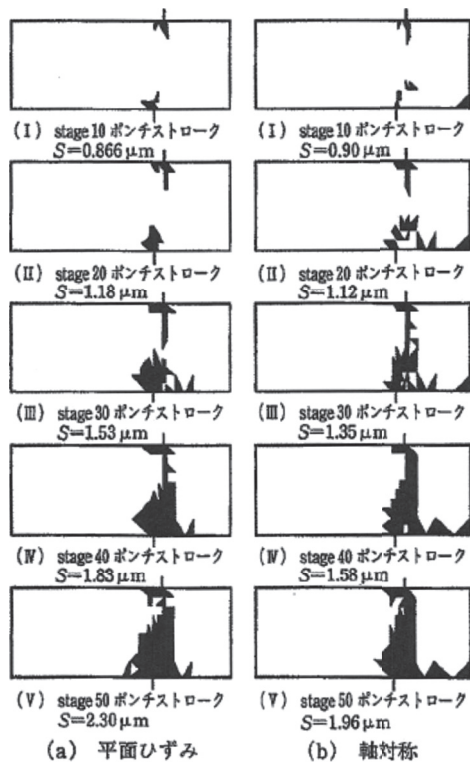
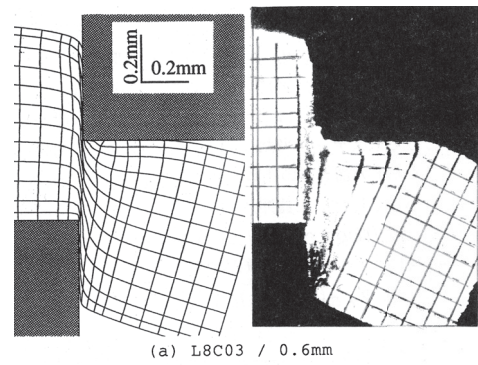


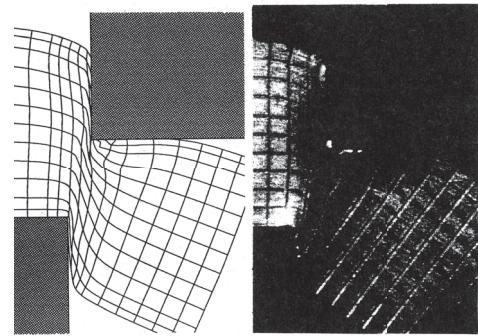
図 10 弾塑性 FEM を用いてのせん断加工塑性域の進展を調べた図

の無い新しい方法（パーティクル流れモデルの手法）が提案された²³⁾。この方法では本質的にリメッシュが不要であり、またメッシュの再配置をうまく工夫すれば工具刃角部近傍の特異点における非定常変形を常に細かく解析する事が可能である。そこで竹増光家らは 1995 年にこの方法を使って板材のせん断加工の数値解析を試みた²⁴⁾。直刃による板材の片面せん断加工に適用した結果加工初期から工具押し込み量が板厚の 80% に至る加工後期迄の行程をリメッシュなしでシミュレートとする事が出来た。図 11 に工具押し込み量ともなう材料の変形挙動が解析（左）と実験（右）の結果と比較し示されている。図よりクリアランス内のせん断変形、上工具刃角部で材料繊維が徐々に断ち切れながら加工が進行してゆく様子、だれ込み部や抜き屑の変形状態などは解析結果と実験結果で良く一致している。この後 1996 年になると、FEM による本格的なせん断加工解析の研究が Taupin らによって行われた²⁵⁾。この時点では彼らの FEM コード (DEFORM-2D) の目的は材料の破壊をシミュレート可能とすることであった。

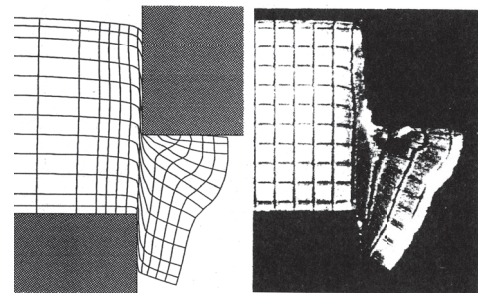
このため、彼らのコードではまず延性破壊を予知し、該当要素を除去し分離を実現するようにした。彼らによると、これまでの研究では連続的なリメッシングを施すのみだったので、だれの大きさおよび部分的にかえりの大きさのみが予想出来たとする。ここで用いる破壊の基準（クライテリオン）は「損傷値」を応力、歪のみで記述できる McClintock の基準式²⁶⁾を用いた。破壊が生ずる領域はメッシュが密に切っているため、破壊後該当メッシュを除去しても（体積一定の観点からは）無視できるとしている。図 12 は軟鋼板 ($t=0.8\text{mm}$)、刃先丸み $=0.05\text{mm}$ 、クリアランス $=15\%t$ の場合における、切り口面の実験結果及びシミュレート結果をそれぞれ示している。同じころ、日本でもせん断加工の数値シ



(a) L8C03 / 0.6mm



(b) L8C13 / 0.6mm



(c) L3C03 / 0.6mm

(Unit : mm)

	L8C03	L8C13	L3C03
Cutting of length	0.8	0.8	0.3
Clearance	0.03 (3%)	0.13 (13%)	0.03 (3%)

図 11 直刃による片面せん断の場合の材料変形挙動（アルミニウム A1050P-H24、無潤滑、工具食い込み量：(a), (b), (c) とも 0.6 mm, 左：シミュレーション, 右：実験）

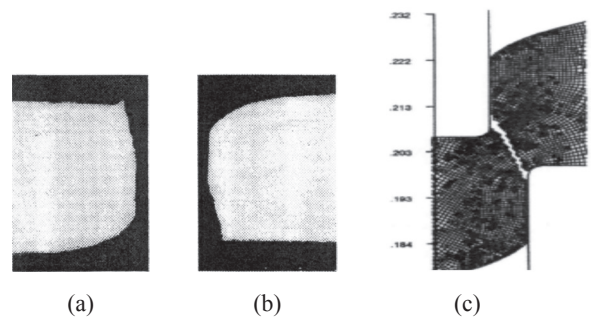


図 12 せん断加工切り口の比較

〈(a): 抜き落とし側, (b): 穴側, (c) がシミュレート結果〉

ミュレーションへの本格的な研究が小森和武によって開始された²⁷⁾。彼の手法では破壊時に節点を Taupin らのように除去するのではなく分離しているのが特徴である。

図 13 には彼の最新の研究結果を示す。破壊時の節点の処理方法とともに破壊のクライテリオンも重要な因子と考えられる。彼は従来良く用いられる、Cockroft らの式²⁸⁾、Oyane の式²⁹⁾の式のほか、Brozzo の式³⁰⁾も用いてシミュレーションの結果比較を行っている。ここでは実験結果と良く合致していると思われる Cockroft の場合のみ引用しておく³¹⁾。

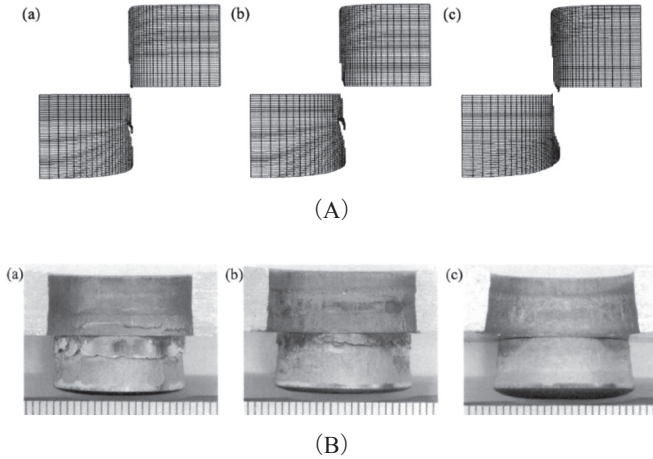


図 13 軟鋼厚板 ($t=9\text{mm}$) の穴あけにおける切り落とし部と穴部の切り口面比較 (A) : シミュレーション, (B) 実験, クリアランス (a):3.3%, (b) :5.6%, (c) :11.1%, 素材径 :40mm)

さて、格子線解析法 (Visioplasticity) は材料の変形挙動を実験的に調べるために最も頻繁に用いられる方法であり、特にせん断加工においては、き裂発生後の挙動も追跡できるので有用な解析方法である。しかし、円形打抜きのような閉曲線輪郭の打抜きのように材料の子午線断面における変形挙動を Visioplasticity により調べる事は、通常の方法では試料の中央合わせ面が分離するために難しい。そこで、子午線断面に格子をけがいた半円状の試料を接着して、それをリング状

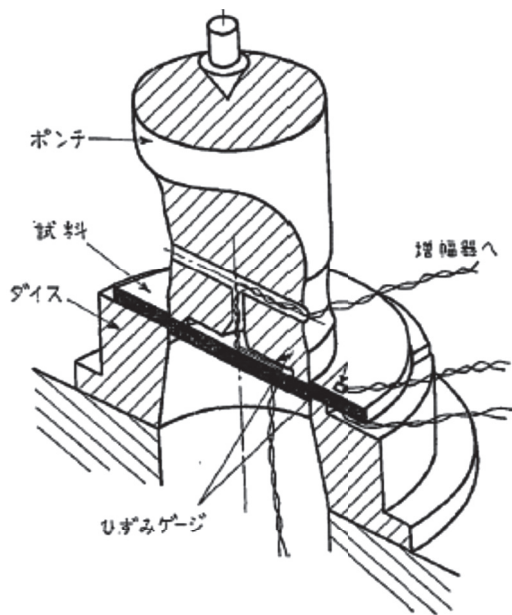


図 14 閉曲線輪郭の打抜きにおける材料挙動を調べるための Visioplasticity 装置

の試料にはめこみ、同試料上面にひずみゲージを直接貼り付ける方法を組み合わせる事により主要変形域周縁の材料流動が春日保雄らによって調べられている³²⁾。

図 14 の装置により、例えば、すきま部の材料過不足を工程につれて測定することにより、すきまの大きな場合ほど、工程の初期において破断しやすい条件がもたらされることを確認している。

前述の研究²³⁾ に関してのべたように、せん断加工の FEM 解析の問題点の一つは変形にともなう要素のゆがみが大きくなり計算続行が不可能になる可能性があることであつた。そこでリメッシングを自動的に行いたい欲求が出てくる。湯川伸樹らはこの問題を解決できるアダプティブ・リメッシング法を開発し (1995 年)、これをせん断加工の解析にも応用した。古閑伸裕らはこの解析結果の検証を、彼らが開発した応力・ひずみ自動測定装置³³⁾ を使用しやはりリメッシング Visioplasticity 法を用い³⁴⁾、解析を行った³⁵⁾ (図 15)。

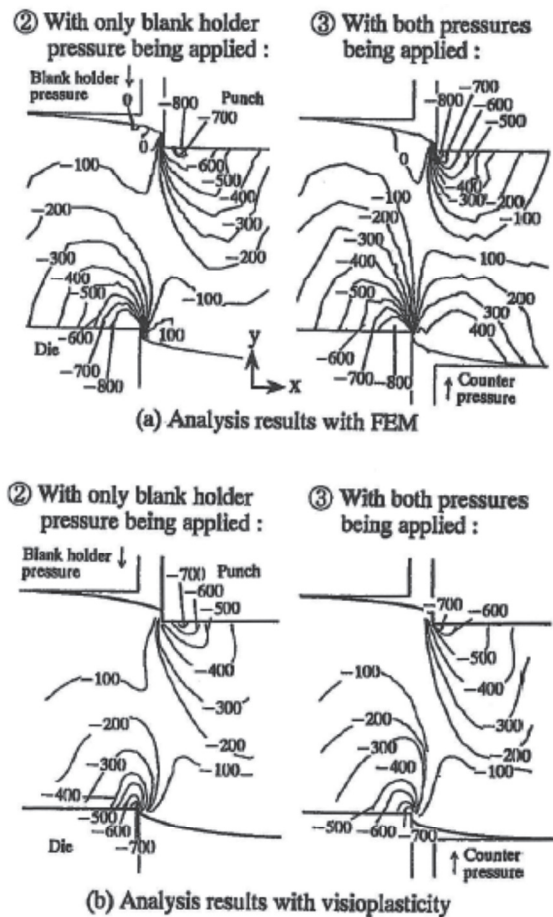


図 15 σ_y の分布の理論解析値 (a) と実験値 (b) の比較 (工具食い込み量 :15% t , $C=10\%t$, オフカット長さ $L=2t$, SS400 材)

その結果、FEM 解析で得た材料内 σ_y の分布と Visioplasticity によって得られた分布に良い一致が見られた。その他にもこのシステムを用いれば、材料分離間近な大きな工具食い込み段階におけるせん断工具刃先付近の面圧分布を正確かつ容易に推定できること、比滑り量も同時に測定でき、これらのデータを利用し材料拘束の違いによるせん断工具摩耗形態の差異なども定量的に解釈できることを明らかにした。

これらの Visioplasticity 法における歪の値を算出するため

の方法を改良した方法が高橋俊典らによって開発され³⁶⁾、また同方法がだれの形成に及ぼすクリアランスの影響について調査された³⁷⁾。その後 2003 年には、これまで破壊節点の取り扱いを、要素の除去または節点の分離で行っていたが、これらの手法ではき裂形状や（特に）き裂進展方向が要素の大きさや形状、種類によって規定されかねないという恐れがあったことに鑑み、より簡便な方法としてき裂の空孔体積率によって破壊節点を取り扱う方法が開発された³⁸⁾。この方法では、空孔の影響を考慮した降伏関数として修正 Gurson 型降伏関数³⁹⁾を用いており、その結果き裂形状は要素によって直接表現されるのではなく、空孔体積率がある値（破壊臨界空孔率）を超えた領域をポストプロセッサで白く表示し、その際空孔体積率が高い領域では応力を負担しないような定式化が行われている（図 16）。

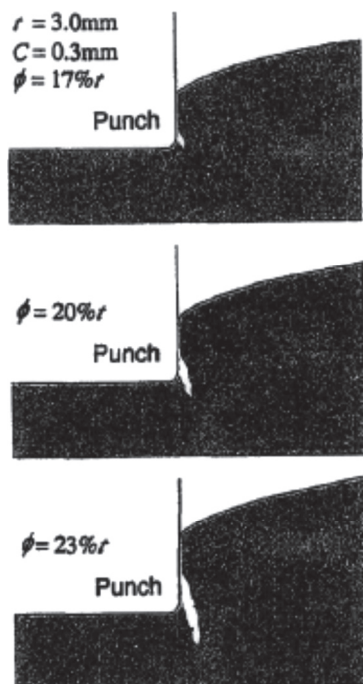


図 16 修正 Gurson 降伏関数を用いた剛塑性 FEM により求められたせん断加工におけるき裂の発生と進展（ ϕ はパンチの押し込み量を示す）

高村正人らによると、後述するファインブランクニング（FB）および板鍛造の領域において FEM 解析によりせん断後の断面性状を予測することの重要性がたかまっている。

しかしその多くは剛塑性 FEM による 2 次元解析である。かれらは静的陽解法である TP-STRUCT（市販ソルバー名 :STAMP-3D）を採用し、Cockroft の延性破壊条件式を用いて鋼板せん断時の破断面およびせん断面の形成を 3 次元的にシミュレートした⁴⁰⁾（図 17）。

実験との対比により、だれの発生が定性的に（すなわちクリアランスが小さい時（ $C=0.06\text{mm}$ ）の方が大きい時（ $C=0.6\text{mm}$ ）よりかなり小さくなっていること）を検証している。

前述したせん断工具摩耗形状についてのシミュレーションについて触れておく。R. Hambli(2001 年)の研究⁴¹⁾は破壊が生ずるまでのせん断変形において工具摩耗モデルを導入した

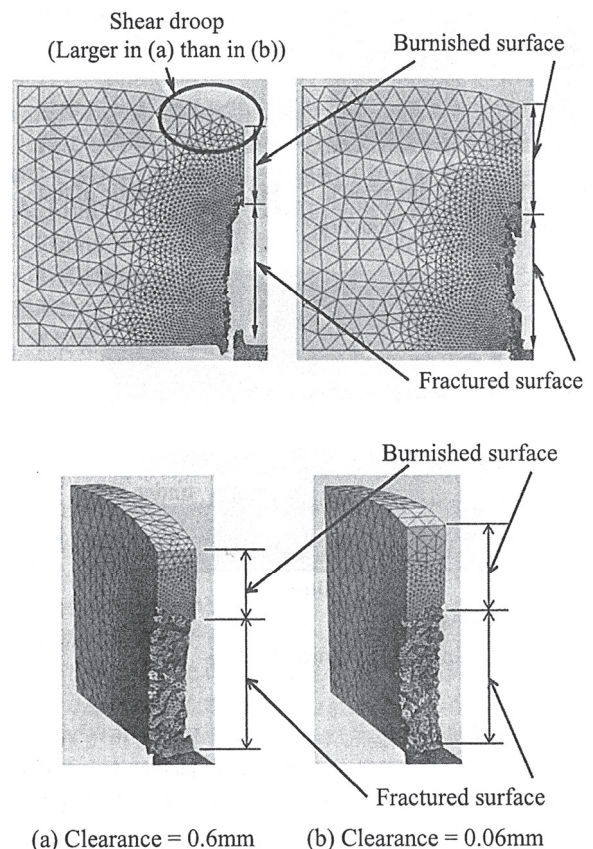


図 17 厚板（ $t=6\text{mm}$, SCM415 材）のせん断加工シミュレーション結果

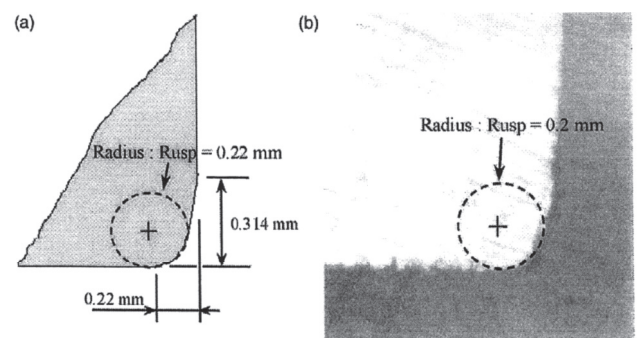


図 18 板厚 $t=3.5\text{mm}$ 、クリアランス $=10\%t$ の円形打抜きにおける 20000 回打抜き後の刃先形状比較
((a):FEM 解析による, (b): 実験結果)

剛塑性 FEM により工具摩耗プロファイルを解析し、20000 回打抜き後における工具刃先摩耗（丸み）と実験値が一致した（図 18）としている。使用した被加工材材質が記載されていないなどの不備な点もあるが先駆的研究のように思われる。せん断加工の FEM 解析が実加工においても有用となり得る一つの分野がこの工具摩耗の分野であり、より具体的にはかえりの大きさによって工具再研磨の時期を推定するという事案であろう。

従来のさまざまな実験的知見より、かえりに最も大きな影響を与える因子が工具刃先丸みであるのが判明していることに鑑みると、良い摩耗モデルを確立し、これを組み込んだ FEM コードを以て打抜き数による丸みの変化すなわちかえりの大きさの変化を予想し、再研磨の時期を決定するという

事が期待される。

最後に FEM ユーザーの立場から、FEM ソフトの種類とその特徴を纏めておくと、静的陰解法のソフトには、JOH/NIKE, MARK, ABAQUS, DEFORM などがあり、静的陽解法には ASU、動的陽解法には LS-DYNA, JSTAMP, PAM-STAMP などがあり、それらの特徴(計算時間や解の安定性等)は表 2 に示す通りである。

表 2 FEM 解析手法の特徴⁴²⁾

解 法	静 的		動的陽解法
	陰解法	陽解法	
説くべき方程式	静的つり合い方程式		運動方程式
FEM の構造	全体剛性方程式を解く		節点毎独立した解を求める
解の方程式	板形成問題では解が収束しないことがある。	安定	安 定
増分ステップの大きさ	大	小	非常に小
一増分ステップに要する時間	かなり長い	長い	短 い
一部分の成形計算に必要な増分ステップ数	数百	数千	数 万

付言すると、牧野内昭武によると⁴²⁾、静的陰解法では各時間増分ステップ内で繰り返し計算を行い、そのステップの最後で必ず釣り合い式を満足するよう解を求めるので、力学的には正確だが、板と工具の接触状態が刻々変化するので計算の収束が得られない恐れがある。接触の微妙な変化に対しても解が安定して得られるのが動的陽解法である。しかし、もともと衝撃変形を解くためのソフトであるが故、増分ステップ数が莫大になるという無理があり、特に静的な釣り合い状態を求める必要のあるスプリングバック過程の計算を正確に行うのは困難である。その点、静的陽解法は適しているが計算時間が長くなるという短所がある。反面工具と板との間の微妙な接触状態の変化に対しても計算は安定で精度のよい解が得られるという重要な長所がある。そうだとすれば、文献⁴⁰⁾のような解析・シミュレーションを薄板のせん断加工におけるスプリングバック(そり)や湾曲の解明にも活用してもらいたいものである。

3. せん断実加工における進歩・展望

ここでは、実加工の例として、リードフレームの打抜き、精密打抜き(ファインブランキング, FB)等を取り上げる。その前に、歴史的観点から、せん断実加工として最初に取り上げられた時計歯車の製造に触れておく。昔から時計部品(歯車)は数の上ではかなりの量製造する必要があったが、日本では戦後はじめて福井伸二らが切削加工(ホブ切り)ばかりでなく塑性加工(打抜き加工)によっても、条件を選べば(例えばクリアランスを小さくすることで)これと比肩できる精度のものが製作可能な事実を実証した(1950)⁴³⁾。しかしながら、時計部品を最初に金型(パンチブロック、現在のユニセット金型)およびプレスを使用して、部品相互の交換性を担保した生産技術は実は米国においてすでに 1870 年代に実施されていた事がレポート⁴⁴⁾よりわかる(図 19)。このレポートは当時米国の安価なウォッチにシェアを大幅に奪

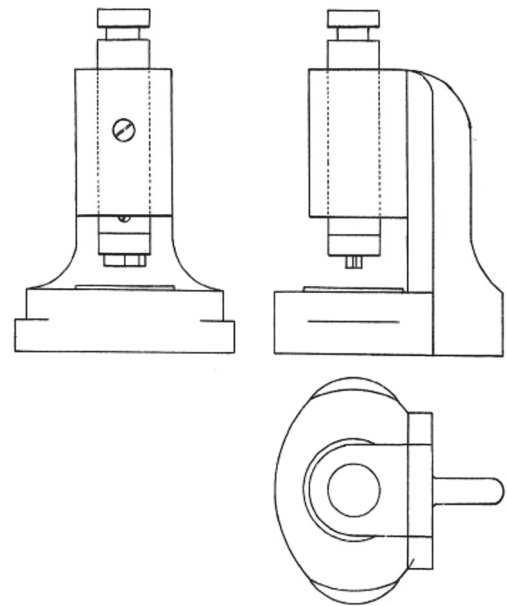


図 19 米国において時計部品を大量生産するためにプレスに取り付けて用いるパンチブロックのスケッチ図 (Jacques David レポートによる)

われていたスイスの時計会社ロンジンの若き技師長 J. David (後の同社取締役)が米国建国 100 周年を記念してフィラデルフィアにて開催された万国博覧会を機に、米国のウォッチ製造生産技術をひそかに(産業スパイ的に)調査し、スイスとは全く異なるプレスを用いた大量生産方式を見聞して、特に部品相互の互換性を保証する生産方式に驚愕するとともに、帰国後スイス同業者に警鐘を鳴らしているのである。

3.1 リードフレームのせん断加工

図 20 には半導体用リードフレームの例を示す。

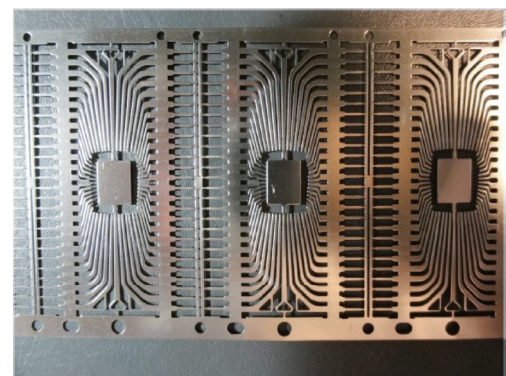


図 20 IC 用リードフレームの例

プレス打抜きで製作されているものは現在 MAX256 ピンにもなっており、プレス加工によるものはこれが限界と思われる(これ以上のピン数の場合はケミカルエッチングで生産される)。板厚 0.25~0.15mm の打抜きプレスリードフレーム材には次の事項と精度が要求される⁴⁵⁾。①平面度が保たれている事。②XY 方向はもちろん、Z 方向の精度もミクロン単位の加工が必要。③バリ(かえり)やダレがないこと。④うち傷やそりがいないこと。被加工材に問題が無ければ、これらの事項が満足されるかどうかは設計時に図面に入れ込んだ事項が

プレス機械の動的精度を介して転写されるということになる。

文献⁴⁵⁾の著者によるとプレスの動的精度としては、

1) 下死点位置精度と2) スライドの振れ(縦振れ, 横振れ, 傾き)が特に重要であるという。彼の経験によると、

1) 下死点位置精度については: ①回転数によって下死点位置が異なる。②連続運転中に下死点が変化する。③プレスはある時間止めると、その前後で下死点位置が異なってくる。④プレススタート直後の数ストロークとその後における下死点位置が変化する。⑤同一メーカ、形式プレスでも、同一金型をセットした後、回転数(spm)によって下死点位置変動が相当ある。

2) スライドの振れについては: ①偏心荷重がかかると、金型の構造および剛性によっては製品精度に影響する。②金型ポストの摩耗に不均一な摩耗が生ずる。③プレスを変えると、同一型でもプレス加工クリアランスが変わる場合がある。これは金型のポスト、リテーナ、ブッシュなどの構造・精度の改善で防止できるなどの知見が得られている。

神馬敬は日本塑性加工学会せん断バリ研究委員会の講演会において、理論的、実験的な考察から、上型の水平変位は二重ガイド金型を用いれば一重ガイドの場合に比べて1/2以下に減少させ得る。一方、上型の傾きは二重ガイドの方が一重ガイドより小さいがその差はあまりない。つまり、上型の水平方向変位は金型の剛性を高める事によって小さくすることが出来るが、上型の傾きはプレスの剛性と精度によって決定され、金型の剛性をたかめても傾きは殆ど小さくならないことを述べた⁴⁶⁾。神馬 敬らはその後もリードフレームの設計指針になるような実験・考察を精力的に行ない、リードの横曲り、そり、ねじれについて、①リードのそりは常にかえり面を外側、だれ面を内側とする湾曲になる、②リードのねじれはリード側面の後抜きによる引き込みによって生じる、③板押さえ力またはリード幅を小さくすると、リードは後抜き工具に近寄る方向へ横曲りを生ずる、④リードは、両側面の打抜き工具クリアランスが小さい側から大きい側へ横曲りを生じる、⑤リードは、先端を工程の最初に打ち抜くほうが、最後に打ち抜く場合に比べて、後抜き工具へ近寄る方向に横曲りが生じる、⑥打抜き工具が摩耗すると、打ち抜きクリアランス差(0~20 μ m)および板押さえ力の強弱に関係なく後抜き工具へ寄る方向に横曲りを生じるという知見を示し、さらにこの知見を説明するモデルを提案している⁴⁷⁾(図21)。研究⁴⁸⁾

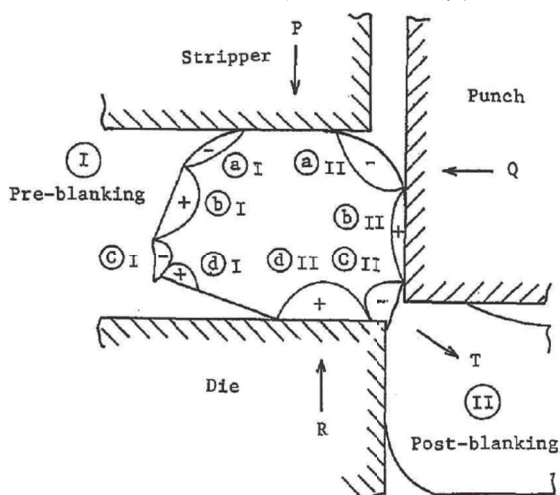


図21 リード変形のメカニズムを説明するモデル

においては①高速打抜きではストリッパーの振動を生じ、板押さえ力が十分に作用しなくなるため製品精度が低下し、提案したストリッパーの振動モデルにより、この振幅がプレス運転速度の2乗に比例することを示した。②ストリッパーのばね力を強くし、かつストリッパーのストッパーの高さを素材高さにほぼ等しくとって、ストリッパーの素材との衝突後の弾性たわみを減少させる事が、高速運転時における製品精度向上に有効である事を確認した。研究⁴⁹⁾においては、研究⁴⁷⁾と同様な実験・考察をL字形のリードについて行った。

さて、電子機器に用いる半導体リードフレームは製造の主たる場がコストの安くて済む海外に移管されて久しいが、最近これにかわり自動車用制御機器に用いるリードフレーム、いわゆる「パワーカード」が国内での需要を伸ばしている⁵⁰⁾(図22)。図22より、自動車用パワーカードは電鉄などの社会インフラ級のアプリケーションから、ホーム・エレクトロニクス製品に相当する幅広いレンジの製品が搭載されていることがわかる。

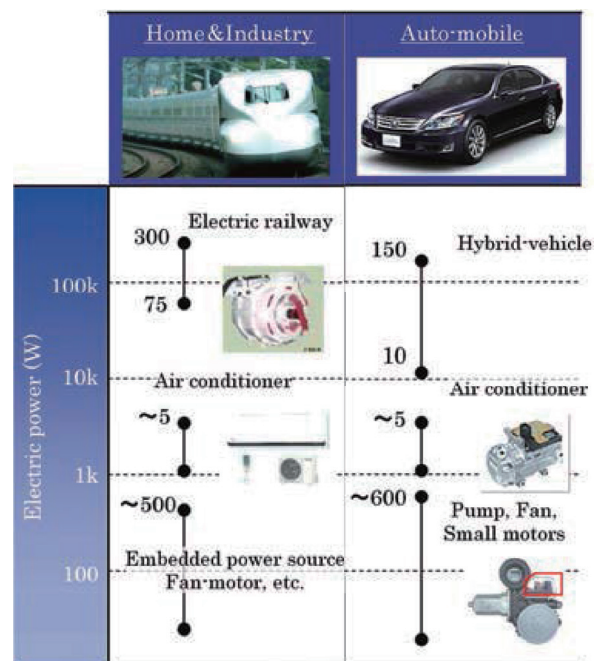


図22 パワーエレクトロニクス製品における、一般製品群と自動車用製品の扱うパワーカード電力の比較⁵⁰⁾

このため、車載向けパワーカードでは、「高機能化」、「高出力密度化」、「信頼性」のほか「低価格化」という技術的に厳しい要求事項を満足させる必要がある。しかしながら、最近のハイブリッドカーに使用されるパワーカードは少なくとも20枚以上の多数と考えられ⁵¹⁾、ビジネス的には極めて魅力がある。そのため、経済産業省のいわゆる「サポイン事業」にも取り上げられた^{52), 53)}。

ここで対象としている被加工材の厚みは従来リードフレームと異なり0.5~3mmと厚く、しかも銅合金の「異形圧延コイル」を使用している⁵⁴⁾(図23)。研究開発^{52), 53)}の詳細はそれらの成果報告書に譲るが、概要を述べるならば、現状のパワーカード順送加工の問題点は、工程が多い⇒したがって金型が大型化し、金型重量が増加⇒高spmでの加工が困難になる⇒加工速度の低下⇒製品単価の上昇という結果をもた

小さくする事が必須，②ダイ切れ刃の丸味は製品のだれや，わん曲が大きくなりえない程度につけることで，切り口面の品質が向上する，③慣用の打抜きに比べてだれは小さくなるなど，FB法の利点を引き出すための基本的指針を解明，ほぼ確定している。

その後のFB法の発展の経緯を概観すると，最初は事務機器に適用されていたのが，日本の自動車産業が急激に発展するにつれて，少なくとも日本においては自動車産業向けの適用が急速に増大した．その第1段階としては，加工板厚の増大である⁶¹⁾ (図26)．

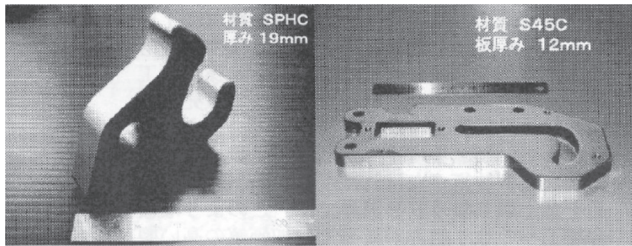


図26 FB法の能力を活かした極厚板の打抜き例

次なる段階は，FBと鍛造の複合化である．このような概念が提案され，実加工で初めて平歯車部品に実施された例が文献⁶²⁾に開示されている．この考え方は現在FB業界で主流の技術となっている板鍛造と呼ばれているものであり，先見性が伺える．板鍛造の最新実加工例を図27および図28に示しておく⁶³⁾，⁶⁴⁾．

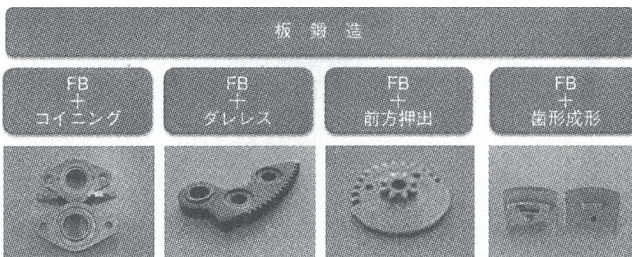
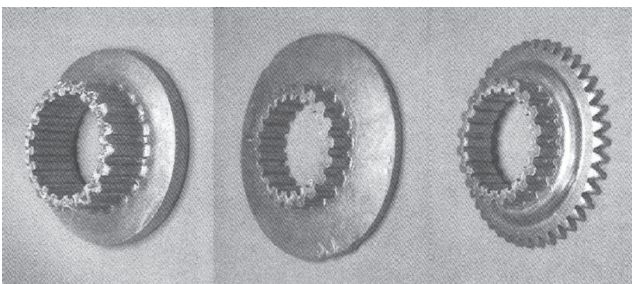


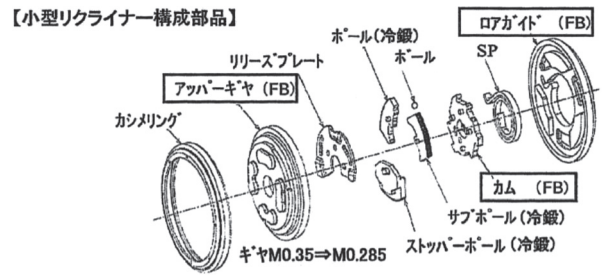
図27 FBと鍛造の複合板鍛造例



(a) パーリング (b) つぶし (c) せん断加工

図28 種々塑性加工による板鍛造トランスファー加工例

精度的にFB加工でないと出来ないと言われている製品にマニュアルシート・リクライナーという部品がある．シートは将来自動車が電気自動車になろうが水素自動車になろうが，必ず必要な部品であるゆえに，又シートの単価が高い故に，その製造技術においても熾烈なグローバル競争が行われている．図29は同部品の分解図と，これまでの性能動向を示し



【リクライナー動向】

現在量産品

	'02年	'09年	'12年	'09年比
製品重量	367g	350.5g	238.7g	▲32%
外形	Φ80	Φ80	Φ65.8	▲18%
厚み	14mm	14mm	14.2mm	+0.2mm
静的強度	1,900Nm	1,900Nm	1,900Nm	=
回転ガタ量	0.8mm	0.8mm	0.5mm	-0.3mm

図29 小モジュール高精度ギヤ製造への取り組み

てある⁶⁵⁾．

これと同様な性能のFBによる高精度歯形の成形法が開発されている⁶⁶⁾．両技術の共通点は歯車のだれを小さくするために，後述するように，負のクリアランスを活用している事である．なお，東洋精密プレスによればFBによる製作可能な微小モジュールの限界は，現在のところ金型製作法・工作機械精度・金型寿命等から0.3mmあたりであるとしている⁶⁷⁾．

なお，クラウニング付与の技術レベルには達していないが，FBによるヘリカルギヤの成形技術が開発されている事を付言しておく⁶⁸⁾，⁶⁹⁾．

その他，FBに関連するトピックを取り上げる．①順送加工に適したFBプレス：前述の板鍛造工法に適した順送工法に十分応えられるように，従来のFBプレスが備えている直径300~500mmのインサートリングを楕円形かつ厚さを1.5倍に広げたものが開発された⁷⁰⁾ (図30)．図示のように，高剛性のスライドガイドが上下テーブルの間に組み入れられている．②FB加工へのトランスファー金型採用：順送加工ではパイロット穴が必要だが，これが材料の歩留まりを悪くする．トランスファー工程が可能となれば，分割された各金型ごとに最適な荷重が掛けられるのでより高精度な加工が可能

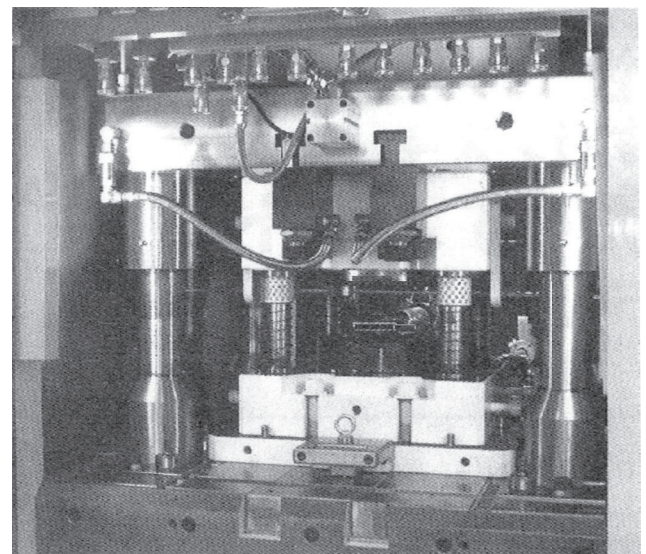


図30 横方向に長くなったインサートリング上に設置された，偏心荷重に耐えられる金型セットの概観

になる⁷¹⁾ (図 31)．③高剛性多軸油圧 FB プレス：このプレスでは、従来順送またはトランスファーで多くの工程を経て成形していた製品を、材料歩留まりの改善を考えて、事前に単片に分離した材料をトランスファー装置で供給し、複数のシリンダーを用いてすべての成形を材料を移動させずに完了させる、いわゆる「縦順送」方式である．これによれば、従来の順送加工の場合は総合圧力 11, 850kN 必要だったものが 4000kN で済むようになり、設置スペースの大幅な節約が可能になる⁷²⁾．その他 FB に関する最新の情報については文献⁷³⁾を参照していただきたい．

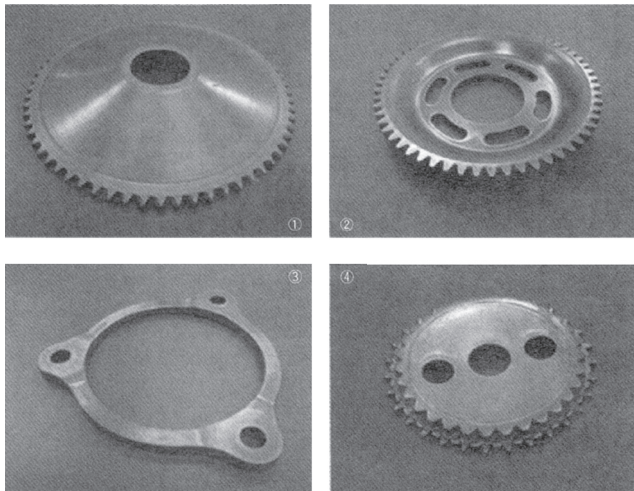


図 31 トランスファー金型を使用した FB 加工製品の例

①ギヤ、②ギヤ、③フランジ、④スプロケット

3.3 その他の板材精密せん断加工技術と関連技術

3.3.1 対抗ダイスによるかえり、だれ無しせん断

近藤一義は負のすき間によるせん断法（対向ダイス法）を創案した⁷⁴⁾．これは切削機構を利用した方法なので、またダイ切り刃に FB のような丸みを付ける必要が無いので、かえりも抑制出来、だれもなく、延性の無い材料のせん断も可能となる純国産の技術であった．その後実加工への適用の可能性も検証された⁷⁵⁾．しかし、工具動作が複雑なことや加工因子が多く加工条件の最適化が難しいといった問題があり、工業的な普及に関してはごく限られた範囲に限られた．そこで、近藤一義はその簡便化についても創案した⁷⁶⁾ (図 32)．

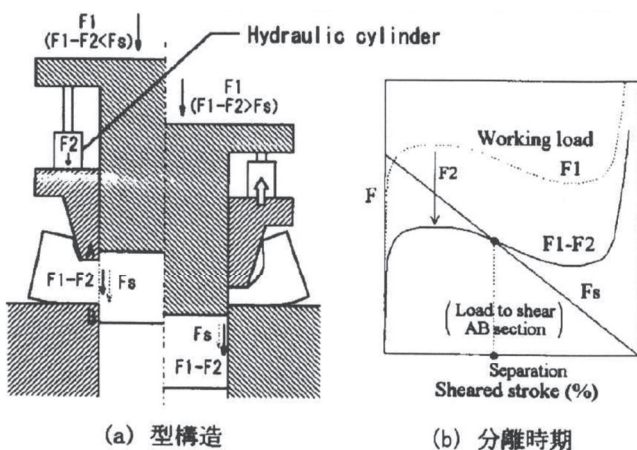


図 32 差圧を利用した分離機構による対向ダイス法の改善

図示の機構により切削工程と分離工程の連続化が図れ、これについて実際の差圧機構を組み込んだダイセットを試作し、汎用クランクプレスによる単純な加圧動作のみで対抗ダイスによる 1 工程精密せん断に成功している．

3.3.2 かえり無しせん断

先駆的な研究として、前田禎三による上下抜き加工法⁷⁷⁾がある (1958) (図 33)．

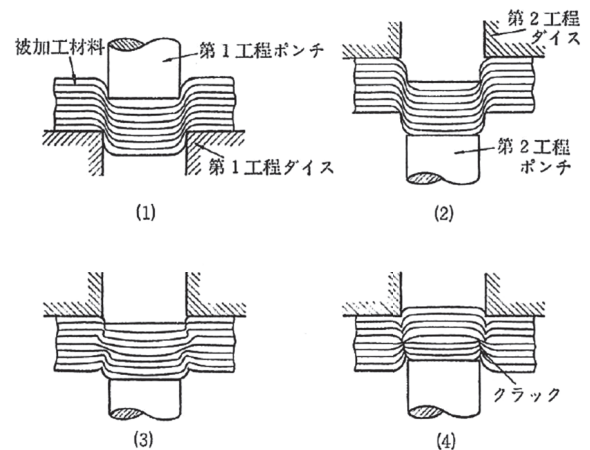


図 33 上下抜きかえり無しせん断法

この方法は創案された当時は金型の製作技術も不十分で必要な小さなクリアランスを保証できないというようなこともあり普及しなかった．しかしながら、かえりが出ないという事は板面を曲げ成形した時に割れが出にくいというようなメリットを生む．図 34 には薄板ばね材料の曲げに上下抜き（かえり無し）法が適用されている例を示す⁷⁸⁾．

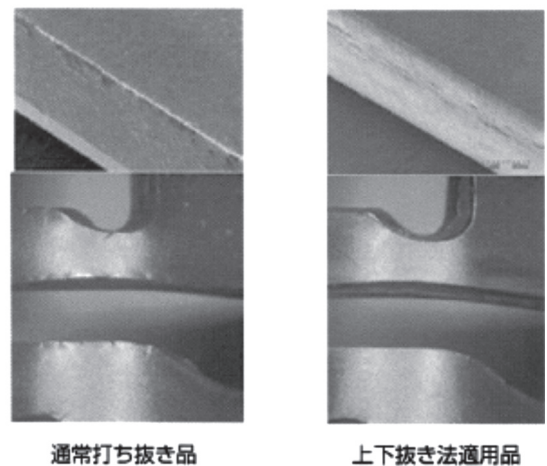
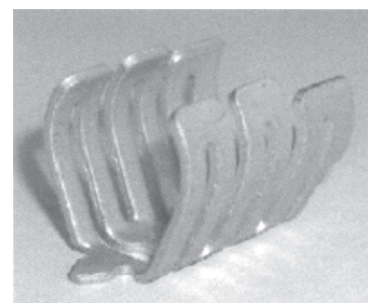


図 34 上下抜き法による曲げ割れ防止の効果

上下抜き法の「かえり無し」特性を活かしたい分野に極薄板の積層分野がある（例えばトランス用基盤板）。このような分野ではわずかなかえりでも何百枚も積層すると端面が盛り上がり不具合となる。しかし、たとえば $100\mu\text{m}$ 程度以下の極薄板を上下抜きするためには、工具クリアランスを $1\mu\text{m}$ 以下とし、パンチストロークもミクロンオーダーで制御する必要がある。そのような要求に応えられる上下抜き装置が先駆的に開発された⁷⁹⁾ (図 35)。

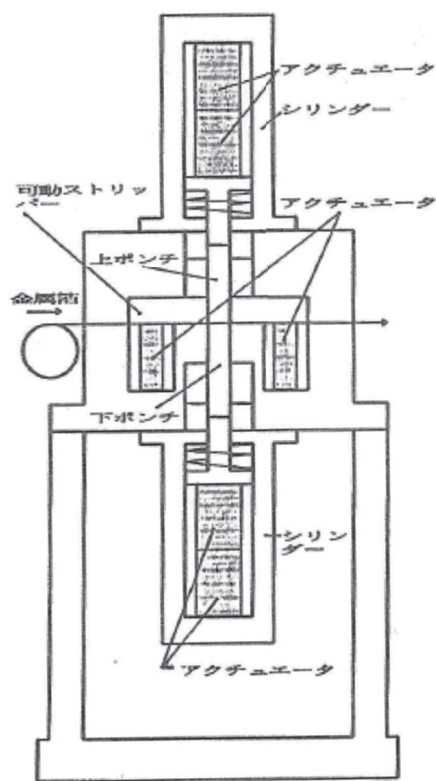


図 35 極薄板用の上下抜き装置（ピエゾプレス）

このピエゾプレスには圧電セラミックに誘起される厚さ方向の伸び歪が利用されており、試作プレスでは、最大発生力が 2800kg 、最大発生ストロークが $50\mu\text{m}$ 、 60spm で作動可能であった。これにより、 $t=50\mu\text{m}$ の SUS304 箔がかえり無しで打抜かれた。上下抜き法の簡易版に「平押し法」がある^{80), 81)}。1 工程目の半せん断は上下抜き法と同様であるが、2 工程目を 2 枚の平板で押圧しているところが要点である。ただし、第 2 工程では板厚と同じ厚さまでしか押し戻せないため、上下抜きとくらべてストロークが制限される。すなわち、第 1 工程では破断を生じさせずに板厚の半分以上の半せん断をする必要があり、そのために負のクリアランスを使用せざるを得ない。そのため、得られる製品の断面形状が「コッペパン」状になり、横バリ状のものが発生する可能性がある。

このような方法を閉輪郭形状の部品の製作に利用しようとすると、平押しの際の被加工材同士のこすれによる切粉が発生しないよう第 1 工程の加工条件選定に注意を払う必要がある。その点、スリッターなどのように被加工材の切断線が開輪郭の場合は同問題が無い。そのようなかえり無しスリッティング法が前田禎三らによって開発されている⁸²⁾。

シヤーの分野においても村川正夫らはかえり無しローリングカットシヤー（RCS）を創案し、かえり無しの特性のみな

らず、切断代が小さい時のボウ、ツイスト、キャンバーのような形状不良を防止できることを検証した^{83), 84), 85)}。

古閑伸裕らはサーボプレスを利用したかえり無しせん断法を創案している⁸⁶⁾。NC サーボを用い、プログラムによりスライドの上下動を正確にコントロールできれば、慣用の単抜き型を用いた場合においても、1 工程でのかえり無しせん断が可能なることを実証している。

ここで、ギロチンシヤーの設計に役立つと思われる、弾塑性 3D 有限要素法（ABAQUS コード）による同シヤーの切断解析を行っている研究⁸⁷⁾を紹介しておこう。例えば、図 36 にはシヤーの切断荷重の FEM による予測値が示されているが、しっかりと定常切断荷重が予測されている。

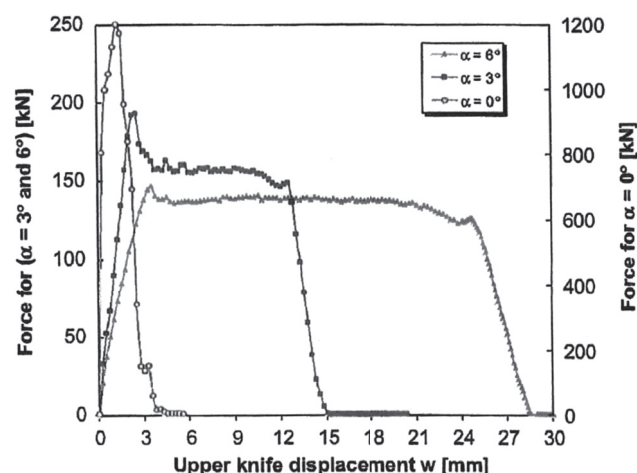


図 36 FEM で求めたギロチンシヤーの定常荷重予測
(材料：引張強度 740MPa , $t=10\text{mm}$ の鋼板, 切断長さ $=240\text{mm}$, クリアランス : $5\%t$)

3.3.3 だれ無し（だれレス）せん断

せん断加工で機能部品を作製する時に常に問題となるのがだれである。生島幸一らはナイフ刃パンチによるコイニング後に打抜き加工を行う方法を創案した⁸⁸⁾。この方法は負のクリアランスによるせん断やナイフエッジによる押し込みの際生ずる材料の盛り上がり第 2 工程のせん断時に生ずる材料不足分の穴埋め用に使用し、結果的にだれを極めて小さくしようという考え方に基づいている。

広田健治は、パンチをダイに嵌合させて材料を分離させるにはクリアランスをゼロ以下には出来ないが、この制約がなければクリアランスをゼロ以下、すなわち負にすることも可能になるという視点から、負のクリアランスにおけるせん断特性について解説している⁸⁹⁾。その中のクリアランスによるだれの変化と加工力の変化を示す図 37 が興味深い。負のクリアランスの絶対値が大きくなるほど、だれの量は小さくなるがある値（10% 程度）を超えると漸減のみである。一方、加工力の方は急激に増大する。したがって、実加工においては、クリアランス -10% 程度のところで妥協することになるであろう。だれの形成過程を FEM により解析した結果⁹⁰⁾が図 38 に示されている。定性的には図 37 と全く同一の結果である。だれの予測において、負のクリアランスの場合はシヤー形状の領域における材料の速度ベクトルの向きがパンチ進行方向と逆方向を向いており、だれ込もうとする部分に対す

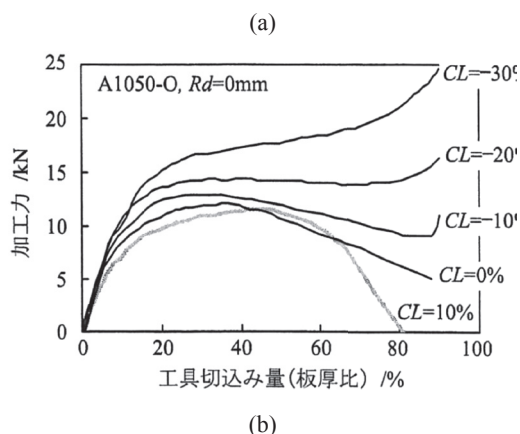
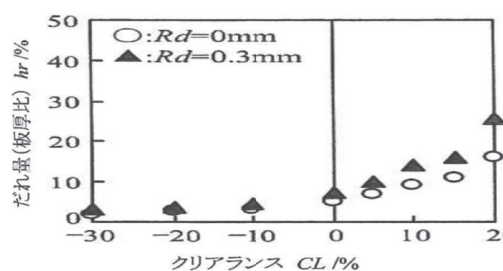
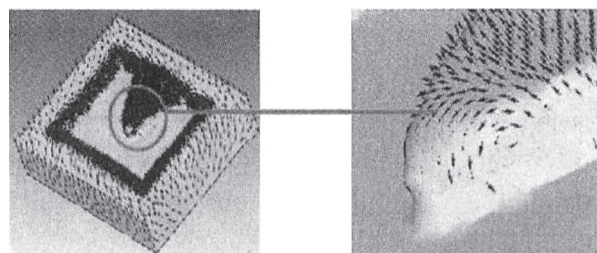
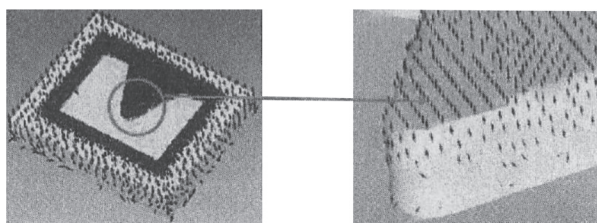


図 37 クリアランスによる,(a) だれの変化と (b) 加工力の変化 (A5052-H34,t=3mm)



(a) クリアランス = 0mm (0%_{ot})



(b) クリアランス = -1.0mm (-0.17%_{ot})

図 38 FB 加工におけるだれ付近の材料の流れを示す速度ベクトルの分布図（材料 : AISI-1035, パンチ速度 : 10mm/s, 工具進入深さ : 2mm, 板押さえ力 : 110kN, 逆押さえ力 : 55kN, 摩擦係数（想定） : 0.12）

る材料の補充がなされ、結果的にだれレスとなっている様子
 がはっきりわかる。

負のクリアランスはパンチとダイの嵌合がない前述の小モジュール歯形形成では当然その恩恵を活かしているのであるが、嵌合のある一般の打抜きではそのままでは活かせない。

すなわち切り残し部分の分離のための工夫が必要である。このあたりは企業のノウハウにも属するので、なかなか公表された文献は見つからない。公表文献の一例⁹¹⁾を紹介しておく(図39)。

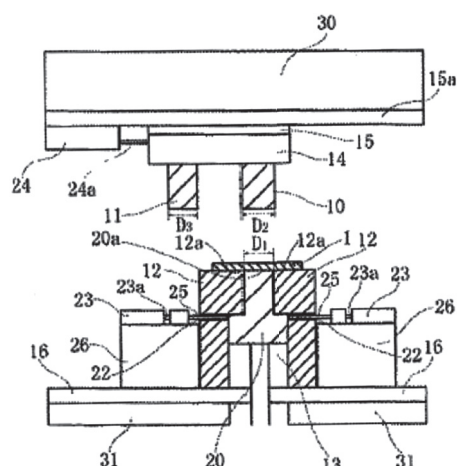
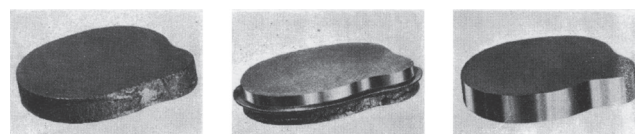


図 39 負のクリアランスで打抜き品を得るための
手段・装置の概観図

その説明をしておく。ダイ 12 に対して、ダイの穴径より少し大きい外径の押出しパンチ 10 と、ダイの穴径より僅かに小さい外径の打抜きパンチ 11 を、当該ダイに対向する位置に NC 位置制御可能に備えた金型を用いて、サーボ機構プレス上プレート 15a に連結したスライダ 15 を介して、押出しパンチをダイ上端直前まで降下させ、材料をダイの穴内に押出し、製品と端材部分を薄皮状のブリッジ部でつながった状態に加工し、押出しパンチを退避させ、つぎにスライダを横方向に移送して当該スライダに取り付けられた打抜きパンチに切り換え、当該ブリッジ部で打抜きせん断または破断するシステム。これにより平面度が良く、端面形状および端面表面が平滑な加工が行える。また薄皮状のブリッジ部を打抜くので、騒音も少なかえりの抑制、そり不良の防止も出来るとしている。

3.3.4 シェービングによる精密せん断

シェービング加工は多分スイスの時計工業において当初は多用されていたと推察される。実加工において注目を浴びた研究はテレタイプライタのような事務機器が大量生産されるようになり出現してきた⁹²⁾ (図 40)。



(a) 素材 (b) シェービング途中 (c) 製品

図 40 シェービングで製作された機能部品の例

これは重ねシェービングという方法⁹³⁾であり、パンチとダイは負のクリアランス関係で配備されている。さらに使用したプレスはスイス ESSA 社製の、パンチが振動する構造の振動プレスが用いられている。シェービングを複動プレス使用により、「双方向シェービング」をおこない、ギヤの精密せん断に広田健治は成功している⁸⁹⁾(H12 年度塑性加工春季講演会論文集, pp163-164 も参照)(図 41)。

シェーピングのメカニズムについてはすべり線を利用した解析的研究はあったが、本格的に弾塑性有限要素法を使用した研究が笹原弘之によって行われた⁹⁴⁾(図 42).

この研究では、節点分離方式の処理を行っている。同図よ

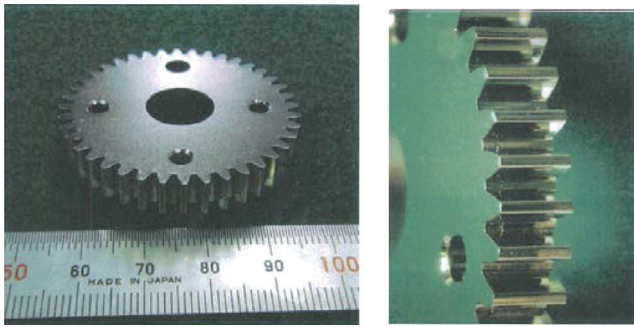


図 41 双方向シェービング法によって得られた精密ギヤーの例 (梯放電精密研究所提供, 材 :S35C, $t=6\text{mm}$, 4.5mm について成形した)

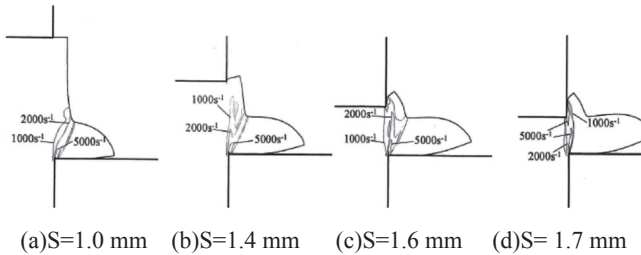


図 42 シェービング過程におけるひずみ速度の分布 (材料 : $t=2.0\text{mm}$ の 7-3 黄銅, パンチ速度 : 500mm/s , クリアランス $=0.01\text{mm}$, 取り代 : 0.1mm , S : パンチの進入深さ)

り変形域が移動してゆくのがわかる。すなわち (a) においては, ダイ刃先から取り代材料表面方向に変形域があり, 刃先と取り代材料表面を結ぶ領域でせん断変形が生じ, 切りくず状に取り代材料部が除去されている。(b) 以降では少しずつひずみ速度の高い領域が前方のパンチ側へ移動してゆき, 同図 (c) ではダイ刃先とパンチ刃先を結ぶ線上に主な変形領域が移りつつある。同図 (d) ではさらに加工が進み, ダイとパンチをつなぐ線上付近だけが変形しており, 切削的な変形は殆どなくなっている事がわかる。

最近軽量かつ強度が高く, 難加工性の CFRP (炭素繊維強化プラスチック) が話題になっているので, その穴加工について言及しておく。同材料は航空機産業では PCD ドリルで穴あけを行っているが, 自動車用途で注目されている熱可塑性 CFRP 材の穴あけにはドリルでは間に合わない。プレスによるせん断加工が望まれよう。この分野では, 横井秀俊らが先駆的研究を行い, 穴あけ装置の開発も行っている^{95), 96), 97)}。同装置のコストパフォーマンス上の劣点について改善された方法, 装置も創案された⁹⁸⁾。霍舒揚らは熱可塑性 CFRP 材をプレスシェービングで穴あけすることにチャレンジしている⁹⁹⁾ (図 43)。まだ完全な平滑面にはなっていないが, 慣用せん断加工に比べて繊維の切り口面へのはみ出しは見られない。

3.3.5 その他の精密せん断

(A) ゼロクリアランスせん断: 三田村一広はゼロクリアランスによる金型で金属箔の精密せん断するシステムを創案している¹⁰⁰⁾。生島彰之らはタブリードの精密せん断 (かえり高さ $5\mu\text{m}$ 以下) のためのゼロクリアランス金型を提案している¹⁰¹⁾ (図 44)。

シェービング前後の切口面

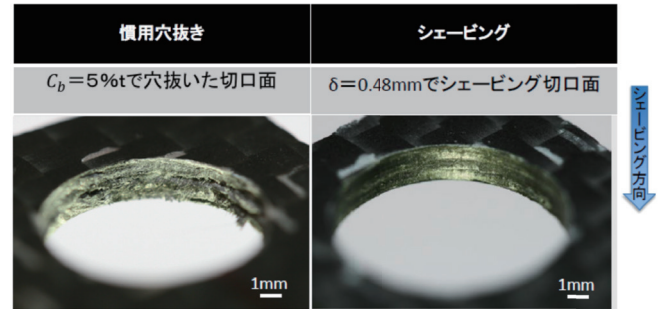
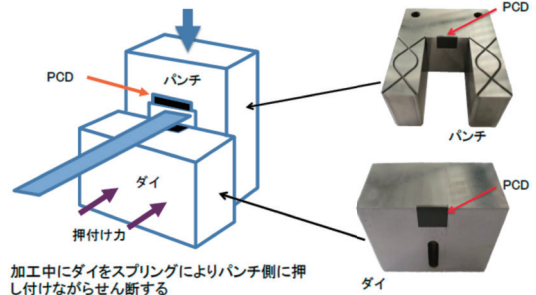
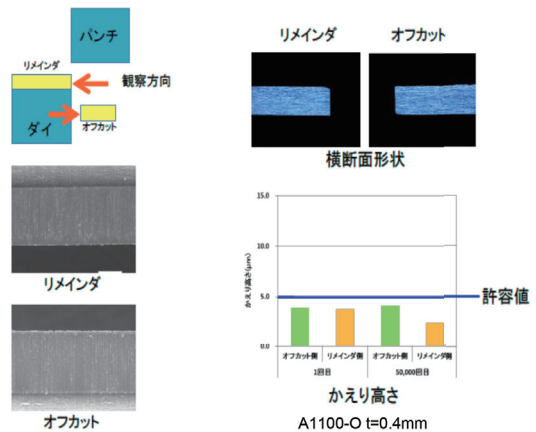


図 43 CFRP 板のシェービング穴あけ面の状況



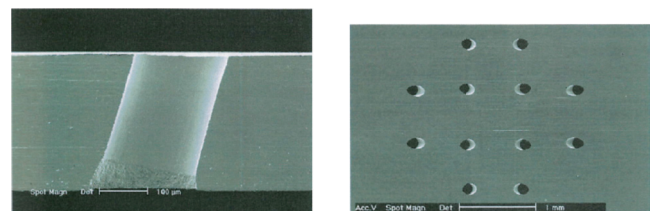
(a)PCD 製工具を備えたゼロクリアランス金型の構造



(b) ゼロクリアランス金型によるせん断実験

図 44 ゼロクリアランス金型の提案

(B) 微細斜め孔の精密せん断: 小松隆史らは時計部品加工の技術を活かして, 燃料噴射斜めオリフィスの加工技術を開発している^{102), 103)} (図 45)。また, 加藤正仁らは前記微細斜め孔打抜きにおける材料変形挙動を解明している¹⁰⁴⁾。なお, 郡司賢一らも CNC プレス加工設備を用いての斜めオリフィス加工技術を開発している¹⁰⁵⁾。



(a) 斜め孔断面

(b) 12 孔あるオリフィス

図 45 プレス加工された噴射オリフィス孔の例

積層して各種センサーを得るシステムを開発した（詳細は文献^{108), 109)}を参照）（図46）.

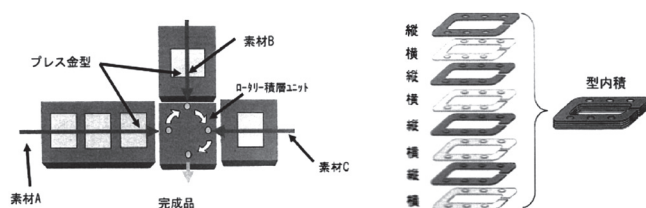


図 46 プレスシステムの平面図

(E) 回転穴あけせん断：清水慶一らは金属薄板の回転せん断について、先駆的研究を行っている^{(110), (111)} (図 47)。

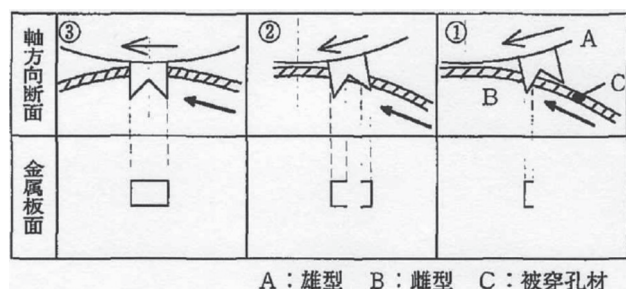


図 47 さん孔機構の模式図

その後、昭和精工においても、同様の金属箔回転打抜き技術が、二次電池や燃料電池用に開発された¹¹²⁾。

3.4 棒材、板金加工における精密せん断

3.4.1 棒材の精密せん断

日本においては、工藤英明らによって棒材のせん断加工の研究は始められたが、要は板材の精密せん断と同様せん断過程中に発生するき裂を抑制すれば良い。そのような方法が前田禎三らによって創案された¹¹³⁾。この方法における刃物の寿命試験が軟鋼線材について行われた¹¹⁴⁾が、刃物への凝着がひどく応用は困難との結果となり、その後この方法は銅やアルミニウムのような非鉄金属材へ適用されるようになった。鋼材については、打抜きにおいて高速せん断が平滑切口面を示すことに鑑み、高速クロッピング（棒材せん断）の研究が活発化した。この分野での先駆的研究が柳原直人らによって行われた¹¹⁵⁾。彼らは又、高速せん断におけるせん断線図や温度の測定も行っている。後にこの装置は苦労の末、

佐藤鉄工で実用化された（塑性と加工，40-459（1999），同社精密鍛造素材切断機，PHS50）．7m/s の速度が可能となっているが，特に切断後の余剰エネルギーの吸収技術で苦労している．一方，(株)万陽の棒材せん断機は加工衝撃の激しい高速せん断にも耐えるレバープレス機構を取っている事，切断時のみ軸圧を加えて，切断完了と同時にこの軸圧を解放する機構も備えているので高精度のピレットシアリングが可能であるとしている¹¹⁶⁾．同社によれば，切断速度は刃物の寿命，機械本体の損傷からして，0.5m/s~0.7m/s が妥当だとしている．表3に鋸刃切断とシャー切断の比較表を示す¹¹⁶⁾．なお，前述の軸力解放のタイミングを良好に制御する高速せん断実験は，村川正夫らも行っている¹¹⁷⁾．

表3 鋸刃切断とシヤー切断比較表 (φ 60.S45C 切断時)

項目\方式	鋸切断	シャー切断
生産性	6 個 / 分	60 個 / 分
切粉	切粉 2.5 mm / 個	なし
ランニングコスト	約 3 円 / 個	1 円以下 / 個
重量精度	± 0.3%	± 0.3%
直角度	直角	1 度以内
変形	なし	あり
傷、割れ	なし	あり

3.4.2 板金加工における精密せん断

板金打抜き加工の有用性は今日よく知られているが、それまでは罫書きの手作業によるものだった。ところが 1960 年代になると穴あけ用の NC パンチプレスという画期的な「工作機械」が開発された¹¹⁸⁾。その後は、米国アマダの創始者 Dennis Daniel が本格的な板金用 CNC (Computer Numerical Control) パンチングプレスを創案している¹¹⁹⁾ (図 48)。昭和 50 年代に入ると、商品寿命の短縮化と相俟って、生産様式は大量生産から多品種少量生産へと変化した。すなわち、必要なものを必要なときに、必要量生産することが要求されるようになった。それにともない、CNC パンチングプレスは事務機等あらゆる分野で活躍するようになった。昭和 60 年代にはいると、あらゆる種類の紙を扱う電子機器の急増に伴い、CNC パンチングプレスもせん断加工の段階で、継ぎ目、かえり、きずなどのない高精度板金部品加工を実現する必要に迫られた。平成になると、それまで機械加工によっていた高精度部品加工が、板金打抜き加工に移行し、レーザーに比べて生産性が高いということで、厚板材料も頻繁に加工されるようになった。これに伴い、打抜き騒音・振動の問題が深刻になってきた。これを解決するために、油圧式 CNC タレットパンチが開発された¹²⁰⁾ (図 49)。このプレスの特徴は、図 50 に示すように、打抜き時間内において、プレスの速度がぐんと低下しており、そのことが打抜き騒音低下に結びついている(在来機種と比べて騒音で 20~24dB、振動で 1/3 と

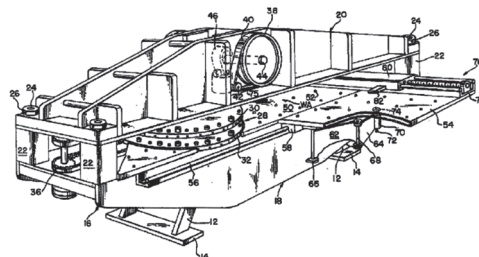


図 48 初期の CNC タレットパンチプレス

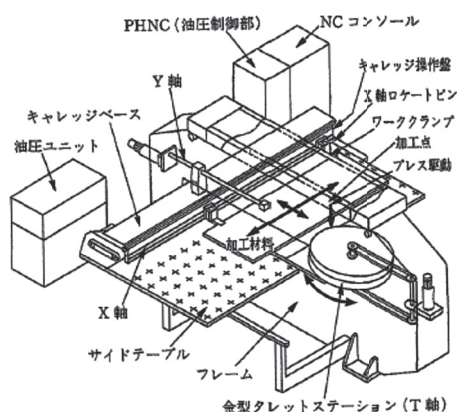


図 49 油圧式 CNC タレットパンチプレス の概要

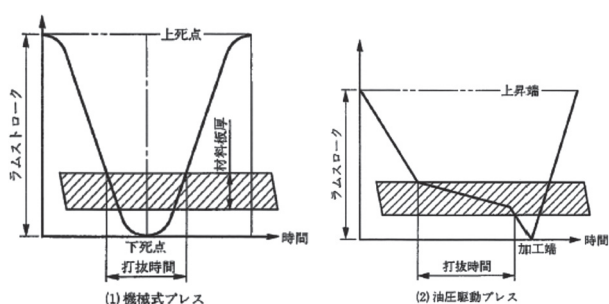


図 50 ラム変位線図に見る駆動方式の違い

なっている)。さらにこの機種では、精密板金で要求されるいわゆる「追い抜き時の継ぎ目無し」という性能がスロッティング金型を使用する事で実現している (図 51)。ここで、最近の技術進歩としてファイバーレーザ加工について触れておく。従来板金切断に用いられてきたレーザビームには、CO₂ のようなガスレーザと、Nd:YAG レーザのような固体レーザがあった。これに対して近年注目を浴びているのが、ファイバー自身が発信器となるファイバーレーザである¹²¹⁾ (原理図を図 52 に示す)。

図示のように該モジュールはダブルクラッドファイバーの内側クラッドに外付けファイバーを介して励起光を導入し、これを外側クラッドとの界面で全反射させながら伝搬させ、さらにこのコアファイバーの両端に埋め込まれた回折格子の作用で増幅させている。したがって、このレーザは (CO₂ レー

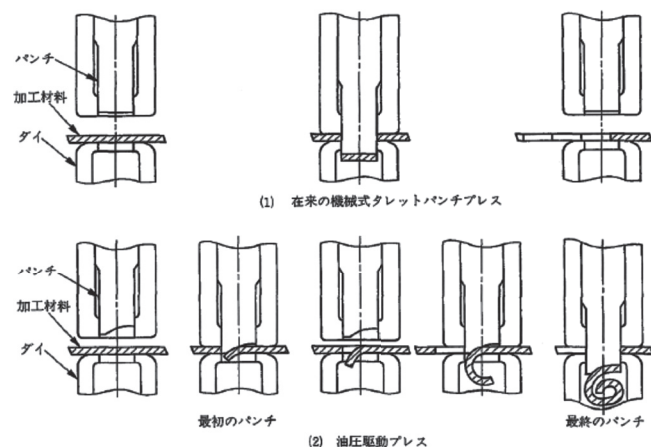


図 51 継ぎ目無し追い抜きを実現するスロッティング金型の作動態様 (上が従来の [機械式]、下が本「油圧式」パンチングプレス)

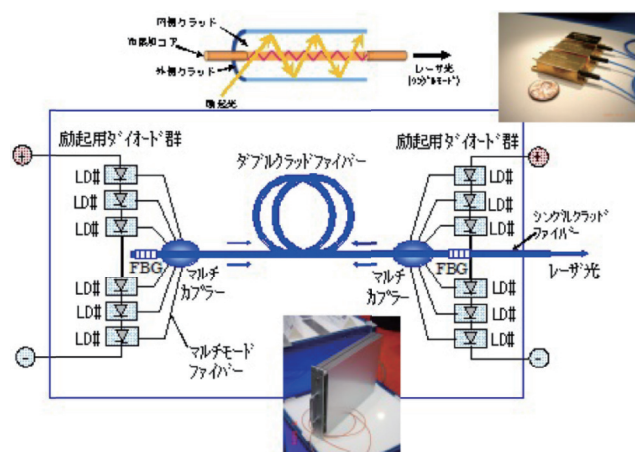


図 52 ファイバーレーザモジュールの原理と基本構成 (LD: レーザダイオードのこと)

ザのように) 反射ミラーを用いずしかも効率良く共振・増幅できる特徴を持っている。また、発振効率が Nd:YAG レーザ (数 %)、CO₂ レーザ (15%) とくらべて 25~30% と高いので、冷却設備の負担が少なく、設備として空冷チラー (冷し器) があればよく、クーリングタワーは不要となるし、電力効率も大幅に向上し、ランニングコストは大幅に低減できる。さらに、切断の精度を高める高出力のシングルモードビームは図 52 のモジュール単体を直列接続することで実用的にも (例えば) 2KW 程度まで高めることが出来る。かくしてファイバーレーザとパンチングの複合機が実現された (例えばアマダ LC-2515C1AJ, トルンプ TruMatic3000fiber など)。当該複合機の技術的に大きな特長の一つは、反射率が高く CO₂ レーザ機が苦手としてきたアルミ、黄銅、銅などの厚板も精度よく切断できるようになった事であろう。反面、ファイバーレーザの波長が 1.08μm (CO₂:10.6μm) と短いために反射光線からオペレータの裸眼を保護することに十分な対策が必要となった (結局光線が飛び交う部分を保護板で覆うという解決策が採用されている)。また現時点での技術水準では、ドロスの点、切断面表面粗さの点でも CO₂ レーザより優れているとまでは言えないようである。しかし薄板・中厚板の切断を、より高速度を以てかつ高精度・良コストパフォーマンスで行えるので、複合機の従来の作業特性「パンチ with レーザ」が「レーザ with パンチ」となる可能性を秘めている。

3.5 高度難加工材におけるせん断加工技術

3.5.1 アモルファス金属のせん断

1960 年代に登場した材料で、現在でも日本では当該合金はさまざまな用途に使用されているが中でも重要なかつ大きな用途がトランス鉄心用途である¹²²⁾ (表 4)。日立金属が年間 10 万トン以上のアモルファストランスを生産しているが、これは従来のケイ素鋼板トランスにくらべて 2% も電力ロスが少ないという重要な特徴を有している。しかし高度難加工性材料である。

当該合金のスリッター加工についてはかなり以前から確立されていた¹²³⁾。箔の打抜きについては、中川威雄らや佐野利男らによって先駆的に研究されている (その解説は文献¹²⁴⁾、¹²⁵⁾ を参照)。先駆研究の要点は、金型を実質的にゼロクリアランスで製作の要ありという点と、刃先の摩耗を防止す

表4 日本が開発したアモルファス合金素材の推定製造額

2008 年企業調査結果（薄膜、粉末材を除く）

企業名	素材製造額	製品名種類	販売年数
NEC トーキン	磁性テープ材 総額約 60 億円	アンテナ チョークコイル ノイズフィルタ等	2003～現在
東 芝	磁性テープ材 総額約 300 億円	マグアンプ用可飽和コア ノイズ抑制素子 遅延素子 パルストランス用高透磁率コア等	1988～現在
ユニチカ	磁性細線材 総額約 150 億円	盗難防止用タグ MI 磁気センサ ボルファ（撚り線材）等	1985～現在
日立金属	テープ・薄帯材 総額約 800 億円	各種トランス鉄心 スイッチング電源用巻コア 電波受信アンテナ ロー材・接合材料 等	1985～現在
旧松下電器	磁性テープ材 総額約 500 億円	スイッチング電源用巻コア 電流センサ 等	1982～現在
ソ ニ ー	磁性テープ材 総額約 400 億円	磁気ヘッド（ウォークマンなど） 音響部品 等	1982～現在
アルプス電気	磁性テープ材 総額約 300 億円	磁気ヘッド 巻鉄心部品 等	1990～現在
その他部品企業	テープ材・複合材 総額約 500 億円	磁気シールド材 電子部品材料 等	1990～現在
概算合計	素材製造額合計＝約 3,000 億円（推定値）		

る事である。この点について、前述した研究¹⁰¹⁾による、ゼロクリアランス金型および刃先への焼結ダイヤモンド採用の研究は解決への示唆を与えらると思う。なお、文献¹²⁵⁾中に記載されていた「多層抜き」のアイデア¹²⁶⁾は興味深い。

多層抜きすることにより、結果的に刃物のもちが枚数で2000枚から225万回へと延びるのである。蛇足になるが、機械加工の分野でも多層方式（座布団方式）ドリル穴あけでバリなし精密穴あけを実現し、はやぶさ2号のエンジン噴射ノズルの高度精密加工を実現している（碌々産業㈱ AFTER JIMTOF2014～微細加工技術研究結果報告会～に参加した時に報告者から披露された話）。技術者が壁に当たった時の苦悶の跡が偲ばれ、共感を覚える。

3.5.2 超高強度材のせん断加工

最近特に自動車の軽量化や安全性向上への要求から自動車部品への超高強度材（ウルトラハイテン材：引張強度が1200～1800MPa）のホットスタンピング技術への関心が高まっている¹²⁷⁾。そのうち、せん断加工に関係の深い技術に言及しておく。先駆的な研究として、熱間における、森謙一郎らのものがある^{128), 129)}。ダイクエンチング後の冷間状態での穴あけ（piercing）は可能だろうか。現在TS1800MPa級のボロン鋼板が開発されている¹³⁰⁾が、この事例では穴あけは加熱成形時に行っており、いわゆる遅れ破壊（delayed fracture）は発生しなかった。しかしながら、将来的にこのクラスの高度難加工性鋼板が高生産性をはかるため、（レーザ加工ではなく）冷間プレス穴打抜きを行った場合に当該遅れ破壊の問題に対する解決策があると良い筈である。このような観点から、村川正夫らは粗抜き後の穴をプレスシェーピング法により冷間加工することにより、TS1800MPa級のSK85焼き入れ、焼き戻し材を仕上げた際の遅れ破壊特性を調査し、同方法の有効性を検証している¹³¹⁾（図53）。

最後に、これまでに紹介した研究において潤滑および（または）硬質表面被膜の役割、作用の解明が極めて重要であることは認識しているものの、著者の浅学菲才の故、ここでは触れられなかったことをご容赦いただきたい。

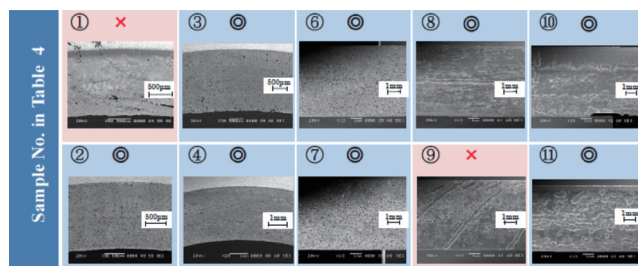


図53 希塩酸溶液への浸漬試験（pH:1.0, 浸漬時間:100時間, 30℃）後におけるSK85焼き入れ・焼き戻し材の遅れ破壊状況（図中×印はせん断加工のまま）

4. おわりに

著者はどのような最新の研究にも（特に工学の研究においては）必ず先駆的な研究があり、その上に先進的な研究があると信ずるものです。かくして、本REVIEWにおいても、歴史的にかなり古いものまで価値のあるものは丁寧に紹介するよう心掛けました。まだまだ抜けている研究紹介も多数あるかと懸念しますが、なにとぞご寛恕いただきたく思うとともに、諸兄の少しでも参考になれば幸いです。最後に貴重な研究結果・資料を引用させていただいた諸兄、先達の皆様に深く感謝いたします。

引用文献

- 1) 前田禎三：プレス加工理論の展望（1）、せん断加工、塑性と加工、2-10（1961）、pp 571-578.
- 2) E.G.Izod:Behaviour of materials of construction under pure shear,Proc. Inst. Mech. Engr., part 1-2(1906), pp 5-55.
- 3) 神馬敬：せん断加工の力学的考察、塑性と加工、10-99(1969), pp226-235.
- 4) 益田森治：塑性加工I、共立全書52、p45.
- 5) E. V. Crane:Machinery (E), 30, 763(1927), p225.
- 6) 前田禎三：複刃による金属薄板のせん断機構理論、精密機械、25-6（1959）、pp 248-263.
- 7) 神馬敬：薄板の打抜きに関する塑性学的研究（第1報、可容応力場の解析）、日本機械学会論文集（第3部）、28-196（1962）、pp 1638-1646.
- 8) 神馬敬：薄板の打抜きに関する塑性学的研究（第2報、可容速度場の解析）、日本機械学会論文集（第3部）、28-196（1962）、pp1647-1654.
- 9) 日本の塑性加工I、歴史と進歩、塑性加工学会（1986）、p486.
- 10) 近藤一義：延性金属板のせん断加工機構（第1報—アルミニウムにおける材質および工具面摩擦の影響—、精密機械、31-6（1965）、pp 476-483.
- 11) 近藤一義：延性金属板のせん断加工機構（第2報—工具によって与えられる材料拘束条件の影響—、精密機械、31-8（1965）、pp 693-698.
- 12) 近藤一義：延性金属板のせん断加工機構（第3報—、精密機械、31-9（1965）、pp 764-770.
- 13) 斎藤博：丸形せん断加工における側圧力の測定、精密機械、20-11（1954）、pp 424-429.
- 14) 前田禎三：せん断工具に作用する側方力の測定、精密機

- 械, 24-11 (1958), pp 575-585.
- 15) 前田禎三: せん断製品のわん曲について, 塑性と加工, 2-10 (1961), pp 619-632.
- 16) Timmerbeil, F.W.: Der Einfluss der schneidkaten benutzung auf den Schneidvorgang am Blech, Werkstattstechnik und Maschinenbau, 6-5(1956), pp 58-66.
- 17) 斎藤 博: せん断加工工具の寿命試験 (その 1), 精密機械, 19-8(1953), pp 302-307.
- 18) 前田禎三・松野建一: せん断工具の摩耗, 日本機械学会誌, 69-568(1966), pp 609-616.
- 19) 斎田洋一: 超硬せん断工具の摩耗, 塑性と加工, 7-64(1966), pp 228-236.
- 20) 青木勇: せん断工具の摩耗と影響因子, 塑性と加工, 27-300(1986), pp 140-150.
- 21) 尾崎龍夫・竹増光家: せん断加工現象の理論的, 実験的解析, 塑性と加工, 35-396(1994), pp 10-16.
- 22) 高石和年・前田禎三: せん断工具の有限要素解析, 塑性と加工, 21-236(1980), pp 784-791.
- 23) 木原茂文・吉井明彦: パーティクル流れモデルによる鍛造解析法, 日本機械学会論文集 (A), 57-541 (1991), pp 2099-2103.
- 24) 竹増光家・尾崎龍夫・山崎進: パーティクル流れモデルによる板材のせん断加工の数値解析, 塑性と加工, 6-418(1995), pp 18-1323.
- 25) E.Taupin, J.Breitling, W-T. Wu, T.Altan: Material fracture and burr formation in blanking results and comparison with experiments, J. Materials Processing Technology, 59(1996), pp 68-78.
- 26) F. A. McClintock: A criterion for ductile fracture by the growth of holes, J. Materials Mechanics, June(1968), pp 363-371.
- 27) 小森和武: せん断加工の数値シミュレーション, 塑性と加工, 38-433(1997), pp 129-134.
- 28) Cockcroft, M.G., Latham, D.J.: Ductility and the Workability of Metals, J. of the Institute of Metals 96(1968), pp 33-39.
- 29) M.Oyane: Criteria of ductile fracture strain, Bulletin of JSME 15(1972), pp 1507-1513.
- 30) P. Brozzo, B. Deluca, R. Redina: A new method for the prediction of formability limits in metal sheets, Proc. of the seventh biannual conf. of IDDRG(1972).
- 31) K.Komori: Simulation of stationary crack during blanking using node separation method, Procedia Engineering, 81(2014), pp 1102-1107.
- 32) 春日保男・堤 成晃・森 敏彦: 延性金属材料のせん断加工, 日本機械学会論文集 C 編, 43-372 (1977), pp 3142-3149.
- 33) 古閑伸裕・柳本哲史・村川正夫・富田正一: 格子法による塑性変形の応力・ひずみ自動測定システムの試作, 非破壊検査, 38-8(1989), pp 689-694.
- 34) 古閑伸裕・工藤 武・村川正夫: Visioplaticity によるせん断加工現象の解析, 塑性と加工, 33-383(1992), pp 1362-1367.
- 35) 古閑伸裕・湯川伸樹・及川 好・村川正夫・神馬 敬: Visio-plasticity によるせん断工具摩耗現象の解明, 塑性と加工, 37-428(1996), pp 957-962.
- 36) 高橋俊典・青木 勇: 画像処理を使った Visioplaticity 法によるせん断変形解析, 日本機械学会論文集 (C 編), 62-600(1996), pp 3196-3201.
- 37) M. Sasada, T. Togashi: Measurement of rollover in double-sided shearing using image processing and influence of clearance, Procedia Engineering 81(2014), pp 1139-1144.
- 38) 吉田佳典・湯川伸樹・石川孝司・細野定一・村瀬道徳: 延性破壊を考慮した剛塑性 FEM によるせん断加工の変形解析, 塑性と加工, 44-510(2003), pp 735-739.
- 39) V.Tvergaard: Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions, Int. J. Fracture, 17(1981), pp 389-407.
- 40) 高村正人・尾崎敏介・三好雄司・須永秀行・高橋進: 延性破壊条件を考慮した 3 次元弾塑性有限要素法による厚板せん断過程のシミュレーション, H23 年度塑性加工春季講演会講演論文集 (2011), pp 113-114.
- 41) R. Hamblin: Blanking tool wear modeling using the finite element method, Int. Journal of Machine Tools & Manufacture, 41(2001), pp 1815-1829.
- 42) 牧野内昭武: 素形材, 1993 年 3 月号, p30.
- 43) 福井伸二・前田禎三: 打抜き歯車の試作について (pp174-179), 時計用歯車の機械切りと打抜き (pp 179-186): 時計の生産技術研究, 日本学術振興会第 95 委員会編 (1951).
- 44) Jaques David: American and Swiss watch making in 1876(Reports to the intercantonal committee of Jura industries on the manufacture of watches in the United States)(1877), published by Richard Watkins, Australia, Nov. 2003, pp 39-40.
- 45) 関谷健助: IC リードフレームのプレス加工と金型, 型技術, 2-13(1987), pp 23-29.
- 46) 神馬 敬: 金型とプレスの総合特性 (せん断加工の精密化), 第 13 回研究委員会資料 (せん断バリ研究委員会報告書) (1994), pp 278-285.
- 47) 神馬 敬・関根文太郎・関谷健助・勝端真一・森本 亘: I 形状舌片リードモデル (精密薄板電子部品のせん断加工の研究 I, 塑性と加工, 28-315(1987), pp 355-362.
- 48) 神馬 敬・関根文太郎・佐藤彰典: 金型の動的挙動の影響 (精密薄板電子部品のせん断加工の研究 II), 塑性と加工, 31-348(1990), pp 60-65.
- 49) 神馬 敬・関根文太郎: L 字型リード形状の製品精度に対する影響 (精密薄板電子部品のせん断加工の研究 III), 塑性と加工, 32-369(1991), pp 1280-1285.
- 50) 平野尚彦・真光邦明・奥村知巳: ハイブリッド自動車用インバータ, 両面放熱パワーモジュール「パワーカード」, デンソーテクニカルレビュー, 16 (2011), pp 30-37.
- 51) 池山智也: 進展するパワー半導体の最新動向と将来展望 2006-2007, 株式会社矢野経済研究所 (2006), pp 20-27.
- 52) 平成 22 年度戦略的基盤技術高度化支援事業, 「エコカー用電子部品 (リードフレーム) における順送プレス加工の工程短縮及び金型のコンパクト化に関する研究開発」成果報告書 (2011), pp 1-22.
- 53) 平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業, 「エコカー用電子部品 (リードフレーム) における順送プレス加工の工程短縮及び金型のコンパクト化に関する研究開発」

- 成果報告書 (2012), pp 1-26.
- 54) 木下 学: リードフレーム用順送金型のコンパクト化と高精度加工, プレス技術, 51-5(2013), pp 22-25.
 - 55) 春日保男: 日本機械学会誌, 63-502, p 151.
 - 56) R. Haag: Sheet Metal Industry, 37(1960-5), pp 397, 352-354.
 - 57) M. Meyer: Verfahren zum Erzielen glatter Schnittflächen beim Genausschneiden, Mit. Forsch. Blechverarbeitung, 19/20(1962), pp 282-.
 - 58) 前田禎三・中川威雄: アルミ板の精密打抜き, 塑性と加工, 6-55(1965), pp 457-465.
 - 59) 前田禎三・中川威雄: 精密打抜き加工の実験的研究—第1報—, 塑性と加工, 9-92(1968), pp 618-626.
 - 60) 前田禎三・中川威雄: 精密打抜き加工の実験的研究—第2報—, 塑性と加工, 9-92(1968), pp 627-636.
 - 61) 山本勝弘・正木昇: FB 技術の現状, 東海支部第 62 回塑性加工懇談会 (2010), pp 1-12.
 - 62) 細野邦男・淵脇忠夫: 順送り複合加工, プレス技術, 16-6(1978), pp 57-59.
 - 63) 淵脇健二: ファインブランキングを利用した板鍛造技術, プレス技術, 51-3(2013), pp 33-35.
 - 64) 塩野目富夫: 塑性加工実用化事例と加工のポイント, プレス技術, 51-3(2013), pp 42-45.
 - 65) 萩田雅俊: 自動車部品における精密 FB 技術の開発, 第 118 回型技術セミナー (2014), (社) 型技術協会, pp 8-15.
 - 66) 東 淳一・野田 優・東 伸匡・前田憲輝・平山和広・田安 昇: 超小型軽量ラウンドリクライナーを実現した小型モジュール高精度歯形成形法の開発, 素形材, 54-12(2013), pp 38-42.
 - 67) 東洋精密プレステクニカルレポート: 小モジュール歯車のファインブランキング化.
 - 68) Method and device for fine cutting of workpieces: 特 許 第 EP2208552B1 号 (2011) (Finova Feinschneidtechnik GmbH.).
 - 69) リクライニングアジャスタ: 特許第 4512423 号 (2010) (株 デルタツーリング).
 - 70) 林 一雄: サーボ式高剛性多軸油圧 FB プレス+対応金型がもたらすメリット, プレス技術, 47-8(2009), pp 35-39.
 - 71) 淵脇健二: FB 加工へのトランスファ採用, プレス技術, 47-8(2009), pp 40-43.
 - 72) 早淵正宏・岩田大助・堀智弘・森孝一・森孝信: 塑性と加工, 53-623(2012), pp 1041-1042.
 - 73) 特集, 加工領域を広げるファインブランキング技術, プレス技術, 52-12(2014), 日刊工業新聞社.
 - 74) 近藤一義: せん断加工における平滑面形成機構 (第 2 報, 分離面性状の改善法), 日本機械学会論文集 (C 編), 35-277 (1969), pp 1972-1979.
 - 75) 近藤一義・渡辺 亮・高田久於男・吉田元昭: プレス, 型構成および炭素鋼厚板への適用性—対抗ダイスせん断法の活用 I—, 塑性と加工, 12-129(1971), pp 733-741.
 - 76) 近藤一義・広田健治・大野廣三・加藤久佳: 差圧を利用した対向ダイスせん断法の簡便化に関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), 61-586(1995), pp 2612-2617.
 - 77) 前田禎三: 上下抜加工法, 機械の研究, 10-1(1958), pp 140-144.
 - 78) 中央発條株式会社: 薄板ばね材料の高精度プレス成形技術, 素形材, 51-1(2010), p 25.
 - 79) 河村幸則・松本徳勝・鎌滝裕輝・松本浩造・野並光晴・新野文達: H2 年度塑性加工春季講演会講論集 (1990), pp 619-622.
 - 80) 牧野育雄: かえりなしせん断法, プレス技術, 13-5(1975), pp 93-98.
 - 81) 牧野育雄: 平押し法の概要と事例, プレス技術, 25-13 (1987), pp 428-433, 120.
 - 82) 前田禎三・村川正夫: かえり無しスリッティングの開発—スリッティング加工に関する基礎的研究 I—, 塑性と加工, 18-193(1977),
 - 83) 村川正夫・呂 言: ローリングカットシヤーによる切断形状精度の向上—精密シヤーリングに関する研究 I—, 塑性と加工, 35-396(1994), pp 73-78.
 - 84) 村川正夫・呂 言: ローリングカットシヤーによるかえり無しシヤーリング—精密シヤーリングに関する研究 II—, 塑性と加工, 36-410(1995), pp 242-247.
 - 85) 精密ローリングカットシヤーリング装置: 特許第 3547807 号.
 - 86) 古閑伸裕・久保雅亮・クンラチャート ジュンラベン: NC サーボプレスを利用したかえり無しせん断, 塑性と加工, 48-558(2007), pp 645-649.
 - 87) K. Saanouni, N. Belamri, P. Autesserre: Finite element Simulation of 3D sheet metal guillotining using advanced fully coupled elastoplastic-damage constitutive equations, Finite Elements in Analysis and Design, 46(2010), pp 535-550.
 - 88) 生島幸一・岩崎 功・近藤一義: だれなしせん断加工法の開発, 塑性と加工, 33-381(1992), pp 1172-1177.
 - 89) 広田健治: 負のクリアランスによる精密せん断加工, 塑性と加工, 55-638(2014), pp 185-189.
 - 90) X. Huang, H. Xiang, X. Zhuang, Z. Zhao: Improvement of die-roll quality in compound fine blanking, Advanced Materials Research, 337(2011), pp 236-241.
 - 91) 精密加工プレス用金型及びそれを用いた加工法: 公開特許公報 第 2004-255454 号 (藤堂工業(株)).
 - 92) T. E. W. Preston: Vibrating ram shaves teleprinter parts, Metalworking Production, March 7(1958), pp 399-406.
 - 93) 中村虔一・容貝昌幸: シェービング・プレス加工について, 塑性と加工, 3-12(1962), pp 11-18.
 - 94) 笹原弘之: シェービング加工における切り口面生成過程の FEM 解析, 天田財団 FORM TECH REVIEW, 12-1(2002), pp 58-63.
 - 95) 横井秀俊・中川威雄: ガラスエポキシ積層板の振動仕上げ特性と加工プロセス, 塑性と加工, 25-279(1984), pp 335-342.
 - 96) 横井秀俊・中川威雄: ガラスエポキシ積層板の振動仕上げ抜き機構と加工因子, 塑性と加工, 25-280(1984), pp 410-417.
 - 97) 横井秀俊・中川威雄: 試作振動打抜きプレスについて,

- 生産研究, 34-6(1982), pp 9-17.
- 98) せん断加工方法及びせん断加工装置: 特許第 5127538 号 (2012) (パナソニック(株)).
- 99) 霍舒揚・古閑伸裕: CFRP 板の精密穴あけ加工, 第 65 回塑性加工連合講演会講演集 (2014), pp 243-244.
- 100) 三田村一広: 自動車リチウムイオンバッテリー用金属箔切断金型の開発, プレス技術, 51-5(2013), pp 48-53.
- 101) 生島彰之・古閑伸裕・山口貴史: ゼロクリアランス金型によるアルミニウム板の精密せん断加工, H26 年度塑性加工春季講演会講演論文集, pp 175-176.
- 102) 小松隆史・小松 誠・柳沢春登・上原恒浩・柳沢 保・真鍋清一: 電子制御燃料噴射インジェクタ用オリフィスのプレス加工技術開発, 塑性と加工, 52-611(2011), pp 1281-1285.
- 103) 噴孔部材の製造方法: 特許第 3934547 号 (2007) (㈱デンソー, (株)小松精機工作所).
- 104) 加藤正仁・白鳥智美・鈴木洋平・中野 禅・小松隆史: 微細粒組織を有する SUS304 極薄板への微細細穴の斜め打抜きにおける材料変形挙動, 塑性と加工, 55-638(2014), pp 223-227.
- 105) 郡司賢一・樋熊真人・吉田三千夫・福島英樹・田中耕幸: 微細傾斜穴の三次元プレス工法の開発とインジェクタへの適用, 素形材, 54-12(2013), pp 20-24.
- 106) プレス加工用ポンチ: 特許第 008388 号 (1978) (㈱日立製作所).
- 107) 村上碩哉・藤井祐輔・金丸尚信: PW ダイを用いた鋼板打抜きにおける切口面の形状特性, 塑性と加工, 55-638(2014), pp 243-247.
- 108) 村田力・山田隆久・橋本祐一・藤根秋彦・本田学・石川 悟: 異形状・異材質薄板プレス積層法による自動車用各種センサー部品の開発, 素形材, 54-12(2013), pp 14-19.
- 109) 積層装置及び積層体製造システム: 特許出願公開第 WO2014050208A1 号公報 (2014) (㈱放電精密加工研究所).
- 110) 志水慶一・田屋慎一: 回転体による高速穿孔システムの開発, 塑性と加工, 44-505(2003), pp 89-93.
- 111) 金属板穿孔用円板状ロール, それを用いた金属板穿孔装置, 金属板穿孔方法, 及び, 穿孔金属板: 特許第 3705471 号 (2005) (東洋鋼鈑(株)).
- 112) 多孔金属箔のロール成形方法及びその方法で成形したコイル状の多層金属箔: 特許第 5458358 号 (2014) (昭和精工(株)).
- 113) 前田禎三・中川威雄: せん断加工への高圧の応用, 塑性と加工, 7-69(1966) pp 543-547.
- 114) 中川威雄・大島正巳・浅見和也: 軟鋼線材の拘束せん断における寿命試験, 塑性と加工, 12-131(1971), pp 886-892.
- 115) 柳原直人・斎藤博・中川威雄: 汎用プレス用加速装置と棒材高速せん断への適用, 塑性と加工, 22-242(1981), pp 245-249.
- 116) 塩川万造: 棒材の精密せん断加工技術, プレス技術, 51-5(2013), pp 26-29.
- 117) 村川正夫・古閑伸裕・呂 言: 棒材の高速せん断時に発生する切口面焼けの現象に関する考察—棒材のせん断特性に関する研究 VII—, 塑性と加工, 33-380(1992), pp 1063-1068.
- 118) Numerically Controlled Punching Machine and Method: 米国特許第 3448645 号 (1969) (The Cincinnati Shaper Company).
- 119) Punch Press: 米国特許第 3717061 号 (1973) (発明者: Dennis Daniels, 出願人: 米国アマダ, 出願日: 1971 年 2 月 19 日).
- 120) 川口晃司: 低騒音タレットパンチプレス, 塑性と加工, 35-396(1994), pp 36-42.
- 121) 荒谷雄: シングルモードファイバーレーザの可能性, 溶接技術, 56-1(2008), pp 73-76.
- 122) 増本健・鈴木耐造: 産学官連携ジャーナル 2013 年 8 月号 (インタビュー記事).
- 123) 桑原大樹: スリット加工—金属からアモルファス—, 第 310 回塑性加工シンポジウム (2014), pp 63-69.
- 124) 中川威雄・青木勇: アモルファス合金箔の打抜き, 精密工学会誌, 52-3(1986), pp 13-18.
- 125) 佐野利男・高橋正春・村越庸一: アモルファス金属のプレス加工, 機械技術 35-12 (9 月号別冊) (1987), pp 508-512.
- 126) 金属薄板積層コアの製造方法: 公開特許公報, 第昭 56-36336 号 (1981) (松下電器産業(株)).
- 127) 超高強度鋼部材のホットスタンピング: 素形材, 55-7(2014), 一般財団法人素形材センター.
- 128) 森謙一郎・斎藤翔一・牧清次郎・岸本信・林達志・奥村俊彦: 超高張力鋼板の温・熱間穴抜き加工, 塑性と加工, 49-564(2008), pp 56-60.
- 129) 森謙一郎・丸尾佳広・前野智美: ダイクエンチングされた鋼板の局部通電加熱小穴抜き加工, 塑性と加工, 52-609(2011), pp 1114-1117.
- 130) 鈴木貴之・増尾俊二・林康彦・渡部光利・匹田和夫・中山伸之: 1800MPa 級車体部材のホットプレス成形技術の開発, 素形材, 55-12(2014), pp 10-14.
- 131) M. Murakawa, M. Suzuki, T. Shionome, F. Komuro, A. Harai, A. Matsumoto, N. Koga, Precision piercing and blanking of ultrahigh-strength steel sheets, Procedia Engineering, 81(2014), pp 1114-1120.