

特集 4

# 精密打抜きのベーナイト鋼への適用

Application of Fine Blanking to Bainite Steel Sheet

中川 威雄\*・鈴木 清\*・チュプカ = ウラジミール\*\*

Takeo NAKAGAWA, Kiyoshi SUZUKI, and Vladimir CUPKA

熱処理済でかつプレス加工が可能な材料として、ベーナイト帯鋼の各種機械部品への適用が注目されている。本研究はプレス加工の中でも技術的に最も困難と考えられるベーナイト鋼の精密打抜き試験を行ない、その使用限界、採用上の問題点等を明らかにした。

## はじめに

事務用、電気用機械部品のうち、かなりの点数は板材から打抜き加工によって作られる。これらの部品の中には高い寸法精度をもった複雑な形状で、かつ高い耐摩耗性を要求されるものが多い。そのため素材として、肌焼鋼や特殊鋼が使用され、加工後熱処理を施すのが通例となっている。しかしながら、部品の寸法や形状によっては無視し得ない熱処理ひずみを生じ、寸法精度の不足のためそのままでは使用できない場合が多い。特に事務用機械部品のように細長い複雑な形状のものでは、かなり大きなそりやひねれが生ずるので、それらはレベラや熟練した作業者による手作業で矯正されている。

この矯正作業はやっかいなものであり、また矯正によって完全に寸法精度を出せるとは限らず、後で研削などの機械加工で仕上げなければならない場合も少なくない。このような部品に恒温変態処理を行ったベーナイト焼入れ鋼を採用すれば、それ自体かなりの硬度をもち、しかもプレス加工も可能であるから、焼入れ作業を省くことができ、したがって矯正作業や後加工の問題もなく生産工程が大幅に簡略化される。

事務用、電機用機械にベーナイト鋼が用いられるのは、それらの部品の許容寸法精度が高く、またカム、ラック、ギヤ、レバーなどの部品から明らかなように板材の端面の耐摩耗性が要求される部品が多いからである。この要求がさらにきびしくなると、単なるベーナイト鋼の打抜きでは十分ではなくなり、精密打抜き法の採用の必要が生ずる。すなわち、精密打抜きを行なうことにより、製品寸法精度は向上して後仕上げ加工を不要とし、さらに端面の加工硬化により耐摩耗性を向上することができる。

しかしながら、精密打抜きは塑性変形によってせん断分離する関係上、被加工材の高い延性が必要であり、通常焼なまし鋼材で引張り強さ 60~70 kg/mm<sup>2</sup> が実用の

限界と言われており、ベーナイト鋼のように 100 kg/mm<sup>2</sup> 以上の硬い材料の精密打抜きが可能であるかどうか疑問視される。さらにたとえ精密打抜きができたとしても、型寿命はかなり短くなることが予想される。

以上のような状況であるので、試みにベーナイト鋼の精密打抜きを行ない、通常の鋼板の場合と比較しながら、ベーナイト鋼の精密打抜きの特質を追ってみた。

## 1. 試験用精密打抜き型

種々の輪郭形状の影響も合わせて調査する目的で、図 1、写真 1 のような対角線の長さ約 40 mm の星形輪郭の精密打抜き試験型を用いた。この輪郭形状は二つの正方形

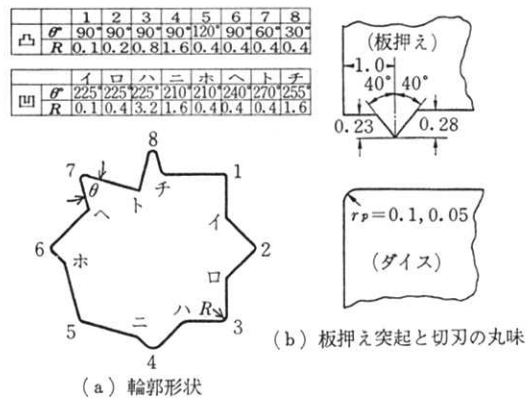


図 1 星形輪郭精密打抜き型 (mm)

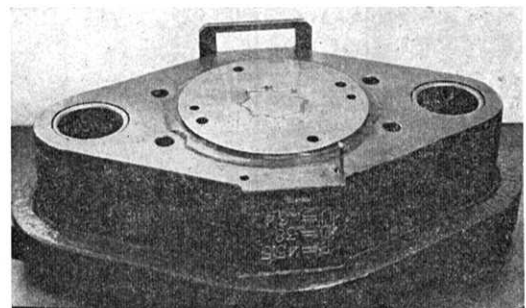


写真 1 星形輪郭精密打抜き型

\* 東京大学生産技術研究所 第 2 部  
\*\* チェコスロバキア, スロバク工科大学

を互いに 45° ずらせて重ねたものに、種々の先端頂角と先端丸味半径を得るために修正を加えたものである。頂角  $\theta$  の影響は先端丸味半径  $R=0.1\text{mm}$  のものについて 30°~270° 間で 9 段階、 $R=0.1\text{mm}$  について 90°~225° 間で 3 段階、 $R=1.6\text{mm}$  について 90°~225° 間で 4 段階を調べることができる。また先端丸味半径  $R$  の影響は、頂角  $\theta=90^\circ$  について 0.1~1.6 mm 間に 5 段階、 $\theta=225^\circ$  について 0.1~3.2 mm の間に 3 段階を調べることができる。

突起は板押え側のみ三角形突起を切刃より一定距離だけ離し、輪郭全周に配してある。またダイス切刃には丸味をつけているが、その値は板厚 0.5 mm のペーナイト鋼について 0.1 mm、板厚 1 mm のものについては 0.05 mm である。型構造はポンチ固定方式であり、型材は SKD-1 相当で、ポンチは研削加工、ダイスは放電加工によって製作され、かたさはそれぞれ HRC 58 と HRC 60 である。使用プレスは 90 ton 油圧式上部駆動の精密打抜きプレス (三井ヒドレル HFP 100 S) である。打抜きにあたっては、潤滑油 (ジョンソン JP 101 とマシン油を 1:9 の割合で混合したもの) を使用した。なお実験を行なった精密打抜き条件は板押え力 10 ton、逆押え力 4 ton である。

2. ペーナイト鋼の硬度と精密打抜き性

どの程度の硬度のペーナイト鋼まで精密打抜きが可能であるかは興味深い点である。ここでは S 60 C 材をベースとして硬度 Hv 300~460、引張強さ約 100~150 kg/mm<sup>2</sup> の板厚 0.5 mm のペーナイト鋼 4 種について精密打抜き試験を行なってみた。その結果、写真 2 に示すよう Hv 450 材の平行方向にわずかの破断面が見られる他は、試験を行なったすべての材料について切口面は全面せん断面となり、精密打抜き可能であることがわかった。しかも直辺部のみならずすべての凸部輪郭についても完全なせん断面が得られている。

後に 1 mm の材料について同じ型で精密打抜きを行なったところ、凸部輪郭については必ずしもすべての材料についてこのように全面せん断面とならなかったことより、このように良好な結果が得られたのは板厚が薄かったことによるものと推定される。また一番かたい Hv 460 のペーナイト鋼の打抜き時には、型が割れたような高い音を発してせん断された。

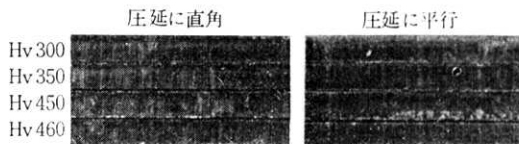


写真 2 星形輪郭による精密打抜き (直辺部 0.5 t)

3. 精品精度

(1) 切口表面あらさ

製品寸法精度、端面精度を問題にする際にはまず第 1 に重要なのがせん断切口面あらさである。図 2 は写真 2 の各種の硬度の精密打抜き切口面の板厚中央のせん断面をせん断方向と直角に測定した表面粗さである。硬度が増すに従って多少粗さも増す傾向を示す。また、図 3、写真 3 は実際の生産に用いるために試作した事務機部品の切口面の拡大写真と、直辺部でせん断方向 (板厚方向) および板厚の中央で、その直角方向に測定した表面あらさである。この材料は Hv 360、 $\sigma_B=105\text{kg/mm}^2$  の材料であるが、図 4 に示した板厚 3.2 mm の軟鋼 ( $\sigma_B=34\text{kg/mm}^2$ ) の精密打抜き面の表面あらさと比較してもほ

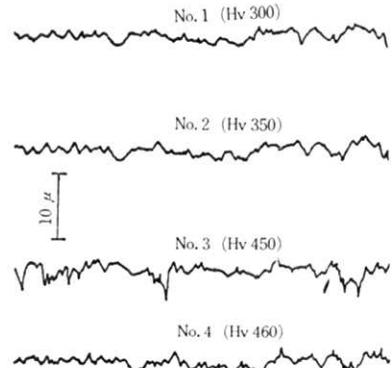


図 2 せん断面の表面粗さ (0.5 t, 板厚中央)

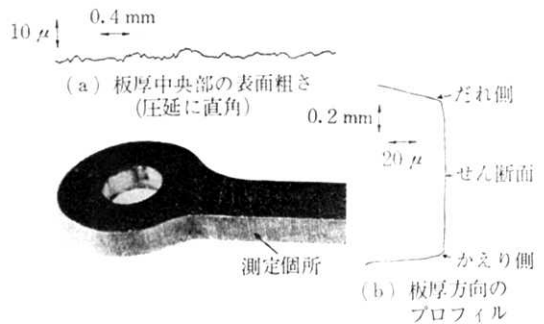


写真 3 精密打抜き品 (Hv 360, 1.0 t)

図 3 精密打抜き品の表面粗さ

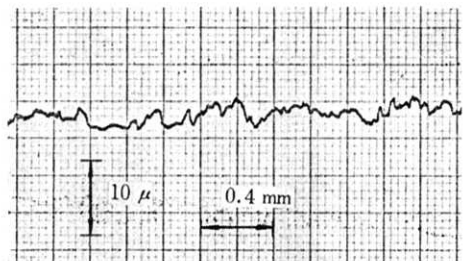


図 4 軟鋼の精密打抜き品の表面粗さ (SS 34,  $\sigma_B=34\text{kg/mm}^2$ , 3.2 t)

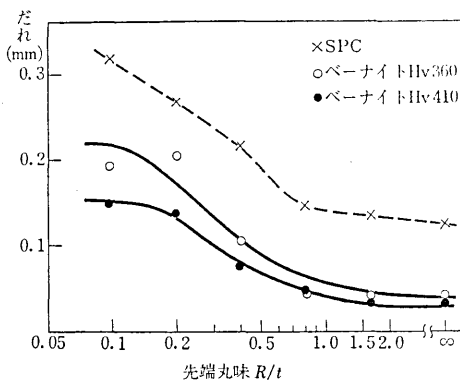
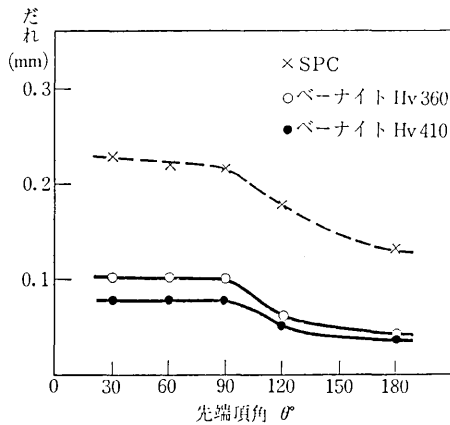


図5 輪郭形状とだれの大きさ (1.0 t)

とんど差はみられない。これはせん断面は材料が塑性変形するとともに切刃にバニシ仕上げされてできた面とみなせるから、せん断面のあらさは微小なき裂がない限り切刃のあらさをうつしているためである。

(2) だれ

ラックやギヤ部品などでは、だれの存在により有効板厚を減少させることになる。図5は板厚 1.0 mm の Hv 360 と Hv 410 のペーナイト鋼の精密打抜きにおける輪郭形状とだれの大きさを示したものである。だれはせん断時の板面に働く引張変形による伸びによって生じ、輪郭が凸になるほど引張りは大となり、だれは大きくなる。硬度が高い材料の方がだれは少なく、また同じ板厚の軟鋼板の場合と比較するとだれはかなり減少している。だれの値は材料の伸びの値が大であるほど大きくなると言われており、軟鋼の伸びの値が 40% 以上であるのに対し、ペーナイト鋼の伸びの値は 6~12% 程度であり、その中でも硬度が高いほど小さくなることと対応している。

(3) 切口面の直角度

寸法精度や端面の接触が重要となる製品では、当然切口面の板面に対する直角度が重要となる。この直角度は輪郭の影響を受け、直辺部では比較的良好であるが、輪郭が凸になるに従って大きくなる。図6は板厚 1 mm の

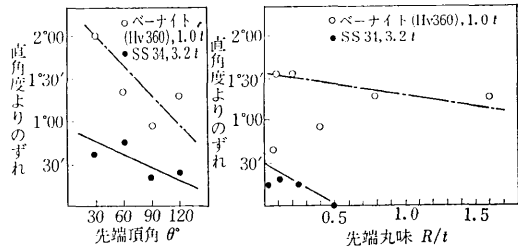


図6 輪郭形状と直角度よりのだれ

Hv 360 の切口面の直角度におよぼす輪郭の影響を示したものである。切口面が直角よりずれる原因は、打抜き時の板にかかる応力が打抜き後に解放され、スプリングバックとして現われたり、ダイス切刃が打抜き時後退することによると言われている。しかしこの場合の型は割り型ではないので、前者の原因と思われる。

凸部輪郭ほど直角度が低下するのは、打抜き時に引張力が大きくそのスプリングバックが大きいためであろう。したがって比較に示した軟鋼に比べてペーナイト鋼の直角度が大きく劣るのはペーナイト鋼の降伏応力が高く、スプリングバック量が大きいためである。しかしながら、ペーナイト鋼の精密打抜きで大きく直角度がずれテープがつくのは、せっかく切口面を平滑にし、寸法精度を高めた効果を打消すことになる。この対策は逆押え力を増すこと、およびダイス切刃の丸味をできるだけ小さくすることであるといわれる。

(4) 板の方向性

ペーナイト鋼の曲げ加工において、大きな方向性があり、圧延に平行方向の曲げでき裂が入り易いことはよく知られている。同じことは精密打抜きにおいても現われ、圧延に直角方向のせん断は比較的容易であるが、平行方向のせん断ではき裂が消えにくい。図7は多少摩擦した型を使い、破断面が生ずる条件下で各種のペーナイト鋼の方向性を比較したものの例で、圧延に平行方向にはあらさが大きく、き裂が生じていることを示している。またここでペーナイト鋼の種類により方向性の大きいものと小さいものがあることに注意したい。

これらの結果はペーナイト鋼の精密打抜きにおいて、材質の選択および板取り方向の決定の際考慮すべき事項

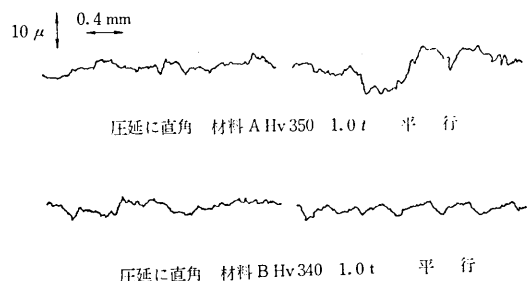


図7 せん断面表面粗さの方向性 (微小な破断面発生面を含む)

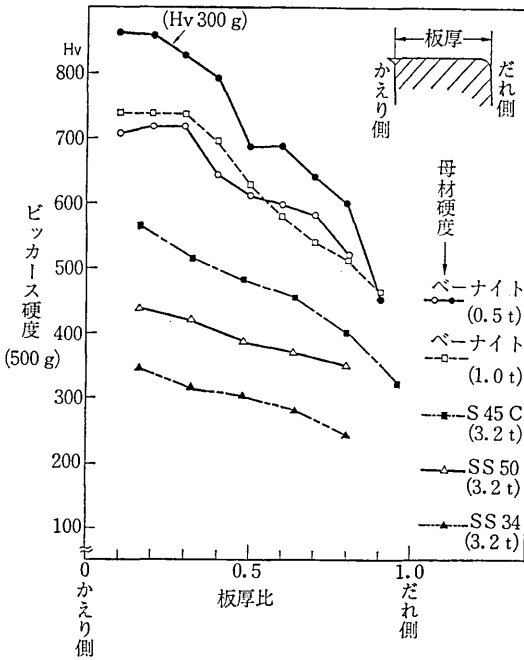


図 8 セン断面表面硬度

であることを示している。またこの方向性は慣用打抜きの場合にもかなり明瞭になる。

#### 4. セン断面の硬化

##### (1) 切口端面の表面硬化

せん断切口面に高い耐摩耗性が要求される部品の場合には、ペーナイト鋼では後で熱処理を行わないので、精密打抜きによる切口面の加工硬化が利用できる。図 8 はせん断面の表面硬度を表面をわずかにラップ仕上げした後、マイクロピッカース硬度計で 500 g の荷量で測定した結果である。だれ側からかえり側に向かうにつれて硬度は上昇するが、これはかえり側に近づくにつれて加工硬化が進んでいることを示すもので、せん断加工の機構から考えて当然といえよう。

ペーナイト鋼の場合、母材硬度が高いにもかかわらず、最高硬度で母材硬度の約 2 倍にも達しており、しかもその値は使用した型の硬度にほぼ等しいものであり、きわめて高い値を示している。このように大きな硬度上昇は、母材硬度だけで推定される耐摩耗性以上のものを示すことは間違いないであろう。比較のため示した、後で熱処理をして使用する軟鋼や S 45 C 材の場合についても加工硬化は大きく、表面硬度の最大値と比較した硬度上昇率でみると図 9 に示すように 2.5 倍から 3.4 倍にも達しており、鋼材に限れば母材硬度上昇率は母材硬度が低いほど大きくなっている。従来、耐摩耗性を増すため熱処理をして使っている部品の中には、この硬化を利用し得るものもあるものではなかろうか。

##### (2) 内部硬度

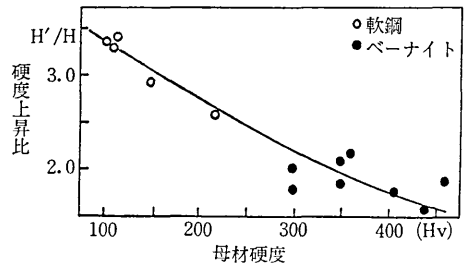


図 9 各種材料のせん断面の硬度上昇率

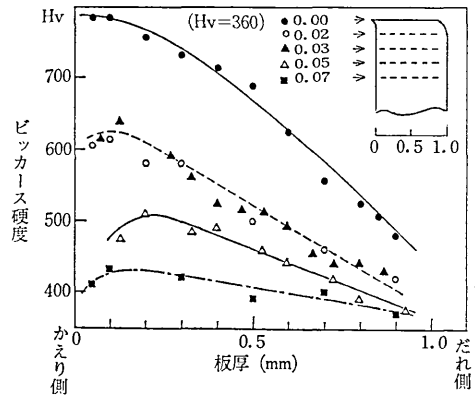


図 10 セン断切口断面の板厚方向の硬度分布 (1.0 t)

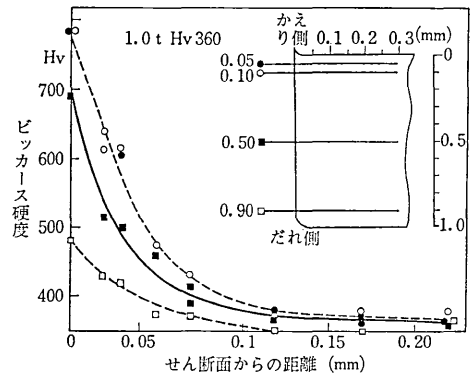


図 11 セン断切口断面の板幅方向の硬度分布 (1.0 t)

耐摩耗性の点から考えると、表面硬度だけでなく、内部の硬度上昇すなわち硬化層の幅も重要となってくる。図 10 は板厚方向に、図 11 は直辺部について幅方向に測定した硬度分布である。20~30 μ で硬度上昇が約半分は落ち、0.1 mm (板厚の 1/10) でほぼ母材硬度となっている。このことより真に硬度が高い層は、ごく表面層のしかもかえり側であることがわかる。

図 12 は直辺部の断面硬度分布を示したものであり、内部硬度の上昇状態が明瞭にわかる。先にペーナイト鋼の切口面の直角度は軟鋼に比べ悪く、切口面はかえり側で外に開いていることを考えると硬度が最も高い部分が接触点となり、耐摩耗の点では都合が良い。

図 13 はギヤの先端などに相当する凸部輪郭の硬度分

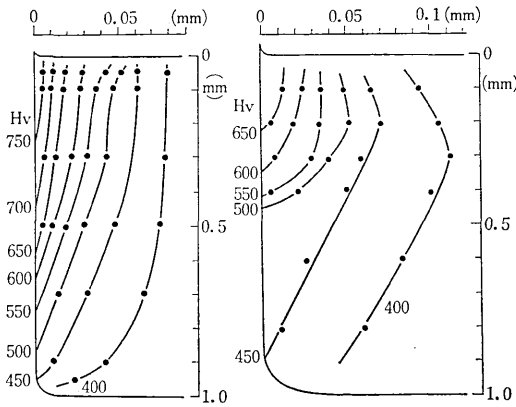


図 12 直辺部断面硬度分布 (Hv 360, 1.0 t)

図 13 凸部断面硬度分布 ( $\theta=30^\circ, R=0.4 \text{ mm}$ , Hv 360, 1.0 t)

布であり、表面硬度は測定されていないが直辺部よりは低く、一方だれが大きいことから明らかに硬度上昇の幅方向の異行は大きい。

### 5. 型 寿 命

広範囲の硬度にわたるペーナイト鋼について、その精密打抜きが可能であることを示したが、実用面からみれば型寿命がある程度以上長くなければ、実際に使用するわけにはいかない。そこでここでは、板厚 1 mm で硬度 Hv=350, Hv=360, Hv=410 の 3 種のペーナイト鋼について星形輪郭形状の型で、1,000~2,500 回の精密打抜き寿命試験を行なった。

#### (1) かえり高さとチッピング

型寿命を決めるのは一般にかえり高さであると言われている。図 14 にかえり高さの推移を示す。また図 15 に打抜き数  $N=1,000$  回,  $N=2,500$  回における発生したかえり高さと輪郭の関係を示す。かえり高さの値はかなりバラツキがあるが、この程度の打抜き回数では必ずしも急激なかえりの上昇は認められない。また輪郭が凸になるほど摩擦の進行が早く、かえり高さも増大している。

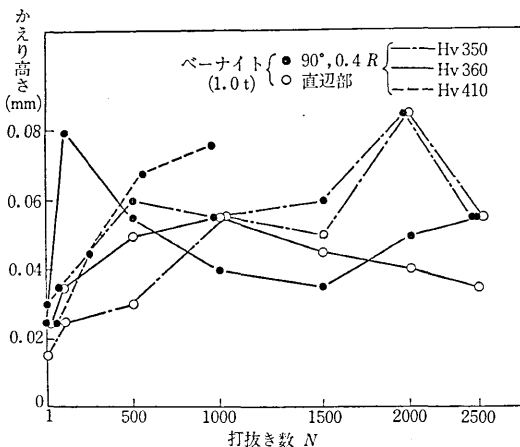


図 14 打抜き数とかえり高さ (1.0 t)

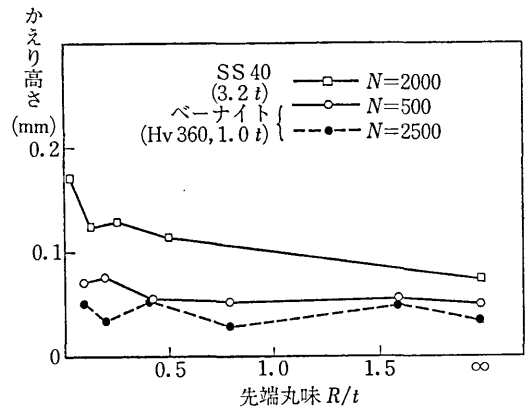
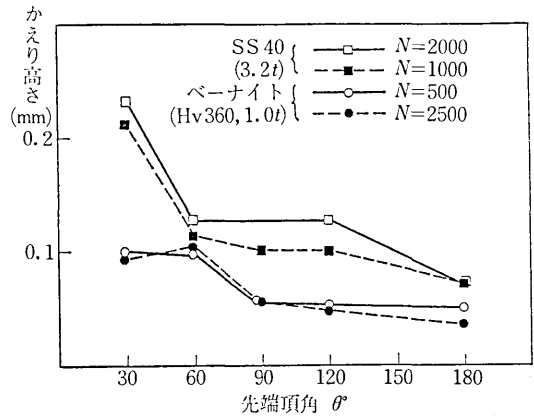


図 15 輪郭形状とかえり高さ

比較のため板厚 3.2 mm の SS 40 材の精密打抜きの結果を示したが、板厚の違いはあるにしてもペーナイト鋼の方がかえり高さが低いことは注目したい。

型寿命を決めるかえり高さは、後のかえり取り作業が経済的にできる限界で決められる場合が多く、その意味では板厚にはあまり関係なく絶対値が重要となる。ペーナイト鋼のかえり高さが低いのは一つには板厚の影響もあるが、一方ペーナイト鋼が軟鋼に比べてかたくてもろいため、大きいかえりが発生しにくいことにもよっている。またかえり発生は摩擦によるものばかりでなく、切刃のチッピングによっても生ずる。この実験ではかなりきびしい輪郭をもった型を使っているので、 $\theta=90^\circ$ ,  $R=0.1 \text{ mm}$ ,  $\theta=30^\circ$ ,  $R=0.4 \text{ mm}$  など、最もきびしい条件ではわずかなチッピングを生じていることは認められる。しかしながらこのチッピングは打抜きの初期に生じ、その量もわずかのようであり、そのためかえり高さもそれほど大きくはない。

#### (2) 表面あらさ

かえり高さだけ考えると必ずしも寿命は短くないが、図 16、写真 4 に示すように表面あらさは打抜き数が増すとともに増加する。Hv 410 材では  $N=50$  回程度より破断面が生じ始めて、その後打抜き数とともにその量を増す。この材料に切口面の完全な平滑さを要求する

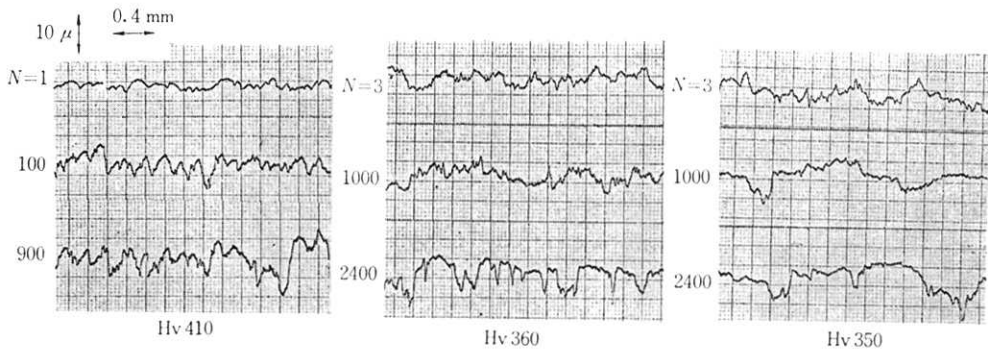


図 16 打抜き数と表面粗さ (圧延に直角, 1.0 t)

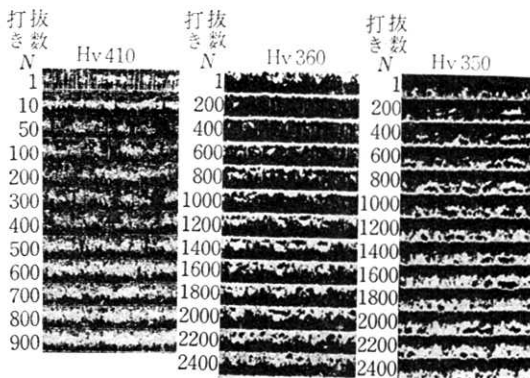


写真 4 打抜き数とせん断切口面 (直辺部, 圧延に直角, 1.0 t)

ならば、型寿命はわずか  $N=100$  回となる。これが Hv 360 材では同じ基準でみた型寿命は  $N=1,000$  回である。

切刃の摩耗によって生じた肌荒れ状破断面のあらさの値は、慣用打抜き時の破断面あらさに近い値を示しており、この時点では最早精密打抜きと言えないようにもみえる。しかしながら、精密打抜き製品は端面板厚方向に測定した平滑さを重んずるので、切口の一部に破断面ぐらいのあらい箇所があったとしても必ずしも障害にならない場合もある。

このようにペーナイト鋼の精密打抜きでは、型寿命を決定する要素はかえりではなく、肌荒れ状破断面であるのが特徴であろうが、用途によってはこの破断面が現われたからと言ってすぐ寿命であるとか、精密打抜きの利点は失われたとするのは早計であろう。このような破断面は通常材の精密打抜きでクリアランスが過大の場合に生ずるものと似ているが、ペーナイト鋼のような硬質材の打抜きでは、切刃の摩耗により実質的クリアランスが増大し、同じ現象が生じたものと思われる。

この寿命試験の結果、Hv 400 以上では少数の精密打抜きは可能でも、すぐ破断面が現われ寿命はきわめて短かく実用にはならないであろうことが明らかとなった。

### 6. 精密打抜き性

ペーナイト鋼には強い方向性が存在し、かつ材料によ

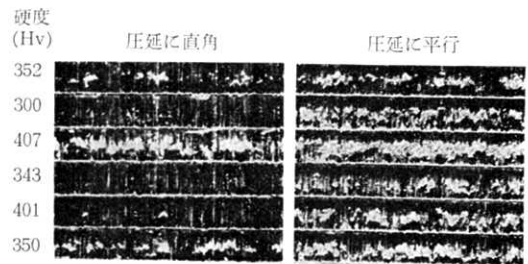


写真 5 各種ペーナイト鋼の精密打抜き性の差 (直辺部, 1.0 t)

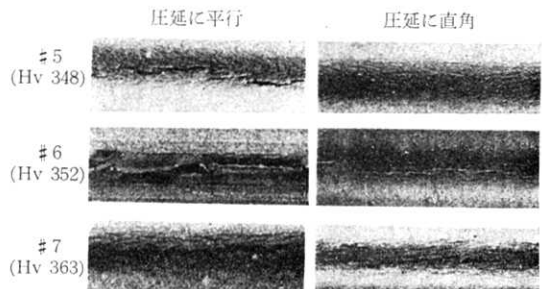


写真 6 曲げによるき裂 ( $\phi=90^\circ$ ,  $r_p=0.5$ , 1.0 t)

って方向性が強いものと比較的弱いものが存在することはすでに指摘した。さらにこの実験を通じて、市販されているペーナイト鋼の中に精密打抜き性にかなりの差があるらしいことに気がついた。ペーナイト鋼を選択する時は母材硬度で指定するので、精密打抜き性は同一硬度で比較しなければならない。写真 5 は同一条件で精密打抜きを行なったときの切口の表面状態の比較であるが、使用したペーナイト鋼の間はかなり大きな材料差が認められる。

これらの精密打抜き性と曲げ性を比較するために、図 17 のような V 曲げ型を用いて曲げ試験を行なった。写真 6 は代表的なき裂の例である。またこれらのき裂の状態を定量的に比較するために、板表面のき裂幅の最大値および  $90^\circ$  V 曲げ後、図 18 のように再折曲げを行ない、その時の破断に要するエネルギーの値を求めてみた。図 19 に両者の比較を示す。これら写真 6、図 19 の結果より、ほぼ同一硬さのペーナイト鋼でも種類によって曲げ

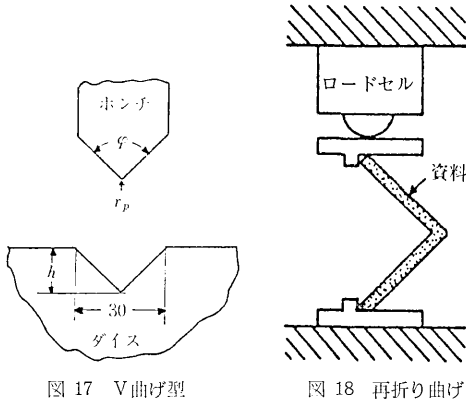


図 17 V 曲げ型

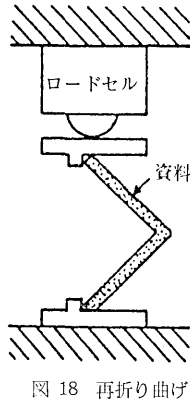


図 18 再折り曲げ

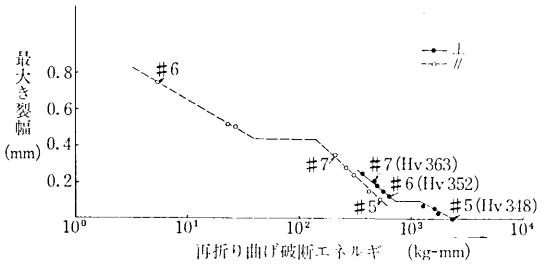


図 19 各種ベーナイト鋼の再折り曲げ破断エネルギーと最大き裂幅 ( $\phi=90^\circ, r_p=1.0, 1.0t$ )

割れとその方向性からみた曲げ性に大きな差があることがわかる。

ここで興味あることは、これらの曲げ性は前述の写真 6 の精密打抜き性と良い対応があることである。これは打抜きと曲げの破断が不安定くびれを併なわない種類の破断であることのためであろうが、実用的には簡単な曲げ試験により精密打抜き性が推定できることを示している。

しかしながら、先に述べた寿命試験でも、かたさの低い材料の方が寿命が短いというような結果が出ており、同程度の硬度の材料間で必ずしも硬度が上がると

もに精密打抜き性や型寿命が低下するとは言えない。これらの結果はベーナイト鋼のメーカ間にかんがりの違いがあり、ベーナイト鋼の素材成分や熱処理条件が異なるためと思われる。ベーナイト鋼はその製造工程からして変化し得る因子が多く、必ずしも現時点で加工性からみて最適な条件で製造されているとは考えられないので、今後の材質の改良の余地が残されていよう。

また板を使用する立場としては、特に精密打抜きの場合には型寿命を考慮して、できるだけ柔らかいベーナイト鋼を選ぶのは当然であるが、このように種々のベーナイト鋼が市販されている以上、同じかたさでも方向性と加工性を検討して材料を選ぶことが重要であろう。

む す び

ベーナイト鋼が精密機械部品へ適用されるのは現在やっと本格的になりつつある段階であり、さらに一步進んだ段階である精密打抜きにいたっては、実際の例がわが国においては今のところほとんどない。なにぶんにもかたい材料であり、精密打抜きを行なう時にはここに指摘した以外の種々の解決すべき技術的問題点も出てこようし、それらは必ずしも簡単に解決されないかも知れない。しかし、このような硬質な材料が精密打抜きできることによる利点はかなり大きいので、今後の発展を期待したい。なお、本実験に当っては電電公社電気通信研究所工博中川三男氏、西畑三樹男氏、升森宏介氏、日立製作所木下素男氏ならびにベーナイト鋼メーカ各社の御協力を得た。

(1972年6月6日受理)

参考文献

- 1) SANDVIK 社：“SANDVIK Hardflex Fabrication data” (昭 46)
- 2) 中川, 鈴木, 木下：“塑性と加工.” Vol. 12, No. 129 (昭 46)

