

薄板プレス加工への局部熱処理の利用

Improvements of the Formability of Sheet Metals by Local Heat-treatments

町田輝史*・中川威雄*

Terufumi MACHIDA and Takeo NAKAGAWA

せん断、曲げ、伸びフランジ加工、張出し、深絞りなどの薄板プレス加工では、局部熱処理を利用することにより加工性を著しく改善することができる。成形の様式に合わせてブランク局部を選択的に加熱や冷却し材質を変化させつつ加工する。局部熱処理の利用による加工性の改善についての理論及び筆者らが開発した幾つかの実用的方法とその実験結果の概要を簡単に紹介する。

1. はじめに

薄板のプレス加工性を向上するために、主として材料製造側における品質改善の研究と実際生産の側における成形技術の開発研究が、これまで盛んに行われ多くの成果を生み出してきた。しかし、同時に、成形技術により合った材料の特性設計あるいは材料特性をより生かした成形技術の設定などの重要性があらためて認識されている。両者の間の旧来の情報伝達を更に進めて、むしろ積極的に境界を取り去った形で、連続的にしかもある場合には微視的にまたある場合には巨視的、総合的に取り組むことが望まれる。このような薄板の材料特性と成形技術を一体のものとして考え、製品の最適な生産システムを見出すという立場で、筆者らはプレス加工の場で熱を利用することによって加工性を向上する方法の開発研究を進めてきた。

熱の利用の仕方は、旧来用いられてきた温・熱間加工におけるものと異なり、プレス成形の応力条件または様式と熱（温度）による材料性質の変化を考慮して、加工する薄板の必要な部分だけを必要な程度選択的に加熱したり冷却するものである。この選択的熱処理（selective heat-treatment）をその形の上から局部熱処理（local heat-treatment）と総称することにした。

この局部熱処理の利用目的を簡単にいえば、ある成形をしようとするときに、i)ある部分が変形し難いことが加工性を上げることになる場合にその部分の変形抵抗を増す。ii)ある部分の変形抵抗を下げることに有利になる場合にその部分の特性を変化させる。iii)ある部分が高い延性を持つと加工性が上がる場合にその部分のみの特性を変化させる。iv)ある部分の延性劣化が加工性を上げる場合その部分を硬脆化する。などである。もちろん成形の様式によって局部熱処理の目的は異なるので、これらのどれかあるいは併用して加工性を上げようとする。以下プレス加工のうち代表的なせん断加工、曲げ加工、伸びフランジ加工、張出

し加工、深絞り加工別に、この局部熱処理の利用法を紹介する。

2. せん断加工への局部熱処理の利用

せん断加工では、所望の形に精度良く打抜き・穴明け・せん断が行なえ、同時にできるだけ低いせん断力でしかも後続加工でトラブルを生じないことが問題となる。大抵の材料は冷間でせん断できるが、難しいものもある。硬くて脆い材質の材料をせん断するのに、その部分を局部的に加熱し延性を増すと、ある程度満足のゆくせん断製品を得ることができよう。例えば普通鉄およびパーライト可鍛鉄も、熱間ではある程度せん断可能となる。¹⁾²⁾ また電子ビームによって硬くて脆いタングステン線を局部加熱しせん断することに成功した方法³⁾は薄板でも利用できよう。

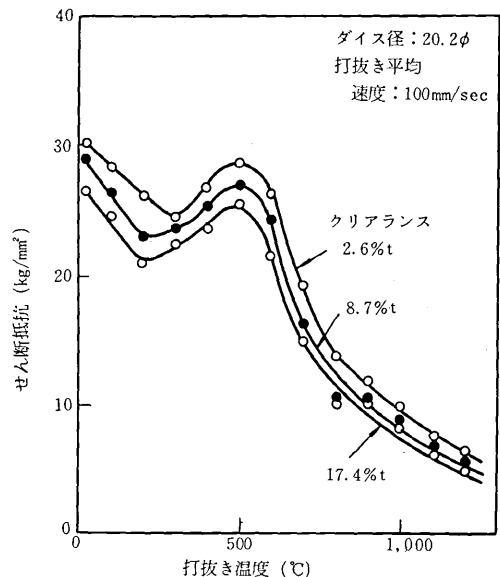


図1. 軟鋼板 (SPHC, 5.7mm t) の打抜き温度によるせん断抵抗の変化⁵⁾

* 東京大学生産技術研究所 第2部

せん断抵抗の軽減やせん断精度改善すなわちだれやかえりが少なく切口面が真直ぐで滑らかであることは、実用上一層重要な問題である。金属の熱間せん断については、実際生産ラインで多く用いられているが、せん断抵抗が減少しせん断面が増加するという程度の特徴は予測できるが公表された具体的データは少なく⁴⁾、支障をきたしている。特にプレス加工で最も広く用いられる軟鋼で詳細なデータを得る必要がある。

そこで筆者らは、広い温度範囲で軟鋼と18-8ステンレス鋼のせん断抵抗、打抜き発生音の大きさ、製品寸法精度、切口面性状などを調べた⁵⁾。図1は一例として軟鋼のせん断抵抗の変化を示す。また軟鋼は青熱域でせん断すると切口面がかなり改善された製品が得られることを示した。図2にそのせん断切口面輪郭を示すが、クリアランスが少なくても約500°Cの打抜きが二次せん断面もなく真直ぐである。通常のプレス速度でこの温度の加熱で十分であるから、スケール発生

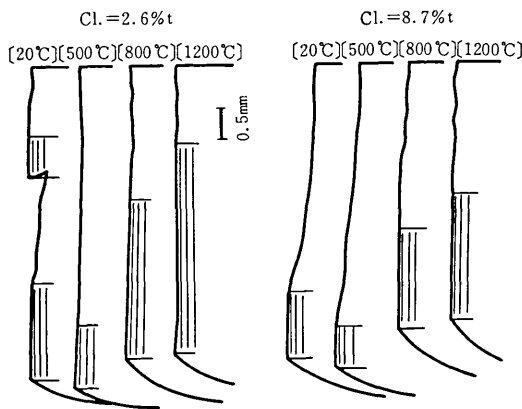


図2. 軟鋼板 (SPHC, 5.7mmt) の各種打抜き温度における切口面輪郭⁵⁾

等のトラブルも少なく十分実用性が高い方法である。また鍛造用素材取りとして丸棒せん断へ応用すると効果的となる。

3. 曲げ加工への局部熱処理の利用

曲げ加工では、曲げ軸に沿って板厚方向にひずみこの配が生じるので、まず引張り側表面でき裂しやすい。またせん断縁を持つ加工片では、その縁からの割れもかなり多く見られる。更に一度成形しても離型後形状が保たれないというスプリングバックなどの現象もある。これらの欠陥発生を防止するのが重要な課題である。

局部熱処理の利用は、他の加工法に比較して曲げの変形部分が限定されているので行いやすい。木内⁶⁾は一つの局部加熱曲げ法の考えを示しているが、それに

よると厚板などでポンチ側を加熱軟化すると曲げ部の肉べりや外表面の伸び変形が抑制され加工性が向上するであろうとしている。き裂の発生を防止するその他の局部熱処理法としては、電子ビームなどによる曲げ部の局部焼鈍⁷⁾や引張り側を加熱軟化しながら曲げる方法がある。

プラスチック薄板の曲げ成形の大部分は加熱して行なわれている。冷間ではアクリル板のようにわずかの弾性曲げでき裂したり、ポリエチレン板のように曲げることができてもスプリングバックが大きかったり時間とともに成形時の形状が変化するためである。しかし作業性・加工速度などからいって、できれば常温で行うのが好都合である。図3は、筆者らが開発した接触加熱曲げ法⁸⁾をV曲げを例に通常の曲げ法と比較して示したものである。分割ダイスの間から、内蔵した抵抗発熱体により100~200°Cに温めた加熱板を、成形前あるいは成形中にプラスチック板に押しつけ曲げる。この方法は冷間曲げと類似しており作業性がかなりよく且つ全成形時間もかなり短かくでき実用的である。しかも、アクリル板でも図4のように90°曲げが可能

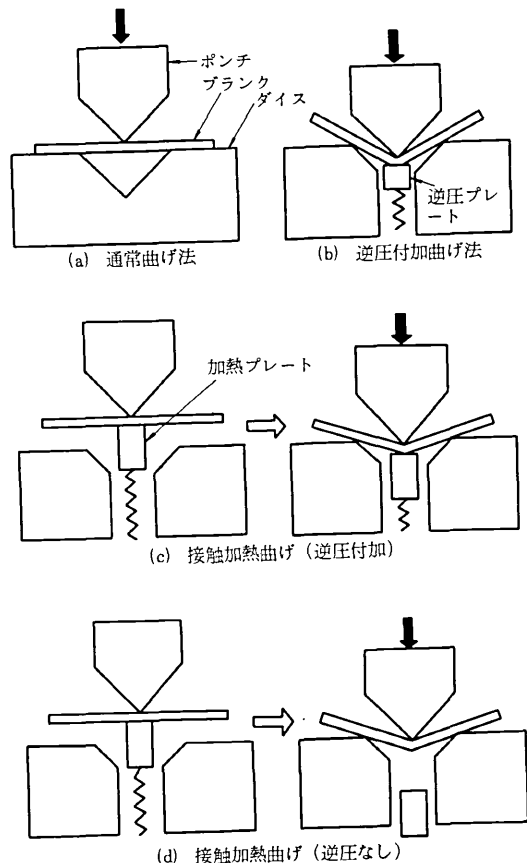


図3. 接触加熱V曲げ方法⁸⁾

となる。更に曲げ成形品には、プラスチック特有の現象である白化も軽減でき、スプリングバック及びその経時変化もほとんど零に抑えることが可能となった。

4. 伸びフランジ加工への局部熱処理の利用

伸びフランジ加工は、縁が二軸引張り変形状態で進行する。その成形限界は、實際上冷間せん断した縁の伸び変形能によって決まる。この点では前述の曲げ加

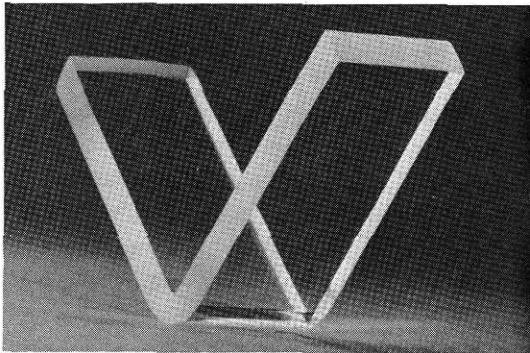


図4 アクリル板の接触加熱曲げ製品例⁹⁾

工の縁割れと対策が共通するものである。せん断縁には加工硬化や微小き裂が存在するので、切削した縁すなわち母材に比較すると、伸び変形能は大幅に低下している。従って、この冷間せん断縁を局部熱処理し伸び変形能を回復すると、成形限界を改善することができる。実作業ではトーチなどで焼鈍し加工する例もあるが、この種の焼鈍については未だ詳細な報告は公表されておらず、焼鈍温度及び改善効果については明らかでない。一方冷間ではなく熱間でせん断すれば、焼鈍と同様の効果を生じることが期待できる。この場合の縁は、少なくとも加工硬化は減少するか存在しないから冷間せん断縁より延性があるであろう。川瀬ら⁹⁾は、

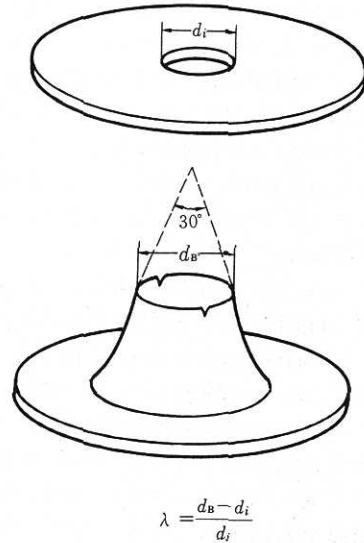


図5. 穴広げ試験法

オーステナイト・ステンレス鋼板を60~100℃の低温加熱し打抜き、冷間での穴縁の延性が、加工誘起変態マルテンサイトの生成が減るためかなり改善されることを報告している。

主に軟鋼板について、筆者らは高周波誘導法を用いて冷間せん断縁の局部急速焼鈍及び熱間せん断した縁の伸び変形能を広範囲に調べた¹⁰⁾。図5は伸びフランジ加工性を評価するためによく用いられる穴広げ試験法を示す。穴広げ限界は、例えば熱延鋼板の場合図6に見られるように、局部焼鈍により大幅に改善され未焼鈍冷間せん断縁の約3倍、切削縁の約80%の水準まで達した。なおこの局部焼鈍は誘導法を用いたので熱処理時間が短く且つプレスラインへ組込み可能である。またこれらのデータは実際プレス加工の際、合理的な指針を与えるであろう。

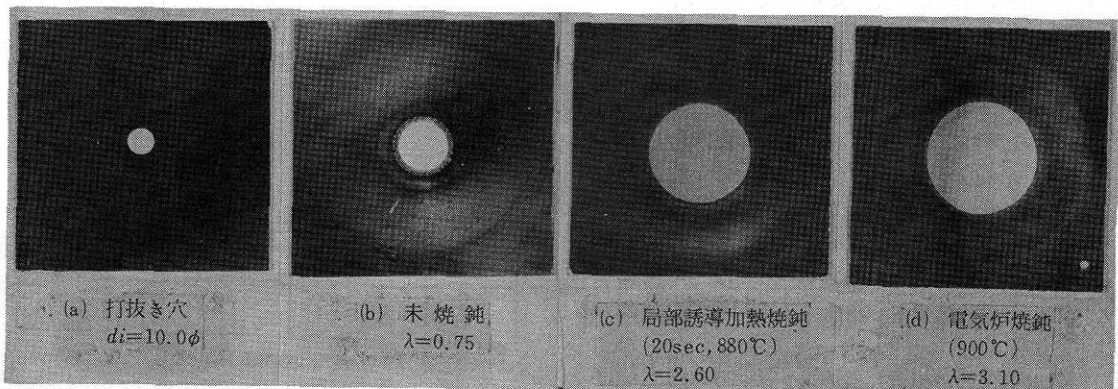
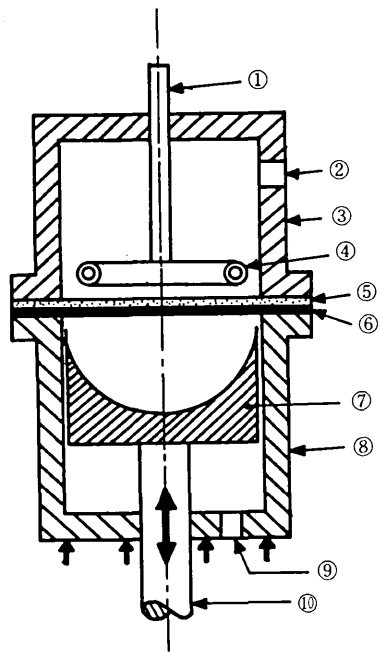


図6. 局部焼鈍をした軟鋼板 (SPHC, 3.2mm) の穴広げ製品外観¹⁰⁾

5. 張出し加工への局部熱処理の利用

張出し加工は、平板を剛体ポンチなどで膨らませる成形で二軸引張りによる伸び変形が主体となる。なるべく深くしかも板厚が一様であることが望ましい。一般に成形限界を向上するには、延性が高いこと及びひずみの伝播がよくなるので加工硬化指数が高い方が望ましい。18-8ステンレス鋼は変形した部分がMd変態によりマルテンサイト組織を生成し順次強くなるのでよく張出すことができる。この種材料は、低温で成形したり変形の進行に合わせて局部的に順次冷却する熱処理法の併用が一層加工性をよくするであろう。²²⁾

一方、製品性能の上からは板厚不同が重要な問題である。プラスチック板のほとんどは、局部加熱を用いる真空または圧空成形で行われている¹¹⁾が、この点で例えば温間真空成形でプラグ補助法や反転法を用いて板厚不同を軽減する方法がとられる^{11)、12)}超塑性を示す金属、例えばZn-22Al共析合金は約250℃の温間で数100%にも昇る著しい伸びを示し、近年成形の研究も



- 1. 誘導コイル導板
- 2. 圧縮空気吹込口
- 3. 固定チャンバ
- 4. 誘導コイル
- 5. 加熱板
- 6. ブランク
- 7. (半球)型
- 8. 可動チャンバ
- 9. 排気口
- 10. ラム

図7. 不均一局部加熱による超塑性板の圧縮空気張出し法¹⁶⁾

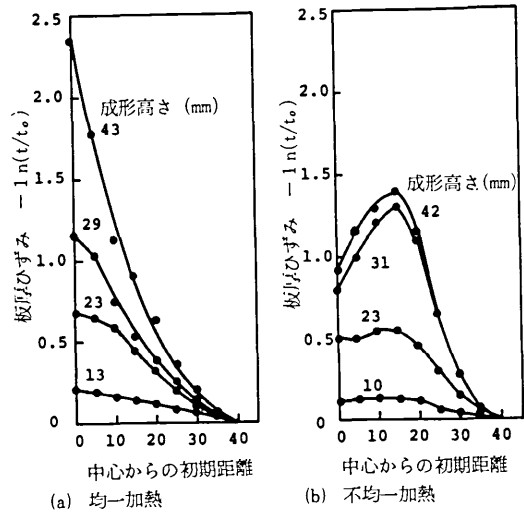


図8. Zn-22Al超塑性板の自由バルジ成形品の不均一加熱法による板厚ひずみの一様化¹⁶⁾

盛んに行われている^{13)、14)}が、やはり板厚不同の問題をかかえており実用化し難い面がある。Johnsonら¹⁵⁾はこの材料のハット成形にプラグ補助や反転法を用いひずみ分布を改善している。しかしこれらの方法は成形速度・工程数・装置の複雑さなどの問題は残る。

そこで、温度によって超塑性が異なることを利用し、ブランクに適当な温度こう配を持たせて成形する方法が有効と考えられたので実施してみた。変形しやすく薄肉化して困る部分を、むしろ超塑性を示す温度以下まで局部冷却するかあるいは加熱しないで張出すわけである。図7は筆者らの行った超塑性材の局部加熱空気圧成形法¹⁶⁾である。圧縮空気を吹込むので成形速度が大きく、誘導加熱法を採用しているので急速加熱でき且つ加熱板とブランク以外は室温に保たれるので作業性がよい。加熱板の材質・寸法・空気孔の位置などの条件によりブランクの温度こう配が変えられる。例えば図8は自由バルジ成形での板厚ひずみが、均一加熱と不均一加熱(温度こう配)でどう変化するかを比較したものである。頂点近傍の薄肉化傾向が、頂点近傍の温度を約50℃低目にしたことにより著しく改善され成形品の板厚はかなり一様化された。延性を多少犠牲にしても十分変形しうるこの種の材料は、温度こう配法による板厚制御が利用できる面が多い。

6. 深絞り加工への局部熱処理の利用

深絞り加工は平板をダイス穴内に流し込んで容器を得る方法であり、通常剛体ポンチで壁になる部分を引き込んで成形する。その際一工程でどの位深い容器を得ることができるかすなわちどの位大きな平板を絞り

込むことができるかということが古くからの興味を中心であった。多くの実験研究や理論計算により、その加工限界は荷重を負担する部分例えばポンチ頭部やフランジから流入して形成された壁部の材料の破断抵抗が大きく、フランジ部の縮みフランジ変形抵抗が低いほどよいことが分ってきた。薄板の深絞り性の尺度としてよく用いられるランクホード値（塑性異方性係数、 r ）が高いことはこの条件を満たすことになる。

深絞り加工での熱の利用は比較的古くから、例えば常温加工性の悪いマグネシウム及びその合金、チタン、ジルコン、ロジウムなどは温熱間加工して所望の形状を得ている。局部熱処理の概念は、室温より深絞り性が悪くなるアルミニウム及びその合金の熱間深絞り、冷却ポンチを用いて荷重を負担する部分を冷却し破断抵抗を上げる絞り方式を採用したKostron,¹⁷⁾ Lenz,¹⁸⁾ Klyucharev,¹⁹⁾らの実験に見ることができ、いずれも限界絞り比を向上させている。また戸沢²⁰⁾は発熱体を組み込んだ工具を用いる周辺加熱深絞りで成果を得ている。これらは、ポンチ頭部材料の冷却強化及びフランジ部材料の加熱軟化法といえる。さらに積極的に宮川²¹⁾は、中央部を急冷却しフランジ部に絞り応力と同種の熱応力を発生させて絞る方法を検討し良好な結果を得た。しかしこれらの方法はいずれも深絞り工程や装置が複雑でしかも加熱などに時間がかかりすぎるという欠点があり、ほとんど実用にはならなかった。最近河合ら²²⁾は、オーステナイトステンレス鋼で加工誘起変態を利用して深絞り限界を向上する方法を発表している。これは室温以下で加工するとマルテンサイト変態が促進されて強度が上がるという古くから知られるサブゼロ加工法の原理を薄板成形で見事に生かしたもので、常温深絞りの際ポンチ頭部を冷却しながら行うものである。

筆者ら²³⁾は、まず最も広く用いられている軟鋼薄板で、フランジ加熱軟化し深絞りする方法の実用化を一步進めるために、深絞り装置に高周波誘導装置を接続し

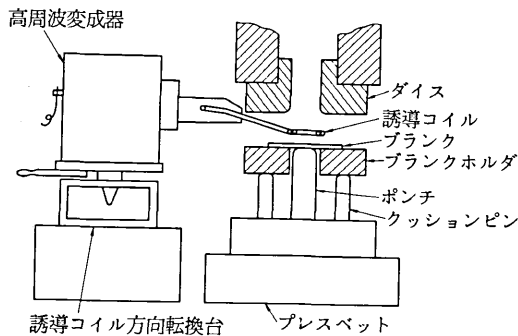


図9. 高周波誘導法による局部加熱を利用した深絞り方法²³⁾

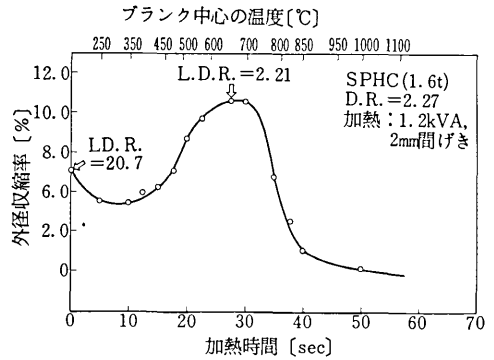


図10. 軟鋼板の青熱強化深絞りによる深絞り限界の改善²³⁾

た。更に軟鋼の青熱脆性域での強度上昇を利用し、この温度まで破断危険部のみを局部加熱（青熱）しながら深絞りする新しい方法を試みた。図9にそれらの方法を示すが、いずれもblankだけを急速に加熱するため冷間に類似した作業を行なうことができ、予想どおり加工限界も向上できた。とくに、局部青熱法は温度も低く表面酸化などのトラブルも少ないので実用化しやすい。図10に、このポンチ頭部青熱による外径収縮率の改善結果の例を示す。

これに対して、深絞り成形にはいる前にblankを同様の考え方で局部熱処理する方法が考えられる。この種の研究には、例えば加工硬化した材料のフランジ部のみを局部的に焼鈍軟化して加工限界を上げる実験がアルミニウム及びその合金で行なわれている^{24), 25)}こ

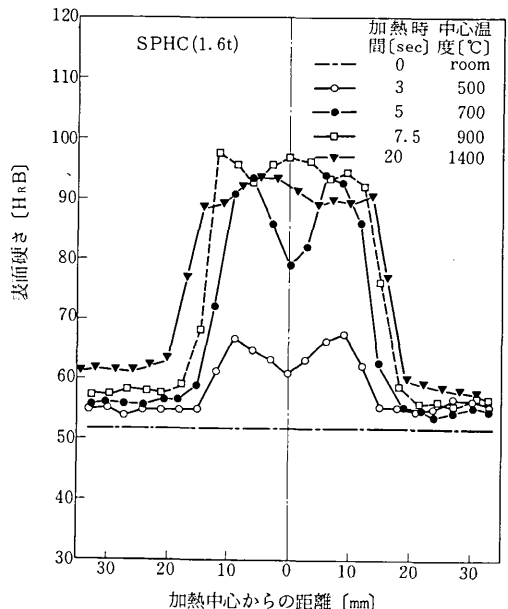


図11. 局部焼入れによる軟鋼板の硬さ上昇²⁴⁾

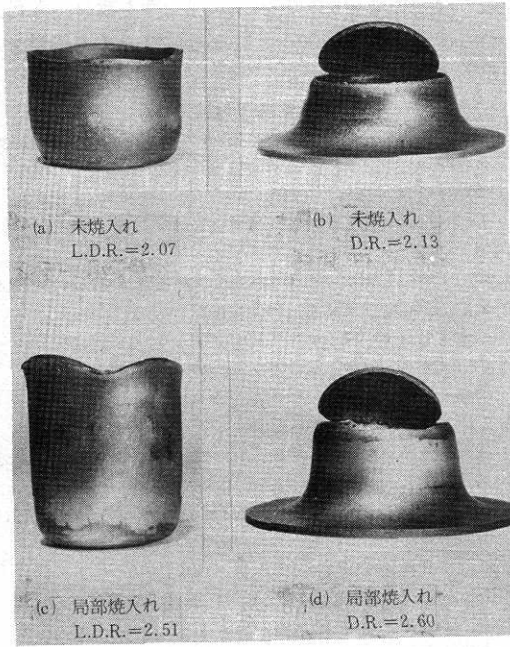


図12. 局部焼入れをした軟鋼板 (SPHC, 1.6mm) の深絞り限界の改善

れらは特殊な例であるが、筆者ら²⁶⁾は、やはり極軟鋼での成形限界の向上をはかった。極軟鋼は加熱し焼入れしても組織変化しないため焼入れ硬化能を持たないものと考えられていたが、約700°C以上の高温から水焼入れすると強度水準を50~100%も上げることができるとを見出した。そこで高周波誘導による急速加熱焼入れを薄板局部に行った。その結果、図11に示すように局部的に著しく硬さを上げることができた。このような不均質なブランクの深絞り限界は、焼入れしないものに比較し図12のように著しく向上した。深絞りの際破断する危険のある部分のみを予備熱処理(焼入れ)したことにより、縮みフランジ変形抵抗はそのままなので、深絞り限界を上げることができたわけである。この方法は、冷却ポンチによる熱間深絞り法などに比較し、単純な冷間加工工程であること、生産性のよいこと、表面酸化が少ないこと、自動車部品のような複雑且つ大型の成形に応用可能であることなどの利点があろう。

7. 局部熱処理の展望

以上加工性を向上するための薄板プレス加工における局部熱処理の利用について概説した。一方熱が塑性変形の主役として用いられる場合もある。線材や管の移動する誘導加熱コイルによるダイスレス引抜き^{27), 28)}宇宙船などに使用する高張力金属の成形に用いられる

表1 薄板プレス加工への局部熱処理の利用例

加工様式	局部熱処理による材質変化				
	変形抵抗増加	変形抵抗減少	変形能の増加	変形能減少・脆化	熱塑性・その他
せん断			* 鑄鉄のせん断 ^{1), 2)} ● 電子ビームによる局部加熱打抜き ³⁾ ● 加熱ポンチせん断 ³³⁾	* 青熱せん断 ^{4), 5)}	
曲げ		● 局部加熱曲げ ⁶⁾	● 局部焼鈍 ⁷⁾ ● プラスチック板の局部接触加熱曲げ ⁸⁾		● 線状加熱曲げ ³²⁾ ● ひずみ取りスポット加熱 ³⁰⁾
伸びフランジ加工			● せん断縁の局部焼鈍 ¹³⁾ * オーステナイトステンレス鋼の低温加熱打抜き ⁹⁾		
張出し	● 局部焼入れ軟鋼板の張出し ²⁰⁾	● 超塑性板の局部加熱張出し ¹⁶⁾ ● プラスチック板の局部加熱真空圧空成形 ¹¹⁾			
深絞り	ポンチ頭部材料の ● 強制冷却熱間深絞り ^{17), 19), 21)} ● 青熱強化 ²³⁾ ● 加工誘起変態の利用 ²²⁾ ● 軟鋼の局部焼入れ ²⁶⁾	フランジ部材料の ● 周辺加熱軟化 ²⁰⁾ ● 加工硬化材の焼鈍軟化 ^{24), 25)} ● 誘導加熱軟化 ²³⁾			

アンダーラインは筆者らが検討して成果を得た方法
 *必ずしも局部加熱に限らない可能なもの

時効あるいはクリープ成形²⁹⁾あるいは部材を局部的に加熱冷却することによって生じる塑性ひずみを利用する熱塑性加工^{30),31)}としては、造船所で船体などの厚鋼板に用いる線状加熱曲げ法³²⁾また薄板のひずみ取りに用いるスポット加熱法などがその例である。やや特殊であるが、高速せん断などの高速加工も間接的に熱を利用していることになろう。表1に薄板のプレス加工様式および期待する材質変化別に、代表的局部熱処理の利用法をまとめて掲げる。成形の種類によって応力条件が定まるから、それに合わせて局部熱処理を行わない材質を適切に変化させなければならない。表中のアンダーラインをした方法は、これまで述べた筆者らが開発し成果を得たものである。

薄板の加工性を上げるために局部熱処理を利用する方法はこれまで述べたようにならかなり効果的である。しかし局部熱処理という新たなプロセスが加わるので、他の方法で改善が期待される場合それとの比較でメリットを確かめる必要がある。筆者らの局部熱処理法は実用性を第一に考えたものであり、また他の方法が見出せないか、あっても改善効果が小さいことが多いので十分利用価値が高いと思われる。ところで、局部熱処理をどのように行なうかについて一般論を言えば、加熱冷却法は処理時間が短いこと、安価なこと、ラインへ組込み可能なこと、材料の取扱いが容易なこと、表面酸化などで大きな損傷がないこと、温度こう配を正確に得るため熱伝導に勝つ急速加熱であり且つ制御容易なことなどが要求される。局部熱処理をする対象・条件に合わせ、これらを十分考慮して、誘導加熱法、ガス吹付け法、火炎法、輻射法、直接通電法、電子線やレーザーなどのエネルギービーム利用法、接触加熱法などを適切に選択すべきであろう。

8. おわりに

薄板の加工性を改善するためには材料特性と成形技術を一体のものとして考えることも必要である。このような観点から、ここでは筆者らが開発した方法を中心に、プレス加工の場で局部熱処理を利用する幾つかの方法とその効果について簡単に紹介した。とくに、

広く用いられる軟鋼などの薄板を対象とした実用性の高い方法で、せん断・曲げ・伸びフランジ・張出し・深絞りなどの薄板加工で著しく加工性を改善できた。これらの手法は薄板加工と異なる分野でも適用できる面があると思われる。

参考文献

- 1) 中川・町田・鈴木・須山：昭和49年塑加春講論，(1974)，337.
- 2) Baker, C. R. : Foundry, 90-8 (1962), 42.
- 3) 宮崎：金属，44-1 (1974)，49.
- 4) 石原・楠・大西・鈴木：精機学会春講シンポジウム，(1964)，131.
- 5) 中川・町田・鈴木・加藤：昭和50年塑加春講論，(1975)，305.
- 6) 木内：23回塑加連講論，(1972)，463.
- 7) 松本・上村・中村：プレス技術，10-6 (1972)，33.
- 8) 中川・鈴木・町田：塑性と加工，16-172 (1975)，379.
- 9) 川瀬・竹添：鉄と鋼，60-4 (1974)，S 319.
- 10) 町田・中川：塑性と加工，16-172 (1975)，365.
- 11) 浅野：現場マニュアル「熱加工成形編」，総合化学研究所，丸善(1971)。
- 12) Aslakson, R. C. : Tool & Mfg Engr., 50-1 (1963)，75.
- 13) 山口：塑性と加工，11-115 (1970)，591.
- 14) 武井：日本金属学会報，12-11 (1973)，815.
- 15) Johnson, W., Al-Naib, T. Y. M. & Duncan, J. L. : J. Inst. Metals, 100-1 (1972)，45.
- 16) 町田・中川：25回塑加連講論，(1974)，257.
- 17) Kostron, H. : Arch. Eisenhüttenw., 22-7/8 (1951)，205.
- 18) Lenz, D. : 同上，23-5/6, (1952)，173.
- 19) Klyucharev, N. A. : Vestnik. Machin., 37-8 (1957)，40.
- 20) 戸沢：塑性と加工，1-1 (1960)，23.
- 21) 宮川：日本機械学会誌，62-484 (1959)，47.
- 22) 河合・後藤・松田：塑性と加工，15-156 (1974)，11.
- 23) 町田・中川：同上，16-171 (1975)，291.
- 24) Ziegler, W. : Baender Bleche Rohre, 13-10 (1972)，511.
- 25) Erdmann, R. H. & Guttmann, V. : Aluminium, 42-5 (1966)，293.
- 26) 町田・中川：塑性と加工，16-169 (1975)，148.
- 27) Johnson, R. H. : Design Engng., (1969-3)，33.
- 28) 小畠・関口・小坂田：24回塑加連講論，(1973)，317.
- 29) Mass Production, 41-2 (1965)，70.
- 30) 栖原：塑性と加工，2-7 (1961)，114.
- 31) 石山：機械設計，15-5 (1971)，77.
- 32) 石川島重工造船部：石川島技報，11-35 (1959).
- 33) 山内・小牧：塑性と加工，10-99 (1969)，261.