

曲げ加工による鉄道車両用窓枠 フレーム製造の高能率化

新潟大学大学院自然科学研究科

助教授 新田 勇

(平成9年度研究開発助成 AF-97006)

1. 研究の目的・背景

図1は、鉄道用窓枠フレームの概略とフレームの断面を示す。図から分かるように、断面が変形コの字型をしたSUS304のチャンネルを原材料として用いる。このフレームの現在の製造方法は以下のものである。4隅のコーナー部を曲げ加工により作製する。次にストレート部とつなぐためコーナー部の端部の余分な部分を切断し、8箇所の溶接を行うことで窓枠1個が完成する。溶接部では熱により表面が変色するのでみがき加工を必要とする。このように現在の製造方法では、窓枠1個を作るのに非常に時間がかかっている。これを最初から曲げ加工だけで窓枠を作製し、最後に1箇所だけの溶接ですますことが出来れば、作業時間の大幅な短縮が可能となる。そのためには、塑性変形を高度に制御する技術確立する必要がある。

本研究を始めるきっかけは、新潟県内の中小企業より上記の相談を受けたことである。納入部品のコスト低減と品質の向上を同時に満足することが早急に求められている。

変形コの字型断面を持つチャンネルを曲げれば非対称な変形をすることは自明である。鉄道車両の窓枠はSUS304などのオーステナイト系ステンレス鋼で作りたいという

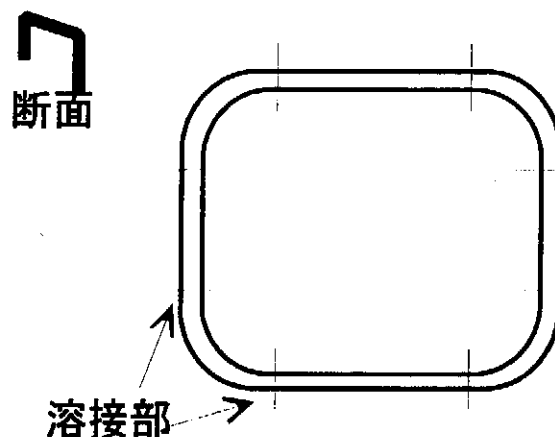


図1 鉄道車両用窓枠フレーム

要求が増えている。しかし、SUS304は加工硬化が最も激しい材料なので、曲げ加工には不向きである。

2. 研究方法

2.1 解決の糸口 当該企業との話し合いから、①アルミ合金A2017等では曲げ加工の実績を持っていること、②SUS304を使用すると曲げ加工近傍に余分なしわが出ること、が確認された。そこで、3種類の材料で準静的な応力-歪み曲線を求めることにした。図2に結果を示す。これより、アルミ合金A2017や高張力鋼HT60に比べてSUS304は加工硬化能が極めて高いことが分かる。アルミ合金A2017等では余分なしわを出さずに曲げ加工できるので、SUS304の応力-歪み曲線をA2017のものに

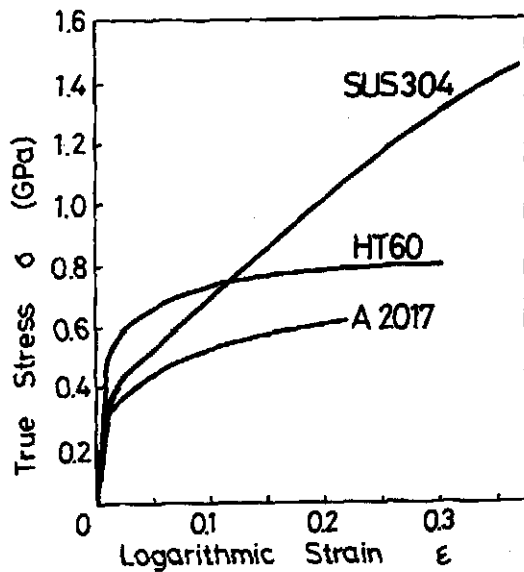


図2 真応力-対数歪み曲線

近づけることができれば，SUS304を使用し
てもしわを出さずに曲げ加工ができるもの
と考えられる．良く知られているように，
SUS304の加工硬化が激しいのは，加工
誘起マルテンサイト変態を生じるためであ
る．したがって，いわゆるMd点以上の温
度で塑性変形をあたえるようにすれば，
SUS304の応力-歪み曲線の形をA2017の
ものに近づけることができると考えられる．
本研究の曲げ加工は，準静的に行うもの
ではなく，ある程度速い歪み速度のもと
で行われる．そこで，高温・高変形速度
のもとで動的な応力-歪み曲線を求める
ことにした．

2.2 高温および高変形速度下における
応力-歪み線図の測定 試験片の形状は
図3に示すように，円形の横断面を持つ
ダンベル型である．試験温度は，室温
(20°C)および約200°C(雰囲気温度)
の2条件で，ひずみ速度は約 10^{-4} (1/s)
，約 5×10^2 (1/s)の2条件で行った．
低ひずみ速度での試験は，インスト
ロン型材料試験機(島津製作所製

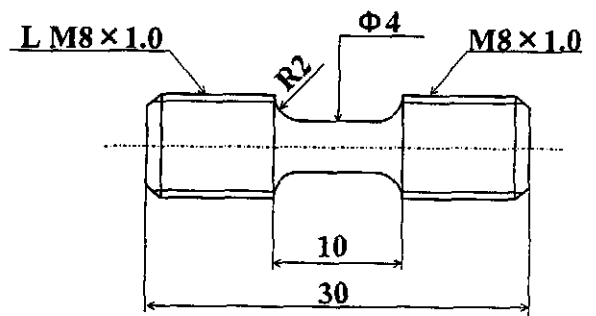


図3 試験片形状

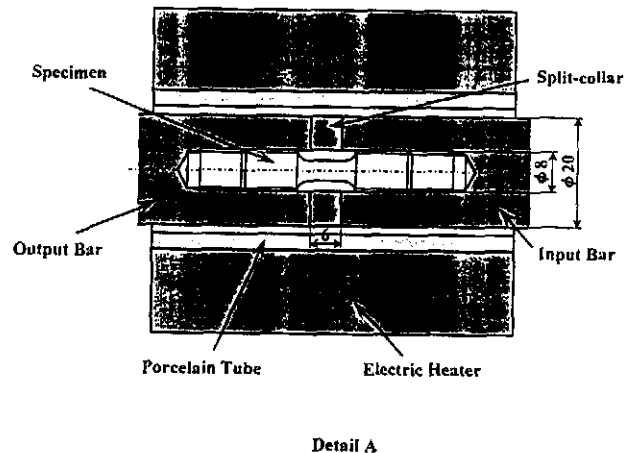
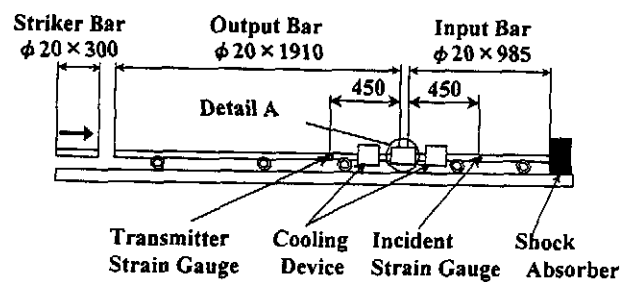


図4 スプリットホプキンソン棒法衝撃試験装置

AUTOGRAPH AG-25TD)を用いた．変位の
測定は，レーザーフィードモニター(キー
エンス製FC2000)で行った．高ひずみ
速度での試験はスプリットホプキンソン
棒法衝撃試験装置を用いた．試験装置
の概略を図4に示す．試験装置は基本
的にStriker Bar，

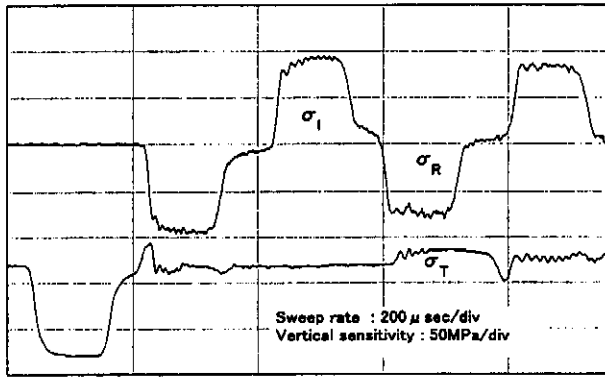


図5 応力波形の一例(200℃)

Input Bar, Output Bar, Shock Absorberより構成されている。試験片は図5のDetail Aに示すようにネジでInput Bar, Output Barに固定した。Striker Bar発射装置により速度を与えられたStriker BarがOutput Barに衝突すると、圧縮の応力パルスが生じ、Striker Barの進行方向に伝わっていく。Output Barを伝わっていく圧縮の応力パルスはSplit-Collarとの界面に達すると大部分はSplit-Collarを透過してInput Barに伝わっていき、一部は反射して引張の応力パルスとなりStriker Bar側に伝わる。しかし、この引張の応力パルスは無視できるほど小さい。ここで試験片、Split Collarよりなる部分を圧縮の応力パルスが伝わる際、ほとんどの荷重をSplit-Collarが受け持ち、試験片に圧縮応力が与える影響は無視できる。Input Barを伝わっていく圧縮の応力パルスはInput Barの端面に達すると、自由端反射して引張の応力パルス(入射応力パルス σ_I)となりStriker Bar側に伝わっていく。 σ_I は試験片、Split-Collarよりなる界面に達する。しかし、Split-Collarは引張荷重を受け持つことがで

きないため透過波 σ_T は全て試験片中を伝わっていく。また一部はShock Absorber側に圧縮の応力パルス σ_R となり反射していく。スプリットホプキンソン棒法衝撃試験装置において、応力パルスはInput Bar, Output Barの対称2点に貼り付けたStrain Gaugeにより検出してオシロスコープ(理研電子製 TCFL-8000, sampling frequency 10MHz)に記録した。オシロスコープに記録された波形の一例を図5に示す。記録した波形から試験片の平均ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 、平均ひずみ e 、平均応力 s は以下に示す式により計算される。

$$\dot{\epsilon} = \frac{2}{\rho_0 c_0 l} (\sigma_I - \sigma_R - \sigma_T) \quad (1)$$

$$e = \int_0^t \dot{\epsilon} dt = \frac{2}{\rho_0 c_0 l} \int_0^t (\sigma_I - \sigma_R - \sigma_T) dt \quad (2)$$

$$s = \frac{A_0}{2A} (\sigma_I + \sigma_R + \sigma_T) \quad (3)$$

式(1)-(3)で σ_I は入射応力波、 σ_R は反射応力波、 σ_T は透過応力波、 t は時間、 l は試験片ゲージ部の長さ、 ρ_0 、 A_0 、 c_0 はそれぞれInput BarとOutput Barの密度、横断面積、縦弾性波速度、 A は試験片の平行部の初期横断面積である。加工硬化指数及び塑性係数を求めるために、平均ひずみ e および平均応力 s を、以下の式により、真ひずみ ϵ 、真応力 σ に変換した。

$$\epsilon = \ln(1 + \theta) \quad (4)$$

$$\sigma = s(1 + \theta) \quad (5)$$

2.3 応力-歪み線図の測定結果 各ひ

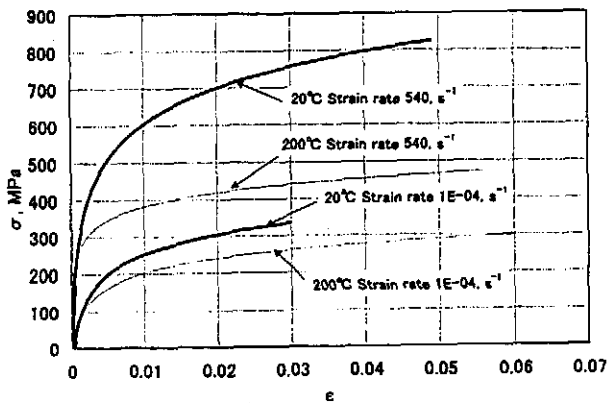


図6 真応力-真ひずみ線図

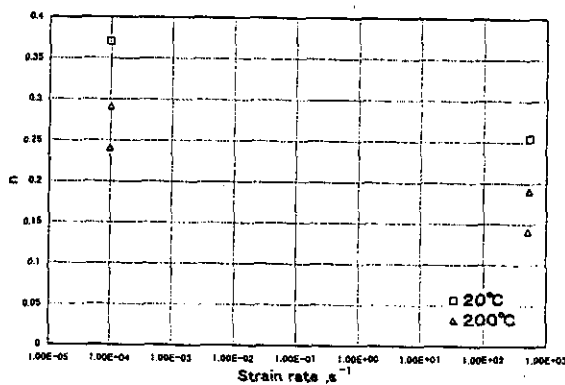


図7 加工硬化指数の変化

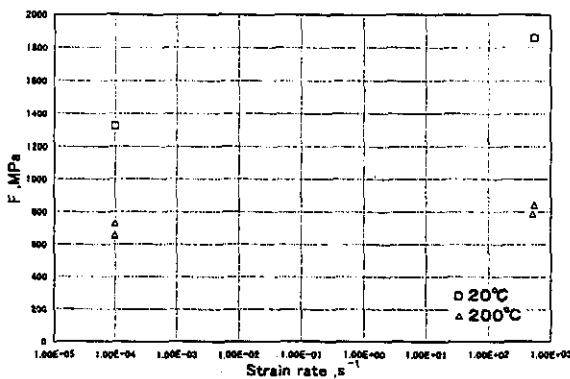


図8 塑性係数の変化

ずみ速度，及び各試験温度での真応力-真ひずみ線図の一例を図6に示す。ひずみ速度の増加に伴い，真応力-真ひずみ線図が上側に位置している。また，温度の増加に伴い，真応力-真ひずみ線図が下側に位置していることが分かる。用いた試料が， n 乗硬化塑性体であるとして，得られた真応力-真ひずみ線図を以下の式で近似して， n 及び F を求めた。

$$\sigma = F \varepsilon^n \quad (6)$$

ここで， σ ， ε ， n ， F はそれぞれ，真応力，真ひずみ，加工硬化指数，塑性係数である。加工硬化指数は，材料の加工硬化の程度を表すものである。また，塑性係数は，材料の変形抵抗のレベルを表すものである。図7及び図9に加工硬化指数と塑性係数のひずみ速度と温度の関係を示す。加工硬化指数は，ひずみ速度の増加及び温度の増加に伴い減少している。一方，塑性係数は，ひずみ速度の増加及び温度の増加に伴い増加しているが，温度の増加による増分は小さい。以上のことより，温度を増加させると加工硬化は起こりににくくなることが示された。これは，加工誘起マルテンサイト変態が生じなくなるためと考えられる。

ここで行った実験は，定量的な解析を行う上では不十分であるが，これまで知られているように，SUS304の加工硬化は環境温度が高くなると穏やかになり，また，逆に変形速度が速ければ加工硬化が激しくなるということは確認することができた。

3. 窓枠フレームの製作結果 共同研究
をしている相手先企業の既存の曲げ加工機

を用いて、変形コの字型チャンネルの長手方向に引張荷重を加えながら曲げ加工を行った。しかし、室温で加工を行うと、コーナー部近傍に余分なしわが発生してしまう結果になっていた。そこで、SUS304チャンネルを加熱し150℃程度になってから曲げ加工を行った。その結果、室温に比べてしわ発生がかなり少なくなった。そこで、ジグの形状を少し変えながら、試行錯誤を繰り返していくうちに、曲げ加工品が満足できるレベルに達した。

ところが、この加工を行うためには加熱が必要であるので、生産効率が悪化する問題が生じた。すなわち、加熱時間が長過ぎるのである。この問題を解決するには、設備投資をして専用の機械を導入することも選択肢のひとつであるが、資金的には不可能である。既存の曲げ加工機を使用して問題を解決することにした。

ここで、150℃で曲げ加工ができたのだから、この条件から徐々に加工温度を下げていくことにした。そして、加工可能な下限温度を探ることにした。この場合加工温度と引張荷重及び曲げのための型枠が加工条件となるがそれらの最適値を探ることもなる。多少の試行錯誤を繰り返したが、結果的に室温で曲げ加工をすることに成功した。図9は、本曲げ加工で製作している製品の一例の図面である。また、図10は、室温で曲げ加工を行った後の写真である。余分なしわが無くきれいに曲げを行っている様子がわかる。

6. まとめ

当初は、SUS304チャンネルを加熱することで問題解決を図ろうとした。しかし、現実には加熱により余分なしわの無い曲げ加工ができて、加熱のためにコスト高になり採算が合わないことが判明した。そこで、試行錯誤的に徐々に温度を下げていくことで、結果的には室温でもしわの無い曲げ加工を行うことができた。

今回の研究では、数値解析により十分な結果を得ることができなかった。今後の課題としたい。

終りに、本研究は(財)天田金属加工機械技術振興財団の助成によってなされたことを付記し、謝意を表します。

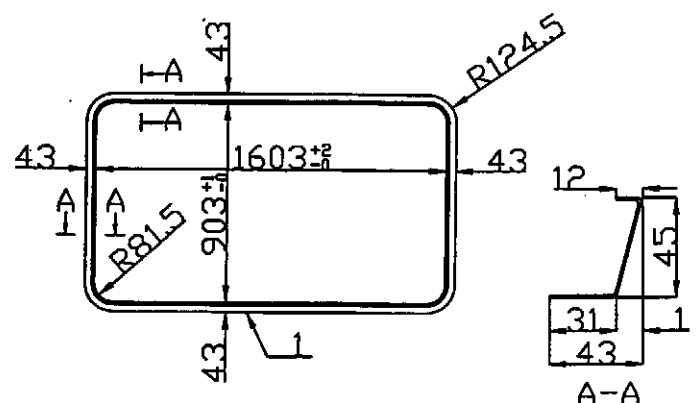


図9 窓枠フレームの図面の例



図10 室温で曲げ加工をしたコーナー部の外観