

テーラードブランク材の溶接と成形

Welding Methods and Forming Characteristics of Tailored Blanks (TBs)

宮崎 康信^{*(1)} 橋本 浩二^{*(2)} 栗山 幸久^{*(3)} 小林 順一^{*(4)}
 Yasunobu MIYAZAKI Koji HASHIMOTO Yukihisa KURIYAMA Junichi KOBAYASHI

抄 録

近年、自動車ボディ部品に広く用いられているテーラードブランク(TB)について紹介し、その製造にかかわる溶接と成形性について論じた。溶接では溶接法の種類について概説した後、特にレーザー溶接について取り上げ、溶接部の特徴、不具合及び光源の影響について詳述した。また成形性については、成形時の破断を“ひずみ律則”あるいは“応力律則”の現象の二つに分類して捉え、これをもとに実成形での不良について論じた。取り上げた成形不良としては、材質や板厚の異なった組合せでの母材破断、材料を流入させるときの溶接ビードの取り扱い、深絞り成形時の破断、伸びフランジ成形での破断、溶接始末端での破断である。

Abstract

Recently, tailored blanks (TBs) are widely used for automobile body parts. This paper mentions the characteristics of TBs themselves and discusses not only welding methods as the manufacturing process of TBs but also forming characteristics of TBs. After outlining the methods of welding process, the laser welding was focused on as a typical welding method for TBs. And the feature of the welded portion, weld defects and the influence of wavelength on welding were explained in detail. The fracture of TBs at forming process is classified into two phenomena, namely "strain rule", breakage determined by strain, and "stress rule", breakage determined by stress, and forming failures of actual autobody parts are discussed based on these two phenomena. Forming failures discussed in this paper are as follows: the fracture at base material of TBs consisting of several pieces of sheet with different quality or different thickness, the arrangement of weld bead in connection with the direction of material flow-in, the fracture at deep drawing, the fracture at stretch flanging, and the fracture caused by weld defect at the beginning and the ending of weld.

1. はじめに

工業技術の発展に、国や会社、人を離れて一つの潮流を読みとるなら、テーラードブランクの源流は1961年の概念特許に遡ることができる¹⁾。1967年には、TIG溶接によりサイドパネルが製造され、この技術が産声を上げたといえよう。一旦、途絶えたかに見えるこの技術は1985年ころに至り、日本及び欧州の自動車会社において、それぞれサイドパネルやフロアパネルの素材として採用され、活発な発展段階の糸口を掴んだ。本論文では、テーラードブランクについて概説した後、その溶接と成形性について詳述し、将来への期待について述べる。

2. テーラードブランク(TB)とは

自動車のボディには商品力あるデザインとともに、強度、耐久性、防錆、衝突エネルギー吸収性、軽量性などの諸性能が要求される¹⁾。このため、ボディ各部で板厚、材質が細かく設定され、ボディを構成するパネル数は大小合わせて数百にのぼる。一方、ボ

ディ精度や生産性を向上させるためには、部品点数は少ない方が好ましい。

テーラードブランク(Tailored Blanks, 以下TB)とは、図1¹⁾に示すように、溶接により複数の鋼板を目的に合わせて仕立てたプレス素材のことを言う。TBを利用すれば、1枚の素材の特性を部分的に変えることができるとともに、部品点数の削減も期待できる。

1985年頃実用化されたTBは、サンルーフラインフォースやカウルインナーであるが、同一鋼板を接合したものであり、その目的は材料歩留まりの向上とパネル数の削減によるボディ精度と生産性の向上であった。その後、1990年に至って異種鋼板を接合したTBを用い

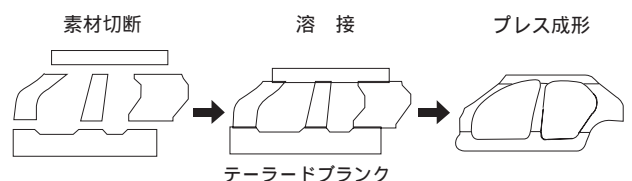


図1 テーラードブランクをサイドパネルアウトターに適用した例

^{*(1)} 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2301

^{*(3)} 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 所長 工博

^{*(4)} TSセンター 所長 工博

^{*(2)} 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 主幹研究員 情報科学博士

てフロントサイドメンバーが製造されたが、板厚や材質の最適配置による吸収エネルギーの向上といった車体性能向上が強く意識されており、新しい発展段階に至った。

3. テーラードブランク(TB)の溶接

3.1 TB溶接法の種類とその特徴

TBの溶接法としては、レーザ溶接、マッシュシーム溶接やプラズマ溶接法が用いられている。その他、海外では高周波誘導溶接法も開発されている。

レーザ溶接法は、図2に示すように、レーザ光線を直径0.5mm程度に集光して鋼板に照射し、熔融溶接を行う手法である²⁾。高エネルギー密度の光が鋼板に照射されると、鋼板は瞬時に熔融、蒸発を始める。蒸発反力により溶鋼中にはキーホールが形成され、その壁面が熱源として鋼板を加熱し、溶接が進行する。典型的な溶接ビード幅は1mm弱である。

マッシュシーム溶接法では、2枚の鋼板を平均板厚の1.5~2倍程度重ね合わせて電極輪で加圧しながら通電し、重ね面を熔融する。高速溶接が可能で生産性に優れるが、めっき鋼板ではめっき金属により電極表面が汚損されることから、厳しい条件管理が必要となる。また、高強度鋼板の溶接は比較的難しい。溶接部の硬さはレーザ溶接部に比較して低く、比較的成形性に優れるが、溶接部板厚が厚くなり、見栄えはあまり良くない。典型的な溶接部幅は5mm前後である。

TBのプラズマ溶接では、高温のプラズマ気流を突合せ部に吹き付けて熱伝導型の溶接を行う。タングステン電極が露出していないために、TIG溶接に比較すると電極の交換頻度が低く、自動化に適した溶接方法である。溶接ビードは、レーザのそれに比べて太く、成形条件によっては成形性が劣ることもあるが、装置コストが圧倒的に低いことが魅力である。典型的な溶接ビード幅は3~4mmである。

3.2 TBのレーザ溶接

3.2.1 レーザ溶接部の特徴

溶接ビード幅が1mm弱と非常に細いため、外観に優れ、溶接熱影響に伴う材質劣化範囲は極めて狭い。溶融池は鋼板への熱伝導により急速に凝固、冷却され、800 から500 までの冷却時間は約0.3s(冷却速度で約1000 /s)である。このため溶接金属は強く焼入れられ、組織はほとんどマルテンサイトとなり硬くなる。このとき溶接金属の硬さは主に鋼中の炭素量によって決まるが、母材成分から精度の良い推定が可能である³⁻⁴⁾。

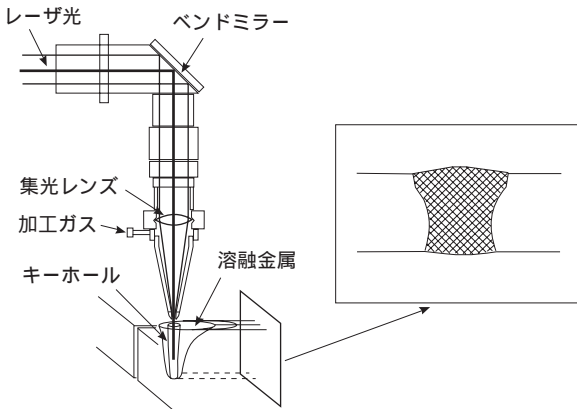


図2 レーザ溶接プロセス

3.2.2 レーザ溶接時の注意点とアンダーフィル

溶接時の鋼材溶融量が少ないため、突合せに隙間があるとか、突合せ線のぬい不良が生じると溶接できなくなる。図3は、突合せ面を機械仕上げした板厚0.7mmと1.4mmの軟鋼板の溶接を行った場合の溶接可能範囲を、レーザビームの狙い位置と溶接速度の関係として示したものである²⁾。突合せの隙間が大きいくほど、溶接可能な範囲は狭くなる。また、溶接可能であっても隙間があると溶鋼が不足して溶接ビードの厚みが鋼板板厚に比べて薄くなり、アンダーフィルとなる。図4は、軟鋼板で溶接ビード厚が減少したときの成形性の低下程度を、エリクセン試験での成型高さで評価したものである²⁾。溶接ビードの厚みとして、母材板厚の70%以上確保すれば成形性が低下しないことが分かる。但し、母材同等の疲労強度が要求される場合、凹んだ溶接ビードでの応力集中があるため、厚みの減少を最小に抑える必要がある。

3.2.3 溶接部の不具合

先述のアンダーフィルの他、気孔が成形性を低下させることがある。光源に炭酸ガスレーザを用いた場合、波長が長いためにレーザ誘起プラズマが生成するが、このプラズマ中で大気中の窒素分子が原子状に乖離されると溶鋼に溶け易くなる。通常はシールドされない鋼板裏面においてこの現象が起きると多量の窒素が溶鋼に溶解し、凝固に伴う溶解度の急減によって窒素の気泡が形成されるが、この気泡が凝固完了までに溶鋼から浮上できないと気孔として残される。図5は、レーザのパワー密度が高いほどこの現象による気孔

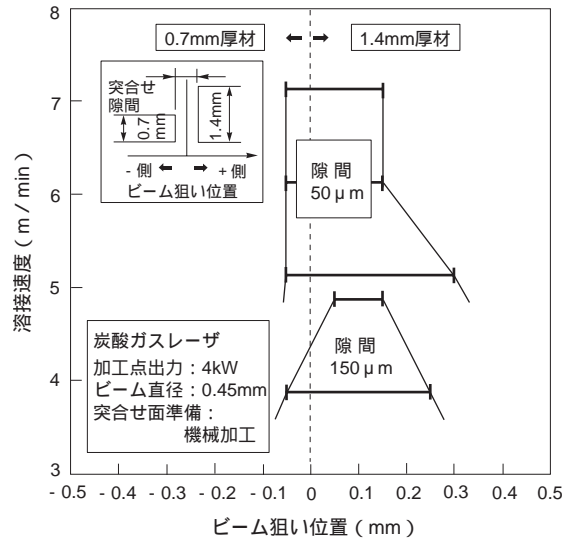


図3 突合せ隙間量と溶接可能範囲

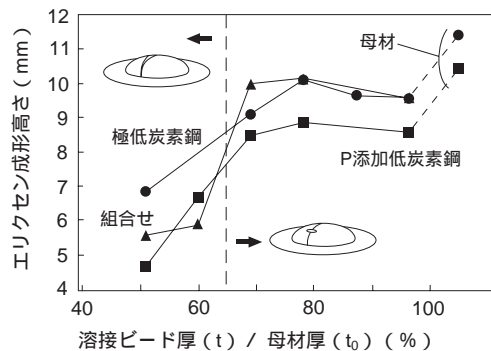


図4 アンダーフィルの成形性に与える影響

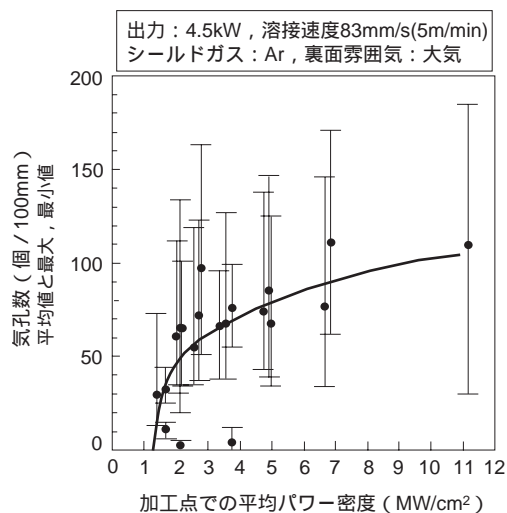


図5 溶接時のパワー密度と気孔数

数が増加することを示している⁵⁾。

3.2.4 レーザの種類の影響

現在、YAGレーザのTB製造への適用が始まっている。このレーザの波長は炭酸ガスレーザのその1/10で、1.06μmである。ところで、この波長域の光の金属表面での吸収率は波長に依存し、一般に波長の短い光ほど吸収されやすい⁶⁾。このため両レーザで溶融効率(単位出力あたりの溶融量)を比較すると、YAGレーザの方が、2倍以上高いことが分かる。結果的に、同じ出力であれば、YAGレーザの方がより高速での溶接が可能である⁷⁾。

4. テーラード blanks (TB)の成形性

4.1 割れの形態による区分

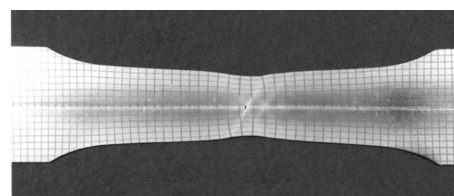
TBが良好に溶接されているとして、その成形不良、特に破断は、1)溶接ビードでの破断と、2)異材組合せTBでの低強度側材料での母材破断の二つに分類することができる。

4.1.1 溶接ビード部の破断

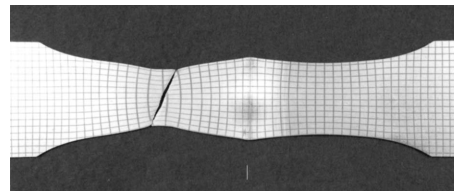
溶接ビードと平行に張力を加えて引張試験をした場合、写真1(a)に示すように溶接ビードでネッキングして破断に至る。この場合、試験片に対して垂直方向に均一なひずみが付与されるが、延性の低い溶接ビードが最初に延性限界に達するためである⁸⁾。この破断形態はひずみが律則することから“ひずみ律則”の破断形態と呼ばれる⁹⁾。同材質、同板厚のレーザ溶接TBでの延性劣化は、母材に比べて4~6%程度にとどまる。これは、溶接ビードの延性劣化は大きい、周辺の母材が溶接ビードへの応力集中を軽減するためと考えられる。なお、溶接ビードによる延性劣化の影響はレーザ溶接、マッシュシーム溶接、プラズマ溶接の順に小さい。

4.1.2 異材組合せTBでの低強度側材料での母材破断

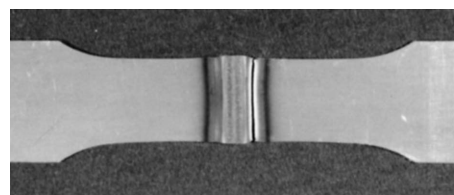
溶接ビードと直角方向に引張試験をした例を写真1(b)に示す。この場合、試験片と平行に均一な張力が付与される。中央の溶接ビードでは強度上昇により加工ひずみが低く抑えられる一方、母材の低強度側(もしくは板厚小側)にはひずみが集中し、耐力限界に達して破断に至る⁸⁾。この破断形態は応力が律則となるため“応力律則”の破断形態と呼ばれる⁹⁾。板厚0.8mmの440MPa材に各種鋼板を溶接し、ゲージ長さ50mmで全伸び量を測定すると、同じ440MPa材を溶接した試験片が最も高い延性を示し、母材からの延性の低下割合は接合した材料の強度比の増加に伴い大きくなる。この点について



(a) 溶接ビードと平行に張力を加えた場合 (SPCE, レーザ溶接)



(b) 溶接ビードと直角に張力を加えた場合 (SPCE, レーザ溶接)



(c) HAZ破断を起こした場合 (高強度材, プラズマ溶接)

写真1 単軸引張試験における種々の破断形態

は、4.2.1節で詳述する。

応力律則での破断の特殊な例として熱影響部(HAZ)破断がある。一部の高強度鋼では、TB製造時の溶接に伴う熱影響により溶接ビード近傍が軟化し強度低下を起こすが、軟化の程度が大きいとHAZで破断することがある。写真1(c)にHAZ破断した試験片の例を示す。

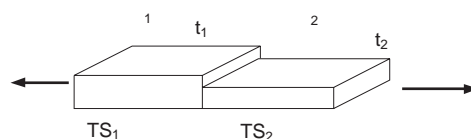
4.2 実成形におけるTB材に特有な成形不良

TBの実際の成形では複合材特有の不良現象が現れるが、基本的には単純な引張試験結果の延長線上で捉えることができる。

4.2.1 異材質TBもしくは異厚TBでの低強度材側における破断現象

最近のTBでは、材質や板厚の異なった組合せとすることが多く、4.1.2節で述べたようにTS(強度)と板厚の積TS×板厚。以後、単に“強度”と表記する)の低い材料側で母材破断することが多い。異材質あるいは異厚材を組合せたTBを図6のように想定する¹⁰⁾。このとき、高強度材の引張強度、板厚、ある時点での応力、 n 値をそれぞれ TS_1, t_1, σ_1, n_1 とし、低強度材のそれらを TS_2, t_2, σ_2, n_2 とした場合、低強度材が破断したときの高強度材の塑性ひずみ ϵ_{1max} は、

$$\sigma_1 = K_1 \epsilon_1^{n_1}, \sigma_2 = K_2 \epsilon_2^{n_2}, \sigma_1 t_1 = \sigma_2 t_2 \quad (1)$$



TS_1, t_1, n_1 : 高強度(もしくは板厚大)側の引張強度、板厚、ある時点での応力 n 値
 TS_2, t_2, n_2 : 低強度(もしくは板厚小)側の引張強度、板厚、応力 n 値

図6 異材質ないし異厚TBの模式図

の式を用いると、TS₁及びTS₂の値から、

$$\epsilon_{1\max} = n_1 \sqrt[n_1]{\frac{t_2 \cdot TS_2 \cdot \exp(n_2)}{t_1 \cdot TS_1 \cdot \exp(n_1)}} \quad (2)$$

で与えられる。

この式による計算値と実際の引張試験での結果を対比させたものが図7である。計算結果と実験結果はよく一致しており、特に高強度材の伸びひずみは強度比1.25程度で0.07、強度比1.5では0.025まで小さくなるのが分かる。このことは、強度比が高々1.5倍でも高強度材の変形はわずかになってしまい、変形の大部分を低強度材だけで受け持つようになって破断に至ることを意味する。

4.2.2 溶接ビード線のずれ¹¹⁾

前節で述べたように、組合せた鋼板の強度差によって変形の割合が異なってくると、材料流入が不均一となり、溶接ビードが成形中に材料の流入方向からずれる現象が発生する。この現象が起きると、特に異厚組合せのTB用プレス金型に板厚段差部の設定が難しくなる。この場合、成形による溶接ビードのずれ量をFEMなどによって事前に予測し、織り込む必要がある。

4.2.3 深絞り成形での破断¹¹⁾

材質の異なる材料を組合せた異材質TBでは、それぞれの鋼板の面積割合がその成形性に大きな影響を及ぼす。写真2にSPCEと590MPa材を組合せて角筒成形した結果を示すが、これら破断形態の違いについて考えてみる。まず、高強度材が十分にボンチ底部に掛かっており、フランジの変形抵抗力を高強度材で受け持てる状態(写真2(c))では、TBの成形性は高強度材の成形性に律則される。そのため、高成形性を有する高強度鋼板を使用すると成形性が高まるものと考えられる。

次に、高強度材がボンチ底部に十分に掛かっていない場合(写真2(b))は、高強度材を金型内に引きずり込む力を低強度材が受け持

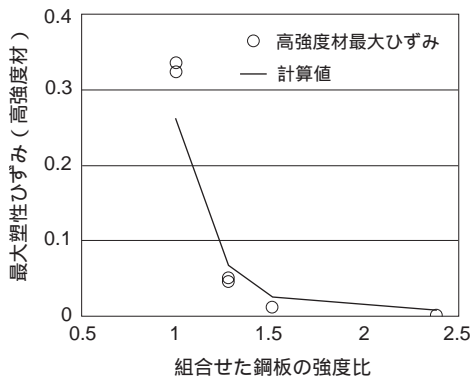
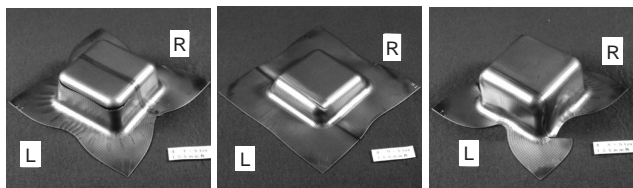


図7 単軸引張試験での低強度材破断時における高強度材の最大伸びひずみ



(a) L: 590MPa(50%), R: SPCE(50%) (b) L: 590MPa(34%), R: SPCE(66%) (c) L: SPCE(34%), R: 590MPa(66%)

写真2 鋼材の組合せ割合を変えたときの種々破断形態

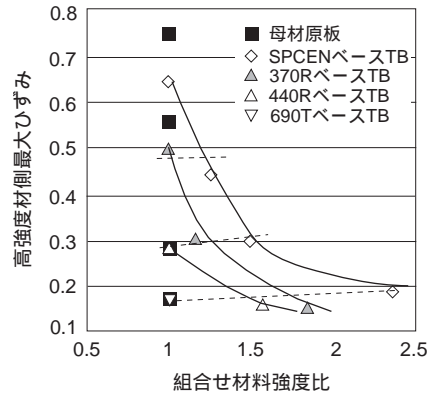


図8 種々鋼種組合せTBでの高強度材最大ひずみと原板の最大ひずみとの比較

つ必要があるが、強度比が大きい場合にはボンチ底の低強度材で破断する(応力律則の破断形態)。このように深絞り成形で破断が生じた場合の対策としては、ビード位置を移動して高強度鋼板がボンチ底に掛かる割合を増やすこと、強度比を小さくして応力律則の割れ形態を防ぐこと、更に成形手法として対向液圧成形を選択することも有効である。

4.2.4 伸びフランジ成形での破断¹¹⁾

穴広げ試験では、工具による材料拘束があるため応力律則(低強度材破断)とひずみ律則(溶接ビード破断)の2種類に区分することが難しいうえに、元穴に占める材料の組合せ割合によって成形性が影響されることから、“穴広げ率”による評価は有効ではない。そこで円筒工具を用いた穴広げ試験を行い、4.2.1節の単軸引張試験結果の検討と同様に、穴広げにおける材料組合せの影響を最大塑性ひずみにより評価した。

試験結果を組合せた材料の強度比で整理し、高強度材で生じる最大塑性ひずみ $\epsilon_{1\max}$ を(2)式により試算した結果とともに図8に示す。なお図中の破線は、原板及びTBでの各種材料組合せ時の高強度材の最大ひずみを結んだ補助線である。同図より、各種組合せにおいて高強度材の最大ひずみは、高強度材原板それぞれの破断限界ひずみとほぼ同等であることが分かる。また、高強度材のひずみが最大ひずみに達したあとは低強度材に変形が集中し、破断に至る。従って、伸びフランジ性を向上させるためには高強度材側の破断限界ひずみを向上させる必要がある。

4.2.5 溶接始末端部の応力集中による破断

レーザ溶接やプラズマ溶接によるTBでは、溶接の始末端部もしくは終末端部に溶融に伴う引けを生じるが、成形中にこの引けが応力集中を起こして破断することがある。そのため始末端をわずかにトリムすることがある。マッシュルーム溶接では、電極輪が始末端に乗り上げたり外れたりするときに溶接条件が安定せず、やはり始末端に溶接不良が生じ破断することがある。

5. おわりに

欧州におけるTB用鋼材の消費予測が文献1)に引用されている。2000年における予測ではあるが、年率20%程度で2000年以降も消費が伸びるとされている。現時点においても、欧州はもとより全世界でTBの消費は頭打ちになっていない。ところで、鋼製自動車車体を軽量化するために鉄鋼材料及びその利用技術の可能性を追求したULSAB及びULSAB-AVCプロジェクトでは、車体に対し重量比約45

%のTB部品の適用が提案された¹²⁾。現時点でのTB部品使用比率はこのレベルに達しておらず、今後ともTB適用による車体性能向上の余地が十分残されていると考えられる。

本論文ではTBの製造にかかわるレーザ溶接及び利用にかかわる成形について論じた。十分とは言えないまでも、生産技術としてのTBの発展に寄与し、鋼製車体の発展に寄与できることを祈念してやまない。

参考文献

- 1) 夏見文章: プレス技術 34(8) ,18(1996)
- 2) 宮崎康信ほか: プレス技術 34(8) 30(1996)
- 3) 宮崎康信ほか: 第34回レーザ熱加工研究会論文集 .1995 p.85
- 4) 百合岡信孝: 溶接学会誌 61(4) 288(1992)
- 5) 宮崎康信ほか: 溶接学会論文集 .19(2) 242(2001)
- 6) 黄地: 溶接・接合プロセスの基礎 産報出版 ,1996
- 7) 宮崎康信ほか: 第50回レーザ熱加工研究会資料集 2000 p.59
- 8) 白田松男 ほか: プレス技術 34(8) 26(1996)
- 9) 樋渡俊二 ほか: 第46回塑加連講論 .1995 p.167
- 10) 池本公一 ほか: 塑性と加工 32-370(11) ,1383(1991)
- 11) 橋本浩二 ほか: 第202回塑性加工シンポジウム 2001 p.27
- 12) 栗山幸久ほか: 溶接学会誌 71(8) 6(2002)