論文

β 型チタン合金板の多段深絞り加工における 成形性と表面粗さの改善

原田 泰典*¹ 古川 陽介*² 村尾 卓児*³
森 謙一郎*⁴ 土田 紀之*¹ 深浦 健三*¹

Formability and Improvement of Surface Roughness in Multistage Deep Drawing Processes of Beta Titanium Alloy Sheet

Yasunori HARADA, Yosuke FURUKAWA, Takuji MURAO,
Ken-ichiro MORI, Noriyuki TSUCHIDA and Kenzo FUKAURA

(Received on August 24, 2005)

In the multistage deep drawing processes of a beta titanium alloy sheet, the formability and the improvement of surface roughness have been investigated. The beta titanium alloy sheets have sufficient ductility at room temperature, whereas a seizure tends to occur during deep drawing due to high reactivity with other materials. To prevent the seizure, the beta titanium alloy sheet was treated by oxide coating heating, because the coated sheet was not in direct contact with the die during deep drawing due to the existence of the oxide layer. The blank used was the commercial beta titanium alloy Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al. The effects of the coating conditions and lubricants on the formability in the multistage deep drawing processes were examined. Long drawn cups with a height sixfold that of the diameter were successfully formed by oxide coating heating. To improve the surface roughness of drawn cups, deep drawing and ironing as well as the grain refining by thermomechanical treatment were also attempted. It was found that the methods of ironing and grain refining were effective for improving the surface roughness of drawn cups.

Key words: sheet metal forming, deep drawing, multistage drawing, beta titanium alloy sheet, tribology, formability, seizure, oxide coating, surface roughness, grain refining, thermomechanical treatment

1. 結 言

チタンの比重は鉄とアルミニウムの間なので比較的軽量であり、比強度が高い金属材料である。また、表面に極薄い酸化膜層を持つため、耐腐食性にも優れている材料でもある。一方、チタン合金は純チタンよりも強度が高く、耐熱性にも優れた性質を持っている。このため、燃費向上等の目的により軽量化が強く望まれている航空機用部品や自動車用部品として用途が拡大している^{1), 2)}。チタン合金は、稠密六方格子を有する α 型、稠密六方格子と体心立方格子を有する $\alpha + \beta$ 型及び体心立方格子を有する β 型の3種類に大別されている。 α 型及び $\alpha + \beta$ 型チタン合金は、冷間加工性があまりよくないので温間や熱間において加工が行われている。ところが、 β 型チタン合金は溶体化処理された状態で比較的冷間加工性が優れている。引張強さは約800MPa程度を示すが、 n 値が非常に小さく約0.06であり、引張特性の面内異方性が小さいことや r 値が約1であることが大きな特徴として挙げられる³⁾。さらに、加工熱

処理を行うことで強靱化が可能であり、多くの方法が提案されている^{4)~6)}。例えば、代表的な β 型チタン合金であるTi-15V-3Cr-3Sn-3Al合金(以後、Ti-15-3合金と称す)の場合、冷間加工と時効処理を組み合わせることで1.3GPa以上の引張強さを得ることができる⁷⁾。また、強靱化に影響のある β 相の微細化に関しては、冷間圧延での高圧下率と β 変態点直上の短時間溶体化処理の組み合わせ処理によって組織微細化が可能である⁸⁾。このため、Ti-15-3合金は室温でのプレス成形が可能で高強度チタン合金として注目されている。しかしながら、冷間加工性に関する研究は少なく、基礎的な報告にとどまっている^{9)~12)}。Ti-15-3合金の冷間加工の場合、深絞り加工性は純チタンのJIS3種相当で、また張出し性や曲げ加工性はJIS2種相当の加工性に相当しており、成形性は良好である。しかしながら、高強度と低ヤング率のため、成形品の寸法精度が低いことが問題となっている。さらに、チタンは化学的に非常に活性な金属であるため、チタン合金の塑性加工においても工具との焼付きが非常に発生しやすい。とくに、多段における深絞り加工に関しては成形が困難であり、十分な成形技術が達成されていない。それゆえ、製品加工の上で大きな障害となっているのが現状である。焼付き防止の研究は、純チタンに関して潤滑剤、工具材質及び皮膜処理の影響に関して

*1 兵庫県立大学大学院 〒671-2280 兵庫県姫路市書写 2167

*2 豊橋技術科学大学・院生 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

*3 (株)野口製作所 〒441-8113 愛知県豊橋市西幸町東脇 202

*4 豊橋技術科学大学 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

多く行われている¹³⁾⁻¹⁶⁾。最近では、著者ら¹⁷⁾⁻²¹⁾が酸化皮膜処理とアルミ青銅ダイスを併用することで、12段もの極深製品の加工が可能であることを、さらに着色目的で陽極酸化皮膜処理された市販カラー純チタン板においても焼付き防止効果があることなど、焼付き防止を考慮した深絞り成形性に関する研究を報告している。純チタンにおいて工具との焼付き防止効果が見られた酸化皮膜処理は、 β 型チタン合金においても焼付き防止効果があると考えられる。

本研究では、冷間加工性に優れた β 型チタン合金を用いて冷間多段深絞り加工を行い、主に成形性におよぼす加工条件の影響について明らかにすることを目的とする。また、しごき絞り加工や結晶粒微細化による容器表面粗さの改善も併せて行った。

2. 実験方法

2.1 供試材料

チタン合金の中で比較的冷間加工性に優れた β 型チタン合金板を用いて冷間多段深絞り加工を行い、その成形性を調べた。本研究では、 β 型チタン合金の中で代表的なTi-15-3合金を用いた。多段深絞り加工のブランクは、直径32.3mm、板厚0.5mmである。ブランクは初期板厚1.0mmの板を冷間多段圧延でパス当たり数%の圧下率で行い、最終板厚0.5mmの板から切り出した。

2.2 大気酸化皮膜処理

チタンは大気雰囲気中で加熱すると厚い酸化皮膜を生成する性質を持っている。そこで、多段深絞り加工における工具との焼付きを防ぐため、Ti-15-3合金においても酸化皮膜処理を施した。酸化皮膜処理は、最も簡便な方法である大気酸化皮膜処理を用いた。酸化皮膜をより強固に形成するため、ブランクの表面をエメリー研磨(#800, $R_z=2.56\mu\text{m}$)とアセトン洗浄によって清浄化した後、大気酸化皮膜処理を行った。Ti-15-3合金は、 β 変態点の約720℃を境に $\alpha+\beta$ 相から β 相に結晶構造を変える⁶⁾。そこで、Ti-15-3合金の大気酸化皮膜処理温度は β 変態点以下の600℃、変態点以上の750℃及び800℃の3温度とした。大気酸化皮膜

処理後のブランク表面は黒色の酸化皮膜で覆われた。皮膜処理したブランクの皮膜厚さの測定は、オージェ電子分光装置(日本電子社製 JAMP-7800)を用いた。Ti-15-3合金における750℃-5minの皮膜処理の場合、皮膜厚さは $1.5\mu\text{m}$ 以上の皮膜が生成していることを確認した。

2.3 引張特性

チタン合金板の材料特性を求めるため、溶体化処理あるいは時効処理を施したJIS13B試験片を用いて引張試験を行った。引張試験片は引張方向を圧延方向と一致させた。引張試験より求めたチタン合金板の材料特性をTable 1に示す。750℃で溶体化処理したTi-15-3合金は、降伏後すぐに最大引張強さを示し、約15%の伸びを示した。一方、600℃で時効処理したTi-15-3合金は、最大引張強さを示した後、約10%の伸びを示した直後に破断した。

2.4 多段深絞り加工

多段深絞り加工は、実験用油圧プレス機(野口製作所製, 2.5tonf)を用い、パンチ速度 $40\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の一定速度で深絞り加工を行った。ダイス形状は、1段目がダイス肩半径4mmの平ダイス、2-10段目がダイス半角60°、ダイス肩半径2mmのテーパダイスを用いた。絞り比は、ステンレス鋼の深絞り加工条件を参考²²⁾にして、1段目から10段目にかけて順に小さくなるように条件を設定した。クリアランスは、ブランクの初期板厚と同じ0.5mmである。潤滑剤は、焼付き防止効果の高い二硫化モリブデン固体潤滑剤を用いた。Table 2に多段深絞り加工条件を示す。

3. Ti-15-3合金の多段深絞り加工

Fig. 1に、600℃-60minの大気酸化皮膜処理を行った多段深絞り加工容器を示す。1段目及び2段目での深絞り加工は可能であったが、3段目の深絞り加工ではパンチR部で破断が生じて容器の成形が出来なかった。これは、時効処理したTi-15-3合金は冷間加工によって変形帯形成や双晶変形が生じて変形組織が不均一になる傾向が強く、その影響によって析出 α 相の分布が不均一となり、延性が大きく低下したためと考えられる^{23), 24)}。

Fig. 2に、750℃-5minの大気酸化皮膜処理を行った深絞り加工容器を示す。深絞り容器における焼付きは、1段目の容器開口部において見られたが、非常に微小であった。2段目以降においては、10段目に至るまで新たな焼付きは全く観察されなかった。それゆえ、大気酸化皮膜処理によって比較的強固な酸化皮膜が形成されたと考えられる。また、加工段数が増えるとともに容器の表面荒れが増加しているのが観察された。

Table 1 Mechanical properties of Ti-15-3 alloy sheet

Materials	Ti-15-3	
Heat treatment	750°C, 5min	600°C, 60min
Tensile strength	805.3 MPa	976.7 MPa
Total elongation	14.0 %	10.2 %
Reduction of area	25.3 %	9.6 %
Hardness	252 HV	272 HV

Table 2 Multistage deep drawing conditions of Ti-15-3 alloy blank

Stage number	1st	2nd	3-10th
Drawing ratio	1.6	1.3	1.1-1.2
Dies	Material	WC	SKD11
	Diameter / mm	20.0	16.0-5.8
	Corner radius / mm	4.0	2.0
Punches	Material	SKD11	SKD61
	Diameter / mm	19.0	15.0-4.8
	Corner radius / mm	3.0	2.0
Clearance / mm	0.5		
Lubricants	Molybdenum disulfide

Fig. 1 Drawn cups of Ti-15-3 alloy sheet treated by heating oxide coating at 600 °C for 60 min

Fig. 3 に、750°C-5min の大気酸化皮膜処理を行った多段深絞り加工容器の皮膜厚さを示す。測定位置は、加工容器の側壁開口部付近である。1 段加工後の容器で、約 1.6 μm の皮膜厚さがある。加工段数が増えるにしたがって皮膜厚さは減少しているが、10 段加工後においても 0.5 μm 以上の皮膜厚さがある。大気酸化皮膜処理により厚く強固な皮膜が生成されたため、深絞り加工後の容器において焼付きが生じなかったと考えられる。

深絞り加工後の容器表面における表面性状を調べるため、実体顕微鏡による容器側面の観察を行った。Fig. 4 と 5 に、750°C-5min と 800°C-5min で大気酸化皮膜処理を行った容器開口部付近の外表面をそれぞれ示す。容器表面は、いずれの皮膜処理においても加工段数が進むにつれて表面荒れが進行していることが観察される。また、皮膜処理温度の違いによる表面荒れはあまり大きな違いが見られない。表面荒れの原因として、冷間圧延の圧下率が 50%と低く、溶体化処理による結晶粒微細化が十分に進んでいないためと考えられる。

一般に、ひずみが大きい絞り製品の開口部付近で肌荒れが大きくなるが、本研究ではパンチとダイスのクリアランスを素材の板厚と同じに設定しているため、開口部では絞り加工によって増肉量が大きくなり、しごきの効果によって肌荒れが抑制される傾向にあった。そのため、開口部付近で常に粗さが大きくなるという傾向は観察されなかった。

Fig. 6 に、750°C-5min の大気酸化皮膜処理を行った多段深絞り加工における容器外側面の表面粗さと深絞り加工段数の関係を示す。表面粗さの測定方向は、容器絞り加工方向である。ここで、0 段目は大気酸化皮膜処理後のブランクの表面粗さである。また、表面粗さは絞り製品の開口部付近、中央部および底部付近の平均値である。表面粗さは、いずれの皮膜処理においても 6 段目まで大きく増加したが、それ以降の段数ではあまり大きな変化は見られない。また、皮膜処理温度が高いと、表面粗さは大きいことが分かる。これは処理温度に伴う結晶粒の粗大化によるものと考えられる。

Fig. 2 Drawn cups of Ti-15-3 alloy blank treated by heating oxide coating at 750 °C for 5 min

Fig. 3 Relationship between thickness of oxide layer and stage number for Ti-15-3 alloy blank treated by heating oxide coating at 750 °C for 5 min

Fig. 4 Surfaces of side wall of drawn cups for Ti-15-3 alloy blank treated by heating oxide coating at 750 °C for 5 min

Fig. 5 Surfaces of side wall of drawn cups for Ti-15-3 alloy blank treated by heating oxide coating at 800 °C for 5 min

Fig. 6 Relationship between surface roughness and stage number for Ti-15-3 alloy blank treated by heating oxide coating

Fig. 7 Distributions of wall thickness strain of drawn cups for Ti-15-3 alloy blank treated by heating oxide coating at 750 °C for 5 min

Fig. 7 に、750°C-5min の大気酸化皮膜処理を行った多段深絞り加工における絞り段数に対する深絞り容器の肉厚ひずみ分布の変化を示す。パンチ R 部での肉厚減少は、絞り段数が増加してもあまり大きくならない。したがって、Ti-15-3 合金板は多段深絞り加工に適した材料であることが分かる。

4. 容器表面粗さの改善

4.1 しごき絞り加工の影響

前節において、Ti-15-3 合金における 750°C-5min の大気酸化皮膜処理を行った深絞り加工容器は良好に成形ができることが分かった。しかしながら、加工段数が増えるとともに容器の表面荒れが増加しているのが観察された (Fig. 2)。とくに、10 段目の容器は表面荒れが大きく、表面性状はあまりよくない。そこで、容器の表面荒れを改善するた

め、しごき絞り加工を試みた。Table 3 に、しごき絞り加工条件を示す。しごき絞り加工は、しごき絞り加工パンチを用いて行った¹⁹⁾。しごき絞り加工は、加工段数の初期である2段目のみに施すスケジュールA、最大高さ粗さが10 μm を上回る4段目のみに施すスケジュールB及び最終段目である10段目のみに施すスケジュールCで行った。しごき率 r は、10%と20%である。潤滑剤は、全てのスケジュールにおいて二硫化モリブデンを用いたが、スケジュールCの一部においてステアリン酸カルシウム粉末を含む硫黄系油性潤滑剤(大同化学工業(株)製、CD400)を用いた。

Fig. 8に、スケジュールAで加工した2段目(a)及び10段目(b)における容器表面を示す。2段目でしごきがかかると、10段目においても容器表面荒れが改善しているのが分かる。また、10段目において表面荒れにおよぼすしごき率の違いによる影響はあまりないことが分かる。また、2段目及び10段目において、焼付きは生じなかった。同様に、スケジュールBで加工した場合も容器表面荒れが改善しているのが観察された。

Fig. 9に、スケジュールCで加工した10段目における容器表面を示す。二硫化モリブデン潤滑剤を用いた場合(a)、しごき率 $r=10\%$ では表面荒れの改善は見られないことが分かる。しごき率 $r=20\%$ では容器表面に軽い焼付きを示す傷が生じている。そこで、純チタンの深絞り加工において焼付き防止効果の高かったステアリン酸カルシウム粉末を含む硫黄系油性潤滑剤を用いて、しごき絞り加工を行った。粉末含有潤滑剤を用いた場合(b)、しごき率 $r=10\%$ では表面性状に改善があまり見られないが、しごき率 $r=20\%$ では容器表面性状の改善が見られ、焼付きの発生もないのが観察される。

Fig. 10に、スケジュールA、B及びCにおいて、多段深絞り加工における容器外側面の表面粗さと深絞り加工段数の関係を示す。スケジュールAの場合、4段目までは表面粗さは増加するがその後は増加しない。同様に、スケジュールBの場合も4段以降は表面粗さが増加しない。また、スケジュールAにおいて、しごき率の違いによる影響は見られなかった。スケジュールA及びBによって、しごき絞り加工を行った容器は、その後の絞り加工で表面粗さは10 μm 程度となり、表面粗さは改善していることが分かる。

4.2 結晶粒微細化の影響

一般に、ブランクの結晶粒径が大きいと深絞り加工後における容器表面は荒れやすい。そこで、結晶粒を微細化したブランクを用いた10段深絞り加工を行い、表面粗さへの影響を調べた。Table 4 にチタン合金板の結晶粒の微細化条件を示す。強加工と熱処理による結晶粒微細化のため、初期板厚 $t_0=1.2\text{mm}$ と1.8mmのTi-15-3合金板を用いて最終板厚 $t=0.5\text{mm}$ まで1パス当たり数%の圧下率で冷間圧延を行った。圧延板から切り出されたブランクは、750℃-5minの大気酸化皮膜処理を行った。初期板厚 $t_0=1.0\text{mm}$ 、1.2mm及び1.8mmの板を最終板厚 $t=0.5\text{mm}$ まで圧延を行い、各板から切り出したブランクをそれぞれX0、X1及びX2とする。

Fig. 11に、結晶粒径の違いによる加工段数と容器表面粗さの変化の比較を示す。結晶粒が微細化されたことにより、1段目より表面粗さが小さくなっている。加工段数が進んでも、表面粗さはあまり大きくならない。結晶粒が微

Table 3 Drawing and ironing conditions of Ti-15-3 alloy blank

Schedule (Stage number)	A (2nd)	B (4th)	C (10th)
Ironing rate $r / \%$	10	10	10
	20		20
Lubricants	Molybdenum disulfide		Molybdenum disulfide, Sulfide including calcium stearate

Fig. 8 Surfaces of side wall of drawn cups for Ti-15-3 alloy blank treated by schedule A

Fig. 9 Surfaces of side wall of drawn cups for Ti-15-3 alloy blank treated by schedule C

Fig. 10 Relationship between surface roughness and stage number for Ti-15-3 alloy drawn cups after 2nd, 4th and 10th stage deep drawing and ironing

Table 4 Ti-15-3 alloy blanks treated by thermomechanical treatment

Blank	X0	X1	X2
Initial thickness (mm)	1.0	1.2	1.8
Reduction (%)	50.0	58.3	72.2
Mean grain size (mm)	0.0895	0.0470	0.0516
Mean grain size after thermomechanical treatment (mm)	0.0688	0.0177	0.0165

Fig. 11 Relationship between surface roughness and stage number for Ti-15-3 alloy blanks treated by thermomechanical treatment **Fig. 12** Drawn cups of Ti-15-3 alloy blank X2 treated by heating oxide coating at 750 °C for 5 min

細化されることで容器の表面荒れが抑制され、表面性状が改善されているのが分かる。

Fig. 12 に、ブランク X2 における 1 段から 10 段までの深絞り加工後の容器を示す。深絞り容器における焼付きはなく、良好な成形であることが分かる。また、ブランクの結晶粒が微細化したことによって、10 段目において容器表面性状が改善されているのが観察される。

5. 結 言

β 型チタン合金を用いて冷間多段深絞り加工を行い、主に成形性におよぼす加工条件の影響について調べ、以下の結果を得た。

- (1) β 変態点以上の温度で溶体化処理を行うことで、10 段の冷間深絞り加工により容器を成形できた。
- (2) 溶体化処理温度は、結晶粒粗大化による表面粗さ増加を防ぐために、 β 変態点直上の 750°C 付近が最適であった。
- (3) 大気酸化皮膜処理は、チタン合金の多段深絞り加工における焼付き防止に有効であった。
- (4) 10 段深絞り加工後においても、パンチ R 部の肉厚ひずみはあまり大きくならないことから、Ti-15-3 合金は

深絞り加工に適した材料であることが分かった。

- (5) 2 段目及び 4 段目でしごき絞り加工を行うことで、容器の表面荒れを抑制できた。
- (6) ブランクの結晶粒を微細化することで、深絞り加工容器の表面荒れを抑制できた。

終わりに、本研究の一部は平成 15, 16 年度科学研究費基盤研究(B)によって行われた成果であることを付記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 錦織貞郎：金属，73-5(2003)，48-51。
- 2) 藤井秀樹・高橋一浩・山下義人：新日鉄技報，378(2003)，62-67。
- 3) 津森芳勝・松本年男・児山佑二：鉄と鋼，72-6(1986)，603-609。
- 4) (社)日本チタン協会編：チタンの加工技術，(1992) 82-87，日刊工業新聞社。
- 5) 新家光雄・小林俊郎・本田弘之・大藪行俊：鉄と鋼，78-12(1992)，1862-1869。
- 6) 牧正志：まてりあ，37-1(1998)，31-34。
- 7) 岡田稔：鉄と鋼，76-4(1990)，614-621。
- 8) 久保木功・頃石圭太郎・本橋嘉信・広橋光治：塑性と加工，37-431(1996)，1297-1302。
- 9) 大山英人・芦田喜郎：材料とプロセス，1-2(1988)，336-339。
- 10) 久保木功：塑性と加工，37-428(1996)，894-899。
- 11) V. V. Balasubrahmanyam, Y. V. R. K. Prasad: Mat. Sci. and Eng., A336(2002)，150-158。
- 12) O. P. Karasevskaya, O. M. Ivasishin, S. L. Semiatin, Yu. V. Matviychuk: Mat. Sci. and Eng., A354(2003)，121-132。
- 13) 村田裕滋：プレス技術，42-2(2004)，22-29。
- 14) 深井英明：同上，42-2(2004)，35-38。
- 15) 木村茂樹：同上，42-2(2004)，69-72。
- 16) 片岡征二・木原諄二・相澤瀧彦：塑性と加工，34-385(1993)，210-215。
- 17) 村尾卓児・森謙一郎・原田泰典・加藤幸司・大久保不二男：同上，43-496(2002)，427-431。
- 18) 村尾卓児・森謙一郎・原田泰典・加藤幸司・大久保不二男：同上，43-495(2002)，336-340。
- 19) 村尾卓児・森謙一郎・原田泰典・大久保不二男：同上，44-504(2003)，55-59。
- 20) 原田泰典・森謙一郎・村尾卓児・今井雅浩・古川陽介・大久保不二男：同上，45-520(2004)，326-330。
- 21) 原田泰典・漆畑直人・村尾卓児・森謙一郎：同上，45-531(2005)，337-341。
- 22) 新プレス加工データブック編集委員会編：新プレス加工データブック，(1993)，233，日刊工業新聞社。
- 23) H. Ohyama, H. Nakamori, Y. Ashida and T. Maki: ISIJ Int., 32-2(1992)，222-231。
- 24) T. Furuhashi, H. Nakamori, and T. Maki: Mater. Trans. JIM, 33-6(1992)，585-595。