

(技術資料)

マフラー用耐熱廉価合金KS Ti-0.9SAの諸特性

Characteristics of Low-cost Heat-resistant Titanium Alloy for Automobile Exhaust Systems, KS Ti-0.9SA



多田宏一郎*
Koichiro TADA



逸見義男**
Yoshio ITSUMI

Another alloy, "KS Ti-0.9SA" (Ti-0.5Al-0.35Si), has been added to the menu for wider use in automotive exhaust systems. It is expected to cost less and have better deep-drawing formability and maintain appropriate high temperature oxidization resistance and strength, compared with the recently-developed KS Ti-1.2ASNEX (Ti-0.5Al-0.45Si-0.2Nb), which is one of the best-performing alloys for exhaust systems. The new alloy, manufactured in a mass production line, exhibits well-balanced properties for use in manufacturing the parts of exhaust systems and for application to their systems.

まえがき＝チタンは近年、その軽量性や耐食性に加えて高級感ある意匠性が受け入れられ、二輪車の多くの部位に採用されている。とくに、大排気量車のマフラーへの適用においてはほぼ定着した感がある。一方、四輪分野のマフラーにおいても、現行のステンレスからチタンへの置換えで40%強もの軽量化が図れることから、運動性能の向上や燃費向上、また、高級感による差別化などの目的で、ごく一部の高級車やオプションマフラーに採用されるようになってきている。

四輪車への採用にあたっては、触媒の搭載などで排ガス温度が二輪車よりも高いため、耐高温酸化性、高温強度や疲労強度を改善したチタン合金がいくつか実用化されている¹⁻⁴⁾。当社においても、2004年にASTM規格に登録されたKS Ti-1.5Al¹⁾、続く2005年には耐高温酸化性を飛躍的に高めたKS Ti-1.2ASNEX²⁾を開発してきた。

一方、より多くのチタン材が四輪車マフラーに採用されるためには、何よりも部品として低コストであることが求められる。このため素材としては、要求される耐高温酸化性はそのままに、複雑で多様な加工に対応できる良好な成形加工性を併せもつ安価な合金が必要となる。

そこで当社は、耐高温酸化性に余力のあるKS Ti-1.2ASNEXをベースに合金構成を見直した。さらに、マフラー部品での成形加工において多用される深絞り成形に着目することにより、加工熱処理による改良を加えたKS Ti-0.9SA合金を開発した。本稿では、KS Ti-0.9SA合金の開発経緯と量産試作した合金の諸特性について紹介する。

1. Ti-Al-Si系合金の高温強度および耐高温酸化性と材料特性

KS Ti-0.9SAの組成は、KS Ti-1.2ASNEXの開発時に既

に検討、報告されている²⁾。しかしながら、ここでは廉価を目的としているため高価なNbの使用を避け、AlとSi量の適正バランスを検討した。Nbはとくに耐高温酸化性向上に寄与していることから、KS Ti-1.2ASNEXと比較して耐高温酸化性は低下すると思われる。このため、750℃大気雰囲気中200時間保持後の酸化重量増加をKS Ti-1.2ASNEXの1.5倍以下にとどめることを目標にAlおよびSiの組成を決定することにした。

まず、アーク炉にて溶解した約100gの小形鋳塊を造り、熱間鍛造、熱延、冷延、焼鈍を施して板厚1.0mmの供試材を作製した。この供試材を対象に高温強度および耐高温酸化性を評価することによって組成を最適化した。高温強度はASTM E21に準拠した700℃における引張試験にて評価した。また、耐高温酸化性は、20.0mm²の試験片を電気炉にて750℃、200時間大気にて加熱暴露して加熱前後の重量変化を測定し、単位表面積あたりの重量変化を酸化増量として評価した。

図1に700℃での高温引張強度に及ぼすAl、Si量の影

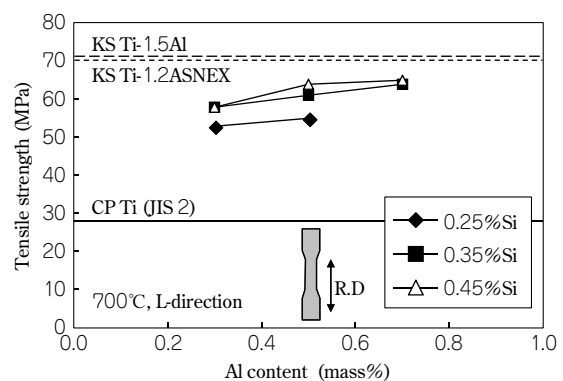


図1 Al、Si量に及ぼす高温引張強度の影響
Fig. 1 Effects of Al and Si content on tensile strength at 700°C

*鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 薄板部 **鉄鋼事業部門 チタン本部 チタン研究開発室

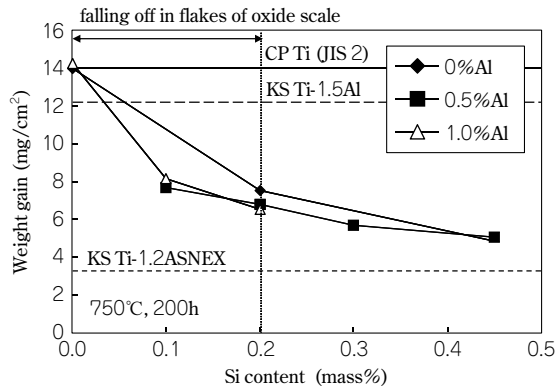


図2 酸化重量増に及ぼす Al, Si 添加量の影響
Fig. 2 Effects of Al and Si content on weight gain at 750°C for 200h

響を示す。図には KS Ti-1.2ASNEX, KS Ti-1.5Al および JIS 2 種純チタン (JIS class2 Commercially Pure Ti, 以下 CP Ti (JIS 2) という) の強度も併せて示した。本試験範囲では Al 量とともに引張強度は一樣に増加するが, Si は 0.35% あたりで飽和する傾向を示す。Al は α 相を固溶強化するが Si は固溶限を超えており, 0.35% 以上添加しても Si 化合物の析出サイズが大きくなるだけで強化に寄与しないと考えられる。KS Ti-1.5Al および KS Ti-1.2ASNEX と比較すると, どの組成においても高温引張強度は低いものの, CP Ti (JIS 2) の約 2 倍の強度を有することがわかる。

図 2 に 750°C で 200 時間大気加熱後の酸化増量に及ぼす Al, Si 量の影響を示す。Al 量および Si 量の増大に伴って酸化増量が減少する。とくに Si は, 0.1% の添加でも酸化重量が大きく抑えられ, 耐高温酸化性に有効な元素であることがわかる。さらに, 0.3% 以上の試験片はスケールのはく離も起こらないことが確認された。一方, Al も耐高温酸化性に有効であるが, 0.5% 以上の添加で飽和する傾向を示す。KS Ti-1.2ASNEX と比較するとどの組成においても耐高温酸化性はやや劣るものの, CP Ti (JIS 2) や KS Ti-1.5Al よりも大幅に優れていることがわかる。

以上の結果より, 高温強度および耐高温酸化性のバランスを考え, Ti-0.5Al-0.35Si を選定した。以降, 本合金を KS Ti-0.9SA と呼ぶ。

2. KS Ti-0.9SA の r 値と焼鈍条件の関係

マフラーの成形では張出しや深絞りの要素を多く含む加工が多い。ここでは深絞り性に着目し, 深絞り性と強い相関がある L 方向 (圧延方向) の r 値 (ランクフォード値) と熱処理の関係調べた。

一般に, r 値が高い方が深絞り性に優れる。供試材にはコールドクルーシブル炉にて溶解した約 10kg の鋳塊から熱間鍛造, 熱延, 冷延, 焼鈍を経て作製した 1.0mm 厚の板を用いた。焼鈍は真空焼鈍 (660°C, 2 時間保持) および大気ライン焼鈍を想定した大気焼鈍 (850°C, 3 分保持) を行い, 両者を比較した。なお, r 値は ASTM E517 に準拠して測定し, 付与したひずみは L 方向, T 方向 (圧延方向に垂直な方向), 45° 方向 (圧延方向と 45° をなす方向) とともに 5% とした。また, r 値に大きな影響を及

ぼす集合組織を比較するため, 焼鈍後の板を板厚 1/4 ままで削り込んだ圧延面を SEM-EBSP により結晶方位を測定し, $\langle 0001 \rangle$ と板面法線方向との傾きの分布図を作成した。当分布図の縦軸は, サンプルの板面法線方向に対する $\langle 0001 \rangle$ 傾角分布を, 完全にランダムな組織状態の $\langle 0001 \rangle$ 傾角分布で規格化した値である。少なくとも結晶粒径が 100 個以上入るように測定面積を 100 μm 角とし, 0.25 μm 間隔で測定した。また比較材の KS Ti-1.2ASNEX は, 量産材の熱延板から, KS Ti-0.9SA と同じ冷延, 焼鈍工程を経て作製した 1.0mm 厚の板を用いた。

図 3 に焼鈍条件の異なる KS Ti-0.9SA の r 値を示す。 r 値は明らかに 850°C の大気焼鈍の方が高い値を示している。一方 KS Ti-1.2ASNEX の r 値は, KS Ti-0.9SA ほどには大気焼鈍での大幅な向上は認められなかった。図 4 に両者における $\langle 0001 \rangle$ と板面法線方向との傾きの分布図を示す。いずれの合金も 850°C 焼鈍は, 660°C 焼鈍に比べて 0° 付近に $\langle 0001 \rangle$ が集積した basal texture 成分が増加し, 90° 付近に $\langle 0001 \rangle$ が集積した transverse texture が減少する傾向にある。KS Ti-0.9SA の 850°C 3 分間焼鈍材が 0° 付近への集積が最も高く, 90° 方向では最も小さくなっている。すなわち KS Ti-0.9SA の 850°C 3 分間焼鈍

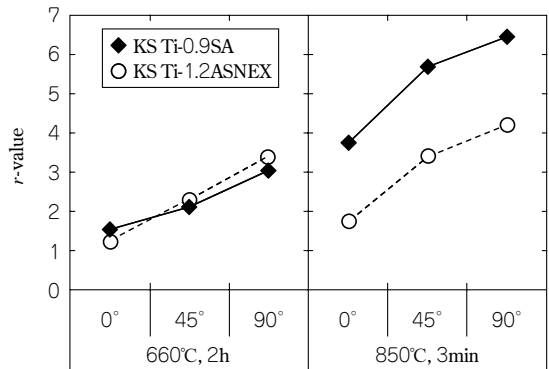


図3 KS Ti-0.9SA の各方向 r 値に及ぼす最終焼鈍条件の影響
Fig. 3 Influence of annealing condition on r -value in various directions of KS Ti-0.9SA
0°: parallel to rolling direction, 45°: 45 degree diagonal to rolling direction, 90°: perpendicular to rolling direction

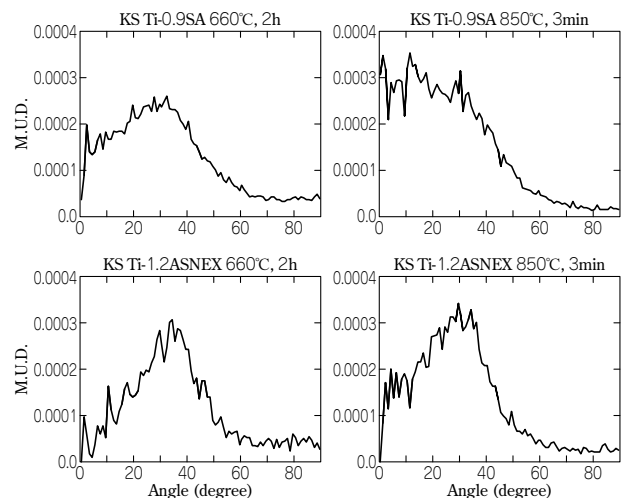


図4 最終焼鈍条件の異なる KS Ti-0.9SA, KS Ti-1.2ASNEX の $\langle 0001 \rangle$ 軸方向平均分布
Fig. 4 $\langle 0001 \rangle$ mean radial distribution for KS Ti-0.9SA and KS Ti-1.2ASNEX annealed at 660°C for 2 h and at 850°C for 3 min

材が basal texture の成分を最も多く含むため r 値が高くなったものと推定されるが、詳細のメカニズム解明は今後の課題である。本合金においては深絞りには有効とされる L 方向の r 値は 850°C の大気焼鈍により向上することがわかった。

3. KS Ti-0.9SA 量産試作材の諸特性

1. の評価を通じて決定した開発材 KS Ti-0.9SA の冷延板を実生産設備で試作した。すなわち、当社高砂製作所チタン溶解工場の消耗電極式真空アーク溶解炉を用いて 6ton の铸塊を製造し、3,000ton プレスで分塊鍛造後、当社加古川製鉄所にて分塊圧延、熱延、冷延および最終焼鈍を実施し、厚さ 1.0mm の冷延板を作製した。最終焼鈍では、2. での検討結果を受けて連続焼鈍酸洗ラインにて 850°C で処理した。この試作材を用いて ASTM E8M に準じた常温引張試験を行い、ヤング率や引張強さなどの物理的および機械的性質を測定した。

表 1 に KS Ti-0.9SA の物理的性質を、既存のマフラー用耐熱合金である KS Ti-1.2ASN, KS Ti-1.5Al および CP Ti (JIS 2) の量産材のそれと比較して示す。密度、線膨張係数は CP Ti (JIS 2) とほぼ同等であるが、ヤング率は CP Ti (JIS 2) に比べてやや低い。また、 β 変態点が Al 添加の影響で CP Ti (JIS 2) より約 30°C 高くなっていることがわかる。

3.1 KS Ti-0.9SA の機械的性質と高温強度および耐高温酸化性

表 2 に KS Ti-0.9SA の室温での機械的性質を KS Ti-1.2ASNEX, KS Ti-1.5Al および CP Ti (JIS 2) との比較で示す。0.2%耐力や引張強度はこれらの中では最も高い。伸びは CP Ti (JIS 2) に比べてやや低いものの、KS Ti-1.2ASNEX, KS Ti-1.5Al とほぼ同等である。CP Ti (JIS 2) の引張強度の規格範囲が 340~510MPa であることから、KS Ti-0.9SA は CP Ti (JIS 2) の硬質材相当の特性を有している。

図 5 に KS Ti-0.9SA の引張強度の温度依存性を示す。1. で述べたように、Ti-Al-Si 系合金の Si 量や Al 量の影響を調べた小形铸塊での引張試験では全体的に KS Ti-1.2ASNEX および KS Ti-1.5Al よりも低い高温強度を示した。しかしながら、量産試作材ではほぼ同等の高温引張特性を示し、600°C 以上の高温では CP Ti (JIS 2) の約 2 倍の強度を有している。これは、量産試作材は小形铸塊に比べて固溶酸素量を増加させたためと考えられる。

図 6 に KS Ti-0.9SA の 700~800°C、200 時間大気加熱後の酸化増量を示す。KS Ti-0.9SA は、最も耐熱性の良い KS Ti-1.2ASNEX と比べてやや劣るものの、750°C まではほぼ同等、800°C でも 1.5 倍以内の酸化増量に抑えられている。KS Ti-1.5Al および CP Ti (JIS 2) は 700°C 以上の高温になると急激に酸化増量が増えているが、KS Ti-0.9SA はそれらの合金と比べて非常に良好な耐高温酸化性を有しているといえる。

3.2 KS Ti-0.9SA の成形加工性

プレス加工に対する板の成形性は、深絞り性、張出し性、曲げ加工性、および伸びフランジ性の 4 つ⁵⁾ の評価

表 1 KS Ti-0.9SA の物理的性質

Table 1 Physical properties of KS Ti-0.9SA

Physical properties	KS Ti-0.9SA	KS Ti-1.2ASNEX	KS Ti-1.5Al	CP Ti (JIS 2)
Density (g/cm ³)	4.49	4.49	4.47	4.51
β transus (°C)	915	906	943	885
Young's modulus L-direction (GPa)	105	102	107	117
Young's modulus T-direction (GPa)	112	115	108	117
Liner expansion coefficient RT-800°C ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	10.0	10.3	10.3	9.9

表 2 KS Ti-0.9SA の機械的性質

Table 2 Tensile properties of KS Ti-0.9SA

	Tensile direction	0.2% proof strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	n-value
KS Ti-0.9SA	L	351	494	33	0.115
	T	415	477	36	0.054
KS Ti-1.2ASNEX	L	286	427	34	0.111
	T	376	434	38	0.056
KS Ti-1.5Al	L	309	455	34	0.134
	T	363	440	35	0.076
CP Ti (JIS 2)	L	222	391	38	0.148
	T	272	387	41	0.100

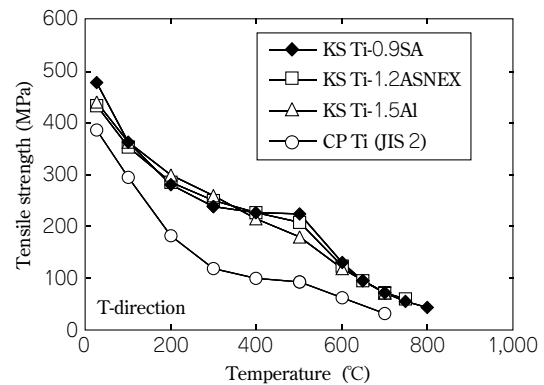


図 5 KS Ti-0.9SA の高温引張特性

Fig. 5 Elevated temperature tensile properties of KS Ti-0.9SA

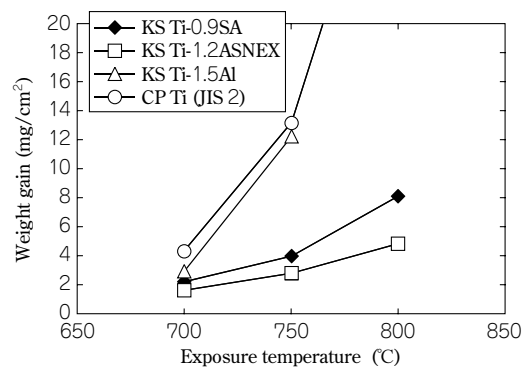


図 6 KS Ti-0.9SA の耐熱性 (高温酸化特性)

Fig. 6 Oxidation properties at elevated temperature of KS Ti-0.9SA

を行った。深絞り性は、Swift 試験⁶⁾ による LDR (Limit Drawing Ratio) と L 方向 r 値で評価した。Swift 試験ではパンチ径: $\phi 50.0\text{mm}$, パンチ肩半径: 10.0mm, ダイス径: $\phi 51.6\text{mm}$, ダイス肩半径: 10.0mm とし、潤滑はポリエチレンシートを用いた。また、張出し性の評価はエリクセン試験 (JIS Z 2247) を採用した。曲げ加工性は

JIS Z2248に準じて行ったが、180°曲げとして曲げ半径を変えて試験し、目視で割れが認められる直前の半径を限界曲げ R/t (R :曲げ半径, t :板厚)として評価した。伸びフランジ性は穴広げ試験打抜き穴φ10.0mmで、日本鉄鋼連盟規格 (JFS T1001-1996) に準じて評価した。

図7にKS Ti-0.9SAのL方向 r 値とLDRを示す。LDRはCP Ti (JIS 2)と同程度で、KS Ti-1.2ASNEXよりも高い値を示す。また、L方向 r 値はCP Ti (JIS 2)およびKS Ti-1.2ASNEXよりも高く、KS Ti-0.9SAが高い深絞り性を有していることが量産試作においても再確認できた。

図8にKS Ti-0.9SAのエリクセン値を示す。KS Ti-1.5Alが若干低い、比較材を含めて±0.5mmの範囲にあり4合金ともほぼ同等の張出し性を示す。

図9に曲げ加工性試験結果を示す。深絞り性とは逆に、 r 値 (図7)が高いほど曲げ加工性は悪くなる傾向があることから、KS Ti-0.9SAは、CP Ti (JIS 2)やKS Ti-1.2ASNEXより劣るものの、KS Ti-1.5Alより優れた曲げ加工性を有していることがわかる。これは、結晶粒成長を抑えるSi化合物の存在により、KS Ti-1.5Alよりも結晶粒が細かいと推察される。

図10はKS Ti-0.9SAの伸びフランジ性を示す。限界穴広げ率はKS Ti-1.2ASNEXやCP Ti (JIS 2)に比べて低い値を示しており、伸びフランジ性はやや劣っているが、同強度の鋼と比較しても遜色 (そんしょく) ない値を示している。

以上により、KS Ti-0.9SAは、CP Ti (JIS 2)と比較して曲げ加工性および伸びフランジ性はやや劣るものの、マフラーを成形加工する際に必要な張出し性や深絞り性

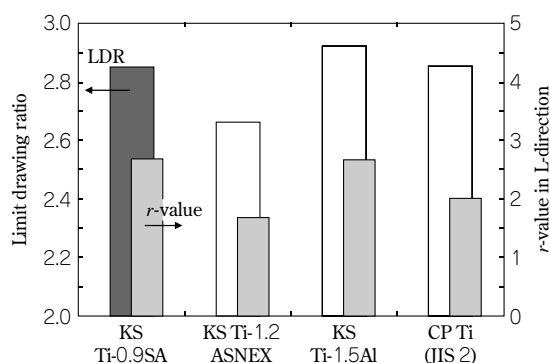


図7 KS Ti-0.9SAのL方向 r 値と深絞り性 (LDR)
Fig. 7 r -value in L-direction and deep drawability (LDR) of KS Ti-0.9SA

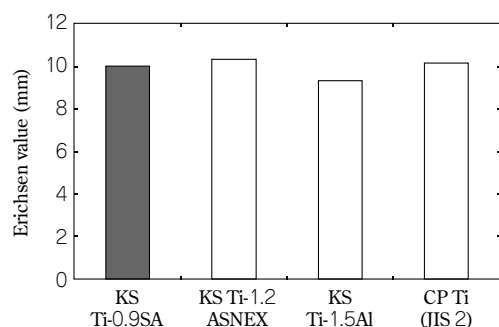


図8 KS Ti-0.9SAのエリクセン値
Fig. 8 Erichsen value of KS Ti-0.9SA

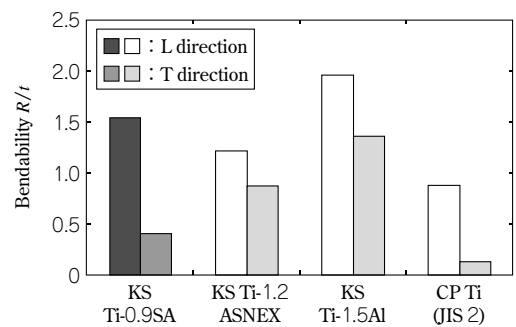


図9 KS Ti-0.9SAの曲げ加工性 (R :最小曲げ半径, t :サンプル板厚)

Fig. 9 Bendability of KS Ti-0.9SA (R : minimum bend radius without cracking, t : thickness of sample sheet)

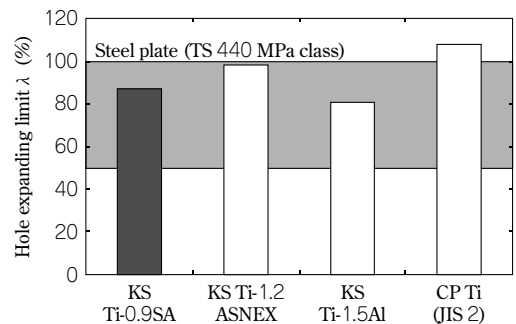


図10 KS Ti-0.9SAの伸びフランジ性

Fig.10 Stretch flange formability of KS Ti-0.9SA

は同等であることを確認した。また、KS Ti-1.2ASNEXと比較すると、耐熱性ではやや劣る一方で、深絞り性では優位にある合金である。

むすび=先行のKS Ti-1.2ASNEXがトヨタ自動車LEXUSの旗艦車種であるLF-Aのマフラーに採用されたことが契機となり、チタン製マフラーは四輪分野でも実績を積上げる段階を迎えている。地球環境保護の気運が高まる中でガソリン車はこれまで以上にCO₂削減のための軽量化が求められており、現行のステンレス製マフラーをチタン製に置換えることによって40%を超える軽量化、すなわち10kg前後の軽量化が期待される。

KS Ti-0.9SA (Ti-0.5Al-0.35Si)は、KS Ti-1.2ASNEXに匹敵する良好な高温強度および耐高温酸化性を有するだけでなく、深絞り性が良好な廉価合金である。本合金が今後、四輪向けマフラー分野におけるチタンの普及に少しでも貢献ができれば幸いである。

参考文献

- 1) 森倉功和ほか:R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.3 (2004), pp.38-41.
- 2) 屋敷貴司ほか:R&D 神戸製鋼技報, Vol.55, No.3 (2005), pp.42-47.
- 3) Y. Kosaka et al.: Ti-2007 Science and Technology, The Japan Institute of Metal, Vol.2 (2007), pp.1403-1406.
- 4) 大塚広明ほか:チタン, Vol.55, No.4 (2007), pp.282-287
- 5) 薄鋼板成形技術研究会編:プレス成形難易ハンドブック, 第3版 (2007), p.71, 日刊工業新聞社発行
- 6) H. W. Swift: Sheet Metal Industries, Vol.31 (1954), p.817.