

軽量化・高機能化に向けたチタン適用

Applications of Titanium and Its Alloys for Weight Reduction and Enhanced Functionality of Automobiles

岳 辺 秀 徳*
Hidenori TAKEBE

西 山 真 哉
Shinya NISHIYAMA

三 好 遼 太 郎
Ryotaro MIYOSHI

國 枝 知 徳
Tomonori KUNIEDA

抄 録

自動車において軽量化と高機能化は重要な課題であり、チタンはこれらの課題を解決する材料であると考えられる。しかしながら、チタンの適用には課題も多く、日本製鉄(株)では優れた特性を有するチタン材やソリューション技術の開発を行ってきた。材料開発では、安価汎用元素を活用した“Super-TIX® シリーズ”を開発しており、特に、排気系用合金や高強度チタン合金について紹介した。ソリューション技術ではプレス成形シミュレーションとプレス時の潤滑性について紹介した。

Abstract

Weight reduction and enhanced functionality in automobiles are critical challenges, and titanium is considered a material that can address these issues. However, there are many challenges in applying titanium, and our company has been developing titanium materials with excellent properties and solution technologies. In material development, we have created the “Super-TIX™ series,” which utilizes inexpensive, common elements. We have mainly introduced alloys for exhaust systems and high-strength titanium alloys. In terms of solution technologies, we have introduced press forming simulations and lubrication during pressing.

1. はじめに

自動車では安全装置の搭載などによる車体重量が増加する一方で排出ガス規制の厳格化が求められており、車体軽量化は重要な課題である。自動車の軽量化には素材の比強度向上が必要であり、鋼ではハイテンの開発が進められ、チタン、アルミニウム、マグネシウムなどの軽量金属やCFRPなどによるマルチマテリアル化も行われている²⁾。

チタンによる自動車部品の軽量化は1980年代からレース車を中心に行われ、コネクティングロッド、エンジンバルブ、サスペンションスプリングなどへチタンが適用されてきた。しかし、チタンは高性能である反面、高コストであるため、現在でもレース車や高級車での適用に限られている。日本製鉄(株)では素材の低コスト化のため、従来から汎用チタン合金に用いられてきたVやMoなどの高価合金元素を安価汎用元素で代替したSuper-TIX® シリーズを開発しており³⁾、これらは自動車部品へ適用されてきた。

一方、部品製造コストは素材コストよりも大きな割合を

占めており、それを削減する取り組みも必要である。日本製鉄では、被削性を改善した材料開発⁴⁾やチタン特有の異方性を考慮したプレス成形ソリューション技術の開発等、多岐にわたっており、幅広くチタンを適用するための技術開発を続けている。今回は、これらの取り組みの一部ではあるが、開発材の特性やソリューション技術について紹介する。また、今回紹介していない部品に関しては、過去の記事もご参照いただきたい^{5,6)}。

2. 排気系部品

排気系部品は古くからチタン化が進められてきた部品であり、軽量化に限らず、意匠性の観点からもチタンが適用されてきた。排気系部品は薄板を成形加工することで製造されるため、成形性はもちろんのこと、高温環境にさらされることから、高温での力学特性や耐酸化性も要求される。日本製鉄では室温での加工性を維持しながら高温強度を向上させるCuを活用したSuper-TIX® シリーズ(以降、STIXと記載)として、表1に記載の合金を開発し⁷⁾、実用化した。

* 鉄鋼研究所 材料信頼性研究部 チタン研究室 研究第一課長 工博 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

表 1 排気系用チタン合金の代表的な化学組成と室温特性
Typical chemical composition and properties at room temperature in titanium for exhaust system

Material	Chemical composition (mass%)					Tensile properties				Density (g·cm ⁻³)
	Cu	Sn	Si	Nb	O	Heat treatment	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	
JIS class 2					≦ 0.20	Annealing	≧ 215	≧ 340	≧ 23	4.51
10CU ⁷⁾	1.0				≦ 0.15	Annealing	≧ 270	≧ 360	≧ 35	4.54
10CUNB ⁷⁾	1.0			0.5	≦ 0.15	Annealing	≧ 270	≧ 360	≧ 35	4.55
10CSSN-1	1.0	1.0	0.2	0.4	≦ 0.15	Annealing	≧ 270	≧ 395	≧ 20	4.55

これらを中心に各種特性を紹介する。

2.1 引張特性の温度依存性

図 1 に引張強度の温度依存性を示す。引張方向は圧延方向に垂直方向 (T 方向) とし、ひずみ速度は室温での結果は 30%/min, それ以外は 7.5%/min である。比較として

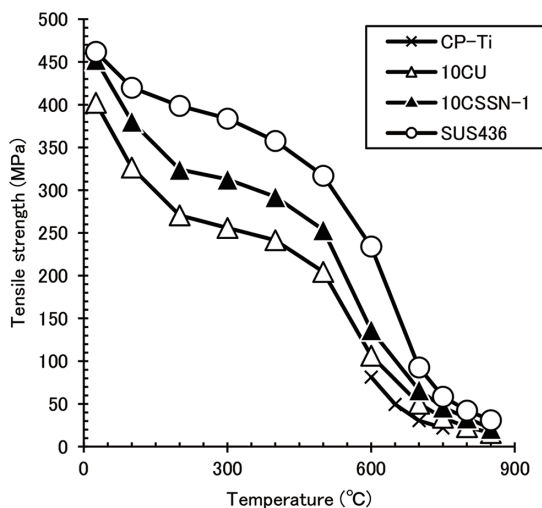


図 1 引張強度と温度の関係
Relationship between tensile strength and temperature

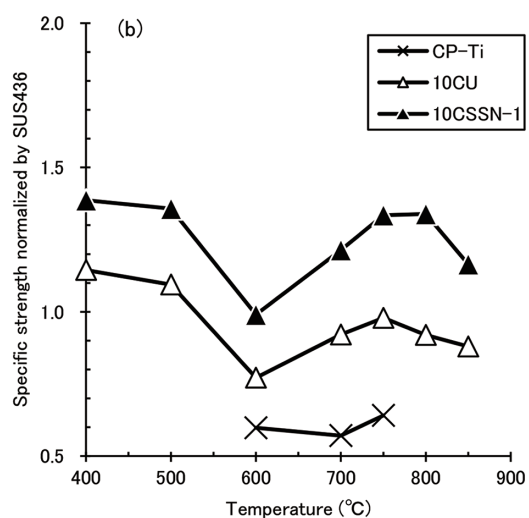
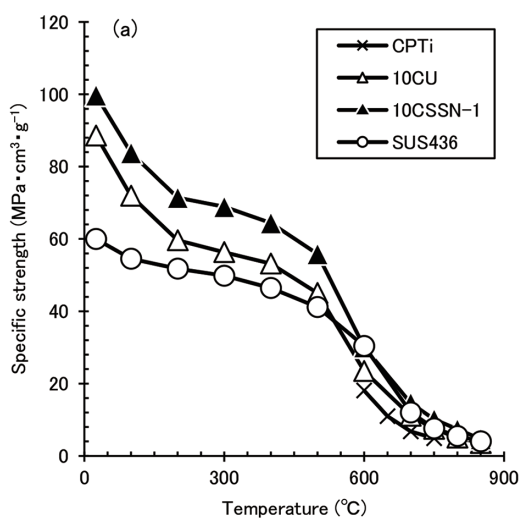


図 2 比強度と温度の関係；(a) 比強度, (b) SUS436 比強度との比
Specific strength as a function of temperature
(a) Specific strength of each material and (b) specific strength ratio normalized SUS436.

SUS436 および JIS2 種純チタン (CP-Ti) の結果もあわせて示す。いずれも高温ほど引張強度は低下しており、全温度範囲において引張強度は CP-Ti, STIX-10CU, STIX-10CSSN-1, SUS436 の順に高い。

図 2 に比強度 (引張強度 / 密度) と温度の関係を示す。密度は室温での値を用いており、表 1 に記載の値および SUS436 では 7.70 g/cm³ とした。比強度 (図 2 (a)) は、室温付近から 500℃ 程度までは STIX-10CU および STIX-10CSSN-1 の方が明らかに高い。一方、600℃ を超える範囲では同程度である。より詳細に比較するため、図 2 (b) に SUS436 の比強度との比を示す。CP-Ti は SUS436 の 60% 弱しかなく、STIX-10CU では 90% 程度である。しかし、最も高温強度を高めた STIX-10CSSN-1 は SUS436 に対して 20~30% 程度高い。

2.2 疲労特性

図 3 に 750℃ での応力比 -1 における平面曲げ疲労の S-N 線を示す。砂時計型の試験片を T 方向に採取し、試験片表面は製品ままとして行った。図中の実線は片対数曲線モデルに従う場合の線である。疲労強度 (図 3 (a)) は高温引張と同様に、SUS436 が最も疲労強度が高くなった。しかし、密度 (2.1 節に同じ) で除した場合 (図 3 (b)) は、SUS

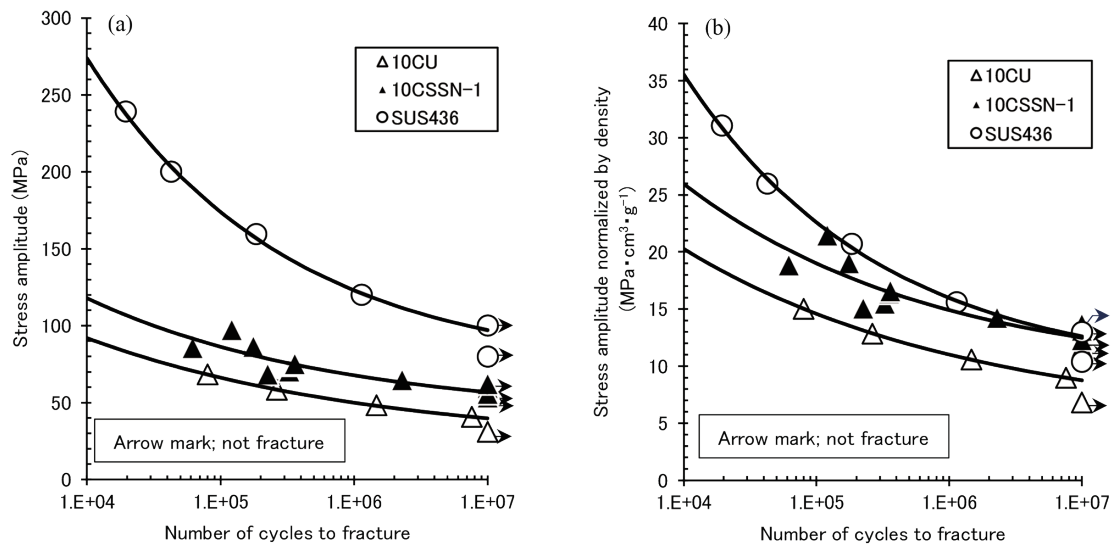


図3 750°CにおけるS-N線図；(a) 応力振幅, (b) 規格化応力振幅
S-N curves at 750°C
(a) Stress amplitude and (b) stress amplitude normalized by density of each material.

436とSTIX-10CSSN-1は非常に近いS-N線図を示しており、高サイクル側ではほぼ同等であった。

2.3 耐酸化性

チタンは酸化しやすく、耐酸化性が課題である。図4に200h連続大気酸化における酸化増量と温度の関係を示す。SUS436に対していずれのチタン材も1~2桁大きく、チタンが酸化しやすい材料であることが分かる。使用中の酸化による減肉等での性能劣化を問題とする場合は、Al, Si, Nbを添加した耐熱チタン合金薄板が用いられる。チタン合金であっても、これらの元素を含有しない場合はCuのみを添加したSTIX-10CUのように純チタンと同等の耐酸化性しか有しない。一方、STIX-10CUにNbを添加したSTIX-10CUNBでは耐酸化性は改善し、SiとNbを添加したSTIX-10CSSN-1ではさらに改善した。800°CではSTIX-10CSSN-1とSTIX-10CUNBは同等となっているが、これはSTIX-10CUNBのNb添加量が10CSSN-1よりも多いためである。このことは、700°C近傍での耐酸化性向上にはNbよりもSiの添加が有効であり、より高温ではNbの効果が大きいことを示すものである。

さらなる耐酸化性向上にはAl, Si, Nb等を多量添加すればよいと考えられるが、これ以上の耐酸化性向上元素の添加では冷間加工性の低下や材料コストの増大を招く。すなわち、STIX-10CSSN-1以上の耐酸化性を達成するには、部品の交換サイクルに応じて表面処理を施す方が効果的である。

2.4 耐高温塩害特性

排気系材料では路面凍結防止のために用いられる融雪剤による耐高温塩害性の評価が必要となる場合がある。日本

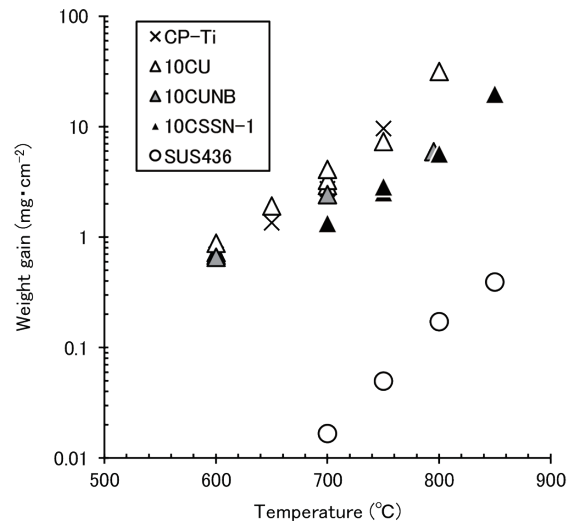


図4 200h連続大気酸化での酸化増量と温度の関係
Weight gain after oxidation for 200 h at various temperature in air

製鉄開発材に用いているCuは高温塩害を促進し、Si, Nbは抑制することが示唆されている⁸⁾。また、高温塩害は、1) NaCl蒸気とチタン酸化膜の反応によってClガスを生成し、2) Clガスと母材元素との反応によって揮発性塩化物を形成、3) 塩化物が酸化されることでClガスを発生する現象の繰り返しによって進むと報告されている⁹⁾。したがって、Cuを添加した合金であっても大気酸化を抑制する添加元素であるNb, Siを添加すれば酸素の供給を抑制することで塩化物の酸化を抑制し、耐高温塩害性を確保できると考えられる¹⁰⁾。

2.5 凝縮水に対する耐食性

排気系部品では排ガスが部品内に残留し、エンジン停止に伴って冷却されることで排ガス成分を含有した水が形成

される。そのため、エンジンの始動停止に伴って、排ガス成分を含有する水が形成と凝縮・揮発を繰り返す。そのため、このような環境における耐食性を評価することも必要となる。JASO-M611-92-A に準拠した腐食試験を行った結果を表 2 に示す。孔食深さは STIX-10CSSN-1 と SUS436 で同等である。また、腐食減量は SUS436 ではほとんどなく、STIX-10CSSN-1 では試験後に重量が微増した。これらの結果は凝縮水の環境においてもチタンが十分な耐食性を有することを示すものである。

3. モーター部品

電子機器では磁場が発生するため、磁性の影響を受けない非磁性材料が用いられる。チタンはオーステナイト系ステンレス鋼¹¹⁾とは異なり、加工されても比透磁率が 1.00 から変化せず非磁性である(図 5)。そのため、材料としての強度を高めることができれば高強度な非磁性材料として、

表 2 凝縮水腐食試験結果
Result of condensed liquid corrosion test

Material	Pitting depth (μm)		Weight loss (mg)
	Ave.	Max	
10CSSN-1	29.5	68	-0.4
SUS436	26.4	71	0.7

表 3 高強度チタン合金の代表的な化学組成と室温での特性
Typical chemical composition and properties at room temperature in high strength titanium alloys

Materials	Chemical composition (mass%)					Tensile properties					Density (g·cm ⁻³)
	Al	Fe	Mo	V	O	Heat treatment	Microstructure	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	
Ti-64	6.0			4.0	≦ 0.20	Annealing	Equiaxed	≧ 828	≧ 895	≧ 10	4.43
51AF	5.0	1.0			≦ 0.25	Annealing	Equiaxed	≧ 700	≧ 800	≧ 10	4.42
523AFM	5.0	2.0	3.0		≦ 0.25	Annealing	Equiaxed	≧ 870	≧ 950	≧ 10	4.53
523AFM	5.0	2.0	3.0		≦ 0.25	STA	Bi-modal	≧ 1100	≧ 1200	≧ 10	4.53

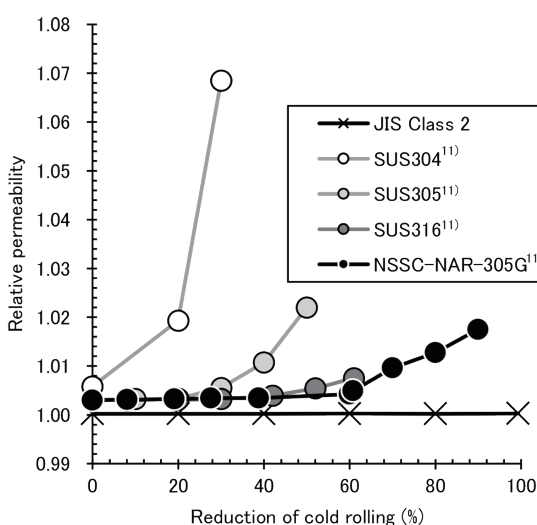


図 5 冷間圧延率と比透磁率の関係¹¹⁾

Relationship between relative permeability and reduction of cold rolling¹¹⁾

モーター部品等での採用を期待したい。本章では高強度チタン合金の特性を中心に紹介をする。

3.1 高強度チタン合金

チタン合金は一般的には合金元素を多量に添加することで固溶強化されている。表 3 に代表的な合金および室温での特性を示す。Ti-6Al-4V(Ti-64) に代表されるような $\alpha+\beta$ 型チタン合金では多くが 900MPa 級以上である。STIX-51AF は Ti-64 ELI^{*1} 相当強度とし、冷間加工性や切削加工性を向上させた合金である。また、室温での疲労強度は Ti-64 と同等であり¹²⁾、コネクティングロッドに採用された実績がある。STIX-523AFM は $\alpha+\beta$ 型の中でも Near- β 型に分類される合金であり、Ti-64 よりも高強度である。また、STIX-523AFM は溶体化時効 (STA) によってさらに高強度化が可能である¹³⁾。

3.2 溶体化時効による高強度化

図 6 に溶体化時効後の STIX-523AFM の引張強度と伸びの関係を示す。試験は丸棒素材から長手方向に平行部が $\phi 6$ mm 標点間距離 25mm、ひずみ速度 30%/min で実施した。

*1 ELI: Extra Low Interstitial の略であり、酸素、窒素、水素および鉄の含有量をより低減していることを意味する。

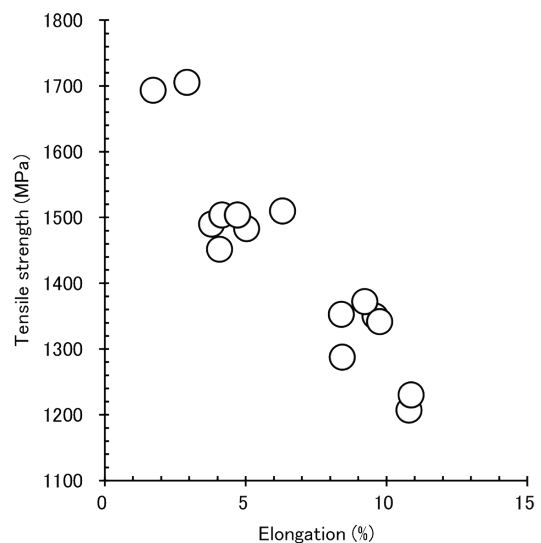


図 6 STIX-523AFM の引張強度と伸びの関係

Relationship between tensile strength and elongation in solution-aged STIX-523AFM bars

引張強度と伸びはトレードオフの関係にある。溶体化時効条件の調整によってさらなる高強度化も達成可能である。

3.3 特異形状変化

STIX-523AFM は溶体化時効によって高強度化するだけでなく、ヤング率の制御や超弾性や形状記憶特性も示す。また、特定の熱処理によって加工方向にさらに変形する特異形状変化を示す。図7に900℃溶体化後に曲げ加工し、200℃保持および450℃保持した際の形状を示す。室温での曲げ加工後は曲げ角が37°、200℃保持後では27°となり、不完全ながらも形状記憶特性を発現した。一方、450℃保持後は曲げ角が57°になっており、加工方向にさらに変形する特異な形状変化を示した。図8に加熱温度と形状変化量の関係を示す¹⁴⁾。ここでの形状変化量とは室温で加工した状態での曲げ角を基準にして、同一試験片を150~450℃まで50℃毎に昇温冷却を繰り返した場合の曲げ角の変化量である。900℃溶体化(ST)では250℃までは不完全ながら形状回復(-37°で完全に回復)しており、形状記憶効果を発現している。一方、300℃以上では加工方向に形状変化(特異形状変化)していることが分かる。また、溶体化温度が930℃では昇温しても形状はほとんど変化しない。これらの違いは溶体化中の元素分配によってβ相の安定度の差による。900℃溶体化ではβ相がより安定であり、冷却後に室温までβ相が不安定ながら多く残留し、加工によって加工誘起変態(β→α'(底心斜方晶マルテンサイト)相)を生じる。その後の昇温によって逆変態(α'→β相)が生じることで形状記憶効果が発現する。また、より高温に昇温するとβ→hcp相への等温変態を生じるが、その際に加工で発生した残留応力によるバリエーション選択を生じ、それによって特異な形状変化を生じると考えられる。一方、930℃溶体化では冷却後にはβ相の多くがα'相に変態し、加工によってα'(hcpマルテンサイト)相へ加工誘起変態する。このα'

相への変態は非熱弾性と考えられるため、昇温時にα'→β相への逆変態が生じず、形状変化が生じなかったと考えられる。

4. チタン適用に向けたソリューション技術

これまでに燃料タンクへの純チタン適用が実現している(図9)。チタン化によって、樹脂製との対比で約40%の軽量化が可能である。また、Alに比べて溶接などの設備が鋼のものを転用できるなどのメリットが大きい。しかし、チタン化には大きな課題が2つある。まずは、プレス金型設計である。鋼を用いる場合にはシミュレーションを活用

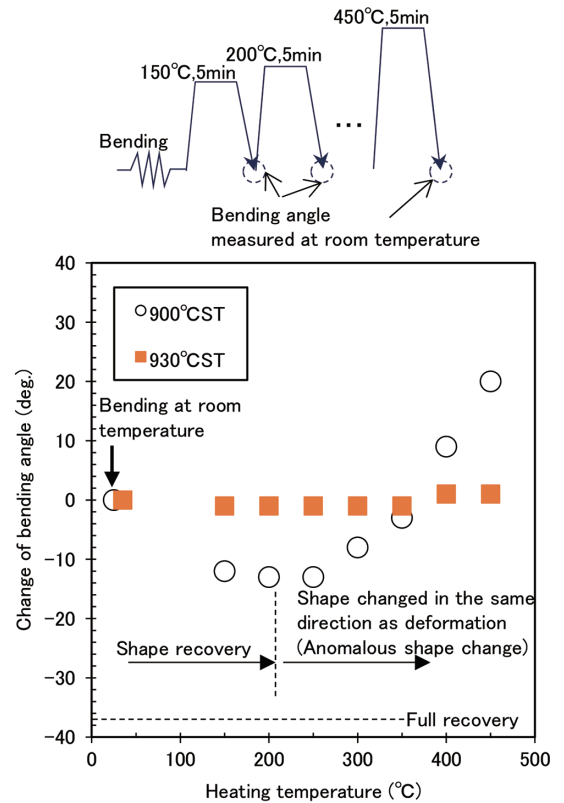


図8 曲げ加工試験片の曲げ角変化量と加熱温度の関係¹⁴⁾
Transition of bending angle during isochronal heat treatment after bending at room temperature in the specimen solution treated at 900 and 930°C followed by water quenching¹⁴⁾

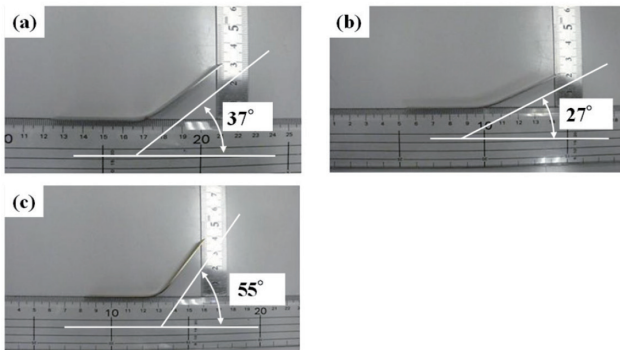


図7 曲げ加工後の形状変化; (a) 室温曲げ加工後, (b) 200℃保持, (c) 450℃保持
Appearances of the specimen during isochronal heat treatment
(a) As initially deformed by bending (before the heat treatment), (b) after heated to 200°C, and (c) subsequently heat treated to 450°C.

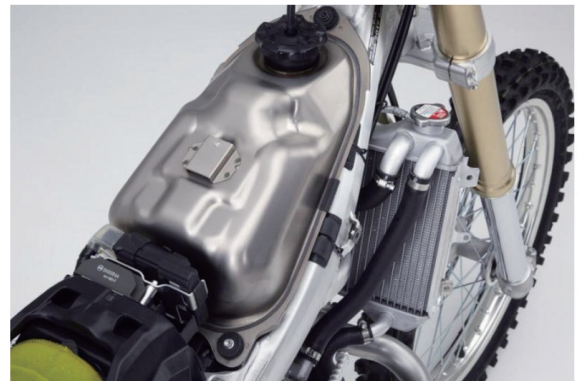


図9 チタン製燃料タンク
Titanium fuel tank

して設計され、試行錯誤を繰り返すことは少なくなっている。しかし、チタンにおいては強い面内異方性があり、シミュレーションを活用した設計は十分ではない。そのため、チタンのプレス成形シミュレーション技術を確立することがチタン適用のハードルを下げるにつながると考えている。次に、プレス時の金型との焼き付きである。チタンは金型と焼き付きやすく、十分な潤滑を要する。固体潤滑剤が最も潤滑に適しているが、塗布や除去が煩雑である。本章では、これら2つの課題に対する日本製鉄の取り組みを紹介する。

4.1 プレス成形シミュレーション

チタンの成形シミュレーションの精度を向上させるには変形・強度異方性、異方硬化則、Strength differential (SD) 効果を考慮する必要がある。日本製鉄ではJIS1種純チタン薄板の円筒深絞り試験を用いてこれらを考慮することでシミュレーション精度向上を行っている。

図10に円筒深絞り試験後の外観写真およびシミュレーション結果を示す¹⁵⁾。シミュレーションの降伏関数には変形・強度異方性を考慮できるYld2000-2dおよびCPB06を用いた。CPB06ではSD効果の有無2パターンでシミュレーションを行った。図10(a, c)に示すように、円筒深絞り試験後には圧延方向(RD)に対して約43°の位置に耳が形成された。耳の谷形状は圧延方向では平坦、圧延幅方向(TD)では丸形状となる異方性が確認された。これに対してシ

ミュレーション結果(図10(b))では、異方硬化則を考慮しない場合、Yld2000-2dおよびCPB06(SD効果無視)ですべての谷が丸形状となり、平坦な谷は再現されなかった。CPB06でSD効果を考慮すると実験では平坦になった谷の位置で耳が形成され、実験結果を再現できない。一方、異方硬化則を考慮すると、いずれの降伏関数でも実験結果に近づいた。特に、CPB06でSD効果を考慮すると、谷形状が実験に近づき、カップ高さ(図10(c))もほぼ実験と一致した。

以上のように、変形・強度異方性だけでなく、異方硬化則、SD効果を考慮することがシミュレーション精度の向上に寄与することが分かる。加えて、シミュレーションを行うための材料データの取得も重要である。日本製鉄では今後もさらなる精度向上を目指し、チタン化の適用支援に取り組む所存である。

4.2 潤滑性

焼き付き防止のために金型とチタンの接触を回避すべくシートや乾燥皮膜型の固体潤滑剤を用いる場合もあるが、生産性を考えた場合には一般的な液体潤滑剤の使用が望ましい。チタン薄板では焼鈍+酸洗もしくは真空雰囲気焼鈍の2種類の焼鈍を行っているが、真空雰囲気焼鈍で表面には薄い酸化皮膜を形成したり、部分的に金型材質を変更することで、金型との焼き付きが軽減され、液体潤滑剤の使用が可能となった¹⁶⁾。

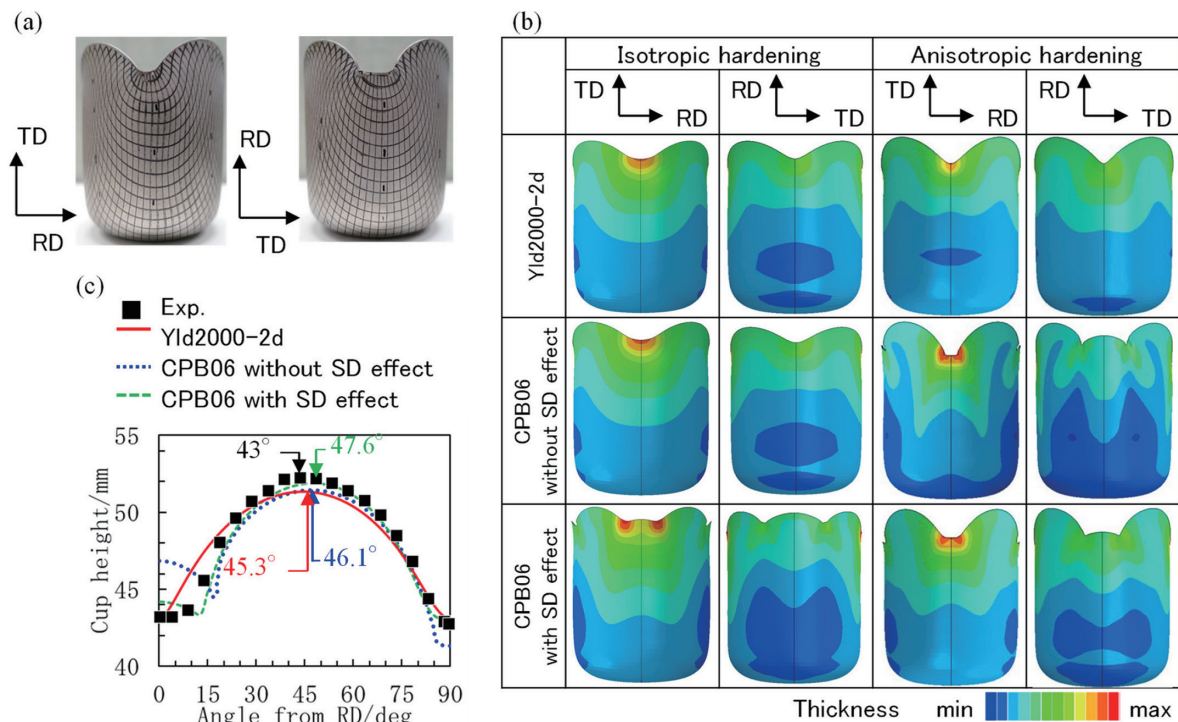


図10 円筒深絞り試験後の外観および円筒深絞り試験のシミュレーション結果¹⁵⁾

Experimental and simulation results in cylindrical deep drawing¹⁵⁾

(a) Appearance after cylindrical deep drawing test, (b) deformed shapes and thickness distribution, and (c) cup height profiles of the simulation using Yld2000-2d, CPB06 without SD effect, and CPB06 with SD effect yield criteria with isotropic and anisotropic hardening rules.

潤滑性の向上にはトライボロジーの研究が不可欠である。日本製鉄では、摺動時の挙動を詳細に調査し、摺動面直下の結晶粒の結晶方位等に関する影響まで考慮した技術開発を行っている。図 11 に摺動面直下のテイラー因子と摩擦係数の関係を示す¹⁷⁾。垂直応力によって摺動面直下の結晶方位の影響が異なることが分かる。図 12 に摩擦係数

に及ぼす摺動面直下の結晶方位の影響について、推定される機構の模式図を示す¹⁷⁾。垂直応力が小さい場合には結晶粒の変形は生じないため、影響はない。一方、垂直応力が高くなると摺動面直下の結晶粒に変形が生じ、テイラー因子が低い結晶粒程大きく変形する。これによる真実接触面積の増加や掘り起こしの影響で摩擦係数が高くなる。さらに垂直応力が高くなると、同時に多くの結晶粒で変形が生じるため、変形が平均化され変動が生じにくくなる。このように、材料組織も潤滑性に影響することから、組織制御も含めて最適な材料開発を行い、潤滑剤の使用量を削減し、環境負荷の低減に貢献するべく取り組んでいく。

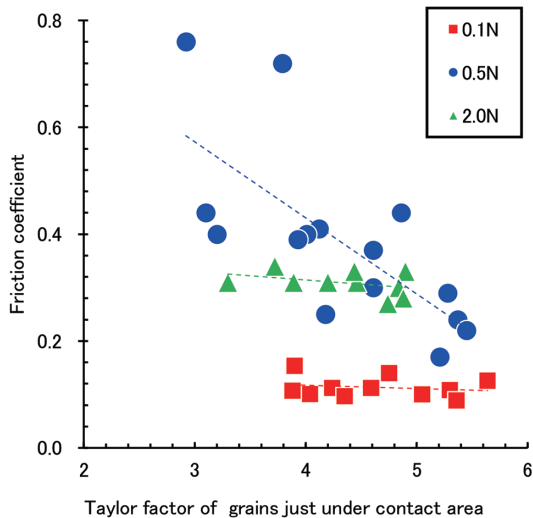


図 11 摩擦係数とテイラー因子の関係^{17, 18)}

Relationship between friction coefficient and Taylor factor of crystal grains immediately below the contact surface in the edge sliding test of IP block at the vertical load of 0.1 N, 0.5 N, and 2.0 N^{17, 18)}

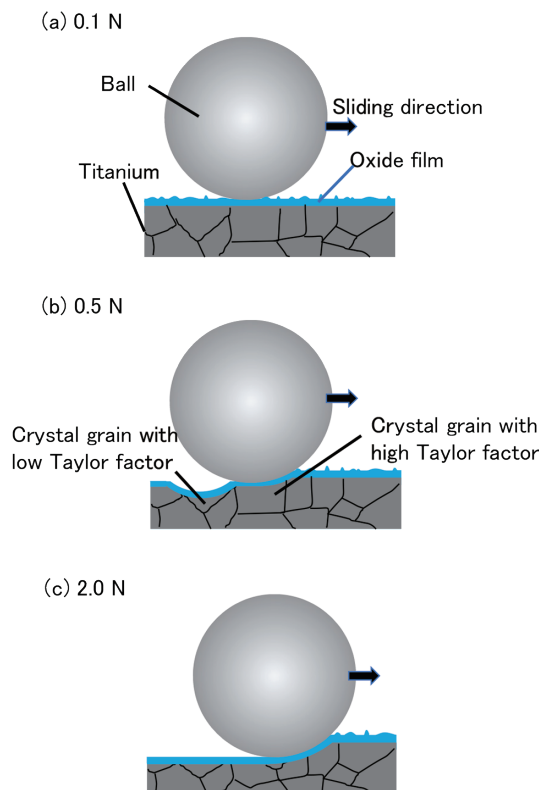


図 12 摩擦係数に及ぼすテイラー因子の影響の発現機構の模式図^{17, 18)}

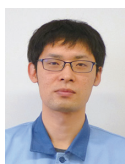
Schematic diagrams of sliding form of edge sliding test at the vertical load of (a) 0.1 N, (b) 0.5 N, and (c) 2.0 N^{17, 18)}

5. まとめ

自動車部品へのチタン適用に向けて、材料の特性や日本製鉄が取り組むソリューション技術の一端を紹介した。今後も、素材メーカーとしてチタンの情報発信を強化するとともに、今後も部品メーカー、自動車メーカーとの共同推進によって自動車分野の発展に貢献していく所存である。

参考文献

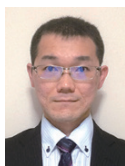
- 1) 高橋学：工業材料. 65 (12), 21 (2017)
- 2) 千葉晃司：工業材料. 65 (12), 16 (2017)
- 3) 藤井秀樹, 高橋一浩：新日鉄技報. (375), 99 (2001)
- 4) 中村貞行：電気製鋼. 60 (3), 272 (1989)
- 5) 井阪正則, 岳辺秀徳, 川上哲, 高橋一浩：日本製鉄技報. (418), 33 (2021)
- 6) 岳辺秀徳, 高橋一浩：日本製鉄技報. (412), 190 (2019)
- 7) 大塚広明：チタン. 60 (2), 26 (2012)
- 8) 屋敷貴司：チタン. 59 (1), 7 (2011)
- 9) 原基, 井上道雄, 中川時子：日本金属学会誌. 62 (8), 691 (1998)
- 10) Mori, K., Takahashi, K., Fujii, H., Otsuka, H.: Proc. 13th World Conf. on Titanium, San Diego, 2015, (The Minerals, Metals & Materials Society, 2016), p.1883-1838
- 11) NSSC-NAR-305G, 日本製鉄(株), https://www.nipponsteel.com/product/stainless/nssc/product/grade/nssmc_series/product/nssmc-nar-305g.html (参照 2025-04-28)
- 12) 土居航介, 久保田剛, 村上剛, 小島勇輝, 三浦徹：チタン. 64 (1), 40 (2016)
- 13) 森健一, 岳辺秀徳, 橋本翔太郎：日本製鉄技報. (418), 97 (2021)
- 14) 國枝知徳, 藤井秀樹, 高橋一浩, 和田恵太, 竹元嘉利：CAMP-ISIJ. 25, 1285 (2012)
- 15) 西山真哉, 塚本元気, 三好遼太郎, 岡村一男：日本機械学会論文集. 9 (928), (2023)
- 16) 川上哲：ふえらむ. 23 (11), 6 (2018)
- 17) 三好遼太郎, 塚本元気：鉄と鋼. 109 (9), 761 (2023)
- 18) Miyoshi, R., Tsukamoto, G.: ISIJ International. 64 (12), 1804 (2024)



岳辺秀徳 Hidenori TAKEBE
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部
チタン研究室 研究第一課長 工博
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



三好遼太郎 Ryotaro MIYOSHI
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部
チタン研究室 研究第一課 主幹研究員



西山真哉 Shinya NISHIYAMA
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部
チタン研究室 研究第二課長 理博



國枝知徳 Tomonori KUNIEDA
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部
チタン研究室長 工博