各種耐食性非鉄金属材料の選択指針

3. チタンならびにチタン合金[†]

中山武典*

Guidelines for The Selection of Corrosion Resistant Non-ferrous Metals III: Titanium and Its Alloys

by

Takenori NAKAYAMA*

Key words: Titanium, Titanium alloys, Materials selection, Corrosion resistance

1 緒 言

チタンは 1790 年に発見されたが、実用材料として登場したのは 1946 年にクロール法といわれるマグネシウム還元方式のチタン製造法が開発実用化されて以降であり、我が国では 1954 年に工業的生産が開始された¹⁾。以来、チタンならびにチタン合金は、軽くて、強く、さびにくいという特性から、反応容器・熱交換器・配管・各種電極として化学工業に、火力・原子力発電所の復水器・蒸気タービンブレードや海水淡水化装置の伝熱管などとしてエネルギー産業に、また航空機の機体・ジェットエンジンやロケット部品として航空宇宙産業などに使用されてきた。近年では、めがね・時計などの日用品、屋根・壁・モニュメントなどの建築分野、ゴルフクラブを初めとするスポーツ用品、釣り具・二輪車マフラー・自転車フレームなどのレジャー用品、人工骨・車椅子などの医療・福祉分野などに幅広く展開されるとともに、プレート式熱交換器や燃料電池用セパレータ素材など

にも用途を広げつつある^{2)~5)}。

本稿では、他の実用材料とも比較して、高耐食性材料として使用が拡大しているチタンならびにチタン合金の種類や特性、選択指針を概説する。各種分野におけるチタン材の適用事例についても触れる。

2 チタン材の構造材料としての一般事項

2・1 一般特性

表 1²⁾に純チタン、チタン合金 (Ti-6Al-4V) と他の各種材料の代表物性値を示す。純チタンの比重は 4.51 で、銅の約 50%、SUS304 ステンレス鋼の約 60%である。また、後述するように、普通鋼とほぼ同等の強度を有している。このことから、薄肉化による構造物の軽量化が可能であり、作業性にも寄与する。また、チタンの線膨張係数は SUS304 ステンレス鋼の約 50%、アルミニウムの約 30%と他の金属材料に比較して熱による伸び縮みが小さく、ガラス、レンガ、コンクリートなどとはほぼ同じ

表1 純チタン、チタン合金ならびに各種材料の代表物性値²⁾

	純チタン	Ti-6Al-4V	鉄	SUS 304	アルミニウム	AL7075	AZ31	ハステロイ C	銅	シリコン	ガラス
結晶構造 [0~100℃]	HCP	HCP	BCC	FCC	FCC	FCC	HCP	FCC	FCC	HCP	非晶質
比重	4.51	4.42	7.9	8.0	2.7	2.8	1.8	8.9	8.9	6.5	2.4
融点(℃)	1688	1540-1650	1530	1400-1427	660	476-638	838-905	1305	1083	1852	800
ヤング率(GPa)	106	113	192	199	69	71	45	205	117	89	98
ポアソン比	0.34	0.30-0.33	0.31	0.29	0.33	0.33	0.35	-	0.34	0.33	0.24
電気抵抗 (μΩ-cm) [20℃]	47-55	171	9.7	72	2.7	5.8	9.3	130	1.7	40-54	-
熱伝導度(W/m℃)	17	7.5	62	16	203	120	96	12	381	17	1
熱膨張係数 (×10 ⁻⁶ /℃) [0~100℃]	8.4	8.8	12	17	23	23	26	12	17	6	9
比熱 (J/kg・K)	520	520	460	500	880	960	960	1050	390	290	1050
熱容量 (J/m ³ ・K)	2.4 ×10 ⁶	2.3 ×10 ⁶	3.6 ×10 ⁶	4.0 ×10 ⁶	2.4 ×10 ⁶	2.7 ×10 ⁶	1.9 ×10 ⁶	3.5 ×10 ⁶	3.5 ×10 ⁶	1.9 ×10 ⁶	2.5 ×10 ⁶

[†] 原稿受理 平成26年 6月 30日 Received June 30,2014 ©2014 The Society of Materials Science, Japan

* (株) 神戸製鋼所 材料研究所 〒651-2271 神戸市西区, Materials Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., Nishi-ku, Kobe,651-2271

表2 純チタン、チタン合金の種類と特徴、用途例²⁾

種類		規格			引張強度レベル (MPa)	特徴	用途例
		JIS	ASTM	AMS			
純チタンおよびα合金	C. P. Ti	1 種	Gr. 1		340	成形性	成型部材、建材
		2 種	Gr. 2	4902 他	440	汎用純チタン	熱交換チューブ、配管、一般用途
		3 種	Gr. 3	4900	530	中強度	管板
		4 種	Gr. 4	4901 他	680	高強度	航空機部材
	Ti-0.15Pd	12 種	Gr. 7		440	耐すきま腐食性	熱交換チューブ、配管、ライニング、電極部材
	Ti-0.3Mo-0.8Ni		Gr. 12		530		
ニアα合金	Ti-5Al-2.5Sn		Gr. 6	4910 他	860	溶接性、耐熱性	航空機ジェットエンジンの動翼など
	Ti-8Al-1V-Mo			4915 他	1020	耐熱性	
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-Si			4949 他	1000	耐熱性	
α+β合金	Ti-3Al-2.5V	61 種	Gr. 9	4943 他	700	冷間加工性	二輪・四輪マフラー、自転車フレーム、メガネフレーム
	Ti-6Al-4V	60 種	Gr. 5	4906 他	1010 (Anneal) 1200 (STA)	汎用高強度合金	航空機部品、コンロッド、バルブスプリングリテーナー、各種構造部材、ゴルフクラブヘッド
	Ti-6Al-6V-2Sn			4918 他	1050 (Anneal) 1300 (STA)	焼入性	
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo			4981	1050 (Anneal) 1230 (STA)	耐クリープ性	ジェットエンジン部品
ニアβ合金	Ti-10V-2Fe-3Al			4983 他	980 (Anneal) 1300 (STA)	高靱性、高疲労特性、焼入性	
β合金	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr		Gr. 19	4957 他	900 (ST) 1410 (STA)	冷間加工性、時効硬化性	
	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al			4914	830 (ST) 1210 (STA)	冷間加工性、時効硬化性	自転車ギヤ、釣具、ゴルフクラブヘッド

注記) C. P. Ti:工業用純チタン, Anneal:焼鈍, ST: Solution treatment (溶体化処理), STA: ST & aging (溶体化処理+時効処理)

ため、これら材料との共用に適している。また、熱伝導率が低いことから、保温性にも優れるという特徴もある^{6),7)}。

さらに、チタンは、後述するように、海浜・海岸を含む大気自然環境下において卓越した耐食性を有することが大きな特徴であり、通常の屋外用途環境では発錆する可能性は皆無と考えられている。ちなみに、高耐食性建材として、最近、SUS447J1に代表される高Crのスーパーステンレス鋼が実用化されているが、チタンはこれら材料よりもさらに優れた耐食性、耐候性を発揮することが確認されている。こうしたチタンの優れた耐食性は、チタンの表面に保護性がきわめて高い酸化皮膜（不働態皮膜）が容易に形成されるためと考えられている。特筆すべきは、後述するように、一般環境における腐食性物質の元凶といわれている塩化物（Cl⁻）イオンに対する抵抗性がきわめて強いことであり、この性質が高級耐食性材料としての地位を揺るぎないものとしている⁸⁾。

2・2 種類と特徴、製造サイズ

チタンおよびチタン合金は、成分組織の相違により、α型、α+β型およびβ型に分類されている。表2²⁾に、純チタンおよび代表的なチタン合金の種類と対応規格、特徴、用途例をまとめる。ASTMとAMS（航空機用材料規格）は米国の材料規格である。α型に属するものは工業用純チタン（C.P.チタン）と低合金チタンである。前者は引張強度が4水準あるが、OとFeの含有量を増大させることで高強度化している。微量のPdやMo、Ni

を添加した低合金チタンは非酸化性酸環境での全面腐食や塩化物環境でのすきま腐食を抑制する耐食チタン材料である。ニアα型合金は高温強度や耐熱性に優れる中強度合金である。α+β型合金は強度や疲労特性、靱性に優れた二相組織を有した合金系である。このなかで、Ti-6Al-4V合金はチタン合金を代表するものである。β型合金は準安定相であり、溶体化処理後の時効処理をすることで微細なα相が析出して顕著な析出強化を生ずる。表3²⁾に、純チタン、代表チタン合金、鉄系材料（軟鋼、SUS304 ステンレス鋼）の各板材の機械的特性を比較する。

ここで、純チタンおよびチタン合金は、チタン鉱石から製造されたスポンジチタンをインゴットに、用途・目的に応じて、圧延・鍛造・鋳造などの工程を経て、厚板、薄板、溶接管、鍛造品、線材、棒材、型材、シームレスパイプなどの各種チタン展伸材として製品化されている。チタン製品の製造可能サイズは、品種や材質、あるいはチタンメーカーによって異なるが、およそ次の通りである。まず純チタンおよびα系合金（JIS1種、2種、3種、11種、12種など）は、熱延圧延コイルで板厚3~7mm、板幅最大1550mm程度、冷延圧延コイルで板厚0.3~3mm、板幅最大1550mm程度、薄肉溶接管で外径12.7~50.8mm、肉厚0.3~2mm範囲、厚板で板厚4mm~200mm、板幅500~4000mm範囲。一方、合金板（Ti-6Al-4Vなど）は、板厚0.5~120mm、板幅最大3500mm程度のものが供給されている。

表3 純チタン、チタン合金の機械的特性(板材)²⁾

材質		引張方向	代表値				
			0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	ビッカース硬さ (Hv)	エリクセン値 (mm)
純チタン	JIS 1 種	T	238	332	45.9	117	11.2
		L	181	337	48.2		
	JIS 2 種	T	272	387	41.6	144	10.3
		L	222	391	38.7		
	JIS 3 種	T	429	551	26.0	202	6.9
		L	411	545	25.9		
チタン合金	Ti-6Al-4V	T	888	957	10.1	320	－
		L	905	959	10.3		
	Ti-3Al-2.5V	T	615	661	23.0	240	－
		L	501	654	20.0		
	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	T	789	828	19.8	260	7.9
		L	772	823	19.1		
軟鋼		T	169	303	45.0	88	10.1
		L	167	301	46.5		
ステンレス鋼 (SUS304)		T	263	648	58.0	168	13.0
		L	264	662	55.7		

2・3 色調と表面仕上げ、成形加工など

チタンの優位性として、建材用途などでは、チタン素地が独特の銀白色を呈すること、ならびに陽極酸化処理に代表される各種の着色法により種々の色に発色することもあげられる。チタン素地は銀白色を呈しているが、表面仕上げの種類によりその色調が微妙に異なる。チタンの表面仕上げ法としては真空焼なまし仕上げ (Vacuum Annealing, 以後 VA 処理と略す) と連続焼なまし酸洗仕上げ (Continuous Annealing Picking, 以後 AP 処理と略す) が代表的であり、後者の AP 処理材は艶の少ない銀白色の外観を提供する。酸洗には通常、硝酸を使用し、硝酸とふっ酸の比率を変えることで、白さを調整できる。ちなみに、硝酸の量を減らすことにより、光沢度が減少して、白っぽくなる。また、酸洗による銀白色の程度は結晶粒径によっても左右され、酸洗条件が同じ場合、粒径の小さいものほど光沢度が小さくなり、白っぽくなる。一方、VA 処理材は、冷間圧延後、真空焼なましと軽い冷間圧延を施すもので、AP 材に比べやや灰色を呈している。一般に、VA 材に比べて AP 処理材はざらつき感がなく、また清浄な雰囲気を持ち、好まれる場合が多い。このほか、表面仕上げには、グラスビーズブラスト、ヘアーライン、エンボス (凹凸加工)、エッチング、鏡面などの加工方法がある。各々の仕上げ方法により、独特の色調を提供するものであり、用途に応じて使い分けがなされ、チタンの意匠性が高められている^{2),9)}。

ここで、チタンのヤング率は表1に示したとおり鉄の約50%であり、軟らかくたわみやすいため、チタン建材の成形に際しては、スプリングバックに対する注意が必要である。その回避には、軟質でスプリングバックの小さい JIS 1種純チタン板の使用が有利である。このほか、チタン建材を成形する上での注意事項として、ペコと呼ばれるポケットウエーブの発生がある。本現象はロールフォーミングなどの加工により、面内に生じた残留圧縮応力が素材の座屈限界応力を越えた場合に生ずる

弾性座屈に起因した凹凸であり、美観を損なう。このため、ポケットウエーブの発生を防止したチタン板が開発されている²⁾。

また、チタン表面が不均一であると、めっき処理や陽極酸化皮膜などの表面処理を行う際に、意匠性や皮膜密着性などを損なうことになる。ちなみに、チタン下地の真空焼なまし時に生成した酸化皮膜、圧延油の残さ、局所的な加工ひずみなどがこうした表面不具合の原因となることから、チタンの適切な前処理管理が必須である。

3 チタン材の耐食性

3・1 チタン材の一般耐食性

各種の腐食性環境における純チタンの一般耐食性のステンレス鋼 (SUS316)、ニッケル合金 (ハステロイ C)、銅との比較を、第4表⁷⁾に示す。このように、チタンは多くの腐食性環境中で優れた耐食性を示すが、他の材料と比較して特筆すべき点は、硝酸のような酸化性の酸に強く、塩化物溶液中で非常に耐食性が優れるとともに、湿潤塩素ガスに対して完璧に耐えることがあげられる。このほか、チタンは、応力腐食割れを起し難く、加工、熱処理、溶接による耐食性劣化がほとんどないなどの特長がある⁷⁾。

しかしながら、チタンは、塩酸や硫酸のような還元性の酸ならびにアルカリに対しては高温高濃度条件になると腐食する。また、他の金属材料と接触している場合には、チタンの高腐食電位に由来するガルバニック腐食に注意する必要がある。ステンレス鋼に対しては腐食電位が近いためにその心配はないが、チタンとの腐食電位の差が大きい亜鉛、アルミニウム、軟鋼、銅合金などはガルバニック腐食を生ずる恐れがある。また、鋼と接触する場合などでは、チタンの水素吸収脆化を生じる場合がある。その防止方法としては、相互の金属間に絶縁材を挿入するか、水溶液が金属間にまたがらないように排水回りを工夫することが有効である。ここで、チタンの水素吸収は、後述する隙間腐食と同様に、チタンの腐食

表4 純チタン、SUS316ステンレス鋼、ハステロイC、銅の耐食性比較⁷⁾

環境条件			各種金属材料の耐食性(※)			
腐食媒	濃度(%)	温度(°C)	純チタン	SUS316	ハステロイC	銅
塩酸	5	室温	○	×	△	×
	10	沸点	×	×	×	×
硫酸	5	室温	○	○	○	△
	10	沸点	×	×	×	△
硝酸	30	室温	○	○	○	×
	68	沸点	○	△	×	×
酢酸	100	室温	○	○	○	×
		沸点	○	○	○	×
苛性ソーダ	20	室温	○	○	○	○
	40	沸点	×	△	○	△
塩化第二鉄	30	室温	○	×	△	×
		沸点	○	×	×	×
塩化ナトリウム	飽和(20°C)	室温	○	△	○	○
		沸点	○	×	△	△
硫化ソーダ	10	沸点	○	△	○	×
塩素ガス	100%(wet)	室温	○	×	×	×
硫化水素ガス	100%(wet)	室温	○	○	△	×

※ ○:耐食性あり(腐食速度0.13mm/年以下)、△:使用可能(腐食速度0.13~1.3mm/年)、×:耐食性なし(腐食速度1.3mm/年以上)

問題の中でも特に注意の要する現象であり、塩酸や硫酸などの非酸化性環境、石油精製プラントなどの硫化水素を含むアルカリ環境、水素ガス環境、電気防食電位が低すぎる場合、チタン表面が鉄で汚染される場合などで生じやすい。対策として、水素吸収が懸念される非酸化性酸中においても、空気吹込みなどにより、環境を出来るだけ酸化性にすることやカソード防食電位の適正制御、あるいは陽極酸化や大気酸化による皮膜付与などが提案実施されている^{7),8)}。

3・2 耐隙間腐食性チタン合金

前述のように、純チタンは、ステンレス鋼や銅合金に比べて全般的に耐食性に優れるが、塩酸や硫酸などの非酸化性の酸性溶液中では不動態皮膜が安定に維持され難く耐食性が十分でない。また、高温高濃度の塩化物水溶液中では隙間腐食が発生することがある。この弱点の改善方法として、従来から、合金元素の添加や環境中への酸化剤の添加、あるいは表面処理などが検討されてき

た。この中でも、合金元素の添加がもっとも確実な方法であり、すでに1950年代から1960年代にかけて検討がなされ、特にPt, Pd, Ru, Rh, Irなどの白金族元素の添加が還元性酸溶液中での耐食性改善に有効であることが見出されている。その結果、隙間腐食によく耐える材料として、表2に示すTi-0.15Pd合金(ASTM.G7、JIS12種)が開発実用化され、多くの機器で優れた性能が実証されている。同合金の優れた耐食性は、溶液中において短時間のうちに合金表面にPdが濃縮して電位が貴側にシフトし、安定なTiO₂皮膜を形成するためであると考えられている。しかしながら、当時より、Ti-0.15Pd合金はPdが高価であることから材料としてコスト高になるという問題があり、これを改善するために白金族元素以外の合金元素の検討がなされてきた。その結果、白金族元素の代替元素として、Ni、Coなどの鉄族元素、やMoが見出され、1970年代にTi-0.3Mo-0.8Ni合金(ASTM.G12)が開発実用化された。このほか、同じ時期に、簡便な隙間腐食防止対策として、PdO/TiO₂皮膜被覆を特徴とする表面処理が開発実用化されている^{3), 8)}。

図1 耐隙間腐食性新チタン合金の位置付け

表5 耐隙間腐食性新チタン合金の化学成分例

名称*	(質量%)							
	Ni	Pd	Ru	Cr	Co	O	N	H
AKOT (Gr.33,34)	0.41	0.01	0.02	0.14	-	0.082	0.003	0.018
TICOREX (Gr.13-15)	0.54	-	0.04	-	-	0.052	0.004	0.002
SMI-ACE (Gr.30,31)	-	0.06	-	-	0.34	0.069	0.006	0.002

*:括弧内NoはASTM相当規格

図2 耐隙間腐食性新チタン合金の耐食性能報告例³⁾

(a)AKOTの隙間腐食発生限界図、(b)TICOREXの耐隙間腐食性、(c)SMI-ACEの耐塩酸性

1980年代に入り、チタンの用途が多様化するにつれて、Ti-0.15Pd合金は高価であり、Ti-0.3Mo-0.8Ni合金は耐隙間腐食性が不十分で、かつNi、Mo添加による加工性劣化を示すことが問題視されるようになった。こうした背景より、国内のチタンメーカ数社において、1980年代後半から1990年代前半にかけて、耐隙間腐食性に及ぼす合金元素の添加効果について再検討がなされ、低コストでかつ加工性を損なわず、Ti-0.15Pd合金に匹敵する耐隙間腐食性を有する新チタン合金として、Ti-0.4Ni-0.01Pd-0.02Ru-0.14Cr合金（AKOT）、Ti-0.5Ni-0.05Ru合金（TICOREX）およびTi-0.05Pd-0.3Co(SMI-ACE)が開発実用化された。これら新チタン合金のコスト・耐食性のイメージを図1に、化学成分例を表5にそれぞれ示す。ちなみに、AKOTは、白金族元素であるPd、Ruの添加量を最小限とし、それを補うNiを加工性劣化しない程度に添加し、さらに耐食性向上のために極微量のCrを加えることで、コストを低く抑えるとともに、純チタン並みの加工性・溶接性とTi-0.15Pd合金に匹敵する耐隙間腐食性を実現している。同合金の耐食性メカニズムは、Crの作用により、腐食の初期段階でTiの選択溶出が生じ、不動態化および不動態化保持能力に優れた白金族元素であるPd、Ruの表面濃化が促進されるためと考えられている。図2³⁾にこれら新チタン合金の耐食性能の報告例を示す。新合金は、高温高濃度の塩化物環境に曝される各種の化学プラント用材料などとしてすでに多くの使用実績があり、今後、各種のプラント・設備のメンテナンスコスト低減の観点からも、より広範囲の適用が期待される^{3), 10)}。

4 チタン材の分野別適用状況

4.1 プラント分野

(1) 復水器

復水器は、タービン蒸気を冷却させて凝縮水に戻す熱交換器であり、多くの伝熱管（復水器管）とその両端を固定する管板から構成される。臨海火力・原子力発電所の復水器内では、一般に海水を冷却水としており、伝熱管と管板材料として、従来、アルミニウム青銅などの銅合金が用いられてきたが、孔食やエロージョンなどの腐

食損傷が避けられず、塩化物環境において卓越した耐食性を有するチタンの使用が拡大・定着している^{6), 8)}。このチタン伝熱管には、JIS2種相当の工業用純チタンの薄肉溶接管が用いられているが、既設復水器の銅合金管をチタン管に取り替える場合には、強度面から支持板間隔を銅合金管よりも狭く取る必要がある。このため、最近、既設復水器を改造することなく適用可能で、コスト的にも有利な銅合金-チタン二重管が開発されている。通常、管内面が冷却水（海水）と接するので、内面チタン二重管が選択されるが、空気冷却部とその近傍に見られるアンモニアアタック防止を考慮する場合は、外面チタン二重管が採用される。さらに、既設銅合金復水器をチタン化する新技術として、既設の伝熱管と内部構造を撤去し、チタン伝熱管と管板、支持板などを一式モジュールとして挿入する技術が提案されている。一方、チタン管板では、JIS3種相当材が使用されているが、コスト低減や胴板（炭素鋼）との溶接性の観点から、母材に炭素鋼、合せ材にチタン板を使ったチタンクラッド材が開発され、採用が進んでいる。チタン復水器においては、フジツボやイガイなどの海洋生物の清掃と処理に労力を要しており、その対策技術として、電気分解により発生する活性酸素を利用した生物付着防止システムが開発されている⁵⁾。

(2) プレート式熱交換器

プレート式熱交換器は、波形状にプレス成形加工した薄板を伝熱エレメントとし、これらを多数積層した熱交換器である。従来の多管式熱交換器に比べて、伝熱効率が高く、軽量・コンパクトで、保守も容易であることから、各種分野で使用拡大しているが、作動媒体として、特に海水などの塩化物溶液が使用される場合には、耐食性確保の観点から、そのプレート材料としてチタンが多用されている。その材質として、プレス成形性の観点から、最も軟質なJIS1種相当の純チタン冷延板が用いられているが、最近では、加工熱処理や潤滑皮膜プレコーティングなどによるプレス成形向上技術が開発されて、JIS2種相当の高強度チタン板の使用が可能になり、プレート薄肉化による伝熱性能の向上や軽量化、コストダウンを実現している。また、最近、プレート表面に微細凹

凸形状を施すことで熱伝達効率を向上させる技術が提案されている。一方、純チタンでは耐食性が不足する高温や酸性の塩化物作動媒体などでは、Ti-0.15Pd 合金や前述の耐すさま腐食性新チタン合金などが使用されている。チタンプレート式熱交換器においても、環境にも配慮した生物付着防止が課題であり、その新技術として、電気化学的微生物制御システムなどが提案されている⁵⁾。

4・2 建築分野

近年、ウォーターフロント開発の進展や酸性雨の発生にともない、建築物をとりまく環境が厳しくなりつつあり、屋根、壁、モニュメントなどの建築素材として、海浜・海岸を含む大気自然環境下において卓越した耐食性を有するチタンの利用が拡大しつつある。前述のように、チタンは、その比重が4.5で、銅の約50%、SUS304ステンレス鋼の約60%であり、普通鋼とほぼ同等の強度を有していることから、薄肉化による構造物の軽量化が可能であり、作業性にも寄与する。また、チタン素地が独特の銀白色を呈すること、ならびに陽極酸化処理に代表される各種の着色法により種々の色に発色できることもあげられる。ちなみに、チタン建材の実用例は、1970年代の大分県佐賀関町の早吸日女（はやすいひめ）神社の屋根が最初であり、1980年代には東京電力（株）電力館や神戸市立須磨海浜水族園の屋根などに適用され、1990年代以降、建材として本格的に用いられるようになった。しかしながら、チタン建材が長年使用されるにともない、変色の問題が顕在化してきた。この経年変色は、使用当初に銀白色を呈していた表面が、使用中に徐々に酸化皮膜が成長して干渉色を生じ、薄茶色に変化する現象である。その要因として、酸性雨、塩化物イオン、太陽光による光電気化学反応、あるいは、材料表面に存在するTiCや不純物元素であるFeの存在などが考えられており、それらの要因を考慮した成分調整や製造工程改良、表面処理などによる変色対策が提案・実施されている^{2), 4), 5)}。

4・3 その他の分野

将来のクリーンエネルギー源の一つとして期待されている固体高分子型燃料電池のセパレータ材では、硫酸酸性の腐食環境に耐える高耐食性が要求されるとともに、反応ガスの遮断性、発生した電気を効率よく流すための高導電性、ガスを流すための流路溝を形成するための成形性、燃料電池を小型・軽量化するために強度が求められている。従来の黒鉛系セパレータ材では、成形性や強度に限界があることから、それに代わる新素材として、最近、高耐食性で、かつ軽く強度の高いチタン箔の表面に、安価な導電性表面処理を施したセパレータ材が開発され、注目されている。また一方で、チタンの軽くて、強く、さびにくいという特性から、従来から、自動車を始めとする輸送機部材への適用が期待され、懸架ばねや弁ばね、エンジンバルブ、コンロッドなどへの検討がなされてきたが、普及が進んだのは二輪車を中心とした排気系・マフラー用途である。本用途では、純チタンが用いられてきたが、薄肉化による更なる軽量化と排ガス規制にともなう高温化ニーズが強まり、最近、冷間加工性と高温強度、耐酸化性に優れたチタン合金が新たに開発され、二輪車だけでなく、四輪車や船舶用マフラーへの適用も進行しつつある⁵⁾。

など、構造用耐食性材料としてチタン材を選択する際の基礎事項を解説した。適用事例からも示されるように、チタンは、強く軽くさびにくいというユニークな特性から、今後も、プラント分野を始めとする各種分野で使用量が増大していくと考えられる。上記で紹介した分野以外にも、電極や地熱発電、海洋エネルギーなどへの利用拡大が期待されている。また、耐食性に加えて、軽量性、生体適合性にも優れることから、整形外科的治療を要する患者向けにインプラント素材としての利用も進むものと期待される。しかしながら、素材単価がステンレス鋼の約10倍と、初期投資の割高感は否めなく、用途によっては、敬遠されるケースも少なくない。ただし、建築分野を例に、腐食しろ、加工費などを加味してインシヤルコストを比較すると、ふっ素樹脂塗装 SUS304 ステンレス鋼や同アルミニウムの2倍を超えず、さらに、ライフサイクルコストを比較すると、これら材料よりも長期的には有利であるとの報告もなされている。今後、使用目的、環境、メンテナンスなどとの関連で、チタンの特性の検討・認識がなされ、これまでも増して、チタンならびにチタン合金が上手に利用されていくことを期待したい。

参考文献

- 1) H.Kusamichi, "The present and future of titanium and its alloys", Kobe Steel Engineering Reports, Vol.32, No.1, pp.1-7 (1982).
- 2) T.Nakayama, "Titanium", Handbook of The Industrial Coating, pp.115-119 (2008) Technosystem Co., Ltd..
- 3) H.Satoh and T.Nakayama, "Nonferrous Materials", Zairyo-to-Kankyo, Vol.53, No.4, pp.178-184 (2004).
- 4) H.Satoh, "Surface treatment technology for titanium as architectural materials", Journal of the Surface Finishing Society of Japan, Vol.43, No.11, pp.1014-1019 (1992).
- 5) T.Nakayama, "Titanium", Zairyo-to-Kankyo, Vol.63, No.4, pp.163-165, (2014).
- 6) J.A.Mountford and M.R.Scaturro, "Titanium - attributes, benefits, and applications in the marine market", Journal of Ship Production, Vol.26, No.1, pp.13-19 (2010).
- 7) H.Satoh and F.Kamikubo, "An application field of titanium by use of its corrosion resistant property", The Piping Engineering, No.12, pp.66-73 (1982).
- 8) H.Satoh, "Some properties of titanium as a structural materials for heat exchangers using sea water coolant", Journal of the Society of Sea Water Science, Japan, Vol.44, No.3, pp.200-208 (1990).
- 9) T.Yashiki, A.Okamoto, T.Kida and H.Ohyama, "Effect of annealing conditions on gloss of pickled pure titanium for construction service", Journal of the Surface Finishing Society of Japan, Vol.50, No.6, pp.547-552 (1999).
- 10) T.Yashiki and F.Kamikubo, "Corrosion resistant titanium alloys and surface treatments for titanium", Kobe Steel Engineering Reports, Vol.49, No.3, pp.43-48 (1999).

5 結 言

以上、チタンならびにチタン合金の種類や特性、特徴