



## チタン材料の利用分野と将来の課題

草 道 英 武\*

## Application of Titanium and Its Future Technology

Hidetake KUSAMICHI

## 1. はじめに

W. J. KROLL が液状の四塩化チタンを金属マグネシウムで還元して 1.4 kg の可鍛性スポンジチタンを試作することに成功したのは 1936 年である<sup>1)</sup>。そのご半世紀を経た現在、クロール法スポンジチタンの生産能力は 103 600 t になり、これと類似の金属ナトリウム還元法<sup>2)</sup>の生産能力 16 500 t を加えると、全世界のスポンジチタンの年産能力は 120 100 t と推定される<sup>2)</sup>。

スポンジチタンは、チタンスクラップとともに消耗電極式真空アーク溶解炉で二重溶解し铸塊とする。わが国ではチタン铸塊の 90% 以上が工業用純チタンで、合金は少ない。チタン铸塊は不銹鋼とほぼ同じ加工プロセスによりミル製品となる<sup>4)</sup>。1984 年のチタンミル製品の出荷量は 5 275 t であつた。

わが国では、化学工業用機器や原子力発電所の復水器など、耐食材料としての利用技術が進んでいる。表 1 にわが国のチタンミル製品の需用分野を示した<sup>7)</sup>。

世界各國のチタンミル製品 (含铸造品) の出荷量を表

表 1 日本のチタンミル製品の国内用途一覧表

	1982 年		1984 年	
	需要量 (t)	比率 (%)	需要量 (t)	比率 (%)
化学工業	1 198	30	724	27
プレート熱交	326	8	236	9
電極	225	6	177	7
電店売その他	374	9	689	26
電力	1 540	38	665	27
電造航	256	6	4	0
空機	127	3	163	6
(含エンジン)				
合計	4 046	100	2 658	100

表 2 チタンミル製品の推定出荷量 (t)

		1982 年	1984 年
日 本	7 837	5 275	
米 国	16 757	20 934	
E C	3 304	3 000	
中 国	1 500	1 000	
ソ 連	40 000	40 000	
全世界総計	69 398	70 209	

示すると表 2 のとおりである。自由世界で最大の生産国は米国で、1984 年 20 934 t であつた。その約 80% が宇宙航空機用と推定され、この分野には軽くて強いチタン合金が利用される<sup>8)</sup>。将来わが国においてもこの分野のチタン合金の生産ならびに利用技術の発展が望まれるところである。

筆者はさきにチタンおよびチタン合金について本誌に報告、展望した<sup>6)9)</sup>。そこではチタンの生産プロセスと材料特性を中心に、一部利用分野についても述べたもので本解説では重複をさけ、その後の研究や調査の結果をもとに技術的に重要と思われるチタンの利用分野をのべ、あわせて将来の課題についても言及する。

## 2. 宇宙、航空機とチタン合金

主として宇宙航空機工業に利用されるチタン合金を金相学的に分類して表示すると表 3 のとおりである。これらの合金の比強度と破壊靱性を図 1 と 2 に示した<sup>6)10)11)</sup>

チタン合金のうち最も多く利用されているのは Ti-6Al-4V (Ti-6-4) で、この合金は密度が 4.43 g/cc で純チタンより軽く、熱処理性、熱間加工性低温、中高温の機械的性質、溶接性など、すべてが平均的に良く、バ

表 3 実用チタン合金の金相学的分類

α 安定化元素 (Al, O)	α 型 (稠密六方晶)	Ti-O (工業用純チタン) Ti-5Al-2.5Sn
	near α 型	Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.2Si (IMI-685) Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-0.3Mo -1Nb-0.3Si (IMI-829) Ti-8Al-1Mo-1V Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo
中性的元素 (Sn, Zr)	α+β 型	Ti-6Al-4V Ti-6Al-6V-2Sn Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo
	near β 型	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo -4Cr (Ti-17) Ti-10V-2Fe-3Al
β 安定化元素 (V, Mo, Fe, Cr, Nb)	β 型 (体心立方晶)	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn (B-III) Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn Ti-15Mo-5Zr-3Al Ti-15Mo-5Zr Ti-13V-11Cr-3Al

昭和 60 年 9 月 5 日受付 (Received Sep. 5, 1985) (依頼解説)

\* (株)神戸製鋼所 理博 (Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinocho-cho Chuo-ku Kobe 651)

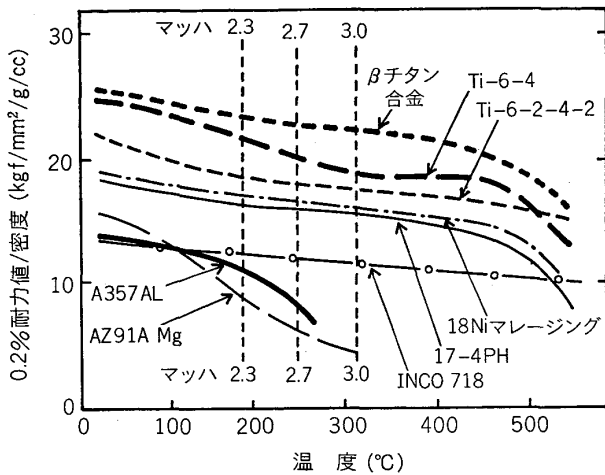


図1 マグネシウム・アルミニウム・鉄基・ニッケル基合金とチタン合金(時効)の各温度における比強度の比較図(マッハ表示線は航空機機体部分の推定温度)

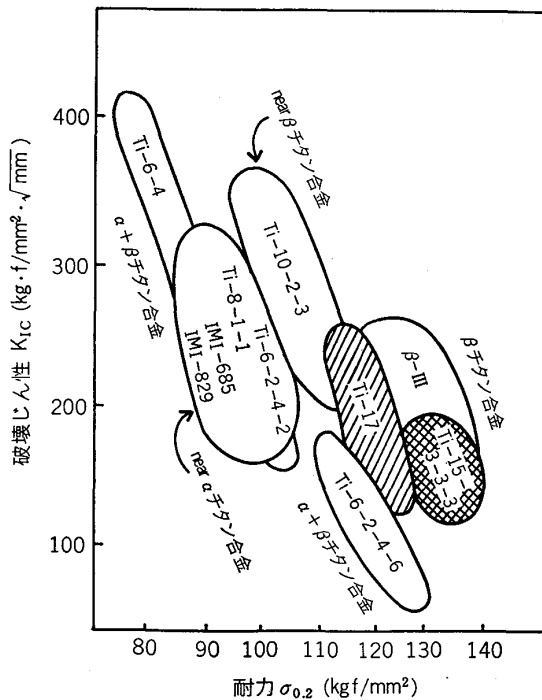


図2 各種チタン合金の強度と破壊じん性との関係

ランスのとれた、実頼性の高い合金である。

2.1 航空機の機体とジェットエンジン

超音速機の表面温度は速度とともに上昇し、マッハ2.3以上になるとアルミニウム合金は軟化し使用不能となる。チタン合金はマッハ3.0以上でも充分使用可能である<sup>12)</sup>。

SR-71 戦略偵察機は高度24000mをマッハ3で巡航し、短時間に広い区域を偵察する。この機体の93%がβ型チタン合金で製作されている。すでに同機は、定常

飛行高度25929m、最高速度3529.56km/h(マッハ3.3)の世界記録を樹立し、上記のような驚異的な行動が可能であることを実証している<sup>13)</sup>。SR-71は特別としても米国の軍用機は、機体にもエンジンにも多量のチタン合金を利用している。その代表的爆撃機、戦闘機、偵察機の重量に占めるチタンの使用比率を表4に示した。それぞれ1機あたりチタン粗材の購入推定重量は75t、30tおよび20tといわれている。これらのうちF-15はわが国においても生産されている。わが国独自開発によるT-2練習機は、現在F-1戦闘機として生産配備されているが、機体重量の9.1%がチタン合金である。

旅客機の場合には航続率(fuel milage)の高い亜音速機が主流となつているが、チタン合金の購入使用量は表5に示すとおり大きい。

B-747ジャンボ機では4本のランディングギヤービーム(LGB)が翼と胴体の交わる部分にあり、離着陸時の応力の伝播に必要なだけでなく、機体の全翼負荷の20%を支持している<sup>14)</sup>。単重1.8tのTi-6-4製で全長7mあり、粗材は世界最大級の50000t型鍛プレスで生産されている。かかる大型型鍛プレスはソ連に3基、米国に2基、フランスに1基あるがわが国にはない。

表4 米国軍用機のチタン合金重量(t)とその比率(%)

	機体中のチタン	エンジン中のチタン	チタン合計	チタン比率
BI-B 爆撃機	11.4	1.4	12.8	13.3
F-15 戦闘機	3.3	1.0	4.3	27.6
TR-1 偵察機	2.3	0.7	3.0	27.2

表5 亜音速旅客機とエンジンのチタン合金素材ミル製品購入推定量(t) ( )内は最大旅客数を示す

機体	チタン合金購入量	エンジン×台数	チタン合金購入量	チタン合金合計
B-747 (550人)	14.5*	JT9D-7×4	22.0	36.5
DC-10 (380人)	14.0	CF6-50×3	12.0	26.0
L-1011 (400人)	15.5	RB211-524×3	6.0	21.5
B-767 (330人)	5.5	JT9D-7×2	11.0	16.5
B-757 (220人)	6.5	PW2037×2	5.0	11.5
		RB211-535×2		
A-310 (265人)	3.0	CF6-80×2	8.0	11.0
A-300 (345人)	1.0	CF6-80×2	8.0	9.0
MD-82 (155人)	1.2	JT8D-217×2	4.0	5.2
B-727 (145人)	0.8	JT8D-15×3	3.0	3.8
B-737 (115人)	1.5	JT8D-17×2	2.0	3.5
DC-9 (135人)	1.0	JT8D-15×2	2.0	3.0

\*東京-N.Y. 直行のB-747-SP(452人)の場合は20.4tになる。

B-767 について、(財)日本航空機開発協会がめざす 150 席級旅客機 YXX は、B-757 の改良型となる可能性がある。B-757 の LGB はチタン合金製であり、YXX も B-757 と同様にチタンの重要な需要分野になるものと期待されている。写真 1 に B-757 の LGB を示した。

1990 年—2000 年代の亜音速旅客機は、現在運航中の B-767 よりもチタン合金の使用比率は図 3 に示すとおり大きくなる。アルミニウム合金の比率が下がり、コンポジットがこれにかわつて使用されるようになるがコンポジットとの接触部にはチタンがよいとされている。

将来亜音速機より航続率のよいマッハ 3 級の超音速旅客機が出現すればチタン比率はさらに大きくなる。

現用ジェットエンジンの圧縮機側の主構成材料、搭載

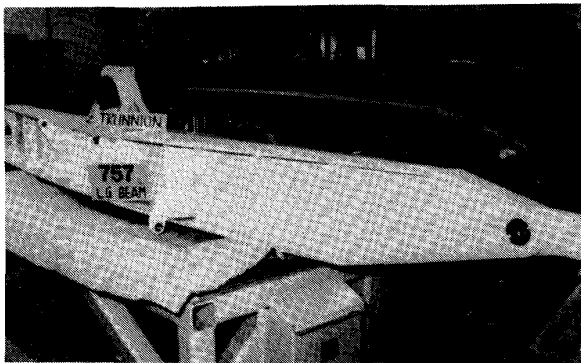


写真 1 ボーイング社で加工中の B-757 用 LGB (Ti-6-4 合金製)

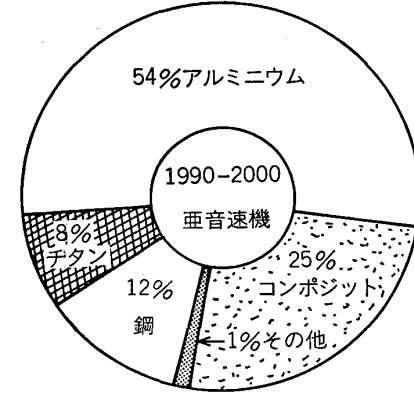
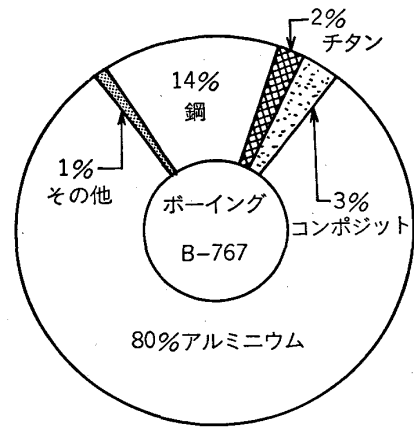


図 3 B-767 と 1990 年代亜音速機 (Advanced Technology Airplane) の機体材料構成比較図

表 6 現用ジェットエンジンの構成材料

( ) は段数を示す

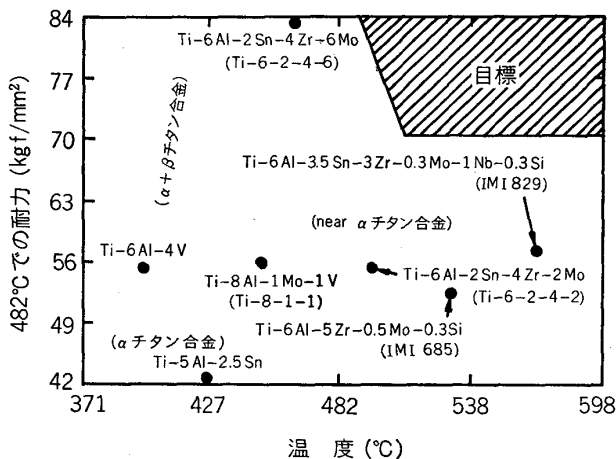
エンジン名	JT 9 D-7 (P&W)	CF 6-50 (GE)	F-100 (P&W)	Adour (RR Turbomeca)
品名				
ファンディスク	Ti-6-4	Ti-6-4	Ti-6-2-4-6 (1~3)	Ti-6-4
ブレード	Ti-6-4	Ti-6-4	Ti-8-1-1 (1~3)	Ti-6-4
ベーン	Al-2014-T6	Al-6061-T6	Ti-8-1-1	
ケース	AISI 410	Al-6061-T6	Ti-6-4 (2~3)	
コンプレッサーディスク	Ti-6-4	Ti-6-4	Ti-6-4	Ti-6-4
	Ti-6-2-4-2-S(12)	Ti-6-2-4-2	Ti-6-2-4-6 (4・5・7・8)	
	Incoloy 901	Inco 718	Ti-8-1-1 (6)	IMI-685
	Waspaloy (13~15)		IN100 (9・11・13)	
ブレード	Ti-6-4	Ti-6-4	Waspaloy (10・12)	
	Ti-8-1-1	Ti-6-2-4-2	Ti-8-1-1 (4~6)	Ti-6-4
	Ti-6-2-4-2-S (13)	A-286	Ti-6-2-4-6 (7~8)	IMI-685
	Incoloy 901 (14・15)		Inconel 910 (9~12)	
	AISI 410		Waspaloy (13)	
	Greek Ascology	Ti-6-4	Ti-6-4	
		A-286, 347	Ti-6-2-4-6 (4.5)	
			Inconel 718 (6~11)	
			Waspaloy (12)	
			Ti-6-4	
			Waspaloy	
			Inconel 718, 625	
ケース	Ti-6-4	Ti-6-2-4-2		Ti-6-4
	Ti-5-2.5	Inco 718		Ti-6-2-4-2
塔載機	B-747 B-767 A-300	DC-10 B-747	F-15 F-16	F-1, T-2 Jagur Hawk
昇推力 (kgf)	21 320	24 494	7 350	1 730
重量 (kg)	3 978	3 962	1 371	470
Ti 使用量 (kg)	1 000	953	493	67
Ti 使用比率 (%)	26	24	36	9
Ti 粗材重量 (kg)	5 500	4 000	2 500	
Ti 加干歩どまり (%)	18	24	20	

航空機、チタンの使用量その他を表6に示した。F-100のチタン使用比率は36%に達している。アドアとF-100はすでに国産化されている。

さらに新しいエンジン、例えば、GE. F-110 (F-15, F-16用), F-101 (B1-B用), PW 2037 と CF6-80 (B-767用), RB 211-535 (B757用) では精密鑄造チタン合金が、非回転部ではあるが始めて採用されたり、ある種のチタン合金がニッケル基合金に代わつてより高温部に使用されるなどしてエンジンの性能向上に貢献している<sup>15)</sup>。

さらに将来の高性能エンジン用に必要とされる高温強度、クリープ特性は図4に示すとおりであつて、この目標に向けて新しい合金の開発が進んでいる。

わが国では(財)日本航空機エンジン協会が中心となり、推力5t級のV2500エンジンを、日英米西独伊の五カ国が共同して開発している。このエンジンは将来、YXXに搭載される可能性がある。



(応力 28 kgf/mm<sup>2</sup>, 100 h で 0.1% クリープする温度)

図4 各種チタン合金の高温強度とクリープ特性との関係図(斜線部は高効率ジェットエンジンに必要なチタン合金の高温特性値)

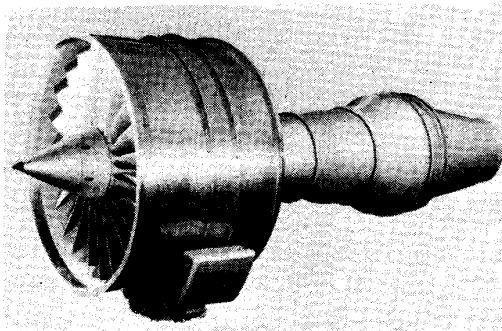


写真2 日本航空機エンジン開発協会のV-2500 (ファンケーシングとファンはTi-6-4合金製)

V-2500のフロントケーシングは、わが国が生産を担当しており、そのTi-6-4ケーシングは、世界最大級のリングロールミルにより製作される。高圧圧縮機用ディスクの6, 7 および8段はTi-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si (IMI-685)、ブレードの6, 7 および8段はTi-5.5Al-3.5Sn-3Zr-0.3Mo-1Nb-0.3Si (IMI-829)である。それぞれの耐熱温度は、540°Cと580°Cである<sup>16)</sup>。写真2にV-2500の概観を示した。今後20年間にわたり、7000余台の需要が見込まれるとのことである。拡大発展が期待されているジェットエンジン市場はチタンにとつても大きく期待される市場といえる。

## 2.2 ロケット ミサイル 宇宙船

宇宙科学研究所は1985年、M-3SIIロケットによりハレー彗星探査機の打上げに成功した。この最上段のモーターケースは、Ti-6-4の圧延板を熱間成形して半球とし、TIG溶接して球体とし、熱処理、機械加工をして製作された。人工衛星軌道修正用キックモーターピンもTi-6-4製である。宇宙開発事業団が計画中のH-1ロケットでは、EB溶接した、高強度チタン合金製となろう<sup>17)</sup>。米国では多くのロケットにTi-6-4または低温靱性の優れたTi-6-4-ELIが使用されている。またある種のミサイルの翼には精密鑄造Ti-6-4が使用されている。

NASAのスペースシャトルオービターは1981年初飛行に成功したが、機体重量の6% (4.1t)のチタン合金を使用している。液体ヘリウム、液体酸素、液体水素貯蔵用として多数使用される高圧容器は、薄肉チタン容器の外表面にケブラー繊維を重ねる新技法を採用することにより、Ti-6-4単相容器より35%軽くした。

オービター後部に3基あるロケットエンジンの支持のためトラス構造が採用されているが、これにはボロンエポキシをTi-6-4角支柱の表面につけている。これらの積層技術は将来他の分野でも利用されよう。また538°Cまで上昇する翼のリーディングエッジ部には鉄-ニッケル基合金に代わつてTi-6-4を使用し、従来より40%の重量削減に成功している<sup>18)</sup>。

## 3. 海洋開発とチタン合金

### 3.1 深海調査船 潜水艦 救難艇

6000m級潜水調査船はSea-Cliff (米国)とNautille (フランス)で、クルーを収容する耐圧殻は、いずれもチタン合金製である<sup>19)</sup>。わが国では海洋学技術センターが耐圧殻の材質について現在検討中である。

すでにチタン合金耐圧殻が試作されている。これは大型鍛造プレスにより製作されたTi-6-4の半球体をEB溶接後精密機械加工仕上げしたもので、外径2000mmである<sup>20)21)</sup>。

ソ連では3000t級のアルファ型原子力潜水艦が6~7隻就航しているが、その耐圧殻は二重構造となつていて

チタン合金板が使用されているという。この原子力潜水艦は深度 900 m, 水中速度は 40 ノット以上の高性能艦で, 1 隻につき 560 t, その粗材は 2000~3000 t 必要との推定がある<sup>22)</sup>。潜水艦が海底に沈座したとき救助するための救難艇の外殻構造などにもチタン合金が使用される<sup>23)</sup>。

### 3.2 海洋開発機器

チタンは不銹鋼に比して縦弾性係数が小さく, 耐食性が優れているため北海などの海流の早い水域での石油採取用ライザーパイプとしての利用技術が米国, 日本およびフランスなどで開発されつつある<sup>24)</sup>。クリスマスリーや継手類への利用も検討されている。このほか, 海底油田, 特にサワーガス捕集管としてのチタン合金の利用研究も進められている。

(社)チタニウム協会では, (社)鋼材倶楽部と協力し, 海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究に積極参加し, 駿河湾に設置されている海洋プラットフォームを利用し, チタンの実用化研究を推進している<sup>25)</sup>。

このほか, 海洋温度差発電<sup>26)</sup>, 超電導磁力推進船, 海洋栽培漁場設備, さらに超大型海上空間利用都市<sup>27)</sup>などの研究にもチタンの利用が考えられている。

## 4. 地上機器とチタン合金

### 4.1 超電導発電機, 超電導磁気浮上走行車

超電導発電機は発電効率が高く, 小型軽量化が可能なため, 商業用発電機や航空機搭載用発電機としてもその将来性が注目され, 世界各国で試作研究が進んでいる。

わが国でもすでに 30 MVA 超電導発電機用の回転子を Ti-6-4-ELI, Ti-5Al-2.5Sn-ELI を用いて溶接構造で試作し, 成功している。チタン合金は極低温においても機械的性質がよく非磁性であるため, 理想的構造材料とみられており, わが国とソ連においてその研究が進んでいる<sup>28)29)</sup>。

超電導磁気浮上走行車(リニアモーターカー)は, 時速 400 km をこえる速度で地上走行可能な車輛である。

国鉄の試作車の超電導線にはニオブ-チタン合金線が, またコイル巻枠, 低温容器, 冷凍機, 圧縮機などにチタンが一部利用されている。価格の点を除き, チタンは最高の材料といわれている<sup>30)</sup>。

### 4.2 蒸気タービンブレード

原子力および火力発電用蒸気タービンの大型化が進むなかで, そのブレード材およびその表面処理材に, 耐エロージョン性がよく, 比強度が大きく非磁性であるチタン合金が検討されている。その実機による試験が 10 年以上経過し, 結果が良いことからわが国において実用化の方向にあり, 世界の注目を集めている。

図 5 にチタン合金ブレードの製造プロセスを, 図 6 に Co を含まない  $\beta$  チタン合金肉盛による硬化処理試験

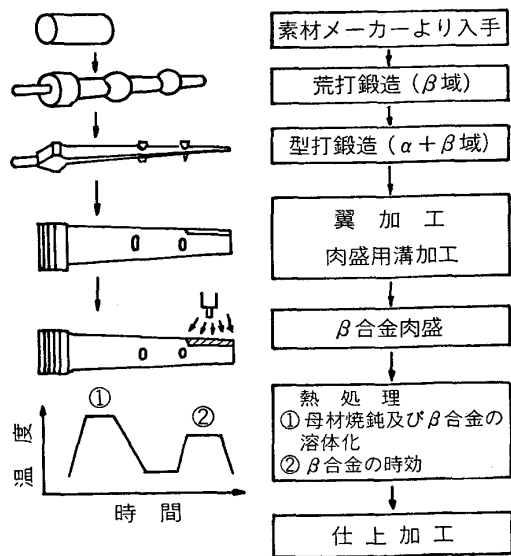


図 5 蒸気タービンブレードの製作工程

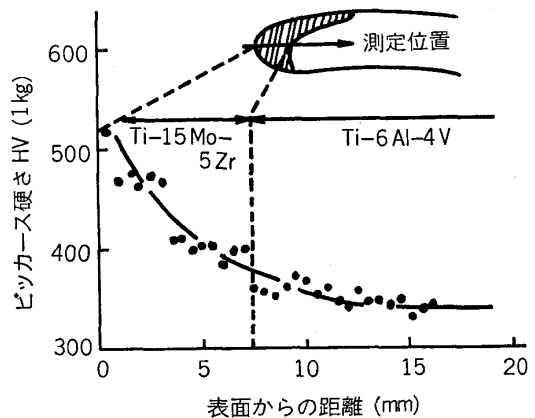


図 6 Ti-15Mo-5Zr 合金肉盛部の硬さ分布例

の結果を示した<sup>31)32)</sup>。

### 4.3 競争自動車 オートバイ 自転車

競争自動車へのチタン合金の利用はすでに一般化している。エンジンのバルブやリタイナーにはチタン合金が表面処理して利用されているが<sup>33)</sup>, 最近では競争用オートバイのマフラー<sup>34)</sup>や自転車の部品としても使用されるようになってきている。

将来は一般車にもスプリング, バルブ, ターボチャージャーなどの部品用に, 新しく開発されたチタン合金や金属間化合物が使用されるかもしれない<sup>35)</sup>。

以上宇宙から深海まで, すでに実用化されているチタン合金や将来利用されようとしているチタン合金について述べたので, 次には工業用純チタンの利用状況について述べる。

## 5. 化学工業とチタン

チタン材料の化学工業への利用は, あらゆる種類の機器にわたっており, 反応器, 熱交換器, 分離器, 吸収塔,

冷却器，濃縮器等々である。またこれらの機器を継ぐ配管，弁類，フィティング，ガスケット，ポンプ等多種多様にわたっている。

またこれらの機器に使用される材料の種類は，薄板，板，条，棒，ビレット，継目無管などの圧延鍛造押出成形加工品に加え，鋳造品，型鍛造品，溶接管などいろいろの形のものがある。使用に応じ入手可能であることがチタンの利用を容易にしている。

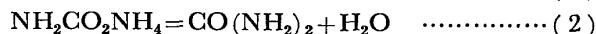
現代化学工業において各種用途に使用されているチタン材料の使用実績は，チタン製機器が高度の発達をとげ十分信頼性のある領域に達していることを示している<sup>36)</sup>。

ここでは化学工業の利用の中で腐食がとくに厳しい高温高圧下でチタンが利用されている例として，尿素肥料メラミン，アセトアルデヒド，テレフタル酸，合成繊維廃液処理および石油精製などのプラントをとりあげ，チタンの使用状況について述べる。

5.1 尿素肥料プラント

尿素の原料はアンモニア (NH<sub>3</sub>) と炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) で高温高圧下の反応で，中間生成物，カルバミン酸アンモニウム (NH<sub>2</sub>CO<sub>2</sub>NH<sub>2</sub>) を経て，尿素 [CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]

は製造される。



ここで(1)は発熱反応で反応速度は速いが，(2)は吸熱反応で反応速度は遅い。尿素プラントは反応速度が速く，尿素の分解のおこらない温度 (180°C~200°C) およびその温度におけるカーバメイトの解離圧以下の圧力 (150~250 atm) で管理される。

カーバメイトの腐食性が厳しかったため，初期には鉛ホモゲンや銀が耐食ライニング材として使用されていたが，寿命が短く大型化に困難があつた。また不銹鋼は溶存酸素が不足すると激しい腐食をうける。1960年代わが国においてチタン材の利用が実用化され，酸素を吹き込む必要がなく上記の高温高圧条件下で，高い合成率を得る操業に成功した。かくして製品品質のよい大型プラントの製作が可能となり，世界各国に数十件のプラントがすでに輸出された。このプラントの心臓部ともいえる合成塔は製作コストを下げるため多層円筒型圧力容器の内側にチタンのルーズライニングが施行されている。多層円筒型圧力容器は 6~18 mm 厚の鋼板を重ね合わせて心円状に巻きつけて製作するが，焼鈍を必要とせず大型容器の製作が容易で，安全性が高い特長をもっている。図7には合成塔の概略説明図を示した<sup>36)</sup>。

5.2 合成繊維プラント

チタンはほとんどすべての合繊プラントに利用されている。わが国で開発されたアクリル繊維は，アクリロニトリルの溶剤として硝酸を使用するため，耐食性の優れ

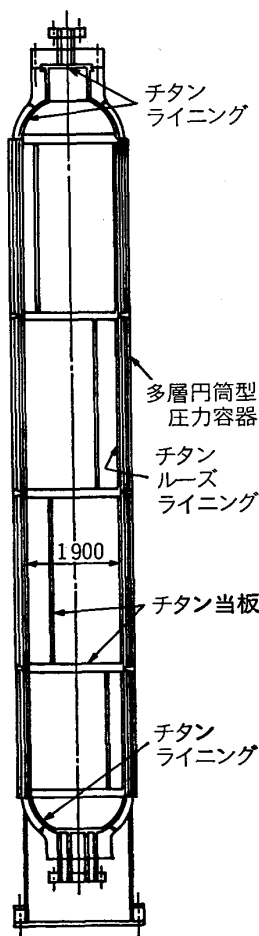


図7 東圧法尿素合成塔概略図

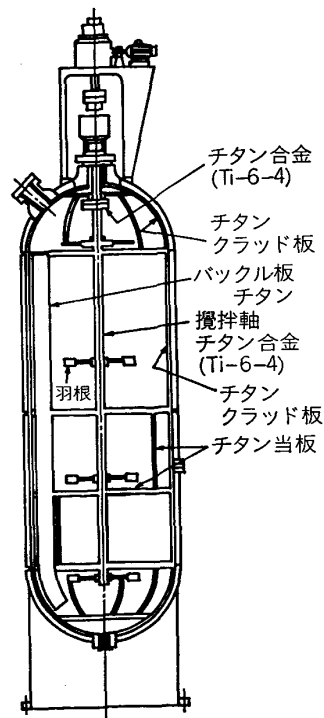


図8 テレフタル酸反応器概略図

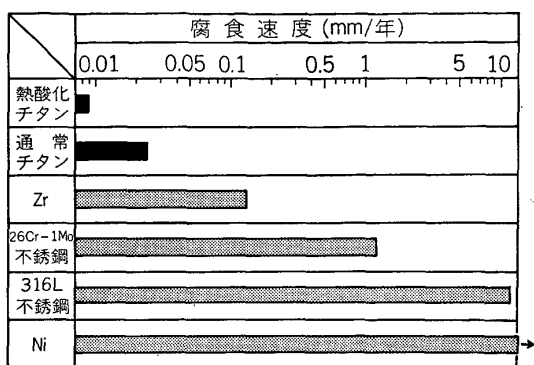


図 9 日産化学(株)パイロットプラントによる高温メラミン溶液中の各種金属の腐食性質の比較図

たチタンおよび Ti-5Ta が実用化された。このプラントは全世界に輸出されている。ポリエステル原料のテレフタル酸は、酢酸を溶媒とし、約 1% 濃度の臭化ナトリウムを触媒としてパラキシレンを液相で空気酸化して製造する。その反応圧力は 80 atm、温度は 200°C が一般に利用される。不銹鋼は 1% 臭化ナトリウム水溶液中ではチタンに比して孔食電位が低く、実際操業中のプラントでは使用に耐えないことが認められている<sup>20)</sup>。図 8 にチタンクラッド鋼を使用した高圧反応器の概略を示した。攪拌軸にはチタン合金を利用している<sup>36)</sup>。ナイロンおよびビニロンのプラントにもチタンは利用されている。

### 5.3 メラミンプラント

メラミンを製造するため、初期にはカーバイトを原料としていたが、現在は低廉な尿素を原料とするようになった。わが国で開発された高圧液相法は、尿素を、60~300 atm、345~450°C の高温下で反応させ、メラミン溶液を得るプロセスで、パイロットプラントによる各種金属の耐食性試験の結果は図 9 に示すとおりである<sup>20)</sup>。本研究結果から高温酸化処理したチタンは特に耐食性の優れていることが明らかとなり、1978 年以来、反応塔、ストリッパーなどに実用化されている<sup>36)</sup>。

### 5.4 アセトアルデヒドプラント

アセトアルデヒドは酢酸、酢酸エチル、ブタノール、オクタノールなどの中間原料で 1962 年エチレンの直接酸化法が西独において開発されて以来、チタンはそのプラントの主耐食材料として、反応塔槽類を始め各種熱交換器、配管、計器類等に使用されてきた。このプロセスでは触媒として塩化パラジウムを使用しているため、反応系に塩素イオンが存在し、不銹鋼では使用に耐えないので、チタンが使われるが、高温高濃度塩化物の存在する部分では細隙腐食の懸念があるため特に Ti-0.2%Pd を使用している<sup>36)</sup>。

### 5.5 廃液処理プラント

染料工場、製鉄所などの各工場から排出される廃液処

理や、し尿処理プラントにはジンプロ方式と呼ばれるプロセスが採用されている。このプロセスでは、汚泥は高温 (200~360°C) 高圧 (60~130 atm) の下で空気中の酸素と結合してガスと灰となる。廃酸液中に空気を吹きこむと、高温においてもチタンは耐食性がよいので実用化を可能とした。ジンプロプロセスではチタン以外の材料は適さない<sup>20)36)</sup>。

### 5.6 石油精製プラント

原油を常圧下で蒸溜し、ナフサ、ガソリンなどを得る蒸溜塔の塔頂熱交換器にチタン伝熱管が使用されるようになった。これは原油中の硫化水素や塩化水素、塩化水素をアンモニアで中和することにより生成する塩化アンモン等により銅合金や不銹鋼は腐食をうけるため、チタンの利用となつたものである。塩化アンモンの堆積部ではチタンもすきま腐食をおこすことがあり、この防止策としてチタン酸化物とパラジウム酸化物とをチタンの表面に混合被覆する処理法が 1977 年開発され、以来実用化されている<sup>37)</sup>。

また、耐すきま腐食性が純チタンより優れた Ti-0.3 Mo-0.8Ni (ASTM G-12) が開発され、放射性廃棄物の処理容器材などとして実用化が進んでいる。Ti-Pd より劣るが、価格がこれよりも安く、強度が大きいので注目されている<sup>38)</sup>。

## 6. 電極とチタン

食塩、次亜塩素酸塩、海水、有機化合物、二酸化マンガ、銅、コバルト、ニッケル、亜鉛、クロムなどの電解工場やメッキ工場の電極や機器にチタンは利用されている<sup>39)</sup>。TiO<sub>2</sub> をドーブした RuO<sub>2</sub> 被覆チタン陽極 (DSA) は、イタリアで発明された技術で、ひろく食塩電解やニッケルコバルト電解採取に利用されている<sup>40)</sup>。

### 7. 原子力および火力発電所復水器とチタン

東京電力(株)をはじめ、国内国外の多くの電力会社では原子力および火力発電用の海水冷却復水器に薄肉溶接チタン管やチタン管板を利用するケースがふえている。

詳細はすでに本誌で紹介したのでここでは省略する<sup>6)41)</sup>。

中近東産油国の海水淡水化装置材料としてもチタンは利用されている。(社)チタニウム協会と(社)造水促進センターの協力により、経済的淡水化装置の利用促進をはかっている<sup>42)43)</sup>。

### 8. 土木、建築材としてのチタン

ギリシャのアクロポリスの神殿の支柱の補修にチタン丸棒が使用されている。耐食性が永久で、大理石の膨脹係数が近いことなどが採用の理由となつている。わが国では海岸地帯や雪国の家屋の屋根やビルなどに試用が始まっている。チタンは建築材に適した不燃材料として、

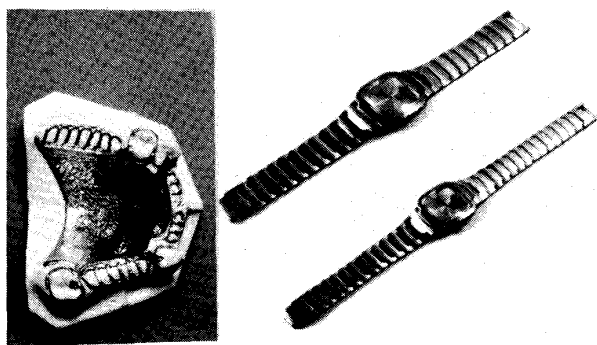


写真 3 精密鑄造した純チタン金属床 ((株)オハラ提供) とチタン製ペアー時計 (セイコー電子工業(株)提供)

建設省から認定される予定である。耐久性が永久であることから、経済的にも検討の価値がある<sup>44)</sup>。

### 9. 生体材料, 医療機材料としてのチタン

Ni, Cr, Co, Mn, Al, Be, Cd, V, Na, Pbなどは人体に毒性があるが, チタンには医害性はない<sup>45)46)</sup>。非磁性で, 医学的に組織適合性がよいので, ペースメーカー, 人工関節, 人工骨補修材, 歯科用補綴物(写真3)などに使用されている<sup>20)</sup>。人体に対する発がん性の簡易正確判定法を開発するため V-79 細胞による in-vitro 試験が行われたが, Ni 板上の細胞は短時間に死滅するがチタンでは認められなかった<sup>49)</sup>。チタンには Ni のような発がん性は認められていない。生体材料としてのみならず, 医療機材, 医薬品や食品工業用材料, バイオ産業機器材料としてチタンの無毒性が認識されればチタンの用途はさらにひろまる<sup>50)</sup>。

福祉関連機器<sup>51)</sup>, メガネ, 時計などに使用しても, Ni のような皮膚障害<sup>45)</sup>が認められておらず, この分野でも需要がひろまるであろう。カメラ, スポーツ用品, 釣り具, 装飾品などの利用分野も広まりつつある<sup>52)</sup>。写真3にケースもバンドもチタン製のファッション時計を示した。

### 10. 将来の課題

チタンが発展するためには, 生産コストをより安くしなければならない。工業用純チタンについていえば, 铸塊以降の下工程は, 不銹鋼と同程度の価格で量産可能である。したがって原料スポンジチタンが安く量産されるようになれば, 大きく利用の道は広まるであろう。原料スポンジチタンの安価な製造技術の開発が必要である。

EB 炉による連铸スラブやピレットの製造は東独や米国ですでに検討されている<sup>53)54)</sup>。写真4に連铸スラブを示した。

チタン合金の鍛造, 圧延加工などは, 特殊鋼, 高合金鋼と同程度にむずかしい。NASA のスペースシャトル



写真 4 E.B. 連続鑄造スラブ型純チタンインゴット (4.5 t) (Viking Metallurgical 社提供)

オービターは 4.1 t のチタン合金のため必要とするチタンミル製品粗材は 54.4 t と発表している。加工歩留は 75% である。航空機体, エンジン, 潜水艦においても現在の技術水準をもつてすれば, 類似の加工歩留しか期待できない。チタン合金をより普及させるため最も重要なことは加工歩留をあげることであり。

そのため, 精密鑄造, 粉末冶金, 超塑性を利用した, 恒温鍛造, 成形, 圧延, 拡散接合, ROC<sup>55)</sup>, HIP プロセス, 表面処理など, 各種の生産, 利用技術の開発普及が必要である<sup>56)57)</sup>。

競合材料の出現も考えられる。このため高性能チタン合金や金属間化合物<sup>58)</sup>の研究開発も必要であり, 熱処理などによる性能改善プロセスも開発しなければならない。

かくして, 軽くて強くて耐食性の優れたチタンは, 鉄, アルミニウムにつぐ重要な金属材料に育つものと期待している。

### 文 献

- 1) W. J. KROLL: 金属チタニウム (チタニウム懇話会編) (1953), p. 9
- 2) D. STROLLO: Titanium 1984 (Titanium Development Association) (1985), p. 2



- 3) 池島俊雄, 井関順吉, 成富辰雄: 日本金属学会会報, 24 (1985), p. 573
- 4) 草道英武, 森口康夫: 日本金属学会会報, 17 (1978), p. 220
- 5) H. KUSAMICHI and H. ITO: Proc. 4th Intern. Cont. on Titanium, Kyoto (1980), p. 2507
- 6) 草道英武, 松本年男: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 1215
- 7) TSG: わが国金属チタン産業の現状と課題 (チタニウム協会編) (1985), p. 46 (私信)
- 8) N. M. A. B.: "Titanium, Past, Present, and Future" (1983), p. 108 [National Academy Press, Washington D. C.]
- 9) 草道英武, 鉄と鋼, 71 (1985), p. 626
- 10) 谷村篤秀, 森川美広: チタニウム協会創立 30 周年記念国際シンポジウム (チタニウム協会編) (1982), p. 181
- 11) 神戸製鋼所チタン本部開発室資料 (1985) (私信)
- 12) 浜井升平, 井上 稔: 「金属チタンとその応用」 (草道英武, 村上陽太郎, 木村啓造, 和泉 修編) (1983), p. 100 [日刊工業新聞社]
- 13) 木村秀政: 文献 10) (1982), p. 99
- 14) T. T. SETO: 文献 12) (1983), p. 76
- 15) D. EYLON, S. FUJISHIRO, P. J. POSTANS and F. H. FLORES: J. Met, (1984) Nov., p. 55
- 16) G. S. HALL, S. R. SEAGLE and H. B. BOMBERGER: Titanium Science and Technology, 4 (1973), p. 2141
- 17) 小幡義彦, 森 康彦, 青木顕一郎, 恒見恒男, 中之瀬恩, 岸 輝雄: 鉄と鋼, 71 (1985), S 728
- 18) C. CRAFT Jr.: 文献 12) (1983), p. 115
- 19) 遠藤倫正, 森鼻英征: 文献 12) (1983), p. 248
- 20) H. KUSAMICHI, S. TOKUDA, H. ITO, T. NISHIMURA: 5th Intern. Conf. on Titanium, Munich (1984), p. 1025
- 21) 森鼻英征, 豊原 力, 高野元太, 西村 孝, 安井健一: 鉄と鋼, 71 (1985), S 720
- 22) G. R. DALY: Titanium News, 16 (1984) 4, p. 2 [Suisman Titanium Corp.]
- 23) 池田玉治, 猪野一郎: 文献 12) p. 264
- 24) 森口康夫: 文献 12) p. 201
- 25) 草道英武: チタニウム・ジルコニウム, 32(1984), p. 75
- 26) 上原春男, 中岡 勉: 日本機械学会論文集, 50 (1984), p. 1955
- 27) K. TERAI: Intern. Symp. on Ocean Space Utiligaion (1985) [Nihon University, Tokyo]
- 28) 岩本雅民: 文献 12) (1983), p. 162
- 29) 荻野 治: チタニウム・ジルコニウム, 32(1984), p. 2
- 30) 京谷好泰: チタニウム・ジルコニウム, 31(1983), p. 251
- 31) A. OKUBO, M. KISHIMOTO, T. ENDO, T. HIWATASHI, H. KUSAMICHI and H. ITO: Proc. 4th Intern. Conf. on Titanium, Kyoto (1980), p. 2507
- 32) R. ARAKI: 文献 31) (1980), p. 3077
- 33) 西村 孝: 文献 12) (1983), p. 271
- 34) 吉村秀雄: バイクスピリッツ (1983), p. 204 [徳間書店]
- 35) H. D. KESSLER: ASTM Standardization News (1984) Jan., p. 26
- 36) 早川 宏: 文献 12) (1983), p. 216
- 37) 福塚敏夫, 下郡一利, 佐藤広士, 上窪文生: 神戸製鋼技報, 32 (1982), p. 32
- 38) R. W. SCHUTZ, J. A. HALL and T. L. WARDLAW: 文献 10) (1982), p. 73
- 39) 山崎道安: 文献 12) (1983), p. 242
- 40) 山内陸文, 坂屋 弘, 増子 昇: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 645
- 41) 草道英武, 伊藤英男, 佐藤広士: 日本金属学会会報, 23, (1983), p. 40
- 42) 慶 永雄, 板橋幸彦: チタニウム・ジルコニウム, 28 (1980), p. 205
- 43) チタニウム協会開発会議, 海水淡水化グループ: 中近東海水淡水化プラント調査団調査報告書 (1984) (私信)
- 44) 草道英武: 金属時評 (1985) 1224, p. 155
- 45) 土屋健三郎: 金属中毒学 (1983), p. 4, p. 426 [医歯薬出版(株)]
- 46) 化学便覧応用編 (日本化学会編) (1965), p. 1408 [丸善]
- 47) R. L. KANE: 文献 12) (1983), p. 296
- 48) 都賀谷紀宏, 井田一夫: 日本歯科材料器械学会誌, 37 (1981), p. 658
- 49) 琴浦良彦, 山室隆夫, 四方実彦, 角谷慶明, 木次敏明, 田中大也, 西村 孝, 高島孝弘: 整形外科基礎科学, 12 (1985), p. 293
- 50) 千葉強平: チタニウム・ジルコニウム, 31(1983), p. 287
- 51) 加倉井周一: チタンおよびチタン合金の義肢装具への応用 (チタン福祉研究会) (1985) (私信)
- 52) 芦浦保之: 文献 12) (1983), p. 283
- 53) S. SCHILLER, U. HEISIG, S. PANGER: Electron Beam Technology (1982), p. 255 [Tohn Wiley & Sons, New York, USA]
- 54) V. K. FORSBERG: "Speciality Metals Melting and Processing" presented 1984 Vacuum Metallurgy Conference, June 12 (1984) (私信)
- 55) Kelsey-Hayes Powder Tech. Center "High Performance Powder Metallurgy Tech" (1982) Michigan, USA (私信)
- 56) IHI 広報部: IHI の先端技術 (ジェットエンジン) (1983 年), p. 109
- 57) 辻本得蔵: 金属間化合物の塑性受形能調査研究報告書 (日本金属学会, 素形材センター共編) (1984), p. 137