

チタン、ジルコン、タンタル、ベリリウム、 ウランなどの溶接

大阪大学工学部 新 成 夫*

は し が き

新しい金属材料としてチタン、ジルコン、タンタルなどがつぎつぎと開発され、これらの金属材料は近代工業の発展に不可欠なものとなってきた。以下にこれらの金属材料の特徴とその溶接冶金学上問題とされている2, 3の点について概要を述べる。

1. 各種金属材料の特徴

第1表は各種金属材料の物理的性質である。

チタンは比重が4.5で、885°C以下においてはh.c.p.で“ α ”と呼ばれ、その温度以上ではb.c.c.で“ β ”と呼ばれている。1.8-8 ステンレスより優る耐食性を有するため、化学機械(反応装置)に広く用いられる。また、比強度が非常に高いため航空機、セン水艦などをはじめとする輸送関係に広く用いられつつある。

ジルコンは熱中性子吸収断面積が0.18バーンで、86.3°C以下ではh.c.p. (α)、それ以上ではb.c.c. (β)である。チタンに優る耐食性を有するため、原子炉に用

第1表 各種金属材料の物理的性質

金属材料 性 質	チ タ ン (Ti)	ジルコン (Zr)	タン タル (Ta)	ニオブ (Nb)	モリブ デン (Mo)	ベリリ ウム (Be)	ゲルマ ニウム (Ge)	ウ ラ ン (U)	アルミ合 金 (75s- T6)	マグネ シウム (AZ- 31X)	18-8 不銹鋼
原 子 番 号	22	40	73	41	42	4	32	92	—	—	—
原 子 量	47.90	91.22	180.95	92.91	95.95	9.02	72.60	238.07	—	—	—
密 度 (g/cm ³)	4.54	6.49	16.2	8.66	10.2	1.847	5.35	18.9	2.8	1.8	7.9
結 晶 構 造	H.C.P.< 885°C B.C.C.>	H.C.P.< 863°C B.C.C.>	B.C.C	B.B.C	F.C.C	H.C.P	D.C	正斜方<665°C 正方(665— 700°C) B.C.C.>700°C	F.C.C	H.C.P	F.C.C
熱中性子吸収 断 面 積 (バーン/原子)	5.6	0.18	21.3	1.1	2.4	0.009	2.35	—	0.215 (Al)	0.059 (Mg)	2.43 (Fe)
融 点 (°C)	1,730	1,845	3,000	2,420	2,620	1,285	940	2,065	476~638	565~632	1,400~ 1,430
線膨張係数	8.8×10^{-6}	5.8×10^{-6}	3.6×10^{-6}	6.9×10^{-6}	5.2×10^{-6}	—	6.1×10^{-6}	—	23×10^{-6}	26×10^{-6}	17×10^{-6}
熱伝率(cal/cm ² /sec/°C/cm)	0.041	0.040	0.068	0.13	0.35	—	0.14	0.06	0.29	0.23	0.039
電気比抵抗 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	47~55	40~54	—	15~20	50~58	—	—	—	5.8	9.3	72
電気伝導率 (%: TACS)	3.1	3.1	—	—	3.3	—	—	—	30	18.5	2.4
比 熱 (cal/g/°C)	0.13	0.07	—	—	0.061	—	0.074	0.0278	0.23	0.25	0.12
ヤ ン グ 率 (kg/mm ²)	10,850	9,100	—	—	35,000	—	—	15,000	7,300	4,570	20,400
引張り強さ (kg/mm ²)	30~65	28~65	35~55	27~60	40~ 250	20~70	—	45,150	57	18~28	62
耐 力 (0.2% offset) (kg/mm ²)	23~55	20~55	17~29	14~45	—	18~40	—	—	50	9~25	26
伸 び 率 (% in 50mm)	20~45	18~40	30~50	18~50	—	1~11	—	26	11	6~10	55
ヴィンカース硬 さ (L. 10kg)	100~250	100~250	125~ 220	40~ 260	—	100~ 240	6(Mo h's)	230~350	10~55	25~60	160~260

* 講師 工博

いられるほか化学機械に広く用いられようとしている。

タンタルは融点が非常に高く膨脹係数が非常に小さい（軟鋼の約 $\frac{1}{2}$ ）ということが特徴となつている。タンタルの耐食性はチタンおよびジルコンのそれを凌ぐといわれており、また、延性が非常によい。たとえば、3 inch ϕ のインゴットを0.005 inch の薄板に圧延するのに中間焼なましを必要としないという。鉄鋼にライニングして化学、原子力関係に用いられようとしている。

ニオブは1.1バーンの熱中性子吸収断面積を有し、この金属は変態がなく b.c.c. である。ウランと種々金属との反応性より考えるとニオブは優れた燃料被覆材といわれている。

ベリリウムは比重 1.85、融点 1285°C 、熱中性子吸収断面積が0.009バーンで gas cooled reactor の燃料被覆材として重要視されている。また、放射線の吸収量が少ないのと α 線の照射によつて中性子を発するなどの性質があるため、放射線関係では不可欠のものとされている。

ゲルマニウムは周知のように半導体として“トランジスタ”工業には欠かせることのできないものである。

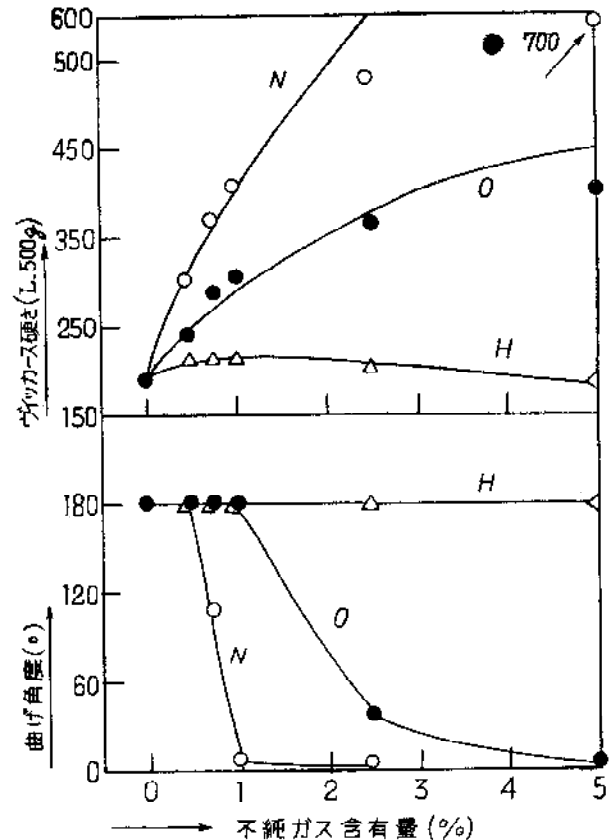
ウランはいうまでもなく単体または合金その他セラミックの形で核燃料として重宝がられている。 665°C 以下では正斜方晶、 665°C ～ 770°C では正方晶、それ以上では b.c.c. である。

これら金属材料の機械的性質は前掲第1表にも示してあるように、含有不純物の量ならびに加工度などによつて（ともに歪硬化をとともなう）その性質にかなり差がある。不純物を含有すると靱、延性を失うばかりでなく、耐食性あるいは溶接性が損なわれる。とくにベリリウムでは気密性が、ゲルマニウムでは電気的特性がいちじるしく損なわれる。

つぎに、これらの金属材料はいずれも高温（チタン、ジルコン、ベリリウム、ニオブでは約 450°C 以上、タンタルでは約 250°C 以上、ゲルマニウム、ウランでは約 150°C 以上）で大気に曝すといちじるしくぜい化する。これは固溶限以上の酸素あるいは窒素とこれら金属材料との反応生成物が形成されるため、その場合には材料の色調もいちじるしく変る。チタン、ジルコンを例にとると薄青紫色から順次黒灰、黄白色となる。水素はこれら金属材料の靱性を低下させる。

なお、これら金属材料の延性と温度との関係は、一般には高温になるほど延性は良くなるが、ベリリウムは 400°C 近傍で最高の延性を示すが、それ以上の温度では逆に悪くなる。これは非金属性物質とベリリウムとの化合物などが結晶粒界に析出してくるためである。

2. 溶接上における問題点



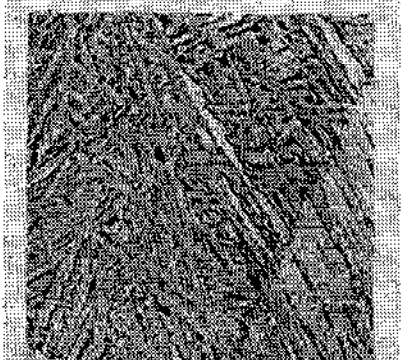
第1図 酸素、窒素、水素などを単独に含んだアルゴンを用いて溶接したチタン融合部の硬さと曲げ性質

2.1 溶接部の機械的性質におよぼす大気の影響

第1図は1例として大気中にてチタンをTIG法（イナートガス・アーク溶接法）で溶接した場合の溶接部断面の硬さにおよぼすシールド状況の影響を示したものである。同図より明らかなように、不完全なシールドイナートガス中に酸素や窒素のような不純ガスが混入されているとき、あるいは溶接中に大気が混入してくるときなどを意味する）によるときは、融合部に固溶体強化効果あるいは化合物の生成が生じ、いちじるしく硬化する。

チタンを例にとると、チタン母材はヴィツカース硬度180～260であるが、Ti-N化合物はヴィツカース硬度150以上にもなる。第2図³-a, b, c, d, eはチタン母材、チタン溶接部、酸素および窒素が侵入した場合の溶接部の代表的な組織である。

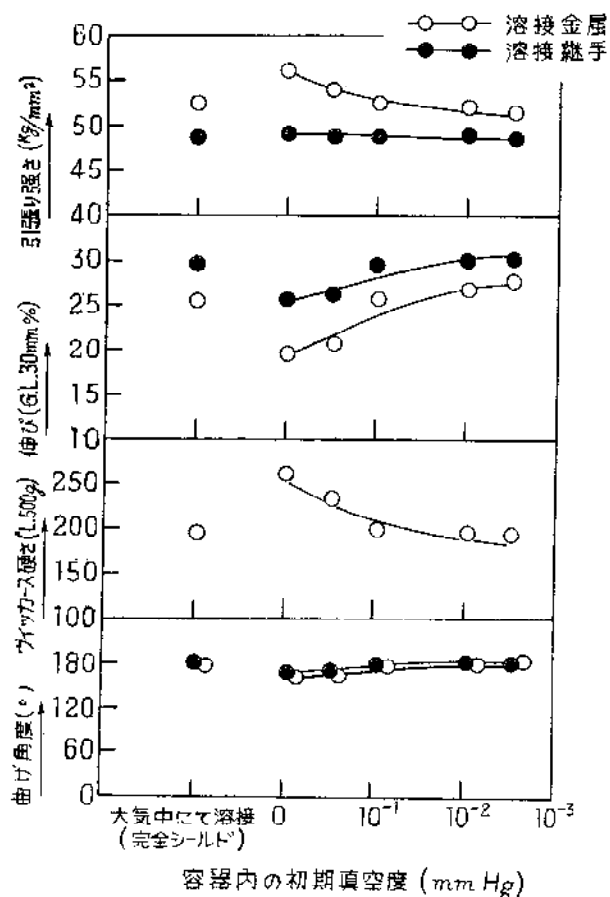
第3図⁴は特殊な容器内（第4図⁵）でTIG溶接を行った場合、溶接部の機械的性質におよぼす容器内の初期真空度の影響を示したものである。すなわち、チタン、ジルコンなどを容器内で溶接する場合、容器内をあらかじめ 10^{-1} ～ 10^{-2} mmHg よりも良い真空度にした後、乾燥したアルゴンを充満させて溶接すべきである。



第2図 チタン溶接部の顕微鏡、組織、腐食液：

$\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

(写真上から) aチタン溶接部、マクロ組織、倍率4, bチタン母材, cチタン溶接部 dチタン溶接部酸素侵入, ヴィカース硬さ 460 eチタン溶接部, 窒素侵入, 白色部 T—N 化合物, ヴィカース硬さ 780



第3図 板厚2mm チタン溶接部の機械的性質におよぼす容器内の初真空度の影響

もちろん、溶接前における母材ならびに溶加材の清掃を怠つてはいけな

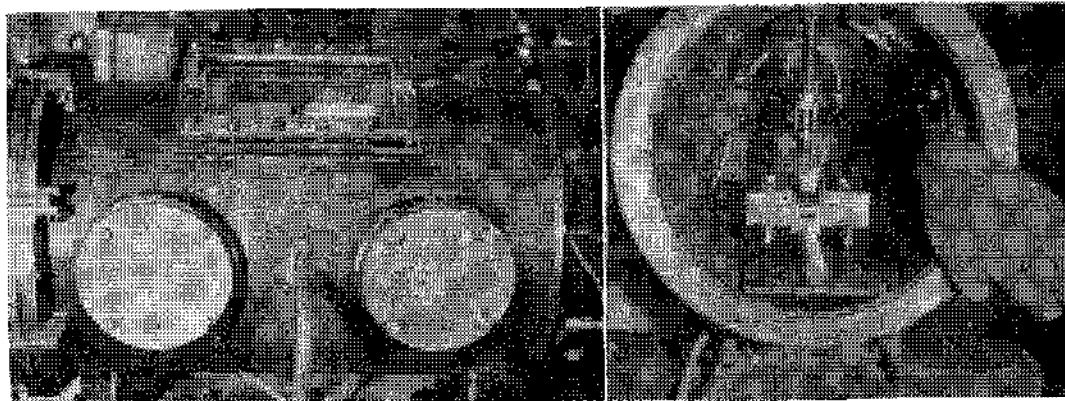
い。以上は融合部についてであるが、融合されない箇所、すなわち、溶接熱影響部はどうであろうか。容器内で溶接する場合は別として、大気中で溶接する場合には前述のように、ある温度以下に冷却されるまでイナートガスを流して十分保護してやる必要がある。このため、通常第5図に示したような補助シールド用の治具を溶接トーチに取付け、溶接裏面のシールドに対しては第6図7-a, b, c, d, eに示したような要領で行う。

チタン、ジルコン、タンタル、ニオブなどは以上のような要領で大気中で溶接することができるが、ベリリウム、ウランなどはとくに酸化性が強い上に、ベリリウムではその蒸気が、ウランでは反応生成物がともに危険をとまなうゆえ、高真空度の容器内で溶接することが望まれる。最近開発されている電子線溶接法はこの種金属の溶接にもつとも適した方法である。

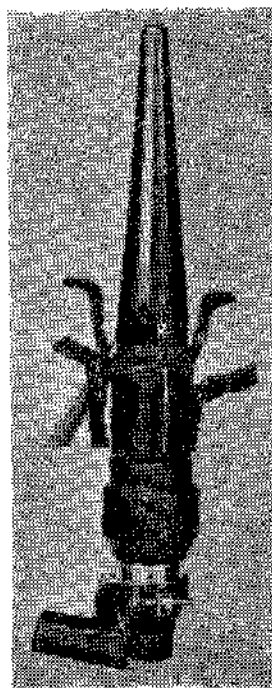
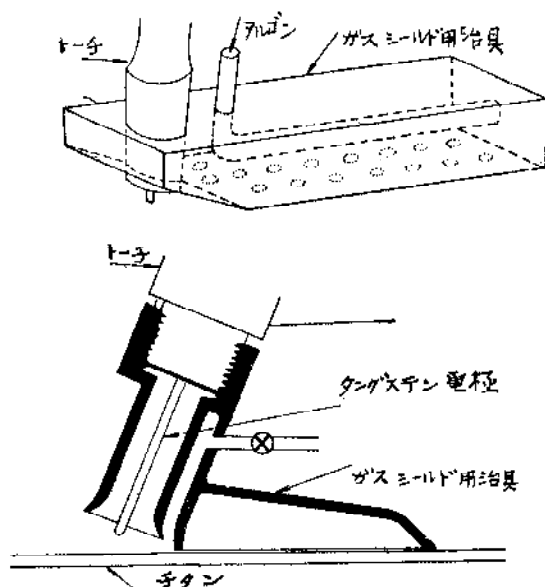
ゲルマニウムは通常ろう付けされている。

2.2 溶接部の諸性質と冷却条件との関係

チタン、ジルコン、ウランのように変態を有する金属の溶接部の性質は冷却条件によつていちじるしく左右せ



第4図 気密溶接室(1例)



第5図 補助ガスシールド用治具(左)と溶接トーチ(右)

られる場合が多い。とくに合金になるほどこの傾向はつよい。

チタンを例にとつて説明すると次のようである。

① 純チタンの場合

冷却条件のいかんを問わず $\beta \rightarrow \alpha$ 変態 (マルテンシック変態) をおこなすが、冷却条件が大なる場合は歪硬化をともなう。したがって、適当に冷却条件を選定するとともに、溶接後 600~800°C の短時間焼なまし処理を施す必要もある。

② α 合金の場合

アルミ合金や銅合金の場合のような析出型(歪硬化型)ではないが、冷却条件が小なる場合はチタンと合金元素との化合物が析出される。極端な例を示せば前述の Ti-N 化合物である。といつて、冷却条件が大なる場合には上述①のように $\beta \rightarrow \alpha$ 変態にともなう歪硬化を生ずる場合がある。したがって、この種合金の溶接には化合物

の析出および変態による歪硬化を生じない程度の冷却条件を選ぶ必要がある。いい換えれば、実用合金としては合金の組成範囲に制限があるということである。

③ $(\alpha + \beta)$

合金の場合

β 安定化合金元

素含有量が比較的少ない(通常4%以下)合金ではとくに問題はない(上述①は考慮する必要がある。通常溶接後 650°C 前後の短時間焼なましをするとよい)が、含有量が多くなると ω の生成による歪硬化をともなう。第7図⑧は代表的な $(\alpha + \beta)$ 系チタン合金を点溶接した場合の冷却条件と溶接部の組織との関係を示したものである。

曲線②、⑤、⑧は冷却条件が大なる場合で、溶接部は準安定的な β 組織(第8図⑨-a, b)となる。曲線④は冷却条件が小なる場合で、溶接部は安定な α と β の組織(第9図⑩)となるとともに、ヴィツカーズ硬度が350程度(母材はヴィツカーズ硬度330)になる。これは曲線②、⑤、⑧のものを溶接後 600~700°C に 10~30min 焼もどしたものにほぼ相当する。しかし、曲線④、③のように ω の生成範囲を通過するような場合あるいは全 β 組織のものを 400~450°C で 10~30min 焼もどしたような場合にはヴィツカーズ硬度 500 以上を示し、ぜい弱なものとなる。第10図⑩および第11図⑪は 8 Mn-Ti 合金の点および TIG 溶接継手についてこれらの現象を示したものである。

したがって、 β 安定化元素を多く含むチタンおよびジルコン合金の溶接にさいしては、冷却条件を適当にするほか、適当な溶接後、熱処理(溶接物の大きさによつて加熱時間は異なるが、板厚 5 mm 程度のものでは溶接後 600~700°C に 15~20min 加熱空冷するとよい)が必要となってくる。

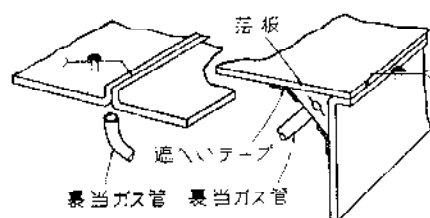
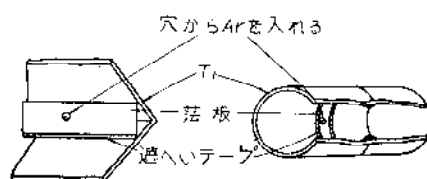
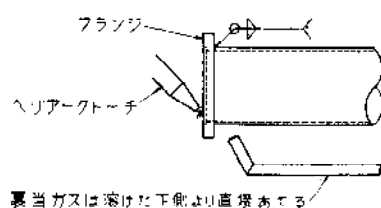
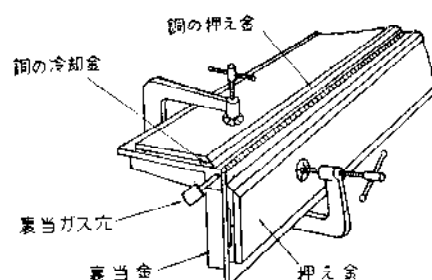
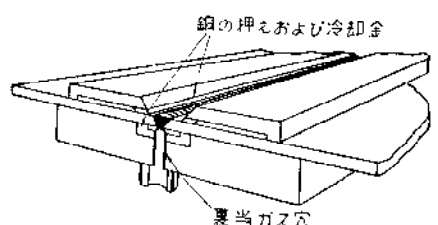
タンタルおよびコオプでは変態がないため実用合金でもこのような現象はみられない。

リリウムおよびウランは一般にぜい弱な材料であるので、溶接する場合には冷却条件を適当にしないと溶接

割れが生じ易い。これは溶着金属の収縮にともなう応力集中による場合が多いが、また反面、結晶粒界に金属化合物の析出される場合も多いゆえ、材料自体を組織的に十分検討されなければいけない。

2.3 鉄鋼その他の異種金属との接合

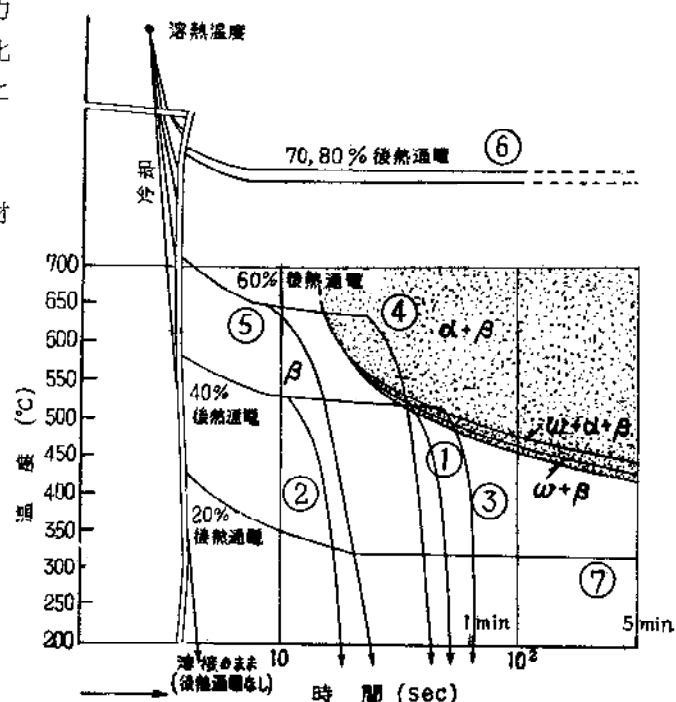
実用上もつとも問題となっている点はこれらの金属材



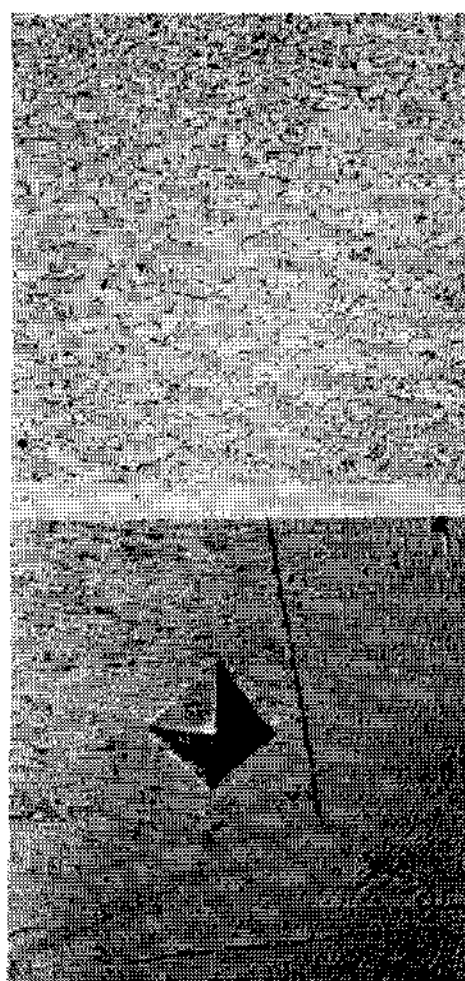
(図上より)

- 突合せ溶接に対する押え金具その他
- 角溶接に対する押え金具その他
- 溶接裏面からのアルゴンシールド要領
- 溶接裏面からのアルゴンシールド要領
- フラン溶接施工例

第6図 溶接部に対するシールド要領例

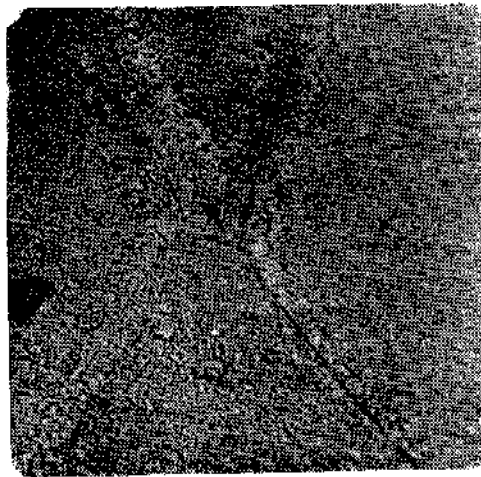


第7図 8 Mn-Ti 合金 (α - β 系チタン合金) を点溶接した場合の冷却条件と溶接部の組織と関係

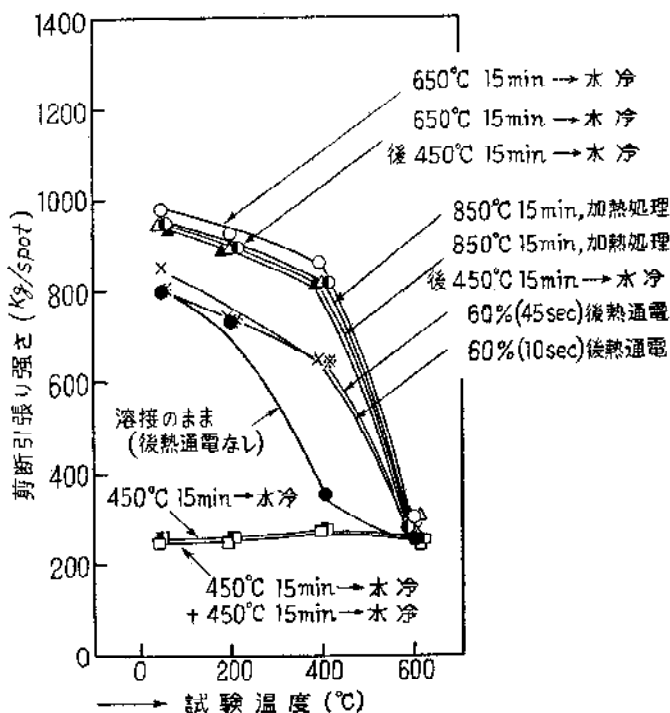


(写真上)
a 焼ならし組織 (α と β)
b β 焼入れ組織 (β)

第8図 α + β 系チタン合金の顕微鏡組織
腐食液: HF + HNO₃ + H₂O, 倍率: 300



第9図 $\alpha + \beta$ 系チタン合金の安定 (α と β)
組織, 地が β , 析出物が α



第10図 板厚 0.9 mm 8 Mn-Ti 合金点溶接継手の高温引

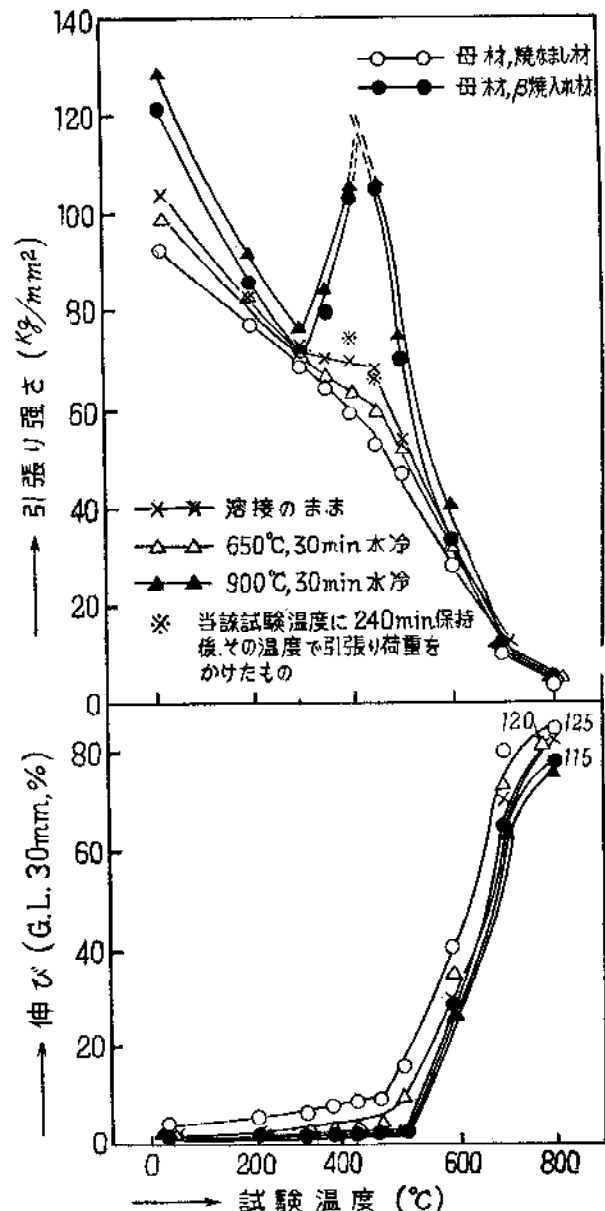
料と鉄鋼その他の異種金属との接合とくにライニングに関する問題であつて、この問題が解決されない限りこれら金属材料の需要の拡張はみられないといつても過言ではない。

現在まで、その接合方法について種々研究されてきたが、いまなお実用面で困難に遭遇している場合が多い。

チタンを例にとつて以下にその接合法について簡単に述べる。

① 直接溶接する方法

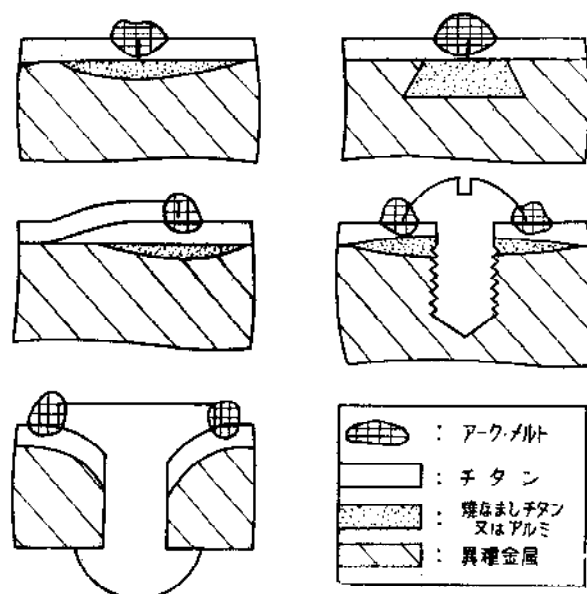
通常ライニングの対象となる金属は軟鋼またはステンレス鋼で、その主成分は炭素、鉄、クロム、ニッケルな



第11図 板厚 3 mm 8 Mn-Ti 合金突合せ継手の高温引張り性質

どである。したがつて、チタンと直接溶接（融合）するときは複雑な金属間化合物が多く形成され、きわめて弱い弱なものとなる。極端な例を挙げると 18-8 ステンレス鋼板上にチタンの溶加材を用いてビードをおいた場合、冷却途中で融合部（とくに境界部）にクラックが生ずる。それゆえ、チタンに対するこれら異種金属の溶け込み量はその接合部の性質を左右するもつとも大きな因子となる。著者の見解によれば、これらの合金元素のチタンに対する溶け込み量を少なくと 4~5% 以下にするときは、やや満足な結果が得られるが、普通の溶接法あるいは溶接設計ではほとんど不可能のように思われる。このために研究されているのが、イナートガスアークスポット溶接法の適用であるが、公表を少し避ける。

② 溶接と機械的接合法を併用する方法



第12図 チタンライニングの一例

第12図⑬にその1例を示すように、異種金属とチタンとをチタンボルトで締め付け、そのチタンボルトの頭をTIG法またはイナートガスアークスポット法で軽くメルトさせるだけでよい。気密を要するときは次項のろう付け法を併用するのがよい。

③ ろう付けによる方法

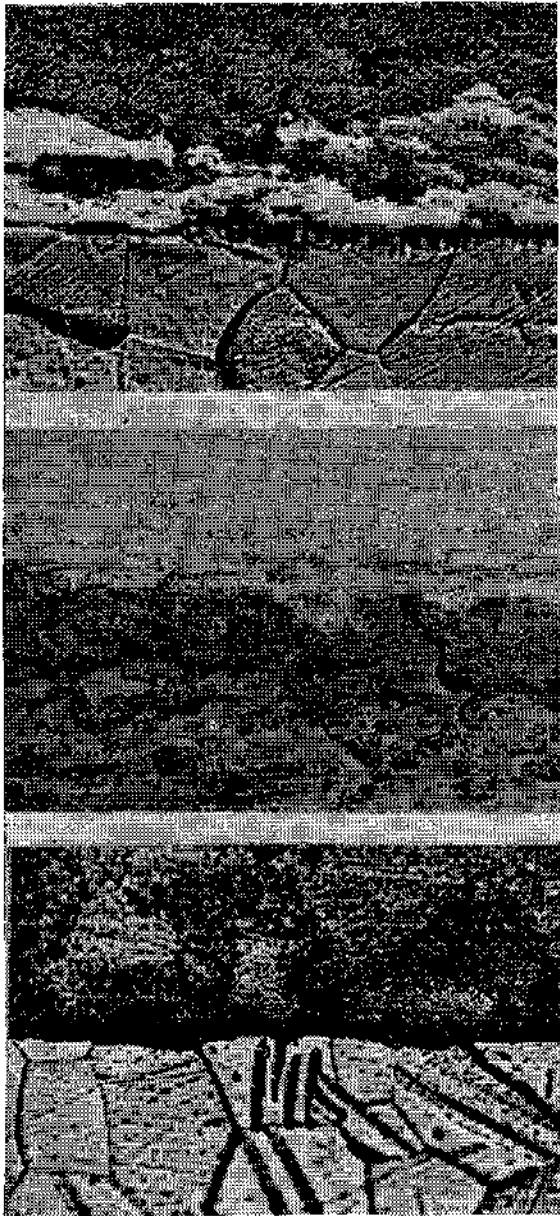
ろう付け法には種々あるが、もつとも効果的なものは高周波加熱ろう付け（真空ろう付け）、炉中ろう付け（通常アルゴン炉による）および抵抗ろう付けである。

高周波加熱ろう付けや炉中ろう付けによるときは、チタンと異種金属の両方になじみやすいろう（第2表⑭）を用いて、抵抗ろう付けの場合はチタンおよび異種金属のそれぞれになじみ易く、かつ、お互同志がなじみ性をもつろう、たとえば、純銀（チタン側）と銀ろう（異種金属側）をサンドイッチのように重ね合せ抵抗加熱（点または縫合せ溶接）すれば所期の目的が達せられる。

④ 超音波による方法

第2表 推奨されるろう材

	Ti	Ag	Cu	Zn	Cd	Mn	Ni	Cr	Al	Li	Zr	Co	Ge	Nb	Pd	Sn	In	Be	Si	その他	備考
•		45	15	16	24																B _{Ag} -1
•		50	13	13.6	20					0.4											B _{Ag} -1a
•		50	15.5	16.5	18																B _{Ag} -3
•		60	10.5	13.1	16					0.4											B _{Ag} 8
•		50	15.5	15.5	16																B _{Ag} -Mn
•		72	28																		
•		72	27.6							0.4											
•		90	9.7							0.3											
•		85				15															
•		85							15												
•		90	7							3											
•	28		15				52					5									
•	66.5						23.5												10		
•							44				10			46							
•	10						45							45							
•							44							46					10		
•							40							40	20				10		
•							70								20						
•							57	13					30								
•							54								10		36		3		
•	87																	10			
•	45													50				5			
•	32	68																			
•	40	50	10																		
•	40	40	10																		
•							5	5													
•							68.62	19											11.25	C, Fe	
•							92.58												4.58	B	
•							65	18									9				
•							38	29		4			29								
•							29	19		4			48								
•							19	19		5			57								



(写真上から)

- a 銅(上)と銀箔(中)とチタン(下)の倍率: 1000
- b ステン(上)と銀箔(中)とチタン(下)の倍率: 400
- c 銅(上)とチタン(下) 倍率: 1000

第13図 超音波によるチタンと異種金属との接合組織

溶接の場合はもちろんのこと、ろう付けの場合にも接合部にせいぜい弱な金属間化合物が形成され、強さあるいは耐食性が損なわれる場合が多い。

これにくらべて、超音波接合法による場合はこのようなせいぜい弱な接合部をつくらないで、第13図⑬-a, b, cの組織にもみられるように完全なる接合部を得ることができる。

⑤ その他

その他の方法としてガス圧着法あるいは高周波誘導加

熱法(または抵抗法)などが考えられるが、まだ実用の段階ではない。

以上はチタンについてであるが、チタン以外の金属についてもほぼ同様に考えられる。

3. む す び

以上新しい金属材料の溶接について問題とされている点を冶金学的立場から考察した。もちろん、溶接は設計、材料、施工、検査ならびに機器などの各分野から考察し、その総合的結果より論じる必要はあるが、まず材料の知識なくして溶接を考えるわけにはいかぬだろう。

簡単であるが拙論を閉じる。

参 考 文 献

- ① 著者; 溶接学会特殊溶接研究委員会資料 (2/1961)
- ②⑧⑨⑩⑪ 著者; チタニウムおよびチタニウム合金の溶接に関する冶金学的研究 (1961)
- ③④⑤ 岡田, 新; 溶接学会誌 Vol. 30, No. 8
- ⑥ M. Okada, S. Shin; The 30th Anniversary Publication of the Japan Welding Society "RESEARCH AND APPLICATION OF WELDING IN JAPAN" (1959)
- ⑦ 著者; 金属 Vol. 29, No. 6, 7
- ⑪ 岡田, 新; 溶接学会誌 Vol. 30, No. 7
- ⑬⑭ 著者; 溶接工学夏季大学資料 (1961) 大阪大学工学部;
- ⑮ 著者; 音響学会超音波応用技術コン談会資料 Vol. 2, No. 3