

# 圧延法によるチタンクラッド鋼の接合状態

論文

吉原征四郎\*・川並 高雄\*<sup>2</sup>・鈴木 堅市\*<sup>3</sup>

## Bonding Condition of Rolled Titanium Clad Steels

Seishiro YOSHIWARA, Takao KAWANAMI and Ken'ichi SUZUKI

Synopsis :

Six kinds of rolled titanium clad steels were made by way of trial, and evaluated mechanically and microscopically. Some of these rolled clad steels satisfy the condition which the JIS G 3603 specifies for the explosively welded clad steels and explosively welded and rolled clad steels with titanium as cladding metal. These rolled titanium clad steels of high performance are bonded without intermedium and with intermedium of iron foil, nickel foil, SUS 304 woven wire cloth or SUS 430 woven wire cloth.

### 1. 緒 言

チタンクラッド鋼板は爆着法または爆着圧延法によつて製造されており、圧延法による製造は難しく、JIS G 3603 (1980) には爆着クラッド鋼と爆着圧延クラッド鋼が規定されているにすぎない。また真空圧延法<sup>1)~3)</sup>による例があるが、工業生産にはほど遠いものである。

本報ではチタン板と鋼板とを直接重ね合わせ、あるいは両者間に中間材を介在させて重ね合わせて熱間圧延し、その接合状態の評価を目的とし、主としてせん断試験値と接合境界部の観察結果について述べる。

### 2. 実験方法

Table 1 に素材の化学成分を示す。母材は低炭素 Si-Mn 鋼 (SB 42)、合わせ材は工業用純チタン JIS 1 種 (TP28H) である。Table 2 に中間材の種類を示す。チタンと鋼の間には何も挿入しない場合 (A) のほか、電解法による鉄箔 (B)、電解法によるニッケル箔 (C)、

チタンへのニッケルめつき (D)、SUS 304 金網 (E) または SUS 430 金網 (F) などの 6 種類の間接材を挿入し、Table 3 に示す順に各素材を重ねて四周を溶接して圧延用組合せ体をサンドイッチ方式により製作した。この全厚 335 mm の組立素材を 750°C に約 7 h 加熱したのち、Table 3 の 4 通りの厚さに圧延した。この圧延ままの材料から試験片を採取し、「JIS G 3603 (1980) チタンクラッド鋼」に従つて評価した。すなわちせん断試験片とその試験方法および側曲げ試験片は JIS G 0601 (1982) に従い、側曲げ試験方法は JIS Z 2248 の押曲げ法に従つた。表曲げおよび裏曲げ試験片は JIS Z 2204 の 1 号試験片であり、曲げ試験方法は側曲げ試験法に同じである。引張試験片は JIS G 2201 の 5 号試験片である。超音波探傷試験は JIS G 0601 に従い、底面エコー方式により非接合部を評価した。Table 4 に超音波探傷試験法を示す。探傷感度は試験材の完全接合部における第 1 回底面エコー高さを目盛板の 80% に調整して合わせ材側と母材側からそれぞれ探傷した。

Table 1. Chemical analysis (wt%).

Material	C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	Cr	Fe	Ti	O	N
Base metal: SB 42	0.183	0.204	0.666	0.020	0.013	0.014	0.020	0.026	Bal	—	—	—
Cladding metal: TP 28 H	0.004	—	—	—	—	—	—	—	0.013	Bal	0.063	0.004
Intermedium	SUS 304	0.04	0.48	0.99	0.16	0.006	0.017	9.63	18.89	Bal	—	—
	SUS 430	0.03	0.55	0.87	0.014	0.008	0.019	—	17.33	Bal	—	—
Cover plate: SS 41	0.14	0.44	0.73	0.021	0.016	0.016	—	—	Bal	—	—	—

昭和 60 年 8 月 7 日受付 (Received Aug. 7, 1985)

\* 新日本製鉄(株)塑性加工研究センター (Material Forming Process Lab., Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yahata-higashi-ku Kitakyushu 805)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)塑性加工研究センター 工博 (Material Forming Process Lab., Nippon Steel Corp.)

\*<sup>3</sup> 新日本製鉄(株)分析研究センター (Analysis Research Lab., Nippon Steel Corp.)

Table 2. Kinds of intermedium.

Symbol	Intermedium
A	None
B	Iron foil: 50 $\mu\text{m}$
C	Nickel foil: 50 $\mu\text{m}$
D	Nickel plated on titanium: 50 $\mu\text{m}$
E	SUS 304 woven wire cloth: $\phi$ 0.5 mm, 10 mesh
F	SUS 430 woven wire cloth: $\phi$ 0.7 mm, 7 mesh

Table 3. Thickness of materials.

	Material		Thickness	
	Before rolling	Base metal	: SB 42	150 mm
Intermedium		: A ~ F	$\leq 1$ mm	
Cladding metal		: TP 28H	14 mm	
Cover plate		: SS 41	2.5 mm	
Cover plate		: SS 41	2.5 mm	
Cladding metal		: TP 28H	14 mm	
Intermedium		: A ~ F	$\leq 1$ mm	
Base metal		: SB 42	150 mm	
Total thickness			385 mm	
After rolling	Reduction ratio		Full thickness	
	4.8		34.8 mm	
	5.7		29.6 mm	
	8.7		19.3 mm	
	11.6		14.5 mm	
Cladding ratio : 8.54%				

Table 4. Method of ultrasonic testing.

Flaw detection apparatus	UM-731, Made by Tokyo keiki
Method of setting working sensitivity	Bottom echo system
Stage of flaw detection	At the time of completion of material manufacturing
Searching side	Cladding metal side and base metal side
Searching surface	As rolled
Working sensitivity of transducer	$B_s$ : 80%
Frequency of transducer	5 MHz
Diameter of transducer	20 mm
Type of flaw detection	Water column coupling method
Couplant	Water

### 3. 実験結果および考察

Fig. 1 に全厚 14.5 mm と 19.3 mm のクラッド鋼板接合部のせん断強さを示す。せん断強さは大きく変動しており、その原因として試験片の製作方法や加工精度および試験治具の精度があげられる。このほか破壊直後の母材のかじりによつて高過ぎる値を示すことがあるが、これは試験速度を十分遅くすることによつて破壊値と区別し、両者の区別が不明瞭なものは Fig. 1 からは除外している。このような変動の大きい試験値を基に冶金的因子との関連を詳細に議論することは避けるが、JIS G 3603 規定のせん断値を満足する条件が存在することが明らかになったので、以下に接合部の調査結果について考察を加える。Fig. 1 では中間材を用いない条件Aで、全厚 19.3 mm を除いて良好な値を示している。全厚 29.6 mm と 34.8 mm のクラッド材のせん断値はこの値よりいつそう低位に変動しているので省略したが、Fig. 1 の条件Aでも見られるように、圧下比が小さい場合に

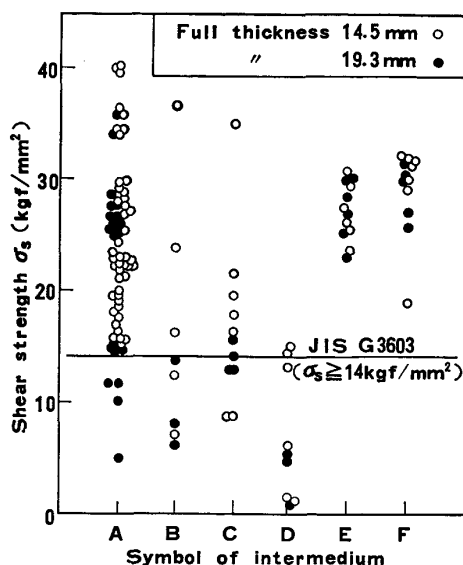
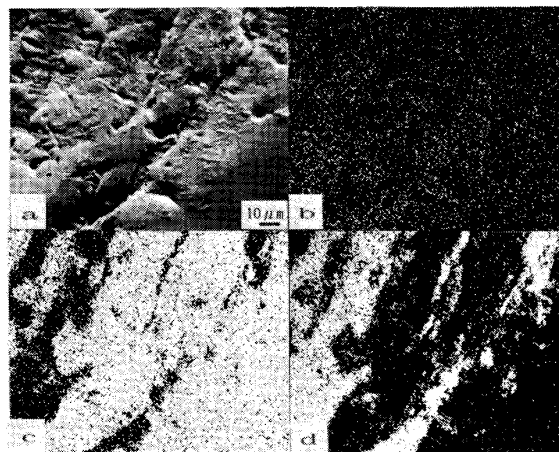


Fig. 1. Relationship between kind of intermedium and shear strength.

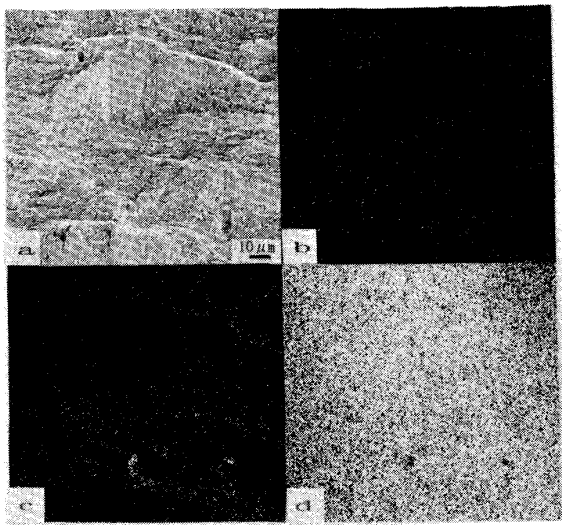


Intermedium : None Full thickness : 14.5 mm  
 $\sigma_s = 38.8 \text{ kgf/mm}^2$  Right down portion is taper polished  
 a : SE, b : O, c : Ti, d : Fe

Photo. 1. Sheared surface of titanium side

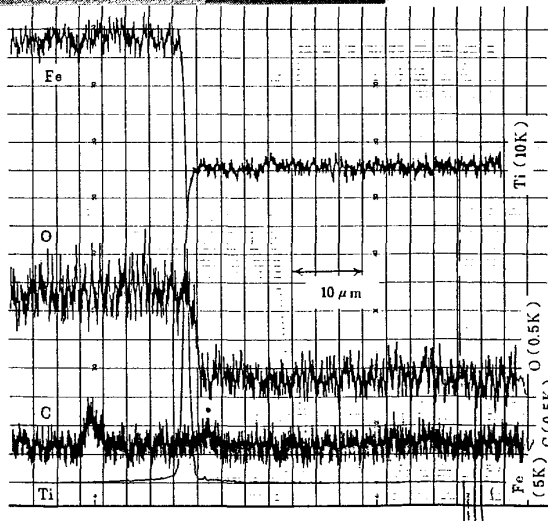
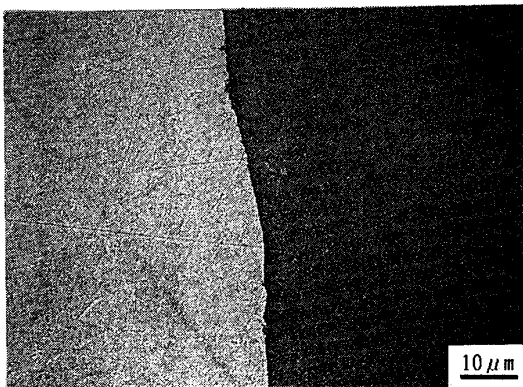
はせん断値が低位に変動することを示唆していると言える。SUS 304 や SUS 430 の金網を中間材として用いた条件EとFのせん断値も十分高い水準にあり、JIS G 3603 の規格下限値 14 kgf/mm<sup>2</sup> を満足している。鉄箔やニッケル箔を中間材として挿入した条件BとCのせん断値は、前記規格値下限をまたいでばらついているが、この値を満足できる条件があることを示唆している。チタン板にニッケルメッキを施した条件Dのせん断値は低く、製造費用も高いため、この6種類の条件の中ではこれは工業化の可能性が最も薄いものである。

Photo. 1 に中間材を使用しない場合のせん断試験片のチタン側破面の EPMA 面分析写真を示す。試験片は 38.8 kgf/mm<sup>2</sup> の高いせん断強さを示したもので、深さ



Intermedium : None Full thickness : 14.5 mm  
 $\sigma_s = 38.8 \text{ kgf/mm}^2$   
 a : SE, b : C, c : Ti, d : Fe

Photo. 2. Sheared surface of steel side.



Intermedium : None Full thickness 14.5 mm  
 Fig. 2. EPMA line scanning across the boundary.

方向の成分の変化を見るために破面に対し 10~20° で傾斜研磨し、未研磨部との境界を解析している。この写

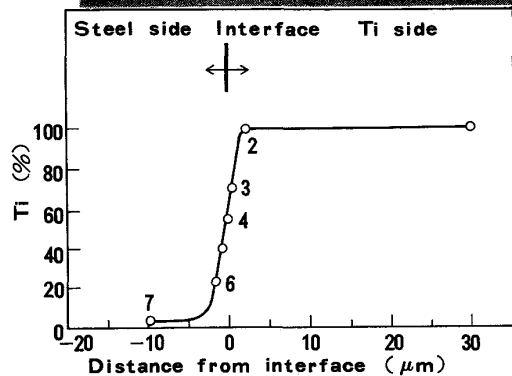
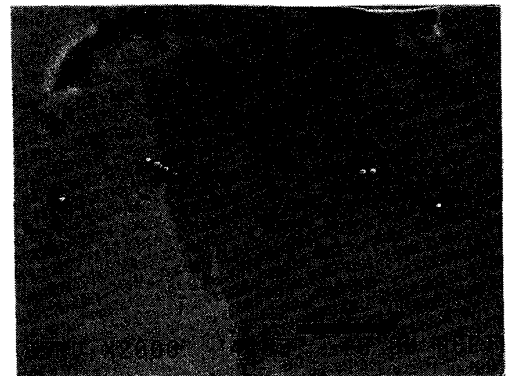
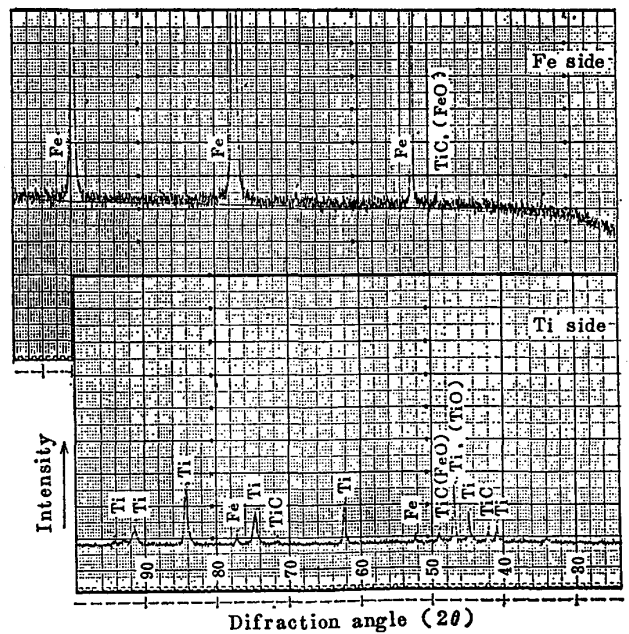


Fig. 3. EDAX analysis near the boundary revealed by taper polishing on the sheared titanium side specimen.



Intermedium : None Full thickness : 14.5 mm

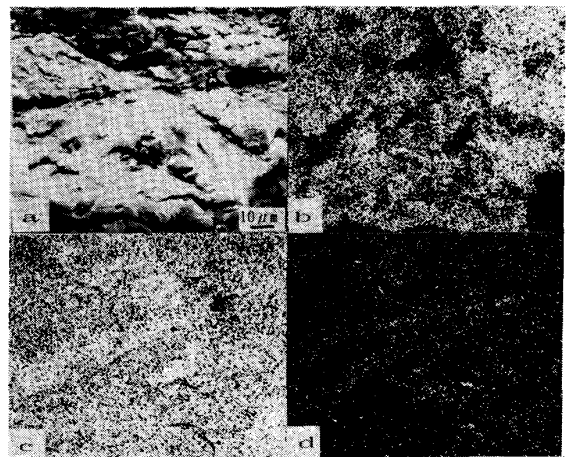
Fig. 4. X-ray reflection on sheared surface.

真では二次電子像 (SE) の右下部が研磨されている。Photo. 1 ではチタン側破面に鋼が脈状にめり込み、破壊は鋼とチタンをジグザグに進んでいるように見える。Photo. 2 に Photo. 1 と対の傾斜研磨をしない鋼側試験片の SEM 分析結果を示す。破面には Ti と C がほぼ



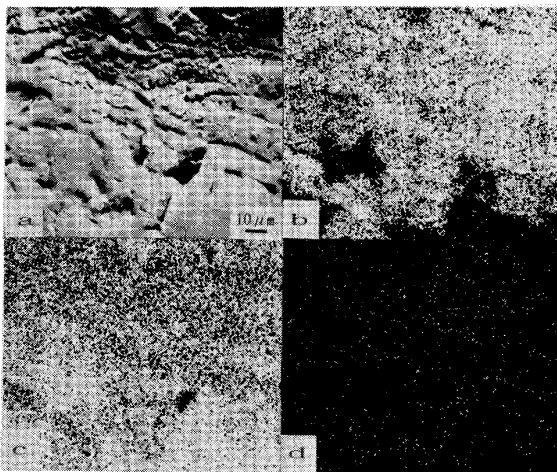
Intermedium : Iron foil Full thickness : 14.5 mm  
 $\sigma_s = 24.1 \text{ kgf/mm}^2$   
 a : SE, b : O, c : Ti, d : Fe

Photo. 3. Sheared surface of titanium side.



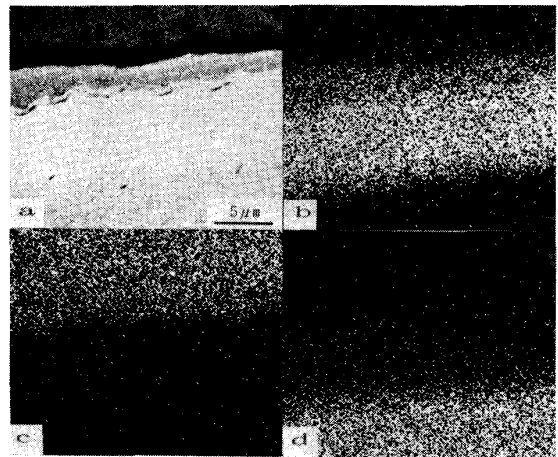
Intermedium : Nickel plated ontitanium fullthickness :  
 14.5 mm  $\sigma_s = 6.2 \text{ kgf/mm}^2$   
 a : SE, b : Ni, c : Ti, d : Fe

Photo. 5. Sheared surface of titanium side.



Intermedium : Nickelfoil Full thickness : 14.5 mm  
 $\sigma_s = 21.6 \text{ kgf/mm}^2$   
 a : SE, b : Ni, c : Ti, d : Fe

Photo. 4. Sheared surface of titanium side.



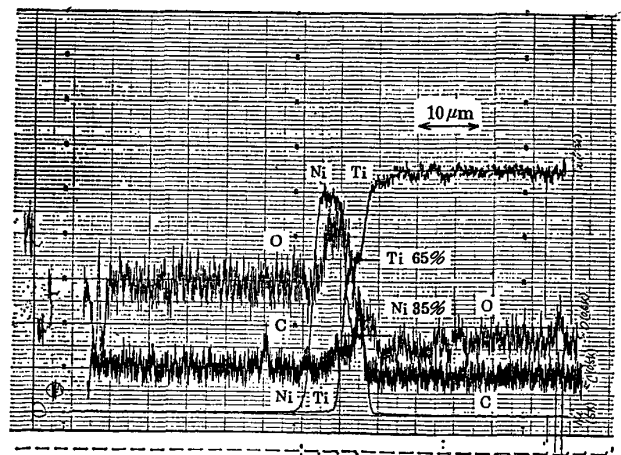
a : SE, b : Ni, c : Ti, d : Fe

Photo. 6. Boundary of nickel plated titanium clad steel.

同じ位置に偏析し、TiCの存在を示唆している。電子像で条こんが見える部分は鋼の内部でせん断された面であり、その周囲の面はせん断方向(Photo. 2の上下方向)に圧縮されてPhoto. 1とは異なつて見える。

Fig. 2にPhoto. 1~2と同類の試験片のEPMA線分析結果を示す。この例では相互拡散は軽微で接合境界から数 $\mu\text{m}$ 程度であり、FeとTiの分析線は数 $\mu\text{m}$ 以内で直線的に入れ替つており、金属間化合物は認められない。この例では接合境界におけるCの濃縮は極微量であるが、Cの濃縮が明瞭に見られる場合もある。

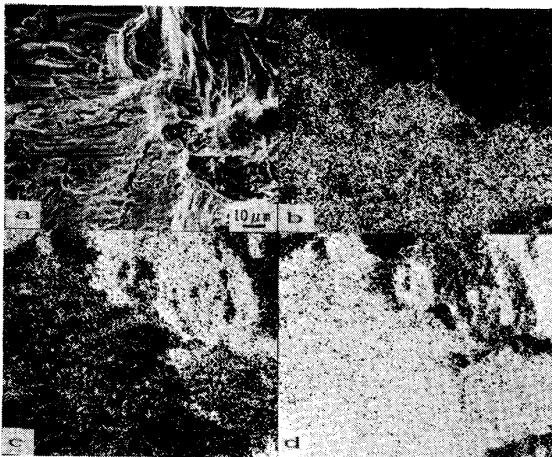
Fig. 3にPhoto. 1と同じチタン側破面の傾斜研磨部に現れた接合境界をEDAXによりTiを分析して示している。チタン側破面上の鋼は極薄層に研磨されているが、この接合境界から鋼へ向かつて $10 \mu\text{m}$ の位置でTi



Full thickness : 14.5 mm

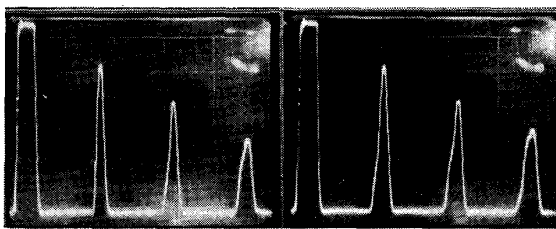
Fig. 5. Result for EPMA line scanning across the boundary of nickel plated titanium clad steel.





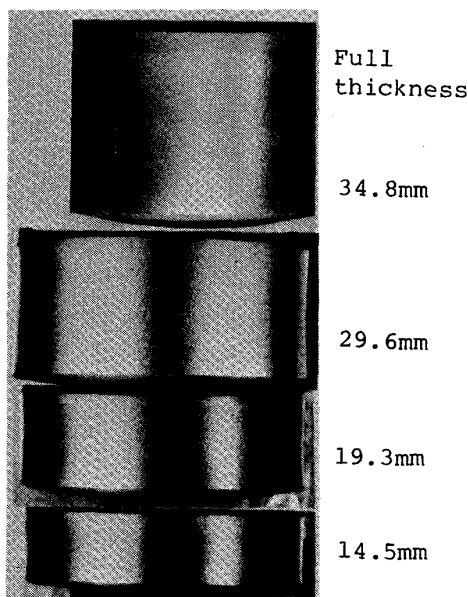
Intermedium : SUS 304 woven wire cloth Full thickness : 14.5 mm,  $\sigma_s=25.3 \text{ kgf/mm}^2$   
a : SE, b : Cr, c : Ti, d : Fe

Photo. 7. Sheared surface of titanium side.



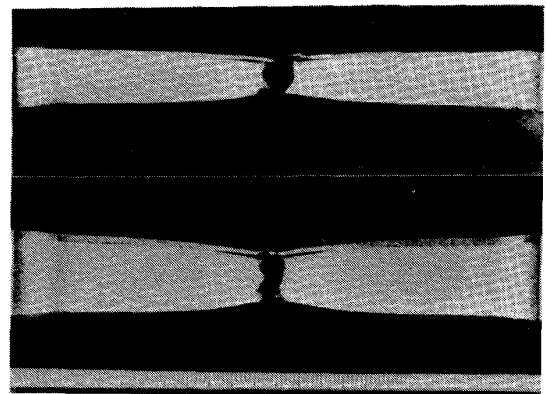
Intermedium : None Full thickness : 14.5 mm  
Left : Searching from the cladding metal side.  
Right : Searching from the base metal side.

Photo. 8. Flaw detection pattern of titanium clad steel.



Based on JIS G 0601,  $R=20 \text{ mm}$  Intermedium : None

Photo. 9. Side bend test pieces.



Intermedium : None Fullthickness : Above 14.5 mm, Below 19.3 mm

Photo. 10. Tensile test pieces.

ケルめつきの場合よりかなり少なく、これがせん断試験値の差となつて現れたと考えられる。この原因としてチタン板にニッケルめつきを施した場合は Ni と Ti の金属間化合物の生成あるいは相互拡散の機会、圧延開始前までの高温にさらされる時間がニッケル箔の場合よりも増加するからである。

Photo. 7 に SUS 304 金網を中間材として挿入したクラッド鋼板のチタン側せん断破面を示す。破面にはチタンと炭素鋼とステンレス鋼線の断面が交錯して現れており、破壊は合わせ材、中間材、母材をそれぞれ横切つて進んでいる。またステンレス鋼線材部に Ti が分布していることから、チタンが拡散する程度の線材表面皮下を破壊が進んだと推定できる。SUS 430 金網を中間材として用いた場合も SUS 304 の場合と全く同じである。

Photo. 8 に中間材を用いないチタンクラッド鋼板の探傷図形を示す。底面エコーに接合面の反射を示す弱い波が重畳されて見られるものがあるが、第2回以降の底面エコーが十分大きいことと顕微鏡観察結果では接合が確認されていることからこれは欠陥波ではなく、音響インピーダンスのちがいによるエコーであると言える。

Photo. 9 に曲げ試験片例を示す。中間材がない場合と鉄箔やニッケル箔を中間材とした場合には、写真の4通りの厚さで接合境界のはく離は生じなかつたが、チタン板にニッケルめつきを施した場合と SUS 304 や SUS 430 金網を挿入した場合には接合部にはく離を生じたものがあつたがこれは接合不良を示すものではない。側曲げ試験はせん断試験とは全く別の特性を評価しているものであり、せん断試験が接合部のせん断強さの指標であるのに対し、側曲げ試験は接合部の均一伸びの指標に近い。従つて接合境界が硬化している場合や母材や合わせ材と伸び特性の異なる物質が介在する場合には、せん断試験値は大きくても割れを生じる場合がある。なおこの

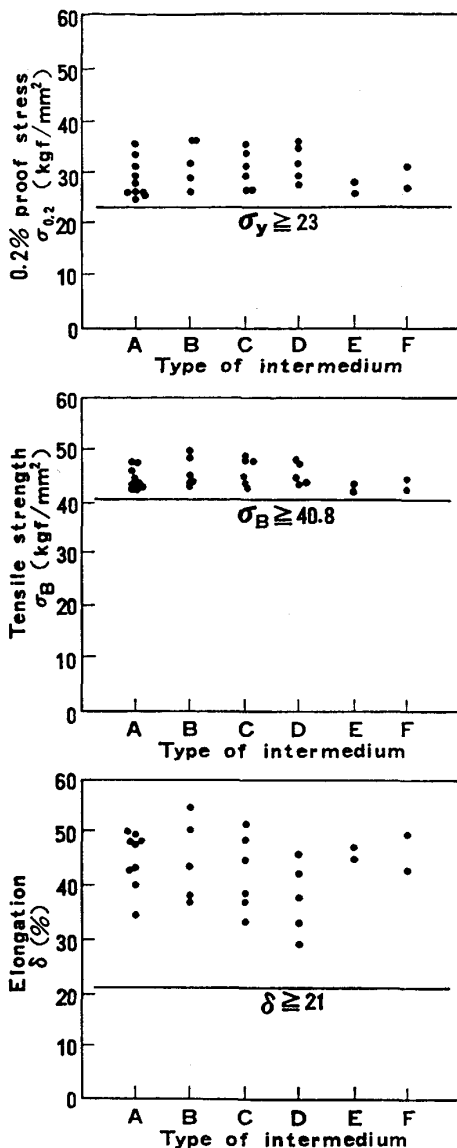


Fig. 7. Mechanical properties.

側曲げ試験は苛酷すぎるため JIS G 3603 (1980) には規定されていない。

Photo. 10 に全厚 14.5 mm(上) と全厚 19.3 mm(下) の引張試験片の外観を示す。いずれも十分な伸びと絞りが見られる。Fig. 7 に全厚 14.5 mm と 19.3 mm の引張試験結果を合わせて示す。0.2% 耐力あるいは降伏点は JIS G 3603 (1980) には規定されていないが、母材と合わせ材の高い方の降伏点、すなわち SB 42 の 23 kgf/mm<sup>2</sup> を超えている。引張強さは JIS G 3603 の計算式に基づく下限値 ( $\sigma_B$ ) を満足している。伸びは JIS G 3603 (1980) に従えば規格値の低い側の SB 42 の 21

% 以上を満足している。絞り値はすべて 40~50% の高い値を示したが、クラッド鋼板であることによる測定精度に疑問があることと、JIS G 3603 (1980) に規定されていないために省略した。また表曲げや裏曲げ試験結果は良好であったが、これらは接合状態を評価するものではないため省略した。

以上のように従来は圧延法では製造困難とされていたチタンクラッド鋼板が数種の方法によつて爆着法および爆着圧延クラッド鋼の規格 JIS G 3603 (1980) の規定を満足できる製造条件が存在することを示した。しかしながらせん断試験値の変動が大きく、この原因の究明とせん断試験値を高位に安定させる技術の確立が必要である。

#### 4. 結 論

チタンクラッド鋼板を熱間圧延によつて試作し、その接合状態を評価し次の結論を得た。

(1) 圧延によつて製造したチタンクラッド鋼板は、爆着クラッド鋼及び爆着圧延クラッド鋼について規定されている JIS G 3603 の要求特性を満足できる。

(2) 合わせ材と母材を直接接合する場合のほか、両者間に鉄箔、ニッケル箔、SUS 304 金網、あるいは SUS 430 金網を介在させた場合にも上記規格値を満足できる条件が存在する。

(3) せん断試験値が高い水準にある工業用純チタン JIS 1種 (TP28H) と低炭素 Si-Mn 鋼 (SB 42) の接合境界のせん断破面には微量の TiC は認められたが、金属間化合物は認められなかった。

(4) 中間材としてニッケルを介在させた場合のせん断破面には NiTi<sub>2</sub> を主成分とする金属間化合物と TiC が認められた。

(5) SUS 304 や SUS 430 金網を中間材として介在させることによつてせん断強さを高い水準に保持できた。

#### 文 献

- 1) R. BLICKENSBERGER: Report of investigations—Bureau of Mines, (1980) 8481, p. 1
- 2) F. E. DOLZHENKOV and Yu. I. KRIVOSONOV: Soviet J. Nonferrous metals, 6 (1964), p. 65
- 3) V. M. AMONENKO, A. S. TRON', V. M. MUKHIN, N. D. RYBAL'CHENKO and E. A. KOVALEVA: Soviet J. Nonferrous metals, 12 (1966), p. 90