PNC TN8410 96-037

抵抗溶接法の開発(2)

〔ODS鋼を用いた溶接条件選定試験と接合部の観察〕

1996年1月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については，下記にお問い合わせ下さい。
〒319－11　茨城県那珂郡東海村大字村松４－３３
動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所　技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to:Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

PNC TN8410 96-037
1996年1月

抵抗溶接法の開発(2)

〔ODS鋼を用いた溶接条件選定試験と接合部の観察〕

実施責任者　上村　勝一郎*1
報告者　西山　元邦*1　関　正之*1
石橋　藤雄*1　塚田　竜也*2

要　旨

抵抗溶接法は、TIG溶接法等にくらべ溶接時の入熱量が非常に少なく、母材に極力影響をあたえずに接合できるため、酸化物分散強化型鋼（以下「ODS鋼」と言う）の溶接手法として有望と考え、溶接装置を開発した[1)]。

しかし、本溶接法を用いてODS鋼の基本特性把握試験を行った結果、高温（650℃）引張試験において、接合部からの破断となり、また、引張強さも母材より低下するといった現象が生じた。

そこで、今回は、接合部の強度を低下させる要因を究明するために、溶接条件にパラメータを取り試験片を製作し、各種強度試験と破面の観察およびTEMを用いて接合部の観察を行った。本試験、観察から得られた主な知見は、以下の通りである。

1．主に接触抵抗を利用した場合の溶接試験（1段溶接）

(1) 接合部の硬さは母材よりも150Hv程度軟化し、これまでの結果と比べ改善は認められなかった。また、180kgf程度の低い加圧力の場合においては、溶接の再現性が得られなかった。

2．主に体積抵抗を利用した場合の溶接試験（2段溶接）

(1) 溶接電流および溶接時間は、硬さの変化にあまり影響をあたえず、加圧力を600kgfと大きくすると、硬さ低下は50Hv程度と非常に小さくなることが分かった。

(2) 金相上良好な接合部の得られる条件は、予熱電流7KA　2cycle、溶接電流13～14KA　0.6～0.9cycle、加圧力180～600kgfの範囲であった。

(3) 常温から650℃の引張試験、650℃の単軸クリープ試験では、加圧力の高い方が強度は強くなった。引張試験においては、加圧力の高い600kgfの場合は被覆管母材部からの破断となったが、単軸クリープ試験においては、どの条件の場合も接合部からの破断となってしまい、長時間側になるほど母材との強度差が大きくなった。

(4) 接合部のTEM観察においては、Y、T等の酸化物の粗大化が生じ、加圧力の増加に伴いその領域は狭くなった。分散材の粗大化が生じたのは接合部の温度が融点付近まで上昇したことが考えられる。なお、接合部の組織は、どの溶接条件においても再結晶組織になっていた。

強度低下が生じるのは、接合部の粒界滑りおよび分散材の凝集、粗大化が原因であり、酸化物の凝集領域が狭いほど接合部の高温強度は強くなり、凝集領域の幅は接合部に加わる加圧力と相関のあることが分かった。

(5) SEM観察による破断面の形状は、ほとんどがディンプル破面であったが、一部に粒状の破面も観察された。この粒状の破面は、接合時に溶融相が残存していたことを示すものであることが推測される。さらに、これらの破面をFE-SEMで観察すると2～3μm程度の微小な球状起伏が見られ、これは、耐熱元素の凝集によるものであることが推定される。

今後は、強度異方性が改善された材料が開発されるのを待って、低電流での溶接を行う等、溶融相を生じさせず、分散材の凝集を無くせるような溶接条件のさらなる検討を行う予定である。

*1 東海事業所 核燃料技術開発部 プルトニウム燃料開発室
*2 原子力技術（株）

目　次

Ⅰ　はじめに …… 1

Ⅱ　試験方法 …… 2
1. 供試材 …… 2
2. 試験内容 …… 4
2.1　溶接条件選定試験 …… 4
2.2　接合部の微視的観察 …… 5
Ⅲ　試験結果 …… 6
1. 溶接条件選定試験 …… 6
1.1　主に接触抵抗を利用した場合の溶接試験（1段溶接） …… 6
1.1.1　溶接パラメータ …… 6
1.1.2　硬さ測定試験 …… 6
1.1.3　溶接可能範囲選定試験および金相試験 …… 6
1.1.4　信頼性試験 …… 6
1.2　主に体積抵抗を利用した場合の溶接試験（2段溶接） …… 10
1.2.1　溶接パラメータ …… 10
1.2.2　硬さ測定試験 …… 10
1.2.3　金相試験 …… 12
1.2.4　溶接パラメータと溶接波形 …… 14
1.2.5　信頼性試験 …… 16
1.2.6　機械的強度測定試験 …… 18
2. 接合部の微視的観察 …… 24
2.1　TEM観察の概要 …… 24
2.2　観察試料の溶接条件 …… 24
2.3　TEM観察結果 …… 24
2.3.1　抽出レプリカの観察 …… 24
2.3.2　薄膜試料の観察 …… 32
3. 破断面のSEM観察 …… 39

Ⅳ　結論 …… 52

Ⅴ　今後の課題 …… 55

Ⅵ　参考文献 …… 56

図リスト

図－1　供試材寸法、形状 …… 3
図－2　溶接のプロセス …… 4
図－3　硬さ測定結果（13KA－2cycle－180kgf） …… 7
図－4　溶接可能範囲選定試験結果 …… 7
図－5　溶接時のチャート（13KA－180、240kgf） …… 9
図－6　硬さ測定結果（7KA－2cycle+13KA－0.6および1.0cycle　180kgf） …… 11
図－7　硬さ測定結果（7KA－2cycle+13KA－0.6cycle　600kgf） …… 11
図－8　変位量の測定部 …… 15
図－9　溶接時間と変位波形 …… 15
図－10　溶接時のチャート（7KA－2cycle+14KA－0.6cycle　180および600kgf） …… 17
図－11　引張試験結果－引張強さ（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf） …… 20
図－12　引張試験結果－引張強さ（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf） …… 20
図－13　引張試験結果－伸び（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf） …… 21
図－14　引張試験結果－伸び（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf） …… 21
図－15　単軸クリープ試験結果 …… 23

表リスト

表－1－1　供試材の化学成分（MA957）…… 2
表－1－2　供試材の化学成分（F21）…… 2
表－1－3　供試材の機械的強度および硬さ（MA957）…… 2
表－1－4　供試材の機械的強度および硬さ（F21）…… 2
表－2　接合部評価項目一覧表 …… 4
表－3　溶接パラメータの範囲（1段溶接）…… 6
表－4　溶接パラメータの範囲（2段溶接）…… 10
表－5　溶接電流と接合状態（2段溶接）…… 12
表－6　引張試験結果（7KA-2cycle+14KA-0.8cycle　180kgf）…… 18
表－7　引張試験結果（7KA-2cycle+14KA-0.8cycle　600kgf）…… 18
表－8　単軸クリープ試験結果（7KA-2cycle+14KA-0.8cycle　180kgf）…… 22
表－9　単軸クリープ試験結果（7KA-2cycle+14KA-0.8cycle　600kgf）…… 22
表－10　TEM観察試料の溶接条件 …… 24
表－11　溶接試料接合部の平均結晶粒径 …… 32

写真リスト

写真－1　溶接部の硬さ分布（13KA－2cycle－240kgf）…… 8
写真－2　断面金相写真（13KA－2cycle－180kgf）…… 8
写真－3　断面金相写真（7KA－2cycle+14KA－1.0cycle　180kgf）…… 13
写真－4　断面金相写真（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）…… 13
写真－5　断面金相写真（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）…… 13
写真－6　接合部の抽出レプリカTEM明視野像（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）…… 26
写真－7　接合部の析出物同定結果（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）…… 27
写真－8　接合部の抽出レプリカTEM明視野像（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　250kgf）…… 28
写真－9　接合部の析出物同定結果（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　250kgf）…… 29
写真－10　接合部の抽出レプリカTEM明視野像（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）…… 30
写真－11　接合部の析出物同定結果（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）…… 31
写真－12　被覆管母材（F21）部の薄膜TEM観察結果 …… 33
写真－13　端栓母材（MA857）部の薄膜TEM観察結果 …… 34
写真－14　接合部の薄膜TEM観察結果（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）…… 35
写真－15　接合部の薄膜TEM観察結果（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　250kgf）…… 36
写真－16　接合部の薄膜TEM観察結果（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）…… 37
写真－17　SEMによる接合部断面の観察結果 …… 38
写真－18　650℃高温引張試験破面の断面金相写真-ディンプル破面（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）…… 40
写真－19　650℃高温引張試験破面のSEM像-ディンプル破面（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）…… 41
写真－20　650℃高温引張試験破面のFE-SEM像-ディンプル破面（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）…… 42
写真－21　650℃単軸クリープ試験破面の断面金相写真-ディンプル破面（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）…… 43
写真－22　650℃単軸クリープ試験破面のSEM像-ディンプル破面（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）…… 44
写真－23　650℃単軸クリープ試験破面のFE-SEM像-ディンプル破面（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）…… 45
写真－24　650℃高温引張試験破面の断面金相写真-粒状破面（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）…… 46
写真－25　650℃高温引張試験破面のSEM像-粒状破面（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）…… 47
写真－26　650℃高温引張試験破面のFE-SEM像-粒状破面（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）…… 48
写真－27　650℃単軸クリープ試験破面の断面金相写真-粒状破面（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）…… 49

写真－28　650℃単軸クリープ試験破面のSEM像-粒状破面（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle 600kgf）…… 50
写真－29　650℃単軸クリープ試験破面のFE-SEM像-粒状破面（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）…… 51

Ⅰ　はじめに

酸化物分散強化型鋼（以下「ＯＤＳ鋼」と言う）は、従来のTIG溶接、レーザ溶接法等の溶融接合法を用いて溶接すると、鋼中のチタンや酸化イットリウム等の耐熱元素が凝集し、空孔を形成して欠陥となり、所定の強度が得られないことが判明した[2]。

そこで、これらに代わる溶接法が必要となり、種々の溶接技術に関する調査を行った結果、TIG溶接法等に比べて溶接時の入熱量が非常に少なく、母材に極力影響を与えずに接合できる抵抗溶接法が有望であるとの結論に達し、溶接技術開発を進めることとした。

これまでは、抵抗溶接溶接法によるＯＤＳ鋼の溶接技術を確立するため、装置・材料の基本特性評価および溶接条件の選定等を行い[1]、その結果、高温（650℃）引張試験において、接合部からの破断となるといった現象が観察された。

本報告書は、接合部の強度を向上できる溶接条件の選定およびTEMを用いた接合部の観察等を行った結果について記述する。

Ⅱ 試験方法

1. 供試材

今回使用した供試材は、端栓材にはMA957、被覆管材にはMA957棒材を加工したものおよびF21を用いた。表－1にこれらの材料の化学成分、機械的強度、硬さ、図－1に寸法、形状を示す。

(1) 化学成分

表－1－1 供試材の化学成分（MA957）

C	Si	Cu	Mn	Cr	Ti	Al	Co	Mo
0.017	0.04	0.04	0.06	14.17	0.99	0.06	0.03	0.30

Ni	P	S	Y_2O_3	N	O	Fe
0.13	0.005	0.006	0.27	0.045	0.22	Bal

(wt%)

表－1－2 供試材の化学成分（F21）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	W	Ti
0.045	0.019	0.013	＜0.005	0.001	12.87	0.16	2.81	0.52

Nb	N	O	Y_2O_3	Fe
－	0.0152	0.186	0.34	Bal

(wt%)

(2) 機械的強度および硬さ

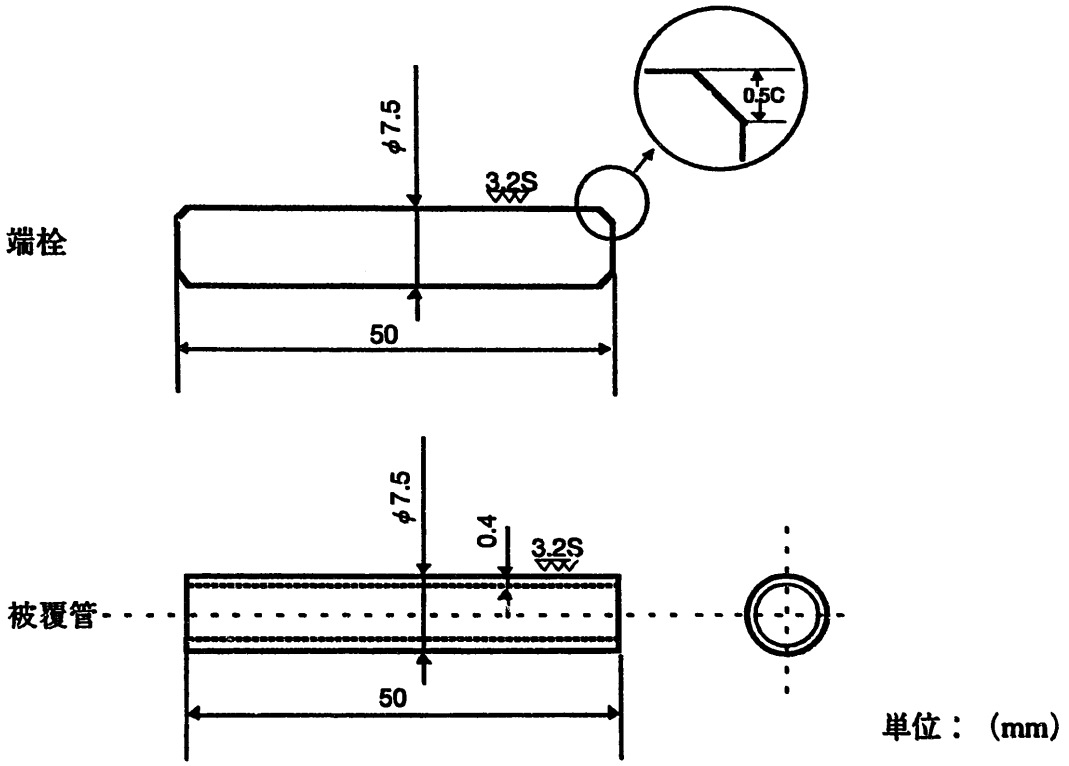
表－1－3 供試材の機械的強度および硬さ（MA957）

常温引張試験			高温引張試験（650℃）			硬さ（Hv）
引張強さ (kgf/mm²)	0.2%耐力 (kgf/mm²)	伸び (%)	引張強さ (kgf/mm²)	0.2%耐力 (kgf/mm²)	伸び (%)	
105.0	94.4	11.0	55.2	46.0	8.0	350

表－1－4 供試材の機械的強度および硬さ（F21）

常温引張試験			高温引張試験（650℃）			硬さ（Hv）
引張強さ (kgf/mm²)	0.2%耐力 (kgf/mm²)	伸び (%)	引張強さ (kgf/mm²)	0.2%耐力 (kgf/mm²)	伸び (%)	
158.7	145.5	9.8	70.9	60.2	14.2	370

(3) 試験片の寸法、形状



図－1　供試材寸法、形状

2. 試験内容

本試験の目的は、より接合部の強度が向上できる溶接条件の選定および接合部強度の把握である。また、選定した条件において、試験片を作製し、強度試験およびTEMによる接合部の微視的な観察を行い、接合部の挙動を観察することである。

本試験は、以下に示す内容から構成されている。

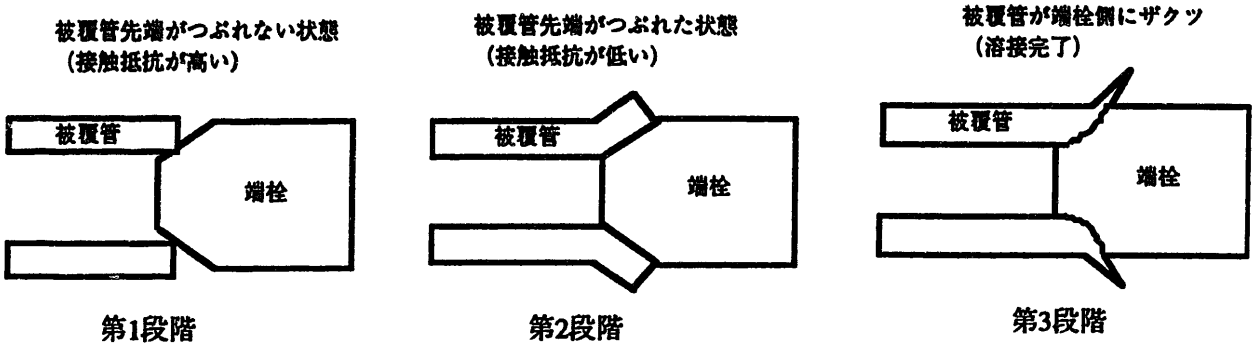
2.1 溶接条件選定試験

抵抗溶接で接合状態に起因してくる主なパラメータは、溶接電流、溶接時間、加圧力、溶接パターン等であり、これらのパラメータを変化させ表−2に示す試験を実施し、最適な接合条件を選定した。

表−2 接合部評価項目一覧表

試験項目	目的	評価項目
1. 金相試験	各溶接パラメータの接合状態に及ぼす影響を総合的に評価する。	・接合長さ ・結晶粒の粗大化の有無 ・組織変化部の幅 ・被覆管の端栓へのザクツ量 ・バリの形状
2. 硬さ測定試験	溶接パラメータにより硬さがどの程度減少するのかを測定し、溶接による母材組織および強度の変化を2次的に観察する。	・接合部硬さ分布 ・熱影響部の幅
3. 溶接波形の観察	溶接時の変位量および溶接ヘッドの加速度等を比較し、最適な条件選定の判断材料とする。	・変位量 ・溶接ヘッドの加速度
4. 引張試験	接合部の強度を確認し、接合部の健全性を評価する。	・引張強さ ・破断伸び ・破断位置
5. 単軸クリープ試験	母材と接合部の強度を比較し、接合部の健全性を評価する。	・破断時間 ・破断位置

また、溶接パターンをパラメータとした試験については、1段と2段の入熱での溶接を行った。図−2には、溶接が完了するまでのプロセスを簡単に示す。



図−2 溶接のプロセス

溶接の第1段階は、溶接加圧直後の突き合わせ部の様子を示す。突き合わせ部は、点で接触しており接触抵抗は高い状態である。第2段階は、溶接の途中段階を示し、通電後、被覆管と端栓の一部が軟化し、面同士の接触になり、接触抵抗は下がる。第3段階は、さらに接合部の軟化、拡散が進み、接合が完了した状態を示す。

本試験では、第1段階より溶接を行った場合（主に接触抵抗を利用した場合）と、初めに低い電流で予熱を加え、第2段階の状態にしてから溶接を行った場合（主に体積抵抗を利用した場合）について、溶接の信頼性、接合部の状態がどのようになるのかを評価した。

以後は、第1段階より溶接を行う場合を1段溶接、第2段階より溶接を行うを2段溶接と呼ぶ。また、2段溶接の場合の1段目の電流を予熱電流、2段目の電流を溶接電流と呼ぶ。

1段溶接の場合は、接触抵抗を有効に活用し、低い電流、加圧力で溶接を行い、熱影響幅を小さくすることが主な特徴である。

2段溶接の場合は、接触抵抗が小さいため、溶接の再現性が取りやすく、また、1段目の入熱で、溶接電流を流した時の塑性流動を起こしやすくしていることが特徴である。

2.2 接合部の微視的観察

抵抗溶接法においては、耐熱元素の凝集は、EPMAレベルでは観察されなかった[2)]が、高温引張試験等の機械的強度試験において、接合部より破断し、接合部の強度低下が起こった。

そこで、強度低下の一因と考えられる耐熱元素の挙動については、より微視的な観察を行うために、抽出レプリカおよび薄膜試料のTEM観察を実施した。

Ⅲ 試験結果

1. 溶接条件選定試験

以下に示す試験では、端栓および被覆管材ともにMA957を用いた。

1.1 主に接触抵抗を利用した場合の溶接試験（1段溶接）

1.1.1 溶接パラメータ

表－3に溶接パラメータの範囲を示す。

表－3 溶接パラメータの範囲（1段溶接）

溶接パラメータ	範　　囲
溶接電流（KA）	9、10、11、12、13、14、15
溶接時間（cycle）	2
加圧力　（kgf）	140、160、180、200、220、240

1.1.2 硬さ測定試験

13KA　2cycle　180kgfで溶接した試料の硬さ測定結果を図－3に示す。接合部の硬さは、母材よりも150Hv以上低下している。金相上、未接合、溶接欠陥の無い比較的良好な接合部が得られる条件（11～14KA、160～240kgf、2cycle）においては、硬さ低下、熱影響部の幅に大きな差は見られなかった。

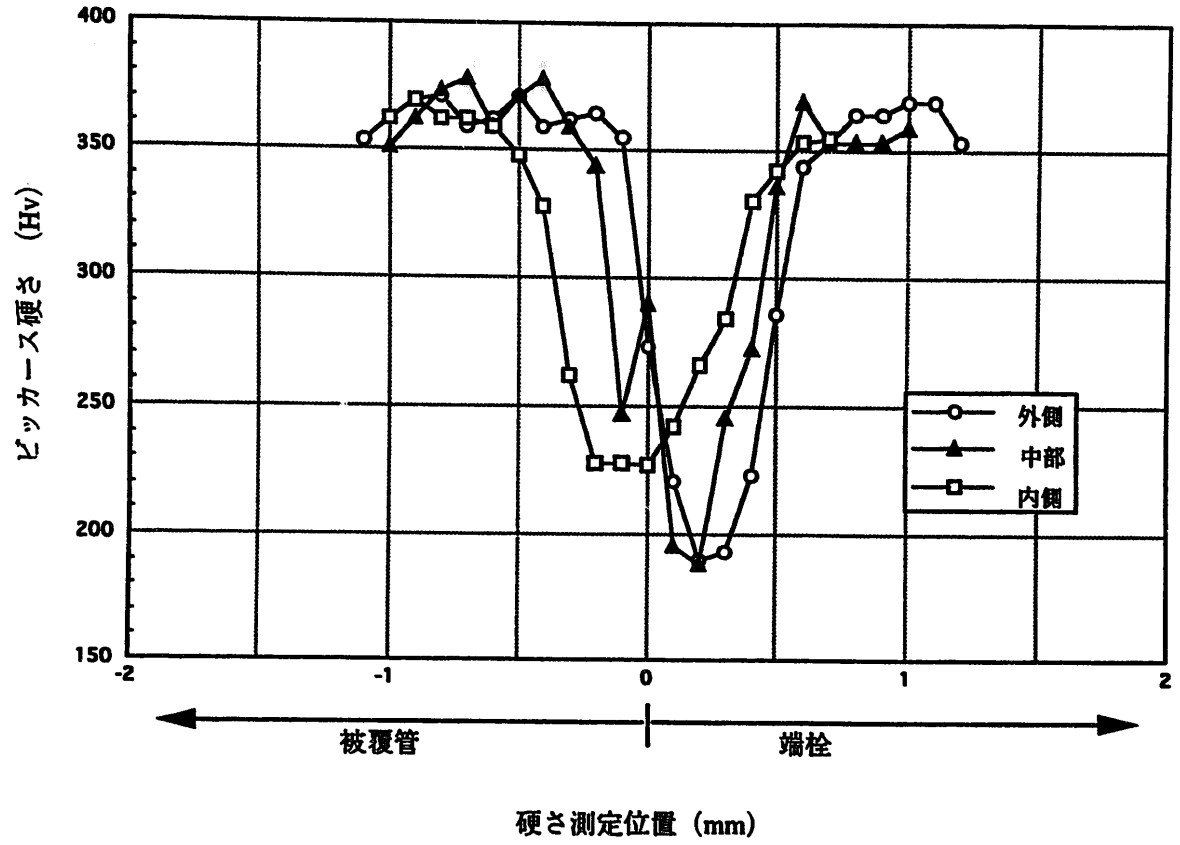
写真－1には、13KA　2cycle　240kgfで溶接した場合の硬さ分布を示す。

1.1.3 溶接可能範囲選定試験および金相試験

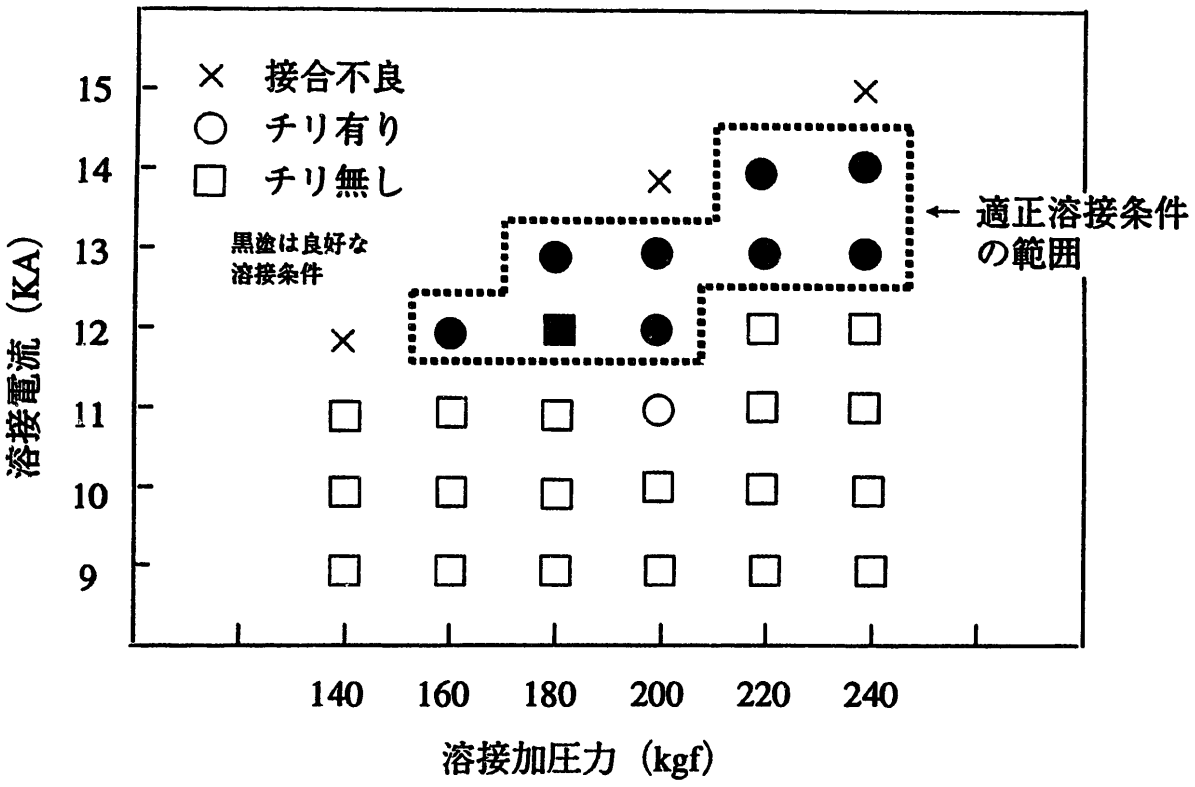
溶接可能範囲の選定を行った結果を図－4に示す。文献によると、大きなチリ（溶融片が弾ける現象）が発生する電流よりやや低い値が適正電流値となることが報告されている。金相上、未接合および溶接欠陥の無い比較的良好な接合部が得られる条件については、図中黒塗で示した。写真－2には、13KA　2cycle　180kgfで溶接した試料の金相写真を示す。

1.1.4 信頼性試験

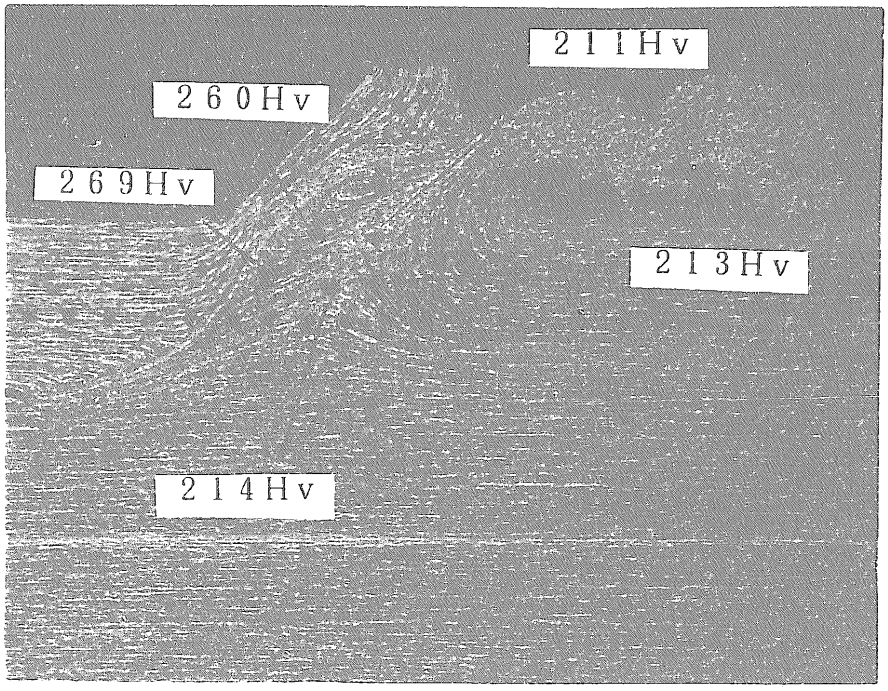
良好な接合が得られる条件の中で、加圧力が低い場合（13KA　180kgf）において、溶接の再現性にバラツキが生じた。この原因としては、加圧力が低い場合は、接触抵抗が増加する、溶接ヘッドの追従性が悪くなる等の原因が考えられる。13KA　180kgfと13KA　240kgfの溶接時のチャートを図－5に示す。両者を比較してみると、接触抵抗（電圧）は、180kgfの方が大きく、溶接ヘッドの加速度は、差が無いことが分かる。



図－3　硬さ測定結果（13KA－2cycle－180kgf）



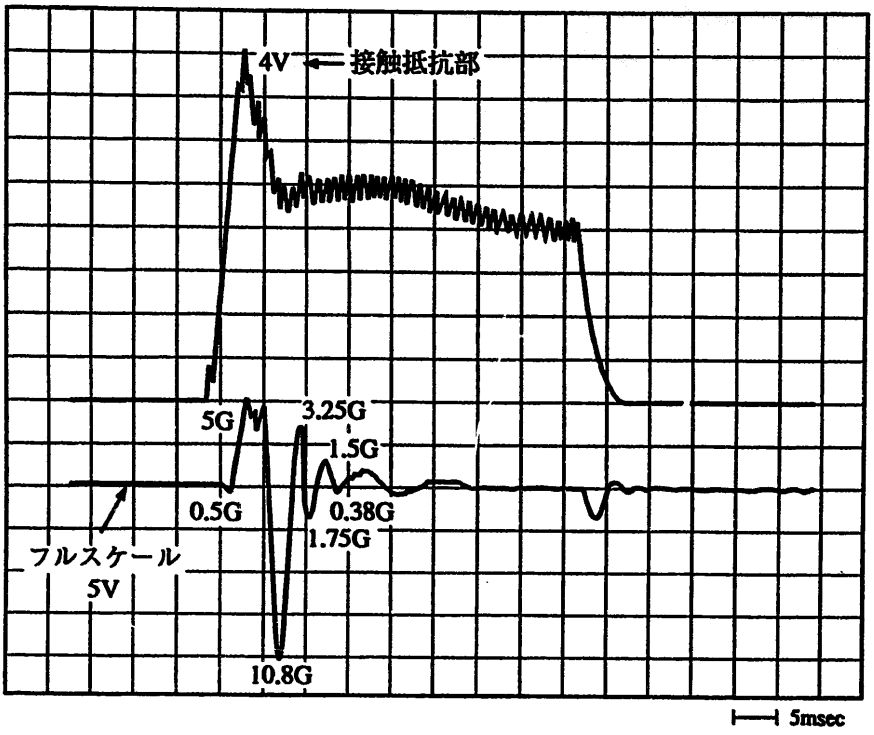
図－4　溶接可能範囲選定試験結果



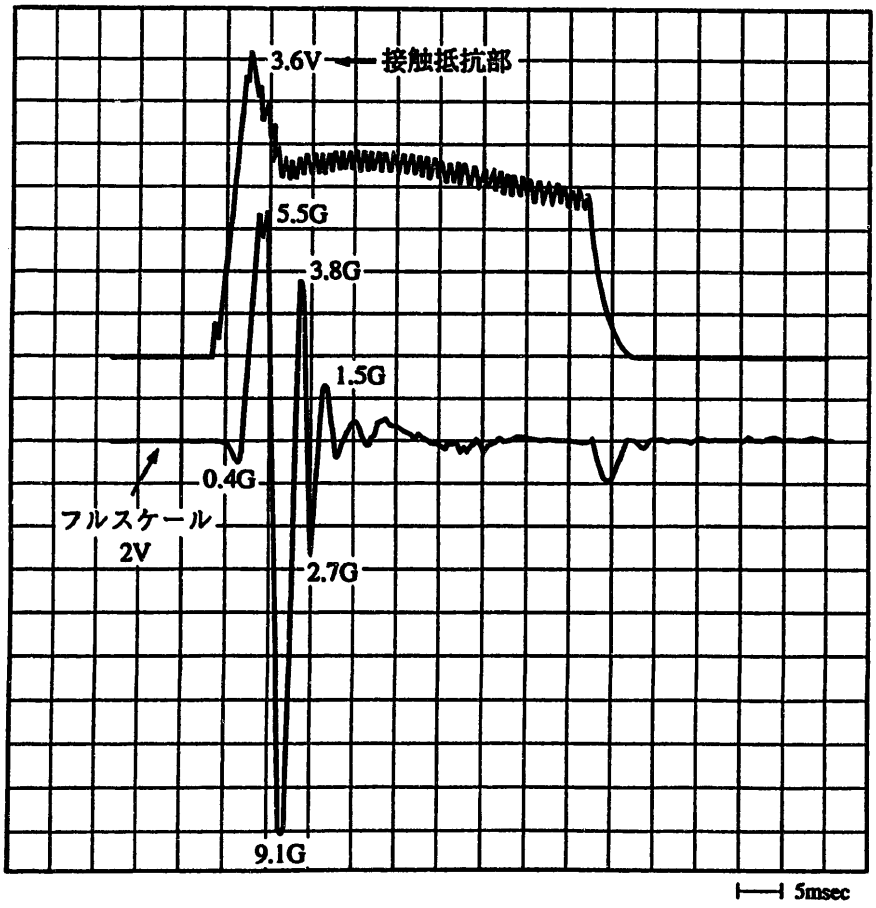
写真－1　溶接部の硬さ分布（13KA－2cycle－240kgf）



写真－2　断面金相写真（13KA－2cycle－180kgf）



(a) 13KA－2cycle－180kgf



(b) 13KA－2cycle－240kgf

図－5 溶接時のチャート（13KA－180、240kgf）

1.2 主に体積抵抗を利用した場合の溶接試験（2段溶接）

1段溶接において、接触抵抗の影響によると思われる、溶接再現性にバラツキが生じた。そこで、再現性を確保するため、はじめ低い電流を流し（予熱）、接触抵抗を小さくしてから（図－2の第2段階）、溶接電流を流す2段溶接を採用して試験を行った。

1.2.1 溶接パラメータ

表－4に溶接パラメータの範囲を示す。

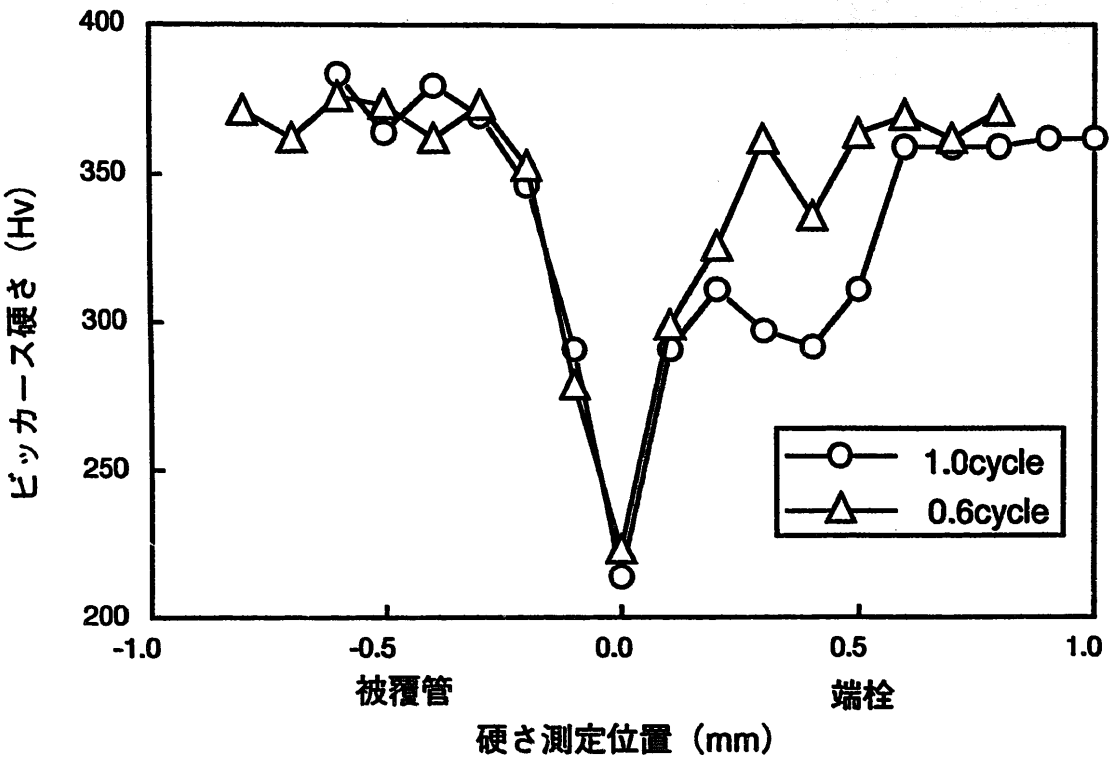
表－4 溶接パラメータの範囲（2段溶接）

溶接パラメータ	範　　囲
予熱電流（KA）	5、7、9
予熱時間（cycle）	0.5、1.0、2.0
溶接電流（KA）	12、13、14、14.5
溶接時間（cycle）	0.6～2.0
加圧力　（kgf）	200、300、400、500、600

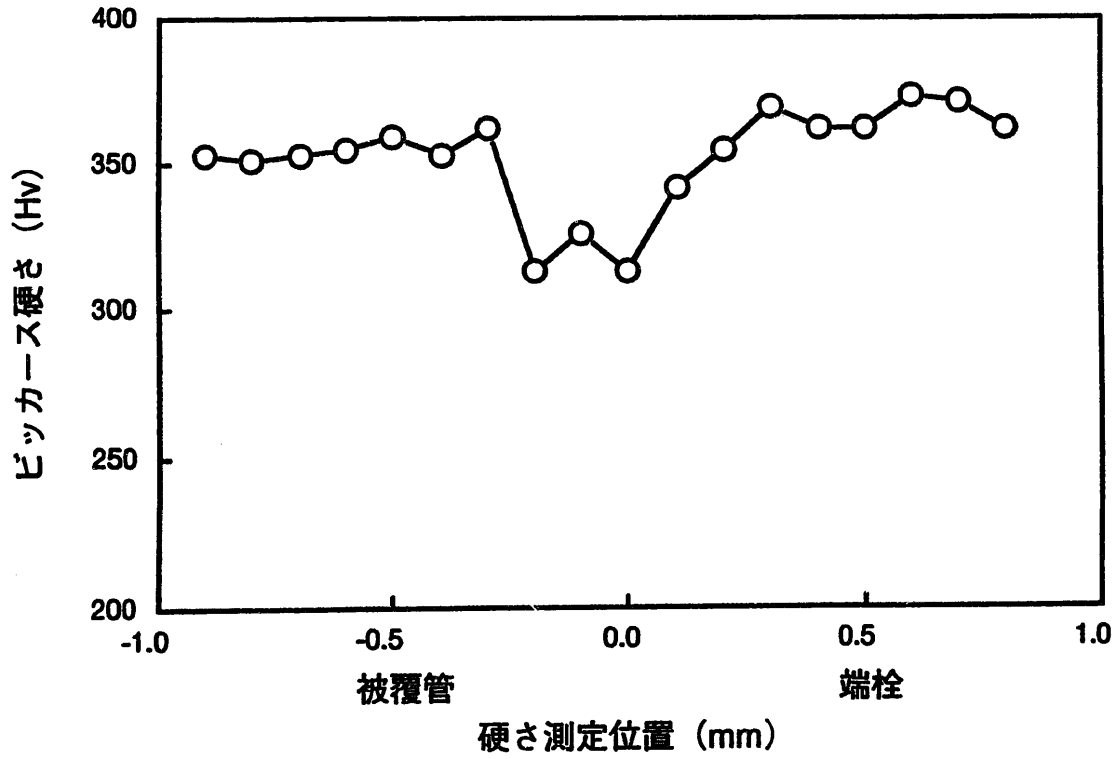
溶接電流を13KA　1cycle　180kgf一定とし予熱の影響を金相試験で観察した結果、予熱電流が低すぎると接合部より離れた端栓部よりバリが生じてしまい、予熱電流が高すぎると溶接が2段になってしまうことから、最適な予熱電流は、7KA　2cycleとした。

1.2.2 硬さ測定試験

溶接電流、溶接時間、加圧力を変え、硬さの変化を見た。その時の硬さ測定結果を図－6、7に示す。溶接電流13KA　1.0cycle　180kgfよりも13KA　0.6cycle　180kgfの方が、熱影響部の幅は小さくなり、さらに13KA　0.6cycle　600kgfの場合は、硬さ低下が非常に小さくなることが分かった。



図－6　硬さ測定結果（7KA-2cycle+13KA-0.6および1.0cycle　180kgf）



図－7　硬さ測定結果（7KA-2cycle+13KA-0.6cycle,600kgf）

1.2.3 金相試験

(1) 溶接電流と接合状態

溶接電流を12KAから1KAずつ上げてゆき、接合状態を観察した。その結果を表－5に示す。

表－5 溶接電流と接合状態（2段溶接）

溶接条件		接合状態
7KA－2cycle+12KA－1.0cycle	180kgf	一部未接合
7KA－2cycle+13KA－1.0cycle	180kgf	未接合無
7KA－2cycle+14KA－1.0cycle	180kgf	未接合無
7KA－2cycle+14.5KA－1.0cycle	180kgf	溶接不良

溶接電流が、14.5KAで溶接不良が生じ、金相の結果、13KAと14KAの場合が未接合部の無い良好な接合部が得られた。写真－3に7KA－2cycle+14KA－1.0cycle 180kgfで溶接した試料の断面金相写真を示す。

(2) 溶接時間と接合状態

溶接時間を0.6～2.0cycleまで0.1cycleごとに変化させ金相状態を確認した（ここで予熱電流は7KA 2cycle、溶接電流は14KA、加圧力は180kgf一定とした）。

その結果、1.0cycleを超えると、接合部より離れた端栓部が変形し、接合部の幅が現象広くなってしまうため好ましい接合状態ではない。よって、このような現象が生じない、0.6～0.9cycleの溶接時間が適当であると判断される。

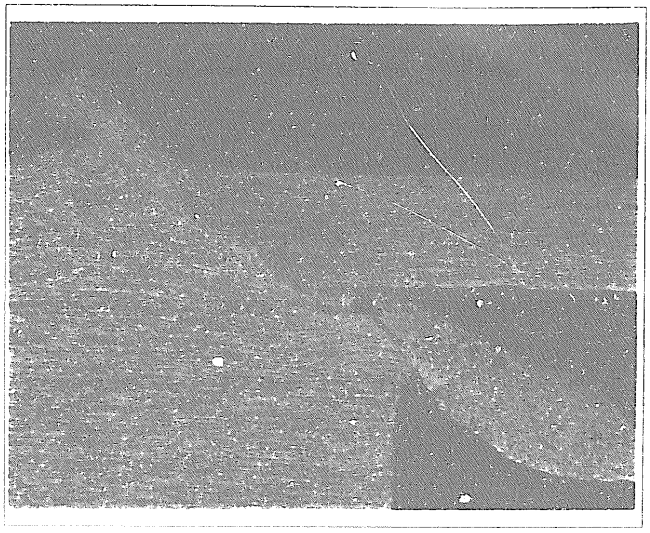
写真－4には、7KA－2cycle+14KA－0.8cycle 180kgfで溶接した試料の断面金相写真を示す。

(3) 加圧力と接合状態

加圧力を200～600kgfまで200kgfごとに変化させ金相状態を確認した（ここで予熱電流は7KA 2cycle、溶接電流は14KA 0.8cycle一定とした）。

その結果、全ての条件において未接合部の無い良好な接合部が得られた。また、加圧力の増加にともない端栓部のバリは厚くなることが確認された。

写真－5に、7KA－2cycle+14KA－0.8cycle 600kgfで溶接した試料の断面金相写真を示す。



写真－3　断面金相写真
（7KA－2cycle+14KA－1.0cycle　180kgf）



写真－4　断面金相写真
（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）



写真－5　断面金相写真
（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）

1.2.4 溶接パラメータと溶接波形

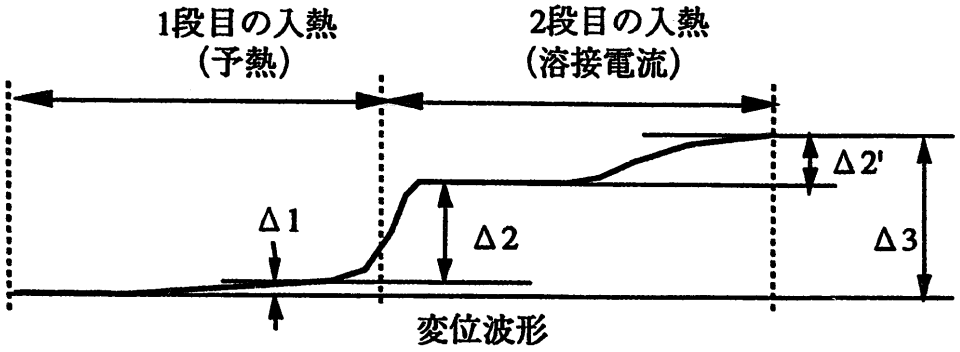
(1) 変位量

図－8に各溶接段階の変位量の変化について示す。

溶接電流を流した際、Δ2'が生じるのは、一度接合が完了した後、再び被覆管および端栓がザクツしていることを示し、接合が2度起こっていることになり、好ましい状態ではない。

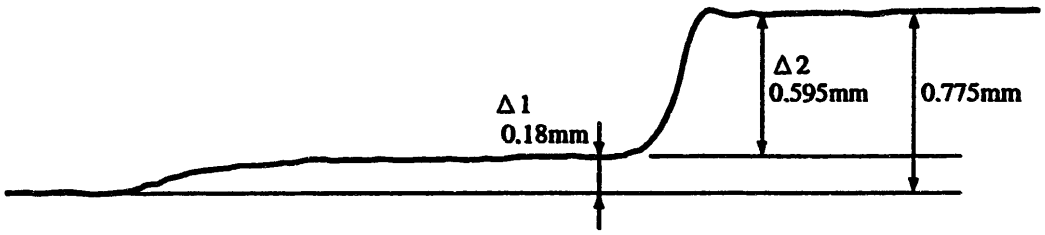
加圧力の大小にかかわらず、溶接時間が1.0cycle以上でΔ2'が生じるため、1.0cycle未満が好ましい。

図－9に1.0cycleと1.5cycleの場合の変位波形を示す。

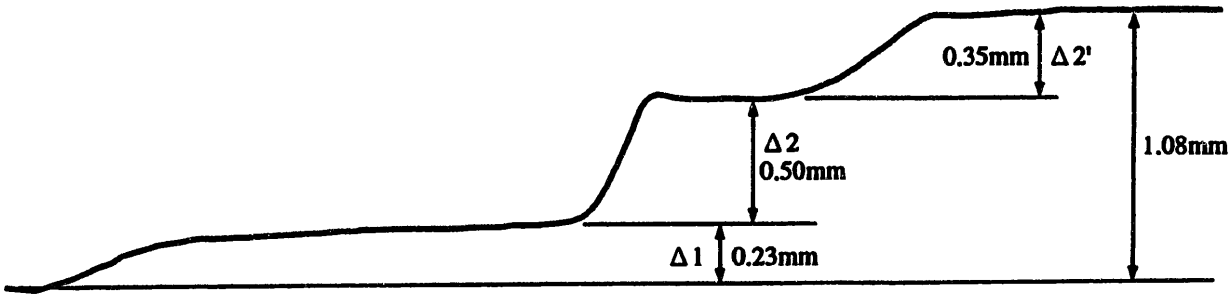


Δ1　1段目の入熱時の変位量
Δ2　2段目の入熱時の初めての変位量
Δ2'　2段目の入熱時の2回目の変位量
Δ3　全変位量

図－8　変位量の測定部



(a) 7KA－2cycle+14KA－1.0cycle　180kgf



(b) 7KA－2cycle+14KA－1.5cycle　180kgf

図－9　溶接時間と変位波形

(2) 溶接ヘッドの加速度

7KA−2cycle+14KA−0.6cycle　180kgfと600kgfの場合の溶接ヘッドの加速度を図−10に示す。600kgfの場合は180kgfの場合にくらべ、溶接ヘッドの加速度が小さい。

加圧力が大きい場合は、被覆管への端栓の押しつけ力が強いため、接触抵抗が低くなり、接合部の昇温が遅く、また、低い温度でも被覆管と端栓のザクツが進行するためこのような結果となったことが推測される。

(3) 電圧

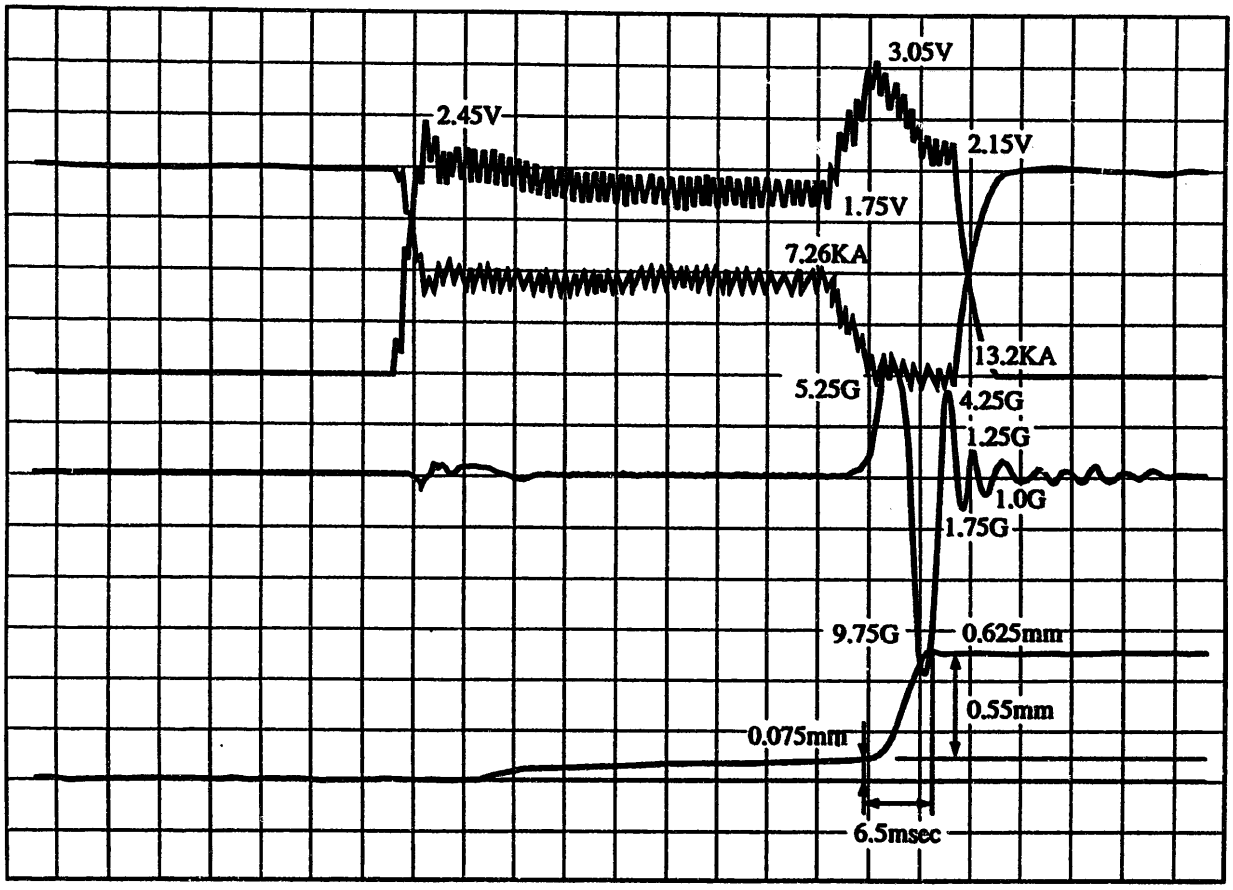
図−10において、溶接電流を流した時の電圧の値を見ると、ピーク値は、180kgfと600kgfの間に差はない。ただし、通電が終了する直前の値は、600kgfのほうが大きくなった。加圧力の高いほうが温度の上昇は低いので、電圧が高くなることは考えにくいため、このような結果が生じた原因については明らかにできなかった。

1.2.5 信頼性試験

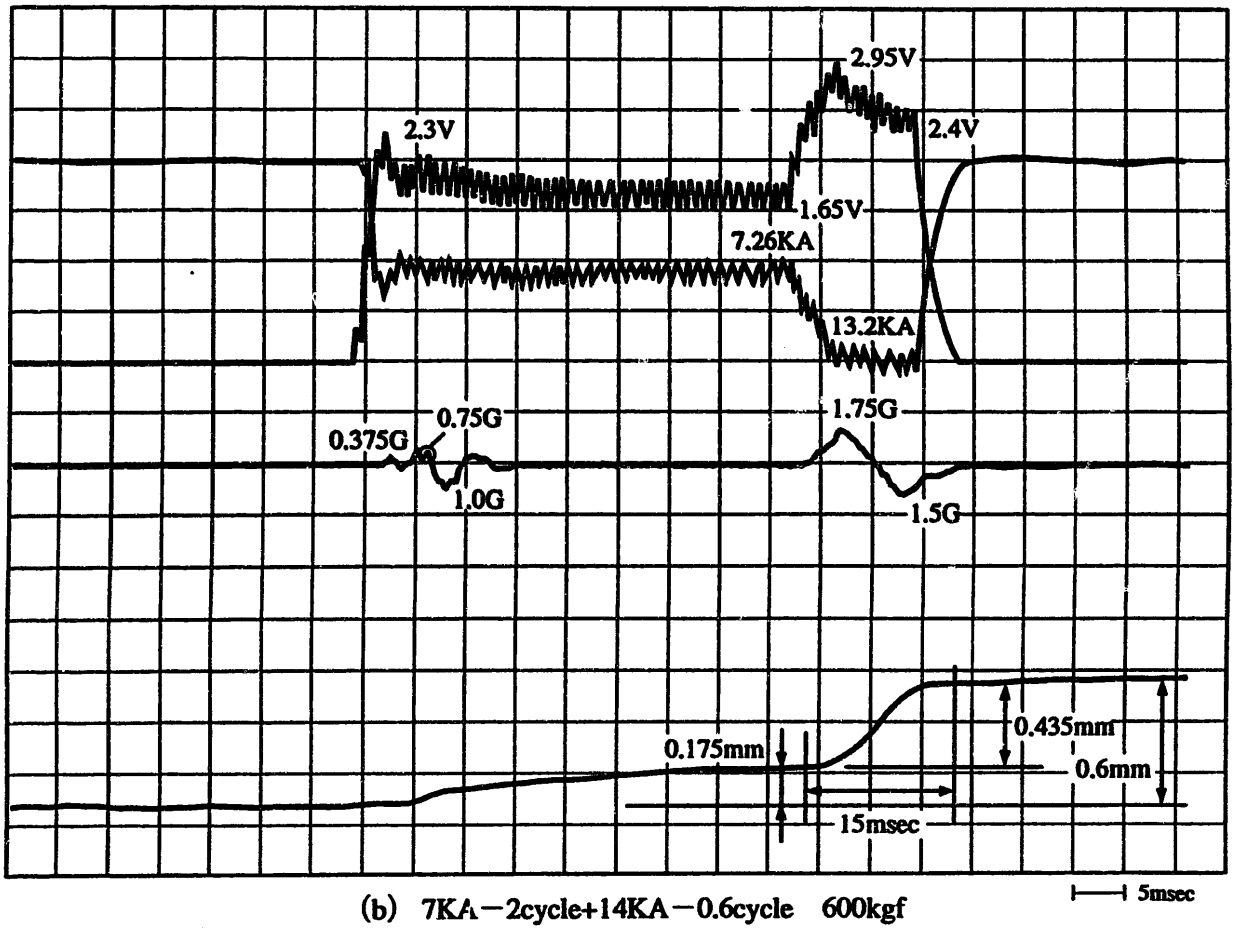
2段溶接において、溶接電流が14KA以下の場合は、180kgfの比較的低い加圧力で数本溶接しても、溶接不良は起こらなかった。

1段溶接と2段溶接を比較すると、1段入熱の方が接触抵抗が1V程度高くなっていることが分かる（図−5および図−10参照）。

1段溶接の場合、溶接の再現性が取れないのは、この接触抵抗が高いことによる接合部の急激な温度上昇が起因していると思われる。



(a) 7KA－2cycle+14KA－0.6cycle 180kgf



(b) 7KA－2cycle+14KA－0.6cycle 600kgf

図－10 溶接時のチャート
(7KA－2cycle+14KA－0.6cycle 180および600kgf)

1.2.6 機械的強度測定試験

これまで、金相試験および硬さ測定試験等により溶接条件選定試験を行い、良好と判断した条件の中で、(a) 7KA-2cycle+14KA-0.8cycle 180kgfと(b) 7KA-2cycle+14KA-0.8cycle 600kgfの2条件を用いて機械的強度測定試験(引張試験、単軸クリープ試験)を行った。

600kgfの条件は、最も接合部の強度が高いと思われる条件である。ただし、実機としての本装置の採用を考えた場合、被覆管のスリップが起こる可能性があるため、取り扱いの容易さでは、180kgfの加圧力が好ましいが、これは、最も強度は低いと思われる条件である。そこで、これらの2条件の機械的強度範囲を把握し、抵抗溶接法の妥当性を判断するため本試験を実施する。

なお、本試験に使用する材料は、端栓は、MA957、被覆管は、F21である。

(1) 引張試験

7KA-2cycle+14KA-0.8cycle 180kgfと7KA-2cycle+14KA-0.8cycle 600kgfで溶接した場合の引張試験結果を表－6、7および図－11～14に示す。

表－6 引張試験結果 (7KA-2cycle+14KA-0.8cycle 180kgf)

試料No	試験温度	外径寸法 (mm)		引張試験結果		
		最大値	最小値	引張強さ (kgf/㎟)	伸び (%)	破断位置
CA－01	常温	7.577	7.561	156.02	15.85	掴み部
CA－02	400℃	7.542	7.524	115.95	2.25	接合部
CA－03	500℃	7.561	7.544	109.54	－	接合部
CA－04	600℃	7.598	7.588	84.50	6.46	接合部
BP－02	650℃	7.595	7.573	63.67	0.63	接合部
CA－05	800℃	7.625	7.611	32.28	1.40	接合部

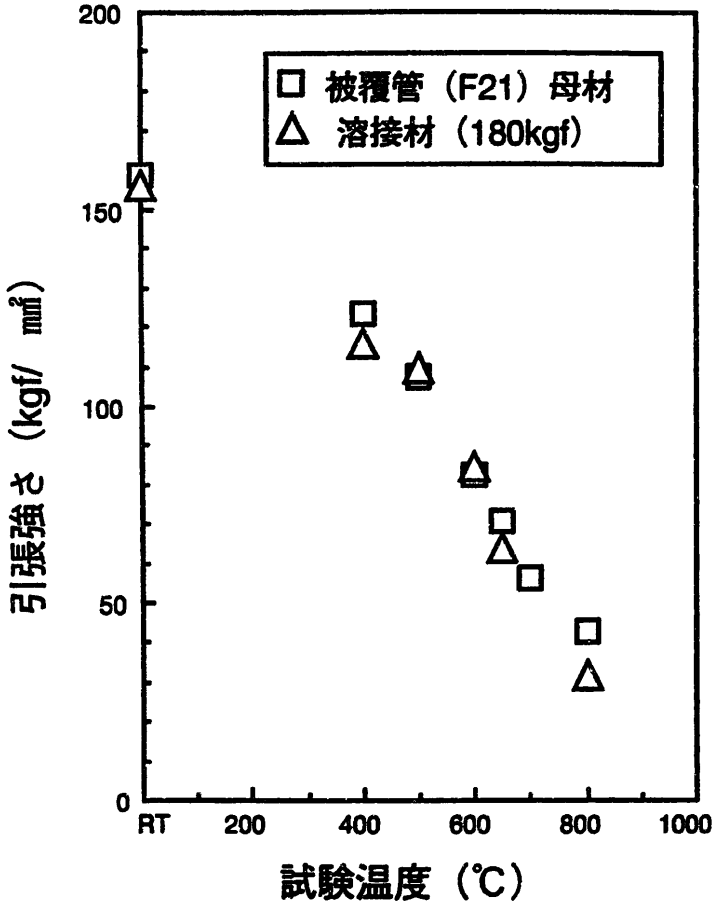
表－7 引張試験結果 (7KA-2cycle+14KA-0.8cycle 600kgf)

試料No	試験温度	外径寸法 (mm)		引張試験結果		
		最大値	最小値	引張強さ (kgf/㎟)	伸び (%)	破断位置
CC－01	常温	7.524	7.494	149.26	9.865	被覆管
CC－02	400℃	7.570	7.539	125.53	9.845	被覆管
CC－03	500℃	7.593	7.583	108.21	12.690	被覆管
CC－04	600℃	7.570	7.534	83.02	14.370	被覆管
BP－01	650℃	7.582	7.566	70.27	8.405	被覆管
CC－05	800℃	7.557	7.535	40.50	2.860	接合部

試験の結果、加圧力180kgfの場合は全て接合部、600kgfの場合は被覆管部破断（800℃のみ接合部破断）となった。180kgfと600kgfの引張強さを比べた場合、常温においての差は無いが、650～800℃では600kgfの方が強いことが分かる。ただし、接合部破断となった場合でも引張強さは、被覆管母材並[3]であった。

180kgfの場合接合部からの破断となるのは、接合部の硬さ低下が大きいためと考えられる。

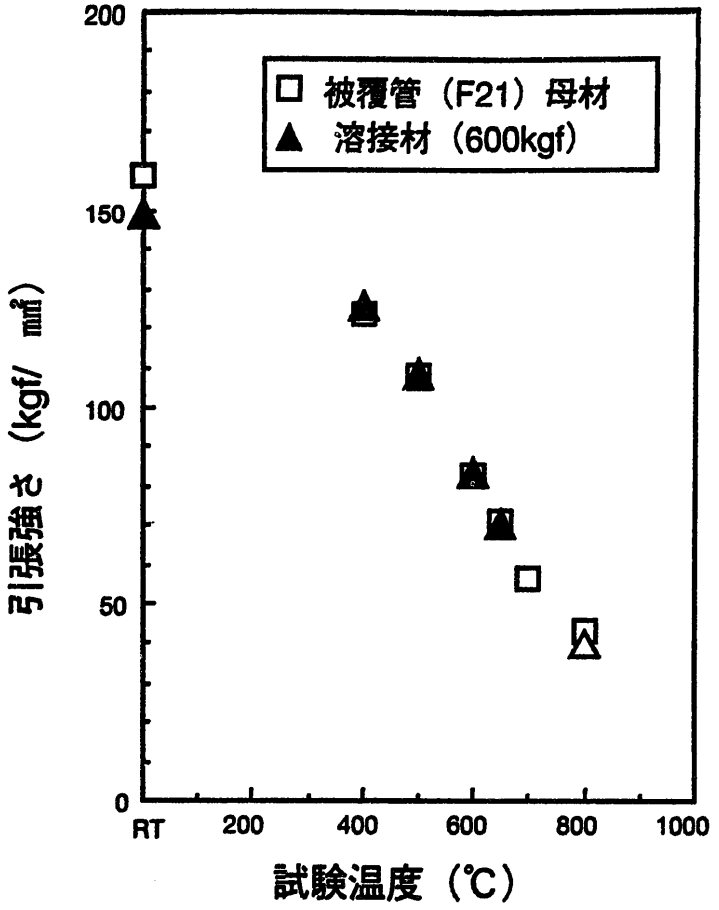
伸びについては、180kgfの場合は接合部破断となったため、被覆管母材よりも低い値を示し、600kgfの被覆管部破断の場合は、ほぼ母材と同等の伸びを示した。



図－11　引張試験結果－引張強さ

(7KA-2cycle+14KA-0.8cycle　180kgf)

＊溶接材の破断位置は全て接合部



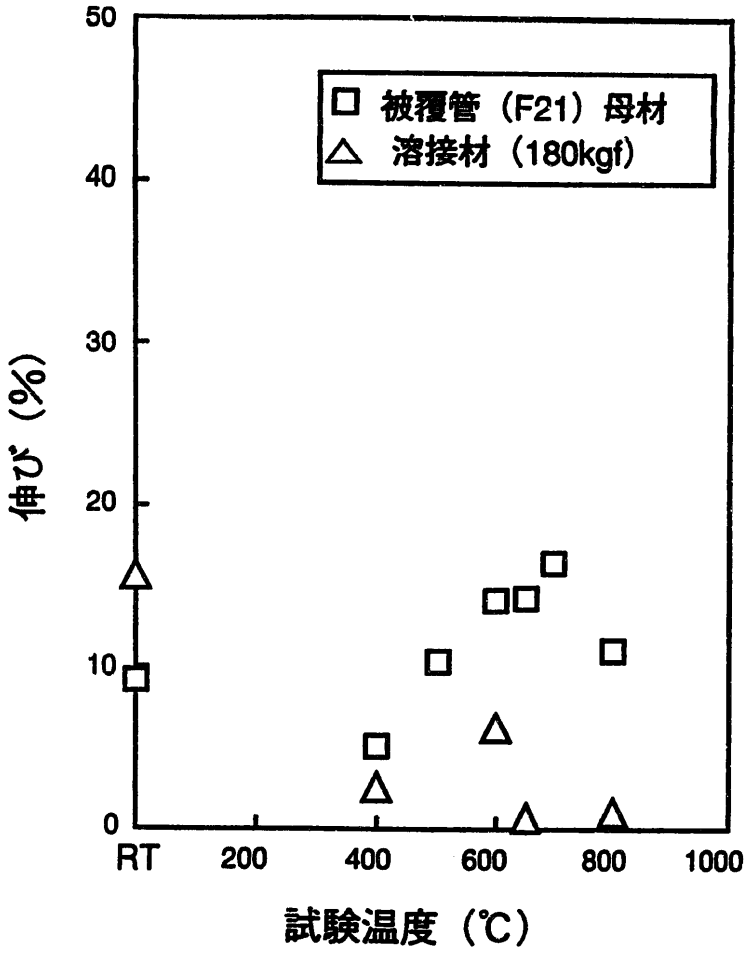
図－12　引張試験結果－引張強さ

(7KA-2cycle+14KA-0.8cycle　600kgf)

＊溶接材の破断位置

▲被覆管母材部破断

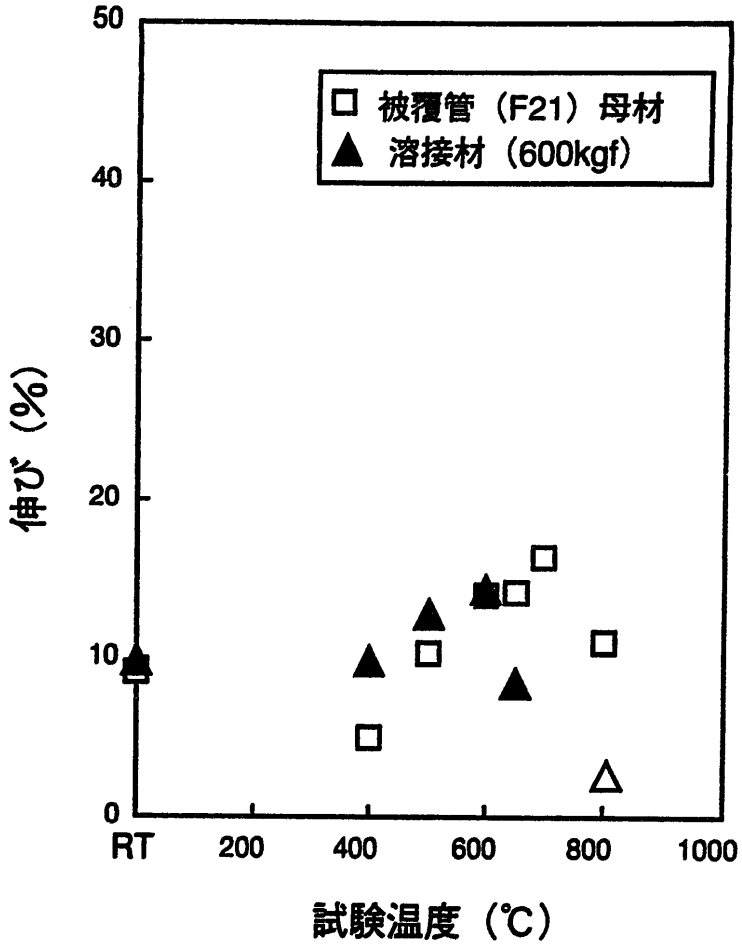
△接合部破断



図－13　引張試験結果－伸び

(7KA-2cycle+14KA-0.8cycle　180kgf)

＊溶接材の破断位置は全て接合部



図－14　引張試験結果－伸び

(7KA-2cycle+14KA-0.8cycle　600kgf)

＊溶接材の破断位置

▲被覆管母材部破断

△接合部破断

(2) 単軸クリープ試験

7KA-2cycle+14KA-0.8cycle 180kgfおよび600kgfで溶接した場合の単軸クリープ試験結果を表－8、9および図－15に示す。

表－8 単軸クリープ試験結果（7KA-2cycle+14KA-0.8cycle 180kgf）

試料No	目標破断時間（h）	付加応力（kgf/㎟）	外径寸法（mm）		単軸クリープ試験結果	
			最大値	最小値	破断時間（h）	破断位置
CB－01	100	42	7.522	7.493	0.2	接合部
CB－02	300	30	7.602	7.585	4.0	接合部
CB－03	1000	26	7.628	7.614	8.4	接合部
CB－04	3000	10	7.601	7.581	2100以上	未破断

表－9 単軸クリープ試験結果（7KA-2cycle+14KA-0.8cycle 600kgf）

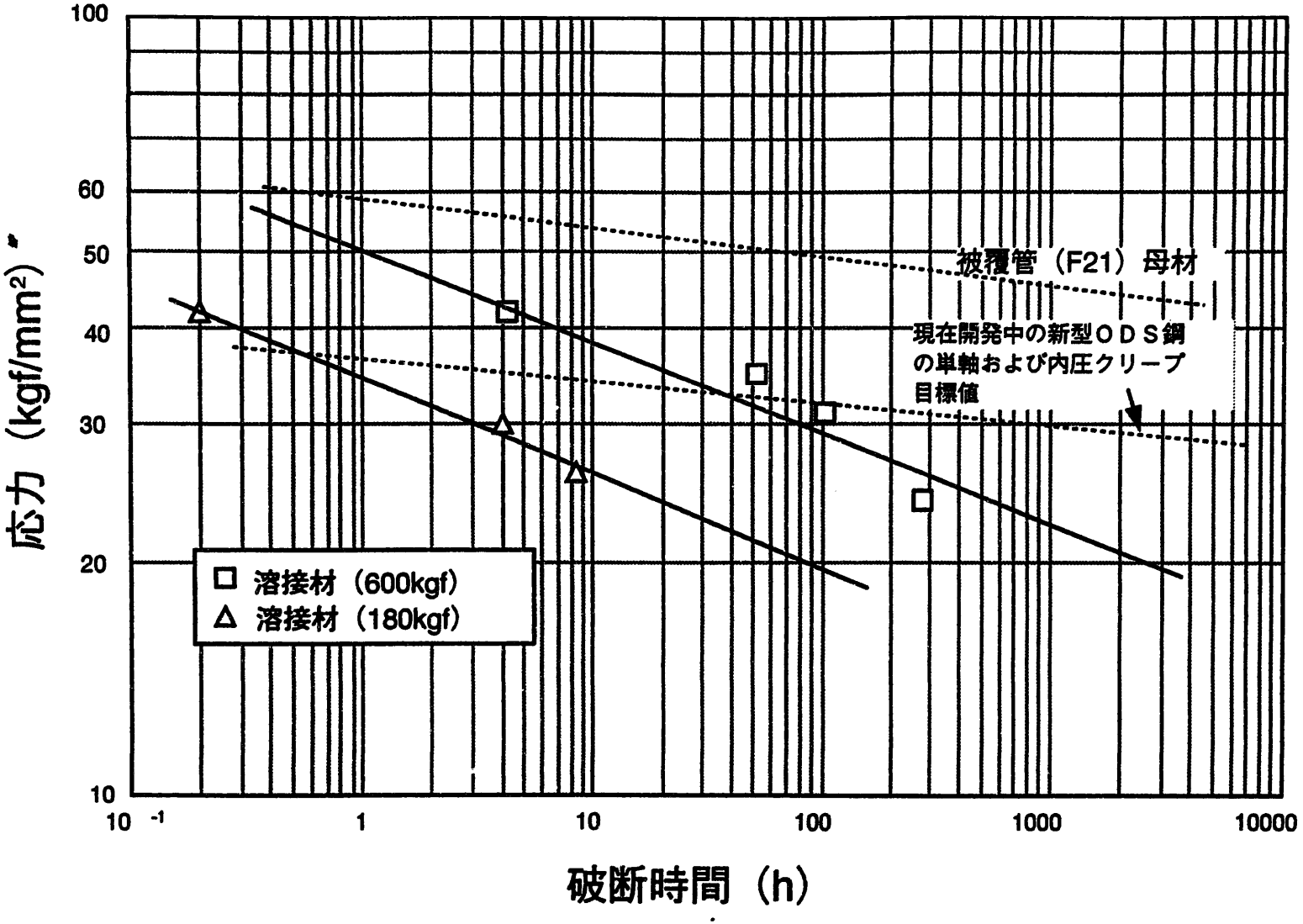
試料No	目標破断時間（h）	付加応力（kgf/㎟）	外径寸法（mm）		単軸クリープ試験結果	
			最大値	最小値	破断時間（h）	破断位置
CD－01	100	42	7.556	7.547	4.2	接合部
CD－02	300	35	7.586	7.569	52.4	接合部
CD－03	1000	31	7.557	7.537	103.7	接合部
CD－04	3000	24	7.517	7.495	276.4	接合部

引張試験で被覆管母材部からの破断となった600kgfの場合も、単軸クリープ試験では接合部破断となって被覆管母材の強度[4]を下回り、長時間側になるほど強度低下が大きくなった。

この原因としては、抵抗溶接の場合、接合部の組織が外側を向くため、長時間高温にさらされると、その部分が粒界滑りを起こし、接合部から破断してしまうこと。また、溶接時に耐熱元素の凝集が生じ、この部分も、高温で長時間応力をかけると、脆くなってしまうことが考えられる。

今回試験に用いたF21被覆管材は、強度異方性が大きく、軸方向の強度が非常に強いため、現在、強度異方性を改善し、10000時間で22kgf/mm² 以上の単軸・内圧クリープ強度を持つ新型のＯＤＳ鋼の開発を行っている（図－15参照）。図－15において、今回のF21接合部（600kgf）と新材料の目標とされる単軸クリープ強度[6]を比較してみると、100時間を超えたところから、F21接合部（600kgf）の強度が低くなってしまうことが分かる。

ただし、新材料はF21とくらべ化学成分、組織、酸化物粒子の分布等、母材の諸性質が変わってくるため、今回の結果から、新材料を溶接した場合、接合部が母材以上になるかどうかは、実際試験を行わなければ判断できない。



図－15　単軸クリープ試験結果

2. 接合部の微視的観察

高温引張試験および単軸クリープ試験において、溶接材は接合部より破断し、接合部の強度低下が起こった。

そこで、強度低下の一因と考えられる、耐熱元素の挙動について、詳細な観察を行いその原因について検討するため、抽出レプリカおよび薄膜試料によるTEM観察を実施した。

2.1 TEM観察の概要

2.1.1 抽出レプリカ観察

抽出レプリカとは、母材のベースとなる成分を溶融させて取り除き、酸化物等の析出物のみを残した試料である。ここでは、接合部より採取した抽出レプリカをTEM観察し、析出物の同定を行うとともに、母材との比較により析出物の凝集、粗大化の有無を観察した。

2.1.2 薄膜試料観察

薄膜試料のTEM観察においては、溶接による組織の再結晶の有無、転位の変化を確認した。

2.2 観察試料の溶接条件

TEM観察で用いた試料の溶接条件を表－10に示す。

表－10 TEM観察試料の溶接条件

試料No	溶接条件
条件（1）	7KA－2cycle+14KA－0.8cycle 180kgf
条件（2）	7KA－2cycle+14KA－0.8cycle 250kgf
条件（3）	7KA－2cycle+14KA－0.8cycle 600kgf

2.3 TEM観察結果

2.3.1 抽出レプリカ観察

母材部の析出物を確認したところ、MA957端栓およびF21被覆管の比較的大きな析出物は、TiO_2と同定され、100,000倍で観察されるような極めて小さな物は、Y_2TiO_5と同定された。

次に接合部の抽出レプリカTEM明視野像および析出物の同定結果を写真－6～11に示す。

抽出レプリカのTEM観察により、いずれの条件でも接合部に析出物の粗大化や凝集領域が観察された。凝集領域の幅は、加圧力の大きいものほど小さかった。

加圧力180kgfの場合は、凝集領域の幅は大きく酸化物の形態は、木の葉状で、これは、Y_2TiO_5であると同定された。加圧力250kgfの場合は、凝集領域の幅は180kgfより小さく酸化物の形態は、木の葉状で、Y_2TiO_5であると同定された。加圧力600kgfの場合は、析出物の凝集領域の幅は非常に小さく球状の物が線上に並んでおり、これは、Al_2TiO_5と同定された。

この凝集、粗大化の見られる領域は、接合時に溶融、または、溶融に近い状態にあったのではないかと推定される。

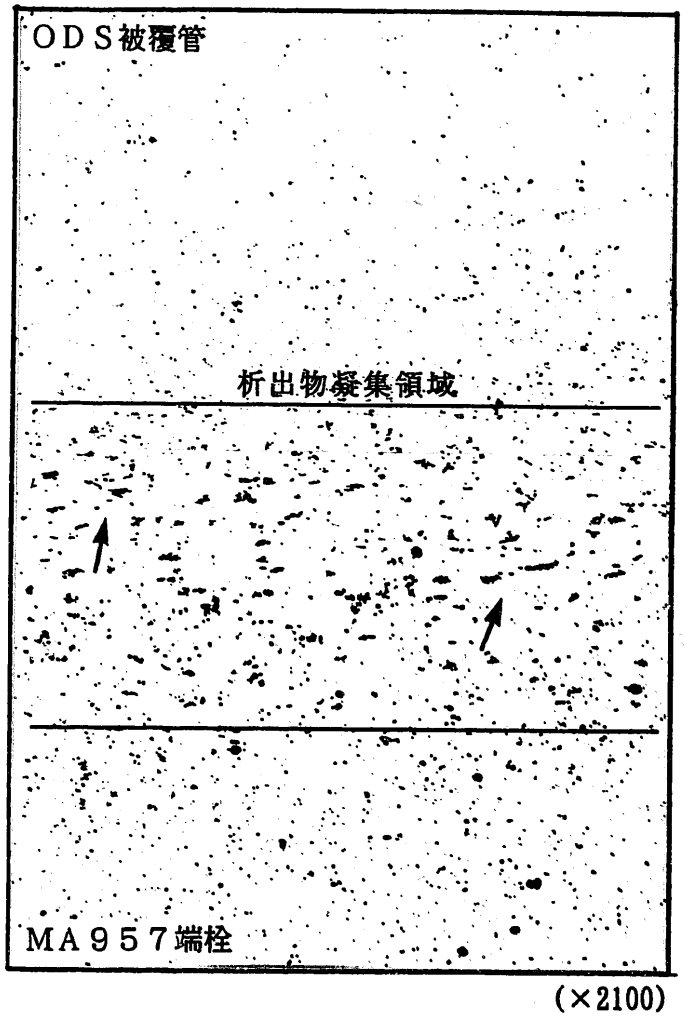
加圧力が大きい場合は、凝集、粗大化領域は非常に小さく線上であり、しかもAl_2TiO_5酸化物は見られるが、Y_2TiO_5の凝集は見られない。

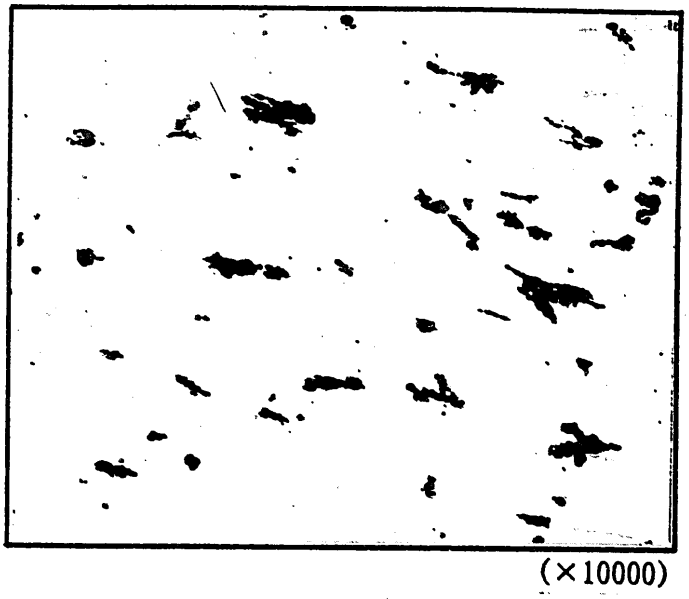
このような現象が見られるのは、1）加圧力の大きい程、粗大化、凝集領域を外に押し出してしまうこと、2）接合部の押しつけ力が高いため、接触抵抗が低く温度上昇が低いこと、3）加圧力が低い場合にくらべ低温で接合部の塑性変形が起こるため、接合部の組織変化が少ない等のことが考えられる。

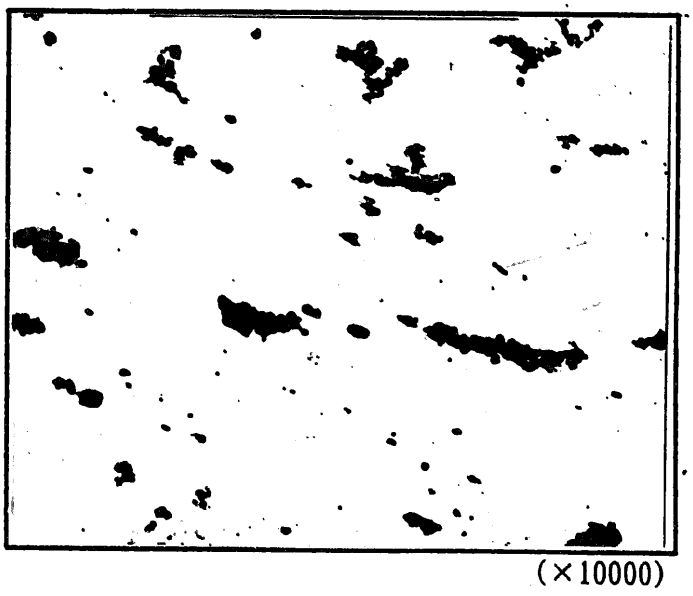
今回は、強度異方性が大きく、軸方向の強度が非常に強い材料を用いたので、接合部の結合状態を良くし、軸方向の強度を向上させるのに、高電流で溶接を行ったため、接合部の温度が融点付近まで上昇し、分散材の凝集が生じたと思われる。

今後は、強度異方性が改善された材料が開発されるため、この材料を用いて、低電流での溶接を行う等、溶融相を生じさせず、分散材の凝集を無くすような溶接条件のさらなる検討を行う必要がある。

また、加圧力が、高くなれば析出物の形態、および凝集の幅が変わってくるが、これ以上加圧力を上げると、実機としての溶接を考えた場合、被覆管のスリップが起こるためさける必要がある。



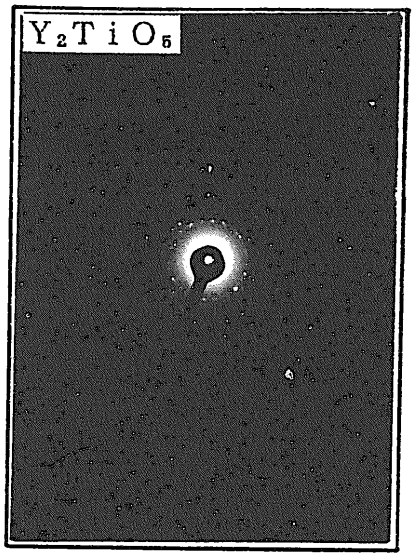




写真－6　接合部の抽出レプリカTEM明視野像
(7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf)

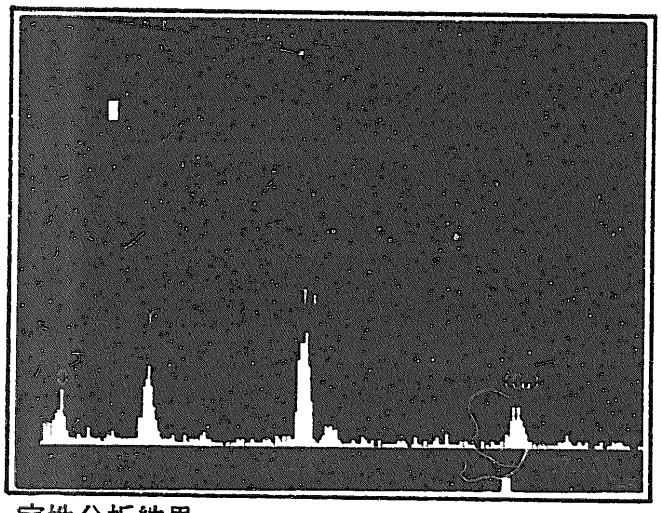


明視野像（×21000）



電子線回折パターン

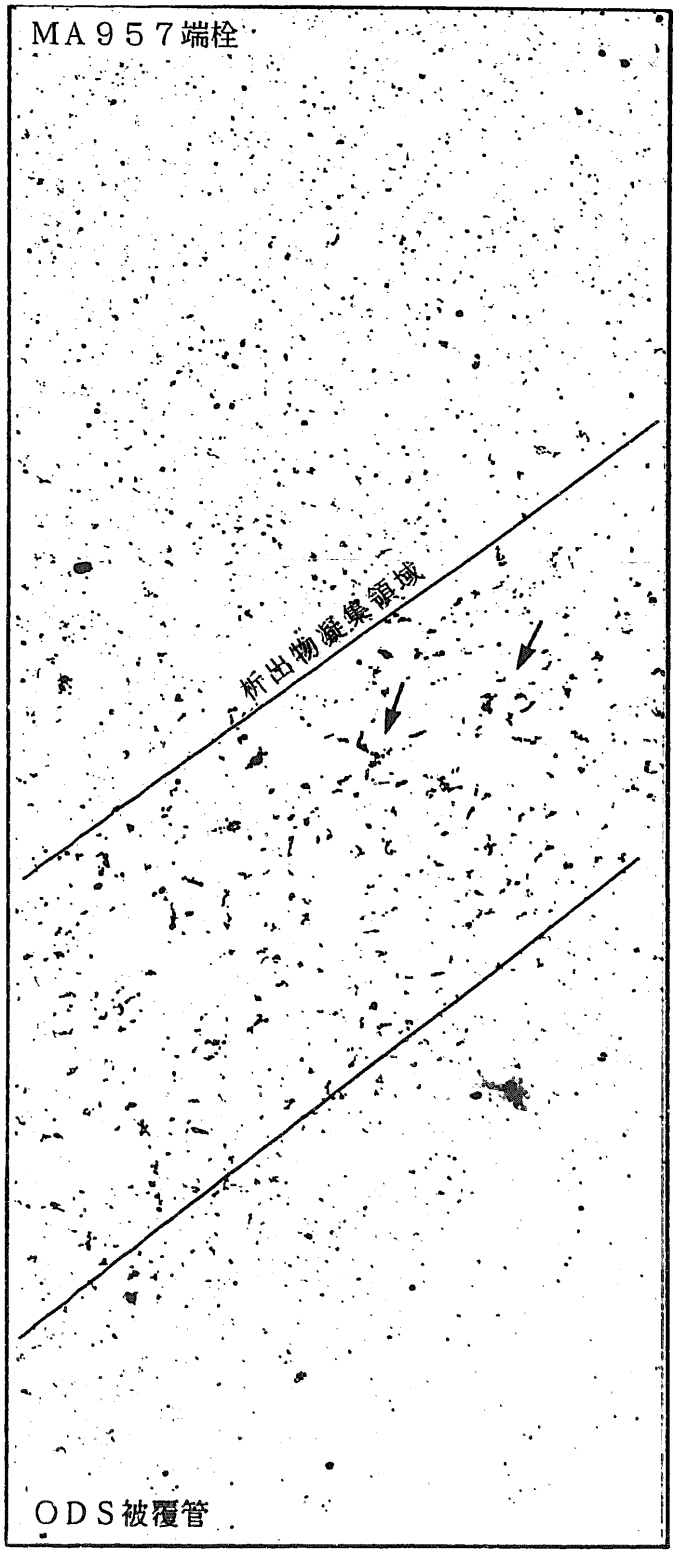
PNC TN8410 96-037



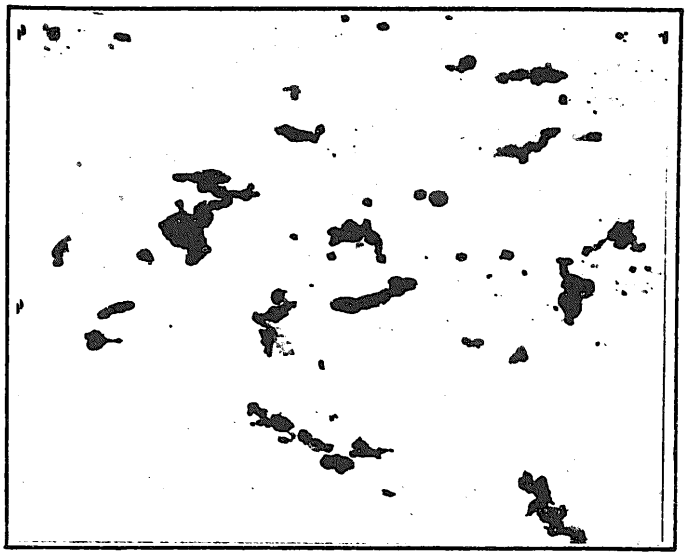
定性分析結果

写真－7　接合部の析出物同定結果

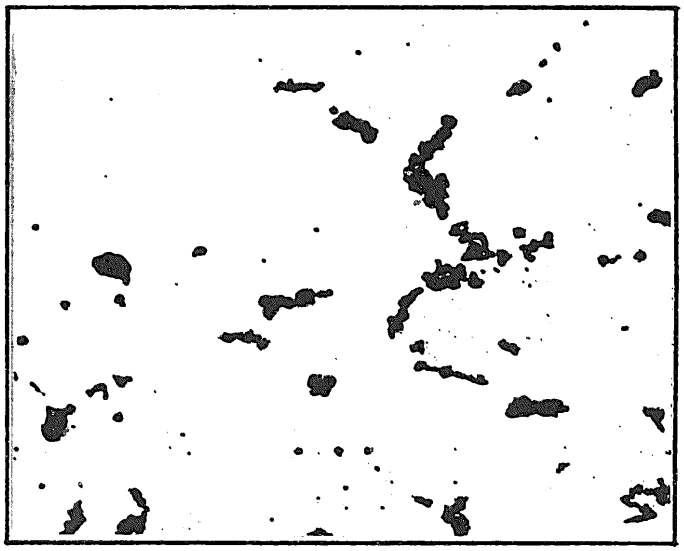
（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）



(×2100)



(×10000)



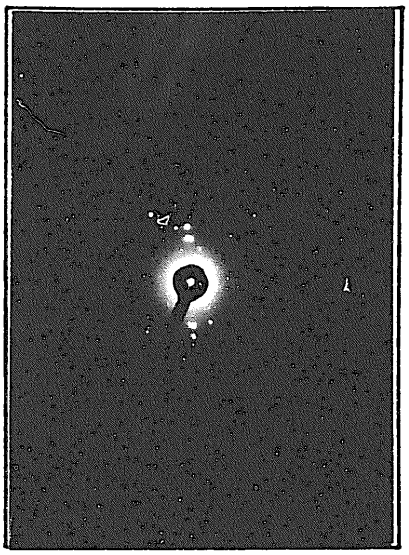
(×10000)

写真－8　接合部の抽出レプリカTEM明視野像

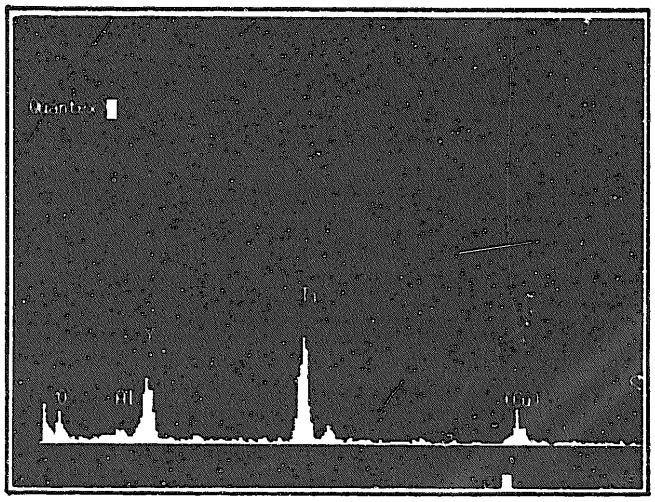
(7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　250kgf)



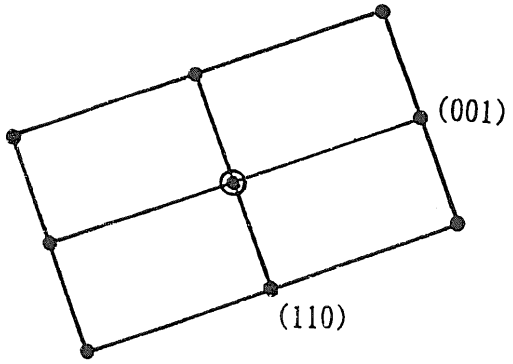
明視野像（×21000）



電子線回折パターン



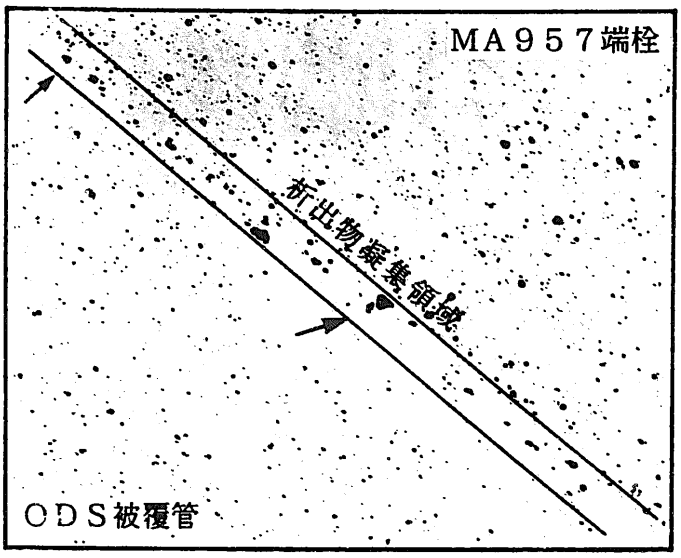
定性分析結果



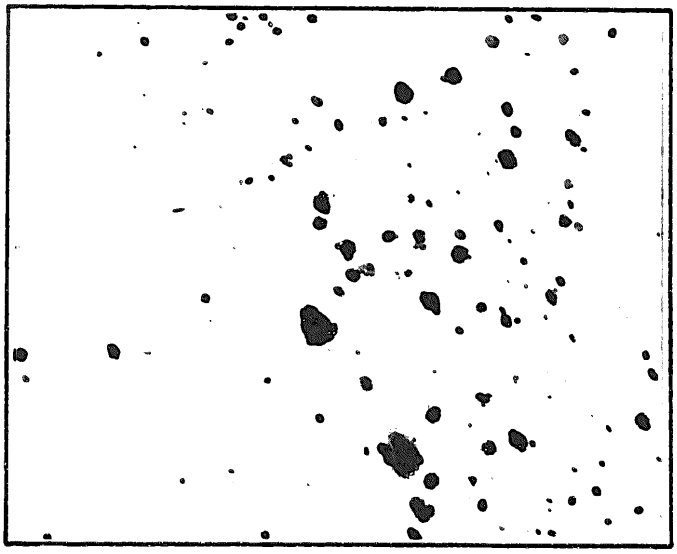
Y_2TiO_5

写真－9　接合部の析出物同定結果

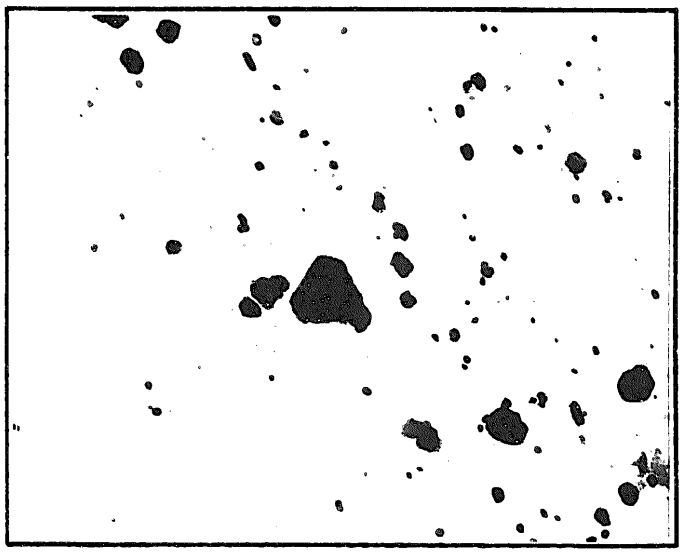
（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　250kgf）



(×2100)



(×10000)



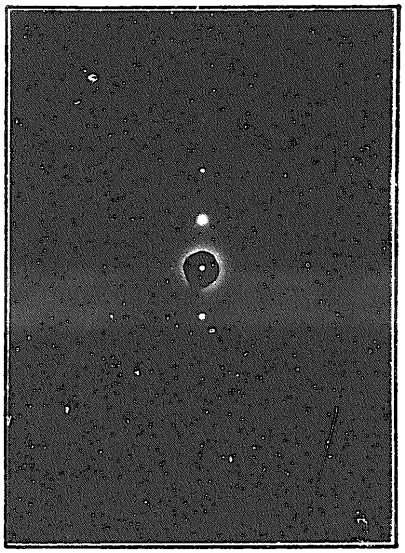
(×10000)

写真－10　接合部の抽出レプリカTEM明視野像

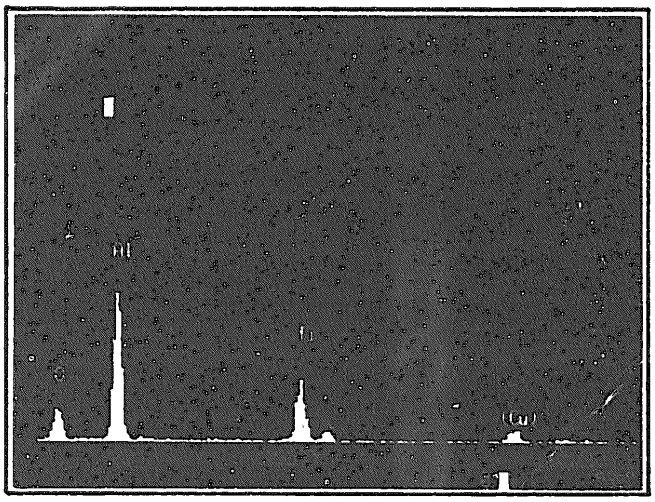
(7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf)



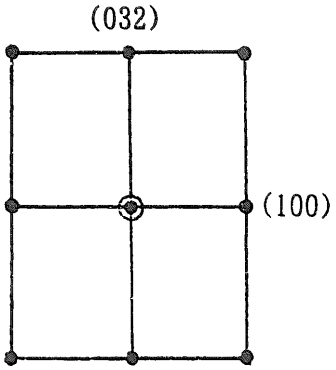
明視野像（×21000）



電子線回折パターン



定性分析結果



Al_2TiO_5

写真－11　接合部の析出物同定結果

（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）

2.3.2 薄膜試料の観察

被覆管および端栓母材部の薄膜TEM観察結果を写真－12、13に、溶接試料接合部の薄膜TEM観察結果を写真－14から16に示す。

また、溶接試料接合部の平均結晶粒径を表－11に示す。

表－11 溶接試料接合部の平均結晶粒径

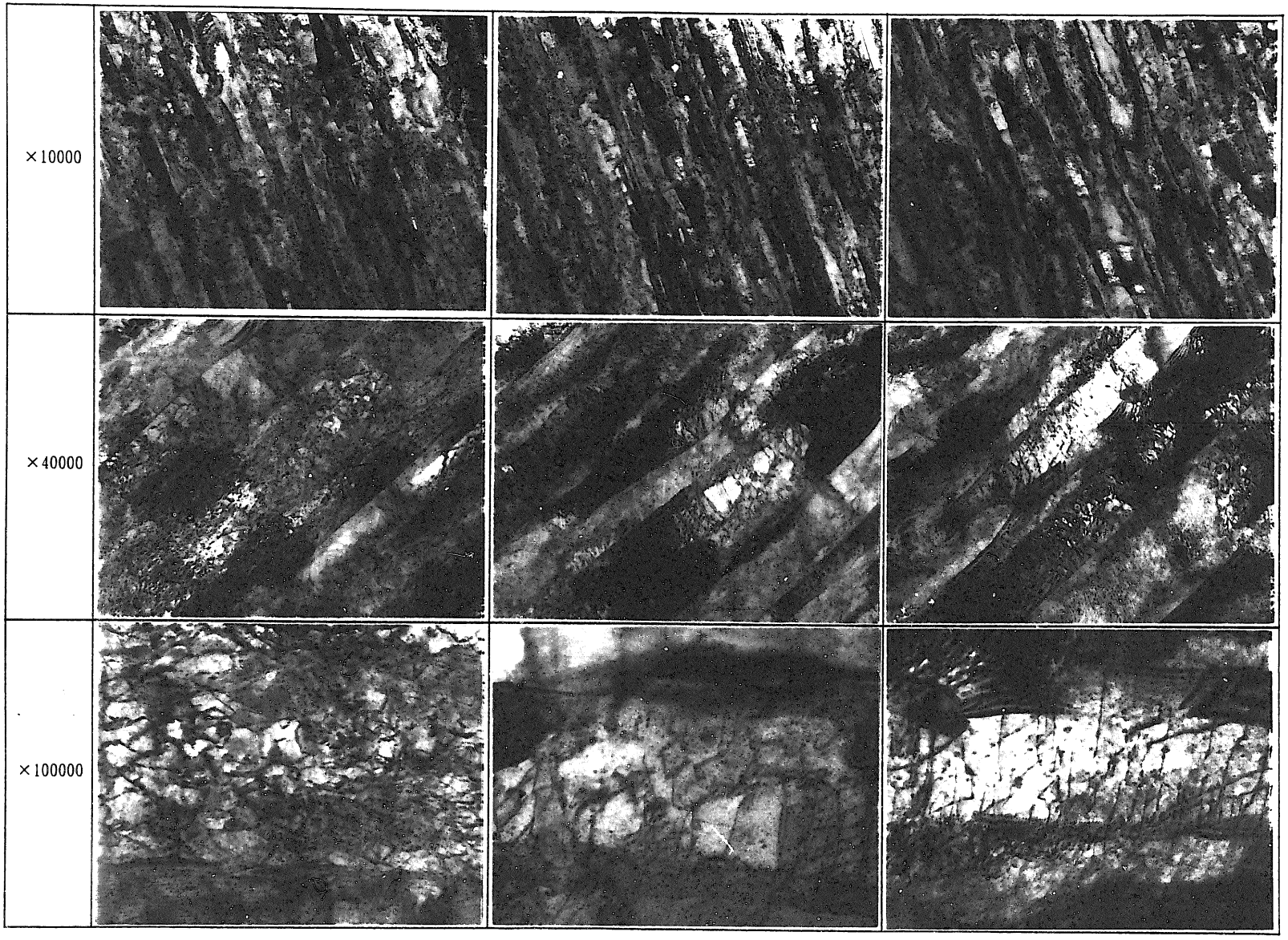
溶接条件	平均結晶粒径（μm）
7KA－2cycle+14KA－0.8cycle 180kgf	0.35
7KA－2cycle+14KA－0.8cycle 250kgf	0.53
7KA－2cycle+14KA－0.8cycle 600kgf	0.66

母材部の組織は、被覆管および端栓とも一方向に伸びたラス状の組織であるのに対し、接合部ではいずれの条件でも等軸状の再結晶組織になっていた。再結晶粒の大きさは加圧力が大きくなるに従って大きくなった。

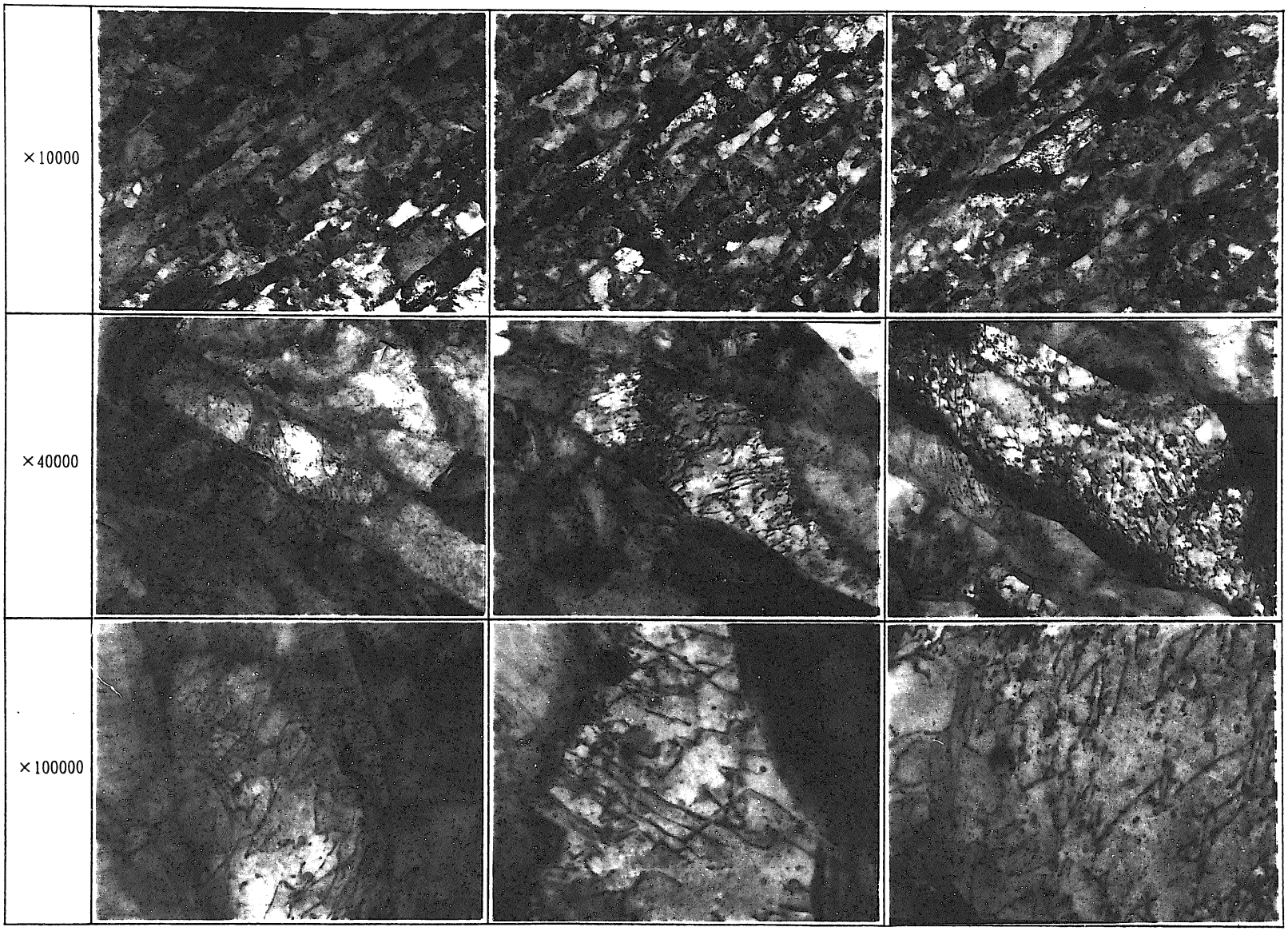
ここで、SEMによる接合部断面の観察結果を写真－17に示す。これを見ると、加圧力の小さい方が、結晶粒径は大きく、薄膜TEMの観察結果とは異なった。

これは、薄膜試料の場合、接合部の同定が困難なため、試料により観察位置が異なったことが原因であると思われる。

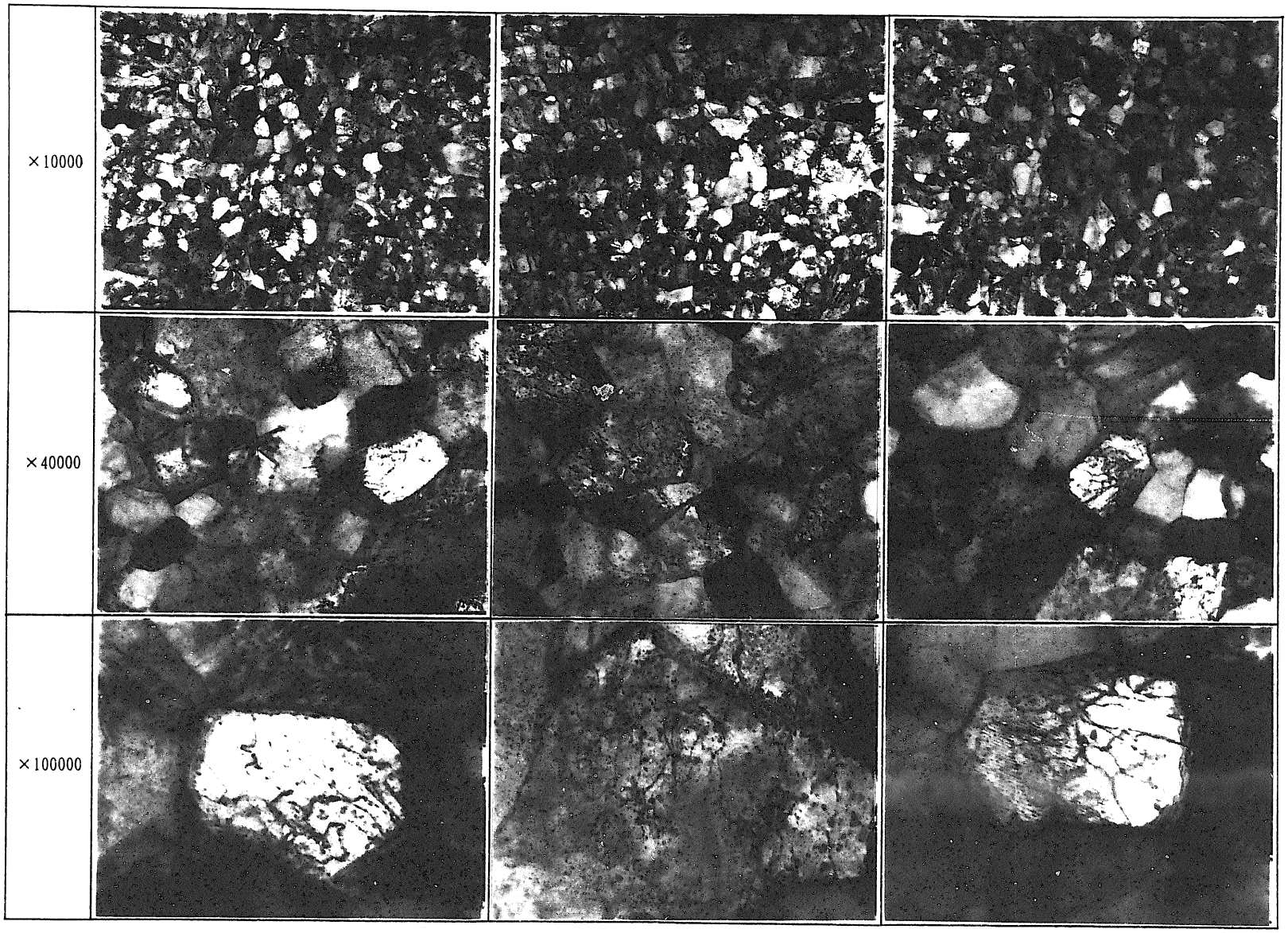
転位の変化は、母材と溶接材および溶接条件の間でも明確な差は、確認できなかった。



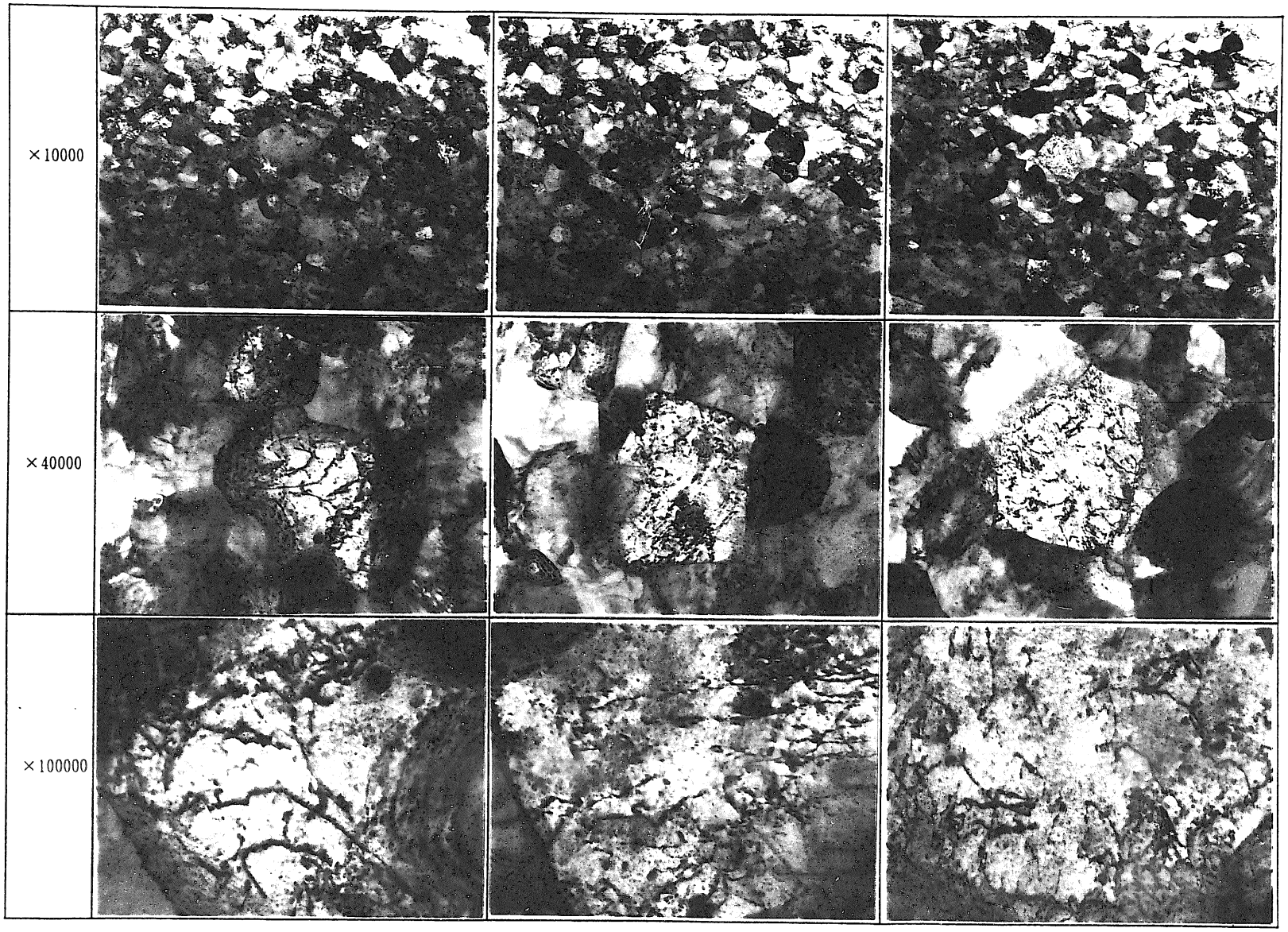
写真－12　被覆管母材（F21）部の薄膜TEM観察結果



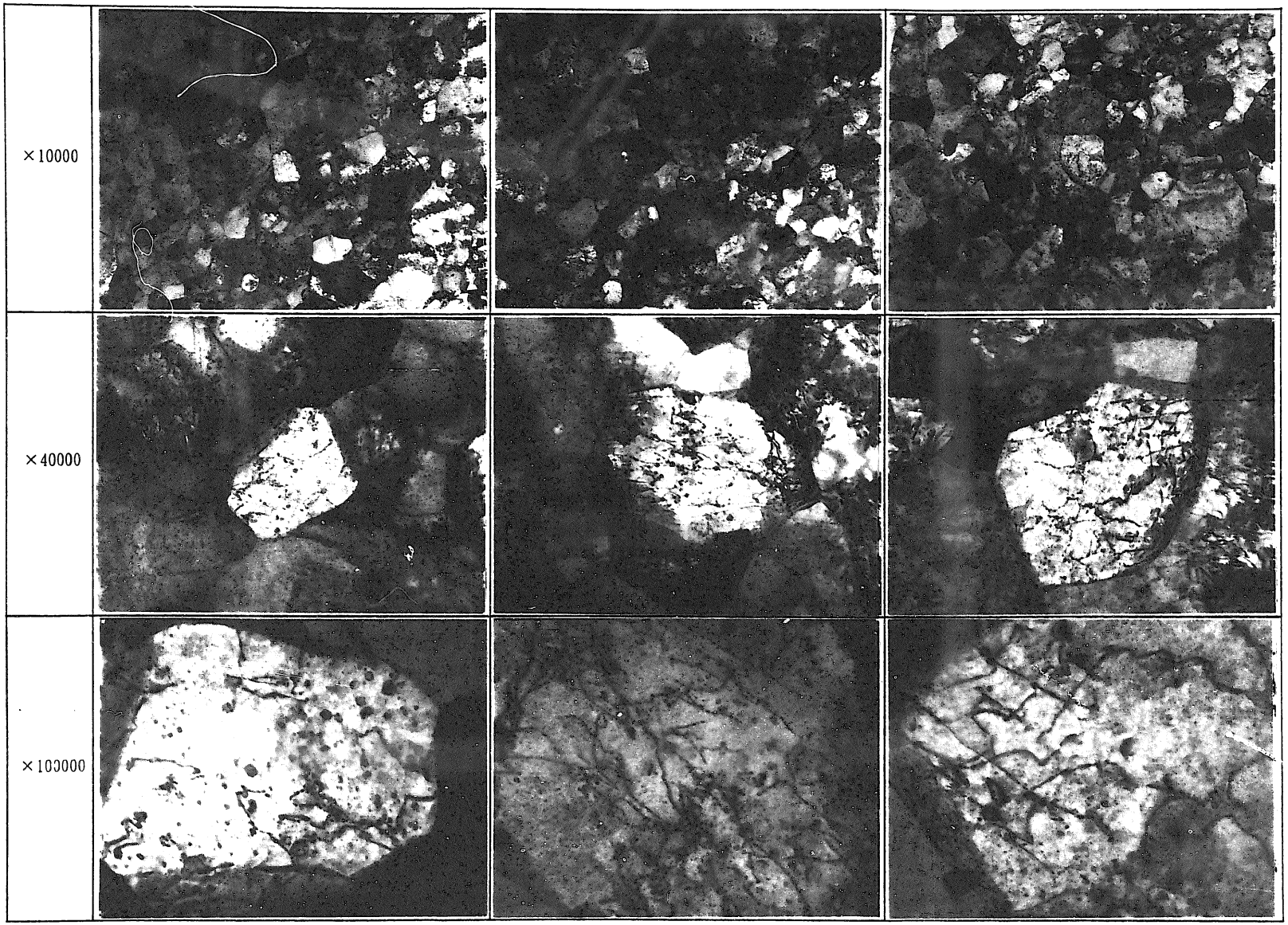
写真－13　端栓母材（MA857）部の薄膜TEM観察結果



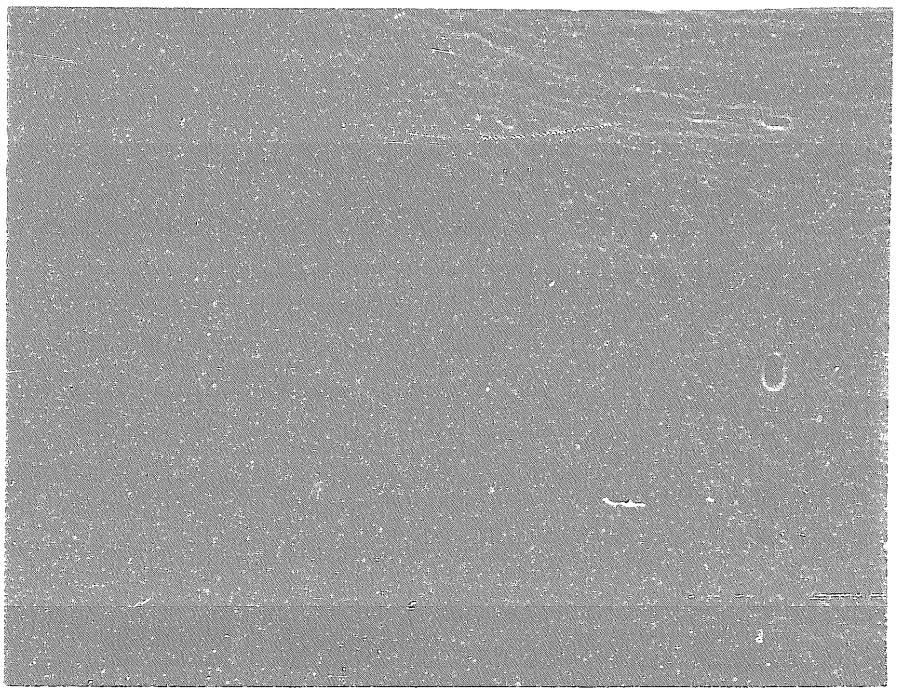
写真－14　接合部の薄膜TEM観察結果
(7KA－2cycle + 14KA－0.8cycle　180kgf)



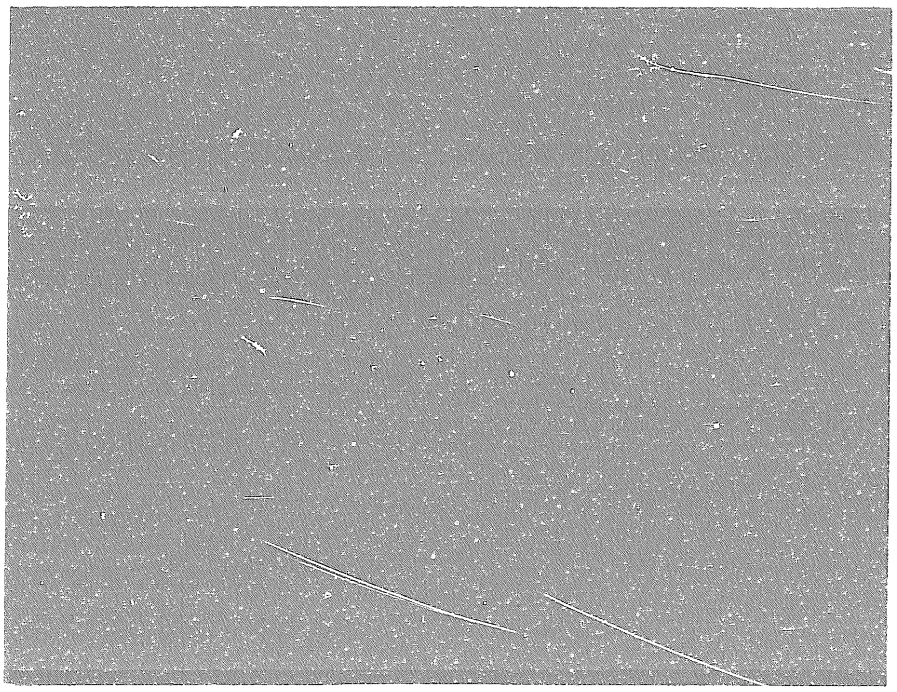
写真－15　接合部の薄膜TEM観察結果
（7KA－2cycle＋14KA－0.8cycle　250kgf）



写真－16　接合部の薄膜TEM観察結果
（7KA－2cycle＋14KA－0.8cycle　600kgf）



(a) 7KA－2cycle + 14KA－0.8cycle　180kgf



(b) 7KA－2cycle + 14KA－0.8cycle　600kgf

写真－17　SEMによる接合部断面の観察結果

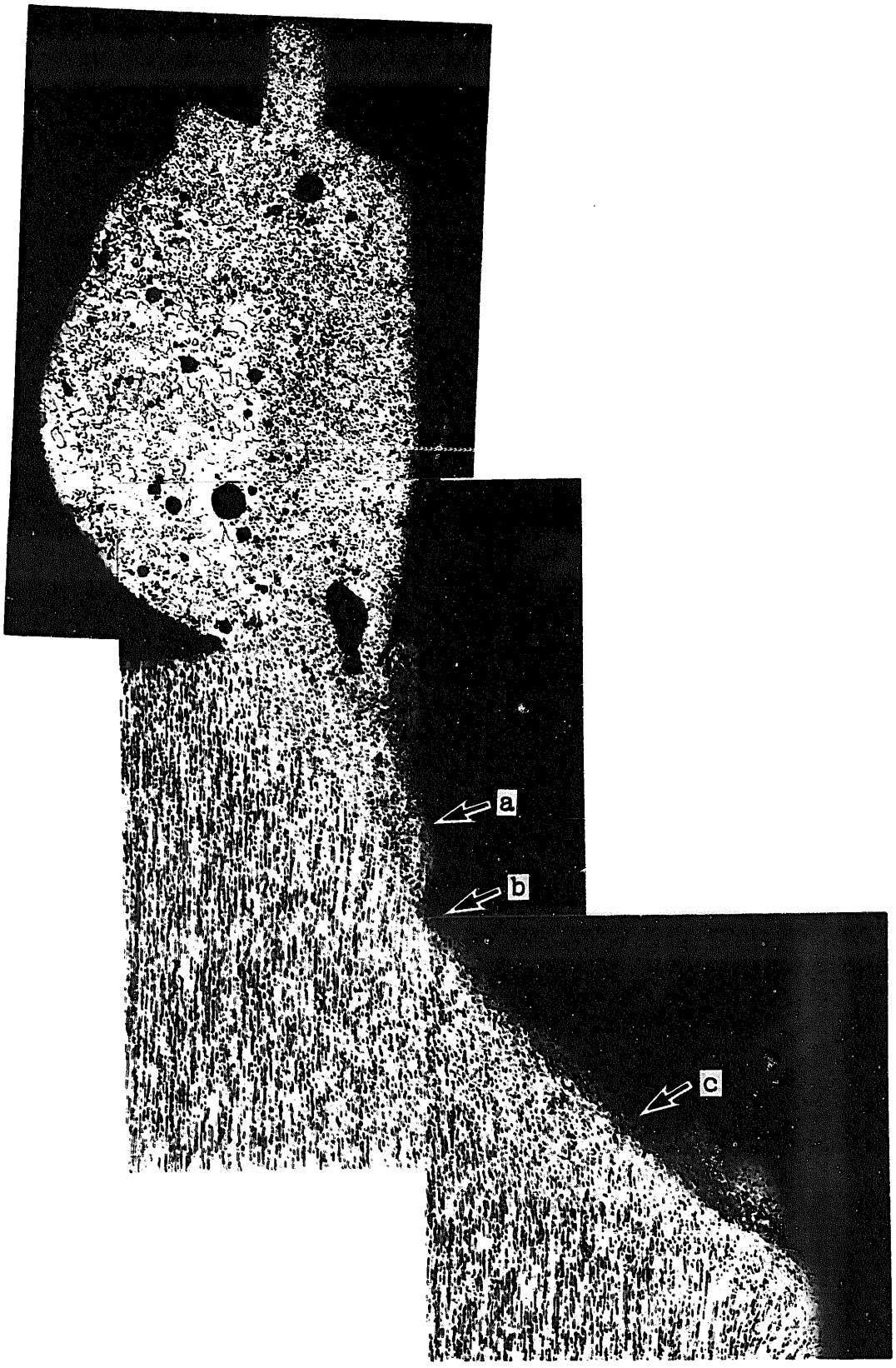
3. 破断面のSEM観察

高温引張試験および単軸クリープ試験後の接合部破断面の断面金相、SEM観察、FE-SEM観察写真を写真－18～29に示す。

断面金相金相写真を見ると、高温引張試験および単軸クリープ試験どちらとも、大部分は、接合部より破断しているが、被覆管部より破断している部分も一部観察された。また、破断形状は、ほとんどがディンプル破面であったが、一部に粒状の破面も観察された。

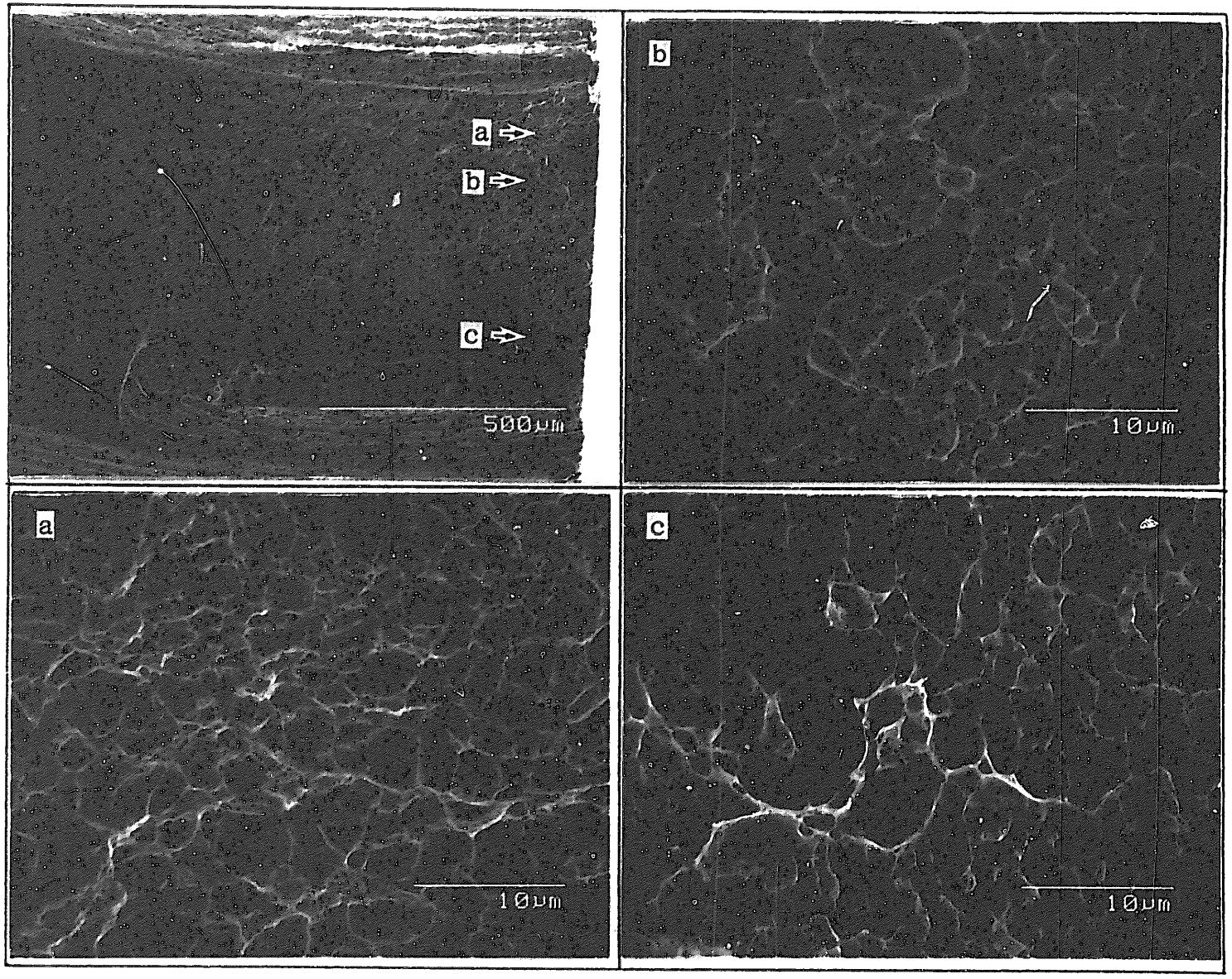
この粒状の破面は、接合時に溶融相が残存していたことを示すものであることが推測される。

さらに、これらの破面をFE-SEMで観察すると、SEMでは識別できなかった、2～3μm程度の表面肌が毛ばだった微小な球状起伏が見られた（写真－29）。この球状起伏は、写真－11に見られるAl_2TiO_5の結晶粒径とほぼ等しく、脆い破断形態を示していることから、耐熱元素が凝集したものであることが推定される。



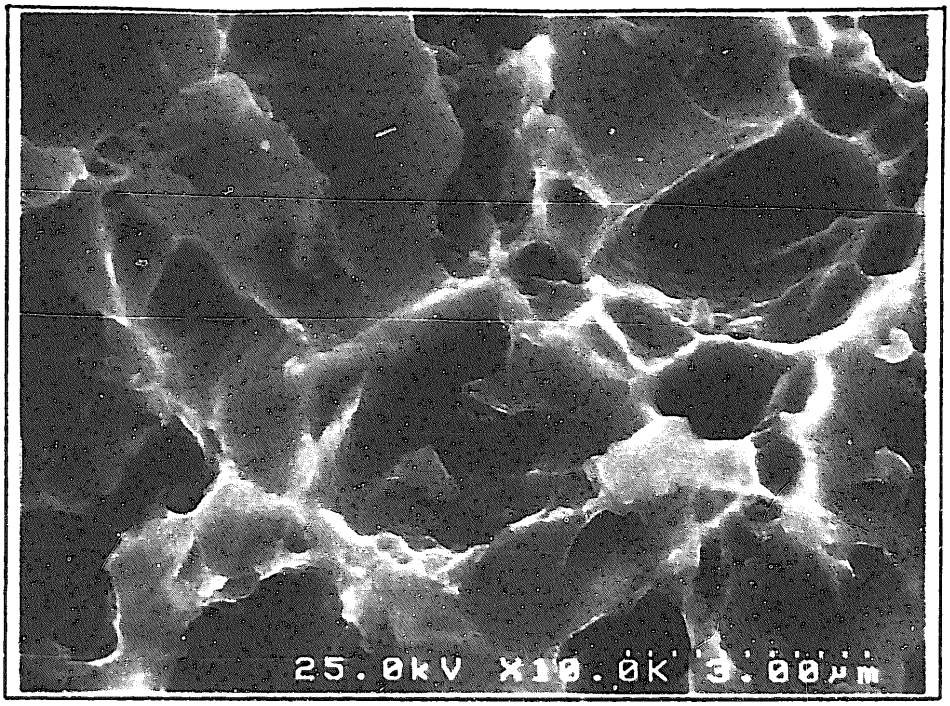
(×100)

写真－18　650℃高温引張試験破面の断面金相写真-ディンプル破面
(7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf)

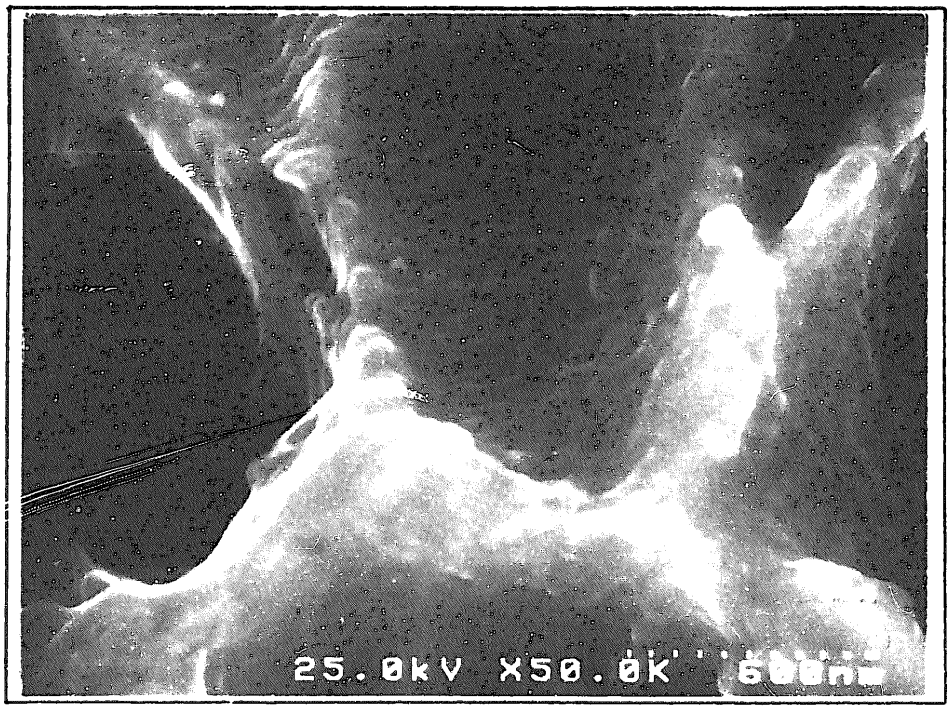


写真－19　650℃高温引張試験破面のSEM像-ディンプル破面
(7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf)

PNC TN8410 96-037

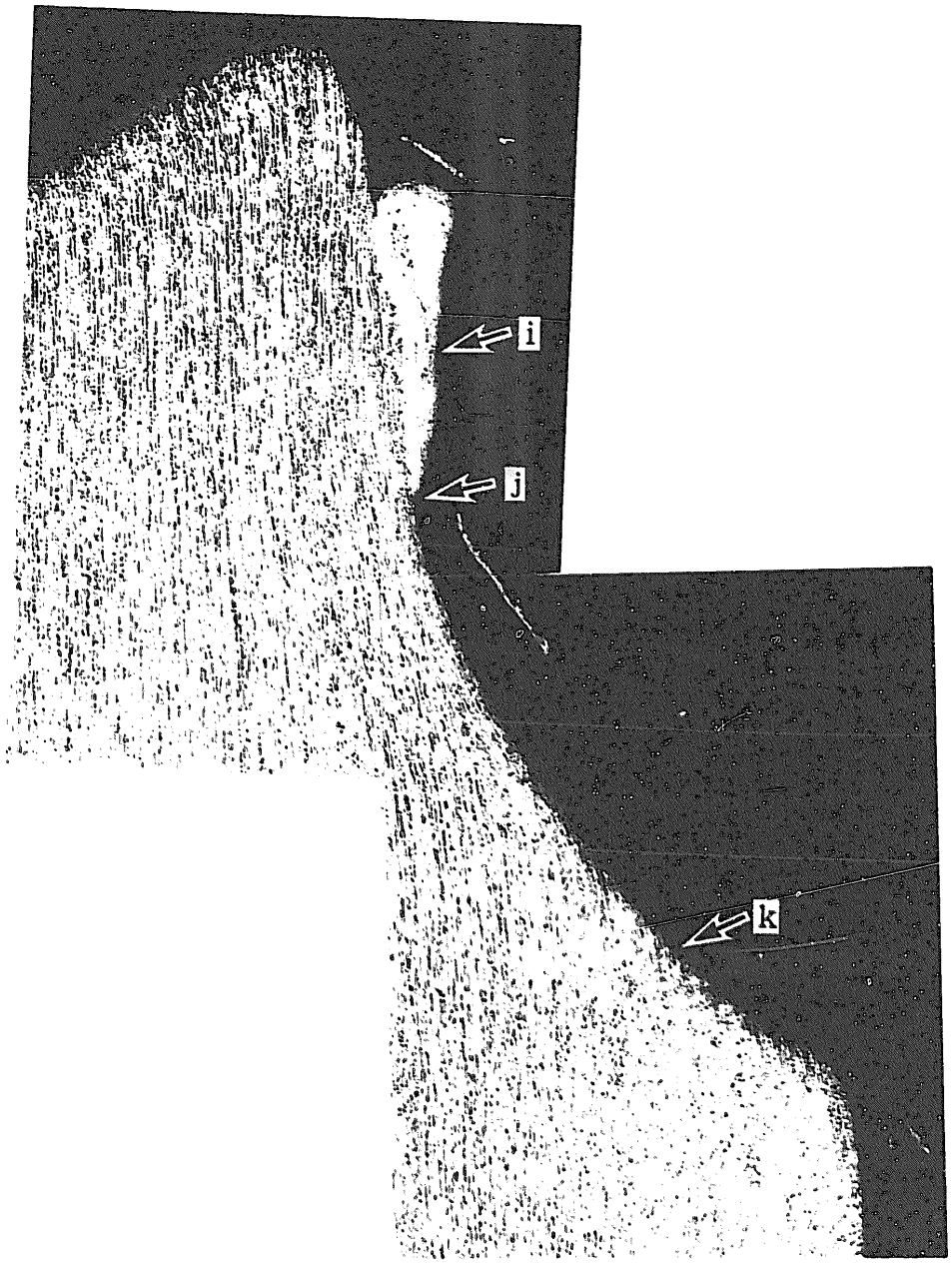


(×10000)

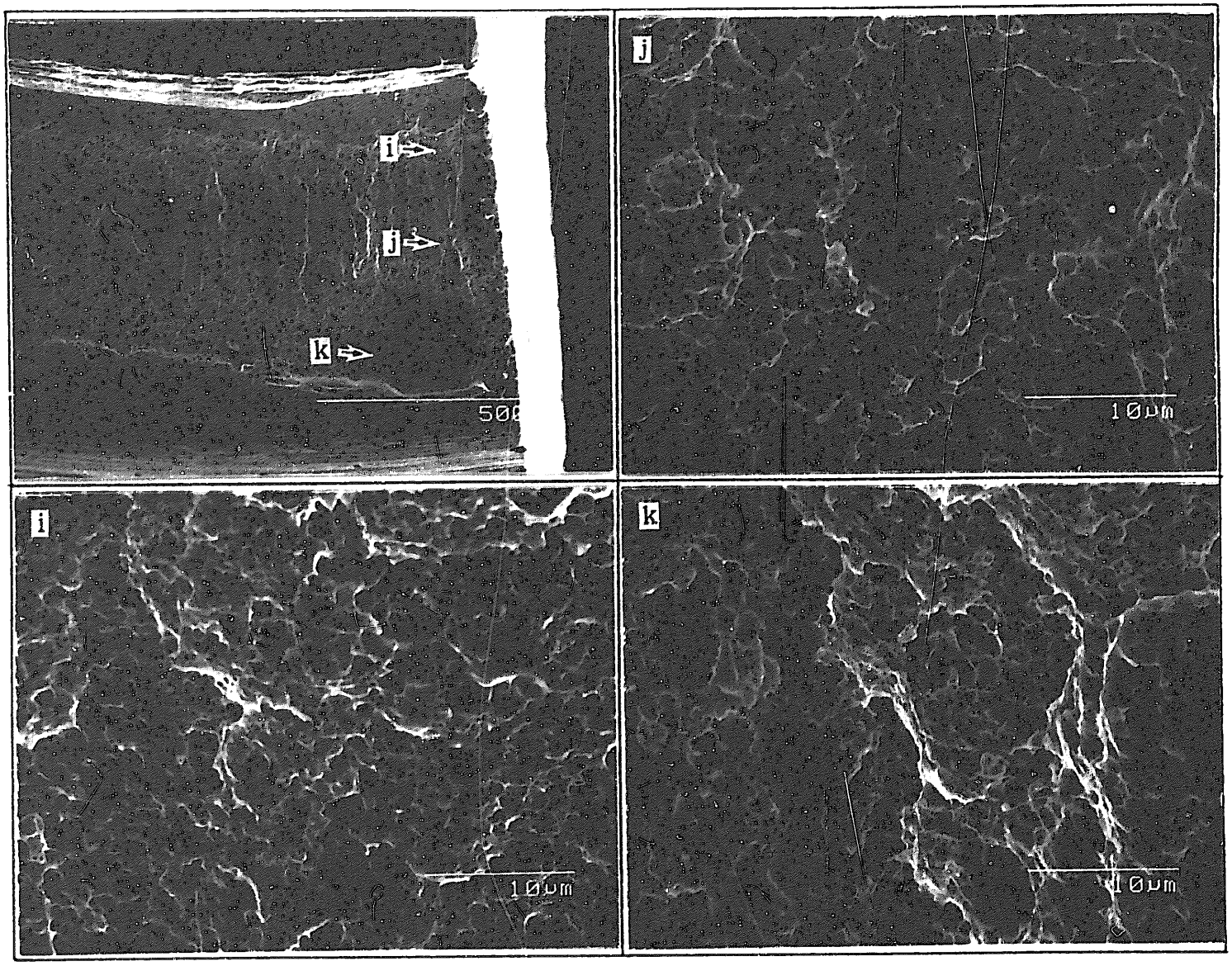


(×50000)

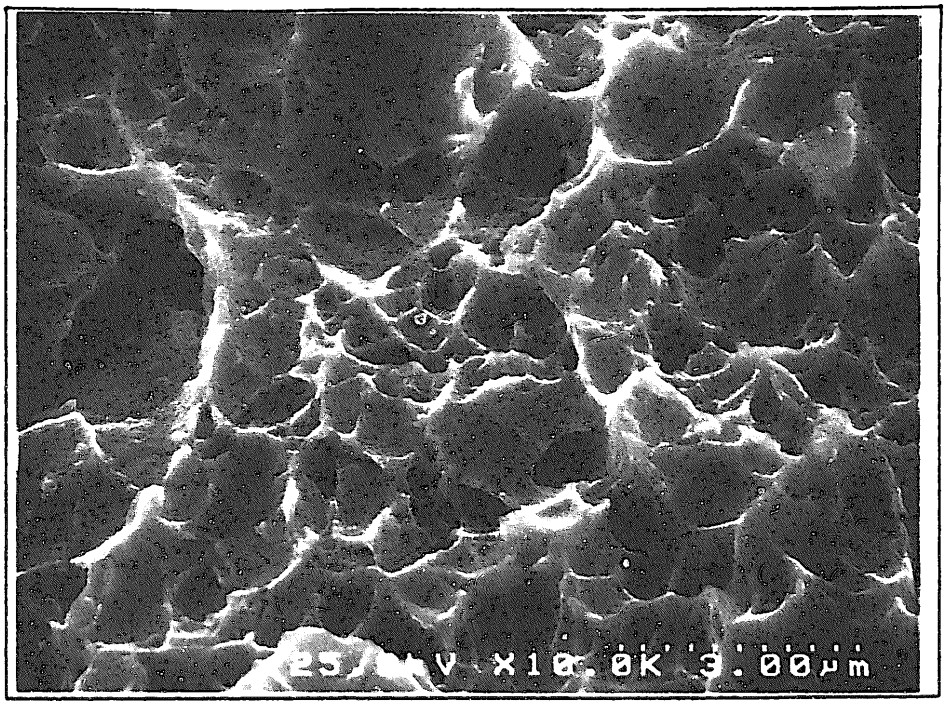
写真－20　650℃高温引張試験破面のFE-SEM像-ディンプル破面
(7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf)



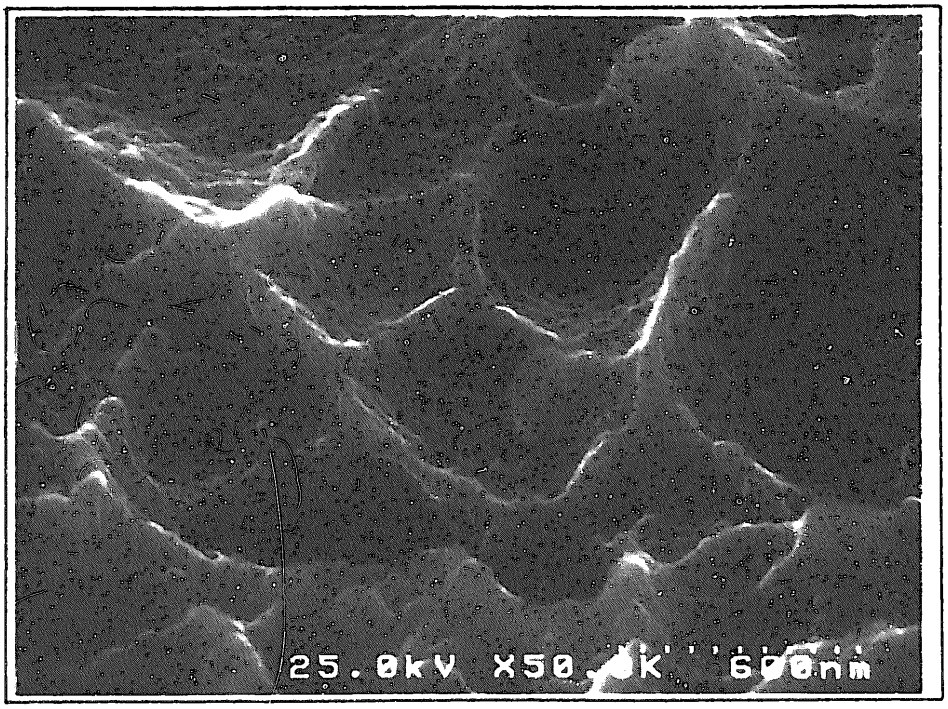
写真－21　650℃単軸クリープ試験破面の断面金相写真-ディンプル破面
(7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf)



写真－22　650℃単軸クリープ試験破面のSEM像-ディンプル破面
（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）

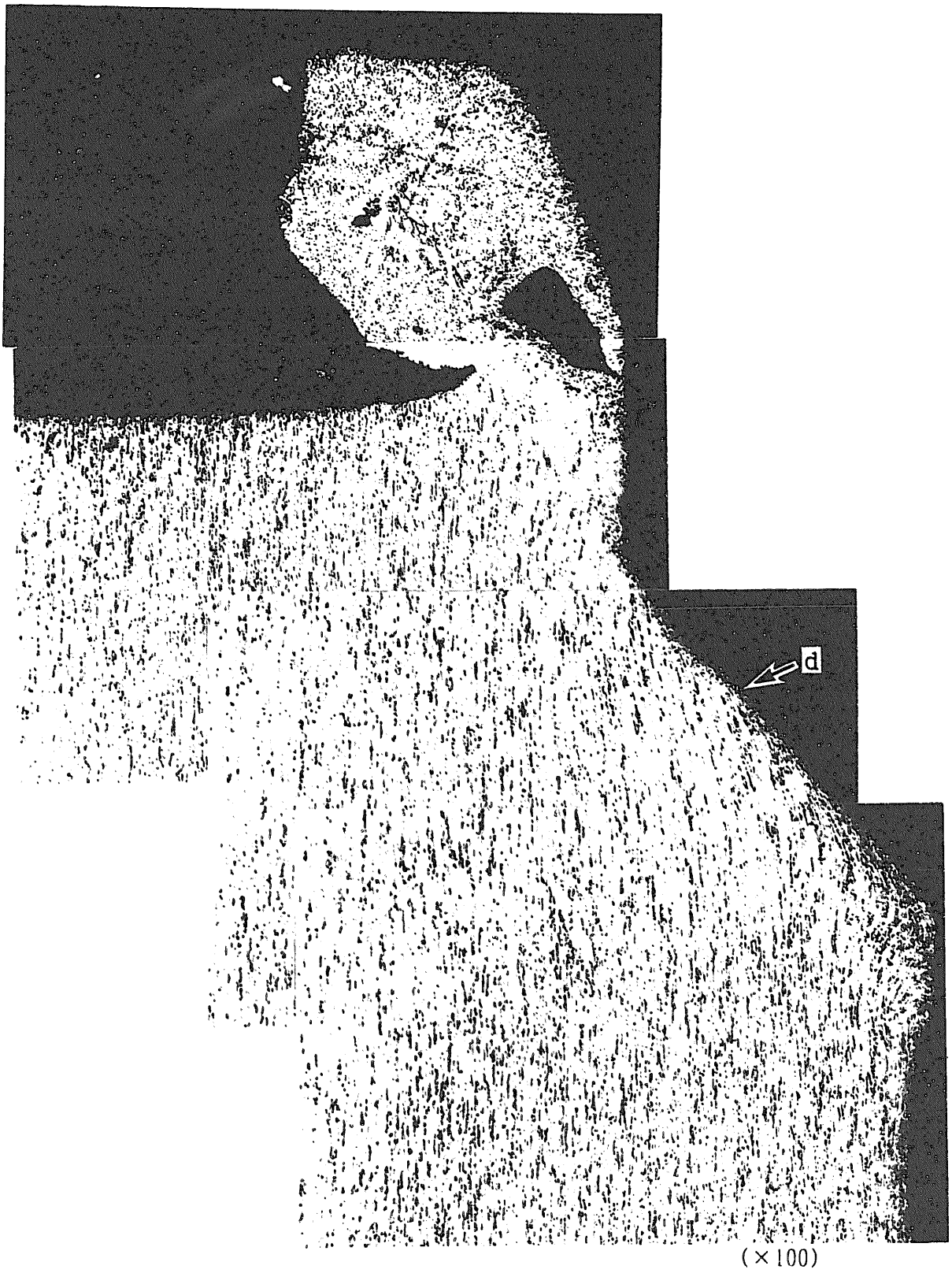


(×10000)

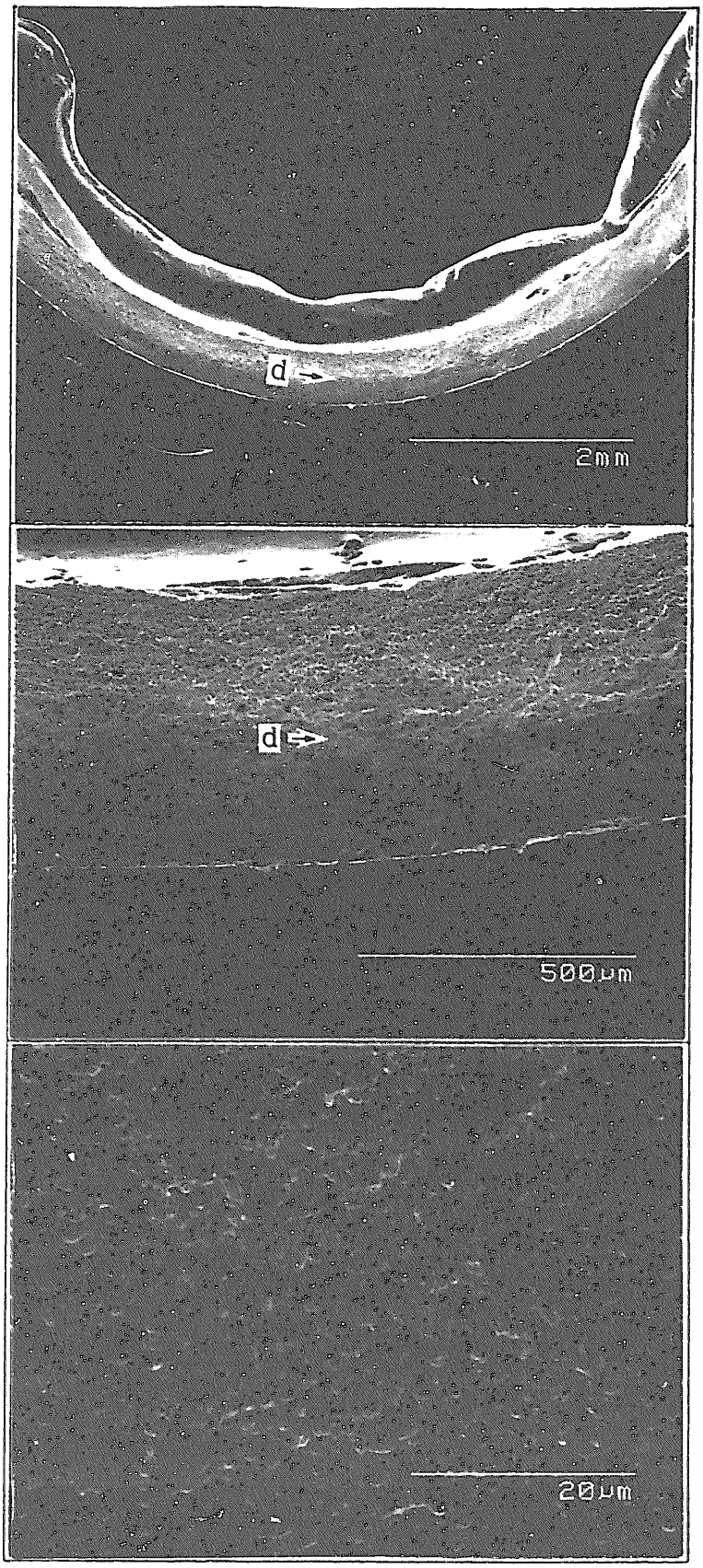


(×50000)

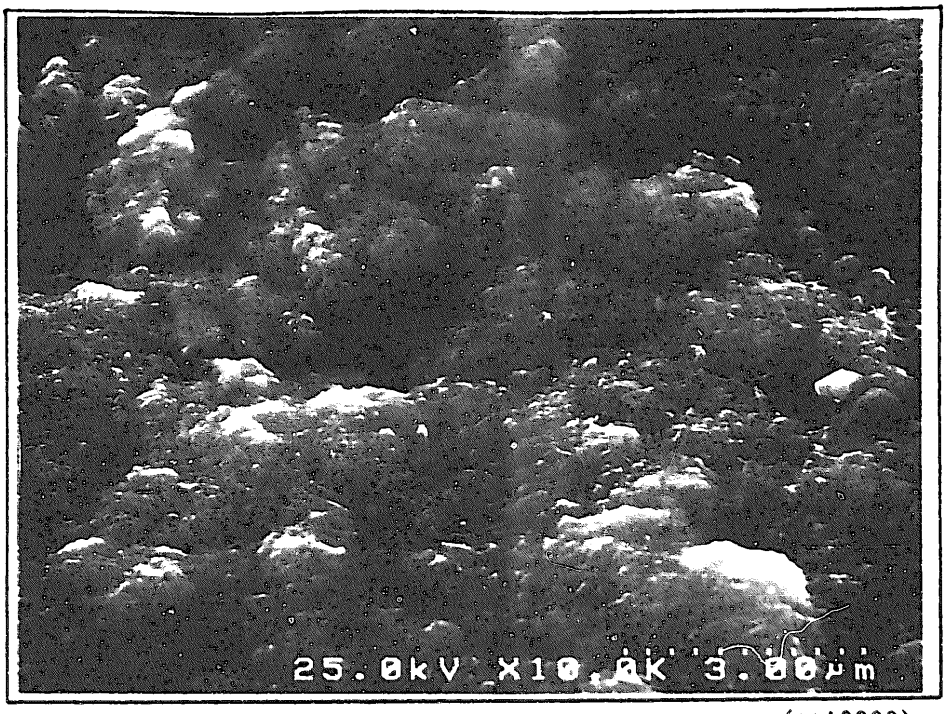
写真－23　650℃単軸クリープ試験破面のFE-SEM像-ディンプル破面
(7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf)



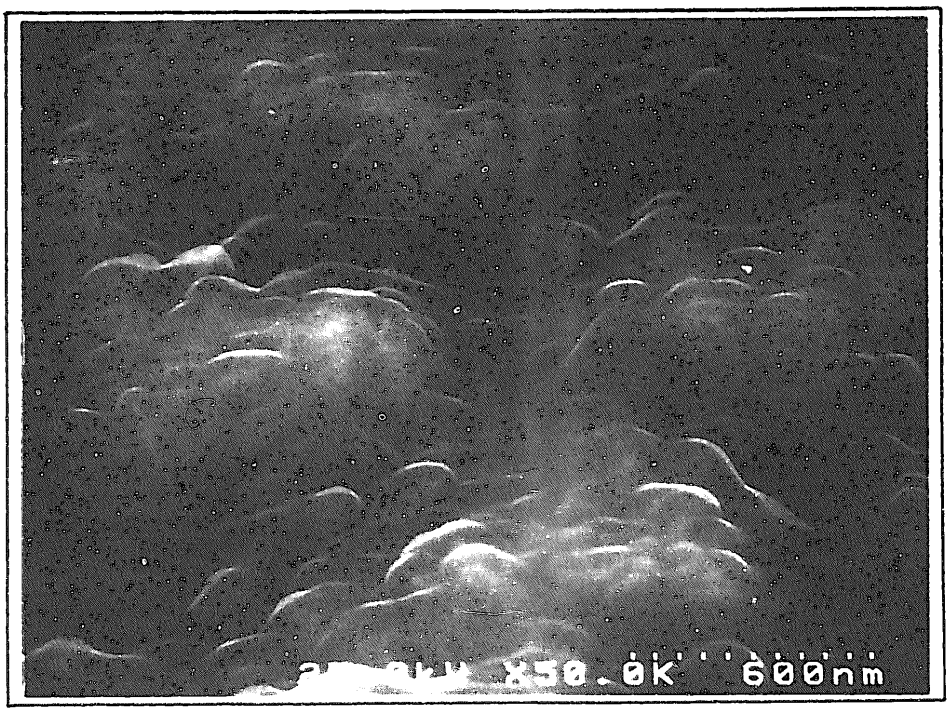
写真－24　650℃高温引張試験破面の断面金相写真-粒状破面
(7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf)



写真－25　650℃高温引張試験破面のSEM像-粒状破面
（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf）



(×10000)

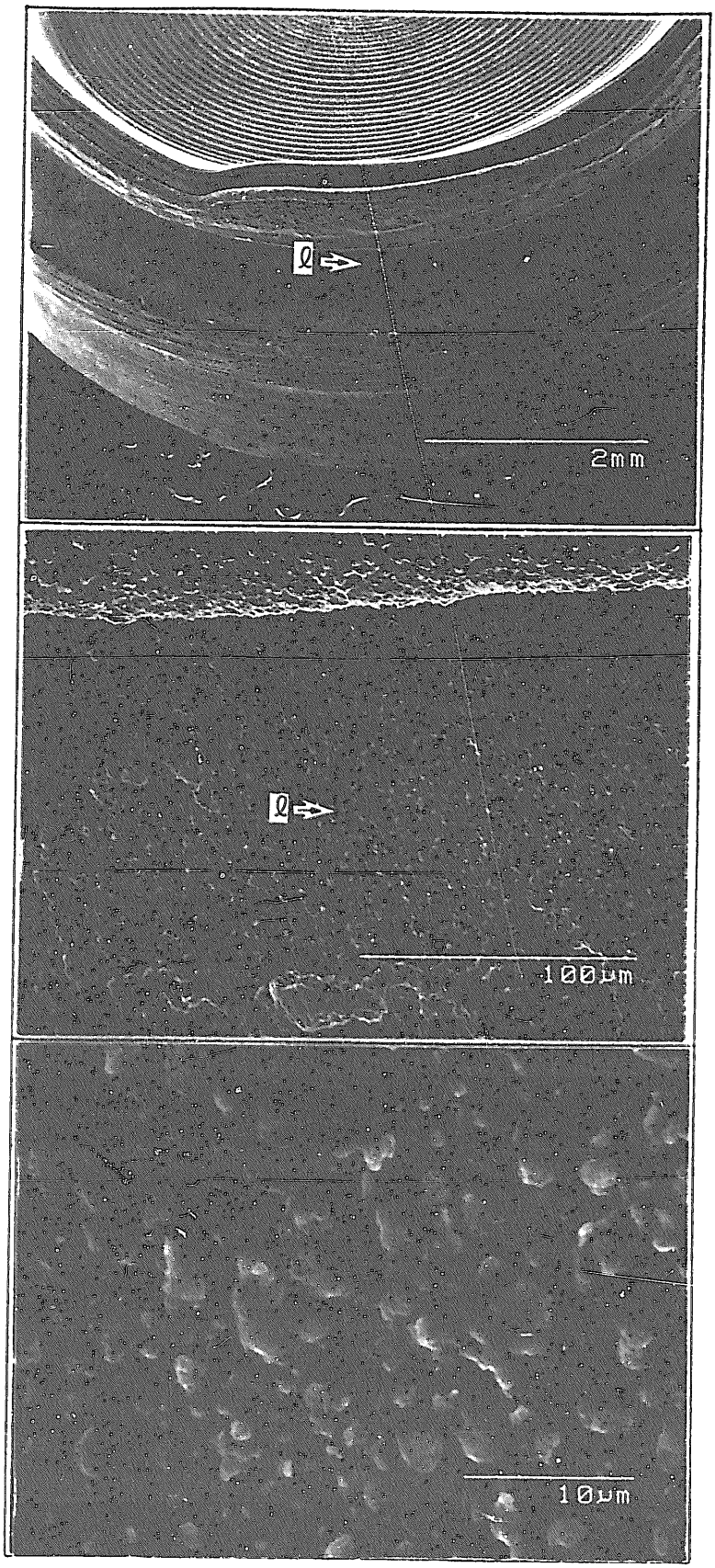


(×50000)

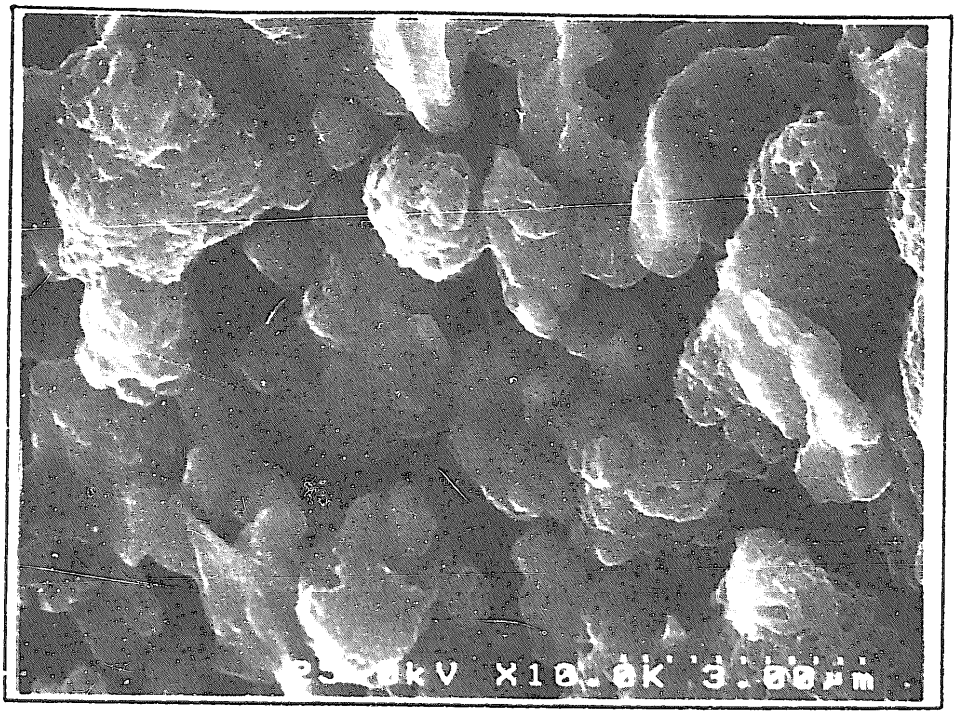
写真－26　650℃高温引張試験破面のFE-SEM像-粒状破面
(7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　180kgf)



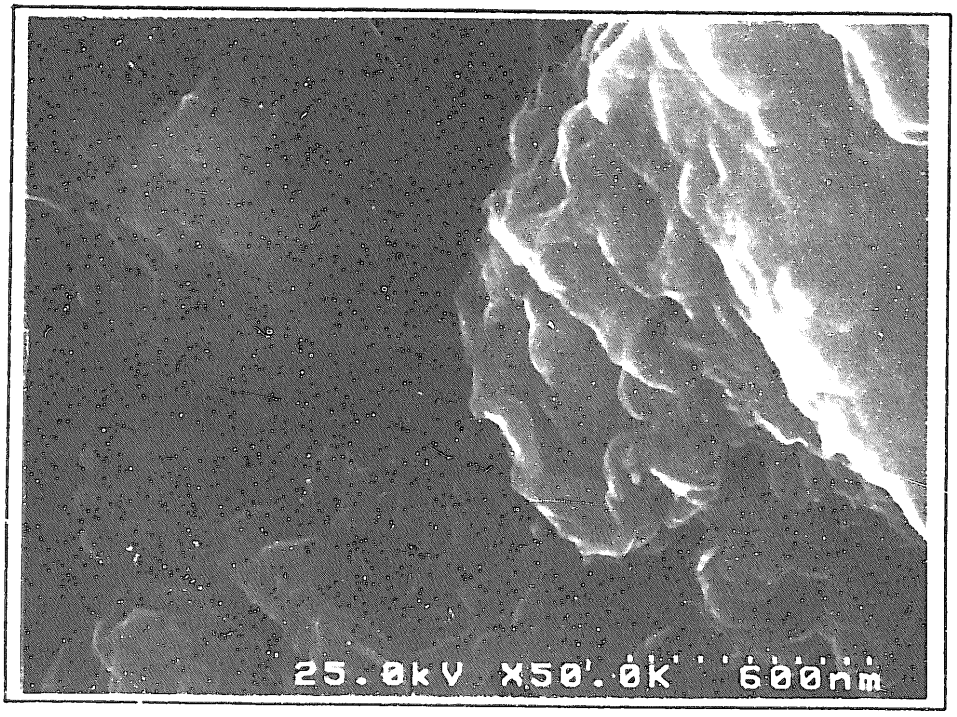
写真－27　650℃単軸クリープ試験破面の断面金相写真-粒状破面
（7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf）



写真－28　650℃単軸クリープ試験破面のSEM像-粒状破面
(7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf)



(×10000)



(×50000)

写真－29　650℃単軸クリープ試験破面のFE-SEM像-粒状破面
(7KA－2cycle+14KA－0.8cycle　600kgf)

Ⅳ 結論

1. 溶接条件選定試験

1.1 主に接触抵抗を利用した場合の溶接試験（1段溶接）

1.1.1 硬さ測定試験および溶接可能範囲選定試験と金相試験

接触抵抗を有効に活用し、低い加圧力、電流での溶接を試みたが、金相上、未接合、溶接欠陥の無い比較的良好な接合部が得られる条件11～14KA、160～240kgf、2cycleの条件においては、接合部の硬さは、母材よりも150Hv以上低下し、以前の条件（13KA-2cycle-250kgf）に対して改善は認められなかった。

1.1.2 信頼性試験

良好な接合が得られる条件の中で、加圧力が低い場合（13KA 180kgf）において、溶接の再現性にバラツキが生じた。この原因としては、加圧力が低い場合は、接触抵抗が増加する、接合部の昇温に対し溶接ヘッドが十分追従していない等の原因が考えられる。

1.2 主に体積抵抗を利用した場合の溶接試験（2段溶接）

1.2.1 硬さ測定試験

溶接電流、溶接時間、加圧力を変え、比較的良好な接合部が得られる条件の硬さ変化を見た。

溶接電流13KA 1.0cycle 180kgfよりも13KA 0.6cycle 180kgfの方が、熱影響部の幅は小さくなったが、溶接後には、母材よりも150Hv程度軟化した。

13KA 0.6cycle 600kgfの場合は、硬さ低下が50Hv程度と非常に小さくなることが分かった。

1.2.2 金相試験

(1) 予熱電流と接合状態

予熱電流が低すぎると接合部より離れた端栓部よりバリが生じてしまい、予熱電流が高すぎると溶接が2段になってしまうことから最適な予熱電流は、7KA 2cycleとした。

(2) 溶接電流と接合状態

溶接電流が、14.5KAで溶接不良が生じ、金相の結果、13KAと14KAの場合が未接合部の無い良好な接合部が得られた。

(3) 溶接時間と接合状態

溶接時間が、1.0cycleを超えると、接合部より離れた端栓部が変形し、接合部の幅が広くなってしまうため好ましい接合状態ではない。よって、このような現象の現れない、0.6～0.9cycleの溶接時間が適当であると判断される。

(4) 加圧力と接合状態

加圧力が200～600kgfの条件において未接合部の無い良好な接合部が得られた。また、加圧力の増加にともない端栓部のバリは厚くなることが確認された。

1.2.3 溶接パラメータと溶接波形

(1) 変位量

加圧力の大小にかかわらず、溶接時間が1.0cycle以上でΔ2'（一度溶接が終了した後の2回目の変位）が生じるため、1.0cycle未満が好ましい。

(2) 溶接ヘッドの加速度

7KA−2cycle+14KA−0.6cycle　180kgfと600kgfの場合の溶接ヘッドの加速度をくらべると、600kgfの場合は、溶接ヘッドの加速度が小さい。

加圧力が大きい場合は、被覆管への端栓の押しつけ力が強いため、接触抵抗が低くなり、接合部の昇温が遅く、また、低い温度でも被覆管と端栓のザクツが進行するためこのような結果となったことが予想される。

1.2.4 信頼性試験

2段溶接において、溶接電流が14KA以下の場合は、180kgfの比較的低い加圧力で数本溶接しても、溶接不良は起こらなかった。

1段溶接の場合、溶接の再現性が取れないのは、接触抵抗が高いことによる接合部の急激な温度上昇が起因していると思われる。

1.2.5 機械的強度測定試験

(1) 引張試験

加圧力180kgfの場合は全て接合部、600kgfの場合は被覆管部破断（800℃のみ接合部破断）となった。接合部破断となった場合でも引張強さは、被覆管母材並であった。

180kgfの場合接合部からの破断となるのは、接合部の硬さ低下が大きいためと考えられる。

(2) 単軸クリープ試験

加圧力180kgf、600kgfをくらべると600kgfの方が強度は強かったが、ともに全て接合部破断となって被覆管母材の強度を下回り、長時間側になるほど強度低下が大きくなった。

この原因としては、抵抗溶接の場合、接合部の組織が外側を向くため、長時間高温にさらされると、その部分が粒界滑りを起こし、接合部から破断してしまうこと。また、溶接時に耐熱元素の凝集が生じ、この部分も、高温で長時間応力をかけると、脆くなってしまうことが考えられる。

2. 接合部の微視的観察

2.1 抽出レプリカの観察

加圧力180、250kgfの溶接条件では、Y_2TiO_5の凝集、粗大化が観察された。また、600kgfでは凝集、粗大化領域は非常に小さく球状の物が線上にいくつか存在する程度であり、Al_2TiO_5酸化物は見られるが、Y_2TiO_5の凝集は見られなかった。酸化物の凝集領域は、加圧力が大きくなるほど小さかった。

このような現象が見られるのは、１）加圧力の大きい程、粗大化、凝集領域を外に押し出してしまうこと、２）接合部の押しつけ力が高いため、接触抵抗が低く温度上昇が低い

等のことが考えられる。

ところで単軸クリープ試験において、接合部の強度低下が起こり、その原因として、分散材の凝集による分散強化の効果の低下が考えられたが、TEM観察においてそのことが証明された。

以上のことから酸化物の凝集領域の幅は、接合面に加わる温度、加圧力と相関があり、凝集領域が狭いほど接合部の高温強度が高くなることが分かった。

2.2 薄膜試料の観察

接合部はいずれの条件でも等軸状の再結晶組織になっていた。再結晶粒の大きさは加圧力が大きくなるに従って大きくなった。これは、薄膜試料の場合、接合部の同定が困難なため、試料により観察位置が異なったことが原因であるとも思われる。

転位の変化は、母材と溶接材および溶接条件の間でも明確な差は、確認できなかった。

V　今後の課題

(1) 今回は、接合部の温度が融点付近まで上昇し、分散材の凝集が生じたと思われる。
今後は、強度異方性が改善された材料が開発されるため、この材料を用いて、低電流での溶接を行う等、溶融相を生じさせず、分散材の凝集を無くすような溶接条件のさらなる検討を行う必要がある。

(2) 回転曲疲労試験、圧縮引張疲労試験を行い、接合部の強度評価を行うための新たな試験方法としての適用の可能性を判断する。

(3) 新材料を用いて、今回行った機械的強度試験に加え内圧クリープ試験を行い、接合部の強度評価を実施する。

(4) 新材料の適切な溶接条件を求め、溶接試験片の照射試験を行い接合部の健全性を評価する。

(5) 接合部の品質保証を行うため超音波探傷法の適用を検討する。

Ⅵ 参考文献

1) 西山元邦、関正之、上村勝一郎：抵抗溶接法の開発（1）－抵抗溶接法の基本特性評価試験およびクミール5照射試験片の製作 PNC PN8410 95-046（1995）

2) 関正之、蔦木浩一、飛田典幸：酸化物分散強化型フェライト鋼材の溶接試験（1）－MA956、MA957板材の溶接試験 PNC SN8430 88-002（1988）

3) 藤原優行、関勇一：分散強化型フェライト鋼被覆管製造技術開発（ⅡA） PNC ZJ 9058 91-002（1991）

4) 藤原優行、内田博幸：分散強化型フェライト鋼被覆管製造技術開発（ⅢA） PNC ZJ 9058 91-006（1991）

5) 社）日本金属学会編：金属便覧 P512-513（1982）

6) 藤原優行、原田誠：分散強化型フェライト鋼被覆管製造技術開発（ⅥA） PNC ZJ 9058 94-003（1994）

追記：なお、本報告書の内容については、1996年3月の「原子力学会 春の年会」で口頭発表を行う。