

共晶反応を利用したアルミニウム接合法の開発

Pressure Joining Method for Aluminum Utilizing Eutectic Reaction

Al(アルミニウム)は機器の軽量化要請に対しますます重要性を増しているが、接合に多大な経費と工数を要しており、生産性の高い接合技術の開発が望まれている。

これに対し、Alと異種金属との間に起こる低融点の共晶反応を利用して、Alの強固な酸化皮膜を除去し、かつ接合面から脆い共晶を排除して高速接合する方法を開発した。

この結果、強靱性、耐漏れ性に優れたAl-Cuパイプ(銅)継手の接合が容易になり、また、溶湯から急冷して作製したAl-高Si(シリコン)合金はくをインサート材として用いることにより、AlとAlを大気中で接合できることを確認した。

宮崎邦夫* Kunio Miyazaki

玉村建雄* Takeo Tamamura

落合和泉** Izumi Ochiai

1 緒 言

最近、機械や部品の軽量化の点からAl(アルミニウム)が多用されるようになり、同種材料だけでなく異種金属材料と接合する構造が多くなっている。

従来、AlとAlは一般にろう付や溶接によって接合されていたが、Alが酸化されやすく、酸化皮膜が強固であるため、前処理、フラックスなどによって酸化皮膜を除去し、再酸化を防止する保護雰囲気が必要であった。また、Cu(銅)などの異種金属と接合する場合、接合部に脆い化合物相が形成されるため、通常の融接¹⁾や固相接合²⁾が困難であった。

日立製作所では、Al接合での生産性、信頼性の向上を図るため、新しい接合技術の開発に取り組み、Alと異種金属との間に起こる低融点の共晶反応を利用した高速接合法(以下、共晶圧接法と呼ぶ。)の開発に成功した。

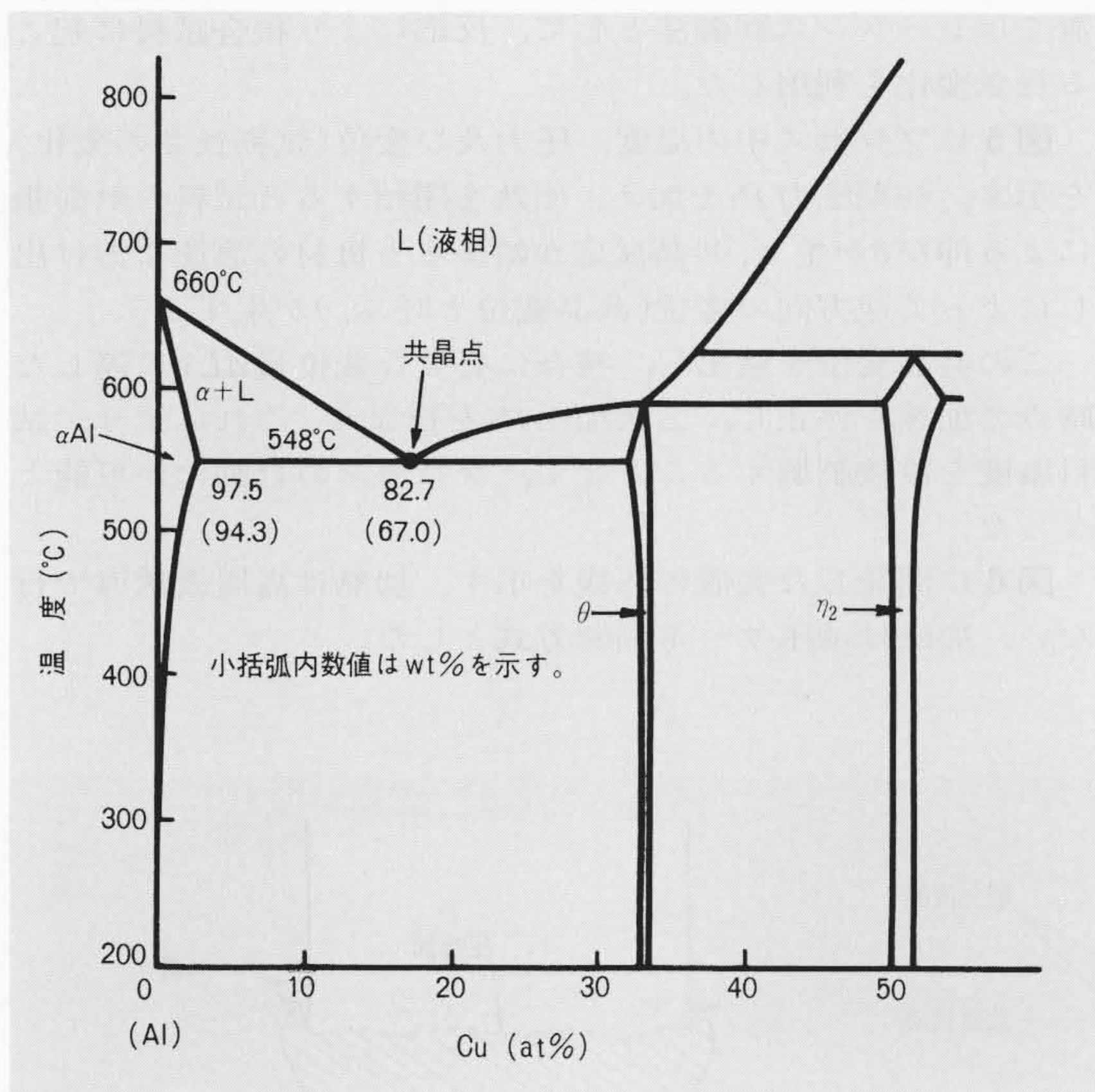


図1 Al-Cu状態図 548℃でαAlとθ相が反応し、融液が生成する。

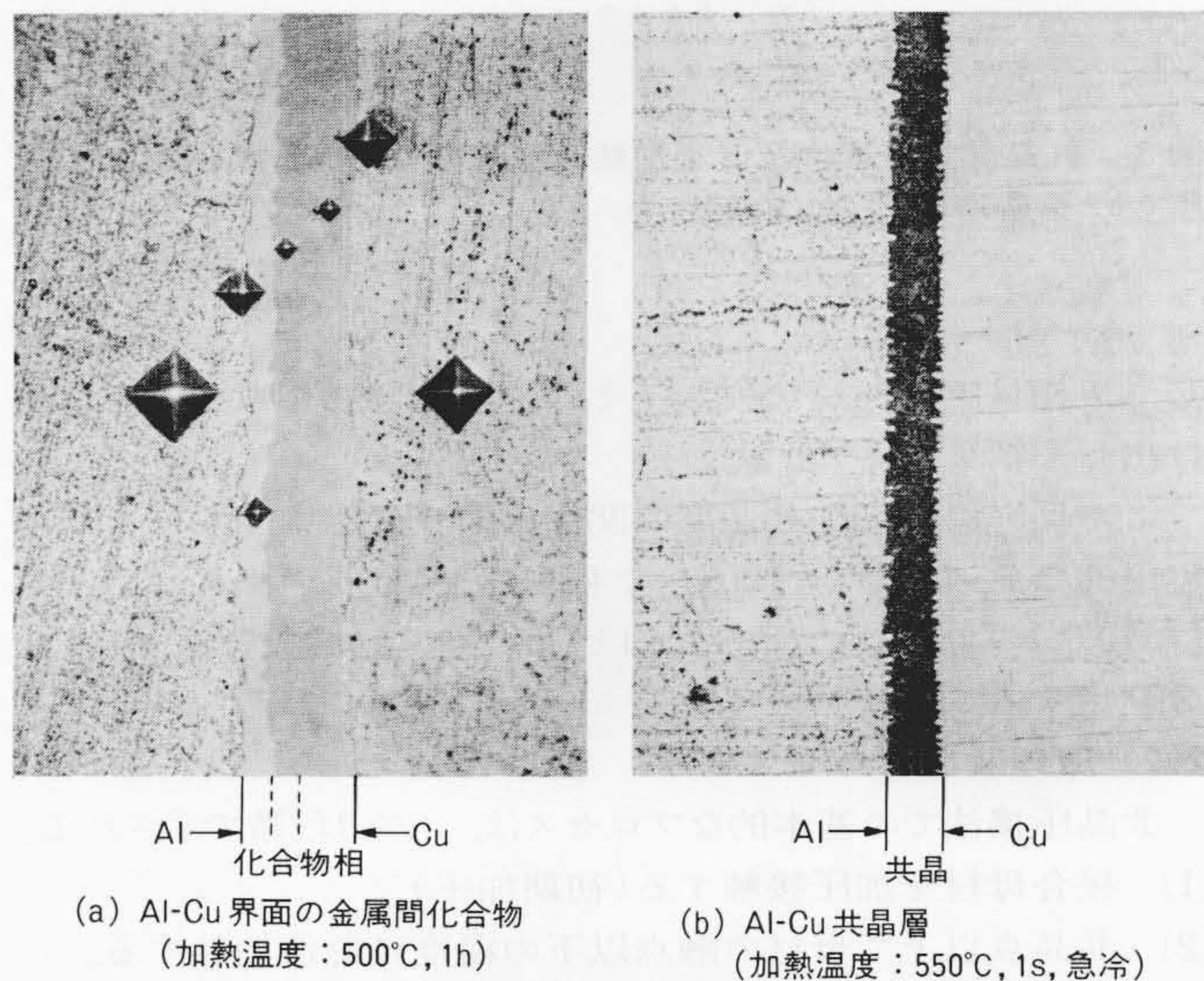


図2 共晶反応による金属間化合物相の熔融 拡散によって形成された化合物相は、共晶反応温度以上に短時間加熱することによって融液化し消失する。図(a)中の□印は、ビッカース硬さ測定による圧痕を示す。

本稿では、共晶圧接法の原理及びプロセスをAlとCuパイプの接合について紹介し、続いてAlとAlの大気中接合法への応用について述べる。

2 接合原理とプロセス

2.1 共晶反応

一般に共晶反応は、合金融液が冷却に際し液相組成の変化を伴わずに、組成の異なった二つの固相へ相変化する反応であり、その温度は各々の成分元素の融点よりも低いのが特徴である。本方法では、この反応を加熱時の低温融解現象として利用する。すなわち、AlとCuを接触させて加熱すると、平衡状態図(図1)に示すように、相互拡散の結果、界面にはθ相、η₂相、η₂相などの非常に硬くて脆い金属間化合物が形成される³⁾。更に温度が上昇し、548℃に達するとAl(α固溶体)とθ相とが反応してAl:67%、Cu:33%(wt%)の組成の融液が生成

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所栃木工場

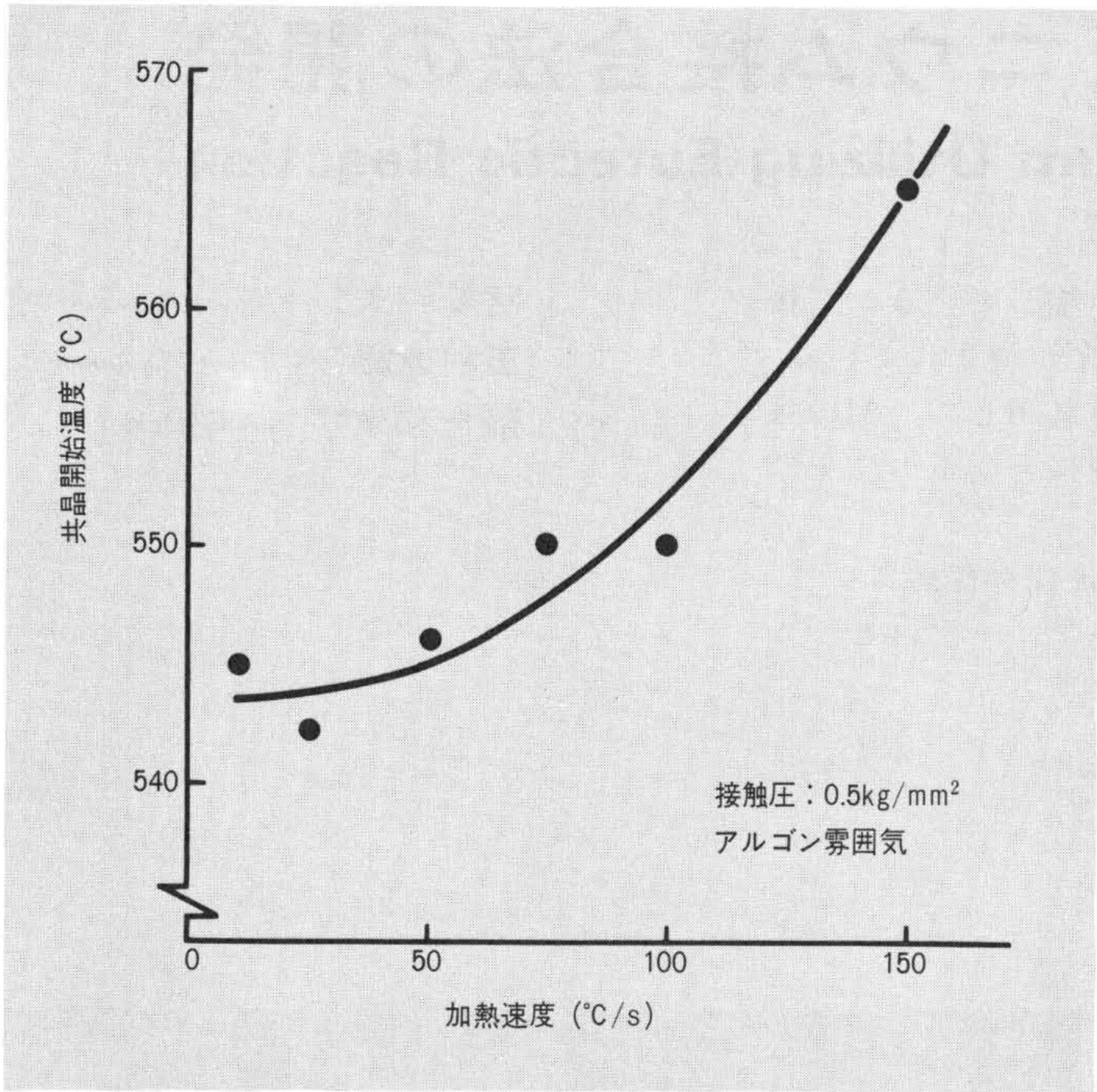


図3 共晶開始温度に及ぼす加熱速度の影響 100℃/s程度の高速加熱でも、共晶開始温度の上昇は小さい。

し、 θ 相は実質的に消失し、その他の化合物相も融液中に溶け出して消失する(図2)。

この反応温度と加熱速度の関係は図3に示すようになり、実用的な急速加熱(<100℃)でも平衡温度からのずれは小さい(<10℃)ので、この反応をAlとCuの高速低温接合法として十分利用することができる。

2.2 原理及びプロセス

共晶圧接法での基本的なプロセスは、次の3段階で示される。

- (1) 接合母材を加圧接触する(初期加圧)。
- (2) 共晶点以上で母材の融点以下の温度に急速加熱する。
- (3) 加熱を停止し、二次加圧を行なう。

各々の段階での接合面の状態をAl-Cuの場合について図4に模式的に示す。第1段階で、小さい圧力下でも幾つかのミクロ的な接触部が形成され、この点では局所的な塑性変形により酸化皮膜が破壊され、真にAlとCuが接触する⁴⁾。第2段階で、このような接触点から相互拡散が進行し最初の共晶反応が起こる。いったん反応が始まると融液が形成され、母材が次々と溶け出すので接触面は急速に広がり、短時間で突合せ面全体で均一に反応が進行するようになる。これにより、酸化皮膜は共晶融液中に混入し、外部に排除される。第3段階

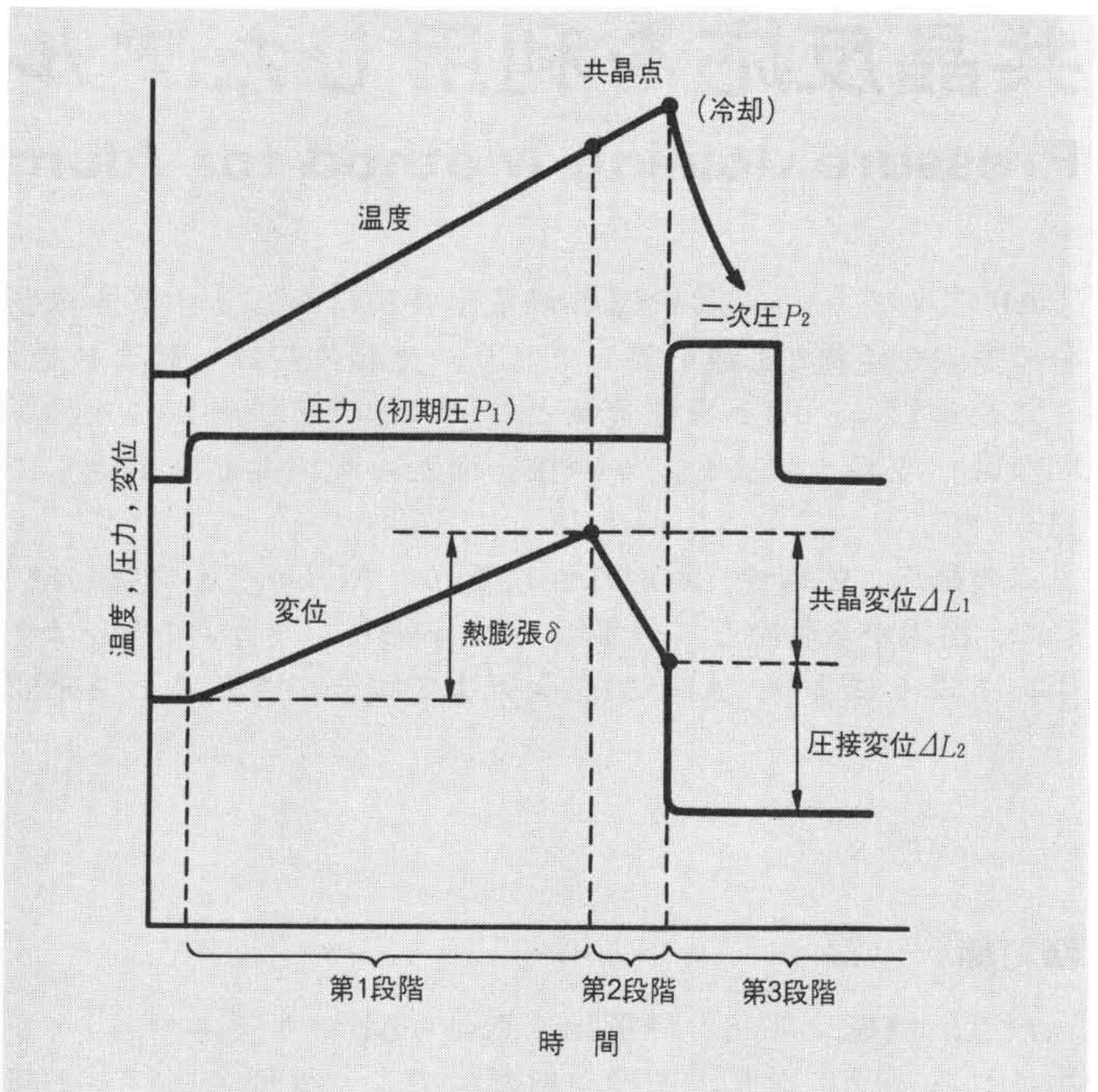


図5 接合プロセス中の温度、圧力変位の関係 共晶変位の検出によって加熱停止、二次加圧を行なう。

階は加熱を停止し、反応を停止するとともに、更に大きな加圧力によって界面に残っている共晶液を凝固前に排除するもので、これによりAlとCuが直接圧着される。冷却では共晶点以下の高温域を急冷し、冷却中過度の拡散による化合物相の成長を防止する必要がある。

2.3 装置の開発

以上の接合プロセスを実施するための装置としては、加熱、加圧及びそのシーケンス制御機能が必要である。開発した装置ではシーケンス制御法として、反応により接合試料に起こる長さ変化を利用した。

図5にプロセス中の温度、圧力及び変位(試料長さの変化)を示す。初期圧力 P_1 を加え、加熱を開始すると試料の熱膨張による伸び δ が生じ、共晶反応が始まると母材の急速な溶け出しによって逆方向の変位(共晶変位と呼ぶ。)が生ずる。

この共晶変位を検出し、接合に必要な変位量 ΔL_1 に達した時点で加熱を停止し、二次加圧 P_2 を行なう。これにより、試料温度を直接制御することなく、プロセスの自動化が可能となった。

図6に開発した装置の外観を示す。加熱は高周波誘導で行ない、加圧は油圧サーボ制御方式とした。

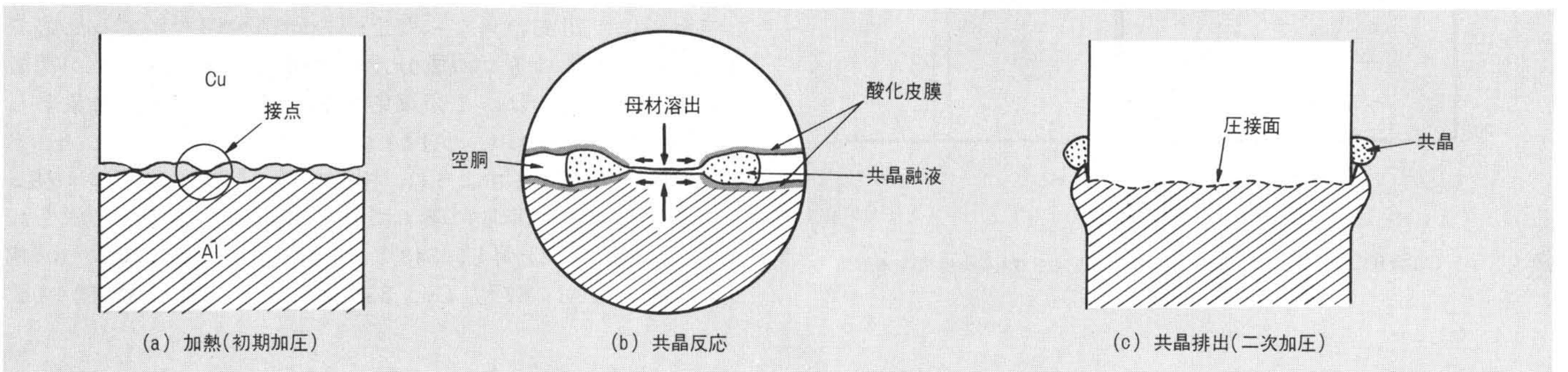


図4 接合原理(Al-Cu) 接点部から共晶反応が始まり、母材が溶け出すことによって酸化皮膜が除去され、二次加圧によって共晶融液が排除される。

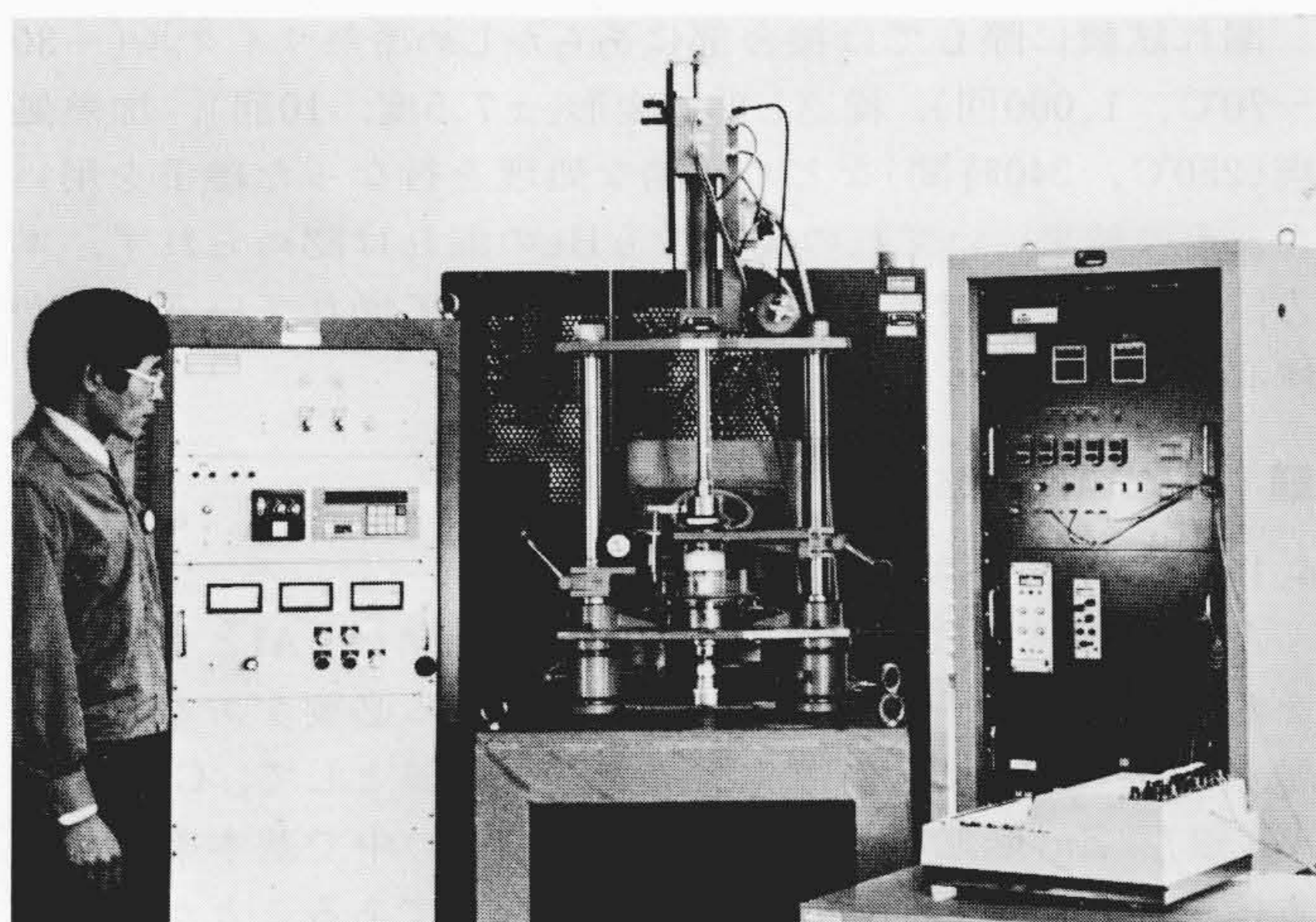


図6 共晶圧接装置 加熱部(高周波)、加圧部(油圧)及びシーケンス制御部で構成されている。

3 Al-Cuパイプの接合

3.1 試料及び方法

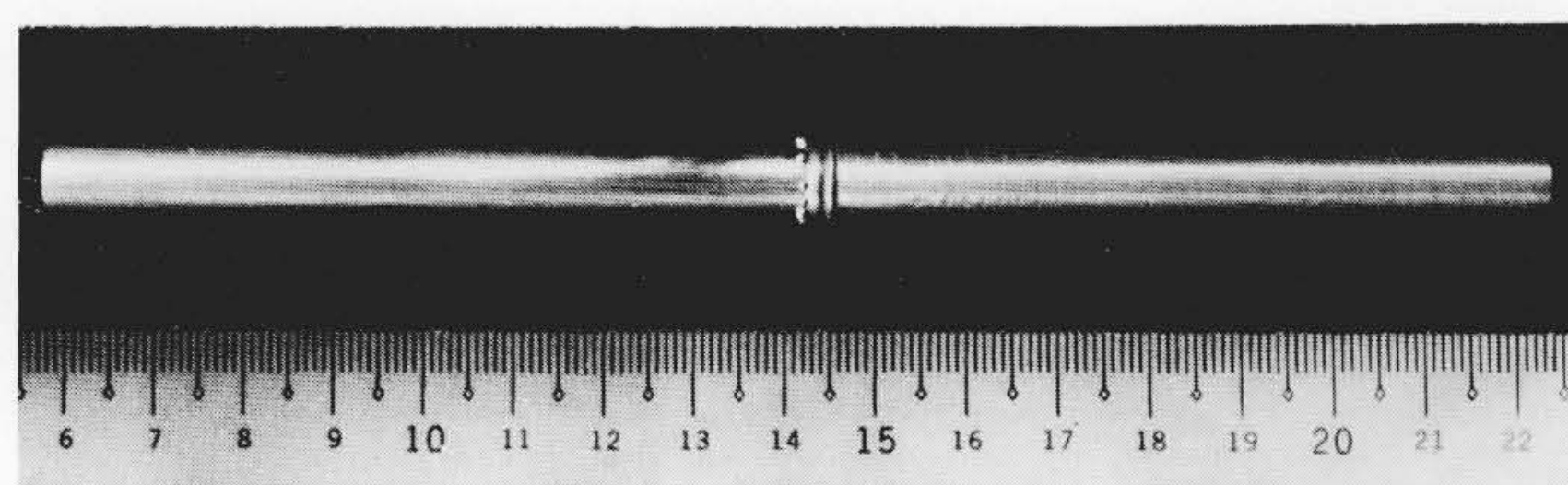
供試材として外径8mm、長さ85mm、肉厚1.25mmのAlパイプ(A-1100材)と同一外径、長さで肉厚1.0mmのCuパイプ(OFCu材)を用い、トリクレンで洗浄したパイプ端面を、アルゴンガスを吹き付けながら50°C/sで加熱し接合した。

接合したパイプ継手の外観及び断面を図7に示す。

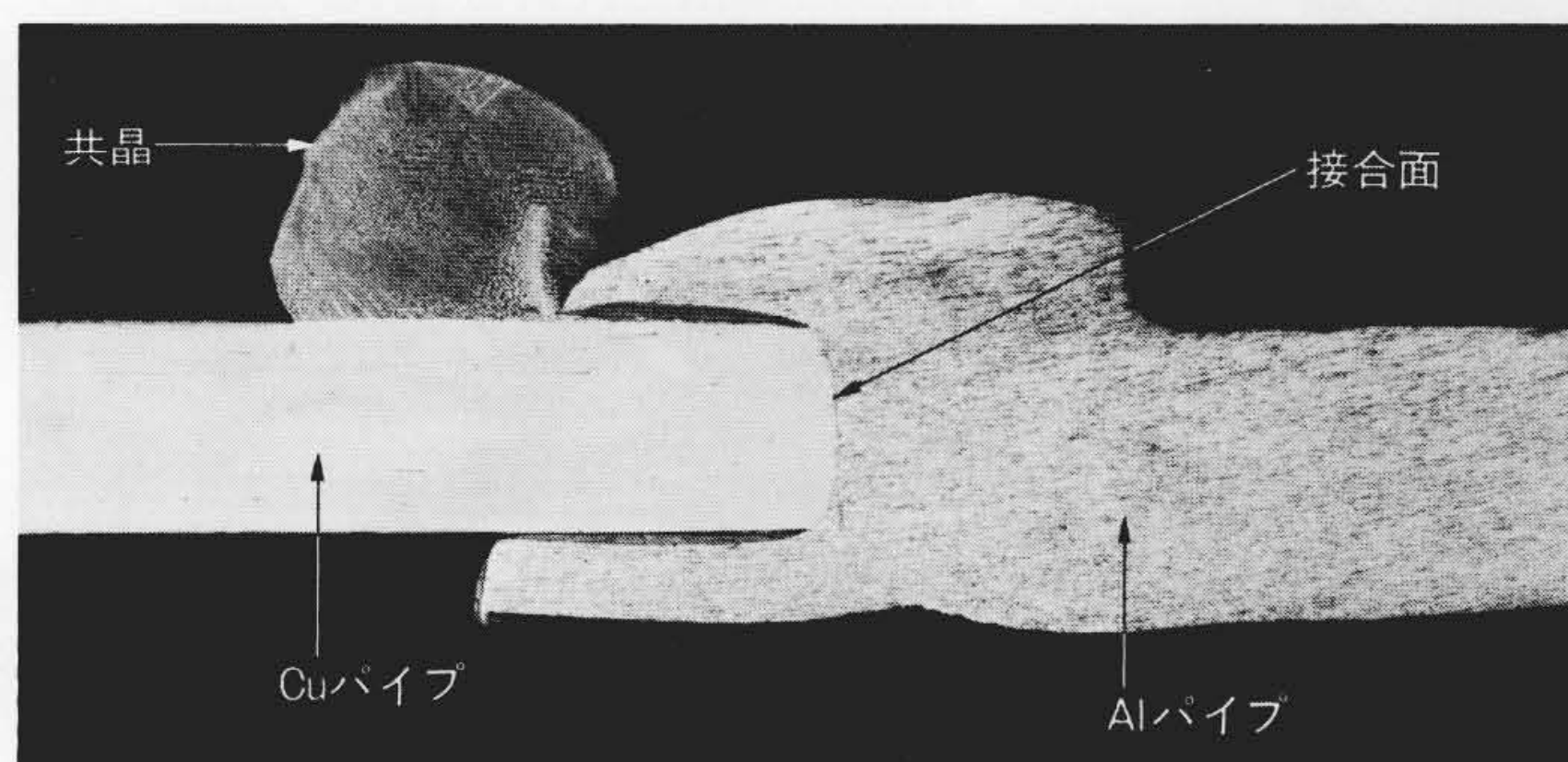
3.2 継手の強靱性

継手の強靱性に最も影響する接合因子は、共晶生成量と二次圧力である。

図8にパイプ長さの変化(共晶生成量)と引張強さの関係を示す。この場合、接合は初期圧(0.5kg/mm²)だけで行ない、引張試験ではAlパイプ側を拘束して行なった。その結果、パイプ長さにして400μm(Al側:347μm, Cu側:53μm)母材が溶け出すことによって、酸化皮膜、ボイドなどが排除され、母



(a) 外観



(b) 接合部断面

図7 Al-Cuパイプ継手 Alパイプの端部は、あらかじめプレス加工により厚肉化してある。

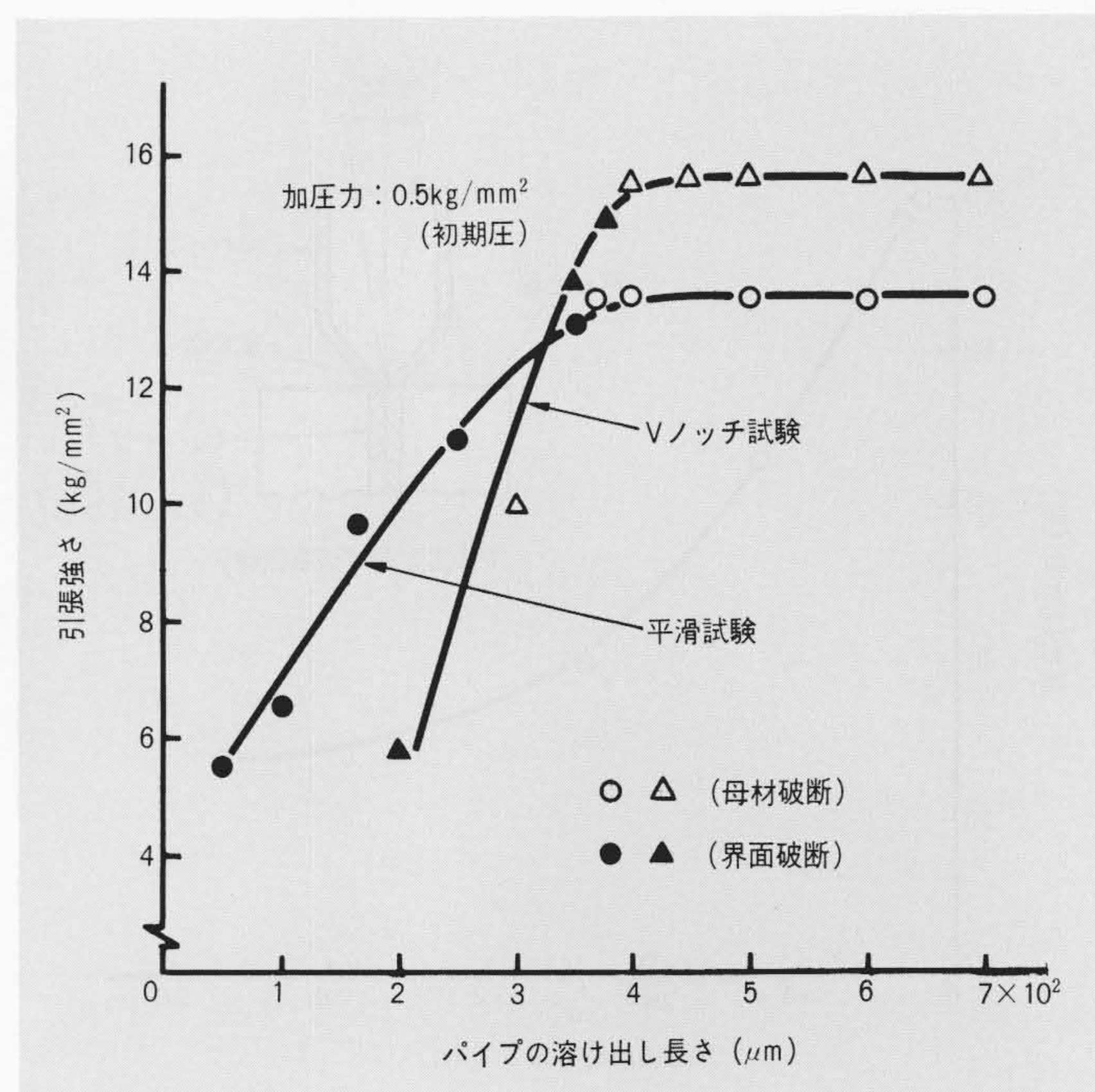
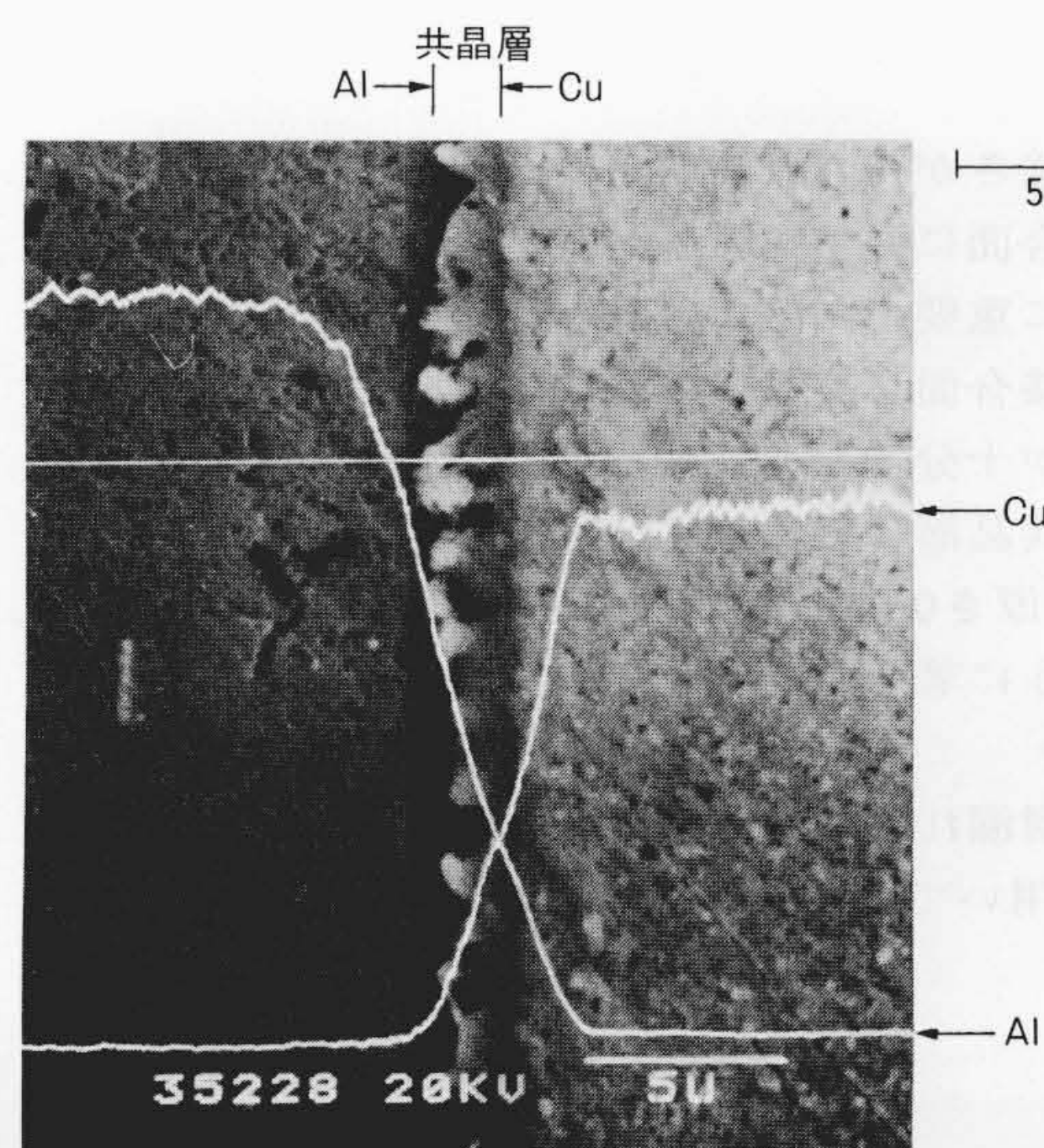
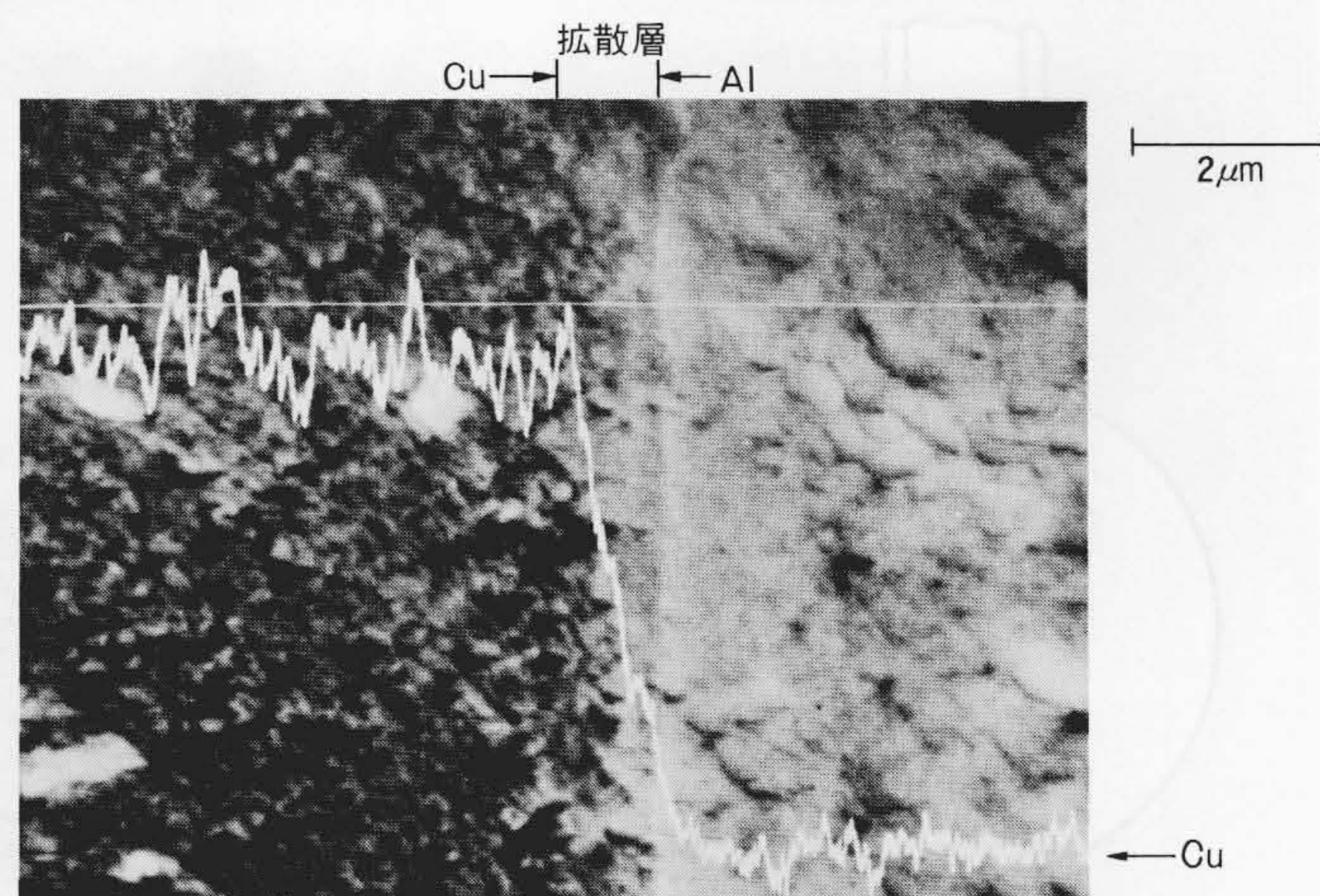


図8 共晶生成量と接合強さの関係 パイプの溶出量(長さ)が400μm以上で、母材と同等の接合強さが得られる。



(a) 初期加圧($P_1=0.5\text{kg/mm}^2$) (走査形電子顕微鏡による観察)



(b) 二次加圧($P_2=3\text{kg/mm}^2$) (オージェ電子分光分析装置による観察)

図9 二次加圧による共晶の排除 加圧力3kg/mm²で、接合面の共晶層はほぼ完全に排除される。

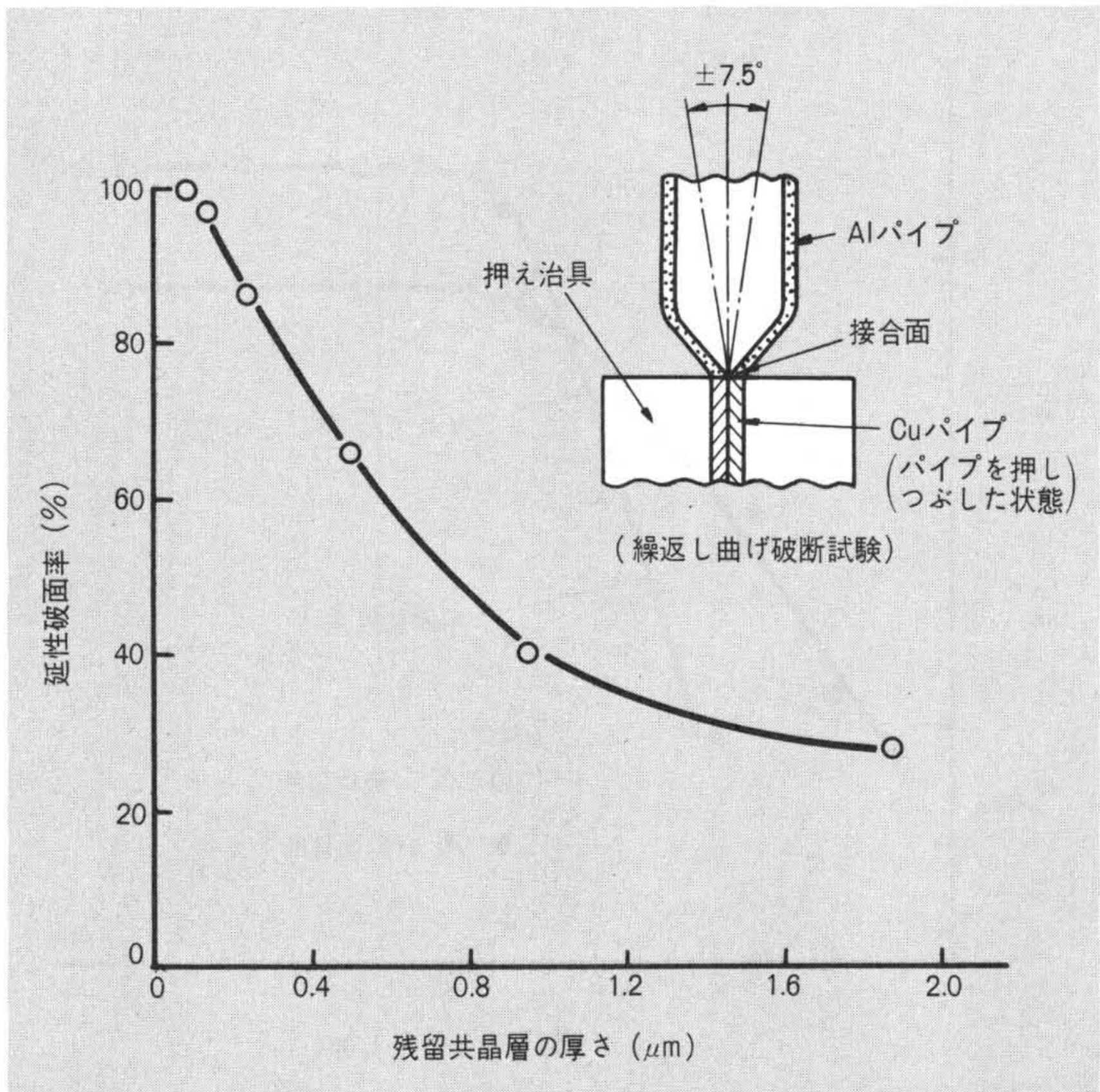


図10 継手の延性と残留共晶層厚さの関係 残留共晶層が薄くなると、継手の延性が著しく向上する。

材と同等の接合強さが得られることが分かる。

二次圧力は接合面に残留する脆い共晶を排除し、継手に延性を与えるために重要である。すなわち、図9に示すように初期圧だけでは接合面に共晶が残留するために、接合部は変形に対する伸びが十分でなく、共晶層で脆性的なはく離が生ずる。この残留共晶層は二次加圧(3 kg/mm²以上)によって大部分を排除でき(厚さ0.1μm以下)、それに伴って継手の延性は図10に示すように著しく向上する。

3.3 気密性試験

パイプ継手の耐漏れ性を調べるため、良好な条件で接合した1,000本の継手を用いてHe(ヘリウム)の漏れ試験を行なった。

漏れ試験に際しては接合部にあらかじめ冷熱サイクル(−30〜70℃, 1,000回)、繰返し曲げ変形(±7.5度, 10回)、加熱処理(250℃, 240時間)などの過酷な処理を行なった継手を用いた。その結果、いずれの場合でもHeの漏れは認められず、本方法による継手は気密性に対しても極めて優れていることが確認された。

4 AlとAlへの応用

4.1 インサート材の選定

AlとAlの接合に本方法を応用するためには、Alと共晶反応を起こす金属はく(インサート材)を用いる必要がある。Alの融点よりできるだけ低温で共晶をもつ金属として、Cu, Si, Ag(銀), Zn(亜鉛)などが挙げられる。この中で基本条件である接合強さに関してはCu, Si, Agが良好であることが分かったが、接合部の耐食性の面からSiが最も優れた元素と考えられた。

しかし、Siは脆いためはく状に加工しにくく、また、粉末として用いたのでは接合欠陥(ボイド)が生じやすいことが分かり、結局Al-Si合金として用いることにした。

4.2 Al-高Si合金はくの作製

- Al-Si合金インサート材には、次の二つのことが要求される。
- (1) Siが共晶組成(11.7%以上)の過共晶合金であること。
 - (2) Si粒子が微細で均一に分散していること。

これらの要求を満足するインサート材の作製法として、片ロールによる溶湯急冷法を適用した。この方法は図11に示すように、合金の溶湯を高速回転している金属ロール面に落下させて急冷する方法で、これにより良好な合金はくの作製が可能となった。

4.3 接合プロセス

Al-AlのプロセスはAl-Cuの場合(図4, 5)と同じであるが、インサート材中のSiと母材Al間の共晶を利用するので、Si粒子が融液化し消耗された時点で反応は停止する。二次加圧は反応が終了した時点で行ない、冷却に際しては特に急冷を行なう必要はない。

プロセス中の接合界面の状態を図12に示す。同図中のマー

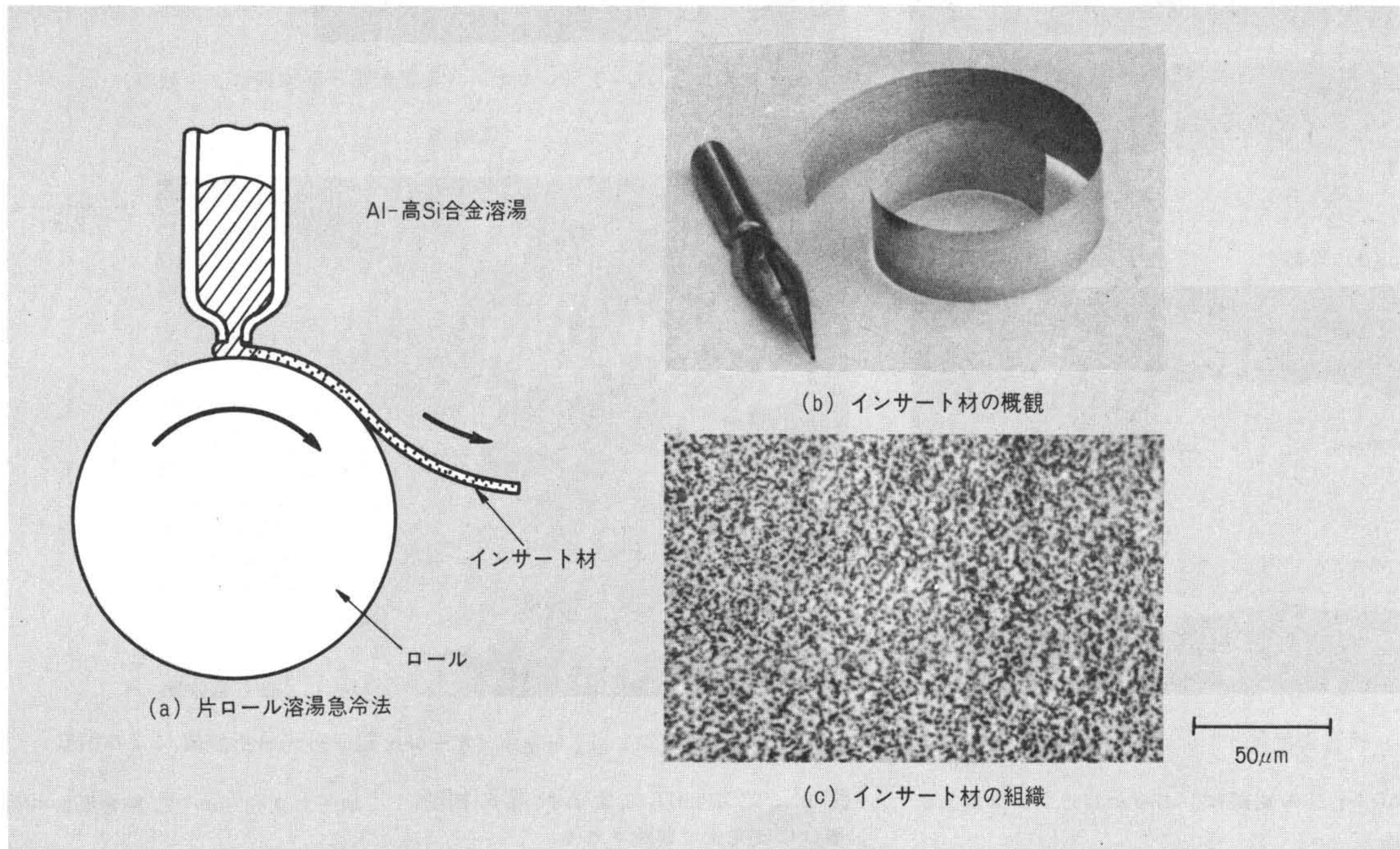


図11 インサート材の製法、概観及び組織 Si粒子が微細均一に分散したAl-高Si合金はくが得られる。

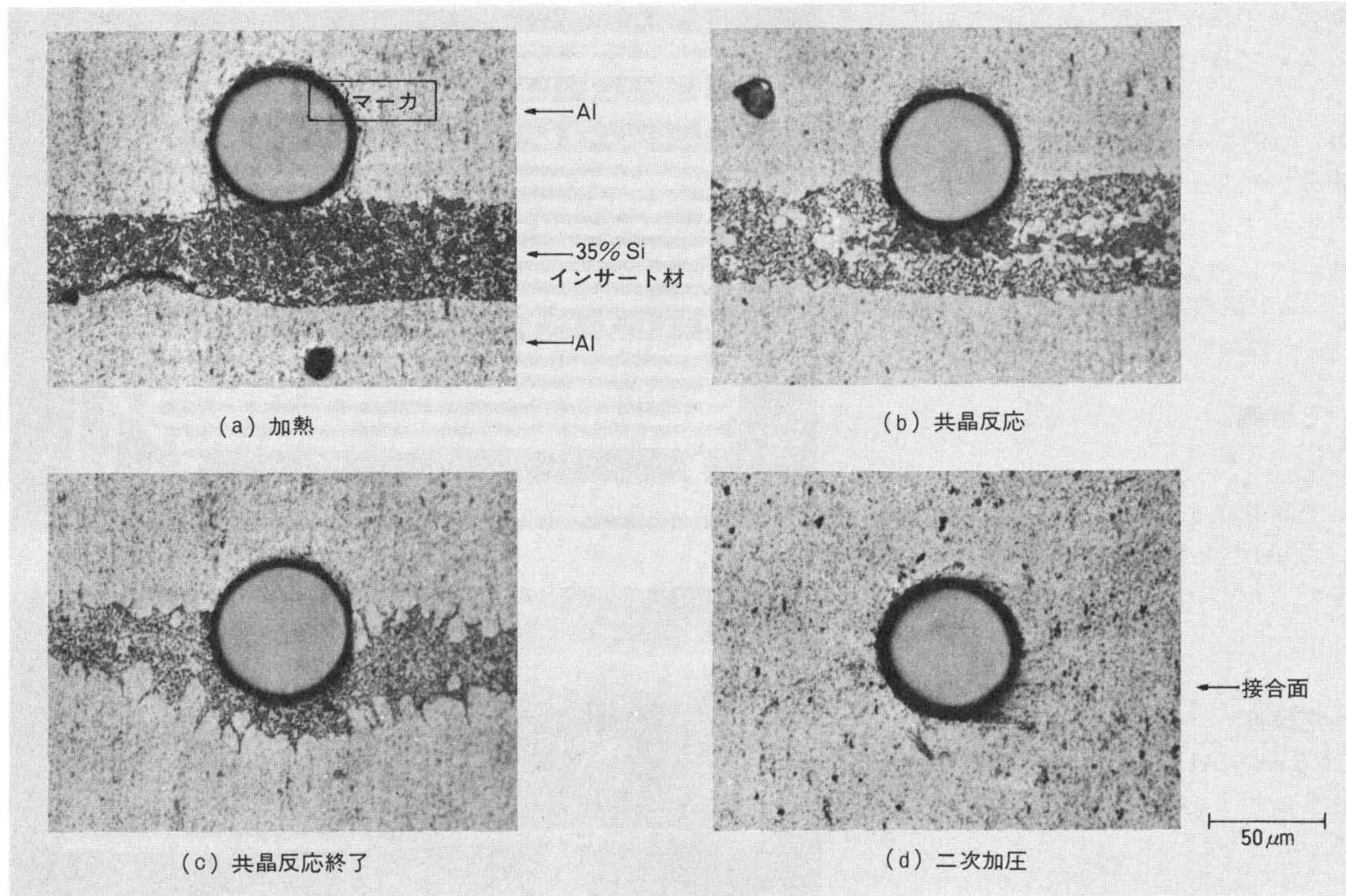


図12 プロセス中の接合面の状態 写真中のWマーカ位置から、共晶反応によりAl母材表面が溶出していることが分かる。反応開始から二次加圧までの時間は、1秒以内である。

カの位置から、反応によりAl母材の表面層が溶け出し、二次加圧によって共晶融液が排除され、Al同士が直接接合される様子が分かる。また、この場合の接合雰囲気は大気中であり、特別な前処理、保護雰囲気、フラックスを用いなくても酸化皮膜が除去されて接合できるのが本方法の特長である。

4.4 Si量と接合強さ

インサート材中の含有Si量としては過共晶組成以上で、更に多量に含有されるほどAlの溶け出し量が多くなり接合に有利となるが、はくの作製上からは低Siが望ましい。

インサート材中のSi量と継手の引張性質の関係を図13に示

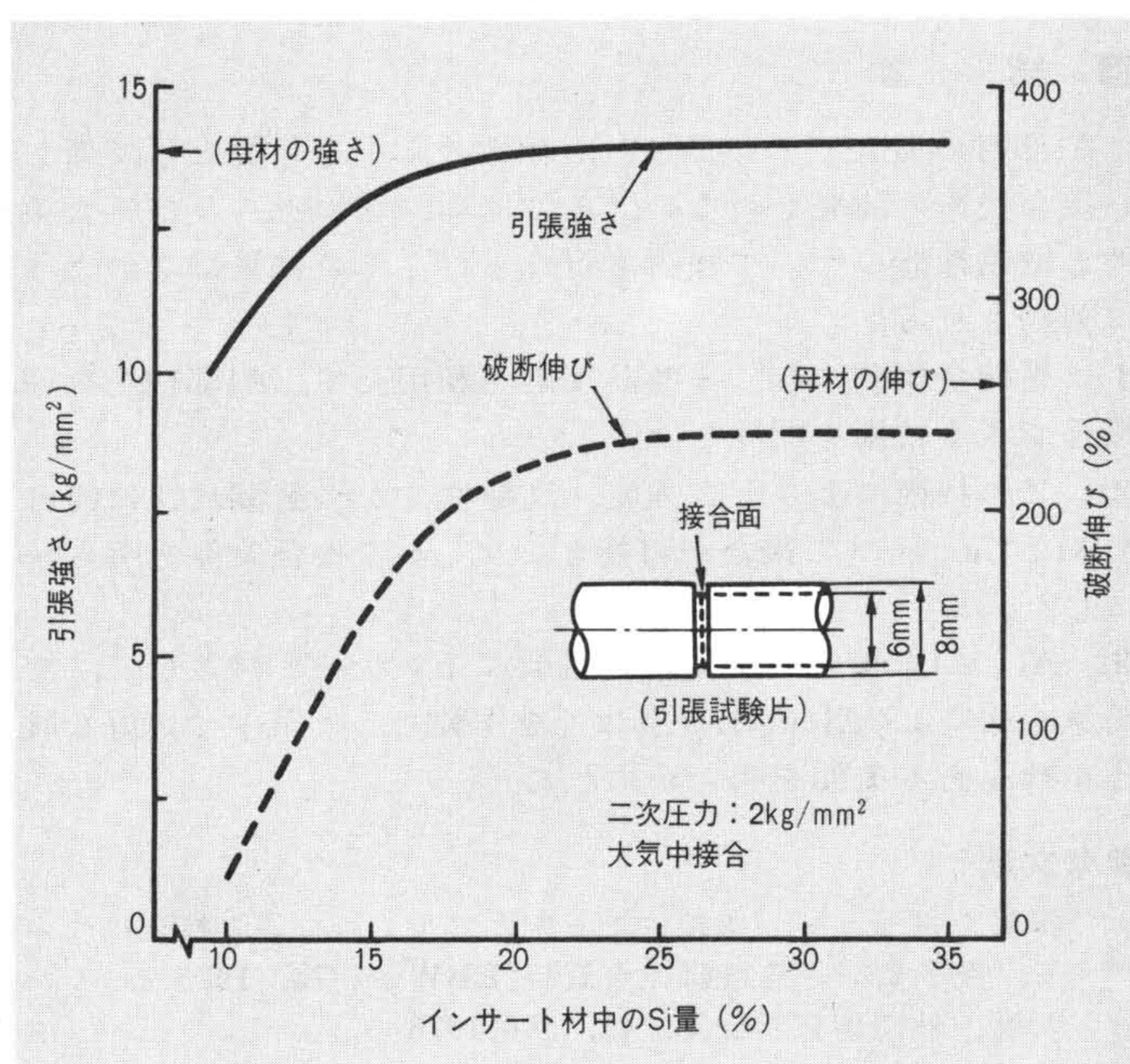


図13 インサート材中のSi量と継手の引張性質の関係 20%以上のSi量で母材と同等の強さと母材の85%以上の破断伸びが得られる。

す。この場合の引張試験は、接合界面に切欠きを設けた厳しい条件での結果であるが、Si量が20%以上であれば大気中で接合強さ、延性ともに良好な継手を得ることができる。

4.5 二次圧力の影響

既に図12に示したように、初期圧下で共晶反応が終了した時点での接合部はろう付によるものと類似しているが、更に二次加圧を行なうことによって本方法の特長が顕著になる。

図14は20%Siインサート材を用いたときの加圧力と継手の引張性質の関係を示すもので、2 kg/mm²以上の圧力によって安定した接合強さ(母材破断)と伸びを得ることができる。

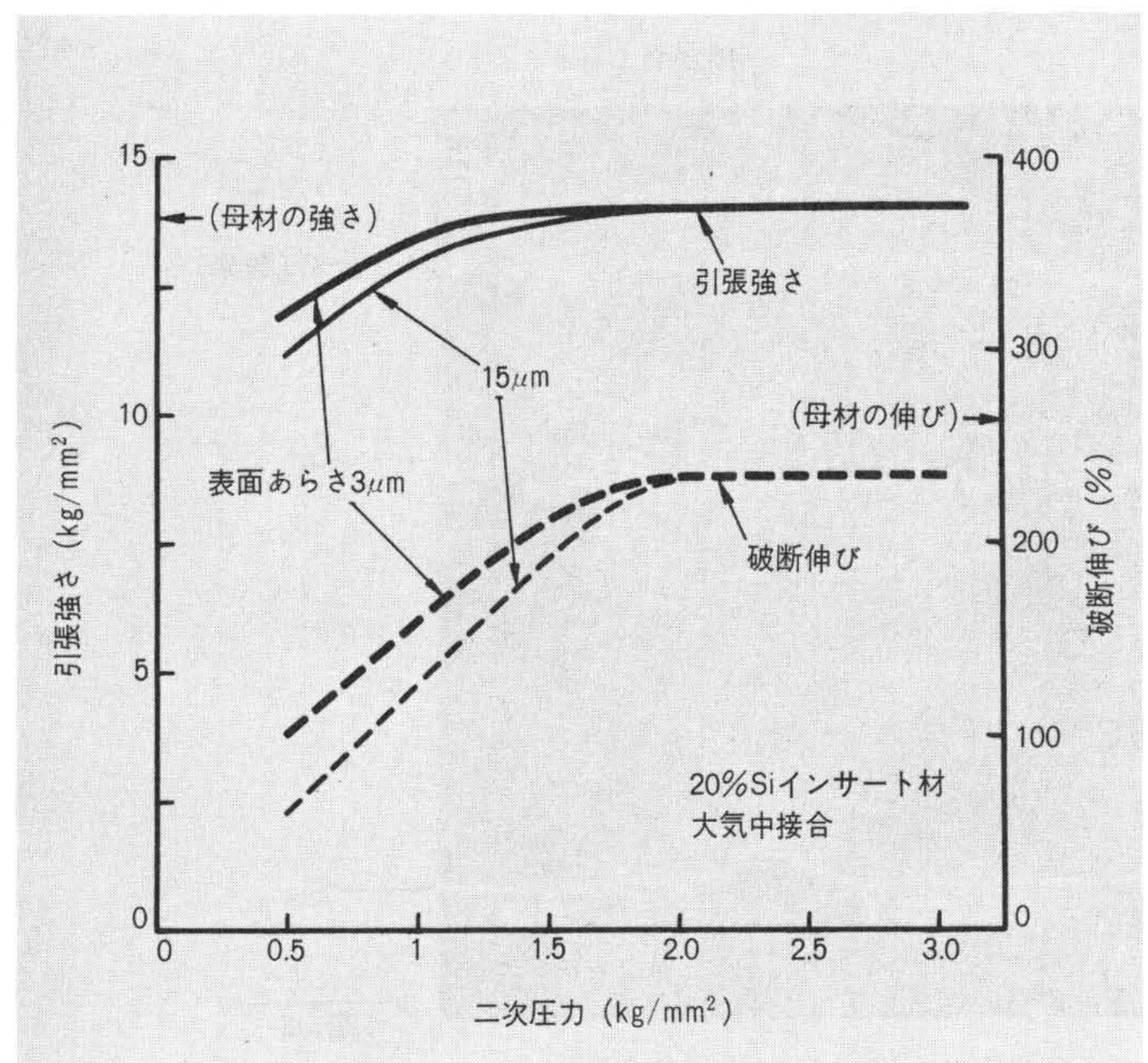


図14 二次加圧力と継手の引張性質の関係 2 kg/mm²以上で良好な継手が大气中で得られる。

この場合の圧力は従来の突合せ圧接法に比べ1/10以下であり、接合部に大きな変形を与えないで接合ができる。

4.6 接合面の観察

図15に接合部を拡大観察した例を示す。光学顕微鏡とSEM(走査形電子顕微鏡)による分析結果から、接合面に残留した共晶はほとんど観察することができず、母材同士が直接圧着されているものと考えられる。しかし、接合面に垂直に交わるAlの結晶粒界にわずかな共晶が観察されたが、継手の引張性質から判断して接合強さ、伸びへの影響は少ないと考えられる。

5 共晶圧接法の特長と応用例

5.1 特 長

- (1) 母材の融点以下の低温で高速接合ができる。
- (2) 前処理、フラックスなしでAlの大気中接合が可能である。
- (3) 接合強さは母材と同等で、かつ気密性に優れている。
- (4) 自動化が容易である。

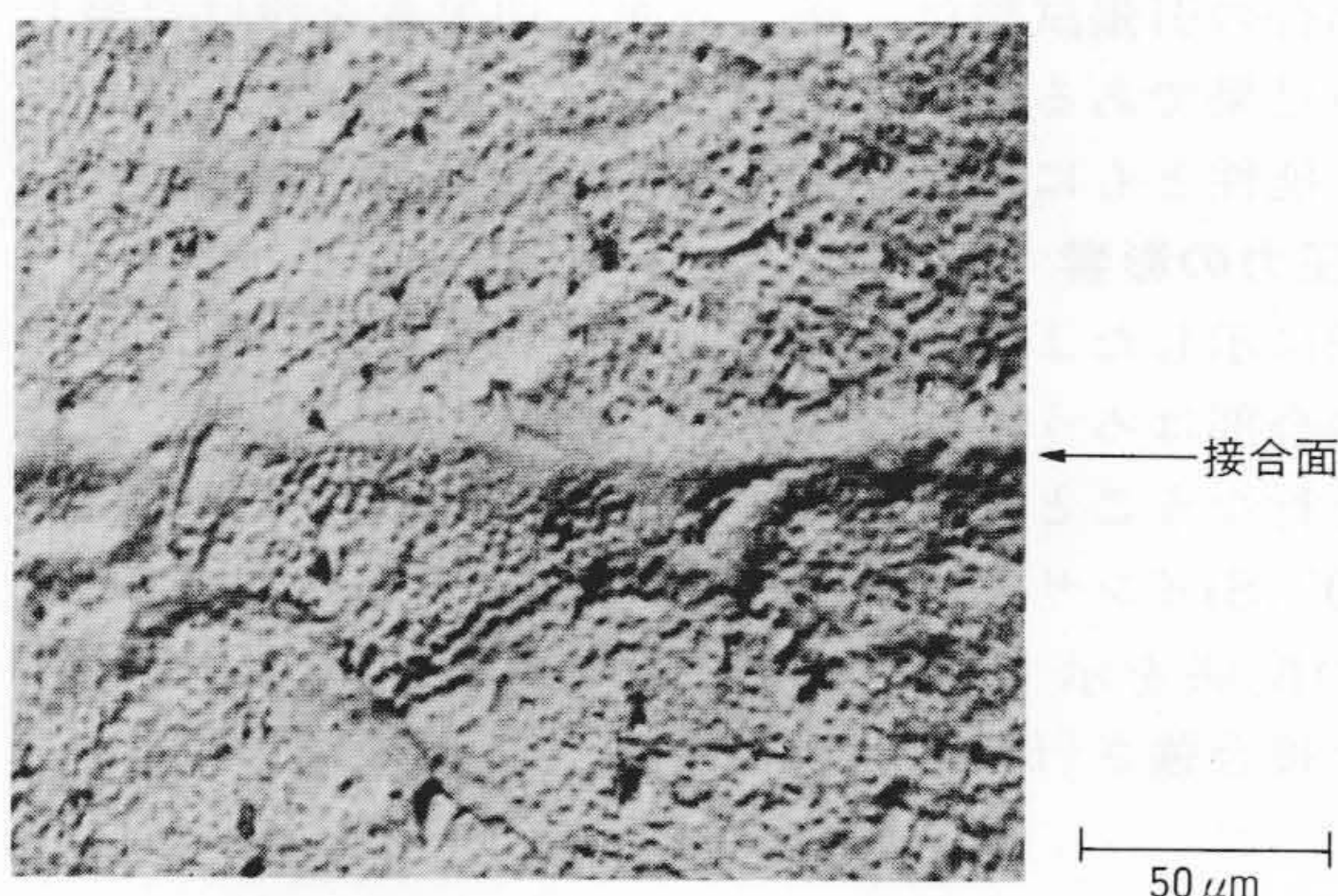
5.2 応 用 例

- (1) Al-Cuパイプ継手の熱交換器への応用

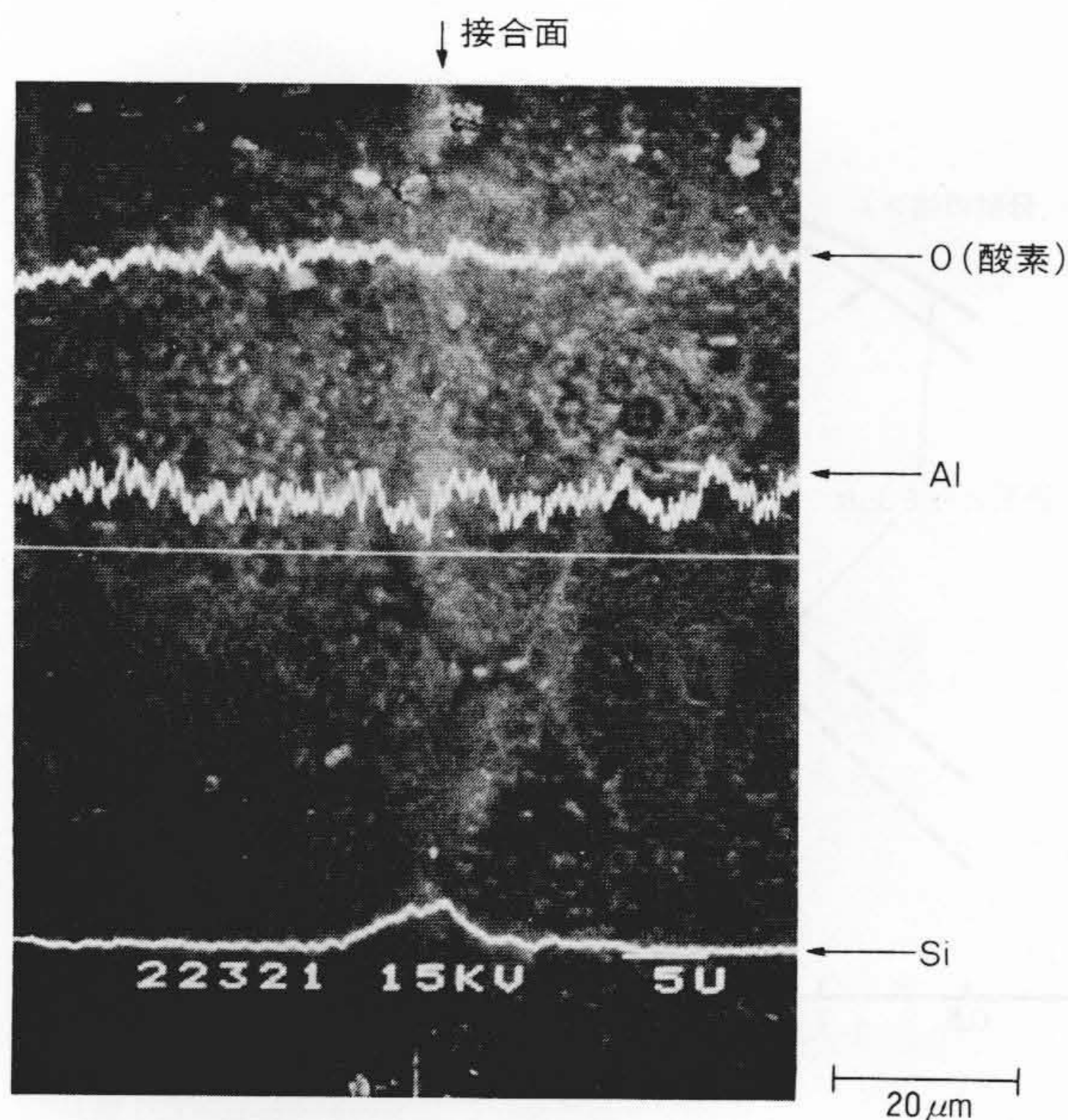
本方法により接合した直径8mmのAl-Cuパイプ移行継手を、冷蔵庫用熱交換器の配管継手として応用した例を図16(a)に示す。

- (2) Al-Al継手の応用例

図16(b)はAl-Alの接合例で、パイプ-パイプ(1100材)丸棒(5051材と6061材)、パイプ-ユニオンナット(1100材)などの継手を

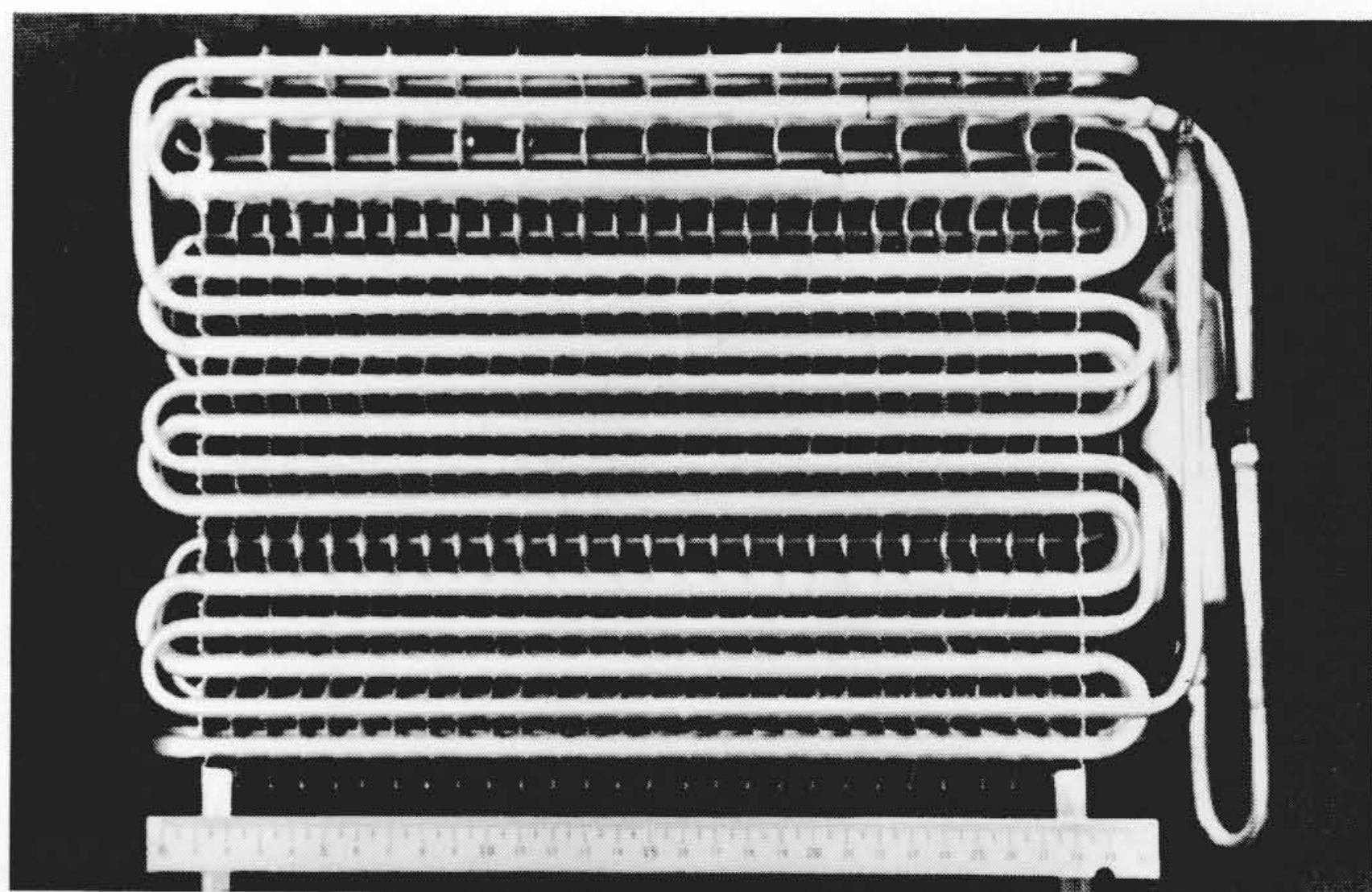


(a) 光学顕微鏡観察

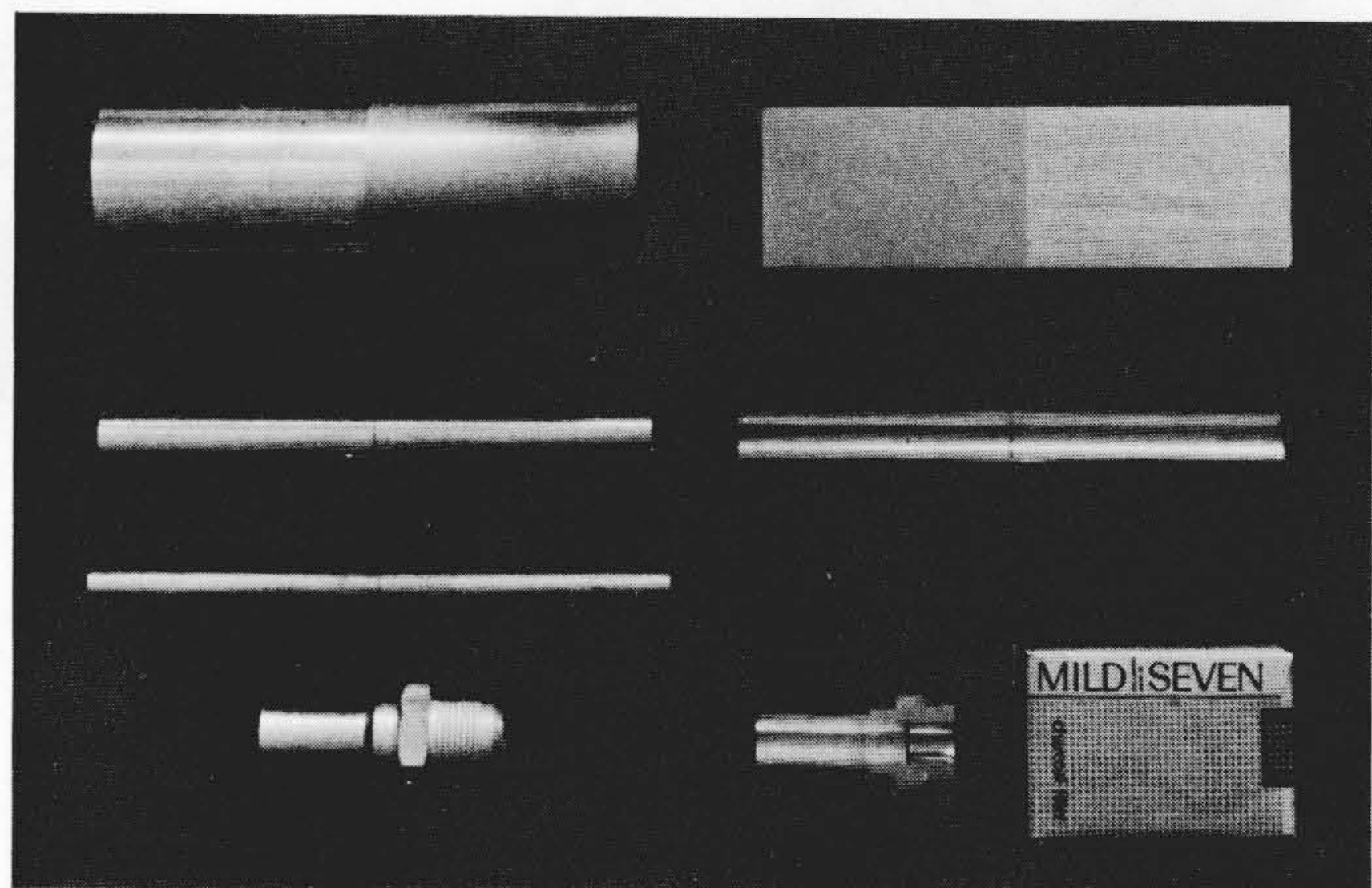


(b) 接合面の分析(SEM:走査形電子顕微鏡)

図15 Al-Alの接合面の観察 接合面に共晶はほとんど残留せず、母材同士の圧着状態となっている。



(a)



(b)

図16 共晶圧接法による接合例 (a)は本接合法によるAl-Cuパイプ継手を用いた冷蔵庫用エバポレータを、(b)はAl-Alの接合継手例を示す。

示す。

以上の接合例に示すように、本接合法は冷凍機器、空調機などの配管接続、導体接続、自動車部品の接合などに対して応用できる。

6 結 言

Al部材の接合での作業性、信頼性の向上を目的として新しい接合技術の開発を行ない、その原理、プロセス及び接合条件と継手性能について検討を行なった。その結果は次のように要約される。

- (1) 異種金属間に起こる共晶反応を利用して、Al部材を高速接合できる技術を開発した。
- (2) この技術により、高強度、高延性でかつ耐漏れ性に優れたAlとCuパイプの接合が可能となり、その接合条件を明らかにした。
- (3) AlとAlを接合する場合に必要なインサート材として、溶湯急冷法によるAl-高Si合金はくを作製し、大気中で良好な接合が行なえる条件を明らかにした。

参考文献

- 1) 安部：電子ビーム溶接による銅とアルミニウムの接合について、電子ビーム溶接研究会資料(EBW-91-73, 1973-5)
- 2) 大橋，外：溶接学会誌，45，590(1976-7)
- 3) M, Hansen: Constitution of Binary Alloys, Macgraw-hill, London (1953)
- 4) 笹田，摩耗(3)，機械の研究，23，1149(1971)