

平成 18 年度 修士論文

中間材に Cu,Zn および Sn を用いた
Al 大気中接合の検討



三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
木村 圭子

目次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 実験装置および実験方法	3
2.1 実験装置の概要	3
2.2 供試材および試験片形状	3
2.3 推定温度実験方法	4
2.4 接合実験方法	5
2.5 各中間材におけるプロセス	5
2.5.1 Al/Cu/Al プロセス概略	5
2.5.2 Al/Zn/Al プロセス概略	5
2.5.3 Al/Sn/Al プロセス概略	6
2.6 EPMA 分析	6
第 3 章 推定温度実験結果および考察	7
3.1 設定温度と実際の温度誤差	7
第 4 章 中間材に Cu を用いた接合実験の結果および考察	9
4.1 予備実験	9
(1) 最適な厚さの検討	9
(2) 最適な接合応力の検討	9
4.2 接合実験の結果および考察	10
4.2.1 加熱速度により影響	10
4.2.2 接合時間による影響	10
4.3 接合部生成相の SEM 観察および EPMA 分析結果	11
4.4 接合性	13
第 5 章 中間材に Zn を用いた接合実験の結果および考察	14
5.1 予備実験	14
(1) 最適な厚さの検討	14
(2) 最適な接合応力の検討	14

5.2	平滑面試験片を用いた接合実験の結果および考察	14
5.2.1	加熱速度により影響	15
5.2.2	接合時間による影響	15
5.3	接合部生成相の SEM 観察および EPMA 分析結果	15
5.4	カップ状試験片を用いた接合実験結果および考察	16
5.5	接合性	17
第 6 章	中間材に Sn を用いた接合実験の結果および考察	18
6.1	平滑面試験片を用いた接合実験結果および考察	18
6.2	カップ状試験片における接合実験結果および考察	18
6.3	接合性	19
第 7 章	結言	20
参考文献		
謝辞		

第1章 緒言

主要な非鉄金属である Al は、軽くて強い、耐食性が良いなどの特徴がある。主な Al 合金の種類としては、1000 番台の純 Al 系、2000 番台の Al-Cu 系、3000 番台の Al-Mn 系、4000 番台の Al-Si 系や 5000 番台の Al-Mg 系などがある^{文1)}。

一般的に、Al は酸素と結合しやすく大気中では Al は、酸化膜に覆われているため、この酸化膜が接合阻害因子となることが知られている^{文2)}。このために Al を接合する場合は、大気中で接合しにくいとされている。例えば拡散接合を行うためには一般的に真空雰囲気を作り出す必要がある。

Al の接合方法の一つとして、液相拡散接合がある^{文3)}。液相拡散接合は、一般的には母材よりも低融点材料をインサートメタルとして用い、Al 母材部に反応拡散により一時的に液相を生じさせたのち、等温凝固させる接合方法である。さらに長時間の加熱を行うことにより接合部顕微鏡組織の均質化も可能である。

本接合法では、接合部に生じた液相が接合(拡散)を促進するために、塑性変形を生じない程度の加圧力での接合が可能である。融点降下が期待できる異種金属を極薄のインサートメタルとして用いることによって、母材である Al を必要最低限溶解するだけですむため、寸法変化が小さい接合体を得ることも可能である。

もし、液相拡散接合が、真空中ではなく大気中で可能であれば、真空雰囲気を作り出す必要もなく接合が可能となり、幅広く利用できる可能性がある。そのためには、接合面での反応拡散に対する阻害因子である酸化膜を何らかの方法で破壊もしくは除去し、清浄な新生面を創出する必要がある。しかしながら、摺動等の機械的酸化膜除去を行った場合、再び適用範囲が制限されることが考えられる。

そこで本研究では、中間材(インサートメタル)に、Cu、Zn および Sn を用いた場合の Al 大気中接合における接合性を検討した。いずれの純金属も Al との共晶反応が生じる。すなわち、これらの純金属は液相拡散接合用インサートメタルとしての基本性質を有している。Cu は過去の本研究室における研究により、大気中異材接合が可能であることが明らかとなっている^{文4)}。Cu の融点は Al より高いため、本実験に用いた接合温度では、初期状態は固相であり、この場合の接合プロセスは一般的な液相拡散接合法とは異なるが、接合部での液化が始まると、その後は液相拡散接合法と同じプロセスを辿ることになる。Zn

および Sn は接合温度の低温度化を意図して選択したものである。また、両金属に関する実験結果は、めっき鋼板と Al との異材接合を検討する際の基礎資料となるものと考えられる。なお、大気中接合において重要となる酸化膜破壊および除去に関して、本接合法の適用範囲拡大を考慮して、本研究では摺動などの機械的方法およびフラックスによる化学的方法による意図的な手法を用いないこととした。

第2章 実験装置および実験方法

2.1 実験装置の概要

本実験の接合装置には、高周波誘導加熱装置（富士電波工機（株）製、FIH-153型、最大出力 15kw、周波数 70kHz）および接合治具を用いた。実験装置の概略図は Fig.2-1 に示したものである。コイルに高周波電流を流すことにより試験片を誘導加熱するものである。

この実験装置に試験片を設置する場合は、図に示してある治具に設置して実験をおこなった。治具の特徴としては、図に示してあるように、下側の試験片を支えるロッドにネジを切り試験片の設置位置を固定できるようにし、実験再現性を保てるようにした。また、試験片を設置しやすくするために可動式にした。実験をおこなう際は、接合界面の密着度をあげるために上側のロットの上から接合荷重をかけた。

またこの実験装置は、図に示してあるプログラムユニットと白金熱電対を接続することで加熱から冷却までの熱サイクルを制御することができる。

2.2 供試材および試験片形状

母材として純アルミニウム A1070 と中間材として純銅 C1020、純 Zn および純 Sn を用いた。

Fig.2-2 に示すように平滑面試験片として母材の A1070 が $\phi 6\text{mm}$ 、長さ 60mm で、中間材は、Cu は $\phi 6\text{mm}$ 、厚さ 50~300 μm 、Zn は $\phi 5\text{mm}$ 、厚さ 500 μm 、Sn は $\phi 6\text{mm}$ 、厚さ 500 μm のものを使用した。実験をおこなう際の前処理として試験片を機械切断後、中間材、平滑面試験片ともに接合面をバリ取りと接合面の粗さを均一にするために、#2000 の耐水研磨紙で研磨をおこなった。その後、接合界面をアセトンで脱脂し洗浄をおこなった。

Fig.2-3 に示すように、カップ状試験片として平滑面試験片の接合面に $\phi 3\text{mm}$ 、深さ 500 μm の穴をエンドミルによって空けた。その場合の中間材は Zn、Sn とともに、 $\phi 3\text{mm}$ 、厚さ 2mm ものを使用した。実験をおこなう際の前処理として試験片を機械切断後、エンドミルで穴を空けたカップ状試験片の接合面の外周と内周部分、中間材の接合面のバリ取りと接合面の粗さを均一にするために、#2000 の耐水研磨紙で研磨をおこなった。その後、接合界面をアセトンで脱脂し洗浄をおこなった。

また化学組成を Table2-1, それぞれの融点と Al との共晶温度を Table2-2 に示す。

2.3 推定温度実験方法

熱電対を試験片の接合面上に設置した場合、熱電対が接合面の密着に対して障害物となり接合を阻害する可能性がある。そのために、接合実験に悪影響をおよぼさない位置に設置した熱電対の温度測定結果より、接合面温度を推定する必要がある。

Fig2-4 に示してあるように、中間材は厚さ $500\mu\text{m}$ の Cu を用い、熱電対を 3 ヲ所設置し実験をおこなった。具体的には図に示すように、温度制御用として熱電対①を上側母材接合面から 5mm 上の位置に設置し、高周波誘導加熱装置を制御するプログラムユニットと接続した。熱電対②は、設定温度と実温度との整合性の確認のために熱電対①を溶接した側と反対側の位置に設置し、コンパクトレコーダーと接続した。熱電対③は、接合面の温度を測定するために、下側試験片接合面中心に設置し、コンパクトレコーダーと接続した。なお、実験に使用した高周波誘導加熱装置のコイルの均熱加熱範囲は、Fig.2-5 に示すように温度制御用の熱電対を試験片の中心に設置し、コイルの中心から上側をプラス、下側をマイナスとしコイルの中心を基準に 3mm 毎に測定をおこなった結果、グラフに示すように上側に 6mm 、下側に 6mm 、計 12mm の範囲で均熱加熱が保たれている。

実験条件としては、加熱速度による温度履歴の差異も検討するために加熱速度を $1, 5, 10\text{K/s}$ とし、接合面を密着させるために 0.69MPa の応力をかけた。測定温度は、 1K/s の場合は $773\text{K}, 823\text{K}, 873\text{K}, 898\text{K}$ とし、 5 および 10K/s の場合は、 $773\text{K}, 823\text{K}, 873\text{K}, 883\text{K}$ とした。いずれの条件においても 3 回ずつ測定をおこなった。測定終了目安は昇温終了後、熱電対②、③が測定した温度が安定したときとした。

熱電対②、③による測定結果の平均値を接合面平均温度として算出し、接合温度とした。

2.4 接合実験方法

選定した中間材と Al との接合性を検討するために以下のような実験をおこなった。

接合実験は 2.2 に述べた前処理を施したあと、試験片を接合装置に設置した。接合圧力は加熱開始前に付加した。下記に実験条件を示す。

加熱速度：1K/s, 5K/s, 10K/s

接合圧力：1.39MPa

接合時間：0～900s

接合温度：893K(Cu), 863K(Zn), 803K(Sn)

冷却方法：空冷

2.5 各中間材におけるプロセス

本接合法は、反応拡散によって接合面近傍を液化させることにより接合させるものである。

2.5.1 Al/Cu/Al プロセス概略

Al/Cu 系平行状態図を Fig.2-7 に示す。本実験では、Al の融点以下、共晶温度以上の温度に加熱する。拡散開始前の時点では Al, Cu とともに固相である。拡散が開始した時点からインサートメタルである Cu 中の Al 濃度は増加する。平衡状態図では右側から左側へと濃度が変化する。この過程で接合部に液相が生じ、Al, Cu とともに液化する。Al 濃度が非常に高くなった時点で、等温凝固が開始する。等温凝固が終了したあとの加熱により、顕微鏡組織の均質化過程に入る。

2.5.2 Al/Zn/Al プロセス概略

Al/Zn 系平行状態図を Fig.2-8 に示す。本実験では、Al の融点以下、Zn の融点温度以上の温度に加熱する。この時点でインサートメタルである Zn は液相であり、Al 母材は固相状態である。接合温度で保持された場合、相互拡散により Zn 中の Al 濃度および Al 中の Zn 濃度が高くなる。この過程で Zn は等温凝固、Al は液化→等温凝固の過程を経る。Cu の場合と同様に、さらなる温度保

持により，接合部での **Zn** 濃度が均一化され，顕微鏡組織の均質化を行うことが可能となる。

2.5.3 Al/Sn/Al プロセス概略

Al/Sn の状態図を Fig.2-9 に示す。本実験では，Al の融点以下，Sn の融点温度以上の温度に加熱する。この時点でインサートメタルである Sn は液相であり，Al 母材は固相状態である。拡散開始後におきる相変化は，Zn の場合と同様である。ただし，Sn では他の金属にくらべてごくわずかの Al 濃度で等温凝固が開始する。

2.6 EPMA 分析

接合実験後の破断面および切断面に関して SAM(Scanning Electron Microscope)および EPMA(Electron Probe Microanalysis)を用いて接合部に生じた生成相の観察および化学分析を行った。

第3章 推定温度実験結果および考察

3.1 設定温度と実際の温度誤差

2.3 に示した方法により，高周波誘導加熱装置の設定温度から接合温度推定法を検討した。以降の図中の **Center** および **Outside** は，それぞれ接合面中心温度および試験片側面温度のことをさす。試験片側面温度は接合面より 5mm 離れた位置にあるが，Fig2-5 に示したように均一加熱帯に位置しているので，接合面外周温度とほぼ同じ温度を示している。

また図中 **Average** は，接合面中心温度と試験片側面温度の平均値で本実験における接合温度としたものである。加熱中の温度は，高周波誘導加熱装置付属のプログラムユニットによりフィードバック制御される。そのため昇温過程末期には Fig.3-1 に示すように 10s 程度のオーバーシュートがおきる。本実験では Al の融点以下の温度域で行うため，オーバーシュート量を考慮しなければならないのであわせて検討した。

加熱速度 1 K/s の結果を最小自乗法で近似したものを Fig.3-2 に示した。図中の点線は，設定温度と各測定温度が等しい場合の関係を示す。この図より接合面温度(図中 **Average**)は，設定温度にかかわらず設定温度よりも約 10K 高くなることがわかった。このときのオーバーシュート量を，Fig.3-3 に示した。昇温が終了した時点での最高温度と保持の段階で安定した温度の差で表した。この図に示すように，接合面外周のオーバーシュートの量は $\pm 5\text{K}$ 以内であった。接合面中心では 1 ～ 6 K 高くなっていた。

加熱速度 5K/s の結果を最小自乗法で近似したものを Fig.3-4 に示した。このグラフより 1K/s と同様に接合面温度は設定温度にかかわらず設定温度よりも約 10K 高いということがわかった。このときのオーバーシュートの量を Fig.3-5 に示した。このときのオーバーシュート量は，接合面外周で 5 ～ 10K ぐらいの範囲で変動した。接合面中心では 0 ～ 20K の範囲で変動した。

加熱速度 10K/s の結果を最小自乗法で近似したものを Fig.3-6 に示した。この図に示してあるように，この場合も 1, 5K/s と同様に設定温度にかかわらず設定温度よりも約 10K 高くなることがわかった。このときのオーバーシュート量を Fig.3-7 に示した。この図に示すようにオーバーシュート量は接合面外周で，5 ～ 10K ぐらいであった。接合面中心では 9 ～ 26K ぐらいであった。

これらの結果より，オーバーシュートについては，加熱速度にかかわらず発

生するということがわかった。その量は Fig.3-8 に示すように接合面外周，接合面中心ともに加熱速度に依存しており，加熱速度が速くなればなるほど増加するということがわかった。

接合温度については，中間材が Cu の場合は Fig.3-2, 3-4, 3-6 より加熱速度にかかわらず設定温度よりも 10K 高いということがわかった。確認のために中間材を厚さ $500\mu\text{m}$ の Zn にし，Cu と同様の実験を設定温度 853K でおこなった。この実験結果を Fig.3-9 に示す。図が示しているように加熱速度にかかわらず，設定温度より約 10K 高いということがわかった。

これらの実験結果より，本実験における接合温度を設定温度より 10K 高い温度とした。

第4章 中間材に Cu を用いた接合実験の結果および考察

4.1 予備実験

(1) 最適な厚さの検討

Cu を中間材として使用したとき Cu は、Al よりも融点が高いため接合温度到達時点では、固相状態である。中間材である Cu が厚すぎると接合プロセスが完了する前に、Al の軟化および顕著な液相の生成による座屈変形する可能性がある。そこで、中間材の最適厚さを検討した。平滑面試験片を使用し、加熱速度を 10K/s、接合応力を 0.69MPa、接合温度 893K、接合時間を 300s、中間材の厚さを 50~300 μm と変化させた。

中間材 Cu の厚さを変えることによる接合部への影響写真を Fig.4-1 に示す。図に示すように、中間材の厚さが小さくなるにつれて接合部の変形量が小さくなった。(d)以外のものは、特に接合面の下側の方が上側に比べ変形している。これは Cu の量が多すぎると拡散が進行し、Al が Cu と拡散し接合部が液化することで、該当個所が接合応力に耐えられなくなり座屈変形したと考えられる。

これらのことから、Cu を中間材として用いた場合、Cu の厚さが厚すぎると接合部の座屈変形量が大きくなることがわかった。

これらの実験結果より、本実験条件において中間材に Cu を使用する場合は、本実験範囲で試験片の変形量が小さかった 50 μm を最適厚さとし、接合実験に用いた。

(2) 最適な接合応力の検討

接合面を介した拡散を生じさせるためには、接合面を密着させるための接合圧力をかける必要がある。平滑面試験片を使用し、加熱速度を 10K/s、接合温度 893K、接合時間を 420 s、中間材の厚さを 50 μm 、接合圧力を 0.69~1.39MPa と変化させた。

引張試験結果を Fig.4-2 に示す。接合応力を 1.39MPa とした場合、最も接合強度が高かった。これは接合応力が増すことによって、Al と Cu の密着度があがりより拡散が促進されたためだと考えられる。また 0.69MPa から 1.04MPa へと接合応力が増加すると接合強度が約 3 倍上昇しているのに対して、1.04MPa から 1.39MPa へ応力が増加させても、接合強度は顕著な向上がみられなかった。接合圧力の増加は前項で検討した接合部の座屈変形に悪影響をも

たらず。

この実験結果より本実験条件において接合応力は、1.39MPa が最も適していると考えられる。

4.2 接合実験の結果および考察

4.1(1)で決定した中間材の厚さ $50\mu\text{m}$ と 4.1(2)で決定した接合応力 1.39MPa を用いて接合実験をおこなった。引張試験結果を Fig.4-3, Fig.4-4～6 をもとに接合時間毎の破面面積(接合面積)測定結果を Fig.4-7, 破面面積を用いて応力に換算した引張強度を Fig.4-8 に示す。なお、加熱速度 1K/s では、長時間加熱による Al の軟化による変形がおきたため、720s が最長実験時間となった。

4.2.1 加熱速度による影響

Fig.4-3 に示すように最高引張荷重は、加熱速度が大きくなるにつれて増加した。Fig.4-7 に示すように多少ばらつきはあるが、接合時間が長くなるほど破面面積の量が増加する傾向にある。これは保持時間が長くなるほど広範囲に渡って酸化膜破壊および拡散が進行したために、破面面積が増加したと考えられる。しかし 1K/s の場合は、接合時間が長時間になっても 10K/s ほど接合面積が増えないということがわかった。加熱速度が 1K/s で最高強度を記録した破面を Fig.4-9 に示した。この接合面を観察すると破面の中心部分のみ金属間化合物が生成されているが、中心以外の部分は黒くなっており酸化膜である。これは拡散が開始する前の段階で加熱速度が遅いほど昇温中の加熱により酸化膜成長が促進され、接合温度に到達したあとも十分に酸化膜破壊がおこなわれず接合面積拡大が阻害されたものと考えられる。

このことから加熱速度の低下は、昇温中の長時間加熱による酸化膜成長により温度保持中の接合面積拡大過程に対して悪影響を与えるものと考えられる。

4.2.2 接合時間による影響

Fig.4-3 に示すように加熱速度にかかわらず引張荷重のピークが 2 カ所あるようである。10K/s で接合時間 900s の時は、Fig.4-7 に示すように接合面積が増加したために強度が上がったと考えられる。

Fig.4-8 で示すように、応力に換算した場合にも加熱速度にかかわらず接合

時間と引張強度の関係には、ピークが2カ所あるということがわかった。このことから強度の変化には、破面面積の変動のために生じたのではなく接合部の生成相が変化したために2カ所ピークが生じたものと考えられる。そこで最も顕著に強度の変化が現れている加熱速度 10K/s に関して引張試験終了後の破面を SEM 観察および EPMA 分析した。接合実験が開始して最初に強度がピークに達した接合時間 300s のときの EPMA 分析結果を Fig4-10 に示す。図中 A に示すように破面には Al 酸化膜が観察されるが、その他に Al と Cu との反応拡散により図中 B のような α 固溶体のデンドライトや図中 C のような共晶組織が観察された。B および C は、接合温度では液相であったものである。最初のピークから強度が低下した保持時間が 480s のときの結果を Fig.4-11 に示す。図中 A~E に示すように AlCu, Al₂Cu のような脆弱な金属間化合物が、多量に観察された。このため、図中 F のような α 固溶体が発生しているにもかかわらず、接合強度は低下したと考えられる。その後再び接合強度が上昇した接合時間 720s のときの結果を Fig.4-12 に示す。接合時間 480s において観察された脆弱な金属間化合物である AlCu, Al₂Cu が消失し、接合部が等温凝固および均質化されたために図中 A~E のような α 固溶体が生成されたと考えられる。この場合の α 固溶体は、300s で観察されたものとは異なり接合温度では固相である。このために接合強度が再び上昇したと考えられる。

この結果より、本実験条件において中間材に Cu を使用した場合は、保持時間が長くなるにつれて拡散が進行し、それによってもって接合部生成相が変化する。このために接合強度に変動が生じると考えられる。

4.3 接合部生成相の SEM 観察および EPMA 分析結果

Al/Cu/Al の接合における顕微鏡組織の変化を Fig.4-13 に示す。Fig.4-13 (a)接合時間 0s の段階では、昇温過程終了時はほとんど Cu は拡散しておらず Cu がそのままの状態を観察された。Fig.4-13 (b)の接合時間が 120s の段階では、酸化膜が破壊個所を中心に反応拡散が進行し、その結果として接合部の液化が生じる。この場合でも、接合時間 0s の段階で接合面全体に観察された Cu がごくわずかに観察された。Fig.4-13 (c)の接合時間 180s の段階では、固相 Cu は完全に消失する。さらに接合時間が進むにつれて、Fig.4-13 (d)の接合時間 360s のように、等温凝固により液相領域が小さくなり始める。Fig.4-13 (e)

の接合時間が 420s の段階では、さらに等温凝固過程が進行し、液相領域は減少した。Fig.4-13 (f)の接合時間 540s の段階では、液相領域が接合面から完全消失し、接合部における等温凝固が終了したと考えられる。

この過程において液相領域は、全接合面において均一には生成しなかった。これは酸化膜破壊が、不均一におきたことが原因となる。本実験で用いた中間材 Cu は鏡面仕上げになっており、接合部の微少な変形による酸化膜破壊を利用することができなかったため、拡散経路が点在したものと考えられる。

接合過程において、各接合時間毎に接合部に生成した相に関する SEM 画像観察および EPMA 分析結果を以下に示す。

接合時間 0s の結果を Fig.4-14 に示す。この段階では Cu は実験前とほぼ同じ形状で観察される。そのほとんどは図中 A に示すように純 Cu の相成を示すが、一部では図中 B に示すように CuO を主体とした酸化膜が観察された。

接合時間 120s の分析結果を Fig.4-15 に示す。拡散が進行することによって接合面の組織は変化し、Fig.4-14 の接合面全体に渡って存在していた Cu が、図中 A に示すように量が少なくなっていた。そのため図中 B のような α 固溶体や、図中 C のような共晶反応によって Al_2Cu のような金属間化合物が生成された。また、図中 D のような Cu_2O や、図中に黒い筋となって存在する E のような Al 酸化膜が発生していた。

接合時間 180s の分析結果を Fig.4-16 に示す。接合時間 180s の段階では、接合時間 120s の時に存在していた、図中 A、B のような Al 酸化膜が接合面全体に渡って広がっていた。また、図中 C のような共晶や D のような α 固溶体が観察された。

接合時間 360s の分析結果を Fig.4-17 に示す。接合時間 120s の段階で接合面全体に広がっていた図中 A のような Al 酸化膜がわずかに減少していた。また図中 B のような共晶も同様に観察された。

接合時間 420s の分析結果を Fig.4-18 に示す。接合時間 420s の段階では図中 A のように Al 酸化膜が観察される。この領域は接合強度に対して何ら寄与しないものと考えられる。このことから接合面積が拡大するにしたがって、Al 酸化膜は接合面から消失することがわかった。

4.4 接合性

中間材を Cu とし接合実験をおこなった場合，本章全体で示したように，拡散が進行し接合強度を得ることができたということから，本実験条件において接合が可能であることがわかった。

第5章 中間材に Zn を用いた接合実験の結果および考察

5.1 予備実験

(1) 接合温度の決定

液相拡散接合法では、中間材の融点以上の温度域でおこなわれる。本方法は母材である Al への Zn の拡散によって進行するのであるが、拡散は温度依存現象である。本研究では、接合時間 900s 以内でのかつ低温度での接合を目指したため、条件を満たす温度を求めた。

平滑面試験片を使用し、加熱速度は、1, 5, 10K/s, 接合応力を 0.69MPa, 厚さを 500 μ m, 保持時間を 900s とした。加熱温度は、713K 以上の温度域で実験を行った。

実験結果を Table 5-1 に示す。加熱速度にかかわらず接合温度 863K から接合が可能であった。

この実験結果より、中間材に Zn を用いた接合実験では接合温度を 863K として実験を行うことにした。

(2) 最適な接合応力の検討実験

接合面を介した拡散を生じさせるためには、接合面を密着させるための接合圧をかける必要がある。平滑面試験片を使用し、加熱速度を 1K/s, 接合応力を 0.03~1.39MPa, 接合温度 863K, 中間材の厚さを 500 μ m, 保持時間を 900s として実験を行った。

引張試験結果を Fig.5-1 に示す。図に示すように、接合圧力が増加すると接合強度が上昇するということがわかった。これは接合圧力が増加することによって、接合部の密着度が上がり、拡散が十分におこなわれたために接合強度が上昇したと考えられる。ただし、接合圧力が過剰になった場合、熔融 Zn の接合面からの顕著な排出が危惧される。

この実験結果より、接合実験では 1.39MPa として実験を行った。

5.2 平滑面試験片を用いた接合実験の結果および考察

5.1 より得られた接合温度 863K, 接合応力を 1.39MPa を用いて、平滑面試験片により接合実験をおこなった。

引張試験による引張荷重測定結果を Fig.5-2, Fig.5-3~5 に示した破断面写

真をもとに接合時間毎の破面面積(接合面積)測定結果を Fig.5-6, 破面面積を用いて応力に換算した引張強度を Fig.5-7 に示す。

5.2.1 加熱速度による影響

Fig.5-2, Fig.5-7 に示すように, Cu の場合と比べて加熱速度によらず接合強度のばらつきが大きくなった。接合強度におよぼす加熱速度の影響は明確には認められなかった。本実験では両図を通算した結果, 接合可能下限温度で実験を実施した。明確には昇温過程もしくは, 接合温度到達直後から接合が開始するより高温で実施した場合には, 異なる結果が得られたものと考えられる。

5.2.2 接合時間による影響

5.2.1 で述べたように Cu における引張試験結果(Fig.4-3)とくらべて, ばらつきが大きく, 接合時間-接合強度の関係において, Cu のような関係が認められなかった。試験片から流出する溶融 Zn の量が接合時間によって変動するためと考えられる。溶融 Zn の接合面からの流出を阻止することのできる継手形状を用いれば良好な接合体が得られるものと考えられる。

5.3 接合部生成相の SEM 観察および EPMA 分析結果

加熱速度 1K/s, 保持時間 60s の切断面における SEM 観察および EPMA 分析結果を Fig.5-8 に示す。接合面には Fig.5-8(a)に示すように, Al との拡散を開始する前の溶融 Zn が観察された。このとき, すでに大気中の酸素と反応し, ZnO に変化していた。Fig.5-8(b)は拡散域で観察された生成相を示す。図中 B および C 相は拡散域外周部に観察された相で, EPMA 分析結果から Al, Zn および O を化学組成にもつ固溶体であった。図中 D および E は拡散域中心部に観察された生成相で図中 D は ZnO であった。これらの結果より, 大気中加熱による酸化により ZnO が生成した場合でも, 液相拡散接合法の中間材として十分に役割を果たすことがわかった。Fig.2-8 に示す Al-Zn 系平衡状態図(Fig.2.8)から生成が予想される相は共晶, Al および Zn である。接合部に観察された生成相については, 現在のところ不明である。Fig.5-9 に保持時間 480s での結果を示す。図中 A~D に示すように, 生成相中の Al が増加した。この時点で Al との拡散の進行により, ZnO は消失した。また, 図中 E および F に示すよう

に、接合部では等温凝固および顕微鏡組織の均質化が進行する。Fig.5-10 に、接合部中に観察された酸化膜(図中 A)を示す。この酸化膜は、延長線上に存在する相(図中 B)へと変化するものと考えられる。また図中 C のような固溶体も観察された。

Fig.5-3～5 に示す破断面写真一覧のうち、加熱速度 1K/s, 保持時間 60s の破断面における SEM 観察および EPMA 分析結果を Fig.5-11 に示す。この時点では、破断面には微量の Zn を含有する Al 酸化膜と Al, Zn および O の固溶体が観察された。加熱速度 5K/s, 480s における観察結果を、Fig.5-12 に示す。図中 A は、切断面において観察できなかったものであり不明な相である。その他の B～H に関しては、切断面で観察されたもので、本破断面では Fig.5-9(b)に示した Al 母材に近接した拡散域において破壊が起きることがわかった。加熱速度 1 K/s, 保持時間 600s での観察結果を Fig.5-13 に示す。観察した相はすべて Al, Zn および O の固溶体であり、図中 E および H をのぞき、Fig.5-12 に示す 480s の破面と観察された相と同等の化学組成を有することから、主に破壊が生じた箇所には変化がないことがわかった。ただし、図中 E および H は Al 母材に近い化学組成を有しており、ディンプルが観察された。

5.4 カップ状試験片を用いた接合実験結果および考察

溶融 Zn の排出を制御したカップ状試験片で再度、接合可能下限温度を検討した結果、823K であった。そこでカップ状試験片を用いて中間材 Zn の接合性を再検討した。接合圧力は平滑面試験片と同様に 1.39MPa を用いた。この場合、カップ内の溶融 Zn には接合圧力はかからない。接合圧力はカップ側壁面積より求めた。

Fig.5-14 に引張試験結果を示す。溶融 Zn の排出を制御したものの同じく引張荷重・接合時間との間に明瞭な関係は認められなかった。これは Fig.5-15 に示すように主に接合部がカップ側壁であったことが原因と考えられる。ここでは平滑面試験片と同形状の接合面であり、同様に溶融 Zn の排出のばらつきを制御できなかった。

5.5 接合性

本章において示したように、中間材に Zn を用いた場合、平滑面試験片、カ

ップ状試験片ともに接合体が得られた。Cu と比べて接合温度は低いが，強度は大きかった。実験結果より Al 大気中用中間材として有望であるが，熔融 Zn の接合面からの排出に対して工夫が必要である。

第 6 章 中間材 Sn を用いた接合実験の結果および考察

6.1 平滑面試験片による接合実験結果および考察

接合温度を 803K, 接合応力を 1.39MPa とし接合実験をおこなった。引張試験結果を Fig.6-1 に示す。

中間材に Sn を用いた接合実験では Zn を用いた場合と違い, Fig.6-1 に示すように加熱速度にかかわらず良好な接合体を得ることができなかった。実験後の切断面写真を Fig.6-2 に示す。Sn の場合も Zn と同様に, 接合圧力により, 接合面に均一に存在した熔融 Sn が排出されたために, 接合面外側にのみ存在する。

保持時間 900s で得られた Al/Sn 界面近傍に観察される顕微鏡組織についておこなった SEM 観察および EPMA 分析結果を Fig.6-3 に示す。図中 A に示すように, 熔融 Sn は Al および O も含む化学組成を有するようになる。これは大気中加熱による酸化だけではなく Al との拡散がおきたことを示す。また図中 B に示すように, 熔融 Sn 中に微量の Sn を含む Al が観察された。すなわち Sn も Zn の場合と同様に, 酸化膜除去を行うことができるということがわかった。

しかしながら引張試験結果より, 本実験条件において Al 大気中接合における Sn の接合性はないことがわかった。

6.2 カップ状試験片における接合実験結果および考察

平滑試験片により接合実験を行った場合, Fig.6-3 に示したように熔融した中間材の接合面からの排出により接合面外周部でのみ拡散がおきていた。そこで排出を制御する目的で, カップ状試験片を用いて実験を行った。実験条件は平滑面試験片と同様のものとした。

引張試験結果を Fig.6-4 に示す。この場合も加熱速度にかかわらず良好な接合体を得ることができなかった。加熱速度 10K/s, 保持時間 900s おける切断面の SEM 観察および EPMA 分析結果を示す。拡散領域はカップ穴全体にわたっており, 接合面積としては十分確保されたが, 引張試験に供することができる接合体は得られなかった。この結果より拡散領域のマトリックスである Sn, Al および O の固溶体が非常に脆弱であることがわかった。これらの結果により中間材に Sn を用いた Al 大気中接合では, 等温凝固を完全に終了させる必要があることがわかった。

しかしながら, Al 中の Sn の拡散係数は Cu および Zn に比べて非常に小さい。Cu および Zn の場合, 等温凝固が観察されたが, そのときの温度(接合温度)での拡散係数は, Fig.6-5 に示すように $10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 程度である。そのため, Sn の拡散係数の温度依存性を考慮すると Sn の場合, 長時間加熱が必要になると考えられる。

6.3 接合性

本章において示したように, 中間材に Sn を用いた場合, 平滑面試験片, カップ状試験片ともに接合体を得ることはできなかった。このことから Sn は Al 大気中接合中間材としては不向きであると考えられる。

第7章 結言

本実験条件において中間材に Cu, Zn および Sn を用い Al 大気中接合をおこなった結果以下のことがわかった。

7-1 中間材 Cu

- (1)本実験条件で接合体が得られた。Al 大気中接合用中間材として有望である。
- (2)加熱速度の増加にともない接合強度は増加した。加熱速度が速いほど、酸化膜破壊が容易であることがわかった。
- (3)引張強度・接合時間図において2ヶ所のピークが認められた。破面観察により、接合強度の最初のピークは、接合部に α 固溶体や共晶組織が生成されることで生じる。さらに拡散の進行により、脆弱な金属間化合物が生成され接合強度は低下する。その後、等温凝固する過程で脆弱な金属間化合物が消失し、 α 固溶体が生成され、接合強度が再び上昇するということがわかった。
- (4)Al 酸化膜は破壊され、拡散が進行する。拡散の進行とともに破壊された酸化膜が、接合面全体に渡って観察されるが、接合面積が拡大するにつれて接合面から Al 酸化膜が消失することがわかった。

7-2 中間材 Zn

- (1)Zn は接合前にすでに ZnO となっていたが、本実験条件で接合体が得られた。溶融 Zn の接合面からの排出に対して工夫が必要であるが、Al 大気中接合用中間材として有望である。
- (2)Cu の場合と異なり、接合強度におよぼす加熱速度の顕著な影響は見られなかった。
- (3)Cu の場合と異なり、引張強度・接合時間の間に明瞭な関係性は見られなかった。
- (4)Al 酸化膜を破壊または除去することで、拡散が進行する。拡散の進行とともに酸化膜は分解され O を含んだ固溶体が生成される。

7-3 中間材 Sn

- (1)本実験条件では、接合体は得られなかった。本実験条件において Al 大気中接合用中間材としては、不向きである。

- (2)切断面において Al 酸化膜が破壊または除去されることによって、拡散が生じ Al と Sn の固溶体を含む生成相や、O を含んだ固溶体が観察された。
- (3)他の金属(Cu, Zn)に比べ拡散係数が小さいことから、接合体を得るためには、接合部を完全に等温凝固させる必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 平野 陽三：金属材料活用辞典（株式会社産業調査会）(1999) 79-84
- 2) 幡野 佐一：初版 工業材料便覧 日刊工業新聞社(1981) 490-491
- 3) 溶接学会：溶接・接合便覧（丸善株式会社）(2003) 440
- 4) 藤原 正典：接合面の液化を利用した Al/Al-Cu/Al および Al/Cu 接合
(平成 14 年度修士論文)
- 5) ASM HANDBOOK: Volume3 Alloy Phase Diagrams (1980) 2.44, 2.52,
2.56

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始懇切なご指導を頂き三重大学工学部鈴木実平教授、川上博士助教授には深く感謝いたします。特に忙しい中、試験片製作や実験のアドバイスやデータ処理の仕方などにあたり、惜しみない協力と援助をして頂いた川上博士助教授には、この場をかりて、改めて深く感謝いたします。

また研究にあたり惜しみない協力をしていただいた三重大学工学部平成 18 年度卒業の今江洋裕君，三重大学工学部平成 17 年度に卒業した近藤智君には深く感謝いたします。ここに書ききれなかった材料機能研究室の院生はじめ学部生のみなさまには深く感謝いたします。

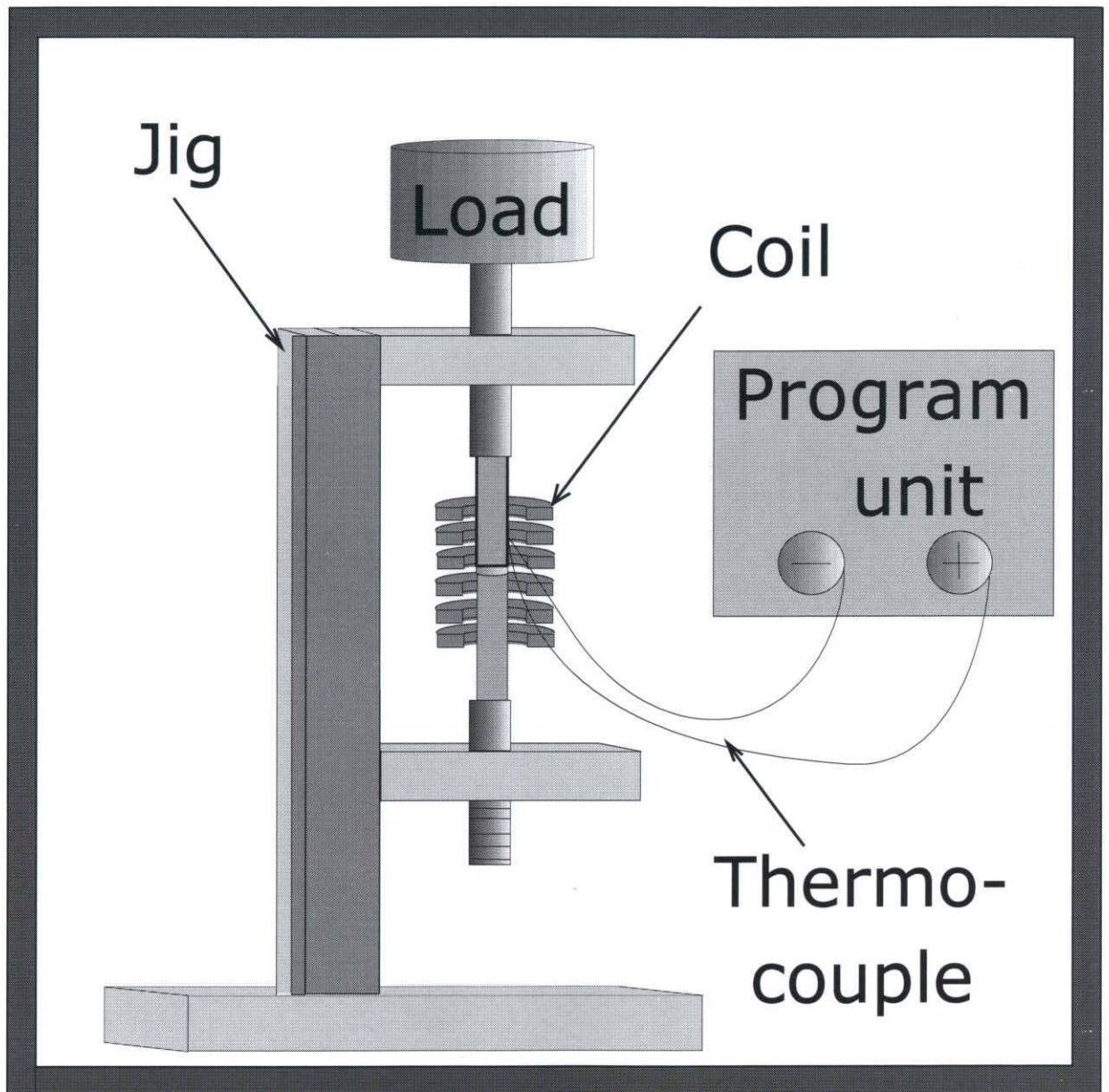


Fig.2-1 Schematic of high-frequency induction heating device and bonding jig.

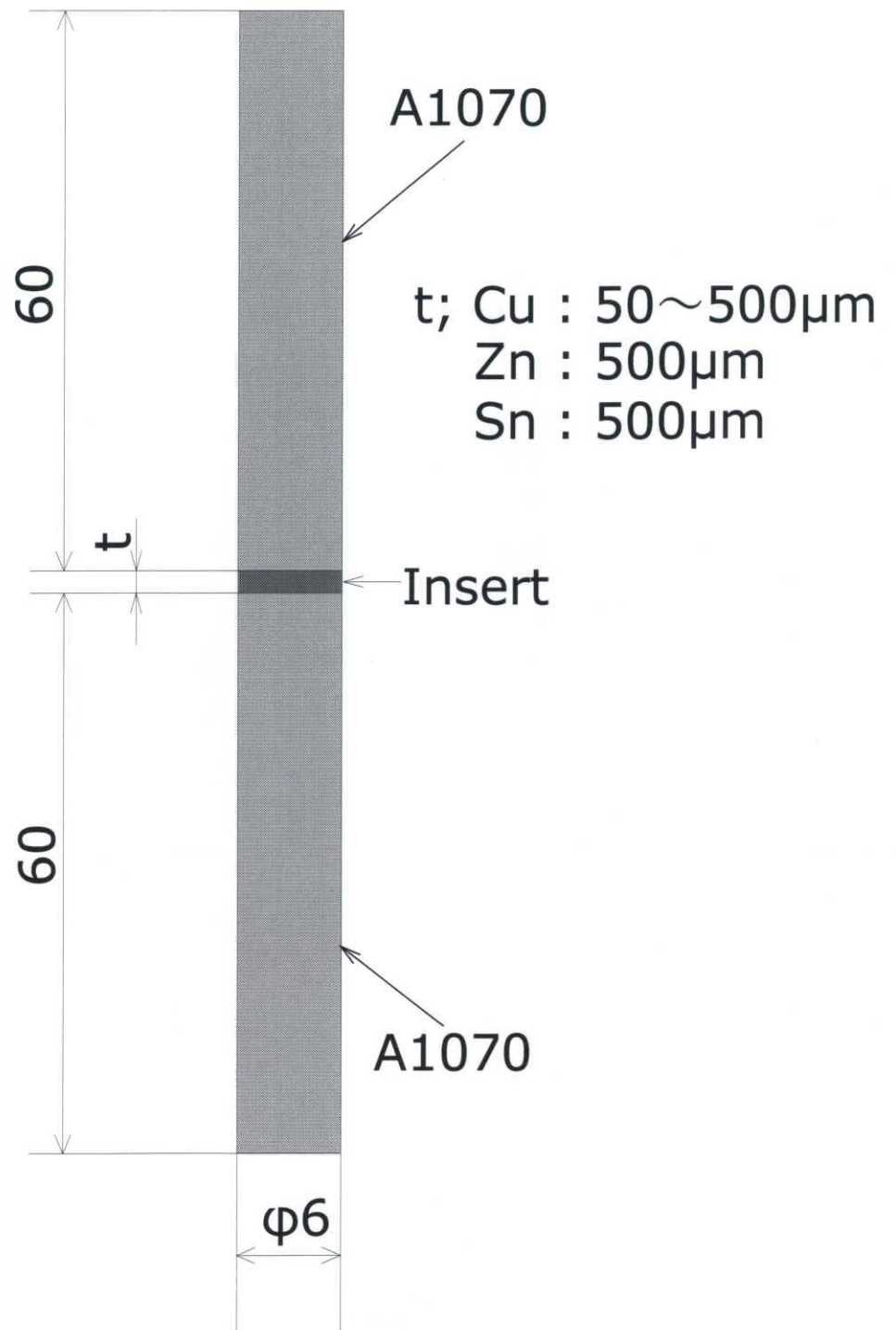


Fig.2-2 Shape of smooth surface specimen and insert metal.

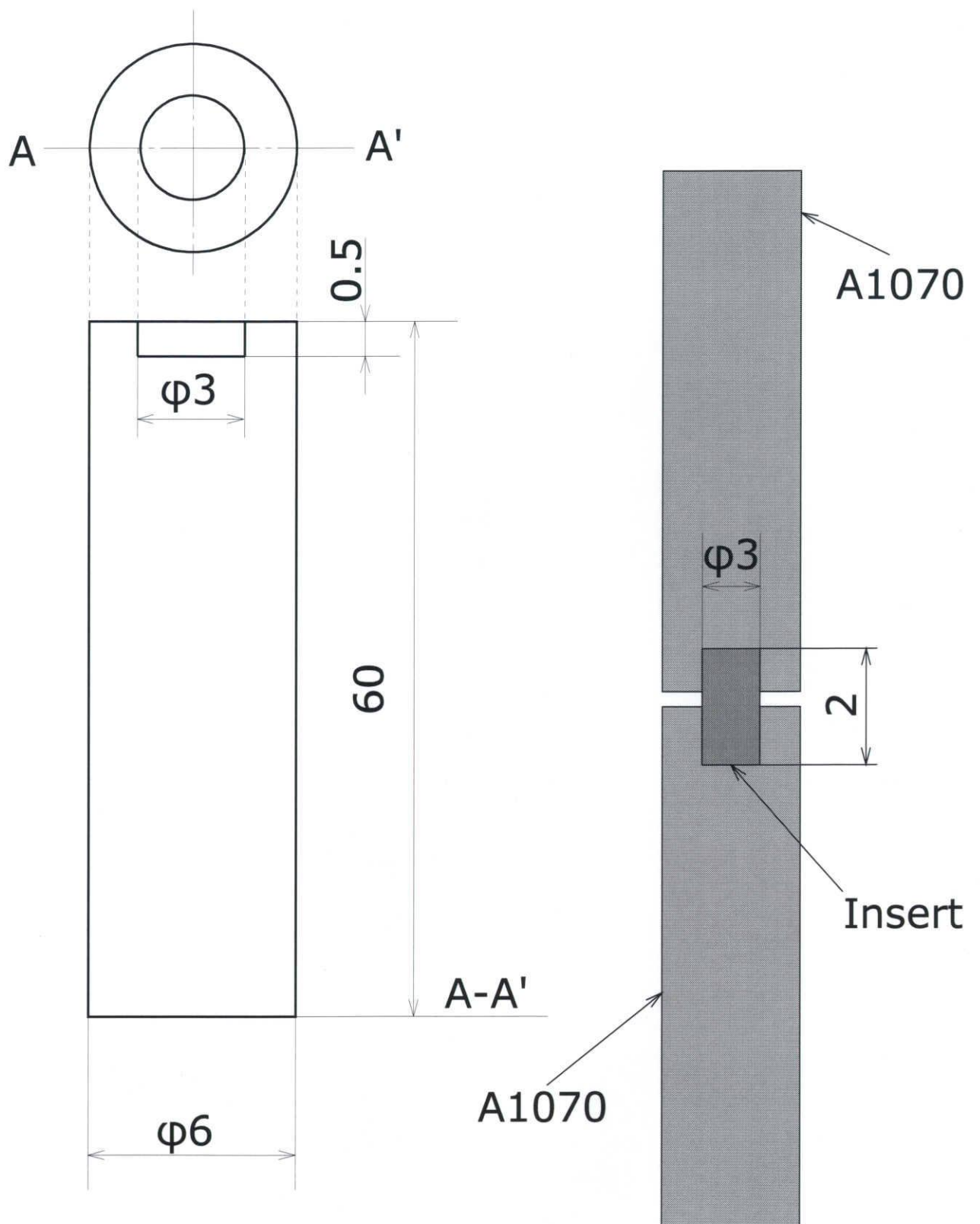


Fig.2-3 Shape of cup shape specimen and insert metal.

Table 2-1 Chemical composition of metals (mass%).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Sn	Ti+Zr	Al
A1070	0.04	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	—	—	—	Bal.
C1020	—	—	99.9	—	—	—	—	—	—	—
Zn	—	—	—	—	—	—	99.9	—	—	—
Sn	—	—	—	—	—	—	—	99.9	—	—

Table 2-2 Melting point and eutectic temperature of Al-X system; X : Cu, Zn, Sn.

Element	Cu	Zn	Sn
Melting point, K	1357	693	505
Eutectic temp., K	821	655	501

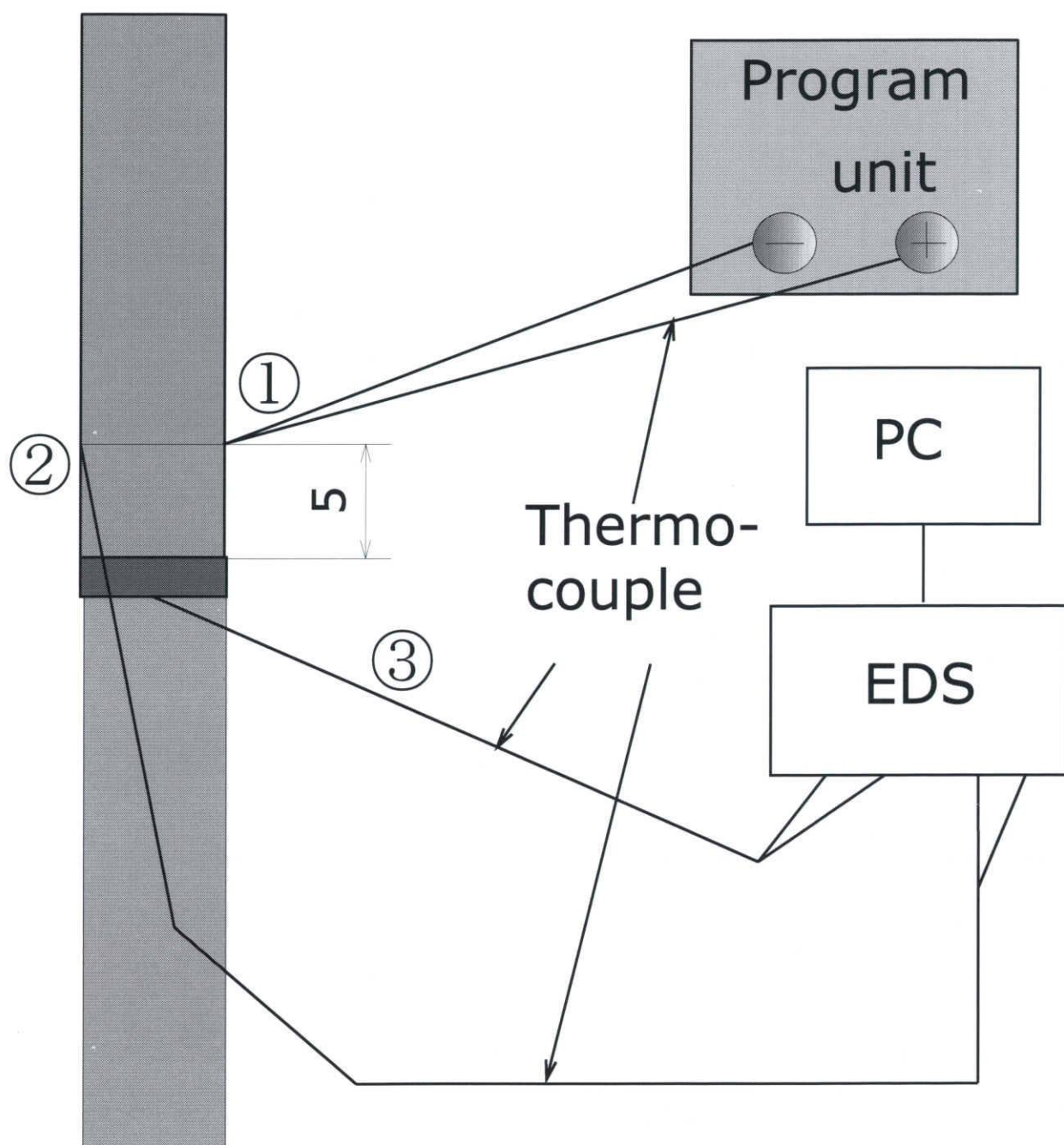


Fig.2-4 Setting point of thermo-couple;
 ① : for control of high-frequency induction heater,
 ② : for induction of heating temperature,
 ③ : for measurement of temperature on bonding surface.

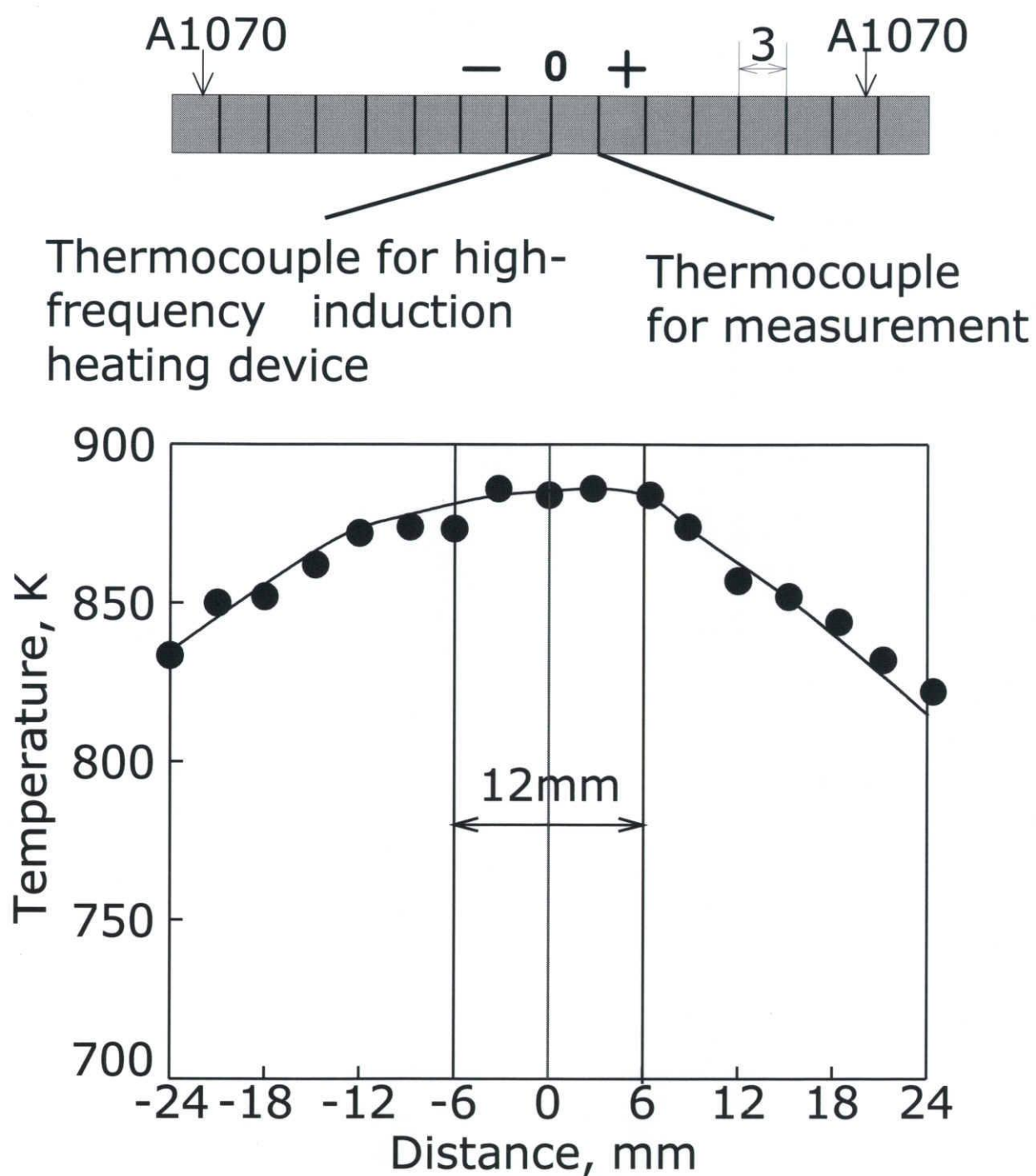


Fig.2-5 Temperature distribution of Al specimen heated at 873K.

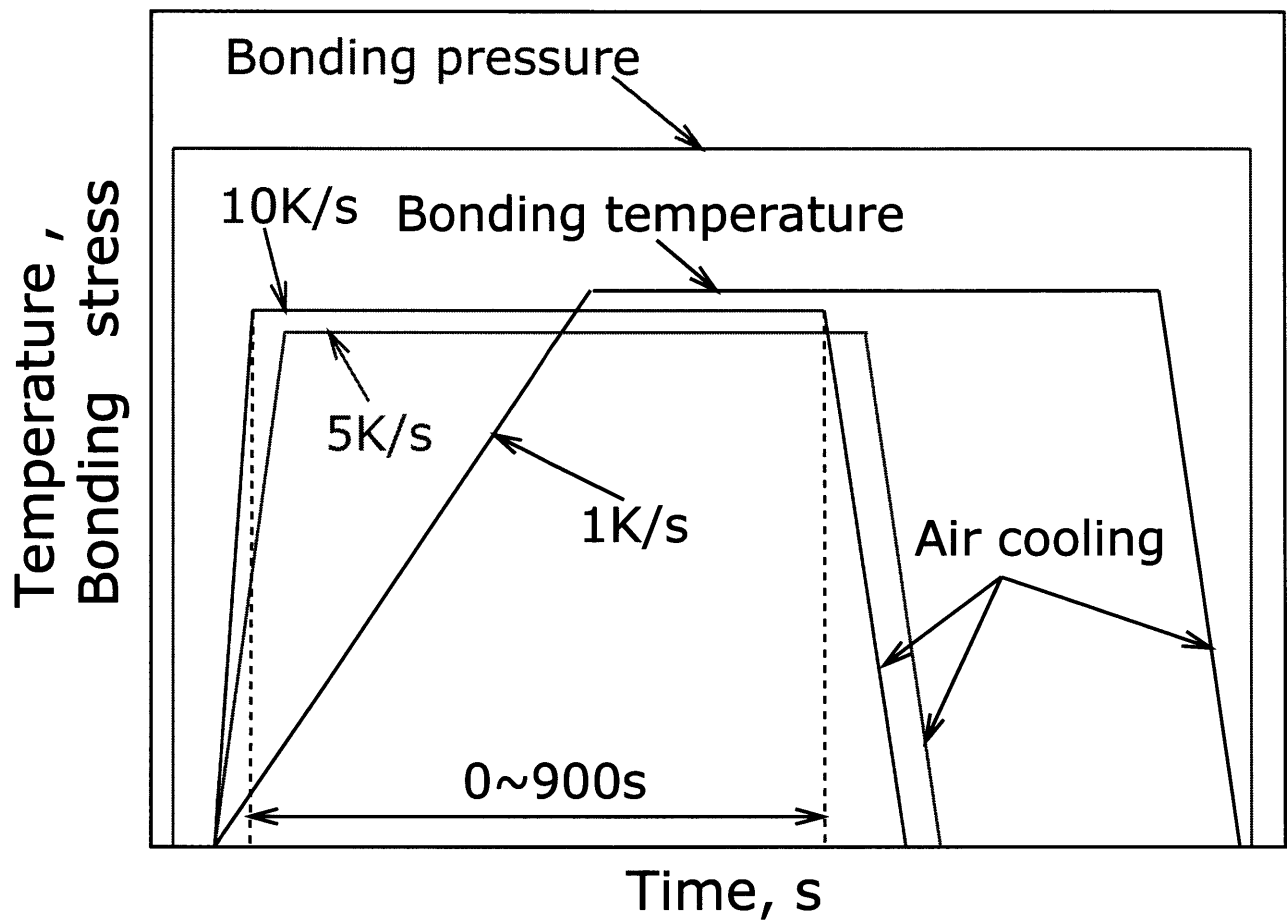


Fig.2-6 Histories for bonding pressure and temperature.

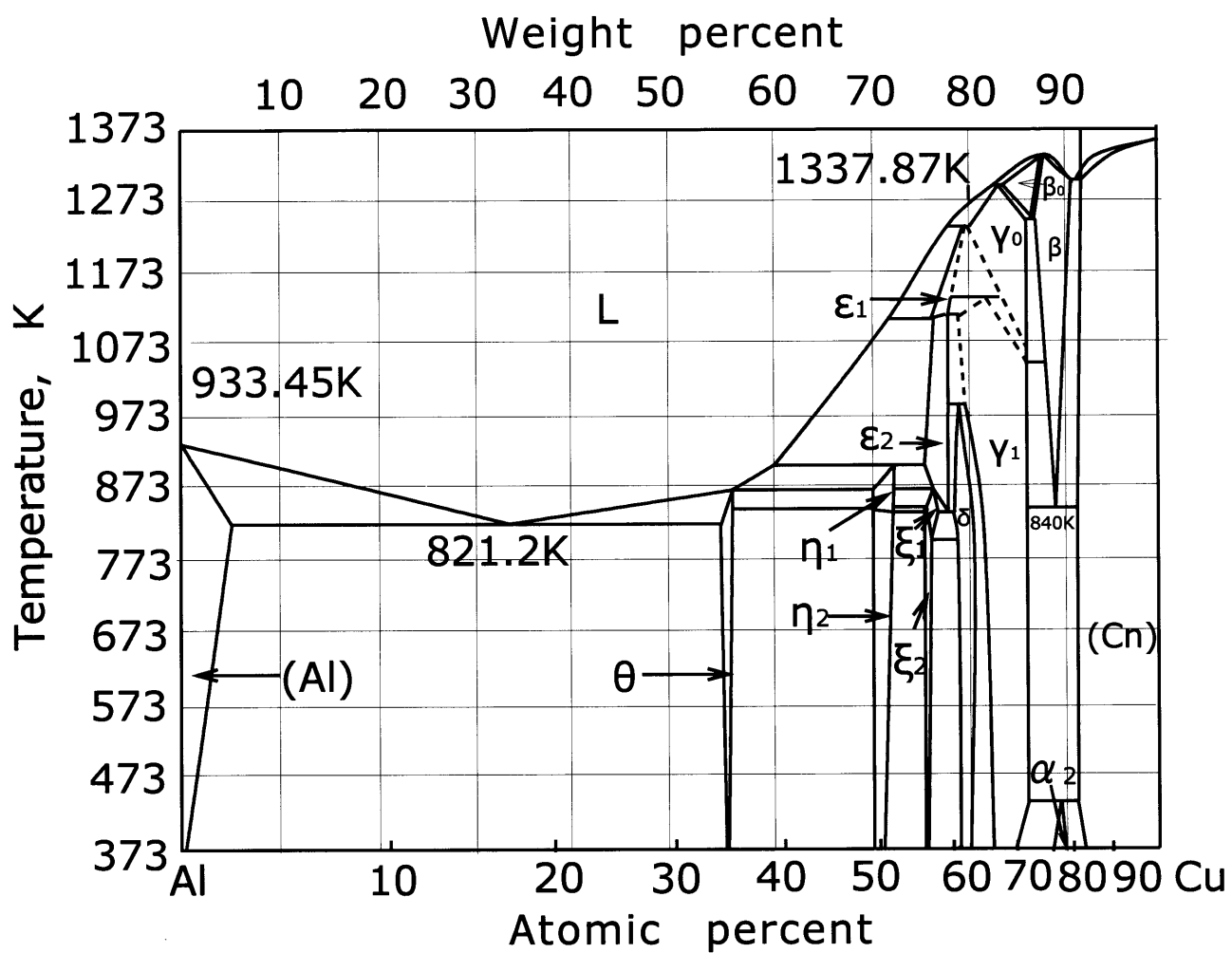


Fig.2-7 Al-Cu system equilibrium phase diagram .

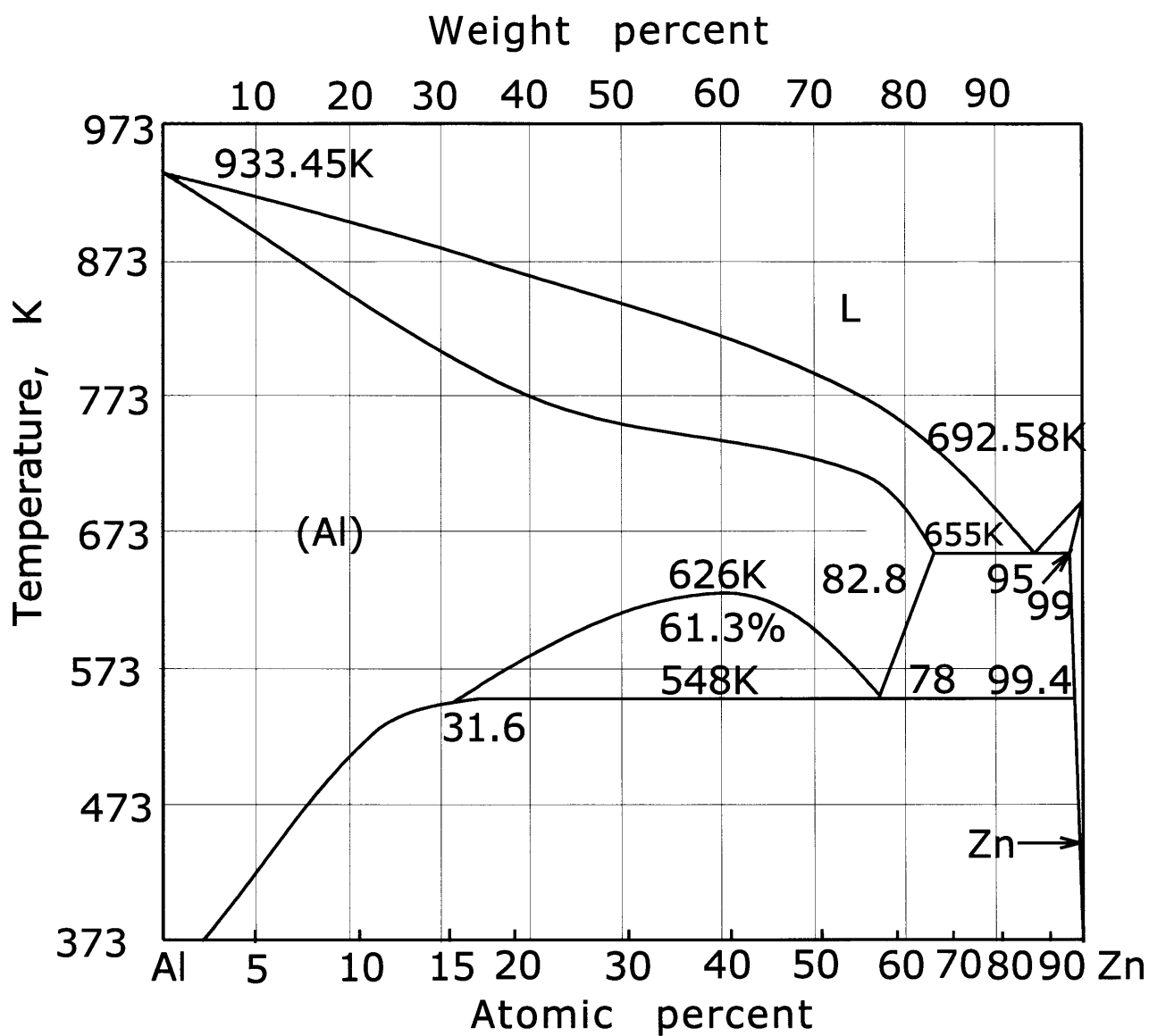


Fig.2-8 Al-Zn system equilibrium phase diagram .

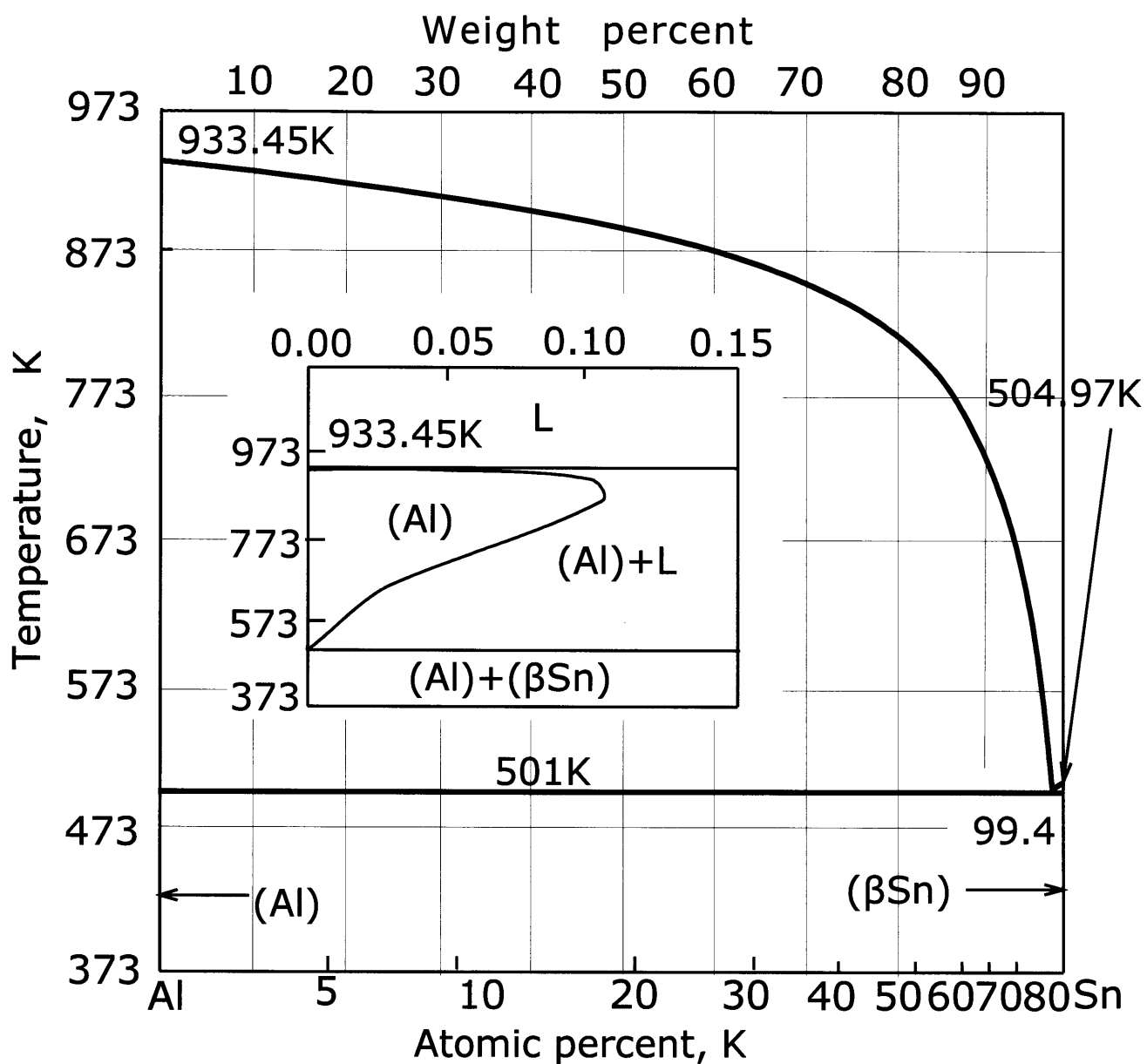


Fig.2-9 Al-Sn system equilibrium phase diagram .

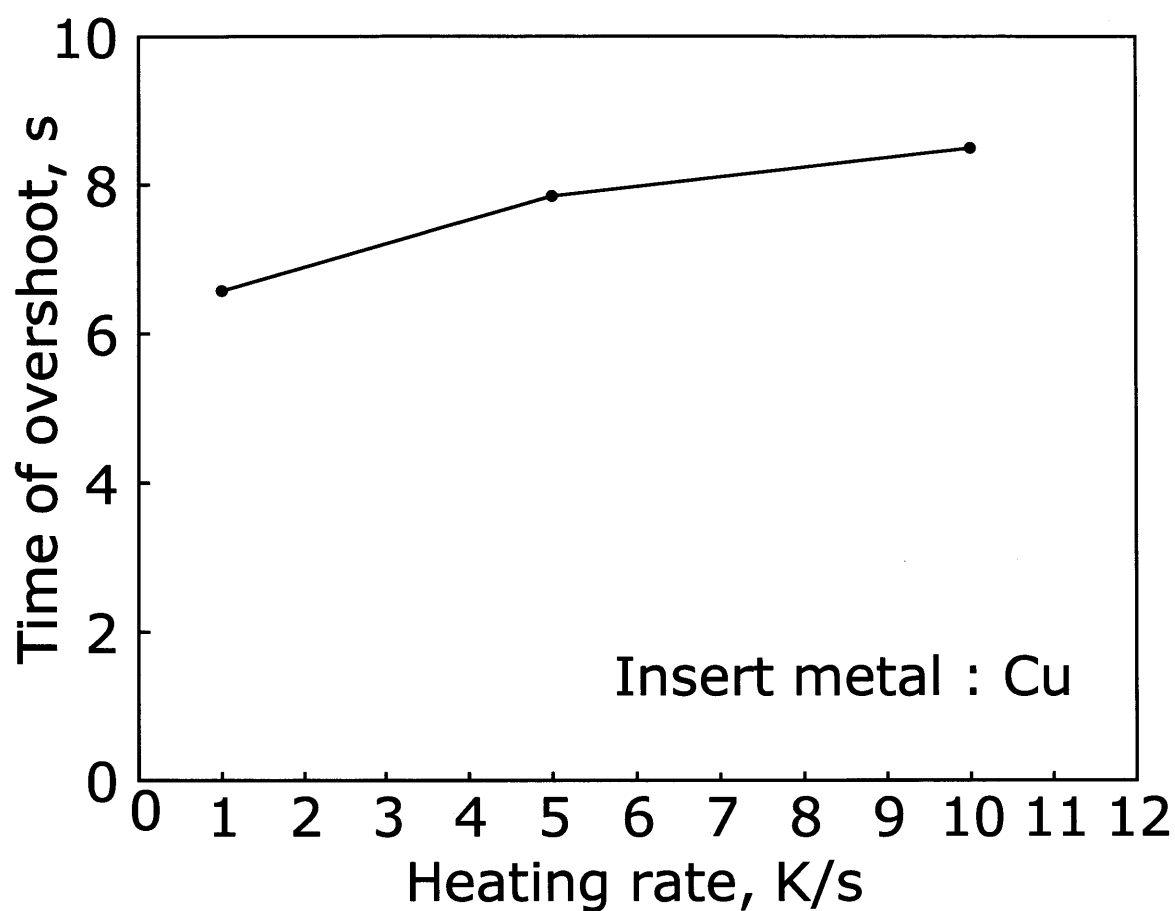


Fig.3-1 Between time of overshoot and heating rate.

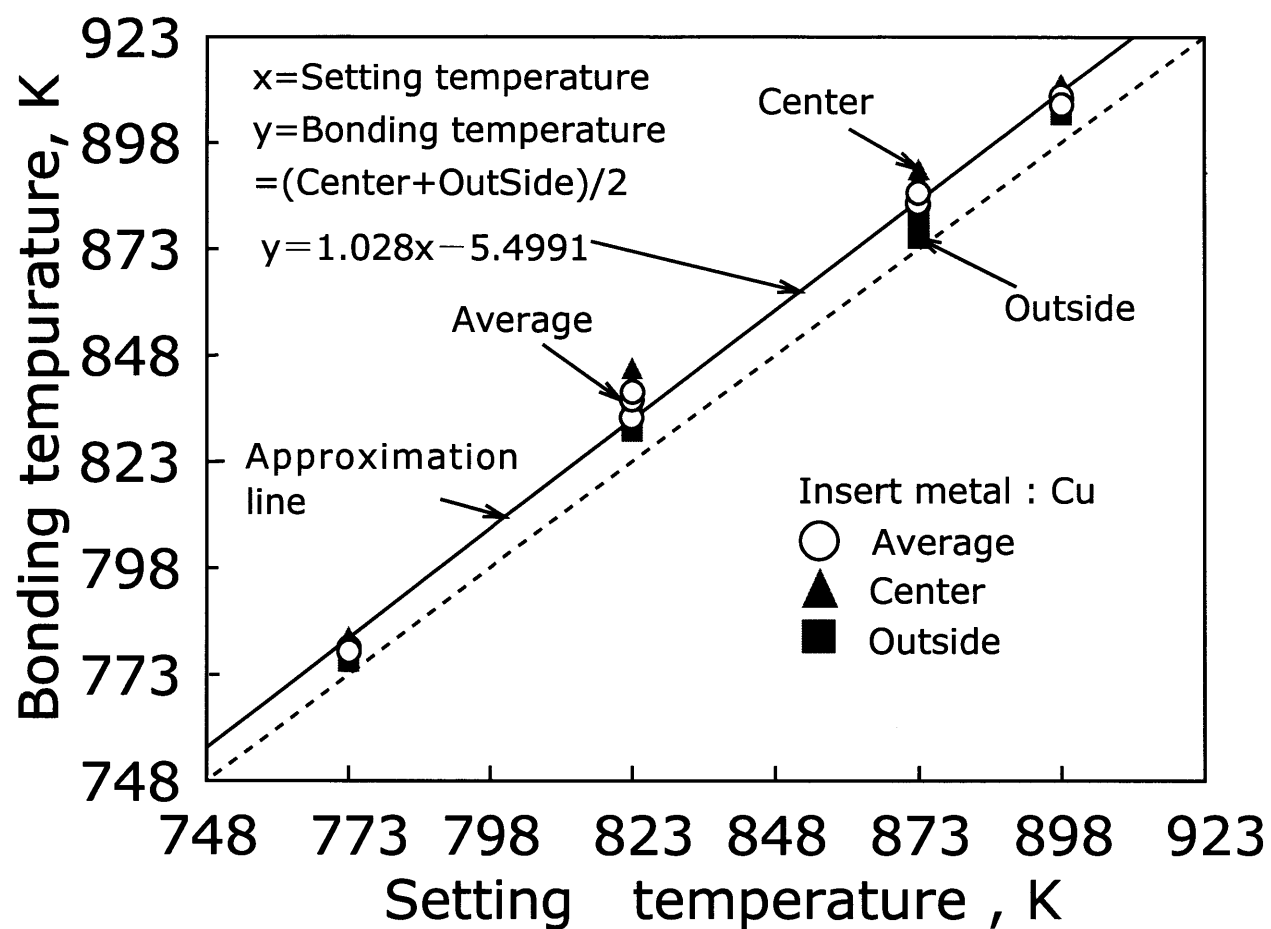


Fig.3-2 Relation between setting temperature and bonding temperature; heating rate:1 K/s.

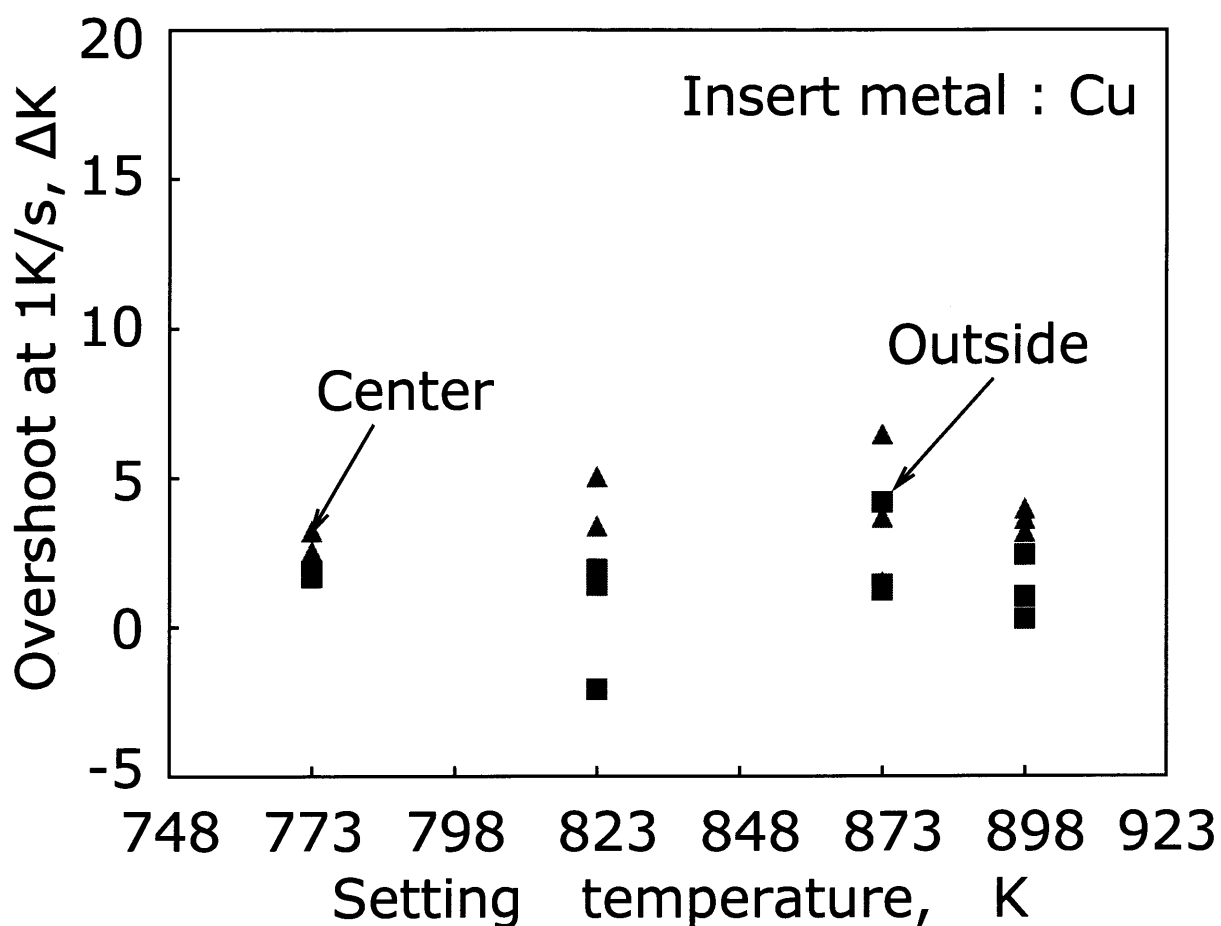


Fig.3-3 Overshoot before holding stage at heating temperature; heating rate: 1K/s.

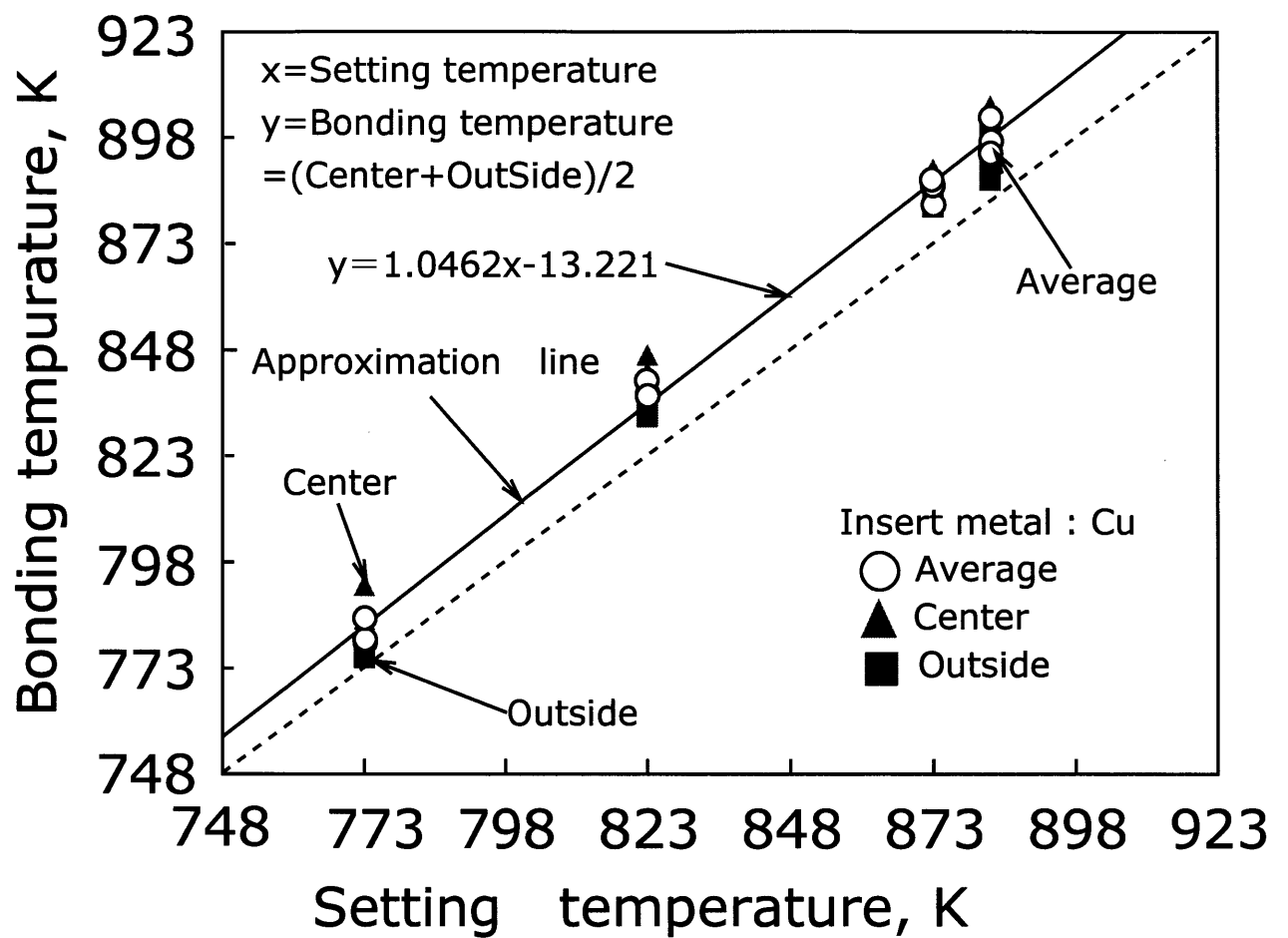


Fig.3-4 Relation between setting temperature and bonding temperature; heating rate:5K/s.

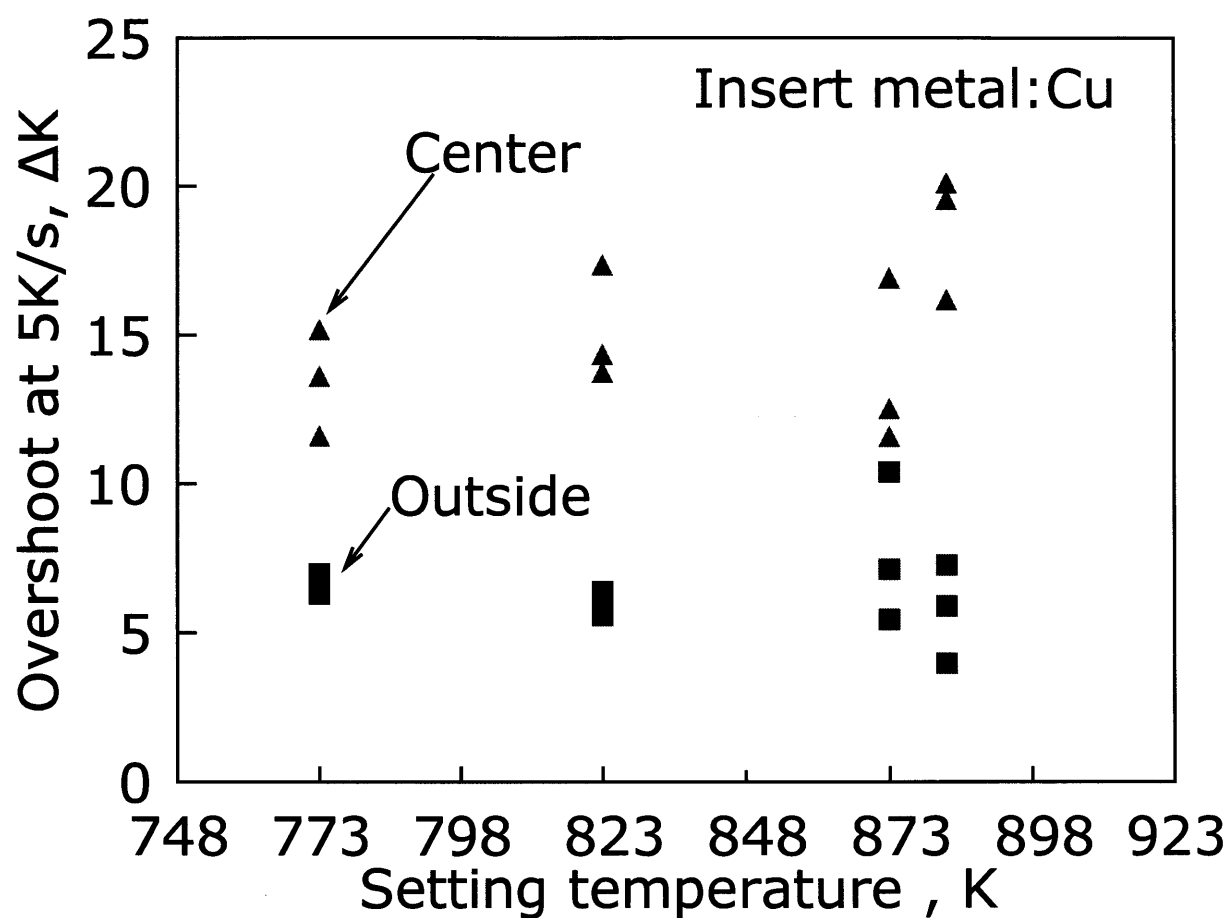


Fig.3-5 Overshoot before holding stage at heating temperature; heating rate: 5K/s.

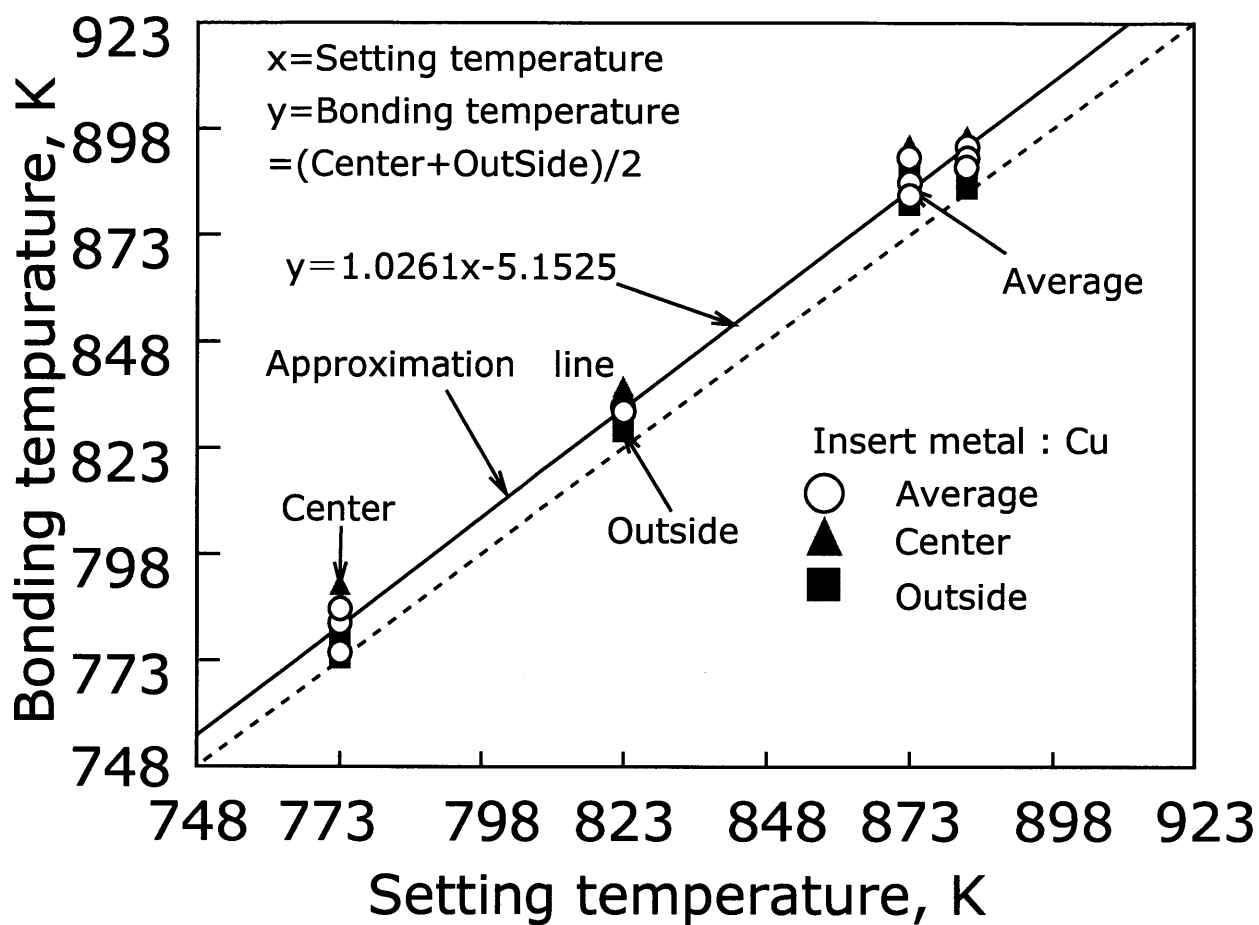


Fig.3-6 Relation between setting temperature and bonding temperature; heating rate 10K/s.

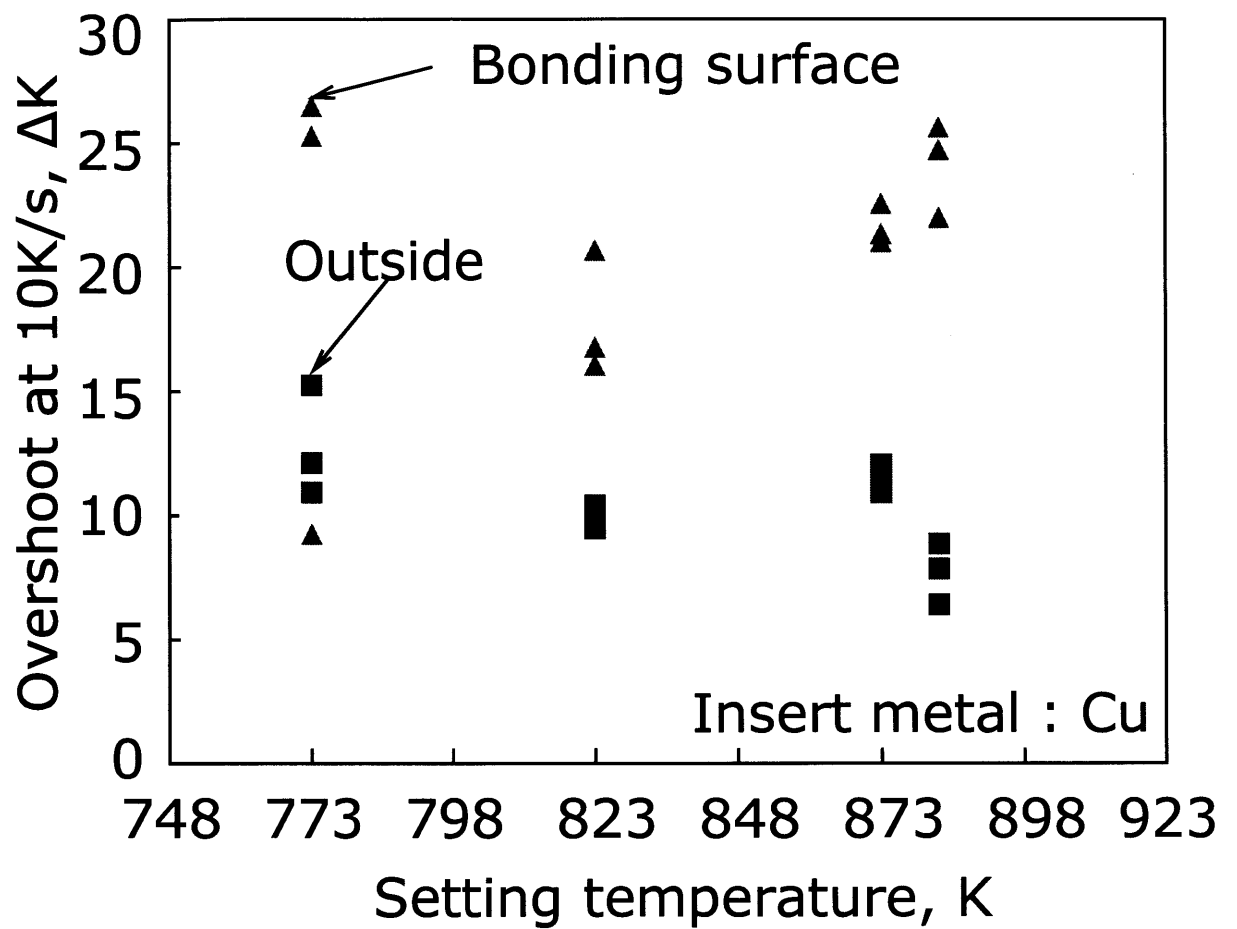


Fig.3-7 Overshoot before holding stage at heating temperature; heating rate: 10K/s.

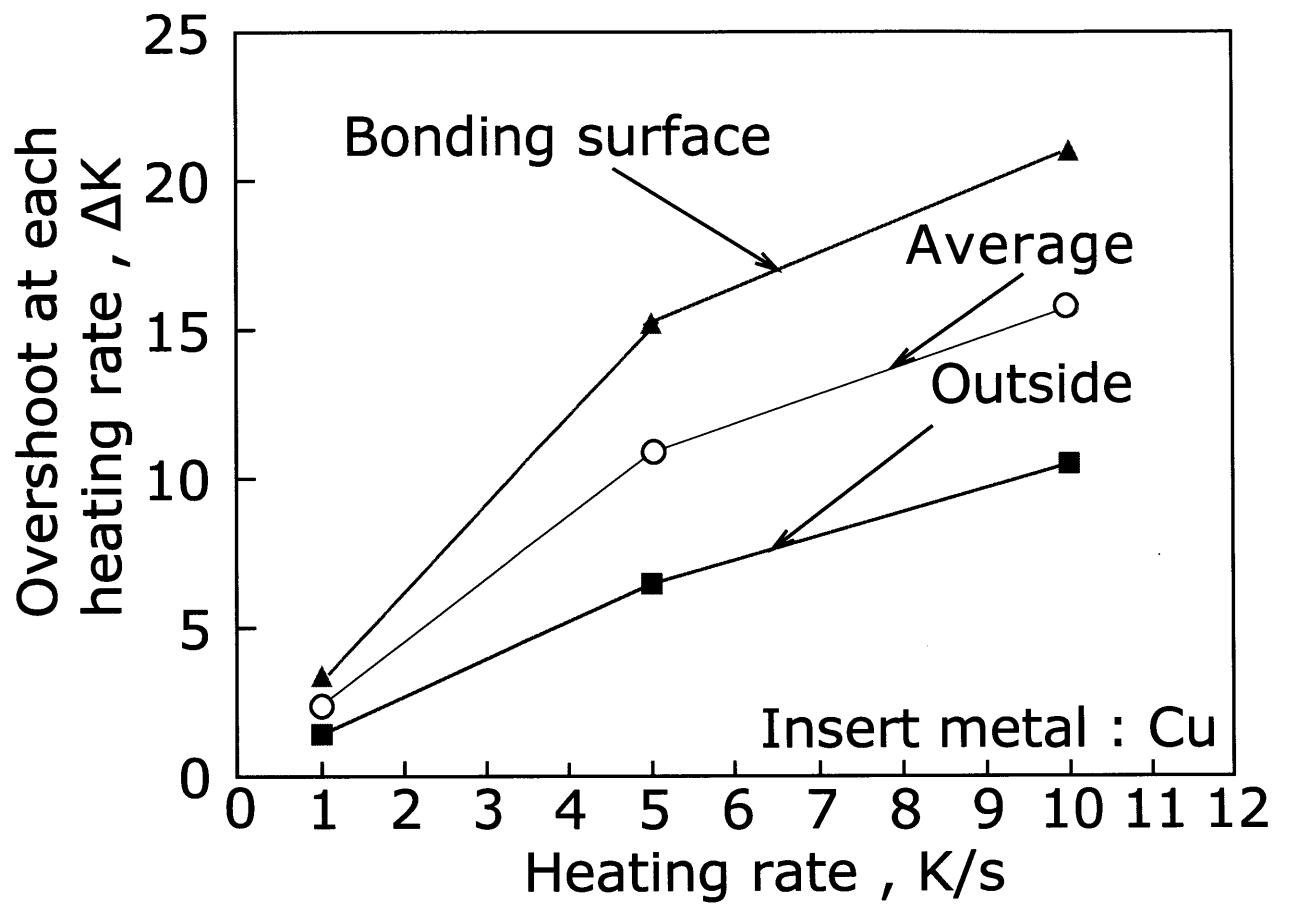


Fig.3-8 Effect of heating rate on overshoot in heating process.

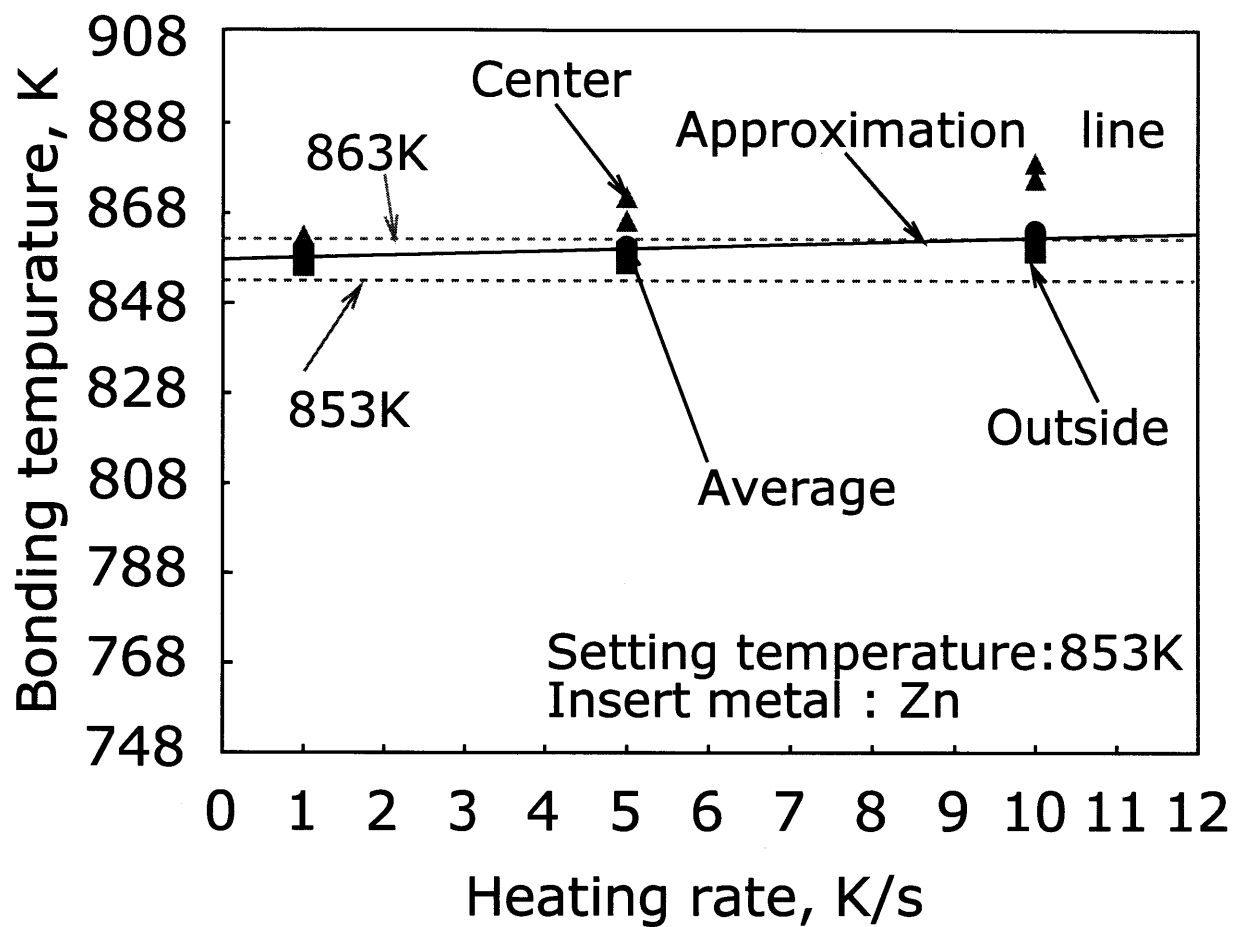
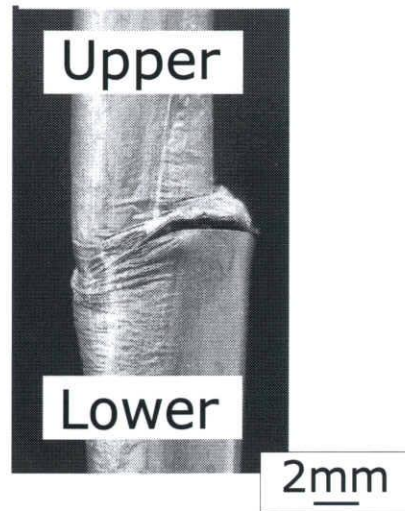
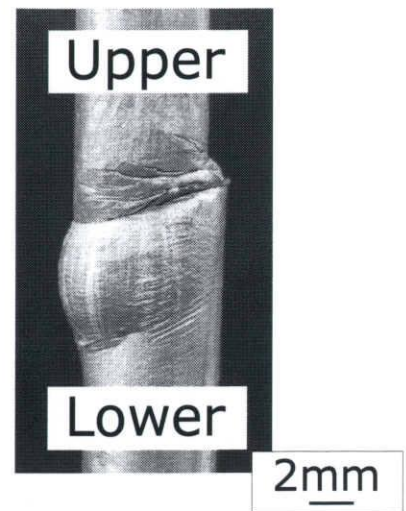


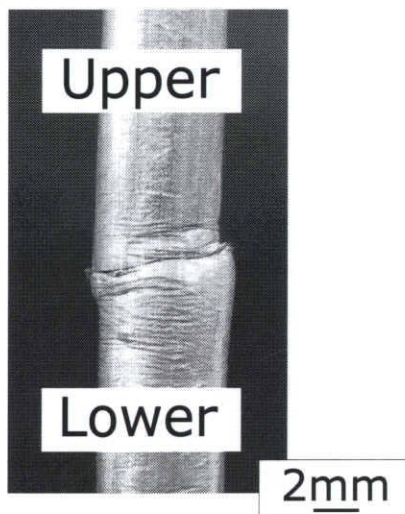
Fig.3-9 Relation between bonding temperature and heating rate.



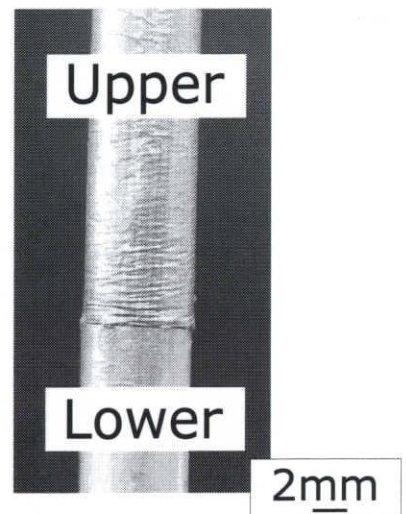
(a) 300 μ m



(b) 200 μ m



(c) 100 μ m



(d) 50 μ m

Fig.4-1 Effect of insert metal thickness on deformation of specimen ; insert metal Cu, bonding temperature:893K,heating rate: 10K/s, bonding pressure:0.69MPa, holding time:300s.

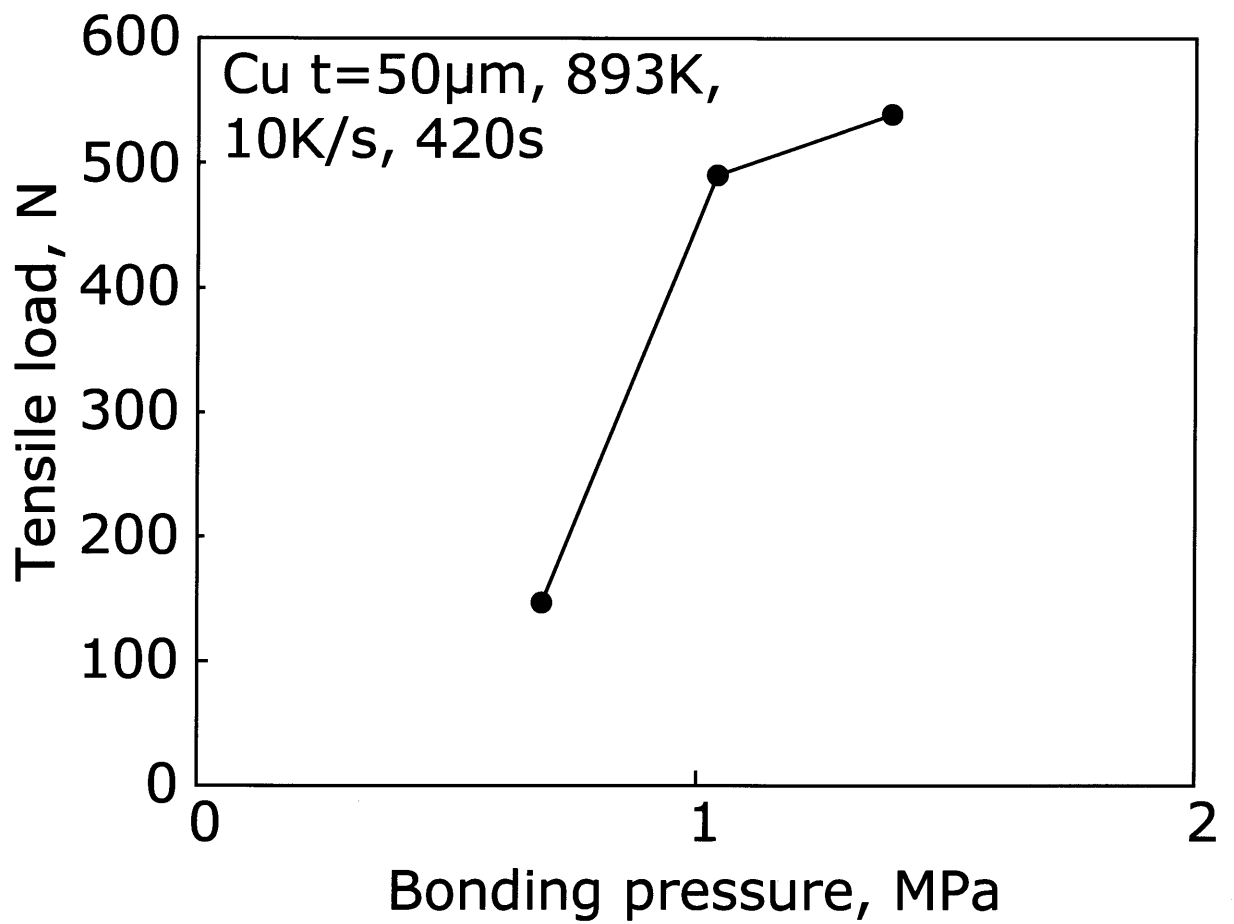


Fig.4-2 Effect of bonding pressure on tensile load of Al/Cu/Al.

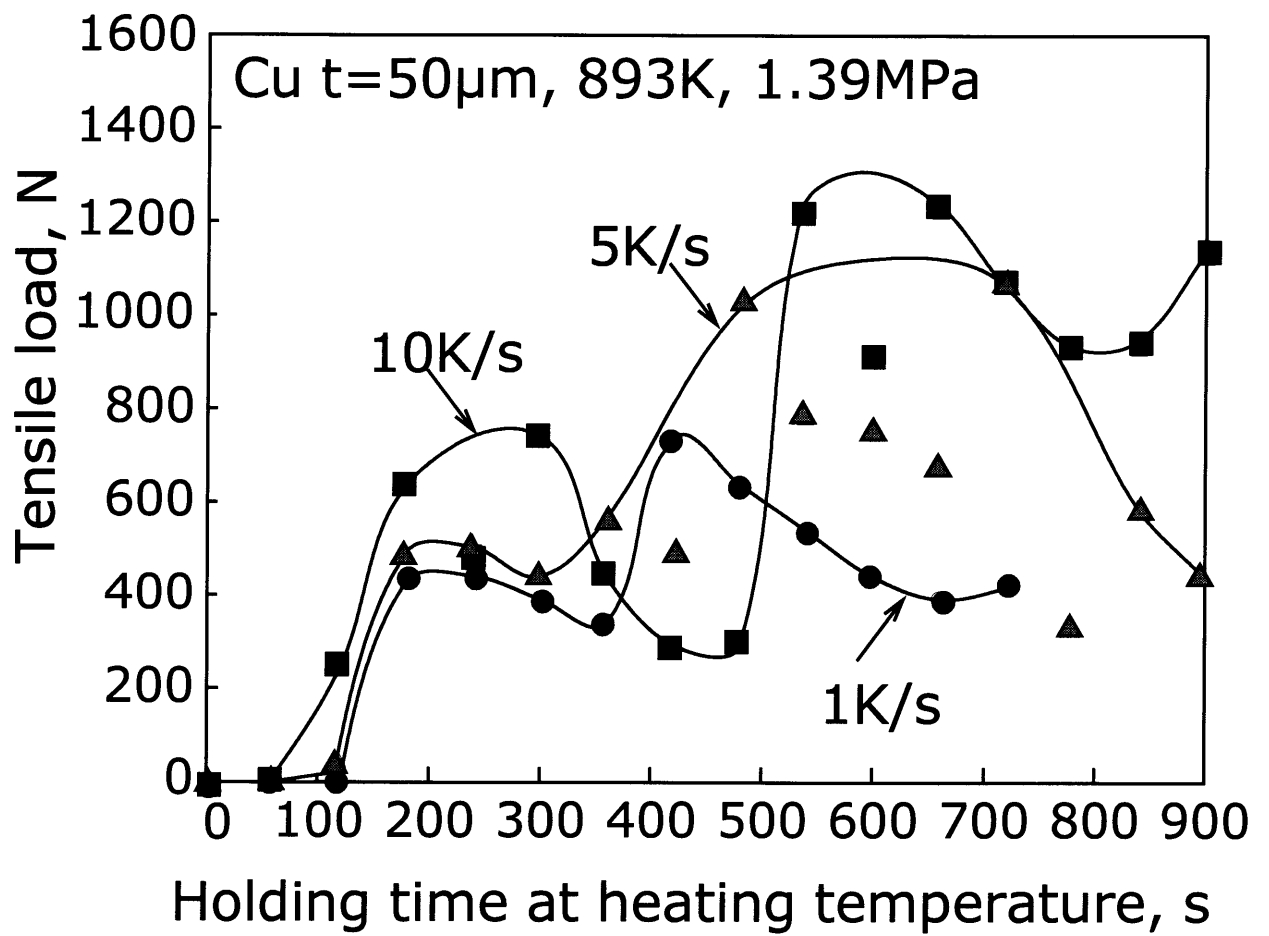


Fig.4-3 Effect of bonding time on tensile load of Al/Cu/Al.

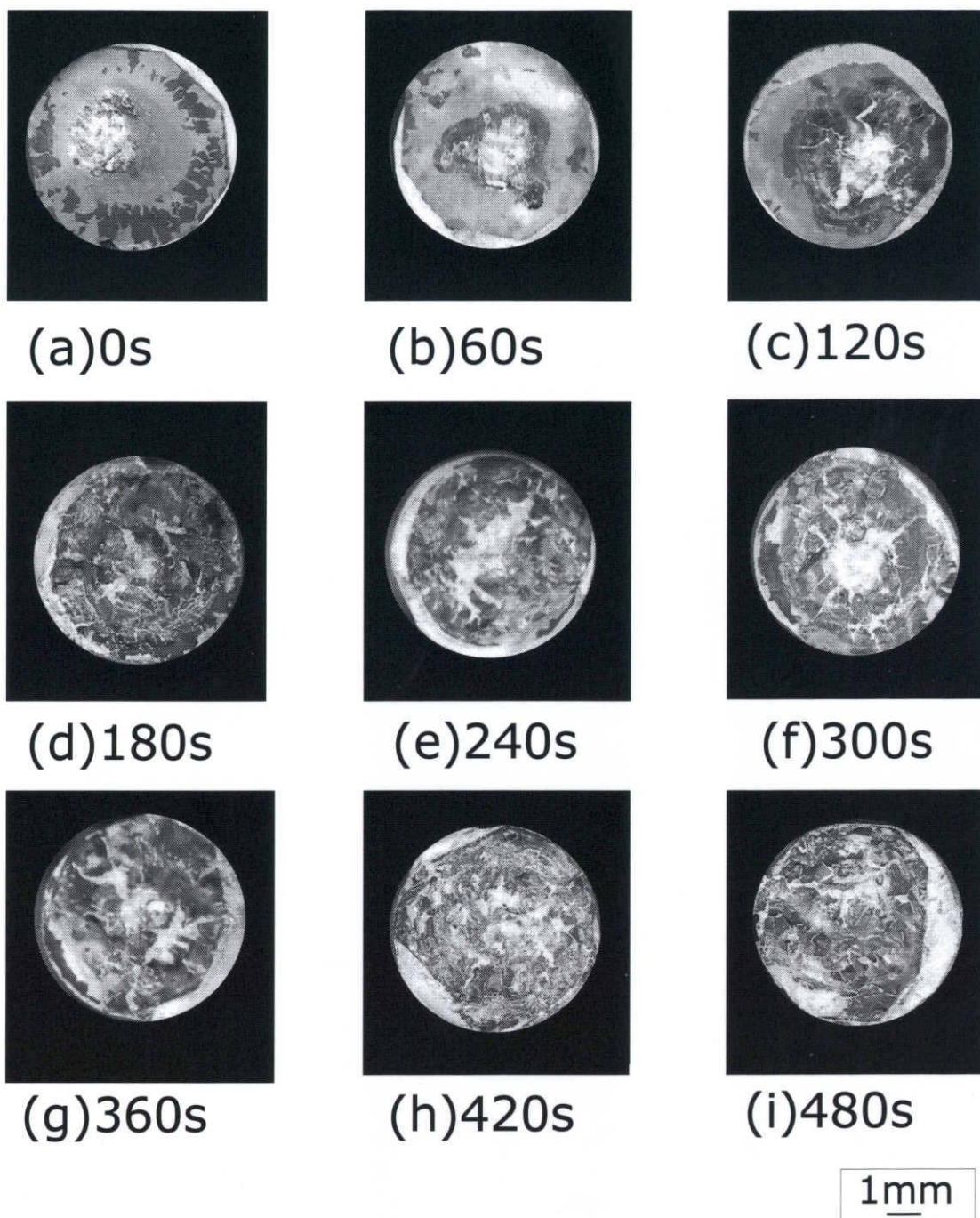
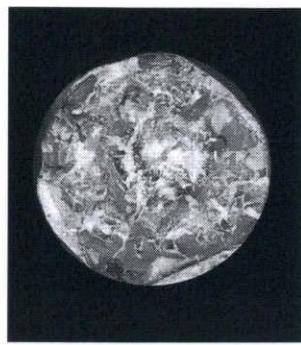
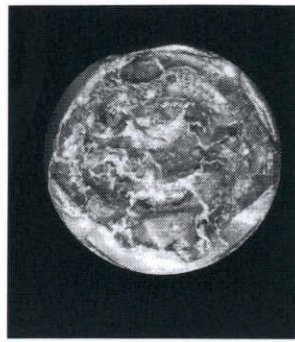


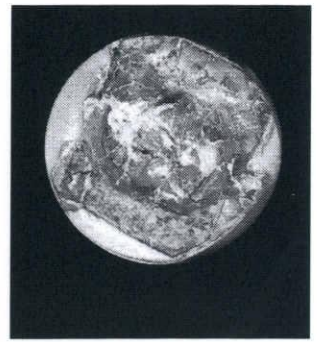
Fig. 4-4-1 Fracture surface of specimen
by Al/Cu/Al;
bonding temperature:893k, heating rate :
1K, bonding pressure:1.39MPa.



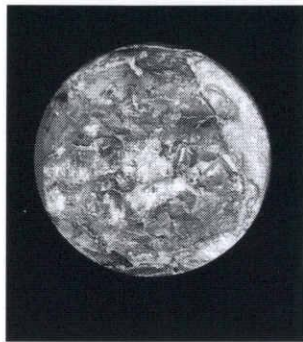
(j)540s



(k)600s



(l)660s



(m)720s

1mm

Fig. 4-4-2 Fracture surface of specimen
by Al/Cu/Al;
bonding temperature:893k, heating rate :
1K, bonding pressure:1.39MPa.

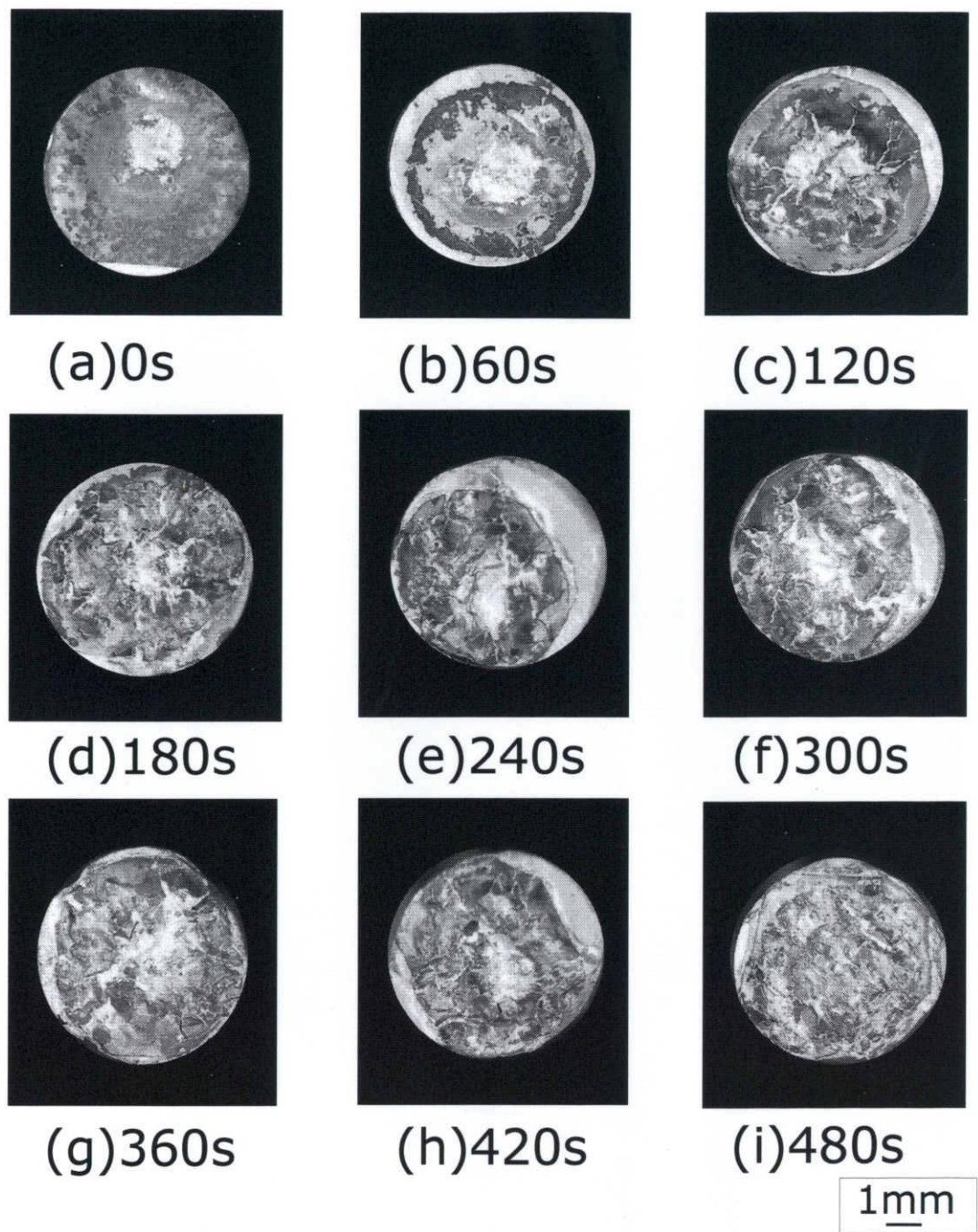
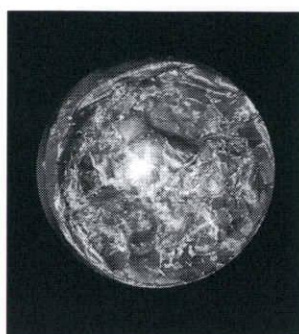
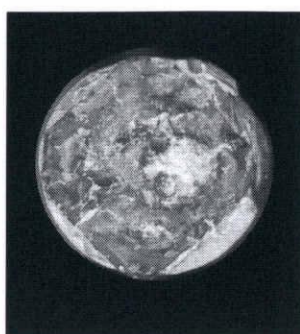


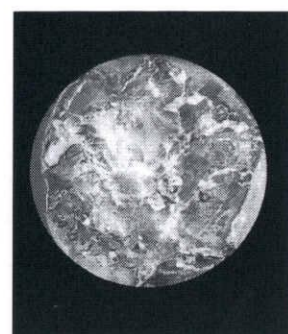
Fig. 4-5-1 Fracture surface of specimen
by Al/Cu/Al;
bonding temperature:893k, heating rate :
5K, bonding pressure:1.39MPa.



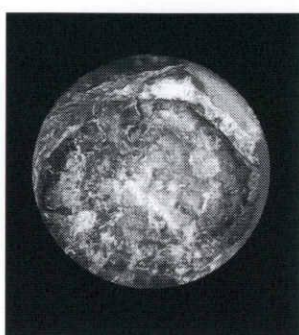
(j)540s



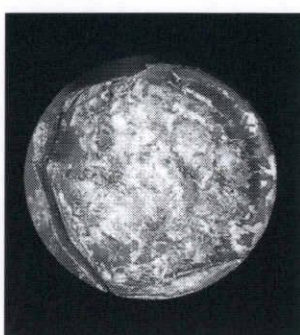
(k)600s



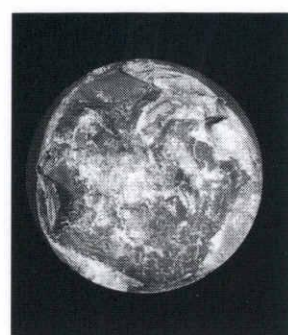
(l)660s



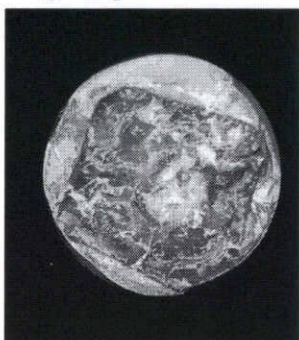
(m)720s



(n)780s



(o)840s



(p)900s

1mm

Fig. 4-5-2 Fracture surface of specimen by Al/Cu/Al; bonding temperature:893k, heating rate :5K, bonding pressure:1.39MPa.

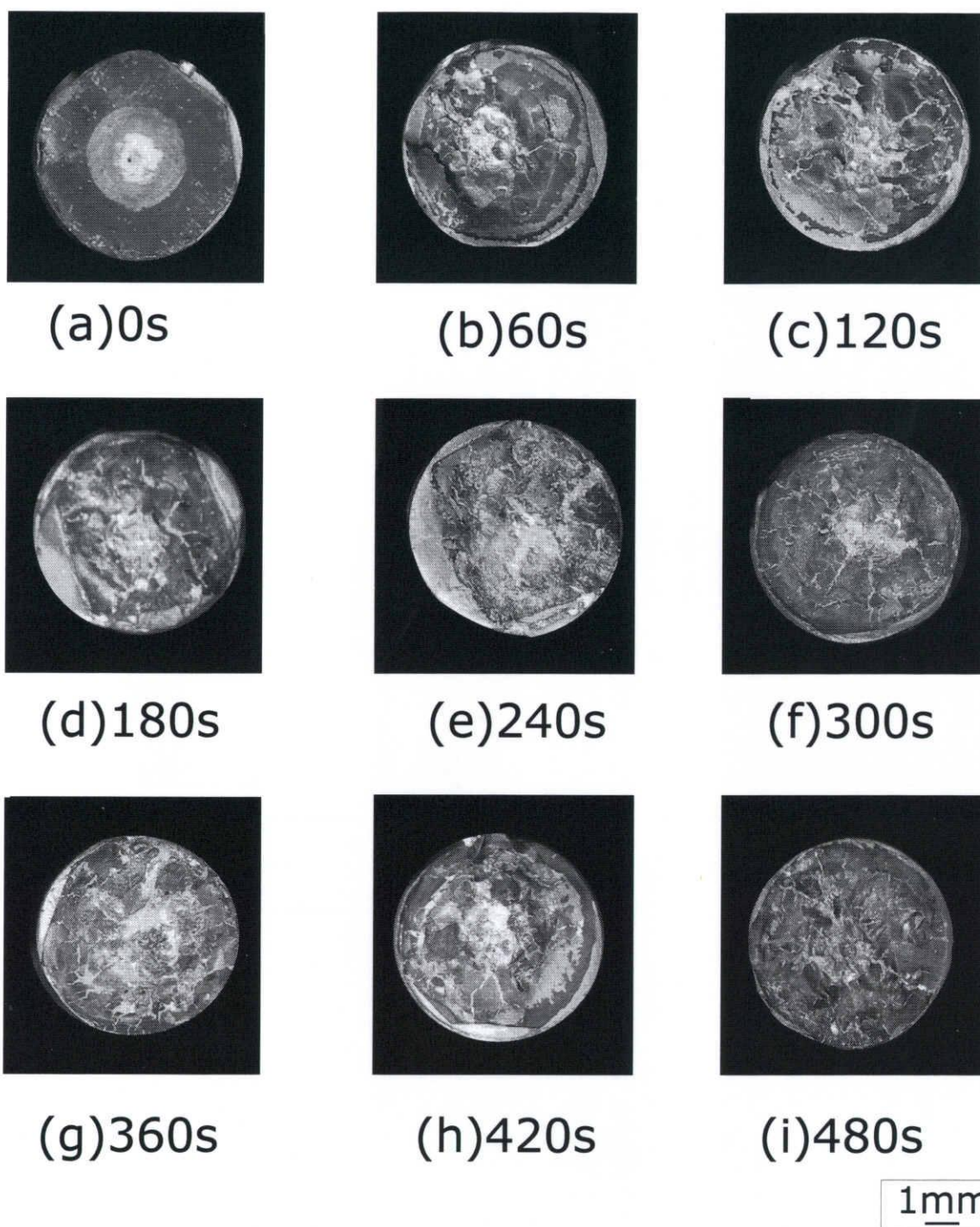


Fig. 4-6-1 Fracture surface of specimen by Al/Cu/Al;
bonding temperature:893k, heating rate:
10K, bonding pressure:1.39MPa.

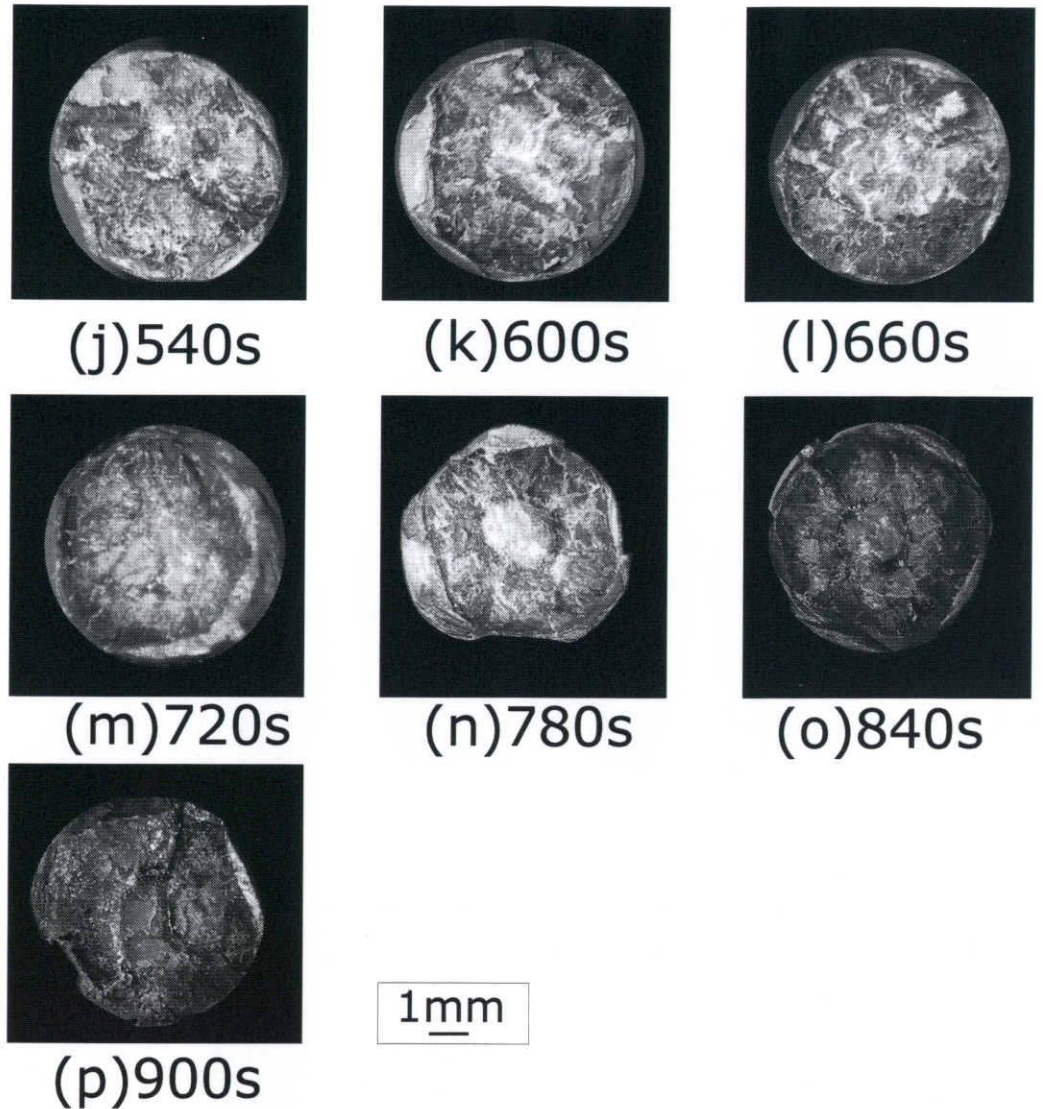


Fig. 4-6-2 Fracture surface of specimen by Al/Cu/Al;
bonding temperature:893k, heating rate:
10K, bonding pressure:1.39MPa.

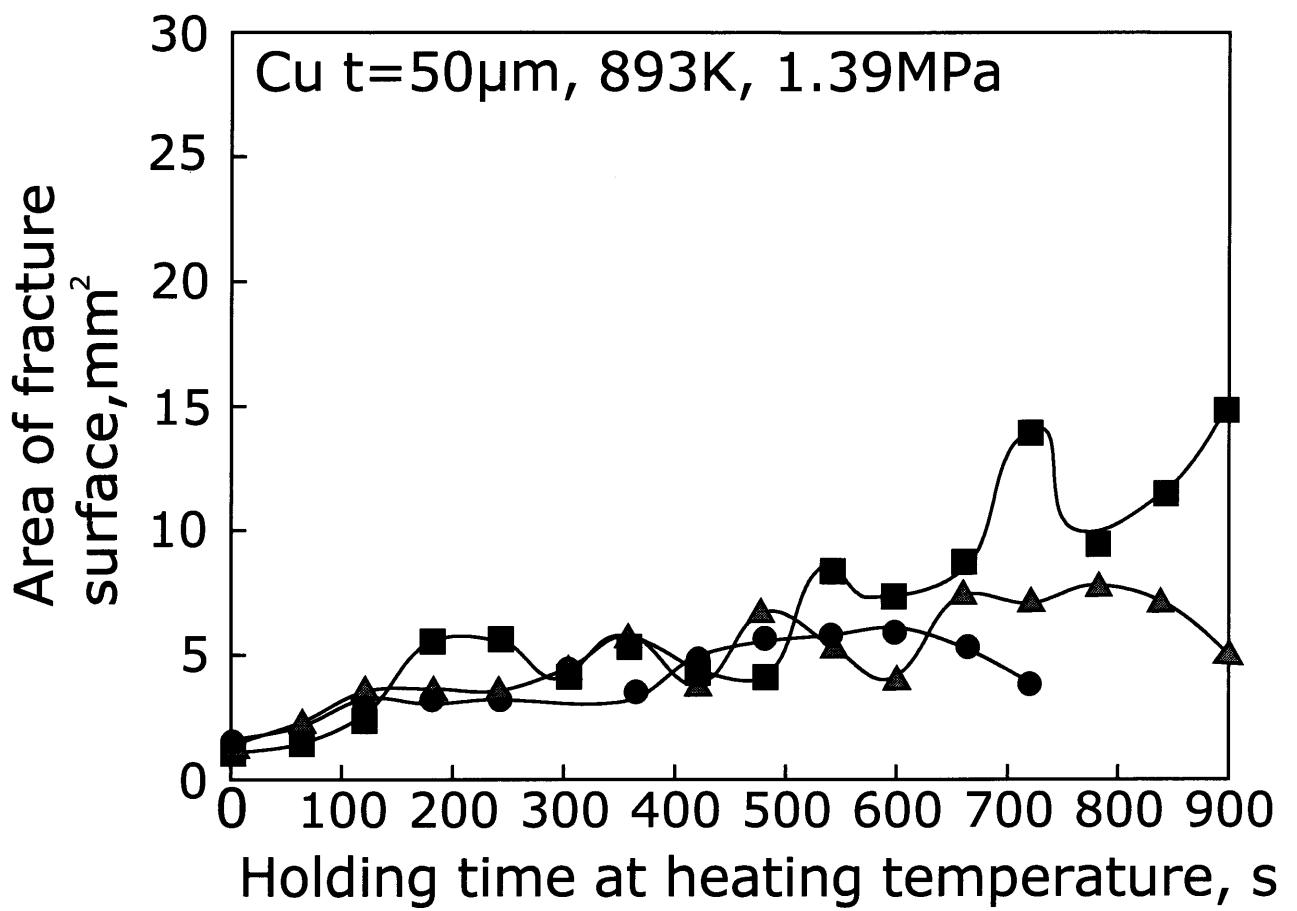


Fig.4-7 Area of fracture surface of Al/ Cu/Al.

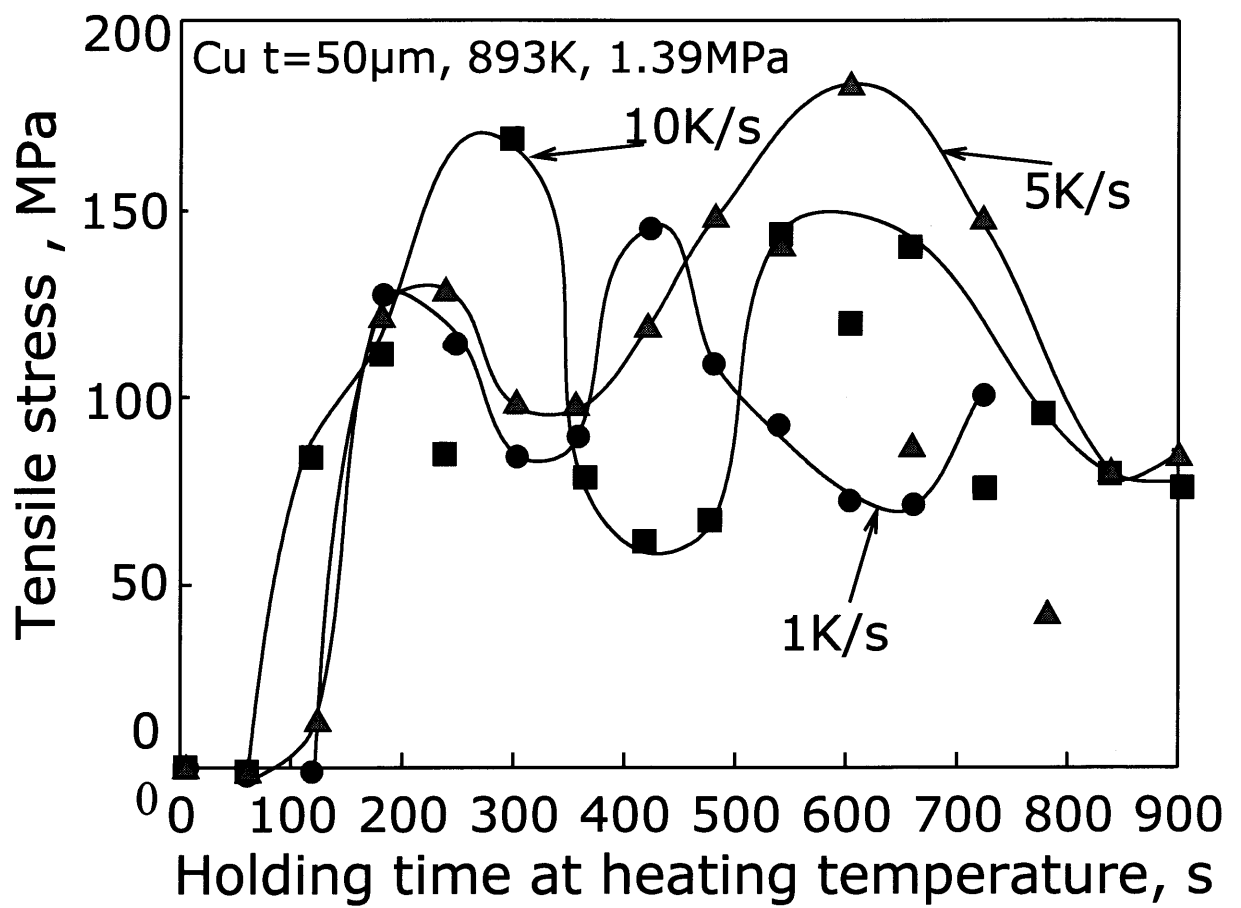


Fig.4-8 Effect of holding time on tensile stress of Al/Cu/Al.

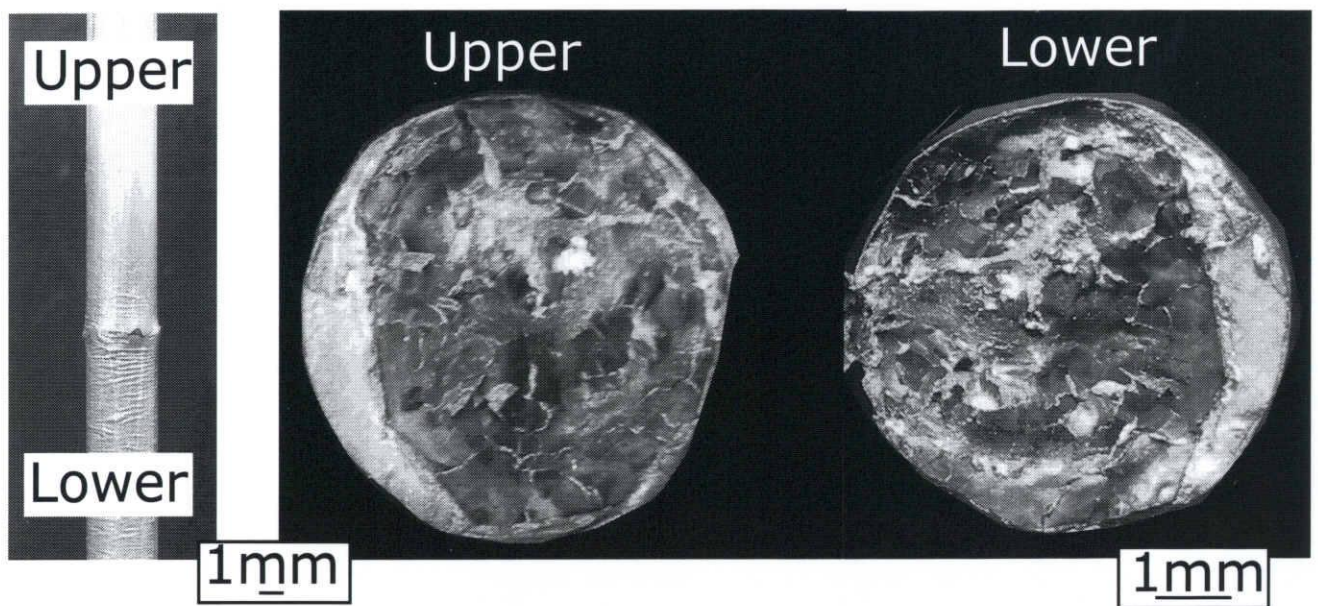
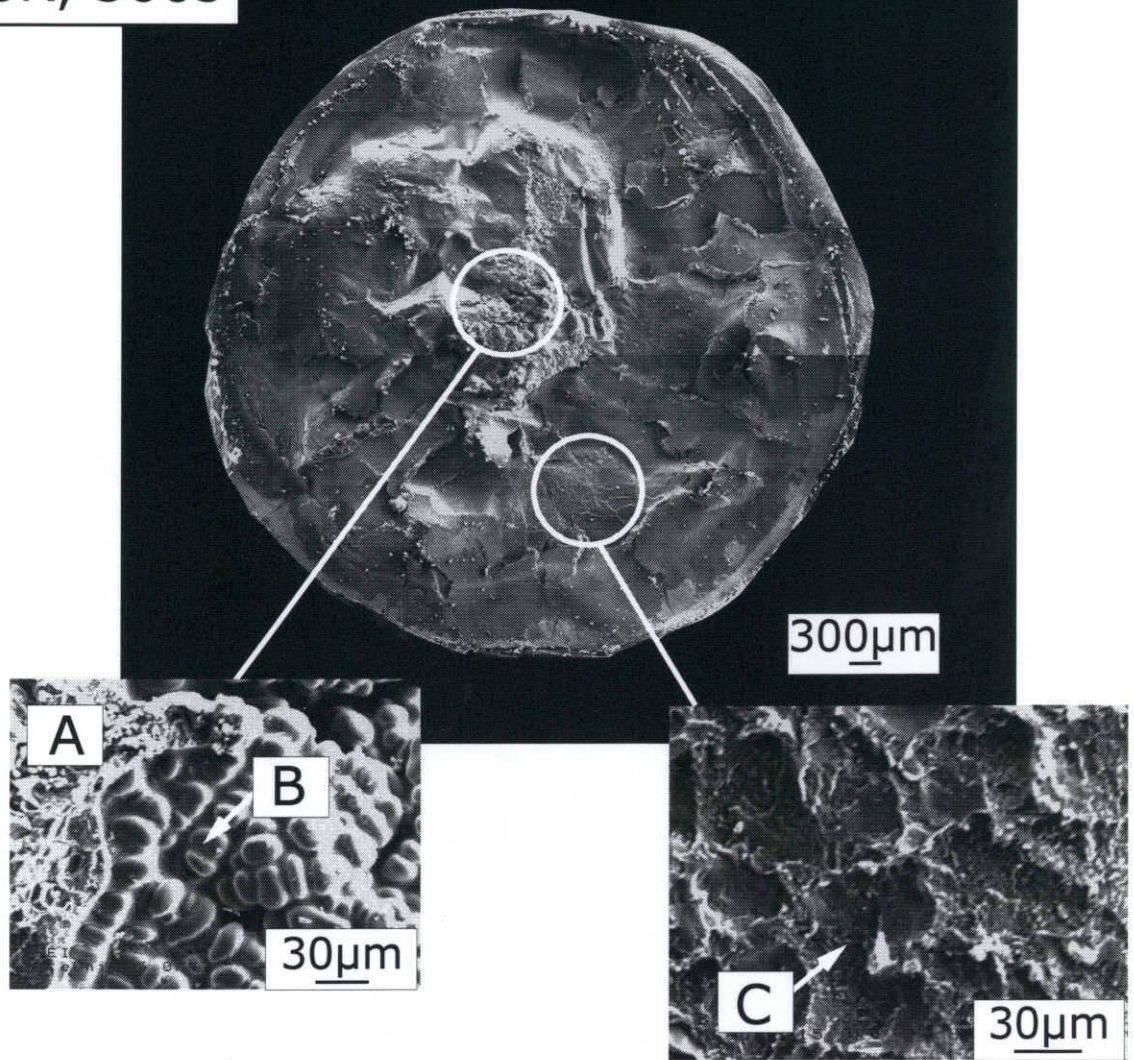


Fig.4-9 Overview and fracture surface of Al /Cu/Al;
bonding temperature:893K, heatingrate:1K/s,
bonding pressure:1.39MPa, holding time:480s.

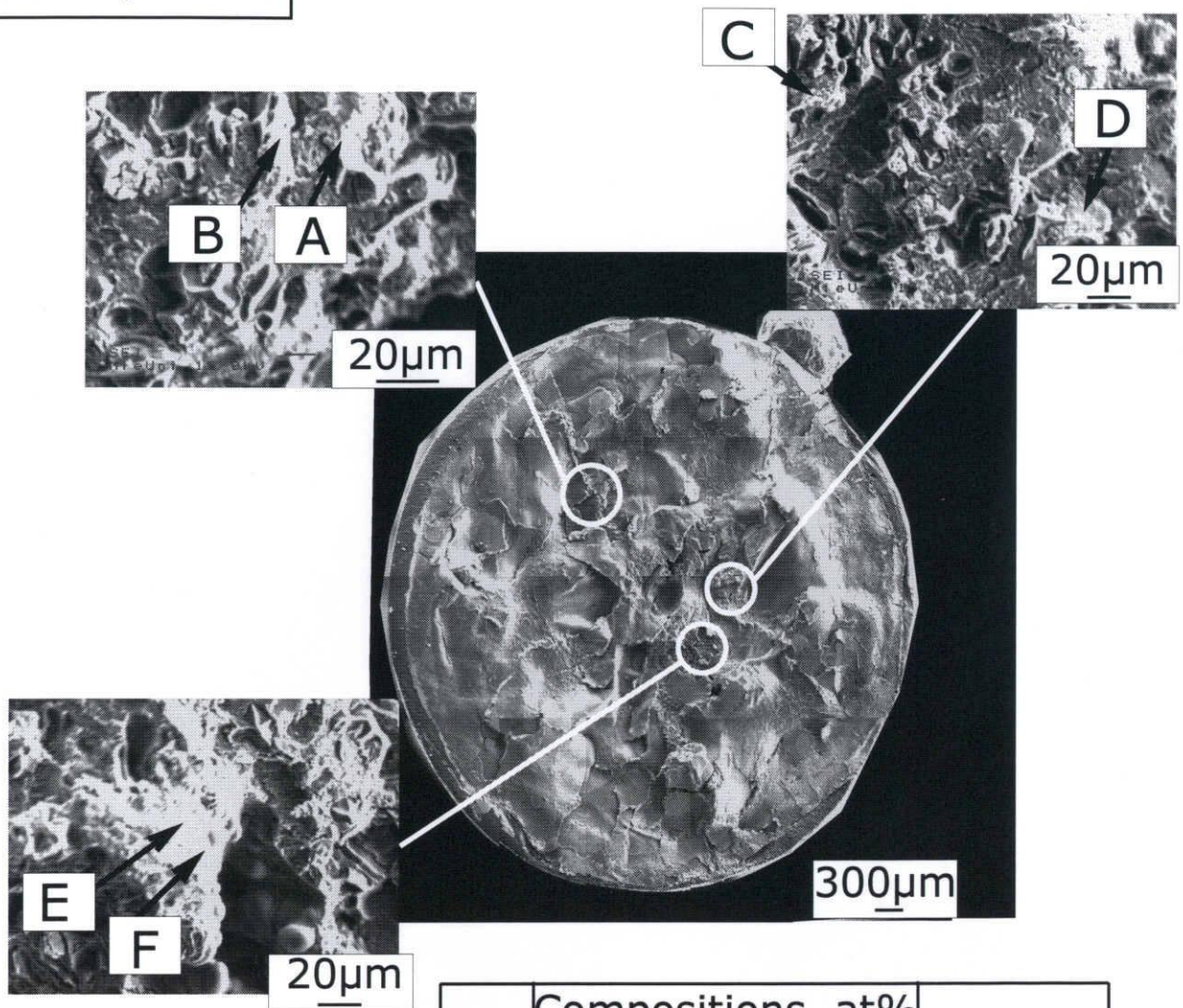
893K, 300s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Cu	O	
A	43.8	1.8	54.4	Al_2O_3
B	98.9	1.1	0.0	α
C	83.1	16.9	0.0	Eutectic

Fig.4-10 Results of SEM observation and EPMA analysis of Fracture surface area in Al/Cu/Al;
heating rate:10K/s, bonding pressure:
1.39MPa.

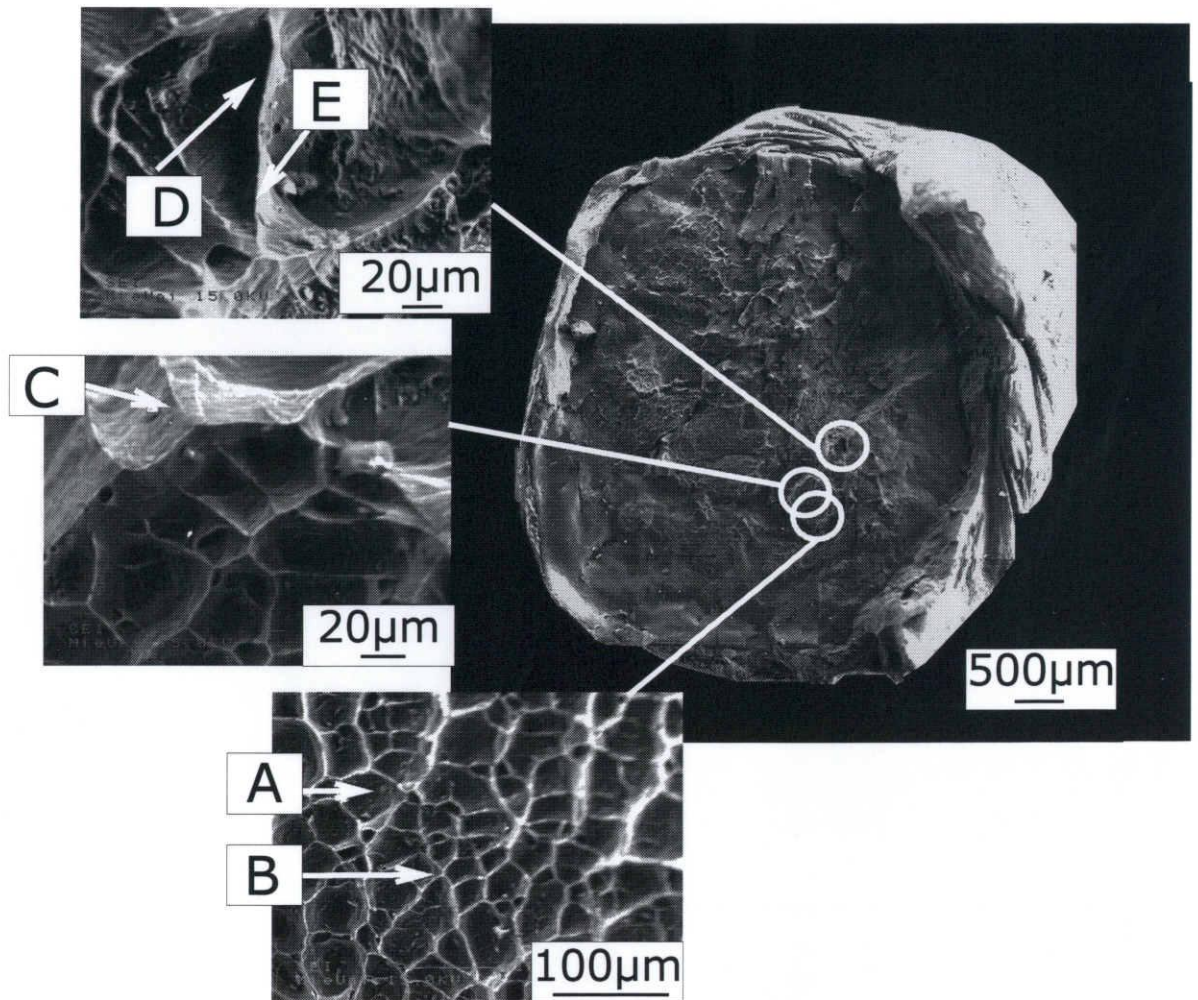
893K, 480s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Cu	O	
A	55.9	43.9	0.2	AlCu
B	69.5	29.5	1.0	Al ₂ Cu
C	55.2	44.3	0.5	AlCu
D	66.8	31.8	1.4	Al ₂ Cu
E	64.6	32.7	2.7	Al ₂ Cu
F	96.1	2.5	1.4	α

Fig.4-11 Results of SEM observation and EPMA analysis of fracture surface area in Al/Cu/Al; heating rate:10K/s, bonding pressure: 1.39MPa.

893K, 720s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Cu	O	
A	98.7	0.0	1.3	α
B	93.7	0.0	6.3	α
C	98.7	0.1	1.2	α
D	98.7	0.2	1.1	α
E	80.1	9.4	10.5	α

Fig.4-12 Results of SEM observation and EPMA analysis of fracture surface area in Al/Cu/Al; heating rate:10K/s, bonding pressure: 1.39MPa.

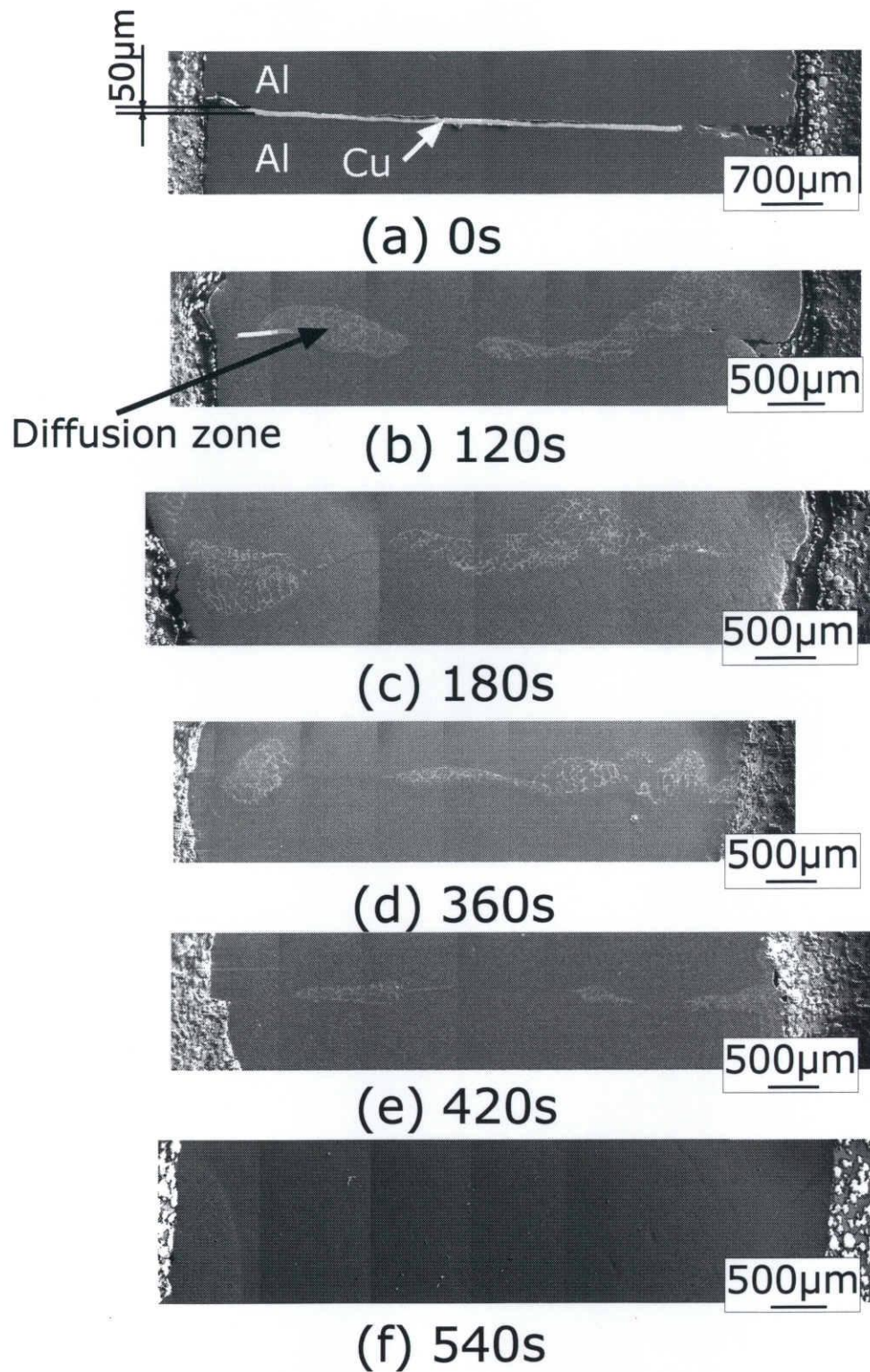
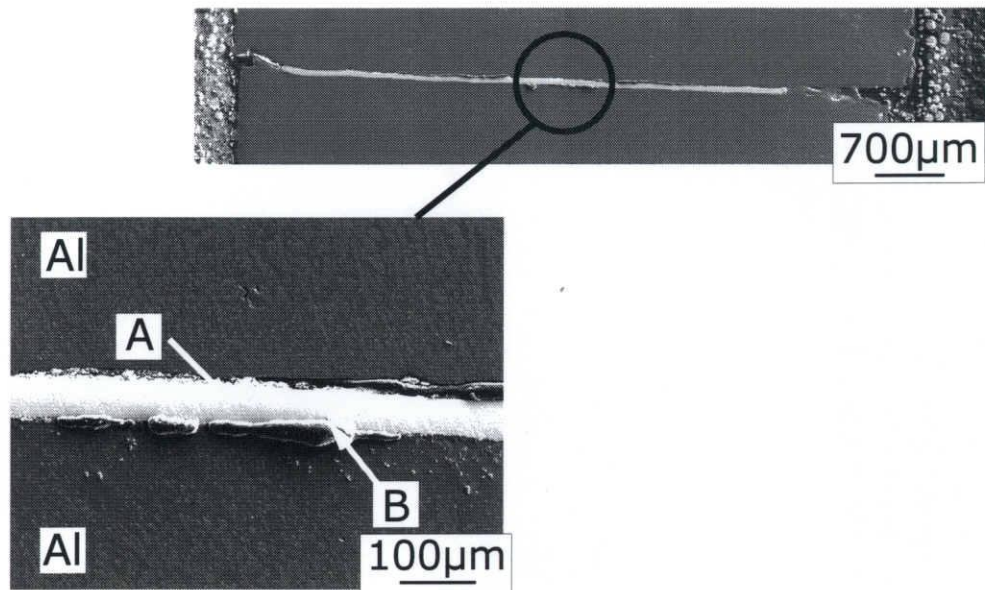


Fig.4-13 Change of microstructure in Al/Cu/Al bond with increasing of bonding time;
bonding temperature:893K, heating rate:10K/s,bonding pressure:1.39MPa.

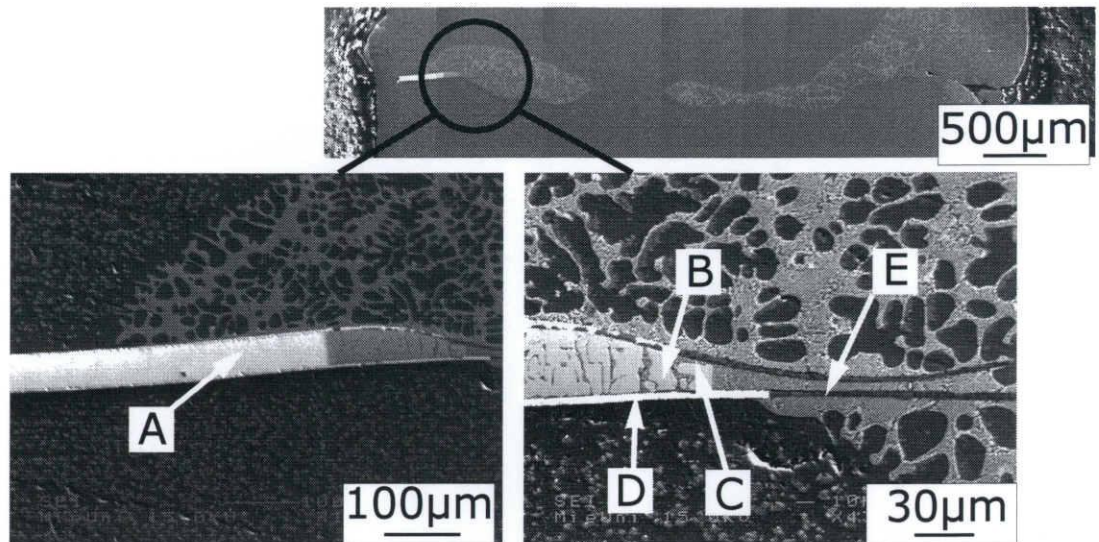
893K,0s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Cu	O	
A	0.1	99.9	0.0	Cu
B	12.8	49.1	38.1	CuO

Fig.4-14 Results of SEM observation and EPMA analysis of cross section in Al/Cu/Al; heating rate:10K/s, bonding pressure: 1.39MPa.

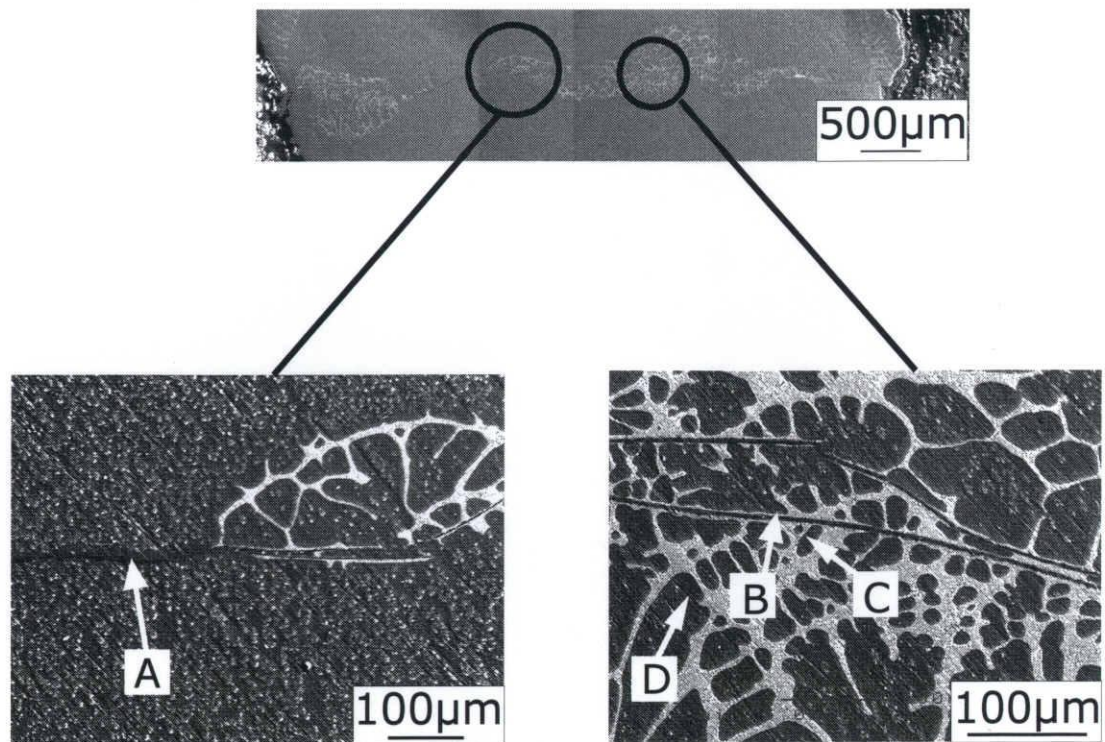
893K, 120s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Cu	O	
A	0.0	100.0	0.0	Cu
B	12.3	87.7	0.0	α
C	69.1	30.9	0.0	Al_2Cu
D	0.0	72.0	28.0	Cu_2O
E	44.5	10.9	44.6	Unknown

Fig.4-15 Results of SEM observation and EPMA analysis of cross section in Al/Cu/Al; heating rate:10K/s, bonding pressure: 1.39MPa.

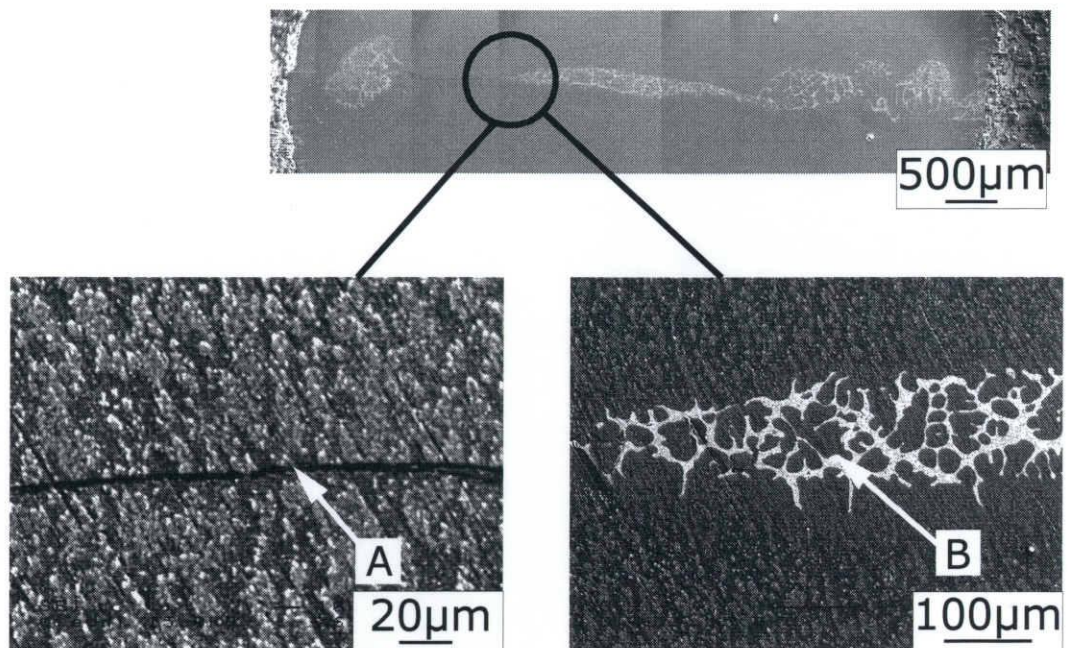
893K, 180s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Cu	O	
A	53.6	4.0	42.4	Oxide film
B	52.6	3.3	44.1	Oxide film
C	84.1	15.9	0.0	Eutectic
D	91.3	1.2	7.5	α

Fig.4-16 Results of SEM observation and EPMA analysis of cross section in Al/Cu/Al; heating rate:10K/s, bonding pressure: 1.39MPa.

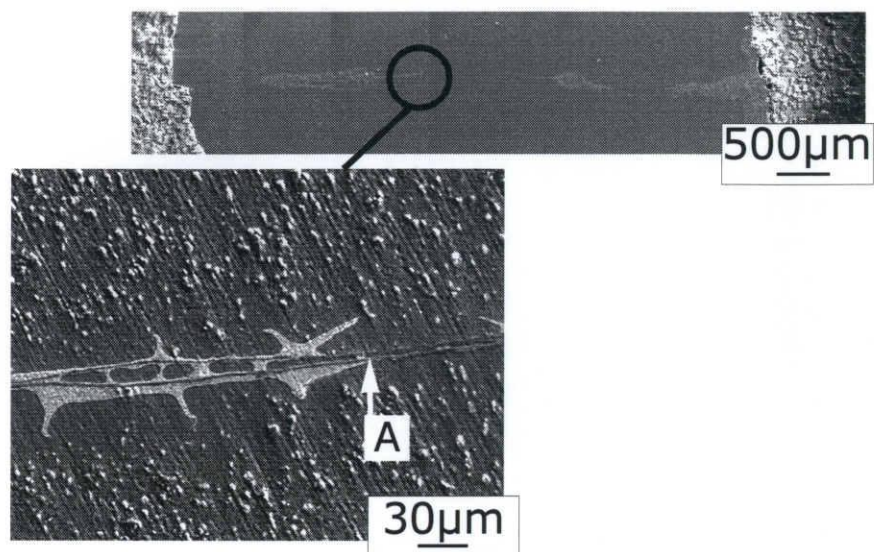
893K, 360s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Cu	O	
A	58.5	0.6	40.9	Oxide film
B	75.8	24.2	0.0	Eutectic

Fig.4-17 Results of SEM observation and EPMA analysis of cross section in Al/Cu/Al; heating rate:10K/s, bonding pressure: 1.39MPa.

893K, 420s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Cu	O	
A	57.7	7.2	35.1	Oxide film

Fig.4-18 Results of SEM observation and EPMA analysis of cross section in Al/Cu/Al; heating rate:10K/s,bonding pressure: 1.39MPa.

Table 5-1 Determination of bonding temperature for joinability of Al/Zn /Al,
bonding pressuer:0.69MPa, bonding time:900s.

Temp. , K	Heating rate, K/s		
	1	5	10
713	×		
613	×	×	×
843	×	×	×
853	×	×	×
863	○	○	○

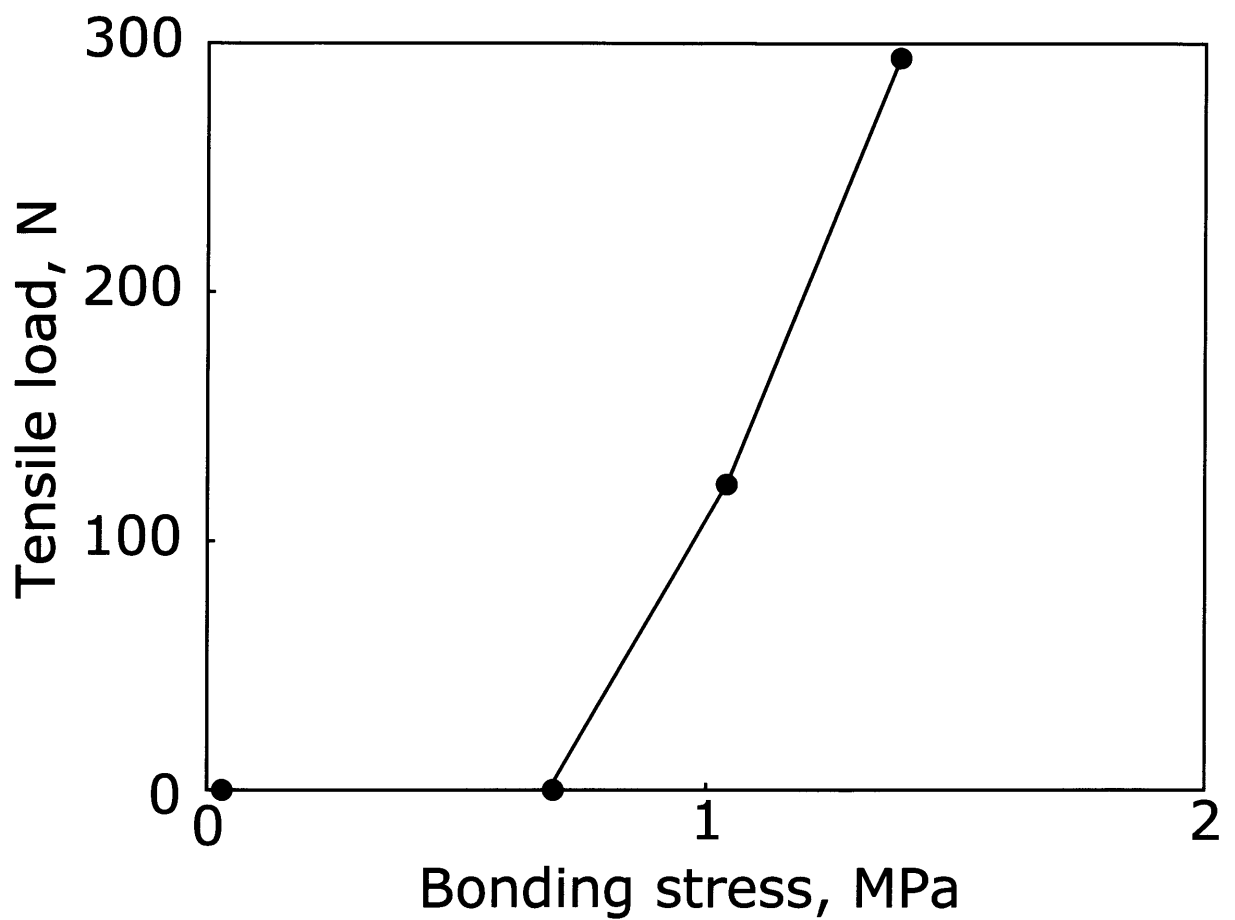


Fig.5-1 Effect of Bonding stress on tensile load of Al/Zn/Al, bonding temperature:863K, heating rate:1K/s, holding time:900s.

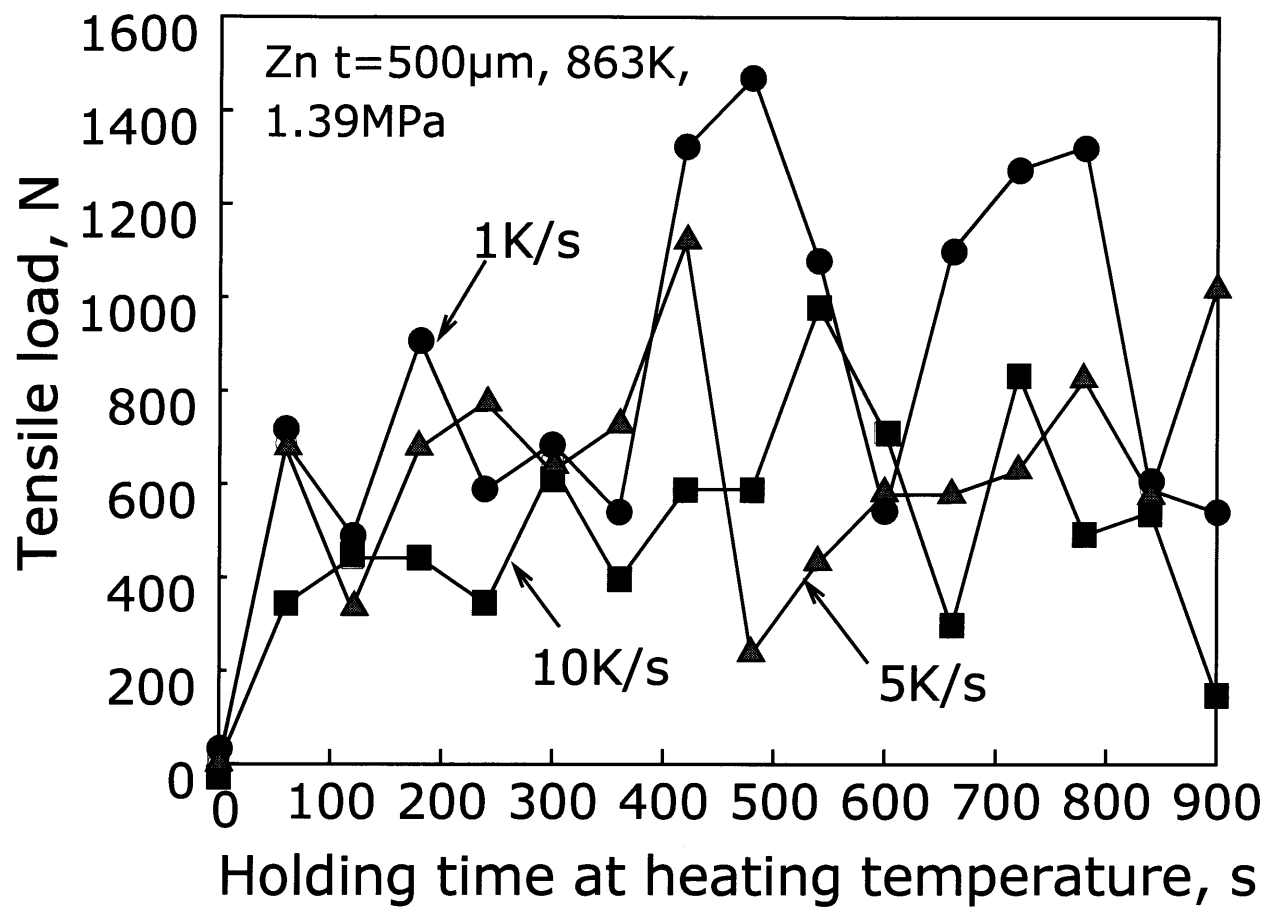
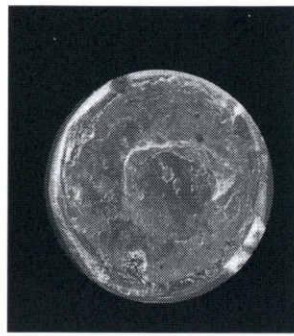
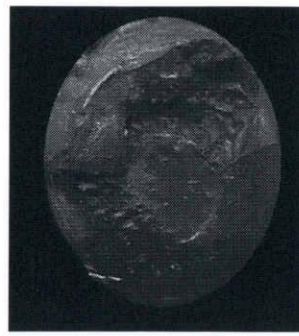


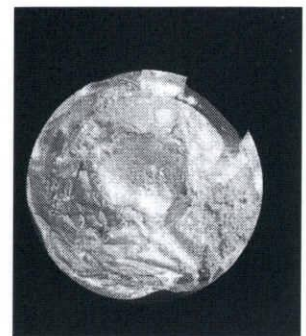
Fig.5-2 Effect of holding time on tensile load of Al/Zn/Al.



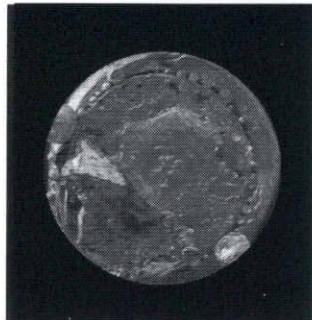
(a)0s



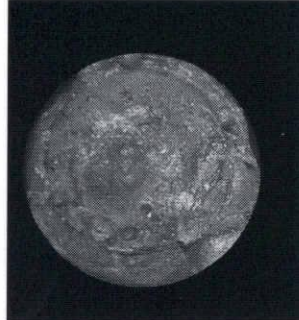
(b)60s



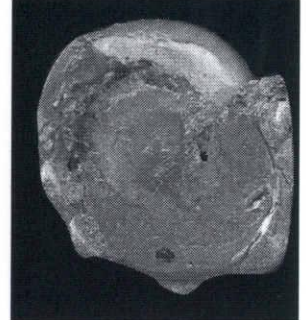
(c)120s



(d)180s



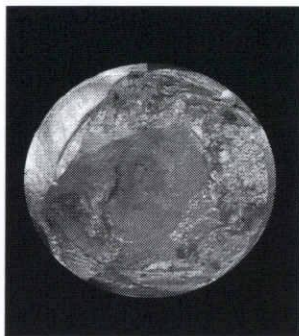
(e)240s



(f)300s



(g)360s



(h)420s

None

(i)480s

1mm

Fig.5-3-1 Fracture surface of specimen by Al/Zn/Al;
bonding temperature:863K, heating rate:1K/s, bonding pressure:1.39MPa.

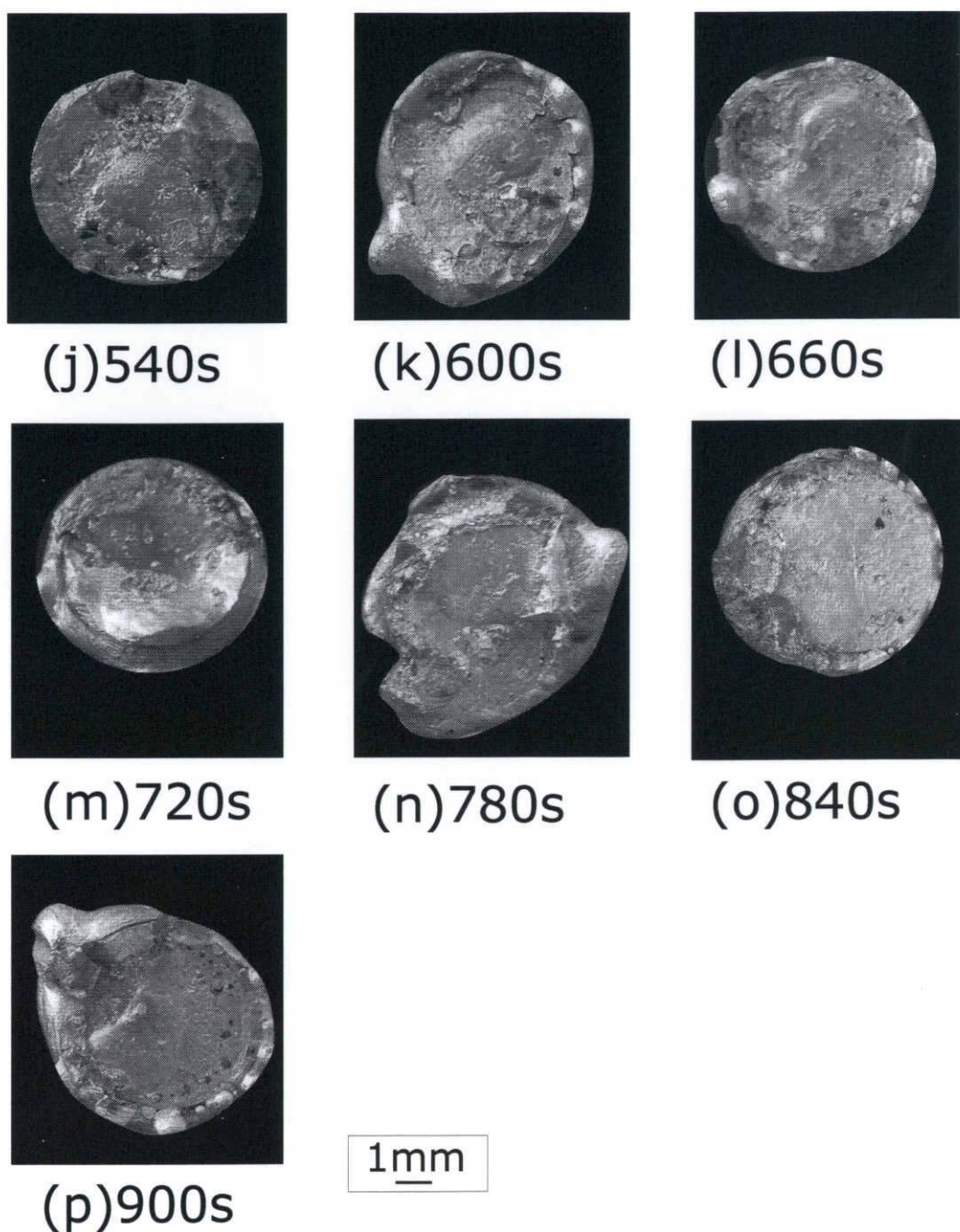


Fig.5-3-2 Fracture surface of specimen
by Al/Zn/Al;
bonding temperature:863K, heating
rate:1K/s, bonding pressure:1.39MPa.

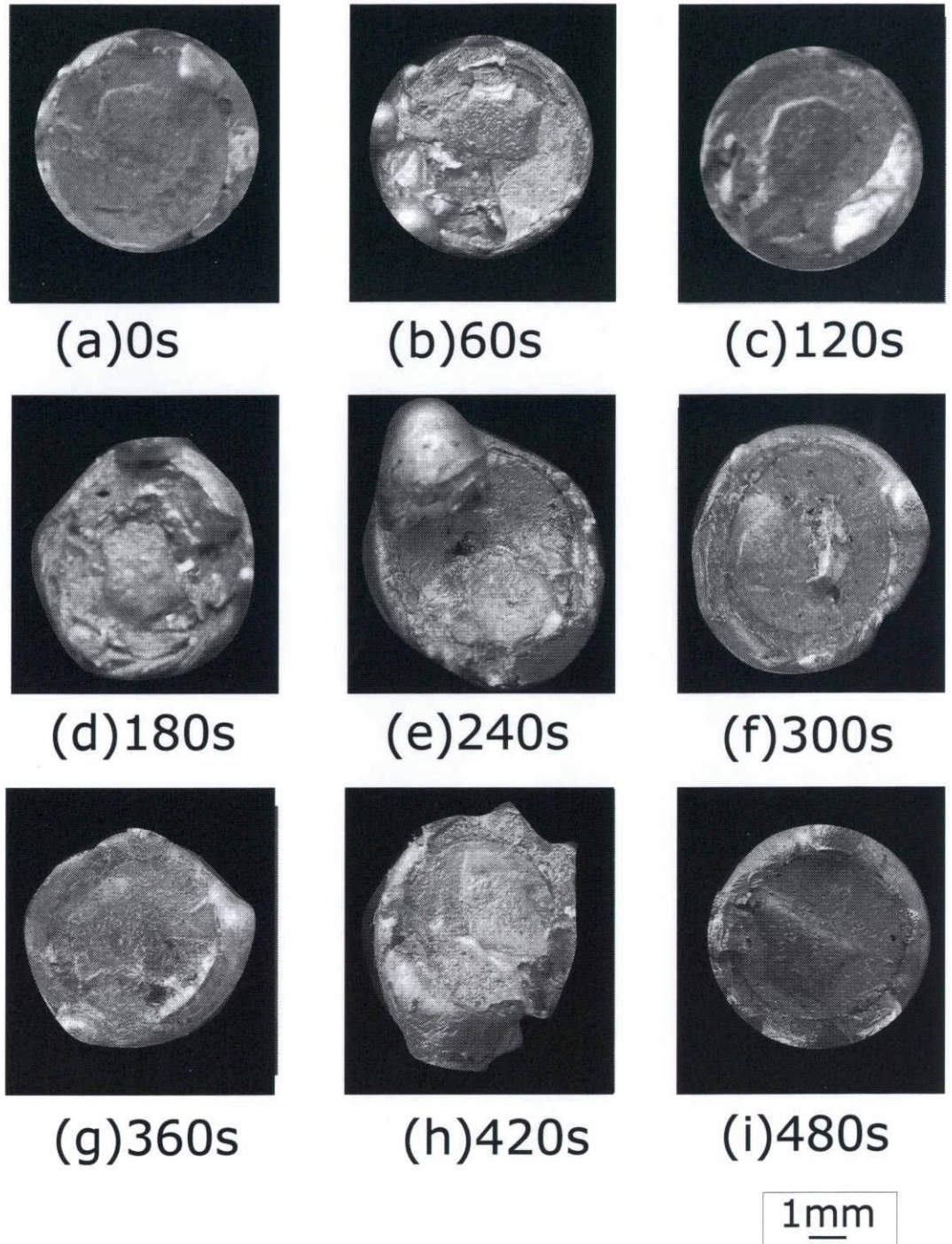
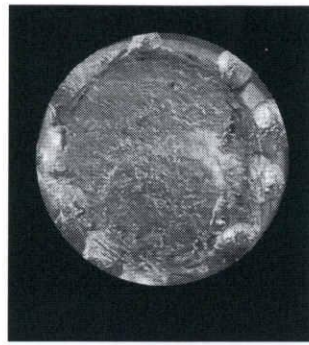
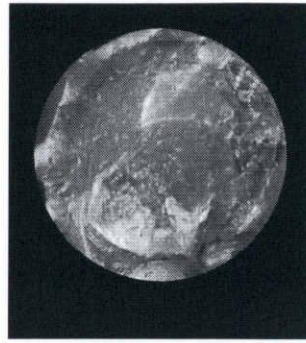


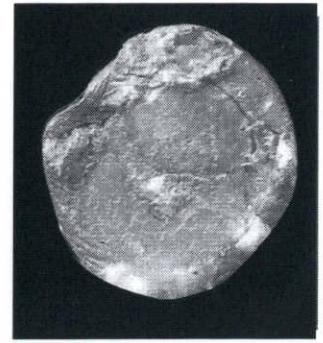
Fig.5-4-1 Fracture surface of specimen
by Al/Zn/Al;
bonding temperature:863K, heating
rate:5K/s, bonding pressure:1.39MPa.



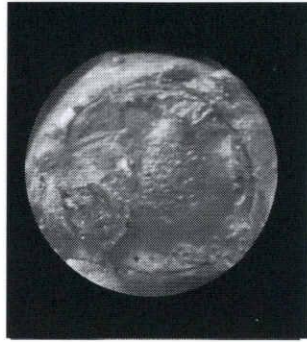
(j)540s



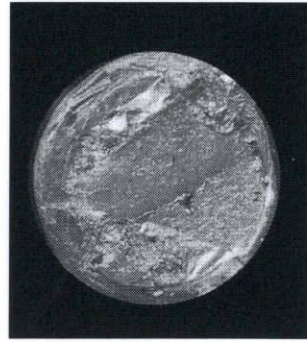
(k)600s



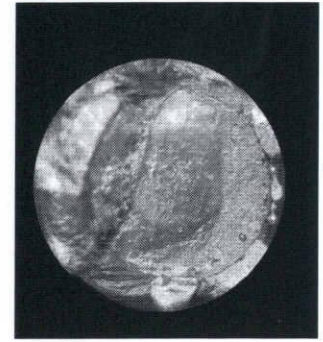
(l)660s



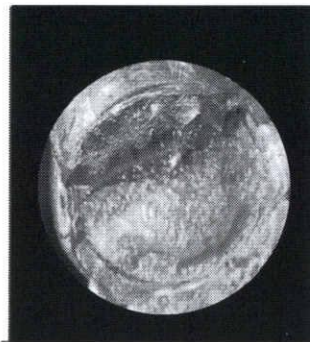
(m)720s



(n)780s



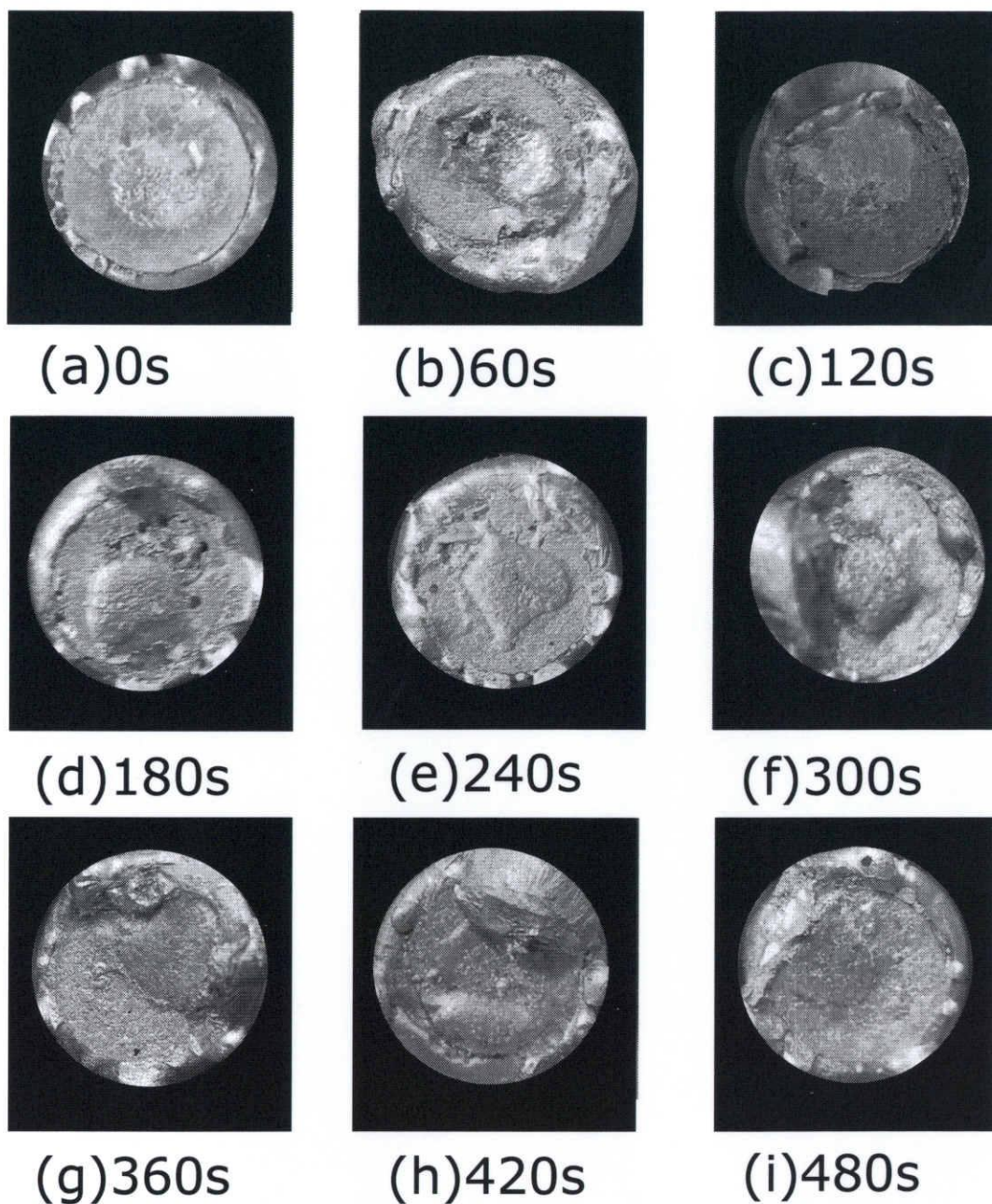
(o)840s



(p)900s

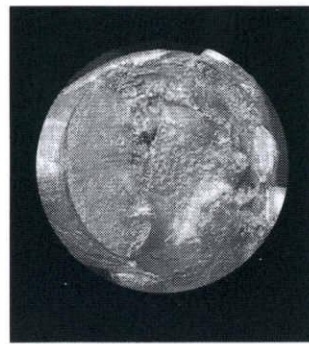
1mm

Fig.5-4-2 Fracture surface of specimen by Al/Zn/Al, bonding temperature:863K, heating rate:5K/s, bonding pressure:1.39MPa.

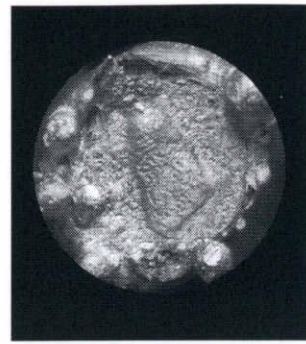


1mm

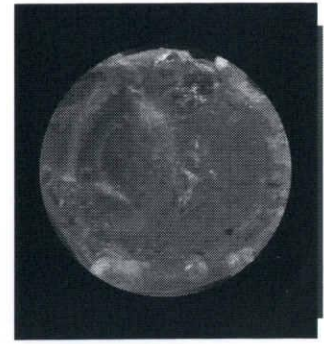
Fig.5-5-1 Fracture surface of specimen
by Al/Zn/Al;
bonding temperature:863K, heating
rate:10K/s, bonding pressure:1.39MPa.



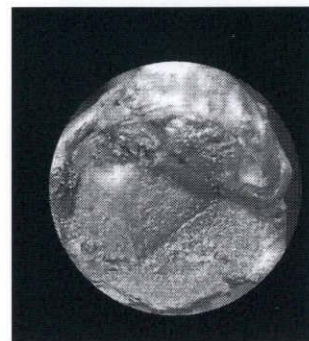
(j)540s



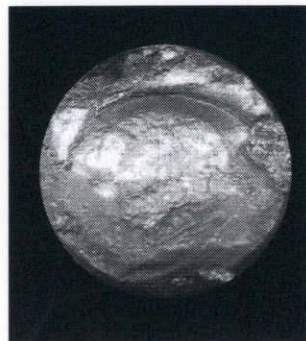
(k)600s



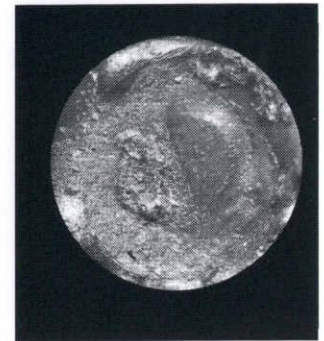
(l)660s



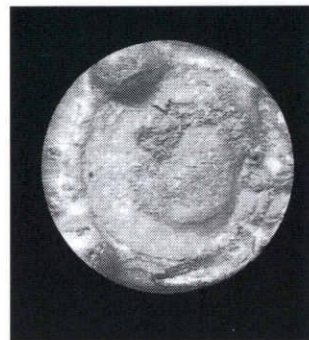
(m)720s



(n)780s



(o)840s



(p)900s

1mm

Fig.5-5-2 Fracture surface of specimen by Al/Zn/Al;
bonding temperature:863K, heating rate:10K/s, bonding pressure:1.39MPa.

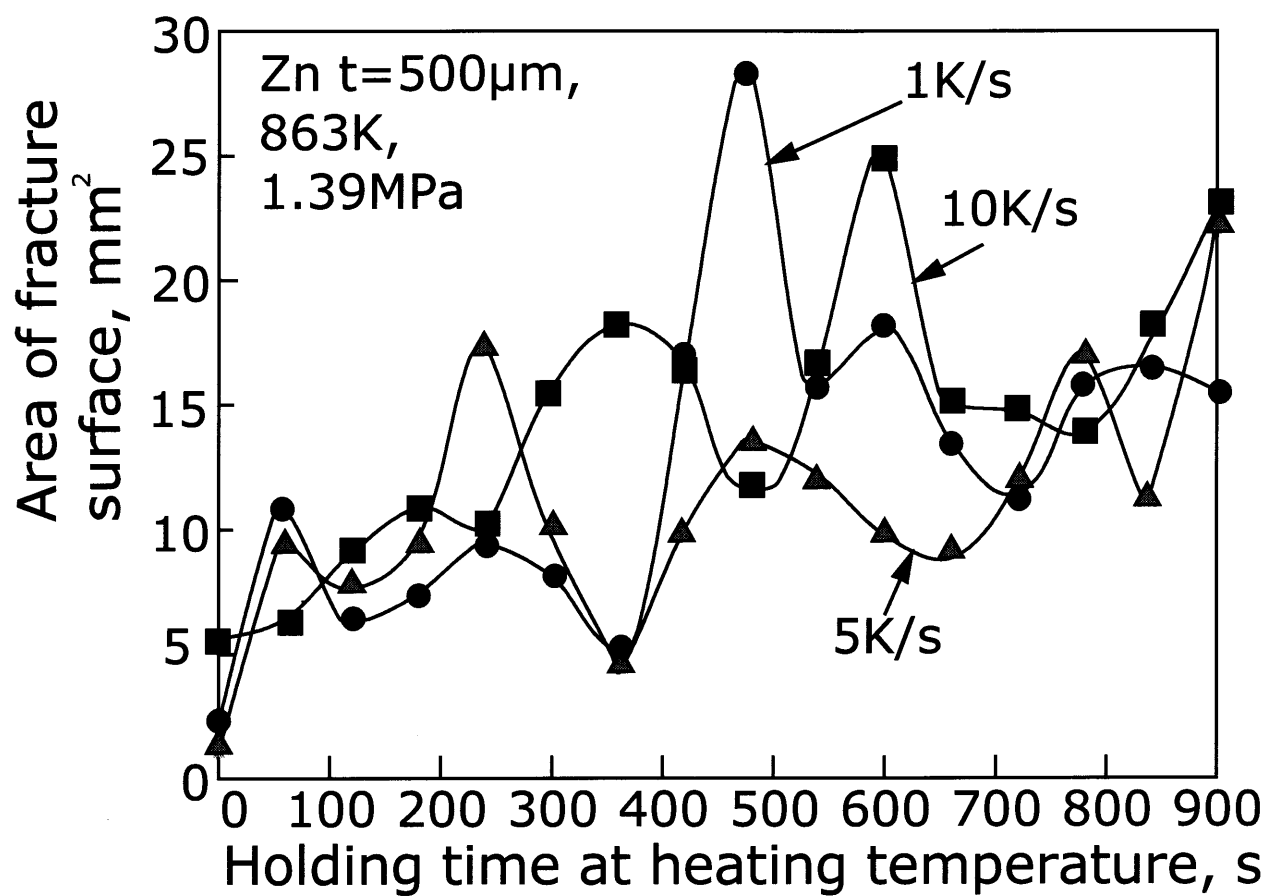


Fig.5-6 Area of fracture surface of Al /Zn/Al .

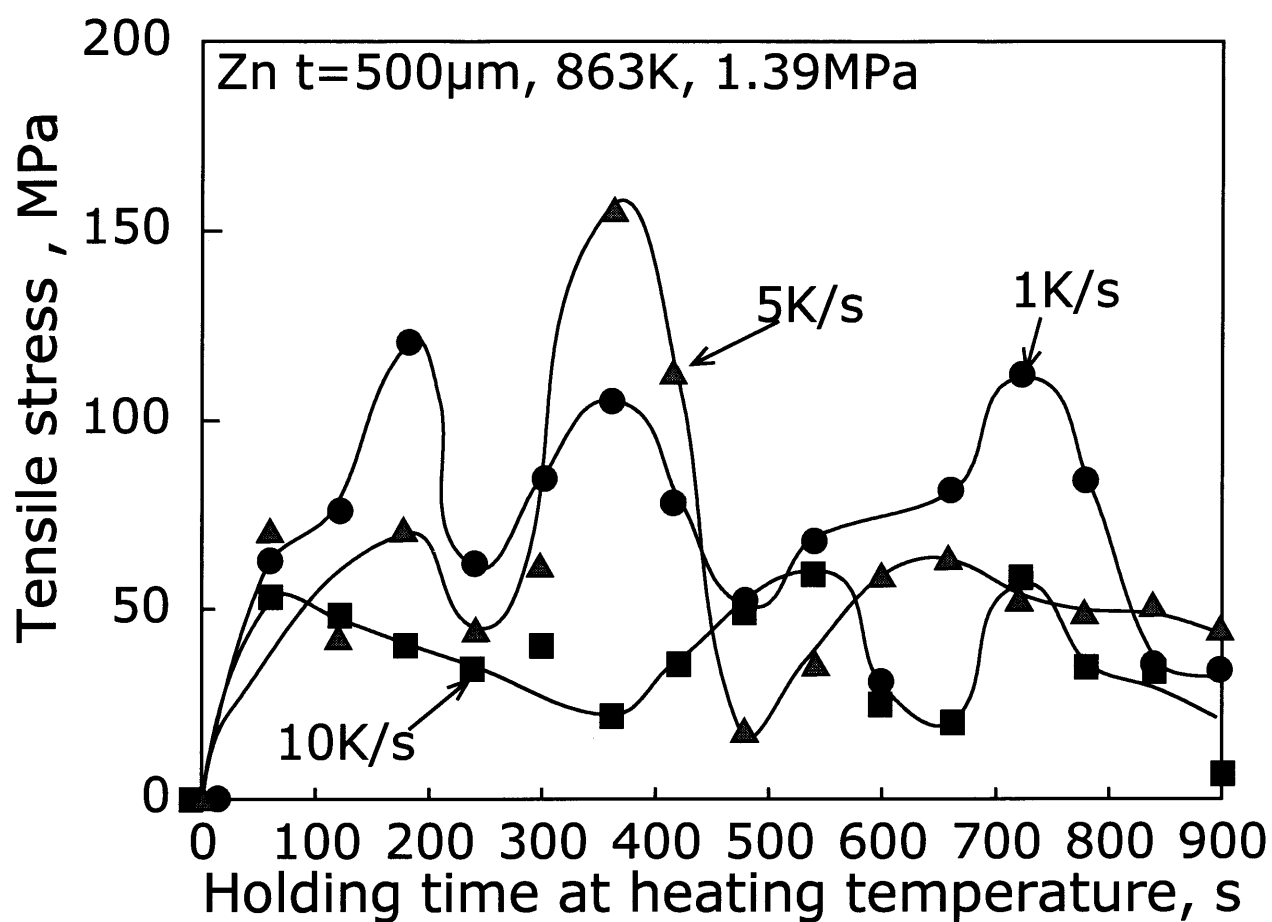
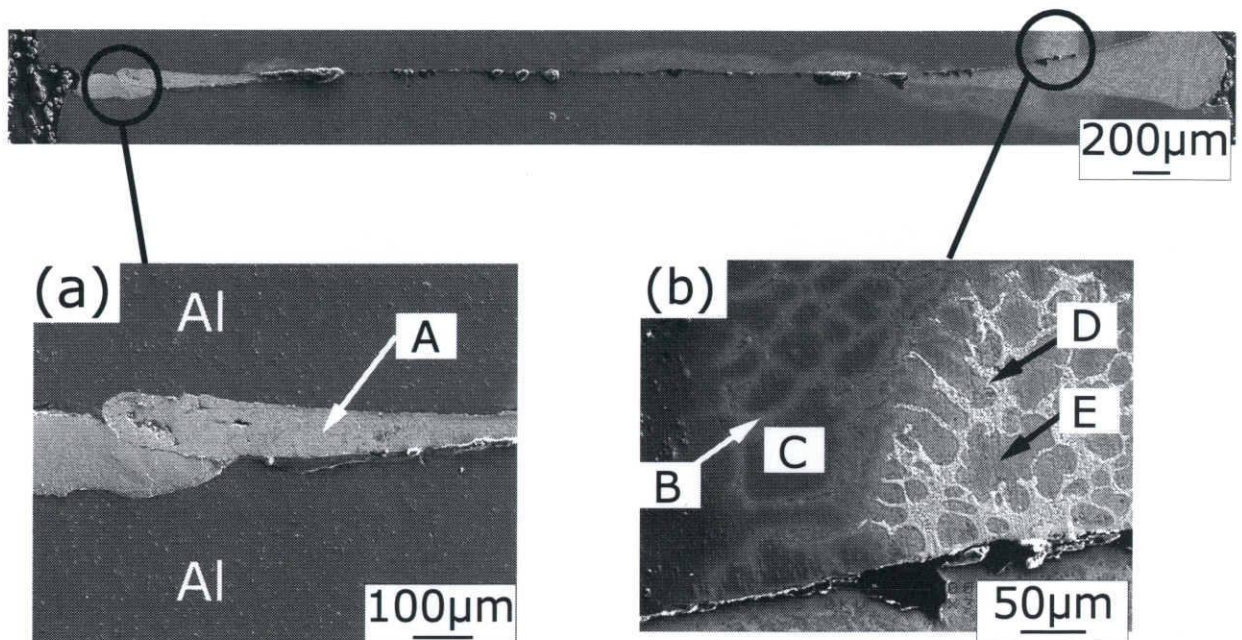


Fig.5-7 Effect of holding time on tensile stress of Al /Zn/Al.

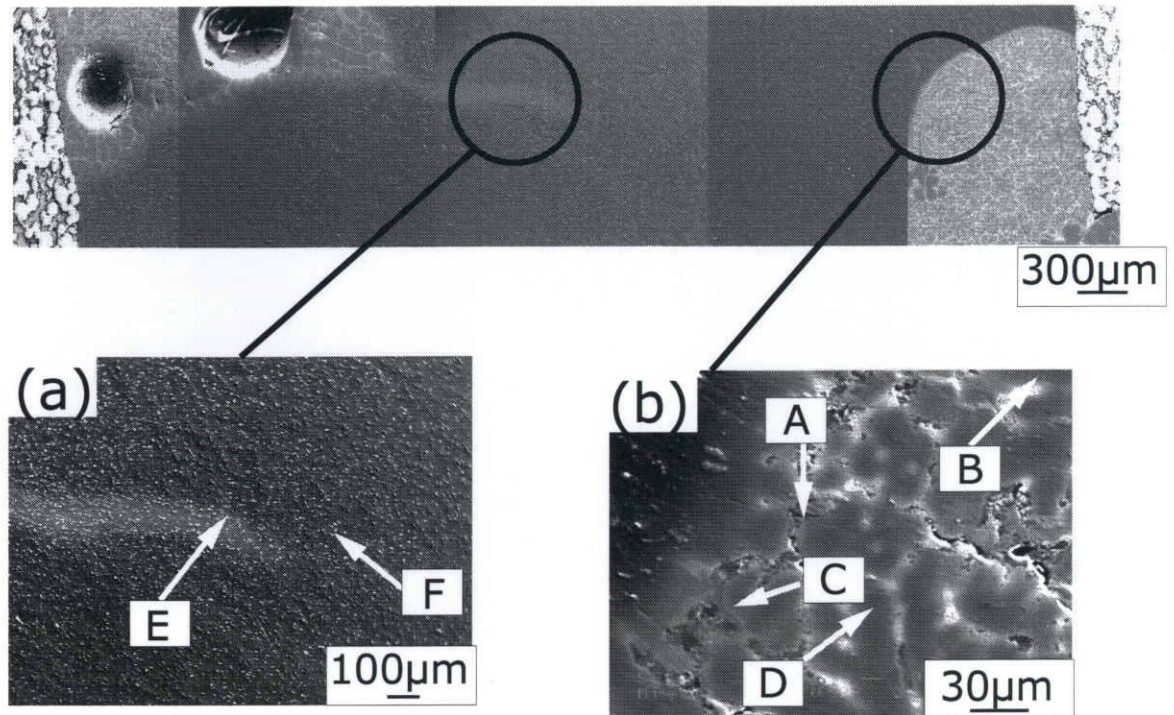
863K, 60s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Zn	O	
A	0.0	50.7	49.3	ZnO
B	65.4	15.7	18.9	Solid solution
C	83.2	6.7	10.1	Solid solution
D	0.0	50.9	49.1	ZnO
E	40.2	30.8	29.0	Solid solution

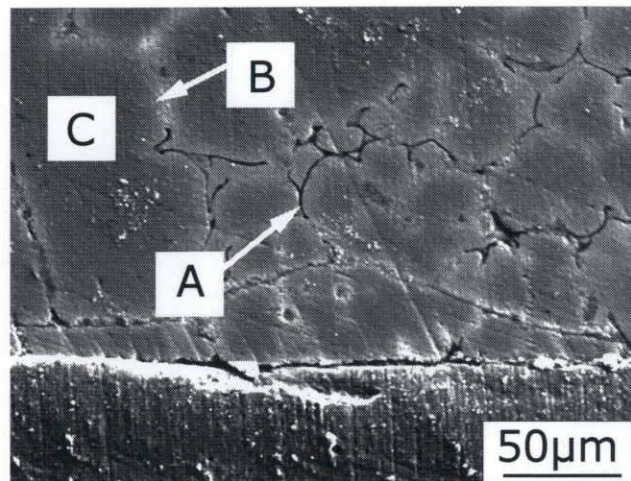
Fig.5-8 Results of SEM observation and EPMA analysis of cross section in Al/Zn/Al; heating rate:10K/s, bonding pressure: 0.69MPa.

863K, 480s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Zn	O	
A	65.7	11.3	23.0	Solid solution
B	34.1	32.8	33.1	Solid solution
C	49.9	24.4	25.7	Solid solution
D	74.7	9.6	16.5	Solid solution
E	85.3	6.4	8.3	Solid solution
F	100.0	0.0	0.0	Al

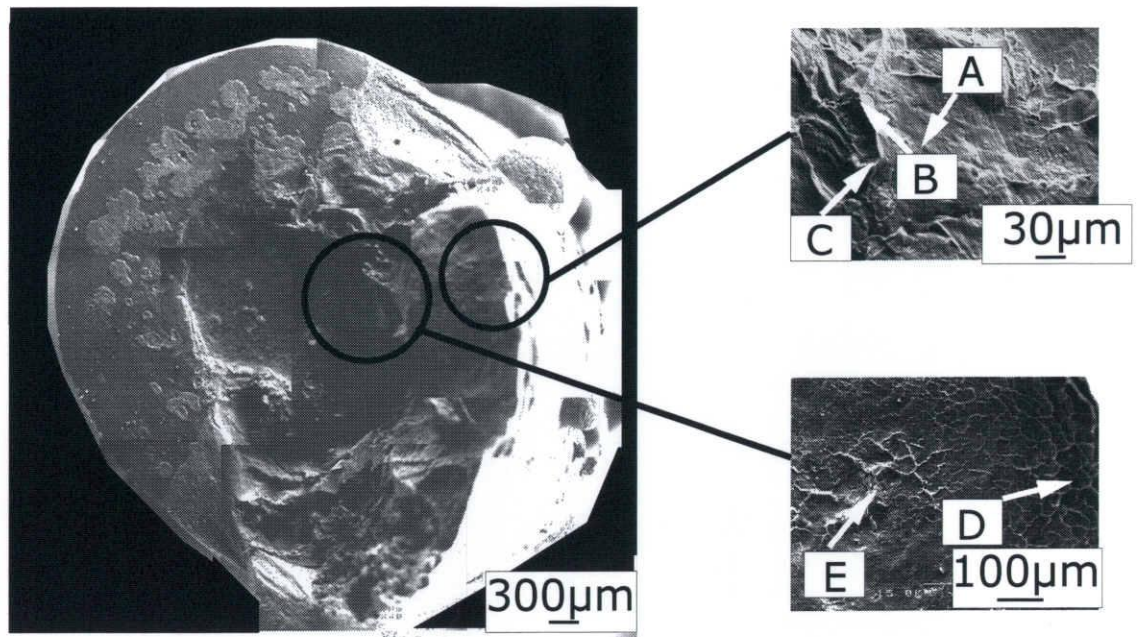
Fig.5-9 Results of SEM observation and EPMA analysis of cross section in Al/Zn/Al; heating rate:1K/s, bonding pressure: 1.39MPa.



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Zn	O	
A	45.0	9.8	45.2	Oxide film
B	52.7	30.1	17.2	Solid solution
C	82.7	8.1	9.2	Solid solution

Fig.5-10 Results of SEM observation and EPMA analysis of cross section in Al/Zn/Al; heating rate:1K/s, bonding pressure: 0.55MPa, holding time:120s.

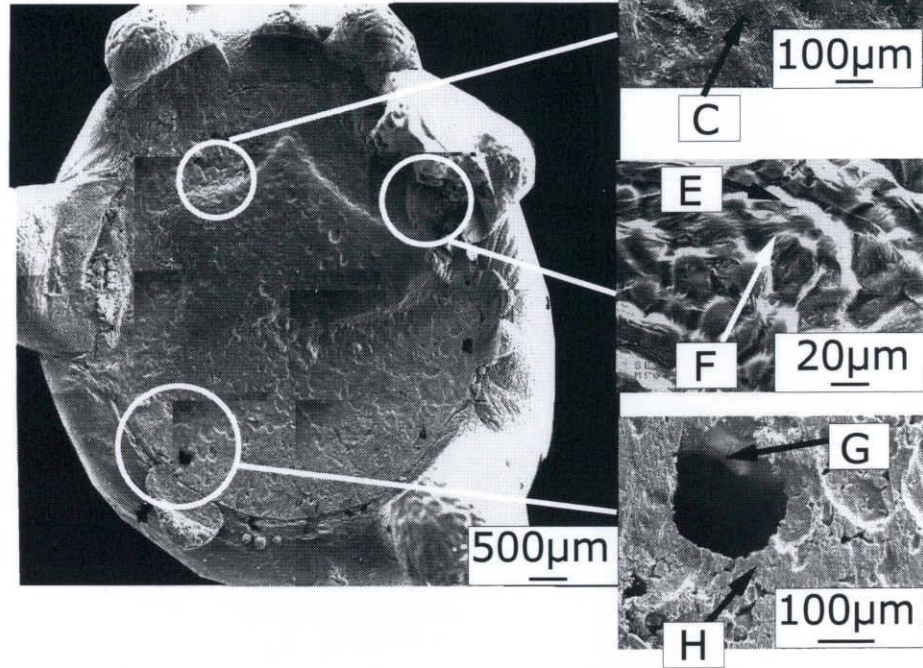
863K, 1K/s, 60s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Zn	O	
A	32.0	3.3	64.7	Al oxide film
B	67.3	2.2	30.5	UnKnown
C	39.6	4.7	55.7	Al oxide film
D	81.7	2.6	15.7	Solid solution
E	78.3	2.3	18.8	Solid solution

Fig.5-11 Result of SEM observation and EPMA analysis of fracture surface in Al/Zn/Al;
heating rate:1K/s, bonding pressure: 1.39MPa.

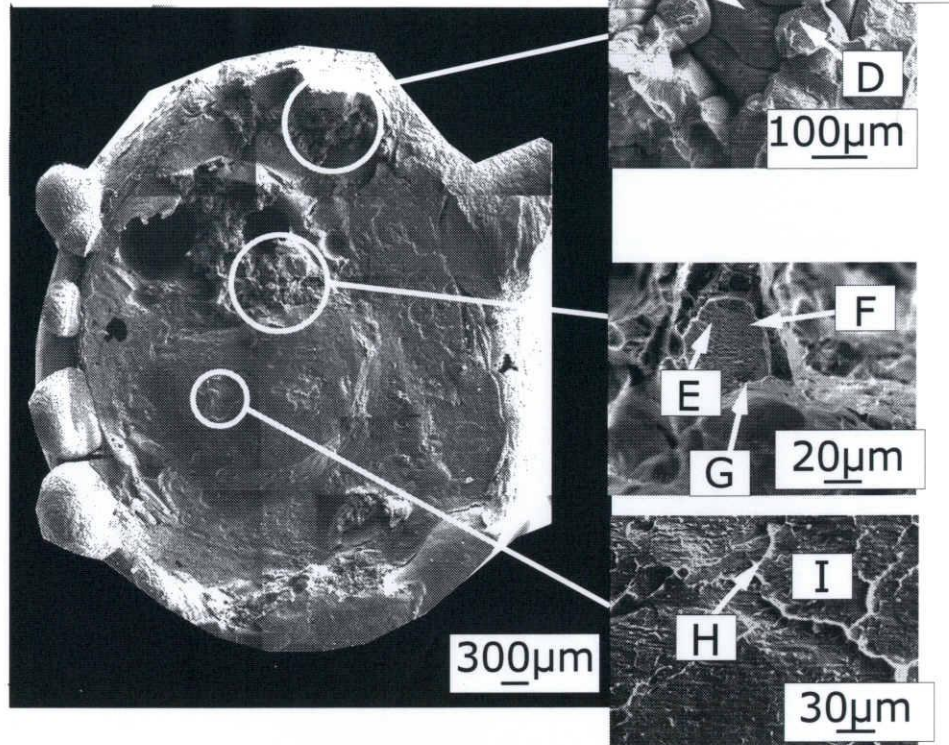
863K, 5K/s, 480s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Zn	O	
A	61.2	3.7	35.1	UnKnown
B	84.7	2.8	12.5	Solid solution
C	82.9	0.9	16.2	Solid solution
D	85.8	0.8	13.4	Solid solution
E	72.2	15.3	12.5	Solid solution
F	54.9	19.6	25.5	Solid solution
G	72.2	15.3	12.5	Solid solution
H	55.7	18.4	25.9	Solid solution

Fig.5-12 Result of SEM observation and EPMA analysis of fracture surface in Al/Zn/Al;
bonding pressure:1.39MPa.

863K, 1K/s, 600s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Zn	O	
A	72.7	15.4	11.9	Solid solution
B	25.4	64.1	10.5	Solid solution
C	35.5	29.0	35.5	Solid solution
D	58.8	11.1	30.1	Solid solution
E	82.1	8.4	9.5	Solid solution
F	72.2	14.4	13.4	Solid solution
G	62.9	6.1	31.0	Solid solution
H	88.8	2.4	8.8	Solid solution
I	72.0	1.5	26.5	Solid solution

Fig.5-13 Result of SEM observation and EPMA analysis of fracture surface in Al/Zn/Al ;
bonding pressure:1.39MPa.

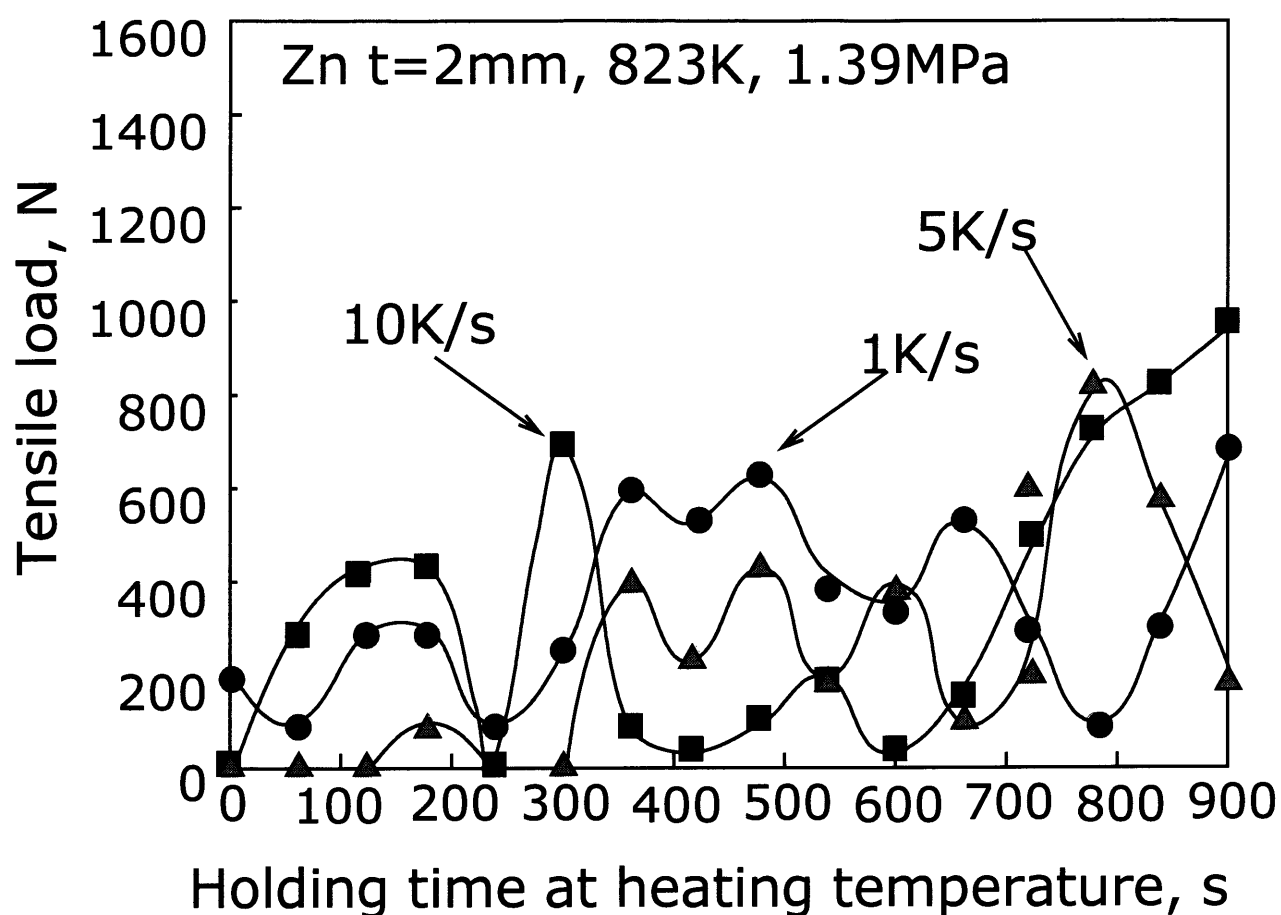
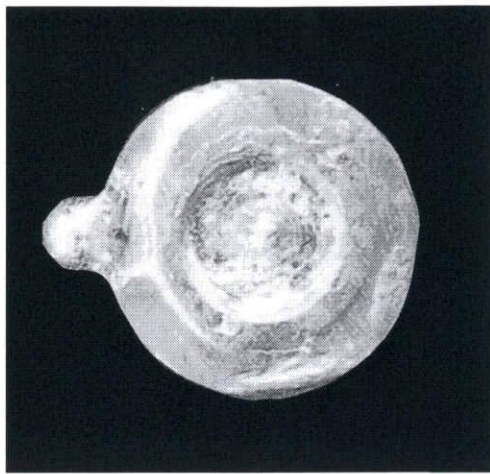


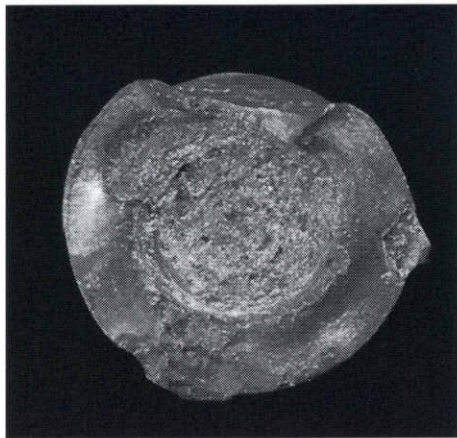
Fig.5-14 Effect of holding time on tensile load of Al /Zn/Al by cup shape specimen.



(a)5K/s 480s



(b)5K/s 480s



(c)1K/s 900s

1mm

Fig.5-15 Fracture surface of Al /Zn/Al;
bonding temperature:863K, bonding
pressure:1.39MPa.

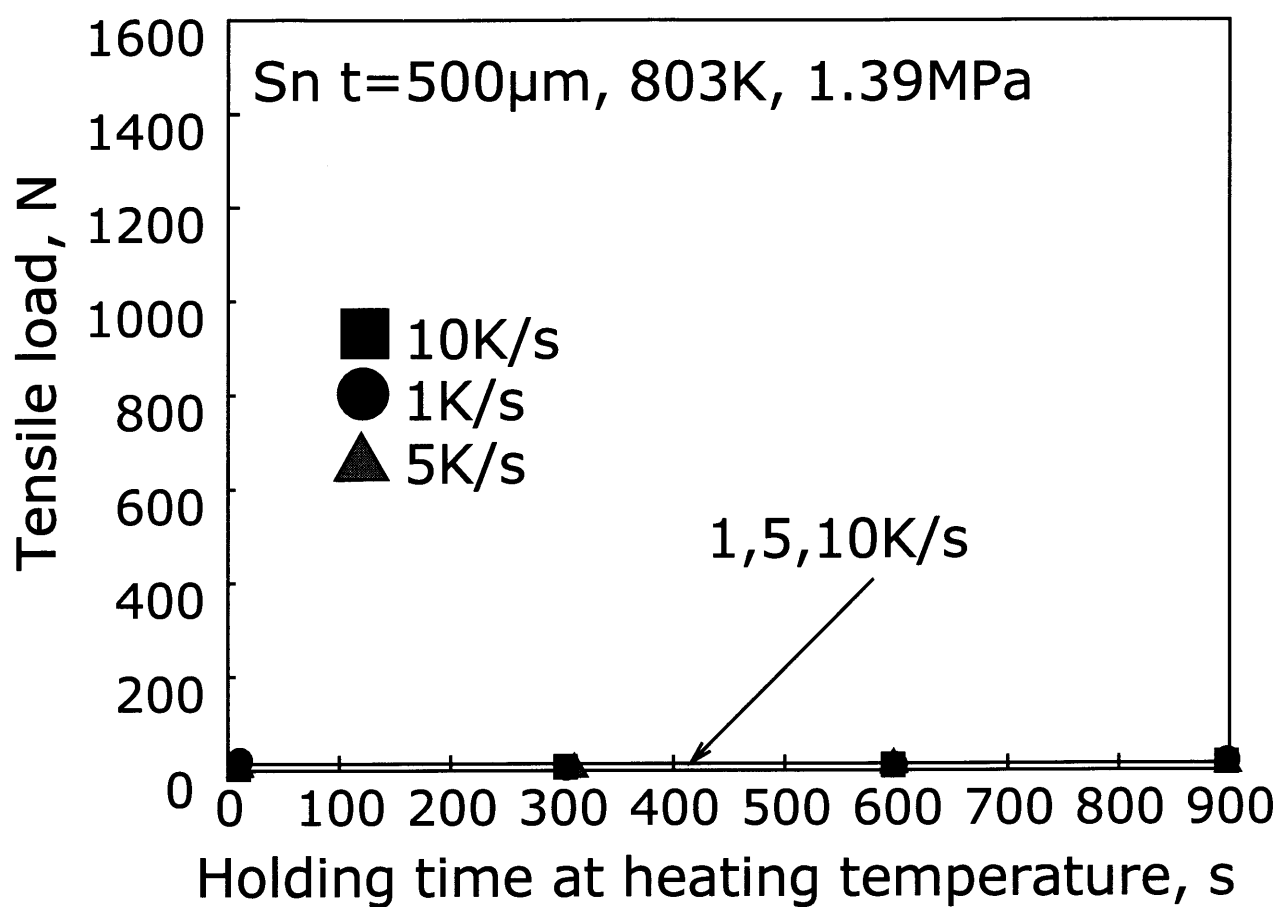


Fig.6-1 Effect of holding time on tensile load of Al /Sn/Al.

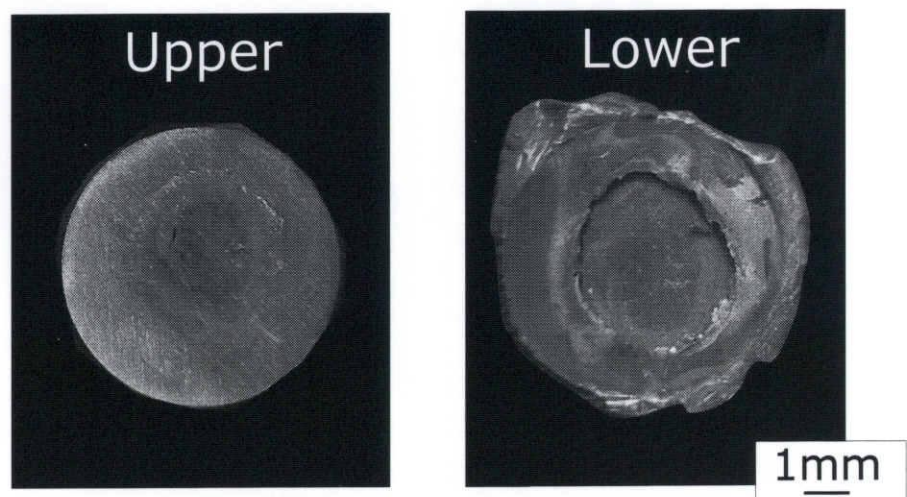
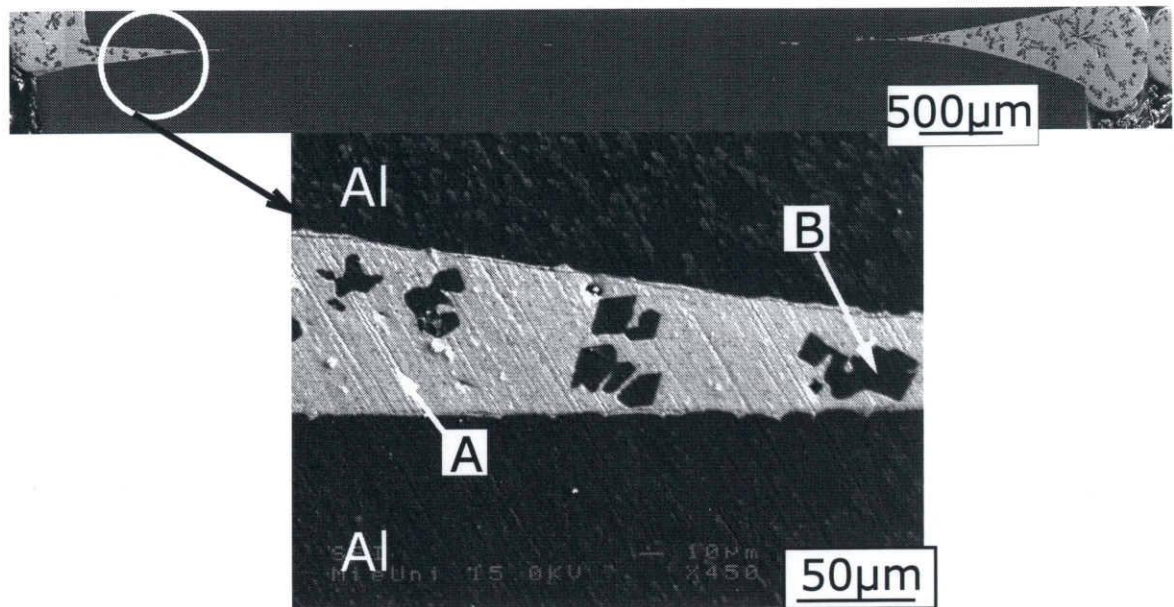


Fig.6-2 Surface of Al/Sn/Al;
bonding temperature:803K,heating
rate:10K/s, bonding pressure, holding
time:900s.



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Sn	O	
A	2.8	70.5	26.7	Solid solution
B	95.3	0.1	4.6	Al

Fig.6-3 Result of SEM observation and EPMA analysis cross-section in Al/Sn/Al, bonding temperature:803K, heating rate: 10K/s, bonding pressure:1.39MPa, holding time:900s.

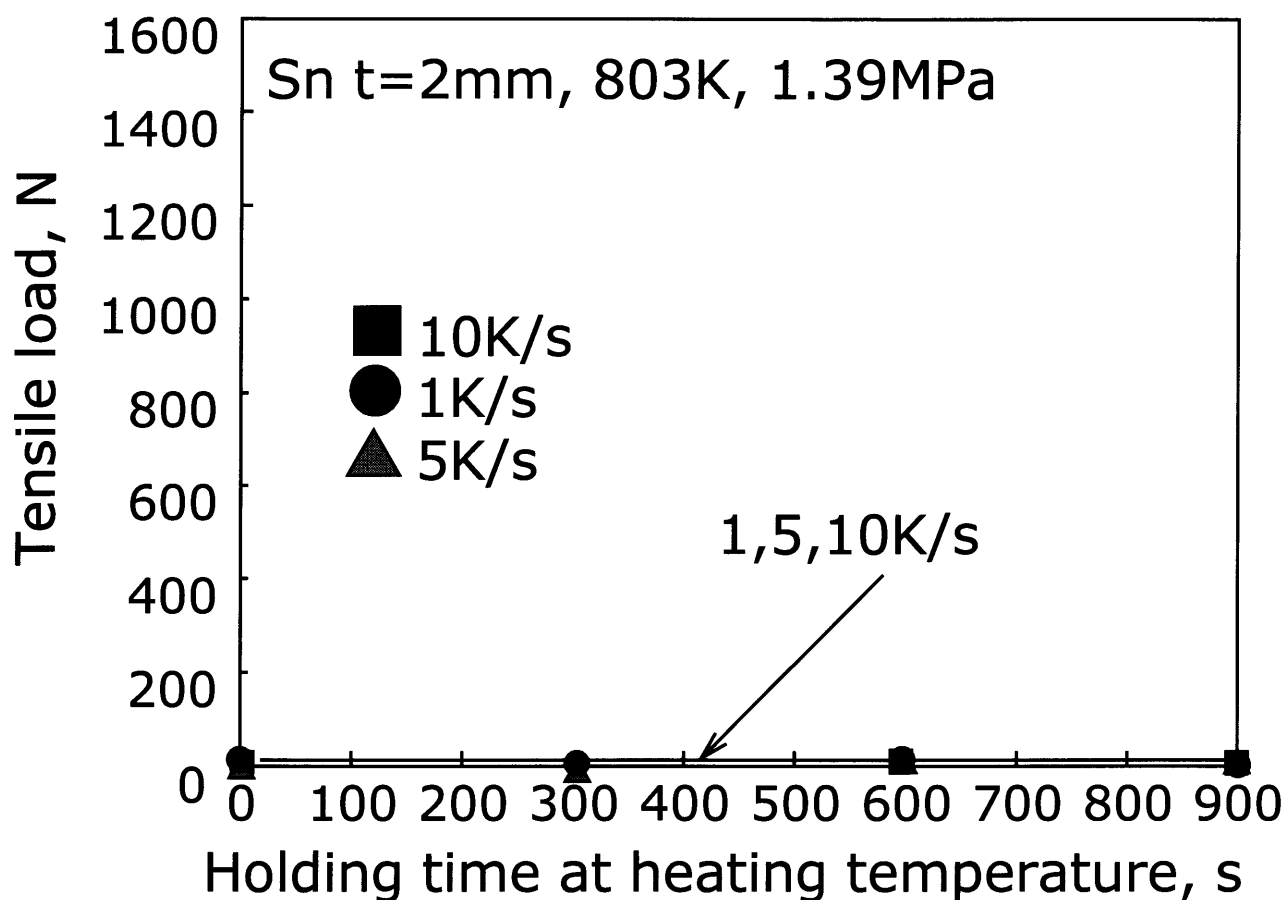
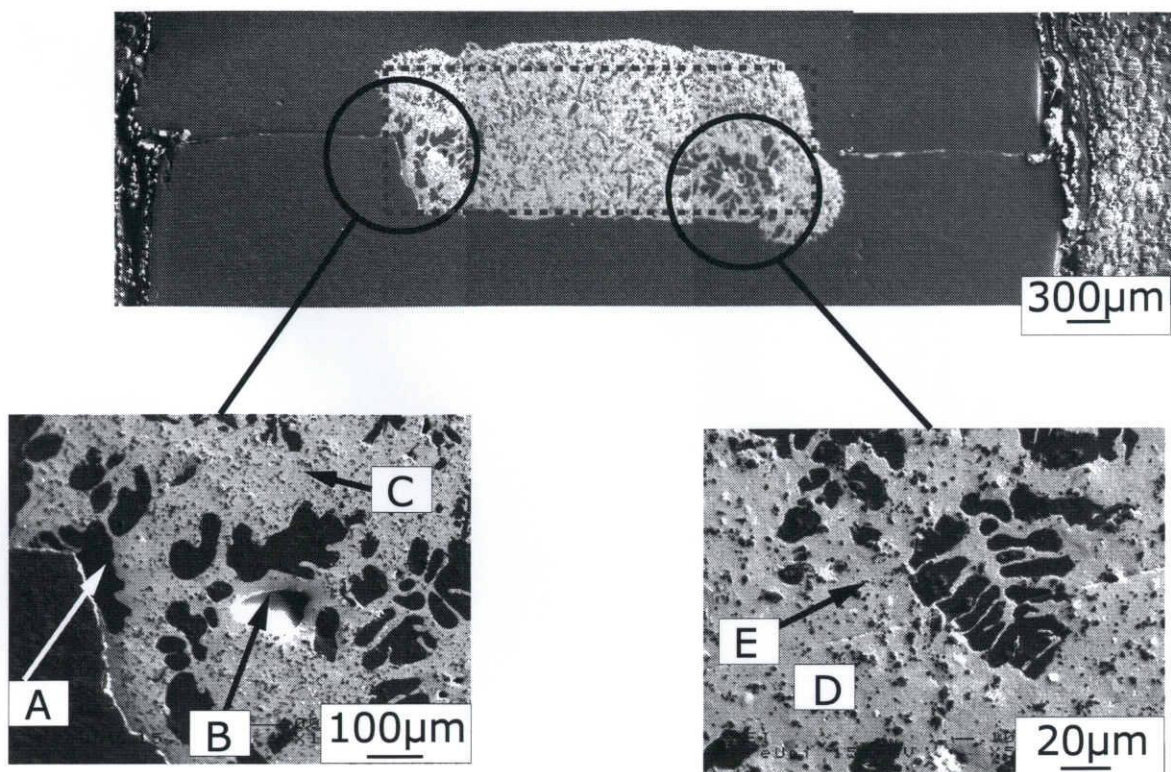


Fig.6-4 Effect of holding time and specimen shape on tensile load of Al /Sn/Al by cup shape specimen .

803K, 900s



Pos.	Compositions, at%			Phase
	Al	Sn	O	
A	99.3	0.0	0.7	Al
B	0.4	61.4	38.2	Sn oxide
C	0.5	82.0	17.5	Solid solution
D	7.9	67.9	24.2	Solid solution
E	60.0	40.0	0.0	Solid solution

Fig.6-5 Results of SEM observation and EPMA analysis in cross section in Al/Sn/Al, heating rate:10K/s, bonding pressure: 1.39MPa.

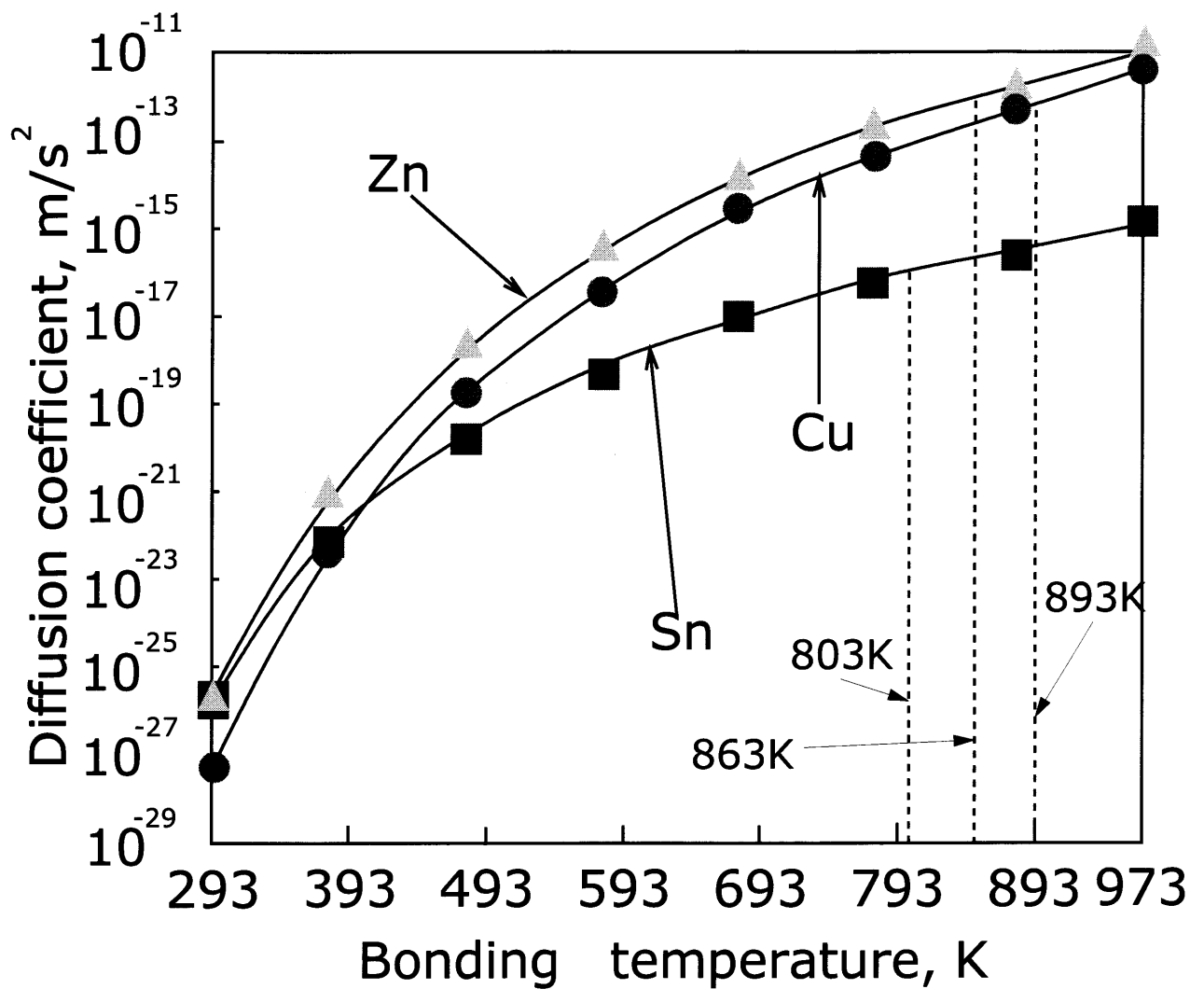


Fig.6-6 Comparison of dependence of temperature on diffusion coefficient of each insert metal.