

無重力条件下における共晶系合金の凝固に関する研究

代表研究者： 大野篤美 (千葉工業大学)

協同研究者： 茂木徹一 (千葉工業大学)

要旨

本研究の目的は無重力条件下でアルミニウム-銅 (Al-Cu) 共晶系合金の溶解および凝固を行い、この合金の凝固メカニズムを明らかにすることである。とくに無重力の無対流の条件下において、共晶系合金の初晶の核生成が融液内部で起こるのか、あるいは容器壁面と接した外周部で起こるのかを明らかにすることは、長年の間、未解決であった凝固組織に現れる等軸晶 (自由晶) の生成メカニズムの解明が期待でき、さらに共晶系合金の凝固理論の確立のためにも大きな意義がある。

実験に使用した合金試料は亜共晶組成のAl-32.4mass%Cuを4個 (うち2個は表面に酸化皮膜を着けて、凝固組織に及ぼすマランゴニ対流の影響を調べる) および過共晶組成のAl-33.5mass%Cuを2個の合計6個である。これらは別々に黒鉛カプセルに入れられた後、石英ガラスアンプルに真空封入され、さらにタンタルカートリッジに入れられた。試料の溶解凝固はスペースシャトル・エンデバー号に搭載された連続加熱型電気炉 (CHF) により、宇宙空間の軌道上で700℃、5分間溶解保持後、冷却された。地上に回収された試料は外観検査の後、組織観察を行った。

試料の凝固組織の観察を行った結果、亜共晶Al-32.4mass%Cu合金では、初晶 α アルミニウムデンドライトはカプセルと接した外周部で核生成されたあと、内部に向かって連続的に成長した様子が観察された。また共晶ラメラは自由凝固が行われたために、方向性のない組織となった。マランゴニ対流防止のために着けられた酸化皮膜の組織に及ぼす影響は皮膜を着けなかったものと比較してとくに違いはなかった。皮膜を着けなかった試料も、アンプル内の残留酸素により表面にごく薄い酸化皮膜が生成されていたことから、すべての試料において、酸化皮膜が表面を被ったために、融液の自由表面は生成されず、その結果マランゴニ対流は発生しなかったと考えられる。

過共晶組成Al-33.5mass%Cu合金においても、初晶 CuAl_2 が試料外周部で核生成して、そこから内部に連続的に成長している様子が観察された。また、過共晶組成では局部的に亜共晶側で晶出するはずの α アルミニウムデンドライトが認められた。さらに共晶ラメラは方向性のないものであった。

各試料の外周部には数個から十数個の小さい気泡が、また内部にはまれに大きな気泡が存在した。この成因はおもに黒鉛カプセルに吸収されていた空気が加熱時に放出されて、融液に吸収され、凝固時に気泡を形成したが、無重力のために移動ができずに生成位置に留まったものと考えられる。

本研究の結果から、対流の起こらない無重力条件下では、融液内での初晶の核生成は認められなかった。このことから、本研究者の提唱した対流の存在下で生成される等軸晶としての初晶の生成メカニズム「結晶遊離理論」が立証できた。

1. 序論

共晶系合金の凝固は、平衡状態図にもとづけば、共晶組成では共晶温度において、均一合金融液から機械的に混合した均質微細な共晶組織が生成される。そして共晶点から離れた組成では、まず初晶が生成され、次に共晶が生成される。

しかしながら、重力下での共晶系合金が凝固する場合、対流の作用により、また非平衡で凝固が進行することにより、共晶組成にもかかわらず初晶が晶出したり、あるいは初晶が晶出する組成では、晶出した初晶の挙動により偏析が生ずる。例えば初晶の生成量の少ない場合は、それらは生成後に融液内を密度差により浮上あるいは沈降して移動するし、またそれが多い場合は、初晶デンドライト間の共晶残液が重力の作用により移動して重力偏析を生成する¹⁾。

一方、微小重力下での共晶系合金の凝固は熱対流の発生がないために、結晶の移動やデンドライト間の残液の移動が起こらないために、偏析のない均質な組織を持つ材料が得られるとされている。これまでのこの環境下での共晶系合金の凝固の研究は、凝固メカニズムに関するもの^{2)~4)}と一方向凝固による共晶整列組織に関するもの^{5)~6)}に分けられる。前者は共晶系合金が微小重力下でどのように凝固するかについてのものである。Carlberg²⁾は過共晶Al-Si合金をロケット実験により溶解凝固させ、この合金の凝固組織は地上と大差のないこと、および初晶Siは融液中で核生成したことを報告している。また後者の一方向凝固に関する研究は、熱対流の影響のない微小重力下では、成長する結晶に欠陥が発生しにくいために、品質の良いものができることから、共晶複合材料の製造を目指した研究が多い。本研究者らは重力下において、共晶系合金の凝固メカニズムを明らかにする目的で、すでにSn-Bi、Sn-Pb、Zn-Al、Al-SiおよびAl-Geの各合金の融液から凝固に至るまでの過程のその場観察を行った。その結果にもとづいて、鑄塊や鑄物の等軸晶（自由晶）は冷却を受ける鑄型壁面上で核生成し、排出される溶質の作用により、根元のくびれた結晶に成長すること、そして溶湯の流動により結晶は遊離、移動、堆積して等軸晶領域を形成することを明らかにした。また、共晶組織の生成に及ぼす初晶の影響についても調べ、共晶先行相と初晶の相が一致する場合は、すでに存在している初晶から共晶は生成でき、等軸共晶粒に成長すること、共晶先行相と初晶の相が一致しない場合は、初晶に無関係に共晶は柱状共晶粒として成長することを明らかにした^{7)~11)}。そして重力下で凝固させた共晶系合金の凝固組織の生成には、重力に起因する熱対流の影響が大きいことを指摘した。

本研究は微小重力下での共晶系合金の凝固メカニズムを明らかにすることを目的として、Al-Cu共晶系合金を試料として用いて、スペースシャトルエンデバー号の宇宙空間の軌道上で溶解凝固させ、回収した試料の凝固組織の解析を行うことである。とくに微小重力下では初晶が等軸晶として凝固組織内部に存在するかどうか、また等軸共晶粒が生成するかどうかを明らかにし、本研究者の提唱した結晶遊離説を立証することにある。

2. 実験試料および方法

2.1 本研究の実験試料の特徴

従来の微小重力下での実験を検討したところ、フライト用試料は地上で自由凝固させて作製されたものが多い。そのために微小重力下での凝固がどのように行われたかを詳細に知ることが困難である。そこで本研究は地上で準備する試料に工夫をした。その一つは一方向凝固による整列組織を持った試料であること、もう一つは共晶組成にきわめて近い亜共晶および過共晶組成の合金を使用することにより、初晶の晶出量を少なくして、地上での凝固においては熱対流による移動が起こるようにしたことである。このような共晶系合金を微小重力下で溶解凝固して凝固組織の変化を調べ、解析を行うことにより微小重力下でのこの合金系の凝固メカニズムの解明が容易になると思われる。

2.2 Al-Cu合金平衡状態図および試料の組成

試料はAl-Cu合金を使用した。図1はAlに対して53mass%Cuまでの組成範囲の平衡状態図を示したものである。また試料の組成は表1に示したように、亜共晶組成のAl-32.4mass%Cuおよび過共晶組成のAl-33.5mass%Cu合金の2種類である。宇宙実験に用いた試料の数は合計6個であり、そのうち亜共晶組成が4個、過共晶組成が2個である。亜共晶組成の2個は溶解時の自由表面の生成により発生すると考えられているマランゴニ対流を防止するために、試料表面に陽極酸化法により人工的に酸化皮膜を着けた。

2.3 試料の作製方法

試料の凝固組織は各組成の合金とも一方向に整列させた。このような試料は加熱鋳型を用いた大野式連続鋳造法(OCCプロセス)¹²⁾により、直径12mm、長さ2mの丸棒を作製し、それを切削加工して、直径4.5mm、長さ23.5mmにした。所定寸法に仕上げた試料は表面をバフ研磨した後、アセトンで洗浄した。さらに亜共晶組成のうち、2個を陽極酸化処理を行うことにより、試料表面全体に酸化皮膜を着けた。

これらの試料をあらかじめ高真空中で脱ガス処理した蓋付きの純黒鉛カプセルに入れた。さらに本研究で使用したAl-Cu合金のCuは、電気炉の異常事態を考慮したNASAの安全性規準のうち、Cu蒸気の毒性に抵触するために、その防止策として透明石英ガラス製アンプルに高真空中で二重に封入した。これをタンタル製カートリッジに入れて、電子ビーム溶接により密封した。この段階で試料は透過X線により形状を観察し、アンプルおよびカートリッジの封入過程で試料が溶解されていないことを確認した。試料の封入の手順を図2に示す。スペースシャトルの軌道上では、このカートリッジを図3に示した連続加熱型電気炉の加熱チャンバーに装入した。

2.4 電気炉および加熱冷却条件

試料の溶解凝固はスペースシャトル内の与圧モジュールに設置された連続加熱型電気炉(CHF)によって行われた。図3は連続加熱型電気炉の模式図である。6個のカートリッジに入れられた試料は連続加熱型電気炉のチャンバー内に2本ずつ順次装

入されて、30分で700℃まで加熱され、さらに5分間保持された。その後、電気炉内で500℃まで炉冷され、冷却チャンバーでヘリウムガスにより室温まで急冷された。図4は試料の加熱冷却パターンを示したものである。

2.5 試料組織の解析方法

地上に回収された試料は、まずタンタルカートリッジを開封して、次に石英アンブルを割って、黒鉛カプセルから試料を取り出した。それぞれの段階で外観を目視観察すると同時に写真撮影を行った。

さらに試料は切断されて、研磨腐食によりマクロおよびミクロ組織を調べた。ミクロ組織の観察は光学顕微鏡およびSEMにより行った。また初晶の相の確認のためにEPMAによる分析も行った。

2.6 加熱冷却曲線の解析

試料の加熱冷却過程で得られた連続加熱冷却曲線を調べて、試料の熱履歴を求めた。

2.7 地上対照実験

宇宙のスペースシャトルの軌道上で使用した連続加熱型電気炉を用いて、宇宙と同じ加熱冷却条件で、地上においても試料の溶解凝固を行った。この試料はフライト用の試料として準備した予備のものである。

3. 結果および考察

3.1 宇宙実験用試料の組織

図5はOCCプロセスで得られた直径12mm、長さ2mの丸棒鋳塊の凝固組織である。初晶および共晶は一方向に整列した組織である。これから切削加工により、宇宙実験用試料として、亜共晶組成のものNo. 207、208、209、210の4個を作製した。過共晶組成のものも同様の組織である。試料は成分分析から、亜共晶組成はAl-32.4mass%Cuおよび過共晶組成はAl-33.5mass%Cuであり、丸棒鋳塊の位置による成分変動はないことが確認された。

3.2 宇宙実験後の試料の外観および凝固組織

(1) 試料の外観

図6は回収された試料のタンタルカートリッジから取り出された二重封入された石英アンブルに入っている試料の外観の様子である。この様子は飛行前の状態と何ら変化は認められなかった。また図7はアンブルから取り出された試料の全体の外観である。最終凝固位置を示す収縮部は試料のほぼ中央表面に現れた。陽極酸化皮膜を着けなかった各試料は表面が酸化皮膜で薄く覆われていた。この酸化膜の生成した理由は試料表面は鏡面状に仕上げられ、さらに試料のアンブルへの真空封入は高真空下で行われたものの、黒鉛カプセルに吸収されていた酸素が完全に放出されないで残留したために、試料の加熱溶解時に放出されて、酸素との親和力の大きいアルミニウムは表面が酸化されたものと思われる。また、酸化皮膜を着けた試料は長さ方向に細い割れ

が認められた。この理由は試料の加熱時の膨張により発生したものである。

(2) 亜共晶 Al-32.4 mass% Cu 合金の凝固組織

図8および9は亜共晶組成試料の凝固組織である。マクロ組織には図8のように方向性のない粒状結晶が観察されたが、そのミクロ組織には、図9のように初晶 α アルミニウムデンドライトが試料外側から内側に向かって、また共晶は方向性のないラメラ組織が観察された。初晶デンドライトアームは溶断しているように見えるが、研磨と観察の繰り返しにより、実際には図10に示したように、デンドライトが三次元的に成長していることが明らかである。また、表面に酸化皮膜を着けた試料と着けないものとの組織の違いはとくに本研究では明瞭に認められなかった。

フライト後の各試料の凝固組織には、微小なガス気泡が存在していた。気泡は試料の最外周部の黒鉛カプセルと接した部分に多く存在していた。また内部にも外周部のものより大きい気泡がしばしば観察された。これらの気泡の成因は、試料の作製のための連続 casting の際に合金に吸収されたガス、あるいは黒鉛カプセルに吸収されていたガスが、試料の加熱時に放出されたものかのいずれかと考えられる。とくに亜共晶組成の陽極酸化法により人工的に皮膜を着けた試料は、皮膜を着けないものよりも気泡の生成数が多かった。これは陽極酸化処理により、試料中にガス吸収が行われたためと考えられる。いずれにしても、微小重力下では、生成された気泡は地上のように容易に移動できないために、凝固組織中に存在することになる。

(3) 過共晶 Al-33.5 mass% Cu 合金の凝固組織

図11および12は過共晶組成試料の凝固組織である。マクロ組織は図11のように亜共晶組成と同様に方向性のない結晶粒であった。またそのミクロ組織には、図12(a)に示したように、黒鉛カプセルと接した外表面から初晶 CuAl_2 が生成して、内部に連続して成長していることが観察された。また共晶は方向性のないラメラ組織であった。図13は初晶 CuAl_2 から共晶が生成している様子を示したものである。図13(b)はそれを拡大した写真である。断面がひし形の初晶 CuAl_2 デンドライトを起点にして共晶 CuAl_2 が連続して成長していることがわかる。本研究者は重力下において共晶系合金の初晶の相と共晶先行相が一致する場合は、初晶の表面で共晶先行相が生成して共晶を生成することをすでに報告した⁹⁾。Al-Cu合金では CuAl_2 が先行相であることが明らかにされている。微小重力下においても、同様の凝固現象であることが認められた。

また過共晶組成の凝固組織には、局部的に亜共晶組成に現れるはずの α アルミニウムデンドライトが存在していた。これはAl-Cu合金の凝固が非平衡状態で進行するために、共晶点近傍の過共晶組成はこの組成の本来の初晶 CuAl_2 が晶出した後、共晶温度に到達しても共晶が直ちに生成されずに過冷却凝固するため、共晶融液は局部的に亜共晶側にずれて、亜共晶の初晶 α アルミニウムデンドライトが少量ながら生成されたものである。このような現象は重力下での共晶系合金の凝固にしばしば現れる。さらに過共晶合金試料においてもガス気泡は観察された。

3.3 地上対照実験による凝固組織

図14および15は当研究室で当初計画した直径10mm、長さ50mmの寸法の

試料を用いて実験を行って得られた結果の組織を示したものである。亜共晶組成では、図14に示したように、初晶 α アルミニウムは試料の上部に集まり、また過共晶組成の場合の初晶 CuAl_2 は図15のように試料の下部に存在した。それらはいずれも、晶出後に共晶融液との密度差により移動したものである¹⁾。

図16および17は宇宙実験で使用した連続加熱型電気炉を使用して、微小重力下と同一条件で行った地上対照実験の結果得られた試料のマクロ組織である。試料は電気炉内で垂直に置かれて溶解凝固された。図16の亜共晶組成および図17の過共晶組成の試料とも、上部が最終凝固部になっていた。また組織は方向性のない自由凝固を示し、図14および15に示したマクロ組織と類似していた。さらにフライト試料で観察されたような気泡の生成は認められなかった。これらのミクロ組織は図18(a)に示したように初晶 α アルミニウムデンドライトは外側から内部に向かって成長していた。さらに共晶粒は方向性のないものであった。また過共晶組成では、図18(b)のように、初晶 CuAl_2 は観察されず、亜共晶組成で晶出するべき、 α アルミニウムデンドライトが少量成長していた。そして共晶粒は自由凝固により方向性のないものであった。この組成の本来の初晶は偏在しているために、現在のところ見いだされていない。

3.4 微小重力下での共晶系合金の凝固メカニズム

微小重力下での共晶系合金の凝固メカニズムを明らかにするために、初晶の晶出量の少ない亜共晶および過共晶 $\text{Al}-\text{Cu}$ 合金を微小重力下で溶解凝固させたところ、フライト前の一方向整列凝固組織の試料はフライト中の溶解凝固により自由凝固した組織に変化した。そして初晶 α アルミニウムデンドライトおよび CuAl_2 はいずれも試料の外側から内部に向かって連続的に成長した。これは冷却時に温度の低下がもつとも早いカプセルと試料が接した場所で初晶は核生成して、対流がないために結晶の遊離、移動が起こらず、内部に向かって連続的に成長したものと考えられる。そして初晶の晶出が終了して、共晶温度になったところで共晶ラメラは自由凝固したものである。したがって、初晶は内部よりもカプセルと接していた外周部の方が多い。このことは、初晶の晶出量の少ない組成では、成分偏析を起こすことになり、微小重力下での共晶系合金の均質材料の生成に問題点を提起するものである。

3.5 結晶遊離理論の立証

本研究者はこれまで多くの共晶系合金の地上実験において、初晶は凝固時に鑄型壁など冷却端で生成されて、熱対流などの融液内の流動が存在すると、遊離移動して等軸晶領域を生成することを見だし、従来から提唱されていた等軸晶生成理論としての「融液内部での核生成説^{13) 14)}」や「デンドライトアームの溶断説¹⁵⁾」に対して、新たに「結晶遊離説」を提唱した⁷⁾。本研究者のこの理論をさらに立証するためには、対流の抑制される微小重力下での実験が最も有効であると考え、本研究を実施した。その結果、対流の抑制される微小重力条件下では、初晶は試料外周部から内部に向かって連続的に成長することが観察された。この結果は本研究者の提唱した理論の正しいことを示したものである。

4. 結論

微小重力環境での共晶系合金の凝固組織を調べ、その凝固メカニズムを明らかにするために、Al-Cu合金をスペースシャトルエンデバー号に搭載された連続加熱型電気炉により宇宙空間で溶解凝固を行った。得られた結果は次のようである。

(1) 一方向に整列した飛行前の凝固組織は宇宙での溶解と自由凝固により、飛行後は方向性のない組織に変化した。

(2) 亜共晶組成のAl-32.4%Cu合金では、初晶 α アルミニウムの自由晶は認められず、 α アルミニウムデンドライトが、試料の外側から内部に向かって連続的に成長していた。

(3) 過共晶組成のAl-33.5%Cu合金では、初晶CuAl₂の自由晶は認められず、初晶CuAl₂は試料の外側から内部に向かって連続的に成長していた。それ以外に亜共晶組成で晶出するべき、 α アルミニウムデンドライトも局部的に生成した。

(4) 微小重力下では自由晶としての初晶は認められず、結晶遊離現象は対流の存在によるという、本研究者の結晶遊離理論が立証できた。

(5) 試料の最外部には、微細な球形気泡が存在した。とくに試料表面に酸化皮膜を着けたものは気泡が多く、内部にも存在した。

(6) 酸化皮膜を着けなかった試料も、飛行後にはどれも試料表面に薄い酸化皮膜が存在した。したがって、酸化皮膜の有無による凝固組織への影響は見られなかった。

(7) 地上実験において、フライト試料より寸法の大きいものは、重力の作用により、初晶の浮上または沈降が起こった。

(8) フライト試料と同一条件による地上対照実験試料は宇宙実験とほぼ同じ組織であった。

引用文献

- 1) 茂木:軽金属 Vol.41(1991),834.
- 2) T.Carlberg:Proc. 3rd European Sympo. on Materials Science under Microgravity,(1979),ESA, SP-142.
- 3) F.Barbieri and C.Patuerri:Met.Trans.A, 19A(1988),2659.
- 4) J.C.Hendrix, P.A.Curreri, and D.M.Stefanescu:AFS Trans.,92(1984),435.
- 5) J.J.Favior and J.de Goer:Proc. 5th European Sympo. on Materials Sciences under Microgravity,(1984), ESA, SP-222.
- 6) D.J.Larson,Jr.:NASA Tech. Memo, No.NASA-TM-4069, 1(1988), 459.
- 7) 大野, 茂木, 早田:日本金属学会誌, Vol.35(1977),
- 8) J.Xing, 茂木, 大野:Trans.JIM,Vo.126(1985),
- 9) 大野, 茂木, 石橋:日本金属学会誌, Vol.42(1978),107.
- 10) 茂木, 大野:日本金属学会誌, Vol.45(1981), 1215.
- 11) 茂木, 大野:軽金属, Vol.38(1988), 96.
- 12) 大野:金属の凝固, 地人書館, (1984),132.
- 13) R.Genders: J.Inst.Metals, Vol.35(1926),256.

- 14) W.C.Winegard and B.Charmers: Trans.ASM,210(1954),1214.
- 15) K.A.Jackson, J.D.Hunt, D.R.Uhlmann and T.P.Seward III: Trans.Met.Soc.
AIME,236(1966),149.

表1 試料の化学組成および表面酸化皮膜の有無

	No.	化学組成 (mass%)	表面状態
フ ラ イ ト 試 料	207	Al-32.4%Cu	酸化皮膜なし
	208	Al-32.4%Cu	酸化皮膜なし
	209	Al-32.4%Cu	酸化皮膜あり
	210	Al-32.4%Cu	酸化皮膜あり
	211	Al-33.5%Cu	酸化皮膜なし
	212	Al-33.5%Cu	酸化皮膜なし
地 上 試 料	3-1	Al-32.4%Cu	酸化皮膜なし
	3-4	Al-32.4%Cu	酸化皮膜あり
	2-3	Al-33.5%Cu	酸化皮膜なし
	28-2	Al-33.5%Cu	酸化皮膜なし

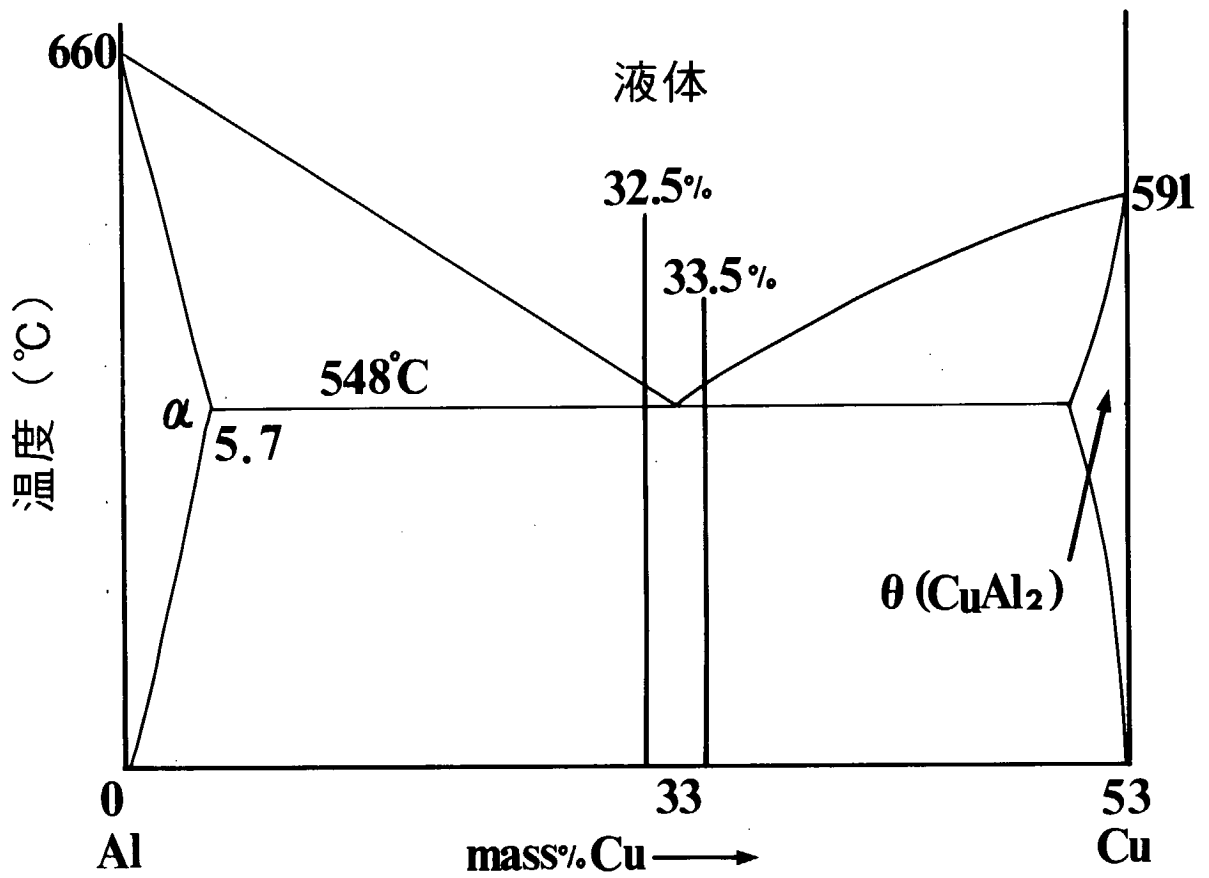


図1 Al-Cu合金平衡状態図 (53 mass% Cuまで)

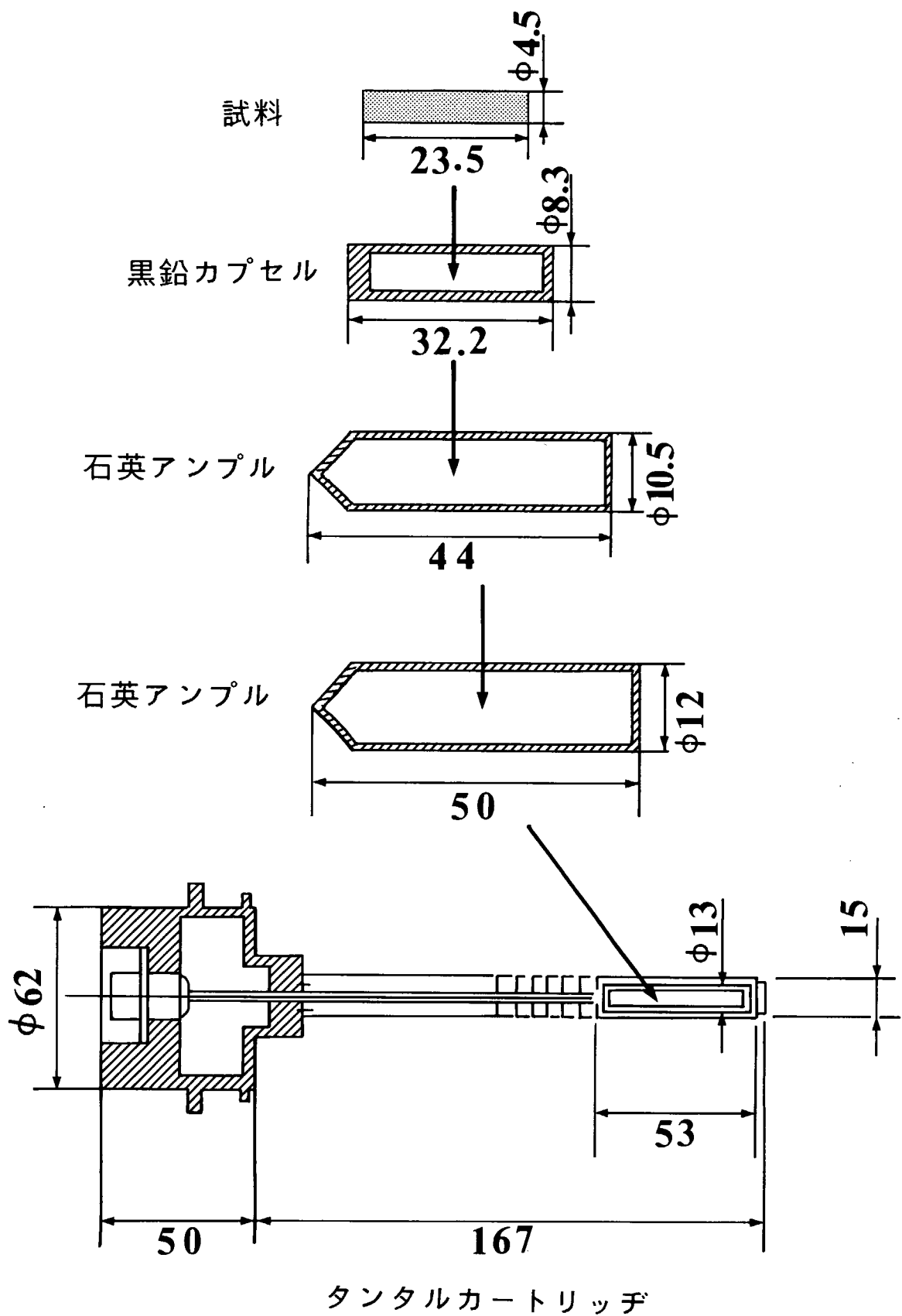


図2 試料のアンフルへの封入過程

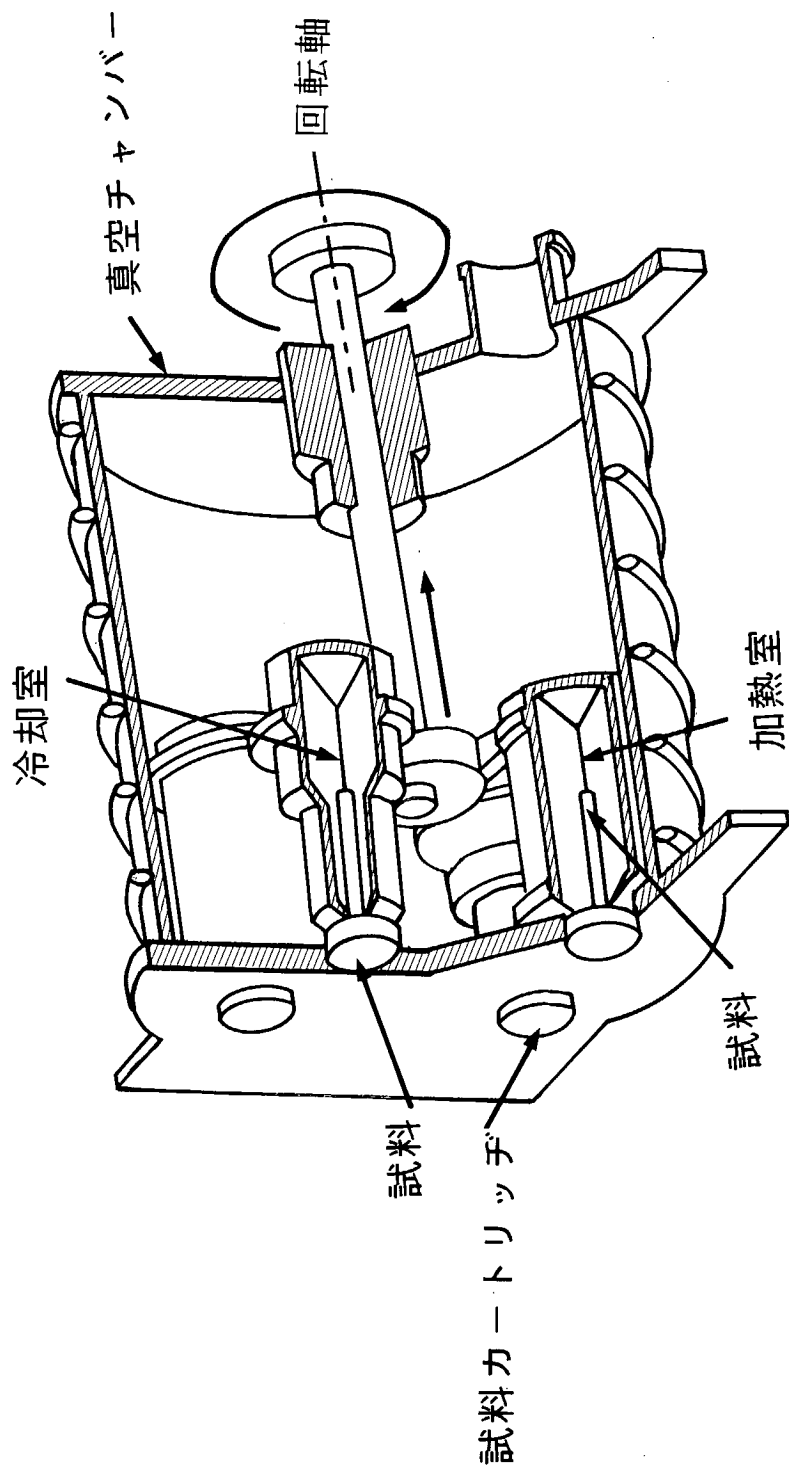


図3 連続加熱型電気炉模式図

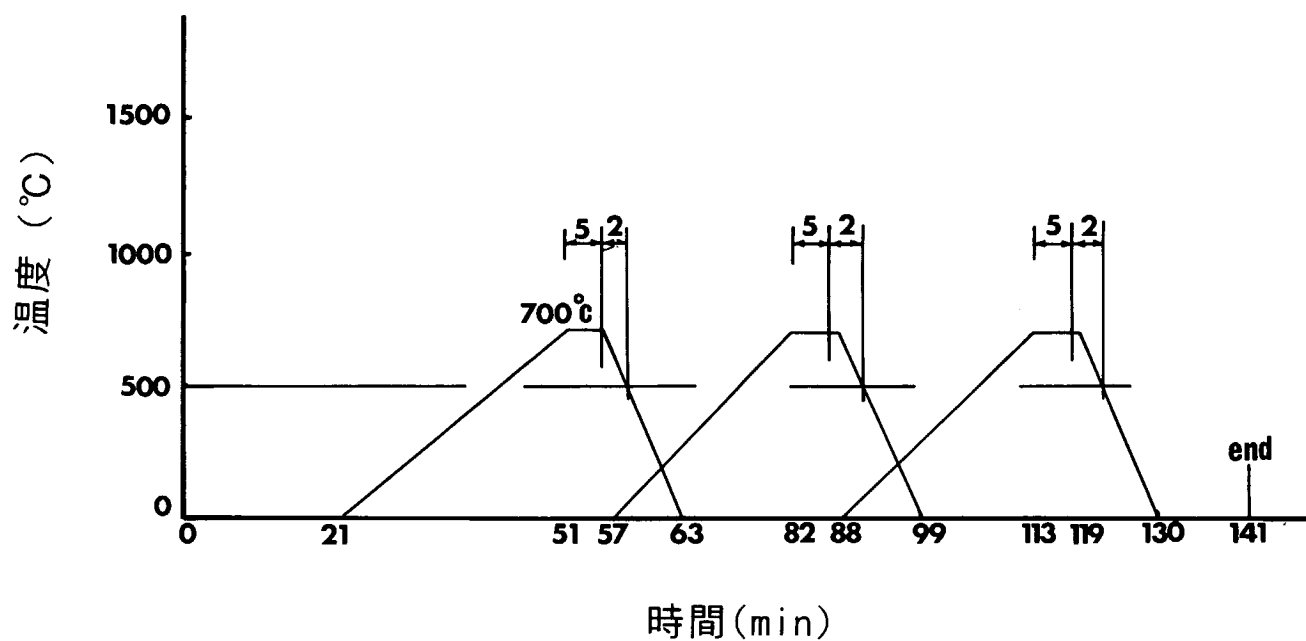


図4 試料の加熱冷却パターン

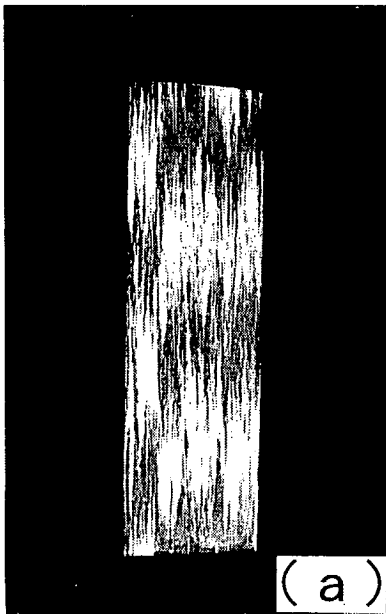


図5 フライト前の試料（No. 207, 208, 209, 210）の凝固組織
（a）マクロ組織（ $\times 1.5$ ） （b）ミクロ組織（ $\times 50 \times 2.5$ ）

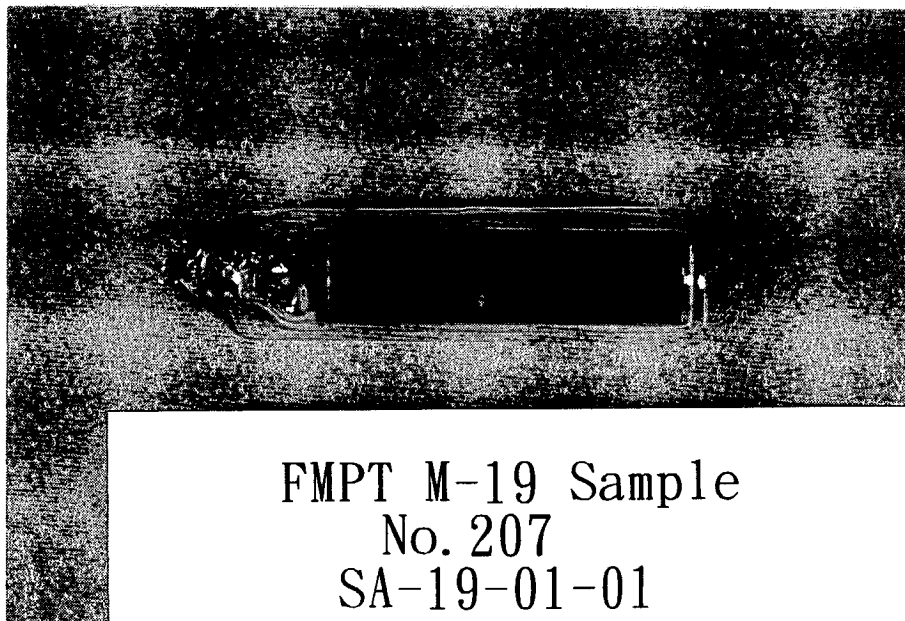


図6 フライト後回収された試料のアンプル外観

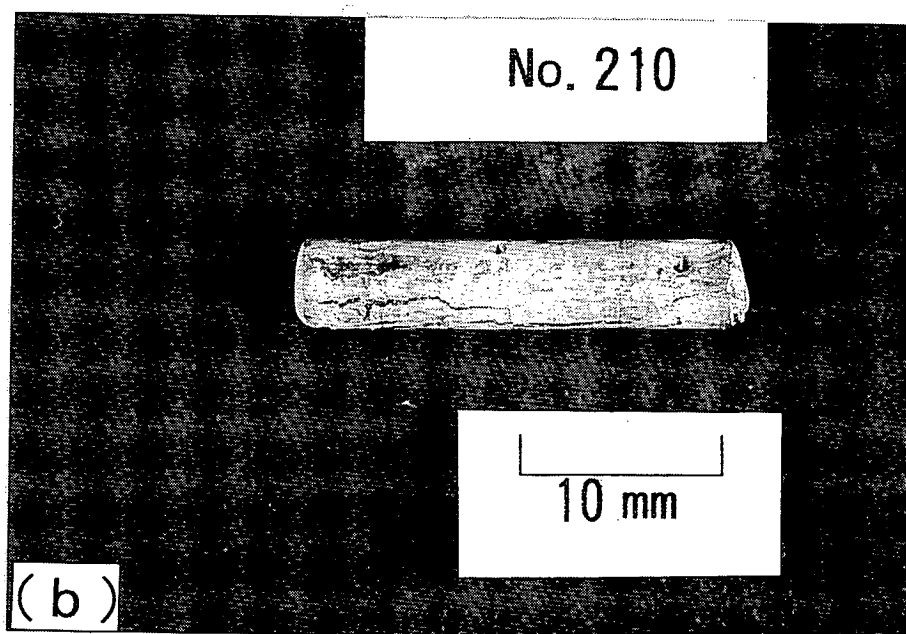
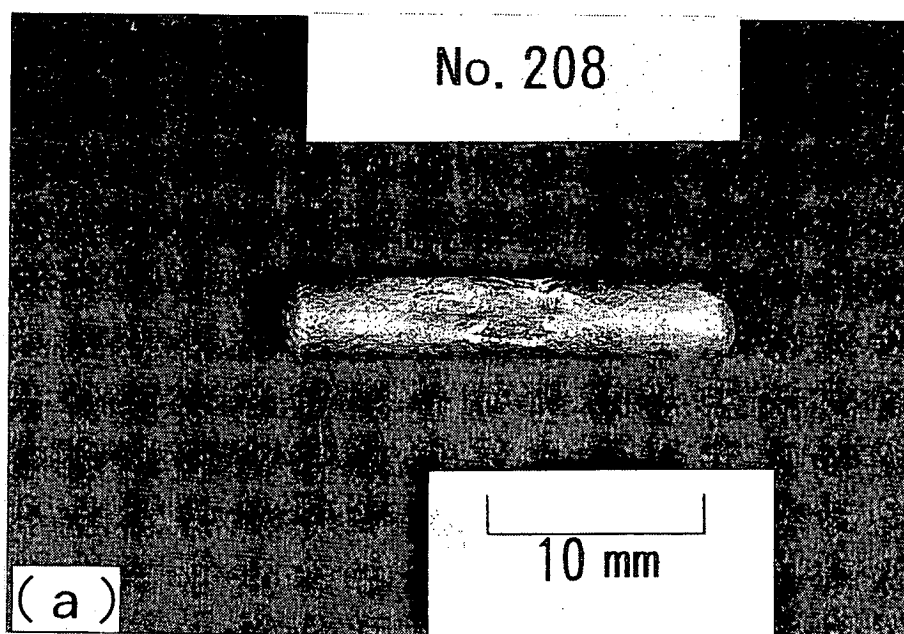
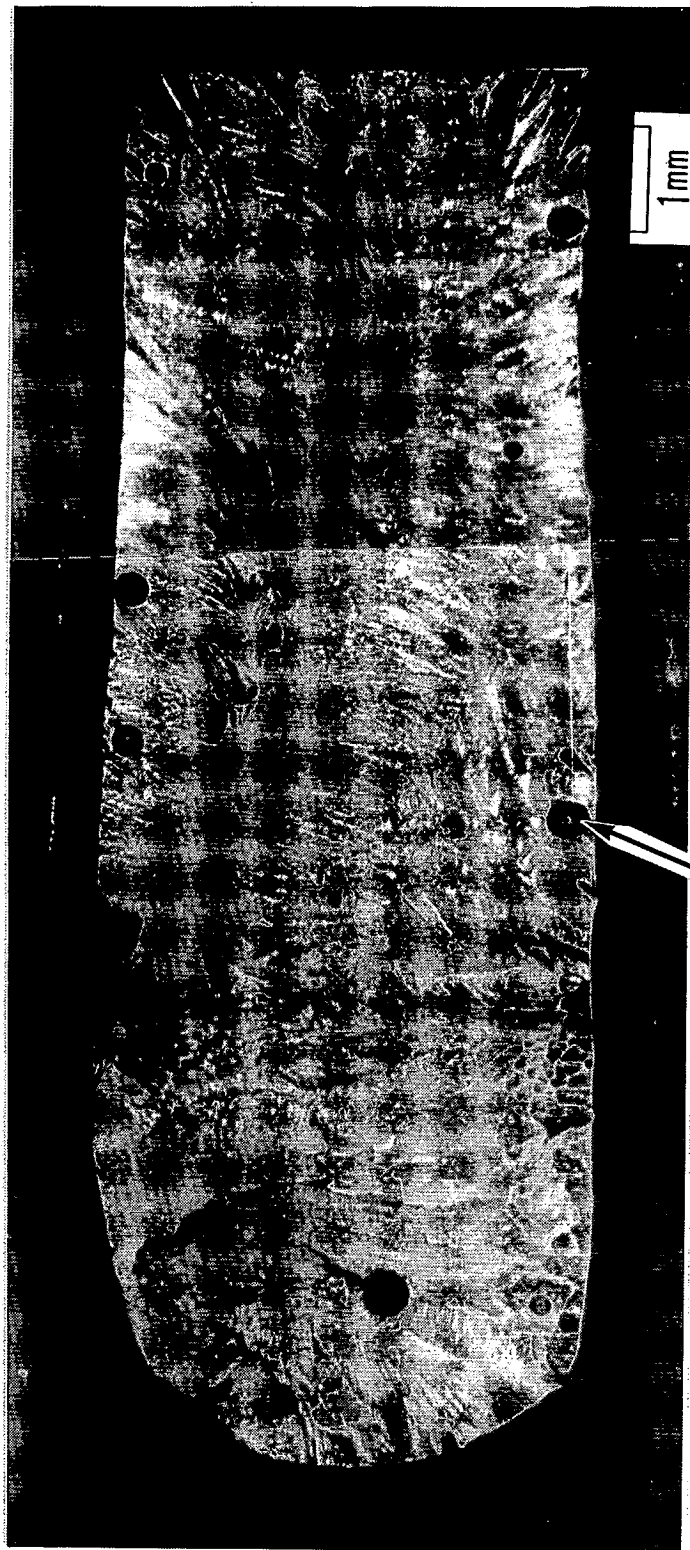


図7 フライト後回収された試料の外観

(a) 酸化皮膜を着けなかった試料 (No. 208)

(b) 酸化皮膜を着けた試料 (No. 210)

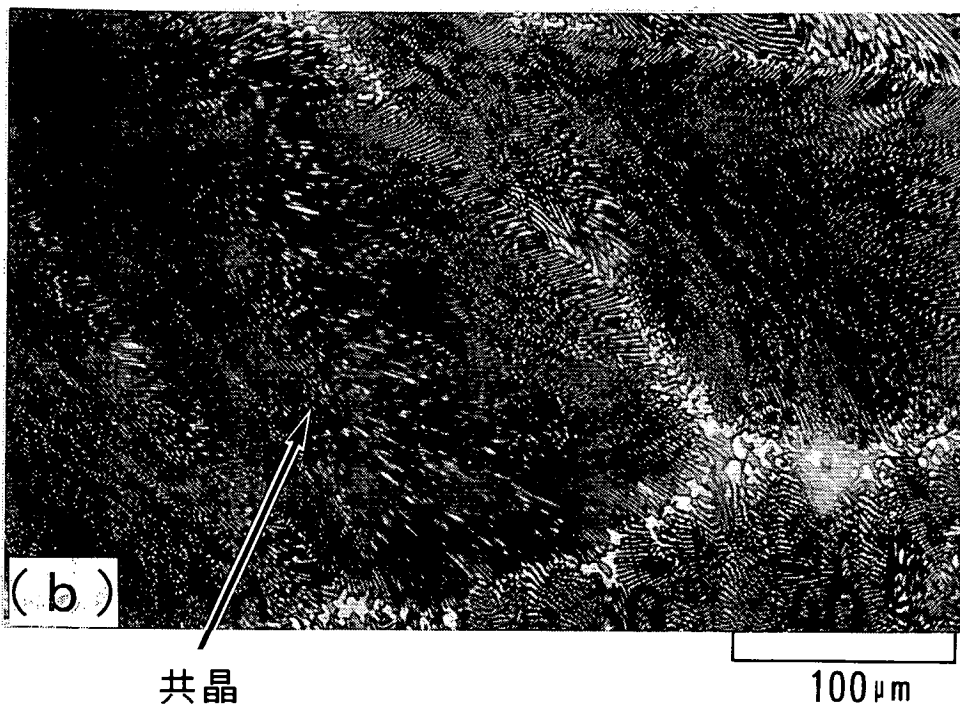


気泡

図8 フライト後の亜共晶組成A1-32.4mass%Cu合金の垂直断面の
マクロ組織 (No.209の試料の長さ方向を1/2に切断)



初晶 α アルミニウム



共晶

100 μm

図9 フライト後の亜共晶組成Al-32.4mass%Cu合金のマイクロ組織
 (試料No. 207)
 (a) 試料外側部 (b) 試料内部

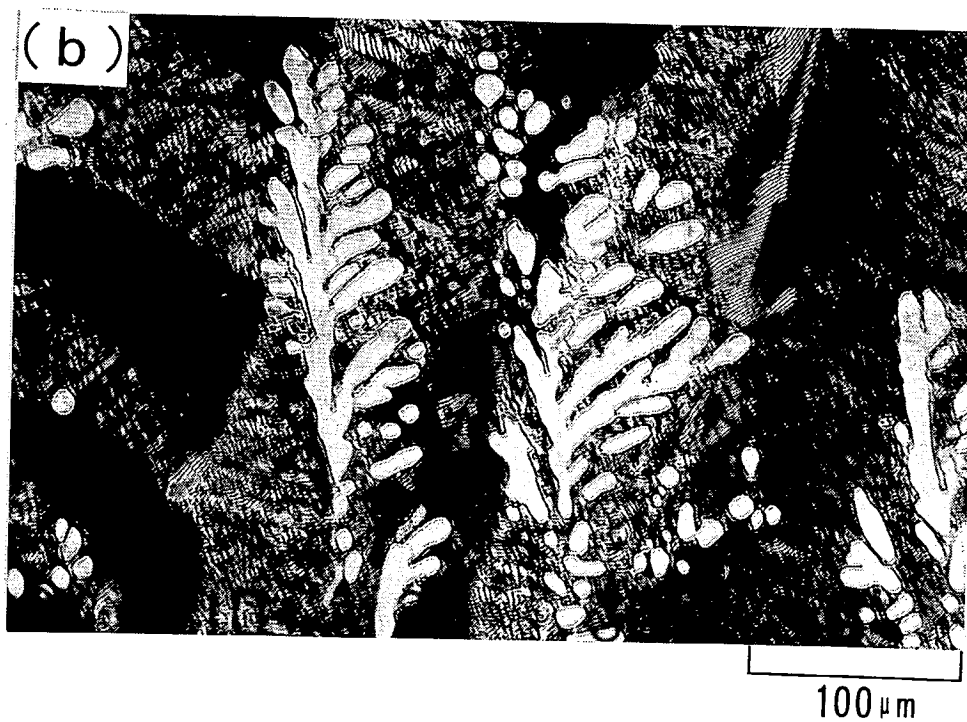


図10 フライト後の亜共晶組成Al-32.4mass%Cu合金に現れた初晶 α アルミニウムデンドライトの連続性(試料No.207)
写真(b)は(a)の位置を15 μ m研磨後、再度観察したもの

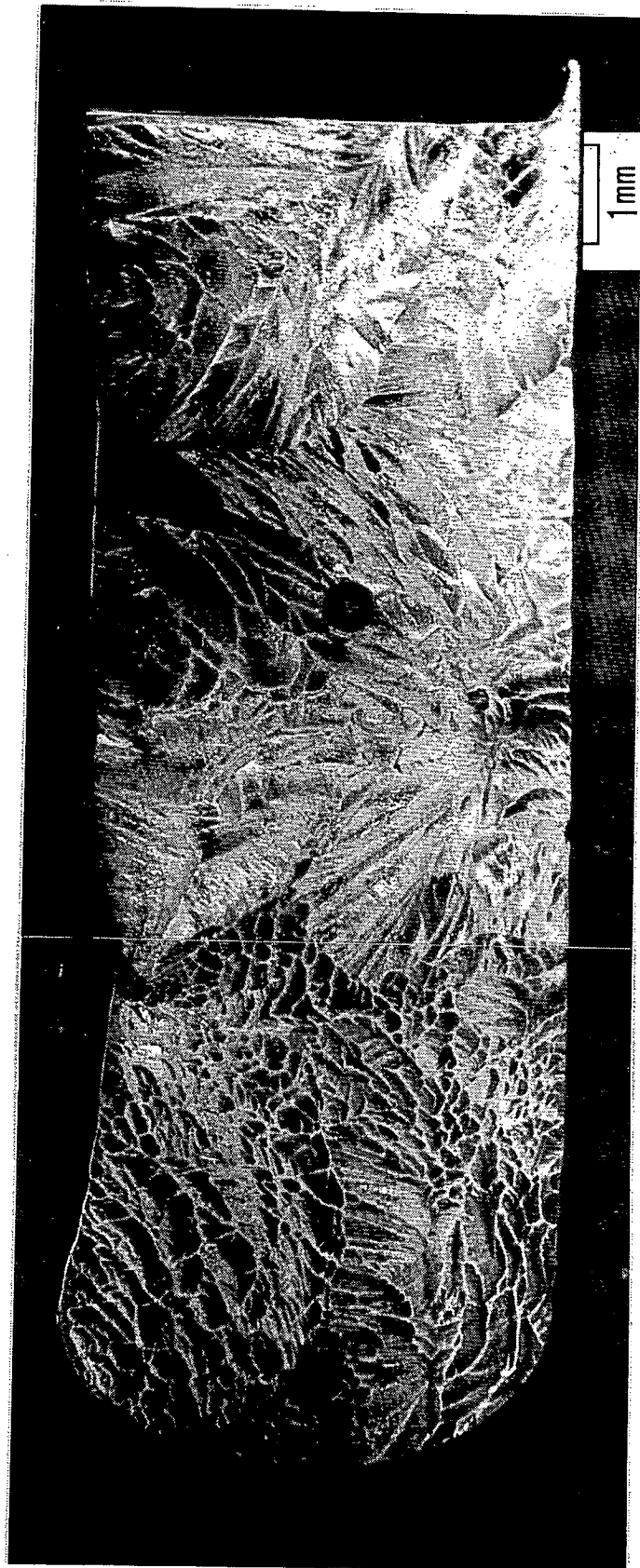


図11 フライト後の過共晶組成Al-33.5mass%Cu合金の
垂直断面のマクロ組織 (No.211の試料の長さ方向に1/2に切断)

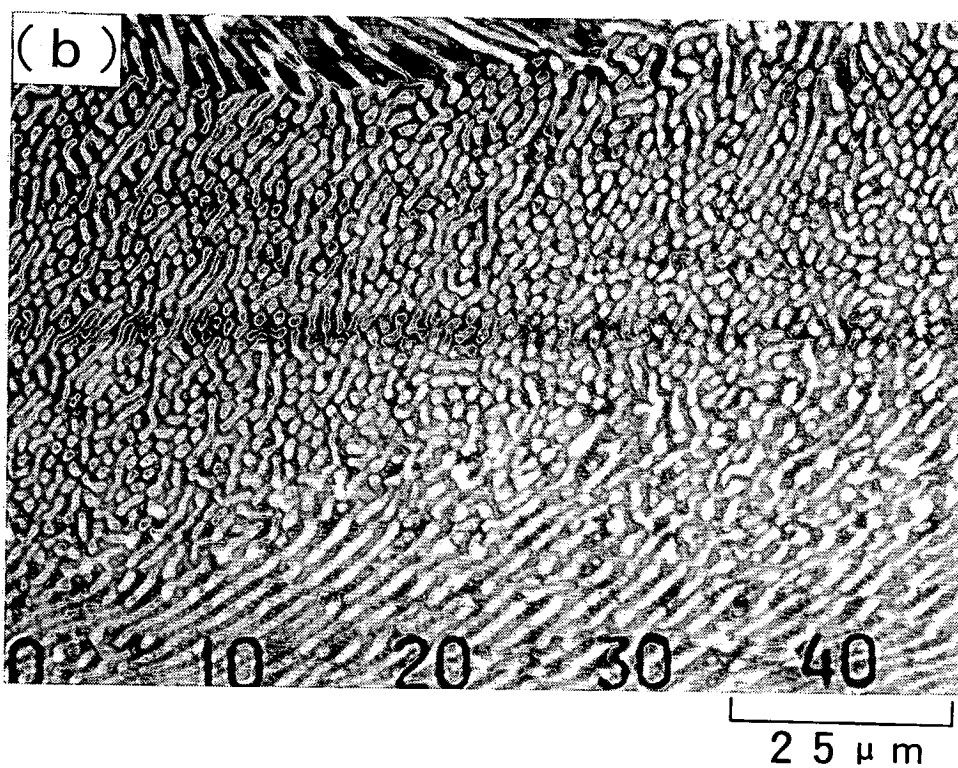
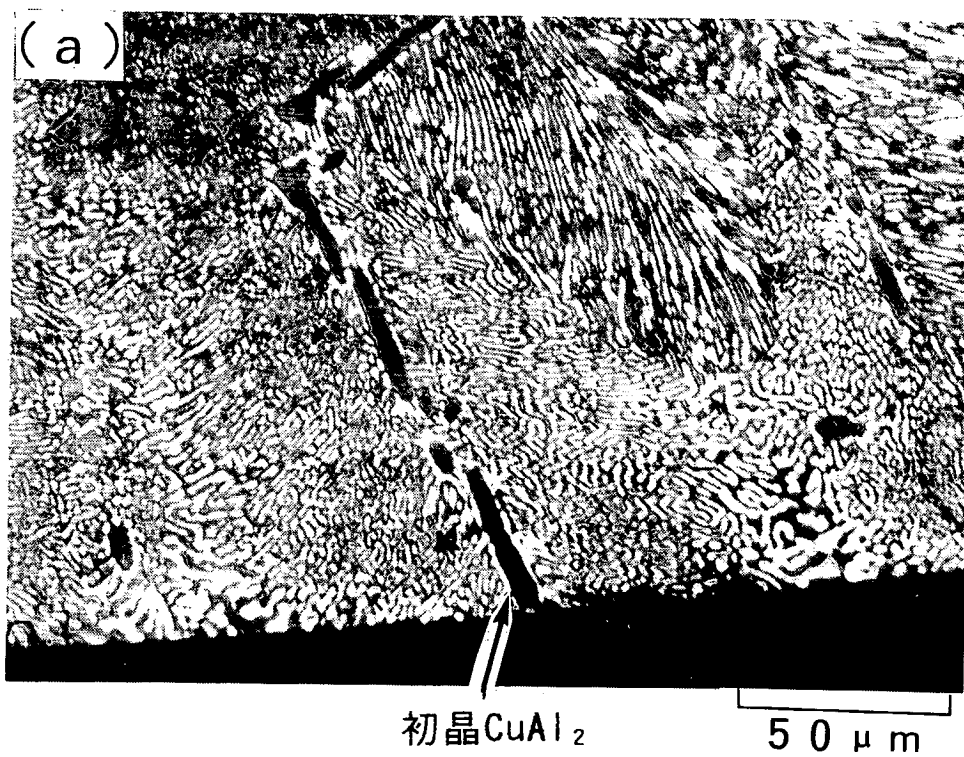


図12 フライト後のAl-33.5mass%Cu合金のマイクロ組織
(試料No. 211)

(a) 試料外周部：初晶 CuAl_2 と共晶

(b) 試料内部：共晶のみ

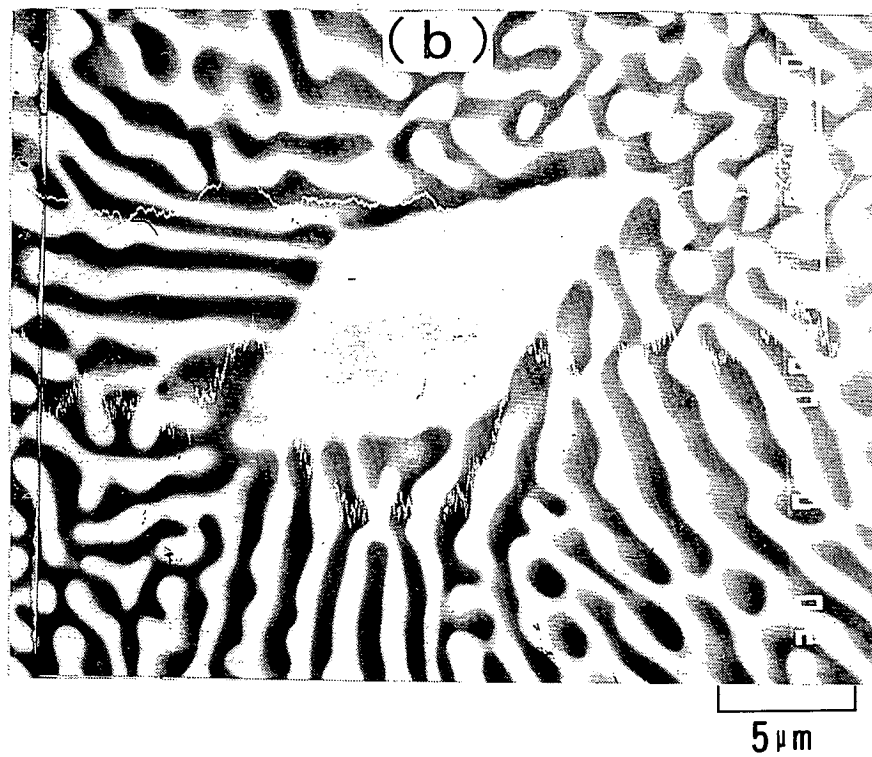
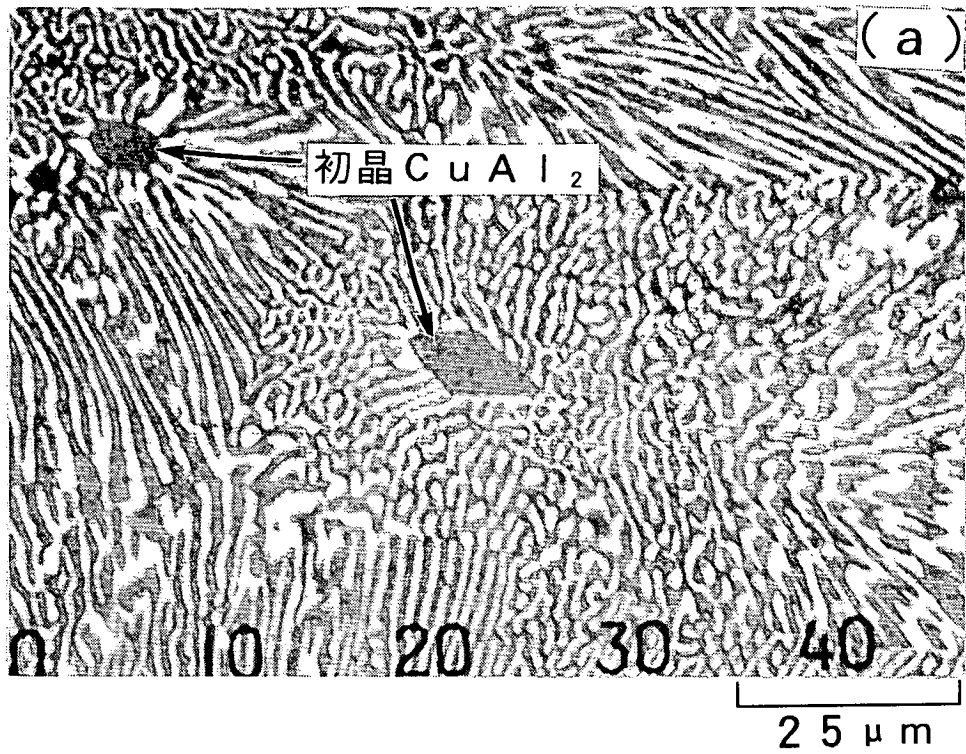


図13 フライト後のAl-33.5 mass% Cu合金のマイクロ組織
 に観察される初晶を中心とした等軸共晶粒
 (試料No. 211)
 (a) 光学顕微鏡 (b) SEM

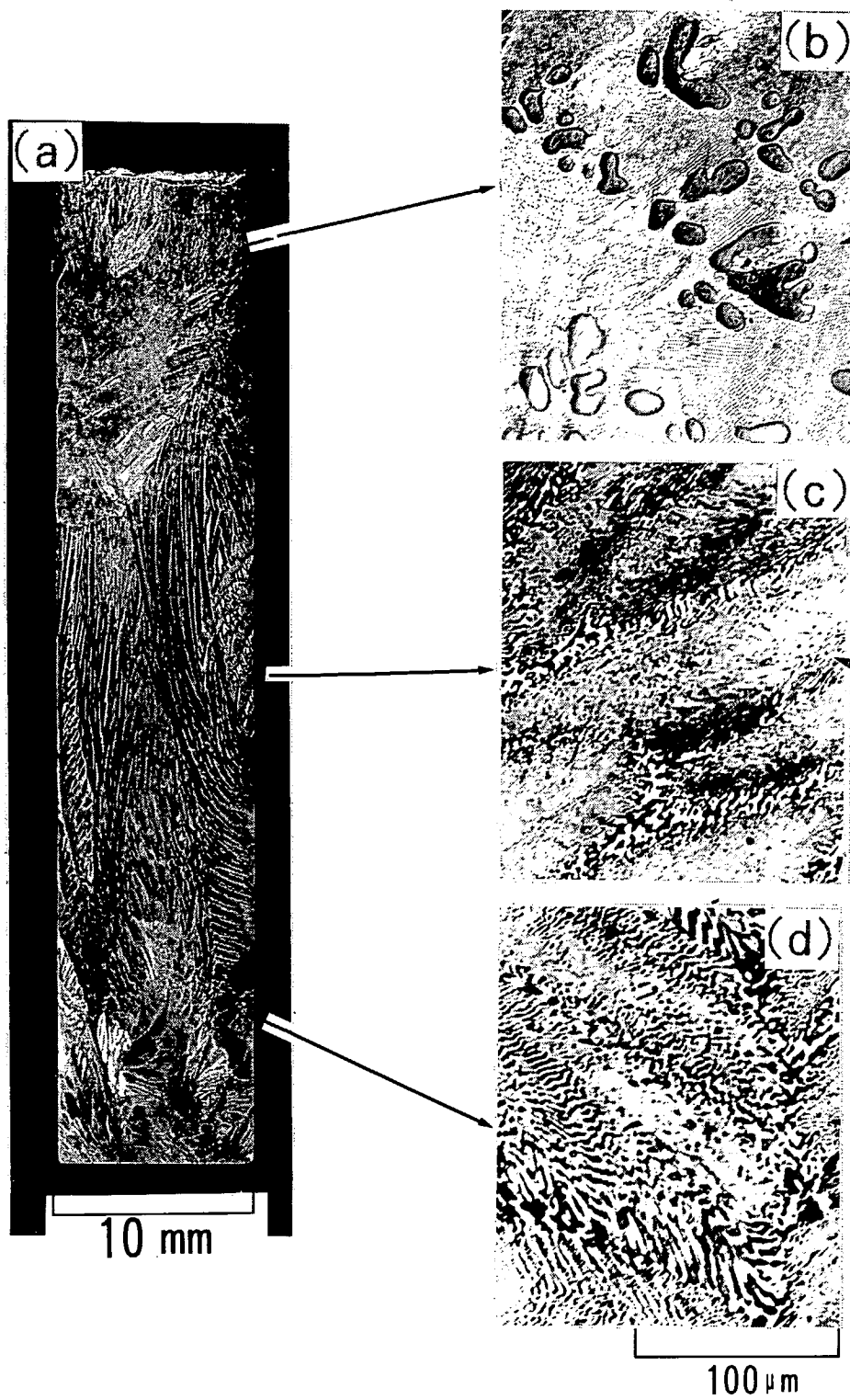


図14 地上対照実験（試料直径10mm）で得られた
 Al-32.4mass%Cu合金の凝固組織
 (a) マクロ組織, (b), (c), (d) ミクロ組織

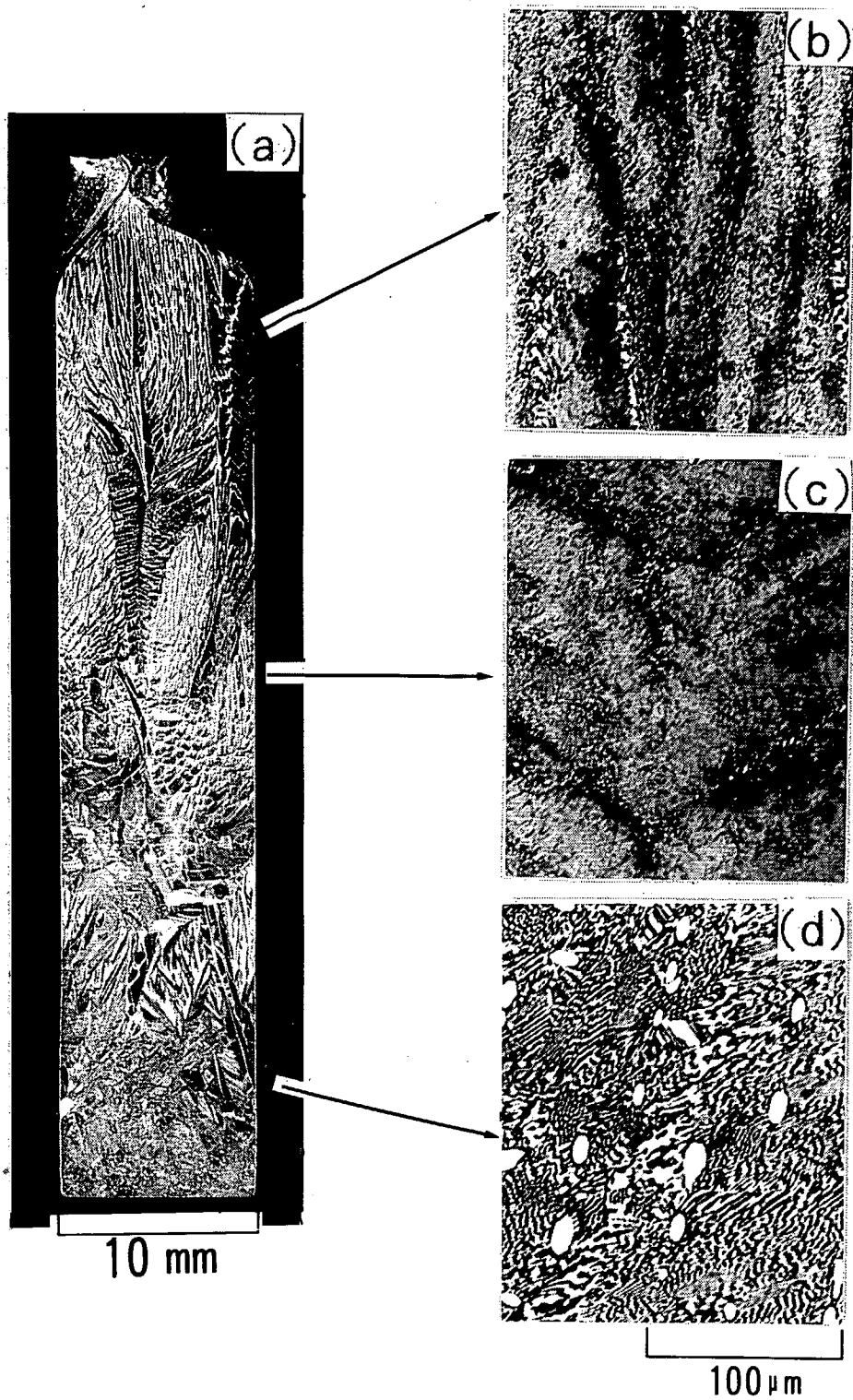


図15 地上対照実験（試料直径10mm）で得られた
 Al-33.5mass%Cu合金の凝固組織
 (a) マクロ組織, (b), (c), (d) ミクロ組織

試料上部

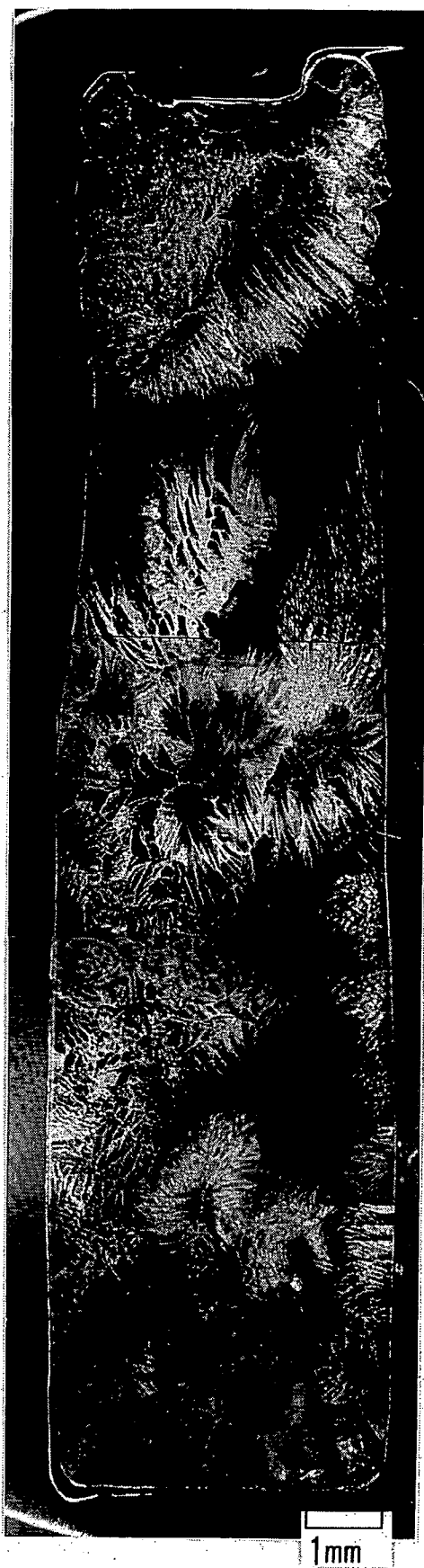


試料下部

1mm

図16 地上対照実験（試料直径4.5mm）で得られた
Al-32.4mass%Cu合金のマクロ組織
（試料No. 3-1）

試料上部



試料下部

図17 地上対照実験（試料直径4.5mm）で得られた
Al-33.5mass%Cu合金のマクロ組織
（試料No. 28-2）



100 μm



100 μm

図18 地上対照実験（試料直径4.5mm）での試料マイクロ組織

(a) 亜共晶組成Al-32.4mass%Cu（試料No.3-1）

(b) 過共晶組成Al-33.5mass%Cu（試料No.28-2）