



合金の凝固組織の制御

岡 本 平*

素形材である鋳物はいかに及ばず、塑性加工によって適当な形状に仕上げられる鋳塊でも、それらが融体から凝固するさいに、最適の凝固組織となるように、組織制御の研究が進められてきた。一般に、鋳物および鋳塊はマクロ偏析、ポロシティ、亀裂、収縮孔などの欠陥がなく、できるだけ等方性のもので、微細な等軸結晶粒からなる凝固組織が要求されるが、場合によっては、材質を改善する目的で、異方性のものがあえて望まれることがある。

合金が凝固するとき、熱の流れに方向性をもたせると、その合金はその方向に凝固が進行し、結晶学的方位および凝固組織が方向性をもって整列した材料を製造することが可能となる。ジェット・エンジンやガスタービンなどに使われるタービン翼は、高温で高速回転するので、たえず大きい力をうけている。力をうける方向に結晶粒界があると、翼はクリープによって破壊し易いという理由から、Ni 基超耐熱合金製のものでは単結晶にするかまたは翼の長さ方向に柱状結晶粒を成長させ、共晶型超耐熱合金製のものでは翼の長さ方向に共晶組織を整列させて、材質改善の成果があげられてきた。磁石材料でも、例えば、アルニコ型磁石は、方向性凝固によって<001>方向に結晶を揃えたのち、この方向に磁場の方向を一致させて熱処理すると、保磁力も残留磁束密度も大きくなることが知られている。また共晶型磁石材料では方向性凝固によって保磁力の大きい磁石を作り出すことが知られている。

このように、2, 3の合金では凝固組織に方向性をもたせることによって、材質改善に成功しているが、一般用構造部品でも、このような組織の形成は、凝固が一方向に進行するため

に、材料内に凝固収縮の結果として現われるミクロ・ポロシティの減少に寄与し、それとの関連で機械的性質の向上が期待され関心もたれている。例えば、低合金鋼鋳物では方向性凝固によってえられた柱状晶組織のものは等軸晶組織のものよりも展延性や疲労強度にすぐれていることが報告されている。

方向性凝固を行なうには熱流の方向を制御する以外に凝固速度や温度こう配をも制御する場合としない場合とがある。制御する方法には、ブリッジマン法やタンマン法などがあり、制御しない方法には発熱鋳型法と高温鋳型法とがある。これらのどの方法でも、方向性凝固させる材料の断面積が大きいのか、凝固温度近くでの融液内の凝固方向への温度こう配が小さいのか、または凝固速度が大きいと、熱流の方向が乱れるので、整列した組織がえられなくなり、ときには等軸晶組織となる。

ブリッジマン法は、合金の融点以上の適当な温度に加熱した鉛直型電気炉内の鋳型に融液を注入してから、鋳型または電気炉を一定速度で移動させて、鋳型を炉外へ引き出すことにより融液を一方向に凝固させる方法である。この方法では凝固速度は鋳型の相対的な移動速度によって、温度こう配は合金の融点近傍での炉内温度分布と鋳型下部から炉ふん囲気中への放熱速度によってきまる。温度こう配を大きくするには、鋳型下部を強制冷却して、一方、上部を加熱することが必要である。タンマン法は温度こう配のある電気炉内に鋳型をおき、鋳型に融液を注入後、電気炉の電力を一定速度で低下させて、炉温を下げ、合金を一方向に凝固させる方法である。単結晶を作る場合は鋳型下部に種子結晶を入れておかねばならない。

以上の2つの方法は凝固速度をかなり小さい値にまで下げることが可能であるから、小さい

*岡本 平 (Taira OKAMOTO), 大阪大学, 産業科学研究所, 教授, 工博, 金属材料

凝固速度を必要とする単結晶や共晶型複合材料の製造用にもっている。

発熱鋳型法と高温鋳型法はともに鋳型底部に水冷チルがとりつけられている。鋳型に注入された融液内での熱流の方向がチルにむいているように、鋳型は発熱鋳型法では発熱剤によって、高温鋳型法は電気炉によって高温に加熱される。このさい、温度こう配を大きくするために、鋳型そのものに温度こう配がつけられている。

単に一方方向に並んだ柱状晶組織を作る場合には凝固速度がかなり大きくなって支障がないから、発熱鋳型法や高温鋳型法で十分である。熱流の方向が一方方向に制御されていても、一方方向に整列した凝固組織がえられるとは限らない。タービン翼の場合、柱状晶組織をうるには温度こう配 G と凝固速度 R との比、 G/R の値が $2000 \text{ K} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 以上であればよいといわれている。もちろん、この値は使用材料の組成によって変わるので、一応の目安を示しているにすぎない。格子欠陥の少ない単結晶材料を作る場合には、その合金の凝固温度範囲が ΔT であれば、 G/R の値は $\Delta T/D$ の値よりも大きくしなければならない。ここで、 D は融液内での溶質の拡散係数である。

G/R の値を大きくするには、凝固速度を小さくするかまたは温度こう配を大きくすればよい。凝固速度をかなり小さい値にまで下げるとはブリッジマン法やタンマン法の場合に可能であるが、小さくすると、マクロ偏析が顕著になる他に、フレックルとよばれる線状の偏析が現われる。フレックルは溶質濃度が高いほど、融液密度が減少する材料に現われる欠陥で、これを防止するには適当な合金元素を添加するか、または凝固速度を大きくするように凝固条件を変えるとよい。

温度こう配を大きくするために種々の工夫がなされている。方向性凝固が工業的に使われ始めた10年ほど前には電気炉内に作られた温度こう配と水冷チルを使って、たかだか $20 \text{ K}/\text{cm}$ の温度こう配がえられたにすぎないが、最近ではLMC (Liquid Metal Cooling) 法によって、真空中で $200 \text{ K}/\text{cm}$ の値がえられている。LMC

法は凝固する材料の冷却媒体に低融点金属融体を使うものである。また加熱に高周波誘導加熱法を使うのが温度こう配を高めるために有利である。

以上の方向性のある凝固組織の製造とは別に、鋳塊や鋳物では一般に微細等軸晶をもった等方性の材料を作ることに関心がはらわれてきた。微細等軸晶をうるには、凝固させる合金に適した結晶微細化剤を融液に添加するか、または鋳物に接する鋳型砂または塗型剤に混入させる方法がとられる。結晶微細化剤は対象となる合金の組成によって独特のものがあつたり、また全ての合金に対して有効な微細化剤が見いだされていないので、一概にはいえないが、例えば、融液に添加するものとして、Al および Al 合金には Ti-B, Mg には Zr のように包晶反応をおこす元素が有効となることが知られている。Ni および Co 基超耐熱合金の場合、アルミン酸コバルトやけい酸コバルトを塗型剤に混入して微細な結晶粒をもった鋳物が作られている。これらの物質を融液に添加しても結晶粒が微細化しないと報告されていて、結晶粒微細化の機構が単純なものではないことを暗に示している。鋼では TiC や酸化コバルト混合物などを塗型に混入すると、結晶粒微細化に効果があるといわれている。

今日まで、結晶微細化剤として多くの物質がとりあげられてきたが、そのどれもが満足すべき成果を示すとはいえないようである。例えば、鋼の連続鋳造で、マクロ偏析を防止するために等軸晶を形成させることが要求されるが、このために、現在ではおもに低温注入と溶鋼の電磁かく拌が実施されていて、特殊な微細化剤の添加は行なわれていない。

合金の凝固組織の制御は、その合金の凝固時に現われる諸欠陥と凝固組織との関係、その合金の特性と凝固組織との関係などを考慮して、その合金に最適な凝固組織を作りあげるために行なわれている。この制御は、凝固組織形成に作用する諸因子が明確になるにつれて、徐々にではあるが、達成されつつあるというのが現状である。