

Al-Si-Mg系合金鋳物の機械的性質に関する均質性の評価

下野 功, 菅原 智明, 加賀 壽

Homogeneous Assessment of Mechanical Properties of Al-Si-Mg Casting Alloy

Isao Shiono, Tomoaki Sugawara
and Hisashi Kaga

要 旨

Al-Si-Mg系合金鋳物の一種であるAC4C材は耐食性が良好で軽量であるという特徴に加えて、地球環境にも優しいことから、船舶用部品等として多く用いられており、特に道南地域でのニーズは高い。本研究は、AC4C材の機械的性質に関する均質性を評価し、製品設計上必要となるAC4C材の基本的な特性を把握し、今後の製品改善のための知見を得ることを目的として行った。AC4C材の引張強度とブリネル硬度は、高温時効処理(T6処理)により、処理前と比較して約2倍の値を示した。この時、結晶粒微細化剤の有無による機械的特性の違いは認められなかった。機械的性質に関する均質性をブリネル硬度測定により評価した結果、円柱状試料の最上段部分を除けばばらつきは小さく、ほぼ均質であることが分かった。最上段の中央部近傍でのみブリネル硬度に低下が見られたのは、鋳造凝固時の鋳巣の発生が原因と考えられ、鋳巣の発生を抑制することで均質性はさらに向上するものと考えられる。

1. はじめに

アルミニウム合金は鉄鋼材料と比較して軽量で耐食性に優れ、さらには同様の特徴を有すFRP材料と比較してもリサイクルが可能であることから環境にも優しいという特徴を有している。¹⁾近年、船舶・構造物などに対する軽量化やリサイクルの要望が強まる中、アルミニウム合金の需要は高まっている。中でも、道南地域では船舶用部品に使用される高耐食性Al-Si-Mg系合金鋳物、特にAC4C材に対する需要が多い。道南地域の鋳物製造業ではAC4C材を用いた船舶用部品の製造が盛んで、従来から機械的特性の向上を目的として結晶粒微細化処理²⁾や、高温時効処理³⁾を行い、機械的特性の向上に努めてきている。しかし、製品の機械的性質に関する均質性の評価については検討課題であった。

本研究は、高耐食性Al-Si-Mg系合金鋳物の一種であるAC4C材の機械的性質に関する均質性を評価し、製品設計上必要となる基本的な特性を把握し、今後の製品改善のための知見を得ることを目的として行った。

2. 実験方法

2.1 試料の作製

本研究の原材料にはAC4C材を選択した。AC4C材の化学成分と機械的特性のJIS規格を表1に示す。⁴⁾化学成分から見たAC4Cの特徴は、鋳造性と機械的特性を向上させる目的でSi(6.5~7.5%)とMg(0.2~0.45%)が含まれており、耐食性を向上させる目的でCu(0.25%以下)とFe(0.55%以下)の含有量が制限されている。

AC4C材における結晶粒微細化処理と高温時効

表1 AC4C材の化学成分と機械的性質のJIS規格

化学成分					
Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn
0.25以下	6.5-7.5	0.20-0.45	0.35以下	0.55以下	0.35以下
Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
0.10以下	0.20以下	0.10以下	0.05以下	0.10以下	残

質別	記号	機械的性質		
		引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	ブリネル硬度 HB(10/500)
鑄造のまま	F	130以上	—	約50
溶体化処理後 高温時効処理	T6	200以上	2以上	約75

処理の効果を調べる目的で、道南地域の鑄物製造業社が製造している一般的な船舶用部品の大きさを参考にし、円柱状試料を4つ作製した。はじめに、図1(a)に示すような直径150mmで高さ200mmの円柱状の試料部分と、直径170mmで高さ180mmの押し湯部分を設けた砂型を作製した。この砂型に、重油溶解炉で溶解したAC4C材(石山軽金属製)を上注ぎ法により鑄込んだ。鑄込みには1つの試料当たり約25kgの原材料を要した。尚、溶解時にはKCl系の脱ガス剤をAC4C材の重量に対して0.3%添加した。また、4つの試料中、2つの試料にはAl-Ti-B系の結晶粒微細化剤をAC4C

材の重量に対して0.2%添加した。なお、砂型には図1(a)に示すように円柱状試料の上段と下段の二カ所に熱電対をセットし、凝固の際の冷却カーブを測定した。

凝固後押し湯部分を切断して、図1(b)に示すような直径150mmで高さ200mmの円柱状の試料を得た。この試料形状のまま、結晶粒微細化剤を添加した試料としていない試料から各1個ずつに対して、JIS H5020に基づいて、825℃で8時間の溶体化処理後、160℃で6時間の高温時効処理を行った。以後、鑄造のままの処理をF処理、高温時効処理をT6処理と記述する。以上、結晶粒微細化剤が無添加であるF処理材とT6処理材、及び結晶粒微細化剤を添加したF処理材とT6処理材の合計4種類の試料を作製した。

次に、円柱状試料の中央部から図1(c)に示すように厚さ20mmの板状試料を採取した。このうち半分は図1(d)に示す均質性評価用試験片に、残りの半分は図1(e)に示す引張試験片に用いた。均質性評価用の試験片は25mm角に切断し、ブリネル硬度測定、蛍光X線分析、光学顕微鏡観察に用いた。引張試験片はJIS Z2201-4号に基づいて上述した4種類の試料から各2本ずつ作製し、引張試験に用いた。

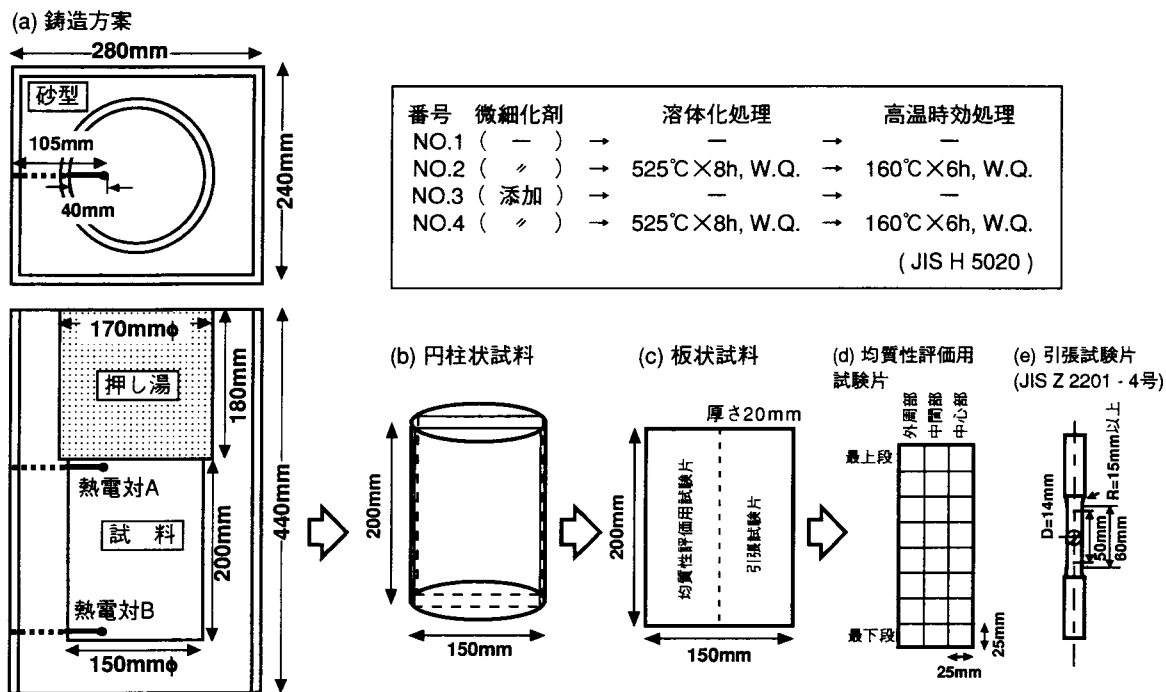


図1 鑄造方案と試験片の作製

2.2 試料の評価

AC4C材の凝固開始温度と凝固完了温度を求める目的で、結晶粒微細化剤を添加していない試料を用いて示差熱分析 (DTA) 測定を行い、冷却時における DTA カーブを測定した。

機械的性質の均質性評価として、引張試験とブリネル硬度測定 (鋼球の直径 = 10mm / 荷重 = 500 kg) を行った。引張試験は上述した4種類の試料に対して各2本ずつ測定し、ブリネル硬度測定は4種類の試料に対して各3行 × 8列 = 24箇所ずつ測定した。引張試験後の試料は、破壊形態を推定する目的で、走査型電子顕微鏡 (SEM) による破断面の観察を行った。AC4C材に含まれている化学成分の均質性評価として、硬度測定に用いた試験片を使用し、蛍光X線分析法による定量分析を行った。ただし、Siに関しては蛍光X線分析法により精度良く定量分析を行うことが困難であるという理由から、分析を行わなかった。⁵⁾ さらに、硬度測定に用いた試験片のうち代表的なものを選び、鏡面研磨後、光学顕微鏡を用いたマクロ及びマイクロ組織観察を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 砂型内の凝固挙動

砂型内の上段と下段にセットした2本の熱電対によって測定された凝固の際の冷却カーブを図2に示す。なお、図2中には熱分析測定により求められた冷却時のDTAカーブも併記した。DTAカーブには二本の発熱ピークが見られ、602°C (= T1)

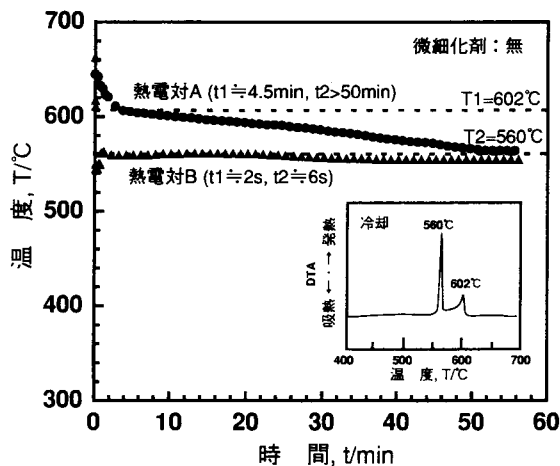


図2 AC4C材の凝固時における冷却カーブとDTAカーブ

のピークは凝固開始温度、560°C (= T2) のピークは凝固完了温度に対応し、これらの温度を図2中に破線で示した。試料下段部分の冷却カーブから、T1に到達するまでに約2秒、T2に到達するまでに約6秒かかっていることが分かる。一方、試料上段部分の冷却カーブから、T1に到達するまでに約4.5分、T2に到達するまでに50分以上かかっていることが分かる。これより、試料の下段部分と上段部分とでは凝固速度が大きく異なることが分かった。

3.2 機械的性質に関する均質性の評価

上述したような凝固速度の違いは、試料の上段部と下段部だけに生じているのではなく、試料の外周部と中央部の間にも生じていると考えられる。このような凝固速度の違いは、機械的性質に影響を及ぼすものと推察される。そこで、はじめに機械的性質に関する均質性の評価を行った。

4種類の試料の引張試験結果を図3に示す。図3には外周部近傍から加工した試験片の引張試験結果を○で、中心部近傍から加工した試験片の引張試験結果を△で、両者の平均値を棒グラフによって示した。参考までに、F処理とT6処理の引張強度のJIS規格値を破線で示した。また、各試料の伸びの平均値を右側に数字で示した。F処理材で約100N/mm²であった引張強度は、T6処理材で約190N/mm²と約2倍になっていることが分かる。ここで、円柱状試料の外周部近傍と中心部近傍による引張特性の違いは見られない。なお、結晶粒

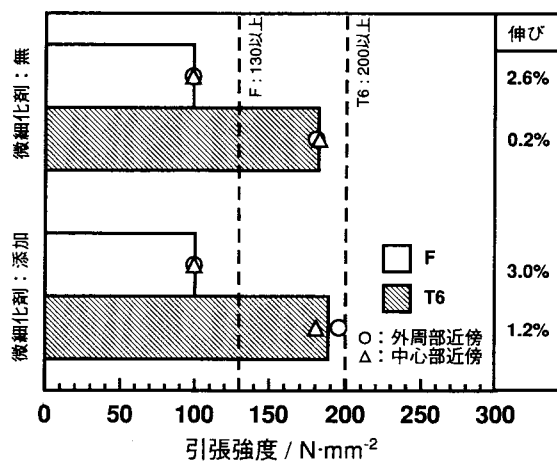


図3 AC4C材の引張試験結果

微細化剤の添加の有無による違いはほとんど無く、その効果は認められない。

表1に示したように、AC4C材の引張強度に対するJIS規格値は、F処理材で130N/mm²以上、T6処理材で200N/mm²以上となっている。JISでは引張試験用の試験片を別鑄込みによって作製するように規定されているのに対し、本研究では機械的性質の均質性を評価する目的から、別鑄込みすることは行わなかった。本研究の引張強度結果がJIS規格値よりも低い値を示した原因として、本研究の試験片作製法とJISで規定されている試験片作製法とが異なるために、両者の冷却速度の違いが引張強度に影響したものと考えている。

次に、引張試験後の試験片破断面のSEM観察を行った。破断面の二次電子像を写真1に示す。4種類の試験片からはへき開又は擬へき開的な破面が観察され、引張試験によって脆性的な破壊を生じたことを示唆している。破面観察の結果は、引張試験における伸びの結果と良い対応を示していると考えられる。

次に、F処理材のブリネル硬度の測定結果を図4(a)と(b)に、T6処理材のブリネル硬度の測定結果を(c)と(d)に示す。ここで、試験片の測定位置は前述の図1(d)に対応している。また、F処理材とT6処理材のJIS規格値を破線で示した。F処理材のブリネル硬度は約40であり、JIS規格値(HB≒50)以下の値であった。この原因として、凝固の際の冷却速度が影響しているものと考えられる。ブリネル硬度の均質性に関し

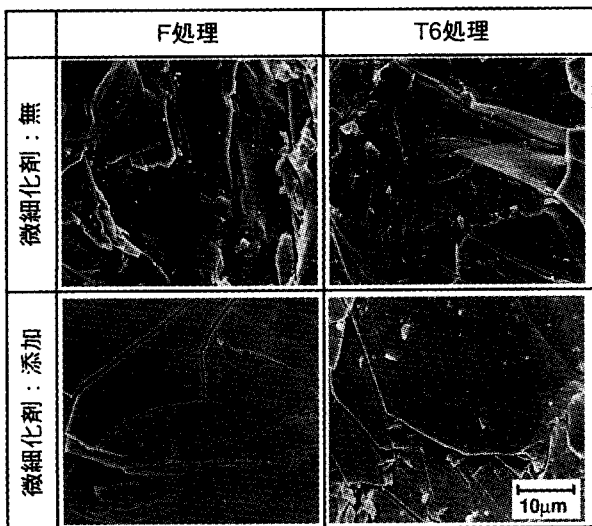


写真1 AC4C材破断面のSEM観察結果

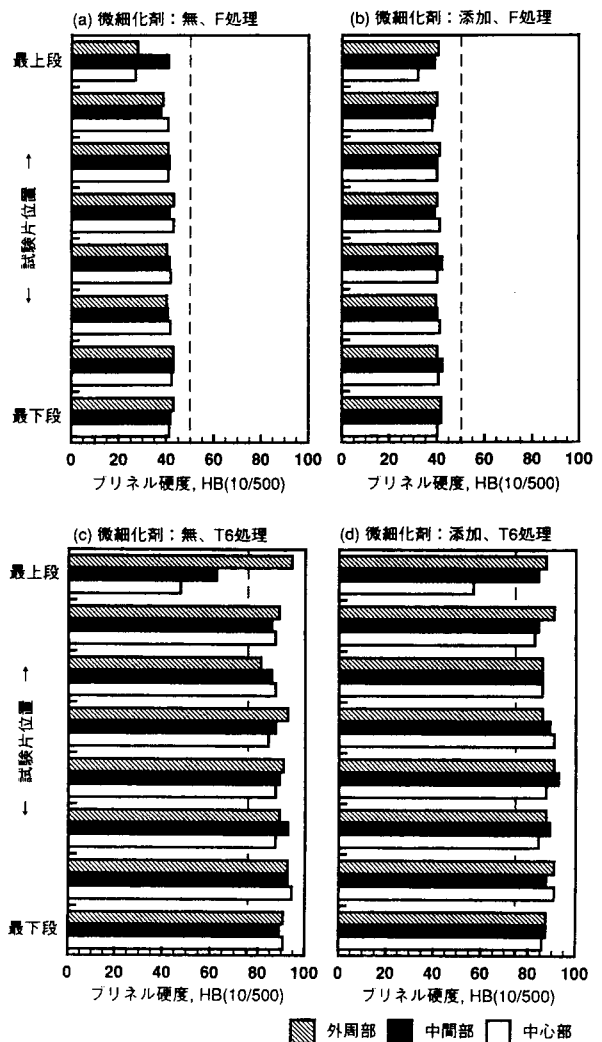


図4 試験片位置によるAC4C材のブリネル硬度測定結果

ては、最上段部を除き、ばらつきは小さい。

次にT6処理材のブリネル硬度であるが、最上段部を除いてJIS規格値(HB≒75)を越えており、高温時効処理によって硬度は約2倍となっていることが分かる。ブリネル硬度の均質性に関しては、F処理材と同様に最上段部を除き、ばらつきは小さい。

なお、結晶粒微細化剤の添加の有無による違いは引張試験の結果と同様にほとんど無く、その効果は認められない。

3.3 化学成分に関する均質性の評価

上述した凝固速度の違いは、化学成分の均質性にも影響を及ぼすものと推察される。そこで、試料内の化学成分の均質性を評価する目的で、表1に示したAC4C材に含まれる化学成分について蛍光X線分析法による定量分析を行った。

はじめに、機械的性質に最も影響を及ぼすと考えられるMgについて、F処理材のMgの分析結果を図5 (a)と(b)に、T6処理材のMgの分析結果を(c)と(d)に示す。ここで、試験片の測定位置は前述したように図1 (d)に対応している。また、MgのJIS規格範囲は破線で示した。結晶粒微細化剤の添加の有無、F処理材とT6処理材の違いに係わらず、Mgの分析値はJISの規格内に収まっており、ばらつきもほとんど見られない。同様に、他の化学成分成分(Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Ti, Pb, Sn, Cr)についても分析を行ったが、Tiを除いてほとんどばらつきは見られなかった。

一方、Tiについて、F処理材の分析結果を図6 (a)と(b)に、T6処理材の分析結果を(c)と(d)に示す。なお、TiのJIS規格値は破線で示した。結晶粒微細化剤を添加していない試料のTiの分

析値は、F処理材とT6処理材の違いに係わらずJIS規格値内に収まっており、ばらつきはほとんど見られない。一方、結晶粒微細化剤を添加した試料では、上段部分の中央部でJIS規格値を越える値を示している。この様な試料内のTi分布における不均質性の原因は、結晶粒微細化剤の添加と凝固速度に関係しており、結晶粒微細化剤に含まれているTiとBとの間でTiのホウ化物を形成し、凝固速度の遅い上段部分の中心部に濃化したのではないかと考えられる。但し、ブリネル硬度のばらつきの傾向と、Ti分析値のばらつきの傾向は一致しておらず、ブリネル硬度の低下がTiの濃化によるものではないことが分かる。

3.4 ブリネル硬度のバラツキ原因

蛍光X線分析法による化学成分の均質性の評価から、最上段部分におけるブリネル硬度のバラ

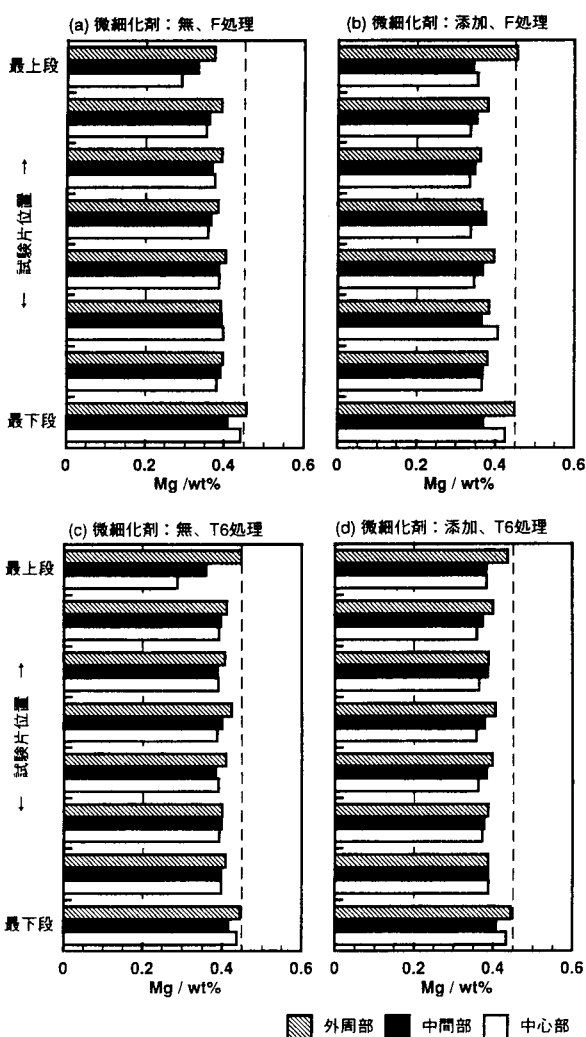


図5 試験片位置によるAC4C材のMg分析結果

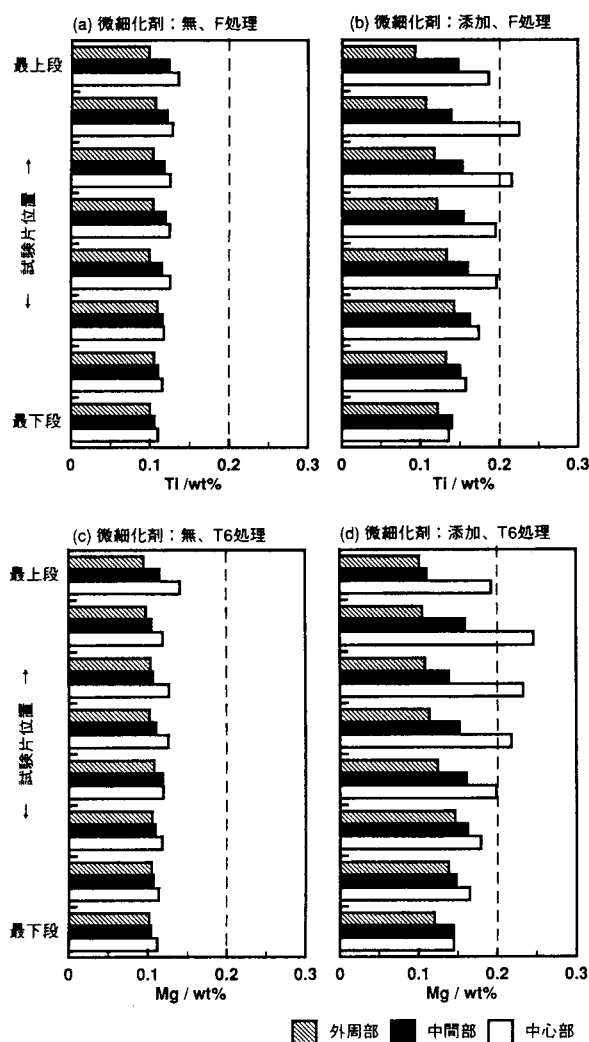


図6 試験片位置によるAC4C材のTi分析結果

ツキの原因は化学成分によるものではないことが分かった。ブリネル硬度のバラツキの原因を探求する目的で、光学顕微鏡によるマイクロ及びマクロ組織観察を行った。

はじめに、マイクロ組織観察結果を写真2に示す。ここには代表的な例として、最下段の外周部近傍、すなわち最も冷却速度が速いと考えられる部分の写真を示した。上下は微細化剤添加の有無、左右は熱処理の有無を表している。4つの試料ともエッチングを行っていないが、針状の粗大なSiが観察された。母材であるAlの結晶粒を観察する目的でエッチングを試みたが、母材の組織を観察するまでには至らず、結晶粒微細化剤の添加による母材組織への影響を確認することは出来なかった。マイクロ組織の観察結果からは、ブリネル硬度のバラツキの原因に関する有益な知見は得られなかった。

次に、光学顕微鏡によるマクロ観察を行った。代表的な観察結果として、結晶粒微細化剤を添加していない、T6処理後の最上段部と上から二段目の計6試料の観察結果を写真3に示す。各写真にはブリネル硬度値を併記した。各写真の中央部の丸い痕跡はブリネル硬度を測定したときの圧痕で、その他のものは鑄巣である。鑄巣の大小及び多少と、ブリネル硬度との間には相関関係があると考えられ、大きな鑄巣が多数存在するものほど、ブリネル硬度は低い値を示している。この結果から、ブリネル硬度の低下は鑄巣の存在が原因と考

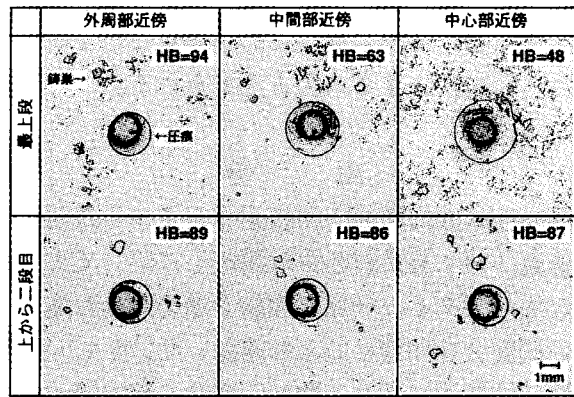


写真3 AC4C材のマクロ組織観察結果 (微細化剤：無、T6処理)

えられ、鑄巣の発生を抑制することで均質性はさらに向上するものと考えられる。

4. ま と め

結晶粒微細化処理及び高温時効処理を行ったAl-Si-Mg系合金鑄物AC4C材の均質性の評価として、引張試験、ブリネル硬度測定、蛍光X線分析、組織観察などを行い、以下のような知見を得た。

- (1) 砂型内の上段部分と下段部分とでは凝固速度が大きく異なることが分かった。このような凝固速度の違いは、試料の外周部と中心部の間にも生じていると考えられる。
- (2) AC4C材の引張強度とブリネル硬度はT6処理によって約2倍に増加した。一方、結晶粒微細化剤の有無による機械的性質の違いは認められなかった。
- (3) 引張試験により機械的性質の均質性を評価したところ、円柱状試料の外周部近傍と中心部近傍で違いは認められなかった。また、ブリネル硬度測定の結果からは、円柱状試料の最上段部分を除き、ばらつきは小さいことが分かった。
- (4) 蛍光X線分析法により化学成分の均質性を評価したところ、Tiを除いてJIS規格値を満足し、バラツキも小さかった。一方、結晶粒微細化剤を添加した試料で、Tiの分析値にバラツキが見られた。但し、このバラツキの傾向と、ブリネル硬度のバラツキの傾向とは一致しておらず、両者の因果関係はないものと判断した。
- (5) 大きな鑄巣が多数存在する試験片ほど、ブリネル硬度は低い値となる傾向を示した。最上段

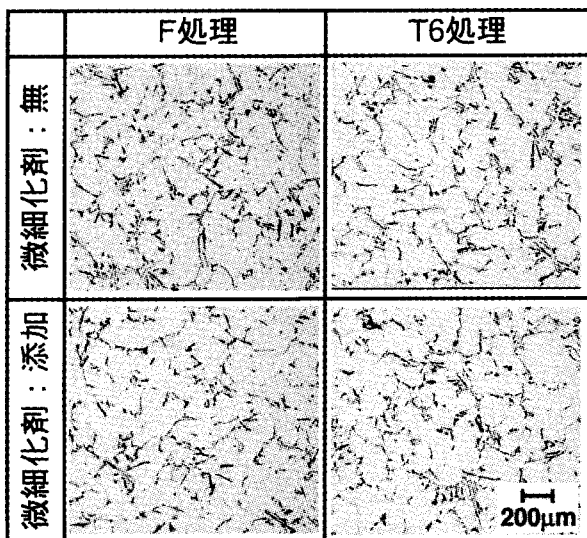


写真2 AC4C材のマイクロ組織観察結果

部のブリネル硬度の低下は鑄巣の存在が原因と考えられ、鑄巣の発生を抑制することで均質性はさらに向上するものと考えられる。

謝 辞

本研究は北海道立工業技術センターの長期実技研修会「目で見える材料実験講座」において実施されたものである。一緒に実験を進めてきた地元企業の研修会参加者に心より感謝いたします。また、本研究の推進にあたり懇切丁寧なる御指導・御助言を頂戴しました室蘭工業大学・桃野正教授に心より感謝申し上げます。

文 献

- 1) 大隅研治：金属, Vol.66, No.2 (1996), p117-128.
- 2) 鋳素形材センター編：素形材の組織（日刊工業新聞社）, (1988), p87-105.
- 3) 佃 誠, 小池 進, 原田雅行：軽金属, Vol.28, No.1 (1978), p8-14.
- 4) JIS H 5202.
- 5) 小谷直美, 五藤 武, 松村哲夫, 成田貴一：日本金属学会誌, Vol.38, No.1 (1974), p63-69.