

マグネシウム合金の機械的性質に及ぼす加圧の効果

金森陽一^{*}，樋尾勝也^{*}，柴田周治^{*}

Effect of Pressurization on Mechanical Properties of Magnesium Alloys

by Yoichi KANAMORI , Katsuya HIO and Shuji SHIBATA

The squeeze casting is a process in which the molten metal is poured into the die relatively slowly and solidifies under high pressure. The development of squeeze casting technology for magnesium alloys has been motivated by incentives to produce high quality components. The effect of the pressurization on the mechanical properties of magnesium alloys was studied.

The squeeze casting improves mechanical properties of magnesium cast alloys. Especially, the improvement of the elongation is remarkable. For example, the tensile strength and the elongation of the squeeze cast ZK61-T6 alloy are about 300MPa and 20%, respectively. The increase in mechanical properties by the squeeze casting may be attributable to reduced porosity and reduction in grain sizes. The longer solidification temperature range, the mechanical properties of the squeeze cast magnesium alloys were improved.

Key words: magnesium alloys, squeeze casting, mechanical properties, grain refinement, solidification temperature range

1. はじめに

マグネシウム (Mg) 合金は、軽量で比強度が高く、電磁波シールド性、美観触感性などに優れていることから、最近急速に電子機器の筐体などに利用されている¹⁾。しかし、現在のところ、その利用は、比較的強度が要求されない肉厚の薄い部品への適用が多く、今後は、優れた機械的性質が必要となる部品への適用が望まれる。

厚肉で優れた機械的性質が必要なる部品として使用するためには、高強度で信頼性が高く、欠陥が少ない製品を製造することが求められる。しかし、一般的に鑄造法による Mg 合金の厚肉品の成形では、結晶粒粗大化による強度低下、内部に鑄巣などの鑄造欠陥が発生しやすく信頼性に乏しいなどの問題がある。

近年、鑄造欠陥の少ない高品位な鑄造品を製造する技術として高圧鑄造法が開発された。高圧鑄造法は、溶湯を低速で金型内に注湯し、その後高圧下で凝固させる方法²⁾で、高品位 Al 鑄造品の製造法として採用されている³⁾。高圧鑄造法を Mg 合金に適用すれば、欠陥の少ない厚肉で高強度の Mg 合金鑄物が製造可能となると考えられる。

既報において、Mg 合金に高圧鑄造法を適用するため、種々の Mg 合金について高圧鑄造を行い、凝固組織に及ぼす加圧の効果について調査した⁴⁾。その結果、加圧により Mg 合金の組織は微細化すること、加圧により Mg 合金の組織は均質化することなどを明らかにした。

本報では、高圧鑄造した Mg 合金の as cast 材及び熱処理材の機械的性質を調査し、機械的性質に及ぼす加圧の効果について検討した。

*金属研究室研究グループ

2. 実験方法

2.1 高圧鋳造装置及び鋳造条件

実験にはプランジャー加圧式の高圧鋳造装置（最大横型締め力：100t，最大上部加圧力：50t）を用いた。供試材は市販の AZ31，AZ63，AZ91，AM60，ZK61，QE22 合金などとした。

約 600g の供試材を，SF₆ ガス雰囲気下の鉄るつぼに入れて電気炉で溶解し，融点を約 100～130K 超える温度で 5min 間保持した。その後，高圧鋳造装置内にセットした 473K の階段状試験片作製用金型に注湯し，上パンチを降下させて溶湯に 0～100MPa の圧力をかけながら凝固させた。なお，注湯開始から加圧開始（上パンチが溶湯に接触する）までの時間は約 5～8s であった。金型には SKD61 を用い，表面に離型材（BN）を塗布した。また，キャピティ直前に目開き約 1 または 0.5mm のフィルターをセットし，溶湯中の介在物の除去を行った。

Mg-Al 系合金については注湯直前に結晶粒微細化処理（スクロース添加 + Ar ガスバブリング）を以下の要領で行った。添加材はスクロース，添加量は約 0.3mass% とし，アルミ箔にくるんだ添加材を，Mg 溶湯中に沈めることにより添加を行った。添加後，先端部に φ1mm の穴を 70 箇所程度あけてある φ25mm の黒鉛製のガス吹き込み管を Mg 溶湯に挿入し，Ar ガスのバブリングを行った。Ar ガスの流量は 3 l/min，バブリング時間は 5min 間とした。バブリング中は，バブリングによる溶湯の温度低下がなるべく小さくなるように，電気炉の出力を調整した。

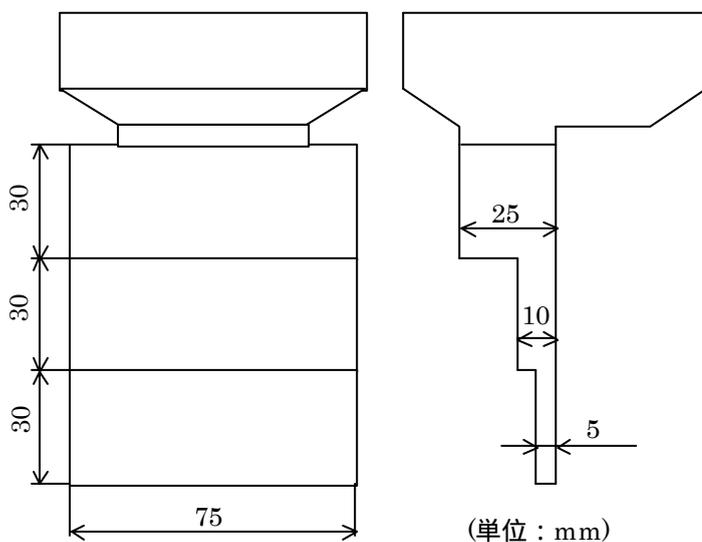


図1 階段状試験片の形状

溶製した階段状試験片の形状を図1に示す。

2.2 評価

鋳造後の評価としては，引張試験，密度測定，粒径測定，X線透過試験を行った。また，各種 Mg 合金による加圧の効果の違いを検討するため，DSC（示差走査熱量測定）により固液共存温度範囲（凝固温度範囲）を求めた。

評価した試料は，高圧鋳造したままの as cast 材及び高圧鋳造後熱処理した熱処理材（T4，T5，T6）とした。

引張試験では，図2のφ8mmの丸棒試験片を機械加工により作成し，クロスヘッド速度：1mm/min で試験を行った。なお，耐力については0.2%耐力とした。DSCによる固液共存温度範囲測定用試料については溶製材から2mgの切粉を採取した。密度測定についてはアルキメデス法により行った。

なお，本報では肉厚25mm部の結果についてのみ報告する。

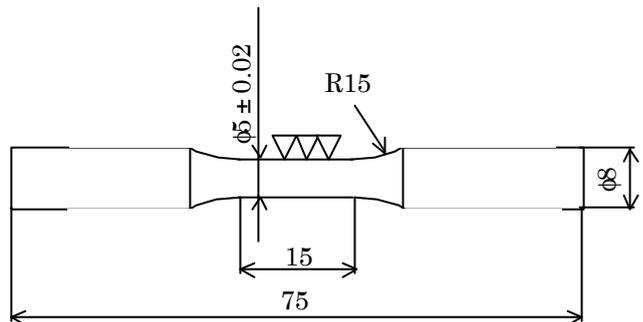


図2 φ8 mm 丸棒試験片 (単位：mm)

3. 実験結果

3.1 as cast 材の機械的性質

図3に各種 Mg 合金に高圧鋳造したときの加圧力と as cast 材の機械的性質の関係を示す。実験を行ったすべての Mg 合金において，引張強さ及び伸びは加圧力が大きくなるとともに向上した。また，この向上については，50MPa ぐらいまでの加圧力の効果が顕著であることがわかった。これらの結果は，高圧鋳造により機械的性質の向上を図る場合，加圧力として約 50MPa 以上が効果的であることを示している。

図4に加圧なしと 100MPa 加圧の as cast 材の機械的性質（引張強さ，耐力，伸び）を示す。図4から，加圧による機械的性質の向上と

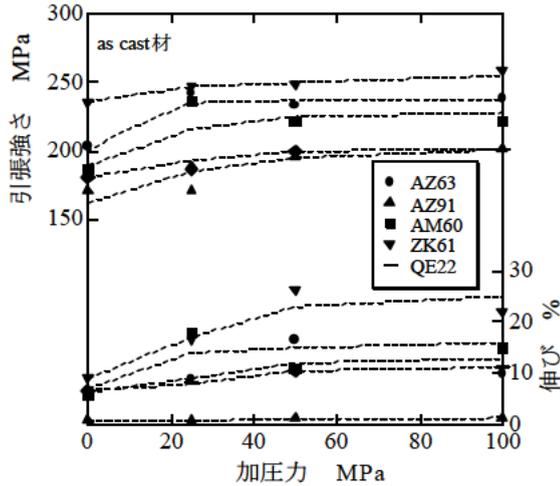


図3 加圧力と機械的性質の関係

しては伸びの向上が顕著であることがわかった。特に AZ63, ZK61 において、加圧力：100MPa で、加圧なしの 2 倍以上の伸びが得られた。100MPa 加圧による引張強さ、耐力の向上は、伸びに比べると小さいものの、それぞれ 7~15%、3~10%程度であった。

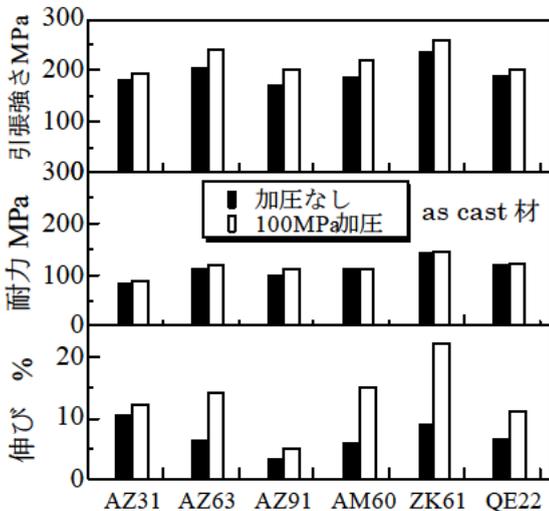


図4 高圧鋳造した Mg 合金の機械的性質

3. 2 熱処理材の機械的性質

表 1 に高圧鋳造（加圧力：100MPa）+ 熱処理後の機械的性質を示す。なお、各熱処理条件において、上の値が実験値、下の値が JIS 規格値である。すべての合金がすべての条件において、JIS 規格値に比べ、大幅に高い値が得られた。特に AZ63-T6 材では引張強さ：約 300MPa、伸び：約 10%、ZK61-T6 材では引張強さ：約 300MPa、伸

表 1 熱処理後の機械的性質

	熱処理	引張 MPa	耐力 MPa	伸び %
AZ63	T4	282	109	17.3
		240	70	7.0
	T5	243	121	7.6
		180	80	2.0
	T6	299	140	12.2
		269	110	3.0
AZ91	T4	292	103	17.5
		240	70	7.0
	T5	223	136	3.9
		160	80	2.0
	T6	285	164	7.0
		240	110	3.0
ZK61	T5	279	186	20.2
		270	180	4.0
	T6	294	189	20.7
		275	180	4.0
QE22	T6	272	198	4.9
		240	175	2.0

（上段：実験値，下段：JIS 規格値）

び：約 20%で、高強度かつ高延性の Mg 合金が得られた。以上の結果から、高圧鋳造+熱処理を行うことにより優れた機械的性質（高強度、高延性）の Mg 合金が得られることがわかった。

図 5 に ZK61-T6 材 加圧なし、加圧力：100MPa についてワイブルプロットした結果を示す。図 5 からワイブル係数 m は、加圧なし：21、100MPa：36 となり、加圧することにより約 1.7 倍に向上することがわかった。この結果は、Mg 合金に高圧鋳造することは、強度の向上だけでなく、強度

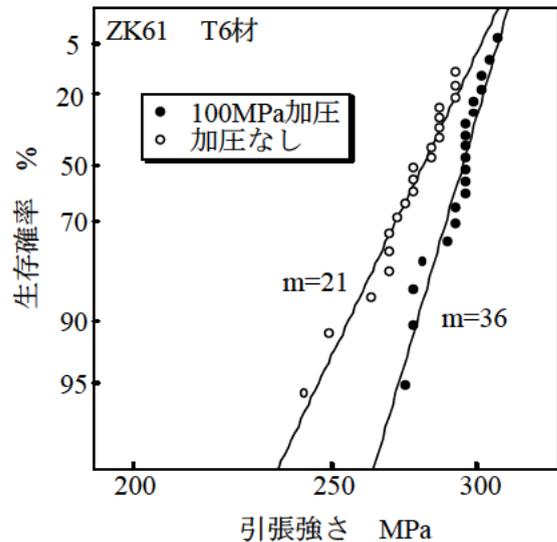


図5 ZK61-T6 材のワイブルプロット

の信頼性も向上させることを示している。また、本実験は少量の実験であるが、大量に製造することにより、さらなる信頼性向上が期待できると考えられる。

4. 考察

4.1 機械的性質に及ぼす結晶粒径の影響

高圧 casting により Mg 合金の結晶粒が微細化されることは既報においてすでに明らかにした⁴⁾。一般に材料の結晶粒微細化による強化機構については、Hall-Petch の関係で表される。

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-1/2} \quad (1)$$

σ_y は多結晶体の降伏応力、 σ_0 は単結晶の平均降伏応力、 K_y は結晶粒界が降伏応力を高める効果を現すパラメータ、 d は結晶粒径を示している。

この関係から結晶粒径が小さくなれば、降伏応力が向上することがわかる。

図6はAZ91合金の本実験値と馬淵ら⁵⁾の耐力と結晶粒径 d の $-1/2$ 乗の関係を示している。図6から、本実験値は少しばらつくが、ほぼ直線関係にあり、Hall-Petch の関係に従うことがわかる。また、本実験値は馬淵ら ($\sigma_y = 130 + 210d^{-1/2}$) ともかなり一致する。Hall-Petch の関係は引張強さについても成り立つことが知られており、以上のことから、Mg についても、加圧による結晶粒微細化は機械的性質を向上させる1つの要因であることがわかる。

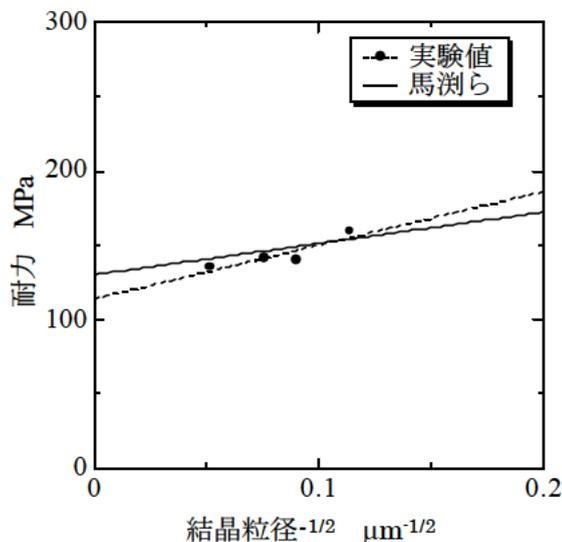


図6 耐力と結晶粒径 $-1/2$ の関係

4.2 機械的性質に及ぼす密度の影響

図7に加圧なしと100MPa加圧における各種Mg合金の密度測定結果を示す。図7から100MPa加圧の密度は加圧なしに比べ、すべてのMg合金で向上した。この密度向上の要因としては、鑄巣の消滅とマトリックスの密度向上が考えられる。仮にこの密度の向上が、鑄巣の消滅のみ(マトリックスの密度向上はない)であると仮定すると、例えばAZ91合金では100MPa加圧により、約 40mm^3 の体積の鑄巣が消滅したことになる。なお、鑄造品(25mm部)全体の体積は、約 $56,250\text{mm}^3$ である。

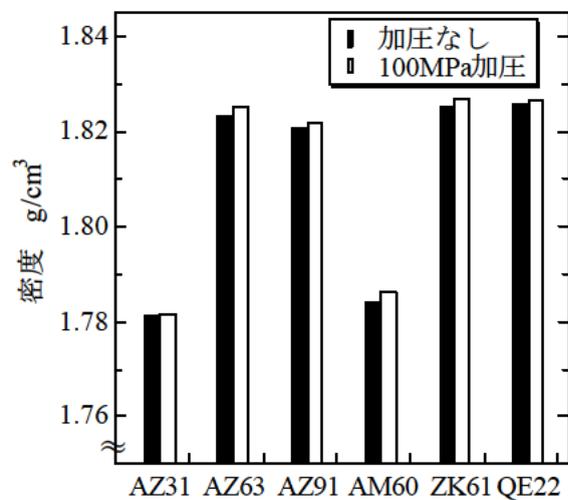


図7 高圧 casting した Mg 合金の密度

また、X線透過試験でも、加圧なしでは約 $\phi 0.8 \sim 3.5\text{mm}$ のポロシティが10個程度検出されたのに、加圧力:100MPaでは全く検出されず、加圧による鑄巣の消滅が確認された。ただし、X線透過試験の検出限界は約 0.5mm であるため、それ以下の欠陥については検出できない。そこで、加圧なしと加圧力:100MPaのX線透過試験結果から加圧力:100MPaで消滅したポロシティの体積(加圧なしで検出されたポロシティの最大径から求めた体積)を求めると、約 45mm^3 となり、密度から求めた値に非常に近い値となった。以上の結果から、加圧による密度向上のほとんどは鑄巣の除去によるものであると考えられる。しかし、X線透過試験から求めた体積は、鑄巣を球と仮定し、その最大径から求めているため、真値より大きくなっていると考えられる。いずれにしろ、密度の向上(鑄巣の消滅)が機械的性質の向上に寄

与していることは明らかである。また、今回の計算では、個々の鑄巣（欠陥）のサイズや形状などを無視している。厳密に機械的性質に及ぼす消滅した鑄巣の影響を評価するためには、鑄巣のサイズや形状などの影響も検討する必要がある。

4. 3 機械的性質に及ぼす固液共存温度範囲の影響

図8に高圧鑄造した Mg 合金の as cast 材の機械的性質と固液共存温度範囲の関係を示す。縦軸の $\sigma_{B100}/\sigma_{B0}$, $\sigma_{0.2100}/\sigma_{0.20}$, δ_{100}/δ_0 は無次元量で、それぞれ、加圧力：0MPa の引張強さ (σ_{B0})、耐力 ($\sigma_{0.20}$)、伸び (δ_0) に対する加圧力：100MPa の引張強さ (σ_{B100})、耐力 ($\sigma_{0.2100}$)、伸び (δ_{100}) を示している。図8から、伸びは若干ばらつくが、固液共存温度範囲が広がるほど、 $\sigma_{B100}/\sigma_{B0}$, $\sigma_{0.2100}/\sigma_{0.20}$, δ_{100}/δ_0 が大きくなることがわかる。この結果は、固液共存温度範囲が広いほど、加圧による機械的性質の向上が大きいことを示している。従って、Mg 合金の加圧による機械的性質の向上は固液共存温度範囲が広い Mg 合金ほど大きいことがわかった。

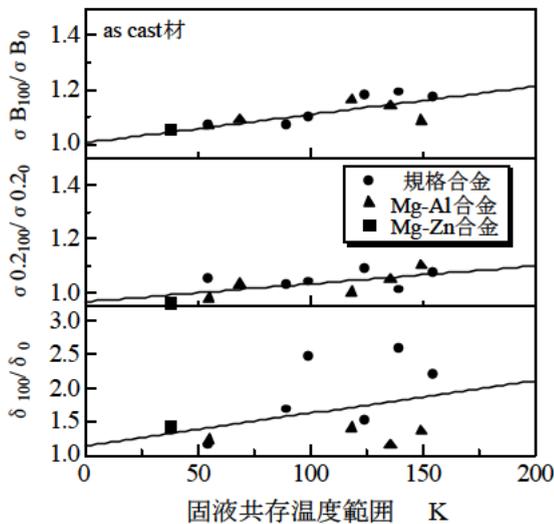


図8 機械的性質と固液共存温度範囲の関係

図9は、高圧鑄造したときの密度向上を鑄巣の消滅だけであると仮定して、密度の測定値から消滅した鑄巣の体積を求めて、固液共存温度範囲と消滅した鑄巣の体積をプロットしたものである。また、図10に G_{100}/G_0 と固液共存温度範囲の関係を示す。図8と同様に G_{100}/G_0 は無次元量で加圧力：0MPa 平均粒径 (G_0) に対する加圧力：100MPa の平均粒径 (G_{100}) を示している。

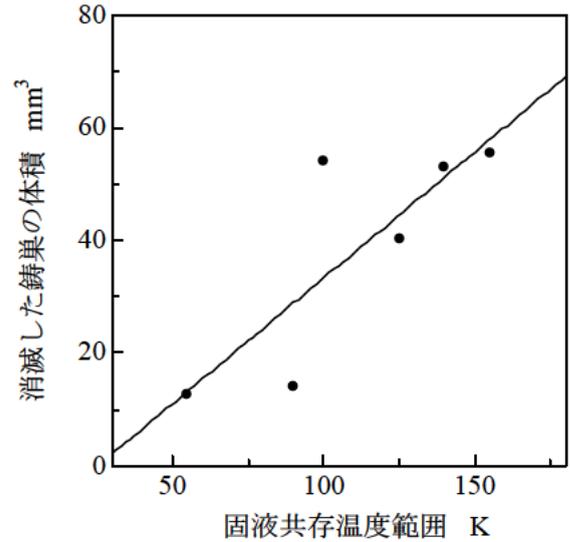


図9 消滅した鑄巣の体積と固液共存温度範囲の関係

図9から固液共存温度範囲が広いほど、加圧により消滅した体積が大きくなり、欠陥が少なくなることがわかる。一般的に、固液共存温度範囲が広い合金ほど鑄巣ができやすいことが知られている。このため、固液共存温度範囲が広い合金ほど、加圧により消滅する体積が大きくなったと考えられる。また、図10から G_{100}/G_0 、つまり加圧による平均粒径の変化は固液共存温度範囲にあまり依存しないことがわかる。(若干、固液共存温度範囲が広がると G_{100}/G_0 は小さくなる。)密度向上を鑄巣の消滅だけとする今回の仮定はかなりラフではあるが、これらから、固液共存温度範囲が広い Mg 合金ほど、加圧により消滅する鑄巣

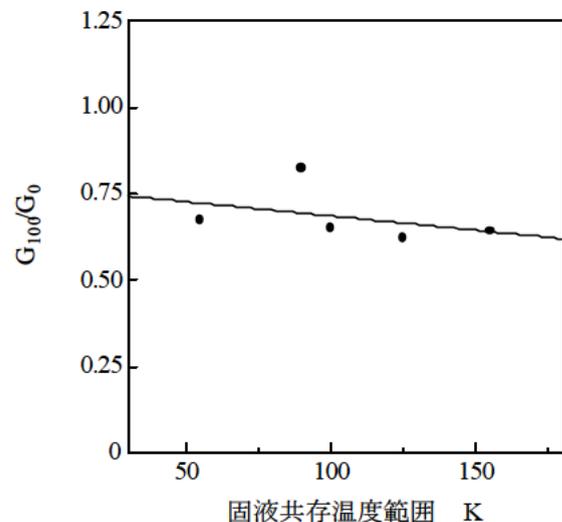


図10 G_{100}/G_0 と固液共存温度範囲の関係

の体積が大きくなり、機械的性質が向上することがわかる。以上の結果から、図8のMg合金の加圧による機械的性質の向上は固液共存温度範囲が広いMg合金ほど大きくなることが説明できる。ただし、この結果は鑄巣の消滅の効果が固液共存温度範囲に依存することを示しているのであって、機械的性質の向上に対し結晶粒微細化が影響しないことを示しているわけではない。

5. まとめ

種々のMg合金について高圧鑄造を行い、機械的性質に及ぼす加圧の効果の検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

加圧によりMg合金のas cast材の引張強さ、耐力、伸びが向上する。特に、伸びの向上が大きく、例えばAZ63、ZK61では加圧力：100MPaで、伸びが2倍以上に向上した。

高圧鑄造+熱処理を行うことにより優れた機械的性質（高強度、高延性）のMg合金が得られるとともに、強度の信頼性も向上する。

加圧による機械的性質の向上の主な要因は結晶粒微細化と鑄巣の消滅によるものである。

加圧による機械的性質の向上は固液共存温度範囲が広いMg合金ほど大きい。

謝辞



本研究は競輪の補助を受けて実施したものです

参考文献

- 1)例えば、鎌土重晴ほか：“ダイカスト用マグネシウム合金の特性と動向”.日本金属学会会報, vol.38, No.4, p285-290(1999)
- 2)西田義則ほか：“溶湯鍛造の基礎の現状”.日本金属学会会報, vol.19, No.12, p895-902(1980)
- 3)安達充：“アルミニウム合金高圧鑄造鑄物の品質と特性”.素形材技術フォーラムテキスト, p11-15(1999)
- 4)金森陽一ほか：“マグネシウム合金の凝固組織に及ぼす加圧の効果”.三重県科学技術振興センター工業研究部研究報告, No.27, p42-48(2003)
- 5)馬淵守ほか：“マグネシウム合金の塑性加工プロセス”.軽金属, 51, p498-502(2001)