ZAC #1, シルミン (13% Si), AZ 91 および 純亜鉛の鑄造収縮について*

佐々木 悦 男**

Etsuo Sasaki: Casting Shrinkage of ZAC #1, Silmin (13% Si), AZ 91 and Pure Zn.

Both the casting shrinkage and the total thermal expansion in a solid state (from room temperature to melting or solidus temperature) of ZAC #1, Silmin (13% Si), AZ 91 and pure Zn were measured when there was nothing to prevent the thermal shrink of casting such as insert cores. The relationship between the casting shrinkage and the total thermal expansion was also discussed. The main results are as follows. (1) The casting shrinkage of metals takes a value close to the total thermal expansion of metals in a solid state, but the relationship between them is very complicated. (2) Both the solidification manner of castings and the temperature distribution in castings during solidification are very important functions for the relationship between them. For the solidification of casting in a pasty manner, the casting shrinkage becomes larger than for the solidification of casting by the skin formation, and the casting shrinkage becomes smaller as the temperature gradient in castings increases.

(Received August 3, 1964)

I. 緒 言

金属の鑄造収縮は、もし中子のようなものがなくて鑄物の熱収縮をおさえるものがない場合、その金属の固体における融点またはその金属が収縮し得る強度を持つ温度から室温までにおこる熱収縮に近い値を示すと考えてよい。

たとえば植村らによるダイカスト⁽¹⁾の鑄造収縮に関する論文ではこのような考えに基づいている。しかし金属の凝固現象を考えてみると種々の鑄造条件によつて異なることが予想される。たとえば大平、小林、坂本⁽²⁾⁽³⁾によつて Al-Si 合金の凝固時に生ずる膨張に関する研究が鑄造収縮の研究との関係でなされているし、この他凝固時の鑄物内の温度分布および凝固形式は当然金属の鑄造収縮と関連がある。そしてここに上げた因子は互いに影響しあい、鑄造収

で、われわれは棒状の鑄造体で中子のような収縮をおさえるものがないような単純な場合については、大体その同一試料についての室温から融点または固相線の温度までの全熱膨張に近い値をとるべきであると予想し、この全熱膨張と鑄造収縮の測定からその差を求め、それらと種々の鑄造条件との関係を求めた。

II. 実験装置および方法

鑄造合金は ZAC #1, 純亜鉛 (99.99%), シルミン (13% Si), AZ 91 の 4 種が使われた。熔解は ZAC #1, 純亜鉛, シルミンは黒鉛ルツボを使い、AZ 91 は鉄製のルツボを使い電気炉で行なった。

鑄造収縮測定用の鑄物は Fig. 1 に示したごときのもので

Fig. 1 Drawing of casting specimen.

縮はほとんど考えられるすべての鑄造条件の複雑な函数となる。しかし問題はその種々の因子の量的な影響力であつ

Fig. 2 Casting method.

図で AA' の部分の鑄造収縮を測定した。また熱膨張は鑄造収縮を測定した丸棒の部分の湯口のところから切りとつてそのまま熱膨張計にセットして測定した。鑄型および鑄造方法を Fig. 2 に示す。

鑄型の外枠としてアンバーで造つた断面が U 状のものを、この両端面間の平行をよく出して研磨し、この両端面にやはり面をよく研磨したアンバーまたは黒鉛の当て板を

** 東京医科歯科大学 歯科材料研究所 (The Research Institute of Dental Materials Tokyo Medical and Dental University, Tokyo)

* 1959 年 11 月本会大阪大会に発表

(1) 菅野, 植原: 軽金属, No. 22 (1957), 49.

(2) 大平, 小林, 坂本: IMONO, 34 (1962), 160.

(3) 大平, 小林: IMONO, 35 (1963), 575.

外側から押しつけておき、鋳造時の Fig. 1 の $\overline{AA'}$ に相当する部分の鋳型の長さが常にアンバーの外枠の平行面間の長さ一致するようにした。そして鋳造収縮はこのアンバーの両端間の長さに対する室温まで冷却した後の鋳物の $\overline{AA'}$ 部の長さでとの差で表わす。このアンバーの両端面間の平行度は $\pm 5 \mu$ 程度で鋳造収縮の測定精度は $\pm 0.01\%$ よりよい。鋳型は石膏と珪砂を 3:7 に配合したものを使った。アンバーおよび黒鉛の熱伝導は当然この鋳型材料よ

とし AZ 91 以外の金属については融点または固相線の温度以下 2°C まで行ない融点まで外挿し、AZ 91 は固相線⁽⁴⁾の温度から約 50°C 上の温度まで測定した。鋳造収縮および熱膨張はともに 20°C を室温として補正した。

III. 実験結果およびその考察

Fig. 3 の (a), (b), (c) は ZAC 鋳造収縮および室温から融点までの全熱膨張と鋳造条件との関係を示す。

Fig. 3 Casting shrinkage of ZAC #1.

りよいので、鋳物の凝固はこの当て板の部分からはじまり、そして湯口の部分が最後に固まる。したがって、鋳造収縮の測定を行なった $\overline{AA'}$ 軸上の温度勾配は比較的大きい。鋳型温度を上げる場合には、アンバーの外枠から石膏型の部分のみをはずして温度を上げ、鋳造直前に外枠の中にもどして鋳造した。鋳型を石膏型で造り、当て板をアンバーまたは黒鉛としたのは当て板のチル効果を狙ったもので、これは鋳造収縮の測定に必要な測定面を十分に平な面にすることに都合がよい。 $\overline{AA'}$ 軸上の平均の温度勾配はもちろん鋳造後時間とともに変るが、最大で当て板がアンバーおよび黒鉛の場合、それぞれ $20^\circ\text{C}/\text{cm}$ および $15^\circ\text{C}/\text{cm}$ であった。この温度勾配は一般に行なわれている鋳造の場合の温度勾配より多分大きめであるが、たとえば Chamberlin and Mezoff⁽⁵⁾ は Dow H. Magnesium 合金に対してよい機械的強度を得るために適当な温度勾配は $50^\circ\text{C}/\text{in}$ であると報告していることなどもあり、われわれの使用した鋳造条件がとくに実際の鋳造条件から離れてはいない。熱膨張の測定は本多式熱膨張計を使い、測定圧を $5\text{g}/\text{mm}^2$

図から判るように鋳造収縮は鋳造条件によつて異なり、 $0.99\sim 1.18\%$ の間の値をとる。熱膨張と鋳造収縮とでは鋳造収縮の方が小さく、その差は $0.05\sim 0.19\%$ と鋳造条件によつて変る。鋳造収縮は鋳型温度とあまり関係ないが、鋳造温度が高くなると鋳造収縮は小さくなる。ZAC の熱膨張が鋳造条件によつて異なるのは ZAC の鋳造組織および ZAC 合金ダイカスト鋳物に生ずる鋳造後の鋳物の寸法変化⁽⁶⁾ と関係あるものと考えられる。ZAC の鋳造組織は後の純亜鉛の実験結果から推定すると、純亜鉛と同様に考えてよく、鋳型温度および鋳造温度の上昇とともに $\overline{AA'}$ 軸上の温度勾配が大きくなり、組織組織が発達し $\overline{AA'}$ 方向の熱膨張は小さくなる。また鋳型温度および鋳造温度の上昇によつて鋳物の冷却速度が遅くなると、鋳物の冷却過程の熱収縮が大きくなり、したがって熱膨張は大きくなる。このようにこの二つの現象が互いに逆に働き、当て板がアンバーと黒鉛の場合にはその各々の影響の大きさの違いから、鋳型温度と鋳造温度の熱膨張に対する影響は当て板がアンバーと黒鉛では逆になっている。

鋳造収縮と熱膨張の差がどのような機構で生ずるかということは前にも述べたように、その機構に対してほとんど

(4) マグネシウムダイカスト合金に関する研究：マグネシウム委員会 (昭和 38 年度報告)

(5) M. V. Chamberlin and J. G. Mezoff : Trans. Amer. Found. Assoc., **51** (1943), 155.

(6) 和田：金属，**4** (1954), 260.

すべての考えられる casting 条件と関係があるものと思う。しかしわれわれは、これらの因子の中で凝固時の casting 体内部の温度分布の影響がとくに大きいものと考え、その温度測定を行ないこれを検討した。われわれの測定に使われた試料の場合、試料内部の温度分布は比較的簡単で、とくに ZAC の場合は一方向凝固 ($\overline{AA'}$ 軸) と考えてよく (これはもちろん厳密な意味ではない)、そのため湯口直下の部分が熱収縮に十分な強さになる前に、試料の両端部で凝固収縮した部分は試料全体としての casting 収縮に関係ないことになる。Fig. 4 (a), (b) はそれぞれ当て板がアンバーおよび黒

鉛の厚さが 0.5~1.5 mm になったときとすると、当て板がアンバーの場合はそれは 20~30 sec 後である。その時間までに両端部で熱収縮してしまっている量は少なくとも 0.05~0.09% となる。これは $\overline{AA'}$ 軸上の温度測定と熱膨張測定の結果から計算したものであるから、鋳物の外被部分はさらに温度が下つているはずであるから、さらにこの量は多くなる。実測された熱膨張と casting 収縮の差は、上述の温度測定のなされた casting 条件では 1.0% なので、もし試料全体として収縮しはじめる点の仮定が正しければ、熱膨張と casting 収縮との差の主なものは温度勾配によるものと考

Fig. 4 Temperature distribution at center line of casting of ZAC #1.

Fig. 5 Solidification manner of ZAC #1 with invar end plate.

鉛で試料の直径 15 mm ϕ 、型温 25°C、 casting 温度 420°C の場合の凝固過程におけるものである。また Fig. 5 は同一 casting 条件の場合に“pour out”法によつて調べた凝固過程を示す。Fig. 5 から判るように casting 凝固過程は“skin formation”で純金属とほぼ同様である。湯口直下の部分の凝固がある程度進んだ後に試料全体としての収縮がはじまると考えられるが、融点付近の ZAC の強度が判らないしまた凝固層の出来方も複雑なので、全体として熱収縮しはじめる点はわからないが、もしそれを Fig. 5 で“C”のと

えてよいと思う。当て板が黒鉛の場合には温度勾配は、Fig. 4 (b) のごとくなり、 $\overline{AA'}$ 軸上の casting 収縮にきいてこない部分は 0.03~0.07% 位である。やはり測定値より少し少なめである。鋳型温度が上ると凝固のときの温度測定結果から考えると、熱膨張と casting 収縮の差は 0.01~0.02% 大きくなるはずであるが、実際は少なくなる。 casting 収縮と全熱膨張の差と鋳型温度との関係がこのようになるのはシルミンと AZ 91 ではみられなかった。

casting 温度の影響は温度測定の結果では casting 温度が高くなると $\overline{AA'}$ 軸上の温度勾配が大きくなるので、熱膨張と casting 収縮との差が大きくなるはずであり、これは実験結果と一致する。Fig. 3 (c) は測定部の直径と casting 収縮との関係を示す。温度測定の結果では直径が小さくなるほど温度勾配は急になり、そのため casting 収縮と熱膨張の差は大きくなるはずでありこの点実験結果と一致するが、型湯が室温のときの 10 mm ϕ の直径のものの差は温度勾配では説明出来ないほど大きい。これは多分直径が細すぎて押し湯の効果のおよばないところが出るため⁽⁶⁾と考えられる。もし直径を 5 mm ϕ にすると casting 収縮は 0.8% 位になるが、この場合 casting 収縮を測定する丸棒状の部分の湯口と両端面の間に引けが現われる。Fig. 6 シルミンは casting 収縮と熱膨張と casting 条件との関係を示す。図に示されるように casting 収縮は、当て板がアンバーの場合は 1.09~1.15%，また黒鉛の場合は 1.24~1.25% である。大平⁽²⁾らの

測定によるとシルミン (12% Si) の铸造収縮は 1.4% で、われわれの測定値より大きい。熱膨張と铸造収縮との差は

manner であるためであると思われる。なおこの金属は固相線の温度で急激に熱膨張係数が大きくなり、Fig.8に固

Fig. 6 Casting shrinkage of silmin (13%Si).

Fig. 7 Casting shrinkage of AZ 91.

当て板がアンバーの場合は 0.9~1.12% であるが、黒鉛のときは 0.01~0.02% と非常に小さくなる。この理由はシルミンの凝固は skin formation と pasty manner によるものとの中間になり、当て板がアンバーのときは skin formation の形式に近くなり、当て板が黒鉛の場合は pasty manner に近い形式で凝固するので、その凝固形式の違いがこのような実験結果となつたものと思われる。Fig.7 に AZ 91 の铸造収縮と铸造条件の関係を示す。AZ 91 の熱膨張は铸造条件によつて変わらない。この金属の铸造収縮は当て板が黒鉛の場合には室温から固相線の温度までの熱膨張より大きい。これはこの金属が固相線以上でも熱収縮するのに十分な強度を持つこと⁽⁴⁾と、凝固がほぼ完全な pasty

相線付近の熱膨張の変化を示す。

Fig.9 は純亜鉛の铸造収縮と全熱膨張の铸造条件との関係を示す(铸物の直径は 15 mm φ である)。铸造収縮は铸型温度の上昇とともに小さくなるが、これは主として铸型温度の上昇とともに熱膨張が小さくなるためである。熱膨張と铸造条件との関係はその铸造繊維組織との関係で説明出来る(純亜鉛の铸造のときに生ずる柱状晶は結晶の c 軸がチル面に対して平行であり、c 軸の熱膨張係数が a 軸の約 4 倍なので柱状晶が AA' 軸に対してよく発達するほど

- (7) R. W. Ruddle: *The Solidification of Castings*, p.287~367.
- (8) R. W. Ruddle: *The Solidification of Castings*, p.60~63.
- (9) C.S.Barrett: *Structure of Metals*, p.511.

熱膨張は小さくなる⁽⁹⁾。鋳造収縮と熱膨張との差は鋳型温度が低いときは熱膨張が大きい、鋳型温度が 300° および 400°C になると鋳造収縮の方が大きくなる。凝固条件からいって凝固収縮が鋳造収縮に入る可能性はないので、これ

われわれは ZAC #1, 純亜鉛, シルミン(13% Si) および AZ 91 の鋳造収縮とその室温から融点または固相線の温度

Fig. 8 Thermal expansion of AZ91 around solidus line.

は多分熱膨張の異方性によつて生ずる熱応力のためと思われる。そしてこの熱応力のために凝固後の熱収縮と熱膨張測定のための再加熱の熱膨張ではその大きさが違い、熱膨張は凝固後の熱収縮より小さい値を示すため、図のごとき結果となつたと思われる。また当て板がアンバーのときと黒鉛のときとでは温度測定の結果から考えると、その鋳造収縮と熱膨張の差はアンバーの方が大きいはずであるのに実験結果では小さい。これも多分亜鉛の熱膨張の異方性から来るものと思われる。

鋳造温度と鋳造収縮および熱膨張の関係は Fig. 9 (b) のごとくとなつて、やはり熱膨張と鋳造収縮の関係に異常性が見られる。

IV. 結 論

(a)

(b)

Fig. 9 Casting shrinkage of pure Zn.

までの固体における全熱膨張とを測定し、その関係と種々の鋳造条件の関係をしらべつぎの結果を得た。

(1) 金属の鋳造収縮の大きさは、もし中子のような収縮を抑えるものがなければその金属の室温から融点または固相線の温度までの全熱膨張と近い値を示すが、それよりも小さい場合も大きい場合もある。

(2) 鋳造収縮と全熱膨張との差に対して金属の凝固の際の凝固形式および温度分布の影響が大きく、試料内の温度勾配の大きいほどこの差は大きくなり、また“pasty manner”で凝固する場合より“skin formation”で凝固するときの方がこの差が大きくなる。

(3) AZ 91 合金のように固相線以上でも収縮するのに十分な強度を持つ金属の鋳造収縮は室温から固相線の熱膨張より大きくなることがある。