

消失模型鑄造法のすず欠陥および湯流れに関する研究

機 械 金 属 室 國 吉 和 男
琉 球 大 学
エ ネ ル ギ ー 機 械 工 学 科 玉 城 努
琉 球 大 学
エ ネ ル ギ ー 機 械 工 学 科 松 永 慎 太 郎

1. 緒 言

消失模型鑄造法は生産性の高い鑄造法として1980年頃から実用化の取り組みが進み、国内では上下水道用異径管、自動車用部品、機械構造用部品、油圧用部品などのFC及びFCD鑄鉄鑄物からアルミ合金、銅合金、さらに合金鑄鋼まで及んでいる。¹⁾

しかし数々の長所がありながら発泡ポリスチレン (EPS) やポリメチルメタクリレート (PMMA) 等の模型が熱分解で消失する時に発生するガスの問題、塗型特性や砂の充填の問題、さらに空洞鑄型には見られないすず欠陥の対策など検討すべき問題も多い。

消失模型鑄造法の独特の欠陥であるすず欠陥 (残渣欠陥) は発泡ポリスチレン模型の熱分解ガスの組成や量、さらに塗型、減圧度、方案等と関係があると言われている²⁾。

前報までは塗型を中心に、模型厚、材質、堰断面積等の要因について検討し、塗型の種類や、模型厚等の影響が大きいことを明かにした。^{3,4)}

しかし、すず欠陥が試験片の上面下面に一樣に発生したことや減圧度、模型形状の影響などまだ不明な点も多かったため、本報では特性値として溶湯速度とすず欠陥に着目し、単純化した模型を使い試験片形状と試験片厚、堰断面積、注湯温度、減圧度の5要因との関係を $L_{16}(2^5)$ 実験計画法に基づき検討をした結果を報告する。

2. 実験方法

2-1 試験片及び鑄造方案

発泡ポリスチレン (積水化成 牌 LKF ピーズ、40倍) 模型は図1に示すような丸型試験片と四角型試験片さらに丸型試験片と同体積の口型試験片の3種類とした。また同図には溶湯速度測定のための熱電対位置と湯流れの仮想経路を示した。

塗型はシリカベースの水性塗型 (ツチヨシ 牌 VF20) でどぶ漬けとした。乾燥後、試験片と湯口系を接着し組み立てた後、図2のようにフラスコ (400×470×560mm) の乾燥珪砂 (B5号) 中に埋没し、振動テーブルを3軸方向に振動させて砂を充分充填した。

図3に示すように、ビニールで上面を覆ったフラスコを減圧ホースに接続して高周波溶解炉前に設置し、溶湯速度測定用のペンレコーダーを結線し、CEメータで溶湯成分を調整後、溶解炉を傾けて直接鑄込んだ。

2-2 鑄込み条件

高周波溶解炉を用いて銑鉄と鋼屑 (配合比: 約6:4) 10~15kgを溶解し、CE値を4.0%に調整して鑄込んだ。目標材質はFC200とした。

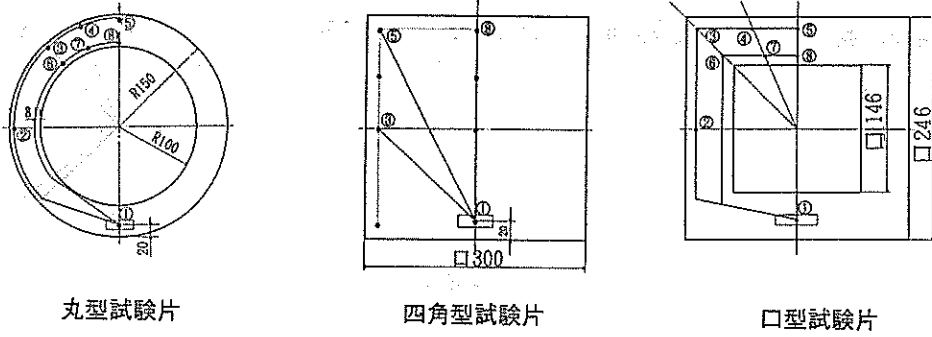


図1 発泡ポリスチレン模型の試験片形状と熱電対位置、湯流れ仮想経路

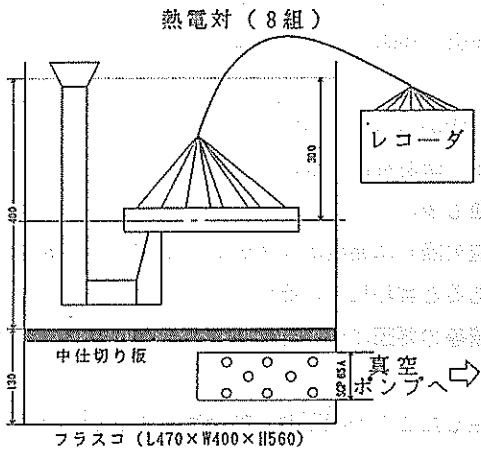


図2 フラスコ内埋め込み状態と鑄造方案

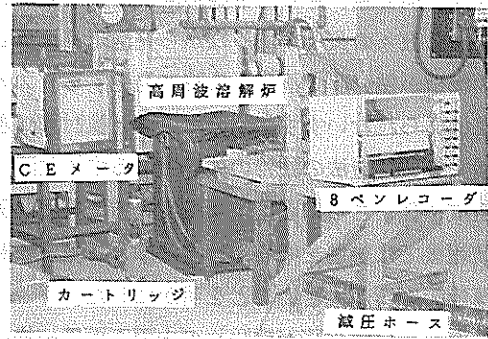


図3 高周波溶解炉とフラスコ設置状況

2-3 実験計画

実験は実験計画法に基づき、因子と水準を表1のように決めて、図5の線点図をもとに、直行配列表 $L_{16}(2^{15})$ に割り付けた。試験片形状の因子は丸型試験片と四角型試験片、丸型試験片と口型試験片の2通りの組合せで実験を2回行った。

2-4 すず欠陥の測定方法

すず欠陥は目視により欠陥部にマーキングをし、それをトレーシングペーパーに写し取った後、OHP用シートにコピーし光電管を用いた葉面積計で定量化してすず欠陥面積とした。また図2に示したように試験片に埋め込んだ熱電対の出力をレコーダーに記録して溶湯速度を計算した。

表1 因子と水準

因子	水準	
	水準1	水準2
A: 形状	丸型	四角(□)型
B: 試験方厚	5 mm	15 mm
C: 堰断面積	150mm ²	450mm ²
D: 注湯温度	1640K	1720K
F: 減圧度	$-0.13 \times 10 \text{ Pa}$	$-0.39 \times 10 \text{ Pa}$

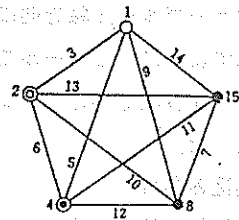


図4 線点図

2-5 溶湯速度の測定方法

図5は記録紙の一例で、チャートスピード120cm/minで記録したものである。熱電対番号1番から各熱電対の立ち上がりまでの時間を横軸長として読み取り、仮想経路の長さから溶湯速度を計算でもとめた。

ペンの立ち上がり部約0.05~0.1sec程度がなだらかなカーブを描いている。この原因として、溶湯前方に高温の分解ガスが先行したり、溶湯先端部にガスが溜るなどの影響が考えられる⁹⁾。しかし前述のごとく非常に短時間であるのでこの時間も含めて、ペンの最初の挙動を溶湯がその点に到達した時間として読み取った。

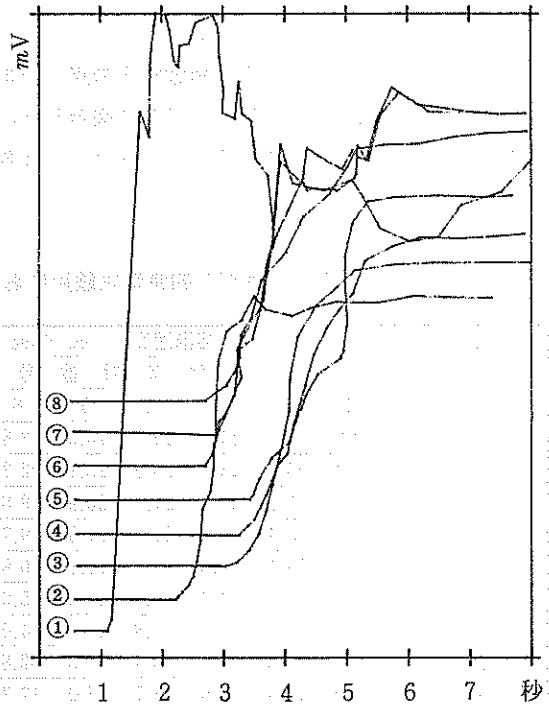


図5 熱電対による溶湯速度測定記録例

3 丸型と四角型試験片の実験結果と考察

試験片形状を丸型と四角型試験片の5水準とし、L₁₆(2¹⁵)実験計画法に基づき表2のように割付けて実験した。

表3に溶湯速度とすす欠陥の面積率を示す。溶湯速度は溶湯到達時間と湯流れ仮想経路から算出し、各測定点毎に整理した。すす欠陥は上面と下面を測定してそれぞれの面積率と合計の面積率で整理したものである。

この測定結果を分散分析した結果が表4である。溶湯速度について、丸型試験片と四角型試験片の測定点の位置が対応しているのは、丸型のNa2、Na3、Na5の各点に対しそれぞれ、四角型のNa3、Na5、Na8の3組と考え、これらの点を対応させて分散分析を行った。

またすす欠陥は上面、下面と合計の面積率についてそれぞれ分散分析をし、まとめて整理した。危険率1%で有意なものを(★★)、危険率5%で有意なものを(★)で示した。図6の(a)~(f)と図7の(g)~(l)は各要因に対する溶湯速度とすす欠陥特性値の母平均推定値をそれぞれ図示した

実験 No.	形状	試験片厚 (mm)	堰断面積 (mm ²)	注湯温度 (K)	減圧度 (Pa)
1	丸型	5	150	1640	-0.13×10
2	丸型	5	150	1720	-0.39×10
3	丸型	5	450	1640	-0.39×10
4	丸型	5	450	1720	-0.13×10
5	丸型	15	150	1640	-0.39×10
6	丸型	15	150	1720	-0.13×10
7	丸型	15	450	1640	-0.13×10
8	丸型	15	450	1720	-0.39×10
9	四角型 □型	5	150	1640	-0.39×10
10	四角型 □型	5	150	1720	-0.13×10
11	四角型 □型	5	450	1640	-0.13×10
12	四角型 □型	5	450	1720	-0.39×10
13	四角型 □型	15	150	1640	-0.13×10
14	四角型 □型	15	150	1720	-0.39×10
15	四角型 □型	15	450	1640	-0.39×10
16	四角型 □型	15	450	1720	-0.13×10

表2 L₁₆(2¹⁵) 実験割付表

ものである。

溶湯速度特性は丸型No.3と四角型No.5の点、つまり試験片中央から左45度方向の奥の点に注目し、またすず欠陥は試験片の上面に注目して図示した。

表4の分散分析表中の小文字アルファベットは各母平均推定図と対応している。

表3 丸型と四角型試験片におけ溶湯速度とすず欠陥面積率

実験 No	溶湯速度 cm/sec								すず欠陥 %	
	熱電対番号								上下面	合計
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	0.0	13.9	14.7	14.7	15.0	12.6	12.2	12.5	0.09 0.17	0.13
2	0.0	26.0	23.7	25.5	25.1	22.2	21.0	20.7	0.13 0.00	0.07
3	0.0	21.5	22.6	21.9	20.9	18.8	17.1	16.5	0.07 0.00	0.04
4	0.0	15.4	23.7	21.9	21.9	19.7	20.6	18.5	1.20 2.20	1.70
5	0.0	19.1	16.8	18.4	19.1	16.9	17.1	16.9	4.00 5.00	4.50
6	0.0	13.4	14.7	15.6	17.5	15.0	15.2	15.8	6.95 4.29	5.62
7	0.0	15.4	16.9	15.3	15.7	14.0	17.6	13.2	0.00 7.27	3.63
8	0.0	30.8	27.3	29.4	31.3	32.8	26.5	30.2	4.89 0.26	2.57
9	0.0	16.9	16.6	16.7	17.0	17.3	15.4	15.8	0.43 0.00	0.22
10	0.0	14.5	13.1	13.7	14.2	15.3	14.1	15.1	0.28 0.00	0.14
11	0.0	18.0	15.6	15.4	15.7	15.3	14.3	14.0	0.12 0.00	0.06
12	0.0	24.6	12.9	15.6	16.5	13.3	14.9	9.9	1.65 0.08	0.87
13	0.0	8.0	6.7	7.6	8.3	7.0	8.1	6.3	8.86 5.39	7.12
14	0.0	19.3	15.6	13.7	16.7	8.4	9.2	10.6	25.23 0.00	12.61
15	0.0	19.3	15.6	13.7	16.7	8.4	9.2	10.6	0.48 0.53	0.50
16	0.0	27.0	16.3	11.4	13.0	12.4	13.3	12.2	24.61 0.00	12.31

表4 丸型と四角型試験片における分散分析表

要因	溶湯速度				すず欠陥		
	熱電対番号				上面	下面	合計
	No.2 (丸型) No.3 (四角型)	No.3 (丸型) No.5 (四角型)	No.5 (丸型) No.8 (四角型)				
A: 形状	★	(a)★★	★★	(g)★	★★		
B: 試験片厚	—	(b)★	—	(h)★★	★	★★	
C: 堰断面積	—	(c)★	—	—	—	—	
D: 注湯温度	—	(d)★	—	(i)★★	—	—	
F: 減圧度	★	(e)★★	—	—	—	—	
A*B	—	—	—	(j)★	★	—	
A*C	—	(f)★	—	—	—	—	
A*D	—	—	—	(k)★	—	—	
B*C	—	—	—	—	—	—	
B*D	—	—	—	(l)★	—	—	
C*D	—	—	—	—	—	—	
D*F	—	—	—	—	—	—	

★★: 危険率1%で有意
★: 危険率5%で有意
—: 誤差にプール

3-1 丸型と四角型試験片の湯流れについて

溶湯速度に対して、形状と減圧度が高度な有意差を示した。

図6-(a)に形状に対する溶湯速度の母平均推定図を示す。丸型試験片の溶湯速度が大きい傾向を示している。これは消失模型鑄造法における湯流れがほぼ放射状に広がって流れると考えられることから^{6,7)}、本実験では図8のように溶湯が広がって充満すると考えられ、断面積は明かに丸型試験片が小さく、溶湯速度が大きくなることが理解できる。

図6-(e)に高度な有意差を示した減圧度に対する母平均推定値を示す。減圧度を高めるとEPSの熱分解により発生したガスが強制的に排出されるため湯流れに対する抵抗が減少し、その分溶湯速度が大きくなる傾向を示していると考えられる。

また図6-(b)(c)(d)は5%の危険率で有意差を示した因子の母平均推定図で、試験片は薄く、堰断面積は大きく、注湯温度は高いほうが溶湯速度は大きくなる傾向を示している。

図6-(f)は5%の危険率で有意となった形状と堰断面積の交互作用の母平均推定図で堰断面積の大きい丸型試験片で溶湯速度が大きくなっている。

3-2 丸型と四角型試験片のすず欠陥

すず欠陥は全般に試験片上面に多く発生し、試験片厚と注湯温度に高度な有意差を示した。

図7-(h)に示すように試験片厚については前報⁹⁾の時よりも高度な有意差を示し、厚いとすず欠陥が発生し易く、また図7-(i)では注湯温度が高いとすず欠陥が発生し易い傾向を示している。

そのほか図7-(g)(j)(k)(l)は5%の危険率で有意となった単独因子と交互作用因子の母平均推定図である。試験片形状は四角型で厚く、注湯温度は高いほうがすず欠陥が発生し易い傾向を示している。

3-3 溶湯速度とすず欠陥面積率の関係

溶湯速度の大小がすずの巻き込み、すなわちすず欠陥を誘発すると考えられるため、表3の溶湯速度を検討した点(丸型でNa3、四角型でNa5)での溶湯速度と、上面のすず欠陥面積率との関係を検討した。

その結果を図9-(a)に示す。比較のため丸型と口型試験片における溶湯速度とすず欠陥の関係を図9-(b)(後述する)に示してある。

部分的に見ると溶湯速度が大きくなるとすず欠陥が減少するように見えるが、溶湯速度がほぼ15 cm/sと同じでありながらすず欠陥が0%に近いものと、25%程度のものがあるなど、全体的には明確な関係は得られなかった。

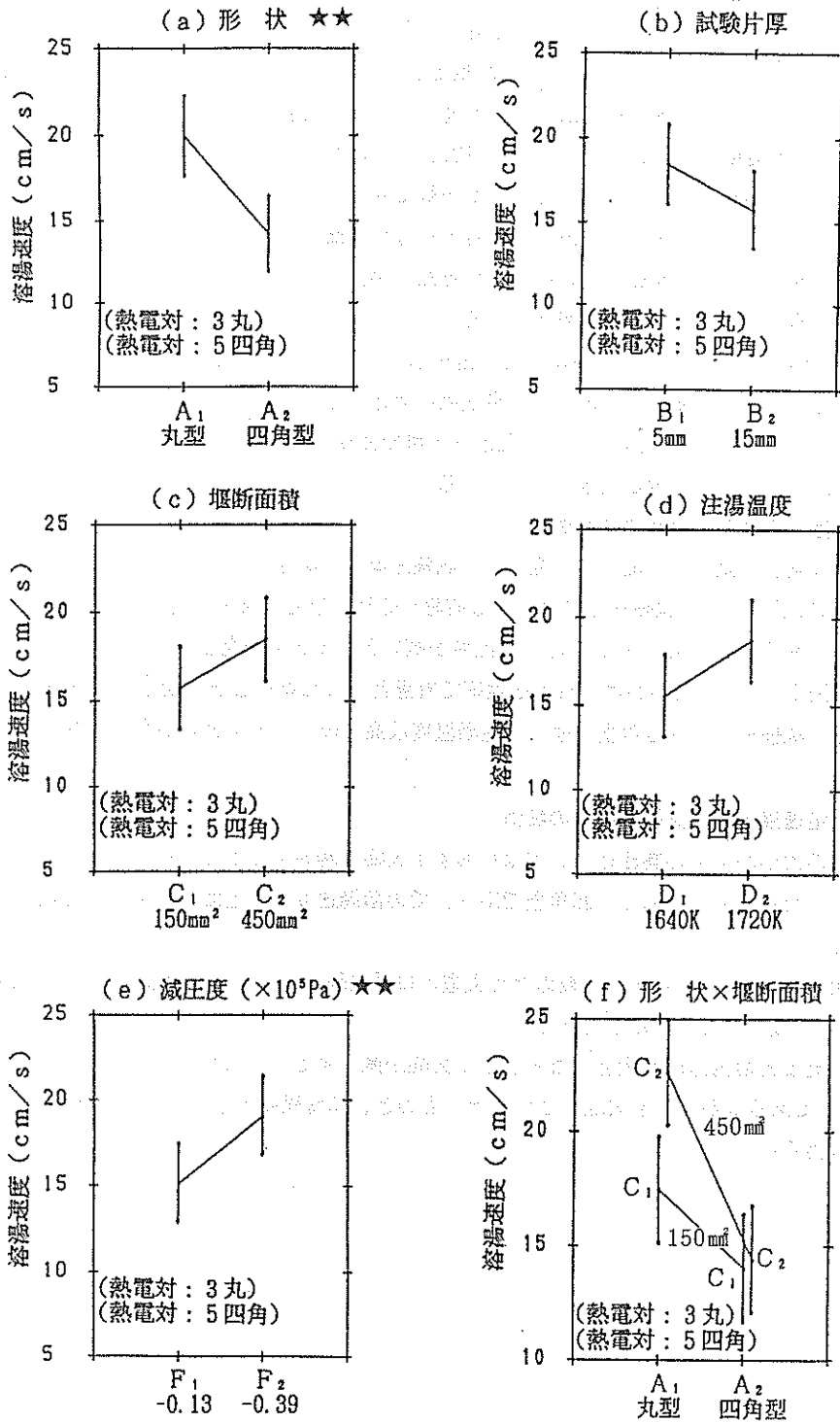


図6 丸型と四角型試験片における各要因と溶湯速度の母平均推定

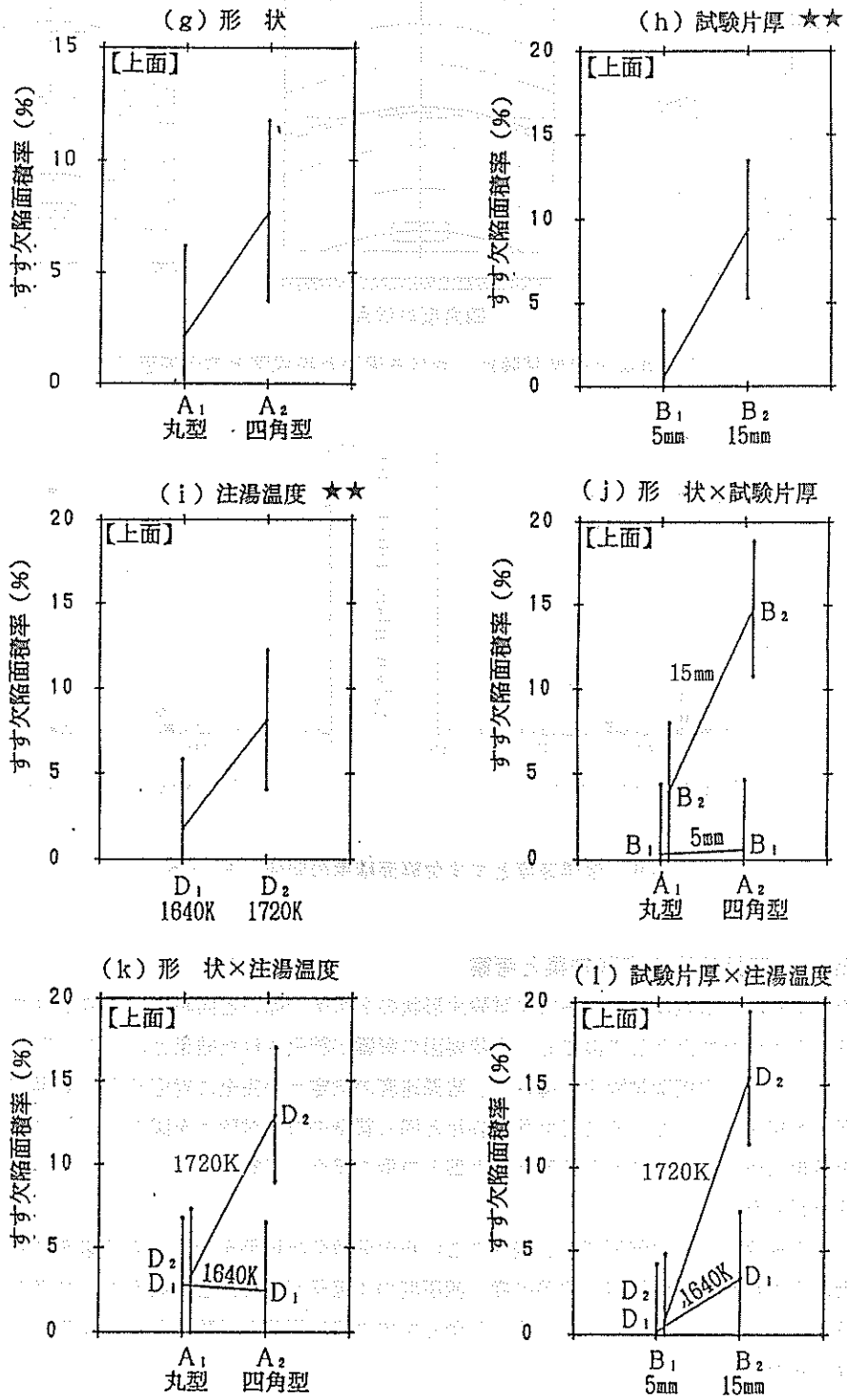


図7 丸型と四角型試験片における各要因とすず欠陥面積率の母平均推定

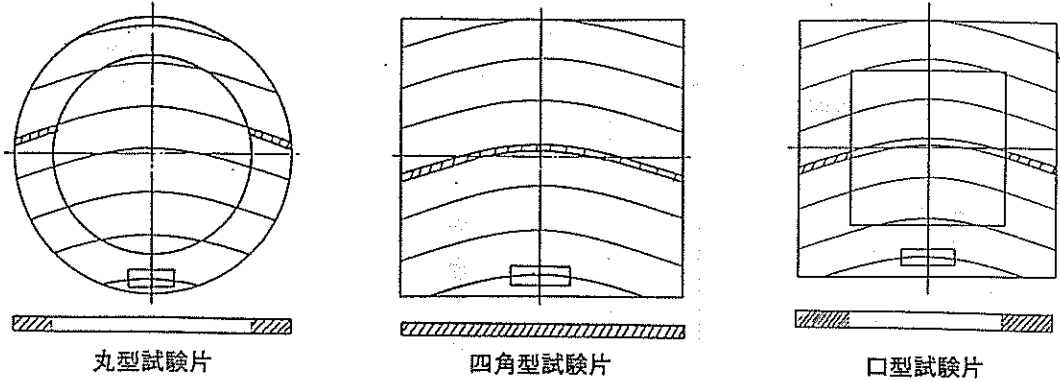


図8 丸型と口型試験片における湯流れ模式図と溶湯断面図

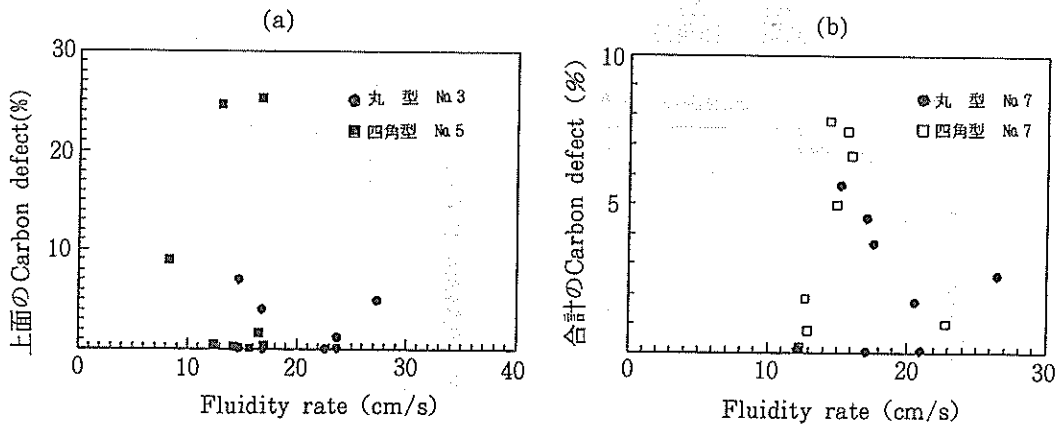


図9 溶湯速度とすす欠陥面積率の関係 (a)~(b)

4 丸型と口型試験片の実験結果と考察

前述の丸型と四角型試験片の実験では試験片形状の2水準の違いと同時に、発泡ポリスチレンの質量の違いも隠れた要因として混在し、形状要因の影響が誇張された結果となっている。

またドーナツ型と平板型試験片の違いで、溶湯速度の測定点が完全に対応せず、溶湯速度の分析も3カ所しか出来なかった。そこで丸型試験片と同じ質量の口型試験片を図1のように決めて形状2水準を設定し直し、表2のとおり形状を丸型と口型の組合せで割付けて、 $L_{16}(2^{15})$ 実験計画法による実験を行った。

表5に溶湯速度とすす欠陥面積率、表6にこれらの分散分析結果を示す。溶湯速度の特性値に対し5要因のうち形状、堰断面積、注湯温度、減圧度の4因子がほとんどの測定点で有意となり、前実験より因子の効果が明確になっている。しかしすす欠陥は形状と試験片厚以外は明確な有意差はみられなかった。

図10-(a)~(g)、図11-(h)~(k)は各要因に対する溶湯速度とすす欠陥特性値の母平均推定値を図示したものである。溶湯速度はNo.7の測定点に注目し、すす欠陥は試験片の上面下面の合計%に注目して図示してある。表6の分散分析表中の小文字アルファベットは各母平均推定図と対応している。

4-1 丸型と口型試験片の湯流れ

溶湯速度は形状、堰断面積、注湯温度、減圧度の各要因と高度の有意差を示したので、図10-(a)(b)(c)(d)にこれらの母平均推定を示した。

表5 丸型と口型試験片における溶湯速度とすす欠陥面積率

実験 No.	溶湯速度 cm/sec								すす欠陥%	
	熱電対番号								上下面	合計
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	0.0	13.9	14.7	14.7	15.0	12.6	12.2	12.5	0.09 0.17	0.13
2	0.0	26.0	23.7	25.5	25.1	22.2	21.0	20.7	0.13 0.00	0.07
3	0.0	21.5	22.6	21.9	20.9	18.8	17.1	16.5	0.07 0.00	0.04
4	0.0	15.4	23.7	21.9	21.9	19.7	20.6	18.5	1.20 2.20	1.70
5	0.0	19.1	16.8	18.4	19.1	16.9	17.1	16.9	4.00 5.00	4.50
6	0.0	13.4	14.7	15.6	17.5	15.0	15.2	15.8	6.95 4.29	5.62
7	0.0	15.4	16.9	15.3	15.7	14.0	17.6	13.2	0.00 7.27	3.63
8	0.0	30.8	27.3	29.4	31.3	32.8	26.5	30.2	4.89 0.26	2.57
9	0.0	12.4	14.4	16.4	17.4	12.0	12.9	14.1	0.93 0.59	0.76
10	0.0	16.2	14.7	16.4	18.3	13.0	12.3	14.6	0.41 0.00	0.20
11	0.0	16.0	15.2	16.4	16.3	13.2	12.7	12.1	3.00 0.65	1.82
12	0.0	26.2	23.2	27.2	27.7	21.9	22.8	22.1	1.96 0.00	0.98
13	0.0	15.6	13.8	16.9	18.2	13.1	14.4	14.0	15.50 0.00	7.75
14	0.0	15.5	15.5	21.1	20.9	13.8	15.7	16.2	14.83 0.00	7.42
15	0.0	16.9	17.9	19.0	23.9	17.2	16.0	18.3	13.22 0.00	6.61
16	0.0	13.5	13.5	18.5	17.8	14.7	14.9	16.0	1.41 8.53	4.97

表6 丸型と口型試験片における分散分析表

要因	溶湯速度							すす欠陥		
	熱電対番号							上面	下面	合計
	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7	No 8			
A:形状		★★		—	★	(a)★★		★	—	(h)★★
B:試験片厚	—	★	—	—	—	—	—	★★	★	(i)★★
C:堰断面積		★★	★★	★	★	(b)★★	★		—	—
D:注湯温度		★★	★★	★★	★	(c)★★	★★	—	—	—
F:減圧度	★★	★★	★★	★★	★★	(d)★★	★★	—	—	—
A*B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(j)★
A*C	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A*D	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B*C	—	—	—	—	—	—	—	★	—	(k)★★
B*D	—	—	—	—	—	(e)★	—	—	—	—
C*D	—	—	—	—	—	(f)★	—	—	—	—
D*F	★		★	—	—	(g)★★	—	—	—	—

★★:危険率1%で有意
★:危険率5%で有意
—:誤差にプール

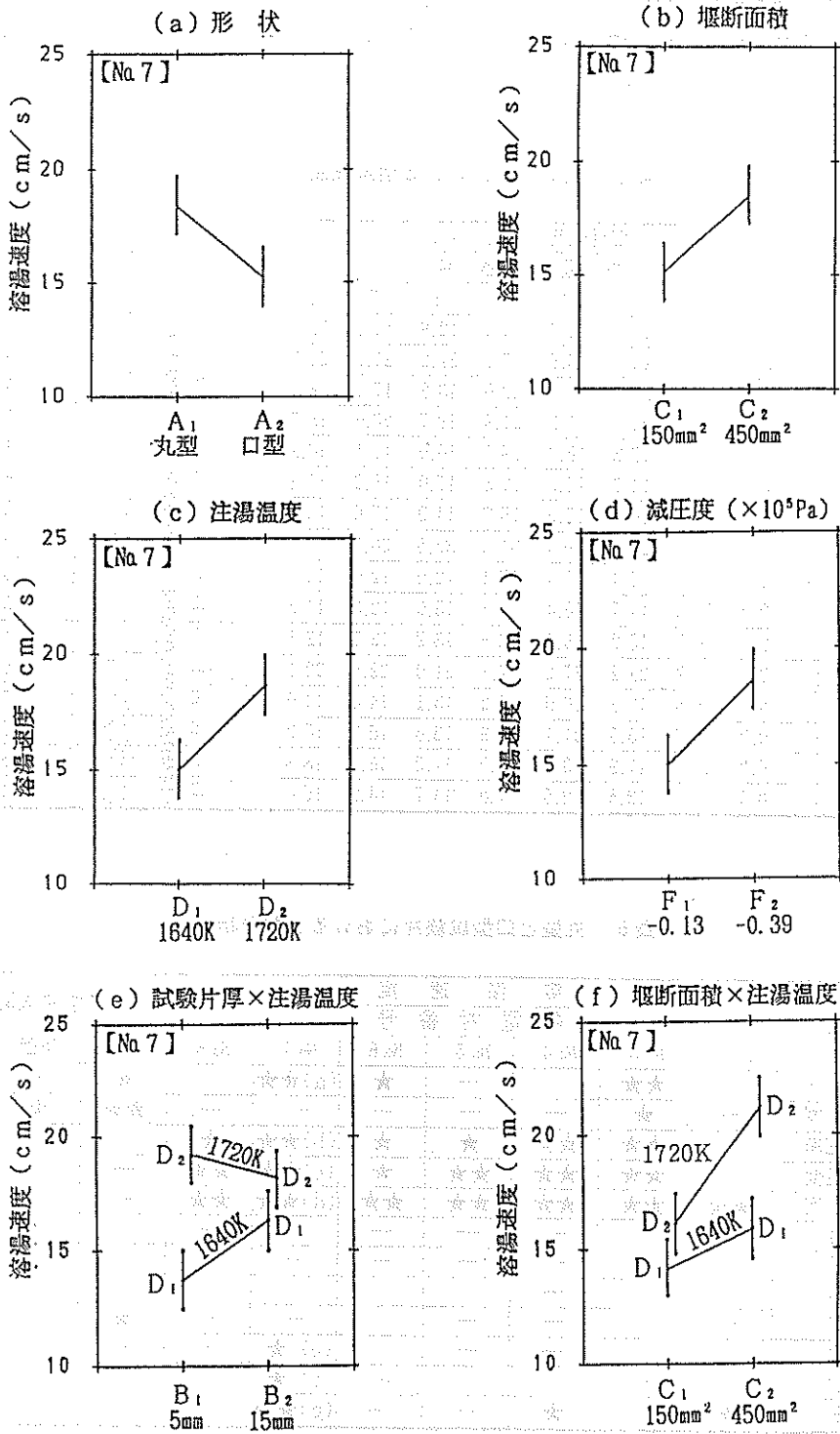


図10 丸型と口型試験片における各要因と溶湯速度の母平均推定

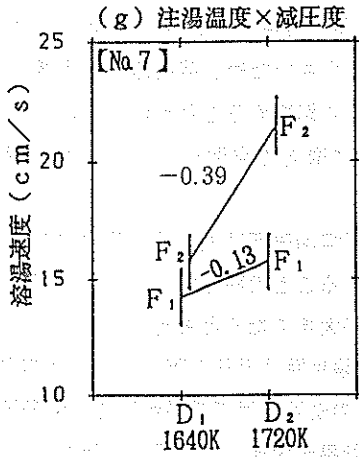


図10 丸型と口型試験片における各要因と溶湯速度の母平均推定

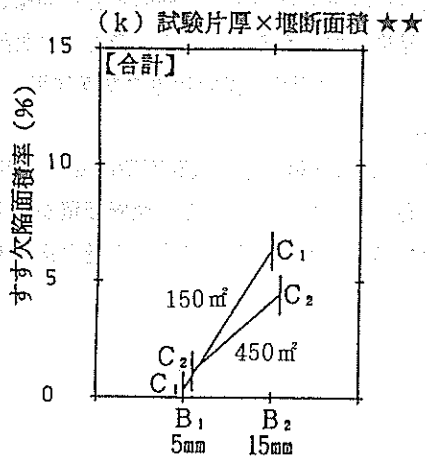
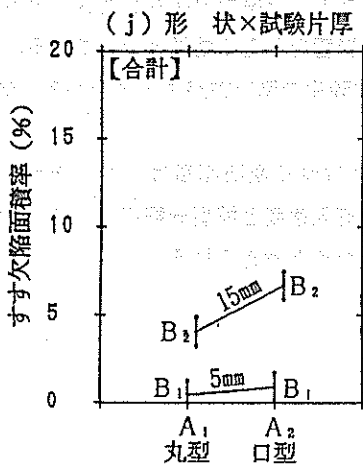
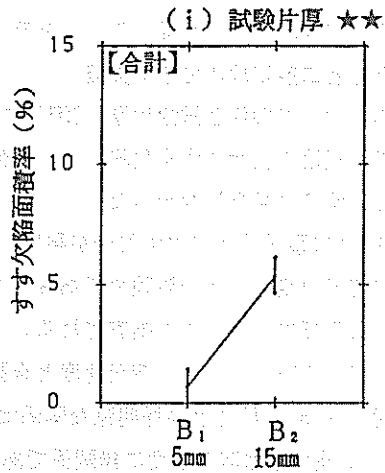
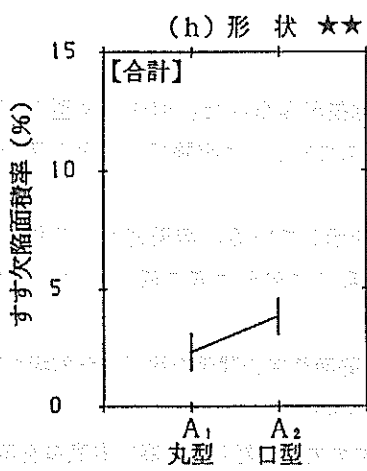


図11 各要因とすす欠陥面積率の母平均推定

図10-(a)から丸型試験片の溶湯速度が大きくなっている。溶湯の断面積が図8のようにほぼ等しくても、丸型試験片のほうが湯流れに対する形状抵抗が小さいため、溶湯速度が大きくなると考えられ、試験片厚より試験片の形状が溶湯速度に対し大きく影響することがわかる。

図10-(b)から堰断面積が大きいと溶湯流入量が比例的に増えて発泡ポリスチレン分解能力も高くなり、溶湯速度も大きくなると考えられる。

図10-(c)(d)から溶湯温度は高く、減圧度の高いほうが溶湯速度は大きくなる傾向を示している。これは温度が高いと溶湯の粘性が低下することと、減圧することで熱分解したガスの排出がスムーズに行われ、ガス圧抵抗値が小さくなることで溶湯速度が大きくなると考えられる。

図10-(e)(f)(g)は交互作用の母平均推定値である。試験片厚は単独の因子としては溶湯速度にほとんど影響を与えないが、図10-(e)のように溶湯温度との交互作用で効果が出て、溶湯温度の高いほうが溶湯速度を高め、試験片の薄いほうで溶湯温度の効果が大きくなる傾向を示している。

図10-(f)は堰断面積は大きく、溶湯温度は高いほうが溶湯速度は大きく、堰断面の大きいところで溶湯温度の効果も大きくなることを示している。

図10-(g)は溶湯温度は高く、減圧度は大きいほうが溶湯速度を増し、温度の高い溶湯で減圧することが溶湯速度に大きく影響することを示している。

4-2 丸型と口型試験片のすず欠陥

すず欠陥に対して形状と試験片厚の2因子に高度な有意差がみられた。前述の丸型と四角型試験片の実験では試験片上面にすず欠陥が多く発生していたのに対し、本実験では上面下面のすず欠陥発生に著しい偏りは見られなかった。

図11-(h)は口型試験片にすず欠陥が発生し易いことを示している。溶湯速度の分析において口型試験片が溶湯速度の小さい試験片であったことから、乱流や溶湯温度の低下ですずを巻き込み、欠陥が多くなる傾向を示したと推察される。

しかし、表5のNo.7に対して溶湯速度と合計のすず欠陥面積率の関係を検討した前掲の図9-(b)からは、図9-(a)の場合と同様明瞭な関係はみられなかった。

図11-(i)試験片厚は溶湯速度に無関係であったが、すず欠陥に対しては高い有意差を示した。これは丸型と四角型試験片の実験の場合と同様、発泡ポリスチレン模型の厚さが大きいと発生するすずの絶対量が増加することから、最もすず欠陥に大きい影響を与える結果となっている。

図11-(j)では形状と試験片厚の交互作用で、口型で試験片の厚い方がすず欠陥が多い傾向を示している。

図11-(k)は試験片厚と堰断面積の交互作用で、試験片は厚く堰断面積は小さい方がすず欠陥が発生し易いことを示している。堰断面積が小さいと溶湯流入速度と模型分解速度が遅くなり、逆に溶湯冷却速度が大きくなってすずを巻き込み易くなったためと考えられる。

5 結 言

消失模型鑄造法における溶湯速度とすず欠陥について試験片形状、試験片厚、堰断面積、注湯温度、減圧度の5因子を選択し、丸型と四角型試験片の組合せ及び丸型と口型試験片の組合せでそれぞれ $L_{16}(2^5)$ 実験計画法に基づいて検討した。得られた結果を以下に要約する。

- 1) 丸型と四角型試験片の組合せより、丸型と口型試験片の組合せの方が因子と特性値の関係が明瞭であった。
- 2) 溶湯速度に対し試験片形状、堰断面積、注湯温度、減圧度の4因子の効果が大きい。
すなわち形状は丸型で、堰断面積は大きく、注湯温度は高く、減圧度は大きい方が溶湯速度は大きくなる。
- 3) 試験片厚と溶湯速度は分散分析表4、表6で見るとおり測定点の一部で5%の危険率で有意となったが、全体的に有意差はほとんどなかった。
- 4) すず欠陥に対し試験片形状と試験片厚の主効果が大きく、さらに試験片厚と堰断面積の交互作用の影響が大きい。すなわち試験片形状は丸型で、試験片の薄い方が、また交互作用では試験片は薄く、堰断面積は大きい方がすず欠陥は少ない。
- 5) 注湯温度はすず欠陥に対し、丸型と四角型試験片の実験において一部1%の危険率で有意となったが、丸型と口型試験片の実験では有意差は認められなかった。全体的には注湯温度はすず欠陥に対し影響を及ぼさないとみるのが妥当であろう。
- 6) 溶湯速度の大小が巻き込みなどをおこしすず欠陥を誘発する可能性を検討したが明確な関係は得られなかった。

最後に本研究を遂行するに当り、ご指導ご助言を下された琉球大学エネルギー機械工学科助教授系村昌祐先生に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山本、三宅：JACT NEWS、1991、7
- 2) 阪口、二宮、野崎、加藤、小林、太田
：「量産フルモールド法に関する研究」
工業技術院名古屋工業技術試験所、平成2年10月
- 3) 國吉、知花、米須：沖工試業務報告、No17、1989
- 4) 國吉、知花、米須：沖工試業務報告、No18、1990
- 5) 小林、糟谷：日本鑄物協会第120回全国講演大会講演概要集(1992)、No59
- 6) 直井、渡辺、荒井、南和、千々岩：鑄物、62(1990)、4、270
- 7) 阪口：鑄物、63(1991)、5、488

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。