

# 鑄造金型用塗型の作業条件設定

## Optimization of Coating Condition for permanent Mold

鈴木孝信 Takanobu Suzuki

●鑄造技術室ダイカスト技術グループ

### 1 はじめに

当社では水冷、空冷の両タイプのモーターサイクル用アルミニウムシリンダーヘッド約70種類を主に低圧鑄造法にて製造している。

低圧鑄造法における鑄造欠陥としては図1に示すように空冷フィン先端部などの薄肉部に発生する湯廻り不良，指向性凝固のくずれにより製品内部に発生する引巣不良及び中子不良が鑄造不良の60%以上を占めている。

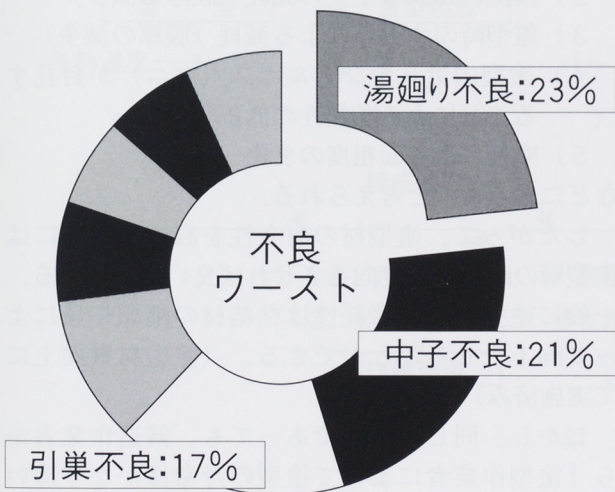


図1 低圧鑄造のワースト不良項目

低圧鑄造の不良低減活動として，この3大不良項目の対策を行っている。湯廻り不良についてはこれまでの活動である『ストック内の介在物除去』や『塗型材質向上』などにより不良の平均レベルは著しく低下した。しかし，図2に示すように依然鑄造ロット間のバラツキが見られる。

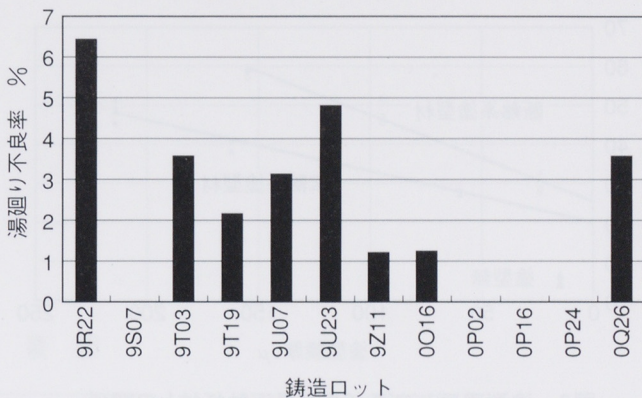


図2 自動車用吸気管の鑄造ロット毎の湯廻り不良の推移

さらに不良低減を図るには，鑄造をシステムとして安定させるために品質のバラツキ要因の把握と低減が必要である。

そこで今回，湯廻り不良に対するバラツキ要因の一つである鑄造金型に施している塗型の作業方法を基本から見直すことにより，塗型性能のバラツキを大幅に改善することができたので，その内容について述べる。

### 2 テーマの選定理由

#### 2.1 塗型の役割

一般にアルミニウム合金の金型鑄造では，金型のキャビティ表面に塗型材を塗布して鑄造を行っている。この塗型の役割は

- 1) 断熱効果によって溶湯の冷却速度を低下させ，湯廻り不良や引巣欠陥を防止する。
- 2) 溶湯による金型の熱衝撃，熱応力の緩和および湯流れによる侵食から金型を保護する。
- 3) 鑄肌を整え，鑄物の離型性をよくし，製品が金型にとられる“カジリ”等を防止する。

など，品質と生産性を確保するために重要な役割を持っている。したがって，湯廻り性向上に対し塗型膜には高い断熱性と耐久性が要求される。



## 2.2 塗型剤の断熱性

図3は塗型膜厚と溶湯／金型間の熱抵抗との関係について示したものである。塗型材には伝熱系塗型材と断熱系塗型材がある。両者とも膜厚の増加と共に熱抵抗は増加するが、今回対象となる断熱系塗型材はその影響が大きい。

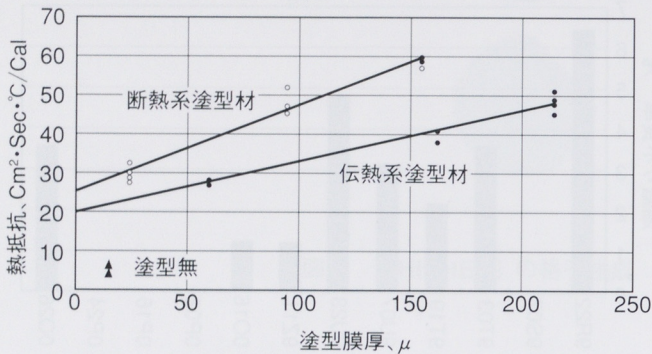


図3 塗型膜厚と溶湯／金型界面熱抵抗との関係

熱抵抗Rは次式で表すことができる。

$$R = 1/h + L/\lambda \quad (1)$$

ここで、

h：溶湯と金型間の熱伝達係数

L：塗型膜厚

λ：塗型層の見かけの熱伝導率

である。

したがって、図3は表1のようになる。

表1 塗型層の熱抵抗

塗型材	熱伝達係数 cal/(cm²·sec·°C)	見かけの熱伝導率 cal/(cm·sec·°C)
断熱系	0.039	0.00046
伝熱系	0.050	0.00078
塗型無し	0.200	—

ここで、塗型基材の熱伝導率は0.04 cal/(cm·sec·°C)程度であるので、塗型層の見かけの熱伝導率はかなり気孔を含んでいるものと考えられる。また、塗型が無い金型での熱伝達率に比べ塗型を施すことでその値は小さくなっている。これは面粗度あるいは漏れ性の違いによるものと思われる。

したがって、塗型材の断熱性は塗型基材の熱伝導率、塗型層の気孔率、塗型層の厚さおよび塗型表面の面粗度が影響している。熱伝導率については塗型材質向上にて既に実施済みであり、今回は気孔率と面粗度が対象となる。

## 2.3 塗型材の耐久性

鑄造時における塗型材の断熱性の劣化は

- 1) 熱、機械的衝撃による塗型の剥離
- 2) 湯流れによる塗型の減耗（膜厚の減少）
- 3) 離型時のすべりによる減耗（膜厚の減少）
- 4) 塗型内気孔をシェルガス（ヤニ）が封孔することによる断熱性の低下
- 5) 摩耗による面粗度の変化

などによるものと考えられる。

したがって、塗型材の耐久性を高めるためには塗型層の耐摩耗性を向上させれば良いことになる。一般に塗型材の耐摩耗性は粘結材の種類や量によって向上させることができる。（塗型材質向上にて実施済み）

しかし、同じ塗型材であっても、鑄造作業から『塗型作業によって塗型の寿命はかなり違いがある。』という話をよく耳にすることもあり、塗型材の耐摩耗性は塗型作業の条件によってもかなり影響を受けそうである。しかし、塗型作業は各社とも熟練工が行なうものとして、塗型材の耐摩耗性に関する研究報告はほとんどない。

そこで今回、塗型材の耐摩耗性および密着性に及ぼす塗型作業条件の影響について品質工学手法を用いて実験を行い、塗型作業の最適化を図った。



3 実験計画

3.1 塗型工程の概略と要因の洗い出し

鑄造が終わった金型は塗型職場に運ばれ

- 1) 金型の分解
- 2) エアーブラスト処理（金型の清浄化）
- 3) 金型の予熱
- 4) 塗型施工作業  
（吹き付け作業標準による）
- 5) 金型の組付け

の順に塗型作業が行われる。

これら工程より塗型材の耐摩耗性に影響を及ぼすと思われる要因を選出し、特性要因図を作成した（図4）。

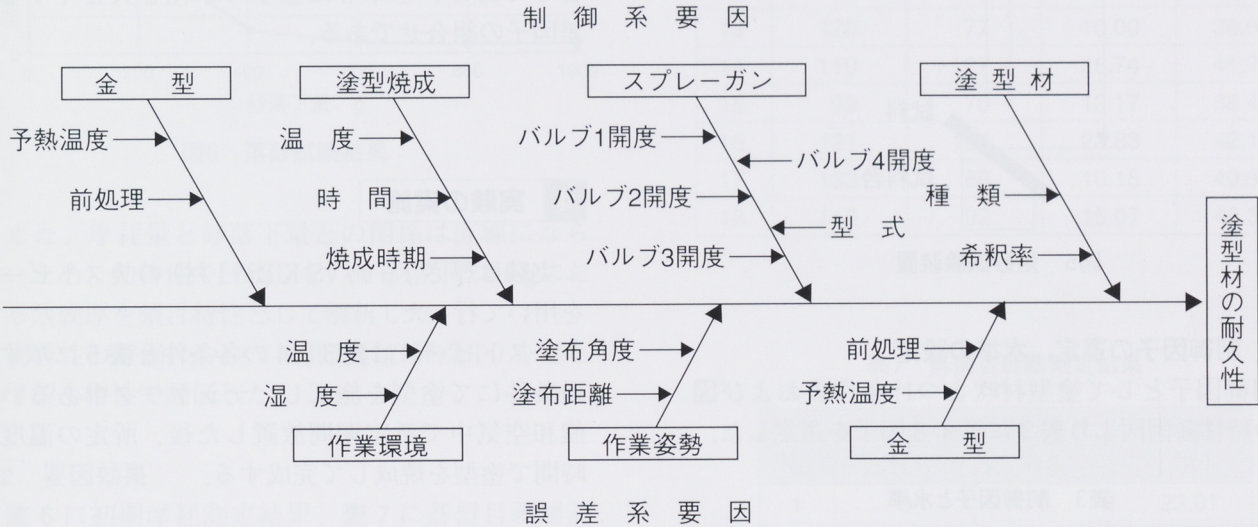


図4 塗型材の耐久性に及ぼす影響因子

3.2 評価特性と計測方法

密着性の評価には JIS - K5400 塗料一般試験方法に記載されている碁盤目試験カッターガイドを用いて室温にて塗型面に碁盤目状の切り傷をつけた後、電気炉中で 350℃×15 分保持後直ちに水中に急冷して熱衝撃を加え、塗型面に現れた碁盤目状の傷の状態を観察し表 2 に示す評価基準により評価点数を求めた。

表2 碁盤目試験の評価基準

評価 点数	傷 の 状 態
10	切り傷の1本ごとが、細くて両側が滑らかで、切り傷の交点と正方形の一目一目にはがれがない。
8	切り傷の交点にわずかなはがれが有って、正方形の一目一目にはがれがなく、欠損部の面積は全正方形面積の5%以内。
6	切り傷の両側と交点とにはがれがあって、欠損部の面積は全正方形面積の5～15%。
4	切り傷によるはがれの幅が広く、欠損部の面積は全正方形面積の15～35%。
2	切り傷によるはがれの幅は4点よりも広く、欠損部の面積は全正方形面積の35%～65%
0	はがれの面積は、全正方形面積の65%以上



耐摩耗性の評価には落砂試験装置を用いた(図5)。試験は5号珪砂を高さ700mmから室温のテストピースに200gずつ落下させ、その際の摩耗量を膜厚計にて測定し砂落下量と摩耗量の関係を求めた。

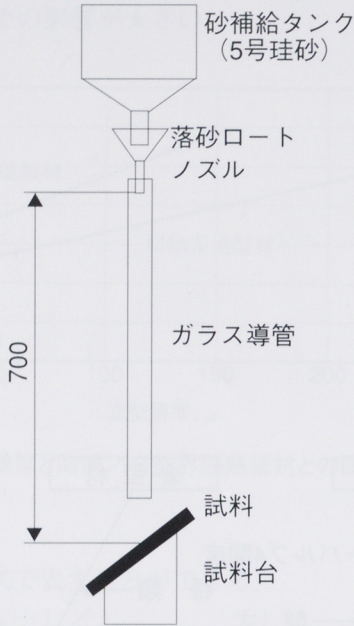


図5 落砂試験装置

3.3 制御因子の選定，水準の設定

制御因子として塗型材吹きつけ条件表および図4の特性要因図より表3に示す8因子を選定した。

表3 制御因子と水準

No.	要 因	水準1	水準2	水準3
A	金型前処理	予熱前	予熱後	—
B	下塗り条件	条件1	条件2	条件3
C	バルブ1開度	少ない	普通	多い
D	バルブ2開度	少ない	普通	多い
E	希釈率	濃い	普通	希い
F	焼成温度	低い	普通	高い
G	焼成時間	短い	普通	長い
H	焼成前放置時間	無し	1日	1週

本要因、水準は本塗りの条件を示す

水準値はバルブ2開度については条件表の公差範囲とし、その他は塗型作業者の現行作業範囲とした。

3.4 誤差因子の選定，水準の設定

誤差因子として表4に示す3因子を選定した。

表4 誤差因子と水準

誤 差 因 子	水準1	水準2
金 型 温 度	低目	高目
放置時湿度	デシケータ中	飽和空气中
塗 布 距 離	近い	遠い

塗型施工時の金型温度は塗型材吹き付け条件表で規定しているが、制御できないためここでは誤差因子として取り上げた。放置時湿度は梅雨時と冬の湿度の違いを極端に考慮した。塗布距離は金型の凹凸を考慮した。

水準1は塗型の摩耗を小さくする誤差因子の組合せであり、水準2は塗型の摩耗を大きくする誤差因子の組合せである。

4 実験の実施

実験は厚さ10mm(SKD61材)のテストピースを用いて行った。

テストピースは表3、4の各条件と表5に示す共通条件にて塗型を施工し、デシケータ中あるいは飽和空气中で所定期間放置した後、所定の温度、時間で塗型を焼成して完成する。

表5 共通条件

固 定 因 子	水 準 値
バルブ3開度	全開
バルブ4開度	全閉
塗布角度	90°
塗型剤	YM-11
下塗り膜厚	0.02mm
本塗り膜厚	0.15mm(合計)
スプレーガン	現行品

このテストピースを3、2項に示す落砂試験および砦盤目試験に供試した。



5 実験データの解析

5.1 実験結果

図 6 に 36 個のテストピースのなかで摩耗の最も多かった試料と最も少なかった試料のデータを示す。YM-11 という同じ塗型材を用いても、塗布条件によりこれだけの差が生じるということがわかった。

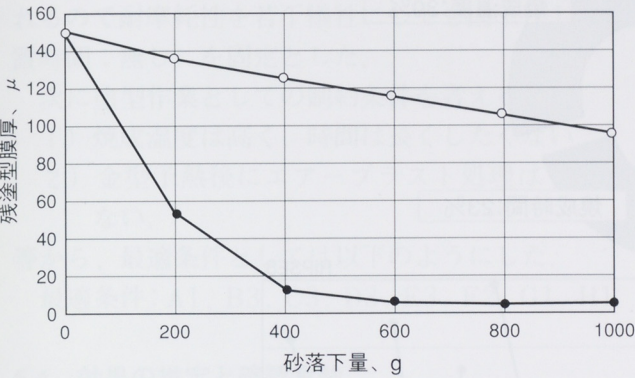


図6 落砂試験結果

また、摩耗量と砂落下量との関係は直線にならないため、動特性で評価しないで砂落下 200 g における残膜厚を望目特性として解析した。

密着性の評価については碁盤目の評点 10 を零として望小特性で評価した。

5.2 要因効果

表 6 に初期摩耗測定結果、表 7 に碁盤目剥離測定結果を示す。

表6 初期摩耗測定結果

No	200g後膜厚(μ)		SN比 (db)	感度 (db)
	N 1	N 2		
1	106	55	6.25	37.66
2	117	74	9.72	39.37
3	128	138	25.48	42.47
4	92	82	21.79	38.78
5	126	118	26.67	41.72
6	116	75	10.15	39.40
7	111	86	14.85	39.80
8	117	102	20.26	40.77
9	141	86	9.04	40.84
10	131	94	12.55	40.90
11	120	108	22.55	41.13
12	145	108	13.59	41.95
13	120	77	10.00	39.66
14	119	127	26.74	41.79
15	99	70	12.17	38.41
16	121	134	22.83	42.10
17	133	86	10.15	40.58
18	118	92	15.07	40.36

表7 碁盤目剥離測定結果

No	10-碁盤目評点		SN比 (db)
	N 1	N 2	
1	0	0	23.01
2	0	6	-12.55
3	0	8	-15.05
4	0	0	23.01
5	0	0	23.01
6	0	6	-12.55
7	0	8	-15.05
8	0	0	23.01
9	0	6	-12.55
10	0	0	23.01
11	0	4	-9.03
12	4	0	-9.03
13	0	6	-12.55
14	0	8	-15.05
15	0	0	23.01
16	0	8	-15.05
17	0	4	-9.03
18	0	0	23.01



表 6、7 の結果を RIPSES (株：リコー製) で解析し、要因の寄与率と効果傾向を図 7 および図 8 に示す。図 7 は耐摩耗性の SN 比に及ぼす影響について示したもので、焼成温度、時間およびバルブ 2 開度の影響が強く、この 3 要因で約 70 % もの寄与率があり、焼成温度は高いほど、バルブ 2 の

開度は多いほど耐摩耗性のバラツキを少なくする効果傾向があることがわかった。

同様に図 8 は密着性の SN 比に及ぼす影響について示したもので、放置時間の寄与率が 77 % と高く、直ぐ焼成した場合その効果が大きいことがわかった。

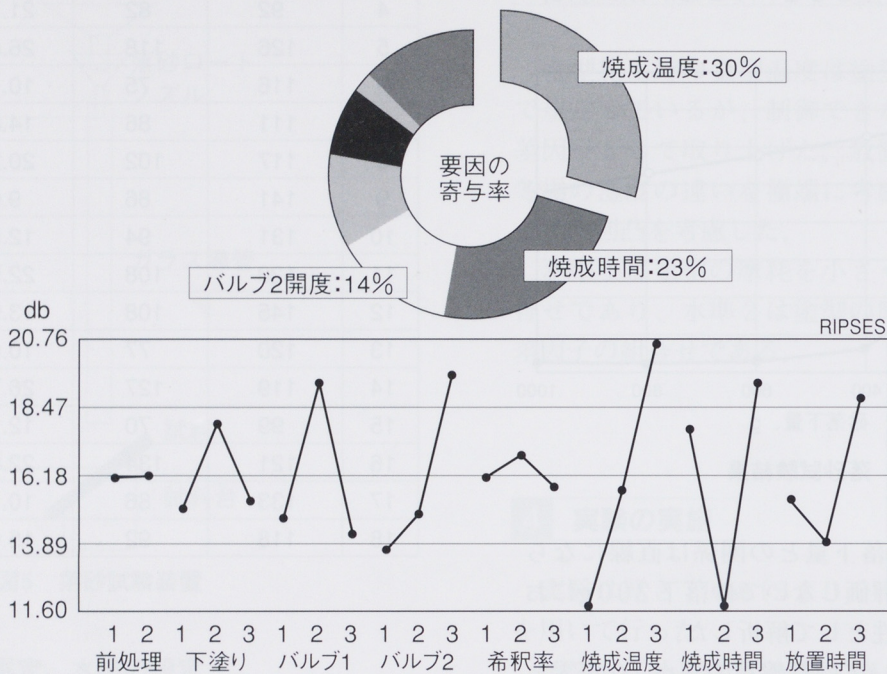


図7 要因効果図 (初期摩耗:SN比)

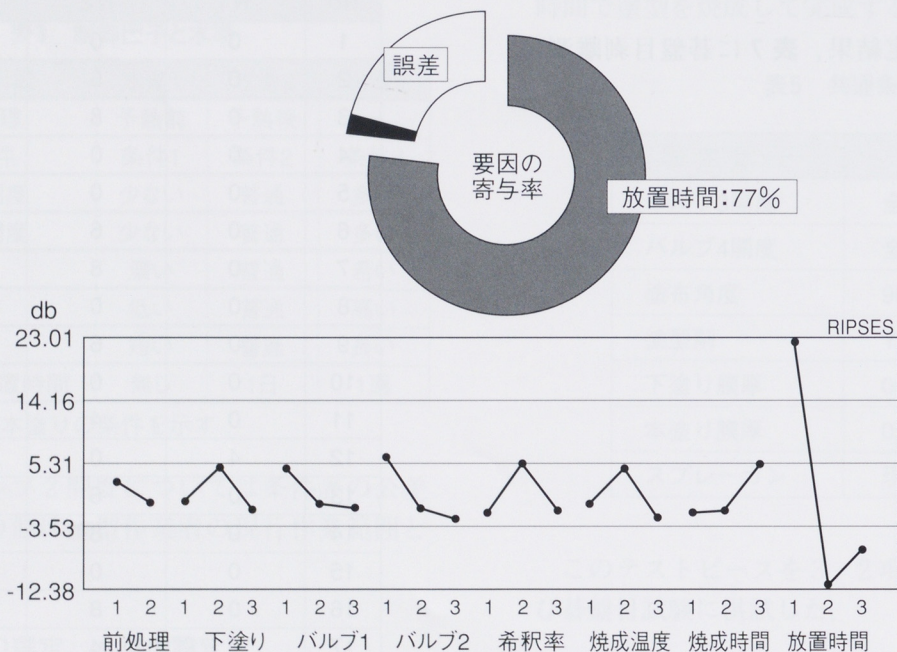


図8 要因効果図 (基盤目剥離:SN比)



5.3 最適条件の設定

今回の試験では2つの特性値で塗型材の耐久性を評価した。要因効果図からもわかるように、密着性と耐摩耗性は放置時間、バルブ2開度等、要因効果が相反する要因がある。しかし、塗型の密着性については塗型の特性として最低限必要な条件である。図8の結果により、塗型材の剥離に関しては放置時間だけで決定されているように思われるので耐摩耗性を若干犠牲にしても因子H1（放置時間：無し）を固定とした。

- 次に塗型作業としての制約条件を考えると
- 1) 焼成温度は高く、時間は長くしたくない。
  - 2) 金型予熱後にエアブラスト処理はしたくない。
- 等から、最適条件としては以下のようにした。
- 最適条件：A1, B3, C3, D3, E3, F2, G1, H1

5.4 効果の推定と確認実験

比較条件として現行塗型作業条件の中で最も耐摩耗性の悪い条件として

最悪条件：A1, B1, C1, D1, E1, F1, G1, H1

を選択して、確認実験を行った。

表8に確認実験の耐摩耗性のSN比、感度について示した。両者とも推定値と確認実験値の効果の比が30%以内のため、実験の再現性は確認できた。

表8 確認実験の結果(耐摩耗性:望大特性)

項目	200g後膜厚(μ)		SN比		感度	
	N1	N2	確認 (db)	推定 (db)	確認 (db)	推定 (db)
最適条件	130	118	23.30	17.50	41.86	41.90
最悪条件	108	85	15.40	8.00	39.63	39.13
効果	—	—	7.90	9.50	2.23	2.77

また、効果としては

バラツキ：σ（標準偏差）で1/2.5に減少

耐摩耗性：σ（標準偏差）で26%の改善となった。

この結果を図9に示す。

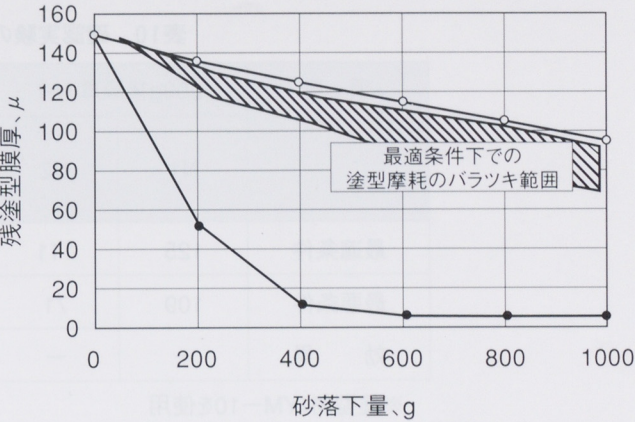


図9 塗型作業条件の最適化による成果

確認実験の碁盤目剥離評価結果を表9に示す。

表9 確認実験の結果(碁盤目剥離:望小特性)

項目	碁盤目剥離評点		確認値	推定値
	N1	N2	(db)	(db)
最適条件	8	8	-6.20	19.58
最悪条件	10	10	23.00	26.68
効果	—	—	-29.20	-7.10

ただし、この条件は耐摩耗性の最適、最悪条件である。確認実験では最適条件においてN1, N2とも評点が1ランク下がった。

これは、推定値でもその傾向は見られるが効果の値において大きな差となってしまった。それは、碁盤目剥離試験の特性値が感応評価のためであり、実際の差としてはほとんど認められない。

したがって、今回選定した最適条件を、剥離も無く耐摩耗性も良好な塗型材の作業条件としても良いと考える。

次に今回実験した塗型材（YM-11）とは別の塗型材（YM-10）を用いて同じ最適条件と最悪条件にて確認実験を行った。その、耐摩耗性の結果を表10に示す。碁盤目剥離性は表9の結果と同じであった。



表8と同様に推定値と確認実験値の効果の比が30%以内であり再現性が認められる。

このように、今回の最適条件は別の塗型材においても適用することができ、汎用性のある条件であることがわかった。

表10 確認実験の結果(耐摩耗性:望目特性)

項 目	200g後膜厚(μ)		SN比		感 度	
	N1	N2	確認 (db)	推定 (db)	確認 (db)	推定 (db)
最適条件	125	111	21.50	17.50	41.40	41.90
最悪条件	109	71	10.30	8.00	38.89	39.13
効 果	—	—	11.20	9.50	2.51	2.77

※塗型材:YM-10を使用

## 6 考察

### 6.1 塗型材の密着性(剥離性)

塗型材の密着性については塗型施工から塗型焼成までの放置時間の影響が大であるという結果がでた。これは水分の影響でありそれも塗型施工時に塗型層に残留した水分よりも空気中の水分の影響の方が大きい。なぜならば表7に示すように、施工時の金型温度が低い誤差水準1(N1)の試料において碁盤目剥離試験の評点が10(表では0)以外であったのはわずか1試料だけであったのに対し金型温度が高い誤差水準2(N2)の試料においては放置時間無し以外の試料に大なり小なり剥離が認められた。これまで、塗型施工後長期連休を挟んだ金型や梅雨時に施工した金型の塗型剥離が多かったこともこれでうなずける。ではなぜ空気中の水分が影響するかであるが、それは塗型膜を完全に焼成していないために粘結材の珪酸系バインダーが空気中の水分を吸湿し再融解するために金型との結合力が無くなり、鑄造のための金型予熱でブリストアが発生したり、鑄造1ショット目やエアブロー程度で塗型が剥離したりするようになるためと思われる。また、粘結材の再融解を防止するためには反応速度論的にみて400℃以上に昇温すれば短時間で可能であると思われる。

また、確認実験において最適と最悪条件の間で差がでたのは耐摩耗性を上げた事で塗膜が硬くなり欠けやすくなったためと思われる。

### 6.2 塗型材の耐摩耗性

次に耐摩耗性の向上及びバラツキの低減についてであるが、今回の実験で優位とでたのはバルブ1, 2の開度を増やす, 希釈率を高くする, 焼成温度を高くするおよび放置時間を長くするである。



図10 塗型層の表面観察

塗型材は図10に示すようにスプレーガンから霧状になって金型面に付着し瞬間的に水分が蒸発して気孔を含んだ粒子が堆積して層を生成する。その際、水分の蒸発が早ければ、荒い粒子による多孔質層となるであろう。逆に蒸発が遅ければ緻密な層となり耐摩耗性も向上するものと思われる。



したがってバルブ1, 2の開度を増やす, 希釈率を上げる, 金型温度が低いことは水分の蒸発を遅らせるように作用する。

また, 放置時間が長くなると水分を吸収し, 焼成が不十分だと粘結材が再融解して塗型層としては緻密になるなどの理由により塗型材の耐摩耗性が向上するものと考えられる。

## 7 まとめ

塗型材の密着性, 耐摩耗性について品質工学手法を用いて実験を行い次のことがわかった。

- 1) 塗型材の剥離は塗型層の焼成が不十分なときに空気中の水分などが原因となって発生する。
- 2) 耐摩耗性は塗型施工時の水分蒸発を遅らせ緻密な塗膜にすることで向上する。
- 3) これまでの弊社における常識を覆す塗型施工方法が塗膜性能を安定させる。
- 4) 今回の最適条件は汎用性があり, 類似塗型においても適用可能である。
- 5) 作業ノウハウを定量化でき, 塗型施工のロボット化の可能性を見いだした。

## 8 参考文献

- 1) ヤマハ発動機編:品質管理技術研修テキスト  
“田口メソッド”
- 2) (社)日本鋳物協会編:鋳鉄の金型鑄造
- 3) プラントエンジニア:圓川ら(1995), 4, 10

### ●著者



鈴木孝信