

論文・解説

28

鋳抜きピン設計基準の最適化 Optimization of Die-Design Standard for Core Pin

小 関 孝^{*1} 村 尾 優 作^{*2}
Takashi Ozeki Yusaku Murao

要 約

アルミダイカストは、短いサイクルタイムによる高い生産性にて、製品形状が複雑かつ薄肉形状であっても寸法精度良く造りこむことが可能である。しかし、高温のアルミ溶湯を高速で金型内に充填するために金型への負荷が高くなり、その結果として鋳抜きピン折れや金型破損の問題が発生し、量産稼動を阻害する大きな問題となっている。鋳抜きピン折れを撲滅するために現場・現物の調査・分析を徹底的に行い、焼き付きによるピン折れメカニズムを明らかにするとともに、品質工学を用いて鋳抜きピン設計基準を最適化し、その基準を量産に適用することで量産稼動を改善した。また、鋳抜きピン設計基準に基づいた設計業務を実践することで、手戻りのない量産準備プロセスを実現した。

Summary

The aluminum die casting enables to build precise products with high productivity in short cycle even if the product shape is complicated and thin. However, a process of filling up the hot molten metal speedily grows high load to the die, causing problems such as core pin breakage and mold breakage, resulting into disturbance to the MP operation. In order to eliminate the pin breakage, the engineers thoroughly investigated and analyzed the actual products on site and understood the mechanism of the pin breakage due to seizure. Then the pin design standard was optimized using Quality Engineering and adopted to the mass production. This improved the MP operation. Moreover, by conducting design operation with the optimized standard, the MP preparation process without re-designing was achieved.

1. はじめに

アルミダイカストは、製品形状が複雑かつ薄肉形状であっても短いサイクルタイムで寸法精度良く造りこむことが可能である (Fig.1)。しかしながら、高温のアルミ溶湯を高速・高圧で金型内に充填するために金型への負荷が高くなる。その結果、製品の形状を形成する金型形状部や鋳抜きピンに「焼き付き」「溶損」「折れ」が発生し、稼動を阻害する大きな問題となっている。その中で最も多くの割合を占めているのが、鋳抜きピン折れであり、その主要因の一つが「焼き付き」である。発生時の対策は、冷却の追加や焼き付いた部分をスケーリングするといった対症療法的な対応であり、根本的にアルミが焼き付かない条件を見出

すことが急務である。

今回、「焼き付き」を撲滅できる最適条件を品質工学の考え方をういて導き出し、鋳抜きピン設計基準の最適化を図った。

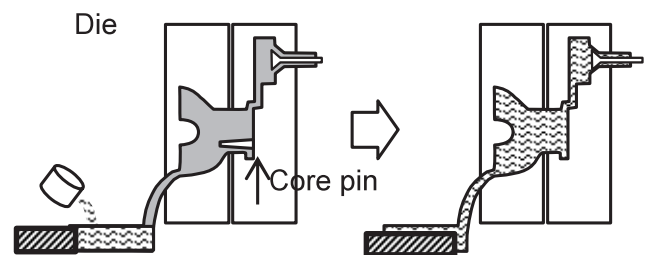


Fig.1 Die-Casting

*1, 2 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

2. 現状の問題点とその要因

従来の鋳抜きピン折れ対策は、高強度材への変更や鋳抜きピンの形状変更によりピン強度向上を実施してきた。その結果、鋳抜きピン折れは減少したが、未だ撲滅（ゼロ）までには至ってない。

焼き付きによるピン折れとは、①鋳抜きピン形状部とアルミの間にFe-Al-Si系金属間化合物層が形成、②化合物層にアルミが凝着し焼き付きが発生（Fig.2）、③製品が金型から離型する時に焼き付き部に抜き抵抗が発生、④ピンに曲げ方向の外力が発生、⑤ピン焼き付き部近傍に引張応力が発生、鋳抜きピン折れ、というメカニズムで発生する（Fig.3）

以上から、アルミ焼き付きそのものを発生させないことで「焼き付きによる鋳抜きピン折れ」を撲滅することができると考え、アルミ焼き付きが発生する要因抽出を行い、品質工学実験を実施した。

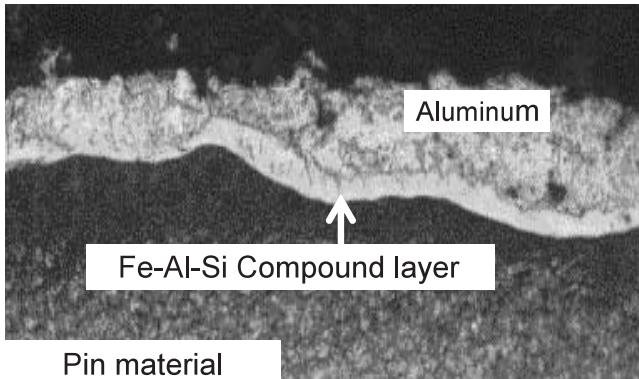


Fig.2 Fe-Al-Si Compound Layer

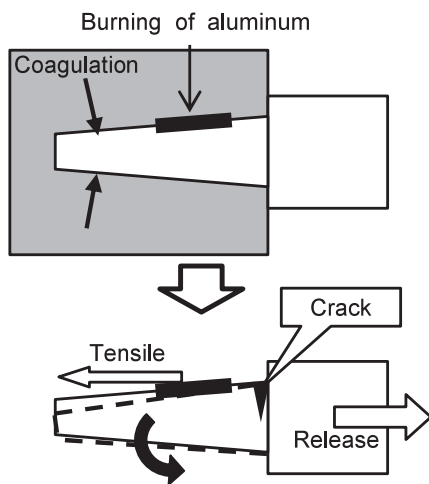


Fig.3 Pin Breakage by Burning of Aluminum

3. 基本機能の考え方

鋳造時における鋳抜きピンには、アルミの凝固収縮により抱き付き力が発生する。そして、この抱き付き力により発生する引き抜き抵抗の反力で離型できるのが理想であ

る。また、量産における鋳抜きピンには径や長さには色々な組み合わせがあるが、どの種類のピンにおいてもこの反力は表面積に比例すると考える。そこで、ピン表面積と引き抜き荷重の比例関係を基本機能と定義した（Fig.4）。また、定義した基本機能における理想は、ピン表面積が増加してもより小さい力で引き抜くことができることである。

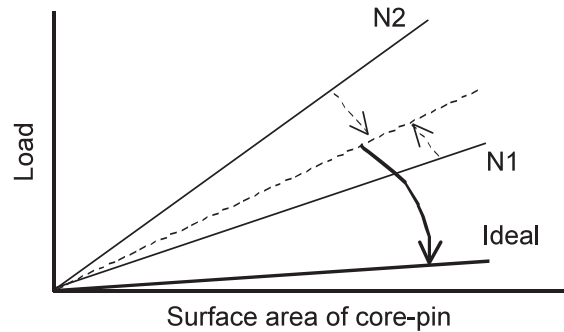


Fig.4 Relation of Surface Area-Load

誤差因子には、焼き付きの発生に対して影響はあるが、金型でコントロールできない「溶湯温度」「溶湯の接触時間」「溶湯圧力」を設定した。この条件をTable 1に示す。

Table 1 Noise Factor

| Noise Factor | N1 | N2 |
|---------------------------------|-------|------|
| Temperature of Melting Aluminum | Low | High |
| Soaking Time | Short | Long |
| Casting pressure | Low | High |

4. 制御因子と実験方法

4.1 制御因子

制御因子には方案系・材料系・形状系・溶湯系の8因子を取り上げ、L18直交表に割り付けた（Table 2）。

Table 2 Control Factor and Level

| Control Factor | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|
| A Method system factor | A ₁ | A ₂ | |
| B Material system factor | B ₁ | B ₂ | B ₃ |
| C Material system factor | C ₁ | C ₂ | C ₃ |
| D Method system factor | Low | Middle | High |
| E Shape system factor | Small | Medium | Large |
| F Metal system factor | Large | Medium | Small |
| G Shape system factor | Small | Medium | Large |
| H Material system factor | Small | Medium | Large |

4.2 実験方法

テスト用の鋳型に鋳抜きピンをセットし、そこへアルミ

の溶湯を杓で流し込み、鋳抜きピンを鋳包んだテストピースを製作する。そしてそのテストピースをオートグラフを用いて引き抜き荷重を測定した (Fig.5)

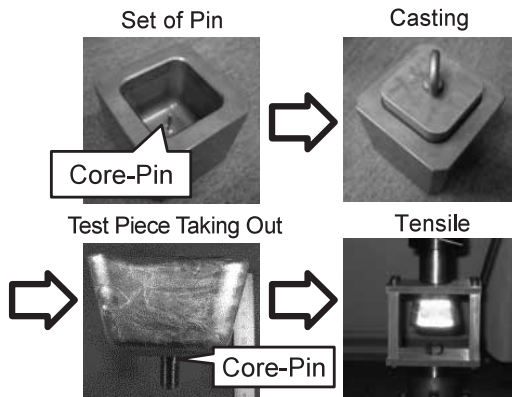


Fig.5 Experimentation

5. 実験

5.1 予備実験

基本機能の妥当性を検証するために予備実験を行った (Fig.6)

予備実験の結果より、①信号因子による出力信号の増加を確認した。②誤差による出力信号の差異を確認した。以上のことから基本機能に妥当性があり、L18実験に移行した。

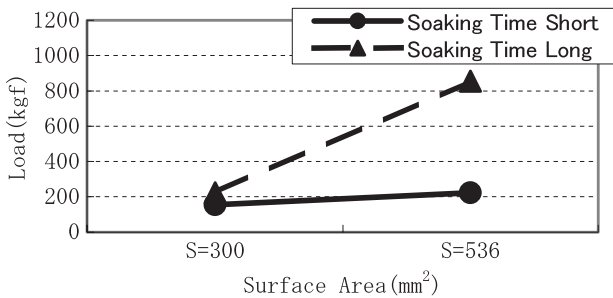


Fig.6 Relation of Surface Area-Load

5.2 データ解析

SN比および、感度を求めるために、鋳抜きピン表面積を入力信号とするデータ変換を行い (Table 3), 下記計算式より、SN比および感度を求めた。計算結果をTable 4に、要因効果図をFig.7, 8に示す。

Table 3 Analyses Data

| | | Input Signal(mm ²) | | | Linear Expression |
|-------|----------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| | | M ₁ | M ₂ | M ₃ | |
| Noise | N ₁ | y ₁₁ | y ₁₂ | y ₁₃ | L ₁ |
| | N ₂ | y ₂₁ | y ₂₂ | y ₂₃ | L ₂ |

<計算式>

線形式

$$L_1 = M_1 \times y_{11} + M_2 \times y_{12} + M_3 \times y_{13}$$

$$L_2 = M_1 \times y_{21} + M_2 \times y_{22} + M_3 \times y_{23}$$

有効序数

$$r = M_1^2 + M_2^2 + M_3^2$$

全2乗和

$$S_T = y_{11}^2 + y_{12}^2 + \dots + y_{23}^2 \quad (f=6)$$

比例項の変動 (f=1)

$$S_\beta = (L_1 + L_2) / 2r$$

N × β の変動 (f=1)

$$S_{N \times \beta} = (L_1 - L_2) / 2r$$

誤差変動 (f=4)

$$S_e = S_T - S_\beta - S_{N \times \beta}$$

誤差分散

$$V_e = S_e / 4$$

調査誤差分散

$$V_N = (S_e + S_{N \times \beta}) / 5$$

SN比(db)

$$\eta = 10 \text{Log} [(1/2r)(S_\beta - V_e) / (1/2r)V_N]$$

感度(db)

$$\eta = 10 \text{Log} [(1/2r)(S_\beta - V_e)]$$

Table 4 S/N Ratio, Sensitivity Calculation Result

| Test No | S/N Ratio (db) | Sensitivity (db) | Test No | S/N Ratio (db) | Sensitivity (db) |
|---------|----------------|------------------|---------|----------------|------------------|
| 1 | -48.12 | -1.72 | 10 | -51.91 | -6.78 |
| 2 | -52.4 | -1.46 | 11 | -43.22 | 1.94 |
| 3 | -37.47 | -1.81 | 12 | -45.1 | -1.4 |
| 4 | -44.31 | -2.34 | 13 | -43.96 | -2.83 |
| 5 | -50.71 | -4.55 | 14 | -47.04 | 1.41 |
| 6 | -46.35 | 1.05 | 15 | -42.84 | 0.1 |
| 7 | -42.25 | 0.5 | 16 | -40.37 | -0.58 |
| 8 | -48.3 | 0.63 | 17 | -52.01 | -3 |
| 9 | -47.7 | -4.71 | 18 | -46.96 | 0.5 |

5.3 最適条件の選定および確認実験結果

Fig.7, 8の要因効果図よりSN比が高く、感度が低い水準を最適条件として選定した。

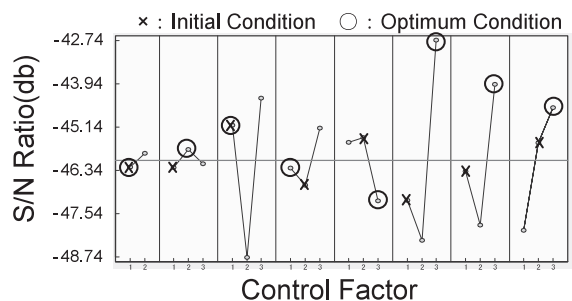


Fig.7 Response Graph (S/N Ratio)

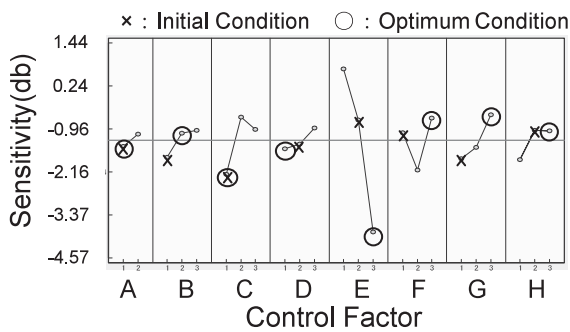


Fig.8 Response Graph (Sensitivity)

次に、得られた最適条件で確認実験を行い、初期条件と比較した利得を計算した。その結果を推定値と合わせて Table 5 に示す。SN比、感度ともに利得が推定値を下回り、再現性を得ることができなかった。

Table 5 Confirmation Test Result

| | S/N Ratio(db) | | Sensitivity(db) | |
|-------------------|---------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Prediction | Confirmation | Prediction | Confirmation |
| Optimum Condition | -40.23 | -43.12 | -2.30 | -1.28 |
| Initial Condition | -47.46 | -45.53 | -1.53 | -1.84 |
| Gain | 7.23 | 2.41 | -0.77 | 0.56 |

6. 考察と再実験

6.1 再現性が得られなかった原因

なぜ再現性が得られなかったのかについて、実験結果から基本機能が成り立っているのかという目付きで分析した。その結果、基本機能と合わない実験があった。その結果を Fig.9 に示す。

この実験の結果を直交表で確認した結果、全ての実験で制御因子Eの抜き勾配が大きいものについて基本機能に合致しないことが判明した。これは、アルミ凝固収縮時に勾配面に外力が働きその影響で鋳抜きピンに抜き方向の力が加わったため、表面積が大きくなるほどその力も大きくなり、引き抜き荷重が低下したと考えられる。

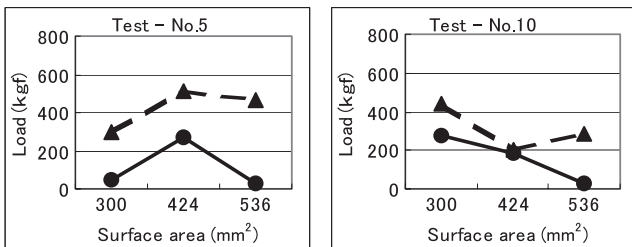


Fig.9 Test Result

6.2 制御因子の見直し

考察を踏まえ、基本機能に悪影響を及ぼす抜き勾配を固定水準とし、抜き勾配ゼロの条件で実験を行った。ここでは、抜き勾配ゼロという最も厳しい条件下で最適条件を導き出せば、勾配がある状態では問題なく引き抜くことができると考えた。また、抜き勾配に替わる要因として、Fig.7, 8 からSN比、感度ともに影響の大きいC要因（材料系）に着目して、C要因に関連するE'要因（材料系）を新たに設定した。更に鋳抜きピンだけでなく、金型形状部へも適用できるように、内冷による温度調節ができなくても最適な条件を見出すことができるようD要因（方案系）を見直した。基本機能の妥当性を検証するために予備実験を行った。

6.3 再実験による基本機能の妥当性確認

前述の予備実験に比べて、入力に対する出力信号の効果が明確に現れた（前述の出力650kgfに対して3,000kgfとなった）。また誤差の効果（出力の差）は、前回の出力600kgfに対して1,000kgfと大きくなり誤差への割り付けとその水準に問題ないことを確認した（Fig.10）。

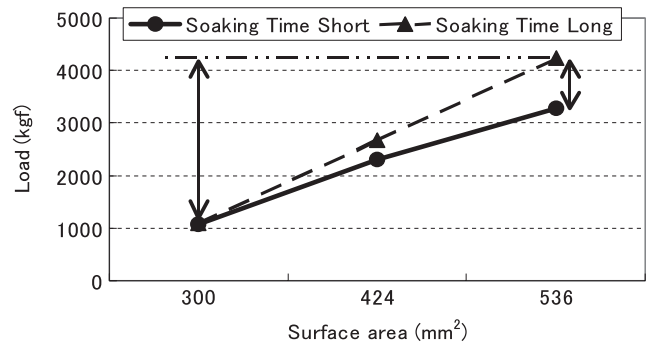


Fig.10 Relation of Surface Area-Load

以上より基本機能の妥当性を確認できたため、L18実験を再度行った（Fig.11, 12）。

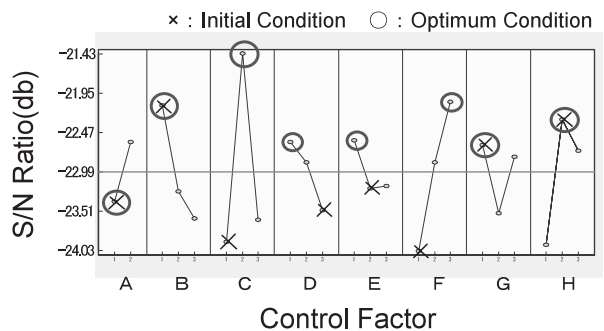


Fig.11 Response Graph (S/N Ratio)

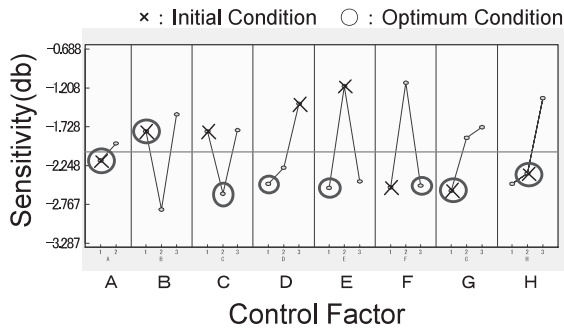


Fig.12 Response Graph (Sensitivity)

Fig.11, 12の要因効果図よりSN比が高く、感度が低い水準を最適条件として選定した。次に、得られた最適条件で確認実験を行い、初期条件と比較した利得を計算した。その結果を推定値と合わせてTable 6に示す。

Table 6 Confirmation Test Result

| | S/N Ratio(db) | | Sensitivity(db) | |
|-------------------|---------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Prediction | Confirmation | Prediction | Confirmation |
| Optimum Condition | -19.71 | -17.72 | -3.98 | -1.97 |
| Initial Condition | -25.68 | -23.53 | -0.75 | -0.42 |
| Gain | 5.97 | 5.81 | -3.23 | -1.55 |

確認実験の結果から、SN比・感度ともに再現性を得ることができた。また、以下の利得の向上を確認した。

- ・抜き勾配をゼロにしたことで各実験値のバラツキが改善され、SN比で約6dbの利得が向上。これは、バラツキを1/4にすることができることを意味する。
- ・C要因やE' 要因は特に感度に大きな影響を与えるため、約2dbの利得が向上。これを真値に直すと、引き抜き荷重を30%低減させることができる。

更にこの評価プロセスの展開により、焼き付きによる鋳抜きピン折れだけに留まらず、金型形状部全体に対するアルミ焼き付きの撲滅と、稼働の改善を見込んでいる。

7. まとめ

今回の取組みにおける効果は以下の通りである。

- ・鋳抜きピン折れ： 78%
- ・金型形状部焼き付き： 50% (見込み)

今回、『焼き付き』というダイカスト技術の最重要課題に対して、現場・現物の調査・分析を徹底的に行い、焼き付きによるピン折れメカニズムを明らかにするとともに、品質工学の考え方を活用することの有効性を確認した。この評価方法は、表面積を入力信号とすることで鋳抜きピンの径・長さの色々な組み合わせに対して汎用的な評価方法となる。これにより、従来の量産後のトライアンドエラー

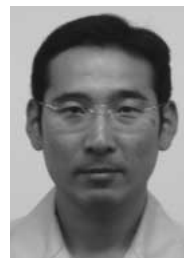
による対症療法的な対策を、金型設計段階で要件として織り込むことを可能とする。また、予備実験から鋳抜きピンの勾配が引き抜き荷重に対して予想以上に大きな影響力をもつということも新しい知見として確認することができた。

今後、この実験から得られた最適条件を金型設計基準として織り込み、これに基づいた設計業務を実践することで、手戻りのない量産準備プロセスとして当社内に展開し根付かせていく。

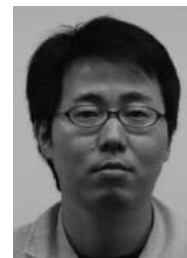
参考文献

- (1) 糸井ほか：ダイカスト金型の焼き付きメカニズム，日立金属技報，Vol.15，p.91-96（1999）

著者



小関 孝



村尾優作