

鋳造シミュレーションを使ったロバスト最適条件の選定

Development of Robust Optimization Procedure for Casting Conditions

齋藤 侑里子 技術開発本部生産技術センター加工技術部
木間塚 明彦 技術開発本部生産技術センター加工技術部 課長 博士(工学)
黒木 康徳 技術開発本部生産技術センター溶接技術部 部長 博士(工学)

近年、鋳造シミュレーションの欠陥予測精度が向上し、製造現場においても鋳造シミュレーションを活用して最適な鋳造条件や鋳造方案の選定が可能となってきた。しかし、製造時には厳密な温度制御などは難しく、条件が変動してしまうことによって結果的に欠陥が発生する場合も多い。そこで本稿では、ロバスト最適化手法であるタグチメソッドを鋳造シミュレーションと組み合わせることによって、製造現場での条件変動に対してロバストな鋳造条件を選定する手法とその適用事例を紹介する。

In recent years, the numerical simulation of casting processes is widely used at various casting companies to optimize casting designs and conditions. However, it is impossible to fix all the process parameters exactly. Therefore, there are many cases where casting defects occur due to the casting conditions not being the same as those chosen through simulation. In this paper, the Taguchi method together with a solidification simulation is employed to achieve the robust design of process parameters for solidification processes.

1. 緒言

近年、鋳造シミュレーションの開発が進み、特に、引け巣に関する予測精度が向上している。このため製造現場での最適な鋳造条件の選定に鋳造シミュレーションを活用することが可能になってきた。

引け巣予測には、後述する温度勾配法や新山パラメータ⁽¹⁾、⁽²⁾と呼ばれるパラメータなどが広く用いられている。

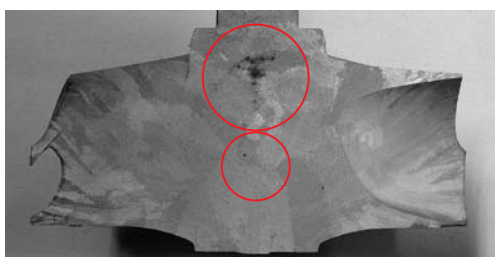
引け巣が発生しやすい条件で鋳造した模擬翼車の実験結果と解析結果の比較を第1図に示す。第1図-(a)に実験結果(断面組織)を、-(b)に解析結果(投影図)を示す。第1図に示すように、引け巣位置を高精度に予測できることが確認されている。

しかし、実際の鋳造の際には、鋳型に流入する直前の溶湯温度や鋳込み速度などを厳密に制御することは困難であり、結果的にシミュレーションで求めた最適条件と鋳造条件が異なってしまふことで、欠陥が発生する場合も多くある。

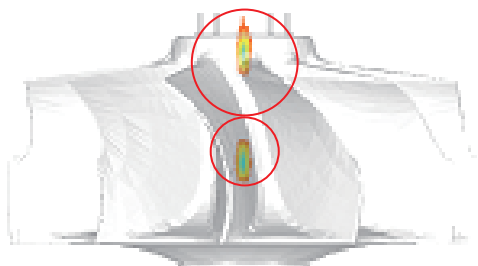
そこで、このような製造上の誤差も考慮したうえで最適な条件を求めることが必要となっている。これをロバスト最適条件と呼ぶ。鋳造をはじめとするものづくりの現場においては、多くの条件で厳密な制御が困難な場合が多いため、このロバスト最適条件を求めることが有効である。

本稿では、ロバスト最適化手法であるタグチメソッド⁽³⁾を鋳造シミュレーションと組み合わせることによって、製造時に条件が変動しても安定した品質の鋳物を製造できる鋳造条件を選定する手法と、この手法を引け巣予測

(a) 実験結果



(b) 解析結果



(注) ○: 引け巣位置

第1図 模擬翼車における実験と解析の比較
Fig. 1 Shrinkage of mock turbine wheel

に適用した事例を紹介する。

2. 実施事項

2.1 対象ならびに評価モデル

モデルは、大径の円柱形状鋳物（以下、円柱部と呼ぶ）の上に押し湯となる小径の円柱形状鋳物（以下、押し湯と呼ぶ）を配した単純形状とした。また、押し湯の周囲には断熱材を配している。解析モデルを第2図に示す。

鋳造には Ni 基合金を用い、鋳型はステンレス鋼とした。この鋳造品には押し湯から円柱部にかかる位置（図中の評価位置）に、凝固収縮による引け巣が発生する。

この鋳物に対して、引け巣を押し湯内部にとどめることを目標に鋳造条件の最適化を実施した。引け巣とは、金属が凝固する際に起こる収縮によって、鋳物内部もしくは表面に発生する空孔のことである。なお、凝固収縮した部分の近傍に液相が残っている場合、収縮分がこの液相部から供給されれば引け巣は抑制される。よって、この目標を達成するためには、円柱部の凝固収縮分が押し湯から十分に供給されるよう、押し湯に液相が残っているうちに円柱部の凝固を完了させる必要がある。つまり、円柱部、押し湯の順に凝固することが必要となる。これを指向性凝固と呼ぶ。

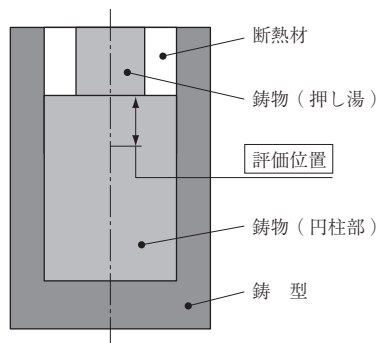
2.2 解析条件

鋳造シミュレーションには JSCAST®（クオリカ株式会社）を使用した。

鋳物-鋳型間の熱伝達率は、通常、鋳造時の測温結果を用いた合わせこみによって決定されるが、本稿では鋳造組織サイズから求められる冷却速度を用いて決定した。また、雰囲気と鋳型の熱伝達率は 20 W/m²/K とした。

2.3 引け巣評価手法

引け巣発生位置の制御には指向性凝固となるような熱制御が必要であり、指向性凝固の度合いを表す指標として凝固時の温度勾配が用いられる。これは温度勾配の小さい



第2図 解析モデル
Fig. 2 Simulation model

領域に引け巣が生じるという Bishop らの実験結果に基づくもので、数値計算としては新山ら⁽¹⁾によって採用された。解析において、温度勾配 G は、あるメッシュ（以降、要素と呼ぶ）が流動限界固相率に達した際の温度 T_s と、その要素に隣接している未凝固要素の温度 T_j を用い、次式より求められる。

$$G = \max \left(\frac{T_j - T_s}{\Delta l} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 Δl は要素間距離である。ここでは流動限界固相率を 0.7 とした。

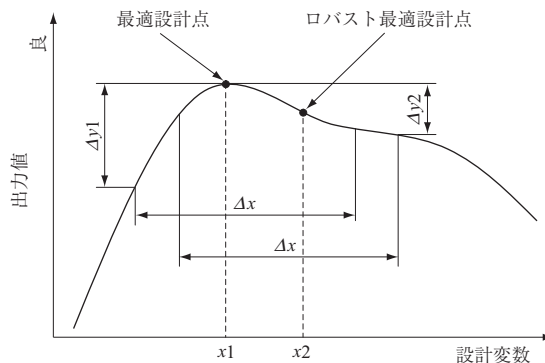
先に述べたように、引け巣を押し湯内部にとどめるためには、円柱部、押し湯の順に凝固させる必要がある。これは押し湯直下、つまり円柱部の最上部で大きな温度勾配とすることで達成される。そこで、最適化においては、第2図に示す評価位置の温度勾配を評価対象とした。

2.4 最適化手法

最適化とは、評価対象のパラメタの値（以降、出力値と呼ぶ）が最小もしくは最大となるように、最適化の対象とする各パラメタ（以降、設計変数と呼ぶ）の値を決定することである。

一方、ロバスト最適化とは、出力値を変動させるノイズがあっても、安定した出力値が得られるように設計変数の値を決定することである。

例えば、第3図に示すように、設計変数によって出力値が変化する場合、最適設計点は x_1 であり、ロバスト最適設計点は x_2 である。 x_1 においては出力値が最大になっているが、設計変数が Δx 変動した場合には Δy_1 の出力値の変動がある。一方、 x_2 においては、出力値は x_1 より劣っているが、設計変数が同様に変動した場合、出力値は Δy_2 の変動となり、 Δy_1 よりも小さくなっている。つまり x_2 は、設計変数が変動しても安定した出力値が得ら



第3図 ロバスト最適化
Fig. 3 Robust optimization

れるといえる。

タグチメソッドの手法のうち、ここでは望目特性で最適化を実施することとした。望目特性とは、目標値が一定であるものを評価する手法であり、ノイズによる出力変動と出力値の両方を評価することができる。出力変動の評価として SN 比、出力値の評価として感度が用いられる。

SN 比 (η) と感度 (S) は次のように求められる。

$$\eta = 10 \log \frac{\mu^2}{\sigma^2} = 10 \frac{1}{r} (S_m - V_e) \dots\dots\dots (2)$$

$$S = 10 \log \mu^2 = 10 \log \frac{1}{r} (S_m - V_e) \dots\dots\dots (3)$$

- μ : 出力値の平均
- σ : 標準偏差
- r : データ数-1
- S_m : データの平均
- V_e : データの分散

また、ノイズが n 種あり、各出力値を y_i とすると、式 (2)、(3) 式の各変数は以下のように求められる。

$$S_m = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$V_e = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - S_m^2}{n-1} \dots\dots\dots (5)$$

タグチメソッドでは後述するように実験計画法によって、パラメタの組合せを決定するため、解析や実験を実施していない組合せの条件が最適条件となる可能性がある。このため、実際にこの組合せで解析を行い、利得と呼ばれるパラメタを用いて結果の妥当性を検証する。利得とは、基準となる条件に対する最適条件の改善度合を評価するパラメタである。実験計画法による解析結果から推定された利得と、実際に最適条件の組合せで解析を行い求められた利得が近い値であれば、その結果は妥当であると判断される。なお、利得は以下の式によって求められる。

$$\text{利得} = 10 \log \frac{\mu^2}{\sigma^2_{\text{最適条件}}} - 10 \log \frac{\mu^2}{\sigma^2_{\text{標準条件}}} \dots\dots\dots (6)$$

2.5 制御因子と誤差因子

引け巣の発生位置に影響を及ぼすパラメタとして、第 1 表に示す A ~ F の六つの制御因子を選定した。制御因子とは人為的に制御し固定できるパラメタのことである。制御因子のうち、押し湯径は円柱部径より小さいものとした。また、誤差因子として鋳物初期温度 (A)、鋳型初期

第 1 表 最適化因子

Table.1 Optimization parameters

| | 制 御 因 子 | 水 準 | | | 誤 差 | |
|---|---------|-----|---|---|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | max (%) | min (%) |
| A | 鋳物初期温度 | 低 | 中 | 高 | 0 | -2 |
| B | 鋳型初期温度 | 低 | 中 | 高 | 0 | -4 |
| C | 円 柱 部 径 | 細 | 中 | 太 | - | - |
| D | 断熱材熱伝導率 | 小 | 中 | 大 | - | - |
| E | 押し湯径 | 細 | 中 | 太 | - | - |
| F | 押し湯高さ | 低 | 中 | 高 | 0 | -10 |

温度 (B)、押し湯高さ (F) を選定し、第 1 表に示す変動幅を与えた。

誤差因子とは固定できないパラメタで、制御不可能なものや実際の製造におけるばらつきのように厳密な制御ができないものも含まれる。

ここで、すべての制御因子が水準 2 である条件 A₂B₂C₂D₂E₂F₂ を標準条件と称することとする。

解析は実験計画法に基づき、72 ケース実施した。それぞれの解析結果から評価位置の 5 要素の温度勾配を対象に最適化を行った。

3. 評価結果

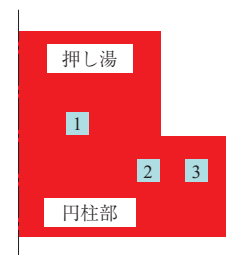
3.1 境界条件の決定と精度確認

鋳物-鋳型間の熱伝達率を決定するため、第 4 図に示す 3 か所のマイクロ組織を撮影し 2 次デンドライトアーム⁽¹⁾間隔を測定した。顕微鏡組織の例として、第 4 図内 1 の位置の顕微鏡組織を第 5 図に示す。

冷却速度と 2 次デンドライトアーム間隔の関係を第 6 図⁽⁴⁾に示す。第 6 図から、測定した 2 次デンドライトアーム間隔から冷却速度を導出した。

解析における冷却速度とは、液相線温度と固相線温度の差を、液相線温度から固相線温度まで下がるのに要した時間で除したものとした。

第 2 表に 2 次デンドライトアーム間隔から求めた冷却速度 (実験結果) と、熱伝達率を 200 W/m²/K とし

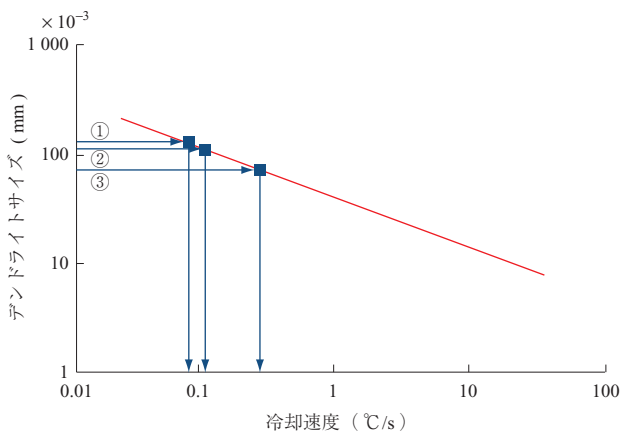


第 4 図 組織観察位置

Fig. 4 Measurement positions



第 5 図 押し湯付近の顕微鏡組織
Fig. 5 Photo of microstructure



(注) ①, ②, ③: 第 4 図に示す観察位置

第 6 図 2 次 dendrite アーム間隔と冷却速度
Fig. 6 Dendrite arm spacing and cooling rate

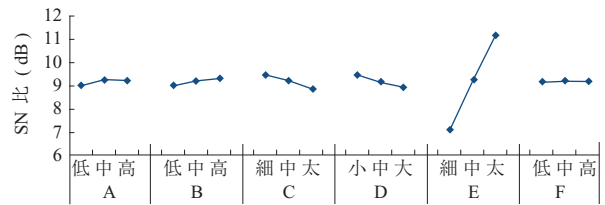
第 2 表 冷却速度比較
Table 2 Cooling rate

| | 実験結果 | 解析結果 |
|---|------------|------|
| 1 | 0.08 ~ 0.1 | 0.07 |
| 2 | 0.1 ~ 0.2 | 0.19 |
| 3 | 0.30 | 0.60 |

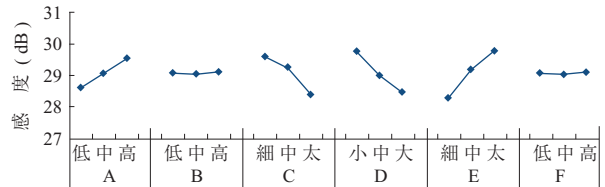
析した際の同位置の冷却速度（解析結果）を示す。両者に若干の差はあるものの、評価位置近傍の 2 点の冷却速度は良く一致していることから、この境界条件が妥当なものであると判断した。よって、本条件を使用して最適化を実施した。

3.2 タグチメソッドによる最適条件の選定

タグチメソッドの評価結果は要因効果図と呼ばれるグラフで表される。要因効果図とは各因子が結果に及ぼす影響度を示す。第 7 図に SN 比、第 8 図に感度の要因効果図を示す。ここで、SN 比が大きいほど温度勾配が誤差に対して安定であり（ロバスト性が高い）、感度が大きいほど



第 7 図 要因効果図 (SN 比)
Fig. 7 Factor effect plot (S/N ratio)



第 8 図 要因効果図 (感度)
Fig. 8 Factor effect plot (Sensitivity)

温度勾配が大きいことを示す。

今回選定した制御因子のなかでは、押し湯径 (E) が SN 比および感度に大きな影響を与えていることが明らかとなった。

また、タグチメソッドにおいては SN 比と感度の傾向が異なった場合は、2 段階設計という手法で最適条件を決定する。2 段階設計とは、まず SN 比が大きく変化する因子はすべて SN 比が大きいパラメタとし、その後で、SN 比が大きく変化しない因子において、感度が良くなるパラメタを選定する手法である。今回はすべての因子において最適パラメタは一致しており、 $A_3B_3C_1D_1E_3F_3$ が最適条件であると同時に、ロバスト最適条件であると判断された。以降、この条件を最適条件と呼ぶ。

個々の制御因子が評価位置の温度勾配に及ぼす影響度、およびその理由について、以下に詳述する。

まず押し湯径 (E) では、SN 比が大きく変化しており、太いほど誤差に対して安定することが明らかとなった。押し湯径が十分に太ければ、温度の変動などがあっても円柱部の後に押し湯が凝固する指向性に大きな影響は与えないため、安定して温度勾配が大きくなることを表している。感度についても押し湯径が太いほど感度が高く、温度勾配が大きいことが明らかとなった。これは押し湯径が太いほど熱容量が大きく、かつ冷却される表面積が小さいため抜熱されず、円柱部から押し湯への指向性凝固となることを表している。

円柱部径 (C) については、径が細いほど良好な結果であった。これは相対的に、押し湯径を太くしたことと同じ効果が現れているためである。

断熱材熱伝導率 (D) については小さいほど、SN 比、感度ともに大きく、安定して高い温度勾配が得られる結果となっている。断熱材の熱伝導率が低いということは押し湯の保温効果が高いことを意味している。押し湯が保温されることで、円柱部から押し湯への指向性を持つことができるため、このような結果が得られたと判断できる。

温度に関しては、鋳物初期温度が高いほど、断熱材に覆われている押し湯の温度が下がりにくくなるため、SN 比、感度ともに高く、良好な結果となった。また、鋳型初期温度 (B) は鋳物初期温度と比べて影響が小さいことが明らかとなった。

一方、押し湯高さ (F) は SN 比、感度のいずれに対しても影響が小さい結果となった。

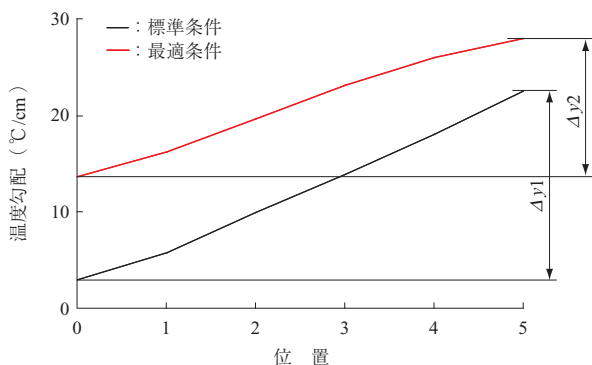
押し湯径が太いほど良好な結果であるにもかかわらず、押し湯高さの影響が小さいことよって、評価位置の温度勾配を高くするには、押し湯の量を増やすのではなく、径を太くする必要があるといえる。また、円柱部の径も影響を与えていたことから、円柱と押し湯の直径比が重要であることも明らかとなった。

評価位置における標準条件と最適条件の温度勾配を第 9 図に示す。第 9 図において、横軸の右側 (位置 5) が高さ方向で上側 (押し湯側) である。

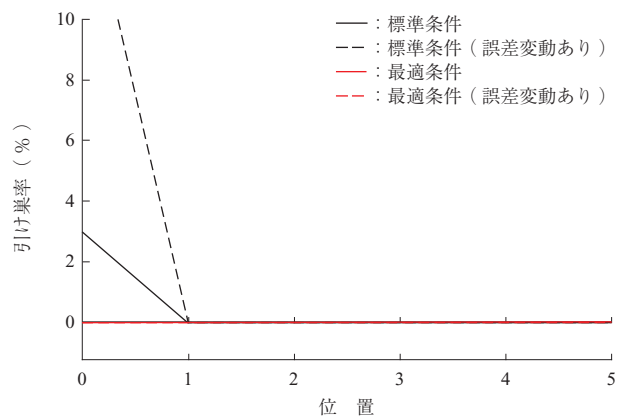
第 9 図から、最適条件の温度勾配は標準条件の温度勾配に対し、評価位置全体で大きくなっていることが明らかとなった。また、最適条件での温度勾配の変動 Δy_2 は標準条件の Δy_1 より小さくなっており、安定して温度勾配が大きくなることが確認された。

同様に評価位置における標準条件と最適条件の引け巣率、および両条件において温度勾配が小さくなるような誤差が生じた場合の引け巣率を第 10 図に示す。

ここで、引け巣率⁽⁵⁾とはある要素の一部が収縮によ



第 9 図 標準条件と最適条件の温度勾配
Fig. 9 Temperature gradient comparison



第 10 図 標準条件と最適条件の引け巣率
Fig. 10 Shrinkage rate comparison

て空孔になると判断された場合の、その要素単独の体積減少率を表す。

第 10 図から、評価位置において、最適条件 (図中の赤線) では誤差の有無によらず引け巣率は 0% であり、安定して引け巣が発生しないと判断された。一方、標準条件では、誤差がない場合 (図中の黒実線) においても位置 0~1 で引け巣が発生し、さらに温度勾配が小さくなる方に誤差が変動した場合 (図中の黒破線) には引け巣率が上昇することが明らかとなった。

この結果からも、最適条件は標準条件よりも誤差に対して安定、かつ大きな温度勾配が得られる条件であるといえる。

さらに、第 10 図の標準条件で引け巣の発生が予測された位置 1 は、第 9 図で温度勾配が $5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ であることから、本検討で対象とした形状においては、温度勾配が $5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ より小さくなると引け巣が発生することが明らかとなった。

3.3 利得の再現性確認

推定と確認シミュレーションの利得について、SN 比の結果を第 3 表に、感度の結果を第 4 表に示す。

第 3 表 利得の再現性確認 (SN 比)

Table.3 Repeatability of gain (S/N ratio)

| | 推 定 | 確 認 |
|------|-------|-------|
| 最適条件 | 14.33 | 14.11 |
| 標準条件 | 7.04 | 7.33 |
| 利 得 | 7.29 | 6.78 |

第 4 表 利得の再現性確認 (感度)

Table.4 Repeatability of gain (Sensitivity)

| | 推 定 | 確 認 |
|------|-------|-------|
| 最適条件 | 27.25 | 26.91 |
| 標準条件 | 22.83 | 22.72 |
| 利 得 | 4.41 | 4.19 |

ここで、推定とは実験計画法による解析結果から推定された結果であり、確認とは実際に条件を組み合わせて解析した結果である。推定と確認の利得の差が 3.0 以内であれば、再現性があると判断される。第 3 表および第 4 表においてこの差はそれぞれ 0.51, 0.22 であり、再現性が非常に良いといえる。

また、確認の結果、SN 比は 7.33 から 14.11 まで上がっており、誤差による出力変動が 50%程度小さくなったことを表している。

以上の結果、求めた最適条件は、温度勾配が誤差に対して安定しており、かつ大きくなる条件であることが確認された。

4. 結 言

本稿では、鋳造シミュレーションとタグチメソッドの組合せによって、鋳造品製造現場で起こり得る条件変動に対して、安定した製造が可能となる条件を選定する手法を提案した。

本手法を適用した単純形状の事例においては、温度勾配が安定して大きくなる条件を選定することができた。

以上の結果、本手法は操業上の変動を考慮した最適鋳造条件を選定するのに有効な手段であるといえる。

参 考 文 献

- (1) 大中逸雄：コンピュータ伝熱・凝固解析入門 丸善 1985 年 1 月 pp.173 - 174, 212 - 218
- (2) 新山英輔：金属の凝固を知る 丸善 1998 年 3 月 pp.94 - 96
- (3) 立林和夫：入門タグチメソッド 日科技連出版社 2004 年 4 月 pp.31 - 36
- (4) G. K. Bouse, J. R. Mihalisin : Superalloys Supercomposites and Superceramics Academic Press, Inc.
- (5) 長坂悦敬, 木口昭二, 那智雅博：3 次元凝固解析による引け巣の定量的予測 鋳物 第 61 卷 第 2 号 1989 年 2 月 pp.98 - 103