SURE 静岡大学学術リポジトリ
Shizuoka University REpository

CFDを援用した最適化技術とプランジャチップ形状設計への適用

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 静岡大学技術部 公開日: 2017-06-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 高木, 優斗, 矢野, 賢一 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00010242

CFD を援用した最適化技術とプランジャチップ形状設計への適用

○高木　優斗 [1)]，矢野　賢一 [2)]
[1)]三重大学工学部・工学研究科　技術部，[2)]三重大学大学院　工学研究科　機械工学専攻

1. 緒言

CFD（Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学）とは，流体の運動に関する偏微分方程式を数値的に解くことで流体の解析を実現する技術のことであり，幅広い分野で利用されている．さらには CFD シミュレータの解析結果に基づく最適化も行われており[1]，この CFD シミュレータを援用した最適化のことを CFD 最適化と呼ぶ．本報告では CFD 最適化問題の 1 つであるダイカスト鋳造プロセスにおけるプランジャチップ形状最適化問題について述べる．

2. ダイカスト鋳造とプランジャチップ

現在，自動車や機械部品といった様々な製品の製造分野でダイカスト法が用いられている．ダイカスト法とは，溶融した金属を精密な金型に圧入することで，高精度の鋳物を短時間に大量に生産することのできる鋳造方式である[2]．他の鋳造方式と比較して，寸法精度が高く，機械加工も少なくて済むといった特徴がある．しかしながら，ダイカストは溶湯を高速かつ高圧で充填するため，製品部やスリーブ内部で空気を巻き込み，それによってブローホールやピンホールといった欠陥を引き起こし，製品品質の劣化を招くという問題がある．

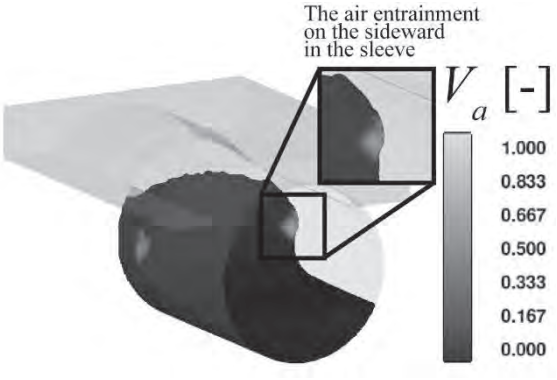


図 1：Air entrainment on the sideward in the sleeve with flat-type tip

このような欠陥の原因の一つとして，図 1 に示すようなプランジャ射出時におけるスリーブ脇での空気巻き込み問題が考えられる．ここで図 1 では単位時間当たりに巻き込まれた液体中の空気連行体積率 V_a を表す．この空気巻き込み現象はプランジャチップ形状に起因すると考えられる．そのため，プランジャ射出時の空気巻き込み現象を防止するためには，いかに適切な形状を設計するかということが課題となる．

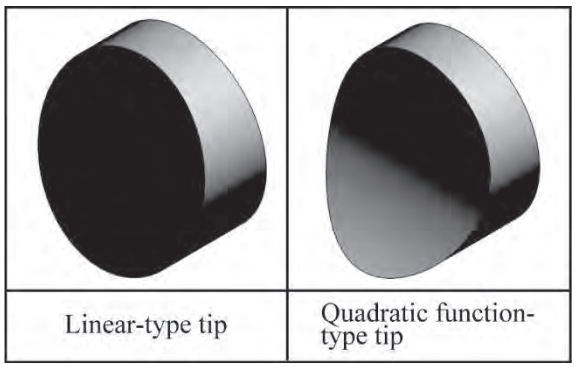


図 2：Linear-type tip and quadratic function-type tip

このようなプランジャ射出直後の波の乱れを抑制するプランジャチップ形状としては，図 2 に示すような傾斜平面を設けた線形チップや曲面を設けた 2 次関数型チップが提案されている．

線形チップは溶湯押出面がスリーブの軸線と直交する鉛直面に関して傾斜しているため，プランジャが前進動作しても溶湯に極端な波面を生じさせず，また溶湯への飛沫も生じにくいため，空気の巻き込みを防止することができる．また，2 次関数型チップは傾斜平面ではなく曲面を設け

た形をしていることにより，より緩やかに溶湯を持ち上げることが可能となり，それにより線形チップよりも波の乱れを抑制することができる．しかしながら，これらの尖ったようなチップ形状は，スリーブとの摩擦や射出時の圧力により損傷しやすいため，長期間繰り返して使用することができず，実際の使用には適さない．

そこで，構造物の繰返し使用により生じる損傷を推定する損傷推定アルゴリズムの提案をする．一般的に構造物の繰り返し使用による生じる疲労破壊の推定と評価を行う場合において，数学的に取り扱いが難しくなる傾向がある．提案する損傷推定アルゴリズムは，構造解析と累積疲労損傷則を用いることで単純でありながら信頼性のある実用的なアルゴリズムである．そして，実数値遺伝的アルゴリズムを用いて，本提案手法を最適化問題に発展させ，損傷を推定しながら，累積疲労に強い形状を最適設計できる実用性の高い最適化手法を構築する．本提案手法の有効性は，ダイカストプロセスにおけるプランジャチップの形状最適化問題において，損傷値と空気連行量の両方の評価基準を同時に満たす最適形状を導出することで示す．

3. 損傷推定アルゴリズム

累積疲労損傷則[3]を構造解析で用いる有限要素モデルに対して適用する．すなわち，FEM を用いた静的荷重に対する解析によって得られる応力から次式を用いて損傷値を求め，損傷の度合いを推定する．

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \cdots + \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} \tag{1}$$

ここで，N は S-N 曲線から得られた破談に至るまでの繰返し回数，n はこれらの応力振幅が繰り返された回数，D は損傷値である．累積疲労損傷則では，$D \geqq 1$ となったときに疲労破壊が生じるとしている．式(1)を構造解析で用いる有限要素モデルに拡張すると次式を得る．

$$\begin{aligned} D(j) &= D_1(j) + D_2(j) + \cdots + D_i(i) \\ &= \frac{n_1}{N_1(\sigma_j)} + \frac{n_2}{N_2(\sigma_j)} + \cdots + \frac{n_i}{N_i(\sigma_j)} \\ &= \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i(\sigma_j)} \qquad (j = 1,2,\ldots,T) \end{aligned} \tag{2}$$

ここで，T は有限要素モデルにおける総節点数である．式(2)を用いることで，有限要素モデルにおける各節点ごとの損傷値 $D(j)$を求めることができる．最適化問題にて利用する評価関数としては，レベル関数を導入し次式とする．

$$D_{eval} = \sum_{i=1}^{T} L\big(D(j)\big) \tag{3}$$

$$L(x) = \begin{cases} 0 & (x < 0.7) \\ 1 & (0.7 \leq x < 0.8) \\ 2 & (0.8 \leq x < 0.9) \\ 3 & (0.9 \leq x < 1.0) \\ 100 & x > 1.0 \end{cases} \tag{4}$$

4. 損傷推定に基づくプランジャチップ形状最適化問題の定式化

損傷推定アルゴリズムによる損傷推定に基づき，プランジャチップ形状の最適化を行う．すなわち，損傷推定アルゴリズムにより得られる損傷値と CFD シミュレータにより算出される空気連行量を評価とし，これらが共に評価基準を満足する形状の導出を行う．また本研究では，CFD シミュレータとして FlowScience 社製の *FLOW-3D* を用いる．このシミュレータは非圧縮流れから自由曲面を伴う流れ，圧縮性を考慮した流れ，さらに凝固を伴う流れまで広範囲な流れを扱うことが可能な差分法を用いた 3 次元流体計算プログラムである．その自由表面計算は Volume of Fluid (VOF) 法に基づいて行われる．また，複雑な障害物に対する幾何形状は，体積率技法の一種である Fractional Area Volume Obstacle Representation (FAVOR) 関数を用いて認識される．

プランジャチップ形状は平型と線形，2 次関数型が表現できるようにスプライン曲線により定義する．このスプライン曲線は，図 3 に示すような 7 個の変数により制御を行う．CFD シミュレータでは，プランジャチップ形状の変動による流体挙動の変化が最も顕著に表れる初期の波立ち現象に注目するため，射出後 0.1[s]までの解析を行う．空気連行量の評価としては，CFD シミュレータにおける各メッシュセルでの空気連行体積率 V_a，流体体積率 F_f，セル体積率 V_f，メッシュセルの体積 V_c を掛け合わせ合算し，式(5)を用いて求める．空気連行量は，まずメッシュセルの体積 V_c にセル体積率 V_f と流体体積率 F_f を掛け合わせることで，流体体積を求め，これに対して空気連行体積率 V_a を掛け合わせることで，液体中に巻き込まれた空気量を計算する．

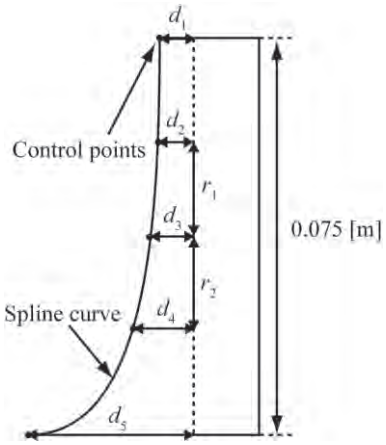


図 3：Concept of optimum tip design: a two-dimensional diagram

$$A = \sum_{k=1}^{n} \left(V_{ak} F_{fk} V_{fk} V_{ck} \right) \tag{5}$$

以上の定義をもとに，最適化問題として次式のように定式化する．

$$\text{Minimize: } A(d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7) \tag{6}$$

$$\text{Subject to : } D_{\text{eval}}(d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7) \leq \varepsilon_d \tag{7}$$

$$1 \leq d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 \leq d_{max} \tag{8}$$

$$1 \leq r_1, r_2 \leq r_{max} \tag{9}$$

ここで，目的関数において A は空気連行量である．また，プランジャチップが一定の強度を有することを保証するために，損傷値 D_{eval} を制約条件として取り扱う．損傷値の上限は事前に解析を行って得られた線形チップの損傷値$\varepsilon_d = 14010$とする．

この問題の解法として実数値遺伝的アルゴリズムを適用する．交叉手法として変数間依存性及び多峰性を有する最適化問題に対し，良好な結果を得ることができる多親交叉（Real-coded Ensemble Crossover: REX）を採用する[4].

5. シミュレーションによる検証

最適化によって導出されたプランジャチップ形状を図 4 に示す．最適化に要した時間は，Intel Xeon W5590（動作周波数: 3.33GHz，搭載コア: 4）搭載パソコンで CFD シミュレータを 3 並列で

解析させ，約 107 時間であった．最適化は第 56 世代で打ち切られた．このとき，空気連行量は$A = 1.0729 \times 10^{-14}$，損傷値は$D_{\mathrm{eval}} = 14010$となった．

次に，最適化によって導出されたチップと平型チップの CFD シミュレーション結果を図５，図６に示す．平型チップではスリーブ脇での空気の巻き込みが発生しているが，最適化によって導出されたチップではその発生が抑えられていることが確認できる．

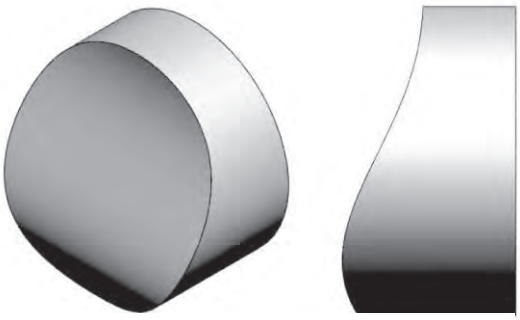
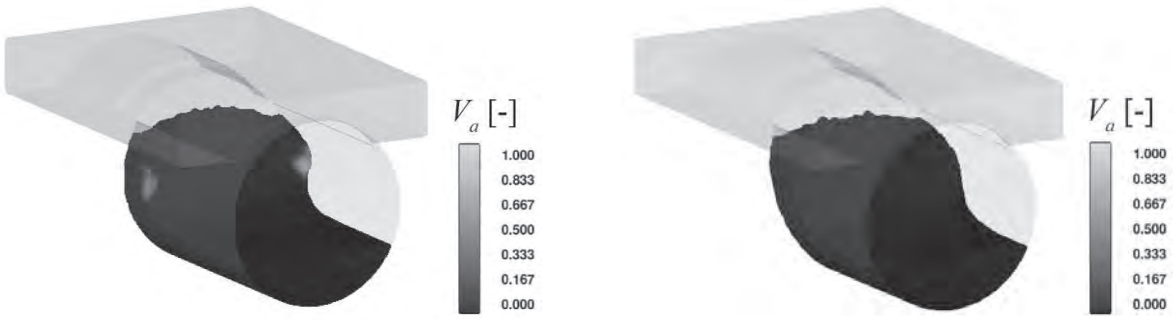


図 4 : Optimized shape by using real-coded genetic algorithm



(a) Flat-type plunger tip **(b) Optimized shape tip**

図５ : Simulation results at 0.1 seconds

6. 結言

構造物を繰返し使用することで生じる損傷の推定を行う損傷推定アルゴリズムを構築した．本提案手法は構造解析と累積疲労損傷則を用いることにより，単純ながらも信頼性のある実用的なアルゴリズムを実現した．そして，本提案手法をダイカストプランジャチップに対して適用することで，損傷評価が行えることを示した．さらに，プランジャチップの損傷値と空気連行量の評価基準を満たす形状を実数値遺伝的アルゴリズムにより求めることで，一定の強度を保ち，かつ空気巻き込みを低減するプランジャチップ形状の導出を行った．これにより，ダイカストにおいて製品の欠陥を減少させることが可能であると思われる．

参考文献

[1] 金澤賢一，矢野賢一，中田竜弘：遺伝的アルゴリズムに基づく運動曲線最適化法の提案とボトリング装置への適用，計測自動制御学会論文集，Vol. 49，No. 1，pp.158-165 (2013)

[2] 菅野友信，植原寅蔵：ダイカスト技術入門 -第 2 版-；日刊工業新聞社，pp. 7-15 (2006)

[3] 田中啓介：材料強度学；丸善，pp.162-168 (2008)

[4] 小林重信：実数値 GA のフロンティア；人工知能学会論文誌，Vol. 24，No. 1，pp. 147-162 (2009)