

技術論文

鋳物の形状最適化

Optimization of Casting Shapes

田中 宏徳
Hironori Tanaka
小川 兼司
Kenji Ogawa

形状最適化を用いた鋳物部品の最適形状を作り出すシステムを確立し、強度、鋳物生産性を改善しつつ、原価低減を達成した内容について報告する。

A system to create optimum shapes of casting components has been established using a shape optimization technique, and is reported as reducing costs, while improving strength and casting productivity.

Key Words: 鋳物, 鋳鋼, CAE, 形状最適化, 凝固解析

1. はじめに

近年、設計から生産技術に至るまで多くの分野でCAE(Computer Aided Engineering)が用いられており、製品開発にCAEは欠かせないものになっている。更に、その高精度化に伴い、試作・試験などの代替として利用され、開発リードタイムを削減するとともに製品性能の向上に一役かっている。その為、製品開発に対する要求も、『素材コストやエネルギーコストの大きな変動に影響されにくい競争力の高い製品設計』、『従来よりも耐久性のある製品設計』といった効率化が求められている。

このようにCAEの製品開発への利用が定着してきたが、設計自由度の高い製品に対する負荷が高まっている。特に、コマツの建機は、鋳物を多用していることに特徴があり、特に重要な構造に利用している。それは、鋳型に溶湯を流し込んで製造するという製法から、比較的、形状の自由度が高く、板金/溶接構造で構成するよりも強度的に優位な形状を作ることができる為である。しかし、設計においては、様々な使用条件下でも耐えるよう複数の負荷条件が定められており、全ての条件で強度を満足させる必要がある。更に、従来の設計検討では、開発リードタイムの問題から鋳物の特徴を最大限に生かした形状を作り込むことが難しく、その鋳物の高い形状自由度を活かしきれていない。

したがって、設計段階で従来以上の耐久性のある構造、且つ、形状の自由度を活かした形状を検討する新たなツールが必要である。これには、評価ツールとしてではな

く、提案型のツールとしてのCAEでなければ開発に対する負荷の低減は難しい。そこで、有限要素メッシュで効率的な形状を自動計算させる形状最適化の利用を評価した。一方で、強度メンバとして利用している鋳物部品の多くは、強度、靱性を併せ持つ鋳鋼で作られているが、鋳鉄に比べると、鋳造方案面での制約が大きい。その為、『設計面での効率的形状化』と『鋳物生産性面での品質確保』を両立させる構造、生産面での改善技術について本稿で紹介する。

2. 形状最適化

2.1 形状最適化の種類

最適化技術は古くから様々な分野で用いられているが、近年のパソコン性能の向上に伴い、FEM解析上で最適形状を自動計算させる手法が利用されつつある。一般に、基本構造が決定された後の最適化手法には、各部寸法を設計変数とするパラメトリック最適化、表面形状を設計変数とするノンパラメトリック最適化がある(図1)。パラメトリック最適化では、予め、最終形状に近い状態から外形寸法、板厚などの設計変数を定義することから、鋳物の形状自由度を活かすことは難しい。鋳物の特性を活かすことを狙いとして、ノンパラメトリック形状最適化の利用を検討した。これにより従来の開発工程において、CAD作成、FEM解析の繰り返しに時間を要していた部分が、FEM解析上で効率的な形状を自動的に探索させることができ、試行錯誤の時間を軽減することが可能となる。

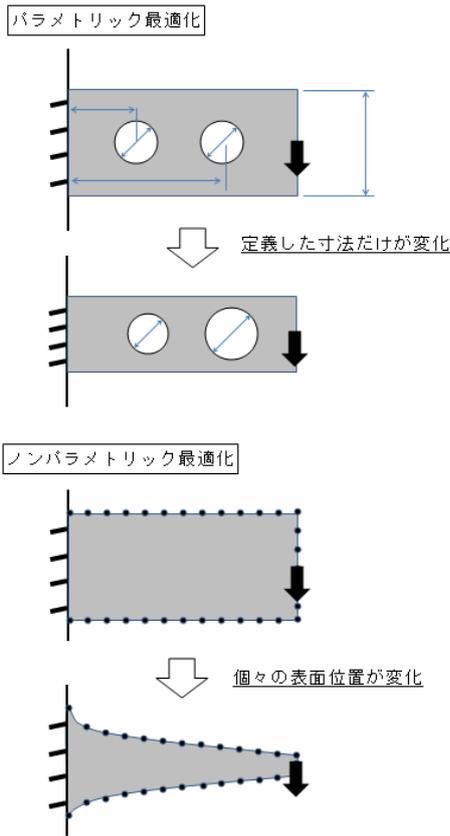


図1 形状最適化の種類

2.2 形状最適化の利用

形状最適化では、目的関数、制約条件といった特定の物理量を組み合わせた評価値が最小となるように形状が決定される。目的関数、制約条件に考慮する物理量には、重量、判定応力、固有振動数などがあり、目的関数値を制約条件下で最適化（最小化）させることを、設計変数としての表面形状を逐次変動させることで実施している。これら目的関数、制約条件は、設計目的を満足させるよう組み合わせる必要がある。一般的には、素材コスト低減を狙いとした変更では、目的関数に重量、制約条件に判定応力といった指標が用いられる。一般に、複数の条件下で個別に応力を維持させることも可能であるが、本稿では複数の負荷条件から、単一の疲労評価判定値を計算させ、その値を制約条件に用いている。これにより、評価値として利用する耐久性の指標で直接評価することができ、個別に評価することに比べて、判断が容易になる（図2）。

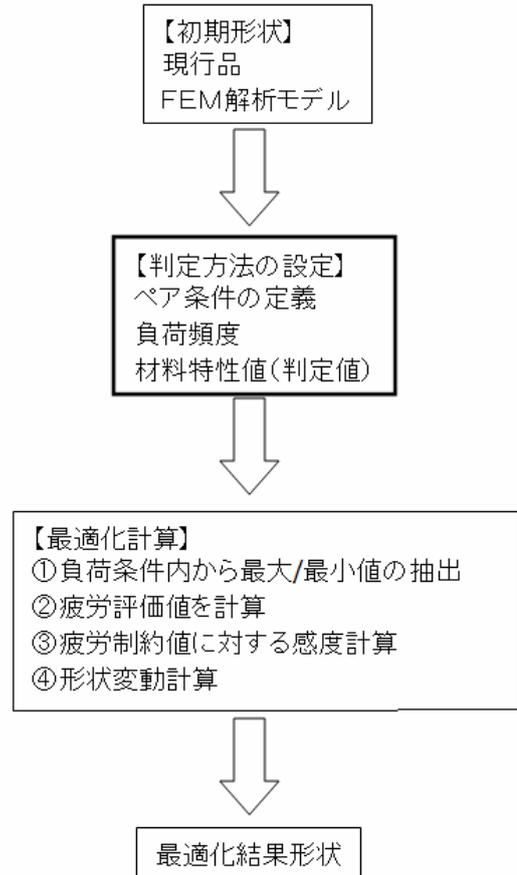


図2 疲労耐久性評価による最適化

2.3 最適化計算例

ここでは形状最適化を用いた計算の流れを紹介する。図3は、最適化計算を含めた構造設計の流れである。従来の設計検討の中に赤枠で示した最適化検討を組み込んだ流れであり、最適化で算出した形状案を利用し、最終の製品形状を作り込むこととした。

実際に、この流れで最適化を実施した建機の足回り部品を図4示す。最適化の目的関数には狙いとして重量低減を用い、制約条件には、2.2節で説明した疲労耐久性評価の指標を用い、現行品同等以上の疲労耐久性を条件に含めている。形状変動に関する制限には、部品間のクリアランスに加え、製造条件として鋳抜き方向、鋳物最小肉厚に対する製造条件に対する変動制限も付与した条件を用いた。

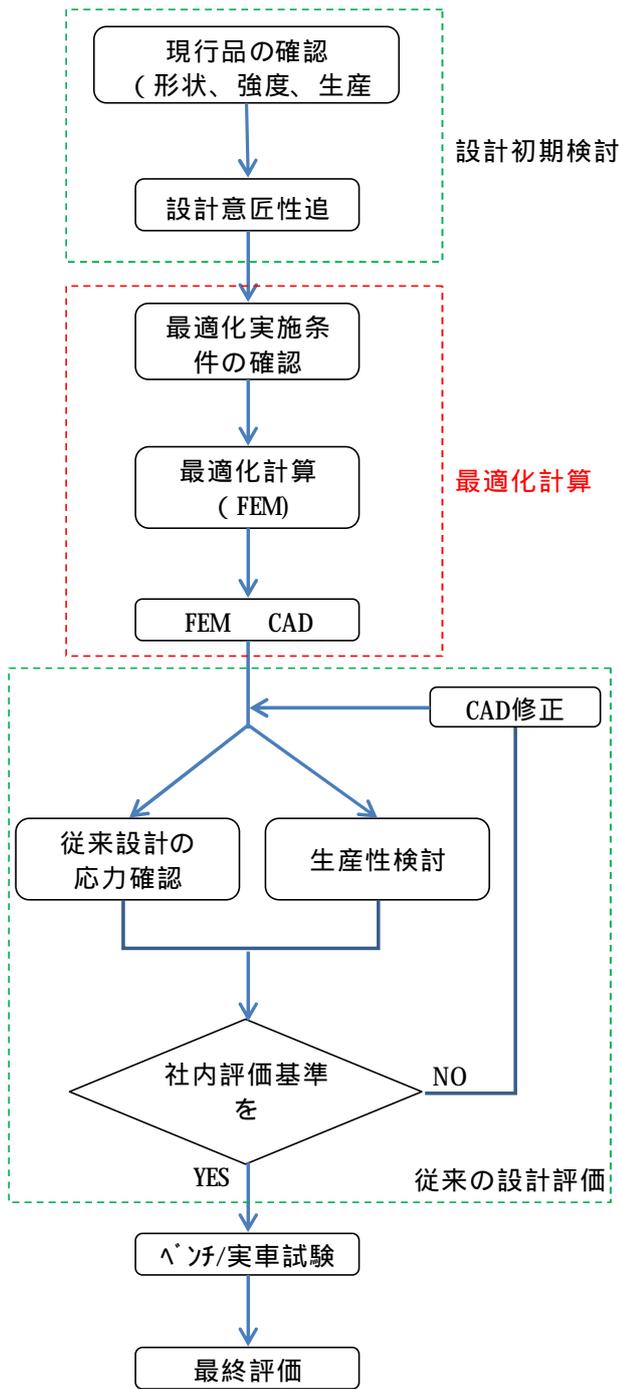


図3 鋳物形状最適化の流れ

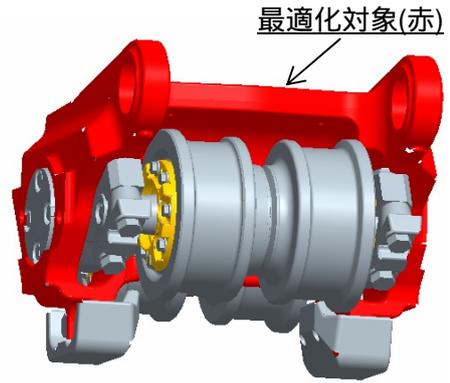


図4 最適化対象品

最適化を実施した結果を図5に示す。左図はCAD形状、右図は最適化計算を実施したFEM形状である。大きな違いは、孔淵の応力を軽減する孔形状の変化、剛性への寄与が小さいベース部の薄肉化となっている。(c)にて得られた形状を参考に(d)のCADを作成することで、このモデルでは約5%の重量低減が得られている。

2.4 生産性評価

鋳鋼の鋳物部品は、溶湯を鋳型に流し込むことで製造する。鋳鋼は溶湯の凝固収縮量が大きいため、方案設計が適切でないと、引け巣と言われる空洞が製品内部に発生する。この欠陥は、強度的な不具合の原因となることから、許容されない。この引け巣を抑制する為に、製品へ溶湯を供給する押湯と呼ばれる補給形状を製品に追加するが、この押湯の溶解コスト、切断コスト、手入れ費等も製品コストに反映される。欠陥抑制、製品重量による素材コスト低減と共に、生産コストを含めた全体としてのコスト低減となるかを確認することが必要である。その為、図6に示すように形状変更した部品に鋳造CAEを用いた凝固解析を実施している。現行品は、検査により無欠陥が確認されている為、現行品に対して、最適化品は、引け巣指標が改善されている。押湯方案も現行と同様で問題ないことが確認できたことから、形状変更の結果においても、品質向上、コスト同等が得られた。

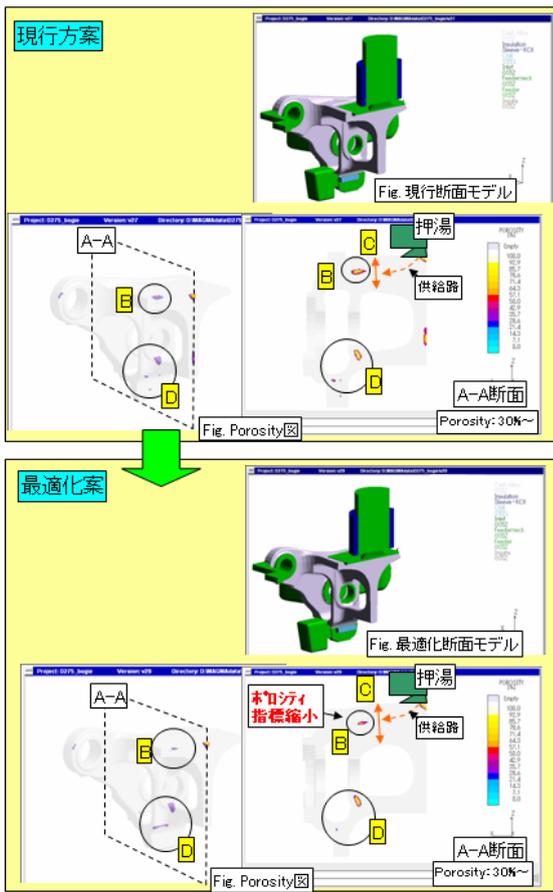
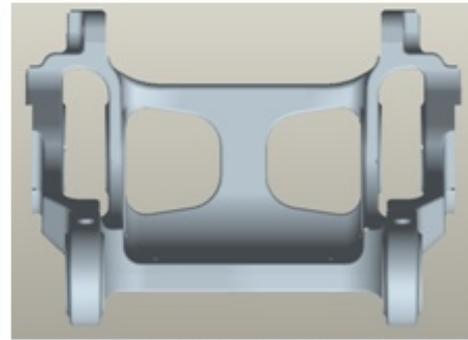
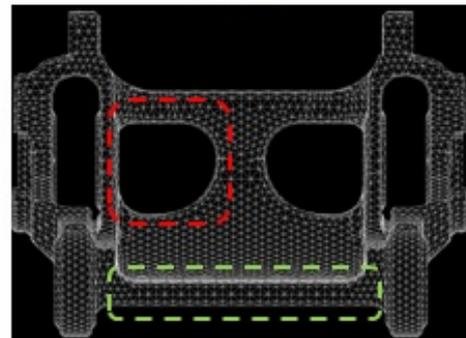


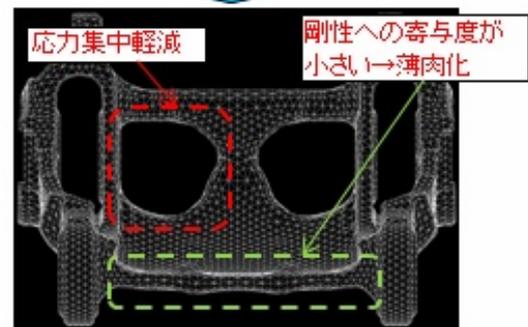
図6 凝固解析結果



(a) 現行品形状



(b) 現行品FEM



(c) 最適化結果FEM



(d) 最適化結果形状

図5 形状最適化結果

3. 試作評価

前節までの検討で、図7に示すように構造面で現行品に対し改善できていることが確認でき、生産性についても現行品同等が維持できている。素材重量低減、生産性についても現行品同等が見込めることで、実機での評価を実施した。図7右に示すベンチ応力試験の結果、実態においても現行品以下の発生応力となっていることが確認できる。更に、実車搭載試験についても実施し、耐久性目標をクリアできていることから、最適化による形状検討の有効性が確認できた。

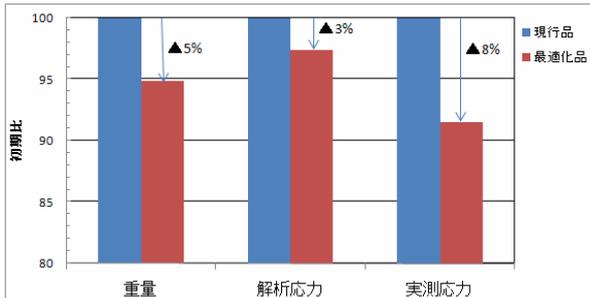


図7 実機評価結果

4. まとめ

形状最適化を用いた構造、生産面での検討に対して、解析、実体の評価を通じて、以下のことが分かった。

- (1) 形状最適化を用いた形状検討は、ある程度、精査された設計初期案の下で、更なる形状案出しに有効である
- (2) 最適化結果のFEMからCADに戻すには、設計判断、妥当性を評価する構造知識の両面が重要である
- (3) 鋳物生産性については、若干の形状変更では大きな問題にならない。但し、薄肉の鋳物については、問題になる可能性が残っており、最適化前の初期検討で、事前に条件化を検討する必要がある

筆者紹介



Hironori Tanaka

たなか ひろのり
田中 宏徳 2008年、コマツ入社。
現在、生産本部 生産技術開発センタ所属



Kenji Ogawa

おがわ けんじ
小川 兼司 1997年、コマツ入社。
現在、生産本部 生産技術開発センタ所属

【筆者からひと言】

鋳物部品は品質管理が課題となることから、構造、生産面の両方を睨んだロバスト性のある最適な形状を作り出す技術をこれからも開発していきたい。