

# 博士学位論文審査要旨

2010年1月12日

論文題目 : 船舶用一体型クランク軸における数値シミュレーションを活用した熱間鍛造工程設計技術の開発

学位申請者: 柿本 英樹

## 審査委員

主査 : 同志社大学大学院工学研究科 教授 今井田 豊

副査 : 同志社大学大学院工学研究科 教授 藤井 透

副査 : 同志社大学大学院工学研究科 教授 田中 達也

## 論文審査の要旨

鍛造加工は、自動車・電機をはじめ様々な製品を製造する方法として発展してきたが、その目的の1つは、加工前のインゴット(鋼塊)の内部欠陥の除去、ならびに、局所的な偏析の拡散・均一化を行うこと、2つには、目的の形状に加工・成形して、メタルフローの連続した繊維組織(鍛流线)を持たせることにある。即ち、鍛造加工を行うことにより、機械的性質が著しく向上する加工冶金学的な特徴を有している。大型部材の熱間鍛造は、製鋼段階でもより大きな内部欠陥が発生するため、鍛造工程で、効率よくそれらを閉鎖させることは重要な問題であると同時に、形状の適正化も極めて重要な問題となる。

船舶用エンジン部品である一体型クランク軸は、重量1トンを超える大型成形品で、その加工は熱間自由鍛造工程、および、熱間型鍛造工程(RR鍛造工程)の2段階を経て行われ、それぞれの工程で内部品質の向上と形状の作り込みを行っている。各生産現場においては保有する鍛造設備、技術的背景、関連部品、生産ロット、後加工設備などの条件が異なる関係上、形状や工程は一般に大きく異なった過程をとり、従来の、知見や経験による工程設計では、相反する多くの条件が存在するゆえ、適正化が強く求められている。本論文はこれらの問題解決のための新しい技術、即ち数値シミュレーションを活用した工程設計の構築を目的としている。

第1章は、本論文の背景・目的、論文構成について述べている。

第2章は、数値シミュレーションについて論じ、構成関係に必要な、材料物性値・変形抵抗値・摩擦係数について同定し、精度よく鍛造形状が予測できることを述べている。

第3章では、軸材鍛伸工程設計技術について、圧縮工程および強圧下工程では内部欠陥閉鎖挙動について、四角工程・八角工程では、幅広がりについて検討している。さらに、タップ工程では、素材形状・素材-工具噛み込み量・回転角度が寸法精度に及ぼす影響、仕上げ寸法を適正にする鍛造条件を明確にするとともに、表面割れ発生位置の予測可能性を明らかにしている。

第4章は、RR鍛造工程設計技術について論じたもので、鍛造荷重算出モデル式を構築し、鍛造荷重が予測できること、さらに鍛造荷重と機械加工代の余肉部に着目した予測精度の検証について述べている。

第5章では、熱間鍛造工程であるシェルリング鍛造工程への適用について述べたもので、孔明け工程への、材料流動予測を行い、リング鍛造工程の、軸方向への伸縮について、そのメカニズムを解明するとともに、鍛造条件による軸方向リング長さに関する、予測式を明らかにし、端部口絞り量の妥当な予測式について述べている。

第6章では、本論文で得られた成果についてまとめている。

本論文の内容は、従来経験を基に設計・製造されていた大型熱間鍛造に数値シミュレーションを導入した新しい技術の構築であり、その成果は本加工技術の飛躍的な向上に繋がり、産業界に対して多大の貢献が期待できる。

よって本論文は博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 学力確認結果の要旨

2010年1月12日

論文題目： 船舶用一体型クランク軸における数値シミュレーションを活用した  
熱間鍛造工程設計技術の開発

学位申請者 柿本 英樹

### 審査委員

主査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	今井田	豊
副査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	藤井	透
副査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	田中	達也

### 要旨

本論文提出者は、同志社大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を1999年に終了し、同年、株式会社神戸製鋼所に入社し、現在にいたる。この間、一貫して研究・開発業務に従事している。

本論文の主たる内容は、塑性と加工（日本塑性加工学会誌）（4編）、Materials Transactions（1編）、Journal of Materials Processing Technology（1編）にすでに公表されており、いずれも十分な評価を得ている。

2009年12月26日午後1時より約2時間にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに、講演会終了後、審査委員により学術論文に関連した諸問題について口頭試問を実施した結果、いずれも十分な学力を有することが確認できた。英語については英文論文での実績で十分な能力を有すること、またドイツ語についても十分な能力があると認定されている。

以上のことから、本学位申請者の専門分野に関する学力並びに語学力は十分なものであると認める。

## 博士學位論文要旨

論文題目：船舶用一体型クランク軸における数値シミュレーションを活用した熱間鍛造工程設計技術の開発

氏名：柿本 英樹

要旨：

鍛造加工は、自動車・電機をはじめとした様々な製品を製造する方法として発展している。鍛造の目的は、第1にインゴット（鋼塊）の鑄造組織の粗大な樹枝状晶を破壊し、鑄巣、収縮孔を消滅させるとともに局所的な偏析の拡散均一化を行うことである。第2に目的の形状を得るまで切削などによる材料の無駄を省きながら加工して、製品全体としてメタルフローによる連続した繊維組織（鍛流線）を持たせることである。これらの効果が統合されて機械的性質、特に引張強さ、伸び、絞り、衝撃値などが著しく向上する特徴がある。

鍛造する前の鋼塊段階では、その鑄込み時にザクやブローホールと呼ばれる空隙系欠陥が主体の内部欠陥が発生するため、製鋼分野においてもこれらの欠陥を低減させることは大きな課題の一つである。これらの欠陥は製鋼での製造方法の進歩により減少傾向にあるが、現在の製鋼法を採用する限り完全に撲滅することは困難である。また、内部欠陥が製品に残存した場合、機械的性質が低下し破損などが起こるため、上記の鍛造加工にて内部品質を向上させることが必要である。特に、船舶用エンジン部品は、自動車用などに比べて大型部材で構成されており、製鋼段階でもより大きな内部欠陥が発生するため、鍛造加工で効率よく内部欠陥を閉鎖させることは極めて重要である。同時に、鍛造形状においても歩留まりを最大化させることは後工程の無駄を省略できるため、鍛造形状の適正化も極めて重要である。

船舶用エンジン部品の一つである一体型クランク軸は、重量1トンを超える大型品で、熱間自由鍛造工程および熱間型鍛造工程（RR 鍛造工程）で製造されており、それぞれの工程で主に内部品質の向上と形状の作り込みを行っている。従来から、それぞれの生産現場において保有する鍛造設備の種類、技術的背景、関連部品との組み合わせ、生産ロット、後加工設備などの前提条件の上で製造するが、同じ形状の製品であっても作業者の知見や経験に基づいて工程設計されることが多いため、鍛造形状や工程は一般的に異なる。自由鍛造工程における作業者による工程設計では、内部欠陥を消滅させつつ、歩留まりや生産性を考慮して形状を作り込む必要があるが、内部欠陥不良を恐れて必要以上に鍛造する工程となり、生産性が低下する。一方、生産性や歩留まりを考慮すると、内部欠陥不良になる可能性がある。そのため、生産性や歩留まりを犠牲にして過剰に内部欠陥を潰す鍛造を行う傾向にある。また、RR 鍛造工程における工程設計では、型鍛造のために過充填となった場合では鍛造荷重がプレス力量を上回って鍛造できなくなる恐れがある。一方で、未充填となった場合では、製品で欠肉となる恐れがある。そのため、比較的安全代のある素材形状・金型形状の工程となる。このような知見や経験による工程設計では、相反する2つの事象を適正化することが困難であるといった問題があった。

工程設計における適正化方法の一つの手段として、従来から数値シミュレーションの適用が有効で、数値シミュレーションを用いて製造条件などを適正化する試みがなされていた。すなわち、1970年代後半から有限要素法（FEM）を用いた解析技術が発達し、複雑な実現象に適用可能な工学的モデルが提案されるようになった。ただし、塑性変形は非線形方程式に

基づいて記述され、工具との接触問題や加工発熱などを伴うことから計算時間は莫大となり、さらなる計算機能力向上を待たざるを得なかった。そのような状況から、従来の数値シミュレーション技術の鍛造工程設計への適用は、簡易な工程解析や各種鍛造条件が変形挙動に及ぼす影響調査などの範囲に限られていた。しかし、これらは、個々の製品あるいは形状に対して、変形解析（数値シミュレーション）を実施したもので、製品毎の工程設計であるとともに、軸対称に代表されるような比較的簡易な形状であった。一方で、数値シミュレーションを鍛造加工のような三次元変形に加えて、バリも発生するような変形挙動に適用する試みもされてきたが、上記したように計算時間が莫大にかかる上、メッシュが潰れることによって計算が止まるなどの問題があった。それ故に、数値シミュレーションを実作業での工程設計に適用することは困難であった。しかしながら、近年のコンピュータ性能の向上により、複雑な三次元変形解析や比較的メッシュ数が多い数値シミュレーションでも実用に耐えるようになってきている。加えて、大変形やバリを伴う変形においても、解析が止まる寸前でリメッシングを行うことで解析エラーを回避することが可能になりつつあり、実用化された例も報告されている。以上から、従来の知見や経験に依存した工程設計に対して、数値シミュレーションを活用した理論に基づく工程設計技術を構築することが重要である。

そこで本論文では、熱間鍛造に関して三次元剛塑性有限要素法による数値シミュレーション技術を構築して、船舶用の一体型クランク軸を製造する熱間自由鍛造工程および熱間型鍛造工程に適用し、数値シミュレーション技術を活用することで内部欠陥閉鎖、鍛造形状および鍛造荷重を容易に予測可能な数値モデル式を提案した。これらを活用することで熱間鍛造工程において、理論に基づいた工程設計技術の開発を行うことを目的とした。

本論文は6つの章により構成されている。

第1章の緒論では、本論文で対象とする船舶用一体型クランク軸における課題を概観した。このような問題解決の基盤として、鍛造工程設計技術の必要性および重要性を述べるとともに、本論文を行うに至った背景を触れ、本論文の目的を述べた。また、本論文の全体の構成についてまとめた。

第2章の数値シミュレーション技術の構築では、自由鍛造工程および型鍛造工程における数値シミュレーション技術の構築について記述した。数値シミュレーション技術の構築には、構成関係式に必要な材料物性値を明確にする必要があるため、モデル実験材の変形抵抗値と、船舶用一体型クランク軸に実際に使用されている変形抵抗値について述べた。また、鍛造荷重や鍛造形状に影響を及ぼす材料-金型間の摩擦係数についても、圧縮工程や鍛伸工程のモデル実験を通じて同定した。さらに、自由鍛造工程で重要となる内部欠陥閉鎖に関する数値シミュレーション技術の構築については、内部欠陥閉鎖パラメータ  $G$  の導入を行い、モデル実験にて  $G=0.21$  以上で内部欠陥が閉鎖することを明らかにした。加えて、自由鍛造工程で発生する表面割れについては、破壊パラメータ  $C$  を導入し、各温度とひずみ速度により、各条件での破壊パラメータ  $C$  値を明らかにした。一方、型鍛造であるRR鍛造における数値シミュレーション技術の構築については、鍛造荷重に影響を及ぼす①実機変形速度、②素材温度分布、③体積減少率および④摩擦係数を同定し、精度よく鍛造形状が予測できる数値シミュレーション技術を構築した。

第3章の軸材鍛伸工程設計技術の開発では、自由鍛造工程における工程設計技術の構築について記述した。はじめに、鍛伸工程の圧縮工程および強圧下工程における内部欠陥閉鎖挙動について検討し、圧縮工程では内部欠陥を閉鎖させるために必要な圧縮率は少なくとも40%以上であることを示した。また、強圧下工程では、品質工学手法を適用し、内部欠陥閉鎖パラメータ  $G=0.21$  以上を満たす工程設計について言及した。さらに、鍛伸工程である四角工程・八角工程では、数値シミュレーション技術を活用した幅広がりに関する数値モデルを構築し、実機鍛造実験にて $\pm 5\%$ 以内の精度で予測できることを明らかにした。タップ工程

では、素材形状・素材-工具噛み込み量・回転角度が寸法精度に及ぼす影響について調査し、仕上げ寸法を適正にする鍛造条件を明確にした。最後に、鍛伸工程中に発生する表面割れについて、破壊パラメータを用いることで数値シミュレーションによる表面割れ発生位置の予測が可能であることについても言及した。

第4章の一体型クランク軸RR鍛造工程設計技術の開発では、型鍛造工程（RR鍛造工程）における工程設計技術の構築について記述した。はじめに、工程設計に重要な因子である鍛造荷重について、素材温度分布と数値シミュレーションによる鍛造荷重の結果を用いて簡易モデル式を構築し、実機鍛造実験から精度よく一致していることを明らかにした。加えて、汎用的に種々の金型形状に適用できるように上記した簡易モデル式の汎用式化し、この式を用いた工程設計を行った。この工程設計を実機に適用し、精度よく鍛造荷重が予測できることを明らかにした。最後に、品質工学手法を適用し、鍛造荷重と機械加工代の余肉部に着目した工程設計手法を構築するとともに、数値シミュレーションにて予測精度の検証を実施した。

第5章のシェルリング鍛造工程設計技術への適用では、上記した自由鍛造工程や型鍛造工程を元に他の熱間鍛造工程であるシェルリング鍛造工程への適用の可能性を検討した。はじめに、孔明け工程への第2章で構築した数値シミュレーション技術の適用について言及した。これを用いて、初期鋼塊内部における材料流動予測を行った。次に、リング鍛造工程では、軸方向への伸縮について、そのメカニズムを解明するとともに、鍛造条件による軸方向のリング長さに関する予測式の構築について述べ、実機鍛造による実測値との比較により精度検証を行った。最後に、端部口絞り拡径鍛造における形状予測については、モデル実験による現状の問題点を把握するとともに、新たな鍛造方法を開発した。さらに、実機実験を行うことで、新たな鍛造方法の効果について言及するとともに、端部口絞り量の予測式を構築した。

第6章では、これまでの研究を通じて得られた知見について総括した。