

学 位 論 文 題 名

圧力容器用大型リングの孔拡げ鍛造に関する研究

学位論文内容の要旨

1960年代の日本の高度成長期において、石油消費量の拡大は地球規模の環境悪化と将来における石油資源の枯渇問題を引き起こし、必然的に代替エネルギーとして原子力発電への転換を促した。石油に含まれる硫黄分除去のための石油脱硫装置の早期建設とエネルギー転換のための原子力発電設備の建設は社会的要請であった。これらの設備は効率化を目指して集約化・大型化がおこなわれ、必然的に使用される圧力容器もまた巨大化してきた。当初圧力容器の製造方法は、厚板圧延鋼板の曲げ加工と溶接により製造されたが、品質に対する信頼性と供用中検査の簡略化を目指すことから、鍛造リングを用いた設計へと変遷してきた。

自由鍛造によって製造される大型鍛鋼部品は、重厚長大分野である各種産業設備や装置における主要部品として重大な役割を担ってきた。自由鍛造はそのフレキシビリティゆえにどのような製品に対しても適用可能ではあるが、鍛造作業者の判断や能力によって製品の品質や精度が変わるといった、所謂、人的要因を残す分野でもある。特に圧力容器用大型リングの鍛造作業は熟練を要する作業の一つであり、リングが大型化するほど難しい作業となる。大型リング鍛造の難しい点は、リングの直径を拡大する孔拡げ鍛造にあり、通常的自由鍛造では、例えば実体鍛造材の鍛造寸法を決めるのはプレスの上下金敷の間隔であり、容易にコントロールできる。しかし、孔拡げ鍛造においては、断続的に回転送りとを与えながらリング周上の点を部分圧下することによりリング直径を少しずつ拡大する成形法である。そのため、部分圧下に伴ってリングには不可避免的にゆがみが発生してしまう。鍛造リングに生じたゆがみの修正に関しては、単純に長径側をつぶすことで修正可能であるが、リングが巨大化し横型リング鍛造機によって孔拡げ鍛造されるリングは、このような修正方法さえ不可能となる。ゆがみのない大型リングの鍛造成形が可能になれば、鍛造取代を削減して鋼塊の持込重量を低減し、機械加工による切削代も低減されることから、大幅なコスト削減が可能となる。

自由鍛造成形は種々の作業因子が複雑に絡むこと、熱間加工のため寸法測定も十分な精度で計測できないことなどの理由から、工学的な実験・研究はほとんど行われていないのが現状である。このような背景にあって、本研究は、孔拡げ鍛造にお

けるリング直径が変形拡大する過程を解析し、ゆがみの発生機構を解明することによってゆがみを発生させない鍛造法の開発を最終目的として実施されたものである。

本論文の第2章では、まず、従来不明であったリングの直径拡大の変形過程を実験的に明らかにする。そのために、正確な圧下量と確実なセンタリングおよび正確な回転送り量を与えられる横型リング鍛造装置と鉛実験材を使用して、リングの部分的な塑性変形がリング全体の形状にどのような影響を与えるかを明らかにする。孔拡げ鍛造によるリングの直径拡大の過程が明らかになれば、ゆがみ発生の少ない鍛造法やゆがみ修正方法についての対策が得られるためである。実験結果を分析して理論計算へ関連付け、同時に有限要素法を利用した解析をおこなって比較し、実験結果の妥当性を裏付ける。その上で圧下位置に対するリング各位置の直径拡大率を定量化し、圧下区間と圧下量からリングの変形を定量的に予測する方法を試みる。

第3章では、第2章で得られたリングの変形過程の解析結果を利用して、孔拡げ鍛造中のゆがみの発生を少なくするための圧下方法の条件を明らかにする。実際の孔拡げ鍛造においては、1回の圧下量を極端に大きくすることはゆがみの発生を大きくすることから、圧下量は肉厚の10%以内に抑えられる。通常、荒地状態からリングの最終仕上り直径に達するまでに10周程度の孔拡げ鍛造が必要となる。そのため圧下方法によってゆがみの累積がどのように変化するかを実験的に確認する。

また、リングの成形精度の点からはリングローリングミル方式の鍛造法が有利であるが、厚肉リングの鍛造では肉厚内部の鍛錬効果について原子炉用圧力容器のように、内部品質を重視するものもある。そのため、横型リング鍛造方式とリングローリングミル方式の鍛錬効果を比較して、リングローリングミルの適用について考察する。更に、これらの知見を発展させてリング鍛造中に発生したゆがみを修正するためのエキスパートシステムの開発へ発展させる。

第4章では、これまでに得られた知見を基に、ゆがみのないリングを成形するために必要な条件を考察する。第3章において開発されたエキスパートシステムは、リングの肉厚が部分的に異なってしまう欠点があることと、鍛造作業中にリング形状の適切な把握と修正の時期を判断する必要がある。これらの人的要因をできるだけ排除した作業方法の確立が、鍛造リングの品質と成形精度の向上に欠かせないこととは言ってもない。そのために鍛造成形精度への影響因子を分析し、ひずみのない孔拡げ鍛造のための具体的な手段としてV金数とR金数を提案する。提案した手段の有効性について、近年のコンピュータの性能向上と解析ソフトの研究発展により、複雑な大変形塑性解析を可能にした鍛造専用解析ソフトによってシミュレーションし、人的要因を排除した大型リング孔拡げ鍛造方法を確立する。

第5章は各章の結果をまとめた結論であり、本研究で得られた成果をまとめ大型圧力容器部材の鍛造成形について総括している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	石川	博將
副査	教授	野口	徹
副査	教授	但野	茂
副査	助教授	佐々木	克彦

学位論文題名

圧力容器用大型リングの孔拡げ鍛造に関する研究

近年の石油消費量の拡大と代替エネルギーとしての原子力発電への転換は、石油脱硫装置と原子力発電設備の建設を促した。これらの設備は効率化を目指して、集約化・大型化が行われ、使用される圧力容器も巨大化してきた。特に、原子炉の単機容量の増大および被検査性の改善と ISI(供用中検査)を容易にするため、圧力容器部材の大型化、一体鍛造化が要請されてきた。その結果、大型リング鍛造による製造が一般的となったが、大型品の鍛造はプレスの大きさに物理的制限を受け、この製造限界を打破る新しい発想から横型リング鍛造機が開発された。

自由鍛造はどのような製品に対しても適用可能ではあるが、圧力容器用大型リングの鍛造作業は熟練を要する作業の一つであり、リングが大型化するほど難しい作業となる。このことは、横型リング鍛造機による作業でも同様である。大型鍛造リングの難しい点は、リングの直径を拡大する孔拡げ鍛造にあり、通常 of 自由鍛造では、たとえば、実体鍛造材の鍛造寸法を決めるのはプレス of 上下金數 of 間隔であり、容易にコントロールできる。しかし、孔拡げ鍛造は断続的に回転送りとを与えながらリング周上 of 1 点を部分圧下することによりリング直径を少しずつ拡大する成形法であるため、部分圧下に伴うゆがみが不可避免的に発生してしまう。鍛造リングに不可避免的に生じるゆがみの修正に関しては、単純に長径側をつぶすことで修正可能であるが、リングが巨大化し横型リング鍛造機によって孔拡げ鍛造されるリングは、このような修正方法さえ不可能である。

本研究は、このような大型リングの孔拡げ鍛造におけるゆがみ発生 of 過程を定量的に解明し、ゆがみのないリング of 鍛造方法を確立する目的で実施されたものである。まず、孔拡げ鍛造におけるリング直径 of 拡大過程を実験的に解明し、曲り梁 of 理論式を適用して、リング周上 of 1 点を部分圧下することによって各直径 of 拡大量を定量的に求めた。また、有限要素法によるシミュレーションも実施した。その結果、リング of 孔拡げ解析により圧下位置に直交する直径が最も拡大することが明らかとなり、圧下位置に対する幾何学的位置関係によって、リング直径 of 拡大率が一義的に決定できることが判明した。ついで、リング of 鍛造ゆがみを軽減する手法を得るために種々の圧下方法によって孔拡げ実験を行い、

最もゆがみを少なくする圧下方法は連続螺旋圧下法であることがわかった。圧下方法によるゆがみの解析結果から、リングローリングミルによるリング鍛造がこの連続螺旋圧下法に類似した方法であること、および精密鍛造のための鍛造方法選定に関して、リングミル方式と横型リング鍛造方式の違いによる鍛錬効果の比較実験を行い、超大型の圧力容器の製造方法として外径の制限の無い横型リング鍛造方式が適しているが、鍛造精度は、その表面粗さも含めてリングミル方式に及ばないことが判明した。そのため、横型リング鍛造方式で真円度向上のための製造方法と表面粗さの改善などの検討が必要であり、生じたゆがみの修正手段として、部分圧下によるゆがみ修正エキスパートシステムの開発を行った。しかしながら、このエキスパートシステムを適用しても、極端なリングのゆがみには、まだ十分には対応できないことが明らかとなった。最後に、孔拡げ鍛造の成形精度への影響因子について分析し、その対策として、金敷形状として孔拡げV金敷とR金敷を考案し、鍛造解析専用ソフトを用いて、V金敷とR金敷による矯正解析を行い、まず、V金敷によって、荒地から最終仕上がり直径までゆがみの無いリングが段取り替えなく成形できることを確認した。また、真円度の高い大型リングの鍛造成形が可能であることも明らかとなった。他方、R金敷の曲率と成形するリングの最終直径が一致している場合、平均直径に対する誤差率で0.2%程度の高精度が得られること、および、金敷角度が大きいほどリング外周の塑性変形を拘束し、内周側の静水応力を増し内圧を受ける圧肉円筒と同様にリングを真円にする効果を生み出すなどR金敷の優位なことが明らかとなった。

これを要するに、著者は、大型圧力容器の製造時に生じるゆがみに関する有益な新知見に基づき、R金敷を用いた孔拡げ鍛造による高精度大型リングの製造を可能にするなど、安定した品質の圧力容器製造法として新たな提案をしており、塑性加工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格のあるものと認める。