

## クランクシャフト軽量化技術の開発

## Development of Technologies for Lightening Crankshaft

田村 憲司*	薮野 訓宏	黄 三守	高本 奨
Kenji TAMURA	Kunihiro YABUNO	Samsoo HWANG	Sho TAKAMOTO
山下 智久	木村 幸彦	松井 友吾	
Tomohisa YAMASHITA	Yukihiko KIMURA	Yugo MATSUI	

## 抄 録

近年、環境保護の観点から、自動車の燃費改善への要求がますます厳しくなっており、エンジンの重要部品であるクランクシャフトについても一層の軽量化が望まれている。クランクアームのピン近傍を機械加工や熱間鍛造により中空として軽量化する方法が提案、実用されてきているが、これらの方法ではコストや剛性面での制約が大きい。そこでピンショルダに穴をあける形状に代わり、軽量化と高剛性化を両立できる形状を新たに考案した。その形状を実現する工法は既に開発しており、量産試作によってその有効性を確認した。

## Abstract

Recently, for environmental protection, technology for reduction of fuel consumption of automobile has become increasingly important and thus, demand for weight reduction of a crankshaft, which is one of the most important parts in an internal combustion engine, has become stronger. For lightening crankshaft weight, some methods to equip each pin shoulder of a crankshaft with a lightening hole by drilling or hot forging have been proposed and applied to real products. However, in those methods, there may be some constraints on such as production cost, obtained stiffness of the product, and so on. Therefore, a new crankshaft design has been developed to satisfy both weight reduction and sufficient stiffness of a crankshaft, instead of giving lightening holes. A new forging method to make such a new lightweight crankshaft has already developed. By trial forging at a forging workshop in Nippon Steel Corporation, it has been confirmed that the new forging method is sufficiently applicable to mass production with successfully satisfying both demands for lightweight and enough stiffness of crankshaft.

## 1. 緒 言

近年、環境保護の観点から、自動車の排出ガス規制や燃費改善への要求がますます厳しくなっており、エンジンの重要部品であるクランクシャフトについても一層の軽量化が望まれている。また、自動車の電動化が急速に進みつつあるが、例えばシリーズハイブリッド車のように発電を主体とするエンジンを採用する場合においても、車体全体の軽量化はエネルギー効率の観点から不可欠であり、やはりクランクシャフトの軽量化は必須である。

日本製鉄(株)では熱間鍛造によってクランクシャフトを製造しているが、上記状況を鑑みて、鍛造クランクシャフトの軽量化により自動車産業界に貢献することは喫緊の課

題である。鍛造クランクシャフトは強度、剛性において鑄造品よりも優れるが、形状が複雑であるほど鍛造時に金型からはみ出す余肉部である“ばり”が多くなり鍛造歩留の低下を招くため、軽量化を狙って複雑な形状を安価に成形することは容易ではない。

一方、最近では積極的な軽量化として、クランクアームのピン側にあるピンショルダ部を機械加工や熱間鍛造によって中空として軽くし、これによりピン側と重量バランスをとるカウンターウェイト部も軽量化する“ピン中空化方式”が実用されてきている。しかしながら、これらの方法ではコストや剛性面での制約が大きい。

そこで日本製鉄では、上記のようにピンショルダに穴をあける形状に代わり、ピンショルダ全体を薄肉化すると

\* 鉄鋼研究所 交通産機品研究部長 博士(工学) 兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891

もに、アームのピンショルダ外縁を厚肉化することで軽量化と高剛性を両立できる形状を新たに考案した。この形状であれば、穴をあける設計に対して軽量化効果が期待でき、日本製鉄製クランクシャフトが性能優位となる。さらにその形状を実現する工法として、ピンショルダ部を後から凹ませるのではなく、あらかじめ薄肉成形したアーム部のピンショルダ外縁部を折り曲げて厚肉とする工法を開発し、量産試作によってその有効性を確認した。以下、その詳細について報告する。

## 2. クランクシャフトとその軽量化の現状

### 2.1 クランクシャフトに求められる性能

クランクシャフトの代表的な例として、直列4気筒エンジン用のものを図1に示す。クランクシャフトはシリンダー内で生じた爆発によるピストンの往復運動を回転運動に変える回転部品である。軸心から偏心した位置にあるピンには、コネクティングロッドを介してシリンダーからの爆発力が伝わるが、この際に生じる回転偏心力を低減するために、ピンとジャーナル軸を挟んだ反対側には重量バランスをとるカウンターウェイトが設けられる。

クランクシャフトには上記のように爆発荷重を負担するため十分な疲労強度が必要となる。また、静粛性等のため十分な剛性が求められる。一方、燃費向上のためクランクシャフトは軽量であることが必要であり、強度、剛性と軽量化の両立がその設計時の鍵となる。なお、クランクシャフトはエンジン部品の中でも重量が大きく、燃費に及ぼす影響は大きい。このため、従来の設計では、軽量化のために、例えば軸心に図1中に示す“肉抜き”と呼ぶ凹みを設けて部分的に薄肉化している。

### 2.2 日本製鉄のこれまでのクランクシャフト軽量化設計

クランクシャフトは回転中心軸のジャーナルを境として、ピン側、カウンターウェイト側に分けられるが、日本製鉄ではそのピン側、カウンターウェイト側各々を別のアプローチで軽量化最適化している。

具体的には、まず方法によりピン側の最適化設計をする。その上で、ピン側とバランスをとるためのカウンターウェイト側を3モーメント法により最適化する。本節では以下、その詳細を説明する。

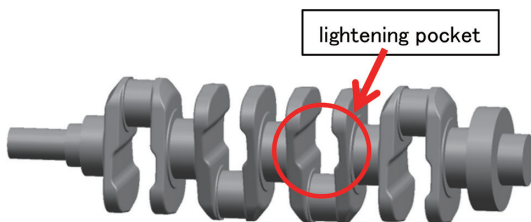


図1 4気筒クランクシャフト  
Crankshaft for 4-cylinder engine

### (a) 方法によるピン側形状の最適化

方法<sup>1,2)</sup>とは表面形状を設計変数とする形状最適化の手法である。具体的には、FEM解析の各節点に対して目的関数に関する感度係数を求め、感度係数に応じて節点を移動させることを繰り返し、順次形状を変更して最適形状を求める方法である。ピン側の設計では剛性を制約条件、質量ならびに重心半径を目的関数とし、方法を用了最適化を実施している。具体的には汎用コードOptishape<sup>3)</sup>を用い、抜け勾配や最小肉厚といった鍛造上の制約も加味して、ピンショルダ部、肉抜き部等の形状を最適化する。このアプローチにより設計パラメータ(例えば各部位の厚さやR)を仮定することなく直接、最適(最軽量)な形状が得られる。その一例を図2に示す。

### (b) 3モーメント法によるカウンターウェイト側形状の最適化

3モーメント法とは、連続梁理論に基づき準静的状態を仮定して運転中の軸受荷重を推定する手法である。図3に同手法によるカウンターウェイト軽量化について示すが、クランクシャフトを多点支持の段付き連続梁で近似する。ここでは、制約条件は軸受荷重、設計変数を各カウンターウェイトの質量とした最適化により、カウンターウェイトの最適重量配分および軽量化設計を実施している。

### 2.3 ピン中空化方式の概要

前述のように最近では、ピンショルダ部に中空部を設ける“ピン中空化方式”が用いられている。本節では、その効果と現状課題について述べる。

#### 2.3.1 ピン中空化とそのメリット

クランクシャフトは回転機能部品であり、スムーズに回転させるためには、先述のようにピン側とカウンターウェイト側のバランスを考慮する必要がある。図4に示す通り、ジャーナル軸を境に、ピン側の質量 $m$ と重心半径 $r$ 、および、カウンターウェイト側の質量 $M$ と重心半径 $R$ とすると、

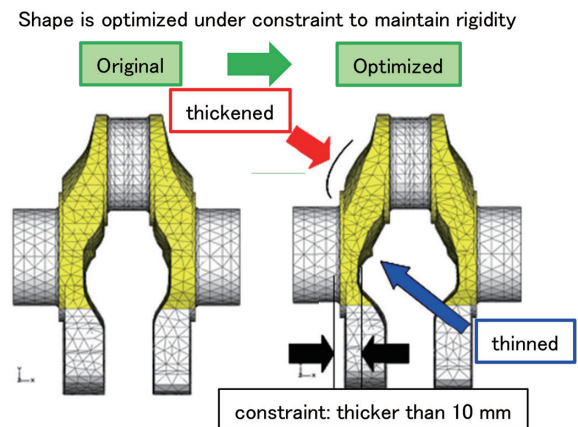
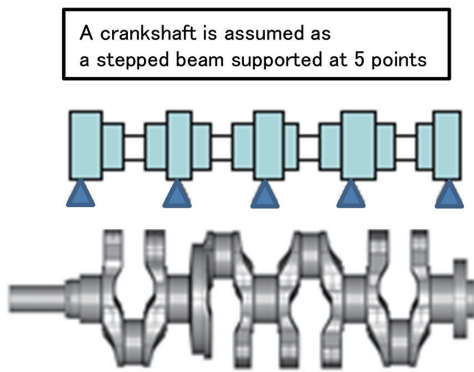


図2 方法による形状最適化  
Design optimization based on traction method



A crankshaft is assumed as a stepped beam supported at 5 points

<Optimization conditions>

objective function	mass of C/W
constraint	maximum journal bearing load
design variable	mass of C/W radius of center of gravity of C/W

図3 3モーメント法によるカウンターウェイト(C/W)軽量化 Counterweight (C/W) optimization based on three-moment-method

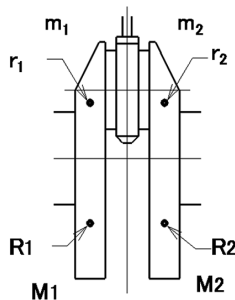


図4 ピン側およびカウンターウェイト側の質量, 重心半径 Mass and radius of center of gravity of pin side and counterweight side of each arm

これらの各値からピン側, カウンターウェイト側の質量モーメント  $mr$  ならびに  $MR$  がバランスするように設計する。したがって, ピン側を軽量化すればピン側の質量モーメントを小さくでき, これと同等の質量モーメント分の軽量化をカウンターウェイト側でも実施することができる。

ピン中空化方式では, ジャーナル軸から離れた位置に穴をあけるため, 質量の軽量化に加え, ピン側の重心半径を小さくできる。このため, クランクシャフト全体の軽量化効果が大きい。したがって, ピン中空化方式は, いわば二重の軽量化効果を得ることができ, 従来の軽量化手法よりも有効な軽量化策ということが出来る。

### 2.3.2 従来のピン中空化例と課題

#### (a) 機械加工による中空化

図5は機械加工によるピン中空化の事例である。穴加工としては, ピン内部まで加工を行うものや, 貫通穴とする場合などがあるが, いずれの方法でも, 機械加工工程が必要になり製造コスト増となる上, 穴相当分の体積が加工で除去され, 歩留の低下を招く。

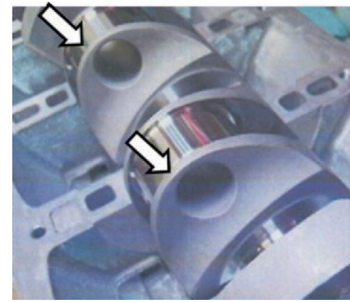


図5 機械加工の中空品例 Drilled holes in pins

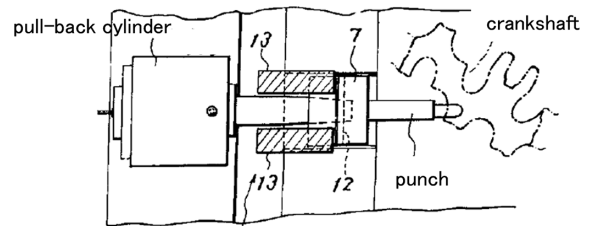


図6 日本製鉄の穴あけ加工例 Schematic drawing of punching system to make a hole in a pin

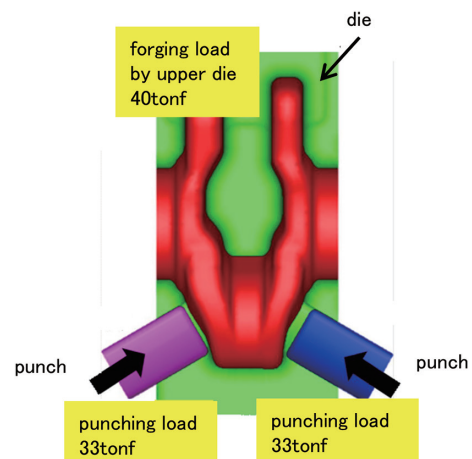


図7 ポンチ押し込み FEM モデル FEM model of hole making analysis at pin shoulders with punch

#### (b) ポンチによる凹み成形

熱間鍛造によるピン中空化例として, 日本製鉄で出願した実用新案例<sup>4)</sup>をベースに設備および製造方法を検討した。図6に前記実用新案の設備構造を示す。プレスを降下させると, カムを介して穿孔工具(パンチ型)を押し出す機構であり, 穿孔後, シリンダーでパンチを引き戻すものである。

図7に, 上記機構と同様にピンショルダにパンチ型を押し込む解析モデルを, 図8にピンボトム部に生じた変形を示す。同図に示すように, パンチ型をピンショルダ部へ押し込むと, 反対側に材料が押し出されてピンの一部が変形し, 噛みだしを生じることを確認した。

また, パンチ型を押し込むには, 一か所のパンチ型につき 33 tonf もの力が必要であり, この方法を実用化するには,

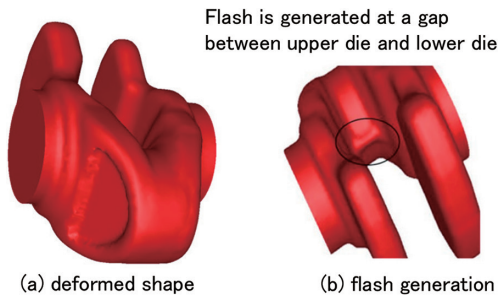


図8 変形解析結果  
Analytical result of hole making process

加圧能力の大きな設備を新規に設置する必要がある。

そこで、ピン中空化に対する新技術として、以下の2点、すなわち

- 機械加工によらない、一連の鍛造プロセスで実現可能であること
- ピン中空化加工によって、周辺部にひずみを生じないことを実現できる軽量化技術を確立すべく、新たな形状設計および工法を開発することとした。

### 3. 日本製鉄独自の軽量化工法の開発

#### 3.1 剛性に寄与する基本形状

剛性を満足しながらクランクシャフトを軽量化しうる形状を考えるために、まず運転中のクランクシャフトに作用する変形について検討した。

クランクシャフトには図9(a)に示すように偏心したピンに爆発力が入力され、これによりピンの両側のアーム部が“ハ”の字型に開こうとして曲げ変形が生じる。一方で、同時にピンが回転するため、アームにはねじり変形も生じる。したがって、クランクシャフトに求められる剛性とは、曲げ変形に対する剛性とねじり変形に対する剛性である。

次に簡易モデルにて曲げ剛性、ねじり剛性に寄与する形状について検討した。一般に、板部材の曲げ変形に対しては、横断面の厚みを増して断面2次モーメントを大きくすれば剛性が高まる。表1に板の曲げ変形解析例を示す。以下、表1、表2の例いずれも、材料はS45Cの室温20℃材とし、汎用コードDEFORM-3Dにて弾性解析を実施したも

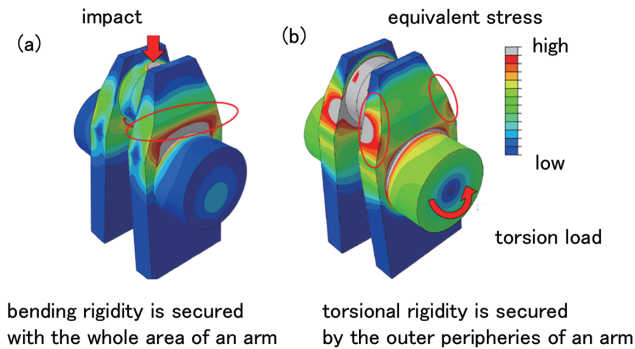


図9 曲げ、ねじりで生じる応力  
Distribution of caused equivalent stress by (a) Bending and (b) Torsion

のである。

同表の左列には幅78mm、長さ80mm、厚み5mmの板を長さ方向の一端を拘束して、反対側に摩擦係数を0として傾斜面を有する工具で図の上方へ向けて力を加えた例を示す。一方、同表右列には、断面中央の厚みを8.75mm、外縁の厚みを3.75mmとした凸断面形状の板材を曲げた解析結果を示す。同表下に表記のように、断面積は前述の均一厚み板と同じであるにもかかわらず、凸断面形状の方が同じ変形量を与えるのに要する力が大きくなった。したがって、例えばピン-ジャーナル中心を結ぶアーム中央付

表1 板曲げ解析  
Sheet bending analysis

	Flat plate	Plate with convex shape
Gross sectional shape		
Before bending		
After bending		
	bending load = 6,614N	bending load = 10,412N

表2 円盤ねじり解析  
Disk twisting analysis

	Flat disk	Disk with thickened edge
Gross sectional shape		
Initial shape		
Twisted by 5 degrees		
	torsion torque = 549kN-mm	torsion torque = 778kN-mm

近の肉厚を選択的に維持、確保し、外縁部を薄肉にすることで、曲げ剛性を維持しながら軽量化が図れることが明らかになった。

一方、板状部材のねじり剛性については、部材の外縁部の厚みが大きく寄与する。表2に円盤のねじり変形弾性解析例を示す。同表左列には直径80mm、厚さ5mmの円盤を片側を固定し反対側を5°傾斜するまでねじり変形させた例を示す。同表右列には、左列と体積と外径を同一に保ちながら、底板厚3.83mm、外周部に5mm高さで径方向5mm幅の縁部を設けた場合の結果を示す。5°ねじるのに要するトルクを同表下に示したが、同じ体積、外径でも外縁部を有する場合には必要なトルクが大きく、ねじりに対して外縁の厚みが有効であることがわかる。

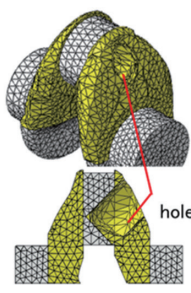
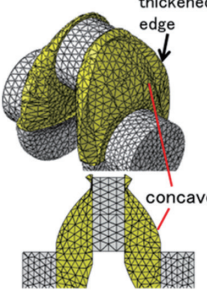
以上の結果から、本軽量化設計においては、この原理を活用して、ピンショルダ部の軽量化を図る。以下、標準的な直列4気筒エンジン用クランクシャフトを対象とした、設計、工法および設備開発を詳述する。

### 3.2 軽量化設計思想

前節で述べた基本思想に基づいて最適化したピンショルダ薄肉形状例を、単純に穴あけを施した形状例と合わせて表3に示す。穴あけ例では中央の狭い範囲を穴によって凹ませるのに対し、本設計ではピンショルダの広い範囲全体に薄肉に成形したアームの外周部のみ厚肉化することで、剛性を満足しながら軽量化を果たす。詳しくは、アームの中央付近は厚みを大きくして曲げ剛性を確保し、そこから外縁に向かうにしたがってピンショルダ部のアーム厚みを薄くすることで軽量化を図り、一方で最外縁部を厚肉としてねじり剛性を確保する設計としている。このような形状とすることで、25mm径×28mm深さの穴によりピンショルダが約100g軽量化されるのに対し、本設計品では曲げ剛性、ねじり剛性を穴あけ品と同等に維持しながら、穴あけ品からさらに約100gの軽量化効果が得られた。

表3 穴あけ形状と新形状

Comparison of pin shoulder shape between models with a drilled hole and newly designed

	Pin shoulder with a hole	New design
Shape		
Bending rigidity	7.85x10 <sup>5</sup> N.mm	7.85x10 <sup>5</sup> N.mm
Torsional rigidity	4.44x 10 <sup>5</sup> Nm/rad	4.44x 10 <sup>5</sup> Nm/rad

### 3.3 工法開発

3.2節で述べたアーム形状はピンショルダ外縁よりも内側の方が薄肉であり、通常の型鍛造では型抜きができず成形できない。そこで、あらかじめアームのピンショルダ外縁部に薄肉の余肉部であるフィン成形しておき、これを後から折り曲げる工法を想到し、開発した。実用性を考慮し、本開発においては従来工程数を維持する前提で検討した。

例えば、日本製鉄の5000tプレスラインでは、予備成形後に荒打、仕上打、の2度の型鍛造を施したのち、ばり抜き、整形の順で製品形状を得る。これらの工程数を増やさずに折り曲げ加工を実施すべく、本開発では仕上打でアームの外縁部に外周へ張り出す余肉部のフィン成形し、次いでばり抜きを施して図10(a)とし、これを次工程の整形工程で同図(b)のように折り曲げることにした。

#### 3.3.1 余肉部と金型の設計

整形工程後の素材はそのまま製品となる。したがって、整形工程で折り曲げ実施するにあたっては、必要な曲げ変形を与えながら周囲の不要な変形を抑制する技術の開発が最大の課題である。図11に折り曲げ加工時の材料および金型の断面形状の代表例を示すが、上方に張り出している材料の余肉部のみが変形し他部に余剰な変形を生じさせないためには、余肉部のフィン傾斜角 $\alpha$ と金型の傾斜角 $\theta$ の

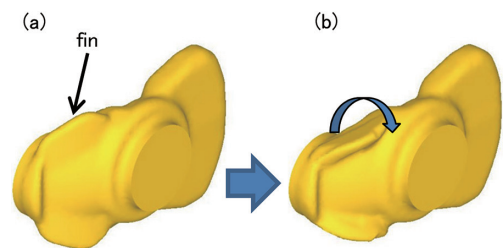


図10 折り曲げ前後のアーム形状  
Shape of newly designed arm when (a) Before bending and (b) After bending of fins

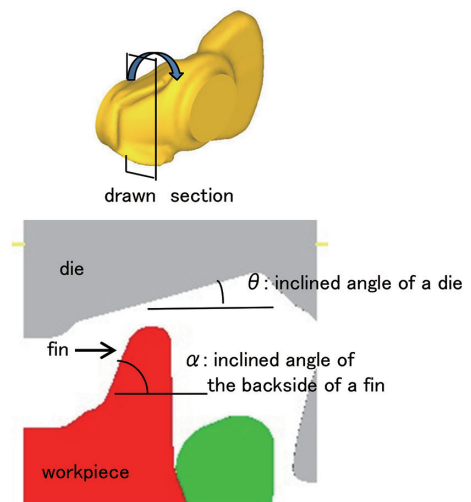


図11 フィン部と金型形状  
Design of fin and bending die

最適な組み合わせが最も重要となる。

図 12 には、良好な形状例と、余肉部フィン、金型ともに傾斜していない不良な形状例の折り曲げ断面を比較して示す。同図 (b) のように金型およびフィン部の形状が適切でなければ、余肉部が折れ曲がる座屈変形を生じる。さらに図 13 には上記 2 例の折り曲げ後の相当ひずみ分布を示すが、不良形状例では、広範囲にひずみが生じ、かつピン外周にもひずみが生じていることがわかる。

なお、折り曲げ成形においてはピンショルダ表面の変形を抑制することを目的として、図 14 のようにポンチによ

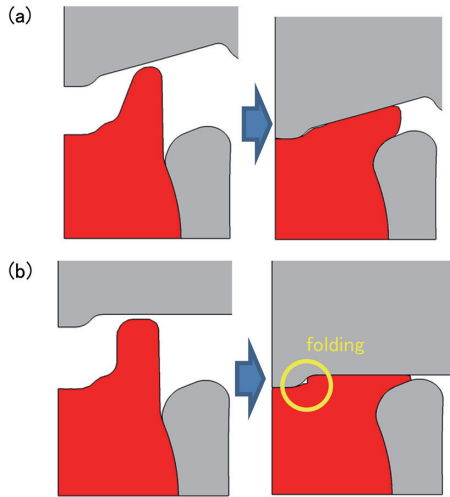


図 12 設計良否による変形断面比較

Comparison of bending deformation between (a) Desirable design and (b) Undesirable design

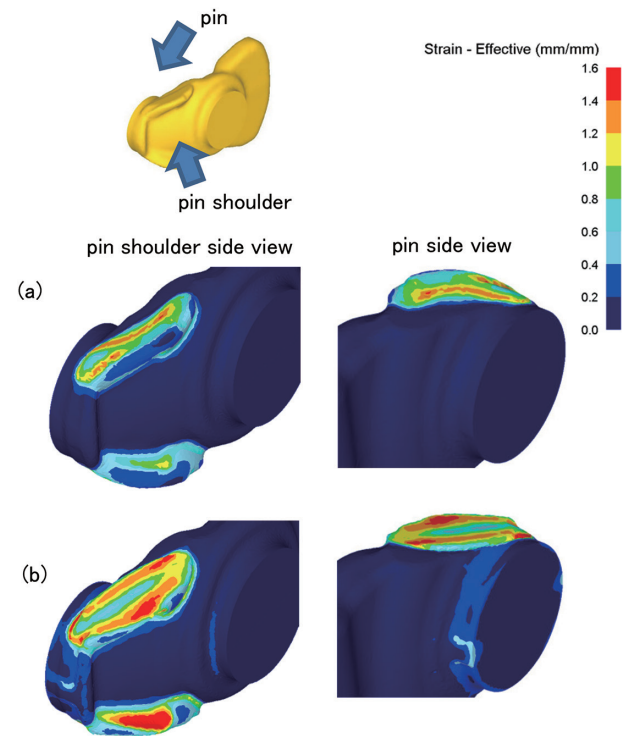


図 13 設計良否による折り曲げ後の相当ひずみ比較

Comparison of plastic strain distribution after bending between (a) Desirable design and (b) Undesirable design

てピンショルダ表面の保持をすることも有効である。この場合は、ポンチは穴あけをするのではなく表面保持のみであるため、押し付け力は微小ですむ。

### 3.3.2 温度のばらつきの影響

折り曲げ工法の最大の利点の一つは、極限られた領域にのみ変形を与えるため鍛造時の材料温度ばらつきの影響が極めて小さいことである。一般に、熱間鍛造においては加熱やその後の搬送、冷却状態によって数 10℃ 程度の材料温度ばらつきが生じることは不可避である。図 15 には、1100℃ 均一状態から余肉部先端を 1000℃、900℃ に放冷したのちに折り曲げ成形した解析結果を示す。折り曲げ後の断面形状にはほとんど差がなく、またいずれの場合でも図

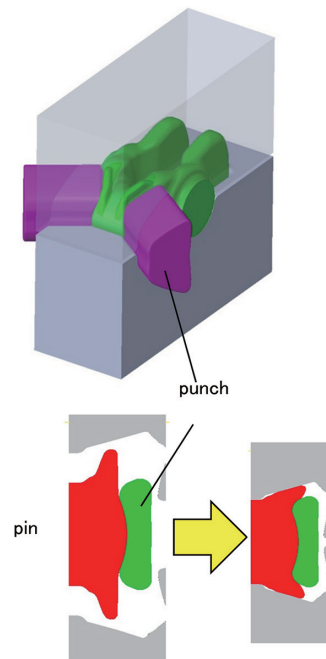


図 14 ポンチによるピンショルダ保持  
Holding pin shoulder surface with punch

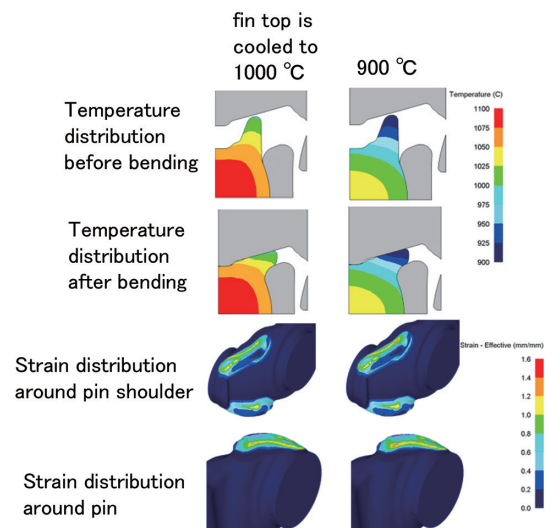


図 15 温度分布による変形比較

Influence of temperature drop on bending deformation

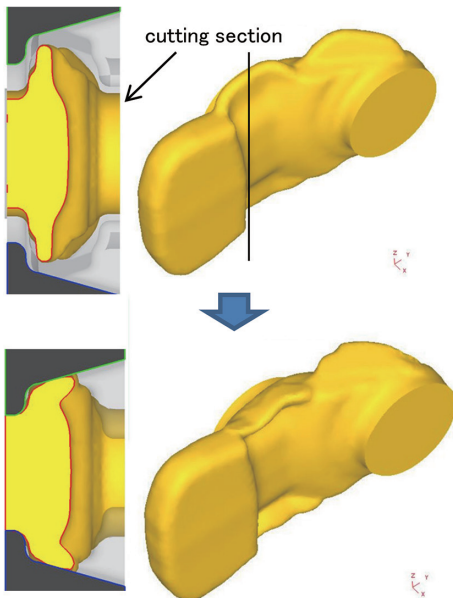


図 16 肉抜き折り曲げ  
Bending at lightening pocket portion

13(a) の良好形状例と同様に周辺部に余剰なひずみが全く生じておらず、本工法の上記利点が確認された。

### 3.3.3 肉抜き部の折り曲げ成形

ここまではピンショルダ部の軽量化について述べたが、同様の鍛造手法を肉抜き部にも適用すれば、更なる軽量化ができる。図 16 に肉抜き部の折り曲げ解析例を示す。ここでも、アームの中央から図の上下方向である外側に向けて厚みを減じ、余肉を折り曲げることで外縁を厚肉とし、軽量と高剛性の両立が可能となる。

### 3.4 生産設備の開発

これまでに図示してきたように直列 4 気筒エンジン用クランクシャフトでは、ピン中心とジャーナル中心を含む面に対してフィンを対称に配置し、折り曲げる。そのため、実際の折り曲げ工程において上下に張り出した余肉部を対称に成形するには、上型と下型が同時に材料に当接して折り曲げ加工を行うことが重要である。したがって、材料を加工中常に上下の型間中央に材料を保持する機構が必要となる。

そこで、これを満足する装置として、図 17 に示す材料保持機構を開発した。ここではジャーナル部を保持する断面例を示す。保持機構部は、上下型各々に設置したばねと当接することにより、常に上下型の図示上下方向中央に維持され、材料には上下型が対称に接触する。この状態で上下型による折り曲げ加工が進行し、加工終了後ジャーナルを保持する油圧シリンダーが除荷、後退した後、プレスが上昇して材料を搬出する。

以上により、局所変形ですみ、かつ温度影響の極めて小さい軽量化工法を確立した。次章では実機試作により実効

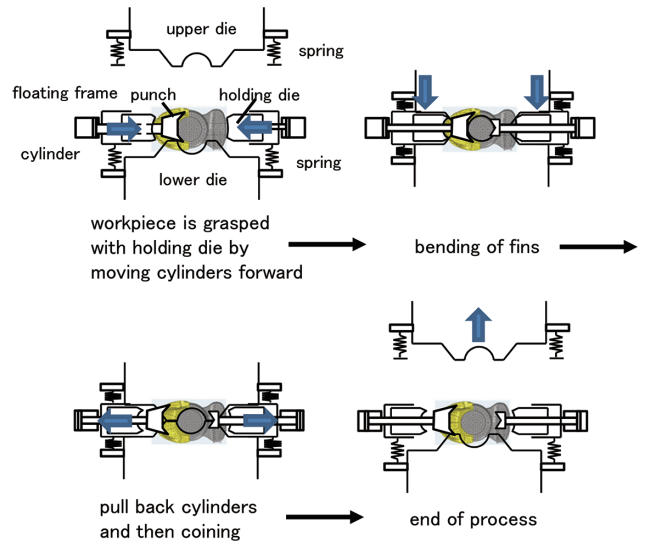


図 17 整形工程の材料保持機構  
Workpiece holding system with floating frame in fin bending and coining process

性を検証した結果を述べる。

## 4. 実試作による成形性および効果検証

まず開発工法の有効性を実験室で評価すべく、日本製鉄の技術開発本部尼崎研究開発センターにある 500t 油圧プレスにて、直列 4 気筒エンジン用クランクシャフトの部分モデルの熱間折り曲げ試作を実施した。図 18 に前章で説明した保持機構の外観を示す。図 10(a) に示したばり抜き後相当形状とした S45C の素材を機械加工により製作し、加熱炉で 1250℃ に加熱した後、折り曲げ成形を行った。成形後の試験体を図 19 に示す。図 13(a) や図 16 等で示した解析での検討通りの形状が得られており、実用化が十分に可能な工法であることを確認した。

そこで、次に直列 4 気筒エンジン用クランクシャフトの全体モデルを対象として実機量産試作を実施した。本量産

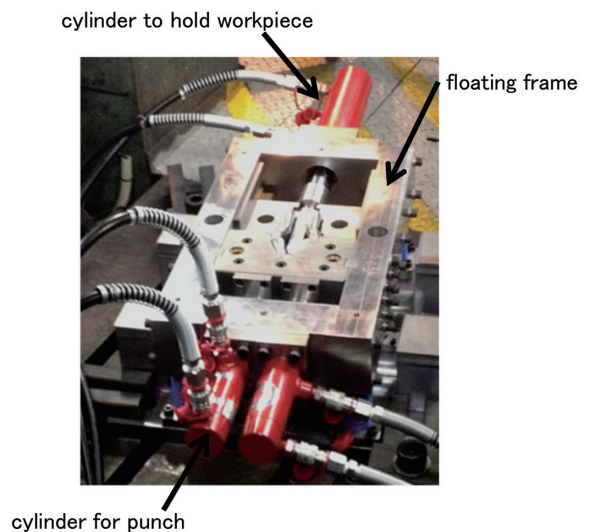


図 18 実験用保持装置  
Floating frame for experiment



(a) pin shoulder portion (b) around lightening pocket portion

図 19 実験試作品写真

Photographs of workpieces by laboratory experiment



(a) whole shape (b) around No.1 arm

図 20 実機試作品

Photographs of workpieces by test forging at Osaka Steel Works

表 4 試作品と解析結果の形状比較

Comparison of obtained shape between FE analysis and experiment

Distance from central axis of journals	#1pin	#4pin
45mm 		
65mm 		

試作は日本製鉄製鋼所の 5000t プレスラインで行い、ピンショルダ部の折り曲げのみを実施した。図 20 に試作品の外観を示すが、この試作品のピンショルダ折り曲げによる軽量化効果は 4% であり、かつ鍛造歩留は現行品と同一であった。表 4 は、この試作品と鍛造シミュレーションの断面輪郭形状を重ねて比較した結果であり、両者は精度よく一致していることがわかる。本試作では連続で 100 本の鍛造を問題なく終えており、量産可能であることを実証することができた。

本試作品の 3 次元形状測定結果を用いて剛性を解析した結果、図 21 に示すように、曲げ剛性、ねじり剛性ともに、

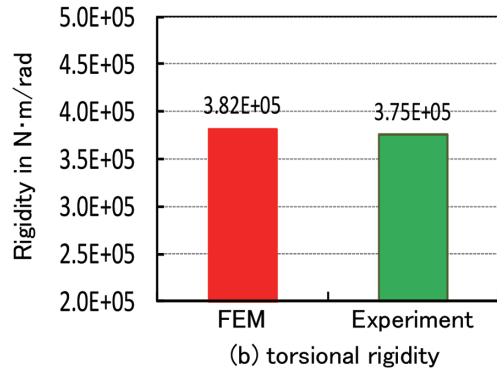
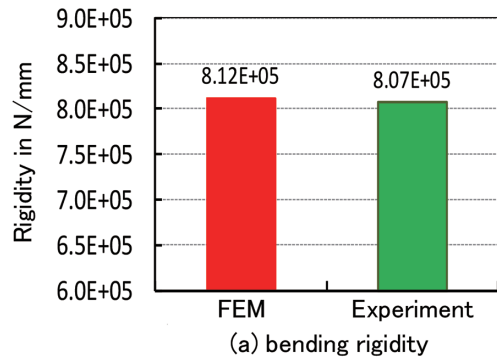


図 21 剛性比較 (1 ピン)

Comparison of rigidity between FE analysis and experiment

解析による事前検討と同等であることを確認している。

以上により、従来にない折り曲げという設計、工法開発により、高剛性でありながら、軽量であるクランクシャフトを製造できる鍛造技術を確立した。

## 5. 更なる進化—設計の高度化に向けて—

これまでは剛性の目標を定め、その中でクランクシャフトの軽量効果を追究してきた。現在の設計思想は、部材全体に均等に応力が分散する形状とすることであり、解析で応力分布を確認しているが、いわゆる“静的”な状態を前提としている。しかしながら、実際のエンジンの運転中は、上記のような静的現象に加え、振動や軸部の油膜圧力変動など、種々の現象が生じる。したがって、クランクシャフトの設計初期段階から、動的な現象も検証しながら設計していくことがより重要となる。

図 22 に、日本製鉄で実施している動解析の一例を示す。同図ではエンジンの運転状態でクランクシャフトを支持する軸受に発生する面圧を示しており、クランクシャフトの形状変更によって、焼き付きなどのリスクがどのように変わるかが確認、評価できる。

このように、クランクシャフトの設計変更がエンジンのシステムに及ぼす影響、あるいは逆に周辺部品の設計変更がクランクシャフトに及ぼす影響について、上記のような動解析評価技術を発展させることにより、近年自動車各社で急速に適用が進むモデルベース開発に日本製鉄では対応していく。また、今後更なる軽量化とエンジンの高効率化



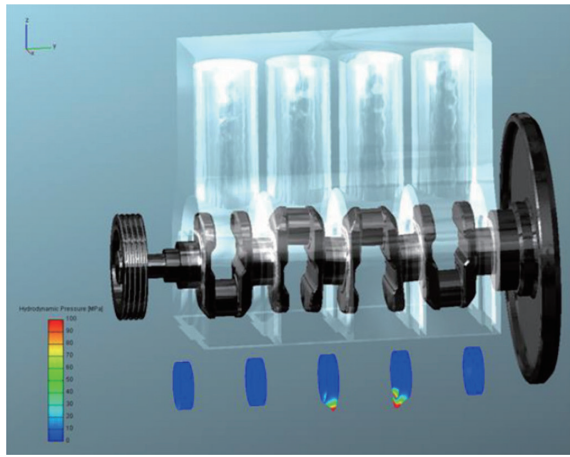


図22 動解析例

Example of dynamic analysis of crankshaft in an operational state of an engine: Distribution of hydrodynamic pressure on each journal bearing

を図る上では、図23のイメージ図に示すように、細軸化、ロングストローク化の傾向が強まるものと予想される。このような従来にない形状のクランクシャフトに対しても、動的特性を含めた評価により、軽量でエンジン全体の最適化に資するクランクの設計を実施していく。

## 6. 結 言

鍛造クランクシャフトを剛性を満足しながら軽量化する新設計および新工法を開発し、以下の結論を得た。

- 1) 従来のピン中空化方式のピンシヨルダに穴をあける方法に代わり、ピンシヨルダ全体を薄肉化するとともに、アームのピンシヨルダ外縁を厚肉化することで軽量化と剛性確保を両立できる形状を新たに考案した。
- 2) この形状を実現する工法として、ピンシヨルダ部を後から凹ませるのではなく、あらかじめ薄肉成形したアーム部のピンシヨルダ外縁部を折り曲げて厚肉とする工法を開発した。

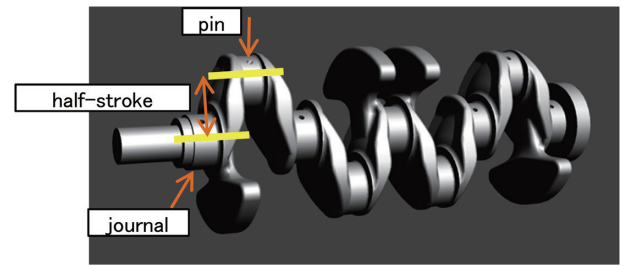


図23 今後のクランクシャフトイメージ

Schematic drawing of a crankshaft expected in the near future

- 3) 本工法では折り曲げ部だけの局所変形ですむことから、鍛造時の温度のばらつきの影響は極めて小さい。
- 4) 開発工法を日本製鉄製鋼所の5000tプレスラインにて量産試作し成形性を確認するとともに、試作品が所定の剛性を満足することを確認し、新工法の有効性を実証した。

今後日本製鉄では、開発した軽量化工法を深化させるとともに、解析技術のレベル向上を図っていく。設計段階からあらゆる評価を実施することで、単なるクランクシャフトのサプライヤーにとどまるのではなく、エンジン最適化を見据えたクランクシャフトを自動車各社に提案していく所存である。

## 参考文献

- 1) 下田昌利, 呉志强, 畔上秀幸, 桜井俊明: 汎用FEMコードを利用した領域最適化問題の数値解析法(力法によるアプローチ). 日本機械学会論文集, A編, 60, 2418(1994)
- 2) 畔上秀幸, 呉志强: 線形弾性問題における領域最適化解析(力法によるアプローチ). 日本機械学会論文集, A編, 60, 2312(1994)
- 3) 竹内謙善: ノンパラメトリック構造最適化技術の産業応用. 日本応用数理学会 2014 年度年会講演予稿集, 2014
- 4) 公開実用新案公報 昭 61-143727, 1986年9月5日



田村憲司 Kenji TAMURA  
鉄鋼研究所 交通産機品研究部長  
博士(工学)  
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



山下智久 Tomohisa YAMASHITA  
製鋼所 型鍛造品製造部 型鍛造品工場



藪野訓宏 Kunihiro YABUNO  
製鋼所 型鍛造品製造部 上席主幹



木村幸彦 Yukihiro KIMURA  
鉄鋼研究所 交通産機品研究部 主任研究員



黄 三守 Samsoo HWANG  
製鋼所 型鍛造品製造部 型鍛造品工場  
主査



松井友吾 Yugo MATSUI  
製鋼所 型鍛造品製造部 型鍛造品技術室長



高本 奨 Sho TAKAMOTO  
製鋼所 型鍛造品製造部 型鍛造品工場