

## 鍛造における製品歩留改善事例

## Cost-Saving method in forging process

後藤 一則  
Kazunori Goto田中 慎二  
Shinji Tanaka蓬田 照久  
Teruhisa Yomogida小沼 智之  
Tomoyuki Onuma大野 悟  
Satoru Ono青山 明祐  
Akihiro Aoyama長尾 拓矢  
Takuya Nagao

## 要 旨

中小型のタービンロータシャフトにおける余肉実績が計画に対して大きい傾向があったため、余剰分である「実績余肉-3 $\sigma$ 」の取代を減じて製造可能と考えた。そこで実績余肉を統計処理し、その結果に基づいて計画取代を減じて製造したところ寸法不良を発生させることなく製造が可能であり、製品歩留を0.9%改善することができた。

大型鋼塊で鋼塊軸芯部に不可避免的に発生する空隙欠陥を圧着する方法のひとつとして温間鍛錬法がある。この工程は1回の圧下量が大きく、圧下毎に素材表層に鍛錬疵を発生させてしまっている。空隙圧着効果を維持したまま鍛錬疵を抑制可能な金敷(面形状や平行部など)をFEM解析を利用して検討し、実機に適用した。鍛錬疵抑制効果により、鍛錬工程中の疵取り量を低減することができ、疵取りで失っていた重量を減じた鋼塊持込重量での製造が可能となり、製品歩留を1.9%改善することができた。

## — Synopsis —

There was a tendency that the machining allowance of turbine rotor shaft (small and middle size) was larger than that in the plan. We thought it could be manufactured with lower machining allowance. We analyzed the actual machining allowance statistically. As a result, we could manufacture the rotor shaft with the machining allowance without material shortage and save 0.9% ingot weight.

There are some void defects in a large size steel ingot. JTS<sup>(1)</sup> forging is the one of the method to eliminate the void defect. However, JTS forging makes some flaws on the material surface, because the reduction in JTS is large. In order to reduce these flaws, we invented the new shape die with the same effect of the void closure by FEM analysis. Adopting new shape die, the flaws on the material surface was decreased. Therefore, we could save 1.9% ingot weight to reduce the scarfing loss.

## 1. 緒 言

近年、中小型のタービンロータシャフトにおいて国内外企業との価格競争が激化しており、品質を維持したまま製品歩留を改善することが急務である。また、大型製品においても他社との競争力強化のために低コスト化が重要である。

歩留改善のアイテムとして、中小型製品は余肉実績が計画よりも大きい傾向があることに着目して計画取代低減に取り組んだ。また、大型製品はロータシャフトの大型化によって既存の金敷面形状ではカブリ疵が大きく、これに伴い疵取りロスが大きいことに着目して金敷面形状を見直し疵取りロス低減に取り組んだ。

本報では、製品歩留を改善させた事例として以下を紹介する。

- ① 余肉（取代）実績に基づき取代を低減
- ② 金敷面形状変更によりカブリ疵を抑制し、疵取り量を低減

## 2. 計画取代の低減による歩留改善

### 2.1 計画取代と余肉実績の把握

弊社では調質前の胴径寸法に基づき計画取代を決定している。表1に調質前胴径寸法(D<sub>Q</sub>)と径及び長さ方向の計画取代を示す。

一方、図1に示すように鍛錬後の製品は調質前に糸張りによる寸法検査を行っている。その際、調質前寸法に対して径方向で約1mピッチで8等配の余肉量を、長さ方向で最大と最小の余肉量を測定している。

製品全て（胴部及び軸部）の計画取代を低減すると調質前形状を逸脱するリスクが高いため、まずは胴部で取代低

表1 調質前胴径寸法に基づく鍛錬計画取代

調質前胴径寸法 D <sub>Q</sub> [φ mm]	径方向片面取代 [mm]	長さ方向片面取代 [mm]
D <sub>Q</sub> ≤ 1200	22.5	30
1200 < D <sub>Q</sub> < 1500	25.0	40
1500 ≤ D <sub>Q</sub> < 2000	30.0	40
2000 ≤ D <sub>Q</sub>	40.0	50

減活動を実施した。胴部のほうが軸部よりも径が大きく、歩留改善効果も大きいためである。また取代を低減させる対象は製品数が比較的多い、調質前胴径が1200mm < D<sub>Q</sub> < 1500mmのロータとした。

測定実績は、寸法検査結果から径及び長さ方向の平均余肉量を求めて統計的に処理した。取代低減による調質前寸法逸脱のリスクを回避するために、計画取代は「実績余肉平均 - 3σ (σ: 標準偏差)」を求めて、この値以内で段階的に低減させることとした。尚、作業班による製造のばらつきを評価するため、製品1本当たりの余肉の分散を求め、その平均から求めた標準偏差をばらつきを加味した標準偏差と考えた。

表2及び3に径及び長さ方向の余肉実績整理結果を示す。径方向の余肉平均と標準偏差はそれぞれ38.2mmと8.3mm、長さ方向はそれぞれ71.5mmと8.5mmであった。余肉平均から3σを減じると、径方向で13.3mm、長さ方向で46.0mmであり、十分な余肉で製造できていることが分かった。上述したが、まずは段階的に径方向で5.0mm、長さ方向で10.0mmの取代を低減する計画とした。

表2 径方向余肉実績（取代低減前）

No.	胴部平均余肉 [mm]	胴部余肉の分散 [mm <sup>2</sup> ]
1	47.6	75.8
2	33.7	44.0
3	39.0	91.0
⋮	⋮	⋮
Ave.	38.2	69.4

標準偏差(σ): 8.3 [mm]

表3 長さ方向余肉実績（取代低減前）

No.	胴部平均余肉 [mm]	胴部余肉の分散 [mm <sup>2</sup> ]
1	85.0	33.3
2	65.0	33.3
3	77.5	8.3
⋮	⋮	⋮
Ave.	71.5	72.0

標準偏差(σ): 8.5 [mm]

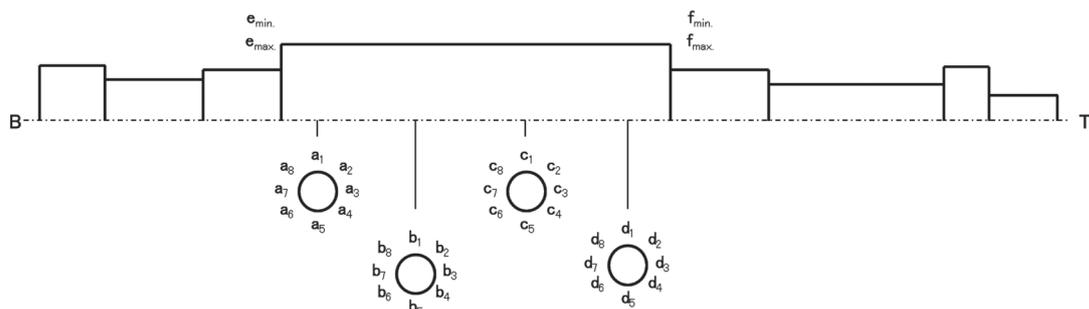


図1 糸張りによる寸法検査概要

2.2 取代低減結果

表4及び5に計画取代を低減した結果を示す。計画取代低減後における径方向の余肉平均と標準偏差はそれぞれ34.2mmと7.3mm、長さ方向はそれぞれ57.1mmと5.0mmであった。表6に示すように径方向の取代は狙った低減量と同程度、長さ方向の取代は狙った以上に低減された。

一方で、取代低減により材料見積りを精度良く実施する必要が生じるため、鍛錬時間の間延びが懸念された。図2に示すように平均鍛錬時間は延びてはなかったものの、ばらつきが大きくなった。今後は更なる計画取代の低減と鍛錬時間のばらつき低減が課題である。

表7に取代低減による鋼塊持込重量低減効果を示す。本活動によって1ton(0.9%)の歩留改善が可能となった。

表4 径方向余肉実績(取代低減後)

No.	胴部平均余肉 [mm]	胴部余肉の分散 [mm <sup>2</sup> ]
A	37.3	76.3
B	36.1	25.9
C	29.2	56.6
⋮	⋮	⋮
Ave.	34.2	52.9

標準偏差(σ):7.3 [mm]

表5 長さ方向余肉実績(取代低減後)

No.	胴部平均余肉 [mm]	胴部余肉の分散 [mm <sup>2</sup> ]
A	61.3	8.3
B	55.0	33.3
C	55.0	33.3
⋮	⋮	⋮
Ave.	57.1	25.0

標準偏差(σ):5.0 [mm]

表6 取代低減前後における余肉実績

	胴部平均余肉量 [mm]		余肉低減量 [mm]	狙い
	① 取代低減前	② 取代低減後		
径方向	38.2	34.2	4.0	5.0
長さ方向	71.5	57.1	14.4	10.0

表7 取代低減による鋼塊持込重量改善効果

改善前	改善後	改善効果
106 <sup>T</sup> 800 <sup>kg</sup>	105 <sup>T</sup> 800 <sup>kg</sup>	▲1 <sup>T</sup> 000 <sup>kg</sup> (▲0.9%)

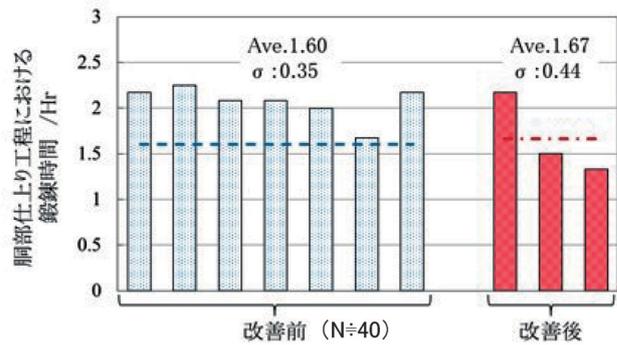


図2 取代低減前後における胴部仕上げ鍛錬時間

3. 疵取り低減による歩留改善

3.1 金敷形状の見直し

大型鋼塊では鋼塊軸芯に空隙欠陥が不可避免的に発生する。弊社では空隙欠陥を圧着するために幅広金敷強圧下(WHF)法及び温間鍛錬法を適用している。前者は幅の広い金敷で素材表層の塑性流動を拘束させて強圧下することによって軸芯にひずみを付与させて空隙欠陥を圧着させる鍛錬方法である。後者は素材を一定時間空放させて素材表層の変形抵抗を軸芯よりも高くし、局部的に圧下することで軸芯の静水圧応力を高くして空隙欠陥を圧着させる鍛錬方法である。温間鍛錬法はWHF法で軸芯に空隙欠陥を圧着させるひずみを付与できない場合に適用している。また、温間鍛錬法は温間鍛錬前の形状が大きくなるにつれて圧下量を増大させ、形状によらず軸芯部に一定の空隙欠陥圧着効果を付与させている。

近年、タービンロータの大型化に伴い温間鍛錬法における圧下量が増大している。一方で、既存の金敷面形状(R=100mm)では金敷の押境の傾斜が急になり、圧下毎に素材表層に覆いかぶさる鍛錬疵(以下、カブリ疵)が発生している。図3にカブリ疵の発生機構及び一例を示す。また、温間鍛錬後は再加熱して据込を行うが、図4に示すように据込後はカブリ疵が深くなる。カブリ疵はガス加工によって除去するが、深いカブリ疵が発生すると疵取り量が増加するため、カブリ疵を抑制することは製品歩留の改善に直結する。

カブリ疵を抑制する際に金敷面形状の変更により空隙欠陥圧着効果が低下する可能性がある。そこで、有限要素法(FEM)解析を利用して空隙圧着効果を維持したままカブリ疵を抑制する金敷(面形状、平行部や金敷幅など)を検討した。結果として金敷面形状をR=200mmに変更することが可能と分かった。図5に金敷形状の改善前後の素材軸芯部における静水圧応力比積分を示す。尚、改善後の金敷を実機に適用した結果、空隙欠陥が残存しなかった。

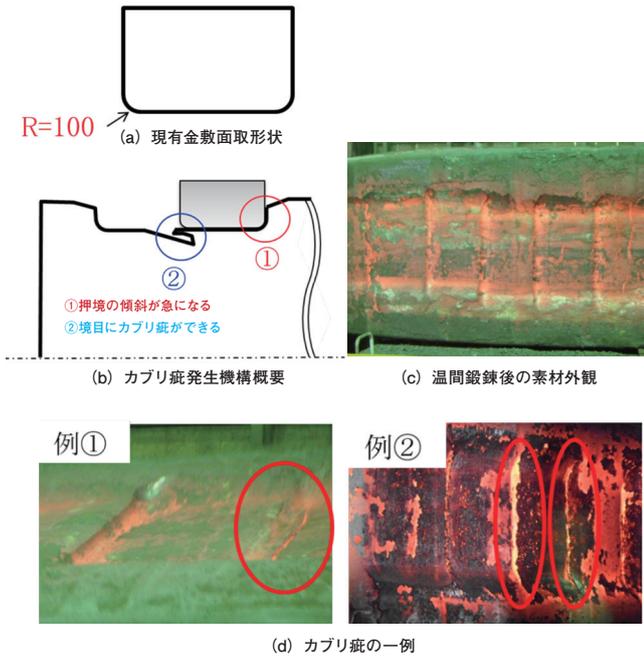


図3 カブリ疵の発生機構及びカブリ疵の一例



図4 据込後の素材外観

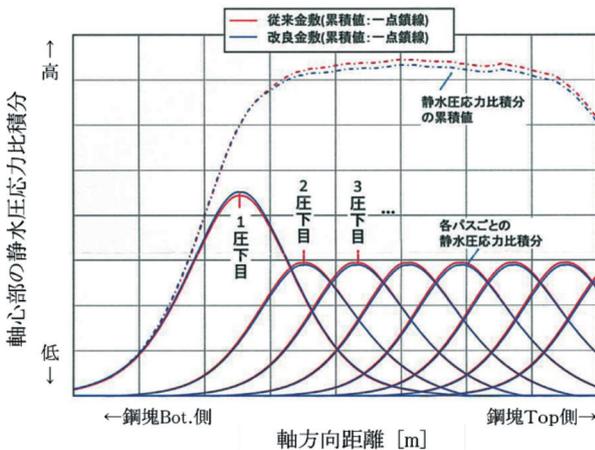


図5 金敷改善前後での静水圧応力比積分の影響

### 3.2 疵取り低減量の検討

持込重量は本体重量に加えて鋼塊負偏析部の切捨重量や疵取りロスを加味して計画している。表8に、3.1項に記述した金敷の改善前後に製造した大型製品における本体重量、切捨重量の予実差及び切捨予実重量比率(=切捨重量の予実差÷本体重量×100)を示す。改善後の金敷(面形状がR=200mm)において切捨予実重量比率は増加傾向であり、これはカブリ疵抑制による疵取り量低減分が切捨重量に加算されたためと考える。ここで、超大型製品の標本数が少ないため、切捨予実重量比率の増大が金敷の改善によるか否かをt検定にて評価した。t検定とは統計的仮説検定のひとつであり、平均に有意差があるかどうかを検定する手法である。結果はP値にて評価し、一般的に $P < 0.05$  (5%) のとき有意と判断される。図6にt検定結果を示す。P値は0.04%であり、金敷の改善が切捨予実重量比率に影響を与えたことが証明された。

表9に改善後の金敷における切捨予実重量比率の平均、標準偏差、95%信頼区間の最小母平均を示す。疵取り低減量は、正規分布に従う標本数を満足していないことから、95%信頼区間の最小母平均から $3\sigma$ を減じた値である鋼塊重量比1.5%に設定した。

表8 金敷改善前後に製造した大型製品実績

金敷	No.	①本体重量 [ton]	②切捨重量予実差 (実績-計画) [ton]	③切捨予実重量比率 (②÷①)×100 [%]
改善前 R=100	1	224.8	1.15	0.51
	2	205.5	3.35	1.63
	⋮	⋮	⋮	⋮
改善後 R=200 +α	A	202.7	5.89	2.91
	B	206.1	6.88	3.34
	⋮	⋮	⋮	⋮

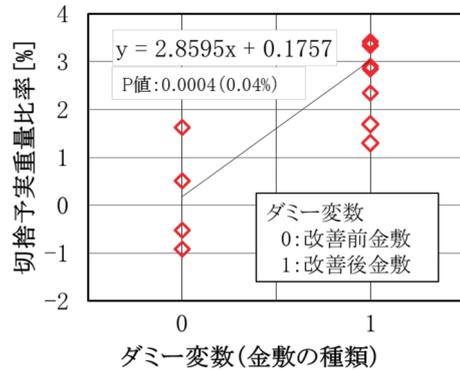


図6 金敷改善におけるt検定結果

表9 改善後の金敷における切捨予実重量比率の統計処理結果

平均	標準偏差 $\sigma$	最小母平均 $\mu$	$\mu - 3\sigma$
3.0	0.42	2.7	1.5

単位 [%]

### 3.3 疵取り量低減結果

表 10 に疵取り量を鋼塊重量比で 1.5% 減じて製造した切捨予実重量比率を示す。適用数は 2 製品のみであるが、切捨重量を不足させずに製造することが可能であった。また、ばらつきはあるものの更に疵取り比率を低減できることも示唆された。

表 11 に疵取り低減による鋼塊持込重量低減効果を示す。本活動によって 4.2ton (1.9%) の歩留改善が可能となった。

表 10 鋼塊持込重量比を 1.5% 減じて製造した大型製品実績

No.	① 本体重量 [ton]	② 切捨重量予実差 (実績-計画) [ton]	③ 切捨予実重量比率 (②÷①)×100 [%]
1	200.8	3.67	1.83
2	250.3	1.29	0.52

表 11 疵取り低減による鋼塊持込重量改善効果

改善前	改善後	改善効果
218 <sup>T</sup> 000 <sup>kg</sup>	213 <sup>T</sup> 800 <sup>kg</sup>	▲4 <sup>T</sup> 200 <sup>kg</sup> (▲1.9%)

## 4. 結 言

製品歩留改善活動として取り組んだ結果を以下に示す。

- ① 余肉 (取代) 実績に基づき取代を低減  
⇒実績から統計的に余肉低減量を検討し、鍛錬時間を間延びさせることなく、径及び長さ方向の計画取代を低減することで鋼塊持込重量を低減することができた。
- ② 金敷面形状変更によりカブリ疵を抑制し、疵取り量を低減  
⇒t 検定を利用して疵取り量の評価を実施し、鋼塊持込重量を低減することができた。

## 参 考 文 献

- (1) 館野、鹿野:大型鋼塊品の温間鍛錬について、塑性と加工, Vol.7, No.65 (1966), p.299-308