

熱間鍛造金型割れ防止技術の開発

Technical design for prevention of cracking of hot forging die

井手洋文*1 中崎盛彦*2 鎌田諒大*3 北城弘樹*4 瀬川勝敬*5

Hirofumi IDE, Morihiko NAKASAKI, Ryota KAMATA, Hiroki KITAJOH and Katsunori SEGAWA

Synopsis: Die crack is one of the popular factors affecting die life in hot forging. Die crack occurs comparatively in early stage in service. Reduction of die crack serves large improvement of die life. Application of high toughness tool steel and reduction of the stress which causes die crack are effective to improve die life. Generally, toughness has a trade-off relationship with high temperature strength. Application of high toughness tool steel, which sacrifices strength to some extent, tends to increase amount of. On the other hand, dominant factor affecting the stress which causes die crack is unclear. The aim of this research is to improve a life of die for connecting rod. Popular damage of connecting rod die life is die crack. Die life has been improved by two processes. One is application of QDT for connecting rod die material. QDT bears excellent balance of toughness and high temperature strength. The other is decrease of maximum principal stress by die shape optimization. Die shape is optimized by combination of CAE analysis and quality engineering. This combination decreases the number of test and reduces maximum principal stress. Maximum principal stress decreased from 835MPa to 520MPa. As a result of test, die life index improved from 0.87 to 1.46.

Key words: Hot forging, die life, quality engineering, maximum principal stress, sensitivity, signal to noise ratio

1. 緒言

熱間鍛造における金型寿命要因として、割れ、摩耗、ヒートチェック（熱疲労き裂）、欠け、変形、へたりなどが挙げられ、損傷形態としては摩耗、変形、疲労破壊、割れの4つに分類できる¹⁾。損傷形態の内、摩耗が全体の要因の7～8割を占める²⁾。一方、金型割れは比較的短寿命で発生するため、これを防止することによる寿命改善効果は大きい。金型割れ対策としては、高韌性工具鋼の適用や割れ発生につながる応力の低減などが考えられる。高韌性工具鋼を適用することで韌性は向上し、金型割れを防止することができる。しかし、一般的に韌性を向上させるには硬さを低減させる必要があり、この場合摩耗が増大する傾向となる。また、金型の割れ発生と負荷応力の関係について検討した事例³⁾はあるが、応力を効果的に低減させる要因は、金型形状や温度、鍛造条件など多くの因子が複雑に絡み合っており、要因を特定するためには実機による多くの試行が必要であった。

これに対し、実機による試行の代わりにCAE解析を適用

し、さらに品質工学を組み合わせた手法を用いることで、実機での試行回数を低減させると同時に、ばらつきの影響を減衰させることが可能となる。また、品質工学の評価指標である感度に着目することで、金型への負荷応力を低減させることが可能と考えられる。本研究では、コネクティングロッド金型割れ防止技術の開発を目的として、CAE解析により金型割れの原因を推定し、CAE解析と品質工学を組み合わせた手法により、割れ発生につながる応力を低減させる金型形状の設計法を検討した。さらに、高韌性工具鋼の適用による金型寿命の向上についても併せて検討した。

2. コネクティングロッドの金型割れに関する現状把握

対象としたコネクティングロッドは、クランクプレスにより3工程の熱間鍛造後、バリ抜きを行う工程で製造されている。熱間鍛造における鍛造品の形状をFig.1に示す。コネクティングロッドは、I-section、大環部O-section、小環部o-sectionで構成される。本研究では#3工程までを

*1 研究・開発センター 加工プロセスグループ
*2 研究・開発センター 加工プロセスグループ長 博士(工学)
*3 TDF株式会社 生産技術部 生産技術課
*4 TDF株式会社 設備部 設備課 課長代理
*5 元TDF株式会社

解析対象とした。現行被加工材はS53C系の鋼材,金型材はSKD61である。金型割れについて調査した結果, Fig.2に示すように, 割れは主に#2工程および, #3工程金型のI-sectionで発生していることがわかった。被加工材質及び硬度が異なる類似品の調査を行ったところ, 材質の違いにより被加工材の硬度が低い類似品番では金型割れの発生は確認されないことから, 現行型番の被加工材の硬度が高いことが金型割れ発生に影響していると考えられる。実際の金型寿命を類似品番の平均寿命で除したものを金型寿命指数と定義すると, 本報告の目標である類似品番の金型寿命指数1.0に対し, 現行金型寿命指数は平均0.87であった。また, 金型は寿命到達後に切削して再使用するが, 金型割れが深いため, 金型切削量を類似品番の4倍以上と大きくする必要があるなど, 寿命が短いのみならず金型の使用可能回数も少ない状態であった。

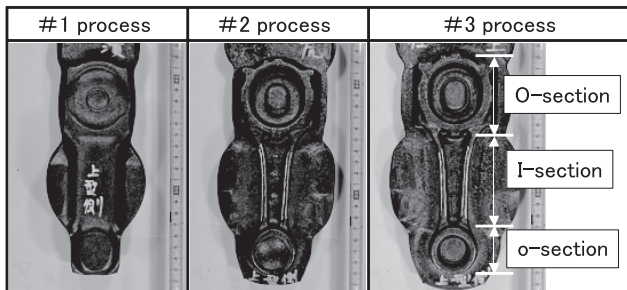


Fig.1 Intermediary and final shapes of hot-forged connecting rod

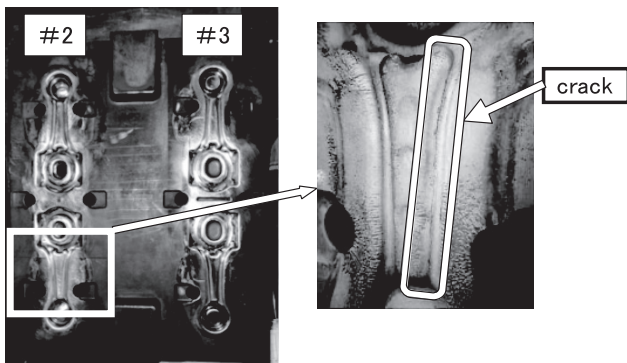


Fig.2 Example of die crack

3. 実験結果

3.1 CAE解析による金型割れの原因推定

金型にかかる応力を算出するため, 第一に, 金型を剛体としてコネクティングロッド鍛造各工程の3次元剛塑性変形解析を行った。第二に, 剛塑性解析にて得られた面圧を弾性体金型に転写し, 応力解析する手法を用いた。解析には市販の有限要素解析ソフトDEFORM 3D™を用い, Table 1に示す条件で解析を行った。コネクティングロッド

の複雑形状を精度よく再現するため, 被加工材の要素数を70000, 金型応力解析での金型要素数を500000とした。金型割れには, 引張応力が影響すると考えられるため, 面圧転写解析で得られた金型の最大主応力により評価した。

Table 1 Condition for CAE analysis(mass%)

Rigid-plastic analysis	FEM code	DEFORM 3D™
	Mesh type	Tetrahedral mesh
	Number of initial mesh	70,000
	Friction coefficient(shear)	m=0.7
	Initial material temperature / °C	1150, 1230
	Processing heat	considered
	Die motion	crank press motion
Die stress analysis	Deformation resistance	S53C
	Mesh type	Tetrahedral mesh
	Number of initial mesh	500,000
	Deformation resistance	SKD61

3.2 最大主応力の低減のための品質工学を用いた金型形状の最適化

品質工学は, 試行回数を少なくする実験計画法をベースとして, ノイズによる目的特性のばらつきの影響を減衰させる手法である⁴⁾。ノイズは生産上のばらつきを発生させる要因であり, これをSN比を用いて評価することで, ノイズが目的特性に及ぼす影響が小さくなる条件を決定できる。また, 目的特性とそれを変化させるパラメータの傾き β により算出される感度Sを評価することで, 目的特性の大きさを理想値に近づけることができる。SN比 η , ならびに感度Sは β を用いて以下の(1), (2)式で示される。

$$\text{SN比: } \eta = 10 \log \left(\frac{\beta}{s} \right)^2 \quad \dots (1)$$

$$\text{感度: } S = 10 \log \beta^2 \quad \dots (2)$$

β : 目的特性と目的特性を変化させるパラメータの傾き
s: 標準偏差

最大主応力低減のための金型形状の最適化手順をFig.3に示す。本研究では, 最大主応力が小さく, 鍛造温度による最大主応力のばらつきが小さい金型形状を得ることを目的とし, 目的特性を金型の最大主応力, ノイズを鍛造温度, 感度を金型の最大主応力と鍛造時のストロークの傾きと設定した。

ノイズである鍛造温度の影響を確認するため, 初期材料温度を1150℃, 1230℃の2条件として変形解析を行った。感度を算出する際, 最大主応力を求めるために各ストロークで金型応力解析を行う必要があるが, すべてのストロークで最大主応力を求めることは困難である。そこで, 最大主応力と相関があると考えられる荷重に着目し, 荷重とストロークの関係から最大主応力を算出するストローク

を以下のように決定した。コネクティングロッドは半密閉鍛造で成形されるため、加工末期において荷重が急激に増加することから、加工末期の線形近似が可能である3点を最大主応力を算出するストロークとした。金型応力解析により得られた最大主応力から感度を算出し、感度が小さくなる条件を検討した。鍛造温度による最大主応力のばらつきをSN比により評価し、SN比が大きくなる条件を検討した。

最大主応力に大きく影響すると考えられる金型形状を制御因子として、Fig.4に示すようにA～Eの5種類を設定した。それぞれの制御因子の水準をTable 2に示すように設定した。水準1は現行金型形状である。これらの制御因子、水準をL₁₈直交表に割り付けた。直交表を用いることで少数の試行での最適条件の検討が可能となる⁴⁾。L₁₈直交表に割り付ける制御因子の数は通常8因子であるが、本研究では、5因子を設定した。

L₁₈直交表に基づき、#1工程、#2工程、#3工程の剛塑性解析を行った後、最大主応力を求めるため、金型応力解析を行った。

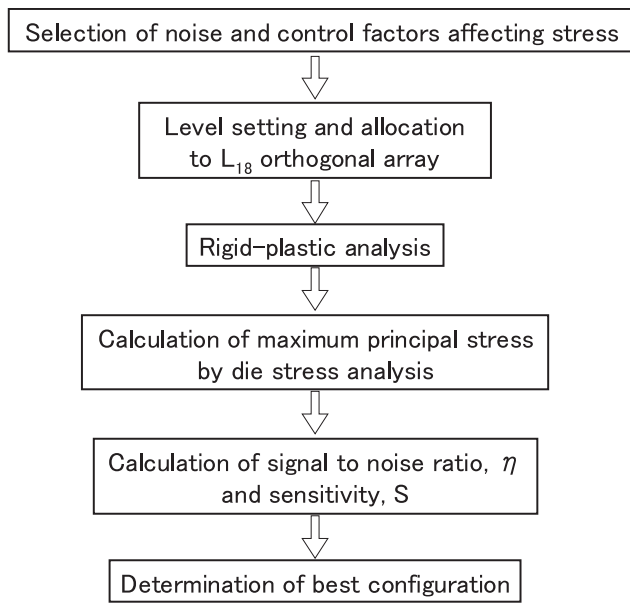


Fig.3 Flow chart of die shape optimization procedure

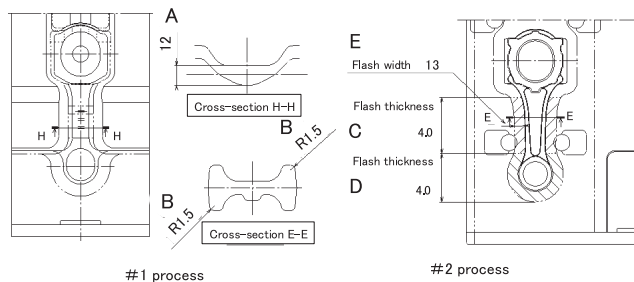


Fig.4 Control factors in determining die shape

Table 2 control factors

Process	Control factor	Level		
		①(Previous)	②	③
#1	A : I-section thickness / mm	12	13	-
#2	B : I-section bottom radius, R / mm	R1.5	R1.85	R2.25
#2	C : I-section flash thickness / mm	4	4.5	5
#2	D : o-section flash thickness / mm	4	4.5	5
#2	E : o-section flash width / mm	13	11	9

3.3 最適金型による高靱性金型材料の実機適用検討

金型割れの対策としては、硬度を下げることによって金型材料の高靱性化を図ることが一般的であるが、高温強度も低下することから摩耗が発生し易くなる傾向となる。そこで、現行の金型材であるSKD61相当の高温強度を保ち、かつ高い靱性を有する高靱性工具鋼QDTの適用を検討した。Fig.5にSKD61とQDTの高温強度を示す。QDTはSKD61と同等の高温強度を有している。また、Fig.6にSKD61とQDTのシャルピー衝撃値を示す。QDTの高温衝撃値はSKD61以上の特性を有している。

以上に示した品質工学による最適金型での金型寿命向上効果と、高靱性工具鋼QDTの適用の効果を確認するため、従来金型材料SKD61とQDTの2鋼種を用いて、現行金型および最適金型形状での実機テストを行った。

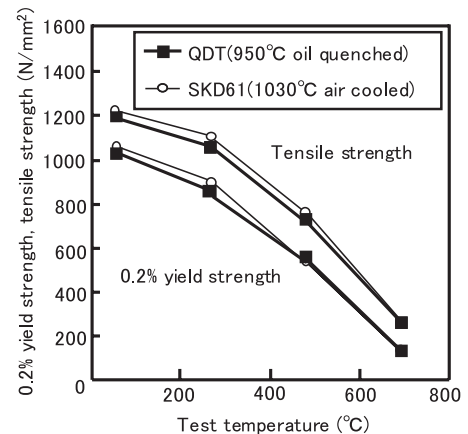


Fig.5 High-temperature strength of SKD61 and QDT

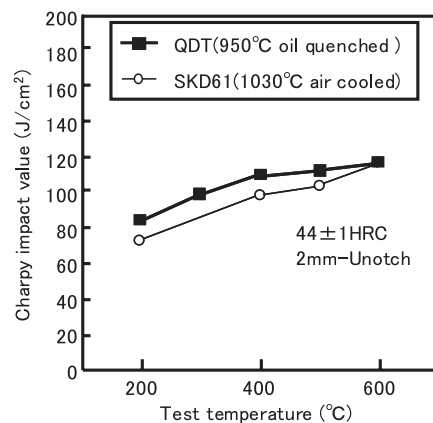


Fig.6 High-temperature Charpy impact value of SKD61 and QDT

4. 実験結果及び考察

4.1 CAE解析による金型割れの原因推定

Fig.7に3次元剛塑性変形解析によって得られた現行#2工程における荷重—ストローク曲線を示す。加工末期に荷重は急激に増加し、下死点直前で荷重は最大となっている。ストローク率0.90～1.0では線形に近いことが確認されたため、金型応力解析を行うストローク率を線形範囲内の0.95,0.97,最大荷重点とした。

Fig.8に現行金型の最大荷重点における最大主応力分布を示す。I-sectionに最大主応力が高い領域が確認され、この領域は、実際の割れ位置とほぼ一致することがわかった。このことから、最大主応力が金型割れに大きく関与していることが考えられた。当該領域の連続5点の平均値を算出すると835MPaであった。この最大主応力を下げることが金型割れ防止につながると考えられる。

4.2 最大主応力を低減する最適金型形状の検討

CAE解析で求めた最大主応力を元に算出した#2工程の各制御因子における各水準のSN比、感度をFig.9に示す。感度が小さいほど最大主応力を小さく、SN比が大きいほど最大主応力の温度によるばらつきを小さくすることが可能である。

通常、品質工学ではSN比が大きくなる条件を優先的に選択するが、本研究では最大主応力を低下させることに着目して、感度を小さくかつSN比を低下させない条件を最適とする、以下の選択方法により検討した。まず、各制御因子で感度が小さく、SN比が大きくなる水準を検討した。感度、SN比が両立できない条件では平均値に近い値とした。また、一方の指数の変化が少なく、もう一方の変化が大きい場合は、指数が大きく改善する条件を選択した。例えば、制御因子Eでは感度は平均値よりわずかに増加するが、SN比が平均値より大きく増加する水準③を選択している。ただし、制御因子Aでは、最大主応力を低下させる

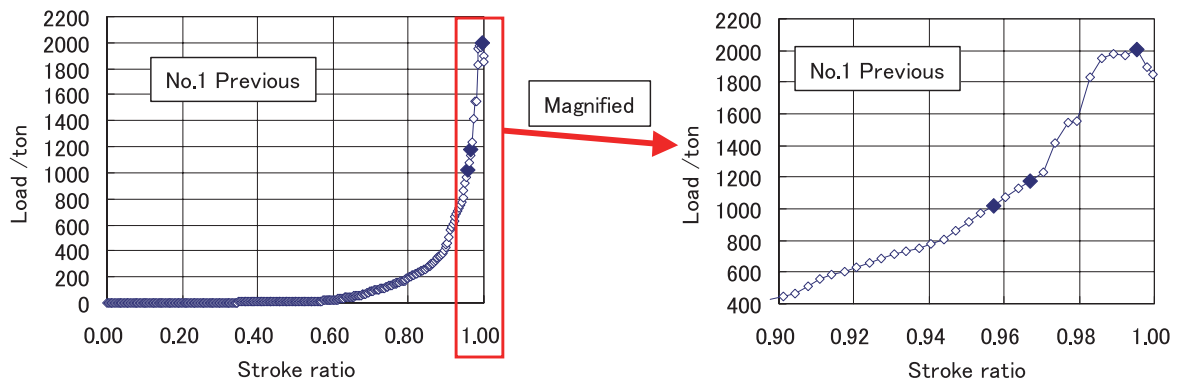


Fig.7 Load-stroke curve in #2 process

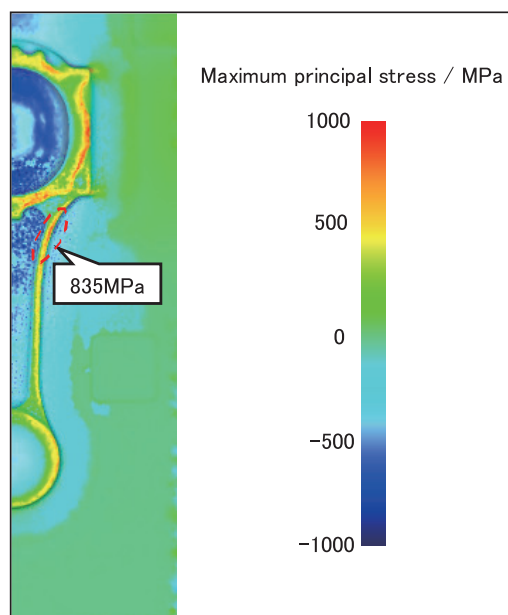


Fig.8 Distribution of maximum principal stress in #2 process

ため感度が小さい水準①を選択した。

以上の方法により、#2工程最適金型形状をFig.9の丸で囲っている水準に決定した。最適金型形状をTable 3に示す。#2工程を最適金型とした場合の最大主応力を算出した結果、現行金型の835MPaより38%低い520MPaとなった。制御因子C,Dは、o-sectionフラッシュ厚であり、大きくすることで負荷を小さくできると考えられていたが、いずれのフラッシュ厚も最大の5.0mmではなく中間の4.5mmが最適であることがわかった。#3工程も同様の基準で検討し、最大主応力が最も低い形状を決定した。

4.3 実機テストによる効果の確認

従来材料SKD61と高靱性工具鋼QDTを用い、現行金型形状、品質工学により算出した最適条件金型形状にて実機

テストを行った結果をFig.10に示す。材料のみを変更した「QDT+現行金型」と金型形状を最適化した「SKD61+最適金型」はいずれも金型寿命指数の目標値1.0を達成した。「QDT+現行金型」では、テスト材の硬さが高かったため、金型寿命指数1.0を超えたところで金型割れが発生したが、カラーチェックによる金型割れの目視確認を行った結果、Fig.11に示すように「QDT+現行金型」の金型割れはFig.2に示す「SKD61+現行金型」より軽微であった。

「QDT+最適金型」では金型寿命指数1.46と目標値を大きく上回る結果が得られた。また、「QDT+最適金型」とすることで金型割れの深さが浅くなり、金型切削量を類似型番と同等レベルとすることができた。金型摩耗は従来と同等レベルであった。これは、QDTがSKD61と同等の高温強度を有しているためと考えられる。

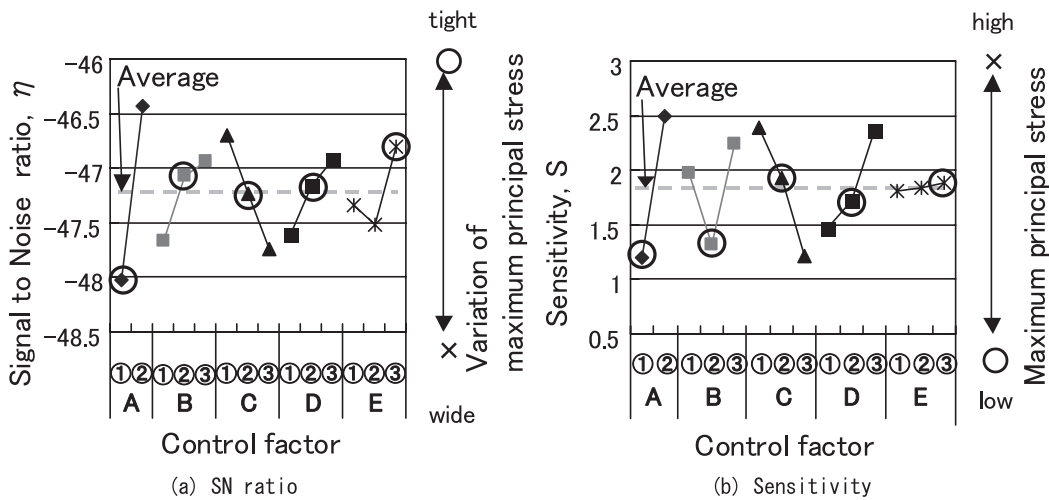


Fig.9 Relationship between SN ratio, sensitivity and control factor in #2 process

Table 3 Previous and modified design for the die

	A	B	C	D	E
Previous design	12	R1.5	4	4	13
Modified design	12	R1.85	4.5	4.5	9

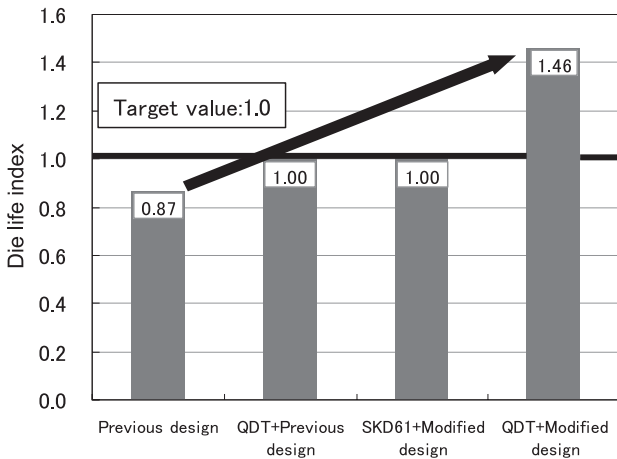
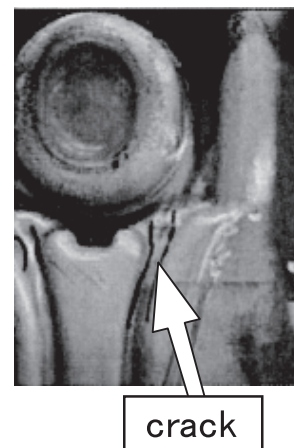


Fig.10 Die lives of modified dies



「QDT+ Previous design」

Fig.11 Appearance of die crack

5. 結言

熱間鍛造金型の寿命向上を目的として、高靱性工具鋼 QDT の適用、ならびに金型形状の最適化手法の確立を行い、以下の知見を得た。

- (1) コネクティングロッド金型応力解析を行った結果、I-section の最大主応力が高い位置と実際の割れの位置が一致した。このことから、最大主応力が金型割れに大きく関与しており、これを低減させることにより金型割れ発生抑制が可能と考えられた。
- (2) CAE 解析と品質工学を組み合わせた方法により、金型割れを防ぐ最適金型形状を決定した。その結果、#2 工程の最大主応力を現行比 38% 減の 520MPa まで抑制できた。
- (3) 高靱性工具鋼 QDT を用い、最適金型形状で実機テストを行った結果、金型寿命指数は 1.46 となり、寿命の目標値 1.00 を達成した。また、金型割れの深さが浅くなることで、金型切削量を類似金型と同等レベルとすることができた。

以上のように、CAE 解析と品質工学を組み合わせることにより、熱間鍛造における金型割れを低減する金型形状の最適化技術を開発することができた。今後、他の金型に適用拡大し、最適化を行うことにより、更なる生産性の向上、コストダウンに貢献する所存である。

参考文献

- 1) 辻井信博：山陽特殊製鋼技報 Vol.7 (2000) No.1,65.
- 2) 土屋能成, 中西広吉, 松井宗久, 田中利秋, 鈴木寿之, 野上芳和, 明石忠雄：トヨタテクニカルレビュー Vol.36 (2001) No.4,47.
- 3) 社会法人日本鍛造協会：「鍛造金型寿命の向上のための支援システムの開発」成果報告書 (2009) .
- 4) 立林和夫：「入門 タグチメソッド」, (2009) .

■ 著者



井手 洋文



中崎 盛彦