

(解説)

# 軟化焼鈍省略線材

## Wire Rod Capable of Eliminating Softening Annealing Treatment



千葉政道\*1 (博士(理学))  
Dr. Masamichi Chiba



坂田昌之\*1  
Masayuki Sakata

Cold forging enables various mechanical structural parts to be produced with high precision and is a promising method for reducing manufacturing cost. Being an ambient temperature process, cold forging emits much less CO<sub>2</sub> and has the advantage of imposing a low environmental burden. In recent years, there has been increased interest in eliminating process steps to reduce the cost and to be environmentally responsible, and demand is increasing for steels that can eliminate the heat treatment of parts during the manufacturing process. This paper outlines the concept of steel design and the representative characteristics of two types of steel (the KTCH<sup>®</sup> Series & KNCH Series) developed both to eliminate softening heat treatment and to prolong the life of forging dies.

まえがき = 冷間鍛造は、各種機械構造部品を高精度に、かつ大量生産することができ、部品の製造コスト低減に有望な加工方法である。また、室温で鍛造するので部品製造に伴うCO<sub>2</sub>発生も少なく、環境負荷が低い利点も有する。昨今、工程を省略することによるコストダウンや環境負荷低減への関心は一層高まっており、部品製造過程の熱処理を省略できる鋼材の需要は拡大傾向にある。

当社では、各種冷間鍛造部品の加工工程や要求特性に応じて、軟化熱処理省略鋼KTCH<sup>®</sup>注1) シリーズ<sup>1)</sup> (Kobe Steel long tool life cold heading wire rod) と非調質線材KNCHシリーズ<sup>2)</sup> (Kobe Steel non heat treatment wire rod) を開発、自動車部品を中心に商品化してきた。

本稿では、上記の工程省略鋼について、鋼材設計の考え方と代表特性について概説する。

### 1. 軟化熱処理省略鋼KTCHシリーズ

KTCHシリーズは、冷間鍛造前に行う軟化熱処理（球状化焼鈍、低温焼鈍など）を省略あるいは簡略化可能な開発鋼である。図1 (a) に適用工程例を示す。低炭素鋼を冷間鍛造ままで用いる部品などでとくに効果を有

し、現行メニューでは、700MPa級（引張強度換算）までの部品強度に対応できる。

冷間鍛造時には、加工発熱に伴って鍛造部品の温度は300℃程度まで上昇し、動的ひずみ時効の影響によって変形抵抗の増大や変形能の低下を招く危険性がある<sup>3)</sup>。軟化熱処理を省略して同等の冷間鍛造性を確保するには、たんに鋼材の硬度を下げるだけでなく、加工発熱温度域での変形挙動を考慮した鋼材設計が不可欠となる。

#### 1.1 KTCH線材：冷間鍛造性向上の考え方

##### 1.1.1 動的ひずみ時効の抑制

動的ひずみ時効は、塑性変形時に導入される転位に鋼材中の固溶Cや固溶Nが固着することによって転位の移動抵抗となり、材料の変形を妨げる（硬化する）現象である。

本開発鋼では、工業的利用面も考慮し、以下の観点から動的ひずみ時効に伴う悪影響を抑制した。

- ①Crの微量添加：フェライトのC溶解度を下げ、固溶C量を低減する。
- ②Bの微量添加：鋼中NをBNとして析出させ、固溶N量を低減する。

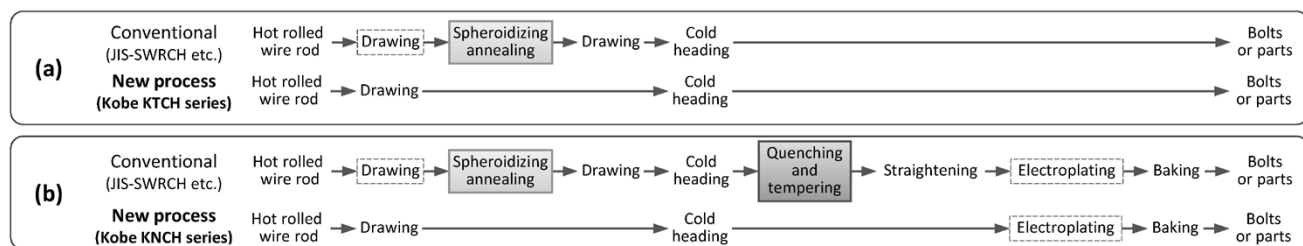


図1 軟化焼鈍省略線材の適用例  
Fig. 1 Examples of manufacturing process

脚注1) KTCHは当社の登録商標である。

\*1 鉄鋼事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部

③線材圧延での制御圧延，制御冷却：AINの固溶を低減し，固溶N増加を抑制する。さらに，AINを核にFe<sub>3</sub>Cを析出させ，固溶Cを低減する<sup>1)</sup>。

### 1.1.2 軟化熱処理省略鋼の特性評価方法

冷間鍛造用鋼の最重要品質である変形抵抗と変形能（割れ発生限界圧縮率）を日本塑性加工学会鍛造分科会の推奨方法<sup>4)</sup>に基づき評価した。供試材は，φ9.5の圧延材から採取した円柱状試験片〔φ8×12mm，据え込み比1.5（12/8=1.5）〕とし，圧縮率60%の据え込み試験で室温から加工発熱温度域での変形抵抗を測定した。また，最大圧縮率80%までの据え込み試験を行い，割れが発生しない最大の圧縮率（n=5）を割れ発生限界とした。

さらに，鋼材設計コンセプトの妥当性を検証するため，同一圧延材から厚さ0.7×幅5.0×長さ105mmの試験片を作製して内部摩擦試験に供し，自由振動減衰法による内部摩擦ピーク高さから固溶C，N量を求めた。なお，測定にはULVAC真空理工(株)製IMF-1500Lを用いた。

### 1.2 KTCH線材の特性と適用効果

KTCHシリーズの中で，炭素量が0.25%であるKTCH25Kを代表例に適用効果を述べる。実験材の化学成分および圧延材での機械的特性をそれぞれ表1，表2に示す。

#### 1.2.1 冷間鍛造性

図2に変形抵抗の比較を示す。JIS SWRCH25Kに比べ，開発鋼KTCH25Kでは加工発熱温度域（200～400℃）での変形抵抗が大きく減少している。また，変形能にも改善が認められ，圧延まま材で規格鋼の球状化焼鈍材並みの特性が得られた（表3）。いずれも固溶C，Nの減少と対応していることから，動的ひずみ時効抑制の効果が

が発揮されたものと考えられる。

また，両材料を用いて鍛造前の軟化焼鈍を省略した工程でM12フランジボルトを成型した際の鍛造荷重（#2パンチ）を図3に示す。KTCH25Kでは，規格鋼SWRCH25Kで認められた加工発熱の影響による荷重増加が解消されており，実部品成型においても有効性が確認できた。

開発鋼の化学成分面の特長であるBについて，存在形態を調査した結果を図4に示す。図4（a）は二次イオ

表3 固溶元素と冷間鍛造性の関係

Table 3 Relationship between solute elements and cold forgeability

Steel		Solute C	Solute N	Flow stress (MPa)		Critical upset ratio
				20°C	250°C	
JIS SWRCH25K	Wire rod	3 ppm	7 ppm	690	640	72.5%
	Spheroidizing	1 ppm	2 ppm	653	572	>80%
Developed steel KTCH25K	Wire rod	1 ppm	<1 ppm	650	562	>80%

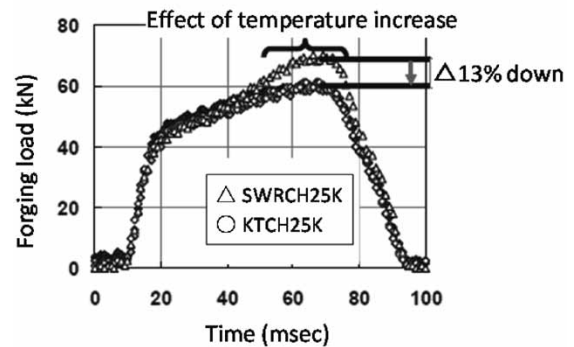


図3 M12フランジボルトでの鍛造荷重例  
Fig. 3 Forging load of M12 flange bolt

表1 KTCHの化学成分例

Table 1 Chemical compositions of developed steel

Steel	C	Si	Mn	Cr	Al	N	B
JIS SWRCH25K	0.25	0.19	0.47	0.02	0.027	0.0043	-
Developed steel KTCH25K	0.24	0.16	0.35	0.10	0.031	0.0038	35ppm

表2 供試材（圧延材）の機械的特性例

Table 2 Mechanical properties of wire rods

Steel	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El./5d (%)	RA (%)
JIS SWRCH25K	263	496	32.7	54.4
Developed steel KTCH25K	217	448	35.2	63.9

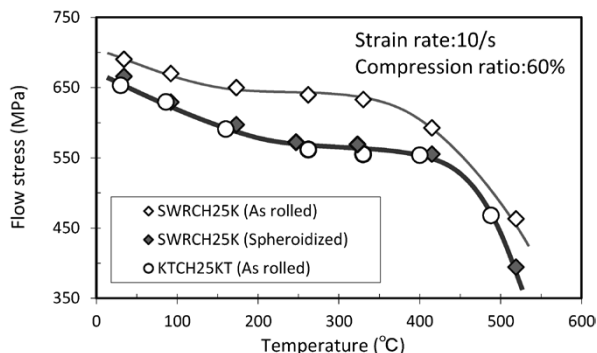
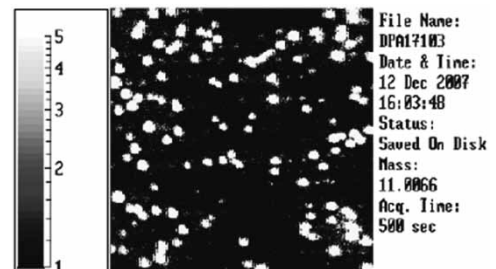
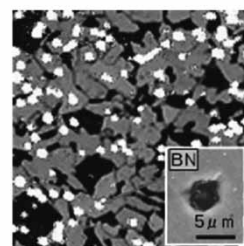


図2 試験温度と変形抵抗の関係

Fig. 2 Relationship between testing temperature and flow stress



Comments: 11(B)+ ion image 200um[] KTCH25KT  
(a) SIMS image: B distribution



(b) SIMS+microscope image

図4 圧延材のマイクロ組織

Fig. 4 Microstructure of wire rod

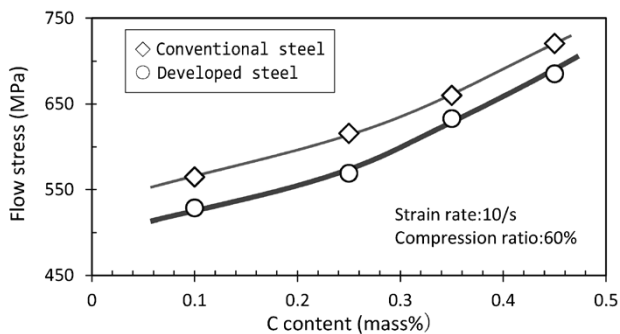


図5 変形抵抗と炭素量の関係

Fig. 5 Relationship between carbon content and flow stress

ン質量分析装置SIMS (CAMECA製 ims5f) によるB (11B+) の分布写真, 図4 (b) は図4 (a) のSIMS写真を光学顕微鏡写真に重ね合わせたものである。本結果から, Bは主にフェライト中に位置しており, 旧オーステナイト粒界に分布していると考えられる。また, 別途行ったTEM観察では, 約5 $\mu$ mのBNの分散が認められ, Bの微量添加による固溶Nの低減効果が組織観察からも把握できる。

図5には, 炭素量の異なるKTCH線材を用いて調べた変形抵抗の低減効果を示す。炭素量が0.10~0.45%において, 上述と同様の改善効果が得られた。また, シリコンキルド鋼だけでなく, アルミキルド鋼でも効果が発揮できることを確認している<sup>1)</sup>。

本開発鋼KTCHシリーズは, 冷間鍛造ままで用いることの多い炭素量が0.35%までのシリコンキルド鋼およびアルミキルド鋼の双方でメニューを有し, 多くの冷間鍛造部品で実績がある。冷間鍛造部品は今後, 大型化・高速鍛造化する傾向にあり, 加工発熱の影響がより顕在化すると予想され, 開発鋼KTCHシリーズの活用範囲も拡大すると考えられる。

## 2. 非調質線材KNCH<sup>注2)</sup> シリーズ

KNCHシリーズは, 冷間鍛造前の軟化熱処理省略に加え, 部品成型後の調質熱処理を省略できる開発鋼である。図1-bに適用工程例を示す。非調質線材では, 冷間鍛造圧前の伸線材強度で製品強度を確保することから, 圧造工具寿命の低下が懸念される。しかしながら, 部品製造工程を大幅に簡略化でき, リードタイム短縮や温室

効果ガスの削減にも貢献できる利点から, ボルトや自動車部品などで採用されている。

表4にKNCHシリーズの適用強度と圧延材の機械的性質例を示す。

### 2.1 KNCH線材: 冷間鍛造性向上の考え方

加工度の高い冷間鍛造部品では, 同等強度の調質部品に比べて延性や靱性が低下する傾向にある。したがって, 非調質線材では圧造段階で調質材より微細な組織が求められ, 部品の強度や形状に合わせた最適な化学成分と加工条件の選定が極めて重要となる。

#### 2.1.1 変形抵抗の低減

1章で述べた動的ひずみ時効の抑制に加え, 伸線や鍛造加工による影響も考慮して変形抵抗の最小化を図った。具体的には次の3点が挙げられる。

- ①動的ひずみ時効の抑制→N低減, Al増量<sup>3)</sup>
- ②加工硬化係数の低減→Si低減<sup>5)</sup>
- ③バウシinger効果の活用→伸線減面率の適正化<sup>6)</sup>

上記の考え方を適用したJIS強度8.8級の新鋼種KNCH8Sおよび従来型(基本型)の非調質線材KNCH8, そして比較例として調質鋼(KCH45KT-W)について, 線材特性とそのボルトでの特性例を以下に述べる。

新鋼種KNCH8Sでは, 基本型KNCH8に対してSi量を低減し, Al量とN量の比Al/Nを約2倍になるように調整した。なお, 調質鋼は球状化処理材を比較材とした。表5に各供試材の化学成分を示す。

#### 2.1.2 冷間鍛造性

##### (1) 圧縮試験

線径13.0mmの圧延材を用い, 減面率10~67%の範囲で伸線を行って圧縮試験に供した。伸線後の線径Dが12.3~7.4mmの範囲で変化するため試験片高さLを調整し, 据え込み比L/Dを1.5と一定として試験を行った。

表5 供試材の化学成分

Table 5 Chemical compositions of steels used in this study

Steel	C	Si	Mn	Cr	Al	N	Al/N	Remark
KNCH8S	0.29	0.02	1.45	0.10	0.045	0.0032	14.1	New non heat treatment steel
KNCH8	0.30	0.24	1.51	0.05	0.033	0.0045	7.3	Non heat treatment steel
KCH45KT-W	0.45	0.18	0.72	0.15	0.024	0.0046	5.2	Quenching and tempering steel

表4 非調質線材KNCHのメニューと機械的性質の例

Table 4 Steel grade of non heat treatment wire rod (KNCH) and examples of mechanical properties of bolts

Type	Steel grade	Strength Class	Reduction of area in drawing (%)	Diameter of bolt (mm)	Example of mechanical properties		
					0.2% proof strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%) GL=5D
Basic	KNCH7	(7T)	Min. 20	-	Min. 490	Min. 686	Min. 15
	KNCH8	8.8	Min. 20	Max. 16 Over 16	Min. 640 Min. 660	Min. 800 Min. 830	Min. 12
High cold headability	KNCH7S	(7T)	Min. 25	-	Min. 490	Min. 686	Min. 15
	KNCH8S	8.8	Min 25	Max. 16 Over. 16	Min. 640 Min. 660	Min. 800 Min. 830	Min. 12

脚注2) KNCHは当社の登録商標(第1644338号)である。

## (2) 工具寿命

多段フォーマを用い、圧造速度60個/分でM12フランジボルトを圧造し、鍛造荷重が最大の#3パンチの工具寿命摩耗または割れ状況で評価した。

## (3) ボルトとしての諸特性

ボルト用途でJIS規定のある3項目(①打撃試験, ②くさび引張試験, ③保証荷重試験)について、圧造試験で得られた試作ボルトを用いて評価した。なお、いずれのボルトも、圧造まま品に加え、降伏比向上と永久伸び低減を狙ったベーキング処理品を使用した。

## 2.2 KNCH線材の特性と適用効果

### 2.2.1 機械的特性と変形抵抗

新たに開発したKNCH8Sと既存鋼KNCH8のマイクロ組織を図6に示す。開発鋼は既存鋼に比べて微細な組織を有しており、これは制御圧延を採用した成果である。各供試鋼の伸線加工特性を図7に示す。開発鋼は既存鋼に比べて伸線前、伸線後ともに同程度の強度差が得られている。いっぽう、絞りは開発鋼の方が向上しており、組織の微細化によって既存鋼よりも強度-延性バランスに優れているといえる。また、20%以上の減面率で伸線加工することにより、強度クラス8.8級の引張特性を満足できることが分かる。

上記伸線材の変形抵抗を測定した結果を図8に示す。非調質線材では、両鋼種とも30%程度の伸線減面率で変形抵抗が極小となる傾向が得られた。加工硬化の増加にもかかわらず変形抵抗が減少するのは、伸線加工と据え込み加工とでひずみが逆方向に加わるために生じる一種のパウシंगाー効果が原因と考えられる<sup>7), 8)</sup>。

伸線減面率30%の加工を施してパウシंगाー効果を最大限に利用することにより、開発鋼KNCH8Sは調質鋼

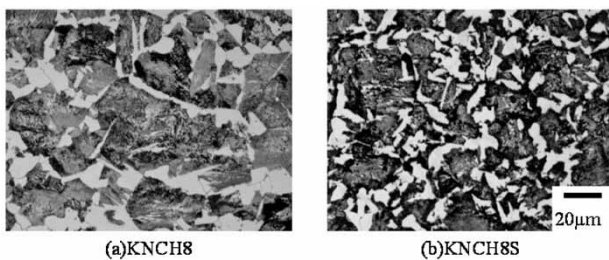


図6 既存鋼と開発鋼のマイクロ組織

Fig. 6 Microstructure of non heat treatment steel in wire rod condition

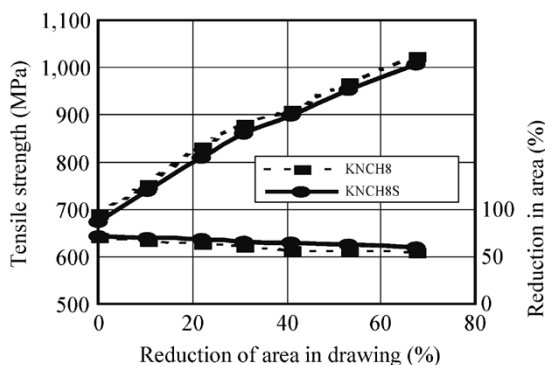


図7 KNCH8/8Sの伸線加工特性

Fig. 7 Mechanical properties of wire drawn in various reduction of area

KCH45KT-Wの球状化材とはほぼ同等の変形抵抗が得られるうえに、伸線加工を加えても変形抵抗の上昇を低く抑えた高強度伸線材が得られる可能性が確認できた。

### 2.2.2 工具寿命

強度クラス8.8級用として、非調質ボルト用の伸線材3種類と調質ボルト用球状化処理材、さらに強度クラス9.8級非調質ボルト用伸線材1種類の合計5種類でボルト圧造実験を行った。

強度クラス8.8級において、開発鋼KNCH8Sは、既存鋼KNCH8に対し変形抵抗を低減でき、工具寿命は3倍程度向上でき(図9)、さらに強度クラス9.8級の非調質ボルトでも、既存非調質鋼より工具寿命が改善できる可能性があることが分かった。開発鋼KNCH8Sでは、伸線減面率の適正化により、強度クラス8.8級と9.8級の非調質ボルトを作り分けることができるといえる。

### 2.2.3 ボルト特性

試作したM12フランジボルトを用いて、JISに規定のある頭部打撃試験、くさび引張試験、保証荷重試験を行った。また、ボルトからJIS14A号試験片を切り出し、引張試験による機械的性質と硬さも調査した。測定結果を表6に示す。圧造ままでは降伏比YP/TSや永久伸びを満足できないが、200℃以上のベーキングを施すことによって強度クラス8.8級としての規格を達成できた。

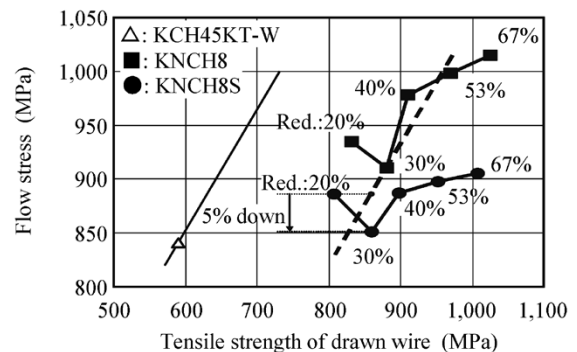


図8 伸線材の引張強さと変形抵抗の関係

Fig. 8 Relationship between tensile strength and flow stress of drawn wire

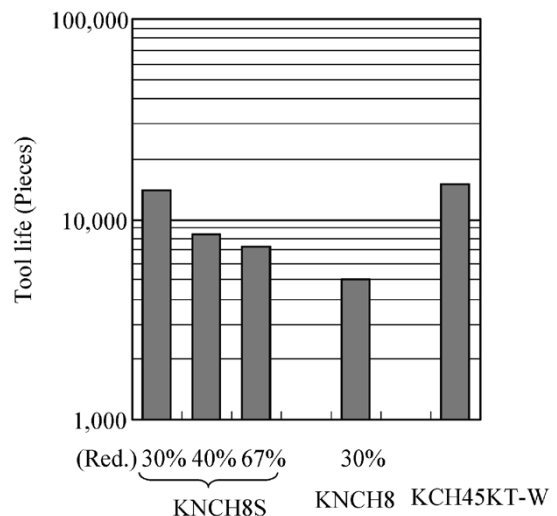


図9 伸線材の工具寿命評価結果

Fig. 9 Results of tool life test of various drawn wires

表 6 強度クラス8.8級非調質ボルトの機械的特性  
Table 6 Mechanical properties of 8.8 class non heat treated bolt

Steel	Reduction of area in drawing (%)	Baking conditions	JIS 14A					Wedge loading test	Proof load test
			0.2%PS (MPa)	Tensile Strength TS (MPa)	0.2%PS /TS	El./5d (%)	Hardness (HV)	Breaking Strength (MPa)	Permanent extension (μm)
KNCH8S	30	None	580	785	0.74	21.9	247	786	21
		200°C×4.0h	693	842	0.82	18.9	266	843	4
		400°C×0.5h	703	853	0.82	18.8	270	865	2
	40	None	595	820	0.73	21.3	259	813	14
		200°C×4.0h	758	864	0.88	18.9	274	867	6
		400°C×0.5h	766	873	0.88	20.8	277	881	2
67	200°C×4.0h	936	996	0.94	12.0	315	1000	5	
KNCH8	30	None	601	818	0.73	18.2	258	832	30
		200°C×4.0h	790	886	0.89	18.3	281	889	5
		400°C×0.5h	793	900	0.88	17.4	286	903	2
KCH45KT-W	Quench and tempered		794	871	0.91	17.9	273	-	≤1
JIS specification	8.8 class		Min. 640	Min. 800	Min. 0.8	Min.12	250/320	Min. 800	Max. 12.5
	9.8 class		Min. 720	Min.900	Min. 0.9	Min. 10	290/360	Min. 900	Max. 12.5

また、頭部打撃試験での首下の割れ、およびくさび引張試験での頭飛びなどの異常は認められなかった。

上述したように、開発鋼KNCH8Sを用いて製造した非調質ボルトは、強度クラス8.8級と9.8級の双方でJIS規定のボルト特性を満足することができ、ボルト以外の部品においても熱処理省略鋼としての活用が可能である。

むすび=軟化焼鈍省略線材として、開発鋼KTCHシリーズとKNCHシリーズについて、設計コンセプトと適用効果例を概説した。熱処理省略鋼は、部品の製造コスト低減に加え、温室効果ガス低減の面からも有効であり、さらなる適用拡大が期待される。本稿では、M12フランジボルトでの効果事例を示したが、ボルト用途以外も含め

た鍛造部品への適用拡大、さらには部品の高強度化を行っていきたい。

#### 参考文献

- 1) 百崎 寛ほか. R&D神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.1, p.45-48.
- 2) 鹿嶋正人ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.52-56.
- 3) 川上平次郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 1984, Vol.34, No.1, p.73-76.
- 4) 日本塑性加工学会編. 鍛造. コロナ社, 1995, p.154.
- 5) 三好英次ほか. 塑性と加工. 1971, Vol.12, No.12, p.167.
- 6) 山田凱郎ほか. 日本塑性加工学会冷間鍛造分科会第13回冷間鍛造実務講座. 1982, p.15.
- 7) 中村芳美ほか. R&D神戸製鋼技報. 1981, Vol.31, No.4, p.34.
- 8) 蟹沢秀雄ほか. 日本金属学会会報. 1991, Vol.30, No.6, p.557.