

棒鋼・線材の冷間鍛造技術

Cold Forging Technology for Steel Bars and Wire Rods

成宮 洋輝*
Hiroki NARUMIYA加田 修
Osamu KADA山下 朋広
Tomohiro YAMASHITA

抄 録

棒鋼・線材を素材とする自動車部品の製造に欠かせない加工方法の一つとして、生産性、材料歩留り、加工精度に優れた冷間鍛造が挙げられる。冷間鍛造の技術課題に対する取り組みとして、低応力三軸度領域における延性破壊限界の評価、中空部材の前方押し出し加工における延性破壊抑制手法の開発、リン酸塩石けん被膜の性能評価を行った事例を紹介した。

Abstract

Cold forging which is excellent in productivity, processing accuracy and material yield is one of the processing methods indispensable for the manufacturing of automotive parts made of steel bars and wire rods. As an effort against technical problems of cold forging, study cases of evaluation of ductile fracture limit in low stress triaxiality region, development of ductile fracture suppressing method in forward extrusion of hollow member, performance evaluation of phosphate and soap coating were introduced.

1. 緒 言

自動車部品に用いられる棒鋼・線材は、鉄鋼メーカーから圧延材として出荷された後、需要家にて伸線や焼鈍、鍛造、切削、表面硬化熱処理等の様々な加工を受けて、エンジンやパワートレイン等の部品となる。これら部品の特性および製造コストは、素材となる鋼材だけでなく製造プロセスにも大きく影響される。そのため、自動車部品の高強度化、高機能化、価格競争力強化の実現には、鋼材・工法両面からのアプローチが必要となる。このような考えの下、日本製鉄(株)では鋼材のみならず部品製造技術に関する研究・開発にも取り組み、鋼材から工法まで一貫となった技術開発を推進してきた¹⁻³⁾。

棒鋼・線材を素材とする自動車部品の製造に欠かせない工法の一つとして、生産性、材料歩留りに優れた鍛造が挙げられる。鍛造は加工温度によって冷間鍛造、温間鍛造、熱間鍛造、半溶融鍛造に分けられるが、ここでは鋼に多用されている冷間鍛造と熱間鍛造の特徴を表1に整理した。冷間鍛造は加工精度および鍛造後の表面状態が良好であり、切削や研削による仕上げ加工を省略あるいは簡略化できるという特長を有する。そのため、欧米からの技術導入

以降、多種多様な部品が冷間鍛造によって成形されるようになり、技術が進歩した現在では、歯車やスパイダ等の高精度・複雑形状部品の生産にも適用されている^{4,5)}。

日本製鉄では、鋼材面から冷間鍛造の技術課題に対応すべく、高延性鋼や軟質鋼、粗大粒防止鋼といった冷間鍛造に適した鋼を開発してきた^{6,7)}。さらに、複動サーボプレス等の実験装置および数値解析を活用して、冷間鍛造技術の

表1 鋼の冷間鍛造・熱間鍛造の比較
Comparison of steel cold forging with steel hot forging

	Cold forging	Hot forging
Process temperature	Room temperature	1000-1250°C
Material flow stress	High	Low
Forging pressure	High	Low
Annealing before forging	Necessary	Unnecessary
Material deformability	Low	High
Shape of forgings	Complex in some cases	Complex
Dimensional accuracy of forgings	High	Low
Surface condition of forgings	Fine	Oxidized and decarburized
Lubricant	Phosphate coating plus metal soap, etc.	Graphite, etc.

* 鉄鋼研究所 棒線研究部 主任研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

高度化、高付加価値冷間鍛造品の試作開発にも取り組んできた。本稿では、その一例として、棒鋼・線材の冷間鍛造における延性破壊、中空部材加工、潤滑に関する日本製鉄の研究事例を紹介する。

2. 低応力三軸度領域における延性破壊限界

素材を加熱せず室温のまま加工する冷間鍛造は、鍛造品の表面あるいは内部に延性破壊（割れ）が発生しやすい。延性破壊が生じた場合、製造工程や鍛造品形状を見直す等の対策に試行錯誤が必要となるため、工期短縮・コスト低減の観点から高精度な延性破壊予測技術の確立が求められている。

一般的に、冷間鍛造における延性破壊の予測には、Cockcroft & Latham の式⁸⁾ や大矢根の式⁹⁾ に代表される延性破壊条件式が用いられる。近年、日本製鉄では、延性破壊限界をより精緻に評価できると考えられる応力三軸度-相当塑性ひずみ平面における延性破壊限界線を用いた予測手法について研究を行っている。応力三軸度は平均応力 σ_m を相当応力 σ_{eq} で除した無次元数であり、応力三軸度が高いほど、延性破壊の一過程であるボイド成長が促進されると考えられている¹⁰⁾。応力三軸度が 0.6 以上の領域において主に引張モードによって素材内部から延性破壊が進行する場合、応力三軸度の増加に伴い延性破壊限界が低下することが知られている¹¹⁻¹⁴⁾。

一方、応力三軸度が 0.0 以上 0.6 未満の領域において素材表面から延性破壊が進行する場合は、様々な結果が報告されている。具体的には、延性破壊限界は応力三軸度の影響を受けず相当塑性ひずみによって一義的に決まる^{11,15)} という結果や、応力三軸度の増加に伴い延性破壊限界が向上する¹⁶⁾、応力三軸度の増加に伴い延性破壊限界が低下する^{17,18)} といった結果である。このように、低応力三軸度領域の延性破壊限界については十分理解されているとは言い難い。そこで、その原因だと考えられる変形モードの違いを明確に区別した上で、低応力三軸度領域における延性破壊限界を調査した^{19,20)}。

供試材には、球状化焼鈍を施した機械構造用炭素鋼 JIS S55C を用いた。試験片形状を図 1 および図 2 に示す。各試験片は、供試材から圧延方向に対して平行に切り出した。試験条件を表 2 に示す。環状切欠き引張試験（試験 No.1～4）では、試験片の切欠き半径の大小によって、延性破壊起点となる試験片中心（素材内部）の応力三軸度を変化させた。環状切欠きねじり試験（試験 No.5～9）では、単純にねじるだけでなく圧縮荷重等を与えながらねじることによって、延性破壊起点となる切欠き底（素材表面）の応力三軸度を変化させた。試験中の応力三軸度および相当塑性ひずみは、有限要素法解析コード Marc Ver.2014 を用いた弾塑性解析により算出した。

各試験で延性破壊に至った際の破壊起点における応力三

軸度および相当塑性ひずみを図 3 に示す。応力三軸度が 0.6 以上の領域で引張モードによって素材内部から延性破壊が進行する場合、従来の報告と同様に、応力三軸度の増加に伴い延性破壊限界が低下した。本検討で注目した低応力三軸度領域においてせん断モード主体で素材表面から延性破壊が進行する場合も、応力三軸度と相当塑性ひずみによって延性破壊限界を整理でき、応力三軸度の増加に伴い延性破壊限界が低下することが明らかとなった。さらに、せん断モード主体と引張モードでは延性破壊限界が異なる

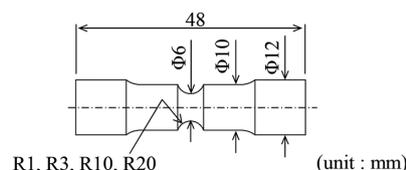


図 1 環状切欠き引張試験片形状
Geometry of notched-bar tensile specimen

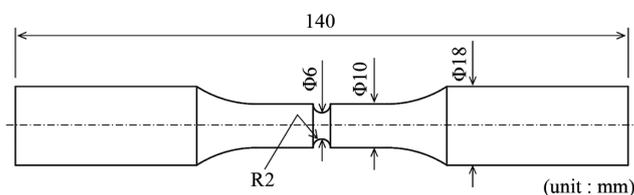


図 2 環状切欠きねじり試験片形状
Geometry of notched-bar torsion specimen

表 2 試験条件
Test conditions

Test number	Test pattern	Notch radius	Tensile rate	Torsion rate	Load
1	Tensile	1 mm	0.3 mm/min	-	-
2		3 mm			
3		10 mm			
4		20 mm			
5	Combined tension and torsion	2 mm	0.3 mm/min	-	-
6					11 kN
7	Torsion			0.5 deg/s	-
8	Combined compression and torsion				-3 kN
9					-6 kN

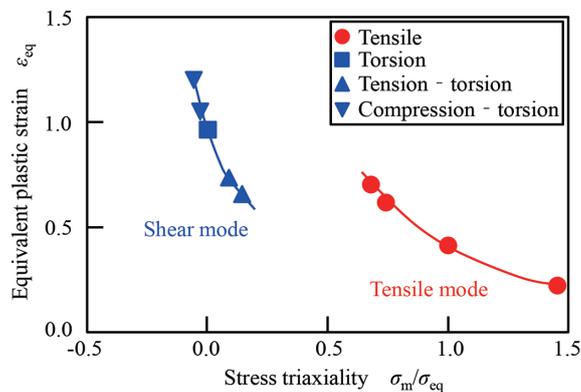


図 3 延性破壊限界
Ductile fracture limit

ことも確認された。

以上より、低応力三軸度領域においてせん断モード主体で素材表面から延性破壊が進行する場合、高応力三軸度領域と同様に、応力三軸度の増加に伴い延性破壊限界が低下することが分かった。また、変形モードによって延性破壊限界が異なることから、より高精度な延性破壊予測には、予測対象と同じ変形モードで延性破壊限界を評価することが重要だと考えられる。

3. 長尺中空部材の加工技術

軽量化を目的として、一部あるいは全体を冷間鍛造によって中空化した自動車部品が数多く製造されている。冷間鍛造による中空化は、前方押しまたは後方押しを用いて中心部に丸穴を成形する場合がほとんどである。この場合、穴径Dに対する穴深さLの比L/Dが4を超えると座屈によるパンチ折損の危険性が高まるため、L/Dが大きい深穴を有する長尺中空部品は冷間鍛造による中空化が困難である。現状、長尺中空部品はガンドリルによる切削で中空化されるのが一般的であるが、生産性および材料歩留りが低い。そのため、冷間鍛造による中空部材成形技術の進化と適用部品拡大が求められている。

前方押しまたは後方押しを用いた穴成形におけるパンチの座屈は、パンチ面圧の低減によって抑制可能である。実際に、パンチ面圧低減手法として補助張力付き容器せん孔押し法²⁰⁾を適用することで、L/Dが11の深穴成形が可能であることが報告されている²¹⁾。一方、日本製鉄でもこれらとは異なる手法で、長尺中空部材の冷間鍛造成形に取り組んできた。具体的には、中実素材を穴成形によって中空化し、得られた中空部材を前方押しによって細径・長尺化していく手法である。しかしながら、本手法では中空部材の前方押しにおいて内径表面の延性破壊（以下、内径表面割れ）が発生しやすく、ダイス角度や減面率の調整だけでは十分に割れを抑制できない可能性がある。そこで、新たな内径表面割れ抑制手法を考案し、その効果を実験的に確かめた。

供試材には、球状化焼鈍を施した機械構造用炭素鋼 JIS S43C を用いた。前方押し前後の鍛造品形状を図4に示す。シヤー切断した丸棒を両端面からの穴成形とその後の打ち抜きによって加工した中空部材（図4(a)）を、前方押しによって、形状が異なる3種類の段付き中空部材（図4(b)～(d)）に成形した。図4(b)は従来手法で成形した段付き中空部材で、外径を縮径する際、外径部と内径部の素材流動速度差に起因した引張応力下で内径表面が塑性変形する。そのため、外径を縮径するごとに内径表面割れの危険性が大きく高まる。

そこで、引張応力の発生原因である外径部と内径部の素材流動速度差を低減するため、外径を縮径すると同時に内径を拡径する、新たな内径表面割れ抑制手法を考案した。

図4(c)は2回目の外径縮径において考案手法を適用した段付き中空部材で、内径表面割れ抑制効果の有無に加えて、同効果に及ぼす拡径角度の影響を調査した。図4(d)は、内径表面割れを最大限抑制するため考案手法を2回適用した段付き中空部材である。

実験結果を図5に示す。従来手法（図5(a)）では、容易に目視可能な内径表面割れが発生した。一方、2回目の外径縮径において考案手法を適用した場合（図5(b)）では、割れの程度が小さくなるとともに割れ発生率が低下してお

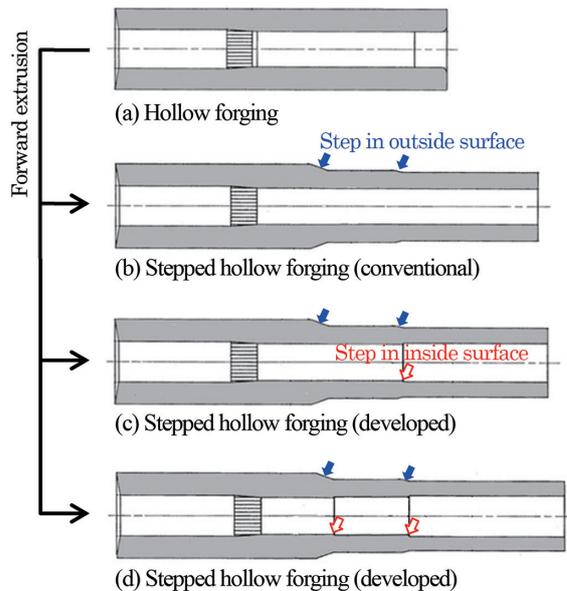
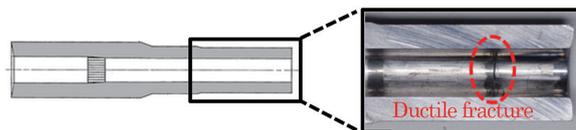
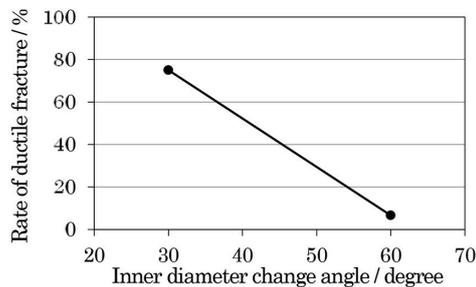


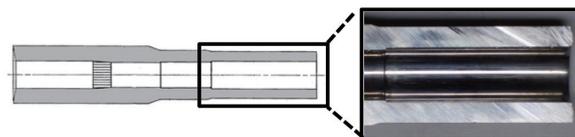
図4 鍛造品形状
Geometries of forgings before and after forward extrusion



(a) Conventional (Fig.4 (b))



(b) Developed (Fig.4 (c))



(c) Developed (Fig.4 (d))

図5 実験結果
Experimental result

り、考案手法によって内径表面割れの抑制が可能であることが確かめられた。また、拡径角度が大きいほど割れ抑制効果が高くなることが明らかとなった。さらに、考案手法を2回適用することで、内径表面割れを完全に抑制することに成功した(図5(c))。

以上より、中空部材の前方押しにおける内径表面割れの新たな抑制手法を考案し、その効果を実証した。本手法の適用により、L/Dが従来以上の深穴を有する長尺中空部材を冷間鍛造によって成形することが可能となる。

4. リン酸塩石けん被膜の潤滑性能評価

冷間鍛造に用いられる潤滑剤には、加工発熱および摩擦発熱による激しい温度上昇や、著しい表面積拡大、高面圧といった厳しい条件下においても、素材-金型間の焼付きを防止し摩擦係数を低減することが求められる。そのため、冷間鍛造には、耐焼付き性に優れたリン酸塩被膜に石けん処理を施して摩擦係数を低減させた、リン酸塩石けん被膜が多く用いられてきた。

リン酸塩石けん被膜の潤滑性能には種々の因子が影響することが知られており、例えば耐焼付き性に及ぼす被膜重量の影響²³⁾や、摩擦係数に及ぼす温度や表面積拡大の影響²⁴⁾が報告されている。日本製鉄においても、独自の耐焼付き性評価手法を考案し、リン酸塩石けん被膜の性能評価を行っている^{25, 26)}。しかしながら、金型粗さ等を含めた様々な因子の影響を体系的に評価した例は少ない。そこで、被膜膜厚、金型粗さ、界面温度、接触面圧、すべり速度を変化させ、摩擦係数および耐焼付き性に及ぼす影響を評価した²⁷⁾。

供試材には焼準を施した機械構造用炭素鋼 JIS S10C 相当材を、潤滑性能評価にはバウデン式摩擦試験を用いた。初期膜厚 5 μm 程度のリン酸亜鉛石けん被膜に、正方形断面のカウンターパンチを用いた異形前方押しによって表面積拡大を与え、被膜膜厚を 0.10~0.94 μm に調整した。圧子には市販の軸受け用鋼球(材質: JIS SUJ2) を使用し、再加工により表面の突出山部高さ Rpk を 0.007~0.300 μm とした。試験温度は 25~250 $^{\circ}\text{C}$ 、試験荷重は 9.8, 29.4, 68.6N、試験速度は 1, 5, 10mm/s とした。摩擦係数は摺動 10 回までの平均値で評価し、耐焼付き性は摩擦係数が 0.2 を超えるまでのすべり距離 $L_{\mu 0.2}$ で評価した。

摩擦係数に及ぼす温度の影響を図6に示す。なお、図6および図7において、プロットは実験データを示し、ラインは後述する予測式を示している。室温から 200 $^{\circ}\text{C}$ までは温度の上昇に伴い摩擦係数は低下し、250 $^{\circ}\text{C}$ で急激に増加した。次に、摩擦係数に及ぼす圧子表面粗さの影響を図7に示す。粗さが小さいほど摩擦係数は低かった。図6および図7から、被膜膜厚は摩擦係数にほとんど影響を及ぼさないことが分かる。また、図は省略するが接触面圧およびすべり速度も影響がほとんど無かった。影響が大きい温度

T [$^{\circ}\text{C}$] および圧子の突出山部高さ Rpk [μm] を用いて摩擦係数 μ の定式化を行い、式(1)を得た。なお、被膜が破壊されて機能しなくなった 250 $^{\circ}\text{C}$ のデータは定式化に使用していない。図6および図7に示すように式(1)は実験データと良く整合しており、温度変化に伴う摩擦係数の変化を考慮した数値解析への活用が期待できる。

$$\mu = 0.338 (1.05 Rpk + 0.975) T^{-0.373} \quad (1)$$

耐焼付き性に及ぼす温度の影響を図8に示す。摩擦係数が 0.2 を超えるまでのすべり距離 $L_{\mu 0.2}$ が長いほど、耐焼付き性が高いと考えられる。25~150 $^{\circ}\text{C}$ の範囲では、温度

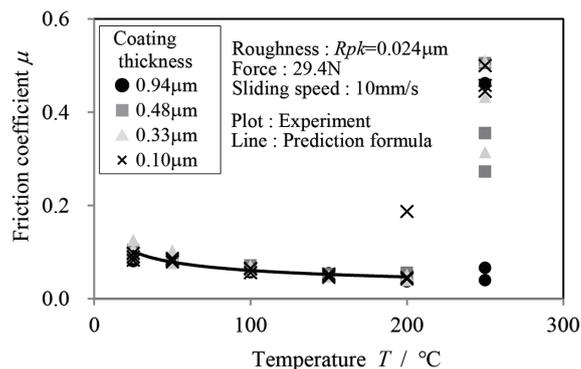


図6 摩擦係数に及ぼす温度の影響
Influence of temperature on friction coefficient

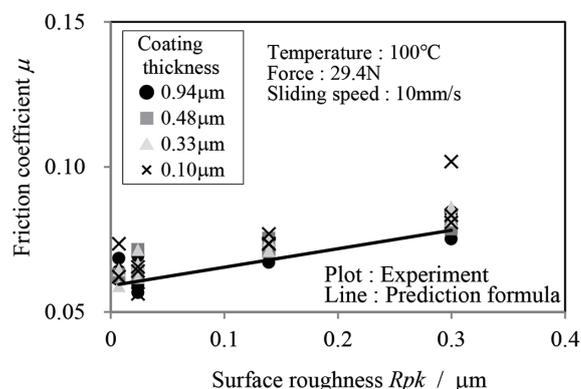


図7 摩擦係数に及ぼす圧子表面粗さの影響
Influence of contact surface roughness on friction coefficient

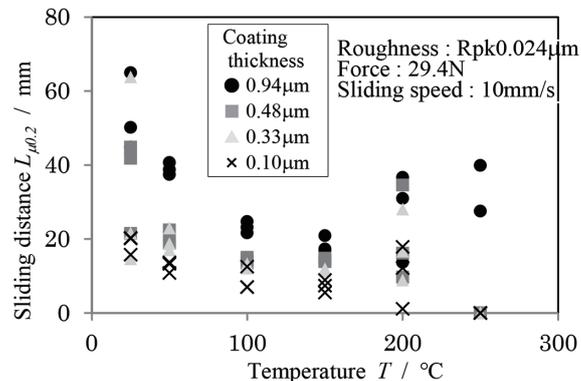


図8 耐焼付き性に及ぼす温度の影響
Influence of temperature on anti-seizure ability

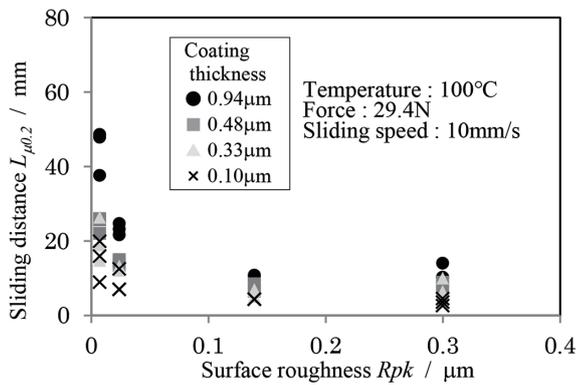


図9 耐焼付き性に及ぼす圧子表面粗さの影響
Influence of contact surface roughness on anti-seizure ability

が高くなるにつれ耐焼付き性が低下した。次に、耐焼付き性に及ぼす圧子表面粗さの影響を図9に示す。粗さが小さいほど耐焼付き性は高かった。図8および図9から、被膜膜厚が厚いほど耐焼付き性が向上することが分かる。なお、図は省略するが接触面圧およびすべり速度の影響はほとんど見られなかった。

以上より、リン酸塩石けん被膜の摩擦係数は界面温度と金型粗さの影響が大きく、耐焼付き性は界面温度と金型粗さ、被膜膜厚の影響が大きいことが明らかとなった。

5. 結 言

- (1) 低応力三軸度領域においてせん断モード主体で素材表面から延性破壊が進行する場合、高応力三軸度領域と同様に、応力三軸度の増加に伴い延性破壊限界が低下することが明らかとなった。
- (2) 中空部材の前方押し出しにおける内径表面割れへの対策として、外径を縮径すると同時に内径を拡張する新たな割れ抑制手法を考案し、その効果を実証した。
- (3) リン酸塩石けん被膜の摩擦係数は界面温度と金型粗さの影響が大きく、耐焼付き性は界面温度と金型粗さ、被膜膜厚の影響が大きいことが明らかとなった。

謝 辞

本稿第3章(長尺中空部材の加工技術)の研究遂行にあたり多大なご協力を頂いた日鉄精圧品(株)に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 藤堂尚二, 末野秀和, 今高秀樹: 新日鉄住金技報. (406), 13

(2016)

- 2) 梅原崇秀, 祐谷将人: 日本熱処理技術協会講演大会講演概要集. (80), 45 (2015)
- 3) 間曾利治: まてりあ. 56 (6), 397 (2017)
- 4) 中島将木, 新井慎二, 近藤一義: 塑性と加工. 50 (587), 1086 (2009)
- 5) 篠崎吉太郎: 塑性と加工. 57 (664), 406 (2016)
- 6) 門田淳, 宮西慶, 山崎真吾, 越智達朗: 新日鉄技報. (393), 127 (2012)
- 7) 戸田正弘, 吉田卓: 塑性と加工. 52 (600), 153 (2011)
- 8) Cockcroft, M.G., Latham, D.J.: J. Inst. Met. (96), 33 (1968)
- 9) Oyane, M: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. 75 (639), 596 (1972)
- 10) Rice, J.R., Tracey, D.M.: J. Mech. Phys. Solids. (17), 201 (1969)
- 11) 川畑友弥, 有持和茂, 大畑充, 望月正人, 豊田政男: 溶接学会論文集. 22 (4), 515 (2004)
- 12) 島貫広志, 古谷仁志, 井上健祐, 萩原行人, 豊田政男: 日本造船学会論文集. (186), 475 (2001)
- 13) 成宮洋輝, 加田修: 平成28年度塑性加工春季講演会講演論文集. 217 (2016)
- 14) 成宮洋輝, 加田修: 材料とプロセス. 29 (1), 174 (2016)
- 15) 庄司博人, 大畑充, 南二三吉: 鉄と鋼. 100 (5), 668 (2014)
- 16) Bao, Y., Wierzbicki, T.: Int. J. Mech. Sci. 46 (1), 81 (2004)
- 17) 志賀聡, 大久保潤一, 田村憲司, 松井直樹, 根石豊, 東田真志: 塑性と加工. 53 (613), 150 (2012)
- 18) 宮田隆司, 大塚昭夫, 奥山彦治: 材料. 37 (420), 1036 (1988)
- 19) 山下朋広, 根石豊, 門田淳, 山崎真吾, 野口泰隆: 第65回塑性加工連合講演会講演論文集. 255 (2014)
- 20) 山下朋広, 根石豊, 志賀聡, 野口泰隆: 塑性と加工. 58 (678), 617 (2017)
- 21) 篠崎吉太郎, 工藤英明: 塑性と加工. 14 (151), 629 (1973)
- 22) 村井映介, 森満帆, 中山省二, 近藤靖之: 平成28年度塑性加工春季講演会講演論文集. 119 (2016)
- 23) 濟木弘行, 丸茂康男, 阮立群, Ngaile, G.E.: 塑性と加工. 41 (477), 1036 (2000)
- 24) 団野敦, 阿部勝司, 野々山史男: 塑性と加工. 24 (265), 213 (1983)
- 25) 加田修, 王志剛, 宮西慶, 柳秀和, 野瀬由香里: 塑性と加工. 60 (696), 8 (2019)
- 26) 加田修, 宮西慶, 野瀬由香里, 柳秀和: 第65回塑性加工連合講演会講演論文集. 277 (2014)
- 27) Kada, O., Wang, Z.: Key Engineering Materials. (767), 124 (2018)



成宮洋輝 Hiroki NARUMIYA
鉄鋼研究所 棒線研究部 主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



山下朋広 Tomohiro YAMASHITA
鉄鋼研究所 棒線研究部 主任研究員



加田 修 Osamu KADA
鉄鋼研究所 棒線研究部 主幹研究員
博士(工学)