

棒線材における鍛造技術の高度化

Advanced Forging Technique with Bar and Rod

戸田 正弘^{*(1)}
Masahiro TODA

加田 修^{*(2)}
Osamu KADA

三木 武司^{*(3)}
Takeshi MIKI

抄 録

鍛造部品形状の高精度化、切削省略化、複雑形状化はいずれも用いられる鋼材、及び工具に対して厳しい条件での加工となり、最適な工程設計を迅速に行うシステムの必要性が高まっている。これに対応すべく、近年の計算機能力向上と相まって鍛造CAE(Computer Aided Engineering)利用が普及しつつある。鍛造CAEの中核となる鍛造シミュレーションの動向と、開発した鍛造用鋼性能解析システム、及びその中で用いられている鋼材加工特性に関して、更に、複雑部品成形を可能とする超高温鍛造の加工性などについて紹介した。

Abstract

High precise forging is required to decrease machining tips and form complex-shaped products. To put these requires to practice, forging conditions become severe for workpiece and tool. So, it is needed to select suite conditions easily and quickly. Recently, computer ability is rapidly developed, and Computer Aided Engineering (CAE) has been popularized. Especially, computer simulation used Finite Element Method (FEM) analysis is available for making suitable forging processes, and a computer simulation system which is a combination of FEM and material data-base of steel is developed by Nippon Steel. In this paper, flow stresses used in the forging simulation system are introduced. And ultra high temperature forging to form complex-shaped products is introduced about forgiabilities.

1. はじめに

自動車鍛造部品製造に関する多くの課題の内、構造に対するものとしては燃料費低減のための軽量化と衝突安全性の強化があり、生産性に対するものとしては切削省略によるコスト低減がある。これらの課題を解決するには、高強度材を複雑形状部品へ成形する必要があり、鍛造に用いられる素材及び工具は、従来にも増して厳しい条件下での加工が強いされている。工具負荷低減可能な新鋼種適用、あるいは工具形状、加工配分変更などにおいて、迅速かつ精度良い最適工程設計が望まれている。これに対して、近年の計算機能力の向上とともにCAE(Computer Aided Engineering)利用が普及しつつある。

以下に、CAEの中核となるFEM(Finite Element Method)解析を用いた鍛造工程シミュレーションについて、その動向、及び新日本製鐵で開発した鍛造用鋼性能解析システムを紹介する。更に、複雑形状部品成形に対する次世代技術として超高温鍛造技術について紹介する。

2. 棒線二次加工におけるCAEの発展

2.1 鍛造シミュレーションの発展

近年の計算機能力向上はめざましく、鍛造分野においてもCAD/

CAMを初めとして、AI技法を用いて鍛造工程設計を支援するエキスパートシステム¹⁾、鍛造時の素材変形挙動を解析する鍛造シミュレーション他CAEの利用が急速に広がりつつある。鍛造シミュレーションでは、FEMあるいはUBET(Upper Bound Element Technique)²⁾を用いたものに大別される。

ここでは、より詳細な素材特性情報を取り扱えるFEMについて紹介する。鍛造加工を解析できるFEMシミュレーターの代表的なものには、弾塑性FEMでは、MARC、ABAQUS、NIKE、DYTRAN-F等の市販プログラムがあり、剛塑性FEMではDEFORM³⁾、RIPLS-FORGE⁴⁾、PLUM⁵⁾、鋼材メーカーからもNASKA⁶⁾(神戸製鋼)、SHPS⁷⁾(山陽特殊鋼)等が開発されている。鍛造加工に対しては、弾塑性FEMよりも剛塑性FEMが多く用いられている。

鍛造加工では素材が受けるひずみが大きいことから、弾性ひずみ分を無視しても十分な解析精度が得られる。また剛塑性FEMでは、応力を増分形で与えないために弾塑性FEMに比べて比較的大きな増分ステップを取ることができると考えられる。更に最近では三次元解析も進み、オイラー要素と動的陽解法を組み合わせたプログラム、例えばGRADE/Forgeによりコンロッドの変形解析も行われている⁸⁾。但し、動的陽解法は連立一次方程式を解かないで高速化を図るもので

*⁽¹⁾鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員
〒293-8511 千葉県富津市新富20-1 Tel: 0439-80-2219

*⁽²⁾鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 研究員

*⁽³⁾鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主幹研究員

あり、連立式を解く他の陰解法に対して内部応力評価においてなお詳細な検討が必要と思われる。

この様に、鍛造加工FEMシミュレーターに関して多くの研究、開発があるが、解析精度を左右する素材加工データが組み込まれたものはほとんどない。ここでは剛塑性FEM解析と鋼材加工特性データとを組み合わせ、鍛造時の素材変形挙動を解析して鍛造用鋼の性能を明らかにする鍛造用鋼性能解析システム⁹⁾について述べる。

2.2 鍛造用鋼性能解析システム

本システムは、(1)変形解析を行う剛塑性FEM解析に各種冷間鍛造用鋼の加工特性データベースを組み合わせた冷間鍛造用鋼性能解析部分、(2)熱解析を連成した剛塑性FEM解析と温・熱間等温変形抵抗データベースを組み合わせた温・熱間鍛造用鋼性能解析部から構成されている。(1)での冷間鍛造用鋼の加工特性は、変形抵抗と加工限界を引張試験結果及び素材成分等から推定している。また、(2)での熱連成解析では、塑性仕事を熱エネルギーに変換して素材内温度分布をFEM解析するとともに、工具温度は一定として工具への熱移動を考慮している。変形解析後に各要素の温度分布を計算し、その後、要素ごとにその温度での等温変形抵抗を用いて次の変形解析を行うステップバイステップで計算する。

インプットデータは、用いられる素材とその形状、及び加熱温度、更に工具形状、工具予加熱温度、摩擦条件等であり、鋼材データベースを通じて変形抵抗等の鋼材加工特性あるいは素材割れ判定のための材料定数を力学的定数に変換する。その力学定数と剛塑性FEMによる鍛造シミュレーションを行い、成形荷重、素材破損、工具面圧、メタルフロー等を判定し、そのトライアンドエラーにより鋼材条件と加工条件を最適化する。

2.3 用いられる鋼材加工特性

2.3.1 冷間鍛造用鋼の変形抵抗曲線

端面拘束圧縮試験¹⁰⁾により大変形、高速変形下での冷間鍛造用鋼の変形抵抗を測定し、データベース化している⁹⁾。棒線鋼材は、圧延材、焼鈍材を引抜加工によって所定の素材径に加工された後に鍛造に供されることが多い。S15C焼準材とその引抜予加工材の変形抵抗曲線を図1に示す。変形初期においては引抜き減面率が大きくなるとともに変形抵抗も上昇するが、相当ひずみ $\epsilon_p \geq 0.5$ では変形抵抗は減面率 R_d に依存せず焼準材のそれと同じになる。すなわち、据込み実加工条件下では引抜き予ひずみの影響があたかも消滅したかのような変形抵抗を示す。この現象は各種鋼材において現れることが知られており、その機構についての議論は文献¹¹⁾に譲る。そして、鋼材の引張強度、あるいは鋼材成分からこの加工履歴を考慮した変形抵抗曲線を推定し、FEM解析に用いている。

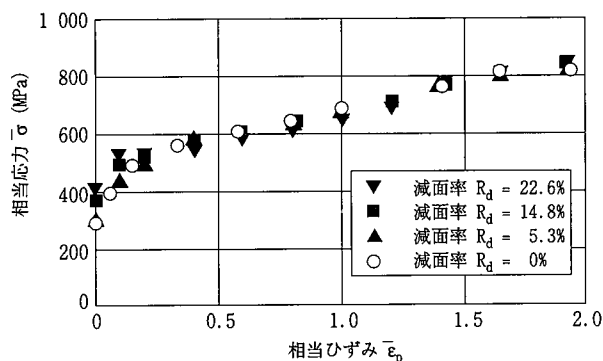


図1 S15C材の変形抵抗曲線

2.3.2 冷間鍛造時の素材割れ判定

冷間鍛造時に生じる素材割れは、MnS等の非金属介在物周りで微小孔が生じ、これが成長して割れに至ることが多い。また、非金属介在物周りでなくセメントイットが破壊して微小孔となる場合もある。(1)式は大矢根らが提案した延性破壊条件式¹²⁾であり、左辺は微小孔の成長を見込んだ体積変化率を示している。この積分値がc値に達した時を破壊点とする純力学的理論であるが、一般の鋼材での破壊限界予測に有効である。c、 a_0 は素材の加工限界及び組織によって定まる材料定数であり、本システムではこれら定数を引張試験結果、素材成分などから回帰して求めている。そして、FEM計算で求まる ϵ_p 、 σ_m 、 σ によって積分値を計算して素材破損を予測している。

$$\int_0^{\epsilon_p} \left(1 + \frac{1}{a_0} \frac{\sigma_m}{\sigma}\right) d\bar{\epsilon}_p = c \dots (1)$$

ここに、 ϵ_f :破壊ひずみ、 σ_m :平均垂直応力、 $\bar{\sigma}$:相当応力

2.3.3 温・熱間等温変形抵抗

温・熱間鍛造工程に見合ったひずみ速度(1~10/s)における鋼材変形抵抗について、摩擦力、加工発熱、熱移動などの影響が大きい高ひずみ域のデータはほとんどない。数値解析には変形中の温度に対応した変形抵抗が必要であり、加工中の温度とひずみで変形抵抗が規定されるものとして、一定温度変形抵抗曲線が存在すると有効である。しかし、一般的な圧縮試験では、加工中の温度変化を伴ったものしか得られていない。そこで、熱連成剛塑性FEMにより圧縮試験中の摩擦力、加工発熱、熱伝達の変形抵抗へ及ぼす影響を定量評価し、単純圧縮試験結果を修正して、実工程に見合った鋼材の熱間変形抵抗を精度良く、かつ簡易に求める手法を提案し¹³⁾、この手法を用いて各種鍛造用鋼の等温変形抵抗を算出して、データベース化している。

S55C圧延材において、荷重を圧縮後の横断面積で除した見かけの変形抵抗と圧縮率との関係を図2に示す。この変形抵抗には工具と素材間の摩擦力、加工発熱、熱移動などの影響が含まれており、ことに高圧縮率域においてはこれらの影響が非常に大きくなる。従来は、圧縮率20%以上は圧縮率によらず変形抵抗一定として、図中の破線で示す変形抵抗で取り扱われる場合が多い。この実験値を基に、摩擦、熱移動の有無による変形抵抗比をFEM解析を援用し修正係数として求め、実験結果を補正して求めた等温変形抵抗曲線を図3に示す。同図はひずみ速度10/sにおける結果であり、高ひずみ域での摩擦による変形抵抗上昇が除かれている。

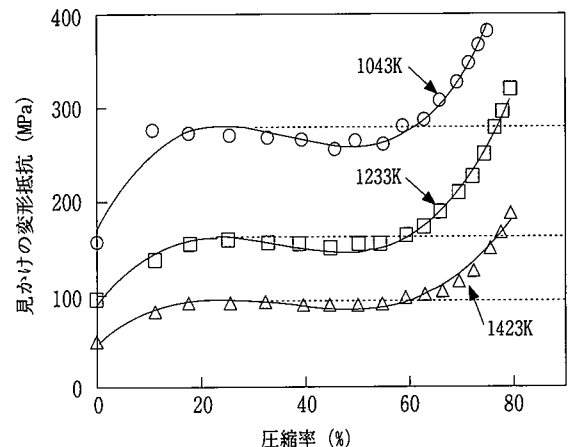


図2 圧縮実験から得られる見かけの変形抵抗 (S55C, ひずみ速度10/s)

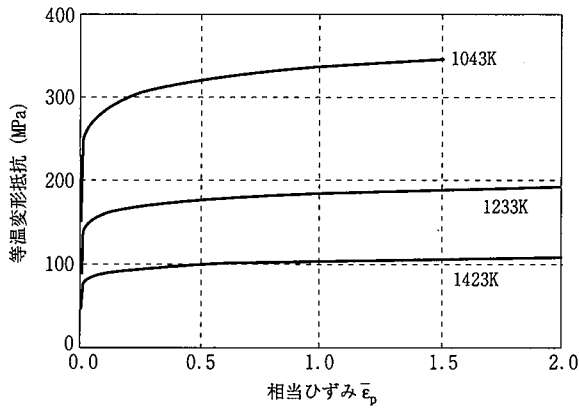


図3 S55C圧延材等温変形抵抗(ひずみ速度10/s)

2.4 システムの適用例

2.4.1 フランジボルトでの割れ予測

フランジボルトの頭部成形は鋼材に対して厳しい加工であり、フランジ部にしばしば割れが発生する。FEM解析における予備据込み後の素材の要素分割状態と、その変形途中形状を図4に示す。パンチが押込まれると、フランジ部が成形されるとともに、上方のパンチ周辺に素材が張出していく。割れ発生し易い箇所は、フランジ部自由側面の下方であり、割れ発生を検討した要素位置を同図に拡大して示す。

素材割れ発生を検討するために、縦軸を(1)式の積分値をc値で除したI.O.I.(Index of Oyane's Integral)をとり、それとパンチストロークとの関係を図5に示す。I.O.I. ≥ 1.0 になると加工限界に達したことを意味する。図中○プロットはS45Cの簡易焼鈍材で、成形終了時のパンチストロークより前で破壊限界に達している。●プロットは延性の高い球状化焼鈍材の場合で、成形終了時点まで破壊限界に達しない。この様に、鋼材特性を代えた場合の安全性を机上で極めて容易に予想することが可能である。また、簡易焼鈍材にお

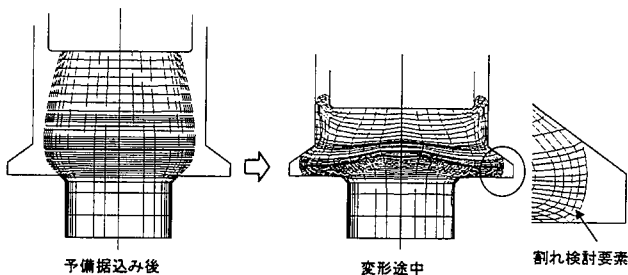


図4 フランジボルト成形形状と割れを検討した要素位置

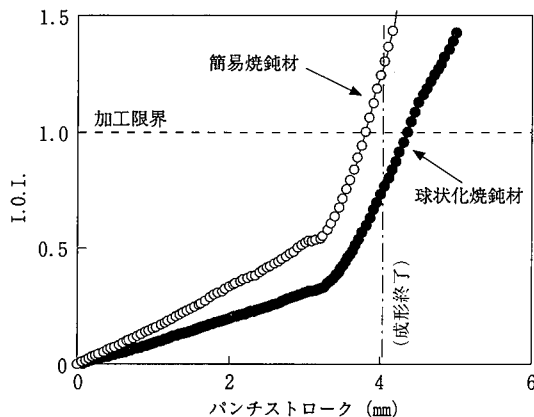


図5 焼鈍条件による割れ発生の予測

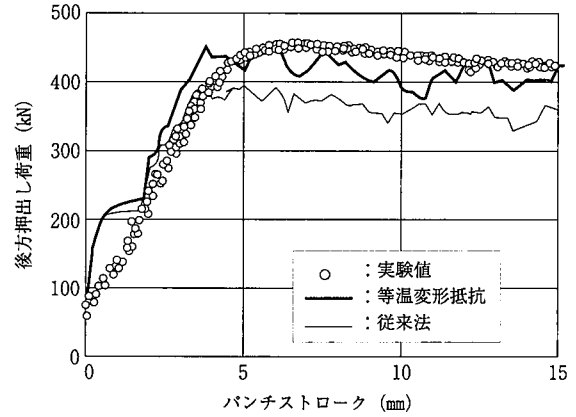


図6 後方押し荷重予測(S55C, 1043K)

いて成形終了まで割れを発生させないような頭部形状等、鍛造条件、あるいは材料改善対策も容易に検討できる。

2.4.2 温間後方押し成形

温間後方押し時の荷重予測の一例を図6に示す。同図はS55C圧延材を用い、30mmのブランクを1043Kで、減面率44%で後方押しした場合の荷重-ストローク線図である。図中太線が図3に示された等温変形抵抗を用いた場合で、細線が図2の破線で示された従来法の変形抵抗で計算された荷重予測結果であり、○印が実験結果である。従来法に比べて20%近くの精度向上が図られている。

工具寿命はわずかな工具負荷の違いによって大きくその寿命が変わってくる。また、使用する鍛造機選定の際にも、工具負荷の絶対値が精度良く求められることが必要となる。従って、工具負荷を精度良く予測するためにも、鋼材加工硬化特性を正確に評価することが重要である。

3. 棒線材のNear Net Shape鍛造

切削省略化、鍛造工程省略等を目指す複雑形状部品のNear Net Shape鍛造の実現には、変形拘束による成形荷重の急増や工具寿命低下など多くの問題を解決しなければならない。そこで、素材の流動性を極限まで上昇させることで複雑形状部品のNear Net Shape鍛造を達成すべく、通常の熱間鍛造よりも高い固相線温度近傍での超高温鍛造を試みた。

固液共存域での半熔融鍛造に関してはいくつか報告^{14,15)}がなされているが、アルミニウム合金やマグネシウム合金などの低融点材を用いたものが多く、自動車や建設機械の足周り部品など、重要保安部品に用いる機械構造用鋼や合金鋼に関する報告はほとんどない。

高強度部品への適用を目的として、機械構造用炭素鋼を用いた超高温鍛造の基礎実験^{16,17)}について紹介する。まず超高温鍛造の長所である加工性向上として変形抵抗低減効果について、また強加工部品の一例として高減面率の前方押しについて述べる。

3.1 変形抵抗低減効果の検討

超高温鍛造で期待される加工性向上の程度を調べるため、端面拘束圧縮試験を行い変形抵抗を測定した。供試材に表1に示す成分のS45C圧延材を用い、20mm径、30mm長に試験片加工した。所定の温度に加熱した後、パンチ速度200mm/s一定で種々のひずみまで加圧した。なおこのときの平均ひずみ速度は約10/sである。

前述した手法に基づき等温変形抵抗を算出し、相当ひずみ $\bar{\epsilon}_p = 0.5$ でのそれを温度について整理した結果を図7に示す。熱間鍛造温度域である1403Kでの圧縮と比べて、固相線直下の1613Kでは

表1 供試材成分(wt%)と固相線、液相線温度(K)

	C	Si	Mn	P	S	T_s	T_L
S45C	0.44	0.20	0.67	0.016	0.012	1615	1768
S55C	0.53	0.20	0.65	0.029	0.016	1575	1761

T_s : 固相線温度, T_L : 液相線温度

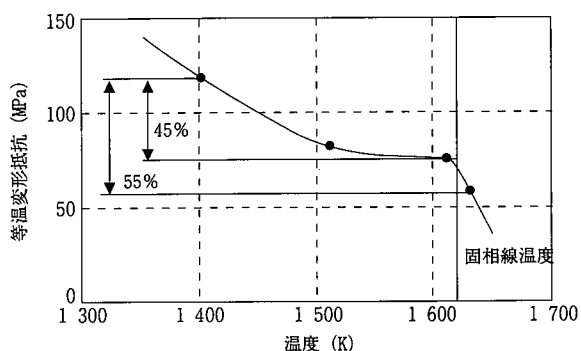


図7 ひずみ0.5における等温変形抵抗

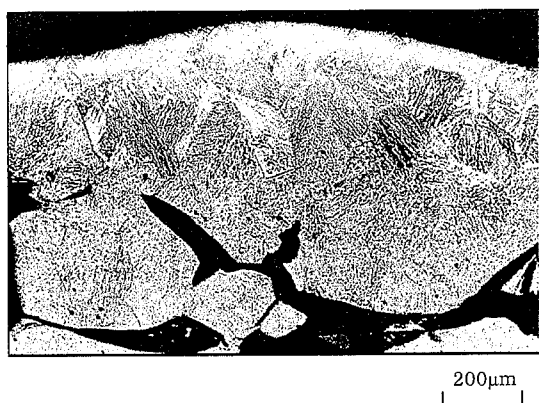


写真1 圧縮時の内部割れ

約45%、固相線を超えた1633Kでは約55%の変形抵抗の低減がみられる。素材を固相線以上の温度域で加工することで変形抵抗は著しく低減できることが分かる。

なお、圧縮開始温度1633Kで加圧した場合、圧縮率45%以上の加工度において試験片の側部に割れが発生した。そのときの内部組織を写真1に示す。自由表面である試験片側部には引張静水圧応力が作用するが、固液共存域での加工では粒界が溶融しており、そこを起点として割れが発生するものと考えられる。

3.2 前方押出実験

固液共存温度で生じる溶融割れを防止するため、素材に大きな圧縮静水圧応力が作用する高減面率の前方押出実験を行った。

3.2.1 実験条件

ダイス形状はコンテナ直径20mm、ダイス半角45°とした。減面率(R_d)は19~96%である。供試材には表1に示すS55C圧延材を用い、19mm径、30mm長に機械加工した。押し出し開始温度は1613K(固相線温度直上)、1423K(熱間鍛造温度)となるよう加熱した後、573Kに予加熱したダイスに挿入し、パンチ速度200mm/s一定で押し出した。

3.2.2 実験結果

固液共存域において端面拘束圧縮試験では溶融割れが生じたが、前方押出では圧縮静水圧応力が作用するため、押し出し先端部分を除いていずれの R_d においても割れは見られなかった。

図8に R_d と最大押し出し荷重の関係を示す。固液共存域では、通常の熱間鍛造温度に比べ、押し出し荷重が低減されることが分かる。

超高温鍛造では加熱温度が高いため、結晶粒の粗大化に伴う材質劣化が懸念される。そこで、押し出し後の組織観察及び機械的性質評価を行った。写真2に押し出し温度1613Kでの代表的な組織を示す。加熱後放冷したものは数100μmオーダーの粗大な結晶粒となっているのに対し、 $R_d=84\%$ 以上で押し出し後放冷した場合は組織の微細化が見られる。また、押し出し温度1423Kではいずれの R_d においても1613Kより微細な組織であった。

引張試験における引張強さを図9に、絞りを図10に示す。 R_d の増加に伴い、引張強度、絞りとともに増加する傾向にある。また、押し出し温度の影響は引張強度にはほとんど見られないが、絞りに対しては大きく、1613Kでは1423Kの半分程度になっている。これは、結晶粒の大きさを反映したものと思われる。また、半径方向中心部の硬度は、引張強さと同様、押し出し温度の影響はほとんど見られなかった。

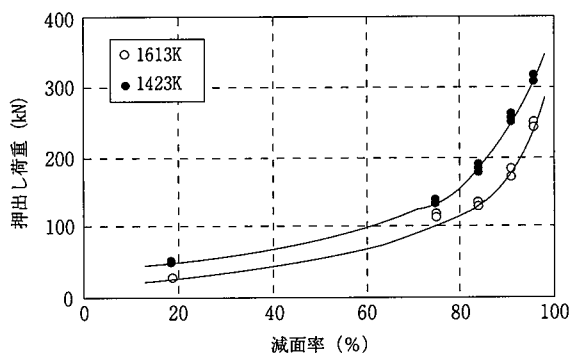


図8 鍛造温度、減面率の押し出し荷重に及ぼす影響

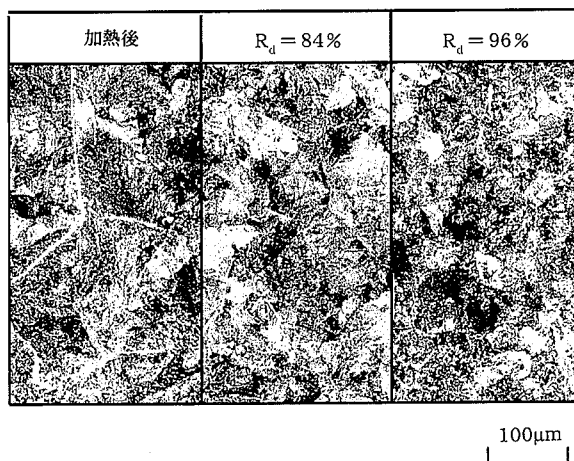


写真2 押し出し後の内部組織

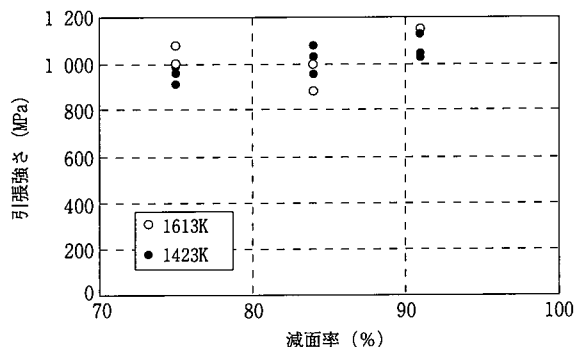


図9 鍛造温度、減面率の引張強さに及ぼす影響

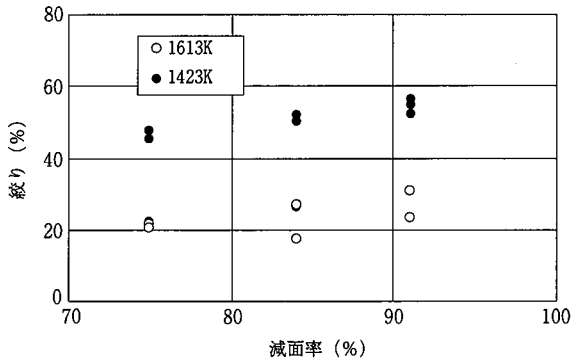


図10 鍛造温度、減面率の絞り及びぼす影響

参考文献

- 1) Badawy,A.A.et al.:J.Mech.Work.Technol.11,259-274(1985)
- 2) 木内学 ほか:塑性と加工. 22(284),495-502(1981)
- 3) Oh,S.I.et al.:Proc. 9th North American Manufacturing Research Conf. 1981,p.83-90
- 4) 小坂田宏造 ほか:第35回塑加連講論,1984,p.41-44
- 5) 田中伸司 ほか:塑性と加工. 26(288),87-93(1985)
- 6) 豊島史郎 ほか:神戸製鋼技報. 43(1),137(1993)
- 7) 鉄鋼新聞:1998.7.24
- 8) 木原茂文 ほか:第46回塑加連講論,1995,p.265-266
- 9) 戸田正弘 ほか:塑性と加工. 29(331),971-975(1988)
- 10) Oaskada,K.et al.:Ann. CIRP. 30(1),135-138(1981)
- 11) 三木武司 ほか:材料. 38(427),398-403(1989)
- 12) 大矢根守哉:日本機械学会誌. 75(639),110-115(1972)
- 13) Kada,O. et al.:Ann. CIRP. 47(1),185-188(1998)
- 14) 木内学:生産研究. 42(7), 32-35(1990)
- 15) 岡野 忍:ダイカスト. 97, 29-37(1993)
- 16) 加田 修 ほか:第45回塑加連講論,1994, p.13-16
- 17) 加田 修 ほか:平8塑加春講論,1996, p.196-197
- 18) Taupin,E.et al.:J. of Material Processing Tech. 59,68-78(1996)

4. おわりに

鍛造部品形状の複雑化及び製品精度向上のため、鍛造CAEによる工程設計が今後更に普及するものと思われる。鍛造は薄板成形と異なりシェル要素を用いた擬似三次元化ができず、また、非定常変形であることからその三次元解析の実用が遅れていた。しかし、計算機能力向上とともに徐々に広まりつつあり、新日本製鐵でも三次元解析を行っている。更に、鍛造のみならず、前工程の剪断加工¹⁸⁾、あるいは鍛造後の熱ひずみシミュレーションも開発されつつあり、バーチャル鍛造試作も夢ではないと考える。そうした中で、用いられる素材加工特性がいかに精度良く評価されているかが、解析精度を決定する要因であり、解析手法と素材特性評価の両面から開発されることが必要と考える。

更に、一回の加圧成形で複雑形状部品を可能とする超高温鍛造等が次世代成形技術の一つと考えられ、それに見合った鋼材開発が必要となる。今後も鋼材と加工技術の連携が進むであろうし、その中で鍛造技術はますます高度化していかなければならないと考える。