

棒線材の高機能成形解析

Advanced Forming Analysis for Bar and Wire Rod with Finite Element Method

加 田 修^{*(1)} 戸 田 正 弘^{*(2)} 柳 秀 和^{*(3)}
 Osamu KADA Masahiro TODA Hidekazu YANAGI

抄 録

鍛造プロセスの最適化を効率的に行うために、FEM(Finite Element Method)が広く用いられるようになってい
 る。10年程前には二次元解析が主流であったが、最近では計算機能力の飛躍的な高まりとともに三次元解析が急
 速に普及してきた。三次元形状部品の鍛造解析事例を紹介するとともに、複雑な製造工程への適用例として多段
 伸線の事例を紹介した。

Abstract

Finite Element Method (FEM) comes to be used widely to optimize forging process effectively. 2D-FEM was used mainly around 10 years ago. But now, computer ability is rapidly developed, 3D-FEM comes to be used rapidly. In this paper, it is introduced that 3D-FEM is applied to some three-dimensional shape parts. And it is introduced that 2D-FEM is applied to multi-stage drawings for wire.

1. はじめに

自動車部品を始めとする機械部品は、棒線材を用いて鍛造加工により製造されることが多いが、多種多様な部品形状に対し多くの鍛造用鋼が供されており、その組合せは膨大である。これらを実験的に検討する代わりに、試作レス・リードタイム短縮を目指したFEM(Finite Element Method)解析を用いた鍛造プロセスの最適化が盛んに行われている。新日本製鐵でも20年以上前からFEMによる棒線材の鍛造解析に取り組んでいる。

10年程前には実用可能な市販解析コードは軸対称などの二次元用が主流であったが、近年の計算機能力の飛躍的な高まりとともに三次元解析が急速に普及¹⁾しており、従来二次元(軸対称あるいは平面ひずみ)問題にモデル化せざるを得なかった解析が、実部品に即した形状で解析できるようになっている。

本稿では、三次元形状部品の鍛造解析事例を紹介する。また複雑な製造工程への適用例として、多段伸線の解析事例を紹介する。

2. 鍛造用鋼性能解析システム

FEM解析精度には用いられる素材特性データが大きな役割を果たすと考え、新日本製鐵の鍛造用鋼材の加工特性データベースをFEM解析に組み込んだ鍛造用鋼性能解析システム²⁾を開発している。図1に同システムの概要を示すが、鋼材加工特性データベースは、①冷間鍛造用鋼変形抵抗データ、②冷間鍛造用鋼加工限界データ、③温・熱間鍛造用鋼変形抵抗データ³⁾、からなっており、入力された鋼材条件(成分、熱処理条件、鍛造温度等)から力学的定数に変換し、FEM解析にて使用される。FEM解析は、軸対称などの二次元モ

デルに対しては自製の二次元剛塑性FEMを用い、三次元モデルに対しては市販の三次元解析コードを用いている。どちらの解析においても、鋼材加工特性データベースを用いて解析精度を保っている。

最近では計算機の能力向上に伴い三次元解析でのFEM計算時間は短縮されているものの、三次元解析では金型形状が複雑で入力データの作成に時間がかかる。従って極力二次元問題へモデル化することが望ましいが、近年、鍛造品形状の複雑化とともに二次元解析では対応のつかない課題が増えており、以下にその一例を紹介する。

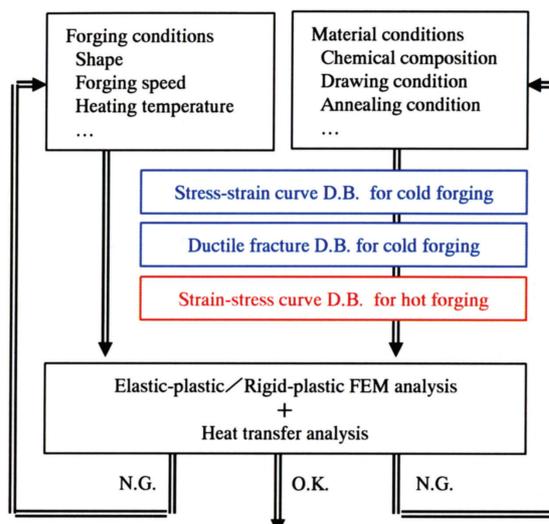


図1 鍛造用鋼性能解析システム
 Forging simulation system

*⁽¹⁾ 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2217

*⁽²⁾ 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主幹研究員 工博
 *⁽³⁾ 松菱金属工業 部品技術部 担当員

3. フランジボルトの花びら形状、割れ予測

フランジボルトは頭部が六角形状であるものの、例えば鍛造荷重予測等の目的においては、頭部形状を断面積が同一となるような円筒と近似して二次元軸対称FEM解析を行うことで従来対応してきた。しかし六角対辺部のフランジ径が対角部のそれよりも大きくなるフランジの花びら状変形が問題となり、三次元FEM解析で対応した。

図2に示す形状のフランジボルトの三次元解析を行った。図3に変形の進行状態を示すが、左側が図2-Aの対辺部断面の変形を、右側が図2-Bの対角部断面のそれを示している。対辺部では六角部分のボリュームが小さいため素材が早期に充填しフランジに流動していくのに対し、対角部ではフランジへの素材流動が遅れ、結果的にフランジ径は対辺部の方が大きくなる。対辺部と対角部のフランジ径の比を花びら度と定義すると、図4に示すように加工が進むにつれ花びら度は大きくなる。本部品では規定のパンチストローク

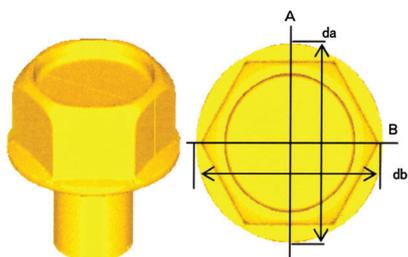


図2 フランジボルト形状
Shape of flanged head bolt

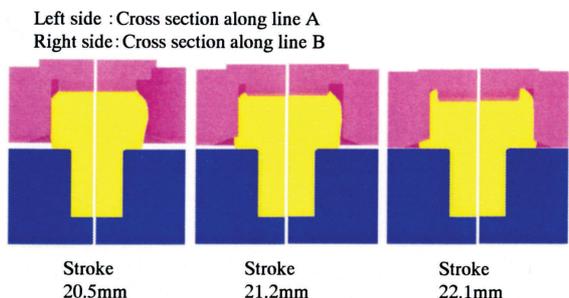


図3 フランジボルト頭部の充填状況
Change of die filling in flanged head bolt

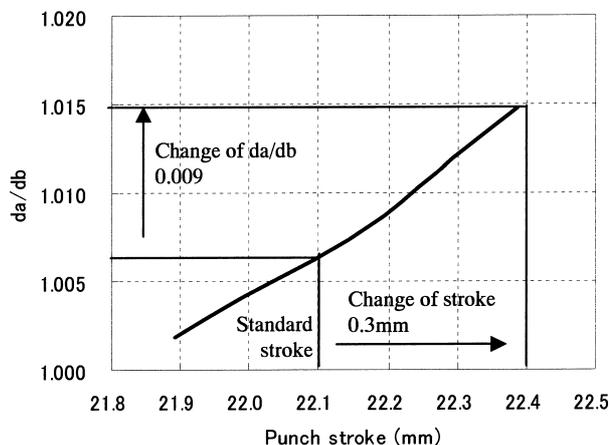


図4 花びら度の推移
Relation between punch stroke and da/db

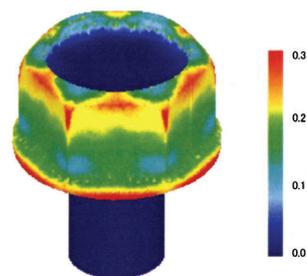


図5 フランジボルト成形時のダメージ値分布
Damage factor distribution in flanged head bolt

22.1mmでは花びら度1.006であるが、仮に0.3mmオーバーストロークすると花びら度1.015となり、極わずかな変動で花びら度は大きく変化することが分かる。

例えば、金型寿命を改善しようと素材を軟質化した場合、軟質化により鍛造荷重が低減され、金型や鍛造機械の弾性変形量が小さくなることになる。その際鍛造機のストローク調整を行わないと、弾性変形量が減った分素材の加工量が大きくなり、花びら形状化することになる。また素材重量が規定より多いものが混入した場合にも、花びら形状が問題となることが考えられる。

次に鍛造割れ予測についてであるが、延性破壊の評価式として汎用ソフトウェアに導入されている下記(1)式で示される一般化Cockcroft-Lathamの式を用いた。

$$D_f = \int \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

D_f : ダメージ値

σ^* : 引張最大主応力

$\bar{\sigma}$: 相当応力

$d\bar{\epsilon}$: 相当ひずみ増分

図5にダメージ値の分布を示す。素材の限界圧縮率60%を想定した表示であり、割れ発生の可能性が高い部位は赤色で示されている。フランジ部では対辺部でダメージ値が高く、これは上記で対辺部の方が対角部よりもフランジ径が大きくなることと対応していると考えられる。またリセス部でも対辺部及び対角部の金型未接触部でダメージ値は高くなっており、これまでの二次元軸対称FEM解析では分からなかった情報が、三次元FEM解析によって得られるようになってきている。なお、本フランジボルト形状であれば、圧縮限界率が65%以上あれば、割れ無く成形できると推定された。

4. 異形後方押し出し部品の鍛造割れ予測

鍛造技術や鍛造用鋼材の進歩にともない、従来熱間鍛造で製造されていた等速ジョイント用アウターレース等の非軸対称部品も冷間鍛造での製造が指向されるようになってきている⁴⁾。ここでは図6に示すような異形後方押し出し部品の厚内部の内面底付近での冷間鍛造割れ予測例を紹介する。

延性破壊の評価式として、下記(2)式で示される大矢根の式⁵⁾を用いた。(1)式の一般化Cockcroft-Lathamの式では扱う応力が最大主応力のみであるのに対し、(2)式の大矢根の式では平均応力 σ_m を介して軸方向、半径方向、周方向の応力を評価しており、複雑形状部品での複雑な応力状態に対しても精度が高いと考えられるためである。(2)式の積分値を素材の加工限界を示す材料定数Cで除したI.O.I (Index of Oyane's Integral)が1を超えると、素材の加工限界に達し

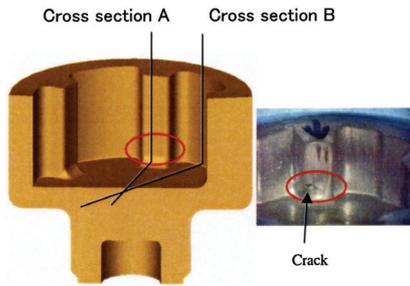


図6 部品形状と割れ発生部位
Parts shape and cracking position

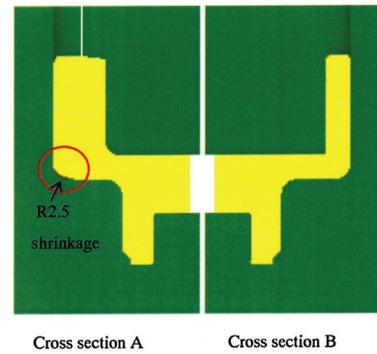


図9 外周部でのひけ発生状況(R2.5)
Shrinkage on the outside parts (R2.5)

割れが発生すると判断される。

$$\int \left(1 + \frac{1}{a} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\varepsilon} = C \quad (2)$$

a, C : 材料定数

σ_m : 平均応力

$\bar{\sigma}$: 相当応力

$d\bar{\varepsilon}$: 相当ひずみ増分

厚肉部、薄肉部のそれぞれの断面形状を用いた二次元軸対称FEM解析を行った場合のI.O.I分布を図7に示す。二次元軸対称解析では内面底付近でのI.O.Iは0.1以下であり、割れ発生の危険性はないと判断され、実態と一致しないことが分かる。一方、三次元FEM解析でのそれを図8に示すが、厚肉部の内面底でI.O.Iが0.8程度まで大きくなっていることが分かる。これには図9に示すように厚肉部の外周部で発生したひけが影響しているものと考えられる。

鍛造では素材と金型が接触していることで素材内部が圧縮応力状態となり割れ発生が抑制されるが、ひけが発生することで素材が金

型から離型して引張応力が発生し、割れにつながったものと考えられる。減面率の小さく底厚の薄い後方押出を行った際、外周底面でひけが生じることがあるが、図7の二次元軸対称FEM解析ではひけは認められなかった。減面率の大きな薄肉部から厚肉部へ周方向に素材が流動することもひけ発生に影響していると考えられ、本部品での割れ発生予測は三次元FEM解析を行って初めて可能であると言える。

ただし本解析でのI.O.Iは1を超えておらず、加工の厳しい部位ではあるものの割れ発生には至らないレベルと判断された。しかし、実態では割れが発生することから、加工発熱による素材の温度変化について検討した。図10に温度連成解析した際の素材の温度分布を示す。加工発熱により内面底部では素材の温度が300℃以上になることが予測された。このような温度域では鋼種によっては青熱脆性状態となり延性が低下するため、ひけの発生にともなう引張応力増加とあいまって、割れに至ったものと考えられる。

割れ発生の抑制対策としては、(2)式に示すように引張応力の低減が有効であり、パンチ底のRを大きくする、後方押出された部分に背圧を付与する、などによる引張応力低減策が考えられる。しかし部品仕様や鍛造機械仕様によってはこれらの対策がとれないこともあり、ここではダイスコーナーRを変更し、上述のひけ発生を抑制して引張応力を低減する方法を検討した。図11に厚肉部での拡大図を示す。ダイスコーナーRを小さくすることにより、後方に押出された素材とダイスとの接触面積が増加する。これにより素材とダイス間の摩擦抵抗が大きくなり、上方への素材流動が抑制されることになる。ダイスコーナーRを2.5から1.0に変更した場合のI.O.I分布を図12に示す。I.O.Iは0.8から0.6へと低減した。実際にダイスコーナーRを変更した金型にて試作したが、割れ発生率は1/5へと大幅に低減しており、本対策の有効性を確認している。

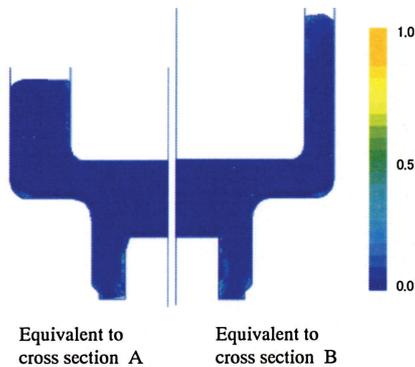


図7 二次元FEM解析でのI.O.I分布
I.O.I distribution obtained by 2D-FEM

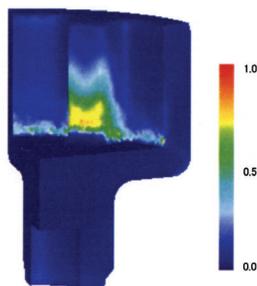


図8 三次元FEM解析でのI.O.I分布
I.O.I distribution obtained by 3D-FEM

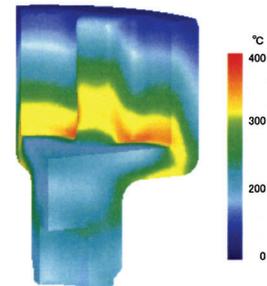


図10 熱連成解析時の素材温度分布
Temperature distribution obtained by 3D-FEM with thermal analysis

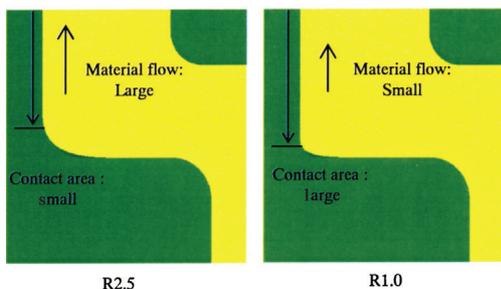


図11 ダイスコナーR変更によるひけ軽減
Reducing shrinkage by change R of outside die

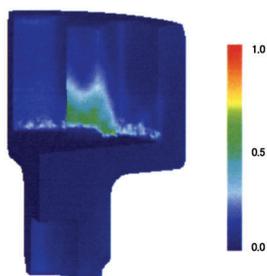


図12 ダイスR1.0でのI.O.I分布
I.O.I distribution obtained by 3D-FEM (R1.0)

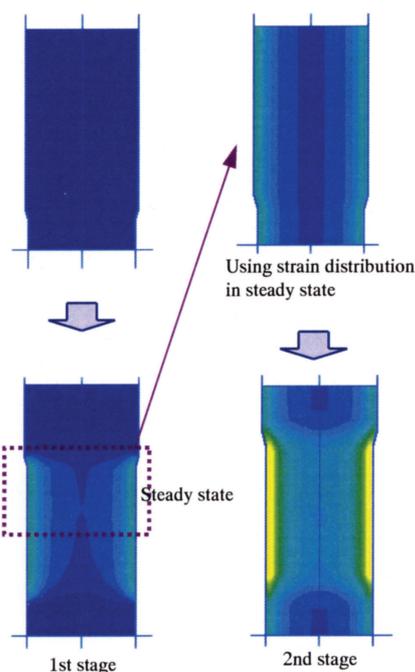


図13 多段伸線解析手法
Analysis method for multi stage drawing

5. 多段伸線への適用

スチールタイヤコード、PWS[®]、ソーワイヤーなど各種線材において高強度材料のニーズが高まっているが、高強度材料になるほど伸線時の断線、発熱等の問題が顕著に表れる。この分野は従来、経験と勘で工程設計されることがほとんどであったが、開発期間短縮などの面からもFEM解析を適用した効率的な検討が必要となってきた。伸線時の加工発熱に対するFEM解析に対してはKempらの解析⁶⁾の他、多くの事例^{7,8)}があり、伸線時の断線に対しては小森⁹⁾らが剛塑性FEMを用いた解析を報告している。しかしいずれの場合も独自のFEMプログラムを用い、伸線パスとしては数段の解析であり、スチールタイヤコード等、20段以上に渡る伸線パスでの解析事例はほとんど無い。そこで汎用FEMコードでの多段伸線解析に取り組んでいる。

図13に多段伸線解析の考え方を示す。伸線解析を行った後、定常変形部のひずみ分布を次パスでの素材ひずみ分布として用いることで多段伸線解析を行う。図14にスチールタイヤコードにおける24段伸線の解析事例を示す。解析には汎用FEMコードであるMARCを用い、軸対称弾塑性解析を行った。摩擦係数 $\mu = 0.07$ としている。図14は24段にわたる素材横断面の相当ひずみ分布を示す。横軸は中心からの距離を素材径で除して無次元化している。また図15は15段目でのひずみ分布であるが、表層から少し内部に入った所で最大ひずみとなっている。ひずみ分布形態は減面率、ダイス半角によって異なるが、本事例では伸線初期から類似のひずみ分布形態となっている。

図16は、15段目の素材中心、素材表層の温度履歴を示している。伸線速度は約300m/minであり、熱伝達係数は水冷として10kW/m²Kとしている。発熱はダイスとの摩擦損失で発生することから表層の温度が高くなる事が分かる。図17は15段目での温度分布を示すが、表層ランド部で温度が高くなっている。高強度化とともに、線形の細径化が進むと温度測定はますます困難であり、FEM解析によ

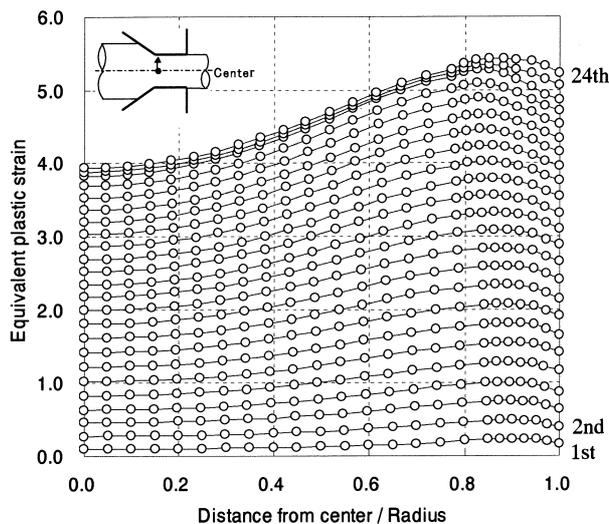


図14 多段伸線時のひずみ分布
Equivalent plastic strain distribution in multi stage drawing

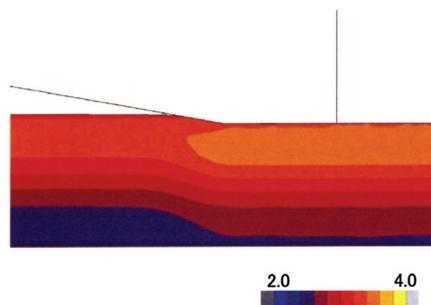


図15 15段目のひずみ分布
Strain distribution in 15th stage of drawing

る温度推定と、これを利用したパススケジュール最適化が重要になると考えている。

本伸線解析は弾塑性FEMで行っていることから、伸線後の残留応力予測への適用も検討している。また、本事例は軸対称解析であるが、汎用FEMプログラムを用いていることから三次元解析への展開、例えば伸線時の偏芯問題への適用も検討している。

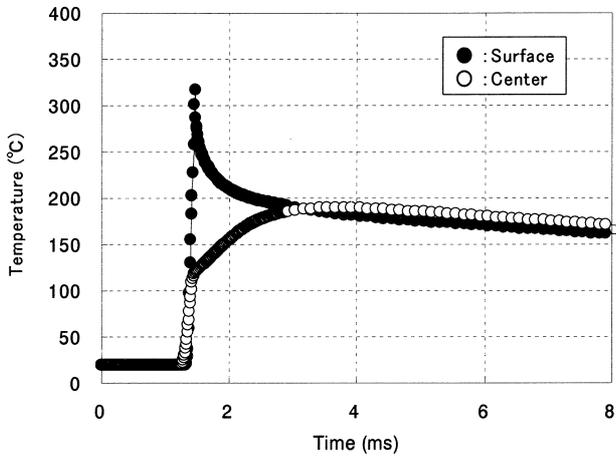


図16 15段目の温度履歴
Temperature history in 15th stage of drawing

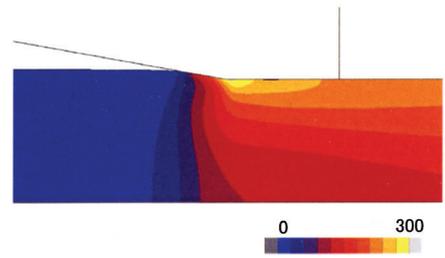


図17 15段目の温度分布
Temperature distribution in 15th stage of drawing

参考文献

- 1) 森謙一郎 ほか: 塑性と加工. 46(536), 833(2005)
- 2) 戸田正弘 ほか: 塑性と加工. 29(332), 971(1988)
- 3) Kada, O. et al.: Ann.CIRP. 47(1), 185(1998)
- 4) 寺内裕: 特殊鋼. 55(4), 21(2006)
- 5) 大矢根守哉: 塑性と加工. 13(135), 265(1972)
- 6) Kemp, L.P. et al.: Int.J.Mech.Sci. 27(11/12), 803(1985)
- 7) Pilarczyk, W. et al.: Wire Journal International. (Nov.), 76(1997)
- 8) Hamada, T. et al.: Wire Journal International. (May), 87(2001)
- 9) 小森和武: 塑性と加工. 39(452), 949(1989)