

今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

3次元熱間曲げ焼入れ加工のモデル化への挑戦

Challenge to Modeling of Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench Process

> 注田紘明 新日鐵住金(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所 利用技術研究部
> Hiroaki Kubota 主任研究員

し はじめに

本稿では、平成27年の澤村論文賞を頂戴した拙著「Finite Element Analysis of Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench Process Considering Phase Transformation and Temperature Distribution by Induction Heating」につ いて、背景と、数値解析モデルの完成に至るまでの過程を私 個人の視点から紹介する。ここに本誌面を拝借し、改めて本 研究を遂行するにあたりご指導、ご支援をいただいた多くの 方々に深甚なる謝意を表したい。

さて、当該論文は、3次元熱間曲げ焼入れ(以下、3DQ)加 工の数値解析モデルについて述べたものである。3DQは、薄 肉鋼管を素材として3次元の曲げ加工と焼入れを同時に行い、 引張強さ1470 MPa以上の閉断面の高強度自動車部品(図1)

図1 3DQにより成形した自動車部品の例

を製造可能な技術である。本技術は、近年の自動車への衝突 安全性の向上と、車体軽量化の要求に対応するため、新日鐵 住金グループで開発された¹⁾。

図2に3DQの加工装置を示す。加工装置は、送り装置、ガ イド、高周波誘導加熱コイル、冷却装置、曲げ加工ロボット から構成されている。鋼管は軸方向に80 mm/s程度の速度 で送られながら、高周波誘導加熱によってAc3変態温度以上 へ急速加熱される。このとき、鋼管の先端はロボットにより 把持されており、ロボットが動作することでコイル直下の高 温域で曲げ加工が行われる。曲げ加工を受けた鋼管には、冷 却水が直接噴射されて焼入れが行われる。塑性変形が狭い高 温域に集中するため、変形の制御が容易で、目的の曲げ形状 を得ることができる。

3DQでは、加工度を大きくすると、冷間の曲げ加工と同様 に肉厚の変化、断面形状の変化、しわの発生などの不良現象 が生じる。また、加熱と冷却を伴うため温度分布が周方向に 不均一になると製品に反りが生じて加工精度が悪化する。当



* [今回の対象論文]

窪田紘明, 富澤淳, 山本憲司, 岡田信宏, 浜孝之, 宅田裕彦: [Finite Element Analysis of Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench Process Considering Phase Transformation and Temperature Distribution by Induction Heating], ISIJ International, Vol.54 (2014), No.8, pp.1856-1865 (第26回澤村論文賞受賞)

該論文では、これらの現象を精度良く予測するために開発し た新たな数値解析手法と、解析により明らかになった変形の メカニズムについて著している。

2 3DQのモデル化への挑戦

私は入社2年目の2009年に3DQの技術開発に参画した。 はじめの1年程は朝から晩まで実験室にこもり、成形された 鋼管の品質と設備の挙動の関係などを実験中心で調べてい た。当時、ロボットの挙動や鋼管の温度、設備の変位等を計 測する技術が確立されており、それらの情報をもとに設備 や、ロボットを動作させるソフトウエアなどを含めた加工技 術の改善が日々なされていた。鋼管の変形挙動についても、 途中止め試験や、予めレーザーで格子を焼き付けた鋼管での 実験などにより、変形の見える化が取り組まれており多くの 有用な情報が得られた。一方で、さらに詳しく変形挙動を理 解しようとすると、熱間ではひずみゲージを貼ることすら難 しく、変形域は冷却水で視界が遮られていて観察も困難で あった。さらに、鋼管の断面寸法を変更した実験をしようと すると、鋼管や高周波誘導加熱コイルの製造から行わなけれ ばならず、すぐに多く実験データを得るのは難しかった。

材料の流動や応力状態はどのようになっているのか。材料 の断面形状や肉厚の変化を決める因子は何か。変形領域の 幅、冷却の不均一、コイルの偏芯、ロボットの動作精度はそ れぞれどのように製品の寸法精度に影響をおよぼしているの か。同時に生じる種々の外乱の影響を、分離できないか。数 値解析技術があれば現象をより詳しく理解できて、効率的な プロセスの改善ができるのではないかと考えた。実験による 検討に参画してから1年が経つ頃、思い切って当時の上司に 数値解析モデルの開発を提案したところ、必要な予算の確保 と、熱処理などの数値解析を専門とする先進デザイン研究部 (現在の材料信頼性研究部)への社内の短期留学が許された。 こうして、実験現場で抱いていた疑問が駆動力となって本研 究はスタートを切った。

3 従来の研究

当時、鋼管の高周波誘導加熱曲げについて、いくつかの数 値解析モデルがすでに提案されていた。栗山ら^{2,3)}、浅尾ら^{4,5)} は、初等解析を用いて、曲げモーメントや肉厚変化を求めた。 しかし、これらのモデルは、断面形状が円形を保つとの仮定 の下で単純化された計算を行うものであり、断面形状の変化 や、詳細な応力、ひずみ分布を知ることはできなかった。一 方、有限要素法(以下、FEM)解析は、Wangら⁶⁾、Huら⁷⁾、 Troppら⁸⁾によって行われており、肉厚変化や扁平化などが 計算されていた。しかし、これらの方法も、実際とは異なる 外表面からの熱流束によって温度が計算されていたり⁸、ほ かの文献の温度分布を使用したりする⁷⁷など解析精度は十分 ではなかった。また、金属組織の変化を考慮した例はなかっ た。3DQは高精度な自動車部品を想定しており、解析にも高 い精度が要求されるが、これに耐えうる解析手法は明らかに されていなかった。

4 解析モデルの構築

3DQの数値解析技術を開発するにあたって、以下の三つを 目標に置いた。第一は、高周波誘導加熱と水冷による温度分 布をできるだけ精度よく再現することである。これは、温度 分布が、成形後の管の断面形状やしわの発生に対して大きく 影響することが小畠ら⁹により報告されていたためである。 第二は、流動応力の温度および金属組織の依存性を精度良く 再現することである。先に述べたように温度分布の精度を高 めるのと同時に、流動応力の温度に対する依存性を高精度化 することで、塑性変形の予測が適切に行えると考えた。第三 は、熱ひずみと変態ひずみを考慮することである。これによ り、温度が不均一となったときに、それが加工精度におよぼ す影響が検討可能になる。

4.1 解析の枠組み

3DQは加熱、曲げ変形、冷却、焼入れと多工程であり、さ らに多くの物理現象を取り扱う必要がある。したがって、解 析精度の確保と同時に、効率的な解析が行えるように、解析 全体の枠組みを検討した。即ち、高周波誘導加熱の解析と、 曲げ変形の解析を連成させて同時に解くとモデル化が非常に 複雑となるため、これらを別々に解くことにした。図3に今



図3 3DQ の数値解析の枠組み

回採用した解析の枠組みを示す。第1段階では、3次元電磁場 - 伝熱連成解析モデル¹⁰⁾を用い温度分布を求める。第2段階 では、第1段階で得られた温度分布を用いて曲げ変形の解析 を行う。変形解析には、汎用のFEM解析コードを用い、金属 組織変化などの特殊なモデルはユーザーサブルーチンとして 組み込むことにした。

4.2 温度分布の解析

上述した3次元電磁場ー伝熱連成解析で特筆すべき点は下 記の二点である。一つは、磁気変態を考慮した点である。具体 的には、供試材の磁気変態温度(737℃)を超える前までは透 磁率は磁性体の透磁率を用い、超えた場合には非磁性体とし て取り扱った。これにより、磁気変態温度を超えた部位にお いて発熱効率が急激に低下し、そのために発熱密度のピーク がコイルの中心に対して上流側へずれる現象が再現できた。

もう一つは、冷却部に実験に即した熱伝達係数を用いた点 である。3DQでは噴射される冷却水によって鋼管が冷却され る。そのため、冷却部分を精度良く解析するためには、適切 な熱伝達係数を与える必要がある。通常、熱伝達係数を求め るには、冷却中の材料の温度を実験により測定し、伝熱解析 により適切な熱伝達係数を割り出す。はじめに、熱電対を鋼 管の外表面に溶接して温度測定を試みた。しかし、その結果 に基づくと過去の知見から予測されるよりかなり大きい熱伝 達係数となってしまった。検証の結果、熱電対に冷却水が直 接当たるため実際より冷却速度が速く見えていることが分 かった。そこで、Beckら¹¹⁾の方法を参考に、冷却水が直接当 たらない鋼管内面の温度を測定して、逆解析により外表面の 熱伝達係数を推定することにした。本方法により、熱伝達係

4.3 温度分布を求める簡易モデルの開発

上述の3次元電磁場-伝熱連成解析は、複雑な断面形状や 経験のない鋼管形状に対しても温度分布を求めることができ る利点があるが、コイル形状のモデリングやメッシュ作成に 手間がかかるという課題があった。そこで、簡易的に温度分布 を得る手法を考案した。即ち、発熱密度を位置の関数として定 義する熱源モデルを開発し、温度の解析には肉厚方向1次元 の伝熱解析を用いることで温度分布を求める方法である。

式(1)に考案した熱源モデルを示す。肉厚方向の電流密度 分布には一次元の誘導電流密度の理論式、長手方向には正規 分布関数を仮定しており、肉厚方向および長手方向の2次元 のジュール熱密度分布を表現することができる。ここで、Q は発熱密度、xは鋼管外表面を基準とした肉厚方向の位置、z は高周波加熱コイルの中心位置を基準とした鋼管の長手方向 の位置である。m、a、∂、Q_{max}は発熱密度分布の形状を決め るパラメータである。各パラメータは、種々の加熱条件に対 しデータベース化した。

つぎに、温度の解析は、連続熱間圧延の温度制御に用い られる非定常伝熱解析にヒントを得てモデル化した。即ち、 炉による加熱とランアウトテーブル (ROT) での水冷帯を、 3DQの高周波誘導加熱と水冷にそれぞれ見立てて、肉厚方 向1次元の伝熱解析を行う方法である。このとき、高周波誘 導加熱による発熱には式(1)を用い、冷却部には前述の熱伝 達係数を用いた対流熱伝達境界条件を仮定した。熱間圧延ラ インと3DQではスケールこそ異なるが、当該論文に示した ように本簡易モデルを用いて肉厚方向の温度勾配も含めて、 3DQの温度分布を良く表現できることが確認でき、効率的な 解析が可能となった。

4.4 金属組織、流動応力、熱・変態ひずみのモデル化

3DQでは、加熱過程において金属組織がフェライト・パー ライト組織からオーステナイト組織へ変化し、冷却過程にお いてマルテンサイト組織へと変化していく。このなかで、流 動応力は相当塑性ひずみ、ひずみ速度、温度の影響だけでな く、組織変化の影響も受ける。また、熱ひずみを考慮する場 合には、組織によって熱膨脹率が異なり、さらに変態するこ とによって変態ひずみが生じる。そこで、3DQの解析におい ては、金属組織変化を各組織の体積率として表現すること を考えた。このとき、変態温度の算出には化学成分の回帰式 であるKunitakeの式¹²⁾を用いた。また、フェライト・パー ライト組織からオーステナイト組織への変態には実験式¹³⁾、 オーステナイト組織からマルテンサイト組織への変態には Koistinen-Marburgerの式¹⁴⁾を用いた。これらの式を用いて 各組織の体積率を、変形解析モデルの各積分点位置に対して 増分ごとに求めた。流動応力は、計算された組織に基づいて 定義し、混合組織となった場合には線形混合則に従うとし た。なお、3DQでは鋼管の内面側においても、冷却速度が臨 界冷却速度以上となるため、フェライト変態とベイナイト変 態は考慮しなかった。

熱および変態ひずみは、Miettinenの密度予測式¹⁵⁾を用い て定義した。本式は、多くの実験結果に基づき、各組織にお ける温度と密度の関係を表したものである。FEM解析では、 温度増分と各組織の体積率増分から、材料の密度増分を求 め、その値をひずみ増分に変換した。

流動応力のひずみ速度依存性はCowper-Symondsの式¹⁶ によって定義した。3DQの主な変形温度域である800℃から 1000℃において高温引張試験を実施し、ひずみ速度依存性パ ラメータを求めた。この範囲であれば、温度毎にパラメータ を定義せずに、一組パラメータで一括してひずみ速度依存性 を表現可能であることも見出した。

上述のように、3DQの特徴に即して適切なモデルを適用 することで、最終的には実験に近い変形挙動を再現できるよ うになった。しかし、そこに至るまでに実験で求める材料特 性の重要性を改めて思い知った。当初、ホットスタンプの解 析のために取得したオーステナイト組織と、別の解析のため に取得したフェライト・パーライト組織の応力--ひずみ曲線 を用いて3DQの解析を実行してみた。その結果、オーステナ イトに変態した瞬間に塑性変形が停止してしまう解析結果と なった。同じ温度であれば、フェライト・パーライト組織に くらベオーステナイト組織の流動応力は高いため、その影響 が現れているのだと、はじめは考えていたが、途中止めサン プルの肉厚測定結果からはこのような現象は生じていないこ とが示唆された。そこで、応力-ひずみ曲線を良く調べたと ころ、引張試験時の試験速度が両組織で異なることが原因で あると分かった。このことから、引張試験の試験速度を管理 し、モデル化にあたってはひずみ速度依存性も考慮すべきと 判断した。今思えば当たり前のことではあるが、信頼性のあ る解析を実行するには、適切なモデルを適用するのと同時に、 適切な材料試験を実施することが重要であると痛感した。

4.5 解析結果

以上のように構築した解析モデルの有効性は、曲げ変形に よる肉厚変化と、不均一冷却した際の反りを、実験と解析で 比較することにより検証し、良好な結果を得た。また、図4 に示すように3DQ加工中の鋼管の応力状態をはじめて明ら



図4 温度、ひずみ速度、相当応力、降伏応力の長手方向分布

かにし、鋼管に生じる応力は加熱されて軟化している部分の 流動応力に律速されて、冷間の部分も含めて鋼管全体が低い 応力レベルとなっており、これがスプリングバックの抑制に 寄与していることを明らかにした。また、塑性変形領域は長 手方向に20 mm程度の狭い領域であることを明らかにし、 3DQにおいて狙いの曲げ形状を得やすい理由を明確にする ことができた。

本解析モデルを用いた研究成果は、当該論文以外の論 文^{17,18)}でも報告しているので、参照いただけると幸いである。

5 おわりに

3DQは、それ自体が複数の要素技術の集合体であるが故、 解析モデルの構築にも種々の要素が必要であった。私がそれ までに経験した冷間加工の知識に加え、電磁場、伝熱、熱伝 達、相変態等の知識が必要であったが、幸いなことに社内に は鉄鋼プロセスの研究のために各要素技術を持った研究者が 多く居り、助言や協力をいただくことができた。また、FEM 解析の原理原則の面からは、私が社会人博士として所属して いた京都大学大学院エネルギー科学研究科の宅田裕彦教授、 浜孝之准教授に大変お世話になった。

こうして本研究遂行の過程を振り返ってみると、私の仕事 としては各分野の専門家に教えを乞い、教えていただいたこと を解析モデルに反映し、3DQの実機を使って検証していった ということが思い出される。お世話になった各専門家の知見が あってこそ、本論文が栄誉ある賞をいただけたと考えている。

本解析モデルは、当初は3DQのプロセス改善を目的として 開発に着手した。しかし、結果として現在は、顧客(自動車メー カー、自動車部品メーカー)との部品の共同開発における開発 速度の向上にも寄与している。本解析モデルを用いることで、 早期の部品形状の最適化や、加工条件の検討が可能になり、 複数の部品の実用化に貢献することができた。3DQは高い加 工精度が実現され、これまでに、シートクロスメンバー¹⁹⁾ やA ピラー²⁰⁾ などの高強度自動車部材へ適用されている。

参考文献

- 富澤淳,嶋田直明,窪田紘明,岡田信宏,坂本明洋,吉田 経尊,山本憲司,森弘志,原三了,桑山真二郎:新日鉄住 金技報,397 (2013),83.
- 2) 栗山慎鋒, 会田督夫: 塑性と加工, 42 (2001) 481, 139.
- 3) S.Kuriyama and T.Aida : Proc.of Advanced Technology of Plasticity, vol.1, ICTP, Beijing, (1993), 464.
- 4)浅尾宏,岡田健一,藤嶋進,松本輝夫:塑性と加工,28 (1987) 313, 150.
- 5) 浅尾宏, 岡田健一, 米村秀雄: 塑性と加工, 33 (1992)

372, 49.

- Z.Wang and Z.Hu : Journal of Materials Processing Technology, 21 (1990) 275.
- Z.Hu and J.Q.Li : Journal of Materials Processing Technology, 91 (1999) 75.
- M.Tropp, M.Handrlk, P.Kopas and M.Saga : Pipeline and Gas Journal, 239, (2012) 11, 86.
- 9)小畠耕二,市瀬辰己,関口秀夫,小坂田宏造:塑性と加工, 28 (1987) 313, 158.
- 10) 岡田信宏, 坂本弘樹, 松尾隆将, 髙谷幸司: 鉄と鋼, 98 (2012) 7, 368.
- 11) J.V.Beck, B.Blackwell and St.C.R.Clair.jr. : Inverse Heat Conduction, J.Wiley & Sons, New York etc., (1985)
- 12) 邦武立郎: 熱処理, 41 (2001) 3, 164.
- 13) 岡村一男: 材料, 55 (2006) 5, 529.

- 14) D.P.Koistinen and R.E.Marburger : Acta Metallurgica, 7 (1959) 1, 59.
- 15) J.Miettinen : Metall.Mater Trans.B, 28B (1997), 281.
- 16) G.R.Cowper and P.S.Symonds : Brown Univ.Div.of Applied Mech.Report, 28 (1952)
- 17) 富澤淳,嶋田直明,窪田紘明,岡田信宏,原三了,桑山真二郎:塑性と加工,56,(2015)658,961.
- 18) 窪田紘明, 富澤淳, 岡田信宏, 山本憲司, 浜孝之, 宅田裕 彦: 塑性と加工, 57, (2016) 668, 掲載予定.
- 19) 自動車工学, 鉄道日本社, 東京, 62, (2013) 4, 86.
- 20) K.Horner : Proc.International Automotive Body Congress (IABC) 2015, (2015)

(2016年5月6日受付)