

高度部品製造解析システムの展開

Development of Advanced Analysis System for the Production of Parts with Bar and Wire Rod

加 田 修*
Osamu KADA

藤 田 崇 史
Takashi FUJITA

橋 村 雅 之
Masayuki HASHIMURA

抄 録

特殊鋼棒鋼・線材は、需要家での多くの製造プロセスを経て、エンジンやパワートレインなどの自動車部品に製造される。鋼材から最終部品までの部品製造工程に対し、鋼材一工法一貫での技術開発に取り組んでいる。その中で重要な位置づけである特殊鋼棒鋼・線材に関するソリューション技術についての取り組み状況を紹介するとともに、鍛造金型応力解析、鍛造品材質予測、熱処理ひずみへの鋼材影響、等についての解析事例を紹介した。

Abstract

Through the many types of manufacturing processes in customers, special steel bars and wire rods are manufactured to the auto parts such as engine and power train. For the manufacturing process to produce the final part of steel, Nippon Steel is working on technology development, including both the steel and manufacturing technology. This paper introduces the efforts of technology solutions for special steel bars and wire rods is important in that position, and then some of examples of analysis such as prediction of die stress in forging process, prediction of material properties after hot forging, and prediction of thermal distortion in heat treatment process.

1. 緒 言

特殊鋼棒鋼・線材は鉄鋼メーカーから圧延材として出荷された後、需要家での多くの製造プロセスを経て、エンジンやパワートレインなどの自動車部品に製造される。例えば、熱間鍛造部品では、転炉－製鉄－製鋼－連続鍛造－圧延－熱処理－切断－熱間鍛造－切削－表面硬化－仕上加工、のようなプロセスを経て部品へと製造されるが、その材質特性は順次変化して各プロセス間の製造特性に相互に影響を及ぼし、最終的に部品性能を決定づけることとなる。使用状態での部品性能を満足する鋼材、製造プロセスを確立するためには、個々の鋼材、製造プロセスに対して取り組むだけでは不十分であり、鋼材から工法一貫となった部品製造への取り組みが重要である。

新日本製鐵ではこれら一貫部品製造への取り組みとして、CAEを中心としたソリューション技術を重要視して開発を行ってきた。本稿では、材料供給メーカーとして部品性能を最大限に引き出すために、材料特性を考慮したソリューション技術を事例とともに紹介する。

2. 部品製造工程と対応するソリューション技術

自動車に用いられる特殊鋼棒鋼・線材は弁ばねや懸架ばね等を除くと、大半の部品は図1に示すように新日本製鐵から出荷された棒鋼、線材を熱間鍛造あるいは冷間鍛造により成形した後、表面硬化熱処理、仕上加工を経て最終部品に製造される。部品の種類とそれに用いられる鋼材種類はそれぞれ膨大であることに加え、工程を経るとともにその形状や材質特性は刻々と変化するため、最終部品の強度特性を満足する製造工程設計を効率的に行うためには、コンピュータシミュレーションを用いたソリューション技術が有効である。

新日本製鐵では、図1のうちの網がけを施した熱間鍛造、冷間鍛造、表面硬化熱処理の工程を中心に、ソリューション技術開発を進めており、それぞれの製造工程における設計ポイントと、それに対応した解析手法、必要なデータを表1に示す。

鍛造においては、素材形状変化とともに鍛造荷重、金型負荷、また素材割れ等が工程設計のポイントとなる。冷間鍛造に対しては剛塑性あるいは弾塑性有限要素法による変

* 鉄鋼研究所 棒鋼・線材研究部 主任研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

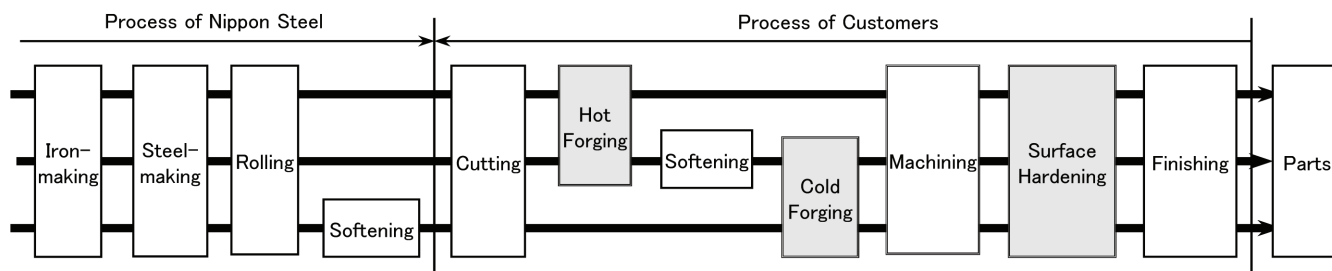


図1 鋼材から最終製品までの主な部品製造工程
Manufacturing process to produce the final parts of steel

表1 製造工程検討におけるポイントと解析手法, 必要材料データ
Considerations in the manufacturing process, analysis techniques and the necessary material data

	Hot/cold forging	Prediction of material properties	Surface hardening
Consideration	• Forging load • Forged shape • Fracture of parts • Tool life	• Material properties of parts	• Hardness • Fraction of microstructure • Thermal distortion • Residual stress
Analysis techniques	• Rigid-plastic FEM • Elastic-plastic FEM • Heat transfer analysis	• Neural network	• Elastic-plastic FEM • Heat transfer analysis • Phase transformation analysis
Material data	• Flow stress • Ductile fracture database	• Experimental database of material properties and forging conditions	• Phase transformation database • Coefficient of thermal expansion • Transformation plasticity coefficient

形解析を行い、熱間鍛造では熱伝導有限要素法による温度解析を変形解析と連成させて対応することが多い。これらの有限要素法プログラムは多くのソフトウェアが市販されており、容易に利用可能な状況であるが、高精度の解析を行うためには、素材である鋼材の変形特性データや、境界条件データ、熱物性データ等が重要である。鍛造解析に関しては、3節にて詳細を述べる。

熱間鍛造では、鍛造後に放冷あるいは徐冷等、冷却速度を制御して鍛造品の材質特性を造り込み、その後の調質工程を省略した非調質が開発されており、ナックルやコンロッド、クランクシャフト等に多く用いられている。この場合、鍛造後の材質特性がそのまま最終部品性能に直結するため、部品の部位に応じた組織や強度を鍛造工程で適正に付与することが必要となる。鍛造後の材質予測に関しては、4節にて詳細を述べる。

歯車、ベアリング等、部品表面に高強度が要求される部品では、浸炭焼入れ、高周波焼入れ等の表面硬化処理が施される。この処理では一旦部品を加熱してオーステナイト変態させた後、急冷してマルテンサイト変態をさせて強化を行うが、焼き割れや熱処理変形、残留応力等が工程設計の課題となる。焼入れは相変態を伴う処理のため、鍛造解析での変形解析、温度解析に加えて、相変態を考慮した解析が必要となる。熱処理解析に関しては、5節にて詳細を

述べる。

3. 鍛造解析

冷間・熱間鍛造解析での鋼材加工特性データについて述べる。鋼材加工特性データベースとして、鍛造用鋼材の変形抵抗データ及び冷間鍛造用鋼加工限界データを整備しており、鍛造素材である鋼材の条件(成分、熱処理条件、鍛造温度等)から力学的定数に変換し、鍛造解析にて使用する。変形抵抗データは鍛造条件に見合ったひずみ、ひずみ速度域でのデータとして圧縮試験によるデータ採取を行っており、温・熱間変形抵抗データは、温度連成解析に有効な等温変形抵抗への換算を行っている。冷間鍛造用加工限界データとしては、据込み性試験²⁾を行い、限界据込み率から延性破壊予測式である一般化 Cockcroft-Latham の式(1)、あるいは大矢根の式³⁾(2)に関して、加工限界値の材料定数を求めてデータベース化を行っている。

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

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

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

a, C : 材料定数

σ_m : 平均応力

$\bar{\sigma}$: 相当応力

$d\bar{\epsilon}$: 相当ひずみ増分

次に冷間鍛造の解析事例としてピニオンシャフトの例について述べる。従来、ピニオンシャフトは、SCr420等の肌焼鋼を用い、歯形形状を切削もしくは冷間鍛造にて成形した後、浸炭焼入れし、その後仕上げ加工にて製造されることが多い。しかし最近では浸炭焼入れを高周波焼入れに変更し、熱処理コストの低減や、仕上げ加工の省略が志向されている。この場合、素材としては高周波焼入れ後の硬さ確保のため、S50C等の高炭素鋼が用いられることとなる。そのためSCr420を用いる場合と比べ鋼材強度が高く、加工限界が低いため、鍛造荷重の増大、金型破損、鍛造時の素材割れが課題となる。

そこでSCr420球状化焼鈍材とS50C球状化焼鈍材を素材とした場合の比較を行った。超硬のニブを二重のリングで補強することを想定し、圧入締代はそれぞれ径の0.45%とした。金型に作用する最大主応力分布を図2に示すが、ニブの歯形成形部に作用する最大主応力はSCr420、S50Cともに圧縮応力からゼロ近傍であり、金型破損の可能性は低いと考えられる。また一般化Cockcroft-Lathamの式で求めたダメージ値を図3に示す。ダメージ値の最大は歯先部分

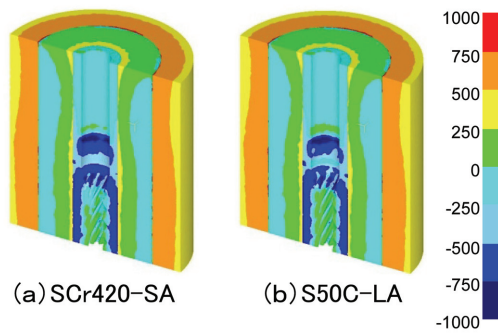


図2 鍛造時の金型最大主応力分布
Maximum principal stress distribution during forging

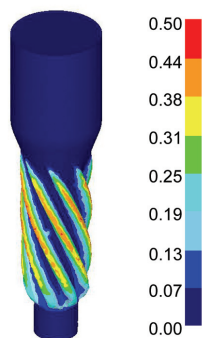


図3 鍛造時の延性破壊予測
Prediction of ductile fracture during forging

に生じ、割れが生じないために素材に必要な限界据込率は65%であるのに対し、用いたS50C球状化焼鈍材の限界圧縮率は70%程度であり、ピニオンシャフトでは割れの発生は大きな問題にはならないと考えられる。

4. 熱間鍛造品の材質予測

材質予測に関しては薄板、厚板の分野が先行しており、加熱温度、加熱時間、析出物の析出状態から加熱 γ 粒径を予測し、その予測した γ 粒径と圧延時のパススケジュールから再結晶ないしは未再結晶 γ 粒径、残留転位密度を予測し、更にこれらの予測値と冷却条件を用いて変態時の組織分率、粒径、形状等の組織因子を予測し、最終的に組織因子から材質を予測する、逐次予測型のいわゆる物理モデルによる材質予測が行われている^{4,5)}。新日本製鐵でも国家プロジェクト“鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト”において、中・高炭素鋼におけるバナジウムカーバイドの析出、析出強化に力点を置いた、鍛造用の材質予測モデル構築に参加してきた⁶⁾。

一方、物理モデル以外の予測として、ニューラルネットを用いた材質予測^{7,8)}にも取り組んでおり⁹⁾、図4にその概要を示す。材質予測データベースとして、鋼材成分、温度、ひずみ、ひずみ速度の履歴と材質特性との関係を表す数式及び係数を整備している。市販有限要素法ソフトウェアにより変形-温度連成解析を行って、鍛造及び冷却時の温度、ひずみ、ひずみ速度履歴を求め、材質予測を行って、硬さ分布を求めることとなる。

解析結果の一例として、0.3C-0.1Vの非調質鋼を用い、鍛造後放冷を行った際の硬さ分布予測を図5に示す。製品部分の他、ばりに相当する部分も、実際の硬さ分布とはほぼ対応することを確認している。

5. 熱処理解析

浸炭焼入れ、高周波焼入れ等の焼入れは、フェライト→オーステナイト→マルテンサイトと相変態を伴う現象であり、変形解析、温度解析に加えて、相変態を考慮し、三者の連成解析を行うため、解析に必要な材料データは多岐にわたる¹⁰⁾。変形解析、温度解析に対しては、変形抵抗、比熱、密度、熱伝導率等のデータが、また相変態に対しては、連続冷却曲線または等温変態曲線、熱・変態線膨張係数、変態塑性係数等のデータが必要となる。また浸炭焼入れでは、炭素濃度がもとの鋼材の0.2%から、浸炭後の表層では0.8%と分布を持つため、それぞれのデータには炭素濃度依存性を考慮する必要がある。

解析結果の一例として、内部に負偏析を有するリング形状部品を浸炭焼入れした際の熱処理変形の例を示す。鋼材はSCr420 (0.2%C) に対し、負偏析部は0.18%Cとし、その位置を図6のようにリング形状中心から偏芯させている。焼入の際の境界条件については、冷媒の種類や温度に

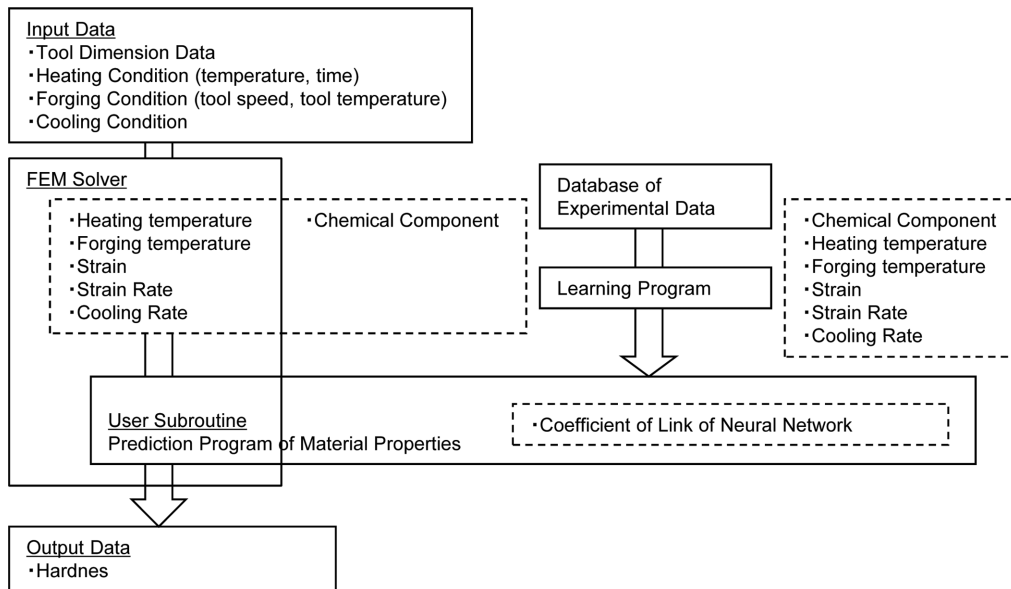


図4 鍛造品の材質予測システム
Prediction of material properties of forged parts

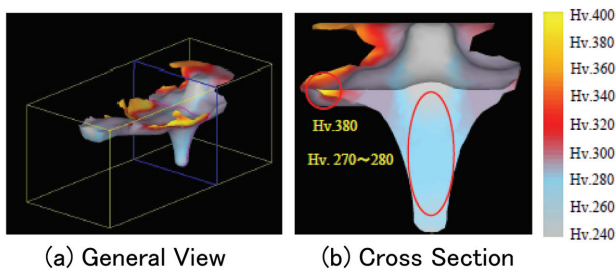


図5 鍛造品の硬さ分布
Hardness distribution of forged parts

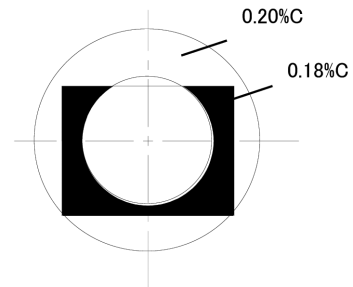


図6 リング試験片断面内の炭素濃度分布
Carbon distribution in cross section of ring part

よって熱伝達率は大きく変化することに加え、部品形状や焼入姿勢などにより冷媒の流れが変化するため、部位によっても熱伝達率が大きく異なる。ここでは銀円柱での冷却速度測定結果から熱伝達率を同定した文献¹¹⁾を参考にし、図7のように、リング形状の全面に均一に与える場合と、リング形状を円周方向に1/2の領域に分け、そこでの熱伝達率を2倍変化させる場合の2通りについて解析している。

図8に内外径の真円度を示すが、熱伝達率が均一の場合には内外径とも真円度は $5\mu\text{m}$ 程度と、熱処理変形には負偏析はほとんど影響していない。一方熱伝達率を部位によって2倍変化させた場合、真円度は $20\mu\text{m}$ 程度と、負偏析のみの場合と比べ大きくになっている。すなわち熱処理変形に対しては、成分ばらつきなどの鋼材要因と比べ、不均一冷却などの焼入れ条件要因の方が、影響度が大きく現れるものと考えられる。

6. 弁ばねの成形解析

上述したように自動車部品の多くは鍛造によって成形さ

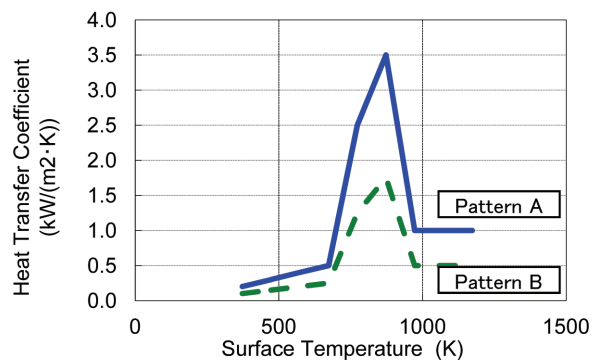
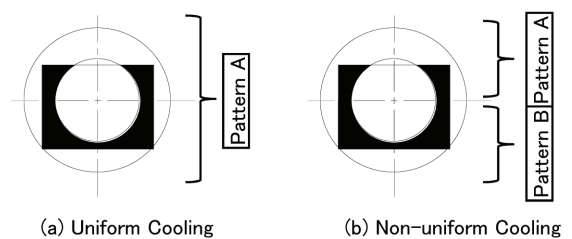


図7 熱伝達率の設定
Condition of heat transfer coefficient

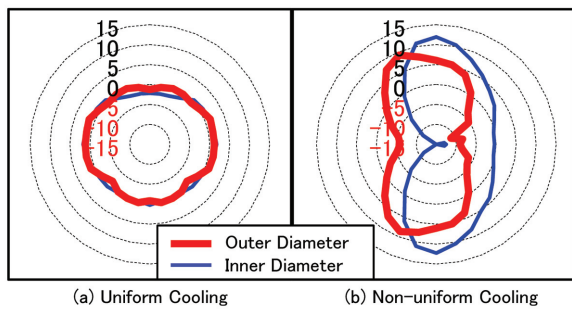


図8 浸炭焼入後のリング試験片真円度
Roundness of ring part after carbonized quenching

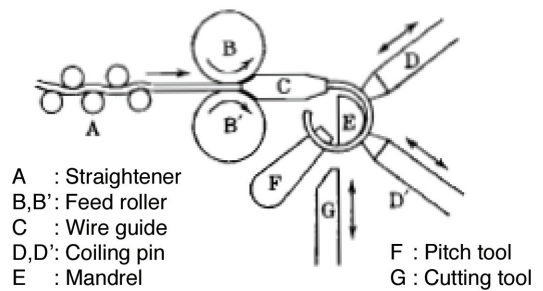


図9 コイリング機構
Coiling mechanism

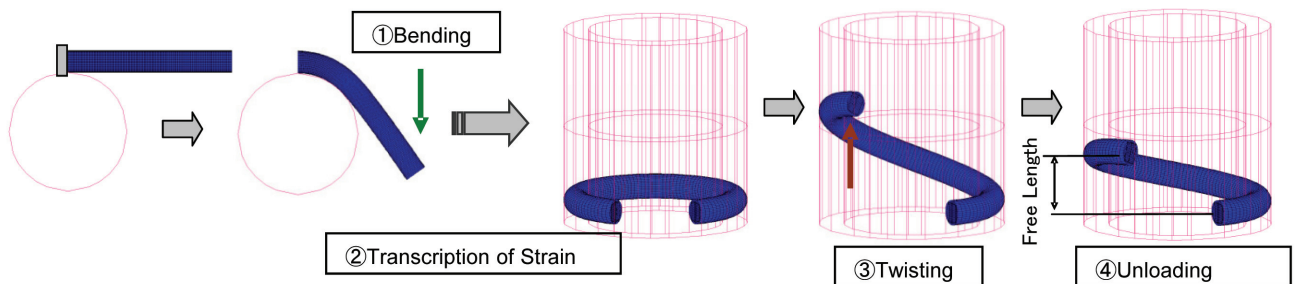


図10 コイリングのモデル化
Coiling process modeling

れるが、弁ばね、懸架ばねなどはコイリングマシンによって成形される等、表1以外にも多くの部品製造プロセスがあり、それらについても数値解析によるソリューションの適用を行っている。ここでは弁ばね成形への適用事例について述べる。

弁ばねをコイリングする際、製造管理指標のひとつとして自由長ばらつきが用いられている。自由長ばらつきには、コイリング工程での加工ばらつきの他、弁ばね用線材の強度ばらつきが関与する。強度ばらつきには、線材長手方向の強度差と、線材断面内の強度差があり、線材断面内の強度差の一因として偏析が挙げられる。ここでは偏析が弁ばね自由長ばらつきに及ぼす影響を明らかにすることを目的として解析を行った。

6.1 解析方法

弁ばねのコイリング機構¹²⁾を図9に示すが、Dコイリングピンにより所定の曲率に曲げた後、Fピッチツールにより所定のピッチ加工を行う。そこで解析にあたっては図10に示すようモデル化した。

- ① 弁ばねの内径と同じ径に曲げ加工を行う
- ② ①の曲げひずみを反映させ、環状の形を作成する
- ③ 環の一端を固定し他端を引き上げることでピッチ加工を行う（この際線材は捻り変形を受ける）
- ④ 除荷して残留変位（自由長）を評価する

実ばねのマクロ偏析の形態から、線材の断面を図11のようにモデル化した。ベースの炭素濃度0.65%に対し、中

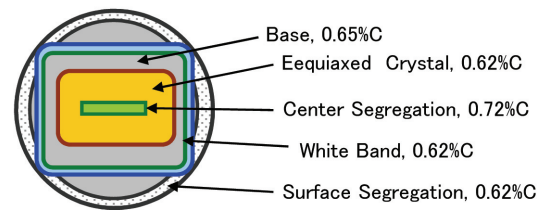


図11 線材断面のモデル化
Modeling of the cross-section of the wire

表2 炭素量による機械的特性
Mechanical properties by the amount of carbon

Carbon (%)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
0.62	1771	1933
0.65	1820	1987
0.72	1934	2112

心偏析を0.72%、ホワイトバンド、等軸晶及び表層負偏析を0.62%とし、表2のように炭素濃度に応じて機械的性質を仮定した。解析では図12に示すように、実体の線材に相当する複合体に関しては偏析の方向性を考慮するため曲げ方向を0°、90°と変えた場合について解析した。また均質材（0.65%C）を基準として中心偏析等の各因子の自由長への寄与の大きさを検討した。

6.2 解析結果

ピッチ加工時の引き上げ荷重とばね自由長の差の関係を

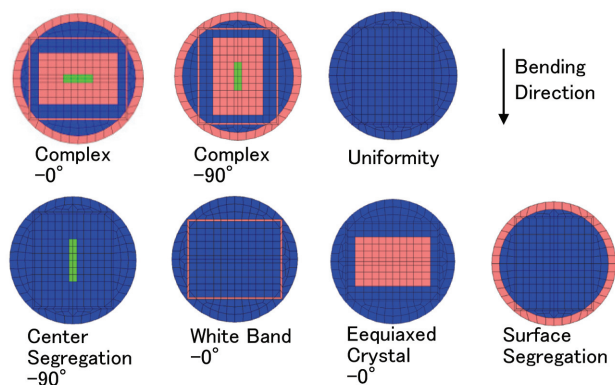


図12 解析モデル
Analysis model

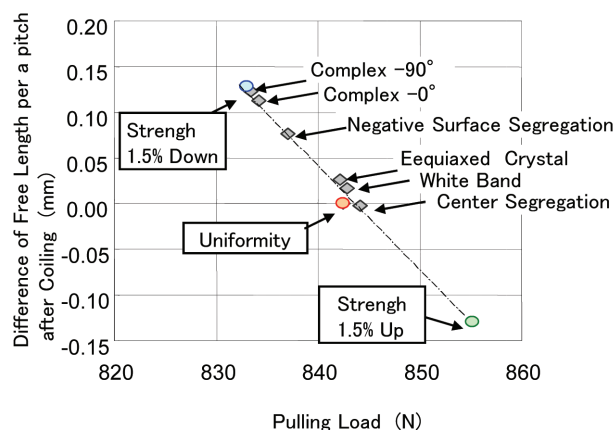


図13 ピッチ加工時の引き上げ荷重とばね自由長の差の関係
Relationship between the pulling load and difference of free length per pitch after coiling

図13に示す。ばね自由長の差は、均質材の自由長との差を示している。引き上げ荷重とばね自由長の差はほぼ直線で整理され、鋼材偏析の各因子のばね自由長への影響は、表層負偏析の影響が最も大きいことが分かった。これは曲げ加工は線材を曲げる方向、ピッチ加工は線材を捻る方向の加工となるため、曲げ剛性、捻り剛性に寄与度の高い表

層付近の影響が現れたものと考えられる。また同じ複合材でも、コイルング時の曲げ方向が変わると自由長に差が生じており、これが同一ロットでも自由長がばらつく原因であると考えられるが、その差は極わずかである。

7. 結 言

棒鋼、線材を用いた部品製造工程のうち、鍛造、材質予測、熱処理の工程に対する新日本製鐵でのソリューション技術開発及び適用事例を紹介した。また弁ばね成形に関しても検討事例を述べた。最終的な部品特性を踏まえた検討を行うには、製造工程のみならず、工程を経るに従って変化していく鋼材特性を十分理解し、把握した上での解析が重要である。今後、素材のみならず、潤滑特性や熱伝達データ等の境界条件データの一層の充実を図るとともに、非金属介在物を考慮した変形解析など、新たなソリューション技術へ展開していく。

参照文献

- 1) 加田 修, 戸田正弘, 柳 秀和: 新日鉄技報. (386), 59 (2007)
- 2) 冷間鍛造分科会材料研究班: 塑性と加工. 22 (241), 139 (1981)
- 3) 大矢根守哉: 塑性と加工. 13 (135), 265 (1972)
- 4) 第131,132回西山記念技術講座“鉄鋼材料の材質予測・制御技術の現状と将来”. 日本鉄鋼協会, 1989
- 5) 第180,181回西山記念技術講座“鉄鋼材料の組織と材質予測技術”. 日本鉄鋼協会, 2004
- 6) 湯川伸樹, 石川孝司: 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト 第2回シンポジウム予稿集. 2012, p. 103
- 7) 市川和利: 溶接技術. 44 (11), 136 (1996)
- 8) 藤井英俊 ほか: 日本金属学会誌. 63 (7), 905 (1999)
- 9) 藤田崇史, 越智達朗, 樽井敏三: 新日鉄技報. (386), 54 (2007)
- 10) 有本享三: 熱処理変形と残留応力. 改訂新版. アリモテック, 2011, p. 11
- 11) 奈良崎道治: 材料. 55 (6), 589 (2006)
- 12) 日本ばね学会編: ばね. 第4判. 東京, 丸善, 2008, p. 523



加田 修 Osamu KADA
鉄鋼研究所 棒鋼・線材研究部 主任研究員
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511



藤田崇史 Takashi FUJITA
鉄鋼研究所 棒鋼・線材研究部 主任研究員



橋村雅之 Masayuki HASHIMURA
鉄鋼研究所 棒鋼・線材研究部 主幹研究員
工学博士