

棒線材の部品製造ソリューション技術

Development of Solution Technology for Parts Production Using Steel Bar and Wire Rod

西 村 隆 一*
Ryuichi NISHIMURA藤 田 崇 史
Takashi FUJITA加 田 修
Osamu KADA成 宮 洋 輝
Hiroki NARUMIYA山 下 朋 広
Tomohiro YAMASHITA

抄 録

数々の製造工程を経る棒鋼および線材製品は、市場からの様々な高い要求があり、鋼材、工法および設計まで一貫となった製品開発が重要となる。新日鐵住金(株)は、鋼材開発に加え、加工、熱処理などの工法開発や、製品形状および構造の最適化などの設計技術まで一貫となった製品開発を目指し、部材製造ソリューション技術に関する研究開発を推進している。冷間鍛造加工に関する要素技術研究から加工技術開発に及ぶ研究事例および数値解析を活用したスチールコード製造時の撚り方法に関する研究事例を紹介した。

Abstract

Process and design technology as well as development of new steels are indispensable for development of new products using steel bar and wire rod which satisfy various demands. Then, research and development for solution technology in production has been promoted in our company, in order to develop new products successfully utilizing throughout metallurgy, process technology and design optimization. This report describes research topics concerning both basic technology and development of forging process for new products, and a research topic concerning manufacturing of stranded wire.

1. 緒 言

棒鋼および線材は、鉄鋼会社から出荷された後、需要家での数々の製造工程を経た後、自動車、建設機械、建築用材料をはじめとした製品に製造される。これら製品は、地球環境保護を目的とした更なる燃費規制の強化、あるいは施工性改善の要求に対応するため、更なる軽量化、高強度化、高機能化に取り組んでいる。前述のように数々の製造工程を経る棒鋼および線材製品に対する高い要求を満たすためには、鋼材開発のみならず、工法一貫となった製品開発が重要となる。

そこで新日鐵住金(株)では、鋼材から工法一貫となった製品開発の取組みとして、部材製造ソリューション技術に関する研究開発を推進している。図1に市場の高い要求を満たす高機能製品開発のフローチャートを模式的に示す。高機能あるいはコスト競争力の高い製品を実現するためには、設計の段階から、鋼材、工法を含めた開発について、

需要家と協業で取り組むことが有効であると考ええる。

棒鋼・線材製品の製造工程の中で部品コストに加え、部材機能に直結するという観点から、最も重要な工程の一つとして鍛造加工が挙げられる。新日鐵住金においても、冷間鍛造加工の試作をはじめとした実験および数値解析技術を活用し、製品開発に取り組んでいる。またこのような取

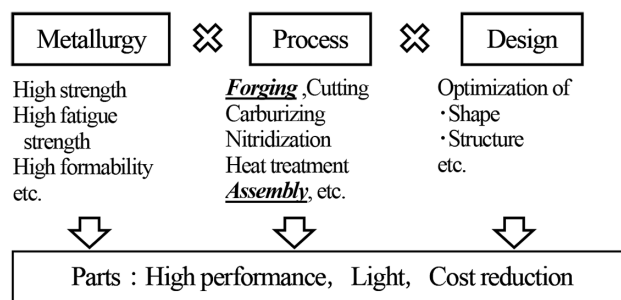


図1 棒線材の高機能製品開発アプローチ
Development process of high performance parts produced with steel bar and wire rod

組みの中で、実生産に近い試作実験や、高造形鍛造加工技術研究のため、各種閉塞鍛造や加工条件を変化させた特徴的な実験が実施できるように、大型サーボプレス機を活用し、本稿に挙げるような各種実験に活用している。

一方、線材の主要製品のひとつであるスチールコードでは、近年の市場ニーズに対応して、更なる高強度化が図られている。そのため、製造時の撚り工程における断線が課題となり、断線率低減のため、撚り方法に関する研究に取り組んでいる。

本稿では、棒鋼、線材の冷間鍛造加工に関する要素技術研究から加工技術開発に及ぶ新日鐵住金の研究事例および数値解析を活用したスチールコード製造時の撚り方法に関する研究事例を紹介する。

2. 数値解析による鋼材破断予測技術

高機能部材の開発において、それらの具現化には、鍛造加工技術の構築が求められる。この技術構築に取り組む場合まずは、考案した加工プロセスの妥当性を数値解析によって検討することが重要である。加工プロセスの妥当性を評価する上で最も重要な課題の一つは、加工中の鋼材破断であるため、数値解析による鋼材破断予測技術が強く求められている。表1に、鍛造加工で用いられる各種破断予測手法を示す¹⁻¹¹⁾。近年、新日鐵住金では、応力三軸度によって変化する実破断現象を精緻に評価できると考えられる相当塑性ひずみ-応力三軸度平面上での破断限界曲線を用いた予測手法について研究を行っている⁶⁻⁹⁾。ここでは、それらのうち、上記の破断限界に及ぼす多軸応力状態の影響について検討した事例⁹⁾と、前方押出しで見られる矢じり形状の内部割れ（以下、シェブロンクラック）に対する予測精度を検証した結果⁸⁾について報告する。

2.1 破断限界に及ぼす多軸応力状態の影響⁹⁾

多軸応力状態も前述の破断限界曲線に影響を及ぼす可能性があると考え、偏差応力の第三不変量の関数である Lode 角パラメータなどを考慮した予測手法確立の取組みがなされている¹⁰⁾。多軸応力状態は ξ ($-1 \leq \xi \leq 1$) で表され、 $\xi=1$

で一軸引張状態、 $\xi=0$ で平面ひずみ状態、 $\xi=-1$ で等二軸引張状態となる。一軸引張状態および平面ひずみ状態における延性破壊限界の評価は数多く行われているが、等二軸引張状態における検討例がほとんど見られない。そこで一軸引張および平面ひずみ状態に加えて、等二軸引張の破断限界を評価することで、破断限界に及ぼす多軸応力状態の影響を検討した。

図2に、試験片形状を示す。供試材は SCr420H 球状化焼鈍材（引張強さ 475 MPa）の丸棒とし、引張方向が供試材圧延方向に対して 90° になるように試験片を作製した。同図(c)に示す考案した二軸引張試験片の特徴は、試験片中央部に設けた球面底状の窪みによって、中心点が常に等二軸引張のまま延性破壊に至り、かつ、窪みの曲率半径によって応力三軸度を制御している点にある。図3に、考案した二軸引張試験片での試験中の応力三軸度の履歴を示

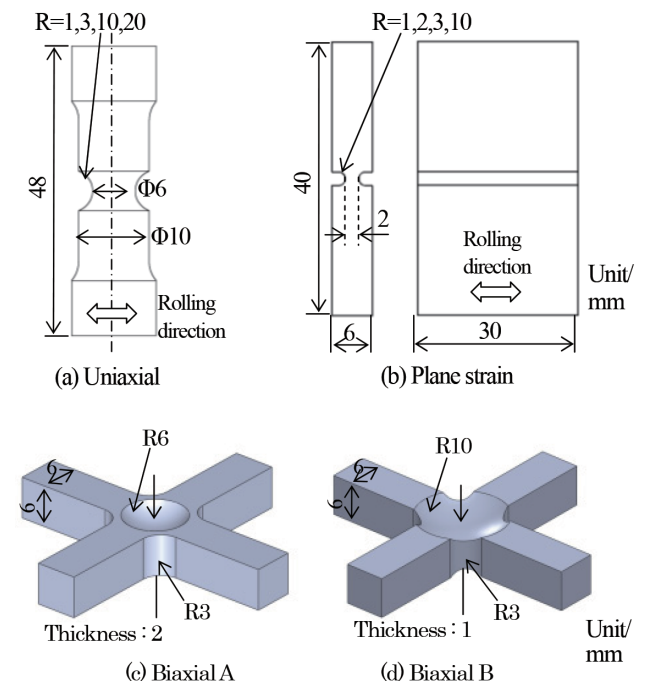


図2 破断特性評価用の試験片
Specimen for evaluation of fracture criterion

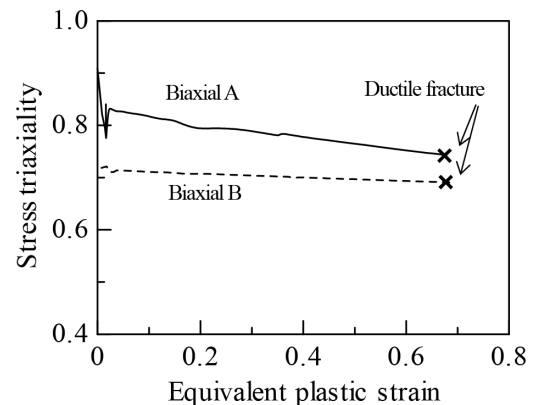


図3 応力三軸度に及ぼす試験片形状の影響
Effect of specimen profile on stress triaxiality

表1 鍛造加工における各種破断予測手法
Fracture prediction method for forging

Classification	Method	Characteristics
Ductile fracture model	Cockcroft-Latham Oyane, etc.	• Application is limited to some simple fracture.
Equivalent strain-stress triaxiality	Experimental method	• High versatility • Procedure for determination of fracture limit is not simple.
Bifurcation theory	Hill, S-R, 3-D bifurcation theory	• Possibility for application to fracture under complex strain path. • Few verification examples in forging.

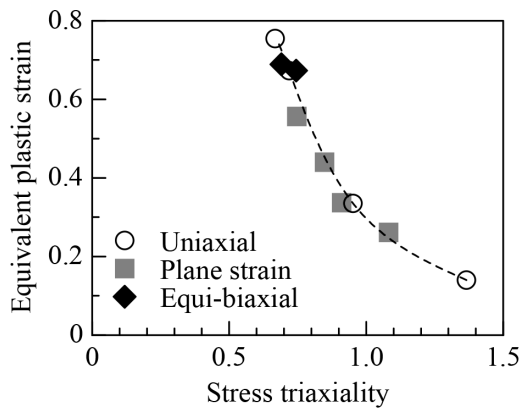


図4 相当塑性ひずみ-応力三軸度平面上の破断限界に及ぼす多軸応力状態の影響

Effect of multiaxial stress condition on fracture criterion in equivalent plastic strain-stress triaxiality

す。本試験片形状によって、同じ等二軸引張で応力三軸度の異なる変形を実現できていることがわかる。つぎに図4に、相当塑性ひずみ-応力三軸度平面上の破断限界ひずみに及ぼす多軸応力状態の影響を示す。多軸応力状態が違って、破断限界は概ね1つの曲線上に位置することがわかる。

以上より、本実験条件においては、相当塑性ひずみ-応力三軸度平面上で定義した破断限界は、多軸応力状態の影響を受けないことがわかった。今後、実機の破断現象に対応した破断モードについて、同様の検証を推進していく。

2.2 相当塑性ひずみ-応力三軸度曲線による破断予測事例^{7,8)}

相当塑性ひずみ-応力三軸度平面上で定義した破断限界の妥当性を検証することを目的として、しばしば課題となるシェブロンクラックの予測可能性を検討した。

図5に、実験で用いた前方押し出しの模式図、ブランクおよび成形品を示す。供試材はS43C-圧延ま材とした。実験は、多段パスでの前方押し出しとし、パス毎に成形品を切断し、破断の有無を確認した。破断判定には、破断起点である中心部とC濃度が同等であるS55C-圧延ま材の破断限界曲線を適用した。

図6および図7に、それぞれ相当塑性ひずみ-応力三軸度平面上の限界曲線による破断予測結果、および実験でのシェブロンクラックの観察結果を示す。図6より、3パス目に破断発生の危険性があると予測された。図7に示す観察結果は、予測結果と合致して3パス目に破断が生じており、パスを重ねるごとに破断が徐々に成長し、9パス後に大きなシェブロンクラックに至っていることがわかった。

以上より、相当塑性ひずみ-応力三軸度平面上で定義した破断限界によって、シェブロンクラックの発生が予測可能であることを実証した。

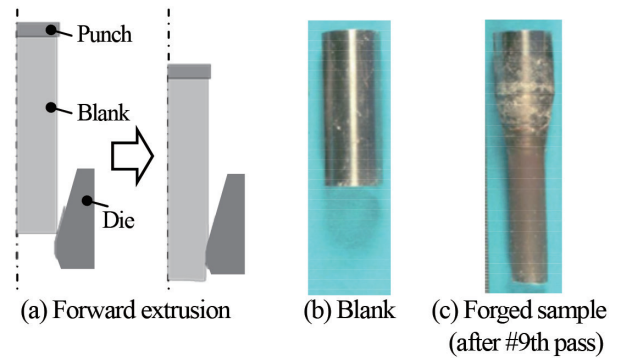


図5 前方押し出し方法
Forward extrusion test

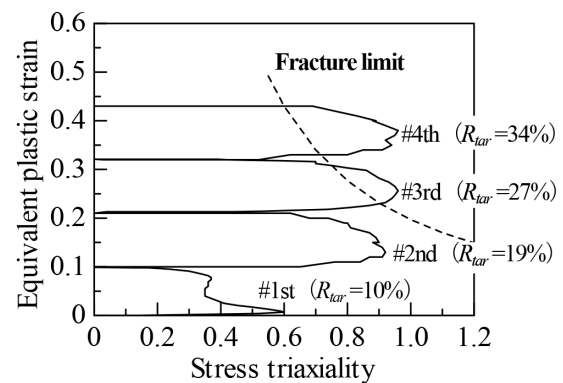


図6 相当塑性ひずみ-応力三軸度平面上の限界曲線による破断予測

Fracture prediction using fracture criterion on equivalent plastic strain-stress triaxiality

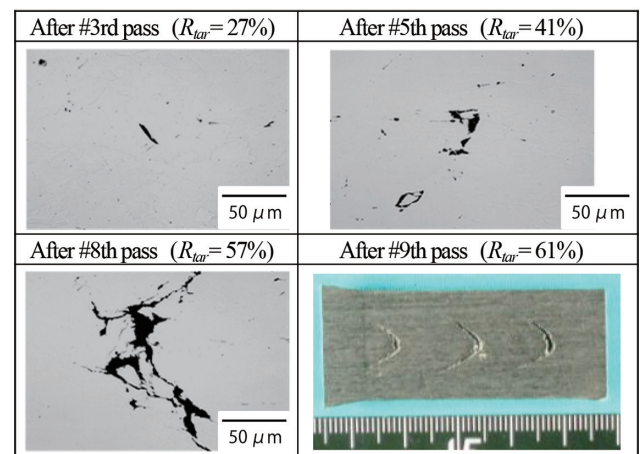


図7 シェブロンクラックの発生
Generation and growth of chevron crack

3. 耐焼付き特性評価技術^{12,13)}

冷間鍛造において、高強度材の大ひずみ加工を行うと、金型と被加工材の界面温度は高温化し、また被加工材の表面積も顕著に拡大する。そのため冷間鍛造用の潤滑剤には、高温かつ面積拡大率の大きな条件での摩擦特性や耐焼付き性が要求される。そこで重要となる耐焼付き性の評価方法は数多く提案されている^{14,15)}が、新日鐵住金では代表的な

鍛造加工法である後方押出しによる評価方法の確立に取り組んだ^{12,13)}。具体的には、後方押出し時の加工荷重の急変により、焼付きの発生を検知する方法である。

図8に、本実験で用いた後方押出しの模式図を示す。供試材は、S10C相当材に焼鈍処理を施したものをを用い、27mm 径×52mm 長に加工した。ショットブラスト、硫酸酸洗の後、化成処理にはりん酸亜鉛を、潤滑処理にはナトリウム石けんを用いた。上述の手法の妥当性を検証するため、図9に示すように、加工荷重急変時の穿孔深さと、試験後のサンプルで焼付きが目視確認された穿孔深さを比較した。なお後方押出し後、パンチを引き抜く際に、サンプルを傷つけないようにするため、下死点でパンチを停止させ、パンチと成形品を取り出し、長手方向断面にて半割に切断し、内面の焼付き状況を観察した。図9より、加工荷重の急変部は、目視確認による焼付き位置の穿孔深さと合

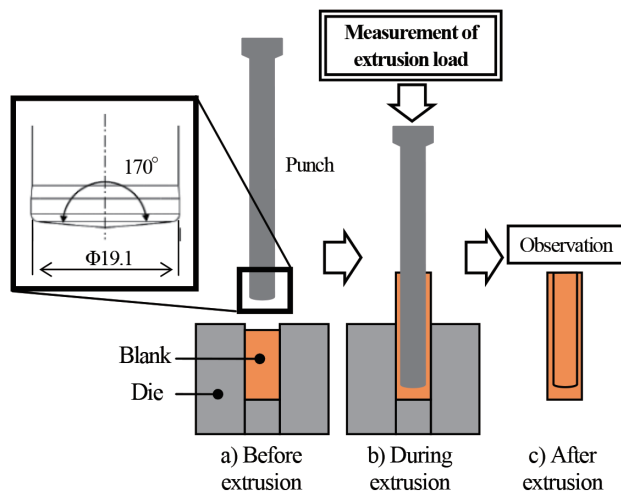


図8 耐焼付き特性評価方法
Schematic drawing of evaluation method of galling resistance characteristics

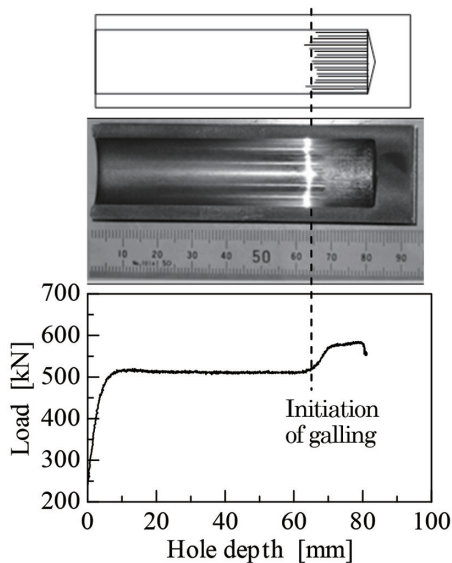


図9 提案手法による耐焼付き特性評価結果例
Example of evaluation results of galling resistance characteristics by means of suggested method

致した。また図示しないが、本手法によって、りん酸塩皮膜量増加に伴い、耐焼付き特性が向上することが確認された¹³⁾。

以上より、考案した後方押出し時の加工荷重急変による焼付き発生の検知方法が妥当であることが実証された。

4. 長尺中空部材の加工技術

シャフト部品に代表される長尺中空部材では、現状、中心部の深孔は切削によって加工されるのが一般的である。コスト、生産性、生産設備の観点から、冷間鍛造によって深孔加工が可能となれば、有用な技術であるが、孔深さ L を孔径 D で除した値 L/D が4を超えると、冷間鍛造の深孔加工時に、座屈による金型（パンチ）破損の危険性が高まる。それに対して、パンチ荷重の低減を目的として、被加工材への張力付与による対策技術が提案され¹⁶⁾、 L/D が約11の深孔加工が実現されている¹⁷⁾。一方、新日鐵住金でもこれらとは異なる手法で、長尺中空部材の加工技術の研究に取り組んでいる。具体的には、丸棒を両端面からの後方押出しとその後の打ち抜きで加工した中空部材（ $L/D \approx 10$ ）を前方押出しによって長尺化する工程を想定した¹⁸⁾。

図10に、検討対象とした部材形状を示す。供試材はS43C球状化焼鈍材とした。本手法における課題の一つとして、前方押出しにおける内径部の鋼材破断が挙げられる。図11に、通常的前方押出し（従来手法）および後述の考案手法で加工した両条件について、数値解析結果に基づく

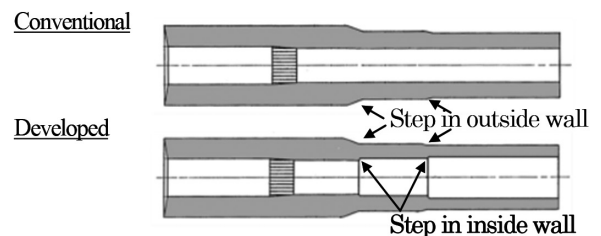


図10 長尺中空部材
Test sample of parts with long hole in the center

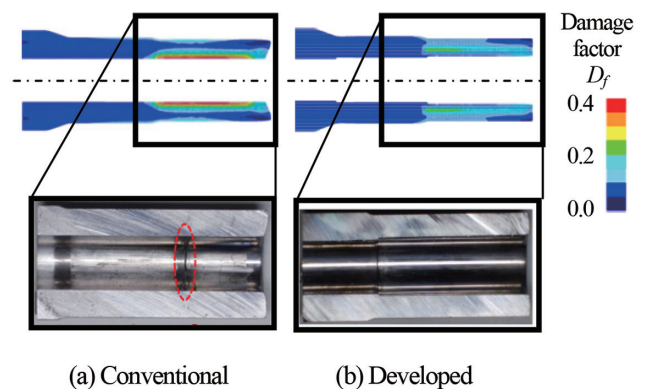


図11 長尺中空部材加工時の内径割れ対策
Countermeasure against fracture along inside wall during forging of parts with long hole in the center

Cockcroft-Latham のダメージ値 D_f 、および実験で得られた成形品の内面の写真を示す。同図 (a) より、従来手法では内面に目視可能な破断が生じていることがわかる。数値解析結果から考察することで、上述の内面破断の要因は、外径部と内径部の素材変形速度差に起因した内径部の引張によることを確認した。

そこで、新たな内径表面割れ抑制手法を考案した。具体的には、外径部と内径部の素材変形速度差を低減するため、外径を縮径すると同時に、内径を拡張する方法（考案手法）である。同図 (b) の FEM 結果から、考案手法によって、内径部引張低減に伴うダメージ値 D_f の低減が確認できる。また実験においても、内径部の破断抑制が確認された。

以上より、前方押出しにおける外径部と内径部の素材変形速度差の抑制の観点から考案した加工手法によって、長尺中空部材の前方押出し工程における内径部の破断抑制が可能となることを確認した。本手法を用いれば、 L/D が従来以上の段付長尺中空部材を、冷間鍛造によって加工することが可能となる。

5. スチールコードの撚り解析

タイヤの補強材として用いられているスチールコードは、直径約 5mm の線材を乾式および湿式にて直径約 0.2 ~ 0.3mm のワイヤに伸線した後、それら複数のワイヤを撚り合わせて製造される。高強度ワイヤのスチールコード製造において、断線率の低減が重要な課題である。ここではバンチャー撚りとチューブラー撚りの撚り加工時の内部応力に着目し、撚り方の違いが断線に及ぼす影響について、数値解析によって検討した内容を紹介する。なお、ワイヤの撚り加工時の変形履歴を把握することは、断線率低減に加えて、撚り加工後のコード特性、更にはタイヤ性能を推定する上においても重要となる。

図 12 に、バンチャー撚りおよびチューブラー撚りの模式図を示す。撚り戻し率 $y^{19)}$ を [(スチールコード中心軸を回る公転と反対方向のストランドの自転速度)/(スチールコード中心軸を回る公転速度)] とすると、バンチャー撚りでは $y=0$ 、チューブラー撚りでは $y=1$ となる。

数値解析モデルでは、直径 0.23mm、長さ 12mm の真直ワイヤを 4 本平行に配置し、片方の端面を完全固定し、もう一方の端面を束ねた 4 本のワイヤの中心(以下、公転中心)を軸として回転させて撚ることにより、1×4 のスチールコードの撚りを模擬した。片端面を公転する際、バンチャー撚りでは自転無し(公転中心に常に同じ面が向く)、チューブラー撚りでは公転と逆向き同速度の自転を与えた。ワイヤは弾塑性体とし、引張強度 $TS=3200\text{MPa}$ 級の鋼材の応力ひずみ曲線を用いた。撚り工程において、張力も重要な因子の一つであるが、ここでは張力無しの条件とした。

図 13 に、撚り加工における主応力分布の数値解析結果を、バンチャー撚りとチューブラー撚りで比較して示す。図中、

各棒内の左上は $L/2$ 断面の最大主応力分布、中は撚り線全体の最大主応力分布、右下は公転側端面から見たワイヤの位置関係を示す。本解析では、ワイヤの両端面を垂直断面に固着しており、撚り時にワイヤが傾く現象を両端面では考慮しなかったため、固定端面および公転側端面近傍は、実際よりも高い応力を示すと考えられる。それに対して、モデルの長手方向中心近傍では応力分布の長手方向変化が無く、撚り工程における状態を代表していると考え、本部位の応力分布を評価した。また図 14 に、長手方向中心断

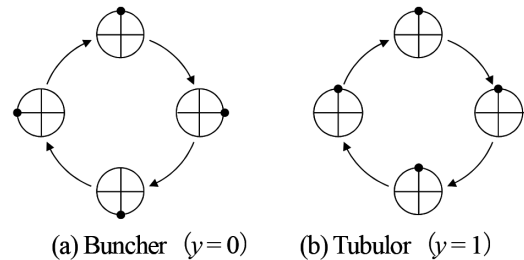


図 12 バンチャー撚りとチューブラー撚り
Schematic view of buncher bunching and tubelor bunching

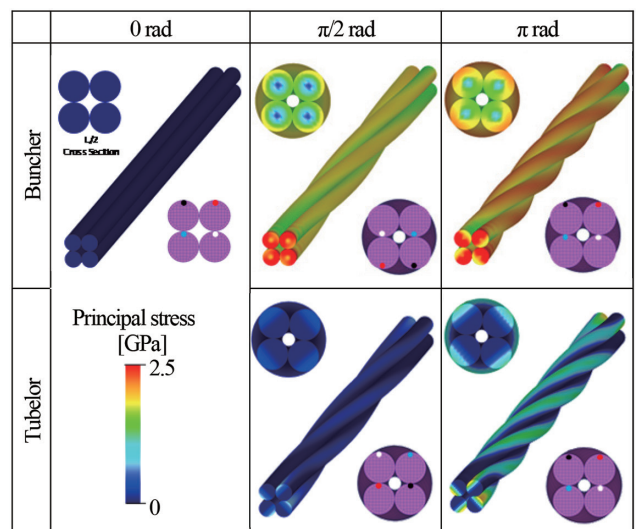


図 13 バンチャー撚りとチューブラー撚りの主応力分布
Comparison of principal stress distribution between buncher bunching and tubelor bunching

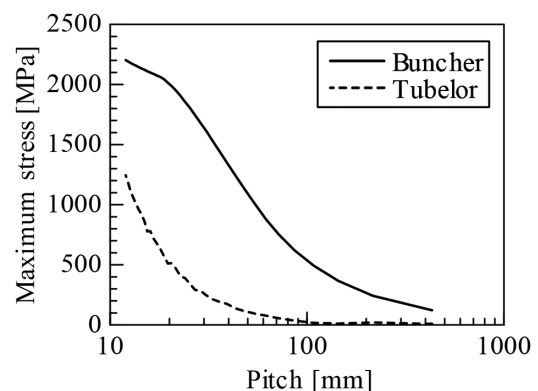


図 14 最大応力に及ぼす撚りピッチの影響
Effect of strand pitch on maximum stress

面における最大主応力の最大値に及ぼす撚りピッチの影響を示す。この最大主応力が破断応力を超えると断線が生じるため、撚り加工工程での断線の指針として活用できる。図 14 より、撚りピッチが密になると、急激に応力が上昇することがわかる。

図 13 および図 14 より、長手方向中心での応力分布を、バンチャー撚りとチューブラー撚りで比較すると、チューブラー撚りの方が、いずれの回転角においても最大主応力が小さい。図 13 より、バンチャー撚りでは公転 1 回あたり、各ワイヤも 1 回捻られるため、各ワイヤの外周は同心円状に高い応力を示している。更に、螺旋状に 3 次元的に変形することにより、ストランド外周部にも応力が生じ、これらが重畳することで、図 13 に示す応力分布となる。一方チューブラー撚りでは、捻り変形は生じないため、3 次元の変形によるストランド外周部の応力のみとなる。そのため、強加工による高応力で断線が生じる課題に対しては、チューブラー撚りの方が断線しにくい撚り方であると言える。

以上から、スチールコードの撚り解析によって、撚り方の違いや撚りピッチが断線に及ぼす影響が定量的に明らかとなった。

6. 結 言

棒鋼、線材の冷間鍛造加工に関する要素技術研究から加工技術開発に及ぶ新日鐵住金の研究事例および数値解析を活用したスチールコード製造時の撚り方法に関する研究事例を紹介した。

- (1) 高機能製品の鍛造加工技術開発に必要な鋼材破断予測技術として、相当塑性ひずみ-応力三軸度平面上の破断限界ひずみに基づく手法について、基盤研究および実機での鋼材破断に対する予測精度の観点から妥当性を確認した。
- (2) 高強度材の冷間鍛造において重要となる、耐焼付き性評価手法として、考案した後方押出し時の加工荷重急変による焼付き発生の検知方法が妥当であることを実証した。
- (3) 前方押出しにおける外径部と内径部の素材変形速度差の抑制の観点から考案した鍛造加工手法によって、 L/D が従来以上の段付長尺中空部材を、冷間鍛造によって加工することが可能となった。
- (4) 更なる高強度化が図られているスチールコードの製造工程において重要課題である撚り工程における断線率低減のため、数値解析によって、撚り方の違いや撚り

ピッチが断線に及ぼす影響を、定量的に明らかにした。

謝 辞

本稿での研究遂行にあたり、第 3 章（耐焼付き特性評価技術）では松菱金属工業(株)、第 4 章（長尺中空部材の加工技術）では日鉄住金精圧品(株)の多大なご協力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Cockcroft, M. G., Latham, D. J.: J. Inst. Met. 96, 33-39 (1968)
- 2) Oyane, M.: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. 75 (639), 596-600 (1972)
- 3) 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, 475-483 (2001)
- 4) 川畑友弥, 有持和茂, 豊田政男: 溶接学会論文集. 23 (2), 319-328 (2005)
- 5) 工藤英明, 青井一喜: 塑性と加工. 8 (72), 17-27 (1967)
- 6) 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), 150-154 (2012)
- 7) 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. 2014, p.255-256
- 8) 山下朋広, 根石豊, 堀上禎悟: 第 66 回塑性加工連合講演会講演論文集. 2015, p.249-250
- 9) 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. 2016, p.217-218
- 10) Bai, Y., Wierzbicki, T.: Int. J. Plasticity. 24, 1071-1096 (2008)
- 11) 佐藤浩一, 水村正昭, 末廣正芳, 伊藤耿一, 植村元: 第 60 回塑性加工連合講演会講演論文集. 2009, p.105-106
- 12) 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. 2014, p.275-276
- 13) 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. 2014, p.277-278
- 14) 北村憲彦, 大森俊英, 団野敦, 川村益彦: 塑性と加工. 34 (393), 1178-1183 (1993)
- 15) 広瀬仁俊, 高橋昭紀, 王志剛, 小見山忍: 日本機械学会東海支部総会講演会講演論文集. 2012, p.61
- 16) 篠崎吉太郎, 工藤英明: 塑性と加工. 14 (151), 629-636 (1973)
- 17) 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. 2016, p.119-120
- 18) 小澤孝: 第 293 回塑性加工シンポジウムテキスト. 2011, p.28
- 19) 村上卓也, 相沢龍彦: 第 66 回塑性加工連合講演会講演論文集. 2000, p.443-444



西村隆一 Ryuichi NISHIMURA
鉄鋼研究所 棒線研究部 主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



成宮洋輝 Hiroki NARUMIYA
鉄鋼研究所 棒線研究部 主任研究員



藤田崇史 Takashi FUJITA
鉄鋼研究所 棒線研究部 主幹研究員



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



加田 修 Osamu KADA
鉄鋼研究所 利用技術研究部 主幹研究員