

鋼線の引抜きにおける横割れ表面疵の成長・消滅解析

篠原 哲雄*・吉田 一也*²

Growth and Disappearance of Transversal Cracks on Stainless Steel Wire in Wire Drawing

Tetsuo SHINOHARA and Kazunari YOSHIDA

Synopsis : The surface crack is fatal for the spring which high fatigue characteristic is required. The surface crack of drawn wire has big influence on the quality of product. As a cause of a surface crack, rolling of a wire rod and the poor handling at the time of conveyance are cited. The authors carried out multi-pass drawing of the stainless steel wire with artificial transversal crack, and have investigated growth and disappearance of crack from both sides of experiment and FEM. If drawing of the wire rod with a surface crack is repeated, it will become the check mark which the width of a concave crack spreads. Furthermore, if drawing is repeated, it will become long and slender in the direction of an axis by stress, and will become quite small. However, the crack of the direction of an axis remained and it was shown clearly that quality is affected. Moreover, the influence which the surface treatment of peeling has on a wire was also considered.

Key words: surface crack; FEM; wire drawing; fatigue characteristic.

1. 緒言

近年、自動車用のサスペンションばねなどに用いられる線材の表面性状に対する要求が厳しくなっている。表面性状は、疲労特性に大きく影響するため非常に重要な問題である^{1,2)}。線材表面に Fig. 1(a)に示すような微小な疵が存在するだけでも、繰返し応力負荷がかかることによって、亀裂に進展し最終的に破断に至る。このため微小疵であっても、致命的な製品欠陥になる可能性がある。また、線材を冷間鍛造加工により、ボルト頭部の成形などの二次加工を行う場合においても、表面疵が加工時の割れにつながり問題となっている。特に安全性が要求される自動車用エンジンの弁ばねに用いられる線材に対しては、 10^9 回の繰返し荷重に耐えられることが要求される。線材表面に疵が全くない線材を製造するのは難しく、これらの厳しい表面性状の製品において棒線メーカーでは、引抜き中に自動で疵を検出させ、線表面の疵取りを行い対応しているところもある^{3,4)}。しかし、これは工程数や加工コストの増加につながる。そのため素線の表面に発生した疵が多段引抜き加工中に消滅するのか、あるいは成長するのか明らかにすることは工学的に重要である。

線材の表面疵は、素材の casting, 熱間圧延, 引抜き中や線材巻取り時の不具合, 運搬時のハンドリング不良でも発生する⁵⁾。引抜き工程においても Fig. 1(b)に示すようなV字疵(チェックマーク)が操業時に見られることもある^{6,7)}。

圧延加工中での表面疵に対する研究は、これまでもなされており^{8,9)}、圧延加工によるワイヤロッドの表面疵は Table 1に示すように分類されている¹⁰⁾。しかし、下工程である引抜きにおける表面疵の研究は少ない。本研究では、線材軸方向に直角にできた凹、U、V形の人工横割れ疵を取り上げ、FEM解析と実験の双方から引抜き中の疵の成

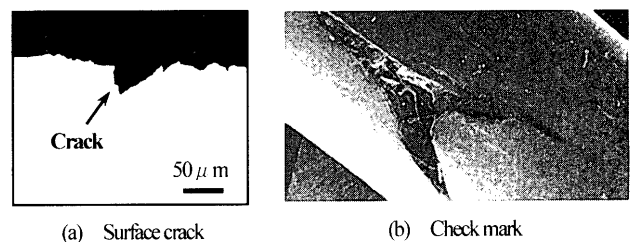


Fig. 1. Generated crack on wire surface in rolling or drawing.

Table 1. Classification of surface cracks.⁸⁾

	Scab		Scale
	Transversal crack		Rolled in material
	Burnt		Over-filled
	Scratch		Slip mark
	Overlap		Rust

平成16年7月13日受付 平成16年8月24日受理 (Received on July 13, 2004; Accepted on Aug. 24, 2004)

* 東海大学大学院生 (Graduate Student, Graduate School of Engineering, Tokai University, 1117 Kitakaname Hiratsuka 259-1292)

*2 東海大学工学部精密工学科 (Department of Precision Mechanics, School of Engineering, Tokai University)

長・回復挙動を明らかにする。さらに、一部の工場では線材表面の疵を自動で検出・除去し、その後引抜き加工を数回行い棒線を仕上げている。この効果をFEM解析により検証する。疵を除去した部分とその後の引抜き加工により何パスで回復するか、引抜かれた線材の真円度、不均一変形や曲がりについて検討した。

2. 実験方法及びFEM引抜き解析モデル

供試材料は素線径 $\phi 10\text{mm}$ のステンレス鋼線 SUS304 である。線材表面に人工疵を与え、その後引抜きを繰り返した。線材表面疵には Table 1 のように様々な形状のものがあるが、本研究では横割れ疵を取り上げた。表面疵は実際の形状を基に、Fig. 2 に示すような凹、U、V 形の3種類と仮定した。素線直径を D_0 、軸方向の疵の長さを a 、深さを h と定義した。V 形疵については疵半角を γ とし、その影響についても検討を行った。引抜き条件は、実際の作業でよく用いられている、ダイス半角 $\alpha=6^\circ$ 、1パスリダクション $R/P=20\%$ とした。引抜きにはドローベンチを用い、潤滑剤は市販の樹脂被膜剤（三宝化学工業所の AGP-8H）ステアリン酸ナトリウム石鹼を用いた。疵の形状測定は SEM と光学顕微鏡で行った。

解析は市販の3次元FEMコードを使用し、(a)引抜きによる横割れ疵の成長・消滅挙動解析、(b)疵を除去した線材の引抜きによる疵回復について検討した。Fig. 3 に横割れ疵の形状と疵を除去した線材の引抜きモデル、Table 2 に解析に用いた材料定数、Fig. 4 に加工硬化曲線をそれぞれ示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 繰返し引抜きによる凹形疵の成長

軸方向の幅 $a=0.3\text{mm}$ 、深さ $h=0.3\text{mm}$ の凹形の人工横割れ疵をつけた直径 10mm のステンレス鋼線 (SUS304) を用いて引抜き実験を行った。Fig. 5 に素線における疵形状と、2、4パス引抜いた線材の軸方向断面における疵部の変形状態を示す。疵は引抜きを繰り返すことによって軸方向に大きく伸びはじめる。疵部の側面 (Fig. 5 矢印) がせん断

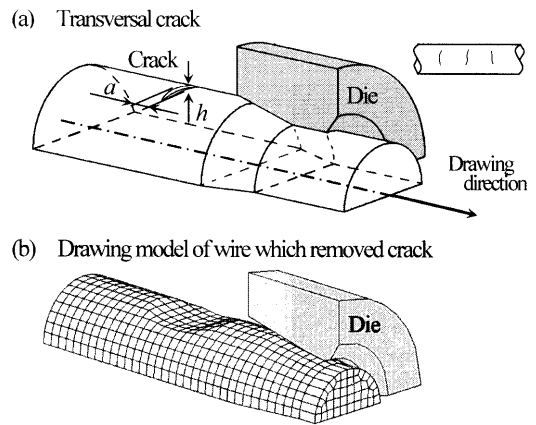


Fig. 3. Drawing model of a wire containing a transversal crack and peeling part.

Table 2. Material property for FEM.

Material	SUS304
Young's modulus E / MPa	197000
Poisson's ratio ν	0.28
Friction coefficient μ	0.05

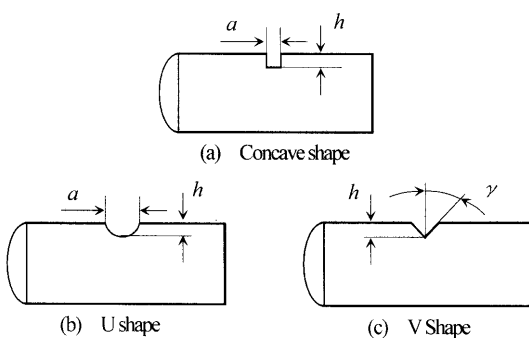


Fig. 2. Various crack shapes on wire surface.

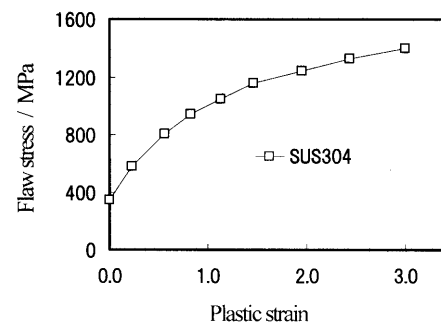


Fig. 4. Work hardening diagram of tested stainless steel wire.

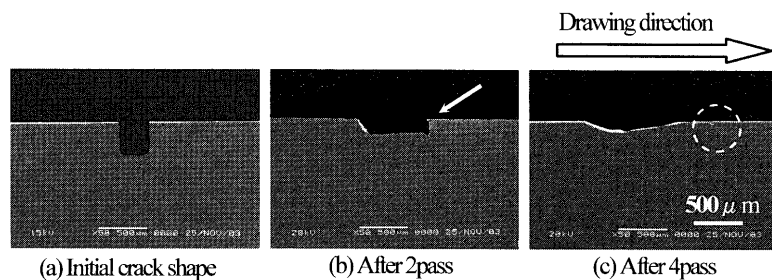


Fig. 5. Shape changes of crack in cross-section during multi-pass drawing of wire with transversal crack of concave shape.

変形を受け疵が倒れ込んでいるのがわかる (Fig. 5 ○印)。Fig. 6に5パス引抜き後の軸方向の線材断面と表面の写真を示す。Fig. 6(b)の①でひび割れのような現象が確認できる。このひび割れが起きている箇所は Fig. 6(d)の断面の拡大図に示すように、内部で重なり欠陥が起きているためのものである。疵が重なるとあたかも消滅したように思えるが、疵部は機械的に接触しているだけである。線材表面ではひび割れのような状態、内部では疵が残留し重なり欠陥となることわかる。Fig. 6(b)の疵中央部②では、底部から盛り上がり、他の表面と同程度に表面が回復している。

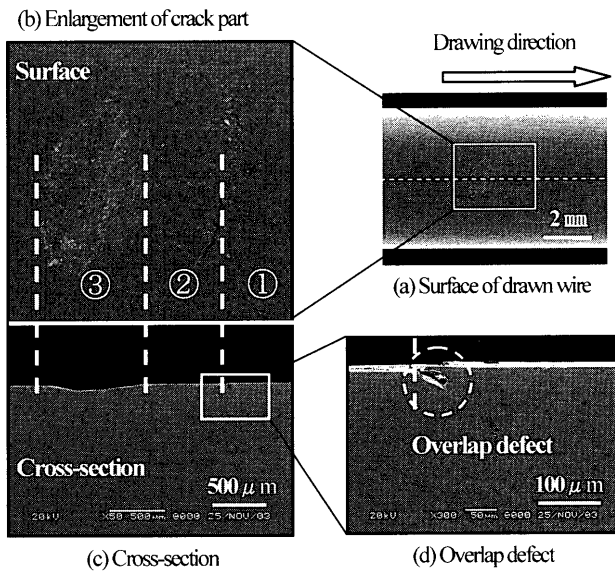


Fig. 6. SEM images of surface and cross-section of drawn wire by 5 drafts.

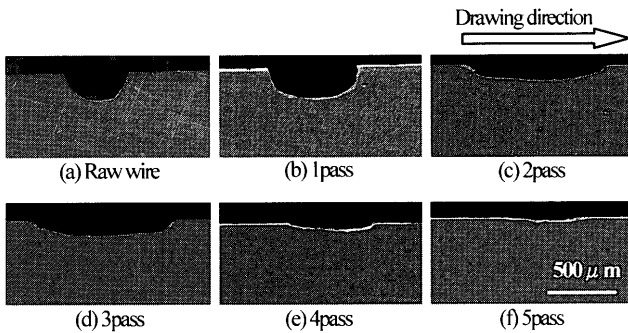


Fig. 7. Shape changes of crack in cross-section during multi-pass drawing of wire.

疵部後端 Fig. 6(b)の③では、底部からの盛り上がりが鈍くダイスと接触しにくいいため、表面から見てもわかるように荒れた状態になっている。

3・2 繰返し引抜きによるU形疵の成長と回復

直径10 mmの線材表面にワイヤ放電加工により、人工U形疵(幅 $a=0.3$ mm, 深さ $h=0.15$ mm)を与え引抜き実験を行った。5パス後の疵部の軸方向断面写真を Fig. 7, 表面写真を Fig. 8にそれぞれ示す。引抜きを繰り返すと、疵幅が線材の軸方向に大きく広がると共に、疵底部は徐々に盛り上がり回復傾向にある。5パス引抜きを繰り返すと、疵底部からの肉の盛り上がりによりほぼ回復する。しかし、引抜き回数が少ない場合、疵底部はダイスと接触しないため、線材表面が荒れた状態になっていることが確認できる。U形疵は凹形疵の場合と異なり、重なり欠陥は見られない。

上記の実験と同様なU形疵を持つ線材をモデル化し、3次元FEM解析を行った。線材径 $\phi 10$ mmで疵の幅 $a=0.6$ mm一定として、深さ $h=0.3, 0.6$ mmと変化したFEM解析の結果を Fig. 9に示す。疵深さ $h=0.3$ mmと浅い場合、疵の変形は実験結果と同様に底部から回復し、3パス後に疵部が回復するという結果が得られた。深さ $h=0.6$ mmの大きい疵では、引抜きを繰り返すことによって、側面が倒れこみ重なり欠陥が起きることがわかった。

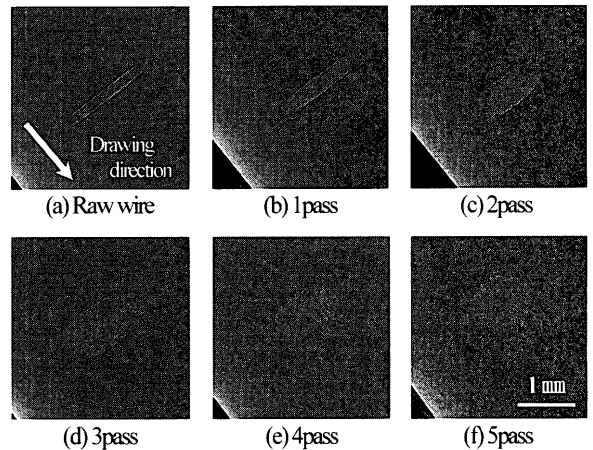


Fig. 8. SEM images of changes of crack shape on drawn wire surface.

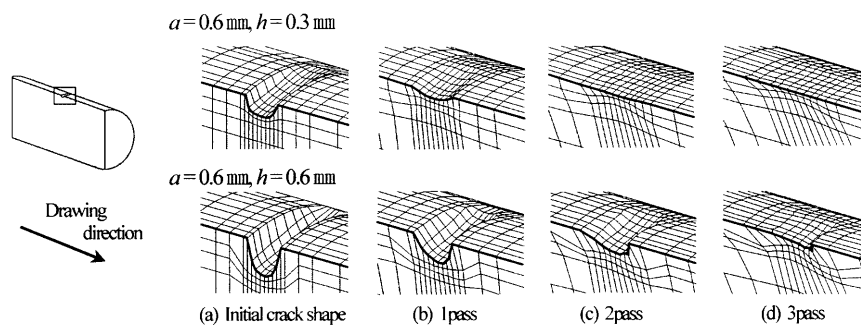


Fig. 9. Change of U crack during wire drawing.

3.3 繰返し引抜きによるV形疵の成長と回復

3.3.1 初期疵角度 γ が疵回復に与える影響

疵が表面にある線材を繰返し引抜くと、疵の引抜き側側面が倒れ込み重なり欠陥に成長することが予測される。このためFig.10に示すようなV形の疵において、その疵角度 γ が引抜き後の疵成長に与える影響について調べた。直径に対する疵の深さ比 $h/D_0=0.01$ とし、疵角度 $\gamma=20\sim 70^\circ$ まで変化させた。引抜き条件は操業条件に近い $\alpha=6^\circ$ 、 $R/P=20\%$ とした。

疵角度 γ を変化させ、引抜きによって疵が回復するかどうかFEM解析により調べた結果をFig.11に示す。縦軸の 90° は疵部が回復したことを示す。この図より初期の疵角度 γ が大きいくほど、引抜き回数が少なくても、疵部は回復しやすいことがわかる。逆に疵の角度 γ が小さいと、引抜

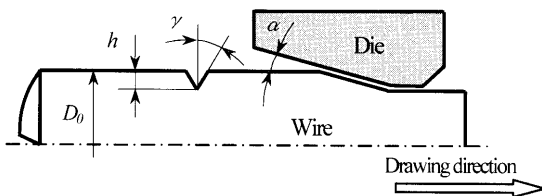


Fig. 10. Drawing model of a wire containing a V shape transversal crack.

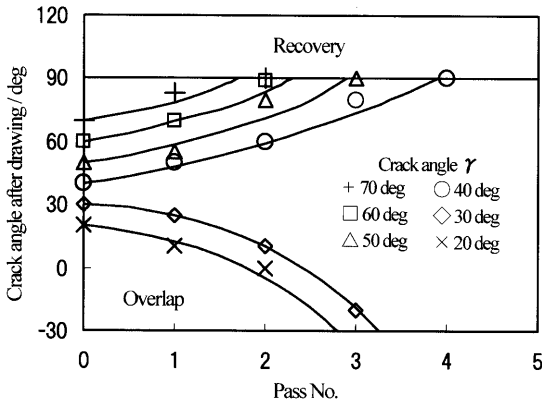


Fig. 11. Criteria for recovery of surface crack by drawing with various crack angle and number of repeated drawing ($h/D_0=0.01$).

きを繰り返していくうちに、疵部の側面から倒れこみが起き重なり欠陥へと成長していく。操業でよく使われる $R/P=20\%$ の場合、疵の回復と倒れ込み欠陥発生の境界は疵角度 $\gamma=30\sim 40^\circ$ にあることがFEM解析からわかった。このため、FEM解析の妥当性を確認するため、同様なV形疵(疵角度 $\gamma=40^\circ$)を線材表面に与え引抜き実験を行った。実験とFEM解析を比較した結果をFig.12に示す。解析では4パスで完全に回復したが、実験では多少疵が残留した。しかし、FEM解析と実験の結果から、引抜きを繰り返した時のV形疵の回復傾向は、双方ともよく一致する結果が得られた。

3.3.2 引抜き条件がV形疵回復に与える影響

引抜き加工条件が疵成長に与える影響を確認するため、 $\alpha=6, 13^\circ$ 、 $R/P=10, 20, 30\%$ 、V形疵角度 $\gamma=15\sim 75^\circ$ と変化させ解析を行った。Fig.13に $\alpha=6^\circ$ 、 $R/P=10, 30\%$ の引抜き条件で行ったFEM解析結果を示す。疵角度が小さい $\gamma=15^\circ$ の場合、 $R/P=10\%$ と小さい方が疵部への倒れ込みが大きくかつ疵底部の盛り上がりは小さい。 $R/P=30\%$ と大きくした場合、引抜き後に疵角度 γ が開き、疵底部の回復が著しいことがわかる。一方開き角が大きい $\gamma=75^\circ$ は、 R/P が小さい 10% であっても、疵の開き角 γ が大きいので引抜きによって疵は回復傾向にある。 R/P が大きい 30% の条件では1パスのみで回復していることもわかる。

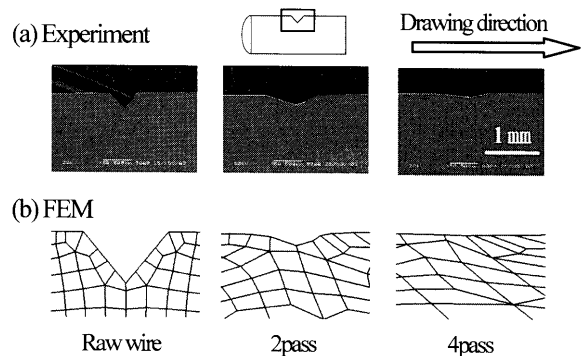


Fig. 12. Comparison of experimental and FEM results in crack deformation after drawing.

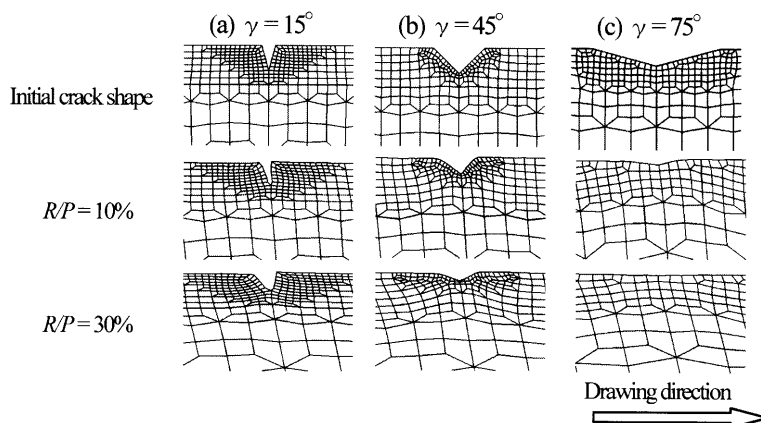


Fig. 13. Change of the crack shape with various R/P often drawing ($h/D_0=0.01$).

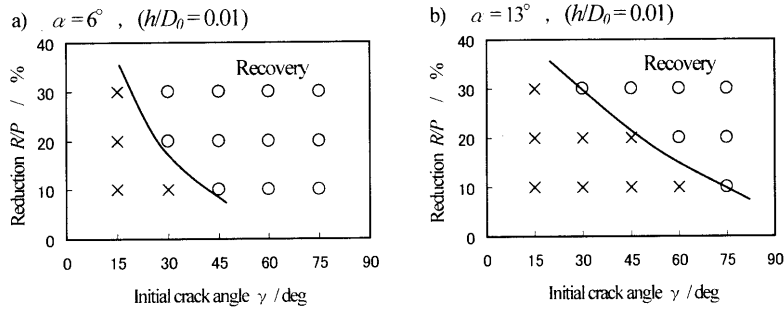


Fig. 14. Growth and recovery of crack in wire drawing with various R/P and γ .

ダイス半角 α を 6, 13° と変化させ、V形疵の重なり発生の有無について調べた結果を Fig.14 に示す。○、×印はそれぞれ疵の回復、残留を示す。Fig.14(a) の $\alpha = 6^\circ$ の条件では初期の疵角度 $\gamma = 30^\circ$ の場合、R/P が小さい 10% では倒れこみが発生し重なり疵となるが、R/P = 20, 30% と高くなった場合は回復する。R/P = 30% の引抜き条件では $\gamma = 30^\circ$ 以上で疵が回復することがわかる。Fig.14(b) の $\alpha = 13^\circ$ と大きい条件では 6° に比べて回復しづらくなっており、特に低い R/P での回復する条件が厳しくなっている。ダイス半角 α はリダクション R/P と共に疵変形に与える影響が大きいことがわかる。疵を回復させる条件は、初期の疵角度 γ が大きいことは当然であるが、 α を小さくし R/P を大きくする必要があるといえる。

4. 表面疵を除去した線材の引抜き解析

自動車エンジンバルブばね用線材は疲労特性向上のため、線材表面疵を皆無にする要求がある。そのため、自動で疵を検出し、切削バイトや研削砥石で疵を除去する試みもある。疵を除去した線材を用いた場合、その後の引抜きで疵が回復するのか、不均一変形が生じるのか不明であるため、FEM 解析を行い検討した。

素線として圧延上がりの $\phi 10$ mm を想定し、疵部を $R = 10$ mm、深さ $h = 0.5$ mm、楕円のチップ状に除去すると仮定した。素線の FEM モデルと各パスの引抜き後の線材断面形状を Fig.15 に示す。1 パスで疵除去部は肉が大きく盛り上がっていることがわかる。2 パスで線材の断面形状はほぼ真円に近くなり、3 パスでは疵除去部が完全に回復することがわかった。しかし、引抜き時に疵除去部が不均一変形となり、引抜き後わずかな曲がりが生ずることがわかった。3 パス引抜き後の相当ひずみ分布を Fig.16 に示す。3 パス引抜き後も、疵部付近の相当ひずみは不均一となるが、さらに引抜きを繰り返すことにより、曲がりと不均一変形は改善されていることも明らかになった。同様な条件で引抜き実験を行ったが、FEM 解析より回復傾向が少し遅いがほぼ一致する結果が得られた。

以上のように疲労特性低下の原因となる線材表面の疵を除去し、その後引抜きを繰り返すことは健全な線材を製造

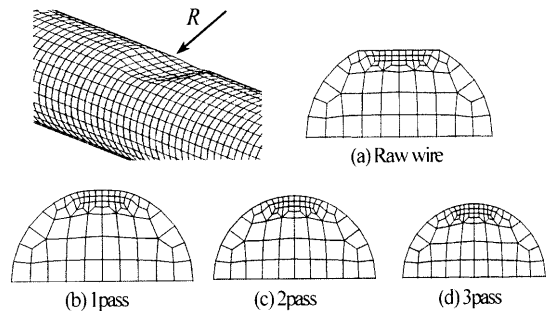


Fig. 15. Cross-sectional recovery of a crack removal part by drawing.

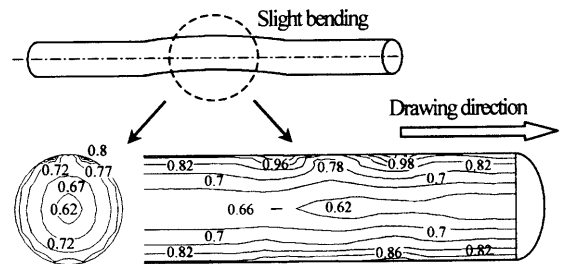


Fig. 16. Equivalent strain distributions in drawing of wire with the crack removed section by FEM.

する上で有効な手段であると判断できる。

5. 結言

疲労特性などに影響する線材表面の横割れ疵を取り上げ、引抜きを繰り返すことにより、疵が回復するのかあるいは、残留・成長するのか実験と3次元FEM解析の双方から検討した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 凹形横割れ疵が線材表面にある場合、引抜きを繰り返しても、疵の側面がせん断変形を受け倒れこみが生じるため、重なり欠陥として疵は残留する。
- (2) U形横割れ疵の場合、引抜きを繰り返すと疵部が回復する場合と残留する2通りがあることを示し、疵幅が広く、疵深さが浅いものほど疵は回復しやすいことを3次元FEMより明らかにした。
- (3) V形横割れ疵角度 γ の大小が引抜き後の疵回復に

影響することを明らかにし、引抜き条件と引抜き回数により疵回復のための条件を考察した。

(4) 表面疵を除去し、その後数回の引抜きを繰り返す方法は、高疲労特性が要求される線材の製造に有効である。

文 献

- 1) E.Sunami and Y.Sagae: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), S415.
- 2) H.Satoh, Y.Kawaguchi, M.Nakamura, M.Terashita, T.Kobayashi and Y.Isono: *Wire J. Int.* March (1995), 120.
- 3) Y.Kawaguchi, Y.Kanesada, H.Kawakami: *CAMP-ISIJ*, **1** (1988), 511.
- 4) 引抜き加工 (塑性加工技術シリーズ6), 日本塑性加工学会編, コロナ社, 東京, (1990), 92.
- 5) 引抜き加工 (塑性加工技術シリーズ6), 日本塑性加工学会編, コロナ社, 東京, (1990), 68.
- 6) K.Yoshida, T.Shinohara: 2003 Conf. Proc. of The Wire Association International, Inc., The Wire Association International, Inc., Boston, (2003), 311.
- 7) 吉田一也, 篠原哲雄: 第53回塑性加工連合講演会講演論文集, 日本塑性加工学会, 東京, (2002), 327.
- 8) T.Ishikawa, N.Yukawa, Y.Yoshida and Y.Tonohata: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 1142.
- 9) T.Matsui, T.Ogata, M.Fujita and M.Asakawa: *Sumitomo Met.*, **26** (1974), 35.
- 10) 改訂条鋼マニュアル (棒鋼・線材編), 日本鉄鋼協会, 東京, (1987), 3.