

(解説)

# スチールコード用線材の歩み

南田高明\*・平賀範明\*・柴田隆雄\*\*

\*鉄鋼部門・加古川製鉄所・厚板線材部 \*\*鉄鋼部門・神戸製鉄所・条鋼技術部

## Developments in Steel Cord Wire Rods

Takaaki Minamida・Noriaki Hiraga・Takao Shibata

Over the past 50 years, steel cord wire technology has progressed steadily. To meet stringent customer requirements, Kobe Steel developed inclusion control and wire rods design for high tensile situations. Such innovations have resulted in a significant reduction in tire weight. This report describes developments in steel cord wire rod technology, focusing especially on aspects related to inclusion control and high tensile strength.

まえばき = スチールコードを補強材としたゴム製品は優れた強度と弾性を有しているため、タイヤやコンベアベルトなど、さまざまな工業分野に広くもちいられている。

とくにタイヤ用スチールコードは、レーヨン、ナイロン、ポリエステルなどの化学繊維系補強材に比べ、剛性率が高く熱伝導性に優れるため、タイヤ寿命を向上させるだけでなく、自動車に高い走行性と操縦安定性を与えている。

タイヤ用スチールコードの歴史は古く、20 世紀前半にフランスの Michelin 社によって開発された。1970 年代に入りトラック、バス用タイヤのベルトやプライ（第 1 図）に採用され、その後のモータリゼーションとともにその使用量を飛躍的に伸ばしてきた。

また、スチールコードは当初 2 800MPa 程度の引張強さのものが使用されていたが、タイヤの軽量化および使用するスチールコード量の低減を目的として、徐々に高強度化が進み、最近では 4 000MPa の強度を有するウルトラハイテンスチールコード（第 2 図）が使用されるに至り、大量生産されている実用材料のなかでは最高強度を有している。さらに、引張強さ 4 000MPa を越えるスチールコードの研究開発も進められており、鋼の極限強度への追求がなされている。

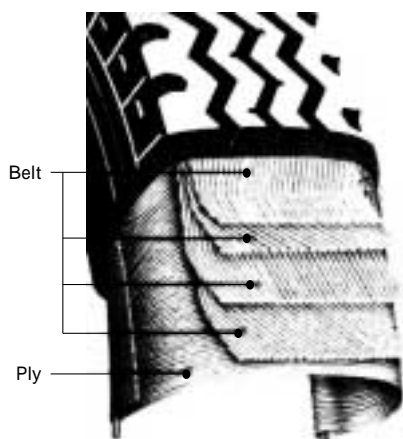
本稿では、約半世紀にわたり当社がスチールコード用

鋼の品質改善に取り組んだ経緯と市場からの高強度化要望への対応、および今後のスチールコード用線材に課せられた技術課題について述べる。

### 1. スチールコードに要求される品質特性

当社は 1960 年代からスチールコードの研究開発に着手し、まずスチールコード用鋼線の伸線技術、めっき技術、およびより線技術など主にスチールコード製造技術の開発をパイロットプラントを設置してすすめた。これと併行してスチールコードメーカーからの情報収集にもつとめ、その結果スチールコード用線材として具備すべき特性を把握し、その品質改善に取り組んできた。

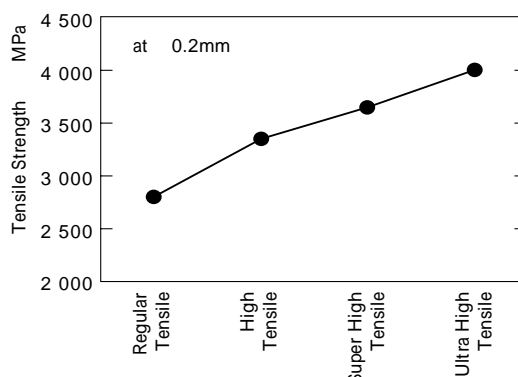
当社で製造しているスチールコード用鋼の代表的な化学成分組成を第 1 表に、スチールコードの一般的な製造工程を第 3 図に示す。圧延された線材は、まず熱間圧延工程で生成したスケールを除去し伸線に供される。スケールを除去する方法としては、線材を酸に浸漬し、



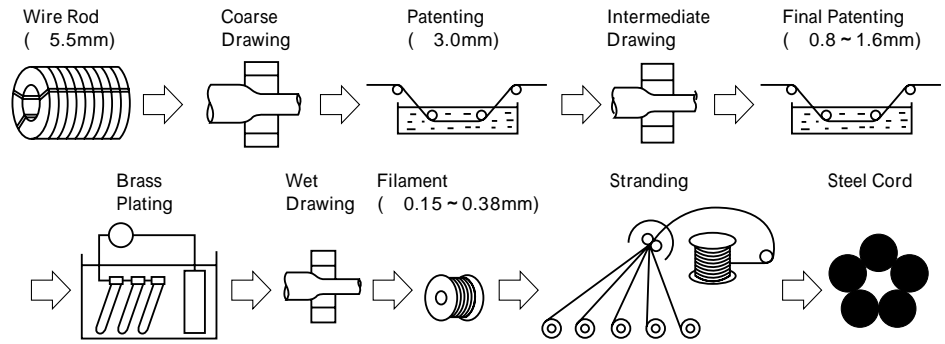
第 1 図 タイヤの構造  
Fig. 1 Structure of steel radial tire

第 1 表 スチールコード用線材の化学成分組成  
Table 1 Chemical compositions of wire rod for steel cord mass%

Steel Grade	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
KSC72	0.70-0.75	0.15-0.30	0.40-0.60	0.020	0.020	0.05	0.05
KSC82	0.80-0.85	0.15-0.30	0.40-0.60	0.020	0.020	0.05	0.05
KSC90	0.88-0.93	0.15-0.30	0.40-0.60	0.020	0.020	0.05	0.05
KSC92-E	0.90-0.95	0.10-0.25	0.30-0.50	0.020	0.020	0.020	0.10-0.30
KSC97-UH	0.95-0.99	0.10-0.25	0.30-0.50	0.020	0.020	0.020	0.10-0.30



第 2 図 スチールコードの強度レベル  
Fig. 2 Tensile strength level of steel cord



第3図 スチールコードの製造工程  
Fig. 3 Manufacturing process of steel cord

スケールを除去する酸洗法と、線材表面に引張り応力を加え、機械的にスケールを除去するメカニカルデスケーリング（以下MD）法に大別されるが、酸洗法は廃酸処理にコストがかかることから、近年ではMD法が主流となっている。

MD性に対しては、添加する合金元素<sup>1)</sup>に加えてスケール/地鉄界面の粗さあるいはスケール厚さ<sup>2)</sup>も顕著に影響するため、薄スケールでかつ剥離性の良い線材をえるためには、鋼片の加熱条件、圧延ロールの表面肌荒れ、圧延後の冷却開始温度、冷却速度など、製造条件の管理がきわめて重要となる。

スケールが除去された後、適切な皮膜処理が施され、伸線、パテンティングが繰り返しおこなわれるが、現在では一次伸線工程での生産コストを下げるため、中間パテンティングを省略するダイレクトドロ잉（以下DD）工程が増えている。DD工程では表面きずによる断線が発生しやすくなるため、従来にもまして鋼片の残存きずや圧延工程、ハンドリング時でのきず発生を低減する必要がある。

続いて最終パテンティング、めっき処理が施された後所定の線径まで伸線されるが、スチールコードを構成する素線（以下フィラメント）は0.15~0.38mmと非常に細く、総減面率で90%以上の強伸線加工が施されるだけでなく、その後のより線工程ではフィラメントに強いねじり応力が加えられるために断線が発生し易く、生産性の低下やえられたコードの品質低下を招く。フィラメント径を0.175mmとした場合、2tonの線材は約1万kmの長さにもおよび、この間の断線が問題とされるため、全長にわたって厳しい品質が要求される。

線材要因の断線としては、表面きず、中心偏析、介在物などが挙げられるが、とくに介在物については、数十μmの大きさでも断線の起点となる（写真1）だけでなく、コードの疲労特性にも影響を及ぼす<sup>3)</sup>ため、鋼の清浄度がスチールコード用線材としての品質を左右するといっても過言ではない。

以下に当社が長年にわたって介在物断線の低減に取り組んできた経緯について述べる。

## 2. 断線レス品質への挑戦

介在物による断線を低減するには、まず断線の原因となる介在物を正確に特定することが必要である。

当社では、鋼を酸で溶解し介在物を抽出する、酸溶解法<sup>4)</sup>（第4図、写真2）の技術確立に成功した結果、有

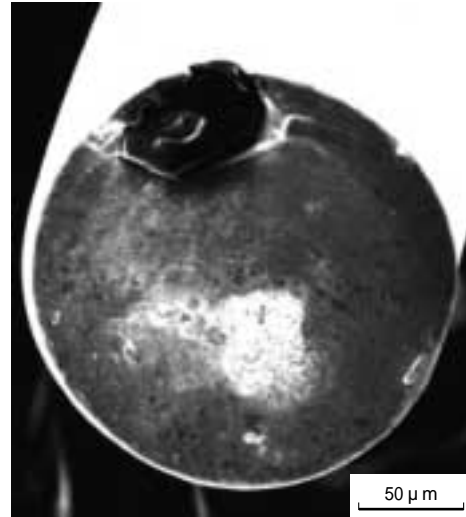
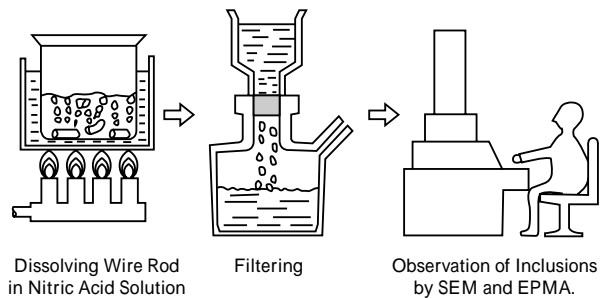


写真1 スチールコードの断線破面  
Photo 1 Fracture surface of steel cord



第4図 酸溶解法  
Fig. 4 Acid dissolution method

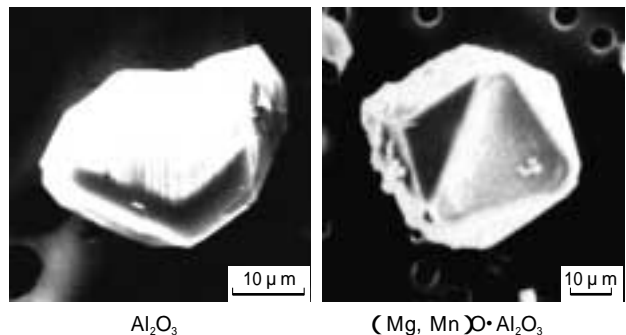


写真2 線材から抽出された介在物  
Photo 2 Typical inclusions extracted from wire rods

害となる介在物のみ形を変えずに抽出し、評価することが可能となった。

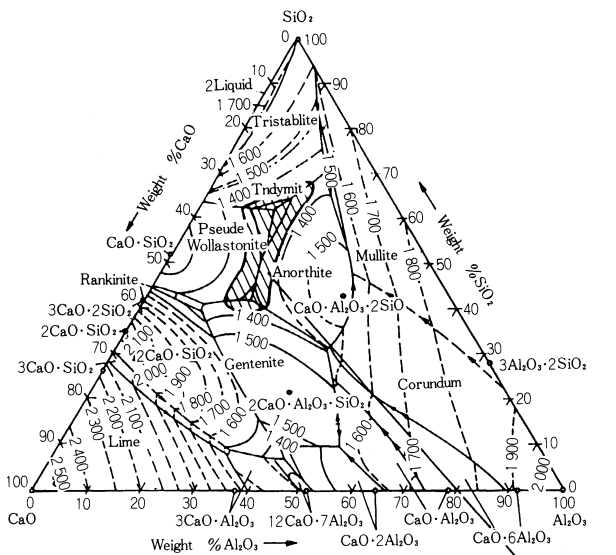
スチールコードの研究開発に着手して以来、所内およびユーザでの断線破面に現れた介在物を数多く調査した

結果、加工中に断線を引き起こす介在物は、熱間圧延や冷間加工時に延びにくく破壊しにくい、硬質の $Al_2O_3$ 主体の介在物であることがわかった。

$Al_2O_3$ の起源としては、溶鋼から晶出する場合と耐火物から混入する場合に分けられる。前者の場合は生成する介在物を延性の高い組成にコントロールし無害化することで断線を防止でき、後者の場合は耐火物材質の選択により断線の低減が可能である。

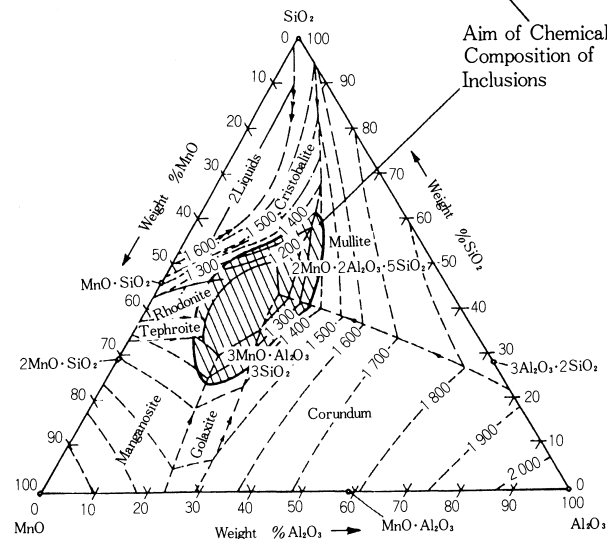
介在物の組成コントロールをおこなうためにはスラグ精錬による介在物の改質が必要であるが、従来のRH脱ガス法ではスラグ精錬機能が弱く、介在物を精度よく形態制御し無害化することが難しいという問題を抱えていたが、1986年に設置されたアーク加熱式取鋼精錬設備(以下LFと略す)をもちいたスラグ精錬による介在物の形態制御技術によって、より安定した高品質のスチールコード用鋼が製造可能になった<sup>5)</sup>。

スチールコード用鋼中の介在物は、スラグ起源の $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 系と、脱酸生成物起源の $MnO-SiO_2-Al_2O_3$ 系に大別される。 $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 系あるいは $MnO-SiO_2-Al_2O_3$ 系状態図を第5図に示す。両組成系において、熱間圧延中に伸長し、無害化されると考えられる低融点領域は、



第5図 目標介在物組成

Fig. 5 Aim of chemical compositions of inclusions

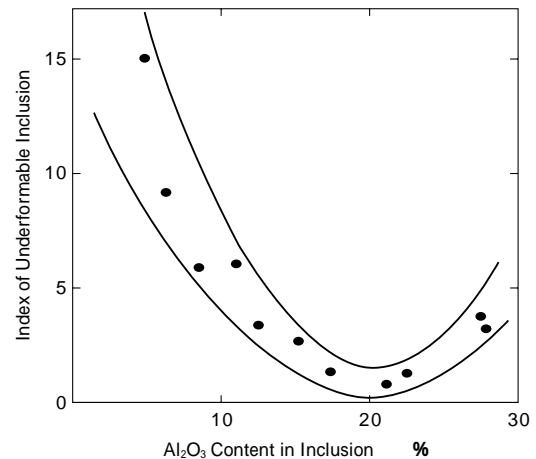


Anorthite と Pseudowollastonite の共晶線近傍および Spessatite 初晶域を中心とする領域であり、両組成系とも  $Al_2O_3$  濃度としては約 20% になる。

第6図は鑄片における介在物の  $Al_2O_3$  濃度と線材での非延性介在物指数(線材縦断面を鏡鏡し、観察された介在物の厚さを指数化したもの)との関係を示しているが、介在物がもっとも低融点となる  $Al_2O_3$  濃度が 20% の近傍で非延性介在物のもっとも少なくなっており、第5図の最適組成と一致する。

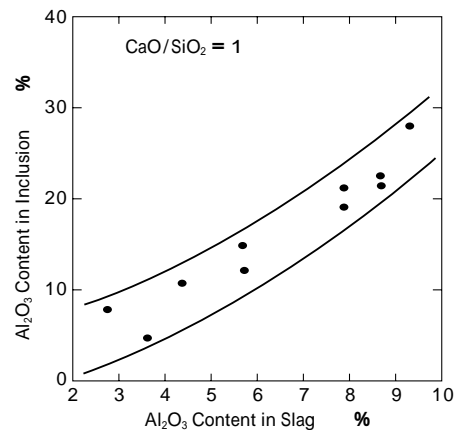
第7図には LF 処理後スラグ中の  $Al_2O_3$  濃度とタンデッシュ内介在物中の  $Al_2O_3$  濃度との関係を示す。スラグ中の  $Al_2O_3$  濃度を約 8% にコントロールすることで、介在物中の  $Al_2O_3$  濃度を適正なレベルに制御可能であることがわかり、LF 処理中にスラグを目標組成に精度よくコントロールする製造技術を確立し、介在物組成を無害化することに成功した。

また、耐火物からの混入による介在物を低減するため、当社はスチールコード用線材の生産を開始して以来、溶鋼処理および鑄造工程で使用されている耐火物の種類と断線破面に認められる介在物組成の関係を詳細に調査し、各工程での最適耐火物を選択して耐火物起源の介在



第6図 介在物中アルミナ濃度と非延性介在物指数

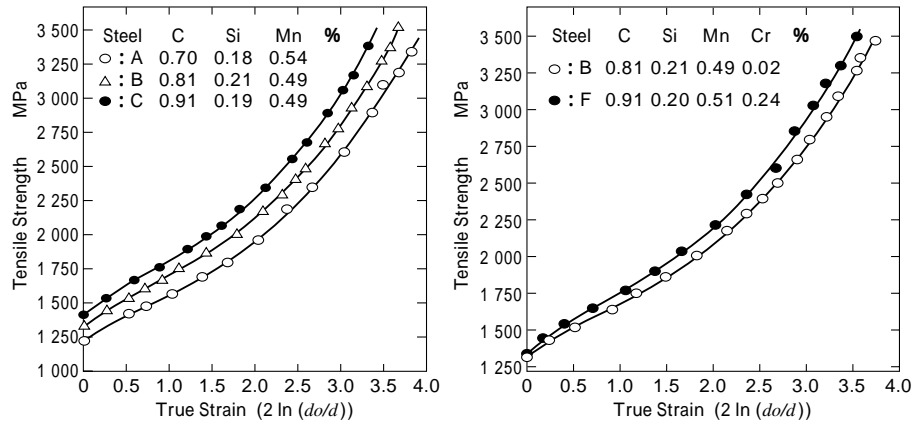
Fig. 6 Relation between  $Al_2O_3$  content in inclusion and index of underformable inclusion



第7図 スラグ中アルミナ濃度と介在物中アルミナ濃度の関係

Fig. 7 Relation between  $Al_2O_3$  content in slag and in inclusions

第8図 湿式伸線工程での加工硬化特性に及ぼすCとCrの影響  
Fig. 8 Influence of carbon and chromium on work hardening of steel in wet drawing



物による断線を低減してきた。

### 3. 高強度化要望への対応

スチールコード用鋼としては、従来0.72%炭素鋼が使用されてきたが、1980年代に入りフィラメントの高強度化が要望されるようになり、当社では市場ニーズに応えるべく高強度スチールコード用新鋼種の開発<sup>6)</sup>に着手した。

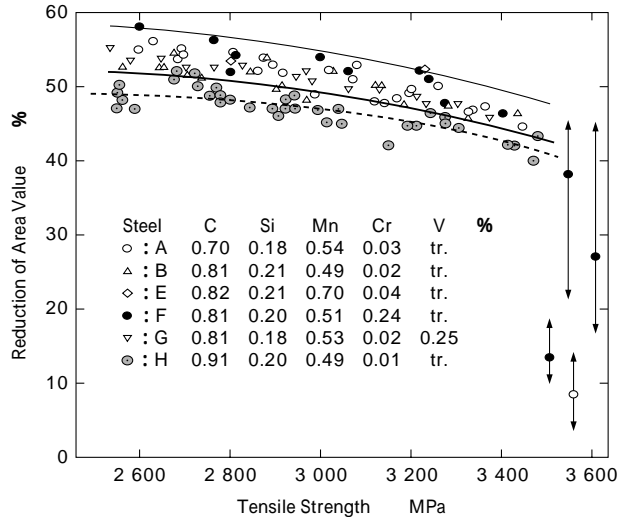
高強度のフィラメントを製造するに際しては、パテント条件などの製造工程が従来の工程と顕著に変わらないことが重要である。このため、高強度スチールコード用線材の化学成分決定において、湿式伸線での加工硬化特性およびフィラメントの絞りや捻回値に及ぼす鋼の化学成分の影響について検討した。

パテント後の加工硬化特性に及ぼすC、Crの影響を第8図に示す。Cの高い鋼はパテント後に高いワイヤ強度を有するだけでなく、湿式伸線においても高い硬化率を示す。したがって、一定の加工率のもとで、従来より高強度のフィラメントをえるためには、C含有量の高い鋼を使用するほうが有利であることがわかった。また、0.24%Cr添加鋼はベース鋼より高い加工硬化率を示しており、高強度フィラメントの製造にはCrの添加が有効な手段であることを見いだした。

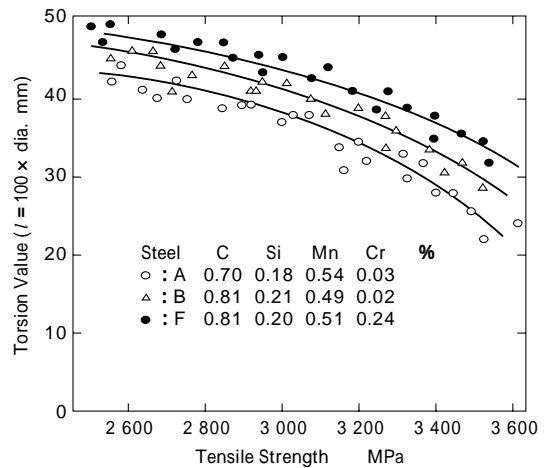
以上の結果から、湿式伸線において、一定の伸線加工硬化率のもとで高強度のフィラメントをえるためには、より高いC量を含むCr添加鋼を使用するのがよいことが判明した。

伸線ワイヤの延性を評価する特性値としては絞り値がよくもちいられる。第9図はフィラメントの絞りに及ぼす化学成分の影響を、引張強さとの関係で整理したものである。引張強さの増加にともなって絞りはすべての材料で低下しており、化学成分の影響を受けていない。

また、より線時の断線は捻回値が低いほど多く発生することが知られており、高強度スチールコード用線材の化学成分を決定する上で、捻回値は重要な特性の一つである。フィラメントの捻回値に及ぼすCとCrの影響を第10図に示す。捻回値は一定引張強さのもとで化学成分の影響を顕著に受け、パテント後のワイヤで高い引張強さを示す高C鋼ほど、また高い硬化率を示すCr添加鋼ほど高い捻回値を示している。



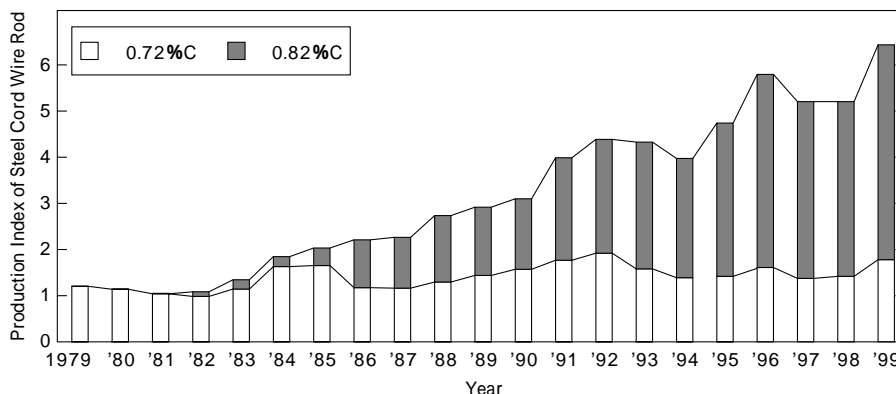
第9図 フィラメントの絞りに及ぼす化学成分の影響  
Fig. 9 Influence of chemical compositions on reduction of area as function of tensile strength of filament



第10図 フィラメントの捻回値と引張強さの関係  
Fig. 10 Effect of chemical compositions on torsion value as function of tensile strength of filament

以上の結果から、高強度フィラメントをえるためには、0.72%C鋼より0.82%C鋼やCr添加鋼のほうが優れていることがわかり、高強度化を目指し、高炭素鋼、Cr添加鋼の開発をおこなった。

1980年以降、0.72%C鋼にかわり0.82%C鋼が広く使われるようになり、当社でも0.82%C鋼の出荷比率が急



第11図 当社におけるスチールコード用線材の生産量推移

Fig. 11 Production of Kobe Steel's wire rod for steel cord

増した(第11図)。その後もスチールコードの高強度化は続き、現在では0.97% CのCr添加鋼も使用されている。

#### 4. さらなる高強度化への挑戦 - 加工技術とマイクロ組織からの検討

上述したように、スチールコードに対する高強度化の要望は強く、現在では引張強さ4000MPaを越えるスチールコードの研究開発が実施され、極限強度への追求がなされているが、鋼線強度が高くなるとねじり変形の初期にデラミネーションと呼ばれる、鋼線が長手方向に裂ける縦割れが発生し、高強度化を阻害している。

デラミネーションの発生原因に関しては、種々の提案<sup>7)8)</sup>がなされているものの、その発生メカニズムは明らかにされていないが、当社では加工技術とマイクロ組織の両面からその防止策について検討をおこなってきた。

伸線されたフィラメントの表面には、通常、引張りの残留応力が付与されるが、伸線工程で最終ダイスの減面率を下げるにより圧縮の残留応力が付与され、デラミネーションの発生限界強度を向上できることがわかった。

また、これまでデラミネーションとマイクロ組織との関連性についての報告例は少ない。この理由は、一般のねじり試験ではねじれ破断するまで変形させるために、デラミネーション発生部の破面が壊れ、デラミネーション発生部の組織を特定することが不可能となるからである。

当社はデラミネーションが発生した時点で亀裂が伝播しないうちにねじり試験を中断し、試験後のフィラメントを液体窒素中で引張り破断させ、デラミネーション発生部の破面を観察することに成功した<sup>9)</sup>。こうしてえられたサンプルのデラミネーションとパテンティング後のパーライト組織との関連を調査し、デラミネーションには第二相フェライトが関与していることを見だし、パテンティング条件の改善でデラミネーション発生限界強度の向上を可能とした。

#### 5. 今後の展望

スチールコードはその優れた特性から、車の安全性、低燃費化に大きな役割を果たしてきたが、昨今の地球環境問題から、自動車の排出ガス規制はますます厳しくなり、タイヤに対してもさらなる軽量化が要望されている。

スチールコードの高強度化はタイヤ重量の低減に有効な手段であり、高強度化のメカニズムとデラミネーションの発生原因について、ナノスケールでの組織解析<sup>10)11)</sup>および伸線加工技術の開発が進められている。いっぽう高強度化にともない材料の欠陥感受性が高くなるため、表面きず、介在物などの一層の低減が必要である。また、高強度と腐食疲労特性を両立させることも重要な課題である。

現在、世界的規模での自動車および自動車関連産業の再編が進んでおり、タイヤメーカーでも生き残りをかけ製造コストの削減に取り組んでいる。今後タイヤの製造方法も変化することが予想され、工程変化に対応できるスチールコードの開発が必要となろう。

コードメーカーにおいても生産コスト削減の目的から、一次伸線工程での中間パテンティングを省略するDD化が進められている。伸線前処理として、従来の酸洗い+りん酸亜鉛皮膜はDD化に有利とされているが、環境問題からはMDによるスケール除去が主流となっており、MD工程でより細くまで伸線できる線材の開発も必要となるであろう。

むすび= 当社は今後とも地球環境の変化に対応できる材料の開発を進め、タイヤおよび自動車業界の発展に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- 1) M. Murahashi et al. : Wire Journal, Vol.26, No.11(1993) p.50 .
- 2) 富永治郎ほか：製鉄研究, 第303号(1980) p.60 .
- 3) 富岡美都夫ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.23, No.3(1975) p.39 .
- 4) A. Yoshimochi et al. : Wire Journal, Vol.16, No.9(1983) p.224 .
- 5) 三村 毅ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.39, No.4(1989) p.77 .
- 6) Y. Yamada et al. : Wire Journal, Vol.19, No.4(1986) p.53 .
- 7) 小川陸郎ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.35, No.2(1985) p.63 .
- 8) 高橋稔彦ほか：新日鐵技報, 347(1992) p.22 .
- 9) N. Ibaraki et al. : Wire Journal International, Vol.33, No.3(2000) p.122 .
- 10) 横井浩一ほか：熱処理, Vol.38, No.6(1998) p.307 .
- 11) 樽井敏三ほか：塑性と加工, Vol.39, No.447(1998) p.7 .