

(解説)

# スチールコードの高強度化を支える線材の製造技術

## Production Technology of Wire Rod for High Tensile Strength Steel Cord



桐原和彦\*1

Kazuhiko KIRIHARA

The wire rod for steel cord is designed for high tensile purposes, and this results in a reduction of the tire weight. For several years, such steel cord has also been used as saw wire to cut silicon ingots. The saw wire is more highly tensile and has a smaller diameter. Therefore, an appropriate wire rod is required for manufacturing such saw wire. This report describes the technology to control non-metallic inclusion and superior draw ability wire rod needed for manufacturing the high strength wire used for steel cord and saw wire.

まえがき＝スチールコードは優れた強度と弾力性を有しているため、タイヤやコンベアベルトの補強材など、さまざまな工業分野に用いられている。

自動車用タイヤを補強するために用いられるスチールコードは、極細鋼線を素線としたより線である。レーヨンやナイロン、ポリエステルなどの化学繊維系補強材に比べて比強度が低く、タイヤが重くなるといった短所がある。しかしながら、剛性率が高いうえに熱伝導性に優れるため、タイヤ寿命を著しく向上させるとともに、自動車に高い走行性と操縦安定性を与える長所がある。

新興国における自動車の普及に伴ってスチールコードの使用量が飛躍的に増加する見込みである。さらに、タイヤの軽量化、自動車の低燃費化および製造工程簡略化などの市場ニーズを反映して、スチールコードの生産性向上と高強度化が求められている。

一方でここ数年、地球環境負荷低減に向けた取組が世界的に高まり、発電時にCO<sub>2</sub>が発生しない太陽光発電の市場が急伸している。太陽電池パネルに用いられるシリコンウエハは、シリコンインゴットからソーワイヤを用いて切断される(図1)。被切断物の歩留りを向上させるため、ソーワイヤの細径化が求められる。また、ウエハ

の切断加工面のひずみを抑制することにより発電効率を向上させることができる。切断加工面のひずみを抑制するためには、ソーワイヤの高強度化が有効な手段であり、スチールコードと同様、高強度のワイヤが求められている。

本稿では、スチールコード細径化・製造工程簡略化要望への対応、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

当社が製造しているスチールコード用線材の代表的な化学成分組成を表1に、スチールコードの高強度化の動向を図2<sup>1)</sup>に示す。素線の引張強度は、1970年代には0.20mm径で2,800MPaであったものが1980年代には3,300MPa、1990年代初期に3,600MPaと高強度化し、1990年代末には4,000MPaに達している<sup>2), 3)</sup>。スチールコードの材料組織は、フェライト/セメンタイトが層状に並んだパーライト鋼を伸線加工強化したもので、大量生産されている実用材料の中で最高強度を有している。高強度化に伴い、スチールコード用線材のC含有量は、0.7%C亜共析鋼から0.8%C共析鋼、0.9%C過共析鋼へと高くなってきた。

タイヤ補強材として用いられるスチールコードの一般的な製造工程を図3<sup>2)</sup>に示す。

φ5.5mmの熱間圧延線材に対し、乾式伸線、中間パテンティング、プラスめっき、湿式伸線を施す工程まではスチールコード、ソーワイヤともほぼ同一の工程で製造される。スチールコードを構成する素線はφ0.15～φ0.38mmと非常に細いうえに、湿式伸線後のより線工程では素線に強いねじり応力が加えられる。このため断線が発生しやすく、生産性の低下や得られたコードの品質低下を招くことから、全長にわたって厳しい品質が要

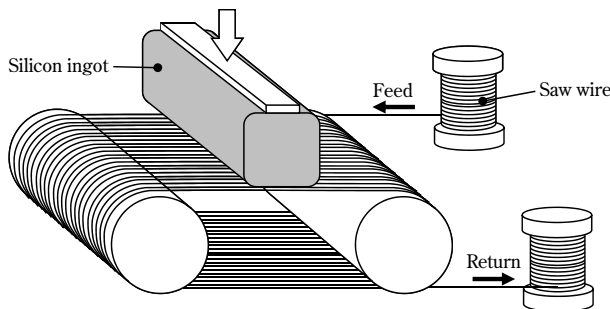


図1 シリコンインゴットの切断イメージ  
Fig. 1 Schematic of cutting of silicon ingot

\*1 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 線材部

表1 スチールコード用線材の化学組成  
Table 1 Chemical compositions of wire rod for steel cord

Steel grade	C	Si	Mn	P	S	Cr
KSC72	0.70-0.75	0.15-0.30	0.40-0.60	≤0.020	≤0.020	≤0.05
KSC82	0.80-0.85	0.15-0.30	0.40-0.60	≤0.020	≤0.020	≤0.05
KSC90	0.88-0.93	0.15-0.30	0.40-0.60	≤0.020	≤0.020	≤0.05
KSC92-E	0.90-0.95	0.10-0.25	0.30-0.50	≤0.020	≤0.020	0.10-0.30
KSC105-E	1.02-1.07	0.15-0.30	0.20-0.40	≤0.020	≤0.020	0.10-0.30

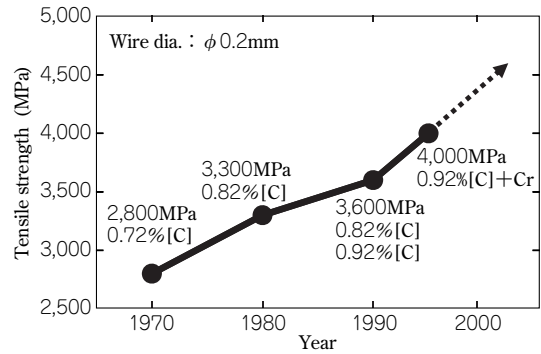


図2 タイヤコードの高強度化の動向  
Fig. 2 Trend of high tensile strength of tire cord

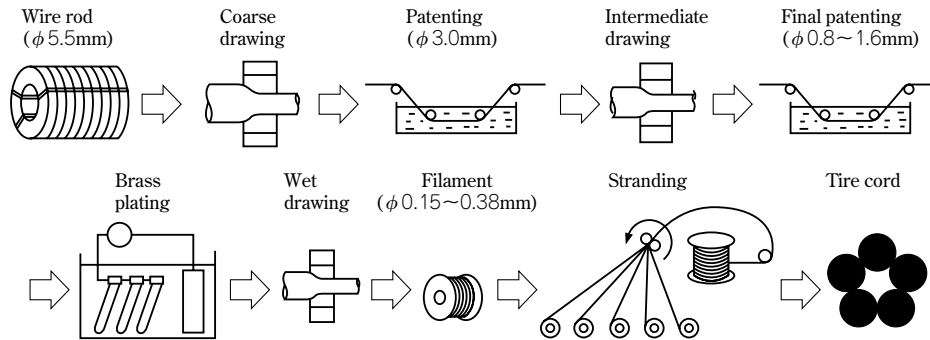


図3 タイヤコードの製造工程<sup>2)</sup>  
Fig. 3 Manufacturing process of tire cord<sup>2)</sup>

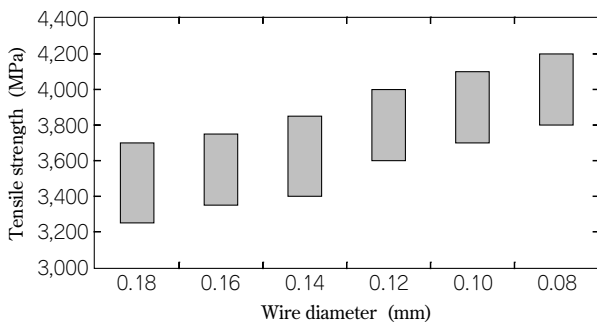


図4 ソーワイヤの引張強度  
Fig. 4 Tensile strength of saw wire

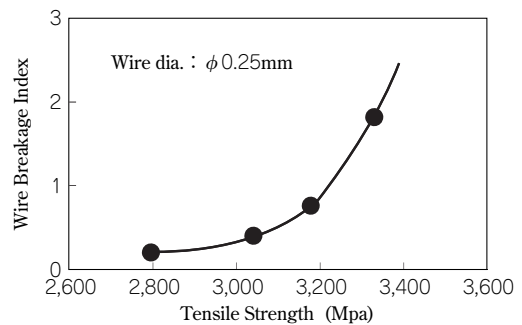


図5 素線の引張強度と熱線時の断線頻度の関係<sup>3)</sup>  
Fig. 5 Relationship between tensile strength of filament and wire breakage index during stranding process<sup>3)</sup>

求される。

一方、単線で使用するソーワイヤにはより線工程はなく、被切断物の歩留り向上のため、ワイヤの線径はφ0.08～0.20mmと極めて細い。さらに、切断中のワイヤに繰返し曲げ応力と引張応力が作用する。このため、ソーワイヤの引張強度は、高いもので4,000MPaに達する(図4)。

図5は、スチールコードの素線強度とより線時の断線頻度の関係を示しており、高強度化に伴って断線率が急激に上昇することが報告されている<sup>3)</sup>。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、とくに介在物は数十μmの大きさでも断線の起点となる(図6)だけでなく、疲労特性にも影響を及ぼす<sup>4)</sup>。鋼の清浄度がスチールコード用線材の品質を左右するといっても過言ではなく、高強度化に伴う断線を防止するためにはさらなる非金属介在物の低減が必須となる。

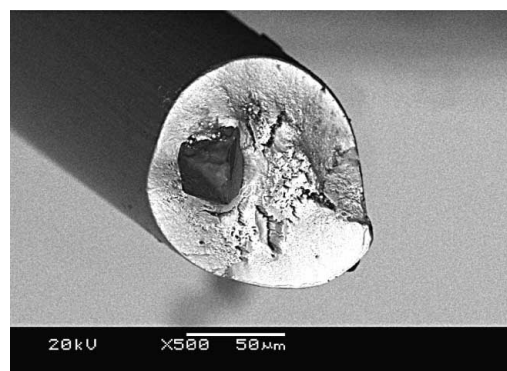


図6 スチールコードの断線破面  
Fig. 6 Fracture surface of steel cord

## 2. 断線ゼロへの挑戦

断線の原因となる介在物の組成は、熱間圧延や冷間加工時に伸びにくく破壊されにくい硬質のアルミナが主体であり、主に Corundum (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) や Spinel (MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

が報告されている<sup>5)~7)</sup>。

アルミナの起源は、溶鋼から晶出する場合と耐火物から混入する場合とに分けられる。これらを防止するため、溶鋼へのAl混入やスラグ精錬方法、耐火物に対してさまざまな対策を実施している<sup>8)</sup>。

### (1) Al混入の規制

目標組成と平衡する溶鋼中溶存Al濃度は数ppm程度の極めて低いレベルであるため、合金鉄などからのAl混入量の制御あるいは規制が行われている。当社では、Al濃度を規制した合金を用いるとともに、後述するスラグ精錬におけるスラグ組成コントロール技術との組み合わせにより、溶鋼中のAl濃度を極めて低い濃度に抑制する技術を確立している。

### (2) スラグ精錬

木村らは、硬質で高融点のアルミナ、ジルコニア、ジルコン、シリカの熱間圧延および冷間伸線時の破壊挙動を調査している<sup>9)</sup>。熱間圧延後のφ5.5mm線材、およびその後の冷間伸線時のアルミナとシリカの破壊挙動を図7<sup>9)</sup>に示す。熱間圧延における破壊挙動に大きな差は見られないが、冷間伸線においては、圧縮強度の低いシリカの方がより小さく破壊されている。溶鋼中に晶出する結晶や耐火物などから混入する介在物について、より破壊されやすいガラス質が主体の低融点介在物組成に改質することが重要である。

スチールコード用線材中の介在物は、スラグ起源のCaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系と、脱酸生成物起源のMnO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系に大別される。CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系およびMnO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系状態図を図8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、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る。当社では、スラグ精錬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の確立により、硬質のアルミナの晶出を防止し、介在物を無害化することに成功した。

### (3) 耐火物の改善

高温の溶鋼を処理するにあたっては耐火物の使用を避けることはできない。しかしながら一方で、耐火物起因と推定される断線が発生する場合がある。当社では、溶鋼を受ける部材としての強度や耐食性を維持しつつ溶鋼の清浄度を最大限に保持するため、耐火物の使い分け技術や施工技術を培ってきた。

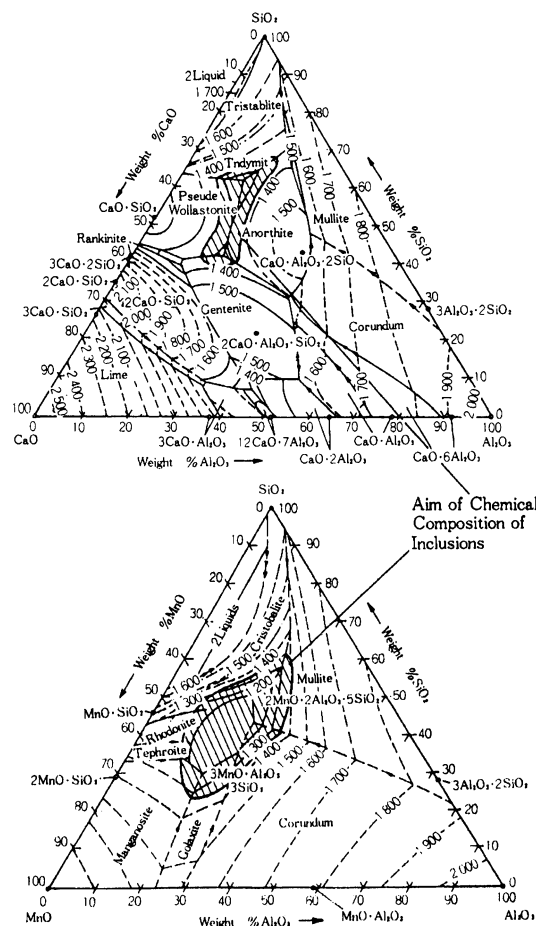


図8 目標介在物組成

Fig. 8 Aim of chemical compositions of inclusions

## 3. 高伸線性への対応—新商品の開発

前述のように、スチールコードに対する高強度化の要望は強いいため、現在では引張強さ4,000MPaを超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。

一方で、コードメーカーでの生産コスト削減の目的から、通常材における一次伸線工程での中間パテンティングを省略する直接伸線化、あるいはダイス寿命向上が進められている。

当社では、高強度化に加えて、直接伸線化、ダイス寿命向上に寄与できる伸線性に優れた線材の開発を進めてきた。

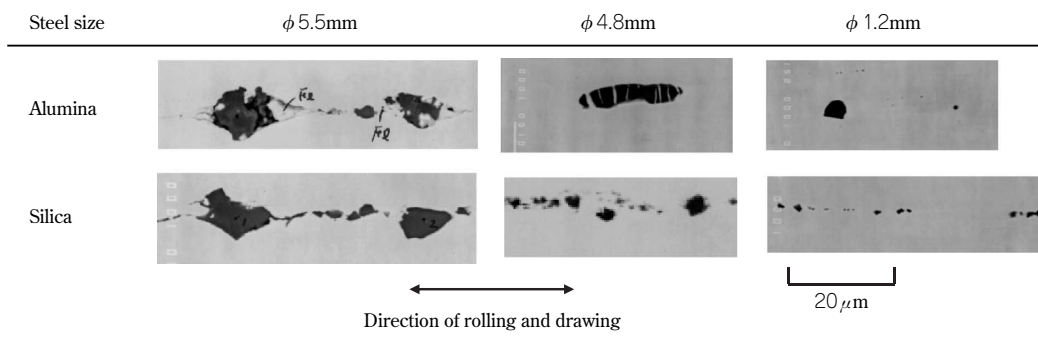


図7 伸線中の介在物の変形例(線材縦断面)<sup>9)</sup>

Fig. 7 Typical examples of change in shape of oxide inclusions appeared on longitudinal section of steel wire during drawing<sup>9)</sup>

線材の伸線性を評価する特性として絞り値が用いられ、絞り値が高いほど伸線に適しているといわれている。一方、伸線限界域の向上、およびダイス寿命の向上のためにはパラライトのラメラ間隔を広くし、線材の引張強度を下げるのが必須である。

一般的に、線材の引張強度と絞り値は比例関係にあり、強度が低くなるほど絞り値も低下する。当社は、制御圧延と制御冷却を組み合わせることにより、絞り値を維持したまま引張強度を低下させ、伸線性に優れた線材を開発するに至った。

ワイヤの健全性を評価する手法の一つとしてねじり試験が行われ、伸線加工によって脆化したワイヤをねじったとき、デラミネーションと呼ばれる縦割れが発生する。

図9は、従来鋼および開発鋼の伸線加工における真ひずみとデラミネーションの発生限界を示す。開発鋼ではより高い伸線ひずみでもデラミネーションが発生せず、伸線性に優れていることを示している。

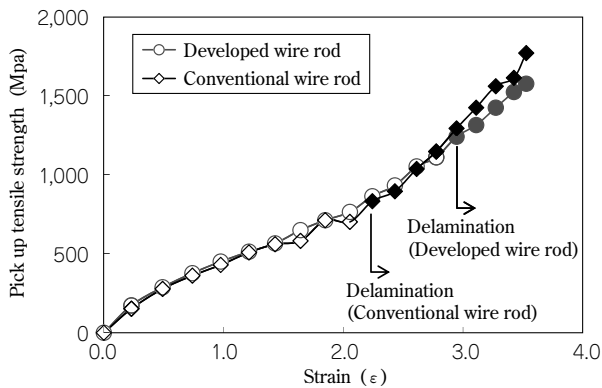


図9 真ひずみとデラミネーション発生の関係  
Fig. 9 Relationship between strain and delamination

#### 4. 今後の展望

タイヤ用スチールコードの優れた特性は、走行性や操縦安定性などの安全性、および軽量化による燃費向上に大きな役割を果たしてきた。地球環境負荷低減への取組が世界規模で進む中、自動車の排出ガス規制は今後ますます厳しくなり、タイヤのさらなる軽量化を可能とする高強度スチールコードが必要になるであろう。

しかしながら、スチールコードの高強度化はタイヤ重量低減に有効な手段ではあるが、高強度化に伴って材料の欠陥感受性が高くなるため、非金属介在物や偏析、表面きずなどの一層の改善が必要である。

一方で、スチールコードの製造においては競争が激化しており、製造コスト削減・生産性向上に寄与する材料も求められている。

また、太陽光発電のマーケットは今後もさらに伸張すると見込まれるものの、ソーワイヤメカ、あるいはインゴット切断メカ間での競争が激化するものと予想される。切断性向上のためには高強度化、切断歩留り向上のためには細径化が有効であり、スチールコード用途と同様、線材の高強度化、断線起因となる欠陥の改善が必要である。

むすび＝当社は今後とも市場ニーズに対応できる材料開発を進め、タイヤ、自動車、および太陽光発電の発展に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- 1) 隠岐保博：ふえらむ，Vol.8, No.9 (2003)，pp.627-632.
- 2) 南田高明ほか：R&D神戸製鋼技報，Vol.50, No.3 (2000)，p.32.
- 3) 山田凱朗ほか：R&D神戸製鋼技報，Vol.36, No.4 (1986)，p.71.
- 4) 富岡美都夫ほか：R&D神戸製鋼技報，Vol.23, No.3 (1975)，p.39.
- 5) A. Yoshimochi et al.：Wire Journal Int., Sep (1983)，p.224.
- 6) 佐藤 洋ほか：製鉄研究，Vol.320, (1986)，p.35.
- 7) E. Stampa et al.：Wire Journal Int., Mar (1987)，p.44.
- 8) 三村 毅：第182・183回西山記念技術講座，(2004)，pp.11-12.
- 9) 木村世意ほか：鉄と鋼，Vol.88, No.11 (2002)，pp.755-762.