



特集記事・2

21世紀 鉄はここまで使える

ここまで強い鋼線が橋を吊る～強度／加工性への挑戦～

Toward the Strengthening of Suspension Bridge Wire

高橋稔彦
Toshihiko Takahashi

独立行政法人 物質・材料研究機構 材料研究所
構造材料研究センター センター長

1 はじめに

近代吊橋の歴史は19世紀1883年ニューヨークのイーストリバーに架けられたブルックリン橋に始まる。中央径間486m、転炉製鋼製のスティールワイヤがはじめてケーブルに使われた吊橋である。また、ワイヤの垂鉛めっき、平行線ケーブル法の採用など現代吊橋の原型となる技術が生まれた橋でもある。ワイヤの強度は1,100MPaであった。20世紀に入り、1931年同じニューヨークのハドソン川に架けられたジョージワシントン橋で、中央径間は1,000mを越え、ワイヤの強度は1,520MPaに達した。20世紀も終わろうとする1998年、中央径間が1,990mと2,000mに迫った明石海峡大橋が開通した。1,800MPa (180キロ) 級のワイヤがはじめてケーブルに採用された。このワイヤが、当初の構想を一変させて今日見るような明石海峡大橋を実現し、また工費の節減と工期の短縮に大きな貢献をしたことは広く知られているところである¹⁾。しかし、自動車タイヤ補強用のスティールコードワイヤでは、すでに4,000MPaという強度の実用化に成功しており、5,000MPaを視野に入れた開発が進められている²⁾。橋梁ケーブル用ワイヤとのこの大きな差は何に由来するのだろうか。

本稿では、21世紀には、はたしてケーブルワイヤの強度をどこまで上げることができるか、そしてどんな吊橋を実現することができるかを展望してみたい。

なお、橋梁ケーブル用ワイヤの世界では、180キロ級ワイヤのように呼称されるので、材料名にはキロ表示を使用させていただく。

2 吊橋のケーブルにはなぜ強度の高いワイヤが求められるのだろうか

吊橋を支えるメインケーブルは、2本の主塔を介して両岸

の間に架けられる。その両端はアンカレイジと呼ぶ巨大なコンクリートに埋め込まれて固定され、橋を通行する車両、橋桁そしてケーブル自身の重量の全てを支える。主塔と主塔の間を中央径間と言う。最近の吊橋のケーブルは、直径5mm程度のワイヤを127本、正六角形に束ねたストランドを基本単位として構成されている。明石海峡大橋の場合には、このストランドを290本架け渡し、最後に束ねてメインケーブルが作られている。

吊橋のケーブルに作用する張力Hは、自動車などの重量をW₁、補剛桁の重量をW₂、ケーブルの自重をW₃ (以上の荷重はいずれも橋の単位長さ当たりの重量)、中央径間長をL、ケーブルの垂れ下がり長さをF (F/Lをサグ比と呼ぶ)、とすると、

$$H = K \frac{(W_1 + W_2 + W_3) L}{8 \frac{F}{L}}$$

で与えられる (Kは定数)。すなわち、サグ比一定であれば、単位長さ当たりの重量は同じでも、中央径間長が長くなるほど大きな張力がかかる¹⁾。

ケーブルの張力はワイヤの強度に本数をかけたものなので、ワイヤの強度が同じであれば、中央径間長が長くなるほどワイヤの本数を増やすことが必要になり、ケーブルの自重は増加する。また、補剛桁も剛性を上げるために重くなる。このように中央径間の長大化に伴ってケーブル張力、従ってそれを支えるワイヤ本数すなわちケーブル径は、加速度的に大きくなる。しかし、ケーブル径には限界があり、何万本のワイヤで構成されるケーブルの空隙を最小限に絞り込む作業の作業性、橋桁を吊るハンガーロープをメインケーブルに固定する際の安定性などの理由から1.2m程度が限界とされている。従って、明石海峡大橋を瀬戸大橋と同じように、160キロ級のワイヤを用いて設計すると、片側2本、計4本

のケーブルが必要であった。ケーブル重量を大きく削減することに加えて、片側シングルケーブル化を可能にすることが、180キロ級ワイヤの開発が要請された背景である。

21世紀には、世界中で明石海峡大橋をはるかに凌ぐ大きな橋が計画されている。代表的な橋として、イタリア本土とシチリア島の間に計画されている中央径間3,300mのメッシナ大橋、ジブラルタル海峡に計画されている中央径間5,000mの橋がある。メッシナ大橋では、180キロ級のワイヤを使用しても片側2本、ジブラルタル海峡大橋では片側6本ケーブルが必要になる。そして、ケーブルにかかる張力の大半がケーブルの自重を支えるために使われることになる。1,800MPaをはるかに超える高い強度のワイヤが求められる由縁である。

3 高強度化を阻害する要因は何か

ケーブルのワイヤには基本的には伸線軸方向の力しか作用しない。従って、引張り延性や疲労特性あるいは遅れ破壊特性は、伸線軸方向の力に対する抵抗力が保障されていれば良い。ところが、主塔の塔頂部あるいはアンカレイジのところではワイヤに曲げの力がかかる。すなわち、ワイヤの伸線軸に対して直角の方向にも力が作用するようになる。

冷間伸線で作られるワイヤには伸線加工量の増加に伴って異方性が発達し、伸線軸方向の延性は良好でも直角な方向の延性は大きく低下する。このことを最も良く評価できるのがねじり試験である。直角方向の延性の低下が顕著なワイヤでは、図1に示すデラミネーションと呼ばれるワイヤの伸線軸方向に沿う割れが発生する。しかもこの割れはやっかいなこ

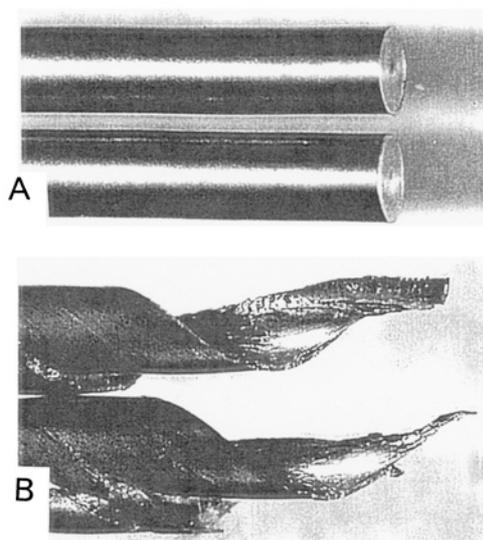


図1 捻り試験における破断形態 (A: 正常破断、B: デラミネーション)

とに、ねじり試験のごく初期、非常に小さな歪で発生する。このような訳で、直角方向の延性を保障する目安として、ねじり試験においてデラミネーションが発生しないことが、ケーブルワイヤの必須の要件となっている。ワイヤの高強度化への挑戦は、デラミネーションとの戦いである。

4 ワイヤのデラミネーションはどういう機構で発生するのだろうか

高強度ワイヤの開発は、後に紹介するようにデラミネーション発生機構に立ち入ることなく到達できる限界の強度まで来ており、デラミネーション発生機構を明らかにしない限り、先の展望を描くことは難しい。しかし、発生機構に関する報告は増えてきているが³⁻⁶⁾、定説はまだないのが現状である。そこで、本稿では筆者の考える仮説にそって話を進める。これは、伸線軸に直角な方向の延性のみが低下することを説明するものである。目指すは、次の飛躍の種を生み出すこと、そしてその妥当性を実験的に検証し、将来の可能性を定量的に予測することである。仮説構築のヒントから始める。

1) 同じ強度を得るにしても、その強度をどういう方法で確保したかによってデラミネーションの発生限界強度が変化する。ワイヤ強度は、図2に示すように冷間伸線(吊橋のケーブル用ワイヤでは、11mmから5mm、真歪1.6程度)によって大きく増加し、溶融亜鉛めっき工程でワイヤが450℃に数10秒加熱される結果低下する。ワイヤ強度は、パテンティング材強度の増加、伸線加工量の増加そしてめっき工程での強度低下の抑制のいずれの方法によっても、増加させることが可能である。図3は、その組み合わせの仕方がデラミネーションの発生限界強度に影響することを示す図で、パテンティング材の強度を高くし、伸線加工量を低く抑える方法で強度を確保することがデラミネーションの抑制に有利であることを示している⁷⁾。

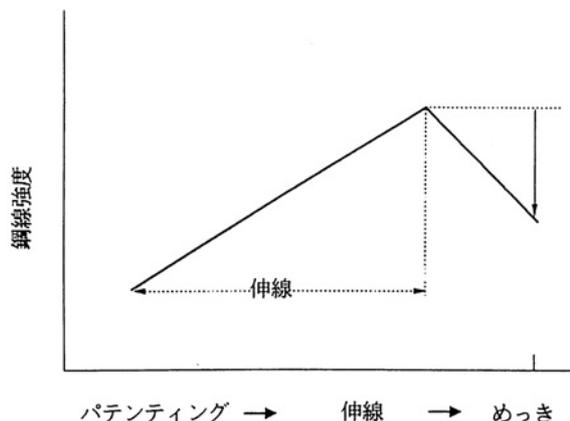


図2 ワイヤの製造工程における強度の推移

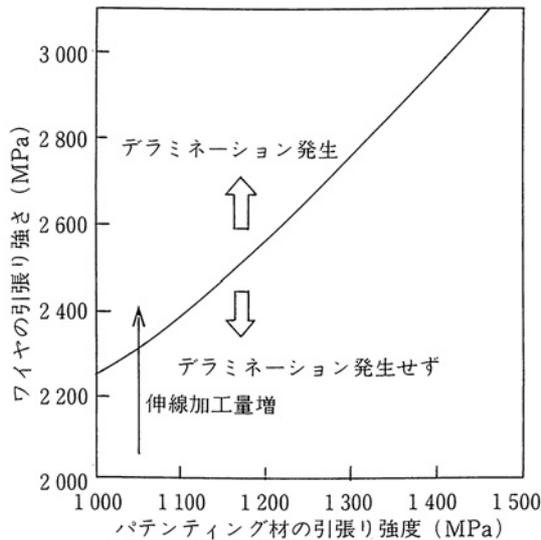


図3 デラミネーション発生限界強度におよぼすパテンティング材強度の効果

2) 強度確保の方法が異なるワイヤで何が違っているかを解析したのが、図4である。

引張りの降伏応力は加工歪の増加とともに著しく増加しているが、ねじりの降伏応力の硬化は非常に小さい⁸⁾。従って、同じ1,800MPaのワイヤでもパテンティング材強度1,450MPaと1,200MPaから出発したものは、引張りの降伏応力とねじりの降伏応力の差は、350MPaと600MPaというように大きく違っている。これは、冷間伸線加工では歪が大きくなると $\{011\}$ 繊維集合組織が発達することに起因する⁹⁾。図5に $\{011\}$ 繊維集合組織が形成されたワイヤの $\langle 111 \rangle$ すべり方向を示した。伸線加工においては、伸線軸に沿う $[111]$ 、 $[\bar{1}11]$ すべり方向が変形に寄与し、従って著しく硬化されている。引張り試験の降伏応力を決めるのは、このすべり方向における変形開始応力である。これに対して伸線軸に直角な $[\bar{1}\bar{1}1]$ $[1\bar{1}1]$ すべり方向はほとんど活動せず、硬化されていない。ねじりの降伏応力を決めるのは、このすべり方向における変形開始応力である。このような理由で、伸線加工量を大きくすると引張りの降伏応力とねじりの降伏応力の差が広がる。

以上の事実をもとにデラミネーション発生機構を考えてみる。ワイヤをねじるとまず伸線軸に直角な $\langle 111 \rangle$ 方向に変形が進む。ねじり変形においても、1個の結晶粒を上下左右前後に囲む全ての結晶粒との間でcompatibilityが維持されることが必要なので、そのための変形が追従する。このとき、隣接する全ての粒との間でcompatibilityを維持するためには、伸線軸方向にも変形が起こらなければならない。ねじり試験の開始と同時に伸線軸方向の変形も起こることは小川らによって明らかにされている³⁾。

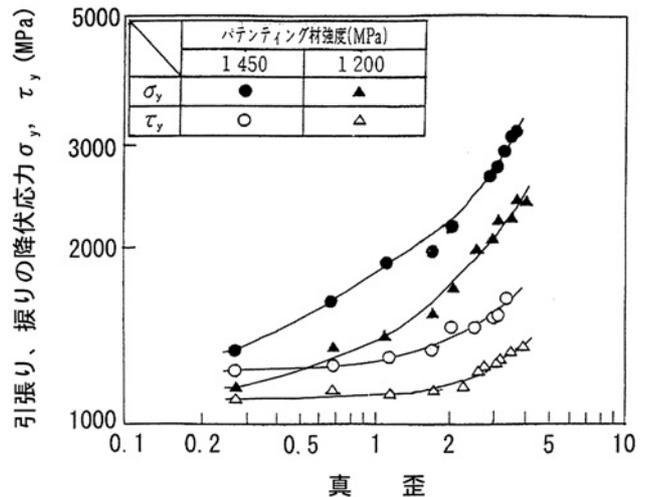


図4 引張り降伏応力と捻り降伏応力の伸線量の増加に伴う変化

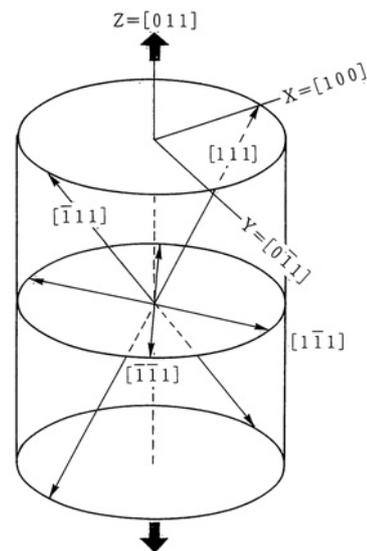


図5 $\{011\}$ 繊維集合組織を持つワイヤの $\langle 111 \rangle$ すべり方向

筆者は、「ワイヤの伸線軸に対して直角な $\langle 111 \rangle$ すべり方向で始まる変形に、粒間のcompatibility維持の変形が追従することが難しいと、伸長した粒界を挟む領域にねじり変形に伴う引張り応力に加えて新たな引張り応力が重畳して作用する。このとき粒界を挟む領域の破壊強度が低下していると、この引張り応力によって粒界近傍に割れが生じ、これがデラミネーションに至る。compatibility維持変形が容易に追従できるか否かは、伸線軸に直角な方向における変形開始応力と、compatibility維持変形において最も大きな力を要する伸線軸方向における変形開始応力の差に支配される、差が大きいほどデラミネーションが発生しやすい。割れは、ねじりに伴う引張り応力に対して直角に傾いた粒界が存在し、かつcompatibility維持変形が最も難しい粒界3重点近傍に発生する」と考えている。

この仮説では、伸長した粒界を挟む領域の破壊強度が低下していることがもう一つの条件になるが、その可能性が高いことは以下の解析からうかがうことができる。図6は横山らによる結果で、ワイヤの伸線軸に直角な方向の特性の伸線工程での変化が解析されている。伸線加工量が増加し、強度も増加するのに伴い、伸線軸方向の絞り値（図中の縦目）は低下していないのに直角方向の絞り値（図中の横目）は著しく低下し、真歪2の伸線加工を行ったワイヤでは、降伏後最高強度へ到達する前にほとんど塑性変形することなく途中破断するまでに延性が劣化している¹⁰⁾。

この考えに基づくと、パテンティング材強度を高く取り、小さな伸線加工歪で強度を確保した材料の方が、伸線軸に直角な方向の降伏応力と平行な方向の降伏応力の差が小さいので、デラミネーションが発生し難かったと説明することができる。また、伸線中あるいは伸線後の時効によってデラミネーションが発生しやすくなるのは、加工硬化している伸線軸方向の降伏応力のみが増加し、異方性が増すためと理解される。

繰り返すと、「伸線軸に直角なすべり方向の降伏応力と平行なすべり方向の降伏応力の差、すなわち力学特性の異方性を小さくすることが、デラミネーションの抑制に有効である」と結論される。なお、伸線工程における現象であるが、compatibility維持変形はワイヤ特有のwavyな変形組織を決めるほどに重要なものである⁹⁾。

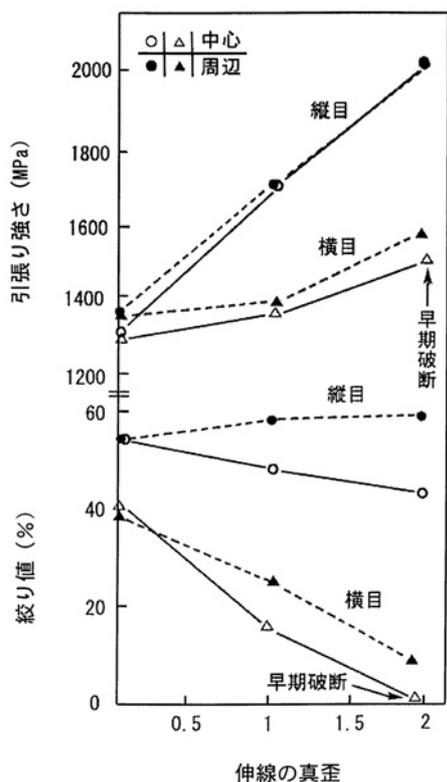


図6 ワイヤの伸線軸方向に対して直角な方向の絞り値の伸線量の増加に伴う変化¹⁰⁾

5 180キロワイヤに採用されたデラミネーション抑制手法

明石海峡大橋のメインケーブルの180キロ級ワイヤ、および工事用のキャットウォークロープの200キロ級ワイヤの開発では、デラミネーションを抑制する手法として伸線加工量の増加によらないで強度を確保するという方法が採用された。すなわち、パテンティング材の強度を増加させる方法と、亜鉛めっきの際の強度低下を抑える方法である。

図7にパテンティング材の強度の増加に対する合金元素の効果をもとめた⁷⁾。Crはセメントイトラメラ間隔の微細化、Siは固溶体硬化、Vは析出硬化、Cはセメントイト量増とラメラ間隔の微細化効果によって強度の増加に寄与する。図8には、溶融亜鉛めっきの際の強度低下に対するSiとCrの効果を示した⁷⁾。いずれも、450℃加熱段階で起こる板状セメントイトの粒状化を抑制する効果によって強度の低下を顕著

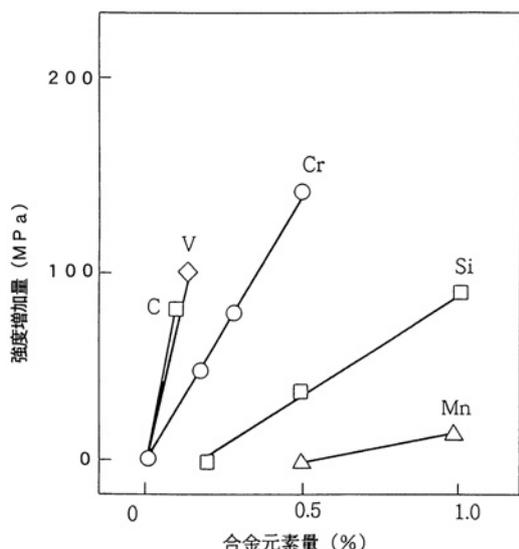


図7 パテンティング材の強度増加に対する合金元素の効果

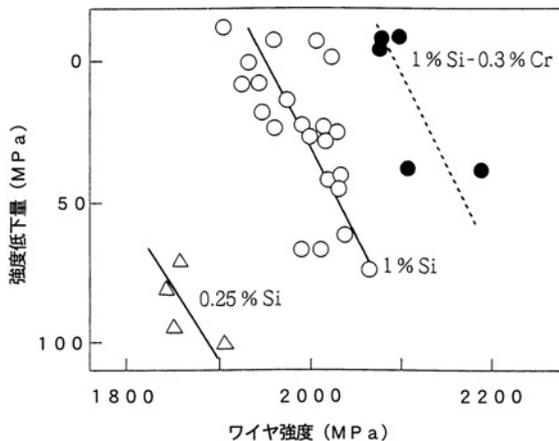


図8 溶融亜鉛めっき工程におけるワイヤ強度の低下に対する合金元素の効果

に抑える。なお、Shimizuらによればセメントの粒状化自体がデラミネーションの発生に不利に作用する⁶⁾。

180キロ級ワイヤにはSiが0.9%添加されている。160キロ級ワイヤの0.25%から0.9%への増加によってパテンティング材の強度を100MPa増加させ、めっき時の強度低下を100MPa減らすこととによって、伸線加工量を増加させることなく、200MPaの強度増加に成功している。一方、200キロ級ワイヤでは、Cを180キロワイヤの0.78%から0.88%へ、Siを亜鉛めっきに影響が出ない限界の1.2%へ増加させ、さらにこれにCrがパテンティング処理時間上許容できる限界の0.3%添加されている⁷⁾。

このように、いずれのワイヤも強化法の最適化を手段にして、その中でベストの組成設計を行ったものである。これ以上の合金設計の余地は少なく、残されているのはCをさらに1%超へ増加させるくらいであるが、図7から明らかなように大きくは期待できない。すなわち、「力学特性の異方性は現状並にとどめ、その中で合金組成と熱処理の最適化によってワイヤ強度の増加をはかる」という冶金学的手法、あえて言えば消極的な方法に頼る限り、橋梁ケーブルワイヤの強度は頑張ってもあと200MPaの増加を図るのも簡単ではない、220キロクラスが限界であろうことが理解される。

6) どういう抑制手法が考えられるか

以上に述べてきたことから、2,000MPaという強度レベルを大きく超えるためには、伸線加工量を大幅に増加させる以外に方法はなく、そのためには「力学特性の異方性を積極的に解消する」方法を見つけ出すことが必須となる。

ここでヒントになるのが、1) 側面を拘束しない圧縮試験で、伸線加工と同じような大歪の加工を行ったときの試験片の形状に関する知見⁹⁾と、2) デラミネーションの発生に及ぼすワイヤ径の影響に関する知見⁸⁾である。

円柱の側面を拘束しないで大歪の圧縮試験を行うと、断面形状はきれいな円形でなくなり、凸凹が現れることが知られている⁹⁾。これは、側面の拘束がないので、表層の結晶粒はおのおの最も変形しやすい方向へ変形した結果である。ワイヤは、円孔を持つダイスを通して伸線される。このことは、ワイヤの場合、表層近傍の結晶粒は円孔を通る過程で強制的に円形形状になるように変形させられていること、すなわち、円周方向に沿う強制変形を受けていることを意味している。この強制変形において活動するのは、伸線軸に対して直角なすべり方向である。そうすると、表層近傍域では伸線軸に対して直角なすべり方向が加工硬化されていることになるが、このことは、小川らがワイヤの表層を研磨によって除去した実験で確認している³⁾。従って、表層域では、伸線軸に平行

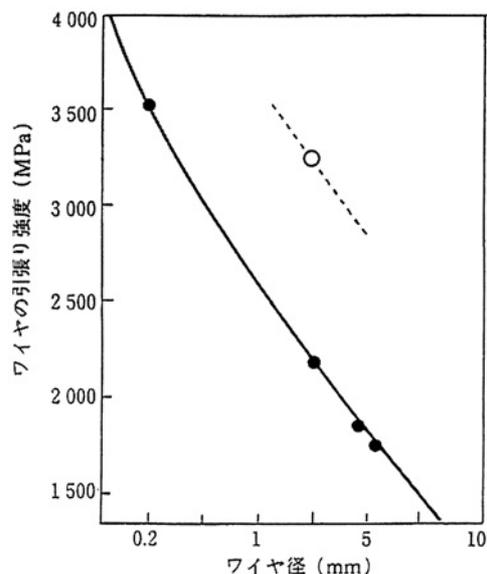


図9 デラミネーション発生限界強度とワイヤ径の関係 (●印はローラー加工なし材、○印はローラー加工材)

な方向の降伏応力と直角な方向の降伏応力の差が小さくなっていることになる。この強制変形は、表層の結晶粒が対象になるので、同じ結晶粒径のパーライト組織から出発し、同じ減面率で伸線されたワイヤであれば、ワイヤ径の大小を問わず同じ大きさの領域で起きていると考えられる。ねじり試験では表層から中心に向けて負荷応力は直線的に減少するので、ワイヤ径が小さくなるほど、表層の強制変形の影響が消える領域での作用応力は小さくなる。このことが、ワイヤ径が細くなるほどデラミネーションの発生限界強度が高くなる原因であると考えられることができる。図9は、ワイヤ径とデラミネーション発生限界強度の関係である。2mm径のワイヤでは2,300MPa程度であった限界強度が、0.2mmのワイヤでは3,500MPa程度にまで著しく増加している。この議論は、たとえば最表層の1結晶粒のみが円周方向に強制変形させられていると考えると分かりやすい。

以上の事実は、ワイヤの円周方向に加工を加えることがデラミネーションの抑制にきわめて有効であることを教えている。そこで、そろばん玉のようなローラーをワイヤに押しつけて回転させるという方法で、ワイヤの円周方向に沿って加工を加えることを試みた¹¹⁾。結果を図9に示した。ワイヤ径は2mmであるが、2,300MPaであったデラミネーション発生限界強度は著しく増加し、3,000MPaを超えた。

7) おわりに 強度はどこまで上げられるか

以上デラミネーション発生機構に関する仮説に基づいて、橋梁ケーブル用ワイヤの強度の増加法を検討し、2mmとい

う細径のワイヤではあるが、3,000MPaという強度を実現することが可能であることを紹介した。図9から判断すると、こういう手法を用いれば、ワイヤ径5mmで、2,000MPaを大きく超えて2,500MPaをも超える強度を実現することも不可能ではない、というのが現時点での筆者の見方である。

課題は異方性の解消を可能にする加工技術の開発である。冶金的には、まず粒界の破壊強度を理解すること、そして伸線工程ではCがセメントイトからフェライトへ溶出し、さらにフェライトもセメントイトも極微細粒化することが知られているが¹²⁻¹⁴⁾、この現象と破壊挙動の関係を理解することである。

パーライト鋼の伸線によって製造されるワイヤは、元来切り欠き脆化や水素脆化にたいして高い抵抗力を持っているが、さすがに強度が2,500MPaに近づくと心配になる。ただ、遅れ破壊が最も問題となるボルトと違って、ワイヤには応力集中部はなく負荷応力も引張り強さの1/2程度であることを考えると、それほど心配する必要はないのかも知れない。疲労も死荷重が全荷重の95%以上にも達するので死活的な問題になることはなからう。

以上、高強度化の鍵を握るデラミネーション発生機構に関する仮説をベースにして、ケーブルワイヤの高強度化の可能性を展望した。仮説が新たな飛躍の種を生み出すことにながしかの役割を果たせたかと思っている。しかし、さらに高い強度を目指すためには、デラミネーション発生機構に関する理解を一段と深めることが求められる。ここで紹介した仮説には、実証すべき多くの問題があるが、これからの研究の一助になれば幸いである。

この記事をもとめるにあたって、多くの研究者の報告を参考にさせていただいた。中でも、新日鐵鉄鋼研究所の浅野巖之(現日鐵テクノリサーチ)、樽井敏三、大橋章一の各氏らと進めた180キロワイヤの研究と、物質・材料研究機構の寶野和博、松岡三郎の両氏らによる超高強度ワイヤの基礎研究

によるところが大きい。記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 高橋稔彦：水曜会誌，23 (1999)，26.
- 2) 落合征雄，西田世紀，大羽 浩，川名章文：鉄と鋼，79 (1993)，1101.
- 3) 小川陸郎，金築裕，平井 洋：神戸製鋼技報，35 (1985)，63.
- 4) Y. Kanetsuki, Y. Hirai and R. Ogawa：ISIJ Int.，29 (1989)，687.
- 5) J. J. Heizmann, A. Tidu, B. Bolle and L. Peters：Wire J. Int.，32 (1999-7)，150.
- 6) K. Shimizu and N. Kawabe：ISIJ Int.，41 (2001)，183.
- 7) 高橋稔彦，樽井敏三，今野信一：鋼構造論文集，1 (1994)，119.
- 8) 高橋稔彦：日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会シンポジウム ヘテロ構造の制御と特性，(1998)，7.
- 9) W. F. Hosford, Jr.：Trans AIME，230 (1964)，12.
- 10) 横山忠正，山田凱朗，木下修司：鉄と鋼，63 (1977)，S673.
- 11) たとえば、高橋稔彦，浅野巖之：特願昭60-214977，(1985)
- 12) T. Tarui, T. Takahashi, S. Ohashi and R. Uemori：Iron & Steel Maker，21 (1994)，25.
- 13) M. H. Hong, W. T. Reynolds, Jr., T. Tarui and K. Hono：Metall. Mater.，30A (1999)，717.
- 14) K. Hono, M. Ohnuma, M. Murayama, S. Nishida, A. Yoshie and T. Takahashi：Scripta mater.，44 (2001)，937.

(2001年8月29日受付)