



溶接性に優れる高強度鋼線の開発

泉田 寛*・清水 健一・高村 伸栄
下田 泰広・桃 澤 理・村 井 照幸

Development of High-Strength Steel Wire with High Weldability—by Hiromu Izumida, Kenichi Shimizu, Shinei Takamura, Yasuhiro Shimoda, Osamu Momozawa and Teruyuki Murai—High-carbon steel wires, such as piano, hard-drawn, or oil-tempered wire, are used for automotive and electronic parts. Despite their outstanding advantages in strength, ductility, and fatigue resistance, these wires are susceptible to fracture due to the brittle as-quenched martensite structure formed by welding. To overcome this problem, we have developed a high-strength steel wire that consists of a bainitic matrix phase to enhance weldability, by adding carbide former elements to low-carbon steel. The developed wire features 1) a finely recrystallized bainite phase in place of the brittle martensite phase after welding treatment, 2) a work hardening behavior and tensile strength equal to and 3) a softening resistance superior to that of a piano wire, 4) a low degradation in the tensile strength (approx. 4%) after welding, and 5) a fatigue limit equivalent to that of a piano wire (after 2×10^6 rotational bending). Sumitomo (SEI) Steel Wire Corp. has been providing the wire and expects even wider applications.

Keywords: steel wire, low carbon, high weldability, high strength, bainite phase

1. 緒言

1-1 開発のコンセプト 自動車部品や家電部品に用いられる高炭素鋼線^{*1}（ピアノ線^{*2}、硬鋼線）、オイルテンパー線等はいずれも強度、韌性、耐疲労性に優れるが、溶接時に焼入組織（マルテンサイト相^{*3}）を形成しやすく、韌性低下の結果、所謂焼割れが生じる可能性が高い。また熱処理などを組み合わせて溶接できた場合も、溶接時の熱影響を受け、溶接部周辺で強度低下を起こす可能性が有る。即ち一般に鋼において高強度と溶接性はトレードオフの関係にあり、この問題を解決する為、接着剤やろう付け等、他の接合方法を用いたり、部品点数を増やし、溶接を避ける形で組み込む方法が採られている。

当社は溶接時の熱影響を受けても、焼入れによる韌性低下が起こらず、強度低下の少ない高強度鋼線为目标として、低炭素鋼をベースとして炭化物析出元素を添加、更に母相をベイナイト相^{*4}とした鋼線を開発した。本報告では、開発材の溶接性向上メカニズムを明らかにし、その特性について述べる。

2. 成分設計

表1に開発材の成分を示す。本材料は通常のピアノ線、硬鋼線と較べて、C量を0.2%に低減し、焼入性を低減している。また、強度、韌性等、機械的性質向上を目的とし、Mn増量とCr添加を行っている。

表1 開発材の化学成分

	C	Si	Mn	Cr
開発材	0.20	0.86	1.54	0.94
(比較材) ピアノ線 B 種	0.84	0.21	0.70	—

(mass%)

3. 熱処理の適正化

図1に一般的なピアノ線、硬鋼線の製造工程を示す。溶解・鍛造された鋼片は熱間圧延され線材となる。その後、伸線加工性を向上させ、所要強度、韌性を得るために熱処理を行い、金属組織の均質化を施した後、伸線加工を行い、必要な線径を得ている。開発材に関しても、同様の製造工程を想定しており、その要求特性を満たすためには熱処理が必要である。

開発材の熱処理条件を確立するため、恒温変態図 (TTT diagrams) の作成を行った。実験ではオーステナイト化温度を900℃として、空冷、鉛浴、溶融塩浴等を用いて恒温



図1 ピアノ線、硬鋼線の製造工程

変態時の組織観察を行い、その結果を基に作成した恒温変態図を図2に示す。図2より明らかなように、開発材ではピアノ線や硬鋼線などに用いられる高炭素鋼と比較して、炭化物生成元素であるCrを多く含む為、変態曲線が長時間側に移行しており、その変態開始に要する時間及び変態が終了するまでの時間が長くなっている。特に550℃～700℃で起こるパーライト^{*5}変態には長時間を要し、最短でも6～7分ほど必要となっている。それに対し、ベイナイト相を得るには比較的短時間で変態が終了する(420℃で約20秒)ことが確認できた。

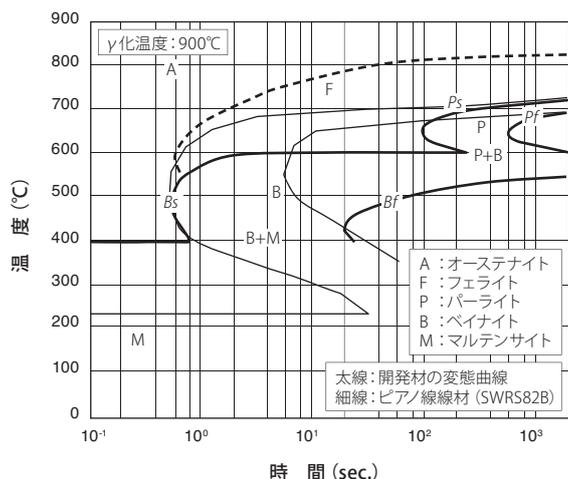


図2 開発材の恒温変態図

当社のこれまでの研究によって、ベイナイト鋼線においても、パーライト鋼線と同等の強度、耐疲労性を有することが分かっている⁽¹⁾。そこで本開発材では量産を考慮し、ベイナイト化熱処理を採用することとした。本報告では図1の製造工程において、熱処理条件420℃×20秒のベイナイト化熱処理を選択し、試作した開発材の評価結果を示す。

4. 溶接時の金属組織変化

溶接時の熱影響を想定し、加熱冷却処理を行った開発材の組織写真を写真1に示す。供試材はベイナイト化熱処理後の線材を厚さ0.5mm程度にスライスしたものをを用いており、所定の温度で1分間加熱後に放冷し、研磨後ピクリン酸エタノール腐食を施し金属組織の観察を行った。実験では400℃～1100℃まで100℃刻みで加熱したものを観察した。写真は組織変化に関して代表的なものを示している。

写真より分かるように、400℃から700℃加熱までは高温化に伴い、セメンタイト^{*6}の球状化が促進され、800℃以上ではフェライト相の再結晶が起こっている。いずれの組織においても焼入組織(マルテンサイト相)は見られなかった。800℃加熱では球状、粗大化したようなセメン

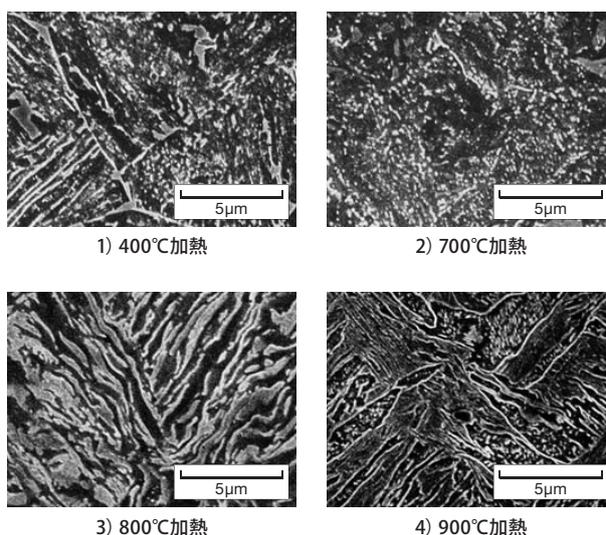


写真1 開発材金属組織への熱影響

イトが多く見られるが、900℃以上ではセメンタイトは一度完全固溶し、再結晶化後に粒界及び粒内に析出しているものと思われる(ベイナイト組織)。得られた再結晶組織はより微細組織に炭化物が分散した構造となっており、溶接において比較的短時間に加熱冷却が行われる場合、高い硬度の保持が期待できる。

図3に溶接時の熱影響を想定し、加熱冷却処理を行った開発材と比較材としてピアノ線線材(JIS線材規格SWRS82B; C:0.81%)の硬度変化を示す。組織変化と同様に、開発材は700℃加熱で最もセメンタイト球状化が促進され、900℃以上の加熱で再結晶とセメンタイト再析出が起き、強度が向上することが確認できる。また比較材ピアノ線線材においては900℃以上の加熱を施すとき硬度がHv:800以上まで急激に上昇するが、これは焼入組織の形成に依るものであり、韌性の低下が起こっていることを示している。

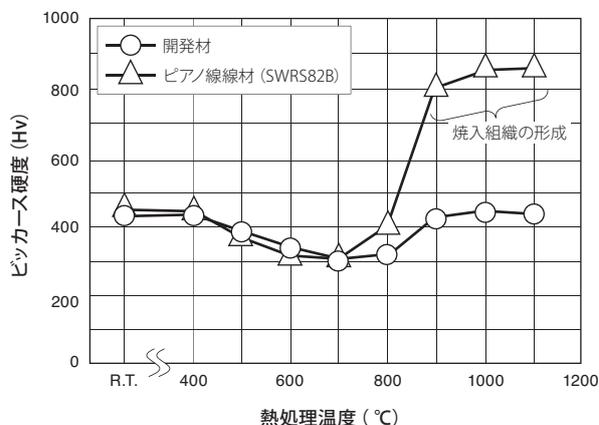


図3 溶接想定熱影響による開発材の硬度変化

5. 開発材の特徴

5-1 鋼線試作結果（加工硬化率とテンパー特性）

図4に開発材を伸線した際に得られた加工硬化率を示す。比較材として、同一の試作設備にて加工した、一般的な高強度鋼線であるピアノ線B種（JIS 鋼線規格 SWP-B；線材 SWRS82B を伸線加工したもの）のデータを示す。

図4から明らかなように、開発材の加工硬化率はピアノ線B種とほぼ同等の加工硬化率であり、到達する強度もほぼ同等であることが分かる。

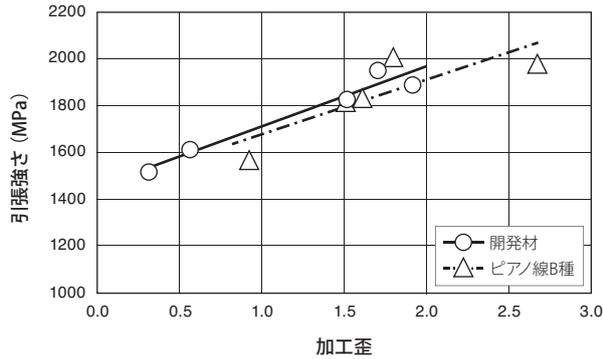


図4 開発材伸線時の加工硬化率

図5に伸線した開発材（ $\phi 2.8\text{mm}$ ）に対して加工の歪取り焼鈍を施した際の引張強さ（テンパー特性）を示す。開発材、比較材共に焼鈍温度の上昇と共に回復が起り、引張強さが低下する傾向にある。またピアノ線B種が350°C以上の焼鈍によって引張強さが低下するのに対し、開発材は350°C付近で引張強さの極大を示しており、焼鈍時の軟化抵抗が高いことが確認できる。これはピアノ線の金属組織であるパーライト組織が350°C以上の熱処理によって球状化するのに対し⁽²⁾、開発材ではCrを主とする炭化物析出が起こる為と思われる。

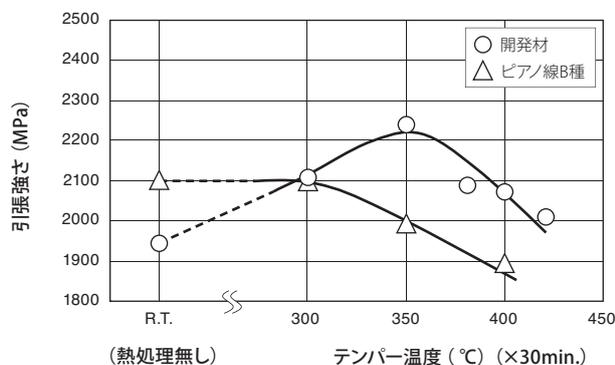


図5 開発材（鋼線、 $\phi 2.8\text{mm}$ ）のテンパー特性

5-2 溶接性

開発材ワイヤー（線径0.45mm）を用い、溶接後（通電加熱溶接→放冷）の引張試験を実施した。線径が細いため、研磨による疵の影響を懸念し、バリ取りは未実施のもので評価を行った。

写真2に試験時の外観写真（代表的なもの）、表2に結果を示す。数値は試験数n=3の平均値である。

引張試験の結果、溶接した供試材は溶接部より0.2mm～0.5mm離れた溶接に因る熱影響部で破断した。その熱影響による強度低下は少なく引張強さで50MPa（1491MPa→1441MPa、約4%の低下）となった。破面はカップアンドコーン形状であり、靱性が高いものと判断できる。

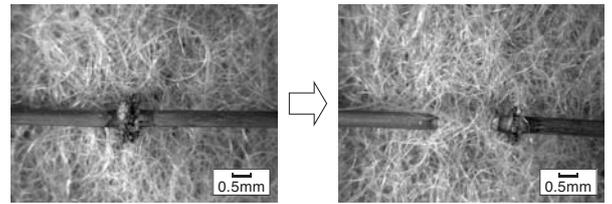


写真2 溶接部引張試験前後の外観写真

表2 溶接部引張試験結果

供試材	引張強さ (MPa)	破断箇所
溶接部無し	1491	—
溶接部有り	1441	溶接部近傍（0.5mm程度）の熱影響部

写真3は破断部断面の金属組織観察と硬度測定を行った結果である。前述の写真1の組織観察に見られたように溶接部では微細な再結晶ベイナイト相、熱影響部では一部セメントライトが球状化したベイナイト組織が観察された。硬度測定の結果、熱影響によって硬度低下が起こった部位に

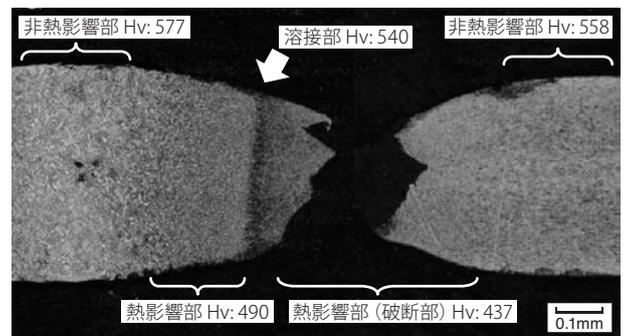


写真3 溶接部引張破断部断面の金属組織と硬度

において破断が起こったと考えられる。但し溶接部そのものは比較的高い硬度を有し、且つ熱影響による硬度低下は短い範囲においてのみ見られることから、結果として引張破断時の強度低下は小さくなったものと思われる。

5-3 疲労特性 開発材の疲労強度予測を目的として線径φ0.45の伸線加工材の疲労試験を実施した。

供試材の引張特性を表3に示す。試験はハンター式回転曲げ疲労試験を行い、 2.0×10^6 回を疲労限とした。

疲労試験結果を図6に示す。比較材であるピアノ線B種の疲労限が650MPaであるのに対し、開発材はおよそ625MPaとほぼ同等の高い疲労限を有することが確認できた。

表3 開発材供試材の引張特性

	線径 (mm)	引張強さ (MPa)
開発材	0.45	1491
(比較材) ピアノ線B種	0.50	2593

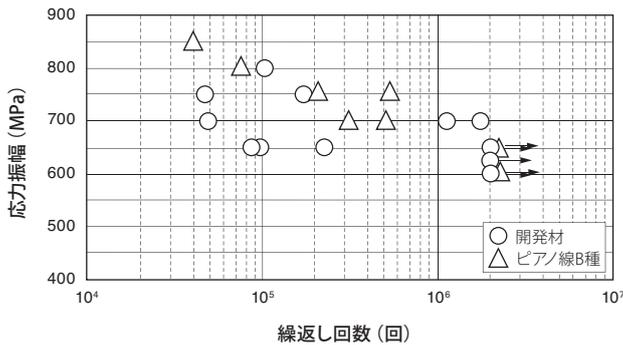


図6 開発材の疲労限 (2×10^6 回、回転曲げ疲労試験)

6. 結 言

以上の結果をまとめると、

- ・溶接可能な高強度鋼線開発を目的に、焼入性の低い低C鋼をベースにCrによる析出強化を行ったベイナイト鋼線の試作に成功した。
- ・開発材の恒温変態図の作成により、開発材の熱処理として $420^\circ\text{C} \times 20$ 秒のベイナイト化処理選択が可能となった。
- ・溶接想定加熱冷却処理を行った後、組織観察と硬度測定を実施した。開発材では焼入組織の発生は観察されず、溶接時高温下に曝された場合は微細に再結晶したベイナイト相となることが判明した。
- ・開発材の伸線加工時の加工硬化率はピアノ線同等であり、得られる引張強さもほぼ同等である。
- ・開発材の伸線材のテンパー特性を調べたところ、ピアノ

線が 350°C 以上の熱処理によって軟化するのに対し、開発材の引張強さは 350°C で極大をとり、その軟化抵抗も高いことが判明した。

- ・溶接した開発材の引張試験を実施したところ、破断部は溶接による熱影響部を起点としており、その強度低下は約4%程度であった。
- ・開発材の回転曲げ疲労強度を測定したところ、 2×10^6 回での疲労限は625MPaであり、ピアノ線とほぼ同等であることが判明した。

本材料は溶接性、高強度、そして高靱性を併せ持つ材料であり、住友電工スチールワイヤー(株)では、自動車部品用として一部出荷を開始している。適切な溶接法を選択し、熱影響による強度低下を抑制できれば、今後、非常に幅広いアプリケーションへの適用が期待できる。

用語集

※1 鋼線

鋼(はがね)とは鉄を主成分にする合金を指し、鉄の持つ性能(強度、靱性など)を人工的に高めたものである。一般に炭素の含有量0.3%~2.0%以下の炭素鋼の意。鋼線とは鋼を圧延もしくは伸線加工などで線形状に加工したもの。

※2 ピアノ線

ピアノ線(ピアノせん)とは、炭素鋼線の一種であり、主にパーライトを母相とする金属線。高い強度と耐疲労性を有する。

※3 マルテンサイト相

マルテンサイト相は炭素鋼を高温から急冷(焼入れ)する事によって得られる、非常に硬くて脆い組織。溶接時、割れの起点となる。

※4 ベイナイト相

同じく鋼の組織の一種。鋼を高温より冷却する際、パーライトが形成される温度とマルテンサイトが形成され始める温度との間の温度域で形成される準安定相であり、鉄炭化物がセメンタイトの形を取って微細に析出しているフェライトからなる。

※5 パーライト相

パーライト相とは、鋼の組織の一種。共析反応によってできた層状の組織であり、非常に薄い板状のフェライト(常温での鉄の金属組織)とセメンタイトが交互に並ぶ構造を持つ。鋼線とした場合、伸線加工によって、上記層状組織が伸線方向に並び、繊維分散強化された集合組織が形成される。

※6 セメントタイト

鉄炭化物 (Fe_3C) の組織。非常に硬く (ビッカース硬度 : 約 1340) 、脆い。金属と非金属の化合物であり、セラミックスの一種である。

参 考 文 献

- (1) H. Izumida, N. Kawabe, "WIRE JOURNAL INTERNATIONAL", p.80-83 (June 2001)
- (1) 河部望、泉田寛 他、SEI テクニカルレビュー第 157 号、p.110-115 (2000)

執 筆 者

泉田 寛* : アドバンストマテリアル研究所
メタル材料研究部 主席
自動車部品用鋼線、合金線の開発に従事



清水 健一 : アドバンストマテリアル研究所 メタル材料研究部
グループ長 工学博士

高村 伸栄 : 住友電工スチールワイヤー(株) 開発企画室 室長

下田 泰広 : 住友電工スチールワイヤー(株) 精密ワイヤー技術部 主査

桃澤 理 : 住友電工スチールワイヤー(株) 精密ワイヤー技術部 主査

村井 照幸 : 住友電工スチールワイヤー(株) 取締役技師長
シニアスペシャリスト

*主執筆者