



1500MPa 級高強度ばね用オイルテンパー線 新鋼種の疲労特性と特性向上メカニズム

Fatigue Properties and Improvement Mechanisms of 1500 MPa-Class-High Strength Oil Tempered Wire

泉田 寛*
Hiromu Izumida

紺谷 博人
Hiroto Kontani

栗田 善貴
Yoshiaki Natsumeda

工藤 大輝
Daiki Kudo

カーボンニュートラル、省資源化への要求の高まりから、自動車のエンジン、クラッチ等の主要な駆動部品に用いられるばね製品も小型・軽量化が求められており、特に要求特性とされる疲労強度に関連してばね材料の高強度化が必要となっている。従来、高疲労強度化≒高強度化（高引張強さ）という方針で材料開発が進められてきたが、あらゆる金属材料の中でも最も高い疲労強度を求められるばね材料では頭打ちになってきており、材料の使用環境などを考慮した新たなアプローチが必要となりつつある。本稿では、成分設計から製造条件確立まで新規に実施した、高強度オイルテンパー線新鋼種の性能と、その特性向上メカニズムについて報告する。

Due to the increasing demand for carbon neutrality and resource saving, there is a demand for smaller and lighter spring products used in automobile engines, clutches, and other parts. As a result, it is necessary to increase the strength of spring materials. Conventionally, materials have been developed with the policy of increasing fatigue strength equating to increasing hardness. Spring materials, which require the highest fatigue strength of all metal materials, are reaching their limits, and a new approach is needed in consideration of the conditions of use. This paper describes the performance of a newly designed high-strength oil-tempered wire product.

キーワード：ばね用鋼線、オイルテンパー線、疲労強度、窒化特性

1. 緒言（開発背景）

近年の環境問題への意識の高まりから、乗用車も従来の高出力・高性能の追求から軽量化・低燃費の追求へと、技術の方向性の転換が明確になってきている。但し、そこに用いられる構造用材料への要求特性は変わらず、高強度（高引張強さ）、高疲労強度である。乗用車の主要な構成材料である鉄鋼の理論強度（引張強さ）はとても高く、10000MPa を優に超える⁽¹⁾。そのリサイクル性の高さから、ライフサイクルアセスメントの観点で鋼製造時のCO₂排出量はアルミニウムの1/5、CFRPの1/10程度であり⁽²⁾、高強度オイルテンパー線^{*1}の比強度は軽量高強度材であるTi合金をも上回る。即ち高強度鋼の活用は、環境問題を考える上で有効な解となり得るものと言える。

高強度ばねは、特に高強度要求の強い自動車用トランス

ミッション用途に用いられる。このとき得られる高効率動力伝達と軽量化により、燃費向上に大きく貢献する。

図1に高強度オイルテンパー線がオートマチック車のトランスミッションに使用される場合の要求特性を示す。通常、高強度ばねに要求される特性は4つあり、1つは強度（引張強さ）、2つ目は疲労強度（疲れ強さ）、3つ目に耐へたり性^{*2}、4つ目に高靱性（低疵感受性）が挙げられるが、ここでは特にあらゆる金属材料の中でも最高レベルの疲労強度が求められる。

図2に住友電工独自の高強度オイルテンパー線開発の経緯を示す。当社では1981年に自社溶解材での弁ばね用SiCr鋼オイルテンパー線の製品化に成功して以来、材料設計技



図1 高強度オイルテンパー線の要求特性

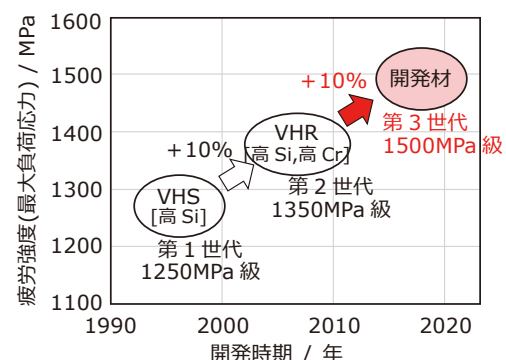


図2 住友電工の高強度ばね用オイルテンパー線開発の経緯

術の開発を推し進めてきた⁽³⁾。更に90年代の半ばには疲労強度をより高く向上させた高Si含有型Si-Cr鋼オイルテンパー線“VHS”（1250MPa級）の開発を行った⁽⁴⁾。このとき、従来の高強度材料≒高疲労強度を有するばねという概念からの脱却を行っている。開発コンセプトは2つあり、1つは製品ばねにおける高強度化と高靱性化、もう1つは結晶粒微細化による疲労強度向上である。

2000年代に入って、VHS以上の高疲労強度鋼線として高Si、高Cr含有鋼オイルテンパー線“VHR”（1350MPa級）の開発を行った⁽⁵⁾。ここではVHSの開発コンセプトを推し進め、更に顧客でのばね製造工程を意識した開発が行われた。VHRの開発においては、現行高強度鋼の強度と靱性はそのままに、高強度ばねの特性を決定する工程である窒化処理時にばね表面の窒化が促進され、内部硬度が低下しない材料を目指した。

次世代（第3世代）新鋼種は、これから縮小していく内燃機関駆動系市場においてさえも、確実に顧客の要望に応え得る最高強度材とするために、現行高強度材であるVHR（以下、現行高強度材と記述）よりも更に10%疲労強度向上を狙った1500MPa級高強度ばね用オイルテンパー線を目指すこととした。

2. 製品開発のコンセプト

図3に一般的な圧縮コイルばねの製造工程を示す。

ばね成形後、過剰な歪を除去すべく歪取り焼なましを施し、表面硬化を狙った窒化処理^{*3}、そして圧縮残留応力付与とばね表面の平滑化を目的としたショットピーニング^{*4}を行い、更に焼なましを施している。先述の1500MPa級の疲労強度とは、これら加工や熱処理の履歴を経たのちに得られるべきばね性能であり、このことが材料設計を非常に困難なものにしている。

図4は、ばね使用時最大応力が発生するコイル内側の表面近傍の内部応力状態を示している。ばねの実用条件ではばね表面に最も高い負荷応力がかかるため、疲労破壊はばね表面近傍で起こることが多い。そのため窒化処理により表面硬度を上げ、さらにショットピーニングにより表面に圧縮残留応力を与え、実質応力を低減させる製造方法が、特に高強度ばねにおいて採られている（図3）。しかし、一方

ではね内部は窒化処理の熱影響に因って硬度が低下してしまい内部疲労破壊の起点となり得ること（図4）、また高強度化によって靱性が低下し（疵感受性が高まり）、介在物^{*5}を起点とする疲労破壊を招くという問題がある。そこで新鋼種の開発において1) 窒化性（表面硬度）の向上、2) 耐熱性（降伏応力）の向上、3) 高靱性の確保の3つを目標とした。

表1にばね疲労強度への影響因子と、それらを考慮した向上手段を示す。表中①が強度因子、②が靱性因子である。①強度因子は主に鋼の化学組成に依って大きく変化するが、その内のばね弾性限に関しては、鋼線の連続熱処理工程（オイルテンパー工程、以降“OT工程”と記す）の条件に依って向上可能と考える。また②靱性因子も成分に大きく依存するものであるが、これもOT工程条件に依って、更なる向上が可能と考えた。即ち、開発材は従来の成分設計のみに依らず、新規に材料の化学組成に適した熱処

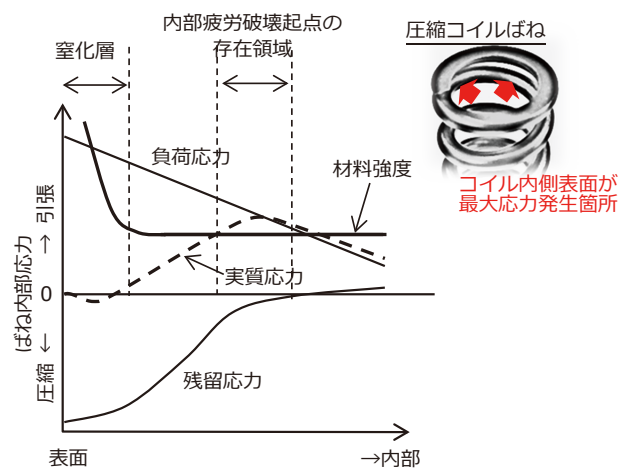


図4 ばねの内部応力状態（コイル内側表面近傍）

表1 ばね疲労強度への影響因子と、向上手段

ばね疲労強度への影響因子		向上手段	アプローチ
①	窒化性（表面強度）	成分	従来手法 *但しばね工程考慮
	窒化後内部強度	成分	
	ばね弾性限（0.2%耐力）	熱処理	新規開発手法
②	靱性（介在物感受性）	成分・熱処理	新規開発手法

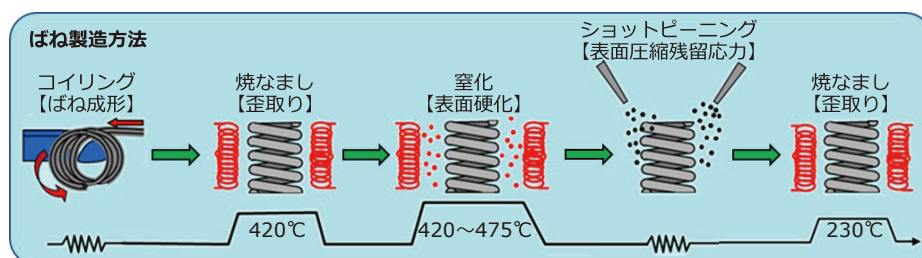


図3 一般的な圧縮コイルばねの製造工程

理方法を確立することで、ばね疲労強度の向上を目指すものとした。

3. 材料設計と製造条件確立

3-1 材料設計

表2に開発材と現行高強度材、そして参考としてSiCr鋼汎用材（JIS規格SWOSC-V）の化学組成を示す。供試材は高炉メーカーとの協業の下、量産試作を行い、現行高強度鋼と同様の工程を経て線材を入手した。表中、SiCr鋼汎用材はJIS規格を示している。

表2 新鋼種量産試作材の化学組成 [mass%]

鋼種	C	Si	Mn	Cr	V	他
開発材	0.65	1.86	0.37	1.77	0.19	—
現行高強度材	0.65	2.21	0.55	1.17	0.14	Co:0.2
SiCr鋼汎用材 SWOSC-V	0.51 ~0.59	1.20 ~1.60	0.50 ~0.80	0.50 ~0.80	—	—

今回、新鋼種を開発するにあたり、前述のようにばね製品になった際の特性向上を目指し、化学組成ならびに製造条件の確立を行った。

まず化学組成については、現行高強度鋼と基本的な設計思想は同様とし、ベースとなるSi-Cr鋼の強化成分Si、Cr、Vを増量したシンプルな組成となっている。

化学組成中Siは、フェライト中に固溶し高温での軟化抵抗を高める元素であり、上述ばね製造時の熱処理においても材料の強度低下を抑制する効果を有する。その結果として(1) OT工程における焼戻し温度の高温化：金属組織中のマイクロ欠陥の低減が可能となり靱性が向上、ばね加工性の向上が得られる。(2) ばね製造における歪取り焼なましの高温化：ばね成形で導入された過剰な歪除去が可能となり、耐へたり性が向上する。また疲労破壊の起点となる、金属組織中のマイクロ欠陥の低減により疲労強度が向上する。(3) ばね製造における窒化処理の高温化：窒素が拡散しやすくなるため窒化深さが大きくなり、かつ、窒化されない、より内部の熱影響部においても硬度低下が小さく、疲労強度が向上する。但し、Siは酸素と結びつきやすい特性を有することから、過剰な添加は、その酸化傾向に因ってばね表面に濃化し、内部への窒素拡散を阻害する傾向にある。また有害な非金属介在物の構成元素でもあるため、現行高強度鋼より若干量低減させている。

次にCr量を高めた狙いを述べる。Crは代表的な炭化物生成元素であり、その炭素との親和性の高さから鋼中の炭化物微細化を促進させ^{(6),(7)}、軟化抵抗を高める効果を有する。また窒化物形成元素でもあることから、窒化処理時、硬化を促進させる効果も持つ。窒化物分散析出により、表面付近に圧縮残留応力が発生するため、疲労強度を大きく向上させる。

さらにV量を高めた狙いについて述べる。Vもまた炭化物生成元素であり、鋼中において比較的高温で安定な微細炭化物を形成するため、結晶粒微細化や軟化抵抗増加に効果がある。また窒化処理時にフェライトの格子間で窒化物を形成することで、繰り返し応力によって生じるすべりを抑制するため、疲労強度向上に寄与する。

MnもSi同様、脱酸剤として添加される。但し、本開発材のように多量のSiが添加されている場合、その効果は限定的であり、かつ熱間圧延時やパテンティング処理時にベイナイトやマルテンサイト等の過冷組織を生成する傾向を有し、伸線加工性低下を招くため、現行高強度鋼よりも低減させた。

上記のように、本開発材は従来の高硬度、高強度の追求による強化元素添加&増加の足し算傾向の成分調整から脱却し、ばね製品での特性向上を目指していることを特徴とする。

3-2 製造条件確立

オイルテンパー線最終工程はOT工程であり、この工程における熱処理条件の適正化が、オイルテンパー線の製品性能を決定する。図5に熱処理条件適正化の仮説を示す。前章でばね疲労強度への影響因子と、向上手段について述べた。新規に熱処理方法を開発することでばね弾性限と靱性を向上させる必要がある。弾性限向上には3つの方法がある。1つは結晶粒微細化（Hall-Petch則）、2つ目は未固溶炭化物低減、3つ目は微細炭化物分散（Orowan機構）である。靱性向上には2つの方法がある。1つは未固溶炭化物低減、2つ目は微細炭化物分散である。即ち要求される特性向上には共通項が存在し、図中に示すようにOT工程において高温短時間加熱を実施することで、それらを満たすことが可能と考えた。

本開発では、この高温短時間熱処理を達成するために、開発材専用のOT工程条件（加熱温度や保持時間等）を新規に設定することとし、材料の作り込みを実施した。表3に開発材の旧 γ 粒サイズを粒度番号^{*6}で示す。開発材は現行高強度材よりも多くの炭化物生成元素を含むため、未固

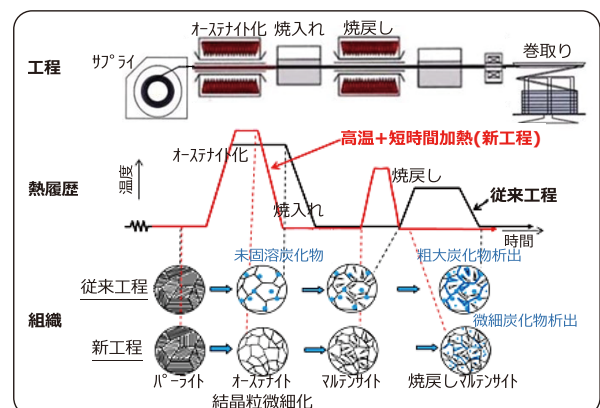


図5 開発材のばね疲労強度向上のための熱処理方法仮説

溶炭化物低減のため加熱温度の高温化を行っており結晶粒粗大化を招きやすいが、その加熱をごく短時間に行うことで、粒成長を抑制し微細な組織を得ることができている。

表3 開発材の金属組織サイズ

鋼種	粒度番号
開発材	12.5
現行高強度材	12.4

4. 結果

4-1 引張特性

表4に開発材と現行高強度材の引張特性 (n=3) を示す。参考としてSiCr鋼汎用材のJIS規格を併記する。

表4 開発材の引張特性

鋼種	線径 [mm]	引張強さ [N/mm ²]	絞り [%]	伸び [%]
開発材	3.50	2158	45.6	5.2
現行高強度材	3.50	2153	49.5	6.0
SiCr鋼汎用材 SWOSC-V	3.50	1860~2010	≥ 45	—

今回、評価を行うにあたり、線径3.5mmの試作材を用いた。開発材はばね加工性を考慮し、引張強さを約2150 N/mm²に調整し試作した。引張試験の結果、絞りは現行高強度材よりも低い値をとるものの、45%以上という高い靱性を確保している。

4-2 テンパー特性 (焼なまし軟化抵抗)

開発材および現行高強度材においてはばね加工後の歪取り焼なましを想定し、大気中400℃~475℃、30分の条件で低温焼なまし後に引張試験を行った結果 (n=3) を図6に示す。図中、引張強さを折れ線グラフ、絞りを棒グラフ

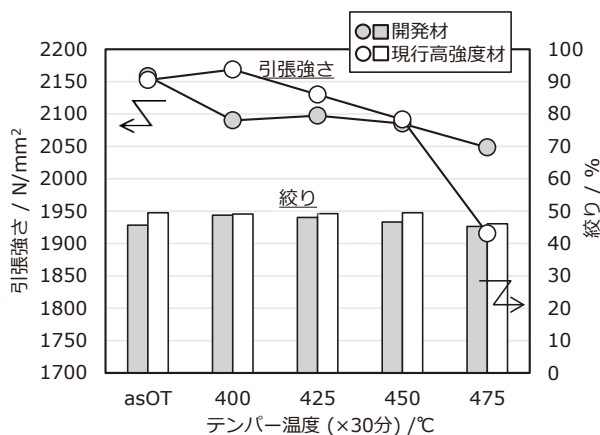


図6 開発材のテンパー特性 (焼なまし軟化抵抗)

(第2軸) で示している。焼なまし後、開発材の引張強さは425℃で最も高くなる。現行高強度材と引張強さを比較してみると、425℃までは現行高強度材の方が高く、450℃で両者同等となり、475℃で開発材の方が高くなり、開発材が高い軟化抵抗を有することが判る。このことから比較的低温側でSi、高温側でCr、Vが軟化抵抗増加に寄与するものと思われる。開発材の絞りは400℃で最も高いが、400~475℃で大きな差異は無く、高温で安定して高い靱性を保持することが確認できる。

4-3 耐へたり性

次に開発材の耐へたり性を評価するため、コの字試験を実施した。図7に試験方法概略を示す。

コの字試験とは、ワイヤーを「コ」の字状に曲げ、一端を固定し、他端に一定角度の捻りを加えることではばね使用時に想定されるせん断歪を付与し、加熱された炉中にて一定時間保持する試験法である。試験終了後、炉外に試料を取出し、せん断歪から開放した際に残留する捻れ角から残留せん断歪量を測定する。この残留せん断歪が小さいほど、高い耐へたり性を有すると言える。ここでは一般的なダンパーばねの過酷な使用環境を想定した評価方法として、コの字に加工したのち430℃×3.5時間の窒化相当熱処理を施し、室温でのせん断応力1200MPa相当の歪を加えた後、165℃の炉中にて24時間保持を行った。結果 (n=3) を表5に示す。

開発材は現行高強度材と比較して、高い耐へたり性を有することが確認できた。

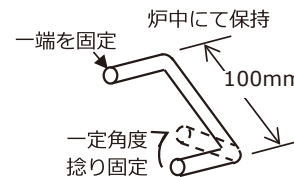


図7 コの字試験方法概略

表5 開発材の耐へたり性

鋼種	線径 [mm]	熱処理	負荷応力 [MPa]	残留せん断歪 [%]
開発材	3.50	430℃ ×3.5時間	1200	0.252
現行高強度材	3.50	//	//	0.287

4-4 疲労特性

開発材の疲労特性を評価するため、中村式回転曲げ疲労試験^{*7}を実施した。サンプルは、ばねでの疲労特性を予測するため420℃×30分の焼なまし処理を実施し、窒化処理での熱影響に因る内部硬度の低下を考慮し430℃×3.5時間の熱処理を実施後、疲労試験を実施した。得られたS-N線図を図8に示す。

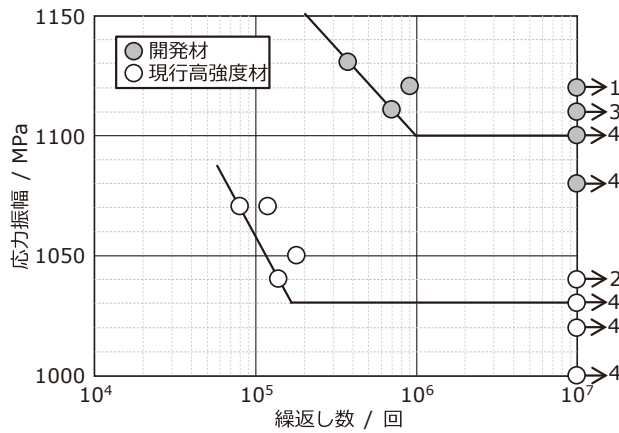


図8 開発材の疲労特性

開発材は現行高強度材の疲労強度が1030MPaに対し、1100MPaと約7%近くの向上が得られていることが確認できる。

4-5 窒化特性

開発材の窒化特性を評価するにあたり、各サンプルに420℃×30分の焼なましを実施後、表面の酸化皮膜（ばね加工性を向上させるため付与）をショットブラストで除去し、430℃×3.5時間の窒化処理を行った。

図9に窒化処理前の表面近傍の硬度分布 (n=4) を示す。開発材、現行高強度材ともに、最表面から深さ0.02mm程度の範囲で脱炭による硬度低下が確認できる。窒化前の段階では開発材と現行高強度材の硬度は引張強さ同様、大きな差異はなく、若干現行高強度材の方が高硬度であることが判る。

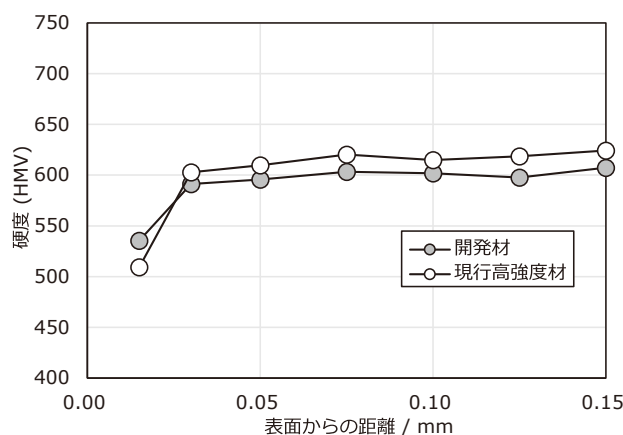


図9 開発材および現行高強度材のワイヤー (asOT) 表面近傍の硬度分布

次に窒化処理後の表面近傍の硬度分布 (n=4) を図10に示す。

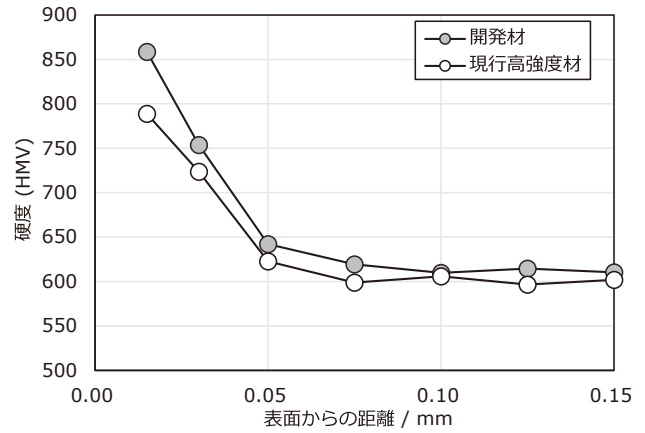


図10 開発材および現行高強度材の窒化後の表面近傍の硬度分布 (430℃×3.5時間)

ここでは開発材が特に表面近傍において高硬度であることが確認できた。窒化の熱影響によって、開発材、現行高強度材共に深さ0.10mm以上の内部ではヴィッカース硬度で約600であることを考慮すると、開発材の表面近傍は、現行高強度材のそれと較べて、窒化による硬度上昇が大きく、より深い範囲まで硬化が促進されていることが確認できる。

5. 結 言

以下に本開発材の結果をまとめる。

- ・最高強度1500MPa級オイルテンパー線開発を実施。特に顧客でのばね製造工程を考慮した開発を目指した。
- ・新鋼種の開発において1) 窒化性 (表面硬度) の向上、2) 耐熱性 (降伏応力) の向上、3) 靱性を確保することを目標とした。
- ・開発材は従来の成分設計のみに依らず、新規に材料の化学組成に適した製造条件を確立することで、ばね疲労強度の向上を目指すものとした。
- ・開発材評価の結果、高いレベルで強度と靱性の両立を確認した。焼なまし等熱処理時の軟化抵抗も、現行高強度材を上回る高い特性を示している。
- ・耐へたり性評価の結果、開発材は現行高強度材よりも高い特性を有する。
- ・窒化処理に因る熱影響 (内部硬度低下) を考慮の上、疲労試験を実施。開発材は現行高強度材よりも約7%高い疲労強度を有することが確認できた。
- ・窒化特性を評価した結果、開発材は硬度上昇が高く、深い範囲まで窒化を促進させる効果を有することが確認できた。

本評価結果より、開発材はばね評価時に現行高強度材より更に高い疲労強度が期待できると考える。

開発材は既に一部の顧客にて御評価頂き、1500MPa級次世代高強度材として、その御期待に応えつつある。今後、

更に用途毎に改良を施し、市場の多くの期待に応え得る材料としていきたい。

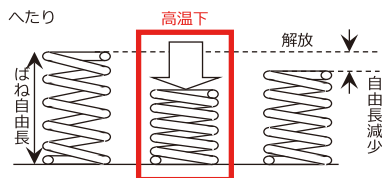
用語集

※1 オイルテンパー線

焼入れ焼戻しの連続熱処理を施すことで、金属組織を焼戻しマルテンサイトとした調質鋼の線。高（疲労）強度、高耐熱性を特長とする。

※2 耐へたりに性

自動車部品に用いられるばねは100℃超えの温度下において使用されることも多い。温間使用時、応力負荷によってばね自由長を減ぜられ、本来の復元力を失ってしまう現象をへたりにという。



※3 窒化処理

鋼材の表面を硬化させ、疲労特性や耐摩耗性を高くする表面処理法。鋼材を例えばアンモニアガス中で400℃～500℃程度に加熱し、鋼材内部に窒炭化物を析出させることによって非常に硬い表面を得る。オイルテンパー線を用いた高強度ばねの加工法として一般的であり、高い疲労強度が得られる。

※4 ショットピーニング

ばね製造工程の1つで、無数の鋼鉄あるいは非鉄金属の小さな球、もしくは鋼線を線径程度に短く切断したものを高速で噴射し、ばね表面に衝突させることで、塑性変形による、表面の平滑化や加工硬化、圧縮残留応力の付与を図る処理である。疲労強度の向上が得られる。

※5 介在物

製鋼時脱酸剤を用い、鋼中酸素と結びつけ、できた酸化物を除去するが、全て捕りきれず鋼中に僅かに残存したもの。非金属介在物。成分調整による低融点化を行い、圧延時軟質化・無害化を行う等の対策が実施されている。

※6 旧γ粒径、粒度番号

近年、材料の結晶粒径微細化が開発のキーワードになりつつある。そこでオイルテンパー線においては、焼入れにおける加熱時オーステナイト化した金属組織の結晶粒径（旧γ粒径）を議論することが多い。旧γ粒径は組織観察によって測定される。粒度番号とは結晶粒径を規定する指標のことで次のように定義されている（JIS 0551に準拠）。

$$b = 2^{(n+3)}$$

n；粒度番号、b；材料断面1mm²あたりに存在する粒数

※7 中村式回転曲げ疲労試験

中村式回転曲げ疲労試験とは、4点曲げに依って一定の曲げモーメントを作用させた鋼線サンプルを回転させ、鋼線表面に繰返し曲げ応力を負荷させる、応力比-1の疲労試験である。一般にばね用鋼線の評価では弾性限以下の応力で1×10⁷回の繰返し回数において未折損であった最大応力を疲労強度（疲労限）とする。実際のばねは、低温焼なまし、もしくは窒化後に使用される。このため、鋼線の疲労試験もできるだけばねの実使用に近い状態での特性を把握するため、ばね加工後の低温焼なましを想定した熱処理（420℃×20分）や窒化想定熱処理（430℃×3.5時間）、そして表面粗さの影響を除去する目的でショットピーニングを選択的に鋼線に施し、試験を実施している。

参考文献

- (1) 田代均、最強のピアノ線、まてりあ、第35巻、第11号、p.1177-1181、(1996)
- (2) World Auto Steel, Life Cycle Assessment: Good for the Planet, Good for the Auto Industry.
- (3) 泉田寛、松本断、村井照幸、SEIテクニカルレビュー第188号、p.20-25 (2016)
- (4) 河部望、泉田寛、村井照幸、山尾憲人、松本断、山口浩司、藤本佐代志、SEIテクニカルレビュー第159号、p.90-95 (2001)
- (5) 藤野善郎、塩飽孝至、山尾憲人、河部望、村井照幸、SEIテクニカルレビュー第169号、p.68-73 (2006)
- (6) A. Hultgren and K. Kuo, Mem. Sci. Rev. Met., 50, p.847. (1953)
- (7) T. Sakuma, N. Watanabe and T. Nishizawa, Trans. JIM, 21, p.159-168 (1980)

執 筆 者

泉田 寛* : 特殊線事業部 部長補佐
部門スペシャリスト



紺谷 博人 : 鈴木住電ステンレス(株)



栗田 善貴 : 特殊線事業部



工藤 大揮 : 特殊線事業部



*主執筆者