

低合金高強度懸架ばね用鋼

Low-alloyed High-strength Spring Steel for Suspension Spring

| | | |
|--------------------|------------------|----------------|
| 鈴木 崇久* | 久保田 学 | 小澤 修司 |
| Takahisa SUZUKI | Manabu KUBOTA | Shuji KOZAWA |
| 宮本 裕嗣 | 吉岡 隆史 | 青野 通匡 |
| Hirotsugu MIYAMOTO | Takashi YOSHIOKA | Michimasa AONO |

抄 録

環境規制対応のため、自動車の軽量化による燃費向上が重要課題となっており、自動車用懸架ばねにも高強度化、軽量化が強く求められている。近年、ばね加工技術の発展により、規格鋼 SAE9254 を従来強度よりも高強度で使用することが海外を中心に検討されているが、高強度化に伴い靱性や耐水素脆性など懸架ばねとして必要となる機械特性が低下するため、更なる高強度化には鋼材自体の開発が必要である。そこで、課題となる靱性、耐水素脆性を従来の合金懸架ばね鋼より少ない合金添加量で改善した“低合金高強度懸架ばね用鋼”を開発した。開発鋼の成分設計コンセプトと、冷間加工ばね用ワイヤとしての機械特性評価結果を報告した。

Abstract

For the environmental regulations, weight saving of automotive for the fuel efficiency improvement is strongly demanded. Suspension spring for automotive is also required to save the weight by strengthening the spring steel. In recent years, conventional spring steel SAE9254 has been tried to use under higher strength condition than before, supported by the improvement of spring manufacturing technologies. But some properties needed for suspension spring steel, such as toughness and resistance for hydrogen embrittlement, are found to short under such high strength conditions. Now, for farther strengthening of suspension spring, stronger spring steel itself is indispensable. Then, we developed the Low-alloyed High-strength Spring Steel focusing on the toughness and resistance for hydrogen embrittlement, saving alloying element than former developed alloyed spring steels. In this paper, we introduce the chemical composition concept of the Low-alloyed High-strength Spring Steel, and show the mechanical properties of spring steel wire for cold coiling springs.

1. 緒 言

1.1 自動車用懸架ばねの概要

自動車用懸架ばねは、自動車のサスペンション装置の中に設置されるばねであり、車体重量を支えると同時に、車輪が受ける路面からの衝撃を吸収緩和する機能を有する。小型軽量化が指向される一般乗用車のサスペンション装置では、ばね鋼をコイル形状に成形した懸架ばねが主流になっている。懸架ばねのサイズは車両重量にも依存するが、ばね線径 8~18mm、コイル径 100~200mm、コイル高さ 400~500mm であり、懸架ばね 1 個当たりの重量は 1~2kg 程度である。

懸架ばねに求められる特性には、走行時の振動荷重に対する疲労耐久特性、長期にわたり車両重量を支持してもばね形状に永久変化が生じにくい耐へたり性、路面凹凸などに起因する衝撃荷重で折損しないための靱性、などが挙げられる。これらの機械特性を満足するため、自動車用懸架ばね鋼は、JIS ばね鋼の SUP7 (SAE9260) や SUP12 (SAE 9254) に代表される 0.5%前後の炭素量を有する中炭素高 Si 鋼を焼入れ焼戻し処理し、高強度かつ高降伏点の焼戻しマルテンサイト組織として使用されることが多い。

懸架ばねの製造方法は、焼入れ焼戻し処理の方法により“熱間巻き”プロセスと“冷間巻き”プロセスに大別される。熱間巻きプロセスでは、ばね鋼線材を高温でコイル形状に

* 八幡技術研究部 主幹研究員 工博 (前 室蘭技術研究部 主幹研究員) 福岡県北九州市戸畑区飛幡町 1-1 〒 804-8501

してから焼入れ焼戻し処理を行う。冷間巻きプロセスでは、ばね鋼線材を直線状に矯直した状態で焼入れ焼戻し処理を施し高強度ばね鋼ワイヤを作成した後、高強度ワイヤを室温でコイル形状に成形する。さらに冷間巻きプロセスではコイル成形時に付与された加工残留応力を除去する目的でひずみ取り焼鈍を行う。熱間巻き、冷間巻きで製造したコイルは共に、大変形を付与して降伏点を向上させるセッチング処理、疲労特性改善のために表層に残留応力を付与するショットピーニング処理を行い、表面保護のために塗装被膜処理を行って最終部品である懸架ばねとなる。

このうち冷間巻きは、ばね形状の自由度、精度が高く高機能な懸架ばねを製造できるメリットがある。ただし、高強度ばね鋼ワイヤを冷間でコイル成形するため、高強度ばね鋼ワイヤには高強度と同時に高延性も求められる。また、直線状態での焼入れ焼戻し処理と、加工後のひずみ取り焼鈍の、合計2回の熱処理を行うため、各工程での熱処理条件の最適化も必要である。

日本製鉄(株)は、鋼材成分設計、熱処理最適化などのノウハウを活用して、冷間巻きを前提とした高強度懸架ばね鋼の開発を重点推進している。

1.2 自動車用懸架ばね鋼の要求特性

自動車用懸架ばねは、ばね最大せん断荷重 (τ_{max}) 980 MPa 級以上が主流であり、鋼材に要求される強度は引張強度 (TS) で 1800 MPa 以上になる。さらに、冷間巻きのための延性や、高い靱性も求められる。これらの要求強度を満足する鋼材として、近年では JIS SUP12 (SAE9254) が幅広く利用されている。JIS SUP12 はシリコンクロムばね鋼とも称され、代表的な化学組成は 0.54C-1.4Si-0.7Mn-0.7Cr である。炭素量が高いため焼入れ焼戻し処理によって高強度のマルテンサイト組織が得られ、さらに焼戻し軟化抵抗を高める Si と Cr を添加することで、引張強度 1800 MPa 級となる焼戻し温度を高く取ることができる。高温の焼戻しにより降伏点と弾性限を高めることが可能で疲労特性や耐へたり特性に優れ、靱性も良好である。元々は米国規格の SAE 9254 を JIS に取り込んだ鋼種であり、SAE9254 は自動車用懸架ばね鋼の世界標準となっている。

また自動車用懸架ばねは車両の足回りに使用されるため腐食が問題となる。自動車用懸架ばねは上述のように焼入れ焼戻し処理で高強度を確保するため、耐腐食性を確保するための表面処理として焼戻し温度より高温に加熱される溶融亜鉛めっき処理などは行われず、懸架ばね完成後に樹脂被膜を塗装するに留まる。このため、懸架ばねを長期間使用するうちに、走行時の飛び石衝突や繰り返し変形によるコイル端部の摺動により樹脂被膜塗装が部分的に損傷すると、損傷部から腐食が進行して、懸架ばねの寿命が低下する可能性がある。寿命低下の要因として、腐食時に鋼材に進入する水素による水素脆化の一種である遅れ破壊と、

腐食ピット形成に起因する腐食疲労特性の低下が懸念されている。

腐食に伴う水素脆化(遅れ破壊)現象はよく知られている。一般に、焼戻しマルテンサイト組織の鋼材では、高強度であるほど水素脆化に対する感受性が高いとされる。懸架ばね鋼は上述のように高強度の焼戻しマルテンサイト組織であり、さらに懸架ばねは自動車が静止状態でも車体重量に相当する荷重が負荷されているため、腐食により鋼材中に水素が侵入する場合には遅れ破壊のリスクが増大する。特に懸架ばねの軽量化のためにばね鋼を高強度化する際には、遅れ破壊への対策が必要である。

また腐食に伴い懸架ばね表面に腐食ピットが形成される。この腐食ピットは懸架ばねの繰り返し変形時の応力集中サイトとなるため、疲労寿命を低下させる。なお、懸架ばねが圧縮変形を繰り返す際に、コイル素線はねじり変形を受ける。この疲労寿命低下を抑制する対策としては、腐食ピット形成の抑制と腐食ピットの無害化がある。前者は鋼材の耐腐食性向上が重要であり、後者は腐食ピットによる応力集中の影響の緩和が重要である。久保田らは、ショットピーニングにより圧縮残留応力を付与することで、圧縮残留応力の深さと同程度の深さの腐食ピットを無害化できることを示している。加えて腐食時の水素侵入が腐食疲労に悪影響を及ぼすが、圧縮残留応力によりピットを無害化できれば疲労に及ぼす水素の影響は顕在化しないことも示している。このように、腐食疲労特性については、鋼材以外にもばね加工方法による改善が期待できる。

1.3 自動車用懸架ばね鋼の動向

自動車用懸架ばねは一般的な自動車用鋼と同様、自動車の燃費改善などを目的に、ばねの高強度化が志向されている。懸架ばねのニーズ動向を踏まえ、日本製鉄もこれまで、各種合金元素を活用し、最大せん断荷重 τ_{max} : 1200 MPa ~ 1250 MPa 級のばねとして使用できる合金懸架ばね鋼を開発してきた。

しかし近年、ワイヤ熱処理方法の改善や、ばね設計やショットピーニング処理、塗装などのばね加工技術の改善により、規格懸架ばね鋼 SAE9254 をより高強度のばねに適用するケースが増加している。この結果、合金懸架ばね鋼のコストパフォーマンスが相対的に低下しており、低コスト高機能の合金懸架ばね鋼が要望されている。一方で、HV化・EV化の潮流の中で自動車の車両重量は増加傾向であり、増加する車重支持のために、自動車用懸架ばね鋼には一層の高強度化が求められている。

この状況を受けて、合金懸架ばね鋼の①省合金によるコスト競争力向上、②高強度化によるパフォーマンスの改善、のために、“低合金高強度懸架ばね鋼”を開発した。

2. “低合金高強度懸架ばね鋼”の設計指針

低合金高強度懸架ばね鋼は、冷間巻きプロセスを想定し、高強度化により課題となる冷間加工性、韌性、耐遅れ破壊特性の改善に主眼を置いた。コスト競争力向上のため、従来の合金懸架ばね鋼で使用されてきた高価な合金元素である Mo や V を使用せず各特性を高いレベルで両立させるため、各特性の発現機構に基づき合金元素の適正添加を図ると共に、ワイヤ熱処理条件によりマイクロ組織を最適化した。

2.1 高強度・高延性化指針

上述のように、自動車用懸架ばね鋼は高強度と延性、韌性、耐水素脆化特性（耐遅れ破壊特性）を兼備する必要がある。マルテンサイト組織において、焼戻し温度を低下させると強度は上昇するが、一般に延性と韌性は低下する。耐水素脆化特性（耐遅れ破壊特性）の影響因子について、南雲は①水素量、②温度、③材料強度、④材料成分と組織、を挙げており、単純な高強度化は耐水素脆化特性（耐遅れ破壊特性）を低下させること、焼戻し温度の上昇が耐水素脆化特性（耐遅れ破壊特性）を改善することを示している²⁾。

これに従えば、焼戻し温度低下による高強度化は、遅れ破壊特性も低下させると考えられる。よって、自動車用懸架ばね鋼の高強度化には、焼戻し温度を低下させずに高強度が得られる鋼材成分設計が重要である。従来は、Mo や V 等の焼戻し軟化抵抗を高める元素を添加してきたが、これらの合金元素は比較的高価であるため、本開発ではこれらに代わる合金元素を検討した。その結果、自動車用懸架ばね鋼の焼戻し温度域（350～450℃）において高い焼戻し軟化抵抗を発揮する Si と Cr を活用することとした。

2.2 高韌性化指針

ばね鋼の高韌化に関しては、川寄らが JIS SUP12 を用いた炉加熱と高周波加熱の実験を行い、短時間加熱の高周波焼入れによりオーステナイト粒径が微細化して韌性が向上すること³⁾、短時間加熱の高周波焼戻しにより炭化物析出挙動が変化して韌性が向上すること^{4,5)}、を報告している。これを受けて、高韌性化のために高強度ばね鋼ワイヤの焼入れ焼戻し処理は炉加熱では無く高周波加熱処理で行うこととした。さらに、オーステナイト粒径を微細化するため、微量の Ti を添加して、オーステナイト粒成長のピン止め効果を有する Ti 炭窒化物を活用することとした。

2.3 耐水素脆化特性（耐遅れ破壊特性）改善指針

水素脆化（遅れ破壊）は、腐食等により鋼材中に水素が侵入し、その後旧オーステナイト粒界に水素が集積して粒界破壊を誘発する現象である。このため、水素侵入の抑制と、旧オーステナイト粒界の強化が耐水素脆化特性（耐遅

れ破壊特性）の向上に有効と考えられる。

水素侵入の抑制には、水素発生源である腐食の抑制が重要である。電気化学的に鉄よりも貴な Ni や Cu は耐食性の向上に有効であり、これらの元素を活用する。加えて水素のトラップサイトである転位などの格子欠陥の減少も水素侵入の抑制に有効と考えられる⁶⁾。転位密度の低下手段として高温焼戻しは有効であり、例えば松本らは、焼戻しマルテンサイト組織の PC 鋼棒について、低 Si・低温焼戻しと、高 Si・高温焼戻しで同一強度（約 1450MPa）に調質した試験片を用いて耐水素脆化特性（耐遅れ破壊特性）を評価し、高 Si・高温焼戻し材の方が遅れ破壊特性に優れることを示している⁷⁾。

旧オーステナイト粒界には、脆化元素である P（りん）の偏析や、粒界炭化物の析出が起りやすく、これらが旧オーステナイト粒界を弱くする。山崎らは、高強度ボルト用鋼の耐水素脆化特性（耐遅れ破壊特性）改善方法として、V 炭化物による水素トラップサイトの有効性を示すと共に、P 低減による旧オーステナイト粒界への P 偏析の抑制と、高温焼戻し処理による旧オーステナイト粒界炭化物の形態制御も、遅れ破壊特性の改善と粒界破壊の抑制に有効であることを示している⁸⁾。

P 偏析抑制の手法には、P 低減に加えて、旧オーステナイト粒界に P と競合的に偏析する B（ほう素）の活用が挙げられる⁹⁾。B は拡散速度が大きいために P より優先的に粒界に偏析し、P 偏析や粒界炭化物の析出を抑制することで、粒界脆化を抑制する元素として知られている。よって、耐遅れ破壊特性の改善には、P 低減と B 添加も有効と考えた。

3. 低合金高強度懸架ばね鋼の性能

3.1 鋼材成分と焼戻し軟化抵抗

焼戻し硬さに及ぼす Si と Cr の影響を実験室試験で調査した。実験室 150kg-真空誘導溶解炉（VIM）で、表 1 に示す化学成分の鋼材を溶製し、熱間鍛造、切削加工で 16mm 径の丸棒とした。これを電気炉で 950℃ × 15min 加熱後、60℃油中に焼入れ、さらに電気炉で各温度で 30min 焼戻し処理を行った。焼戻し後の丸棒を中心軸を含む断面（L 断面）で切断し、樹脂埋め研磨後、直径の 1/4 位置のビッカース硬さ（HV₁₀：測定荷重 10kgf）を測定した。

図 1 に、各鋼材の焼戻し温度と硬さの関係を示す。1.5Si-

表 1 焼戻し硬さ調査用サンプルの化学組成
Chemical compositions of the sample for evaluation of hardness after tempering

| | C | Si | Mn | P | S | Cr |
|---|------|------|------|-------|-------|------|
| A | 0.55 | 1.51 | 0.70 | 0.001 | 0.001 | 0.70 |
| B | 0.54 | 2.00 | 0.71 | 0.001 | 0.001 | 0.00 |
| C | 0.55 | 2.00 | 0.70 | 0.001 | 0.001 | 0.30 |
| D | 0.56 | 1.99 | 0.71 | 0.001 | 0.001 | 0.71 |

0.7Si (SAE9254 相当) に対し、Si 増量の 2.0Si-0.7Cr は焼戻し硬さが増加しており、HV=550～600 となる焼戻し温度が 10～15℃ほど上昇している。2.0Si で Cr 量を低下させると焼戻し硬さは低下し、HV=550～600 となる焼戻し温度は 2.0Si-0.3Cr と 1.5Si-0.7Cr (SAE9254 相当) が同程度となることを確認した。

3.2 機械特性評価サンプル作製方法

以上の予備検討を踏まえて、焼戻し軟化抵抗の異なる R1 (1900MPa 級) と R2 (2000MPa 級) の 2 水準の開発鋼を溶製した。開発鋼と比較用の規格鋼 SAE9254 の化学成分を表 2 に示す。開発鋼はいずれも 2t-VIM 炉により鋳片を作製後、実機鋼片サイズに分塊圧延し、室蘭製鉄所線材工場にて実機圧延した。R1 は 14.0mm 径に圧延し、12.7mm 径に伸線後、高周波焼入れ焼戻しにより引張強度 (TS)=1900MPa 狙いで調質した。R2 は 16.0mm 径に圧延し、15.0mm 径に伸線後、高周波焼入れ焼戻しにより引張強度 (TS)=2000MPa と 2100MPa 狙いで調質した。比較材として、実炉出鋼の SAE9254 を 13.5mm 径に圧延し、12.0mm 径に伸線後、高周波焼入れ焼戻しにより引張強度 (TS)=1900, 2000, 2100MPa 狙いで調質した。

高周波焼入れ焼戻し後の素材から、機械加工により引張試験片 (JIS 14 号平行部 6mm 径: 図 2)、シャルピー衝撃試験片 (5×10mm サブサイズ 2mm-U ノッチ: 図 3)、遅れ破壊試験片 (平行部 8mm 径, 1mm 環状ノッチ: 図 4) を作製し、各種試験に供した。

3.3 試験方法

引張試験は、ひずみ速度が $0.002 + 0.0004 (s^{-1})$ となるよ

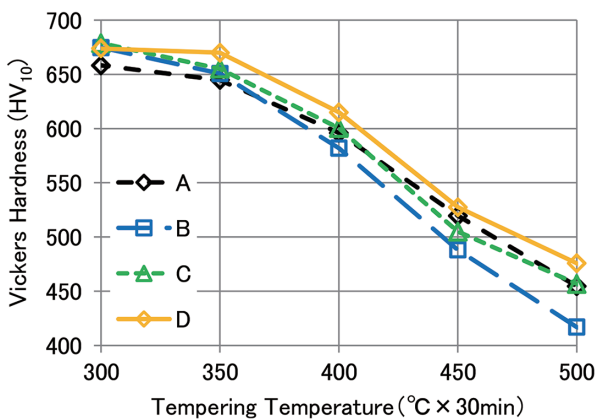


図 1 焼戻し硬さに及ぼす Si と Cr の影響
Effect of Si and Cr on hardness after tempering

表 2 機械特性評価用サンプルの化学組成
Chemical compositions of the sample for evaluation of mechanical properties

| | | C | Si | Mn | P | S | Cu | Ni | Cr | Ti | B |
|--------------------|---------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|--------|
| Developed steel | R1 | 0.50 | 2.02 | 0.50 | 0.005 | 0.005 | 0.25 | 0.25 | 0.29 | 0.069 | 0.0026 |
| | R2 | 0.50 | 2.00 | 0.52 | 0.005 | 0.005 | 0.24 | 0.24 | 0.75 | 0.065 | 0.0021 |
| Conventional steel | SAE9254 | 0.55 | 1.35 | 0.70 | 0.013 | 0.003 | - | - | 0.70 | - | - |

う、クロスヘッド速度を 5.0mm 一定条件で実施した。ひずみの測定には、ゲージ長 30mm のひずみゲージを使用した。シャルピー衝撃試験は、試験機容量 300J のシャルピー衝撃試験機を使用し、室温で実施した。遅れ破壊試験は、一定条件で陰極水素チャージしながら定荷重試験機で定荷重を負荷し、720000s (200h) 耐久する最大荷重 (σ) を測定し、引張強度 (TS) との比を遅れ破壊強度比として評価した。陰極水素チャージの条件は、30℃の pH3.0 硫酸水溶液中で、チャージ電流密度 1mA/cm² とした。

3.4 引張試験結果

図 5 に各強度狙いの評価材の引張強度と 0.2% 耐力を示す。ほぼ狙い通りに、引張強度 1900, 2000, 2100MPa に作り分けることができた。開発鋼の 0.2% 耐力は、引張強度同等の SAE9254 と同等以上であった。

図 6 に各強度狙いの評価材の破断伸びを示す。破断伸びは 1900～2100MPa の全強度範囲において、開発鋼の方が引張強度同等の SAE9254 より良好であったが、特に開

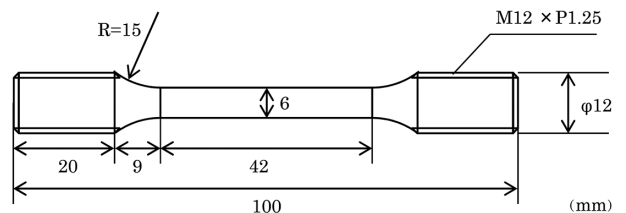


図 2 引張試験片形状
Test piece for tensile test

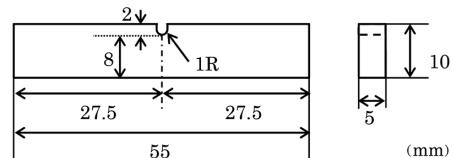


図 3 シャルピー衝撃試験片形状
Test piece for Charpy impact test

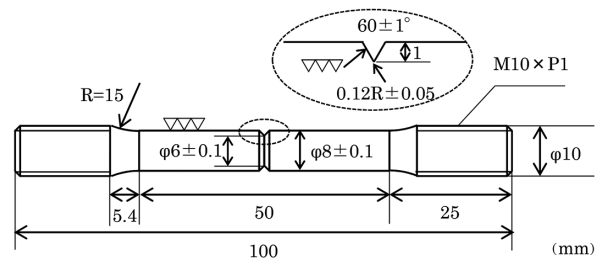


図 4 遅れ破壊試験片形状
Test piece for delayed fracture test

発鋼 R1 が良好であった。

図 7 に各強度狙いの評価材の絞りを示す。絞りは、1900～2100MPa の全強度範囲において、開発鋼の方が引張強度同等の SAE9254 より良好であり、2100MPa まで高強度にさせても絞りの低下はほとんど見られない。

以上より、開発鋼 R1, R2 は 1900MPa 以上の高強度に調質しても、破断伸び・絞りが良好であり、コイルばね成形時の冷間加工性が良好であると推察できる。また 0.2%

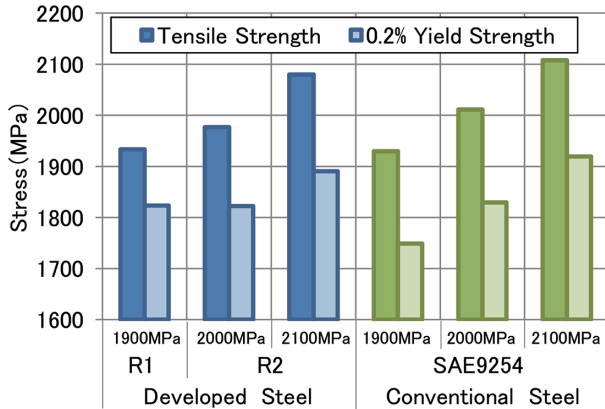


図 5 試験片の引張強度と 0.2%耐力

Tensile strength and 0.2% yield strength of test pieces

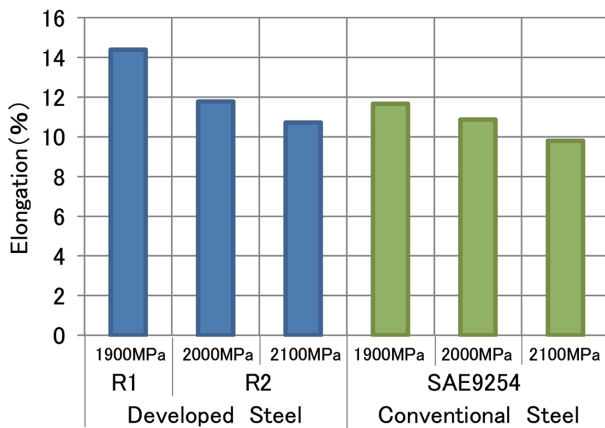


図 6 試験片の破断伸び
Elongation of test pieces

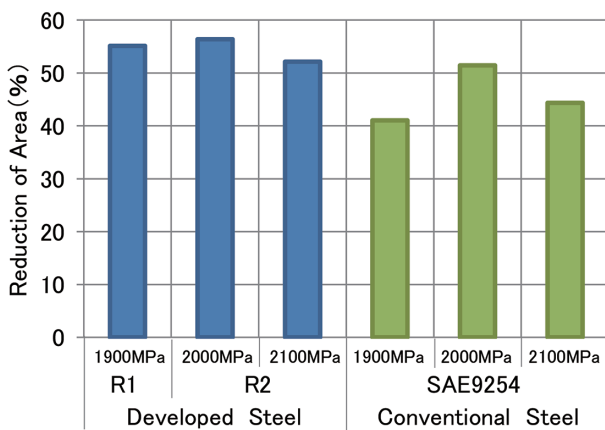


図 7 試験片の絞り
Reduction of area of test pieces

耐力や降伏比についても SAE9254 と同等以上であると言える。

3.5 衝撃試験結果

図 8 に各強度狙いの評価材のシャルピー衝撃値を示す。SAE9254 は引張強度が 1900MPa 級、2000MPa 級では衝撃値は 60J/cm² 程度であるが、引張強度が 2100MPa 級では約 30J/cm² 程度に低下してしまう。これに対し、開発鋼 R1 は引張強度 1900MPa 級で 90J/cm² もの衝撃値を示し、非常に高靱性である。高 Cr の開発鋼 R2 も、引張強度同等の SAE9254 より高靱性であり、さらに引張強度 2100MPa 級でも衝撃値はほとんど低下しない。以上より、開発鋼 R1, R2 は、SAE9254 より強度 - 靱性バランスに優れると言える。

開発鋼の靱性改善機構を解明するために、シャルピー試験片の破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。図 9 に、引張強度 2000MPa 級と 2100MPa 級のシャルピー破面 SEM 観察結果 (ノッチ下 1.0mm 位置) を示す。開発鋼 R2 は、2000MPa 級、2100MPa 級のいずれも微細なディン

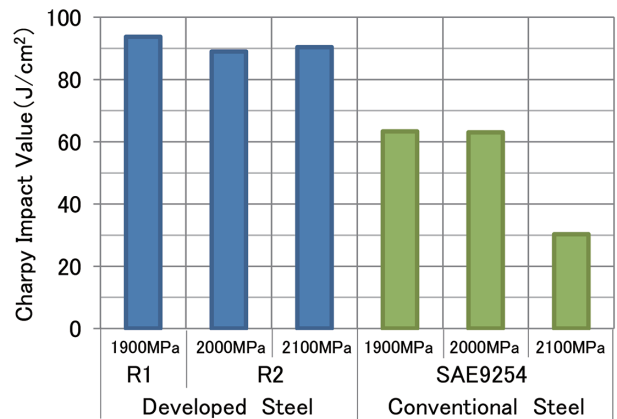


図 8 試験片の衝撃値
Charpy impact value of test pieces

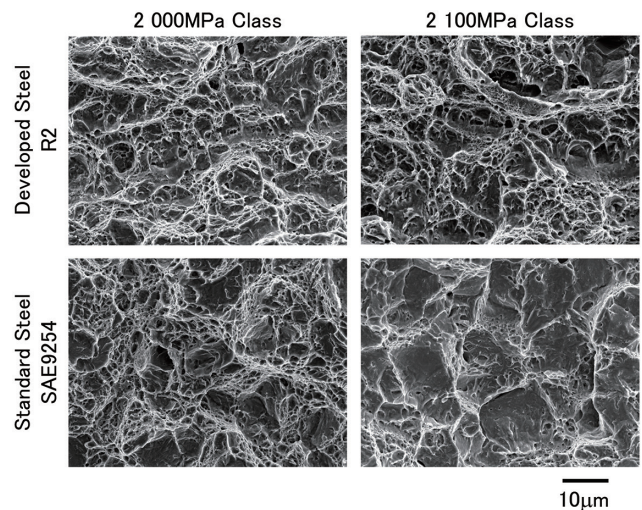


図 9 試験片の衝撃破面形態 SEM 観察結果
SEM images of fractures after Charpy impact test

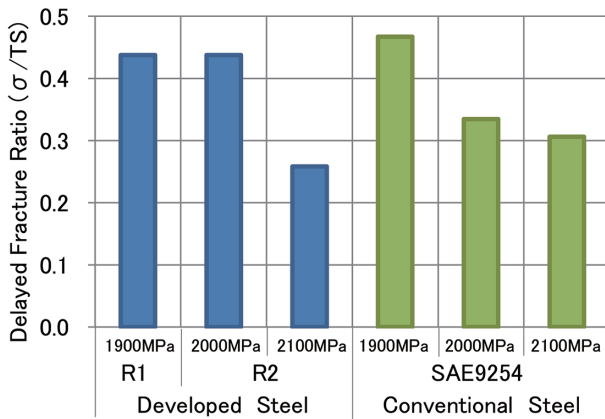


図 10 試験片の遅れ破壊強度比
Delayed fracture ratio of test pieces

プルから成る延性破面であった。一方で、規格鋼の SAE 9254 は、2000 MPa 級は延性的なディンプル破面を示すが、2100MPa 級では粗い粒界破面が主となり、粒界破面の出現が靱性低下の原因であると考えられる。開発鋼では遅れ破壊特性のために B 添加・P 低減で粒界を強化した結果、2100MPa 級に高強度化しても粒界破壊が抑制されたと考えられる。

3.6 水素脆化（遅れ破壊）試験結果

高周波熱処理ワイヤから、平行部 8mm 径の環状ノッチ試験片（ノッチ底 6mm 径）を採取した。水素脆化（遅れ破壊）試験方法には、定荷重試験機で一定荷重をかけながら、電解液として 30℃ の pH=3.0 硫酸を用いて連続陰極水素チャージする方法を採用し、200h で遅れ破壊しない最大の荷重と引張強度の比を“遅れ破壊強度比”として評価した。

図 10 に水素脆化（遅れ破壊）試験結果を示す。SAE9254 は引張強度が 1900MPa 級から 2000MPa 級に強度が上昇すると、遅れ破壊強度比が急激に低下する。一方、開発鋼は、1900MPa 級、2000MPa 級で遅れ破壊強度比が同等であり、2000MPa 級まで高強度化しても遅れ破壊への耐性は低下しないことが確認された。

開発鋼の遅れ破壊特性改善理由は、シャルピー衝撃値と同様に粒界強化による粒界破壊抑制に加えて、開発鋼 R2 は焼戻し軟化抵抗向上により 2000MPa でも焼戻し温度が十分に高く、水素トラップサイトである転位密度を低下させられたことが影響したと考えられる。

低合金条件では、これ以上の焼戻し温度の向上は難しいと考えられるため、更なる耐遅れ破壊特性改善のためには、より多くの合金元素の活用が必要と考えられる。

4. 結 言

懸架ばね高強度化ニーズに対応するため、高強度化で課題となる延性、靱性、耐水素脆性（耐遅れ破壊特性）に優れた低合金高強度懸架ばね鋼を開発した。この開発を通じて、規格鋼 SAE9254 の高強度化の限界、低合金ばね鋼の課題が明らかになると共に、合金活用のメリットも明確になりつつある。自動車の構造変化に伴い、懸架ばねの軽量・高強度化ニーズはさらに高まっており、本開発の知見を基に、懸架ばね鋼の更なる高強度化を目指し、不断の開発活動を継続する。

参考文献

- 久保田学, 鈴木崇久, 平上大輔, 潮田浩作: 鉄と鋼. 100 (8), 974 (2014)
- 南雲道彦: 水素脆性の基礎. 第 1 版. 東京, 内田老鶴舗, 2008, p.219
- 川崎一博, 千葉貴世, 高岡憲久, 山崎隆雄: 鉄と鋼. 73 (16), 2290 (1987)
- 川崎一博, 千葉貴世, 山崎隆雄: 鉄と鋼. 74 (2), 334 (1988)
- 川崎一博, 千葉貴世, 山崎隆雄: 鉄と鋼. 74 (2), 342 (1988)
- 山崎真吾, 平上大輔, 真鍋敏之: 新日鉄住金技報. (406), 37 (2016)
- 松本優, 高井健一, 市場幹之, 鈴木崇久, 岡村司, 溝口茂: 鉄と鋼. 99 (3), 236 (2013)
- 山崎真吾, 久保田学, 樽井敏三: 新日鉄技報. (370), 51 (1999)
- 越智達朗, 間曾利治, 寺本真也, 久保田学: ばね論文集. (57), 1 (2012)



鈴木崇久 Takahisa SUZUKI
八幡技術研究部 主幹研究員 工博
(前 室蘭技術研究部 主幹研究員)
福岡県北九州市戸畑区飛幡町1-1 〒804-8501



宮本裕嗣 Hirotsugu MIYAMOTO
君津製鉄所 品質管理部 線材管理室長
(元 棒線技術部 主幹)



久保田学 Manabu KUBOTA
鉄鋼研究所 交通産機品研究部
上席主幹研究員 工博
(前 室蘭技術研究部 主幹研究員)



吉岡隆史 Takashi YOSHIOKA
室蘭製鉄所 品質管理部 棒線管理室長
(前 棒線技術部 上席主幹)



小澤修司 Shuji KOZAWA
室蘭製鉄所 品質管理部 主幹



青野通匡 Michimasa AONO
棒線技術部 主幹