

高強度低コスト肌焼きボロン鋼の開発

Development of High-strength Case-hardened Boron Steel

木 下 齋*
Hitoshi KINOSHITA
高 山 透**
Toru TAKAYAMA

村 上 敦*
Atsushi MURAKAMI
浜 田 貴 成***
Takanari HAMADA

曾 田 奈津子*
Natsuko SOTA
白 井 佑 介***
Yusuke USUI

要 旨

トランスミッションシャフトへの適用を想定し、冷鍛性に優れ、高強度な肌焼き鋼を開発した。冷鍛性は近年主流となっている鋼線からの多段フォーマでの加工性を維持し、高強度化は特別熱処理(Cold焼入れ)により強度向上しているものを、通常浸炭焼入れ(Hot 焼入れ)で達成するものである。浸炭後の矯正工程は、高強度化と相反するものであり、両者をバランスさせる必要がある。これらの要求を満たすため、焼入れ性曲線(Jominy 曲線)の平坦化に着目し、従来の JIS SCr 系合金に対しボロン添加及び Cr 量を調整した新鋼種を開発した。開発の過程において、ボロン添加により浸炭層の焼入れ性低下のメカニズムを明らかにし、Cr 添加により焼入れ性の改良をおこない目標を達成した。

ABSTRACT

A high-strength case-hardening steel maintaining good cold forgeability has been developed for use in the manufacture of transmission shafts. The cold forgeability of the steel enables workability to be maintained when the steel is used in the form of wire in a multiple-stage former, as has now become standard. The developed material is also able to match the strength increase that was previously achieved using a special heat treatment (cold quenching) by using a standard carburization quenching (hot quenching). Higher strength represents an impediment to the straightening process that follows carburization, and it was therefore necessary to achieve a balance between high strength and straightenability. In order to do so, flattening of the hardenability curve (Jominy curve) was focused on. Boron was added to a conventional JIS SCr alloy steel and Cr content was adjusted to develop a new steel. During the development process, the mechanism by which the addition of boron causes a decline in the hardenability of the carburized case was clarified, and hardenability was enhanced by the addition of Cr, enabling the achievement of the development goals.

1. はじめに

二輪車は高出力化・小型軽量化のニーズは高く、トランスミッションシャフトにも高強度化が望まれている。特にオフロード競技二輪車などにおいては、ジャンプ着地などの急激なトルク変動によるねじりまたギヤの反力による曲げに耐えうる強度が必要であり、エンジン的高出力化・小型軽量化によりトランスミッションシャフトにかかる負荷は増加している。

トランスミッションシャフトの製造工程は、生産性に優れたコイルからの冷間鍛造が主流となっており、多段フォーマにて、スプライン部は最終形状まで成形される。製造・コストの観点から、シャフトの高強度化を図る場合においても、生産性を低下させることはできない。また、製造工程において、浸炭後の軸振れを矯正する工程が必要であるが、矯正性は高強度化と相反するものであり、両者をバランスさせる必要がある。

本開発では高強度と低コストを両立したトランスミッションシャフトに適した材料を開発するにあたり、合金元素添加を低減し、焼入れ性を補うことができるボロン鋼を選択した。ボロン添加鋼では、ボロンの焼入れ性倍数(ボロンファクタ:fb)は炭素量に依存し、炭素量が増えるにつれて、fbは小さくなる⁽¹⁾ことが知られているが、開発の過程において、むしろボロンを添加することにより浸炭層の焼入れ性が低下することが明らかになった。このため、合金元素添加による焼入れ性の改善を試みた。

2. 開発のねらい

従来、Hondaの二輪車のトランスミッションシャフトには JIS の Cr-Mo 鋼の類似鋼である HSCM420H の浸炭品が使用されている。そのなかでも前述したオフロード競技

* 二輪開発センター
** 住友金属工業(株)
*** (株)住友金属小倉

二輪車など負荷が高いものには、浸炭焼入れ時の油温を低く設定(通称Cold焼入れ)し内部硬度を高めることで、シャフト強度を向上させている。

開発にあたってはこのような特別な熱処理管理を廃止し、高強度で低コストなシャフトを開発することを目的とし、以下の特性を満足できる材料を設計した。

- (1) Hot 焼入れで現行材 Cold 焼入れと同等以上の強度を有すること
- (2) 現行材と同等の生技性であること
- (3) 低コストであること

(1)は一般的なガス浸炭炉にて処理可能であることを前提として、Cold焼入れ(60-80℃)で管理していたものを通常のHot焼入れ(110-130℃)にしても、強度を確保できるようにするものである。

また、Cold焼入れの場合は、浸炭後の振れが大きくなると共に内部硬度が高くなり過ぎ、矯正時の変形態が低下し、矯正工程での歩留りが低下する問題もあった。このため、開発鋼では内部硬度が高くなり過ぎないように成分設計をおこなった。

(2)の生技性では、リン酸亜鉛皮膜伸線加工を施した鋼線を用いた多段フォーマでの冷間鍛造が主流であるため、現行の量産工程にて製造できることを前提とした。

(3)低コスト化には、近年高騰している Mo の無添加と冷間鍛造後の焼準を省略することにした。

3. 材料成分設計の考え方

3.1. 焼入れ性曲線のデザイン

材料成分設計に先立ち、焼入れ性曲線(Jominy曲線)のデザインをおこなった。

開発目標である Hot 焼入れにより内部硬度を高め、高強度化するために、J7-J15 近傍の硬度を上げる。さらに水冷端側の硬度を低下させ、ジョミニー曲線をフラットにする。水冷端側の硬度を低下させるのは、内部硬度が高くなり過ぎ、矯正性が低下するのを防ぐためである。

また量産においては、浸炭焼入れ時の冷却速度のばらつきによるシャフトの内部硬度ばらつきが、強度ばらつきの原因にもつながっていた。したがって、ジョミニー曲線をフラット化し、シャフトの内部硬度のばらつきを低減させることは重要である(Fig. 1)。

3.2. 基本成分

開発方針より低コスト化で Mo を省略することから、材料成分は SCr 系とする。さらに冷間加工性を向上させるために低Siとし、ボロンを添加し焼入れ性を補う。ジョミニー曲線のフラット化を達成するために、水冷端の硬度を下げる

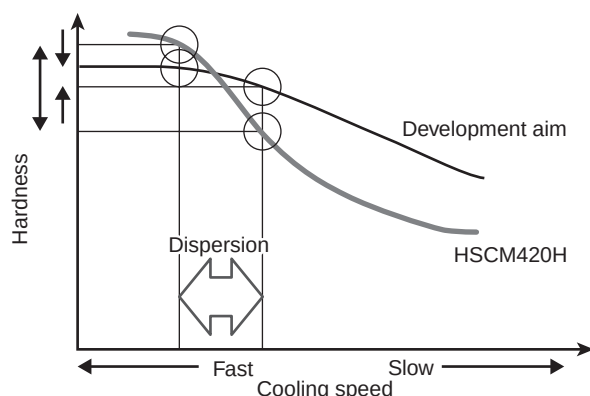


Fig. 1 Flattening quenching curve

ため、炭素量を0.20%から下げ、水冷端から離れた位置の硬度を上げるために、ボロン、Cr、Mnを添加する。また、冷間鍛造後に実施している焼準工程の省略には、続く浸炭焼入れにおいて混粒組織を発生させないため、結晶粒成長を抑制するピンニング元素として、Nb を添加することにした。

3.3. 浸炭層の焼入れ性に及ぼすボロンの影響調査

前述したようにボロンの焼入れ倍数(ボロンファクタ: fB)は、炭素量に依存し炭素量が増えるにつれて fB は小さくなる⁽¹⁾。浸炭部品で考えれば、炭素量が0.2%である内部組織の焼入れ性は向上するが、浸炭時に炭素量が0.8%程度になる浸炭層の焼入れ性向上には、あまり寄与しないことにある。これは、浸炭層内でボロンが化合物($M_{23}(CB)_6$)を形成し、焼入れ性を確保するために必要な固溶ボロンが減少するためである⁽²⁾と考えられている。そこで、開発鋼の合金設計に先立ち、SCr 系のボロン鋼において浸炭層の焼入れ性を評価することにした。

まず、調査には SCr420 にボロンを添加した鋼(A 鋼)と現行材である HSCM420H を用いた。150 kgVIM(Vacuum Induction Melting)で溶製した鋼を 1250℃で鍛伸後、焼準(925℃—1h A.C.)をおこない、試験片(φ25×40 mm)に加工後、量産炉で浸炭処理し熱処理品質の確認をおこなった。焼入れ温度は Hot 焼入れ相当の 125℃と、Cold 焼入れ相当の 80℃とした。断面硬さ分布を Fig. 2 に示す。

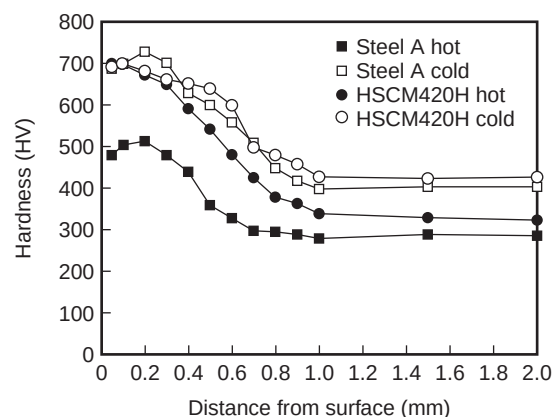


Fig. 2 Cross-sectional hardness distribution

Fig. 2 に示すように、A 鋼は Cold 焼入れでは、SCM420 と同等の浸炭層硬さを得ることができるが、Hot 焼入れでは浸炭層表面において現行材以下の硬度となっており、浸炭層の焼入れ性が不足していることがわかる。

次に浸炭層の焼入れ性にボロン添加の影響があるか調査をおこなうため、Table 1 の A 鋼をベースに炭素量を浸炭層相当の 0.8% とし、それぞれボロン添加あり無しの鋼を用意した (Table 2)。

先ほどと同様に鍛伸、焼準後、ジョミニー試験をおこなった。ジョミニー試験の加熱パターンは浸炭を想定して、930 °C - 30 min. に続き 840°C - 20 min. 実施後、焼入れとした。

試験結果を Fig. 3 に示す。ボロン添加鋼では、J15-J25 位置から硬度低下が認められた。

このため、光学顕微鏡によって焼入れ組織を詳細に調査したところ、硬度低下が発生する位置よりも水冷端からの距離が長くなるところでは、マルテンサイトより硬度の低いトルースタイトの存在が確認された。それよりも短い距離、すなわち焼入れ端に近く十分に急冷されたところでは、フルマルテンサイト又はトルースタイトが少ない組織であることがわかった。

さらに、硬度低下が発生した距離の長い部分を FE-SEM (Field Emission - Scanning Electron Microscope) 観察した

Table 1 Chemical composition and measured DI value

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Ti	B	DI
Steel A	0.20	0.03	0.60	1.06	—	0.031	0.031	0.0012	2.52
HSCM420H	0.20	0.20	0.70	1.10	0.10	—	—	—	2.50

Table 2 Chemical composition

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Ti	B
Steel A 0.8%C-B	0.79	0.05	0.75	1.06	—	0.036	0.028	0.0017
Steel A 0.8%C	0.79	0.05	0.75	1.06	—	0.036	0.028	—

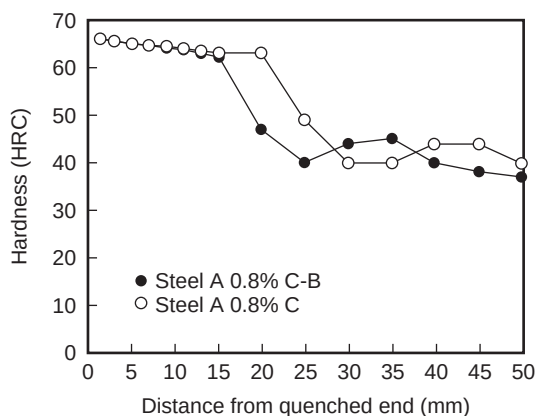


Fig. 3 Hardening-related test results

ところ、巾数 μm の比較的大きな析出物とその周辺部がトルースタイトを呈していることが判明した。

比較的大きな析出物へのボロンの偏析状態を明らかにするため、AES (Auger Electron Spectroscopy) によるマイクロ分析を実施した。Fig. 4 に A (0.8%C-B) 鋼における粒界近傍に生成したトルースタイト周辺の AES 元素マッピング像を示す。炭化物の可能性が示唆された。

次に、炭化物周辺の元素濃度変化を明確にするために EPMA (Electron Probe Microanalyzer) による線分析を実施した。その結果を Fig. 5 に示す。ボロンについては析出物中の存在量が少なく、線分析による調査は困難と考えられたので実施していない。Cr に関しては約 17%、マトリックスよりも欠乏している領域が $3\mu\text{m}$ 程度存在することが判明した。Mo, Mn については若干欠乏領域が存在するようにも見えるが、明瞭ではなかった。C の欠乏領域は認められない。析出した炭化物の結晶構造を同定する目的で、TEM (Transmission Electron Microscope) / EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) による電子回折を実施したところ、 $\text{M}_{23}(\text{CB})_6$ であることが判明した。TEM 像及び電子回折パターンを Fig. 6 に示す。

これらの結果より、Cr 系ボロン鋼 (Steel A 0.8%C-B) は、(a) 粒界に Cr を含んだ炭化物である $\text{M}_{23}(\text{CB})_6$ 、(b) その周辺に Cr 欠乏層が生成、(c) 冷却時、Cr 欠乏層からトルー

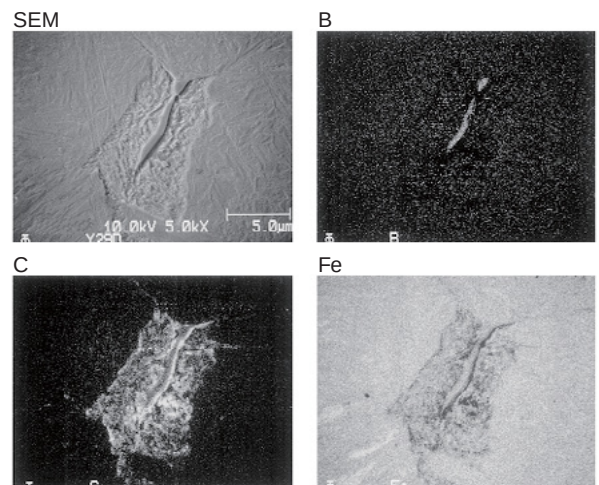


Fig. 4 Boron compound (AES mapping) separated at grain boundary in steel A 0.8%C-B

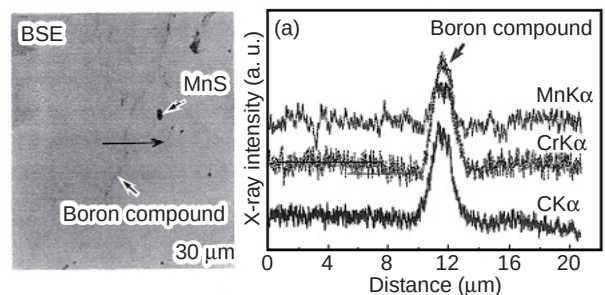


Fig. 5 Effect of boron compound vicinity in EPMA line analysis

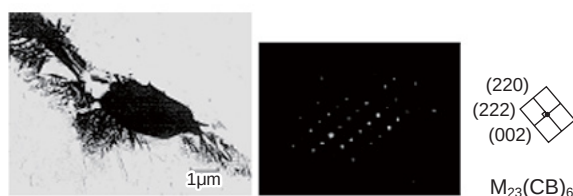


Fig. 6 TEM image of steel A 0.8%C-B steel and electron diffraction pattern

スタイトが生成、(d)トルースタイトが混在した組織となったため硬度が低下したものと考えられた。

この現象を浸炭条件から考えると、Cold焼入れで冷却速度が速い場合は、考慮しなくて良かったことが、Hot 焼入れのように冷却速度が遅い場合には浸炭層の焼入れ性不足となり問題になる。このことは、現在の量産浸炭工程がひずみを嫌い Hot 焼入れが主流であることを考えると SCr 系ボロン添加鋼採用時の大きな留意点の一つといえる。

3.4. 浸炭層の焼入れ性の評価手法

開発鋼の成分設計におこなう際に、浸炭層の焼入れ性評価として、素材を浸炭した後、ジョミニー試験をおこなう「浸炭ジョミニー」試験により評価することを試みた。

試験方法は、JIS G 0561と同様の試験片(φ25×100 mm)を作成し、あらかじめ試験片に浸炭を施す。試験片の加熱は浸炭条件を想定し、930℃・30 min. から 840℃・20 min. 実施後、JIS 方法で焼入れする。硬度測定位置を表面から 0.1 mm 深さとし、ピッカース硬度計で測定する。

A 鋼の浸炭ジョミニー試験結果を Fig. 7 に示す。A 鋼は明らかに現行材に比べて焼入れ性が不足していることがわかる。したがって、成分設計にあたっては、浸炭ジョミニーにおいて現行材以上の焼入れ性を有することを目標とした。現行材との材料置換を考えた場合、この試験において、現行材と同等以上の焼入れ性を有していれば、部品形状、浸炭時の冷却条件違いによる浸炭層の焼入れ性を評価する必要がなく、材料開発において有効な浸炭層の焼入れ性評価方法といえる。

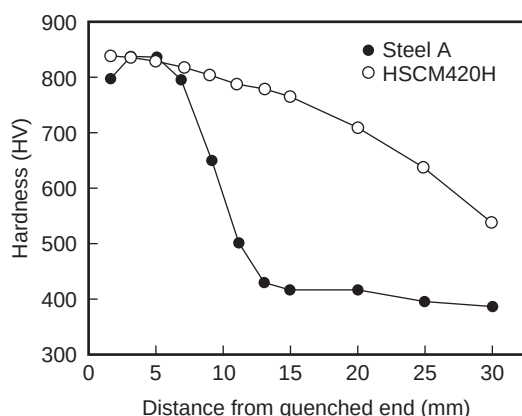


Fig. 7 Carburization Jominy curve

3.5. 材料成分の設定

これまでの検討、調査結果を基に材料成分を設定する。焼入れ性を補う元素として、Mn, Cr が候補に上がるが、Cr に比べ Mn の方がフェライト強化指数が高いため、冷鍛性の確保から Cr 量の最適化をおこなうこととした。

Table 3 のような Cr 量を変化させた鋼を試作し、浸炭ジョミニー試験による焼入れ性の評価、量産炉での浸炭焼入れ(Hot 焼入れ)を施し熱処理品質確認をおこない Cr 添加量を決定した。

調査の結果、Cr 含有量 1.8%以上で現行材と同等以上の内部及び浸炭層の焼入れ性を得られることがわかった(Fig. 8, Fig. 9)。開発鋼の成分のねらいを Table 4 に示す。

Table 3 Chemical composition

	(mass%)							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Ti	B
1.6% Cr	0.14	0.05	0.50	1.60	—	0.028	0.025	0.0016
1.8% Cr	0.14	0.05	0.50	1.80	—	0.028	0.025	0.0016
2.0% Cr	0.14	0.03	0.49	1.99	—	0.028	0.024	0.0015
HSCM420H	0.20	0.20	0.70	1.10	0.10	—	—	—

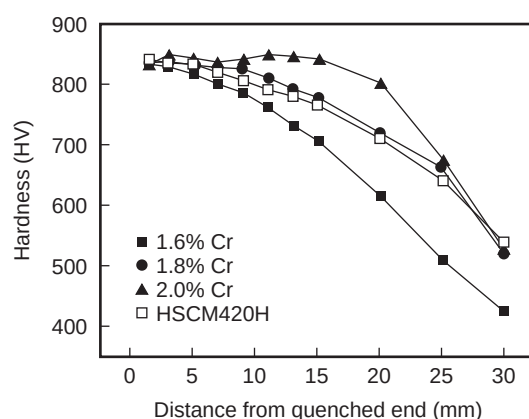


Fig. 8 Carburization Jominy test results

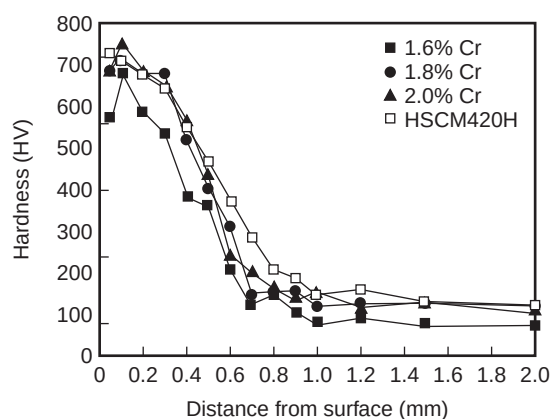


Fig. 9 Cross-sectional hardness analysis

Table 4 Chemical composition of developed steel

	(mass%)							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	B	Ti	Nb
Developed steel	0.16	0.05	0.55	1.93	—	0.0015	0.040	0.040
HSCM420H	0.20	0.20	0.70	1.10	0.10	—	—	—

4. 開発鋼の生技性

開発鋼を現行材と同様の工程で製造するため、皮膜伸線、機械加工工程で条件変更をおこなっている。

4.1. 被膜伸線工程

多段フォーマで冷間鍛造をおこなう場合、素材にはリン酸亜鉛系皮膜処理を施した鋼線が用いられる。皮膜処理は、スケール除去のための酸洗をおこなった後、リン酸亜鉛処理浴に浸漬したのち乾燥をおこなうが、酸洗条件によって皮膜の密着性が大きく劣化することがわかった。Fig. 10に酸洗条件違いによる皮膜生成量の違いを示す。短時間側で皮膜生成量の少ない酸洗条件では、鍛造時に皮膜はがれが発生した(Fig. 11)。開発鋼はCr含有量が多いため、現行材に比べて圧延後のスケール層直下にCr濃化が発生する。酸洗条件によっては、このCr濃化層と酸洗時の腐食残渣(スマット)が皮膜生成に影響を及ぼしたと考えられる。

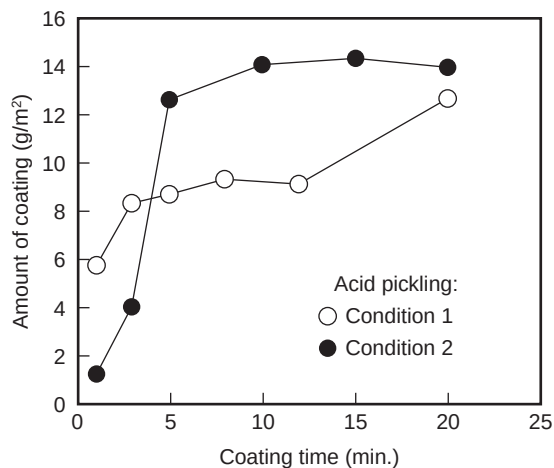


Fig. 10 Amount of coating in different acid pickling

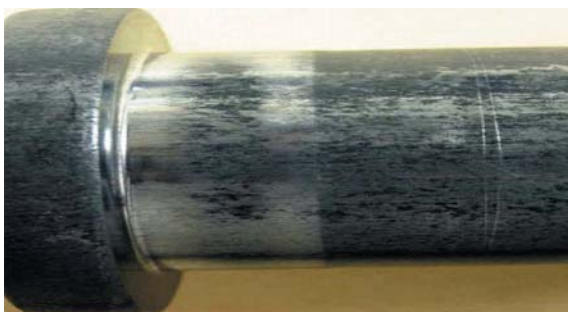


Fig. 11 Cracking of anodic oxide coating

4.2. 浸炭前後での寸法変化

トランスミッションシャフトには、その上に配置されるギヤの位置を規制するためのクリップを組み込む溝が設けられている。この溝は冷間鍛造後、切削によって加工をおこなうが、加工時には浸炭後の寸法変化を見込み加工位置を設定している。

開発鋼の浸炭前後の寸法変化は、現行材と傾向が異なり新たに設定することとした。この際、開発鋼において、制御圧延にて製造した鋼線と、圧延後、焼鈍を施した鋼線とでは、寸法変化の傾向が異なった。寸法変化調査の一環として、各鋼線から Fig. 12 に示すような試験片を加工し、浸炭前後の寸法変化を比較した例を示す(Fig. 13)。

制御圧延材は焼鈍材に比べ、寸法変化が大きくなった。この結果、製品での寸法精度確保のためには、寸法変化量の少ない焼鈍材が適していることから、量産には焼鈍材を用いている。

5. トランスミッションシャフト特性

5.1. ねじり強度

排気量 1100 cc クラスのカウンタシャフトを試作し、ねじり強度を比較した。量産材は Hot 焼入れ品と Cold 焼入れ品を用意した。試験結果を Fig. 14 に示す。内部硬さとクラック発生時のトルク倍率で整理すると、内部硬度が上昇するにつれ、強度が向上することがわかる。開発鋼は現行材に比べ、高強度側に位置するが、これはボロンによる粒界強化が寄与していると考えられる⁽³⁾。

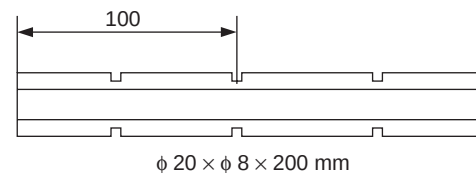


Fig. 12 Test piece

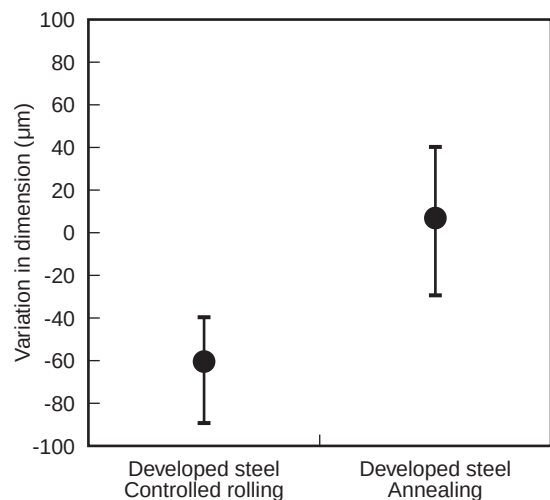


Fig. 13 Change in dimension

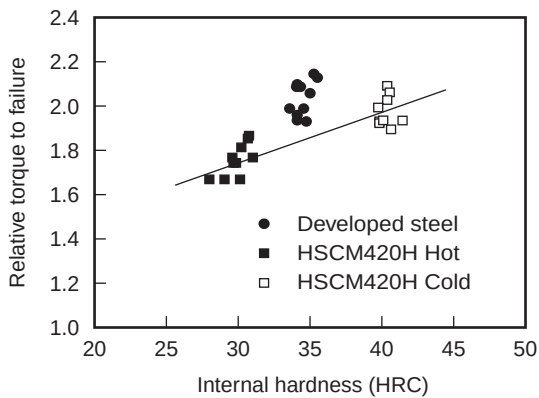


Fig. 14 Relationship between shaft torsional strength and internal hardness

また、Cold焼入れに比べ、内部硬さを低く抑えていることから、矯正性は改善されている。

5.2. 製造コスト

開発鋼の適用により、冷鍛後の焼準省略、Cold焼入れの廃止、矯正工程での歩留り向上により、トランスミッションシャフトコストを 14%低減することができた(Fig. 15)。

なお本開発鋼はオフロード競技車両の 2008 年モデル CRF250R のトランスミッションシャフトに適用している。

6. まとめ

高強度低コスト肌焼きボロン鋼の開発において、以下のことが明らかになった。

- (1) JIS SCr420 にボロンを添加すると浸炭層の焼入れ性が低下した。これは、粒界に Cr を含んだ炭硼化合物が生成し、その周辺に生成する Cr 欠乏層からトルースタイトが生成したため、硬度が低下した。
- (2) SCr 系ボロン添加鋼において、Cr を 1.8%添加することで、SCM420 同等以上の浸炭層の焼入れ性を確保することができる。

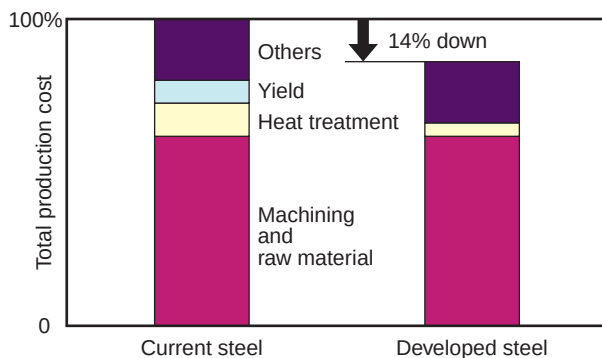


Fig. 15 Comparison of total production cost

- (3) 浸炭層の焼入れ性評価には「浸炭ジョミニー」が有効である。
- (4) 開発鋼を用いた場合、トランスミッションシャフト製造工程のうち、皮膜伸線、機械加工工程において、現行材から工程条件変更が必要であるが、現行設備を用いて量産可能である。
- (5) 開発鋼成分において、Cold 焼入れを Hot 焼入れに置き換え、ねじり強度を維持したまま、矯正性を改善することができる。

参考文献

- (1) Rahrer, G.D., Armstrong, C.D.: The effect of carbon content on the hardenability of boron steels, "Trans ASM", Vol. 40, p.1099(1948)
- (2) 山下孝子, 松崎明博, 高城重彰: Fe-0.8mass%C 鋼のセメントナイト球状化挙動に及ぼす B 添加の影響, 鉄と鋼, Vol. 85, No.6, p.486-491(1999)
- (3) Kinoshita, H., Murakami, A., Takayama, T., Hamada, T.: Developed of High Strength and Low Cost Motorcycle Transmission Shafts, Small Engine Technology Conference, 2007-32-0087(2007)

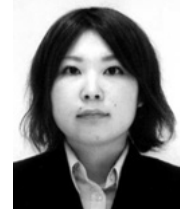
■著 者■



木下 斎



村上 敦



曾田奈津子



高山 透



浜田 貴成



白井 佑介