

等速ジョイント用冷間鍛造炭素鋼 アウターレースの開発

Development of Cold Forging 0.53% Carbon Steel for CVJ Outer Race

町田 功* 高木 武** 梅野 好和*
Isao Machida Takeshi Takagi Yoshikazu Umeno
吉村 泰律* 中尾 彰一**
Yasunori Yoshimura Shoichi Nakao

要 旨

自動車の駆動軸用等速ジョイントのアウトボードアウターレース用に冷間鍛造性と高周波焼入れ性に優れた0.53%C鋼を開発し、全工程冷間鍛造によるアウターレースの量産化を実現した。アウターレースの部品要求特性は転動寿命と捩り強度とが重要であり、高炭素鋼化が必須となっている。そのため、球状化焼なまし後での硬さが高く冷間鍛造は難しいとされてきた。

本報では、上記特性の両立が出来る0.53%C-0.05%Si-0.25%Mn-15ppmB鋼の開発と、高炭素鋼の冷間鍛造工程および金型技術を確立したので、その概要を述べる。

これらの開発により、塑形材から熱処理完成までインライン化が行え、従来の浸炭肌焼鋼に対し、工程省略による省エネルギー等の大幅な効率向上が図れるとともに、軽量化に寄与した。

ABSTRACT

A 0.53%-carbon steel was developed for the outer race of constant velocity universal joint of automobiles drive axles. It has the advantages of good formabilities in cold forging and induction hardening, thus realizing production of the outer race with cold forging throughout the process.

Torsional strength and rolling contact fatigue life are the requirements for the outer race component, thus necessitating the high carbon content which makes the steel so rigid after spheroidized annealing, a condition so far believed incomparable with cold forging. This paper outlines the development of the 0.53%C-0.05%Si-0.25%Mn-15ppmB steel which makes it possible to meet the rigidity requirement and still use it in cold forging. The cold forging process for high-carbon content steel and the metal mold technologies, which were established along with the steel, are also introduced.

Thus, it was made possible to realize in-house processing for all procedures, from forging to completion of heat treatment, thus contribute to simplification of the manufacturing process, enhancing efficiency and saving energy as well as achieving weight savings, as compared with the existing cemented steels for case hardening.

1. まえがき

自動車の高伝達効率化および居住スペースの拡大化追求により、前輪駆動(FWD)車ニーズが高まって来ており、このFWD車の発展と歩調を合わせる形で等速ジョイント(Constant Velocity Universal Joint 以下CVJと略す。)の生産量も増大し、多様化する車種毎に様々なCVJが使用されている。

一方、アウターレース材質および製造方法も変遷をとげ当初JIS SCr420またはSCM420の肌焼鋼を浸炭焼入れして用いるのが通常であったが、その後高周波焼入れ技術や鍛造技術の進歩により0.48~0.55%C鋼の高周波焼

入れへと移行して来た。また冷間鍛造は切削工程の簡略化、歩留りの向上が図れること、生産性が高いなどの利点があり、最近時アウターレースへの適用が検討されつつある。一般に、冷間鍛造性は炭素量が高くなる程変形抵抗が増大するため、通常アウターレースの製造方法としては温間および熱間鍛造後冷間サイジングが行われている。今回、球状化焼なまし状態に於ける冷間鍛造性、高周波焼入れ性におよぼす合金元素の影響を検討し、従来困難とされてきた高炭素冷間鍛造用鋼の開発と最適な冷間鍛造技術の組み合わせにより0.53%C鋼の全工程冷間鍛造によるアウターレースの量産化を実現した。

* 栃木研究所

** 栃木製作所(真岡工場)

2. CVJの要求特性および高炭素冷間鍛造 アウターレースの開発構想

CVJのアウターレースは駆動軸からのトルク、回転を角度がついた状態でも等速に伝達させるため、捩じり特性、転動疲労寿命特性が要求される部品である。また鍛造肌をそのまま使用する場合、安定した材料品質、鍛造品質および寸法精度の維持が必要となる。炭素鋼を用いて鍛造を行う場合は、冷間鍛造性の改善および高周波焼入れ性保証が重要である。本開発ではこれらの技術改善を基本に、従来の浸炭焼入れアウターレースと同等特性確保を目的とした。Fig. 1に高炭素冷間鍛造鋼をアウターレースに適用する上での懸案項目とその開発手法を示す。

3. アウターレースに求められる基本特性

0.53% C 鋼を冷間鍛造アウターレース材料に適用する場合、冷間鍛造性向上と高周波焼入れ性維持が一つのポイントである。冷間鍛造性の特性要因図を Fig. 2 に、高周波焼入れ性の特性要因図を Fig. 3 に示す。本報では、材料および金型技術の概要について述べる。

4. 冷間鍛造アウターレースの合金設計

4.1. 実験方法

供試鋼として Table 1 に示す化学組成の真空溶解鋼を用いた。0.53%C- < 0.01%Si-0.5%Mn- < 0.01%Cr- < 0.01%Mo- < 2ppmB を基本成分として Si、Mn、Cr、Mo

Table 1 Chemical Compositions of Steels
(mass%)

Steel	C	Si	Mn	Cr	Mo	B	Ti
Base	0.53	<0.01	0.50	<0.01	<0.01	<0.0002	<0.01
Si-series	0.53	~1.00	0.50	<0.01	<0.01	<0.0002	<0.01
Mn-series	0.53	<0.01	~1.00	<0.01	<0.01	<0.0002	<0.01
Cr-series	0.53	<0.01	0.50	~1.00	<0.01	<0.0002	<0.01
Mo-series	0.53	<0.01	0.50	<0.01	~0.50	<0.0002	<0.01
B-series	0.53	<0.01	0.50	<0.01	<0.01	~0.0020	0.03

および B を変化させ、変形抵抗および、高周波焼入れ性におよぼす影響を調査した。冷間鍛造性は球状化焼なまし材を直径 6mm × 高さ 12mm に加工した試験片を用い、490kN 容量の万能試験機にて圧縮試験を行い、徐々圧下時の変形抵抗とひずみの関係を測定、真ひずみ 0.8 における変形抵抗を求めた。この時のひずみ速度はおおよそ 0.002S^{-1} で、潤滑のため MoS_2 を試験片両端に塗布して試験した。また、高周波焼入れ性は直径 25mm × 長さ 80mm に試験片を加工し、周波数 = 100kHz、電圧 = 9.3kV、電力 = 55kW、移動焼入れ速度 = 6mm/s の条件で試験した。

4.2. 変形抵抗

ベース鋼の真ひずみ 0.8 に於ける変形抵抗と各合金元素添加量の差で整理し Fig. 4 に示す¹⁾。合金元素増加に伴う変形抵抗の影響は、 $\text{Cr} > \text{Mn} = \text{Si} > \text{Mo} > \text{B}$ の順である。球状化焼なまし状態の変形抵抗に影響をおよぼす因子としては、炭化物量、炭化物の粒径、マトリックス

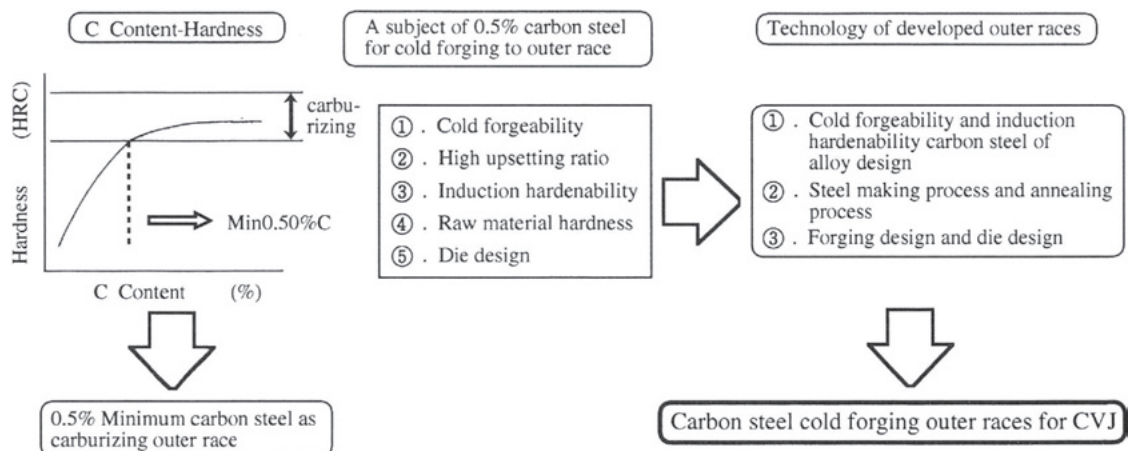


Fig. 1 Development of High Carbon Steel for CVJ

のフェライト結晶粒径およびフェライトの固溶元素量が考えられる。一方、合金元素がフェライト／セメンタイトに分配する事が知られており、一般にネルンストの式が成り立つ、即ち、セメンタイト中の元素濃度 $<M>$ とフェライト中の合金元素 $[M]$ との比 $<M>/[M]$ は鋼中

の元素含有量に無関係に一定に保たれる。各元素の分配係数を Table 2 に示す。

またセメンタイトの量はC量に依存するため、佐藤らは²⁾炭化物とフェライト中への合金元素の分配について検討し、(1)式を提案している。

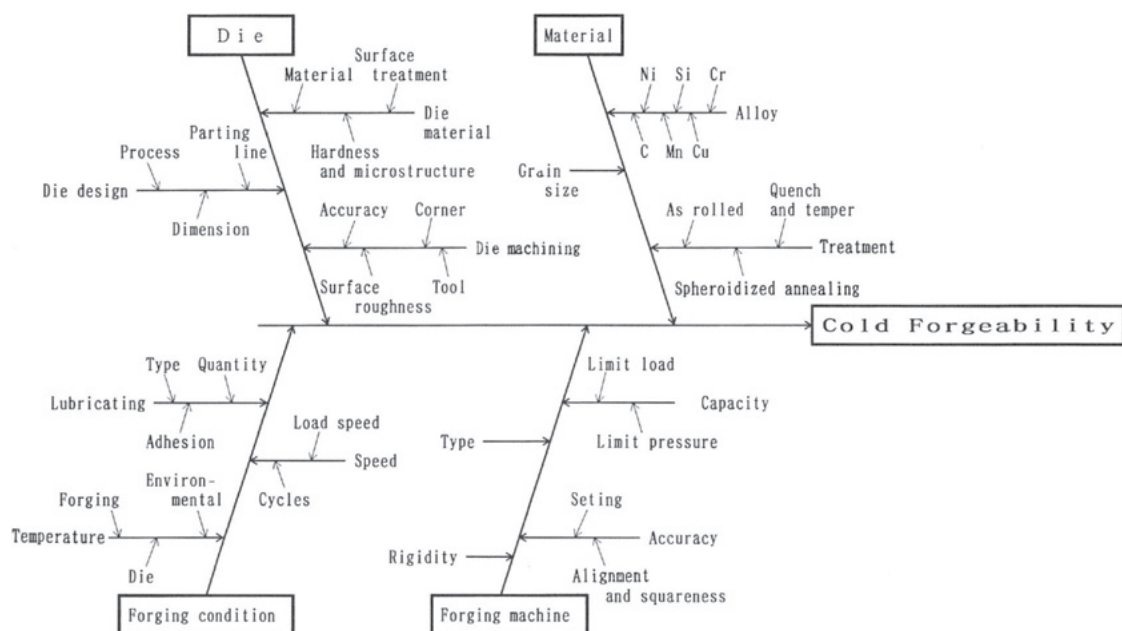


Fig. 2 Fish Bone Diagram for Cold Forgeability

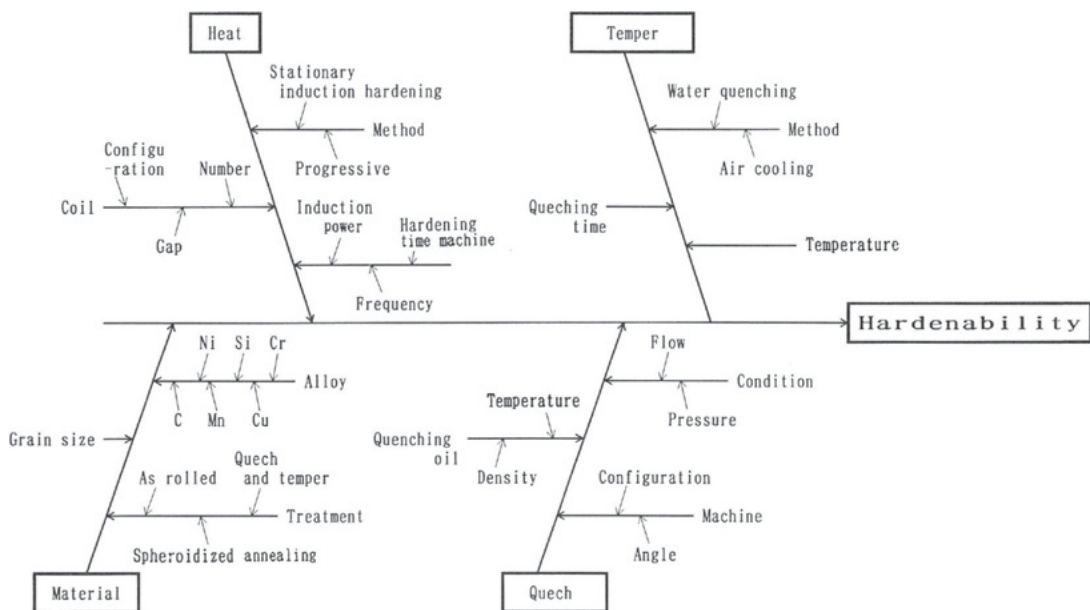


Fig. 3 Fish Bone Diagram for Induction Hardenability

Table 2 Partition Coefficient

Cr	Mn	Mo	Si
28	10.5	7.5	0.03

$$\left. \begin{aligned} [\text{Cr}]/\text{Cr} &= 1/(1 + 4C) \\ [\text{Mn}]/\text{Mn} &= 1/(1 + 1.4C) \\ [\text{Mo}]/\text{Mo} &= 1/(1 + C) \\ [\text{Si}]/\text{Si} &= 6.7/(6.7 - C) \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、[Cr]、[Mn]、[Mo]および[Si]はフェライト中の固溶量、Cr、Mn、MoおよびSiは鋼中への添加量である。以上より添加元素のセメンタイトへの分配は $\text{Cr} > \text{Mn} > \text{Mo} > \text{Si}$ の順となりSiについてはフェライト母相への分配が大きい。そのためCr、Si、Mnを下げて、変形抵抗の低減化を図った。

4.3. 高周波焼入れ性

各合金添加元素高周波焼入れ性の関係を、表面からHV450が得られる距離にまとめFig. 5に示す。合金元素の効果は $\text{B} > \text{Mo} = \text{Si} > \text{Mn} > \text{Cr}$ の順である。Bは他の合金元素に対し、微量添加でも安定した硬化層深さが

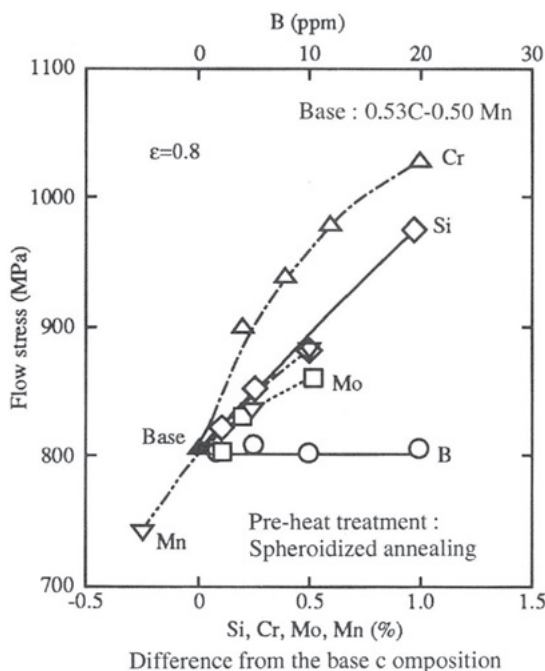


Fig. 4 Effects of Alloy Contents on Flow Stress in Upset Tests

得られている。Fig. 6にB添加量と焼入れ性向上効果を示す³⁾。10ppm以上の添加で効果が飽和し、過剰のB添加は有害であるため、10～20ppmの範囲とした。

4.4. 炭素量と焼入れ最高硬さ

鋼の炭素量と焼入れ最高硬さの関係をFig. 7に示す。変形抵抗を下げるためには、出来るだけC量を低く抑え

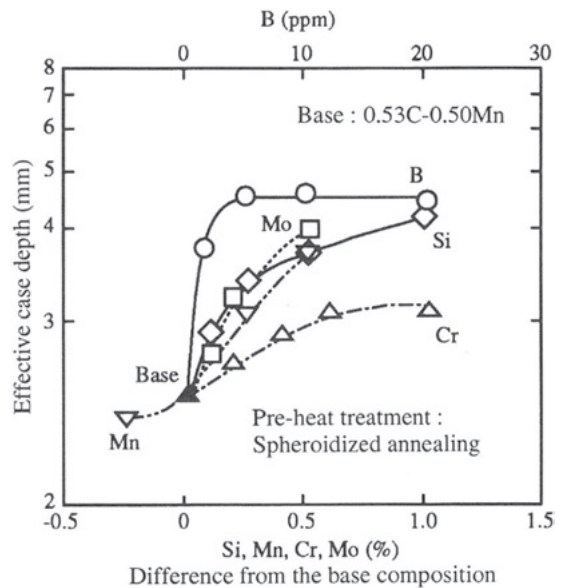


Fig. 5 Effects of Alloy Contents on Induction Hardenability

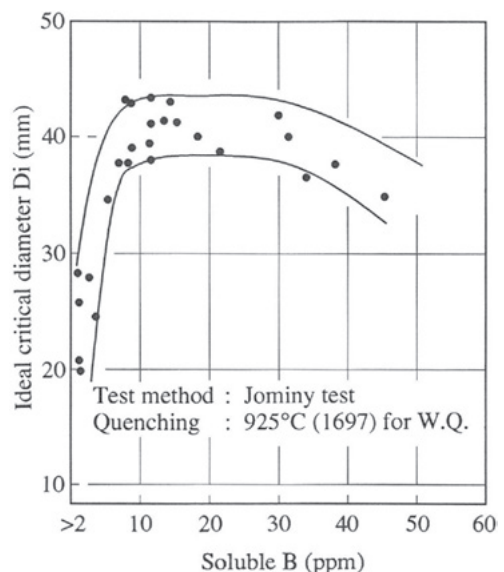


Fig. 6 Effects of Soluble B on Hardenability Low C-Mn Steels

れば良いが、冷間鍛造後の高周波焼入れにおいて、浸炭焼入れ鋼と同等硬さを得るため、0.50%Minとした。

4.5. 合金設計の考え方

各合金元素の高周波焼入れ性と変形抵抗への影響を Fig. 8 に示す。

Si、Mn は高周波焼入れ性、冷間鍛造性におよぼす影響が同程度であり、実体での硬化深さおよび製鋼条件などを考慮し、低減化を図った。

Mo は変形抵抗の増加を出来るだけ少なくして、高周波焼入れ性向上が図れる元素であるが、コストを考慮し添加可否を判断する事とした。

4.6. 前組織の高周波焼入れ性におよぼす影響

高周波焼入れ焼戻し後の Di 値 (焼入れ倍数) と有効硬化深さとの関係を Fig. 9 に示す⁴⁾。Di は(2)式により計算した。

$$Di = 0.338 \times \sqrt{C} (1+0.64Si) (1+4.1Mn) (1+2.83P) (1 - 0.62S) (1+2.33Cr) (1+0.52Ni) (1+3.14Mo) (1+0.27Cu) \times 25.4 \quad \dots\dots (2)$$

焼ならし処理において Di が増加するにしたがって有効硬化層深さが増大する。球状化焼ならし処理においては、焼ならし処理と比較し若干硬化層深さが低下してい

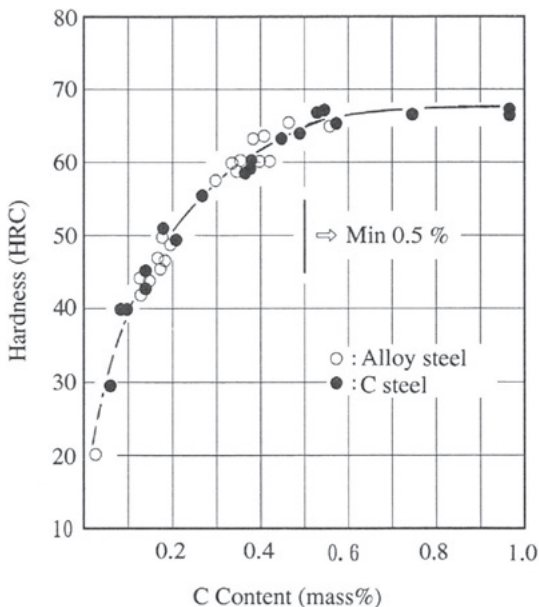


Fig. 7 Relationship between Carbon Content and Maximum Hardness

る。その程度は元素によって異なり、特に Cr 添加鋼の影響が著しい。Cr はセメンタイト中への分配係数が 28 と大きく、セメンタイト中に $(FeCr)_3C$ として存在しセメンタイトを安定化したものと考えられる。

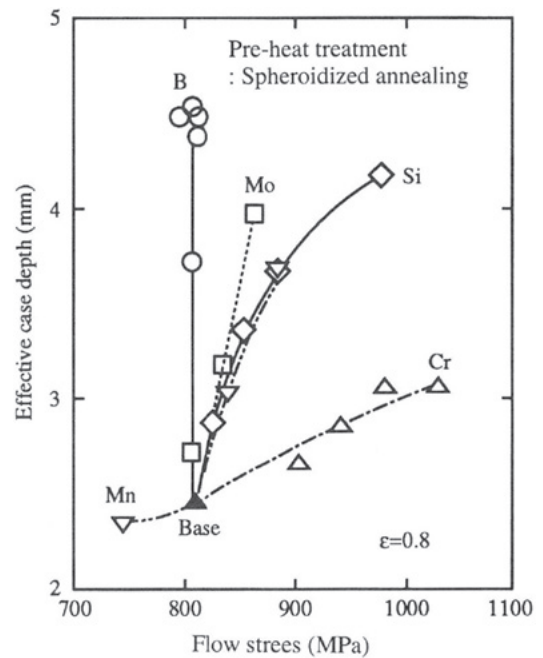


Fig. 8 Relationship between Cold Workability and Induction Hardenability

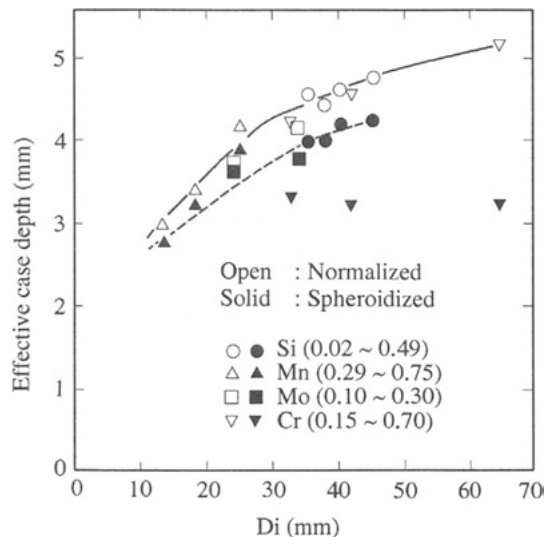


Fig. 9 Effects of Ideal Critical Diameter (Di) on Induction Hardenability

Table 3 Analysis Method to Plastic Working

Annalysis method	Informations					Practicability
	Global		Local			
	A	B	C	D	E	
Slab method	○		△			Simplicity
Ship lind method	○		○	○		Difficulty of design
Upper bound method	○	○		○		Difficulty
Finite element method	○	○	○	○	○	Difficulty
Simulation experiment to material model	○	○	△	△		Difficulty in local

A : Load
B : Transformation of material
C : Stress distribution
D : Strain distribution
E : Temperature distribution

○ : general
△ : occasional

5. 冷間鍛造の改良技術

5.1. 塑性加工の解析技術

アウターレースの様な冷間据え込み加工で加工率が高い場合は、デットメタルや表面の割れ現象が出やすく、硬さむら等の内部欠陥につながる場合がある。本開発においては、高炭素鋼の高変形を伴う塑性加工であるため、Table 3 に示す様な解析手法を基に型および素材の負荷を定量的に推測し、最適な工程設計を行った。

5.2. 金型表面処理

成形荷重の比較的高い冷間鍛造金型の場合、金型寿命を決定する因子として金型の表面処理技術が重要なポイントである。最も普及している表面処理は窒化処理であり、アウターレース用としては従来イオン窒化を適用し

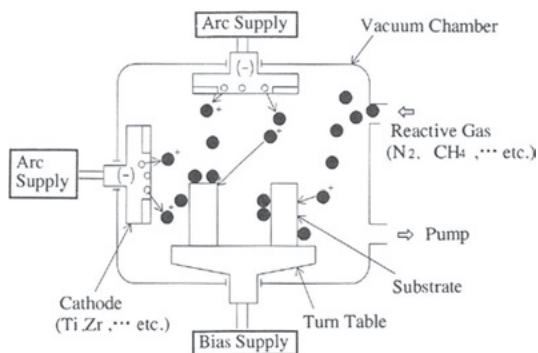


Fig. 10 Physical Vapor Deposition Method (PVD. Method)

Table 4 Chemical Composition of Developed Steel

	(mass %)				
	C	Si	Mn	Cr	B
Developed steel	0.53	0.05	0.25	0.15	0.0015
JIS S53C	0.50 ~0.53	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	≤ 0.30	—

てきた。本開発では高炭素鋼化に伴う金型寿命の更なる向上追求より Ti、Nb、V、Cr 炭化物などの硬質炭化物被覆処理の検討を行い、最も信頼性の高い PVD 処理 (AIP; アークイオンプレーティング) を採用した。その概要を Fig. 10 に示す。

6. 開発鋼の特性

高炭素冷間鍛造用鋼の基本成分を Table 4 に示す。本開発鋼を用い冷間鍛造性、高周波焼入れ特性および転動寿命特性を検討した。また JIS 炭素鋼 (S53C) を比較として用いた。

6.1. 冷間鍛造性

Fig. 11 に徐々圧下試験における変形抵抗と真ひずみの関係を示す。開発した冷間鍛造鋼は JIS 炭素鋼 (S53C) より大幅に低い変形抵抗値を得ている。

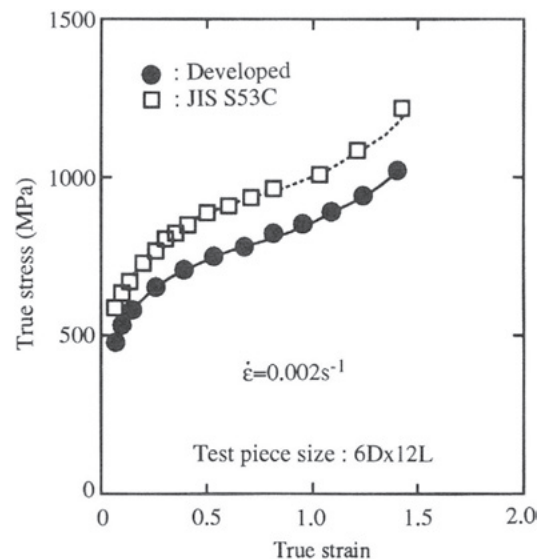


Fig. 11 Stress Strain Curves

6.2. 高周波焼入れ特性

球状化焼なまし処理後の高周波焼入れ試験結果を Fig. 12 に示す。開発した冷間鍛造鋼は、JIS 炭素鋼 (S53C) と同等以上の焼入れ性を示している。表層から HV500 迄の距離は若干開発鋼が深くなっている。

6.3. 転動寿命特性

円筒型転動寿命試験結果を Fig. 13 に示す。直径 12mm × 高さ 22mm の試験片を用い、周波数 = 100kHz、電圧 = 7kV、電流 = 5.0A、時間 = 4s の条件で定置高周波焼入れを実施した。転動試験条件はヘルツ応力 = 5880MPa、回転数 = 4624rpm である。開発鋼は、JIS 炭素鋼 (S53C) と同等の寿命特性を示している。

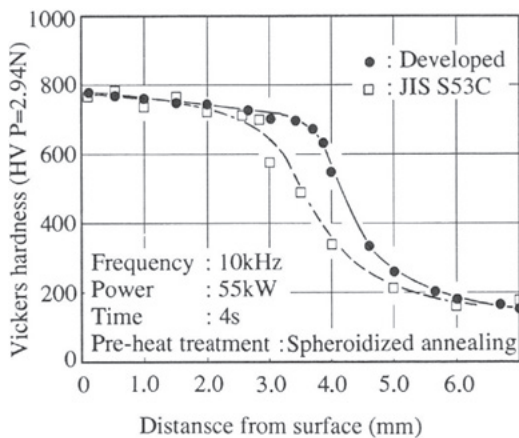


Fig. 12 Induction Hardenability Properties

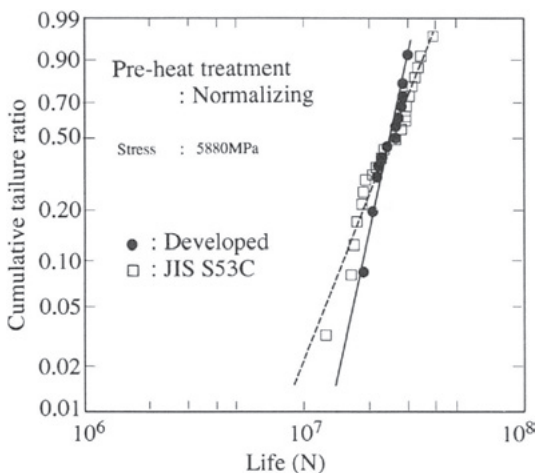


Fig. 13 Rolling Contact Fatigue Properties by Point Contact Type Tests

7. 開発鋼のアウターレースへの適用効果

7.1. 成形荷重

開発した冷間鍛造用鋼のアウターレース成形荷重を JIS 炭素鋼 (S53C) および、肌焼鋼 (SCr420) と比較し Fig. 14 に示す。冷間鍛造性に優れる合金設計により、JIS 炭素鋼 (S53C) に対し成形荷重が約 10% 低減でき、従来の肌焼鋼 (SCr420) 並の成形性が得られた。

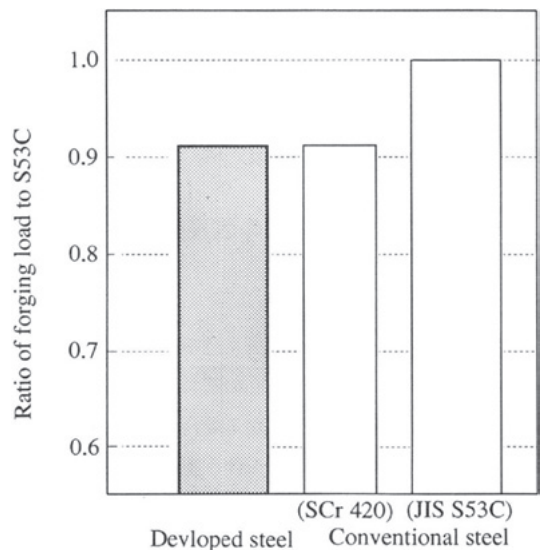


Fig. 14 Forging Load of Outboard-outer race

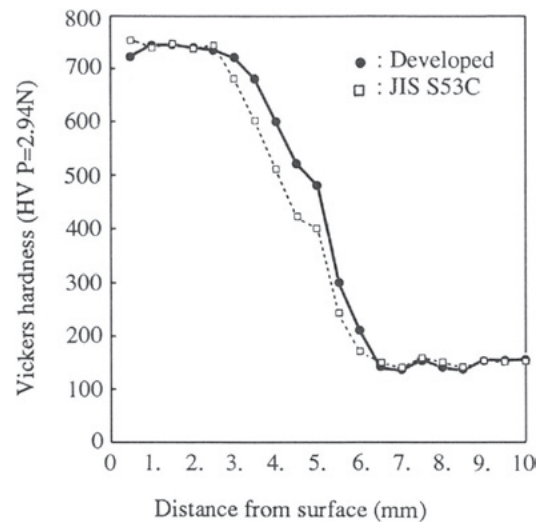


Fig. 15 Profiles Outboard-outer Race Hardness after Induction Hardening

7.2. 高周波焼入れ品質

Fig. 15 に軸部の高周波焼入れ後の断面硬度勾配を示す。開発鋼は、JIS 炭素鋼 (S53C) と同等の硬化層特性を示す。

7.3. トラック溝プロファイル

高周波焼入れ後のトラック溝 (ボール転動溝) の断面形状プロファイルを Fig. 16 に示す。断面形状は、基準形状 (直線と曲線で形成) に近いプロファイルになっており、機能耐久性に影響する品質安定化に寄与している。

8. アウターレースの製品特性

8.1. 軸振り強度

Fig. 17 に開発したアウターレースの強度の一例として、両振り振り疲労強度を JIS 炭素鋼 (S53C) 高周波焼入れ品のデータと比較示す。開発アウターレースは、JIS 炭素鋼 (S53C) と同等の強度特性を示している。

8.2. ジョイント寿命

開発したアウターレースを組み込み、単体ベンチでの濃縮耐久モード、トルク = $490\text{N}\cdot\text{m}$ 、回転数 = 500rpm 、取り付け角度 = 7° の一定条件でテストした結果を浸炭焼入れ肌焼鋼アウターレースと比較し Fig. 18 に示す。本テスト条件では、アウターレース材料違いによる寿命差は認められない。

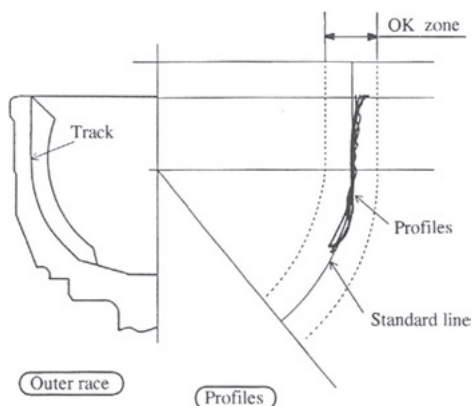


Fig. 16 Profile of Track

9. 実車への適用効果

9.1. 実車適用性

開発したアウターレースを組み込み、市場走行モードでの寿命評価した結果を Fig. 19 に示す。開発鋼のアウターレース組み込み品は既存鋼 (SCr420 浸炭品) と同等以上の寿命特性を示している。

9.2. 軽量化効果

開発した高周波焼入れアウターレースは浸炭焼入れ肌焼鋼アウターレースの重量に対し、外径寸法の適正化を図り、約 0.3kg /台の軽量化効果を得た。また、今後の高出力エンジンに対し、大幅な重量増加なしに対応出来る CVJ アウターレースの製品化が可能となった。

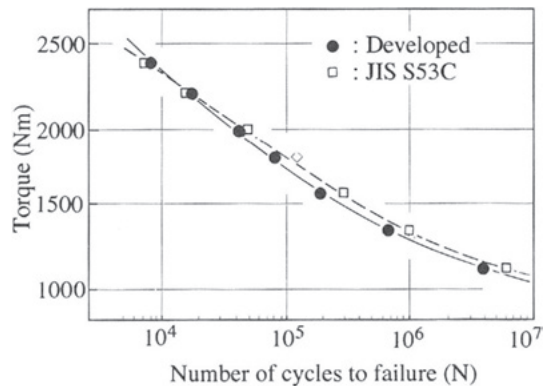


Fig. 17 Assembly Tests of Torsional Fatigue Strength

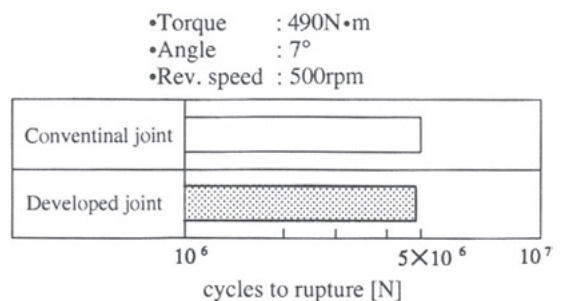


Fig. 18 Assembly Tests of Joint Life

10. まとめ

浸炭焼入れ肌焼鋼アウトターレースと同等以上の強度特性を有し、冷間鍛造技術、高周波焼入れのインライン方案等の製造技術を確立し効率的な製造が可能な全工程冷間鍛造炭素鋼アウトターレースを開発した。Fig. 20 に開発したアウトターレースの製造工程を、Fig. 21 にアウトターレースの外観写真を示す。本開発鋼を適用する事により、塑性材から熱処理完成までインライン化が可能となり、工程省略および省エネルギー等の大幅な効率向上を達成した。

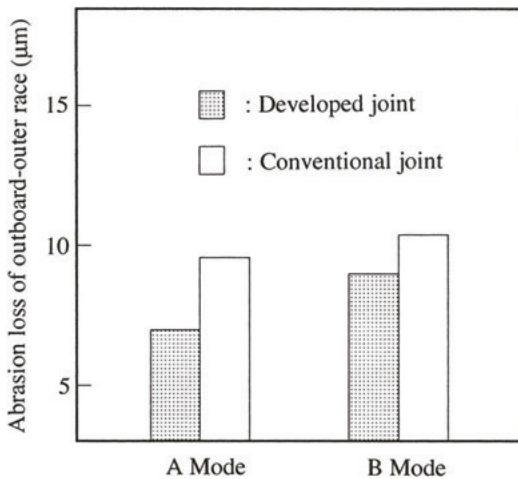


Fig. 19 Simulate Test

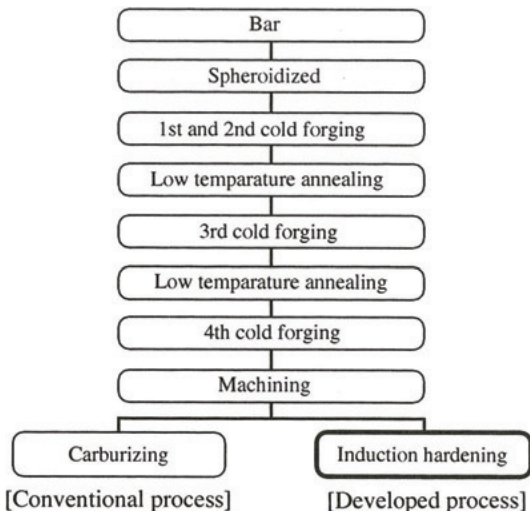


Fig. 20 Production Sequence of Outboard-outer Race

- (1) 開発鋼の基本的化学成分は、0.53%C- < 0.15Si- 0.25%Mn-15ppmB である。冷間鍛造性を確保するために、Si と Mn を低減し、B 添加により高周波焼入れ性を保証することを特徴とする。
- (2) 冷間鍛造加工工程の解析技術および金型の PVD 表面処理技術により安定した鍛造品質保証が可能となる。
- (3) 浸炭焼入れから高周波焼入れ化によりサイズの適性化でき軽量化に寄与する。

開発アウトターレースは1990年より販売されているレジェンドに適用され更に適用拡大中である。

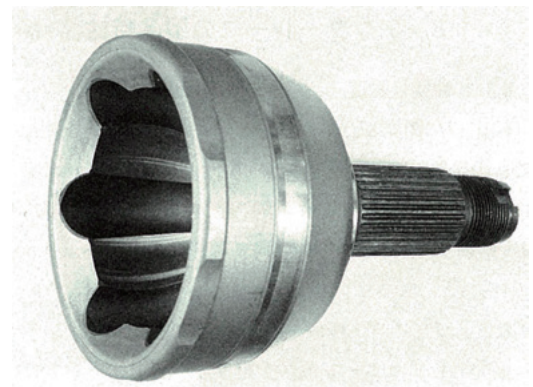


Fig. 21 External View of Developed Outboard-outer Race

謝 辞

本開発にあたって多大な御協力を頂いた大同特殊鋼(株)、その他社内外の多くの関係者の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 瓜田龍実, 冷鍛・高周波焼入用鋼の開発, 電気製鋼 第6巻第1号 1992年1月 P59
- 2) 佐藤知雄, 鉄鋼中の炭化物の電解分離による研究 (第2報), 日本金属学会誌 1955年6月 P385
- 3) 上原紀興, Medium Carbon-Boron Steel for Automobile Components SAE Technical Paper 820123 1982
- 4) 星野俊幸, 高炭素鋼の冷間鍛造に及ぼす化学成分の影響, 川崎製鉄技報 vol.23 No.2 1991 P21

■著 者■



町 田 功



高 木 武



梅 野 好 和



吉 村 泰 律



中 尾 彰 一