

# レアメタルレス高強度浸炭ギヤ材の開発

Development of Carburized High-strength Gear Steel with Less Rare Metals Added

二 宮 彬 仁\*

Akihito NINOMIYA

堀 本 雅 之\*\*

Masayuki HORIMOTO

岡 田 善 成\*

Yoshinari OKADA

前 田 修 作\*\*\*

Syusaku MAEDA

## 要 旨

従来の高強度ギヤ材は、Ni、Moの添加により、浸炭焼入れで生成するギヤ表層の不完全焼入れ組織を低減し、マルテンサイトとすることで高い疲労強度を確保していた。しかしながら、NiやMoはレアメタルのひとつであり、これらの多量添加による材料コストの上昇は無視できなくなってきた。本開発では、不完全焼入れ組織の生成メカニズムに基づき、浸炭焼入れにコールド油焼入れを適用することで冷却速度の向上を図り、さらに材料成分の最適化を図った。この結果、従来の高強度材に対し、Niを添加せず、Moの添加量を1/2以下としながらも、同等以上の疲労強度を有するギヤ材を開発し、レアメタルの使用量削減と高い疲労強度の確保を両立した。

## ABSTRACT

In conventional high-strength gear steel, the addition of Ni and Mo reduces the non-martensitic structure at the process of quenching the gear surface after carburizing. This makes the gear surface martensitic and thereby guarantees high fatigue strength. However, Ni and Mo are rare metals, and it has become impossible to ignore the increase in material costs caused by the addition of large quantities of these metals. Based on the mechanism by which non-martensitic structures form, we have developed a method for producing carburized high-strength steel in which the application of cold-oil to the quenching process improves the cooling speed and the chemical composition of the steel is optimized. Using no Ni and reducing Mo to less than half, we have developed a new gear steel with a greater level of fatigue strength than conventional steel. In other words, it was made possible to reduce the amount of rare metals used while simultaneously achieving high fatigue strength.

## 1. ま え が き

トランスミッションの動力伝達に使用されるギヤはその要求性能によって汎用材と高強度材の使い分けがされている。一般的に、高トルクの入力頻度の高い低速段ギヤや常にトルク入力があるファイナルギヤには高い疲労強度が要求され、高強度材が適用される傾向にある。さらに、近年の自動車の環境負荷低減や商品魅力向上に対するニーズの高まりから、トランスミッションの多段化と軽量コンパクト化のため、ギヤに対する負荷はより厳しくなる傾向にある。一般的にトランスミッションギヤは、鍛造と機械加工の後、浸炭焼入れによる高硬度化やショットピーニングによる残留圧縮応力の付与により疲労強度の向上が図られる。

Hondaは1990年代に高強度材<sup>(1)</sup>を量産車に適用し、現在も多くの機種で採用している。浸炭焼入れ等の表面硬化処理を前提としたギヤに使用される肌焼鋼は、炭素鋼の主成分であるC、Si、Mnに加えてCr、Ni、Mo、V等の合金元素が種々の目的により添加されている。汎用材であるSCr420の成分がC-Si-Mn-Cr系であるのに対し、高強度材はさらにNiとMoを添加した成分系とすることで浸炭焼入れ時の最表層の硬度上昇幅をさらに高め、疲労強度を向上させている。

トランスミッションギヤの多くがその強化手法として浸炭焼入れを採用している理由は、浸炭焼入れによって金属組織で最も硬く強いマルテンサイト組織が得られるためである。マルテンサイト組織は鋼をオーステナイト域に

\* 四輪 R&D センター

\*\* 新日鐵住金株式会社

\*\*\* 日本グリース株式会社

昇温し急冷することによって得られる組織で、その硬さは炭素 (C) 濃度で決まり、0.7%C から 0.8%C で最も高硬度が得られる<sup>(2)</sup>。理想はギヤ内部から表層にわたり全体がマルテンサイト組織となることであるが、材料成分や浸炭焼入れの条件によってはその状態は得られない。Fig. 1 にガス浸炭焼入れした (a)SCr420 および (b) 従来の高強度材の表層断面マイクロ組織を示す。SCr420 の最表層に見られる黒色の組織は不完全焼入れ組織 (微細パーライト組織) でありマルテンサイトではない。これは粒界酸化によって鋼材表層の焼入れ性が著しく低下しているためである。Fig. 2 にそのメカニズムを示す。粒界酸化はガス浸炭特有の事象であり、炉内残留酸素や浸炭ガスの分解によって生じる酸素が鋼材中に侵入する際に、特に表面近傍の旧オーステナイト粒界で鋼中の Si, Mn, Cr と結合し酸化物を形成する事象である。粒界酸化物近傍のオーステナイトでは Si, Mn, Cr の溶解量が局所的に減少するために焼入れ性の低下が生じ<sup>(3)-(6)</sup>、焼入れ時にマルテンサイトが得られにく

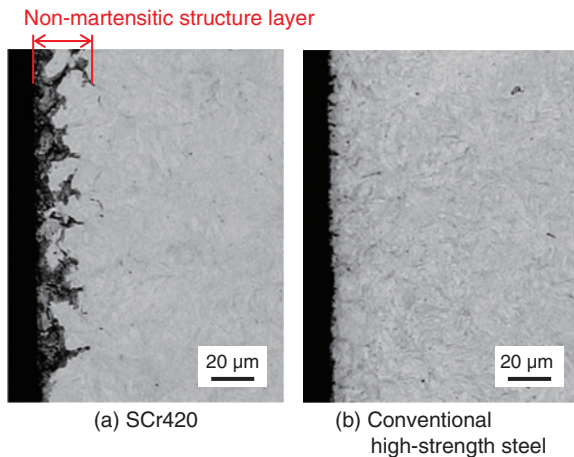


Fig. 1 Microstructure of gas-carburized steel surface

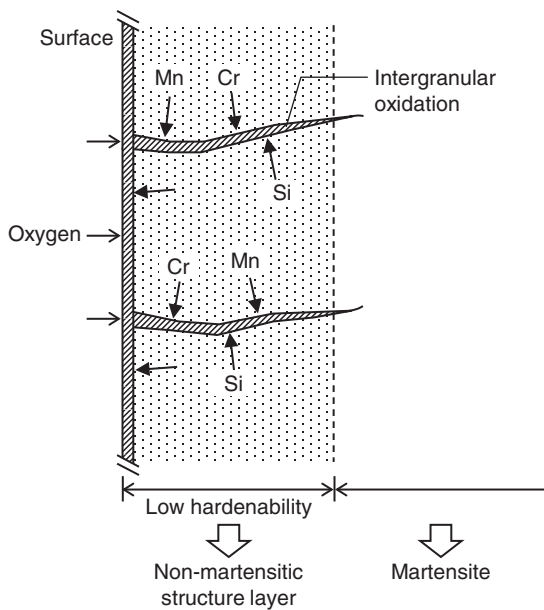


Fig. 2 Mechanism of non-martensitic structure layer generation

くなる。鋼中の酸素拡散速度は炭素の拡散速度に比べて遅いため、粒界酸化物生成深さは浸炭深さに比べて浅い。この結果、ガス浸炭焼入れ材では高炭素でありながら最表層部の焼入れ性の局所的な低下により、最表層部のみで硬さの低い不完全焼入れ組織が生じることがある。従来の高強度材は酸化物を形成しにくい Ni, Mo をそれぞれ 0.5%, 0.8% 程度添加することによって、Si, Mn, Cr などの粒界酸化物生成による焼入れ性の低下を補い、Fig. 1(b) のように不完全焼入れ組織を低減することで疲労強度を向上させている。Fig. 3 に不完全焼入れ組織の生成深さと曲げ疲労強度の関係を示す。不完全焼入れ組織の低減が高強度化に有効であることが確認できる。しかしながら、レアメタルである Ni, Mo は供給が不安定で、価格高騰しやすい元素であるため、材料コストの上昇が課題となっていた。

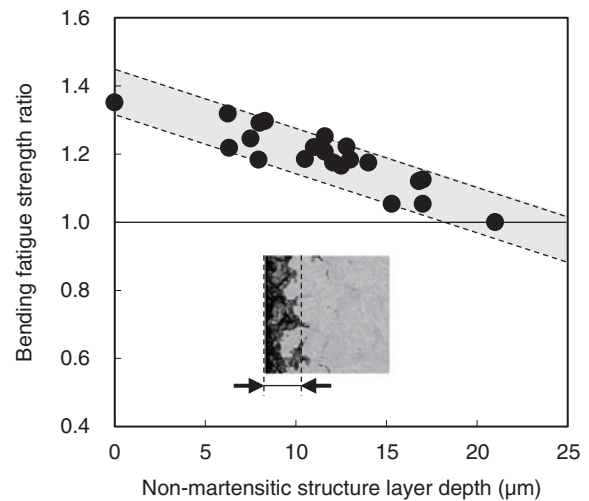


Fig. 3 Relationship between depth of non-martensitic structure layer and bending fatigue strength (SCr420 gas-carburized = 1.0)

## 2. 開発のねらい

本開発では、高強度ギヤ材の低コスト化を目的とし、Ni と Mo の添加を抑制しつつ不完全焼入れ組織の低減 (すなわち高強度化) を可能とする材料成分設計および熱処理仕様の検討をおこなった。

## 3. コールド油焼入れによる不完全焼入れ組織の低減

材料を高合金化 (Ni や Mo を添加) することなく不完全焼入れ組織を低減する手法としては、真空浸炭や浸炭後の歯面研削がある。真空浸炭は炉内酸素が存在せず粒界酸化が起こらないため、鋼材表層の焼入れ性低下がなく一般に不完全焼入れ組織は生成しない。しかしながら、現状 Honda および関連メーカーではガス浸炭が主流であり、既存

設備を前提とした場合は適用拡大しにくい課題がある。浸炭後の歯面研削については、不完全焼入れ組織が生成しても研削によって取り除くことができる。しかしながら、通常歯面研削で研削するのは歯面のみであり、歯底には不完全焼入れ組織が残るため歯元曲げ疲労強度の向上を図ることができない。また、歯面研削を前提とすると部品コストが上がってしまう。そこで本開発では、既存設備を活用することができ、ギヤ全面にわたり不完全焼入れ組織の低減効果が得られるコールド油焼入れに着目した。

一般的に、約 930℃ で浸炭されたギヤは約 850℃ に降温、保持され、油焼入れによって急冷されるが、このとき鋼材表面に不完全焼入れ組織が生成するか否かは材料の焼入れ性と焼入れ時の冷却速度で決定される。Fig. 4 に連続冷却変態 (CCT) 曲線の模式図を示す。冷却曲線がパーライト変態開始 (Ps) 線を通過すると微細パーライト組織が生成する。第 1 章で述べた SCr420 ガス浸炭材の表面の状態が Fig. 4 に相当する。一方で、冷却曲線が Ps 線を通過しない場合には不完全焼入れ組織は生成しない。すなわち、不完全焼入れ組織の生成を抑制するには、冷却曲線が Ps 線を通過しないように、Ps 線を長時間側へシフトさせるか、冷却曲線を短時間側へシフトさせるか、あるいはその両者を組み合わせるという考え方ができる。従来の高強度材は Ps 線を長時間側へシフトさせる効果がある Mn, Cr, Ni, Mo 等の元素のうち、酸素との親和力が低く、粒界酸化物を形成しにくい Ni, Mo を添加する手法を採用している。

本開発では、Ni, Mo の添加を抑制すべく、冷却曲線を短時間側へシフトさせる、すなわち冷却速度を向上させる手法としてコールド油焼入れを採用した。一般にコールド油は建機などに使用される大型ギヤ等のヒートマスの大きい部品の内部硬度を確保するために使用されるが、本開発では油種メーカーの協力のもと鋼材最表面の冷却特性に優れたコールド油の選定をおこなった。Fig. 5 に検討油種の一部であるコールド油 (A), (B), (C) の冷却曲線<sup>(7)</sup>を示す。併せて、量産で使用しているホット油 (代表 1 種) の冷却特性を示す。Fig. 6 にはコールド油 (A), (B), (C) で浸炭焼入れ

されたギヤ歯底最表面のバルクハウゼンノイズ<sup>(8)</sup> (BN) 測定値を示す。BN 値は金属材料の組織や硬度と相関を持ち、BN 値が小さいほど高硬度であることを示す。したがって、最も安定して歯底最表面で高硬度が得られるコールド油 (C) を選定した。

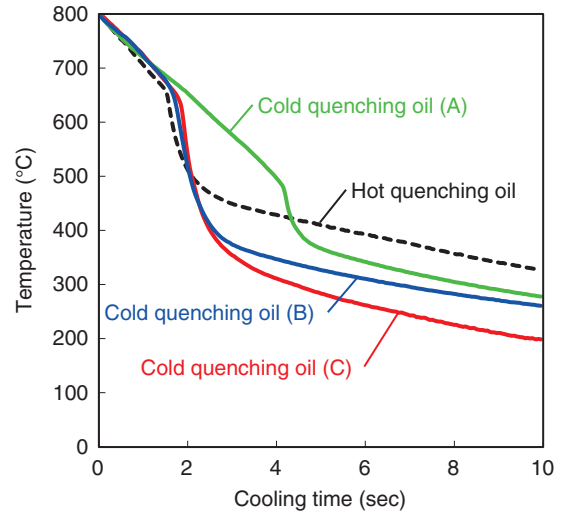


Fig. 5 Cooling characteristics of quenching oil (JIS-K-2242 method, silver probe test)

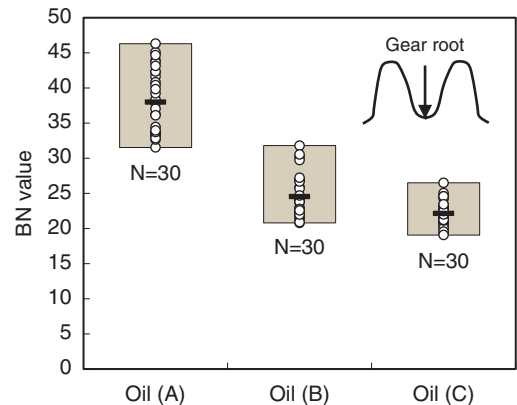


Fig. 6 Barkhausen noise (BN) value of gear root quenched by cold oil (A), (B), (C)

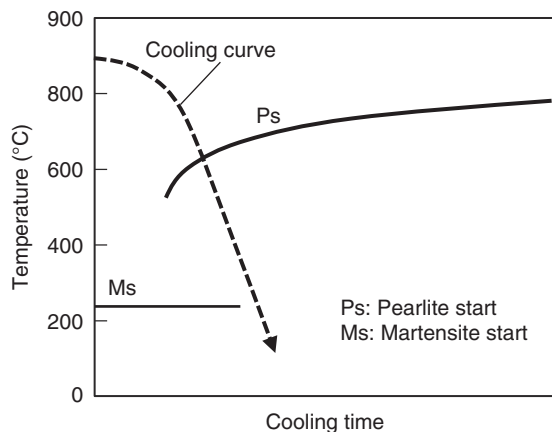


Fig. 4 Schematic diagram of CCT curve

#### 4. 材料成分設計

第 3 章で選定したコールド油を用いたガス浸炭焼入れを前提とし、不完全焼入れ組織を低減するのに効果的な成分バランスの検討をおこなった。まず Sente Software 社製の計算ソフト (JMatPro) を用い、SCr420 の浸炭層表面のパーライト変態開始線を算出した。なお、ここでは浸炭層表面を模擬するために SCr420 の炭素量を 0.75% として計算した。Fig. 7 中の  $Ps_1$  および  $Ps_2$  がその計算結果であり、 $Ps_1$  は粒界酸化が無い場合、 $Ps_2$  は粒界酸化に伴う Si, Mn, Cr 溶解量の減少を考慮した場合のパーライト変態開始線である。図中には、850℃ から選定したコールド油に焼入

れした際のギヤ表面温度を実測した際の温度履歴を冷却曲線として併記している。P<sub>S1</sub>に比べて、P<sub>S2</sub>は短時間側にシフトしており、冷却曲線と交差している。これは、選定したコールド油を適用したとしても、SCr420のような酸素との親和力の小さいNiやMoを添加していない成分系では、粒界酸化物の生成により局所的に焼入れ性が不足し、不完全焼入れ組織が生成する可能性があることを示している。

そこで、本開発ではNiよりも少量の添加で高い焼入れ性が得られるMoに着目し、その最適添加量を検討した。Fig. 7のP<sub>S3</sub>はP<sub>S2</sub>と同様に、浸炭時の表面を模擬した炭素濃度を0.75%とし、粒界酸化を考慮した場合の検討鋼(0.3%Mo添加)での計算結果であるが、冷却曲線とは交差しておらず、従来の高強度材に対し、Niを添加せず、Mo添加量を1/2以下としても不完全焼入れ組織の生成を抑制できることが予想された。

さらに、粒界酸化深さの低減について検討した。Fig. 8に粒界酸化深さに対するSi、Mn、Crの影響を示す。粒界酸化深さを浅くするためには、Si添加量を低減するだけでなく、Cr/Mn比を大きくすることが効果的であることがわかった。従来の高強度材の粒界酸化深さは5 μm程度であ

Table 1 Chemical composition

|                                  | (mass%) |      |      |      |      |      |
|----------------------------------|---------|------|------|------|------|------|
|                                  | C       | Si   | Mn   | Ni   | Cr   | Mo   |
| Developed Steel                  | 0.20    | 0.08 | 0.65 | -    | 1.05 | 0.35 |
| Conventional high-strength steel | 0.20    | 0.05 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.80 |

り、これと同程度の粒界酸化深さを達成するため、Si添加量低減に加えてCr/Mn  $\geq 1.3$ を満足する成分系とした。

これらの検討内容をもとに、開発材の成分系を決定した。開発材の代表的な成分系をTable 1に示す。Fig. 9にガス浸炭後にコールド油焼入れされたSCr420および開発材の表層断面ミクロ組織を示す。SCr420では粒界酸化物近傍に不完全焼入れ組織が認められるが、開発材ではこれが抑制されることが確認できた。

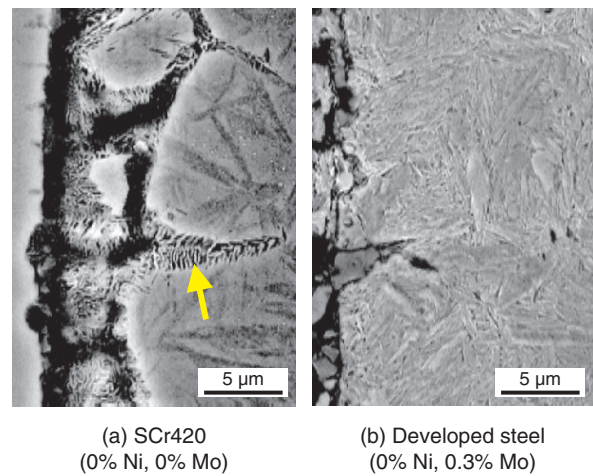


Fig. 9 Scanning electron micrograph of steel surface that was gas-carburized and cold-oil quenched (Arrow mark indicates non-martensitic structure)

## 5. 開発材の特性

### 5.1. 熱処理品質

Fig. 10にガス浸炭焼入れ焼戻しをおこなった開発材のミクロ組織と硬度分布の例を示す。Fig. 1(b)で示した従来の高強度材と同様に不完全焼入れが低減された組織が得られ、高い表層硬度(720 HV以上)を確保できた。

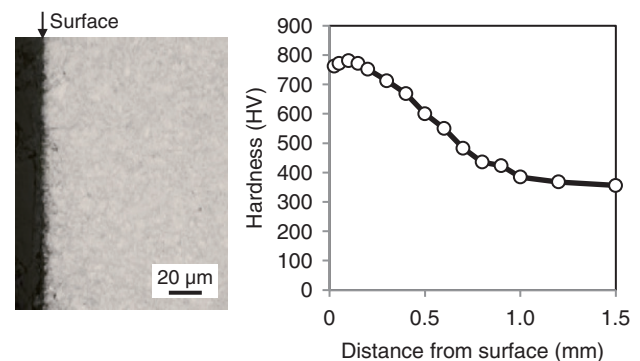


Fig. 10 Microstructure and hardness distribution of gas-carburized developed steel

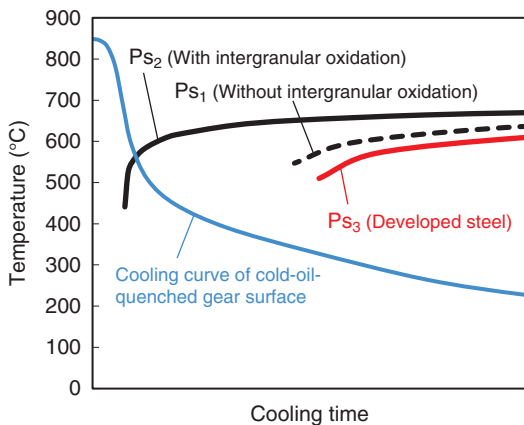


Fig. 7 CCT curve of SCr420 (0% Ni, 0% Mo) and developed steel (0% Ni, 0.3% Mo)

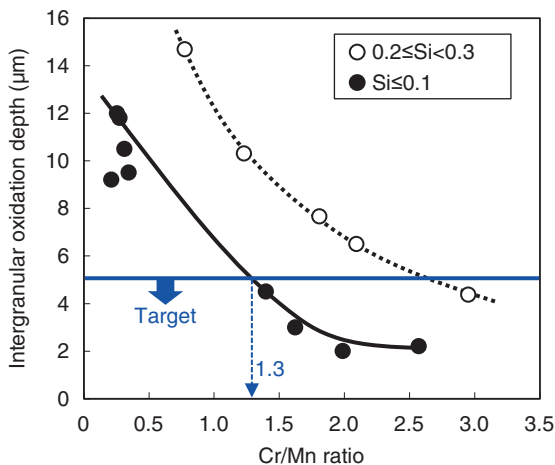


Fig. 8 Relationship between Cr/Mn ratio and intergranular oxidation depth

## 5.2. ギヤ疲労強度

開発材と従来の高強度材のギヤ疲労強度を比較するため、ギヤ単体疲労試験機を用い、歯元曲げ強度およびピitting強度を評価した。なお、評価に用いたギヤは各鋼種同等歯形で製作し、浸炭後の歯面研削はおこなっていない。Fig. 11 にギヤ単体疲労試験結果を示す。歯元曲げは試験トルク 320 Nm、ピittingは試験トルク 200 Nm の結果である。(a), (b) は浸炭後ピーニング無し、(c), (d) は浸炭後ピーニング仕様の結果であり、いずれの仕様においても開発材は従来の高強度材同等以上の疲労強度を達成した。Fig. 12 に開発材の強度位置づけを示す。

## 5.3. 歯形精度

開発材と従来の高強度材の熱処理ひずみ特性を比較するため、代表的な高強度材適用部品であるファイナルギヤを用い、熱処理寸法変化量を評価した。開発材のファイナルギヤは、浸炭焼入れ条件を除き量産と同じ工程で製作した。評価結果の一つとして、Fig. 13 に歯筋修正量を示す。開発材の寸法変化量および変化量のばらつきはともに従来の高強度材に対し同等以下であることを確認できた。

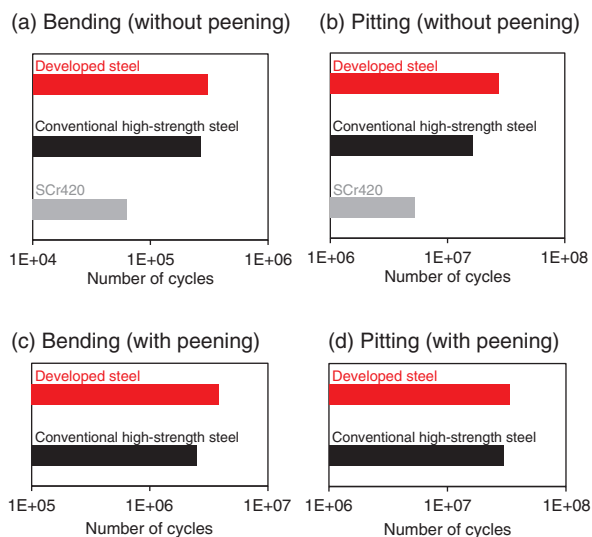


Fig. 11 Gear bending and pitting fatigue strength

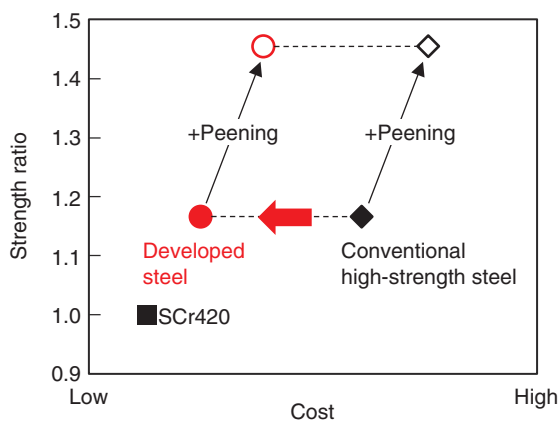


Fig. 12 Position of developed steel

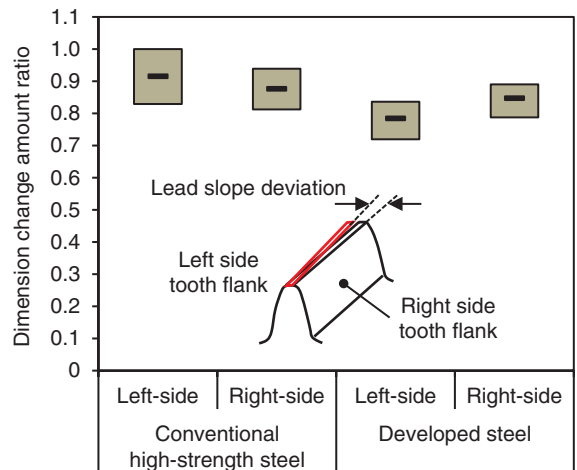


Fig. 13 Dimension (Lead slope deviation) change amount (Maximum change amount = 1.0)

## 6. まとめ

浸炭コールド油焼入れ専用鋼として最適な材料成分設計をおこなうことにより、従来の高強度材に対しレアメタルである Ni, Mo 添加量を削減しながら同等以上の強度を確保できる高強度ギヤ材を開発した。これにより、従来の高強度材の代替によるコストダウンを可能とした。本開発では、以下のことが明らかになった。

- (1) 焼入れ時の冷却速度向上と材料成分設計を適切に組み合わせることで、材料コスト上昇を抑制しながら不完全焼入れ組織を低減することが可能である。
- (2) コールド油焼入れをおこなうことで、ホット油焼入れで従来の高強度材が必要としていた Ni 添加を不要とし、Mo 添加量を 1/2 以下に抑制することが可能である。
- (3) ガス浸炭焼入れにおいて不完全焼入れ組織生成の一要因である粒界酸化物の生成深さを浅くするには Si 添加量を低減するだけでなく、Cr/Mn 比を高くすることが効果的である。

## 参考文献

- (1) 水野孝樹, 松原敏彦, 天野政樹, 中田雅之, 鈴木雅啓, 服部弘基: 高強度トランスミッションギヤ材の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol. 5, p. 60-70
- (2) Krauss, G.: Steels: Heat treatment and processing principles, ASM International, p. 147(1990)
- (3) 内藤武志: 浸炭鋼の粒界酸化, 浸炭焼入れの実際, 第2版, 日刊工業新聞社, p. 197-200(1999)
- (4) 村井暢宏, 相原賢治, 神原進, 津村輝隆, 西田和彦: 浸炭異常層低減鋼の開発, 住友金属, Vol. 45, No. 4, p. 11-21(1993)

- (5) 村井暢宏, 津村輝隆, 長谷部光弘: ガス浸炭処理での  
平衡炭素量に及ぼす合金元素と酸素ポテンシャルの  
影響, 鉄と鋼, Vol. 81, No. 3, p. 203-208(1995)
- (6) 蟹沢秀雄, 越智達朗, 子安善郎: 高強度歯車用鋼の開  
発, 新日鐵技報, No. 354, p. 43-47(1994)
- (7) 日本工業規格 JIS K2242:2012, 熱処理油剤
- (8) 古屋泰文: バルクハウゼンノイズ法による非破壊材料  
評価, 溶接学会誌, Vol. 64, No. 2, p. 120-125(1995)

■ 著 者 ■



二宮 彬 仁



岡田 善 成



堀 本 雅 之



前田 修 作