

高強度歯車用鋼の開発

Development of High Strength Carburized Steel for Automobile Gears

蟹 澤 秀 雄^{*(1)} 越 智 達 朗^{*(1)} 子 安 善 郎^{*(2)}
Hideo KANISAWA Tatsuro OCHI Yoshiro KOYASU

抄 録

浸炭焼入れは疲労強度や耐摩耗性を向上するため、自動車、産業機械などの歯車等に広く適用されている。近年、特に自動車の低燃費化、軽量化、更にはエンジンの高出力化に伴い、歯車の高強度・小型化が強く望まれるようになった。このような背景のもとで、自動車の変速機などに用いられる歯車の疲労強度向上の要求にこたえるべく開発した新日本製鐵の高強度歯車用鋼について述べた。

Abstract

Carburization of steel has been widely applied to gears of automobile, construction machinery, production equipment and so forth, since it improves fatigue strength and wear resistance of the steel. Especially, with the recent advance of low fuel consumption and lightening of the automobile as well as high power of its internal combustion engine, there is a growing trend toward higher strengthening and miniaturizing of gears. In this paper, a high strength carburized-steel for transmission gears and differential gears developed by Nippon Steel to meet such a demand of improving in their fatigue strength, is referred.

1. 緒 言

歯車は自動車、産業機械などに使用される主要な機械部品の一つであり、疲労強度や耐摩耗性が要求されるため、通常、浸炭肌焼鋼が用いられる。近年、特に自動車の軽量化、低燃費化が大きな課題となっており、それに対応するための歯車の高強度・小型化が強く望まれるようになってきている。

歯車の強度特性には、耐曲げ疲労特性、耐ピッチング特性、耐摩耗特性及び耐衝撃特性がある。なかでも、歯元の曲げ疲労強度及びピッチング強度により、歯車の寿命が決定される場合が多く、その対応策として材料、熱処理及び加工面からの種々の研究が進められている。

本報告では、このような背景のもとで、自動車の変速機などに、用いられる歯車の疲労強度向上の要求にこたえるべく、開発した新日本製鐵の高強度歯車用鋼について述べる。

2. 曲げ疲労強度向上技術

2.1 曲げ疲労向上の考え方

浸炭歯車における疲労強度は、歯元強度（曲げ疲労強度）と歯面強度（ピッチング強度）に大別されるが、高強度化において最初の問題になる曲げ疲労強度についてまず述べる。

現行の JIS SCM420 鋼を用い、浸炭熱処理を行い、小野式回転曲げ疲労試験で破断した破面を観察した結果を写真 1 に示す。疲労亀裂は浸炭熱処理中に生成される粒界酸化層を起点とし、粒界破壊で

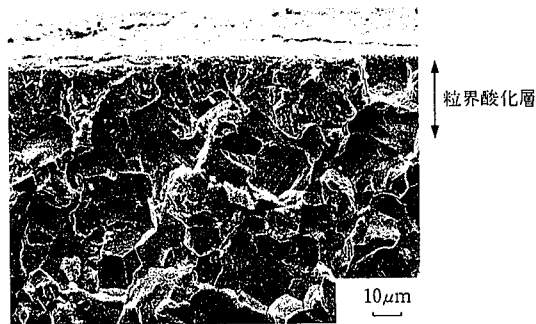


写真 1 浸炭材の曲げ疲労破壊起点部

進展し破壊に至っていることが分かる。

図 1 は同じく浸炭熱処理した疲労試験片の疲労試験後において、適当な時間で疲労試験を中断し、酸化法により疲労亀裂の進展状況を観察した結果¹⁾である。疲労亀裂は全体の疲労寿命に対しかなり早期に発生していることが、又、発生寿命（疲労亀裂発生までの繰返し回数）は負荷応力が高い程、短いことが分かる。これらの結果から浸炭部材の疲労強度を向上させるには、以下のことが有効であると分かる。すなわち、疲労亀裂の発生抑制の観点から、起点となる粒界酸化層の発生を抑制すること、又、残留応力の付与や表層硬度の増加により、実効的な負荷応力を減少させることである。

図 1 において、疲労限である応力振幅 686 MPa の結果をみると、全寿命の 99% を疲労亀裂の進展、停留状態が占めており、疲労強度

^{*(1)} 技術開発本部 室蘭技術研究部 主任研究員

^{*(2)} 名古屋支店 専門部長

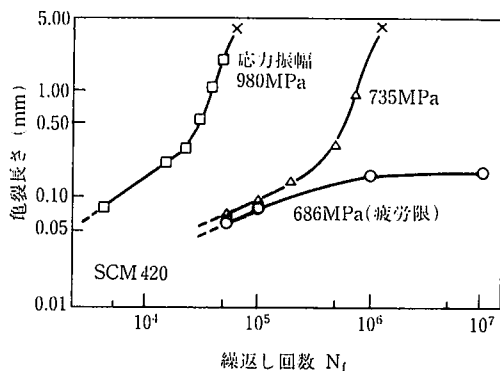


図1 浸炭材の疲労亀裂の発生、進展挙動

には疲労亀裂の停留特性も大きく影響していることが分かる。

破壊力学の観点より、疲労亀裂の停留条件は次式で表せる²⁾。

$$\Delta K_{eff} \leq \Delta K_{eff,th} (=const)$$

なお $\Delta K_{eff} = \sigma_a (\pi a)^{1/2} + K_{res} + K_{clos}$

σ_a : 疲労応力振幅 a : 亀裂長さ

K_{res} : 残留応力のK値換算

K_{clos} : 亀裂先端の閉口現象をK値で示したもの

(K_{op} : 亀裂開口時のK値 $= -(K_{res} + K_{clos})$)

すなわち、0.8% C鋼(浸炭層のC量)の下限界応力拡大係数 $\Delta K_{eff,th}$ はほぼ一定のため、疲労強度向上には、亀裂先端での有効応力拡大係数 ΔK_{eff} を $\Delta K_{eff,th}$ 以下に低減することが必要である。このためには、初期の亀裂長さである粒界酸化層の低減、及び亀裂閉口現象を促進する圧縮の残留応力の付与によって、亀裂先端に作用する実効的な引張応力を低減することが有効であることが導き出される。

以上のことから、浸炭部材の疲労強度を向上させるためには、鋼材と歯車製造の両面から条件を最適に整えることが重要である。すなわち鋼材としては、浸炭熱処理時の粒界酸化を最小限に抑え、且つ不可避のわずかな粒界酸化が生じて、表面の硬さの低下を最小限に、抑える合金設計をすること、又、結晶粒の微細化を図ることが有効である。歯車製造側としては、ショットピーニングにより、表面に適切な圧縮残留応力を付与することが、極めて有効であることが分かる。

2.2 曲げ疲労強度に及ぼす冶金因子の影響

浸炭熱処理時に生じる粒界酸化現象は、酸素との親和力が強い鋼中のSi, Cr, Mnの影響を強く受ける。粒界酸化層の深さは図2に示すように下の式で表され、粒界酸化の防止には特に鋼中のSiを低減することが有効であることが分かる³⁾。

$$\text{粒界酸化層深さ} (\mu\text{m}) = 13(\% \text{Si}) + 5(\% \text{Cr}) + \% \text{Mn} + 1$$

浸炭熱処理: 930°C, 5h

浸炭雰囲気中のカーボンポテンシャル: 0.8%

粒界酸化層の深さを抑えることにより、図3に示すように疲労強度は向上することが分かる⁴⁾。又、疲労破壊は粒界酸化層を起点として、粒界を進展していくため、細粒化により粒界を強化することも疲労強度向上に有効であることも確認している⁵⁾。

一方、疲労亀裂の進展及び停留特性に最も影響する因子は表層に存在する残留応力である。図4に表層残留応力の積分平均値と疲労限の関係を示す。残留応力の値が大きくなるとともに疲労限は向上することが分かる。通常の場合、浸炭焼入れで粒界酸化の生成により、表層に不完全焼き入れ組織が生成し、十分な圧縮の残留応力は付与されないことが多い。これに対して、粒界酸化層の抑制やシ

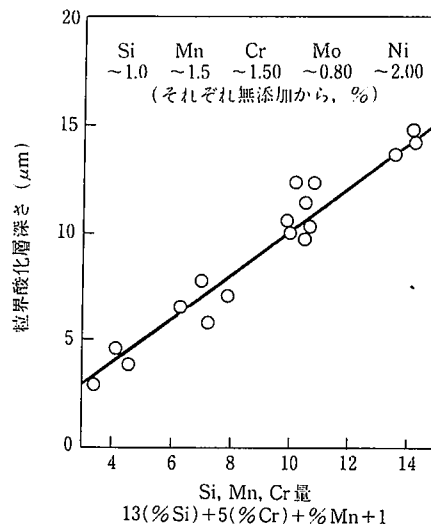


図2 粒界酸化層深さに及ぼす合金元素の影響 (930°C-5h, カーボンポテンシャル0.8%)

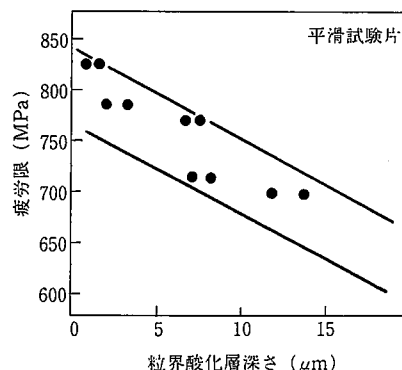


図3 粒界酸化層深さと疲労限の関係

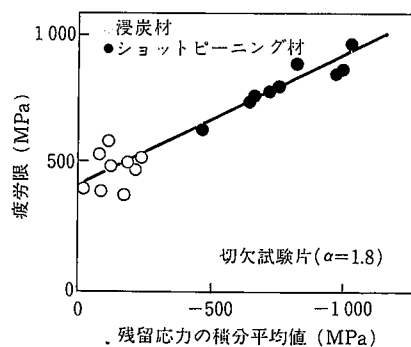


図4 圧縮残留応力と疲労限の関係 (表層から300μmまでの積分平均値)

ョットピーニング処理により、圧縮残留応力を増加することが可能である。

ところで、試験片の疲労特性を評価する場合、試験片を素材棒鋼の圧延方向と平行になる方向(L方向)に採取した回転曲げ疲労試験片により評価されるのが一般的である。従って、試験片の場合、疲労亀裂は圧延方向に直角に進展し破壊するが、実際の歯車の歯面疲労の多くはそれと異なり、疲労亀裂は素材棒鋼の圧延方向に平行に進展し破壊する場合が多い。そこで、実歯車ではなく、試験片で評価する場合、素材棒鋼の圧延方向に対して直角な方向(T方向)から採取した試験片で評価をしないと、実際の歯車になったときの

特性の評価を誤る恐れがある。

図5は上述の点を明らかにするため、疲労試験片の採取方向の違いにより疲労特性の異方性を検討した結果である⁹⁾。この図から、L方向に比べT方向の疲労強度が著しく低く、疲労強度に顕著な異方性があることが分かる。すなわち、実際の歯車では、通常の回転曲げ疲労試験で予測されるより、疲労強度が低下していることが推測される。この現象は鍛造、圧延により延伸されたMnSが原因で、いわゆる圧下比の影響を受けることが判明しており、この異方性はMnSの組成を制御し、過度な延伸を抑制することにより改善される。この疲労強度の異方性は実際の歯車の強度向上を図る場合、極めて重要な問題であり、新日本製鐵ではこの点も考慮した高強度鋼の開発を行っている。

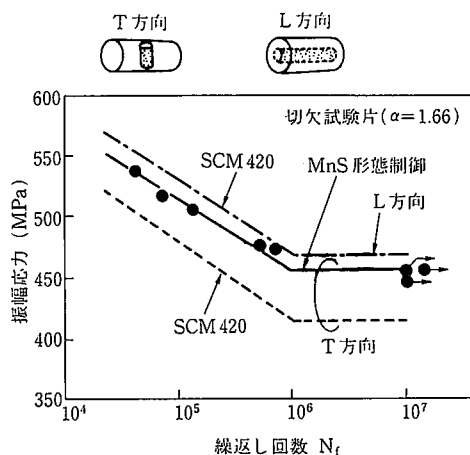


図5 疲労強度の異方性及び硫化物形態制御の影響

3. ピッチング強度向上技術

3.1 ピッチング疲労向上の考え方

近年、ハードショットピーニングの実用化に伴い、歯車の破損モードは歯元疲労から破面のピッチングへと移行してきており、ピッチング強度の向上要求は極めて強い。

現行のJIS SCM420鋼を用い、二円筒型ローラーピッチング試験片(試験ローラー: $\phi 26\text{mm}$, 負荷ローラー: $\phi 130\text{mm}$)を製作し、浸炭熱処理を行い、面圧2 648MPa、回転数25回 s^{-1} (1 500rpm)、滑り率40%、油温353Kの条件下でピッチング試験を行い、試験片断面の亀裂発生状況を観察した結果を写真2に示す。ピッチングの疲労亀裂は、曲げ疲労と同様に、浸炭熱処理中に生成する粒界酸化層を起点としていることが分かる。

図6は、同じくピッチング疲労において、適当な時間で疲労試験を中断し、試験片断面の疲労亀裂の進展状況を観察した結果⁷⁾である。疲労亀裂は全体の疲労寿命に對しかなり早期に発生していることが、又、発生した亀裂はピッチングに至るまでかなり遅い速度で進展していることが分かる。これらの結果から浸炭部材のピッチング強度を向上させるには、疲労亀裂の発生抑制の観点から、起点となる粒界酸化層の発生を抑制するのが有効であると分かる。

又、加工法としては、曲げ疲労と同様にショットピーニングにより、圧縮残留応力の付与が有効と類推されるが、ピーニング粒による表面の粗さなどが影響するので、表面粗さを抑制する鋼材を用いることが重要である。

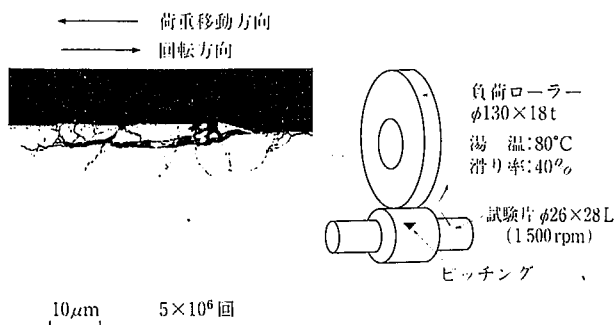


写真2 ピッチングにおける初期亀裂部

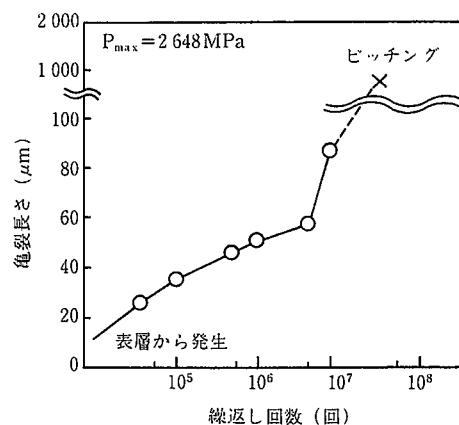


図6 繰返し回数と亀裂長さの関係 ($P_{\max}=2\,648\text{MPa}$)

3.2 ピッチング強度に及ぼす冶金因子の影響

鋼材側で最も影響が大きい因子は粒界酸化層であり、これを抑えることにより、図7に示すようにピッチング強度は向上することが分かる。この理由は疲労亀裂の発生が遅れること、すなわち発生寿命の延長によることも確認している。

一方、加工法の面から、疲労亀裂の発生、進展特性に最も影響する因子は、ショットピーニング処理により圧縮残留応力を付与することや、表面を清浄化(粒界酸化層の除去、表面粗度の軽減)することである。ピッチング強度に及ぼすこれらの影響を調査した⁸⁾。

図8にローラーピッチング試験結果を示す。浸炭焼入れ焼戻し材に比べ、ショットピーニング材及び電解研磨材で疲労限が向上することが分かる。この疲労亀裂の発生、進展挙動を調査するために、図6と同様に、疲労亀裂の進展状況を観察した結果を図9に示す。この図から、ショットピーニング材及び電解研磨材のピッチング強

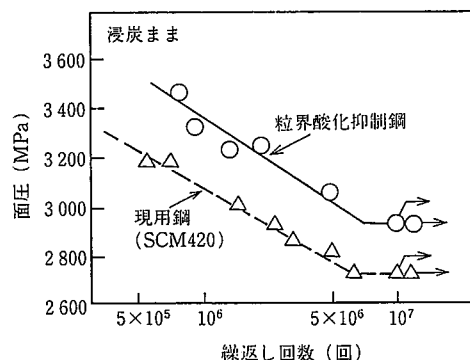


図7 粒界酸化層の抑制によるピッチング強度の向上

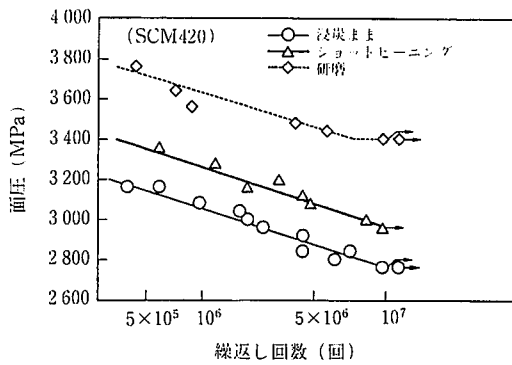


図 8 表面処理とピッチング強度の関係

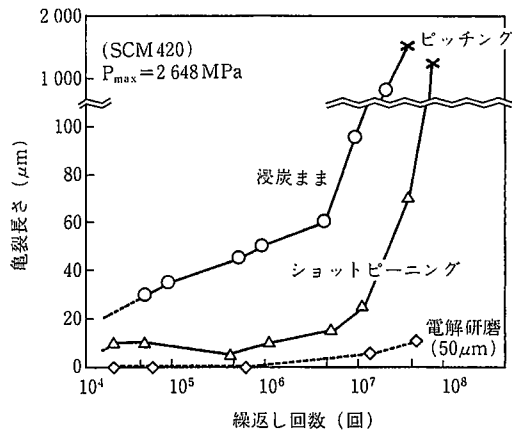


図 9 亀裂の発生、進展挙動に及ぼす表面処理の影響

度の向上は、ともに亀裂発生寿命の延長によることが分かる。

以上の結果から、鋼材としては粒界酸化層の抑制、加工法ではショットピーニング及び表面清浄化（電解研磨）がピッチング強度向上に有効な手段である。

4. 高強度歯車用鋼

上記の基礎検討をもとに開発した高強度歯車用鋼の例を表1に示す。粒界酸化層生成を助長する元素であるSiを低減し、焼入れ性をMoとVで補てんし、Vにより細粒化効果を持たせている。又、歯車の疲労特性の異方性に対しては、写真3のようにCa添加によりMnSを(Ca,Mn)Sに改質し、過度なMnSの伸長を抑えている。

この開発鋼を930°C、5hの浸炭処理を施し、そのときの粒界酸化の発生状況及び浸炭粒を現行のJIS SCM420鋼と比較して写真4に示す。開発した高強度鋼はほとんど粒界酸化層は見られず、又、十分な細粒化も図られており、現行のSCM420との差は顕著であることが分かる。

浸炭後は近年多用されてきたエアークラウド方式によるハードショットピーニングを行い、新日本製鐵開発の試験機により一歯曲げ疲労試験を行った。本装置の外観を図10に示す。従来の一歯曲げ疲労試験機は測定値のばらつきが大きいという問題を有していたが、本装置は1) 歯車同志のかみ合いによる応力作用点の固定化、2) 至ゲージによる歯元応力の制御により、極めてばらつきの少ない一歯曲げ疲労試験を達成している。

通常 SCM420では、粒界酸化の生成により不完全焼入れ層が表層部に生じる。表層が十分に硬化しないためハードショットピーニングを行うと、そのために表層が大きく荒れ、疲労亀裂の発生の起点

になるという逆効果が見られる。しかし、表層が十分硬化されている本開発鋼では、ハードショットピーニングの効果が十分に引き出され、かつ異方性の軽減も図られているため、図11に示すように、現行材を通常のショットピーニングで処理した場合に比べ、極めて高い歯曲げ疲労強度を得ることができた。

歯曲げ疲労の向上の次に問題となるピッチングに対しても本開発鋼は有効であり、ローラーピッチング疲労試験において、疲労寿命が2倍以上に向上していることも確認した。

表 1 高強度歯車用鋼化学成分例 (wt %)

C	Si	Mn	S	Cr	Mo	V	Ca	O
0.20	低減	0.50/0.70	0.015	0.50/0.90	0.75	0.1	添加	低減

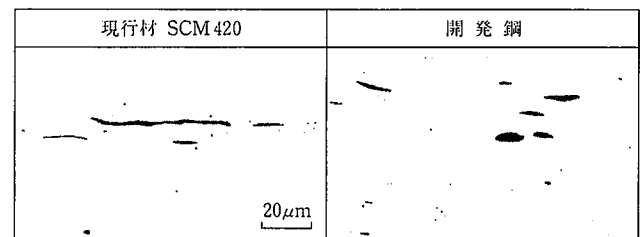


写真 3 高強度歯車用鋼のMnSの形態制御例

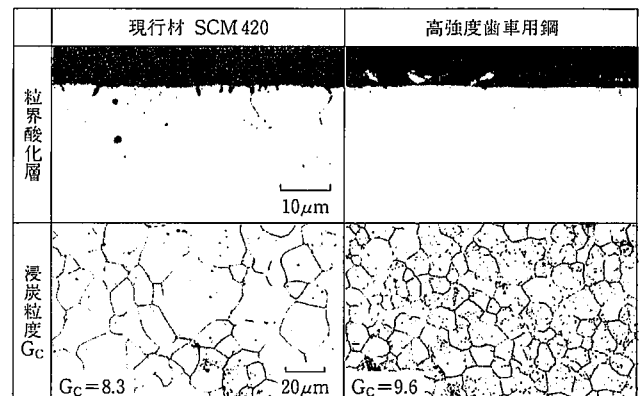


写真 4 高強度歯車用鋼の浸炭後の組織

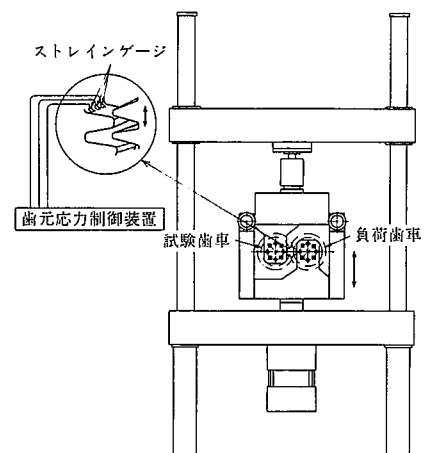


図 10 一歯曲げ疲労試験機

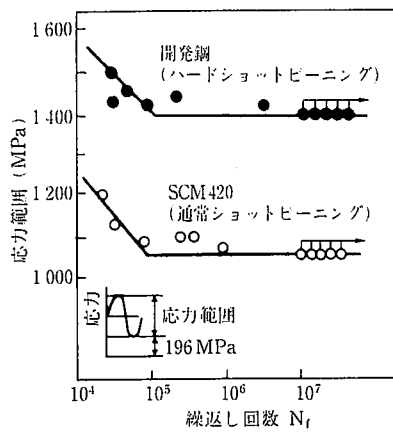


図 11 高強度歯車用鋼の歯曲げ疲労特性

5. 結 言

以上、自動車の軽量化、燃費改善に対応するため、新日本製鐵で取り組んでいる高強度歯車用鋼の開発状況について述べた。

高強度歯車の開発には、材料開発とともにその特性を最大限に引き出すための最適な設計、製造方法、加工方法を適切に組み合わせることが重要である。又、自動車部品においてはその高性能化と良燃費は永遠の課題であり、この二つのニーズにこたえる高強度鋼の重要性は、今後、ますます高まっていくものと思われる。

参 照 文 献

- 1) Naito, K., Ochi, T., Takahashi, T., Suzuki, N.: Proc. Fourth International Conf. on Shot Peening. (1990), p.519
- 2) 征矢, 田中: 溶接学会講演概要. 37, p.334 (1985)
- 3) 日本特許出願公告 昭55-32777. 1980年8月27日
- 4) 蟹澤, 森, 奥野: 鉄と鋼. 73, S1303 (1987)
- 5) 蟹澤, 森, 奥野: 材料とプロセス. 2, p.1981 (1989)
- 6) 蟹澤, 子安, 森: 日本鉄鋼協会北海道支部大会春期 講演大会予稿集. (1991) p.30
- 7) 蟹澤, 子安: 日本鉄鋼協会北海道支部大会春期 講演大会予稿集. (1992) p.29
- 8) 蟹澤, 子安: 材料とプロセス. 6, p.1767 (1993)