論 説

高強度歯車用鋼の実用化

並木邦夫*, 杉浦三朗**, 梅垣俊造***岡田義夫****
谷 意公夫*****

The Application Study on High Performance Gear Steel

Kunio Namiki, Saburoh Sugiura, Shunzoh Umegaki,
Yoshio Okada and Ikuo Tani

Synopsis

As many of the power train components have to withstand higher loads with increasing engine power, high performance gear steels have been strongly demanded. In accordance with these trends the application study on the high performance gear steel has been conducted.

The results obtained from this study are as follows.

- (1) The chemical composition of the new grade is $0.18C-Si < 0.15-0.70Mn-1.0Cr-0.40Mo$. This steel is characterized by decreasing strong oxide former, Si and austenite grain embrittling element, P and by increasing Mo content to enhance the case toughness.
- (2) The new grade shows higher fracture resistance than conventional steels from the both points of view, impact fracture strength and fatigue strength.
- (3) On the basis of the fundamental and application studies, the new grade has been applied to high performance Nissan passenger cars.

1. 緒 言

自動車の高出力化・高性能化の動きはますます加速する傾向にあり、これに用いられる動力伝達部品にもより高強度化が望まれるようになった。特にトランスミッション歯車、ディファレンシャル歯車などは空間の制限があるため歯車の大型化は難しく、同一諸元の歯車を用いようとするれば歯車の高強度化を図らねばならない。いっぽう歯車

の高強度化により歯幅が減少できればトランスミッションボックスの小型化が図れ、自動車室内空間の拡大、あるいは自動車の軽量化といった利点が生ずる。特に米国における燃費効率法案の検討にともない、自動車部品のコンパクト・軽量化への動きはさらに急になると思われる。

歯車の高強度化に当っては、歯車材料、加工、熱処理さらには設計を含めた総合的な検討が必要であるが新歯車材料の開発が最も重要であることはいうまでもない。歯車材料には耐摩耗性と疲れ強度を付与するため、従来より浸炭肌焼鋼が用いられてきたが、肌焼鋼の疲れ強さに及ぼす諸因子の影響については多くの研究がなされている^{1)~10)}。いっぽう、歯車によっては繰返し応力のみならず、衝撃負荷も懸かるため耐衝撃性に及ぼすミクロ組織、焼入性、主要合金元素、残留応

1989年10月31日 受付

*大同特殊鋼㈱研究開発本部

**大同特殊鋼㈱技術サービス第二部, 工博

***日産自動車㈱吉原工場

****日産自動車㈱第二技術部

*****日産自動車㈱中央研究所材料研究所

力の影響なども検討されてきた^{11)~15)}。また繰り返し応力に過負荷が加わるような実用歯車に近い応力負荷状態における歯車材料の破壊挙動も検討されるようになった^{16), 17)}。

こうした動向にあつて、著者らは、まず浸炭層の靱性に注目し不純物元素および主要合金元素の影響を明らかにした^{18), 19)}。さらに実際の浸炭鋼の疲れ特性および衝撃特性に及ぼす合金元素の影響を明確にし^{20)~23)}、2~3の高強度歯車用鋼を開発をしてきた。これに引き続き、高強度歯車用鋼の一つを自動車ディファレンシャル歯車、およびトランスミッション歯車へ適用すべく実用化研究を行ったので、その結果を報告する。

2. 実用歯車の破壊機構

ビニオンメイト歯車はサイド歯車と噛み合う差動歯車（ディファレンシャル歯車）の一つであるが、急発進・急停止時に衝撃応力が負荷される。そこで、まずディファレンシャル・ユニットを用いた繰り返し衝撃試験を実施し、歯車の破壊機構を検討した。試験機の機構を Fig. 1 に示す。ここで衝撃負荷はトルク、 $420\text{kgf}\cdot\text{m}$ 、回転数 120rpm で回転するユニットの一方の軸を急激に制動することにより懸けられる。この操作を繰り返し、破壊までの耐用繰り返し数で実部品の耐衝撃性を評価するものである。

Photo. 1 に100サイクルで破壊したテストギヤの外観を示す。鋼種は JIS SCM 418 である。いずれの歯も歯元から破損しているが、一部歯面からクラックが発生している様子も観察される。衝撃破壊破面を走査型電子顕微鏡で観察した結果、表層から有効硬化層深さ（HV 550 の得られる深さ：調査歯車では約 0.7mm ）にかけては旧オーステナイト粒界に沿った粒界破壊、また内部は粒内破壊を呈することがわかった。さらに破損に至らなかった歯の歯元部の断面観察結果を Photo. 2 に示す。表面の白色層は観察のための Ni メッキである。表層近傍に約 $20\mu\text{m}$ の粒界酸化層が観察されること、さらにこの粒界酸化層を起点としてクラックが発生し、蛇行しながら進行していることが観察される。腐食により粒界を現出させた結果、このクラックはオーステナイト粒界に沿って進展していることが確認された。

Fig. 1. Schematic illustration of the repetition impact tester.

Photo. 1. The appearance of fractured differential pinion-mate gear.

Photo. 2. An example of crack initiated from intergranular oxidation.

3. 合金設計の考え方

実用歯車の調査により、衝撃破壊クラックは粒界酸化を起点として発生すること、また浸炭層をオーステナイト粒界に沿って伝播することが明ら

かとなったため、この見地から高強度歯車用鋼、ここでは特に耐衝撃性の優れる歯車用鋼の合金設計を行った。

粒界酸化とはRXガスを搬送ガスに用いた通常のガス浸炭において観察されるもので、オーステナイト粒界が酸化雰囲気中で優先的に酸化される現象である。従来より多くの研究がなされているが^{24)~27)}、さらに酸化物形成能の大きいSi, Mn, Crなどは焼入性向上元素でもあるため酸化物の形成により、この近傍ではこれら元素濃度が減少し焼入性が劣化してトルスタイトのような不完全焼入組織が形成されることが確認されている²⁸⁾。また各合金元素によって酸化物の形成形態も異なり、Crは表層のみ、Mnはやや深くまで、Siは最も深くまで粒界酸化物を形成することが確認されている²⁵⁾。著者らは粒界酸化層に及ぼす合金元素の影響について検討し粒界酸化層深さは $10\text{Si}+\text{Mn}+\text{Cr}$ (wt %) で整理できること、また疲れ強さは粒界酸化層の軽減により向上することを明らかにしてきた^{20),21)}。いっぽう、浸炭鋼の靱性については、クラックの発生挙動が寿命を決定するとの立場から、浸炭層を想定した0.8% C鋼を溶製し、浸炭層の靱性に及ぼす合金元素の影響を調べてきた¹⁹⁾。その結果、Ni, Mo, Crは靱性を増加させること、Mnは反対に劣化させることが明らかとなった。さらに、不純物元素についても検討を加え、Pはオーステナイト粒界に偏析し粒界脆化をもたらして浸炭層の靱性を劣化させること、MoはPの粒界偏析を防止することはできな

いものの脆化を抑制できることなどを明らかにしてきた^{18),22)}。なおこれらの知見は実際の浸炭歯車を用いた衝撃試験でも確認された²³⁾。

従って耐衝撃性の優れる高強度歯車、合金設計の考え方は下記の通りである。なお当該ビニオンメイト歯車については含Ni系肌焼鋼SNCM 420と同等の性能が得られれば要求水準を満足することがわかっているためNiを含まずSNCM 420と同等以上の性能を有する比較的低廉な材料であることも開発の狙いとした。

高強度歯車用鋼の化学成分をTable 1に示す。まず粒界酸化を軽減するため、最も酸化物形成能の大きいSiを0.15%以下とし、Siについて深くまで酸化物を形成するMnを0.7%まで低下させた。また浸炭層の靱性を高める元素、Moを0.4%添加した。Moは0.6%までは靱性を高めることを確認しているが²⁹⁾、高価な元素であること、さらに多量の添加は焼ならしでベイナイト組織を増加させ被削性を劣化させることが懸念されるため0.4%とした。さらに粒界偏析・脆化元素Pは0.015%以下とした。SはMnSを形成し圧延方向に直角方向の靱性を劣化させるため少量ほど好ましいが、被削性を考慮し0.015%添加とした。

4. 0.18C - 0.7Mn - 1.0Cr - 0.4Mo鋼の基礎特性

4.1 実験方法

供試材の化学成分をTable 2に示す。比較鋼としてJIS SCM 418およびSNCM 420を用いた。0.18C-0.7Mn - 1.0Cr - 0.4Mo鋼（以下、開発鋼と呼ぶ）は2tアーク炉で溶製後、直径90mmの丸棒に熱間圧延し、900℃で焼ならし後、実験に供した。比較材は量産市販材より153mm角のビレットを入手、熱間鍛造にて90mmの丸棒を得た。

その後、90mm丸の素材より歯車試験片を機械

Table 1. Chemical composition of the new grade. (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.18	<0.15	0.70	<0.015	0.015	1.00	0.40

Table 2. Chemical composition of test steels.

(wt %)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
New grade	0.18	0.07	0.67	0.006	0.012	0.08	0.95	0.39
SCM 418	0.18	0.26	0.77	0.017	0.017	0.10	1.02	0.16
SNCM 420	0.19	0.20	0.59	0.015	0.015	1.74	0.49	0.20

加工し浸炭焼入・焼もどし後、歯車疲れ試験および衝撃試験を行った。浸炭は910℃で浸炭時間および拡散時間、それぞれ3.5, 2hの組み合わせで行い、830℃に30min保持後80℃の油中に焼入れた。また焼もどしは、180℃で行った。歯車疲れ試験はモジュールが2.5、圧力角20°、歯数がそれぞれ28と32の組み合わせの小歯車と大歯車を用い、動力循環式歯車試験機にて実施した。また衝撃試験は一对の上記小歯車を噛み合わせ、Fig. 2に示す要領で行った。回転歯車はインパクトアームと連結されており、このアームを振り上げ角度55°より落下させたハンマーで打撃することにより固定歯車との間で衝撃荷重が付加される。ハンマーに計装されたロードセルにより衝撃負荷時の応力-時間曲線を求め、ここでは最大負荷荷重をもって衝撃破壊強さとした。なお、主題のピニオンメイト歯車

Fig. 2. Gear impact testing machine.

は、カサ歯車であるが実験の簡易化のため試験歯車は平歯車としてある。

さらに歯車の硬さ分布、残留オーステナイト量測定、マイクロ組織観察を行うとともに、走査型電子顕微鏡による破面観察を行って検討を加えた。

4.2 結果および検討

4.2.1 浸炭特性

試験歯車の硬さ分布および残留オーステナイト測定結果をFig. 3とTable 3に示す。開発鋼は表面から約1.0mm以内では比較鋼とほぼ同等の硬さを有しているが、心部硬さはやや低めである。また有効硬化層深さは0.75~0.80mmであった。なおSNCM 420は残留オーステナイト量が他鋼種に比べ多いため表面近傍硬さ（表面から0.05mm深さ）が若干低下している。

歯元近傍のマイクロ組織をPhoto. 3に示す。表面の白色層は観察のためのNiメッキである。3鋼種の粒界酸化層に明瞭な相違が認められる。開発鋼においても完全に粒界酸化層を消滅させることは不可能であるが、その深さは比較鋼が10~15

Fig. 3. Hardness profile of test gears.

Table 3. Carburizing properties of test gears.

Steel	Surface hardness (HV)	Effective case depth (mm)	Core hardness (HV)	Retained austenite (%)
New grade	741	0.75	316	17.9
SCM 418	710	0.75	367	20.1
SNCM 420	659	0.80	405	25.8

Photo. 3. Optical micrographs of the tooth root of test gears.

20 μ m

μ mであるのに対し、開発鋼は10 μ m以下であった。これは、特にSiを0.07%まで低減した効果である。また腐食後の観察写真に認められる粒界酸化層近傍の不完全焼入組織は従来鋼、SCM 418よりも軽微であり、これは粒界酸化層そのものが軽微であること、さらにMoを0.4%まで高めたことにより粒界酸化層近傍の焼入性が補完されているためと考えられる。

4.2.2 歯車衝撃特性

歯車衝撃試験を行い、計装化ハンマーで求めた、衝撃破壊時の最大荷重をFig. 4に示す。ばらつきはあるものの3鋼種の中では開発鋼の破壊荷重が最も高く、耐衝撃性に優れることを示している。Photo.4は試験歯車の破壊起点近傍を走査型電子顕微鏡で観察した結果である。破面は粒界破面と粒内破面から成るが、これらの割合は鋼種によって異なることが特徴である。すなわち、開発鋼の粒界破面は起点近傍に限られ、粒界破面率が他鋼種に比べて小さい。これはオーステナイト粒界の強度が他の鋼種に比べ高いことを示すものであるが、その理由は下記の3点と考えられる。まず粒界酸化層の軽減により、クラックの発生が抑制されたこと、第2にP量の低減によりオーステナイ

Fig. 4. Gear impact test result.

ト粒界への偏析量が減少したことである。またMo量の増加によりPの粒界脆化作用を抑制したこと、さらに機構そのものはまだ明確に解明されていないが、Mo単独による靱性向上効果によるものと考えられる。

今回の試験結果を一連の高強度歯車用鋼およびJIS鋼のデータと比較するため、破壊荷重を合金元素パラメータ $(\text{Ni} + \text{Mo}) / (10\text{Si} + \text{Mn} + \text{Cr})$ で

Photo. 4. SEM fractographs of fractured gears.

Fig. 5. Relation between impact fracture load and alloying parameter.

Fig. 6. Tooth root fatigue properties.

整理した結果を Fig. 5 に示す²⁸⁾。このパラメータは元来、疲れ強さと合金元素との相関を求めるために考案したものであり、分母は粒界酸化層深さと比例関係にあり、分子は疲れ強さを向上させる元素の量をとったものである。その結果、歯車衝撃強さも当パラメータで良く整理できることを示している。ここで高強度鋼のグループは JIS 鋼に比べ等パラメータにおいても強度が高いが、これはパラメータに含まれる以外の元素、すなわち P の低減効果によるものと考えられる。含 Ni 鋼に比べ Mo 単独添加鋼が同等の衝撃強さを示すのは注目に値しよう。

なお、落垂型の衝撃試験結果によっても、当開発鋼は SNCM 420 に比べ破壊までの繰り返し衝撃回数が 2～7 倍となることを確認している³⁰⁾。

4.2.3 歯車疲れ特性

Fig. 6 に動力循環式歯車試験の結果を示す。開発鋼は従来鋼 SCM 418 より優れ、SNCM 420 とほぼ同等の疲れ特性を示すことがわかる。なお疲れ破壊後の破面を走査型電子顕微鏡で観察した結果、衝撃歯車と同様、開発鋼の粒界破面率は比較鋼に比べ小さいことも判明した。

5. 実用特性

以上のように開発鋼は衝撃強さのみならず疲れ強さにも優れていることが判明したため、次に実用化試験を行った。電気炉溶解、熱間圧延後、熱間鍛造にてピニオンメイト歯車の粗形品となし、その後焼ならし、機械加工、浸炭を施した。ピニオンメイトの外観を Photo. 5 に示す。Fig. 1 に示すディファレンシャル・ユニットによる繰り返し

Photo. 5. An example of differential gear.

Fig. 7. Gear assembly test result.

衝撃試験の結果を Fig. 7 に示した。クラック発生までの衝撃繰り返し数をワイブル解析した結果である。SNCM 420 に比べやや寿命が長い傾向にあり、Fig. 4 に示した衝撃強さと同様の結果が得られた。すなわち100回前後という極めて低サイクルの衝撃疲れ強さは、1回の衝撃強さと良い相関を有することを示すものである。これは歯車一歯を模した試験片での衝撃破壊強さと、ロウ・ブローによる破壊までの繰り返し衝撃回数が良い相関を示すとの Diesburg らの実験結果¹⁴⁾とも対応しており、本実験での歯車衝撃試験は実用特性を一応評価できると考えて良からう。

さらに実車での性能評価を踏まえ、当開発鋼はディファレンシャルユニットの一部、ピニオンメ

イト歯車に適用されている。

6. ショットピーニングの適用

6.1 目的

ショットピーニングは古くからの技術であるが、近年の自動車部品の高強度化手法として見直されつつある。その目的は被加工材の表面近傍に圧縮残留応力を付与し、部品使用時の実質の引張応力を低下させること、さらに表面硬さの増加により疲れ強さを高めることである。自動車部品への適用も古くから行われているが^{31)~33)}、その効果をより発揮させるために、より大きな投射エネルギーでのショットピーニング（ここではアークハイト $\geq 0.6\text{mmA}$ のピーニングを便宜上、ハードショットピーニングと呼ぶ）が検討されるようになった³⁴⁾。ところがハードピーニングの場合、浸炭部品の表面に粒界酸化および浸炭異常層が存在すると、表面粗度を劣化させ疲れ強さもむしろ低下することが懸念される^{35)~37)}。この意味で粒界酸化軽減鋼である当開発鋼はハードショットピーニングに適すると考えられる。そこで歯車試験片を用いて疲れ強さに及ぼすショットピーニングの影響を検討した。

6.2 実験方法

供試材は Table 2 に示した本開発鋼であり、試験歯車の加工、浸炭焼入れ条件はすべて前述した通りである。ただし浸炭焼入れは Fig. 6 に結果を示した試験とは別ロットであり、焼もどし温度は 160°C とした。ショットピーニングはインペレータータイプのピーニング機を用いアークハイト 0.45mmA （通常ピーニング）と 0.67mmA （ハードピーニング）の2水準で実施した。投射材はいずれも直径 0.6mm であるが、その硬さは通常用ではHRC 42、ハード用、HRC 52である。また投射速度はそれぞれ64, 76m/secであり、投射時間はいずれも2min、カヴァレッジは300%とした。その後、内孔のみ精加工を施し試験に供した。

6.3 結果および検討

まず歯車試験片の硬さ分布、残留オーステナイト量および残留応力などについて測定した結果を Table 4 に示す。アークハイトの増大とともに表面近傍硬さは高くなり残留オーステナイトは減少することがわかる。表面近傍硬さの増加幅はHV 50~70であり、残留オーステナイトは $1/2 \sim 1/3$ に

Table 4. Case properties of shot peened gears.

Arc height (mmA)	Surface hardness (HV)	Effective case depth (mm)	Core hardness (HV)	Intergranular oxidation depth (μm)	Amount of retained austenite(%)	Residual stress (kgf/mm^2)
—	744	0.95	340	5	21.8	-13.0
0.45	786	0.90	368	3	11.6	-47.0
0.67	810	0.90	370	3	8.4	-57.1

Fig. 8. Effect of shot peening on the gear fatigue properties of the new grade.

減少する。また歯面でX線法すなわち $\sin^2\psi$ 法で測定した圧縮残留応力は3～4倍となることがわかった。なお表面層を電解研磨で除去しつつ応力測定を繰り返した結果、アークハイト0.67Aの場合、表面から0.05mmの距離で圧縮応力は最大となりその値は100kgf/mm²に達することを確認している。

Fig. 8に歯車疲れ試験結果を示す。浸炭焼入・焼もどしのままに比べ、ショットピーニング材は10⁷疲れ限度、高応力時間強さともに向上することを示している。特にアークハイト0.67Aの疲れ強さは10⁵、10⁷でそれぞれ110、95kgf/mm²であり、これは約25%の向上に相当する。こうした疲れ強さの増加は表面近傍の圧縮応力と、表面硬さの増大によるものであるが、最近では表面層の圧縮応力の累積値により疲れ強さの増加度が整理できるとの報告もなされている³⁸⁾。

またショットピーニングの効果は鋼種によらず一般的に認められるものであるが、耐粒界酸化鋼ともいべき本開発鋼においては前述したよう

に、肌荒れや歯車精度を懸念することなく疲れ強さの大幅向上を狙ったハードピーニングを施すことが可能といえる。

これらの知見をもとに、本開発鋼は疲れ強さが特に要求される高負荷用トランスミッションギヤとして、耐久試験をクリアし、ハードショットピーニングの量産への適用が行われている。ショットピーニングの適用については稿をあらため、別報で詳細を報告の予定である。

7. 結 言

耐衝撃性と耐疲れ特性に優れる高強度歯車用鋼の実用化研究を行い下記の結論を得た。

(1) 浸炭異常層を軽減し、さらに浸炭層の靱性を向上できる歯車用鋼として0.18C-Si<0.15-0.7Mn-1Cr-0.4Mo鋼を合金設計した。

(2) 試験歯車により評価した本開発鋼の耐衝撃性および疲れ特性は通常鋼SCM 418より優れ、含Ni鋼SNCM 420と同等以上である。

(3) 本開発鋼はディファレンシャル・ユニットを用いた繰り返し衝撃試験でも良好な結果を得、高出力車種用ビニオンメイトギヤとして適用している。

(4) 本鋼はハードショットピーニング用にも適しておりショットピーニングにより疲れ強さは約25%向上する。

最後に本実験に当り熱心にご協力頂いた、研究開発本部特殊鋼研究所、構造材料研究室、渥美安二、土川一樹の両氏に感謝致します。

(文 献)

- たとえば、日本機械学会編：金属材料疲労強度の設計資料
- D.E.Diesburg : SAE Technical Paper Series, 780771(1978)
- D.E.Diesburg and G.T.Eldis : Metall.

- Trans. A, **9A**(1978), 1561
- 4) 古川, 小沼, 酒庭 : 鉄と鋼, **65**(1979), 1024
 - 5) 古川, 小沼, 西脇 : 鉄と鋼, **67**(1981), 596
 - 6) H.Wiegand and G.Tolasch : Haertere Tech. Mitt. **22**(1967), 330
 - 7) R.H.Richman and R.W.Landgraf : Metall. Trans. A, **6A**(1975), 955
 - 8) H.Brandis and W.Schmidt : TMS Paper Selection, A83-3
 - 9) 山崎ら : 材料, **31** (1982), 915
 - 10) 岡崎, 長谷川 : 関西造船協会誌, (1980), 178, 113
 - 11) G.Krauss : Metall.Trans. A, **9A**(1979), 1527
 - 12) Y.E.Smith and D.E.Diesburg : Metal Prog., **115** (1979) 5, 68
 - 13) D.E.Diesburg and Y.E.Smith : Metal Prog., **115**(1979) 6, 35
 - 14) D.E.Diesburg and Y.E.Smith : Metal Prog., **116**(1979) 2, 67
 - 15) M.M.Shea : SAE Technical Paper Series 780772 (1978)
 - 16) T.B.Cameron, D.E.Diesburg and C.Kim : Journal of Metals, **35** (1983) 7, 37
 - 17) T.B.Cameron : SAE Technical Paper Series 841089(1984)
 - 18) 並木, 礒川 : 鉄と鋼, **72**(1986), 2117
 - 19) 礒川, 並木 : 電気製鋼, **57** (1986), 4
 - 20) 礒川, 並木 : 電気製鋼, **57** (1986), 13
 - 21) K.Namiki and K.Isokawa : Trans. ISIJ, **26**(1986), 642
 - 22) 並木, 飯久保, 斉藤 : 鉄と鋼, **73**(1987), A 275
 - 23) 並木, 飯久保 : 電気製鋼, **59** (1988), 5
 - 24) H.Schenck, E. Schmidtman und H.Müller : Arch.Eisenhüttenwes., **31**(1960), 121
 - 25) R.Chatterjee-Fischer : Metall.Trans.A, **9A**(1978), 1533
 - 26) 市原, 各和 : 日本金属学会誌, **30**(1966), 307
 - 27) 市原, 各和 : 日本金属学会誌, **32**(1968), 745
 - 28) 内藤 : 浸炭焼入れの実際, (1979), 180〔日刊工業新聞社〕
 - 29) 上原, 並木, P.Evon : 鉄と鋼, **67**(1981), S 1349
 - 30) 日産自動車㈱ : 社内資料
 - 31) 久松, 金沢 : 自動車技術, **41** (1987), 722
 - 32) M.D.Lawrenz : SAE Technical Paper Series, 841090 (1984)
 - 33) N.K.Burrell : SAE Technical Paper Series(1985), 850365
 - 34) Y.Miwa, M.Suzawa, Y.Arimi, Y.Kojima and K.Nishimura : SAE Technical Paper Series, 880666 (1986)
 - 35) R.Schreiber, H.Wohlfahrt und E.Macher-auch : Arch. Eisenhüttenwes., **48** (1977), 649
 - 36) R.Schreiber, H.Wohlfahrt und E.Macher-auch : Arch.Eisenhüttenwes., **49**(1978), 37
 - 37) R.Schreiber, H.Wohlfahrt und E.Macher-auch : Arch.Eisenhüttenwes., **49**(1978), 265
 - 38) 岡田, 田原, 松本, 吉田 : 自動車技術協会, 春期学術講演大会前刷集, **891**(1989), 891039