

# 浸炭・鍛造焼入れによる高疲労強度傘歯車の開発

© 1992 ISIJ  
 ///////////////  
 論文  
 ///////////////

伏見 慎二\*・島村 三郎\*<sup>2</sup>

## Development of High Fatigue Strength Bevel Gears by Forge-Quenching after Carburizing

Shinji FUSHIMI and Saburo SHIMAMURA

### Synopsis :

In the previous report, basic tests conducted on test pieces revealed the possibility of improvement of bevel gear strength through the combined application of carburizing and forge-quenching.

A study was then made of suitable manufacturing conditions including the blank shape, die shape and forging temperature, and metallurgical structures and mechanical properties were examined.

The following results were obtained in carburized, forge-quenched gears and bevel gears that were by conventional process. (1) Bevel gear strength was reduced due to increased surface roughness as a result of oxidation when gears were forged at temperatures over 1050°C. (2) Low cycle fatigue life of the gear corner R of tooth root was 100 times longer at a forging temperature of 1050°C, but 40 times longer at forging temperatures of 850 or 950°C. (3) The bending fatigue limit of the corner R of tooth root was 40% higher at a forging temperature of 850°C, but 20% higher at 1050°C. (4) Gear accuracy was nearly equal to that of gears manufactured by a conventional machining process.

The results of these tests have led to the development of higher fatigue strength bevel gears.

**Key words :** carburizing ; forge-quenched ; bevel gear ; mechanical properties of bevel gears ; gear accuracy.

## 1. 緒 言

自動車用エンジンの高出力、高性能化に伴う動力伝達系歯車の高強度化および強靱化は、部品およびユニットの小型軽量化ならびに原価低減ニーズの面からも永遠のテーマであり、歯車諸元<sup>1)2)</sup>、歯車用鋼<sup>3)4)</sup>、加工方法<sup>5)6)</sup>、および熱処理法<sup>7)~10)</sup>、など多くの研究が各方面で続けられている。

本研究は加工熱処理の面から高強度化を検討しているものの一つで、現在実用化されている浸炭<sup>11)~13)</sup>、鍛造焼入れ<sup>14)~17)</sup>および精密歯形鍛造<sup>18)19)</sup>の3つの技術を複合化して、より一層高強度化することを狙いとするものである。

すでに報告<sup>8)9)</sup>したように、浸炭・鍛造焼入れ法の基礎特性の把握に引き続き、素材に浸炭後精密歯形鍛造し、ただちに焼入れ、焼もどしし、その後歯面を基準面にし

て、背面とシャフト穴のみ c-BN 工具で加工仕上げする工法で、小型傘歯車を試作した。

本報告は試作品の諸物性、機械的性質および歯車精度について調査したものである。

実験に先だってまとめた技術上の課題は次のとおりである。

(1) 浸炭後歯形鍛造焼入れしたものは、硬さが HRC 60 以上になり、冷間サイジングが不可能になる。そのため精度確保方法の確立。ただし、温間鍛造のままでも JIS3 級を十分満足するとの報告<sup>19)</sup>もあるので確認する。

(2) シャフト穴内面に浸炭層を付与するための、素材の前形状を含めた型設計、製造技術の検討。

(3) 仕上げ加工後に背面の浸炭層を 0.5 mm 以上残すため、加工代を 0.3 mm 以下にするニアネットシェイプ技術。

平成 3 年 8 月 28 日受付 平成 4 年 4 月 10 日受理 (Received on Aug. 28, 1991 ; Accepted on Apr. 10, 1992)

\* 日産自動車(株)総合研究所 (Nissan Research Center, Nissan Motor Co., Ltd., 1 Natsushima-cho Yokosuka 237)

\*<sup>2</sup> 日産自動車(株)第二技術部 (Production Engineering Department No. 2, Nissan Motor Co., Ltd.)

(4) 歯底すみ R 部の最適浸炭層の確保。

以上を念頭においた素材の前形状、金型構成および工程設定を行った。

試作した傘歯車を、歯切り後浸炭焼入れした歯車と比較した結果、歯車精度はほぼ同等、低サイクル疲労寿命は 40~100 倍、高サイクルの歯元曲げ疲労限は約 20~40%、時間寿命も 5~10 倍向上する高疲労強度傘歯車を得ることができたので、その詳細について報告する。

2. 実験方法

2.1 対象傘歯車の諸元および材質

対象とした歯車の諸元および形状を Fig. 1 に、供試材の化学成分を Table 1 に示す。なお、供試材はアルミニウムと窒素量を調整した粗粒化防止鋼である。

2.2 加工法および金型構成

シャフト穴の中に浸炭層を付与すること、および歯底部の加工率を 30% 程度にすることを条件に、素材の前

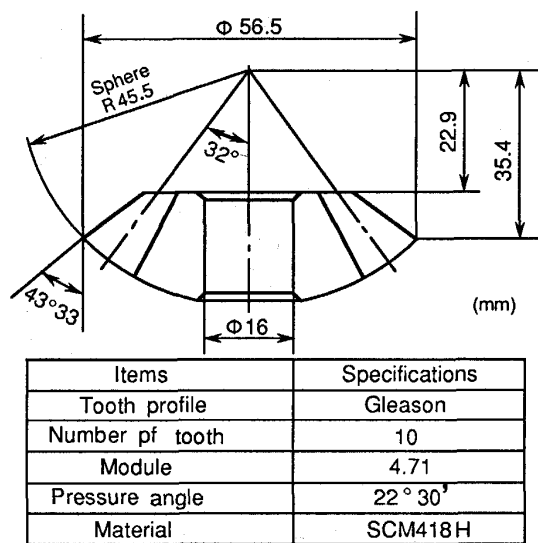


Fig. 1. Dimension of bevel gear.

形状を円筒状にし、中空部にはマンドレルを用いる閉そく鍛造法で試作した。

金型の材質は SKD62 で、焼入れ、焼もどし処理をして硬さを HRC58 にし、鍛造時には約 300°C に加熱してシリコン油を鍛造ごとにスプレーした。

試験片の前形状と試作工程を Fig. 2 に示す。プレスは最大能力 10 MN の複動プレスである。

まず、機械加工で切り出した円筒状の前加工品に、浸炭(深さ約 0.9 mm)した後、潤滑剤としてリン酸化処理(10~15 μm)、さらに黒鉛処理(30~50 μm)の 2 層コーティングをして実験に供した。

本来、浸炭時の熱を利用して鍛造するのが理想であるが、実験工程上無理であったため、今回は浸炭と鍛造を分けて実験した。

鍛造工程のヒートパターンを Fig. 3 に示す。酸化、脱炭を防止するため、窒素ガスを流しながら高周波加熱で鍛造温度まで昇温後、金型にセットし、一工程で精密歯形鍛造した。その後、焼入れ温度をそろえるため、850°C の中性塩浴中に 30 s 浸漬してから、80°C の油中に焼入れ、170°C で 120 min 焼もどした。

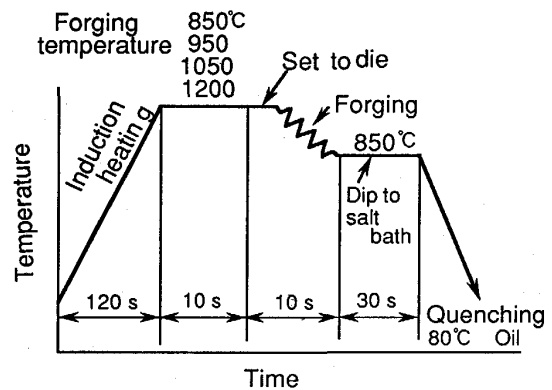


Fig. 3. Forging and heat treatment temperature conditions.

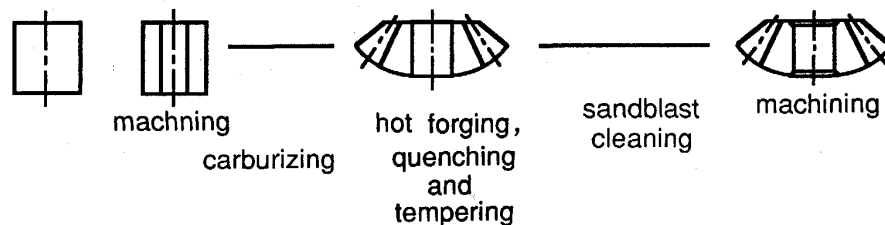


Fig. 2. Forging process.

Table 1. Chemical composition of test materials (wt%).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	O	N
SCM418H	0.17	0.30	0.63	0.015	0.018	0.09	1.02	0.16	0.019	0.0012	0.0155

焼もどし後、サンドブラストで黒皮を除去し、最終仕上げは歯面を基準面にして、c-BN 工具を用い、シャフト穴の内面と背球面のみを旋盤で仕上加工した。

### 2.3 調査内容

(1) 鍛造温度を 850, 950, 1050, 1200 ± 50°C としたときの基礎物性および歯車精度。

(2) 機械的性質として、低サイクル疲労寿命および歯元曲げ疲労強度。

低サイクル疲労試験は、差動装置ユニットの後車軸を固定し、傘歯車に直接荷重がかかるように改造して<sup>10)</sup>、7.7 kN・m の衝撃トルクを 30 s に一回のサイクルで加え、破損するまでの繰り返し数を測定した。

歯元曲げ疲労試験は、最大能力 100 kN の油圧サーボを用い、傘歯車単体の歯元曲げ疲労の S-N 曲線を求めた。試験サイクルは 15 Hz である。

強度試験に先立ち、傘歯車の基礎物性として、鍛造による浸炭層の塑性変形状況、および旧オーステナイト ( $\gamma$ ) 結晶粒の変化を把握するためマクロ、ミクロ組織、硬さ分布、歯底すみ R 部の残留応力を測定した。

マクロ、ミクロ組織の観察は、試料断面をエメリー紙で 1000 番まで研磨し、バフで鏡面に仕上げた。マクロ、ミクロの腐食液は 3% ナイタル、旧  $\gamma$  粒はピクリン酸 4 g、塩酸 0.5 ml、界面活性剤 (ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム) 4 g、水 100 ml の 60°C 混合液。

残留応力は X 線法で、Cr 管球を用い、 $\alpha$  相の (211) 面を測定した。試料の表面付近は 10  $\mu$ m おきに、内部は 100  $\mu$ m おきに、測定箇所のみ 30% 硝酸水で化学研磨と測定を繰り返し、表面から 1.0 mm までの深さ方向

の応力分布を測定した。

低サイクルおよび歯元曲げ疲労試験で破損した歯の破面を、走査型電子顕微鏡で観察した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 鍛造条件と表面粗さ

950°C で鍛造後、サンドブラストでクリーニングした試作品の外観を Photo. 1 に、また背面の表面粗さと鍛造温度の関係を Photo. 2 に示す。

850 および 950°C では  $H_{max}$  約 30  $\mu$ m であるが、1050°C では約 0.1 mm、1200°C では 0.3 mm 以上になる。

加熱中は窒素ガスで保護しているが、出炉から焼入れまでの間大気に曝されるため、1200°C では酸化による表面荒れがひどくなり、加工代 0.3 mm 以下の条件下で

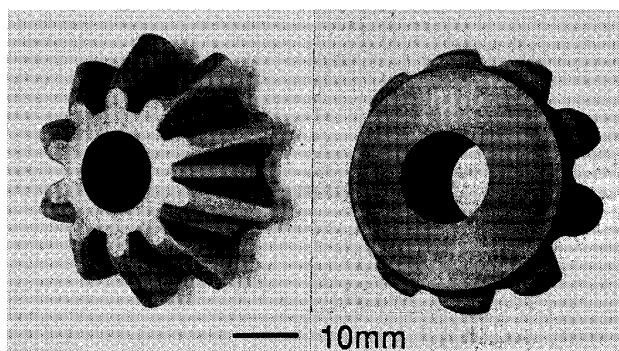
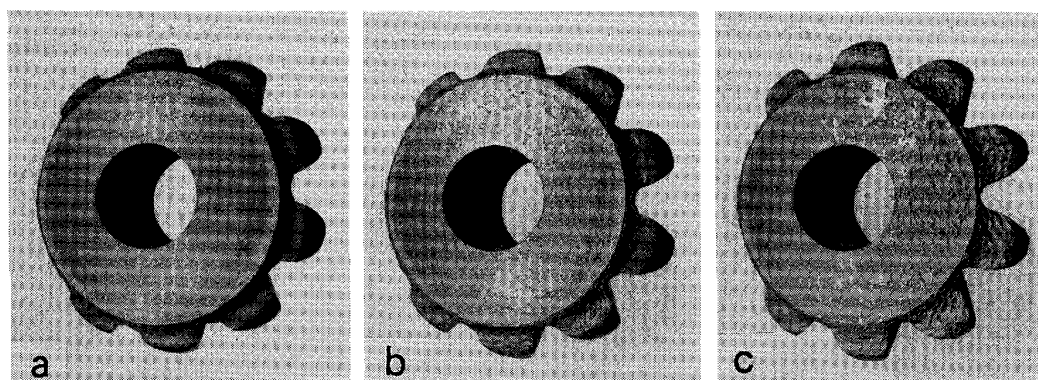


Photo. 1. Examples of forged gears after sand-blast cleaning.



Forging temperature	$H_{max}$
a: 850, 950 °C	30 $\mu$ m
b: 1050 °C	0.1 mm
c: 1200 °C	0.4 mm

Photo. 2. Relation between surface roughness and forging temperature.

は、黒皮が取りきれずに残ってしまい、使用不可能であるため以下の調査対象から除外した。

### 3.2 マクロおよびミクロ組織

試作品の断面マクロ組織を Photo. 3 に示す。歯底すみ R 部の浸炭層は、途切れることなく連続しており、ピッチ円付近は深め、歯底すみ R 部は浅めに仕上がっている。しかし、歯先部は形状効果の影響で、冷却速度が大となるため深めになっている。

浸炭歯車の硬化層プロファイルは、相手歯車と噛み合って動力を伝達する歯面では深め、曲げおよび衝撃荷重を受ける歯元すみ R 部では浅め、歯先部は硬化層のないものが、強度上理想的であると、会田<sup>20)</sup>によって理論的に解明され提案されている。

しかし、その実現は高周波焼入れでは可能であるものの、浸炭焼入れでは困難であるとされ、今日に至って

る。

本試作品の歯面および歯底すみ R 部は、この強度上理想的とされる浸炭硬化層プロファイルに近づいたものといえる。

本傘歯車は常時回転して用いられるものではないので、歯先カケなどの問題は発生しないものと判断されるが今後実車耐久で確認する予定である。

950°C で鍛造した主要部分の旧  $\gamma$  粒の様子を Photo. 4 に示す。これは 400 倍で撮影した組織写真をつなぎ合わせ、複写して縮小したものである。歯底部の浸炭層直下の旧  $\gamma$  粒 (黒い部分) は強く塑性変形している。歯底部表面の白い部分は浸炭層で、ほとんど変形していない。

これは、金型の凸部に接触した歯底部は急冷され、炭素濃度も高いため変形抵抗が増大し、ほとんど変形せずに押し込まれるが、内部の温度も高く炭素濃度も低い変形抵抗の小さい浸炭層直下は、強く変形するためと推定される。

鍛造温度 1050°C のピッチ円部および歯底すみ R 部の旧  $\gamma$  を Photo. 5 に示す。850 および 950°C は大差ないため省略した。1050°C のピッチ円部に一部未再結晶の旧  $\gamma$  粒が認められる以外は、すべて再結晶した Gc 9.0 以上の細粒が観察された。

鍛造温度が粒界酸化におよぼす影響についても調査したが、鍛造温度による影響は見られず、鍛造によって粒界酸化が少なくなる傾向はすでに報告<sup>8)9)</sup>したものと

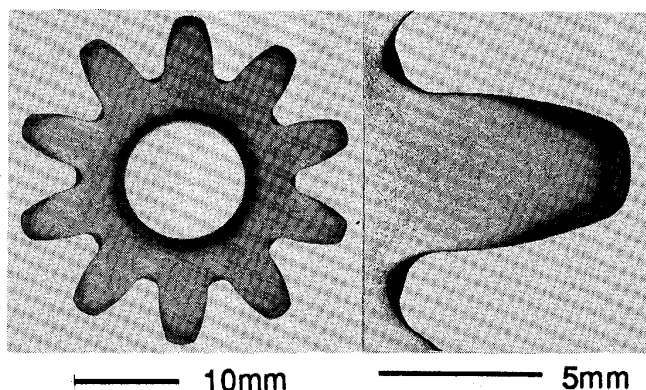


Photo. 3. Macrostructures of cross section.

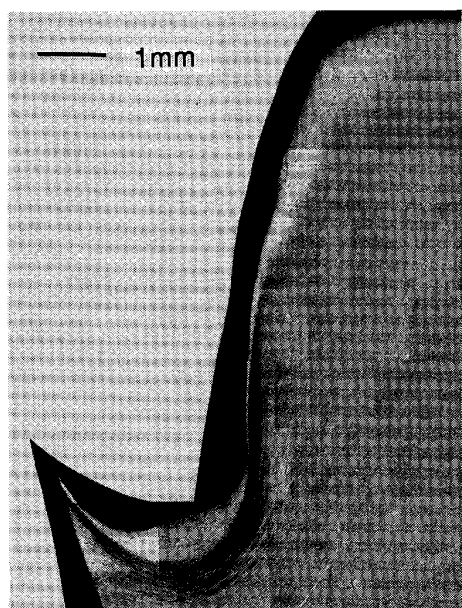
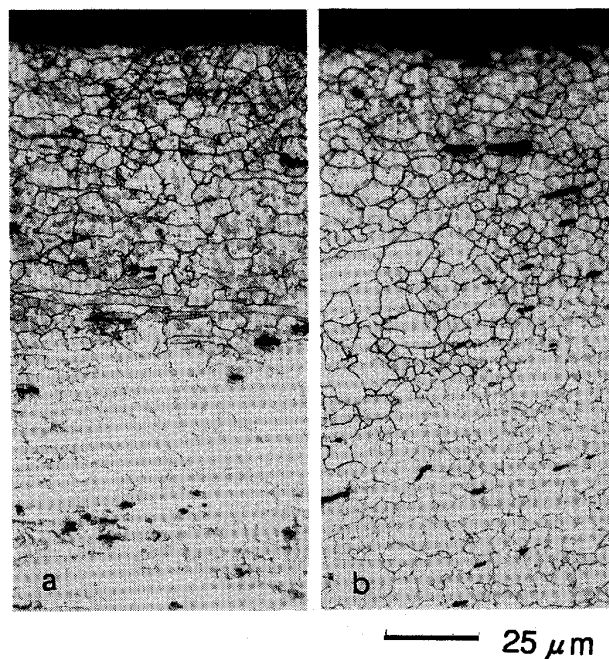


Photo. 4. Optical micrograph of austenite grain which was plastic deformed.



a : Pitch circle      b : Corner R of tooth

Photo. 5. Optical micrograph of austenite grain size.

じ傾向であった。

### 3.3 硬さ分布

硬さ分布から求めた鍛造温度と歯車各部の有効浸炭硬化層深さ (HV550) の関係を Fig. 4 に示す。

浸炭層は歯面および歯底部では伸ばされて薄くなり、背面ではほとんど変化なく、シャフト穴ではつぶされて厚くなる傾向が見られた。これにより背面およびシャフト穴の加工代を 0.3 mm とした場合でも十分浸炭層を確保できることが分かった。

歯底すみ R 部の硬さ分布と鍛造温度の関係を Fig. 5 に示す。850°C は 950°C とほぼ同等なため省略した。

鍛造焼入れしたものの芯部硬さは普通浸炭焼入れしたものに比較して、HV で約 150 高く、表面は約 30 低くなっている。

表面の HV30 の硬度低下は、バラツキの範囲と考え

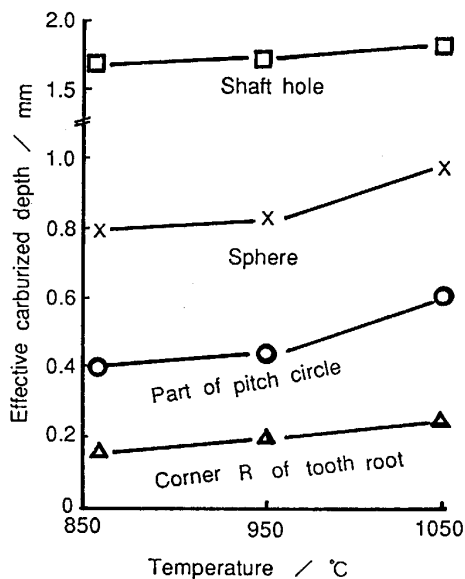


Fig. 4. Relation between effective carburized depth at various locations and forging temperature.

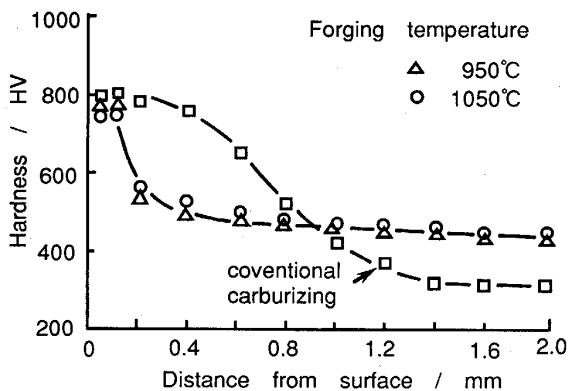


Fig. 5. Distribution of hardness at cross section of a corner R of tooth root.

られるが、芯部の HV150 の増加は、塩谷<sup>21)</sup>らの低炭素鋼 (0.26% C) での実験結果とほぼ一致している。

この硬度増加原因は、熱間加工の効果が残されていると考えるべきで、この熱間加工の効果について中村<sup>22)</sup>は、透過電子顕微鏡による、マルテンサイトの直接観察の結果、マルテンサイトの内部には、多くの転位および内部双晶が観察され、 $\gamma$ 状態での加工による影響と考えるのが当然で、これらの欠陥と硬度増加は密接な関係があり、内部双晶のごとく数百 Å 位の微細な双晶が多数ならんでいる場合には、転位のすべりに対して大きな抵抗を示すものと考えられ、加工焼入れの硬度増加の原因の一つであると述べている。

これらのことから本実験で芯部硬度が増加した理由は加工に伴い、転位、双晶などの内部欠陥の増加によるものと推定される。

また、高炭素鋼 (1.07% C, 900°C からの水冷) では、約 HV100 の増加で、普通焼入れでもかなりの硬さが得られるため、低炭素鋼のようないちじるしい影響は見られないと述べている。

本歯車の表面 C 濃度は、EPMA での定量結果、0.75% で、850°C からの油焼入れ条件のため、普通焼入れ品との硬度に差がなかったものと推定される。

### 3.4 残留応力分布

歯底すみ R 部の残留応力分布を Fig. 6 に示す。850°C は 950°C とほぼ同等なため省略した。

850 から 1050°C では最表面で約 -600 MPa の圧縮応力を示し、0.2 mm 深さでほぼ 0 MPa にもどる分布曲線を示している。

普通浸炭品 (有効硬化層深さ 0.6 mm) の表面では、表面異常層の影響で焼入れ性が低下し、パーナイトおよび

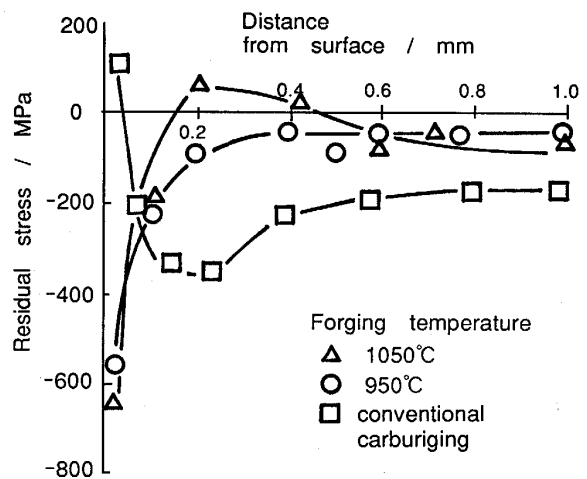


Fig. 6. Distribution of residual stress at a corner R of tooth root.

ツールタイト組織となる<sup>23)</sup>、このため最表面は引張りの残留応力になり、深さ約 0.2 mm で最大の -400 MPa を示し、0.6 mm で -200 MPa にもどり安定する。

浸炭部品の圧縮残留応力の大きさは硬化層(浸炭層)の厚さに依存し、硬化層厚さが薄ければ相対的に大きい芯部面積のためその弾性力により高い圧縮残留応力を硬化層に生ずる<sup>20)</sup>。

Photo. 3 に示すように、歯底 R 部の浸炭層は加工で薄く延ばされており、Fig. 5 の硬さ分布からも、相対的に芯部面積が増大しているものと見なせる。

さらに、浸炭時に発生した表面異常層が加工によって減少することで、表面に強い圧縮の残留応力が発生したものと推定される。

深さ方向は浸炭層深さに比例して浅くなっている。この表面の強い圧縮残留応力は亀裂発生に対して強い抵抗となり、疲れ強さ向上に寄与するものと推定される。

### 3.5 機械的性質

低サイクル疲労強度のワイブル線図を Fig. 7 に、歯元曲げ疲労の S-N 線図を Fig. 8 に示す。

低サイクル疲労の試験条件は、通常の車両では決して

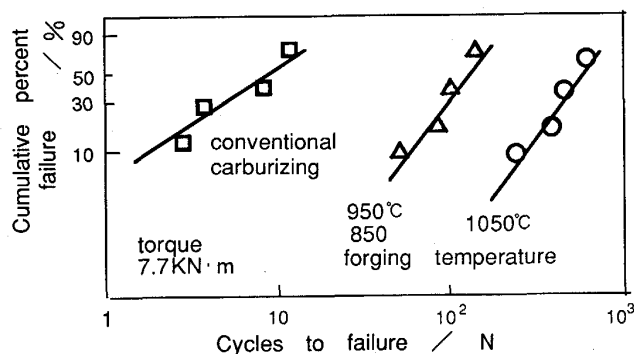


Fig. 7. Relation between low cycle fatigue strength at a corner R of tooth root and forging temperature.

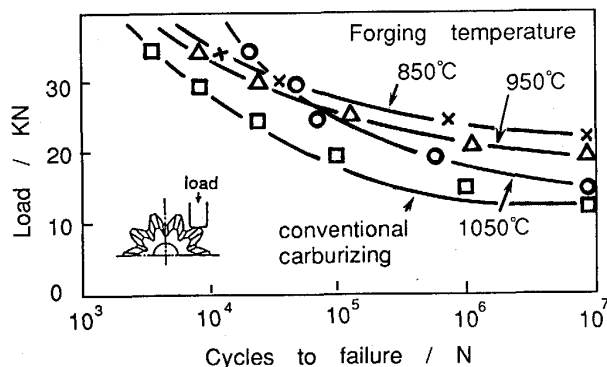


Fig. 8. Relation between bending fatigue strength at tooth root and forging temperature.

作用することのない非常に厳しい加速試験条件である。

歯切り後普通浸炭焼入れしたものと比較すると、低サイクル疲労寿命は鍛造温度による差が見られるものの、850, 950°C で約 40 倍, 1050°C で約 100 倍と大幅に向上し、バラツキも非常に小さい優れた低サイクル疲労特性が得られた。

$\gamma$  を加工すると格子欠陥が増大し、マルテンサイトの双晶欠陥が多くなったり、屈曲したりして双晶薄板が微細化することでマルテンサイトの強度は向上する。しかし、強度が向上しても、靱性がほとんど低下しないことが加工焼入れの特徴である<sup>24)</sup>。

また、筆者<sup>9)</sup>らの、SCM420H 平板での浸炭鍛造焼入れ品のシャルピー衝撃試験の結果によれば、衝撃エネルギーのほとんどは芯部(非浸炭部)で吸収され、全吸収エネルギーは普通浸炭品の 1.0 kgf·m/cm<sup>2</sup> に対し、加工率 30% で 2.2 倍, 50% で 5.5 倍と、鍛造焼入れによる靱性の向上が認められた。

浸炭層は C 量が高く、破壊靱性値が低いため、粒界破壊を起こし、加工焼入れしても、靱性の向上はほとんど認められなかった。

これらのことから、本傘歯車の歯元すみ R 部の浸炭層は薄いため、相対的に芯部面積が増大している。この強化された芯部によって低サイクル強度が向上したものと推定される。

浸炭歯車の低サイクル疲労に関する報告は非常に少なく、表面粗さの影響を強く受けるとの報告<sup>25)</sup>もあるが、本実験では逆の結果であった。また、低サイクル疲労強度すなわち亀裂発生、亀裂進展抵抗および破壊靱性値などと、混粒または表面粗さの関係についても不明な点が多く、本実験で見られた、低サイクル疲労寿命に鍛造温度が影響している原因を推定することはできなかった。

歯元の曲げ疲労限は 1050°C で約 20%, 850 および 950°C はバラツキの範囲でほぼ同じと見なせ、約 40% 向上した。

1050°C で疲労限が低い原因は、Fig. 6 に示す 950°C の残留応力と大きな差が見られないこと、さらに Fig. 5 に示すように表面硬さは HRC で約 2 の差にすぎないことから、表面粗さが悪いことが主要な要因であると推定される。

歯元曲げ疲労強度はショットピーニングすることによってさらに向上することが期待できる。

### 3.6 破面観察

低サイクルおよび歯元曲げ疲労試験で破損した歯の、走査型電子顕微鏡による観察結果を Photo. 6, 7 に示す。

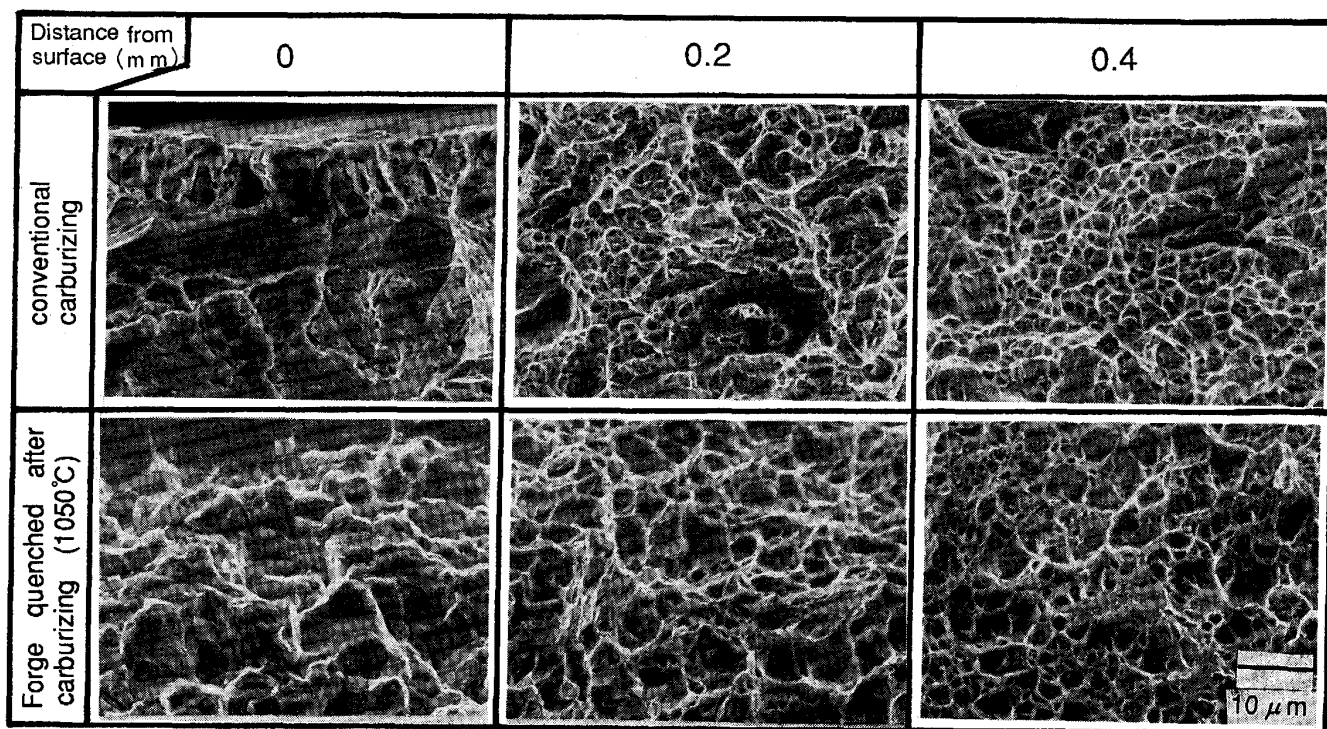


Photo. 6. SEM fractographs (low cycle fatigue).

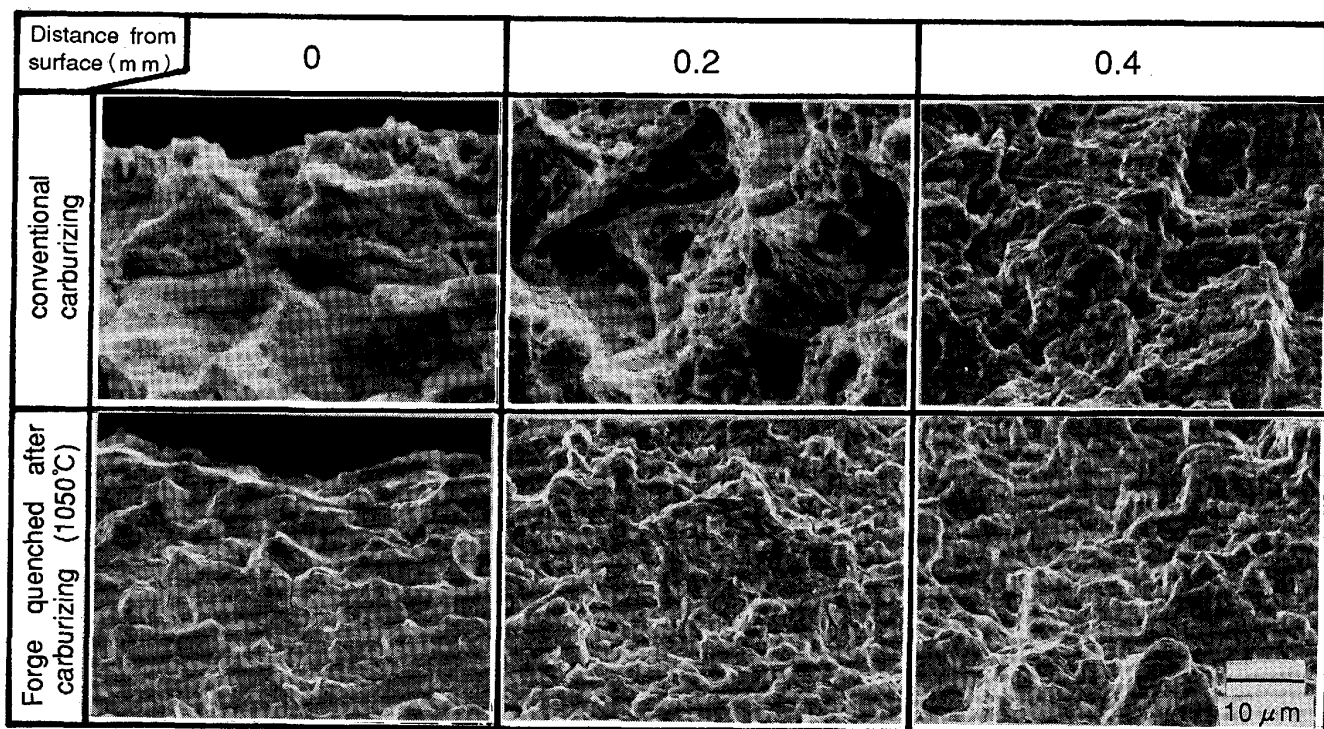


Photo. 7. SEM fractographs (high cycle fatigue).

普通浸炭および浸炭鍛造焼入れ品(1050°C鍛造)の低、高サイクル疲労破壊とも最表面は粒界破面であるが、浸炭鍛造焼入れ品の方が細かい破面である。内部は両方とも低サイクル疲労はディンプル、高サイクル疲労はス

トライエーションが観察された。

### 3.7 歯車精度

歯車精度として歯溝の振れ、隣接ピッチエラーおよび球面振れを測定した。

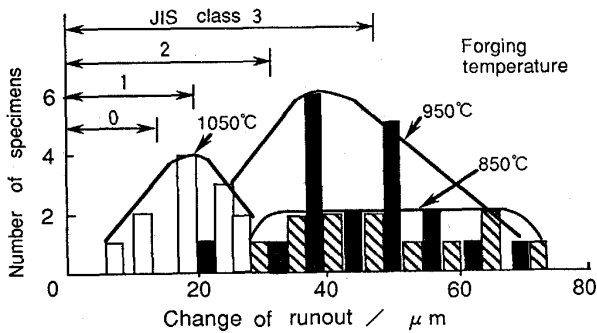


Fig. 9. Relation between change of runout and forging temperature.

Fig. 9 は歯溝の振れで測定数 52 個のデータである。鍛造温度が 1050°C のものは JIS 2 級以内の精度であるが、950°C 以下の温度になると JIS 3 級以下のものが発生した。

隣接ピッチエラーも歯溝の振れと同じ傾向であったのでデータは省略した。なお球面振れは機械加工の精度で決まるものであり、特に問題は認められなかった。

鍛造温度が 950°C 以下になると歯溝の振れおよび隣接ピッチエラーの精度が低下する。この原因は変形抵抗の増大および型剛性によるものと考えられ、今後の課題である。

#### 4. 結 言

肌焼鋼素材に浸炭してから精密歯型鍛造し、ただちに焼入れる方法で試作した傘歯車の機械的性質を中心に調査し、歯切り後普通浸炭焼入れしたものと比較した結果、以下のことが判明した。

##### (1) 歯元の低サイクル疲労寿命

鍛造温度 850, 950°C はほぼ同じで約 40 倍、1050°C は約 100 倍向上した。

##### (2) 歯元曲げ疲労強度

歯元曲げ疲労限は鍛造温度 850 と 950°C はほぼ同じ

と見なせ約 40%, 1050°C は約 20%, 時間寿命も 5~10 倍向上した。

(3) 高強度化要因としては、歯底すみ R 部の浸炭層浅め、強い圧縮残留応力の発生、特に鍛造による旧  $\gamma$  粒の微細化およびマルテンサイトの強靱化など、いわゆる鍛造焼入れ効果などの相乗効果によるものと推定される。

#### 文 献

- 1) 会田俊夫: 機械の研究, **22** (1970), p. 1671
- 2) 仙波正荘: 歯車, **3** (1961), p. 21
- 3) 渡辺敏幸: 機械設計, **26** (1982) 11, p. 40
- 4) 並木邦夫, 飯久保知人: 電気製鋼, **59** (1988) 1, p. 5
- 5) 石橋 彰: 機械の研究, **37** (1985), p. 912
- 6) 芳賀 実, 野村哲彦, 吉村博仁, 三谷祐史: トヨタ技術, **37** (1987), p. 103
- 7) 小島芳彦, 三輪能久, 柴田伸也, 有見幸夫: 自動車技術, **42** (1988), p. 755
- 8) 伏見慎二: 熱処理, **29** (1989), p. 328
- 9) 伏見慎二, 中西栄三郎: 熱処理, **30** (1990), p. 33
- 10) 伏見慎二, 谷意久男: 熱処理, **30** (1990), p. 259
- 11) 鮎谷清司, 中村引夫: トヨタ技術, **17** (1965), p. 293
- 12) 内藤武志, 木林靖忠, 三原健治: 小松技報, **22** (1976), p. 219
- 13) 西山幸夫, 宇野兵衛, 岡本安治: 熱処理, **22** (1982), p. 168
- 14) 前田久義, 河辺寿雄, 遠藤敬人: 日本金属学会誌, **28** (1964), p. 91
- 15) 塩谷敏祐, 山田銑一, 樽谷 豊: 日本金属学会誌, **31** (1967), p. 126
- 16) 中村 衛, 浅村 均, 山中久彦: 日本金属学会誌, **32** (1968), p. 28
- 17) 田村今男: 日本金属学会会報, **2** (1968), p. 426
- 18) 吉村豹治, 島崎 定: 塑性と加工, **24** (1983), p. 781
- 19) 高橋 涉, 福田 隆, 井垣幸三: 同上, **30** (1989), p. 351
- 20) 会田敏夫: 機械の研究, **23** (1971), p. 910
- 21) 塩谷敏祐, 山田銑一, 樽谷 豊: 日本金属学会誌, **31** (1967), p. 126
- 22) 中村 衛: 日本金属学会誌, **30** (1966), p. 151
- 23) 内藤武志: 浸炭焼入れの実際 (1974), p. 188 [日刊工業新聞社]
- 24) 牧 正志, 田村今男: 熱処理, **26** (1986), p. 353
- 25) 豊田武司, 石島正規, 高田勝則: 自動車技術会講演会前刷集 (1989年10月), p. 399