

高周波焼入歯車の残留応力について

On the Residual Stress of Induction Hardened Gears

保 延 誠* 高 西 忠 司* 吉 武 博 之*
Makoto Honobe Tadashi Takanishi Hiroyuki Yoshitake
渡 辺 真* 本 間 八 郎*
Makoto Watanabe Hachirō Honma

内 容 梗 概

高周波焼入歯車は近年各方面に広く使用され、よく製作管理されたものは使用実績から曲げに強いことが知られている。

高周波焼入によって曲げ疲労限が向上する理由の一つは、焼入歯面の圧縮残留応力によることは丸棒の回転曲げ疲労試験より推定できる。高周波焼入歯車は形状が複雑であるため、歯面および硬化深さ方向の応力分布も複雑なものと考えられる。しかし曲げ強度に対して最も強く影響するものは、すみ肉曲線部の表面の歯たけ方向残留応力と考えられるので、この点の測定を行った。試片歯車としては最も簡単な形状の小歯車を選び、70 kW、10 kc ショップ高周波焼入装置で焼入した。測定は穿孔法と放電加工による切取法の二つの方法で行った。

測定結果は相当のばらつきはあるが、予期したように圧縮残留応力(歯たけ方向約 38 kg/mm²、歯幅方向約 10 kg/mm²) の存在を確認した。

1. 緒 言

高周波焼入歯車は近年各方面に広く使用され、よく製作管理されたものは使用実績から歯の曲げに強いことが知られているが、その実験結果は少ない。たとえば日本国有鉄道電気車用小歯車は従来クロム・モリブデン鋼のかた焼が使用されていたが、使用条件が過酷で特に片当りによる歯元応力集中のため歯の破損が時々見られた。これを炭素鋼製高周波焼入歯車に変更してから破損もなくなり、現在大歯車にも高周波焼入が行われている。クロム・モリブデン鋼かた焼歯車に比較して炭素鋼製高周波焼入歯車の疲れ限度が上昇するおもな原因として、歯底表面の残留圧縮応力⁽¹⁾と、急速加熱のための材質的向上が考えられる。しかし残留応力が引張応力であれば圧縮応力の場合より当然疲れ限度の上昇率は低下し、極端な場合は逆に疲れ限度が低下することもあると考えられる。

そこで日立製作所製鉄道車両、建設機械、鉱山機械などに多く使用されている 70 kW、10 kc ショップ高周波焼入歯車の残留応力の測定の必要を痛感した。歯車は一般に形状が複雑であるため、歯表面および硬化深さ方向の残留応力分布は非常に複雑なものと考えられる。しかし曲げ強さに対して最も大きな影響を及ぼすのは、歯元すみ肉曲線部の表面付近の残留応力であると考えられるので、この点の測定をすることにした。残留応力の測定方法としては、同一条件で製作された二つの試験小歯車の歯底すみ肉部にひずみゲージを接着したのち、穿孔法あるいは切取法の二つの方法を採用して応力を解放し、解放前後のひずみゲージの読みの差より残留応力を計算した。以下、測定方法とその結果について報告する。

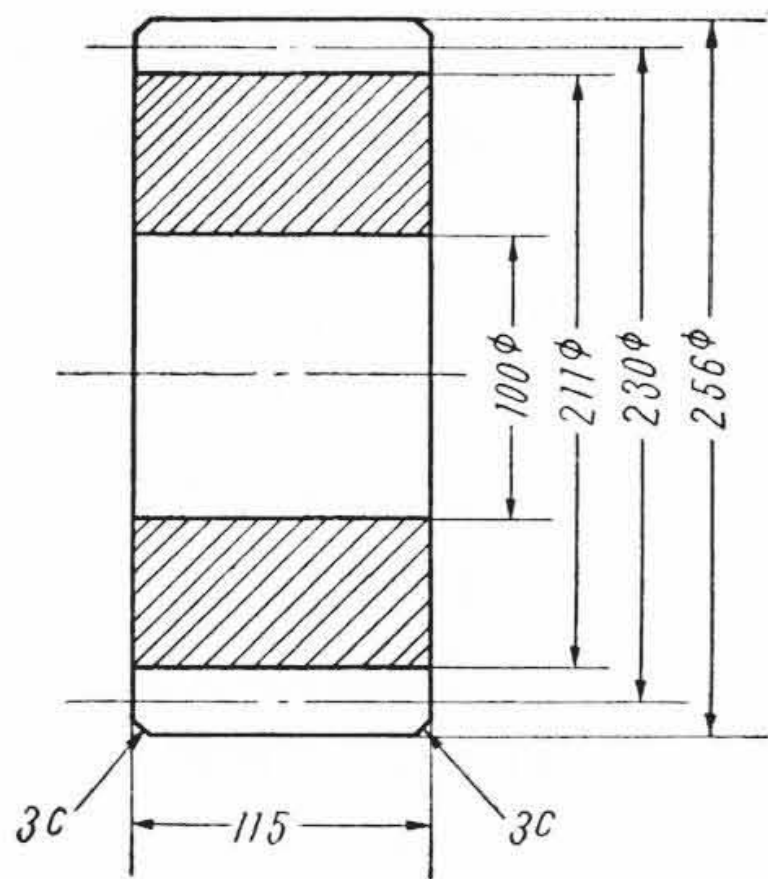
2. 試料および実験方法

2.1 試 料

試験歯車の仕様を第1表、形状を第1図に示す。素材の成分および機械的性質を第2、3表に示す。歯車はホブ切り後次の熱処理を行った。

調質：焼入 850°C で1時間半加熱後油冷、焼戻 600°C で3時間半加熱後油冷。

高周波焼入：70 kW、10 kc ショップ高周波焼入装置により1歯みぞずつ漸進焼入した。第2図に焼入装置の外観、第3図に焼入方



第1図 試験歯車寸法

第1表 試験平歯車仕様

モジュール	10
歯数	23
歯幅(mm)	115
圧力角(度)	20
転位量(mm)	+3
軸径(mm)	100

第2表 化学成分(%)

成分	C	Si	Mn	P	S
材質 S40C	0.40	0.28	0.75	0.019	0.013

第3表 素材の機械的性質

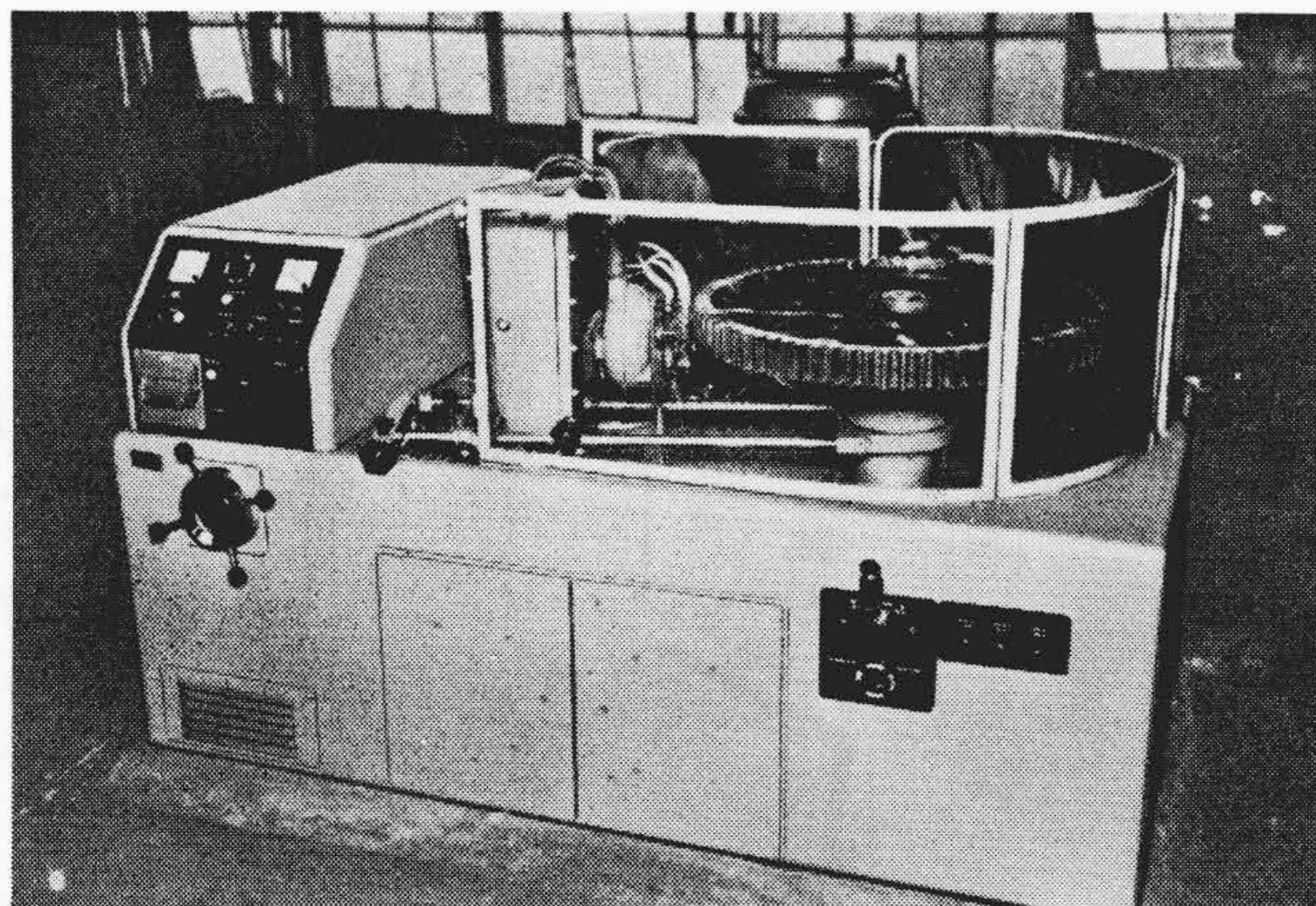
降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	衝撃値 (シャルピ) kg.m/cm ²	カタサ (ブリネル)	熱処理	
						焼入°C	焼戻°C
60.1	89.6	23	58.7	13.4	285	850	640

法を示している。

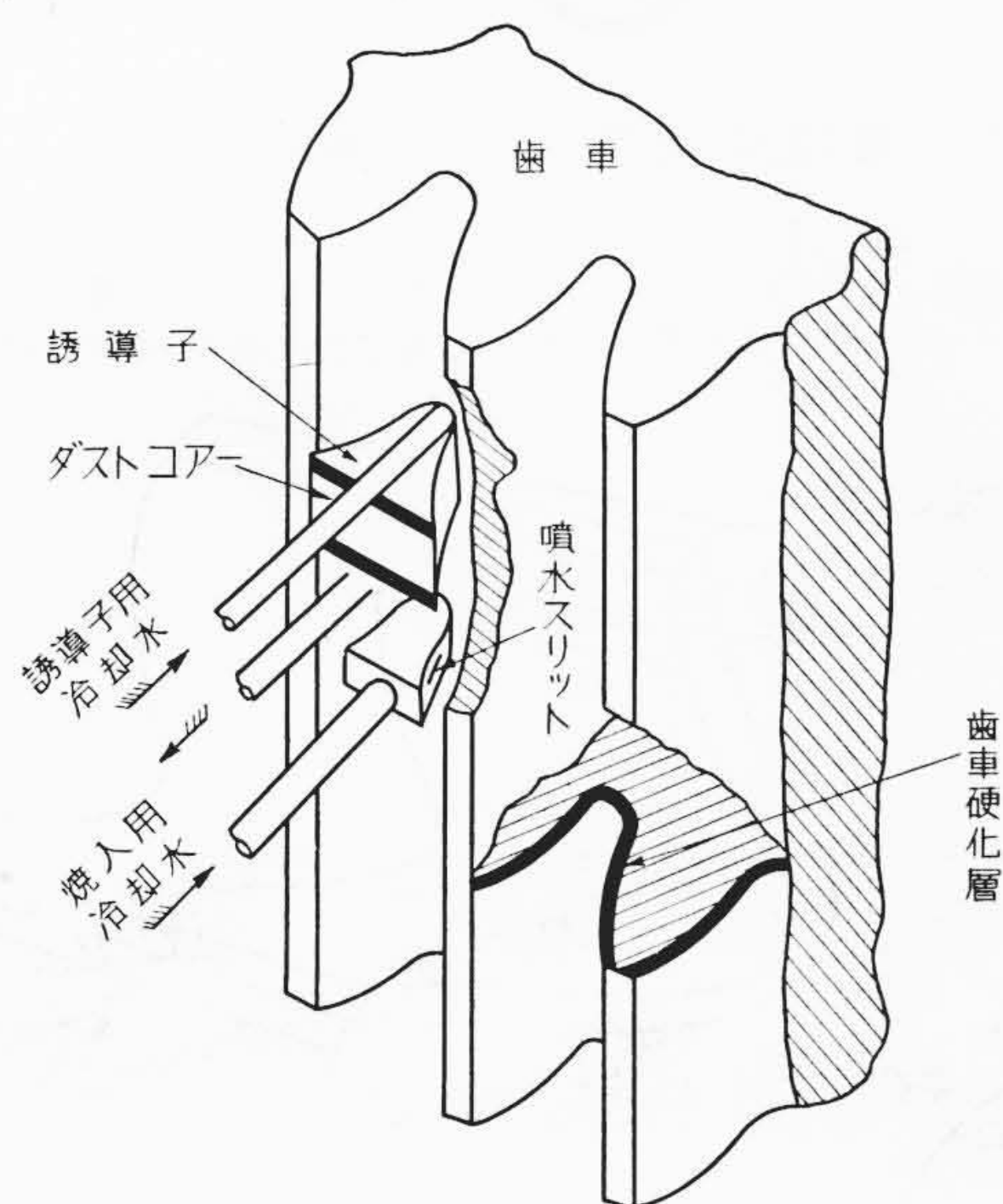
焼戻：200°C で4時間加熱後空冷。

穿孔法で測定を終ったのち、その試験歯車から一部を切り取って歯面、歯底の硬度分布およびマクロエッチングされた層の深さを求めた。第4図に硬度分布、第5図にマクロ写真を示す。第4図の硬度分布曲線より、硬化深さは歯面で約3mm、すみ肉部で2.5mm程度であることが知られる。第6図は焼入層の顕微鏡写真を示す。写真で明らかなように、焼入表面部は微細なマルテンサイト、フェ

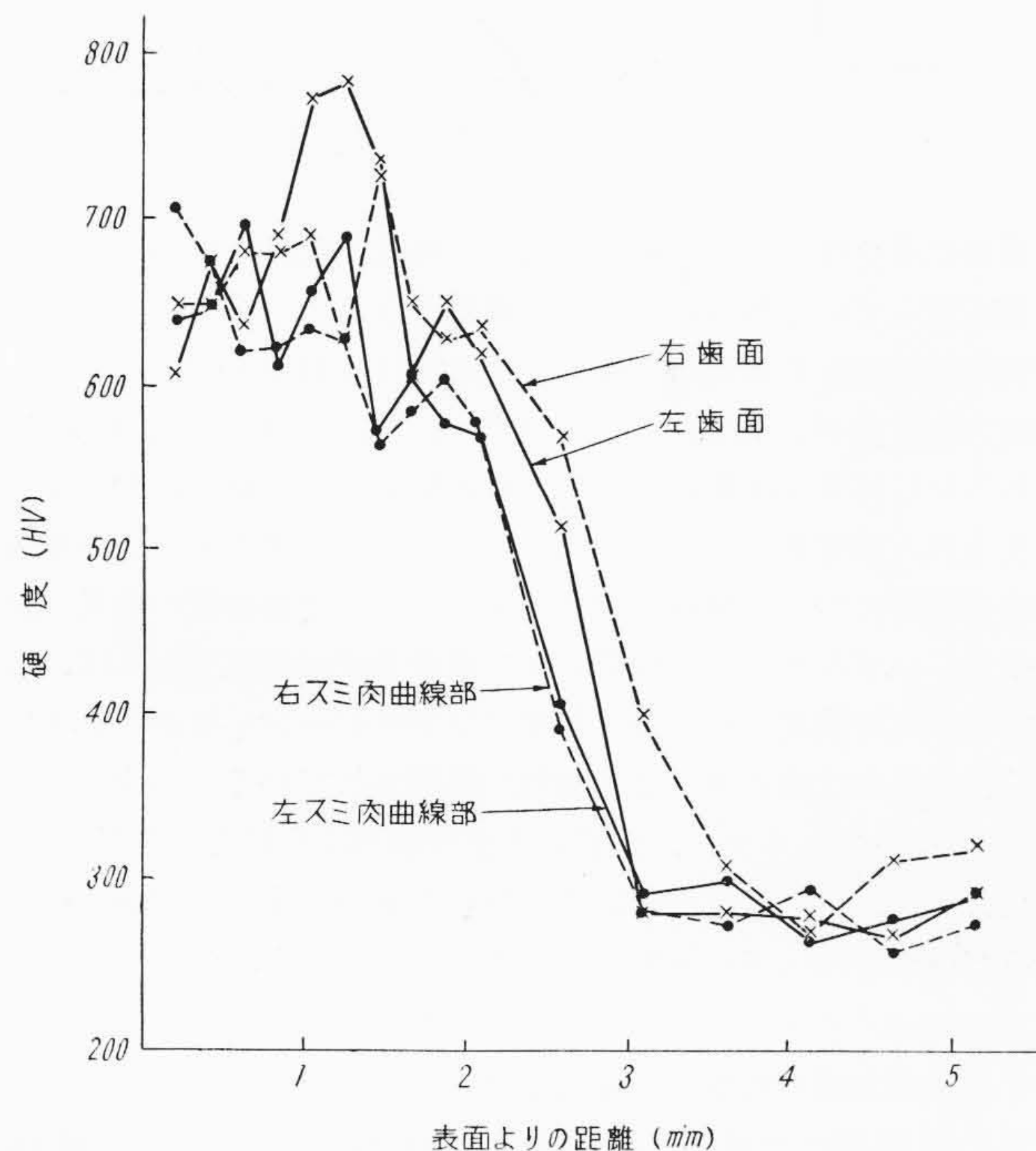
* 日立製作所亀有工場



第2図 70 kW 10 kc ショップ高周波焼入装置外観



第3図 高周波焼入方法



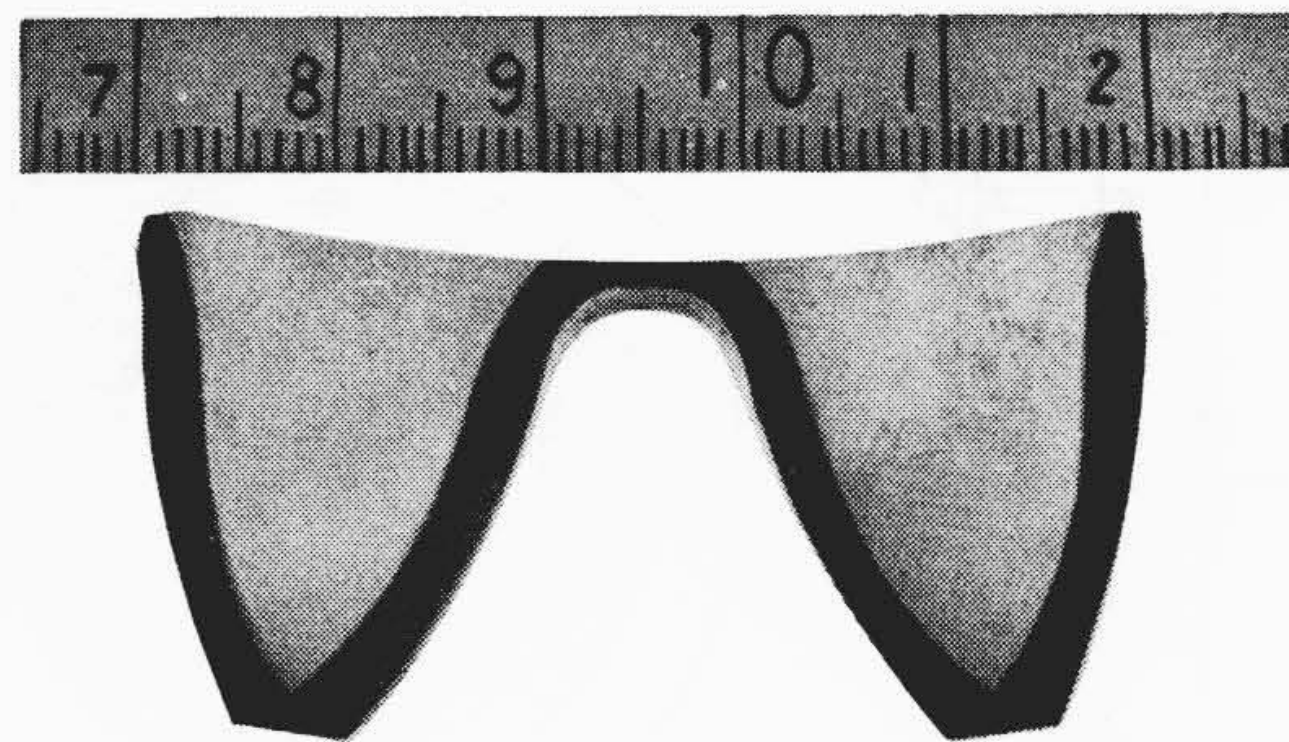
第4図 高周波焼入歯車の硬度分布

ライトの残留, トルスタイトの析出は認められず適正な焼入組織となっている。

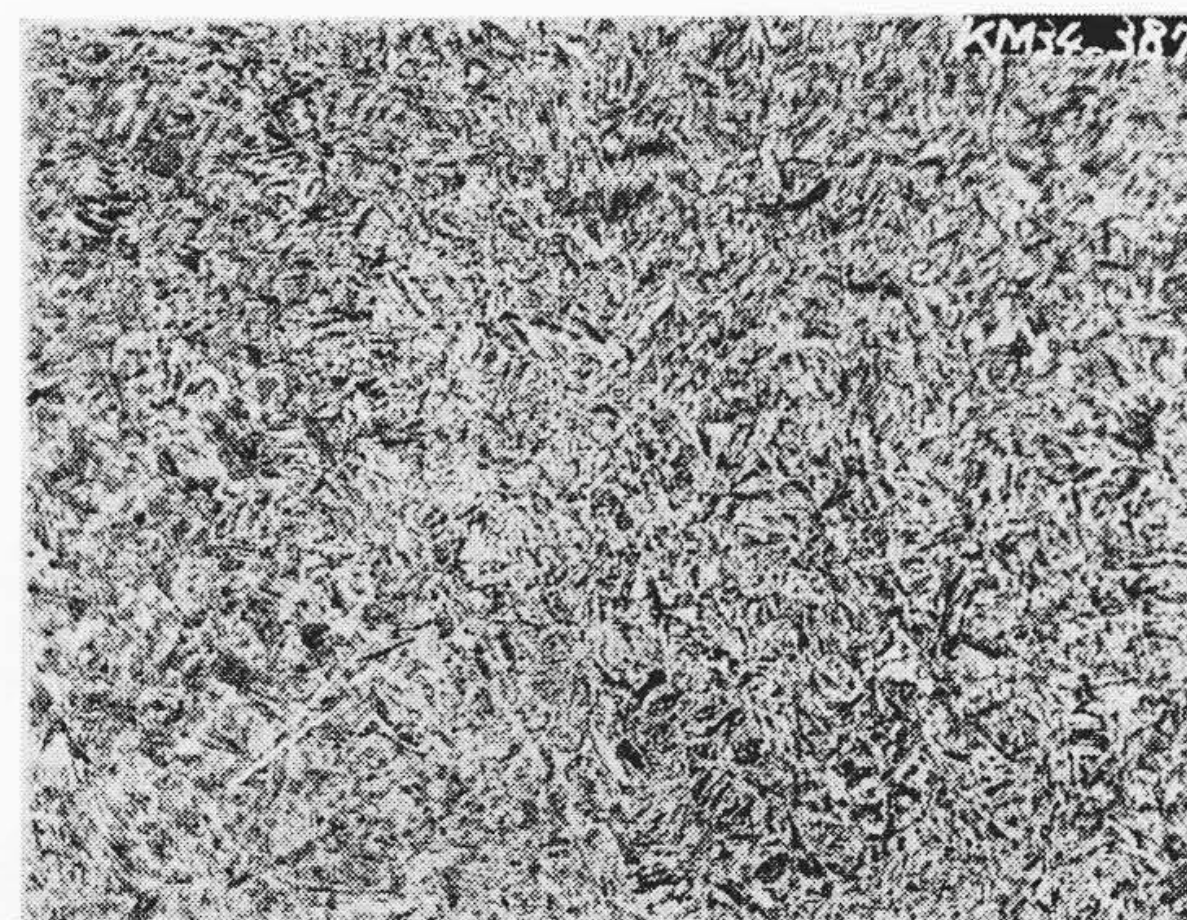
2.2 実験方法

2.2.1 穿孔法

残留応力の測定方法にはX線を用いるもの, あるいは腐食また

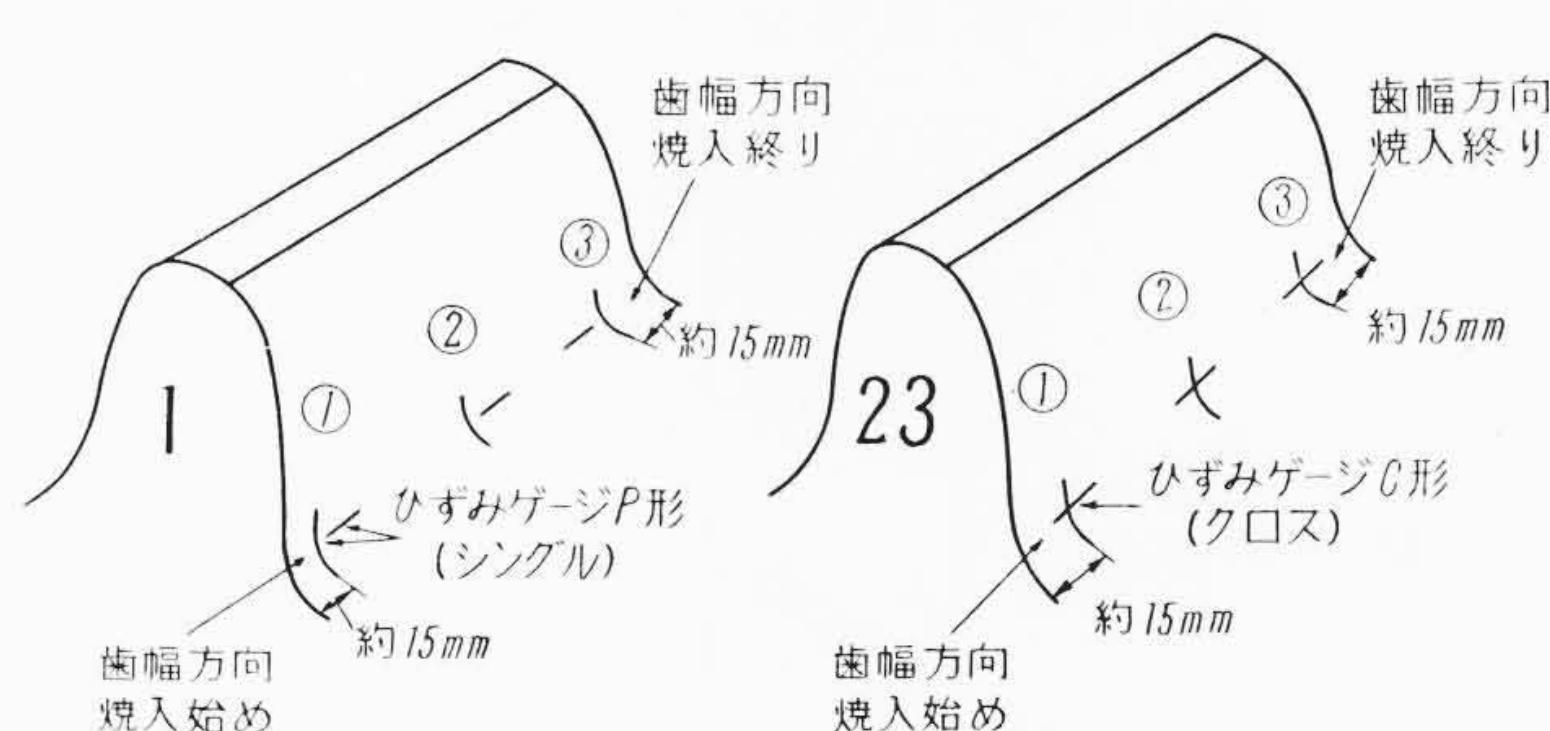


第5図 高周波焼入硬化層のマクロ写真

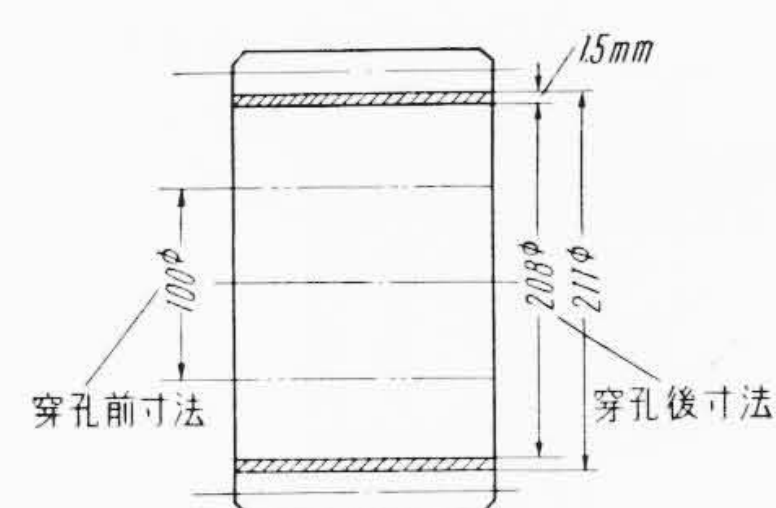


($\times 400$) 2%硝酸アルコール

第6図 高周波焼入硬化層の顕微鏡組織写真



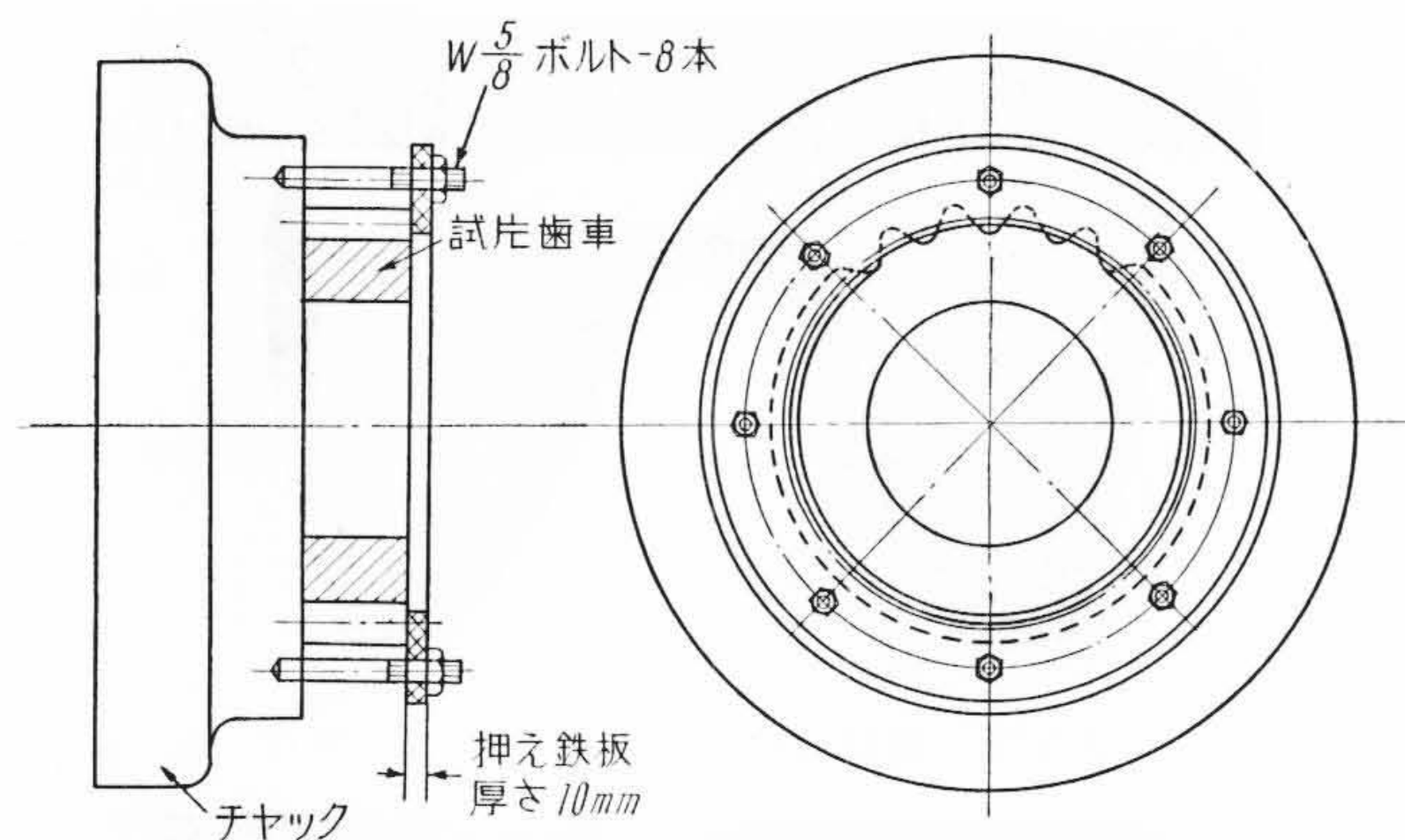
第7図 ひずみゲージ接着位置



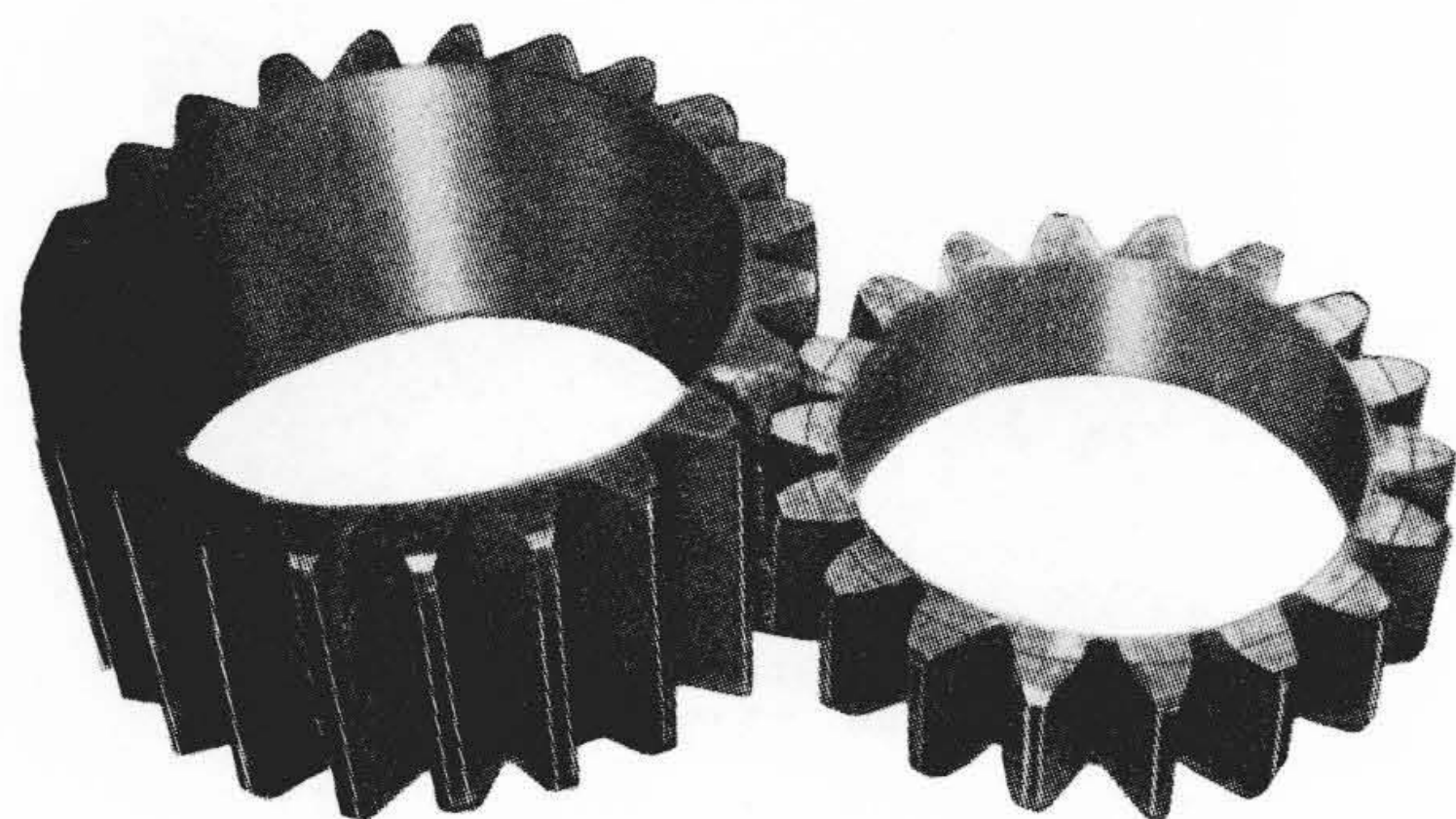
第8図 試験歯車の穿孔寸法

は加工によって応力を解放するものなどいろいろ⁽²⁾あるが, 高周波焼入された歯車は歯面がかたく, その部分を機械的方法で削り取って残留応力を解放することは困難である。また形状も複雑であるからザックスの方法(穿孔法)を適用して断面の残留応力の分布を求めることはむずかしい。ゆえに本実験では, 断面の残留応力分布を求めることは断念し, 曲げ強さに大きな影響を持つすみ肉曲線部の表面の残留応力を測定する目的で, すみ肉部にひずみゲージを接着し, 旋盤で内径を徐々に穿孔して応力を解放した。

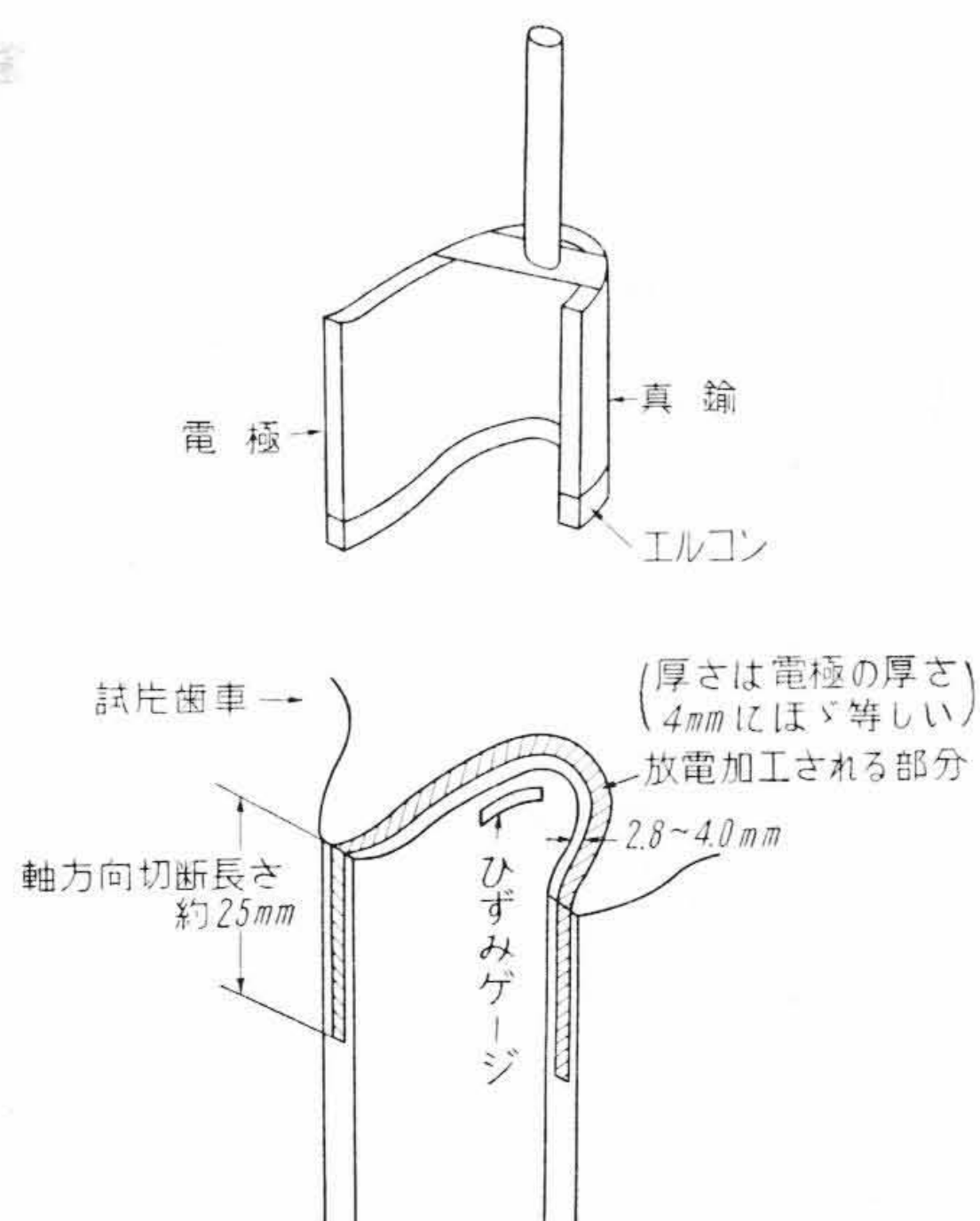
ひずみゲージは新興通信社製 S121 ペーパーゲージの P 型と C 型, ゲージ長さ 4 mm, 幅 2 mm, 抵抗 60 Ω を用いて, 8 箇所の歯底におのおの 3 点, 計 24 点接着した。第 7 図にひずみゲージの接着位置を示す。旋盤による穿孔条件は予備試験歯車であらかじめ検討し, 穿孔によって残留応力を乱さないような条件とした。穿孔中の試験歯車の温度は 40°C 以下に空冷しながら約 18 rpm, 切込深さ 0.2 mm, 送り 0.2 mm/min で, 第 8 図に示すとおり内径 100



第9図 試験歯車の固定方法



第10図 穿孔された試験歯車

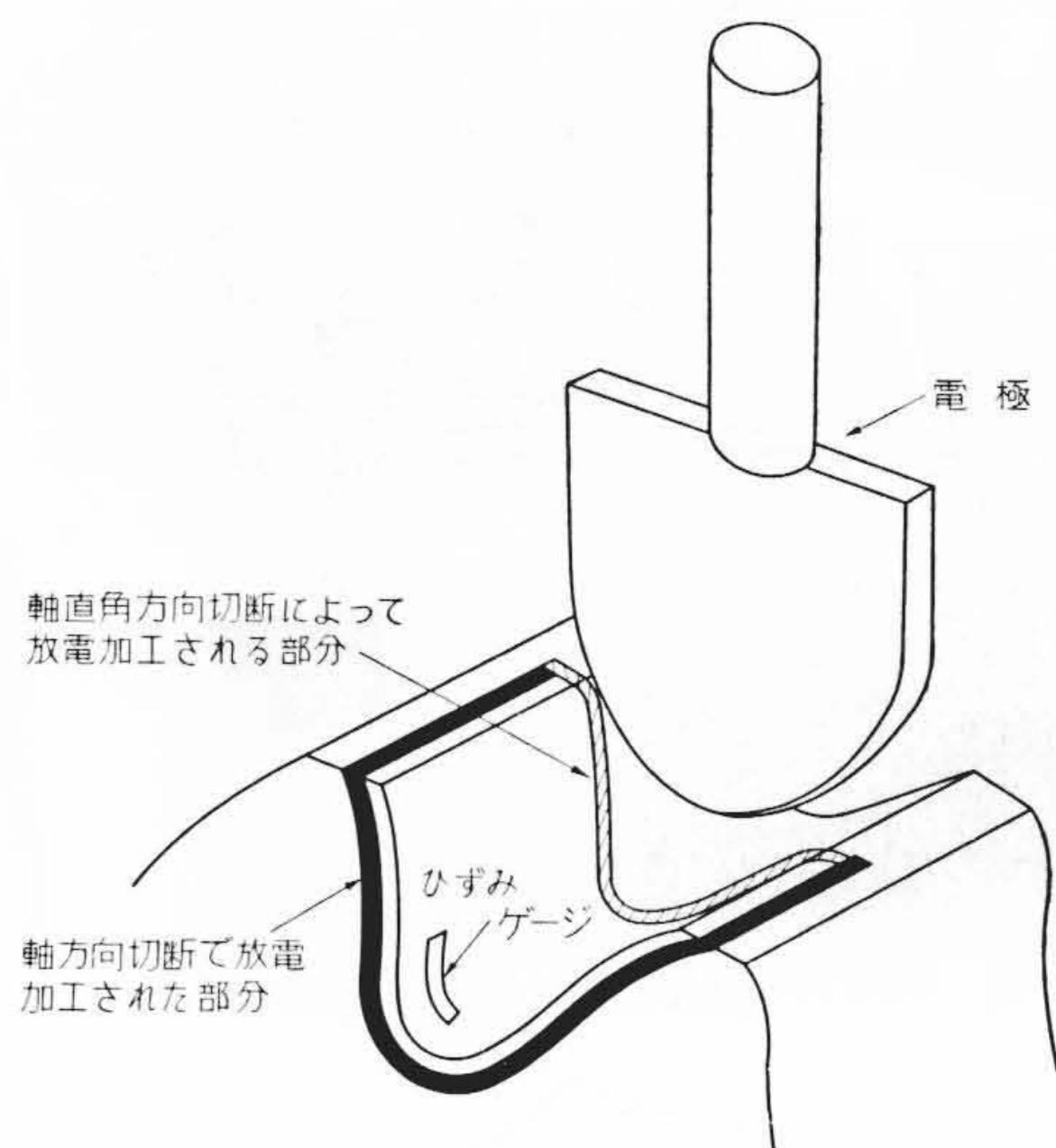


第11図 放電切断方法 軸方向

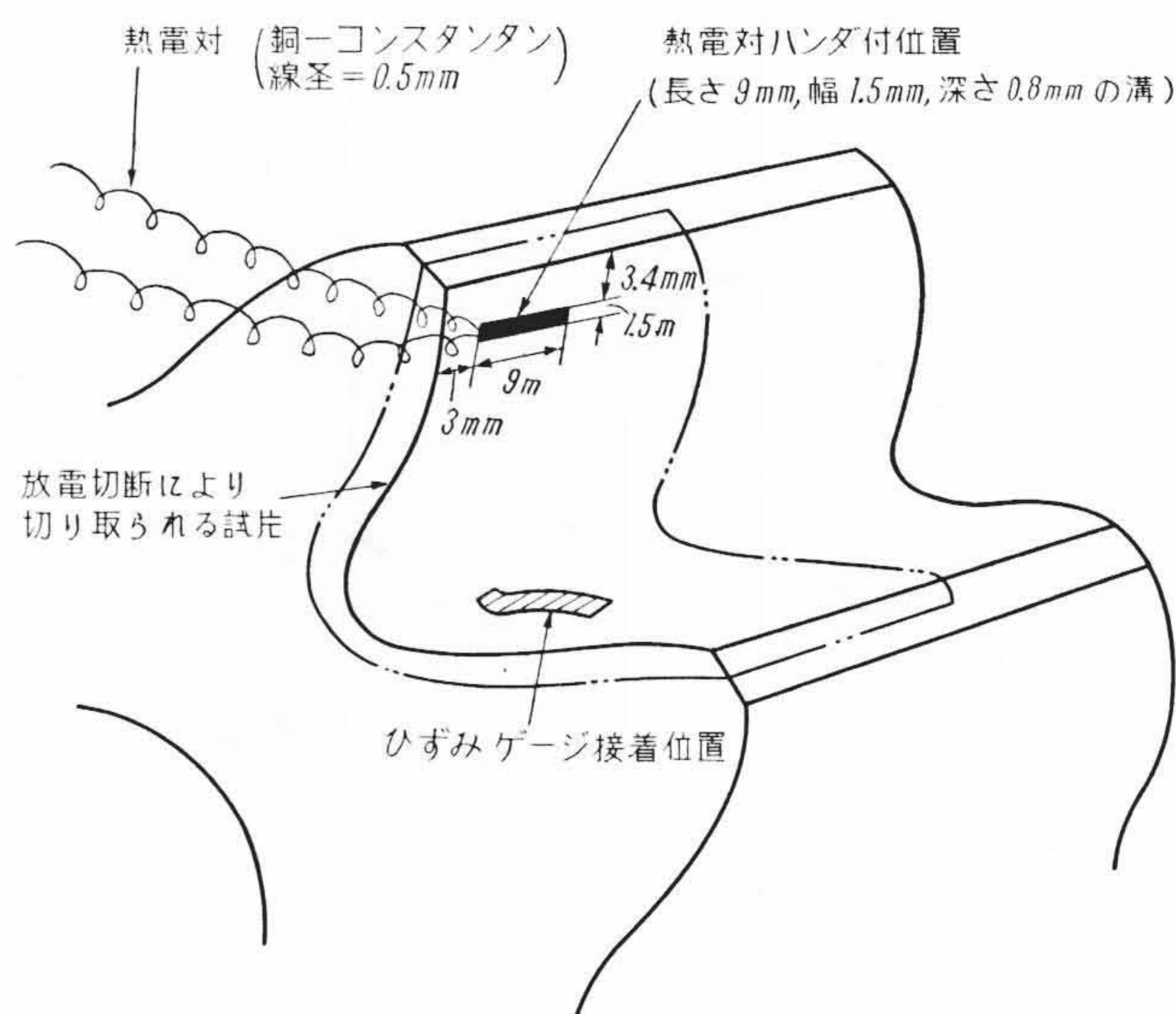
mm を 208mm まで穿孔した。歯底における肉厚は約 1.5 mm となり第 5 図のマクロ写真で知られるように、歯底の硬化層は約 1 mm 削り取られている。この残留応力の測定においては、歯底の肉厚 1.5 mm まで削れば応力が完全に解放されてその部分は無応力状態になったものと仮定している。実際にはまだ多少その部分に残留応力として残っていると思われるから、その分だけは誤差となる。第 9 図には試験歯車をチャックへ固定する方法を示し、第 10 図には穿孔された試験歯車を示す。

2.2.2 切取法

切取法は放電加工機で高周波焼入歯車のすみ肉部のみを歯形に沿って切断し、残留応力を解放しようとするものである。しかし放電加工機でも硬化層を歯形に沿ってあまり薄く切断することは、電極の精度、加工中の歯表面の温度上昇などにより困難であるため、切断試片の厚さは約 2.8~4 mm 程度にし、その後は酸



第12図 放電切断方法 軸直角方向

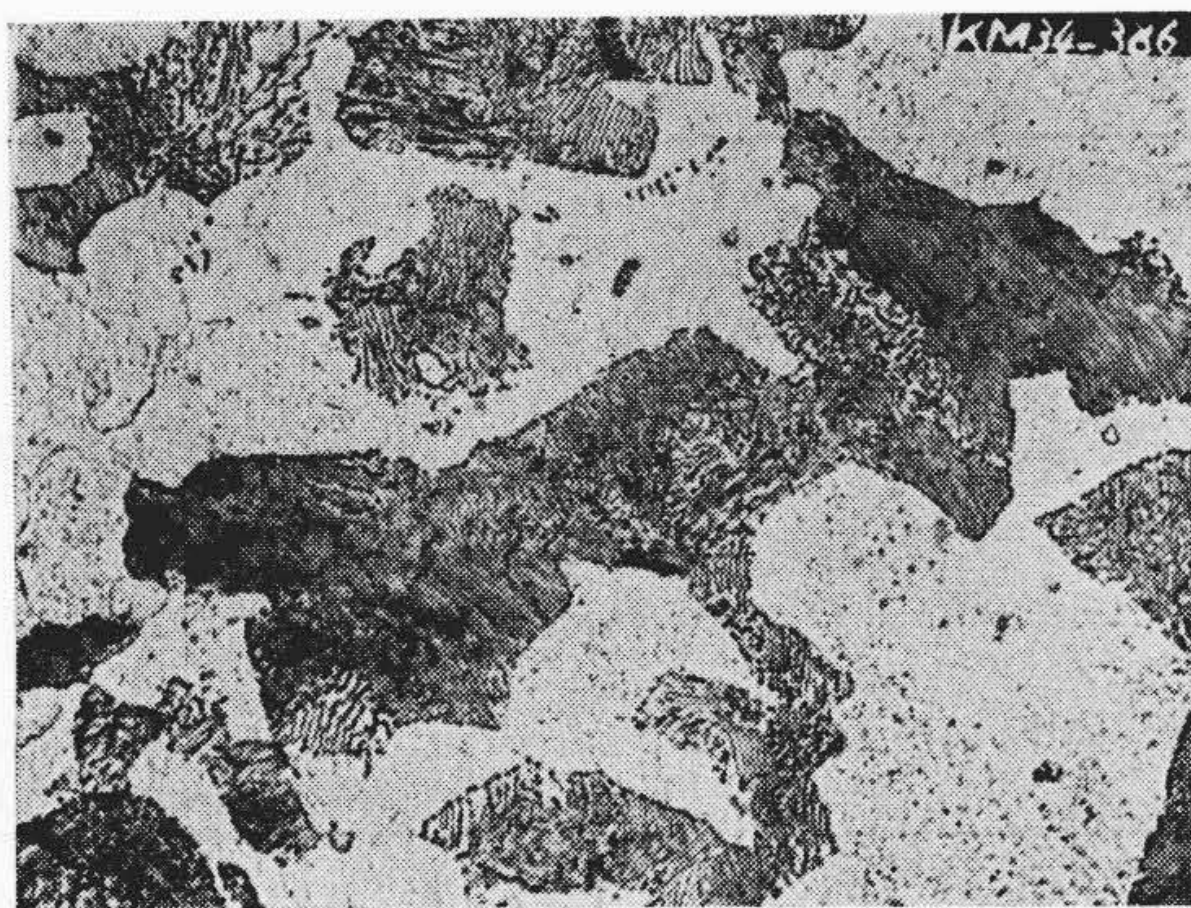


第13図 温度測定位置

腐食により厚さ約 1 mm まで徐々に腐食した。この場合も 1 mm 部に残っている残留応力の分は誤差となる。

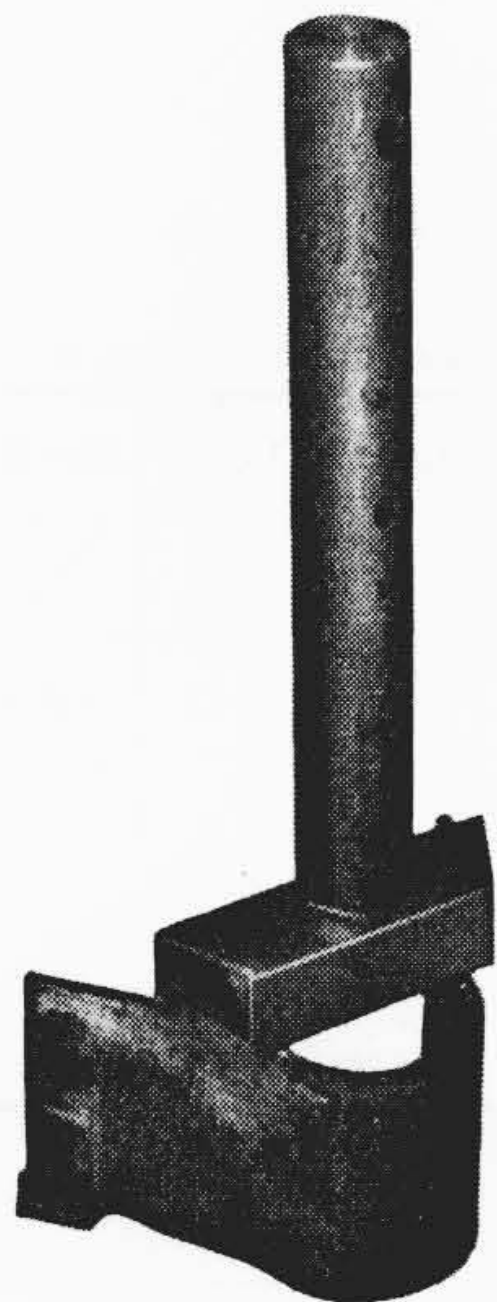
切断に使用した放電加工機は、IKEGAI JAPAX D 102 形で、切断方法を第 11, 12 図に示す。放電加工機で切断する切断条件は、あらかじめ完全に焼鈍された予備試験歯車を切断し、加工中の温度上昇、放電加工による残留応力の乱れ、ひずみゲージの接着方法の良否について検討を加えて決定した。予備測定の結果、加工条件、ひずみゲージの種類および接着方法が適正であれば、加工中の試片の温度上昇が 15°C 程度 (ひずみゲージが接着されている部分の温度は接着剤により放熱が阻害されているため少し高いと思われる) であるから、測定に大きな誤差は生じないと思われる。また完全に焼鈍して残留応力を除いた歯車のすみ肉部表面にひずみゲージをはって、放電加工による応力の乱れを求めた結果約 3 kg/mm² であった。このことから推定すると、放電加工によるすみ肉部表面の残留応力変化はほとんど無視できるものと思われる。第 13 図に放電加工中の温度上昇の測定位置を示し、第 14 図に完全焼鈍歯車のすみ肉部の顕微鏡写真を示す。

放電切断は長時間 (7~8 時間) ケロシン中で行うため、ひずみゲージの種類、接着方法には特に注意した。ひずみゲージは東京測器製 BL-5 (ベークライトゲージ) で、ゲージ長さ 5 mm のものを使用した。接着剤は東京測器製 FC-7 接着剤にて接着後加圧しながら最初 80°C で 1.5 時間保温し、次に 130°C で 2 時間焼



(×400)

第14図 予備試験歯車スミ内部の顕微鏡組織写真



第15図 軸方向切断電極



第16図 軸直角方向切断電極

付け接着後アラルダイトタイプCにてコーティングした。ひずみゲージの接着位置は穿孔法と同様すみ肉曲線部で歯たけ方向のみとし、接着点数は6箇所の歯底に各3点、計18点である。

放電加工機は前述したように IKEGAI JAPAX D 102 形を使用した。軸方向切断用電極は真鍮製で第15図のようにすみ肉部を均一な厚さに切断できるような形状に作り、電極の消耗を少なくするため先端に厚さ3mmのエルコンを銀ろう付した。また軸直角方向切断用電極も真鍮製で、放電加工に使用後の写真を第16図に示す。放電加工の切断条件は電圧100V、電流3A、加工量0.4~0.5g/mimでケロシン中で加工した。

第17図に放電切断された試片を示し、第18図に放電切断された試験歯車を示す。

次に酸腐食は放電加工後ベークライトゲージをはがし、その位置に新興通信製ペーパーゲージS21、長さ8mm、幅2mmのものをK-4接着剤で接着し防湿剤としてマイクロワックスを使用した。腐食は20%硝酸液で約1mmまで徐々に行った。第19図に放電切断後酸腐食された試片を示す。

3. 実験結果

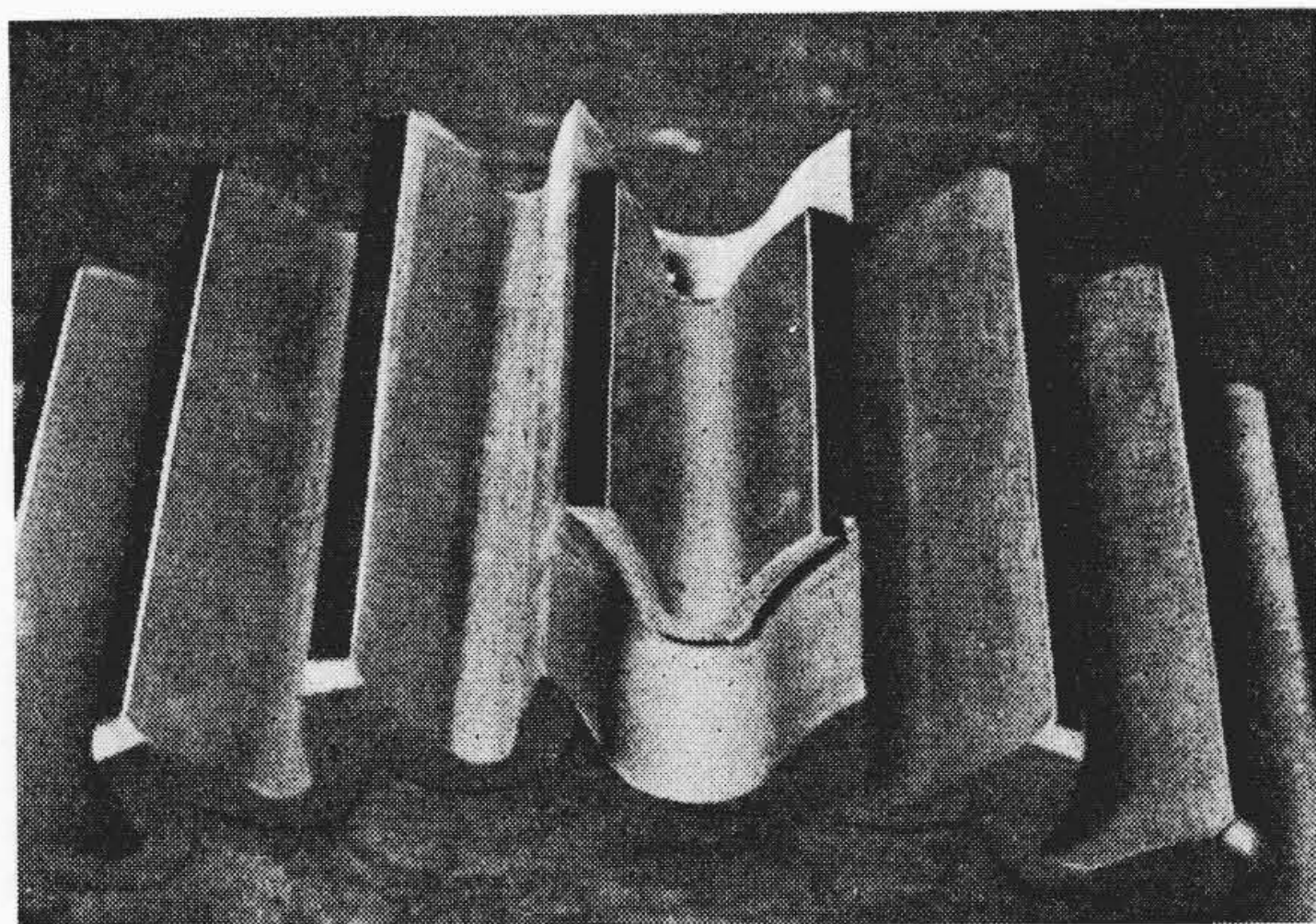
3.1 穿孔法による結果

第4表にすみ肉部歯たけ方向、歯幅方向24点の残留応力解放前後のひずみゲージの読みの差および(1)、(2)式を用いて計算した残留応力の値を示す。

$$\sigma_x = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \dots\dots\dots(1)$$



第17図 放電切断された試片



第18図 放電切断された試験歯車



第19図 放電切断後酸腐蝕された試片

$$\sigma_y = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \dots\dots\dots(2)$$

ここに

σ_x : すみ肉曲線歯たけ方向残留応力

σ_y : すみ肉曲線歯幅方向残留応力

E : 縦弾性係数 (2.1×10^4 kg/mm²)

ν : ポアソン比 (0.3)

ε_x : すみ肉曲線歯たけ方向のひずみ

ε_y : すみ肉曲線歯幅方向のひずみ

である。

ひずみ測定値の正は表面の伸び、負は収縮を示す。また残留応力計算値で負は表面の圧縮残留応力を示す。第5表は歯たけ方向、歯幅方向それぞれの平均値を示す。第4、5表よりわかるように測定値に相当のばらつきはあるが、すみ肉曲線部の表面の残留応力は圧縮で、平均値は歯たけ方向で約38 kg/mm²、歯幅方向で約10 kg/mm²であった。歯幅方向の残留応力は歯たけ方向の約1/4である。これは、歯底径に比して歯幅が小さい(約1/2)ことが大きな原因と考えられる。

3.2 切取法による結果

切取法ではすみ肉部の歯たけ方向のみ18点ひずみゲージを接着したが、半数以上はがれて正確に測定できたのは7点である。第6表

第 4 表 ひずみ測定値・残留応力計算値

歯 #	ゲージ 種類	歯幅方 向位置	ひずみ測定値 (旋削前後における ひずみ計よみの差)		残留応力計算値	
			$\varepsilon_x \times 10^{-6}$	$\varepsilon_y \times 10^{-8}$	$\sigma_x \text{ kg/mm}^2$	$\sigma_y \text{ kg/mm}^2$
1~2	P	①	876	31	-20.3	-6.8
		②	1204	-322	-25.5	-0.9
		③	1011	129	-24.1	-9.9
5~6	C	①	1364	176	-32.6	-13.5
		②	1663	-246	-36.6	-5.8
		③	1902	65	-44.2	-14.6
6~7	P	①	2518	413	-60.8	-26.9
		②	2092	-254	-46.4	-8.6
		③	1728	-457	-36.5	-1.4
11~12	C	①	1184	239	-28.9	-13.7
		②	1814	-304	-39.6	-5.5
		③	1727	51	-40.1	-13.1
12~13	P	①	1454	65	-33.9	-11.5
		②	1141	-239	-24.6	-2.4
		③	1945	-73	-44.2	-11.7
17~18	C	①	1210	119	-28.7	-11.1
		②	2041	-377	-44.3	-5.8
		③	2062	62	-47.9	-15.7
18~19	P	①	2615	-59	-59.7	-16.7
		②	1883	-101	-42.6	-10.7
		③	2099	-57	-47.9	-13.2
23~1	C	①	1656	35	-38.3	-12.2
		②	1082	-228	-23.3	-2.3
		③	2348	-153	-52.9	-12.7

注：① 歯幅方向 焼入始め ② 歯幅方向 中央 ③ 歯幅方向 焼入終り

第 5 表 硬化層残留応力全平均値

単位 kg/mm ² ，-圧縮応力	
硬化層残留応力 全平均値	
σ_x (歯たけ方向)	σ_y (歯幅方向)
-38.6	-10.3
(標準偏差 11.0)	(標準偏差 6.0)

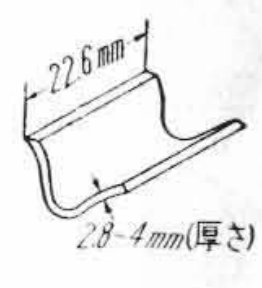
に放電切断により解放された歯たけ方向残留応力の測定値を示す。第 7 表に放電切断された試片の厚さ 2.8~4 mm のものを、20% 硝酸液で厚さ約 1 mm まで腐食したため、腐食により解放された応力を示す。第 8 表に放電切断と酸腐食により解放された応力の和を示し、第 9 表にその平均値を示す。放電法で測定されたすみ肉部表面の歯たけ方向残留応力は穿孔法と同様相当のばらつきはあるが圧縮で、平均値は約 38 kg/mm² であった。歯たけ方向について両者の測定結果を比較するとほぼ等しい。この結果は中村宏氏⁽¹⁾が電用小歯車について測定した結果に大体近い値である。

4. 結 言

高周波焼入により疲疲限が上昇する理由の一つは、焼入表面の圧縮残留応力であると考えられる。この意味で高周波焼入歯車の歯表面の圧縮残留応力の存在は重要である。

本実験は S40C 小歯車に 70 kW、10 kc ショッペ高周波焼入装

第 6 表 放電切断により解放された歯たけ方向残留応力

単位 kg/mm ² -圧縮応力						
試片形状および寸法 (放電切断)	歯 # 位置	1~2	6~7	11~12	13~14	20~21
	① 焼入始め	-38.4	-64	-8.0		
	② 中 央		-11.9		-6.2	-16.7
	③ 焼入終り	-44.8		測定失敗		

第 7 表 20%硝酸液により解放された歯たけ方向残留応力

単位 kg/mm ² -圧縮応力						
試片形状および寸法 (放電切断後酸腐食)	歯 # 位置	1~2	6~7	11~12	13~14	20~21
	① 焼入始め	-2.8	-11.6	-13.8		
	② 中 央		-23.6		-4.8	-1.9
	③ 焼入終り	-16.5		-24.8		

第 8 表 放電切断と酸腐食により解放された歯たけ
方向残留応力の和

単位 kg/mm ² -圧縮応力						
試片形状および寸法	歯 # 位置	1~2	6~7	11~12	13~14	20~21
	① 焼入始め	-41.2	-75.6	-21.8		
	② 中 央		-35.5		-11	-18.6
	③ 焼入終り	-61.3		-24.8		

第 9 表 歯幅中央および両端の歯たけ方向残留応力の平均値

単位 kg/mm ² ，-圧縮圧力		
歯幅の位置	① 焼入始め	-46.2
	② 中 央	-21.6
	③ 焼入終り	-61.3
	全 平 均 値	-37.9

置で焼入し、穿孔法と切取法の 2 方法ですみ肉部の残留応力を測定した。その結果によればすみ肉曲線部の表面の残留応力は歯たけ方向、歯幅方向ともに圧縮である。平均値は歯たけ方向で約 38 kg/mm²、歯幅方向で約 10 kg/mm² であった。歯幅方向の残留応力が歯たけ方向のものより小さくなっているのは歯底径に比して歯幅が小さい(約¹/₂) ことが大きな原因と考えられる。

なお本実験は形状の簡単な小歯車についてのもので、実際の製品歯車に残留応力効果を期待するためには、熱処理の管理、歯車の形状などに十分の注意が必要と思われる。

終りに本実験にご指導、ご助言を賜った鉄道技術研究所大和久重雄博士、中村宏技師、ジャパックス株式会社ならびに日立製作所亀有工場の関係各位に厚く感謝を申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 中村：機学誌，61，1018 (昭33-9)
- (2) Symposium on Internal Stress in Metal and Alloys, (1948) The Institute of Metals.

Vol. 22 ◎巻頭随筆.....中村汀女 ◎松 島 湾 の 大 火 力 発 電 所 ◎鳳 来 町 の 有 線 放 送 電 話 ◎新 し い 照 明 施 設 ◎ハ イ ラ イ ト カ ラ ー 「カラーTV」 発 行 所 日 立 評 論 社 東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地 振 替 口 座 東 京 71824 番	No. 12 ◎金 属 の 透 視 術 ◎日 立 だ よ り ◎明 日 へ の 道 標 ◎超 高 圧 送 電 の 話 ◎印 刷 機 と 私 達 取 次 店 株 式 会 社 オ ー ム 社 東京都千代田区神田錦町3の1 振 替 口 座 東 京 20018 番
--	---