
齒 車 特 集

車両用高周波焼入歯車の製造上の問題点	53
電気機関車用高周波焼入歯車の曲げ疲れ強さ	60
電気機関車用歯車の負荷条件と実車応力	65
ホブ切り歯車の歯形誤差に関する研究	70
ACP 歯車の耐負荷能力	74
動力伝達用歯車の騒音	78
高速大容量遊星歯車変速機の性能	82

車両用高周波焼入歯車の製造上の問題点

A Point of Manufacturing for Induction Hardened Locomotive Gears

本 間 八 郎* 佐々木 敏 美**
Hachirô Honma Toshimi Sasaki
小 岩 正 一** 石 坂 隆 一***
Shôichi Koiwa Ryûichi Ishizaka

要 旨

電気機関車用大歯車の高周波焼入法に関して研究を行なった。研究は、応力、強さ、工作法、材料、熱処理、検査法など広範囲にわたるが、ここでは材料、熱処理および検査法に関して報告した。上記研究によって、品質の安定した車両歯車が安定した製造工程によって製造されるようになった。

1. 緒 言

電気機関車の軽量化高出力化にともない、これに使われる減速歯車はますます強度の増大が望まれている。わが国では強度増大の手段として高周波焼入法が盛んに使用されており、国鉄では大歯車の焼入はすべてこの方法によることにしている。しかし実際に製造するうえにおいては、大形の製品であるため焼割れ、かたさむらなどの欠陥が生じやすい。また、材料の選定や高周波焼入方法によって著しく強度、特に曲げ疲れ強さが異なり、場合によっては走行中の歯車の欠損事故にもつながっている。そこで、高度の性能を保持し、かつ安定した品質の車両歯車の製造法を確立する目的で、材料の選定および開発、工作法の研究、熱処理法の研究および熱処理作業管理の確立、実車の応力測定、歯車検査法の研究など、素材から完成品に至るまで一貫した研究を行なった。本報は、これらのうち製造上の問題点、特に材料、熱処理および検査法に関して記述するものである。

2. 車両歯車の高周波焼入

2.1 高周波焼入方法と装置

ここで対象としている電気機関車駆動用歯車のような比較的大形の歯車の高周波焼入は、1歯みぞごとに移動して焼入れを行なう方法、歯1枚全体を一回で焼入れる歯1枚一発焼入法などが、従来の小出力の高周波焼入装置には適した方法であり、一般的であった。しかしながら最近では発振器の出力も大きくなって、リング状のコイルで歯車全体を包み加熱焼入れする、いわゆる全周一発焼入法が大形の歯車にも適用できるようになり、かつこのほうが、作業能率のほか強度が高いという結果も得られる。今回の車両用歯車の製造に関しても歯元の曲げ強度に最大の重点を置いているので、この方法を採用した。

高周波焼入装置は、周波数 10 kc 出力 750 kW の西ドイツ AEG 社製電動発電機式を使用して行なうものである。この装置は歯車のセッティング→加熱→冷却器へのセッティング→噴水冷却→取り出し、まですべて自動化され、精度 ±0.1 秒のタイマーによって、与えられた焼入線図を follow するようになっている。

2.2 高周波焼入作業管理

車両歯車の高周波一発焼入作業において、特に入念な管理を要する要素を大別すると

- (1) 誘導子、冷却器などの機器類の設計製作基準の確立
- (2) 段取精度の保持

- (3) 焼入線図の決定
 - (4) 焼入結果の統計的な把握
- の4点があげられる。

誘導子の設計製作基準は、過去の実績に基づき、主としてインピーダンスマッチングを最良にして、発電機の出力を被焼入歯車に最も効率良く与えるように考えられている。

冷却器は、被焼入歯車の表面を均一に冷却することが最大の目的である。したがって冷却器への配管、冷却器の形状、寸法、冷却水孔の径、分布などが重要である。

段取精度とは、一発焼入時の被焼入歯車と誘導子および冷却器の相互寸法精度のことである。この精度はできるだけ厳密なるを要する。

ある種類の車両歯車一発焼入作業が開始される時、最初の1個を先発させて試験歯車とし、これを試験焼入することによってその後の焼入線図を決定するのが、従来の焼入線図決定方法であった。後章で述べる実験結果から、次に示すような基本事項が明らかになったため、焼入線図の決定が容易となった。

- (1) モジュールの大きな歯車は、一発焼入前に炉中予熱を行なう。
- (2) 冷却前の放冷時間の調節により、温度分布の均一化をはかる。
- (3) 噴水冷による冷却時間を短くする。

このようにして一発焼入された歯車は、その種類ごとに管理記録にとられ、作業結果の作業条件への反映がす早く、確実にこなされることになった。

2.3 高周波一発焼入における周波数

高周波一発焼入における歯車モジュールと適正周波数に関してはソ連の報告⁽¹⁾があり、ヴォログジン氏は、次式により電流の周波数を選ぶことを勧めた。

$$f_{\text{best}} = \frac{6 \times 10^5}{m^2} \text{ サイクル,}$$

m : モジュール

また、ロジンスキー氏は、4~8 モジュールの歯車で歯形に沿って一様な焼入層を得るため、同時加熱で周波数 $f_{\text{best}} = 2 \times 10^6 / m^2$ サイクルすなわちヴォログジンの値より約3倍の値をとることを勧めている。

以上の適正周波数より低い周波数、すなわち $f < f_{\text{best}}$ で加熱する場合は歯元ばかり加熱され、 $f > f_{\text{best}}$ では歯先がずっぽとはげしく加熱される。もちろん歯形に沿った輪郭焼入を行なうには、大出力の発生装置を必要とする。

さて、この式によって 15 モジュールに対する周波数を求めると、ヴォログジンで約 3 kc、ロジンスキーでは約 9 kc となる。したが

* 日立製作所機械研究所 工学博士

** 日立製作所亀有工場

*** 日立製作所足立工場

表1 試験歯車の要目

モジュール	10	12	13	15
材質	S45C	S45C	S45C	S45C
歯形	ナミバ	ナミバ	ナミバ	ナミバ
圧力角	20°	20°	20°	20°
歯数	33	28	25	22
刻ミ円径	330φ	336φ	325φ	330φ
歯先径	350φ Ha	360φ Ha	351φ Ha	360φ Ha
歯幅	80	80	80	80
アデンダム	10	12	13	15
Aφ	255	250	235	220
個数	4	4	4	4

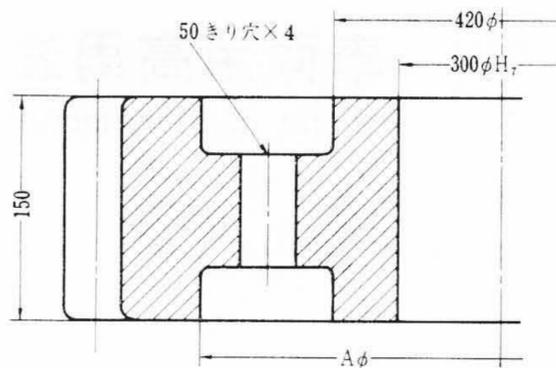


図1 試験歯車の形状

表2 一発焼入周波数比較実験結果

項目	周波数	
	3 kc 焼入	10 kc 焼入
表面硬さ分布	バラツキが大である。しかしこれは周波数でなく、冷却に起因した。	バラツキが少ない。
マクロ腐食による硬化層形状	良く歯型に沿っている。	歯先および歯面が著しく深くなる。
歯底の硬化層	2.3 mm で10 kc 焼入より深い。	2.0 mm で3 kc 焼入より浅い。
焼入後の顕微鏡組織	正常	歯先および歯面の結晶粒が大きく過熱されている。
焼割れ	1 個	6 個
ひずみ	全体的に収縮する。	全体的に収縮する。
作業性	よい	あまりよくないと思われる

表3 試験歯車の要目

項目	歯車 No.										
	1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	
製造方法	普通溶製								真空鑄造		
材質	S40C		S45C DHa				S40C		S45C DHa		
モジュール	12				15				15	12	
歯形	ナミバ								ナミバ		
圧力角	20°								20°		
歯数	69枚				55枚				55枚	69枚	
刻ミ円径	828φ				825φ				825φ	828φ	
歯先径	852φ				855φ				855φ	852φ	
アデンダム	12				12				15	12	
歯底端面のR	1.5	5	1.5	5	1.5	5	1.5	1.5	1.5	5	
歯底面のあらさ	6 S	18 S	6 S	18 S	6 S	18 S	6 S	18 S	6 S		
Aφ	718				687				687	718	

って今回の実験に用いた10 kc, 750 kWの装置の周波数はモジュールによっては必ずしも最適のものとはいえない場合もある。そこで、3 kcおよび10 kcの焼入装置を用いて、歯車を一発焼入し、焼入結果に対する周波数の影響を検討した。

2.3.1 実験

試験歯車は表1に示されるようにやや小形のものとし10, 12, 13および15モジュールで各モジュールについて4個合計16個である。比較した焼入結果の項目は、表面かたさ、硬化層、焼入組織、焼割れおよびひずみである。予備実験によって各モジュールおよび周波数ごとに適当な焼入線図を決定した。焼入線図の決定にあたっては、加熱に要する時間をなるべく短くして急速加熱となるように留意した。誘導子としては、内径360~370mmφ幅60~65mm, 2巻きのコイルを用い、冷却器は内径410mmφ, 幅120mmのものである。

2.3.2 実験結果と検討

表面かたさの測定は、1個の歯車について歯面4×2×15個所、歯底4×15個所の測定を行なったが歯面Hs65~68, 歯底Hs67

~75で若干バラツキが多くなった。

硬化層は歯底では3 kcの場合が深く、歯先では10 kcの場合が深くなった。マクロ腐食写真で硬化層の形状を比較した結果では、3 kcの場合のほうが歯形に沿った形となった。このほか顕微鏡組織、焼割れの点でも若干差があり、15モジュール程度の大きさでは3 kcのほうがより均一に加熱されやすい結果となった。以上の結果を総合して比較すると表2のとおりである。

3. 中炭素鋼製歯車の高周波焼入実験

3.1 実験計画

表3に示すとおり10個の試験歯車を製作し、一発焼入を施したのち疲れ試験を行なって、車両歯車の材質、熱処理、強さなどに関して結論を得ようとした。表3中No.1~8の試験歯車は実験要因をH_{2-s}直交配列表に従って配列した。その形状を図1に示す。

変化させた実験要因について説明すると次のとおりである。

- (1) 材質: 鋼種はJIS S40C (C=0.41%) およびS45C (C=0.46%) である。溶製法としては大気溶製(普通溶製)と真空鑄造の2種類とした。
- (2) モジュール: 12および15
- (3) 歯底端面のR: この部分は最も焼割れの発生しやすい部分である。そこでこの部分のRを変えて焼割れへの影響を見た。
- (4) 歯底面あらさ: 疲れ強さにおよぼす影響を見た。
- (5) 加熱条件: 2通りとした。焼入れは2% PVA水溶液による噴射冷却で一定時間急冷し、その後空冷した。

No.10および11試験歯車は真空鑄造されたS45C材で製造され、溶製法の影響も検討された。

これら真空鑄造歯車の仕様はNo.4およびNo.6歯車と等しい。

真空鑄造歯車の製作に先だち、真空鑄造材の試験片による普通溶製材との各種比較試験を行なった。試験したのは、含有ガス量、非金属介在物、結晶粒度、組織、機械的性質、疲れ強さなどであるが、特に著しい差の認められたのは含有ガスであった。これら10個の試験歯車の分析値および機械的性質は表4および表5に示すとおりである。

3.2 高周波一発焼入実験

焼入れに用いた誘導子は2巻きにしたリング状のもので、試験歯車を加熱したときの温度分布曲線を測定して、歯底の歯幅方向の温度分布が均一になるように、また歯底端面の温度上昇を極力小さくするように設計された。

冷却器は、予備実験により表面かたさのバラツキをできるだけ小さく押えるようなものを選定した。

試験歯車の高周波一発焼入結果として表面かたさを表6に、焼割れの状況を表7および図2に示す。実験にとりあげた要因中モジュールだけが、歯底の表面かたさに影響を及ぼしている。すなわち、12モジュールの歯底かたさのほうが15モジュールのそれより高くなる。

表4 試験歯車の化学成分 (%)

溶製法	歯車 No.	材質	採取位置	C	Si	Mn	C#
普通溶製	1	S40C	トリベ実体	0.41 0.40	0.34 0.31	0.76 0.74	69,291
	2	S40C	トリベ実体	0.41 0.38	0.34 0.32	0.76 0.76	69,291
	3	S45CDHa	トリベ実体	0.45 0.45	0.29 0.27	0.72 0.74	13,390
	4	S45CDHa	トリベ実体	0.45 0.45	0.29 0.29	0.72 0.74	13,390
	5	S45CDHa	トリベ実体	0.45 0.44	0.29 0.27	0.72 0.73	13,390
	6	S45CDHa	トリベ実体	0.45 0.44	0.29 0.28	0.72 0.76	13,390
	7	S40C	トリベ実体	0.41 0.39	0.34 0.30	0.76 0.78	69,291
	8	S40C	トリベ実体	0.41 0.40	0.29 0.27	0.79 0.82	79,293
真空鋳造	10	S45CDHa	トリベ実体	0.44	0.28	0.70	
	11	S45CDHa	トリベ実体	0.44	0.28	0.64	

表5 試験歯車の機械的性質

製鋼法	歯車 No.	項目	降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び (%)	絞り (%)	シャルピー 衝撃値 kg-m/cm ²	硬 HB
普通溶製	No. 1		60.0	71.2	24.2	44.2	7.1	188
	No. 2		42.5	69.0	24.1	45.9	6.3	195
	No. 3		43.6	69.7	23.9	42.6	5.9	192
	No. 4		41.7	69.3	25.2	44.6	6.5	199
	No. 5		56.3	71.7	23.2	42.1	7.6	199
	No. 6		42.8	71.0	22.6	37.7	5.5	207
	No. 7		44.5	69.3	21.7	40.8	7.3	195
	No. 8		46.0	70.7	23.6	46.9	6.4	195
真空鋳造	No. 10							
	No. 11							

表6 試験歯車の表面かたさ (Hs)

歯車 No.	位置 項目	歯面		歯底	
		平均値	分散	平均値	分散
1		71.2	2.4	66.5	3.9
2		77.6	13.1	66.7	1.8
3		77.7	18.8	69.3	3.5
4		78.3	12.7	72.2	9.7
5		77.2	12.3	62.6	5.6
6		76.4	16.6	67.3	5.1
7		76.8	11.1	62.2	4.5
8		74.1	16.2	61.8	7.1

表7 試験歯車の焼割状況

歯車 No.	焼割れた歯数		
	端面 R 部		歯底
	上	下	
1	0	0	0
2	0	0	0
3	28	0	42
4	20	0	0
5	0	0	0
6	37	0	0
7	0	0	0
8	33	0	0

焼割れについては、常識的な結果であるが、S40C、2回加熱および歯底端面5Rの場合は焼割れが少ない。

こうして一発焼入された10個の試験歯車は、焼割れのあるものはこれを削り取って、疲れ試験を行なった。

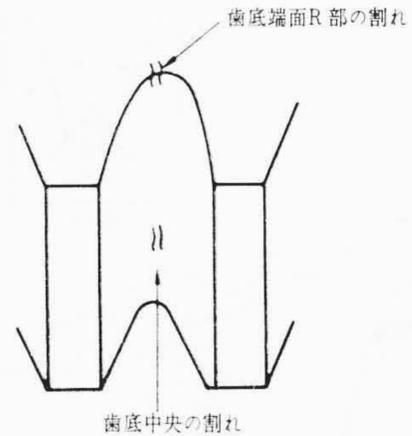


図2 焼割れの位置

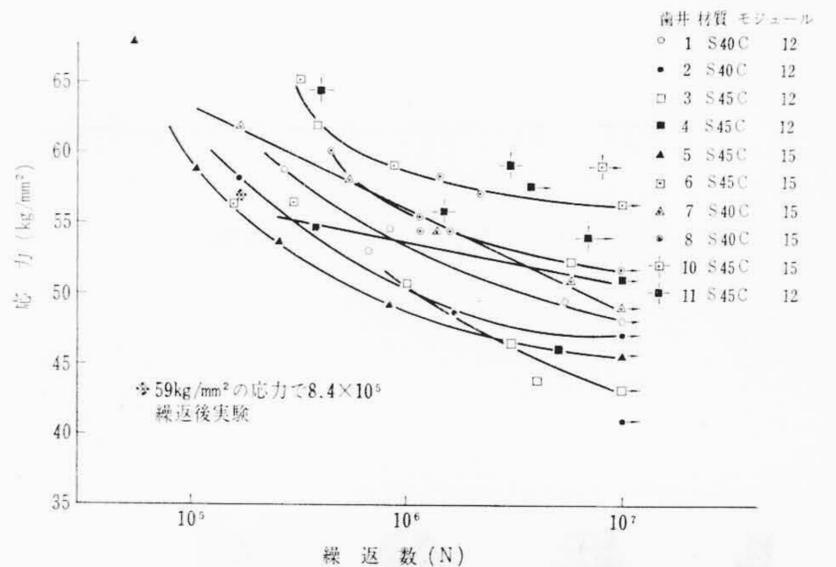


図3 試験歯車の疲れ試験結果

4. 疲れ強さと材料および熱処理との関係

10個の試験歯車の疲れ試験結果を図3に示す。No.1~8歯車の疲れ限度について分散分析を行なったところ、疲れ限度に有意な影響を及ぼす実験要因はなかった。すなわち、本実験の範囲ではモジュール、材質、歯底端面のR、歯底面あらかさおよび加熱回数とも疲れ限度は18Sの場合より約10%高い。したがって、このような車両歯車の高周波一発焼入にあたっての各種条件の選定は、本実験の範囲内で、焼割れの発生を少なくするようにすればよいことがわかった。

4.1 硬化層および組織の影響

No.1~8歯車の歯底硬化層および歯底の焼入組織(未溶解フェライトの面積百分比)について、疲れ限度と同じように分散分析を行なったが、本実験の範囲では疲れ限度と同じくこれらに有意な影響を及ぼす要因は認められなかった。硬化層のかたさ分布、マクロ腐食硬化層および歯底の焼入組織の例を図4、図5および図6に示す。また各試験歯車についての測定値の平均を一括して示したのが表8である。

表8から明らかになった事柄を記すと次のとおりである。

- (1) 歯底部の硬化層は、全硬化層深さで3~5mm程度、有効硬化層で0.5~2.5mm程度である。
- (2) 端面部の硬化層深さのバラツキが大きい。特に、焼入時下側になった端面部の硬化深さが小さい。これは図5の歯筋方向のマクロ腐食写真からも明らかである。
- (3) 未溶解フェライト量は大略10~30%の範囲にある。

4.2 材料の影響

図3から明らかなように、No.10およびNo.11試験歯車の疲れ強さは、ほかの試験歯車の疲れ強さより明らかに高い。

No.10およびNo.11は真空鋳造歯車で、調査した範囲内で普通溶製歯車と著しく違うのは、含有ガス量であった。この差が、どのよ

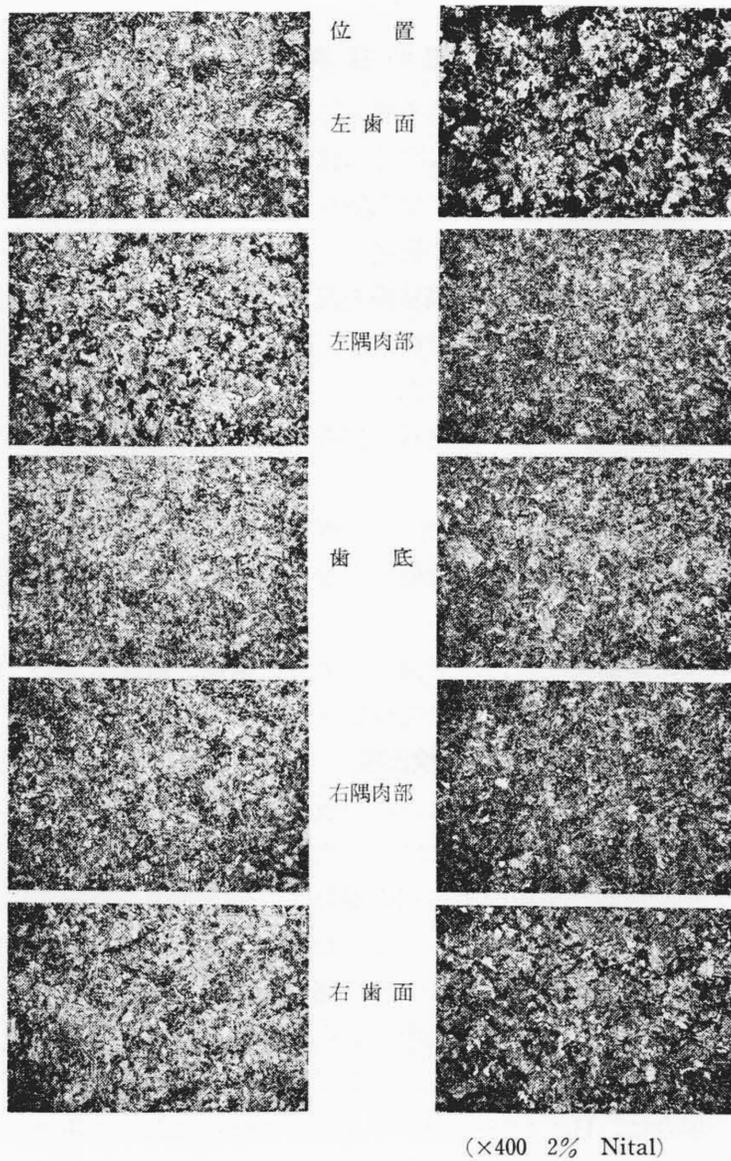


図7 焼入組織例

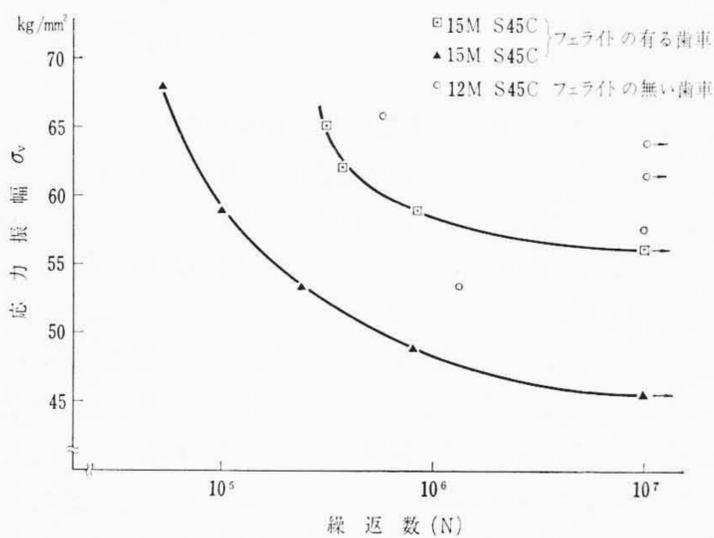


図8 フェライトを無くした歯車の疲れ試験結果

うに疲れ強さの差となって表われたか明瞭ではないが、歯車材料として適当なことは明らかである。

4.3 未溶解フェライトを少なくした場合の実験

焼入硬化層中に、図6のように未溶解フェライトが残っておれば、疲れ強さが低下すると考えるのは常識である。そこで、No.2 試験歯車 (S40C, 12 モジュール) に歯底部の未溶解フェライトがほとんどなくなるような高周波一発焼入を施したものの疲れ試験を行なって、未溶解フェライトの疲れ強さに及ぼす影響を調べた。このときの高周波加熱は低出力で予熱を十分行ない、最後に高出力で焼入温度まで加熱した。この場合、歯先および歯底の温度-時間曲線を測定し、歯底部の温度を A_3 変態点以上あげて未溶解フェライトをなくし、かつ歯先部の過熱を防ぐように設定した。このときの歯底部の組織を図7に示す。

試験歯車の疲れ試験結果では図8のように、バラツキは大きい

表9 供試鋼

鋼種	おもな成分範囲 (%)				
	C	Mn	Ni	Cr	Mo
S45C	0.42~0.48	0.60~0.90	—	—	—
高炭素鋼	0.55~0.65	0.40~0.80	—	—	—
SCM4	0.38~0.43	0.60~0.85	—	0.90~1.20	0.15~0.30
SNCM8	0.36~0.43	0.60~0.90	1.60~2.00	0.60~1.00	0.15~0.30

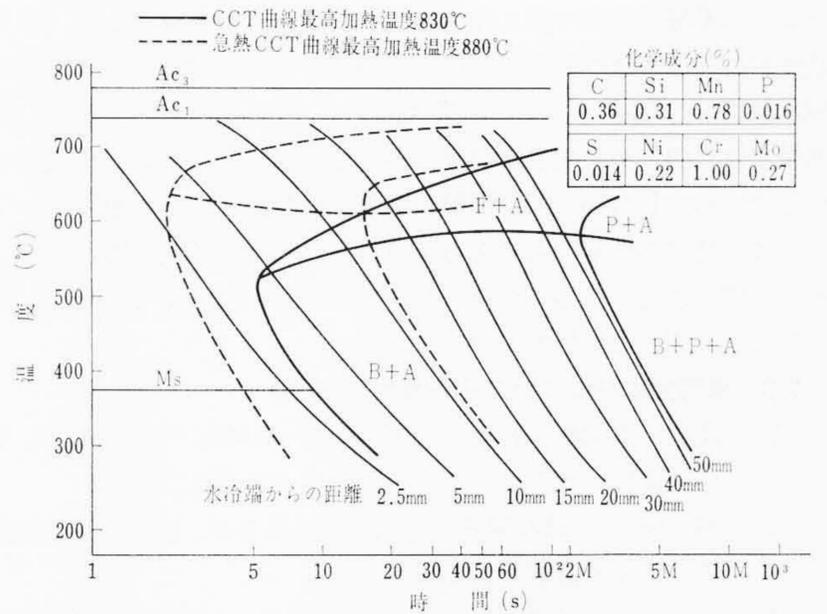


図9 SCM4の普通および急熱CCT曲線

が、未溶解フェライトを少なくしたことによる疲れ強さの上昇は著しい。

図8に示されたバラツキの原因は、調査した結果では、焼入冷却の不足によるトルースタイトの析出にあるようである。また、この方法は加熱時間も長く作業性がやや悪い。したがって、未溶解フェライトをなくして疲れ強さを上昇させるには、焼入冷却法の研究、作業性の改善などを行なう必要があり、その後に実機に適用すべきと考える。

5. 特殊鋼に対する検討

高周波一発焼入を行なう車両歯車材として具備すべき性質は次のとおりである。

- (1) 高周波焼入したものが強じんであること。特に曲げ疲れ強さの高いこと。
 - (2) 高周波焼入において焼割れが生じがたいこと。
 - (3) 急熱における焼入性が大きく、一様な硬化層が得られること。
- これらの諸要求を満たすために従来の中炭素鋼に代えて、特殊鋼を採用するのも一つの方法である。

そこで、ここではまず市販の鋼種から代表的なものを選んで、各特性の比較を行なうこと、特殊鋼による実物大歯車の疲れ強さを確かめることおよび車両歯車に最も適した特殊鋼を開発することについて実験を行なった。

5.1 車両用歯車材の比較実験

ここでとり上げた鋼種は表9のとおりである。これらの鋼の変態点、焼入性、焼割れ感受性、表面硬化部の残留応力、表面硬化部の機械的性質および高周波焼入した試験片による小野式疲れ試験を行ない、結果を比較検討した。得られたおもな結論を記すと次のようになる。

- (1) SCM4は、図9のCCT曲線のように急熱による焼入性の低下が著しい。
- (2) 低温焼戻 (250°C まで) の場合の機械的性質は主としてC含

有量によって決定され、合金元素の影響は少ない。すなわち、特殊鋼であるがための利点は、機械的性質に関してはあまりない。

(3) 焼割れ感受性は、高炭素鋼 > SCM4 > S45C となる。

(4) 疲れ限度は図10のようで、特にS45Cが200℃以上の焼戻しで著しく低下する。

5.2 SCM4 歯車による疲れ試験

実物大歯車をSCM4で製作し、疲れ試験を行なった。

その結果、十分な焼入かたさ (Hv 650 程度) を持っているにもかかわらず、予期に反して 30 kg/mm^2 以下と非常に低い値を示した。そこで、SCM4 歯車の疲れ強さの低い原因究明の一環として、焼入温度および冷却速度を変えて高周波焼入を施した試験片に、小野式疲れ試験を行なった。その結果は図11に示すとおりである。この結果では、明らかに噴水冷のほうが油冷の場合より高い疲れ限度を示している。したがって、SCM4 歯車の疲れ強さの低い原因の一つは冷却速度にあるものと考えられるが、このほか破壊が脆性(ぜいせい)破壊に近い状態で行なわれたため低下したとも考えられ、現在これらに関しなお研究を進めている。

5.3 車両歯車材について得られた結論

- (1) 現在、車両歯車材として $C=0.40\sim0.46\%$ の真空鋳造した中炭素鋼が製造面および性能の点ですぐれている。
- (2) 特殊鋼ではSNCM8が適当と思われるが、さらに実物大歯車による確認試験が必要である。
- (3) なお、現在熱処理性がよく、かつ強じんな鋼材を考究中で、これについても実物大歯車の試作を行なう予定。

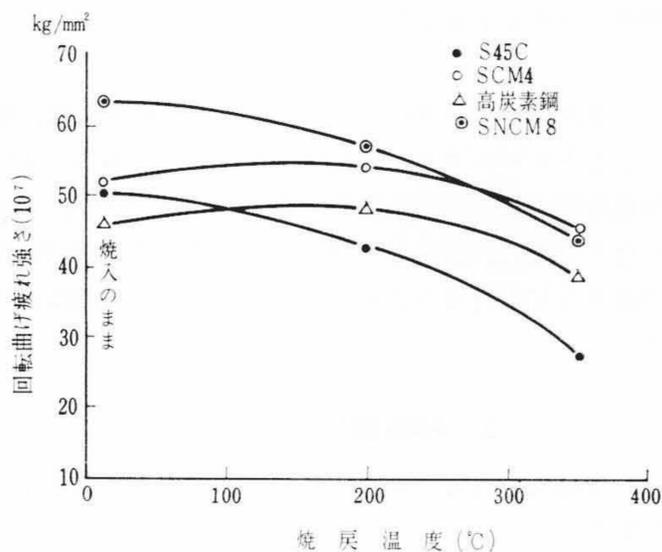


図10 各種高周波焼入材の焼戻温度と疲れ強さとの関係 (切欠試験片)

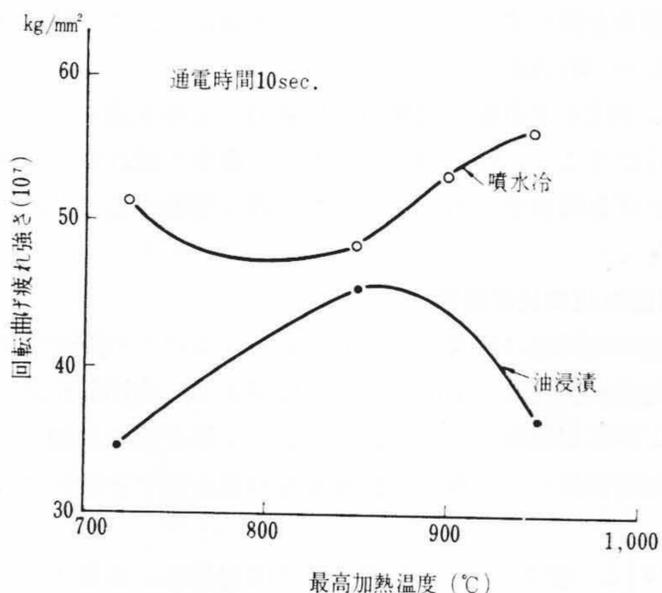


図11 SCM4 の高周波焼入における最高加熱温度と疲れ強さとの関係 (切欠試験片) (焼戻 200℃×1h)

6. 磁粉探傷検査

以上、車両歯車製造における熱処理上の問題点を述べたが、常に安定した高品質の製品を納入するには、品質管理とともに検査技術も重要である。そこで今回の車両歯車の製造にあたっては、従来よりも精度を高める検査技術の研究および合理的な検査規準の確立をあわせ行なった。すなわち鋼材検査規準の確立、磁粉探傷検査法、X線による非破壊的硬化深度検査法、残留応力測定検査法、表面組織検査法などについて研究した。

以下、これらのうち、磁粉探傷検査に関する研究成果の概要を記述する。

磁粉探傷検査を行なう場合、どの程度の大きさの割れまで検出しているか、という問題に定量的な答を与えることはなかなか困難である。

そこで、本研究では、車両歯車の場合、歯面、歯底についてたしかに検出能を保証し得る方法を確立する目的で始めた。

6.1 磁粉探傷法における検出能

探傷検査における検出能とは、一般に最小検出欠陥大きさで決めているのが普通であり、ここでいう大きさは検査法によってまちまちになっている。磁粉探傷検査の場合は、表面きずの有害度に最も影響を与えるきずの深さをもってした。磁粉探傷法において、割れに磁粉が付着するのは、図12で割れ部の漏れ磁場の強さ H_g によるものであり、これは被検品中の磁束密度 B と割れの形状によって決まる。割れの形状については、割れの長さが割れの幅に比べて十分長い場合は、 H_g は割れ深さ d と割れの幅 w によって決まるものである。一般の割れは、 w が d に比べて著しく小さく、 H_g はほぼ d によってのみ決まると考えて差支えないので、検出能として割れ深さをとるのが適当と考えた。もちろん、磁粉模様形成の程度は、このほかの条件によっても変化するが、同一作業状態の場合は、これをほとんど一定にできよう。

6.2 はり付け試験片による磁束密度分布測定

検出能は前述のように B で決まるから、 B がわかれば求められるはずである。 B は与えられた磁場の強さ H_0 によって材質固体の磁気特性にしたがって決まる。それゆえ、起磁力 F が与えられれば、 H_0 が求まり、 H_0 より B が算出できるわけである。しかしながら、これが可能なのは、 B が閉磁路を作る場合で、一般の磁粉探傷法のように、 B が閉磁路を作らない場合は、 H_0 より B を求めることはできない。そこで、はり付け試験片によってこれを実測することにした。これはJIS-A形試験片にヒントを得たもので、図13のようなはり付け試験片を、ギャップゲージを利用して作成した。材質はSK2である。これをK形試験片と称することにした。この場合、高炭素鋼を用いたのは、予備試験によって、有効磁場の強さの推定には、飽和磁場の強さの大きい材質のものの方が有効であることがわかったからである。

このK形試験片を使用して、種々の磁場の強さを与えた場合の磁

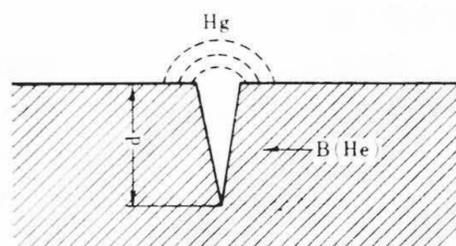


図12 磁化した割れ部の状況

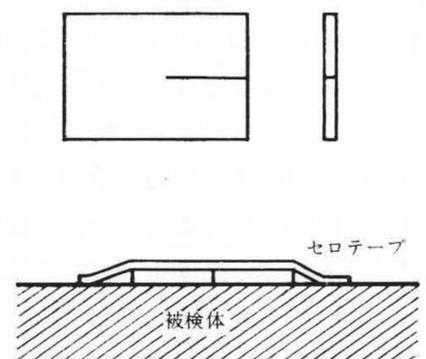


図13 K形試験片と貼付状況

表 10 K形試験片磁粉模様の明瞭度

明瞭度	内 容
0	認められない。
1	わずかに認められる。
2	やや明瞭に認められる。
3	明瞭に認められる。
4	きわめて明瞭に認められる。

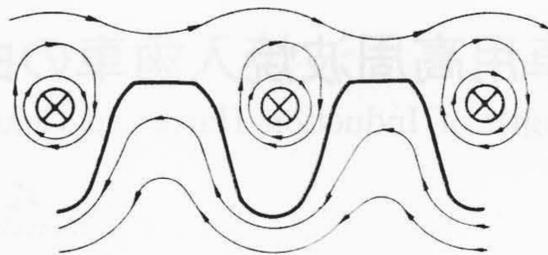


図 14 歯溝通電磁化による磁束の流れ予想図

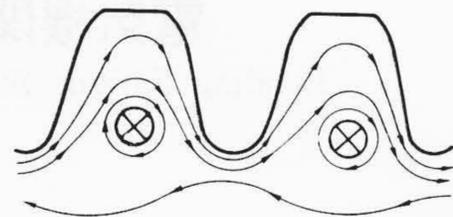


図 15 歯筋通電磁化による磁束の流れ予想図

表 11 K形試験片磁粉模様の明瞭度と有効磁場の強さ
〔表中の数字は (Oe)〕

明瞭度 T.P 厚さ(mm)	0	1	2	3	4
0.01	≦16	26~112	≧128	—	—
0.02	≦16	—	26~96	≧112	—
0.03	≦16	—	26~96	112~128	≧161
0.04	≦16	—	26~47	74~112	≧128
0.05	≦16	—	26~47	74~96	≧112

表 12 JIS-A形試験片とK形試験片の相違点

	JIS-A形試験片	K形試験片
材 質	純 鉄	高 炭 素 鋼
標 準 ぎ ず	み ぞ	切 込
製 作 法	困 難	き わ め て 容 易
使 用 法	みぞ面を下にして被検品の表面に、試験片の表面を露出させてはり付ける。	被検品の表面に、セロテープで試験片の表面をおおってはり付ける。
性 能	磁束の方向の適否判断はできる。有効磁場の強さの確認はできない。	磁束の方向の適否、有効磁場の強さの確認ができる。
脱磁の確認	で き な い	で き る
価 格	高 価	安 価

粉模様の変化を見たが、残留法によれば、有効磁場の強さを推定できることがわかった。

磁粉模様の明瞭度を、表 10 のように規定した場合、K形試験片の磁粉模様明瞭度と有効磁場の強さの関係は表 11 に示すとおりである。この結果、K形試験片を、検査しようとする製品の各部にはり付けることにより、製品の磁化の程度をは握することができるようになった。JIS-A形試験片とK形試験片の違いを表 12 に示す。

6.3 磁気特性と検出能の問題

磁気特性と検出割れ深さの関係を求めるために、材質 SK3 の丸棒で割れ試験片を作り、種々の磁場の強さを与えて、割れ部に形成される磁粉模様を観察した結果、実験的に検出割れ深さと磁性特性の間に、次のような関係があることがわかった。

連続法では、

$$d_p = \frac{223}{B - 893} \text{ (mm)} \dots\dots\dots (1)$$

残留法では、

$$d_r = \frac{58}{H_c^2 - 70} \text{ (mm)} \dots\dots\dots (2)$$

- ただし、 d_p : 連続法で検出され得る最小割れ深さ (mm)
- B : 最大磁束密度 (G)
- d_r : 残留法で検出され得る最小割れ深さ (mm)
- H_c : 保 磁 力 (Oe)

この式を使用すれば、製品の磁気特性と、与えられた有効磁場の強さがわかれば、検出され得る最小割れ深さを求めることができる。磁気特性は、材質、熱処理によって変わるので、それぞれについて求めておくことが必要であり、有効磁場の強さはK形試験片より求めることができる。

6.4 車両歯車の磁化方法

実際の歯車について最適磁化条件を考えると、次の二つがあげられる。

- (1) 歯面、歯底について同一検出能で検査できる磁化方法であること。
- (2) 要求された検出能を満足するに十分なだけ磁化できる方法であること。

(1)については、リム部にコイルを巻いて磁化するコイル法で行なえば、歯面と歯底の検出能が著しく違って、歯面の検出能が低下するのでほかの磁化方法を考慮しなければならない。

歯筋方向の割れを検出する場合コイル法以外の磁化方法として次の二つを考えた。

- (1) 図 14 に示すように、歯みぞの間に電流を流す方法
- (2) 図 15 に示すように、歯筋方向に歯部に直接電流を流す方法

両方とも、図示のような磁束の流れが予想され、歯底と歯面ではほぼ均一に磁化されるであろう。しかし実際作業上、(1)については、歯みぞにケーブルまたはこれに代わる導体を入れていかねばならずやや厄介である。これに比べ、(2)の場合は、接触子により歯筋方向にはさんで通電すればよいので、操作としては簡単である。

次に歯たけ方向の割れ検出であるが、この場合は磁束の方向が歯筋方向に向かなければならない。そうすると、歯端部は磁束が垂直に通過することになり、かなり自己減磁力が生ずる。そこで、おおざっぱに歯車を 1 個の円板と考え、円周コイル磁化法によって、最も磁化条件の悪い歯底部に基準を置いて、その部分についてK形試験片の磁粉模様が見えるようになるかどうか検討した。

以上の考えに基づいて、実際の車両歯車の磁気探傷検査を行なった結果次のような結論を得た。

- (1) 歯筋方向割れ検出には歯筋通電磁化法が、歯たけ方向割れ検出には円周コイル磁化法がよい。
- (2) K形試験片、磁化条件決定法などについて作業基準を作った。

7. 結 言

以上、車両用高周波焼入歯車の製造に関する研究のうち、材料熱処理および検査に関する研究成果の一端を述べたが、これにより歯元の曲げ疲れ強さ約 40 kg/mm² の歯車を安定して製造できるようになった。現在、この成果によって製造された歯車が国鉄 E F 70、E D 75 形などの電気機関車に装着され、事故なく稼動している。しかしながら、今後さらに強度を高めるためには、根本的には素材の選定、特により強じんな合金鋼の使用が考えられ、この方面についてなお深い研究を必要とする。

最後に本研究を遂行するにあたり、種々ご指導戴いた日立製作所水戸工場松村工場長、亀有工場割石副工場長および日立研究所根本部長に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 高周波熱処理に関するロシア文献 No. 14, 高周波熱処理技術委員会 (昭和 32.5)