

第5章 高周波焼入れ歯車の残留応力,硬化層と曲げ疲労強度に及ぼす加熱条件の影響

5.1 緒言

高周波焼入れは、機械要素の熱処理による表面硬化処理法の中でインライン化が比較的容易で、省エネルギー効果のある方法なので、生産性の向上に有望であり、また生産環境の改善にも適している。しかし、歯車のように表面形状が複雑な場合には、表面に沿った硬化層を得るための焼入れ条件を決定するには試行錯誤が必要で、浸炭焼入れに比較し、品質の安定性や信頼性の面からあまり高く評価されていないのが現状である。高周波焼入れ歯車の強度信頼性を高めるためには、種々の高周波焼入れ歯車の曲げ疲労試験や歯面疲労試験を行って、これらの疲労強度に及ぼす焼入れ条件の影響について検討し、最適な焼入れ条件の選定法の確立を進める必要があると考えられる。第4章では、高周波焼入れ歯車の残留応力・硬化層と曲げ疲労強度に及ぼす加熱時間の影響などについて明らかにした。

本章では、加熱電力、周波数、加熱時間の異なる高周波焼入れ歯車の硬さ測定と焼入れ組織観察を行って、硬さ分布、硬化層および表面焼入れ組織に及ぼす焼入れ条件と加熱コイル形状などの影響について明らかにする。次に、これらの高周波焼入れ歯車の曲げ疲労試験を行って、曲げ疲労強度を求め、曲げ疲労強度に及ぼす加熱電力、周波数および加熱コイル形状の影響について検討を加えるとともに、曲げ疲労強度と硬化層、焼入れ組織の関係などについて明らかにする。これにより、高周波焼入れ歯車の曲げ疲労強度に対する最適焼入れ条件の選定と加熱コイル形状設計法についての検討を行う。

5.2 実験方法および実験装置

5.2.1 試験歯車および加熱コイル

本実験で用いた試験歯車は、鳥取県金属熱処理協業組合（TMHT社）および電気興業株式会社（DKK社）にて高周波焼入れを行ったものである。これらの試験歯車の形状寸法、主諸元は、4.3.1で用いたものと同じである。

表5.1に試験歯車の加熱条件を示す。加熱電力は $P=50, 100$ kW, 周波数は $f=30, 60$

kHz で、加熱時間 t_h は、 $P=50$ kW では $t_h=2.8, 3.3, 3.8, 4.3$ s の 4 種類、 $P=100$ kW のでは $t_h=0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8$ s の 5 種類である。また、図 5.1, 図 5.2 に TMHT 社での高周波焼入れに用いた加熱コイル (Coil B) と、DKK 社で用いた加熱コイル (Coil C) の形状寸法を示す。これらの加熱コイルの材料は銅である。

Table 5.1 Heating conditions of test gears

Gear sign	Material	Electric power P kW	Frequency f kHz	Heating time t_h s	Heating coil	Testing machine	
G3N1*	S35C	50	30	2.8	Coil B	TM- I	
GB1							
GB2							
GB3							
GB4		50	30	3.3	Coil B	TM- I	
GB2							
GB3							
GB4							
G3N2*		S35C	50	30	2.8	Coil C	TM- II
GC1							
GC2							
GC3							
GD1			100	30	0.8	Coil C	TM- II
GD2							
GD3							
GD4							
GD5	100		60	1.0	Coil C	TM- II	
GE1							
GE2							
GE3							
GE4	100		60	1.2	Coil C	TM- II	
GE1							
GE2							
GE3							
GE4	100	60	1.5	Coil C	TM- II		
GE1							
GE2							
GE3							

*:normalized gear

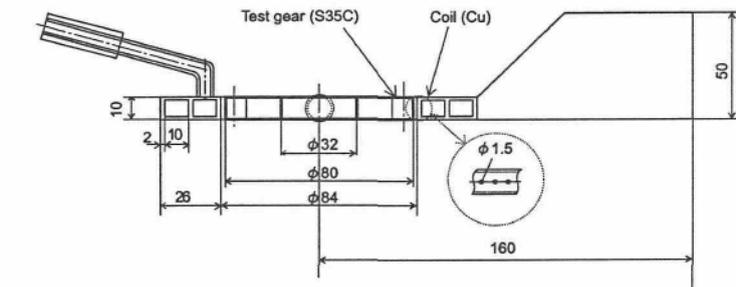
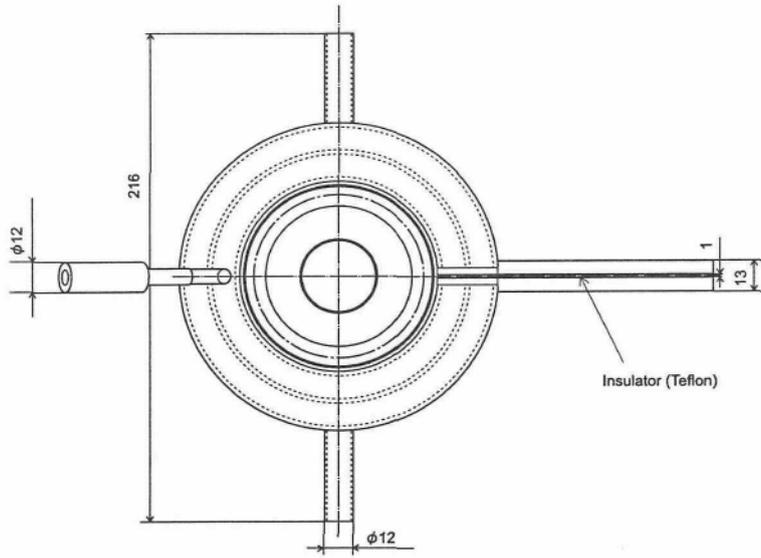


Fig. 5.1 Dimensions of gear and heating coil (Coil B)

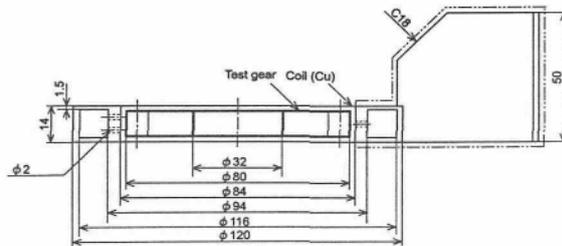
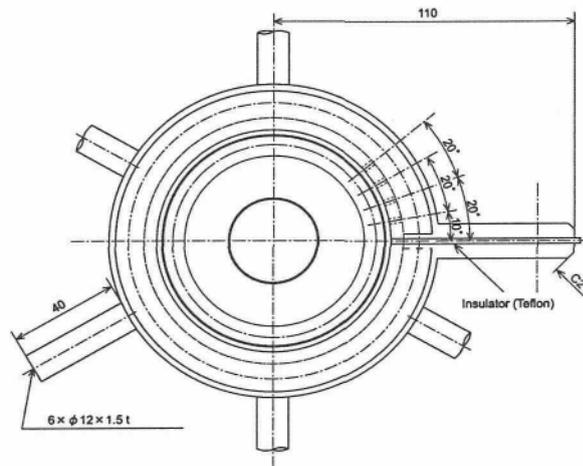


Fig. 5.2 Dimensions of gear and heating coil (Coil C)

5.2.2 高周波焼入れ装置

高周波誘導加熱装置は、いずれも DKK 社製の真空管発信式で、型式は前者が MLL-50-TRS (図 3.4)、後者が MLL-250-STR-II である。また、それらの最大出力はそれぞれ 50 kW および 250kW で、発振周波数は共に 30, 60, 200 kHz の 3 種類である。表 5.2 に高周波加熱装置の仕様を、図 5.3 に DKK 社での歯車の高周波焼入れの様子を示す。

Table 5.2 Specifications of induction hardening equipments

Model No.	MLL-50-TRS	MLL-250-STR-II
Max. output power	50kW	250kW
Exciting frequency	30 kHz 60 kHz 200 kHz	30 kHz 60 kHz 200 kHz
Capacity of main transformer	90kVA	340kVA
Capacity of source	200V, 100kVA	200V, 400kVA
Heating Coil	Coil B	Coil C

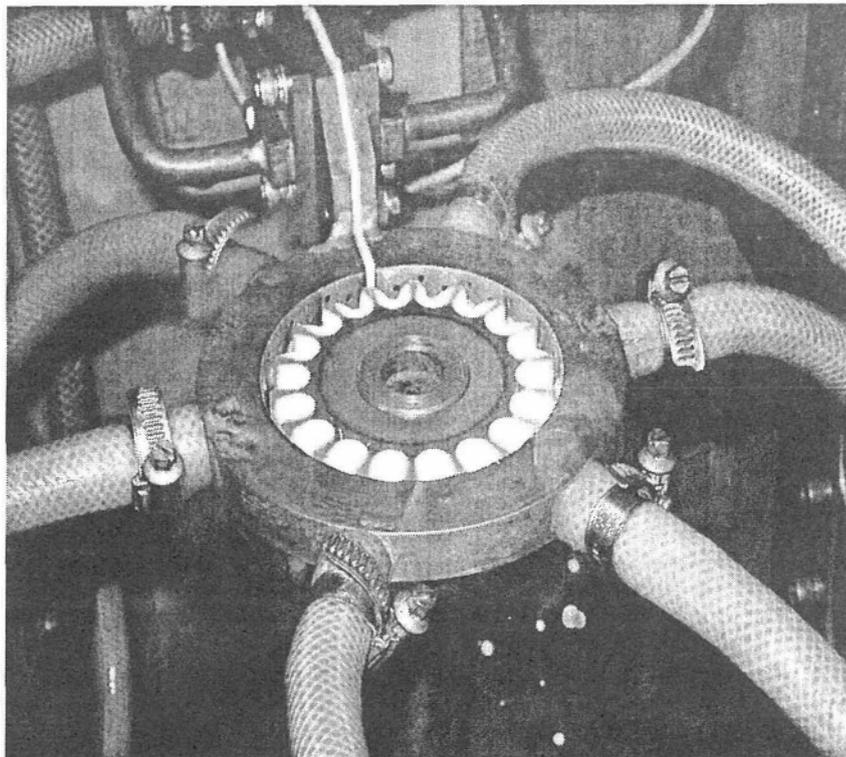


Fig. 5.3 Photograph of test gear induction heated (Coil C)

5.2.3 硬さ測定と金属組織観察

硬化層のマクロ腐食写真撮影は、焼入れ時における歯車の上側側面 (Gear-side U)、歯幅中央断面 (Middle section M-M)、下側側面 (Gear-side L) の表面をバフ研磨した後、それらを 5% 希硝酸で腐食させて行った。

硬さ分布の測定は、焼入れ時における歯車の Gear-side U、Middle section M-M および Gear-side L の表面をバフ研磨した後、歯元すみ肉部接線角度 $\theta=30^\circ$ の Hofer の危険断面位置における歯面垂直方向に対して行った。

組織観察は、焼入れ時における Gear-side U、Middle section M-M および Gear-side L の表面をバフ研磨した後、それらを 5% 希硝酸で腐食させて、Hofer の危険断面位置付近および図 2.22 中の H の位置 (core) に対して金属顕微鏡 (OLYMPUS PMG3) を用いて行った。

5.2.4 曲げ疲労試験

本実験に用いた曲げ疲労試験機は、4.3.4 の場合と同じ、図 4.6 に示した曲げ疲労試験機 (パルセータ試験機) TM-I および TM-II である。図 4.7 に示した歯車の歯の諸寸法を測定し、この数値により歯元応力影響係数 A を求めた。表 5.3 に試験歯車の歯の諸寸法の計測結果および歯元影響係数 A の計算結果を示す。

Table 5.3 Dimensions of test gear tooth and root stress factor

Testing machine	l mm	s mm	y mm	ρ mm	θ °	A
TM-I	7.48	7.64	1.84	2.10	62.61	0.867
TM-II	7.95	7.64	1.59	2.10	61.05	0.910

5.3 実験結果および考察

5.3.1 マクロ腐食写真

(a) 加熱時間の影響

図 5.4 は、表 5.1 に示す試験歯車 GB1~GB4 の歯のマクロ腐食写真を示す。図 5.4 より、硬化層は、加熱時間が短い場合には、歯幅中央のピッチ点付近から歯先付近までしか生じないが、加熱時間の増加とともに両歯幅端および歯底に広がって行く

ことがわかる。しかし、この硬化層はいずれの加熱時間においても図 4.33(b)に示す計算結果と比較すると、体積が少なく一致していないことがわかる。これは炭素鋼のオーステナイト化温度と加熱速度の関係^(5.1)により、加熱速度が大きいほど、オーステナイト化に必要な時間を与えないうちに温度は上昇し続けるので、変態完了温度は高温側に移動するため、温度上昇だけでは硬化層が得られていないことによる。

(b) コイル形状の影響

図 5.5 は、GC1～GC3 の歯のマクロ腐食写真を示す。図 5.4、図 5.5 より、 $t_h=2.8$ s では、GB1 の方が GC1 に比べて硬化層がかなり少なく、GB2 と GC1 で硬化層がほぼ同程度に生じることがわかる。これは、GB1～GB4 で用いられた焼入れ装置（MLL-50-STRS）と GC1～GC3 で用いられた焼入れ装置（MLL-250-STR-II）が異なるため加熱電力にも相違が生じたことによると考えられる。また、図 5.4 の GB2、GB3 では、Section A-A において硬化層が Gear-side U と L 側で大きな相違が生じているが、図 5.5 の GC2、GC3 では、両歯幅端で硬化層がほぼ同じになっていることがわかる。これは、Coil C の方が Coil B よりコイル幅が広いことによると考えられる。

(c) 加熱電力の影響

図 5.6 は、GD1～GD5 の歯のマクロ腐食写真を示す。図 5.5、図 5.6 より、GC1 より GD2 の方が歯形に沿った硬化層が得られること、また、GD2、GD3、GD4 では両歯幅端における硬化層にかなり相違が認められるが、GC2、GC3 では歯幅にわたってほぼ一様に硬化層が生じることがわかる。これは、加熱電力の増加とともに時間が短くなるため、歯の表面付近から内部への熱伝導による移動熱量が減少することによると考えられる。

(d) 周波数の影響

図 5.7 は、GE1～GE4 の歯のマクロ腐食写真を示す。図 5.6、図 5.7 より、硬化層は GD1、GD2 と GE1、GE2 の Section A-A の比較したとき、GD1、GD2 の場合では歯幅中央が深く、両歯幅端で浅くなるのに対し、GE1、GE2 の場合では逆に歯幅中央が浅く、両歯幅端で深くなる。これは、周波数の高い方が低い方に比べて、表皮効果が大きくなることによると考えられる。

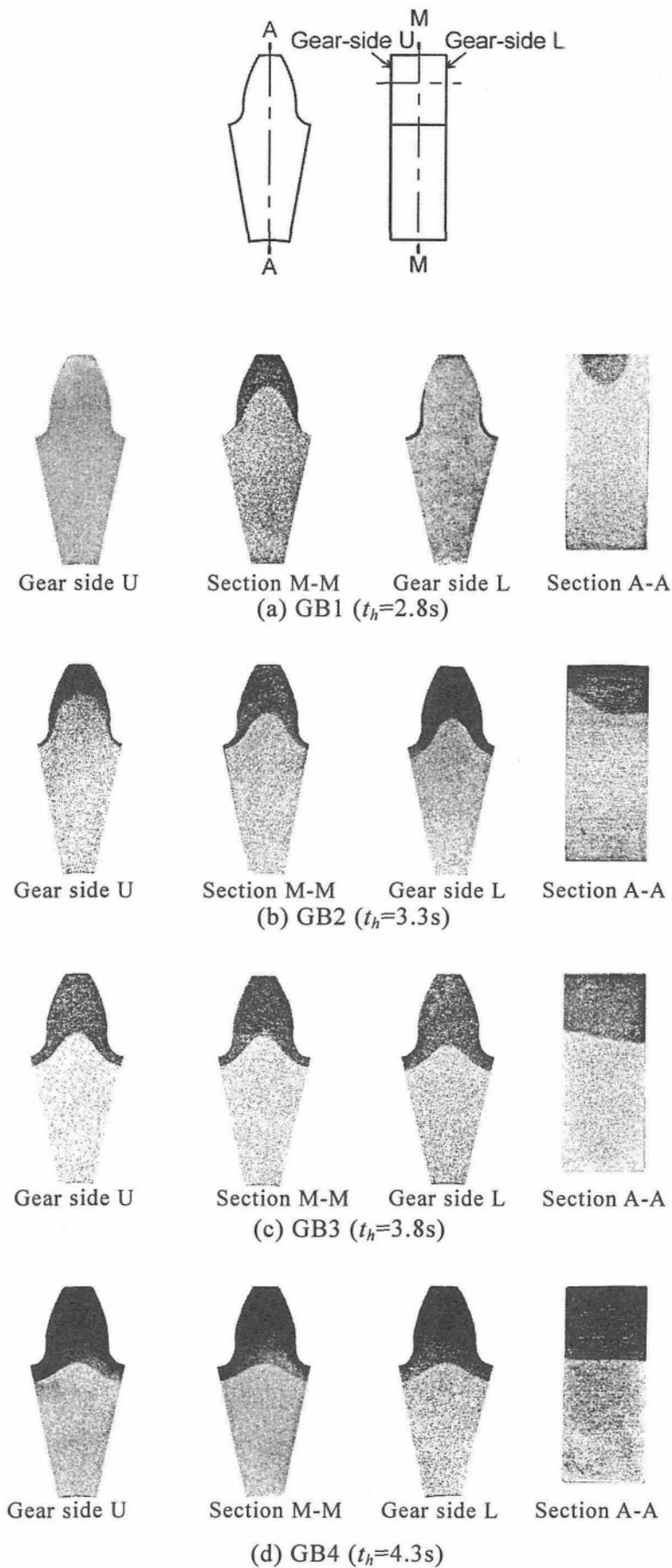


Fig. 5.4 Photographs of macro-structure of test gears ($P=50kW, f=30kHz, \text{Coil B}$)

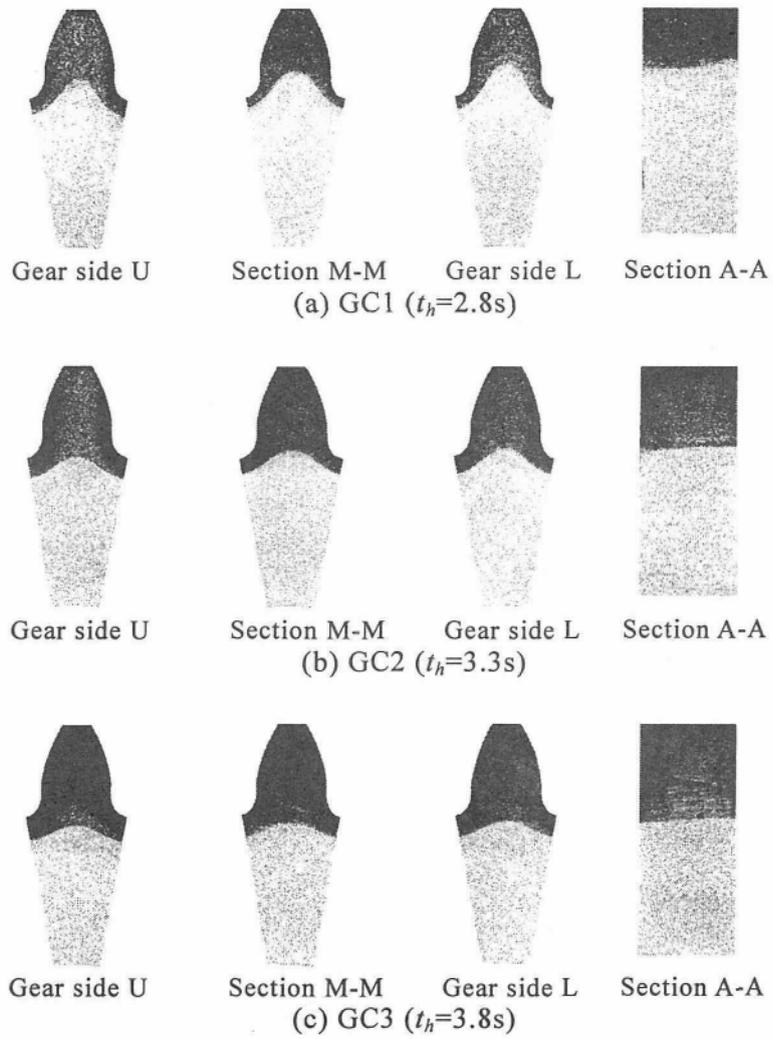


Fig. 5.5 Photographs of macro-structure of test gears ($P=50kW$, $f=30kHz$, Coil C)

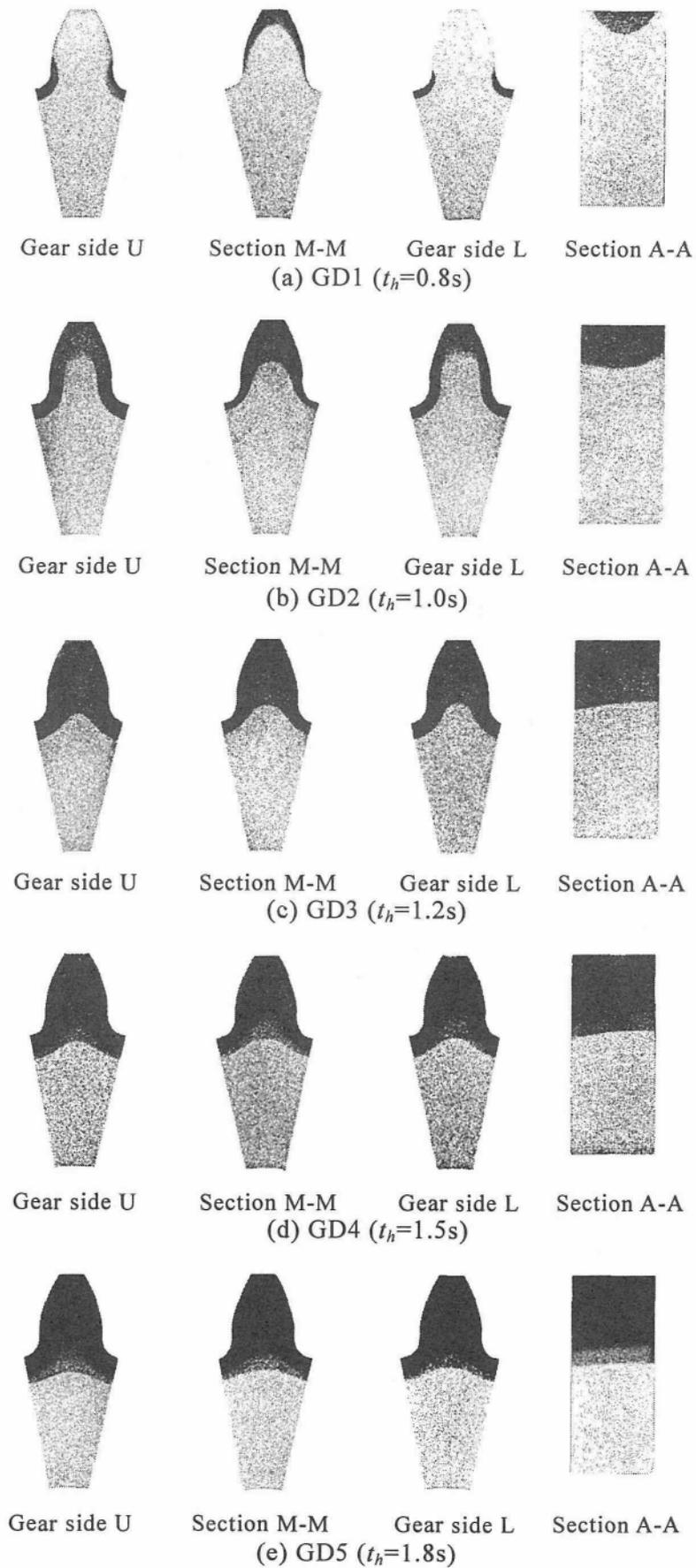


Fig. 5.6 Photographs of macro-structure of test gears ($P=100kW$, $f=30kHz$, Coil C)

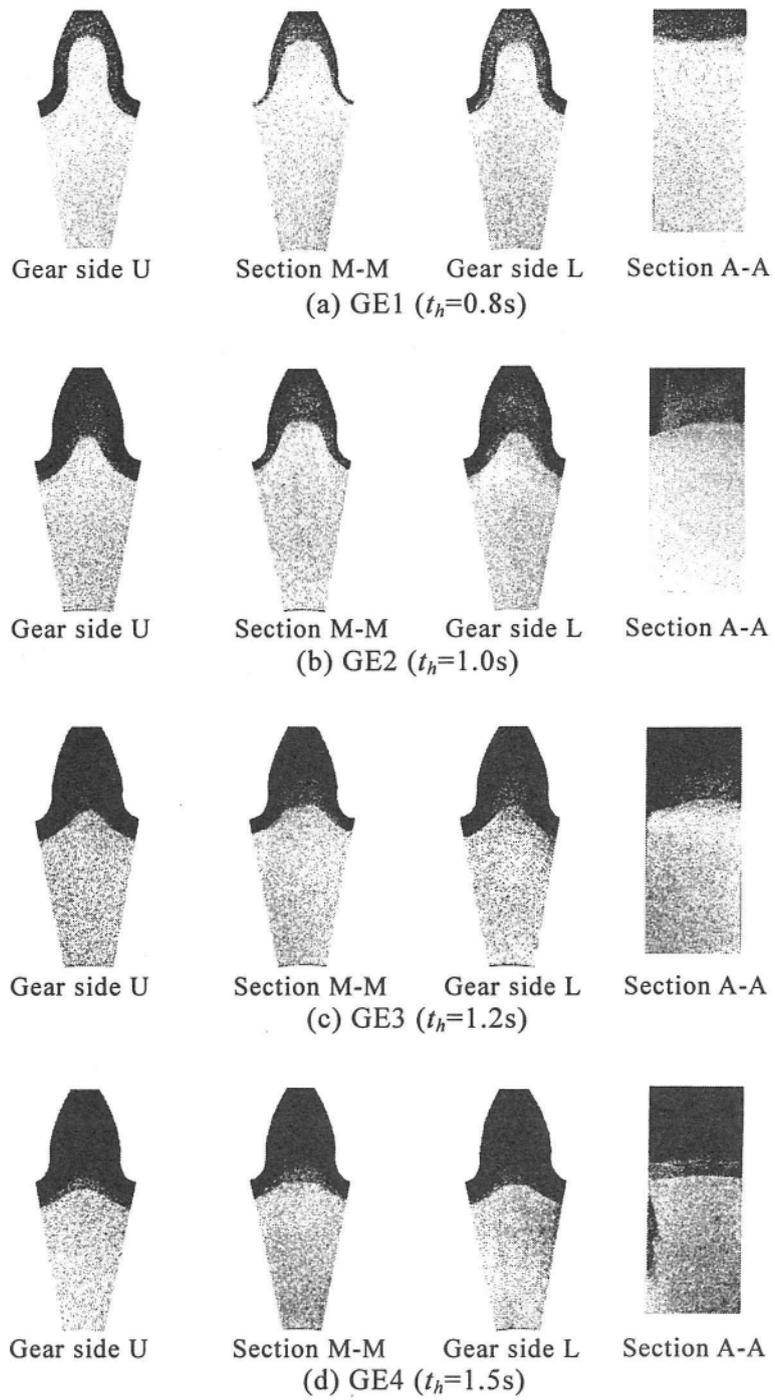


Fig. 5.7 Photographs of macro-structure of test gears ($P=100kW$, $f=60kHz$, Coil C)

5.3.2 硬さ分布

(a) 加熱時間の影響

図 5.8 は、GB1～GB4 の歯元すみ肉部 Hofer の危険断面の歯面垂直方向の硬さ分布の測定結果を示す。図 5.8 より、加熱時間の増加とともに表面硬さおよび硬化層深さが増加すること、加熱時間が短い場合には歯幅方向の硬さ分布に大きな相違が見られるが、加熱時間が長くなると歯幅にわたってほぼ一様な硬さ分布になることがわかる。また、加熱時間が長い場合、高周波焼入れによる表面硬さの最高値は、 $HV=600$ 程度に収束することがわかる。

表 5.4 は、硬さ分布測定結果より求めた有効硬化層 ($HV = 400$) 深さを示す。表 5.4 の GB1～GB4 より、有効硬化層深さにおいても、加熱時間の増加とともに硬化層が厚くなるが、GB3 と GB4 の Gear-side L においては硬化層深さが逆転していることがわかる。これは、加熱された歯車の容量に対し冷却穴が 1 個の Coil B では、冷却能力が不足し内部で不完全焼入れとなったためと思われる。

(b) コイル形状の影響

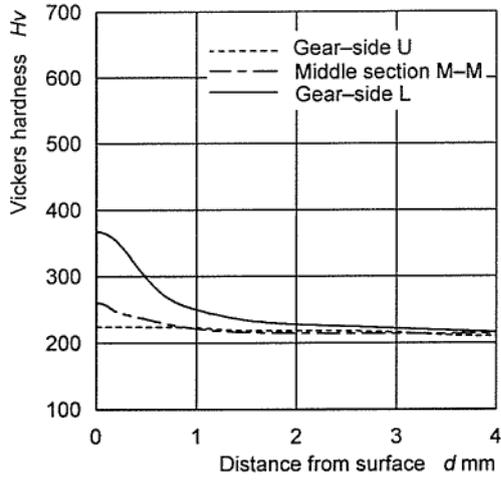
図 5.9 は、GC1～GC3 の歯元すみ肉部 Hofer の危険断面の歯面垂直方向の硬さ分布の測定結果を示す。図 5.8、図 5.9 の硬さ分布の測定結果より、GB2 と GC1、GB3 と GC2、GB4 と GC3 でそれぞれ類似した硬さ分布になることがわかる。Coil B と Coil C を比較すると、マクロ腐食写真と同様に Coil B では、 $t_h = 2.8s, 3.3s$ ときは Gear-side U と Gear-side L の硬度分布の差が大きく、一方で Coil C ではその差が比較的小さいことがわかる。

(c) 加熱電力の影響

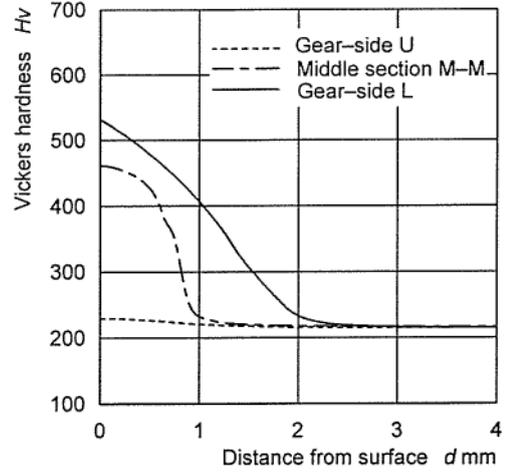
図 5.10 は、GD1～GD5 の歯元すみ肉部 Hofer の危険断面の歯面垂直方向の硬さ分布の測定結果を示す。図 5.9、図 5.10 より、加熱電力 $P=50kW$ と $P=100kW$ を比較すると、加熱電力の高い $P=100kW$ の方が、短時間で硬化層が生成されるため、 $HV=400$ 付近の硬さの変化が急勾配になっていることがわかる。

(d) 周波数の影響

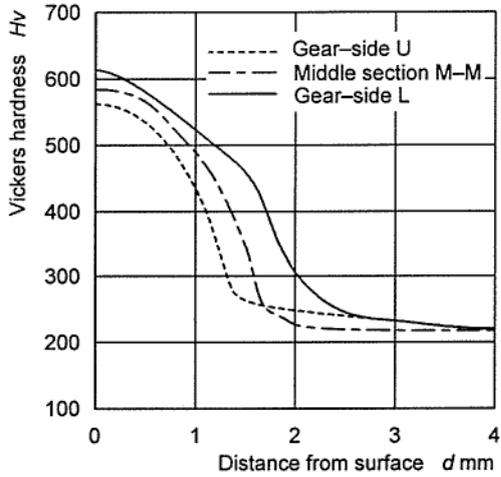
図 5.11 は、GE1～GE4 の歯元すみ肉部 Hofer の危険断面の歯面垂直方向の硬さ分布の測定結果を示す。図 5.10、図 5.11 の Hofer の危険断面位置の硬さ分布の測定結



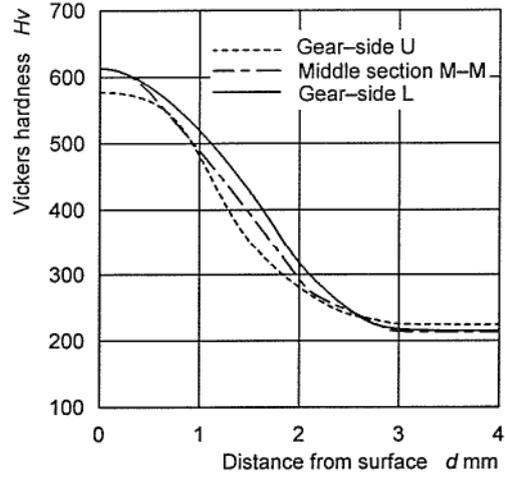
(a) GB1 ($t_h=2.8s$)



(b) GB2 ($t_h=3.3s$)



(c) GB3 ($t_h=3.8s$)



(d) GB4 ($t_h=4.3s$)

Fig. 5.8 Measured hardness distributions at Hofer's critical section of test gears ($P=50$ kW, $f=30$ kHz, Coil B)

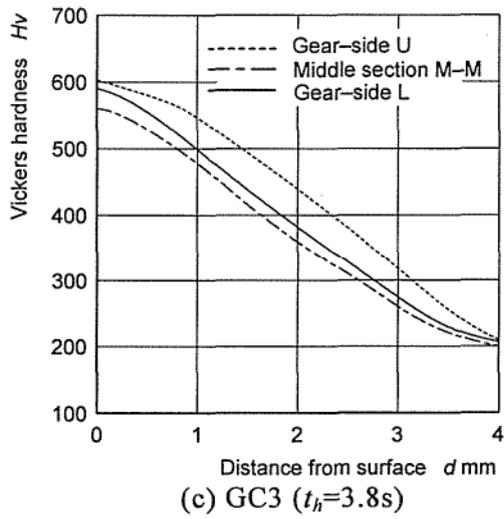
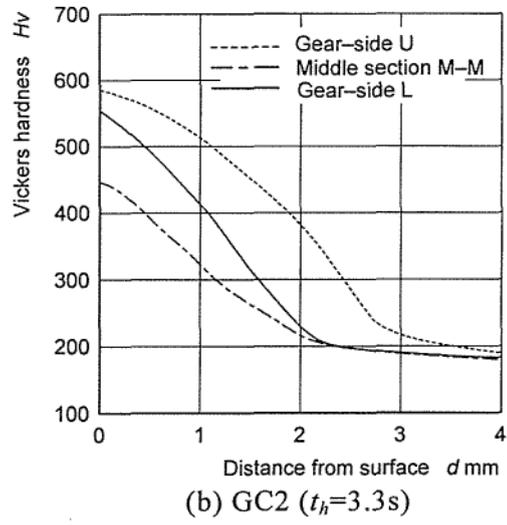
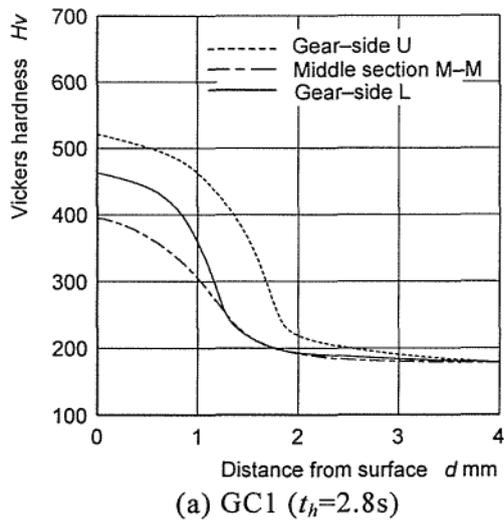


Fig. 5.9 Measured hardness distributions at Hofer's critical section of test gears ($P=50kW$, $f=30kHz$, Coil C)

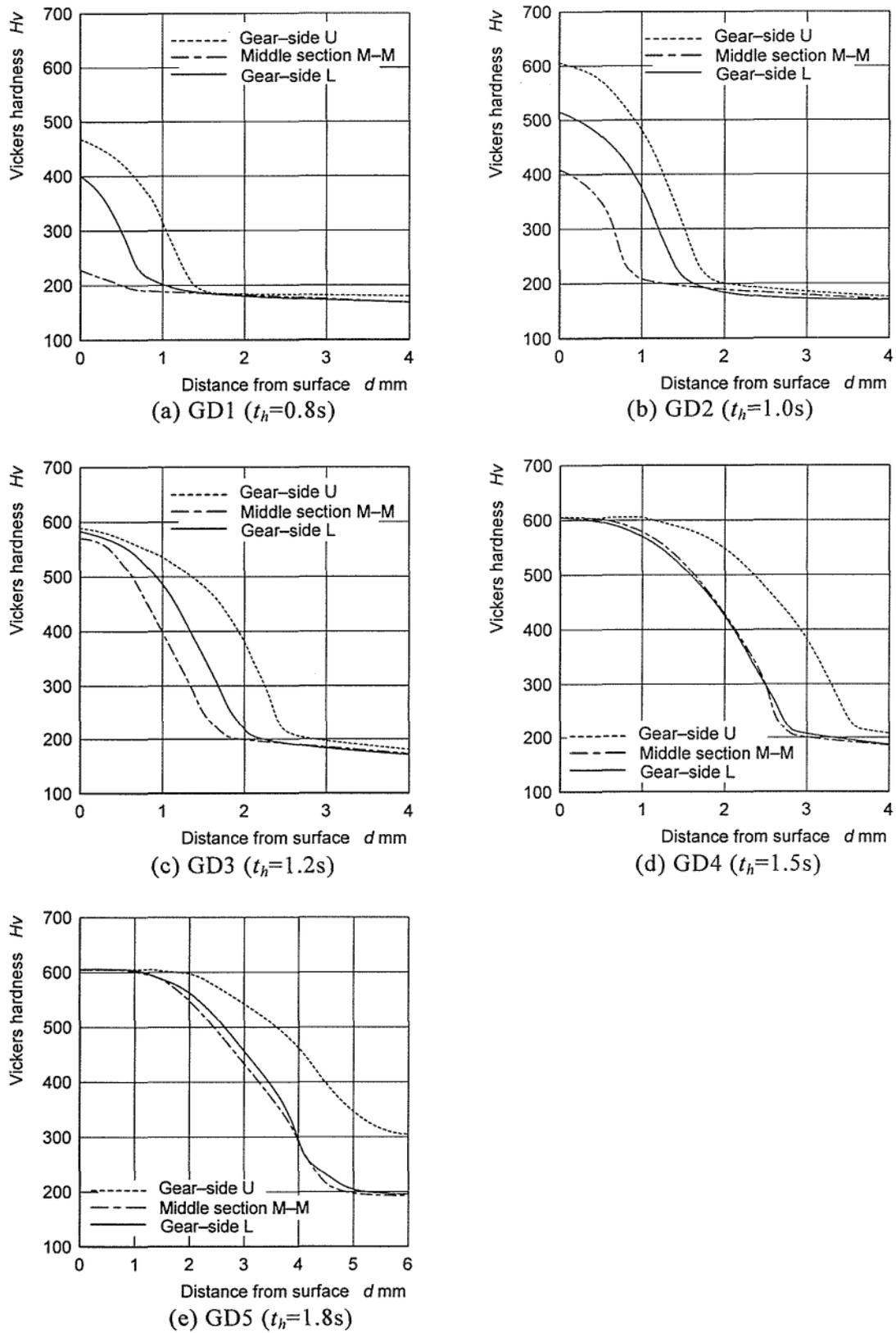


Fig. 5.10 Measured hardness distributions at Hofer's critical section of test gears ($P=100kW$, $f=30kHz$, Coil C)

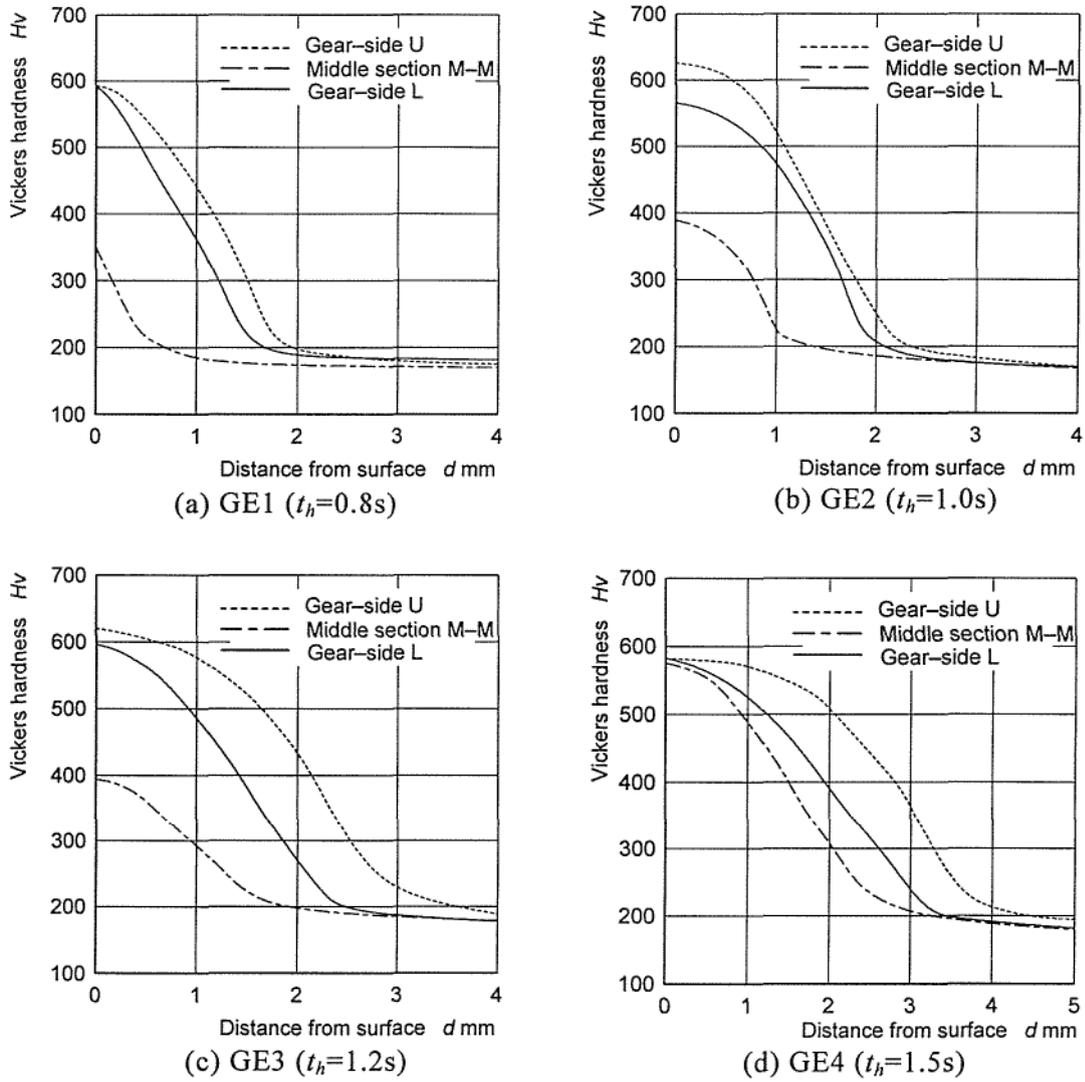


Fig. 5.11 Measured hardness distributions at Hofer's critical section of test gears ($P=100\text{kW}$, $f=60\text{kHz}$, Coil C)

果より、周波数が異なる $f=30\text{kHz}$ と $f=60\text{kHz}$ を比較すると、周波数の低い方では、Middle section M-M から硬化層が生成するのに対し、高い方では、歯車側面から硬化層を生成することがわかる。これは、周波数の増加にともない、表皮効果により歯先や歯車側面の方が、歯底付近の歯幅中央より強く加熱されるためである。表 5.4 より、GD1~4 および GE1~4 の Hofer の危険断面位置付近における有効硬化層深さを比較すると、 $t_h=0.8\text{ s}$ を除いては周波数の低い方が、歯幅全体にわたって硬化層が厚くなることがわかる。

Table 5.4 Effective case depth at Hofer's critical section of test gears

Gear sign	Heating condition	Heating time (sec)	Effective case depth D mm ($HV=400$)		
			Gear-side U	Section M-M	Gear-side L
GB1	$P = 50\text{kW}$ $f = 30\text{kHz}$ (Coil B)	2.8	0.00	0.00	0.00
GB2		3.3	0.00	0.60	1.10
GB3		3.8	1.15	1.30	1.75
GB4		4.3	1.30	1.50	1.70
GC1	$P = 50\text{kW}$ $f = 30\text{kHz}$ (Coil C)	2.8	1.35	0.00	0.85
GC2		3.3	1.90	0.45	1.10
GC3		3.8	2.35	1.65	1.85
GD1	$P = 100\text{kW}$ $f = 30\text{kHz}$ (Coil C)	0.8	0.65	0.00	0.00
GD2		1.0	1.25	0.10	0.90
GD3		1.2	1.95	1.00	1.35
GD4		1.5	2.90	2.10	2.10
GD5		1.8	4.50	3.25	3.45
GE1	$P = 100\text{kW}$ $f = 60\text{kHz}$ (Coil C)	0.8	1.20	0.00	0.85
GE2		1.0	1.45	0.00	1.30
GE3		1.2	2.15	0.00	1.40
GE4		1.5	2.80	1.50	1.95

5.3.3. 組織観察

(a) 加熱時間の影響

図 5.12 は、GB1～GB4 の歯元すみ肉部 Hofer の危険断面の組織写真を示す。図 5.12 より、歯面付近において、加熱時間が短い場合には、歯車の心部と同様なフェライトとパーライトとの混合組織であることが確認できるが、加熱時間の増加とともに、歯面付近の組織は、マルテンサイトとフェライトとの混合組織になり、更にマルテンサイトの割合を増して、最終的に全体がマルテンサイト組織となることが確認できる。

図 5.13 は、GC1～GC3 の歯元すみ肉部 Hofer の危険断面の組織写真を示す。ここで、4.4 で最適時間であると計算した加熱時間 $t_h = 3.3$ s の図 5.12(b)GB2、図 5.13(b)GC2 はいずれもフェライトとマルテンサイトの混合組織であり、焼入れ組織としては適切な加熱時間ではなかったと思われる。これは、文献(5.1)の関係が高周波焼入れシミュレータのプログラムに考慮されていないことが原因であると判明した。

(b) コイル形状の影響

図 5.12、図 5.13 より、Coil B と Coil C を比較すると、各加熱時間において、Coil C の方がマルテンサイトの割合が多いことがわかる。これは、Coil C は幅が 14mm と広いためとくに歯幅端における温度を高くすることができたことによる。なお、Coil C による加熱時間は、シミュレーションで得られた 10mm 幅の加熱時間では、不十分であると考えられる。

(c) 加熱電力の影響

図 5.14 は、GD1～GD5 の歯元すみ肉部 Hofer の危険断面の組織写真を示す。図 5.13、図 5.14 の組織写真より、加熱電力 $P=50$ kW と $P=100$ kW を比較すると、各加熱時間において、加熱電力の高い $P=100$ kW の方が、短時間加熱で Hofer の危険断面位置付近におけるマルテンサイトが生成されていることがわかる。

(d) 周波数の影響

図 5.15 は、GE1～GE4 の歯元すみ肉部 Hofer の危険断面の組織写真を示す。図 5.14、図 5.15 より、周波数が異なる $f=30$ kHz と $f=60$ kHz を比較すると、図 5.14(a)と図 5.15(a) の $t_h=0.8$ s においては、周波数の高い方が、Hofer の危険断面位置付近における、歯

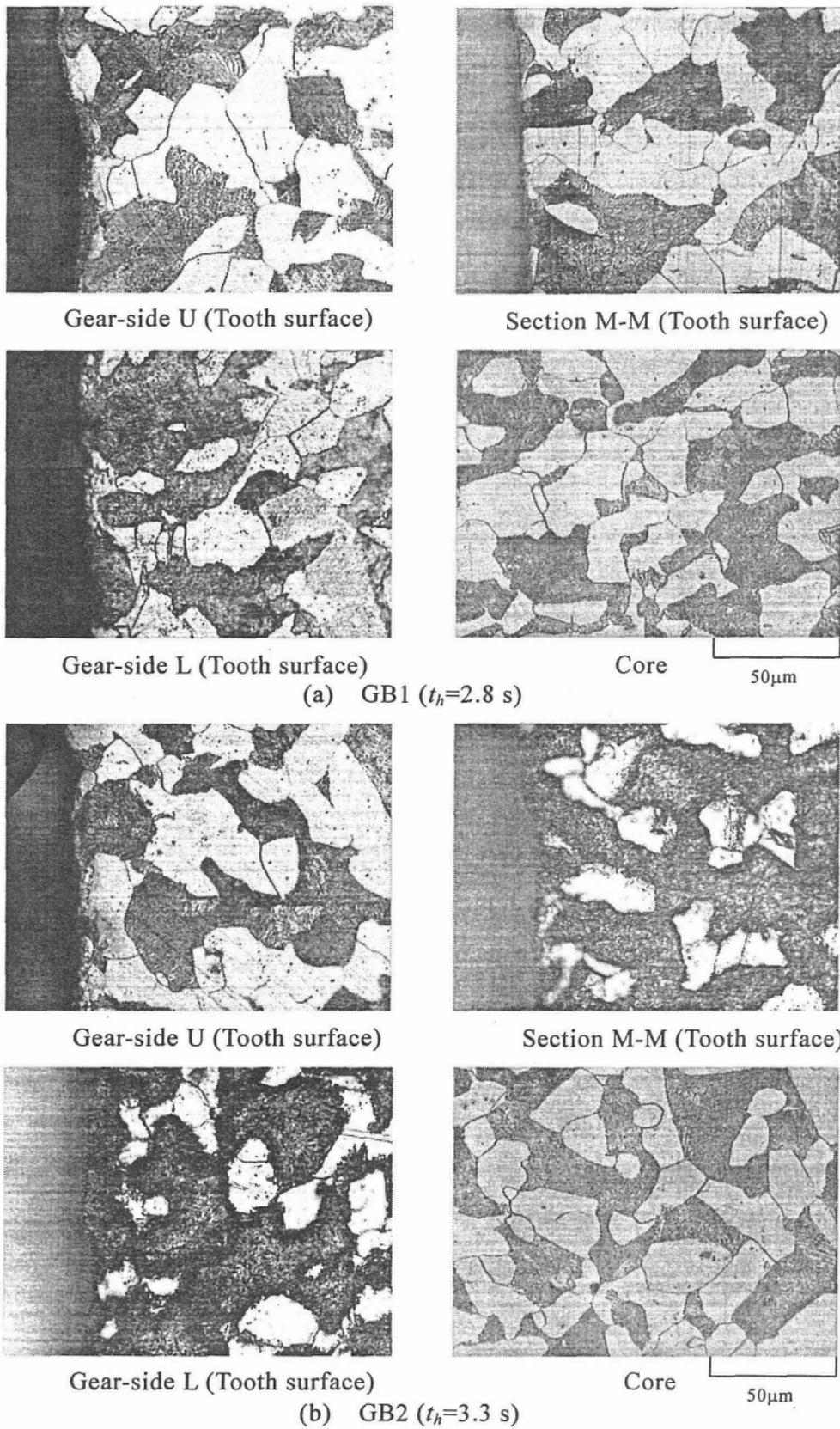


Fig. 5.12 Photographs of micro-structure at Hofer's critical section of test gears ($P=50$ kW, $f=30$ kHz, Coil B)

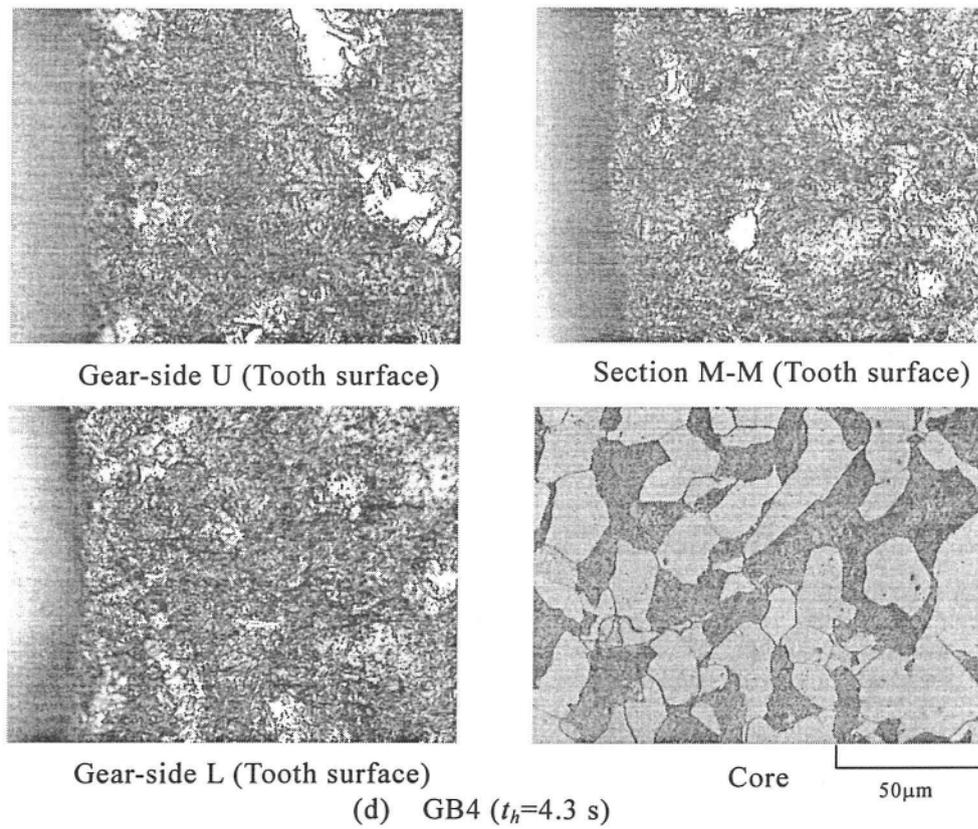
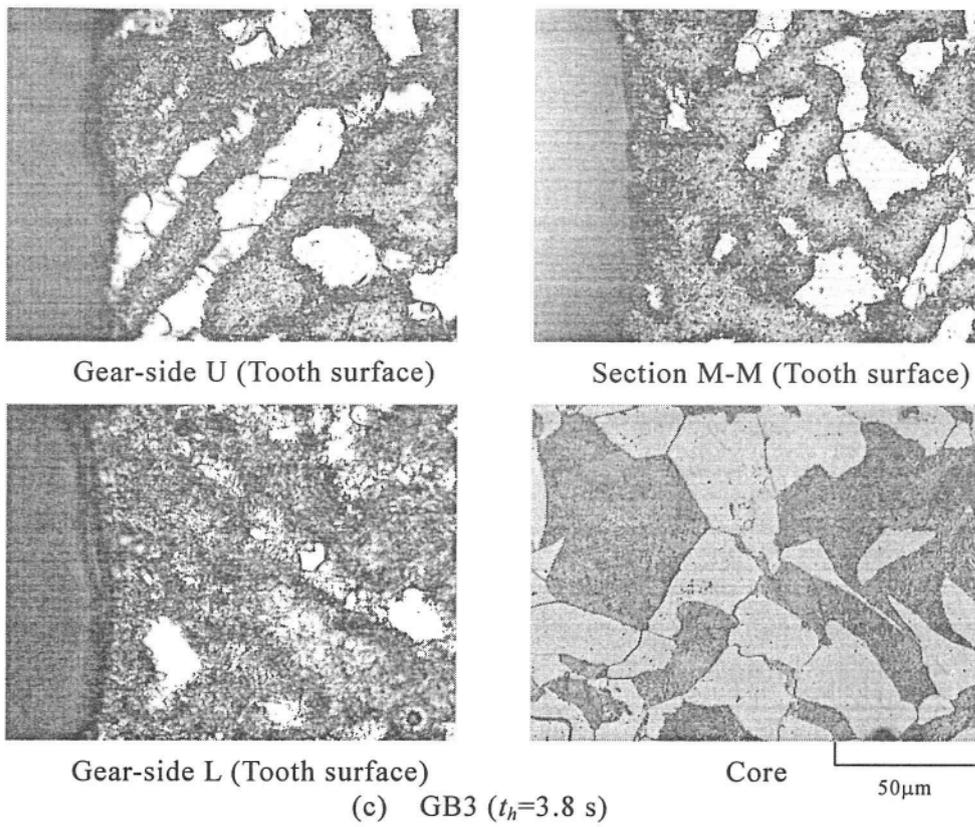


Fig. 5.12 Photographs of micro-structure at Hofer's critical section of test gears ($P=50$ kW, $f=30$ kHz, Coil B)

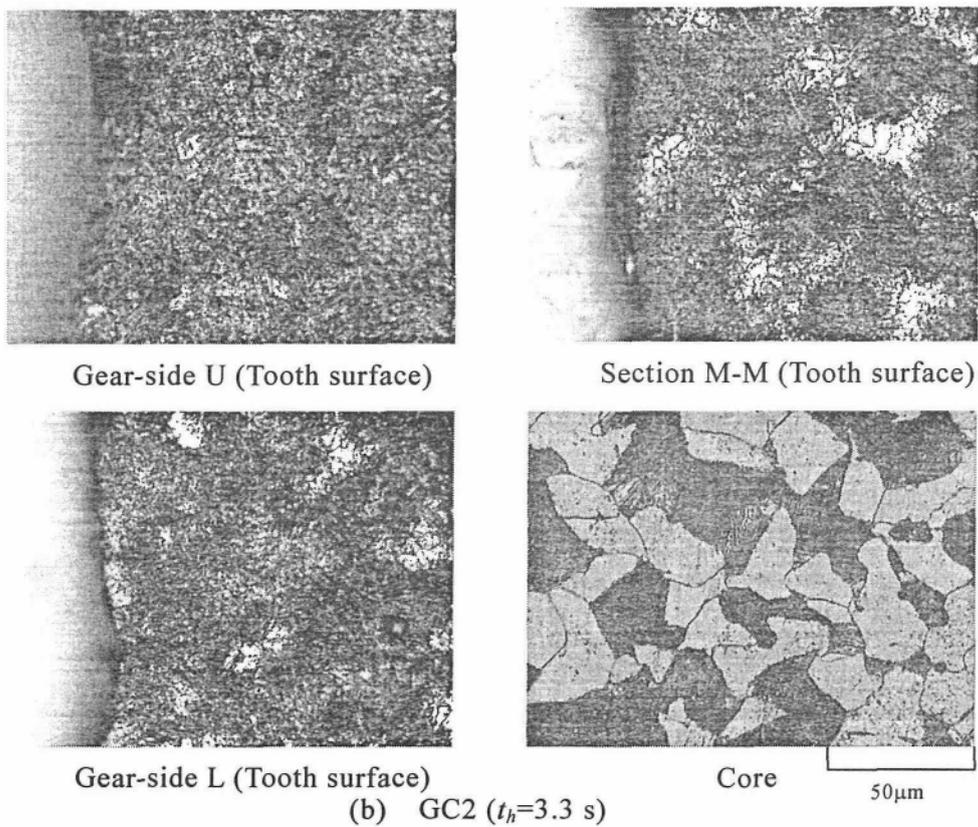
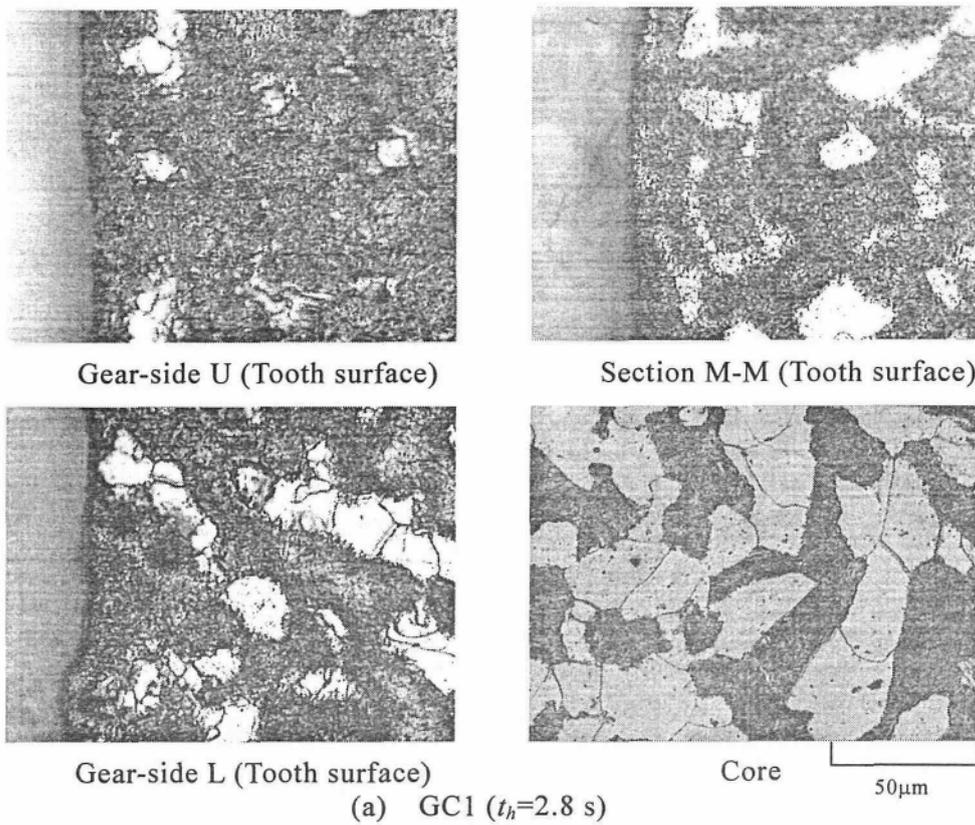


Fig. 5.13 Photographs of micro-structure at Hofer's critical section of test gears ($P=50$ kW, $f=30$ kHz, Coil C)

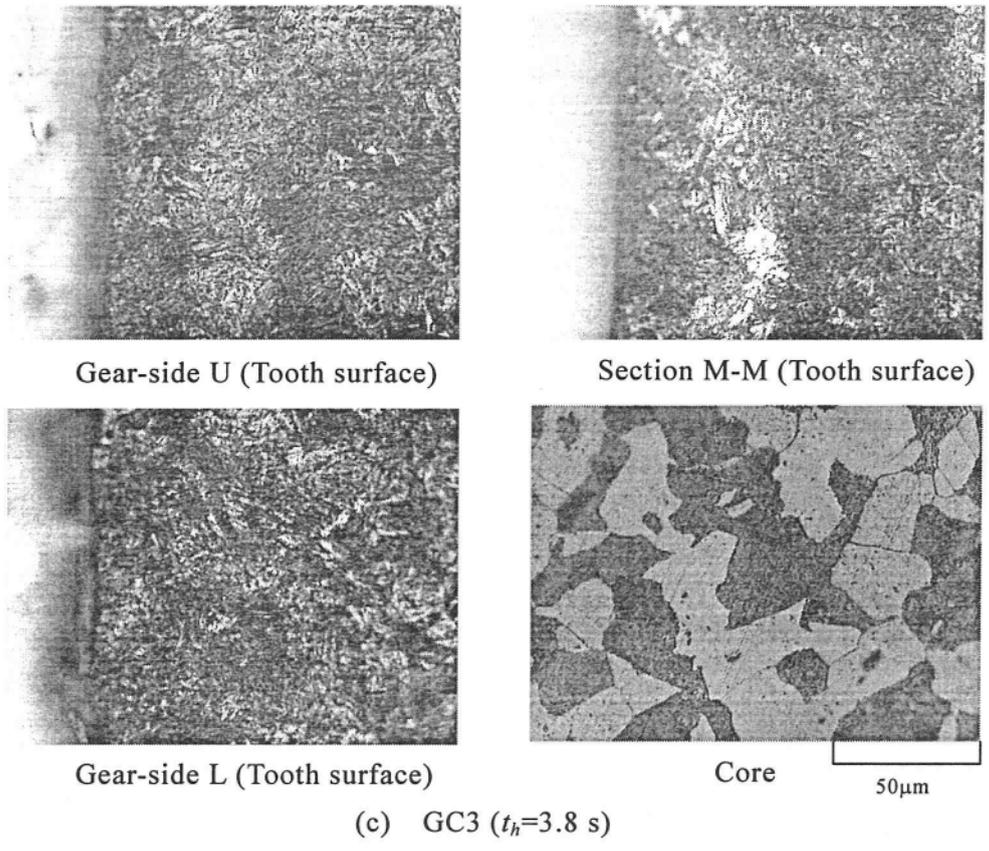


Fig. 5.13 Photographs of micro-structure at Hofer's critical section of test gears ($P=50$ kW, $f=30$ kHz, Coil C)

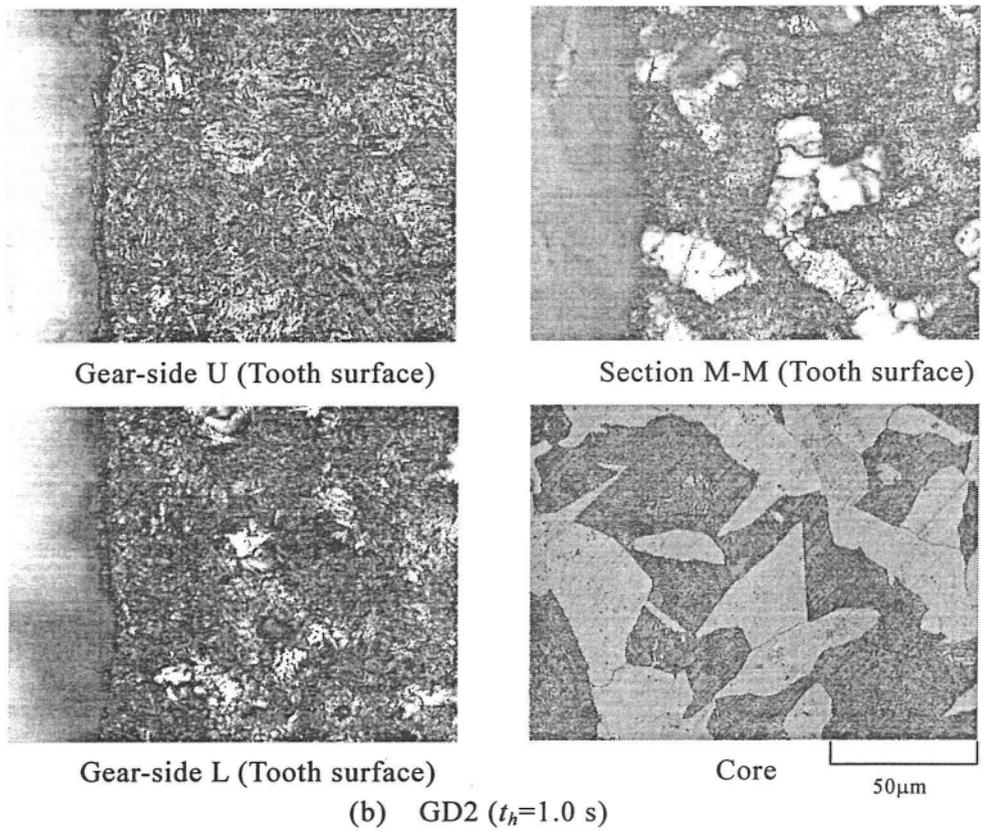
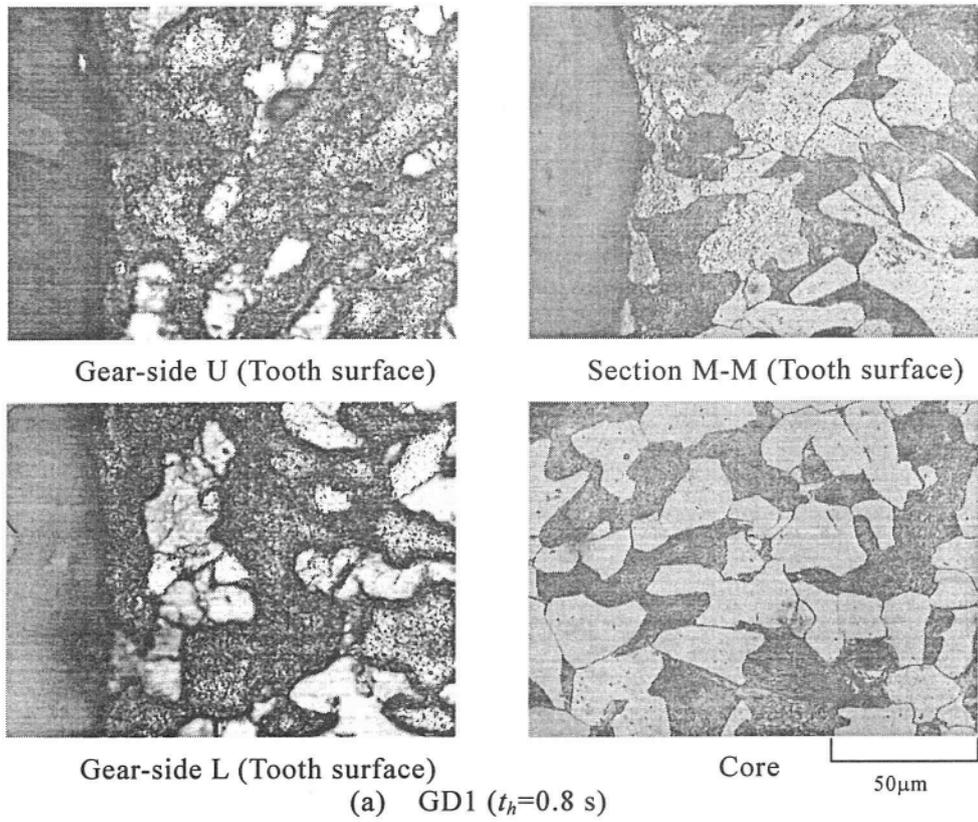


Fig. 5.14 Photographs of micro-structure at Hofer's critical section of test gears ($P=100$ kW, $f=30$ kHz, Coil C)

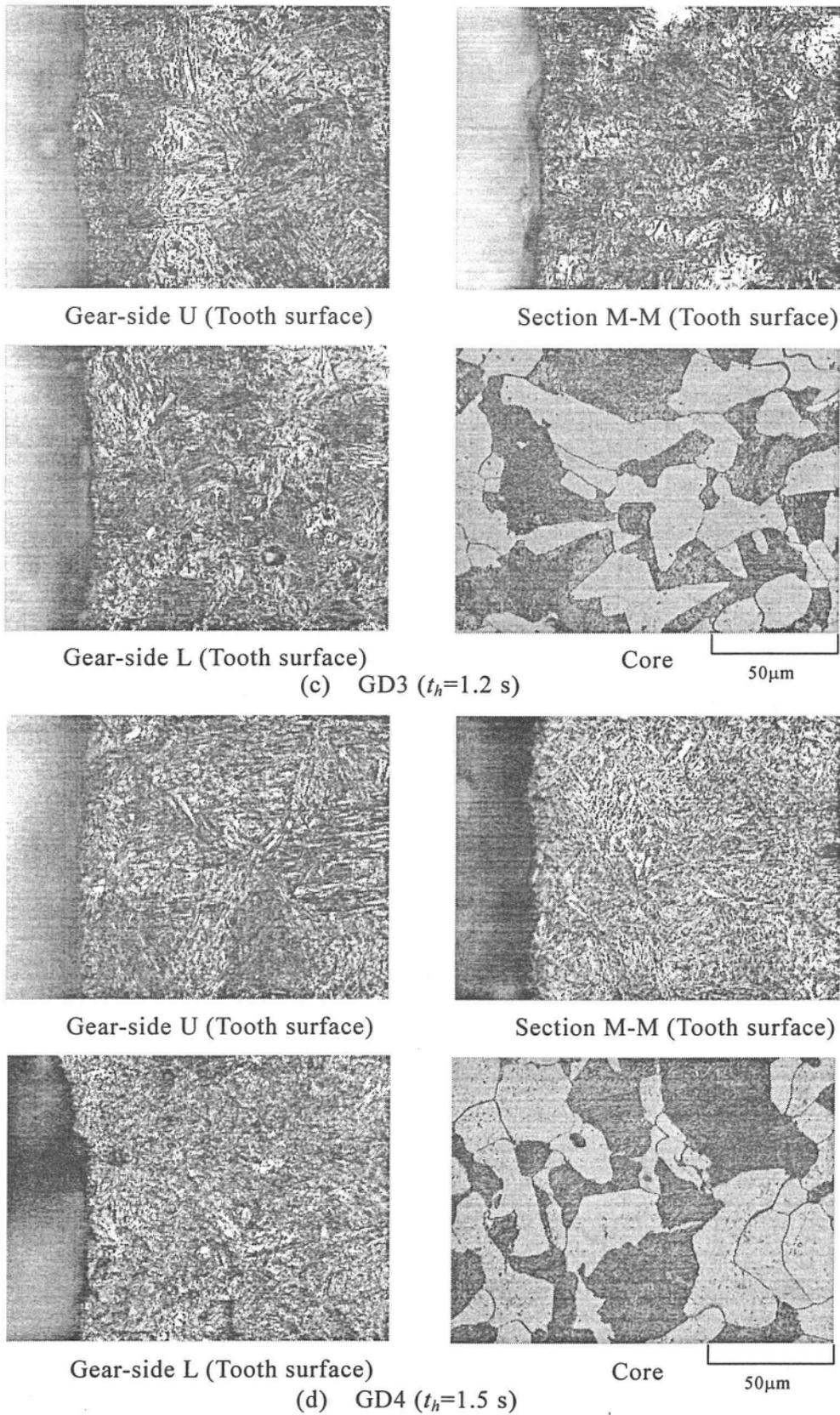


Fig. 5.14 Photographs of micro-structure at Hofer's critical section of test gears ($P=100$ kW, $f=30$ kHz, Coil C)

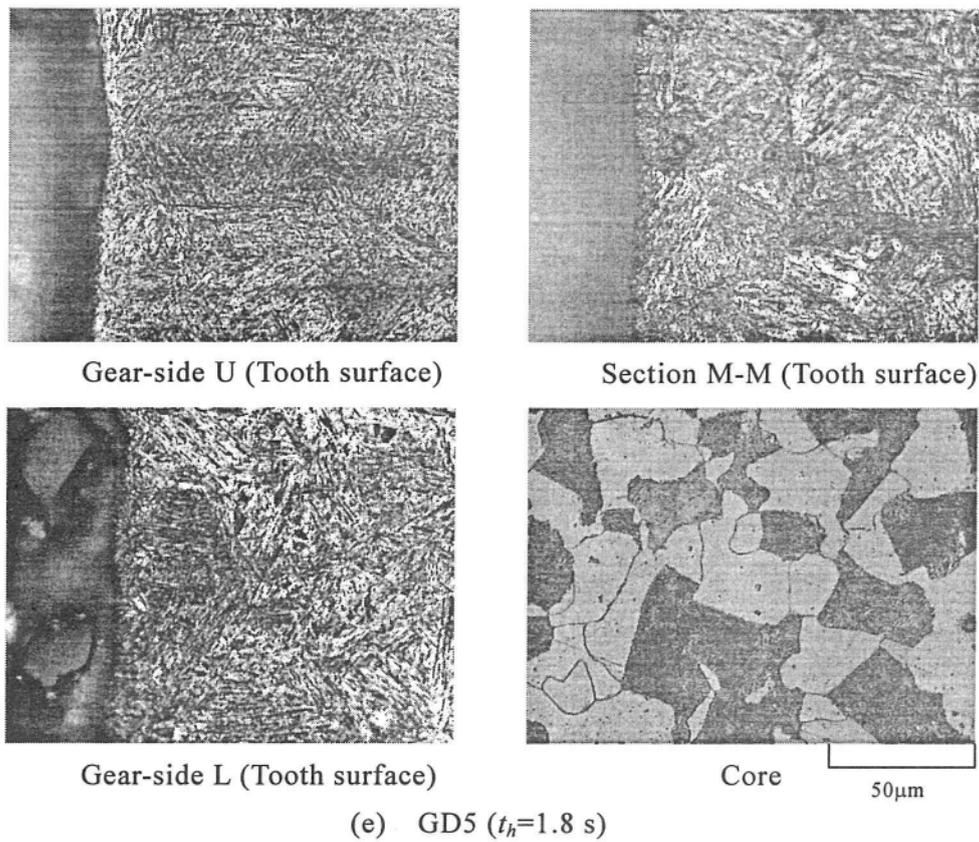


Fig. 5.14 Photographs of micro-structure at Hofer's critical section of test gears ($P=100$ kW, $f=30$ kHz, Coil C)

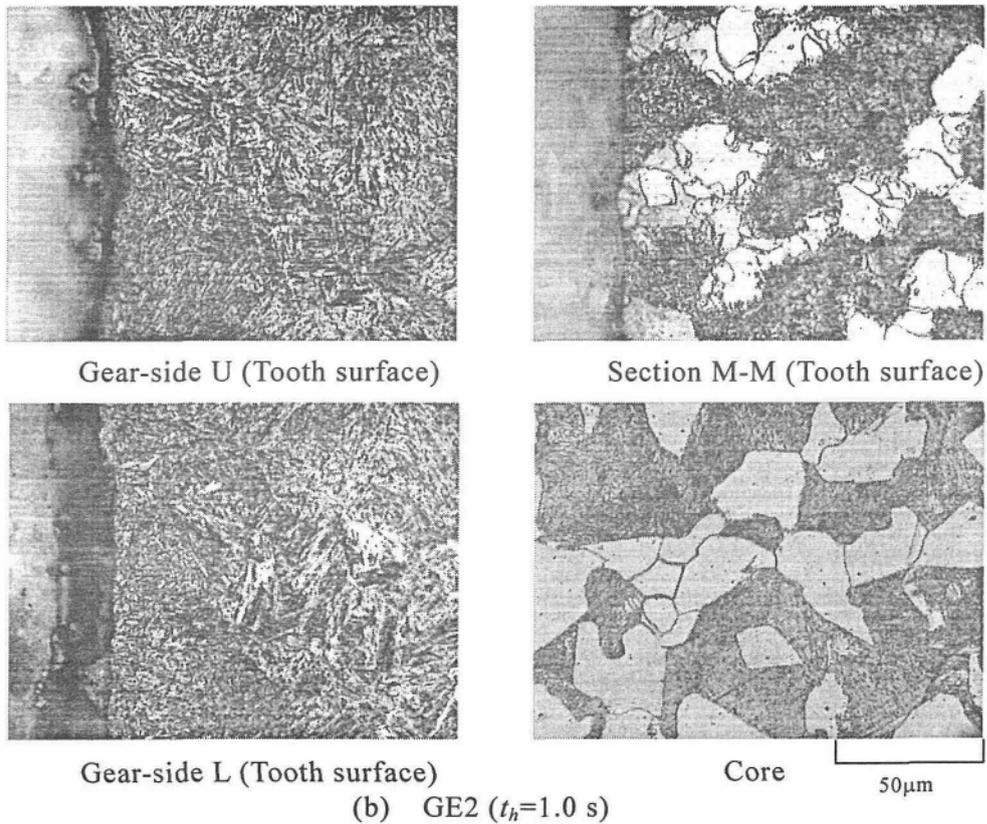
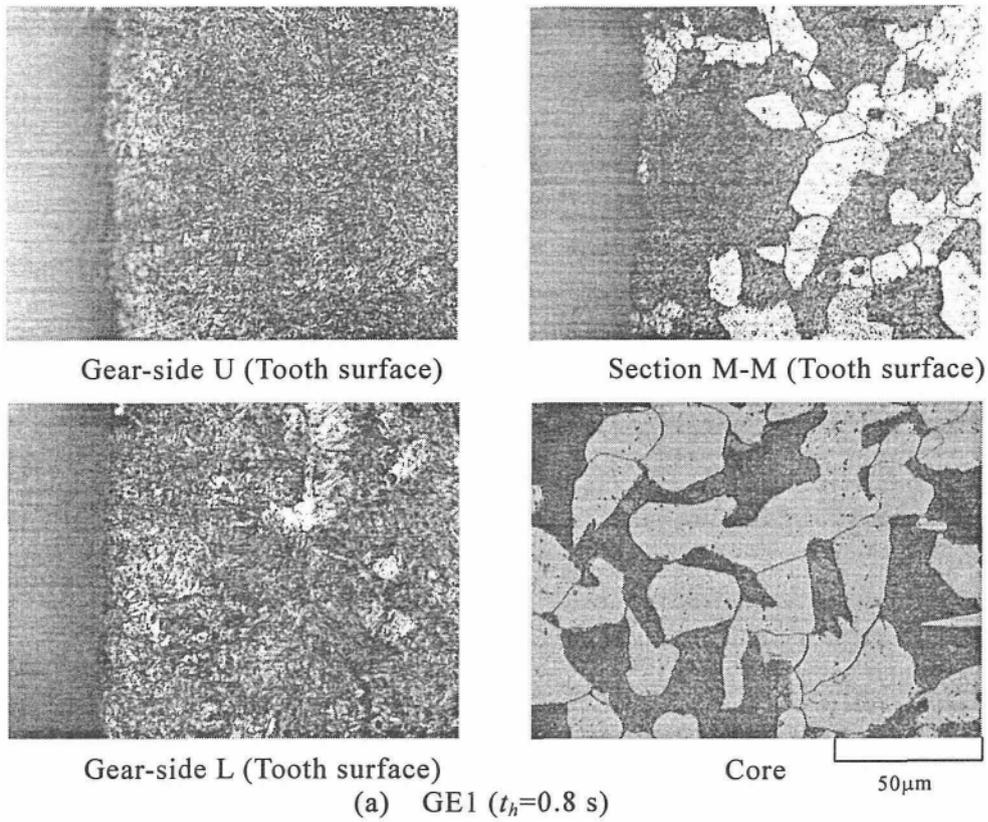


Fig. 5.15 Photographs of micro-structure at Hofer's critical section of test gears ($P=100$ kW, $f=60$ kHz, Coil C)

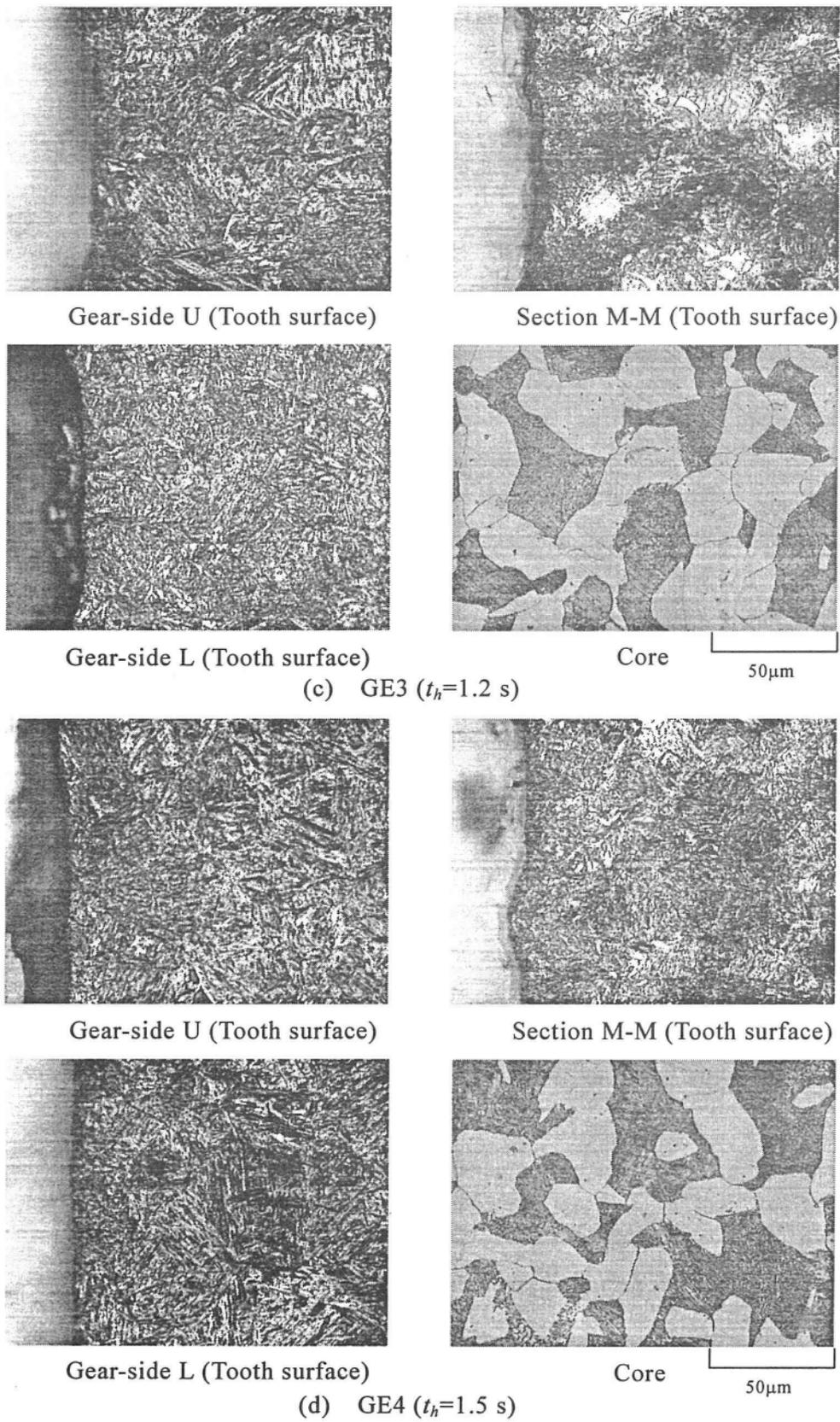


Fig. 5.15 Photographs of micro-structure at Hofer's critical section of test gears ($P=100$ kW, $f=60$ kHz, Coil C)

幅端付近にマルテンサイトが多く生成されているのに対し、 $t_h=1.0$ s以上になると、周波数の低い方が、Middle section M-M の位置におけるマルテンサイトの割合が多くなることがわかる。

5.3.4 曲げ疲労強度

(a) 加熱時間の影響

図 5.16 は、GB1~GB4 の曲げ疲労試験結果を示す。図 5.16 より、加熱時間を変化させたとき GB2, GB3 の時間寿命域における強度は GB4 より大きい、 P_{nu} は GB2~GB4 と同じ値にあった。さらに細かく調べると、GB2 か GB3 において P_{nu} が最大値になる適切な加熱時間が存在すると考えられる。

図 5.20 は、図 5.16 の結果より求めた曲げ疲労限度荷重 P_{nu} を示す。図 5.20 より、 P_{nu} の最大値は GN1 の P_{nu} の約 1.8 倍になるが、上述のように P_{nu} の最大になる加熱時間が存在すると思われる。

(b) コイル形状の影響

図 5.17 は、GC1~GC3 の曲げ疲労試験結果を示す。図 5.16, 図 5.17 より、加熱条件 $P=50$ kW, $f=30$ kHz が同じ Coil B と Coil C を比較すると、Coil B では時間寿命域における強度の差が小さいのに対し、Coil C ではその差が大きいことがわかる。

図 5.21 の GC1~GC3 は、図 5.17 の結果より求めた曲げ疲労限度荷重 P_{nu} を示す。ここで、GN1 と GN2 に差異が生じているのは、表 5.3 で示したように試験歯車の加工ロットが異なること、および歯車支持台の相違による荷重作用点の位置の差によるものであり、本来曲げ疲労限度応力は同じになると考えられる。図 5.20 と図 5.21 の GC1~GC3 より、GC2 において疲労限度荷重 P_{nu} が最大値となることがわかる。表 5.4 より、このときの有効硬化層深さは 1.90mm (Gear-side U), 0.45mm (Middle-section M-M), 1.10mm (Gear-side L) であり、歯形に沿った硬化層が得られている。

(c) 加熱電力の影響

図 5.18 は、GD1~GD5 の曲げ疲労試験結果を示す。図 5.17, 図 5.18 より、同じ $P=50$ kW と $P=100$ kW の場合を比較すると、加熱電力が高いほうが、時間寿命域における加熱時間による強度の差が更に大きくなることがわかる。

図 5.21 の GD1~GD5 は、図 5.18 の結果より求めた曲げ疲労限度荷重 P_{nu} を示す。

図 5.21 の GC1~GC3 と GD1~GD5 より, $P=100\text{kW}$ の P_{nu} の最大値 8.9kN は GN1 の約 1.8 倍に達し, $P=50\text{kW}$ の P_{nu} の最大値より大きいことがわかる. しかし, $P=100\text{kW}$ の P_{nu} では, 加熱時間が長くなると急激に低下し, $t_h=1.8\text{ s}$ (GD5) では焼きならし歯車 (GN2) より小さくなる. このことより, 加熱電力が大きくなれば, P_{nu} を最大にする加熱時間の変動幅は狭くなることがわかる.

(d) 周波数の影響

図 5.19 は, GE1~GE4 の曲げ疲労試験結果を示す. 図 5.18, 図 5.19 より, $f=30\text{kHz}$ と $f=60\text{kHz}$ の場合を比較すると, $f=30\text{kHz}$ の時間寿命域における強度の変化は, $f=60\text{kHz}$ の場合とほぼ同じであることがわかる.

図 5.21 の GE1~GE4 は, 図 5.19 の結果より求めた曲げ疲労限度荷重 P_{nu} を示す. 図 5.21 の GD1~GD5 と GE1~GE4 より, $f=30\text{kHz}$ の P_{nu} の最大値は $f=60\text{kHz}$ より大きいことがわかる. $f=30\text{kHz}$ の P_{nu} の最大値は, 加熱時間により大きく変化するのに対し, $f=60\text{kHz}$ では変化が小さい. これは, 周波数が高いと表皮効果により誘導電流は歯車の表面付近に集中する傾向があり, 加熱時間が長くなっても硬化層が相対的に厚くならないことによる.

図 5.20, 図 5.21 および表 5.4 より, $P_{nu} \geq 8\text{kN}$ である高周波焼入れ歯車の Hofer の危険断面位置の有効硬化層深さは, Gear-side U, L が $0.85 \sim 1.90\text{mm}$ で, Middle-section M-M は $0.00 \sim 0.45\text{mm}$ であることがわかる. また, 最大 P_{nu} より長時間加熱で $P_{nu} \leq 6\text{kN}$ である高周波焼入れ歯車の Hofer の危険断面位置の有効硬化層深さは, Gear-side U, L が $1.95 \sim 4.50\text{mm}$ で, Middle-section M-M は $1.50 \sim 3.25\text{mm}$ であり, 有効硬化層深さが深くなれば P_{nu} は低くなることがわかる.

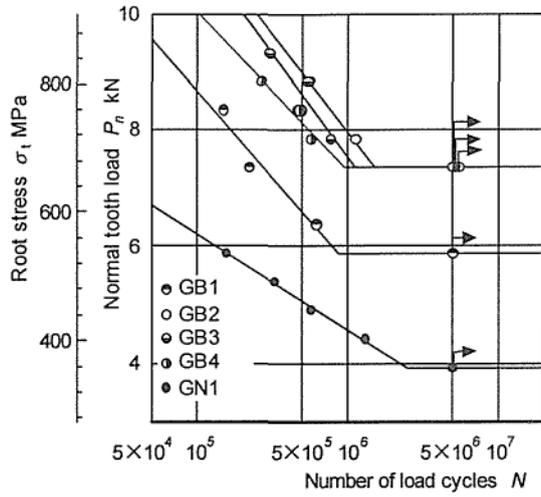


Fig. 5.16 *S-N* curves ($P=50$ kW, $f=30$ kHz, Coil B, TM- I)

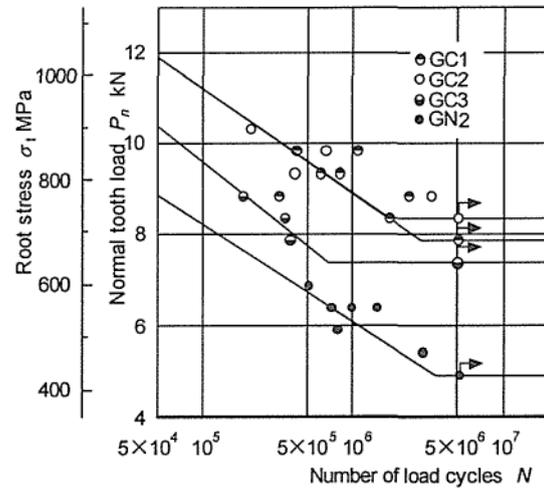


Fig. 5.17 *S-N* curves ($P=50$ kW, $f=30$ kHz, Coil C, TM- II)

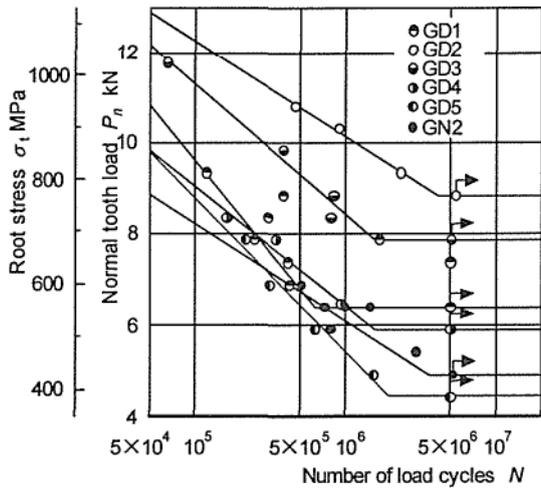


Fig. 5.18 *S-N* curves ($P=100$ kW, $f=30$ kHz, Coil C, TM- II)

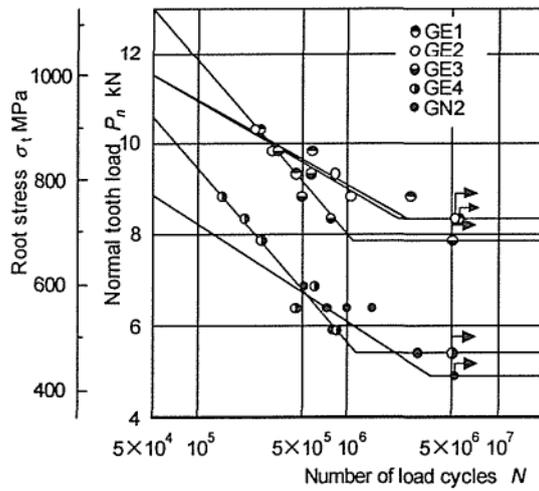


Fig. 5.19 *S-N* curves ($P=100$ kW, $f=60$ kHz, Coil C, TM- II)

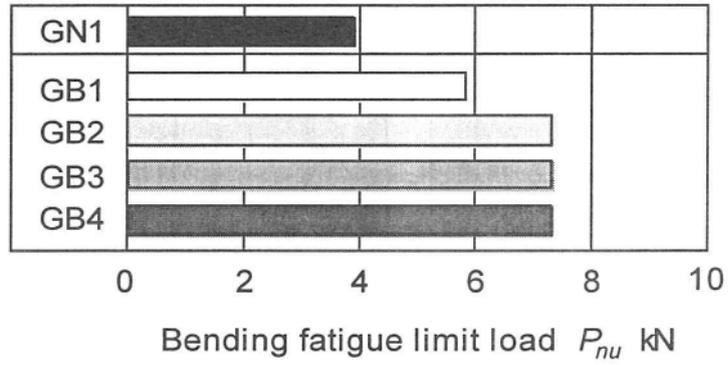


Fig. 5.20 Bending fatigue limit loads (MLL-50TSR,Coil B, TM- I)

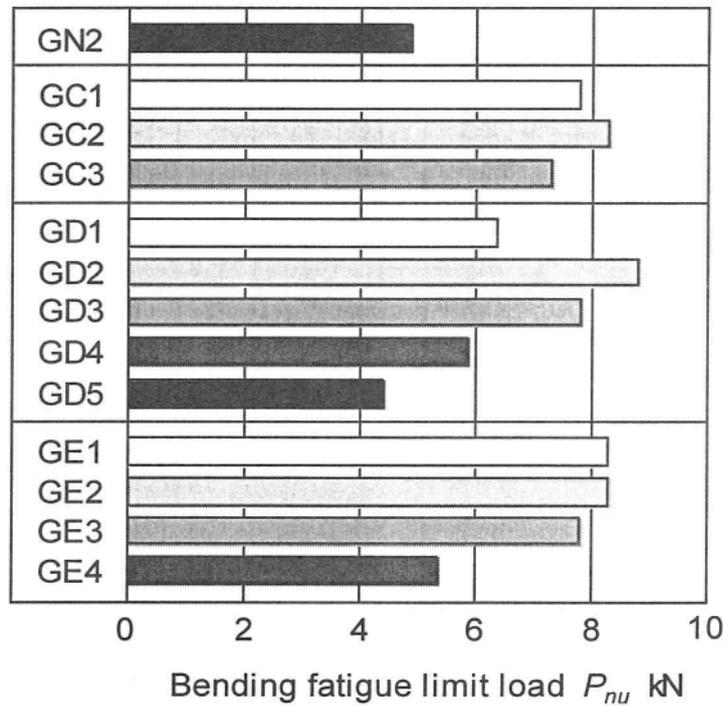


Fig. 5.21 Bending fatigue limit loads (MLL-250TSR- II ,Coil C, TM- II)

5.4 結 言

本章で得られた結果は、要約すると以下の通りである。

- (1) 高周波焼入れ歯車の硬化層は、加熱時間 t_h の増加とともに厚くなり、加熱電力 P の増加とともに短時間加熱で生成され、周波数 f が高いと歯先から、 f が低いと歯底から生成される。また、 t_h の増加にかかわらず、完全にマルテンサイト組織が得られた硬化層の硬さは、 $HV=600$ 程度に達する。
- (2) Hofer の危険断面位置付近における表面の硬化層は、 t_h が短い場合には、 f の高い方が厚くなるが、 t_h の増加とともに f の低い方が、歯幅中央における硬化層が厚くなる。
- (3) 試験歯車と同じ幅の加熱コイル (Coil B) では、高周波焼入れ装置へのセッティングをする時に、加熱コイルと歯車とにわずかな位置のずれがあったときは、硬化層深さに差が出たが、試験歯車より 4mm 広い加熱コイル (Coil C) では、歯幅にわたって一様な硬化層が得られた。
- (4) 高周波焼入れ歯車の曲げ疲労限度荷重 P_{nu} は、最適な t_h で焼入れを行うと、焼ならし歯車の P_{nu} の約 1.8 倍 (8.9kN) になる。
- (5) 高周波焼入れ歯車の最大 P_{nu} を得る t_h は、いずれの加熱条件においても存在し、Hofer の危険断面位置の有効硬化層深さが、歯車側面において 0.85mm~1.90mm のとき、最大 P_{nu} になる。また、このときの硬化層は歯形に沿った形になる。

第6章 結 論

本論文は、軸対称高周波焼入れシミュレータと二次元高周波焼入れシミュレータを発展させた三次元形状の機械要素に適用できるシミュレータを開発し、この三次元高周波焼入れシミュレータを用いて、種々の高周波焼入れ条件およびコイル形状に対する歯車のシミュレーションを行って、高周波焼入れによる歯車の残留応力と硬化層について明らかにした。さらに曲げ疲労試験を行って高周波焼入れ歯車の曲げ疲労強度を求め、残留応力・硬化層と曲げ疲労強度に及ぼす焼入れ条件と加熱コイル形状の影響などについて明らかにすることにより、高周波焼入れ歯車の曲げ強度設計および最適な高周波焼入れ条件の選定と加熱コイル設計を行うための基礎資料を得るために行ったものである。本論文で得られた結果を総括すると次のとおりである。

第1章では、本研究の目的を述べるとともに、従来行った主な研究を紹介し、本研究の位置づけ、意義ならびに研究内容の概要を述べた。

第2章では、三次元有限要素法(3D-FEM)による電磁界、熱伝導および弾塑性応力解析法を用いて、軸対称および二次元高周波焼入れシミュレータを発展させた三次元形状の機械要素に適用できるシミュレータを開発した。そして、この三次元高周波焼入れシミュレータを用いて、軸の高周波焼入れ過程の温度・応力、焼入れによる残留応力と硬化層を求め、これらの結果を軸対称高周波焼入れシミュレータによる計算結果が、軸対称FEMによる結果とほぼ一致し、本解析プログラムは、任意形状の機械要素の高周波焼入れによる残留応力と硬化層の計算に有効であることを計算実験的に確かめた。さらに、本シミュレータを用いて、歯車の高周波焼入れ過程の温度・応力、焼入れによる残留応力と硬化層を求め、これらに及ぼす加熱電力 P と周波数 f の影響などについて検討を加えた。その結果、高周波加熱終了時の歯車の最高温度は、歯幅端歯底付近に生じ、 P 、 f の増加とともに上昇すること、歯車の高周波焼入れによる残留応力は P が小さく、 f が低い場合には、歯底付近で大きな圧縮応力になるが、 P が大きすぎると、圧縮残留応力は小さくなること、硬化層は P 、 f が小さい場合には、歯先を除いて歯全体に生じ、 P が大きく、 f が小さい場合には、歯底付近にしか生じないが、 P 、 f が大きい場合には、歯全体に生じることなどを明らかにした。

第3章では、三次元高周波焼入れシミュレータを用いて、歯車の定置単周波高周波焼入れ過程の温度計算を行うとともに加熱過程の温度測定を行って、両者がよく一致することから、本シミュレータは高周波焼入れ過程の温度計算に有効であることが確認できた。次に、歯車の定置単周波および二重周波高周波焼入れ過程の温度・応力、焼入れによる残留応力と硬化層を求め、これらに及ぼす焼入れ条件および歯幅の影響などについて検討を加えた。その結果、歯車の単周波加熱による加熱終了時の最高温度の位置は、歯幅 b が小さい場合には加熱条件にかかわらず歯底歯幅端になるが、 b が大きい場合には P にかかわらず、 f が小さいときには歯底歯幅中央に、 f が大きいときには歯先歯幅中央になること、また、加熱終了時の等温線は、適切な二重周波加熱を採用することによって歯形に沿わせることができることを明らかにした。さらに、歯車の単周波高周波焼入れによる歯元の残留応力は、 b にかかわらず P 、 f が小さい場合には大きな圧縮応力になるが、 P 、 f が大きい場合には引張応力になるので注意を要すること、また、適切な二重周波高周波焼入れによって歯元に生じる圧縮残留応力を大きくすることができること、歯車の硬化層の計算結果は、実際の高周波焼入れ歯車における側面のマクロ腐食写真の硬化層とほぼ一致することを明らかにした。さらに、歯車の単周波高周波焼入れによる硬化層は、 b にかかわらず P 、 f が小さい場合には歯全体に生じ、 P が大きく f が低い場合には歯底付近のみに生じ、 P 、 f が大きい場合に歯先付近のみに生じる。また、適切な二重周波高周波焼入れを採用することによって歯形に沿う硬化層を得ることができるが、歯底付近で大きな圧縮残留応力が生じる加熱条件は、歯形に沿った硬化層が生じる条件とは異なるので、注意が必要であることなども明らかにした。

第4章では、実用される加熱コイル冷却用と歯車冷却用の2つの水路をもつ高周波焼入れ用加熱コイル(Coil B)を追加して設計製作し、このコイルを用いた場合の歯車の種々の高周波焼入れのシミュレーションを行って、高周波焼入れ過程の温度・応力、焼入れによる残留応力と硬化層を求め、歯車冷却用の水路をもたない加熱用コイル(Coil A)を用いた場合の計算結果と比較し検討を加えた。その結果、高周波焼入れ歯車のHoferの危険断面位置の残留応力 $\sigma^*_{\theta=30^\circ}$ は、適切な加熱時間の場合には、歯幅にわたって一樣になるが、加熱時間が短い場合には歯幅中央では小さくなり、歯幅端では大きくなること、リム厚さが異なる高周波焼入れ歯車の $\sigma^*_{\theta=30^\circ}$ は、 $b=10\text{mm}$ では歯幅全体にわたり、 $l_w=2m$ 、 ∞ 、 m の順に大きくなり、 $b=20\text{mm}$ では、歯

幅中央ではほぼ同じになり，側面では， $l_w = \infty$ ， m ， $2m$ の順に大きくなることを明らかにした．また，高周波焼入れによる歯車の硬化層は，加熱時間の増加とともに深く生成されるが，加熱コイルと歯車のわずかなずれにより，両端面の硬化層が不均一になるため注意が必要であること，リム厚さの異なる高周波焼入れ歯車の硬化層は，リム厚さが増加すれば浅くなり，歯幅が増加すれば深くなることなどを明らかにした．次に，これらの加熱コイルを用いて加熱時間の異なる高周波焼入れ歯車を作製し，これらの歯車の硬さ測定および曲げ疲労試験を行って，高周波焼入れ歯車の歯元付近の硬化層が，歯形に沿う形になったときに曲げ疲労限度荷重を大きくし，最大値は，Coil Aでは焼きならし歯車の約1.6倍に，Coil Bでは約1.8倍になることを確認した．

第5章では，加熱電力，周波数，加熱時間の異なる高周波焼入れ歯車の硬さ測定と焼入れ組織観察を行って，硬さ分布，硬化層および表面焼入れ組織に及ぼす焼入れ条件と加熱コイル形状などの影響について検討を加えた．また，これらの高周波焼入れ歯車の曲げ疲労試験を行って，曲げ疲労強度を求めて検討を行った．その結果，高周波焼入れ歯車の硬化層は，加熱時間 t_h の増加とともに厚くなり，加熱電力 P の増加とともに短時間加熱で生成され，周波数 f が高いと歯先から， f が低いと歯底から生成されこと， t_h の増加にかかわらず，完全にマルテンサイト組織が得られた硬化層の硬さは， $HV=600$ 程度に達することを明らかにした．また，Hofer の危険断面位置付近における表面の硬化層は， t_h が短い場合には， f の高い方が厚くなるが， t_h の増加とともに f の低い方が，歯幅中央における硬化層が厚くなり，試験歯車より 4mm 広い加熱コイル (Coil C) では，加熱コイルと歯車との位置のずれに対して有利であること，高周波焼入れ歯車の曲げ疲労限度荷重 P_{nu} は，最適な t_h で焼入れを行うと，焼きならし歯車の P_{nu} の約 1.8 倍 (8.9kN) に達し，最大 P_{nu} を得る加熱条件は，硬化層は歯形に沿った形になる条件に等しくなることを明らかにした．

以上の結果，三次元高周波焼入れシミュレータを用いて，加熱時間，加熱電力，周波数などのパラメータを計算実験することにより，歯形に沿った硬化層に基づく大きな P_{nu} をもつ高周波焼入れ歯車を得る条件をシミュレーションすることが可能になった．これらことは，加熱コイルの形状設計変更にも威力を発揮するので，本論分の結果は，歯車の大きな曲げ疲労強度に対する最適な焼入れ条件の選定および加熱コイル設計を行うための有用な基礎資料を提示している．

謝 辞

本研究は、鳥取大学教授・宮近幸逸博士の御指導のもとに遂行されたものであり、終始懇切な御指導と御鞭撻を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

また、本研究に対して、種々の御教示、御助言をいただいた鳥取大学教授・早川元造博士、同教授・西村正治博士、および同助教授・小出隆夫博士に対して深く感謝致します。

本研究を進めるにあたって、実験および資料整理などに御協力いただいた鳥取大学工学部技術職員・難波千秋氏、同機械工学科機械設計学研究室の大学院生澤田修司氏（現鳥取三洋電機株式会社）、中井裕幸氏（現光洋精工株式会社）、織田一輝氏をはじめ同研究室の在学生ならびに卒業生各位に厚く御礼申し上げます。

本研究を行うにあたって、種々の御助言、励ましをいただいた鳥取大学工学部機械工学科の諸先生方および職員の方々、試験機および試験歯車の製作に御協力いただいたものづくり教育実践センター(実習工場)の方々に厚く御礼申し上げます。

さらに、本研究に関して、種々の御協力をいただいた電気興業株式会社高周波統括部の顧問・伊能日出男氏をはじめ、試作開発課長・片沼秀明氏、栗田洋平氏および岩永淳氏に厚く御礼を申し上げます。

なお、本研究に対して全面的な協力をいただいた鳥取県金属熱処理協業組合の専務理事・渡辺英人氏をはじめ、直接高周波焼入れ作業を行っていただいた技術課係長・生田智章氏、佐々木寛氏のほか、不在時に各種業務を代行していただいた技術課長・中本孝志氏、製造課長・住田清氏、営業課長・宮野清志氏、設備課長・小武勝氏、庶務係・中島さつき氏および様々な協力と激励をいただいた職員の方々に改めて御礼を申し上げます。

最後に本研究論文執筆にあたり、全面的な理解と協力により、蔭ながら私を支えてくれた妻みどりと子供たち、家族に深く感謝する次第であります。

参 考 文 献

- (1.1) (社)日本熱処理技術協会・日本金属熱処理工業会, 熱処理技術入門, (1997), 272-291, 大河出版.
- (1.2) 会田俊夫・小田 哲・松尾義一・橋本郁郎, 歯車の曲げ疲れ強さに関する研究 (第 5 報, 炎および高周波焼入れ歯車の曲げ疲れ強さ), 日本機械学会論文集, 32-242(1966), 1580-1588.
- (1.3) 藤尾博重・会田俊夫・増本雄治・鶴木孝典, 焼入れ歯車の歯形の変形と残留応力に関する研究(第 3 報, S35C 材歯車の高周波焼入れの場合), 日本機械学会論文集, 44-387(1978), 3941-3949.
- (1.4) 藤田公明・吉田 彰・安藤 滋・太田一忠, SCM440 鋼製高周波焼入れローラの面圧強さに及ぼす曲率半径と硬化層深さの影響, 日本機械学会論文集, 48-430, C(1982), 876-885.
- (1.5) 小峰厚友・菊池雅男・植田秀夫・内藤武志, 高周波焼入材における残留応力の発生と減衰, 熱処理, 25-3(1985), 118-122.
- (1.6) MIKAEL MELANDER, Theoretical and Experimental Study of Stationary and Progressive Induction Hardening, J.HEAT TREATING OF AMERICAN SOCIETY FOR METALS, (1985), 145-166.
- (1.7) 松原洋一・熊川 誠・渡辺康男, 二重周波誘導加熱による歯車の高周波焼入れ, 熱処理, 29-2(1989), 92-98,
- (1.8) JOHN M.STORM and MICHAEL R.CHAPLIN, Induction gear hardening by the dual frequency method, SAE, (1987), 30-35.
- (1.9) 小田 哲・宮近幸逸・高塚弘幸・坪井 始, 高周波焼入れによる丸棒の残留応力の計算, 日本機械学論文集, 60-573, C(1994), 1856-1861.
- (1.10) 有本亨三・生田文昭・井上達雄, 高周波焼入れ・焼戻し変形の有限要素法による連成シミュレーション, 熱処理, 34-6(1994), 332-338.
- (1.11) 生田文昭・堀野 孝・井上達雄, 高周波移動焼入れ過程における残留応力・ひずみおよび組織のコンピュータシミュレーション, 材料, 47-9(1998), 892-898.
- (1.12) 宮近幸逸・小田 哲・加藤昌一・坪井 始・藤尾博重, 平滑軸の高周波焼入れ過程の温度・応力, 日本機械学会論文集, 64-625, C(1998), 3623-3629.

- (1.13) 宮近幸逸・小田 哲・加藤昌一・坪井 始・藤尾博重, 坪根太平, 軸の高周波焼入れによる残留応力と硬化層に及ぼすコイル形状の影響, 日本機学会論文集, 66-625, C(2000), 4080-4086.
- (1.14) 宮近幸逸・小田 哲・加藤昌一・坪井 始・藤尾博重, 二重周波高周波焼入れによる段付き軸の残留応力と硬化層, 日本機学会論文集, 66-652, C(2000), 4087-4094.
- (1.15) 宮近幸逸・小田 哲・坪井 始・藤尾博重, 二重周波誘導加熱による歯車の高周波焼入れ過程の温度・応力, 材料, 52-7, (2003), 801-806.
- (1.16) 加藤昌一, 軸およびシリンダの高周波焼入れによる残留応力と硬化層に関する基礎研究, 鳥取大学博士論文, (2000).
- (2.1) 文献(1.1)と同じ.
- (2.2) 米谷 茂・篠原俊英・高橋克明, 浸炭焼入鋼の残留応力について, 日本金属学会誌, 44-5(1980), 467-473.
- (2.3) 井上達雄・田中喜久昭・青木正人, ひずみ履歴を考慮した弾塑性熱応力の解析, 日本機械学会論文集, 38-314(1972), 2490-2496.
- (2.4) 藤尾博重・会田俊夫・秋園純一, 焼入れ歯車の歯形の変形と残留応力に関する研究(第 4 報, 浸炭波焼入れ平歯車の場合), 日本機学会論文集, 44-387(1978), 3950-3957.
- (2.5) 王 志剛・井上達雄, 相変態の応力依存性を考慮した鋼の焼入れにおける温度, 組織および応力の解析, 材料, 32-360(1983), 991-996.
- (2.6) 山口 豪・王 志剛・井上達雄, 歯車の浸炭焼入過程における炭素濃度依存性を考慮した温度, 組織および応力の解析, 材料, 33-375(1984), 1470-1476.
- (2.7) 宮尾光介・王 志剛・井上達雄, 歯車の浸炭焼入過程における変態塑性を考慮した温度, 組織および応力の解析, 材料, 35-399(1986), 1352-1357.
- (2.8) 小田 哲・宮近幸逸・三佐尾昌邦・藤尾博重, 浸炭焼入れ薄肉平歯車の残留応力, 日本機械学会論文集, 53-493, C(1987), 1965-1971.
- (2.9) 小田 哲・宮近幸逸・藤尾博重, 浸炭焼入れ内歯平歯車の残留応力に及ぼすリム厚さ・基準圧力角の影響, 日本機械学会論文集, 56-530, C(1990), 2751-2755.
- (2.10) 文献(1.3)と同じ.

- (2.11) 文献(1.5)に同じ.
- (2.12) 文献(1.9)に同じ.
- (2.13) 文献(1.12)に同じ.
- (2.14) 文献(1.14)に同じ.
- (2.15) 三次元 F E M による高周波焼入れ過程の温度・応力の計算, 宮近幸逸・馬田秀文・松岡 徹・小田 哲・坪井 始, 設計工学, 掲載決定.
- (2.16) 中田高義・高橋則雄, 電気工学の有限要素法 第 2 版, (1986), 66-225, 森北出版.
- (2.17) 矢川元基, 流れと熱伝導の有限要素法入門, (1983), 103-121, 培風館.
- (2.18) 藤尾博重・会田俊夫・増本雄治, 焼入れ歯車の歯形の変形と残留応力に関する研究(第 1 報, S45C 材円柱のずぶ焼入れの場合), 日本機械学会論文集, 42-364(1976),4026-4032.
- (2.19) 山田嘉昭, マトリックス法材料力学, (1983), 43-53, 培風館.
- (2.20) 山田嘉昭, 塑性・粘弾性, (1984), 75-147, 培風館.
- (2.21) 鷺津久一郎・宮本 博・山田嘉昭・山本善之・川井忠彦, 有限要素法ハンドブック I 基礎編, (1981), 349-362, 培風館.
- (2.22) 中村 仁, 高周波加熱, (1964), 厚生閣版.
- (2.23) Hansen, Constitution of Binary Alloys, MATERIALS SCIENCE AND ENG-INEERING SERIES, (1958), 353-357, McGRAW-HILL.
- (2.24) 坪井 始, 内藤 督: 実践数値電磁界解析法, (1995), 77-99, 養賢堂.
- (2.25) 近角聰信, 強磁性体の物理(上), (1991), 115-171, 裳華房.
- (2.26) 大槻義彦・小出昭一郎, 新版物理便利帖, (1989), 59-62, 共立出版.
- (2.27) 関 信弘, 伝熱工学, (1989), 87-181, 森北出版.
-
- (3.1) 文献(2.23)に同じ.
- (3.2) 文献(2.17)に同じ.
- (3.3) 文献(2.19)に同じ.
- (3.4) 文献(2.10)に同じ.
- (3.5) 文献(2.24)に同じ.
- (3.6) 文献(2.25)に同じ.
- (3.7) 文献(1.3)に同じ.

- (4.1) 文献(1.3)に同じ.
- (4.2) 会田俊夫・小田 哲・草野昂三郎・伊藤芳澄, 歯車の曲げ疲れ強さに関する研究(第7報, 浸炭焼入れ歯車の曲げ疲れ強さ), 日本機械学会論文集(第3部), 33-252(1967), 1314-1320.
- (4.3) 戸部俊美・丸山昇, 平歯車の歯の曲げ疲労強度に関する基礎的研究(第3報, SCM418 浸炭焼入れ歯車の変動荷重下での疲労強度), 日本機械学会論文集, 48-427, C(1982), 383-390.
- (4.4) 藤尾博重・迫田雅治, 硬化層厚さをかえた浸炭焼入れ歯車の残留応力の理論解析, 日本機械学会論文集, 50-449, C(1984), 179-186.
- (4.5) 井上克己・柳晟基・鄧鋼・加藤正名, 浸炭歯車の郷土に及ぼす表面硬化の破壊力学に基づく評価, 日本機械学会論文集, 65-593, C(1995), 306-311.
- (5.1) (社)日本熱処理技術協会・日本金属熱処理工業会, 熱処理技術入門, (1984), 222-237, 大河出版.

END