

(論文)

焼結転造歯車の高強度化メカニズムおよび適用メリット

谷口祐司*・西田 智

Mechanism of Attaining High Strength Sintered and Surface-rolled Gear and Merits of Its Application in Automotive Field

Yuji TANIGUCHI・Satoshi NISHIDA

要旨

自動車への焼結部品の適用拡大を目的として、高い疲労強度が要求されるトランスミッション歯車への適用が検討されている。最近の研究では、プレアロイ鋼粉を用いた焼結転造歯車が、従来の溶製鋼歯車と比較して同等以上の疲労強度を得られることが報告されている。しかし、焼結転造歯車で溶製鋼歯車を超える疲労強度が得られるメカニズムは十分には解明されていなかった。

そこで当社では、焼結転造歯車で高い疲労強度が得られる要因を溶製鋼との比較によって調査し、圧縮残留応力が高いことに起因することを明らかにした。さらに当社は、焼結転造ギアの適用メリットについても検討を行った。歯形精度向上の観点から転造条件を調整することにより、歯面研削（歯研）を行わなくても歯研品と同等の面圧疲労強度が得られ、歯研工程省略の可能性が示された。

Abstract

With the aim of expanding the application to automobiles, a study was conducted to determine the applicability of sintered parts to transmission gears that require high fatigue strength. Recent studies have reported that sintered and surface-rolled gears based on pre-alloyed steel powder can achieve fatigue strength equal to or higher than that of conventional wrought steel gears, but the mechanism that enables the former to achieve a fatigue strength higher than that of the latter has not been fully clarified. Hence, Kobe Steel has investigated the factors that may bring higher fatigue strength to sintered and surface-rolled gears in comparison with wrought steel and found that it is attributable to their highly compressive residual stress. Also studied were the advantages of applying sintered and surface-rolled gears. By optimizing the surface-rolling conditions so as to improve the tooth profile accuracy, the same contact-pressure fatigue strength as that of the ground product can be obtained without any grinding, suggesting the possibility of eliminating the grinding process.

キーワード

焼結歯車, トランスミッション, プレアロイ鋼粉, 転造, 面圧疲労強度, 歯研

まえがき = 近年、地球温暖化対策として二酸化炭素排出量削減が大きな課題となっており、自動車分野では電動化が急速に進展している。焼結部品の主要用途は自動車エンジン部品であるため、自動車の電動化により用途が減少することが懸念される。

そうしたなか、焼結部品の新たな用途として、トランスミッション歯車への適用が検討されている。トランスミッション歯車の材料には高い疲労強度が要求されることから、主にSCr420などの機械構造用合金鋼の浸炭焼入れ材が用いられている。焼結材は内部に空孔が存在するため、疲労強度が溶製鋼と比較して低いことが課題であった。しかしながら、転造加工によって表面近傍を緻密化することで溶製鋼歯車と同等以上の疲労強度が得られている^{1), 2)}。とくにCrなどの易酸化性元素を含まないNi-Moプレアロイ合金鋼粉は、吸熱型変成ガス(通称:RXガス)雰囲気下の焼結および熱処理でも酸化による性能低下の懸念が小さいという利点を有している。いっぽう、転造加工において空孔は完全にはなくなっていないにもかかわらず、焼結転造歯車が溶製鋼歯車を上回る疲労強度を示すメカニズムは十分には解明されてい

い。

そこで当社では、焼結転造歯車が高い疲労強度を示す要因を解明すべく、溶製鋼歯車との比較調査を行った。さらに、焼結転造歯車の適用拡大のため、溶製鋼歯車からの置換えによるメリットについても検討を行った。本稿ではこれらの概要を述べる。

1. 焼結転造歯車の高強度化メカニズム

歯車の強度として、曲げ強さや歯面強さ、スコーリング強さを検討するのが一般的である。本章では焼結転造歯車の面圧疲労強度について述べる。

1.1 歯車面圧疲労強度への影響因子

歯車の歯面損傷の代表的なものにピッチング損傷が挙げられる。ピッチングの発生には、表面硬さや内部欠陥(介在物や空孔)、残留オーステナイト量、圧縮残留応力が影響すると考えられている³⁾。トランスミッション歯車は面圧負荷が高くすべりを伴う駆動条件で使用され、歯車の歯面では摩擦熱による温度上昇が生じる。このため、常温硬さ(初期硬さ)だけでなく573 K焼戻し硬さが耐ピッチング性に影響することが報告されている⁴⁾。

* 素形材事業部門 鉄粉ユニット 鉄粉工場

これらの因子について焼結転造歯車と溶製鋼歯車との比較調査を行った。

1.2 試験方法

焼結鋼試験材は、水アトマイズ法により作製した0.5%Ni-1.0%Moプレアロイ粉（完全合金鋼粉）に0.3%黒鉛粉を加えた混合粉を用いた。直径70mm高さ30mmの円盤形状ブランク材を密度7.5g/cm³狙いで成形し、N₂-10%H₂雰囲気中で1,120℃×60min焼結を行った。ブランク材から表1に示すはすば歯車形状に切り出し、転造加工を行った後、浸炭焼入れを行った。転造方法はプランジ式転造で、転造量は工具押し込み量1.2mmとした。浸炭焼入れ条件は、ガス浸炭930℃×120min、160℃×120min焼戻しとした。溶製鋼試験材にはJIS SCr420（以下SCr420という）を使用し、前記の焼結鋼試験材と同じはすば歯車形状に切り出し、浸炭焼入れを行った。浸炭焼入れは、パルス浸炭950℃×210min、焼戻し150℃×60minの条件で行った。表面粗さによる強度への影響をできる限り小さくするため、いずれの歯車も歯面研削仕上げによってJIS B 0601:2001で規定された最大高さRzを2μm以下とした。

面圧疲労試験は動力循環式運転試験機を用いて行った。疲労限度荷重は、荷重繰返し数が1.5×10⁷を超えても損傷面積が2%に達しないときの荷重とした。残留応力および残留オーステナイト量の測定にはPSPC型微小X線測定装置を用いた。

1.3 試験結果および考察

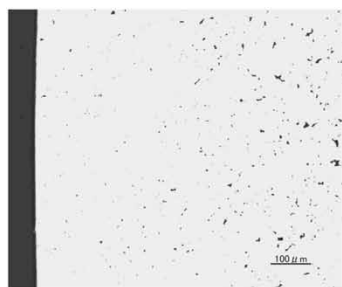
面圧疲労試験の結果を図1に示す。縦軸はピッチ点

表1 試験歯車の諸元（はすば歯車）
Table 1 Dimensions of test gear (helical gear)

	Drive	Driven
	Evaluation material	SCM420 carburized
Material		
Module	3	
Pressure angle (deg.)	20	
Helix angle (deg.)	20	
Number of teeth	16	24
Face width (mm)	6	25
Standard pitch circle diameter (mm)	51.1	76.6

表2 表面硬さおよび残留オーステナイト量
Table 2 Surface hardness and amount of retained austenite phase

		Rolled sintered gear	SCr420 gear
Surface hardness (HV)	before testing	708	717
	after tempering 573K	656	667
Amount of retained austenite phase (%)		14.1	16.0



Rolled sintered gear



SCr420 gear

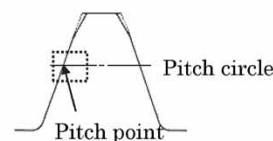


図2 ピッチ点近傍の空孔および介在物
Fig.2 Porosities and inclusions near pitch point

におけるヘルツ接触応力を計算した値である。本試験においても、焼結転造歯車は溶製鋼よりも高い面圧疲労強度が得られることを確認した。

表面硬さと残留オーステナイト量の測定結果を表2に示す。焼結転造歯車と溶製鋼歯車の硬さおよび残留オーステナイト量はほぼ同じであった。

ピッチ点近傍（図中の破線枠部）の断面写真を図2に示す。いずれの歯車においても粗大な介在物は確認されなかったが、焼結転造歯車には多数の微小な空孔が存在していた。そこで、表面近傍および表面から約1mm内側の幅1mm×深さ0.5mmの部分を対象に画像解析を行い、当該領域に含まれる空孔の個数と各空孔の円相当径を算出した。それらの結果を表3に示す。転造により緻密化された表面近傍において10μm以上の粗大な空孔は全体の0.6%とわずかであり、最大径も13.4μmと小さい。このため、空孔の強度への影響は極めて小さいものと考えられる。

歯の表面近傍の残留応力は、電解研磨によって深さ方向に研削することによって測定した。歯たけ方向の残留応力測定結果を図3に示す。焼結転造歯車は溶製鋼歯車と比較して表面近傍に高い圧縮応力が残留していることがわかった。圧縮残留応力は面圧疲労強度の向上に有効であることが知られている⁵⁾ことから、本試験結果

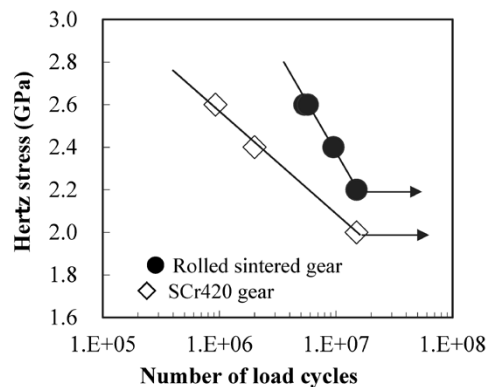


図1 歯車面圧疲労試験結果
Fig.1 Results of fatigue test for gear surface pressure

表3 焼結転造歯車の空孔サイズおよび分布

Table 3 Pore size and distribution of surface-rolled and sintered gear

	Surface	Inside
Mean diameter (μm)	2.8	5.3
Maximum diameter (μm)	13.4	21.6
Ratio of pores (%)	<5 μm	89.7
	5~10 μm	9.8
	>10 μm	0.6

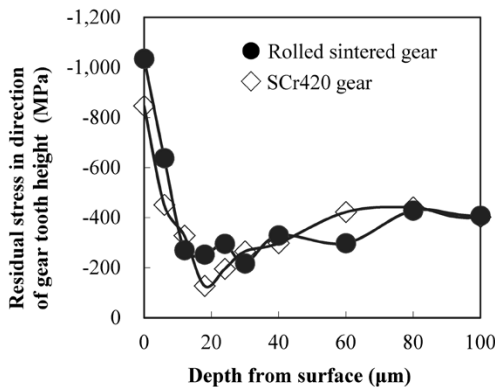
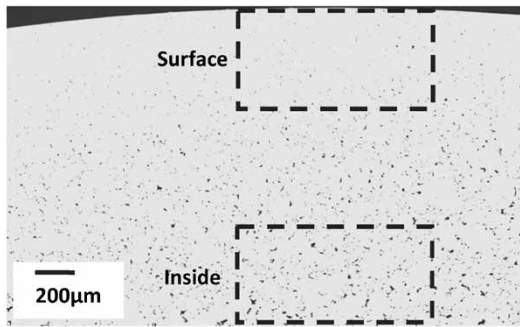


図3 表面近傍の歯たけ方向の残留応力分布
Fig.3 Residual stress distribution near surface

は焼結転造歯車の面圧疲労強度の向上に寄与することを示唆している。

なお、焼結転造歯車と溶製鋼歯車とで残留応力の大きさに差異が生じた要因として、焼結転造歯車は表層近傍と内部で密度差があることが考えられる。すなわち、転造により緻密化した表面近傍と空孔が残存している内部とでは浸炭焼入れ時の変形量が異なる。このため、密度差がほとんどない溶製鋼歯車よりも大きな圧縮残留応力が生じる。これが焼結転造歯車の優れた面圧疲労強度の発現メカニズムであると推察できる。

2. 焼結転造歯車の適用メリット

2.1 転造工程での歯形調整効果

自動車のトランスミッションには、燃費向上の観点からは小型軽量化、走行快適性の観点からは高静粛性が求められている。歯車に対してはそれに応じて強度向上やギヤノイズ低減の要求が高まっている。歯車の歯形精度が強度や騒音に影響することが知られており^{6), 7)}、上記の要求に対応するために近年では歯形精度の向上を目的として実施する歯面研削（以下、歯研という）の採用が増加している。

歯研を行う場合の溶製鋼歯車および焼結転造歯車の製造プロセスを図4に示す。溶製鋼歯車では歯形精度を調整できる工程が歯研工程のみとなる。いっぽう焼結転

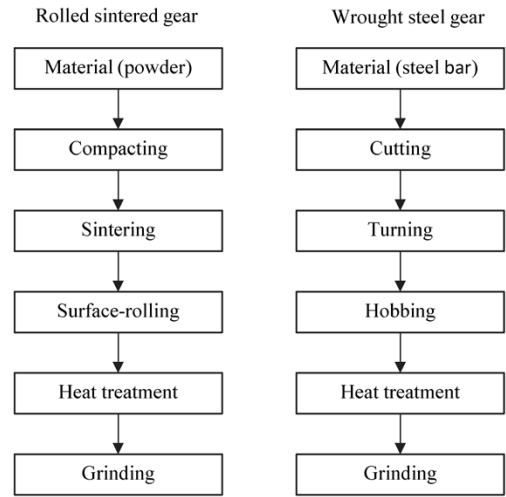


図4 焼結転造歯車と溶製鋼歯車の製造プロセス比較
Fig.4 Comparison of production process between rolled sintered gear and wrought steel gear

表4 試験歯車の諸元（平歯車）
Table 4 Dimensions of test gear (spur gear)

	Drive	Driven
Material	Evaluation material	SCM420 carburized
Module	3	
Pressure angle (deg.)	20	
Number of teeth	13	26
Face width (mm)	6	10
Standard pitch circle diameter (mm)	39.0	78.0

造歯車では、歯研工程だけでなく転造工程でも歯形調整が可能であることが報告されており⁸⁾、転造工程での歯形精度を向上させることによって熱処理後の歯研工程を省略できる可能性が期待される。本章では歯面強度の観点から転造条件の改良による歯形精度向上と歯研省略の可能性について検討を行った。

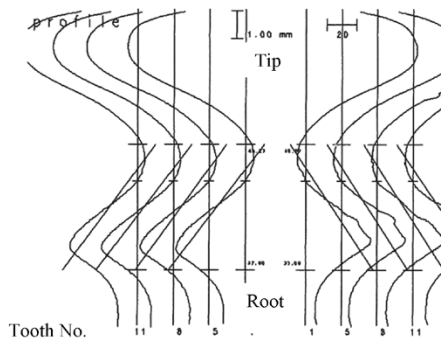
2.2 試験方法

水アトマイズ法により作製した0.5%Ni-1.0%Moブレアロイ粉に0.3%黒鉛粉を加えた混合粉を用いた。ブランク材を密度7.5 g/cm³狙いで成形し、1,120℃×60 min N₂-10%H₂雰囲気焼結を行った。ブランク材から表4に示す平歯車形状に切り出して転造加工を行った後、浸炭焼入れを行った。転造にはプランジ式転造盤を用い、転造代0.14 mmの従来条件で実施した。また、この改良条件として転造代を0.11 mmとし、歯形精度向上のために転造ダイス形状を調整して転造を実施した。浸炭焼入れ条件は、ガス浸炭930℃×120 min、焼戻し160℃×120 minとした。従来条件で転造した歯車は浸炭焼入れ後に歯形精度がJIS N4級となるように歯研を行った。

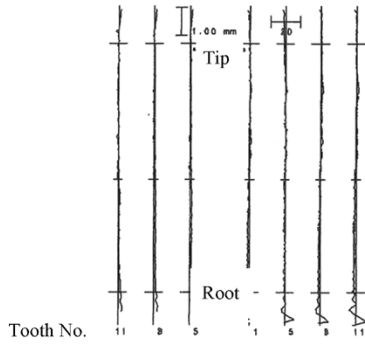
面圧疲労試験は動力循環式運転試験機を用いて行い、荷重繰り返し数が1.5×10⁷を超えても損傷面積が2%に達しないときの荷重を疲労限度荷重とした。

2.3 試験結果および考察

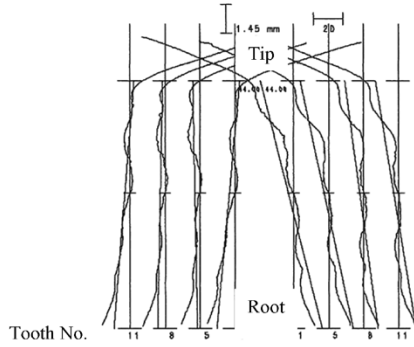
歯形形状の測定結果を図5に示す。(a)図は従来条件で転造した歯車、(b)図は従来条件で転造したものに歯研を行った歯車、(c)図は改良条件で転造した歯車の歯形を示している。歯形精度の改善を狙って改良条件



(a) Surface-rolled under conventional rolling condition (without grinding)



(b) Surface-rolled and ground



(c) Surface-rolled under modified rolling condition (without grinding)

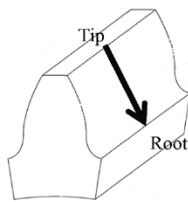
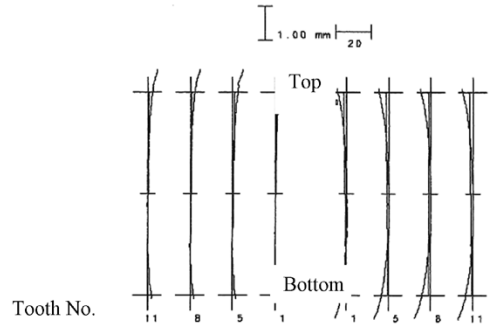
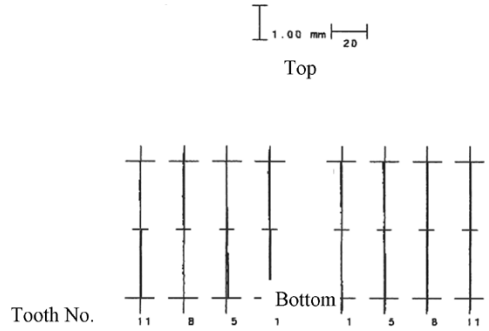


図5 歯形状の比較

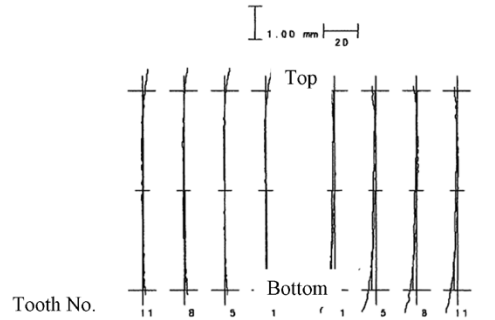
Fig.5 Comparison of tooth profiles



(a) Surface-rolled under conventional rolling condition (without grinding)



(b) Surface-rolled and ground



(c) Surface-rolled under modified rolling condition (without grinding)

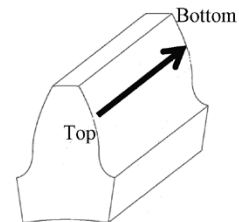


図6 歯すじ形状の比較

Fig.6 Comparison of lead profiles

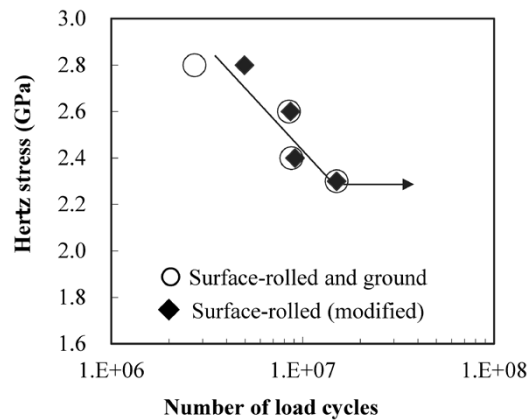


図7 歯車面圧疲労試験結果

Fig.7 Results of fatigue test for gear surface pressure

で転造した歯車は、従来条件と比較して歯形誤差が大幅に低減した。しかし、歯研歯車と同等レベルまでには至らなかった。また、歯すじ形状の測定結果を図6に示す。歯すじ誤差は転造条件および歯研の有無による差はほとんど認められず、いずれも良好な歯すじ精度を示した。

歯車面圧疲労試験結果を図7に示す。従来条件で転造した歯車(a)は運転試験時の振動が大きく、試験機の異常停止が発生して面圧強度を評価できなかった。いっぽう、改良条件で転造した歯車は運転試験時の問題はなく、歯研歯車と同等の面圧疲労強度であった。改良条件で転造した歯車は歯形誤差が十分に小さく歯面強度の低下が生じなかったものと考えられる。転造条件の調整により、歯研を行わなくとも歯研品相当の歯面強度寿命が得られることが示された。

むすび = 焼結転造歯車について高強度化メカニズムおよび適用メリットの検討を行い、以下の結果を得た。

- ①焼結転造歯車には転造によって溶製鋼歯車より大きい圧縮残留応力が生じるため、面圧疲労強度に優れる。
- ②焼結転造歯車は転造工程での歯形精度調整が可能で、条件調整により熱処理後の歯研工程を省略しても歯研材と同等の面圧疲労強度が得られる。

最後に、本検討にあたり転造技術および歯車評価技術に関して多大なご協力をいただいた諏訪東京理科大学、鳥取大学、(株)ニッセーの関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Teruie Takemasu et al. JSMME. 2011, Vol.5, No.12, p.825-837.
- 2) 西田 智ほか. 粉体および粉末冶金. 2014, Vol.61, No.6, p.318-323.
- 3) 永浜陸久ほか. R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.3, p.53-58.
- 4) 秦野敦臣ほか. CAMP-ISIJ. 1993, 6, p.796.
- 5) 石倉亮平ほか. 電気製鋼. 2010, Vol.81, No.2, P.99-108.
- 6) 吉崎正敏. 日本機械学会論文集C編. 2001, Vol.67, No.660, p.2651-2658.
- 7) 中村貫太郎. 日本機械学会論文集. 1966, Vol.32, No.238, p.1001-1006.
- 8) Hiroshi Sasaki et al. Procedia Engineering. 2014, Vol.81, p.316-321.



谷口祐司
素形材事業部門
鉄粉ユニット 鉄粉工場



西田 智
素形材事業部門
鉄粉ユニット