

焼結および粉末鍛造歯車の疲労強度に及ぼす密度の影響
Influence of Density on Fatigue Strength of Sintered and Powder-Forged Gears

○正 關 正憲 (岡山大学) 正 藤井 正浩 (岡山大学) 正 吉田 彰 (岡山大学)

Masanori SEKI, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-Naka, Kita-ku, Okayama
Masahiro FUJII, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-Naka, Kita-ku, Okayama
Akira YOSHIDA, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-Naka, Kita-ku, Okayama

In this study, sintered and powder-forged rollers and gears with different densities and nickel contents were fatigue-tested using a roller testing machine and a gear testing machine in order to elucidate their fatigue strength. These experimental results were compared with the results of conventional steel ones. The hardness near the surface of the test specimens with higher nickel content was smaller than that of the other ones. The pores in the sintered rollers became smaller and were disappeared by the hot forging. The fatigue strength of the sintered rollers and gears was the lowest in this experimental range. The fatigue strength of the powder-forged rollers and gears was slightly lower than that of the steel ones. The fatigue strength of the test specimens increased as their density increased, and was hardly influenced by the nickel content in this experimental range. It was clear that the fatigue strength of the sintered and the powder-forged rollers and gears was proportional to the hardness for each pre-alloyed metal powder.

Key words: Gear, Sintering, Powder Forging, Fatigue Strength, Density

1. 緒言

粉末焼結とは、金属粉の圧縮成形と焼結により製品を製造する技術であり、粉末鍛造とは、圧縮成形と焼結の後、熱間鍛造により製品を製造する技術である。これらの共通する特徴は、決められた形により近いニヤネットシェイプならびに決められた形どおりのネットシェイプを実現できること、同形状のものを大量生産することが可能であること、金型の精度が製品に反映されるので、高精度のものが得られることなどである。しかし、粉末焼結では材料内部に気孔が存在し、粉末鍛造では真密度にならないため、いずれの材料においても溶製鋼より機械的強度が弱いという欠点がある。

そこで本研究では、異なる Ni 含有率の鋼粉を用いた粉末焼結材ならびに粉末鍛造材で製作したローラおよび歯車の疲労試験を行い、それらの疲労強度に及ぼす材料密度ならびに Ni 含有率の影響について検討を行った。また、比較対象のために溶製鋼で製作したローラと歯車の疲労試験も行った。

2. ローラと歯車

2・1 ローラと歯車の製作 表1に本研究で用いたローラと歯車の製作条件および表記名を示す．まず本研究ではNi含有率が異なる2種類のプレアロイ型鋼粉が用いられた．1つは通常の粉末鍛造で使用する0.5%のNi含有率であり，もう1つは通常より多い3.0%のNi含有率である．これら2種類の鋼粉にグラファイトとステアリン酸亜鉛を混合し，直径90 mm，厚さ45 mmのディスク形状に成形および焼結して圧粉密度7.01 g/cm³の粉末焼結材を製作した．さらに，この粉末焼結材を鍛造圧2.7 ton/cm²または10.0 ton/cm²で熱間鍛造し，直径91 mm，厚さ40 mmのディスク形状で鍛造密度がそれぞれ7.50 g/cm³，7.84 g/cm³の粉末鍛造材を製作した．本研究で用いた試験片は，図1に示す直径60 mmのローラ対と表2に示すモジュール4 mm，基準圧力角20°の平歯車対である．1種類の圧粉密度の粉末焼結材および2種類の鍛造密度の粉末鍛造材を試験ローラと試験歯車の形状に機械加工した後，浸炭焼入れ焼戻しと研削仕上げを施した．

Table 1 Manufacturing conditions of test rollers and pinions

[illegible]

比較対象には、試験ローラとしてクロモリブデン鋼 (JIS:SCM420) 製ならびにクロム鋼 (JIS:SCr420) 製の浸炭硬化ローラを製作し、試験歯車としてクロモリブデン鋼 (JIS:SCM415) 製の浸炭硬化歯車を製作した。また、すべての相手ローラと相手歯車にはクロモリブデン鋼 (JIS:SCM415) 製の浸炭硬化ローラと浸炭硬化歯車を使用した。いずれの浸炭硬化ローラと浸炭硬化歯車にも研削仕上げが施された。

ここで、ヤング率とポアソン比は、焼結ローラと焼結歯車でそれぞれ 152 GPa, 0.26, 鍛造密度 7.50 g/cm³ の粉末鍛造ローラと粉末鍛造歯車でそれぞれ 177 GPa, 0.28, 鍛造密度 7.84 g/cm³ の粉末鍛造ローラと粉末鍛造歯車、浸炭硬化ローラと浸炭硬化歯車でそれぞれ 206 GPa, 0.30 とした。

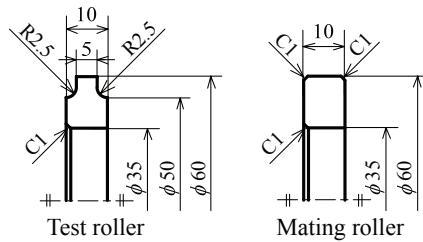


Fig.1 Shapes and dimensions of test roller pair

Table 2 Specification of test gear pair

	Pinion	Gear
Module	mm	4
Pressure angle	deg.	20
Number of teeth	19	26
Addendum modification coefficient	0	0.2916
Tip circle diameter	mm	84.67
Center distance	mm	91.5
Facewidth	mm	5
Contact ratio		1.535
Accuracy*	Class 2	Class 2
Heat treatment	Case hardening	
Tooth surface finishing	Grinding	

*JIS B 1702-1976

2・2 ローラと歯車の性状 図2に試験ローラと試験歯車の硬さ分布を示す。マイクロビッカース硬度計（フューチャテック製 FM-7D）を使用し、ローラ軸断面と歯車軸直角断面において表面からの深さ z ごとに硬さ測定を行った。この図より焼結ローラと焼結歯車はガス浸炭により材料内部にまで浸炭性ガスが入り込んだため、硬化層深さが他の試験片より深くなった。また Ni 含有率 3.0 % の試験ローラと試験歯車は、他の試験片より表面付近の硬さが小さくなった。一般に Ni は焼入れ性を良くし、じん性を増加させる効果があり、オーステナイト化を促進させやすい元素である。また、オーステナイトの硬さはマルテンサイトより柔らかいことが知られている⁽¹⁾。

ここで、表3にローラ表面における残留オーステナイト量を示す。残留オーステナイト量は X 線回折装置（理学電機製 RINT2000）によって得られ、表中の $(V_\gamma)_x$ と $(V_\gamma)_y$ は、それぞれローラ円周面におけるローラ軸方向ならびにローラ円周方向の残留オーステナイト量である。R-1N78 と R-2N78 の残留オーステナイト量を比較すると、同じ鍛造密度でも R-2N78 の残留オーステナイト量が多くなっていることが確認できる。したがって、Ni 含有率 3.0 % の試験片の表面付近の硬さは Ni によるオーステナイト化の影響によってあまり増加しなかったと考えられる。

表4に試験ローラ対と試験歯車対の表面硬さ、表面残留応力、表面粗さを示す。ここで表面硬さは、図2で得られた硬さ分布を近似した際の深さ $z=0.0$ mm における硬さである。また表面残留応力の測定は、残留オーステナイト量の測定と同じ X 線回折装置を用いて測定を行った。表中の $(\sigma_x)_r$ は、ローラ円周面におけるローラ軸方向または歯車歯面のかみあいピッチ点付近における歯筋方向の表面残留応力であり、 $(\sigma_y)_r$ は、ローラ円周面におけるローラ円周方向または歯車歯面のかみあいピッチ点付近における歯形方向の表面残留応力である。表中の Ra は、ローラ円周面におけるローラ軸方向、または歯車歯面のかみあいピッチ点付近における歯形方向の算術平均粗さである。表4より、材料密度による表面残留応力の違いはみられなかった。また、本研究で用いたすべての試験片には研削仕上げを行っているため、それらの表面粗さはほぼ同じであった。

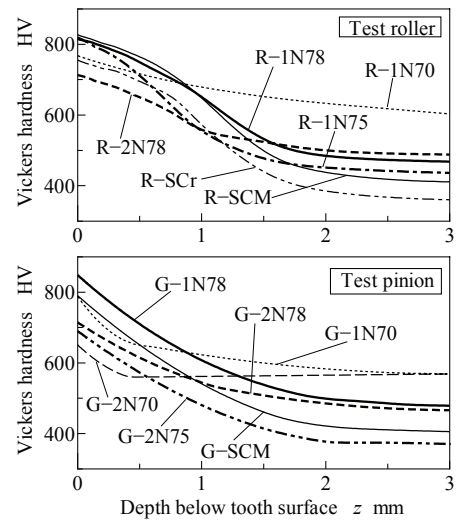


Fig.2 Hardness distributions of test rollers and pinions

Table 3 Amount of retained austenite on roller surfaces

Specimen	R-1N70	R-1N75	R-1N78	R-2N78	R-SCM	R-SCr	Mating roller
$(V_\gamma)_x$ %	21.77	26.62	27.87	31.07	40.19	33.72	39.11
$(V_\gamma)_y$ %	21.49	25.51	26.14	30.23	39.85	32.74	38.76

Table 4 Surface properties of test specimens

Specimen	R-1N70	R-1N75	R-1N78	R-2N78	R-SCM	R-SCr	Mating roller
HV	768	819	815	713	827	756	763
$(\sigma_x)_r$ MPa	-328	-434	-436	-271	-413	-203	-402
$(\sigma_y)_r$ MPa	-125	-269	-334	-121	-255	-84	-183
Ra μ m	0.29	0.28	0.23	0.20	0.25	0.21	0.29

Specimen	G-1N70	G-2N70	G-2N75	G-1N78	G-2N78	G-SCM	Mating gear
HV	788	651	690	849	715	790	880
$(\sigma_x)_r$ MPa	-110	-145	-151	-224	-157	-344	-165
$(\sigma_y)_r$ MPa	-385	-346	-597	-777	-445	-803	-662
Ra μ m	0.26	0.22	0.25	0.24	0.19	0.23	0.23

図3に試験ローラの断面写真を示す。R-1N70には多くの気孔が存在し、熱間鍛造を行った鍛造密度 7.50 g/cm³ の R-1N75 では気孔が存在するものの、かなり小さくなっていることが確認できる。図中の気孔率は、画像解析プログラム（Image-Pro Plus Ver.4.0）を使って、試験ローラの断面写真を二値化処理することによって得られた。R-1N70の気孔率が14.6 %であるのに対し、R-1N75では3.6 %であった。一方、真密度に近い鍛造密度 7.84 g/cm³ の R-1N78 と R-2N78 では気

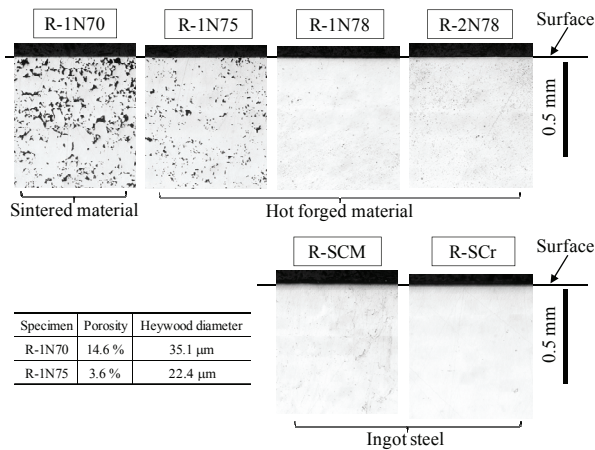


Fig.3 Cross sections and porosities of test rollers

孔を確認できなかったことから、熱間鍛造によってほとんどの気孔が消失したと言える。

3. 試験方法と試験結果

3・1 疲労試験方法 本研究では、ばね荷重式二円筒滑り転がり疲労試験機⁽²⁾を使用し、試験ローラを低速側（ローラ周速度 4.50 m/s, 滑り率-25.7 %）、相手ローラを高速側（ローラ周速度 5.65 m/s, 滑り率+20.5 %）としてローラの転がり疲労試験を行った。歯車の運転疲労試験では、FZG 型動力循環式歯車試験機⁽³⁾を用い、試験歯車を被動側、相手歯車を駆動側として、試験歯車の回転速度 $n_1=1800$ rpm で運転疲労試験を行った。負荷の基準には、2 つのローラ間または歯車のかみあいピッチ点におけるヘルツの最大接触応力 $p_{\max}$ ⁽⁴⁾を用いた。また、ローラおよび歯車の疲労試験に使用した潤滑油は、EP ギヤ油（動粘度 190.9 mm²/s [313 K], 17.47 mm²/s [373 K]）であり、試験ローラ対および試験歯車対への供給時の油温を 313±4 K に制御した。

後述するが、本研究のローラの転がり疲労試験は $p_{\max}=900$ MPa~2200 MPa で行われ、D.Dowson の式⁽⁵⁾より求めた試験ローラ対の理論最小油膜厚さ $h_{\min}$ は 2.0 μm ~2.5 μm であった。一方、歯車の運転疲労試験は $p_{\max}=1200$ MPa~2400 MPa の範囲で行われ、 $h_{\min}=0.9$ μm ~3.2 μm であった。また、P.H.Dawson が定義した D 値⁽⁶⁾は本研究で用いたすべての試験ローラ対ならびに試験歯車対において $D>1$ であった。

本研究の疲労試験では、任意の試験ローラおよび試験歯車繰返し数 N_1 ごとにローラ円周面または歯車歯面に生じたピッチングの面積を測定し、試験ローラ対または試験歯車対の総接触面積に対するピッチング面積の比で表すピッチング面積率を求めた。そのピッチング面積率が 1 % に達したときの試験ローラおよび試験歯車繰返し数をその疲労寿命 N とした。また、ローラの大きな損傷あるいは歯の折損により異常振動が発生し、振動感受スイッチによって試験機が自動停止したときの試験ローラまたは試験歯車繰返し数も疲労寿命 N とした。

3・2 ローラと歯車の損傷形態 すべての焼結ローラの損傷形態は、表面下き裂発生に起因するスポーリング損傷であり、焼結ローラの以外の試験ローラでは、一部の低負荷条件で表面き裂発生に起因するピッチング損傷であったが、ほとんどがスポーリング損傷であった。試験ローラに発生したスポーリング損傷の深さは、ローラ円周面から 0.5 mm 前後であった。一方、ほとんどの焼結歯車の損傷形態は歯元からの歯の折損であった。また、それ以外の試験歯車では、ピッチング損傷が発生したかみあいピッチ点付近から反作用歯面へのき裂進展による歯の折損あるいは歯元からの歯の折

損が高負荷条件で発生し、低負荷条件ではピッチング損傷が発生した。

3・3 ローラと歯車の疲労寿命 図 4 と図 5 に疲労試験で得られた試験ローラと試験歯車の $p_{\max}-N$ 線図をそれぞれ示す。図中の矢印は $N_1=2.0 \times 10^7$ までに損傷が発生しなかったことを表す。なお、図 5 の右側の縦軸は G.Niemann と H.Glaubitx の式⁽⁷⁾で求めた引張側歯元最大曲げ応力 $\sigma_{BT\max}$ である。これらの図より、焼結ローラと焼結歯車の疲労寿命は他の試験片より極端に短いことから、熱間鍛造を施すことによって疲労寿命がかなり長くなることがわかる。また、疲労試験の高負荷条件において、鍛造密度 7.84 g/cm³ の試験ローラと試験歯車の疲労寿命は、溶製鋼の試験片より長かったが、鍛造密度 7.50 g/cm³ の試験ローラと試験歯車の疲労寿命はそれより短かった。しかし、鍛造密度 7.50 g/cm³ の試験片は溶製鋼の試験片に匹敵する疲労寿命であった。一方、低負荷条件で比較すると、R-SCM と G-SCM の疲労寿命が最も長い結果となった。長時間の疲労試験になると、溶製鋼の試験片に比べ、粉末鍛造ローラと粉末鍛造歯車の内部に存在する気孔や介在物の影響によって、き裂が発生および進展しやすくなり、疲労寿命の低下につながったと考えられる。

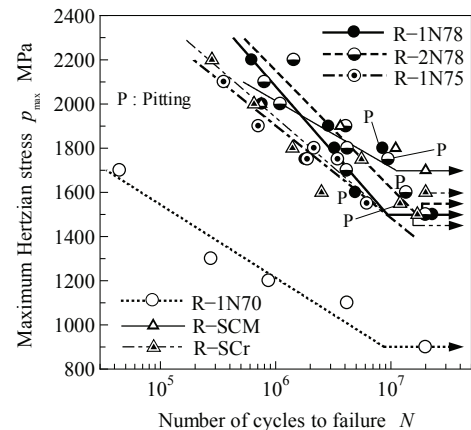


Fig.4 $p_{\max}-N$ curves of test rollers

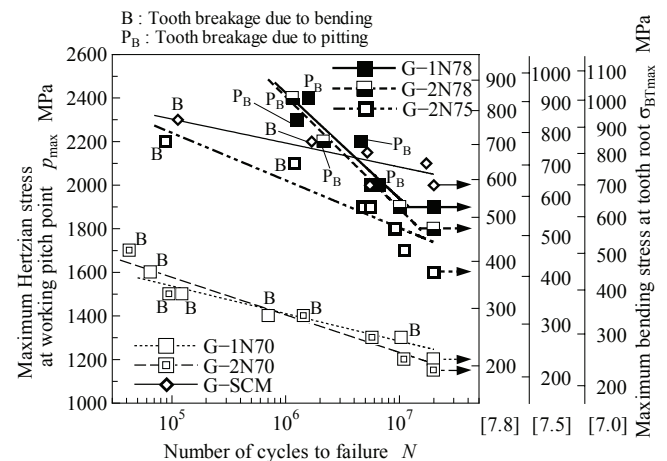


Fig.5 $p_{\max}-N$ curves of test pinions

3・4 疲労強度と密度の関係 試験ローラと試験歯車の疲労強度と密度の関係を図 6 に示す。本研究では、疲労寿命 $N=2.0 \times 10^7$ に対するヘルツの最大接触応力 $p_{\max}$ を試験ローラおよび試験歯車の疲労強度 ($p_{\max})_{lim}$ とした。この図より、粉末鍛造ローラと粉末鍛造歯車の疲労強度はそれぞれ R-SCM と G-SCM よりわずかに小さいが、粉末鍛造材の疲労強度が溶製鋼に匹敵していると言える。また、試験ローラおよび試験

歯車の材料密度が大きくなるほど、それらの疲労強度が大きくなっていることが確認できる。一方、この図を見る限り、試験片の疲労強度に及ぼす Ni 含有率の影響はみられなかった。なお、試験歯車の疲労強度が試験ローラに比べ、材料密度に関係なく一様に大きくなっている。本研究で用いた試験歯車対のかみあいピッチ点における相対曲率半径が 8.5 mm であるのに対し、試験ローラ対の相対曲率半径は 15.0 mm である。同じ $p_{\max}$ でかつ同じ接触幅で比較した場合、相対曲率半径が小さいほど法線荷重が小さくなる。また、ローラと歯車の試験条件や損傷形態が異なることから、同じ材料密度の試験ローラと試験歯車の疲労強度に差が現れたと考えられる。

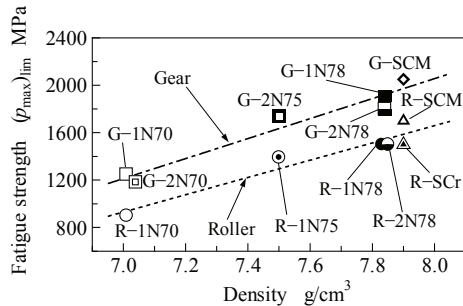


Fig. 6 Relationships between fatigue strength and density of test rollers and pinions

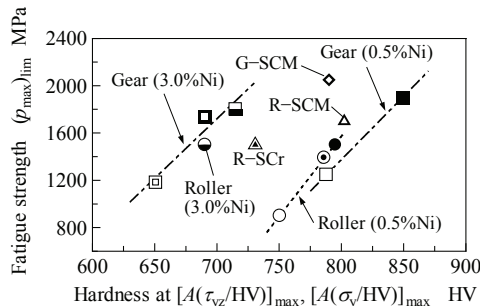


Fig. 7 Relationships between fatigue strength and hardness of test rollers and pinions

3・5 疲労強度と硬さの関係 前述のように本研究で使った試験ローラの主な損傷形態はスポーリング損傷であったことから、せん断応力 τ_{yz} による振幅最大値 $[A(\tau_{yz}/HV)]_{\max}^{(8)}$ を求め、試験歯車の主な損傷形態はピッチング損傷であったことから、垂直応力 σ_y による振幅最大値 $[A(\sigma_y/HV)]_{\max}^{(9)}$ を求めた。これらの振幅最大値は試験片表面下の各深さで求めた振幅値の中で最大となる値であり、 $[A(\sigma_y/HV)]_{\max}$ は試験片表面における値、 $[A(\tau_{yz}/HV)]_{\max}$ はスポーリング損傷深さと同程度の深さにおける値であることを確認した。したがって、スポーリング損傷とピッチング損傷の発生がそれぞれ $[A(\tau_{yz}/HV)]_{\max}$ ならびに $[A(\sigma_y/HV)]_{\max}$ に依存すると考えた。

ここで、図 2 で示したように Ni 含有率によって試験片の硬さ分布が大きく異なっていた。そこで、 $[A(\tau_{yz}/HV)]_{\max}$ における試験ローラの硬さと $[A(\sigma_y/HV)]_{\max}$ における試験歯車の硬さが試験片の疲労強度に影響していると考え、それらの硬さと疲労強度の関係を表したのが図 7 である。この図より、Ni 含有率 0.5 %と 3.0 %のそれぞれの試験片において硬さと疲労強度が比例関係になっていることがわかる。このことから、損傷発生箇所における硬さの増加が試験片の疲労強度の向上につながっていることが明らかである。また、Ni 含有率 3.0 %の試験片の硬さは他の試験片に比べて小さいが、Ni に

よるじん性の効果によって試験片の疲労強度が他の試験片と同程度になったと考えられる。

以上の結果、粉末焼結材に熱間鍛造を行うことによって、気孔が小さくなり、材料密度が大きくなるが、それに伴い、硬さも増加している。本研究で使った粉末鍛造歯車は、材料密度の増加、硬さの増加によって疲労強度が大きくなっているとともに、Ni による硬さの低下があっても Ni によるじん性の効果によって疲労強度の低下には至らないことを明らかにした。

4. 結 言

焼結密度 7.01 g/cm³ の焼結ローラには多くの気孔が存在したが、鍛造密度 7.50 g/cm³ の粉末鍛造ローラでは気孔がかなり小さくなり、鍛造密度 7.84 g/cm³ になると気孔を観察できなかった。試験ローラの主な損傷形態はスポーリング損傷であり、試験歯車ではピッチング損傷であった。疲労試験の結果、材料密度が大きくなるほど試験片の疲労強度が大きくなった。また、損傷発生箇所における硬さが大きいほど、試験片の疲労強度が大きくなる傾向があった。さらに、Ni 含有率 3.0 %の試験片における表面付近の硬さは他の試験片に比べて小さかったが、Ni によるじん性の効果によって試験片の疲労強度が他の試験片と同程度になった。

謝 辞

最後に本研究の一部は、文部科学省 科学研究費補助金を得て行われたことを付記する。また本研究で使った試験片を提供していただいた (株) 神戸製鋼所、そして潤滑油を提供していただいた JX 日鉱日石エネルギー (株) に謝意を表す。さらに本研究で用いた治具の製作にご尽力いただいた岡山大学工学部 萩原和彦技術職員に心よりお礼を申し上げる。

文 献

- (1) T.F.Stephenson, S.T.Campbell, et al., Finer Powder Additions Can Make Harder, Tougher Steels, *Metal Powder Report*, Vol.59, No.3 (2004), pp.26-28, 30.
- (2) Q.Zhang, M.Seki, et al., Study on Surface Durability of Powder-Forged Rollers with Case-Hardening, *JSME International Journal*, Series C, Vol.47, No.3 (2004), pp.925-932.
- (3) M.Seki, A.Yoshida, et al., Influence of Shot Peening on Surface Durability of Case-Hardened Steel Gears, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.1, No.4 (2007), pp.518-529.
- (4) K.L.Johnson, *Contact Mechanics*, (1987), p.84, Cambridge University Press.
- (5) D.Dowson, Elastohydrodynamics, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.182, Part.3A (1967-1968), pp.151-167.
- (6) P.H.Dawson, Further Experiments on the Effect of Metallic Rolling Surfaces, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.180, Part.3B (1965-1966), pp.95-100.
- (7) JSME, *Gear Strength Design* (in Japanese), (1979), p.10, JSME.
- (8) K.Fujita and A.Yoshida, Surface Durability of Steel Rollers (In The Case of Case-Hardened and of Nitrided Rollers), *Bulletin of the JSME*, Vol.21, No.154 (1978), pp.761-767.
- (9) K.Fujita and A.Yoshida, Surface Failure of Soft and Surface-Hardened Steel Rollers in Rolling Contact, *Wear*, Vol.55, No.1 (1979), pp.27-39.