高真空無潤滑下における無電解 Ni 合金めっき歯車の摩擦・摩耗*

藤井 正 浩^{*1}, 吉 田 彰^{*1}
原 野 智 哉^{*2}, 大 前 勝 禎^{*3}Friction and Wear of Electroless Ni Alloy Plated Gear
under Non-Lubricating Condition in High VacuumMasahiro FUJII^{*4}, Akira YOSHIDA,
Tomoki HARANO and Katsuyoshi OHMAE^{*4} Department of Mechanical Engineering, Okayama University,
3-1-1 Tsushima-naka, Okayama-shi, Okayama, 700-8530 Japan

A gear test and a two-cylinder test were carried out under non-lubricating condition in high vacuum to investigate the friction and wear behaviors of electroless Ni based alloy plated gears in vacuum. The gear test results were compared with the two-cylinder test results. Three kinds of electroless Ni based alloy platings and two kinds of composite platings with dispersed particles were employed here. In case of the Ni-P alloy plated gear with dispersed PTEE particles, the wear was almost uniform along the tooth profile and the fluctuation of the dynamic load was small. In cases of the Ni-B alloy plating, the Ni-P-B alloy plating and the Ni-P alloy plating with dispersed BN particles, the wear of the gear pairs was large, while the wear of the cylinders was rather small. Though the wear in the two-cylinder test was much smaller than that in the gear test, the average friction coefficients in both the two tests were almost the same with each other.

Key Words: Tribology, Wear, Friction, Vacuum, Gear Test, Two-Cylinder Test, Electroless Plating

1. 緒 言

宇宙, 航空用または半導体製造設備など真空や清浄環境下で使用される機械要素の開発はバルク材の開発とともに表面改質によるところが大きい。また, 油潤滑下においても機械の小型化により機械要素の使用条件は厳しいものとなっており, 接触表面には種々の表面改質の適用が進められている。近年の表面改質技術として, セラミックス被覆, 固体潤滑剤スパッタリングやめっきなど, 表面強さを向上させる種々の方法が開発されているものの, 機械要素へ適用するためには改質表面の摩擦・摩耗特性などの表面強度特性を解明することが必要である。さらに工業面からは, 低コストで高機能を有する改質皮膜を得ることが求められている。本研究は真空中で使用される動力伝達機械要素に適用することを目的として, 比較的低コストの表面改質を施した平歯車の摩擦・摩耗特性を高真空無潤滑下で調べた。

本研究で取り上げる無電解 Ni 合金めっき処理は電子部品のみならずピストンなどの内燃機関のしゅう動

材や歯車, ベアリングなどの広範な工業部品に適用されており⁽¹⁾, 自己潤滑性粒子等を分散させることにより低コストで改質被膜を高機能化できる⁽²⁾。また, Ni と各種の金属を合金化することにより, 種々の合金めっきの開発が進められており, 最近では3元合金めっきとして開発された無電解 Ni-P-B 合金めっきは無電解 Ni-P 合金めっきと比較して優れた摩擦・摩耗特性を大気中油潤滑下で示している⁽³⁾。しかし, 人工衛星の摺動部へ無電解 Ni-P 合金めっきが適用された例はあるものの, 高真空無潤滑下の無電解 Ni 合金めっきの摩擦・摩耗について調べた研究は少なく⁽⁴⁾, ⁽⁵⁾, 動力伝達機械要素へ適用した研究例もみられない。

著者らは, 高真空歯車試験および高真空二円筒試験を行い, 浸硫処理, Sn めっき熱拡散処理, 無電解 Ni-P 合金めっき処理の高真空無潤滑下における摩擦・摩耗を調べた^{(6), (7)}。無電解 Ni-P 合金めっき処理は浸硫処理や Sn めっき熱拡散処理より摩擦係数はやや大きかったが, 無電解 Ni 合金めっきは熱処理によりめっき硬度の増加が可能なことや, 自己潤滑性材料の PTFE 微粒子や BN 微粒子などをめっき中に分散した複合めっきとすることにより, 摩擦低減や耐摩耗性向上などの目的に合わせた摩擦・摩耗制御が可能と考えられるため, 本研究では無電解めっきに着目した。

* 原稿受付 2002 年 7 月 29 日。

^{*1} 正員, 岡山大学工学部(☎ 700-8530 岡山市津島中 3-1-1)。^{*2} 正員, 阿南工業高等専門学校(☎ 774-0017 阿南市見能林町青木 265)。^{*3} 正員, 三菱重工業(株)(☎ 676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1)。

E-mail: fujii@mech.okayama-u.ac.jp

Table 1 Specifications of test spur gear pair

Items	Pinion	Gear
Module	4	
Standard pressure angle	20°	
Number of teeth	19	20
Addendum modification coefficient	0.181	0.168
Reference diameter mm	76.00	80.00
Tip circle diameter mm	85.66	89.55
Center distance mm	79.50	
Face width mm	5	6
Material	SUS440C	
Accuracy	JIS B 1702-Class2	
Tooth surface finishing	Grinding

本研究では無電解 Ni-P 合金めっき、無電解 Ni-B 合金めっき、無電解 Ni-P-B 合金めっきに加えて、無電解複合めっきとして PTFE 粒子または BN 粒子を分散した無電解 Ni-P 合金めっきを取り上げ、これら無電解めっきをステンレス鋼 SUS440C 製の平歯車および円筒に施し、 10^{-4} Pa 台の高真空無潤滑下で歯車試験および二円筒試験を行い、摩擦・摩耗を調べた。さらに、両試験結果を比較検討し、本無電解 Ni 合金めっきにおいて、二円筒試験結果から歯車の摩擦・摩耗を評価することを試みた。

2. 試験片および実験方法

2・1 試験歯車および試験円筒 表 1 および図 1 は本実験で使用した試験歯車の諸元および円筒の寸法・形状を示す。試験歯車および試験円筒の材質はス

Fig.1 Shapes and dimensions of test rollers

テンレス鋼 SUS440C で、焼入れ・焼戻し後研削仕上げされた。無電解 Ni 合金めっき処理は研削仕上げ後の歯車および円筒に施した。表 2 は本文中で使用する無電解 Ni 合金めっきの記号と実験前における各試験片のめっき層硬さ、組成、膜厚、比重、熱処理条件、分散粒子の形状・大きさ、歯形方向または円筒軸方向中心線平均あらさを示す。なお、Ni-P に熱処理が加えられた場合には記号(H)を付して Ni-P と区別して表記し、Ni-P+PTFE では PTFE 分散粒子の含有率の違いを(b)と(c)で区別した。Ni-P+BN の BN 粒子は hBN(六方晶窒化ホウ素)である。めっき硬さ HUT は、薄膜硬度計によるダイナミック硬さであり、母材の影響を受けないよう圧子の押込み深さが膜厚の 10%未満となるよう予荷重および負荷速度を調整した⁽⁸⁾。表 2 の歯車と円筒のめっき硬さには最大 20%程度の差が認められるが、熱処理条件が同じであってもめっき部の形状や大きさにより加熱・冷却速度が異なることや、めっき浴 pH の若干の違いといっためっき製造上のばらつきが原因と考えられる^{(1),(2)}。めっき層硬さは、めっき層の耐摩耗性や摩擦に影響し、一般に硬さが大きいほ

Table 2 Specifications of electroless plated layers

		Ni-P	Ni-P(H)	Ni-B	Ni-P-B	Ni-P +PTFE(c)	Ni-P +PTFE(b)	Ni-P+BN
Thickness of plated layer μm		16	13	13	13	13	13	13
Specific gravity		7.9	7.8	8.6	8.6	6.6	7.9	7.7
Composition mass %		Ni:92, P:8	Ni:92, P:8	Ni:99, B:1	Ni:98, P:1, B:1	Ni:83, P:9, PTFE:8	Ni:88, P:8, PTFE:4	Ni:88, P:8, hBN:4
Heat treatment		—	673K×1h	473K×1h	473K×1h	623K×1h	573K×1h	673K×1h
Grain shape and size μm		—	—	—	—	Sphere 0.2	Sphere 0.4	Pillar 1~5
Surface hardness <i>HUT</i> * Gear/Roller		432/366	606/567	536/578	538/529	—/311	533/404	460/451
Surface roughness μmRa	Gear Tooth profile direction	0.24	0.23	0.58	0.36	—	0.35	0.23
	Roller Faster/Slower	0.33/ 0.07	0.52/0.16	0.59/0.13	0.52/0.09	1.49/0.61	0.54/0.17	0.41/0.11

HUT*: Dynamic hardness measured with the triangle pyramid indenter to make an angle of 68° between the axis and a lateral face

Fig.2 Observation of cross section of rollers before test

ど耐摩耗性が向上すると考えられるため、めっき硬さを考慮し歯車試験と二円筒試験における本めっきの摩擦・摩耗の比較を行う必要がある。

2・2 無電解めっき 無電解めっき処理は、歯車および円筒を脱脂・酸洗した後にいった。無電解めっき処理で用いられた還元剤は、粒子分散複合めっきを含む無電解 Ni-P 合金めっきの場合でホスフィン酸ナトリウム、無電解 Ni-B 合金めっき処理でジメチルアミンボラン、無電解 Ni-P-B 合金めっき処理では両者であった。めっき浴温度は Ni-P、Ni-P+PTFE および Ni-P+BN では 363K、Ni-B および Ni-P-B では 336K であった。めっき後の試験片熱処理は昇温時間約 30 分とし、表 2 に示した熱処理条件で行った後、炉中で徐冷した。図 2 はめっき層の断面観察の一例を示す。いずれの試験片のめっき厚さもほぼ均一であった。Ni-P+PTFE および Ni-P+BN ではステンレス鋼 SUS440C との密着強度を確保するため、無電解めっき処理前にストライク処理として本めっきと母材間に約 1μm の電気 Ni めっきを施した。図 3 は複合めっき円筒表面の粒子分散状態の一例を示す。PTFE 粒子は球形状、BN 粒子は樹枝形状を呈しており、両粒子ともに Ni-P めっき層内でほぼ均一に分布している。

2・3 実験方法 実験は高真空歯車試験機⁽⁶⁾ならびに高真空二円筒試験機⁽⁷⁾を用い、すべて室温で行い、試験片の組み合わせを同じめっき同士とした。真空容器内はロータリーポンプとターボ分子ポンプにより排気し、試験開始直前の真空度は 10^{-4} Pa 台とした。

歯車試験の場合、駆動小歯車側回転速度が 200rpm、ピッチ点における最大ヘルツ接触面圧が 0.74GPa となるよう、伝達トルクを設定した。試験は所定の時間毎

Fig.4 Rolling velocity U , sliding velocity V_s , and specific sliding $\sigma_{1,2}$ of pinion and gear

に停止する断続運転と運転終了まで連続して高真空中で運転する連続運転試験を行った。断続試験では運転停止毎に試験歯車を大気中に曝露し、質量、あらさ、歯形・歯すじ形状の測定および歯面観察を行った。運転中の歯元ひずみの波形を、歯元すみ肉部の側面に貼付けた半導体ひずみ計により測定し、運転中の変動荷重の変化を調べた。

二円筒試験の場合、所定の時間毎に停止される断続試験のみを行い、二円筒間の法線荷重は、図 1 の形状の円筒においてヘルツの最大接触面圧が 0.8GPa となるように加えた。平均転がり速度は 100rpm、滑り率は 30%とした。ここで、滑り率は高・低速両円筒の円周速度差を高速側円筒円周速度で除した値である。試験中の円筒間の摩擦力は、高速側のトルク検出軸に貼付けられたひずみ計によりスリップリングを介して測定し、軸受の摩擦損失トルクを差し引いて求めた。

運転中の歯面および試験円筒の接触表面温度は、測定範囲φ2mm の放射温度計を用いて測定した。放射温度計の応答速度は 1 秒であるため、測定温度は円筒試験では高・低速側両円筒かみ込み側の外周面の平均温度、歯車試験では小歯車の複数歯の作用歯面ピッチ点から歯先までの範囲の平均温度であった。

図 4 は本試験歯車の幾何学的かみあい域内の転がり速度 U 、小・大歯車の滑り率 σ_1, σ_2 、滑り速度 V_s を示す。二円筒試験の V_s は 0.08m/s であり、歯車試験における 1 対かみあい域内 BP、PC 間のほぼ中央の滑り速度に相当する。

表面改質層の実用可否の判断は長時間の運転により摩擦・摩耗を評価した上で行うべきであるが、改質層の摩擦・摩耗特性および寿命は運転開始直後から摩擦挙動が安定するまでの短い運転時間における挙動が大

Fig. 5 Relation between sliding distance L and friction coefficient μ , and wear amount in gear test

きく寄与すると考えられるため、本実験では運転開始直後から比較的短い運転時間における摩擦・摩耗挙動を調べた。

3. 実験結果

図5および図6は歯車および円筒の滑り距離 L と摩耗量および摩擦係数 μ の関係を示す。歯車試験の場合、 μ は Niemann らの計算式⁽⁹⁾により求めた平均摩擦係数であり、 L は幾何学的かみあい域内のすべり速度をかみあい時間で積分し、歯数、総回転数を乗じて求めた。二円筒試験の L は高・低速両円筒の滑り速度に運転時間を乗じて求めた。図5に示した歯車試験における摩耗量は、大・小両歯車の摩耗量の和を、図6に示した二円筒試験における摩耗量は高・低速両円筒の摩耗量の和を示す。

無電解 Ni 合金めっきが施された試験歯車および試験円筒の μ は概ね 0.4 前後であり、未処理の場合より小さい。一方、試験歯車の摩耗量は同じ L の試験円筒の摩耗量と比較して極めて大きい。また、未処理の歯車および円筒の場合、移着が大きく摩耗粉の脱落が生じにくいことにより質量減少量より求めた摩耗量は小さいため、めっきが施された試験歯車および試験円筒の摩耗量は概ね未処理の場合より大きい。

熱処理されていない Ni-P の場合、両試験ともに運転初期から摩耗量が大きく、その後も L の増大とともに摩耗量が増加しているが、 μ は運転初期から小さく、 L の増大に伴う変化も小さかった。Ni 合金めっき中で最高硬度の Ni-P(H) の場合、両試験ともに運転初期で摩耗量が小さいものの μ は大きく、その後 L の増大とともに摩耗量が増加するが μ は減少している。

Fig. 6 Relation between L and wear amount, and friction coefficient μ in two-cylinder test

Ni-P-B および Ni-B の場合、歯車と円筒では摩擦・摩耗挙動が大きく異なっている。試験歯車では運転初期 $L=66$ m から摩耗が大きいが、円筒では摩耗量は非常に小さい。また、二円筒試験の μ は Ni-P-B と Ni-B のいずれの場合も運転中ほとんど変化せず値も小さいが、摩耗の大きい Ni-P-B の歯車試験では、滑り距離の増大に伴い μ は漸増し、運転終了時では未処理とほぼ同程度の値を示している。

つぎに複合めっきの場合について比較する。まず自己潤滑性を示す PTFE 粒子が分散された Ni-P+PTFE では、PTFE 粒子が小さく含有率の大きい Ni-P+PTFE(c) の場合、二円筒試験では運転開始直後では最小の μ を示しているが、その後顕著な摩耗量の増加とともに μ は増大している。なお、歯車試験では運転

直後にめっき層がすべて摩耗すると予想されたため、Ni-P+PTFE(c)の歯車試験は行っていない。PTFE 粒子が大きく含有率が小さい Ni-P+PTFE(b)の場合、試験円筒では運転初期の摩耗量は小さいが、運転開始直後の μ は Ni-P+PTFE(c)の場合よりも大きい。一方、試験歯車では、 μ は比較的小さく運転中の変化も小さい。また、運転終了時の摩耗量もめっき歯車中で最も小さい。

Ni-P+BN の場合、試験歯車の μ は Ni-P-B と同様の挙動を示し、運転とともに漸増し運転終了時では未処理歯車とほぼ同程度の値を示している。また、試験円筒でも、 $L=66\text{m}$ で摩耗量の増加がみられるものの、 μ は Ni-P-B や Ni-B と同程度で運転中の変化も小さい。

歯車試験では所定の時間毎に停止する断続試験と運転終了まで連続して高真空中で運転する連続運転試験を行った。つぎに歯車試験の運転方法による摩擦・摩耗について比較する。連続運転の場合、運転終了時 $L=640\text{m}$ のめっき歯車の摩耗量は、断続運転の場合と比較して小さい。断続運転の場合、試験機起動停止の際の加減速、試験歯車の取り外し、測定および取り付けの一連の作業によるかみあい状態の変化を避けることができず、各運転段階の開始時における摩耗が大きくなると考えられる。しかし、Ni-P(H)を除くめっき歯車の場合、連続運転の μ は断続運転と比較してやや小さいが、 L の増大に伴う μ の変化の傾向は両運転においてほぼ同様であり、連続運転と断続運転でほぼ同じ摩擦挙動を示している。なお、Ni-P(H)の場合、連続運転の場合の摩耗量が断続運転の場合と比較して極めて小さく、運転中の μ がほぼ未処理歯車と同程度であった。Ni-P(H)の連続運転では、測定された歯面温度上昇がめっき歯車中で最大であったことから、移着が大きく摩耗粉の脱落が生じにくかったものと推察できる。なお、断続運転における各試験歯車の最大歯面温度上昇は 8K、連続運転では Ni-P(H)歯車で 103K、Ni-P-B 歯車で 93K、Ni-P 歯車で 73K、Ni-B 歯車で 48K であった。また、断続運転のみが行われた各試験円筒の最大接触面温度上昇は 15K 以下であった。本実験で

は、歯車試験と二円筒試験のいずれの場合も断続試験では接触面の温度上昇は小さく、本実験の断続運転では、摩擦・摩耗に及ぼす接触面温度上昇の影響は小さいといえる。

4. 考 察

4・1 無電解 Ni 合金めっきの摩擦・摩耗

図 7 は試験円筒の軸方向における断面曲線の変化の一例を、図 8 は試験歯車の歯幅中央における歯形変化の一例を示す。試験歯車では全般的に歯形の変化が大きく、摩耗あるいは移着によりかみあい位置での歯形誤差も大きく異なっている。とくに図 5 で摩耗の大きかった Ni-P-B および Ni-B の大歯車ピッチ点付近での摩耗が大きい。一方、試験円筒では図 6 で摩耗の大きかった Ni-P および Ni-P(H)の断面曲線の変化が大きいが、摩耗量の小さい Ni-P-B および Ni-B の断面曲線の変化は極めて小さい。

図 9 は大歯車の摩耗面積率 A_r の変化を示す。摩耗面積率 A_r は、歯すじ方向断面の摩耗面積を表面改質層の断面積で除した値である。すなわち、 $A_r=100\%$ でほぼ改質層が摩耗したことを示す。歯車の場合、歯形のみでは摩耗深さがめっき厚さに達した場合の判断が困難なことに加えて、歯面上で滑り率、滑り速度、面圧がかみあい位置により大きく変化するので、各かみあい位置により摩耗の進行が異なると考えられたため、近寄り側および遠のき側の幾何学的 2 対かみあい域中央およびかみあいピッチ点の 3 箇所で A_r が測定された。なお、図 9 中の各かみあい位置における A_r は全歯の平均値である。

試験歯車中めっき硬度が最大で耐摩耗性の向上が期待された Ni-P(H)の場合、図 5 に示したように運転初期の摩耗量が小さく、 μ は運転初期で 0.5 と大きな値を示した。図 9 の A_r が運転初期において近寄り側および遠のき側で負の値をとっていることから、滑り速度の大きい 2 対かみあい域で移着が生じており、質量減少量から求めた摩耗量は小さく、また摩擦にも悪影

Fig. 7 Variation of profile curves along axial direction of rollers with sliding distance L in two-cylinder test

Fig. 8 Tooth profile curves of test gears

響を及ぼしたと推察される。その後 $L \geq 200\text{m}$ でこの2対かみあい領域の移着が脱落することにより、摩耗量が増大したと考えられる。また、円筒の場合でも歯車と同様の摩耗挙動を示しており、めっき硬度の大きい Ni-P(H) では Ni-P と比較して運転初期では摩耗量が小さく、図7中 $L=66\text{m}$ の断面曲線では移着と見られる高さ $12\mu\text{m}$ の突起が観察されるが、その後 $L > 66\text{m}$ で移着部が脱落し摩耗が進行したと考えられる。二円筒試験の Ni-P(H) の μ は運転初期で試験歯車と同程度の0.5と大きな値を示し、摩耗が増大した $L > 66\text{m}$ で μ が減少したことから、円筒でも摩擦挙動に移着が関与していると考えられる。

3元合金めっきの Ni-P-B の場合、試験歯車の摩耗量は運転初期から運転終了時まで、試験歯車中最も大きかった。図9の A_r の変化からもかみあい全域において摩耗が大きく進行していることがわかる。歯形の変化も運転初期から大きく、運転終了時には大歯車のピッチ点付近での摩耗深さは約 $100\mu\text{m}$ であった。ただし、この部分はピッチ点よりもやや近寄り側にあるため、図9の A_r にはそれほど大きな値として現れていない。 μ は運転初期で0.35程度であったが、図9の A_r の値から判断して、摩耗の進行に伴い部分的な母材の露出が生じており、これに伴い μ は漸増した。一方、試験円筒では摩耗量は極めて小さく、 L に伴う断面曲

Fig. 9 Relation between wear area A_r and L of wheels

線の変化も小さい。運転終了時には低速側円筒に深さ $6\mu\text{m}$ の小さい摩耗痕、高速側円筒に移着とみられる高さ $9\mu\text{m}$ の突起が観察されるが、図6に示したように μ の変化は小さかった。

Ni-B の場合、試験歯車では摩耗量は Ni-P-B の場合と同程度であったが、 A_r および歯形の変化から各かみあい位置での摩耗が一樣でなく、近寄り側では摩耗粉の移着、脱落を繰り返している様子が観察される。また、ピッチ点での摩耗深さは $100\mu\text{m}$ を超え試験歯車中最大であった。一方、試験円筒では摩耗量は試験円筒中最も小さく、図7の断面曲線では運転終了時に移着とみられる高さ $5\mu\text{m}$ 程度の突起が高速側円筒に観察されるが、低速側円筒では摩耗痕はみられず、試験円筒中断面曲線の変化も最も小さかった。また、図6に示したように、 μ の変化は Ni 合金めっき円筒中最も小さかった。

以上、本実験で用いた無電解 Ni 合金めっきでは円筒に比べて歯車の摩耗が大きかった。歯車では、かみ合いの始めおよび終わりにおける歯先稜干渉に加えて各かみあい位置で滑り率、滑り速度が変化し、また歯面に作用する動荷重も比較的大きい。一方、円筒では本試験条件の滑り率、滑り速度が歯車試験の歯面の最大滑り率および最大滑り速度に比べて小さいことに加え、接触面の滑り率、滑り速度および荷重が一定であ

る。このような接触状態の違いにより、歯車では摩耗の進行が速く、円筒では摩耗の進行が緩やかであったと考えられる。とくに、Ni-P に比べて脆性が大きい⁽¹⁾Ni-P-B や Ni-B では歯車と円筒の摩耗挙動が極端に異なっていた。

各めっきの摩擦・摩耗挙動をまとめると、無電解 Ni-P 合金めっきの場合、熱処理による硬さ増大により運転初期段階で耐摩耗性の向上効果が認められたが、運転に伴い摩耗は進行した。還元剤の違いによる摩擦・摩耗挙動の違いとして、歯車と円筒のいずれの場合も摩擦は無電解 Ni-P-B 合金めっきより無電解 Ni-B 合金めっきで小さかった。一方、摩耗挙動は歯車試験と二円筒試験で異なり、歯車では Ni-P-B、Ni-B とともに運転初期から摩耗が大きく進行したが、円筒では摩耗が非常に小さかった。このことは、B と合金を形成する無電解 Ni 合金めっきの場合、熱処理が加えられると硬度が増大する一方で脆化が生じる⁽¹⁾ため、二円筒試験と比較して接触が断続的で、歯面上の滑り率、滑り速度、荷重が大きく変化する歯車試験では摩耗が大きく進行したことが原因と考えられる。

4・2 無電解複合めっきの摩擦・摩耗

Ni-P 合金めっき層中に PTFE 粒子を分散させた Ni-P+PTFE(b)の場合、図5に示したとおり歯車では運転初期の摩耗量が大きかったが、その後の摩耗は小さく運転終了時の摩耗量は試験歯車中最も小さかった。PTFE の潤滑効果により、 μ は運転初期で 0.34 と試験歯車中最も小さく、その後の μ の変化も小さかった。摩耗もピッチ点近傍を除き歯面上でほぼ一様に生じていることが、図8の歯形曲線の変化および図9の A_r の変化から見て取れる。また、歯側面に貼付けられた半導体ひずみ計により測定された歯元ひずみ波形からも、運転に伴う歯元ひずみ波形の変化が試験歯車中最小であったことから、Ni-P+PTFE(b)の歯車では歯面動荷重が小さく良好な運転状態であったといえる。

Ni-P+PTFE(b)の円筒では運転初期の摩耗量は小さかったが、その後摩耗量は漸増し、 μ が増加した $L \geq 44$ m では図7の断面曲線から判断して部分的に母材が露出していたと推察される。また、Ni-P+PTFE(b)と比較して PTFE 粒子含有率が高い Ni-P+PTFE(c)の場合、図6に示したように運転開始直後の μ は 0.12 と試験円筒中最小であり、PTFE の潤滑効果が認められた。しかし、図7の断面曲線には運転初期 $L=22$ m で低速側円筒に深さ 10 μ m 程度の摩耗痕が観察され、部分的に母材の露出に至っていることから、PTFE 粒子の効果は運転初期に限られたと考えられる。

Ni-P めっき層中に BN 粒子を分散させた Ni-P+BN の

場合、試験歯車では摩耗量が運転初期から大きく、また μ は $L \leq 200$ m では Ni-P よりも低い値を示したものの、その後 0.5 まで上昇した。図8に示した Ni-P+BN の歯形の変化は Ni-P-B とほぼ同様であった。また、図9の A_r の変化から運転初期における近寄り側の摩耗が大きいことがわかり、Ni-P-B と同様に近寄り側での部分的な母材の露出が μ 上昇の原因と考えられる。一方、試験円筒の摩耗量は運転初期で極めて小さいものの、その後漸増した。図7に示したように $L \geq 66$ m で低速側円筒では移着とみられる突起や、高速側円筒で大きな摩耗痕がみられ、断面曲線の変化が比較的大きかったが、 μ は運転中ほぼ一定で 0.34 と小さかった。

以上をまとめると、摩擦特性の向上が期待される粒子分散複合めっきとして PTFE 粒子を分散させた場合では、PTFE 粒子の潤滑効果により、歯車試験および二円筒試験ともに無電解 Ni-P 合金めっきより摩擦係数は小さかった。歯車の場合、図8からわかるように運転初期に2対かみあい域で大きく摩耗した後、近寄り側、遠のき側のいずれもほぼ均等で緩やかに摩耗が進んでおり、PTFE 粒子の潤滑効果が認められた。円筒では PTFE 粒子が小さく含有量が多い場合に、PTFE 粒子の優れた潤滑効果が認められたが、その反面摩耗が大きく、その効果は運転初期に限られた。BN 粒子を分散させた場合、かみあい位置により面圧、滑り速度および滑り率の変化が大きい歯車試験では明確な耐摩耗性の向上効果は認められなかったが、面圧、滑り速度および滑り率が一定の二円筒試験では、優れた耐摩耗性に加え、摩耗が生じても摩擦の変化が小さい優れた摩擦の安定性が得られた。

4・3 二円筒試験と歯車試験の比較

図10は断続試験におけるめっき硬さ HUT と体積摩耗量 W_c および平均摩擦係数 μ との関係を示す。 W_c は図7の断面曲線および図9の大歯車の A_r から判断して摩耗深さがめっきの厚さに達した滑り距離での質量減少量を滑り距離とめっきの比重で除して求めた。 μ は摩耗深さがめっきの厚さに達するまでの平均摩擦係数である。図10中の実線は二円筒試験の場合の最小自乗近似曲線を示す。二円筒試験の W_c に及ぼす HUT の影響は大きく、 HUT が大きいほど W_c は減少しているが、歯車試験では W_c と HUT との間に明確な相関は見られない。一方、歯車試験と二円筒試験の μ はほぼ 0.4 付近の値を示しており、両試験の μ の差は小さい。本実験で用いた無電解めっきの Ni 含有量は 83mass%以上であり、めっき被膜の組成に極端な差はない。このため、本実験に用いた無電解 Ni 合金めっきでは摩擦係数に大きな差はなかったと考えられるも

Fig. 10 Relation between HUT and W_c , and μ_c of all specimens

の、歯車試験および二円筒試験ともに μ_c は HUT が大きいほど増加する傾向にある。両試験の摩擦係数は良好な相関がみられ、歯車試験における歯面平均摩擦係数は二円筒試験における平均摩擦係数を用いて評価し得る。

一方、表 2 に示したように試験歯車の HUT は試験円筒より総じて大きかったが、試験歯車の W_c は総じて二円筒試験より大きく、歯車と円筒の摩耗の大小と HUT の間に相関はみられない。歯車試験の接触条件が二円筒試験より厳しいことに加え、ピッチ点前後で滑り方向が逆転することなどの接触状態の違いにより、歯車試験の摩耗は二円筒試験と比較して極めて大きかったものと考えられる。二円筒試験から歯車試験における摩耗を評価するためには、円筒と歯車の接触条件の違いを考慮する必要がある。

5. 結 言

10^{-4} Pa オーダーの高真空無潤滑下で二円筒試験および歯車試験を行い、無電解 Ni 合金めっき表面の摩擦・摩耗について調べ、両試験の比較検討を行った。以上の結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 歯車および二円筒の両試験において、いずれの無電解 Ni 合金めっきも未処理と比較して小さい摩擦を示した。
- (2) 歯車および二円筒の両試験において、熱処理を施した Ni-P 合金めっきの場合、熱処理を施していない Ni-P 合金めっきと比較して運転初期の耐摩耗性は向上したが、摩擦は増大した。
- (3) Ni-P-B 合金めっき、Ni-B 合金めっきおよび BN 粒子を分散した Ni-P 合金めっきの場合、かみ合い位置により面圧や滑り速度が大きく変化する歯車

試験では摩耗が大きく、とくに Ni-P-B 合金めっきや BN 粒子を分散した Ni-P 合金めっき歯車では運転途中でめっき層がすべて摩耗した。一方、面圧および滑り速度一定の円筒試験では、摩耗は小さく、摩擦挙動が極めて安定していた。

- (4) 無電解 Ni-P 合金めっき層中に PTFE 粒子を分散した場合、歯車試験では摩擦、摩耗および歯形誤差のいずれもめっき歯車中最も小さく、各かみ合い位置の摩耗がほぼ均一であり、歯面動荷重も小さかった。
- (5) 歯車試験における断続運転と連続運転の摩擦はほぼ同じ挙動を示したが、連続運転した場合の摩耗は断続運転した場合より緩やかに進行した。
- (6) 本試験条件の場合、歯車試験の摩耗は二円筒試験より極めて大きかったが、両試験の平均摩擦にはよい相関があった。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金によって行われたことを付記し、謝意を表す。また、試験円筒に無電解 Ni 合金めっき処理を施して頂いた日本カニゼン株式会社に謝意を表す。

文 献

- (1) 林忠夫・松岡政夫・縄舟秀美、無電解めっき基礎と応用、日刊工業新聞社、(1994)。
- (2) 津久井豊、めっきとトライボロジー、月刊トライボロジー、7(1999)、54-55。
- (3) 仙波忠雄、無電解 Ni-P・Ni-B めっきと Ni-P-B 無電解めっきの物性について、機能性非晶質めっき専門部会例会テキスト、39(1995)、1-8。
- (4) 西羅正芳・山岸憲史・鷹野修、表面技術、44(1993)、140。
- (5) Gao HUSHENG, Gu HAICHENG and Zhou HUIJIU, Sliding wear and fretting fatigue resistance of amorphous Ni-P coatings, *Wear*, 142(1991)、291-301。
- (6) 吉田彰・藤井正浩・原野智哉・三浦健蔵、表面改質された SUS440C 製平歯車の高真空中における摩擦・摩耗特性、日本機械学会論文集(C 編)、64-632(1999)、2034-2041。
- (7) 吉田彰・藤井正浩・原野智哉・三浦健蔵、表面改質ローラの高真空中における摩擦・摩耗、日本機械学会論文集(C 編)、65-633(1999)、2034-2041。
- (8) 松田健次・兼田禎宏、めっき材のピッカース庄こん形状に及ぼす下地・めっき材の影響、トライボロジー会議予稿集東京、(1999)、19-20。
- (9) G. Niemann and H. Winter, *Maschinen-elemente*, Band II, (1983)、220, Springer Ver.