四球試験におけるすずめっき熱拡散処理層の摩擦特性* (ステンレス鋼 SUS 440 C 材の場合)

灘 野 宏 正*¹, 河 野 正 来*¹
中 迫 正 一*¹, 中 村 之*²

Frictional Characteristics of Thermally Diffused Layer after Sn-Plating in Four-Ball Test (Case of Stainless Steel SUS 440 C)

Hiromasa NADANO, Masaki KOHNO,
Masakazu NAKASAKO and Itaru NAKAMURA

In an attempt to clarify the effect of the Sn-diffused layer on the seizure resistance and the frictional characteristics of a stainless steel ball, a four-ball test was carried out. From the test, the following results were obtained. (1) Under dip-feed lubrication, the seizure resistance of the Sn-diffused ball was increased with increasing thickness of the Sn-diffused layer. The seizure resistance of the ball in which the diffused layer was 10 μm thick was about 6 times larger than that without a diffused layer. (2) Under thin-film lubrication, the longest running time was evidenced at the incipient stage of seizure in which the diffused layer was 6 μm thick.

Key Words: Sn-Diffused Layer, Seizure Resistance, Thin Film Lubrication, Dip-Feed Lubrication, Four-Ball Test, Frictional Characteristics

1. 緒 言

耐食性の高いステンレス鋼歯車は食品加工や化学プラント等の動力伝達部に主として使用されている。しかしながら、炭素鋼や軸受鋼と比してステンレス鋼の場合の熱伝導率は 1/4 程度⁽¹⁾であり、接触面上に発生した摩擦熱の拡散性が悪く、しかも硬さが低いため凝着摩耗やスコアリングが発生しやすく、ステンレス鋼歯車の使用は比較的低負荷領域に限られる。

近年、動力伝達機構の大形化や高速化に伴って、上述の歯面損傷に対して高い負荷性能を有するステンレス鋼歯車が必要であり、熱処理や摩擦特性の良好な被膜処理などによる歯面の改質が要求される。

前報⁽²⁾および本報における研究目的は大、小歯車の材質が同じ組合せの歯車対、ステンレス鋼 SUS 304 同士および SUS 440 C 同士(大、小歯車の歯数がそれぞれ 44, 36; モジュールが 2 mm; 小歯車の回転数が 500 rpm)の場合を想定した高い負荷性能を得るため

の歯面の改質に関する基礎的研究である。歯車の場合において、スコアリングによる歯面損傷は歯面温度が最大となる大歯車の歯先と小歯車の歯元のかみあい位置に発生するものと考えられ、この位置における滑り速度は約 0.49 m/s である。

前報では、上述の滑り速度に相当する回転数(回転球の回転数: 800 rpm)で、回転球、固定球の材質が SUS 304 同士の場合について四球試験を行った。しかしながら、試験開始直後に焼付きを発生し、すずめっき熱拡散処理⁽³⁾による拡散層の摩擦特性が検討できないため、回転球の材質を市販の高炭素クロム鋼 SUJ 2 に変更した。この結果、すずめっき熱拡散処理層(以下、拡散層と称する)は良好な摩擦特性を示し、拡散層の焼付き強さは未処理の場合に比して 2.6 倍程度向上することを明らかにした⁽²⁾。しかしながら、本来の研究目的である同じ材質からなる歯車対に拡散処理を施した場合の負荷性能に関しては、前報の四球試験結果より言及できない。

本報では、前報の実験結果を考慮して、比較的高負荷の機械要素に使用されるステンレス鋼 SUS 440 C の場合の拡散層の摩擦特性および焼付き強さについて、前報と同様な実験条件のもとで四球試験を行った。ただし、回転球および固定球の材質は SUS 440 C

* 平成 5 年 11 月 20 日 九州支部・中国四国支部合同企画・鹿児島地方講演会において講演、原稿受付 平成 5 年 2 月 12 日。

*¹ 正員、呉工業高等専門学校 (〒737 呉市阿賀南 2-2-11)。

*² 同和鉱業(株)サーモテック事業本部 (〒223 横浜市港北区箕輪町 2-6-26)。

とした。回転球の回転数に関しては、800 rpm の場合、試験開始直後に焼付きを発生したので、回転球の回転球を 400 rpm とした。

2. 試験方法

2.1 試験球 回転球および固定球には 1060°C で油焼入れ後、150°C で焼戻した市販のステンレス鋼球 SUS 440 C (マルテンサイト系) を使用した。表面のビッカース硬さは約 780HV、表面あらさは $R_{\max}=0.1\ \mu\text{m}$ である。鋼球の直径および平均真球度はそれぞれ 19.05 mm, 0.18 μm である。表 1 に試験球の化学成分 (mass%) を示す。試験球の表面処理工程としては、アルカリ脱脂し、洗浄および酸化膜除去の前処理をした。その後、すずめっきを行い、約 400°C に保持された炉中で熱拡散処理を行い、表 2 に示す試験球を作成した。なお、拡散層の厚みは EPMA により計測した平均値を示し、熱拡散処理のめっき層の厚さに比して約 20% 減少する。熱拡散処理後の表面あらさは各試験球とも $R_{\max}=2.5\ \mu\text{m}$ で、表面は半光沢の灰色被膜で覆われる。なお、X 線回折による計測結果では、表面層には FeSn_2 の金属間化合物が認められる。

表 1 試験球の化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
SUS440C	1.01	0.18	0.41	0.025	0.003	16.89	0.17	0.47

表 2 試験球のすずめっき熱拡散処理

Ball pair	Thickness of diffused layer μm
A 0	0
B 4	4
C 6	6
D 8	8
E 10	10

図 1 試験球 E 10 の断面の EPMA 像

一例として、図 1 に試験球 E 10 の場合の断面の EPMA により計測した Sn-La 像を示す

Sn 粒子が高濃度に分布した拡散層の厚みの最大値は 10 μm 程度で、その厚みは不均一である。また光学顕微鏡による断面の観察では、すずの拡散によって生じた空孔をもつ、厚みが 0.5 μm 程度の層が拡散層の上に認められる。拡散層の硬さは約 700HV で、母材の硬さと比してわずかに低い。なお、母材の硬さは拡散処理によって変化しない。

2.2 試験機 試験機としては、既報⁽²⁾と同様な曾田式四球試験機を使用した。垂直荷重は潤滑油容器に油圧を加えて与え、運転中における摩擦力の変動は潤滑油容器の一端に板ばねを接触させ、その変化をひずみゲージにより検出して測定した。

油浴潤滑における焼付き試験の場合には、回転球の約 1/3 がつかる油浴潤滑の状態で行い、油温はほぼ室温 (25°C) とした。潤滑油としては無添加タービン油 (ISO VG 46; 動粘度: 40°C で 48 mm^2/s , 100°C で 7 mm^2/s) を使用した。回転球の回転数は 400 rpm (滑り速度: $V_s=0.23\ \text{m/s}$) 一定とし、負荷過程は単位球当たりの垂直荷重 $P_n=86\ \text{N}$ から約 40 N ずつ 1 min ごとに段階的に上昇させた。各試験段階では、最初の 30 s を荷重上昇区間、残りの 30 s を荷重一定区間として、焼付きが発生するまで連続的に運転を行った。

一方、薄膜潤滑における焼付き試験の場合には、潤滑油を薄く試験球に塗布した状態で試験機に取付け、無給油の状態で行い、焼付きが発生するまで連続的に運転を行った。回転球の回転数は油浴潤滑の場合と同様 400 rpm、垂直荷重は $P_n=368\ \text{N}$ (ヘルツ接触応力 $p_0=3.45\ \text{GPa}$) 一定とし、雰囲気温度は室温とした。

図 2 固定球の摩耗径と垂直荷重の関係 (油浴潤滑)

3. 実験結果および考察

3.1 油浴潤滑

3.1.1 摩耗こん 図2は3個の固定球に発生した摩耗こんを測微顕微鏡により測定した場合の滑り方向に沿った摩耗こん直径の平均値 d と垂直荷重 P_n の関係を示す。

試験開始時 ($P_n=86\text{ N}$) におけるヘルツ接触応力 p_0 は約 2.1 GPa であり、試験球の圧縮降伏強さに比してかなり大きい⁽⁴⁾。したがって、本実験の場合、試験開始時において、試験球の接触面は既に塑性変形に近い状態にあり、試験球 A 0 の場合を除いて摩耗こん直径はヘルツ接触円より大きく現れる。

$P_n=500\text{ N}$ までは、すずの拡散によって生じた空孔をもつ層およびその近傍に形式される拡散層の摩耗が進み、摩耗こんの直径は荷重の上昇に伴って増大しており、摩耗量の多い初期摩耗の状態を示す。しかしながら、 $P_n=500\text{ N}$ を超えると、接触路上には Sn 粒子の分布濃度が多い拡散層が現れるため、荷重の上昇に伴う摩耗こんの直径の増加が小さく、摩耗量が少ない

定常摩耗の状態を示す。なお、EHL 油膜厚さの計算式⁽⁶⁾を用いて計算した場合、 $P_n=86\text{ N}$ における油膜厚さ h_0 は $1.53\text{ }\mu\text{m}$ で、 λ 値⁽⁶⁾は約 2.49 となり、接触面は混合潤滑に近い流体潤滑状態にあるものと考えられる。しかしながら、試験球 A 0 の場合の焼付き荷重 ($P_n=167\text{ N}$) における h_0 は $0.27\text{ }\mu\text{m}$ で、 λ 値は約 0.44 となり、接触面は境界潤滑状態を示しており焼付きが発生したものと考えられる。ただし、 $\lambda=h_0/S$ 、 h_0 : 油膜厚さ、 S : 上、下鋼球の接触面の自乗平均平方根あらさ rms の平均値。

一例として、焼付きが発生した試験球 E 10 の場合の回転球に生じた接触路の EPMA 観察結果を図3に示す。図3中、(a)は接触路の一部を示す。接触路の中央部には溶着部のせん断や掘り起しによってできた損傷の著しい引っかき傷が接触点の移動方向に沿って認められる。(b)は損傷の著しい中央部を拡大観察した SEM 像を示し、(c)は(b)と同じ位置における Sn-L α 像を示す。損傷の著しい部分では拡散層は消失し、母材が露出する。しかしながら、比較的平滑な接触路上には高密度のすずの存在を示す拡散層が残留しており、焼付きの早期発生を阻止したものと推定される。

3.1.2 摩擦係数 図4は摩擦係数 μ と垂直荷重 P_n の関係を示す。摩擦係数の測定はそれぞれの試験球について3回以上行っており、そのうちの代表的な一例を示す。図4中の記号 S は焼付きを表し、矢印で示した荷重段階で焼付きが発生したことを示す。

拡散処理を施さない試験球 A 0 の場合、摩擦係数は荷重の増加に伴って上昇し、 $P_n=200\text{ N}$ で焼付きが発生する。しかしながら、この場合の摩擦係数は拡散処理した場合のそれと比してかなり低い。

一方、拡散処理を施した試験球の場合では、拡散層の厚みが $4\text{ }\mu\text{m}$ の場合の摩擦係数が最も大きく、拡散

(a) Wear scar

(b) SEM image [(a)の□部の拡大図]

(c) Sn-L α image

図3 焼付きが発生した試験球 E 10 の場合の回転球に生じた接触路の EPMA 像(油浴潤滑)

層の厚みの増大に伴って摩擦係数は低下する。また、 $P_n=400$ Nまでは荷重の増加に伴って摩擦係数は上昇する。しかしながら、 P_n が 500 N を超えると摩擦係数は一定値を示し、焼付き直前までこの状態が続く。これは、最表面の多孔質層が摩耗した後、接触面は摩擦特性の良好で平滑な拡散層で覆われるため、真実接触部の凝着が阻止され摩擦係数が安定し、焼付き強さが向上するものと考えられる。

3・1・3 焼付き荷重 各試験球について、焼付きにより運転の継続が不能になった場合の垂直荷重 P_n と拡散層の厚みの関係を図 5 に示す。焼付き荷重の測定はそれぞれの試験球について 3 回ずつ行っており、その平均値を示す。焼付き荷重に関しては、試験球 E 10 の場合を除いたほかの試験球の場合、荷重段階で 1 段階(約 40 N)変動しており、焼付き荷重に対する再現性は極めて良好である。拡散処理を施した場合の焼付き強さは拡散層の厚みの増加に伴って向上し、拡散層の厚みが 10 μm 程度で焼付き強さはほぼ飽和状態となる。また、拡散処理を施さない試験球と比較して拡散処理を施した試験球 E 10 の場合の焼付き強さは 6 倍程度向上しており、ステンレス鋼 SUS 440 C に対するすずめつき熱拡散処理法は摩擦面の改質に極めて有効な一方策と考えられる。

3・1・4 焼付き臨界温度 各試験球に対して、焼付き直前の表面温度上昇の計算値 θ_f と試験球の本体温度 θ_b の和を焼付き発生時の臨界温度 θ_{cr} として図 6 に示す。なお、 θ_f の計算には熱源の熱量の分布密度を放物線状とした場合の計算式⁽⁴⁾を使用した。また、摩擦係数および接触面の大きさは実測値を使用し、試験球の熱的物性値としては、表 3 の値⁽¹⁾を使用した。 θ_b に関しては、3 個の固定球に囲まれた空間の中央に設置した熱電対による油温の実測値を使用し、この部分における油温はほぼ固定球の本体温度に等しいと考え

られる。

拡散処理を施した各試験球の場合の焼付きに対する臨界温度 θ_{cr} の平均値は約 160°C であり、拡散処理を施した試験球の場合の焼付き強さは接触面の臨界温度の計算により精度よく評価できるものと考えられる。また、拡散処理を施した試験球の場合の θ_{cr} は拡散処理を施さない試験球の場合のそれと比して約 2 倍上昇しており、すずめつき熱拡散処理により焼付き強さは著しく向上する。

3・2 薄膜潤滑

3・2・1 摩擦係数 図 7 は $V_s=0.23$ m/s で $P_n=368$ N の場合の運転時間の経過に伴う摩擦係数の変化を示す。摩擦係数の測定はそれぞれの試験球について 3 回以上行っており、そのうちの代表的な一例を示す。図 7 中の記号 S は焼付きを表し、矢印の位置で焼

図 5 焼付き荷重と拡散層の厚みの関係(油浴潤滑)

図 4 摩擦係数と垂直荷重の関係(油浴潤滑)

図 6 焼付き発生時の臨界表面温度(油浴潤滑)

付きが発生したことを示す。

拡散処理を施さない試験球 A 0 の場合、試験開始から 20 s 程度経過した後、運転不能となる。試験球 B 4 の場合では、安定した摩擦係数を示す時間帯は試験球 E 10 を除いた試験球の場合のそれらと比してかなり短く、拡散層の形成が不十分と考えられる。他方、試験球 E 10 の場合、運転時間の経過に伴って摩擦係数は上昇し、試験球 C 6 および D 8 の場合と比して早期に焼付きが発生する。これは以下のように考える。試験球 E 10 の場合の拡散層は比較的厚く、最表面の多孔質層や拡散層の摩耗が進み、それらの摩耗片の一部が接触部に侵入し、ざらつき摩耗 (abrasion) が促進されるため、摩擦係数が上昇し、焼付きに至る。なお、試験球 B 4, C 6, D 8 の場合にも、ざらつき摩耗は発生する。しかしながら、これらの試験球の場合の拡散層の厚みが薄いため、拡散層の摩耗が少なく、固定球に発生した摩耗こん周辺の接触開始点付近に集積した黒色のペースト状の集積物の量は E 10 の場合のそれと比してかなり少ない。光学顕微鏡による集積物の検鏡では、拡散層の摩耗片が多く観察された。したがって、摩耗粉が摩擦面間に混入される可能性は E 10 の場合がほかの試験球の場合と比して大きいものと考えられる。

一例として、試験球 E 10 の場合において摩擦係数

表 3 試験球の熱的定数値⁽¹⁾

	SUS440C
Thermal conductivity K, W/(m K)	29.27
Thermal diffusivity κ , m ² /s	7.38×10^{-6}
Specific heat c, J/(kg K)	502
Density ρ , kg/m ³	7900

図 7 運転時間の経過に伴う摩擦係数の変化 (薄膜潤滑)

の上昇が顕著に現れる運転開始後 12 min における回転球に生じた接触路の EPMA 像を図 8 に示す。図 8 中、(a)ではすずの拡散によって生じた空孔が接触路上に多数あり、引っかきにより発生した条こんが接触路の中央部に数条認められる。しかしながら、接触路面は比較的平滑である。(b)は(a)と同じ位置における Sn-L α 像を示す。引っかきこんを除いた接触路上には高密度のすずの存在を示す摩擦特性の良好な拡散層が残留しており、最終的な焼付きの発生を遅延したものと考えられる。

3・2・2 焼付きに対する時間強度 各試験球について、焼付きが発生するまでの運転時間と拡散層の厚みの関係を図 9 に示す。すず拡散層の厚みが 6 μ m の試験球の場合、焼付きが発生するまでの運転時間は最も長く、油浴潤滑の場合と同様、薄膜潤滑の場合においても、すず拡散層は焼付きに対する時間強度の向上に極めて効果的であることが明らかになった。しかしながら、薄膜潤滑の場合では、拡散層の形成が厚すぎると、拡散層の摩耗が進み接触面のざらつき摩耗が促進されるため、焼付きに対する時間強度は低下する。

なお、前報の場合では、すず拡散層の厚みが 4 μ m

(a) SEM image

(b) Sn-L α image

図 8 試験球 E 10 の場合の回転球に生じた接触路の EPMA 像 (薄膜潤滑)

図 9 焼付き発生までの時間強度と拡散層の厚みの関係 (薄膜潤滑)

以上になると焼付き発生までの時間強度は拡散層の厚みに無関係にほぼ一定値を示しており、本報の場合と比較して、拡散層の厚みに対する焼付き発生までの時間強度の傾向は著しく異なる。これは以下のように考える。前報の場合では固定球のみ拡散処理を施しており、本報の場合のように回転球および固定球とも拡散処理を施した場合には、最表面の多孔質層や拡散層の摩耗量が前報の場合と比較して極めて多い。したがって、拡散層の厚みが $6\mu\text{m}$ を超えた場合、摩耗片の侵入による接触面のざらつき摩耗が促進されるため、焼付きに対する時間強度が低下したものとする。

4. 結 言

四球試験機を使用して、油浴潤滑および薄膜潤滑の場合についてすずめっき熱拡散処理を施したステンレ

ス鋼 SUS 440 C の摩擦特性を検討した結果、次のことが明らかになった。

(1) 油浴潤滑の場合では、拡散処理を施した場合の焼付き強さは拡散層の厚みの増加に伴って向上する。また、拡散処理を施さない試験球と比較して $10\mu\text{m}$ 程度の拡散層を施した場合の焼付き強さは 6 倍程度向上しており、ステンレス鋼 SUS 440 C に対するすずめっき熱拡散処理法は摩擦面の改質に極めて有効な一方策と考えられる。

(2) 油浴潤滑の場合、拡散処理を施した各試験球の場合の焼付きに対する臨界温度 θ_{cr} の平均値は約 160°C であり、拡散処理を施した試験球の場合の焼付き強さは接触面の臨界温度の計算によりかなり精度よく評価できる。

(3) 薄膜潤滑の場合では、拡散層の厚みが $6\mu\text{m}$ の試験球の場合、焼付きが発生するまでの運転時間は最も長く、すず拡散層は焼付きに対する時間強度の向上に極めて効果的である。しかしながら、拡散層の形成が厚すぎると、拡散層の摩耗が進み接触面のざらつき摩耗が促進されるため、焼付きに対する時間強度は低下する。

文 献

- (1) 日本金属学会・日本鉄鋼協会編, 鉄鋼材料便覧, (1967), 608, 丸善.
- (2) 灘野・河野・長尾, 機論, 58-553, C(1992), 2750.
- (3) 岩野・殿塚, 金属材料, 15-4(1975), 23.
- (4) 寺内・灘野, 機論, 47-423, C(1981), 1502.
- (5) Wedeven, L. D., Evans, D. and Cameron, A., *Trans. ASME, Ser. F*, 93-3(1971), 349.
- (6) Wellauer, E. J. and Holloway, G. A., *Trans. ASME, Ser. B*, 98-2(1976), 626.