四球試験, 二円筒試験および歯車試験における 被膜の焼付き強さの相関性について*

寺内喜男**, 灘野宏正***, 河野正来***

On the Relation between Seizure Resistances of Coatings in Four Ball Tests, Two Roller Tests and Gear Tests

by Yoshio TERAUCHI, Hiromasa NADANO, and Masaki KOHNO

To clarify the seizure resistance and the frictional characteristics of rollers with various coatings, two roller tests on rollers coated with copper, graphite and molybdenum disulfide were carried out using an Amsler machine, and the flash temperature rise on the contacting surface when the rollers were seized was calculated. Further, the relation between the test results in the two roller machines and the previous test results in a Soda-type four ball machine and a power-circulating gear machine on the seizure resistance and the frictional characteristics of the coatings were estimated. From the experimental results a considerable relation between the seizure resistance in the two roller tests and the scoring resistance in the gear tests was recognized, and the variation in the coefficient of friction in the two roller tests was different from that in the four ball tests.

Key Words: Gear, Lubrication, Coatings, Seizure Resistance, Two Roller Test, Four Ball Test, Gear Test

1. 緒 言

歯面になじみ性, 熱伝導特性, 潤滑性の良好な被膜を施すことにより, 歯車のスコーリングに対する負荷容量の向上が期待できる。著者らもすでに, 動力循環式歯車試験機によるスコーリング試験^{(1)~(3)}および四球試験機による焼付き試験⁽³⁾⁽⁴⁾を行い, 各種の被膜を施した歯車のスコーリング強さおよび鋼球の焼付き強さについて, 表面温度の観点から検討を行った。本研究では, 負荷装置を改造したアムスラー摩擦試験機を使用して二円筒試験を行い, 二硫化モリブデン被膜, グラファイト被膜および銅めっきを施した円筒の焼付き強さおよび摩擦特性を調べた。

また, 一般に四球試験機, 二円筒試験機, 歯車試験機の間の相関性を調べておくことは焼付き強さの評価をする際の重要な問題であると考えられる。しかしながら, このような問題に関して各種試験機間の相関性を調べた報告⁽⁵⁾は数少ない。したがって, 本研究ではアムスラー摩擦試験機による実験結果と既報の歯車試験機および四球試験機による実験結果に関して比較,

検討を行い, 被膜の焼付き強さおよび摩擦特性に関する各試験機間の相関性を調べた。

2. 実験方法

2.1 試料 四球試験および二円筒試験に使用した試験鋼球および試験円筒の諸元を表1に示す。また, 歯車試験に使用した試験歯車の諸元を表2に示す。試験鋼球は1173 Kで焼入れ後, 443 Kで焼もどして被膜処理を行った。コーティング前の鋼球の平均真球度は $0.12\mu\text{m}$, 表面のビッカース硬さは約800HVである。試験円筒(たる形試験片, 円筒形試験片)は1173 Kでガス浸炭後, 1073 Kで油焼入れして研削仕上げを行っており, 表面のビッカース硬さは約720HVである。なお, たる形試験片の研削仕上げにおいては, 砥石が凹面円弧状に動く自作の研磨機を使用した。コーティング前の円周方向の表面あらさはたる形試験片では約 $3\mu\text{m}R_{\text{max}}$, 円筒形試験片では約 $2\mu\text{m}R_{\text{max}}$ であった。また, 軸方向の表面あらさは, たる形試験片では約 $6\mu\text{m}R_{\text{max}}$, 円筒形試験片では約 $3\mu\text{m}R_{\text{max}}$ であった。試験歯車は, 同様にガス浸炭焼入れ後, ライスハウ研削を行っており, JIS 0級に仕上げられている。

2.2 被膜処理 鋼球, 円筒および歯車の表面に施した被膜処理および被膜と表層の熱伝導率を表3に

* 昭和60年8月28日 第22回シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 昭和60年10月25日。

** 正員, 広島大学工学部 (〒724 広島市西条町下見)。

*** 正員, 呉工業高等専門学校 (〒737 呉市阿賀南2-2-11)。

示す。被膜処理の方法については、既報⁽²⁾に述べたとおりである。被膜の厚さはいずれも約 10 μm とし、両試験片に同一の被膜を施した。被膜の熱伝導特性は大幅に異なり、銅めっき (試験 C) およびグラファイト被

膜 (試験 G) の熱伝導率は、試験片母材の SUJ 2 および SCM 415 H のそれに比してかなり大きい。したがって、試験 C および試験 G の場合には摩擦熱の拡散による瞬間温度上昇の低下が期待できる。一方、二硫化モリブデン被膜 (試験 M) の熱伝導特性はきわめて悪い。

表 1 試験鋼球および試験円筒の諸元

	Test piece	Diameter mm	Width mm	Material
Four ball test	Rotatory ball	19.05	—	SUJ2
	Stationary ball	19.05	—	
Two roller test	Barrel*	40.0	10	SCM415 H
	Cylinder	40.0	10	

* Crowning radius : 20 mm

表 2 試験歯車の諸元

	Pinion	Wheel
Number of teeth z	18	40
Center distance mm	116	
Pressure angle α_0	20°	
Module m mm	4	
Backlash S_n mm	0.5	
Face width B mm	10	
Effective face width B_f mm	7	
Tooth profile	Standard	
Pitch circle diameter d_0 mm	72	160
Outside diameter d_1 mm	80	168
Material	SCM 415 H	

表 3 被膜処理および材料の熱伝導率

Test	Surface treatment	Thermal conductivity of surface layer $W/(mK)$	
M	MoS ₂ coating	0.14	
U	Uncoated	SUJ2	27.6
		SCM415 H	24.0
G	Graphite coating	151	
C	Cu-plating	379	

2・3 試験機 四球試験では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、その変位をひずみゲージにより検出して測定した。二円筒試験では、負荷装置を油圧により制御できるように改造したアムスラー摩擦試験機を使用した。垂直荷重は上部試験円筒を保持する機枠に油圧シリンダを取付けて油圧を加えて与え、荷重センサにより垂直荷重を検出した。また、摩擦力は試験機に連結された振り子の変位を差動トランスにより検出して測定した。歯車試験では動力循環式歯車試験機を使用した。

2・4 試験条件 四球試験 (FB)、二円筒試験 (TR 1, TR 2) および歯車試験 (GE) における試験条件を表 4 に示す。四球試験における負荷過程は、各試験段階の最初の 10 s を荷重上昇区間、残りの 20 s を荷重一定区間とした。二円筒試験における負荷過程は、各試験段階の最初の 10 s を荷重上昇区間、残りの 50 s を荷重一定区間とした。歯車試験では、単位歯幅当たりの歯面荷重 266 N/mm 一定のもとで、歯車の回転速度を段階的 (18 段階) に増加させた。速度段階で歯車のスクーリングが発生しない場合には、小歯車の回転速度を 10 372 rpm 一定にして歯面荷重を段階的 (10 段階) に 390 N/mm まで増加させた。なお、四球試験および二円筒試験の場合には、焼付きが生じるまで連続的に試験段階を上昇させた。一方、歯車試験の場合には、各試験段階ごとに約 2 h 以上試験機を休止し

表 4 試験条件

	Test piece	Revolution speed rpm	Specific sliding	Normal load P_n		Time of unit test range
				Initial load	Increment	
Four ball test (FB)	Rotatory ball	500	1	46.0 N	40.0 N	30 s
	Stationary ball	0	$-\infty$			
Two roller test (TR1)	Barrel	344	-2.07	974 N	243 N	1 min
	Cylinder	1056	0.67			
Two roller test (TR2)	Cylinder	344	-2.07	97.4 N/mm	24.3 N/mm	1 min
	Cylinder	1056	0.67			
Gear test (GE)	Pinion	2000 ~ 10372	-6.68 ^(a)	266 N/mm	12.4 N/mm ^(c) (10372 rpm)	4.4 × 10 ⁴ revolutions ^(d)
	Wheel	900 ~ 4667	0.87 ^(b)			

(a) Root of pinion

(b) Tip of wheel

(c) The load was increased after the tests of 18 speed ranges were finished.

(d) Total revolutions of pinion

た。

2.5 潤滑油 潤滑油はいずれの試験の場合も無添加鉱油#140タービン油(動粘度, 323 K: $28 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 363 K: $8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)を使用した。各試験における潤滑方法を表5に示す。四球試験の場合には回転球(上球)の約1/3がつかる油浴潤滑の状態で行った。この場合、潤滑油容器内の潤滑油の温度は試験機の運転時間の経過につれて上昇し、焼付き発生時には油温は最高約323 Kに達した。二円筒試験の場合には強制潤滑とし、潤滑油は両試験円筒のかみこみ側に吹き付けた。この場合、油槽内の潤滑油(約20 L)の温度は焼付き発生時には最高約313 Kに達した。歯車試験の場合には同様に強制潤滑とし、潤滑油は大、小歯車のかみこみ側に吹き付けた。

3. 実験結果および考察

3.1 摩擦係数 四球試験FBの場合の摩擦係数 μ と単位球当たりの垂直荷重 P_n の関係を図1に示す。ただし、記号Sはそのつぎの試験段階において焼付きが生じたことを表す。また、摩擦係数の測定は4種類の試験球についてそれぞれ2回ずつ行っており、そのうちの一方を示す。なお、2回の測定値はほぼ同

表5 潤滑方法

Test	Lubricating method	Supply rate of oil L/min	Initial oil temperature K
FB	Bath lubrication	—	303
TR1 TR2	Forced lubrication	0.3	293
GE	Forced lubrication	0.6	323*

* The oil temperature was controlled to $323 \pm 2 \text{ K}$ during all tests.

図1 四球試験の場合の摩擦係数と単位球当たりの垂直荷重の関係

様な傾向を示す。

図1に見られるように、荷重約0.2 kNから0.65 kNの区間では被膜を施した試験球M (MoS_2 被膜)、試験球G (グラファイト被膜) および試験球C (銅めっき) の場合の摩擦係数は、試験球U (被膜なし) の場合のそれに比してかなり小さく、被膜の効果が顕著である。とくに、試験球C (銅めっき) の場合には、荷重約0.3 kN以後、摩擦係数は荷重の増加につれてしだいに低下し、荷重約0.8 kNで摩擦係数は最低値を示す。しかしながら、その後摩擦係数は急激に上昇し、いったん低下するものの再び上昇して焼付きを生じる。また、被膜を施した試験球の場合の焼付き直前における摩擦係数の値は、被膜なしの試験球Uのそれに比してほぼ同じか逆にかなり大きな値を示す。

たる形試験片と円筒形試験片の組合せによる二円筒試験TR1の場合の摩擦係数 μ と垂直荷重 P_n の関係を図2に示す。摩擦係数の測定は4種類の試験円筒についてそれぞれ3回以上行っており、その典型的な結果を示す。いずれの試験円筒の場合も試験開始直後の摩擦係数は最高値を示し、荷重の増加につれて摩擦係数はしだいに低下する。とくに、試験円筒Cの場合にはその傾向が顕著で、試験開始直後の摩擦係数はきわめて大きな値を示し、その後荷重の増加に伴って摩擦係数は急激に低下する。これは、被膜が摩擦力や摩耗の作用により均一に摩耗し、接触面が平滑になったためと考えられる。試験片どうしが純粋すべり接触をする四球試験の場合(図1)とところがり-すべり接触をする二円筒試験TR1の場合とを比較すると、摩擦係数の変化は大幅に異なる。また、二円筒試験TR1の場

図2 二円筒試験TR1の場合の摩擦係数と垂直荷重の関係

合には, 四球試験の場合のような焼付き前の摩擦係数の上昇はほとんどなく, 二円筒試験 TR 1 における焼付き直前の摩擦係数はいずれの場合もほぼ 0.06 である。

円筒形試験片どうしの組合せによる二円筒試験 TR 2 の場合の摩擦係数 μ と単位幅当たりの垂直荷重 P_n の関係を図 3 に示す。ただし, 試験円筒 M については, 試験機の負荷容量を超えたため, 荷重 $P_n = 1.02 \text{ kN/mm}$ で試験を終了した。いずれの試験円筒の場合も試験開始直後の摩擦係数は比較的小さく, その後摩擦係数は急上昇して最高値を示した後, 荷重の増加につれて低下する。試験片どうしが線接触をする二円筒試験 TR 2 の場合と点接触をする二円筒試験 TR 1 の場合 (図 2) とを比較すると, 摩擦係数の変化はかなりよく似た傾向を示す。しかしながら, 試験開始直後を除いて, 前者の場合の摩擦係数は後者の場合のそれに比してかなり高い値を示す。

3.2 焼付き強さ 各試験において焼付き (スコアリング) が発生した時点の最大ヘルツ応力 σ_H の計算値を図 4 に示す。ただし, 歯車試験ではスコアリングによる損傷は小歯車の歯元と大歯車の歯先のかみあい付近において著しく現れており, 図 4 中のすべり速度およびヘルツ応力 (ピッチ点におけるヘルツ応力の約 1.28 倍) はこの小歯車の歯元における値を示す。また, 矢印を付した試験については焼付きが発生する以前に試験を停止したことを示しており, それぞれの最終試験段階 (TR 2: $P_n = 1.02 \text{ kN/mm}$, GE: $P_n = 390 \text{ N/mm}$) におけるヘルツ応力の値を示す。

図 4 に見られるように, 試験方式の違いによる焼付き強さに関しては, 試験片が線接触をする二円筒試験 TR 2 および歯車試験の場合ではヘルツ応力はほぼ 2

GPa 以下である。一方, 点接触をする四球試験および二円筒試験 TR 1 の場合には, 焼付き時のヘルツ応力は材料の圧縮降伏強さに比してきわめて大きく現れている。したがって, 実際にはかなり早い試験段階において接触面は塑性変形しているものと推察される。なお, 銅めっきを施した場合の荷重の増加に伴う固定球の摩耗径の測定値の変化は, ヘルツの接触円の直径に比してかなり大きく現れた。

被膜処理の違いによる焼付き強さに関しては, 二円筒試験 TR 1, 二円筒試験 TR 2 および歯車試験における焼付き強さはいずれの場合も被膜なし, グラファイト被膜, 銅めっき, MoS_2 被膜の順に向上しており, 歯車試験によるスコアリング強さの試験結果と二円筒試験による焼付き強さのそれとの相関がかなり認められる。一方, 四球試験では, MoS_2 被膜およびグラファイト被膜の場合の焼付き強さは被膜なしの場合に比してやや小さく現れており, 二円筒試験による焼付き強さおよび歯車試験によるスコアリング強さの試験結果と四球試験による焼付き強さのそれとの相関はほとんど認められない。

なお, 試験 M の最終試験段階における最小油膜厚さの計算値は, Dowson の弾性流体潤滑の式⁽⁶⁾によれば, 歯車試験の場合では小歯車の歯元と大歯車の歯先のかみあい位置において $0.49 \mu\text{m}$ となる。また, 二円筒試験 TR 2 の場合では $0.19 \mu\text{m}$ となり, 歯車試験の場合に比してかなり小さな値を示す。

3.3 摩耗こんの状態 一例として, 二円筒試験 TR 1 の場合について, 焼付き後におけるたる形試験片および円筒形試験片の軸方向の表面形状を図 5 に示す。なお, 測定には触針式表面あらさ計を使用した。たる形試験片では, いずれの試験の場合も摩耗こんの表面は約 0.1 mm の深さのくぼみが生じており, 肉眼観

図 3 二円筒試験 TR 2 の場合の摩擦係数と単位幅当たりの垂直荷重の関係

図 4 各試験における焼付き強さ

察により母材の露出が認められた。一方, 円筒形試験片では, 試験円筒 M の場合を除いて表面は大きく盛り上がっている。これは, 円筒形試験片の円周速度がたる形試験片のそれに比して約3倍大きく, 両試験片の本体温度はかなり異なるものと考えられる。したがって, 焼付き発生と同時にたる形試験片の母材の一部がせん断されて, これが円筒形試験片の表面に移着したものと考えられる⁽⁷⁾。

同様に, 二円筒試験 TR1 の場合の試験円筒 M と試験円筒 C について, 焼付き直前および焼付き後の円筒形試験片の摩耗こんの光学顕微鏡写真を図6に示す。焼付き直前と焼付き後の写真の試験は別々に行っており, 焼付き直前の試験については, 摩擦係数が上昇の兆候を示した時点で試験機の運転を停止した。焼付き後では, いずれの試験の場合も摩耗こん上に円筒母材が露出し, 表面は荒れの激しい状態となっている。一方, 焼付き直前では摩耗こん表面は比較的滑ら

かであり, 母材の露出はほとんど認められない。したがって, 焼付き直前まで被膜の効果が継続しており, 焼付き発生と同時に急激に焼付きによる損傷が進行するものと考えられる。

なお, 焼付き時における円筒の軸方向のヘルツの接触幅の計算値は, 試験円筒 M では 1.98 mm, 試験円筒 C では 1.81 mm となり, 実際の摩耗こんの幅(焼付き直前)に比してやや小さい。

3・4 瞬間温度上昇 現在のところ, 歯面に発生する歯面温度(瞬間温度上昇+歯車本体温度)はスコ어링強さの重要な指標値と考えられており, スコ어링強さを臨界温度で評価する場合には, 瞬間温度上昇および歯車本体温度(かみあい直前の表面温度)の厳密な把握が必要となる。しかしながら, 各試験における本体温度を十分な精度で評価することはかなり難しい。したがって, ここでは二円筒試験および歯車試験の場合について, 瞬間温度上昇の計算を行い, 両者間の相関性を検討した。

二円筒試験および歯車試験において, 焼付きが発生した時点の瞬間温度上昇の計算値を図7に示す。ただし, 二円筒試験 TR2 の試験 M と歯車試験の試験 M, C については, 最終試験段階における瞬間温度上昇値を示す。温度計算では, 物体の表層と素地の熱的性質が異なる場合の放物線状の分布熱源による瞬間温度上昇式⁽⁸⁾を適用した。摩擦係数 μ については, 二円筒試験の場合には焼付き直前の測定値を使用し, 歯車試験の場合には, $\mu = 0.1 V_0^{-0.2}$ (V_0 : ピッチ点における周速 m/s)⁽⁹⁾ として計算を行った。なお, 後者の場合, 摩擦係数 μ は試験 U では 0.054, 試験 G では 0.049, 試験 M および試験 C では 0.048 となる。また, 二円筒

図5 二円筒試験 TR1 の場合の焼付き後における試験円筒の表面形状(軸方向)

図6 二円筒試験 TR1 の場合の円筒形試験片の摩耗こん

図7 二円筒試験および歯車試験の場合の焼付き時の瞬間温度上昇の計算値

試験 TR1 の場合において、摩擦熱により接触面上に発生する熱源の単位時間当たりの熱量密度の最高値 q_0 については、接触面にだ円体状の分布熱源が発生するものとした場合の単位時間当たりの熱量 Q' を温度上昇式中の放物線状の分布熱源の熱量 Q に一致させて与えた。歯面温度の計算における荷重分担率の値は、大、小歯車のかみあい歯のたわみ量の和の逆数より求めた。被膜の厚さは、いずれの場合も $0.1 \mu\text{m}$ として計算を行った。

図7に見られるように、試験方式の違いによる瞬間温度上昇に関しては、歯車試験の試験 M の場合を除いて、両試験片が点接触をする二円筒試験 TR1 の場合の瞬間温度上昇が線接触をする二円筒試験 TR2 および歯車試験の場合のそれに比してかなり高く現れる。一方、被膜処理の違いによる瞬間温度上昇の順序に関しては、いずれの試験においても瞬間温度上昇は被膜なし、グラファイト被膜、銅めっき、 MoS_2 被膜の順に高くなり、前述の焼付き強さの順序によく一致する。

なお、焼付き発生直後（運転停止後）、接触式表面温度計により銅めっきを施した試験円筒 C の場合について円筒表面の本体温度を測定した結果、試験 TR1 の場合の両円筒試験片の平均温度は約 347 K、試験 TR2 の場合のそれは約 403 K であった。また、歯車試験において、最終試験段階終了直後の試験歯車 C の大、小歯車の平均本体温度は 356 K であった。このよ

うに、本体温度の測定値は前述の瞬間温度上昇の計算値とは逆の順序を示す。

また、四球試験における焼付き時の試験球の表面温度上昇⁽⁴⁾の計算結果に関しては、銅めっきを施した場合の試験球の表面温度上昇 ($\theta=417 \text{ K}$) が被膜なしの場合のそれ ($\theta=489 \text{ K}$) に比してかなり低く現れ、歯車試験および二円筒試験における瞬間温度上昇の計算結果との相関は認められなかった。

4. 結 言

アムスラー摩擦試験機を使用して二円筒試験を行い、各種の被膜を施した円筒の焼付き強さおよび摩擦特性を調べ、既報の歯車試験機および四球試験機による実験結果に関して比較、検討を行った。その結果から、以下のことが明らかになった。

(1) 二円筒試験および歯車試験における各被膜の焼付き強さは、いずれの場合も被膜なし、グラファイト被膜、銅めっき、二硫化モリブデン被膜の順に向上しており、歯車試験によるスコアリング強さの試験結果と二円筒試験による焼付き強さのそれとの相関がかなり認められる。

(2) 線接触をする二円筒試験の場合の摩擦係数の変化は、点接触をする二円筒試験の場合のそれと比較的よく似た傾向を示す。また、二円筒試験の場合には、四球試験の場合のような焼付き前の摩擦係数の上昇はほとんどみられない。

(3) 点接触をする二円筒試験の場合の焼付き時の瞬間温度上昇の計算値は、線接触をする二円筒試験および歯車試験の場合のそれに比してかなり高く現れる。

文 献

- (1) 寺内・灘野・河野, 機論, 50-450, C (昭59), 379.
- (2) 寺内・河野・灘野・中本, 機論, 51-465, C (昭60), 1101.
- (3) Terauchi, Y., Nadano, H. and Kohno, M., *Trans. ASME, J. Mech. Transm. Autom. Des.*, 108-1 (1986), 127.
- (4) 寺内・灘野・河野, 潤滑, 30-1 (昭60), 38.
- (5) 成瀬・灰塚, 潤滑, 21-12 (昭51), 832.
- (6) Dowson, D., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 182-Pt. 3 A (1967-68), 151.
- (7) 寺内・宮尾・灘野, 機論, 36-281 (昭45), 119.
- (8) 寺内・宮尾・灘野, 機論, 39-317 (昭48), 404.
- (9) ISO/TC 60/WG 6, Netherlands, 17, Calculation of Scoring Resistance of Gear Drives, (1975).

討 論

〔質問〕 吉 田 彰 (岡山大学工学部)

被膜の焼付き強さおよび摩擦特性に関する各試験機間の相関性に関し種々検討されている点, 敬意を表す。

(1) 図 1, 2 あるいは図 4 の結果によると, 同じ点接触条件下にある FB と TR1 において, M, G の焼付き強さの U の焼付き強さに対する傾向が逆になっているが, この点いかがお考えか。

(2) 図 7 において, GE の場合の M の焼付き時の瞬間温度上昇が著しく高くなっているが, この理由についていかがお考えか。

〔回答〕 (1) ご指摘のように, 四球試験 FB と二円筒試験 TR1 において, M, G の焼付き強さの U の焼付き強さに対する傾向が逆になっている。両試験の相違点に関しては, 垂直荷重, すべり速度, すべり率, 試験片の形状・材質, 潤滑方法などがあげられる。また, 実験結果 (図 1~3) に見られるように, 両試験の摩擦係数の挙動は大幅に異なっており, TR1 の摩擦係数の変化はむしろ TR2 のそれに比較的好く似た傾向を示している。さらに, Cheng のだ円接触の場合の EHL の計算式 (付 1) によれば, 焼付き時の最小油膜厚さ h_{min} の値は, FB の場合には $U: 0.029 \mu\text{m}$, $M: 0.029 \mu\text{m}$, TR1 の場合には $U: 0.21 \mu\text{m}$, $M: 0.20 \mu\text{m}$ となる。本文に示した TR2, GE の場合の h_{min} の値 (試験 M) と比較すると, TR1 の場合の h_{min} の値は TR2 の場合のそれとほぼ一致しており, 両試験とも混合潤滑のもとで行われたものと考えられる。しかしながら, FB の場合の h_{min} はきわめて小さく, 接触面は金属接触に近い状況であると考えられる。これらの点からも, 焼付き強さに対する歯車試験機と四球試験機の場合の相関性は, 歯車試験機と二円筒試験機の場合の相関性に比してかなり小さく, FB の焼付き

強さの順序が他の試験の場合のそれとかなり異なった傾向を示したものと考えられる。したがって, 被膜を施した歯車の焼付き強さを四球試験で評価することは困難であると考えられる。

なお, 四球試験の場合, M, G の焼付き強さが U のそれに比してやや小さく現れる点については, コーティング前の鋼球の表面あらさが被膜のそれに比してきわめて小さいために, U の場合のほうが油膜を形成しやすいことも一因であると考えられる。

(2) ご指摘のように, GE の場合の M の焼付き時の瞬間温度上昇は約 770 K と著しく高くなっている。瞬間温度上昇に及ぼす被膜の影響に関しては, 被膜の熱的性質, l_h/l_0 の値 (l_h : 膜厚, $2l_0$: ヘルツの接触幅) などが大きな因子となる (付 2)。表 3 に示したように, MoS_2 の熱伝導率は他の被膜および歯車母材のそれに比してきわめて小さく, 同じ試験段階で計算を行った C に比して, M の瞬間温度上昇値はきわめて高く現れる。

また, 他の試験 TR1, TR2 の場合の M の瞬間温度上昇は GE のそれに比してかなり低い値を示している。焼付き時の l_h/l_0 の値は, TR1: 8.0×10^{-5} , TR2: 7.3×10^{-5} , GE: 4.1×10^{-3} (瞬間温度上昇が最高となる大歯車の歯先端) となり, GE では母材の熱伝導率の影響度と比して, 被膜のそれがとくに大きく現れる。

なお, 温度計算では, 被膜は接触面上に一様に分布しているものと仮定しているのので, 実際には M の場合の瞬間温度上昇は計算値よりやや低い (C, G の場合のそれは計算値より高い) ものと考えられる。

(付 1) Cheng, H. S., *Trans. ASME, Ser. F*, 92-1 (1970), 155.

(付 2) 寺内・ほか 2 名, 機論, 50-450, C (昭 59), 379.