

ISSN 0389-4010
UDC 621.454.2:
62-762

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1155

液体酸素ターボポンプ用カーボンセグメント
シールの耐久性能

菊池正孝・尾池守
野坂正隆・渡辺義明

1992年5月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

液体酸素ターボポンプ用カーボンセグメント シールの耐久性能*

菊池 正孝*¹ 尾池 守*¹
野坂 正隆*² 渡辺 義明*¹

Durability of a Carbon Segmented Circumferential Seal for a Liquid Oxygen Turbopump*

Masataka KIKUCHI*¹, Mamoru OIKE*¹
Masataka NOSAKA*² and Yoshiaki WATANABE*¹

ABSTRACT

A carbon segmented circumferential seal with Rayleigh steps, designed as a helium purge seal for the liquid oxygen turbopump of the LE-7 rocket engine, was experimentally studied to improve its durability over a wide range of operating conditions. Five combinations of sealing materials were tested for long durations using helium purged pressures from 0.3 to 0.8 MPa and speeds from 52 to 105 m/s. Friction tests of the sealing materials were also performed to enable comparisons with the seal test results. The effects of the operating conditions and the use of carbon materials, hard coating materials on the runner and MoS₂ lubricating films were examined to enable the tribological performance of the sealing surfaces. The test seal having a MoS₂ lubrication film sprayed on the carbon sealing surface and a runner coated with a Cr₂O₃ plasma-sprayed film demonstrated sufficient durability over a wide range of operating conditions.

Keywords: Carbon segmented seal, helium purge seal, liquid oxygen turbopump, LE-7 engine

概 要

LE-7 ロケットエンジンの液体酸素ターボポンプ (OTP) に用いるヘリウムパーズシールの耐久性能を改善する目的で、レイリーステップを有するカーボン製セグメントシールの研究を行った。5種類のシール材料の組合せを有する供試シールに対して、次のようなOTPを模擬した条件下で長秒時試験を実施した；ヘリウムパーズ圧力範囲は0.3~0.8MPa、しゅう動速度範囲は52~105m/s。更に、シール試験結果と比較するために、シール材料の摩擦試験を行った。

試験結果をもとに、シール面のトライボロジー的な性能に及ぼすシール試験条件の影響、

* 平成4年2月18日 (received 18 February 1992)

*¹角田支所 (Kakuda Research Center)

*²宇宙開発事業団 (National Space Development Agency of Japan)

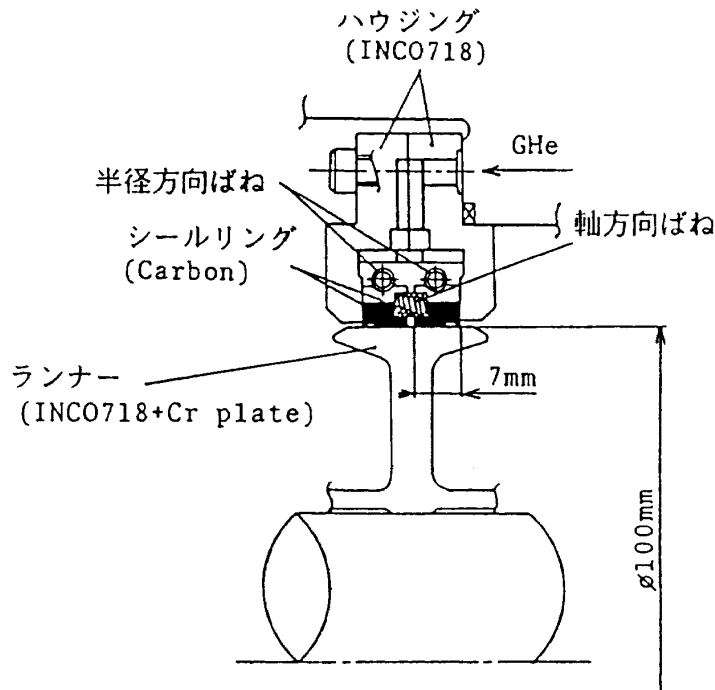
カーボン材質の影響、ランナー硬質被膜材の影響及び MoS₂ 潤滑被膜の効果について検討を加えた。その結果、カーボン製シール面上に MoS₂ スプレー被膜を施した供試シールと、Cr₂O₃ プラズマ溶射被膜を有するランナーの組合せは、広範囲な試験条件下で十分な耐久性を示すことが明らかとなった。

1. 結 言

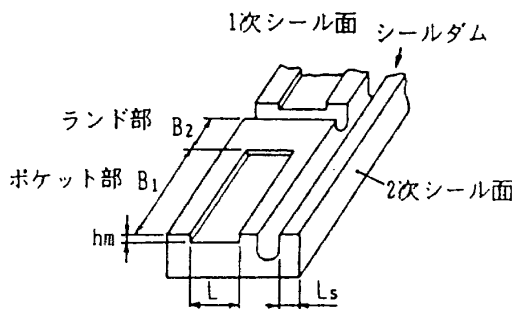
現在我が国では、H-2 ロケットの1段目エンジンとして、液体酸素 (LOX) と液体水素を推進薬とする LE-7 エンジンの開発が進められている。航空宇宙技術研究所は宇宙開発事業団と共同で、同エンジンの実証用原型機に組込む液体酸素ターボポンプ (OTP) の研究開発を担当した。

図1は、同OTP用に研究試作されたヘリウムパ

ージシールの概要である。このヘリウムパージシールは、対面合せにされた一対のカーボン製セグメントシールから構成されており、その中間に不活性なヘリウムガス (GHe) をパージすることで、両側に存在する LOX と低温水素ガス (170K) を完全に分離し、両流体の混合・爆発を防いでいる。したがって、OTPの耐久性はこのシールによって決まるといっても過言ではなく、その要求寿命を表1に示す。



(a) ヘリウムパージシールの構成図



シールリング分割数	3
ステップ数 (Ns)	21
シール幅	7
B ₁	7.77
B ₂	3.89
L	4.00
Ls	0.60
hm	0.003

(b) カーボンセグメントの模式図

図1 ヘリウムパージシールの概要

表1 ヘリウムパージシールに対する要求寿命

軸回転数	18,000~20,000 rpm
GHeパーシ圧力	0.4~0.6 MPa
寿命	2,510 s
起動回数	28 回

前報¹⁾では、図1に示したヘリウムパージシールを供試シールとして、OTPを模擬したシール単体試験を行ない、その結果をもとにカーボン製セグメントシールの密封特性について述べた。本報では摩耗特性を中心に、その耐久性能について述べる。さて、図1に示したように、本供試シールはカーボンシール面上にレイリーステップを有しており、その動圧効果によりシール面間に開口力を発生させ、シール面押し付け力を緩和し摩耗の軽減化を図っている。しかし前報¹⁾で指摘したように、シールリングを構成するカーボンセグメントの摩耗に伴って、レイリーステップの発生する開口力が増加するためには、ランド部のシールすきま h_2 が数 μm 以下の値を維持する必要がある。すなわち、供試シールの耐久性能という観点に立てば、レイリーステップの機能が有効に作用出来るような表面状態を保持する形で、シール材料の摩耗が生じる必要がある。

しかしながら、カーボン材料の摩擦、摩耗特性が、摩擦速度や荷重などの摩擦条件²⁾、あるいは、雰囲気中に水分などの活性な吸着分子が存在するか否かなどの雰囲気条件³⁾に対して敏感に反応することが良く知られている⁴⁾。このことは、筆者らの行なった摩擦試験⁵⁾においても認められた。図2は、カーボンA製ピン試片と表面に硬質クロム(Cr)めっき層を有するSUS440C製円板とをヘリウムガス(GHe)中で摩擦したときに得られた、雰囲気温度と摩擦係数の関係を示したものである。図から明らかなように、雰囲気温度が $T=273\text{K}$ 以上の常温では摩擦係数が $f=0.07$ 程度と低い値を示すが、 $T=273\text{K}$ を下回ると f の値が上昇し、 $T=213\text{K}$ 付近以下の低温では $f=0.15\sim 0.45$ の範囲で激しく変動することが分った。この低温下ではカーボンの摩耗量も多く、比摩耗量は $W_s=2.05 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{N}$ にまで達した。前報¹⁾で示したよ

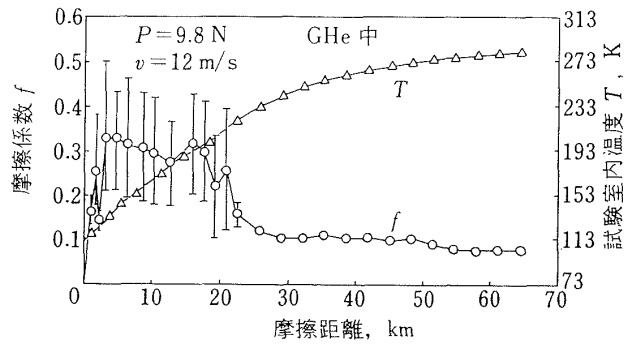
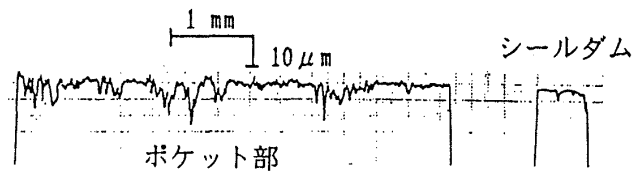
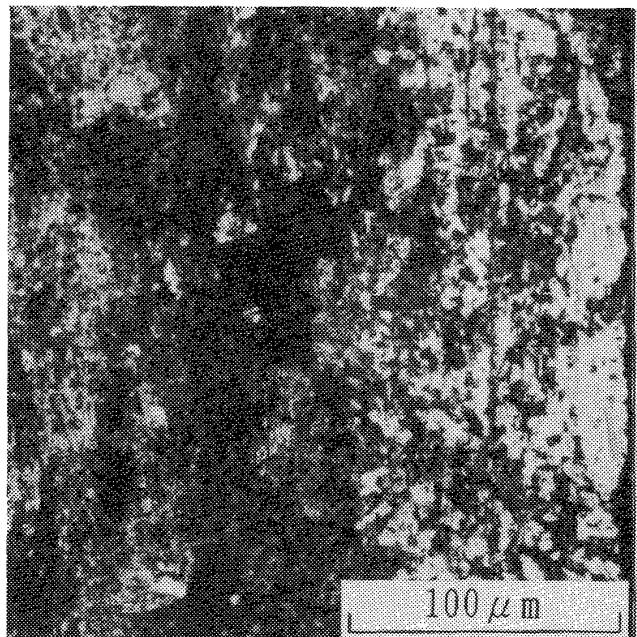


図2 カーボンの摩擦に及ぼす雰囲気温度の影響



(a) 表面形状



(b) 表面顕微鏡写真

図3 液体酸素ターボポンプ試験後のカーボンシー面(異常摩耗の例)

うに、本供試シールの使用温度条件は $T=213\text{K}$ 以下であるため、常温下で観察されるカーボン材料の良好な自己潤滑性は、損われる可能性が高い。

供試シールをOTPに組込んで試験を行なった際に観察された異常摩耗の例を図3に示す。これは、OTP試験後の検査で得られた、カーボンセグメントの表面形状とその顕微鏡写真である。一見ランド部のように見えるが、ポケット部が完全に摩耗

してしまった跡である。シール面が極めて粗いことから考えて、初期摩耗段階で発生した異常摩耗によりカーボンシール面が荒れ、レイリーステップの効果が損われたものと推察される。したがって、本供試シールの耐久性能を確保するためには、広範囲な稼働条件下で試験を行ない、シール材料の摩耗特性を十分に把握する必要がある。

以上のような背景の下に、本報告では、シール材料の5種類の組合せに対して行なったシール試験結果を基に、供試シールの耐久性能について述べる。

2. 実験方法

対象とした供試シールのシールリングには、表2に示した機械的性質の異なる2種類のカーボン材料を用いた。ランナーシール面上の硬質被膜と

表2 カーボン材料

カーボン	圧縮強さ (MPa)	使用限界温度 (K)	ショアー硬さ (Hs)	密度 (g/cm ³)
A	437	644	80	1.72
B	924	700	90	1.85

表3 ランナー被膜材

被膜材	厚さ (μm)	表面粗さ Rmax (μm)	硬さ Hv
硬質Crめっき	200	0.4 以下	850
Cr ₂ O ₃ プラズマ溶射	150	1.0	1150

しては、表3に示した硬質クロム (Cr)めっきとプラズマ溶射した酸化クロム (Cr₂O₃)を実験に供した。更に、シール材料の摩耗特性を改良する目的で、下記に示す二硫化モリブデン (MoS₂) 被膜の効果を調べた。

- (1) カーボンシール面上への MoS₂ スプレー被膜
- (2) 硬質Crめっき上への MoS₂ 高周波スパッタ被膜

被膜厚さはそれぞれ約3μmと約1μmで、スプレー被膜には無機系のバインダーを使用した。各試験で対象にしたシール材料の組合せを表4に示す。

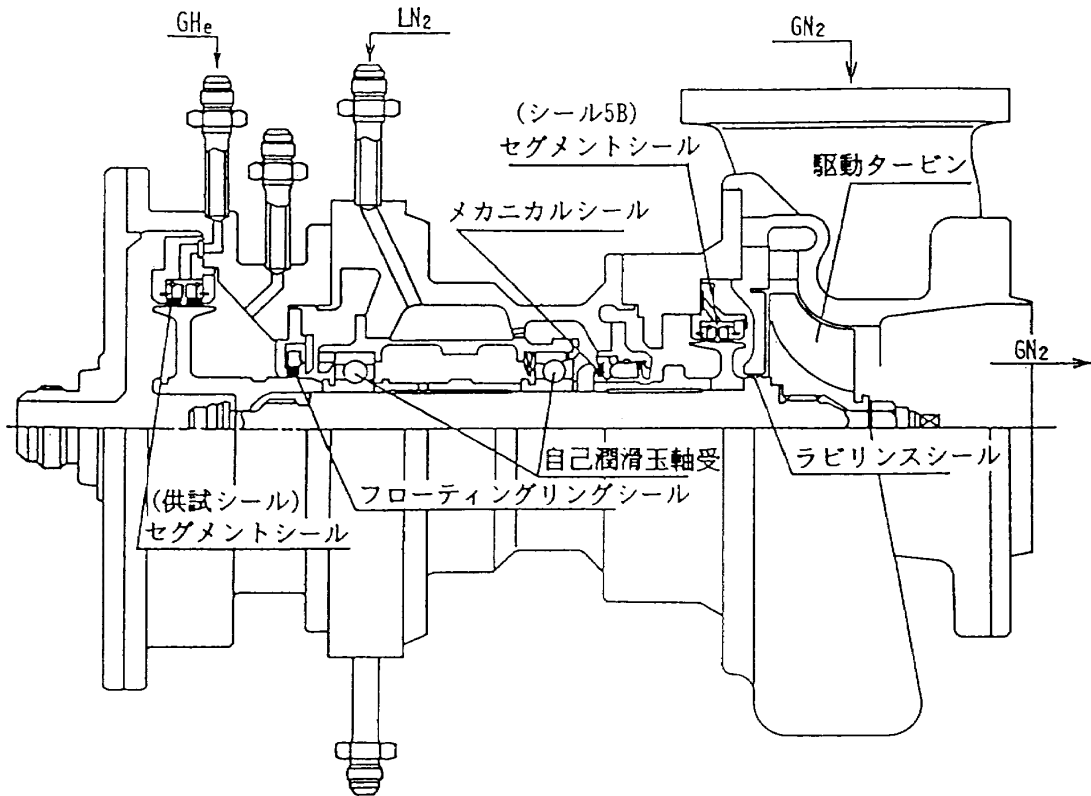
使用したシール試験機及び試験手法は前報¹⁾と全く同じであり、その詳細な説明は省略するが、図4にシール試験機の概略と試験時における供試シールの漏れ室の平均的な温度を示した。この温度状態はOTPを模擬したものとなっている。各試験区間毎に定常回転試験を行ない、試験前後に測定したシール面の表面形状の変化よりカーボンの摩耗量を求めた。なお、定常回転試験は表5に示

表5 定常回転試験条件

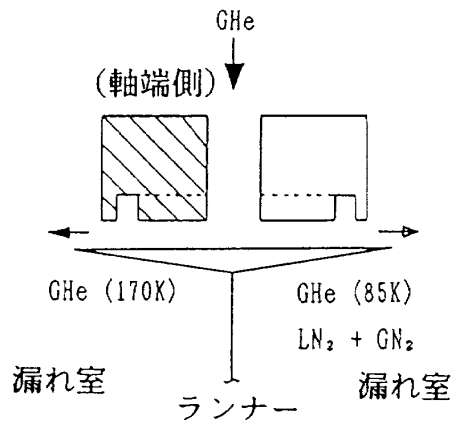
定常試験条件	回転数 (rpm)	GHeバージ圧力 (MPa)
1	20,000	0.6
2	10,000	0.6
3	20,000	0.8

表4 シール材料の組合せ

組合せ	静止側(シールリング)	回転側(ランナー)	試験番号
1	カーボンA+MoS ₂ スプレー被膜	Cr ₂ O ₃ プラズマ溶射被膜	1
2	カーボンA	硬質Crめっき	2
3		硬質Crめっき+ MoS ₂ スパッタ被膜	
4	カーボンB	硬質Crめっき	3
5	カーボンB+MoS ₂ スプレー被膜		



(a) シール試験機の概略図



(b) 試験時における供試シールの雰囲気温度

図4 シール試験機の概要

した3種類の条件下で行なった。また、ピン回転円板型摩擦試験機⁶⁾を用いてシール材料の摩擦、摩耗特性を調べ、シール試験結果と比較した。

3. 実験結果

図5に、3種類の試験シリーズで得られたカーボンセグメントの摩耗進行曲線を示す。縦軸に示したカーボンの摩耗量は、軸端側セグメントシールの単位長さ当りの体積摩耗量である。図4に示

したように、供試シールの漏れ室温度は左右で異なるため、ランナーは遠心力による歪と熱歪の両方を受ける。シール試験機の軸端側では、両歪が同一方向に作用するため、ランナーシール面の変形が大きく、摩耗の進行が速くなる。したがって、耐久性を議論する上では軸端側シールの摩耗が問題となる。以後は、軸端側セグメントシールを対象にして論を進めることにする。なお、試験1と表示した結果は前報¹⁾に示した結果を再録したも

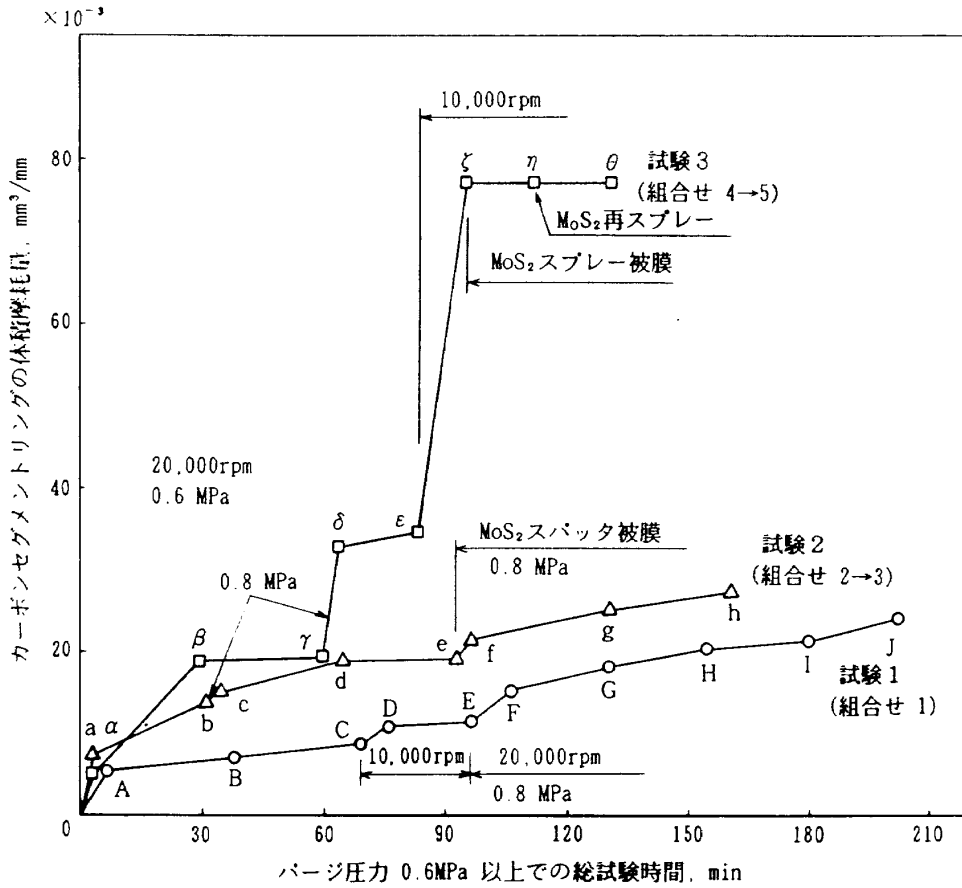


図5 カーボンセグメントリングの摩耗進行曲線

のである。図5中の各試験区間で行なった、定常回転試験の条件と使用したシール材料の組合せを表6にまとめて示す。

表6 試験内容

3.1 試験条件の影響

定常回転試験は、回転数20,000rpm(周速105m/s)、バージ圧力0.6MPaを基本条件として、回転数を10,000rpmに低下させた場合と、バージ圧力を0.8MPaに上昇させた場合の3種類の条件下で行なった。図5から分るように、基本条件下で摩耗率の低い定常的な摩耗状態に移行した後、引続く試験区間でバージ圧力の上昇、あるいは、回転数の低下という形で試験条件を変化させると、摩耗率が急激に増加する。特に、試験3の0点からγ点に至る試験区間では、摩耗率が試験条件の変化に対して敏感に反応している。

この試験3に着目すると、試験開始からγ点までは基本条件下の試験であるが、その内β点に至る区間ではカーボンの摩耗が急激に進行した。しかし、区間βγでは同一条件下にもかかわらず摩耗率は低い値を示し、定常摩耗状態に移行したこ

試験番号	試験区間	材料組合せ	定常試験条件	定常試験時間(分)
1	OA	1	1	6.8
	AB	1	1	31.0
	BC	1	1	31.4
	CD	1	2	5.8
	DE	1	2	21.4
	EF	1	3	5.4
	FG	1	3	20.8
	GH	1	3	20.6
	HI	1	3	21.8
	IJ	1	3	20.1
2	0a	2	1	3.5
	ab	2	1	27.2
	bc	2	3	1.0
	cd	2	1	30.6
	de	2	1	28.4
	ef	3	3	2.6
	fg	3	3	29.2
	gh	3	3	27.8
3	0α	4	1	3.0
	αβ	4	1	26.2
	βγ	4	1	30.2
	γδ	4	3	1.9
	δε	4	1	20.0
	εζ	4	2	12.0
	ζη	5	2	16.4
	ηθ	5	2	19.0

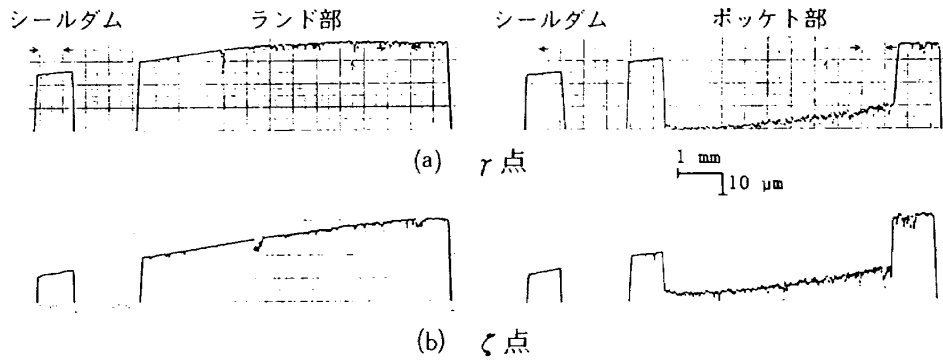


図6 カーボンセグメントの表面形状

とが分る。 r 点におけるカーボンセグメントの表面形状を図6(a)に示す。この場合もカーボンの摩耗量はシールドラム部で最大値を示しており、前報¹⁾にランナー変形接触モデルとして提示した接触状態が生じていたことが分る。すなわち、区間 $0\alpha\beta$ ではカーボンセグメントに働く見かけの押し付け力 F が変化しなくとも、摩耗の進行に伴いランド部のシールドラム h_2 が主に減少するため、レイリーステップの発生する開口力 $W(A, hm, h_2)$ が増加し、正味の押し付け力 F_a は減少する。その結果、摩耗の進行が鈍り、区間 $\beta\gamma$ では定常摩耗状態に移行したものと考えられる。この区間では特に摩耗率が低く、いわゆる“Non contact operation”⁷⁾に近い状態が具現化されているものと想像される。

続く区間 $\gamma\delta$ では、パーシ圧力を 0.8MPa まで増加したため、カーボンの摩耗は急激に増大した。しかし、区間 $\delta\epsilon$ で再び基本条件に戻すと摩耗率は低下した。担し、 δ 点でランナーを未使用のものに交換したためか、区間 $\beta\gamma$ より高い摩耗率を示している。区間 $\epsilon\zeta$ では、回転数を $10,000\text{rpm}$ に下げて試験を行なったが、カーボンの摩耗が急激に進行した。試験後、 ζ 点で得られたカーボンセグメントの表面形状を図6(b)に示す。摩耗はシールドラム全面に渡っており、 r 点に比較すると、平均ポケット深さが $10\mu\text{m}$ 程度浅くなっている。図7(a)は、同時点で観察されたカーボンシールドラムの外観写真である。ポケット部などには多量のカーボン摩耗粉が残存しており、摩耗量の多さを物語っている。

試験条件の影響をより明確化するために、各試

験点で測定された平均ポケット深さ hm を用いて開口力 $W(A, hm, h_2)$ を前報と同じ方法で算出し¹⁾、カーボンセグメントに作用している正味の押し付け力 F_a を推定した。 r, ϵ, ζ の各点における開口力 $W(A, hm, h_2)$ の計算例を図8に示す。 ϵ 点に対しては、回転数 $20,000\text{rpm}$ の場合と、 $10,000\text{rpm}$ の場合の両方が示されている。また、計算に際してはGHe温度として、試験中に測定されたGHe入口温度の平均値を用いた。ランド部のシールドラム $h_2=1.5\mu\text{m}$ と仮定すると、 ϵ 点で回転数を $20,000\text{rpm}$ から $10,000\text{rpm}$ に低下させた場合、開口力 $W(A, hm, h_2)$ は約 25.3N 減少することになる。この値を押し付け力 F に換算すると、シールドラム差圧を約 0.22MPa 増加させたことに相当する。

押し付け力 F から、このように計算した開口力 $W(A, hm, h_2)$ を減ずることにより、カーボンセグメントに働く正味の押し付け力 F_a を推定することが出来る。 β 点から ζ 点に至る試験区間に対し、 $h_2=1.5\mu\text{m}$ と仮定して求めた F_a の推定値を図9に示す。但し、試験区間中の F_a の値は線形的に変化するとして模式的に示してある。また、同図中には、各試験区間におけるカーボンの比摩耗量(単位荷重、単位摩擦距離当りの体積摩耗量)を、区間 $\beta\gamma$ の値で標準化して示している。なお、押し付け力 F の算出にあたっては、2次シールドラム間に働く摩擦力を無視している¹⁾。図から分るように、基本条件下の定常摩耗状態にある区間 $\beta\gamma$ (比摩耗量 $W_s=2.01\times 10^{-11}\text{mm}^2/\text{N}$)に比較して、試験条件を変化させた区間 $\gamma\delta, \epsilon\zeta$ においては、 F_a が最大で1.9倍と1.8倍に、比摩耗量は両区間とも

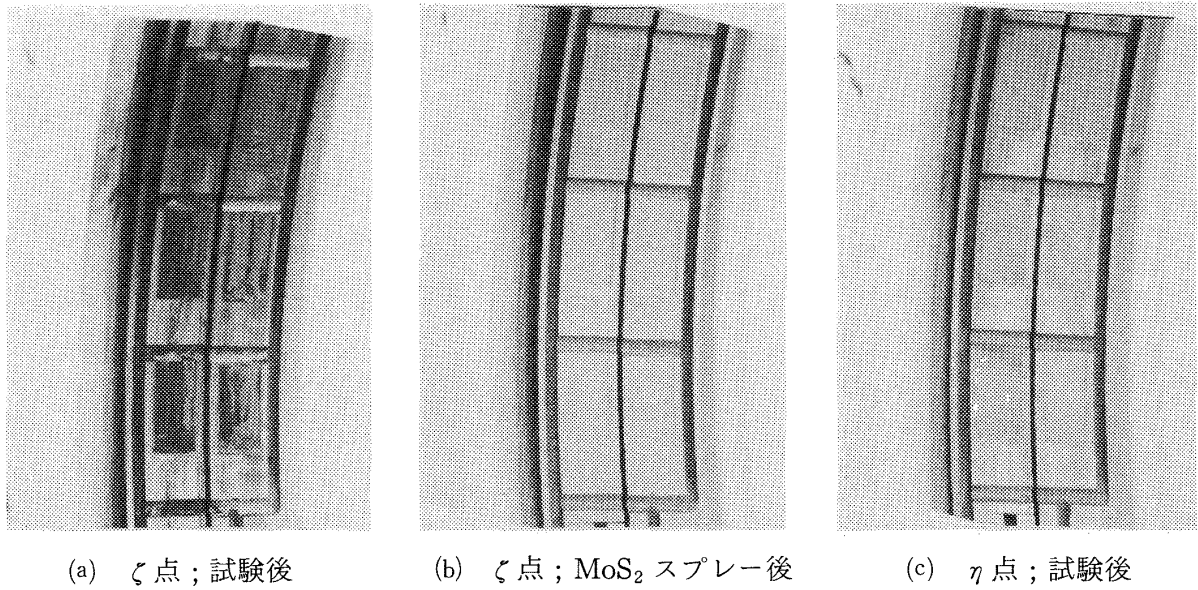


図7 カーボンシール面外観写真

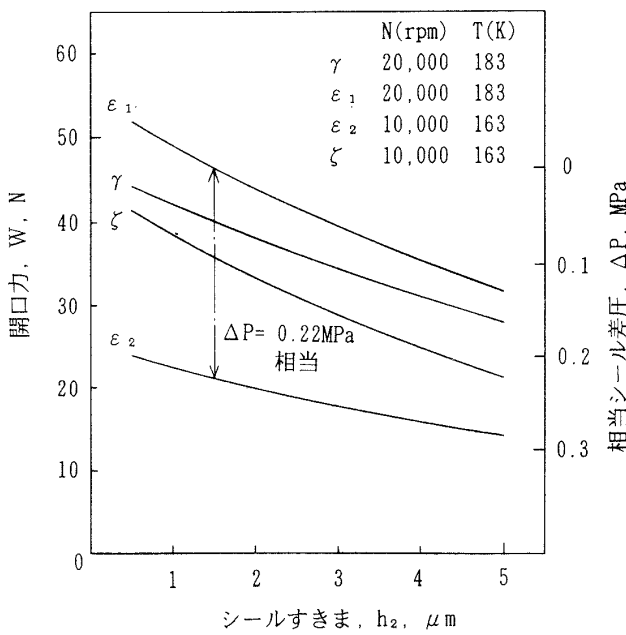


図8 シール面開口力の計算例

200倍程度にまで増加している。すなわち、ページ圧力を0.6MPaから0.8MPaに増加させることと、回転数を20,000rpmから10,000rpmに低下させることは、Faを増加させるという形で、カーボンの摩耗に対してはほぼ同等の効果を及ぼすことが分る。一方、PV(荷重と速度の積)で評価すると、速度を低下させることは、Pを増加させるがVは減少するので、その効果は相殺されるという考えが成り立つ。しかしながら、実験結果を見る限り、回転数の低下は比摩耗量の増加を招い

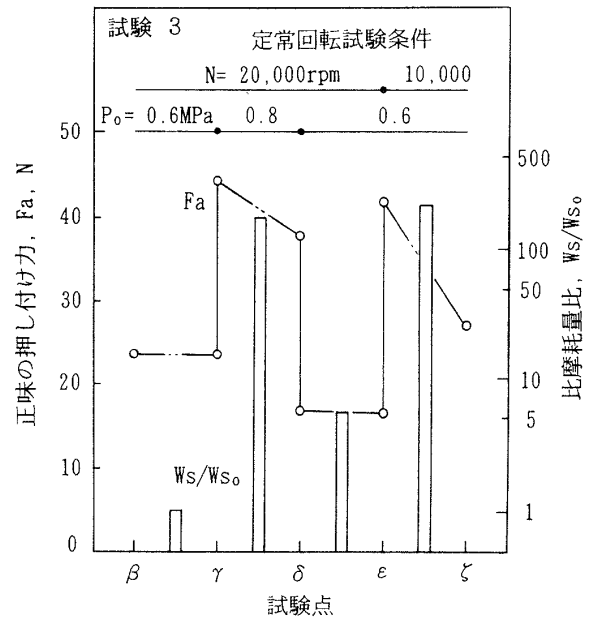


図9 正味の押し付け力とカーボンの摩耗量

ており、本試験条件範囲では荷重の効果の方が支配的であるものと理解出来る。

さて、図9から明らかなように、同一試験条件下においても、カーボンセグメントに働くFaの値すなわち荷重は、摩耗履歴によって変化する。それ故、図5に示した各試験区間における摩耗量を同一基準の下で比較するために、試験区間毎に開口力W(A, hm, h2)を算出し比摩耗量を求めた。図10、図11及び図12は、試験条件毎にまとめた各試験区間の比摩耗量である。但し、W(A, hm, h2)

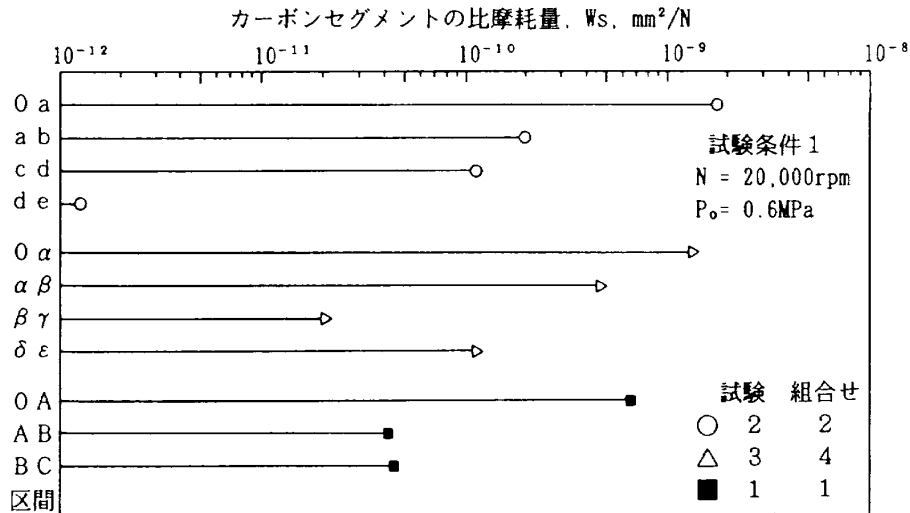


図10 基本試験条件下におけるカーボンの比摩耗量

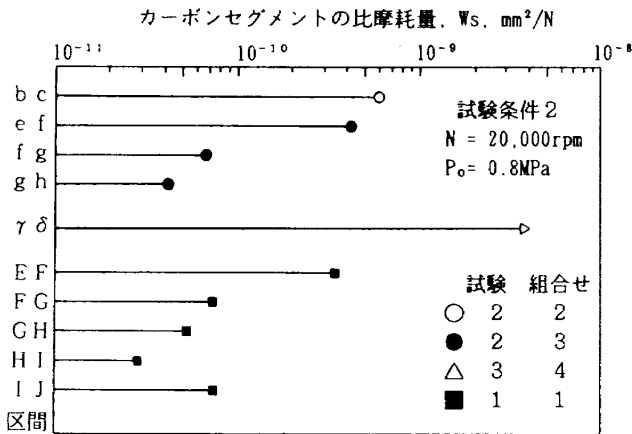


図11 高パーズ圧力試験におけるカーボンの比摩耗量

の計算に際しては、 $h_2 = 1.5 \mu\text{m}$ と仮定し、その他の諸量は測定値を用いた。また、摩擦距離は各区間の定常回転試験時間に基づいて算定した。

これらの図を見ると、同一試験条件では、試験時間の経過する程、比摩耗量が減少する傾向が認められる。しかし、区間 $\delta\epsilon$ とIJについては同一条件の先の区間より比摩耗量が増加している。区間 $\delta\epsilon$ については、ランナーを新品に交換したため、シール面間のなじみ過程が新たに生じ、比摩耗量が増加したものと考えられる。また、区間IJについては MoS_2 の効果が薄れてきたものと推察される。

3.2 カーボン材料の影響

表2に示したように、機械的性質の異なる2種

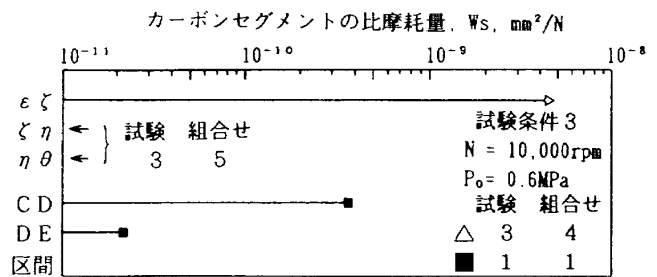


図12 低速回転試験におけるカーボンの比摩耗量

類のカーボン材料を用いている。試験1と2はカーボンAを、試験3はカーボンBを使用した。試験2の開始からe点に至る区間と試験3の開始から ϵ 点に至る区間は、ともに相手側が硬質Crめっき被膜を有するランナーであり、両カーボンの比較には適している。

図10によれば、基本条件下の定常摩耗状態にある区間 de と区間 $\beta\gamma$ の比摩耗量を比較すると、カーボンAの方が1ケタ程度低いことが分る。更に、パーズ圧力を 0.8MPa に上昇させた区間 bc と区間 $\gamma\delta$ における比摩耗量を比べると、やはりカーボンAの方が1ケタ程度低いことが図11から分る。このように、機械的性質に優れたカーボン材料が、かならずしも優れた摩耗特性を示さないという事実は、鈴木らが報告⁸⁾したLE-5エンジン用OTPのシールに対する結果とも符号するものである。

3.3 MoS₂被膜の効果

シール材料の摩擦・摩耗特性を改善する目的で、カーボンシール面上あるいはランナーシール面上に MoS₂ 被膜を形成し、試験を行った。試験3では ζ 点において、図7(b)に示すようにカーボンシール面上に厚さ約3 μ mの MoS₂ スプレー被膜を施し、回転数10,000rpmの試験を続行した。その結果、同図(c)に示すように MoS₂ 被膜の摩耗は観察されたが、カーボン自体の摩耗は認められなかった。 η 点で MoS₂ 被膜を修復し、再び10,000rpmでの試験を行なったが、 θ 点においてもカーボンの摩耗は観察されなかった。試験2では e 点において、シール面上に厚さ約1 μ mの MoS₂ スパッタ被膜を有するランナーに交換し、その後の区間では、パージ圧力を0.8MPaに上昇させた試験を行なった。結果は図11に示したように、区間efでは同一試験条件下の区間bcに比べ、比摩耗量が30%程度減少し、続く区間fg, ghでは1/10程度にまで減少した。また、試験1においては当初より、シール面上に厚さ約3 μ mの MoS₂ スプレー被膜を有する供試シールを使用した。図5から分るように、試験1の供試シールは、条件的にも時間的にも、最も過酷な試験履歴を経たにもかかわらず、カーボンセグメントの総摩耗量は最も低い値を示した。

これらの実験結果は、シール面間に介在する MoS₂ 被膜が、カーボンセグメントの摩耗軽減に極めて有効であることを示している。

3.4 ランナー被膜材の影響

カーボンシールの相手材としては、従来から硬質Crめっきがよく使用されて来た。本実験では、この硬質Crめっきに加え、Cr₂O₃のプラズマ溶射被膜もランナー被膜材として使用している。更に、前節で述べたように、硬質Crめっき層上に MoS₂ をスパッタしたものも用いた。すなわち、試験3の全区間と試験2の開始からe点に至る区間では硬質Crめっきを、試験2のe点からh点に至る区間ではその上に MoS₂ スパッタ被膜を施したものである。試験1は全区間で Cr₂O₃ プラズマ溶射被膜を使用している。

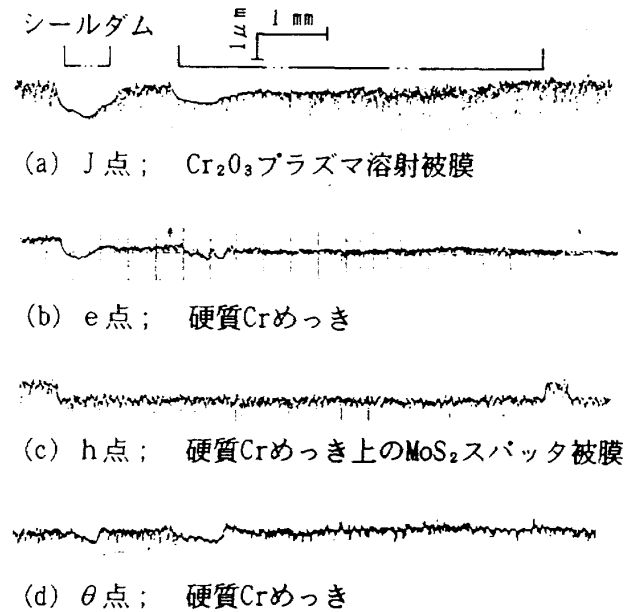


図13 ランナーシール面の表面形状

図13は、図5に示したJ点、e点、h点及び θ 点で得られた各ランナーシール面の表面形状である。J点で測定されたCr₂O₃プラズマ溶射被膜の場合¹⁾、試験履歴が最も過酷であったためか、最大摩耗深さはシールドラムに相対する部分で約1.5 μ mと、他の被膜に比べ一番多い。しかし、未使用時の表面粗さが硬質Crめっきに比較して大きいにもかかわらず、摩耗面の形状を見ると極めて平滑であり、摩擦接触の強さに応じて表面粗さ程度からバルクへと、摩耗が様に進行している様子が分る。これに対して、同図(b), (d)に示した硬質Crめっきの場合は様相が異なる。(b)は試験2の開始からe点まで、(d)は試験3の δ 点から θ 点まで使用したものである。ともに試験時間が短いため、硬質Crめっき層の最大摩耗深さは0.5 μ m程度と少ないが、摩耗面の形状を見ると、(a)に示したCr₂O₃被膜程平滑ではないことが分る。図13(c)は、試験2のe点からh点に至る区間で用いた、厚さ約1 μ mの MoS₂ スパッタ被膜を有する硬質Crめっきである。図から明らかなように、カーボンシール面と摩擦接触した部分は、全面に渡って MoS₂ 被膜層が一様に摩耗してしまっている。しかしながら、露出した硬質Crめっき層表面には、シールドラム部に対応する明確な摩耗痕跡は観察されず、硬質Crめっき層の保護という意味では、MoS₂ スパッタ被膜の効果が認められる。

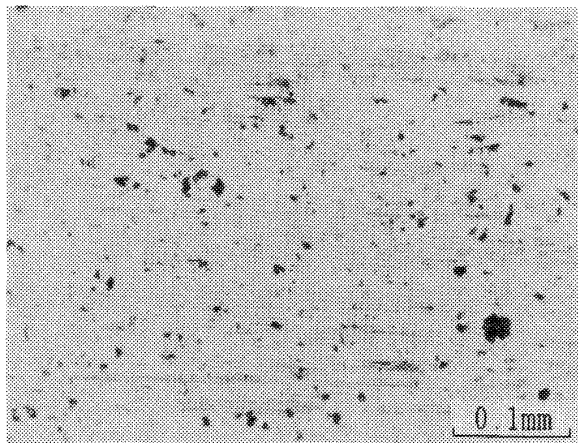
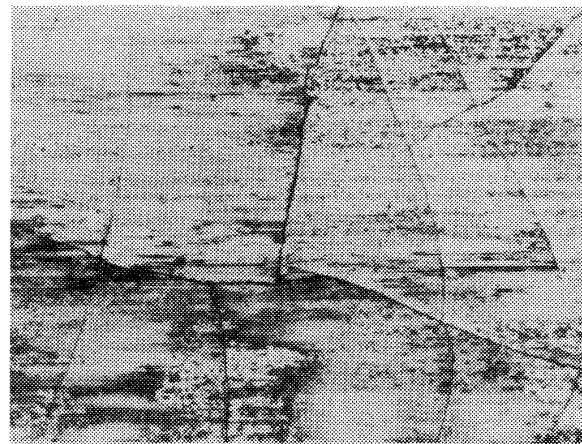
(a) J点; Cr_2O_3 プラズマ溶射被膜(b) θ 点; 硬質Crめっき

図14 ランナー摩耗面顕微鏡写真

図14の(a)と(b)は、それぞれ図13の(a)と(d)に示したランナーシール面の摩耗痕の顕微鏡写真である。これらは、シールドラム部と摩擦接触した部分であるが、(b)に示した硬質Crめっきの場合、摩耗面上には多数のき裂が観察される。これらのき裂は摩耗面を越えて未接触部分にも延びており、カーボンとの摩擦によって発生したものではなく、めっき時に残留したもの⁹⁾が摩耗により表面部が平坦化したため、明確化したものと推察される。しかし、き裂部付近にはカーボンなどが選択的に移着しており、今後更に試験を続行した場合、これらのき裂を起点として、新たなき裂の伸展が生じる可能性は極めて高いであろう。これに対して、同図(a)に示した Cr_2O_3 被膜では、き裂などの大きな乱れはなく、摩耗が一様に進行している様子が良く分る。

図15は、図13に示した各ランナーの相手側にあたるカーボンシール面の摩耗面形状を示したものである。同図(b)と(c)を比較すると、e点からh点に至る試験で生じた摩耗の進行に伴い、表面形状の乱れが大きくなっていることが分る。外観観察から判断すると、これらの乱れの多くは、カーボン表面層にブリスタが発生しそれがはく離することによって生じたものと考えられる。図15の(a)と(d)は、J点及び θ 点で得られた結果であるが、カーボンシール面上の摩耗した部分を見ると、ともに表面形状の乱れは少ない。したがって、カーボンの摩耗状態に及ぼす影響という観点から判断す

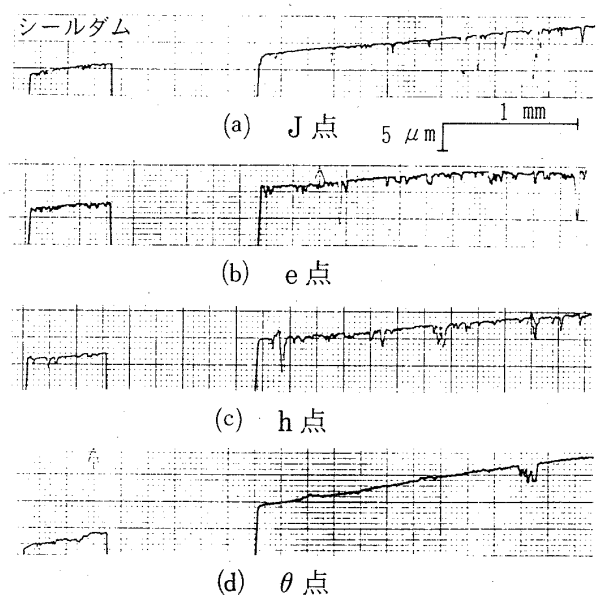


図15 カーボンセグメントの摩耗面形状

る限り、ランナー面上への MoS_2 スパッタ被膜よりも、カーボンシール面上への MoS_2 スプレー被膜の方が有効であることが分る。

さて、鈴木らの研究⁸⁾によれば、相手側カーボンの異常摩耗を避けるために、硬質Crめっきの表面粗さは $R_{\text{max}}=0.4\mu\text{m}$ 以下に抑える必要があると指摘されている。しかし表3に示したように、 Cr_2O_3 プラズマ溶射被膜は $R_{\text{max}}=1\mu\text{m}$ 程度であるが、相手側カーボンの摩耗量は最も少なかった。その理由としては、カーボンシール面上に施した MoS_2 スプレー被膜の効果がまず考えられる。更に、試験後の Cr_2O_3 被膜摩耗面は極めて平滑化されており、カーボンと Cr_2O_3 被膜との摩擦相

性の良さを物語っている。すなわち、MoS₂被膜の効果と両者の摩擦相性の良さ故に、Cr₂O₃被膜に対しては硬質Crめっき程、カーボンが相手材の表面粗さに敏感に反応しなかったものと推察される。

3.5 摩擦試験結果との比較

シール試験結果と比較するために、ピン回転円板型摩擦試験機⁶⁾を用いて、カーボン材料とランナー被膜材との摩擦試験を行なった。

表7は、試験室温度約100KのGHe中で行なった、カーボンA製ピンと硬質Crめっきされた円板との摩擦試験結果を示したものである。試験条件は摩擦速度12m/s、荷重9.8N(接触面圧力1.4MPa)と、シール試験をかならずしも模擬していないが、表中に示したように、カーボン表面に施した厚さ約3μmのMoS₂スプレー被膜は、摩擦係数や比摩耗量の軽減に絶大なる効果を及ぼしている。なお、MoS₂被膜を有するカーボンの場合、総摩擦距離が43km余りにも達したが、試験後の摩擦面上にはMoS₂が残留しており、カーボンの重量減は検出されなかった(使用した天秤の測定分解能0.1mg未満)。

表8は、常温GHe中に行なったカーボンAと

硬質Crめっき及びCr₂O₃プラズマ溶射被膜との摩擦試験結果¹⁰⁾である。摩擦試験は、摩擦速度9.8m/s、荷重9.8Nの条件下で開始し、その後荷重を段階的に増加させ、摩擦係数や摩耗が急激な増加を示す直前の、荷重と摩擦係数を求めている。Cr₂O₃被膜の場合、試験機の許容限度である196Nまで荷重を増加させたが、摩擦係数は $f=0.03$ 程度の低い値を維持した。これに対して硬質Crめっきの場合は、30Nを越えて荷重を増加させると、摩擦係数と摩耗の急激な増加が認められた。この結果は、カーボンAの摩擦相手材としては、硬質CrめっきよりCr₂O₃被膜の方が優れていることを端的に示している。しかし一方で、カーボン材料自身の良好な自己潤滑性が損われる低温GHe中では、両者の差が常温程明確ではないという結果も得られている¹⁰⁾。すなわち、低温下で失われたカーボンの自己潤滑性は、Cr₂O₃被膜でも補償することは出来ないのである。換言すれば、硬質CrめっきとCr₂O₃被膜の差は、カーボン材料の良好な自己潤滑性をどの程度助長するかにかかわるものであり、MoS₂のような自己潤滑剤でない限り、失われたカーボンの自己潤滑性を補うことは出来ないものと考えられる。

以上のように、摩擦試験の結果は前節までに述

表7 MoS₂被膜の効果

円板試片	SUS440C+硬質Crめっき	
ピン試片	カーボンA	カーボンA+ MoS ₂ スプレー被膜
摩擦係数 カーボンの比摩耗量	0.15~0.30 2.05×10 ⁻⁸ mm ² /N	0.06~0.11 検出不能

表8 硬質被膜の効果

ピン試片	カーボンA	
相手硬質被膜	Cr ₂ O ₃ プラズマ溶射	硬質Crめっき
最大試験荷重 摩擦係数	196N 以上 0.03	30N 0.08

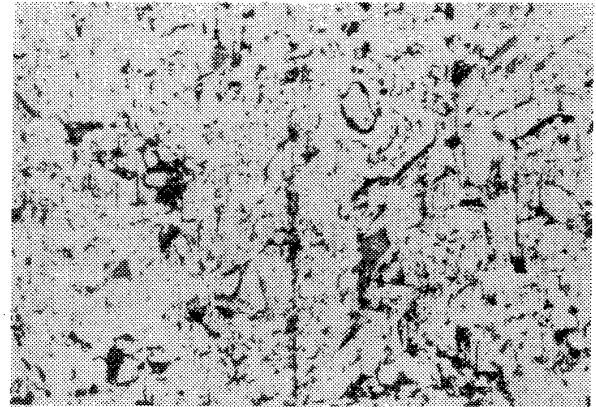
べてきたシール試験結果を裏付けるものとなっている。このことは、摩擦試験がシール試験の内容を絞り込むための予備的な試験として、あるいはその確認試験として、極めて有用であることを示唆している。

さて、図16は摩擦試験¹⁰⁾で観察された3種類の典型的な摩耗状態を示す、カーボン摩耗面の顕微鏡写真である。同図(a)には、摩擦係数、摩耗量ともに低い摩耗状態の例として、常温GHe中でのカーボンAとCr₂O₃被膜との摩擦試験で観察された、カーボン摩耗面を示した。摩耗面は極めて平滑化されており、光沢すらある。これに対して同図(c)は、摩擦係数、摩耗量ともに高い摩耗状態の例である。これは、低温GHe中でのカーボンAと硬質Crめっきとの摩擦試験結果であるが、カーボン摩耗面上には表面層の大規模な脱落が見られ、摩耗量の多さを物語っている。これら2例の中間に位置する状態が同図(b)に示した摩耗状態である。ここには一例として、低温GHe中でのカーボンAと窒化ボロンを含有するニッケルめっきとの摩擦試験結果¹⁰⁾を示した。カーボン摩耗面上には、表層部の大規模な脱落は認められないが、ブリスタ状の盛り上がりが多数観察され、正に上記2例の中間に位置することが分る。

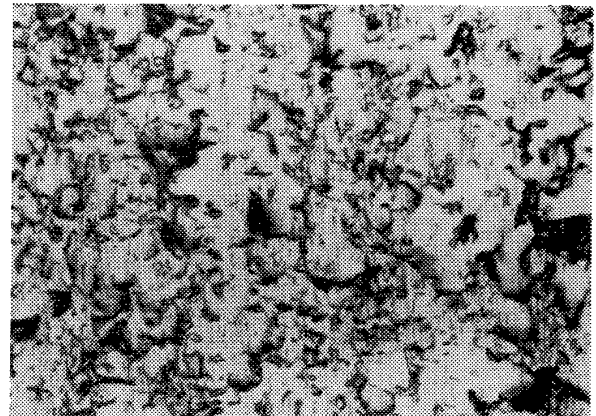
ここに示した3種類の摩耗状態は、供試シールのカーボンシール面上においても同様に観察された。前節までに述べてきたように、シール試験の場合、カーボンセグメントの摩耗面は基本的に平滑化しており、図16(a)に近い摩耗状態が生じている。図17に、一例として試験1のJ点で得られたカーボンシール面の顕微鏡写真を示した。しかし、図15(d)に示したh点でのカーボン摩耗面形状には、ブリスタ状のはく離に伴う乱れが発生しており、図16(b)に示した摩耗状態へ移行しつつあるものと推察される。また、図3に示したカーボンセグメントの異常摩耗の例が、図16(c)に示した摩耗状態であることは、両図を比較すれば明らかである。

4. 考 察

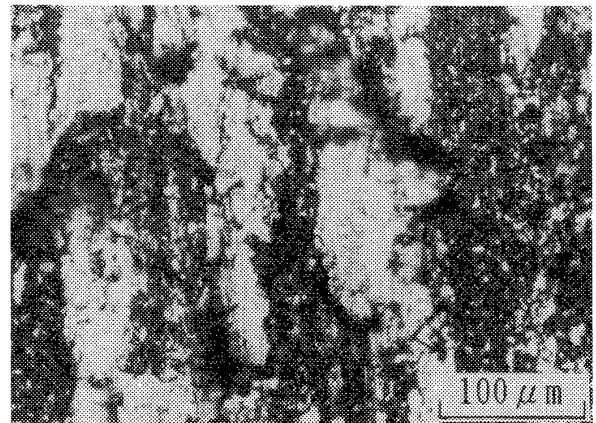
以上述べてきた試験結果及び観察結果を基に、以下、供試シールの耐久性について考察を加えた



(a) 摩擦係数・摩耗量が低い状態
(摩耗状態1)



(b) ブリスタ状のはく離を伴う状態
(摩耗状態2)



(c) 摩擦係数・摩耗量が高い状態
(摩耗状態3)

図16 カーボン摩耗面の顕微鏡写真
(摩擦試験)

い。話を簡便化するために、図16(a), (b), (c)に代表されるカーボンの摩耗状態を、それぞれ摩耗状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲと名付けることにする。摩耗状態ⅠとⅢは、LANCASTERが報告²⁾している、遷移前と遷移後の状態に対応するものと考えられる。

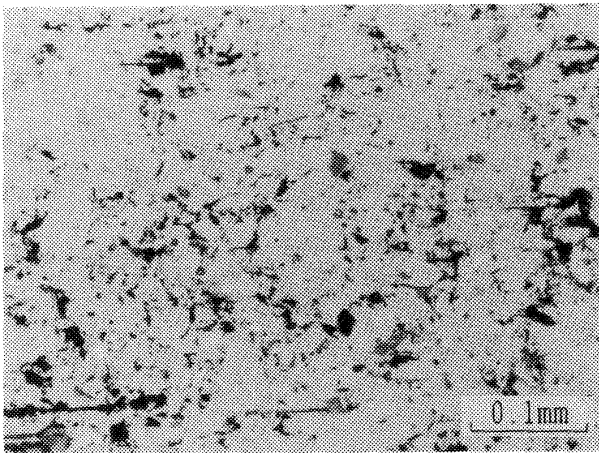


図17 カーボンシール面の顕微鏡写真
(試験1のJ点)

これに対して摩耗状態Ⅱは、それが単なる遷移の中間過程なのか、独立した状態なのかは、議論の分かれるところである。しかしどちらであるにせよ、一つの危険信号と見なすならば、実用上意味のある状態区分と言えよう。

さて、カーボンセグメントの摩耗が摩耗状態Ⅰを維持する限り、レイリーステップの効果が損われることはない。したがって、外的条件が変化しても、摩耗の進行による開口力の増加という形で、自己適応することが出来るものと考えられる。しかしながら、初期摩耗段階において過大な負荷が働いたり、外的条件の変化が大きくてカーボンセグメントに過大な押し付け力が作用すると、カーボンシール面は摩耗状態Ⅰを維持することが困難となる。その結果、摩耗状態はⅡの状態を経てⅢの状態へと遷移することになる。一度、カーボンシール面上で摩耗状態Ⅲが発生すると、シール面が荒れ、レイリーステップの効果は損われる。それ故、摩耗が進行しても開口力の増加は期待出来ず、カーボンの摩耗は直線的に進行するものと考えられる。すなわち、その結果が、図3に示したカーボンセグメントの異常摩耗である。

したがって、問題は初期摩耗段階や外的条件の変化に対して、いかにⅠの摩耗状態を維持するにかかわって来る。シール試験や摩擦試験の結果から明らかなように、この問題に対する有力な解決策の一つは、シール面間に MoS_2 被膜を介在させることである。特に、試験1で使用したカーボ

ンシール面上に MoS_2 スプレー被膜を有するカーボンA製シールリングと、 Cr_2O_3 プラズマ溶射被膜を有するランナーの組合せは、3種類の試験条件に及ぶ3時間余りの試験にもかかわらず、カーボンシール面は摩耗状態Ⅰを維持しており、その最大摩耗深さも $10\mu\text{m}$ 程度と極めて少なかった¹⁾。この実績は、あくまでもシール試験機の結果であるが、広範囲に渡る試験条件と試験時間の長さを考慮するならば、ロケットエンジンにおいても、その要求寿命を十分満足するものと予測される。

しかしながら、被膜という形を取る限り、 MoS_2 の効果にはある一定の限界が存在することも事実である。たとえば、図7(c)が端的に示しているように、カーボンシール面上の MoS_2 スプレー被膜自身も摩耗するわけである。また、図13(c)に示したように、ランナー面上の MoS_2 スパッタ被膜でも事情は変わらない。更に、試験1では図11に示したように、区間IJにおいてカーボンの比摩耗量が前区間より増加しており、 MoS_2 被膜の効果が薄れてきたことを物語っている。したがって、カーボンセグメントシールに対して更なる長寿命化を望むならば、 MoS_2 自身を含浸ないしは含有するカーボン材料が必要となるであろう。これは今後の課題である。

5. 結 言

液体酸素ターボポンプを模擬した条件下で、レイリーステップを有するカーボンセグメントシールの試験を行ない、その摩耗特性を明らかにした。主な結果は次のとおりである。

(1) ヘリウムパーズ圧力を増加させることと、ランナー回転数を低下させることは、ともにカーボンセグメントに働く正味の押し付け力を増加させるという形で、カーボンの摩耗を促進させる方向に作用する。

(2) シール面間に介在する MoS_2 被膜は、カーボンセグメントの摩耗軽減に極めて有効である。

(3) カーボンA製シール面上に MoS_2 スプレー被膜を施した供試シールと、 Cr_2O_3 プラズマ溶射被膜を有するランナーの組合せは、広範囲な試験条件下で十分な耐久性能を示した。

(4) ピン回転円板型摩擦試験機を用いたシール材料の試験結果とシール試験機による結果との間には、強い相関関係の存在することが確認された。

本研究を行うにあたり、イーグル EG & G エアロスペース(株)及び昭和電工(株)から供試シールや試料の一部を提供して頂いた。ここに厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 尾池 守, 渡辺義明, 菊池正孝, 野坂正隆; 液体酸素ターボポンプ用セグメントシールの密封特性, 航技研報告 TR-1130 (1991).
- 2) J. K. Lancaster; Transitions in the Friction and Wear of Carbons and Graphites Sliding against Themselves, ASLE Trans., Vol.18, No.2 (1975) pp.187-201.
- 3) R. H. Savege & D. L. Schaefer; Vapor Lubrication of Graphite Sliding Contacts, J. Appl. Phys., Vol.27, No.2 (1956) pp.136-138.
- 4) 山口光彦; カーボンブラシと摩擦・摩耗, 潤滑, Vol.26, No.5 (1981) pp.351-354.
- 5) 尾池 守; セラミックスと環境-低温-, トライボロジスト, Vol.34, No.2 (1989) pp.95-98.
- 6) 尾池 守, 菊池正孝; 低温液体中のアルミニウム合金しゅう動部に対する陽極酸化被膜の効果, 潤滑, Vol.30, No.6 (1985) pp.452-458.
- 7) G. P. Allen; Self-Acting Geometry for Noncontact Seals, Lubrication Eng., Vol.39, No.5 (1983) pp.300-305.
- 8) 鈴木峰男, 上條謙二郎, 渡辺義明, 森 雅裕; 液酸ターボポンプ・軸シールのシール性能と耐久性, 航技研報告 TR-717 (1982).
- 9) 例えば, 金属表面技術協会編; 金属表面技術便覧 (1976) pp.296-297, 日刊工業新聞社.
- 10) 菊池正孝, 野坂正隆, 尾池 守, 若松三郎; 日本潤滑学会第32期全国大会(大阪)予稿集, (1987) pp.413-416.

航空宇宙技術研究所報告1155号

平成4年5月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区西早稲田2-1-18
