TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

高温下におけるサーメット溶射膜の摩耗特性

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-12-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 金, 雄亮 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1648

修士学位論文

高温下における
サーメット溶射膜の摩耗特性

平成 30 年度
(2018 年 9 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋システム工学専攻

金　　雄亮

目次

第 1 章　序論.....1
1.1 サーメット溶射膜とは.....2
1.2 研究背景.....3
1.3 従来の研究.....4
1.3.1　Yang 氏の研究（1）.....4
1.3.2　Yang 氏の研究（2）.....5
1.4 研究目的.....6
第 2 章　実験.....7
2.1　実験概要.....8
2.2　実験装置.....8
2.2.1　駆動装置.....11
2.2.2　回転速度計測系.....12
2.2.3　恒温槽.....14
2.2.4　温度制御系.....17
2.2.5　測定機器.....19
2.3　試験片.....21
2.3.1　サーメット溶射膜ブロック試験片.....22
2.3.2　サーメット溶射膜リング試験片.....23
2.4　実験手順.....24
2.5　解析方法.....26
2.5.1　ブロック試験片に溶射されたサーメット皮膜の比摩耗量計算.....26
2.5.2　リング試験片に溶射されたサーメット皮膜の摩耗量の計算.....29
2.6　実験条件・試験片組み合わせ.....30
第 3 章　実験結果・考察.....32
3.1 リングにサーメット溶射膜の有無による摩耗特性への影響.....33
3.2 サーメット溶射膜の組み合わせによる摩耗特性への影響.....35
3.2.1 リング CrC とブロック CrC の組み合わせ.....35
3.2.2 リング CrC とブロック WC12%の組み合わせ.....37
3.2.3 リング CrC とブロック WC17%の組み合わせ.....37
3.2.4 リング WC12%とブロック CrC の組み合わせ.....38
3.2.5 リング WC12%とブロック WC12%の組み合わせ.....40
3.2.6 リング WC12%とブロック WC17%の組み合わせ.....40
3.3 リング母材による摩耗特性への影響.....41
3.4 温度による摩耗特性への影響.....42
第 4 章　結論.....44
参考文献
謝辞

第１章　序論

1.1 サーメット溶射膜とは

工業技術の発展に伴い、機械材料に課せられる耐熱性、耐摩耗性などの要求及びその使用環境は年々苛酷になっている。さらに材料部品、部材の長寿命化も求められており、これらを満たすための技術として表面改質技術がある。

その表面改質技術としてこれまでに多くの機械部品に使用されてきたのが高硬度で耐摩耗性に優れている硬質クロムメッキである。

しかし、近年の環境規則に伴い、この硬質クロムめっき製作工程には大量の化学薬品を使用することから、化学薬品の廃液処理に生じる環境負荷及びコストが大きく、現在その使用が見直されつつある。

めっきに代わる処理法として、化学薬品を一切使用しない溶射による皮膜形成法の応用開発が進められている。特に、HVOF (High-Velocity Oxygen Fuel) 溶射で製作されるサーメット溶射膜はその代替候補の一つである。

HVOF 溶射とは、直径数十マイクロメートルの微細な粉末材料を超音速燃焼炎のジェットによって、溶射装置内で溶融・加速させ、高速で材料表面に衝突・堆積させることで、非常に緻密で高密着力を有する皮膜を形成することができる技術である。サーメット (Cermet) とはセラミックス (Ceramics) と金属(Metal)を複合させた材料であり，その名称自体が材料成分の前半部から作られた造語である。

HVOF 溶射で作成膜されたサーメット溶射膜は、耐熱性、耐摩耗性が要求される機械部品表面に使用されている。このような皮膜を有する機械を設計ならびに製作する際には、その皮膜の特性を把握することが重要である。しかし、サーメット溶射膜の高温下での特性は未だ明らかになっていない。

1.2 研究背景

通常、機械部品に使用される摺動材料の組み合わせでは一方が摩耗しやすく、もう一方が摩耗しにくい材料とする場合が多い。なぜならば機械メンテナンスの場合に部品交換が容易となるためである。しかし機械の長寿命化を考えると両方の摺動材料の低摩耗が望ましい、特に宇宙で使用される機械では部品交換が困難であり摺動材料の長寿命化は重要となる。そのため機械部品双方の摺動材料にサーメット溶射膜を施し、両材料の損耗を減らすことが期待される。

しかし、サーメット溶射膜同士の摩耗特性に関する研究は少なく、その特性は明らかとなっていない。この特性を明らかとすることは将来の有益な摺動材料の開発に繋がると考える。

1.3 従来の研究

1.3.1　Yang 氏の研究（1）[2)]

2003 年と 2006 年に Yang 氏らによってタングステンカーバイト（以下 WC と称す）の粒子径と比摩耗量との関係に注目した論文が発表されている。ここではまず 2003 年に発表されたものを紹介する。

2003 年の論文では WC の粒子径及び摩擦面にかかる圧力の違いによる摩擦 •摩耗特性の変化を研究している。実験はカーバイドのサイズを細かいもの，中間のもの、粗いものという三段階に分けた WC/12%Co 溶射膜をダイヤモンドスリラーによって研磨を行い、アルミナを相手材にとしてリング・オン・プレート摩擦試験機を用いて実験を行っている。

WC/12%Co 膜の鋼と焼結したアルミナはそれぞれプレートと円筒の試験片として使用する。円筒の試験片（Al2O3）は注油せずに、大気中で負荷をかけ、正方プレート試験片（WC - Co 膜の鋼）と接触させ回転させるという実験を行っている。

回転速度は 220rpm(約 0.2m/s)とし、負荷荷重は 107、214 及び 321N と設定、接触面での圧力はそれぞれ 0.4,0.8,1.2MPa とする。実験後に XRD (X-Ray diffraction)で成分分析を行い、SEM (Scanning Electron Microscopy) と EPMA (Electron Probe Micro Analysis) によって摩擦断面及び摩擦表面の観察を行っている.

コバルトと WC は強く結びつくことは分かっているが，Yang 氏の実験結果によるとカーバイドの粒子径が小さくなればなるほど硬さ及び破壊靭性は減少することが報告されており，これは粒子径が小さくなるにつれて結合が弱まると結論付けている.

比摩耗量は $10^{-6}mm^3/(Nm)$程度と小さい値をとっており，粒子径の増加に伴い比摩耗量が増加するという結果になった.

また、Yang 氏はこれを柔らかく延性のあるコバルトが保持されコーティング皮膜の母体となるため，もしくはカーバイドの除去に伴いコバルトが表面に突き出されるため，あるいは摩耗粉が剝がれてから表面に再結合されるメカニズムに対してコバルトが有効に働くためと考えられると述べている.この摩耗粉の表面への再結合を一般的にはトライボフィルムと呼ぶ。

結果として表面にトライボフィルムが形成されることによって，これが保護膜となって比摩耗量，ダメージともに少なくなると報告している。

1.3.2　Yang 氏の研究（2）[3)]

2006 年に Yang 氏らが発表した論文で，高温下でのサーメット溶射膜の WC 粒子径と摩耗特性の関係について明らかにすることを目的とした研究であり，1.2.1 項の論文の実験条件を変えたものである。

実験方法は 1.2.1 項と同様，カーバイドのサイズを三段階，WC/12%Co をダイヤモンドスリラーによって研磨を行い，アルミナを相手材とした高温下でのリング・オン・プレートでのすべり摩耗実験を行った。

WC/12%Co 膜の鋼と焼結したアルミナはそれぞれプレートと円筒の試験片として使用する。

円筒の試験片（Al2O3）は注油を行わずに大気中で負荷をかけ，正方プレート試験片（WC-Co 膜の鋼）と接触させ回転させる実験を行った。

1.2.1 項では常温だったが，この論文では 200℃，300℃，400℃，で実験を行っている。回転速度は 220rpm，負荷荷重は 321N とし，接触面の圧力は 1.2Mpa 実験を行った。実験後各温度での摩耗損失，摩耗体積を調べ，SEN と EPMA によって表面観察を行った。

実験結果によると，最も細かい粒子は 300℃で摩耗表面が酸化，それ以上の温度では 400℃で酸化し始め，それぞれでトライボフィルムが発生した。

結果と表面観察からトライボフィルムが溶射膜の破片の再付着とその圧縮によって形成されることがわかる。これは過去の研究での結果と一致する。

このような摩耗形態によって，除去したカーバイド，または砕けたカーバイドによるコバルトの析出が摩耗面に起こり，WC/12%Co コーティングの高速度の摩耗メカニズムができると仮定される。これが起きるとき，コーティングの摩耗率はカーバイドの粒子サイズの増加によって増えるという結果が出た。また 400℃以上の高温下ではコーティングに激しい酸化が起き，その酸化膜がトライボフィルムを形成し、このトライボフィルムの剝離、再付着により，コーティング摩耗率のばらつきが大きくなる。

実験結果から，コーティングの摩耗率が温度上昇によって，減少しているのは重要なことである。滑り温度が常温~300℃まで増加する間，コーティングの摩耗率はカーバイドの粒子の大きさによって増減することがわかった。微量でもカーバイドの粒子が減少することで摩耗率はわずかに減少した。これは常温下での実験で得た結果と同じ傾向である。

実験結果から，突出した摩耗粉のコバルト成分がコーティングの表面上に密集し，粘着性を持ったトライボフィルム形成の基礎部分のような重要な役割を果たすのではないかと結論をつけた。

1.4 研究目的

サーメット溶射膜を使用した機械要素の設計製作を行う場合,サーメット溶射膜の特性を把握することが必要不可欠である。

本研究室での従来の研究では高温下におけるサーメット溶射膜と金属との摩耗特性について検討が行われてきたがサーメット溶射膜同士の場合については実験検討が行われていない。

本研究ではサーメット溶射膜同士の摩耗実験を行い、摩耗特性を調べることでサーメット溶射膜同士を摺動材として使用することの実用性を検証し、最適なサーメットの組み合わせを明確にすることを研究目的とする。

本研究で対象としたサーメット溶射膜は,HVOF(High-Velocity Oxygen Fuel)溶射により形成されたものを使用する。研究対象のサーメット溶射膜は WC/12%Co 膜, WC/17%Co 膜, Cr_3C_2/25%NiCr 膜の 3 種類であり, 溶射膜は外部の溶射メーカーに委託して成形されたものである。

第２章　実験

2.1　実験概要

試験ブロックと回転するリング双方の表面にサーメット溶射を施し，その双方を接触させる。その摺動部を断熱材によって構成された恒温槽によって高温に保ち，高温下でのサーメット溶射膜同士の間に生じる摩耗量，比摩耗量について調べる。その結果から各溶射膜の摩耗特性を評価する。

2.2　実験装置

実験装置に用いたブロック･オン･リング型試験機の概要を図 1（正面図），と図 2（側面図）に実験装置の構成の概略を図 3 に示す。

装置は駆動装置によって回転するリングに上から一定荷重で押し付ける。ブロックの溶射面とリングの溶射面に摩擦摩耗を生じさせる試験部と，リングの回転速度測定機器，恒温槽内の温度測定機器の測定系からなる実験装置である。

装置の構成は先ほど述べた試験部，測定部からなり，試験部はブロック及びリングを回転させる駆動装置と接触部を高温に保持する恒温槽から構成されており，測定部はリングの回転速度及び恒温槽内の温度を測定する機器から構成されている。

装置を構成している軸駆動用モーター，回転検出器及びデジタル表示器の回転測定系，恒温槽，温度調節器および熱電対の温度制御系について図 1，図 2 で概要を示す。

ブロックは下部バーに，リング試験片は回転軸にそれぞれ固定する。上部バーに荷重かけ，それが下部バーへと伝わる仕組みとなっている。下部バーは上部バーと交差するように設置する。

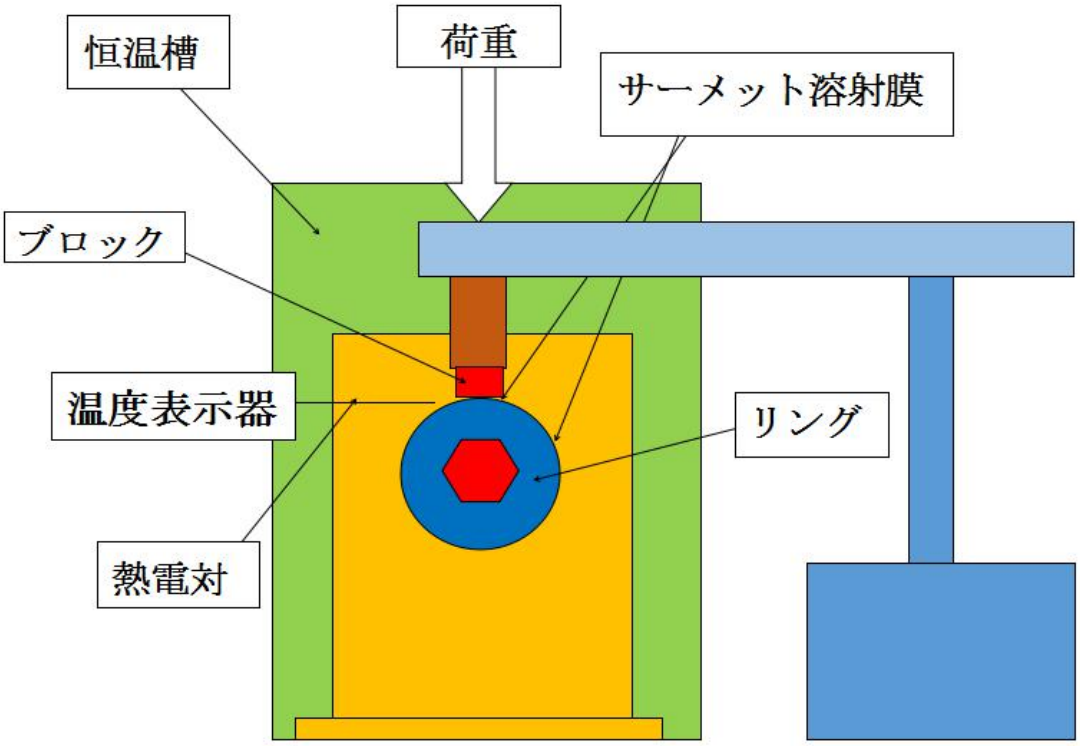

図１　　ブロック・オン・リング型実験装置（正面図）

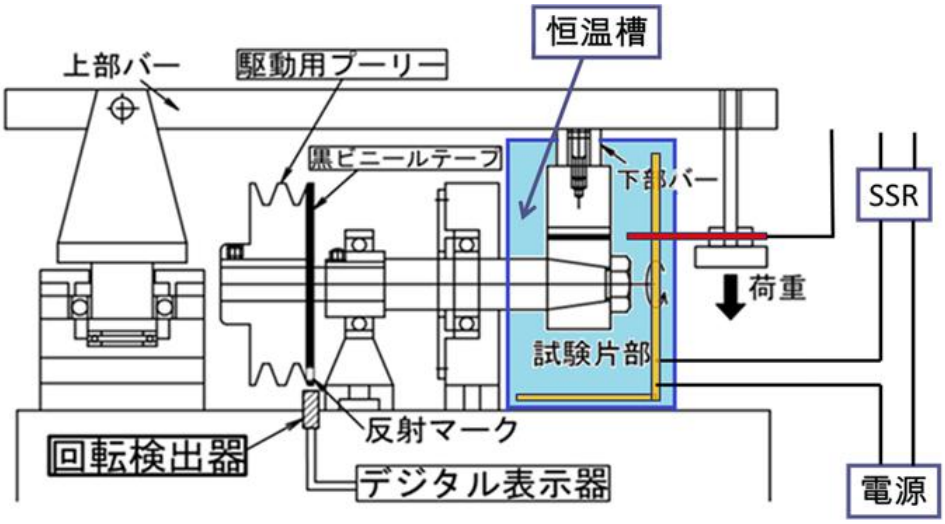

図２　　ブロック・オン・リング型実験装置（側面図）

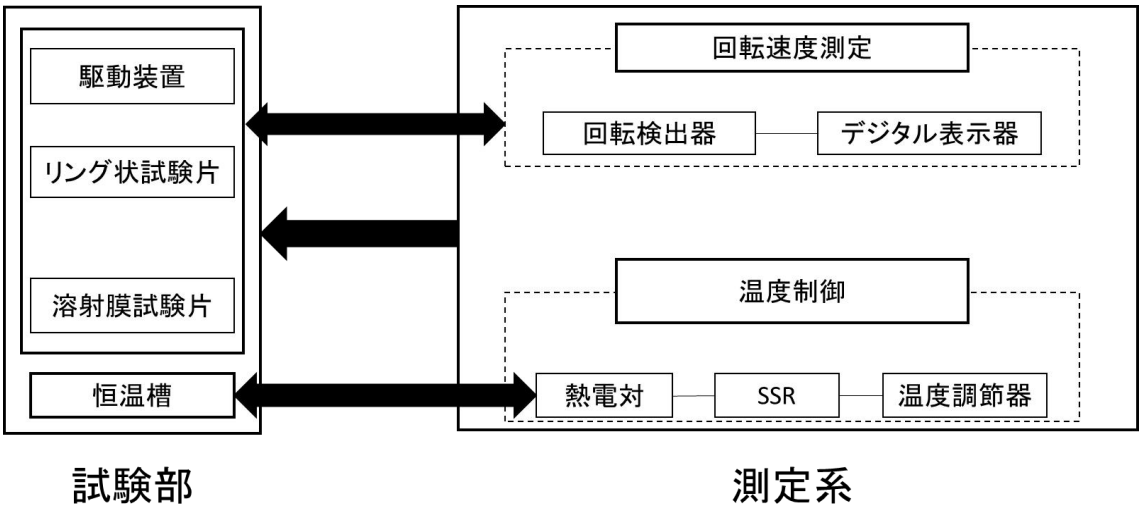

図 3　　実験装置の構成の概略図

2.2.1　駆動装置

本実験で回転軸を回転するために使用した駆動用モーターを図 4 に, その仕様を表 1 に示す。

図 4　駆動用モーター

表 1　駆動用モーターの仕様

形式	三木プーリー株式会社製　DCモーター　SMD-3700
出力電圧	160V (ARM VOLT) 185V (FIELD VOLT)
入力電圧	3.7kW
回転速度	モーター側最高回転数1750(rpm)
電流	26.2A(ARM CUR)

2.2.2　回転速度計測系

リングの回転速度の測定には回転速度検出器を使用する。まず，駆動用プーリー先端の円周上に黒色ビニールテープを巻き，その上に反射マークを貼る。そして，回転検出器から光（赤外線）を放ち，反射マークにあたって戻ってきた反射光を検出することで回転速度を測定する。測定された回転測定はデジタル表示器で確認できる。

使用する回転速度検出器を図 5，デジタル表示器を図 6 に示しそれぞれの仕様を表 2，表 3 に示す。

図 5　回転速度検出器

表 2　回転速度検出器の仕様

形式	株式会社　小野測器　製　光電式検出器　LG-916
検出方法	光電反射方式
検出距離	最大　20mm
検出物体	反射マーク
最大反応速度	20m/s
応答遅れ速度	1ms以下

図 6　デジタル表示器

表 3　デジタル表示器の仕様

形式	株式会社　小野測器　製　TM-2110
表示器	緑色7セグメント　LED（5桁）
表示時間	約1秒ごとに繰返し表示

2.2.3　恒温槽

断熱ブロックと電熱線を用いて，恒温槽を作ることにより高温実験を行う。電熱線を埋め込んだ断熱ブロックで実験装置を囲い込み，恒温槽として内部を加熱する。電熱線にはニクロム線よりも耐久性に優れたカンタル線を使用し，昇温温度を速くするためにコイル状に加工されたものを使用する。

恒温槽は熱電対で捉えた槽内の実温度（以下，検出温度とする）を検出させ，その温度と温度調節器で設定した目標温度（以下，設定温度とする）とを比較し，検出温度が低ければソリッドステート・リレー（SSR）がカンタル線へ供給電気を ON にし，逆に高ければ OFF にといった ON/OFF 式のフィードバック制御によって温度制御を行っている。

カンタル線は耐熱性無機接着剤を用いて固定し，恒温槽の全体図を図 7 に示す。断熱材を図 8，断熱材の仕様を表 4，カンタル線を図 9，仕様を表 5 に耐火パテを図 10 に，仕様を表 6 に示す。

恒温槽内の温度はリング摺動面上の三点を選び，一分おきに温度を測定し 10 分間の平均温度を測定した。測定点については図 11 に示し，測定結果については表 7 に示す。

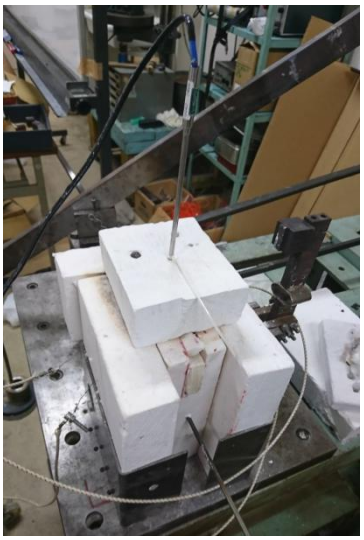

図 7　恒温槽の全体図

図 8　断熱材

表 4　断熱材の仕様

形式	イソライト工業(株)製 イソウール1000ボード
最高使用温度	1000℃
材質	セラミックファイバー

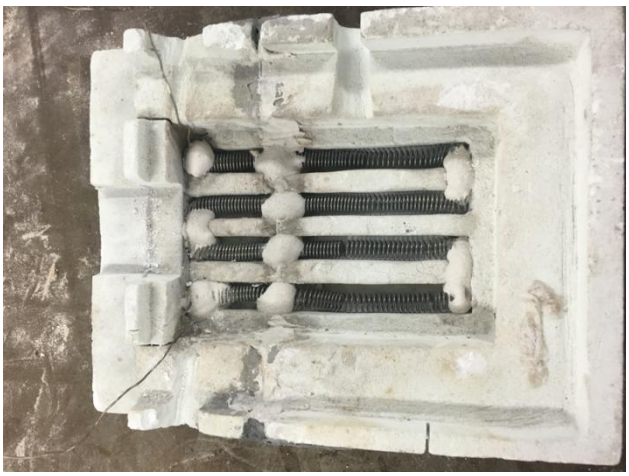

図 9　カンタル線

表 5　カンタル線の仕様

使用電圧	AC100V
使用電力	500W
線太さ	Φ0.7
コイル外形	Φ0.7　密着巻長さ180mm

図 10　使用した耐火パテ

表 6　耐火パテの仕様

形式	セメダイン株式会社　製　セメダイン耐火パテ
種類	耐熱性無機接着剤
耐久温度	1100℃

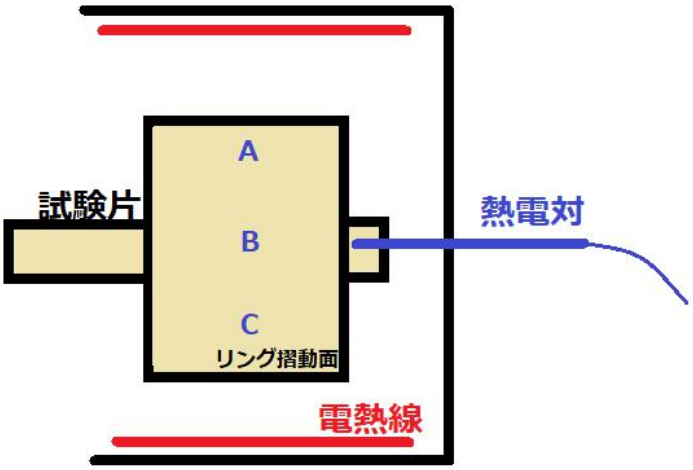

図 11　温度分布測定実験での測定点

表 7　温度分布測定試験の結果

実験温度（℃）	300	500
A点（℃）	300.7	503.8
B点（℃）	297.5	491.5
C点（℃）	301.4	503.6
実測平均温度（℃）	299.9	499.6

2.2.4　温度制御系

恒温槽の断熱材に埋め込まれた電熱線にソリッドステートリレー（以下SSR と称す）と呼ばれる半導体を接続することによって加熱を行う。温度調整はSSR に接続された電子温度調節器及び熱電対を用いて行う。この温度調節はON/OFF 制御であり，SSR を図 13，電子温度調節器を図 14 に示し，それぞれの仕様を表 8，表 9 に示す。

図 13　SSR

表 8　SSR の仕様

形式	オムロン　G3NA-220B
入力定格電圧	DC5～24V
入力インピーダンス	7mA以下
出力定格電圧	AC24～240V

図 14　電子温度調節器

表 9　電子温度調節器の仕様

形式	オムロン　E5CN
指示制度	±0.3%
制御方式	ON/OFF制御・PID制御
出力電圧	DC12V±15%
最大負荷電流	21mA
備考	短絡保護回路付

2.2.5　測定機器

実験には温度測定器，電子天秤，表面粗さ測定器の三種類の測定器具を使用する。それぞれの写真を図 15，図 16，図 17 に仕様を表 10，表 11，表 12 に示す

図 15　温度測定器

表 10　温度測定器の仕様

形式	チノー　MC1000-000(1.02)
測定範囲	熱電対Kの場合　-200～1370℃
精度定格	分解能1℃の時、±(測定値の0.1%+1℃)

図 16　電子天秤

表 11　電子天秤の仕様

形式	Mettler PM400
最小測定値	0.001g
限界測定値	410g

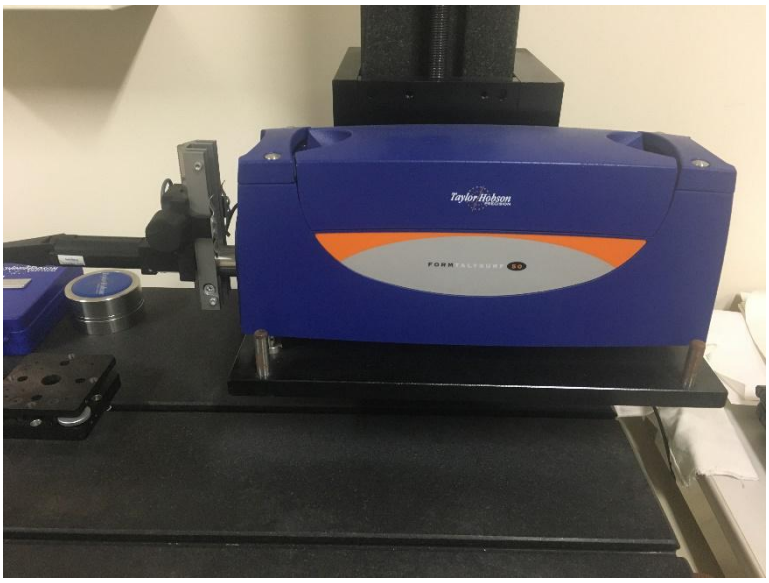

図 17　表面粗さ測定器

形式	Taylor Hobson 製　フォータムリサーフIntra2
ゲージ測定範囲	1mm,0.2mm(通常時)
ゲージ分解能	0.8mm
スタイラス荷重	0.7mN～1mN
スタイラス先端形状	半径2μmR　円錐状
スタイラス許容値	0.25μm以下　キャリブレーション結果:0.0957μm
トラバースユニットの真直度制度	0.4μmR/50mm
校正法	ボールマスター校正法
解析ソフト	Ultraソフトウェア
備考	測定部と操作表示部が分離されたポータブルタイプ USBによるPCでの操作が可能

表 12　表面粗さ測定器の仕様

2.3　試験片

試験片は表面にサーメット溶射を施したブロックとリングを用いる。図18に各試験片の形状図を図示し，溶射膜の仕様を表13に示す。

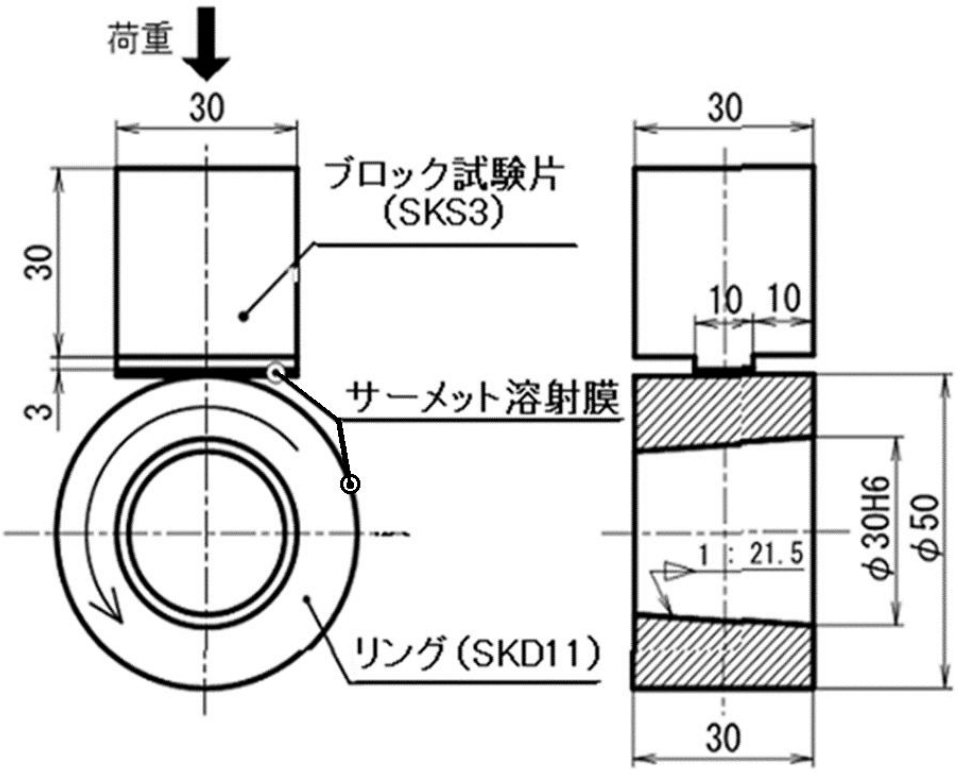

図18　各試験片の形状図

表13　サーメット溶射膜の仕様

サーメット溶射膜	厚さ(μm)	硬度(HV)	表面粗さRa(μm)
WC/12%Co	150	1293	0.24
WC/17%Co	150	1252	0.2
Cr3C2/25%NiCr	150	381	0.15

2.3.1　サーメット溶射膜ブロック試験片

サーメット溶射膜試験片の母材には，実験対象とした温度範囲において温度上昇による硬度変化が少なく，高温下での比摩耗量への影響を最小限にするため SKS3 を使用する。表 14 に示されるように SKS3 は 700℃まで加熱後，常温へと冷却を行った後に硬度を測ってみたところ母材硬度は HV218 となり，常温での測定値とあまり変わらないことが確認できた。この結果から SKS3 は高温状態に変化させたとしても組織変化はなく，母材硬度の変化がない状態で摩耗実験が行われていると判断した。

試験片の凸面にサーメット溶射膜を溶射する。溶射に使用されるサーメットは WC/12%Co，WC/17%Co，Cr_3C_2/25%NiCr の 3 種類とする。

溶射にはショットブラストにより前処理を行い，HVOF 溶射によってサーメット溶射膜を形成した。

溶射後に実験条件の均一化のため，平面研削盤によるサーメット溶射膜試験片の溶射面の研磨を行う。

実験に使用したサーメット溶射膜試験片を図 19 に示し，母材の硬度を表 14 に示す。

図 19　サーメット溶射膜試験片

表 14　ブロックの硬度

材料名	硬度(HRB)
SKS3	91.378571

2.3.2　サーメット溶射膜リング試験片

リングの母材にはSKD11とS45Cを使用する。それぞれの構成元素を表13,に示す。その表面にはサーメット溶射を施す。溶射に使用されるサーメットはWC/12%Co，Cr_3C_2/25%NiCrの2種類とする。溶射にはショットブラストにより前処理を行い,HVOF溶射によって平均160μmのサーメット溶射膜を形成した。

リングの内側は回転軸にしっかりと固定されるようにテーパ比1/21.5の加工を施す。リングを図20に示し，仕様を表15，表16に示す。

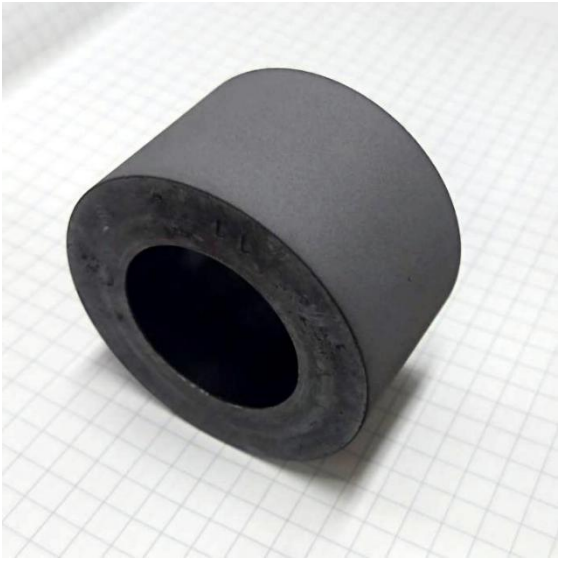

図20　リング試験片

表15　リング母材の構成元素

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
SKD11	1.40 -1.60	1.40 以下	0.60 以下	0.030 以下	0.030 以下	11.00 -13.00	0.80 -1.20	0.20 -0.50
S45C	0.42 -0.48	0.15 -0.35	0.60 -0.90	0.030 以下	0.035 以下	-	-	-

表16　リング母材の仕様

母材	硬度(HRB)	表面粗さRa(μm)
SKD11	114.7	2.40
S45C	93.1	2.22

2.4　実験手順

実験条件は実際の使用温度にできるだけ近づけるために，表 17 のような条件を設定した。なお過去の実験では回転速度 700rpm で実験を行ってきたが，回転速度が大きいと装置の振動が過大になることから，回転速度を 350rpm，実験時間を過去データの 2 倍とすることですべり距離を等しくすることで。昨年度までのデータと比較考察できる実験条件とした。また荷重に関しても，リングにサーメット溶射を施すことで摩耗の進行が遅くなる可能性があったため，40N を選択した。

表 17　実験条件

荷重	40N
回転数	350rpm
実験時間	40m in
実験温度	300℃，500℃
使用リング母材	SKD11，S45C
使用リング溶射膜	WC/12%Co，Cr_3C_2/25%NiCr
使用ブロック溶射膜	WC/12%Co，WC17%Co，Cr_3C_2/25%NiCr

実験手順は以下の通りである。

実験前に電子天秤を使用してリングの重量を測定しておく。

1. ブロック試験片を実験装置の下部バーに，リング試験片を回転軸にセットする。
2. マーカーを用いて，セットしたブロック試験片とリング試験片との接触面が均一に当たっているかの確認を行う。不均一であれば銅板をブロック試験片と下部バーの間に挟み，再度固定してリングとの接触面が均一になるよう調整を行う。
3. 均一であることが確認できれば，エタノールを使用してブロック試験片，リングに付着したマーカー及び，汚れを拭き取る。
4. ブロック試験片とリングの接触面を中心として，断熱材で構成された恒温槽で周りを覆う。
5. 断熱材に埋め込まれたカンタル線の両端を SSR へと接続する。
6. 温度調節器に接続された熱電対を恒温槽内部に固定し，槽内部の温度測定の準備を行う。
7. 回転速度検出器を回転軸用プーリーの付近に準備する。
8. ブロック試験片を固定した下部バーと上部バーを下ろし，その上から断熱材によって蓋をすることで恒温槽からの熱の漏れを少なくする。
9. 温度調節器に電源を入れ，設定温度を入力し，電熱線にも電源を入れ，恒温槽内部の加熱を開始する。
10. 温度調節器に表示される温度が上昇し，実験温度付近で安定したことを確認する。
11. 測定温度が実験温度になったことが確認できたら軸駆動用モーターの電源を入れ，デジタル表示器を確認しながら回転速度を 350rpm まで回転させる。
12. 上部バーの先端に重りを設置し，ブロック試験片とリングとの接触面に荷重をかける。
13. 荷重をかけた時点から実験開始とし，決められた実験時間の間，回転を続ける。
14. 実験終了後，モーターの回転を止め，重りを外す。
15. 電熱線の電源を切り，温度調節器の設定温度を 0℃に戻し，電源を切る。
16. 恒温槽を解体し，上部バー，下部バーを上げ，ブロック試験片及びリングの冷却を行う。
17. 冷却後，ブロック試験片及びリングを装置から取り外す。
18. リングの重量を電子天秤で測定し，実験前後の重量差から摩耗重量を算出する。
19. 表面粗さ測定器を使用して，溶射膜上に形成された摩耗痕の幅，深さを測定する。
20. 計測された幅、深さの値を用いてブロック試験片の摩耗体積及び比摩耗量を算出する

2.5　解析方法

2.5.1　ブロック試験片に溶射されたサーメット皮膜の比摩耗量計算

サーメット溶射膜試験片の摩耗痕の幅・深さより摩耗体積を求め，更に次式より，その比摩耗量を算出する。

$$Vs = V/(W \cdot L) \cdots\cdots (1)$$

Vs：比摩耗量[mm^2/N]
V：摩耗体積[mm^3]
N：荷重[N]
L：すべり距離[mm]

この式で，N：荷重は固定値であり，L：すべり距離はリングに溶射されたサーメット皮膜の外周長さ[mm]と試験機の回転速度[rpm]から算出できる。

摩耗痕深さと幅は表面粗さ測定器を用いて計測する。

ブロック試験片の摩耗痕形状の概略を以下の図 21 に示す。

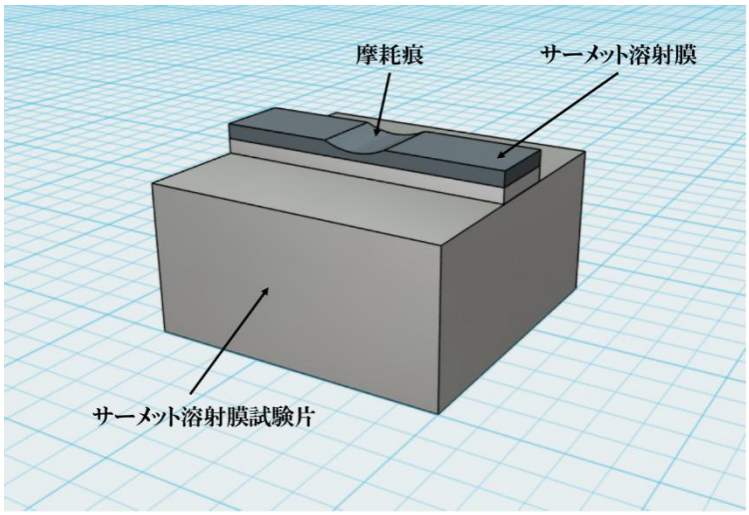

図 21　摩耗痕形状

摩耗痕の幅・深さの測定基準を以下に記し，測定個所の基準を以下の図 22 に示す。

測定手順

1. 測定個所は 3 ヶ所（摩耗痕両端と中央）とする。
2. 表面粗さ測定器で 3 ヶ所の粗さ曲線を測定する。
3. 測定された粗さ曲線から摩耗痕の幅と深さを求める。

4.　　測定した 3 ヶ所の幅，深さの平均値を算出し，その値を実験値とする。

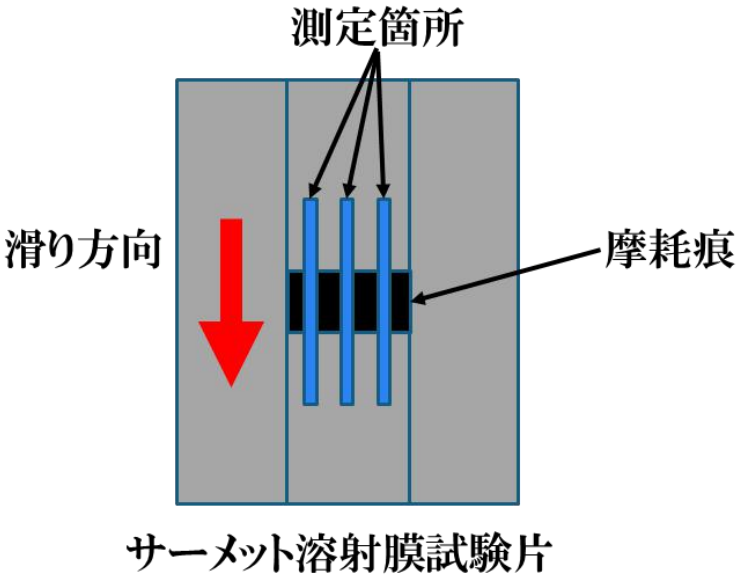

図 22　摩耗痕の測定基準

ブロック試験片の摩耗体積は，溶射膜がリングと接触してリングの形状に摩耗したと仮定すると，図 23 のように円弧に沿った摩耗痕ができると考えられる。

その摩耗痕を半径 r の円の一部とみなし，幅 w，深さ d だけ溶射膜を削ると仮定し，測定した摩耗痕の幅 w，および深さ d を用いて以下の式に代入し，摩耗体積を算出する。

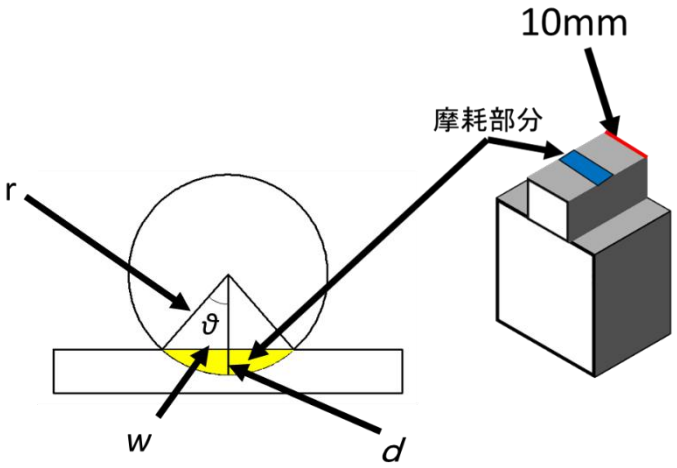

図 23　摩耗体積　計算図

$$r = \sqrt{(r-d)^2 + (\frac{w}{2})^2}$$

$$\theta = \cos^{-1}(r-d)/r$$

$$V = 10\{r^2\pi 2\theta/2\pi - W(r-d)/2\}$$

r：半径［mm］
w：横幅　［mm］
θ：角度［rad］
d：摩耗深さ［mm］
V：摩耗体積［mm^3］

得られた摩耗体積 V を（1）式に代入してブロックに溶射されたサーメット皮膜の比摩耗量を計算する。

2.5.2　リング試験片に溶射されたサーメット皮膜の摩耗量の計算

サーメット溶射膜試験片と同様に，リング材に関しても比摩耗量を計算する。手順としては実験前後の重量差からリングの摩耗重量を計測し，摩耗体積を算出する。

摩耗重量は電子天秤（測定最小値 0.001[g]）を用いて測定する。これによって得られた摩耗重量とリング材の密度から摩耗体積を算出する。リング材の表面に施されたサーメット溶射膜の密度は，溶射膜自体の密度データがないため，溶射材の密度を用いる。その密度を表 16 に表す。

リングに溶射されたサーメット皮膜の摩耗量とブロックに溶射されたサーメット皮膜の摩耗体積の算出方法に違いがある，ブロック試験片の実験前後の摩耗量は非常に微小であり，電子天秤でこれを測定するのは困難であり，かつ正確に測れないからである。そのため測定方法を 2 つの方式に分けている。

2.6　実験条件・試験片組み合わせ

先行研究では、ブロックにのみサーメット溶射を施し，無加工のリングと溶射済みブロックを摺動させて実験を行ってきた。だが，本実験ではリングにもサーメット溶射を施し，サーメット溶射膜同士の摺動実験を行った。試験片の組み合わせに関しては表 18 に示す。実験温度[4)]は 500℃，及び 300℃とし，ガスタービンや蒸気タービンなどの高温下で使用される軸受における使用温度に近い温度で実験を行った。

実験時間は，今までの実験データと比較するため，また硬度が高いために実験時間が短いと十分な摩耗量が得られない可能性があることから，350rpm／40 分 とした。荷重に関しても上記と同じ理由で 40N とした。なお，昨年度までの実験では，リングの摩耗量について比摩耗量を計算して比較していた。だが今回リング表面にサーメット溶射を施したことにより，摩耗した溶射膜自体の比重が求められないことから，リング摩耗量は重量を用いて比較した。

表 18　試験片組み合わせ

番号	温度(℃)	リング		ブロック
		母材	溶射材	溶射材
1	500	SKD11	WC12%	WC17%
2		S45C		
3	500	SKD11	CrC	WC17%
4		S45C		
5	500	SKD11	CrC	WC12%
6		S45C		
7	500	SKD11	WC12%	CrC
8		S45C		
9	500	SKD11	CrC	CrC
10		S45C		
11	500	SKD11	WC12%	WC12%
12		S45C		
13	300	SKD11	WC12%	WC17%
14	300	SKD11	CrC	WC17%
15	300	SKD11	CrC	WC12%
16	300	SKD11	WC12%	CrC
17	300	SKD11	CrC	CrC
18	300	SKD11	WC12%	WC12%

第３章　実験結果・考察

3.1 リングにサーメット溶射膜の有無による摩耗特性への影響

清水等[1)]の研究では、ブロック側にのみサーメット溶射膜を施し、リング側に溶射膜を施さないリング試験片を摺動させ実験を行ってきたが、サーメット同士の実験考察は行われておらず、摩耗特性もまだ明らかとなっていない。

そのため、ここではリング側サーメット溶射膜の有無によりどのような影響を受けるかについて、清水等の実験結果と我々のサーメット同士の摩耗実験結果を比較し、サーメット同士の摩耗特性について考察する。

図24、図25に清水等の実験結果とサーメット同士の摩耗実験結果を示す。図中のブロック側サーメット溶射膜あり、リング側溶射膜なしの組み合わせのデータは清水等の実験結果である。

清水等の実験結果は恒温槽温度500℃、荷重40N、700rpm、20分間の条件で得たものであるが、我々のサーメット同士の実験結果は恒温槽温度500℃、荷重40N、350rpm、40分間の条件で得た結果である。両実験は回転速度と摺動時間が異なるが、滑り距離は同一となるため、両実験で得られた比摩耗量と摩耗量の比較が可能と考える。

図24はリング側サーメット溶射膜の有無によるブロック側サーメット溶射膜の比摩耗量の比較を示す。図中の縦軸はブロック側サーメット溶射膜の比摩耗量を示し、横軸はサーメット溶射膜組み合わせの詳細を示す。

図25はリング側サーメット溶射膜の有無によるリング側サーメット溶射膜の摩耗量の比較を示す。図中の縦軸はリング側サーメット溶射膜の摩耗量を示し、横軸はサーメット溶射膜組み合わせの詳細を示す。

リング側の材質を同一の条件で比較した場合、ブロック側材質の硬度が高いほどブロック側比摩耗量は減少する傾向が見られる。

リング側のサーメット溶射膜がなしの場合にはブロック側サーメット溶射膜の硬度が硬いほどリング側の摩耗量は減少する。

リング側のサーメット溶射膜がCrCの場合にはリング側に摩耗粉が凝着し、ブロック側材質の硬度が高いほどその凝着量は大きくなる。

リング側のサーメット溶射膜がWC12%で、ブロック側のサーメット溶射膜がCrCの場合にはリング側溶射膜がCrCの場合と同様に摩耗粉がリング側に凝着し、リング重量は増加するが、ブロック側溶射膜がWC材（WC12%とWC17%の材料を総称する）の場合、摩耗量は正の値を示し、リング重量は減少する。

図24及び図25からリング側サーメット溶射膜がない場合のブロック側比摩耗量及びリング側摩耗量に比較してリングにサーメット溶射膜が施された場合にはそれらの値が小さいくなるサーメット溶射膜の組み合わせの存在が分かる。

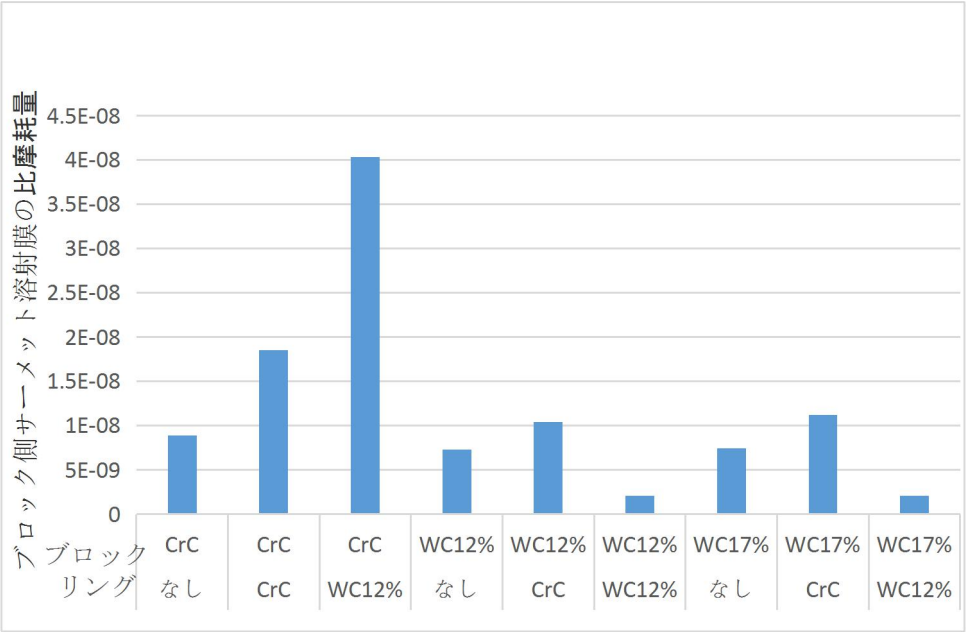

図 24　ブロック側サーメット溶射膜の比摩耗量

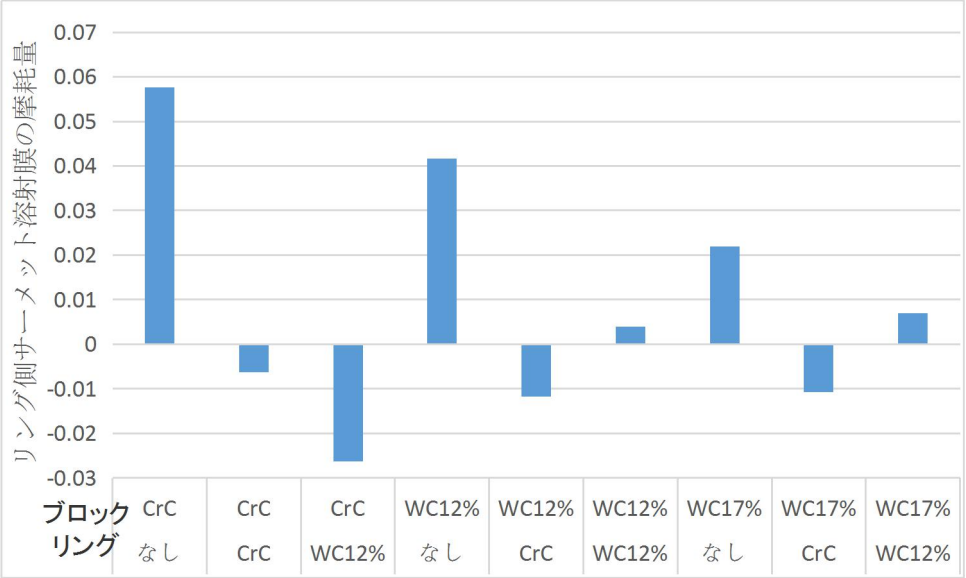

図 25　リング側サーメット溶射膜の摩耗量

3.2 サーメット溶射膜の組み合わせによる摩耗特性への影響

サーメット同士が摺動する場合、摩耗特性はサーメット材料の硬さ、粒子径、環境温度に影響を受ける。宇宙等々で使用される機械では部品交換が困難であり摺動材料の長寿命化は重要となる。その視点から機械材料が摺動する場合に摩耗する機械部品と摩耗される機械部品両方の低摩耗化が望ましい。3.1節で考察したように一方のみにサーメット溶射膜を施した場合に比較して両摺動材料にサーメット溶射膜を施した場合の方が摩耗量の減少する組み合わせの存在が確認された。本節ではそれぞれの組み合わせについて考察を行う。

3.2.1 リング CrC とブロック CrC の組み合わせ

図 26 はリング側 CrC とブロック側サーメット溶射膜との摩耗実験によるブロック側サーメット溶射膜の比摩耗量を示す。

図 27 はリング側 CrC とブロック側サーメット溶射膜との摩耗実験によるリング側サーメット溶射膜の摩耗量を示す。

ここではリング側CrCとブロック側CrCの組み合わせでのブロック比摩耗量について考察する。

図中の結果ではブロック側サーメット溶射膜の比摩耗量は 18.5(N/mm2)、リング側摩耗量は-0.0063g であった。

サーメット溶射膜 CrC はサーメット溶射膜 WC12%、WC17%に比較して硬度が低く、摩耗しやすい材料であるため、ブロック側溶射膜の比摩耗量は他のサーメット溶射膜の比摩耗量に比較して大きな値を示す。

リング側サーメット溶射膜は摩耗し、重量は減ることを予想されるが結果は逆であり重量は増加した。この結果はリング側に摩耗粒子の凝着が発生したことによるものと考える。また、重量の増加量は他のサーメット溶射膜の場合に比較して小さくなった。これは摺動により生じたサーメット溶射膜の摩耗粉の硬度が小さく、リング側溶射膜に凝着しにくかったために生じた結果と推測される。

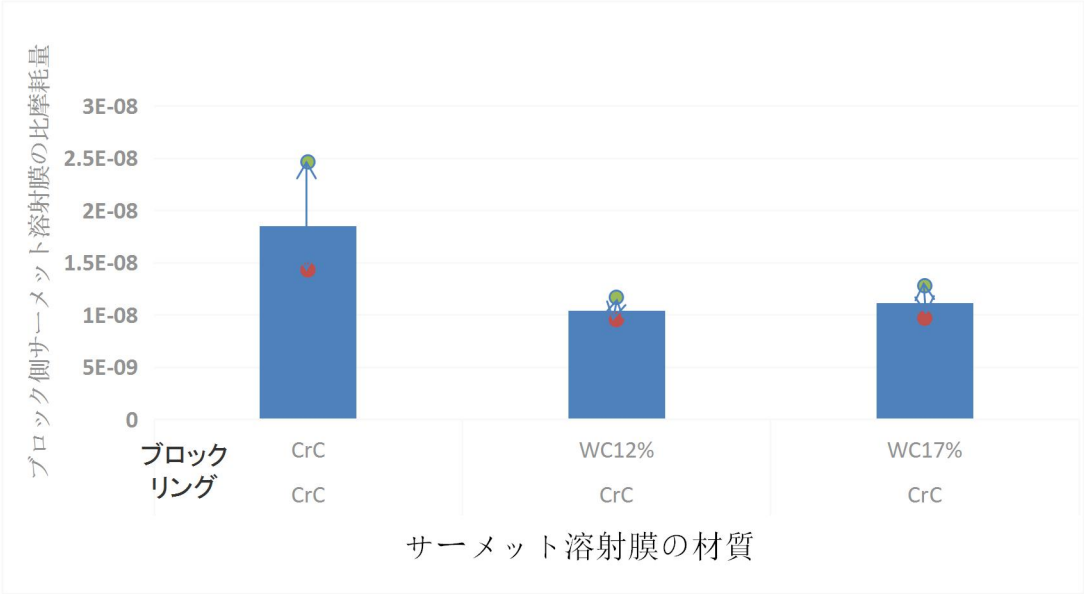

図 26　リングに CrC サーメット溶射膜を施した場合のブロック側比摩耗量

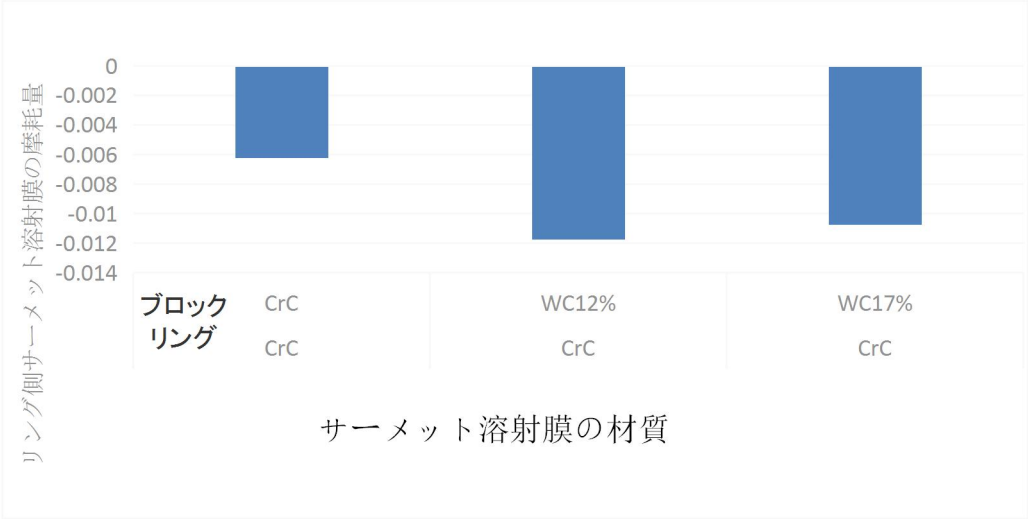

図 27　リングに CrC サーメット溶射膜を施したの場合リング摩耗量

3.2.2 リング CrC とブロック WC12%の組み合わせ

図 26 にリング側 CrC とブロック側 WC12%の組み合わせでのブロック比摩耗量を示す。

ブロック比摩耗量は 10.4(N/mm^2)になった。ブロック側に施したサーメット溶射膜 WC12%は CrC より硬く、ブロック側 WC12%の比摩耗量は 3.2.1 で述べたブロック側 CrC の比摩耗量に比較して減少した。

図 27 にリング側 CrC とブロック側 WC12%の組み合わせでのリング摩耗量を示す。その結果は-0.0117g であった。3.2.1 で述べたリング CrC とブロック CrC の組み合わせでの結果と比較すると、ブロック側 WC12%の方がブロック側 CrC に比較して比摩耗量は小さく、リング側に凝着する摩耗粉も少なくなると予想されるが、結果は逆であり凝着量は増えた。この結果のメカニズムについて次に考察する。ブロック側サーメット溶射膜の摩耗粉は一部リング側サーメット溶射膜に凝着し、ブロック側サーメット溶射膜の硬度が高いほど、リング側サーメット溶射膜に埋め込まれる割合が高くなり、リング側サーメットに凝着し易くなったために生じた結果と考える。

3.2.3 リング CrC とブロック WC17%の組み合わせ

図 26 にリング側 CrC とブロック側 WC17%の組み合わせでのブロック比摩耗量を示す。

ブロック側比摩耗量は 11.2(N/mm^2)になった。ブロック側 WC17%の結果はブロック側 WC12%の結果に近い数値結果であり、WC17%サーメット溶射膜と WC12%サーメット溶射膜に明らかな硬度の差が存在しないのために生じた結果と考える。

図 27 にリング側 CrC とブロック側 WC17%の組み合わせでのリング側摩耗量を示す。その結果は-0.0108g で、リング側摩耗量についてもブロック側 WC17%とブロック側 WC12%では近い数値結果となった。この結果も WC17%サーメット溶射膜と WC12%サーメット溶射膜に明らかな硬度の差が存在しないために生じたものと考える。

以上の結果から考えると摩耗状態に影響を与える要因として相手材の硬さが重要であると考える。

ブロック比摩耗量おいては、ブロック側溶射膜の硬度が高いほどブロック側比摩耗量の減少する傾向が見られ、材料の硬度に影響を受けると考える。

また、リング摩耗量では、ブロック側溶射膜の硬度が高いほどリング側凝着量の増加する傾向が見られ、材料の硬度に影響を受けることが分かる。

3.2.4 リング WC12%とブロック CrC の組み合わせ

図 28 はリング側 WC12%とブロック側サーメット溶射膜との摩耗実験によるブロック側サーメット溶射膜の比摩耗量を示す。

図 29 はリング側 WC12%とブロック側サーメット溶射膜との摩耗実験によるリング側サーメット溶射膜の摩耗量を示す。

ここではリング側 WC12%とブロック側 CrC の組み合わせでのブロック側比摩耗量について考察する。

図中の結果ではブロック側サーメット溶射膜の比摩耗量は 40.3(N/mm^2)、リング側摩耗量は-0.0263g であった。

ブロック側 CrC の比摩耗量が他の材質に比較して高いのは摺動するサーメット同士の硬度差が大きいことによると推測される。

リングに WC12%が施された場合、ブロック側ＣｒＣは他の材料と比較して硬度が低いので摩耗しやすい材料である。そのため、ブロック側比摩耗量が大きくなっている。また、リング側にその摩耗粉が凝着し、リング重量は増加する。他のブロック側 WC12%、WC17%の場合、ＣｒＣに比較して硬度が高いので比摩耗量は小さく、リング側に摩耗粉が凝着していないことが分かる。

図 28　リングに WC12%サーメット溶射膜を施した場合ブロック側比摩耗量

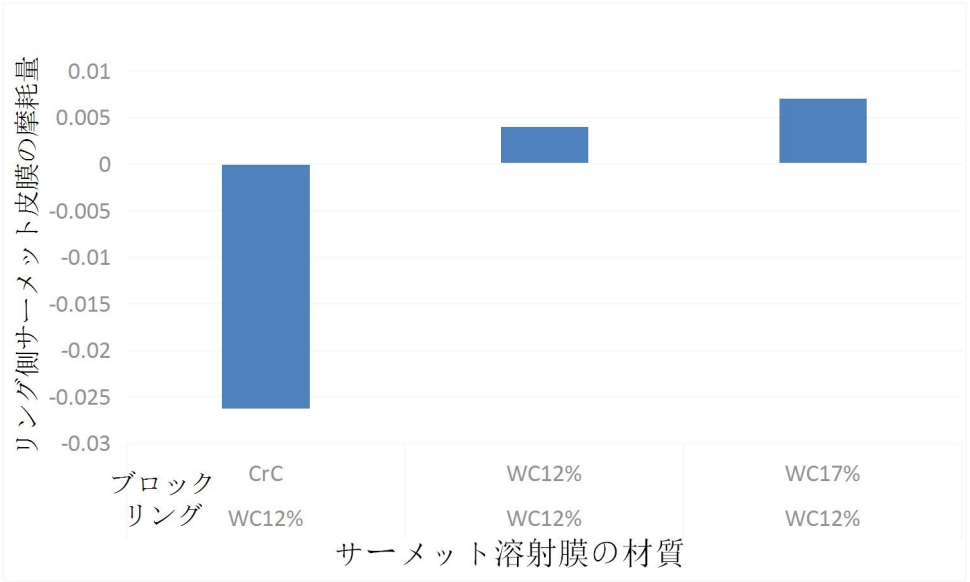

図 29　リングに WC12%サーメット溶射膜を施した場合リング側摩耗量

3.2.5 リング WC12%とブロック WC12%の組み合わせ

図 28 にリング側 WC12%とブロック WC12%の組み合わせでのブロック比摩耗量を示す。その結果は 2.07(N/mm^2)となった。

この比摩耗量は他の組み合わせの場合の比摩耗量と比較すると明らかな差がある。WC12%は CrC に比較して硬度の高い材料であり、摩耗しにくい材料である。そのため、ブロック側 WC12%は他の材料の比摩耗量に比べ１０分の１程度の小さな値となったと考える。また、ブロック側 WC12%とリング側 WC12%の組み合わせの場合の値はブロック側 CrC とリング側 WC12%の組み合わせの場合の値に比較して硬度さが小さく、そのため、ブロック側 WC12%は他の材料の比摩耗量に比べ小さな値となったと考える。

図 29 にリング側 WC12%とブロック側 WC12%の組み合わせでのリング摩耗量を示し、その結果は 0.0040g であった。リング側への凝着は発生しなかった。WC12%は CrC に比較して硬度の高い材料であり、摩耗しにくい材料である。そのため、リング側 WC12%は他の材料のリング側摩耗量に比べ小さな値となったと考える。

3.2.6 リング WC12%とブロック WC17%の組み合わせ

図 28 にリング側 WC12%とブロック WC17%の組み合わせでのブロック比摩耗量を示す。その結果は 2.09(N/mm^2)である。WC17%は WC12%に比較して硬度の近い材料である。そのため、WC17%と WC12%の比摩耗量と摩耗量は近い値となった。また、WC17%は WC12%に比較して硬度のやや低い材料である。そのため、WC17%の摩耗量は WC12%の値より少し高い値となった。

図 29 にリング側 WC12%とブロック側 WC17%の組み合わせでのリング摩耗量を示し、その結果は 0.0070g となった。リング側への凝着は発生しなかった。WC17%は CrC に比較して硬度の高い材料であり、摩耗しにくい材料である。そのため、リング側 WC17%は CrC のリング側摩耗量に比べ小さな絶対値となったと考える。

以上の結果からリング WC12%とブロック WC12%の組み合わせが実験で対象としたサーメット溶射膜の組み合わせの中では最も実用上有益な組み合わせであることが分かったが、Co の勾配割合を変えることで硬度を調整することが可能であると考えるので低摩耗量を満たす WC 材の開発が期待される。

3.3 リング母材による摩耗特性への影響

高温下において溶射膜母材は硬度変化を生じるため、高温条件下での溶射膜の摩耗量は母材の硬度変化により影響を受けると考える。ここでは硬度変化の異なるリング母材SKD11とS45Cを使用した場合の摩耗特性について考察する。実験条件としてはSKD11を母材とした場合の材質の組み合わせと同様の実験条件で、実験温度500℃，荷重40N、実験時間40分間で実験を行った。

図30はリング母材が異なる場合のそれぞれの組み合わせのブロック側サーメット溶射膜の比摩耗量を示す。

図31はリング母材が異なる場合のそれぞれの組み合わせのリング側サーメット溶射膜の摩耗量を示す。

結果では、リング，ブロック双方の摩耗量においてリング母材が異なることによる相違は見いだせなかった。

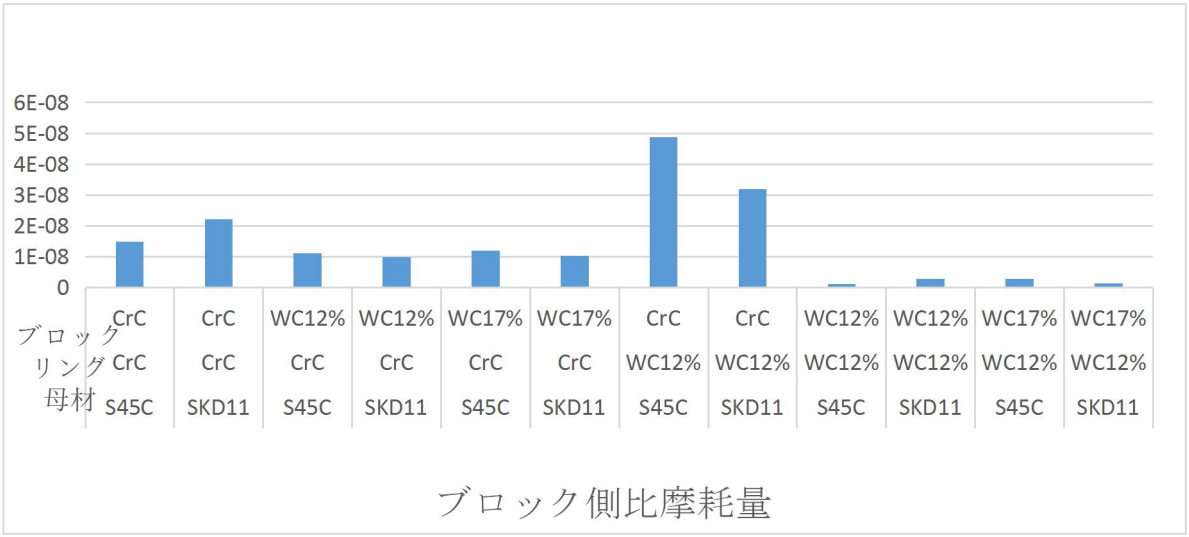

図30 それぞれの組み合わせのブロック側サーメット溶射膜の比摩耗量

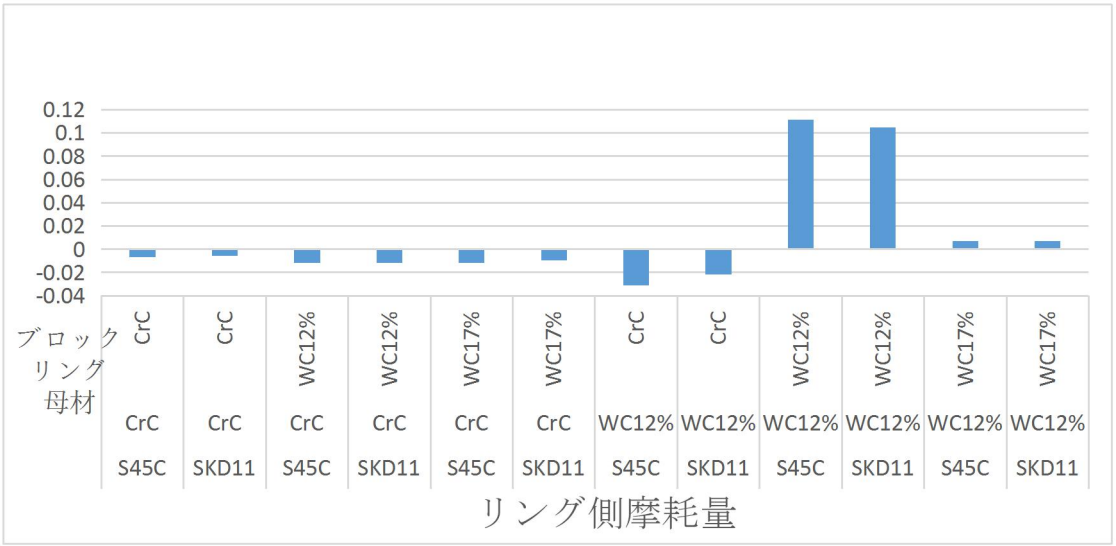

図31 それぞれの組み合わせのブロック側サーメット溶射膜の比摩耗量

3.4 温度による摩耗特性への影響

サーメット同士が摺動する場合、摩耗特性はサーメット材料の硬さ、粒子径、環境温度に影響を受ける。荷重、摺動時間、回転速度、材質を統一し、恒温槽内温度のみを変化させた場合の実験を行った。その結果を図32と図33に示す。

図32は恒温槽内温度が異なる場合のそれぞれの組み合わせのブロック側サーメット溶射膜の比摩耗量を示す。

図33は恒温槽内温度が異なる場合のそれぞれの組み合わせのリング側サーメット溶射膜の摩耗量を示す。

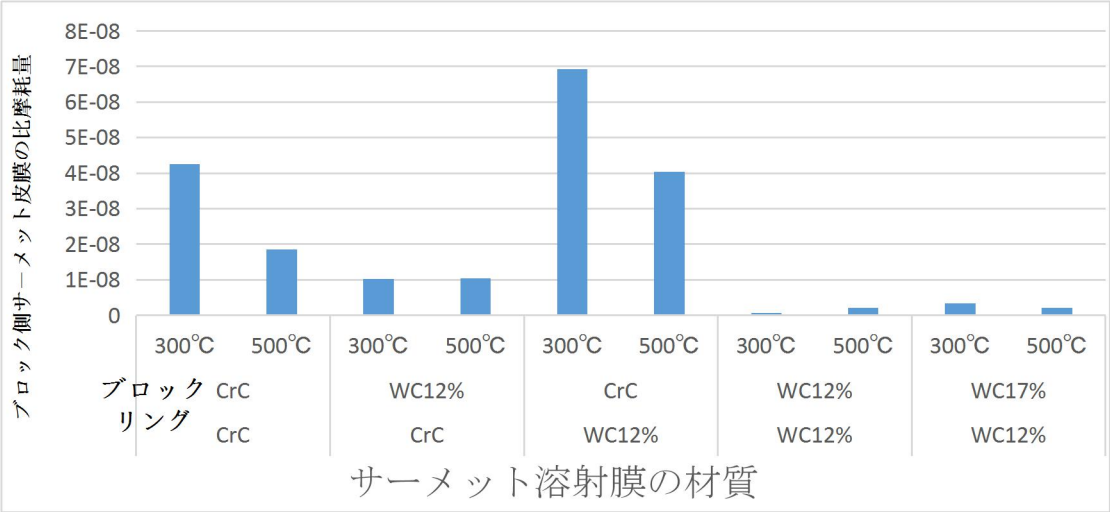

図32 恒温槽内温度が異なる場合のブロック側サーメット溶射膜の比摩耗量

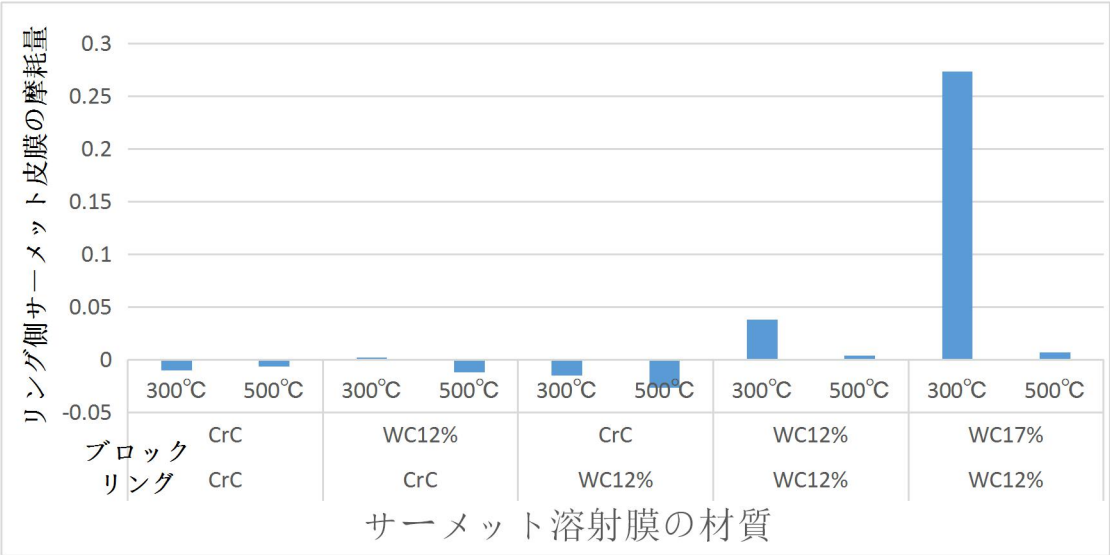

図33 恒温槽内温度が異なる場合のリング側サーメット溶射膜の摩耗量

ブロック比摩耗量についてみると、Cr が含まれる組み合わせでは 300℃の値は 500℃での値より高い数値になった。

300℃の条件下では 500℃の場合に比較して低い温度であるため溶射膜の軟化の度合いが小さく、摩耗しにくい環境である。そのため、WC 材と WC 材の組み合わせの場合には 300℃での実験においての摩擦振動大きくなり、不安定な摩耗状況になった。そのため、300℃の結果はばらつきが大きくなってしまった。

以上の結果では実験温度の対する定性的傾向が見られず、さらに、同一条件下における実験点数を増やし、温度による影響を考察する必要があると考える。

第４章　結論

本研究で行われた実験結果および考察より以下の結論を得た。

（1）Cr が含まれる組み合わせではブロック側比摩耗量とリング側摩耗量に全体的により高い摩耗数値になった。

（2）ブロック側溶射膜とリング側溶射膜の硬度差の値により摩耗特性が影響を受ける。

（3）ブロック側溶射膜自体の硬度とリング側溶射膜自体の硬度より摩耗特性が影響を受ける。

（4）ブロック側溶射膜の硬度が高いほどブロック側溶射膜の比摩耗量は減少する傾向を示す。

（5）ブロック側溶射膜の硬度が高いほどリング側溶射膜への凝着量は増加する傾向を示す。

（6）リング母材に対して摩耗結果は溶射膜の硬さに依存し，母材の硬さによる影響については定性的傾向は見なれなかった

（7）今迄試験した組み合わせの中でリング WC12%とブロック WC12%の組み合わせが実験で対象としたサーメット溶射膜の組み合わせの中では最も実用上有益な組み合わせであることが分かったが、Co の勾配割合を変えることで硬度を調整することが可能であると考えるので低摩耗量を満たす WC 材の開発が期待される。

参考文献

1) 清水 隆司
高温下におけるサーメット溶射膜の摩擦摩耗特性(2016)
東京海洋大学修士論文

2) Q.yang,T,Senda,A,Hirose
Sliding Wear Behavior of WC-12%Co Coatings at Elevated Temperatures
Surface & Coatings Technology 200 (2006)

3) Qiaqin Yang, Tetsuya Senda, Akira Ohmori
Effect of carbide Grain Size on Microstructure and Sliding Wear Behavior of HVOF Sprayed WC-12%Co Coatings
Wear254(2003) 23-24

4) ターボ機械協会 HP
蒸気ターボとは？
https://www.turbo-so.jp/turbo-kids5.html

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始暖かく、時に厳しくご指導とご教授を頂いた岩本勝美教授に心より深く御礼申し上げます。実験の初期からサーメットの組み合わせについて研究が進みたいという実験方針の相談のみならず実験のやりかた、実験片の準備および外社の連絡、論文作成に至るまで丁寧にご指導いただきました。様々な助言をいただき、本研究を書き上げることが出来ました。

田中健太郎准教授には勉強会などに際し鋭い指摘や有益な助言を数多くいただきましたこと、心より深く御礼申し上げます。

共に実験をするにあたり実験方法や実験結果の考え方などに教えてくれた清水隆司先輩、実験方針に従い長時間の実験を共に行ってくれた山崎君、大塚君に深く感謝します。

工場見学をさせて下さり，些細な質問にも答えて下さったトーカロ株式会社の竹内様，試験片に溶射をしてくださり，質問にも答えて下さった ICS 株式会社村松様には大変お世話になりました。

地引達弘教授をはじめとする機械応用力学研究室の皆様には本研究を進める上で惜しみないご協力をいただきました。ありがとうございました。

外山一雄技術職には実験装置の不具合や作製、試験片の加工などに際し、多くのご配慮とご支援をいただきましたこと、深く心より感謝いたします。

最後に、研究に限らず様々な面において良き友人と師でありました機械設計研究室の皆様に厚く御礼申し上げます。皆と同じ研究室で過ごせたことで、この三年留学生活は楽しく充実したものとなりました。

2018 年 8 月
金雄亮