

ISSN 0389-4010
UDC 621.3.047.3
621.3.047.4
62-982
629.78

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1315

宇宙用スリップリング材の摩擦，摩耗，通電特性に関する研究
(第2報)

—スリップリングモデル機による摺動特性の評価—

鈴木峰男・渡邊幹男
西村 允・中川 潤

1996年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

Abstract	1
要旨.....	2
第1章 まえがき.....	2
第2章 供試ブラシ材, リング材.....	6
第3章 実験装置及び実験方法.....	8
3-1 実験装置	8
3-2 実験方法	9
第4章 実験結果と考察.....	9
4-1 押付け荷重の影響	9
4-2 MoS ₂ とNbSe ₂ の最適配合比	22
4-3 大電流通電下の特性	37
4-4 雰囲気の影響	51
4-5 摺動速度の影響	62
第5章 結論.....	63
参考文献.....	64
付録.....	65

宇宙用スリップリング材の摩擦，摩耗，通電特性に関する研究 (第2報)*

—スリップリングモデル機による摺動特性の評価—

鈴木 峰 男*¹ 渡 邊 幹 男*²
西 村 允*³ 中 川 潤*²

Friction, Wear and Electric Characteristics of Slip-ring Brush Materials for Space Applications Part 2 : Evaluation by Slip-ring Simulation Tests

Mineo SUZUKI, Mikio WATANABE,
Makoto NISHIMURA and Jun NAKAGAWA

ABSTRACT

Wear and electric characteristics of hot-pressed Ag-MoS₂-NbSe₂ composites were evaluated in a vacuum environment in order to find the optimum brush material of a slip-ring for space applications. The composite brush was rubbed against a coin silver ring or a silver ring, simulating a brush/ring contact of a slip-ring.

First, the effect of the contacting load was evaluated under an electric current of 1 A and a sliding speed of 75 mm/s. The loads tested were 0.2 N, 0.6 N and 1 N. The increase in load resulted in lower electrical contact resistance and noise, and less wear. Better contact between the brush and the ring seemed to be responsible for the good performance.

As the second step of the study, Ag-MoS₂-NbSe₂ composites with different contents of MoS₂ and NbSe₂ were evaluated under a load of 1 N and an electric current of from 1 A to 20 A. The best performance was obtained with an 85wt%Ag+12.5wt%MoS₂+2.5wt%NbSe₂ composite brush and a silver ring under both low-current (1A) and high-current (20A) conditions. The result demonstrated that this brush/ring combination is relevant for both a signal slip-ring and a power slip-ring.

As the third step, the electric current density was increased up to 800 A/cm², 16 times higher than that used for current power slip-rings, to examine the feasibility of the best brush/ring material combination for future use as a high-power-transmission slip-ring. Electrical contact resistance, electrical noise, and temperature and wear of the brush became extremely high as the electric current density increased. However, increasing the contact pressure of the brush was found to be very effective in lowering the electrical contact resistance and noise at high current density conditions. A high-electric current density of 800 A/cm², with good electrical and wear resistance performance, was achieved at a contact pressure of 90 N/cm².

Finally, the performance in nitrogen gas was examined because ground tests of a slip-ring for space use are carried out in nitrogen gas. Electrical contact resistance and noise, and wear of the brush were

* 平成8年9月19日受付 (received 19 September 1996)

* 1 宇宙研究グループ

* 2 三菱電機(株)

* 3 元 宇宙研究グループ, 現 法政大学工学部

all higher in nitrogen gas than in a vacuum. However, the good performance was recovered when the environment was changed from nitrogen gas to a vacuum.

The performance obtained with the selected 85wt%Ag+12.5wt%MoS₂+2.5wt%NbSe₂ composite brush and a silver ring was superior to that of slip-rings currently used for satellites, especially in terms of high-power transmission capability. The composite brush material developed in this study is a promising candidate for a high-power, small-sized, lightweight and long-lived slip-ring for future use in the space program to accommodate the increased power requirements.

Key Words: Slip-ring, Electrical contact, Silver-based composite, Molybdenum disulfide, Niobium diselenide, Vacuum

要 旨

宇宙用スリップリングとして最適なブラシ材料を見出すために、ホットプレス法で作製した銀-二硫化モリブデン-セレン化ニオブ(Ag-MoS₂-NbSe₂)系複合ブラシ材の摩耗、通電特性を真空中で評価した。試験は、スリップリングのブラシとリングの接触状態を模擬したモデル試験機を用いて行い、相手リング材には貨幣銀(Ag-10Cu)及び純銀(Ag)を用いた。

まず、ブラシとリングの接触荷重を0.2N, 0.6N, 1Nに変化させ、通電量1A, すべり速度75mm/sで摩耗、通電特性を評価した。荷重を増すと接触抵抗、電気ノイズが減少し、またブラシ摩耗も小さくなった。荷重の増加に伴いブラシ/リングの接触状態が良好になったことが、良好な性能につながったものと考えられる。

次に、MoS₂とNbSe₂の配合比を変えた4種類のAg-MoS₂-NbSe₂系複合ブラシ材の摩耗、通電特性を、通電量を1Aから20Aまで変化させ荷重1Nで評価した。低電流通電(1A)、大電流通電(20A)のいずれの場合にも、85wt%Ag-12.5wt%MoS₂-2.5wt%NbSe₂ブラシとAgリングの組み合わせが最も良好な性能を示した。このブラシ/リングの組み合わせは電気信号伝達用、電力伝達用のいずれのスリップリングとしても適している。

さらに、スリップリングの大電流化を達成するための要因を明らかにするため、最適組成の85wt%Ag-12.5wt%MoS₂-2.5wt%NbSe₂ブラシ材を用いて、電流密度を現用の人工衛星の電力伝達用スリップリングの約16倍である800A/cm²まで増した実験を行った。電流密度を増すと接触抵抗、電気ノイズ、ブラシ摩耗、ブラシの温度上昇が極めて増加した。しかし、ブラシ/リング間の接触面圧を増やすことにより、大電流通電下においても接触抵抗と電気ノイズを小さく抑えられることがわかった。電流密度800A/cm²においても良好な摩耗、通電特性を、接触面圧90N/cm²で達成することできた。

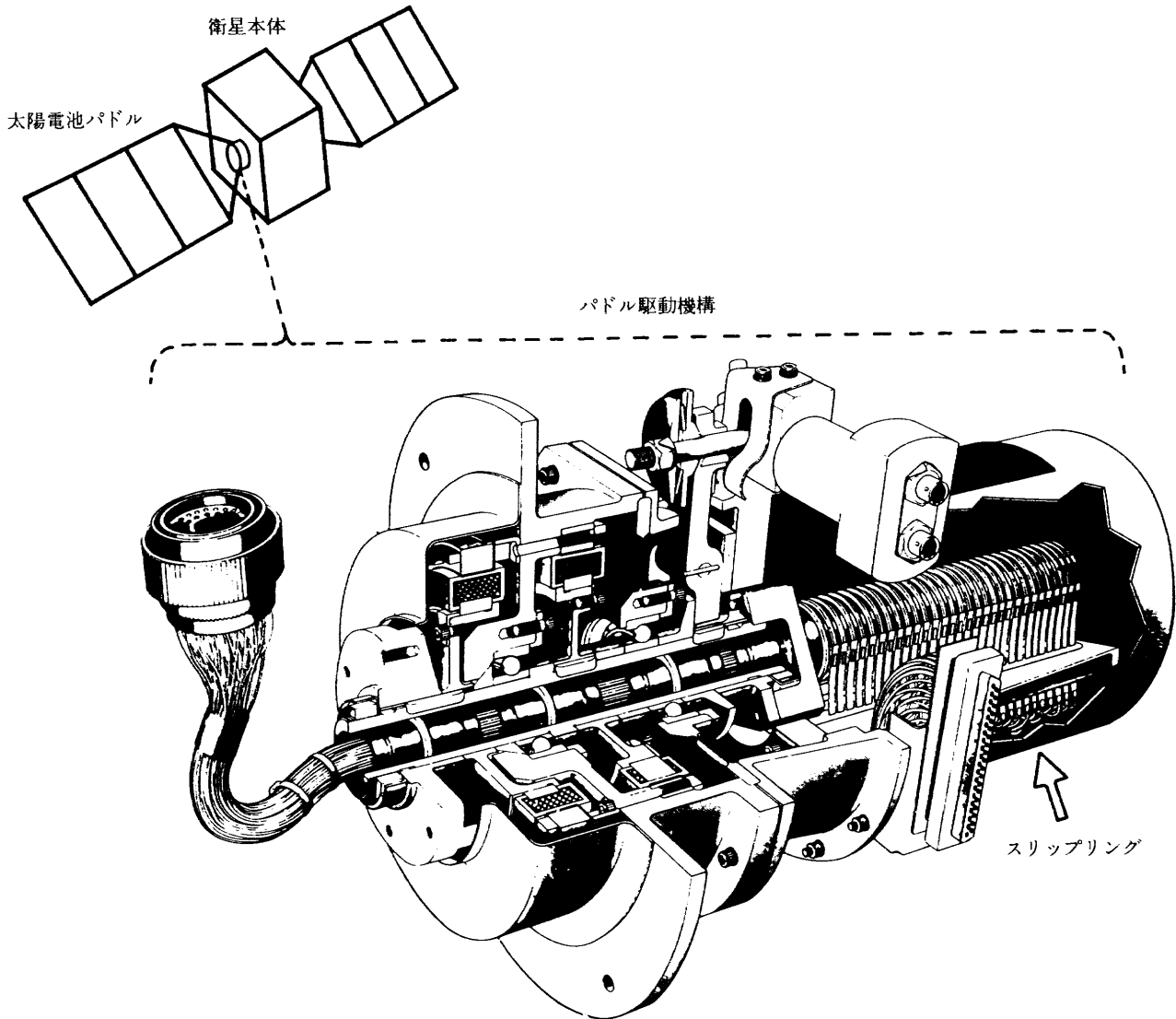
最後に、宇宙用スリップリングの地上試験が窒素ガス中で行われることを想定し、窒素ガス中における摩耗、通電特性を評価した。窒素ガス中では、真空中に比べ接触抵抗、電気ノイズ、ブラシ摩耗のいずれもが大きくなった。ただし、窒素ガス中で摺動させた後でも、雰囲気を変化させると真空中本来の良好な性能を示した。

本研究で試作したAg-MoS₂-NbSe₂系複合ブラシ材とAgリングの組み合わせ時の摩耗、通電特性は、現在人工衛星で使用されているスリップリングに比べても良好であり、特に大電流密度においても通電が可能である。本ブラシ材は、大電力化、小型軽量化、長寿命化が要求される今後の将来型宇宙ステーションや宇宙プラットフォームなどの宇宙用スリップリング材料として有望である。

第1章 まえがき

人工衛星に搭載されている太陽電池パドルや送受信アンテナなどは、常に太陽あるいは地上のアンテナを指向させる必要があり、衛星本体とは駆動機構を介して接続され、衛星本体に対して回転運動を行っている。このた

め、太陽電池パドルやアンテナの駆動機構内には、衛星本体との間で電気信号や電力を伝達するためにスリップリングと呼ばれる電気機械部品が組み込まれている。図1-1に人工衛星の太陽電池パドル駆動装置に組み込まれているスリップリングの模式図¹⁾を示す。スリップリングは、回転するリングにブラシを押し付ける構造になっ

図1-1 人工衛星のスリップリング¹⁾

ており、リングとブラシの接触面ですべり摩擦を行いながら、その接点で電気信号や電力を伝達する。スリップリングは、その目的に応じて、電力伝達用としては接触抵抗が小さく電力損失が少ないものが、また、電気信号伝達用としては電気ノイズが小さく高S/N比が達成できるものが要求されている。

スリップリングは、その目的から、もし不具合が生じれば人工衛星の死命を制するものであるため、通常は冗長系を構成して使用されている。しかし、冗長系があるにもかかわらずスリップリングの不具合により衛星の機能が停止した例としてはSeasat衛星が知られている。不具合の原因は、スリップリング内で電気回路に短絡が生じたためであり、隣のブラシ同士がなんらかの原因で接触したか、摩耗粉により短絡したものと推定されている²⁾。このため、低接触抵抗・低電気ノイズといった機能要求以外に、摩耗粉の発生が少ないこと、すなわち低摩耗が特に要求される。また、人工衛星では重量軽減のた

めに必要最小限の出力のモータが選ばれており、スリップリングの摩擦損失が異常に大きくなるとパドルやアンテナの駆動機構そのものが停止してしまう恐れもあるため、地上用と比べると低摩擦にも相当の注意を払う必要がある。

表1-1、表1-2は、実験室レベル及び人工衛星に実用されたスリップリングに関する文献²⁾⁻¹¹⁾から推定されるスリップリングの設計仕様・性能をまとめたものである。ブラシ材としては固体潤滑剤を含んだ銀系の複合材料、リング材としては貨幣銀(Ag-10Cu)などの銀系の金属材料が用いられている。ブラシ用の銀系複合材料として最も多用されているのは、アメリカでは銀(Ag)85%+二硫化モリブデン(MoS₂)12%+黒鉛(Gr)3%の組成のものであり、ヨーロッパでは82.5~85%Ag+15%MoS₂+2.5%Cuの組成のものが主流である。これらの文献から推定されるスリップリングの性能は、現存する人工衛星用としては十分なレベルに達していると考えられる¹⁰⁾が、

表1-1 スリッピングの材料、性能(スリッピング単体での試験例)

ブラシ材	リング材	接触面積 (mm ²)	荷重 (N)	面圧 (N/cm ²)	通電量 (A)	電流密度 (A/cm ²)	速度 (mm/s)	接触抵抗 (mΩ)	ノイズ (mV)	摩耗	運転時間	備考	文献
Ag-2.5Cu-12.5MoS ₂ Ag-2.5Cu-15MoS ₂	Ag	8.71	0.6	6.9	4	46.5	179.9	6~40	0.1~0.4	0.18~0.66μm	847 hr		4
		212	14.54		75	35.3	134.6	1以下	2~5	0.18~0.51μm	700 hr		
Ag-12MoS ₂ -3Gr Ag-15NbSe ₂ -3Gr	Coin Silver	53.7	1.67	3.1	8.33	15.5	0.55 (0.1 rpm)	—	~15 mA ~30 mA	2×10 ⁻⁹ cm ³ /cm	2年	μ=0.12-0.3 μ=0.27-0.54	5
		8.56	0.28	3.3	2.5	29.2	0.17 rpm	—	0.3~0.8	—	3146回転	6	
Ag-2.5Cu-15MoS ₂	—	15	0.69	4.6	7.0	46.7	0.026	—	0.08-2.9	—	—	—	—
		6	0.39	6.5	3.0	50	(1 rph)	—	0.08-3.2	—	5620回転	—	
Ag-2.5Cu-15MoS ₂	—	7.2	0.14~0.42	1.9~5.8	1.25	17.4	(32 rpm)	—	0.9~16	4-13μm/10 ⁶ rev	7×10 ⁷ 回転	—	—
		4.8	0.055~0.165	1.1~3.4	0.05	1.0	—	—	0.2~8.5	7-12μm/10 ⁶ rev	—	—	
Ag-2.5Cu-15MoS ₂ Ag-2.5Cu-15NbSe ₂	Ag plate	12.5	0.875	7.0	5.0	40.0	0.83 (1 rpm)	2~20	10~60 10~100	2.3~5.5×10 ⁻¹⁰ cm ³ /cm ² ·N 12~21×10 ⁻¹⁰ cm ³ /cm ² ·N	1500 hr	—	7
		11.8	0.85	7.2	5.0	42.4	(100 rpm)	—	20~50	3.1~3.7×10 ⁻¹¹ cm ³ /cm ² ·N	4500 hr	—	
Ag-2.5Cu-15MoS ₂	Ag solid	10.0	0.55	5.5	5.0	50.0	130	—	0.8-10	1.7~2.6×10 ⁻¹¹ cm ³ /cm ² ·N	17000 hr	—	—
		5.0	0.28	5.5	2.5	50.0	(150 rpm)	—	0.8-4	4.2×10 ⁻¹¹ cm ³ /cm ² ·N	—	—	
Ag-2.5Cu-6.9MoS ₂	Coin Silver	7.0	0.29	4.1	2.2	31.4	(100 rpm)	—	55 mV/A	0.1 mm	8.5×10 ⁶ 回転	—	10
		7.0	1.76	25.1	2.0	28.6	—	—	15 mV/A	0.1 mm	8×10 ⁶ 回転	—	
		7.0	0.29	—	1.4	—	—	—	10 mV/A	0.2 mm	5×10 ⁶ 回転	—	
Cu/Be合金にAg-MoS ₂ を plasma spray coating	Coin Silver	333	16.65	5	100	30.0	0.3 deg step/s	0.035	1 mV/A 以下	—	850 hr -40~60°Cの 温度サイクル	μ=0.37-0.47 T=0.5-0.8N·m	12

表1-2 太陽電池パドル駆動機構のスリップリングの設計仕様、性能

	ブラッサ材	リング材	運転(試験)条件	性能	備考	文献
BAe 太陽電池パドル駆動機構の耐久性試験	Ag-2.5Cu-15MoS ₂	Silver	運転(試験)条件 POWER用(6個) 荷重: 0.41N, 通電量: 2.5A SIGNAL用(6個) 荷重: 0.15N, 通電量: 0.1A 温度サイクル: 60-20°C 回転数: 1回転/day リング外周の振れ: 80μm 試験期間: 4 years	接触抵抗: 30-60mΩ (配線抵抗を含む) 摩擦トルク: 0.063N・m	試験後観察 *ブラッサ・パネ接続部1ヶ所が劣化 *摩耗粉は認められない *リーダー線絶縁部にアブレーション摩耗あり	11
Ball Aerospace System Divisionのスリップリングの実用例	Ag-12MoS ₂ -3Gr	Coin Silver	POWER用 接触面積: 44mm ² (4個) 荷重: 1.8N(面圧4.1N/cm ²) 通電量: 10A(電流密度22.8A/cm ²) SIGNAL用 接触面積: 4.65mm ² (30個) 荷重: 0.2N(面圧4.3N/cm ²)	9 setsがフライトしており、 異常は報告されていない (長いものは8年飛行)		13
SPOT-1の太陽電池パドル駆動機構	Ag-12MoS ₂ -C	Silver	POWER用 接触面積: 25mm ² 通電量: 7.5A(30A/cm ²) 回転数: 0.01rpm	フライトでの異常は報告されていない 摩擦トルク: 0.2-0.3N・m	Integration test時にリング表面の汚染物質が原因と思われる高い接触抵抗が観測された。電流を増減させることで、正常に戻った	14
SeaSatの太陽電池パドル駆動機構	Ag-12MoS ₂ -3Gr	Coin Silver	POWER用 通電量: ~2.3A (30個) 面圧: 3.5~4.3N/cm ² SIGNAL用(14個) 回転数: 0.01rpm	打上げ後105日で回路に短絡が生じ機能停止 接触抵抗: 20Ω以下 (設計仕様値)	隣回上のブラッサの接触または摩耗粉により短絡が生じたと推定された	2

今後、将来型の宇宙ステーションや宇宙プラットフォームなどでの大電力化や、小形軽量化に対応するためには、さらに接触抵抗が少なく長寿命のスリップリングが必要である。

本研究は、大電力伝達用としても、また電気信号伝達用としても使用できる低接触抵抗、低電気ノイズ、長寿命のスリップリングの開発を目的に行ったものである。

前報¹²⁾では、ピン/円板型摩擦試験機を用い、ホットプレス法で作製した銀系複合材について摩擦、摩耗、通電特性の評価試験を行った。その結果、固体潤滑剤としてMoS₂とセレン化ニオブ(NbSe₂)を併せて15~20%添加した複合材が最も良好な摩擦、摩耗、通電特性を示すことを明らかにした。また、押付け荷重は、バネ負荷の場合0.5N以上、重錘荷重の場合2N以上が良好な特性を得るのに必要であることを明らかにした。さらに、試作ブラシ材が、既に実用されている85%Ag-12%MoS₂-3%Grのブラシ材に比べ接触抵抗、電気ノイズ、耐摩耗性のいずれの面でも同等以上の性能を示すことを示した。

試作したブラシ材は摩擦試験では良好な摺動特性を示したが、実用するに当たっては極力実用に近い条件下で性能を確認しておく必要がある。そこで本報告では、スリップリングの使用条件を模擬したモデル試験機を用いて摩擦、通電特性の評価試験を行った結果について述べる。まず、スリップリングモデル機におけるブラシ材の最適押付け荷重を明らかにするとともに、摩擦、通電特性がピン/円板型摩擦試験機で得られた特性とほぼ同等であることを示す。次に、信号伝達用及び電力伝達用のスリップリングを模擬した通電量下でMoS₂とNbSe₂の配合比を変化させたブラシ材の特性を評価し、最適ブラシ材を選定する。さらに、今後の大電力化・小型化を想定して通電密度を大幅に増加させた実験を行い、適切な押付け荷重に設定すれば、試作したブラシ材を用いて大電流化を達成できることを示す。また、宇宙用スリップリングが地上で性能試験されることを考慮し、試作ブラシ材の窒素ガス雰囲気中での摩擦、通電特性を調べた結果について述べる。

これらの一連の評価試験の結果、試作したブラシ材は、現在実用されているものに比べ優れた摩擦、通電特性を示すことが明らかとなり、今後の宇宙用スリップリング材料として極めて有望である。

第2章 供試ブラシ材、リング材

本報でブラシ材として用いた銀系複合材は、

- (1) Ag-15wt% MoS₂
- (2) Ag-12.5wt% MoS₂-2.5wt% NbSe₂
- (3) Ag-10wt% MoS₂-5wt% NbSe₂
- (4) Ag-7.5wt% MoS₂-7.5wt% NbSe₂

の4種類である。前報¹²⁾の結果から固体潤滑剤の添加量は15wt%とし、MoS₂を単独添加したもの及びMoS₂とNbSe₂の比率を変えたもの3種を用いた。なお、以下では簡単のためにブラシ組成の表記ではwt%を省き、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂などと略記する。

表2-1に銀系複合材の試作に用いた原料粉の特性を示す^{13),14)}。銀系複合材の作製法は前報と全く同じで、真空雰囲気下でのホットプレス法を用いた。表2-2にホットプレス条件を示す。作製手順としては、まず配合する原料粉を所定量秤量し、自動乳鉢で混合する。次に、その混合原料粉を炭素製のダイスに詰めてホットプレス装置の炉内に装填し、炉内を10⁻³Pa台に排気する。ついで、ホットプレス温度の800~950℃まで加熱し、その温度を保ちながらダイスの軸方向に35MPaの圧力を加えて焼結した。保持時間は30~90分である。その後、炉内を自然冷却させ、約500℃で加圧を解除した。

表2-3に試作した4種類の銀系複合材の配合比、密度、密度比及び硬度を示す。密度比は、理論密度(配合比から計算で求めた密度で、化学反応がないと仮定した場合)に対する複合材密度の比で、空隙がどの程度残存しているかの目安となるものである。複合材の焼結は密度比が大きいほど進んでいると考えられるが、いずれの複合材の密度比も96%を越えており、全般的に焼結状態は良好である。複合材の硬度は、ビッカース硬度で57~68であった。

表2-1 銀系複合材に用いた原料粉の特性

原料粉	Ag	MoS ₂	NbSe ₂
純度 (%)	99.9	99.0	99.9
粒度 (μm)	5~6	1.35	1~3
密度 ⁽¹²⁾ (g/cm ³)	10.5	4.8	6.25
固有抵抗 ^{(12),(13)} (Ω·cm)	1.6×10 ⁻⁶	851	5.35×10 ⁻⁴
融点 ⁽¹²⁾ (℃)	960	1800<	...

表2-2 銀系複合材の成形条件

ホットプレス法	
圧力	35MPa
温度	800~950℃
保持時間	30~90分
雰囲気	真空 10 ⁻³ Pa台

表2-3 銀系複合材の配合比と密度、密度比、硬度(ホットプレス条件; 35Mpa, 800℃)

配合比			密度	密度	硬度
Ag	MoS ₂	NbSe ₂	(g/cm ³)	(%)	(Hv)
85	15	...	8.55	96.0	57
85	12.5	2.5	8.74	97.0	61
85	10	5	8.80	96.6	66
85	7.5	7.5	8.90	96.6	68

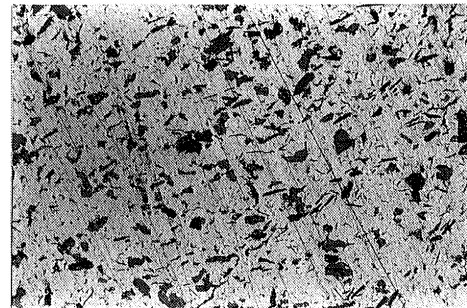
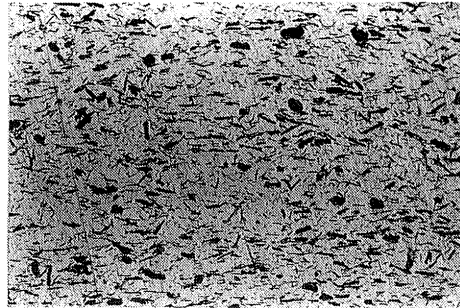
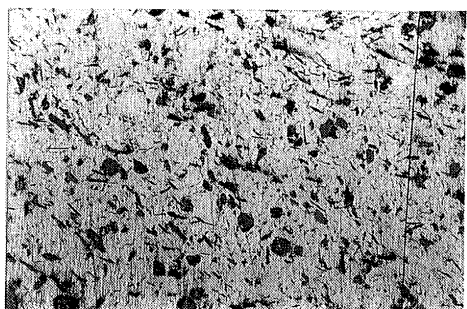
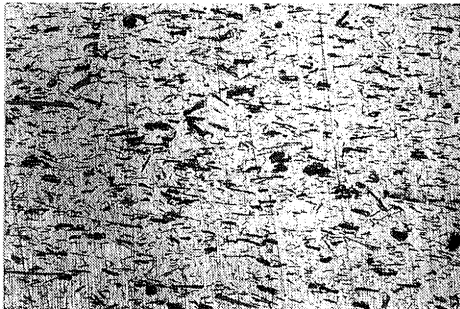
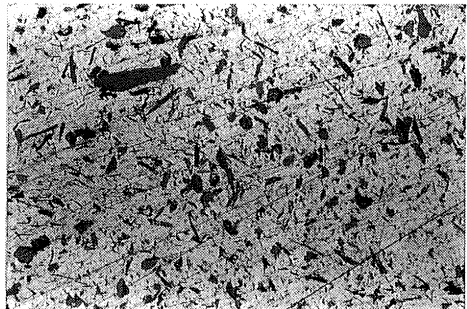
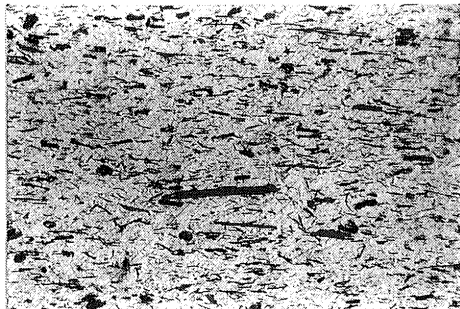
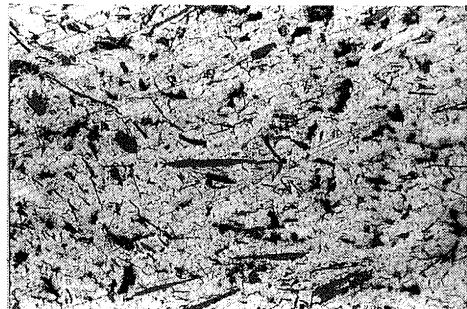
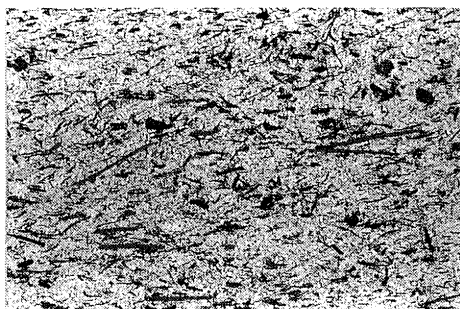
MoS₂単独添加の場合よりもMoS₂とNbSe₂を併合添加した方が硬度が高く、4種類の銀系複合材の中ではNbSe₂の添加量が多いほど硬度が高くなっている。

図2-1に銀系複合材4種類の光学顕微鏡組織写真を示す。白色部がマトリックスの銀であり、黒色部がMoS₂、灰色部はNbSe₂である。MoS₂のみを添加した複合材では黒色の凝集部の大きさは10μm程度であり分散状態も良好である。NbSe₂を併合添加した複合材ではNbSe₂の凝集部が観察され、NbSe₂の添加量が多いほど凝集部が多くなっている。ただし凝集部はそれほど大きくなく、MoS₂とNbSe₂を併合添加した複合材においても固体潤

滑剤の分散状態は良好である。ホットプレスの加圧軸に垂直な面と平行な面を比較すると、加圧軸に平行な面では固体潤滑剤が細長く押しつぶされているものが多い。

作製した銀系複合材は、2mm×6mm×3mmの直方体に切り出してブラシ試験片とした。リング材との摺動面にはホットプレスの加圧軸と平行な面を用い、接触面積は12mm²とした。ただし、一部の試験では大電流密度化、小型化を達成するために接触面積を1.5mm²と小さくしたブラシ材も用いた。

相手リング材には純銀(Ag)と貨幣銀(Ag-10Cu)の2種類を、外径50mm、幅10mmに加工して用いた。表2

Ag-15MoS₂Ag-12.5MoS₂
-2.5NbSe₂Ag-10MoS₂
-5NbSe₂Ag-7.5MoS₂
-7.5NbSe₂

(a)ホットプレス加圧軸に平行な面 (b)ホットプレス加圧軸に垂直な面

図2-1 銀系複合材の組織写真

100μm
└───┘

表2-4 銀系合金材(相手リング材)の特性

合金材	組成 (wt%)		硬度 (Hv)	固有抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)
	Ag	Cu		
純銀	純度99.99	...	97	1.6×10^{-6}
貨幣銀	89.26	10.74	124	1.9×10^{-6}

- 4 に用いたリング材の特性を示す。

第3章 実験装置及び実験方法

3-1 実験装置

実験は、スリップリングの使用条件を模擬したモデル機を用いて行った。図3-1にモデル機の模式図と通電回路を、図3-2にモデル機の外観写真を示す。

このモデル機では、ブラシをリング側面に加圧接触させ、リングを回転させて評価試験を行う。ブラシ材は、モデル機の外部ケースにネジ止めされた銅製の板バネにハンダで固定されており、板バネのたわみ量を調整してブラシとリングの接触加圧力を設定した。また、ブラシ材を固定した部分の裏側の板バネ表面に熱電対を貼りつけ温度を測定した。ブラシ/リングの摺動面から熱電対までの距離は約4mmで、約10分間隔で測定した。リングはモデル機の主軸に絶縁材を介して固定されている。

試験では、図3-1に示すように、定電流直流電源を用いてブラシ→リング→別のリング→別のブラシの経路で直

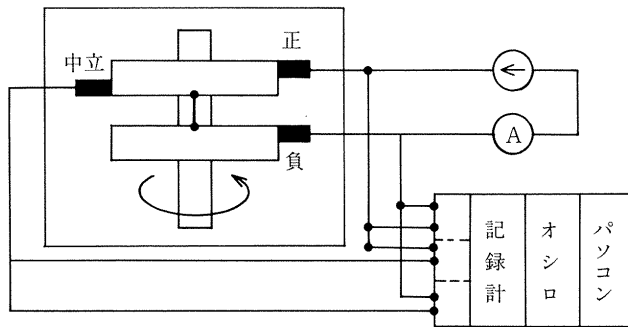


図3-1 スリップリングモデル機の構造と通電回路

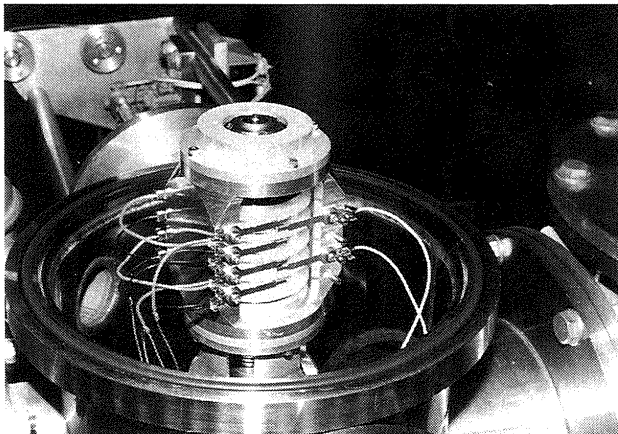


図3-2 スリップリングモデル機の外観写真

流電流を流し、ブラシ間の電圧降下をペンレコーダとオシロスコープで測定した。本報告では、以下、電流がブラシからリングに流れる場合を正極、リングからブラシに流れる場合を負極と呼ぶこととする。また、電流を流さない中立の補助ブラシを取り付け、正極側だけ及び負極側だけの電圧降下も測定できるようになっている。試験は、正極2本、負極2本、中立1本の計5本のブラシと2つのリングを1組として行った。このモデル機には4個のリングが取り付けられており、同時に2組の試験ができる。

試験は、モデル機を前報¹²⁾で用いた摩擦試験機の回転機構に設置して行った。モデル機を試験装置に設置したときの試験装置全体の構造を図3-3に、その外観写真を図3-4に示す。モデル機の主軸は2個の玉軸受によって支持

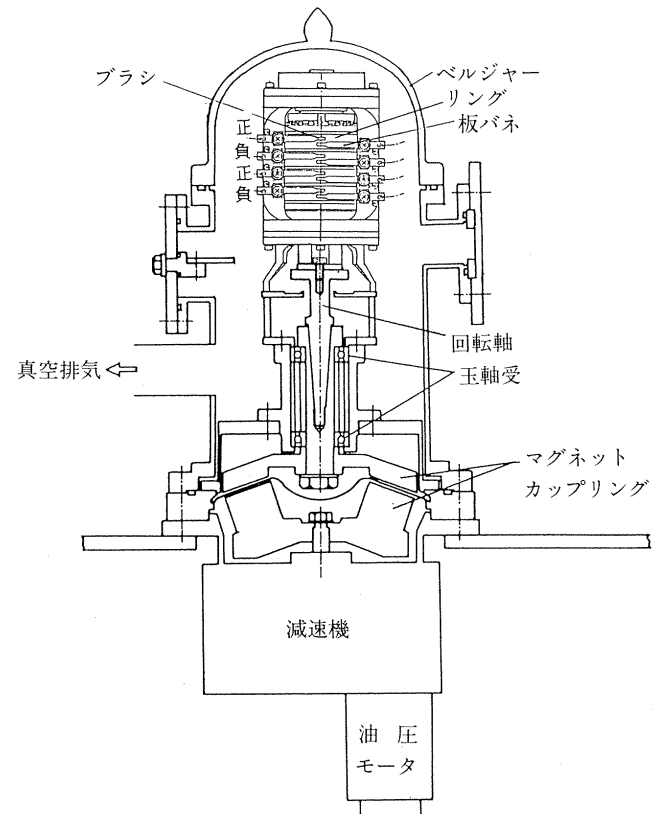


図3-3 試験装置の構造

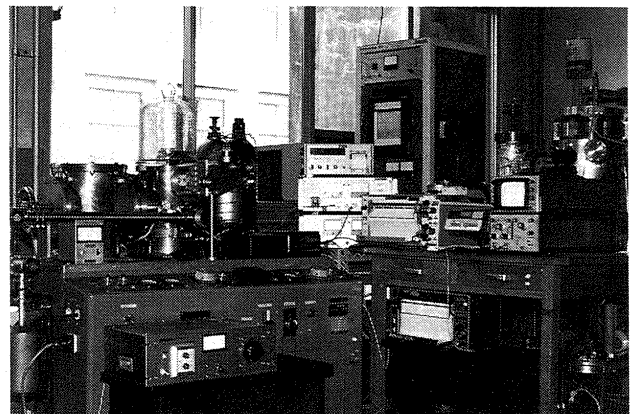


図3-4 試験装置の外観写真

されており、その一端はフレキシブルカップリングを介して摩擦試験機の回転軸に締結されている。モデル機の主軸は、このフレキシブルカップリング、摩擦試験機回転軸、マグネットカップリングを介し、真空槽外の油圧モータにより回転駆動される。

真空排気系はソーブションポンプ2台とサブリメーションポンプ2台、イオンポンプ1台によって構成され、 10^{-6} Pa台まで真空排気可能である。

3-2 実験方法

実験は原則として以下の手順で行った。まず、ブラシ材のあたり出しを行った。あたり出しは、大気中においてモデル機のリング表面に研磨紙を貼り、主軸を手で反転させながらブラシ材の切り出し平面がリング曲面に全面接触するまで行った。あたり出しの荷重は試験荷重と同一にした。次に、ブラシ材を板バネごとモデル機から取り外し、摩耗量算出のため重量を測定するとともに、モデル機はあたり出しを行った際に生じた研磨粉の影響を取り除くため分解洗浄を行った。重量を測定したブラシは再度組み立てたモデル機に取り付け、板バネのたわみ量を調整してリングへの押付け力を試験荷重に設定した。さらに配線、導通チェックを行った後、配線抵抗を実測し、その後 10^{-5} Pa台まで真空排気した。

実験条件は、摺動速度については75mm/s(約29rpm)で一定としたが、押付け荷重や通電量、摩擦回数などは試験内容によって変化させた。具体的な実験条件は4章の実験結果の中で述べる。

本研究では、前報¹²⁾で述べたように、測定した抵抗値から配線抵抗分を差し引いたものを電気抵抗、電気抵抗のうち安定している部分を接触抵抗、変動している部分を電気ノイズと呼ぶことにする。この関係を図3-5に示す。なお、電気ノイズの単位は、通常使用されている電圧(mV)を用いた。

試験後のブラシ材、リング材は、光学顕微鏡や電子顕

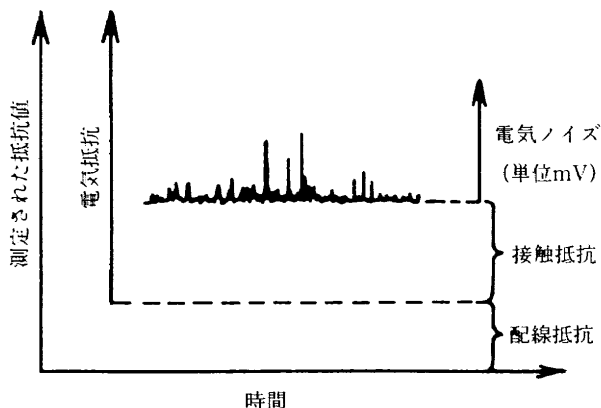


図3-5 電気抵抗、接触抵抗、電気ノイズの関係

微鏡で摺動面を観察するとともに、ブラシ材については重量を測定し試験前後の重量差から摩耗量を算出した。スリップリングのブラシ材では、摩耗高さや摩耗率(単位摩擦距離あたり、または単位運転時間あたりの体積摩耗量)で摩耗量を評価するのが一般的である。このため、本試験でも摩耗率(単位摩擦距離あたりの体積摩耗量)で摩耗特性を比較した。

第4章 実験結果と考察

4-1 押付け荷重の影響

前報¹²⁾のピン/円板型摩擦試験では、良好な摩擦・摩耗・通電特性を得るには複合材ピンの押付け荷重がバネ負荷の場合には0.5N以上必要なことを明らかにした。ただし、実際のスリップリングでは摺動面が曲面であり、またバネ負荷した際のバネ定数も異なると考えられるため、摩擦試験で得られた結果がそのまま適用できるかどうかは検討の余地がある。このため、まず本節では、実際のスリップリングにおけるブラシのリングへの最適押付け荷重を明らかにするため、押付け荷重を変化させて摩耗・通電特性を評価した。試験した押付け荷重は、前報¹²⁾の摩擦試験の結果を参考に、0.2, 0.6, 1.0Nの3種類とした。また、得られた摩耗・通電特性、試験後の摺動面の状態を摩擦試験の結果と比較した。

試験したブラシ材は、摩擦試験で良好な特性を示したAg-15MoS₂、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂の2種類で、相手リング材はAgとAg-10Cuの2種類とした。すなわち、ブラシ/リングの組み合わせが4組、押付け荷重が3種、合計12種の条件で試験を行った。

本節における実験条件を表4-1に示す。ブラシのリングへの押付け荷重以外は、実験条件、実験手順ともに前報¹²⁾の摩擦試験と全く同じである。実験では、まず無通電状態でならし運転を14000回行い、ついて直流0.1Aで通電を開始し、電流を逐次増加させ最終的に1Aで26000回摩擦した。通電時、無通電時を通しての総摩擦回数は60000回である。なお、1A通電時の摩擦回数は、太陽電池パドル駆動機構を想定した場合、低・中高度衛星では約5年、静止衛星の場合には約70年に相当する。

図4-1~図4-4は、4組のブラシ/リングについて各押

表4-1 実験条件

摺動速度	75mm/秒
荷重	0.2, 0.6, 1N
通電量	直流1A(0.1Aから段階的に増加)
摩擦回数	60000回 ならし運転 14000回 1A通電時 26000回
雰囲気	真空 10^{-5} Pa台

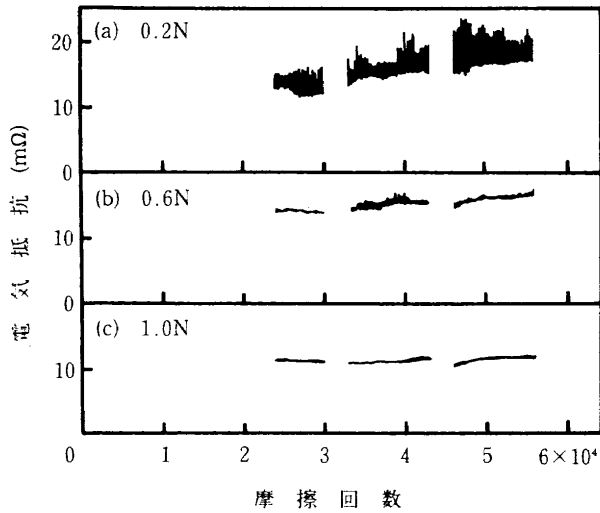


図4-1 Ag-15MoS₂ブラシ/Ag-10Cuリングの電気抵抗(通電量1A)

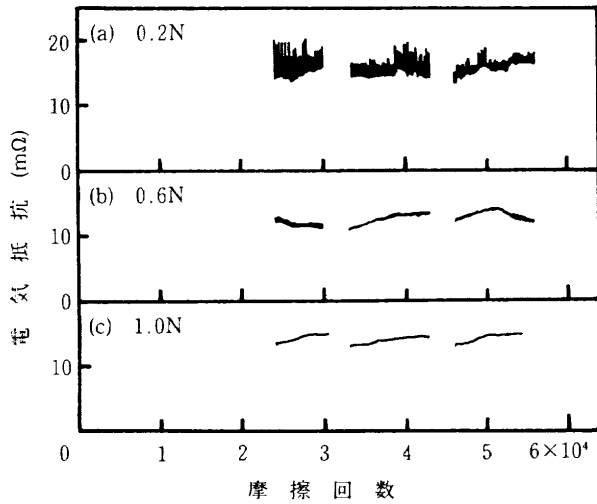


図4-2 Ag-15MoS₂ブラシ/Agリングの電気抵抗(通電量1A)

付け荷重における1A通電時の電気抵抗の推移を示したものである。図中の電気抵抗の空白部は無通電時または1A未満の通電時である。通電再開時には改めて電流を0Aから逐次増加させている。

いずれのブラシ/リングの組合わせでも、全般に、摩擦が進むにつれて電気抵抗が大きくなる傾向がみられるが、図4-2(b)や図4-3(b)などのように、摩擦が進むと電気抵抗が低下する現象がみられる場合もあり、摩擦回数の電気抵抗に与える影響はあまりはっきりしない。Ag-15MoS₂ブラシ材(図4-1, 図4-2)に比べると、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ材(図4-3, 図4-4)では全般に電気ノイズが大きく、特に荷重が小さい場合の通電特性が劣ることが目につく。ブラシ材に比べると、リング材の通電特性への影響はあまりみられない。

いずれのブラシ/リングの組合わせでも、押付け荷重

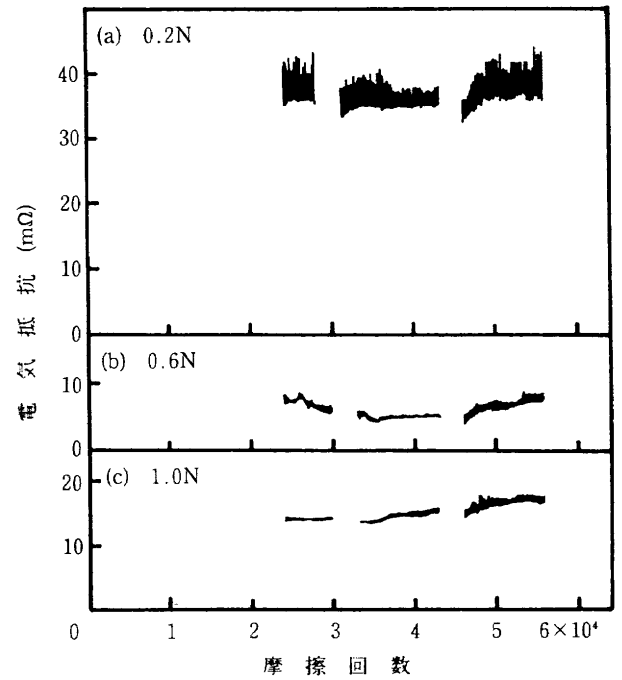


図4-3 Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ/Ag-10Cuリングの電気抵抗(通電量1A)

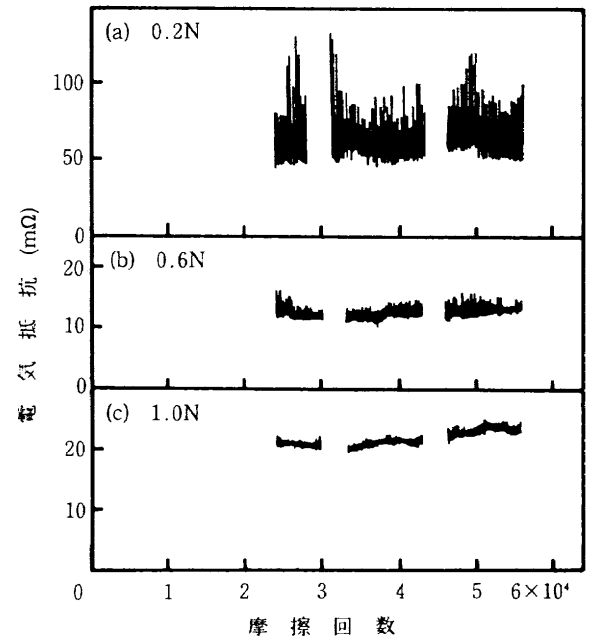


図4-4 Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ/Agリングの電気抵抗(通電量1A)

が大きいかほど電気ノイズが低減した。図4-5は、荷重を変えた場合の電気抵抗をオシロスコープで観察した一例である。荷重を増すと電気ノイズが減少する様子が明瞭に見て取れる。接触抵抗は、Ag-15MoS₂ブラシ材の場合は荷重が大きいかほど低下する傾向がみられたが、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ材では荷重0.6Nの時が最も小さい値を示した。なおブラシ材の温度上昇は試験した4組ともほとんどみられなかった。

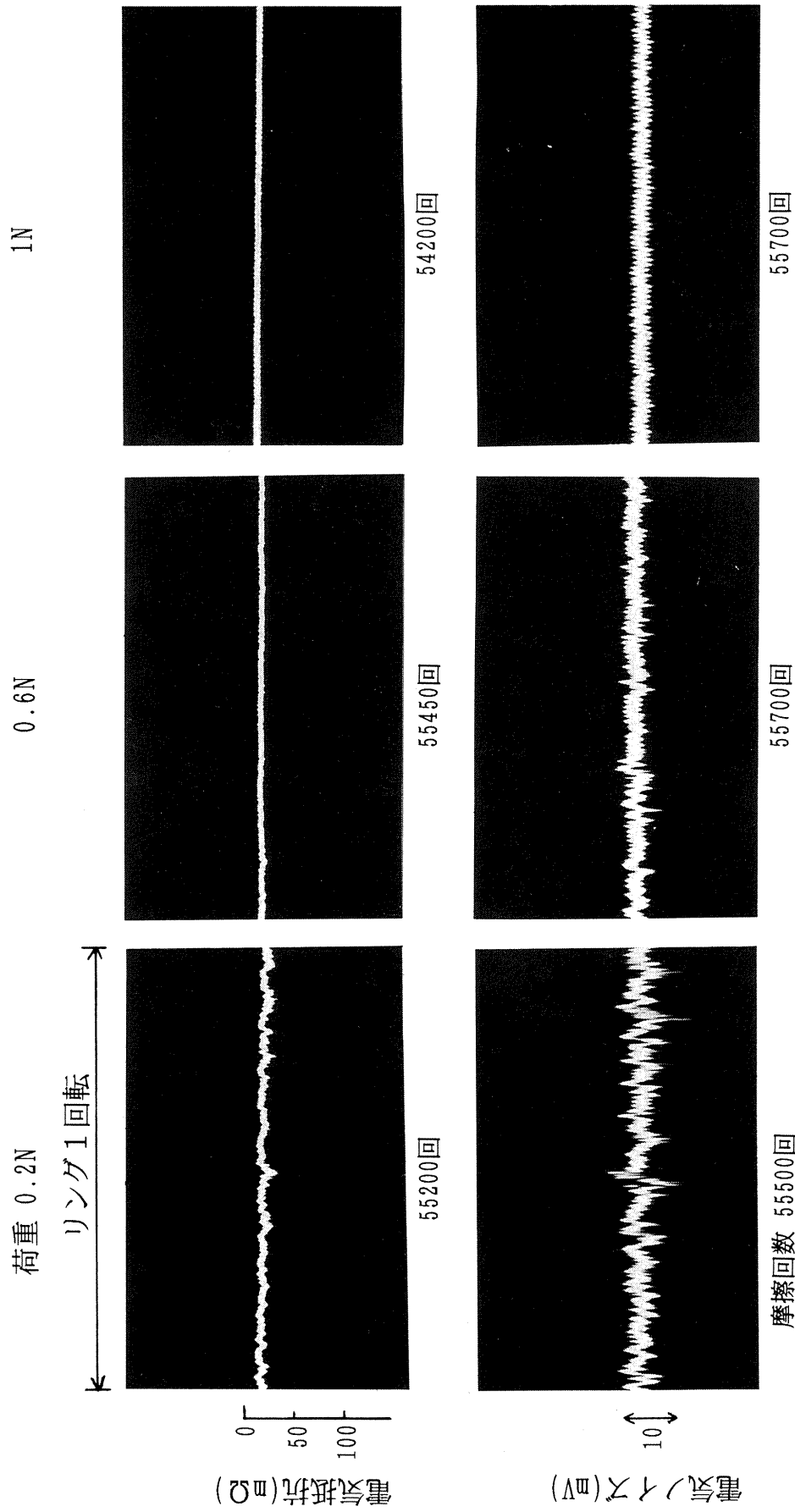


図4-5 オシロスコープによる電気抵抗、電気ノイズの観察例
Ag-15MoS₂ブラシ/Ag-10Cuリング、通電量：1 A

図4-6～図4-13に、試験後のブラシ材とリング材の摺動痕の顕微鏡写真を示す。図4-6 図4-7は、Ag-15MoS₂ブラシ/Ag-10Cuリングの組合わせで試験した場合である。図4-6のブラシ摺動痕では、いずれの荷重においても摺動した方向に条痕が形成されており、また試験前のブラシ研磨時の黒色の傷が認められる。ただし、荷重が大きい場合には比較的凹凸の少ないなめらかな条痕になっており、しかもその条痕のほぼ全域にMoS₂の灰色部が広が

っている。一方、リング摺動痕上には、図4-7に示したように摩耗粉や摩擦によって押し延ばされた付着物が見られた。これらには特性X線像よりMoが多く存在していることが確認されたため、ブラシ材からの移着物であることがわかった。摩耗粉をSEM像で見ると、細かい摩耗粉が多数より集まって大きな塊状になっていることがわかる。また、これらの付着物は荷重が大きい方が薄く押し延ばされている。荷重が大きいほど良好な通電特性

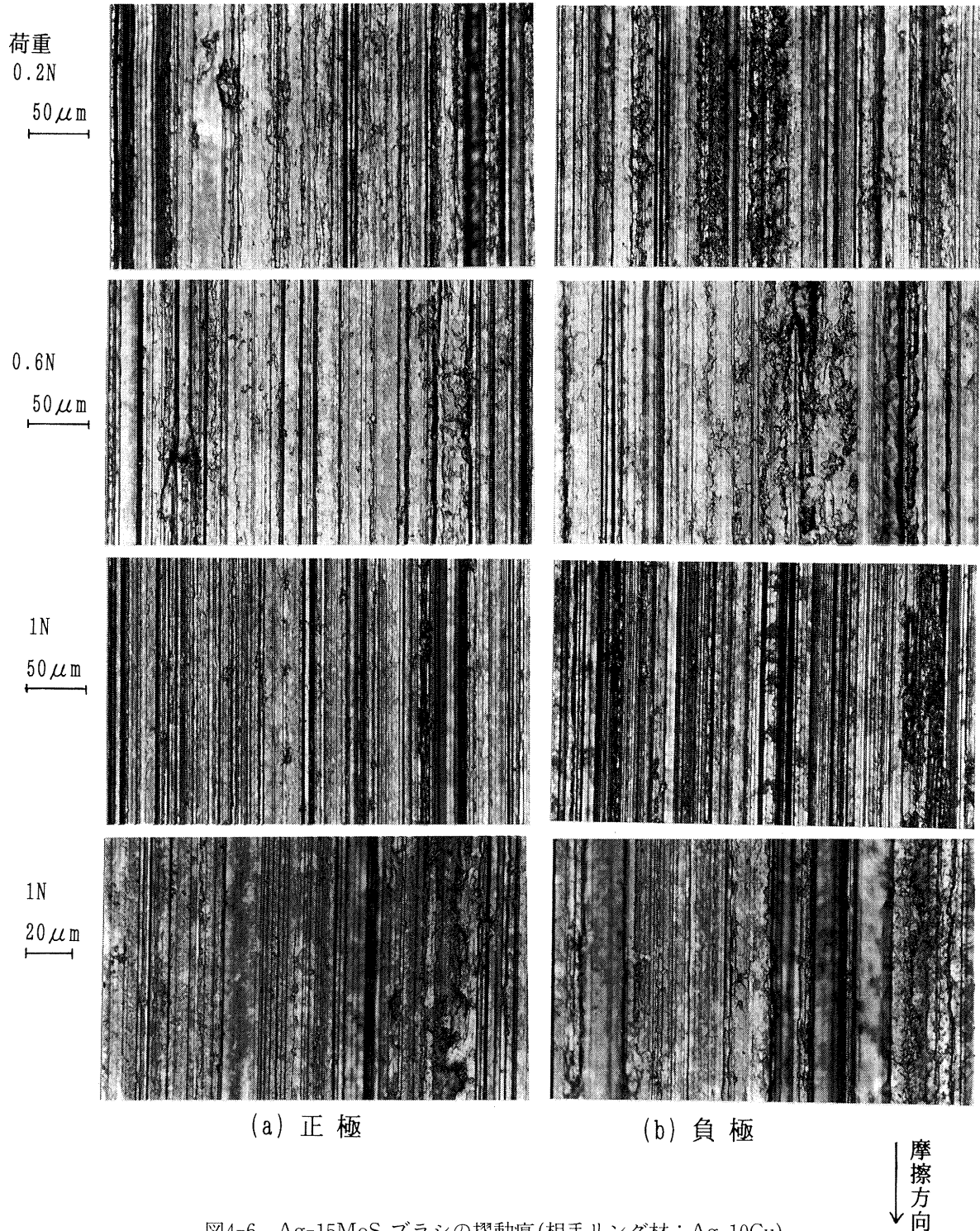


図4-6 Ag-15MoS₂ブラシの摺動痕(相手リング材: Ag-10Cu)

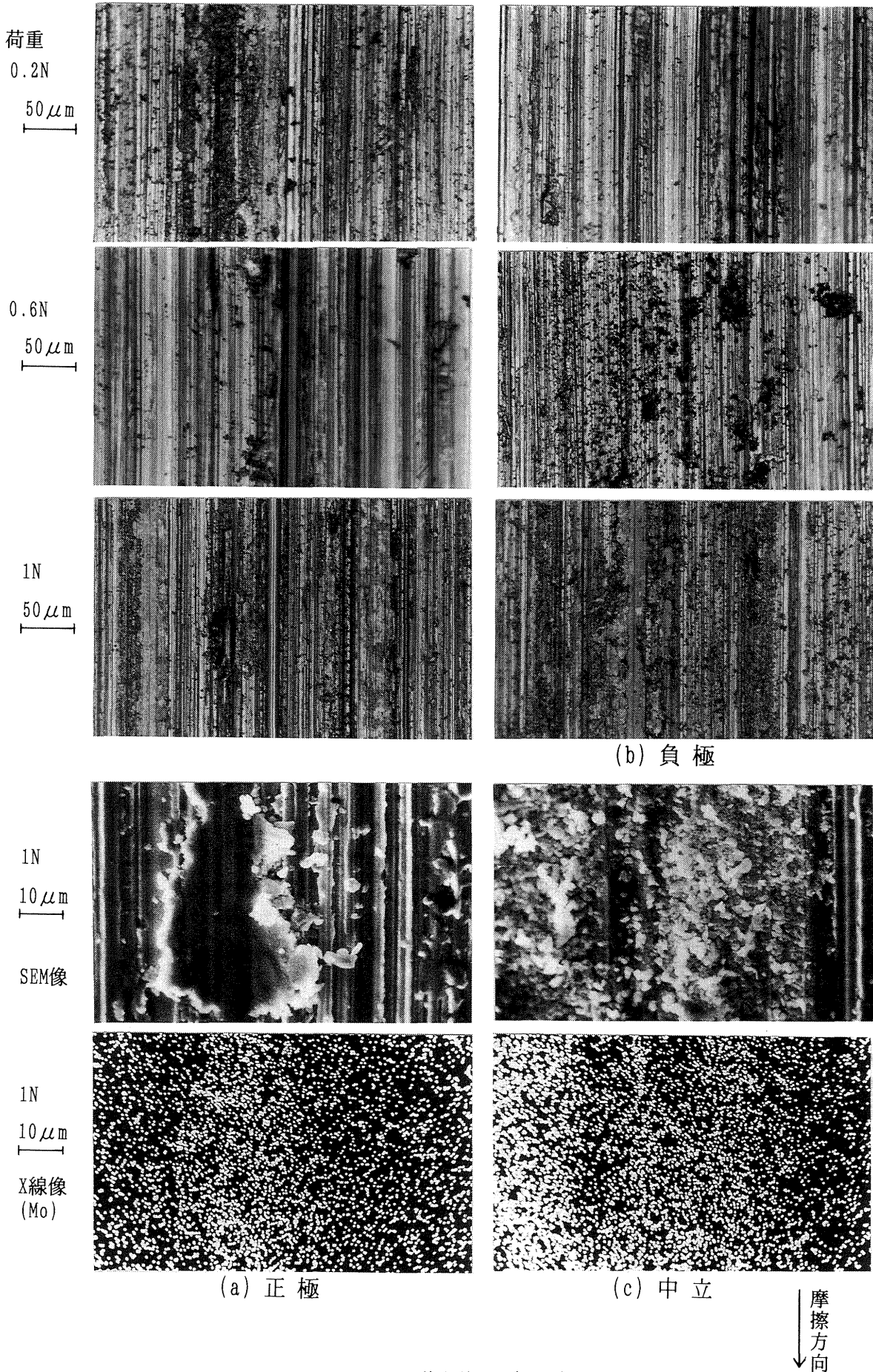


図4-7 Ag10Cuリングの摺動痕(相手ブラシ材: Ag-15MoS₂)

が得られたのは、ブラシ材、リング材ともに荷重が大きい方が接触面はなめらかであり、従って接触状態が良好であったためと推定される。

図4-8、図4-9はAg-15MoS₂ブラシ/Agリングの組合わせの場合である。ブラシ摺動痕には多数の条痕が形成され、MoS₂の灰色部も広く押し延ばされている。リング摺動痕にはブラシ材からの移着物や摩耗粉が見られる。摺動痕の状態は、図4-6、図4-7に示したAg-10Cuリングの場合ときわめて類似しており、リング材の種類による差異はあまり認められない。

図4-10、図4-11は、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ/Ag-10Cuリングの組合わせである。図4-10のブラシ摺動痕には、やはり多数の条痕が形成されているが、図4-6、図4-8のAg-15MoS₂ブラシの場合とはだいぶ様相が異なっている。条痕内には白色部と濃い灰色の部分、淡い灰

色の部分が混在している。濃い灰色部、淡い灰色部は、ブラシ材に添加したMoS₂、NbSe₂である。すでに摩擦によって押し延ばされている灰色部もあれば、複合材バルク中にみられたかたまり状の形を保持している灰色部もある。このようなかたまり状の灰色部は図4-6、図4-8のAg-15MoS₂ブラシ材にはみられなかったものである。また、Ag-15MoS₂ブラシ材に比べると白色部の比率が多く、灰色部が少ない。MoS₂、NbSe₂の灰色部がブラシ摺動面に少なく、かたまり状のものが観察されたということは、ブラシ内部の灰色部がリングにより摺動されていないこと、すなわちブラシの摩耗があまり進んでいないことを意味する。摺動面の灰色部は荷重が大きいほど広く押し延ばされている傾向がみられるが、Ag-15MoS₂ブラシの場合ほど荷重の影響は顕著でない。図4-11のリング摺動痕には、ブラシ材からの移着物が形成されてお

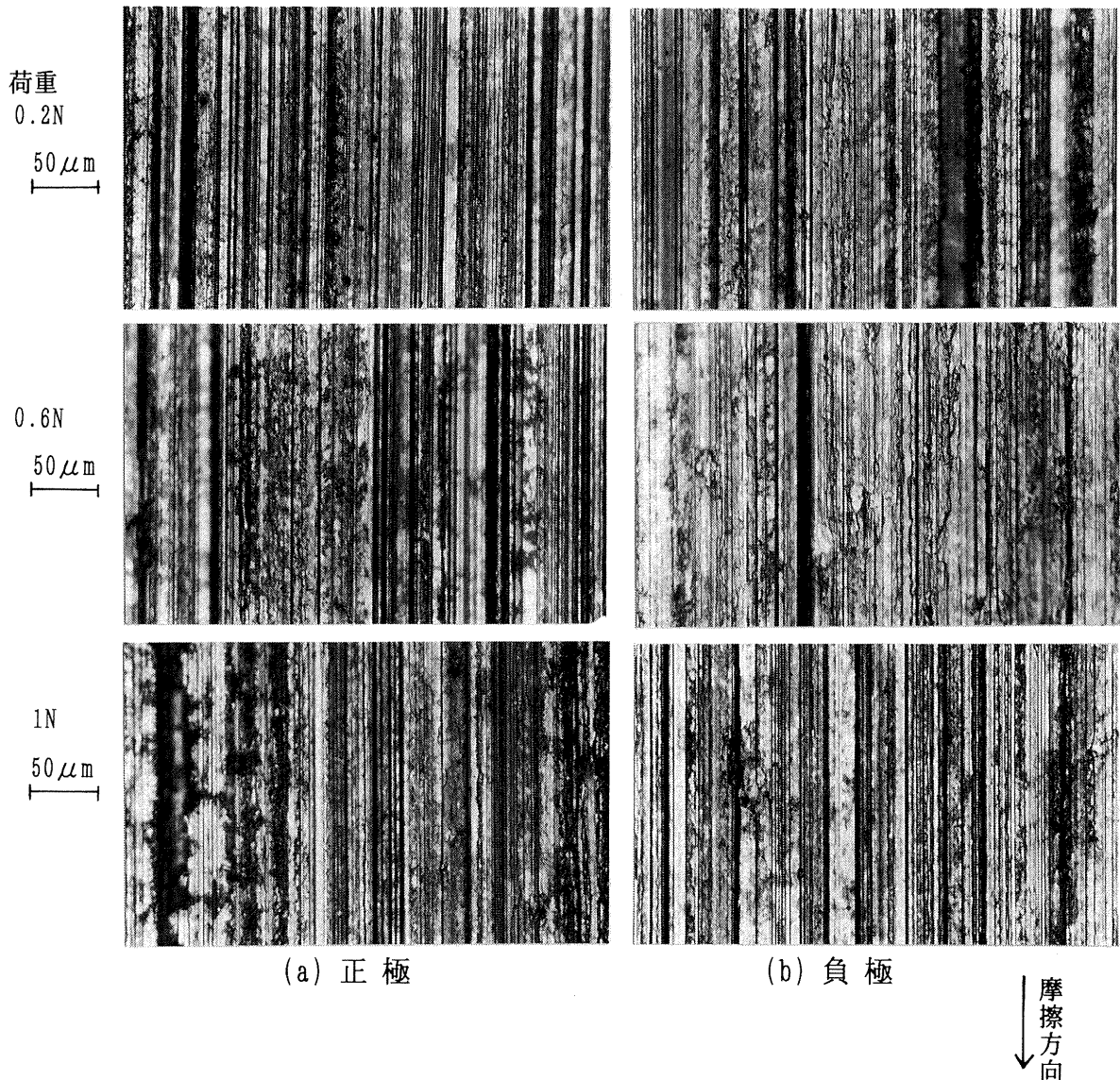


図4-8 Ag-15MoS₂ブラシの摺動痕(相手リング材: Ag)

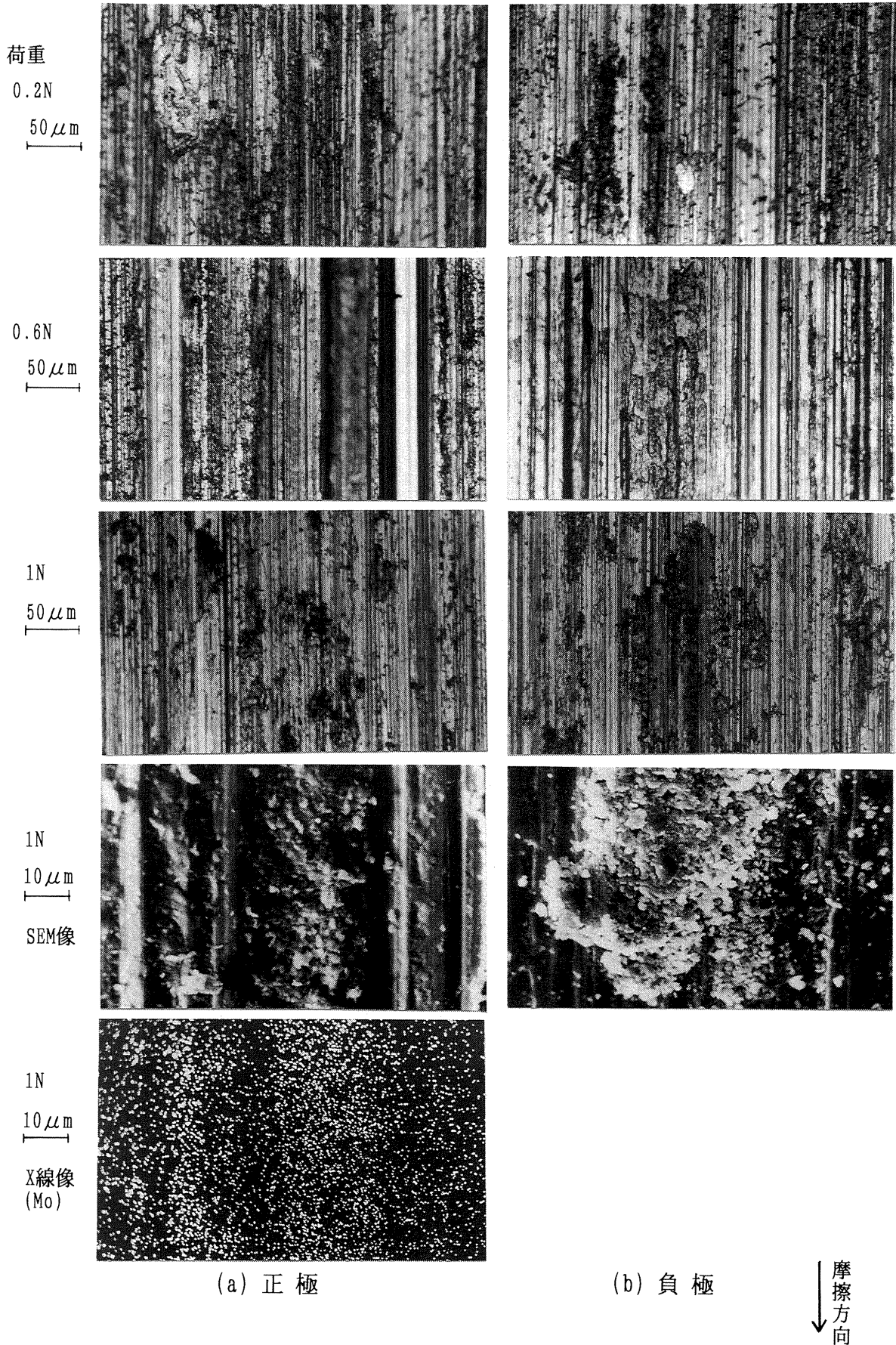


図4-9 Agリングの摺動痕(相手ブラシ材: Ag-15MoS₂)

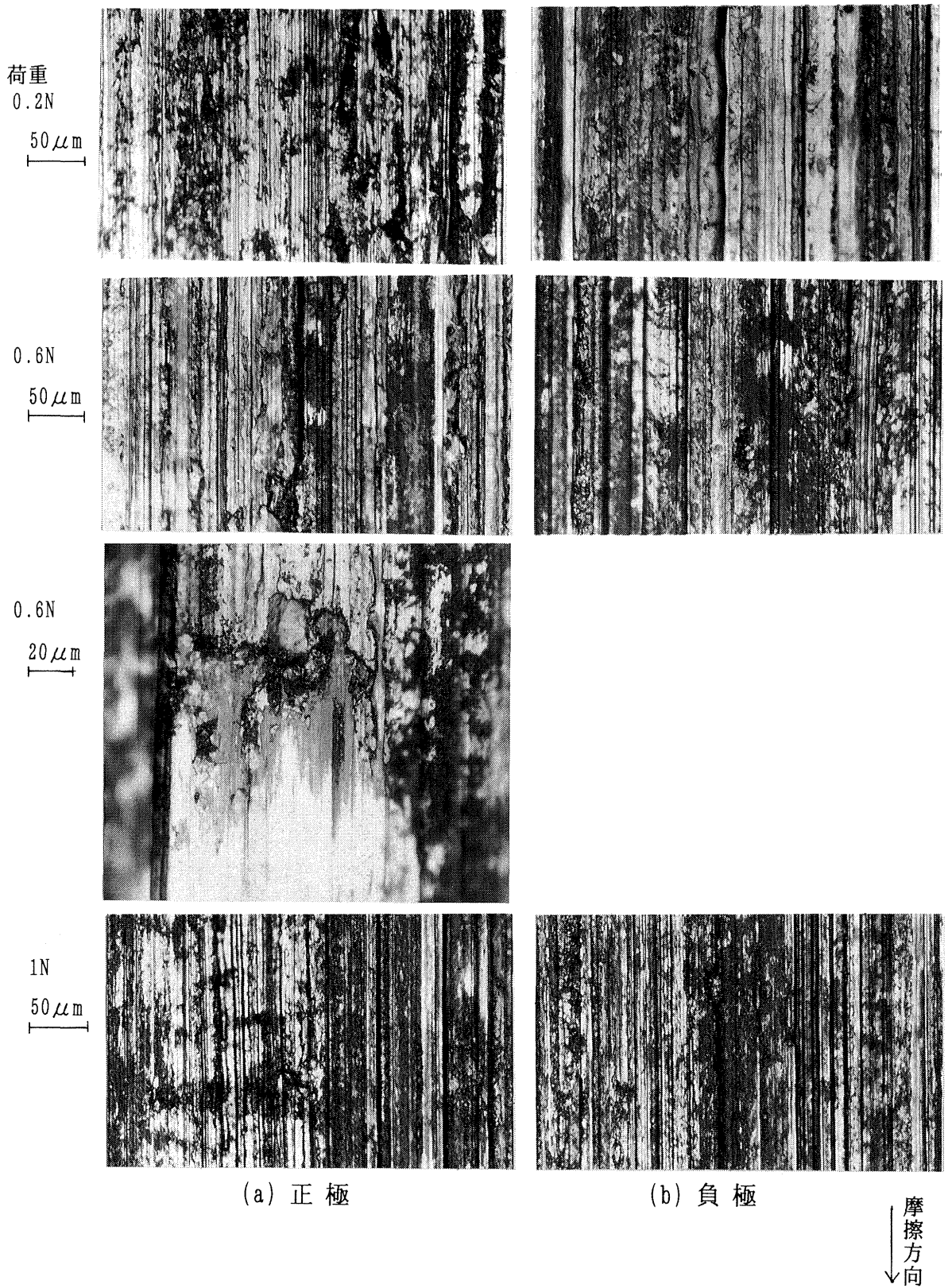


図4-10 Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシの摺動痕(相手リング材: Ag-10Cu)

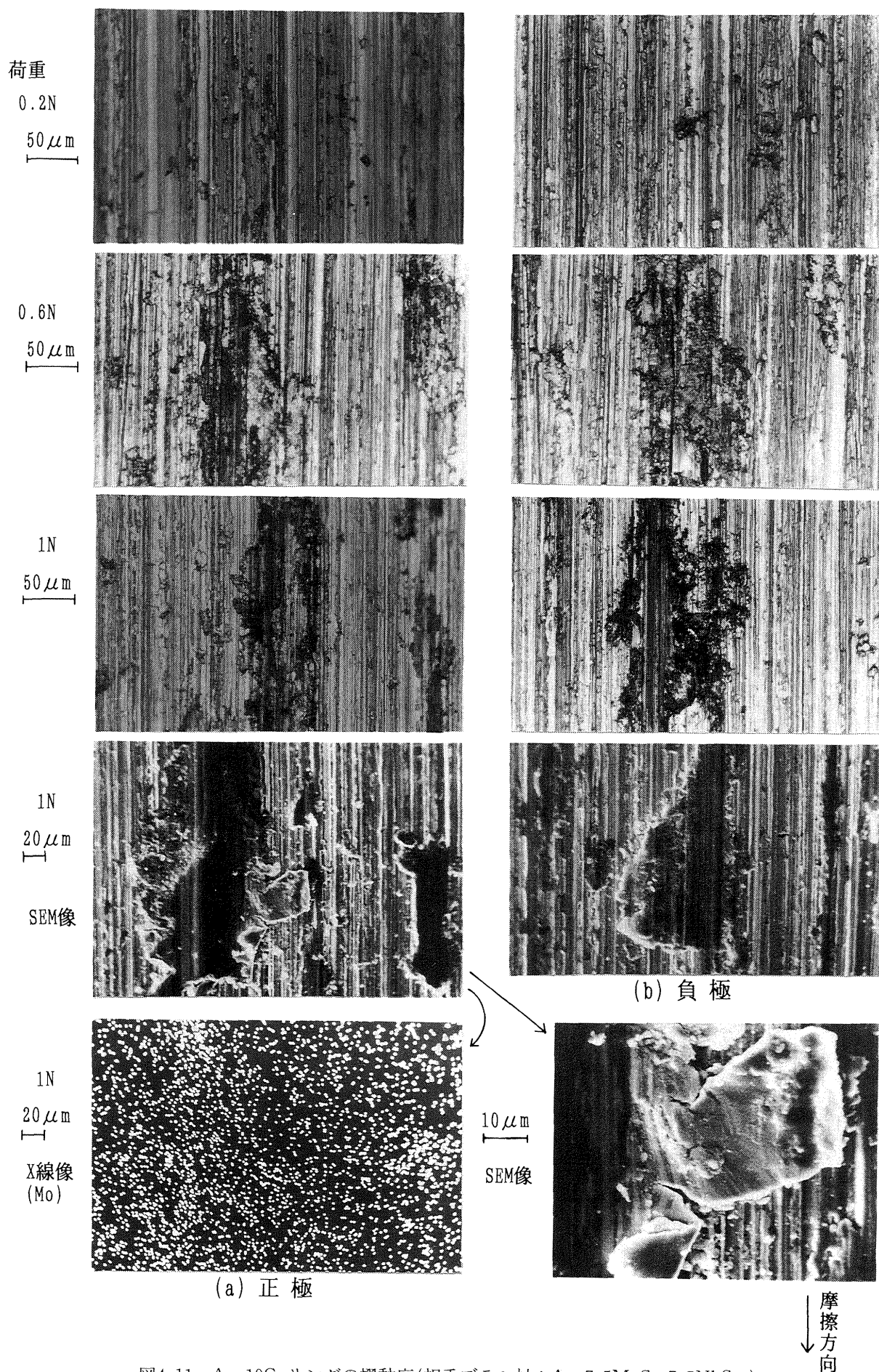


図4-11 Ag-10Cuリングの摺動痕(相手ブラシ材: Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂)

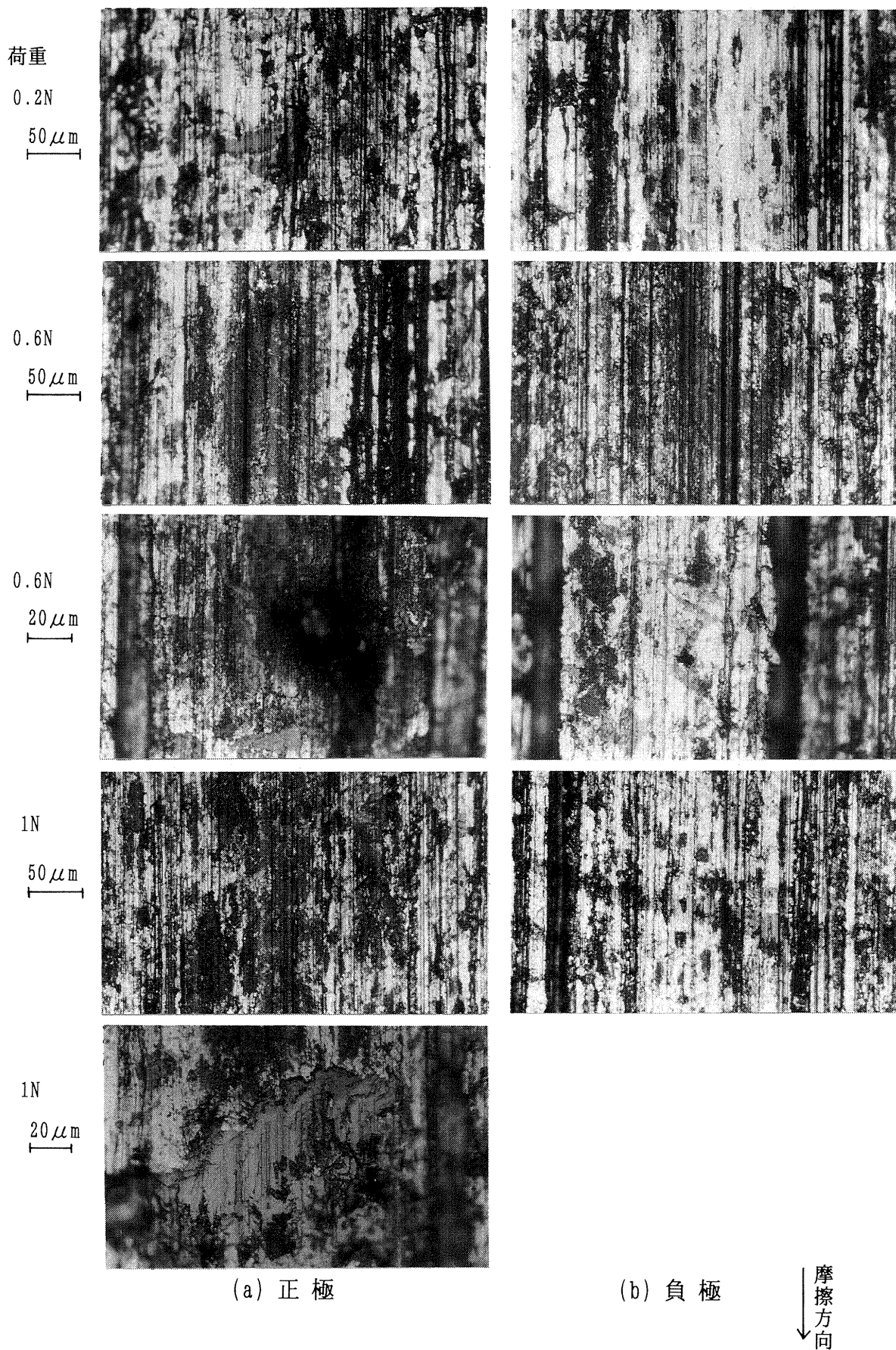


図4-12 Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシの摺動痕(相手リング材: Ag)

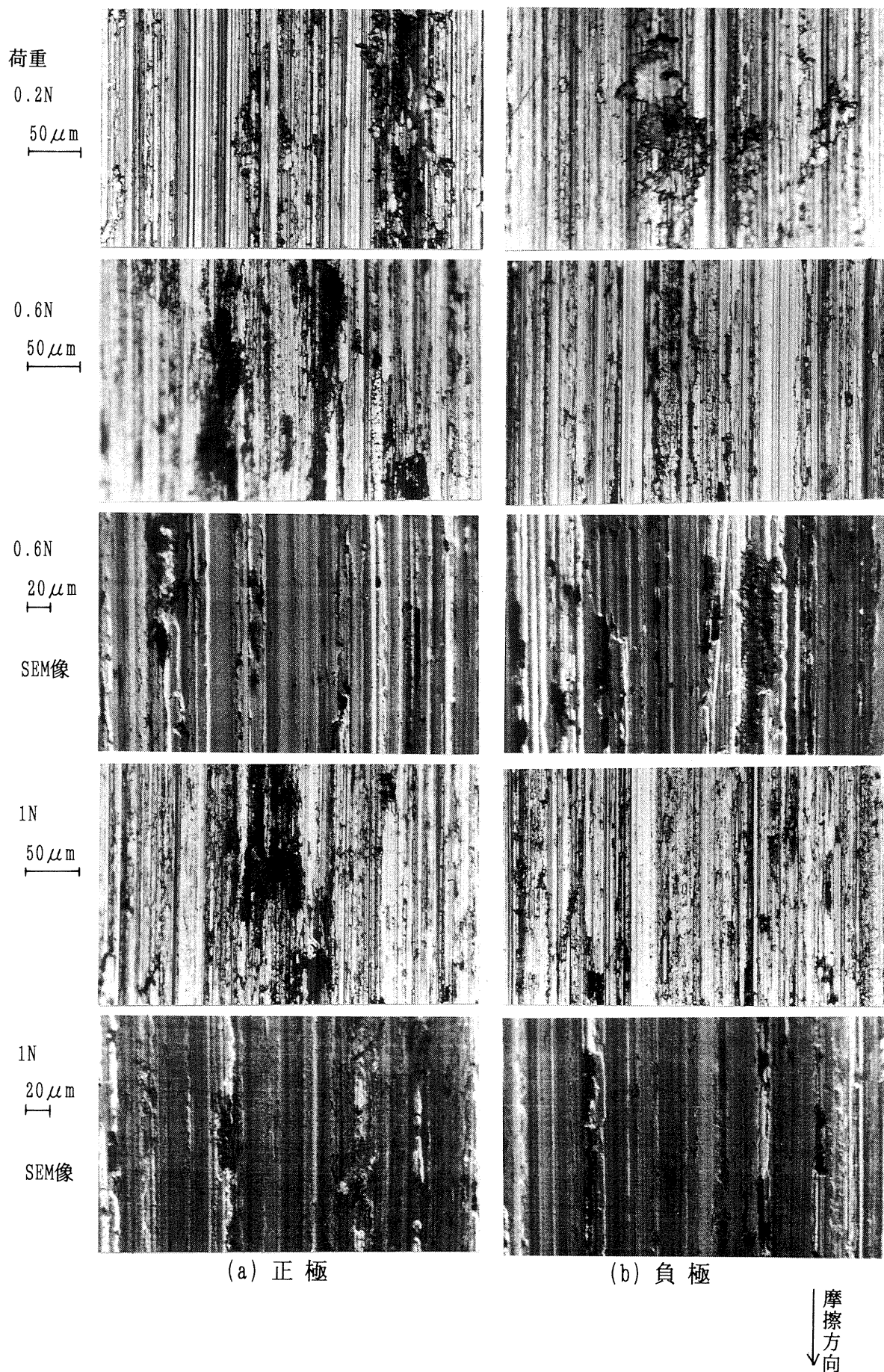


図4-13 Agリングの摺動痕(相手ブラシ材: Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂)

り、荷重が大きい方がたくさん見られた。SEM像では、移着物にクラックが入り、折り返されたり、今にもリング材から離脱し摩耗片になりかけているものが観察された。図4-7、図4-9のAg-15MoS₂ブラシ材の場合と比べると、Ag-15MoS₂ブラシ材の方が摺動面はなめらかで、付着物も広い領域にわたって薄く引き延ばされている。

図4-12、図4-13は、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ/Agリングの組合せである。ブラシ摺動痕には条痕があり白色部と灰色部が混在しているのが観察され、またリング摺動痕にはブラシ材からの移着物が形成されている。摺動痕の状態は、図4-10、図4-11に示したAg-10Cuリングの場合と同様であり、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ材の場合もリング材の種類による差異はあまり認められない。

図4-14は、図4-1～図4-4から読みとった接触抵抗及び電気ノイズと押付け荷重の関係を、各ブラシ/リングの組合せについて比較したもので、ブラシ材の摩耗率も併せて示した。

Ag-15MoS₂ブラシ材では、押付け荷重が大きいほど接触抵抗、電気ノイズともに減少する傾向がみられた。荷重を増すとブラシ材とリング材の接触が安定した良好な状態になるためと考えられる。このことは、図4-6～図4-9の摺動面の状態からも裏付けられる。一方、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ材の場合、押付け荷重を0.2Nから0.6Nに増やすと大幅に接触抵抗、電気ノイズが減少したが、さらに1Nを増やすと電気ノイズはやや減少するものの、接触抵抗は増大した。荷重1Nの場合、リング摺動面には図4-11に示したように摩耗片になりかけている付

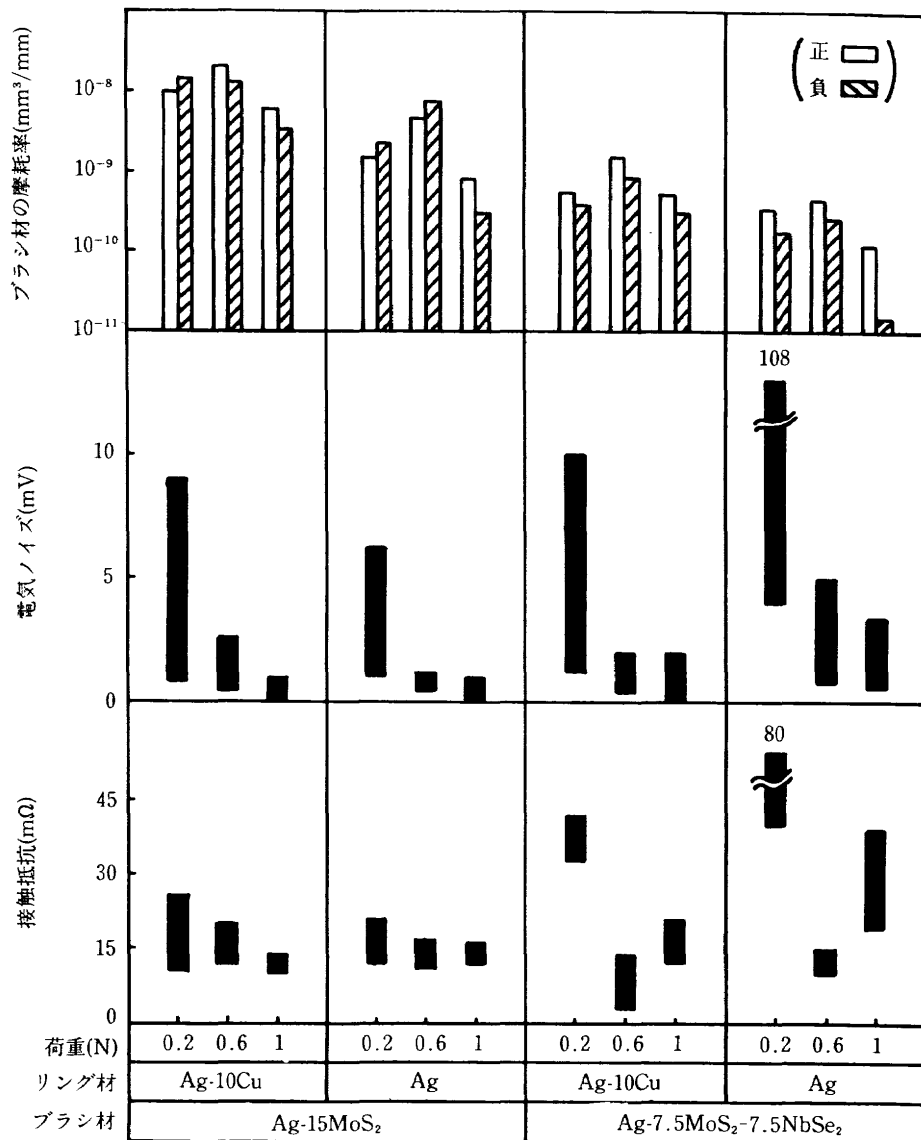


図4-14 押付け荷重の摺動特性への影響(通電量 1 A)
 ブラシ材：Ag-15MoS₂、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂
 リング材：Ag-10Cu、Ag

着物が観察されており、このような摩耗片により接触状態が悪くなったためと思われる。電気ノイズは荷重が高い方が小さくなるが、接触抵抗はブラシ材によって最小となる押付け荷重が異なることがわかった。

ブラシ材の摩耗率は、いずれのブラシ/リングの組合わせでも、荷重を0.2Nから0.6Nに増やした場合には若干の増加がみられた。さらに荷重を増すと摩耗が増えることが懸念されたが、荷重1Nでのブラシ材の摩耗は、荷重0.2N及び0.6Nの場合よりも小さくなった。荷重を増やすと機械的な摩耗は増加するものの、ブラシとリングの接触状態が良好になり電気的な摩耗が低減し、全体の摩耗量としては減少したためと推定される。このことは、通電下の摩耗では電気的摩耗がかなりのウェイトを占めていることを示唆している。なお、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ材の摩耗率は、Ag-15MoS₂ブラシ材に比べ約1桁小さかった。この結果は前述したブラシ摺動面の観察結果とよく符合している。また、いずれのブラシ材でも相手リングがAg-10CuよりAgの方が摩耗が少ない。

以上の結果から、ブラシの最適押付け荷重について考察してみよう。まず、Ag-15MoS₂ブラシ材の場合、本節で試験した荷重範囲0.2~1Nでは接触抵抗、電気ノイズ、ブラシの摩耗率はいずれも荷重1Nの場合に最も小さく良好であった。さらに荷重を高くすることにより、より優れた性能が得られる可能性がある。一方、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ材の場合、接触抵抗は荷重0.6Nで最小、電気ノイズとブラシの摩耗率は荷重1Nで最も小さくなった。ただし、リング材がAgの荷重1Nの時の接触抵抗を除けば、荷重0.6Nと1Nでの特性の差は小さい。従って、このブラシ材の場合、最適荷重は0.6~1N程度と考えられる。

ここで、本節で得られた摺動特性と前報¹²⁾のピン/円板型摩擦試験での摺動特性を比較してみよう。

まず、押付け荷重の影響であるが、両試験とも荷重を増やすと接触抵抗、電気ノイズ、ブラシ材の摩耗率いづ

れも全般的に小さくなる傾向が認められた。摺動特性への荷重の影響は、いずれの試験形態でも同様な傾向を示した。それでは、得られた接触抵抗、電気ノイズやブラシ材の摩耗率の値はどうであろうか。両試験で最も実験条件に近いのは、本節の荷重0.6Nの場合とピン/円板型摩擦試験のコイルバネ荷重0.5Nの場合であり、この両者の摺動特性を比較する。なお、通電条件や摺動速度など荷重以外の条件は全く同じである。表4-2に両者を比較した結果を示す。ピン/円板型摩擦試験における接触抵抗は、本節のスリップリングモデル機の試験よりわずかに小さく、電気ノイズは逆に摩擦試験の方がやや大きい程度である。また、複合材(ブラシまたはピン)の摩耗率はほぼ同程度である。摺動試験につきものばらつきや両試験の接触形態の大きな差を考えると、この結果はいずれの試験形態でも摺動特性は同じであったことを示している。

次に、両試験における摺動面の状態を比較する。摩擦試験での複合材ピン、円板の摺動痕¹²⁾を図4-15に示す。複合材側の摺動痕は、摩擦試験ではあたり出しの際にできた研磨傷が明瞭に認められる、モデル機の試験では条痕がややなめらかである、など細かい点で相違はみられるが、図4-6 図4-10と図4-15を比べて明らかなようにその様相は類似している。一方、リング(円板)の摺動痕も、モデル機の場合の方が、図4-7 図4-11にみられるようにブラシからの移着物がなめらかに押し延ばされて形成されているのが目につくが、移着物の表面状態は比較的よく似ている。

以上の結果は、ほぼ同じ条件で試験すれば、摺動特性、荷重特性、さらには摺動痕の状態もモデル機と摩擦試験機で大差ないこと、すなわち、前報の摩擦試験がスリップリングの摺動状態を模擬できていたことを示している。このことは、前報で得られた結論、例えば固体潤滑剤の最適配合比が15%程度である、試作したブラシ材が既に実用されているAg-12MoS₂-3Grのブラシ材と同程度以上の摺動特性を示す、ということがスリップリングの場

表4-2 スリップリングモデル機とピン/円板型摩擦試験機における摺動特性の比較 (真空中、相手リング材；Ag-10Cu、通電量；1A)

銀系複合ブラシ材	Ag-15MoS ₂		Ag-7.5MoS ₂ -7.5NbSe ₂	
	モデル機	ピン/円板型	モデル機	ピン円板型
試験機	モデル機	ピン/円板型	モデル機	ピン円板型
荷重条件	板バネ0.6N	コイルバネ0.5N	板バネ0.6N	コイルバネ0.5N
接触抵抗(mΩ)	6~10	5~8	2~7	3~5
電気ノイズ(mV)	0.5~2.5	2~6	0.5~2	2~14
複合材の摩耗率 (nm ³ /mm)	正極	2.2×10 ⁻⁸	1.4×10 ⁻⁹	6.5×10 ⁻⁹
	負極	2.0×10 ⁻⁸	1.7×10 ⁻⁸	9.6×10 ⁻¹⁰

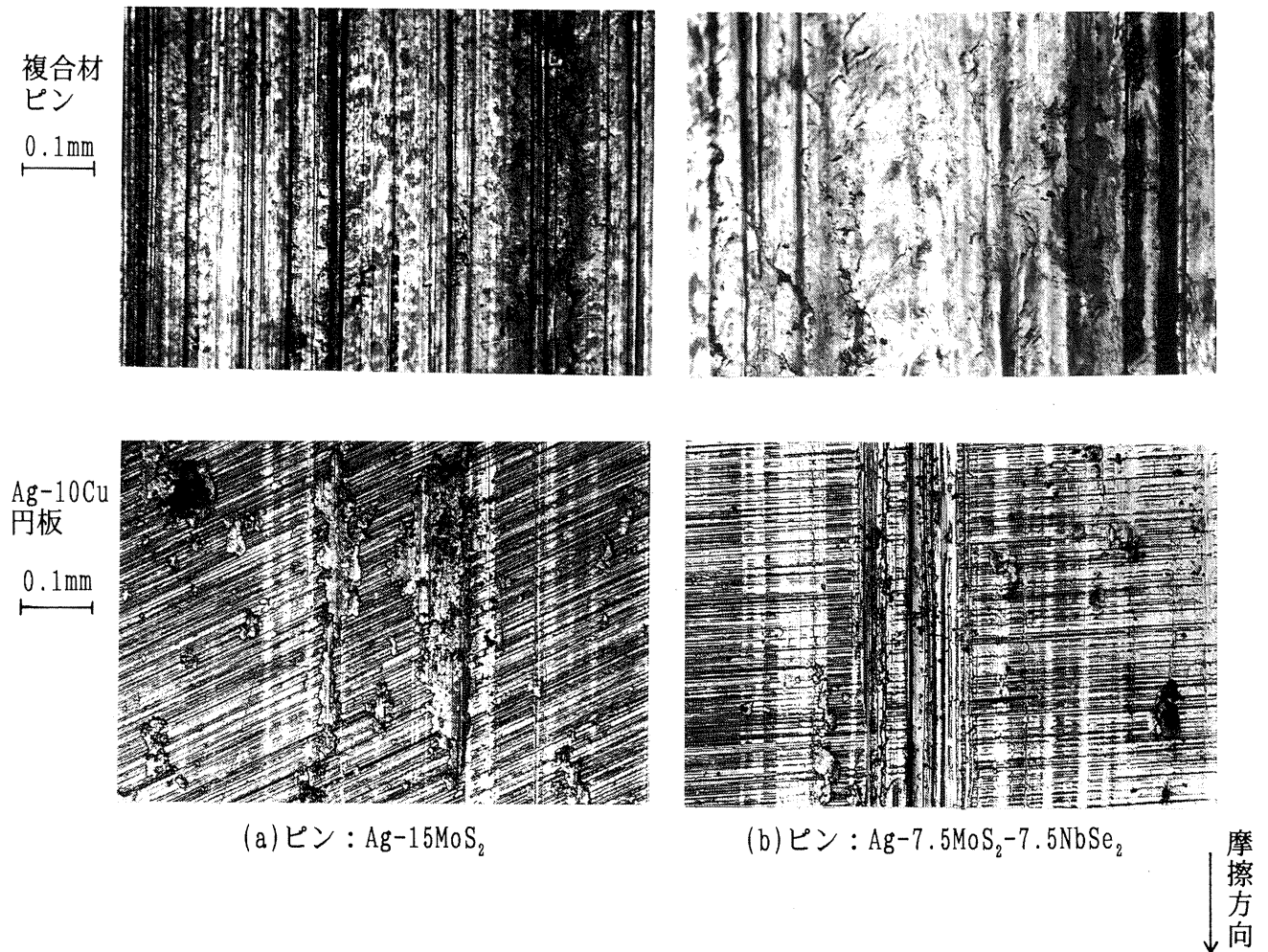


図4-15 ピン/ディスク摩擦試験における摺動痕
 ブラシ材 : Ag-15MoS₂, Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂
 リング材 : Ag-10Cu, Ag
 荷重 : ばね荷重0.5N, 通電量 : 最大1 A

合にも適用できることを示唆している。

4-2 MoS₂とNbSe₂の最適配合比及び通電量の摺動特性への影響

前報¹²⁾では、NbSe₂を単独添加した複合材は摺動特性が劣ること、MoS₂を単独添加した複合材およびMoS₂とNbSe₂の配合比を1:1とした複合材は固体潤滑剤の配合量が15%程度で最も良好な摺動特性を示すことを明らかにした。この結果は、最適な複合材はMoS₂とNbSe₂の配合比が1:0~1:1の間に存在していることを想定させる。

本節では、MoS₂とNbSe₂の最適配合比を明らかにするために、固体潤滑剤の合計添加量は15%とし、MoS₂とNbSe₂の配合比を変えたブラシ材の摺動特性を評価した結果について述べる。また、電力伝達用スリップリングを想定して通電量を20Aまで増やした時の摺動特性を評価し、本複合材の宇宙用スリップリングへの適用の可否を検討する。

試験に用いた複合材は、NbSe₂の添加量を0~7.5%と

した下記の4種類である。

- (1) Ag-15MoS₂
- (2) Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂
- (3) Ag-10MoS₂-5NbSe₂
- (4) Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂

相手リング材には、Ag-10CuとAgの2種類を用いた。したがって、本節で試験したブラシ/リングの組み合わせは8組である。

本節における試験条件を表4-3に示す。摺動速度は75

表4-3 実験条件

摺動速度	75mm/秒
荷重	1N
通電量	直流1, 3, 6, 9, 12, 15, 17, 20A (1Aから段階的に増加)
摩擦回数	60000回 ならし運転 14000回 各電流通電時 4000~7000回
雰囲気	真空 10 ⁻⁵ Pa台

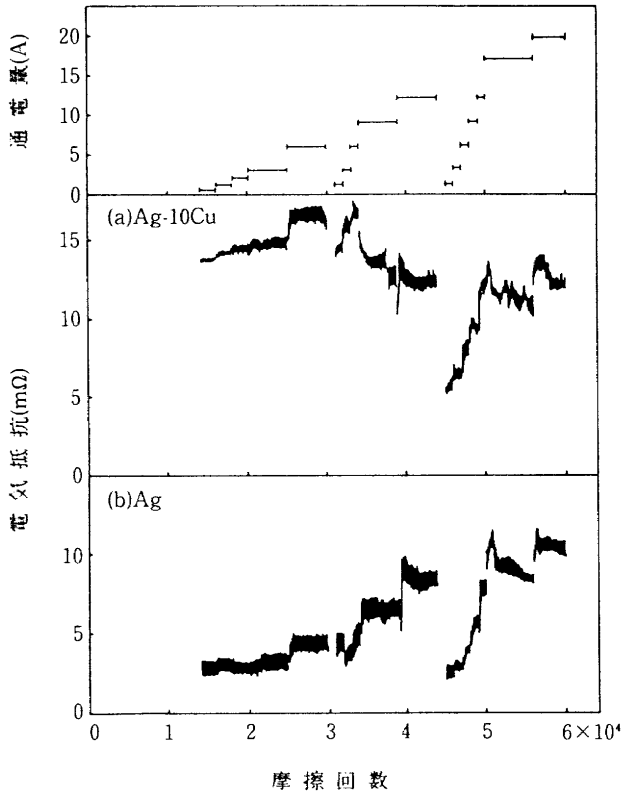


図4-16 Ag-15MoS₂ブラシの電気抵抗
押付け荷重：1 N

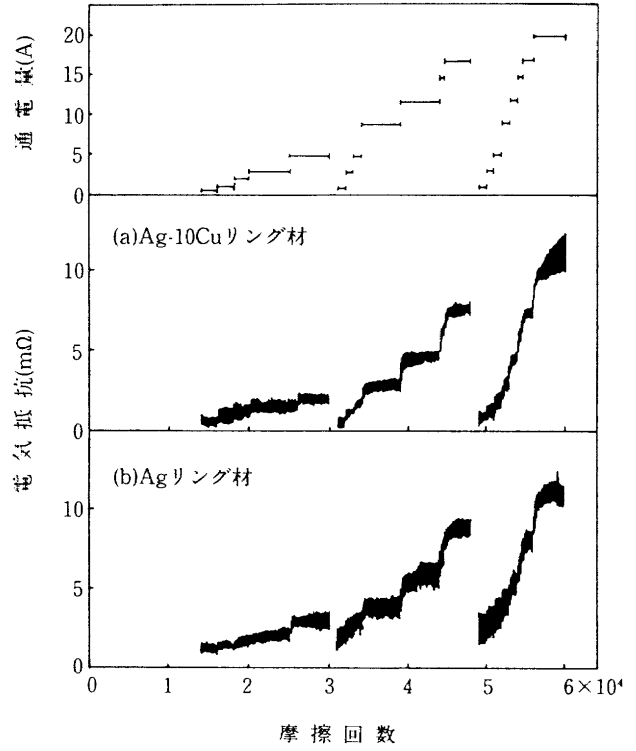


図4-18 Ag-10MoS₂-5NbSe₂ブラシの電気抵抗
押付け荷重：1 N

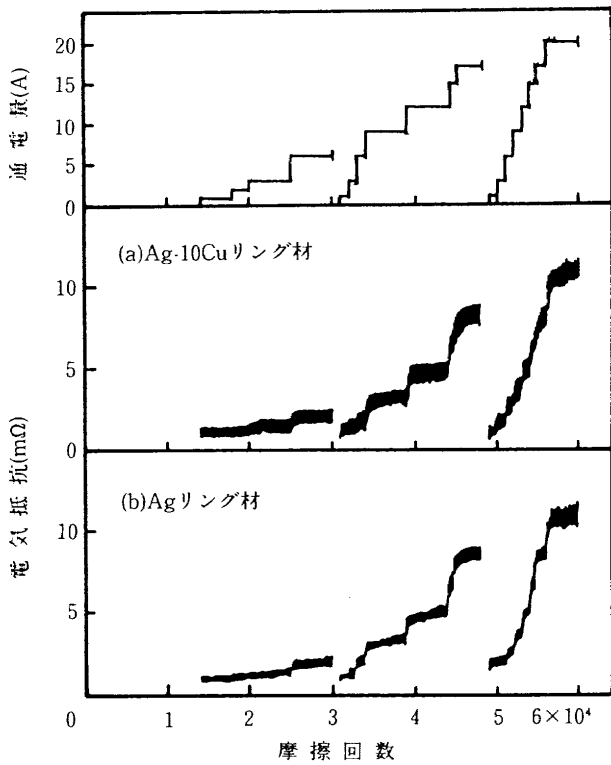


図4-17 Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシの電気抵抗
押付け荷重：1 N

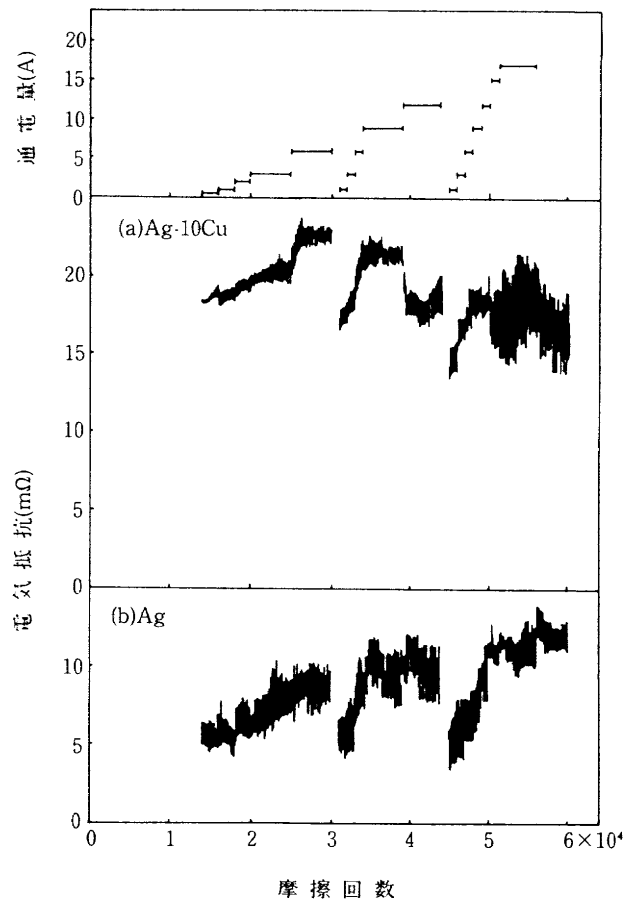


図4-19 Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシの電気抵抗
押付け荷重：1 N

mm/s(約29rpm)で、押付け荷重は前節で適切であることが明らかとなった1Nとした。なお、ブラシ材が摩耗することによる押し付け荷重の変化は最大でも7%程度の減少であった。実験は、まず無通電下でのならし運転を14000回行った後に通電を開始し、通電量を1Aから逐次増加させ6Aまで通電したところで一旦停止した。次に、改めて無通電状態から試験を再開し、今度は12Aまで通電したところで停止した。さらに、無通電状態から試験を再開し最終的に20Aまで通電したところで試験を終了した。総摩擦回数は60000回であり、各通電量における摩擦回数は1Aと17Aが4000~6000回、3Aと6Aが7000回、9Aと12Aが6000回、20Aが4000回である。

図4-16~図4-19は、8組のブラシ/リングの組合わせについて、通電量と電気抵抗を摩擦回数に対して示したものである。いずれのブラシ/リングの組合わせにおいても、通電量が増えると接触抵抗および電気ノイズは全般に大きくなる傾向がみられる。リング材がAg-10Cuの場合、NbSe₂の添加量が0%、7.5%のブラシ材では摩擦するにつれて電気抵抗が低下する傾向がみられたが(図4-16(a) 図4-19(a))、これ以外のブラシ/リングの組合わせでは、同じ通電量であれば摩擦回数によらずほぼ同等の電気抵抗を示した。ブラシ/リングの組合わせによりブラシ摩耗に起因する摺動面のなじみやすさが異なるためと思われる。相手リング材はAg-10CuよりAgの方が全般に良好な性能を示している。Agリングでは電気抵抗はあまり摩擦回数に依存していないことを考慮すると、Agの方が柔らかくなじみやすいためと思われる。

図4-20は、通電量を変えたときの電気抵抗をオシロスコープで観察した一例である。図から、通電量を増やすと電気ノイズが大幅に増加することが明瞭にみとれる。

図4-21は、図4-16~図4-19の3回目の電流増加時における通電量と接触抵抗の関係を示したものである。接触抵抗は通電量の影響を強く受け、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ/Ag-10Cuリングの組み合わせを除いて、通電量を増やすと大きくなる傾向にある。この原因としては、通電量増加に伴う発熱による固有抵抗の増大、ブラシ材/リング材の接触面で電流が真実接触面を通過する際に絞られて流れることにより発生する絞り抵抗の増大などが考えられる。また、接触抵抗はブラシ材、リング材によっても大きく影響を受けている。NbSe₂を2.5%及び5%添加したブラシ材の接触抵抗は極めて小さく、20A通電時でも10mΩ以下と良好である。これに対し、NbSe₂の添加量が7.5%のブラシ材では、2.5%及び5%のブラシ材に比べ接触抵抗が大きく、特にAg-10Cuリングとの組合わせでは、通電量が少ない場合に他のブラシ材の数倍から十数倍の接触抵抗を示した。また、NbSe₂を

含まないブラシ材も、Ag-10Cuリングとの組合わせでは大きな接触抵抗を示した。すなわち、NbSe₂をごく少量添加するのは効果的だが、添加し過ぎるとかえって性能が低下することを示しており、興味深い。リング材に関しては、Ag-10Cuに比べAgの方が全般的に小さな接触抵抗を示したが、ブラシ材に比べると接触抵抗へ与える影響は少ない。Ag-10Cuリングの方が接触抵抗が大きかった理由としては、リング材自体の固有抵抗が大きいため、後述するように固有抵抗の大きいNbSe₂などの移着物がAg-10Cuリングの摺動痕上に多く形成されていたこと、などが考えられる。

図4-22は、図4-16~図4-19から求めた通電量と電気ノイズの関係である。接触抵抗と同様に、電気ノイズも通電量の影響を強く受け、電流を増やすと電気ノイズが大幅に増加する傾向にある。1A通電時に1mV程度であった電気ノイズが、20A通電時には20~100mVにも達している。この原因としては、後述するように、通電量を増やすとブラシ材の摩耗が増大しており、摺動面に介在する摩耗粉によりブラシ材とリング材の接触状態が不安定となるためではないかと思われる。電気ノイズは、NbSe₂の添加量が0%および2.5%のブラシ材では極めて小さく、20A通電時でも30mV以下と良好である。それに対し、NbSe₂を7.5%添加したブラシ材の電気ノイズは最も大きく、特にAg-10Cuリングとの組み合わせでは通電量が17A以上で約100mVを示した。リング材に関しては、Ag-10Cuに比べてAgの方が全般に電気ノイズは小さく、接触抵抗と同じ傾向を示した。

図4-23は、20Aまで通電した8組のブラシ/リングについて、ブラシ材の摩耗率を比較したものである。ブラシ材の摩耗率は、いずれも10⁻¹¹~10⁻⁸mm³/mm台と小さく良好であり、特にNbSe₂を添加したブラシ材の摩耗が少なくなっている。また、相手リングがAgの方がAg-10Cuより小さな摩耗率を示した。通電量が20Aと大きい本実験では、後述するようにブラシ材の摩耗は電氣的摩耗が支配的と考えられる。従って、ブラシ材の摩耗率の差は、NbSe₂を添加したブラシ材が硬く、Agの方がAg-10Cuより柔らかい(表2-3、表2-4)という硬さの違いによるのではなく、ブラシ/リングの組合わせによって摺動面の接触状態が異なっていたためと考えられる。なお、リング側の摩耗はいずれの組み合わせでもほとんどみられなかった。

図4-24は、4-1節で試験した1Aまでしか通電しなかったブラシ材の摩耗率を、20Aまで通電したブラシ材と比較したものである。Ag-15MoS₂及びAg-7.5MoS₂-7.5NbSe₂のいずれのブラシ材も、相手リング材に係わらず、20Aまで通電したブラシ材の方が摩耗率が数倍から十倍程度大きい。このことは、ブラシ材の摩耗のかなりの部

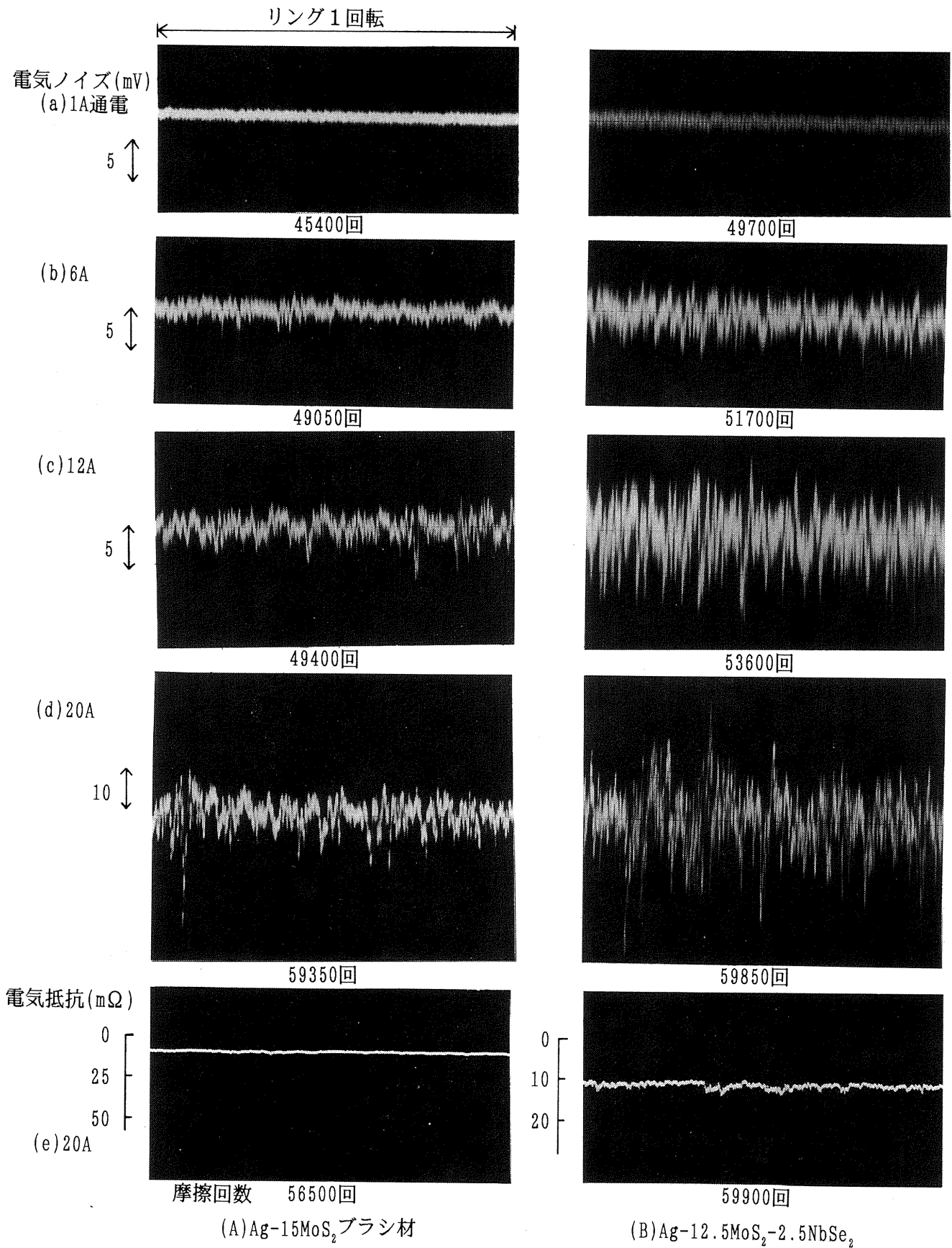


図4-20 オシロスコープによる電気抵抗、電気ノイズの観察例
 相手リング材：Ag、押付け荷重：1N

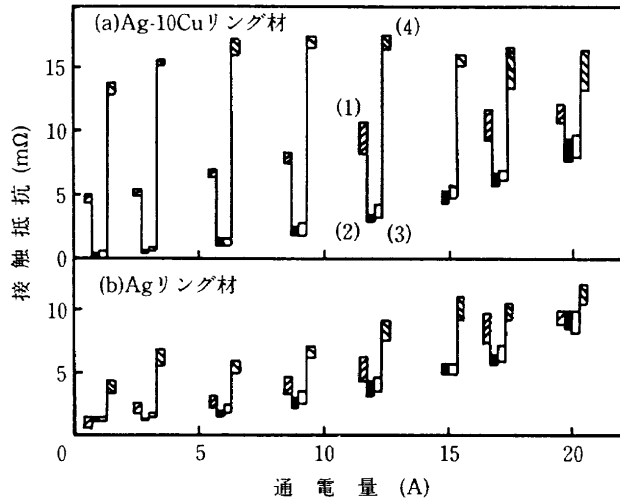


図4-21 接触抵抗への通電量の影響
 押付け荷重：1 N
 ブラシ材：(1) \square Ag-15MoS₂, (2) \blacksquare Ag-12.5 MoS₂-2.5NbSe₂, (3) \square Ag-10MoS₂-5NbSe₂, (4) \square Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂

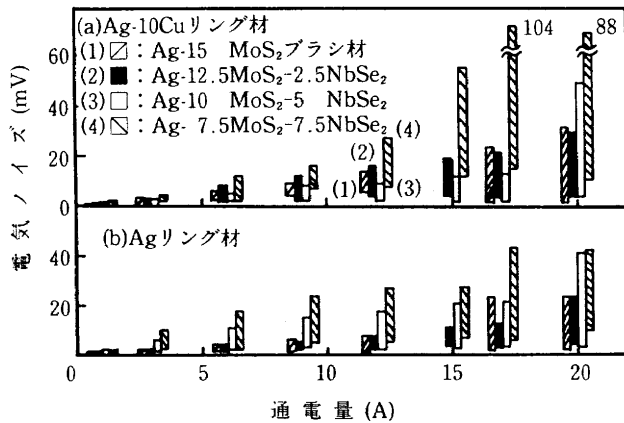


図4-22 電気ノイズへの通電量の影響
 押付け荷重：1 N
 ブラシ材：(1) \square Ag-15MoS₂, (2) \blacksquare Ag-12.5 MoS₂-2.5NbSe₂, (3) \square Ag-10MoS₂-5NbSe₂, (4) \square Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂

分が通電に伴って生じる電氣的な摩耗で占められていることを示唆している。ブラシ材の摩耗が増えるということは、摺動面内に介在している摩耗粉やリング表面への付着物が増えることにつながるため、ブラシとリングの接触状態が不安定になりやすいと考えられる。また、接触状態が不安定になれば火花放電などの現象が起りやすくなる。通電量が多いほど接触抵抗や電気ノイズが大きくなった原因には、このような摩耗粉の挙動も大きく影響していたと考えられる。

図4-25は、各ブラシ/リングの組み合わせにおける通電量とブラシ材の温度上昇の関係である。ブラシ材の温

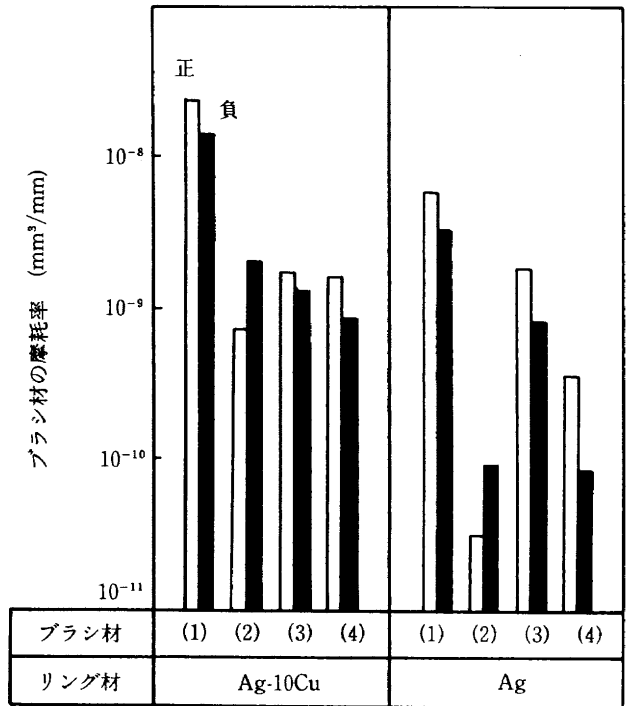


図4-23 ブラシ材の摩耗率
 押付け荷重：1 N, 通電量：最大20A
 ブラシ材：(1) Ag-15 MoS₂, (2) Ag-12.5 MoS₂-2.5NbSe₂, (3) Ag-10MoS₂-5NbSe₂, (4) Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂

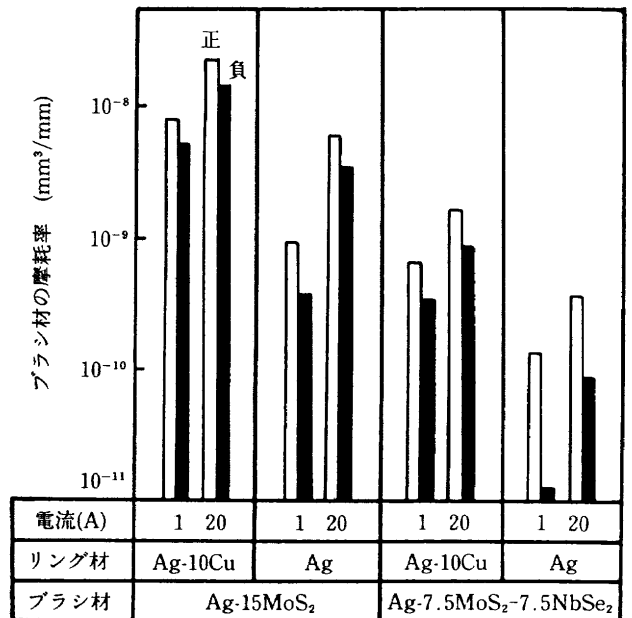


図4-24 ブラシ材の比摩耗量への通電量の影響
 押付け荷重：1 N

度上昇は通電量の影響を強く受け、通電量を増やすと大きくなった。特に、通電量が6A以上では温度上昇が著しく、20A通電時には約120℃も温度が上昇したことがあった。本試験条件では摺動速度・荷重ともに小さいこと、

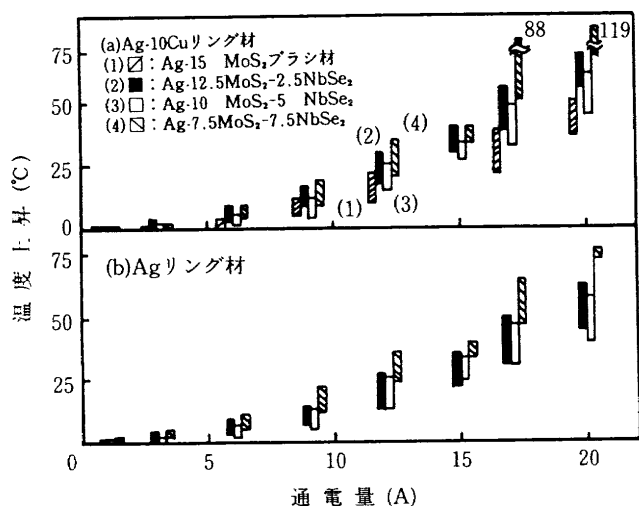


図4-25 ブラシ材の温度上昇への通電量の影響
 押付け荷重：1 N
 ブラシ材：(1) Ag-15MoS₂、(2) Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂、(3) Ag-10MoS₂-5NbSe₂、(4) Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂

通電量が小さい場合にはほとんど温度上昇がないことを考慮すると、ブラシ材の温度上昇は接触抵抗に伴うジュール熱に起因すると考えられる。このことは、接触抵抗が大きいブラシ材/リング材の組み合わせであるAg-7.5MoS₂-7.5NbSe₂/Ag-10Cuなどの場合に温度上昇が著しいことから裏付けられる。

図4-26～図4-33に、8組のブラシ材とリング材の摺動痕の顕微鏡写真を示す。図4-26は、Ag-15MoS₂ブラシ/Ag-10Cuリングの組み合わせの場合である。ブラシ摺動痕には細かい条痕が形成されているが、条痕のほぼ全域にMoS₂の灰色部が広がっておりブラシ摩耗がかなり進んでいることがわかる。リング摺動痕にはブラシ材からの移着物や摩耗粉が見られる。移着物は、粒状で付着しているものもあるが、多くは押し延ばされてリングのかなりの範囲に広がっている。このブラシ/リングの組み合わせの場合、図4-21、図4-22に示したように電気ノイズは比較的小さいものの接触抵抗が大きかったのは、摺動面に広がったMoS₂の影響と思われる。

図4-27～図4-29は、NbSe₂の添加量がそれぞれ2.5%、5%、7.5%のブラシとAg-10Cuリングの組み合わせの場合である。いずれのブラシ摺動痕にも条痕が多数形成されており、ブラシ摩耗が進んでいることがうかがえる。Ag-15MoS₂ブラシの場合に比べると白色部が多く、灰色部のMoS₂やNbSe₂が摺動痕内に広がっている割合がAg-15MoS₂ブラシの場合よりも小さい。また、NbSe₂を2.5%添加したブラシ摺動痕は、5%、7.5%添加したブラシに比べ、白色部が多く見られる。一方、リング摺動痕には薄く押し延ばされた移着物がみられるが、島状に点在

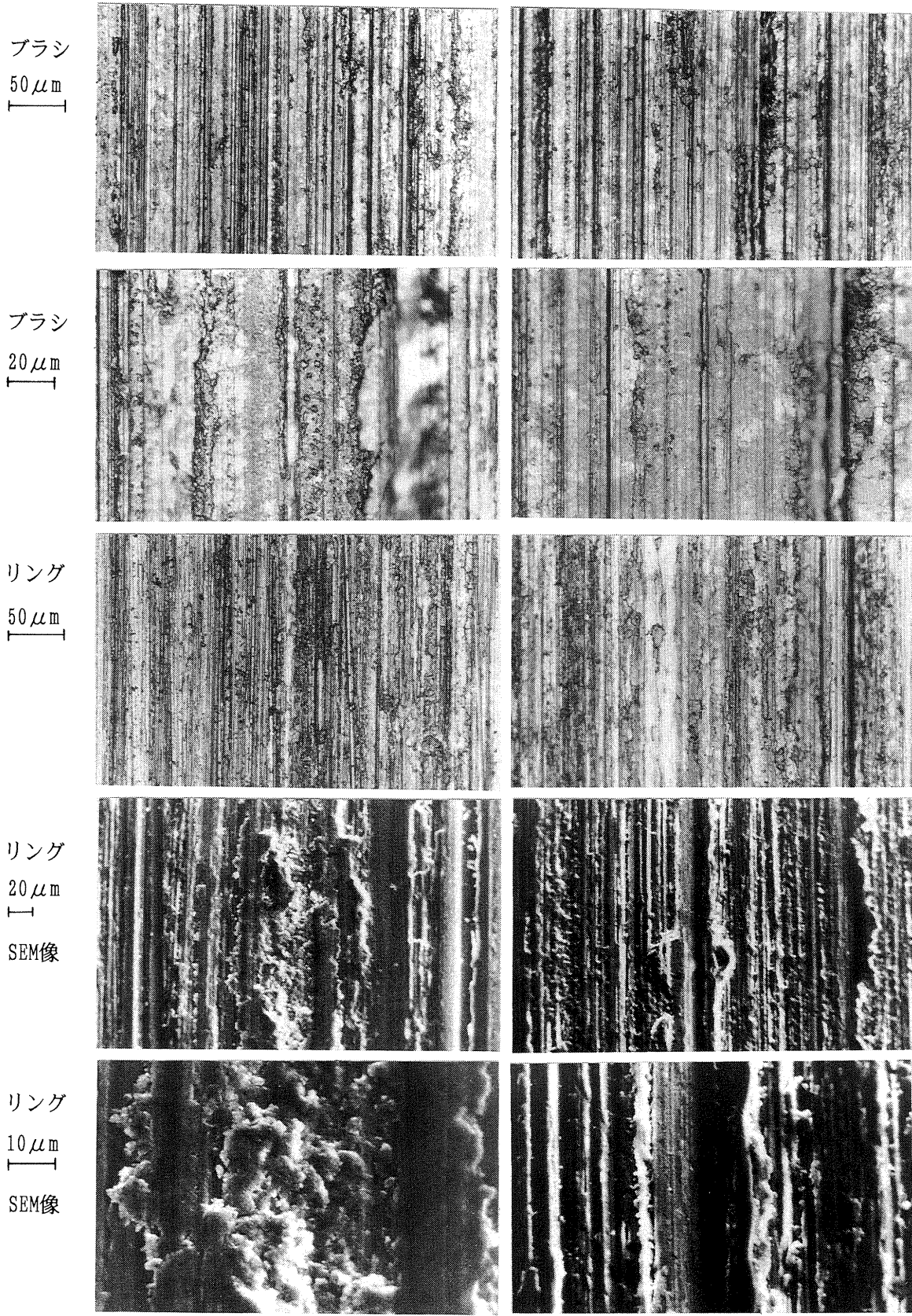
する移着物や摩耗粉もあり、またブラシ材からの移着物が存在しない領域も多くみられた。リング摺動痕の様相は、ブラシ材のNbSe₂の添加量による差異はあまり認められないが、NbSe₂の添加量が7.5%の場合のみ、図4-29にみられるように移着物がやや大きく厚めである。このブラシ/リングの組み合わせの場合、図4-19、図4-21、図4-22に示したように特に接触抵抗や電気ノイズが大きかったが、このような移着物が存在していたためと思われる。

図4-30は、Ag-15MoS₂ブラシ/Agリングの組み合わせの場合である。Ag-10Cuリングの場合に比べAgリングの方が接触抵抗、電気ノイズともに小さく良好な性能を示したが、ブラシ摺動痕、リング摺動痕の様相はいずれも相手リング材がAg-10Cuの場合(図4-26)ときわめて類似している。摺動痕の状態の微妙な相違が通電特性を大きく左右するものと思われる。

図4-31～図4-33は、NbSe₂の添加量がそれぞれ2.5%、5%、7.5%のブラシとAgリングの組み合わせの場合である。Ag-15MoS₂ブラシの場合に比べると、いずれのブラシ摺動痕にも白色部が多くみられ、また複合材作製時のかたまり状の灰色部も観察される。Ag-10Cuリング材の場合(図4-27～図4-29)に比べると、かたまり状の灰色部が明瞭に現れており、またブラシ摺動痕の条痕もなめらかである。この観察結果は、ブラシ材の摩耗がAgリングの方が少ないという図4-23の結果とよく対応している。また、NbSe₂を2.5%添加したブラシ摺動痕は、5%、7.5%添加したブラシに比べ、白色部が多く条痕もなめらかである。一方、Ag-10Cuリング材の場合と異なり、リング摺動痕には大きな移着物や摩耗粉は見られず、移着物が薄く押し延ばされている。この傾向は、Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシの場合に顕著である。このようなブラシ、リングの摺動面の状態から、Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂/Agリングの場合には、特に接触状態が良好だったものと推測され、これが接触抵抗、電気ノイズが小さく良好な特性につながったものと思われる。

ここで、試験した8組のブラシ/リング材から最適な組み合わせを選定し、宇宙用スリップリングへの適用の可否について検討してみよう。

宇宙用スリップリングには、その使用目的から電気信号伝達用と電力伝達用がある。信号伝達用スリップリングは低電流通電下で用いられ、特に電気ノイズ特性が良好であることが要求される。現在人工衛星に搭載されているスリップリングの電流密度は8A/cm²程度で、電気ノイズは数mV以下が要求されている。一方、電力伝達用スリップリングでは、電気ノイズ特性は多少犠牲になっても、できるだけ大電流を通電できること、すなわち接

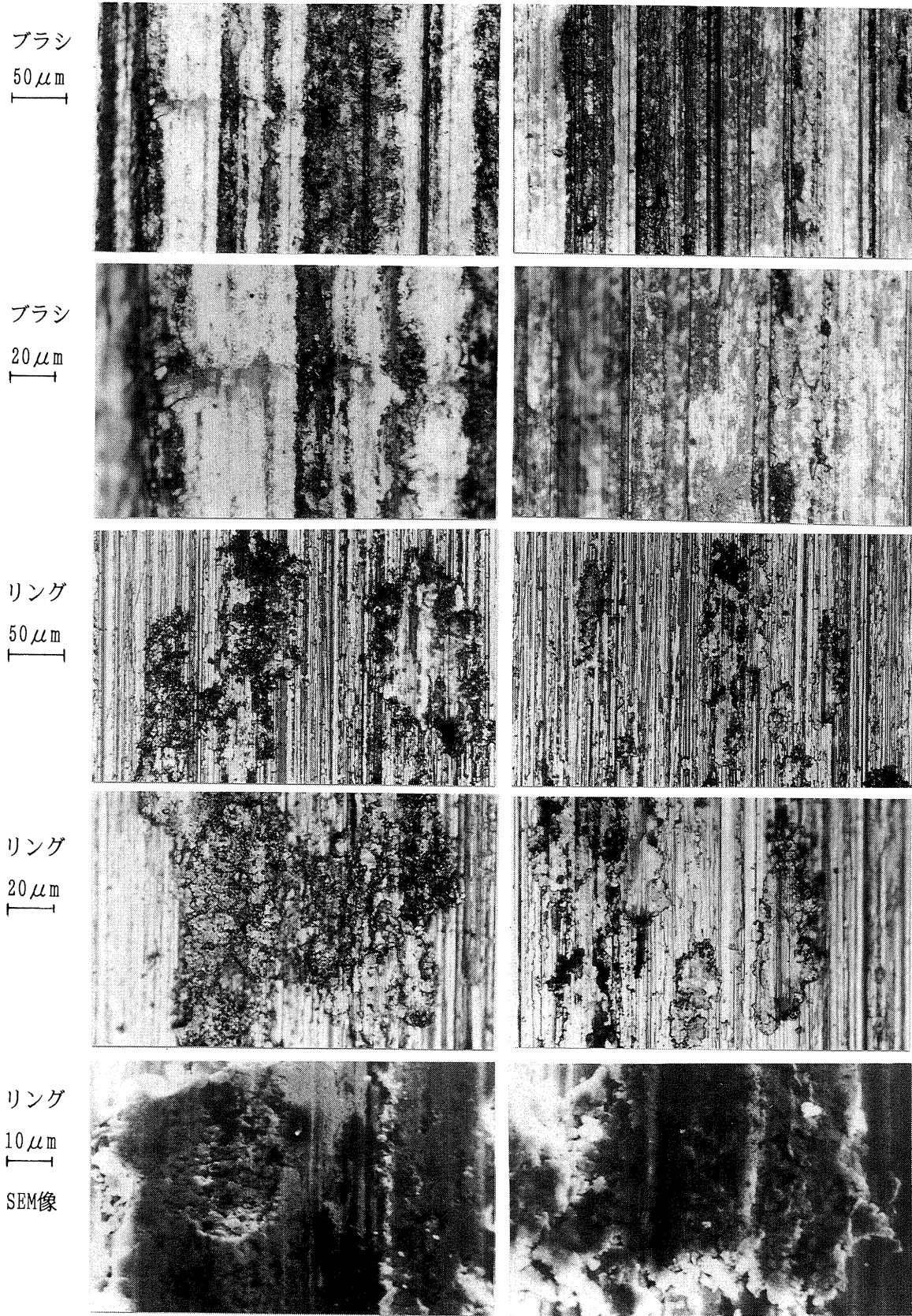


(a) 正極

(b) 負極

摩擦方向
↓

図4-26 Ag-15MoS₂ブラシ/Ag-10Cuリングの摺動痕
押付け荷重：1 N，通電量：最大20A



(a) 正極

(b) 負極

摩擦方向
↓

図4-27 Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシ/Ag-10Cuリングの摺動痕
押付け荷重：1 N，通電量：最大20A

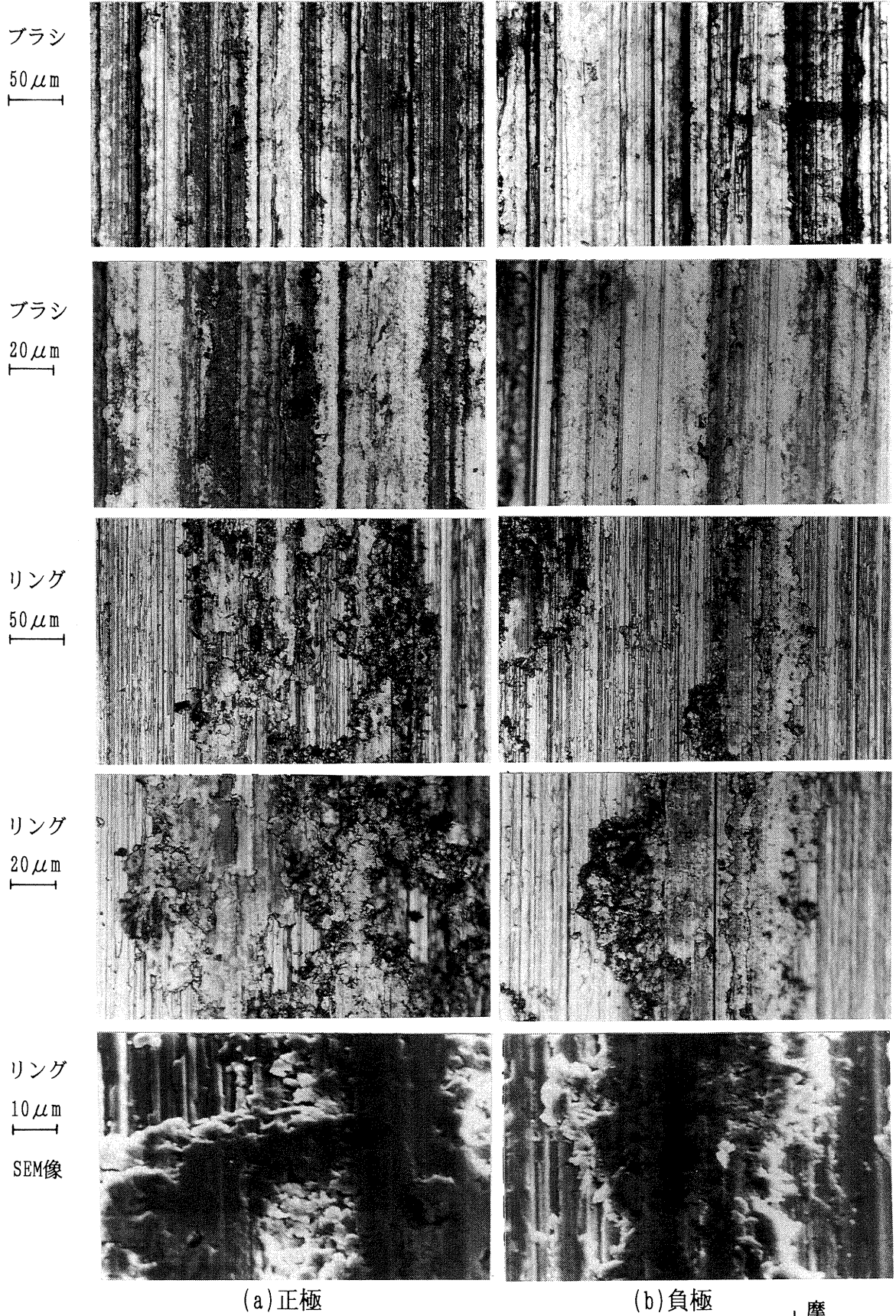


図4-28 Ag-10MoS₂-5NbSe₂ブラシ/Ag-10Cuリングの摺動痕
押付け荷重：1 N，通電量：最大20A

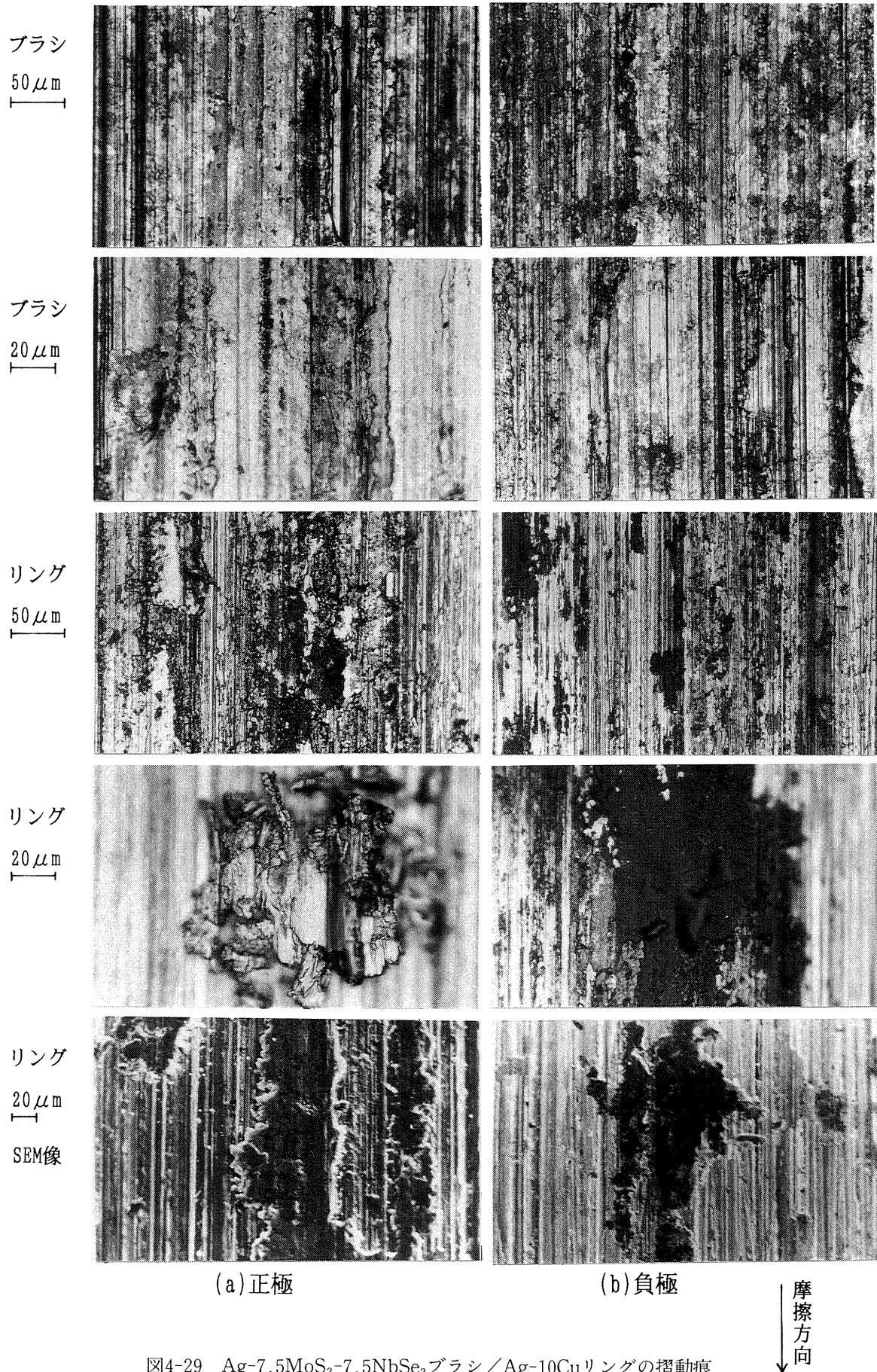
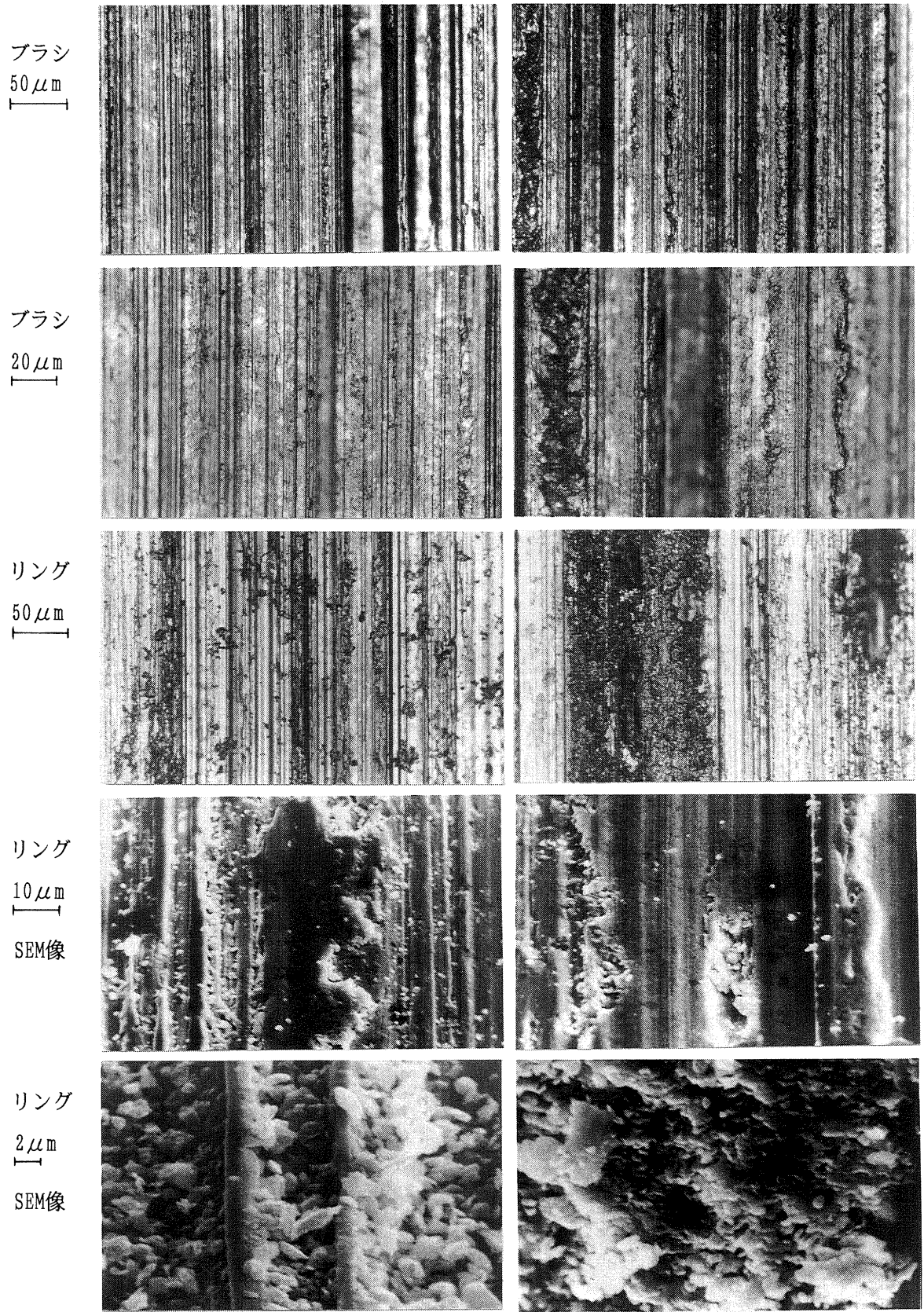


図4-29 Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ/Ag-10Cuリングの摺動痕
押付け荷重：1 N，通電量：最大20A



(a) 正極

(b) 負極

摩擦方向
↓

図4-30 Ag-15MoS₂/Agリングの摺動痕
押付け荷重：1N，通電量：最大20A

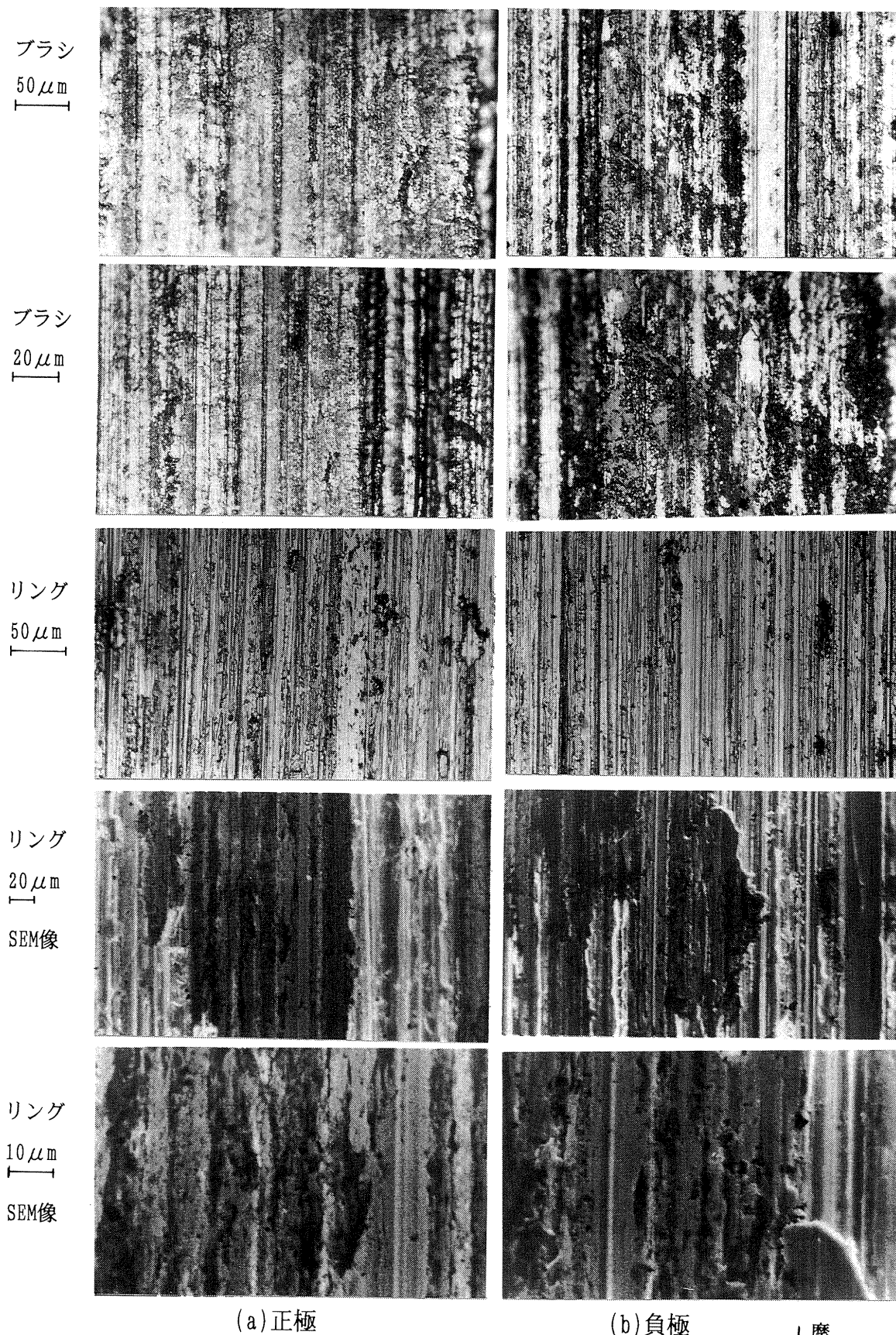
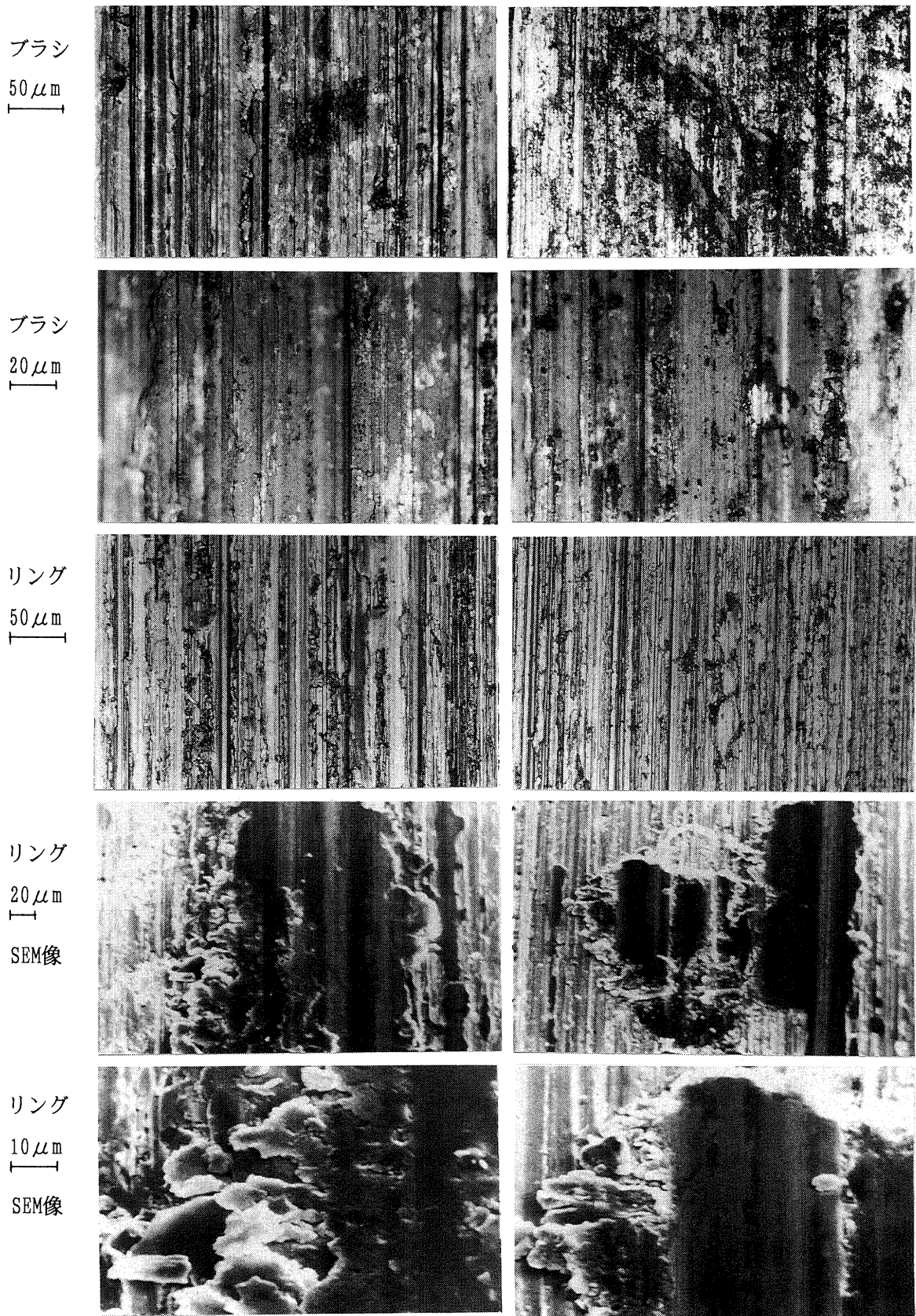


図4-31 Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシ/Agリングの摺動痕
押付け荷重：1 N，通電量：最大20A



(a) 正極

(b) 負極

摩擦方向
↓

図4-32 Ag-10MoS₂-5NbSe₂ブラシ/Agリングの摺動痕
押付け荷重：1 N，通電量：最大20A

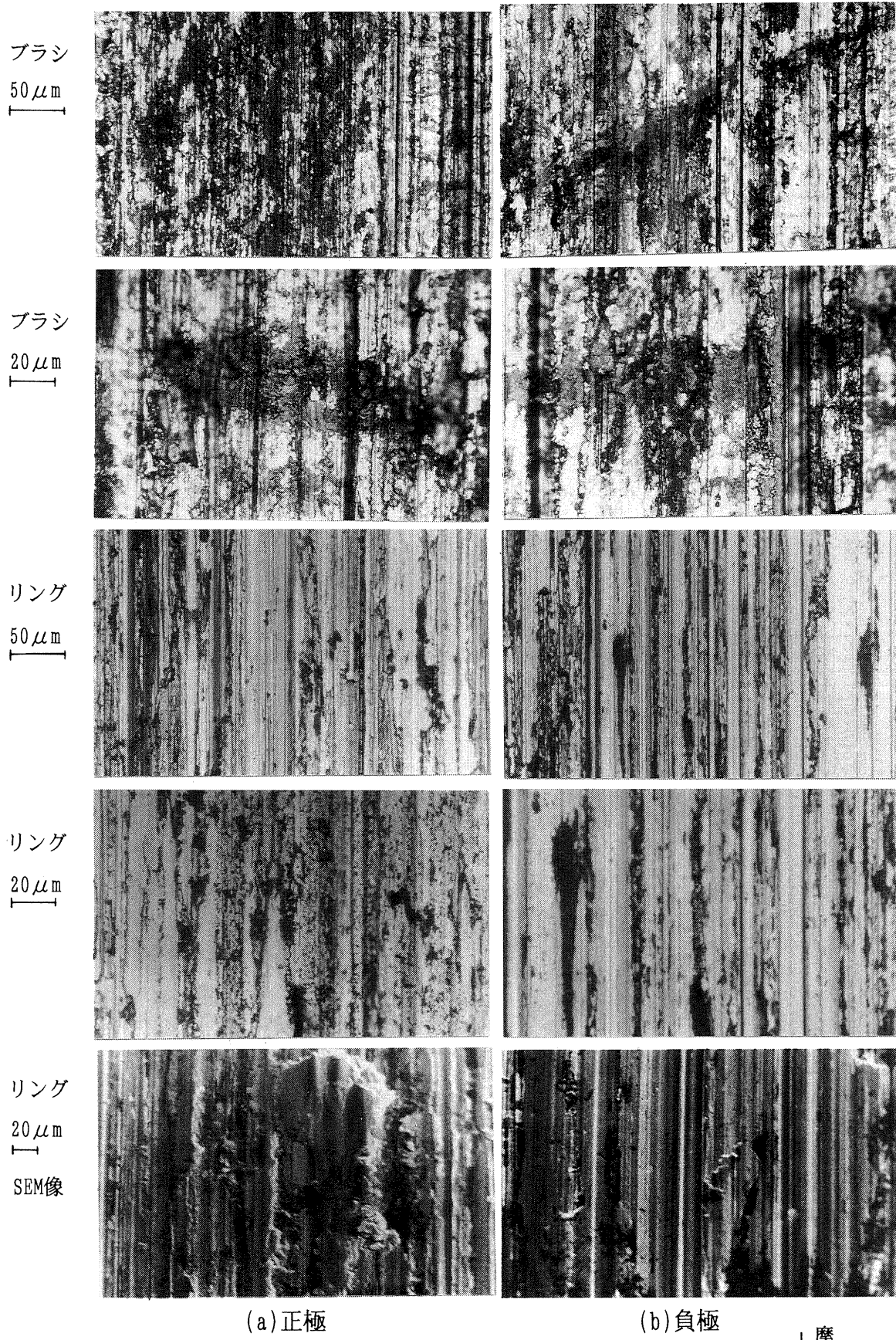


図4-33 Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ/Agリングの摺動痕
押付け荷重：1 N，通電量：最大20A

触抵抗ができるだけ小さいことが要求される。現用されている電力伝達用スリップリングの電流密度は50A/cm²程度である。このように使用目的によって要求される性能が大幅に異なるため、電気信号伝達用と電力伝達用のそれぞれについて、ブラシ/リング材の最適な組み合わせを検討する必要がある。

まず、電気信号伝達用スリップリングに現用されている電流密度に比較的近い1A通電時(電流密度4A/cm²)の摺動特性を評価し、最適なブラシ/リング材の組み合わせを選定してみよう。図4-34に4A/cm²通電時における摺動特性を比較して示す。図中に示した接触抵抗、電気ノイズ、温度上昇は本節の試験における1A通電時の結果であるが、ブラシ材の摩耗率は通電量を最大1Aとした4-1節での試験結果である。8種の組み合わせとも摺動特性は良好で、電気ノイズはいずれも2mV以下であり現用されているスリップリングの要求条件を概ね満たしている。特に、Ag-15MoS₂、Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂の2種のブラシ材は、いずれのリング材でも電気ノイズが1mV以下ときわめて良好な性能を示した。また、Ag-10MoS₂-5NbSe₂ブラシ/Ag-10Cuリングの組み合わせも同等の低

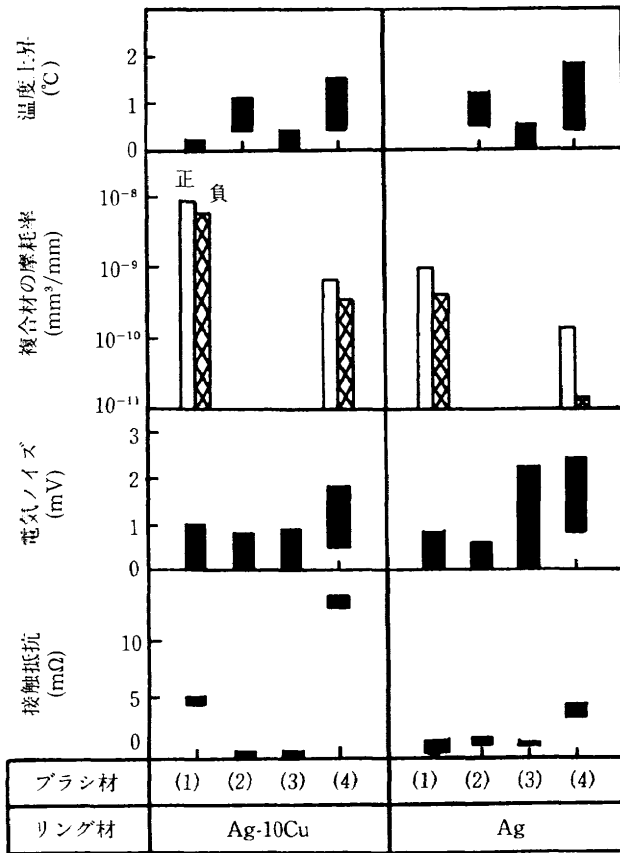


図4-34 4A/cm²通電時における摺動特性
 押付け荷重：1N
 ブラシ材：(1) Ag-15MoS₂, (2) Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂, (3) Ag-10MoS₂-5NbSe₂, (4) Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂

電気ノイズ特性を示した。ブラシ材の摩耗率は、図4-23に示した20Aまで通電した試験の結果から、NbSe₂を添加したブラシ材の方が一般的に耐摩耗性が優れていると考えられるが、電流密度が小さい場合にはAg-15MoS₂ブラシでも摩耗は少ない。以上のことから、上述の5種の組み合わせが信号伝達用スリップリングとして適用可能と判断される。

次に、試験した中で最も通電量の多い20A(電流密度83A/cm²)での摺動特性で電力伝達用スリップリングとして最適なブラシ/リング材の組み合わせを選定してみよう。図4-35に、8種のブラシ/リングの組み合わせにおける83

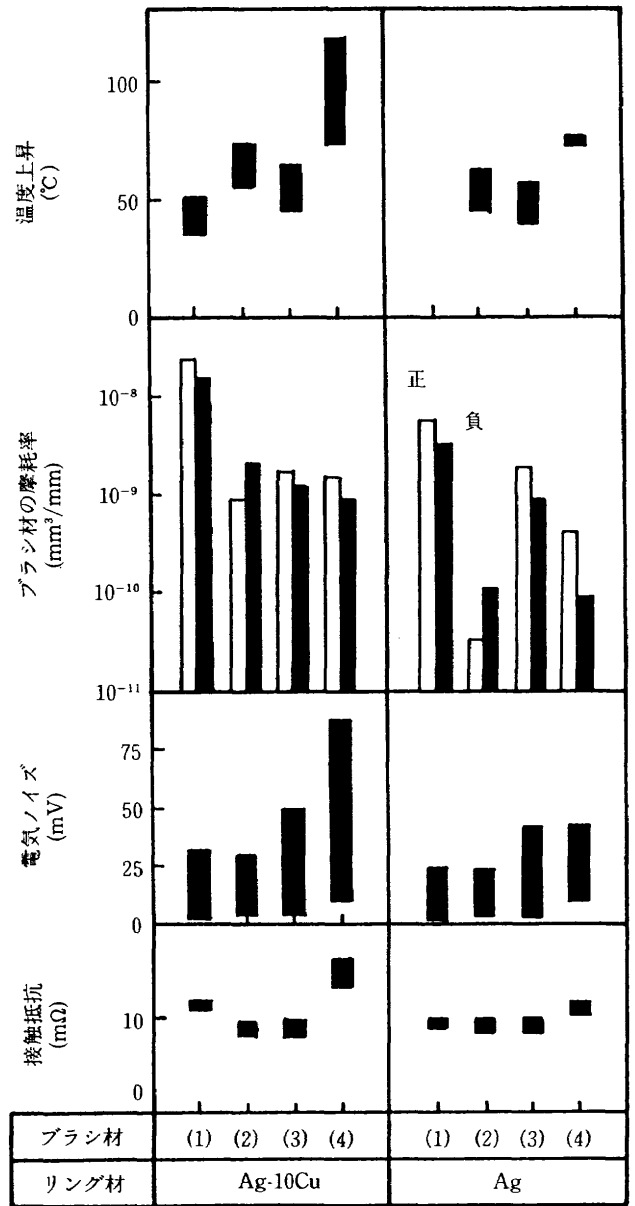


図4-35 83A/cm²通電時における摺動特性
 押付け荷重：1N
 ブラシ材：(1) Ag-15MoS₂, (2) Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂, (3) Ag-10MoS₂-5NbSe₂, (4) Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂

A/cm²通電時の摺動特性を比較して示す。この電流密度は電力伝達用スリップリングとして現用されている値の約1.6倍である。接触抵抗は、Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂ブラシ/Ag-10Cuリングの組合わせを除けば、いずれも12 mΩ以下ときわめて良好な性能を示した。特に、Ag-15 MoS₂とAg-12.5MoS₂-2.5NbSe₂の2種のブラシ材の場合は、リング材によらず電気ノイズも30mV以下、温度上昇が約75°C以下と他の摺動特性も優れている。ブラシ材の摩耗率をみると、Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシ/Agリングの組合わせでは 1.1×10^{-10} mm³/mm以下と耐摩耗性が際だって優れているのに対し、ブラシ材がAg-15 MoS₂の場合、リング材がAg-10Cuの場合には摩耗率が約1桁以上劣っている。第1章で述べたように、Seasat衛星ではスリップリングの摩耗粉によって短絡が生じ衛星の機能が停止したとされている。そのため、摩耗粉はなるべく少ないか、できれば生成されないことが望ましいとされている。以上の結果から判断すると、電力伝達用スリップリングとしてはAg-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシ/Agリングの組合わせが最適である。

以上の検討結果から、Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシ/Agリングの組合わせが信号伝達用及び電力伝達用スリップリングのいずれの用途にも最適な組合わせであることがわかった。これは、一つのブラシ/リングの組合わせが信号伝達用にも電力伝達用にも使用できることを意味している。もし、これが可能であるならば実用上のメリットは極めて大きいと考えられる。

4-3 大電流通電下の特性

人工衛星は今後、大電力化、小型軽量化、長寿命化などが進められると予想されており、また宇宙ステーションや宇宙プラットホームなど現在開発中または計画中の宇宙システムでは、さらに大電力が長期間にわたって必要とされている。これに対応して、スリップリングには長寿命で、かつ大電流が通電可能であることが要求される。本節では、前節で最も良好な特性を示したAg-12.5 MoS₂-2.5NbSe₂ブラシ材を用いてさらに電流密度を増やした時の摺動特性を評価した結果について述べ、一連の試験の結果から、このブラシ材が将来の宇宙用のスリップリングとしても適用可能であることを示す。

試験に用いたブラシ材は、電流密度が大きく設定できるようにリング材との接触面積をこれまでの試験の12 mm²から1.5 mm²へと小さくした。これは、使用した試験装置の通電容量が限られていたためであるが、スリップリングを小型化した際の摺動特性を把握することも考慮したものである。相手リング材には、AgとAg-10Cuの2種類を用いた。前節ではAgリングの方が良好な特性を示したが、Agは柔らかく傷がつきやすいこと、酸化しやす

いことなどから、実用上はAg-10Cuの方が取扱いやすい点を考慮したためである。

実験は、まず無通電下でのならし運転を14000回行い、ついで電流密度33A/cm²で通電を開始し、その後電流密度を100, 200, 300A/cm²と100A/cm²ステップで逐次増加させた。摺動速度は前節までと同じ75mm/s(約29 rpm)である。ブラシのリングへの押付け荷重は、まず最初の試験では前節までの1N(接触圧力8.3N/cm²)を参考に、ほぼ同等の接触圧力となるように0.15N(接触圧力10 N/cm²)とした。

ブラシのリングへの接触面圧を10N/cm²とした最初の試験での摩擦回数と電気抵抗の関係を図4-36に示す。電気抵抗は、いずれの相手リング材の場合も通電量が増えるに従い急激に増加する傾向を示した。Agリングの場合、400A/cm²通電時には摩擦回数45000回頃では接触抵抗が25mΩ程度であったが、摩擦回数が55000回になると30mΩを越え、またブラシ材の温度が約130°C(温度上昇は100°C)に達したので総摩擦回数56800回で試験を中止した。一方、相手材がAg-10Cuリングの場合は、この時

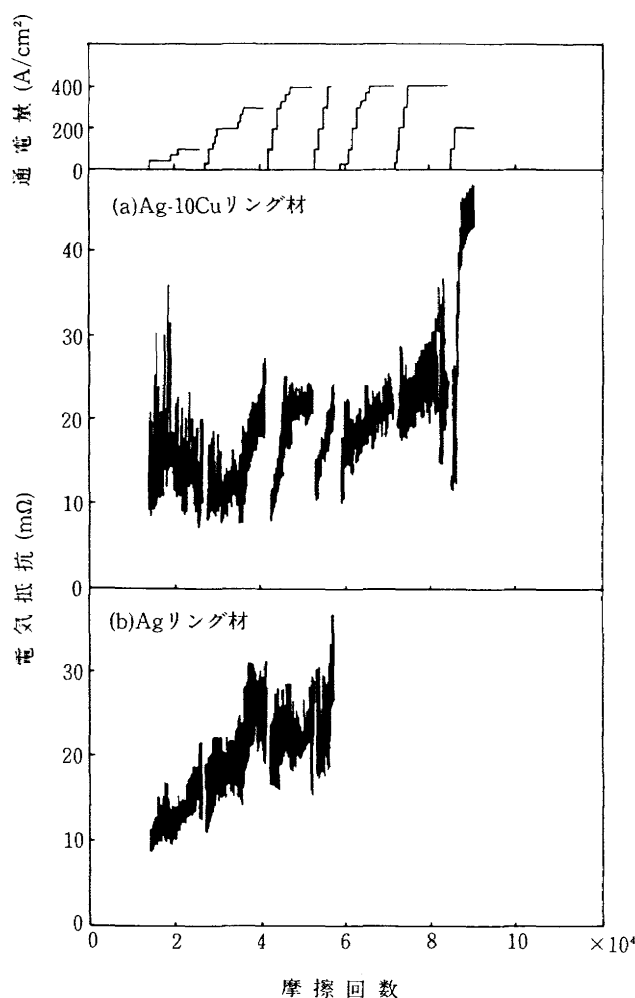


図4-36 大電流通電下における電気抵抗(押付け荷重:0.15N) ブラシ材:Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

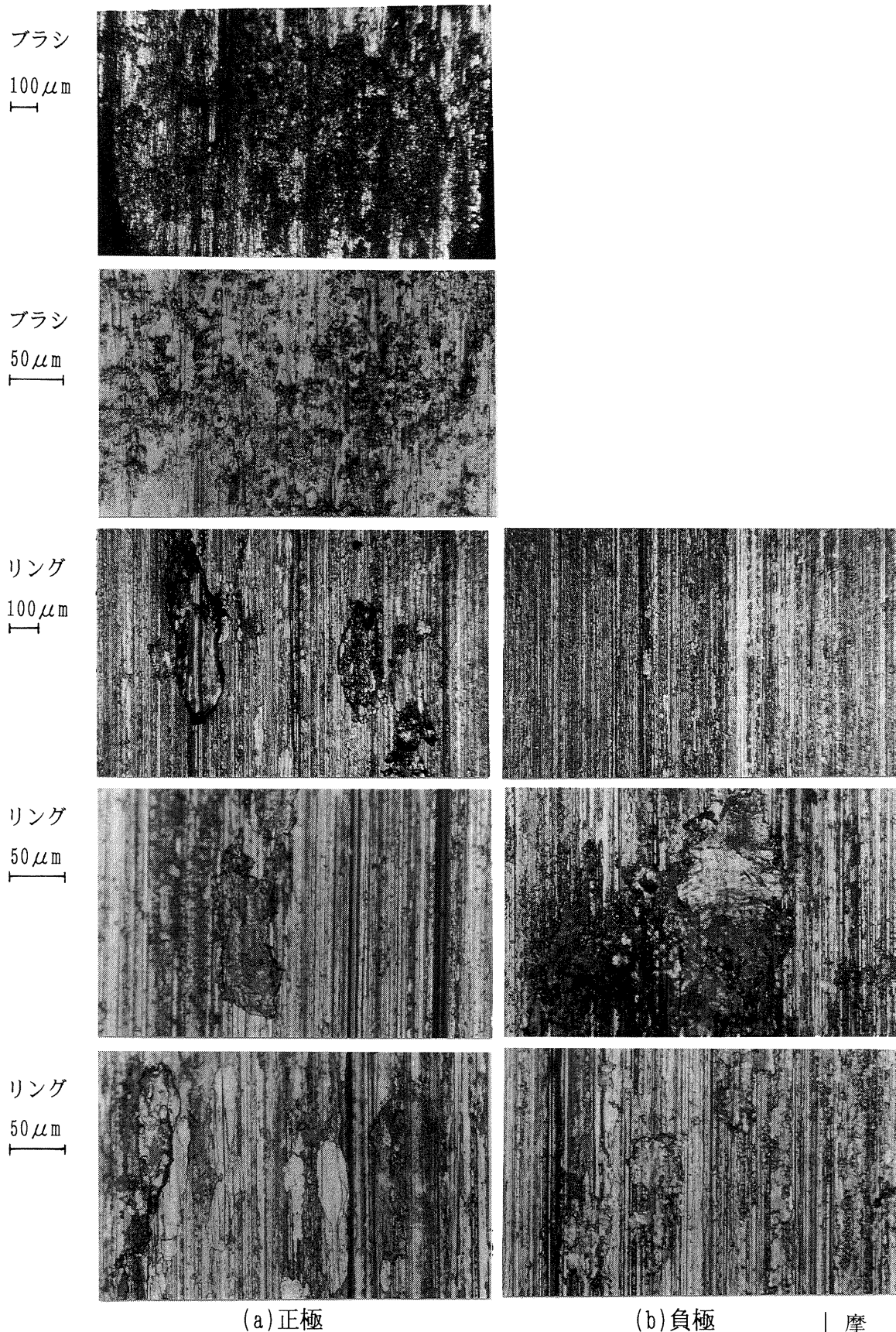


図4-37 ブラシ、リングの摺動痕(押付け荷重：0.15N)
 ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂、リング材：Ag-10Cu
 通電量：最大400A/cm²

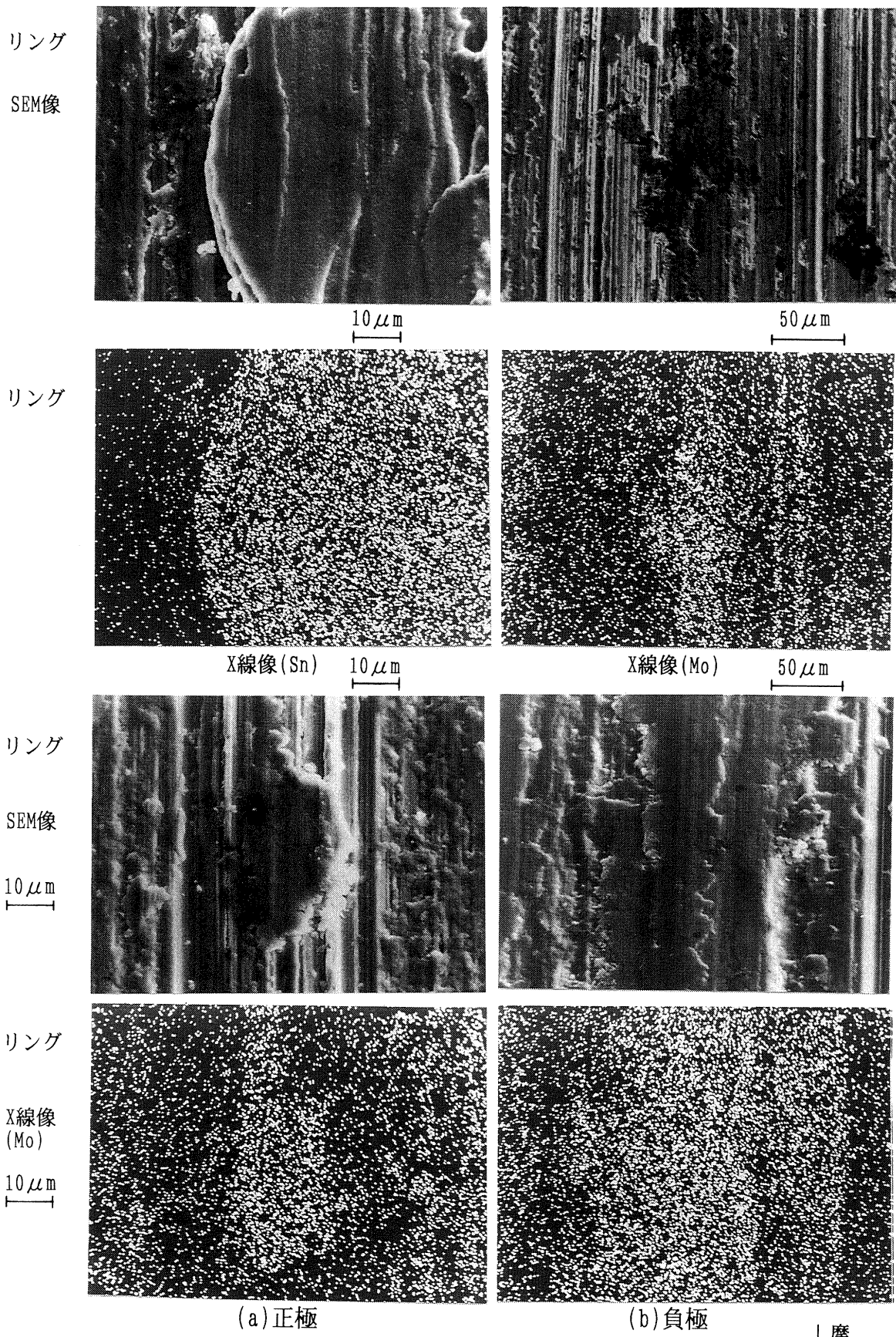


図4-38 Ag-10CuリングのSEM像、X線像(押付け荷重: 0.15N)
 相手ブラシ材: Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂
 通電量: 最大400A/cm²

点では接触抵抗は25mΩ程度であったため試験を続行したが、その後約82000回摩擦した時に30mΩを越え、約92000回では通電量が200A/cm²と低いにもかかわらず接触抵抗が40mΩと異常に大きくなり、ブラシ材の温度も約130℃に達したので試験を中止した。

試験後、試験機を分解したところ、相手材がAgリングの場合には、1つのブラシ材はブラシホルダーから脱落してなくなっており、また他のブラシ材もブラシホルダーから脱落しかけていた。相手材がAg-10Cuリングの場合には、ブラシ材は元の状態でブラシホルダーに固定されていたが、ブラシ材の側面に亀裂が発見された。

試験後のブラシ材とリング材の摺動痕の様相を図4-37～図4-40に示す。図4-37は相手リング材がAg-10Cuの場合のブラシ材、リング材の摺動痕の光学顕微鏡写真である。ブラシ摺動痕上には黒色の摩擦生成物が溶融した

ような形跡がみられる。リング摺動痕上にはブラシ材からの移着物が観察され、一部は押し延ばされずに粒状の形をとどめている。図4-38は、Ag-10Cuリング摺動痕の電子顕微鏡写真と特性X線分析の結果である。リング上の押し延ばされた付着物からは特性X線分析でMoが多量に検出されたため、ブラシ材からの移着物であることが確認されたが、図に示したように、円形状の付着物からはSnが検出された。Snはブラシ材やリング材には含まれておらず、ブラシ材をブラシホルダーに固着するために用いたハンダに起因するものと推定される。ブラシ材の側面には、前述したように亀裂が発見されており、溶けたハンダがその亀裂を通してブラシ/リングの摺動面まで流れ込んできたものと推測される。

図4-39、図4-40は、リング材がAgの場合のリング摺動痕の光学顕微鏡写真、及び電子顕微鏡写真と特性X線分

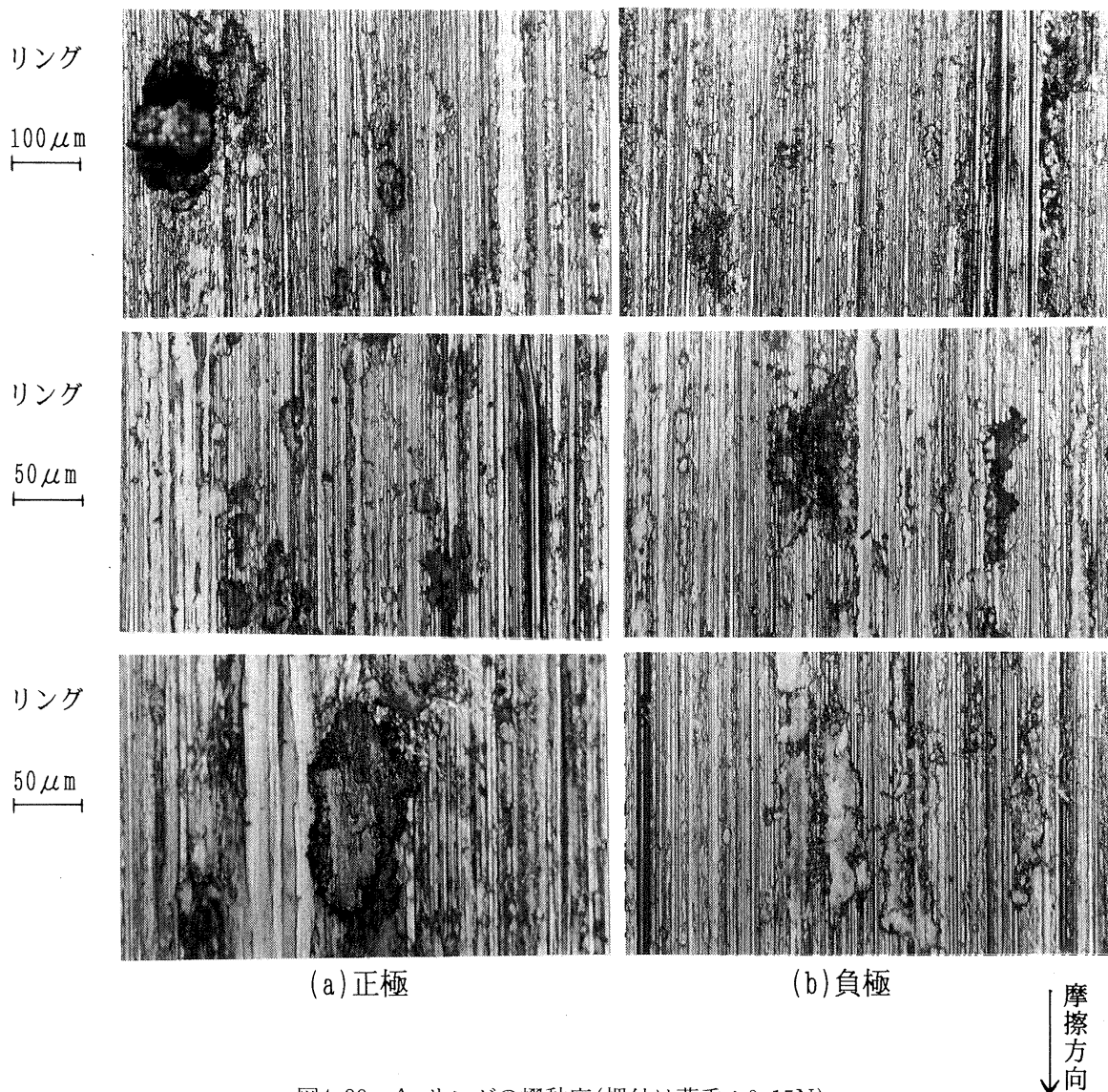


図4-39 Agリングの摺動痕(押付け荷重：0.15N)
相手ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂
通電量：最大400A/cm²

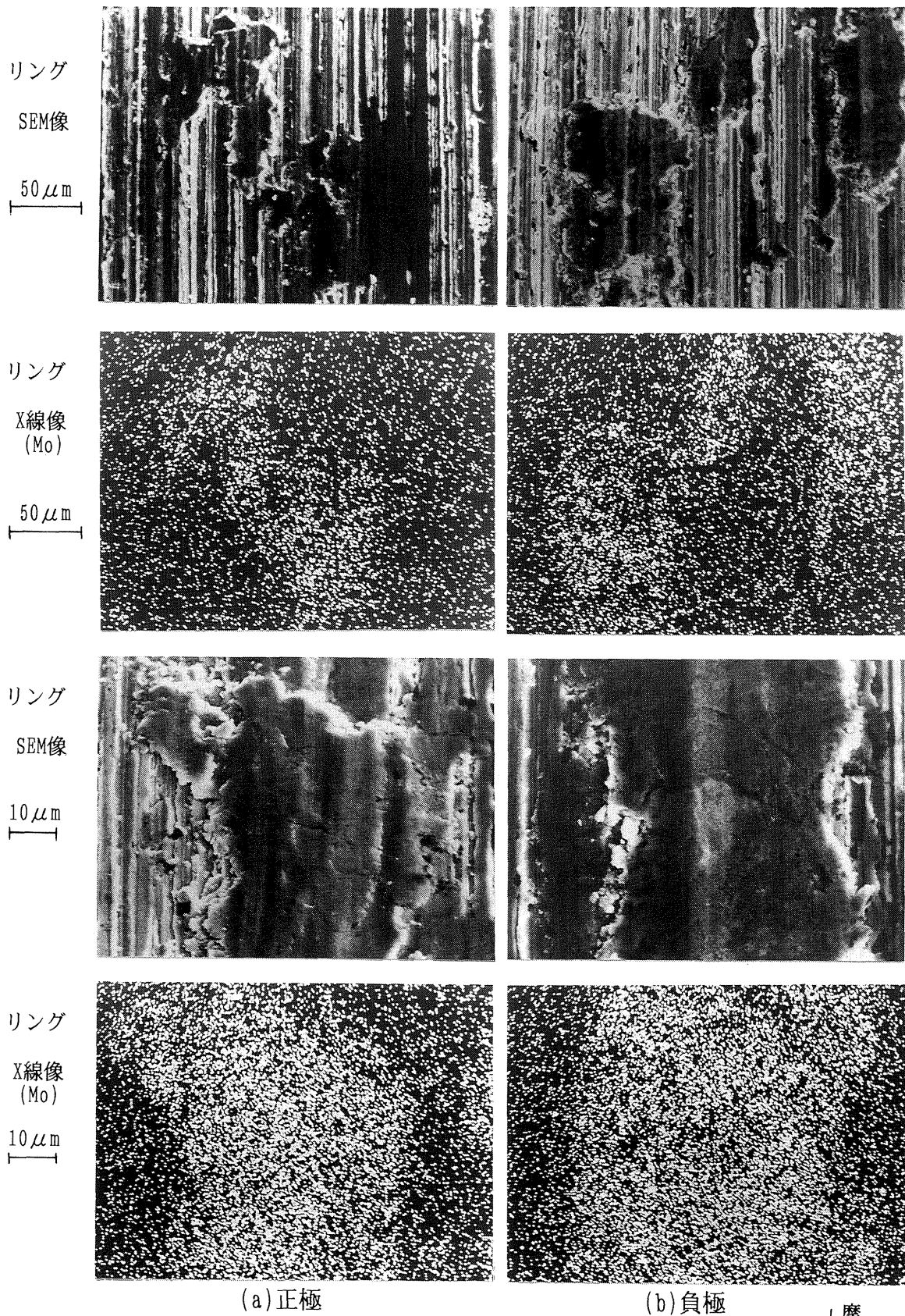


図4-40 AgリングのSEM像、X線像(押付け荷重：0.15N)
 相手ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂
 通電量：最大400A/cm²

析の結果である。付着物の様相はAg-10Cuリングの場合と類似しており、リング材の種類による相違はほとんどみられない。摺動痕上の付着物からは特性X線分析によりMoが存在していることは確認されたが、Snは検出されなかった。この試験では、すでに述べたようにブラシ材が脱落していたのが観察されており、ブラシをブラシホルダーに固着していたハンダが溶けたと推定されるが、摺動面へはハンダは流れ込まなかったと思われる。

以上の観察結果は、通電量の増加にともない接触抵抗が増大してブラシ材の温度上昇をもたらす、ついにはブラシ材を固着しているハンダが溶融するにいたったことを示している。しかし、使用したハンダの融点は約210°C程度であることを確認しており、試験中、熱電対で測定したブラシ材の温度は最高でも約130°Cであった。熱電対の設置位置はブラシホルダー背面部のハンダ接合部直近であり、ハンダ接合部との間に80°Cも温度差があったとは考えにくく、またブラシに電流を流すことにより熱電対の指示値が影響を受けないことも確認している。ハンダにブラシ材の銀が拡散するなど局部的にハンダ成分の変化が生じ、ハンダの融点が低下したことも考えられるが、銀の拡散による融点の低下は高々10°C程度であり、これが主因とはなり得ない。それではなぜハンダが溶けたのであろうか。ブラシ材の温度測定は3-1節で述べたように約10分おきに記録しており、記録していないごく短時間の間に急激な温度上昇があったためと考えざるを得ない。推測の域を出ないが、通電量の増加と接触抵抗増大の相乗効果により発熱量が急増し、発熱量と放熱量のバランスが崩れたことがブラシ材の急激な温度上昇をもたらす、ハンダの溶融につながったものと思われる。このことは、大電流スリップリングを設計する際には、放熱法も十分考慮する必要があることを示唆している。

接触抵抗が30 mΩを越え、かつブラシ材の温度が約100°Cも上昇したのは上述した試験が初めてであった。このことから、改めて大電流通電がスリップリングにとって極めて厳しい条件であることがわかる。ただし、上述した試験では通電量そのものは最大でも12Aで、4-2節の20Aに比べても少なかった。従って、接触抵抗が増大した主因は、電流密度が4-2節の83A/cm²に対して400A/cm²と約5倍にもなったためと考えられる。

表4-4は、4-2節で述べた20A通電時(電流密度83A/cm²)の摺動特性を、上述した試験においてほぼ同様の電流密度であった3A通電時(電流密度100A/cm²)の場合と比較したものである。なお、接触面圧はそれぞれ8.3N/cm²(押付け荷重は1N)、10N/cm²(押付け荷重は0.15N)で、ほぼ同等である。表から、接触抵抗はいづれの試験の場合もほぼ同じ値を示していたことがわかる。このことは、接触抵抗は通電量よりも通電密度に支配されるこ

表4-4 ブラシ/リングの接触面積が異なるときの摺動特性の比較

銀系複合ブラシ材		Ag-12.5MoS ₂ -2.5NbSe ₂			
接触面積(mm ²)		12		1.5	
荷重(接触圧力)		1N(8.3N/cm ²)		0.15N(10N/cm ²)	
通電量(電流密度)		20A(83A/cm ²)		3A(100A/cm ²)	
リング材		Ag	Ag-10Cu	Ag	Ag-10Cu
接触抵抗(mΩ)		9~10	8~10	12~17	8~14
電気ノイズ(mV)		4~24	4~30	2~46	1~32
温度上昇(°C)	正極	...	30~43	...	1~7
	負極	45~63	56~74	1~7	1~6

とを示唆している。電気ノイズはブラシ/リングの接触面積が大きい時の方がやや小さかった。接触面圧が同じであれば接触面積が広い方が接触点が多くなり、安定した接触状態が得られるためと思われる。

以上の実験結果を踏まえて、通電量及び押付け荷重の接触抵抗への影響について検討した結果を付録に示す。大電流通電が極めて厳しい条件である理由は、電流密度が高くなるのに伴い接触抵抗が増加することにあると考えられるが、付録に示した検討によれば、この原因は電流密度が高くなると接触面の絞り抵抗が急増するためであり、凹凸の少ない面同士で良好な接触状態を保てば、絞り抵抗は小さくなると推定される。また、接触面圧を高くすることは、機械的な摩耗を増大させない限り、接触抵抗には好影響を及ぼすこともわかった。

このため、以下ではブラシのリングへの押し付け荷重を増やし、接触面圧を上げた実験を行った。なお、以下の試験では、安全のためブラシ材の温度が100°Cを越えない範囲で行うこととした。

まず、荷重を0.45N(接触圧力30N/cm²)と3倍に増加させて試験を行った。試験条件は、押付け荷重を増やした以外は、荷重0.15Nの場合と同じである。このときの摩擦回数と電気抵抗の関係を図4-41に示す。荷重0.45Nの場合でも、電流を増加させていくと電気抵抗は大きくなったが、400A/cm²通電時でもAg-10Cuリングの場合が20mΩ程度、Agリングの場合は15mΩ程度と、荷重0.15Nに比べると大幅に小さくなった。また、ブラシ材の温度上昇も60°C程度であった。ブラシのリングへの押し付け荷重を増加させることが、大電流密度通電下において接触抵抗を低下させるのにきわめて効果的であることがわかる。さらに500A/cm²に通電量を増加させても電気抵抗はあまり増大せず良好な性能を示したが、その後再び通電量を0Aから段階的に増加させたところ、Ag-10Cuリングの場合には200A/cm²において電気抵抗が30mΩを越

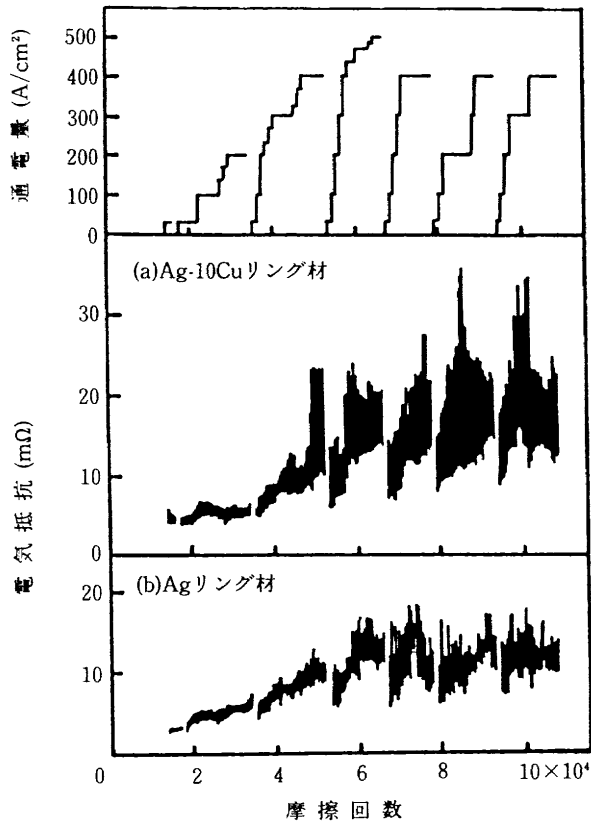


図4-41 大電流通電下における電気抵抗(押し付け荷重: 0.45N)
ブラシ材: Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

えるなど、性能劣化がみられるようになった。摩擦とともに摺動面の状態が変化したものと思われる。また、ブラシ材の温度上昇が70℃を越えるようになったため、摩擦回数108000回でこの試験を打ち切った。

試験後のブラシ材とリング材の摺動痕の光学顕微鏡写真を図4-42、図4-43に示す。図4-42は相手材がAg-10Cuの場合、図4-43はAgの場合である。いずれの相手リング材でもブラシ摺動痕には条痕が多数見られ、かなり荒れた状態になっているが、荷重0.15Nの場合に観察された溶けたような箇所は認められない。リング摺動痕にはブラシ材からの移着物や摩耗粉が多数見られるが、移着物は0.15Nの場合に比べると薄く押し延ばされており、摺動状態は0.45Nの場合の方が良好であったことがうかがえる。また、Ag-10Cuリングの方には粒状の移着物が認められ、接触抵抗・電気ノイズともにAg-10Cuリングの方が大きかったことと対応している。

押し付け荷重を0.15Nから0.45Nへ増やすと、電気抵抗が大幅に低下することがわかったため、さらに荷重を0.9N(接触圧力60N/cm²)に増した実験を行った。このときの摩擦回数と電気抵抗の関係を図4-44に示す。

電流を増加させていくと、荷重0.9Nの場合でも電気抵抗は大きくなるが、400A/cm²通電時でも7mΩ程度、ブラ

シ材の温度上昇も20℃程度と、荷重0.45Nの時に比べても小さくなった。また、図4-41と比較すると明らかなように電気ノイズが大幅に減少した。さらに通電量を上げていくと、700A/cm²でブラシ材の温度上昇が70℃程度になったので、ここで試験を打ち切った。荷重を0.9Nに増やすことで700A/cm²もの大電流通電が達成できた。

この試験では、一度通電を停止し、再度通電量を段階的に増加させても電気抵抗の値には再現性が認められ、安定した通電特性を示した。また、リング材がAg-10CuでもAgでも同等の通電特性を示した。このことは逆に、押し付け荷重0.45Nまでの試験では大電流通電により摺動面が何らかのダメージを受け、このためにそれ以降の通電特性が劣化したことを示唆している。また、リング材の種類により摺動面のダメージの受け易さが異なっていたことを示している。

試験後のブラシ材とリング材の摺動痕の光学顕微鏡写真を、相手リング材がAg-10Cuの場合は図4-45に、Agの場合は図4-46に示す。いずれの相手リング材でも、ブラシ材は全面にわたって条痕が形成されており摩耗が著しい。ただし、ブラシ材の拡大写真をみると、条痕の凹凸はあまり大きくなく図4-37に示した荷重0.15Nの場合、及び図4-42、図4-43に示した0.45Nの場合よりも平坦であることが分かる。また、灰色の部分(主にMoS₂)が押し延ばされており、摺動状態は荷重0.45Nの時よりもさらに良好に推移していたと推測される。リング摺動痕上には白色や黒色のブラシ材からの移着物が多数見られる。Ag-10Cuリングでは主に白色系の移着物が薄く押し延ばされているのに対し、Agリングでは黒色系の移着物がみられ、かつ凹凸があることがみてとれる。ただし、いずれのリング材でもほぼ同等の低い電気抵抗を示しているため、このような摺動痕の状態の相違は通電特性には影響を及ぼしていない。

さらに荷重を上げた場合の性能をみるため、荷重を1.35N(接触圧力90N/cm²)に増した実験を行った。このときの摩擦回数と電気抵抗の関係を図4-47に示す。試験は、摩擦回数96000回まではこれまでの試験と同様の手順で行ったが、その後は、4-4節で述べる雰囲気ガスの影響を調べる実験を引き続き行っており、図には真空中での結果のみを示した。

電流を増加させていくと、やはり電気抵抗は大きくなったが、その増加率は荷重が0.9Nまでの場合に比べ小さい。400A/cm²通電時の電気抵抗は2mΩ程度、ブラシ材の温度上昇も12℃程度と極めて小さい。さらに電流密度を上げていくと、相手リングがAg-10Cuの場合には500A/cm²通電時に電気抵抗が大きくなる現象が観察されたが、いずれのリング材でも800A/cm²の大電流密度での通電が可能であった。この時、ブラシ材の温度上昇が70~80℃

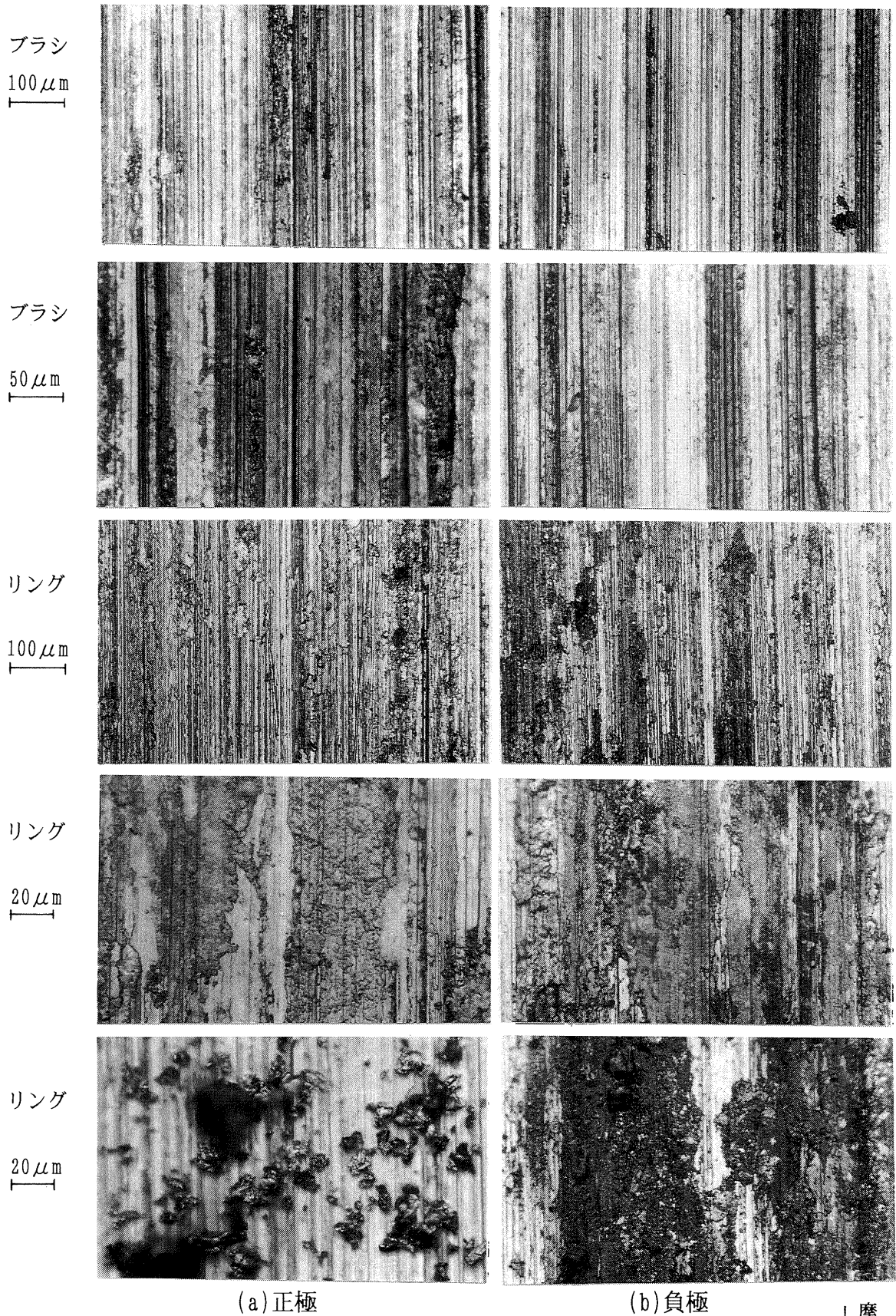


図4-42 ブラシ、リングの摺動痕(押付け荷重：0.45N)
 ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂、リング材：Ag-10Cu
 通電量：最大500A/cm²

摩擦方向
 ↓

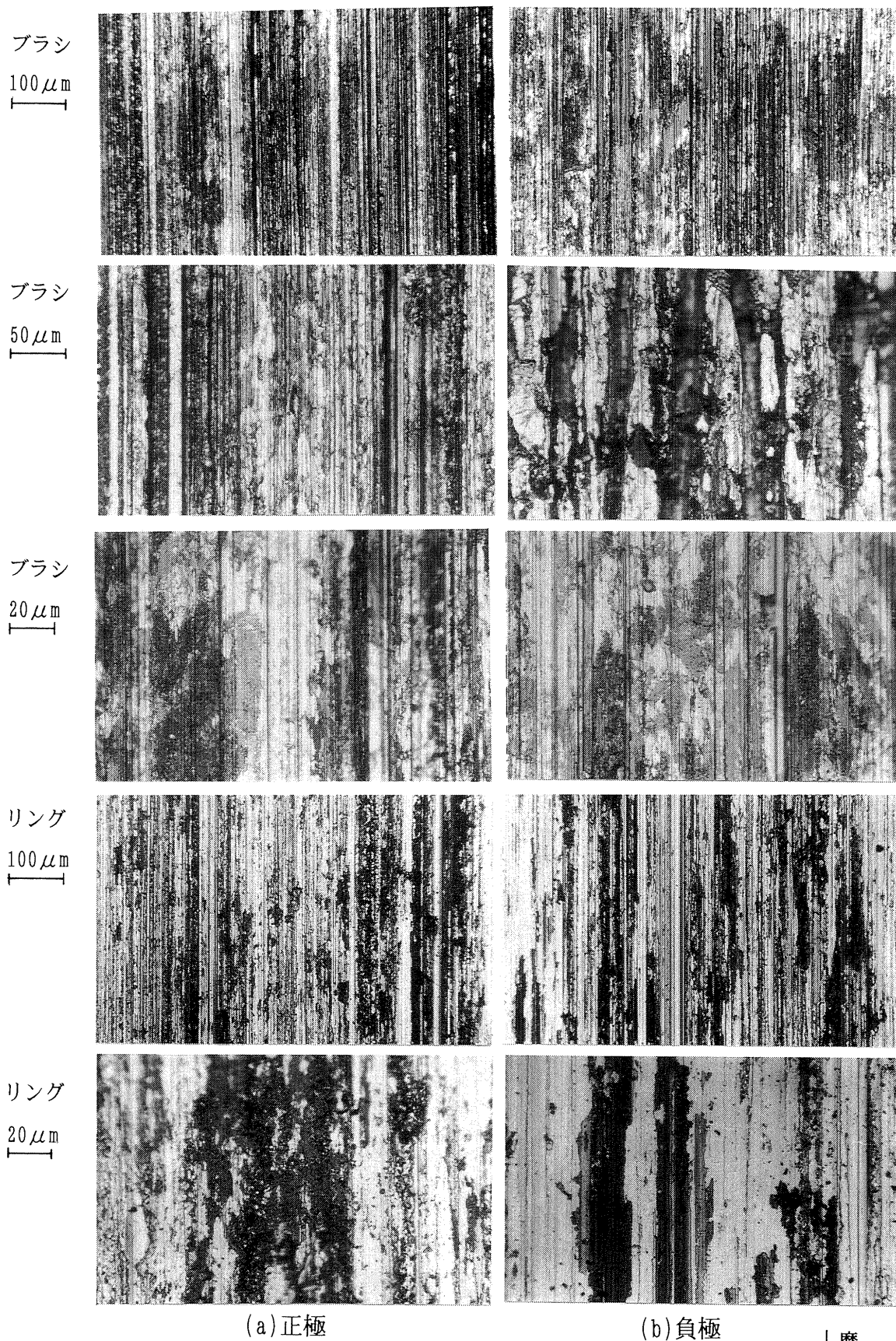


図4-43 ブラシ、リングの摺動痕(押付け荷重:0.45N)
 ブラシ材: $\text{Ag}-12.5\text{MoS}_2-2.5\text{NbSe}_2$ 、リング材: Ag
 通電量: 最大 $500\text{A}/\text{cm}^2$

摩擦方向
↓

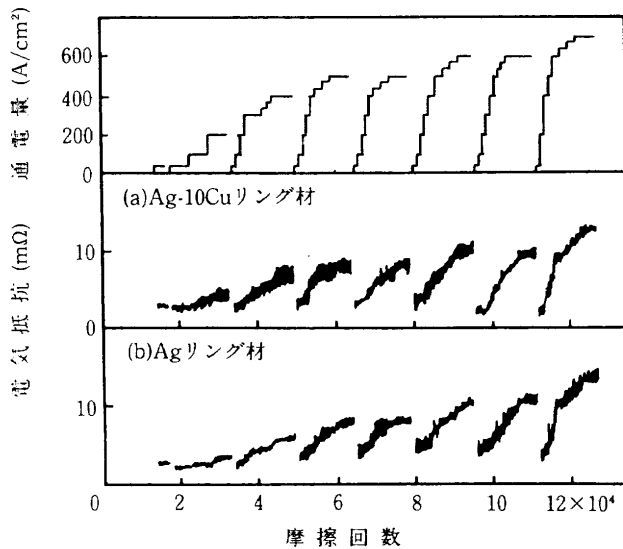


図4-44 大電流通電下における電気抵抗(押付け荷重：0.9N)
ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

に達したため、これ以上電流密度は上げなかった。図4-48は800A/cm²通電時の電気抵抗をオシロスコープで観察した例である。Ag-10Cuリングに比べ、Agリングの場合には電気ノイズが極めて小さい。また、図4-47から明らかかなようにAgリングの方が試験中安定した性能を示しており、リング材としてはAg-10CuよりもAgの方が適している。

800A/cm²通電時の摺動特性を表4-5に示す。相手リング材がAgの場合、接触抵抗が2.6~3.1mΩ、電気ノイズが2~30mV、温度上昇が65~77℃と極めて良好な特性が得られた。また、ブラシ材の摩耗率は、4-4節で述べる窒素ガス中の試験を含めた値であるが、 $1.2\sim 2.8\times 10^{-9}$ mm³/mmと極めて小さい。この性能は、4-2節で述べた電流密度83A/cm²の場合と比べても良好であり、Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシ材/Agリングの組み合わせは、大電流通電用のスリップリングとして十分実用し得る。

ここで、接触抵抗、電気ノイズおよびブラシ材の温度上昇と押付け荷重、電流密度の関係をみてみよう。

図4-49は、電流密度をパラメータにとり押付け荷重と接触抵抗の関係を示したものである。接触抵抗は荷重を増すと急激に減少し、荷重0.15Nでは400A/cm²通電時に20mΩを越えているのに対し、荷重1.35Nでは2mΩ以下になった。また、いづれの荷重でも通電量を増すと接触抵抗は増加したが、荷重が1.35Nの場合にはその増加量が極めて小さく、800A/cm²の大電流通電時でも5mΩ以下であった。すなわち、大電流通電下では接触抵抗のある程度の増大は避けられないものの、押付け荷重を増やすことにより接触抵抗の増大率を大幅に低減させることができる。

押付け荷重と電気ノイズの関係を図4-50に示す。相手リング材がAgの場合は、接触抵抗と同様に荷重が大きいほど電気ノイズが減少し、荷重0.15Nでは400A/cm²通電時に70mV程度であったのが荷重1.35Nでは8mV程度と約1/10に低減した。また通電量が多いほど電気ノイズが増加したが、その増加量は荷重が高いほど小さい傾向が認められ、荷重1.35N、800A/cm²通電時でも17mV以下と極めて小さい。試験した範囲では、接触抵抗と同様、電気ノイズ特性も荷重が大きいほど良好であった。一方、Ag-10Cuリングの場合も、全般的には荷重が大きいほど電気ノイズが減少する傾向が認められるが、荷重0.45Nでの電気ノイズがかなり大きく、また荷重1.35Nよりも0.9Nの場合の方が電気ノイズが小さいなど、電気ノイズ特性はやや不安定である。電気ノイズが大きかった試験では、同一通電量での電気抵抗が摩擦回数によって異なっており、摩擦にともない摺動面の状態が変化したことが不安定な電気ノイズ特性につながったものと思われる。

押付け荷重とブラシ材の温度上昇の関係を図4-51に示す。ブラシ材の温度上昇は荷重が大きいほど低下し、400A/cm²通電時でみると荷重0.15Nでは80℃程度であったのに対し、1.35Nでは12℃と極めて低くなった。ただし、通電量が多くなるとブラシ材の温度上昇は急増し、荷重1.35Nでも800A/cm²通電時の温度上昇は70℃を越え、かなり厳しい状態である。ブラシ材の温度上昇は、接触抵抗によるジュール熱が主因と考えられるため、温度上昇を抑えるには荷重を増やすなど接触抵抗を低減させる方法が効果的であろう。しかし、前述したように大電流通電下ではある程度の接触抵抗の増大は避けられないため、実用に際しては放熱法などを工夫する必要がある。

以上の結果から、試験した荷重0.15~1.35Nの範囲では、荷重が高いほど接触抵抗、電気ノイズ、ブラシ材の温度上昇はいづれも低減し、良好な性能を示すことがわかった。それでは荷重を増やしたときのブラシの摩耗はどうであろうか。

図4-52にブラシ材の摩耗率と押付け荷重の関係を示す。荷重1.35Nの試験は引続き4-4節で述べる窒素ガス中での試験を行っており、摩耗率を直接比較することが適切でないため、図には真空中のみで試験を行った押付け荷重0.15、0.45、0.9Nの場合のみを示した。荷重を0.15Nから0.45Nへ増加させると、荷重が大きくなったにも関わらず、ブラシ材の摩耗率は同等かまたは小さくなっている。これは、荷重を増やしたことによって接触抵抗や電気ノイズが小さくなり電氣的な摩耗が減少したためと考えられる。しかし、荷重を0.9Nに増やすと、ブラシ材の摩耗率は大きくなった。なお、さらに荷重を増やした1.35Nの場合は、表4-4に示したように、窒素ガス雰囲気での試験も含め約120000回摩擦しているが、ブラシ材の

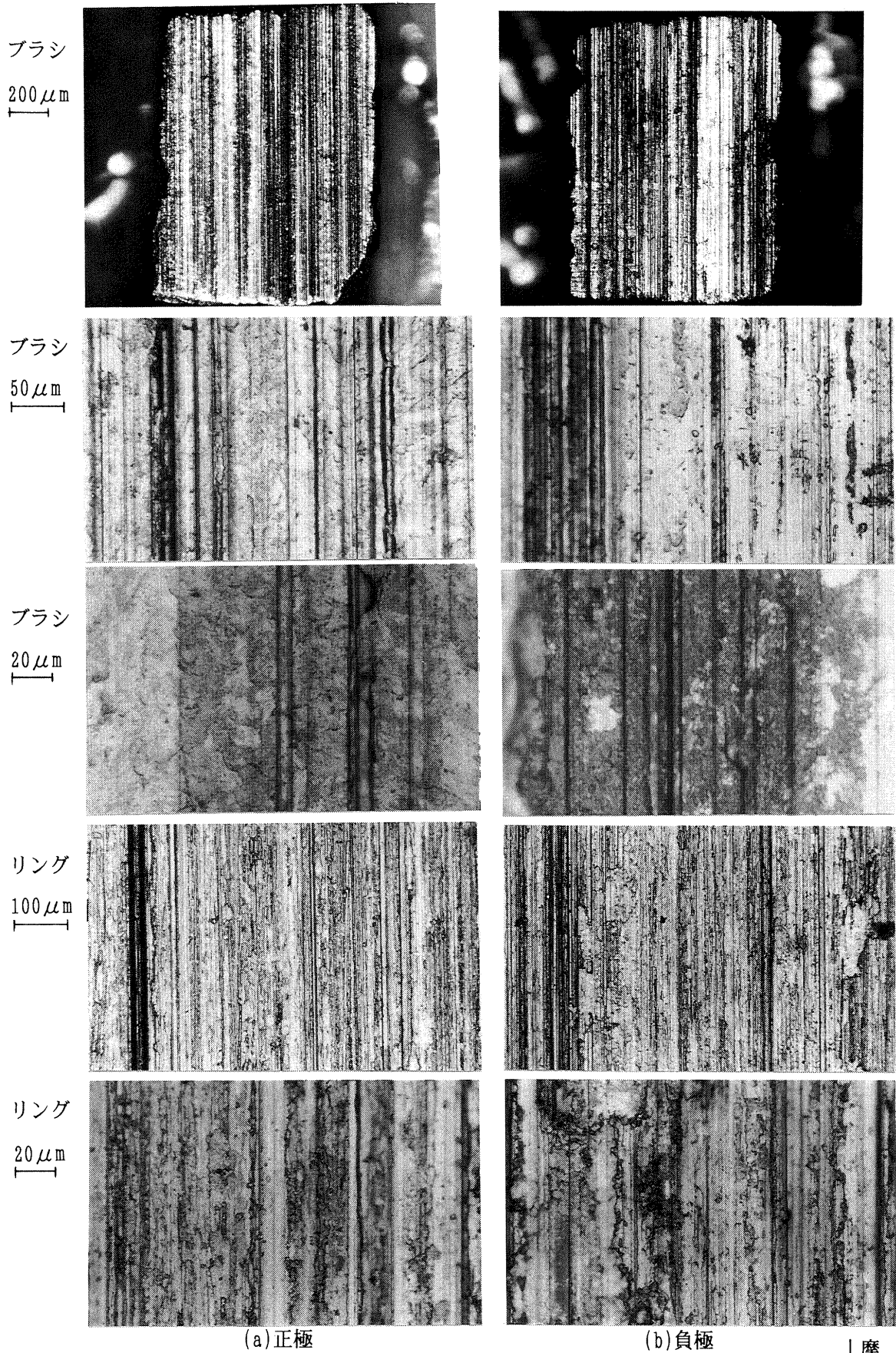


図4-45 ブラシ、リングの摺動痕(押付け荷重：0.9N)
 ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂、リング材：Ag-10Cu
 通電量：最大700A/cm²

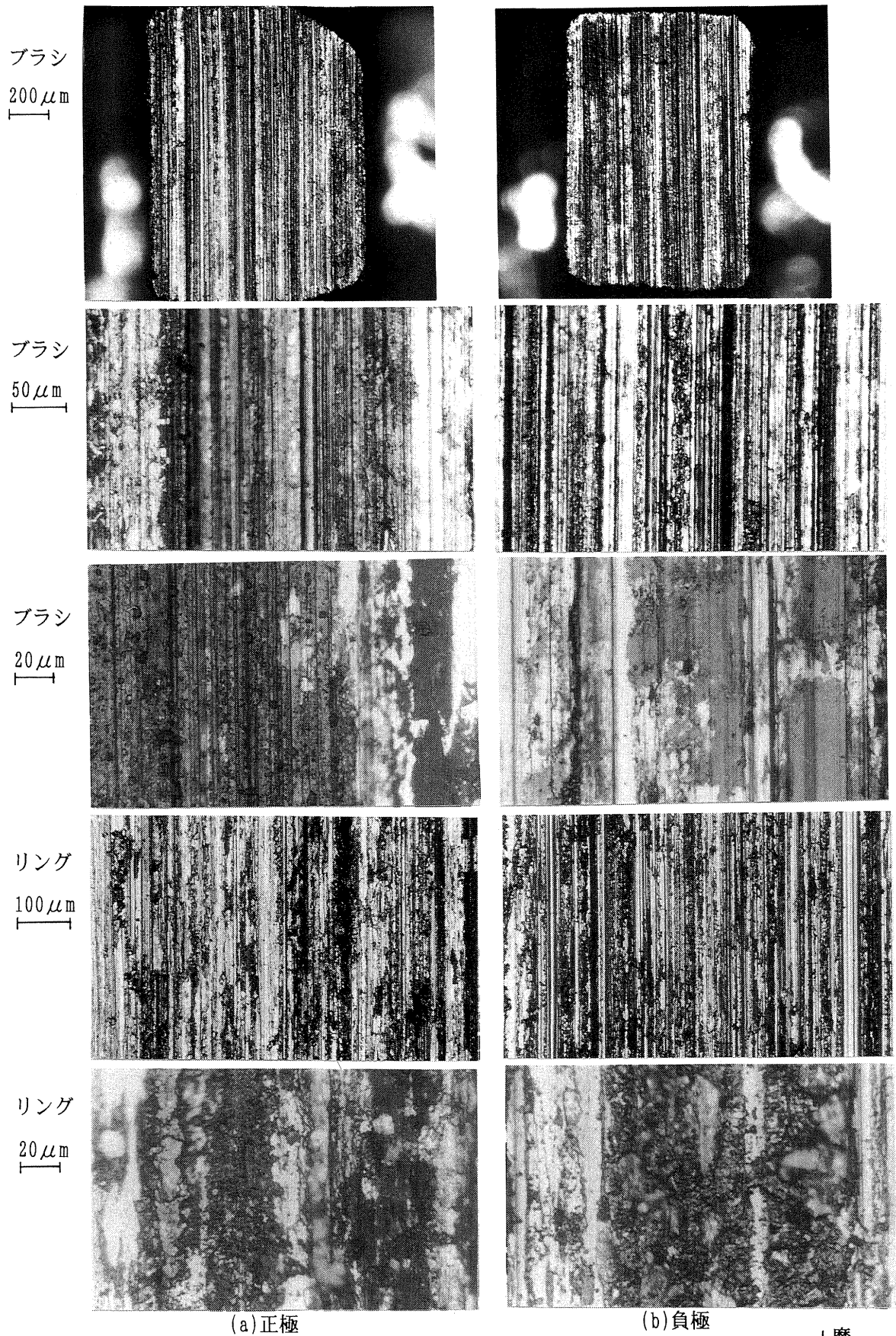


図4-46 ブラシ、リングの摺動痕(押付け荷重：0.9N)
 ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂、リング材：Ag
 通電量：最大700A/cm²

摩擦方向
↓

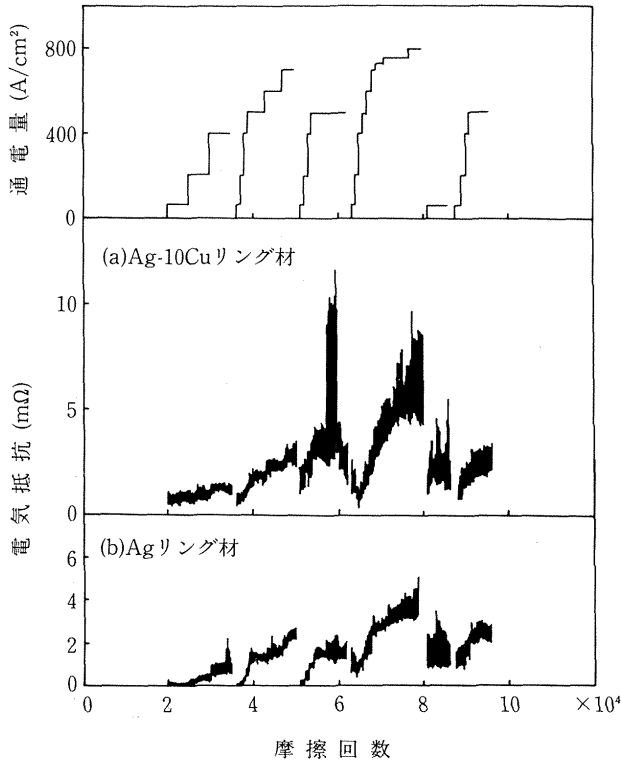


図4-47 大電流通電下における電気抵抗(押付け荷重：1.35N)
ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

表4-5 800A/cm²通電時における摺動特性
(真空中、押付け荷重 1.35N、摺動速度 75mm/s)

銀系複合ブラシ材		Ag-12.5MoS ₂ -2.5NbSe ₂	
リング材		Ag	Ag-10Cu
接触抵抗(mΩ)		2.6~3.1	4.0~4.9
電気ノイズ(mV)		2~30	6~100
温度上昇(°C)	正極	65~70	73~77
	負極	73~77	81~86
ブラシ材の摩耗率* (mm ³ /mm)	正極	2.8×10 ⁻⁹	3.6×10 ⁻⁸
	負極	1.2×10 ⁻⁹	1.4×10 ⁻⁸

*：4.4節で述べる窒素ガス中の試験も含めた摩耗率

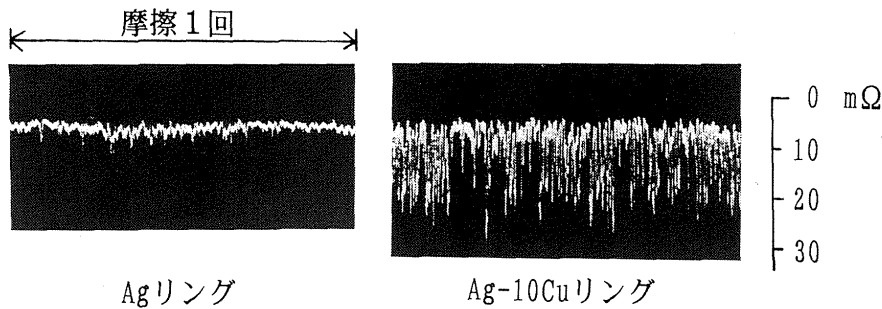


図4-48 オシロスコープによる電気抵抗の観察例
通電密度：800A/cm²、押付け荷重：1.35N

摩耗率は荷重0.9Nと同等かまたはやや大きい程度であった。荷重を増やすと接触抵抗や電気ノイズが小さくなり電気的な摩耗は減少するものの、機械的な摩耗がそれ以上に増加したためと考えられる。すなわち、ブラシ摩耗に関しては、電気的な摩耗と機械的な摩耗の兼ね合いで、摩耗が最小になる荷重が存在し、本試験の場合は0.45N程度であった。ただし、荷重が高い場合でも摩耗率の値そのものは十分小さく、実用上ほとんど問題にならない範囲にある。従って、試験した荷重0.15~1.35Nの範囲では、最も通電特性が良好で、かつ摩耗も比較的少ない1.35

Nが最も適した押付け荷重であった。

本節の結果は、大電流通電は極めてきびしい条件ではあるが、Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシ材を用い、押付け荷重を適切に選定すれば800A/cm²の大電流密度での通電が達成できることを示している。得られた接触抵抗、電気ノイズ、ブラシ材の摩耗率は、現用されている比較的低い電流密度のスリップリングの摺動特性と比べても良好であり、試作したAg-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシ材は、今後の大電流通電用スリップリング用として十分実用可能である。

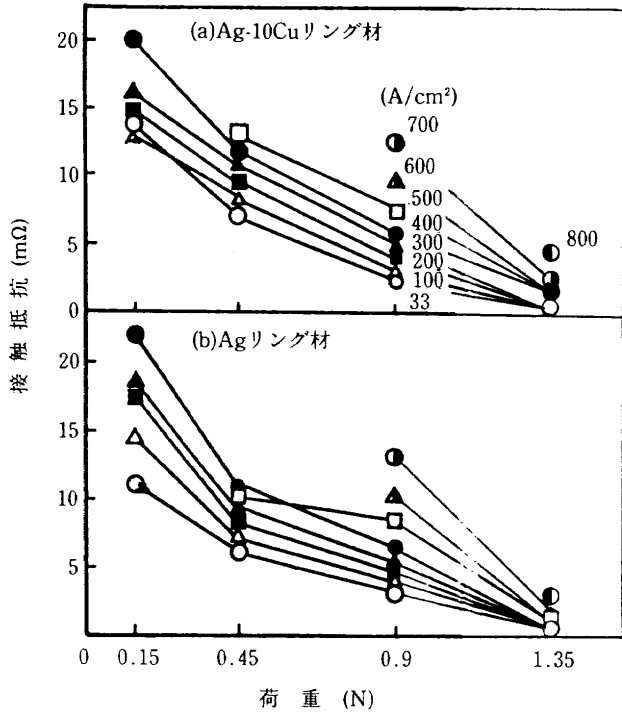


図4-49 接触抵抗への通電量，押付け荷重の影響
ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

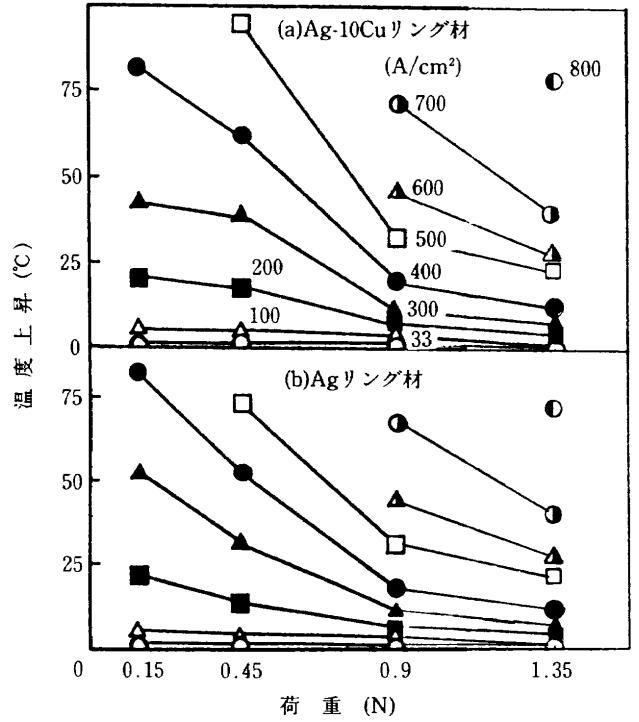


図4-51 ブラシ材の温度上昇への通電量，押付け荷重の影響
ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

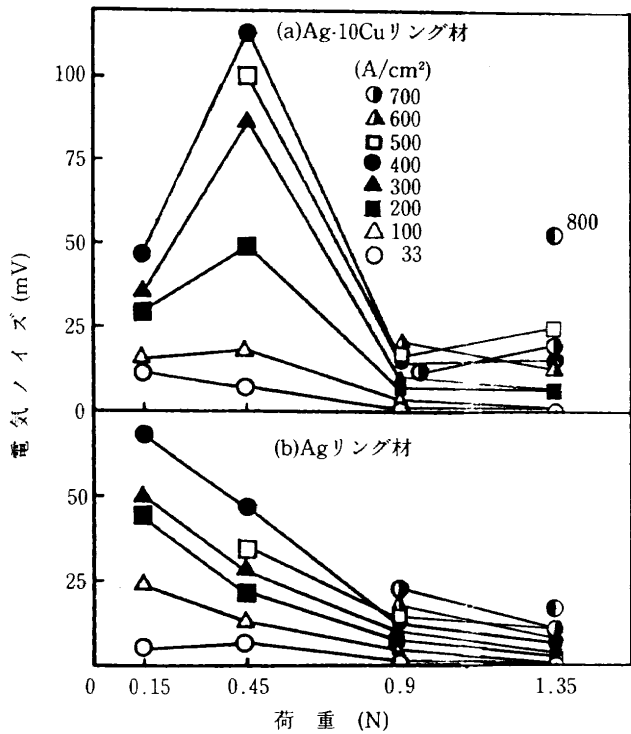


図4-50 電気ノイズへの通電量，押付け荷重の影響
ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

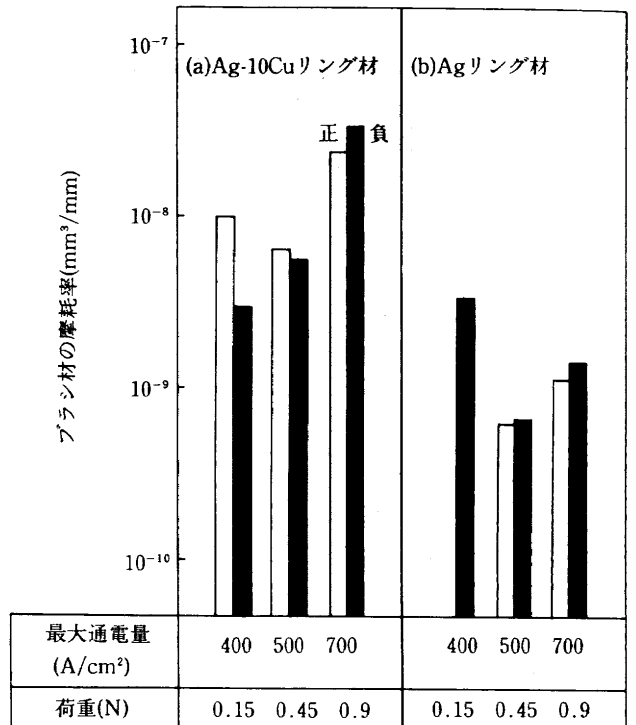


図4-52 ブラシ材の摩耗率への通電量，押付け荷重の影響
ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

4-4 雰囲気, 摺動速度の影響

宇宙機器は地上で機能評価試験を行う必要がある。地上試験を窒素ガス中で行うことを想定し, 前節までに最も良好な特性を示したAg-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシ材の窒素ガス中での摺動特性を評価し, 真空中との特性の違いを調べた。相手リング材にはAg-10CuとAgの2種類を用いた。

表4-6に, 比較した3種の試験における試験条件を示す。試験Aは, 前節で述べたブラシの押付け荷重が1.35N(面圧90N/cm²)の試験に引き続いて, 真空槽に窒素ガス(純ガスA:純度99.9998%以上)を導入して摺動特性を評価した試験である。窒素ガス導入後, 10⁻¹Pa台までの真空排気, 窒素ガス導入を2度繰返して摺動特性の変化を調べた。最後は窒素ガス中で摺動させた状態で試験を終了させた。総摩擦回数は真空中・窒素ガス中を合わせて121000回であり, 窒素ガス中のみでは25000回である。なお, 上述の10⁻¹Pa台の真空中では, 残留ガス成分は窒素

表4-6 実験条件

	A	B	C
摺動速度(mm/秒)	75		
荷重(N)	1.35	1	
接触面積(mm ²)	1.5	12	
通電密度(A/cm ²)	0~800	0~83	
摩擦回数	121000回*	60000回	
	ならし運転 14000回 各電流通電時 2000~23000回		
雰囲気	10 ⁻⁵ , 10 ⁻¹ Pa台 N ₂ ガス 試験途中で変更	10 ⁻⁵ Pa台	N ₂ ガス

*96000回までは4-3節で述べた大電流通電試験で, 96000~121000回が本節で述べる雰囲気を変えて真空, 窒素ガスと繰返し変化させた試験

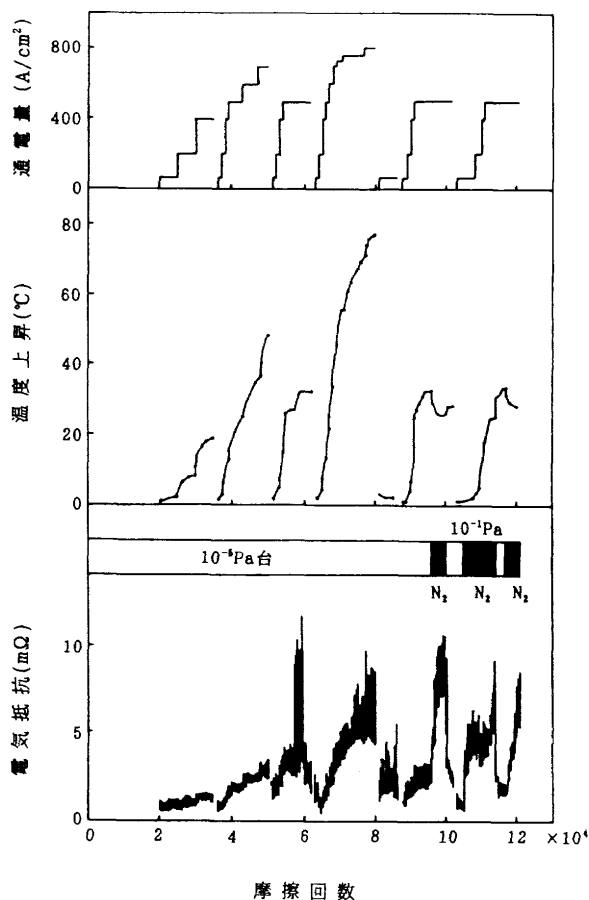
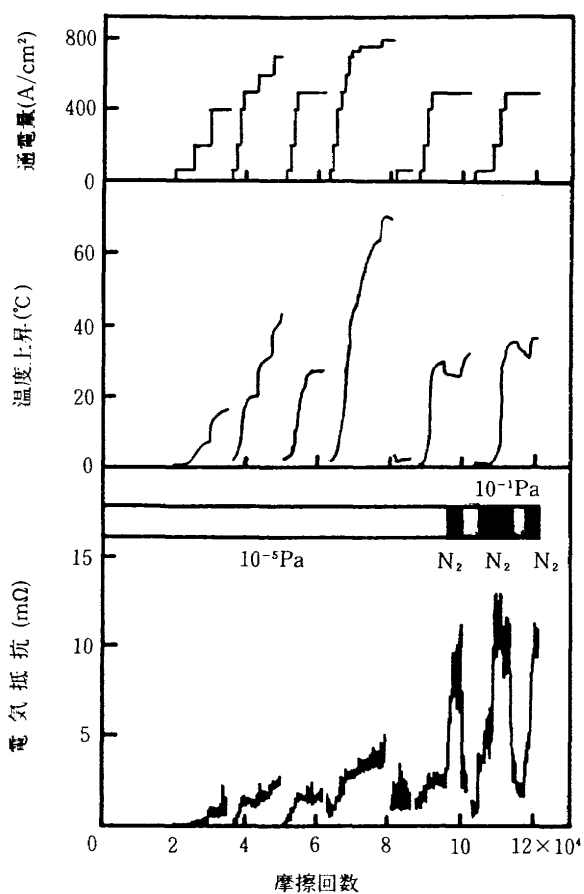


図4-53 窒素ガスを導入した時の接触抵抗と温度上昇の変化
試験A(押付け荷重: 1.35N)
ブラシ材: Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂
相手リング材: Ag

図4-54 窒素ガスを導入した時の接触抵抗と温度上昇の変化
試験A(押付け荷重: 1.35N)
ブラシ材: Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂
相手リング材: Ag-10Cu

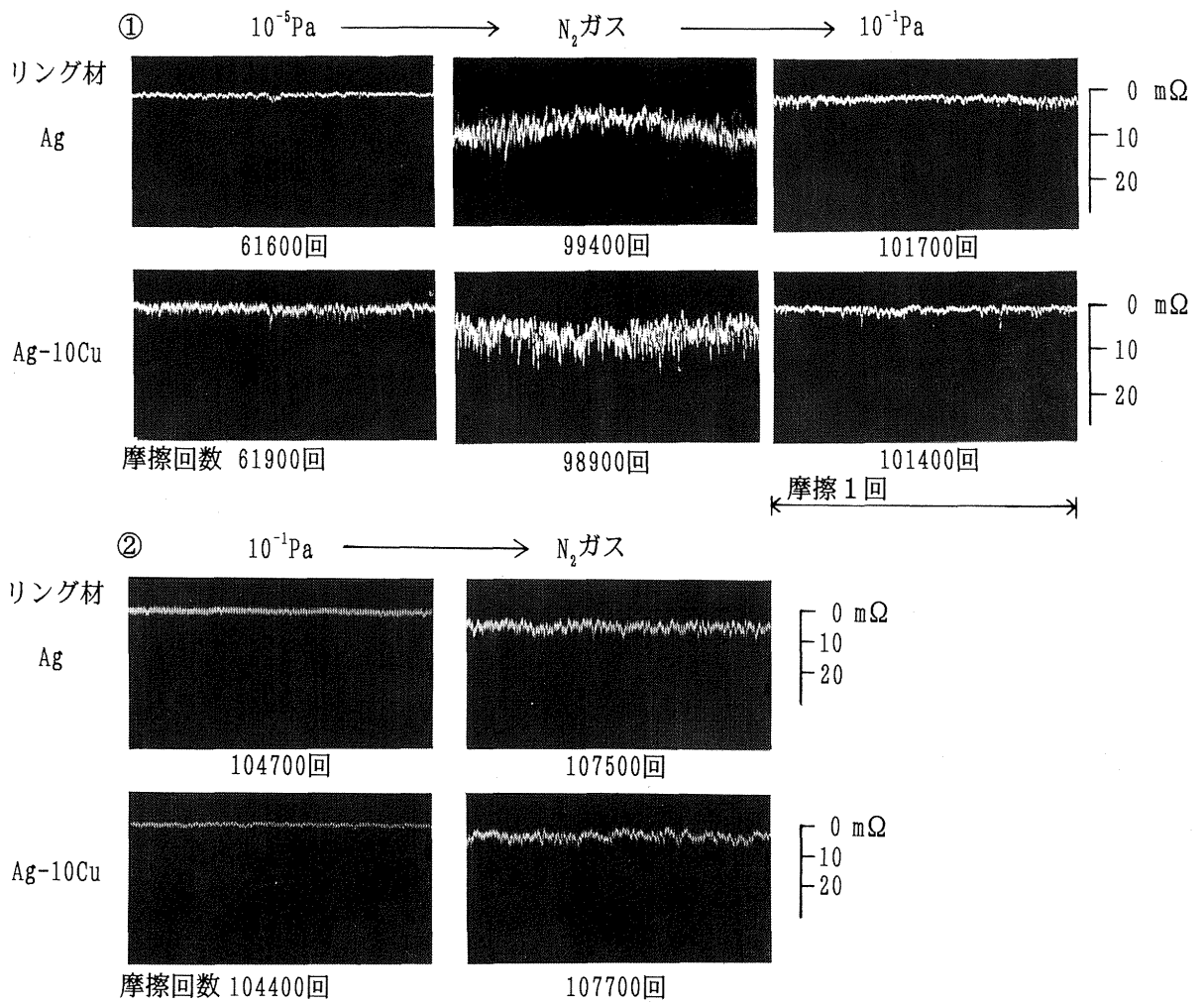


図4-55 オシロスコープで観察した雰囲気による電気抵抗の変化
 通電密度：①500A/cm²，②33A/cm²
 試験A(押付け荷重：1.35N)
 ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

ガスが主体であり、通常の10⁻¹Pa台の真空に比べると酸素分圧は低い。詳しい試験手順・条件は実験結果の検討の中で述べる。

試験Bは、4-2節で既に述べた真空中のみで摺動させた試験であり、押付け荷重は1N(面圧8.3N/cm²)である。試験Cは、試験Bと直接比較するため、試験雰囲気を窒素ガスとした以外は試験Bと全く同じ摺動条件で新たに試験したものである。なお、試験B、Cでは摺動面積が12mm²のブラシ材を用いているが、試験Aでは摺動面積は1.5mm²である。いずれの試験でも、摺動速度は75mm/s(約29rpm)である。

図4-53、図4-54は、試験Aの摩擦回数と電気抵抗及び温度上昇の関係を示したもので、図4-53は相手リング材がAg、図4-54はAg-10Cuである。摩擦回数が約96000回までの10⁻⁵Pa台の真空中の特性については4-3節で既に述

べた。

約96000回摩擦後、通電量500A/cm²の状態では窒素ガスを真空槽に導入すると、いずれのリング材の場合も電気抵抗、電気ノイズが急激に増加した。また、ブラシ材の温度上昇はやや小さくなった。次に、ソープションポンプを用い窒素ガス雰囲気から10⁻¹Pa台まで真空排気すると、接触抵抗、電気ノイズ、ブラシ材の温度いずれも窒素ガス導入前の10⁻⁵Pa台の真空中とほぼ同程度の値に復帰した。この時の電気抵抗の変化をオシロスコープで観察した結果を図4-55に示す。窒素ガスを導入すると通電特性が劣化し、しかも再度真空排気すると、窒素ガス導入前の真空中の良好な通電特性へと可逆的に変化していることが見てとれる。なお、通電特性が回復するのに要する摩擦回数は両リング材とも約1000回であった。

ついで、通電量を33A/cm²に下げ、10⁻¹Pa台の真空中

および窒素ガス中の摺動特性の変化を調べた(図4-53, 図4-54で摩擦回数103000~108000回)。図4-56は、接触抵抗、電気ノイズ、ブラシ材の温度上昇が、試験雰囲気によってどのように変化するかを通電量が500A/cm²と33A/cm²の場合について比較したものである。いずれのリング材でも、500A/cm²通電時には、10⁻⁵Pa中での接触抵抗は2mΩ程度、電気ノイズが20~30mV程度以下と小さいが、窒素ガス中になると接触抵抗、電気ノイズともに約4倍に増大した。ブラシ材の温度上昇は、窒素ガス中の方がやや小さい。これは、窒素ガス中では接触抵抗が増加し発熱は増えるが、窒素ガスの伝熱効果により温度上昇は抑えられるためである。一方、10⁻¹Pa台の真空中での特性は、10⁻⁵Paの真空中とほぼ同じである。通電量33A/cm²の場合は、接触抵抗の変化は500A/cm²の場合と同様であったが、電気ノイズとブラシ材の温度上昇は試験雰囲気の影響はほとんど認められなかった。

通電特性は真空度が10⁻⁵Pa台でも10⁻¹Pa台でもほぼ同じであった。このため、窒素ガスの影響がどの程度の圧力で現れるかを次に調べた(図4-53, 54で摩擦回数

117000~121000回)。10⁻¹Pa台の真空中に窒素ガスをパルス的に微量ずつ導入し、その際の電気抵抗の変化を観察したところ、電気抵抗に明らかな変化がみられたのは、真空度が10²Pa程度になった時点であり、それより低い圧力では電気抵抗の変化はほとんどみられなかった。また、電気抵抗が変化し始める圧力は両リング材とも同じであった。以上の結果は、窒素ガスを導入するとAg-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシ材の接触抵抗や電気ノイズ特性が劣化するが、かなりの量の窒素ガスが導入されてから劣化が始まることを示している。

このブラシ材は、窒素ガス中で摺動させた後でも、10⁻¹Pa台まで真空排気してやれば真空中本来の良好な通電特性が回復した。このことは、宇宙用として用いる場合、地上で窒素ガス中の機能評価試験を行っても宇宙での性能には支障がないことを示している。ただし、窒素ガス中の試験の間にブラシ材が大幅に摩耗し、摺動面の接触状態が大きく変化してしまえば、真空排気しても通電特性が回復しない恐れがある。そこで、次に窒素ガスのブラシ材の摩耗特性への影響について調べた。

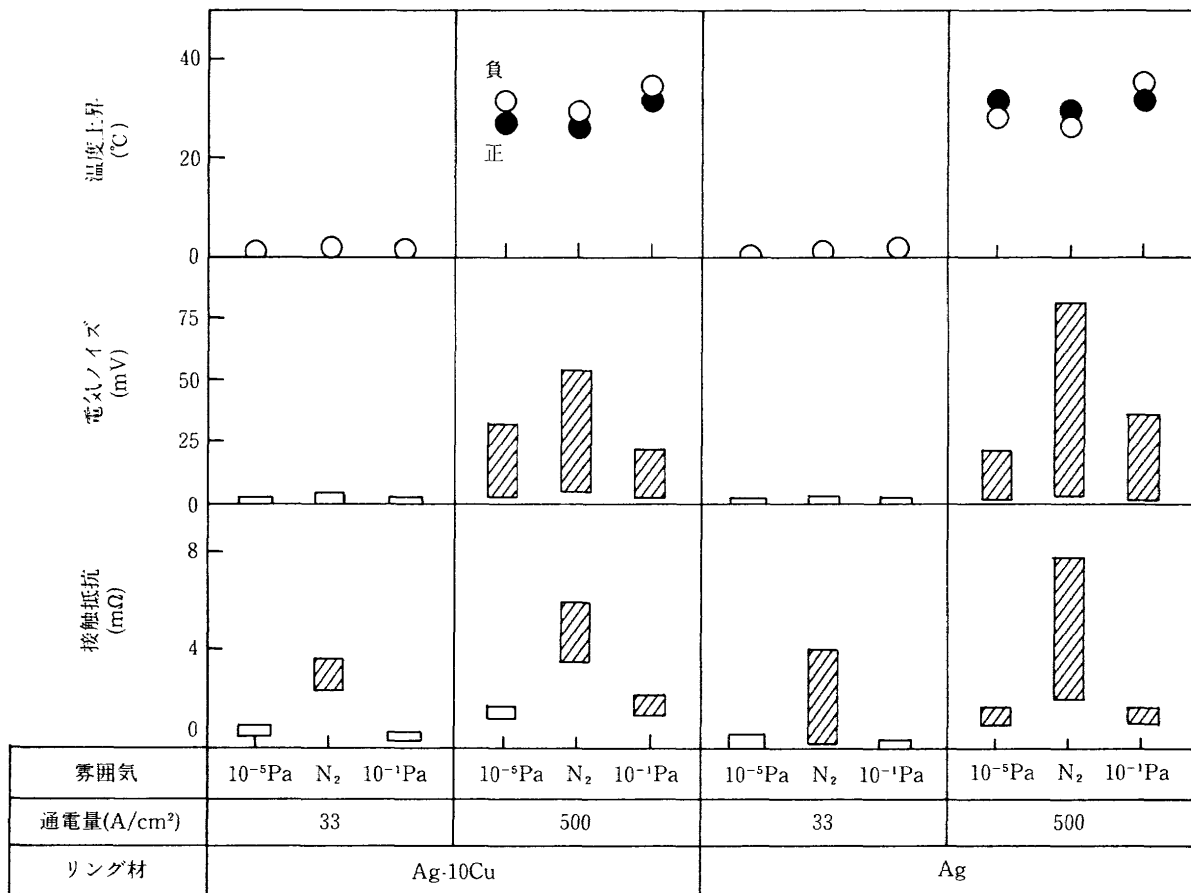


図4-56 雰囲気による摺動特性の変化
試験A(押付け荷重：1.35N)
ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

上述した試験Aでは試験途中で雰囲気を変えているため窒素ガス中での摩擦特性を知ることができない。このため、窒素ガス中のみでの試験Cを行い、同じ摺動条件で雰囲気が 10^{-5} Pa台の真空中の試験(試験B, 4-2節で既述の試験)と比較した。試験Cの摩擦回数と電気抵抗及び温度上昇の関係を図4-57, 図4-58に示す。図4-57は相手リング材がAgの場合, 図4-58はAg-10Cuの場合である。図4-17, 図4-25の試験Bの場合と比較すると, 試験Aで得られた結果と同様に, 接触抵抗や電気ノイズは窒素ガス中の方が大きく, 温度上昇は真空中の方が大きい。また, 試験Aの窒素ガス中の場合と比べると, 電流密度が同等であれば, ほぼ同じ接触抵抗, 電気ノイズ特性が得られた。

試験B, Cでのブラシ材の摩擦率を比較して図4-59に示す。試験雰囲気によらず相手リング材がAgの方がブラシ材の摩擦率が小さかったが, いずれの相手リング材でも, 窒素ガス中の方が真空中よりもブラシ材の摩擦率が1桁近く大きい。ただし, 摩擦率の値そのものは 10^{-9} mm³/mm程度であり, 十分小さい。

図4-60~図4-65に, 試験A(真空中および窒素ガス中での試験)及び試験C(窒素ガス中のみでの試験)後のブラシ材とリング材の摺動痕の光学顕微鏡写真, 及びリング摺動痕の電子顕微鏡写真を示す。図4-60は, 試験Aの相手

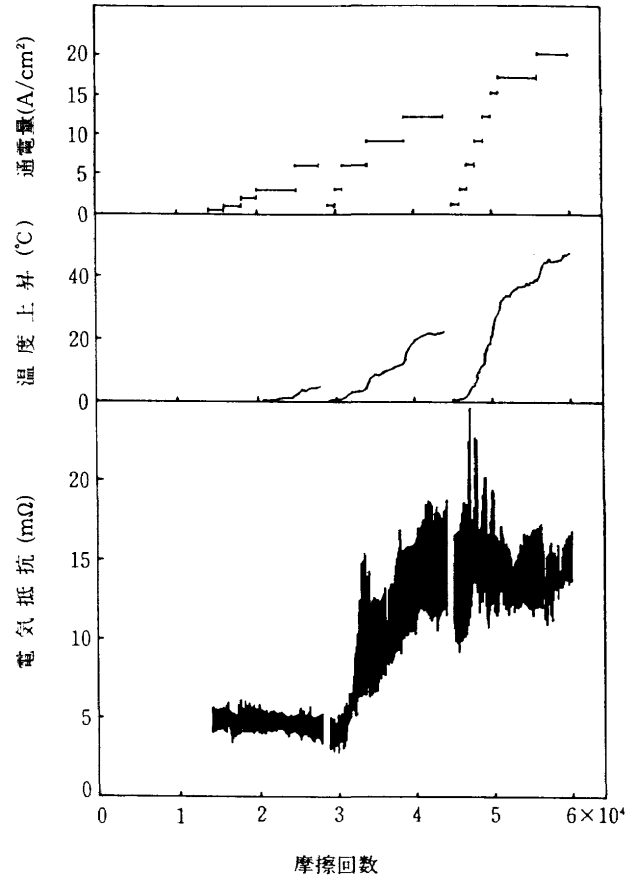


図4-58 窒素ガス中における電気抵抗, 温度上昇, 通電量の推移
試験C(押付け荷重: 1 N, 通電量: 最大83A/cm²)
ブラシ材: Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂
相手リング材: Ag-10Cu

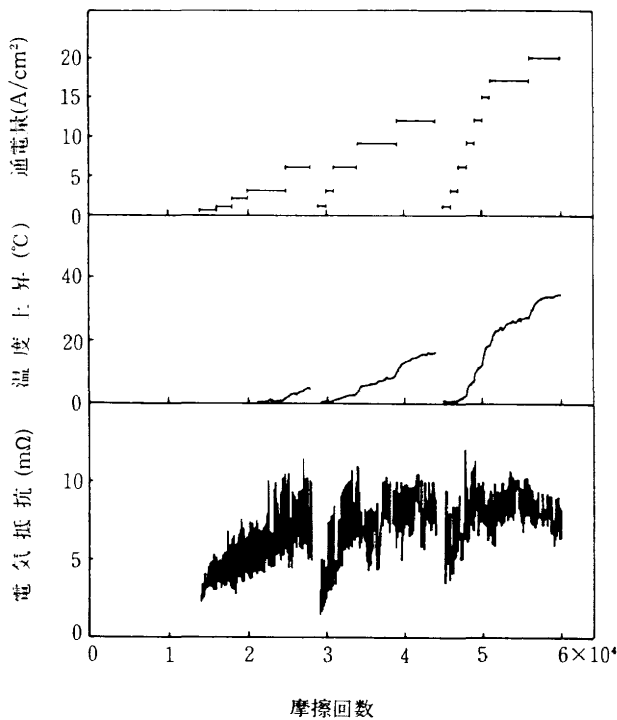


図4-57 窒素ガス中における電気抵抗, 温度上昇, 通電量の推移
試験C(押付け荷重: 1 N, 通電量: 最大83A/cm²)
ブラシ材: Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂,
相手リング材: Ag

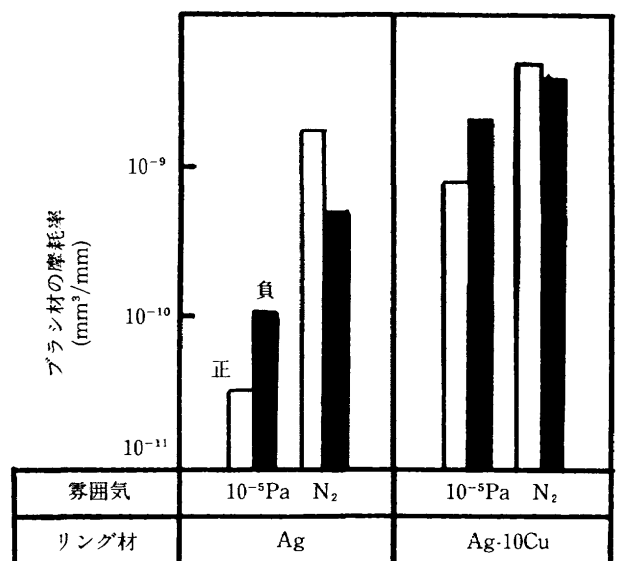


図4-59 ブラシ材摩擦率への雰囲気の影響
試験B, C(押付け荷重: 1 N, 通電量: 最大83A/cm²)
ブラシ材: Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

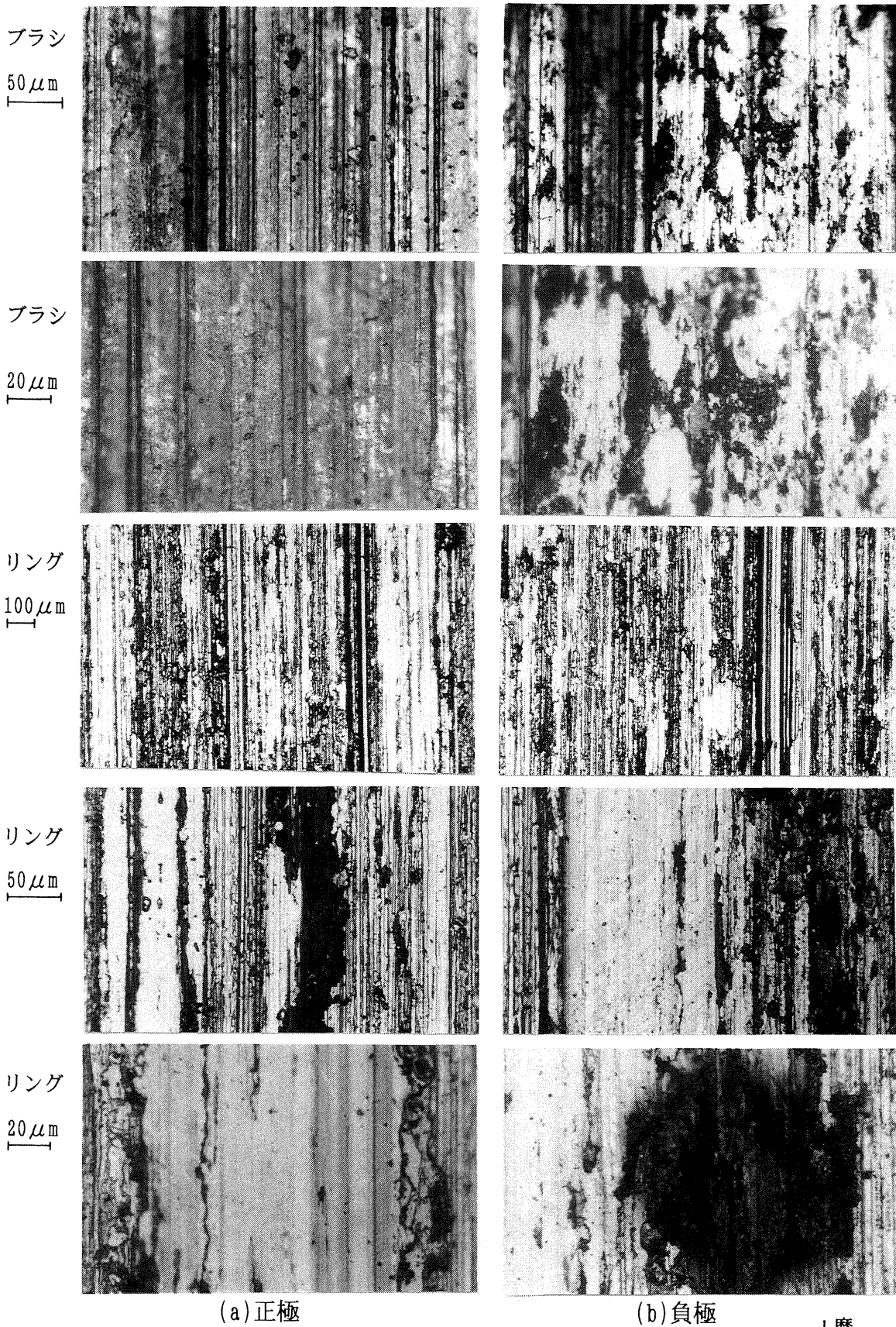


図4-60 真空+窒素ガス中で試験した後のブラシ、リング摺動痕
 試験A(押付け荷重：1.35N)
 ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂、相手リング材：Ag

摩擦方向
↓

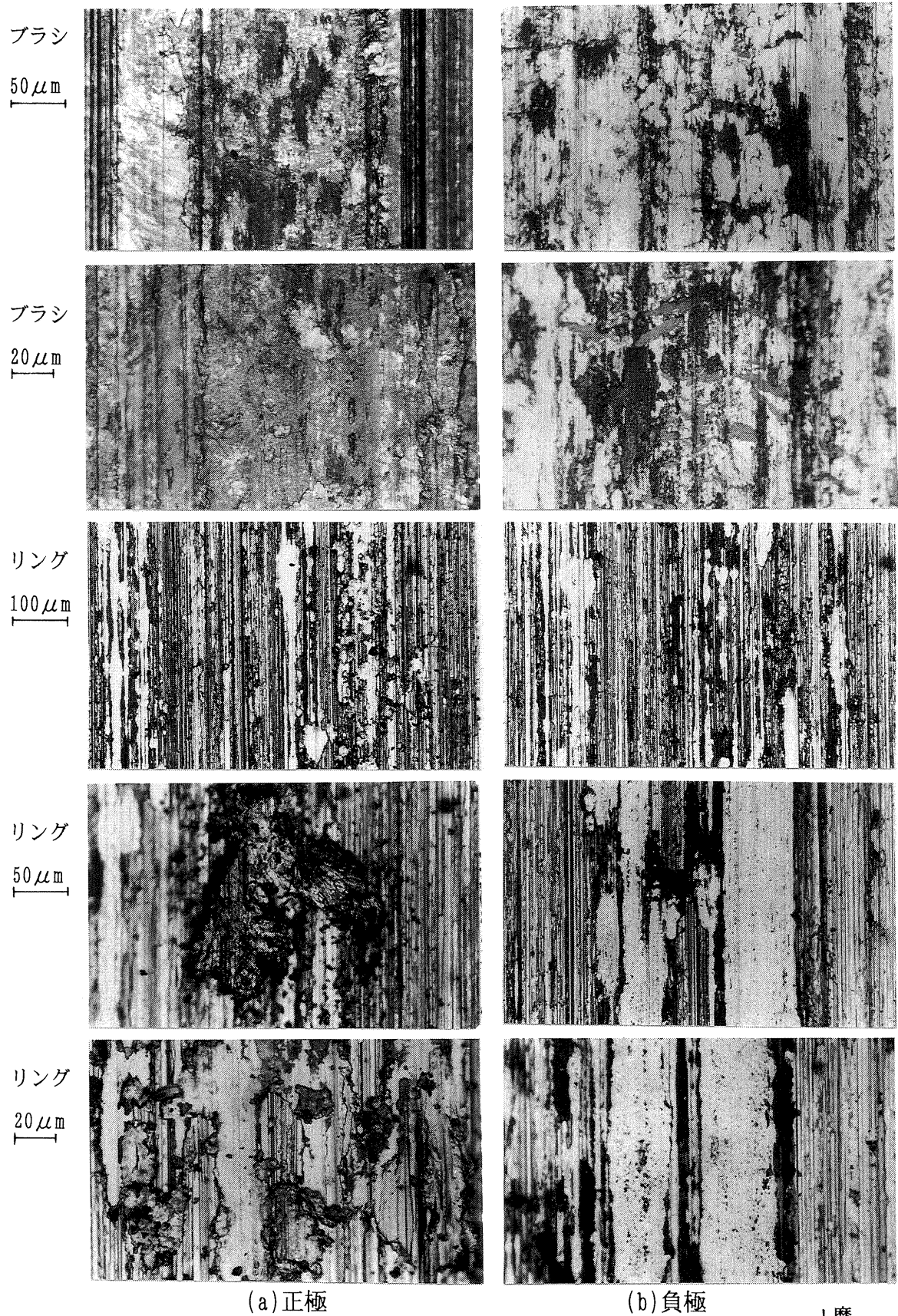


図4-61 窒素ガス中で試験した後のブラシ，リング摺動痕
 試験C(押付け荷重：1 N，通電量：最大83A/cm²)
 ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂，相手リング材：Ag

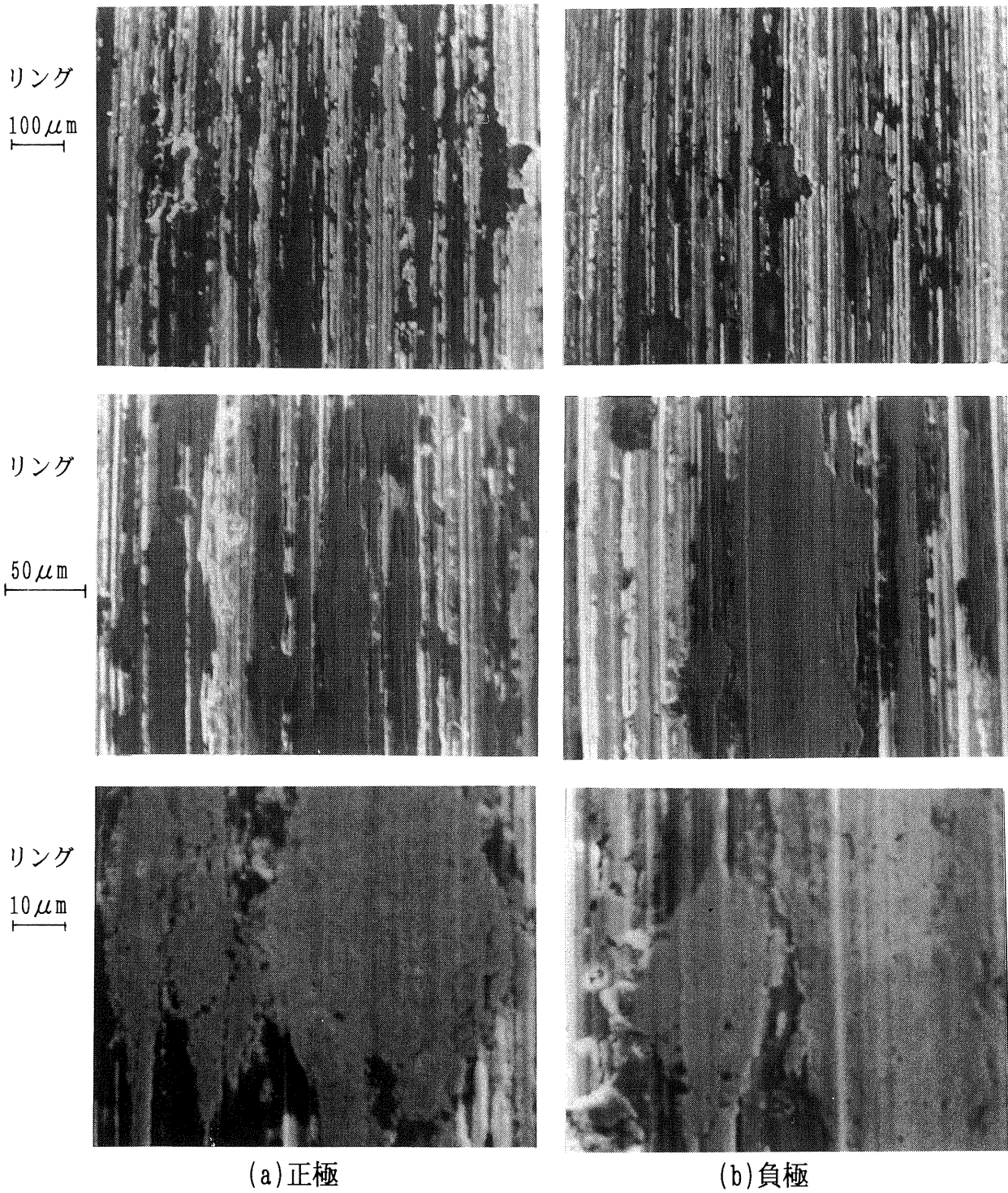


図4-62 窒素ガス中で試験した後のAgリング摺動痕のSEM像
 試験C(押付け荷重：1 N，通電量：最大83A/cm²)
 相手ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

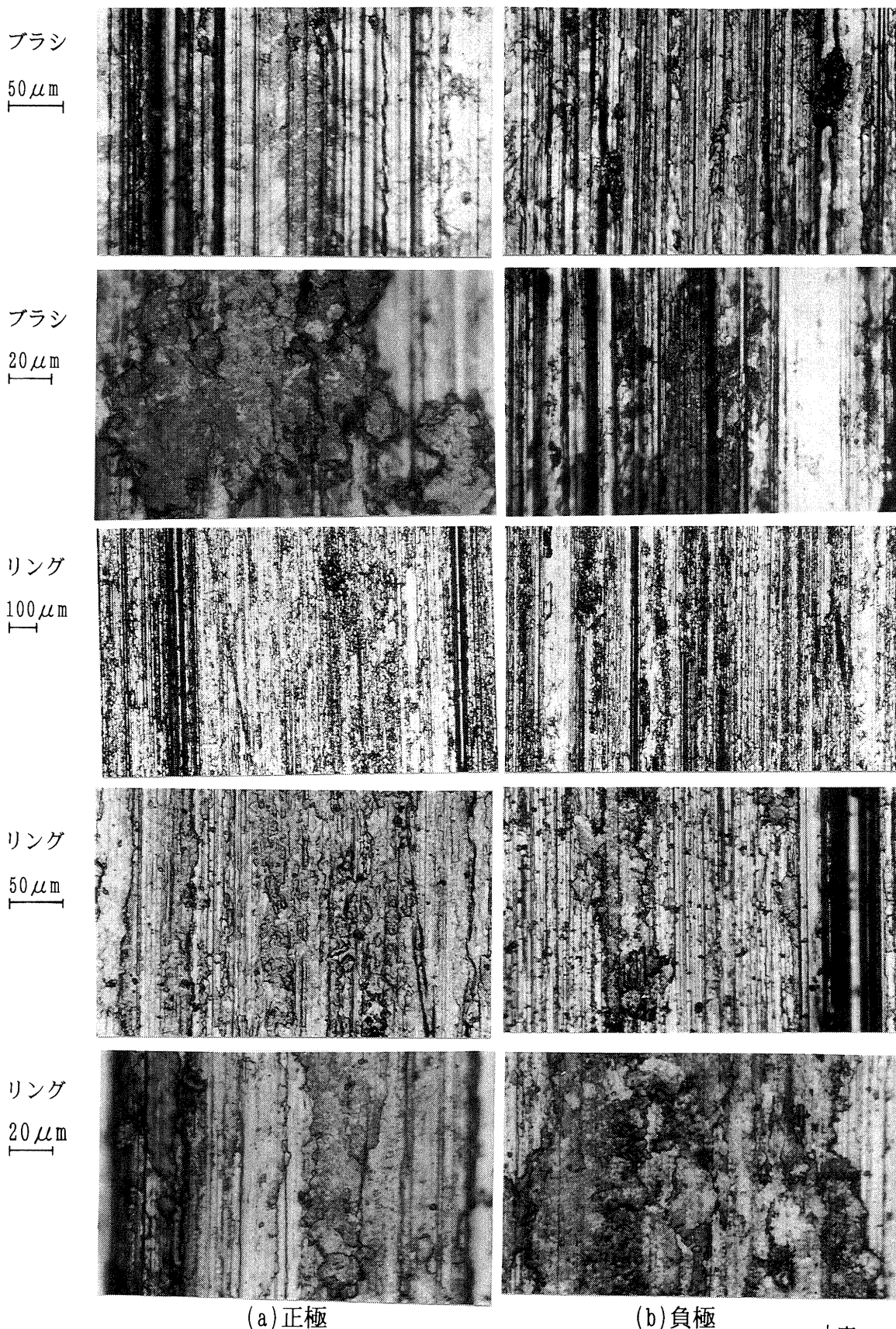


図4-63 真空+窒素ガス中で試験した後のブラシ，リング摺動痕
 試験A(押付け荷重：1.35N)
 ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂，相手リング材：Ag-10Cu

摩擦方向
↓

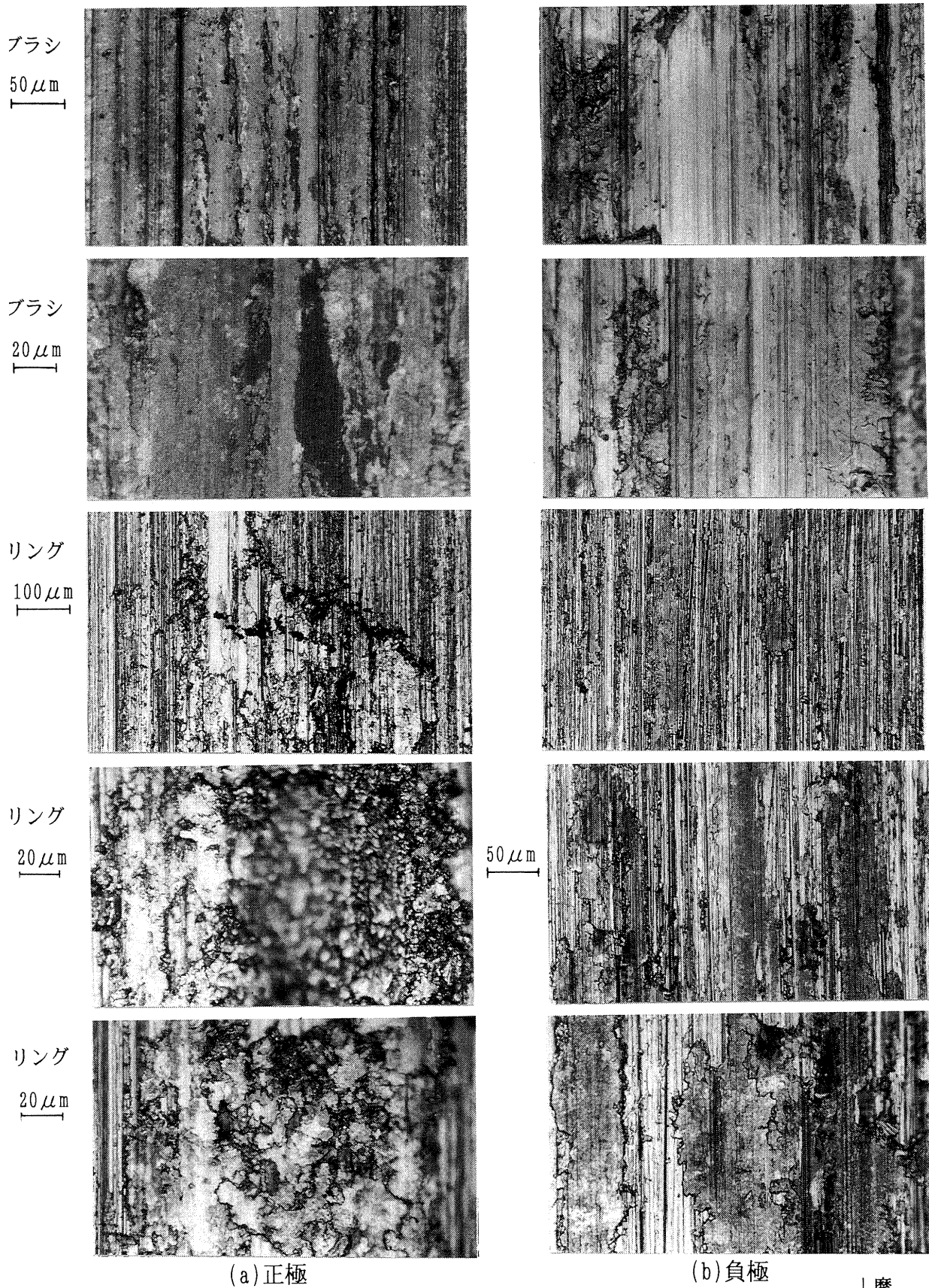


図4-64 窒素ガス中で試験した後のブラシ、リング摺動痕
 試験C(押付け荷重：1 N、通電量：最大83A/cm²)
 ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂、相手リング材：Ag-10Cu

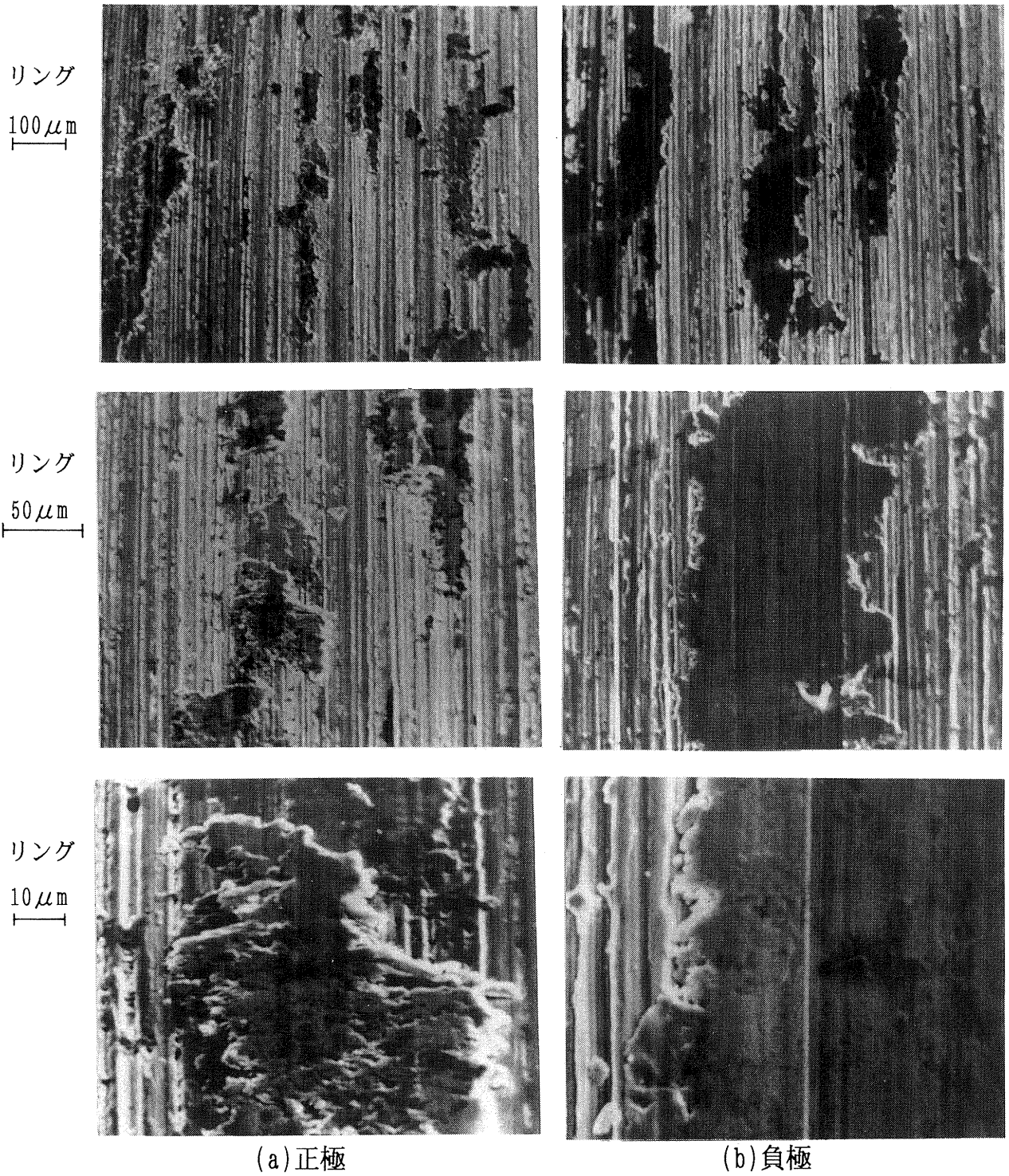


図4-65 窒素ガス中で試験した後のAg-10Cuリング摺動痕のSEM像
試験C(押付け荷重：1 N，通電量：最大83A/cm²)
相手ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

摩擦方向
↓

リング材がAgの場合である。ブラシ摺動痕には明瞭な条痕が認められ、その表面は黄褐色を呈していた。一方、リング摺動痕もほぼ全域にわたって条痕が見られ、条痕内には淡い褐色系の膜が形成されていた。リング摺動痕上にはブラシ材からの移着物も多数見られる。

図4-61, 図4-62は、試験Cの相手リング材がAgの場合である。ブラシ、リングともに摺動痕の様相は図4-60に示した試験Aとかなり類似しており、淡い褐色系の膜が形成されていた。また、リングのSEM像からは、ブラシ材からの付着物が押し延ばされており摺動面がかなり平坦になっていることがみてとれる。

図4-63は、試験AのAg-10Cuリング材の場合である。図4-60の相手リングがAgの場合に比べ、ブラシ材表面は凹凸が大きく、また塊状の付着物も観察され、摩耗が進んでいることがうかがえる。リング摺動痕上にAgリングの場合と同様、多数の条痕がみられるが、付着物がやや厚めであること、細かい摩耗粉が多数見られた点がAgリングとは異なっている。表面の膜の色は、Agリングと同様茶褐色系であった。

図4-64, 図4-65は、試験CのAg-10Cuリング材の場合である。ブラシ摺動痕はほぼ全域が付着物状の膜におおわれており、黄褐色及び灰色を呈していた。このような付着物は試験Aや試験CのAgリングの場合にも観察されたが、試験CのAg-10Cuリング材の場合が最も顕著である。リング摺動痕もほぼ全域が黄褐色の移着物層でおおわれていた。摺動面には厚めの移着物が観察されたが、リングのSEM像から、付着物の表面は比較的平坦になっていたことがわかる。また、一部の移着物では、繰返し摩擦により移着物内部で破壊されたような状態にあるものもみられた。リング上の移着物の量は他のケースに比べても多い。

以上の観察結果から、多少の相違は見られるものの、試験Aと試験Cの摺動痕の状態はきわめて類似しており、摺動面が黄褐色を呈していたことがわかった。試験Aは最終的に窒素ガス中で摺動させた状態で試験を終了させている。このため、窒素ガス中のみで摺動させた試験Cの摺動痕と同様な様相を呈していたものと考えられる。

ここで、真空中のみで試験した試験Bの摺動面(図4-27, 図4-31)と比較してみよう。ブラシ摺動面は、真空中で試験した場合には銀白色を呈していたのに対し、最終的に窒素ガス中で試験した摺動面は黄褐色の付着物で覆われているところが多かった。一方、リング摺動面は、窒素ガス中では黄褐色の付着物が摺動面のほぼ全域に形成されていたが、真空中ではリング摺動面の全域に付着物が形成されるような現象はみられず、また付着物も黒色または灰色であった。このような表面状態の相違が真空中と窒素ガス中での特性の差につながったものと推定

されるが、特に黄褐色の付着物は窒素ガス中のみで観察されており、これが窒素ガス中で通電特性が劣化した理由である可能性が高い。

図4-66, 図4-67は、試験後のAg-10Cuリング表面をアルゴンエッチングをしながら深さ方向にオージェ分光分析を行った結果である。図4-66は真空中のみで試験した場合(試験B)であり、図4-67は真空中及び窒素ガス中で試験した場合(試験A)である。

真空中のみで試験した場合、図4-66に示したように、摩擦していない未摺動部からはごく表層にCやO, Nが存在していることが認められるが、スパッタ時間約3分後以降はAgとCuのみが検出され、しかもその比率がリング組成のAg-10Cuに近くなっている。検出されたC, O, Nは表面汚染と考えられる。一方、摺動させた表面のごく

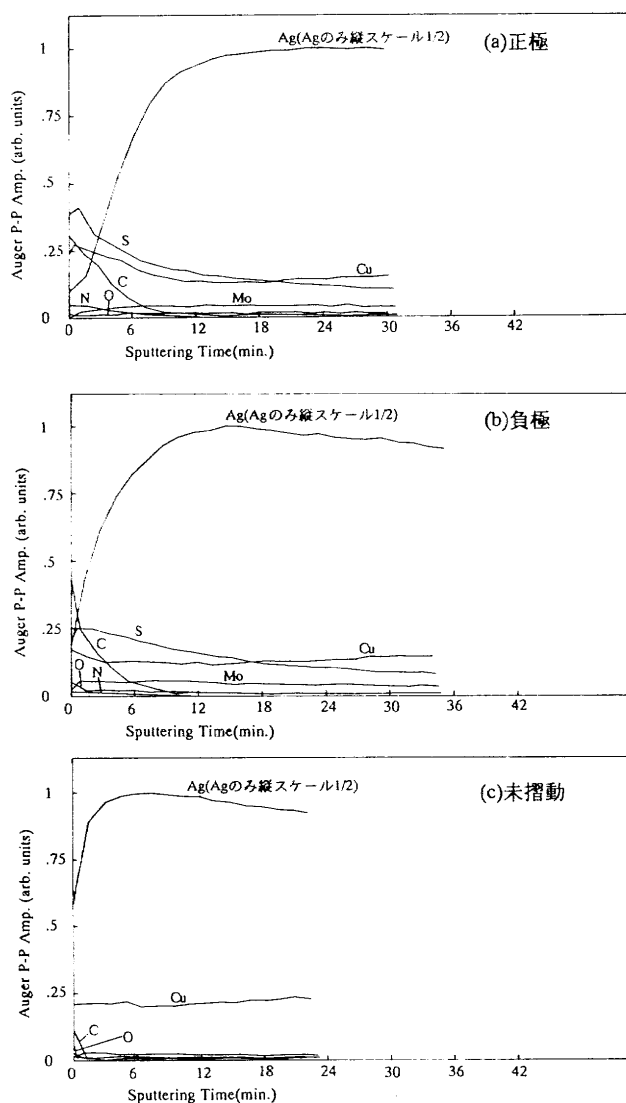


図4-66 Ag-10Cuリング摺動痕のオージェ分析結果(真空試験後)
 試験B(押付け荷重:1 N, 通電量:最大83A/cm²)
 相手ブラシ材: Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

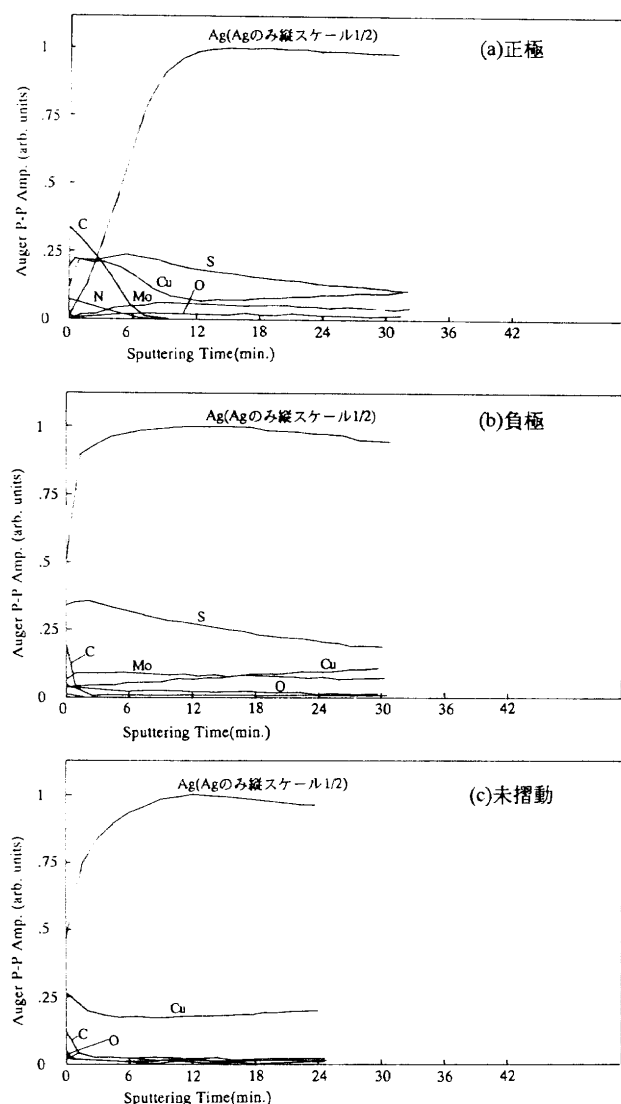


図4-67 Ag-10Cuリング摺動痕のオージェ分析結果(真空+窒素ガス試験後)
 試験A(押付け荷重: 1.35N)
 相手ブラシ材: Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

表層からはCやSが多く検出された。スパッタするにつれてCは急激に減少するのに対し、Sは緩やかに減少し、Moが増加している。MoとSが検出されたことから、ブラシ材のMoS₂が移着していたことがわかる。OとNについては未摺動部分と同様であり、表面汚染と考えられる。

一方、窒素ガス中で試験した場合(図4-67)は、未摺動面は真空中のみで試験した場合とほぼ同じである。摺動させた表面でも、負極の場合は真空中と同様であり、ブラシ材のMoS₂が移着していることがわかるが、Nの存在は少ない。これに対し、正極ではMoS₂は真空中同様存在しており、さらにNが存在していることが確認できる。Ag-10Cu表面のオージェ分析では、窒素ガス中で試験した正極の摺動面のごく表層にNが存在していたこと以外は、窒素ガス中と真空中との相違は見いだせなかった。

ブラシ材についてはX線光電子分光分析(XPS分析)を行った。真空中のみで試験した場合(試験B)と窒素ガス中で試験を終了した場合(試験A, C)のスペクトルにはほとんど相違は認められず、いずれのブラシ表面からもブラシ成分以外にはC, Oが検出された。なお、Nについては結合エネルギーがMoのピークに近く、Moのピークに埋もれてしまうため検出できなかった。

黄褐色の付着物が何であるかは、オージェ分析、XPS分析では特定することができなかった。オージェ分析では窒素ガス中で試験した正極の摺動面のごく表層にNが存在していたのに対し、黄褐色の付着物は正極にも負極にも存在していたこと、一般に窒化物は形成されにくいことを考えると、黄褐色の付着物が何らかの窒化物である可能性は少ないと思われる。むしろ、オージェ分析、XPS分析ともにOが検出されたこと、真空中(10⁻⁶Pa台)よりも窒素ガス中(純度99.9998%)の方が酸素濃度が高いと考えられることから、酸化物であった可能性がある。窒素ガスを導入すると通電特性が劣化し、しかも再度真空排気すると、摩擦回数約1000回で窒素ガス導入前の良好な通電特性に復帰するのは、黄褐色の付着物が摩耗し、元の摺動面が現れるためと推測される。

4-5 摺動速度の影響

これまで述べてきた試験はすべて75mm/sの摺動速度で行ってきた。この速度は実際の宇宙用スリップリングに比べるとかなり速いが、加速試験によりブラシ材の耐摩耗性を評価する必要があったためである。75mm/s程度の摺動速度ならばブラシの飛び跳ね現象などは起こらず、実際のスリップリングと同等の通電特性を示していたと考えられるが、この点は実験的に確認しておく必要がある。ただし、もしブラシの飛び跳ね現象などが起きていたとしても、通電特性は悪化する方向に影響が現れるため、スリップリング材の性能を過大評価する恐れはなく、いわば安全側に評価していたことになる。

これまでの試験で最も良好な性能を示したAg-12.5MoS₂-2.5NbSe₂ブラシ材を用い、摺動速度を25mm/sとこれまでの1/3にして摺動特性を評価し、75mm/sの場合と比較した。試験は真空中で行い、相手リング材にはAg-10CuとAgの2種を用いた。ブラシのリングへの押付け荷重は0.9N(接触圧力60N/cm²)とした。

試験中の電気抵抗の推移を図4-68に示す。試験では、まず無通電下でのならし運転を20000回行い、ついで電流密度33A/cm²で通電を開始し、総計で46000回摩擦した。最大通電密度は、摺動速度75mm/s、荷重0.9Nの場合と同様に700A/cm²とした。電流を33A/cm²から逐次増加させていくと電気抵抗は大きくなるが、摺動速度25mm/sの場合でも700A/cm²の大電流通電を達成した。700A/

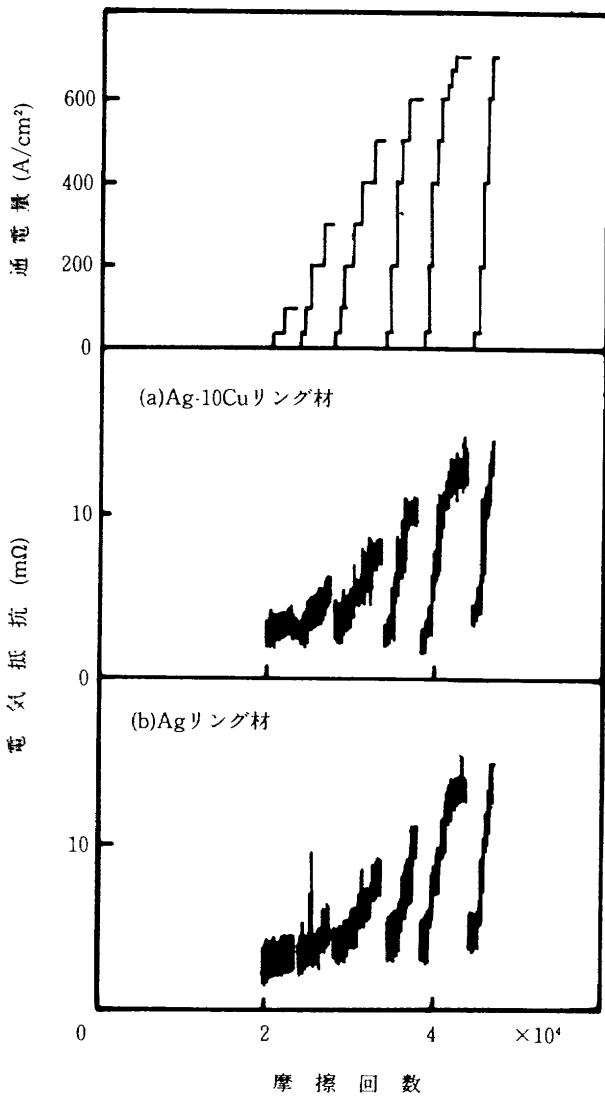


図4-68 低すべり速度試験における電気抵抗の推移
すべり速度：25mm/s, 押付け荷重：0.9N
ブラシ材：Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂

cm²の時の摺動特性を表4-7に、摺動速度75mm/sの場合および静止時の場合と比較して示す。摺動速度25mm/sの場合は75mm/sの時と比較すると電気ノイズがやや増加し、ブラシ材の温度上昇はやや減少した。ただし、接触抵抗とブラシ材の摩耗率はいづれの摺動速度でもほぼ同程度であった。摺動速度が異なっても摩耗率がほぼ同等であったということは、この摺動速度の範囲では加速試験が妥当であったことを示している。また、摺動時の接触抵抗は静止時に比べてやや大きい程度であり、試験した範囲のすべり速度では摺動が接触抵抗へ及ぼす影響はあまり大きくないことがわかる。

以上の結果は、試験した範囲では、摺動速度は通電特性にあまり影響を与えないことを示しており、75mm/sで試験した本研究の結果は実際のスリップリングでも成立すると考えられる。

第5章 結論

宇宙用スリップリングの使用条件を模擬したモデル試験機を用いて、ホットプレス法で作製したAg-MoS₂-NbSe₂系の銀系複合ブラシ材の摩耗、通電特性を評価した。試験したブラシ材の組成は、

- (1) Ag-15MoS₂
- (2) Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂
- (3) Ag-10MoS₂-5NbSe₂
- (4) Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂

の4種類で、相手リング材にはAg-10CuとAgの2種類を用いた。その結果、得られた結論は以下の通りである。

- (1) Ag-15MoS₂, Ag-7.5MoS₂-7.5NbSe₂の2種のブラシ材について、リングへの押付け荷重を0.2, 0.6, 1Nに変化させて最適押付け荷重を調べた。その結果、荷重を増加させると電気的特性が飛躍的に向上するだけでなく、摩耗特性も改善された。荷重の増加に伴わない接触状態が良好になり、電気的摩耗が減少

表4-7 摺動速度を変えたときの700A/cm²通電時における摺動特性(真空中, 押付け荷重 0.9N)

銀系複合ブラシ材		Ag-12.5MoS ₂ -2.5NbSe ₂					
摺動速度(mm/秒)		75		25		0	
リング材		Ag	Ag-10Cu	Ag	Ag-10Cu	Ag	Ag-10Cu
接触抵抗(mΩ)		12.8~13.7	12.1~13.2	11.2~12.8	11.5~12.7	11.2	11.4
電気ノイズ(mV)		2~45	2~20	3~64	2~44	0	0
温度上昇(°C)	正極	76~91	62~78	52~68	40~52	50	41
	負極	47~58	68~80	40~53	53~68	37	49
ブラシ材の摩耗率*(mm ³ /mm)	正極	1.1×10 ⁻⁹	2.3×10 ⁻⁸	1.2×10 ⁻⁹	3.3×10 ⁻⁸
	負極	1.4×10 ⁻⁹	3.3×10 ⁻⁸	4.2×10 ⁻⁹	1.5×10 ⁻⁸

* 総摩擦距離：7226m(摺動速度25mm/s), 19949m(摺動速度75mm/s)

したためと考えられる。

- (2) MoS₂とNbSe₂の配合比を変えたブラシ材4種類について、摩耗・通電特性を押し付け荷重1N、通電量1~20Aで評価し、MoS₂とNbSe₂の最適配合比を調べた。その結果、通電量1A、20Aのいずれの条件でも、最も良好な性能を示したブラシ材はAg-12.5MoS₂-2.5NbSe₂であり、相手リング材としてはAgの方がAg-10Cuよりも適していた。このブラシ/リングの組み合わせは、電気信号伝達用、及び電力伝達用の両用途に使用可能である。
 - (3) ブラシの接触面積を12mm²から1.5mm²へと小さくし、通電密度を大幅に増加させて最適ブラシ材Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂の摺動特性を評価した。その結果、通電密度を増加させると接触抵抗、電気ノイズが急増し、ブラシ材の温度上昇も著しくなること、及びブラシのリングへの接触面圧を増やすことにより性能が大幅に向上することがわかった。大電流通電を達成させるには、摺動部の接触状態を良好に保って接触抵抗と電気ノイズを小さく抑えることが肝要で、このためには接触面圧を増やすことが効果的な手段であった。本実験では、接触面圧90N/cm²(押し付け荷重1.35N)で通電密度800A/cm²を達成した。
 - (4) スリップリングの摩耗、通電特性への窒素ガスの影響を、最適ブラシ材Ag-12.5MoS₂-2.5NbSe₂を用いて調べた。窒素ガス中では真空中に比べ、接触抵抗、電気ノイズ、ブラシ摩耗のいずれもが大きくなった。ただし、窒素ガス中で摺動させた後でも、雰囲気を真空にすれば、真空中本来の良好な性能を示した。
- 本研究で得られた摩耗・通電性能は、現在人工衛星で使用されているスリップリング材に比べても良好であり、試作したAg-MoS₂-NbSe₂系ブラシ材は今後の宇宙用スリップリング材料として有望である。特に、800A/cm²という現用されている電力伝達用スリップリングの約16倍もの大電流密度においても通電可能であり、将来型の宇宙ステーションや宇宙プラットホームなどの大電力化や小型軽量化に対して極めて適している。

付記

本研究は、三菱電機(株)との共同研究として行われたものである。

参考文献

- 1) J. S. Sheppard : Design and development of an advanced solar array drive mechanism, Proc. first european space mechanism and tribology symposium, ESA SP-196 (Dec. 1983) pp.19-26
- 2) Report of the Seasat Failure Review Board, NASA, Dec.21, (1978)
- 3) F. J. Claus, M. K. Kingery : Sliding electrical contact materials for use in ultrahigh vacuum, J. Spacecraft vol. 4, No. 4(1967) pp. 480-485
- 4) E. Lewis, S. R. Cole, E. W. Glossbrenner and C. E. Vest : Friction, wear and noise of slip-ring and brush contacts for synchronous satellite use, Proc. first european space tribology symposium, ESA SP-111 (Oct. 1975) pp.367-378
- 5) A. J. Walton, H. E. Hintermann and M. Maillat : Performance of dry-lubricated slip-rings for satellite application, Proc. first european space tribology symposium, ESA SP-111 (Oct. 1975) pp.379-389
- 6) K. R. Dalley and P. J. O'Donnell : Design and performance of electrical contacts for use in ultrahigh vacuum, Proc. first european space tribology symposium, ESA SP-111 (Oct. 1975) pp.391-409
- 7) A. C. Anderson : The wear and electrical characteristics of some dry lubricated slip ring/brush contact, Proc. 2nd space tribology workshop, ESA SP-158(Dec. 1980) pp.125-132
- 8) D. Neushutz and G. Tomalla : Development and performance of a new power slip-ring system for space application, Lub. Eng. vol.41 (Jan. 1985) pp.15-21
- 9) A. J. Walton, J. Gillies and J. A. Duvall : BAe solar-array drive mechanism : life test, strip-down and optical encoder examination, ESA trib/2 (Dec. 1980)
- 10) D. D. Phinney : Slip ring experience in long duration space applications, 20th Aerospace mechanism symposium. NASA CP-2423 (1986) pp.45-54
- 11) G. Atlas and G. Thomin : Experiences of CNES and SEP on space mechanisms rotating at low speed, 21st Aerospace mechanism symposium, NASA CP-2470(1987) pp.131-144
- 12) 鈴木峰男, 西村允, 渡辺幹男, 播磨三弘 : 宇宙用スリップリング材の摩擦, 摩耗, 通電特性に関する研究(第1報), 航空宇宙技術研究所報告, TR-1040 (1989)
- 13) 津谷, 松永編 : 固体潤滑ハンドブック, 幸書房 (1978) pp.540-543
- 14) P. M. Magie : A review of the properties and potentials of the new heavy metal derivative solid

lubricants, Lub. Eng. vol.22 (July 1966) pp. 262-269

付録 接触抵抗に及ぼす押付け荷重および通電量の影響

ブラシ/リング間の見かけの接触面のうち実際に接触しているのはごく一部であり、電流が流れるのはこの真実接触面のみである。真実接触面積 A_r は見かけの接触面積に比べてはるかに小さく、押付け荷重を W 、柔らかい方の材料の塑性流動圧力を P_m とすれば、一般に、

$$W = A_r \cdot P_m \dots\dots\dots (1)$$

という関係が成り立つ。本試験での真実接触面積を計算してみると、塑性流動圧力 P_m としてブラシ材のビッカース硬さを用いれば、押付け荷重1Nの場合で0.002 mm²程度になり、真実接触面積はブラシ材の摺動面積が12 mm²の場合でみかけの接触面積の0.02%、1.5mm²の場合でも0.13%程度ときわめて小さい。

なお、本試験のように接触面が摺動している場合は、接触点の位置が常に変化していること、また接触点の成長が起きることなどに注意する必要がある。

真実接触面積がきわめて小さいため、接触面を通過しようとする電流は接触面で絞られて流れる。このため、電流の通路が曲げられ抵抗が増加する。また、接触面表面には被膜(例えば、コンタミやMoS₂などの付着物)が形成されているため、この被膜により抵抗が増加する。

今、真実接触点を半径 a の円と仮定し、ブラシ材とリング材の抵抗率を λ_1, λ_2 、被膜の固有抵抗を ρ とすれば、1つの真実接触点における接触抵抗 r は絞り抵抗 r_1 、被膜抵抗 r_2 、材料自身の固有抵抗 r_3 の和として以下のように現される。

$$r = r_1 + r_2 + r_3 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 r_1, r_2 はそれぞれ次式で現わされる。

$$r_1 = \lambda_1/4a + \lambda_2/4a \dots\dots\dots (3)$$

$$r_2 = \rho/\pi a^2 \dots\dots\dots (4)$$

スリップリングの場合には、材料自身の固有抵抗 r_3 は他の抵抗に比べて一般に小さい。したがって、固有抵抗を無視すると、接触抵抗 r は次のようになる。

$$r = \lambda_1/4a + \lambda_2/4a + \rho/\pi a^2 \dots\dots\dots (5)$$

接触点の数を n とすれば、全体の接触抵抗 R は、

$$R = 1 / \sum_{i=1}^n (1/r_i) \dots\dots\dots (6)$$

であり、また真実接触面積 A_r は、

$$A_r = \pi \cdot \sum_{i=1}^n a_i^2 \dots\dots\dots (7)$$

となる。ただし、 a_i, r_i はそれぞれ i 番目の接触点における接触面の半径、接触抵抗である。もし接触点の大きさが

すべて等しいと仮定できれば、接触抵抗は(5)、(6)式から、

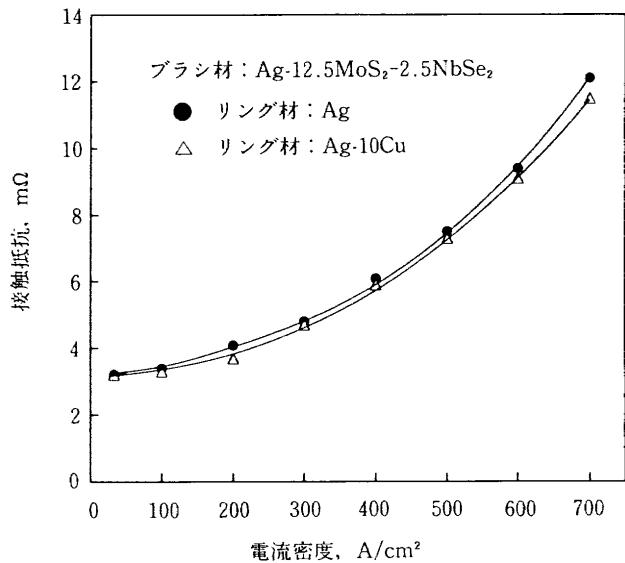
$$R = \lambda_1/4na + \lambda_2/4na + \rho/\pi na^2 \dots\dots\dots (8)$$

と現わせる。

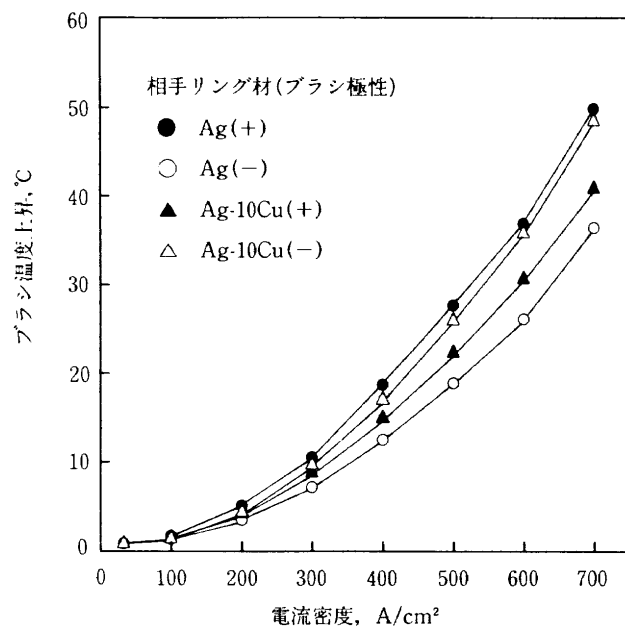
これらの式を基に、接触抵抗と押付け荷重、通電量の関係について考察してみよう。

まず、みかけの接触面積が同じ時に、押付け荷重、通電量を変化させた場合を考えよう。ブラシのリングへの押付け荷重を増やすと、真実接触点の半径が大きくなり、また接触点の数も増えると考えられる。この場合、(5)(6)式から絞り抵抗、被膜抵抗ともに減少するため接触抵抗が小さくなる。4-1節で、荷重を増やした場合に接触抵抗が小さくなったのは、摺動面の真実接触点が大きくなり、また接触点の数も増えたためと推定される。Ag-7.5 MoS₂-7.5NbSe₂ブラシの場合は荷重を0.6Nから1Nに増やしたにも係わらず接触抵抗が増大したが、ブラシ材の摩耗やリング材表面の付着物のため接触状態が悪くなり、(5)式の被膜の固有抵抗 ρ が大きくなったためであろう。

一方、通電量を増やすと絞り抵抗が増大することがまず第一に考えられる。図A-1、A-2は、静止時の接触抵抗及びブラシ材の温度上昇が通電量によってどのように変化するかを実測した結果を示したものである。通電密度が200A/cm²を越えるあたりから接触抵抗、ブラシ材の温度ともに急激に増加する傾向がみられる。電流密度が大きくなると接触点が局部的に加熱されるために(5)式の抵抗率 λ_1, λ_2 が増大し、絞り抵抗が大きくなる。このため接触点ではさらに加熱が促進され、より一層絞り抵抗が大きくなる。ジュール熱の影響で温度が上昇し、固



図A-1 静止状態における接触抵抗と電流密度の関係
押付け荷重: 0.9N



図A-2 静止状態におけるブラシ材の温度上昇と電流密度の関係
押付け荷重：0.9N

有抵抗 r_3 が増加することも接触抵抗の増大に寄与しているであろう。また、摺動時には電氣的な摩耗が増加することにより接触状態が悪化し被膜抵抗(5)式の ρ も増加すると思われる。4-2節で、通電量を増やすと接触抵抗が大きくなったのは、このような理由によるものと考えられる。

次に、みかけの接触面積は異なるが、接触面圧、通電密度が同じ場合について考えよう。真実接触面積は、(1)式に示したようにみかけの接触面積が異なっても押付け荷重、材料の硬さで決まる。このため、摺動面の表面状態が均一であれば、面圧が等しい場合には単位面積あたりの真実接触点の数や大きさの分布も同じになると考えられる。すなわち、摺動面の接触状態は、荷重そのものではなく接触面圧によって決まると考えられる。

一方、表面被膜の状態や接触点の大きさ・分布が同一であり、個々の接触点を通る電流量が同じ、すなわち電流密度が同じであれば、単位面積あたりの接触抵抗は同じになる。すなわち、接触状態が同じであれば、単位面積あたりの接触抵抗は通電量そのものではなく通電密度

によって決まると考えられる。

以上の考察は、接触状態が同じであれば、単位面積あたりの接触抵抗は接触面圧と電流密度によって決まり、従って全体の接触抵抗はみかけの接触面積に反比例することを示唆している。しかし、4-2節の電流密度が $83\text{A}/\text{cm}^2$ 、接触面圧 $8.3\text{N}/\text{cm}^2$ の場合と、4-3節の $100\text{A}/\text{cm}^2$ 、 $10\text{N}/\text{cm}^2$ の場合の接触抵抗は、前者の方が摺動面の面積が8倍と大きいにもかかわらず、ほぼ同じであった。みかけの接触面積が大きい場合には、摺動面全体が均一の状態では接触していなかったため実質の電流密度が高くなり接触抵抗が増大したためと思われる。このことは、部分的に接触すれば接触面圧が高くなるため接触抵抗は減少するが、この効果よりも電流密度が高くなり絞り抵抗が増加した影響の方が強いことを示唆している。

最後に、以上の検討を踏まえて、大電流通電を達成するための条件を検討してみよう。大電流通電下では必然的に電流密度が高くなるため、絞り抵抗が支配的になると考えられる。(5)式から明らかなように、絞り抵抗は個々の真実接触面積が大きく接触点の数が少ない方がはるかに小さくなる(例えば、 $a=1, n=20$ の場合と $a=2, n=5$ の場合では真実接触面積が同じであり被膜抵抗は等しくなるが、絞り抵抗は前者は後者の2倍になる)。すなわち、絞り抵抗を低減するためには、個々の接触点はできるだけ大きい方がよい。このためには、摺動面はなめらかで十分なじんだ状態であればならず、摩耗によって摺動面が荒れたり、摺動面間に摩耗粉や厚い付着物が存在するのは極めて悪影響を及ぼす。摩耗を防ぐ必要最小限のきわめて薄い潤滑膜が摺動面に存在するのが理想的である。

一度、接触抵抗が増大してしまうとジュール熱による接触面温度の上昇により、摩耗しやすくなる、接触面に被膜が形成されやすくなる、固有抵抗が増加するなど、さらに接触抵抗が増加するという悪循環に陥ると推測される。接触抵抗を小さくするためには接触面圧は高い方がよいが、しかし摩耗が生じれば摺動面が荒れて、かえって接触抵抗が増大してしまうため、あまり高過ぎてもいけない。薄い潤滑膜が摺動面に形成される理想的な状態を、なじみ運転の間に達成できる摺動材を使用することが最も重要なポイントであろう。

航空宇宙技術研究所報告1315号

平成 8 年 11 月 発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町 7 - 44 - 1
電話 (0 4 2 2) 4 7 - 5 9 1 1 〒182
印刷所 株式会社 実業公報社
東京都千代田区九段北 1 - 7 - 8

© 禁無断複写転載

本書（誌）からの複写、転載を希望される場合は、企画室
調査普及係にご連絡ください。

Printed in Japan

This document is provided by JAXA.