

燃料噴射弁では孔食とみられる陥没やえぐれた箇所が観察されたが、円周方向の加工痕はほとんど消滅していた。一方、通常燃料で使用した燃料噴射弁では加工痕は残存していたが、その表面を拡大すると酸化が進行していたことが分かる。さらに、新造品では円周方向の加工痕に加えて、乳化燃料で運転した場合に見られたものとよく似たえぐれた箇所が観察された。いずれも、SEM観察用に切断した面の付近にあったことから、このえぐれは切断時に発生したものと推定される。

さらに、弁座の表面を観察した。図50にそのSEM写真を示す。使用済み燃料噴射弁の弁座の上半分（いわゆる黒あたり）では、表面は比較的平滑であるものの、ところどころに孔食が観察された。一方、下半分（いわゆる白あたり）ではほぼ一面が酸化生成物で覆われていた。また、加工痕は上、下側ともほとんど残存していなかった。こうした状況は、乳化燃料及び通常燃料で使用したいずれの燃料噴射弁においてもほぼ同様であった。これに対して、新造品の場合は、上、下側とも加工痕が観察された。使用済み燃料噴射弁の場合は、上側にはニードル弁が衝突する際の衝撃によりエロージョンが発生し、そこから腐食が広がっていくものと推測される。また、下側では全面的に酸化が進み、酸化生成物で覆われると考えられる。

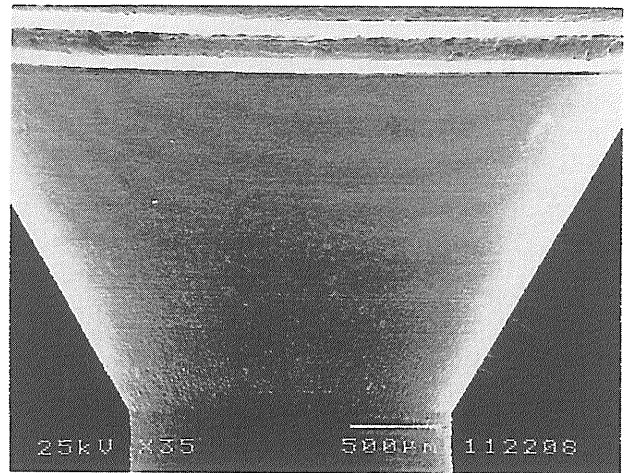
次に、弁座と衝突するニードル弁の先端部（あたり面）を観察した。図51にそのSEM写真を示す。目視観察では、使用済みのニードル弁は、いずれも先端部（先端から約1.2mmの範囲）がカーボン状のものがこびりついたように黒色を呈していた。SEMにより、この部分が酸化され、さらにカーボンが付着していることが観察された。一方、それよりも後方の部分は比較的平滑であるが、ところどころに燃料中に残留していた改質触媒粒子と見られる粒子がめり込むように付着していた。この部分は弁座に高速で衝突するため、衝突により粒子がニードル弁上にめり込むと同時に、弁座上にエロージョンが発生するものと推測される。

最後に、送油孔及び油溜めを観察した。図52にそのSEM写真を示す。使用済みの場合は、いずれも油溜めに近いところほど送油孔内側の酸化が進行しており、油溜め内面も酸化していることが観察された。これに対して、新造品の場合は加工痕が観察されたのみであった。

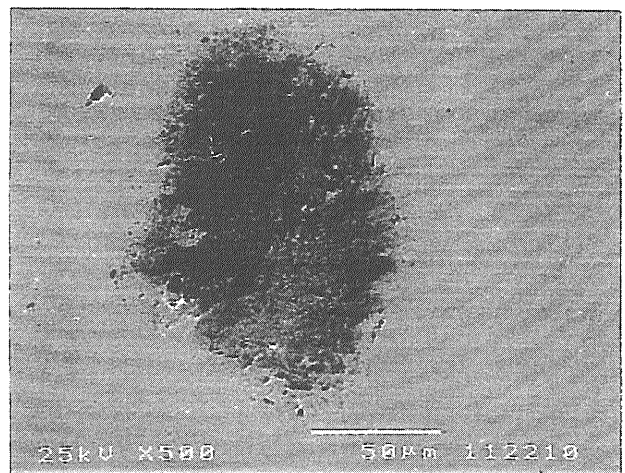
以上のように、乳化燃料の使用においては、噴射孔内部の腐食等については留意する必要があるものの、それ以外の部位については通常燃料を使用した場合と比較して、顕著な腐食及び摩耗は観察されなかった。

7.2.1.2. 燃料噴射ポンプ

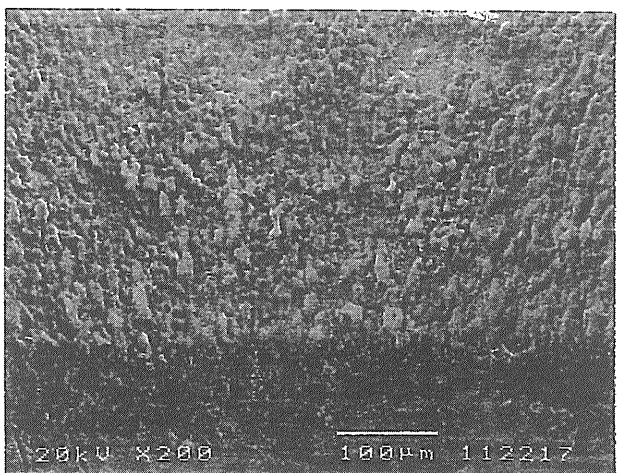
燃料噴射ポンプの外観及び検査部位を図53に示す。目視検査では、乳化燃料で運転したものは、通常燃料



(a) 乳化燃料使用。全体。

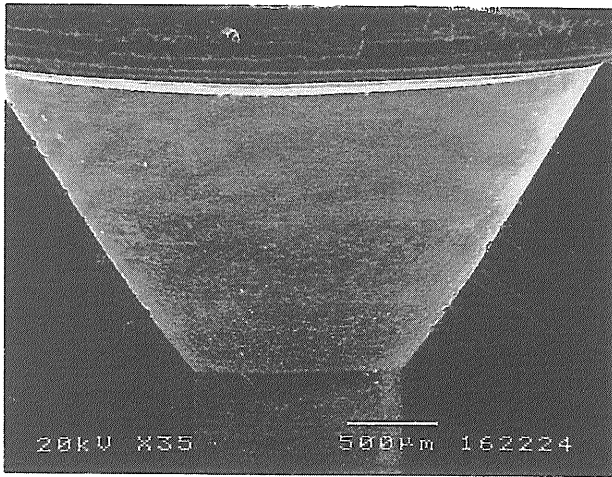


(b) 同上。上端部の孔食部拡大。

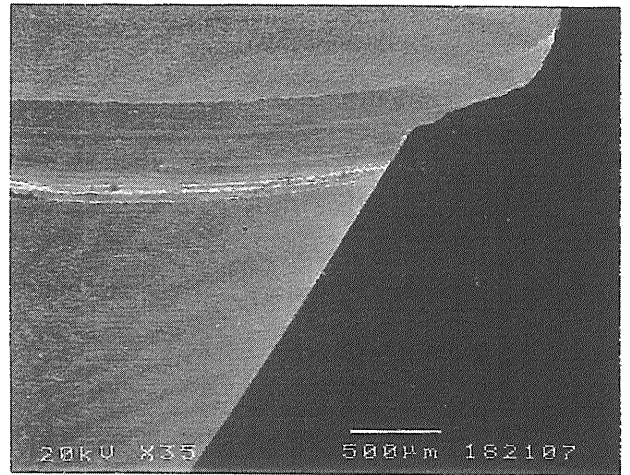


(c) 同上。下端部拡大（酸化物に覆われている）。

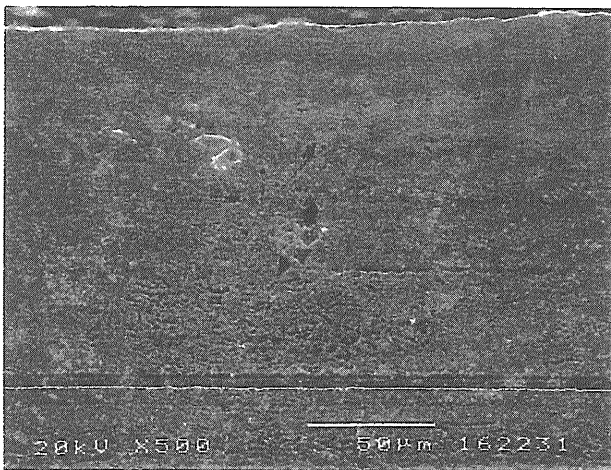
図50 燃料噴射弁弁座表面SEM写真



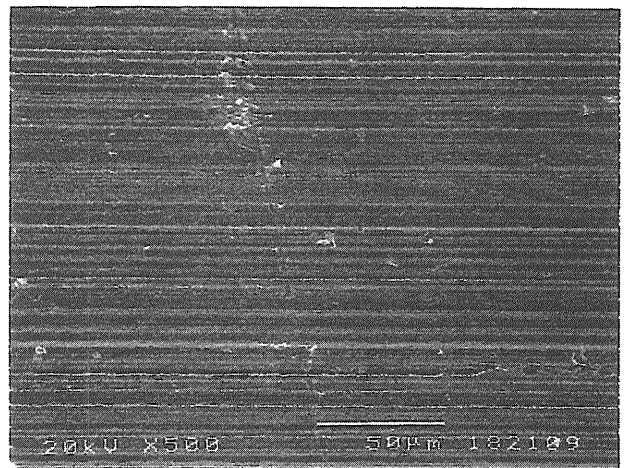
(d) 通常燃料使用。全体。



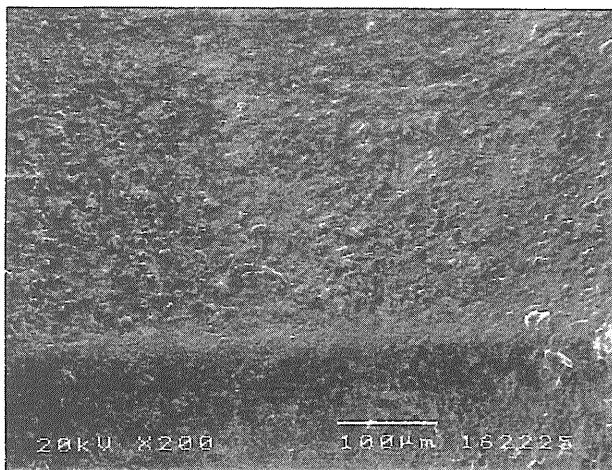
(g) 新造品。全体。



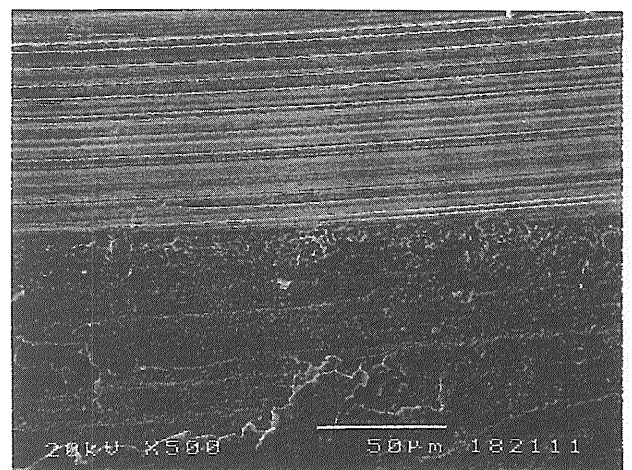
(e) 同上。上端部拡大。



(h) 同上。上端部拡大。

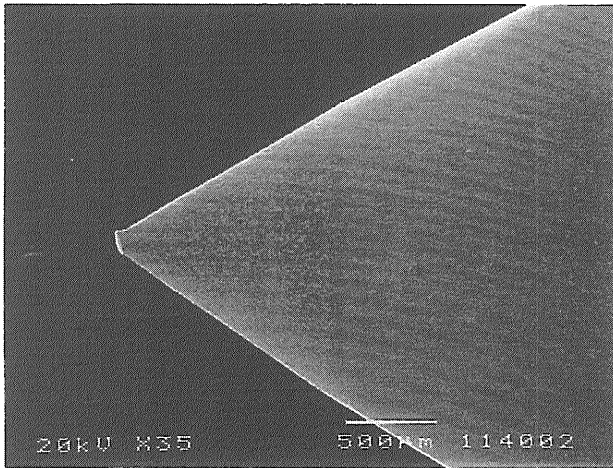


(f) 同上。下端部拡大。

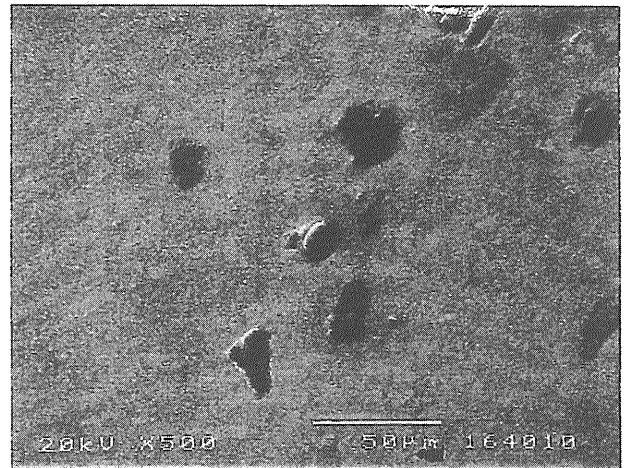


(i) 同上。下端部拡大。

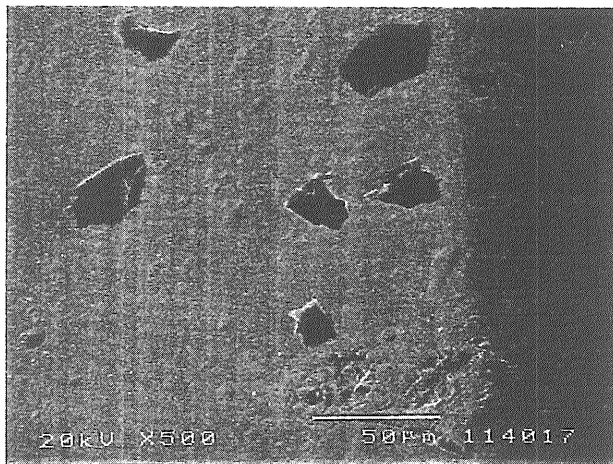
図50 燃料噴射弁弁座表面SEM写真



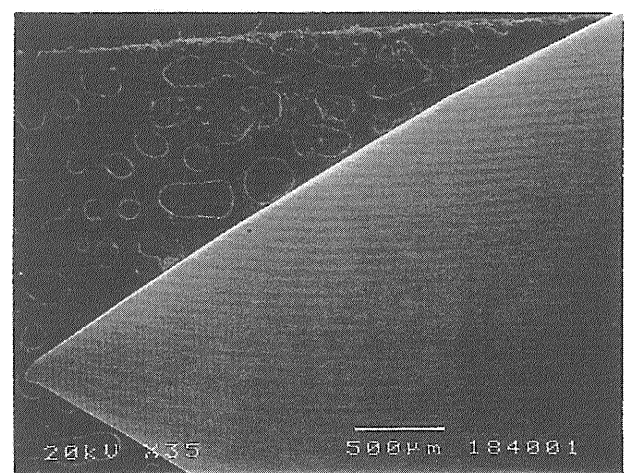
(a) 乳化燃料使用。先端部全体。



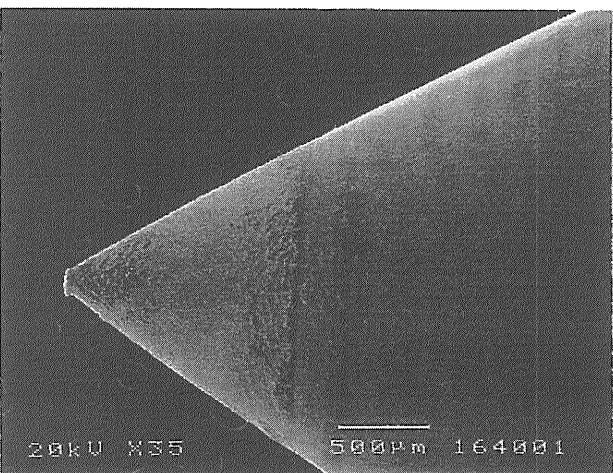
(d) 通常燃料使用。拡大 (粒子が付着しているの見える)。



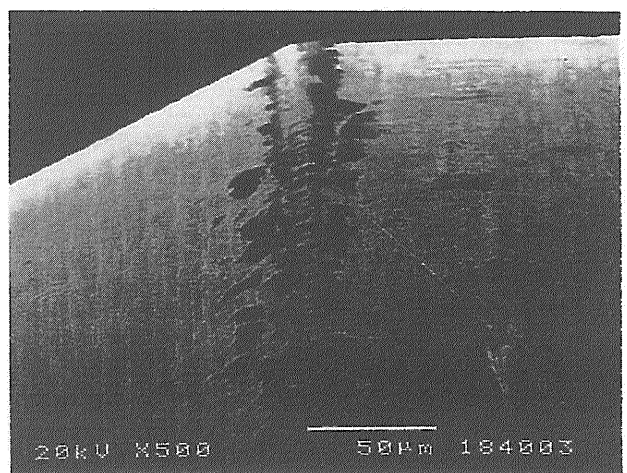
(b) 同上。拡大 (粒子が付着しているの見える)。



(e) 新造品。先端部全体。

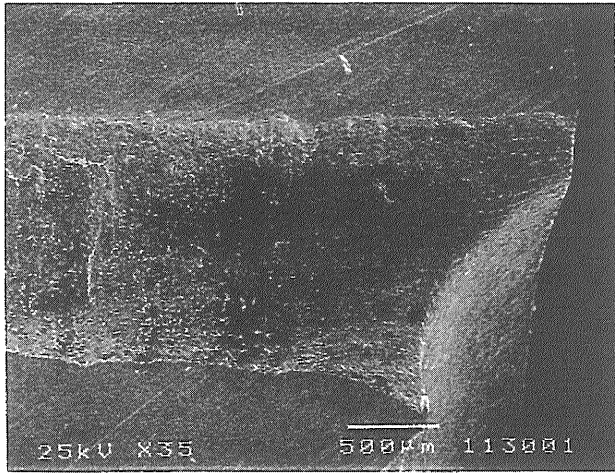


(c) 通常燃料使用。先端部全体。

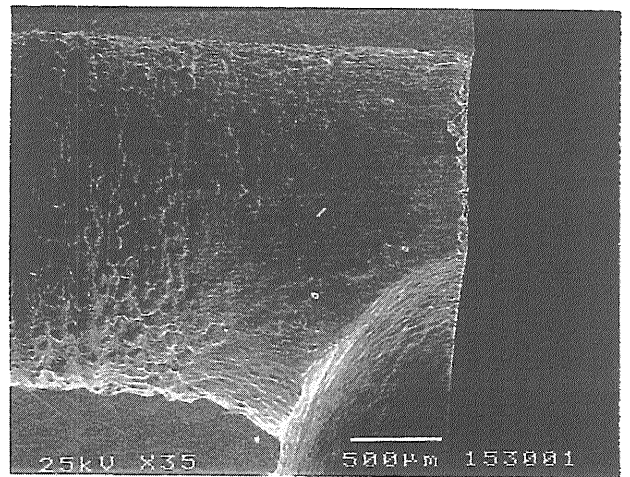


(f) 同上。拡大 (グリスが付着しているの見える)。

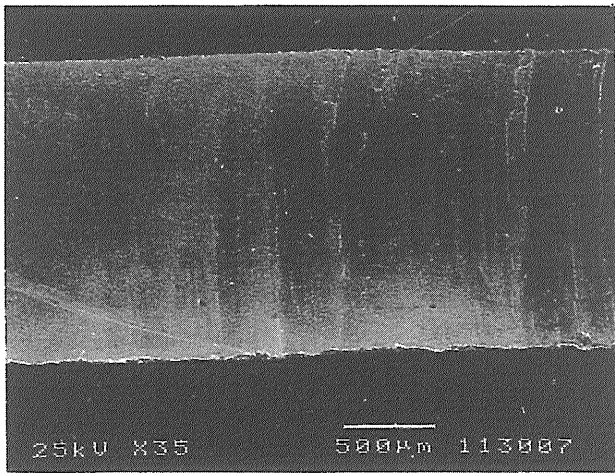
図51 燃料噴射弁ニードル弁表面SEM写真



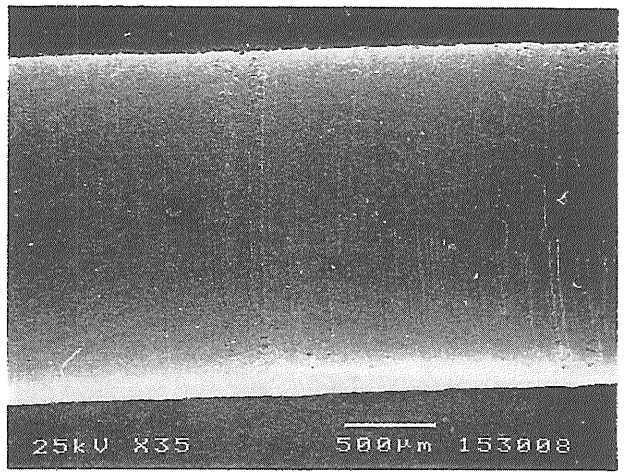
(a) 乳化燃料使用。送油孔 (油溜めに近いところ)。



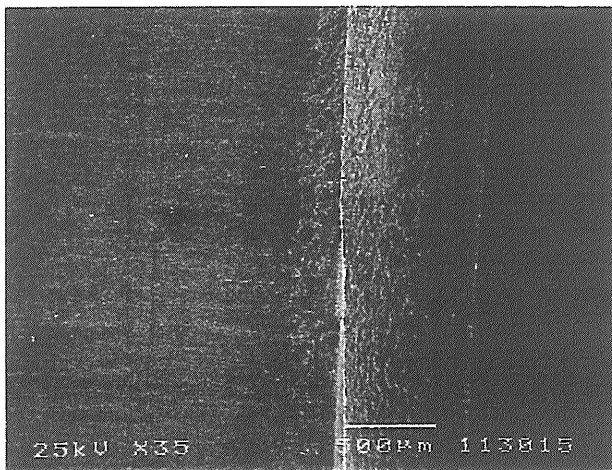
(d) 通常燃料使用。送油孔 (油溜めに近いところ)。



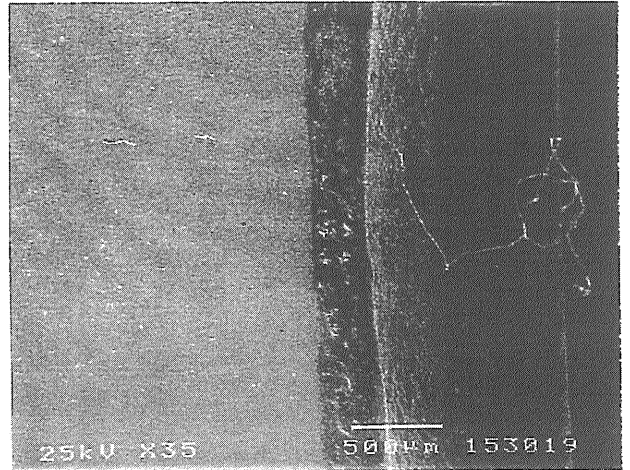
(b) 同上。送油孔 (油溜めから離れたところ)。



(e) 同上。送油孔 (油溜めから離れたところ)。

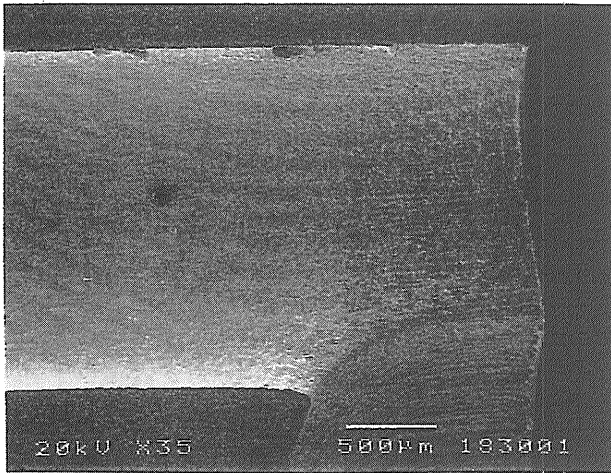


(c) 同上。油溜め。

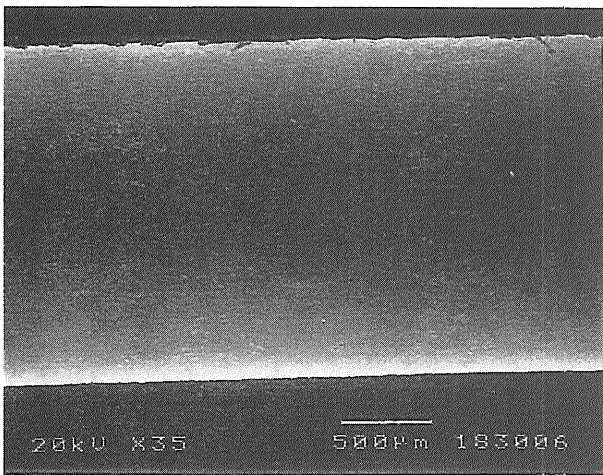


(f) 同上。油溜め。

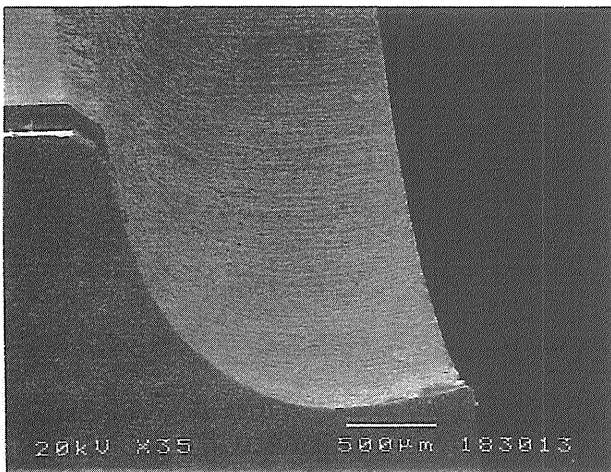
図52 燃料噴射弁送油孔内部および油溜めSEM写真



(g) 新造品。送油孔（油溜めに近いところ）。

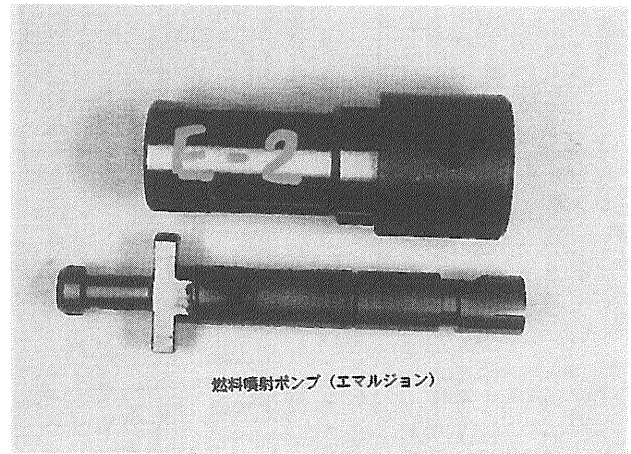


(h) 同上。送油孔（油溜めから離れたところ）。



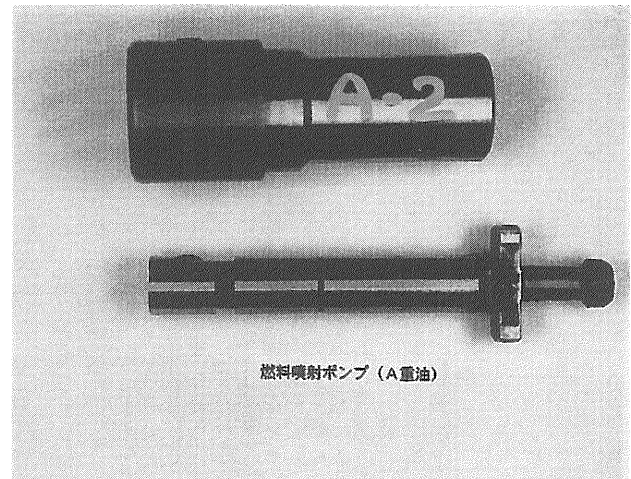
(i) 同上。油溜め。

図52 燃料噴射弁送油孔内部および油溜めSEM写真 (328)



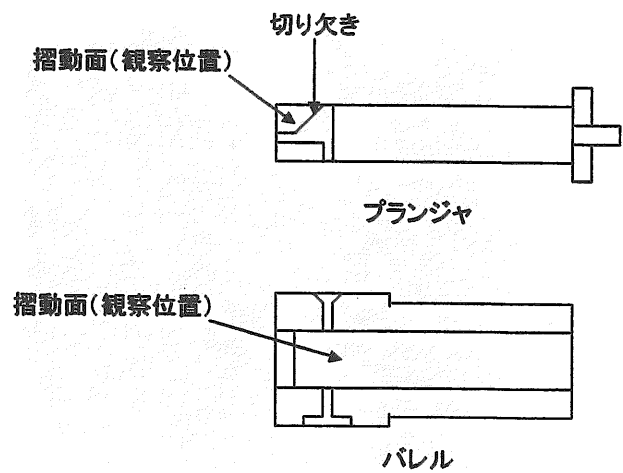
燃料噴射ポンプ（エマルジョン）

(a) 乳化燃料を使用。



燃料噴射ポンプ（A重油）

(b) 通常燃料を使用。



(c) 燃料噴射ポンプの検査部位。

図53 燃料噴射ポンプの外観及び検査部位

で運転したものと及び新造品と比較してプランジャ及びバレルの摺動面の光沢が鈍いことが観察された。

まず、図54にプランジャのSEM写真を示す。乳化燃料を使用したものでは、摺動面上に摺動方向に平行な痕が観察された。これに対し、通常燃料を使用したものでは、加工痕と見られる摺動方向に垂直な痕が観察され、新造品と類似した外観を呈した。

次に、図55にバレルのSEM写真を示す。乳化燃料を使用したものでは、摺動面上に摺動方向に平行な痕が観察された。これに対し、通常燃料を使用したものでは、加工痕と見られる斜めの痕が観察され、新造品と類似した外観を呈した。

以上の結果から、水の添加により燃料の潤滑性が低下し、摺動面における摩耗が進行して加工痕が消滅する一方で、摺動方向に平行な痕が発生し、光沢が鈍くなるのではないかと考えられる。しかしながら、ポンプの噴射特性等については明白な性能低下等は見られておらず、実用上の支障はないと考えられる。

7.2.1.3. 燃料パイプ

燃料パイプの外観及び検査部位を図56に示す。検査は、口部、曲管部及び直管部において行った。目視検査では、内側に黒色の酸化皮膜が発生していることが観察された。

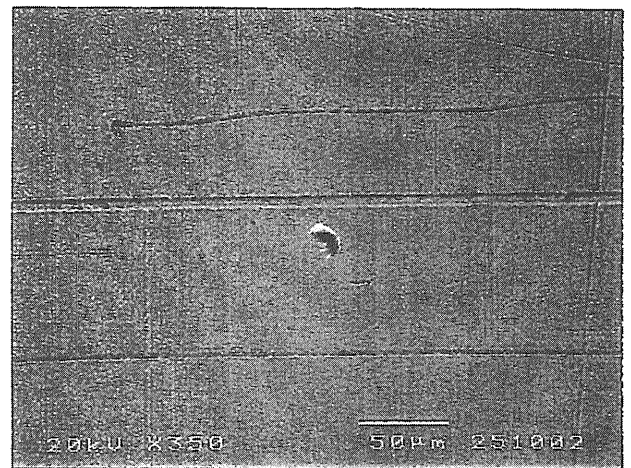
次に、図57に燃料パイプの内部のSEM写真を示す。いずれの部位においても、燃料の流れの方向に沿って酸化皮膜の流線模様が観察された。口部付近には球形の塊が見られたが、これは溶接時に飛散した鉄が球形に固まって付着したものと見られる。燃料パイプについては、過去に油水分離が報告された例があり、また、キャビテーションによるエロージョンの可能性も懸念されていたが、今回の検査においては、このような事例は観察されなかった。

7.2.1.4. 部品検査のまとめ

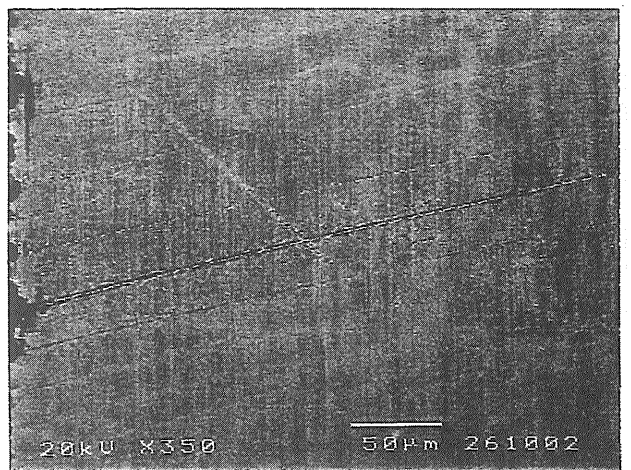
乳化燃料の使用が機関部品に与える影響を検討するため、燃料が直接接触する燃料噴射弁、燃料噴射ポンプ及び燃料パイプについて目視及びSEMによる観察を行った。この結果、燃料噴射弁については、当初懸念された噴射孔の孔口部の拡張は見られなかったものの、噴射孔内部の腐食、摩耗等は通常燃料を使用した場合と比較してやや進行しており、孔食と見られる陥没も観察された。一方、弁座、ニードル弁、送油孔及び油溜めについては、通常燃料を使用した場合と比較して、顕著な相違は見られなかった。また、燃料噴射ポンプ及び燃料パイプについても顕著な腐食、摩耗等の進行は見られなかった。このように、一部の部品については再検討の必要性が指摘されるものの、それ以外の部品については乳化燃料の使用は支障はないと考えられる。



(a) 乳化燃料使用。

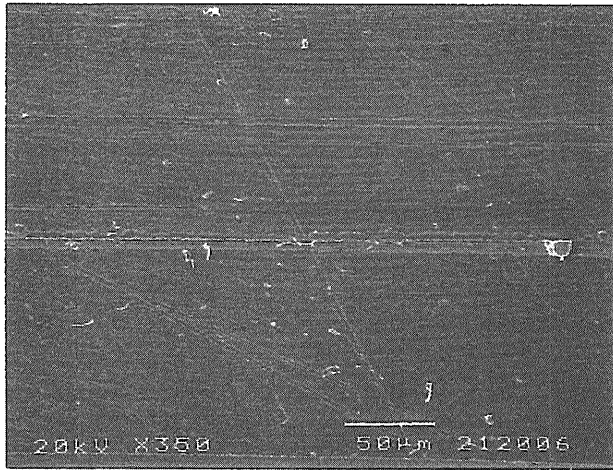


(b) 通常燃料使用。

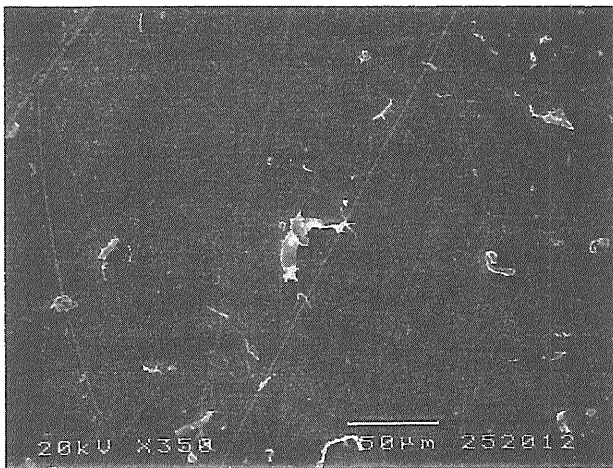


(c) 新造品。

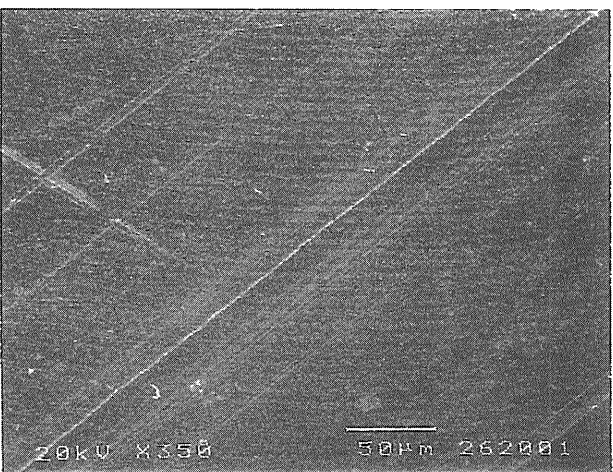
図54 燃料噴射ポンププランジャ表面SEM写真



(a) 乳化燃料使用

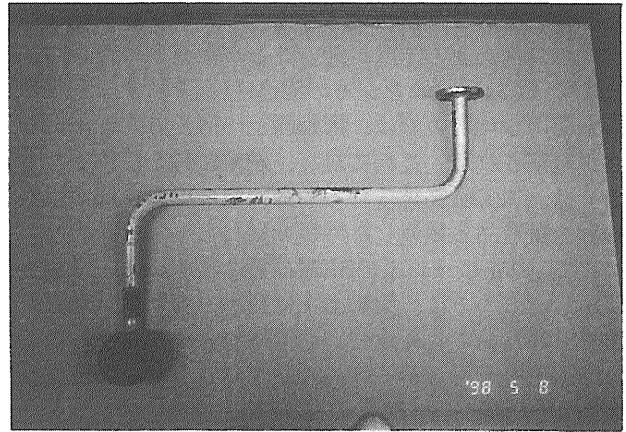


(b) 通常燃料使用

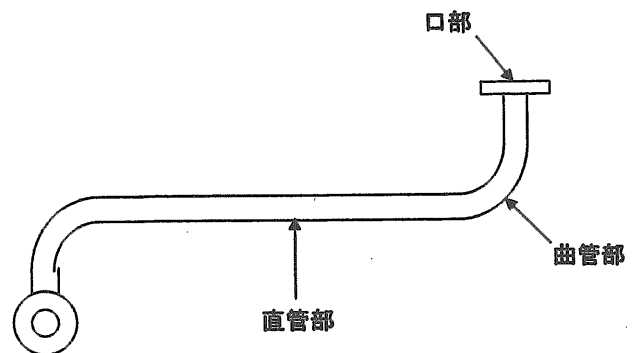


(c) 新造品

図55 燃料噴射ポンプパレル内部SEM写真



(a) 外観



(b) 燃料パイプの検査部位

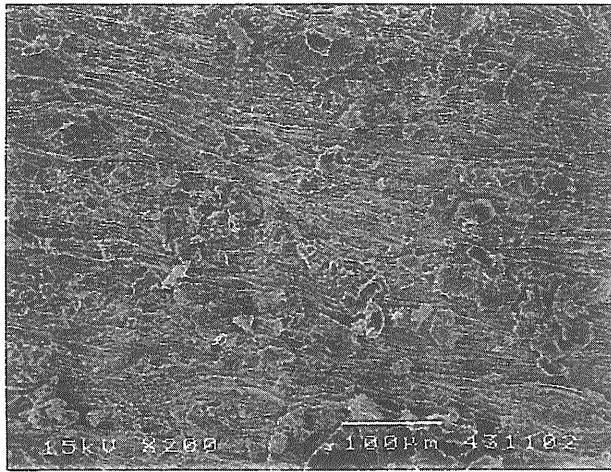
図56 燃料パイプの外観及び検査部位

7.2.2. 付着物検査

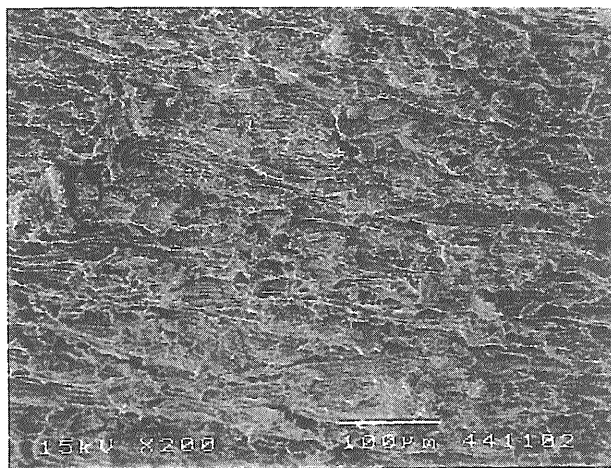
7.2.2.1. ピストンヘッド

乳化燃料を使用した結果、ピストンヘッドの頂部に通常とは異なる付着物が固着した。この付着物を削りとしてサンプリングし、XRD及びEPMAにより分析した。付着物の写真を図58に示す。通常燃料を使用した場合の付着物は黒色粒状のもののみであったが、乳化燃料を使用したときにはこの下に灰色灰状の外観を呈する付着物が堆積した。

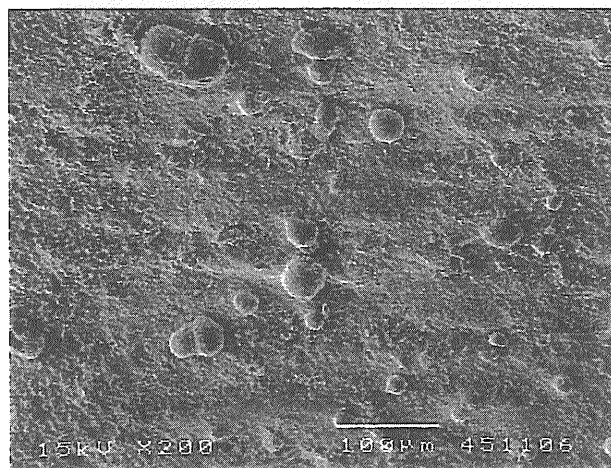
XRD及びEPMAの結果を表12に示す。XRDにより、灰色付着物の場合は、試料の結晶性は比較的高く、結晶質の主成分として硫酸カルシウム (CaSO_4) が検出された。一方、黒色付着物の場合は、試料の結晶性は比較的低いが、結晶質の主成分としてやはり硫酸カルシウムが検出された。さらに、EPMAにより、灰色付着物の場合は、主要な元素として硫黄、酸素及び炭素、微量元素としてカルシウム、ケイ素、バナジウム、亜鉛、カリウム及びナトリウムが検出された。一方、黒色付着物の場合は、主要な元素として、炭素、酸素及びカルシウムが、微量元素として、硫黄及び亜鉛が検



(a) 直管部

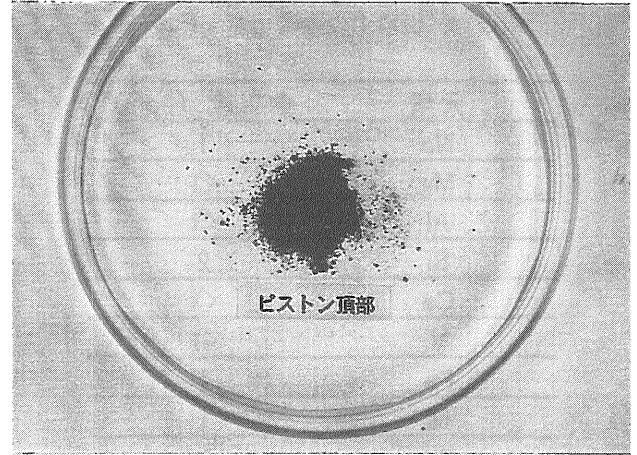


(b) 曲管部

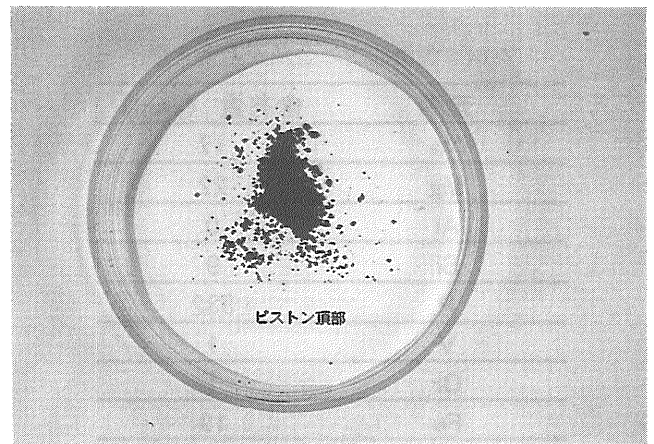


(c) 口部付近

図57 燃料パイプ内部SEM写真



(a) 乳化燃料使用



(b) 通常燃料使用

図58 ピストンヘッド付着物外観

表12 ピストンヘッド付着物の分析結果

外観	乳化燃料	通常燃料	
	灰色灰状	黒色粒状	
XRD	結晶性	高い	低い
	結晶質の主成分	CaSO ₄	CaSO ₄
	結晶質の副成分	-	-
EPMA	主要元素*	S, O, C	C, O, Ca
	少量元素**	Ca, Si, V, Zn, K, Na	S, Zn

* : 10%以上含まれるもの

** : 1%以上含まれるもの

出された。以上の結果から、いずれの試料も硫酸カルシウム及び炭素を主成分とすることが分かった。

このうち、炭素の主な起源としては燃料及び潤滑油、硫黄では燃料油、金属元素の場合は燃料、潤滑油、雑用水及び部材が考えられる。燃料及び潤滑油中の金属元素の分析値を表13及び14に示す。燃料については、給油の度毎に詳細な値は異なるが、A重油の品質は比

表13 燃料中の金属元素含有量

元素	含有量 (ppm)
Na	1
Mg	<1
Al	<1
Si	2
Ca	<1
V	<1
Fe	1
Ni	1
Zn	<1
Pb	<1

表14 潤滑油中の金属元素含有量

元素	含有量 (ppm)
Na	17
Mg	22
Al	0
Si	9
P	332
V	1
Cr	1
Fe	19
Ni	0
Cu	1
Zn	422
Mo	0
Sn	0
Ba	4
Pb	0

較的一定しているため、成分の傾向は把握できるものと考えられる。この表から、カルシウムの起源は主として潤滑油であるが、乳化燃料を製造するために用いた雑用水からの供給もありうると考えられる。さらに、亜鉛は主として潤滑油、ケイ素等の微量元素は雑用水が起源と考えられる。また、ケイ素、カリウム及びナトリウムについてはXRDでは関連するピークが見られなかったため、ガラス状となっていた可能性が指摘される。以上から、付着物中の主な成分の生成プロセスを検討すると、炭素は燃焼火炎中の未燃炭素及び高温にさらされた潤滑油が熱分解して生成した無機炭素が堆積したものと、また、硫酸カルシウムは、潤滑油もしくは雑用水中のカルシウムと燃焼により生成した

硫酸化合物が反応して生成したものと考えられる。

しかし、乳化燃料を使用した場合は比較的炭素の量が少なく、色も灰色で結晶性が高いのに対して、通常燃料を使用した場合は比較的炭素の量が多く、色も黒色で結晶性が低い。添加した水は陸上から水道水として供給されたものであり、それに含まれる金属塩類の濃度が非常に高いとは考えにくい。ため、乳化燃料の使用により燃焼状態が変化し、付着物の性状及び組成に影響したのではないかと考えられる。

さらに、船内において付着物を除去した後のピストンヘッド頂部表面の目視観察を行ったところ、表面に部材（アルミニウム合金）がわずかに溶けた痕跡と見られるしわが観察された。この写真を図59に示す。さらに6個のピストンヘッドのうち1個（5番シリンダ）は、頂部の辺縁部の一部に高温によると見られる溶損が観察された。

このため、乳化燃料の使用により燃焼火炎が伸張し、ピストンヘッドの頂部にまで到達し、溶痕等が発生したと考えられる。燃料に水を添加すると着火遅れが増大し、また燃焼期間が延長されるため、火炎が伸張されることが報告されており、この報告からも上記の考察は支持される。また、火炎に直接さらされることにより潤滑油が燃焼し、生成した硫酸カルシウムがピストンヘッド上に堆積したと考えられる。頂部のしわ状の溶痕はただちに問題とはならないが、辺縁部の溶損については運航中に5番シリンダの不調が発生しており、ピストンヘッドの形状及び材質の再検討が成されるべきと考えられる。

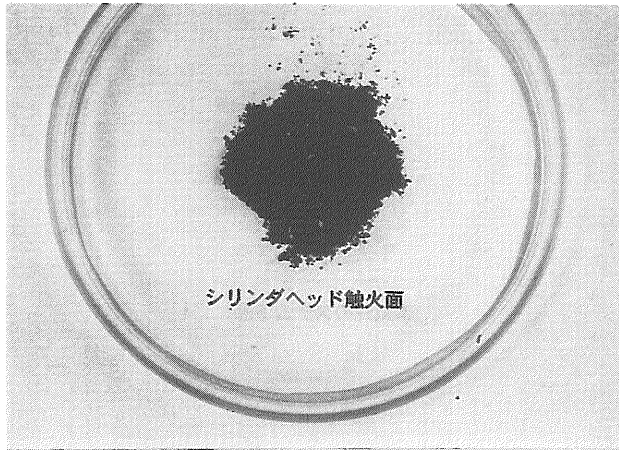


図59 ピストンヘッド外観

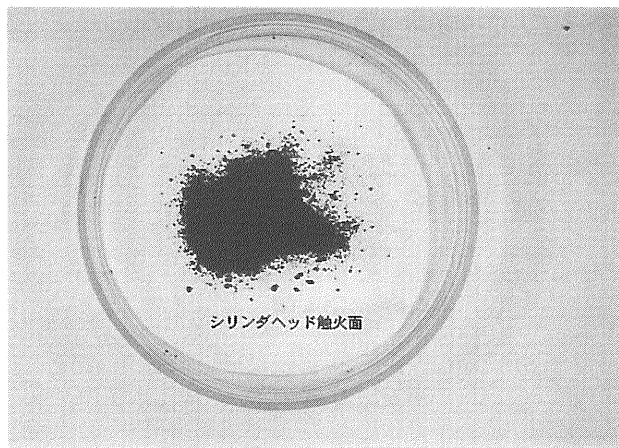
マーカーで囲んだところにしわ及び溶損が観察された

7.2.2.2 シリンダヘッド触火面

シリンダヘッド触火面の付着物の写真を図60に示す。乳化燃料を使用した場合、灰色灰状の外観を呈した。これに対し、通常燃料を使用した場合の付着物は黒色粒状であった。



(a) 乳化燃料使用



(b) 通常燃料使用

図60 シリンダヘッド触火面付着物外観

XRD及びEPMAの結果を表15に示す。XRDにより、乳化燃料を使用した場合、試料の結晶性は比較的高く、結晶質の主成分として硫酸カルシウムが検出された。一方、通常燃料を使用した場合は、試料の結晶性は比較的低く、結晶質の主成分として硫酸カルシウムが、副成分として亜硫酸カルシウム四水和物 ($\text{CaSO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 及び硫酸鉄(II)一水和物 ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

表15 シリンダヘッド触火面付着物の分析結果

	乳化燃料	通常燃料	
外観	灰色灰状	黒色粒状	
XRD	結晶性	高い	低い
	結晶質の主成分	CaSO_4	CaSO_4
	結晶質の副成分	-	$\text{CaSO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
EPMA	主要元素*	S, O, Ca	C, O
	少量元素**	C, Si, Zn, Fe, K, Na	S, Ca

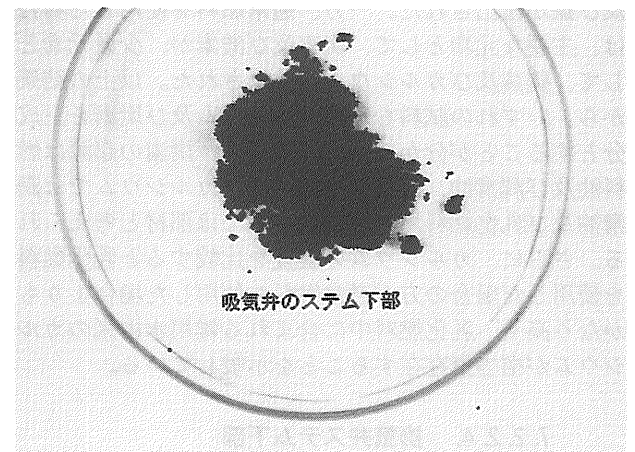
* : 10%以上含まれるもの
** : 1%以上含まれるもの

が検出された。さらに、EPMAにより、乳化燃料を使用した場合は、主要な元素として硫黄、酸素及びカルシウムが、少量元素として炭素、ケイ素、亜鉛、鉄、カリウム及びナトリウムが検出された。一方、通常燃料を使用した場合は、主要な元素として、炭素及び酸素が、少量元素として、硫黄及びカルシウムが検出された。以上の結果から、ピストンヘッドの場合とほぼ同様に、いずれの試料も硫酸カルシウム及び炭素を主成分とすることが分かった。元素の起源もほぼ同様であろうが、鉄は部材が起源と考えられる。燃料の相違による付着物の性状及び成分比率の相違についてもピストンヘッドの場合と同様に考えられる。

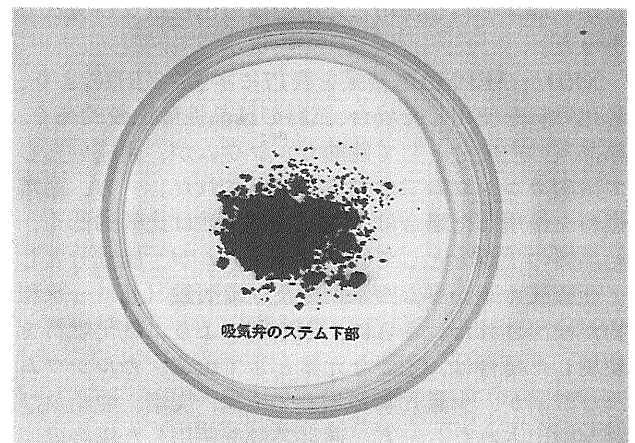
7.2.2.3. 吸気弁ステム下部

吸気弁ステム下部の付着物の写真を図61に示す。いずれの燃料を使用した場合も黒色粒状の外観を呈し、硫黄臭を有した。

XRD及びEPMAの結果を表16に示す。XRDにより、



(a) 乳化燃料使用



(b) 通常燃料使用

図61 吸気弁ステム下部付着物外観