

1 はじめに

広く使われている「焼付き」という現象の概念を正確に述べることは難しい。というのは、焼付きは色々な場面で色々な形で出現するので、人によって捉え方が様々であるからである。

日本語では「焼付き」が最もポピュラーに使われており、何でも焼付きで通してしまうが、類似語としては「かじり」、「凝着」、「溶着」、「融着」などがあり、それぞれ若干ニュアンスが異なる。ところが英語でも事態は似ており、まず Scuffing (イギリスで多く使われる)、Scoring (アメリカで多く使われる) という用語が、「潤滑が不良となって局部的に融着した表面が引きはがされて疵をつける現象」という意味で使われている。次に、激しい焼付きとして、Galling と Seizure があり、さらに、比較的微細な移着現象に対して、Pick-up、Transfer、また凝着、粘着という意味もある Adhesion なる用語もあるが、これらが厳密に使い分けられているとはいえない。

このように国内外で多くの用語が混同して用いられているのが実状であるが、現象的にも軸受けからロールまで種々の材料間の、色々な場合に様々な形態があること、そしてそれらは主観的、定性的にしか捉えようがないことが「焼付き」があいまいなまま容認されている原因と思われる。

ここでは、金属材料の摩擦において頻繁に出現するこの焼付きについて、現在何がわかっているのか、そしてその防止には何が効果的なのかを浅学を顧みず解説し、この混乱を少しでも和らげたいというのが筆者の思いである。

2 焼付きとは何か

焼付きの「焼」は温度上昇を意味する。すなわち、摩擦中に何らかの原因で摩擦面温度が上昇して摩擦面の一部が「くっつく」というのが語源であろう。そしてこれは摩耗のように徐々にではなくカストロフィ(悲劇的な結末)として突然出現するのが特徴である。いかえると、正常な摩擦状態がある時突然変調をきたして異常となり、摩擦を中止せざるを得なくなるのが焼付きの発生なのである¹⁾。

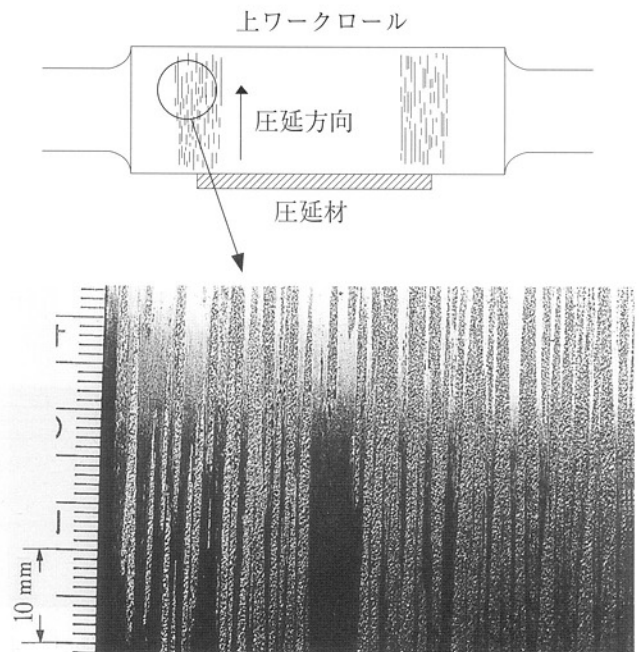
焼付きの規模は大小様々であるが、目に見えないまま成長しないものは恐らく無害であろうから、判定は通常肉眼に頼る。そしてミクロに調べると、一方の材料が

他方の表面にくっ付いている。これが焼付きと決めつける場合の唯一の証拠となる。なぜくっつくのかというのは素直に湧いてくる疑問であるので、この点については次章で述べる。

焼付きを大きく分けると、軸受け、歯車、ピストンなどの潤滑油の助けを借りて定常的に動いている機械で生じるものと、圧延、成形などの比較的大きな面圧を受ける加工工具に生じて製品表面に次々に疵をつけるものがある。前者は主に潤滑油の問題であろうから、ここでは金属材料屋にとって興味がある後者に焦点を絞ることにする。しかしそれでもなお、熱間と冷間、鉄鋼と非鉄、ロールとガイドシューなどの違いにより様々な焼付きが出現するのであるが…。

加工における焼付きについては文献²⁾の特集号を参照されたい。

焼付きの形態の一例として、ステンレス鋼の熱間圧延においてロールに生じたものを図-1³⁾に示す。ロール両端近くで円周方向に筋状の肌荒れが断続しているのがわかる。焼付きのないロール中央部に比べて、表面の凹凸が大きく、板に転写して疵を付けるので、ロールは直ちに交換される。



Y製鉄所熱間圧延機仕上げ3号スタンドでステンレス鋼930ton圧延後の高クロム鋳鉄ロール

図-1 圧延ロールの焼付きの例

図-2³⁾はこの焼付き部の断面であるが、E P M Aによるとロール表面に圧延材であるステンレス鋼の一部が移着していることが確認できる。その厚さは数10 μ mで、長さ数100 μ mの薄片であるが、これが積み重なり、つながり合って成長し、目に見える焼付きとなっている。加工における焼付きはこのように、発生と成長の2つのプロセスに分けられ、焼付き物が層状構造をとることは以前から知られている⁴⁾。他の焼付きにおいても、同様な移着が認められるはずである。

3 物がくっ付くとはどういうことか

焼付きがいかに非学術的であいまいな用語であるかを知るために、物が付くという意味で学術的に整理された用語を復習してみよう。

3.1 接着

糊(のり)に始まる接着剤の種類は今や、接着剤コーナーで誰もが選択に迷うほどに多くなった。このように、これは接着剤という第三相を介して物と物をくっ付けるのであるが、学術的に立派に接着理論が確立され、日本接着協会のリードで、近年著しく進歩しつつある分野なのである⁵⁾。ちなみに、英語では Adhesion であるが、焼付きとは関係が薄い。

3.2 溶接

あらためて説明を要しないが、要するにある熱源を利用して接合部を溶かしてくっ付ける技術である。これも伝統ある日本溶接協会と溶接学会が斯界に君臨しており、溶接理論はほぼ完成している。

3.3 圧接

摩擦圧接ともいい、摩擦熱により接合部の温度を融点付近まで上昇させ、さらに材料を押しつけて変形させることにより接合させる技術で、焼付きに最も近い現象と考えられる。つまり、焼付きを逆手に利用しているともいえる。おもしろいことに、金属の組み合わせとして、溶接が不可能な異種金属同士でも接合が容易に可能である。表-1⁶⁾は金属材料の摩擦圧接の適用可能範囲を示す。圧接不能の組み合わせはもろい金属間化合物が生じる場合のみのものである。こちらも摩擦圧接協会が存在

表-1 金属材料の摩擦圧接適用範囲(ブレーキ法)

材料	78Ni20Al	78Ni20Al合金	黄銅	青銅	酸化Al ₂ O ₃	鋼鉄	コバルト	チタン	チタン合金	銅	銅合金	アルミニウム	アルミニウム合金	マグネシウム	マグネシウム合金	鉛	鉛合金	錫	錫合金	亜鉛	亜鉛合金	ニッケル	ニッケル合金	白金	白金合金	白金-コバルト	白金-チタン	白金-銅	白金-アルミニウム	白金-マグネシウム	白金-鉛	白金-錫	白金-亜鉛	白金-ニッケル	白金-白金合金		
78Ni20Al	■																																				
78Ni20Al合金		■																																			
黄銅			■																																		
青銅				■																																	
酸化Al ₂ O ₃					■																																
鋼鉄						■																															
コバルト							■																														
チタン								■																													
チタン合金									■																												
銅										■																											
銅合金											■																										
アルミニウム												■																									
アルミニウム合金													■																								
マグネシウム														■																							
マグネシウム合金															■																						
鉛																■																					
鉛合金																	■																				
錫																		■																			
錫合金																			■																		
亜鉛																					■																
亜鉛合金																						■															
ニッケル																																					
ニッケル合金																																					
白金																																					
白金合金																																					
白金-コバルト																																					
白金-チタン																																					
白金-銅																																					
白金-アルミニウム																																					
白金-マグネシウム																																					
白金-鉛																																					
白金-錫																																					
白金-亜鉛																																					
白金-ニッケル																																					
白金-白金合金																																					

する。

3.4 吸着(分子結合)

一般には、固体表面に気体、または液体が結合することをいうが、物理的吸着では弱いファン・デア・ワールス力が、化学的吸着では化学反応に伴う強い原子結合が結合の原因である。ファン・デア・ワールス力というのは、分子を取り巻く電子雲の偏りによって生じる双極子(両極に正負の電荷分布をもつ原子群)同士の電気的な引き合いである。物理的吸着力は弱いので、例えば加熱などにより容易に吸着分子の離脱が起こる。

3.5 固相接合

固体の状態で、主に原子拡散を利用して接合することをいい、上記の圧接も広い意味では固相接合に含まれるが、特に、大きな塑性変形を与えない場合には、拡散接合と呼ばれ、最近注目されている技術でもある⁷⁾。要するに、材料を非酸化性雰囲気炉中で融点以下の温度まで加熱して表面の吸着膜、酸化膜などを拡散により除去す

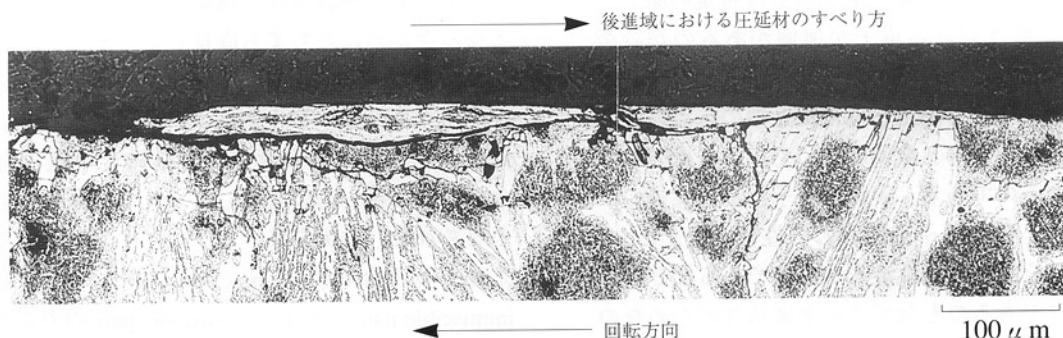


図-2 圧延ロール焼付き部の断面(光学顕微鏡像、ナイトールエッチ)

ることにより、金属同士の接合（金属結合）に至らしめるものである。この場合にも接合可能な異種金属の組み合わせは多く、表-2⁷⁾のようである。

表-2 異種金属拡散接合部の引張り強さ

Be	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Zr	Nb	Mo	Pd	Ta	W	Pt	U	
A					A												Be
	A	B	A		A		B	B									Al
		A															Si
			A	A	B		C	B		B	A	B	B	A	B		Ti
				A		B	A	A	C				B			B	Cr
					A												Fe
						A	A		C	C							Co
							A	A	C	A							Ni
								A									Cu
									A							B	Zr
										A	B						Nb
											A						Mo
																	Pd
																	Ta
																	W
																	Pt
																	U

A : 母材強さと同等
 B : 母材強さの50%以上
 C : 母材強さの50%以下

(異種金属の接合の強さは、強さの低い母材を基準)

3.6 原子結合

最後に、結合の本質を知るべく、原子の世界に立ち入ってみたいと思う。原子の結合方式は昔からイオン結合、共有結合、および金属結合に分類されていた。ところが最近では固体電子論の進歩により、原子の電子構造から統一的に論じられるようになった。つまり、どの原子も核の周囲に雲のごとく分布する電子雲を持っているが、その電子雲が接近したときの全エネルギーが最小になるように接合するというのである。この理論のもとになるポリアル定理から出発すると、コンピュータ計算によって結合状態はもちろん、結合した物質の性質さえも求められるのである⁸⁾。固体の性質は原子核ではなく、電子の状態が直接決めているということが出来る。最近、摩擦表面の原子の動きを計算により求めた例⁹⁾がいくつかあるが、これらはスーパーコンピュータの発展に負うところが極めて大きい。

この固体電子論によると金属結合は特異な結合として説明される。すなわち、金属の電子構造は特定の原子に属さない自由に動き回れる電子が何個かあるのが特徴で、この自由電子とそれ以外の電子との相互作用によって結合している。この自由電子は電気と熱の伝導の主役であるといわれているが、金属結合においても重要な役目を果たしているのである。金属は原子移動（拡散）が起こり易いとか、他の原子を固溶して性質を変えたり、また適度の硬さを有して塑性変形が可能であるなど、利用しやすい材料であるのも全てこの金属結合のためなのである。自由電子を持たない原子はより強固に結合するので加工が難しく、金属とは全く異なった性質を示す。

最近の研究に超高真空結合というのがある。これは 10^{-10} Torr. 以下の超高真空中で、吸着層を完全に除去した2表面を軽く接触させるとそのまま結合してしまう現象を応用するものである。コンタミネーション（汚れ）のない表面がいかに活性かということを示しているが、実用性のほどは不明である。

このように、学術的に整理された結合様式に対して焼付きはどのような機構によって結合しているのであろうか。不思議なことに、この質問に答えてくれる文献は見当たらないのでここに推測するしかない。恐らく、部分的な動的固相接合状態、むしろ圧接に近いものと化学的吸着とが混在したものではなかろうか。固相接合は原子的には金属結合ではあるが、平衡的な金属結合にまで至っている割合は極めて少ないのではないか。ここで動的という意味は、摩擦表面の特異性、つまり、酸素、炭素、水などを吸着した上に摩擦による大きな歪みと熱を与えられて非結晶質に近い乱れた状態の原子、分子同士が接近し、ある部分では強く、他の部分では弱い力で結合しており、時間とともに変化する。つまり、短い範囲での原子移動（拡散）が生じ、結合状態が変化していく。このような複雑怪奇さの故に誰もが真剣に取り組もうとしないのであろうと推察され、焼付きの結合機構の正確な解明は今後に期待するしかない。

要するに、焼付きとは非定常、非平衡状態の動的な特異な結合であるといえる。そして金属は塑性変形が可能なので、初期表面に凹凸があっても面圧が大きくなれば表面原子同士が接近しやすく、また格子欠陥を通して表面の非金属原子の拡散が起こり、金属原子の電子が相互作用をおよぼすようになるので、本質的に焼付き易い性質があるということができる。

4 焼付きに影響する因子

原子の世界から再び現実に戻ると、焼付きに影響する多くの因子は経験的に次のように整理されている。

4.1 金属の組み合わせ

同種金属は俗に共金（ともがね）というが、これが焼付き易いことは容易にわかる。しかし、異種金属の組み合わせでも、焼付きが一度始まると同種金属同士の摩擦となるがためにたちまち成長してしまう。

しからは、異種金属同士を組み合わせた場合、焼付きが始まり易いのかどうかについて見てみよう。金属には焼付き易い組み合わせと焼付きにくい組み合わせがあり、これを統一的に説明しようとする試みが以前いくつかなされた。一例を表-3¹⁰⁾に示すが、液相で全率固溶し合う組み合わせを miscible pair、そうでないものを immiscible pair とすると、miscible pairの方が焼付き易い組み合わせが圧倒的に多いことがわかる。この表と表-1、2とは比較が難しいが、要するに金属は異種でも意

外に結合し易い材料であることは間違いなさそうである。ことに、鉄には多くの金属が焼付く。Cuが焼付きにくい方に入っているが固相接合では接合可能となっているのは、焼付き評価方法に何らかの問題があったのかもしれない。

Moは焼付きにくい金属として有名であるが、油中での実験結果である表-3では焼付き易い部類に入っている。これはやはり、大気中では容易に酸化して生じるMoO₃の蒸気が金属接触を妨げるからであろうか。

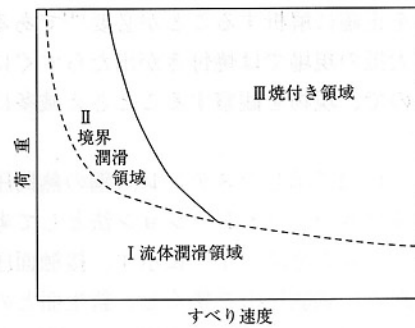


図-3 Salomon の線図

表-3 金属の相性と焼付き易さ

(a) Miscible Pair による結果	
焼付きやすい	鋼 Be, Al, Si, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ce, Ta, W, Ir, Pt, Au, Th, U
	Al Be, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cb? Mo? Rh, Ag, Sn, Ce, Ta, W, Pt, Au, Th, U
	Cu Be, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Co, Ni, Cu, Zn, Zr, Cb? Mo? Rh, Ag, Cd, In, Sn, Ce, Ta, W, Pt, Au, Th, U
	Ag Be, Mg, Si? Zr? Cd, In, Th? Au
焼付きにくい	鋼 Cu?
	Al Zn
	Cu Sb
(b) Immiscible Pair による結果	
焼付きにくい	鋼 Ag, Cd, In, Ti, Pb
	Al Cd, In, Ti, Pb, Bi
	Cu Cr, Ti, Pb, Bi
	Ag Ti? Cr, Fe, Co, Cb
焼付きやすい	鋼 Li, Mg, Ca, Ba
	Al C
	Cu C, Fe?
	Ag C, Mo? Ni

また、合金では、ステンレス鋼が焼付き易いことがよく知られているが、この理由は残念ながらまだ誰にもわからない。Cr含有量が高いほど焼付き易いといわれているが¹¹⁾、固溶しているCrそのものが結合に関与しているのか、表面酸化膜の性状の違いか、あるいはCrが高いほど表層が塑性流動し易いためなのかと種々な推測ができる。硬さの影響は後述する。経験則的に焼付き防止のためにCrは7%以下に抑えられるが、この値はステンレスとして耐食性を発揮する下限に近い値でもある。このことから、酸化膜が最も疑わしいと思われるが、まだ実証されていない。

他に、合金元素として、Nb、Al、Tiが入ると焼付き易いといわれることもあるが、明確なデータは認められない。

4.2 P V 値

軸受などの焼付きでは、接触面圧Pとすべり速度Vの積PV値が焼付き発生の基準とされる。これはPを縦軸に、Vを横軸にとって焼付き限界を求めると図-3¹²⁾のようにほぼPV=const.の曲線で表わせるからである。PV値は摩擦係数が変化しないとした時の単位時間に発生する摩擦熱に比例する数値であり、摩擦中の表面温度にも関連している。いわば、焼付きの本質に最も近い因子である。このことから、焼付き限界荷重、限界すべり速度、限界表面温度という指標がよく用いられるのであろう。

4.3 硬さ

軟らかい金属は硬い金属より焼付き易いこともよく知

られている。これはもちろん金属の組み合わせにもよるが、同じ組み合わせでも一方を熱処理などで硬さを変えた場合に当てはまるようである。この理由は、軟らかいということは摩擦力によって表層が塑性流動し易いことであるから、表面の酸化膜が破れて新生面が現われ、金属接触を生じ易いからであろうと推測できる。また、変形による歪みのために拡散も生じ易いことも関係すると考えられる。

4.4 表面粗さ

おもしろいことに表面粗さは焼付き易い方にもにくい方にも作用する。つまり、潤滑剤があって面圧が低い時には、適当な粗さがあった方が潤滑剤の供給源となるので好ましいが、そうでない時には粗さが大きいと凸部に強い応力がかかって変形し、新生面が現われて焼付きが発生する。したがって、加工工具では一般に粗さは小さい方が好ましいといえるが、スリップが生じるほどになると逆に著しい焼付きを招くことにも注意せねばならない。

4.5 金属組織

金属組織の影響はそれほど大きくなく、組織が不均一の方が焼付きにくい傾向が認められる程度である。これまで述べてきたことから、非金属つまり、炭化物、黒鉛などを多く含む材料の方が金属結合を起しにくいことは容易に推察できるのであろう。昔から、鋼より鋳鉄の方が焼付きにくいことが知られている。

5 焼付きの評価試験法

摩擦と同じように、焼付きの評価試験法は研究者ごとに種々の方法が考案されている。最も多いのは固定試験片を回転試験片に押し付けるものであるが¹³⁾、これは圧接にほかならない。いいかえれば、完全に圧接する前の途中段階を見ているに過ぎない。摩擦はマイルドからシビアまで広い条件で生じるが、焼付きは前章で述べたように、限界荷重、限界温度を超えないと発生しないのであるから、どうしても試験条件範囲が制限されてしまう。また、焼付き性の定量的表現が難しいことも評価法開発を遅らせている原因のひとつである。

さらに、シミュレーション法を考える時には、まず、

実際の現象を正確に解析することが必要¹⁴⁾であるが、困ったことに大抵の現場では焼付きが出たらすぐに削り取ってしまうので、現物を観察することさえ減多にできない。

著者が図-1、2で示したステンレス鋼の熱間圧延ロールに生じる焼付きのシミュレーション法として考案したころがりすべり方式を図-4¹⁵⁾に示す。接触面圧を実際に近づけるために試験片巾を狭くし、新生面との接触にするため10回転ごとに摩擦位置をずらし、厚い酸化膜が生じないように温度を600℃にしたことなどが工夫した点である。この方法で発生した焼付きは実ロールから採取した焼付きに大変近似していたので、その後の研究をすることができた¹⁶⁾。

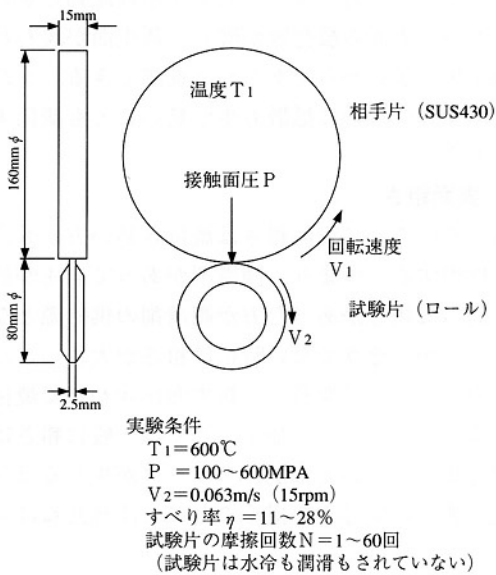


図-4 圧延ロールの焼付き試験法

6 焼付き防止法

製鉄プロセスラインなどで焼付きが生じると製品に疵をつけて大問題となるので、現場技術者にとってその防止法は重要な課題である。そして大抵の場合、経験的に求めた焼付きの生じない条件で作業が続けられている。

焼付き防止法としてまずロール材質改善が求められることが多いが、これはほとんどの場合成功しない。理由は、ここまで読まれた読者なら理解できるであろうが、金属は本質的に焼付くものだからである。従って、金属の焼付きを防止するには接触面を非金属化するしかない、すなわち広い意味の潤滑である。この時常に注意せねばならないことはその供給方法である。潤滑剤が界面に存在しなければ何の役にも立たないからである。

潤滑剤を系外から供給しなくても材料自身の酸化膜を利用することはおもしろい方法である。実際に、継目無鋼管の圧延ではあらかじめ厚い酸化膜を生成させた工具が用いられており¹⁷⁾、この処理をしないと圧延ができない。

もうひとつの方法は工具表面をセラミックスにすることである。しかし、表面の凸凹に金属が埋め込まれてしまうと金属同士の接触となること、およびセラミックスが割損しやすいことなどの問題があるので、実用化の成功例はまだ少ない。

7 まとめ

焼付きは解明が遅れているトライボ現象の一つであり、明確な指導原理が見当たらないのが現状である。現在の科学技術によれば、金属同士が接触すればその種類が異なっても焼付きの生成を完全に防止することはできない。ただ、焼付きは必要条件がそろわないと生成しないので、限界ぎりぎりのところで用いられている場合には、4章で述べたように硬さを増すとか、表面粗さを下げることなどの材料選定がその防止対策として有効になることもある。しかし、抜本的な防止法には潤滑剤の使用、あるいは表面の非金属化しかない。

参考文献

- 1) 木村好次：塑性と加工，24 (1983)，No.265，P.91
- 2) 塑性と加工，24 (1983)，No.265
- 3) 加藤 治，川並高雄：塑性と加工，30 (1989)，No.336，P.103
- 4) 例えば，I.V.Kragelsky：Trans. ASME J.Lubr. Tech. Jan. 1976，P.133
池 浩：鉄と鋼，76 (1990)，P.1219
- 5) 井本 稔，黄慶雲：岩波新書135「接着とはどういうことか」，岩波書店 (1985)
- 6) 摩擦圧接協会編：「摩擦圧接」(1982)、コロナ社
- 7) 大橋 修：ハイテク文庫①「Q & A 拡散接合」，産報出版 (1993)
- 8) 寺岡清之：鉄と鋼，69 (1983)，P.1955
- 9) 佐々木直哉：トライボロジスト，39 (1994)，P.194
- 10) 木村好次，岡部平八郎：トライボロジー概論，養賢堂 (1982)，P.173
- 11) 加藤 治，菊間敏夫：塑性加工春季講演会論文集 (1988-5)，P.285
- 12) G.SALOMON：Wear，36 (1976)，P.1
- 13) 例えば，後藤邦夫，間瀬敏郎：鉄と鋼，77 (1991)，P.107
- 14) 加藤 治：フジコー技報，No.2 (1994)，P.51
- 15) 加藤 治，川並高雄：塑性と加工，28 (1987)，P.264
- 16) 加藤 治，内田 秀，菊間敏夫：製鉄研究，335 (1989)，P.35
- 17) 大貫 輝：潤滑，28 (1983)，P.365