

特別講演(基調講演)

第 64 回日本熱処理技術協会講演大会

トライボロジーと熱処理・表面改質

日本ブレーテック(株) 竹内 榮一

1. はじめに

いろいろな機械部品や工具類の耐久性に関する課題の一つとして耐摩耗性が挙げられる。しかし、摩耗は極めて複雑な現象を伴うものとされ、解明にはかなりの難しさがある。その原因の一つは、例えば摩耗は硬さと密接な関係のあることは周知である。また、硬さは組織や残留応力とも関係があることから、これら 3 者が有機的な繋がりを以て摩耗現象に影響を及ぼしていることは容易に推察される。この場合、硬さ、残留応力は共に定量的表現が可能であるのに対し、組織は定性的表現が一般的である。このように摩耗と密接な関係のある因子が一方は定量的であり、他は定性的な表現であるため、摩耗現象の解明は複雑とならざるを得ない。

それに加えて、摩耗現象は単独の摩耗機構の下で生ずることは少ない。殆んどは摩耗損失の著しい摩耗機構と、逆に損耗の少ない機構のものが混在する場合が多く、これらの現れ方の如何によって摩耗量の再現性は著しく損なわれ、摩耗は複雑な現象を伴うという印象をもたれる原因となる。

以下、摩耗に及ぼす熱処理に関する諸因子ならびに表面改質の影響、潤滑油の挙動について述べ、若し時間に余裕があれば Al 合金の耐摩耗性改善のための表面改質についても述べることにす。

2. 摩耗に及ぼす諸因子の影響

摩耗に及ぼす硬さの影響

Khruschov は硬さの異なる純金属についてアプレシブ摩耗を行い、硬さと摩耗の関係を求めた。その結果、硬さと耐摩耗性を表わす相対耐摩耗度は直線関係にあり、硬さ値の高いものほど耐摩耗性に優れていることを明らかにしている。また、焼入れ、焼戻しによって硬さ値を変化させた鋼の場合も同様な傾向がみられるが、硬さと耐摩耗性の関係を現わす直線の勾配は純金属の場合よりも緩やかとなる。この原因は次項で述べる残留応力が関係しているともみることができる。

日本潤滑学会(現、日本トライボロジー学会)摩耗研究会が 1973~1974 年に亘って摩擦、摩耗に関する試験、研究を行っている機関を対象にアンケートをお願いし、得られたデータのうちから硬さと摩耗の関係をみると、非潤滑、潤滑下を問わず硬さ値の高くなるに伴って比摩耗量の減少傾向がみられる²⁾。

このように硬さが摩耗の軽減に有効な手法となり得ることは明らかである。しかし、

硬化の原因の如何によっては摩耗に及ぼす影響に違いの現れることがある。これについては次項で述べる加工に伴う硬化現象を挙げる事ができる。

摩耗に及ぼす残留応力の影響

加工によって表面付近に生じた残留応力は硬さにも影響を及ぼしている。表面付近に残存する圧縮応力は疲れ強さの改善に有効とされているが、すべり摩擦に対しては逆の影響を齎す。図1は各種金属、合金の摩擦面を加工硬化させたのち、アプレシブ摩耗を行ったときの硬さと摩耗（相対耐摩耗度）の関係を示したもので、加工硬化は耐摩耗性の向上に対して効果はみられず、逆に低下傾向が現れるようになる³⁾。

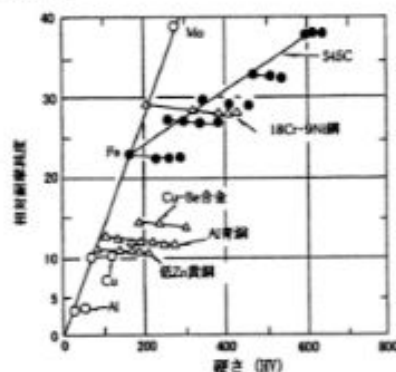


図1. 加工硬化した金属、合金の硬さと相対耐摩耗度の関係 (Khrushchov)

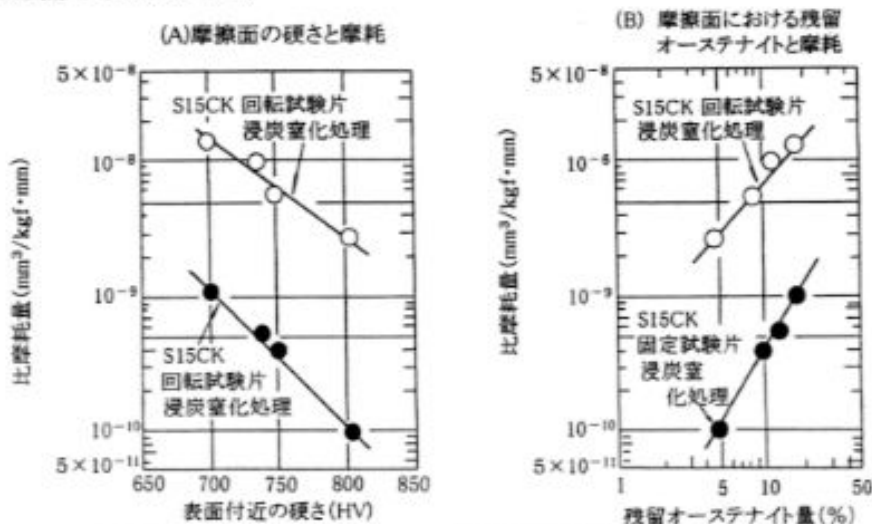
残留応力が摩耗に及ぼす影響は熱処理の際にしようずる

熱あるいは変態応力についてもみられる現象である。例えば、高周波焼入れの場合、焼入れ時、表面には約800 MPaの圧縮応力が存在するが、焼戻しによって応力の開放が進み、400℃付近ではほぼ完全に開放される。他方、硬さについても同様な傾向がみられ、焼戻温度の上昇と共に軟化する。摩耗に対して及ぼす両者の影響から150~200℃において焼戻したものに最も損耗の少なくなる状態が得られる⁴⁾。

摩耗に及ぼす残留オーステナイト(γ_R)の影響

すべり摩耗に及ぼす γ_R の影響

図2は750~900℃で浸炭窒化処理したS15CKの表面硬さおよび γ_R と摩耗の関係を潤滑下のすべり摩擦によって得た結果を示したものである。これによると、処理温度の高いものほど γ_R の生成量が多く、従って硬さ値が低くなり、これらの現象が摩耗を進行させる原因となっている⁴⁾。



試験片の浸炭窒化処理条件 : 750~900℃処理後、油焼入れ→100℃焼戻し
 摩耗条件 : $P=1.47\text{MPa}$, $v=3.4\text{m/s}$, 定常摩耗域
 供試油 : パラフィン系60スピンドット (粘度指数: 80.4), 20℃

図2. 浸炭窒化処理したS15CKの摩擦面における硬さならびに残留オーステナイトが摩耗に及ぼす影響

2.3.2 転動疲れ（転がり、転がり-すべり摩耗）に及ぼす γ_R の影響

転動疲れ現象に及ぼす γ_R の影響について、その存在を可とするものと、否とするものがある。まず、可とするものについては、

- 1) ローラ接触面が塑性変形を起こし、接触幅が拡大されるため単位面積当りの負荷が軽減される⁹⁾。
- 2) γ_R の存在は表面層に塑性流動を起こしやすくし、このために接触面積が拡大されると共に、加工硬化現象が見られる⁹⁾。
- 3) γ_R は10~25%が適量と考える。10%以下では硬すぎ、20%以上では軟らかすぎて機械的強さも低下する⁷⁾。
- 4) 浸炭窒化処理したCr-Mo鋼の歯車は γ_R 量の増加に伴ってピッチングを起こす限界荷重(疲れ限度)に向上がみられる⁸⁾。
- 5) SNCM 420 Hを浸炭窒化処理し、表面層に γ_R を生成させたものについて転動疲れ試験を行なった結果、 γ_R の存在は有効と認められた⁹⁾。
- 6) γ_R をサブゼロ処理によってマルテンサイトに変態させたものよりも、加工誘起変態によって得たマルテンサイトのほうが靱性に優れている¹⁰⁾。

他方、否とするものには

- 1) 歯車の浸炭窒化処理は歯面強度の改善が目的であり、しかも表面硬さ値が高いものほど面強さは向上する。従って γ_R の存在は好ましくない¹¹⁾。
- 2) 浸炭後、急熱急冷した表面層には γ_R が少なく、硬化と共に靱性が増すため疲れ強さは改善される¹²⁾。
- 3) γ_R の存在は歯車のスコアリング限界荷重を低下させる¹³⁾。

以上のように転動疲れに影響を及ぼす γ_R の影響についてはその結果に相違がみられる。従って、広い意味での実験条件を的確に把握したうえで議論することは勿論である。しかし、発表された論文をみると傾向的には有効と見るものが多いようである。

3. 化合物層の存在とこれが摩耗に及ぼす影響

窒化をはじめとする多くの表面熱処理を施した鋼の表面付近には化合物層が生成され、これが非金属的物性をもつことから、相手金属との間で凝着現象が起こり難く、従って耐摩耗性に優れた結果が得られている。ここではその一例として浸炭窒化処理を採り上げることとした。

浸炭窒化にはその処理法によって凡そ2つの方法に大別される。その一つは窒化性の塩浴に硫黄塩を添加したもの^{14)~16)}、他は NH_3 に N_2 で希釈した H_2S を添加した雰囲気中で処理する方法である^{19)~22)}。また、得られた表面層の状態にも差異がみられる。すなわち表面付近の硫黄濃度が低く、化合物として検出できないものと²³⁾、明らかに FeS 、 Fe_{1-x}S などの硫黄化合物が同定されるものとに分かれる²⁴⁾。

図3(A)は応力除去焼なまし処理したFCD 700とS45C調質材を組合せ、接触圧力0.49

MPa一定の下で摩擦速度を変化させて摩耗特性を検討した。その結果から酸化摩耗 (0.30 m/s)、凝着摩耗 (0.60 m/s) および熱的摩耗 (4.00 m/s) が損耗の主体となる条件を求め、それらの条件で浸硫空化処理を施した FCD 700 の摩耗特性と比較、検討した。その結果は図から明らかなように凝着摩耗域よりも過酷な条件の下で浸硫空化は効果的に作用し、摩耗量に差異の現れることを認めた。また、摩耗推移曲線に折点が現れ、摩耗量の増加が大きくなり始めるときの摩耗痕の深さは 15~20 μm であり、このときの摩擦面には図 3 (B)から明らかなように硫黄分は殆んど検出されない。換言すると、Fe-S からなる化合物の存在が耐摩耗性の改善に重要な役割を果たしているものと判断される¹⁸⁾。

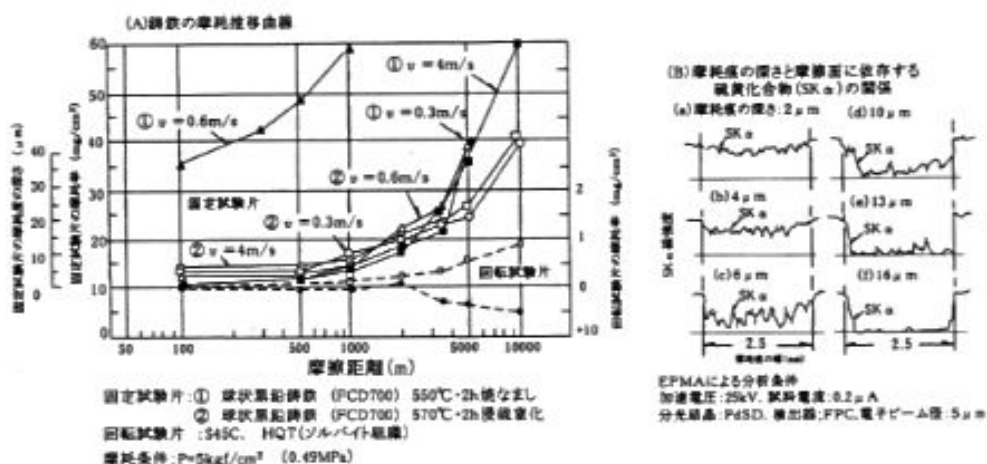


図3. 浸硫空化処理した球状黒鉛鋼鉄(FCD700)の摩耗推移曲線ならびに摩耗試験後の摩擦面に残存する硫黄化合物(SK α)と摩耗の関係

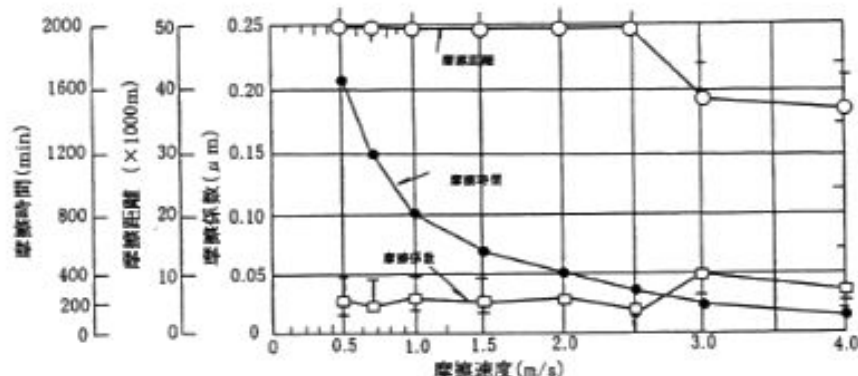
次に Al 合金の耐摩耗性の改善を目的から、例えば A5052 に Fe または Fe-Cr 合金めっきを施したのち、空化性の雰囲気中において 450~500 $^{\circ}\text{C}$ で処理するとき、めっき界面には数 μm の Al と Fe の相互拡散層、ならびに両者の熱膨張率の相違から Fe 合金めっき面に亀甲模様の亀裂が観察される。このような相互拡散がめっき層の密着強さを向上させ、亀甲模様の亀裂は潤滑下の摩擦において油道の役割を果たすことから低摩擦、耐摩耗性に優れた状態が期待される。

図4は一例として A5052 に厚さ約 15 μm の Fe-8%Cr 合金めっきを施したのち、500 $^{\circ}\text{C}$ で 3h ガス浸硫空化処理したものを S45C 調質材と組合せ、接触圧力を 0.196 MPa に一定、すべり速度を 0.50~4.00 m/s の範囲で変化させて潤滑・すべり摩擦試験を行なった結果を示す²⁰⁾。なお、この実験ではまず浸硫空化した A5052 回転試験片を約 15 秒間、潤滑油 (7.5W30SE) に浸漬後、取出して 10~15 秒間垂直に保持して余分な油を除いたのち試験機に取り付け、実験を開始した。実験は連続摩擦距離 50000m を限度とし、摩擦係数が実験の過程で瞬間的にでも 0.20 を越えた時点で実験を中止した。その結果によると、摩擦速度 0.50~2.50 m/s の範囲では距離 50000m まで摩擦係数が 0.05 以下に保たれ、平均値は約 0.025 である。しかし、速度 3.00 m/s 以上では距離 40000m 付近で摩擦係数が 0.20 を超す現象が現れたため実験を中止した。しかしこの場合でも、摩擦係数の平均

値は約 0.04 の低摩擦状態である。

また、この実験での比摩耗量は速度 2.50 m/s 以下の速度範囲では $5 \times 10^{-11} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 、
摩耗痕深さは $0.70 \mu\text{m}$ 前後である。

この実験のもう一つの目的は高価な設備や高度な技術を用いなくとも汎用設備を活用することによって低摩擦、耐摩耗性に優れた表面層を得ることが可能という一例である。



試験片: 回転, A5052PにFe-8%Cr合金めっき, 500°C-3hガス浸炭酸化
固定, S45C, HQT.
摩擦条件: P, 0.196MPa. 供試油, 7.5W30SE. 実験開始直前1回油塗布.

図4. 500°C・3hガス浸炭酸化処理を施したFe-8%Cr合金めっき皮膜
のすべり摩擦特性

4. 摩耗に及ぼす潤滑油の挙動

機械の摺動面はその殆んどが潤滑下で稼働している。従って潤滑の問題は機械の寿命維持の観点から重要な課題と考える。そこで過去に行った実験の中から 1, 2 これについて述べることにする。

4.1 潤滑油の酸化と摩耗現象²⁶⁾

潤滑油の酸化が摩耗に及ぼす影響について検討した。SAE 20 モータ油に相当する粘度をもつ油を 100 もしくは 150°C に加熱した状態の下、10 l/min の割合で空気を吹込みながら合計 200 h 酸化を行い、酸化の状態を全酸価から求めた。それによると 100°C・25h までは全酸価に殆んど変化はみられないが、引続き酸化を継続するときは急激に全酸価の上昇が見られ、100~200h の間で更に酸化を進行させるために 150°C に昇温させた。つぎに、無酸化油、100°C・100h 酸化 (全酸価: 2.3 mg/g KOH)、更にこれに 150°C・50h (3.1 mg/g KOH)、および 150°C・100h (4.1 mg/g KOH) 酸化を加えた 4 種類の潤滑油についてすべり摩耗試験を行ない、摩耗に及ぼす潤滑油の酸化の影響を求めた²⁶⁾。

表1. 酸化に伴う供試潤滑油の性状の変化

試験項目	単位	測定温度 (°C)	酸化条件 (空気吹き込み量: 10 l/min)			
			無酸化	100°C~100h	100°C~100h 150°C~50h	100°C~100h 150°C~150h
粘度	C.S	37.8 98.9	70.53 8.59	72.78 8.84	75.46 9.14	84.52 9.35
粘度指数			101	101	101	94
表面張力	dyne/cm	24	37.02			36.30
境界摩耗係数 ¹⁾		20	0.278	0.195	0.192	0.160
		100	0.210	0.187	0.187	0.136
油膜厚さ ²⁾	kg/mm ²	20~	518	485	469	448

(注) 1) T型型振り子摩耗試験機により測定した境界潤滑状態における境界摩耗係数
2) 3/4φ 4球式摩耗試験機により測定した直線から算出された油膜の最大圧力

表1は酸化に伴う供試油の一般性状の変化を示したものである。

摩擦試験は焼入焼戻処理したSUJ2と調質したS55Cを組合せ、接触圧力は油温20℃の場合は1.92MPa (20 kgf/cm²)、100℃では0.98 MPa (10 kgf/cm²)、摩擦速度は3.40 m/sに一定とし、距離200000mまでおこなった。図5はその結果を示したものである。

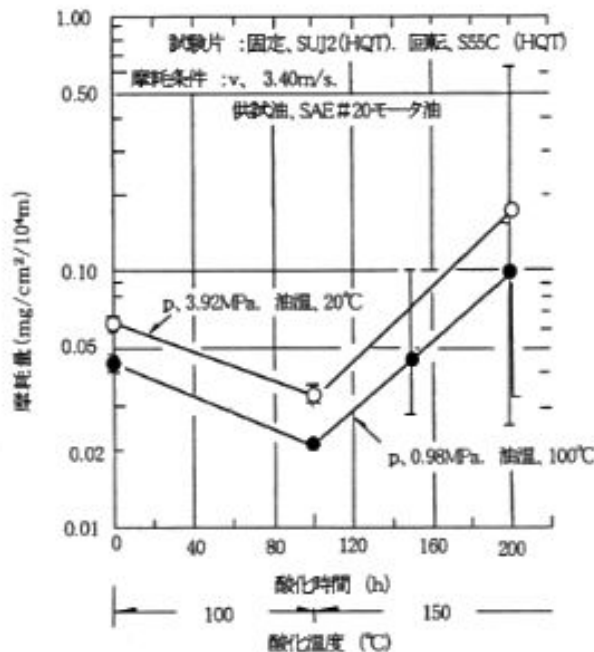


図5 潤滑油の酸化が摩耗に及ぼす影響(SUJ2 : S55C)

油膜強さの低下によるものと考えられる。他方、油温100℃の下で摩擦を行ったものは供試油が低粘度となるため、粘度よりも油膜強さの影響を受けているものと判断される。

以上の結果から、潤滑油はある程度酸化したときに摩耗軽減に効果のあることが認められた。この原因は上述の他に潤滑油が酸化に伴って極性を持つようになり、これが摩擦面への吸着を容易にしていることもその一つと考えられる。

4.2 焼付きに伴う潤滑油の挙動²⁷⁾

摩擦面間で焼付きを生ずるような過酷な摩擦状態の下での潤滑油の挙動について検討した結果について述べる。実験は高速4球式摩擦試験機を用い、ASTM-D-2596-67T法に従って行った。供試油は低粘度の合成潤滑油(平均分子量≒470)をベースオイルとし、この他に油性向上剤としてステアリン酸0.2%、極圧剤に属するダイベンジルポリサルファイド(DBPSと記す、硫黄分≒36%)0.2%、塩素化パラフィン(P-Clと記す、

これによると、両者とも100℃で100h酸化させた潤滑油を供試油とした時に最も損耗が少なかった。この現象を摩耗量と摩擦距離の関係をもって表した摩耗推移曲線からみると、油温20℃の場合、初期摩耗の段階では何れも同様な摩耗傾向を呈するが定常摩耗状態に達してからの摩耗に差異が現れ、殊に100℃・100h+150℃・100h酸化させたものは距離120000m付近から損耗が激しくなる傾向がみられるようになる。この原因は表1からも明らかのように酸化の進行とともに高粘度となり、そのために摩擦面間への潤滑油の供給が不十分になること、および

塩素分≒40%) 2.0%、塩素を加えたアルキルフォスフェイト(APと記す、りん分≒20%、塩素分≒30%) 0.2%添加した4種類について検討した。焼付き荷重はベースオイルと0.2%ステアリン酸添加油とも1380N、0.2%P-Cl添加油および0.2%AP添加油はそれぞれ1740N、0.2%DBPS添加油は1940Nである。

図6は上述の負荷で焼付きを生じた4球のうち固定球と回転球の溶着面に対し直交す



図6. 油中で焼付きを起こさせた回転球と固定球の溶着界面付近で観察されたC K α 線の挙動 (計測法: ASTM, D-2596, 67T)

る方向に沿って油の主要成分である炭素をEPMAにより線分析した結果である。これによると、C K α 線のピークとなる部分は熱衝撃により生じた亀裂に炭素が堆積した状態と判断される。また、溶着面の炭素濃度は殆んどが増加の傾向にあるが、図6(c)のDBPSを添加した油はこのような現象はみられず、逆に図6(d)、(e)のように塩素を含む潤滑油では炭素濃度の増加ならびに浸入深さとも他の潤滑油に比較して大きな値を示すことが認められた。

このように摩擦熱によって熱分解した潤滑油により生じる表面炭素濃度の増加は加工性、耐食性などの観点から考慮する必要のある場合が考えられる。

5. おわりに

以上、長期に亘ってトライボロジーに

関連する仕事に携わり、その一部を紹介させて頂いた。基調講演に相応しいか否かは皆様の判断にお任せするとして、終りに臨みお願いがございませう。それは最初にも述べましたように摩耗は極めて複雑な現象を伴うものであり、ベンチテストの結果を実機に移すにあたり、いろいろな条件を踏まえて広範囲に亘り検討を重ねた結果から判断して頂きたいと思ひます。少ない条件で得た結果から結論を出すのは極めて危険と考えます。

つぎは摩耗の観点から、使用条件によって材料の選択や処理方法を検討して欲しいということです。一例を挙げると、ガス軟空化処理の場合、耐摩耗性か、疲れ強さの何れが処理の目的かによって雰囲気を変える必要がある場合があります。すなわち、耐摩耗性の改善を目的とするときはEndo Gas ベースの雰囲気、また、疲れ強さの向上を目的とするときはN₂ベースの雰囲気での処理の方が望ましい結果が得られます。

参考文献

- 1) M. M. Khrushchov ; Proc. of the Conf. on Lub. and Wear. Inst. Mech. Engr. London p. 655 (1957).
- 2) 日本潤滑学会 第19期摩耗研究会；摩耗データ収集報告 (1975・3)
- 3) M. M. Khrushchov & M. A. Babichev ; Amer. Soc. Mech. Engg. p. 1.(1964).
- 4) E. Takeuchi ; Advanced Metal Finishing Technology in Japan. P. 273. (1980)/
- 5) C. Razim ; Harterei Technische Mitteilungen. 22, Heft. 4, p. 253 (1967).菊池麟平訳
熱処理 10. p. 348 (1970).
- 6) P. Sheehan et al ; SAE Tech. Engg. Report, 720268.
- 7) R. A. Wilder ; Reserch Center Eaton and Towne Inc, (Oct. 1967) .
- 8) V. I. Krylov, et al ; Metal Sci. and Heat Treatment, 13, p. 1028 (1971).
- 9) 内藤武志、木村靖忠、三原健治；小松技報 19, 3, p. 20 (1973).
- 10) R. H. Richman, et al ; Metallurgical Trans. A6, p. 955 (1975・5)
- 11) W. T. Chesters ; J.I.S.I. 208, p. 982 (1970).
- 12) 内藤武志、木村靖忠；鉄と鋼 57, p. 982 (1971).
- 13) 寺内善男；歯車研究会資料、歯車のスクーリングについて (1971・11) 広島大学
- 14) F. D. Waterfall ; Engineering, 187, p. 113.
- 15) 織田貞四郎、大黒 貴、池永 勝；日本金属学会誌、26, p. 363 (1962).
- 16) R. B. Waterhouse ; WEAR, 8, p. 421 (1965).
- 17) J. C. Gregory ; WEAR, 9, p. 249 (1966)/
- 18) 竹内榮一；日本金属学会誌、36, p. 671 (1971).
- 19) 百瀬 治、内田荘祐；熱処理、25, p. 89 (1985).
- 20) 野口奉夫；熱処理、38, p. 198 (1998).
- 21) 梶沢 均；熱処理、39, p. 383 (1999).
- 22) 片桐敏夫、藤井京子、石渡伸一、大関泰之、竹内榮一；日本金属学会誌、51, p. 871 (1987).
- 23) Hydromechanique et Frottement ; Sur Surf
- 24) 例えば 14) ~18)
- 25) 竹内榮一、及川 渉、小室文稔、梶沢 均；熱処理、44, p. 239 (2004).
- 26) E. Takeuchi ; WEAR, 15, p. 201 (1970).
- 27) 竹内榮一、田中益夫；日本金属学会誌 35, p. 989 (1971).