タフトライド処理材の疲労強度*

(試験片の発熱に着目した疲労強度推定)

岡 崎 章 三** 中 川 良 治***
中 村 宏** 鈴 木 恵****

Fatigue Strength of Tufftrided Steel

(Estimation of Fatigue Strength from Heat Generation in Specimen)

by

Shozo OKAZAKI

(Technical Research Laboratory, Kawasaki Heavy Industry Co., Ltd., Akashi)

Yoshiharu NAKAGAWA

(Kyoto Institute of Technology, Kyoto)

Hiroshi NAKAMURA

(Technical Research Laboratory, Kawasaki Heavy Industry Co., Ltd., Akashi)

and Megumu SUZUKI

(Kyoto Institute of Technology, Kyoto)

Fatigue strength of tufftrided S15CK steel (smoothed specimen) was estimated using the change of temperature at the surface of a specimen during the rotating bending fatigue test. The results obtained are summarized as follows;

(1) The relation between the mean temperature rise ΔT_{eq} and the number of cycles to failure N_f can be described as $\Delta T_{eq}^m N_f = C$, and between ΔT_{eq} and the stress amplitude σ_a it is $\Delta T_{eq} = A \sigma_a^n$.

(2) The fatigue strength for each of the three specimens with different diameters, and that under varying stress in the two level single block fatigue test can be approximately estimated from the change of temperature at the surface of a specimen during the fatigue test.

(Received Feb. 27, 1976)

1 緒 言

筆者らは種々の鋼材にタフトライド処理を行い、その材料の耐疲労強度についてかなり系統的に研究を行ってきた。その研究結果の興味ある現象の一つとして、たとえば S15CK 材、S45C 材、および SNC2 材を用い、それぞれの試験片に種々の切欠きをつけ疲労試験をした結果、タフトライド処理をした試験片の場合応力集中率が1.2~1.4と非常に浅い切欠きをもつ試験片の疲労強度は、平滑試験片のそれよりもはるかに高い強度を有する結果が得られた¹⁾²⁾。その後の実験により、タフトライド処理した平滑試験片は疲労過程³⁾⁴⁾中の表面の温度上昇が顕著となり、このため疲労挙動も複雑と

なることがわかった。そこで本報では、タフトライド処理した平滑試験片のこうした発熱現象に着目し、疲労強度を推定することを試みた。材料の疲労に伴う発熱量を測定し、疲労現象を推察する試みは、筆者らの⁵⁾一人を始めとし、多くの研究者によってなされている。本報はタフトライド処理した S15CK 平滑試験片の回転曲げ疲労強度を、表面の温度を非接触に測定した温度変化から推定した結果、およびこの考え方を寸法効果、変動荷重下における疲労寿命推定に応用した結果について報告する。

2 実験方法

実験に使用した材料は市販の S15CK 材丸棒で、この材料の機械的性質および化学成分を Table I に示す。このうち素材直径 $D=100 \phi \text{mm}$ のものは、処理材の寸法効果の検討に使用した。試料は 880℃で1時間保持後水冷した後、Fig.1 に示す試験片形状に加工

* 原稿受理 昭和51年2月27日

** 正 会 員 川崎重工業(株)技術研究所 明石市川崎町

*** 京都工芸繊維大学大学院 京都市左京区松ヶ崎御所海道町

**** 正 会 員 京都工芸繊維大学工学部

京都市左京区松ヶ崎御所海道町

Table I. Mechanical properties and chemical composition.

22 mm ϕ	Yielding point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	
	31	41	41	68	
	C	Si	Mn	P	S
	0.14	0.25	0.43	0.013	0.010
100 mm ϕ	Yielding point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	
	29	47	34	63	
	C	Si	Mn	P	S
	0.16	0.32	0.41	0.008	0.024

Fig. 1. Dimension of specimens.

した。図中試験部直径 9 ϕ mm のものは発熱現象による疲労強度推定, および変動荷重の試験に使用し, 寸法効果については直径 10 ϕ mm, 16 ϕ mm, 20 ϕ mm のものを用いて実験した。試験片は試験部を機械研磨し, 所定の寸法に仕上げた後タフトライド処理を行った。タフトライド処理は, 570 $\pm$ 5 $^{\circ}$ C の塩浴に 120 分保持後取り出して水冷した。処理後つかみ部を再研磨し試験に供した。試験機は, $d=9$ ϕ mm, 10 ϕ mm のものについては 10 kg $\cdot$ m 小野式回転曲げ疲労試験機 (3 600 cpm), 16 ϕ mm, 20 ϕ mm のものについては, 60 kg $\cdot$ m 小野式回転曲げ疲労試験機 (3 600 cpm) を用いた。疲労試験中試験片の温度測定は赤外線放射温度計を用い, 非接触で試験片中央部表面の直径 3 mm (実際には試験中回転しているので 3 mm 幅) の範囲について, 試験開始から破断にいたるまでの温度変化を測定した。この計器で測定される温度測定誤差は $\pm 2^{\circ}$ C であった。温度測定にあたっては試験片中央部に放射率 0.996 を保証する専用のペイント (3M Velvet coating 101-C10 black) を塗り測定した。

3 実験結果

3.1 疲労試験結果

Fig. 2 はタフトライド処理した S15CK 材 (以下処理材と呼ぶ) についての疲労試験結果である。同図に素材 (以下無処理材と呼ぶ) の疲労試験結果を実線で示した。この結果処理材の疲労限は約 42 kg/mm² となり, 無処理材の疲労限 22 kg/mm² に比べて約 1.9

Fig. 2. S-N diagram for tufftrided specimen ($d=9$ mm).

倍の強度上昇を示した。ここで“○”印が実験結果を示すものであり, 図中の式で表される S-N 線図は後で述べる方法により推定したものである。また処理材については 10^7 回を越えても破断するものがあるので注意を要する³⁾。

Fig. 3 は寸法効果の影響を無処理材についてみたもので, この直径範囲内での寸法効果は顕著ではない。しかしながら高応力側で若干寸法の大きいものの寿命が小さいものに比べて短く, 後で述べる温度変化の現象とよく対応している。Fig. 4 は処理材についての同様の結果を示す S-N 線図で, この直径範囲内でも明らかに寸法効果の影響が現れ, 無処理材のそれに比べて寸法効果の影響は大きいようである。これは直径に対する硬化深度の割合が, 寸法の大なるものが小なるものに比べて小さいためと考えられる。なお, Figs. 3, 4 の図中の式で表される S-N 線図も後述の方法で推定したものである。Fig. 5 はこれらの S-N 線図から求められた疲労限と, 試験片直径を両対数目盛で整理したものである。図中“◇”“⊕”印は, Sauer らが S15CK 平滑材を用いて実験を行った結果を示し, 今回筆者らが行った結果とほぼよい一致を示している。タフトライド処理による寸法効果の影響は大きい,

Fig. 3. S-N diagram for non-tufftrided specimens ($d=10$ mm, 16 mm, 20 mm). Fig. 4. S-N diagram for tufftrided specimens ($d=10$ mm, 16 mm, 20 mm).

Fig. 5. The relation between diameter and fatigue limit.

この直径範囲内では処理による強度上昇は大きく、 $d = 20 \text{ mm}$ のものでも無処理材に比べて約 1.6 倍の疲労限上昇を示すことは興味深い。

3・2 温度測定結果

Fig. 6 は $d = 9 \text{ mm}$ 処理材について疲労試験時の試験片表面温度変化を測定した一例を示す。温度は疲労初期は応力繰返し数とともに温度も上昇するが、応力レベルによっては以後漸増、または一定となり、破断直前に温度は急上昇する。すなわち、疲労初期においては応力の繰返しによる転位密度の増加および集積によって生じるひずみの増加に伴い温度が上昇するが、

Fig. 6. Surface temperature rise with number of cycles.

繰返し数の増加に伴い転位密度が減少し、疲労による加工硬化、およびマトリックスに固溶する窒素原子による転位の釘付けが起り、熱の発生と拡散が均衡することで温度が一定となるのではないかと考えられる。さらに繰返し数が増加すると窒素は化合物を形成し、転位の運動を阻止する能力が減少し、転位密度の増加と時効による効果の均衡が破れ主き裂が発生するものと思われる。Fig. 6 において破断直前に温度が急激に上昇するのは、こうした主き裂が相当長くなったあと短時間に伝ばし破断にいたるために起るものと推察される。このことを確認するために各段階で試験をとめ、試験片表面あるいは内部を観察した。疲労試験中の温度変化に伴う組織観察結果の一例を Figs. 7, 8 に示す。Fig. 7 は負荷応力 50 kg/mm^2 で $N_f = 1.88 \times 10^4$ で破断した例についての温度上昇曲線およびかたさ変化（表面から 0.2 mm の位置のかたさ）を示したものである。この結果、温度変化とかたさ変化はほぼ

Fig. 7. Surface temperature rise and hardness increase in the diffusion zone of the fatigue test specimen. (A~D indicate the point to be shown in Fig. 8.)

Fig. 8. Micro structure change of the tufftrided fatigue test specimen ($\sigma_a = 50 \text{ kg/mm}^2$).

い対応を示していることが伺えた。Fig. 8 は Fig. 7 に示されている④～⑩、破断の各繰返し数に対応する試験位置での組織観察結果である。図中⑧は④とほぼ同じ組織であった。⑨の繰返し数ですべり線にそった窒素の析出物がみられる。⑩では相当数の窒素の析出物がすべり線にそって観察され、この段階では⑩'に示すごとく相当大きなクラックが存在していた。

このクラックの発生は⑨の段階では観察されていないことからみて、⑨と⑩の間で発生したものと推察される。⑩の繰返し数ではクラックは試験部円周方向に約 7～8 mm、深さ方向にも数 mm 入っていた。このようにクラックが生長して相当長いクラックになると、試験部の有効断面積は減少し、試験片はたわみ現象を起し急激に破断する。温度変化をみると、クラックの発生とみられる⑨と⑩の繰返し数の間は若干温度は上昇し、⑩の繰返し数をすぎると温度は急激に上昇し破断にいたっていることがわかる。とくに負荷応力が高いと温度上昇が顕著となり、温度上昇に伴う窒素の窒化物としての析出が容易となるため、転位を釘付けする効果を生じる期間が短い。そのため温度は疲労試験中一定となる期間がなく、応力繰返しとともに温度は上昇し破断にいたる現象がみられた。そこで疲労過程に外部から強制的に冷却すると、疲労寿命の伸びは顕著となる (Fig. 2 の“●”印) が確認された。

Figs. 9 および 10 はこの処理材を二段二重変動応力試験を行ったときの温度変化の一例を示す。Fig. 9 は $\sigma_1 = 48 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_2 = 46 \text{ kg/mm}^2$ とした応力下降の場合、Fig. 10 は逆の応力順序とした応力上昇の場合に

Fig. 9. Surface temperature rise under doubly-repeated stress. (High-Low varying stress)

Fig. 10. Surface temperature rise under doubly-repeated stress. (Low-High varying stress)

についての結果である。図中破線はそれぞれの応力を単独に負荷したときの温度変化を示す。この結果両者とも一段目の応力負荷により二段目の温度上昇は、とくに変動初期において一定応力におけるそれよりも急激な立ち上りをみせている。この結果は変動応力における塑性ひずみ幅の挙動と類似した現象を示しており¹¹⁾、発生した塑性ひずみが温度上昇と密接な関係があるのではないかと考えられる。¹²⁾

Fig. 11 は処理材での応力繰返しによる温度上昇に及ぼす寸法効果の例である。図が示すように同じ応力負荷では直径の大なるものが温度上昇が顕著で、直径が小さくなっていくに従って温度上昇は小さい。

Fig. 11. Surface temperature rise with number of cycles of tufftrided specimen with different diameter.

4 実験結果に対する考察

4.1 処理材の疲労強度に対する検討

疲労過程での温度変化は、その材料の疲労特性をかなりよく反映することがうかがわれた。そこで処理材の疲労強度をこうした温度変化の現象を用い推定することを考えた。まず Fig. 6 に示した温度上昇曲線から、Fig. 12 に示すようにその温度変化を各破断繰返し数で積分した値 W を求め、 W と破断までの繰返し数 N_f との関係で整理した結果が Fig. 13 である。すなわち、

$$W = \Delta N_f \sum_{i=1}^n (T_i - T_0) \quad (1)$$

ここで $\Delta N_f = N_f/n$, n は数値積分における等分数を表し(今回の結果は $n=20$ とした), T_i は ΔN_f 間の平均温度を表す。また T_0 は試験片取付け時の無応力状態における試験片表面温度である。この結果 W と N_f との間には両対数目盛ではほぼ直線関係が成立する

Fig. 12. Method of obtaining W .

Fig. 13. Relation between W and number of cycles.

ことがわかった。すなわち、

$$W = KN_f^a \quad (2)$$

Fig. 13 より実験点を(2)式で近似した線図から $a = 0.75$, $K = 1.59 \times 10^3$ なる結果が得られた。(2)式の W を N_f で除した値を ΔT_{eq} とすれば、 ΔT_{eq} は温度上昇曲線の破断にいたるまでの平均温度上昇に等しい。(2)式が成立するとすれば ΔT_{eq} と N_f についても同様の結果が得られるはずであり、それを確かめたものが Fig. 14 である。Fig. 14 より実験結果は、

Fig. 14. Relation between mean temperature rise ΔT_{eq} and number of cycles.

$$\Delta T_{eq}^m N_f = C \quad (3)$$

をほぼ満足することがわかった。Fig. 14 より(3)式と近似した線図を求めると $m = 4.07$, $C = 1.06 \times 10^{13}$ となる。すなわち平均温度上昇が大きいものほど寿命は短く、低応力負荷で寿命の長いものほど平均温度上昇は小さい。この平均温度上昇 ΔT_{eq} は、試験片表面の塑性変形の現象と対応していることを確かめるため、表面にひずみゲージを貼付し、繰返し応力に伴う塑性ひずみの挙動を測定した。Fig. 15 は測定結果をもと

Fig. 15. Relation between the plastic strain range $\Delta \varepsilon_p$ and number of cycles.

に塑性ひずみ幅 $\Delta \varepsilon_p$ を求め、 $\Delta \varepsilon_p$ と N_f との関係を整理した結果である。この結果、 $\Delta \varepsilon_p$ と N_f との間には

$$\Delta \varepsilon_p^\alpha N_f = K_c \quad (4)$$

が成立する。実験結果は $\alpha = 3.74$, $K_c = 54.6$ で整理された。Fig. 14 と Fig. 15 よりグラフの傾斜はほぼ一致し、 ΔT_{eq} と $\Delta \varepsilon_p$ の間には、

$$\Delta T_{eq}(\text{deg}) = 5.9 \times 10^2 \Delta \varepsilon_p^{0.92} (\%) \quad (5)$$

が成立する。すなわち応力繰返しによる温度上昇は、表面に生じる塑性ひずみと密接な関係があることが判明した。

つぎに Fig. 2 に示されるように温度変化はまた負荷される応力 σ_a と密接な関係があると考えられるため、負荷応力 σ_a と平均温度上昇 ΔT_{eq} との関係をみたものが Fig. 16 である。Fig. 16 は $\Delta T_{eq}/\sigma_a$ と $1/\sigma_a$ を対数目盛で表示したもので両者は、

Fig. 16. Relation between $(1/\sigma_a)$ and $(\Delta T_{eq}/\sigma_a)$.

$$(\Delta T_{eq}/\sigma_a) (1/\sigma_a)^{n-1} = A \quad (6)$$

書き直すと

$$\Delta T_{eq} = A \sigma_a^n \quad (7)$$

の関係がほぼ成立する。ここで Fig. 16 から $n = 10.13$, $A = 1.02 \times 10^{-15}$ が得られた。すなわち平均温度上昇は応力の約10乗に比例して増加することがうかがえる。筆者らの一人は(7)式に相当するものとして ΔW (1サイクル中の単位体積当りの損失仕事) と応力 σ_a の関係として

$$\Delta W = C \sigma_a^n \quad (8)$$

を与え $n = 8$ で実験結果を説明し、榎本らの実験によれば6~12の値となることを指摘した。今回得られた係数 n もほぼこれらの値に近い。

以上の結果よりタフトライド処理材のS-N線図は(3)式と(7)式より ΔT_{eq} を消去すれば求まることになる。すなわち、

$$\sigma_a^{n \cdot m} N_f = C/A \quad (9)$$

(9)式に各実験で得られた係数を代入すると、

$$\sigma_a^{41.3} N_f = 1.10 \times 10^{74} \quad (10)$$

が得られ、(10)式に相当するS-N線図が Fig. 2 の処理

材に対するS-N線図である。この結果実験点はほぼこのS-N線図上にプロットされるようで、こうした応力繰返しによる試験片表面の平均温度上昇をパラメータとして処理材の疲労強度をおおよそ推定できることが確かめられた。

4・2 寸法効果に対する検討

Figs. 3, 4 の疲労試験結果について 4・1 で述べた方法を用いて疲労強度を検討した。Fig. 17 は Fig. 3 の無処理材のS-N線図に対応する温度上昇曲線を用いて求めた平均温度上昇 ΔT_{eq} と N_f との関係を示す。図中“▽”印は Fig. 2 の無処理材についての試験結果に対するものである。この結果この実験範囲内の直径においては、 ΔT_{eq} と N_f との間には直径にかかわらずほぼ両対数目盛で一本の直線で整理され、この直線は、

Fig. 17. Relation between ΔT_{eq} and number of cycles (non-tuffrided specimens).

$$\Delta T_{eq}^{1.54} N_f = 2.16 \times 10^7 \quad (11)$$

と近似できる。これはこれまでに種々の材料について得られた塑性ひずみ幅 $\Delta \varepsilon_p$ と N_f との間に

$$\Delta \varepsilon_p^{1.6} N_f = 1.0 \quad (12)$$

¹³⁾ の関係が求められており、この場合についても ΔT_{eq} と $\Delta \varepsilon_p$ との指数間にほぼよい相関が認められる。Fig. 18 は処理材について ΔT_{eq} と N_f との整理結果を示したものである。図が示すごとくそれぞれの直径に対しては、 ΔT_{eq} と N_f との間に(3)式の関係が満足されるようであるが、無処理材と異って直径に無関係に一本の直線で整理することは困難である。これは前述したように硬化深度が直径に関係なく一定のため、表面

Fig. 18. Relation between ΔT_{eq} and number of cycles (tuffrided specimens).

Fig. 19. Relation between $(\Delta T_{eq} d_i / d_{10})$ and N_f (tuffrided specimens).

における塑性変形量の硬化層での拘束が、直径が大なるものほど小さくなるためと考えられる。Fig. 18 において直径 10 φmm のものの ΔT_{eq} を基準とし、他の直径における ΔT_{eq} をそれぞれの直径の比で除した値と破断寿命の関係を示したものが Fig. 19 である。すなわち、

$$\left(\Delta T_{eq} \frac{d_i}{d_{10}} \right)^\beta \cdot N_f = K_\beta \quad (13)$$

ここで β , K_β は直径 10 φmm での ΔT_{eq} と N_f の関係から得られる値を使用している。また d_i / d_{10} は直径 10 φmm と各直径との比である。この結果この直径範囲内では各直径とも(13)式でほぼ整理されるようである。

Figs. 20, 21 は Fig. 16 の関係と同様の整理法で無処理材、処理材について検討した結果である。この結果両者ともほぼ(7)式を満足しており、直径が大なるにつれて(7)式の指数 n の値は増加する傾向を示す。両図から指数 n の値は無処理材では約 7～10、処理材では約 12～16 の値を示した。とくに処理材においては同応力負荷における ΔT_{eq} の上昇割合は、直径が大きくなるに従って大きく、それも負荷応力が高いものがその上昇割合が顕著となる傾向を示した。以上の結果から無処理材は Figs. 17 および 20、処理材は Figs. 18, 21 の各係数を用いてそれぞれの直径に対するS-N線図を推定したものが Fig. 3 (無処理材), Fig. 4 (処理材) の式で示したS-N線図である。それぞれの実験

Fig. 20. Relation between $(1/\sigma_a)$ and $(\Delta T_{eq}/\sigma_a)$ (non-tuffrided specimens).

Fig. 21. Relation between $(1/\sigma_a)$ and $(\Delta T_{eq}/\sigma_a)$ (tufftrided specimens).

結果は比較的良好にこれらの $S-N$ 線図上にプロットされるようである。

4・3 変動荷重に対する検討

一定荷重に対する処理材の疲労強度は、負荷応力に伴う温度変化を用いてほぼ推定できることを述べたが、Figs. 9, 10 に示されるごとく変動荷重試験においても、荷重変動に伴う温度変化が顕著に現れることから、こうした温度変化から変動荷重における処理材の疲労寿命についても推定できないかどうかを検討した。Fig. 22 は $\sigma_1 = 48 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_2 = 46 \text{ kg/mm}^2$ とした二段二重応力下降についての整理結果を示すものである。図中 W_1 は、一段目の応力 σ_1 が一定の繰返しを受けたとき破断するまでの寿命 N_1 に対する(2)式で求められる値を示し、 W_2 は二段目の応力 σ_2 での破断寿命 N_2 における同様に求めた値である。 w_1 は一段目の応力を n_1 回繰返したときの温度上昇曲線を、(1)式で計算して求めた値、 w_2 は二段目の応力負荷による破断までの繰返し数 n_2 から同様の手順で求めた値である。Fig. 22 (a)はこうして求められた w_1/W_1 と n_1/N_1 との関係を示し、図より

$$w_1/W_1 = (n_1/N_1)^{1.9} \quad (14)$$

の曲線で実験点は近似される。同図(b)は w_2/W_2 と n_2/N_2 との関係で

$$w_2/W_2 = n_2/N_2 \quad (15)$$

で表される。つぎに同図(c)は w_1/W_1 と w_2/W_2 との関係のみたもので

$$(w_1/W_1)^{0.42} + (w_2/W_2)^{0.5} = 1.0 \quad (16)$$

と近似すると比較的良好に実験点を説明できそうである。

Fig. 22. Arrangement of results under High-Low varying stress.

現在のところこれらの指数は実験結果があって始めて定まるものであるため、種々の実験を重ねた上でより合理的に求められるものに拡張していく必要がある。以上の結果から n_1/N_1 と n_2/N_2 の関係を(14), (15), (16)式から求めると、上記条件における処理材の応力下降については、

$$(n_1/N_1)^{0.8} + (n_2/N_2)^{0.5} = 1.0 \quad (17)$$

が得られ、(17)式の線図を描いたものが同図(d)の曲線である。“○”印が実験結果で(17)式の曲線は、実験点を比較的良好に近似していると考えられる。Fig. 23 は同様の整理法によって求められた処理材の応力上昇の場合で、この場合(17)式に相当するものとしては、

$$(n_1/N_1)^{2.0} + (n_2/N_2)^{1.3} = 1.0 \quad (18)$$

が得られた。応力上昇の場合は、応力下降に比べて実験点が非常にばらつき、寿命推定結果もこの例ではよい対応を示しているとはいえないが、今後はこの点をさらに実験し、変動荷重に対するこれら温度変化を用いた推定が可能かどうかを検討していく考えである。

Fig. 23. Lives under Low-High varying stress.

以上疲労過程中的温度変化を用い S15CK 平滑タフトライド処理材の一定荷重、寸法効果、および変動荷重における疲労強度を推定した結果、ほぼ良い推定結果が得られたと考えられる。しかしながらこれらの推定法は非常に多くの問題点を含んでいるため、今後は他の鋼種についても検討し、しかも金属組織変化と対応させながらこれら温度変化と物理現象を結びつけ、より定量的な疲労強度推定、および処理による強化機構を解明していきたいと考えている。

5 結 言

タフトライド処理をした S15CK 平滑試験片の回転曲げ疲労強度、および寸法効果、変動荷重による影響を疲労過程中的発熱現象に着目し、試験片表面の温度

変化を用いて検討した。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 平均温度上昇 ΔT_{eq} と破断寿命 N_f との間には $\Delta T_{eq}^m N_f = C$ なる関係がほぼ成立し、また負荷応力 σ_a との間には $\Delta T_{eq} = A \sigma_a^n$ の関係がほぼ成立する。これら二つの関係から得られる $S-N$ 線図と実験点は比較的良好一致を示した。

(2) 素材、およびタフトライド処理材の試験片直径を 10 mm, 16 mm, 20 mm とした試験片についての寸法効果の影響を調べた結果、(1)の方法でそれぞれの寸法に対する疲労強度をほぼ推定できる。

(3) 二段二重応力下降、応力上昇の変動荷重による寿命は、応力変動に伴う温度変化を用いてほぼ推定できることがうかがえた。

最後に本タフトライド処理を快く引受けてくださいました、日本パーカライジング工業(株)伊丹熱処理工場の関係者各位様、および本研究の試験の一部は当時京都工芸繊維大学工学部学生であった中川一郎氏(現在製鉄化学(株))の多大なる協力を得たことに心から感謝の意を表します。

(昭和50年3月18日 日本機械学会関西支部第50期定時総会講演会、昭和50年6月10日 日本機械学会関西支部第233回講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 中村 宏, 岡崎章三, 堀川 武, 柴尾勝耀, 日本機械学会論文集, **39**, 3519 (1973).
- 2) 中村 宏, 堀川 武, 岡崎章三, 日本機械学会第6回シンポジウム講演集, No.730-10, 183 (1973).
- 3) 岡崎章三, 中村 宏, 堀川 武, 材料, **23**, 693 (1974).
- 4) 喜多 清, 苧野兵衛, 中村 宏, 岡崎章三, 日本金属学会誌, **38**, 852 (1974).
- 5) 中村 宏, 鉄道業務研究資料, **13**, 2 (1956).
- 6) 榎本信助, 鉄道業務研究資料, **12**, 363 (1955).
- 7) 小野鑑正, ZAMM, **16**, 23 (1936).
- 8) 樋口正一, 今井康文, 竹中 稔, 日本機械学会論文集, **40**, 644 (1974).
- 9) Sauer, G., Industrie-Anzeiger, **87**, 95 (1965).
- 10) Wilson, D. V., Acta Met., **21**, 673 (1973).
- 11) 鎌田敬雄, 岡田友信, 中村 宏, 堀川 武, 日本機械学会講演論文集, No.710-9, 101 (1971).
- 12) 大野啓充, 鯉淵興二, 材料, **17**, 806 (1968).
- 13) たとえば, 中村 宏, 堀川 武, 機械の研究, **27**, 949 (1975).