

残留応力分布を持つ表面硬化材料の疲労強度推定手法

Fatigue Strength Estimation Technique for Case-hardening Steels Involving Residual Stress Distribution

伊藤 寿浩* 安達 修平*
Toshihiro Ito Shuhei Adachi

要旨

表面硬化処理を施した鉄鋼材料は、表面から内部に向かって変形抵抗の分布を持つと同時に、残留応力の分布をも持つ傾斜機能材料と言うことができる。本稿ではガス軟窒化処理を施したJIS SCM440について、その疲労強度を推定する方法として、次の手順を踏むことを提案した：

- 1) 硬さ(Hv)分布曲線と残留応力(σ_R)分布曲線を基に、疲労強度(σ_W)分布曲線を計算する。関係式には $\sigma_W = 1.6 \times Hv - 0.5 \times \sigma_R$ を用いる。
- 2) 各応力レベルにおける深さ方向への応力振幅分布を計算する。これは試験片の形状(形状係数)、荷重モード(曲げ、引張、ねじりなど)によりFEMまたはNeuberの式から決定される。1), 2)の計算に際しては同じ応力比に換算した値を用いる。
- 3) 計算より求まった疲労強度分布曲線と外力による応力分布曲線の内の1つが最も低い位置で接する点を見つける。この接点の深さ位置が、疲労クラックの発生位置となり、接している応力勾配で代表される応力レベルが疲労強度となる。

より正確な推定を行うには正確な表面下の疲労強度を知る必要があり、これは意図的に表面からクラックが発生するようにした試験片を用いた疲労試験により得ることができる。この手法を用いれば、ショットピーニング処理などで得られる急勾配の残留応力分布を持つ表面硬化材についても、疲労強度ならびにクラック発生位置の予想が可能となる。この考え方は、浸炭焼入れや高周波焼入れなどの処理を施した表面硬化材料の全般的な疲労現象への適応が可能である。

1 はじめに

内燃機関などに用いられる部品の多くには、耐摩耗性と強度を確保するための表面硬化処理が施されている。中でも、鉄鋼材料に対する表面硬化処理の占める比率は大きく、その代表的なものとして、浸炭、窒化および高周波焼き入れ処理があげられる。これらの処理を施された部材は、いずれも表面から内部に向かって材料の変形抵抗が変化する、いわゆる材質的な傾斜構造を持っているが、同時に、多くの場合、残留応力も表面から内部にかけて連続的に変化するような分布を示すことから、弾性歪み場の傾斜構造をも持っていると言えることができる。

このような部材の疲労強度を推定しようとする場合、上述した二つの種類の傾斜構造を考慮した強度分布を設定した上で、外力による応力分布との相互作用を考えなければならない。こうした表面硬化材料の疲労強度の考え方に関しては、すでに浸炭処理を施した歯車の歯元曲げ疲労強度への考察^{1), 2)}や、浸炭後ショットピーニング処理を施した場合の疲労寿命向上機構に関する説明³⁾に紹介

されている。しかし、こうした考え方を厳密に適用して部材の疲労強度を高い精度で予測する手法については、必ずしも明確にされているとは言えない。

本稿では、比較的薄い硬化層を持つ、ガス軟窒化処理鋼について、材質的強度分布、残留応力分布と外力による応力勾配の相互作用から疲労強度を推定することによって得られた結果を、実際の疲労試験結果と比較し検討を加えることで、上記の考え方とその手法の妥当性を検証すること目的とした。

2 実験方法

実験に供した材料は、JIS SCM440で、その代表的化学成分の構成は、C 0.39 Si 0.19 Mn 0.73 P 0.019 S 0.008 Ni 0.046 Cr 1.01 Mo 0.16 (各wt.%)である。本材料を試験片形状に加工後、図1に示す条件にて、焼き入れ焼き戻しおよびガス軟窒化処理を施した。目的に応じて一部の試験片には、ショットピーニング処理を実施した。ショットピーニング処理は、SiCの研磨材#220(100μm)を用いた空圧式ピーニングマシンにより、表層約60μmを除去する条件で行った。

疲労試験には、小野式回転曲げ疲労試験機を用

* 技術本部 基礎技術研究室

い、試験片には静的形状係数 $K_t=1.78$ 、最小断面径8mmの円周切り欠き試験片および同径の平滑試験片を用いた。図2に、用いた試験片の諸元を示した。試験はいずれも室温で行い、試験回転数は3,000~3,600回転/分とした。各表面処理と試験片の形状係数の組み合わせについて表1に示すように3とおりのシリーズを作成し、それぞれ記号をT-1, T-2, およびTSP-2とした。

残留応力の計測には、X線残留応力測定装置を用い、Cr-K α 線のフェライト相(211)面の回折ピーク位置からsin二乗 ϕ 法により求めた。応力の測定方向はいずれも試験片長手方向で、側傾法を使用した。深さ方向の残留応力分布は、マスキングで囲った約4mm角の表面を電解研磨により除去しながら計測する方法で求めた。また、半価幅の分布の計測には、各深さでの $\phi=0^\circ$ 時の回折角ピーグ幅(2θ)から求めた値を用いた。

表1 試験片の種類と呼称

熱処理 表面処理	切り欠き係数	$K_t = 1$	$K_t = 1.78$
窒化処理まま		T-1	T-2
窒化処理後 ショットピーニング			TSP-2

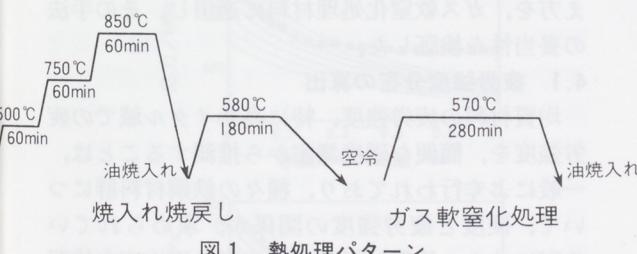


図1 热処理パターン

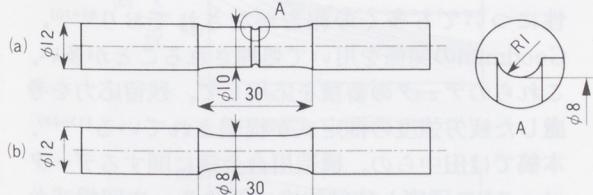
(a) 円周切り欠き付試験片 $K_t = 1.78$
(b) 平滑試験片 $K_t = 1$

図2 回転曲げ疲労試験片形状

3 結果

図3に試験片各シリーズの回転曲げ疲労試験結果を示す。縦軸は、応力振幅であるが、円周切り欠き試験片であるT-2およびTSP-2シリーズについては、いずれも、切り欠き底での応力値

として公称応力に静的形状係数を乗じた値を用いた。図3から、繰り返し数10回での疲労強度は、TSP-2, T-2, T-1の順で、それぞれ、1040, 820, 560MPaであった。この結果、同じ形状係数をもつ円周切り欠き試験片では、ガス軟窒化後に研削材を投射して表面層を除去したものが、窒化ままのものに比べ約30%高い疲労強度を示し、また同じ窒化ままであれば、形状係数 K_t を1から1.78にすることで、約45%の疲労強度上昇が得られることになる。なお、平滑試験片のシリーズT-1では、高サイクル域で破断した試験片の中に、表面下にきれつ発生点をもつ、いわゆるFish-eye型の破面が観察された。

図4に、T-2およびTSP-2シリーズの疲労試験実施前の試験片について計測した、深さ方向への硬さ分布を、図5に、表面近傍の断面微細組織写真を示す。組織写真から、窒化ままのT-2では、表層厚さ約10μmの白色の窒化化合物層が見られるのに対し、TSP-2では、ショットピーニング処理により窒化化合物層が完全に除去されていることがわかる。TSP-2の硬さ分布は、T-2の表面が約60μm除去されたと仮定した場合にほぼ一致しているとみなすことができ、表面

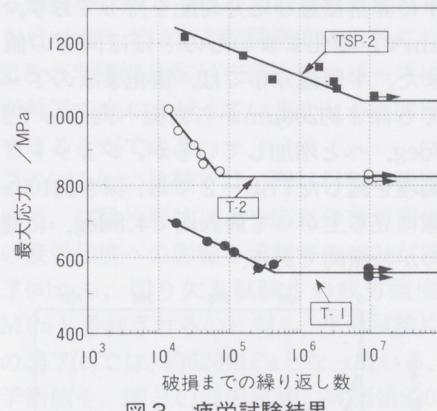


図3 疲労試験結果

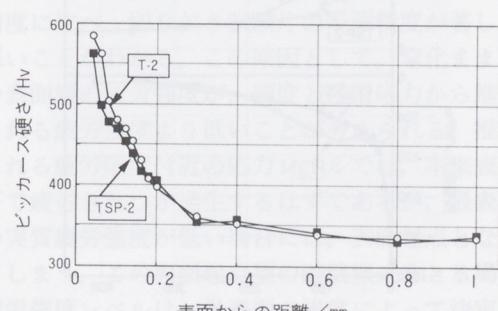
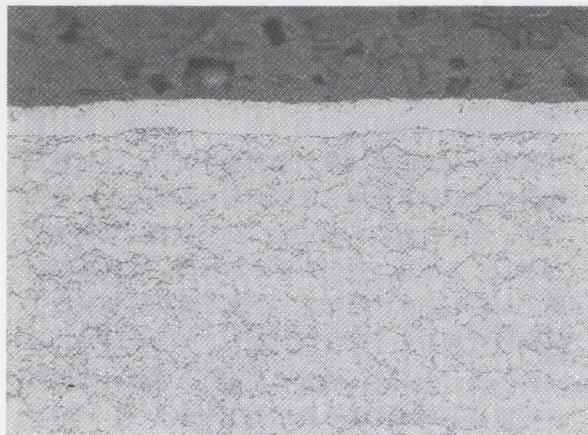
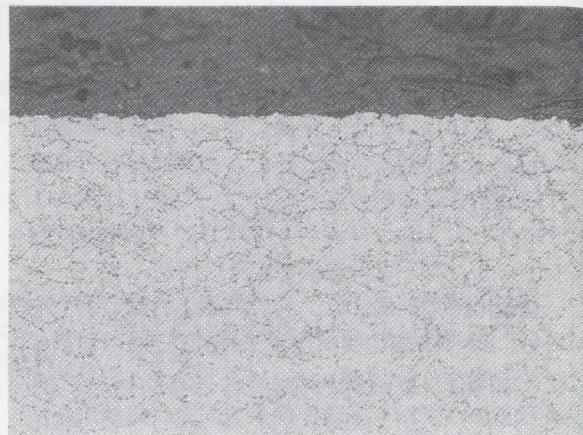


図4 T-2およびTSP-2の断面硬さ分布



(a) T-2



(b) TSP-2

20μm

図5 試験片表面近傍の断面顕微鏡組織

層除去後の実際の径の計測結果とも一致している。図6に、上述したシリーズの試験片について求めた、残留応力および半価幅の深さ方向の分布を示す。ガス軟窒化ままの場合、表面で約300MPaの圧縮応力があり、表面から内部にかけてなだらかに減少し、深さ約400μmでほぼゼロとなる。これに対し、ショットピーニングを施したものは、表面で約900MPaという極めて高い圧縮応力を示すが、表面下に非常に急な応力勾配を持っており、深さ約20μmで、窒化ままのものとほぼ同等の値となる。また、半価幅分布では、窒化ままのT-2においても深さ約200μmから表面へ向かって2.5から3.8deg. へと増加しているが、ショットピーニング処理を施したTSP-2では、深さ約100μmから急激に立ち上がって最表面で4.8deg. に達しているのが特徴的である。

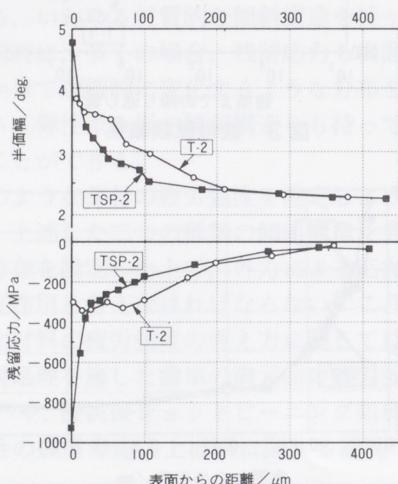


図6 T-2 およびTSP-2 における半価幅と残留応力分布

4 考察

表面硬化熱処理を施された材料の疲労強度は、破損起点となる疲労きれつの発生場所が表面であるか、内部であるかによって大きく異なることが予想される^{4),5)}。疲労きれつの発生場所は、材料の強度分布と、外力による表面下の応力分布との相対関係によって決定されると考えられる。この考え方を、ガス軟窒化処理材料に適用し、その手法の妥当性を検証した。

4.1 疲労強度分布の算出

均質材料の疲労強度、特に高サイクル域での疲労強度を、簡便な硬度測定から推測することは、一般によく行われており、種々の鉄鋼材料群について、硬度と疲労強度の関係が、求められている^{6),7)}。また、鉄鋼材料の疲労強度の平均応力依存性について多くの報告がなされており^{8)~10)}、Goodmanの関係を用いて処理されることが多い。これらのデータの蓄積を応用して、残留応力を考慮した疲労強度の推定式が提唱されている^{11)~13)}。本稿では田中らの、構造用合金鋼に関するデータベース⁶⁾の硬度と疲労強度に関する一次回帰式から得られた、疲労強度／硬度比として1.6を、また、同合金系の疲労限度線図におけるGoodmanの関係式から、疲労強度／平均応力比として-0.5を採用し、次式により疲労強度の推定を行った。

$$\sigma_W = 1.6 H_V - 0.5 \sigma_R \quad (1)$$

(1)式を用いて、窒化まま材と窒化後ショットピーニング処理を施した材料の二通りについて、測定した硬度分布と残留応力分布から、各深さ位置における疲労強度 σ_W を求め、表面からの距離の

関数として疲労強度分布を得た。それぞれのシリーズの材料について得られた疲労強度分布を、図7に、プロットしたシンボルとそれらを連結した実線で示した。

4.2 表面下の応力分布

円周切り欠きをもつ丸棒に曲げが働く場合の、切り欠き底における引張り主応力 σ_y の深さ方向の分布は、次式(2), (3)を用いて計算した結果から求めた。

$$\sigma_y = Kt \cdot \rho \cdot \sigma_N / (\rho + 2x) \quad (2)$$

$$\sigma_N = (-2\sigma_0/d) \cdot x + \sigma_0 \quad (3)$$

ここで、 Kt : 静的形状係数

ρ : 切り欠きの曲率

x : 切り欠き底表面からの距離

σ_0 : 切り欠き底での公称応力

d : 切り欠き底での試験片直径

形状係数 $Kt=1.78$, 最小試験片直径 $d=8$ の切り欠き底の応力分布を、公称曲げ応力100MPaごとに600から1200MPaまで計算したものを、図7(a) (b)に実細線にて示した。

また、平滑試験片については、式(3)を用いて求めたものを、同様に図7(c)に示した。

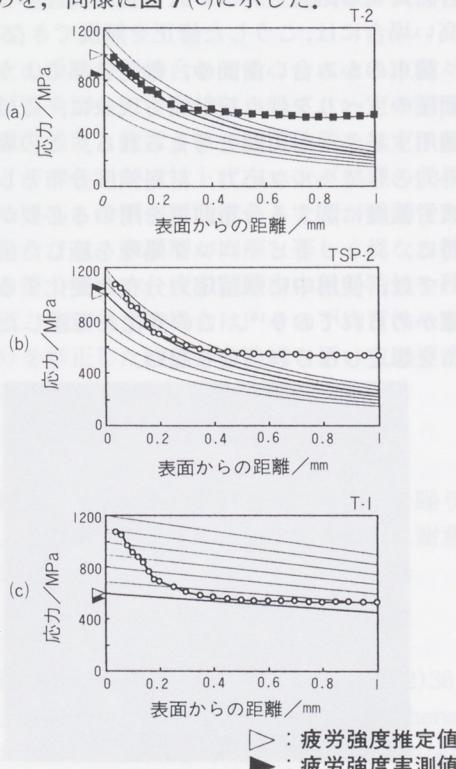


図7 各試験片における疲労強度分布と外力による応力分布の関係

4.3 疲労強度の推定と実測値との比較

図7では、硬度と残留応力分布から求めた材料の疲労強度分布と、外力による応力分布の相対関係が明確になっている。この図より、外力による応力分布曲線が低レベルから高レベルへと移行していく、最初に材料の強度分布線と接するレベルに到達した時が、材料の疲労限度であることがわかる。すなわち、応力分布曲線と強度曲線が一点で接する状態になったときの強度曲線から得られる表面の応力レベルがその材料の疲労強度として測定されることになる。また、材料中に欠陥や介在物などの不連続な部分の存在が無視できる場合には、その接点の深さ方向の位置が、疲労きれつの発生位置と一致していることになる。

図7(b)について、強度分布線に接する応力分布曲線が表面を表す縦軸と交わる点から疲労強度を予測すると、約1000MPaとなり、図3のTSP-2の疲労試験結果である1040MPaとほぼよい一致を示す。推定値と実測値との間にずれを生じる他の原因としては、ショットピーニングによって増殖した転移間の相互作用により可動転移密度が減少し、表面近傍の変形抵抗が上昇した結果、疲労きれつの発生が抑制されるなどの、材質の変化に起因する機構が作用していることも考えられる。ショットピーニングによる転移密度の上昇については、図6の半価幅分布がTSP-2シリーズにおいて表面付近で立ち上がっていることから間接的に確認することができる。

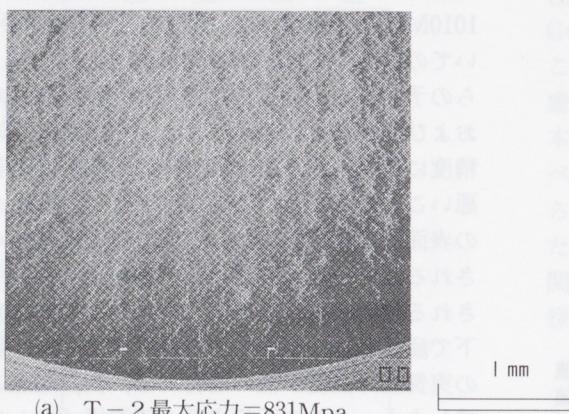
図7の(a)と(c)の比較では、同じ材料の強度分布について、試験片形状により応力分布が変化した場合の疲労強度への影響を予測することができる。

図7(a)から、切り欠き試験片の疲労強度が約1010MPaと予測されるのに対し、平滑試験片についての図7(c)では、約620MPaとなっている。これらの予測値を、図3の疲労試験の実測値820MPaおよび560MPaと比較すると、平滑試験片の予測精度に比べ、切り欠き試験片の予測精度が著しく悪いことがわかる。この原因として、空化まま材の表面層の疲労強度が、硬度と残留応力から推定される疲労強度より低いと考えられる。推定される疲労限度付近の応力レベルでは、本来表面下で疲労きれつが発生するはずであるが、最表面の実質疲労強度が低い場合には、表面起点となってしまう。この表面起点型の破壊様式をとる場合、疲労強度レベルは、最表面の強度によって決定され、そのレベルを越えることはありえない。そこ

で、T-2シリーズの中から、疲労限度付近で破断した切り欠き試験片について破面観察を行ったところ、図8(a)に示すように、表面を破壊起点とした破面を呈していることが確認された。この結果は、この材料の強度が表面層の疲労強度に支配されているという上記の推論を裏付けるものである。また、T-2のS-N曲線(図3)から、本試験で用いたガス軟窒化処理を施したままの材料においては、表面の窒化化合物層の疲労強度が、約820MPaであることが推測される。したがって、本材料の疲労強度分布線は、表面部のみ820MPaの不連続な値をとることになる。なお、平滑試験片の場合は、応力勾配が比較的ゆるやかであるため、図7(c)に示されるように強度分布曲線と接する応力分布線が、表面で820MPa以下となり本来の疲労強度を示すことになる。この場合、破壊起点は図から深さ0.4~0.6mmの内部破壊様式となるはずである。図8(b)は、T-1シリーズの疲労限度付近で破壊したテストピースの破面を示すが、表面下約0.5mmに起点をもつFish-eye型破面であり、上記の推測を裏付けるものと考えられる。

以上の結果から、ガス軟窒化処理鋼の疲労強度推定手法として、次の手順を踏むことが推奨される。

- 1) 硬度分布と残留応力分布を(1)式により合成した、強度分布曲線を描く。
- 2) その強度分布曲線と最も低い応力レベルで接する外力による応力分布曲線を求める。
- 3) 項目2)で得られた応力分布曲線が、試験片(または部材)の表面位置に達した応力レベルが疲労強度を表す。ただし、この応力レベルは、表面層の疲労強度を越えることはできない。



項目3)にある、表面層の強度については、硬度や、残留応力のみから推定することが困難な場合が多い。浸炭鋼の場合は、表面の粒界酸化層の存在が、また、窒化鋼の場合は、化合物層の性状が表面強度を決定することが多いと考えられる。さらに、村上らの指摘するように、非金属介在物の存在や^{8),13)}、試験環境から受ける腐食、酸化などの時間依存性の因子¹⁴⁾についても、無視できない場合がある。このような場合には、確実に表面で疲労きれつが発生していることを確認できる試験片と試験条件を用いて、表面層の真の疲労強度を実測する必要がある。

疲労きれつの発生場所については、項目2)の両分布曲線の接点の位置から推測することができる。この場合も、表面の真の疲労強度が実験的に求められていることが前提となる。

以上の手法は、材料因子が疲労中にほとんど変化しないことが前提となっているので、疲労限度付近の破損を扱う場合に有効である。試験中に硬度分布や残留応力分布が変化する場合には、その変化を予測して修正する作業が必要となる。特に、外力による応力レベルが疲労強度に比べて著しく高い場合には、こうした修正を無視できなくなる。

歯車のかみ合い歯面や、軸受け部のように高い面圧やすべりを伴う接触疲労現象に、この手法を適用することも可能と考えられる。この場合は、外力としてヘルツ応力、材料強度分布として剪断疲労強度に関する分布曲線を用いる必要がある。特に、ショットペーニング処理を施した歯車については、使用中に残留応力分布が変化することが確かめられており¹⁵⁾、この変化を考慮した強度分布を想定しなければならない。

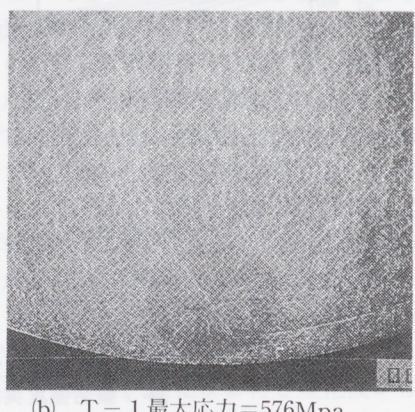


図8 試験片破面のSEM写真

5 まとめ

ガス軟窒化処理を施したJIS SCM440材について、表面下の硬度分布、残留応力分布と外力による応力分布との相対関係から疲労強度を推測する手法の妥当性を検証した。その結果、以下のような結論が得られた。

1. 表面に窒化化合物層がない場合、材料の疲労強度は、表面下の硬度分布と残留応力分布から推定される疲労強度分布曲線と接する、もっとも低いレベルの応力分布線により、数%の精度で推定することができる。また、接点の位置から、疲労きれつの発生箇所を推定することができる。
2. 表面に窒化化合物層がある場合の疲労強度分布は表面のみ特異値を設定する必要がある。本稿で試験した範囲では、ガス軟窒化処理したJIS SCM440材の化合物層の疲労強度は、820MPaであり、上記の方法で得られた応力分布線の表面でのレベルがこの値を越える場合は、この値が疲労強度の上限となる。また、この場合、疲労きれつの発生箇所は、表面となる。
3. 以上の手法を組み合わせることにより、種々の材質や切り欠き形状について、一定の精度で疲労強度と疲労きれつ発生位置を推定することができ、ショットピーニング処理の効果についても予測が可能であることが確認された。ただし、表面層が内部と著しく異なる性状を持つ場合や、疲労試験中に材料特性や残留応力が変化する場合は、その不均質性や変化分を修正した強度分布曲線を用いる必要がある。

謝辞

試験結果の考察にあたり有用なコメントを賜りました、名古屋大学工学部の田中啓介教授に謝意を表します。

■参考文献

- 1) 米谷 茂, 機械設計, Vol. 26, № 13(1982)36
- 2) H.J.Spies, Verhalten von Oberflaechenschichten und oberflaechenbehandelten Bauteilen bei komplexen Beanspruchungen, VEB Deutscher Verlag fuer Grundstoffindustrie, Leipzig 262 (1987)7-26
- 3) 香川裕之, 石黒守幸, ショットピーニング技術協会シンポジウム, 94.9.13 予稿集(1994)1
- 4) T.Naito, H. Ueda, M. Kikuchi, Metallurgical Transactions A, Vol. 15A, July (1984)14-311436
- 5) 浅見克敏, 熱処理, Vol. 25, № 3 (1985)123-128
- 6) 田中道七編, 金属材料疲労強度データベースの解析と耐疲労信頼性設計資料集の編集, 昭和61年度科学技術研究費補助金研究成果報告書, 研究課題番号60302040, (1987)
- 7) M.F.Garwood, et. al. Correlation of Laboratory Tests and Service Performance. Interpretation of Tests and Correlation with Service, ASM(1951)1-77
- 8) 村上敬宣, 上村裕次郎, 夏目喜孝, 宮川進, 日本機械学会論文集, A編, 56, 525(1990)1074-1081
- 9) 日本材料学会, 金属材料の疲労強度データ集, Vol. 1-3, (1982)
- 10) 日本機械学会, 金属材料疲労強度の設計資料, 1一般, 寸法効果, 切り欠き効果, (1982)
- 11) 村上敬宣, 鉄と鋼, Vol. 75, № 8 (1989)126
- 12) 松本和明, 三瓶哲也, 豊田武司, 金沢孝, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, № 900-86(1990)275-277
- 13) 村上敬宣, 宇宿尚史, 日本機械学会論文集, A編, 55-510(1989)213
- 14) 江村秀樹, 浅見克敏, 日本機械学会論文集, A編, 55-509(1989)45-50
- 15) 安達修平, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, № 900-86(1990)278-280