セラミックカッタの熱損傷 (第 1 報)*

— 切削諸因子の影響 —

杉田 忠彰** 山田 巖**

Thermal Cracks of Ceramic Face Milling Cutter (1st Report)

— Effects of Some Machining Conditions —

Tadaaki SUGITA, Iwao YAMADA

In this paper, thermal cracks arised in ceramic face milling cutter used sintered pure alumina (Al_2O_3) have been observed, and typical tool face damages caused of the thermal cracks have been discussed in relation to some machining factors.

As the results, it is evident that the thermal cracks and damages are changed by kinds of workpiece material as well as cutting conditions, especially cutting speeds and feeds.

Generally, the cracks at right angles to cutting edge line (right angle cracks) are produced by alternated thermal cycles in the first period of the machining, and the cracks run parallel to the cutting edge (parallel cracks) are detected with increasing of the tool wear, in other words increasing of each length of the right angle cracks.

Cutting conditions being severe, parallel cracks are formed, and then a typical network type cracking is observed under the more severe cutting condition. On the other hand, configuration of the cracks with straight line type cracking become to be observed in the opposite cutting condition. The cracks are observed at 0.02—0.04 mm, distance from the cutting edge, and also each other distance of the cracks is about 0.03—0.05 mm.

1. 緒 言

Al_2O_3 系のセラミックが工具材料として実用に供されるようになってから、その切削性能あるいは工具特性は種々の観点から検討されるようになった。とくに連続切削を中心としての発展が目ざましく、最近では奥島、藤井らの研究¹⁾ あるいは大越、佐田、天野らの研究²⁾ によってセラミック工具の実用的価値が一段と明らかになった。しかしながら、セラックのごとき脆弱な材料を断続切削に用いた研究は比較的少なく、若干の試用例が報告されているにすぎない。³⁾ その場合においても被削材として鋳鉄を対象としており、仕上面としては良好な結果を得ても工具寿命の点およびそれに関連した切削能率の点ではいまだしの感がある。筆者の一人が高純度アルミナを工具材料とした正面フライスを試作して、鋳鉄系の被削材について切削試験を行なったところによれば工

具形状、とくに切れ刃稜線部の形状を適当に考慮すること (切れ刃線部に過大応力が生じないように考慮) によって、刃欠けなどを避けることが可能であり、かつ実用的な工具寿命をとり得ることがわかった。⁴⁾ ところが、この場合に連続切削のときは異なった様相が刃面に見られ、セラミックのフライスへの応用をさらに拡張するためには、まずその影響を明らかにしておく必要がある。すなわち、それはすでに超硬カッタにおいて、奥島、星ら、⁵⁾ および篠崎⁶⁾ によって論じられてきた刃面の熱損傷である。超硬合金に比してその固有強度ひいては熱衝撃抵抗の小さなアルミナにおいては、当然多数の熱亀裂の発生を予測することができる。これらの熱亀裂の挙動のいかんによって工具損傷あるいは工具寿命がどのように左右されるかは興味深い問題である。ここで当面問題となるのは、

- (i) 刃面にいかなる熱亀裂が発生するか
- (ii) 切削条件あるいはその他の切削上の諸因子と熱亀裂の関係
- (iii) 熱亀裂が生成してから変化してゆく過程

* 昭和37年11月 精機学会関西支部秋季講演会にて講演

** 正会員 姫路工業大学

- (iv) 熱亀裂の形態およびその深さ
 (v) 熱亀裂が工具損傷あるいは工具摩耗におよぼす影響
 (vi) 熱亀裂生成に関する熱解析的考察

の諸点である。

正面フライス切削においては、カッタの1回転中の切削行程において刃面は切削熱により高温下下にさらされ、非切削行程（空転期間）では見かけ上高速度の常温空気流によって冷却される。これはカッタの1回転中に1回の熱サイクルがあったと考えてよい。ここにおいて、刃物内部には時間に関係した複雑な温度分布を生じ、それによって特有の熱応力を生ずる。この熱応力の大きさによっては単に亀裂としてとどまらず、刃先の破断に発展することもあり得るであろう。その上、切削抵抗から生ずる機械的な応力の作用も重なるために現象は非常に複雑なものとなってくるはずである。しかし、外見的には熱的破壊と機械的破壊とはその破壊の形態から区別して考えられよう。すなわち、破壊の主原因が機械的応力であるならば、その破壊は一般に完全破壊の形をとるであろうし、熱的応力が主であれば、停留亀裂のごとき不完全破壊の状態も存在し得る。

以上のごとき断続切削中に刃面に生ずる亀裂は、熱応力を主原因とする熱亀裂であると考えられ、本研究でこの熱損傷の挙動を系統的に調べるために、まず本報告では、前記の(i)(ii)について述べ、その他は第2報以下

で論じてあわせてセラミックカッタの熱損傷を明らかにしたい。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験には既報⁴⁾と同様のシンシナティ社製立て型2番フライス盤と直径220φ、ブレードシャンク寸法25mm角、セラミックチップ寸法13×13×5（旋削用チップ）のスローアウェイ方式の正面フライスを用いた。カッタの工具形状はアキシャルレーキ角 -7° 、ラジアルレーキ角 -7° 、コーナ角 20° であり、実験中に刃の欠けを防止する目的ですくい面、逃げ面のそれぞれと 45° をなすように切れ刃上にランドを設けた。ランド幅は0.1~0.15mmを全実験範囲に対して採用したが、工具寿命の点からはもっと厳密に決める必要がある。いまの場合においてはできるだけ広い摩耗面を残す必要があるためにランド幅を小さくした。

切削は幅100mm、高さ120mm、長さ600mmの被削材の中心とカッタ中心とが一致するようにセット（エンゲージ角 27° ）して切込み量を常に2mmとし、切削速度と一刃送り量を変えた。

2.2 被削材

実験に用いた被削材の種類と諸性質を表1に示す。ミーハナイトGCは一般構造用材であり、GMはその強力形のものである。そして後者は軟鋼とかわらない抗張力

表1 被削材の物理的性質

性 質 種 類	化 学 成 分 (%)						機 械 的 性 質		
	C	Si	Mn	P	S	その他	引張り強さ kg/mm ²	シャルピー 衝撃値 kg·m/cm ²	硬 度 BHN
FC-15	3.28	1.38	0.64	0.129	0.085	—	15.6	—	170
ミーハナイトメタル GC	3.1	1.1	0.8	0.15	0.12	—	28	0.63	190
ミーハナイトメタル GM	2.9	1.1	0.9	0.10	0.12	3.5	38	1.12	220

表2 焼結アルミナの物理的性質（常温における値）

密 度 g/cm ³	融 点 °C	耐熱限度 °C	熱膨張係数 (20~1000°C) ×10 ⁻⁶	熱伝導率 kcal/m·h·°C	比 熱 kcal/kg·°C	電気抵抗 μΩ/cm
3.9~3.93	2050	1200	8.8	14.4	20°C で 0.21 500°C で 0.25	10 ⁸ ~10 ⁹
引張強さ kg/mm ²	圧縮強さ kg/mm ²	抗折力 kg/mm ²	シャルピー衝撃値 kg·m/cm ²	硬 度 RA	弾性係数 kg/mm ² ×10 ⁴	剛性率 kg/mm ² ×10 ⁴
20~25	400	40~45	0.05~0.08	91~93	3.5	1.4

を有している。工具寿命の点からみると、ミーハナイト GM が最も削りがたく、GC と FC-15 は大差がない、また 鋳鉄系材料の特徴として衝撃値の低いことが知られる。

2.3 セラミックチップの性質

実験に使用したセラミックチップは約 99% Al_2O_3 の純度の焼結材で、 $2 \sim 3 \mu$ の粒径をもっている。メーカー等により公表され、一般に知られているその物理的性質は表 2 に示されている。このセラミックは低い熱伝導率を示し硬度が高く、耐熱限度が大である。強度的には衝撃値の低いことから脆性の著しいことが知られ、引張強さに対して圧縮強さが大きい。抵抗力は超硬合金の約 $\frac{1}{2}$ で、この辺に工具材料としての欠点がうかがえる。

図 1 すくい面および逃げ面上に発生する熱亀裂の一例

切削速度 $V=290 \text{ m/min}$, 一刃送り $f_t=0.175 \text{ mm/t}$, 切込み $d=2 \text{ mm}$, 被削材 FC-15

t : 見かけ上の切削時間, n : 総熱サイクル数

注) (a)(b)(c)のそれぞれの写真で上はすくい面を, 下は横逃げ面を示す

3. 実験結果とその考察

3.1 刃面に発生する熱亀裂

前述のセラミック正面フライスで鋳鉄 FC-15 を切削したとき, ある程度の工具摩耗量に達すると, 刃面すなわちすくい面と逃げ面の摩耗痕上に多数の亀裂を伴った損傷状態が見られるようになる。一般的な傾向としてこの刃面損傷は, 切削条件が苛酷になるにつれて顕著になるように見受けられた。一例として図 1 に切削時間の経過と刃面損傷との関係を示す。 t は見かけ上の切削時間 (カッタの回転時間), n は熱サイクル数 (カッタの延べ回転数) を示し, 上の写真はすくい面を, 下は逃げ面

を示している。この刃面損傷は亀裂の発生を中心として, その亀裂にもとづいて起こっていると解せられる。図中の (a)(b)(c) はそれぞれある切削時間経過後の刃面損傷の各例を示している。したがって, このような写真から, 切削時間 (時には熱サイクル) とともに熱損傷がいかに変化するかわかることができる。

切削条件が苛酷になること, すなわち切削速度とか送り量を大きくすることは切削温度を上昇させる結果となり, その点から考えれば, 切削温度の上昇と亀裂の発生およびその形態とは密接な関係があるようである。図 1 において, すくい面, 逃げ面のいずれにおいてもある切削時間だけ経過した後には亀裂を発生し, その亀裂は比較的広い溝として観察される。そしてこの亀裂は, 切れ刃端から $0.02 \sim 0.04 \text{ mm}$ だけ内側に入った個所から発生している。この事実から, 切れ刃端より若干はなれたところより内側で生ずる熱応力が亀裂を生ぜしめることに関与していると考えることができ, 切れ刃端近傍に発生する熱応力は亀裂を生ぜしめるのに低すぎると考えてさしつかえなかろう。

亀裂は切れ刃に対して直角にも平行にも生じ, その形状は網目状もしくは矩形状をなしている。そして亀裂間の距離は大体 $0.03 \sim 0.05 \text{ mm}$ であり, 工具摩耗の進行につれて若干変化する

図 2 熱亀裂の発生条件

w : 摩耗幅, x : 亀裂間隔, y : 切れ刃線から亀裂の発生する点までの距離

が、比較的等しい間隔で配列している。さらに亀裂の発生状況を調べてみると、切れ刃に平行な亀裂は切れ刃に直角な亀裂に寸断された形をとっていることが知られる。このことは、切れ刃に直角な亀裂が先に発生したのではないかと推察するのに役立つものである。アルミナのごとく、寸法効果の著しい材料⁷⁾においては同一の応力が作用しても亀裂がどの方向に生ずるかは試料の形状に大きく依存するはずである。摩耗痕が切れ刃線に沿って細長い長方形であることによって、亀裂はまず切れ刃に直角をなすように発生するであろうと考えられる。いま亀裂の発生する順序を予想して模型的に図解すると図2のごとくなる。まず(a)において、切削のごく初期に切れ刃線から y だけ入ったところに直角な亀裂が x の間隔で生じ、その亀裂の長さが $(x - \Delta x)$ である状態では、直角亀裂はそれぞれが自由端となり、平行亀裂が入るには直角亀裂の長さが Δx だけ不足していることを示している。 x と y とは大体等しい値である。この状態から切削が進行して(b)のごとくなると、平行亀裂の発生条件が満たされ、不足分の亀裂長さ Δx が補われたので、平行亀裂も生ずるようになる。そしてそれ

以後は以上のことが連続的に起こり、平行亀裂間隔も大体 x に等しくなって規則性のある亀裂配列をとるものと考えられる。

以上の考察から、逃げ面に発生する亀裂の生成過程については一応推察することができるが、一方すくい面上においては、切削の初期から比較的広い範囲にわたって切りくずが接するので、極端な場合には1回の熱サイクルによって亀裂の規則正しい配列がみられることも考えられる。ところが図1の(a)と(b)の比較でも明らかなように、やはりある切削時間後に亀裂を発生している。この理由について一つの考え方として、次のように考察してみた。刃面は切削の初期において、研摩仕上がったままに近い表面を保っている。この表面あらさは $H_{\max}$ で $0.5 \sim 1 \mu$ 程度である。切りくずはその面上を流れているために、実質的に $0.5 \sim 1 \mu$ 程度の空気

層が切りくずとすくい面の間に存在する(突起部で互いに接してはいるだろうが)。切りくずから刃面への切削熱の伝達はこの空気層を介して行なわれることになり、空気の熱伝導特性の悪いことから推して、切削の初期におけるすくい面の温度はさほど高くない。同時に、この

図 3 切削速度と熱損傷 (高速)

切削速度 $V=290 \text{ m/min}$, 一刃送り $f_t=0.085 \text{ mm/t}$, 切込み $d=2 \text{ mm}$, 被削材 F C-15
写真は横逃げ面を示す

図 4 切削速度と熱損傷 (中速)

切削速度 $V=220$ m/min, 一刃送り $f_t=0.085$ mm/t, 切込み $d=2$ mm, 被削材 FC-15
写真は横逃げ面を示す

- (a)
 $t=20$ min
 $n=6300$ cycles
- (b)
 $t=40$ min
 $n=12620$ cycles
- (c)
 $t=100$ min
 $n=31600$ cycles
- (d)
 $t=133$ min
 $n=42100$ cycles
- (e)
 $t=166$ min
 $n=52700$ cycles

図 5 切削速度と熱損傷 (低速)

切削速度 $V=160$ m/min, 一刃送り $f_t=0.081$ mm/t, 切込み $d=2$ mm, 被削材 FC-15
写真は横逃げ面を示す

- (a)
 $t=30$ min
 $n=6630$ cycles
- (b)
 $t=57$ min
 $n=13300$ cycles
- (c)
 $t=110$ min
 $n=25500$ cycles
- (d)
 $t=156$ min
 $n=36600$ cycles
- (e)
 $t=227$ min
 $n=53200$ cycles

時期においては、切りくずがカールしているのに反し、すくい面はほとんど平面であるために（換言すれば、クレータ摩耗が進行していないために）十分広い面での接触が考えられないので、切りくずから刃面への熱は空气中に放出されることが多く、したがってすくい面が高い温度になると考えられない。その結果、発生する熱応力も小さいと考えてよいのではなかろうか。切削が進行して、切りくずと刃面とが密接に接するようになると、切削熱は無限大に近い熱伝達係数で刃面へ伝達されるようになり、亀裂も生ずるようになる（たとえば、後述の図 6 の (a) と (b)、とくに図 7 の (a) と (b) の比較において、それぞれの (a) 図が滑らかなアルミナ素面の露出の少ないことを示し、あるいは、切れ刃線からもっともはなれた摩耗痕端周辺の面が荒れている状態などより考察せられる）。

3.2 切削条件と熱亀裂

3.1 でも触れたように、切削熱条件が異なると熱亀裂の発生状況あるいは形態が異なるが、この切削熱は種々の因子によって左右されることが一般に知られている。切削条件、被削材質あるいは工具形状等がそれである。このうち工具形状は 2.1 にしるしたごとく一定であり、切削条件のうちでも切込み量も一定である。ここでは切削速度と一刃送り量とを変え、次節で被削材質を変えて熱亀裂との関係を論ずる。

一刃送り量を大略一定に保って、切削速度を変えたときの横逃げ面の損傷を 図 3, 4, 5 に示す。図 3 は切削速度 290 m/min の場合であり、図 4 は 220 m/min, 図 5 は 160 m/min の場合を示す。これらの 3 種類の写真から、亀裂の出はじめる時期は切削速度の高いほど早いことがわかる。そしてそれは工具摩耗幅と密接な関係のあることが知られ

(a)
 $n=1050$ cycles

(b)
 $n=6720$ cycles

(c)
 $n=10100$ cycles

図 6

すくい面の熱損傷と一刃送り量との
関連性 (I)

切削速度 $V=220$ m/min, 一刃送り
 $f_t=0.313$ mm/t, 切込み $d=2$ mm
被削材 FC-15

(a)
 $n=1950$ cycles

(b)
 $n=8485$ cycles

(c)
 $n=11750$ cycles

図 7

すくい面の熱損傷と一刃送り量との
関連性 (II)

切削速度 $V=220$ m/min, 一刃送り
 $f_t=0.165$ mm/t, 切込み $d=2$ mm
被削材 FC-15

(a)
 $n=6300$ cycles

(b)
 $n=12620$ cycles

(c)
 $n=31600$ cycles

図 8

すくい面の熱損傷と一刃送り量との
関連性 (III)

切削速度 $V=220$ m/min, 一刃送り
 $f_t=0.085$ mm/t, 切込み $d=2$ mm
被削材 FC-15

る。切削速度が低下してくると、亀裂は次第に発生しがたくなり、細かい刃欠けを生じやすくなる。この亀裂の発生程度は一刃送りの影響を受けることが大きく、一刃送りを変化すると亀裂の形状も異なってくる。

図 6, 7, 8 は切削速度 220 m/min の場合におけるすくい面上の損傷を示す。図 6 は一刃送り 0.313 mm/t,

図 7 は 0.165 mm/t そして図 8 は 0.085 mm/t の条件である。これらの写真からもわかるように、一般に一刃送りの大なるほど刃面上の損傷は顕著であり、低い熱サイクル数の時期に亀裂を生ずるようである。また一刃送りの影響は亀裂の形状に変化を与える。図 9 は切削速度 290 m/min における横逃げ面上の刃面損傷形態におよ

(a) $f_t = 0.354 \text{ mm/t}$
 $t = 38 \text{ min}$
 $n = 15800 \text{ cycles}$

(b) $f_t = 0.175 \text{ mm/t}$
 $t = 60 \text{ min}$
 $n = 24570 \text{ cycles}$

(c) $f_t = 0.086 \text{ mm/t}$
 $t = 105 \text{ min}$
 $n = 44000 \text{ cycles}$

図 9

一刃送り量による損傷形態の変化
(いずれも横逃げ面)

切削速度 $V = 290 \text{ m/min}$, 切込み $d = 2 \text{ mm}$, 被削材 FC-15

すくい面

ランド面

逃げ面

図10

ミーハナイトメタル GM の切削における熱損傷 (高速の場合)

切削速度 $V = 290 \text{ m/min}$, 一刃送り $f_t = 0.175 \text{ mm/t}$, 切込み $d = 2 \text{ mm}$, 被削材ミーハナイト GM, 切削時間 $t = 30 \text{ min}$ 後, 熱サイクル $n = 12100 \text{ cycles}$

すくい面

ランド面

逃げ面

図11

ミーハナイトメタル GM の切削における熱損傷 (低速の場合)

切削速度 $V = 160 \text{ m/min}$, 一刃送り $f_t = 0.154 \text{ mm/t}$, 切込み $d = 2 \text{ mm}$, 被削材ミーハナイト GM, 切削時間 $t = 104 \text{ min}$ 後, 熱サイクル $n = 24300 \text{ cycles}$

すくい面

ランド面

逃げ面

図12

ミーハナイトメタル GC の切削における熱損傷

切削速度 $V = 290 \text{ m/min}$, 一刃送り $f_t = 0.175 \text{ mm/t}$, 切込み $d = 2 \text{ mm}$, 被削材ミーハナイト GC, 切削時間 $t = 60 \text{ min}$ 後, 熱サイクル $n = 24900 \text{ cycles}$

ばす一刀送り量の影響を示す。一刀送り量の増加は切削温度の増加を意味するが、このような切削温度の高くなるような条件下においては、(a)に示されるように典型的な網目状亀裂を示し、切削温度の低くなるような一刀送りの小さい(c)のごとき場合においては直線状亀裂を生ずる。そして(a)(c)の中間的な条件(b)においては、網目状と直線状の混合した状態の亀裂が観察される。これらの亀裂形状の相違は発生する熱応力の程度に支配されるものと考えられる。たとえば、(a)においては高い熱応力のために、直角亀裂のみならず平行亀裂の発生条件も満足され、平行亀裂の出る状態下では直角亀裂とほとんど同時に発生するために網目状となる。切れ刃端に近いところで、直角亀裂だけであることは図2の説明により納得できる。(c)では熱応力が低いために直角亀裂の発生のみが主となる。

3.3 被削材質の影響

発生する切削熱の大小を左右するものとして、前述の切削条件のほかに被削材質があげられる。3.1, 3.2 においてはすべて F C-15 の切削中に発生する熱損傷を示したが、これに対してここでは鋳鉄系の材料であるミーハナイトメタル G M と G C の切削中に見られる刃面損傷について述べる。

図10はミーハナイト G M を切削速度 290 m/min, 一刀送り 0.175 mm/t で切削したときの刃面損傷である。F C-15 の場合との大きな差異は、ランド面全体にわたって亀裂を生じ、その亀裂の大半は切れ刃端にまでびていることである。これに対して図11に示す、切削速度 160 m/min, 一刀送り 0.165 mm/t の場合では、切れ刃端まで亀裂は進行していない。この条件下では、F C-15 の切削の場合においてはあまり亀裂を生じなかった。図12は図10と同一条件でミーハナイト G C を切削したものである。図10と対照的なのは、すくい面上の亀裂が少ないが、逃げ面での亀裂形状、数にはほとんど差がないことである。図6~8や以上の結果によると、切削条件による切削温度の変化は、逃げ面でよりもすくい面で著しいのではないかということを暗示している。ミーハナイト G M は他の材料よりも機械的性質のすべての点においてすぐれており、他のものよりも削りがたいことから、これの切削においては高い切削温度が期待される。このことは、切削実験中に非常に多数の火花発生があった(他の材料ではミーハナイト G C で若干あり、F C-15 ではほとんど見られなかった)ことから考察せられる。結局、ミーハナイト G M の切削中に刃物に生ずる熱応力が最も大きいように思われる。

4. 総 括

高純度焼結アルミナを鋳鉄系材料の正面フライス切削用工具材料に適用して、高能率の切削を行なわしめる研究において、その刃面に多数発生する熱亀裂にもとづく熱損傷を種々の条件について調べた結果、次のごとき諸点にこれをまとめることができる。

- 1) 熱亀裂はすくい面、逃げ面のいずれにおいても生じ、切れ刃に直角な亀裂も平行な亀裂も出るが、その発生状況は切削温度を支配する因子によって左右される。
- 2) 各熱亀裂の間隔は切削条件、摩耗痕幅によって多少異なるが、大体 0.03~0.05 mm であり、亀裂の発生点は切れ刃線より 0.02~0.04 mm だけ内側に入った個所である。
- 3) 切れ刃に直角な亀裂がまず先に発生する。
- 4) 切削速度が高いほど熱亀裂は早く出現するが、これは工具摩耗幅と密接な関係がある。
- 5) また一刀送りによって熱亀裂の生成は異なる。送り量の大きるときには網目状、小なるときには切れ刃に直角な直線状の亀裂配列をとる。
- 6) 被削材質と熱亀裂の関係では、ミーハナイトメタル G M の切削中に最も亀裂を生じやすく、その亀裂の多くは切れ刃端にまで達している。

終わりにあたり、ご指導を賜った大阪大学工学部上田太郎教授ならびに田中義信教授に心よりお礼を申し上げる次第である。また実験試料について種々のご配慮をいただいた日本特殊陶業株式会社研究部の諸氏のご厚情に感謝の意を表する。(1964, 2月19日受付)

参 考 文 献

- 1) 奥島, 藤井: (i) セラミック工具の物理的性質(特に溶着性について), 日本機械学会論文集, 26巻163号(1960) 418.
(ii) セラミックバイトの寿命曲線について, (第1報)(第2報)(第3報), 日本機械学会論文集, 29巻199号(1963) 466, 473, 481.
(iii) セラミック工具実用化に関する研究, 日本機械学会誌, 66巻535号(1963) 1035.
- 2) 大越, 佐田, 天野: セラミック工具の切削性能(第2報), 日本機械学会論文集, 26巻163号(1960) 408.
- 3) たとえば Д. Н. ТРОИЦКАЯ: Фрезерование Серого Чугуна Торцовыми Фрезами с Минералокерамическими Пластинами, ВЕСТНИК МАШИНОСТРОЕНИЯ, No. 8 (1958).
R. M. Gill, C. Spence: Now—Successful Ceramic Milling, Metal Working Production, March, 23

- (1960).
- 4) T. Sugita : Application of Al_2O_3 Ceramics in Face-Milling, Reports of Himeji Institute of Technology, No. 16 (1963).
- 5) 奥島, 星 : 超硬正面フライスにおける熱亀裂 (第 1 報), 日本機械学会論文集, 27 卷 178 号 (1961) 843.
- 6) 篠崎 : 超硬正面フライスの熱損傷, 日本機械学会論文集, 28 卷 187 号 (1962) 339.
- 7) たとえば S. S. Manson : Behavior of Materials under Condition of Thermal Stress, NACA Report, 1170 (1954) 317.
- 鵜戸口 : 熱衝撃および熱疲労について, 日本機械学会誌, 61 卷 476 号 (1958) 1044.
- 金沢 : 鋼材のぜい性破壊についての理論的研究の展望, 日本機械学会誌, 61 卷 476 号 (1958) 1000.
-