研 究

高切込み研削における研削比と実除去速度*

——高切込み研削に関する研究 (第4報)——

安井平司** 松尾哲夫** 留守浩充*** 末広照義† 中園 汎††

Grinding Ratio and Actual Metal Removal Rate
in High-depth of Cut Grinding
—Studies on Heavy Grinding (4th Report)—Heiji YASUI, Tetsuo MATSUO,
Hiromitsu RUSU, Teruyoshi SUEHIRO
and Hiroshi NAKAZONO

In the research, wheel wear rate B and actual metal removal rate Z_{tp} were measured over a wide range of theoretical metal removal rate Z_{th} . By using the results, the grinding ratio G_B and the Z_{tp} in high-depth of cut grinding have been investigated mainly. The conclusions obtained are as follows: (1) At the Z_{th} within a critical theoretical metal removal rate $(Z_{th})_{cr}$, the grain fracture is related to the B . At the Z_{th} , the B and the G_B do not show large variation for varying Z_{th} . And,

the Z_{tp} is regarded as being approximately equal to the Z_{th} . (2) At the Z_{th} over the $(Z_{th})_{cr}$, the bond fracture is related to the B . From the $(Z_{th})_{cr}$, the B and the G_B begins to increase and decrease steeply with the increase of Z_{th} . And, the Z_{tp} begins to become outstandingly smaller than the Z_{th} . (3) The $(Z_{th})_{cr}$ becomes larger for wheels of coarser grain and harder grade. Grain type in wheel influences the value of the $(Z_{th})_{cr}$. (4) The Z_{th} from which Z_{tp} does not increase with the increase of Z_{th} , exists. (5) The sum of machining cost and wheel cost shows the minimum at a Z_{th} near the $(Z_{th})_{cr}$.

Key words: high-depth of cut grinding, heavy grinding, actual metal removal rate, grinding ratio, critical theoretical metal removal rate, grain fracture, bond fracture, limitation of actual metal removal rate, machining cost, wheel cost.

1. は じ め に

前報まで^{1)~3)}に高切込み研削における砥石の損耗特性を概括的に明らかにし得ることができた。しかし、実作業での最適な高切込み研削条件や高切込み研削に適したより良い砥石の開発を考えるには、検討した研削条件の範囲が比較的狭く、不十分であった。また、実作業を考える場合には、基礎的な砥石の損耗特性という観点よりも、むしろ加工費とより直接的な関係をもつ研削比や実除去速度での検討の方が、より具体的で有用であるが、この観点からの検討も不十分であった。このようなことの外、前々報²⁾で砥石の損耗速度がある臨界の理論削除率を越えると急激に上昇し始めることや、ある限界の理論削除率以上では、砥石の損耗によって理論削除率を増加しても、実削除率は増加せず、逆に減少するようになる可能性を示したが、その発生機構や存在の確認に

についての検討も十分でなかった。

そこで、本報では、比較的低い理論削除率から臨界や限界理論削除率をも検討し得る高い理論削除率までの広範囲の理論削除率に対する各種砥石の損耗速度および実削除率を調べた。そして、その結果を用いて高切込み研削における研削比と実除去速度を検討するとともに、加工経費についても言及した。また、臨界理論削除率の発生機構を切れ刃の挙動と関係させながら検討するとともに、限界理論削除率の存在の検討もした。なお、工作物は、前報までに用いてきたSKD 11 ダイスイ工具鋼の生材を、より高切込み研削作業の対象になりやすい、焼入れ処理材に変えている。

2. 実験方法および条件

実験は前報までと同様、岡本工作機械製作所製のPSG-5 BE 平面研削盤を使用して、すべて平面ブランチカット研削で行った。表1に本実験で用いた主な実験条件を示す。表中の研削液エマルジョンは10倍希釈のW1種2号相当品である。なお、実験装置および実験方法は前報³⁾と同様である。

3. 実験結果および考察

図1に各種結合度の砥石に対する設定砥石切込み t_s (μm) (以下では、後述するものも含めて、差し支えが

* 原稿受付 昭和57年4月12日。昭和52年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和52年10月16日)および昭和53年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和53年10月3日)ならびに昭和56年度精機学会長崎地方講演会(昭和56年11月26日)にて発表。

** 正会員 熊本大学工学部(熊本市黒髪2-39-1)

*** 正会員 鹿児島市水道局(鹿児島市鴨池新町1-10)

† 正会員 日立造船(株)(大阪市此花区桜島1-3-40)

†† 正会員 西日本工業大学(福岡県京都郡刈田町新津1633)

Table 1 Grinding conditions

Grinding wheel	Types: WA 46 I 8 V, WA 46 J 8 V WA 46 K 8 V, WA 46 M 8 V Dimensions: $\phi 205 \times 19 \times \phi 50$ mm
Work	Type: SKD 11 ($H_v \approx 800$) Dimensions: Length 100 mm Width 4 mm
Dressing	Feed: $300 \mu\text{m}/\text{rev}$ Depth of cut: $30 \mu\text{m}/\text{pass}$
Wheel speed V	32 m/s
Table speed v	0.2 m/s
Depth of cut t_i	$30\text{--}150 \mu\text{m}/\text{pass}$
Coolant	Type: Emulsion type Flux: 4 L/min

Fig. 1 Effect of wheel grade on residual stock removal ratio related to wheel wear

ないと考えられる場合には記号のみで示す)と単位設定砥石切込み当たりの平均砥石半径減耗量の割合 $A_r = (\Delta R/nt_i) \times 100 (\%)$ との関係を示す。なお、ここで用いている $(\Delta R/n)$ は第2報²⁾で示した第3損耗過程(定常砥石損耗過程)における研削1回当たりの砥石半径減耗量である。また、 A_r は第2報²⁾で示した高切込み研削における理論削除率 Z_{th} ($\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$) と実削除率 Z_{ip} ($\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$) との下記関係式から考えられるように、砥石の損耗による切残し率をも意味するものである。

$$Z_{ip} = \left\{ t_i - \left(\frac{\Delta R}{n} \right) \right\} v = \left\{ 1 - \left(\frac{\Delta R}{nt_i} \right) \right\} Z_{th} \\ = (1 - B I_w \times 10^{-3}) Z_{th} \quad (1)$$

ここで、 B : 単位研削幅で単位量を研削した場合の第3損耗過程における砥石半径減耗量 ($\mu\text{m}/\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$), I_w : 工作物長さ (mm)。

図よりわかるように、各結合度の砥石ともその結合度

に対応するある大きさの t_{ic} (以下では、臨界設定砥石切込み (t_{ic}) と記す) 以下の範囲では、 t_{ic} を大きくしても A_r , 言い換えれば、式 (1) から容易に理解できるように砥石の損耗速度 B はそれほど増加しない傾向にある。なお、結合度 I の場合には (t_{ic}) が存在することは明確には言えないが、この点については後に言及する。そして、(t_{ic}) 以下の A_r は結合度によって大きな差がみられず、約 5% 程度である。しかし、(t_{ic}) を越えて t_{ic} を大きくすると、結合度の低い砥石から順に A_r が急増していく。このように (t_{ic}) を越えて t_{ic} を大きくすると、結合度の低い砥石から順に A_r が急増していくことから、(t_{ic}) 以上の t_{ic} の範囲における B には、結合度と関係をもつ切れ刃の脱落が主として関係するものと考えられる。この一方、結合度によって A_r に大きな差がみられない (t_{ic}) 以下の t_{ic} の範囲における B には、前報³⁾でも言及したように、切れ刃の破壊が主として関係するものと考えられる。同様な結果は、図は省略するがテーブル速度 v を変えた場合にも得られた。これらの結果から、微視的な切れ刃の挙動という観点からみると、 $Z_{th} = vt_i$ と B との関係は以下になると考えられる。すなわち、同一砥石を用いて Z_{th} を大きくする場合、その砥石に対応するある臨界の理論削除率 ($Z_{th})_{cr}$ 以下の範囲では、 B の大きさには主として切れ刃の破壊の頻度が関係する。しかし、 Z_{th} が ($Z_{th})_{cr}$ を越えると、切れ刃の脱落の頻度が主として B に関係するようになる。なお、この Z_{th} と B との関係は、第2報²⁾の結果から考えると v によってそれほど大きな影響を受けず、 v が変わっても同一 Z_{th} ならば同一の B を示すものと思われる。このようなことからすると、図1における結合度 I の場合にも、切れ刃の破壊が B に関係する Z_{th} の範囲の存在が考えられるので、図1の実験で調べた最小の t_{ic} ($=30 \mu\text{m}$) よりも小さな t_{ic} の範囲で、(t_{ic}) が存在すると言える。なお、図1からみて、(t_{ic}) は $30 \mu\text{m}$ 付近であると考えられる。

図2に図1の結果から求めた Z_{th} と研削比 G_B との関係を示す。なお、 G_B は次式で求めた。

$$G_B = \frac{1000 t_p}{\pi D B t_i} \quad (2)$$

ここで、 D : 砥石直径 (mm), t_p : 平均の実砥石切込み (μm)。

図からわかるように、 G_B はある Z_{th} までは、 Z_{th} が増加してもあまり変化がないが、ある Z_{th} を越えると急激に減少するようになる傾向がみられる。この急激に減少し始める Z_{th} は前述した ($Z_{th})_{cr}$ に対応するものであった。この結果からすれば、 G_B は砥石の損耗が切れ刃の脱落と関係して進行するようになると、急減し始める

Fig. 2 Effect of wheel grade on grinding ratio

Fig. 3 Effect of wheel grade on actual metal removal rate

ので、砥石経費の観点からすれば、 $(Z_{th})_{cr}$ 以下の Z_{th} の範囲の研削条件を選択すべきであろう。なお、結合度 I の場合、 $(Z_{th})_{cr}$ 以上のある Z_{th} までは G_B が急減するが、更に Z_{th} を増加すると、 G_B は比較的緩やかな減少傾向となる。これは、 Z_{th} がこのように大きくなると、 A_r が大きくなるので、図 1 から考えられるように、 t_i を増加しても t_p の増加が伴わず、結果として、 B の増加が緩やかになるためで、 Z_{ip} が大きくなると G_B の減少傾向が緩やかになるのではないことに留意しておく必要がある。

図 3 に各種結合度の砥石に対する Z_{th} と Z_{ip} との関係を示す。なお、 Z_{ip} は実際の研削量を測定し、その値を研削時間と研削幅で除すことによって求めた。図よりわかるように、 Z_{th} が比較的小さな範囲では、 Z_{ip} は Z_{th} に近似的に等しい。この範囲でも、図 1 から考えて約 5% の切残しがあるので、正確には Z_{ip} は Z_{th} に等しくない。しかし、 Z_{th} が大きくなるにつれて、結合度の低い砥石から順に顕著に Z_{ip} が Z_{th} よりも小さくなり始める。この Z_{ip} が Z_{th} よりも顕著に小さくなり始める

Z_{th} は各結合度に対応する $(Z_{th})_{cr}$ であった。

ところで、結合度 I の場合に良くわかることであるが、 Z_{th} をその $(Z_{th})_{cr}$ を越えて更に大きくしていくと、 Z_{th} を増加しても Z_{ip} はほとんど増加しなくなる状態に近づくような傾向がみられる。この結果は、高切込み研削にすればするほど工作物除去速度を大きくし得るのではなく、ある程度以上の t_i にしても砥石の損耗速度のみが大きくなって t_p が増加しなくなるという、第 2 報で示唆したような除去速度限界削除率 Z_{lim} の存在の可能性を示すものである。そこで、もう少し検討してみる。

図 1 から WA 46 I 砥石の t_i と A_r との関係は近似的に $A_r = t_i^{1.21} \times 10^{-8}$ で表すことができる。この結果を式 (1) に代入し、微分することによって求めた $dZ_{ip}/dZ_{th} = 0$ となる t_i は、図 1 の実験で調べた最大の t_i より少し高い $154 \mu\text{m}$ であった。また、同様な方法で後述する SA 46 I 砥石の場合についても検討したところ、 $dZ_{ip}/dZ_{th} = 0$ となる t_i は、その場合の実験で調べた最大の t_i である $130 \mu\text{m}$ の範囲内にある約 $118 \mu\text{m}$ で、 Z_{th} は約 $14 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ であった。後者の SA 46 I 砥石の結果から、実験的に $dZ_{ip}/dZ_{th} = 0$ となる t_i 、すなわち、 Z_{lim} が存在し、 Z_{lim} よりも更に t_i を大きくすると、 dZ_{ip}/dZ_{th} が負になることがわかる。また、前者の WA 46 I 砥石の場合も図 1 の t_i に対する A_r の増加形態をみると、上述の $t_i = 154 \mu\text{m}$ 程度で Z_{lim} になることは十分考えられる。このようなことから Z_{lim} は存在すると言える。

以上の結果から、 Z_{th} と G_B および Z_{ip} との関係に及ぼす結合度の影響については、図 4 の模式図のように示すことができる。すなわち、その結合度に対応する $(Z_{th})_{cr}$ 以下では、主として切れ刃の破壊の頻度が B に関係するため、 G_B および Z_{ip} は結合度の違いによって大きな差が出ない。しかし、 $(Z_{th})_{cr}$ を越えると、主として切れ刃の脱落の頻度が B に関係し始めるので、 Z_{th} が大きくなるにつれて、結合度の低い砥石から順に G_B が減少し始める。一方、 Z_{ip} は Z_{th} よりも急激に小さくなり始める。 Z_{ip} が Z_{th} よりも小さくなり始めても、 Z_{ip} は Z_{lim} までは Z_{th} の増加とともに増加するが、 Z_{th} が Z_{lim} を越えると逆に減少することにもなる。

図 5 に図 2 と同様にして求めた Z_{th} と G_B との関係に及ぼす粒度の影響を示す。ただし、前報で $(Z_{th})_{cr}$ 以下の Z_{th} の範囲での検討は行っているのので、ここでは $(Z_{th})_{cr}$ 以上の範囲での G_B も含めた G_B に及ぼす粒度の影響を調べるために、結合度の比較的低い、結合度 I の砥石を用いた。図からわかるように、調べた結果の中の最も小さい Z_{th} における G_B は粒度によって大きな差がみられない。このことおよび図 2 の結果から考えると、この Z_{th} は $(Z_{th})_{cr}$ の近くであると考えられる。しかし、

Fig. 4 Inclination of changes in grinding ratio G_B and actual metal removal rate Z_{tp} with changing wheel grade

Fig. 5 Effect of grain size on grinding ratio

それ以上の Z_{th} になると、粗粒の WA 36 I 砥石の G_B はより細粒の粒度 46 以下の砥石よりも相当高くなる。また、粒度 46 よりも細粒の砥石では、粒度によって G_B の値に大きな差はみられないが、粗粒の砥石の方が多少 G_B が大きくなるような傾向がみられる。このような結果とともに、同一結合度でも粗粒の方が結合剤による大きい切れ刃保持面積をもち、より高い切れ刃保持力をもつ可能性があることを考慮すると、切れ刃の脱落が B に関係する範囲では、同一結合度でも粗粒の砥石の方が切れ刃の脱落が生じにくく、 G_B が高くなることが考えられる。なお、図 5 からは Z_{th} が小さい場合には、前述したように、粒度によって G_B に大きな差がないような傾向がみられるが、前報で示したように B が切れ刃の破壊と関係する範囲では、それほど大きな差ではないが、

Fig. 6 Effect of grain size on actual metal removal rate

Fig. 7 Inclination of changes in grinding ratio G_B and actual metal removal rate Z_{tp} with changing grain size

細粒の方が粗粒よりも G_B が大きくなる傾向があることを付言しておく。

図 6 に図 3 と同様にして求めた Z_{th} と Z_{tp} との関係に及ぼす粒度の影響を示す。図からわかるように、調べた結果の中の最も小さな Z_{th} においては、粒度によって Z_{tp} に大きな差がみられず、ほぼ Z_{tp} は Z_{th} に等しい。しかし、 Z_{th} が更に大きくなると、細粒の砥石から順に Z_{tp} が Z_{th} よりも急激に小さくなり始める傾向がみられる。以上の結果から考えると、 Z_{th} と G_B および Z_{tp} との関係に及ぼす粒度の影響は図 7 の模式図のように示すことができる。すなわち、切れ刃の脱落が B に影響しない $Z_{th} < (Z_{th})_{cr}$ の範囲では、前報の結果から切れ刃密度の密な細粒の砥石の方が G_B が大きい。また、 Z_{tp} は Z_{th} にほぼ等しい。しかし、細粒の砥石は切れ刃の保持力が相対的に小さいため、小さい Z_{th} から G_B が急減し始め、

Fig. 8 Effect of grain type on grinding ratio

同時に Z_{tp} も Z_{th} より急激に小さくなり始める。この一方、粗粒の砥石は切れ刃の保持力が大きいので、大きな Z_{th} まで、大きな G_B および Z_{tp} が Z_{th} にほぼ等しい状態を維持することができる。

図8に図2と同様にして求めた Z_{th} と G_B の関係に及ぼす砥粒の種類の影響を示す。なお、図5と同じ理由で結合度Iの砥石を用いた。図よりわかるように、GC砥石は他のA系砥石に比較して相当小さい Z_{th} の範囲から G_B が小さくなっている。前報³⁾で報告したように、より軽研削条件の場合でも、C系の砥石の方がA系の砥石に比較して G_B が小さかったことを含めて考えると、C系の砥石はこのような研削には適さないものと言える。SA砥石は前述したWA砥石とほぼ同様な傾向を示す。これらの砥石に比較してKA砥石は相当大きい Z_{th} まで G_B が高くなっている。この結果についての明確な検討は本報ではなし得ないが、他の種類の砥石の場合には、切れ刃の脱落が G_B に関係している Z_{th} の範囲で、KA砥石の G_B のみが、切れ刃の破壊と関係するような範囲である傾向を示すことから、KA砥石の場合には同じ結合度でも切れ刃の保持力が強くなっていることが考えられる。なお、砥粒の種類を変えた場合における Z_{th} と Z_{tp} との関係については、図は省略するが、前述した結果から考えられるように、GC, WA および SA, KA の砥石の順に小さい Z_{th} から Z_{tp} が Z_{th} よりも急激に小さくなり始めることを付言しておく。

以上、各種高切込み研削条件における G_B や Z_{tp} を調べてきたが、それらの結果が加工経費に及ぼす影響を明確にすることは、最適研削条件を検討するうえで重要なことである。そこで、次により具体的な観点ということで、ごく概括的であるが、加工経費に言及してみる。

図9に一例として、図2および図3の結果を用いて求めた Z_{th} と研削経費 C_h (円/mm³) および砥石経費 C_k

Fig. 9 Effect of wheel grade on machining cost and wheel cost

(円/mm³) との関係を示す。なお、 C_h は Z_{tp} から決まる単位加工量当たりの加工時間 T_g と単位時間当たりの人件費 Y_h との積で求めた。 C_h には、その他砥石や工作物の着脱時間、砥石の形直しや目直しの時間、機械の使用経費および動力費なども考慮する必要はあるが、ここでは Z_{th} と Z_{tp} との関係が加工経費に及ぼす影響に注目するという観点からこのようにした。 C_h および C_k は、 Y_h を 1 円/s、単位砥石損耗体積当たりの砥石価格 Y_k を 0.01 円/mm³ として、次式から求めた。なお、研削幅 B_w は 4 mm としている。

$$C_h = \frac{Y_h}{B_w Z_{tp}}, \quad C_k = \frac{Y_k}{G_B} \quad (3)$$

図よりわかるように、 C_k は前述した $(Z_{th})_{cr}$ までは Z_{th} が増加しても大きな変化を示さない。しかし、 $(Z_{th})_{cr}$ を越えると急上昇し始める。この一方、 C_h は結合度Iの場合にみられるように、図3で述べた $Z_{th}=26$ 程度の Z_{lim} 付近になるとほとんど減少しなくなる。しかし、それ以下の Z_{th} では、結合度Jの場合をみればわかるように、 $(Z_{th})_{cr}$ を越えても相対的には C_k のような大きな変化は示さず、 Z_{th} にほぼ反比例して減少する。また、結合度Iの結果から考えられるように、ある Z_{th} 以下では $C_h > C_k$ となっているが、ある Z_{th} を越えると、 $C_h < C_k$ となり、その大きさが逆転する。

図10に研削幅が図9の4mmの場合およびその10倍の40mmの場合の Z_{th} と $C_h + C_k$ との関係を示す。なお、研削幅40mmの場合の Z_{th} が6以下の二点鎖線----は、WA 46 I 砥石を用いた場合の $Z_{th} < 6$ の範囲で、 B が変わらず、また $Z_{tp} = Z_{th}$ であるとして求めたものである。図の研削幅4mm、結合度Iの場合をみると、 $C_h + C_k$ は結合度Iでは、前述した $(Z_{th})_{cr} = 6$ 付近よりも大きな $Z_{th}=10$ 程度までは Z_{th} が増加するにつれて急

Fig. 10 Effect of wheel grade and grinding width on total cost

減する。そして、 $Z_{th}=10$ 程度から $Z_{th}=14$ 程度までは漸減する傾向を示し、 $Z_{th}=14$ 程度で最小値をとる。しかし、 $Z_{th}=14$ 程度以上の Z_{th} になると、 C_h+C_k が Z_{th} の増加とともに急増し始める。このように C_h+C_k が最小値をとり、そこから急増し始めるのは、図 9 から考えられるように、 C_k の増加率が C_h の減少率よりも急激に大きくなるためである。このような結合度 I の最小値をとる結果に対して、結合度 J 以上の砥石では、本実験で調べた Z_{th} の範囲まででは同様な結果は得られていない。しかし、上述の結果からみて、更に大きな Z_{th} の範囲を考えれば、同様な結果が得られることは十分確かであると思われる。

研削幅が上述の 10 倍の 40 mm の場合にも、図 10 からわかるように、定性的には研削幅 4 mm の場合と同様な傾向を示す。ただし、同一 Z_{th} における C_h+C_k は研削幅 4 mm の場合に比較して小さい。また、 C_h+C_k が最小値となる Z_{th} は研削幅 4 mm の場合に比較して小さくなり、 $(Z_{th})_{cr}$ に近づく。この結果から、広い研削幅での加工が考えられる実作業においては、 $(Z_{th})_{cr}$ を最小の C_h+C_k を示す Z_{th} とみなすことができよう。なお、研削幅によって C_h+C_k の値に差が生じるのは、式 (3) からわかるように、同一 Z_{tp} では研削幅が厚くなると、 C_h

が減少するのに対して C_k が変化しないために起きる。したがって、加工経費を考える場合には研削幅にも十分留意する必要があるだろう。

4. ま と め

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) ある臨界の理論削除率 $(Z_{th})_{cr}$ 以下の理論削除率 Z_{th} の範囲における切残し率、言い換えれば、砥石の損耗速度 B には、主として切れ刃の破壊が関係する。この範囲では、 B および研削比 G_B は Z_{th} によって大きな差を示さない。また、実削除率 Z_{tp} も Z_{th} にほぼ等しい。
- (2) しかし、 Z_{th} が $(Z_{th})_{cr}$ を越えると、主として切れ刃の脱落が B に関係するようになり、 B および G_B は急増あるいは急減し始める。また、 Z_{tp} も Z_{th} よりも急激に小さくなり始める。
- (3) $(Z_{th})_{cr}$ は粗粒で結合度の高い砥石の方が大きくなる。また、 $(Z_{th})_{cr}$ は砥石の砥粒の種類が変わると変化する。
- (4) 限界理論削除率は存在し、これ以上の Z_{th} では Z_{th} を増やしても Z_{tp} は増加しない。
- (5) 研削経費と砥石経費の和は $(Z_{th})_{cr}$ に近いある Z_{th} で最小値を示す。研削幅が厚くなるに従って、この最小値は小さくなり、また最小値を示す Z_{th} はより $(Z_{th})_{cr}$ に近づく。

謝 辞

終わりに、実験に御協力いただきました弥永典宏、村田洋一、齋田博紀の各氏ならびに砥石、研削液、工作物の御提供をいただきましたノリタケカンパニーリミテド、ユシロ化学工業、日立金属の各社に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 安井平司, 松尾哲夫, 大島栄一: 乾式高切込み研削における砥石の損耗特性, 精密機械, **42**, 11 (1976) 1029.
- 2) 安井平司, 松尾哲夫, 森藤光章: 湿式高切込み研削における砥石の損耗特性 (その 1), 精密機械, **44**, 6 (1978) 678.
- 3) 安井平司, 松尾哲夫: 湿式高切込み研削における砥石の損耗特性 (その 2), 精密機械, **45**, 1 (1979) 62.