

切削工具逃げ面摩耗のバラツキの 原因究明に関する基礎的研究 (第1報)*

— 摩耗面の機械的衝撃疲労劣化と劣化モデル —

前 川 克 廣**

久 保 明 彦**

北 川 武 揚**

(昭和57年9月受理)

Study on Scattering in Flank Wear of Cutting Tools (1st Report)

— Mechanical Impact Fatigue Deterioration
of Wear Surface and its Modeling —

by Katsuhiko MAEKAWA, Akihiko KUBO
and Takeaki KITAGAWA

This paper investigates the effects of tool vibration and wear surface deterioration on scattering in flank wear of cutting tools. An hypothesis for explaining variations in the wear rate experienced in the actual turning is proposed, in which the scatter is mainly caused by changes of stress and temperature along the wear land and by fatigue deterioration of the wear surface. Variations in the wear rate are also induced by vibration between the tool and the work material, including cases in which the wear surface completely separates from the machined surface. Numerical analysis and a special mechanical impact fatigue experiment partially prove that the hypothesis, in conjunction with a wear characteristic equation proposed elsewhere (Reference (4)), holds qualitatively, although a thermal fatigue experiment is to be performed.

1. ま え が き

切削工具の摩耗と寿命が切削加工の経済性の観点から重要であり、これを解析的あるいは実験的に求めるための多くの努力がなされてきた。その結果、工具すくい面に生ずるクレータ摩耗に関しては十分な精度で工具寿命を予測するための解析システムが開発されるに至っている¹⁾が、逃げ面摩耗の予測についてはその性格上解決できない難問が一、二あり、その一つに逃げ面摩耗のバラツキの問題がある。バラツキの原因は主に切削工具系の振動特性あるいは逃

* 昭和57年度精機学会北海道支部学術講演会にて発表 (昭和57年9月)

** 北見工業大学機械工学科

げ面摩耗の進行に伴って増大する工具のびびり振動にあると思われるが、従来よりびびり振動それ自体あるいは仕上げ面性状に関連させた研究が多く、振動と摩耗過程を直接に関連させた研究はほとんど見あたらない。

本研究では逃げ面摩耗のバラツキ、すなわち摩耗速度の変動の原因として (i) 切削工具系の振動による逃げ面摩耗痕応力および温度の変動, (ii) 摩耗痕と仕上げ面との着脱を含むような工具振動による摩耗面の疲労劣化の二点に着目し、この予想の正否を解析的および実験的に一、二検討してみた。その結果、逃げ面摩耗のバラツキを説明するための一つのモデルが提案され、これを先に報告した切削工具面の摩耗特性式^{1),4)}と関連させれば、実際の旋削作業の際に現れる摩耗速度の変化が説明できる見通しがえられたので報告したい。

2. 振動と摩耗に関する二、三の結果

機械構造用炭素鋼 S 45 C を超硬合金工具 P 20 により高速切削する場合を問題の対象とすれば、次のような実験結果がえられている。

(I) 摩耗幅速度を最小にする工具刃先部の振動振幅が存在すること²⁾

Fig. 1 は工具の固定方法、突出し量および工具シャンク材質を変えさせ、あるいは工具にダンパーを取付けるなどして工具の振動モードを変化させた工具により逃げ面摩耗経過曲線 ($V_B - T$ 線図) を求め (Fig. 2), このときの工具刃先先端下部位置の振動振幅 X と逃げ面摩耗幅速度 dV_B/dT の関係を示したものである。同一工具で V_B の増大にともなって X が増加する場合も含まれているが、同図より片振幅が $0.5 \mu\text{m}$ 程度で dV_B/dT が最小となり、無振動状態ではかえって dV_B/dT は増大していることがわかる。

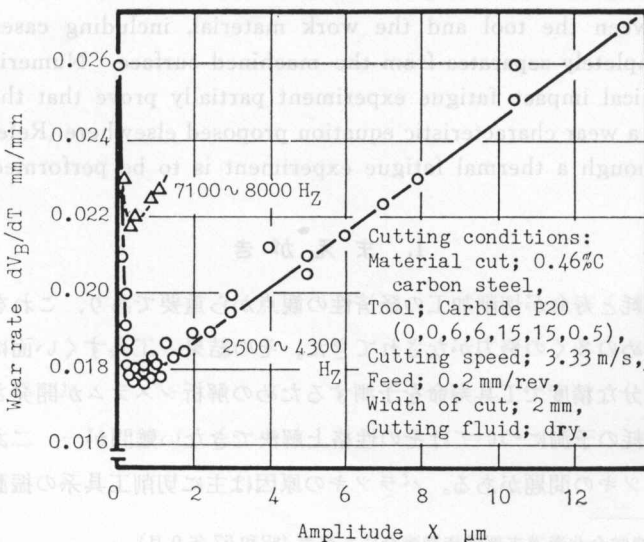


Fig. 1. Effect of tool vibration upon wear rate on flank wear land.

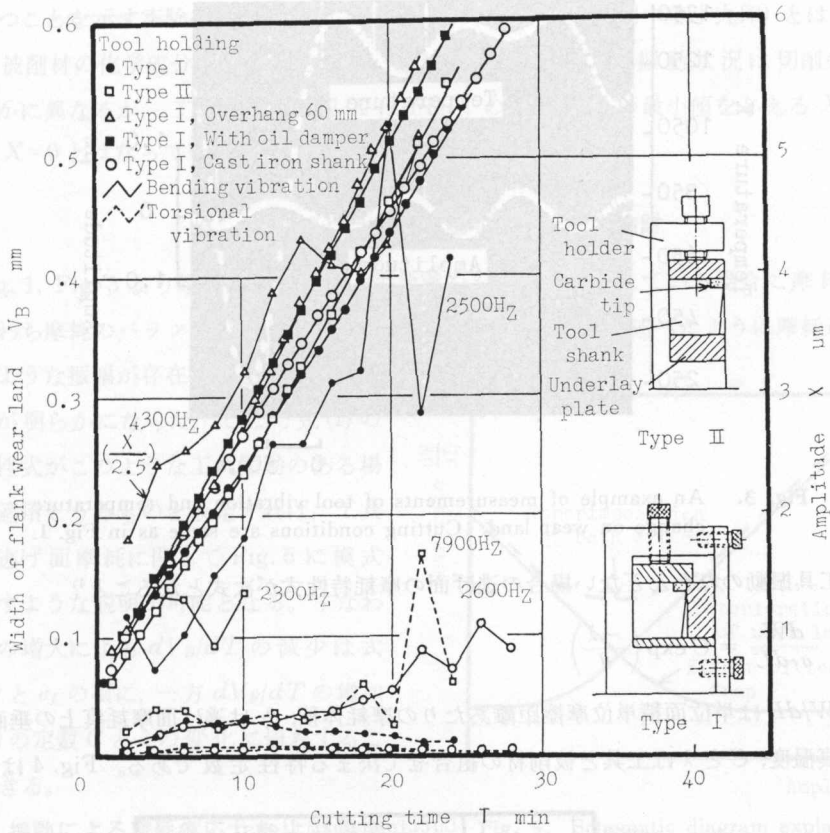


Fig. 2. Scatter in wear progress curves and tool vibration. Tool shank: Material; 0.55% C carbon steel, Dimension; 30×30 mm, Overhang; 80 mm. Cutting conditions are same as in Fig. 1.

(II) 摩耗痕が仕上面^{注)}と着脱を含む振動をしていること³⁾

Fig. 3は直径20 μ mの白金線をAl₂O₃とともに焼成したセラミック工具を用いて、微小露出熱電対法¹⁾により実測された逃げ面摩耗痕中央位置の温度変動である。同図中の振幅はFig. 1と同様に工具刃先下端に取付けられた加速度ピックアップ(ST研究所, AH 6-5000)により検出され、データプロセッサを通して換算されたものである。同図より検出位置での工具振動と摩耗痕の振動モードは一致しておらずむしろ逆位相に近いこと、工具振動により摩耗痕温度が200 K程度変動し、また摩耗痕が仕上面から完全に離れる場合も生じることがわかる。ただし離れた場合(以下、脱あるいは脱状態とよぶ)に熱電対の接点は形成されないから、脱状態の摩耗痕温度は測定できていないことに注意を要する。

注) 厳密には三次元長手方向旋削の場合に工具横切れ刃により切削される面は二次元切削の場合の仕上面に対応しない。しかし切削速度Vと切りくず流出速度V_eを含む面内の状況は二次元的とみなせるから、ここでは便宜上V-V_e面内の切削面を仕上面とよぶ。

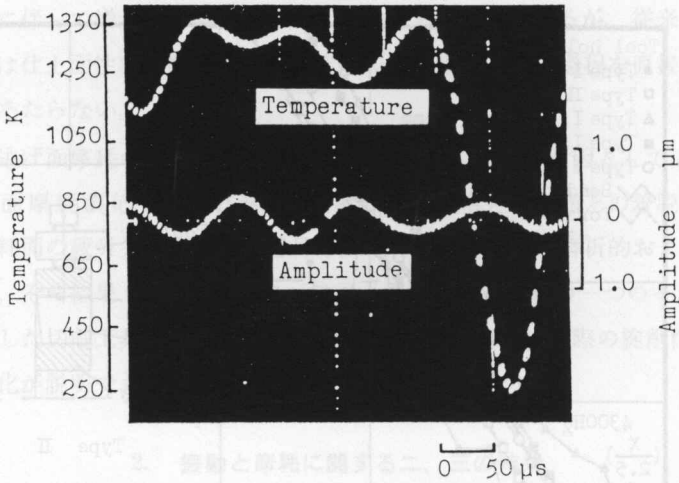


Fig. 3. An example of measurements of tool vibration and temperature change on wear land. Cutting conditions are same as in Fig. 1.

(III) 工具振動のほとんどない場合の逃げ面の摩耗特性式が次式となること⁴⁾

$$\frac{dW}{\sigma_f dL} = C \exp\left(\frac{-\lambda}{\theta}\right) \tag{1}$$

ただし dW/dL は単位面積単位摩擦距離あたりの摩耗体積, θ_f は逃げ面摩耗痕上の垂直応力, θ は摩耗痕温度, C と λ は工具と被削材の組合せで決まる特性定数である。Fig. 4 は式 (1) が

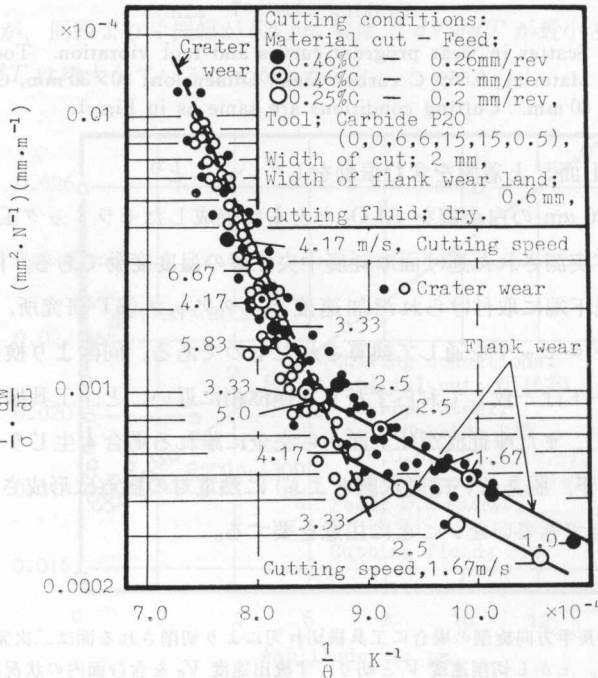


Fig. 4. Flank wear characteristics.

成りたつことを示す実験結果であるが、すくい面の摩耗特性(同図中の小丸印)とは異なり、定数 C は被削材の化学成分に依存している。なおこの場合の工具の振動状況は切削条件によってわずかに異なるが、工具先端の振幅 X は Fig. 1 の dV_B/dT の最小値を与える X より小となるが $X=0$ とはなっていない。

3. 摩耗のパラツキの説明仮説とその検討

Fig. 1, Fig. 3 より摩耗痕が仕上面と脱状態をも含む振動をしている場合に摩耗速度の変動すなわち摩耗のパラツキが生じていること、さらに前節の (I) で述べたように摩耗速度が最小となるような振幅が存在するという興味深い現象が明らかになった。ここで式 (1) の摩耗特性式がこのような工具振動のある場合にも適用しうるものと仮定すれば、工具振動と逃げ面摩耗に関して Fig. 5 に模式的に示すような説明が可能となる。すなわち振幅の増大による dV_B/dT の減少は式 (1) の θ と σ_f の項に、一方 dV_B/dT の増加は式 (1) の定数 C と λ の変化に帰着することができる。

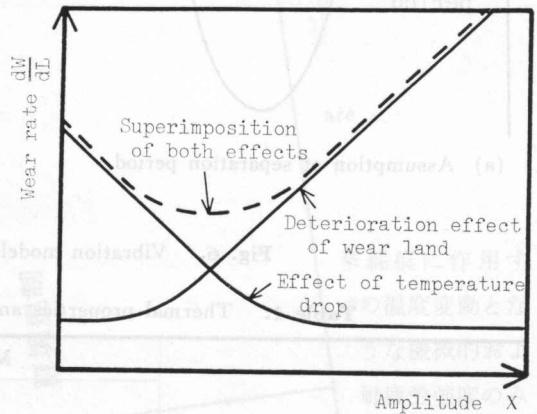


Fig. 5. Schematic diagram explaining change of wear rate.

3.1 振動による摩耗痕応力および温度の変動の効果

摩耗痕が被削材といかなる振動をしているかについては現在のところまったく不明である。微視的には振幅の大小にかかわらず摩耗痕と被削材のアスペリティ同志が着脱を繰り返しているのであろうが、巨視的には Fig. 6 (a) に示すように工具の振幅がある限界値を越えて大になれば摩耗痕全域で脱状態が生ずるものと考えられる。Fig. 6 (a) のモデルでは振幅が増大すれば、それにとまって1周期中の脱状態が最大 1/2 周期まで増加することになる。このモデルにさらに次のような仮定を設けて摩耗痕上の刃先点温度 $(\theta_f)_E$ と刃先点の摩耗速度 $(dW/dL)_E$ がどの程度変化するかを試算してみた。用いた仮定は (i) 振動数は一定 (3.33 KHz) とする、(ii) 振動がない場合の摩耗痕摩擦応力 τ_f の解 (Fig. 6 (b)⁴⁾ が本モデルの着状態に適用できる、(iii) 脱状態では刃先点を除いて他のすべての摩耗痕上の節点が仕上面から離れる、(iv) 脱状態では摩耗痕は断熱の境界条件として扱う、である。計算に用いた諸定数を Table 1 に示すが、数値解析法は文献¹⁾ に詳述してあるのでここでは省略する。Fig. 7 は脱状態が 1/2 周期の場合の定常振動時の $(\theta_f)_E$ と $(dW/dL)_E$ である。同図より温度は約 200 K 変動し、これにとまって式 (1) より求まる摩耗速度も無振動時のその最大 1/3 程度、時間平均すれば約 70% 減少することがわかる。ただし着脱振動をしている場合の応力状態は未知であるから刃先点以外の摩

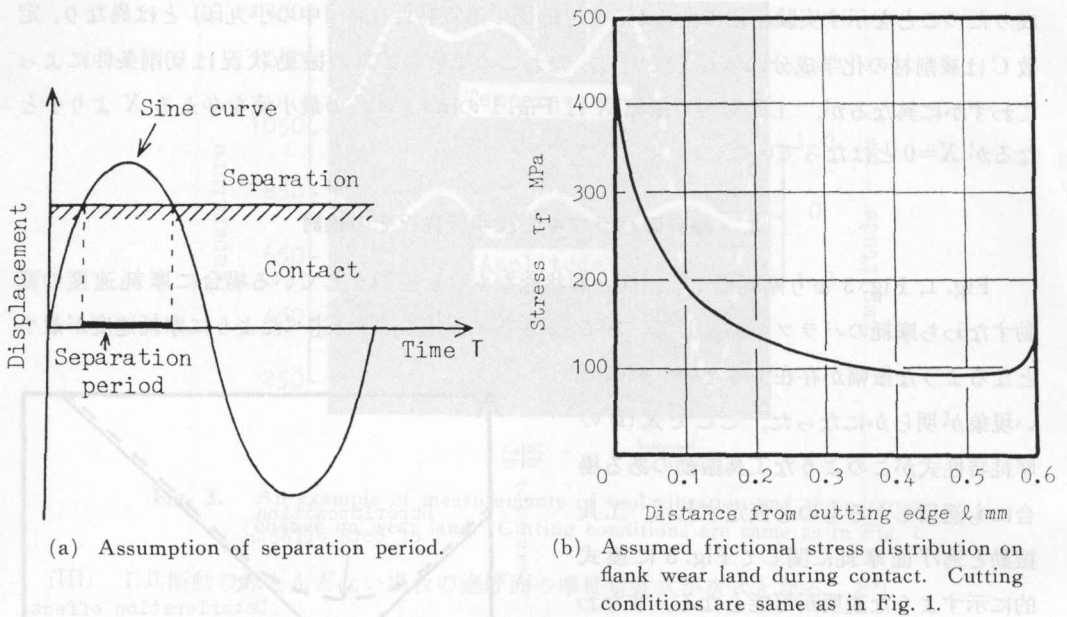


Fig. 6. Vibration model for flank wear land.

Table 1. Thermal properties and constants in wear equation.

	Material cut		Tool
	0.46% C		Carbide P20
Thermal conductivity k W/m·K	4.605×10^{-2}		6.70×10^{-2}
Specific heat c J/kg·K	0.502		0.398
Density ρ kg/m ³	7.84×10^3		11.2×10^3
Thermal diffusivity α m ² /s	15.04×10^{-6}		11.69×10^{-6}
	above 1163 K	below 1163 K	
C mm ³ /N·m	11.98	7.238×10^{-6}	
λ K	21950	4950	

耗痕上の各位置の摩耗速度は求まらないが、いったん刃先点の摩耗速度が決まれば摩耗痕全域でこの摩耗速度となるような応力状態と温度状態が実現しているものと考えられる。振動時の摩耗痕の応力と温度の詳細な検討は摩耗痕の振動状態が解明されるのを待っておこないたい。

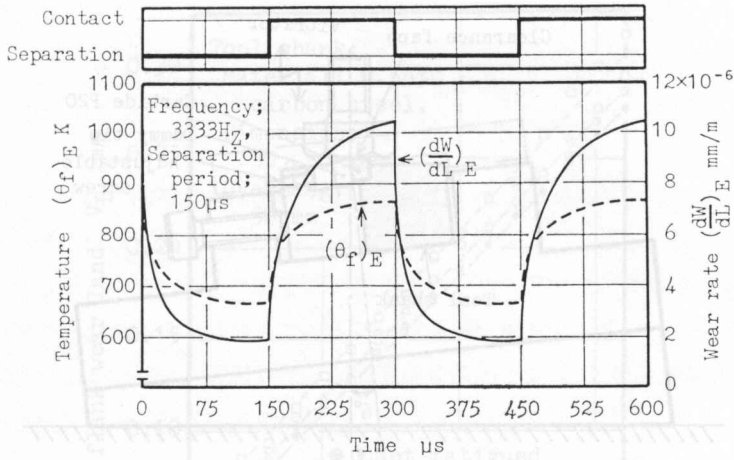


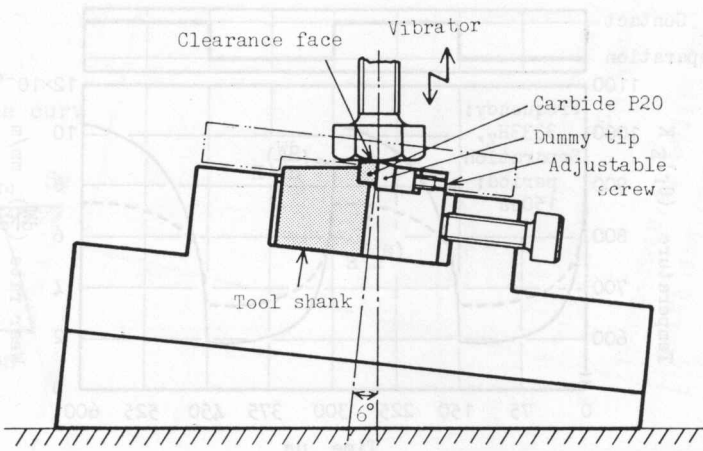
Fig. 7. Variations of $(\theta_f)_E$ and $\left(\frac{dW}{dL}\right)_E$. Cutting conditions are same as in Fig. 1.

3.2 振動による摩擦面の機械的衝撃疲労劣化の効果

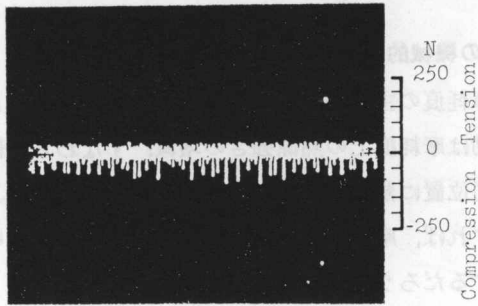
工具振動が生ずれば摩擦痕の主に垂直応力の変動は機械的衝撃力として摩擦痕に作用する。一方、摩擦応力の変動は摩擦痕上の熱源強さの増減、すなわち摩擦痕近傍の温度変動となる。温度の急激な変化は同位置に熱衝撃あるいは熱応力を発生させる。このような機械的および熱的応力の変動が持続すれば、摩擦痕は疲労劣化することになるから、その耐疲労強度のみならず、耐摩擦性も低下するだろうことは容易に想像される。

そこでまず機械的衝撃力の持続が摩擦速度に及ぼす影響をみるために次のような実験をおこなってみた。Fig. 8 (a) に示すような治具を用いて 6° の横逃げ角をもつ逃げ面 (加圧面積 20 mm^2) を電磁加振機により衝撃疲労させた。同図 (b) は治具のかわりにロードセルを装着して加振力の時間的変化を測定したものである。加振機の容量の制限から振動数が大になれば加振力は減少してしまい、実際の工具振動時の数 KHz の振動数、数百 MPa の接触圧力は得られなかった。Fig. 9 はこのようにして疲労させた工具により S 45 C 材旋削時の摩擦経過曲線を求め、無疲労工具のそれと比較したものである。両者の差は切削初期の摩擦量にあらわれており、衝撃疲労の影響が超硬チップの逃げ面内部にまで及んでいないことがわかる。また衝撃後の逃げ面を含む横断面の顕微鏡観察においても、たとえば微小き裂の発生やポアの増加⁵⁾ などの組織の劣化した状態は衝撃した面の表層にかぎられ、内部では認められなかった。もとより疲労試験時の振動条件が実切削時のそれと異なるので確かなことは言えないが、微弱な応力の付加であってもそれが長時間にわたって作用すれば工具材の表面は疲労劣化し、このために摩擦は増大するようである。なお熱疲労の同様な影響については次報で述べる。

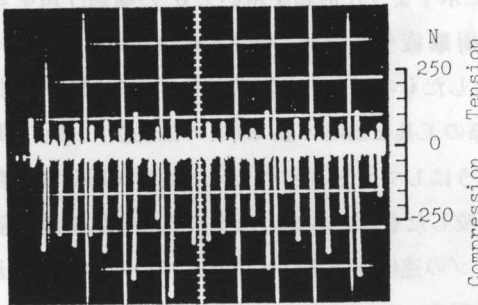
このような疲労劣化を説明するモデルは種々考えられるが、ここでは式 (1) を基礎に一つの劣化モデルの可能性を考察する。Fig. 10 に模式的に示すように疲労劣化が進行すれば式 (1) 中



(a) Set-up for fatigue deterioration of clearance face



Frequency; 500 Hz,
Amplitude; 0.02 mm



Frequency; 100 Hz,
Amplitude; 0.5 mm

(b) Load-time diagram

Fig. 8. Mechanical fatigue experiment.

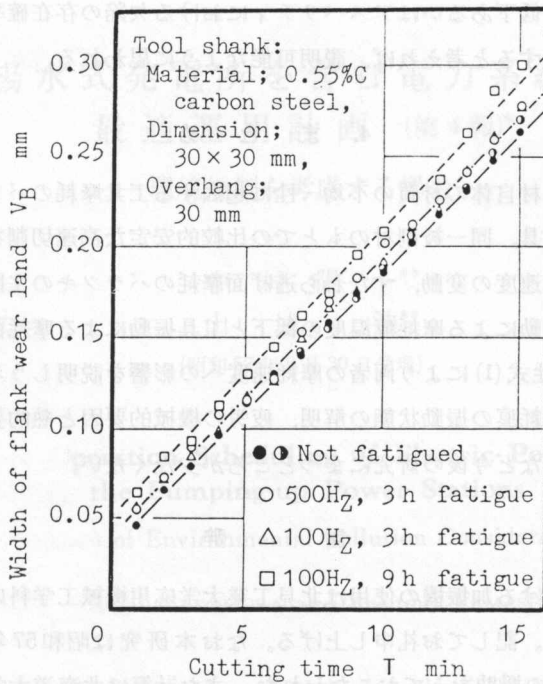


Fig. 9. Wear progress curves showing impact fatigue effect. Cutting conditions are same as in Fig. 1.

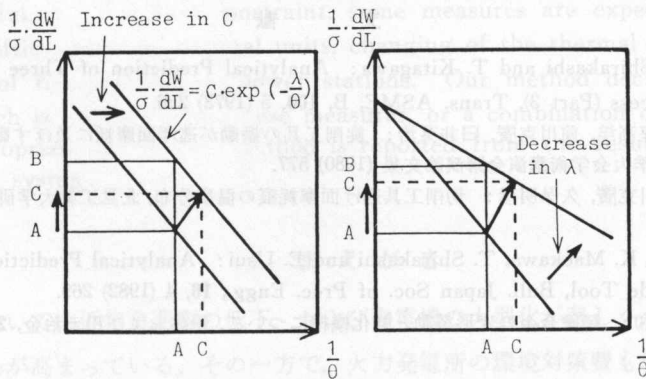


Fig. 10. Relation between the wear rate and variation of the constants C or λ in Eq. (1).

の特性定数 C が増大 (同図左図) あるいは定数 λ が減少 (同図右図) するものと考えてみる。図示のように特性曲線が移動すれば $(1/\sigma) \cdot (dW/dL)$ は $A \rightarrow B$ に変化することになる。しかしこの場合に摩耗痕が 3.1 節に述べたような振動をしていれば摩耗痕温度は低下することになるから、結局 $A \rightarrow C$ の $(1/\sigma) \cdot (dW/dL)$ の増大となって現れる。このように疲労劣化の効果を摩耗特性式 (1) 中に含まれる定数の変化としてとらえることができれば、振動の摩耗に及ぼす影響を定量化することも可能である。物理的にも式 (1) 中の定数の変化は、疲労劣化の進行により工具側の接

触アスペリティの強度低下あるいはアスペリティにおける欠陥の存在確率の増加により摩耗粉の生成する確率が增大すると考えれば、説明可能なように思われる。

4. ま と め

工具材および被削材自体の材質の不均一性に起因する工具摩耗のバラツキがないものとするれば、すなわち同一工具、同一被削材のもとでの比較的安定な高速切削を問題の対象とした場合に、工具振動が摩耗速度の変動、すなわち逃げ面摩耗のバラツキの主因となっている。その原因として摩耗痕の振動による摩耗痕温度の低下と工具振動による摩耗面の劣化の効果が考察され、いずれも摩耗特性式(1)により両者の摩耗速度への影響を説明しうる事が定性的に示された。しかしながら摩耗痕の振動状態の解明、疲労の機械的要因と熱的要因との軽重および摩耗痕の劣化機構の検討など今後の研究にまっところが少ない。

謝 辞

衝撃疲労試験における加振機の使用は北見工業大学応用機械工学科応用力学研究室片岡更一教授の好意によった。記してお礼申し上げる。なお本研究は昭和57年度文部省科学研究費補助金(奨励研究(A))の援助をえておこなわれた。また計算は北海道大学大型計算機センターM-200Hを本学のデータステーションより利用しておこなった。関係各位にお礼申し上げる。

文 献

- 1) E. Usui, T. Shirakashi and T. Kitagawa: Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process (Part 3), Trans. ASME, B, **100**, 5 (1978) 236.
- 2) 北川武揚, 白樫高洋, 前川克廣, 白井英治: 旋削工具の振動が逃げ面摩耗に及ぼす影響, 昭和55年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1980) 577.
- 3) 北川武揚, 前川克廣, 久保明彦: 切削工具逃げ面摩耗痕の温度分布, 北見工業大学研究報告, **14**, 1 (1982) 17.
- 4) T. Kitagawa, K. Maekawa, T. Shirakashi and E. Usui: Analytical Prediction of Flank Wear of Carbide Tool, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., **16**, 4 (1982) 269.
- 5) 例えば土井英和: 超硬合金の変形挙動と強化機構について, 粉体および粉末冶金, **24**, 2 (1977) 33.