

傾斜切削を応用した  
Al合金製部品の超精密円筒外周加工

平成18年度

三重大学大学院工学研究科  
博士前期課程 機械工学専攻

田 中 耕 太 郎



修士論文

傾斜切削を応用した  
Al 合金製部品の超精密円筒外周加工

指導教員 五十君 清司 特任教授

平成 18 年度



三重大学大学院工学研究科

博士前期課程機械工学専攻

田中 耕太郎



# 目次

第1章 緒言	1
第2章 切削加工理論	
2.1 通常切削及び傾斜切削の定義	
2.1.1 三角形スローアウェイチップ使用時	2
2.1.2 円形チップ使用時	3
2.2 切削加工	4
2.3 傾斜切削	4
2.4 逃げ角について	8
2.5 幾何学的表面粗さ式の算出	
2.5.1 通常切削	10
2.5.2 傾斜切削	
2.5.2(a) 三角形スローアウェイチップ	10
2.5.2(b) 円形チップ	14
2.6 傾斜切削における切込み量について	20
第3章 実験装置	
3.1 使用旋盤	24
3.2 供試工具	
3.2.1 工具精度について	26
3.2.2 三角形スローアウェイチップ	
3.2.2(a) 通常切削時	28
3.2.2(b) 傾斜切削時	28
3.2.3 円形チップ	
3.2.3(a) 通常切削時	31
3.2.3(b) 傾斜切削時	31
3.3 供試被削材	35
3.4 使用油剤	37
第4章 切削条件及び測定方法	
4.1 切削条件	39
4.2 測定方法	
4.2.1 被削材表面粗さの測定	40
4.2.2 被削面の観察	41
4.2.3 工具摩耗幅の測定	41



## 第5章 実験結果及び考察

### 5.1 被削材表面粗さの測定及び被削面の観察

5.1(a) 三角形スローアウェイチップを用いた切削 44

5.1(b) 円形チップ( $\phi 10$ )を用いた切削 54

5.1(c) 円形チップ( $\phi 6$ )を用いた切削 64

5.2 工具逃げ面の観察 74

## 第6章 結言 81

参考文献

謝辞



## 第 1 章 緒言

現在，ほとんどの機械加工において高い寸法精度や複雑な形状加工技術が求められており，同様に環境への配慮，製造工程におけるコストダウンが求められている．このような時代の需要に応えるためにトータルでの加工技術の向上が必要である．

従来から，切削加工は機械加工において大きな割合を占めている．このような切削加工の加工性能を改善する方法として工具のすくい角を正方向に大きく傾けることが考えられる．しかし，工具のみですくい角を大きくしてしまうと，刃先くさび角が小さくなるために刃先部の剛性が低下してしまう．しかし傾斜切削を旋削加工に採用し，傾斜角を大きく設けることで工具剛性を保ったまま，すくい角を正方向に大きく設定することが出来る．また，従来の切削では 3ヶ所のコーナー部しか使用できない三角形スローアウェイチップを傾斜切削に用いた場合，コーナー部以外の直線エッジ部も積極的に使用できるようになり，工具コストの低減も可能となる．

さらに切削加工に関係した他の課題として，生産現場がもたらす環境負荷の一つとして切削油剤の問題がある．切削油剤は工具磨耗の抑制，仕上げ面品位の向上，被削材表面部の材料的変化や残留応力の抑制など，様々な目的のために大量に使用されてきた．これまで主に使用されてきた切削油剤は焼却処理時に環境汚染物質であるダイオキシンを発生する塩素系極圧添加剤が使用されたことも有り，また添加剤規制後も他の汚染物質等による環境負荷は言うまでもない<sup>(1)</sup>．そこで本研究ではこうした切削油剤の問題を少しでも解決するために，実験条件としてセミドライ切削を採用した．セミドライ切削を採用することで油剤の大量使用を抑制することができ，また油剤のコスト問題にも有効であると考えられる．

本研究では小型の超精密部品の加工を対象に取り上げて，従来の切削と傾斜切削の相違点について考察することを目的とした．切削実験は円筒外周旋削加工を対象とし，被削材にアルミ合金である A5052 を，工具に超硬合金工具の三角形スローアウェイチップと円形チップを用いた．考察は幾何学的な面，実験において測定した被削材表面粗さ，被削面の観察から評価することにした．



## 第 2 章 切削加工理論

### 2.1 通常切削及び傾斜切削の定義

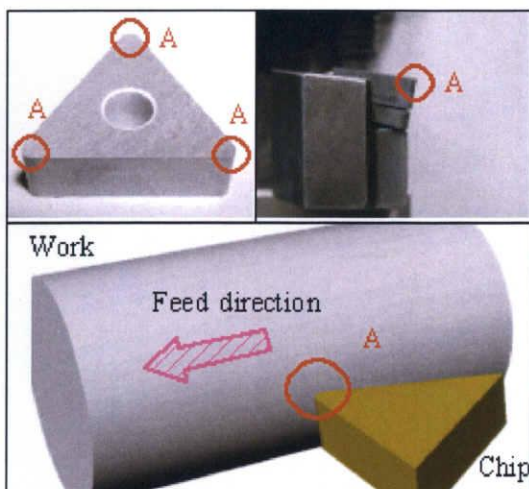
#### 2.1.1 三角形スローアウェイチップ使用時

##### ・ 通常切削

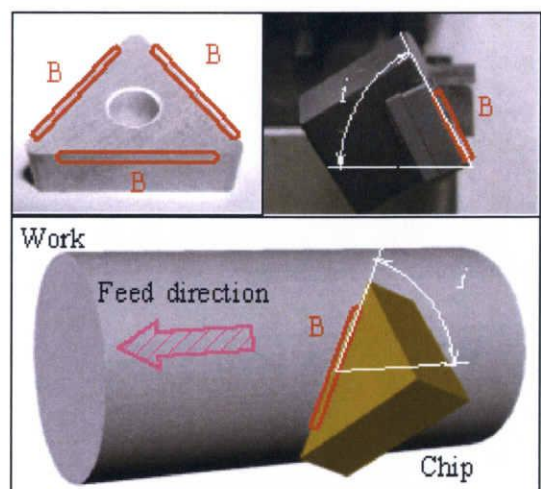
本実験では、チップのコーナー部（図 2.1 中の A 部）を使用し、後述のチップホルダーを用いて切削することを通常切削と定義している。

##### ・ 傾斜切削

本実験では、チップの直線エッジ部（図 2.1 中の B 部）を使用し、後述のチップホルダーを用いて、工具切刃を切削方向に傾けて切削することを傾斜切削と定義している。



(a) Normal cutting



(b) Oblique cutting

Fig.2.1 Model of Normal cutting and Oblique cutting (Triangle chip)



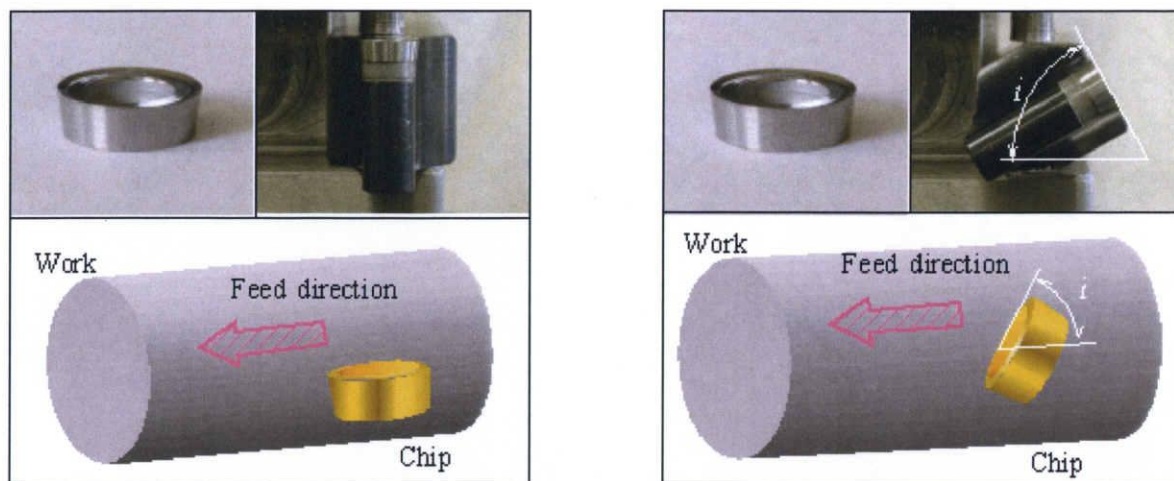
### 2.1.2 円形チップ使用時

- 通常切削

本実験では、後述のチップホルダーを用い、図 2.2(a)のように従来の方法で切削することを通常切削と定義している。

- 傾斜切削

本実験では、後述のチップホルダーを用い、図 2.2(b)のように工具切刃を切削方向に傾けて切削することを傾斜切削と定義している。



(a) Normal cutting

(b) Oblique cutting

Fig.2.2 Model of Normal cutting and Oblique cutting (Circular chip)



## 2.2 切削加工

実際の切削加工のほとんどが三次元切削(Oblique cutting)であり、純粋な二次元切削(厳密な平面塑性流れ)の行われる例は皆無に等しい。しかし、三次元切削加工は被削材の変形が、三次元的な相互作用によって生じた歪みの問題となっているため、降伏条件や塑性流動則は二次元切削とかなり異なるものとなる。よって、厳密な解析をめざすと工具形状や切削条件により切削機構が極めて複雑なものとなって解析も非常に困難になる。

そこで、現在行われている三次元切削の理論的解析の多くは、二次元切削の理論を応用しており、それらの切削過程がさまざまな二次元切削機構の組み合わせと考えると解析を行っているのがほとんどである。

本研究でも、二次元切削における理論を傾斜切削に適用して、傾斜切削における各角度の関係について考察を行っている。

## 2.3 傾斜切削<sup>(2)</sup>

二次元切削から三次元切削に転じる最も簡単な方法は、図 2.3(b)に示すように直線切刃が切削方向に対して垂直位置になく、傾いた位置関係にある場合である。このような切削形式のことを傾斜切削と呼び、図中に示している角度  $i$  を切刃傾斜角(Inclination angle)と呼称している。ここでは、二次元切削理論を用いて切削機構を取り扱う。塑性学的に言うと、傾斜切削の変形は三次元塑性変形、すなわち立体すべりの問題であり、平面すべりの二次元切削とは本質的に異なるが、平面すべりの二次元切削の理論を用いて三次元切削へと橋渡しすることが一般的である。

傾斜切削の場合、図 2.4 に示すように三種のすくい角が考えられ、以下に概略を示す。

### i) 垂直すくい角 $\alpha_n$ (Normal rake angle)

切刃に垂直な面内で規定されるすくい角である。この角度は、工具の研摩時に直接指定されるもので、一般的にすくい角と呼ばれるものはこの  $\alpha_n$  である。

### ii) 速度すくい角 $\alpha_v$ (Velocity rake angle)

切削面に垂直かつ切削方向ベクトルを含む面内で規定されるすくい角で、垂直すくい角  $\alpha_n$  との間には下式 (2.1) のような関係が成り立つ。

$$\tan \alpha_v = \frac{\tan \alpha_n}{\cos i} \quad (2.1)$$



iii) 有効すくい角  $\alpha_e$  (Effective rake angle)

平行四辺形 ODEF で示すように、切削速度ベクトル  $V_c$  と切屑流出速度ベクトル  $V_f$  を含む面内で規定するもので、切屑流出角  $\eta_c$  及び垂直すくい角  $\alpha_n$  との間に次のような関係式 (2.2) が成り立つ。

$$\sin \alpha_e = \sin \eta_c \sin i + \cos \eta_c \cos i \sin \alpha_n \quad (2.2)$$

上式から  $\alpha_e$  を求めるには、切屑流出角  $\eta_c$  を求める必要があるが、これは以下の 2 つの方法で測定できる。

a) 写真撮影などで直接測定する。

b) 切削幅  $b$  及び切り屑幅  $b_c$  の測定から次式 (2.3) より計算する。

$$\cos \eta_c = \frac{b_c \cos i}{b} \quad (2.3)$$

しかし、実際の切削は三次元的に湾曲したりするため、いずれも測定することは困難である。そこで、切屑流出角  $\eta_c$  については Stabler<sup>(3)</sup> が示した実験結果を基に導き出した仮定が単純かつ明快なものであり、比較的良好に実験事実にあうので採用する。これは、「切削速度、すくい角、工作物材料、工具材種のいかに問わず、切屑流出角は工具の切刃傾斜角にほぼ等しい。」というものである。すなわち、

$$\eta_c = i \quad (2.4)$$

したがって、式 (2.2) は式 (2.5) のように書くことができる。

$$\sin \alpha_e = \sin^2 i + \cos^2 i \sin \alpha_n \quad (2.5)$$

式 (2.5) を用いて計算した本研究においての有効すくい角  $\alpha_e$  の変化の様子について、三角形スローアウェイチップを用いた場合を図 2.5 に、円形ポジティブチップを用いた場合を図 2.6 に示す。

グラフより、切刃傾斜角が増大すると共に有効すくい角も増加していることが分かる。特に三角形スローアウェイチップの場合について注目すると、通常切削においてすくい角が  $-6^\circ$  であるのに対し、切刃傾斜角を  $60^\circ$  に設定することによって有効すくい角  $\alpha_e$  が約  $46^\circ$  にまで大きくなっている。実際の加工においてすくい角  $46^\circ$  の工具は強度の点からも実現が困難である。このことから、傾斜切削は有効すくい角を大きく変化させ、通常では得ることの出来ないような大きなすくい角を擬似的に作り出すことのできる切削方式であるといえる。



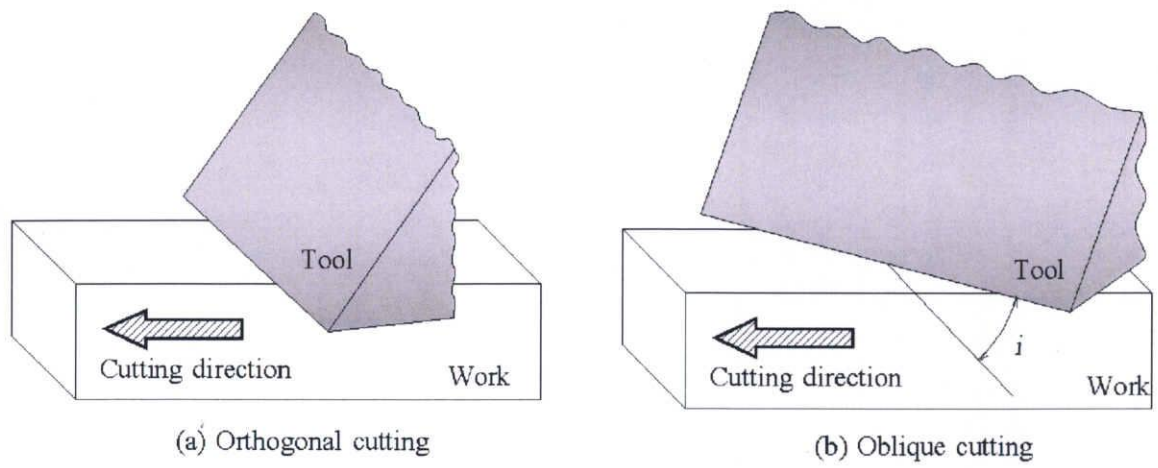


Fig.2.3 Schematic illustration of orthogonal cutting and oblique cutting

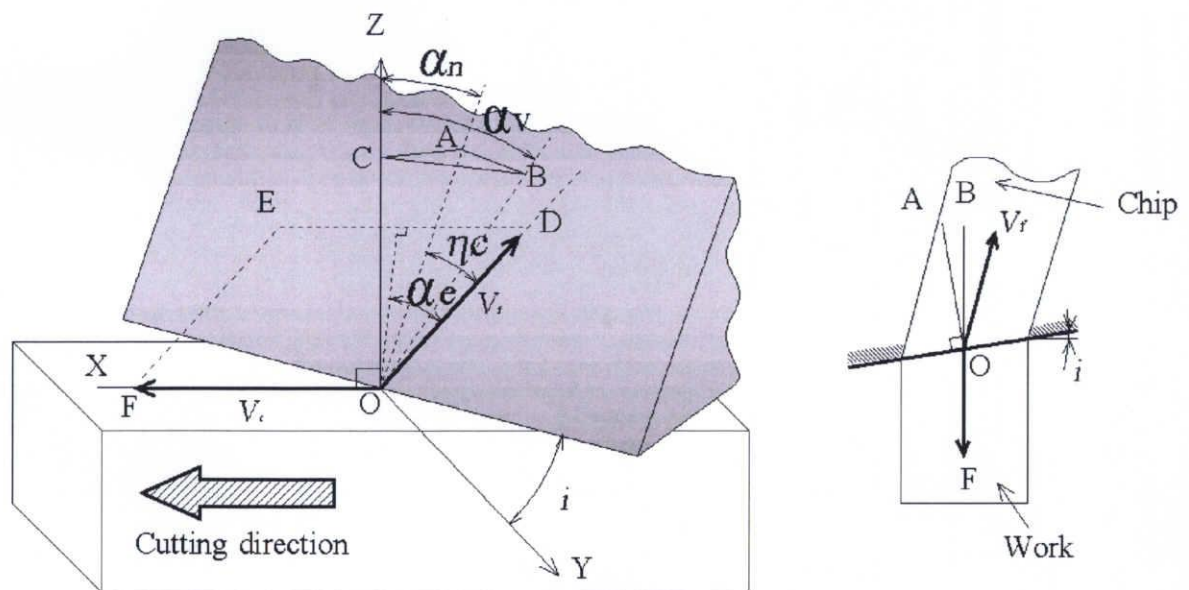


Fig.2.4 Three kind of rake angle in oblique cutting



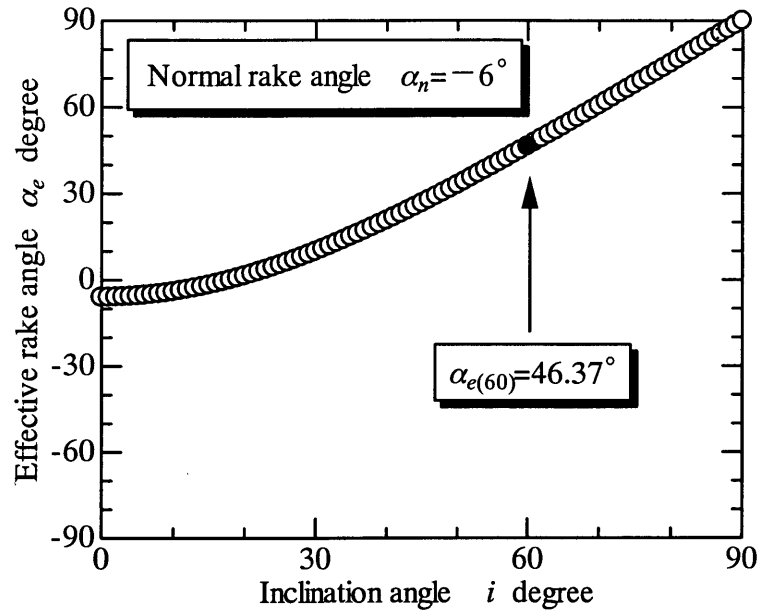


Fig.2.5 Change of effective rake angle (Triangle chip)

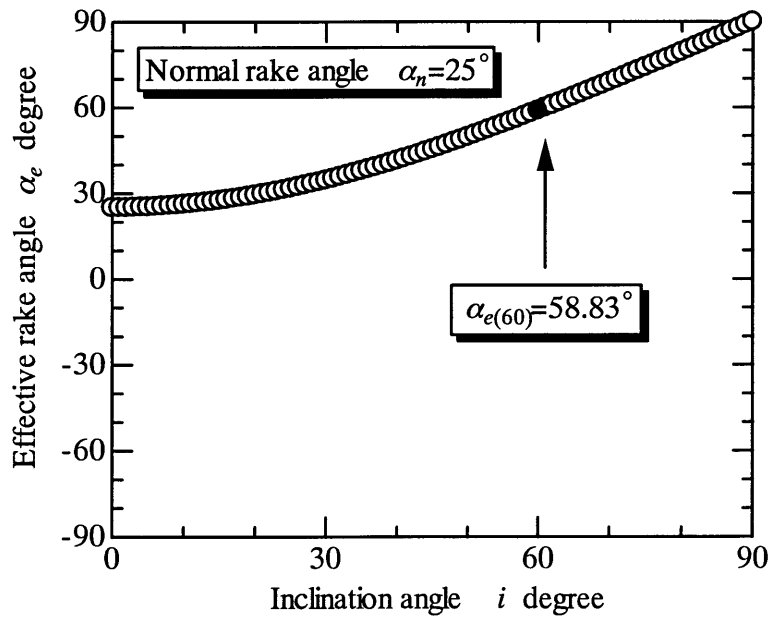


Fig.2.6 Change of effective rake angle (Circular chip)



## 2.4 逃げ角について

本研究では三角形スローアウェイチップを用いた切削実験において、工具逃げ面と被削材との接触を防ぐために図 2.7 に示す  $\beta = 5^\circ$  の傾斜を持つ治具にツールシャンクを乗せ、切削実験を行うことにより工具逃げ角を設けた。

治具を用い、逃げ角  $\beta$  を設けた場合における有効すくい角  $\alpha_e$  と傾斜角  $i$  の関係式を式(2.6)に示す。

$$\sin \alpha_e = \sin^2 i + \cos^2 i \sin(\alpha_n - e)$$

$$(e = \tan^{-1} \frac{\tan \beta}{\sin i}) \quad (2.6)$$

式(2.6)より得られた、 $\beta = 5^\circ$  における有効すくい角  $\alpha_e$  と傾斜角  $i$  の関係を図 2.8 に示す。図 2.8 より、治具を用いたことにより多少有効すくい角の値は小さくなるが、それでも本実験で採用した傾斜角  $i = 60^\circ$  では約  $44^\circ$  といった通常切削では実現困難である大きな有効すくい角を得ることができる。



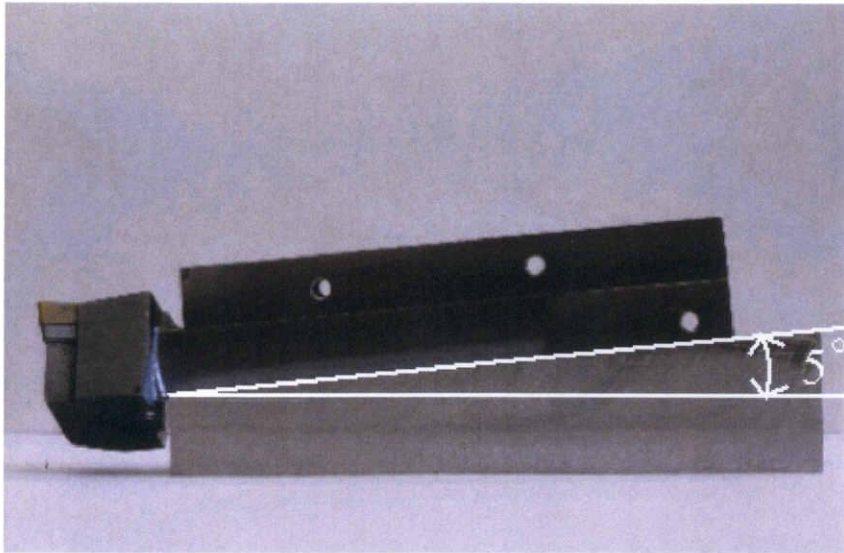


Fig.2.7 Jig for preparing clearance angle

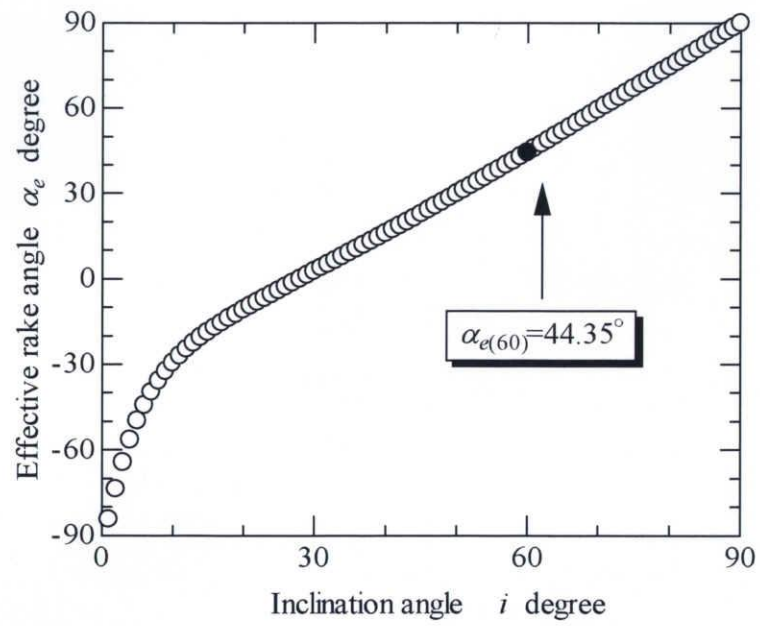


Fig.2.8 Change of effective rake angle (Triangle chip , jig angle  $\beta = 5^\circ$  )



## 2.5 幾何学的表面粗さ式の算出

### 2.5.1 通常切削

通常切削時の幾何学的表面粗さ  $R_z$  は本実験条件下 ( $f \leq 2r_n \sin C_f$ ) においては,

$$R_z = \frac{f^2}{8r_n} \times 1000 \quad (2.7)$$

で表される。但し,  $f$  は送り,  $r_n$  はチップノーズ半径を示す。

### 2.5.2 傾斜切削

#### 2.5.2(a) 三角形スローアウェイチップ

図 2.9 に三角形チップ使用時における傾斜切削時の幾何学的モデルを示す。図中の  $D$  は被削材の直径,  $d$  は切込み,  $L$  はチップと被削材との接触長さ,  $i$  は切刃傾斜角である。切刃稜エッジは微視的には丸みがあるが今回の解析では鋭いエッジ線で無限大の長さがあるものとして扱っている。工具の切刃稜がそのまま被削材に転写される理想状態を仮定すると, 図 2.9 より, 切刃ライン中心から任意の点  $B$  までの距離を  $l$ , 点  $A$  を含む平面  $M$  から点  $B$  を含む平面  $N$  までの距離を  $x_l$  とすると,

$$\begin{aligned} x_l &= \overline{AC} = \overline{AB} \cos i \\ l^2 &= \frac{x_l^2}{\cos^2 i} \end{aligned} \quad (2.8)$$

となる。また,

$$\begin{aligned} \overline{BC} &= \overline{AB} \sin i \\ &= l \sin i \end{aligned} \quad (2.9)$$

$\triangle O'BC$  と式(2.8)より

$$\overline{O'B}^2 = \left( \frac{D}{2} - d \right)^2 + l^2 \sin^2 i \quad (2.10)$$

よって, 任意の点  $l$  における位置でのカーブの切込み量  $y_l$  は

$$\begin{aligned} y_l &= r - \overline{O'B} \\ &= \frac{1}{2} \left\{ D - \sqrt{(D - 2d)^2 + 4l^2 \sin^2 i} \right\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

式(2.8)を式(2.11)に代入して解くと,

$$y_l = \frac{1}{2} \left\{ D - \sqrt{(D - 2d)^2 + 4x_l^2 \tan^2 i} \right\} \quad (2.12)$$

が得られる。



任意の点( $X$ ,  $Y$ )での切込み量  $Y$  は

$$Y = \frac{1}{2} \left\{ D - \sqrt{(D - 2d)^2 + 4X^2 \tan^2 i} \right\} \quad (2.13)$$

式(2.13)から  $x$  方向に送り  $f$  送った切込み量は

$$Y = \frac{1}{2} \{ D - \sqrt{(D - 2d)^2 + 4(X - f)^2 \tan^2 i} \} \quad (2.14)$$

で得られる.



12



式(2.12), 式(2.13)より  $X$ ,  $Y$  について解くと,

$$X = \frac{f}{2} \quad (2.15)$$

$$Y = \frac{1}{2} \left\{ D - \sqrt{(D - 2d)^2 + f^2 \tan^2 i} \right\} \quad (2.16)$$

が得られる.

よって,幾何学的表面粗さ  $R_z$  は, 図 2.10 より,

$$\begin{aligned} R_z &= d - Y \\ &= -\frac{1}{2} \left\{ (D - 2d) - \sqrt{(D - 2d)^2 + f^2 \tan^2 i} \right\} \end{aligned} \quad (2.17)$$

となる.

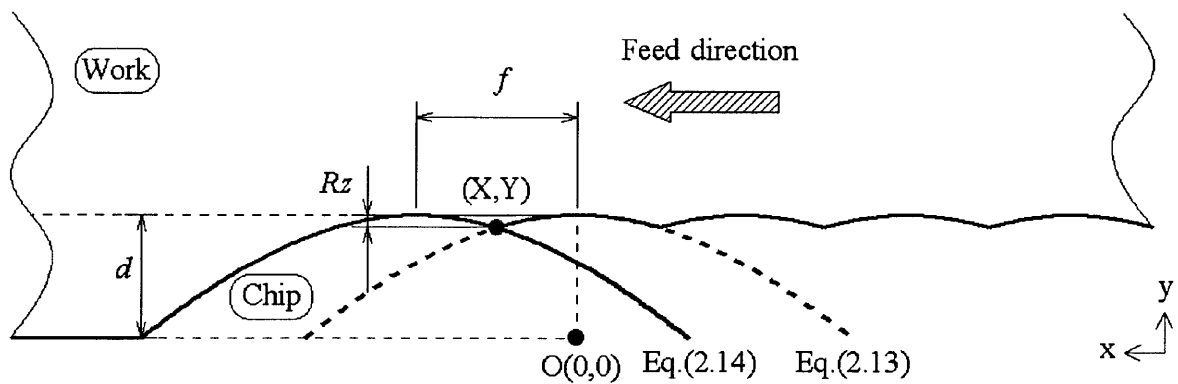


Fig.2.10 Model of surface formation of oblique cutting (Triangle chip)



### 2.5.2(b) 円形チップ

図 2.11 及び図 2.12 に円形工具を用いた場合における傾斜切削時の幾何学的モデルを示す。図中の  $D$  は被削材の直径,  $d$  は切込み,  $r$  は円形工具半径,  $L$  はチップと被削材との接触長さ,  $i$  は切刃傾斜角である。

図 2.11 における, 工具中心軸 (座標軸  $x=0$ ) において,  $y$  軸方向に切込み  $d$  を与えた場合,  $xy$  座標中心から  $x$  軸方向に  $l$  離れた位置における切込み量は,

$$l^2 + y'^2 = r^2$$

$$y' = \sqrt{r^2 - l^2}$$

より,

$$d' = y' = \sqrt{r^2 - l^2} \quad (2.18)$$

となる。

工具の切刃稜がそのまま被削材に転写される理想状態を仮定する。

図 2.12 より, 切込みの中心点を含む平面  $M$  から任意の点を含む平面  $N$  までの距離を切刃ライン上で  $l$ ,  $x$  軸方向で  $x_l$  とすると

$$\cos i = \frac{x_l}{l}$$

$$l = \frac{x_l}{\cos i} \quad (2.19)$$

となる。

また,

$$\overline{BC} = \overline{AB} \sin i = l \sin i$$

より

$$\overline{BC} = \overline{A'A''} = l \sin i \quad (2.20)$$

式(2.20)に式(2.19)を代入すると

$$\overline{A'A''} = \frac{x_l}{\cos i} \sin i = x_l \tan i \quad (2.21)$$

となる。

$$\overline{A'B} = \overline{A''C}$$

より,



$$\begin{aligned}
\overline{O'B}^2 &= \overline{O'C}^2 + \overline{BC}^2 \\
&= (\overline{O'A''} + \overline{A''C})^2 + \overline{BC}^2 \\
&= (\overline{O'A} + \overline{A'B})^2 + \overline{BC}^2 \\
&= \left\{ \left( \frac{D}{2} - d \right) + (r - \sqrt{r^2 - l^2}) \right\}^2 + (x_l \tan i)^2 \quad (2.22)
\end{aligned}$$

よって、任意の点  $x_l$  における切込み量  $y_l$  は、

$$\begin{aligned}
y_l &= \frac{D}{2} - \overline{O'B} \\
&= \frac{D}{2} - \sqrt{\left\{ \left( \frac{D}{2} - d \right) + (r - \sqrt{r^2 - l^2}) \right\}^2 + (x_l \tan i)^2} \quad (2.23)
\end{aligned}$$

式(2.23)に式(2.19) を代入すると、

$$y_l = \frac{D}{2} - \sqrt{\left\{ \left( \frac{D}{2} - d \right) + \left( r - \sqrt{r^2 - \frac{x_l^2}{\cos^2 i}} \right) \right\}^2 + (x_l \tan i)^2} \quad (2.24)$$

となる。

任意の点(X, Y)での切込み量 Y は

$$Y = \frac{D}{2} - \sqrt{\left\{ \left( \frac{D}{2} - d \right) + \left( r - \sqrt{r^2 - \frac{X^2}{\cos^2 i}} \right) \right\}^2 + (X \tan i)^2} \quad (2.25)$$

となり、

式(2.25)から x 方向に送り f 送った切込み量は

$$Y = \frac{D}{2} - \sqrt{\left\{ \left( \frac{D}{2} - d \right) + \left( r - \sqrt{r^2 - \frac{(X-f)^2}{\cos^2 i}} \right) \right\}^2 + \{(X-f) \tan i\}^2} \quad (2.26)$$

となる。



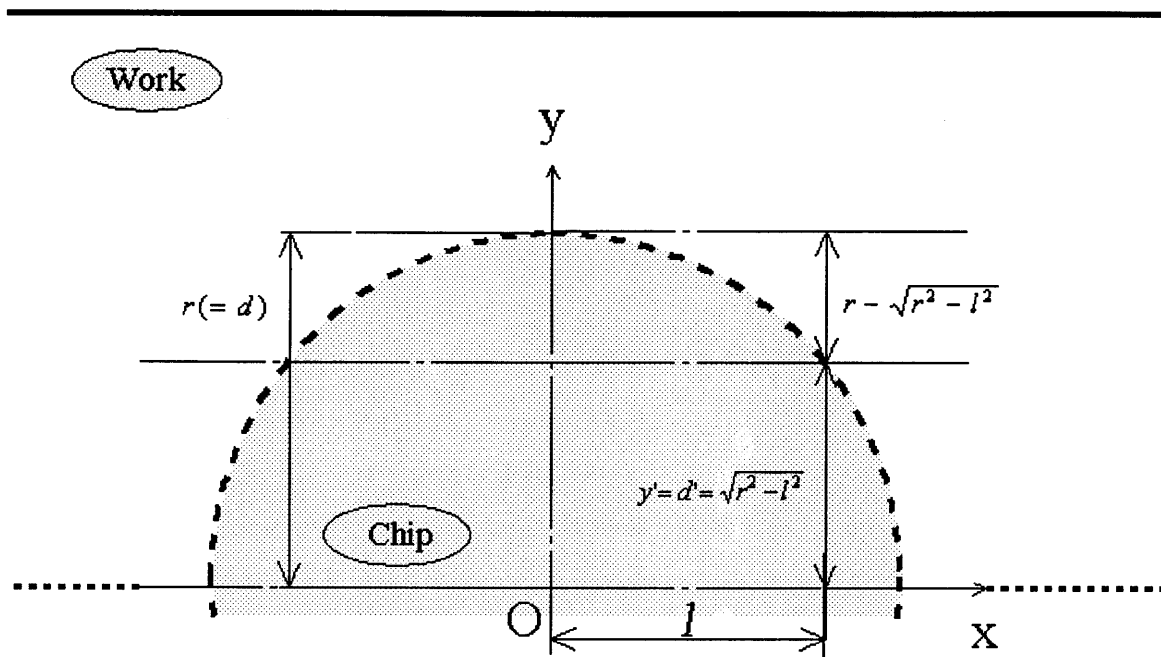


Fig.2.11 Model of circle cutting



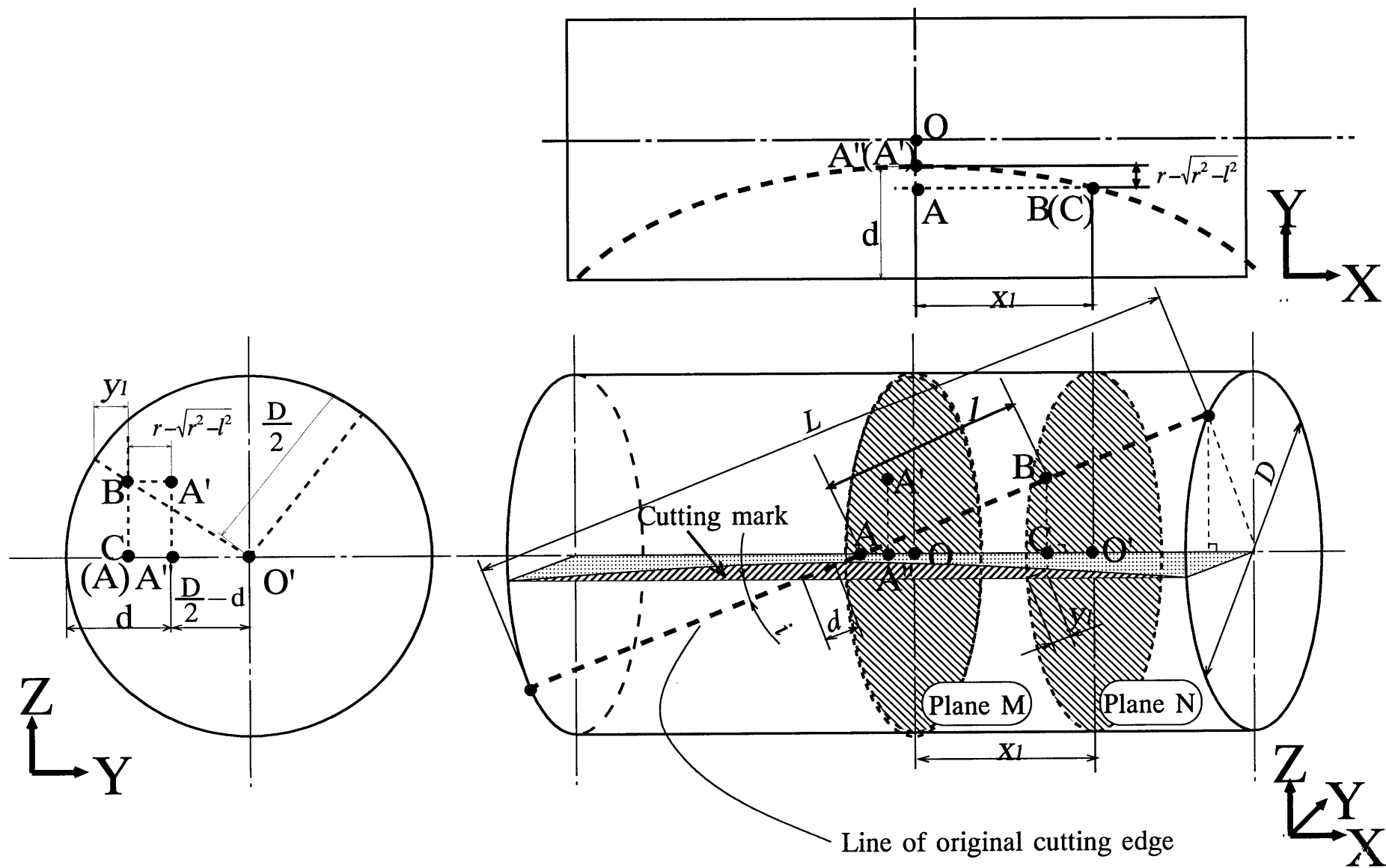


Fig.2.12 Model of oblique cutting (Circular chip)



式(2.25)及び式(2.26)より  $X$ ,  $Y$  について解くと,

$$X = \frac{f}{2} \quad (2.27)$$

$$Y = \frac{D}{2} - \sqrt{\left\{ \left( \frac{D}{2} - d \right) + \left( r - \sqrt{r^2 - \frac{f^2}{4 \cos^2 i}} \right) \right\}^2 + \left\{ \frac{f^2}{4} \tan^2 i \right\}} \quad (2.28)$$

が得られる.

よって,幾何学的表面粗さ  $R_z$  は, 図 2.13 より,

$$\begin{aligned} R_z &= d - Y \\ &= \left( d - \frac{D}{2} \right) + \sqrt{\left\{ \left( \frac{D}{2} - d \right) + \left( r - \sqrt{r^2 - \frac{f^2}{4 \cos^2 i}} \right) \right\}^2 + \left( \frac{f^2}{4} \tan^2 i \right)} \end{aligned} \quad (2.29)$$

となる.

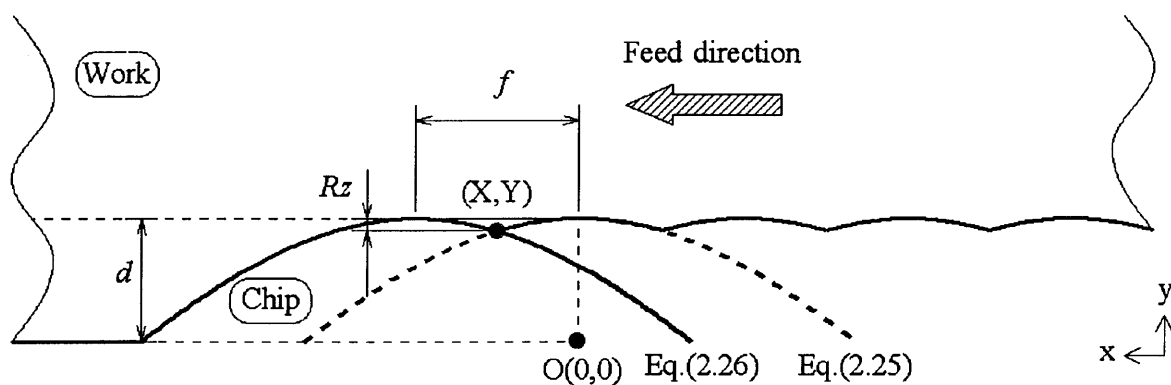


Fig.2.13 Model of surface formation of oblique cutting (Circular chip)



図 2.14 に式(2.7), 式(2.17), 式(2.29)より計算された通常切削, 三角形及び円形チップを用いた傾斜切削の幾何学的表面粗さについての具体例を示す. 図 2.14 における実験条件は本研究で実際に使用した条件である,

$$V=95\text{m/min}, f=0.0233\text{mm/rev (70mm/min)}, d=0.015\text{mm}$$

を用いた.

グラフより, 三角形チップによる通常切削と傾斜切削を比較すると, 本研究で使用した切刃傾斜角( $i=60^\circ$ )では, 傾斜切削は表面粗さが通常切削に比べて著しく小さくなっていることが分かる. また, 幾何学的表面粗さ算術式より, 傾斜切削は通常切削に比べ送りを大きくしたことによる幾何学的表面粗さ数値が悪化する割合が小さいことがわかる.

傾斜切削において三角形チップと円形チップを比較した場合, 円形チップの方が少し三角形チップよりも悪化する. また, 円形チップは径が小さくなるほど幾何学的表面粗さが悪化する.

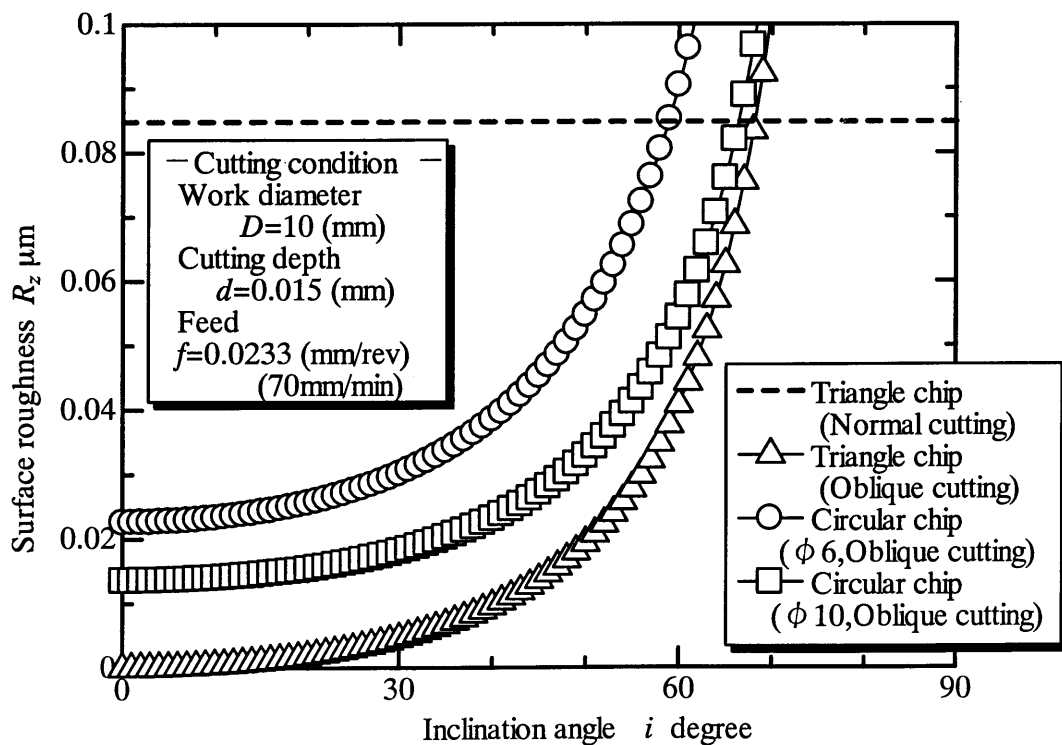


Fig.2.14 Change of theoretical surface roughness  $R_z$



## 2.6 傾斜切削における切込み量について

三角形スローアウェイチップによる傾斜切削において、鋭いエッジを持った工具切刃稜がそのまま被削材に転写される理想状態を仮定し、被削材の回転と工具の送りを考慮した場合、傾斜切削では工具が被削材に接触する場所によって切込み量が変わることが考えられる。

図 2.15 に被削材の回転と送りを考慮した場合における切込み量についての説明図を示す。工具－被削材間における接触長さを  $L$ 、被削材半径を  $r_0$ 、切刃傾斜角を  $i$ 、送り速度を  $f$ 、切込み設定量を  $d$ 、任意の点における切込み量を  $d'$  とする。工具－被削材間の接触長さにおける左端からの移動量を  $X$ 、接触長さ中心点から下方向の移動量を  $Y$  とする。

工具－被削材の接触長さ  $L$  は式(2,11)に  $y=0$  を代入して  $l$  について解くことにより

$$L = 2l = \frac{2\sqrt{(D-d)d}}{\sin i} \quad (2.30)$$

で求められ、図 2.15 における接触長さの半分である  $L/2$  を送り方向へ換算した値を  $Y_0$  とすると、

$$\begin{aligned} Y_0 &= \frac{L}{2} \sin i \\ &= \sqrt{Dd - d^2} = \sqrt{2r_0d - d^2} \end{aligned} \quad (2.31)$$

となる。

また、 $Y$  方向の変位は、

$$y = Y_0 - x \tan i \quad (2.32)$$

で求められる。

図 2.15 における接触長さの左端点から  $X$  方向に任意の量だけ移動した  $X=x_1$  ( $x_1 < f$ ) 及び  $X=x_2$  ( $x_2=x_1+f$ ,  $f \leq x_2$ ) における切込み量を考える。

任意の点  $X=x_1$  ( $x_1 < f$ ) における切込み量  $d'_{x_1}$  は、三平方の定理より、

$$d'_{x_1} = r_0 - \sqrt{Yx_1^2 + (r_0 - d)^2} \quad (2.33)$$

より求めることができる。



また、任意の点  $X=x_1$  から  $X$  方向に  $f$  だけ移動した  $X=x_2$  ( $x_2=x_1+f, f \leq x_2$ ) における切込み量  $d'_{x_2}$  は、被削材 1 回転前に相当する  $X=x_1$  の時点で所定の切削が行われているため、

$$\begin{aligned} d'_{x_2} &= (r_0 - d'_{x_1}) - \sqrt{Yx_2^2 + (r_0 - d)^2} \\ &= \sqrt{Yx_1^2 + (r_0 - d)^2} - \sqrt{Yx_2^2 + (r_0 - d)^2} \end{aligned} \quad (2.34)$$

となる。

よって、接触長さの端点から  $X < f$  の範囲における、任意の点での切込み量は、

$$d' = r_0 - \sqrt{y^2 + (r_0 - d)^2} \quad (2.35)$$

で求められ、

また、接触長さの端点から  $f \leq X$  の範囲における、任意の点での切込み量は、

$$d' = \sqrt{y_{x-f}^2 + (r_0 - d)^2} - \sqrt{y^2 + (r_0 - d)^2} \quad (2.36)$$

で求められる。

図 2.16 に式(2.35)、式(2.36)より計算された工具－被削材間における接触場所ごとの切込み量についての具体例を示す。図 2.16 における実験条件は本研究で実際に使用した 3 種類の条件である、

$$V=95\text{m/min}, f=0.0017\text{mm/rev (5mm/min)}, d=0.015\text{mm}, D=10\text{mm}$$

$$V=95\text{m/min}, f=0.0033\text{mm/rev (10mm/min)}, d=0.015\text{mm}, D=10\text{mm}$$

$$V=95\text{m/min}, f=0.0100\text{mm/rev (30mm/min)}, d=0.015\text{mm}, D=10\text{mm}$$

を用いた。

グラフより、傾斜切削では接触長さの左端点から接触長さの中心点ぐらいまでの範囲で切削が行われることがわかる。つまり、切刃上部では切削が行われていないということがいえる。また、傾斜切削では設定した切込み量  $d$  よりも実際の切込み量  $d'$  は小さくなり、実際の最大切込み量  $d'_{\max}$  は送りが大きくなるにつれて増加することがわかる。



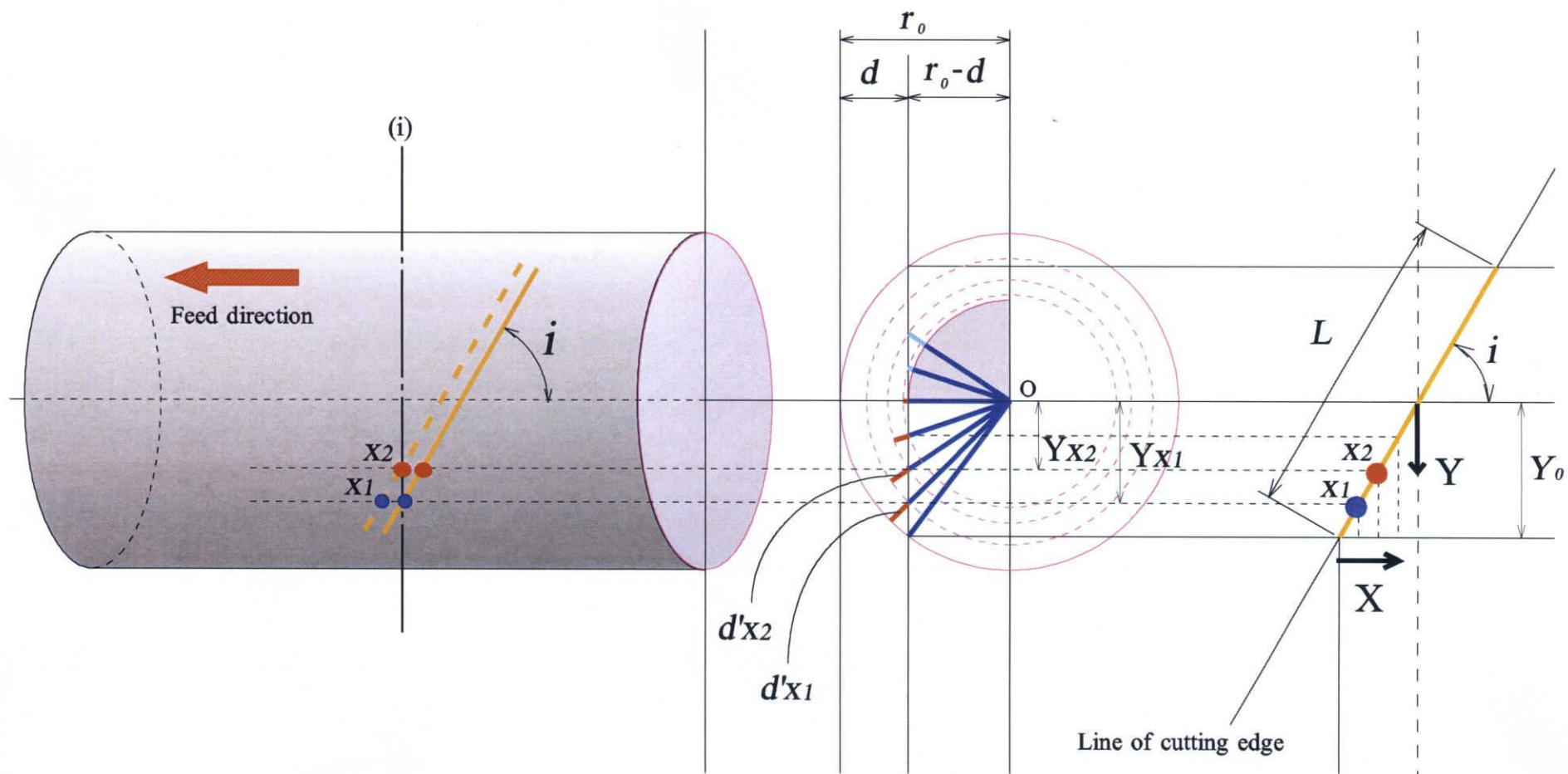


Fig.2.15 Model of cutting depth



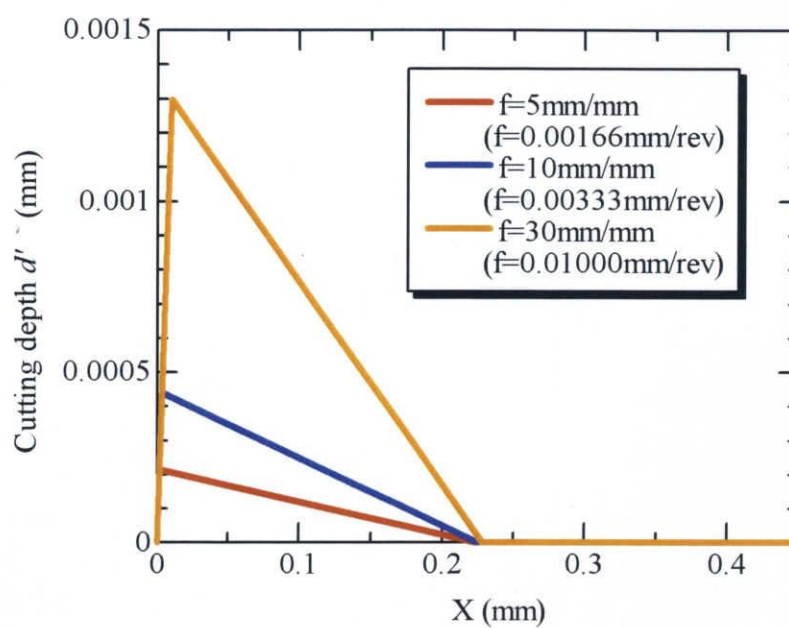


Fig.2.16 Change of cutting depth (Triangle chip)



## 第 3 章 実験装置

### 3.1 使用旋盤

実験は立型 NC フライス盤（牧野フライス社製：AVNC-74，図 3.1）を用い，チャック部にホルダーを介し丸棒被削材を取り付け，テーブルに固定したバイスにて保持した工具を Z 軸上向き方向に移動させることにより，外周切削加工をおこなった．切削の様子を図 3.2 に示す．



Fig.3.1 NC milling machine for experiment





Fig.3.2 Setup for external cylindrical cutting



## 3.2 供試工具

### 3.2.1 工具精度について

現在、旋削用スローアウェイチップとして使用されている工具の大多数が、工具精度 M 級と G 級のものである。M 級と G 級では工具の仕上げ精度が多少異なる。M 級と G 級の工具精度について表 3.1 に示す。

Table 3.1 Chart of tool tolerance

Symbol	Nose height	Thickness	Inscribed circle
M	$\pm 0.08 \sim \pm 0.18$	$\pm 0.13$	$\pm 0.05 \sim \pm 0.13$
G	$\pm 0.025$	$\pm 0.13$	$\pm 0.025$

表 3.1 より、M 級と G 級の工具では G 級工具の方が仕上げ精度が高いことがわかる。仕上げ精度の違いを示す具体例として図 3.3 に M 級の三角形スローアウェイチップ (TNMA160408)、図 3.4 に G 級の三角形スローアウェイチップ (TNGA160408) の直線エッジ部を、走査型電子顕微鏡 (SEM) にて 1000 倍の倍率で観察した様子を示す。図 3.3 における M 級工具のエッジ部には、すくい面と逃げ面の境界に製造工程におけるばりが多少見られる。それに対し、図 3.4 の G 級工具ではばりが非常に少なく仕上げ精度が高い様子がわかる。本研究は仕上げ加工を想定し実験条件を設定しているため、切込み深さが  $d=0.015\text{mm}$  ととても小さい。そのため、所定の切込みが正確に行えるよう、工具はエッジ部にばりが少なく、仕上げ精度が高い G 級のものを使用することにした。



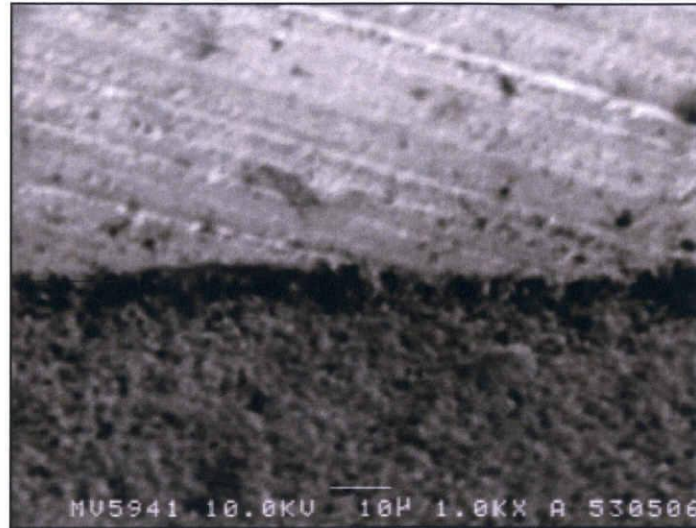


Fig.3.3 Photograph of chip edge (TNMA160408)

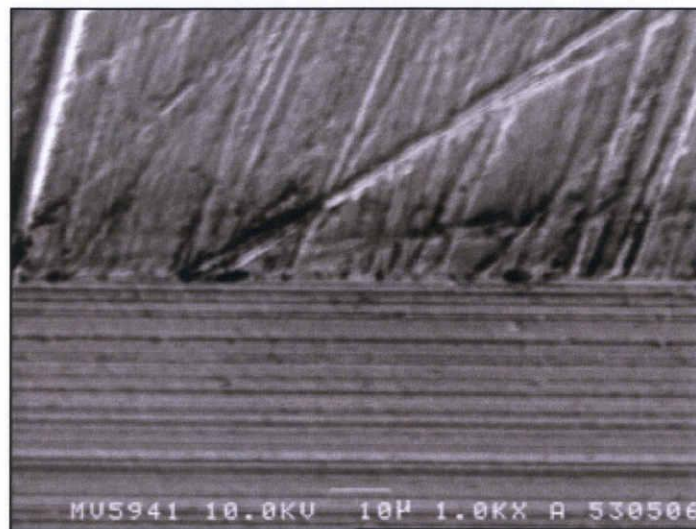


Fig.3.4 Photograph of chip edge (TNGA160408)



### 3.2.2 三角形スローアウェイチップ

#### 3.2.2(a) 通常切削時

通常切削時の供試工具は、三菱マテリアル株式会社製一般旋削用スローアウェイチップ(TNGA160408)を三菱金属製 TAC チップホルダー(PTG NR2020K16)に取り付けたものである。図 3.5 に使用チップの形状を示し、表 3.2 には、その仕様を示す。また図 3.6 に通常切削でのチップをホルダーに取り付けた状態の様子を示す。

Table 3.2 Specification of employed chip (Normal cutting)

Clearance angle	Thickness	Dimension of inscribed circle	Corner radius	Chip breaker	Hand of tool
0°	4.76mm	9.525mm	0.8mm	None	Right hand

#### 3.2.2(b) 傾斜切削時

傾斜切削時の供試工具は、三菱マテリアル株式会社製一般旋削用スローアウェイチップ(TNGA220408)をダイジェット工業株式会社製チップホルダー (PTF NR3232P22)に取り付けたものである。図 3.7 に使用チップの形状を示し、表 3.3 にはその仕様を示す。また図 3.8 に傾斜切削でのチップをホルダーに取り付けた状態の様子を示す。尚、チップホルダーは本実験条件である  $i=60^\circ$  の傾斜角を持つように加工を施した。

Table 3.3 Specification of employed chip (Oblique cutting)

Clearance angle	Thickness	Dimension of inscribed circle	Corner radius	Chip breaker	Hand of tool
0°	4.76mm	12.7mm	0.8mm	None	Right hand



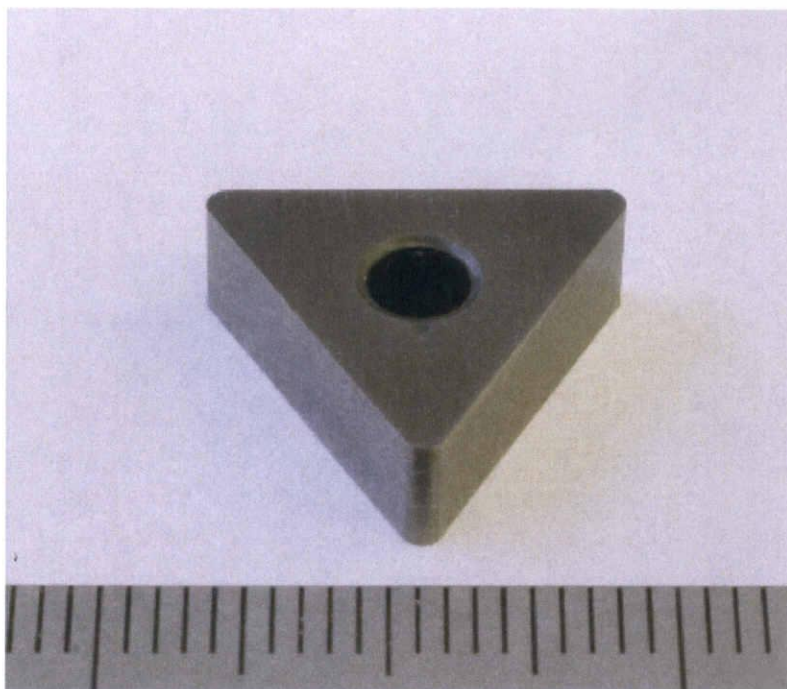


Fig.3.5 Photograph of chip used (Normal cutting)

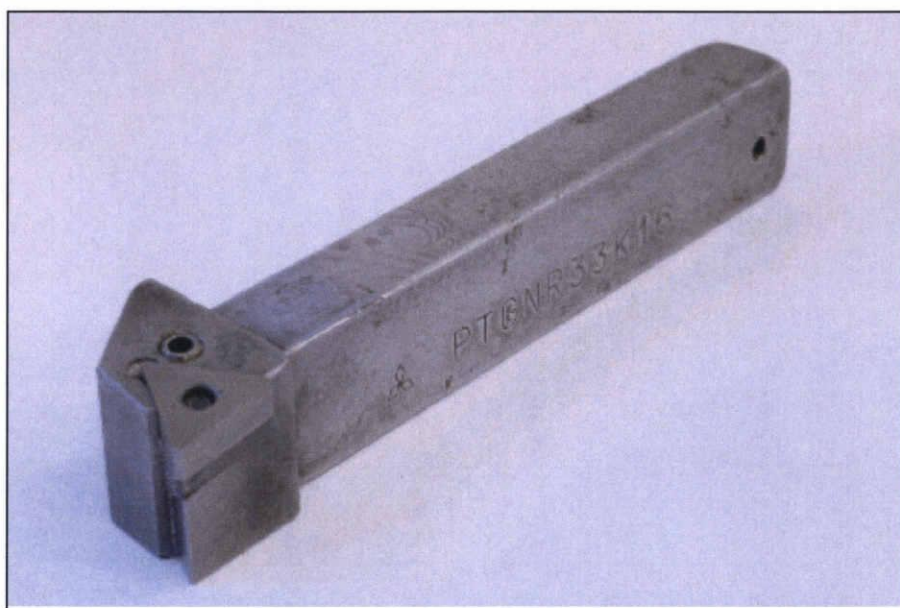


Fig.3.6 Photograph of Normal cutting tool



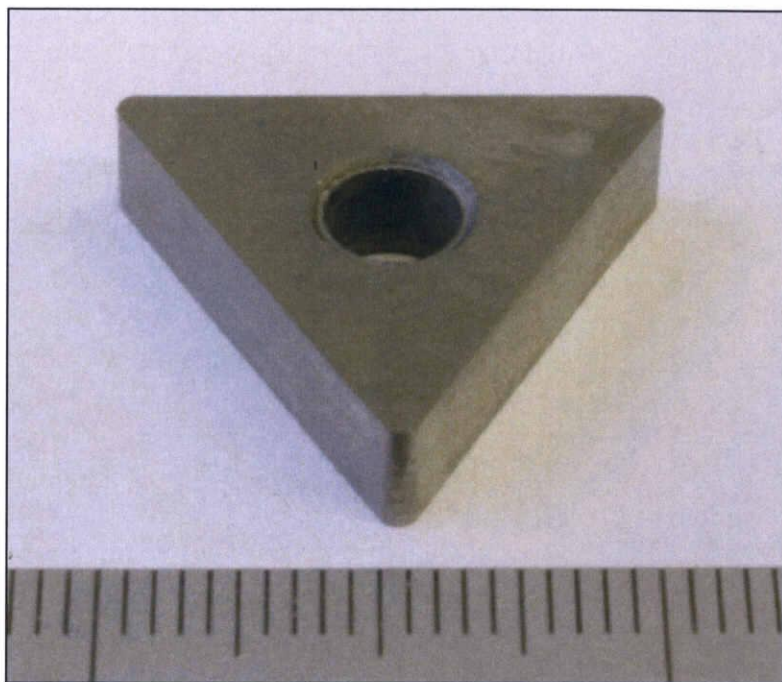


Fig.3.7 Photograph of chip used (Oblique cutting)

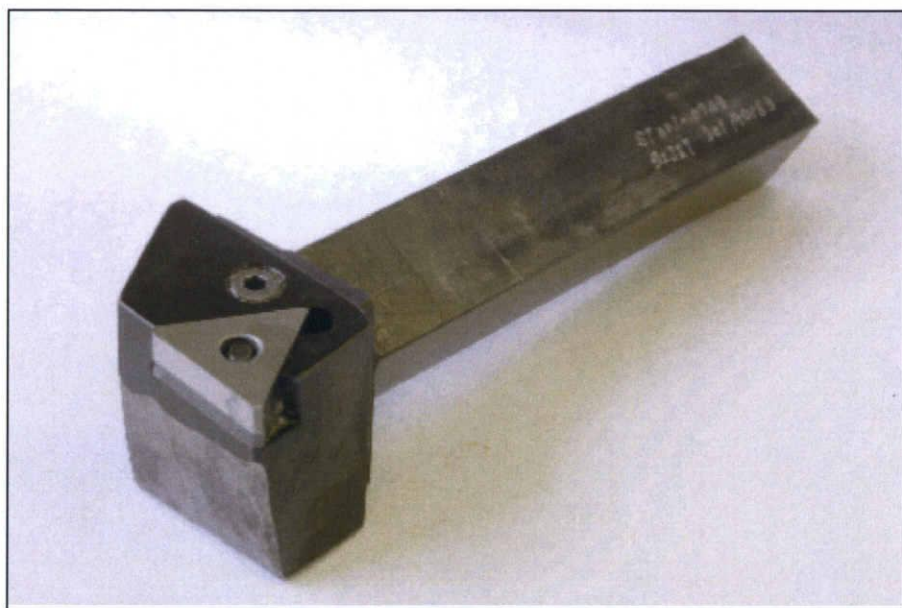


Fig.3.8 Photograph of oblique cutting tool ( $i=60^\circ$ )



### 3.2.3 円形チップ

円形チップにおける供試工具は、株式会社タンガロイ製一般旋削用円形穴つきチップ (RCGT1003MO-AL( $\phi 10$ )), (RCGT0602MO-AL( $\phi 6$ ))を株式会社タンガロイ製チップホルダー (SRDCN2525M10( $\phi 10$ )), (SRDCN2525M06( $\phi 6$ ))に取り付けたものである。

図 3.9 及び図 3.10 に使用チップの形状を示し、表 3.4 及び表 3.5 には、その仕様を示す。

Table 3.4 Specification of employed chip ( $\phi 10$ )

Rake Angle	Clearance angle	Cutting edge Length	Thickness	Corner radius	Chip breaker
25°	7°	10.0mm	3.18mm	5.0mm	AL

Table 3.5 Specification of employed chip ( $\phi 6$ )

Rake Angle	Clearance angle	Cutting edge Length	Thickness	Corner radius	Chip breaker
25°	7°	6.0mm	2.38mm	3.0mm	AL

#### 3.2.3(a) 通常切削時

図 3.11 に円形チップ( $\phi 10$ )をホルダーに取り付けた状態の様子を、図 3.12 に同様に円形チップ( $\phi 6$ )をホルダーに取り付けた状態の様子を示す。

#### 3.2.3(b) 傾斜切削時

図 3.13 に円形チップ( $\phi 10$ )をホルダーに取り付けた状態の様子を、図 3.14 に円形チップ( $\phi 6$ )をホルダーに取り付けた状態の様子を示す。尚、チップホルダーは本実験条件である  $i=60^\circ$  の傾斜角を持つように加工を施した。





Fig.3.9 Photograph of chip used (Circular chip ,  $\phi$  10)



Fig.3.10 Photograph of chip used (Circular chip ,  $\phi$  6)





Fig.3.11 Photograph of Normal cutting tool (Circular chip ,  $\phi$  10)



Fig.3.12 Photograph of Normal cutting tool (Circular chip ,  $\phi$  6)



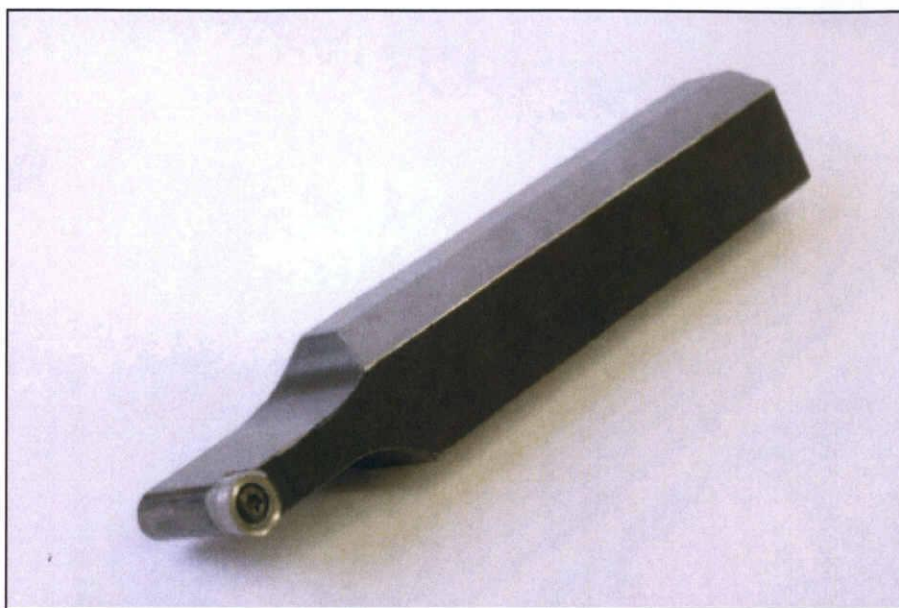


Fig.3.13 Photograph of Oblique cutting tool ( $i=60^\circ$ ) (Circular chip,  $\phi 10$ )

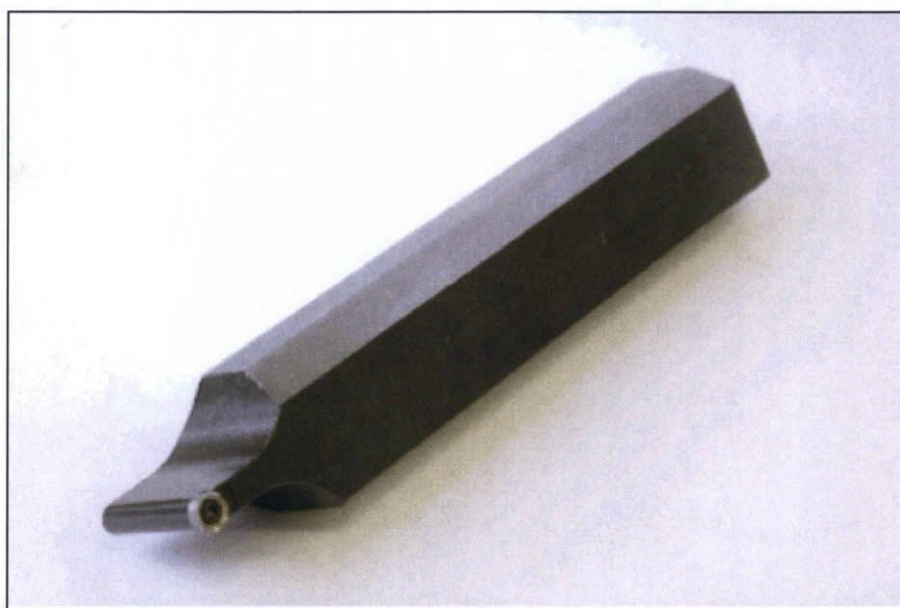


Fig.3.14 Photograph of Oblique cutting tool ( $i=60^\circ$ ) (Circular chip,  $\phi 6$ )



### 3.3 供試被削材

供試被削材には、アルミ合金 A5052 (Al-Mg 系合金) を供給状態のまま、直径 10mm に加工し使用した。

アルミの密度は銅や鉄の約 1/3 であり、大気中で自然に酸化皮膜が形成されるため優れた耐食性をもち、また展延性に富みその後の成形加工、切削加工なども容易である。そのため、アルミ合金は多くの分野で精密小型加工部品材料として使用されている。

アルミ合金は熱処理型合金と非熱処理型合金に分類することができる。図 3.15 にアルミ合金の分類を示す。

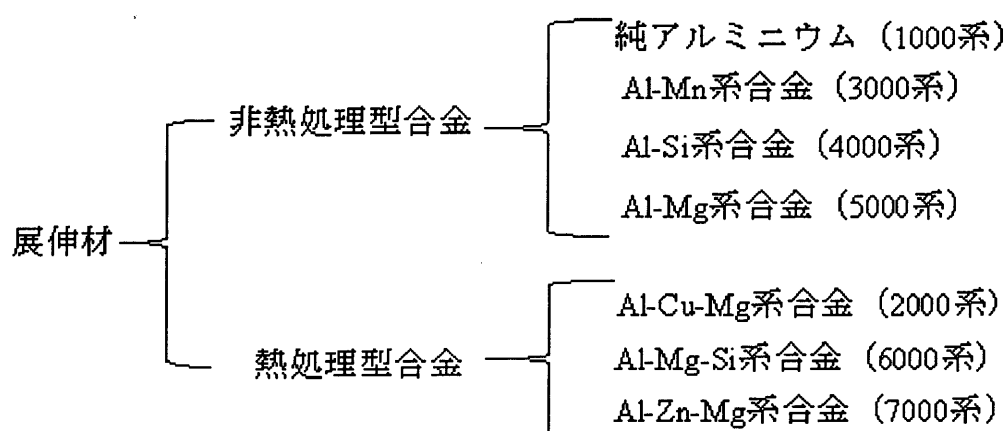


Fig.3.15 The classification of aluminum alloy

5000 系のアルミ合金で中程度の Mg を含有するものとしては A5052 が代表的であり、中程度の強度をもつ材料として最も一般的である。

表 3.6 に供試被削材の化学成分を示す<sup>(4)</sup>。また、図 3.16 に被削材をホルダーに固定した様子を示す。実験は被削材をホルダーに固定した状態で縦型フライス盤の主軸部に固定し、テーブル上に固定した工具に上向き方向の送りを与えることで切削を行った。



Table3.6 Chemical compositions of workpiece (%) <sup>(4)</sup>

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
Measuring values	< 0.25	< 0.40	< 0.10	< 0.10	2.2 ~ 2.8	0.15 ~ 0.35	< 0.10

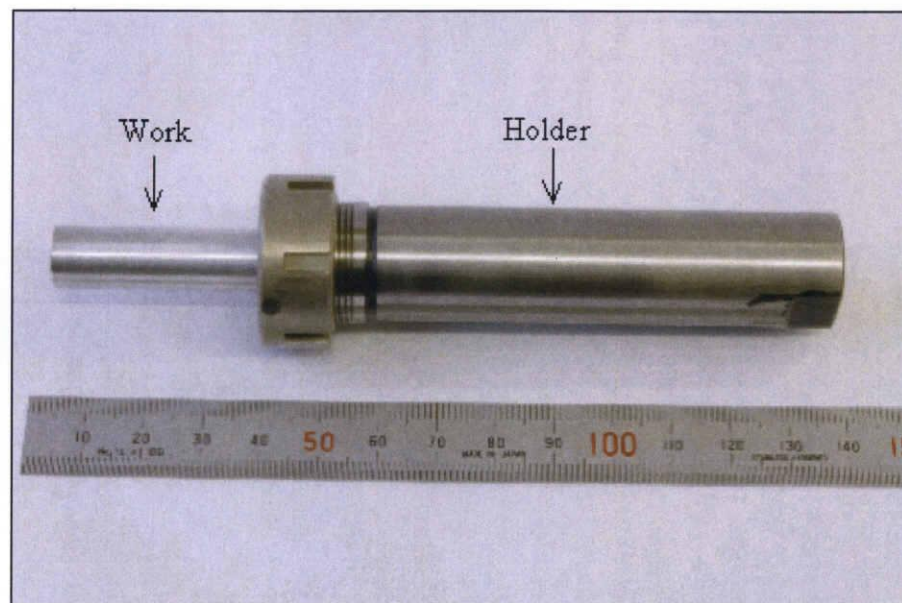


Fig.3.16 Photograph of work material and holder



### 3.4 使用油剤

本研究は環境への配慮を払いつつ、必要な超精密仕上切削を行うことを目的としているため、切削実験においてはセミドライ方式の切削を採用した。従来の油剤を大量に使用する切削と比較し、セミドライ切削を行うことで以下のような利点が考えられる。

- ・ 被削材の洗浄処理が容易である
- ・ 廃油を出さない（油剤回収の必要がない）
- ・ 油剤を大量使用しないことによるコストダウン

セミドライ切削を行うことで環境汚染を誘発する廃油に関する問題が軽減され、廃油焼却処理時におけるダイオキシンの発生を最小限に抑えることができる。また現在、切削加工にかかるコストの約 1/3 が切削油剤に使用される中で、セミドライ切削を採用することによるコストダウンの効果はとても大きいと考えられる。

実験に使用したセミドライ給油装置を図 3.17 に示す。本実験では扶桑精機株式会社製セミドライ式給油冷却機（マジックカット e-ミスト）を使用した。また使用油剤は同じく扶桑精機株式会社製（AM-50）を使用した。AM-50 は精製天然植物油脂であり、人体及び環境に無害といった特色を持つ。使用油量は AM-50 の推奨量である 5~10ml/h と設定した。



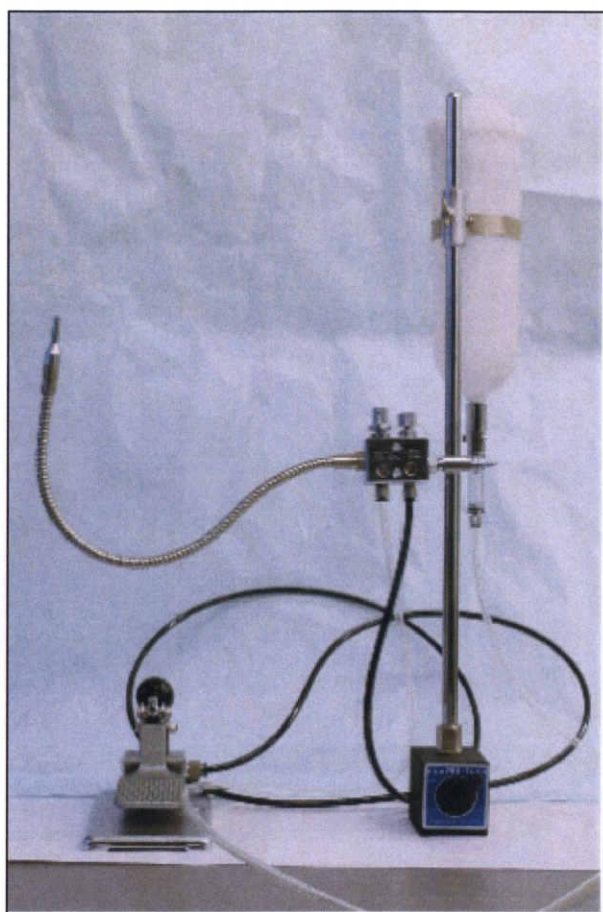


Fig.3.17 Photograph of semi-dry type cutting fluid supplying device



## 第4章 切削条件及び測定方法

### 4.1 切削条件

本実験で使用した切削条件について，三角形チップを使用した切削実験を表 4.1 に，円形チップを使用した切削実験を表 4.2 に示す．

Table 4.1 Cutting conditions (using triangle chip)

Cutting speed	$V = 95 \text{ m/min (3000rpm)}$
Feed rate	$f = 0.0003, 0.0007, 0.0010, 0.0013, 0.0017, 0.0033 \text{ mm/rev}$ $(f = 1, 2, 3, 4, 5, 10 \text{ mm/min})$ $f = 0.0100, 0.0167, 0.0233, 0.0300, 0.0367, 0.0433 \text{ mm/rev}$ $(f = 30, 50, 70, 90, 110, 130 \text{ mm/min})$
Cutting depth	$d = 0.015 \text{ mm}$
Cutting chip	TNGA160408 (Normal cutting) TNGA220408 (Oblique cutting)
Work	A5052
Inclination angle	$i = 60^\circ$ (Oblique cutting)



Table 4.2 Cutting conditions (using circular chip)

Cutting speed	$V = 95 \text{ m/min (3000rpm)}$
Feed rate	$f = 0.0003, 0.0007, 0.0010, 0.0013, 0.0017, 0.0033 \text{ mm/rev}$ $(f = 1, 2, 3, 4, 5, 10 \text{ mm/min})$ $f = 0.0100, 0.0167, 0.0233, 0.0300, 0.0367, 0.0433 \text{ mm/rev}$ $(f = 30, 50, 70, 90, 110, 130 \text{ mm/min})$
Cutting depth	$d = 0.015 \text{ mm}$
Cutting chip	RCGT1003MO-AL ( $\phi 10$ ) RCGT0602MO-AL ( $\phi 6$ )
Work	A5052
Inclination angle	$i = 60^\circ$ (Oblique cutting)

## 4.2 測定方法

### 4.2.1 被削材表面粗さの測定

被削材表面粗さの測定には、表面形状測定器（ミットヨ製：SV-524）を使用した。測定には触針を使用し、送り方向に走査して被削材の表面形状を測定した。本実験で使  
用した被削材の切削可能部分の長さは送り方向に 20mm であるため、測定箇所により表  
面粗さが多少異なる。そこで、表面粗さを測定する際には図 4.1 に示すように軸方向の  
3 箇所を測定し、その平均値をとった。



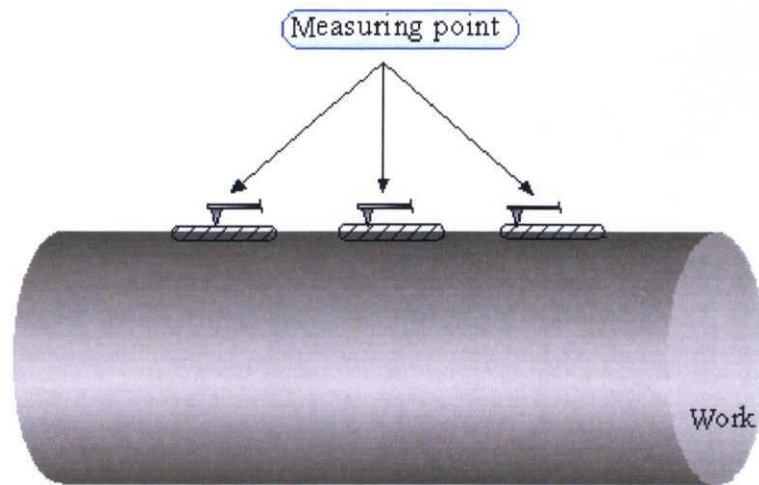


Fig.4.1 Measuring region of surface roughness

#### 4.2.2 被削面の観察

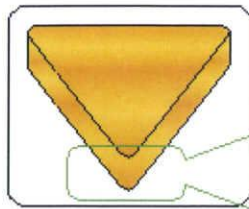
被削面の観察は，光学顕微鏡（株式会社ニコン製：光学顕微鏡 20 型）及び走査型電子顕微鏡（株式会社エリオニクス製：ESA-2000）を使用した．また観察は光学顕微鏡では 50 倍，走査型電子顕微鏡では 500 倍の倍率で行った．

#### 4.2.3 工具摩耗幅の測定

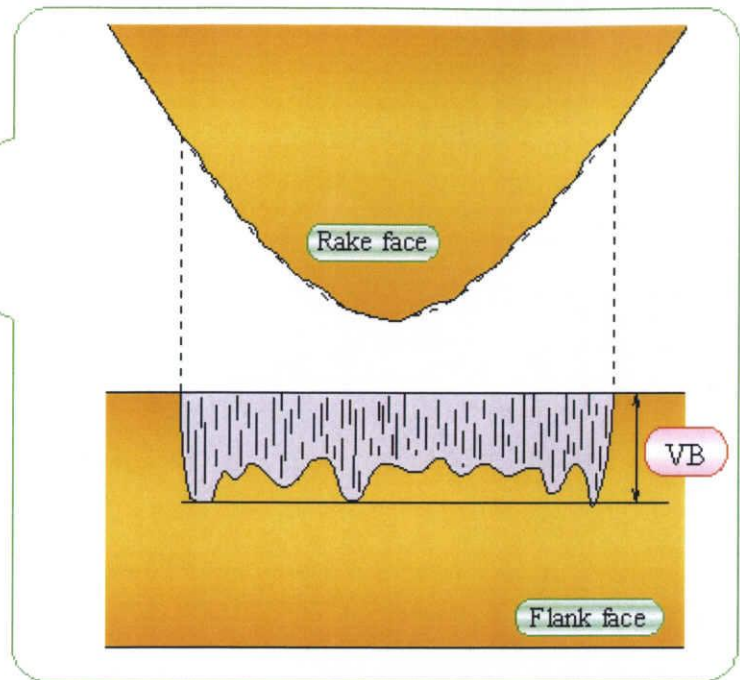
工具摩耗幅の測定には，光学顕微鏡（株式会社ニコン製：光学顕微鏡 20 型）を用いて逃げ面摩耗幅  $V_B$  を測定し，逃げ面に生じる工具摩耗の形態を観察した．尚，観察は 100 倍の倍率にて行った．図 4.2 に三角形チップ，図 4.3 に円形チップ使用時における通常切削時と傾斜切削時の工具摩耗形態の模式図を示す．



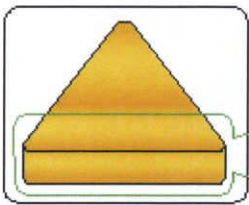
(a) Normal cutting



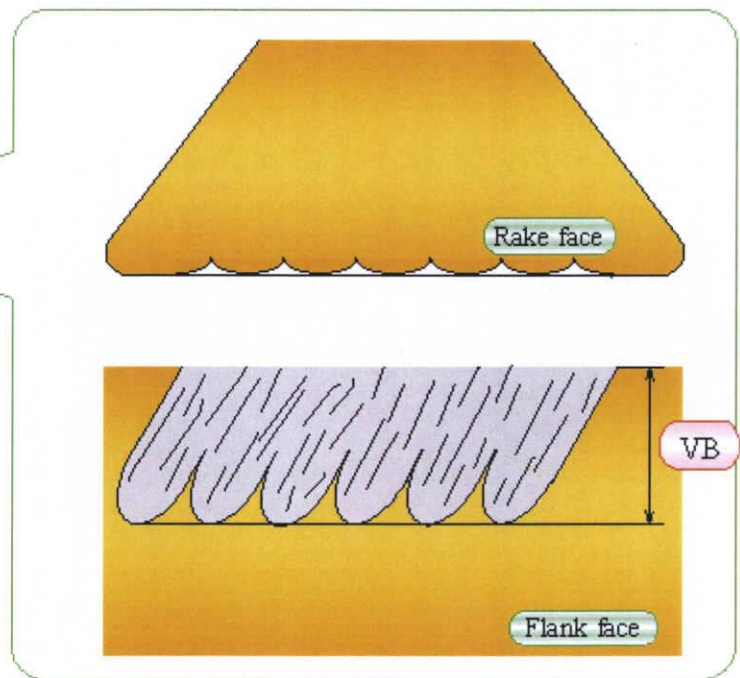
Zoom up



(b) Oblique cutting



Zoom up

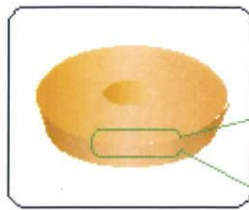


VB : Width of flank wear

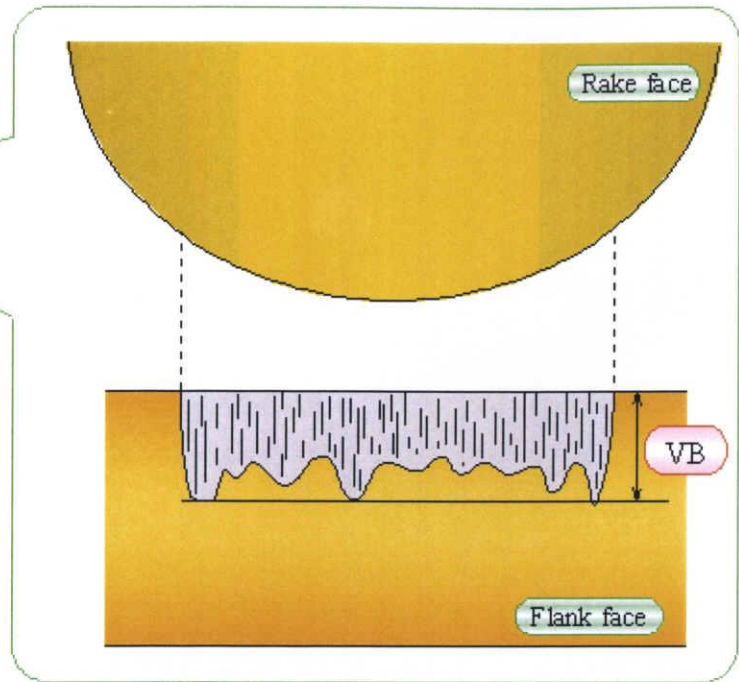
Fig.4.2 Identification of tool wear (Triangle chip)



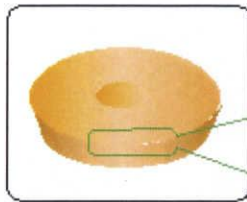
(a) Normal cutting



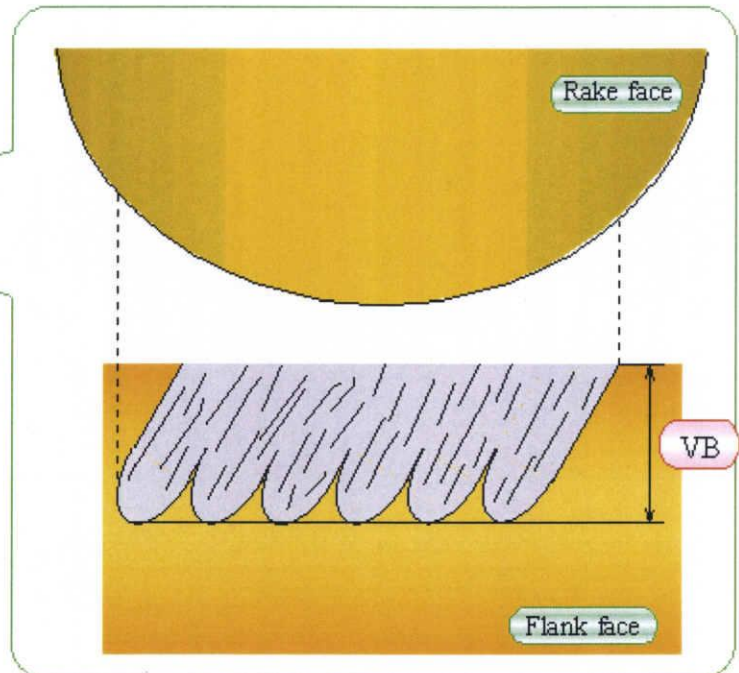
Zoom up



(b) Oblique cutting



Zoom up



VB : Width of flank wear

Fig.4.3 Identification of tool wear (Circular chip)



## 第5章 実験結果及び考察

### 5.1 被削材表面粗さの測定及び被削面の観察

#### 5.1(a) 三角形スローアウェイチップを用いた切削

表面性状を評価するパラメータである，中心線平均粗さ  $R_a$ ，最大高さ  $R_z$ ，十点平均粗さ  $R_{zjs}$  の測定結果を表 5.1 及び図 5.1 に，光学顕微鏡による被削面の観察及び粗さカーブを図 5.2.1~図 5.2.6 に，走査型電子顕微鏡 (SEM) による被削面の観察結果を図 5.3.1 ~図 5.3.2 に示す。

実験結果より通常切削及び傾斜切削の両条件において，送りの大きさが増大するにつれ表面性状値が悪化していく傾向が見られた．表面性状の変化について詳しく検討すると， $R_a$ ， $R_z$ ， $R_{zjs}$  の表面性状値には通常切削と傾斜切削の両条件において大きな差は見られない．しかし，粗さカーブ及び被削面の様子を観察した場合，通常切削では傾斜切削に比べ送り速度の増加に伴う粗さカーブの悪化割合が大きい．

また，通常切削時において送り速度  $f=0.0033\text{mm/rev}(10\text{mm/min})$  を超えたあたりから，被削面にびびり振動によるものと思われるうろこ状の模様が見られた．このうろこ状の模様は送り速度を大きくするにつれて増大し，送り速度  $f=0.0300\text{mm/rev}(90\text{mm/min})$  を超えると SEM 写真でもはっきりと観察することができる．

傾斜切削時も通常切削と同様，送り速度が増大するにつれ表面性状値及び粗さカーブは悪化していく．粗さカーブは送り速度  $f=0.0167\text{mm/rev}(50\text{mm/min})$  を超えたあたりから特に振幅が大きくなる様子が見られた．また図 5.2.6 に示す光学顕微鏡における被削面の観察において，送りの増大に伴い切削痕が大きくなる傾向が見られた．第 2 章 2.6 に示したように，傾斜切削は送り速度によって工具－被削材間における接触場所ごとの切込量が変わる．送りの増大に伴い切込が深くなり，被削面に見られる切削痕が大きくなったのではないかと考えられる．しかし，図 5.3.2 に示す SEM 観察では，通常切削時に見られたびびりマークや特徴的な痕は見られなかった．

被削面の観察及び粗さカーブの結果より，通常切削に比べ傾斜切削時の方が良好な切削を行うことができたのではないかと考えられる．



Table 5.1 Surface roughness (Triangle chip)

Feed rate $f$ mm/rev (mm/min)		0.0003 (1.0)	0.0007 (2.0)	0.0010 (3.0)	0.0013 (4.0)	0.0017 (5.0)	0.0033 (10.0)
Normal Cutting	Ra ( $\mu$ m)	0.0421	0.0362	0.0379	0.0405	0.0511	0.0490
	Rz ( $\mu$ m)	0.2121	0.1747	0.1839	0.1790	0.2221	0.2144
	Rzjis( $\mu$ m)	0.1552	0.1300	0.1287	0.1391	0.1736	0.1881
Oblique Cutting	Ra ( $\mu$ m)	0.0482	0.3900	0.0471	0.0391	0.0403	0.0508
	Rz ( $\mu$ m)	0.2135	0.1780	0.2250	0.1830	0.1848	0.2335
	Rzjis( $\mu$ m)	0.1684	0.1284	0.1541	0.1489	0.1431	0.2006
Feed rate $f$ mm/rev (mm/min)		0.0100 (30.0)	0.0167 (50.0)	0.0233 (70.0)	0.0300 (90.0)	0.0367 (110.0)	0.0433 (130.0)
Normal Cutting	Ra ( $\mu$ m)	0.0473	0.0549	0.0700	0.0561	0.0625	0.0703
	Rz ( $\mu$ m)	0.2160	0.2436	0.3213	0.2675	0.2877	0.3380
	Rzjis( $\mu$ m)	0.1688	0.2065	0.2639	0.2210	0.2384	0.3014
Oblique Cutting	Ra ( $\mu$ m)	0.0566	0.0602	0.0661	0.0710	0.0715	0.0769
	Rz ( $\mu$ m)	0.2522	0.2720	0.3043	0.3167	0.3161	0.3213
	Rzjis( $\mu$ m)	0.1808	0.2177	0.2427	0.2818	0.2736	0.2930

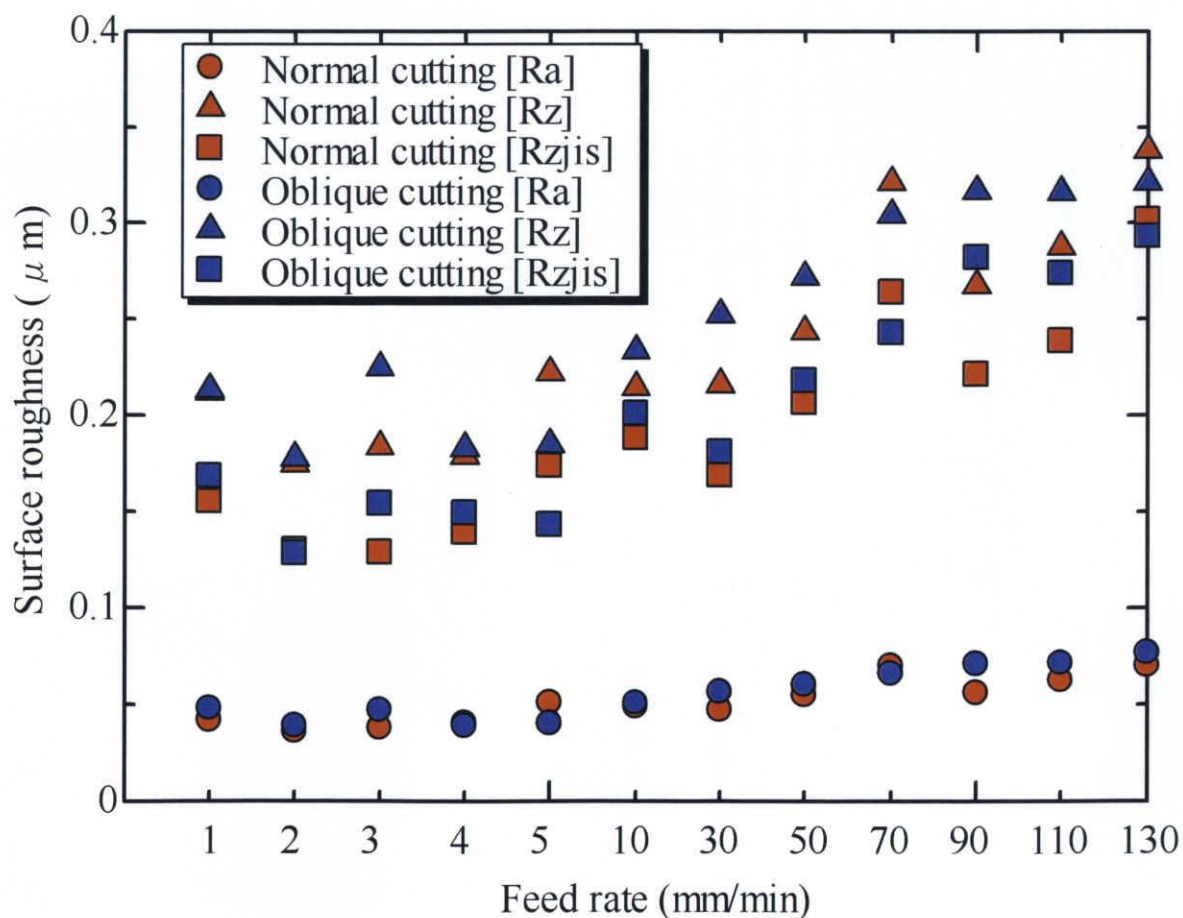


Fig.5.1 Effect of feed rate on surface roughness (Triangle chip)



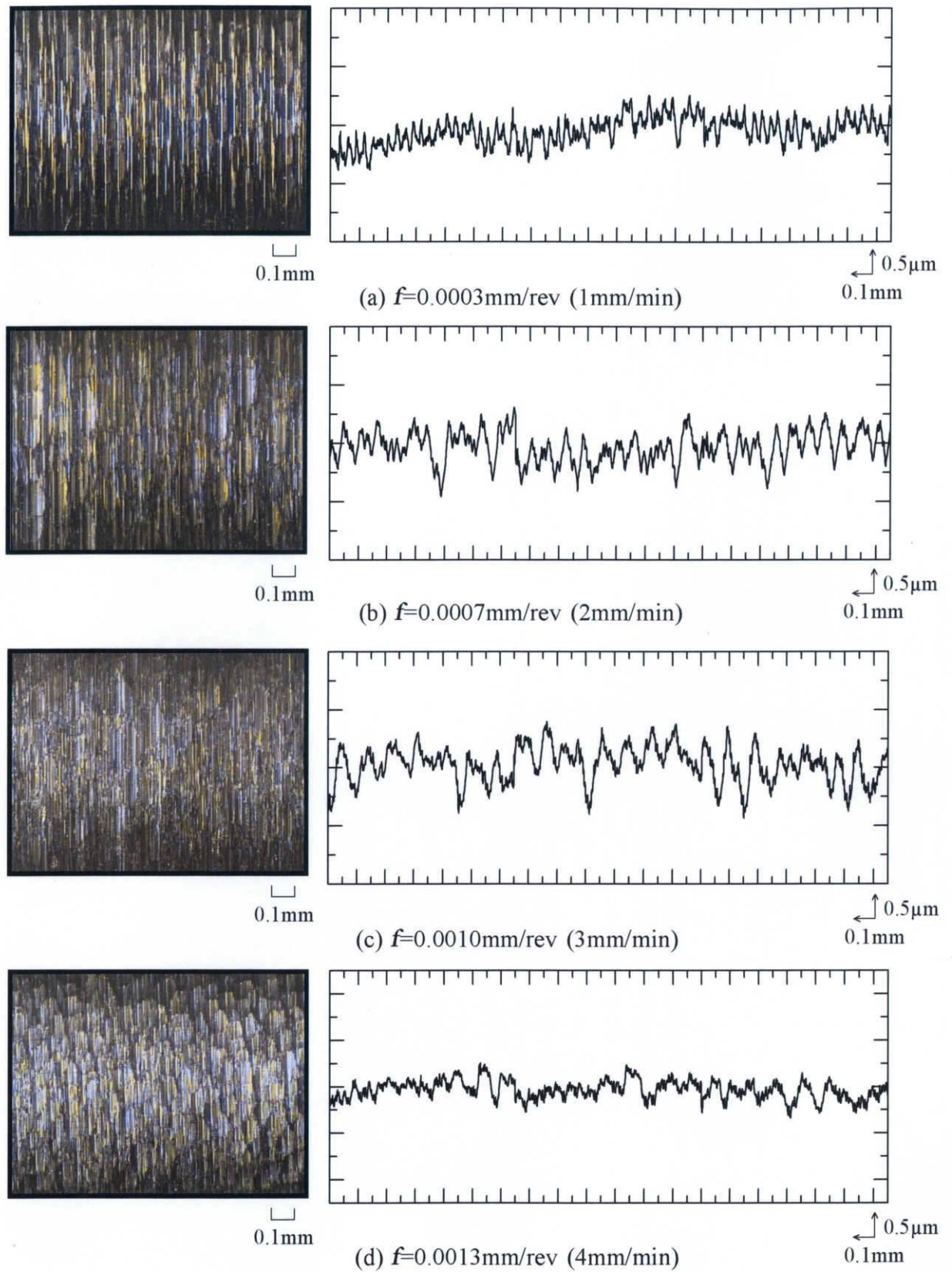


Fig.5.2.1 Surface profiles (Triangle Chip)  
(Normal cutting ,  $V=95\text{m/min}$  ,  $d=0.015\text{mm}$ , TNGA160408)



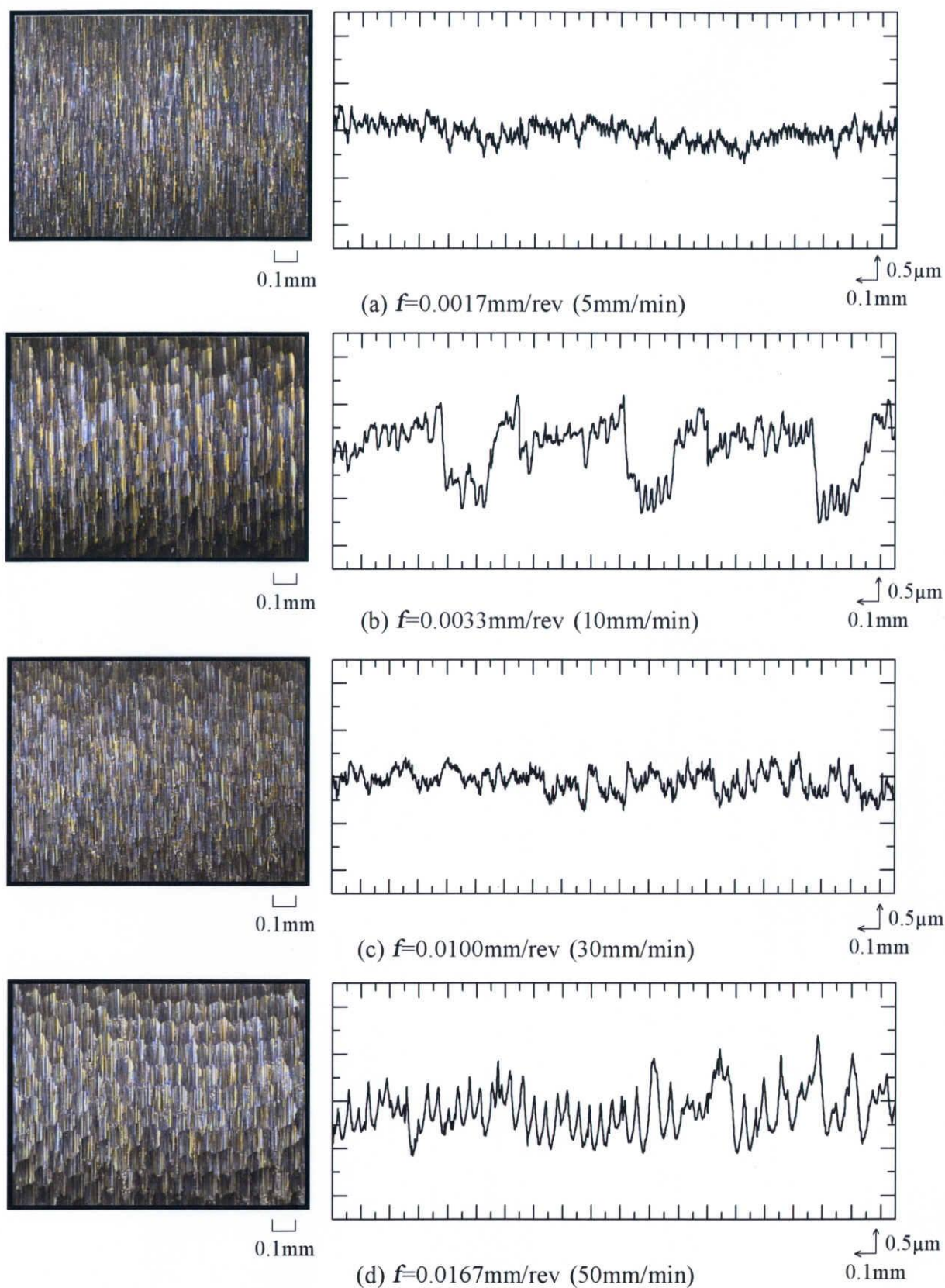


Fig.5.2.2 Surface profiles (Triangle Chip)  
(Normal cutting ,  $V=95\text{m/min}$  ,  $d=0.015\text{mm}$ , TNGA160408)



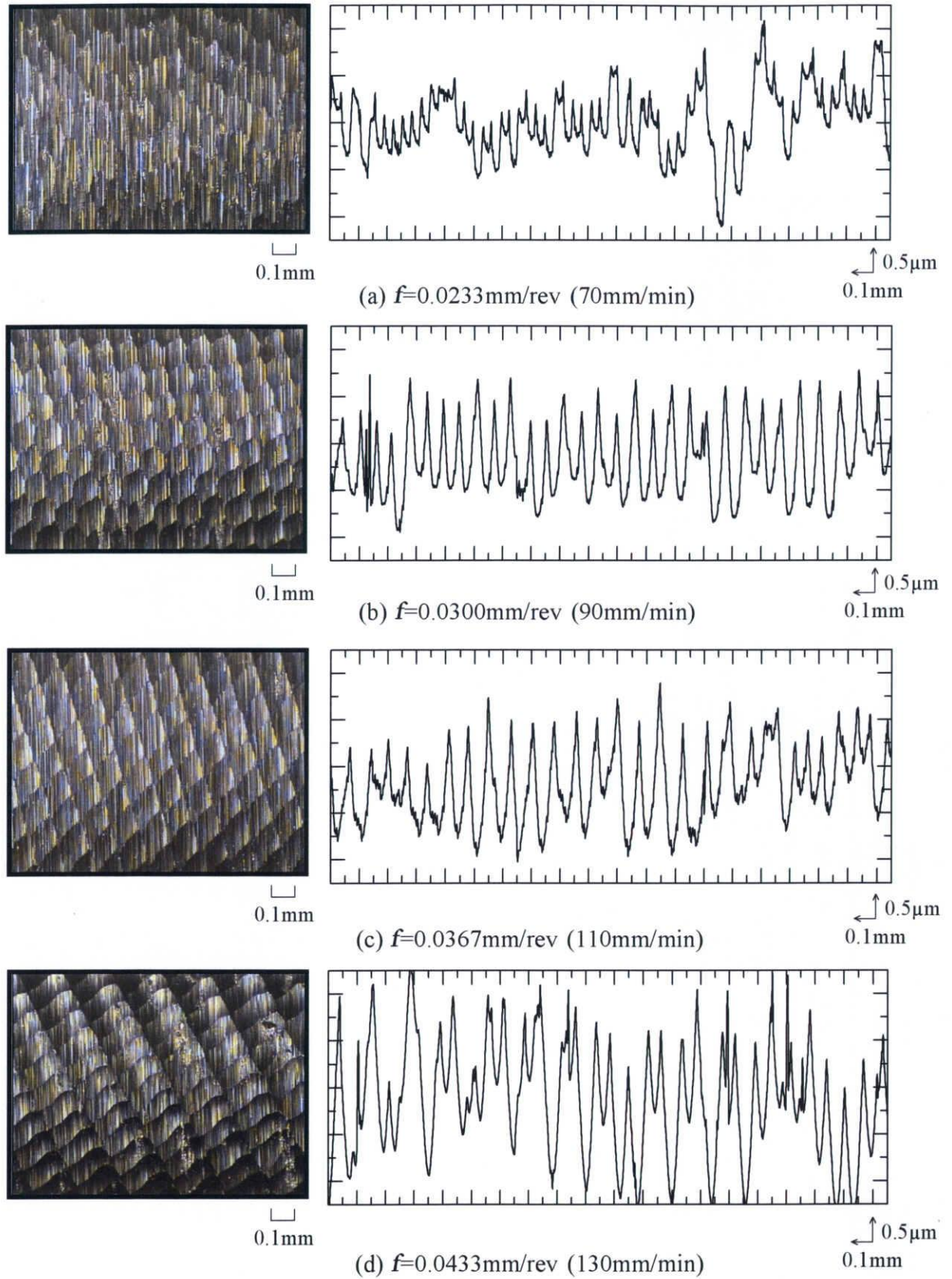


Fig.5.2.3 Surface profiles (Triangle Chip)  
(Normal cutting ,  $V=95\text{m/min}$  ,  $d=0.015\text{mm}$ , TNGA160408)



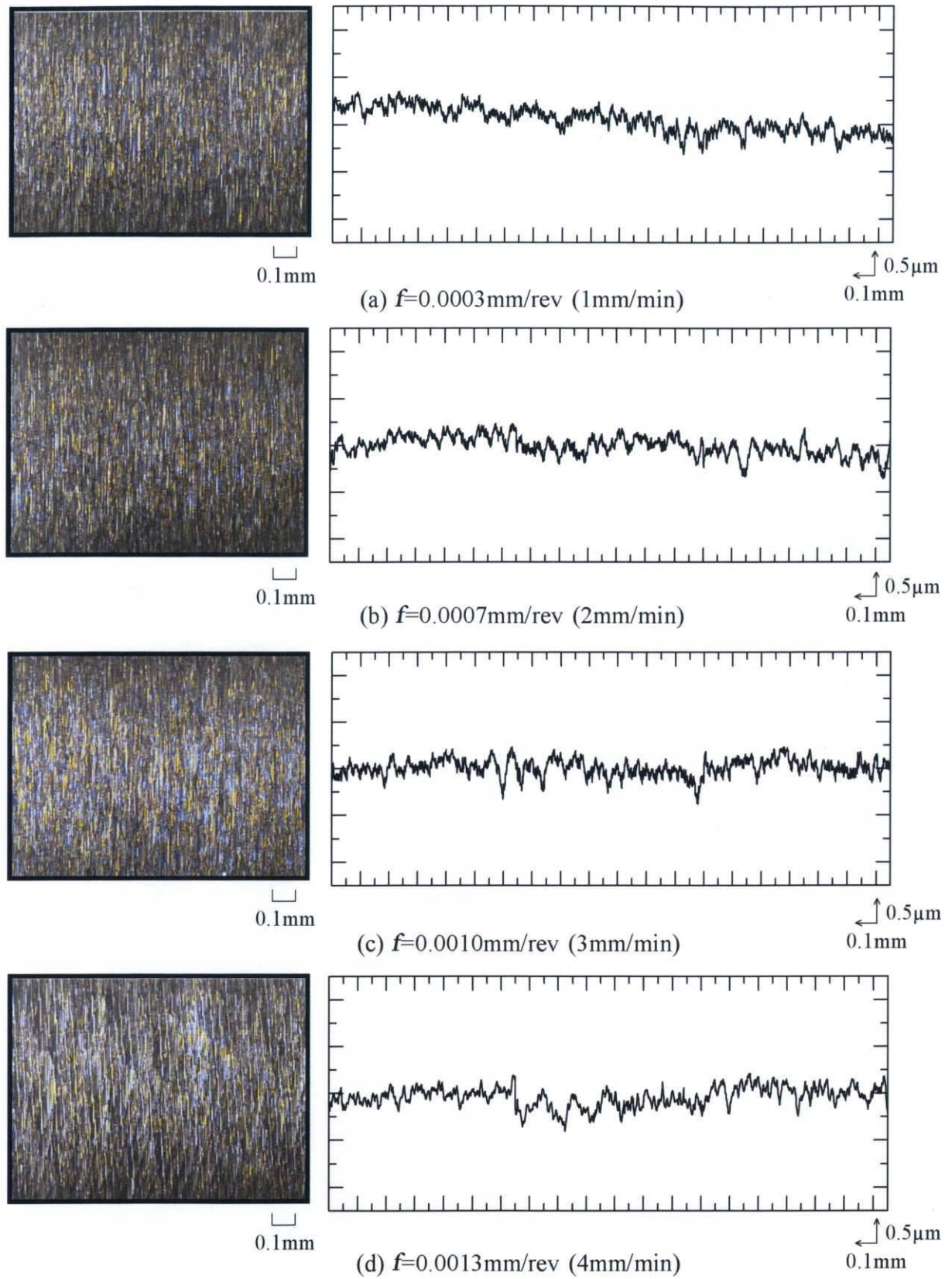


Fig.5.2.4 Surface profiles (Triangle Chip)  
 (Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , TNGA220408)



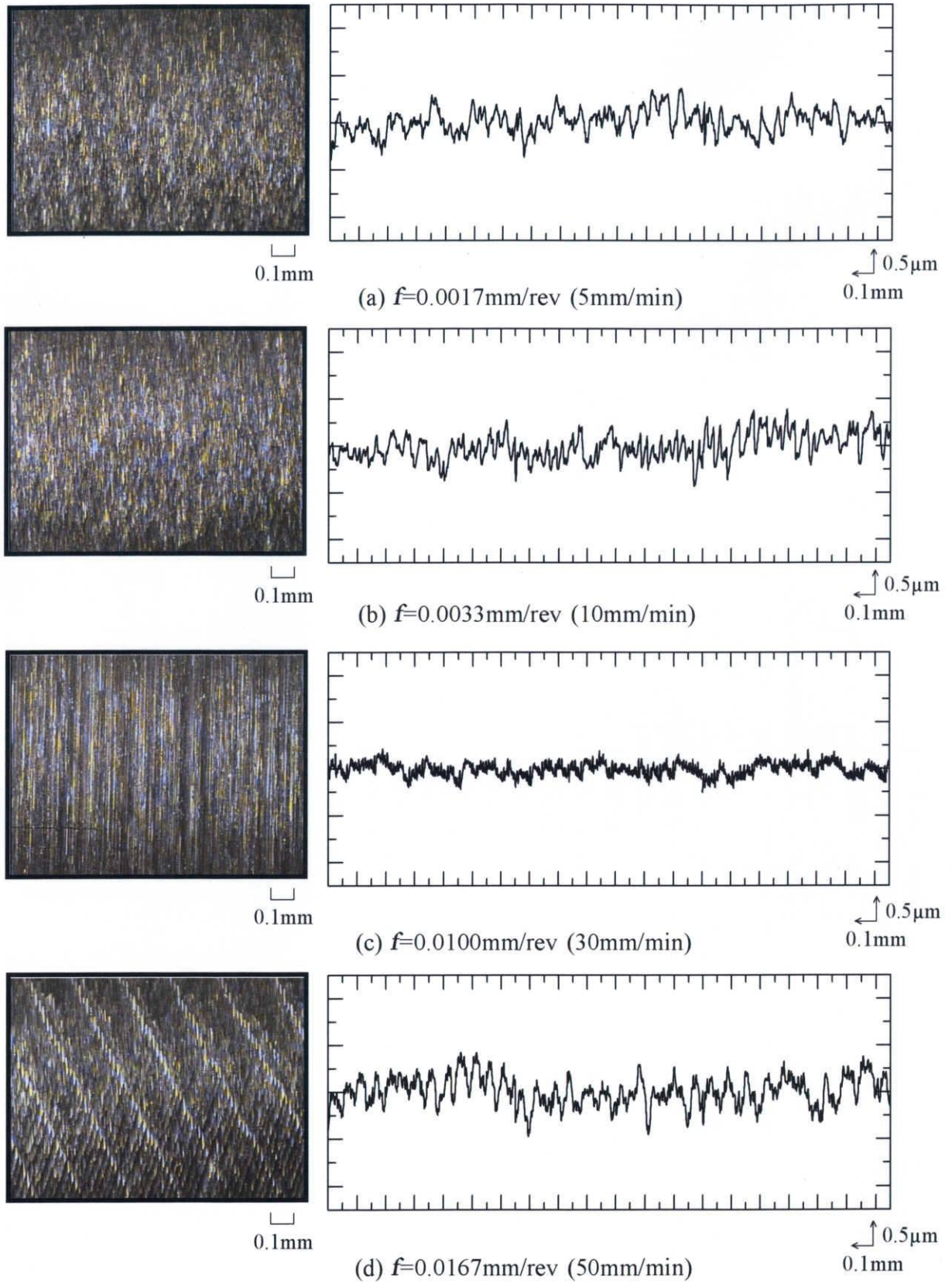


Fig.5.2.5 Surface profiles (Triangle Chip)  
 (Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , TNGA220408)



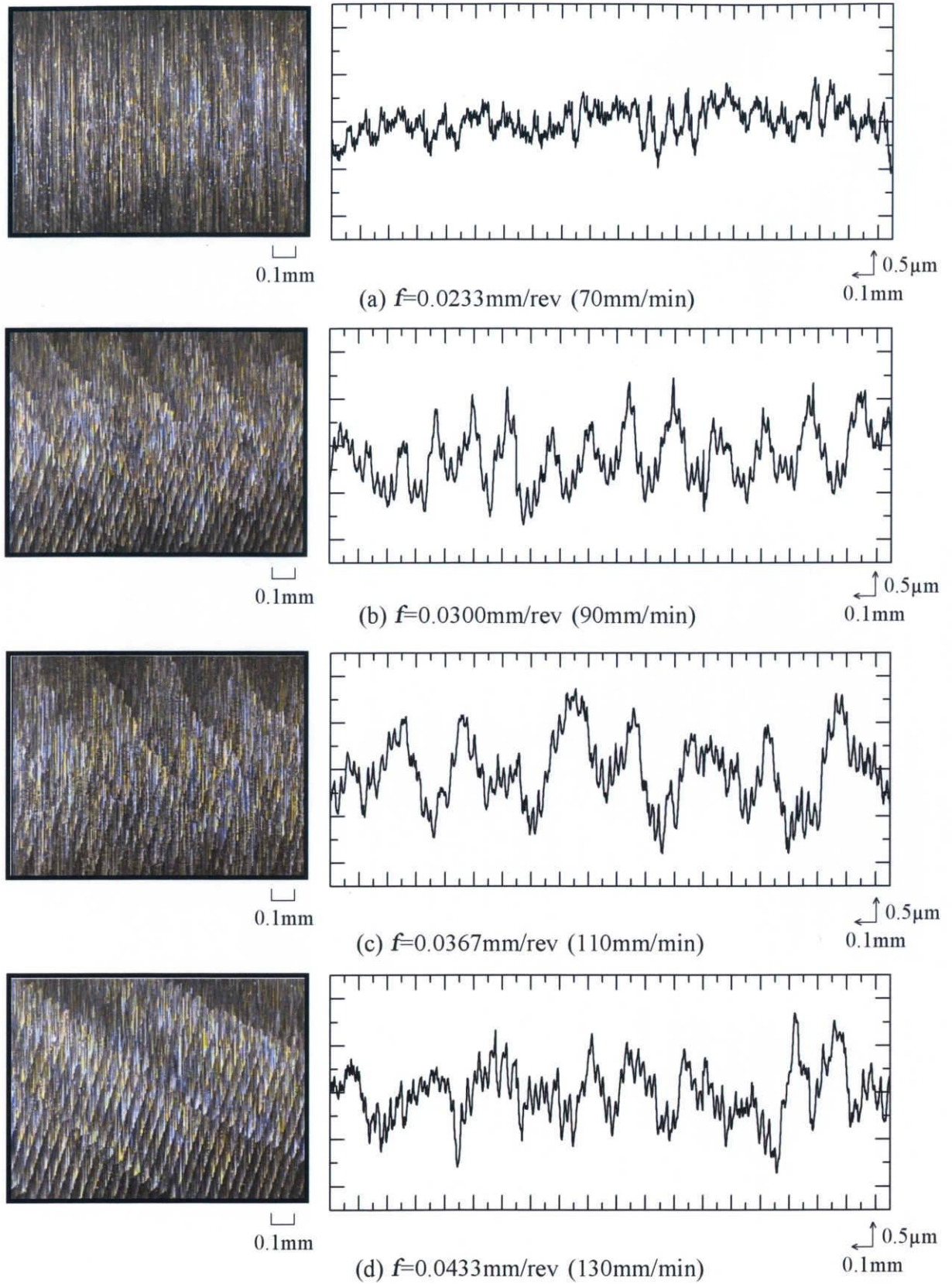


Fig.5.2.6 Surface profiles (Triangle Chip)  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , TNGA220408)



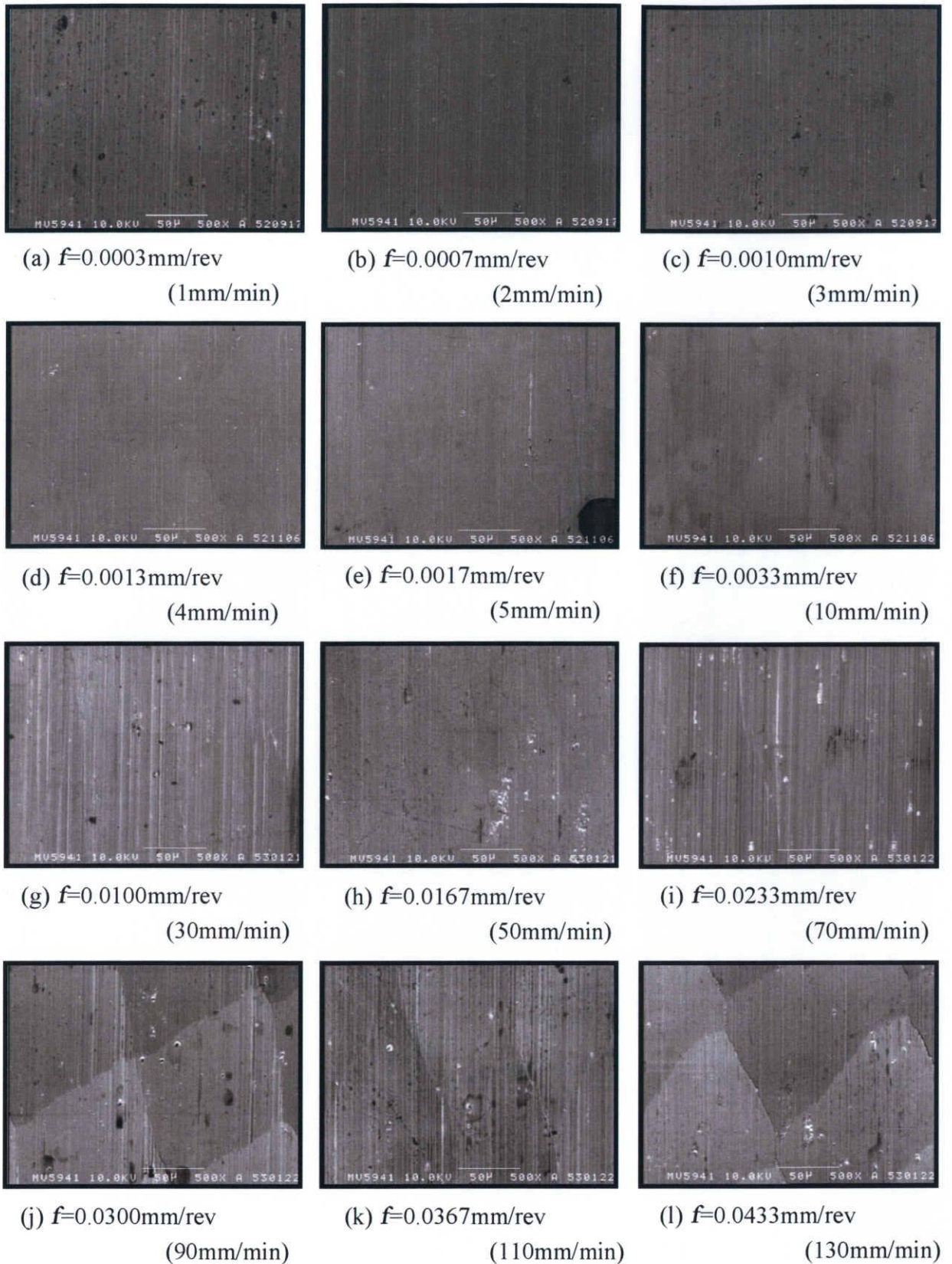


Fig.5.3.1 Photograph of SEM (Triangle Chip)  
(Normal cutting ,  $V=95\text{m/min}$  ,  $d=0.015\text{mm}$  , TNGA160408)



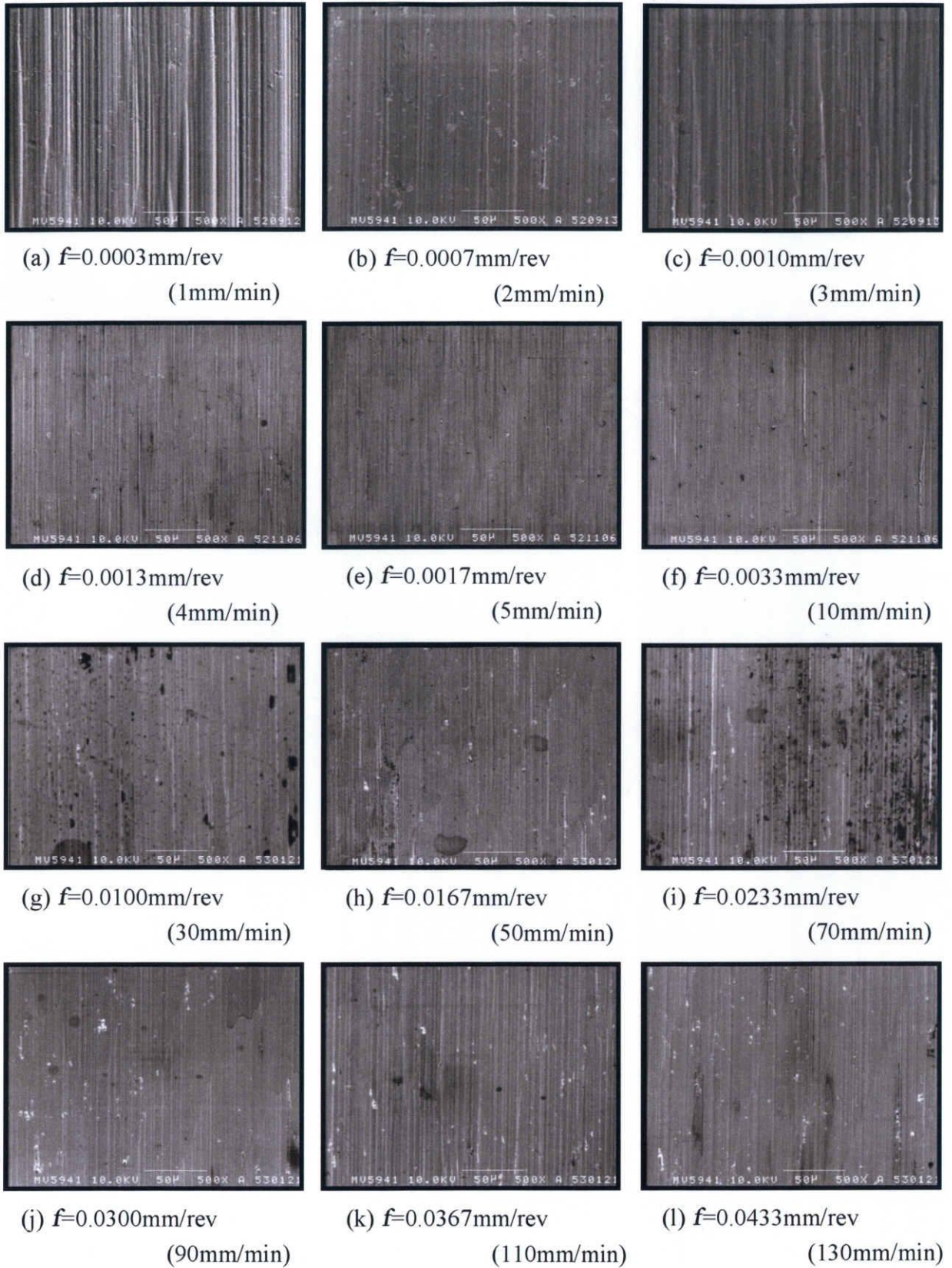


Fig.5.3.2 Photograph of SEM (Triangle Chip)  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , TNGA220408)



### 5.1(b) 円形チップ（ $\phi 10$ ）を用いた切削

表面性状を評価するパラメータである，中心線平均粗さ  $R_a$ ，最大高さ  $R_z$ ，十点平均粗さ  $R_{zjs}$  の測定結果を表 5.2 及び図 5.4 に，光学顕微鏡による被削面の観察及び粗さカーブを図 5.5.1~図 5.5.6 に，走査型電子顕微鏡（SEM）による被削面の観察結果を図 5.6.1~図 5.6.2 に示す．

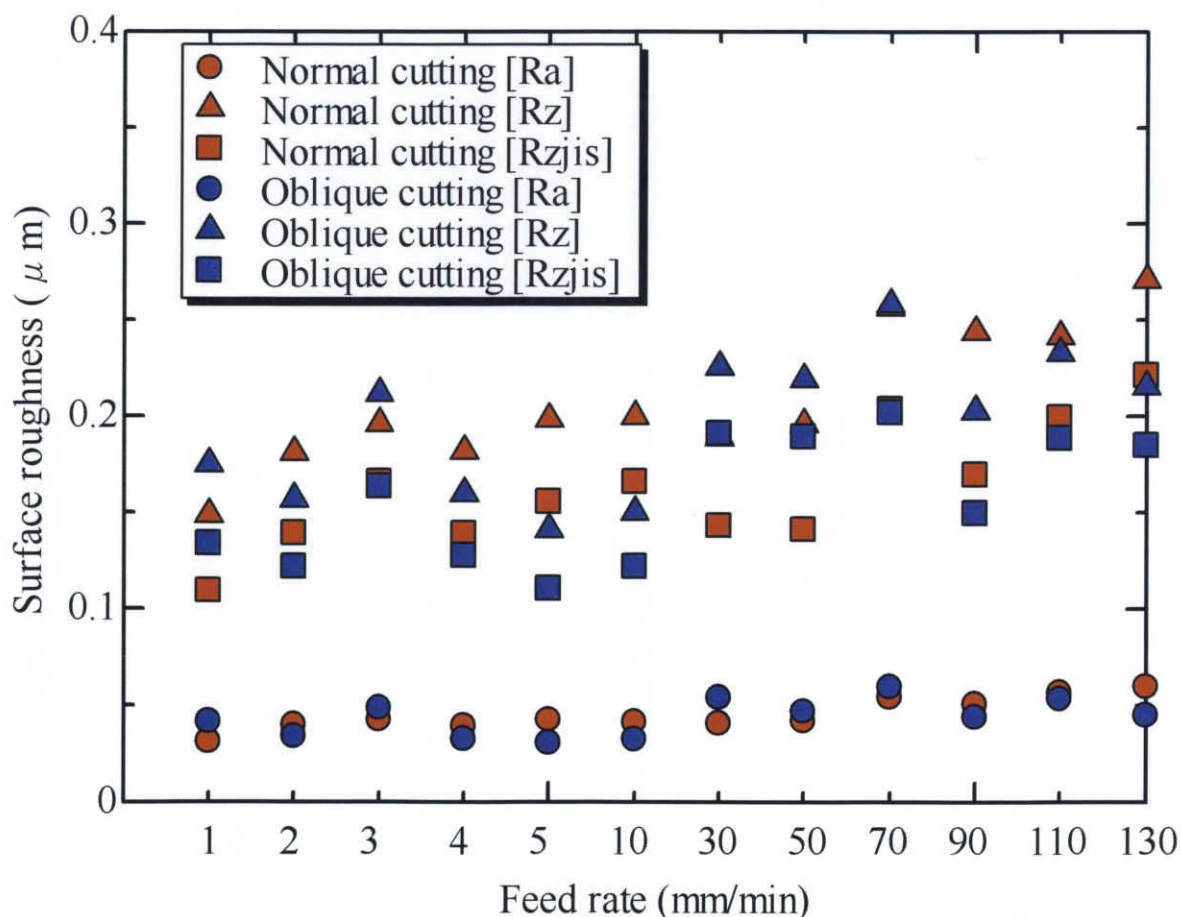
実験結果より，三角形チップを用いた切削よりは穏やかではあるが，通常切削及び傾斜切削の両条件において送り速度が大きくなるにつれ表面性状が悪化していく傾向が見られた．粗さカーブについて考察すると，通常切削では，送り速度  $f=0.0033\text{mm/rev}(10\text{mm/min})$  を超えたあたりからカーブの振幅が大きくなる傾向が見られた．それに対し，傾斜切削では送りが大きくなるにつれ多少振幅は大きくなるが，通常切削時ほど極端に大きな変化は見られない．実験条件における最も大きい送り速度  $f=0.0433\text{mm/rev}(130\text{mm/min})$  においても，粗さカーブの振幅は約  $1\mu\text{m}$  程度である．

また被削面を観察すると，通常切削では三角形チップを用いた切削でも見られた，びり振動によるものと考えられるうろこ状の模様が多く見られた．このうろこ模様は送りが小さい条件でも見られ，送り速度  $f=0.0100\text{mm/rev}(30\text{mm/min})$  を超えた辺りからは SEM 写真でも被削面が荒れている様子がはっきりとわかる．このような痕は傾斜切削では見られなかった．傾斜切削における被削面を観察した際，切削跡は切削方向のものだけで，被削面が荒れた様子は特に見られなかった．



Table 5.2 Surface roughness (Circular chip,  $\phi$  10)

Feed rate $f$ mm/rev (mm/min)		0.0003 (1.0)	0.0007 (2.0)	0.0010 (3.0)	0.0013 (4.0)	0.0017 (5.0)	0.0033 (10.0)
Normal cutting	Ra ( $\mu$ m)	0.0311	0.0398	0.0424	0.0392	0.0424	0.0412
	Rz ( $\mu$ m)	0.1487	0.1812	0.1962	0.1816	0.1984	0.1997
	Rzjis ( $\mu$ m)	0.1091	0.1391	0.1656	0.1385	0.1552	0.1657
Oblique Cutting	Ra ( $\mu$ m)	0.0415	0.0339	0.0484	0.0325	0.0305	0.0323
	Rz ( $\mu$ m)	0.1752	0.1569	0.2118	0.1597	0.1411	0.1500
	Rzjis ( $\mu$ m)	0.1337	0.1215	0.1633	0.1272	0.1102	0.1217
Feed rate $f$ mm/rev (mm/min)		0.0100 (30.0)	0.0167 (50.0)	0.0233 (70.0)	0.0300 (90.0)	0.0367 (110.0)	0.0433 (130.0)
Normal cutting	Ra ( $\mu$ m)	0.0404	0.0417	0.0541	0.0505	0.0565	0.0597
	Rz ( $\mu$ m)	0.1888	0.1958	0.2565	0.2437	0.2415	0.2709
	Rzjis ( $\mu$ m)	0.1428	0.1408	0.2035	0.1692	0.1991	0.2210
Oblique Cutting	Ra ( $\mu$ m)	0.0538	0.0467	0.0594	0.0438	0.0533	0.0448
	Rz ( $\mu$ m)	0.2254	0.2192	0.2580	0.2026	0.2327	0.2155
	Rzjis ( $\mu$ m)	0.1905	0.1891	0.2018	0.1494	0.1883	0.1847

Fig.5.4 Effect of feed rate on surface roughness (Circular chip,  $\phi$  10)



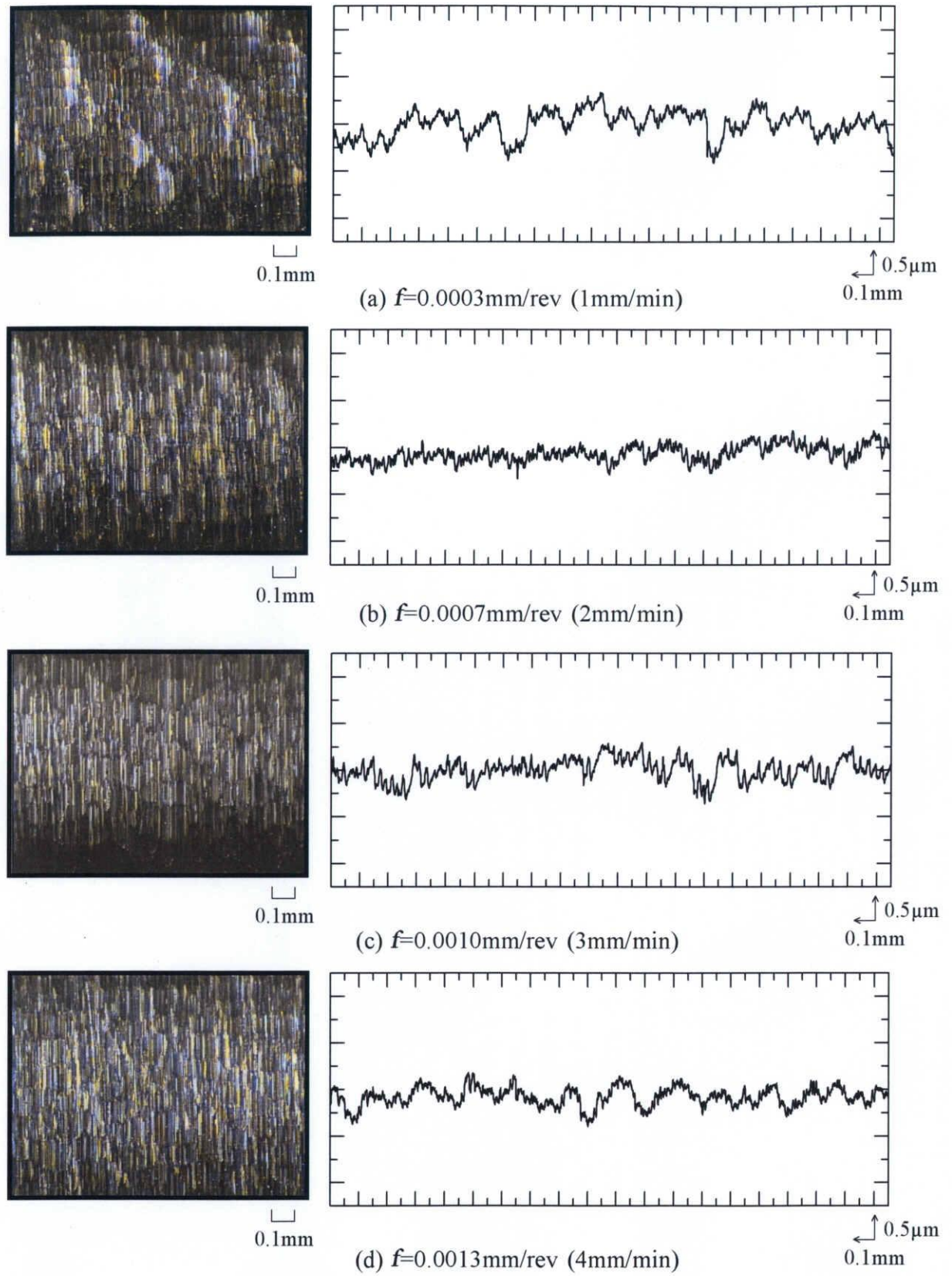


Fig.5.5.1 Surface profiles (Circular Chip,  $\phi 10$ )  
(Normal cutting,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT1003MO-AL)



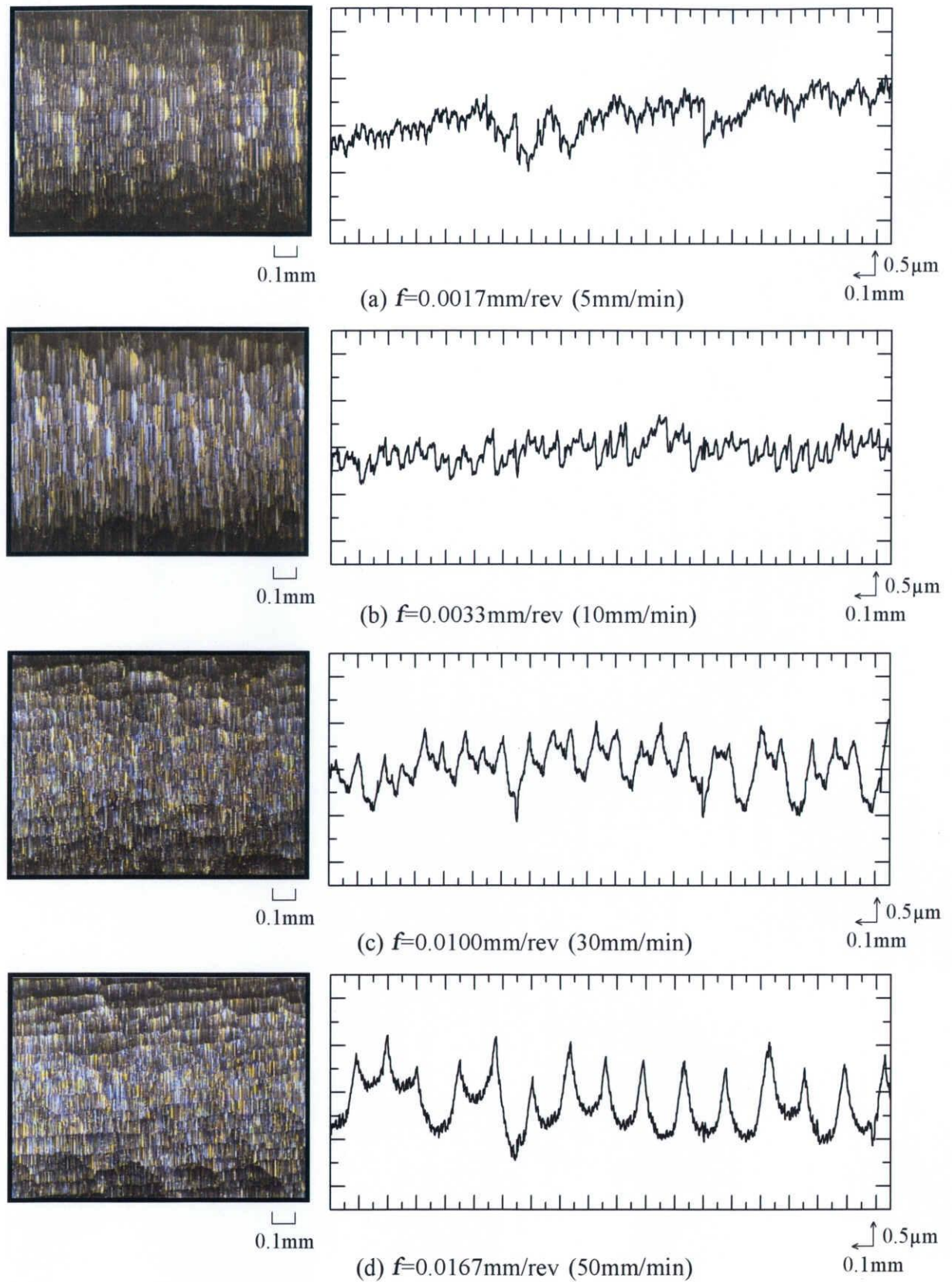


Fig.5.5.2 Surface profiles (Circular Chip,  $\phi$  10)  
(Normal cutting,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT1003MO-AL)



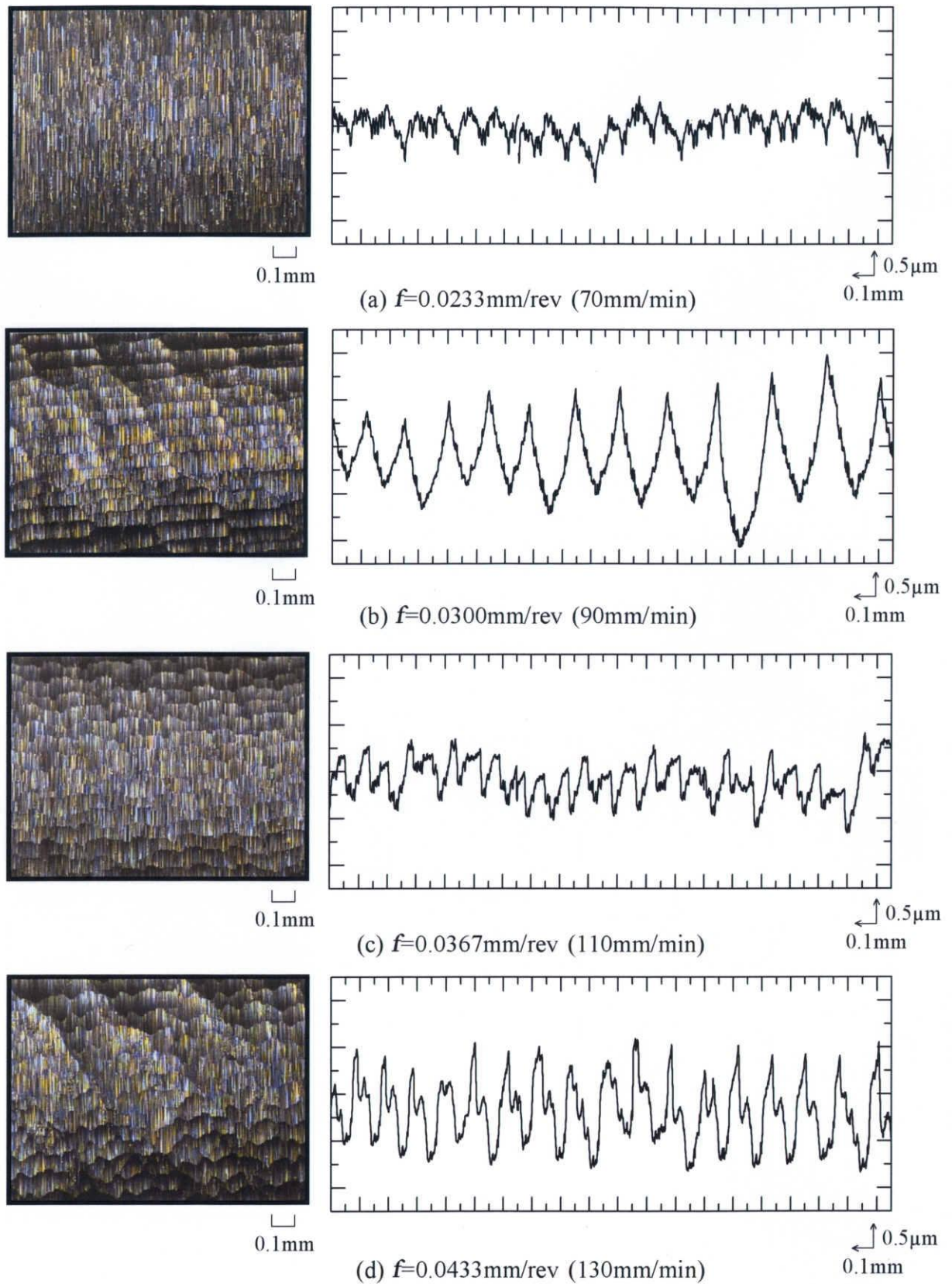


Fig.5.5.3 Surface profiles (Circular Chip,  $\phi 10$ )  
(Normal cutting,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT1003MO-AL)



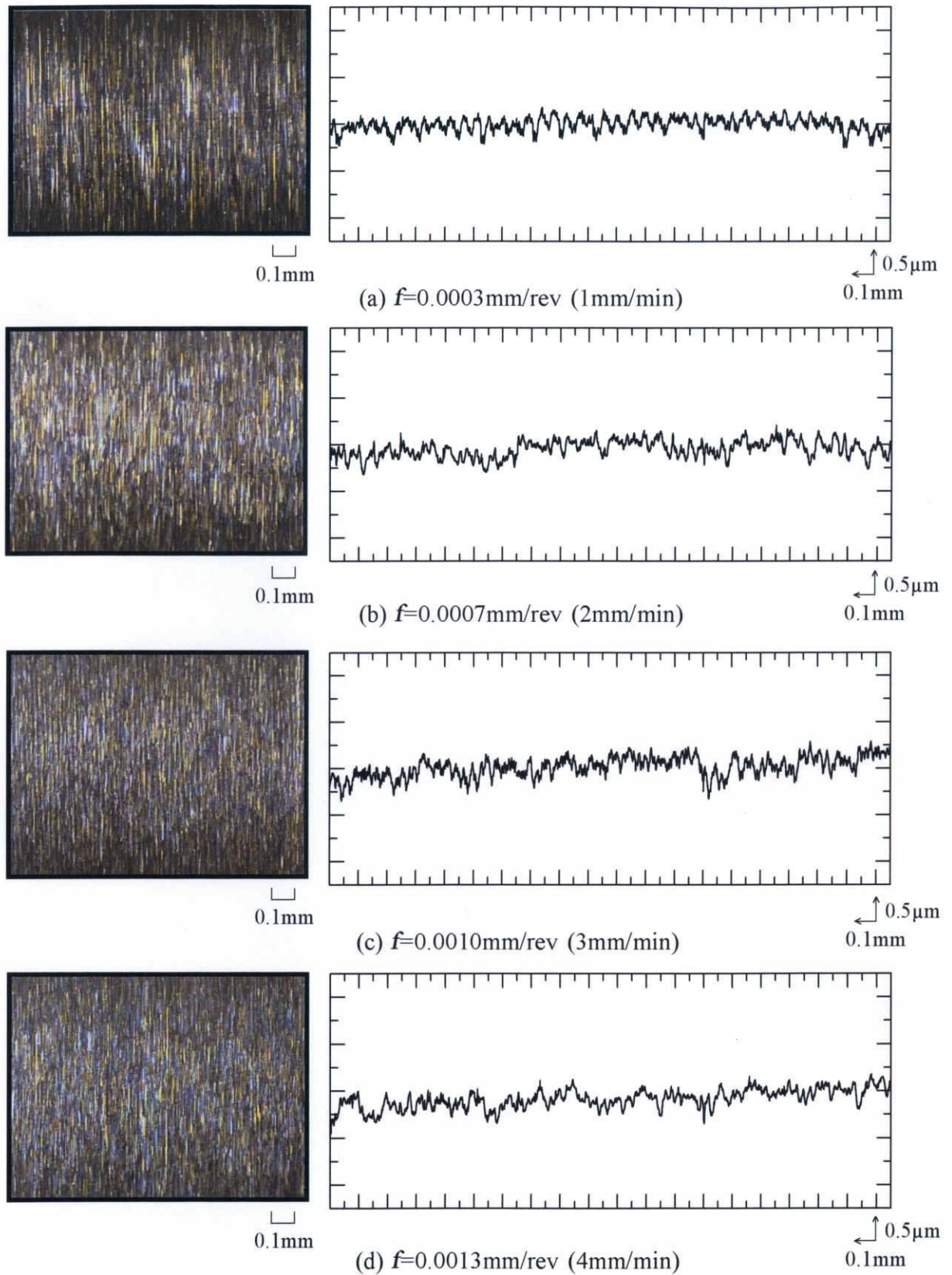


Fig.5.5.4 Surface profiles (Circular Chip,  $\phi 10$ )  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT1003MO-AL)



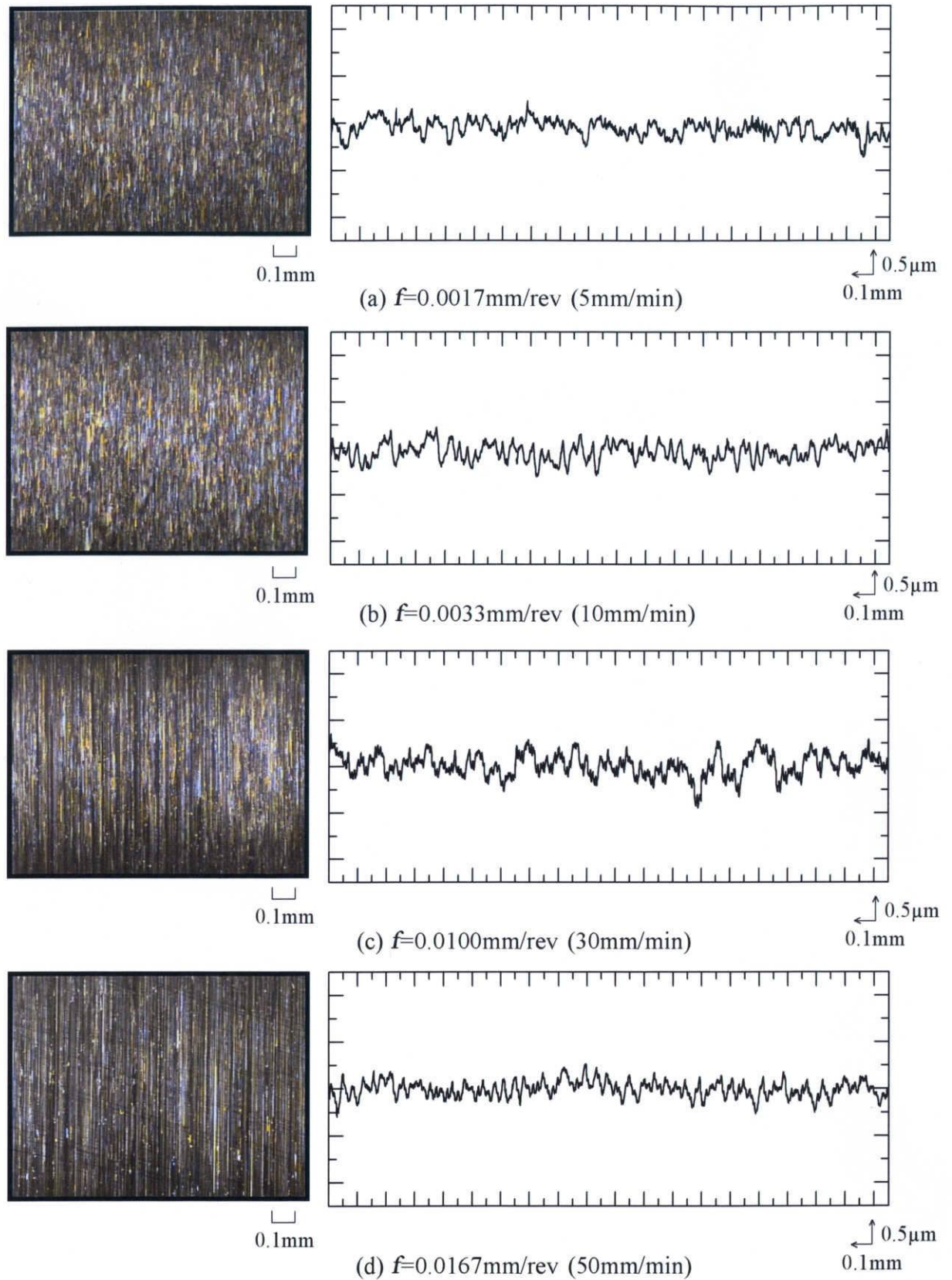


Fig.5.5.5 Surface profiles (Circular Chip,  $\phi 10$ )  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT1003MO-AL)



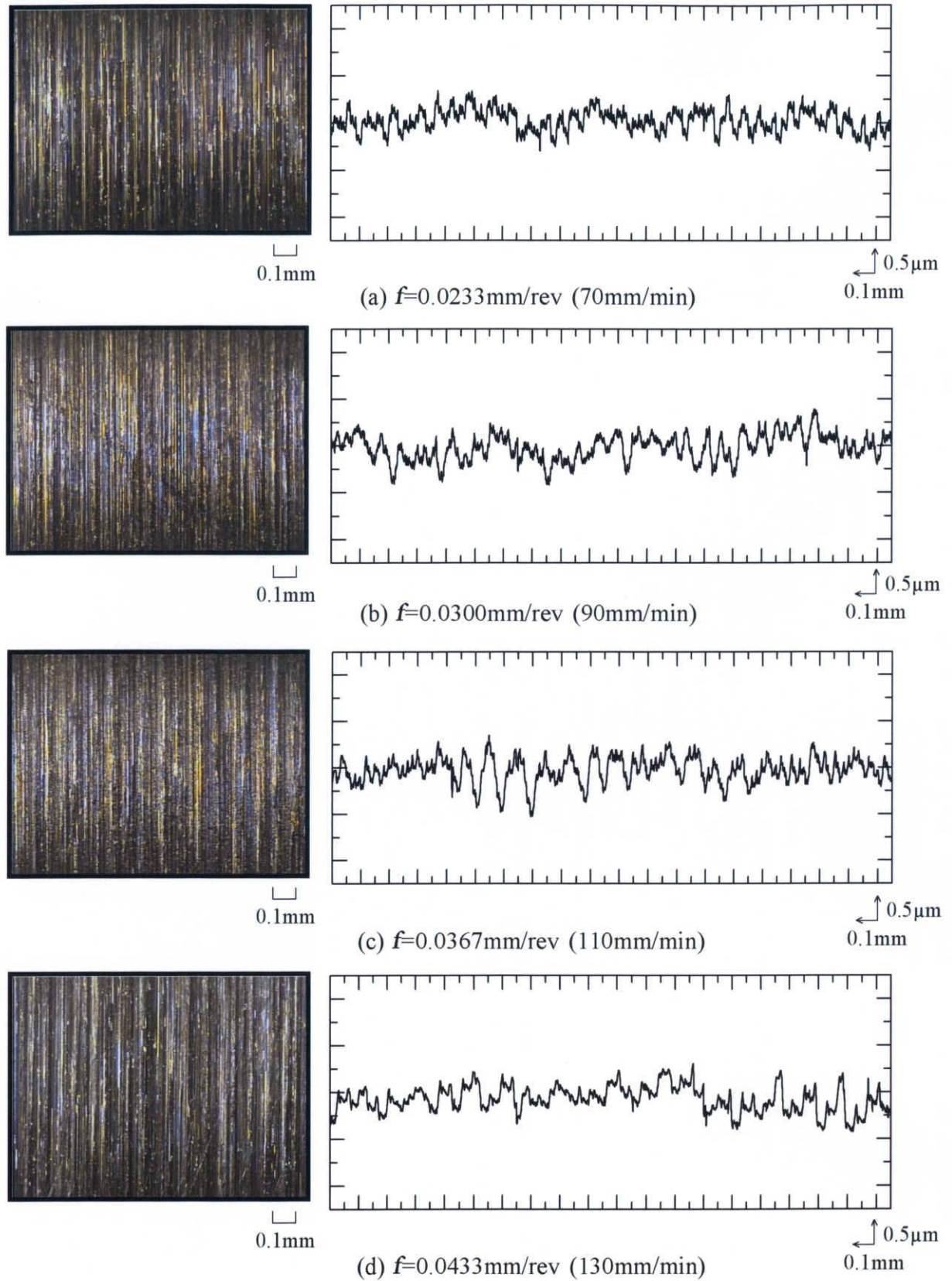


Fig.5.5.6 Surface profiles (Circular Chip,  $\phi 10$ )  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT1003MO-AL)



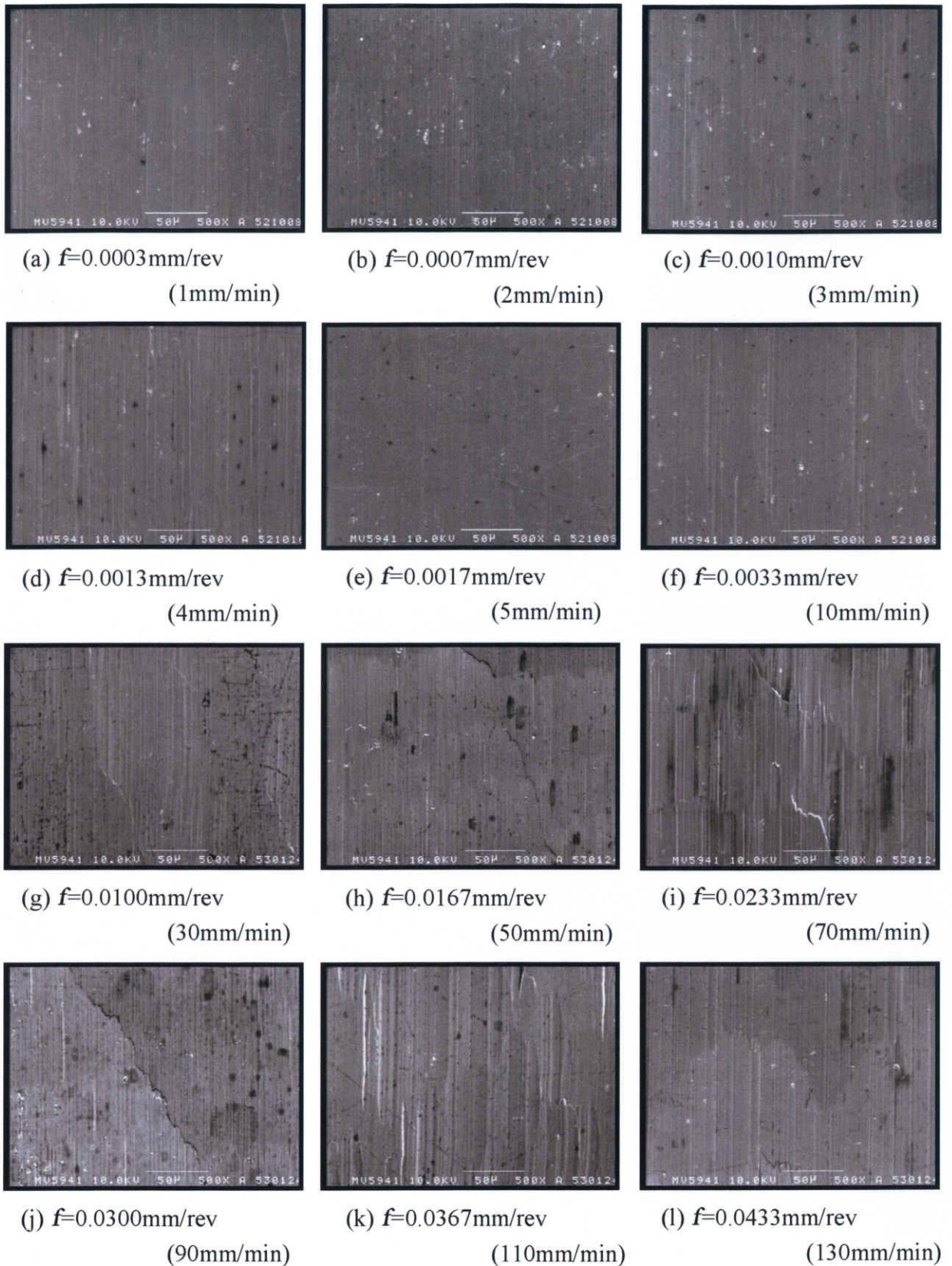


Fig.5.6.1 Photograph of SEM (Circular Chip,  $\phi 10$ )  
(Normal cutting,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT1003MO-AL)



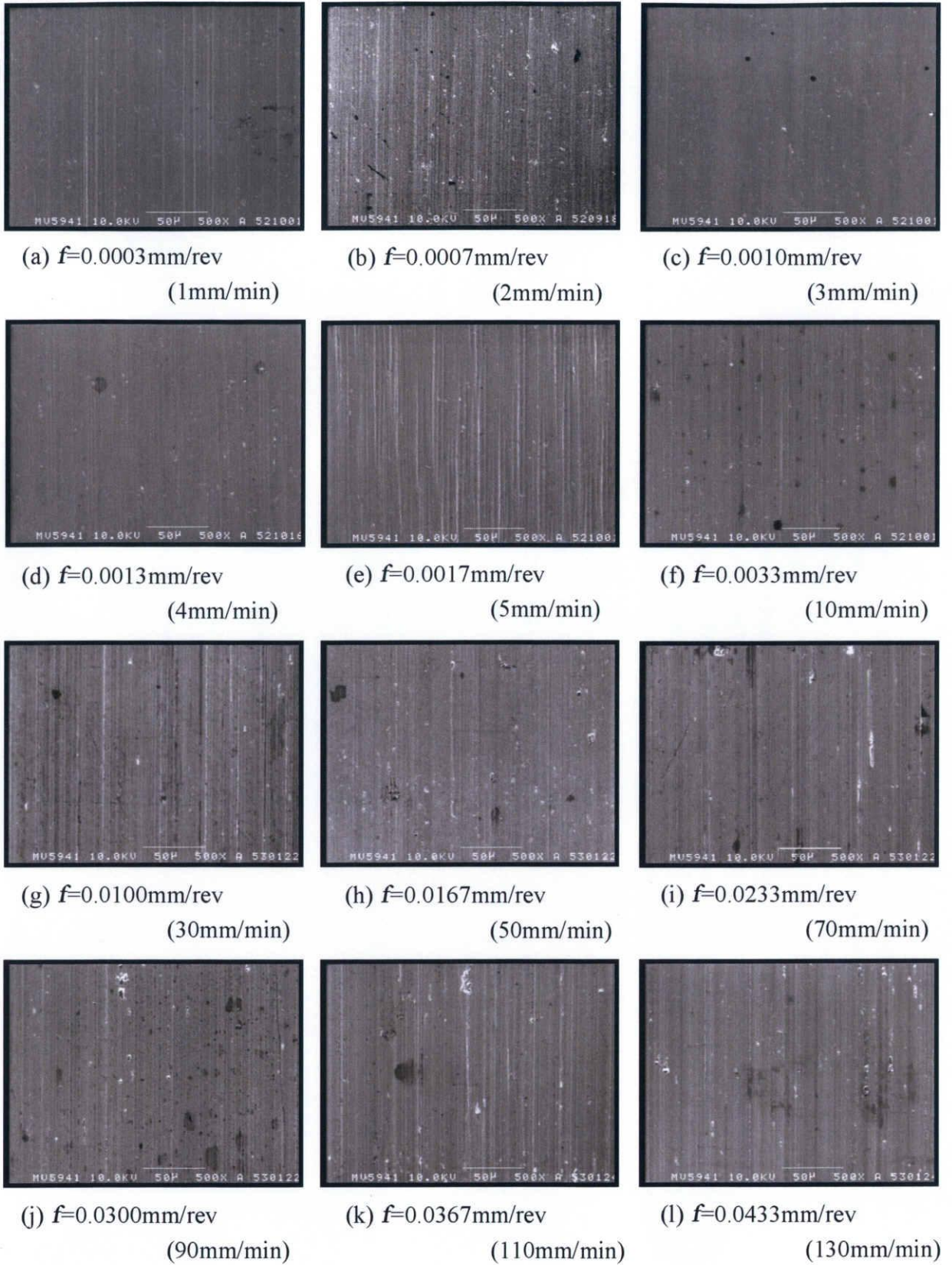


Fig.5.6.2 Photograph of SEM (Circular Chip,  $\phi 10$ )  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT1003MO-AL)



### 5.1(c) 円形チップ（φ6）を用いた切削

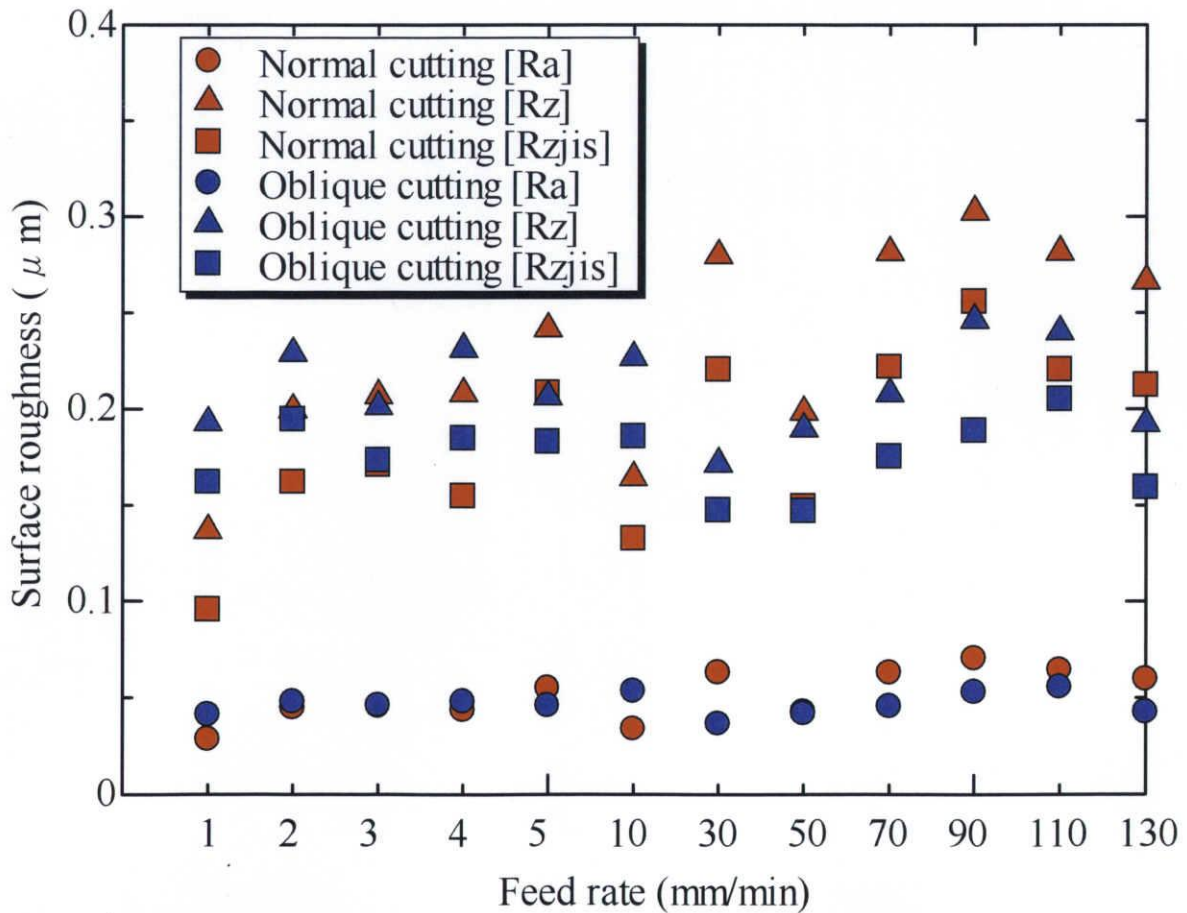
表面性状を評価するパラメータである，中心線平均粗さ  $R_a$ ，最大高さ  $R_z$ ，十点平均粗さ  $R_{zjs}$  の測定結果を表 5.3 及び図 5.7 に，光学顕微鏡による被削面の観察及び粗さカーブを図 5.8.1~図 5.8.6 に，走査型電子顕微鏡（SEM）による被削面の観察結果を図 5.9.1~図 5.9.2 に示す．

通常切削と傾斜切削における表面性状値を比較した場合， $f=0.0100\text{mm/rev}(30\text{mm/min})$ 以上の送りが大きい範囲において，傾斜切削の方が全体的に表面性状値が小さくなる傾向が見られた．しかし，送り速度  $f=0.0167\text{mm/rev}(50\text{mm/min})$ における通常切削の表面性状値は傾斜切削時と同様な小さな値となっているが，粗さカーブを観察すると周期的なカーブではなく，また被削面にも荒れた様子が観察された．粗さカーブについて考察すると，通常切削時には送り速度が大きくなるにつれカーブの振幅は大きくなり，周期的でなくなる様子が見られた．図 5.9.1 における SEM 観察でも被削面が荒れた様子をはっきりと観察することができる．傾斜切削における粗さカーブについて考察すると，通常切削と同様，送り速度と共にカーブの振幅が大きくなっていく．しかし，通常切削時ほどカーブが悪化する様子は見られず，最も大きい  $f=0.0433\text{mm/rev}(130\text{mm/min})$ の条件下においても振幅は約  $1.5\mu\text{m}$  となっている．図 5.9.2 における傾斜切削時の SEM 写真を観察すると，送り速度が大きくなるにつれて切削方向の切削痕が大きくなっている様子がわかる．しかしながら図 5.9.1 の通常切削時に見られたうろこ模様や荒れた痕などは特に見られない．よって傾斜切削は送り速度を大きくしても被削面が極端に悪化することではなく，また悪化の割合は通常切削に比べるととても小さいことがわかった．



Table 5.3 Surface roughness (Circular chip,  $\phi 6$ )

Feed rate $f$ mm/rev (mm/min)		0.0003 (1.0)	0.0007 (2.0)	0.0010 (3.0)	0.0013 (4.0)	0.0017 (5.0)	0.0033 (10.0)
Normal cutting	Ra ( $\mu\text{m}$ )	0.0286	0.0450	0.0458	0.0436	0.0550	0.0338
	Rz ( $\mu\text{m}$ )	0.1369	0.1996	0.2071	0.2081	0.2418	0.1642
	Rzjis ( $\mu\text{m}$ )	0.0957	0.1620	0.1708	0.1545	0.2082	0.1325
Oblique Cutting	Ra ( $\mu\text{m}$ )	0.0414	0.0479	0.0462	0.0479	0.0460	0.0534
	Rz ( $\mu\text{m}$ )	0.1929	0.2291	0.2013	0.2312	0.2064	0.2267
	Rzjis ( $\mu\text{m}$ )	0.1620	0.1944	0.1732	0.1846	0.1830	0.1856
Feed rate $f$ mm/rev (mm/min)		0.0100 (30.0)	0.0167 (50.0)	0.0233 (70.0)	0.0300 (90.0)	0.0367 (110.0)	0.0433 (130.0)
Normal cutting	Ra ( $\mu\text{m}$ )	0.0630	0.0427	0.0631	0.0705	0.0646	0.0598
	Rz ( $\mu\text{m}$ )	0.2797	0.1984	0.2813	0.3026	0.2816	0.2666
	Rzjis ( $\mu\text{m}$ )	0.2201	0.1490	0.2217	0.2555	0.2203	0.2122
Oblique Cutting	Ra ( $\mu\text{m}$ )	0.0365	0.0418	0.0457	0.0530	0.0556	0.0427
	Rz ( $\mu\text{m}$ )	0.1715	0.1896	0.2080	0.2462	0.2401	0.1924
	Rzjis ( $\mu\text{m}$ )	0.1471	0.1468	0.1751	0.1884	0.2050	0.1590

Fig.5.7 Effect of feed rate on surface roughness (Circular chip,  $\phi 6$ )



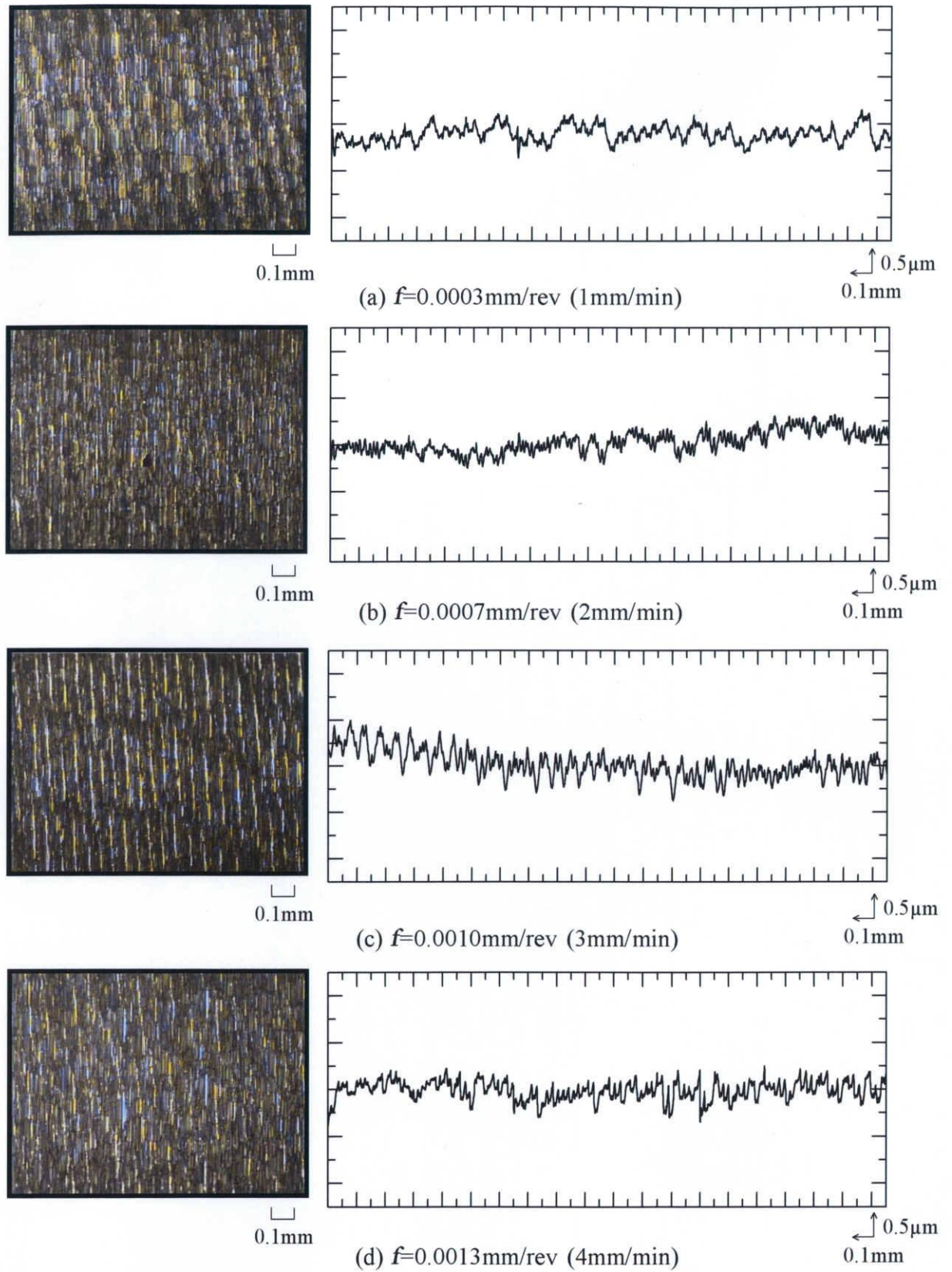


Fig.5.8.1 Surface profiles (Circular Chip,  $\phi 6$ )  
(Normal cutting,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT0602MO-AL)



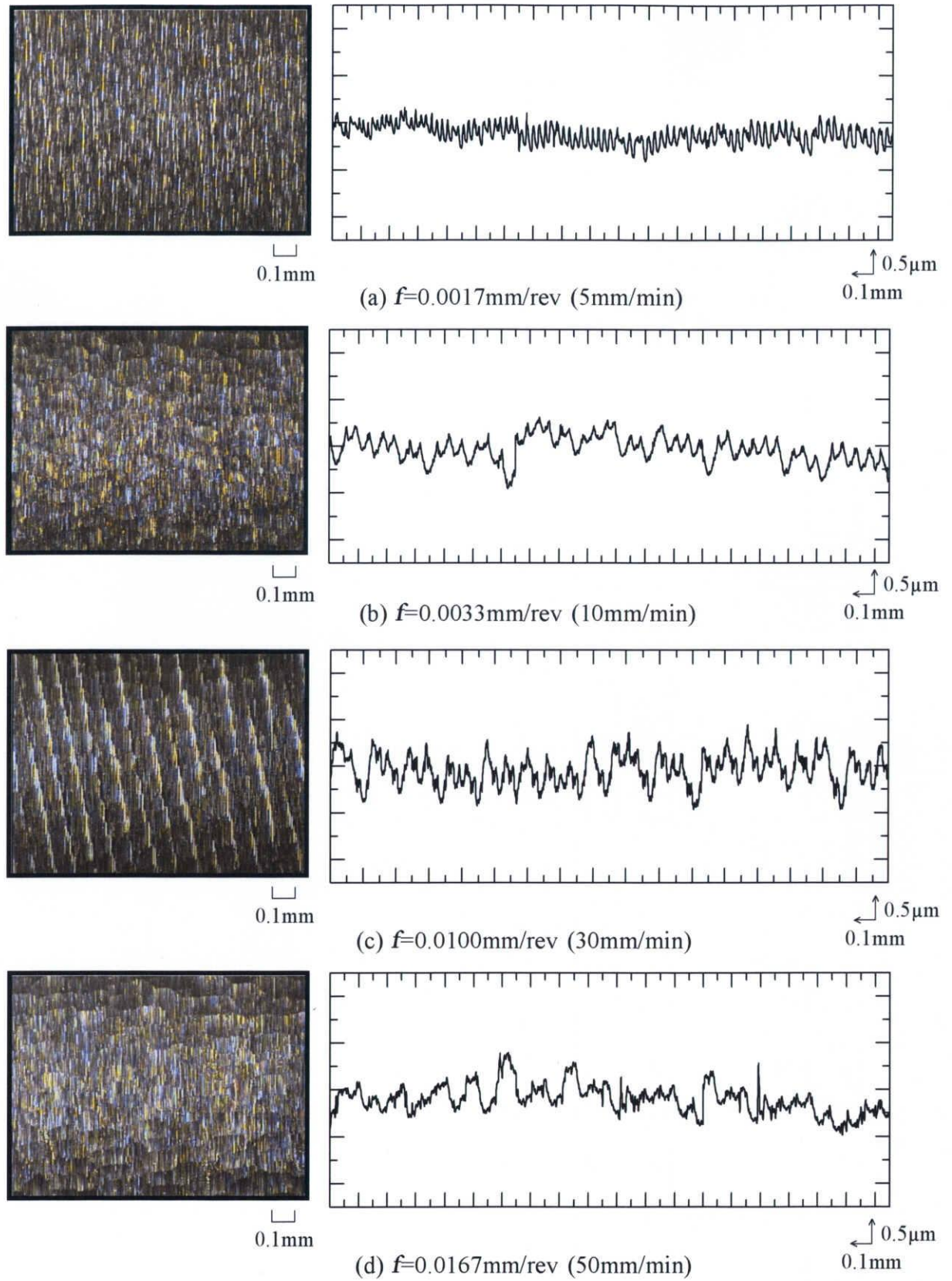


Fig.5.8.2 Surface profiles (Circular Chip,  $\phi 6$ )  
(Normal cutting,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT0602MO-AL)



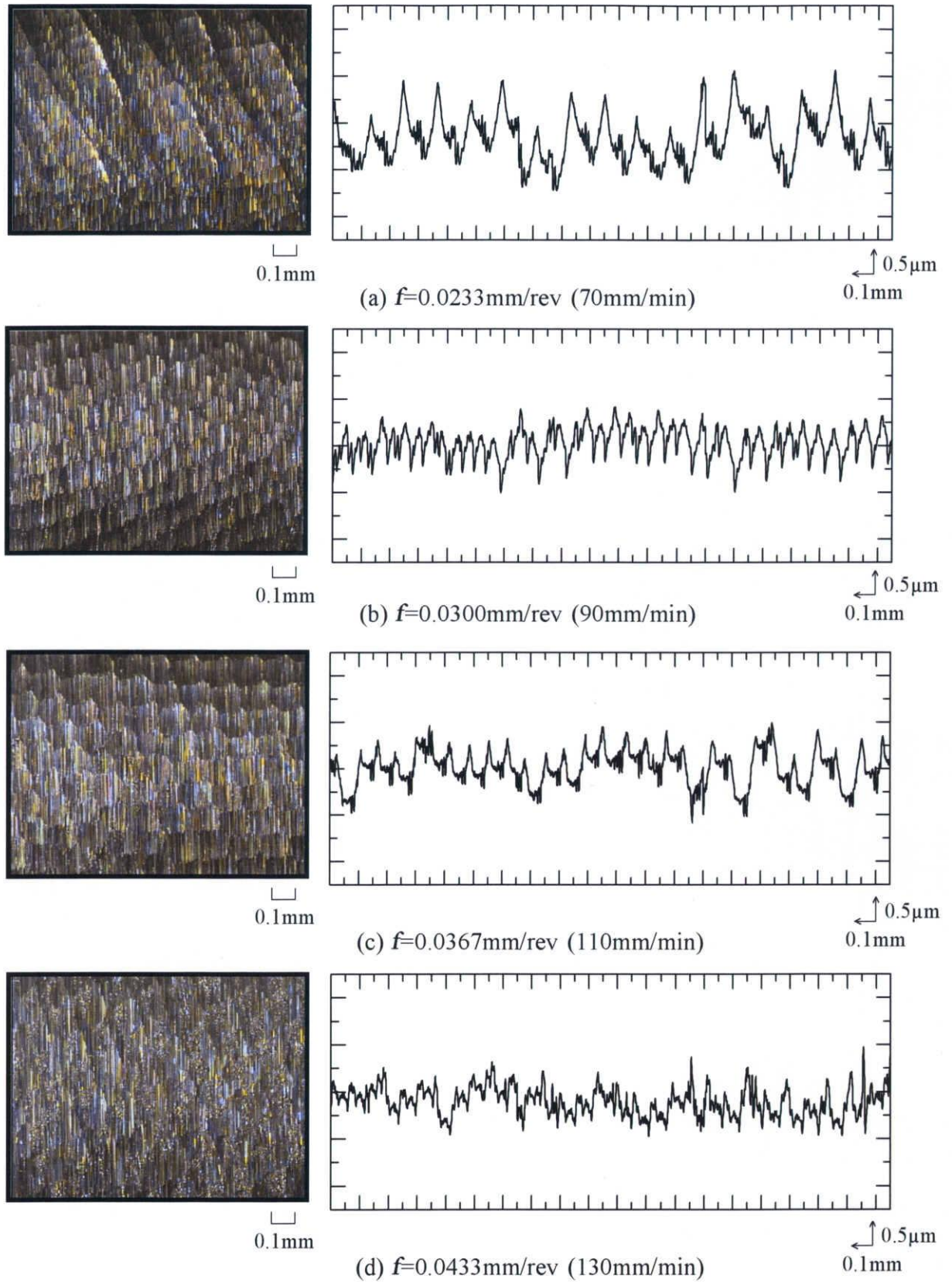


Fig.5.8.3 Surface profiles (Circular Chip,  $\phi 6$ )  
(Normal cutting,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT0602MO-AL)



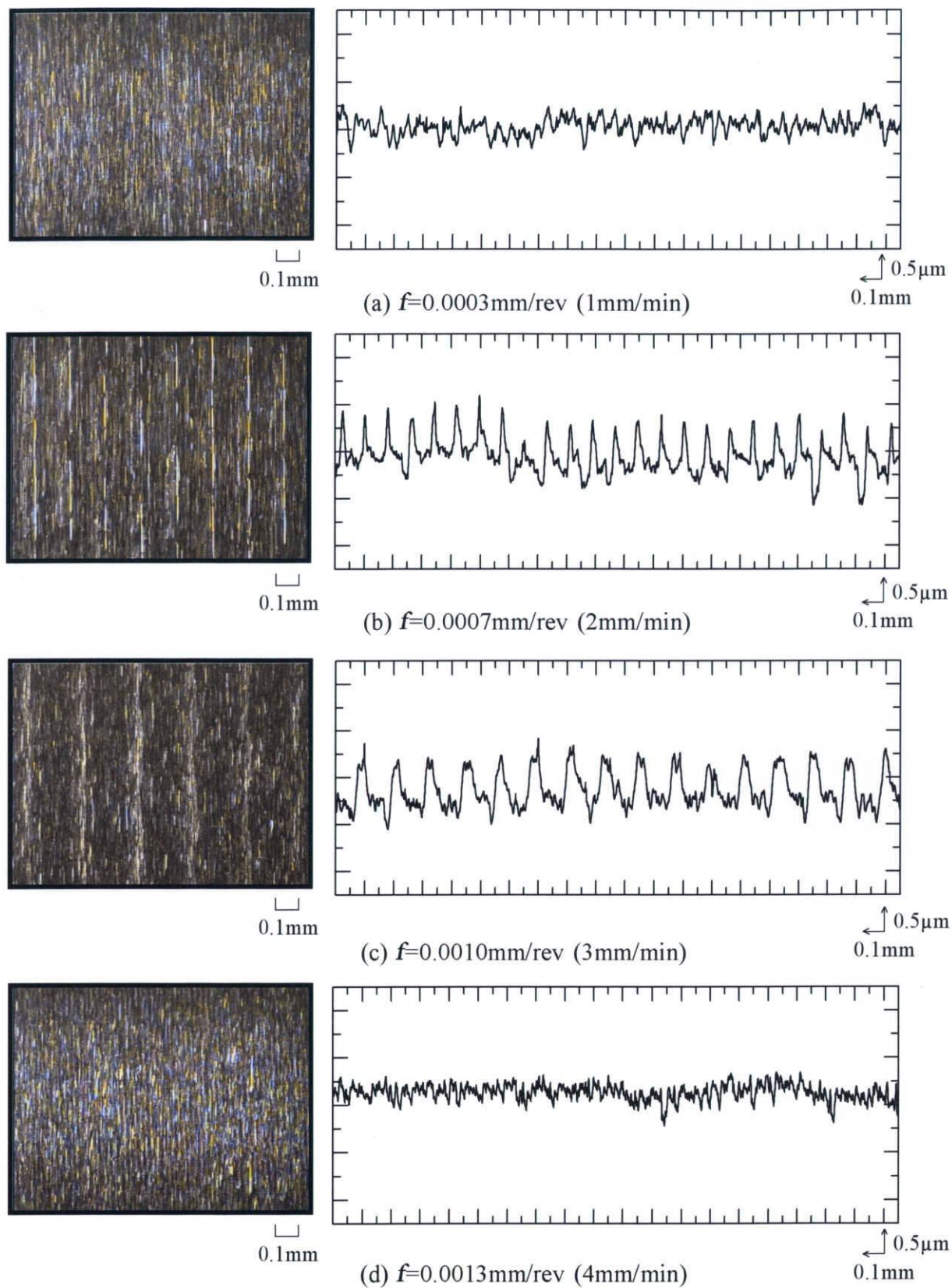


Fig.5.8.4 Surface profiles (Circular Chip,  $\phi 6$ )  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT0602MO-AL)



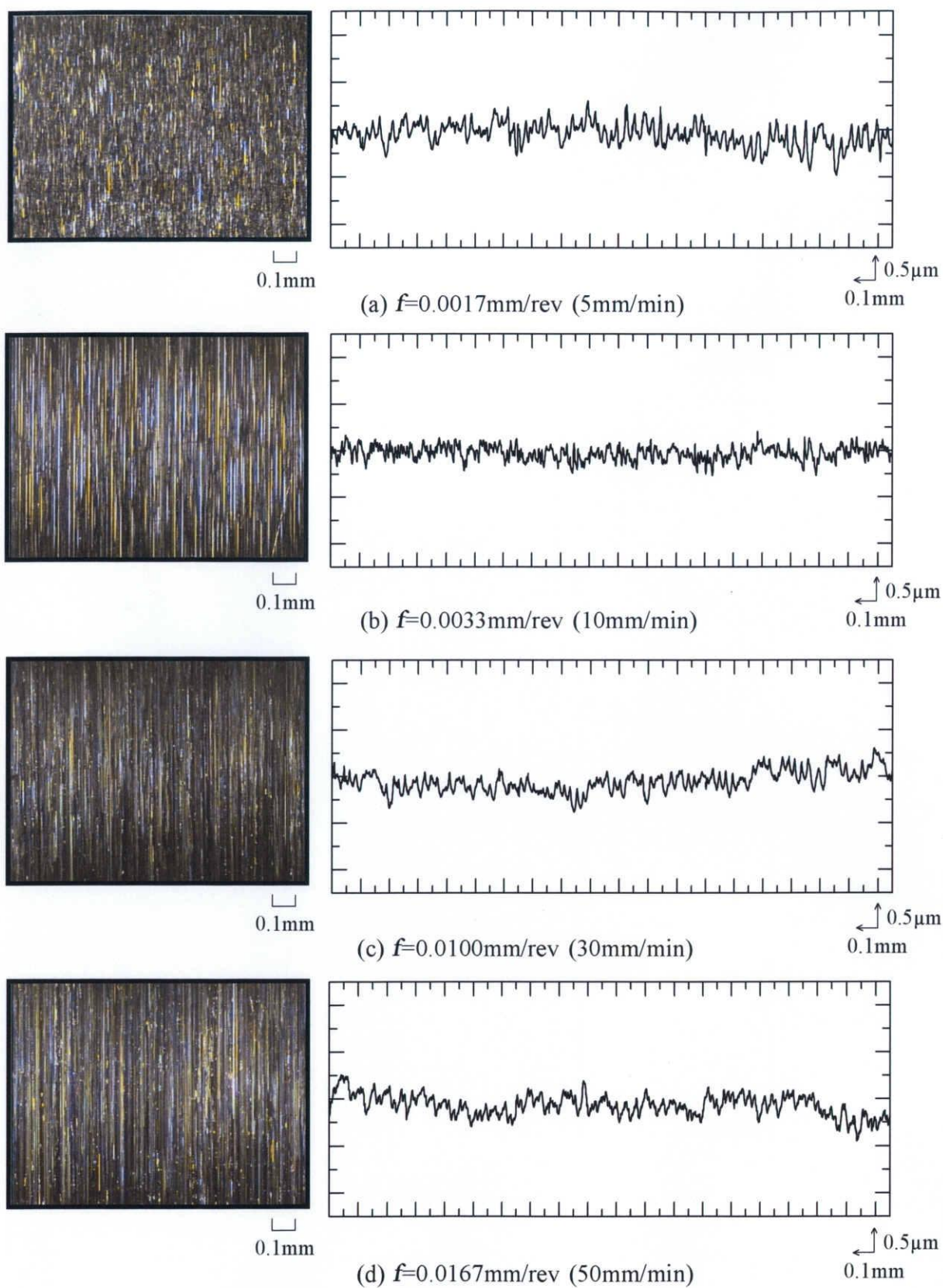


Fig.5.8.5 Surface profiles (Circular Chip,  $\phi 6$ )  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT0602MO-AL)



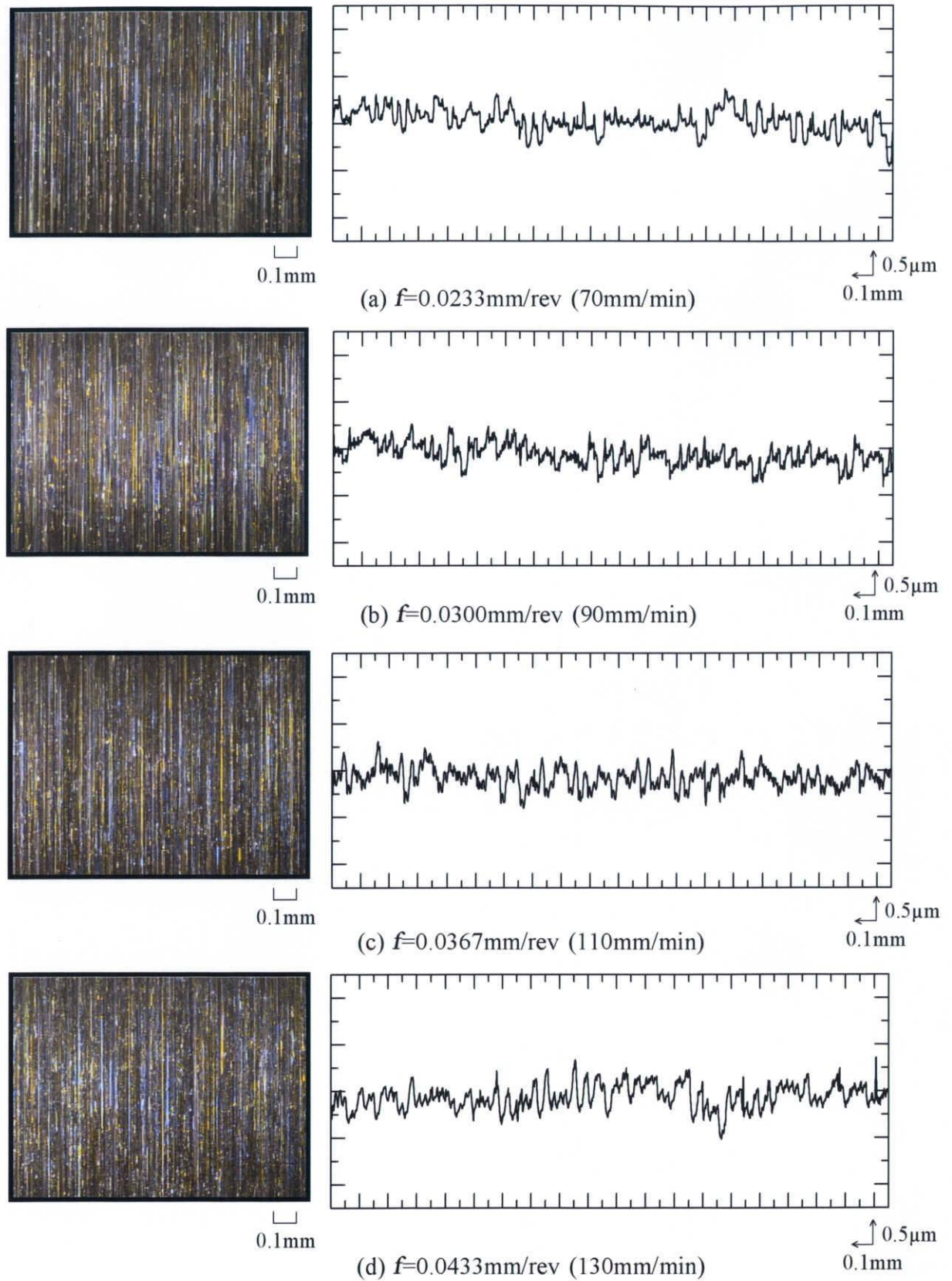


Fig.5.8.6 Surface profiles (Circular Chip,  $\phi 6$ )  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT0602MO-AL)



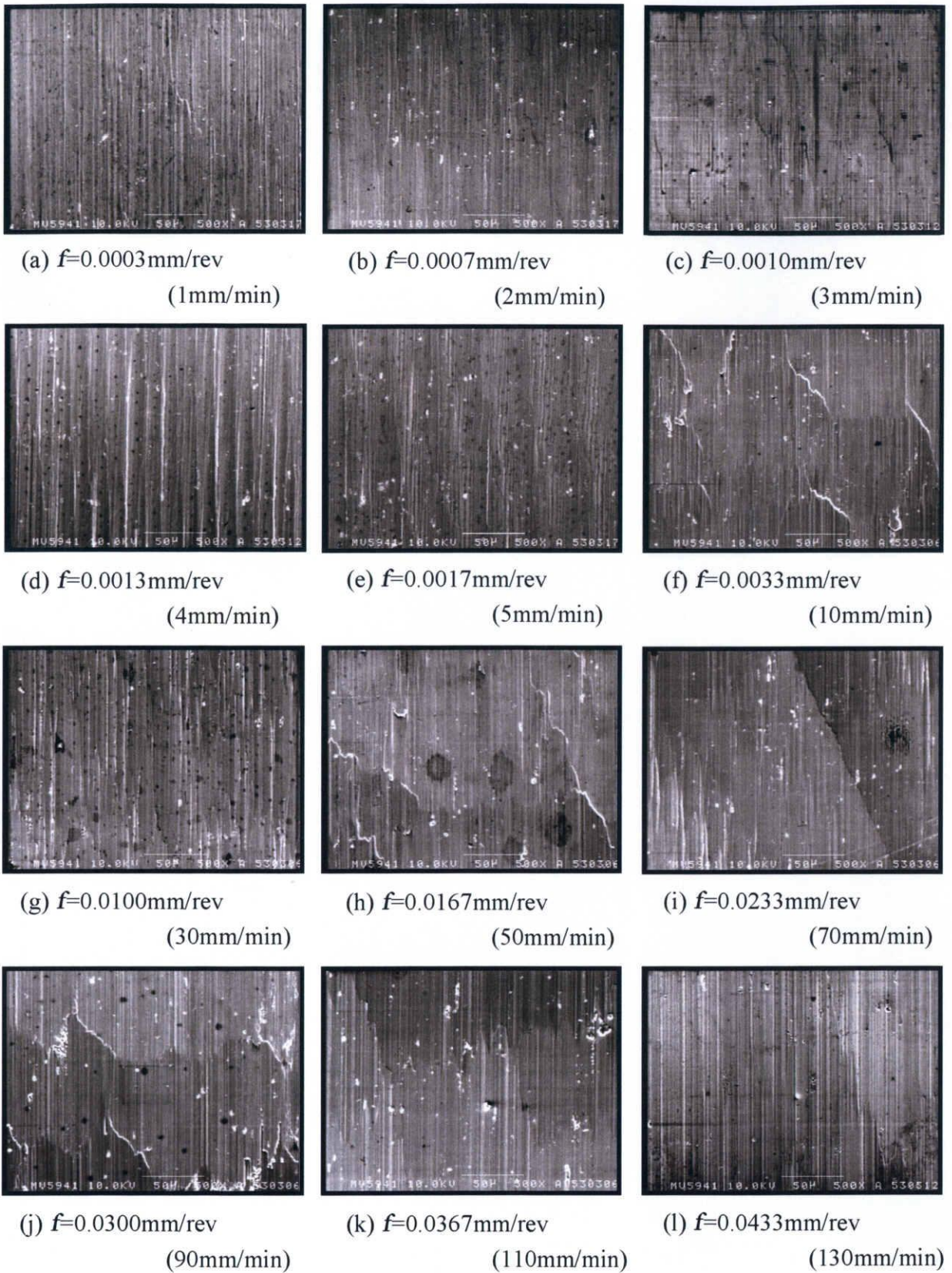


Fig.5.9.1 Photograph of SEM (Circular Chip,  $\phi 6$ )  
(Normal cutting,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT0602MO-Al)



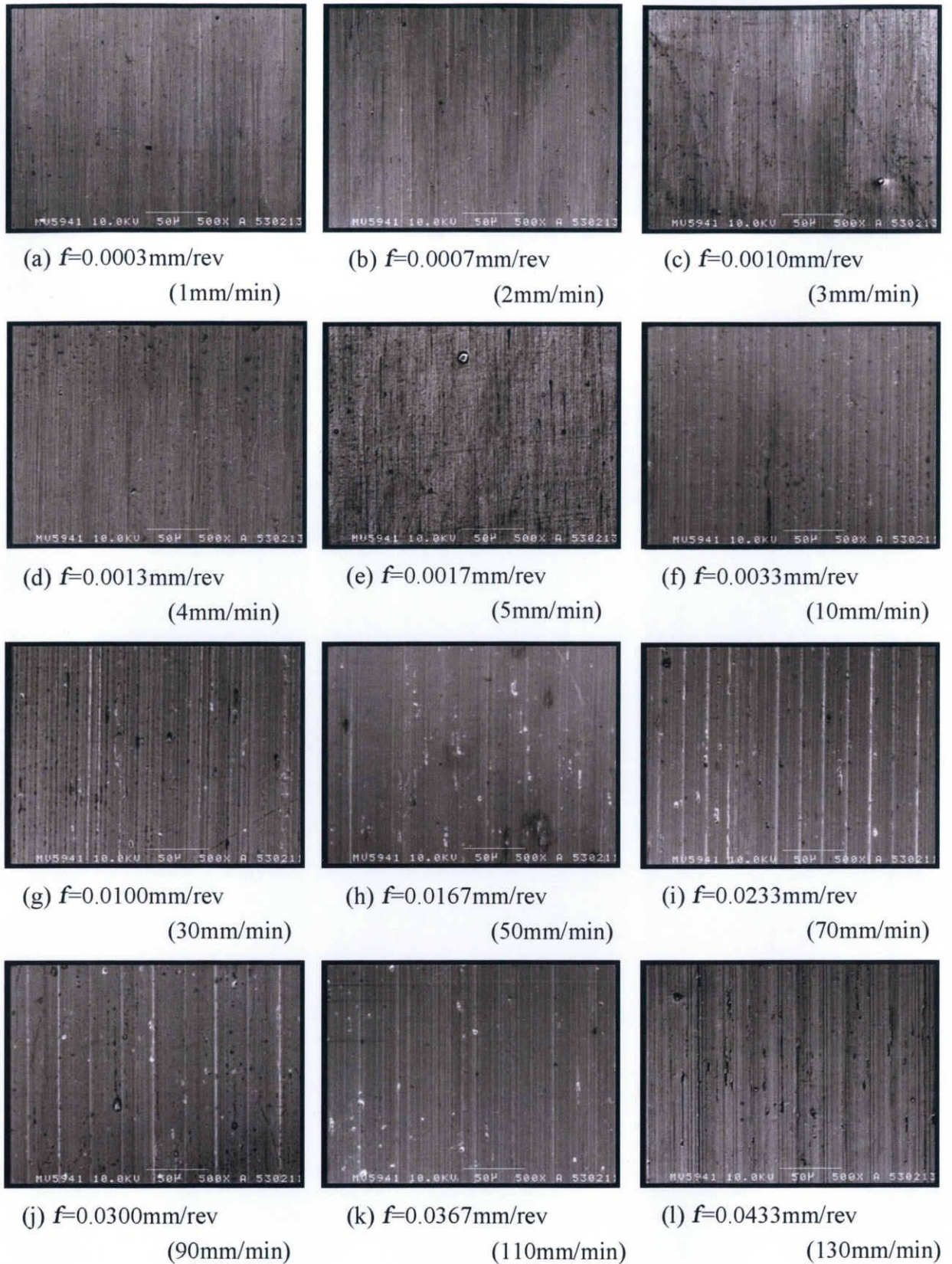


Fig.5.9.2 Photograph of SEM (Circular Chip,  $\phi 6$ )  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT0602MO-AL)



## 5.2 工具逃げ面の観察

図 5.10.1～5.10.2 に三角形チップ，図 5.11.1～5.11.2 に円形チップ（ $\phi 10$ ），図 5.12.1～5.12.2 に円形チップ（ $\phi 6$ ）の逃げ面摩耗の様子を示す．実験条件により使用チップは異なるが，本研究での使用チップは全て超硬合金工具であり，また切込み量は全て  $d=0.015\text{mm}$  と設定している．

本研究における全ての切削条件で，工具逃げ面に被削材のアルミが溶着した様子は多少見られたが，特に特徴的な摩耗痕は見られなかった．これは被削材が軟らかい非鉄金属であり延性を持つので切削が容易であること，また仕上げ切削を目的としたため切込み量が非常に小さかったことが要因であると考えられる．さらに，通常切削と傾斜切削で摩耗痕が大きく異なる様子も観察されなかった．



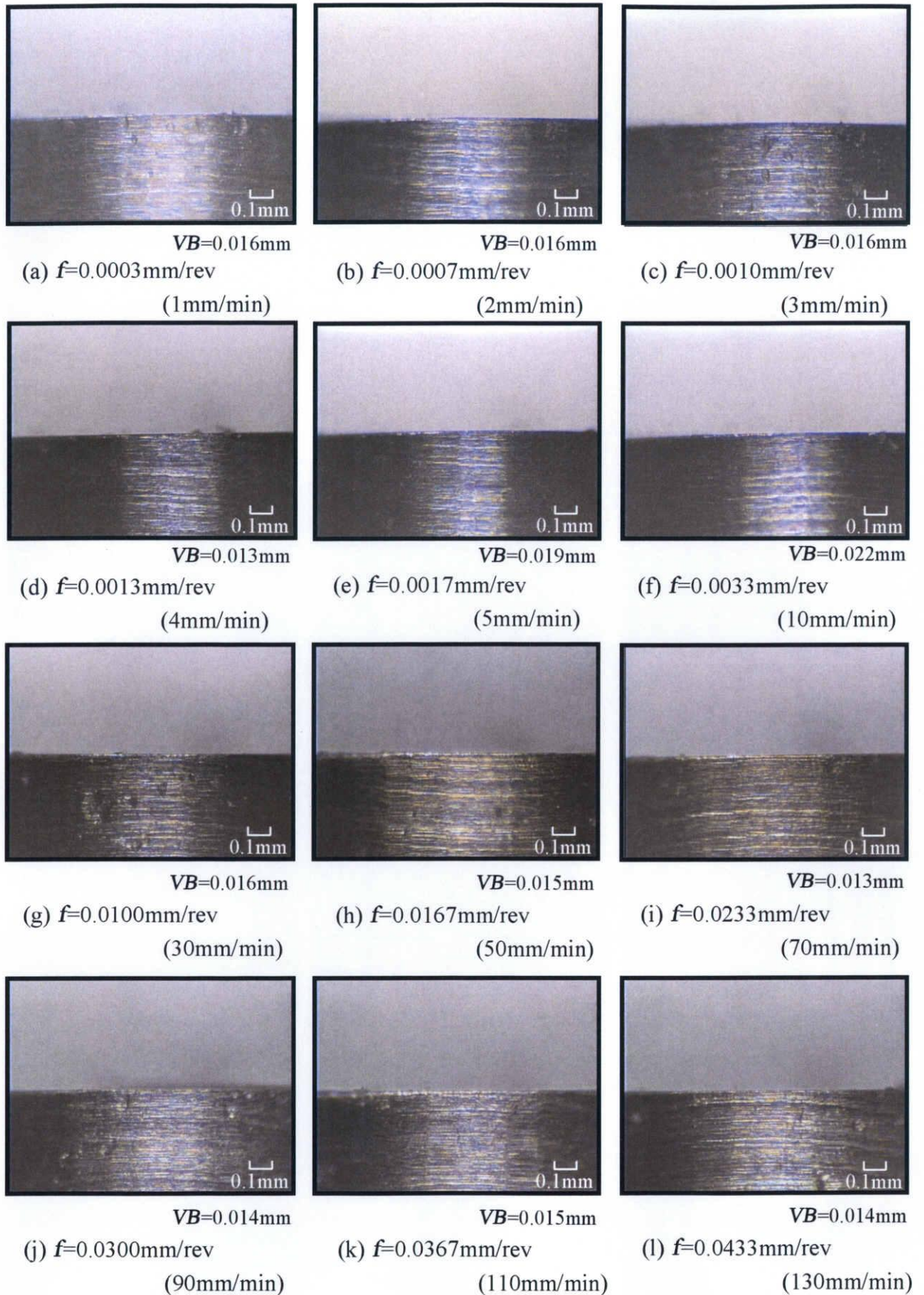


Fig.5.10.1 Photograph of flank wear (Triangle Chip)  
(Normal cutting ,  $V=95\text{m/min}$  ,  $d=0.015\text{mm}$  , TNGA160408)



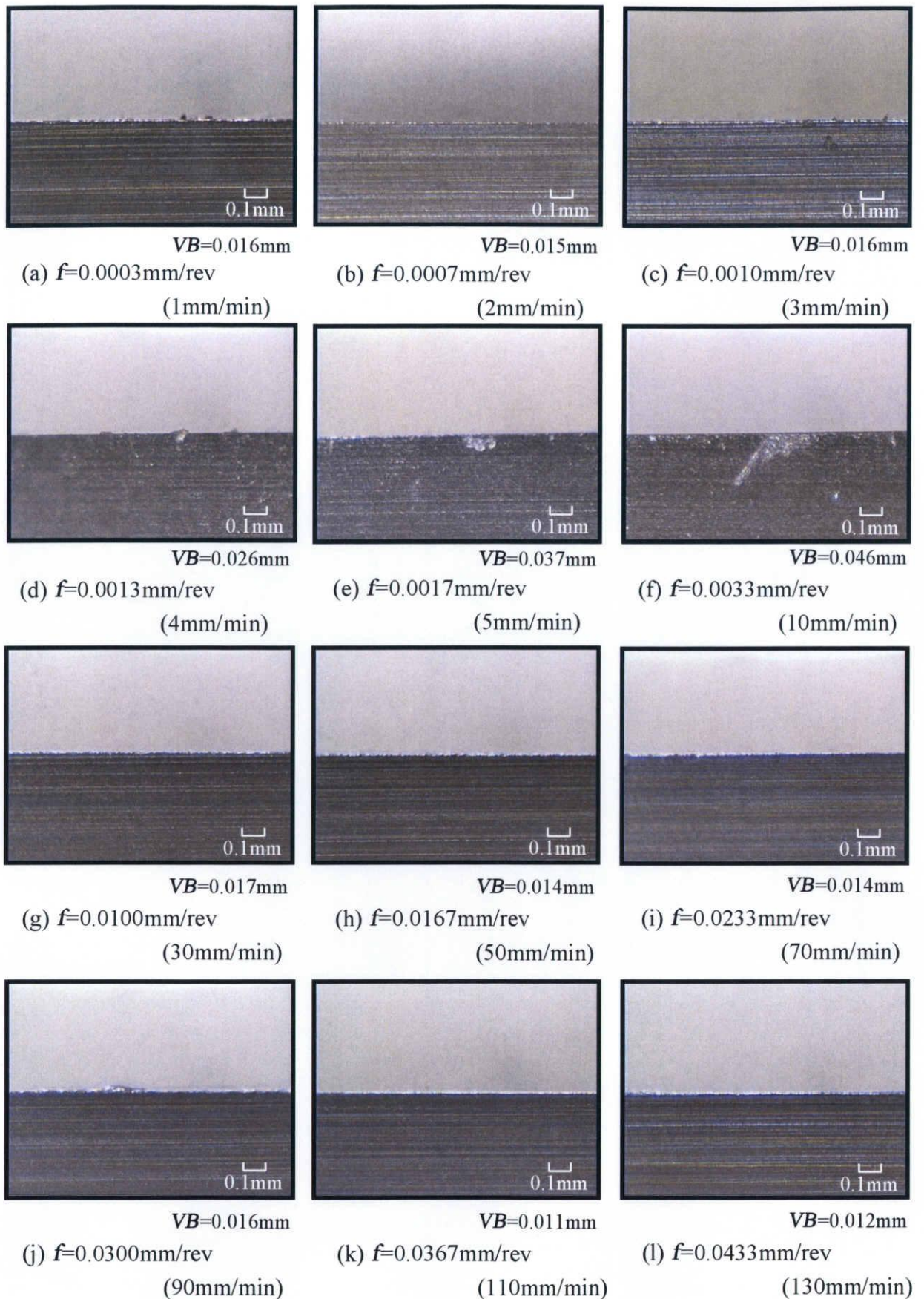


Fig.5.10.2 Photograph of flank wear (Triangle Chip)  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$  ,  $V=95\text{m/min}$  ,  $d=0.015\text{mm}$  , TNGA220408)



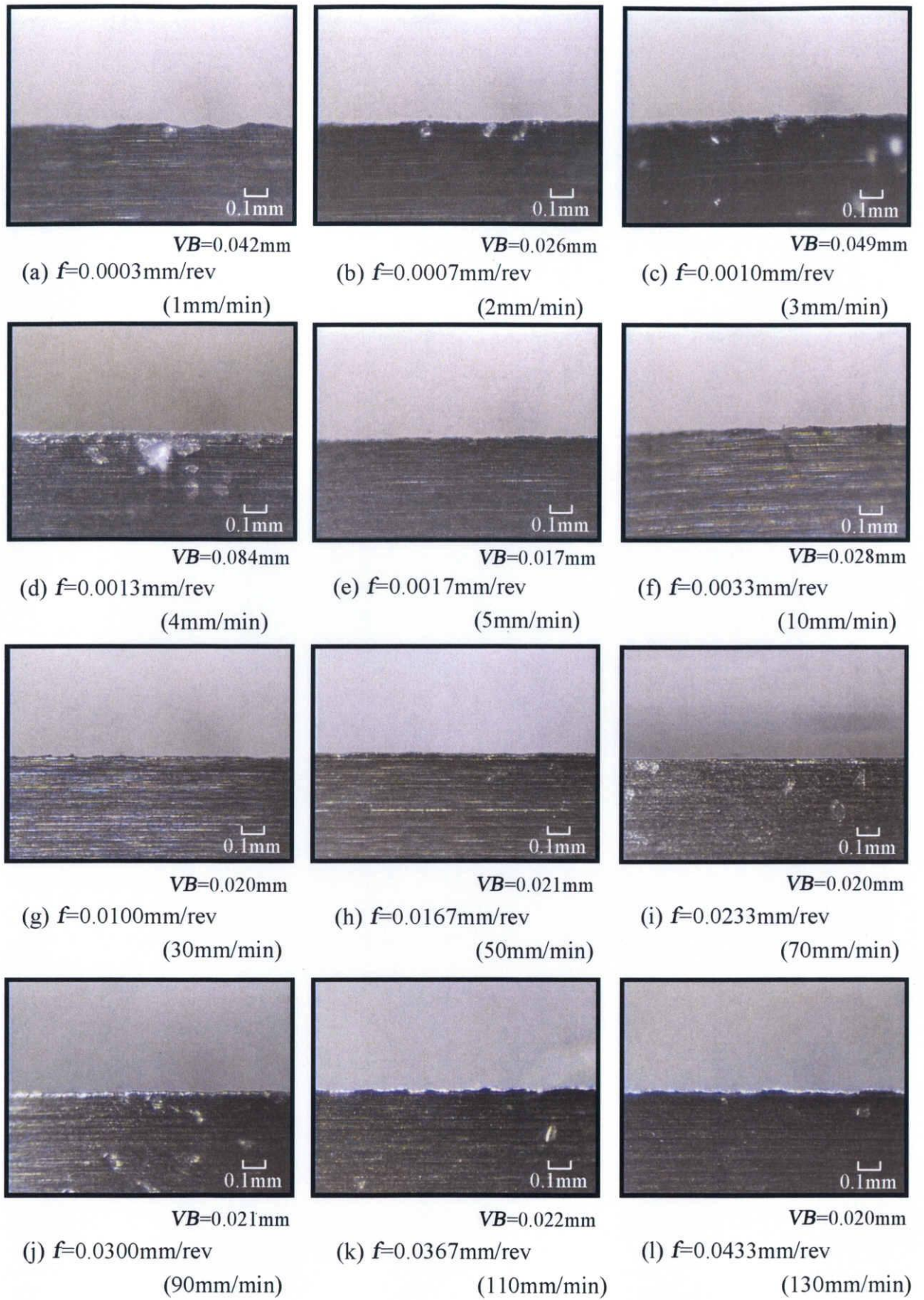


Fig.5.11.1 Photograph of flank wear (Circular Chip,  $\phi 10$ )  
(Normal cutting,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT1003MO-AL)



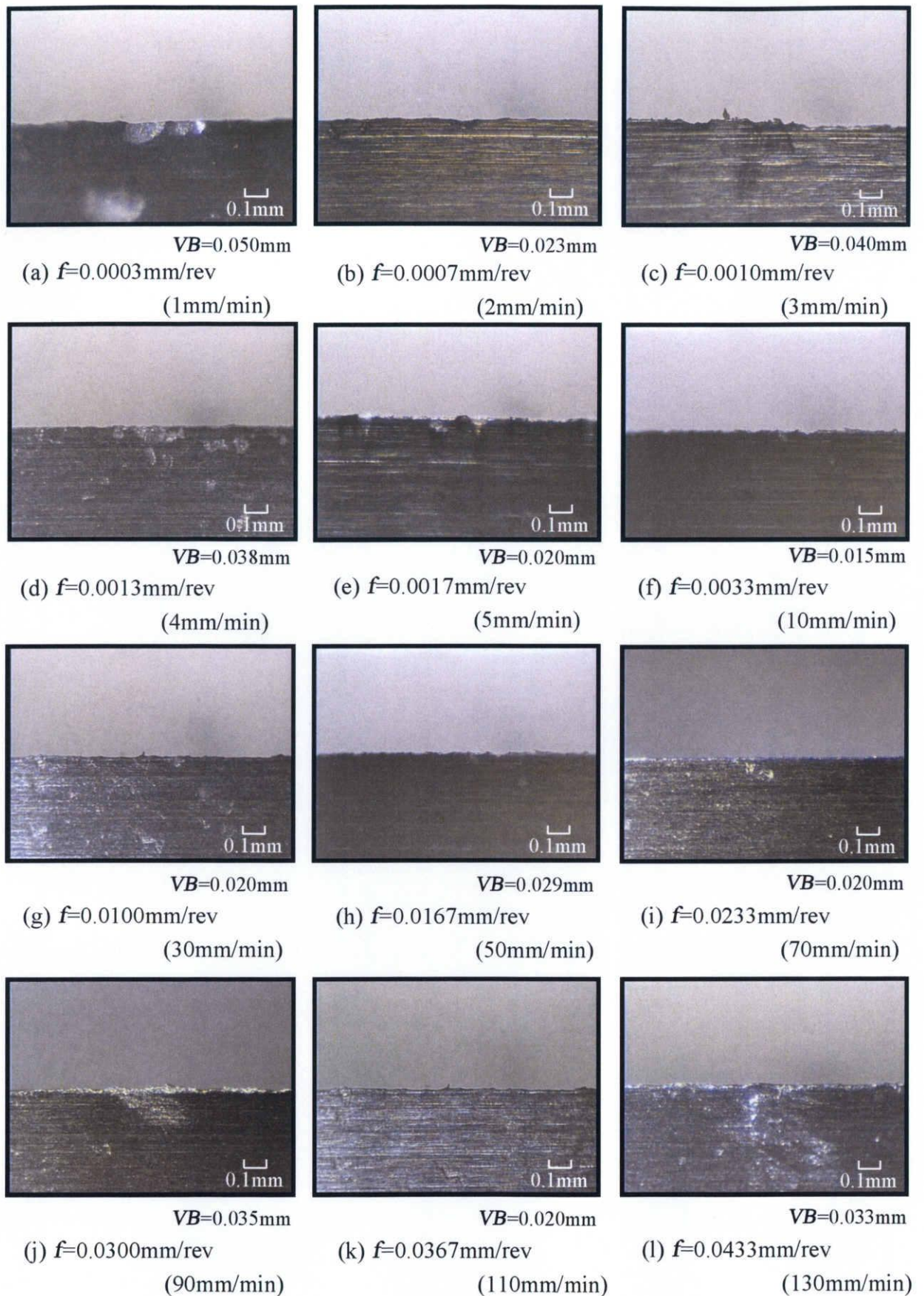


Fig.5.11.2 Photograph of flank wear (Circular Chip,  $\phi 10$ )  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT1003MO-AL)



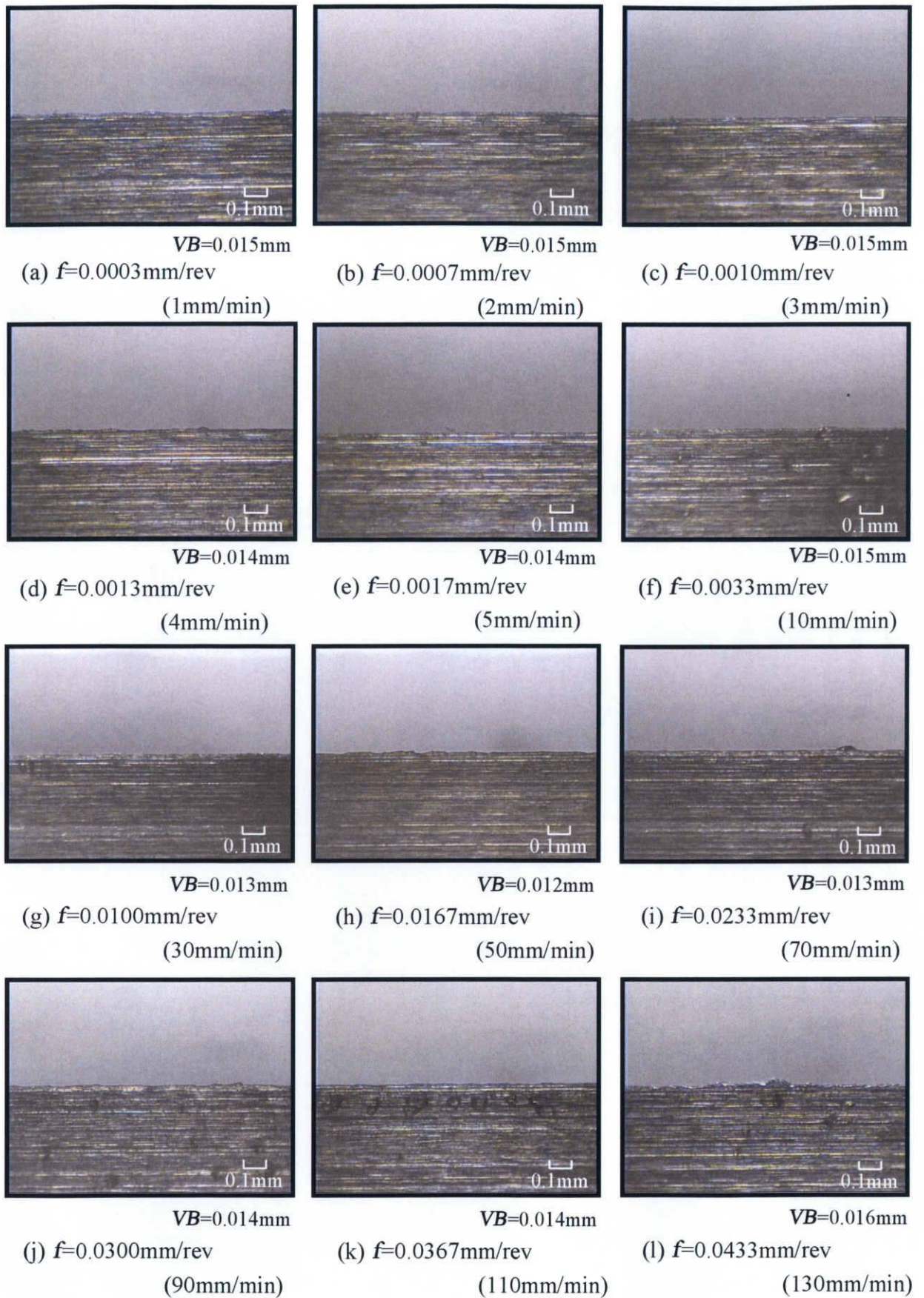


Fig.5.12.1 Photograph of flank wear (Circular Chip,  $\phi 6$ )  
(Normal cutting,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT0602MO-AL)



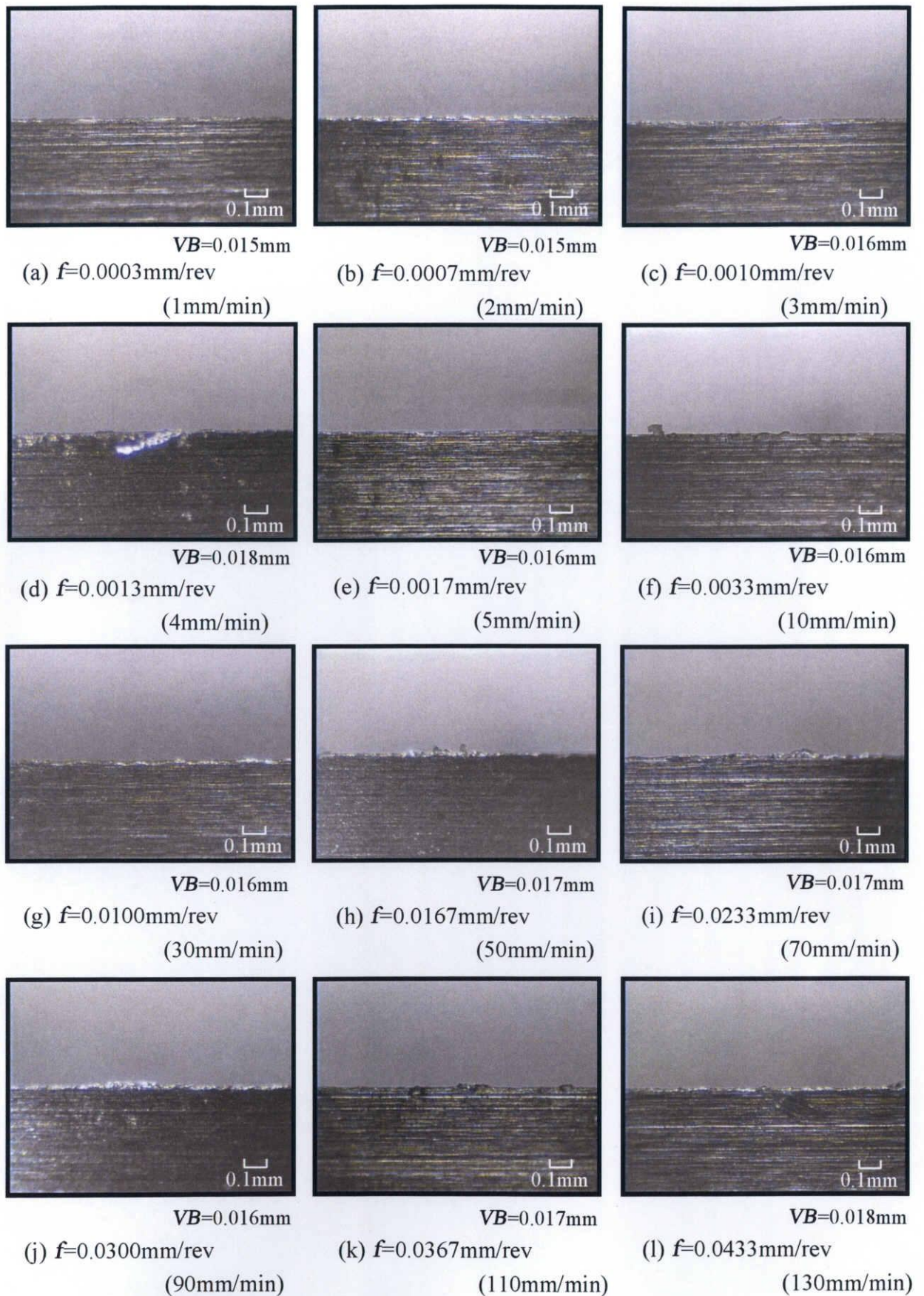


Fig.5.12.2 Photograph of flank wear (Circular Chip,  $\phi 6$ )  
(Oblique cutting  $i=60^\circ$ ,  $V=95\text{m/min}$ ,  $d=0.015\text{mm}$ , RCGT0602MO-AL)



## 第 6 章 結言

本研究は傾斜切削を小型部品の超精密円筒外周加工に応用することで従来の切削に比べどのような変化がもたらされるかという点に注目し、実験を進めた。研究は切削における幾何学的な面からと、実際の実験結果の両者から考察することとした。実験は被削材としてアルミ合金である A5052 を対象として仕上げ面加工を想定し、切削速度 95.0m/min, 切込み 0.015mm, 送り速度を 1.0~130.0mm/min の範囲で変化させ切削を行なった。研究の結果、明らかになった点を以下に述べる。

- 負のすくい角を持つ工具の場合でも、傾斜切削を採用し切刃傾斜角を大きくとることで正の大きな有効すくい角を得ることができた。
- 理論計算結果によると、切刃傾斜角が増大するにつれて幾何学的表面粗さが大きくなる傾向にある。しかし、傾斜切削時の表面粗さは通常切削に比べ小さく、また送り速度増大に伴う幾何学的表面粗さの悪化割合についても通常切削より少ない。
- 三角形チップと円形チップについて幾何学的表面粗さを比較した場合、円形チップは三角形チップよりも表面粗さが大きくなる。また円形チップの径を小さくするほど幾何学的表面粗さは大きくなる傾向が見られる。
- 実験結果より、通常切削では送り速度を大きくすると被削面にびびり振動によるびびりマークが多く見られた。それに対し、傾斜切削では送り速度を大きくした場合でもびびりマークはあまり見られず、通常切削に比べ良好な被削面を得ることができた。
- 傾斜切削において三角形チップと円形チップを比較した場合、送り速度が大きくなるほど円形チップの方が振幅の小さい被削面形状カーブを得ることができた。また円形チップは送り速度を大幅に大きくしても粗さカーブが極端に悪くなることはなかった。

理論式及び実験結果より、送りが大きな切削時には傾斜切削を用いた方が従来の切削よりも良好な被削面を得ることができることがわかった。

また三角形チップを用いた切削において、従来、ほとんど使用されていなかったチップの直線エッジ部についても切削が十分に可能であることがわかった。



## 参考文献

- (1) : 甲木 昭：“極低濃度の硫黄系極圧添加剤が工具摩耗および仕上げ面粗さに及ぼす効果”，日本機械学会論文集（C 編）60 巻 573 号，（1994），pp.323-328
- (2) 小野 浩二，川村 末久，北野 昌則，島栄 勉：“理論切削工学”，現代工学社，（1986），pp.75-78，p.113
- (3) J.V.Stabler：“The fundamentals geometry of cutting tool”，Proc.IME, 165,（1951）
- (4) 高橋 昇，浅田 千秋，湯川 夏夫：“金属材料学”，森北出版株式会社，（2000），pp.269-279



## 謝辞

： 初めに，本研究は光精工株式会社との共同研究の一環として実施されたものであることを記して，多大なご協力を頂いた同社ならびに同社の関係各位に対し深く御礼を申し上げます。

また本研究を進めるにあたり，終始懇切丁寧な指導を賜った 五十君 清司 教授（現特任教授），論文作成にあたり御査読いただいた 鈴木 実平 教授，ならびに 中西 栄徳 助教に心より感謝致します。

さらに，実験を遂行するにあたり，多大な御協力を頂きました 中川 浩希 技官，ならびに大学院生 杉浦 英明氏，学部生 北村 幸一氏をはじめ集積加工システム研究室諸氏に感謝致します。

また，本研究で使用した工具及びチップはダイジェット工業株式会社より御提供して頂いたことを記して，心より御礼申し上げます。

最後に，幾多の御協力を頂きながら，ここに御氏名を掲載できなかった方々に対し，その失礼をお詫びするとともに，謹んで御礼申し上げます。