

# 宇宙環境におけるアルミニウムの比切削抵抗

三好 由記博\*

## Specific Cutting Forces of Aluminium Alloys in A Pseudo-space Environment

by Yukihiro Miyoshi\*

**Synopsis:** The cutting operation will be a tool for repairs and reconstructions of facilities and equipments and for mends of artificial satellites also in the future space factory. Specific cutting forces and surface acceptabilities of aluminium alloys turning under the high vacuum environment, simulating the cutting operation in space, were experimentally examined. Experimental results show that specific cutting forces as well as surface roughness under the vacuum environment are in every case greater than those under the atmospheric environment while cutting results are acceptable showing that the cutting under the space environment is feasible. Specific cutting forces, estimated from the main spindle torque, under the vacuum environment are 1.2~1.3 as great as those under the atmospheric environment and the ratios of the specific cutting forces are nearly constant for some different cutting conditions.

**要旨:** 将来の宇宙工場では、設備・装置の補修、再構築あるいは衛星等の修理など、切削加工が必要になる可能性がある。宇宙空間での切削加工を想定して、高真空環境 ( $2.5 \times 10^{-4}$  Torr) におけるアルミニウム合金の比切削抵抗と仕上面品位を実験的に検討した。実験の結果、真空中での切削のほうが大気中に比べて比切削抵抗、仕上面あらさともに常に大きかったが、特定の一部を除いて、真空中での切削は実用上容認しうるものであった。主軸トルクより求めた真空中での比切削抵抗は大気中の比切削抵抗の1.2~1.3倍で、その比は切削条件によりあまり変化しなかった。

### 1. はじめに

#### 1.1 研究の背景

スペースシャトルの出現、そして宇宙基地計画の進展により、いよいよ21世紀には宇宙工場が実現するものと期待される。宇宙工場を構築し、さらに維持していくためには、スペースシャトルあるいは類似の輸送手段の利用が原則としては不可欠である。スペースシャトルは使い捨てロケットに比べれば経済的といわれるが、それでも1982年時点で1フライトあたり1億ドル程度の費用が必要といわれており<sup>1)</sup>、宇宙工場と地球の間で物資を輸送するためには多額の費用が必要となる。軌道上の宇宙基地に、地球ではなく、重力のない月面から資材などを調達するという発想も輸送費用を抑えるためである。将来あるいは近い将来に、低地球軌道 (LEO) あるいは月面での人類の活動が、開発から生産的・商業的活動へ

と裾野を広げるためには、種々のコストの低減が重要な課題となることはまちがいない。宇宙工場の開発期には基本的な設備費、宇宙飛行士の育成費、打ち上げ費、地上支援設備費など種々の多額の費用が必要であるが、定常な運転期には維持材料費とその輸送費が主な経費と考えられる。従って、生産的・商業的活動期では宇宙空間で材料を徹底的に再利用し、構造物ならば宇宙空間で設備補修・再構築を行い、地球との物資の往来を必要最小限にするのが肝要である。再利用すべきものには、種々のエネルギー、液体なども含まれるが、種々の設備・装置類、構造物材料なども含まれる。設備・装置類、構造物材料の再利用には何らかの加工が必要であり、切削加工の必要性も高いと考えられる。

米国、ESA、日本、カナダにより最初の宇宙工場となるであろう宇宙基地には、新材料の開発<sup>2)</sup>という重要な使命があり、また、人工衛星の回収、修理なども考えられている。いずれの場合も補修などのために何らかの加工手段が必要であり、宇宙空間でのマニピュレータによる溶接<sup>3)</sup>、宇宙空間で利用するための工作機械の検討<sup>4)</sup>

\*工学部機械工学科 助教授 工学博士  
Dept. of Mechanical Engineering, Associate Professor,  
Dr. of Engineering

などの研究がすでに行われている。

## 1.2 研究目的

今後、宇宙環境を活かした新しい加工手法も現れてくるであろうが、加工効率の高さ、加工可能材料の多さ、加工種類の多さ、地上での技術の完成度からして、切削加工も重要な一手法と考えられる。本研究は、将来、宇宙工場で必要となるであろう宇宙環境での切削加工について、その現象、機構を実験的に検討して、技術蓄積の一助たらしとするものである。本報では、人工衛星等の宇宙機器で現在多用されているアルミニウム合金のうち6061アルミニウム合金<sup>5)</sup>を、LEO近くの宇宙環境で切削した場合の比切削抵抗と仕上面品位を実験的に模擬し、検討する。

## 1.3 従来の研究

宇宙環境全般と切削現象の関連についての研究はあまり見られないが、工作機械については微小重力による精度変化の問題等をLewis<sup>4)</sup>らが検討している。真空環境における切削現象についても若干の研究があるのみである。不活性ガスと真空環境での極低速の鋼切削を古市ら<sup>6)</sup>が比較検討しており、工具寿命の若干の検討をКаликштейн<sup>7)</sup>が行っているが、宇宙空間での切削現象を予告するには不十分である。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験条件

宇宙で加工作業を行う時の環境としては、人間が生活できるような環境を考えることもできるが、作業のなかに設備の構築、補修などが想定されるため、必然的に暴露環境での切削作業を検討する必要がある。宇宙の暴露環境の特殊性としては、微小重力、高あるいは超高真空、異常温度、放射線などが挙げられる<sup>8)</sup>。微小重力は工作機械の精度、切り屑の処理などに影響するが、切削機構そのものにはほとんど影響しないと考えられる。温度は暴露環境とはいえパッシブな方法で50°C程度の変動に制御可能であり、切削点近傍の温度がかなりの高温に達するであろう切削機構では多少の影響に留まると考えられる。放射線の影響も考えにくいところであり、結局、切削機構に最も影響しうるのは真空環境ということになる。

本研究では宇宙環境として高真空を取り上げ、高真空環境における切削現象を実験的に検討する。後述の実験装置において、ベークン無し、液体窒素トラップ無しで到達可能な圧力 $2.5 \times 10^{-4}$  Torr ( $3.33 \times 10^{-2}$  Pa)をもって宇宙環境を模擬する。スペースシャトル、宇宙基地の高度は300~400 km程度のLEOであり、圧力は $10^{-3}$ ~

表1 切削条件

項目	条件
被削材	アルミニウム合金 A6061BE φ30
工	スローアウェイ バイト
具	チップ
切削速度	100, 180 m/min
送り	0.1 mm/rev
ふんい気	大気中, 真空中 $2.5 \times 10^{-4}$ Torr

$10^{-4}$  Pa程度である<sup>9)</sup>。従って本実験の圧力はほぼLEO近くの圧力である。

その他の実験条件は表1に示す通りである。

### 2.2 実験装置

真空チャンバー内で、表1の実験条件により切削実験を行うために、図1に概要を示す旋削形式の切削装置を試作した。主軸はDCモータにより、刃物台はボールねじを介してパルスモータによりそれぞれ駆動する。両モータとも真空チャンバーの外に設置し、真空チャンバー内部との連結には、許容トルク42 kgcm、耐真空度 $10^{-8}$  Torrの磁性流体真空回転導入器を用いた。摩擦部分の潤滑には蒸気圧 $5 \times 10^{-13}$  Torr (26°C)の真空用グリースを用いた。切削装置は主軸部分をSUS304で、他をアルミ合金で作った。真空チャンバーは内径400 mm、内高320 mmのSUS304製である。排気装置は油回転ポンプと排気速度570 l/sの油拡散ポンプを組み合わせたものである。チャンバー内の真空度測定には電離真空計を用いた。

### 2.3 実験方法

図1の切削装置の真空回転導入器に挟まれた部分を真空チャンバーの内部に固定し、図2に示す形状のA6061円柱を表1の切削条件に従って切削する。バイトの切込みは、ダイヤルゲージ(1/100)により調整しながら設定するが、精度があまりよくないため、図2のように同一の被削材上で一組の真空中と大気中の切削をそれぞれ20 mmずつ行い、切込みの絶対値の精度が悪くても同一の切込みでの比較が行えるようにした。切削加工中に、主軸DCモータの電機子電流を記録し、後に比切削抵抗に換算する。また切削終了後の仕上面を観察し、触針式あらさ計を用いて送り方向の最大高さ( $R_{max}$ )表面あらさを測定する。

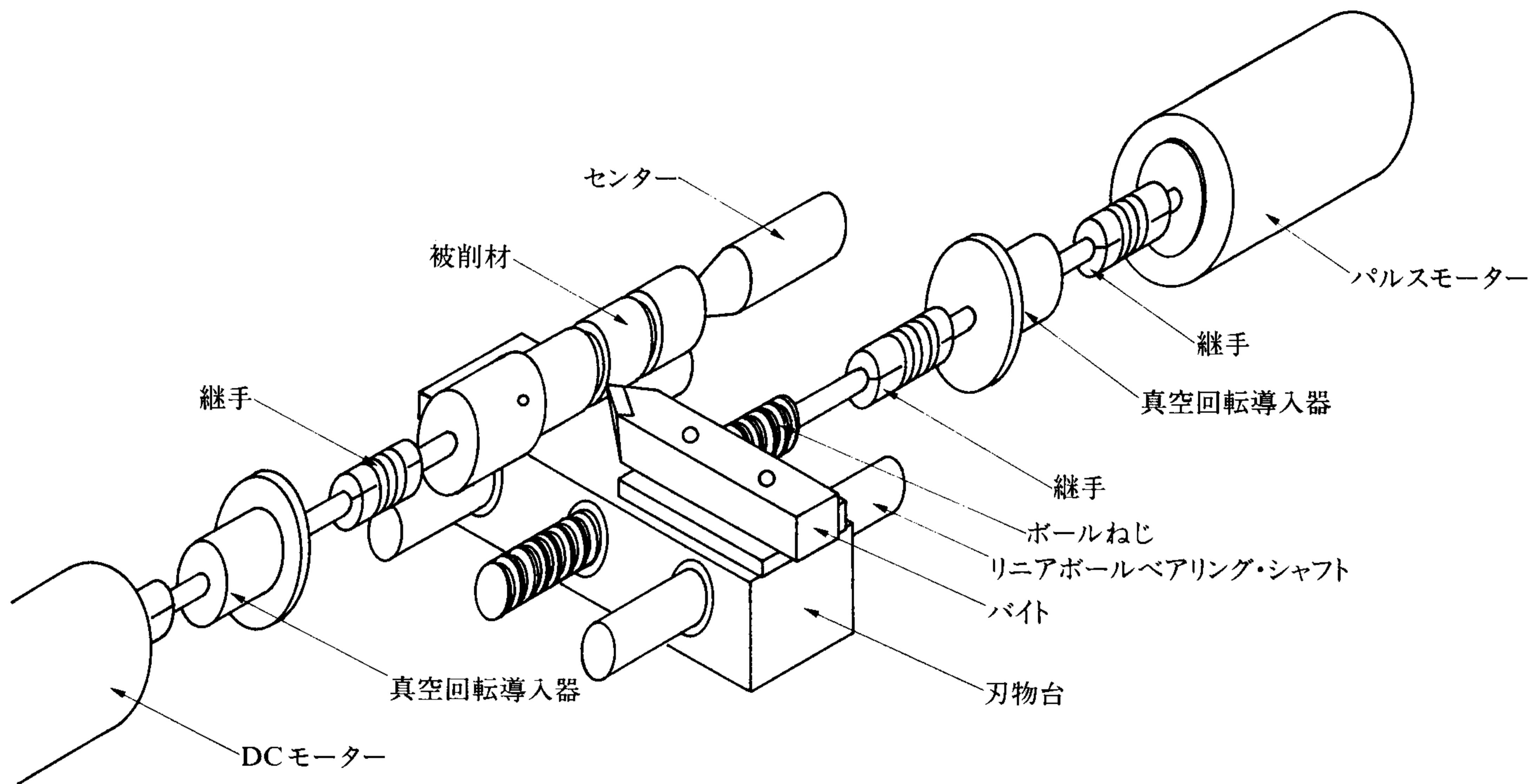


図1 切削装置

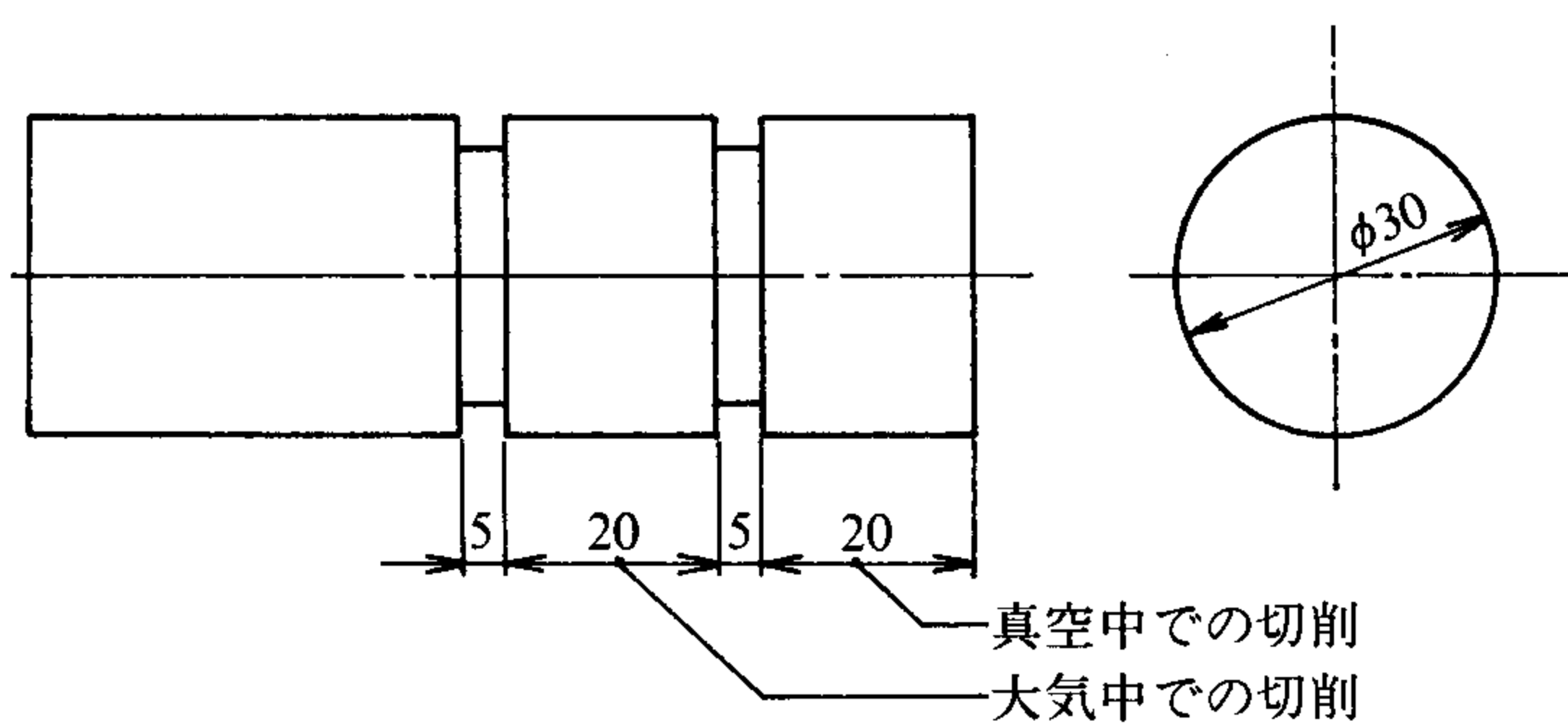


図2 被削材

切削主分力  $F_H$  の実用値は益子<sup>10)</sup>によれば

$$F_H = d \cdot f \cdot P_s \quad (1)$$

$$P_s = K_\delta \cdot K_k \cdot v \cdot P_0 \quad (2)$$

$$v = \frac{1}{0.9} \cdot r^{0.1} \cdot d^{-0.1} \quad (3)$$

と表される。トルク定数と被削材直径を用いて、主軸DCモータの電機子電流を切削主分力  $F_H$  に換算し、さらに、実験条件の切込み  $d$  [mm] と送り  $f$  [mm/rev] を式(1)に代入して比切削抵抗  $P_s$  の実験値を求める。式(2),(3)からは実験値に対応させて比切削抵抗  $P_s$  の計算値を求める。ただし、式(2),(3)において、 $K_\delta$  と  $K_k$  はそれぞれ工具すくい角  $\alpha$  と工具取り付け角  $C$  で決まる定数であり、 $v$  は工具刃先の丸みを補正する係数、 $r$  は刃先ノーズ半径、 $P_0$  は  $\alpha=0^\circ$ ,  $C=90^\circ$ ,  $v=1$  での比切削抵抗である。 $P_0$  は  $115[\text{kgf}/\text{mm}^2]$  とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 比切削抵抗

比切削抵抗  $P_s$  の実験値と計算値を図3(a)に示す。図3(a)において、●▲は大気中で切削した時の比切削抵抗であり、実線(—)で示した計算値とほぼ同程度の値になるはずであるが、切削速度が180 m/minで、切込みが小さい場合に、実験値と計算値のずれが大きい。比切削抵抗が大きくなる理由としては、切込みが小さくボイド等の存在確率が低下したことによる寸法効果、切削速度の増加によるひずみ速度の増加等が考えられるが、図3(a)の場合は切込みが小さく、切込みの設定誤差が無視できなくなったのが最も大きい原因と考えられる。その場合も、2.3節で述べたように、一組の真空中と大気中(△と▲)の切削は完全に同一の切込みで行なったものであり、真空中(△)と大気中(▲)の値を比較する限りにおいて誤差の影響はない。なおその他の実験条件では大気中の切削から求めた比切削抵抗の値(●▲)と計算値がほぼ一致している。

図3(a)の○△の点は、真空中での比切削抵抗の測定値であり、いずれの切削条件においても、対応する大気中の同じ切削条件での比切削抵抗の実験値(●▲)よりも大きくなっている。図3(b)は、同じ切削条件でふん囲気を大気から真空に変えた時に比切削抵抗がいくら増加するかを、図3(a)から両者の比として計算したもの

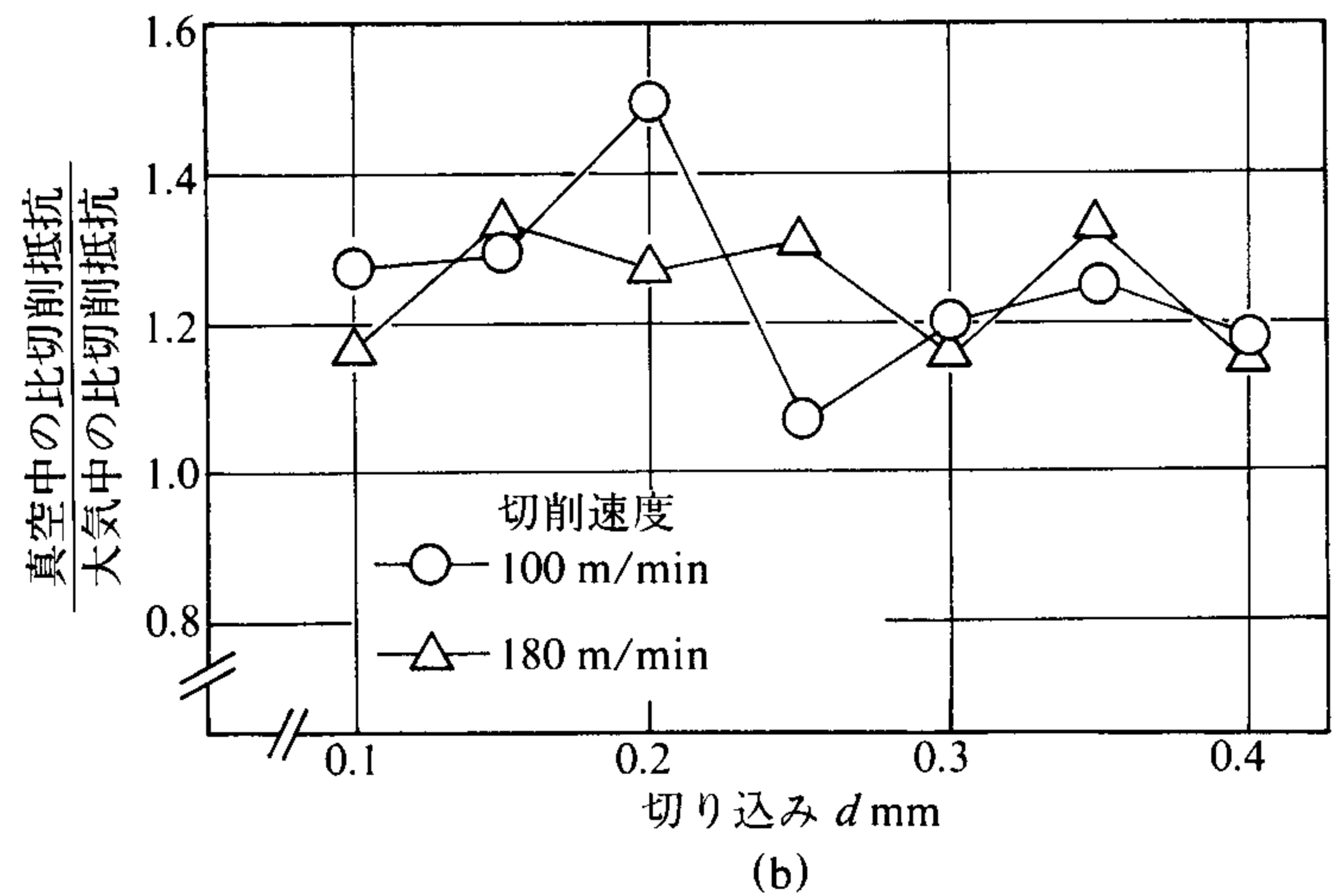
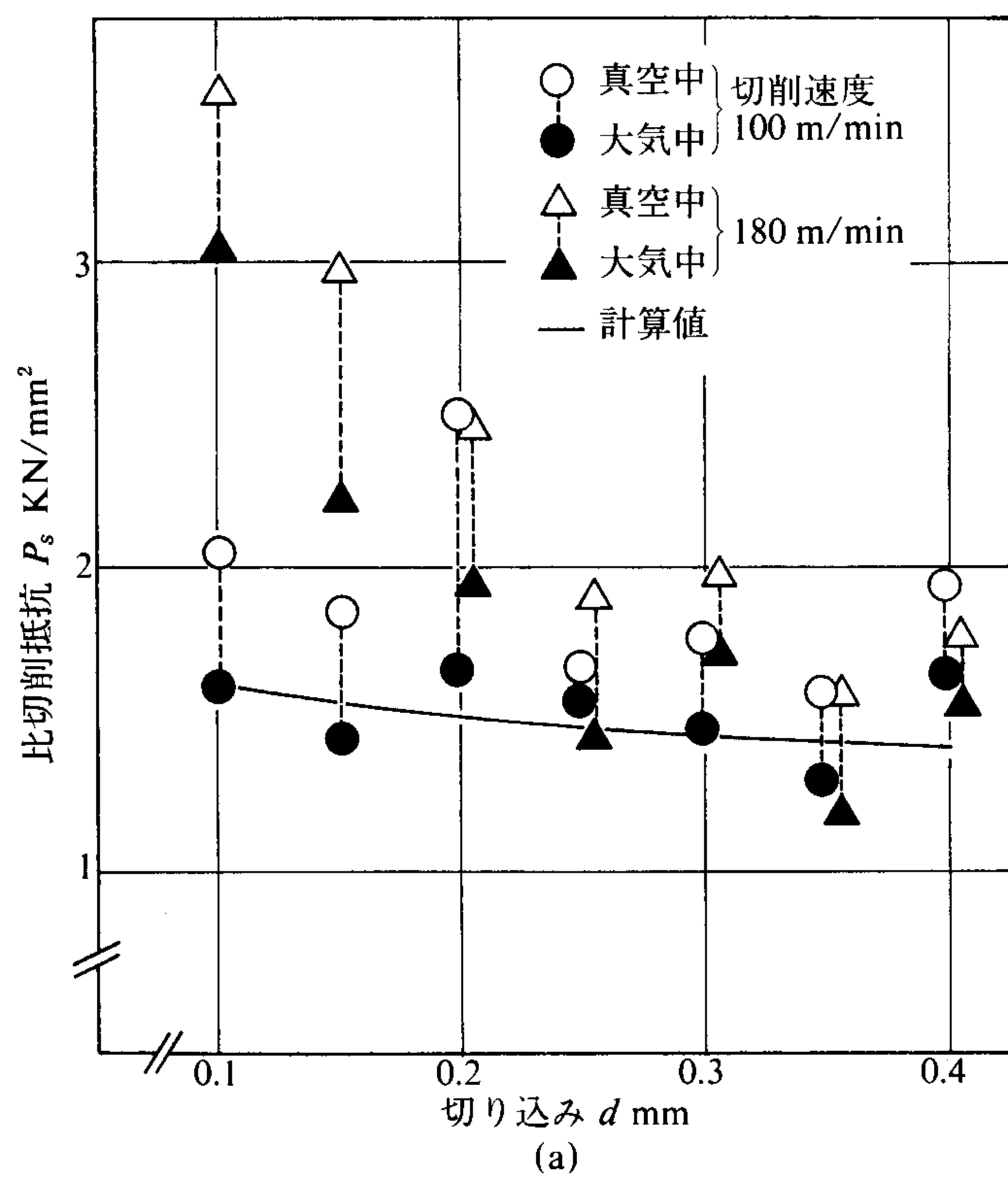


図3 真空中と大気中の比切削抵抗

である。図3(b)から明らかなように、大気中と真空中の切削における比切削抵抗の比は切削速度、切込みによりあまり変化せず、真空中での比切削抵抗の値が大気中での値のほぼ1.2~1.3倍であった。

### 3.2 仕上面品位

図4(a)は図3(a)に対応した被削材の最大高さ ( $R_{max}$ ) 表面あらさである。図4(a)より明かなように、いずれの切削条件においても、真空中での切削による表面あらさ (○△) のほうが大気中での切削による表面あらさ (●▲) より大きくなっている。図4(b)は大気中における表面あらさと真空中における表面あらさの比を図4(a)から求めたものである。比切削抵抗を表わした図3(b)と異なり、図4(b)の表面あらさの比はかなり大きく変動し、切削条件による特定の傾向も見受けられない。

図4(b)において、大気中と真空中での表面あらさの差が最も大きいのは、切削速度  $V=100$  m/min, 切込み  $d=0.4$  mm の場合である。図5は  $V=100$  m/min,  $d=0.4$  mm の場合の表面あらさ曲線であり、図6は対応する切削後の被削材表面の写真である。図5, 図6より明らかなように大気中での切削加工面は良好であるが、真空中での加工面はかなり荒れた面となり実用に耐えないものである。

### 3.3 実験結果の検討

切削理論によれば、切削力  $F$  は、被削材のせん断せん断応力  $\tau_s$ , 切削幅  $b$ , 切込み  $d$ , 工具すくい角  $\alpha$ , 切

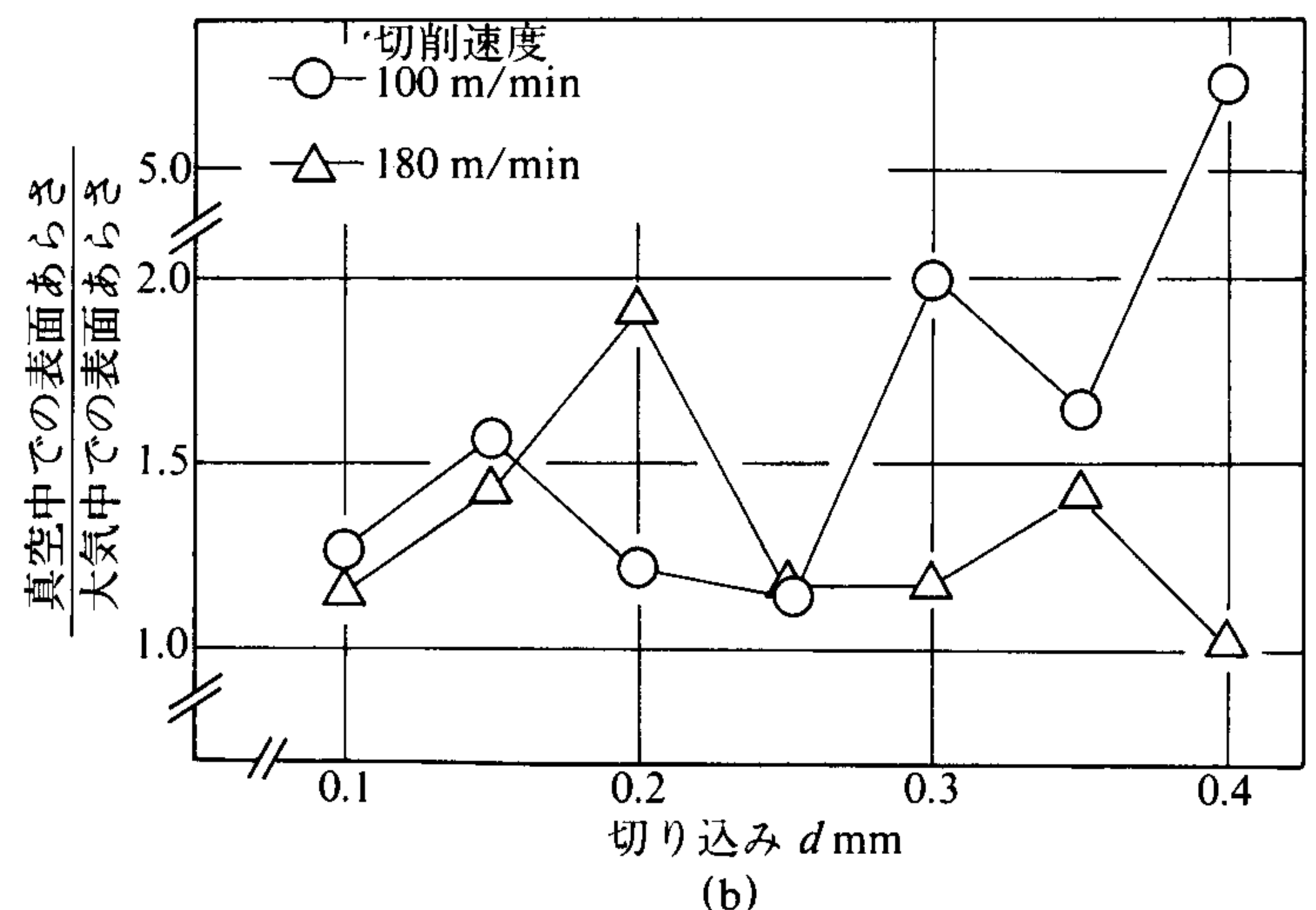
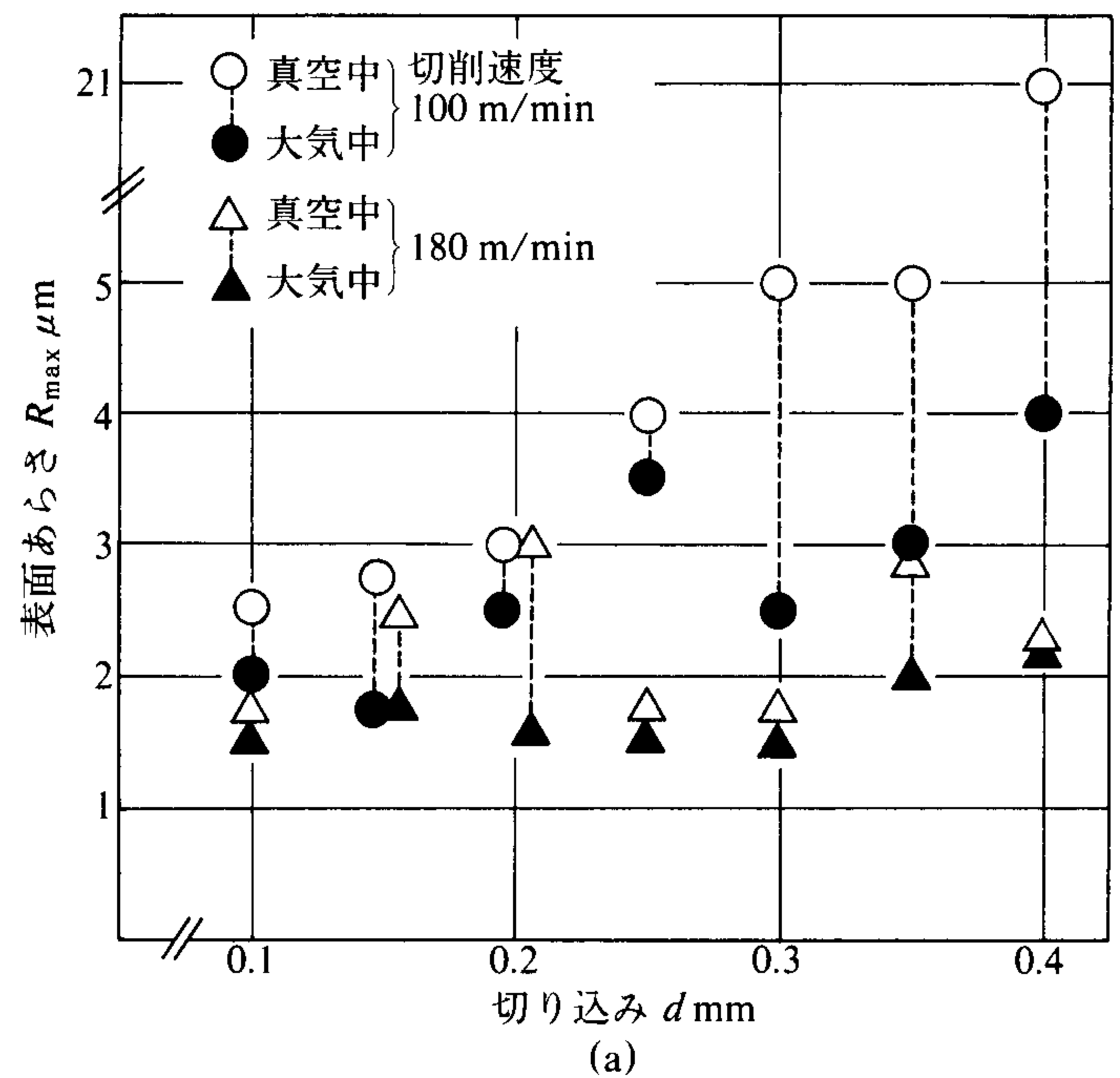
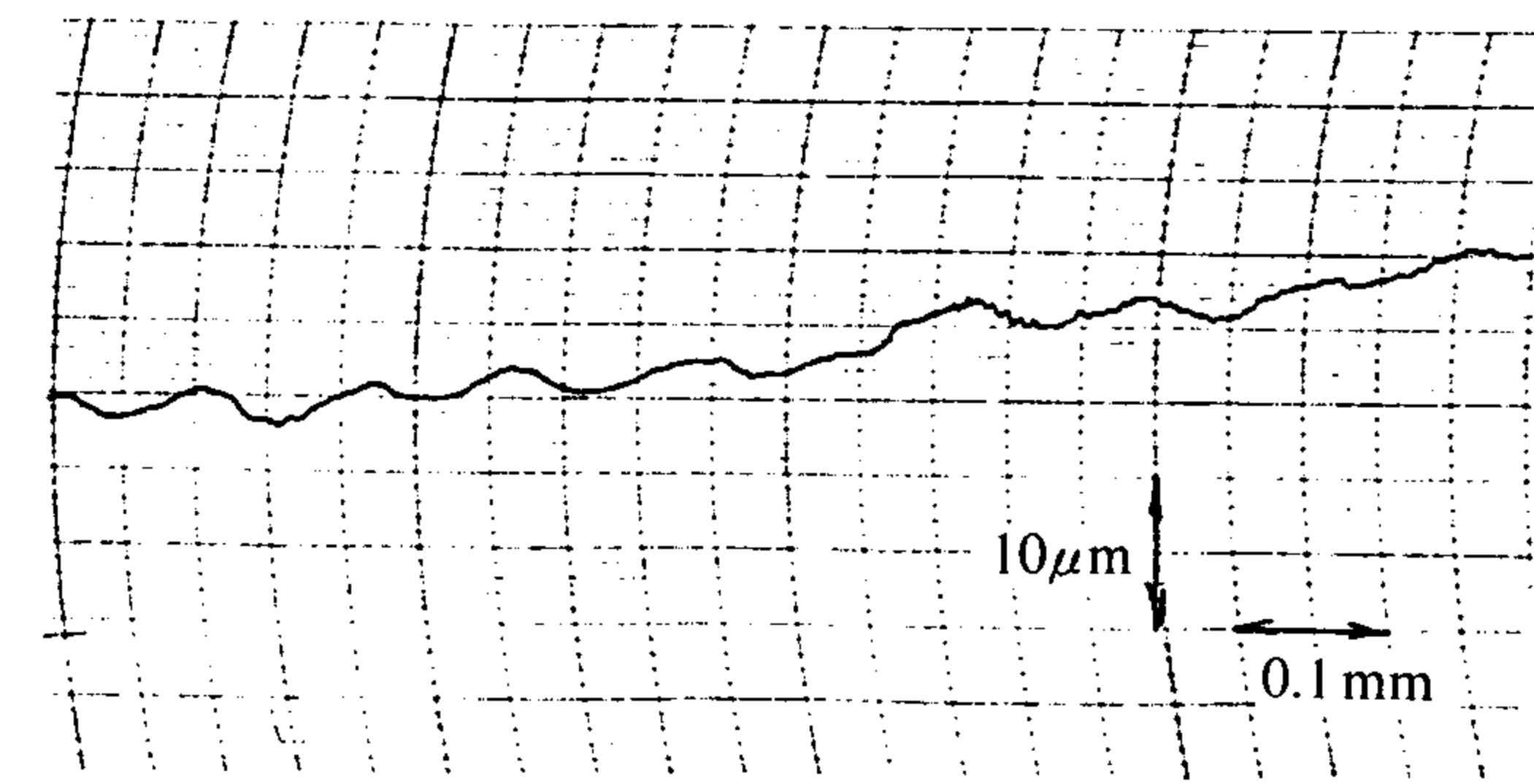
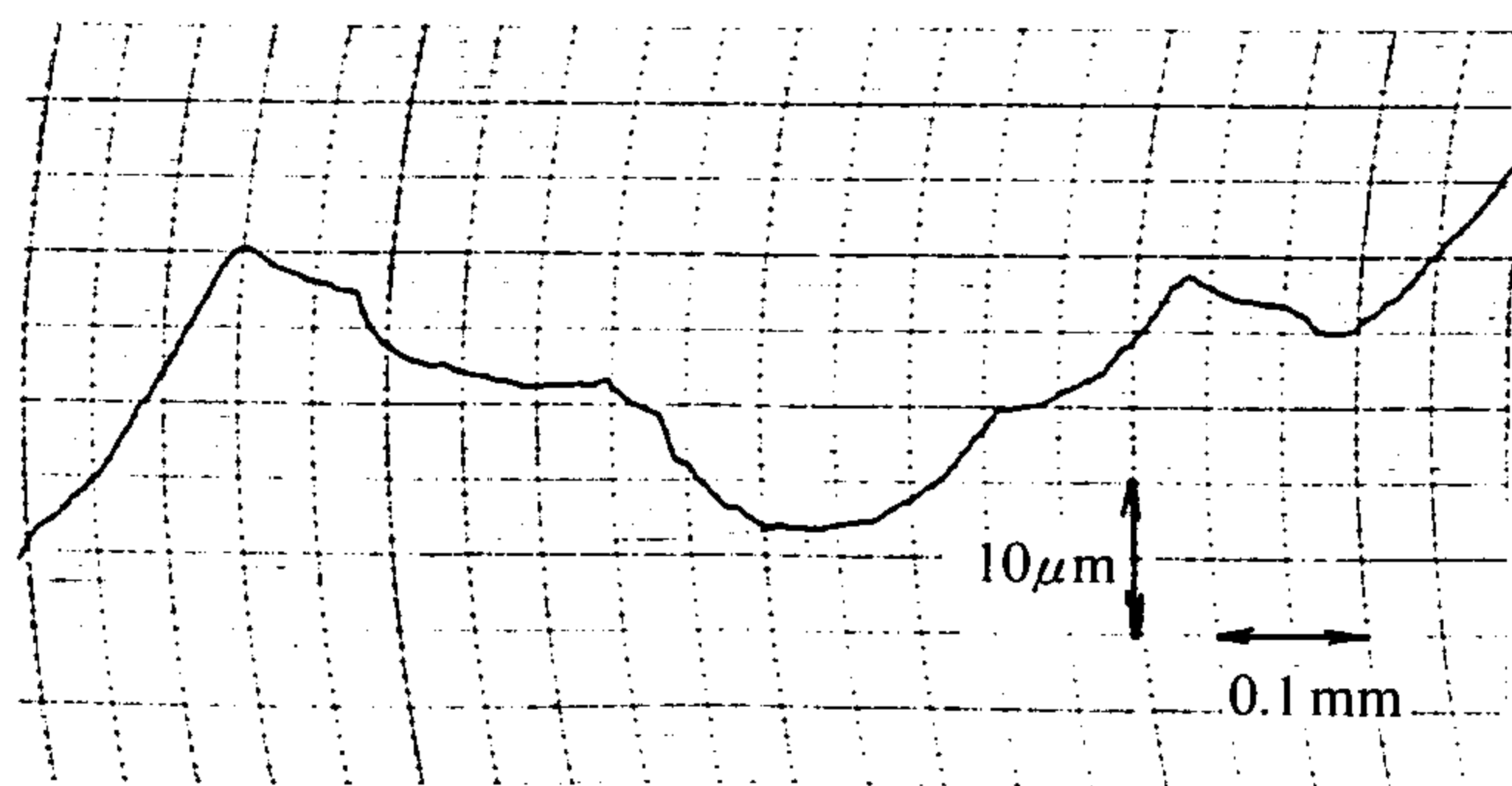


図4 真空中と大気中での表面あらさ



(a) 大気中



(b) 真空中

切り込み0.4 mm, 切削速度100 m/min

図5 切削面の仕上面あらし

りくずせん断角  $\phi$ , 工具すくい面摩擦角  $\beta$  の関数として表現される。

$$F = g(\tau_s, b, d, \alpha, \phi, \beta) \quad (4)$$

また2次元切削の種々実験からは, 切りくずせん断角  $\phi$  と工具すくい面摩擦角  $\beta$ , 工具すくい角  $\alpha$  の間にほぼ線形な関係が認められている<sup>10)</sup>。

$$\phi = A - B(\beta - \alpha) \quad (5)$$

ただし,  $A, B$  はともに正の定数である。 $\tau_s$  は材料特性により,  $b, d, \alpha$  は工具と被削材の幾何学的な位置, 形状によりそれぞれ決まる変数であり, ともにふん囲気の変化とは無関係である。さらに式(5)から  $\phi$  と  $\beta$  は独立ではないので, 結局, 切削力に影響する因子のうちで, ふん囲気の変化の影響を受けうるのは工具すくい面摩擦角  $\beta$  のみであり,  $\beta$  が変化した結果, 切りくずせん断角  $\phi$  も変化する。宇宙機器で, 金属の暴露面どうしの接着により潤滑が難問となっている<sup>11)</sup> ように, 真空中の切削においても, 工具すくい面での, いわゆる凝着が, 大気中の切削に比べて増加した結果, 工具すくい面摩擦角  $\beta$  すなわち摩擦係数が増加して, 図3に示したように比切削抵抗が増加したと考えられる。

図4, 図5, 図6に示した真空中での仕上面の悪化も, 同様に工具すくい面摩擦角  $\beta$  が増加した結果, 式(5)か

切り込み 0.4 mm, 切削速度 100 m/min

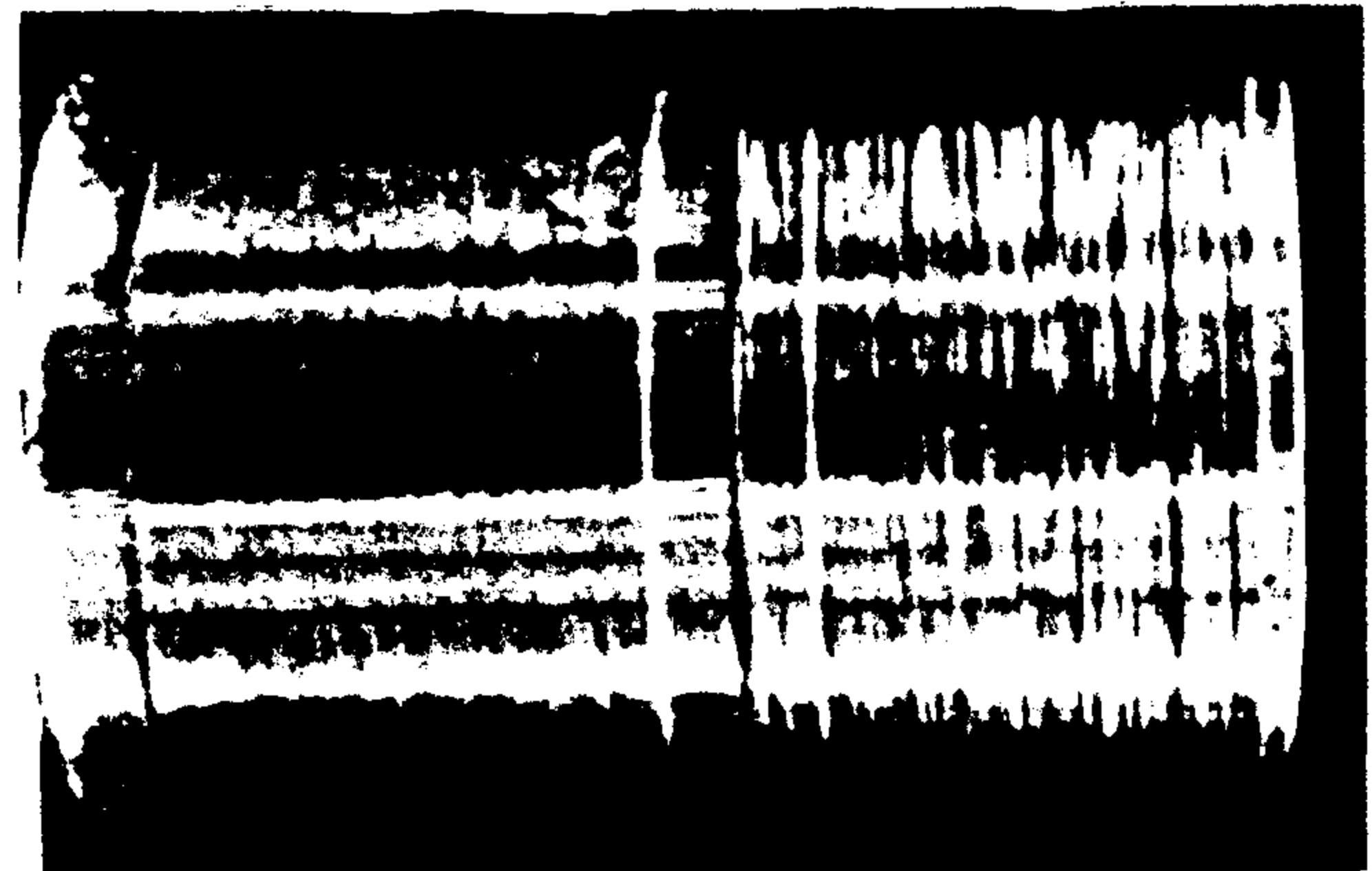


図6 切削仕上面

ら判断されるように切りくずせん断角  $\phi$  が減少し, いわゆるむしれ型の切削が行われたためと考えられる。ただし一般に仕上面生成には工具逃げ面の影響も大きく, 切削力への影響は無視しうるような工具逃げ面での凝着でも仕上面の品位には大きく影響する。図3の切削力はふん囲気を真空にしたことによりほぼ1.2~1.3倍程度に増加しているが, 対応する表面あらしは増加の程度が大小まちまちであり, 切削力の増加とは対応していない。従って, 切削力の変化には寄与しないような工具逃げ面の微小な凝着が仕上面の悪化に大きく影響していると考えられる。

真空中での切削加工は大気中での場合に比べて比切削抵抗も大きく, 仕上面も劣るが, 本実験の範囲では図5, 図6に示した場合を除いて, 真空中での切削は実用上容認しうるものであった。切削により被削材金属の結晶が暴露されるもの工具側は必ずしもそうではないこと, 被削材金属結晶の暴露と同時に被削材内部のガスも切削により放出されること,  $2.5 \times 10^{-4}$  Torr ( $3.33 \times 10^{-2}$  Pa) 程度の真空度ではかなりの数の気体分子 ( $20^\circ\text{C}$ , 分子量32で  $9.05 \times 10^{16}$  [1/s·cm<sup>2</sup>]) が依然として金属面に衝突していること, により実用上容認しうる真空切削が可能であったものと考えられる。ただし, 材料の種類によっては吸着膜の存在により逆に摩擦が増加するという報告<sup>12)</sup> もあり, また今回の実験では, ベアリングの摩擦等の切削以外の要因も含まれるため, さらに実験が必要である。

#### 4. ま と め

大気中と真空中 ( $2.5 \times 10^{-4}$  Torr) におけるアルミニ

ウム合金 (A6061BE) の比切削抵抗と切削仕上面を比較したところ, 限られた切削条件の範囲ではあるが以下の結果が得られた。

(1) 真空中での切削で主軸トルクから得られた比切削抵抗のほうが, 大気中に比べて1.2~1.3倍程度大きく, その傾向は切削速度, 切込みの変化に対して, ほとんど変化しない。

(2) 真空中での切削による仕上面は, 大気中に比べて, 最大高さあらかさが大きく, 表面が実用に耐えないほど荒れることもある。真空中と大気中でのあらかさの比は, 切削速度, 切込みの変化に対して明確な傾向を示さず, 変動も大きい。

なお本研究の実験は, 本学卒業生の栗昭二氏と平伸一郎氏の協力によるものであり, ここに謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) J. H. Sloan: The Cost of Materials in Space, SME Technical Paper, EM85-960 (1985) 47-58
- 2) 東久雄: 宇宙工場と製造技術, 精密工学会誌, 54, 3 (1988) 32-36
- 3) 増淵興一: 宇宙溶接, 軽金属溶接, 25, 1 (1987) 2-5
- 4) Wm. Lewis, J. Kreiner: Machining in Low Earth Orbit, 31st Int. SAMPE Symposium, April, 7, 10 (1986) 1264-1271
- 5) 日高忍: 人工衛星搭載機器材料と加工技術, 塑性と加工, 23, 258 (1982) 618-624
- 6) 古市亮蔵他: ふん囲気が切削現象に及ぼす影響, 日本機械学会論文集, 第3部, 32, 234 (1966) 329-340
- 7) Б. Ш. Каликштейн: Особенности Физико-Химических Процессов в Контакте Инструмент, Деталь при Резании Металлов в Условиях Атмосферы И Вакуума, Fiz Khim Obrab Mater, 4 (1985) 123-126
- 8) 日本航空宇宙学会: 航空宇宙工学便覧, 丸善, (1974) 1072
- 9) 毛利衛: 宇宙実験と真空, 真空, 31, 1 (1988) 21-32
- 10) 臼井英治: 切削・研削加工学, 切削加工, 共立出版 (1977) 63, 185
- 11) M. J. Todd: Sateellite mechanism tribology at ESTL, TRIBOLOGY International, June (1975) 99-104
- 12) S. V. Pepper: Effect of Adsorbed Films on Friction of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-metal Systems, J. Applied Physics, 47, 6 (1976) 2579-2583