

ポリカーボネートを用いたドリルの 増減送り加工機構の検討

吉川 晃*, 櫻井 恵三*, 小堀 修身*, 足立 勝重*, 沖田 耕三*

Examination of intermittently decelerated feed drilling using polycarbonate

YOSHIKAWA Akira, SAKURAI Keizo, KOBORI Osami,
ADACHI Katushige and OKITA Kozo

Abstract

At present in strictly economic and environmental situations, the improvement of production efficiency and environmental bad influence is the actual subject in a drilling process. In this study, in order to solve the cutting mechanism during intermittently decelerated feed drilling with polycarbonate was investigated and the relation among the cutting force (thrust, torque), chip shape and breaking stress of chip etc. was discussed.

The main results are as follows.

- (1) The torque force in case of intermittently decelerated feed drilling ($F_t=2,3,4$) nearly equal in comparison with conventional drilling ($F_t=1$) and the changed range of this torque varies approximately 20 % because of a dynamic component due to the periodic fluctuation of the applied feed.
- (2) The thrust force in case of intermittently decelerated feed drilling ($F_t=2,3,4$) increases approximately 50% in comparison with conventional drilling ($F_t=1$) and the changed range of this thrust varies approximately 50~60% than that of $F_t=1$.
- (3) The change of chip thickness is not a rectangle, it is chevron. On intermittently decelerated feed drilling, there was a chip of the folded condition on the slow feed part.
- (4) In breaking test of the chip, the breaking power is lowered of intermittently decelerated feed drilling further than conventional drilling. The breaking position is different by intermittently decelerated feed ratio.

Key words: Drilling, Intermittently decelerated feed drilling, Twist drills, Cutting force, Chip shape.

1. 緒言

物づくり現場において、環境が大きなキーワードとなっている。ドリル加工においても環境にやさしい加工法が模索されている。一般的には切削油剤の使用量の抑制が考えられている。また、ドリル形状の変更も考えられている。

別の方法としては、新しい加工法¹⁾として、ドリル加工の送りを変化させる増減送り加工法が提案されている。この方法はパルスの衝撃力が作用することにより、切りくずが分断され工具寿命が良好であると言われている。

本研究においては、増減送り加工機構を最も忠実に再現できると考えられる、ドリル切れ刃の軌跡と対応した切りくずが生成されるポリカーボネートを用いた。そして切削現象であるトルク・スラストの変化、切りくずの形状の観察および切りくずの破断の状態を観察することにより有用性について検討した。

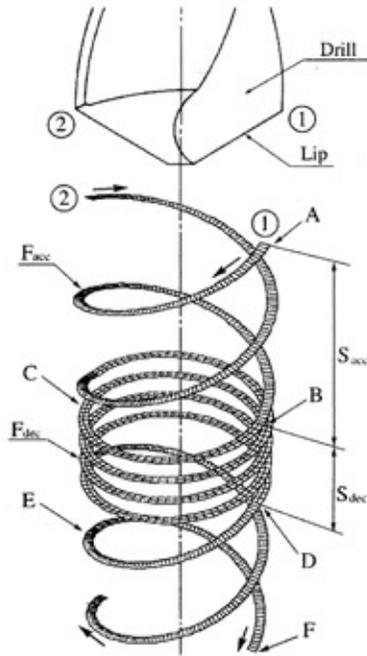
2. 増減送り加工機構

増減送り加工はドリルの回転数を一定に保ちながら、ドリルの送り速度を周期的に増減させる加工法である。

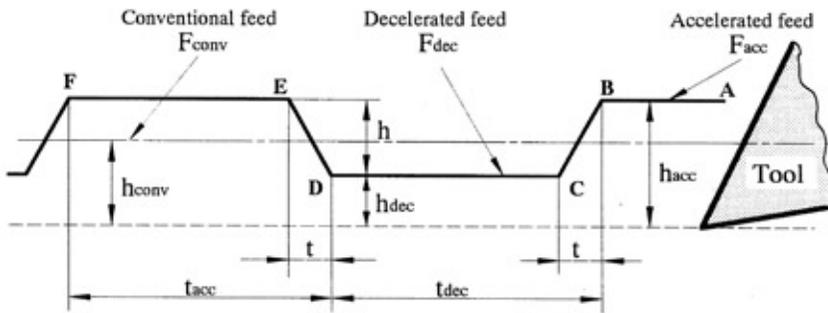
図1は増減送り加工機構を説明するためにドリル切れ刃の運動を示したものである。

同図(a)は、ドリルの両切れ刃上の2点①、②の軌跡を示したものである。同図(b)は切れ刃上の点①の切り込み厚さの変化を切れ刃に対して相対的に示したものである。切り込み厚さの変化を理解するために、模式的に同図(a)の記号と同じ個所を平面的に表している。同図(a)、(b)において、 S_{acc} (mm)の穴深さに対して、早い送り速度 F_{acc} (mm/s)でドリルを送り、次に S_{dec} (mm)の穴深さに対して減速した遅い送り速度 F_{dec} (mm/s)で送る。すなわち、A点からB点までは早送り F_{acc} で送り、早送り F_{acc} から遅送り F_{dec} に減速した瞬間、そのB点からドリルが半回転するC点までの t 秒間は、切れ刃②が早い送り F_{acc} で切削した面の下を切れ刃①が遅い送り速度 F_{dec} で切削する。したがって、切り込み厚さが早い送り F_{acc} 時の正味切り込み厚さ h_{acc} (mm)から遅い送り F_{dec} 時の正味切り込み厚さ h_{dec} (mm)に急減する。さらに、遅い送り F_{dec} から早い送り F_{acc} に増速した瞬間のD点からドリルが半回転するE点までの t 秒間はその逆に、切り込み厚さが h_{dec} (mm)から h_{acc} (mm)に急増する。

以上のように切り込み厚さの変化は、送りの増減によって決定される。そこで、これらの関係を詳細に調べるために、早送り F_{acc} と遅送り F_{dec} の比 F_f を送りの増減比と呼び、次式で定義した。



(a) Loci of both cutting edges



(b) Depth of cut

Fig. 1 Illustration of intermittently decelerated feed drilling

Table 1 Mechanical property of polycarbonate

Tensile strength (MPa)	Density (g/cm ³)	Melting point (°C)	Compressive strength (MPa)	Shear strength (MPa)	Elongation (%)	Specific gravity
63	1.20	230~240	78.4	39.2	110	1.2

Table 2 Cutting conditions

Ratio of accelated feed	Frequency (Hz)	Rotational frequency (m ⁻¹)	Early feed (mm/rev)	Slow feed (mm/rev)
F _f =1	1	180	0.15	
F _f =2			0.200	0.100
F _f =3			0.225	0.075
F _f =4			0.240	0.060

$$F_f = \frac{F_{acc}}{F_{dec}}$$

送りの増減による正味切り込み厚さ比 h_{acc}/h_{dec} は理論的に増減比 F_f と一致する。

3. 実験方法

実験に使用した工作機械はNCフライス盤(マキノ社製)である。被削材としてポリカーボネートを使用した。試験片の形状は直径60mm, 長さ50mmとした。ポリカーボネート材の機械的性質を表1に示した。使用したドリルは直径18mmである。切削抵抗の測定は水晶圧電式切削動力計(キスラー社製9123B型)を用いて測定した。切りくずの破断試験は小型引張試験機を製作した。

切削実験条件は表2に示した。同表より $F_f=1$ は通常の慣用加工で送りの増減はない。回転数は増減送り現象が明確になるように1分間に180回転と低速に設定した。

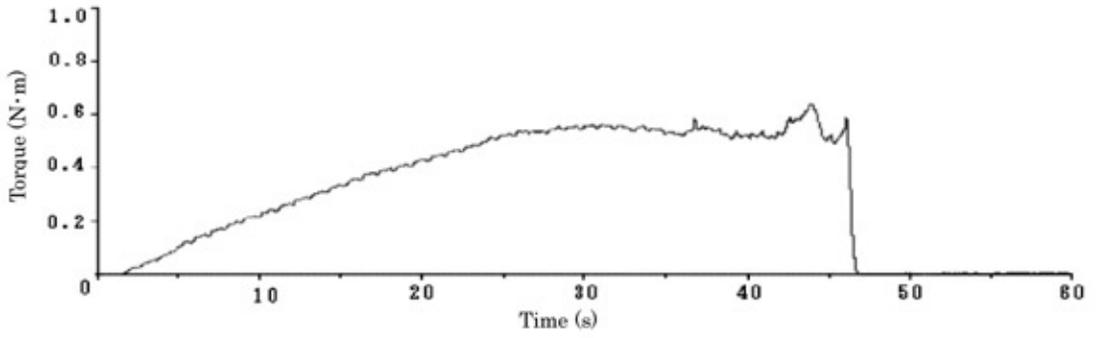
4. 実験結果と考察

4.1 増減送り比とトルク・スラストの関係

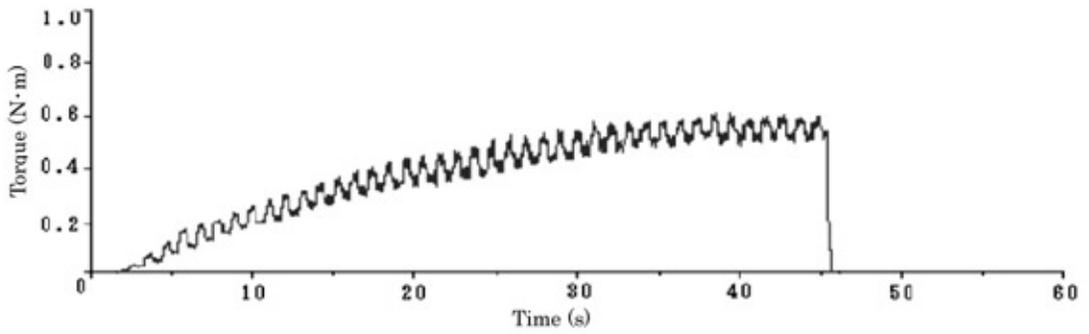
図2, 3は増減送りにより切削現象であるトルク・スラストの変化を示したものである。同図2, 3(a)は $F_f=1$ で慣用切削の場合を示したものである。同図より, トルクは切削開始より徐々に上昇し, 25秒附近より定常域に達している。スラストは切削開始時高い値を示しているが, 時間の経過とともに低下し定常域に達している。

同図2, 3(b)は $F_f=2$ の場合のトルク・スラストの変化を示している。 $F_f=1$ と異なり, トルク・スラスト共にある一定幅で変動しているのが認められる。この現象が増減送りの特徴である。トルクは定常域では最大値において慣用加工の $F_f=1$ と同じ値を示している。トルクの変動幅は $0.09N \cdot m$ である。スラストの定常域における最大値は $F_f=1$ に比較して約40%増加しているのが認められる。変動幅は27Nである。

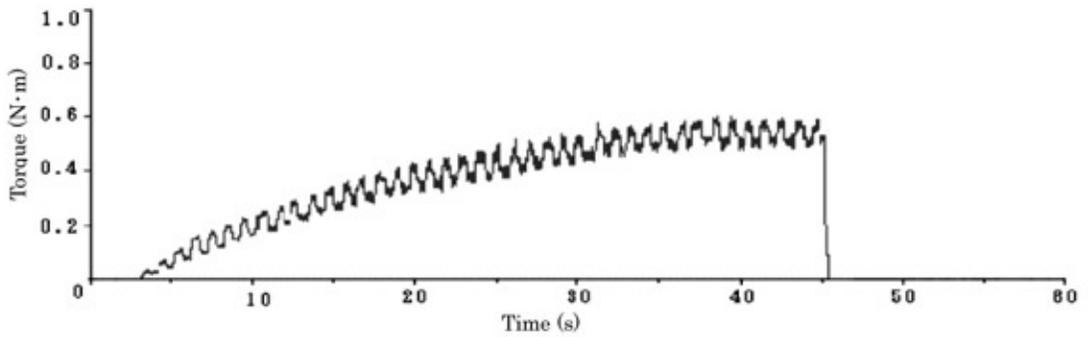
同図2, 3(c)は $F_f=3$ の場合である。トルクは, $F_f=1$, $F_f=2$ の場合と同じ値を示している。変動幅は $0.11N \cdot m$ を示している。スラストの値は56Nで $F_f=2$ の場合に比較して, 3N程度増加しているがほとんど同じ値であると考えられる。



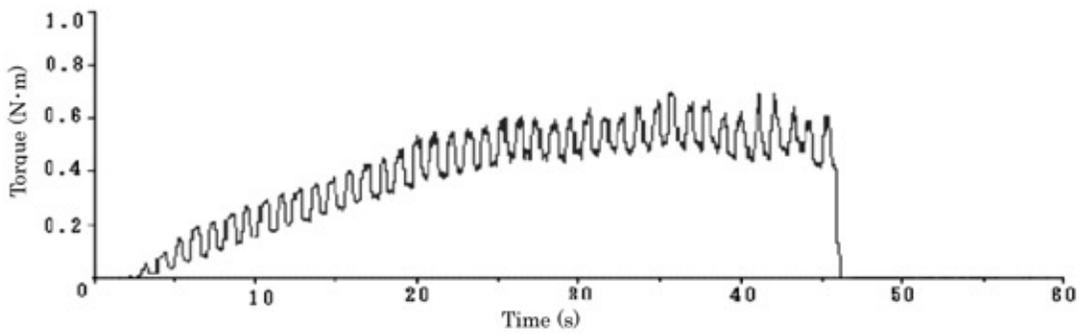
(a) $F_i=1$



(b) $F_i=2$

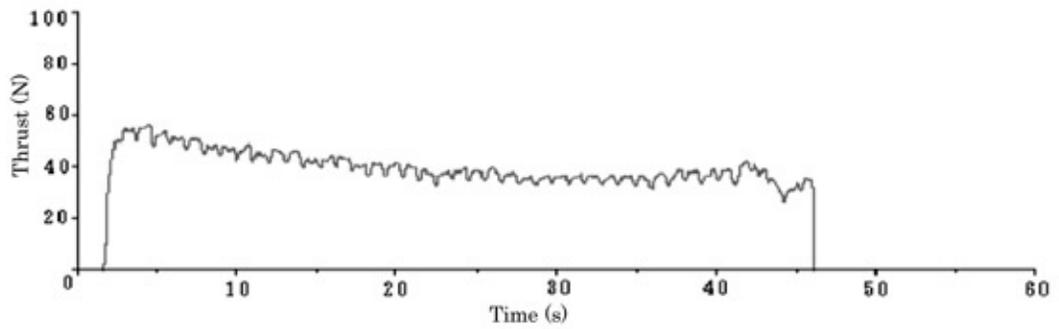


(c) $F_i=3$

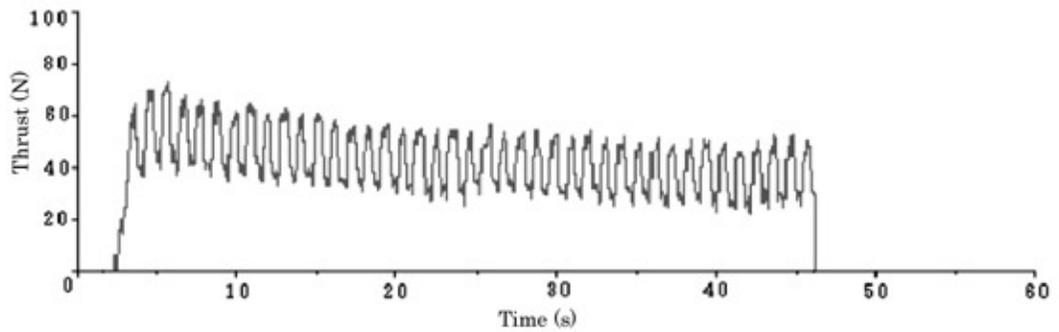


(d) $F_i=4$

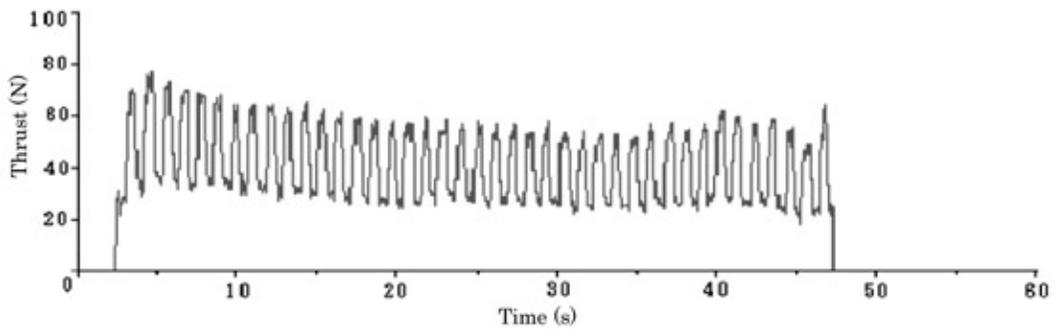
Fig. 2 Measured results of torque



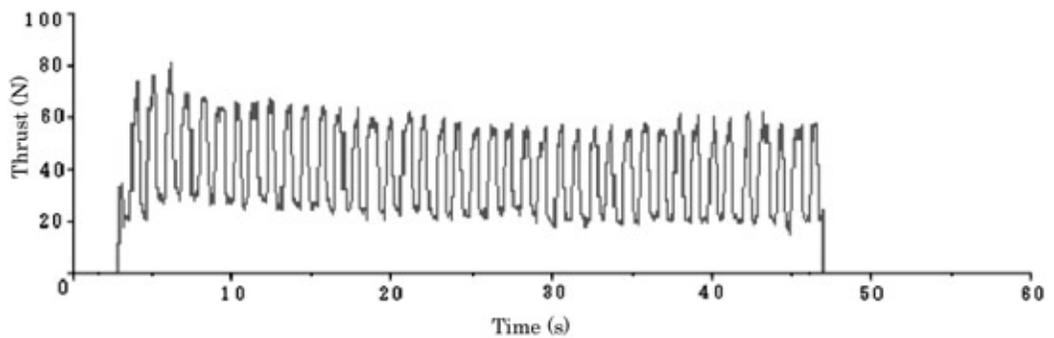
(a) $F_i=1$



(b) $F_i=2$



(c) $F_i=3$



(d) $F_i=4$

Fig. 3 Measured results of thrust

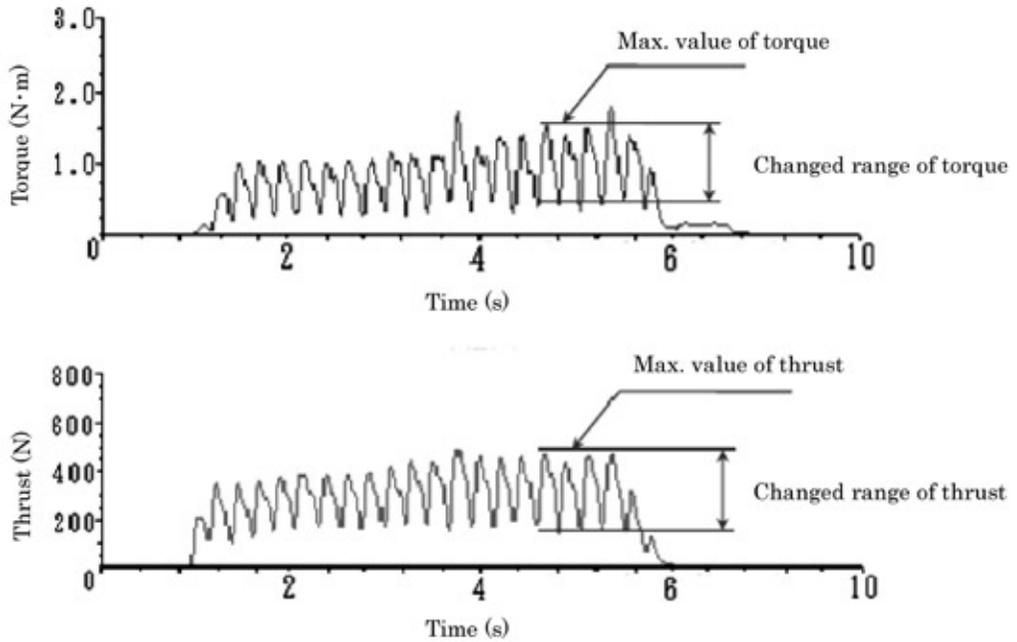


Fig. 4 Definition of cutting force (thrust, torque) during intermittently decelerated feed drilling

Table 3 Measured results of cutting force (thrust, torque) for intermittently decelerated feed drilling

Ratio of accelerated feed	Early feed value (mm/rev)	Changed range of intermittently decelerated feed (F ₂ =100%)	Cutting Torque (N·m)		Cutting Thrust (N)	
	Slow feed value (mm/rev)		Torque (F ₂ =100%)	Changed range torque (F ₂ =100%)	Thrust (F ₂ =100%)	Changed range thrust (F ₂ =100%)
F ₁ (F _i = 1)	0.15	/	0.53 (100%)	/	37 (100%)	/
F ₂ (F _i =2)	0.2	0.1 (100%)	0.53 (100%)	0.09 (100%)	53 (100%)	27 (100%)
	0.1				53 (143%)	
F ₃ (F _i = 3)	0.225	0.15 (150%)	0.53 (100%)	0.11 (122%)	56 (106%)	32 (120%)
	0.075				56 (150%)	
F ₄ (F _i = 4)	0.24	0.18 (180%)	0.64 (120%)	0.13 (144%)	57 (108%)	38 (140%)
	0.06				57 (155%)	

同図 2, 3(d)は $F_f=4$ の場合である。同図より最大トルクは $0.64N\cdot m$ 、変動幅は $0.18 N\cdot m$ を示している。

図 2, 3において、トルク・スラストの変動があるため、本研究において、図 4 に示したように、トルク・スラストの値について、安定域で最大値をトルク・スラスト値として測定した。変化しているトルク・スラスト値を変動幅とした。

表 3 は、図 2, 3 における実験結果をまとめたものである。同表よりトルクは $F_f=1,2,3$ とほぼ同一の値を示している。 $F_f=4$ の場合も $F_f=1$ に比較して20%増加しているにすぎない。この事は切りくず排出において、増減送りの影響をあまり受けていないことを示している。増減送り比が増加すると切りくずが外壁により拘束されトルクの増加が考えられるが、トルクの増加がないことは、増減送り比が増加しても切りくずの排出がスムーズに行われていることと推察される。表 3 より、トルクの変動幅は設定された変動幅が $F_f=2$ から4の間で80%増加しているが、測定されたトルクは約45%の増加となっており低い値を示している。

スラストについては、 $F_f=1$ の慣用加工の場合、37Nである、この値を100とした場合に $F_f=2$ の増減送りの場合は53Nで約143%と5割近く増加している。 $F_f=3$ 、 $F_f=4$ の場合は56N、57Nと50%、55%と増加している。スラストの増加は顕著に認められる。ここに増減送り加工の特徴を示しているものと考えられる。しかし、増減送り比が2, 3, 4と増加してもトルクの増加は表 3 より0から20%とあまり増加は認められなかった。工学的見地より、増減比を増加させてもトルクに対してはあまり効果は期待できないことを示している。

スラストの変動幅については、 $F_f=2$ で27N、 $F_f=3$ で32N、 $F_f=4$ で38Nと増減比の増加につれて増加していることが認められる。このスラスト変動幅の値はスラストの値を1とすると、 $F_f=2, 3, 4$ で0.51, 0.57, 0.67と大きな比率であることが判明した。このことよりパルス的な衝撃力が増減比の増加につれて増していることが認められる。

4.2 切りくず形状の検討

図 5 は切りくず形状を示したものである。同図(a)は $F_f=1$ の慣用加工の場合である。同図(a)より規則正しい円すい形の切りくずが観察される。なお、切りくずの黒点は形状の変化がわかりやすくするために入れたものである。

同図(b)は $F_f=2$ の増減送りの場合である。同図より円すい形の切りくずが認められるが、一部にやや長く伸びて小さくカールしている切りくずが認められる。

同図(c)は $F_f=3$ の場合である。円すい形の切りくずの部分も認められるが、円すい形の一部が少し伸びて小さくカールして折り畳まれた部分が観察される。

同図(d)は $F_f=4$ の場合である。同図(d)より円すい形の切りくず形状よりカールしながら細かく折り畳まれた切りくず形状が観察される。この切りくずの折り畳み現象は遅い送りの薄い切りくずが、早い送りの厚い切りくずにより押し出されたためと考えられる。この現象は増減送

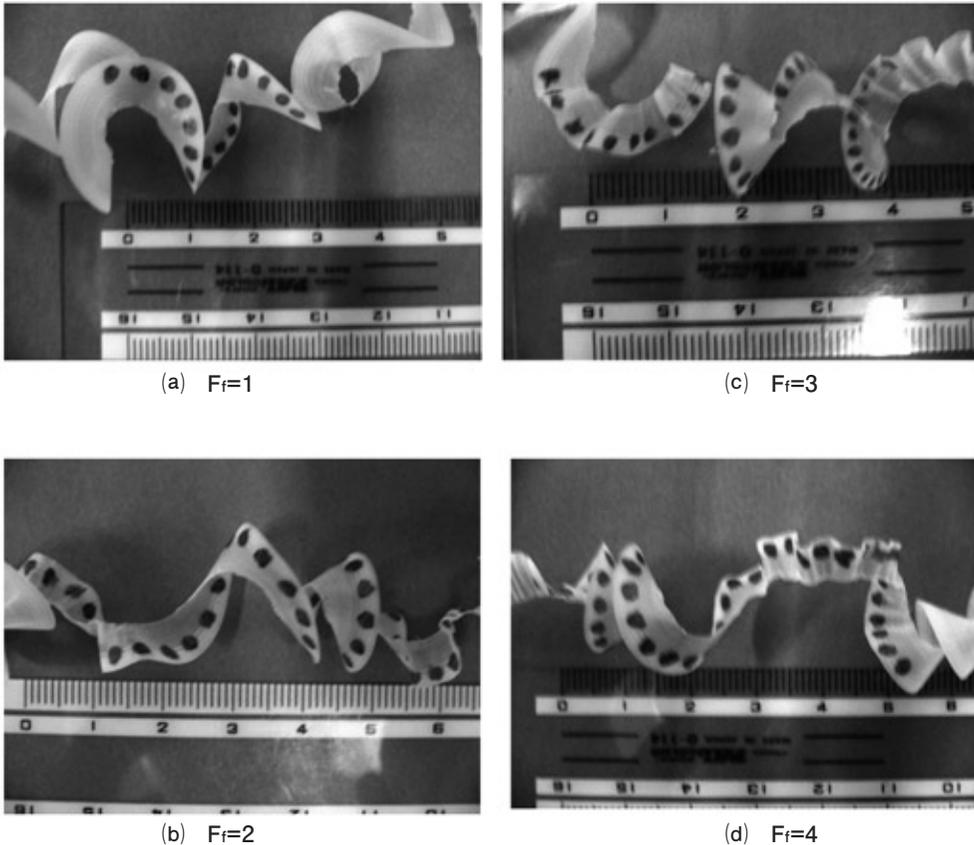


Fig. 5 Comparison of chip shape in case of $F_r=2,3,4$ with that of $F_r=1$

り加工特有の切りくず形状と考えられる。このことより、切りくずの折断、排出に大きな影響を与えるものと推察される。

4.3 切りくず厚さの検討

図6は、図5に示した切りくず厚さを測定したものである。測定方法は切りくず外周より2mmの位置で2mm間隔で測定した。各測定は5回測定した平均値を切りくず厚さとした。

$F_r=1$ の場合は、切りくず厚さは概ね0.123mm程度で一定で推移している。 $F_r=2, 3, 4$ の増減送りの場合は、切りくず厚さの変化は矩形ではなく滑らかな山形をしているのが認められる。増減比の増加につれて、最大厚さが厚くなっている。また、増減比の増加につれて最小厚さが薄くなっている。これは早い送り量と遅い送り量と比例している。これらの測定値を整理したものが表4である。

表4より、 $F_r=1$ では切りくず厚さが0.123mmであるが $F_r=2$ になると最大厚さ0.158mm、最小厚さ0.02mmと早い送り値、遅い送り値と異なっているが、とくに最小厚さは0.021mmとかなり薄くなっているのが認められる。変動幅切りくず厚さの差は最大厚さから最小厚さを引いた厚さは

0.137mmである。早い送り値から遅い送り値を引いた値が0.1 (mm/rev) より大きな差となっている。しかし、 $F_i=3$ の場合、最大厚さ0.187mm、最小厚さ0.018mmで、厚さの差は0.169mmである。早い送り値から遅い送り値の差0.15 (mm/rev) に対して0.169mmであるので概ね対比している。しかし、この場合も最少厚さ0.018mmと薄くなっている。 $F_i=4$ の場合、最大厚さ0.194mmに対して最少厚さは0.011mmとその差は0.183mmである。 $F_i=2, 3, 4$ に見られるように最少厚さが遅い送り値に比べて極めて薄いことが認められた。この現象は実験機の影響も考えられるが、切りくずが薄くなることは切りくずの折断・排出に大きな影響を与えるものと推察される。

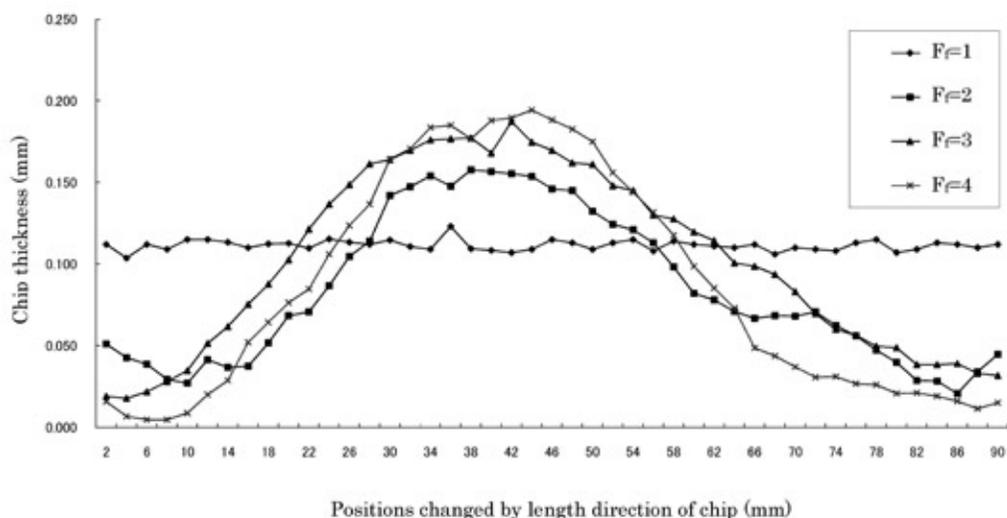


Fig. 6 Variation of chip thickness for F_i

Table 4 Measured results of chip thickness for intermittently decelerated feed drilling

Ratio of accelated feed	Early feed value (mm/rev)	Changed range of intermittently decelerated feed ($F_2=100\%$)	Largest chip thickness (mm)	Changed range of chip thickness (mm) ($F_2=100\%$)
	Slow feed value (mm/rev)		Smallest chip thickness (mm)	
F_1 ($F_i=1$)	0.15		0.123	
F_2 ($F_i=2$)	0.2	0.1 (100%)	0.158	0.137 (100%)
	0.1		0.021	
F_3 ($F_i=3$)	0.225	0.15 (150%)	0.187	0.169 (123%)
	0.075		0.018	
F_4 ($F_i=4$)	0.24	0.18 (180%)	0.194	0.183 (134%)
	0.06		0.011	

4.4 切りくずの破断特性の検討

増減送り加工された切りくずの強度特性を調べるために破断試験を行った。切りくずの厚さの変化により、破断特性が大きく変化するものと推察される。用いられた切りくずは一度折断され排出されたものであることを前提としている。

図7は、 $F_f=1, 2, 3, 4$ での切りくずの破断試験結果を示したものである。試験片はチャッキングが困難であるために、切りくずの両端を樹脂に埋め込んだ。試験結果のバラツキが大きいと予想されたので、5本の試験結果の平均値をとった。試験機については荷重が極めて小さいので極薄板用の引張り試験機を改良して小型引張試験機を製作した。

同図より、 $F_f=1$ の場合1.6Nである。増減送りの $F_f=2$ で1.4N、 $F_f=3$ で1.3Nとあまり差は認めら

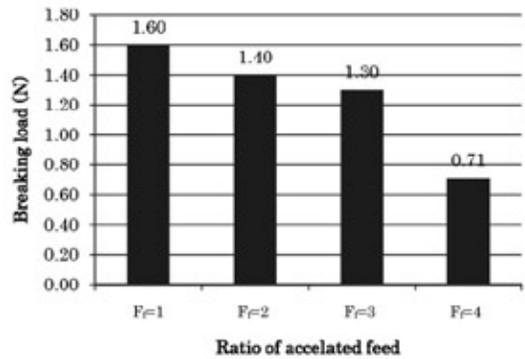


Fig. 7 Comparison of breaking load for F_f

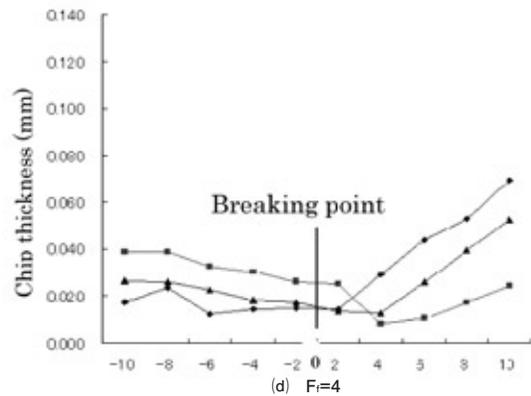
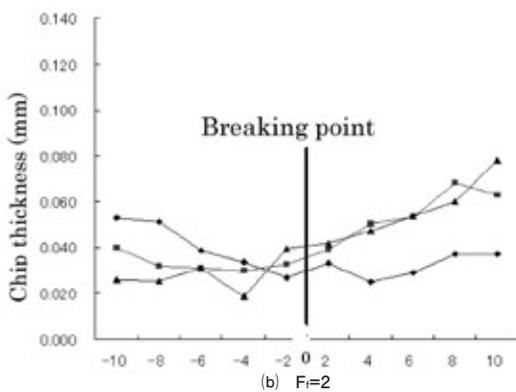
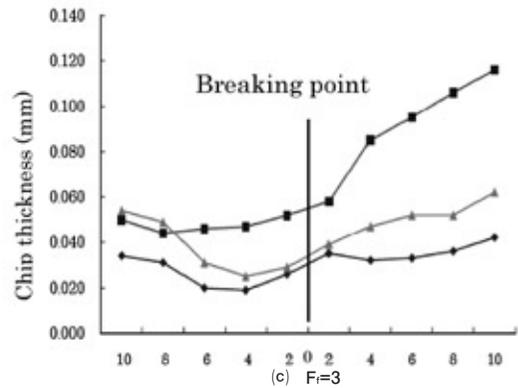
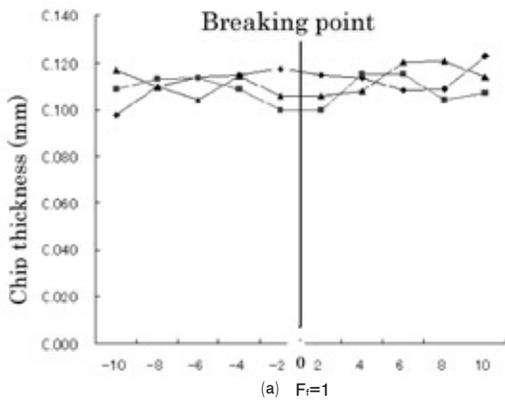


Fig. 8 Variation of chip thickness from breaking points

れなかった。しかし、 $F_f=4$ で0.7Nと $F_f=2$, 3の場合に比較して約50%の値である。概ね切りくずの厚さと対比しているが、慣用送りの場合と $F_f=2$, 3の場合には顕著な差は認められなかった。破断した切りくずをさらに詳細に検討するために、破断部について調べた。

図8(a), (b), (c), (d)は破断点を0として、破断点からの厚さの変化を示したものである。各3本の試験片の値である。 $F_f=1$ の慣用加工の場合、0.100mmから0.118mmの間で破断しており、必ずしも最少厚さ部ではない。 $F_f=2$ の場合、破断点は切りくずの一番薄い部分での破断でないことを示している。厚さがやや厚くなる部分で破断していることが認められる。 $F_f=3$ の場

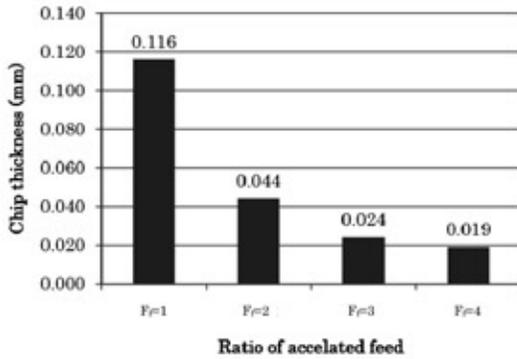


Fig. 9 Comparison of chip thickness in case of $F_f=1$ with that of $F_f=2,3,4$

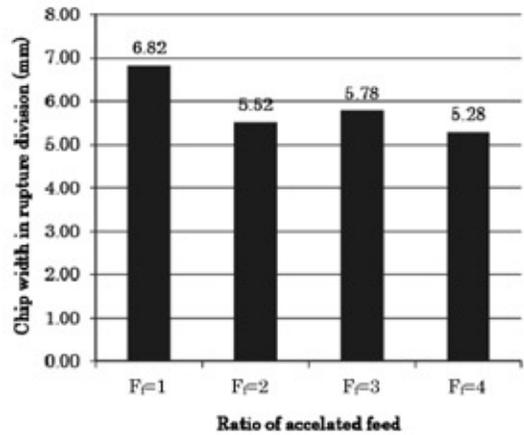


Fig. 10 Relationship between chip width and ratio of accelerated feed for breaking point

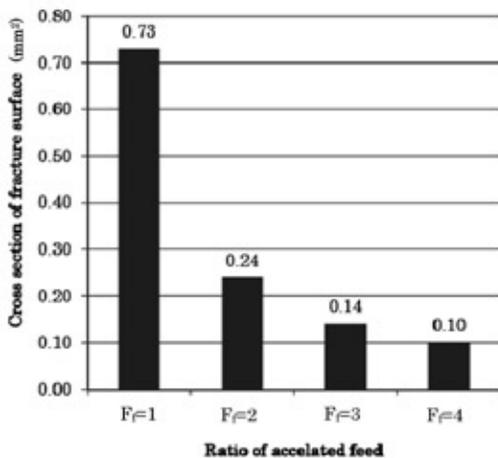


Fig. 11 Cross sectional area of breaking surface of chip

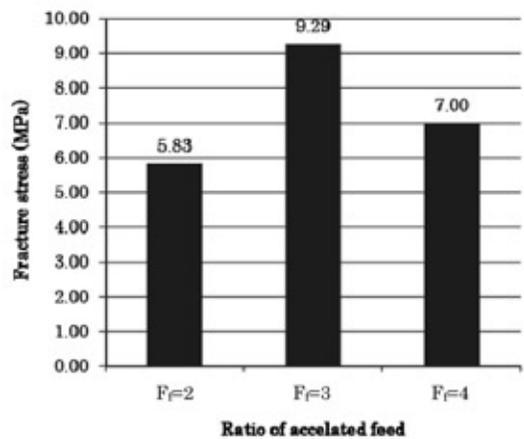


Fig.12 Relationship between breaking stress and ratio of accelerated feed

合も $F_f=2$ と同じ傾向を示しているが、この場合は、破断点は厚さの厚い方向に引張られていることが明瞭に認められる。厚さの薄い一番弱い部分で破断しないことを示している。 $F_f=4$ の場合は、概ね薄い切りくずの部分で破断していることが認められる。この $F_f=4$ においては、図5に見られるように薄い切りくずの部分の長さが $F_f=2, 3$ より長いいため弱い部分から折断したものと考えられる。

図9は、切りくず破断部の厚さを示したものである。同図より、 $F_f=1$ の場合は0.116mmであり減少は認められなかった。 $F_f=2$ では、切りくず破断厚さ0.044mmで最少厚さ0.021mmよりも0.02mm程度厚い部分で破断している。 $F_f=3$ では、0.024mmの厚さで破断しているが、最少厚さ0.018mmよりも0.006mm程度厚い部分で破断している。 $F_f=4$ では0.019mmの部分で破断しているが、最少厚さの0.011mmよりも0.008mm程度厚い部分で破断している。とくに、 $F_f=2$ の場合は $F_f=3, 4$ の場合よりも最小厚さよりもかなり厚い部分で破断していることは増減送り機構において注目すべき現象である。このことは、切りくずが薄い場合はひずみが少なく、折断されにくい切りくずが薄い部分から厚い部分に変化したときにひずみが増加して折断されるので、 $F_f=2$ のこの現象は切りくず折断に有効性があるものと推察される。

図10は切りくずの破断部の幅を示したものである。 $F_f=1$ の場合は6.8mmである。増減送りの場合は $F_f=2, 3, 4$ とあまり変化はなく5.3mmから5.8mmである。

図11は図9と図10の結果をもとに破断部の断面積を示したものである。 $F_f=1$ の場合は 0.73mm^2 である。 $F_f=2$ の場合は、 0.24mm^2 で $F_f=1$ の場合の面積の33%である。 $F_f=3$ の場合は 0.14mm^2 で $F_f=1$ に比較して19%、 $F_f=4$ の場合は 0.1mm^2 で $F_f=1$ に比較して14%と断面積は減少していることが明らかとなった。

この結果をもとに増減送り比と破断応力の関係を示したものが図12である。同図より、増減送り比の低い方が破断応力が低いことが明らかとなった。この現象は、増減送り比が $F_f=2$ が $F_f=3, 4$ に比べて有用性があることを示唆している。

5. 結 言

本研究では、増減送りドリル加工の機構を明らかにするため、ポリカーボネートを用いて増減送り比とトルク・スラストの関係、切りくずの状態、切りくずの破断特性について検討した。その結果は以下の通りである。

- (1) トルクに関しては、慣用送り加工と増減送り加工においてほぼ同じ値である。増減送り加工において、約20%程度のトルク変動幅が認められた。
- (2) スラストに関しては、増減送り加工は慣用送り加工より約50%程度増加している。スラストの変動幅も50%~60%変動している。増減送り加工においてスラストの変化が顕著に現われている。

- (3) 増減送り加工において、切りくず厚さの変化については矩形でなく山形である。また、遅い送り部分において折り畳まれた状態の切りくずが認められた。
- (4) 切りくずの破断試験においては、慣用加工よりも増減送り加工の方が破断力が低かった。破断位置は増減送り比により異なった。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、実験とデータ整理にあたって、平成20年度卒業研究生である南裕輔、中森裕城、森岡明彦氏にご協力をいただきました。心より厚く感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 櫻井恵三, 足立勝重, 花崎伸作, 2017アルミニウム合金の増減送りドリル加工における切りくずの折断機構, 軽金属, Vol.48, (1998), pp.195-198.