

# 案内溝による切りくず制御に関する研究

青木 友弥

# 目次

<b>第1章 緒論</b>	4
1.1 研究背景	4
1.1.1 自動車の燃費改善方策	4
1.1.2 燃費改善のための自動車部品技術とその加工技術に対する要求	9
1.1.3 自動車部品加工技術に対するさらなる要求	12
1.1.4 自動車部品加工における切りくず処理の重要性	12
1.1.5 チップブレーカを中心とした切りくず分断処理	14
1.1.6 切りくず分断処理の有効範囲	18
1.1.7 切りくず案内切削の提案と方策	20
1.1.8 切りくず引張切削を可能にする切りくず案内切削	23
1.2 研究目的	25
1.3 本論文の構成	27
1.4 参考文献	29
<b>第2章 切りくず案内切削の検討</b>	33
2.1 緒言	33
2.1.1 チップブレーカ形状と微細な凹凸構造について	33
2.1.2 案内溝を有する工具（溝付き工具）	37
2.2 案内溝の基本形状の設定	38
2.2.1 目的	38
2.2.2 切りくず案内切削の方策	38
2.2.3 単一溝付き工具	38
2.2.4 単一溝付き工具による加工実験の方法及び条件	40
2.2.5 単一溝による加工実験結果	41
2.2.6 複数溝付き工具	44
2.2.7 複数溝及び誘導路による加工実験の方法及び条件	46
2.2.8 複数溝による加工実験結果	48

2.3	溝付き工具による切りくず案内切削の機構	51
2.3.1	目的	51
2.3.2	対象プロセスの設定	51
2.3.3	傾斜切削プロセスの解析モデル	51
2.3.4	切りくず案内切削プロセスの解析モデル	54
2.3.5	解析方法	58
2.3.6	直線切れ刃を有する溝付き工具による加工実験の方法及び条件	60
2.3.7	流出切りくずの分析	62
2.3.8	測定切削力の分析	65
2.3.9	実験結果と測定結果の比較	69
2.4	溝形状と案内角度の検討	73
2.4.1	目的	73
2.4.2	溝形状の変更	73
2.4.3	溝付き工具による加工実験の方法及び条件	76
2.4.4	溝形状に対する流出切りくずと切削力の比較	79
2.4.5	案内角度の変更と加工実験の方法及び条件	83
2.4.6	案内角度に対する流出切りくずと切削力の比較	86
2.4.7	切りくず流出制御に伴うすくい面上の力角度変化	93
2.4.8	誘導路による切りくず案内切削の検証	95
2.4.9	誘導結果	95
2.4.10	切りくず案内切削の有効案内角度範囲の検討	97
2.5	結言	99
2.6	参考文献	101
<b>第3章</b>	<b>切りくず引張切削の検討</b>	<b>103</b>
3.1	緒言	103
3.2	手動の張力付与による切りくず引張切削の初期検討	103
3.2.1	手動の切りくず引張切削実験の方法及び条件	103
3.2.2	切りくず引張切削の実験結果	104
3.3	切りくず引張切削の機構	106
3.3.1	切りくず引張切削プロセスの解析モデル	106

3.3.2 解析方法 .....	110
3.4 切りくず引張装置を用いた切りくず引張切削の検証 .....	111
3.4.1 切りくず引張装置の構成 .....	111
3.4.2 切りくず引張切削の加工実験の方法及び条件 .....	111
3.4.3 実験結果と解析結果の比較 .....	114
3.5 結言 .....	120
3.6 参考文献 .....	120
<b>第4章 結論</b> .....	<b>121</b>
<b>研究業績</b> .....	<b>123</b>
<b>謝辞</b> .....	<b>124</b>

# 第1章 緒論

本章では、研究背景として、自動車の燃費改善方策のために求められる自動車部品技術及び部品加工技術について記す。また、研究目的として、本研究で対象とする切りくず引張切削(Chip-pulling cutting)を可能にする切りくず案内切削(Chip-guiding cutting)の基本的な方策について説明する。

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 自動車の燃費改善方策

社団法人日本工作機械工業会・技術委員会・研究開発部会内に設定された次世代産業対応形工作機械研究会の調査研究報告書では、自動車、航空機産業だけでなく、エネルギー及び医療機器産業、今後さらにグローバル競争が激化すると予想される産業は、技術革新が加速的に進み、日本の製造業の国際競争力を牽引する次世代の成長産業に位置付けられている[1-1]。例えば、自動車分野においては、地球温暖化の要因となっている CO<sub>2</sub> を削減するため、自動車の CO<sub>2</sub> 排出規制の指標を各国が打ち出している[1-2]。特に欧州は厳しい CO<sub>2</sub> 排出指標値を掲げており、2015 年で 130 g/km、2020 年には 95 g/km まで下げている[1-3]。この推移は、年平均 4%削減するという厳しい燃費規制を意味している。欧州を中心に世界的な燃費規制の強化によって、各自動車メーカーの燃費向上の動きは活発になってきている。今後、同様のペースで推移するとすれば、ハイブリット車 (HEV) や電気自動車 (EV) 等の次世代環境対応車への移行が加速すると考えられる[1-4] [1-5]。ただし、表 1.1 に示すように、日本政府が掲げている次世代自動車の普及目標において、当面の間は HEV を含む内燃機関を有する自動車の販売は 2030 年でも 60%を超え、大きなシェアは維持すると予想されている。そのため、日本全体の約 2 割を占めているとされる自動車からの CO<sub>2</sub> 排出量を削減することは大きな課題であり、自動車の燃費性能を改善させることが必要になっている[1-6] [1-7]。この燃費改善の方策として、エンジン・トランスミッションの高効率化 (パワートレインの高効率化) と車両の軽量化の 2 つが重要になる[1-3]。

まず、パワートレインを高効率化するためには、トランスミッション関連の部品については、小型化・機構の一体化や摩擦損失低減が必要[1-1]になる。これに加えて、超高压燃料噴射システム、可変バルブリフト、可変バルブタイミング、気筒休止、可変圧縮比等の

新たな機構を付与しなければならない[1-1]. これらの取り組みをまとめるキーワードとしては、軽量化、小型化、新機構、可変機構、摩擦低減、伝達効率向上が挙げられる[1-8]. 一方で、機能向上だけでなく、部品製造コストの低減も求められている. 図 1.1 及び表 1.2 に示す現状の自動車部品構成の出荷額から、パワートレイン関連の部品として対応する駆動・伝導及び操縦装置部品とエンジン部品は、出荷額の占める割合が大きな部品であることが分かる[1-7].

次に、車両の軽量化による燃費向上の効果を、図 1.2 のガソリン車における車両重量と燃費の関係から見積もると、1.5 km/L の燃費向上には約 100 kg の軽量化が必要になることが分かる[1-3] [1-9]. 一方で、図 1.3 に示す車両全体に占める自動車部品の重量比 [1-10]から、切削加工工程が比較的多く含まれるパワートレイン関連の部品は車両重量に対して 25%程度であることが分かる. そのため、燃費向上を考える上では、車両重量の 40%程度を占める車体部品だけでなく、パワートレイン関連部品の軽量化も求められる.

Table 1.1 The Japanese governmental goal of automobile selling [1-4]

	2020年	2030年
Conventional automobiles	50-80%	30-50%
Next-generation automobiles	20-50%	50-70%
Hybrid	20-30%	30-40%
Electrically-powered Plug-in hybrid	15-20%	20-30%
Fuel cell	~1%	~3%
Clean diesel	~5%	1-5%

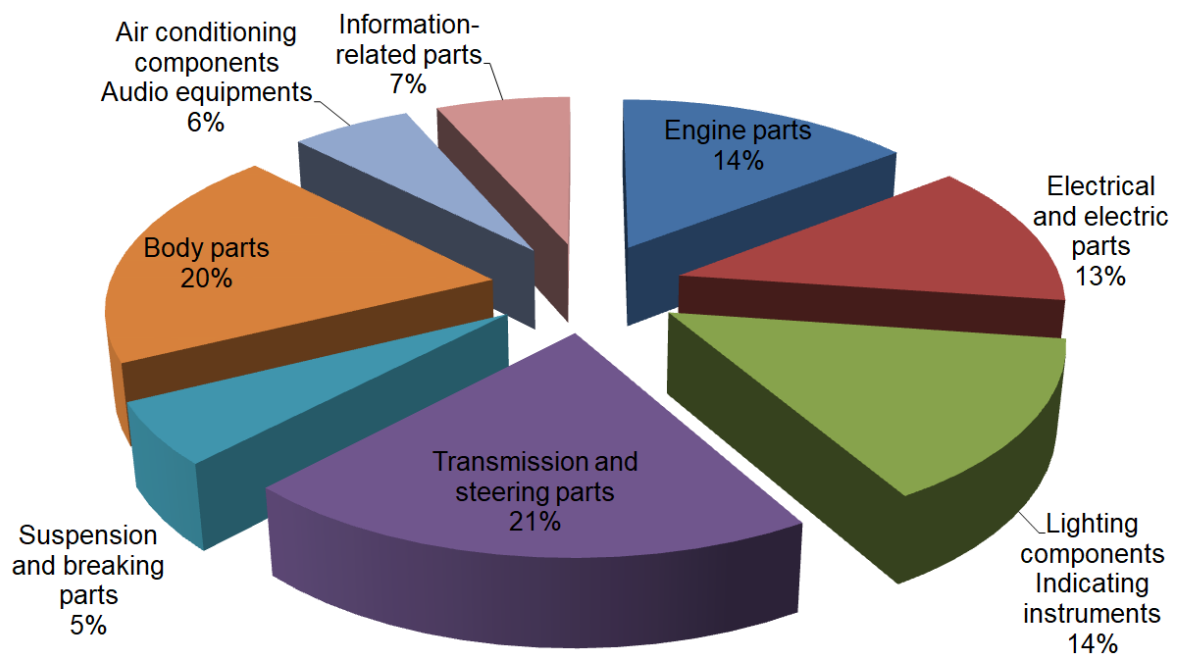


Fig. 1.1 Shipment value ratio of auto parts in Japan [1-7]

Table 1.2 Shipment values of staple auto parts [1-7]

Part name	Shipment value Unit:One million JPY	
	Fiscal 2013	Fiscal 2014
Engine parts	2,805,842	2,869,511
Electrical and electric parts	2,487,811	2,521,121
Lighting components Indicating instruments	2,778,911	2,852,214
Transmission and steering parts	4,089,434	4,083,183
Suspension and breaking parts	1,145,397	1,080,665
Body parts	3,733,751	3,915,006
Air conditioning components Audio equipments	1,204,154	1,173,261
Information-related parts	653,849	1,305,676
<b>Total shipments</b>	<b>18,899,149</b>	<b>19,800,637</b>

Number of companies targeted\_313(Fiscal 2013) / 339(Fiscal 2014)

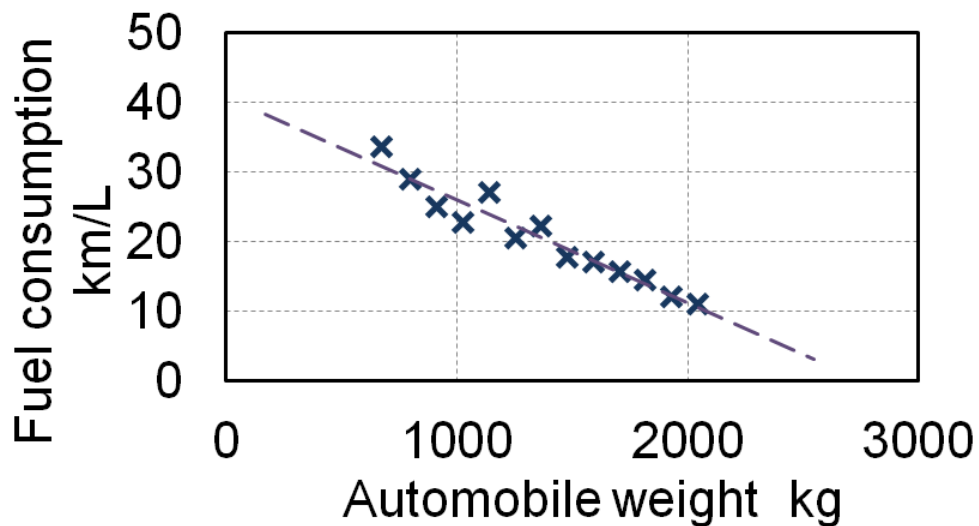


Fig. 1.2 Relationship between JC08 mode fuel consumption and automobile weight of gasoline-fueled automobile [1-9]



<b>Part name</b>		<b>Weight ratio</b>
<b>Body parts related</b>	<b>Flame components</b>	<b>20%</b>
	<b>Outer panels</b>	<b>6%</b>
	<b>Exterior parts</b>	<b>7%</b>
	<b>Interior parts</b>	<b>11%</b>
<b>Base carrier parts related</b>	<b>Suspension parts</b>	<b>12%</b>
	<b>Wheels and tyres</b>	<b>7%</b>
	<b>Steering parts</b>	<b>3%</b>
<b>Powertrain parts related</b>	<b>Intake and exhaust parts</b>	<b>7%</b>
	<b>Fuel equipments</b>	<b>18%</b>
<b>Others</b>		<b>9%</b>

Fig. 1.3 Weight ratio of auto parts to automobile [1-10]

### 1.1.2 燃費改善のための自動車部品技術とその加工技術に対する要求

前項で示した背景から、内燃機関を主体としたパワートレインの究極の効率を目指して、(1)軽量化・小型化、(2)新機構・可変機構、(3)摩擦低減・伝達効率向上の3つに着目した図1.4に示すような部品・システムの開発が進められている[1-1][1-8][1-10]。これらのニーズに対応する3つの加工技術について以下に記述する。

1つ目は、軽量化・小型化対応加工技術である。新素材への代替えに対応する技術が主であるが、加工物の形状変更への対応も求められる。新素材への代替えは、図1.5に示すエンジン材料の展望のように、マグネシウム合金やチタン合金などの適用が進んでいる[1-11][1-12][1-13]。また、一部の高級車やスポーツカーの車体には既にCFRPが実用化されている[1-11][1-14]。このような新素材は、一般に、難削材に分類され、切削抵抗は大きく、切削温度は高いため、工具寿命は短くなる[1-15][1-16]。そのため、加工コストの点で問題となることが多い。一方で、加工物の形状変更については、例えば、中空カムシャフトや組立カムの展開などはさらに進むと考えられる[1-17]。加工物の中空化・薄肉化が進むと、加工物自体の剛性低下に繋がり、加工中のたわみやびびり振動が生じ易くなると考えられる。

2つ目は、パワートレ関連部品における新機構・可変機構対応加工技術である。図1.6に示す新機構・可変機構による究極の効率を目指し、運転状態に応じた最適効率システム、最適燃焼システム、最適伝達効率システムの追及が行われている。例えば、内燃機関/変速機システムにおいて、従来機構にリンク機構、センサやアクチュエータなどを加えた可変動弁機構、可変気筒機構や可変圧縮比機構などは、高精度小型部品を集約した部品・システムとなる。このとき、システムがより複雑になることで、部品形状は複雑化し、高いレベルの加工精度も要求されるようになる。

3つ目は、摩擦低減・伝達効率向上対応加工技術である。内燃エンジンやミッション系部品における摩擦低減のために表面粗さの低減が、伝達効率向上のために表面形状の最適化が求められる。例えば、MoS<sub>2</sub>ピストンで表面形状とコーティングによる摩擦低減を実現した例[1-18]や、トロイダルCVTディスクの動力伝達面に微細テクスチャを施すことで、トラクション係数を向上させた例[1-19]がある。さらに、最近ではDLC(Diamond Like Carbon)コーティングの自動車部品への適用[1-20]のように、表面材質の役割も大きくなっており、表面材質と表面微細形状の最適化は重要になってくると考えられる。

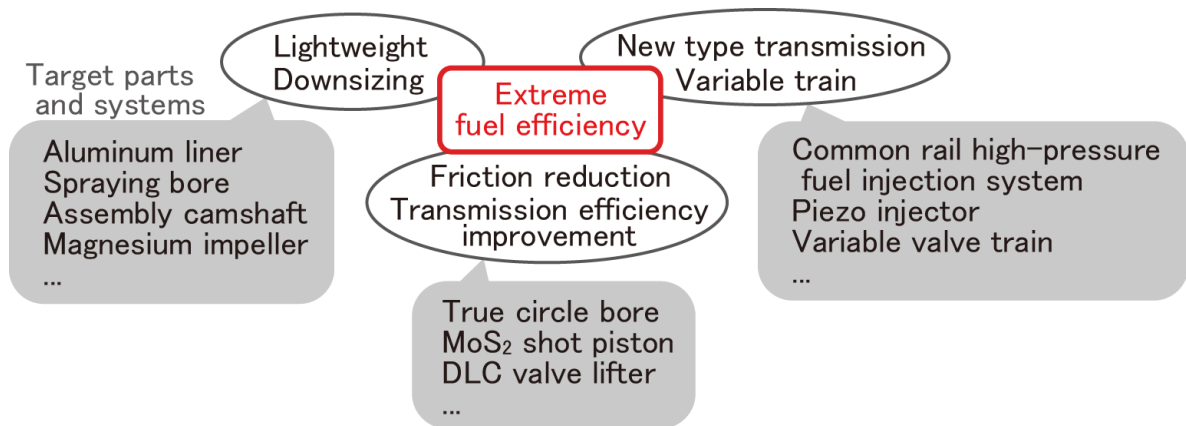


Fig. 1.4 Parts and system technology for highly efficient powertrains [1-8]

Engine component parts	Current		Future
Head cover	Al alloy	>>	Plastic
Cylinder head	Al alloy	>>	Mg alloy
Lifter	Steel	>>	Al alloy, Plastic
Valve sheet	Fe powder metal	>>	Al powder metal
Cylinder liner	Cast iron	>>	Al alloy
Cylinder block	Al alloy	>>	Mg alloy
Oil pan	Steel	>>	Mg alloy
Crank shaft	Alloy steel	>>	Ductile cast iron
Connecting rod	Alloy steel	>>	Ti alloy, Al alloy
Piston	Al alloy	>>	Mg alloy
Valve sheet	Heat resistance alloy	>>	Ti alloy
Cam shaft	Chilled cast iron	>>	Fe powder metal

Fig. 1.5 Future prospect of engine materials [1-8]

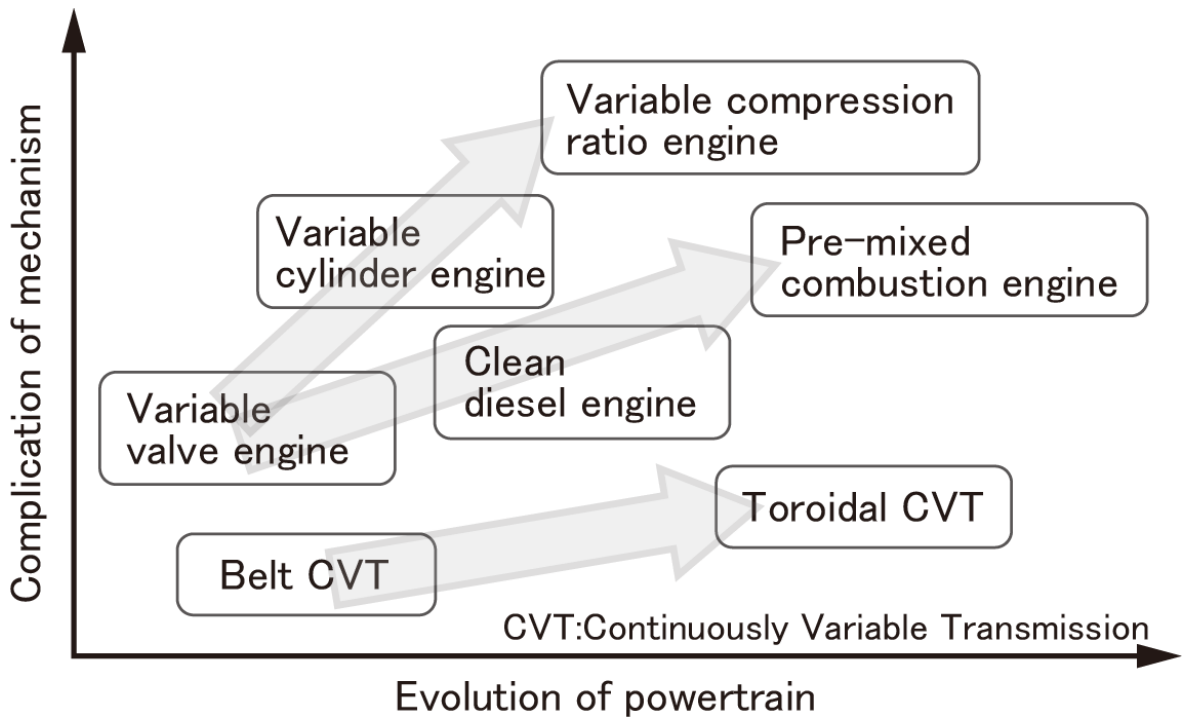


Fig. 1.6 New and variable mechanical technology of powertrains [1-8]

### 1.1.3 自動車部品加工技術に対するさらなる要求

近年の急速に進む自動車分野を取り巻くグローバルな経営環境に対応していくためには、製造リードタイム短縮と加工コスト低減が求められることになる。そのため、前項で示した(1)軽量化・小型化、(2)新機構・可変機構、(3)摩擦低減・伝達効率向上の要求に対応した加工技術を実現するだけでなく、生産性向上も達成しなければならない。したがって、このような背景から、自動車部品の加工技術には(4)高速・高能率化、(5)製造工場・加工設備の自動化・無人化も求められる[1-21] [1-22] [1-23] [1-24]。

### 1.1.4 自動車部品加工における切りくず処理の重要性

燃費改善のための自動車部品技術に関する(1)軽量化・小型化、(2)新機構・可変機構、(3)摩擦低減・伝達効率向上の観点から、部品の中空化・薄肉化によりびびり振動が、部品の一体化・形状の複雑化から切りくず処理が主な切削課題として挙げられている[1-1]。また、生産性向上に関する(4)高速・高能率化、(5)製造工場・加工設備の自動化・無人化の観点から、短時間に大量の切りくずが複雑化した部品に絡み付き易くなるため、長時間の連続自動・無人加工を実現するために切りくずの確実な処理が必須となる[1-25] [1-26]。

特に、ニアネットシェイプ／ネットシェイプの進んでいる自動車部品の製造工程では、成形されたアウトプットシャフトや等速ジョイント等のトランスミッションやサスペンション部品の内／外形の仕上げ加工を行うことが多い[1-27] [1-28] [1-29]。図 1.7 は、トランスミッション部品の製造工程で実際に発生した切りくず絡み付きの事例（アイシン・エイ・ダブリュ株式会社提供）である。これは、軟鋼板をカップ状に塑性変形させた後にその内面の仕上げ加工時に流出した切りくずがその部品のシャフト部に絡み付いたときの写真である。図のような状態で加工を継続すると、仕上げ面を傷つけ、製品不良になるため、加工機を停止させ、作業者が切りくずを取り除いている。このような一時的な加工機の停止を製造現場では「チョコ停」と呼ぶことがある。この「チョコ停」に関連して、国内外に工場を持つ数十社の企業を対象とした自動化・無人化に関する調査が切削油技術研究会によって行われた[1-30]。その結果において、「チョコ停」の原因として切りくずの絡み付きや噛み込みが最も多いことが指摘されており、切りくず処理の問題は(4)高速・高能率化、(5)製造工場・加工設備の自動化・無人化の推進の妨げになっていると考えられる[1-31] [1-32] [1-33]。

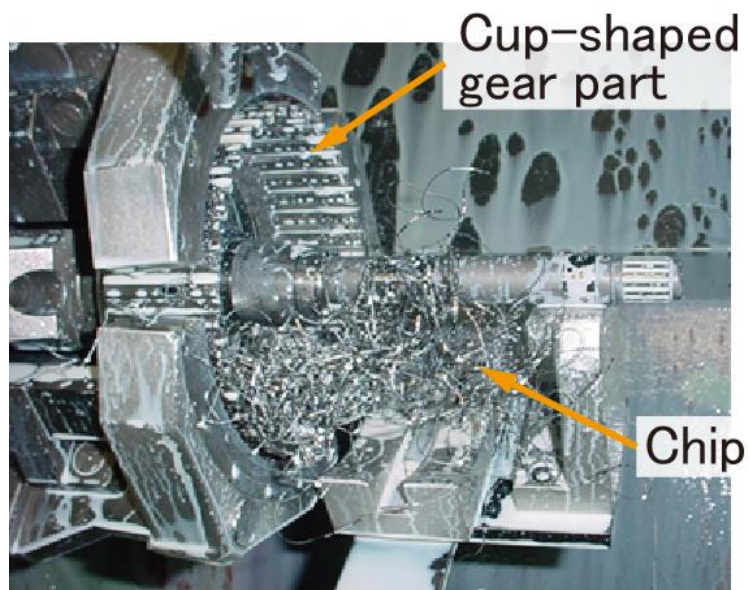


Fig. 1.7 Chip jam in finishing process of cup-shaped gear part for automobile transmission

### 1.1.5 チップブレーカを中心とした切りくず分断処理

切りくずを適切に処理するために、現在も広く利用されているチップブレーカ（工具先端の突起部等）は 60 年以上前に開発された。図 1.8 に示すように、1900 年初頭に高速度鋼（ハイス）工具が登場し、1927 年にドイツ クルップ社から「WIDIA」という商品名称で切削用超硬工具として販売されるようになった[1-34]。その後、1950 年代後半からは、スローアウェイ（刃先交換）チップが登場し始め、それと同時期にチップブレーカを付与した切削工具チップが主流となり、効率良く切りくずを処理できるようになった[1-35] [1-36]。このチップブレーカによって、図 1.9 に示すように切りくずを強制的にカールさせ、工具や被削材に再び接触する際に切りくずの強度以上の変形を与えることによって短く分断することができる[1-37] [1-38] [1-39]。一般には、細かく分断された切りくずはエアブローや切削油剤、あるいは重力によって加工点付近から排除された後、必要に応じてコンベヤー等で運ばれて廃棄される。

このチップブレーカの形状はこれまでに改良が重ねられてきた[1-35] [1-40]。中山は切りくずの曲げ試験により、切りくずが折れるひずみ（以降、破断ひずみ）を明らかにすることで、強制すべきカール径の指針が容易に獲得できることを論じている[1-41]。また、Jawahir らは、切りくず流出の観察結果に基づき、切りくず破断サイクル(Chip breaking cycle)を明らかにし[1-40]、Shinozuka らは有限要素法（FEM 解析）を用いて切りくずが分断する条件を予測し、加工実験と一致することを確認している[1-42]。これらの研究は、主に上向きカール（工具すくい面上方へのカール）(Up-curl)を対象としていた。工具のノーズ半径が関与するような加工では上向きカールだけでなく、図 1.10 に示す材料の自由表面側(Uncut surface side)への横広がり(Side flow)による横向きカール（工具すくい面水平面内におけるカール）(Side-curl)も生じる[1-43] [1-44]。そのため、2つのカールが合わさることで、切りくずの形状は複雑になるが、中山はその幾何パラメータに関する基本的な考え方をまとめている[1-45]。Kharkevich らは、切りくずの接触領域（Tool-chip contact region）を考慮することで、中山の提案した切りくずの幾何パラメータを拡張した[1-46] [1-47]。これらの成果によって、3次元切りくずの幾何パラメータに関する理解は進んだが、破断ひずみの見極めは難しかったため、Choi らは複数の加工条件で実施した切りくず分断の実験結果を利用したチップブレーカ形状の決定手法を提案している[1-48]。

チップブレーカによる処理方法は現在でも広く活用されているが、それ以外の分断処理方法も提案されている。Palanisamy らは、工具先端に 9MPa の高圧で切削油剤を供給することでチタン合金の切りくず分断に成功している[1-49]。これに対して、帯川らはそれ以上の

20 MPa の高圧で加工液を供給することで Ni 基耐熱合金等の切りくず分断に成功している [1-50]. Lin らは被削材の一部をレーザー焼き入れすることで切りくず分断性を向上させている [1-51]. また, 窪田らは穴あけ加工を対象として, 三宅, 笹原らは旋削加工を対象として, 工具を低周波振動させることで被削材の切取りを幾何的に変動させ, 切りくずを分断している [1-52] [1-53].



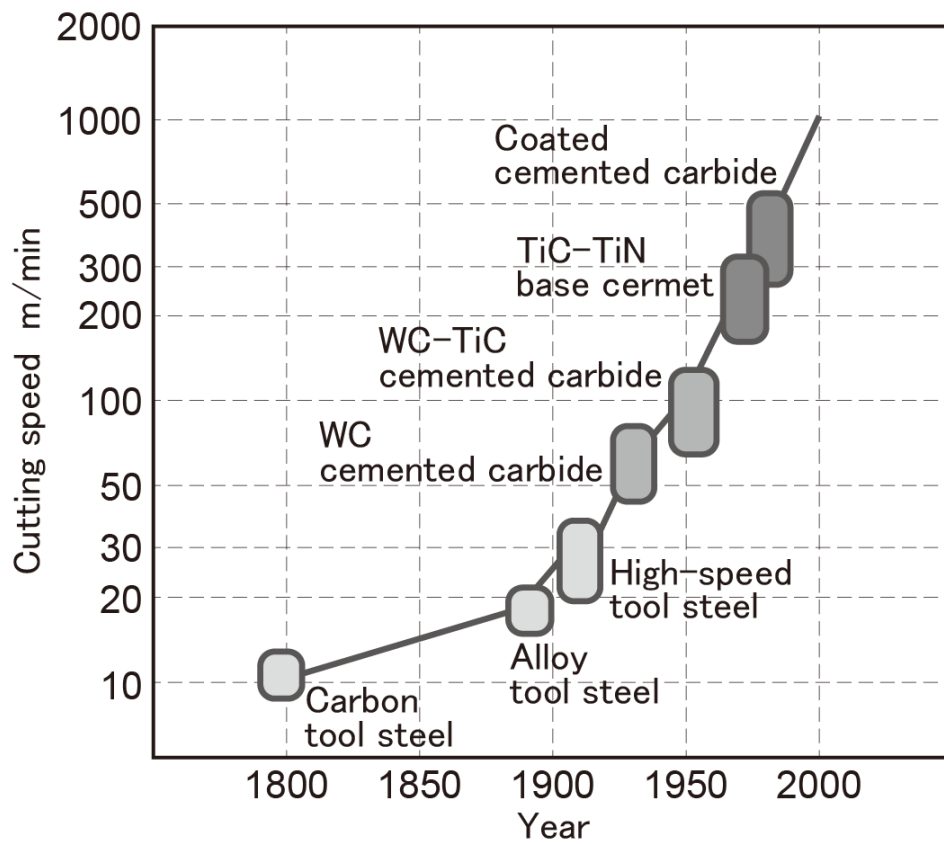


Fig. 1.8 Transition of tool materials [1-34]

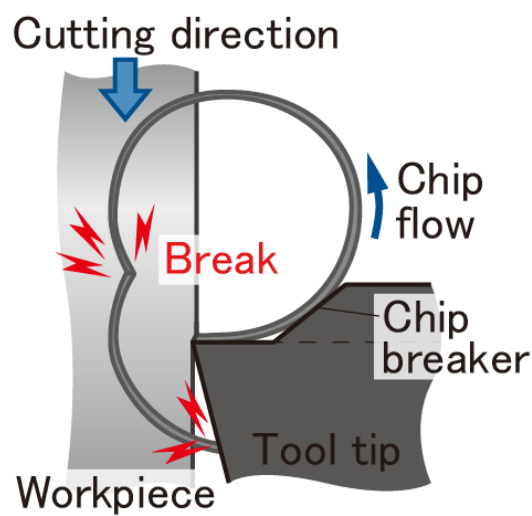


Fig. 1.9 Chip flow on cutting with chip breaker (Obstruction type)

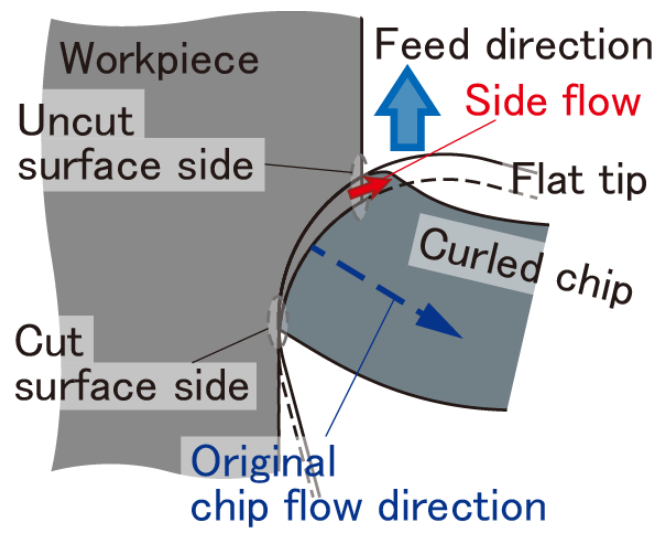


Fig. 1.10 Side-curl of chip

### 1.1.6 切りくず分断処理の有効範囲

広く活用されているチップブレーカを例に，切りくず分断可能な加工条件の範囲を記す．チップブレーカにより切りくずを強制的にカールさせ，破断ひずみに達するまで変形させると切りくずは分断する．しかし，プレス用低炭素鋼材や耐熱合金のような高い延性を持つ材料の切削加工においては，破断ひずみが大きくなり，分断処理が困難になることが多い[1-54] [1-55] [1-56]．ここで，切削工具カタログ[1-39]に記載されているチップブレーカの有効範囲の一例（炭素鋼の旋削加工の場合）を図 1.11 に示す．切込みが 0.8 mm 以下，または送り 0.18 mm/rev 以下では，図 1.12 に示す A, B 形のように，長く繋がった切りくずが流出してしまい，切りくず分断が難しい条件範囲が存在する．また，仕上げ条件では切りくずが薄くなり，切りくずを強制的にカールさせても破断ひずみに達することが難しい．このことは，中山らが，切りくずの表面ひずみの観点で指摘している[1-41]．曲げ試験において，曲げの中立軸が切りくず厚さの中央にあると仮定すると，初期カール半径  $R_0$ ，測定時のカール半径  $R_m$ ，切りくず厚さ  $t$  としたとき，切りくずの表面ひずみ  $\varepsilon_s$  は式(1)のように表される[1-41]．切りくずを分断するためには，表面ひずみ  $\varepsilon_s$  が破断ひずみ  $\varepsilon_c$  を超える必要があることを論じている．一方で，中山は切りくずの曲げ試験で取得した応力-ひずみ曲線から，炭素鋼を異なる加工条件で取得した切りくずについて，その破断応力は  $\pm 5-10\%$  でおぼらつくことを確認している[1-57]．さらに，切りくずの自由表面側（工具すくい面とは反対側）の微小凹凸の影響によるばらつきを除けば，加工条件に対する破断ひずみの変化は小さいことも確認している[1-57]．これらの結果から，仕上げ条件における切りくずの分断処理は，切りくず厚さの減少に伴う表面ひずみの減少が主な原因であると考えられる．

$$\varepsilon_s = \frac{t}{2} \left( \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_m} \right) \quad (1)$$

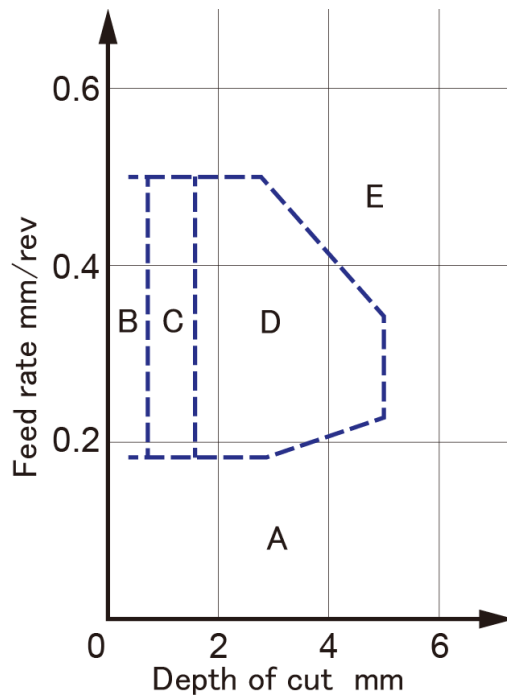

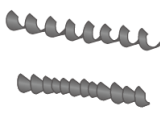





Fig. 1.11 Effective range of chip breaker in turning of carbon steel at cutting speed 150 m/min [1-39]

	A	B	C	D	E
Chip type					
Chip length	50 mm or more			50 mm or less	
Number of curl	Irregular curl	5 or more	Roughly 1-5	Roughly 1	0.5-1 or less

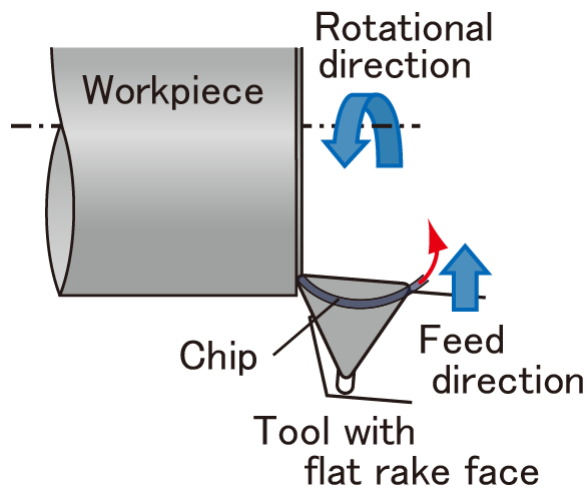
} Successful chip disposal

Fig. 1.12 Effective range of chip breaker in turning of carbon steel [1-39]

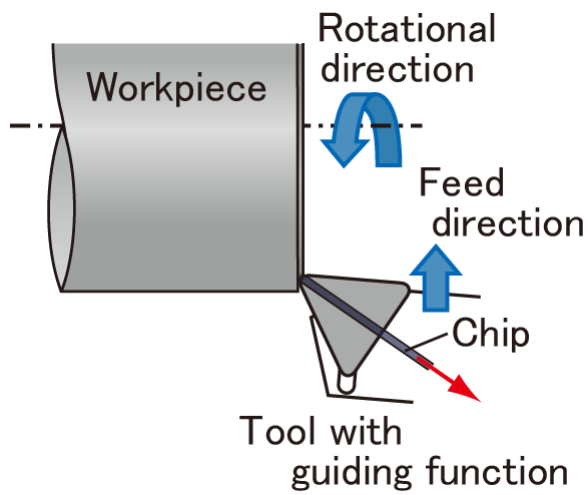
### 1.1.7 切りくず案内切削の提案と方策

前項で示したように、切りくず分断が難しい加工条件に対する切りくず処理の問題を解決するため、本研究では切りくずの分断処理という従来の考え方でなく、連続処理に基づいた加工方法を提案する。具体的には、図 1.13 に示すように、切りくずカールを逆に抑制して真直ぐな切りくずが流出するように制御して所望の位置へ導くことを目指す。切りくずを導いたその位置に、連続処理装置を設置することで適切に切りくずを処理・回収する。切りくず連続処理の考えに基づいたこの加工方法を、本研究では切りくず案内切削 (Chip-guiding cutting) と呼ぶことにする。

この切りくず案内切削の具体的な方法を記す。図 1.14 に示すように、工具すくい面に案内溝 (Guide groove) を施した工具 (以降、溝付き工具と呼ぶ) を用いてその溝方向に沿って横向きカールの抑制された切りくずを流出させる。刃先から離れた所望の位置まで確実に導くためには、その溝付き工具で生成された切りくずを把捉し、通過させるための誘導路 (Guide tunnel) も必要となる。このとき、誘導路には切りくず形状を直線状に矯正させる役割もある。刃先近傍で生成される切りくずは高温で軟化しているため、誘導路を通過させることで、ある程度の上向きカールであれば矯正することが可能であると考えられる。刃先で生成された切りくずを誘導路の出口まで導くことを案内切削の目指す目標とする。



(a) Side-curl of chip



(b) Suppressed side-curl of chip

Fig. 1.13 Chip flow on ordinary and proposed tools

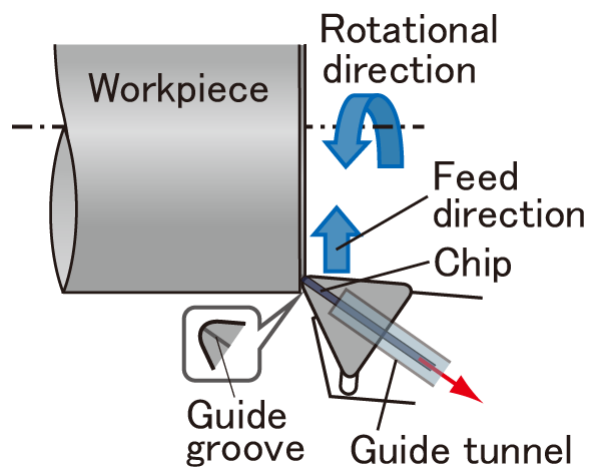


Fig. 1.14 Chip-guiding function with guide groove and guide tunnel

### 1.1.8 切りくず引張切削を可能にする切りくず案内切削

この切りくず案内切削により、新たな加工法の実現の活路を見出すことができる。所望の位置まで真直ぐな切りくずを導くことができれば、単に廃棄処理を行うだけではなく、切りくずを引っ張りながら切削することが容易となる。この引張切削(Chip-pulling cutting)は、低い切削速度に限れば、従来から被削性改善のために現場の作業者が行うことのある手法であることが知られている。中山が行った図 1.15 の切りくず引張実験によって切削抵抗、切削エネルギーを大幅に減少させ得ることが確認されている[1-58]。この実験では、パイプ状被削材端面の全幅切削を行った際に流出する切りくずを誘導輪(Guide pulley)で支え、把持具(Chip holding)で鋼線(Steel wire)と繋ぎ、加工を行った。鋼線の一端を、段付きローラ(Stepped roller)と一体構造の巻き取りローラ(Chip take-up roller)に固定した。このとき、段付きローラには別の鋼線を巻き付けておき、その反対の端は天井の滑車に掛けた後、重り(Weight)と繋いだ。これにより、ブレーキペダル(Brake pedal)を踏むことで巻き取りローラが回転するようになり、重りの降下によって段付きローラに巻き付けておいた鋼線が解けながら、切りくずに張力を与えた。また、中山は切りくず引張切削の機構についても論じ、引張力が摩擦力を相殺していることも指摘しており[1-58]、切りくず引張切削の効果を明らかにしている。

切りくず引張切削により、切削抵抗の減少、加工精度向上等を同時に達成することが期待できるが、その効果の大きさに反して、引張切削の研究は継続的に行われなかった。その理由として切りくず制御方法の欠如が挙げられる。切りくず引張切削の実用化に向けた最初の段階で、刃先で生成された切りくずを所望の位置まで確実に導く切りくず案内切削を実現する必要がある。しかし、切りくずの連続処理の観点で今まで研究は行われてこなかったため、加工開始から終了まで安定した張力の付与方法についても検討されなかったと考えられる。



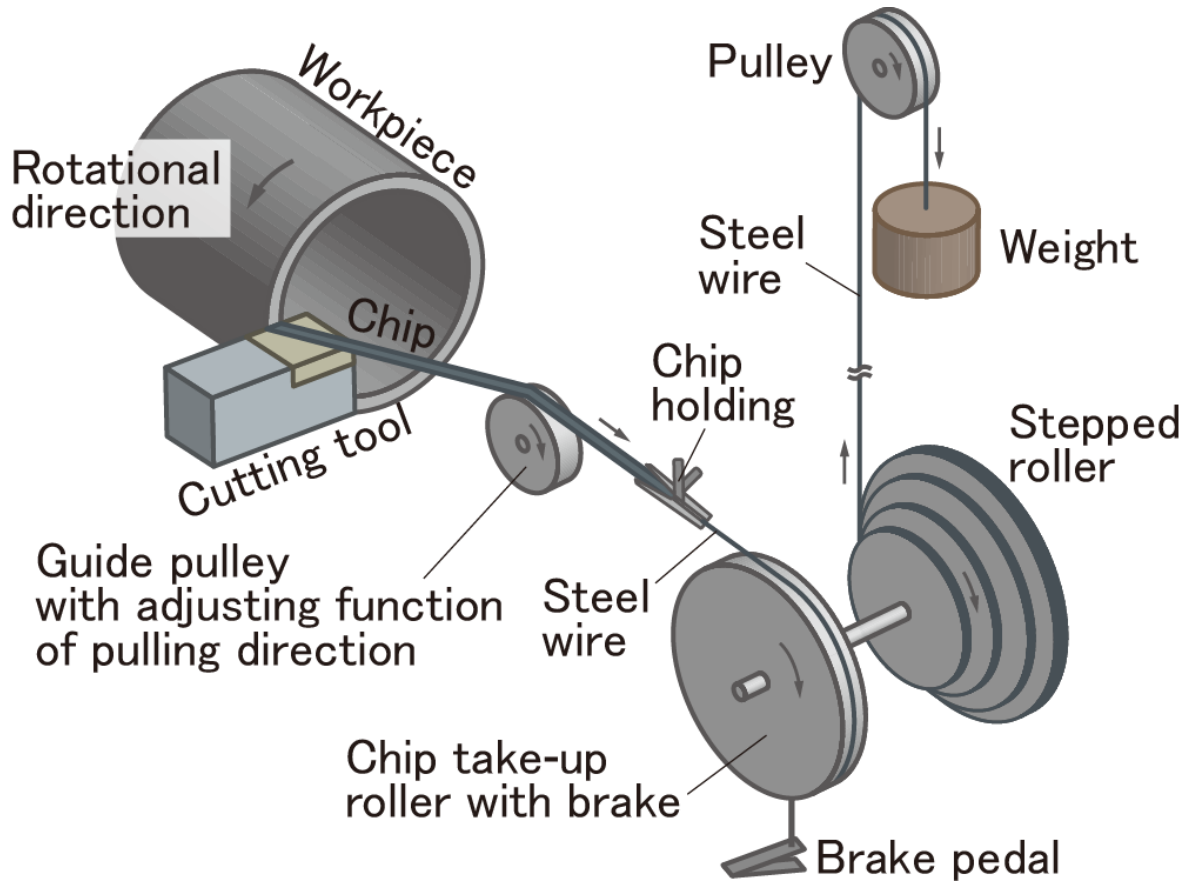


Fig. 1.15 Previous setup for chip-pulling tests [1-58]

## 1.2 研究目的

切りくず引張切削の実用化には、図 1.16 に示すように、切りくず把捉及び張力を付与するためのローラ等を備えた装置（以降、切りくず引張装置(Chip-pulling device)と呼ぶ）が果たす切りくず引張機能(Chip-pulling function)だけでなく、溝付き工具と誘導路が果たす切りくず案内機能(Chip-guiding function)も必要となる。この切りくず案内機能において重要なのは、溝付き工具である。切りくずは刃先で生成されるため、工具すくい面に施す案内溝形状が切りくずの流出方向及び形状に及ぼす影響は大きい。そのため、流出方向及び形状の制御を可能にする溝付き工具の案内溝形状とその溝方向に着目する。

本研究では、自動車部品の製造工程で問題となる軟鋼及び炭素鋼を対象として、切りくず案内切削が実現可能な案内溝形状とその溝方向について調査し、切りくず案内機能を備えた切りくず引張切削による切削力及び切削エネルギーの低減効果について検証することを目的とする。

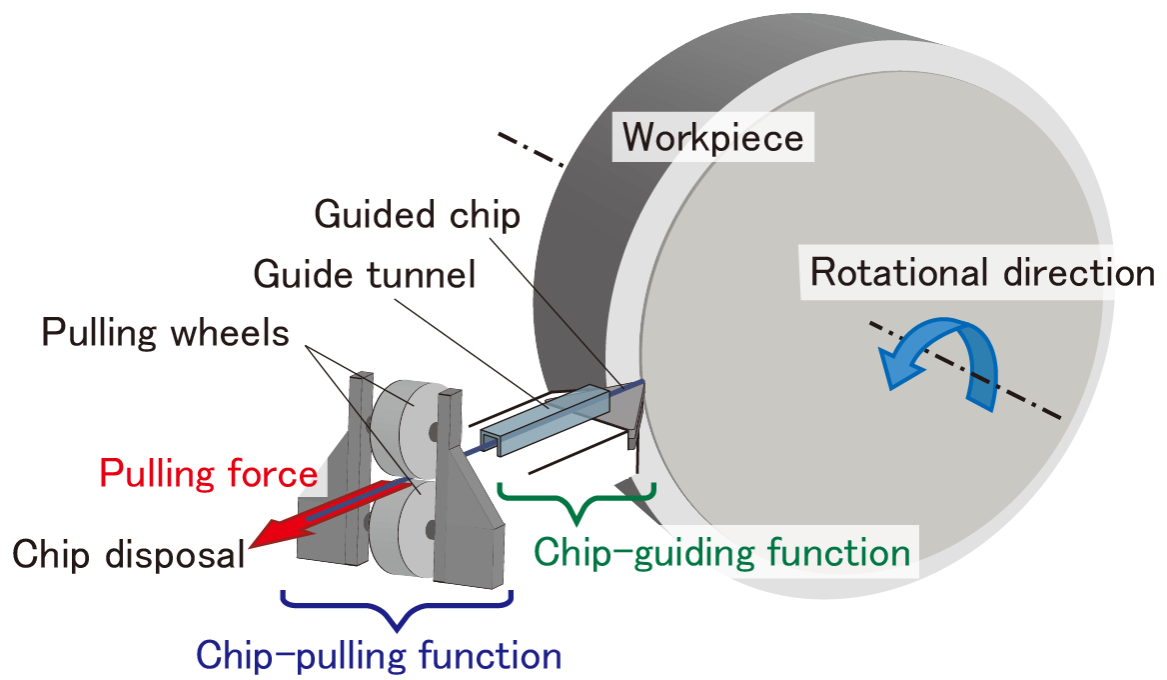


Fig. 1.16 Proposed chip-pulling cutting with chip-guiding function

### 1.3 本論文の構成

本論文は、図 1.17 に示すように第 1 章から第 4 章で構成される。

第 1 章では、本論文の緒論として、研究背景及び目的を記す。自動車の燃費改善方策のために求められる自動車部品技術について述べ、切削課題として特に高速・高能率化、製造工場・加工設備の自動化・無人化の妨げになっている切りくず処理を本研究のテーマに取り上げた経緯を説明する。この切りくず処理の問題を解決するための基本的な考えとして、切りくずの連続処理を示した。この考えをさらに拡張し、切りくず処理を解決するだけでなく、切削力及び切削エネルギーも低減し得る切りくず引張切削(Chip-pulling cutting)を実現するための切りくず案内切削(Chip-guiding cutting)を提案し、その基本的な方策について説明する。

第 2 章では、切りくず案内切削を可能にする溝付き工具の案内溝形状とその溝方向について検討する。これらが切りくず流出方向及び形状に及ぼす影響を、溝付き工具と誘導路を用いた加工実験により調査する。また、考案した解析モデルによる数値解析により切削力に及ぼす影響も調査し、切りくず案内切削の基本的な知見をまとめる。

第 3 章では、第 2 章で判明した切りくず案内切削が可能な加工条件を対象として、切りくず案内機能(Chip-guiding function)を備えた切りくず引張切削による切削力及び切削エネルギーの低減効果について検討する。張力による摩擦力の相殺を考慮した解析モデルによる数値解析と、切りくず引張装置(Chip-pulling device)を用いた加工実験によりその低減効果を検証する。

第 4 章では、本論文の結論として、第 2 章で得られた切りくず案内切削の基本的な知見と、第 3 章で得られた切りくず引張切削の効果をまとめる。また、本研究成果から明らかになった切りくず引張切削の課題と発展性についても述べる。

## 第1章 緒論

### ◇研究背景

自動車の燃費改善方策  
自動車部品加工技術に対する要求  
切りくず処理の重要性

### ◇研究目的

切りくず案内機能を備えた切りくず引張切削による  
切削力及び切削エネルギー低減の検証



## 第2章 切りくず案内切削の検討

### ◇溝付き工具の「案内溝形状」, 「案内角度(溝方向)」を対象

切りくず流出方向, 切りくず形状, 切削力に着目し,  
切りくず案内切削可能な加工条件を調査



## 第3章 切りくず引張切削の検討

### ◇切りくず案内切削可能な加工条件を対象

加工に要する切削力, 切削エネルギーの低減効果を検証



## 第4章 結論

◇まとめ    ◇課題と発展性

Fig. 1.17 Composition of this paper

#### 1.4 参考文献

- [1-1] 社団法人 日本工作機械工業会：平成 23 年度 次世代成長産業の競争力確保に必要な工作機械に関する調査研究報告書
- [1-2] 西野浩介：三井物産戦略研究所 戦略研レポート 2017 年 3 月 15 日，世界の燃費規制の進展と自動車産業の対応
- [1-3] 工藤茂：環境対応を実現する自動車部品，日立化成テクニカルレポート No.58 (2015・12 月)，pp.6-13.
- [1-4] 経済産業省製造産業局自動車課：自動車産業戦略 2014
- [1-5] 日本政策金融公庫総合研究所：電気自動車をはじめとする自動車産業の新たな展開と部品サプライヤーの動向 -次世代自動車に対応する中小サプライヤーの現状と課題-，No.2010-4 (2011)
- [1-6] 齋藤和也：自動車用ハイテン材の現状，まてりあ，53，12 (2014)，pp.584-588.
- [1-7] 社団法人 日本自動車部品工業会：自動車部品出荷動向調査結果 平成 26 年度
- [1-8] 太田稔：環境にやさしい車のための先進加工技術，素形材，50，6 (2009)，pp.10-15.
- [1-9] 国土交通省ホームページ：自動車燃費一覧（平成 29 年 3 月）  
[http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha\\_fr10\\_000031.html](http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000031.html)
- [1-10] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：車体軽量化に関わる構造技術、構造材料に関する課題と開発指針の検討 成果報告会資料（2015 年 6 月 22 日）
- [1-11] 大楠恵美：三井物産戦略研究所 戦略研レポート 2014 年 7 月 28 日，自動車構造材の軽量化と多様化
- [1-12] 藤井秀樹，高橋一浩，山下義人：自動車部品へのチタン材適用，新日鉄技報，378 (2003)，pp.62-67.
- [1-13] 武田秀：自動車用マグネシウムダイカスト技術動向，まてりあ，53，12(2014)，pp.594-598.
- [1-14] 石川隆司：自動車構造部品への炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の応用の展望(CFRTPを中心に)，精密工学会誌，81，6(2015)，pp.489-493.
- [1-15] 鳴瀧則彦：切削工具概論，精密工学会誌，61，6(1995)，pp.751-753.
- [1-16] 中島正憲：航空機機体の製造技術，精密工学会誌，75，8(2009)，pp.941-944.
- [1-17] 栗熊勉：自動車部品における鋳鉄鋳物の最新製造技術，鋳造工学，76，12 (2004)，pp.972-978.
- [1-18] 馬淵豊：自動車における最新の環境対応技術 (1) -エンジンの省燃費化技術-，表面技

術, 63, 3 (2012), pp.140-144.

[1-19] 南部俊和, 保田芳輝, 牛嶋研史, Dong ZHU: 表面微細形状によるトラクション係数向上  
第1報 -微細形状の方向性の影響-, 日本機械学会論文集 C 編, 74, 738 (2008), pp.417-424.

[1-20] 馬淵豊: DLC 膜の自動車部品への適用-, トライボロジスト, 58, 8 (2013), pp.557-565.

[1-21] 森脇俊道: 切削加工の軌跡 -ミクロンからナノへ, 高速から超高速へ, メカニカル制御  
から情報化・知能化へ-, 精密工学会誌, 65,1 (1999), pp.325-328.

[1-22] 松村隆: 切削加工シミュレーション, 特殊鋼, 63,3 (2014), pp.6-10.

[1-23] 臼井英治: 切削加工-何ができたか, できつつあるか-, 精密機械, 50,1 (1984), pp.67-68.

[1-24] 井原透: 切削技術のサプライチェーン, 精密工学会誌, 76,10 (2010), pp.1105-1108.

[1-25] 清水伸二: 加工の高能率化・高精度化を実現する複合加工機, 精密工学会誌, 74,4 (2008),  
pp.325-328.

[1-26] 上原邦雄: 切削加工研究の展望と鋳鉄の切削概説, 鋳造工学, 70, 6 (1998), pp.425-431.

[1-27] 小坂田宏造: ネットシェイプ成形の現在, 精密工学会誌, 80,12 (2014), pp.1045-1048.

[1-28] 三菱マテリアル株式会社: 自動車部品 特殊ツーリング Vol.2 Transmission parts

<http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/4014/4186/4263/p210j.pdf>

[1-29] 三菱マテリアル株式会社: 自動車部品 特殊ツーリング Vol.3 Suspension parts and  
accessories

<http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/4814/4186/4322/p220j.pdf>

[1-30] 横内正洋: 切削加工の自動化を推進する現場の工夫, 神奈川県ものづくり技術交流会  
予稿集, 2014.

[1-31] 並河紘一: 生産加工工場における物流システム自動化の事例と経済性, 精密機械, 48,4  
(1982), pp.434-441.

[1-32] 三菱日立ツール株式会社 技術資料: 旋削の切りくず処理

<http://www.mmc-hitachitool.co.jp/technical/tech-info/pdf/c42.pdf>

[1-33] 中山一雄, 新井実: 切りくず処理, 精密機械, 49,8 (1983), pp.1108-1109.

[1-34] 津田圭一: 工具用超硬材料の進化の歴史 ~超硬合金とサーメット~, SEI テクニカル  
レビュー (188), 2016-01, pp10-14.

[1-35] Jawahir, I.S., van Luttervelt, C.A., 1993, "Recent developments in chip control research and  
applications", CIRP Annals - Manufacturing Technology, 42/2, pp.659-693.

[1-36] 住友電工ハードメタル株式会社: イゲタロイの歴史

<http://www.sumitool.com/aboutus/brands-history/>

- [1-37] K. Nakayama, 1962, "A study on chip-breaker", Bulletin of JSME, 5(17), pp.142-150.
- [1-38] サンドビッグ・コロマント：良好な切りくず処理  
[http://www.sandvik.coromant.com/ja-jp/knowledge/general\\_turning/how-to-achieve-good-component-quality/successful-chip-control/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/ja-jp/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/successful-chip-control/pages/default.aspx)
- [1-39] 三菱マテリアル株式会社：総合カタログ 技術資料  
[https://www.mitsubishicarbide.com/mmc/jp/product/pdf/catalog/c007j\\_q.pdf](https://www.mitsubishicarbide.com/mmc/jp/product/pdf/catalog/c007j_q.pdf)
- [1-40] I.S. Jawahir, 1990, "On the controllability of chip breaking cycles and modes of chip breaking in metal machining", CIRP Annals - Manufacturing Technology, 39/1, pp.47-51.
- [1-41] 中山一雄, 新井実：切りくずの折れやすさの測定 -切りくず処理に関する研究-, 精密機械, 44, 525 (1978), pp.1129-1135.
- [1-42] J. Shinozuka, T. Obikawa, T. Shirakashia, 1996, "Chip breaking analysis from the viewpoint of the optimum cutting tool geometry design", Journal of Materials Processing Technology, 62/4, pp.345-351.
- [1-43] K. Nakayama, 1972, "Origins of side curl of chip in metal cutting", Bull JSPE, 6(3), pp.99-101.
- [1-44] 中山一雄：切りくず形状の分類について, 精密機械, 42,2 (1976), pp.74-80.
- [1-45] K. Nakayama, M. Arai, 1992, "Comprehensive chip form classification based on the cutting mechanism", CIRP Annals - Manufacturing Technology, 41/1, pp.71-74.
- [1-46] A. Kharkevich, Patri K. Venuvinod, 1999, "Basic geometric analysis of 3-D chip forms in metal cutting : Part 1: determining up-curl and side-curl radii", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 39/5, pp.751-769.
- [1-47] A. Kharkevich, Patri K. Venuvinod, 1999, "Basic geometric analysis of 3-D chip forms in metal cutting : Part 2: implications", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 39/6, pp.965-983.
- [1-48] Choi J. P. , Lee S. J. , 2001, "Efficient chip breaker design by predicting the chip breaking performance", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 17/7, pp.489-497.
- [1-49] S. Palanisamy, D. S. McDonald, S. M. Dargusch, 2009, "Effects of coolant pressure on chip formation while turning Ti6Al4V alloy", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49/9, pp.739-743.
- [1-50] 帯川利之, 森合主税, 松本航, 林遵：高圧クーラントを用いた高速切削の動向と最新のトピックス, 生産研究, 67, 5 (2015), pp.607-612.
- [1-51] Lin Y. , Tanaka R. , Hosokawa A. , Kusano T. , Ueda T. , 2009, "Studies on chip control in



turning by partially laser hardening of carbon steel”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 3/1, pp.13-21.

[1-52] 窪田英毅, 田部井英世, 佐藤崇 : 切りくずを細分化するドリル穴加工法の検討, *精密工学会誌*, 60, 11 (1994), pp.1611-1615.

[1-53] 三宅章仁, 北風絢子, 加藤聖子, 笹原弘之, 三宮一彦, 村松正博, 野口賢次, 中谷尊一 : 低周波振動切削 (LFV) の切削特性, *精密工学会*, 2016 年度精密工学会秋季大会, 2016, pp.591-592.

[1-54] Shane Y. Hong, Yucheng Ding, Robert G. Ekkens, 1999, “Improving low carbon steel chip breakability by cryogenic chip cooling”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39/7, pp.1065-1085.

[1-55] E.O Ezugwu, 2005, “Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45/12-13, pp.1353-1367.

[1-56] 中山一雄, 李振加, 新井実 : チップブレーカの切りくず折断性能 (第 1 報) -チップブレーカの有効範囲-, *精密工学会誌*, 52, 12 (1986), pp.2120-2125.

[1-57] 中山一雄 : 切りくずの純曲げ試験 -直接測らずに切削抵抗を求めるための試み-, *精密機械*, 28, 332 (1962), pp.525-531.

[1-58] 中山一雄 : 切削中に切りくずに加える張力の影響, *精密機械*, 30,1 (1964), pp.46-52.

## 第2章 切りくず案内切削の検討

本章では、切りくず案内切削を可能にする溝付き工具の案内溝形状とその溝方向について加工実験と数値解析による検討を行う。溝付き工具と誘導路を用いた加工実験では、切りくず案内切削可能な案内溝形状と溝方向に着目し、切りくず流出方向及び形状に及ぼす影響を調査する。また、考案した解析モデルによる数値解析では、切りくず流出の案内方向が切削力に及ぼす影響を調査し、切りくず案内切削の基本的な知見をまとめる。

なお、本章の内容の一部は、研究業績の査読付き原著学術論文[1], [2], [3]に記載されている。

### 2.1 緒言

#### 2.1.1 チップブレード形状と微細な凹凸構造について

本研究で提案する溝付き工具の案内溝形状との違いを明らかにするため、ここでは、すくい面に施されるチップブレードの形状と微細な凹凸構造について記す。

はじめに、チップブレード形状について説明する。切りくずを分断させるチップブレードの形状は改良が重ねられ、複雑になってきている[1-35] [1-36]。切りくずカールを強制し、分断させる機能は共通であるため、チップブレードの基本的な形状で図 2.1 に示す 2 種類に大別することができる[2-1]。平らなすくい面の上に突起物を設置したチップブレード[2-2] [2-3](Obstruction type)とすくい面に溝を持つチップブレード(Groove type)である。前者のチップブレードを凸状ブレード、後者を凹状ブレードと定義する。凹状ブレードの溝方向は刃先に概ね平行である[2-4] [2-5] [2-6]。このとき、すくい面と切りくずが接触する領域(Tool-chip contact region)に溝を施すため、凹状ブレードはその接触長さを拘束することもできる。Oxley は、切りくず接触領域の拘束の効果について、数値解析によりせん断角の推定が定性的に可能であることを確認し、その切削機構の基本的な考えを明らかにしている[2-7]。

次に、チップブレード形状よりも微細な凹凸構造について説明する。工具-切りくず間の摩擦・摩耗を改善させるため、工具すくい面に微細な凹凸構造を施す研究も行われている。Kawasegi らは、溝方向、溝間隔、深さを変化させた微細溝構造をノーズ部に施した図 2.2 の工具を用いて、MQL (Minimal Quantity Lubrication)の潤滑環境下でアルミニウム合金の旋

削加工を行い、そのときに切削力が低減することを論じている[2-8]。また、Sugihara と Enomoto らは、工具すくい面に図 2.3 に示す微細溝構造を付与した工具を用いて、切削油剤を供給させた潤滑環境下でアルミニウム合金と炭素鋼のフライス加工を行い、被削材の凝着低減及び摩耗抑制の効果が向上することを確認している[2-9] [2-10]。さらに、Obikawa らは、直線切れ刃を持つ工具のすくい面に、微細溝だけでなくピット状やドット状の微細構造を施した図 2.4 のコーティング工具においても、アルミニウム合金の旋削加工で切削力が低減することを確認している[2-11]。潤滑環境下で行われた上述の研究では、微細構造の凹部が切削油材の供給及び保持部となり、工具-切りくず間の潤滑を促進させている。これに対して、Kiyota と Itoigawa らは、ドライ環境下で炭素鋼の加工を行い、構成刃先の生成しない比較的高い切削速度の加工条件で切削力が低減することを確認している[2-12]。この結果に基づいて、Kiyota らは、微細構造は潤滑を促進する機能だけでなく、工具-切りくず間の接触状態を変化させていることを指摘し、その機構について論じている[2-13]

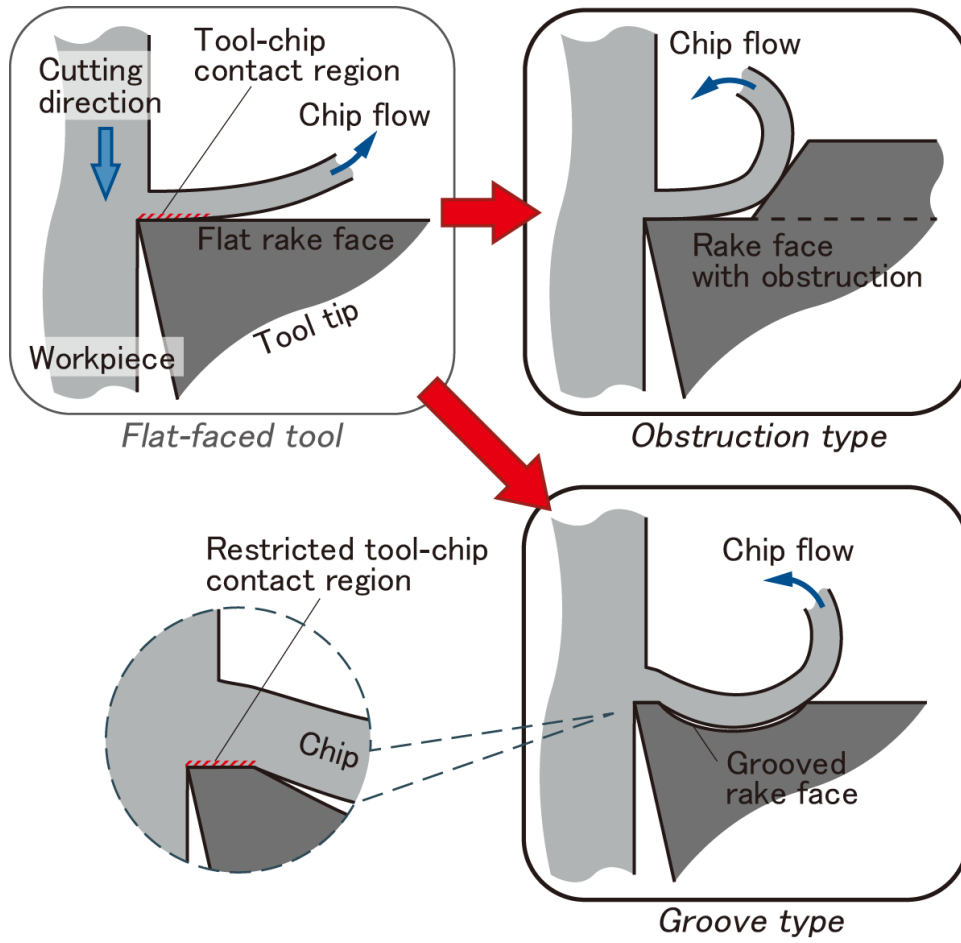


Fig. 2.1 Two types of chip breakers

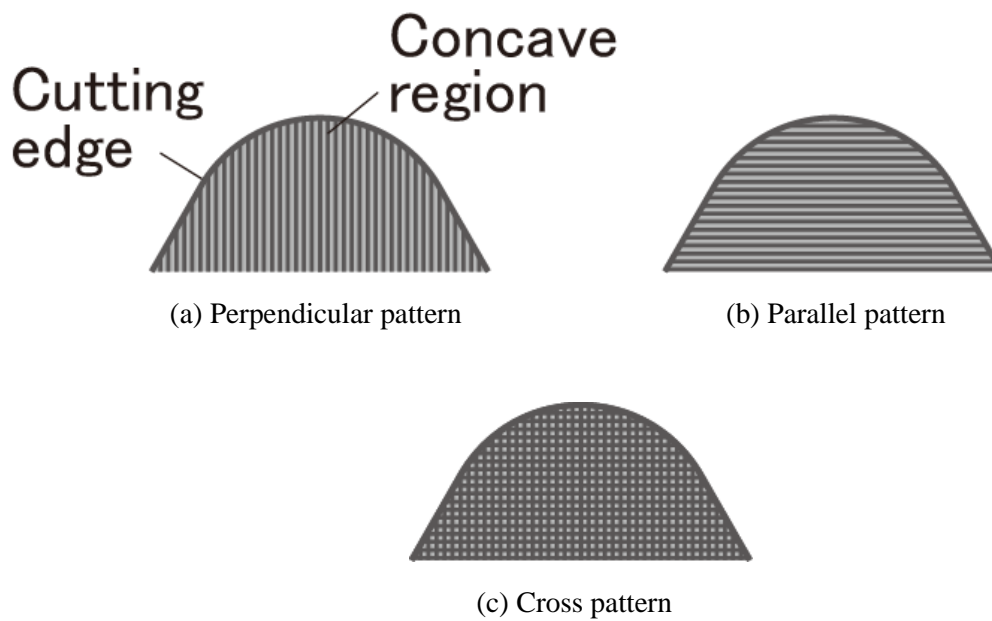


Fig. 2.2 Textured rake faces in nose radius [2-7]

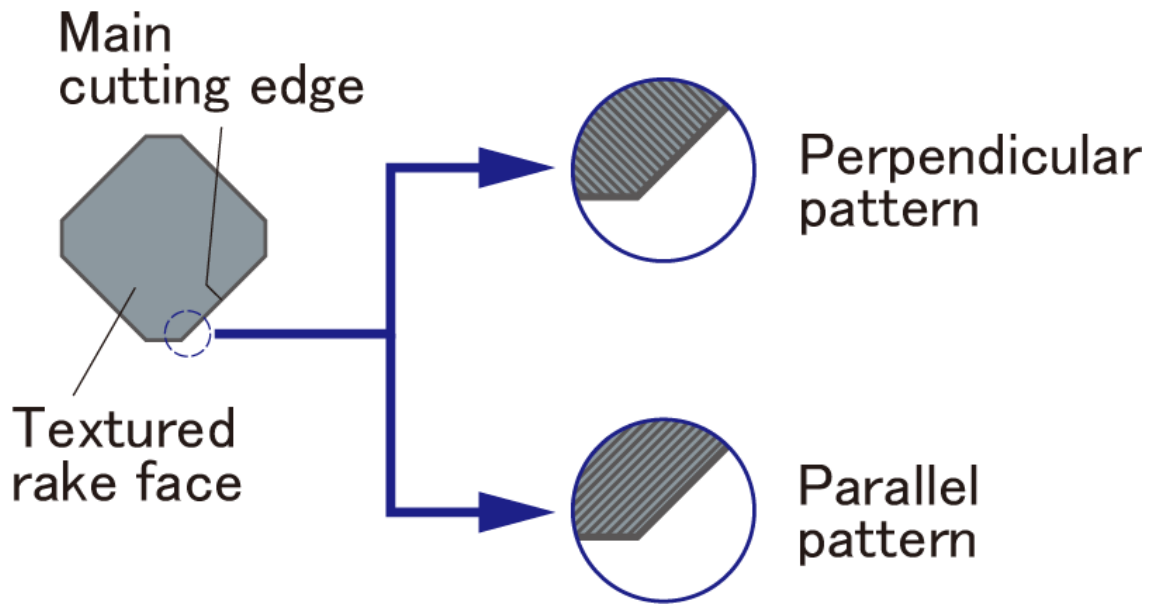


Fig. 2.3 Cutting tools with micro stripe texture in face milling [2-8] [2-9]

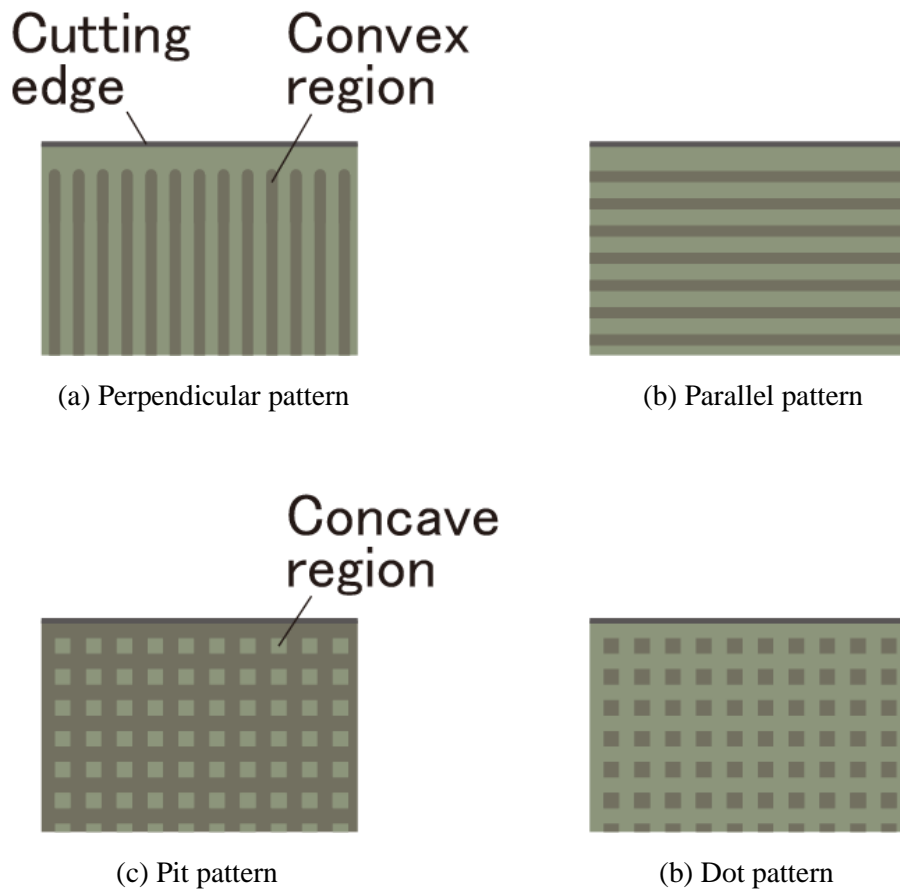


Fig. 2.4 Micro-textures coated with DLC [2-10]

### 2.1.2 案内溝を有する工具（溝付き工具）

考案した案内溝の配置と大きさに着目して、凹状ブレーカと微細溝との違いについて記述する。まず、凹状ブレーカは、切りくずを強制的にカールさせるために、刃先に平行な溝を付与させている。前項の微細構造に関する研究はいずれも、微細溝を刃先に平行（または切りくず流出方向に垂直方向）に配置することで切削力低減や凝着低減の効果が高まると論じている[2-7] [2-8] [2-9] [2-10] [2-11]。次に、微細溝の大きさについて、Enomotoらは、微細溝深さ 5  $\mu\text{m}$ 、溝の間隔（幅）20  $\mu\text{m}$  とすることで、炭素鋼の加工における工具摩耗を効果的に抑制することを確認している[2-9]。

これに対して、本研究では、真直ぐな切りくずを所望の位置まで導くため、微細溝を切りくず流出方向に対して略平行方向に配置させ、溝に沿って切りくずを流出させることを目指す。また、微細溝の大きさについては、工具すくい面に施した微細溝内で切りくずの一部を生成させることを考え、前項の微細溝構造よりも大きな溝を対象とする。本研究では、この大きな溝を案内溝(Guide groove)と呼び、案内溝を有する工具を溝付き工具と呼ぶ。

## 2.2 案内溝の基本形状の設定

### 2.2.1 目的

本節では、切りくず案内切削を実現するための案内溝の基本形状を見極め、次節以降で実施する解析モデルや案内溝の形状適正化の検討に活用する。

### 2.2.2 切りくず案内切削の方策

溝付き工具による切りくず案内切削について記述する。切りくずの横向きカールは、材料の横広がり [1-43] によって切りくず流出速度に差が生じることが主な原因と考えられる。また、切りくず流出方向は、Colwell の経験則 [2-14] が示すように、切削に関与する切れ刃の両端点を結ぶ方向に対して概ね垂直となる。したがって、案内溝の無い平らなすくい面を持つ工具（従来工具(Ordinary tool with flat rake face)と呼ぶ）では横向きカールを生じるとともに、工具形状とその姿勢、切込み、送り、送り方向によって切りくず流出方向は変化する。このような切りくずを所望の位置まで導くため、工具すくい面に案内溝を施した溝付き工具による加工方法を考案した。この案内溝は、図 2.5 に示すように、切りくず生成に関与する刃先近傍からすくい面上に設けられる。これにより、被削材の一部が溝に入り込んだ状態で切りくずを生成するため、この部分が案内の役割を果たし、横向きカールを抑制するとともに、案内溝に沿って切りくずを流出させる。

### 2.2.3 単一溝付き工具

横向きカール抑制と切りくず流出方向制御の効果を発揮する案内溝の基本的な形状を確認するため、単一の溝を付与した溝付き工具を製作した。市販の超硬工具（ノーズ半径 0.8 mm，すくい角 0°，逃げ角 11°，刃先角 60°，K 種）を利用し、その三角形のすくい面を二等分する位置に、ワイヤカット放電加工によって各種案内溝を形成した。表 2.1 は、試作した 4 種類の溝付き工具（A-D と呼ぶ）であり、上から、溝の断面形状、すくい面と逃げ面の顕微鏡写真を示している。表に示されるように、溝断面の形状は直線と半円で構成され、深さは 150-300  $\mu\text{m}$ ，幅は 100-600  $\mu\text{m}$  の範囲とした。

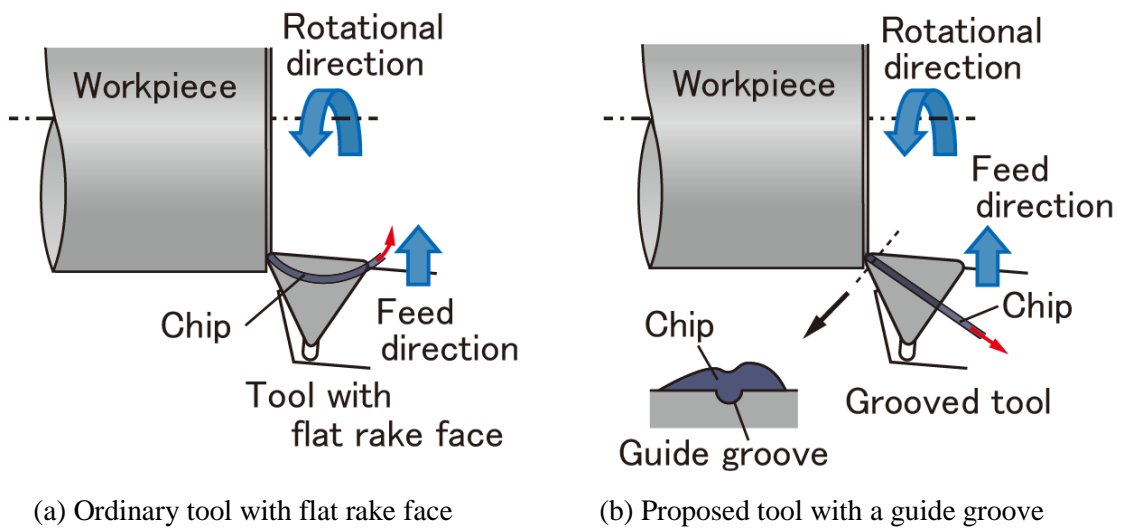


Fig. 2.5 Control of chip curl and flow with a guide groove

Table 2.1 Cross-sections of guide grooves and microphotographs of rake and flank faces

Type-A	Type-B	Type-C	Type-D



## 2.2.4 単一溝付き工具による加工実験の方法及び条件

直径 121 mm の円板状の冷間圧延鋼板(JIS:SPCC)を被削材とした端面旋削を行った. 図 2.6 に示すように, 切りくずの案内角度を案内溝の方向が主軸回転軸と成す角度 $\psi$ と定義し, これが $45^\circ$ となるように設定した. 加工条件は, 主軸回転数を $561 \text{ min}^{-1}$ (切削速度 $213\text{-}183 \text{ m/min}$ )で一定とし, 切込み $d$ と送り $f$ の組合せ( $d, f$ )を( $0.2 \text{ mm}, 0.08 \text{ mm/rev}$ ), ( $0.2 \text{ mm}, 0.13 \text{ mm/rev}$ ), ( $0.5 \text{ mm}, 0.3 \text{ mm/rev}$ ), ( $1 \text{ mm}, 0.2 \text{ mm/rev}$ )の4条件とした. 各条件では2回ずつの加工実験を行い, 比較のために, 平らなすくい面を持つ工具(従来工具)でも同様の加工実験を行った.

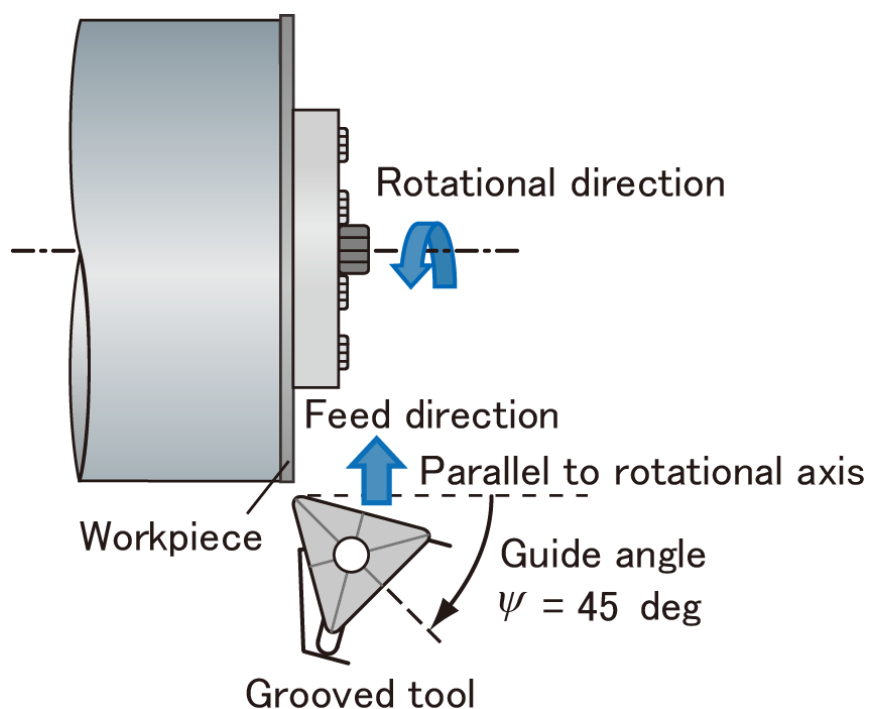


Fig. 2.6 Turning experiment with flat and grooved rake face

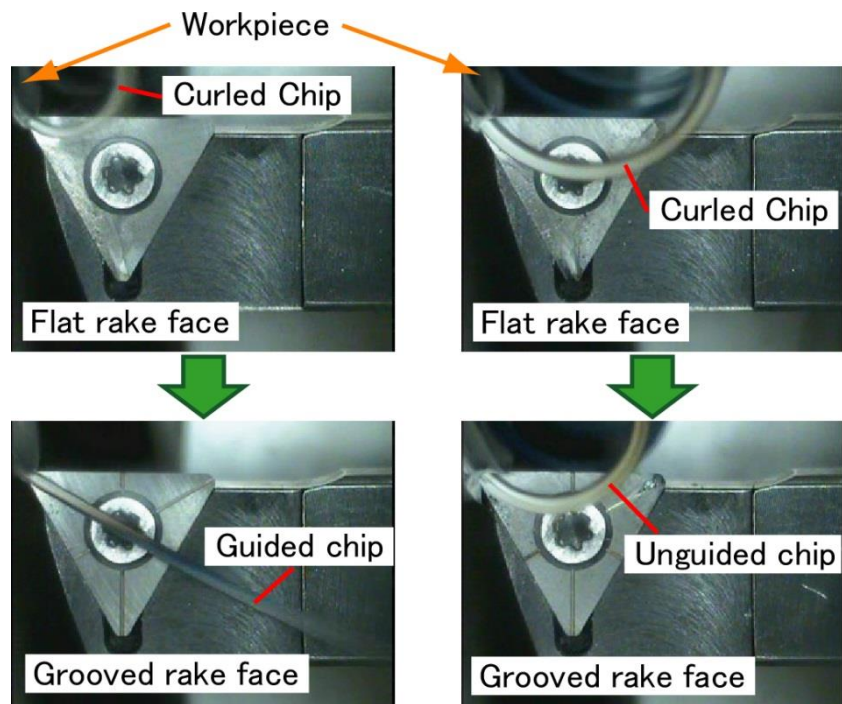
## 2.2.5 単一溝による加工実験結果

従来工具及び溝付き工具 B における切りくず流出の様子を図 2.7 に示す。  $d=0.5\text{ mm}$ ,  $f=0.3\text{ mm/rev}$  の条件について、図 2.7(a)から、従来工具の切りくずでは横向きカールが生じるのに対して、溝付き工具 B を用いることで横向きカールが抑制され、案内溝方向に切りくずを誘導すること（以降、切りくず誘導と記述）に成功した。一方、図 2.7(b)に示されるように、  $d=1\text{ mm}$ ,  $f=0.2\text{ mm/rev}$  の条件では、溝付き工具 B を用いても切りくず流出に変化が見られず、切りくず誘導に失敗した。

4 種類の溝付き工具と 4 つの加工条件の各組み合わせにおける切りくず誘導の成否を、表 2.2 にまとめて示す。表には、参考として、Colwell の経験則[2-14]によって推定される切りくず流出角度  $\eta$ （案内角度と同様に、主軸回転軸と成す角度として定義する）も合わせて示している。Colwell 則は、案内溝が無い場合の切りくず流出方向を推定するものであり、この値と本実験での案内角度  $\psi=45^\circ$  の差が大きいほど、切りくず制御が困難になるものと推定される。例えば、  $d=0.2\text{ mm}$ ,  $f=0.08\text{ mm/rev}$  の条件では、  $45-19.3=25.7^\circ$  程度、切りくず流出方向を強制的に変更しようとすることを意味する。各条件で行った 2 回の実験のうち、2 回ともに案内溝方向への切りくず誘導に成功した場合を○、2 回ともに失敗した場合を×、1 回成功して 1 回失敗した場合を△、工具欠損を生じた場合を-の記号で示す。

表 2.2 に示されるように、切込みが小さい条件では△が目立ち、切込みが  $0.5\text{ mm}$  において最も多く○が得られ、切込みが  $1.0\text{ mm}$  になると×が多くなっている。これらの原因について、図 2.8 に示す切削断面と工具形状の模式図を用いて以下に考察する。切込みが  $0.2\text{ mm}$  の 2 条件で△が目立つ結果となったのは、図 2.8(a), (b)に示されるように、主に案内溝の無い刃先部で切削を行ったために、案内溝が切りくず生成に十分関与することができなかつたものと考えられる。これに対して、切込みが  $0.5\text{ mm}$  になると、図 2.8(c)に示されるように案内溝の刃先位置で切りくず生成が行われるため、C 以外の工具で切りくず誘導に成功している。工具 C については、表 2.1 の写真から推察できるように刃先部の強度が低く、切込み  $0.5\text{ mm}$  以上の切削負荷に耐えられなかつたものと考えられる。切込みがさらに増加して  $1.0\text{ mm}$  になると、図 2.8(d)に示されるように切りくずが生成される工具 D のみで誘導に成功し、工具 A と B では失敗した。このことから、大きな切りくずを誘導するためには一つの小さな案内溝では不十分であると考えられる。

なお、今回の加工条件の範囲内では上向きカールの曲率が小さく、特に溝付き工具によって誘導に成功した条件においては、ほとんど上向きカールを生じることがなく真直ぐな切りくずが生成された。



(a)  $d=0.5$  mm,  $f=0.3$  mm/rev

(b)  $d=1$  mm,  $f=0.2$  mm/rev

Fig. 2.7 Photographs of chips flowing on flat tool and grooved tool (Type B)

Table 2.2 Results of chip control with grooved tools

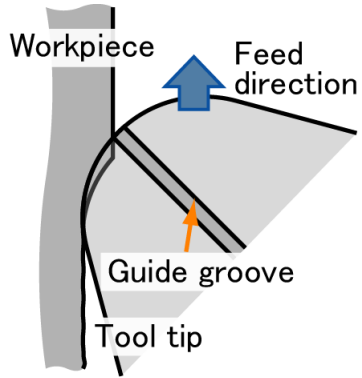
Depth of cut $d$ mm	Feed rate $f$ mm/rev	Chip flow angle (by Colwell's law) $\eta$ deg	Types of tested tools			
			A	B	C	D
0.2	0.08	19.3	△	△	○	△
0.2	0.13	18.4	△	△	○	△
0.5	0.3	28.9	○	○	—	○
1.0	0.2	48.7	×	×	—	○

○: Two successful guidance

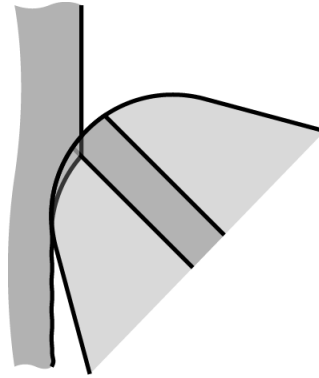
×: Two failed guidance

△: One successful and one failed guidance

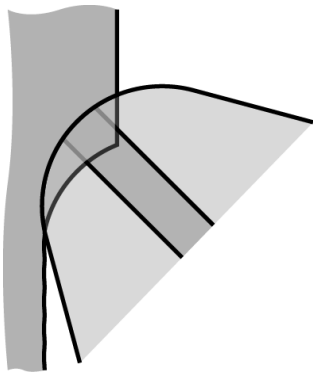
—: Tool failure



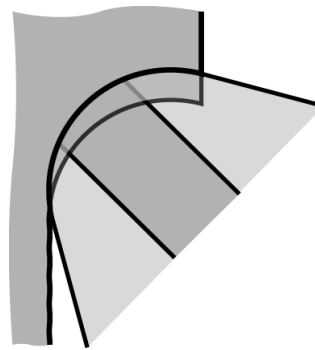
(a) Type A,  $d=0.2$  mm,  $f=0.13$  mm/rev



(b) Type B,  $d=0.2$  mm,  $f=0.13$  mm/rev



(c) Type C,  $d=0.5$  mm,  $f=0.3$  mm/rev



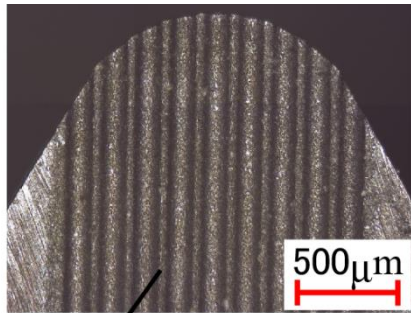
(d) Type D,  $d=1.0$  mm,  $f=0.2$  mm/rev

Fig. 2.8 Uncut chip sections and tool geometries

## 2.2.6 複数溝付き工具

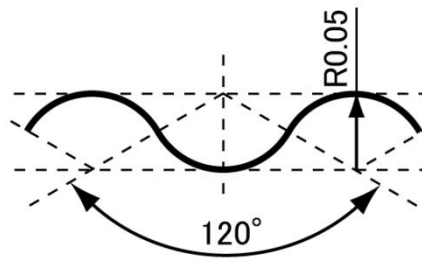
前項の切りくず誘導の成否の結果を踏まえ、広範囲の加工条件で案内溝が切りくず生成に関与できることと、相対的に小さな案内溝でも切削幅が大きい条件で十分な案内溝の性能を発揮することを期待して、図 2.9(a)に示すようにノーズ部分の全域にわたって複数の案内溝を持つ工具を考案・開発した。具体的には、ノーズ半径 0.8 mm、刃先角 60°、逃げ角 11°の K 種超硬工具のすくい面上に、刃先角を二等分する方向に、高低差 50  $\mu\text{m}$  の 9 本の案内溝をワイヤカット放電加工によって形成した。なお、切込みと送りの小さな加工条件にも対応できるように個々の溝を小さくして R50  $\mu\text{m}$  とするとともに、図 2.9(b)に示すように欠損を生じ易い頂点がないように滑らかな円弧形状の繰返しとした。複数の案内溝を持つ工具による切りくず流出の模式図を図 2.10 に示す。

開発した複数溝付き工具と、案内溝の無い平らなすくい面を持つ従来工具を用いて端面旋削を行い、複数の案内溝の効果を確認した。被削材には、板厚 3.2 mm、直径 150 mm の円板状の冷間圧延鋼板(JIS:SPCC)を用いた。加工条件は、案内角度  $\psi=45^\circ$  (図 2.6 参照)、すくい角  $0^\circ$ 、主軸回転数  $561 \text{ min}^{-1}$  (切削速度 264-238 m/min)、切込み  $d=0.4 \text{ mm}$ 、送り  $f=0.12 \text{ mm/rev}$  とした。各工具における切りくず流出の様子を図 2.11 に示す。図に示すように、従来工具では切りくずカールが生じ、流出方向が制御されないのに対して、複数溝付き工具では真直ぐな切りくずが溝に沿って流出した。なお、加工後に採取した切りくずを観察すると、工具すくい面と擦過した側には案内溝形状と対を成す形状が転写されていることを確認した。



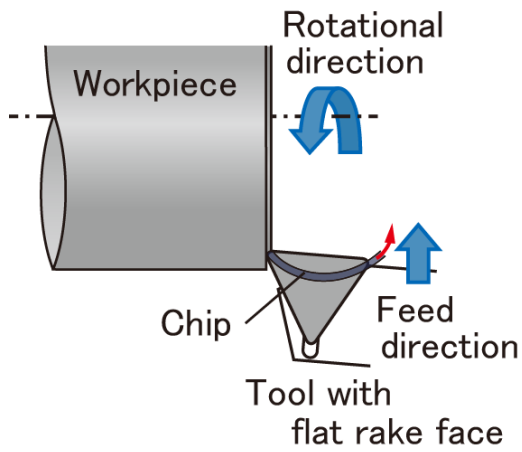
Grooved rake face

(a) Microphotograph

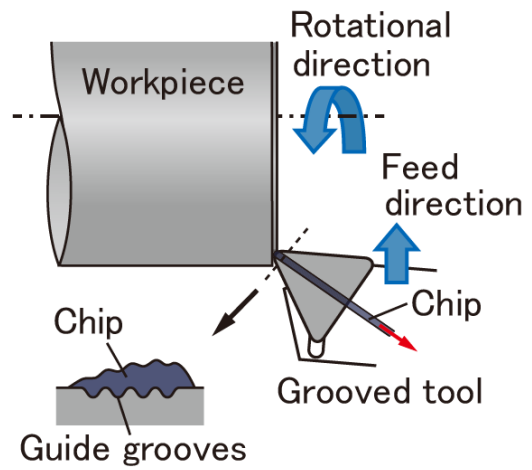


(b) Cross sectional drawing

Fig. 2.9 Developed tool with guide grooves



(a) Ordinary tool with flat rake face



(b) Proposed tool with guide grooves

Fig. 2.10 Control of chip curl and flow

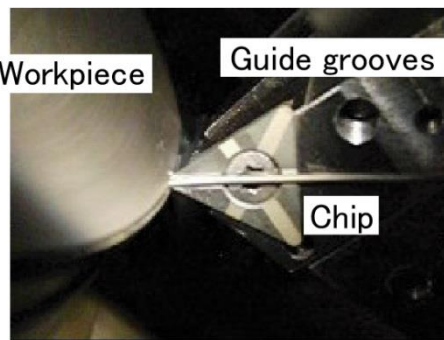
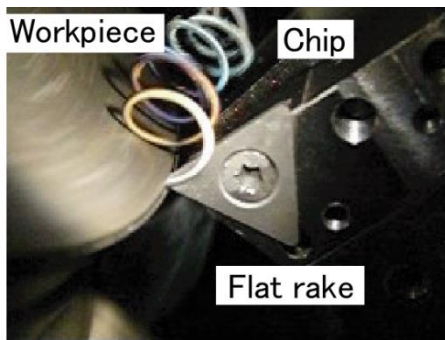


Fig. 2.11 Photographs of chip flow with flat and grooved tools

## 2.2.7 複数溝及び誘導路による加工実験の方法及び条件

切削点から離れた所望の位置まで切りくずを誘導するため、溝付き工具によってカールの抑制と流出方向の制御を行うとともに、切りくずを通過させる誘導路を設け、旋削実験を行った。切削方向から誘導路装置を見た写真と各部の誘導路寸法を図 2.12 に示す。溝付き工具の上に取り付ける誘導路の入口部分は、高温の切りくずとの接触を考慮して超合金製の部品で構成し、刃先より約 4 mm 後方に配置した。その入口以降に続く誘導路は基本的に鋼製であるが、途中に観察窓を設けたため、4 つの誘導路を接続する構造にした。各誘導路は、案内溝方向に沿って配置され、切りくずが通過するにつれて少しずつ広がるように設計されており、刃先から出口までの全長は約 125 mm である。加工条件は $(d, f)=(0.2 \text{ mm}, 0.06 \text{ mm/rev}), (0.4 \text{ mm}, 0.12 \text{ mm/rev}), (0.6 \text{ mm}, 0.18 \text{ mm/rev}), (0.8 \text{ mm}, 0.24 \text{ mm/rev})$ の 4 種類とした。図 2.13 に示す案内角度 $\psi$ については、誘導路を含めた工具全体を回転させることで、 $\psi=45, 30, 15, 0^\circ$ の 4 段階で変化させた。他の加工条件については前項と同様であり、円板状の冷間圧延鋼板に対して、各条件で 2 回ずつの端面旋削を行った。切りくずが誘導路の入口から出口まで通過した場合を成功、通過しなかった場合を失敗と判断した。

工具直下に圧電型動力計を固定し、加工中に切削力の 3 分力を測定して、その 3 分力からすくい面上における切削力の方向を算出した。この力の方向についても、前述の切りくずの案内角度 $\psi$ 及び流出角度 $\eta$ と同様に、主軸回転軸と成す角度を $\gamma$ として定義する（図 2.13 参照）。参考として、従来工具についても、誘導路を外して各加工条件で同様の加工実験を行い、力の角度 $\gamma$ を測定した。この場合の力の角度 $\gamma$ は、ほぼ摩擦力の方向を示し、切りくず流出方向に一致する（本実験で使用した工具は刃先が鋭利であり、刃先丸みに起因する力は小さい）。

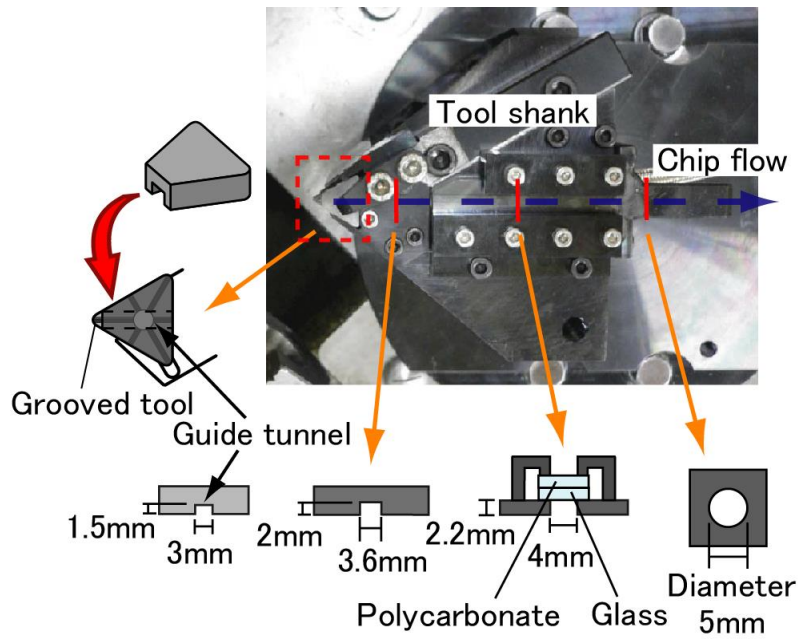


Fig. 2.12 Guide tunnel with observation window for experiments

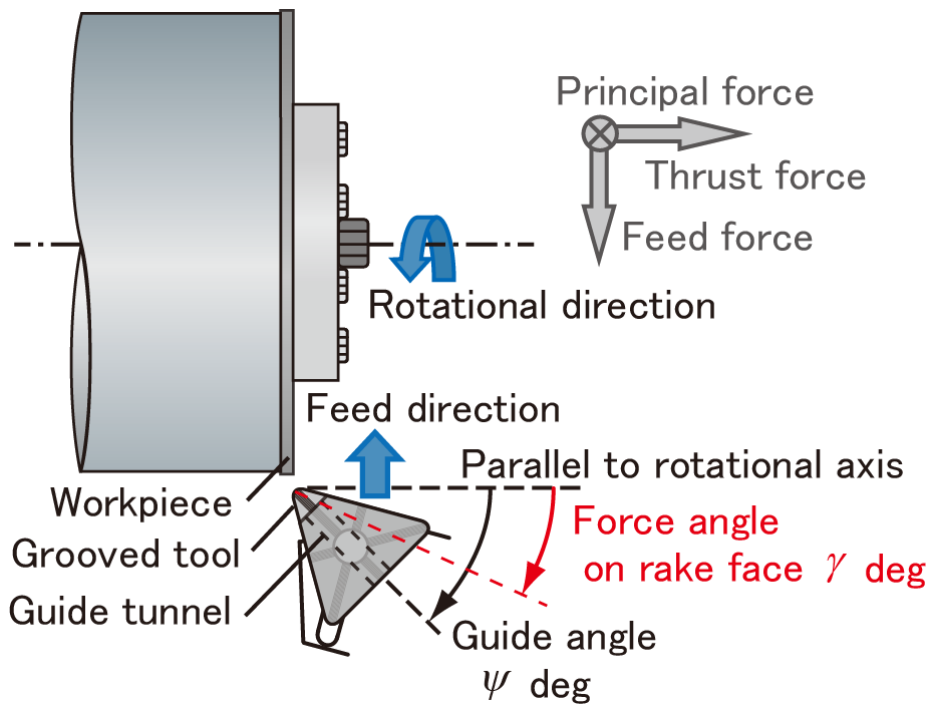


Fig. 2.13 Definition of angle and forces acting on the tool



## 2.2.8 複数溝による加工実験結果

誘導路の通過に成功した条件のうち、 $\psi=45^\circ$ 、 $d=0.4$  mm、 $f=0.12$  mm/rev で切りくずが誘導路を通過した様子を図 2.14 に示す。このように、一旦誘導路を通過した切りくずは、途中で詰まってしまうことはなく、旋削終了までスムーズに誘導路内を通過した。

加工条件、従来工具における切りくず流出角度 $\eta$ （実際には力の角度 $\gamma$ の測定値）、及び誘導路通過の成否を表 2.3 にまとめて示す。案内角度 $\psi$ ごとに通過の成否を比較すると、 $\psi=45^\circ$ では全ての条件で切りくずが誘導路内を通過したが、案内角度が小さくなるにつれて、通過が困難になった。次に、加工条件ごとに見ると、 $d=0.2$  mm、 $f=0.06$  mm/rev の条件で、全ての案内角度で切りくずの通過に成功したが、切込み、送りが大きい条件ほど通過が難しい結果となった。これは、案内角度が小さく、切込みと送りが大きいほど、案内方向が本来の切りくず流出方向から大きく外れ、案内溝によって流出方向を強制し得る範囲を超えたためと考えられる。また、誘導路の入口寸法も影響を持つものと考えられる。 $d=0.8$  mm、 $f=0.24$  mm/rev で生成された切りくずの厚さを実測したところ、平均で約 0.8 mm であったのに対して、本実験の誘導路の入口高さは 1.5 mm であった。したがって、切りくず誘導に成功したが、切りくずが通過するための余裕は少なかったと推定される。

図 2.15 において、案内角度 $\psi$ （流出角度 $\eta$ ）が力の角度(Force angle on rake face) $\gamma$ に及ぼす影響を見ると、いずれの切削条件においても、若干右下がりの傾向があり、 $\eta$ を増大すると $\gamma$ が若干減少する。しかし、その変化は小さく、案内溝によって切りくず流出方向を大きく変化させても、すくい面上での力の方向は、案内溝が無い場合とあまり変わらない。この傾向の詳細については、本章の後半で説明する。

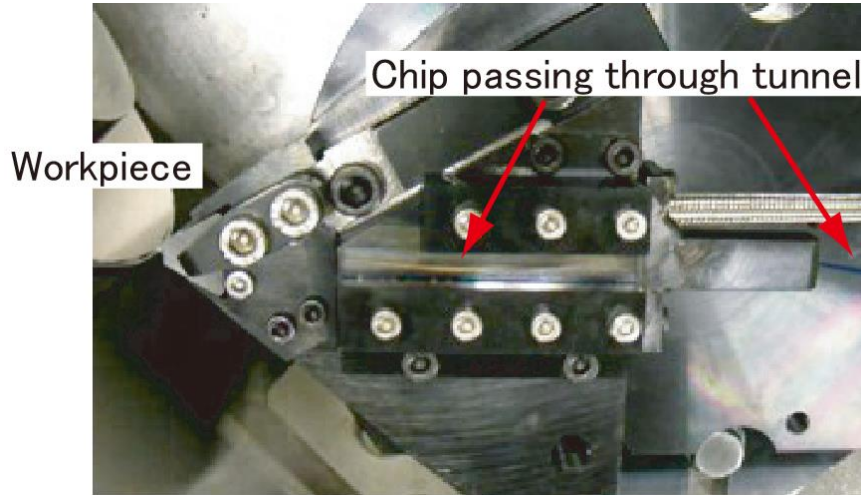


Fig. 2.14 Guide tunnel with observation window for experiments

Table 2.3 Results of chip-guiding cutting with guide grooves and tunnel

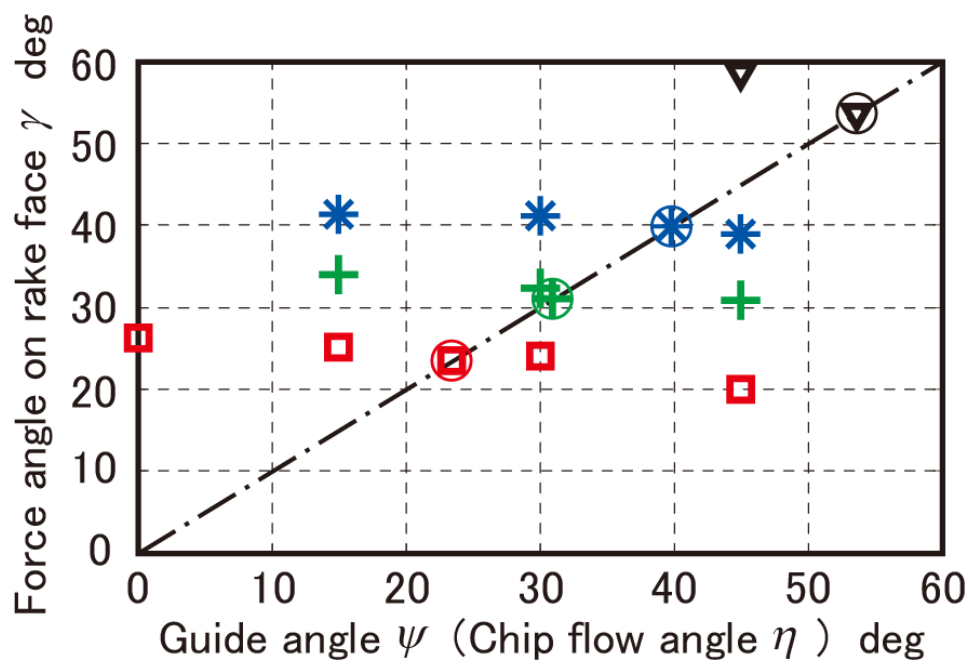
Depth of cut $d$ mm	Feed rate $f$ mm/rev	Chip flow angle with flat rake $\eta$ deg	Guide angle $\psi$ deg			
			45	30	15	0
0.2	0.06	23.9	○	○	○	○
0.4	0.12	31.4	○	○	△	×
0.6	0.18	40.2	○	△	△	—
0.8	0.24	53.9	○	×	—	—

○: Two successful guidance

×: Two failed guidance

△: One successful and one failed guidance

—: No data



■:  $d=0.2$  mm,  $f=0.06$  mm/rev     +:  $d=0.4$  mm,  $f=0.12$  mm/rev  
\*:  $d=0.6$  mm,  $f=0.18$  mm/rev     ▼:  $d=0.8$  mm,  $f=0.24$  mm/rev

Mark with/without circle shows angle measured  
 on flat/grooved rake face tool respectively

Fig. 2.15 Relationship between chip flow angle and force angle on rake face

## 2.3 溝付き工具による切りくず案内切削の機構

### 2.3.1 目的

本節では、前節で試作した複数溝を基本形状とした切りくず流出制御を伴う切削プロセスモデル（切りくず案内切削プロセスモデル）を考案する。本解析モデルにより、切りくず流出方向を溝方向に強制した際の切削力変化について調査し、次節以降の切りくず案内切削及び引張切削の加工条件設定に役立てる。

### 2.3.2 対象プロセスの設定

基礎的な切削機構を検討するため、R バイトではなく直線切れ刃上に微細な案内溝を形成した工具を用いて近似 2 次元切削形式の加工を対象とする。ここで、近似 2 次元切削形式の加工とは、マクロに見た工具切れ刃が直線であってその切れ刃が切削速度方向に垂直であることを指す。実際には、微細な案内溝の方向が切れ刃に垂直な面内に存在せずに傾斜するために、せん断方向や合成切削力方向が切れ刃に垂直な面内に存在せず、3 次元的な切削と考えなければならない。そこで、案内溝が十分に微細である（溝深さよりも切りくず厚さが十分に大きい）ことを前提とし、図 2.10 に示されるように、切りくずが分離することなく一体となって流出する場合の切削機構について検討する。

### 2.3.3 傾斜切削プロセスの解析モデル [2-15] [2-16]

ここでは、提案するモデルの基本となる傾斜切削プロセスモデルについて簡単に説明する。解析に使用する諸変数と単位ベクトルを図 2.16 に示す。本モデルでは、3 つのベクトル式を連立して解くことで、3 つの未知の単位ベクトル（切りくず流出方向 $\vec{v}_c$ 、合成切削力方向 $\vec{a}$ 、せん断方向 $\vec{v}_s$ ）を算出する。まず、速度ベクトルの間に成り立つ関係[2-17]を考える。連続の条件より、 $\vec{v}_c$ は、切削方向 $\vec{v}_w$ と $\vec{v}_s$ を含む面内にある。このため、すくい面法線方向ベクトル $\vec{n}_r$ を用いると次式が成り立つ。

$$\vec{v}_c = \frac{\vec{n}_r \times (\vec{v}_w \times \vec{v}_s)}{|\vec{n}_r \times (\vec{v}_w \times \vec{v}_s)|} \quad (2)$$

次に、力の関係[2-18]について考える。摩擦力は切りくず流出と反対方向 $-\vec{v}_c$ に、垂直抗力はすくい面法線方向 $\vec{n}_r$ に働く。合成切削力方向 $\vec{a}$ は、それらの 2 方向の間に存在し、垂直抗力と摩擦角 $\beta$ を成すことから、次式が成り立つ。

$$\vec{r} = \vec{n}_r \cos\beta - \vec{v}_c \sin\beta \quad (3)$$

最後に、合成切削力方向 $\vec{r}$ とせん断方向 $\vec{v}_s$ の関係について考える。ここでは最大せん断応力説を適用し、合成切削力方向が主応力方向の 1 つとし、最大せん断応力方向にせん断が生じると仮定すれば、次式が成り立つ。

$$\vec{r} = \vec{v}_s \cos 45^\circ + \vec{n}_s \sin 45^\circ \quad (4)$$

なお、 $\vec{n}_s$ はせん断面垂直方向ベクトルであり、 $\vec{n}_s = (\vec{v}_s \times \vec{e}_y) / |\vec{v}_s \times \vec{e}_y|$ によって求められる。

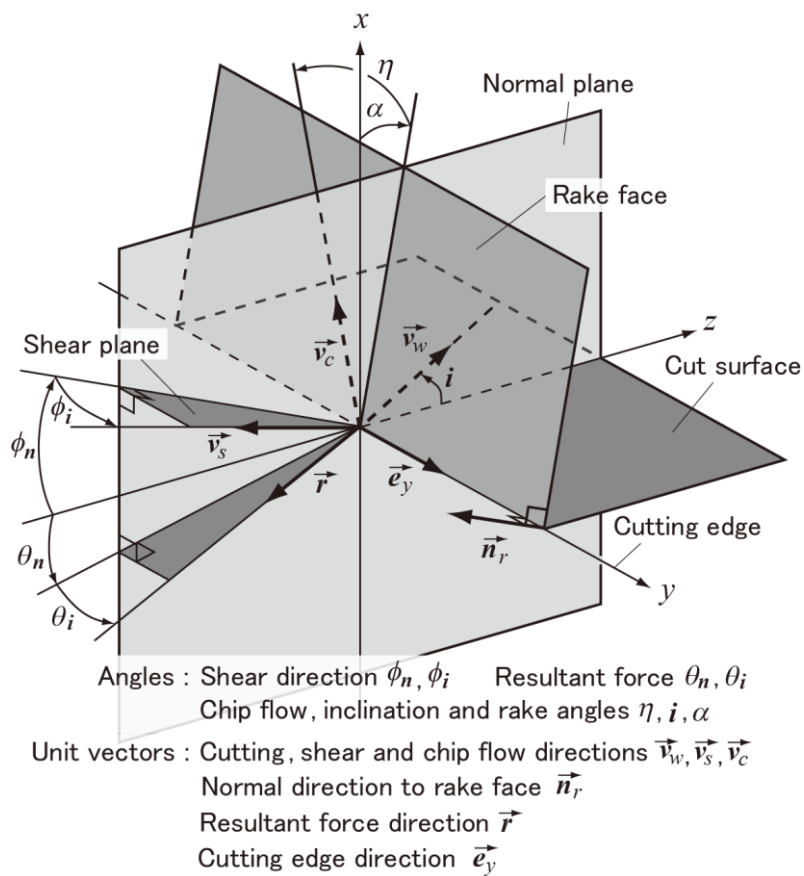
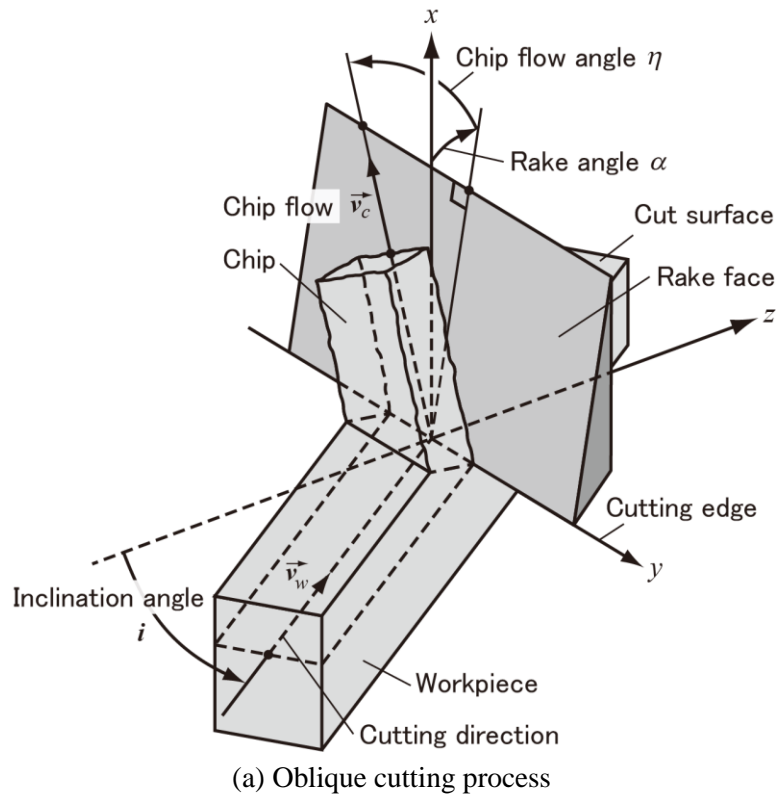
ここで、上述の非線形ベクトル方程式(2)、(3)、(4)を連立して数値的に解くことにより、 $\vec{v}_s$ 、 $\vec{v}_c$ 、 $\vec{r}$ を求めることができる。なお、切削断面積  $A_c$  を用いるとせん断面積  $A_s$  は  $A_s = A_c / (-\vec{v}_w \cdot \vec{n}_s)$  と表され、せん断面せん断応力  $\tau_s$  を用いて、せん断力  $\vec{F}_s$  及び合成切削力  $\vec{F}_r$  は、次のように算出される。

$$\vec{F}_s = \frac{A_c \tau_s \vec{v}_s}{(-\vec{v}_w \cdot \vec{n}_s)} \quad (5)$$

$$\vec{F}_r = \frac{|\vec{F}_s| \vec{r}}{(\vec{r} \cdot \vec{v}_s)} \quad (6)$$

また、切削エネルギー  $E_c$  は、合成切削力  $\vec{F}_r$ 、切削速度ベクトル  $\vec{v}_w$ 、切削速度  $V$  を用いて、次式のように表される。

$$E_c = (-\vec{F}_r \cdot \vec{v}_w) V \quad (7)$$



(b) Oblique cutting parameters

Fig. 2.16 Oblique cutting process and parameters

### 2.3.4 切りくず案内切削プロセスの解析モデル

すくい面が平らな工具による 2 次元切削プロセスと溝付き工具による切りくず案内切削プロセスを図 2.17 に示す. すくい面が平らなとき, 切りくず流出方向は切刃稜線に垂直な方向となり, これは 2 次元切削となる (図 2.17(a)参照). 本研究では, 直線切れ刃の稜線方向  $\vec{e}_y$  と切削方向  $\vec{v}_w$  は垂直であり, 傾斜角  $i$  及びすくい角  $\alpha$  はともに  $0^\circ$  である. したがって, 溝が無い場合は 2 次元切削となり, 溝が切れ刃と垂直な場合にも同様のプロセスとなる. しかし, 溝が切れ刃と垂直な面(Normal plane)から案内角度  $\psi$  だけ傾斜する (図 2.17(b)参照) と, その方向に切りくず流出方向は強制的に傾き, 傾斜切削のようにせん断方向  $\vec{v}_s$ , 合成切削力方向  $\vec{r}$  は 3 次元の成分を持つ. これらの方向は, 2 つの角度  $\phi_n$  (垂直せん断角と呼ぶ),  $\phi_t$  (せん断傾斜角と呼ぶ) あるいは  $\theta_n, \theta_t$  によって表される (図 2.16(b)参照). このとき, 切りくずには, その流出方向を案内溝方向に強制するための力(Chip-guiding force)が, 案内溝の側面から加えられる. この強制力のため, 溝が無い場合のすくい面垂直抗力に相当する力は, 見掛けのすくい面法線方向から溝方向に垂直な面内で角度  $\xi$  だけ傾く. すくい面が溝方向の回りに傾くことに相当することから, この傾いた力を相当すくい面垂直抗力と呼ぶことにする.  $\vec{v}_c$  と  $\vec{n}_r$  に垂直なベクトル  $\vec{p}_a$  を式(8)のように定義し, 切りくず流出方向  $\vec{v}_c$  を法線とする面内において, 相当すくい面垂直抗力方向ベクトル  $\vec{n}_r^i$ ,  $\vec{n}_r$ ,  $\vec{p}_a$  の間には図 2.18 に示す関係が成り立つ. このとき, 相当すくい面垂直抗力方向ベクトル  $\vec{n}_r^i$  は式(9)のように表すことができ, 角度  $\xi$  によって決定される.  $\vec{n}_r^i$  を用いて, 力の関係式(3)を式(10)のように修正する.

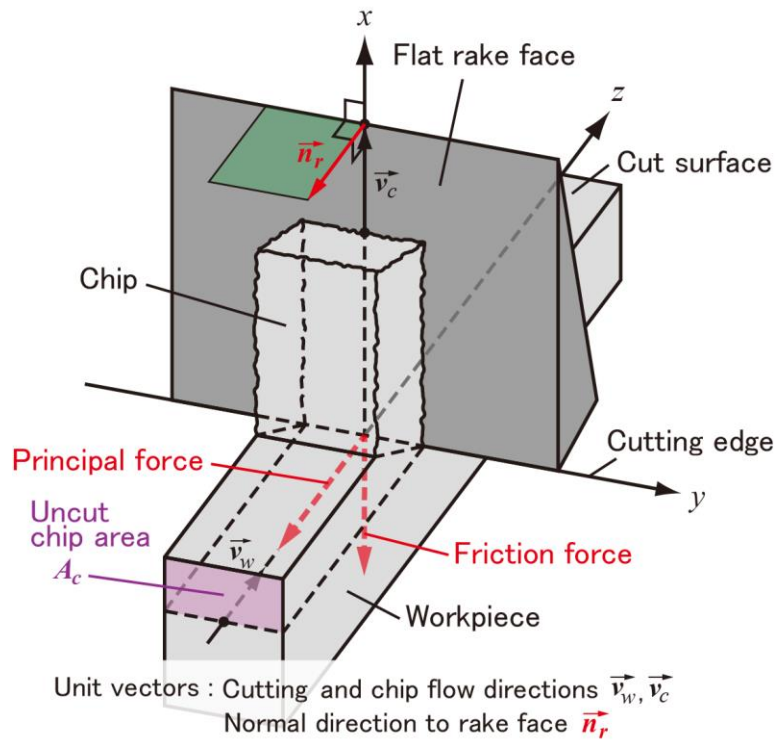
$$\vec{p}_a = \vec{n}_r \times \vec{v}_c \quad (8)$$

$$\vec{n}_r^i = \vec{n}_r \cos \xi + \vec{p}_a \sin \xi \quad (9)$$

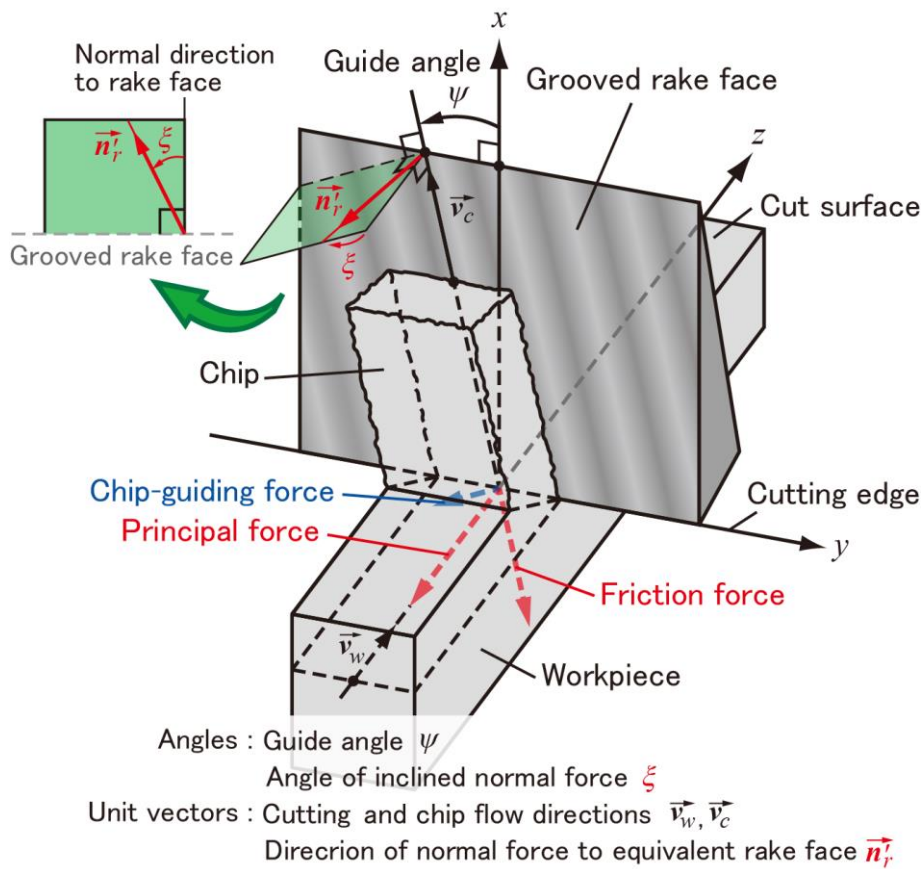
$$\vec{r} = \vec{n}_r^i(\xi) \cos \beta - \vec{v}_c \sin \beta \quad (10)$$

前項で述べた傾斜切削プロセスでは、すくい面法線方向 $\vec{n}_r$ が既知であり、切りくず流出方向 $\vec{v}_c$ は未知である。一方、切りくず案内切削プロセスでは、切りくず流出方向 $\vec{v}_c$ が制御されて既知となるが、相当すくい面垂直抗力方向 $\vec{n}_r$ は未知となる。そこで本研究では、すでに構築済みの傾斜切削モデルを利用し、 $\vec{n}_r$ の代わりに角度 $\xi$ を与える。これにより $\vec{n}_r$ が決定し、 $\vec{v}_c$ を含む未知数を求める。その結果として、切りくず流出方向を $\vec{v}_c$ に制御する場合の切りくず案内切削プロセスで発生する垂直抗力方向の傾斜やせん断方向、合成切削力方向等を得る。





(a) Flat rake face



(b) Grooved rake face

Fig. 2.17 Cutting process models with flat and grooved rake faces  
 Cutting conditions:  $i=0$  deg,  $\alpha=0$  deg

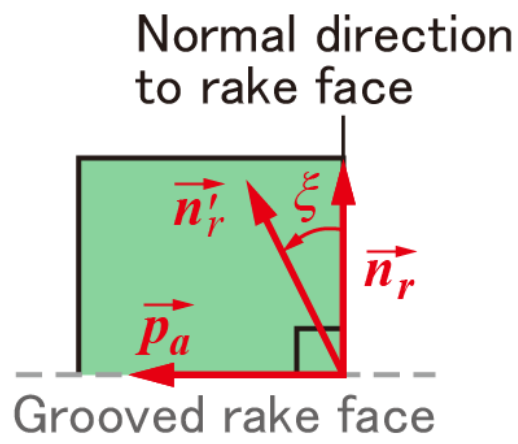


Fig. 2.18 Unit vectors on plane perpendicular to chip flow direction

### 2.3.5 解析方法

前項の通り，切りくず案内切削プロセスの解析手順は，傾斜切削プロセスの場合と基本的に同じである．相違点は3つのベクトル式のうち，式(3)を式(10)に置き換えること，すなわち，すくい面法線方向 $\vec{n}_r$ の代わりに角度 $\xi$ だけ傾斜した $\vec{n}_r$ を用いることのみである．

切削プロセスにおいて成り立つ3つのベクトル式と諸変数の関係を図 2.19 に示す．ここで，切削方向 $\vec{v}_w$ ，刃先の方向 $\vec{e}_y$ ，すくい面法線方向 $\vec{n}_r$ ，摩擦角 $\beta$ は，それぞれ加工条件，工具形状，材料特性として与えられる．本研究では，傾斜角  $i=0^\circ$ ，すくい角 $\alpha=0^\circ$ で一定であり，すくい面法線方向の傾き角 $\xi$ には，仮定した値が与えられる．案内角度 $\psi$ は，本来は設定値として与えられるべきであるが，ここでは解析の結果として算出される切りくず流出方向 $\vec{v}_c$ より求められる．3つのベクトル式により，3つの未知ベクトル $\vec{v}_s$ ， $\vec{v}_c$ ， $\vec{r}$ の相互関係が成り立っている．これを解く手順を図 2.20 に示す．ここでは，傾き角 $\xi$ を仮定して3つのベクトル式を満たす $\vec{v}_s$ ， $\vec{v}_c$ ， $\vec{r}$ を探索する．その手順として，せん断方向 $\vec{v}_s$ を仮定し，式(2)，(10)より合成切削力方向 $\vec{r}_1$ ，また式(4)より $\vec{r}_2$ を算出する．正解のためには $\vec{r}_1$ と $\vec{r}_2$ が一致しなければならないので， $\vec{r}_1$ と $\vec{r}_2$ の外積の大きさを誤差とし，その誤差を最小(ゼロ)とする $\vec{v}_s$ を，滑降シンプレックス法によって探索する．傾き角 $\xi$ を少しずつ変えて上記手順を繰り返すことにより，各種案内角度 $\psi$ での諸変数を求めることができる．本解析では，傾き角 $\xi$ を  $0^\circ$  から  $35^\circ$  の範囲で  $1^\circ$  ずつ変化させて解析を行う．

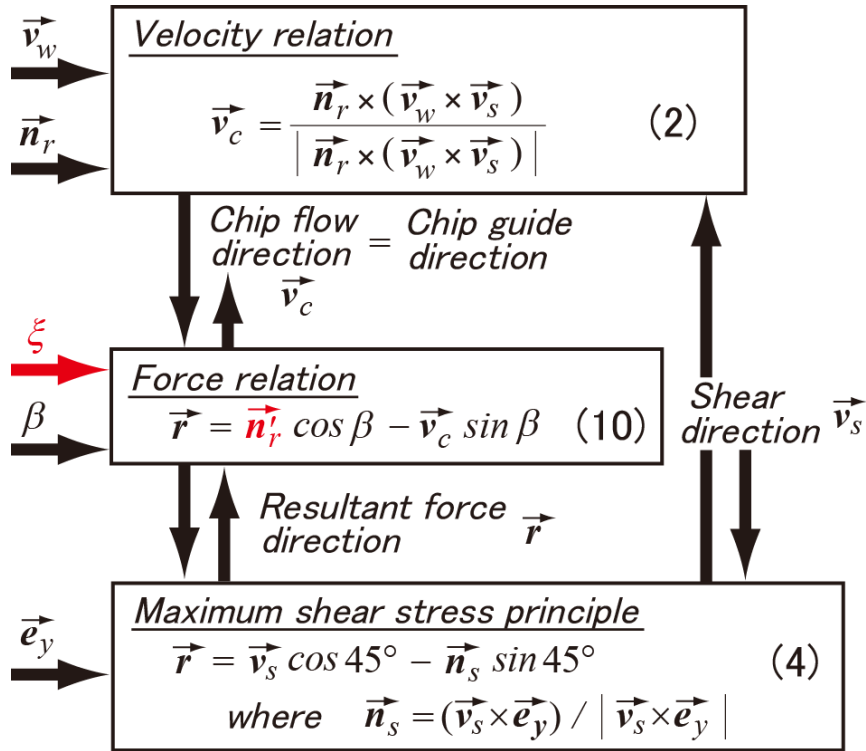


Fig. 2.19 Relation among parameters in chip-guiding cutting process model

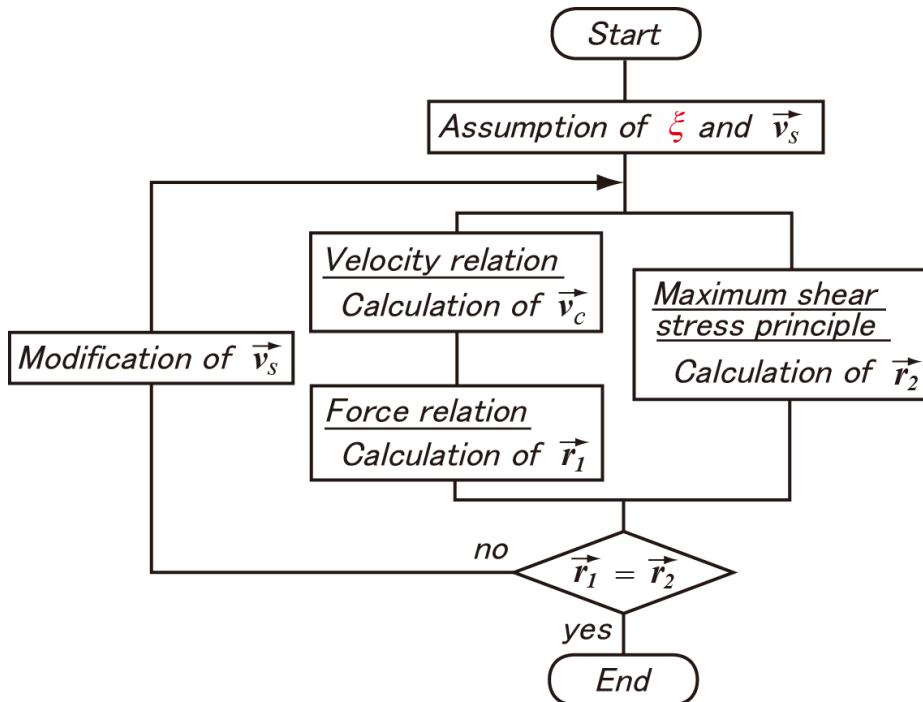


Fig. 2.20 Analysis procedure of chip-guiding cutting process based on maximum shear stress principle

### 2.3.6 直線切れ刃を有する溝付き工具による加工実験の方法及び条件

切りくず案内切削の機構について基礎的な検討を行うため、直線切れ刃に案内溝を形成し、各種案内角度で加工実験を行った。刃先角  $60^\circ$  のサーメット工具を用いて、図 2.9 に示す案内溝をワイヤカット放電加工によって形成した。ノーズ部分はダイヤモンド砥石によって研削して直線切れ刃とした。試作工具の例( $\psi=0, 30^\circ$ )を図 2.21 に示す。また、比較のために、案内溝が無い平らなすくい面と直線切れ刃を有する工具も製作した。この平らなすくい面は、溝付き工具の面性状と同じにするため、ワイヤカット放電加工によって形成した。すくい面上から見た実験装置の配置図を図 2.22 に示す。なお、図に示す案内角度  $\psi$  が  $0, 15, 30, 45^\circ$  となるように工具固定角度を変化させ、いずれの角度でも直線切れ刃は黄銅パイプの中心軸と垂直になるように配置した。平らなすくい面を有する工具と  $\psi$  の異なる 4 種類の溝付き工具について、黄銅パイプ端面の全幅切削を行った。加工条件は、黄銅パイプ外径 20 mm、厚み 1 mm に対して、すくい角  $0^\circ$ 、逃げ角  $7^\circ$ 、主軸回転数  $769 \text{ min}^{-1}$ 、送り  $0.12 \text{ mm/rev}$  とした。

本実験の最大案内角度  $\psi$  は  $45^\circ$  であるが、ここでは幾何学的に有効な案内角度範囲について考察する。 $\psi=90^\circ$  では刃先と平行な溝となるため、凹状ブレーカ（図 2.1 参照）となる。また、 $\psi=0^\circ$  のときの案内溝間隔  $170 \mu\text{m}$ （図 2.9 参照）は案内角度が増加するにつれて広がる。前節で行った炭素鋼の加工実験において、切りくず流出を制御するためには、切りくず生成の範囲に案内溝が 1 本以上存在する必要があることを確認している。したがって、本実験の溝間隔  $170 \mu\text{m}$  で切削幅 1 mm 時の切りくずを制御するためには、幾何学的に案内角度は  $80^\circ$  より小さい範囲とする必要がある。

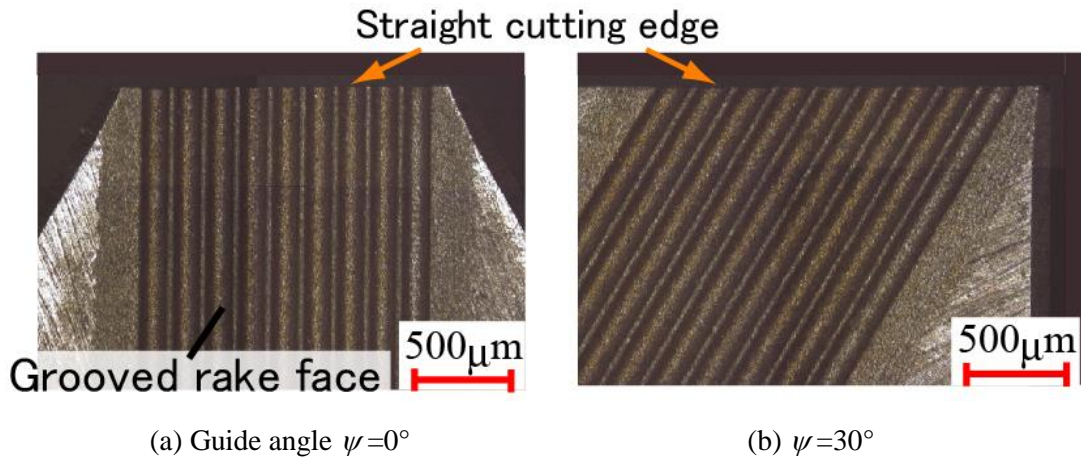


Fig. 2.21 Grooved straight-edge tools

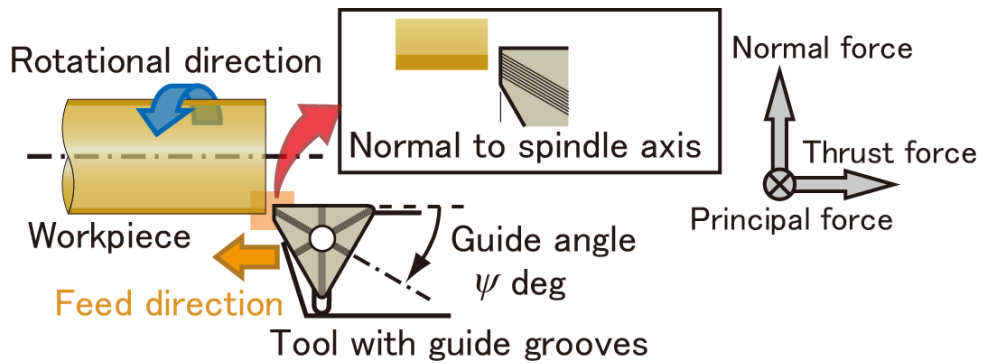


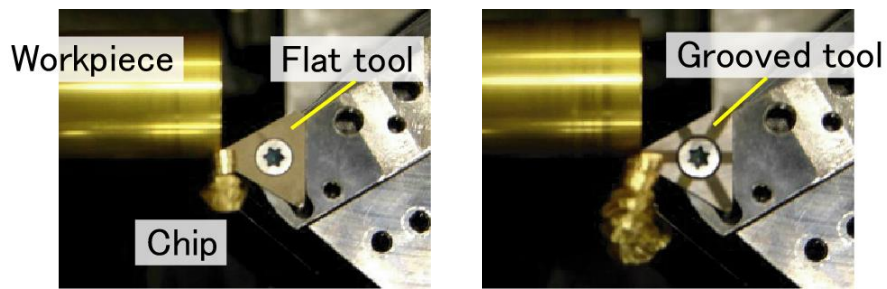
Fig. 2.22 Cutting experiment with grooved straight-edge tool

### 2.3.7 流出切りくずの分析

平らなすくい面を有する工具と溝付き工具による切りくず流出の様子を図 2.23 に示す。図 2.23(a)に示す溝の無い工具の場合、近似 2 次元切削となるため、直線切れ刃と垂直な方向に切りくずが流出している。一方、溝付き工具では、いずれの案内角度においても、切りくずの流出は案内溝方向に強制されていることが分かる。なお、今回の加工条件では切りくずカールが生じており、真直ぐな切りくずを流出させるためには、誘導路等の別途対策が必要と思われる。

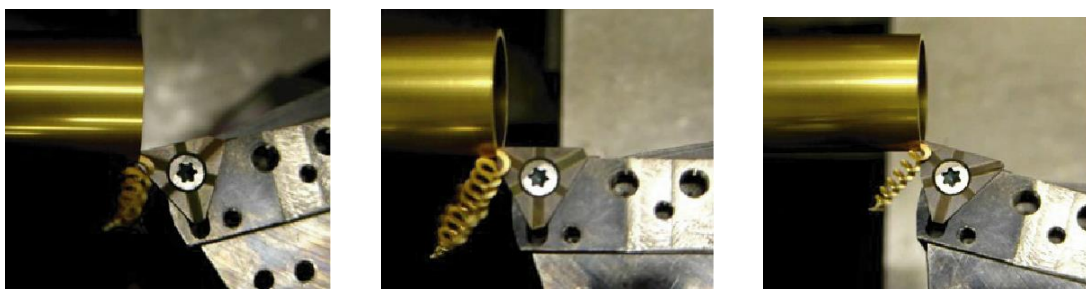
切りくず流出角度 $\eta$ は、図 2.24(a)に示すように、流出した切りくずのすくい面側(Back surface)の顕微鏡写真から求めた。図は案内角度 $\psi=30^\circ$ で流出した切りくずの例を示している。まず、切りくずのすくい面側に転写された案内溝の間隔から切れ刃稜線(Straight cutting edge)の方向を推定した。次に、その中心位置付近に転写された溝形状の接線方向から、切りくず流出方向(Chip flow direction)を推定した。この方向と切れ刃の稜線に垂直な線が成す角度から切りくず流出角度 $\eta$ を測定した。各案内角度について3回測定し、平均値を求めた。その測定結果を図 2.24(b)に示す。図より案内角度 $\psi$ と流出角度 $\eta$ が一致していることから、意図した案内方向に切りくずが流出したことが分かる。なお、図 2.25 に示す流出した切りくずの自由表面側(Front surface)の顕微鏡写真から、切りくず流出方向に平行で、案内溝の間隔に倣った微細な凹凸が存在することが分かった。

各案内角度における切りくず厚さの測定結果およびせん断方向算出結果を図 2.26 に示す。まず、流出した切りくず厚さをマイクロメータにより 10 回計測した。このとき、計測値から案内溝深さの半分 0.025 mm を引いた値を切りくず厚さの測定値とした。切りくずのすくい面側に転写された案内溝形状による切りくず厚さ変化を考慮するためである。図 2.26(a)に示されるように、案内角度 $\psi$ が増加するに伴い、切りくず厚さは若干増加する傾向が見られる。次に、せん断方向 $\phi_n$ ,  $\phi_t$ の測定値については、切りくず厚さの測定結果から切りくず流出速度を算出し、その速度ベクトルから切削速度ベクトルを引くことで算出した。図 2.26(b)に示されるように、垂直せん断角 $\phi_n$ は、案内角度 $\psi$ が増加するに伴って若干減少している。これは前述の切りくず厚さの増大傾向に対応しており、切りくず流出方向を強制的に変化させる際に、わずかながら被削性が低下することを意味している。なお、せん断傾斜角 $\phi_t$ は、案内角度 $\psi$ の増加に伴って絶対値が増加している。これは切りくず流出角度の増大に対応している。



(a) Flat rake face

(b)  $\psi=0^\circ$

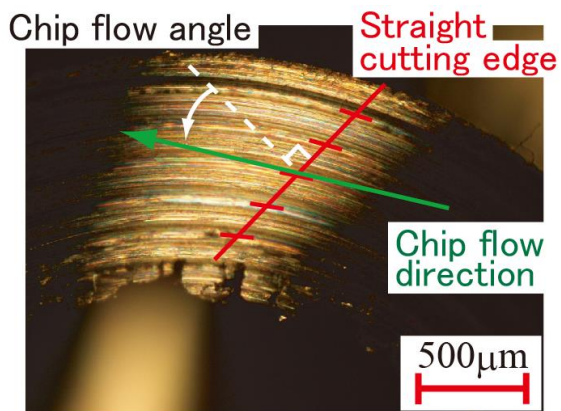


(c)  $\psi=15^\circ$

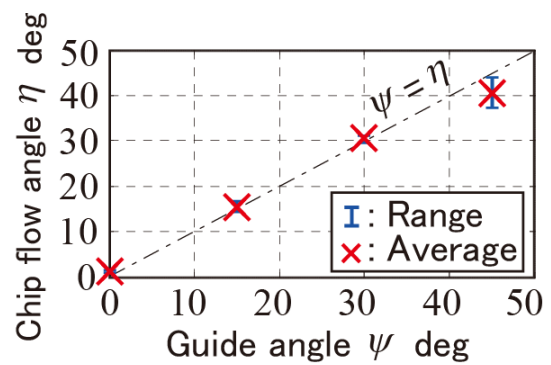
(d)  $\psi=30^\circ$

(e)  $\psi=45^\circ$

Fig. 2.23 Photographs of chip flow with flat and grooved rake faces



(a) Back surface of chip ( $\psi=30^\circ$ )



(b) Measured result

Fig. 2.24 Measurement of chip flow angle by using geometries of chip and cutting edge



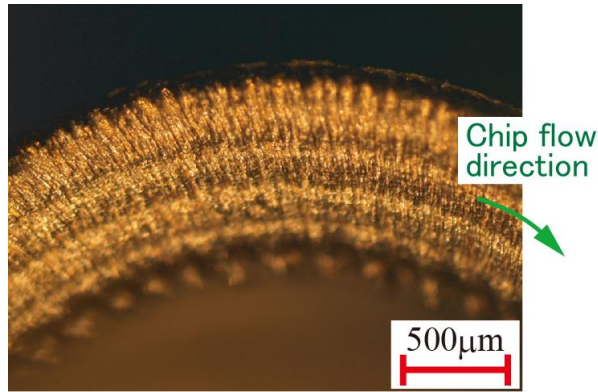


Fig. 2.25 Front surface of chip ( $\psi=30^\circ$ )

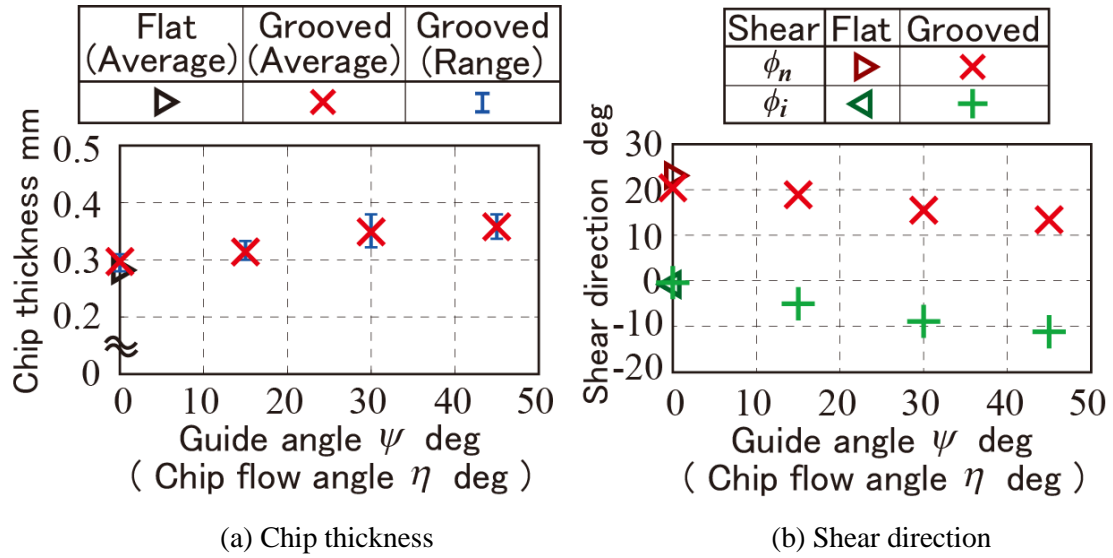


Fig. 2.26 Measured chip thickness and shear direction at various guide angles

### 2.3.8 測定切削力の分析

まず、平らなすくい面の工具と案内角度  $0^\circ$  の溝付き工具を用い、本実験でのみ送りを変化(0.03, 0.06, 0.09, 0.12 mm/rev)させ、エッジフォース成分を次のように求めた。図 2.27 は、測定された切削力である。図に示すように、各分力を線形近似し、送り 0 mm/rev での値、すなわちエッジフォース成分（平らなすくい面を持つ工具では主分力方向 18.5 N、背分力方向 17.2 N、溝付き工具では主分力方向 21.7 N、背分力方向 18.2 N）を取得した。なお、以降の実験では送りを 0.12 mm/rev で一定とした。

次に、各案内角度における切削力からエッジフォース成分を除いた。そのときの切削力の各分力を図 2.28 に示す。ここで、エッジフォース成分は、各案内角度において同じであると仮定し、上記のように案内角度  $0^\circ$  において同定した値を他の案内角度の切削力成分を求める際にも利用した。この仮定は、本研究で用意した溝付き工具の刃先はすべて同様に研削された状態であったこと、エッジフォースが切りくず案内とは関係しない逃げ面側で生じる力であることから概ね正しいと考えられる。

主分力と背分力については、前述の切りくず厚さの増大傾向に対応し、案内角度の増加に伴って若干増加する傾向を持つ。一方、垂直分力（切れ刃稜線方向の分力）は、他の分力に比べて一桁以上小さい。この理由は次のように推測される。案内角度を大きくする程、その方向に働く摩擦力が垂直分力方向の成分を増大させる。その反面、切りくず流出が溝方向に強制される際、その強制力は案内角度に応じて溝の側面から切りくずに加えられる。案内角度  $\psi=30^\circ$  における工具すくい面内に働く切削力の各成分を図 2.29 に示す。図に示すように、強制力と摩擦力の垂直分力方向の成分が相殺されるため、すくい面内の合力に対する垂直分力方向の成分が小さいと考えられる。この傾向は、図 2.15 の実験結果と一致する。

次に、摩擦角  $\beta$  とせん断面せん断応力  $\tau_s$  を、上述の切りくず厚さと切削力の測定値から求めた。具体的には、溝付き工具の摩擦角  $\beta$  は、測定された合成切削力  $\vec{F}_r$  を案内溝方向に投影した分力（摩擦力） $f$  と、案内溝に垂直な面に投影した分力（すくい面垂直抗力として主分力  $F_p$  と案内溝に垂直な分力  $N$  の 2 つの合力） $\sqrt{F_p^2 + N^2}$  から  $\beta = \tan^{-1}(f / \sqrt{F_p^2 + N^2})$  として求めた。図 2.30(a) に示すように、摩擦角  $\beta$  は案内角度  $\psi$  によらず概ね一定であることが分かった。せん断面せん断応力  $\tau_s$  は、せん断面が平面であると仮定し、せん断面積  $A_s$  とせん断力  $F_s$  から算出した。せん断面積  $A_s$  は前項で測定された角度  $\phi_n$  を用いて求め、せん断力は測定された合成切削力  $\vec{F}_r$  のせん断方向 ( $\phi_n, \phi_t$ ) 分力として式(5)から求めた。図 2.30(b) に示すように、せん断面せん断応力  $\tau_s$  についても、案内角度  $\psi$  によらず概ね一定となった。切りくず案

内切削プロセスの解析モデルでは、エッジフォース成分を除去した案内角度 $\psi=0^\circ$ で同定された値、 $\beta=27.0^\circ$ 、 $\tau_s=386\text{ MPa}$ を用いた。

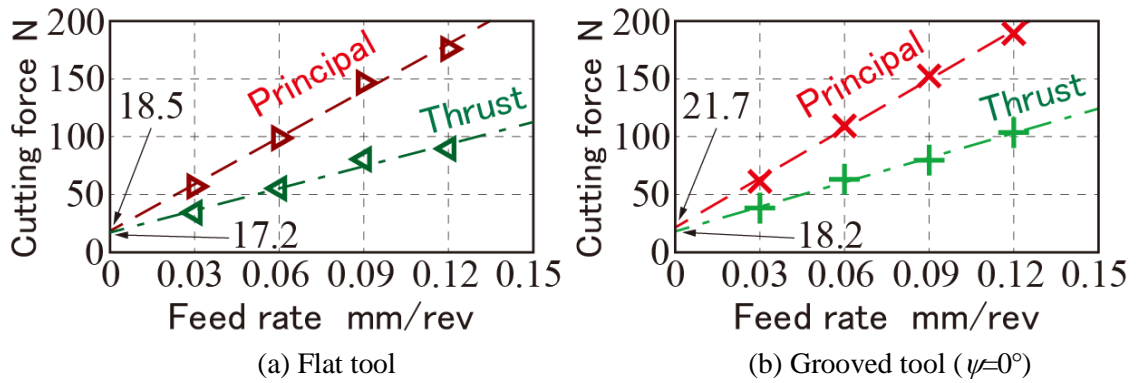


Fig. 2.27 Cutting forces including edge force components measured with flat and grooved tools at various feed rates

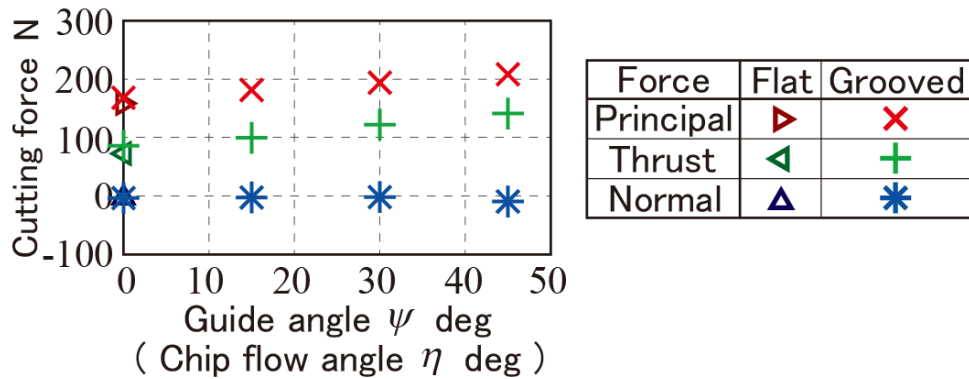


Fig. 2.28 Cutting forces excluding edge force components measured with flat and grooved tools at various guide angles

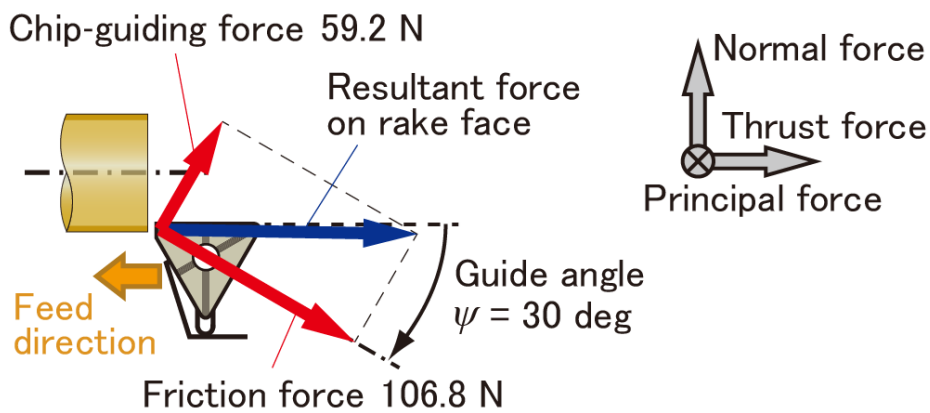


Fig. 2.29 Example of measured cutting forces on rake face at guide angle of  $30^\circ$

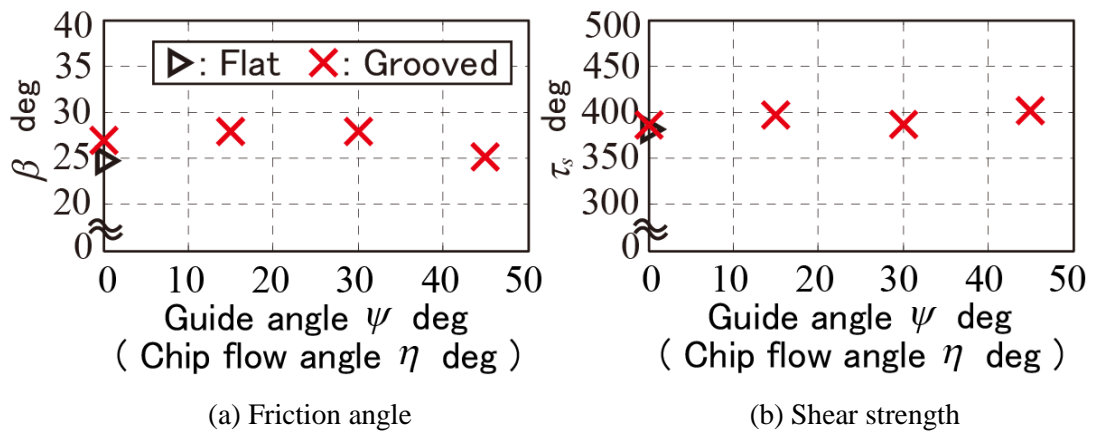


Fig. 2.30 Friction angle and shear strength measured with grooved tools at various guide angles

### 2.3.9 実験結果と測定結果の比較

各種実験結果と解析結果を図 2.31 にまとめて示す。まず、主分力と背分力の解析結果について、案内角度  $15^\circ$ 以下では測定値と一致することが分かった。しかし、案内角度が  $30^\circ$ 以上では、増加傾向は合致するものの、切削力の解析値は急激に増加し、測定値と定量的には一致しない。この理由については後述する。次に、垂直分力の解析結果について、案内角度が増加しても他の分力ほど大きく変化しないことが分かった。この傾向は実験結果と一致しており、図 2.15 の実験結果とも一致する。

案内角度に対する傾き角 $\xi$ は解析結果と一致していることが分かった。この結果から、提案した解析モデルが切りくず案内切削プロセスをよく捉えていることが分かった。

せん断方向 $\phi_n, \phi_t$ と合成切削力方向 $\theta_n, \theta_t$ について、まとめて比較する。まず、 $\theta_n, \theta_t$ は測定した切削力からエッジフォース成分を除去した後に、各方向の分力の比から求めた。切りくず流出を強制する際に生じる力(Chip-guiding force)の増大に対応して、案内角度が増加するにつれて $\theta_n$ が増加し、それによって垂直せん断角 $\phi_n$ が減少している。これにより、せん断面積が増大し、上述の切削力の漸増傾向を生じたものと推察される。特に、案内角度  $30^\circ$ 以上の解析では $\phi_n$ が  $10^\circ$ 程度以下の非常に小さな値となり、切削力の解析値が急激に増加したことが分かる。2次元切削においても、最大せん断応力説がこのように非常に小さいせん断角を予測する領域では実験結果に合致しなくなることが知られており、本解析においても同様の誤差を生じたものと思われる。この他に、加工実験の誤差要因として2つ考えられる。案内角度 $\psi=45^\circ$ の解析結果では、傾き角 $\xi=35^\circ$ 程度であるが、案内溝の間隔と深さから求めた図 2.32 の平均的な側面角度 $\xi_{av}=30^\circ$ であったため、溝側面から生じさせ得る強制力が限界であったことが考えられる。また、案内角度がゼロの際に同定されたエッジフォース成分を用いて、すべての案内角度の切削力を補正したことも誤差を生じさせた要因として考えられる。

次に、 $\phi_t$ と $\theta_t$ について追記する。せん断傾斜角 $\phi_t$ は案内角度の増加により絶対値が増大している。これは、切りくず流出角を強制的に増大したことで、その方向にせん断方向も傾斜したことを示している。 $\theta_t$ は案内角度に依らず、ほぼ  $0^\circ$ である。これは、垂直分力が小さいことを意味している。この分力が小さくなるのは、上述のように切りくず流出を強制する力(Chip-guiding force)と摩擦力の垂直分力方向(切れ刃稜線方向)の成分が相殺するためである。

なお、本解析では、合成切削力方向 $\vec{r}$ とせん断方向 $\vec{v}_s$ の關係に、最小エネルギー説を適用し、切削エネルギー $E_c$ に対して図 2.33 の手順に基づいた解析も行ったが、傾き角 $\xi$ に応じて切りく

ず流出方向 $\vec{v}_c$ は変化しなかったため省略した。その原因は、すくい面上に作用する強制力を付与させることは切削エネルギーを増加させる方向に働き、傾き角 $\xi$ を与えてもせん断方向 $\vec{v}_s$ は変化しなかったためと考えられる。

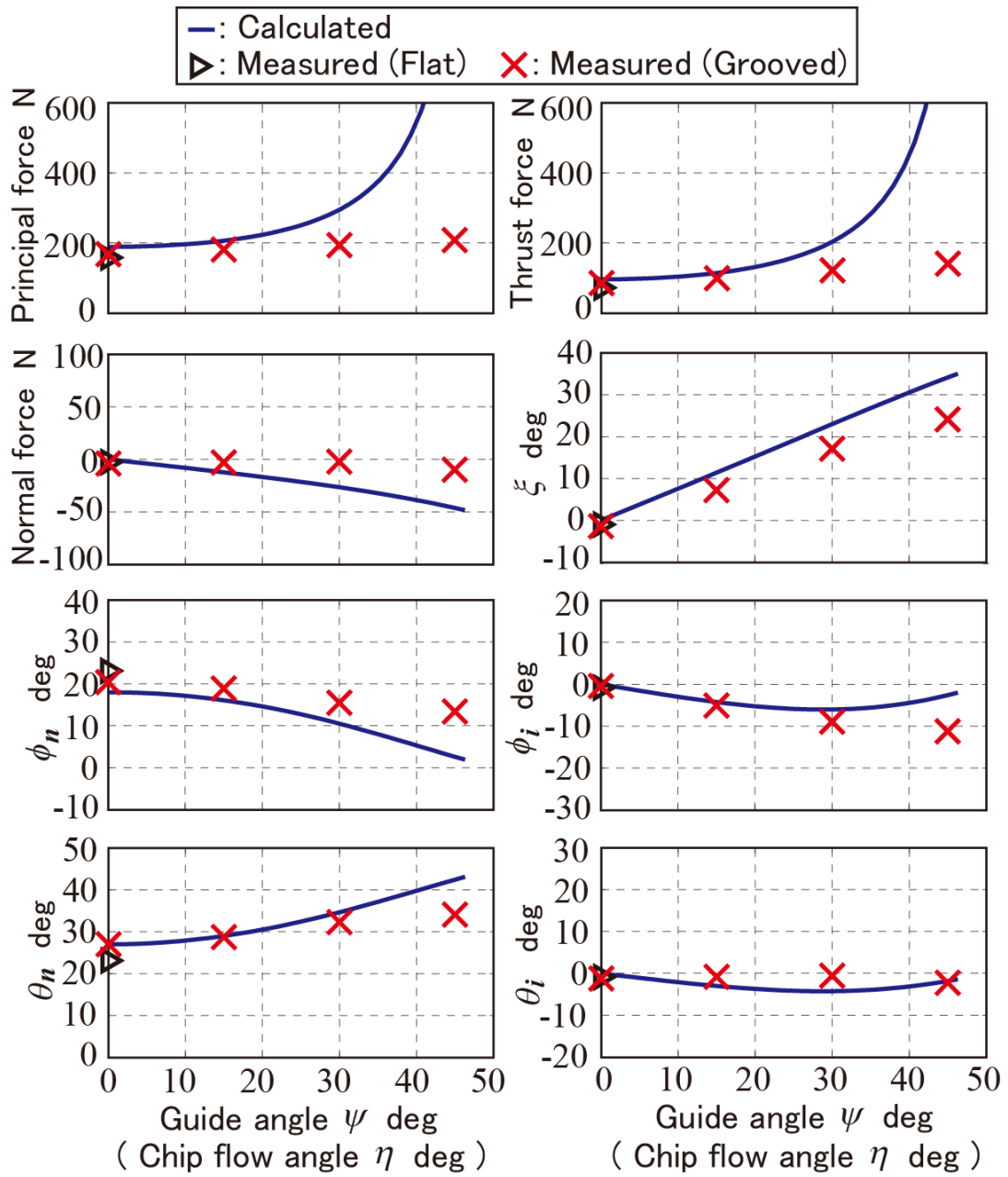


Fig. 2.31 Calculated and measured parameters of chip-guiding cutting



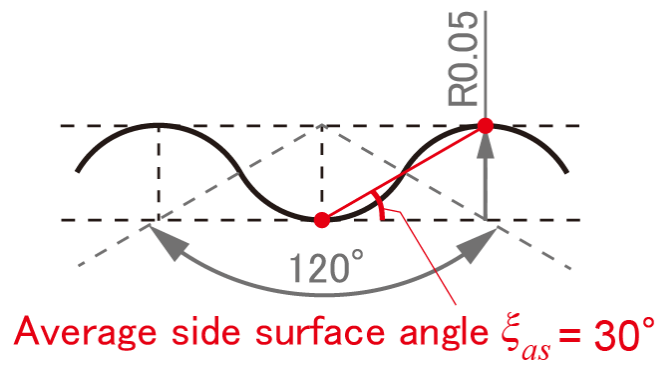


Fig. 2.32 Cross sectional drawing of guide grooves

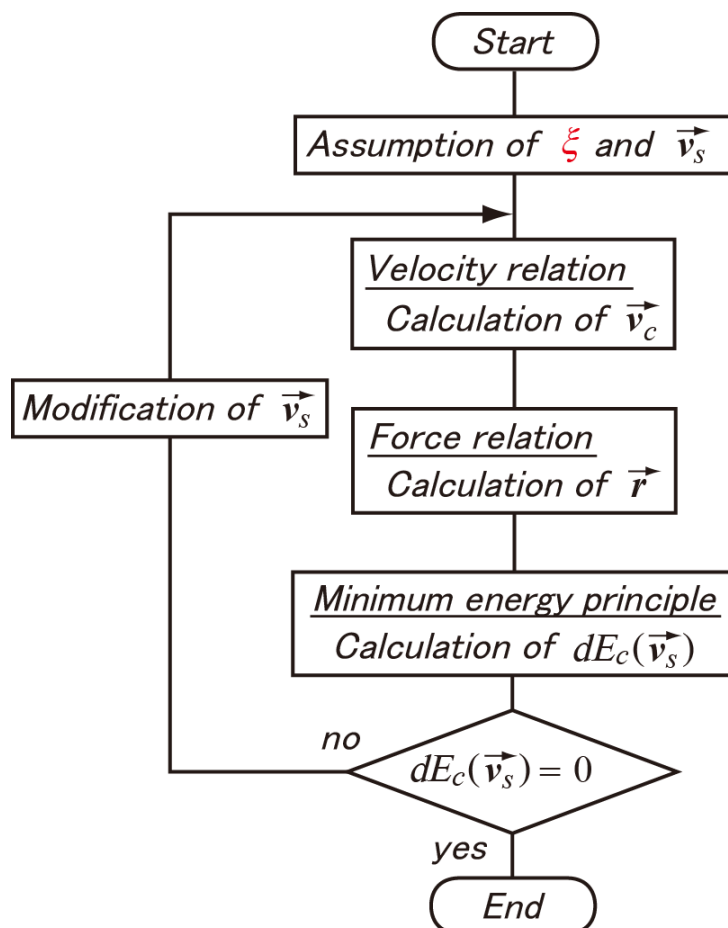


Fig. 2.33 Analysis procedure of chip-guiding cutting process based on minimum energy principle

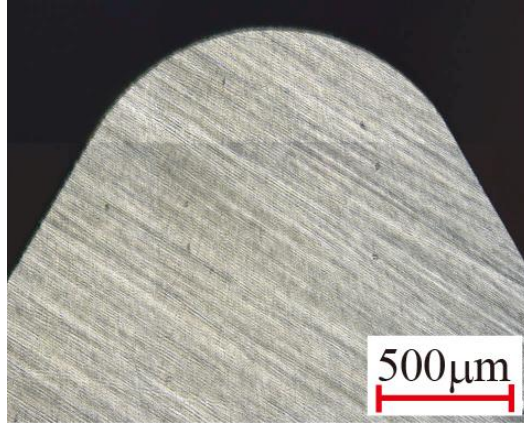
## 2.4 溝形状と案内角度の検討

### 2.4.1 目的

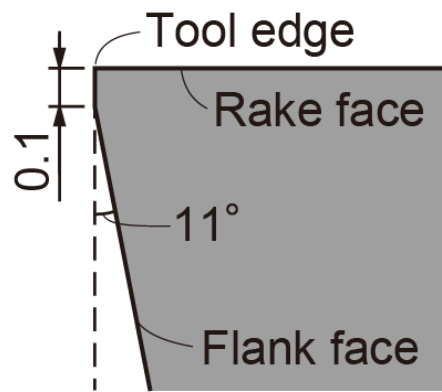
本節では、切りくず案内切削の可能な加工条件の拡大を目指し、第 2 節で基本形状とした案内溝に対して、その溝形状の変更を試みる。加工実験により、切りくずカールを抑制する溝形状について調査した後、案内角度が切りくず形状及び切削力に及ぼす影響についても調査する。本節で得られた結果から、次章で実施する切りくず引張切削で用いる溝付き工具と加工条件を決定する。

### 2.4.2 溝形状の変更

案内溝の深さ(Depth), 隣り合う溝との間隔(Width), 溝側面の勾配(開き角(Concave angle))に着目し、溝付き工具を試作した。このとき、溝深さと間隔については、前節で記した平均的な側面角度 $\xi_{as}=30^\circ$ 以上となるように配慮した。ノーズ半径 0.8 mm, 逃げ角  $11^\circ$ , 刃先角  $60^\circ$ で平らなすくい面を持つ図 2.34(a)の超硬工具 (P 種) に対して、そのすくい面にプロファイル研削により案内溝を施した。製作した溝付き工具の断面形状とすくい面の顕微鏡写真を表 2.4 に示す。断面形状について、曲率半径, 溝間隔, 溝側面の勾配から幾何学的に決まるが、ここでは比較のために溝深さも示した。また、製作の都合上、曲線部は R0.05 以上とした。各溝形状について、工具 A は溝の開き角  $60^\circ$ , 溝深さ  $50\ \mu\text{m}$  の曲線構造, 工具 B は溝深さが  $200\ \mu\text{m}$  となるように工具 A を相似拡大させた構造, 工具 C は開き角  $10^\circ$ , 溝の間隔  $330\ \mu\text{m}$  で曲線と直線を合わせた構造で溝の深さを  $92\ \mu\text{m}$  とした。工具 D, E, F は工具 C の一部を変更した構造を持つ。溝の間隔を  $200\ \mu\text{m}$  に狭くした曲線構造, 開き角を  $111^\circ$  に大きくした構造, 直線部を調整し溝深さを  $150\ \mu\text{m}$  とした構造をそれぞれ工具に施した。工具 G は溝側面の直線部を伸ばすことで溝深さを  $300\ \mu\text{m}$  とした。また、球面加工の際、刃先に存在する溝は逃げ角があることで加工精度に影響を与えることを考え、全工具の刃先先端で逃げ角が  $0^\circ$  となるように処理を行った。その処理は、逃げ面から見たとき工具最上面から工具 A で  $50\ \mu\text{m}$ , 工具 B で  $200\ \mu\text{m}$ , 工具 C, D, E で  $140\ \mu\text{m}$ , 工具 F, G で  $300\ \mu\text{m}$  の幅に対して行った。さらに、比較のために、同様の超硬工具に対して案内溝の無い平らなすくい面を持つ工具を製作した。同じ加工面とするため、平らなすくい面をプロファイル研削により施した。なお、刃先について溝付き工具と合わせ、逃げ面から見て  $100\ \mu\text{m}$  の幅で逃げ角が  $0^\circ$  となるように処理を行った (図 2.34(b)参照)。製作の容易さの観点から、溝付き工具 C, D, E, F, G は、刃先の頂部から 3 mm 後方の範囲に案内溝が施されている。この案内溝の存在するすくい面内で切りくずが生成されることは事前に確認している。



(a) Microphotograph of rake face



(b) Shape of tool edge

Fig. 2.34 Original tool tip with flat rake face and chamfered edge

Table 2.4 Cross-sections of designed guide grooves and microphotographs of rake faces

Type	Cross-sectional drawing	Microphotograph
A	<p>Curvature R0.05 Concave angle 60° Width 0.173 Depth 0.05</p>	<p>Engagement region Cut surface side Uncut surface side 500µm</p>
B	<p>Curvature R0.2 Concave angle 60° Width 0.693 Depth 0.2</p>	<p>500µm</p>
C	<p>Curvature R0.05 Concave angle 10° Width 0.33 Depth 0.092</p>	<p>500µm</p>
D	<p>Curvature R0.05 Concave angle 10° Width 0.2 Depth 0.092</p>	<p>500µm</p>
E	<p>Curvature R0.05 Concave angle 111° Width 0.33 Depth 0.092</p>	<p>500µm</p>
F	<p>Curvature R0.05 Concave angle 10° Width 0.33 Depth 0.15</p>	<p>500µm</p>
G	<p>Curvature R0.05 Concave angle 10° Width 0.35 Depth 0.3</p>	<p>500µm</p>

### 2.4.3 溝付き工具による加工実験の方法及び条件

溝形状が切りくず形状に及ぼす影響を確認するため、加工実験を行った。被削材は冷間圧延鋼板（JIS:SPCC）製で、直径 150 mm の円板材とし、図 2.35 に示すように、主軸回転軸に対して案内角度  $\psi=45^\circ$  に設定した端面切削を行った。加工条件を表 2.5 に示す。この条件において、案内溝は 1 本以上関与することを確認している（表 2.4 の被削材が切り取られる切削領域(Engagement region)を参照）。なお、比較のために、平らなすくい面を持つ工具に対しても同様に実験を行った。このとき、図 2.36(a)のように切りくずはカールしたこと、図 2.36(b)のように工具下に取り付けられた動力計により測定された背分力  $F_f=150.2$  N、送り分力  $F_{fe}=94.1$  N からすくい面上に働く摩擦力方向が  $32.1^\circ$  であることを確認した。その摩擦力方向は切りくず流出方向と一致するため、今回の実験では案内溝により、 $45-32.1=12.9^\circ$  の角度だけ強制的に流出方向を変更することとなる。

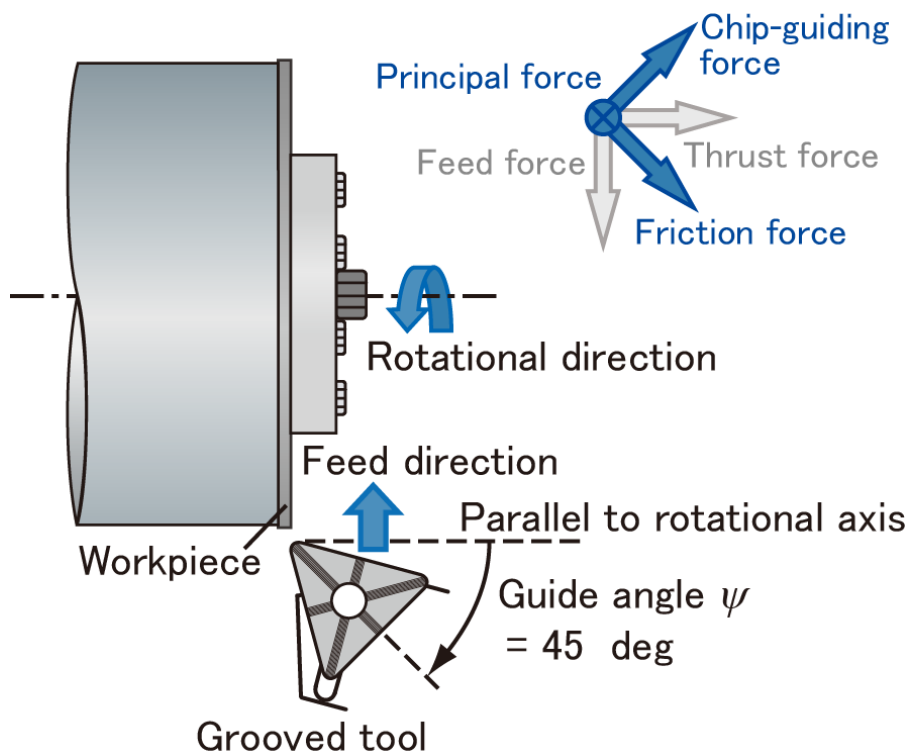
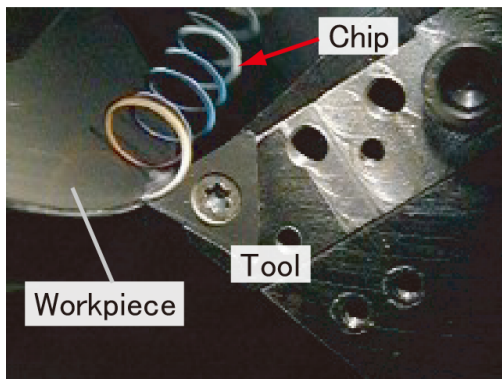


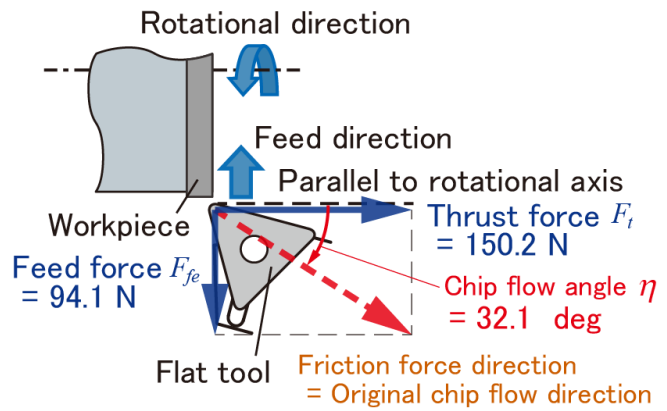
Fig. 2.35 Face turning experiment setup

Table 2.5 Conditions of first set of cutting tests

Workpiece	Material	Cold rolled steel (JIS: SPCC)
	Diameter	150 mm
Tool	Material	Sintered tungsten carbide
	Rake/relief angle	0/11 deg
	Nose radius	0.8 mm
Process		Face turning
Cutting conditions	Rotational speed	561 rpm
	Cutting speed $V$	238–264 m/min
	Depth of cut $d$	0.4 mm
	Feed rate $f$	0.12 mm/rev
	Guide angle $\psi$	45 deg



(a) Side-curl of cut chip



(b) Cutting force directions and original chip flow angle

Fig. 2.36 Reference experiments performed on the original flat rake faced tool

#### 2.4.4 溝形状に対する流出切りくずと切削力の比較

定常状態における溝付き工具 A, D, F の切りくず流出を図 2.37 に示す。図の写真右方向が流出を強制する案内溝の方向となる。

はじめに、溝の無い平らなすくい面を有する工具では、切りくずカールが生じる（図 2.36 参照）のに対して、溝付き工具 G では切りくず流出自体を妨げてしまい、欠損が生じたが、他の溝付き工具では、案内溝に沿って切りくずが流出した。そのため、案内溝による切りくず流出方向制御は可能であることが確認できた。また、図からも分かるように溝の無い工具に比べ、溝付き工具では切りくずカールが抑制された。しかし、その効果は案内溝形状で異なったため、流出した切りくずのカール径から詳細に比較した。

以下では、各種測定結果から案内溝形状の影響に関する考察を示す。各工具に対する切りくずカールの曲率 $\rho_c$ 、切削力の測定値、その測定値から算出した摩擦角 $\beta$ 及び垂直抗力の傾き角 $\xi$ を図 2.38 にまとめて示す。ここで、 $\xi$ は、切りくず流出を強制する力である溝側面を押す力(Chip-guiding force)によって、すくい面垂直抗力が溝に垂直な面内で見掛けのすくい面法線方向に対して傾いた角度である（図 2.17(b)参照）。

まず、溝付き工具 A-F に対するカール抑制について考察する。工具 A について、切りくずのカールを抑制することが分かった。また、工具 A の溝形状を相似拡大した工具 B について、工具 A よりカールを抑制することが分かった。このことから、案内溝が深くなることで、カールの抑制効果は大きくなるが、溝間隔を大きくすることは切削に関与する溝本数の減少に繋がり、特に切取りの小さい条件で切りくずカールは生じ易くなると推察される。工具 C について、工具 B と比較すると、大きな変化がないことが分かった。また、工具 C と D を比較すると、いずれも工具 D の方がわずかにカールを抑制することが分かった。このことから、溝間隔を小さくし、切削に関与する溝本数が増加することで、真直ぐな切りくずが流出することを確認した。さらに、工具 C に対して開き角を大きくした工具 E について、工具 C と比較すると、切りくずカールが生じ易くなることが分かった。このことから、溝側面の開き角は小さくすることで、案内溝に入り込んだ材料を把捉できカールを抑制できると考えられる。加えて、工具 C に対して溝を深くした工具 F について、工具 C と比較すると、カールがわずかに生じ易くなることが分かった。このことから、切りくずカールを最も抑制する適切な案内溝深さが存在することが推察される。

次に、切削力の各成分と諸変数について考察する。切削力は工具下に取り付けられた動力計から測定し、主分力、摩擦力、溝側面を押す力（強制力）の定常状態における平均値を示す。主分力、摩擦力は、案内溝形状によって大きく変化しないことが分かった。一方、



強制力は切りくず流出を変化させる際に生じるため、溝付き工具でのみ発生する。溝が最も深い工具 F で最も大きい、概ね一定であることが確認できた。

傾き角 $\xi$ について、溝の無い工具では垂直抗力の傾きはないため $\xi=0^\circ$ であり、溝付き工具 F が最も大きい、概ね  $11^\circ$ 前後であることが分かった。このことから、切りくず流出 ( $\eta=32.1^\circ$ ) を溝方向 ( $\psi=45^\circ$ ) に強制する際、溝の側面から切りくずに加えられる強制力は案内溝形状によって変化せず一定であると考えられる。

摩擦角 $\beta$ は実質の垂直抗力 (Principal force と Chip-guiding force の合力) に対する摩擦力との関係から算出した (2.3.8 項参照)。各工具を比較すると、溝の有無に関わらず大きく変化しないことが分かった。なお、測定結果の変動について、刃先処理が各工具で異なるため、エッジフォース成分を切削力から除去していないことが影響している。

工具 C, D で流出した切りくずのすくい面側の顕微鏡写真とその断面形状を図 2.39 に示す。断面形状の測定には、キーエンス社製のレーザ顕微鏡を用いた。切りくずの表面形状を計測したため、その凸部は溝付き工具の溝部 (凹部) に対応する。各工具とも流出した切りくずには、案内溝と反対の形状が転写されており、材料が溝内部全体に入り込むことが分かった。また、図 2.39(a)の工具 C について、断面形状の左端部が溝形状と異なっていた。この部分は切削に関与しない工具の溝部に相当するため、材料の横広がりにより材料が流れ込んだことで生じたと考えられる。

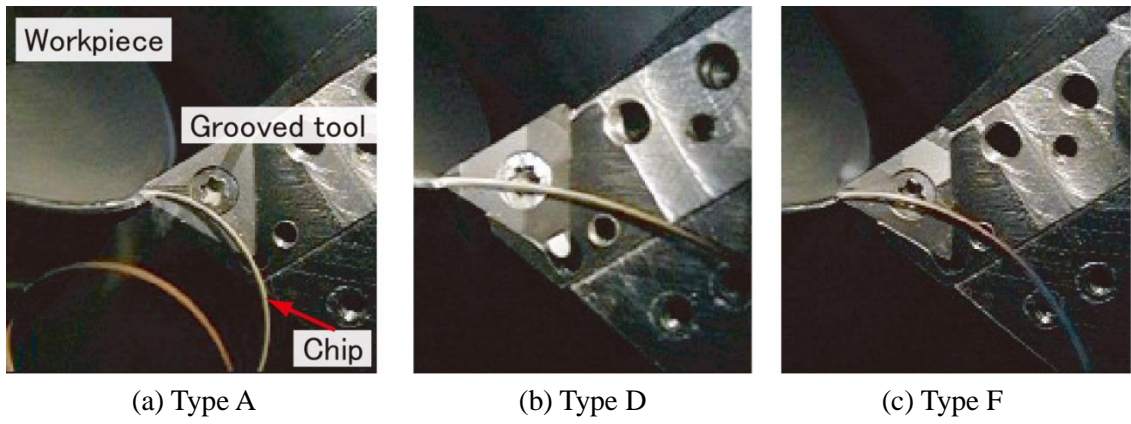


Fig. 2.37 Photographs of chip flow with grooved tools

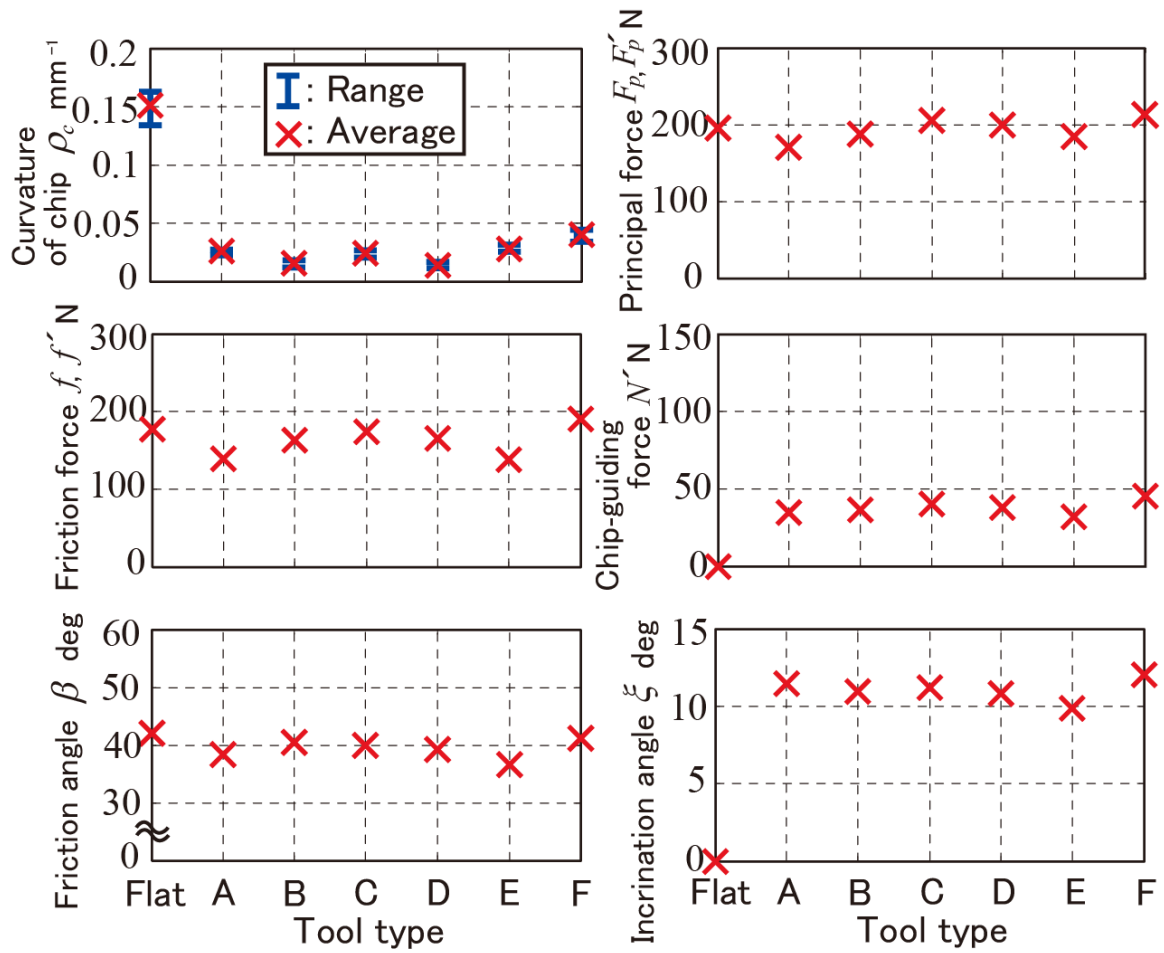


Fig. 2.38 Experimental results with flat and grooved rake faced tools

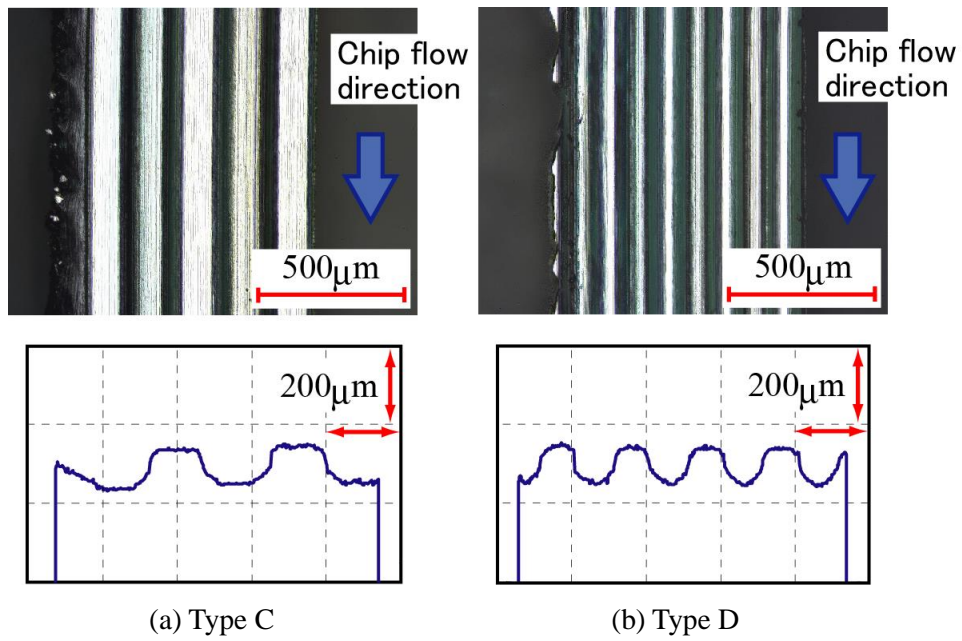


Fig. 2.39 Pictures of the chip back surface and measured surface topography

#### 2.4.5 案内角度の変更と加工実験の方法及び条件

案内角度が切りくず形状及び切削力に与える影響を確認するため、2.4.2 項で使用した溝付き工具 A, C, D を用いて、加工実験を行った。すくい面上から見た実験装置の配置図を図 2.40 に示す。主軸回転軸に対して垂直方向から案内角度  $\psi=45^\circ, 30^\circ, 15^\circ, 0^\circ$  となるように装置を配置した。被削材は S45C の円柱材で外形旋削を繰り返し行ったため、直径は 119-114 mm の範囲で実験を行った。加工条件を表 2.6 に示す。切込み  $d$  と送り  $f$  の組合せ( $d, f$ )を Set-1( $d=0.4$  mm,  $f=0.12$  mm/rev), Set-2( $d=0.25$  mm,  $f=0.25$  mm/rev)の 2 条件とした。なお、比較のために、2.4.2 項で使用した溝の無い工具についても同様に実験を行った。そのときの切りくず流出の様子を図 2.41 に示す。流出した切りくずは概ね同程度のカーブであることを確認した。切削力は、工具下に取り付けられた動力計により測定した。このとき、すくい面上に働く摩擦力方向は切りくず流出方向と一致し、各条件で  $\eta=31.2^\circ, 18.0^\circ$  であることを確認した (図 2.40 参照)。今回の実験では、案内角度  $\psi$  と切りくず流出角度  $\eta$  は加工条件により変化し、それらの角度差だけ強制的に流出方向を変更することとなる。

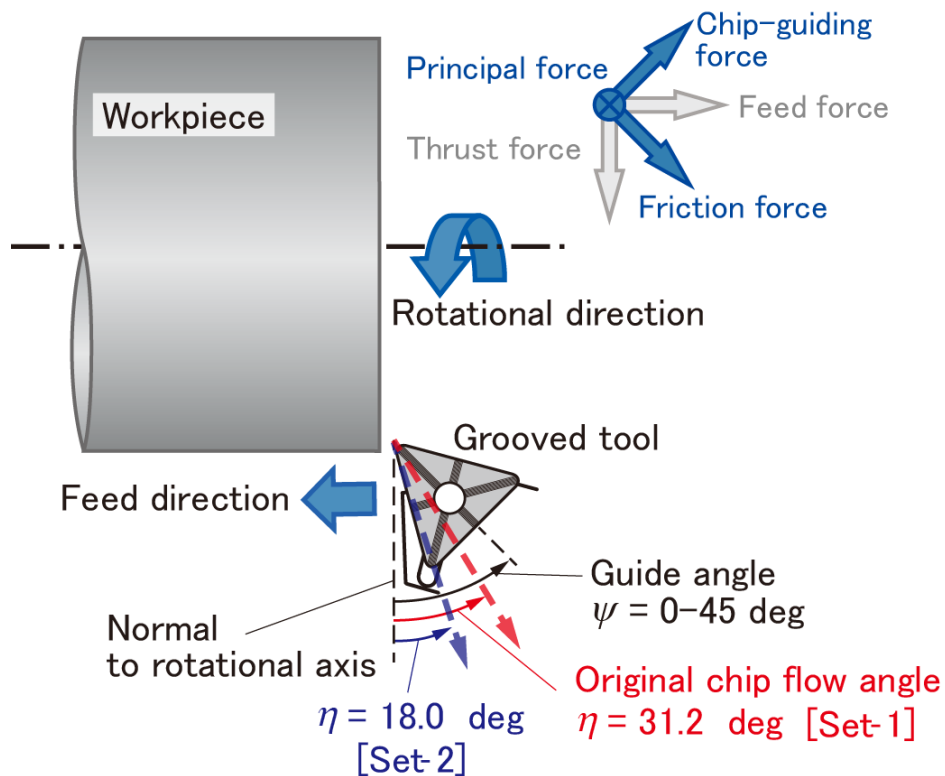
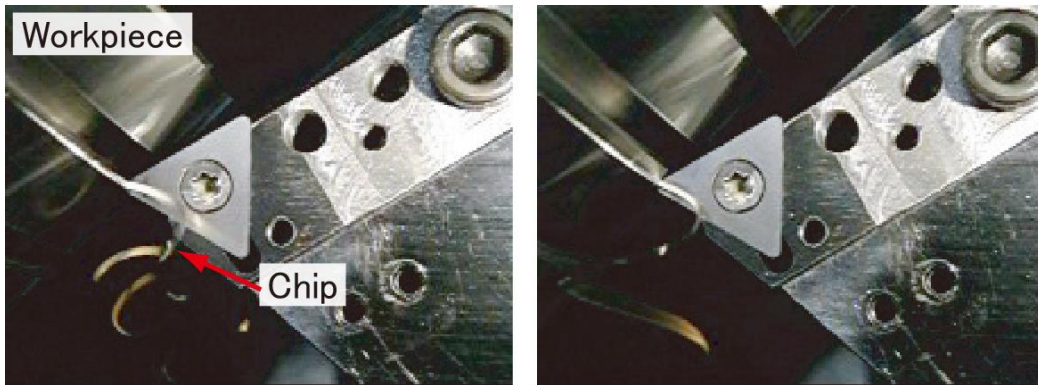


Fig. 2.40 Turning experiment setup

Table 2.6 Conditions of second set of cutting tests

Workpiece	Material	Carbon steel (JIS: S45C)
	Diameter	114–119 mm
Tool	Material	Sintered tungsten carbide
	Rake/relief angle	0/11 deg
	Nose radius	0.8 mm
Process		Turning
Cutting conditions	Rotational speed	769 rpm
	Cutting speed $V$	275–287 m/min
	Depth of cut $d$	0.4 , 0.25 mm
	Feed rate $f$	0.12 , 0.25 mm/rev
	Guide angle $\psi$	0–45 deg



(a)  $d=0.4$  mm,  $f=0.12$  mm/rev

(b)  $d=0.25$  mm,  $f=0.25$  mm/rev

Fig. 2.41 Chip flow with flat rake face

#### 2.4.6 案内角度に対する流出切りくずと切削力の比較

Set-1( $d=0.4$  mm,  $f=0.12$  mm/rev)で案内角度 $\psi=30^\circ, 0^\circ$ における切りくず流出の様子を図 2.42 に示す. なお, 案内溝方向は図の右方向である. 図から, 刃先付近における切りくずは案内溝に沿って流出することが分かった. また, 案内角度 $\psi=30^\circ$ ではカールが抑制され, 真直ぐな切りくずが流出し,  $\psi=0^\circ$ では溝の無い工具よりも強いカールが生じることが分かった. 次に, Set-2( $d=0.25$  mm,  $f=0.25$  mm/rev)で案内角度 $\psi=15^\circ, 0^\circ$ における切りくず流出の様子を図 2.43 に示す. Set-1 の時と同様に, 刃先付近では案内溝に沿って流出することが分かった.

加工後に取得した切りくずカール径を測定した. 各加工条件に対して 5 点測定したときの平均値の曲率を図 2.44 に示す. 案内角度で比較すると, 溝の無い工具の摩擦力方向から判明した本来の切りくず流出角度 ( $\eta=31.2^\circ, 18.0^\circ$ ) と案内角度 $\psi$ を一致させると切りくずカールを抑制し易いことを確認できた. 次に, 各溝付き工具で比較すると, Set-1 及び Set-2 の両条件で溝付き工具 D が最も良くカールを抑制することが分かった. 特に, Set-1 では曲率  $0.05$  mm<sup>-1</sup> 以下の直線状の切りくずも流出した. 一方で, Set-2 では曲率  $0.05$  mm<sup>-1</sup> 以上の切りくずしか流出せず, 工具 C においてはカール抑制効果が低い案内角度 ( $15^\circ$  以下) が存在した. これは, 刃先で切削に関与する溝本数が影響したと考えられる. Set-1 よりも切取りの小さい Set-2 では, 図 2.45 に示すように, 切削に関与する溝本数は 1 本程度少なくなり, 切りくずを拘束する力が弱まり, カールを許容したものと推察される. したがって, 切取りの大きい Set-1 で溝間隔の狭い工具 D では, 切削に関与する溝本数は 3 本以上となり, 案内角度の変化による影響を受け難くなるが, 切取りの小さい Set-2 で溝間隔の広い工具 C では, 溝本数は 1 本程度となり, その影響を受け易いと推察される.

主分力, 摩擦力, 強制力の 3 方向成分の測定値, 測定値から算出した垂直抗力の傾き角 $\xi$ , 摩擦角 $\beta$ 及びすくい面上の力角度 $\gamma$ を図 2.46 及び 2.47 にまとめて示す. 主/背分力について, 案内角度が変化しても概ね一定であることが分かった. また, 溝の無い工具に比べて, 溝付き工具では増加する傾向であった. これは, 前節の圧延鋼より強度の高い炭素鋼に変わったことで, 変形抵抗が増加[2-19] [2-20]し, 案内溝に塑性変形させるために要する力が顕著に増加したと推察される. 次に, 強制力は本来の切りくず流出角度をゼロとして, 案内角度に概ね比例することを確認した. 切りくず流出を強制する角度が大きい案内角度では, 溝付き工具 A の強制力は工具 C, D に比べてわずかに弱いことも確認できた. この強制力の傾向は, 垂直抗力の傾き角 $\xi$ についても同様であった. そのため, 前節と同様に, 開き角が狭い溝付き工具 C, D の方が強制力を生じさせ得ることが分かった.

次に, 実質の垂直抗力に対する摩擦角 $\beta$ について, 各案内角度で比較すると, 概ね一定で

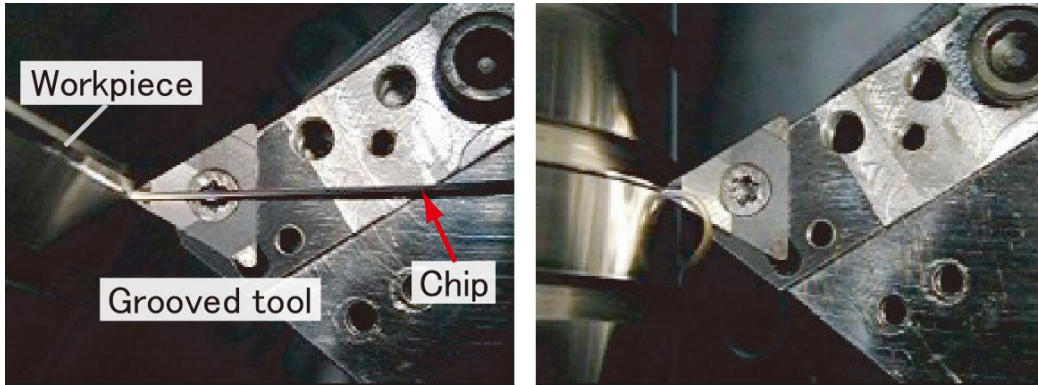
あったが、各溝付き工具で比較すると、案内角度に関係なく工具 D, C, A の順で溝の無い工具よりも摩擦角 $\beta$ は大きくなることが分かった。これは、先述の変形抵抗の増加により溝内の圧力が高くなり、(前節の溝付き工具 G のように切りくずの流出を妨げ、工具欠損に至らないまでも) 擦過する表面積の増加の影響で摩擦力が増加したことで、被削性を悪化させたと考えられる。そのため、主/背分力の増加は、変形抵抗と摩擦力の増加により生じたと推察される。

これに対して、すくい面上の力角度 $\gamma$ は、案内角度の増加により若干減少する傾向があるが、概ね溝の無い工具と同じであることが分かった。この理由は、前節で記したように、案内溝方向に摩擦力が生じる一方で、切りくず流出を強制するための力が加わり、それらが相殺するためである。なお、案内角度の増加に対して力角度 $\gamma$ が減少する理由については、次項で説明する。

本項で得られた各種測定結果を表 2.7 にまとめた。表には、式(11)のように定義した溝付き工具の主分力増加率 $r_{FP}$ も追記した。 $r_{FP}$ を比較すると、溝の無い工具(Ordinary)から溝付き工具(Chip-guiding)に変更すると主分力は 11-34 %増加することが分かった。特に、溝の間隔が狭く、溝が深く、開き角が狭い溝形状では、切りくずの拘束が強くなり、カール抑制効果が大きくなるが、主分力は増加し易いことを確認した。なお、この表は、次章において切りくず引張切削による切削力及び切削エネルギーの低減効果を検証する際にも用いる。

$$r_{FP} = \frac{F'_{p(Chip-guiding)} - F_{p(Ordinary)}}{F_{p(Ordinary)}} \times 100 \quad (11)$$





(a)  $\psi = 30^\circ$

(b)  $\psi = 0^\circ$

Fig. 2.42 Chip flow with grooved rake face ( $d=0.4$  mm,  $f=0.12$  mm/rev)



(a)  $\psi = 15^\circ$

(b)  $\psi = 0^\circ$

Fig. 2.43 Chip flow with grooved rake face ( $d=0.25$  mm,  $f=0.25$  mm/rev)

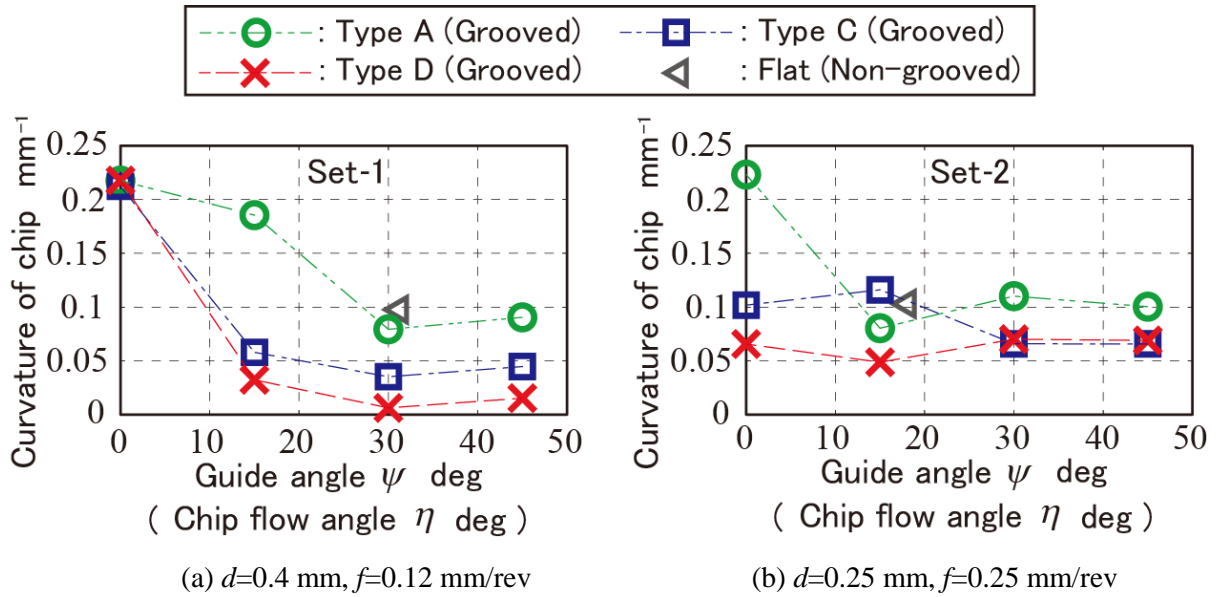


Fig. 2.44 Measured average chip curvatures

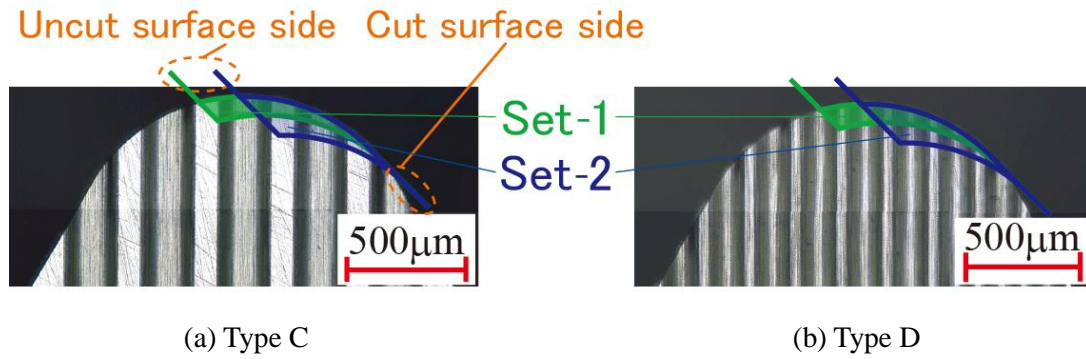


Fig. 2.45 Engagement regions of workpiece on grooved tool edges at guide angle of  $45^\circ$

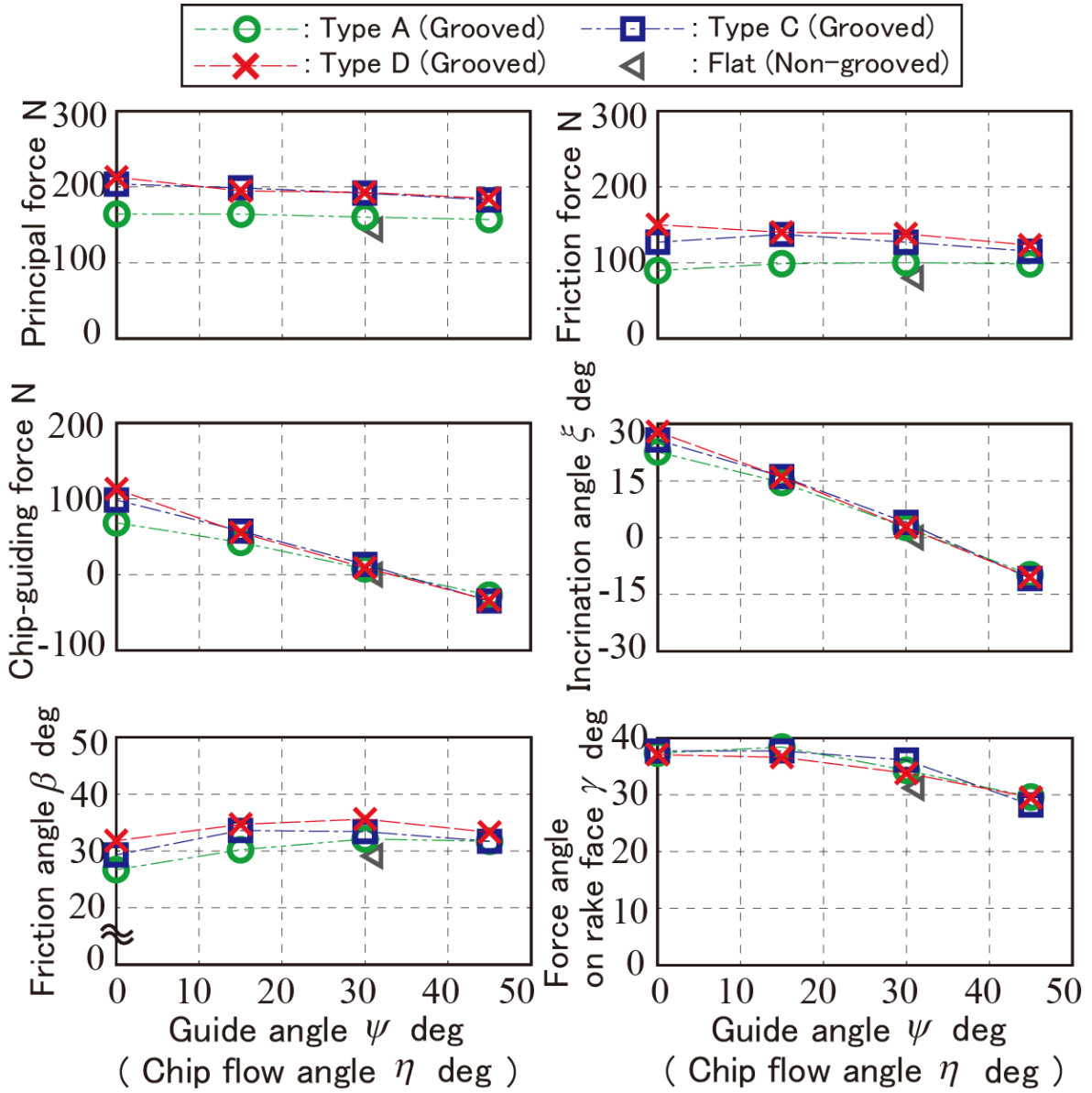


Fig. 2.46 Experimental results at various guide angle (Set-1:  $d=0.4$  mm,  $f=0.12$  mm/rev)

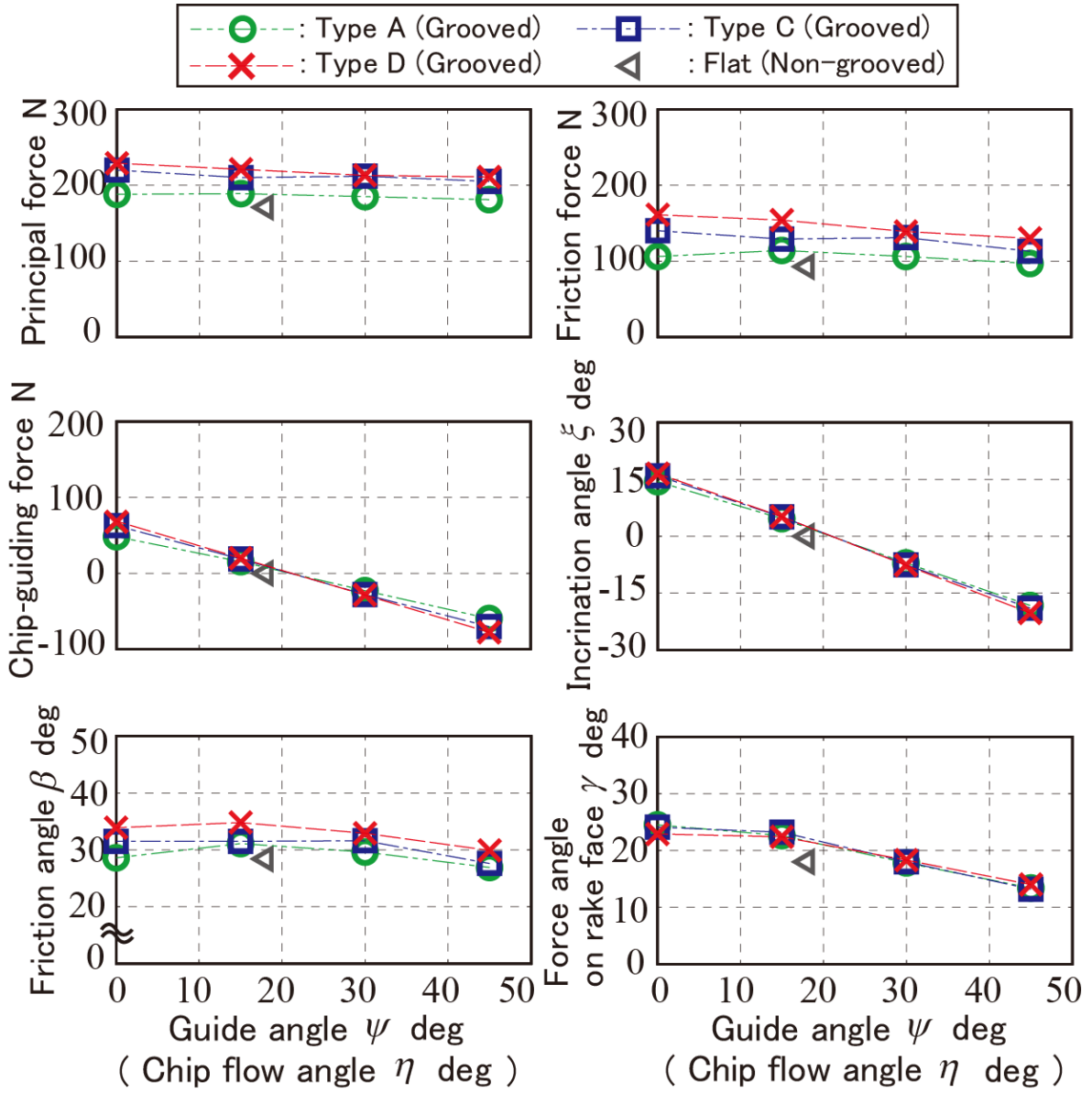


Fig. 2.47 Experimental results at various guide angle (Set-2:  $d=0.25$  mm,  $f=0.25$  mm/rev)

Table 2.7 Results of turning tests

(a) Set-1 at guide angle  $\psi=30^\circ$ ( $\approx$ Original chip flow angle)

Cutting process	Tool type	Principal force $F_p, F_p'$ N	Froce change rate $r_{FP}$ %	Average curvature of chip $\rho_c$ mm <sup>-1</sup>
Ordinary	Flat	144	–	0.098
Guiding	A	160	+11	0.079
	C	192	+33	0.035
	D	193	+34	0.0062

(b) Set-2 at guide angle  $\psi=15^\circ$ ( $\approx$ Original chip flow angle)

Cutting process	Tool type	Principal force $F_p, F_p'$ N	Froce change rate $r_{FP}$ %	Average curvature of chip $\rho_c$ mm <sup>-1</sup>
Ordinary	Flat	171	–	0.10
Guiding	A	189	+11	0.080
	C	210	+23	0.12
	D	211	+23	0.049

#### 2.4.7 切りくず流出制御に伴うすくい面上の力角度変化

案内角度 $\psi$ の増加により，すくい面上の力角度 $\gamma$ が大きく変化しなかったことは，前節及び前項で確認した．ここでは， $\gamma$ が $\psi$ の増加に応じて減少したことを考察する．溝の無い工具(Tool with flat rake)と溝付き工具(Tool with grooved rake)における切りくずに及ぼす力関係を図 2.48 に示す．まず，溝の無い工具で加工したとき，切削合力 $\vec{F}_r$ とせん断力 $\vec{F}_s$ は同一面内に存在するため，本実験の加工条件から傾斜角  $0^\circ$ ，すくい角  $0^\circ$ の単純な切削と見なすことができる．このときの切りくず流出方向と切削力の各成分を破線で示す．なお，図中の主分力 $\vec{F}_p$ は切削方向と反対方向であり，摩擦力 $\vec{f}$ は切りくず流出方向と反対方向となる．一方で，溝付き工具では，切りくずの流出を案内溝の方向に強制するため，摩擦力 $\vec{f}'$ は溝方向に変化する．この $\vec{f}'$ には，溝側面から切りくずの流出を強制する力 $\vec{N}'$ が切りくずに作用するため，切削合力 $\vec{F}_r'$ は $\vec{F}_r$ と概ね一致する．正確には，図に示すように， $\vec{N}'$ は $\vec{f} - \vec{f}'$ の差以上に作用する傾向となる．これは，切削方向と切りくず流出方向が成す面内でせん断は生じ，そのせん断方向に投影した切削合力 $\vec{F}_r'$ の成分がせん断力 $\vec{F}_s'$ である必要があるために生じる．従って，これを満たす $\vec{F}_r'$ と $\vec{F}_s'$ の関係は図のようになる．

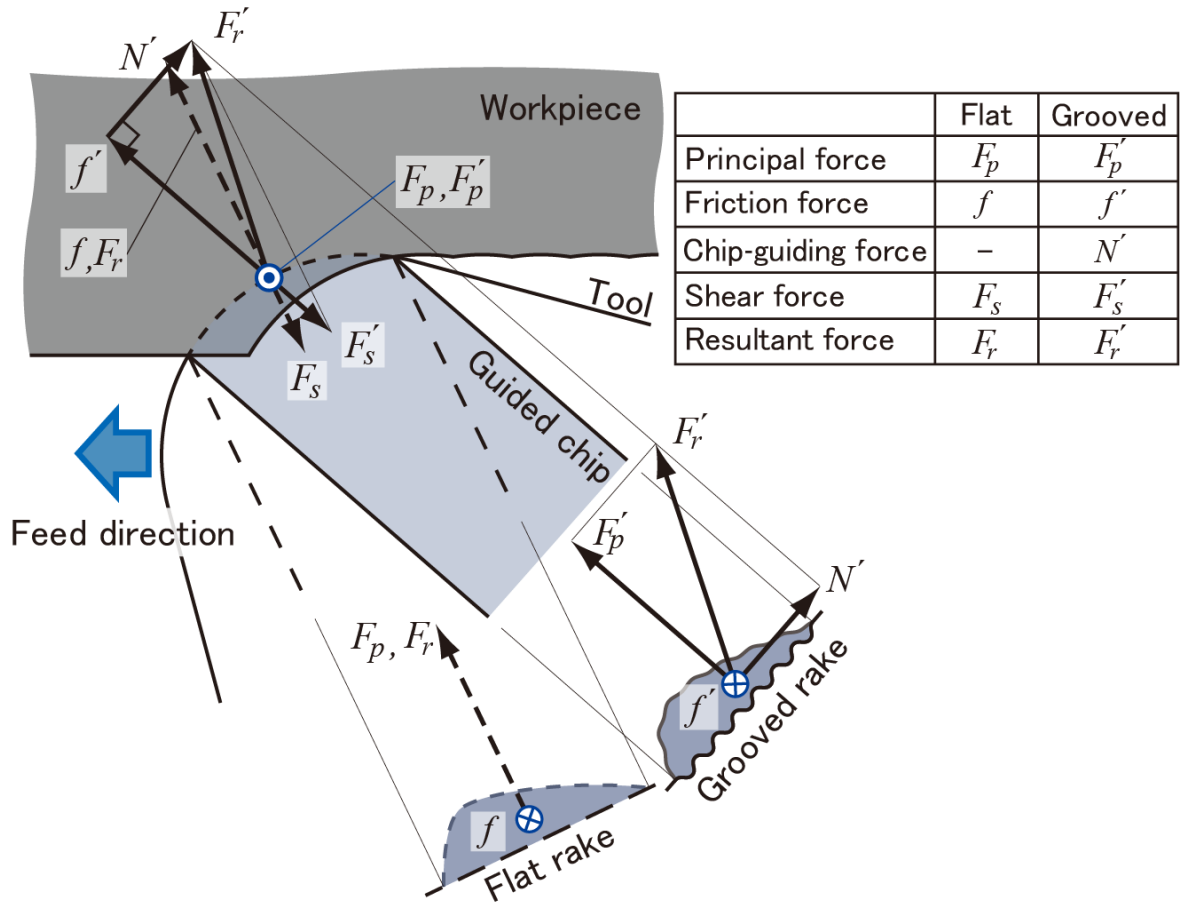


Fig. 2.48 Forces acting on the chip in ordinary and chip-guiding processes  
(Top view to the rake face)

#### 2.4.8 誘導路による切りくず案内切削の検証

切りくず引張切削による切削力及び切削エネルギーの低減効果を検証する加工条件を決めるため、誘導路出口まで切りくずを誘導する加工実験を行った。2.4.2 項で最もカールを抑制した溝付き工具 D と、図 2.12 に示した誘導路装置を用いた。加工条件は表 2.6 と同様とし、各条件に対して切りくずの誘導を 3 回試みた。

#### 2.4.9 誘導結果

切りくず流出角度  $\eta$  (図 2.40 参照) と実験結果をまとめて表 2.8 に示す。誘導に 3 回とも失敗した条件 ( $\psi=0^\circ$ ,  $d=0.4$  mm,  $f=0.12$  mm/rev) は 1 つのみで、他の条件では 3 回とも成功した。本加工実験でも、本来の流出方向に近い案内角度範囲において、切りくず案内切削に成功することを確認できた。失敗した条件では、切りくずが通過せず誘導路内で詰まっていた。ここで、表 2.3 で示したように、溝付き工具 A で、切込み  $d=0.4$  mm, 送り  $f=0.12$  mm/rev において案内角度  $\psi=15^\circ$  以下の条件では失敗することがあった。これらの実験結果と、切りくずカールの測定結果 (図 2.44) を比較すると、曲率が  $0.1$  mm<sup>-1</sup> 以下の切りくずが案内溝に沿って流出する場合には、誘導に成功することが分かった。曲率が  $0.1$  mm<sup>-1</sup> 以下の切りくずは誘導路内で直線状に矯正され、誘導路出口まで導くことができると考えられる。従って、次章で実施する切りくず引張切削は、切りくずカールを最も抑制した条件である溝付き工具 D, 案内角度  $\psi=30^\circ$ , 切込み  $d=0.4$  mm, 送り  $f=0.12$  mm/rev で行うことにする。

なお、本論文では検討できていないが、刃先で生成される切りくずの位置及び大きさに応じて誘導路位置及び形状を変更することで、誘導に成功する条件範囲をある程度変化・拡大させることは可能であると考えられる。



Table 2.8 Results of chip-guiding cutting with type D grooved tool and guide tunnel

Depth of cut $d$ mm	Feed rate $f$ mm/rev	Chip flow angle with flat rake $\eta$ deg	Guide angle $\psi$ deg			
			0	15	30	45
0.4	0.12	31.2	×	○	○	○
0.25	0.25	18.0	○	○	○	○

○ : Three successful guidance    × : Three failed guidance

#### 2.4.10 切りくず案内切削の有効案内角度範囲の検討

切込み及び送りに対する切りくず案内切削の有効範囲について検討するため、溝の無い工具における切りくず流出方向(Original chip flow direction)の推定を行った。推定には工具刃先形状と被削材の切取りから幾何学的に求められる Colwell 則[2-14]を用いた。Colwell 則に基づくと、図 2.49 に示すように、加工前の被削材表面(Uncut surface)と工具刃先の交点 A と、加工後の被削材表面(Cut surface)と工具刃先の交点 B を結んだ直線に垂直な方向が切りくず流出方向となる。

工具ノーズ半径 0.8 mm に対して、切込み  $d$  及び送り  $f$  を変数として切りくず流出角度  $\eta$  を求めた。図 2.50 の算出結果から、送り  $f$  の変化よりも切込み  $d$  の変化の方が切りくず流出角度を変化させることが分かった。また、切りくず流出角度  $\eta=30^\circ$  の条件であれば切込み  $d$  を約 0.2 mm、 $\eta=20^\circ$  の条件であれば切込み  $d$  を約 0.1 mm 変化させても、 $\eta$  の変化を  $10^\circ$  以下に抑えられることが分かった。前項の実験結果から、案内角度  $\psi$  と本来の流出角度  $\eta$  の角度差が  $10^\circ$  以下で切りくず案内切削に成功すると仮定すると、前述の切込み変化には対応可能であると予想される。

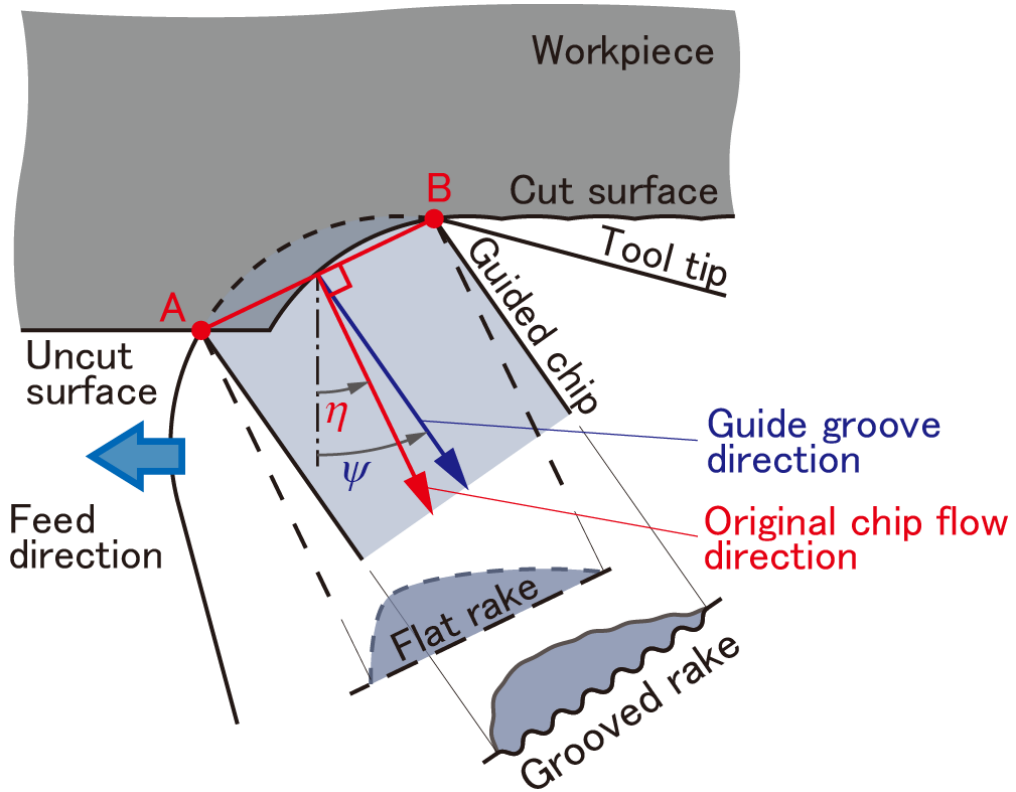


Fig. 2.49 Chip flow direction in ordinary and chip-guiding processes  
(Top view to the rake face)

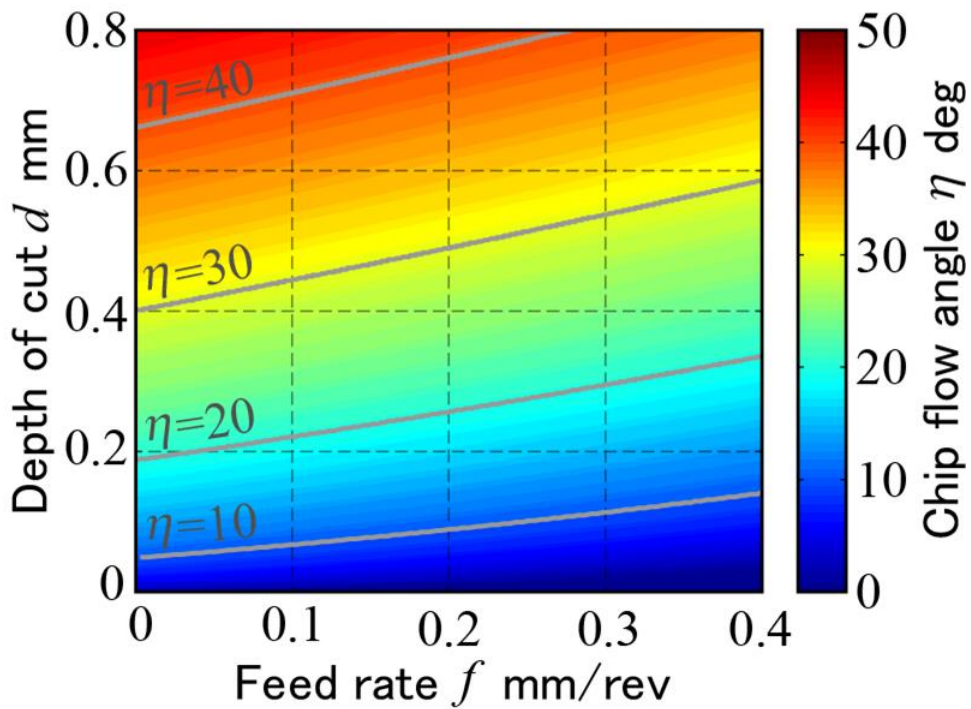


Fig. 2.50 Calculated result of chip flow direction according to Colwell's law

## 2.5 結言

本章では、切りくず案内切削を可能にする溝付き工具の案内溝形状とその溝方向が切りくず流出方向、切りくず形状、切削力に及ぼす影響について調査した。以下に、加工実験及び数値解析で得られた結果をまとめる。

[1] 単一溝付き工具による軟鋼の旋削加工実験から、切削に関与する刃先に深さ 150-300  $\mu\text{m}$ 、幅 100-300  $\mu\text{m}$  の単一溝を形成することで、横向きカールの抑制と流出方向の制御が可能であることを確認した。同時に、すくい面に垂直な直線状に単一溝を形成すると工具欠損が生じ易いことが分かった。

[2] [1]の知見に基づき、溝断面形状を半径 0.05 mm の曲線で構成し、深さ 50  $\mu\text{m}$  の複数溝付き工具を考案した。この溝付き工具に誘導路を取り付けた旋削加工実験を行った結果、切込み  $d=0.2-0.8$  mm, 送り  $f=0.06-0.24$  mm/rev の範囲において、切りくずが誘導路を通過し、切りくず案内切削に成功する案内角度  $\psi$  が存在することを確認した。

[3] 直線切れ刃を有する複数溝付き工具に対応した切りくず案内切削プロセスモデルを構築した。本来の切りくず流出角度に対して強制する角度が大きいほど、主分力は増加する傾向であった。なお、解析モデルによる数値解析では、強制角度が  $30^\circ$  のとき、主分力の増加は 56 % であった。

[4] 案内溝側面が切りくずを押す力により相当すくい面垂直抗力は見掛けのすくい面法線方向から案内溝方向に垂直な面内で傾き、切りくず流出方向はその溝方向に強制される。このすくい面垂直抗力の傾きにより合成切削力が仕上げ面となす角度  $\theta_n$  が増大し、その結果、垂直せん断角  $\phi_n$  が減少して切削力が増加する。

[5] 案内角度  $\psi$  が増加しても、すくい面上における切削力の方向は、大きく変化しない。これは、案内溝側面が切りくずを押す力が増大する一方、切りくずに働く摩擦力が傾き、それらの切れ刃に平行な成分が相殺するためである。

[6] 案内溝の深さ 50-300  $\mu\text{m}$ 、間隔 173-693  $\mu\text{m}$ 、開き角  $10-111^\circ$  の範囲で製作した溝付き工具による軟鋼及び炭素鋼の加工実験を、切込み  $d=0.25-0.4$  mm, 送り  $f=0.12-0.25$  mm/rev で行った。流出した切りくず形状の測定結果から、案内溝の深さ 92  $\mu\text{m}$ 、間隔 200  $\mu\text{m}$ 、開き角  $10^\circ$  である溝付き工具 (工具 D) で、切りくずカールを最も抑制することを確認した。また、案内角度  $\psi$  については、溝の無い工具における切りくず流出角度  $\eta$  と一致させるとカールを最も抑制することも確認した。

[7] 溝の無い工具と比べると、溝付き工具を用いることで主分力は増加する傾向であることを確認した。なお、溝付き工具 D を利用した場合に生じる主分力が最も大きく、溝の

無い工具に対して 34 % 増加した。

[8] 軟鋼に比べて切りくずカールの生じ易い炭素鋼に対して、溝付き工具 D と誘導路を用いた旋削加工実験を行った。その結果から、本来の切りくず流出方向と案内角度の差が最大 27°であっても、切りくずが誘導路を通過し、切りくず案内切削に成功することを確認した。

## 2.6 参考文献

- [2-1] I.S. Jawahir, 1988, "The chip control factor in machinability assessments: Recent trends", *Journal of Mechanical Working Technology*, 17, pp.213-224.
- [2-2] J.D. Kim, O.B. Kweun, 1997, "A chip-breaking system for mild steel in turning", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37/5, pp.607-617.
- [2-3] T. Shi, S. Ramalingam, 1991, "Slip-line solution for orthogonal cutting with a chip breaker and flank wear", *International Journal of Mechanical Sciences*, 33/9, pp.689-704.
- [2-4] B. Worthington, A.H. Redford, 1973, "Chip curl and the action of the groove type chip former", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 13/4, pp.257-270.
- [2-5] Nakayama K., Arai M., Kondo T., Suzuki H., 1981, "Cutting Tool with Curved Rake Face — A Means for Breaking Thin Chips", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 30/1, pp.5-8.
- [2-6] E. Usui and M.C. Shaw, 1962, "Free Machining Steel—IV: Tools With Reduced Contact Length", *Trans. of ASME Journal of Engineering for Industry*, 84/1, pp.89-98.
- [2-7] P.L.B. Oxley, 1962, "An analysis for orthogonal cutting with restricted tool-chip contact", *International Journal of Mechanical Sciences*, 4/2, pp.129-135.
- [2-8] N. Kawasegi, H. Sugimori, H. Morimoto, N. Morita, I. Hori, 2009, "Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior", *Precision Engineering*, 33/3, pp. 248-254.
- [2-9] Sugihara T., Enomoto T., 2012, "Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture", *Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 36/2, pp.229-237.
- [2-10] Enomoto T., Sugihara T., Yukinaga S., Hirose K., Satake U., 2012, "Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61/1, pp. 571- 574.
- [2-11] T. Obikawa, A. Kamio, H. Takaoka, A. Osada, 2011, "Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51/12, pp.966-972.
- [2-12] Kiyota, H., Itoigawa, F., Nakamura, T., 2014, "Experimental research of micro-textured tool for reduction in cutting force", *Key Engineering Materials*, 611-612, pp.1258-1263.
- [2-13] 清田大樹, 糸魚川文広, 中村隆: 表面微細テクスチャによる切削工具・切りくず間の付着拘束緩和が加工力低減に及ぼす影響, *精密工学会誌*, 81, 5 (2015), pp.452-458.

- [2-14] L. V. Colwell, 1954, "Predicting the angle of chip flow for single point cutting tools", Trans. ASME, 76, pp.199-204.
- [2-15] 社本英二：3次元切削機構に関する研究（第1報）-傾斜切削プロセスの理解とベクトルによる定式化-, 精密工学会誌, 68, 3 (2002), pp.408-414.
- [2-16] E. Shamoto, M. Kato, N. Suzuki, R. Hino, 2013, "Analysis of three dimensional cutting process with thin shear plane model", Trans. of ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 135/4, 041001.
- [2-17] M. E. Merchant, "Basic Mechanics of the Metal-Cutting Process", ASME Journal of Applied Mechanics, 11 (1944), A168-A175.
- [2-18] G. V. Stabler, "The fundamental geometry of cutting tools", Proc. Inst. Mech. Engrs., 165 (1951), pp.14-21.
- [2-19] 大内千秋, 大北智良：鉄鋼の熱間変形抵抗, 日本金属学会会報, 18, 6 (1979), pp.432-438.
- [2-20] 小坂田宏造, 石川孝司, 小野宗憲, 森下弘一, 安藤弘行：精密鍛造, 日刊工業新聞社, 2010.

## 第3章 切りくず引張切削の検討

本章では、切りくず案内機能を備えた切りくず引張切削による切削力及び切削エネルギーの低減効果について検討を行う。第2章の加工実験で得られた結果から、溝付き工具の案内角度を本来の切りくず流出角度と一致させると切りくずカールを最も抑制することを確認した。そこで、本章ではこの案内角度を対象とした切りくず引張切削の数値解析と加工実験によりその低減効果を調査し、得られた結果をまとめる。

なお、本章の内容の一部は、研究業績の査読付き原著学術論文[1], [3]に記載されている。

### 3.1 緒言

本章で調査する内容について記す。中山は切りくず引張切削における切削力及び切削エネルギーの低減効果を、加工実験及び数値解析によって明らかにしている[1-58]。本研究で提案している溝付き工具による切りくず案内機能を備えた切りくず引張切削においても同様に発揮し得るか、中山の研究成果に基づいた加工実験による初期検討と、張力による摩擦力の相殺を考慮した解析モデルによる数値解析により調査する。最終的に、切りくず案内切削によって導かれた切りくずを把捉し、張力を付与する切りくず引張装置(Chip-pulling device)を用いた切りくず引張切削の加工実験によってその効果を検証する。

### 3.2 手動の張力付与による切りくず引張切削の初期検討

#### 3.2.1 手動の切りくず引張切削実験の方法及び条件

中山が実施した切りくず引張切削実験(図1.15参照)を模して、溝付き工具で導かれた切りくずに手動で張力を付与する加工実験を試みる。溝付き工具によって誘導路の出口まで誘導された切りくずをペンチで把捉し、流出方向(案内溝方向)に沿って手動で張力を付与した。切込み  $d=0.2$  mm, 送り  $f=0.06$  mm/rev, 案内角度  $\psi=30^\circ$ , 主軸回転数  $317$  min<sup>-1</sup> (張力付与時の平均的な切削速度は  $146$  m/min) とし、他の加工条件は2.2.7項と同様にした。



### 3.2.2 切りくず引張切削の実験結果

測定した切削力の各成分（図 2.13 参照）を図 3.1 に示す。溝付き工具による張力が無い加工時(Without pulling)と比べて、張力付与した加工時(With pulling)の切削力は、最大で概ね半減（主分力については 238 N に対して 130 N まで減少）した。また、灰色で示す区間内で流出した切りくずの厚さ  $t$  も図中に示す。張力が無いと  $t=0.69$  mm であった切りくず厚さが張力付与により 0.55 mm に減少し、さらに張力を付与すると 0.37 mm まで減少した。この切りくず厚さが大きく減少した結果から、切りくずに作用する摩擦力を張力で相殺することで、せん断面積が大きく減少したと考えられ、切削力及び切削に要するエネルギーも同様に大きく減少したと推測できる。

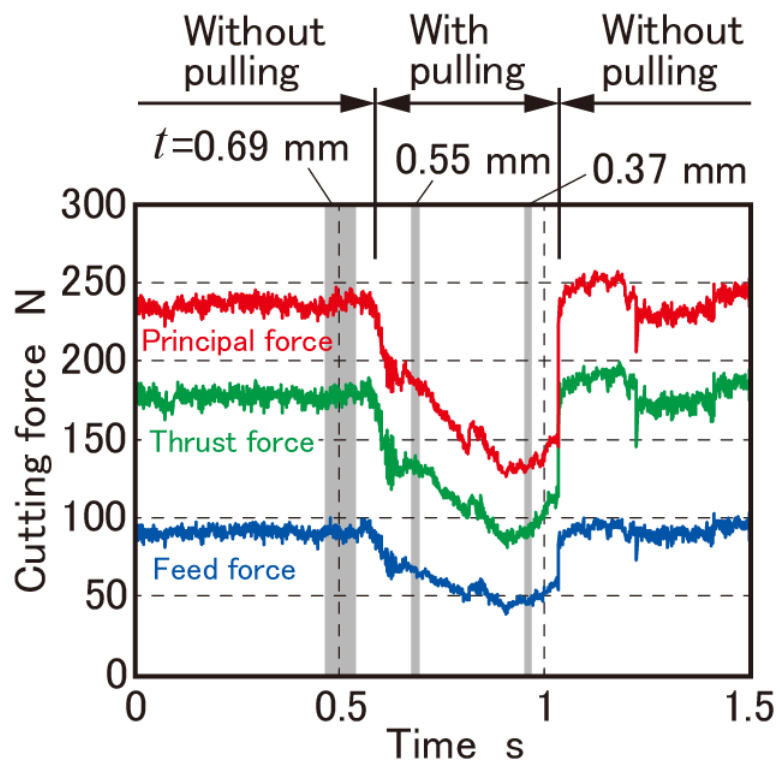


Fig. 3.1 Reduction of cutting forces in manual chip-pulling cutting

### 3.3 切りくず引張切削の機構

#### 3.3.1 切りくず引張切削プロセスの解析モデル

切りくずに付与する引張力が切削力及び切削エネルギーを低減させる効果について数値解析により調査する。本解析で用いる解析モデルについて説明する。

第2章の加工実験で得られた結果から、案内角度を本来の切りくず流出角度と一致させると切りくずカールを最も抑制することを確認した。これを第2章の切りくず案内切削プロセス（図2.17(b)参照）で考えると、案内角度 $\psi=0^\circ$ に相当し、図3.2に示すプロセスモデルとなる。このモデルに対して、切りくずに付与する引張力を、切りくず流出方向 $\vec{v}_c$ に作用させ、この引張力による摩擦力の相殺を考慮した切りくず引張切削プロセスを考える。このとき、全ての力成分が図中の $x$ - $z$ 面内に存在することから、2次元せん断面モデル[3-1]で説明することができる。したがって、本解析では、2次元せん断面モデルを用いて切りくず引張切削プロセスについて説明する。

まず、切削力の算出について説明する。すくい角 $\alpha$ 、切込み $d$ 、切削幅 $b$ 、摩擦角 $\beta$ 、せん断面せん断応力 $\tau_s$ としたときの2次元せん断面モデルと、すくい面に平行方向に張力を付与した切りくず引張切削プロセスモデルをそれぞれ図3.3(a)及び(b)に示す。このとき、被削材側に作用する切削合力 $F_r$ はせん断角 $\phi$ を用いて式(12)のように表すことができる。これに対して、切りくずに引張力 $F_{pull}$ が作用すると、摩擦力 $f'$ の一部が相殺され、図3.3(b)に示すように、切りくず引張切削時のせん断角及び見掛けの摩擦角(Effective friction angle)はそれぞれ $\phi'$ 、 $\beta_e$ に変化する。このとき、切削合力 $F_r'$ は式(13)となる。

$$F_r = \frac{\tau_s b d}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha + \beta)} \quad (12)$$

$$F_r' = \frac{\tau_s b d}{\sin \phi' \cos(\phi' - \alpha + \beta_e)} \quad (13)$$

ここで、切りくず引張切削におけるせん断角 $\phi'$ には、最大せん断応力説(Maximum shear stress principle)と最小エネルギー説(minimum energy principle)の2つを利用する。このとき、 $\phi'$ はすくい角 $\alpha$ と見掛けの摩擦角 $\beta_e$ から求めることができ、それぞれ式(14)、(15)のように表される。

$$\phi' = 45^\circ + \alpha - \beta_e \quad (14)$$

$$\phi' = 45^\circ + \alpha/2 - \beta_e/2 \quad (15)$$

すくい角 $\alpha$ ，切込み $d$ ，切削幅 $b$ ，摩擦角 $\beta$ ，せん断面せん断応力 $\tau_s$ を入力条件とし，見掛けの摩擦角 $\beta_e$ を変数とすれば切削合力 $F_r$ ， $F_r'$ を求めることができる．また，すくい面に対する垂直抗力 $F_n'$ ，摩擦力 $f'$ ，引張力 $F_{pull}$ には，摩擦角 $\beta$ ， $\beta_e$ を用いて式(16)-(18)が成り立つ（図3.3(b)参照）．

$$F_n' = F_r' \cos \beta_e \quad (16)$$

$$f' - F_{pull} = F_r' \sin \beta_e \quad (17)$$

$$f' = F_n' \tan \beta \quad (18)$$

次に，切りくず引張切削における各種エネルギー[1-58]の算出について説明する．なお，本章ではすくい角 $\alpha = 0^\circ$ とし，すくい面に対する垂直抗力と主分力は一致するため， $F_n$ 及び $F_n'$ を，それぞれ $F_p$ ， $F_p'$ で表記する．単位時間当たりに切削に要するエネルギー（切削エネルギー (Cutting energy)） $E_c$ は，主分力 $F_p$ （または $F_p'$ ）と切削速度 $V$ を用いて，式(19)から求めることができる．また，単位時間当たりに切りくず引張に要するエネルギー（引張エネルギー (Chip-pulling energy)） $E_{pull}$ は，引張力 $F_{pull}$ と切りくず流出速度 $V_c$ を用いて，式(20)から求めることができる．したがって，これらのエネルギーを合算すると，加工に要する全エネルギー（切削全エネルギー (Total cutting energy)） $E_T$ であり，式(21)となる．

$$E_c = F_p \cdot V \quad (19)$$

$$E_{pull} = F_{pull} \cdot V_c \quad (20)$$

$$E_T = E_c + E_{pull} \quad (21)$$

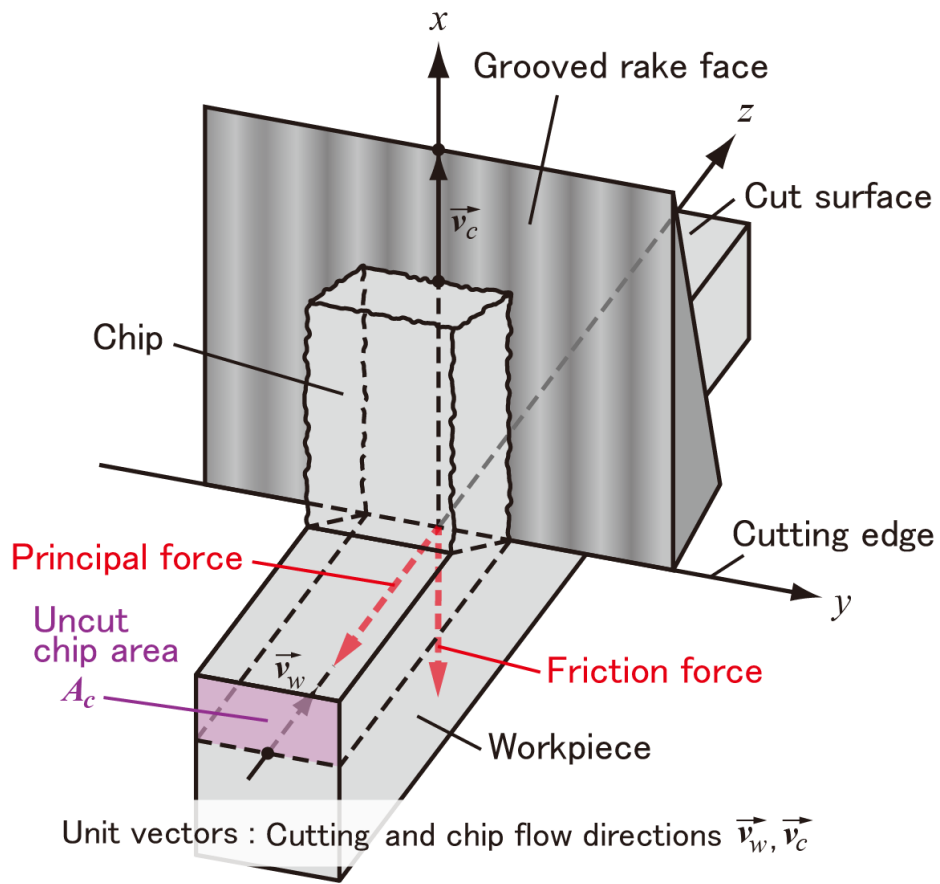
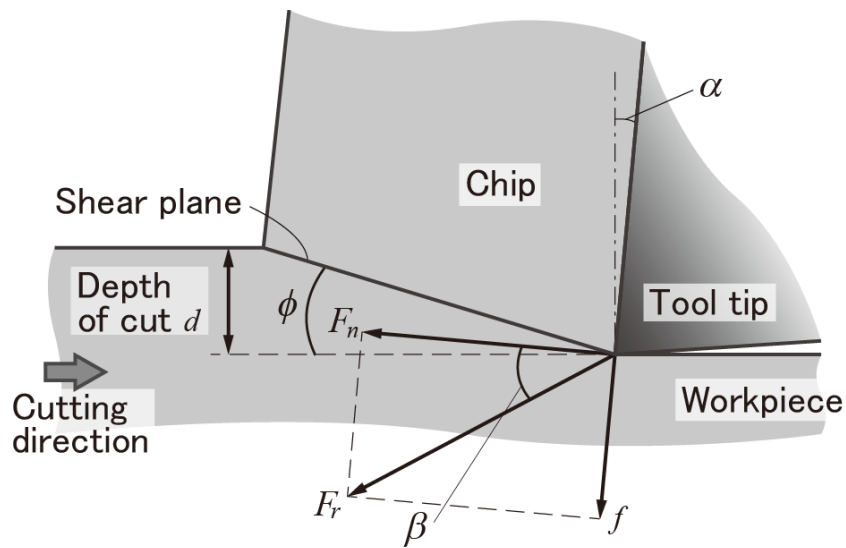
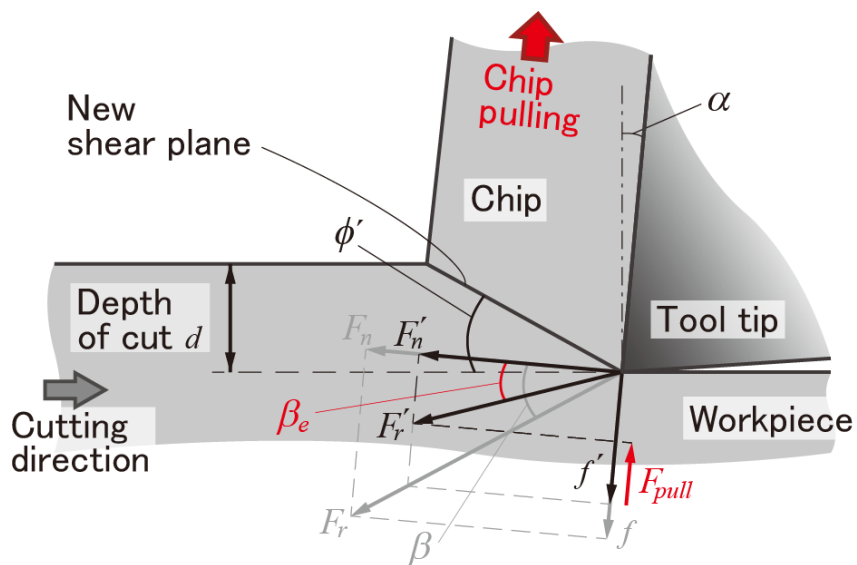


Fig. 3.2 Cutting process models with grooved rake face  
 Cutting conditions:  $i=0$  deg,  $\alpha=0$  deg,  $\psi=0$  deg



Normal force to rake face $F_n$	Friction force on rake face $f$
Resultant force $F_r$	Shear angle $\phi$
Friction angle $\beta$	Rake angle $\alpha$

(a) Ordinary cutting



Normal force to rake face $F_n'$	Friction force on rake face $f'$
Resultant force $F_r'$	Shear angle $\phi'$
Friction angle $\beta$	Rake angle $\alpha$
<b>Chip-pulling force <math>F_{pull}</math></b>	<b>Effective friction angle <math>\beta_e</math></b>

(b) Chip-pulling cutting

Fig. 3.3 Cutting process models without and with chip-pulling force

### 3.3.2 解析方法

解析に使用した諸変数を表 3.1 にまとめて示す. 見掛けの摩擦角 $\beta_e$ を変数として, 引張前に相当する 43°から 10°まで減少させたときの引張力と, 切削力及びエネルギーの各成分を求めた.

なお, 2 次元せん断面モデルにおける切込み $d$ , 切削幅 $b$ については, 次節で行ったノーズ半径 0.8 mm の超硬工具を用いた外形旋削の加工条件から近似的に求めた. 具体的には, 切れ刃の関与長さを切削幅 $b$ とし, 切削面積をその切れ刃関与長さで除算することで求めた平均的な切取り厚さを切込み $d$ とした. また, 摩擦角 $\beta$ , せん断面せん断応力 $\tau_s$ については, 次節の加工実験で測定された引張力 $F_{pull}=0$  N における切削力 $F_p=237$  N,  $f=219$  N, 加工距離に対する流出切りくずの長さから求めた切削比(Chip thickness ratio) [3-1] 0.18 を用いて算出した.

Table 3.1 Analytical conditions of chip-pulling process

Rake angle $\alpha$	0 deg
Depth of cut $d$	0.0534 mm
Width of cut $b$	0.898 mm
Friction angle $\beta$	43 deg
Shear strength $\tau_s$	720 MPa
Effective friction angle $\beta_e$	43 - 10 deg

### 3.4 切りくず引張装置を用いた切りくず引張切削の検証

#### 3.4.1 切りくず引張装置の構成

切りくずに付与する引張力が切削力及び切削エネルギーを低減させる効果について加工実験により調査するため、誘導路出口まで導かれた切りくずに機械的に引張力を付与させる切りくず引張装置を製作した。上下にローラ（直径 40 mm）が配置された図 3.4 に示す引張装置を誘導路出口の近傍に設置した。引張前の切りくず流出速度よりも速い周速でローラを回転させることで、導かれた切りくずを挟みながら引張力を付与することができる。この 2 つのローラはばね構造で繋がっており、大きな引張力を付与しても切りくず-ローラ間で滑らない締め付け力（クランプ力）が生じるようにばねの強さを調節した。

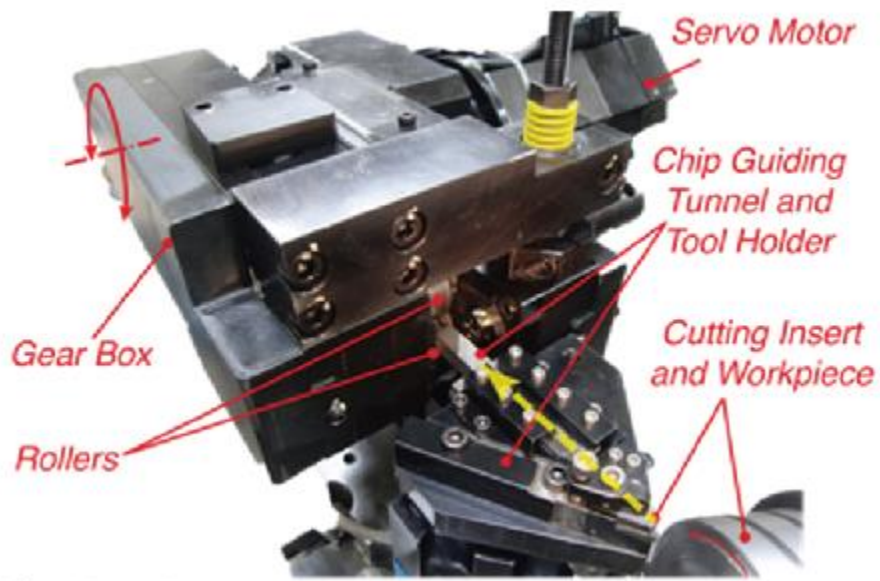
本実験では、このローラはギアボックス（変速比：2）を介してサーボモータで駆動させ、設定したサーボモータの速度を開ループで制御した。また、エンコーダによりローラ回転速度（滑りが無い場合は、切りくず流出速度に相当）を、引張装置の下に取り付けられた圧電型動力計により切りくずに作用した引張力を測定した。

#### 3.4.2 切りくず引張切削の加工実験の方法及び条件

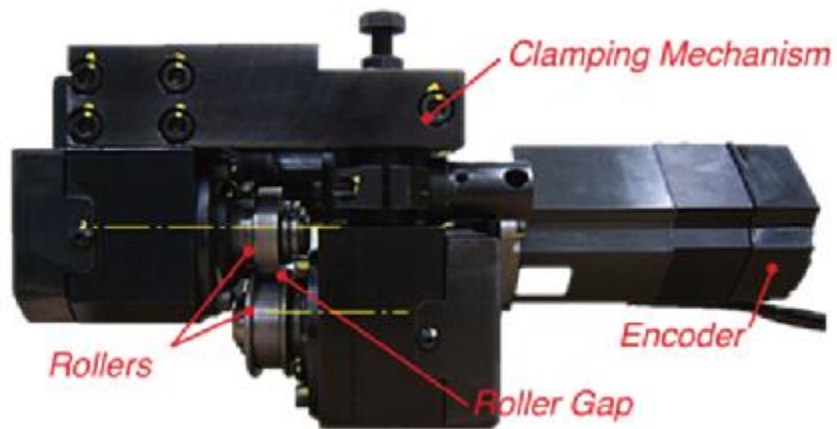
第 2 章の加工実験で切りくずカールを最も抑制した結果（溝付き工具 D, 案内角度  $\psi=30^\circ$ , 切込み  $d=0.4$  mm, 送り  $f=0.12$  mm/rev）を反映した表 3.2 に示す加工条件で、サーボモータの設定速度を変化させた切りくず引張切削の加工実験を行った。工具直下に取り付けた圧電型動力により、加工時の切削力を測定した。

なお、本実験の被削材は引張時に切りくずが破断し難い低炭素鋼（JIS:S10C）とし、ローラ回転速度の上限により切削速度を 133 m/min に設定した。また、比較のために、切りくず引張装置が無い状態の加工実験（切りくず誘導装置のみを取り付けた切りくず誘導加工実験）を実施し、そのときの切削力も測定した。

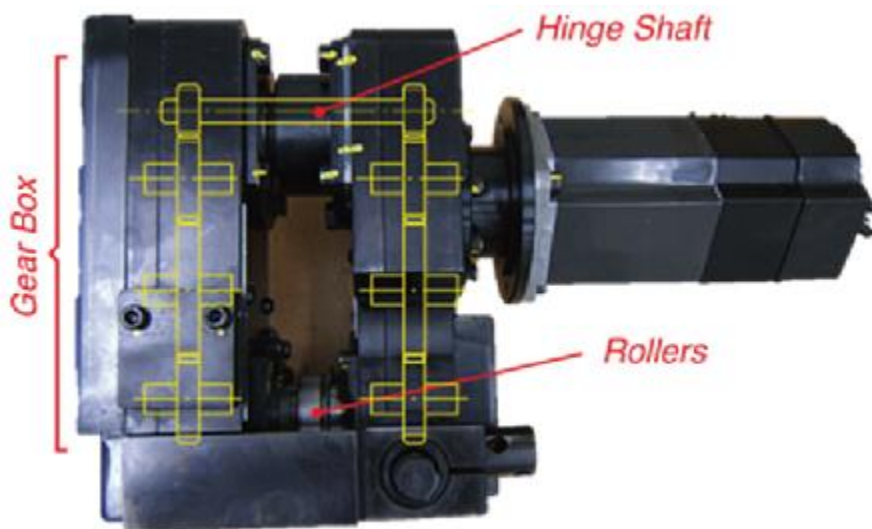




(a) Perspective



(b) Front view



(c) Top view

Fig. 3.4 Photographs of chip-pulling device

Table 3.2 Conditions of chip-pulling cutting tests

Workpiece	Material	Low-carbon steel (JIS: S10C)
Tool	Material	Sintered tungsten carbide
	Rake/relief angle	0/11 deg
	Nose radius	0.8 mm
Process		Turning
Cutting conditions	Rotational speed	215 rpm
	Cutting speed $V$	133 m/min
	Depth of cut $d$	0.4 mm
	Feed rate $f$	0.12 mm/rev
	Guide angle $\psi$	30 deg

### 3.4.3 実験結果と解析結果の比較

まず、加工実験で得られた切りくずの一部を図 3.5 に示す。切りくず誘導のみを行った切りくずは青色だったが、引張力を与えると銀色に変わることが分かった。また、青色に比べて銀色の切りくずの方が薄いことを確認した。これらの結果から、加工点付近の切削熱及びせん断面積が減少したと予想される。

次に、設定したサーボモータの速度は切りくず引張速度(Chip-pulling speed)に換算して、30-51 m/min としたときの主分力及び引張力の測定波形の一部を図 3.6 に示す。引張力を与えることで、主分力の継続的な減少に成功したことが確認できる。横軸を引張力 $F_{pull}$ とし、実施した実験結果を図 3.7 にまとめて示す。図には切りくず誘導のみを行ったときの結果を $F_{pull}=0$  N の位置に記した。測定した切削合力 $F_r'$ は、引張力 $F_{pull}$ の増加に伴い減少し、最小となったときの引張力 $F_{pull}=50.4$  N であることを確認した。また、切りくず流出速度 $V_c$ は、引張力 $F_{pull}$ に応じて増加することを確認した。ここで、すくい角 $\alpha=0^\circ$ のとき、この切りくず流出速度 $V_c$ 及び切削速度 $V$ の比とせん断角 $\phi$ (または $\phi'$ )の間には、式(22)が成り立つ[3-1]。式(22)により求めたせん断角 $\phi$ 、 $\phi'$ は、引張力 $F_{pull}$ の増加に応じて増加し、見掛けの摩擦角 $\beta_e$ は減少することを確認した。これらの実験結果は解析結果と概ね一致することが分かった。ただし、最大せん断応力説に基づいて求めた切削合力 $F_r$ 、 $F_r'$ の解析結果は、実験結果と大きな差があった。これは 2.3.9 項で記述した理由(最大せん断応力説によるせん断角の小さな領域の予測は難しい)と同じであると考えられる。したがって、本章で解析に用いた切りくず引張切削プロセスモデルにより、切削力や切りくず流出速度等に関連する諸変数の傾向は捉え得ると判断できる。

次に、図 3.7 の実験結果に基づいて算出した図 3.8 の結果から、各種エネルギー変化について検討する。切削エネルギー $E_c$ は引張力 $F_{pull}$ の増加に伴い減少し、引張エネルギー $E_{pull}$ は増加したが、切削全エネルギー $E_T$ は減少したため、切りくず引張切削による切削エネルギーの低減効果を確認することができた。また、これらの実験結果は、上述の切削合力の差の影響を除けば、解析結果と概ね一致することも確認することができた。さらに、切削面積とせん断角(または切削比)から切りくず断面積を算出し、引張力をその断面積で除算し、切りくずに加わる引張応力 $\sigma_{chip}$ の算出結果を図 3.8 の最下段に示す。ここで、炭素鋼の切削加工で流出した切りくずの引張強度は、少ない炭素量であるほど若干小さくなり、炭素鋼[JIS:S10C]では 1000 MPa 程度であると考えられる[3-2]。この 1000 MPa に対して、本実験で切りくずに加わる $\sigma_{chip}$ は最大でも 500 MPa を下回っていたので、切りくずは破断しなかったと推察される。より大きな引張力を加え、切削力の低減効果を高める場合には、切りく

ず破断の可能性が高まるため、引張力の精密な制御が必要になると考えられる。

最後に、本実験により判明した切りくず引張切削の効果を確認するため、引張力 $F_{pull}=0$ , 50.4 Nにおける各種エネルギーを表 3.3 にまとめた。表には、式(23), (24)のように定義した切削エネルギー $E_c$ 及び切削全エネルギー $E_T$ の増加率 $r_{EC}$ ,  $r_{ET}$ も追記した。 $r_{EC}$ ,  $r_{ET}$ から、切りくず引張切削(Chip-pulling cutting)により切削エネルギー $E_c$ は 38 %減少し、引張エネルギー $E_{pull}$ を加えた切削全エネルギー $E_T$ は 30 %減少することが分かった。ここで、溝の無い工具から溝付き工具に変更したとき、主分力の増加率 $r_{FP}$ が最大 34 %であった表 2.7 の結果と比較する。 $r_{FP}=34$  %に対して切削エネルギーの増加率 $r_{EC}=38$  %よりも小さいが、切削全エネルギーの増加率 $r_{ET}=30$  %に対しては大きいことが分かった。厳密には加工条件が異なる(被削材種や切削速度等)が、加工に要する切削全エネルギーで比較したとき、切りくず引張切削により増加し得ると考えられる。ただし、切りくずの流出方向が制御され、曲率が  $0.1 \text{ mm}^{-1}$  以下の切りくずであれば切りくず案内切削に成功した前章の実験結果を踏まえ、その範囲内で案内溝形状を変更することで、切削力増加を抑制し得ることが期待できる。特に、本来の切りくず流出角度に案内角度を一致させた条件に限れば、溝付き工具 A のような溝が浅く、開き角が大きい案内溝形状でも切りくず案内切削に成功すると予想でき、主分力の増加率 $r_{FP}$ を溝付き工具 D の 34 %から 11 %に抑え得ることが期待できる。したがって、加工条件に合わせて切削力増加を抑える案内溝形状を選択することで、切りくず引張切削により切削全エネルギーも減少させ得ると判断できる。

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{V_c}{V} \right) \quad (22)$$

$$r_{EC} = \frac{E_{c(\text{Chip-pulling})} - E_{c(\text{Chip-guiding})}}{E_{c(\text{Chip-guiding})}} \times 100 \quad (23)$$

$$r_{ET} = \frac{E_{T(\text{Chip-pulling})} - E_{T(\text{Chip-guiding})}}{E_{T(\text{Chip-guiding})}} \times 100 \quad (24)$$

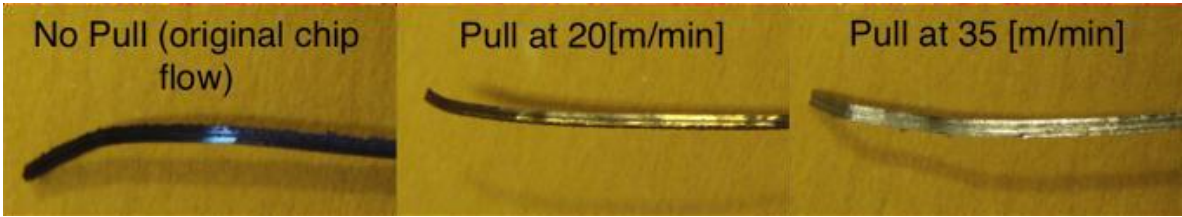


Fig. 3.5 Photographs of cut chip without and with chip-pulling force

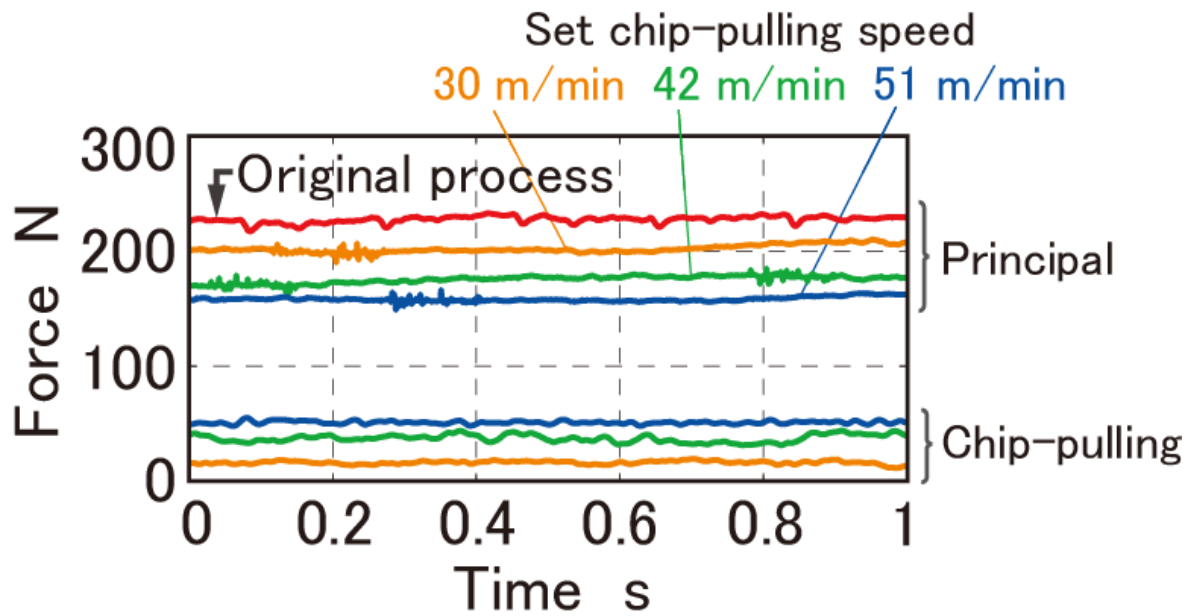


Fig. 3.6 Measured cutting and pulling forces

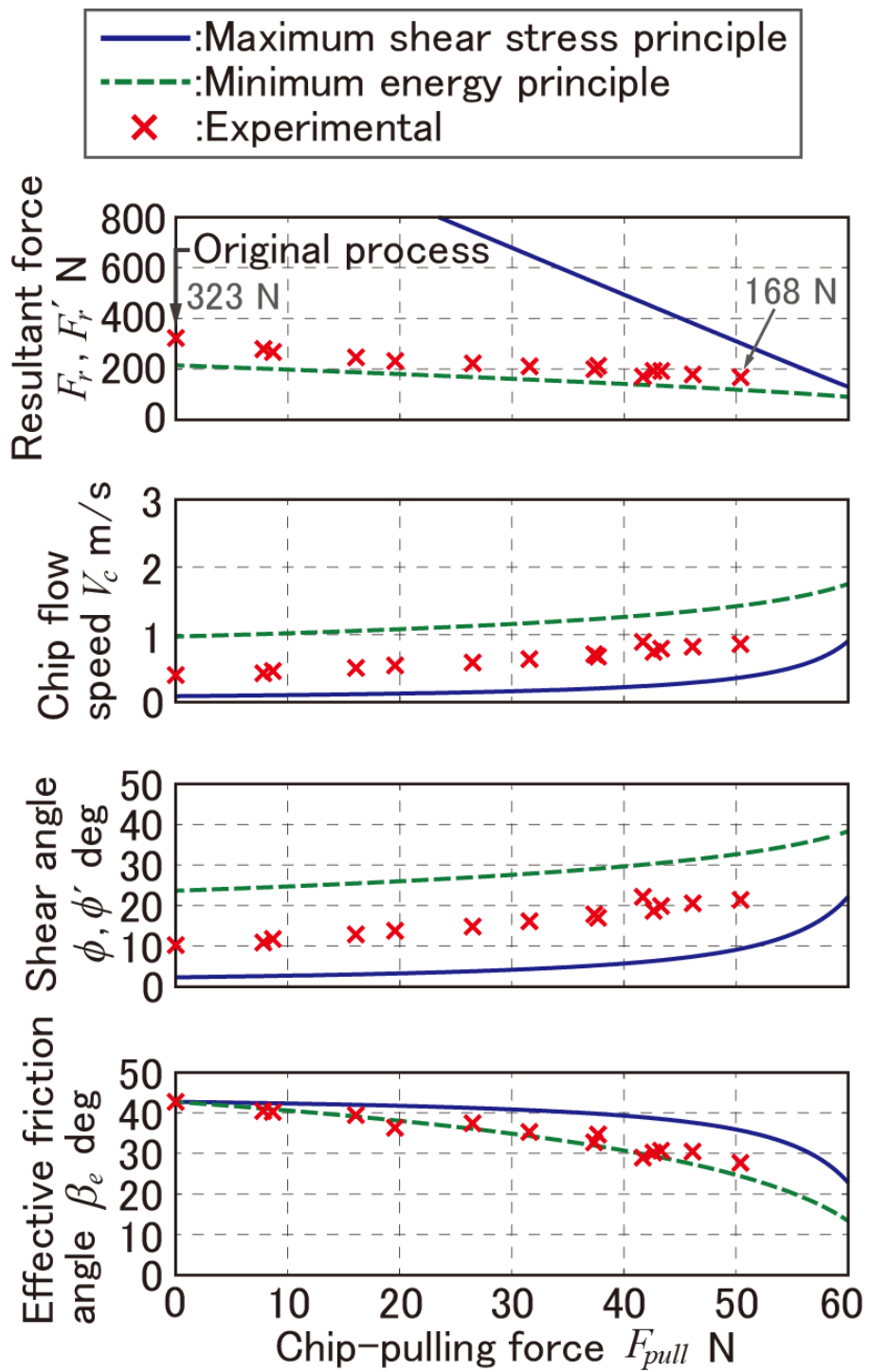


Fig. 3.7 Measurement and calculation results of force, speed and angle

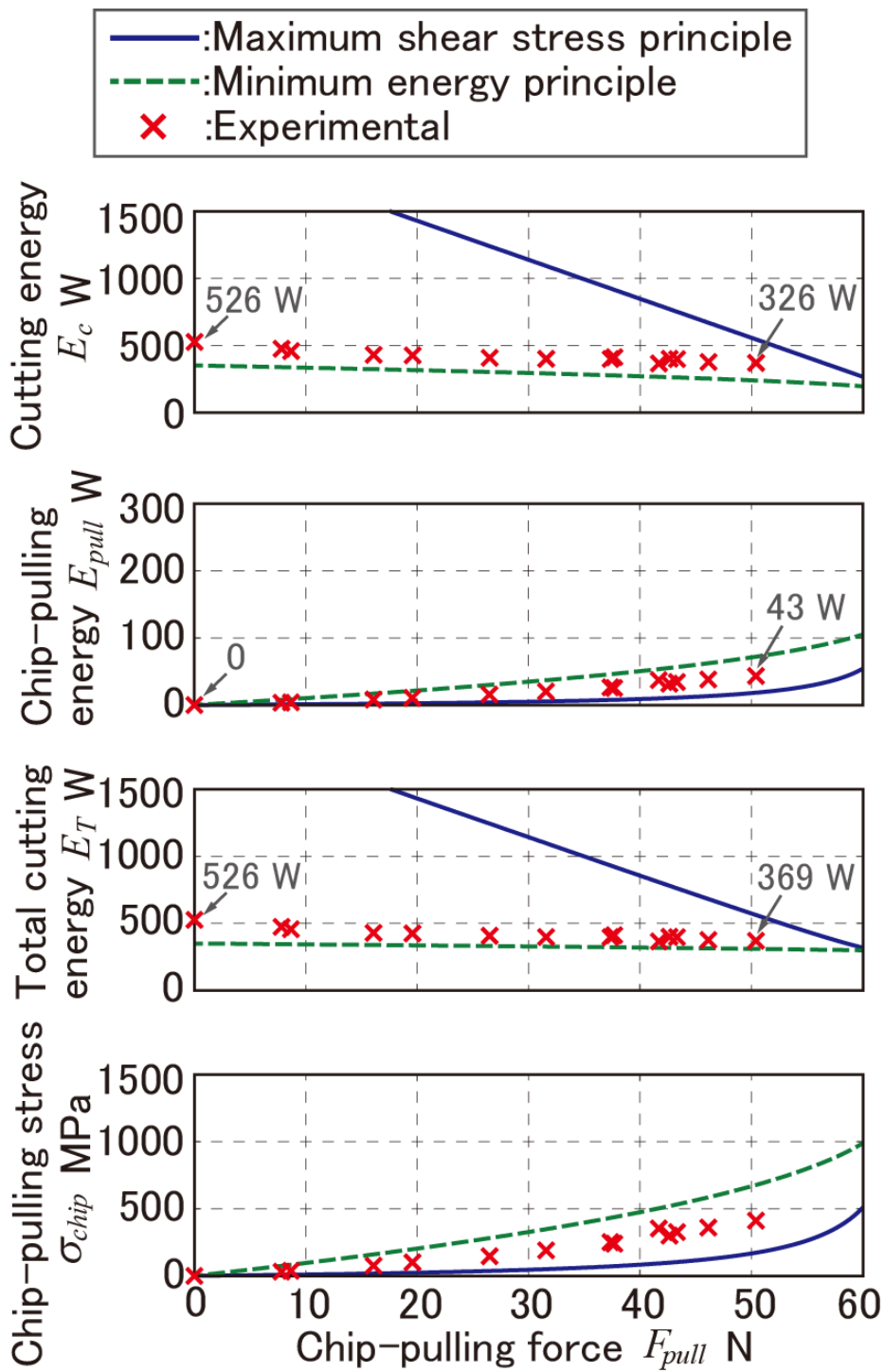


Fig. 3.8 Measurement and calculation results of energy and stress

Table 3.3 Results of chip-guiding and chip-pulling cutting tests

Cutting process	Cutting energy $E_c$ W	Cutting energy change rate $r_{EC}$ %	Chip-pulling energy $E_{pull}$ W	Total cutting energy $E_T$ W	Total energy change rate $r_{ET}$ %
Guiding	526	–	0	526	–
Pulling	326 (Minimum)	-38	43	369	-30



### 3.5 結言

本章では、本来の切りくず流出角度と一致する案内角度を対象に、切りくず引張切削による切削力及び切削エネルギーの低減効果について調査した。以下に、加工実験及び数値解析で得られた結果をまとめる。

[1] 溝付き工具と誘導路に加えて切りくず引張装置を用いた切りくず引張切削の加工実験で、主分力を最大で 38 % 減少させることに成功することを確認した。

[2] 引張力の増加に伴い、切削力が減少、切りくず流出速度が増加、せん断角が増加、見掛けの摩擦角が減少することは切りくず引張切削プロセスモデルの数値解析により定性的には一致することを確認した。

[3] 切りくず引張切削では主分力の減少により切削エネルギーも 38 % 減少するが、引張力を切りくずに作用させることで、引張に要するエネルギーが増加するため、それを含めた切削全エネルギーでは、引張の無いときに比べて 30 % の減少となることを確認した。

[4] 第 2 章において、溝付き工具 D で主分力が 34 % 増加したように、切りくず案内切削により切削エネルギーは増加した。溝の無い工具と溝付き工具による加工で比較すると、切削全エネルギーは切りくず引張切削の方が大きい場合があり得る。そのため、切りくず案内切削における主分力増加を抑え得る案内溝の選択（例えば、溝付き工具 A のような溝が浅く、開き角が大きい案内溝形状であれば切削エネルギーは 11 % の増加に抑えられる）が重要である。

### 3.6 参考文献

[3-1] 杉田忠彰, 上田完次, 稲村豊四郎: 基礎切削加工学, 共立出版, 1984.

[3-2] 中山一雄, 田村清: 切りくずの硬度試験, 精密機械, 29, 9 (1963), pp.39-42.

## 第4章 結論

本論文の緒論では、研究背景及び目的として、自動車の燃費改善方策のために求められる自動車部品技術について記した。(1)軽量化・小型化、(2)新機構・可変機構、(3)摩擦低減・伝達効率向上に向けた自動車部品技術に加えて、生産性向上の観点から、(4)高速・高能率化、(5)製造工場・加工設備の自動化・無人化が必要であることを示した。特に、(4)、(5)の実現を妨げている要因として切りくず処理を取り上げ、それを本研究テーマとして取り組んだ経緯について説明した。この切りくず処理の問題を解決するため、切りくず分断に代わる方法として連続処理の考え方を示した。本研究ではこの考えを拡張し、切りくず処理を解決するだけでなく、切削力及び切削エネルギーも低減し得る切りくず引張切削(Chip-pulling cutting)の実現が可能になることを説明した。この実現には、刃先で生成される切りくずの流出を制御する必要がある点について指摘した。それを可能にする切りくず案内切削(Chip-guiding cutting)を提案し、その基本的な方策について説明した。

第2章では、切りくず引張切削を可能にする切りくず案内機能(Chip-guiding function)には、溝付き工具の案内溝形状とその溝方向が重要であると考え、これらが切りくず流出方向、切りくず形状、切削力に及ぼす影響について加工実験及び数値解析により調査した。案内溝の深さ 50-300  $\mu\text{m}$ 、間隔 173-693  $\mu\text{m}$ 、開き角 10-111°の範囲で製作した溝付き工具による軟鋼及び炭素鋼の加工実験によって、切りくずカールを最も抑制する案内溝形状は、案内溝の深さ 92  $\mu\text{m}$ 、間隔 200  $\mu\text{m}$ 、開き角 10°であることを確認した。また、切込み  $d=0.25-0.4$  mm、送り  $f=0.12-0.25$  mm/rev で行った炭素鋼の加工実験から、溝方向を本来の切りくず流出方向と一致させるとカールは抑制され得ることも確認した。さらに、直線切れ刃を有する切りくず案内切削プロセスモデルによる数値解析では、切りくず流出方向を強制するほど、主分力は増加する傾向であることを明らかにし、強制角度が 30°のとき、主分力は 56% 増加することを確認した。したがって、本章で得た結果から、切りくず引張切削に活用する案内溝形状と加工条件を、案内溝の深さ 92  $\mu\text{m}$ 、間隔 200  $\mu\text{m}$ 、開き角 10°、切込み  $d=0.4$  mm、送り  $f=0.12$  mm/rev、案内角度  $\psi=30^\circ$  に決定することができた。

第3章では、第2章で決定した溝付き工具と加工条件を対象として、切りくず案内機能を備えた切りくず引張切削による切削力及び切削エネルギーの低減効果について加工実験及び数値解析により調査した。溝付き工具と誘導路に加えて切りくず引張装置を用いた切りくず引張切削の加工実験で、主分力を最大で38%減少させることに成功することを確認した。この結果は、引張力による摩擦力の相殺を考慮した切りくず引張切削プロセスモデルによる数値解析と定性的に一致することが確認できた。切りくずに引張力を付与することで、引張に要するエネルギーが増加するため、加工に要する切削全エネルギーで比較すると、切りくず案内切削に対して30%減少することが分かった。一方で、溝の無い工具と溝付き工具を比較すると切削エネルギーは34%増加する場合がある。そのため、切削全エネルギーを溝の無い工具よりも低減させるためには、強制前の切りくず流出方向と案内角度を一致させた上で、案内溝が浅く、開き角が大きい案内溝形状に変更（例えば、溝付き工具D：溝の深さ92 $\mu\text{m}$ 、間隔200 $\mu\text{m}$ 、開き角10°から溝付き工具A：溝の深さ50 $\mu\text{m}$ 、間隔173 $\mu\text{m}$ 、開き角60°への変更）することが望まれる。

以上のことから、切りくず引張切削を実現するために必要な切りくず案内切削の方策を示し、溝付き工具と誘導路に加えて切りくず引張装置を用いた切りくず引張切削方法により、切りくず流出の制御だけでなく、切削力及び切削エネルギーが低減することを確認し、その実用化に道を開いたと考える。

最後に、切りくず引張切削の長所を最大限活かすために必要な課題と発展性を記す。切りくず処理性の向上と切削抵抗の減少だけでなく、切削全エネルギーの減少も確実に実現するためには、加工機等から切削力／動力を検出し、案内角度を本来の切りくず流出角度に自動で変更する制御システムの構築が必要になる。このシステムにより案内角度の適正化が可能になり、溝付き工具Dほど強く切りくずを溝内に拘束する必要がなくなるため、溝付き工具による切削力の増加を抑制することができる。また、切削力・切削動力に加えて、引張力・引張速度を検出することで、切削全エネルギーを把握することができる。そのため、極端な引張エネルギーの増加を防ぐ加工／引張条件に制御し、省エネルギーな加工を行うことができる。さらに、被削材に作用する背分力等の切削力に着目し、それを低減した高精度加工も可能になると考えられる。

## 研究業績

### ◇査読付き原著学術論文

- [1] E. Shamoto, T. Aoki, B. Sencer, N. Suzuki, R. Hino, T. Koide, 2011, “Control of chip flow with guide grooves for continuous chip disposal and chip-pulling turning”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 60/1, pp.125-128.
- [2] 青木友弥, Burak Sencer, 鈴木教和, 小出富夫, 社本英二: 溝付き工具を用いた切りくず案内切削の機構, 精密工学会誌, 82,1 (2016), pp.75-81.
- [3] Tomoya Aoki, Burak Sencer, Eiji Shamoto, Norikazu Suzuki, Tomio Koide, 2016, “Development of a high-performance chip-guiding turning process—tool design and chip flow control”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 85/1-4, pp.791-805.

### ◇国際会議論文

- [1] Tomoya Aoki, Burak Sencer, Eiji Shamoto, Tomio Koide, 2015, “Effects of Guide Groove Shape on Chip Controllability for Chip-Guiding Turning”, Key Engineering Materials, 656-657, pp.251-254.

### ◇その他の業績

#### ・ 査読付き学術論文

- [1] 社本英二, 安田浩一郎, 青木友弥, 鈴木教和, 小出富夫: 切りくずの連続処理と引張り切削に関する研究 -すくい面形状による切りくず制御の試み-, 精密工学会誌, 77,5 (2011), pp.520-524.

#### ・ 外部表彰

- [2] 公益社団法人精密工学会 第28回2011年度沼田記念論文賞 切りくずの連続処理と引張り切削に関する研究 -すくい面形状による切りくず制御の試み-
- [3] 公益財団法人マザック財団 平成27年度優秀論文表彰 高性能切りくず案内旋削の開発 -工具形状と切りくず流出制御-

## 謝辞

本論文は、株式会社豊田中央研究所に勤めながら、国立大学法人名古屋大学大学院工学研究科の博士課程（後期）に入学し、研究成果をまとめたものである。本研究を進める上で、多くの方々のご指導・ご協力いただきましたことを心より感謝致します。

名古屋大学大学院工学研究科 社本英二教授には、学部生からご指導いただき、研究の楽しさ・奥深さも教えていただきました。博士課程の入学後も研究を行う機会を与えていただきましたこと、また多方面にわたり適切な助言をしていただきましたことを深く感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、審査・助言いただきました副査の先生、糸魚川文広教授、梅原徳次教授、鈴木教和准教授に感謝致します。

本研究を進めるにあたり、オレゴン州立大学 Burak Sencer 助教、社本研究室の早坂健宏助教には、加工実験及び論文製作の面において手厚くサポートをしていただき、また秘書 石原朋子様をはじめ研究室の学生・卒業生の皆様には、様々な方面で助けていただきましたことを感謝致します。

加工実験装置の製作において、村田機械株式会社 石原正史様、廣瀬光典様、小出富夫様をはじめ多くの皆様にはご協力・ご助言いただきましたことを感謝致します。

最後に、博士課程進学を快く受け入れ、また精神的に支えてくれた妻 恵に感謝致します。