論文

仕上げ抜きと押し出し打抜きによる 金属マイクロギヤ歯形の加工と切り口面形状の評価

鈴木 洋平* 白鳥 智美*

楊 明** 村川 正夫***

Processing of Metal Microgear Tooth Profile

by Finish Blanking and Extrusion Blanking and Evaluation of Cut-surface Shape

Yohei SUZUKI*, Tomomi SHIRATORI*,

Ming YANG** and Masao MURAKAWA***

(Received on May 31, 2018)

Precision blanking processes suppress shear droop, fracture, and burr generation on a cut blank surface. However, as the blank size becomes extremely small, as in a microgear, the technology involved becomes extremely difficult. In the previous report¹⁾, the authors fabricated microgears by finish blanking and extrusion blanking, evaluated their cut surfaces, and confirmed the effectiveness/advantage of extrusion blanking. However, in the previous study, because of concerns about tool breakage due to punch and die interference, which is a problem of negative clearance processing, the extrusion process comprising two steps was stopped at 90 % of the plate thickness in the first step, and the remaining 10 % that was blanked in the second step became a fractured surface. Therefore, in this experiment, with the aim of preventing such fracture, extrusion processing was additionally carried out to the very limit of 99 % of the plate thickness where the punch and the die were almost in contact, and the plate was severed in the second step. Measurements of the constituent ratio of the whole cut surface, the geometry, and the surface roughness of the cut surface were performed. As a result, the fractured surface could be suppressed, and few burrs were observed.

Key words: shearing, finish blanking, extrusion blanking, forming property, metal microgear.

1. 緒 言

せん断加工によって得られる切り口面は板厚に対するだけ、かえり、せん断面の割合（以下切り口面構成比率と表記）から定義されるが、ギヤの様にお互いの切り口面が接触するような部品は、切り口面を出来る限り平滑面にしたという要求が多い。従来、その解決手段として、被加工材に静水圧を付加した状態で打抜き加工を行う精密せん断加工法が用いられてきた²⁾。近年は医療機器や電子機器をはじめ小型化且つ、高精度化が求められ、精密せん断加工法もそのニーズに対応が迫られている。しかしながら、小

型化するに従い金型部品製作の難易度は高くなり製作方法にも限界がでてくる。更には被加工材の薄肉化によりパンチとダイのクリアランスを狭くする必要があり、それらの位置合わせの難易度は極めて高くなるという課題が生ずる。

これらの課題に対して著者らは、既報¹⁾において、せん断加工で製作可能であり且つ、切り口面構成比率も制御可能であるとする極小サイズのマイクロギヤ歯形（ピッチ円直径が 1.42 mm, 歯数 9, モジュール $m = 0.16$, 板厚 $t = 0.21$ mm）を以下の 2 種類の精密せん断加工法で製作し、その切り口面を評価した。その結果、パンチとダイのクリアランスが 2 μm の仕上げ抜き法³⁾を用いても破断面を防止することは困難であり且つ、切り口面の構成比率にばらつきが生じることを明らかにした。一方、マイナスクリアランスを用いた押し出し打抜き法⁴⁾においては、第一工程の押し出し加工段階までは破断面が生じず且つ、切り口面構成比率のばらつきが仕上げ抜き法に比べ小さくなることから、マイクロギヤ歯形の加工においては、製品品質及び金型製作・クリアランス調整の観点からも同法が有効であることを報

* (株)小松精機工作所 〒392-0012 諏訪市四賀桑原 942-2
Komatsuseiki kosakusho. Co., Ltd.,
942-2 Shiga, Suwa, Nagano 392-0012, Japan.

** 首都大学東京 システムデザイン研究科 〒191-0065 日野市旭が丘 6-6
Tokyo Metropolitan University,
6-6, Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065, Japan.

*** 日本工業大学 〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1
Nippon Institute of Technology,
4-1 Gakuenndai, Miyasiro, Minamisaitama, Saitama 345-8501, Japan.

告した。しかしながら、既報においてはマイナスクリアランスの課題である、パンチとダイの干渉⁵⁾による工具（特にパンチの）破損を懸念し、押し出し加工段階を板厚の 90 % までに留めた結果、残りの 10 % は第二工程の打抜き加工段階による破断面発生となった。従って、本報の実験では前述の課題を踏まえて、既報¹⁾と同一のパンチとダイ及び歯車形状の後述のカウンターパンチを用いて、パンチとダイが接触しない（工具破損しない）限界までマイナスクリアランスによる押し出し加工を試みた。次に加工品の評価項目について説明すると、ギヤ精度は一般的には、ピッチ誤差、歯形誤差、歯すじ誤差測定によって評価されるが、本報告においては、実測値を得るのは極めて困難であることに鑑み、当該評価はせん断加工特有の現象、すなわち、だれ・破断面の発生、及びわん曲の発生の程度等の測定を以て代替的に行った。より具体的には、切り口面構成比率、歯形の形状寸法、歯形平面部の平面度、歯形平面部に対する切り口面の傾きの測定による評価を行った。加えて、切り口面におけるせん断面の表面粗さの測定も行い、各工法加工品の評価を試みた。

2. 実験方法

せん断加工するマイクロギヤ歯形は既報¹⁾同様 Fig. 1 に示すように、ピッチ円直径が 1.42 mm、歯数 9、モジュール $m = 0.16$ のインボリュート歯車形状とした。被加工材料は特殊金属エクセル製の板厚 $t = 210 \mu\text{m}$ 、幅 $B = 20 \text{ mm}$ の SUS304 材とした。材料の機械的特性を Table 1 に示す。

次に実生産における順送加工を想定して構想した押し出し打抜き法の工法概略図を Fig. 2 に、金型詳細仕様を Table 2 にそれぞれ示す。Fig. 2 (a) は、材料板厚の 99 % を押し出した際の概略図であり、この段階では原材料と押し出された材料は分離されていない。(b) では材料及び押し出された材料を金型表面に押し戻し、(c) では (a) とは異なるパンチとダイを用いて材料と押し出された材料を完全に分離させる。(d) は (a) の拡大図であり、板厚の 99 % を押し出し加工した際のパンチ、ダイ、被加工材料の位置関係を示している。押し出された材料は原材料と僅かに繋がっているだけの状態である。従って、逆圧力を負荷したままプレス機のスライドが上昇するとカウンターパンチによって、つなぎ部が切断され、押し出された材料が穴の中に戻されてしまい、結果的に押し出し打抜き加工面に傷が付く望ましくないことが分かった。そこで本実験では金型内のカム機構により、プレス機のス

Fig. 1 Main dimensions of fabricated 210 μm -thick microgear

Table 1 Mechanical properties of work material

Items	value
Grain size [μm]	10
Tensile strength [MPa]	1059
0.2 % proof stress [MPa]	892
Elongation [%]	30
Vickers hardness [HV]	329
n value	0.13

ライドが上昇した後にカウンターパンチが原位置に戻るよう制御した。パンチは超硬材を丸棒から直接プロファイルグラインダーを用いて製作し、ダイは超硬材をワイヤーカット加工にて複数回粗加工後、歯面表面の加工変質層を除去するためラップ仕上げを行った。ダイ刃先の丸み半径は押し出し打抜き法の知見⁴⁾を参考に、板厚の 5 % ($R_d = 0.01 \text{ mm}$) を用いた。なお、ダイ刃先の丸みはセラミック砥石を用いて手作業にて加工し、非接触三次元測定機にて丸み半径値を確認した。また、工具（パンチ・ダイ）の位置精度を確保するため、板押え/ストリッパプレート、パンチプレート、ダイプレート等の材料には強度及び、寸法安定性が確保出来る SKD11 を使い、それぞれの部品の正確な相対位置関係を得るためのキーパーツである穴加工には治具研削仕上げを用いた。ファインブランキングの知見⁶⁾を参考に、実験に用いる最大板押え力はせん断力の 50 % 程度、最大逆押え力はせん断力の 20 % 程度に設定した。各工法における実金型の歯形輪郭各部におけるクリアランスばらつきは、切り口面評価における重要な加工パラメーターであるが、形状が複雑なため歯形の歯先円直径と歯底円直径

Fig. 2 Schematic of extrusion blanking used in the mass-production-scale progressive die system

をパンチとダイそれぞれで測定して、同直径の差を 2 で割った値をもってクリアランス値とした。プレス機はスクリーサーボプレス機 (DT-J515 微細加工研究所製 加圧能力 50 KN) を用いた。押し出し打抜き法における押し出し加工量の決定はパンチとダイの干渉を防ぐための重要な制御項目である。本実験では、プレス機のスライド変位量 (すなわちパンチ移動量) をレーザ変位計で測定し、更にパンチ上面にロードセルを設け、打抜き荷重が過大にならないことを確認することで、パンチが被加工材に接触してからのパンチストローク量を $1\text{ }\mu\text{m}$ 単位で制御できるようにした。かくして、押し出し加工量を被加工材板厚の 99 % になるように設定することができた。

Table 2 Blanking tool specifications

Items	Value
Clearance CL (μm)	$-8\text{ }\mu\text{m}$ ($-3.8\text{ }\%$)
Punch outer diameter dP_1 (mm)	1.746
Die inner diameter dD_1 (mm)	1.730
Punch outer diameter dP_2 (mm)	1.736
Die inner diameter dD_2 (mm)	1.750
Die radius Rd_1 in 1st step (mm)	0.01
Die radius Rd_2 in 2nd step (mm)	Nearly zero
Counterpunch outer diameter dPc (mm)	1.720

切り口面構成比率の評価においては、歯形輪郭全周における実クリアランス値そのものを知ることも製品切り口面の評価の際極めて重要となるが、前述したように実際のクリアランス値を直接測定するのは極めて困難である。そこで、クリアランスを小さくすると板厚に対するだれ及び破断面の割合が小さくなり、反対にせん断面の割合は大きくなるという一般的知見⁷⁾から、実験によって得られた切り口面の、だれの大きさ h_1 、せん断面 (平滑面) の大きさ h_2 、及び破断面の大きさ h_3 から求める各切り口面構成比率 (h_1/t , h_2/t , h_3/t) と同実クリアランス (実際には前述の便宜的に設定/測定したクリアランス) には相関関係があると仮定し、輪郭各個所のうち代表となる個所を選定し、同個所における切り口面構成比率を求める。各ギヤ測定点は Fig. 3 (●印の A-1~A-9 (歯先部), B-1~B-18 (ピッチ円直径付近部), C-1~C-9 (歯底部) の計 36 箇所) に示す通りである。

Fig. 3 Measurement points of constituent ratio of cut surface of the microgear

更に、歯形の形状寸法は歯先円直径を代表として測定し、切り口面の傾きは、A (歯先部), B (ピッチ円直径付近部), C (歯底部) 各部において測定を行い、歯形の平面度は歯形の中心から歯先部にかけて A (歯先部) を代表として測定した。切り口面の表面粗さは、板厚方向 0.1 mm 位置のせん断面についてその直交方向において非接触次元測定機を用いて測定した。

3. 実験結果及びその評価

3.1 歯形切り口面構成比率の SEM 観察結果

Fig. 4 にだれ側から撮影したマイクロギヤ歯形の SEM 写真を示す。なお、比較として既報¹⁾の仕上げ抜き法及び、押し出し打抜き法 (90 % 押し出し) で加工した歯形の SEM 写真もそれぞれ示す。本実験の押し出し打抜き法 (99 % 押し出し)

(a) Finish blanking¹⁾

(b) Extrusion blanking (90 % Extrusion)¹⁾

(c) Extrusion blanking (99 % Extrusion)

(d) Enlarged view of tooth tip in (c)

Fig. 4 SEM images of microgears fabricated in the experiment

による歯形の切り口面を観察すると、仕上げ抜き法及び押出し打抜き法 (90 % 押出し) による歯形と比較しても破断面が抑制できている。しかしながら、歯先部拡大図 (d) からは僅かにかえりの様な変形体が確認できる。かえりの様な変形体の発生方向は板厚方向だけでなく、直径方向 ((d) 拡大図の白矢印方向) にも認められる。これは破断防止を目的としてダイ刃先部に微小 R を付与した結果、被加工材が R 形状に沿うようにして成形され、更には第二工程のダイ直径 dD_2 が第一工程のダイ直径 dD_1 より大きいことで直径方向に段差が生じたためと推察される。

3.2 切り口面構成比率

SEM 写真で示した切り口面の状況をより具体的に示すため、前記構成比率を Fig. 3 の測定個所で SEM の測長機能を用いて測定した。Fig. 5 に各工法において加工したマイクロギヤ歯形の各測定個所における切り口面構成比率の測定結果をそれぞれ示す。仕上げ抜き法によって加工したマイクロギヤ歯形は、前述した歯形の測定個所の違いにより、切り口面の構成比率 h_3/t が明らかに異なる。押出し打抜き法 (90 % 押出し) で加工したマイクロギヤ歯形は仕上げ抜き法に比べ、ばらつきの少ない切り口面構成比 h_3/t となっているが完全な破断の抑制には至っていない。押出し打抜き法 (99 % 押出し) は、破断抑制は出来ているが、板厚の 5 % 程度に前述したかえりの様な変形体が生じた。なお、仕上げ抜き法及び、押出し打抜き法 (90 % 押出し) の第 2 工程打抜き後におけるかえりは SEM で確認できないほど小さかったため測定していない。

各工法の切り口面構成比率を特にだれ、せん断面、破断面、かえりに着目して数値比較するため、測定箇所 A 部 (歯先部)、B 部 (ピッチ円直径付近部)、C 部 (歯底部) のそれぞれを平均値にてまとめた結果を Fig. 6 に示す。まず、だれ高さ構成比 h_1/t について評価する。特にだれが発生しやすい A 部 (歯先部) では、仕上げ抜き法はだれ平均高さ構成比 h_1/t が 14.4 % となり、押出し打抜き法 (押出し 90 %) では 11.8 %, 押出し打抜き法 (押出し 99 %) では 10.6 % となった。この結果は、淵脇らによってファインブランキングプレスを使用して製作した歯車 (ピッチ円直径: 6.3 mm, 歯数: 14, モジュール: 0.45, SUS304 $t=0.178$ mm, grain size $0.5 \mu\text{m}$) のだれ高さ 17.4 %⁸⁾ と比較しても同等かそれより良好な結果であり、マイクロ部品加工においても極小クリアランス及びマイナスクリアランスを採用することが、だれの抑制に有効であることが分かった。次に、破断面構成比率 h_3/t について評価を行う。仕上げ抜き法において最も破断面構成比率 h_3/t の高い B 部 (ピッチ円直径付近部) で、仕上げ抜き法は h_3/t が 18 %, 押出し打抜き法 (90 % 押出し) では、 h_3/t が 12.4 % であった。今回、更に押出し量を増加させる (99 % 押出し) ことで破断面構成比 h_3/t は実質的に 0 % となった。即ち、マイナスクリアランスでの加工時には従来の知見⁹⁾同様、破断が生じないことが分かった。

3.3 歯形の形状寸法評価

Fig. 7 に上記 3 種類の加工法について、マイクロギヤ歯形の歯先円直径を縦軸に、横軸にだれ側とかえり側からそれぞれ測定した製品直径及び金型ダイ直径をプロットした結果を示す。仕上げ抜き法によって加工したマイクロギ

(a) Finish blanking¹⁾

(b) Extrusion blanking (90 % Extrusion)¹⁾

(c) Extrusion blanking (99 % Extrusion)

Fig. 5 Constituent ratio of cut surface processed by various blanking methods

Fig. 6 Average value of constituent ratio of cut surface processed by various blanking methods

ヤ歯形は、だれ側とかえり側共にダイ直径寸法とほぼ一致した。基本的に打抜き加工によって得られるブランク直径はダイ直径に等しくなる知見¹⁰⁾からしても理解できる結果である。しかしながら、村川らによるとハイテン材の仕上げ抜き加工を行った際、ブランクが打抜き時にスプリングバックを起こし、ブランク（製品）直径がダイ直径より大きくなる¹¹⁾としており、本実験の結果と幾分異なる。これは、本実験においては、板押え力が既報より大きく取り、逆押え機構を用いたことによりブランクのわん曲を防ぎ、寸法精度を損なうことなく加工できたためと推察する。一方、押し出し打抜き法は 90 % 押し出し、99 % 押し出し共に、だれ側寸法は第一工程の押し出し加工で用いるダイ寸法 dD_1 と一致し、かえり側寸法は第二工程の打抜き工程で用いるダイ直径 dD_2 とほぼ一致した。かえり側の寸法測定結果は、Fig. 4 (d) の SEM 写真からも理解できる。だれ側とかえり側に寸法差が発生するということは、ギヤの実用性から考えると歯面の接触面積が減少しギヤどうしの噛み合いが悪化することを意味する。対策として、後工程のバレル研磨等で寸法差部分を除去することも考えられるが、これは同時にだれの増加にも繋がる。従って、かえりの様な変形体自体を発生させないか、または減少することが必要である。しかし、それにはダイ刃先部の丸み半径を縮小することを意味する。現状以上の丸み半径の縮小は、すなわちシャープエッジに近づく事を意味するので、切り口面に破断面が発生することが懸念され、課題が残る。また、第二工程の打抜き加工ダイ寸法を第一工程の押し出しダイ寸法にどの程度近づけられるかも要点となるが、寸法差が小さくなりすぎると金型製作上の困難が生じる。具体的には順送加工における工程間の位置精度は金型精度が影響する。従って精密な金型製作が必要となり、以上の解決には更なる検証が必要である。

Fig. 7 Gear tip diameter vs die diameter for processing by various blanking methods

3.4 平面度及び切り口面の傾き評価

Fig. 8 に歯形のかえり側平面部と切り口面の傾きを、A（歯先部）の全 9 箇所、B（ピッチ円直径付近部）の全 18 箇所、C（歯底部）全 9 箇所の測定を行い、その平均値を求めた結果を示す。仕上げ抜き法によって加工したマイクロギヤ歯形は、ほぼ直角に打抜かれているが、押し出し打抜

きした歯形には約 3 度の傾きが確認できる。このことから、歯形にはわん曲が生じているものと推察する。そこで、かえり側表面において、A-1 ポイントから歯形中心までの距離 L に関する板厚方向の高さ変化 Δh を非接触三次元形状測定機にて測定した結果を Fig. 9 に示す。仕上げ抜き法で加工したマイクロギヤ歯形は Δh が L に関してほぼ平坦状である。一方、押し出し打抜き法で加工したマイクロギヤ歯形は、歯形中心から A-1 ポイントにかけて 10 μm 程度（板厚の約 5 %）板厚方向に高さ Δh が増加していく。

切り口面の傾き及びわん曲の原因に関して、Fig. 10 に示す荷重ストローク線図から考察する。押し出し打抜き法の押し出し最大荷重は、仕上げ抜き法の打抜き最大荷重に比べて 30 % 程度パンチにかかる負荷が高い。従って、歯形はダイ内面に強く擦られながら、加工が進んでいくと考えられ、その抵抗により切り口面の傾き及び、わん曲が生じたと推察する。更にその要因としては、マイナスクリアランスの値、板厚、輪郭寸法、ダイ刃先部の丸み半径、更には逆押え力等の複合的なものが考えられる。この変形メカニズムの解明については、上記パラメーターを変化させた加工実験と FEM を用いた同加工法のシミュレーション解析を比較することで今後明らかにしていきたい。なお、90 % 押し出しと 99 % 押し出しの押し出し加工荷重が加工終期において僅かに異なる。この原因として、本実験に使用したロードセルの定格容量が 20 kN と押し出し加工荷重に比べ大きいため、測定精度が十分でなく、押し出し加工荷重に差が生じたと推察する。

Fig. 8 Angle θ of cut surface processed by various blanking methods

Fig. 9 Relationship between L and Δh at the edge of the burr-side surface (L : Distance from A-1 point to gear center, Δh : Amount of change at each position of plate thickness)

Fig. 10 Load-stroke curves of various blanking methods

3.5 切り口面の表面粗さ

表面粗さの測定箇所を Fig. 11 に示す. 測定箇所はせん断面とし, 測定方向は打抜き方向と直角方向, 測定長さは 0.1 mm, カットオフ値は測定長さの 1/5 である 0.02 mm とした. 各工法における表面粗さ測定結果を Fig. 12 に示す. 全ての工法において, 算術平均粗さ (Ra) は 0.1 μm 以下, 最大高さ (Rz) は 0.3 μm 以下となり, 鏡面までとはいかないが滑らかな表面である. しかしながら, この数値の良否によってのみではマイクロギヤの実用によって生じる騒音や振動を評価するまでは判断できないと考える. これについてもこれから明らかにして行きたい. なお, ダイ内側面の表面粗さを測定したところ, $Ra = 0.09 \mu\text{m}$, $Rz = 0.38 \mu\text{m}$ であったことから, せん断面はダイ内側面によってバニッシされ, ダイ内側面の表面粗さがせん断面に転写され, その結果, せん断面粗さとなって表れたと推察する. 従って, 更なる表面粗さの改善には, ダイ内側面の仕上げ方法の改善や, コーティングによる改善が考えられる.

Fig. 11 Surface roughness measurement point (thick white line is the measurement line)

Fig. 12 Measurement result of surface roughness for processing by various blanking methods

4. 結 言

押し出し打抜き法の押し出し量をパンチとダイが接触する限界と思われる板厚の 99 % にまで制御し, その後完全打抜きを行う工程を機械サーボプレスにより実現し, マイクロギヤ歯形の製作を行った. 既報¹⁾の仕上げ抜き法及び押し出し打抜き法 (90 % 押し出し) とを比較し, 以下の新しい知見を得た.

- (1) 押し出し量を増加させ, その後完全打抜きをする 2 工程押し出し抜きによって, 破断の抑制は可能である. しかしながら, 歯形製品のだれと反対側にかえりの様な変形体が発生する.
- (2) 歯形の歯先円直径は, 仕上げ抜き法を採用すると, ダイ直径とほぼ一致する. 一方, 押し出し打抜き法を採用すると, だれ側の寸法は押し出し加工時に用いるダイ直径とほぼ一致し, かえり側は打抜き加工時に使用するダイ直径とほぼ一致する.
- (3) 押し出し打抜き法を採用すると, かえり側表面近傍において歯形輪郭形状に沿って板厚方向に製品わん曲と考えられる変形が生じる.

謝 辞

本報告の一部は, H28 年度金型技術振興財団の助成を受けて実施しました. ここに感謝の意を表します.

参 考 文 献

- 1) Suzuki, Y., Shiratori, T., Yang, M. & Murakawa, M.: *Procedia manufacturing*, **15**(2018), 1445-1451.
- 2) Murakawa, M.: *J. JPN. Soc. Technol. Plast.*, **35**-396(1994), 3-9.
- 3) Howard, F.: *Finish blanking I, Sheet Metal Industries*, 137-397 (1960), 339-351, 354-356, 374.
- 4) Yamada, T.: *Machinery*, **26**-389(1963), 956-961.
- 5) Hirota, K.: *J. JPN. Soc. Technol. Plast.*, **55**-638(2014), 185-189.
- 6) Fine blanking gijutsu kenkyukai: *Fineblanking handbook*, (2010), 13, Fine blanking gijutsu kenkyukai.
- 7) Maeda, T.: *J. JPN. Soc. Technol. Plast.*, **1**-4(1960), 309-316.
- 8) Fuchiwaki, K., Nakamura, K., Suzuki, M., Yoshida, K., Koga, N. & Murakawa, M.: *Proc. 67th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast.*, (2016), 11-12.
- 9) Kondo, K. & Kimura, Y.: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **35**-277(1969), 1972-1979.
- 10) Maeda, T.: *Seimitsukikai*, **25**-11(1959), 607-614.
- 11) Murakawa, M., Nakamura, K., Tsuchiya, T., Matsumoto, A. & Koga, N.: *J. JPN. Soc. Technol. Plast.*, **54**-628(2013), 45-49.