コントロールバルブスプール穴・リーマ加工の円筒度向上技術開発

永田　宏樹*　　勝又　雅文**　　射庭　智之*　　曽和　真弘*

抄　録

CVT用コントロールバルブは，燃費向上のためリーク量低減が必要である．そのために高精度加工が求められており，今回はその中でも要求精度の高い，スプール穴・リーマ加工の円筒度向上に関する取り組みを報告する．

1. はじめに

CVTには燃費向上が求められており，その方策として，コントロールバルブ内のリーク量低減が有効である（Fig. 1）．コントロールバルブとは，オイルポンプで発生させた油圧を用いて，変速に必要な油圧を制御するための部品であり，今回取り上げるスプール穴は，油圧調整を行うスプールバルブとの勘合穴としての機能を担っている．リーク量を低減するために，スプールバルブとスプール穴とのクリアランスを最小化し，更に高強度材の適用により耐久性を向上させているが，この影響によりスプール穴・リーマ加工精度が悪化し，とりわけ数μmオーダーの円筒度確保が課題となった．本稿は，円筒度向上のための具体的方策を報告する．

2. スプール穴の加工方法と課題

スプール穴加工には，縦型マシニングセンタを使用し，Fig. 2に示す（a）鋳抜き粗材に対して，（b）下穴ドリルおよび（c）リーマの2工程によって加工される．リーマの作用切れ刃数は，精度上問題となる加工穴の多角形形状誤差(1)を抑制するため1枚刃を使用し，工具のチャッキングには，高剛性で振れ精度と脱着性にも優れるハイドロチャックホルダを用いる．スプール穴・リーマ加工における課題は，円筒度，仕上げ面粗度，工具寿命の3つに大別でき，その中でも円筒度向上は高難度の課題となっている．

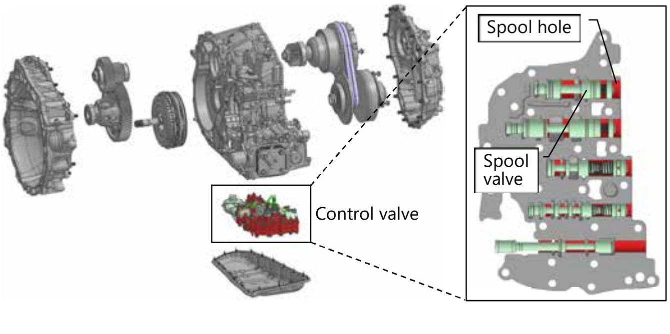


Fig. 1 Exploded view of a CVT

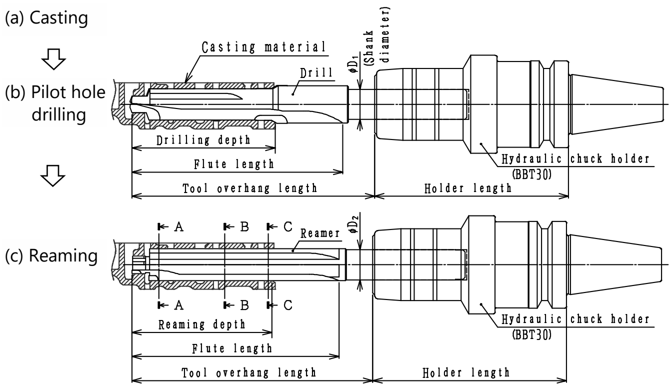


Fig. 2 Conventional tooling layout

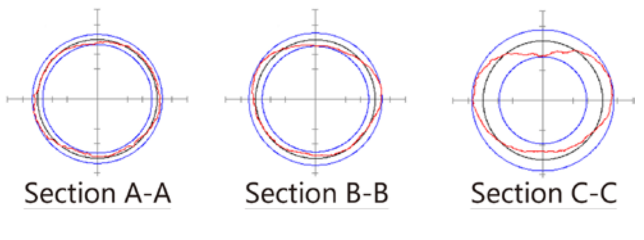


Fig. 3 Roundness profile of reamed spool hole

* 部品技術部　** 試作部

3. 円筒度向上の影響因子

円筒度は，円周振れ（穴径寸法），真円度，同軸度（位置偏差）という3要素の組み合わせにより定義され，測定には専用機を用い，Fig. 3に示すC-C断面（口元），B-B断面（中央），A-A断面（奥側）各々で測定する．各断面の真円度を比較すると，C-C断面（口元）が最も悪く，この口元の真円度悪化が円筒度悪化の主要因になると考えらえる．そこで，従来の研究結果[(1)～(5)]を基に，円筒度向上に関する影響因子をFig. 4に示す系統図としてまとめた．円筒度におよぼす影響は，工具・ホルダ仕様，切削条件，被削材，加工設備と考えられ，この内，切削条件（下穴送り速度）と工具・ホルダ仕様（工具の曲げ剛性，回転バランス）に着目し，その影響調査の実験を行った．

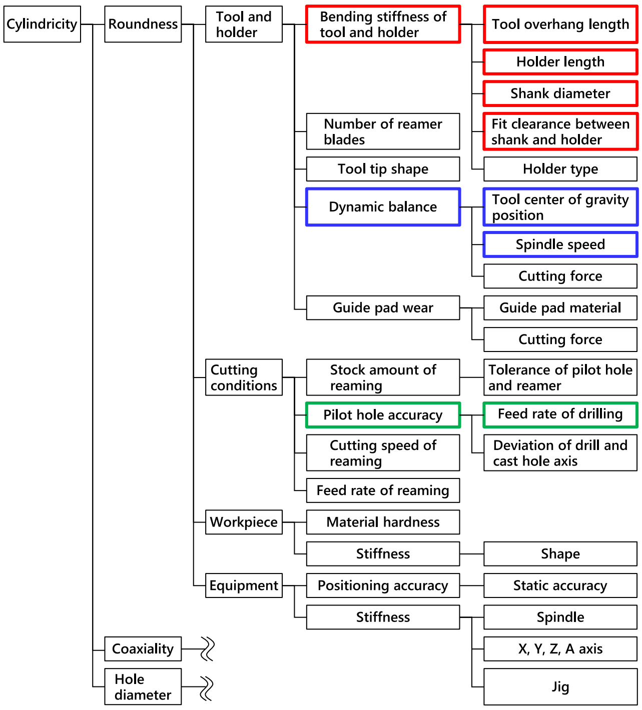


Fig. 4 Cause and effect diagram for improving cylindricity

4. 試験概要

4.1 下穴送り速度が円筒度に及ぼす影響

下穴ドリル加工（以下 下穴加工）の送り速度がリーマ加工後の円筒度に及ぼす影響を確認するため，Fig. 5に示す装置を用いて加工試験を行った．切削条件をTable 1に示す．下穴を3水準の送り速度で加工後，ワークをいったん取り外して円筒度を測定し，再度ワークを装置に取り付

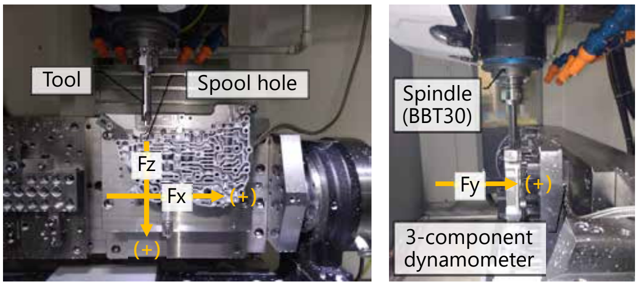


Fig. 5 Schematic diagram of cutting test

Table 1 Cutting conditions

Process	Cutting speed Vc m/min	Feed rate fz mm/tooth	Tooling
Drilling	311	0.025, 0.05, 0.1	Fig. 2(b)
Reaming	150	0.089	Fig. 2(c)

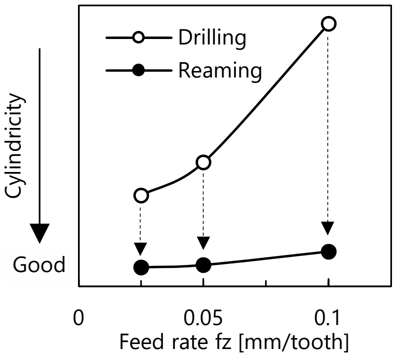
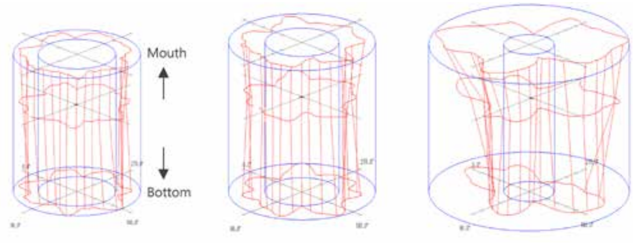


Fig. 6 Results of cutting test



(a) fz 0.025 mm/tooth　(b) fz 0.05 mm/tooth　(c) fz 0.1 mm/tooth

Fig. 7 Cylindricity profile of pilot hole

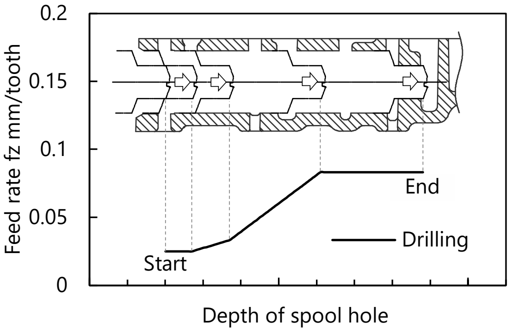


Fig. 8 Variable feed control of drilling

け，単一条件でリーマ加工を行った．なお，本装置は高精度位置決めが可能であり，ワーク脱着による下穴とリーマ穴との位置偏差は無視できるものとする．

円筒度の測定結果をFig. 6に示す．リーマ加工後の円筒度は下穴円筒度の影響を受け，かつ下穴円筒度は下穴加工の送り速度の影響を受けることを確認した．

Fig. 7に下穴のプロファイル形状を示す．送り速度が上がるに連れて口元の真円度悪化が顕著となる．これは従来の研究[4]によれば，工具食い付き時に挙動が不安定になることが原因と考えられ，高剛性工具の使用と切削初期に微小送りで切削することが有効であると報告されている．そこで，高精度化と高能率化を両立するため，Fig. 8に示すように，下穴加工の切削初期を低送りとし，加工深さに応じて送り速度を上げる，可変送り制御を取り入れた．

4.2 工具の曲げ剛性改良

ホルダに把持された工具の曲げ荷重に対する変位量[5]を確認するため，Fig. 9に示す方法で測定を行った．従来仕様のドリルとホルダによる測定結果をFig. 10(a)に示す．シャンク把持部の支点から工具先端にかけて変位勾配が急になっており，シャンク把持部の高剛性が重要であると考えられる．そこで，Table 2に示す工具突き出し長短縮，シャンク径拡大，ホルダ全長短縮，シャンクとホルダのはめ合いクリアランス最小化を組み合わせ，変位量の低減を図った．その結果をFig. 10(b)に示す．

工具突き出し長短縮の方策として，Fig. 2(b)，(c)に示すドリルおよびリーマの溝長短縮が考えられるが，その影響でスプール穴口元(上部)への切りくず排出性が悪化し，切りくず詰まりによる加工面カジリが懸念される．そこで，スプール穴口元から奥側(下部)へと切りくず排出させるため，流体シミュレーションを活用することで工具のクーラント吐出穴位置・角度を最適化し，Fig. 11に示す樹脂3Dプリンタ製の切りくず採取治具を用いて効果確認を行った．

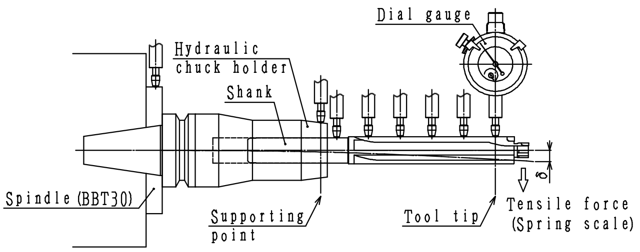


Fig. 9 Method of measuring bending stiffness of tool and holder

Table 2 Improved specifications

Contents	Drill	Reamer
Tool overhang length	↓ 30.2% shorter	↓ 35.9% shorter
Shank diameter	↑ 25.0% larger	↑ 12.5% larger
Holder length	↓ 28.6% shorter	
Fit tolerance of shank and holder	H4 (holder)/js4 (shank)	

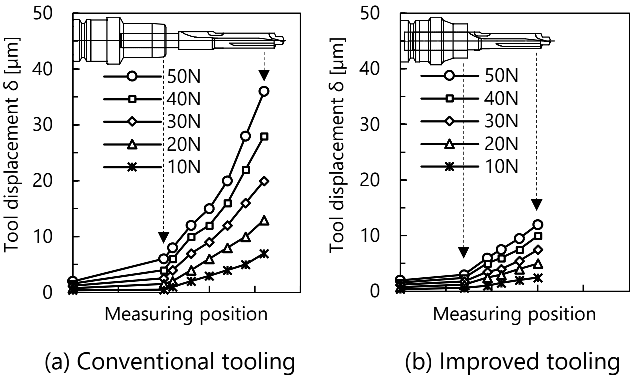


Fig. 10 Measured bending stiffness of drill and holder

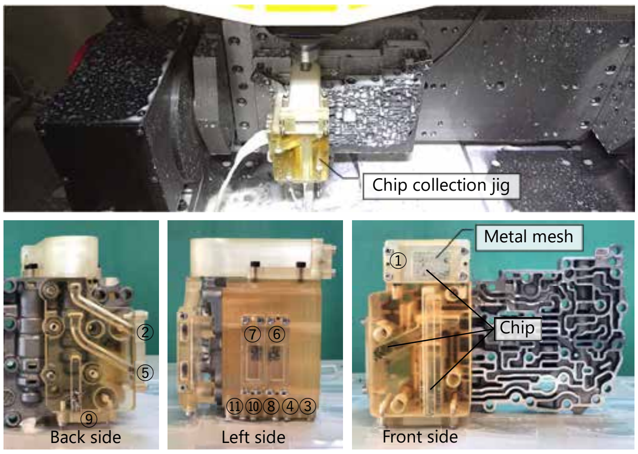


Fig. 11 Chip collection jig

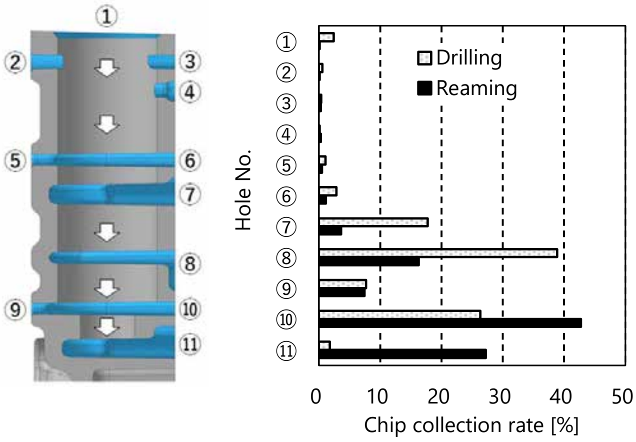


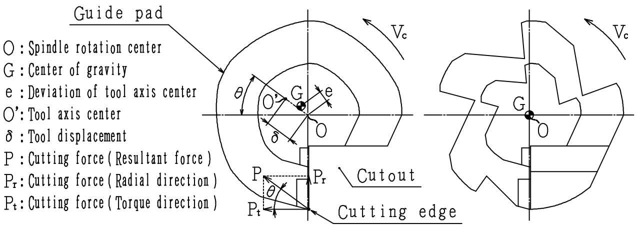
Fig. 12 Chip collection results

この治具は，スプール穴口元①および側面開口部②～⑪各々に隙間なく接続されており，出口側に組み込んだ金属メッシュにより，クーラントと共に排出される切りくずのみを分離採取することが可能である．その結果をFig. 12に示す．奥側（下部）の側面開口部⑦～⑪に切りくず排出が集中しており，狙い通りの効果が確認できた．

4.3 工具の回転バランス改良

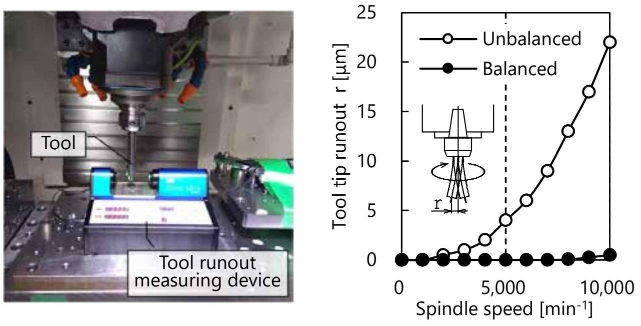
4.2節で取り上げた工具の曲げ剛性改良に加え，回転バランスによる工具先端振れの影響を調査した．1枚刃リーマは，加工穴が多角形形状になりにくい利点がある一方，以下の理由で回転バランス悪化が懸念され，(I) Fig. 13 (a)に示す切れ刃部のくり抜きにより，ガイドパッド側に重心Gがズレやすい，(II)切削力Pが切れ刃と逆位相のガイドパッド側に加わることで，リーマ食い付き時の挙動が不安定になり，口元の真円度が悪化すると考えられる．そこで，Fig. 13 (b)に示す主軸回転中心Oに重心Gが位置するよう，リーマ外周部の形状設計を行った．

Fig. 14 (a)に光学ラインセンサ方式工具測定器および工具先端振れ測定方法の外観，Fig. 14 (b)にその測定結果を示す．バランス設計を施すことにより，高速回転時における工具先端振れの低減を可能にした．



(a) Unbalanced　　(b) Balanced

Fig. 13 Cross section of reamer



(a) Schematic diagram　　(b) Dynamic balance

Fig. 14 Results of dynamic balance test

5. 最適仕様と適用結果

4章の結果を踏まえ，Table 2に示す工具・ホルダの高剛性化とFig. 13 (b)に示すリーマの回転バランス設計を組み合わせ，Table 3に示す切削条件で加工試験を行った．その結果をFig. 15に示す．従来と比較し，下穴およびリーマ加工後の円筒度が共に良化しており，本仕様の有効性が確認できた．

Table 3 Improved cutting conditions

Process	Cutting speed Vc m/min	Feed rate fz mm/tooth	Tooling
Drilling	311	0.025-0.083 (Variable feed control)	Table 2 and balanced
Reaming	225 (50% faster)	0.1 (12% faster)	

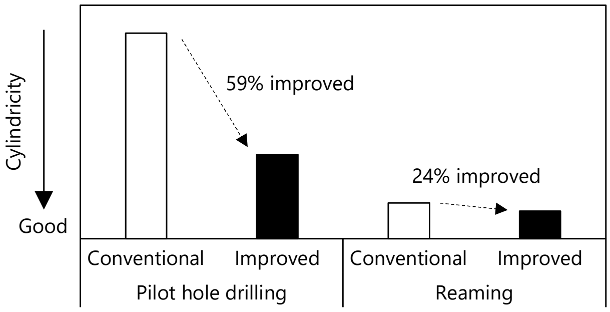


Fig. 15 Results of cutting test

6. 結論

コントロールバルブスプール穴加工における工具・ホルダ仕様を最適化することで，円筒度が24%向上できた．以下にその知見を示す．

(1) リーマ加工後の円筒度は，下穴円筒度の影響を大きく受ける．下穴円筒度を向上するには，下穴ドリル加工の送り速度を下げることが有効である．

(2) 工具変位量を抑制するには，工具突き出し長短縮，シャンク径拡大，シャンクとホルダのはめ合いクリアランス最小化が有効である．

(3) 工具のクーラント吐出穴位置・角度を最適化し，切りくずをスプール穴口元（上部）から奥側（下部）へと排出させることで，工具溝長が短縮できる．

(4) 高剛性かつ回転バランスの良い1枚刃リーマを設計することで，高速回転時の工具先端振れが低減できる．

7. 参考文献

(1) 佐久間敬三，清田宏：超硬リーマによる加工精度に関する研究（第1報）－工具の挙動と加工穴の多角形形状－，精密機械，46巻，7号，pp.856-861（1980）

(2) 佐久間敬三，清田宏：超硬リーマによる加工精度に関する研究（第4報）－特殊不等分割工具および高剛性工具による真円度の改善－，精密機械，48巻，6号，pp.745-750（1982）

(3) 佐久間敬三，清田宏：超硬リーマによる加工精度に関する研究（第5報）－高速加工における食付き時の工具挙動と前加工穴の入口部形状の影響－，精密機械，48巻，11号，pp.1496-1501（1982）

(4) 佐久間敬三，清田宏，森田秀則：ドリル加工における穴の位置精度に関する研究－食い付き時の挙動と工具剛性および先端形状の影響－，日本機械学会 48巻，432号，pp.1275-1283（1982）

(5) 坂本治久，田口脩一郎，清水伸二：ミーリングチャックの曲げ剛性特性の定量的評価法，日本機械学会論文集，77巻，782号，pp.3552-3561（2011）

■ 著者 ■

永田　宏樹

勝又　雅文

射庭　智之

曽和　真弘