

硬脆性材の機械加工の実現と専用加工機の開発

Development of a machining process for hard, brittle material and a special processing machine

株式会社 山武

關 宏治

Koji Seki

株式会社 山武

福辺 卓史

Takashi Fukunabe

キーワード

硬脆性材, シリコン, 超音波加工, 機械加工, 圧力センサ, 生産技術開発

近年, 計測機器や制御機器を取り巻く環境は, 市場のグローバル化や世界規模での生産拠点の変化にともない厳しさを増し, これまで以上に高いコスト競争力と差別化技術が必要不可欠な状況となった。

本稿では硬脆性材の機械加工は, こうした環境を背景に, 製品を構成する最も重要な部品の一つであるシリコンチューブを従来技術の常識に囚われることなく, 新たな工法での開発に挑戦した。その結果コスト課題の解決と品質向上を達成することができたので報告する。

The environment surrounding the market measurement and control equipment has become increasingly challenging, following the internationalization of both the market and the production base in recent years. Products need to be competitively priced and possess a technological edge over competing offerings. Seeking to satisfy these demands, we took part in the development of the silicon tube—one of the key components of the products—using new technology that dispensed with conventional wisdom.

This paper summarizes the new technology, which has enabled significant reductions in cost and improvements in quality.

1. はじめに

硬脆性材と呼ばれる石英ガラス, シリコン, フェライトなどでは, アスペクト比の大きな形状の部品加工には, 超音波加工が適用されることが, これまでの常識であり, 機械加工での生産は考えられなかった。特に今回報告するシリコンチューブは, 円柱形状の端面にある鏡面部に $\phi 1.3\text{mm}$ という小径の深穴貫通加工をチップングやマイクロクラックといった欠けの発生を極力抑制した品質が求められるため, 機械加工での量産適用は更に困難とされてきた。

しかしながら, 超音波加工は確かに小径の深穴加工を可能としたが, 加工ツールの交換やメンテナンスに手間がかかり連続加工には不向きであった。更に外形寸法精度も不安定であり, 外周・内周部にチップングやマイクロクラックが多く発生するといった品質課題も解決できなかった。品質, コストの両者が求められる量産工法としては, とても満足できるものではなかった。そこで, 筆者らは従来技術の常識に囚われることなくコスト, 品質の両者を達成する量産工法として機械加工による工法開発に挑戦した。

硬脆性材の機械加工による工法開発では, 機械設備開発だけではなく, シリコン素材の前処理方法の確立, 工具の開発, 加工条件の確立, さらにはシリコンチューブ設計の見直しまで, 総合的な検討と課題解決が必要とされた。

本稿では従来の超音波加工と機械加工の本質的な違いを説明するとともに, 工法開発から量産技術構築まで一貫して行った生産技術開発によってコスト課題の解決と品質向上を達成した専用加工機の開発についても報告する。

2. シリコンチューブ

2.1 シリコンチューブの内容および特徴

シリコンチューブとは当社製品である差圧/圧力発信器に内蔵される圧力センサパッケージを構成する重要部品の一つである。(図1.図2)

外径 $\phi 3.2\text{mm}$, 内径 $\phi 1.3\text{mm}$, 全長 7mm のチューブ形状で, 片方の端面には鏡面を有している。圧力センサパッケージの構成を簡単に説明すると, 筐体となる金属で製作された金属ヘッダー, 圧力を感知するピエゾ式圧力センサチップ, 圧力センサを

保持し電気的絶縁を確保するガラス台座,そしてシリコンチューブからなる。シリコンチューブは鏡面側を,ガラス台座を介し圧力センサチップと接合された後,金属ヘッダーに接合される。



図1 DSTJ™3000 Ace

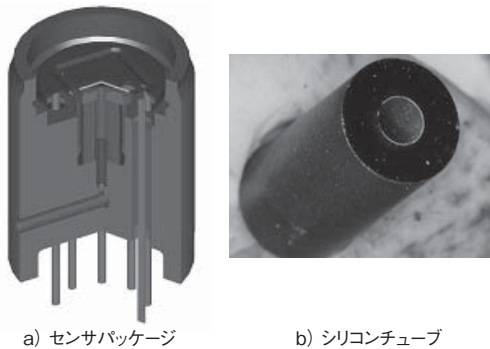


図2 圧力センサパッケージの構成

シリコンチューブの機能は,金属ヘッダーとセンサチップの熱膨張率の違いによる熱ひずみを吸収することと,発信器の受圧部に加わった圧力を,圧力センサチップに伝達させることである。

発信器として使用された場合,シリコンチューブには内面と外面に最大42MPaの圧力差が生じる環境で使用される。このため圧力センサチップを保持するガラス台座との接合には高い信頼性が求められる。シリコンチューブの外周,内周部のチップングやマイクロクラックは接合強度の低下を発生させる原因となるため,これを極力抑制できる量産工法が要求される部品である。

2.2 シリコンチューブに求められる仕様

シリコンチューブに求められる機能の一つは,前述のように,圧力センサチップと金属ヘッダーとをガラス台座を介して機密性をもって締結し,圧力を伝達することにある。この機能を達成するためにシリコンチューブに要求される主な仕様は次の4つが挙げられる。

- (1) ヘッダーと圧力センサチップの熱膨張率の差を緩和できる十分な長さがあること
- (2) 外周,内周部のチップングやマイクロクラックがないこと
- (3) 鏡面端面をもち,鏡面部に切粉等の異物が付着していないこと
- (4) 制限されたスペース内に設置できる適正な寸法精度と幾何公差精度をもつこと

3. 超音波加工

3.1 超音波加工の仕組み

超音波加工とはJIS B 0106では以下のように定義されている。

“超音波振動をする工具と砥粒とを使用して工作物を加工する方法”

超音波加工の具体的な方法を説明する。シリコンカーバイト,ボロンカーバイトなどの砥粒と水とを懸濁液状で超音波振動する工具と被削材との間に注ぎ込みながら,適当な加圧力で工具を押し付ける。工具と被削材の間に入った砥粒粒子は,振動周波数としては15~40kHz,振幅5~40 μ m程度で超音波振動する工具先端から,大きな衝撃を与えられ,その衝撃力で被削材を少しずつ砕いて加工を行うものである。

超音波加工の特徴としては,石英ガラス,シリコン,フェライト,カーボン,グラファイト,アルミナ等の硬くて脆い,いわゆる硬脆性材料の穴あけ加工,切断加工に適していると言われている。

1回の衝撃で破砕される量はごくわずかだが,前記のように1秒間に15,000~40,000回と繰り返し回数が多いので,実用的に使用可能な速さで加工ができ,特にアスペクト比の高いシリコンチューブのような形状の部品は,超音波加工により製造されることが常識とされてきた。

3.2 超音波加工の問題点

超音波加工のシリコンチューブ加工への適用にはいくつかの技術的な問題点があった。代表的なものとして次の3つが挙げられる。

(1) 連続加工,大量生産に適さない工法

超音波加工では硬質の砥粒を激しく振動させることで,被削体を砕くため,同時に工具の磨耗も当然激しいものとなる。このためシリコンチューブのようなアスペクト比の大きな形状のもので,一つの材料から多数個削りださなければならない量産加工では,工具の磨耗による交換やドレッシングが必要になってしまう。このためすべての工程を完了させるまでに何度も設備を止めなくてはならず,加工のリードタイムが非常に長いものになってしまう。

(2) 外周・内周部のチップングやマイクロクラックの発生

前述のようにシリコンチューブでは一端面に鏡面をもち,この面をセンサ台座と接合する。このため,通常の超音波加工では許容される程度の外周部や内周部のチップングやマイクロクラックであっても,接合強度を低下させる致命的な原因になってしまうので,とても許容できない。超音波加工によるシリコンチューブを製品に適用するためには,こうしたチップングやマイクロクラックを厳しく選別する必要があり,結果として加工歩留まりが低いものになってしまう。当然製造コストにも影響を及ぼす。

(3) 環境負荷

超音波加工では砥粒を使用して加工をするため,毎加工ごとに廃棄物として切粉だけではなく,大量の研磨剤も排出される。これはコスト的な不利益ばかりではなく,作業環境の悪化や廃棄処理の困難さといった環境負荷が大きい。

これら超音波加工の技術的な問題点と厳しい要求コスト,さら

には高い品質の維持,すべてを兼ね備えた工法として,筆者らは機械加工による工法開発に挑戦することを決定した。

4. 機械加工による工法開発

4.1 工法開発

工法開発の設備として,チッピング,マイクロクラックの防止を念頭に,脆性材加工に適するとされる高速回転の精密スピンドルをもつ加工機をベースマシンとして採用し,脆性加工に対応させるためにいくつかの改造を施し,導入した。(図3)

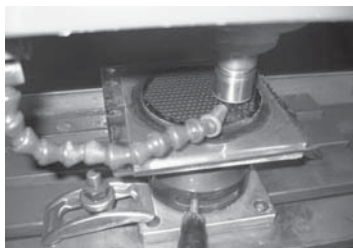


図3 工法開発用設備

次に被削材としてのシリコン構造について説明する。(図4)

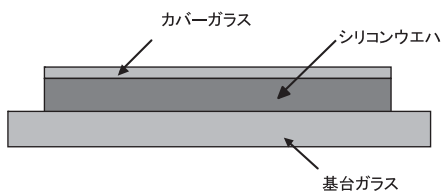


図4 シリコンウエハ加工前構造

一端面をラッピング処理して鏡面をもたせた円形のシリコンウエハを被削材として使用した。鏡面側を上面に配置し,下面を基台ガラスと接着により固定し,基台ガラスを機械的に加工機に固定して機械加工を行う。

鏡面をもつ上面にはカバーガラスを同様に接着している。これは加工時の鏡面部の保護と,チッピング,マイクロクラックの発生抑制が目的であるが,シリコンウエハとガラスでは熱膨張率に差があるため,ガラスには残留応力が発生している。このため硬脆性材ゆえに加工時のわずかな温度変化が,シリコンチューブの鏡面表面にマイクロクラックを発生させる原因となってしまう。接着方法の確立はもちろんのこと,加工機を取り巻く温度管理が工法開発の前提となる。

工法開発で最も困難であったのが,加工ツールの開発である。特に外径を加工するツールは,汎用ツールなどないため専用工具として開発しなければならなかった。

ツールの形状,電着するダイヤモンド砥粒の粒径や密度,さらに加工条件など制御因子とその水準が多く,最適条件を見出すことは容易ではなかった。そこで加工時に発生する加工ツールのスラスト力を特性値として,加工条件を定量的に評価することにより,これを解決することができた。具体的には実験計画法

を用いて,各制御因子の適正値を絞り込んでいった。(表1)

表1 制御因子の割付例

	制御因子	ツール	ダイヤモンド	ダイヤモンド	主轴の回転数	送り速度
		形状	密度	粒径		
水準	水準1	形状A	密	大	高速回転	高速
	水準2	形状B	疎	中	中速回転	中速
	水準3	形状C	—	小	低速回転	低速

このときのデータを図5に示す。右のデータが最適条件でのスラスト力を示している。

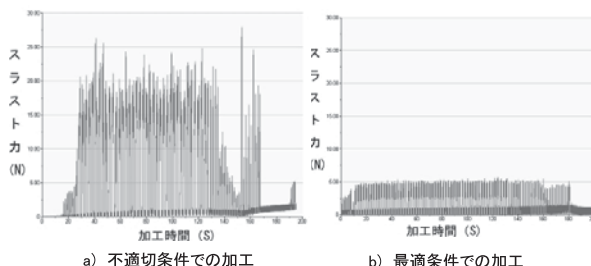


図5 スラスト力の比較

4.2 形状の工夫

鏡面状態の確保は,加工工程の施策だけではなく,形状設計まで工夫を施すことで実現することができた。チッピングは特に曲率の小さい内径のエッジ部に多く発生することが分かった。そこで内径円周部にわずかにドラフトを設け,応力の集中する部分であるエッジの角度を鈍らせることで,これを防止することができた。これをシリコンチューブの設計にフィードバックすることにより加工時のチッピングが軽減されるばかりではなく,運搬や加工後の洗浄工程で発生する二次的なチッピングやマイクロクラックも抑制され,鏡面品質を飛躍的に向上させることができた。

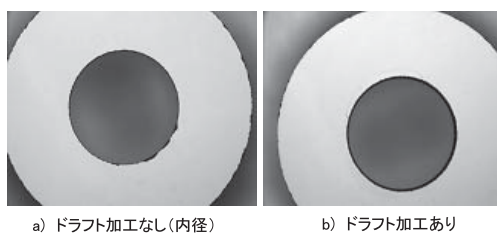


図6 鏡面部分の比較

4.3 評価

シリコンチューブの機械加工による工法開発によって,寸法精度としては,外径は $\phi 3.2 \pm 0.05$,内径 $\phi 1.3 \pm 0.05$,幾何公差として鏡面と外径の垂直度 $1/100\text{mm}$,両端面の平行度 $1/10,000\text{mm}$ の仕様を実現することができた。耐圧性能は製品にかかる最大圧力 42MPa を十分満足する耐圧試験に合格した。鏡面部は要求される表面粗度を満たすと同時にチッピング,マイクロクラックのない良好な状態を確保している。

また市販のマシニングセンターをベースマシンに使用した機械加工により、超音波加工では実現できなかった目標コストでの生産が可能となった。

5. シリコン専用加工機の開発

機械加工によるシリコンチューブの工法開発において、筆者らが最も注力した開発活動の一つが、工法開発後の量産への移行期間、いわゆるパイロット生産である。パイロット生産は本格的な量産活動を前に、その準備期間と扱われてしまうことがあるが、これは正しくない。シリコンチューブの機械加工のように、これまでに経験のない新しい工法による生産では、数を作ることで始めて確認できる様々な不具合や技術課題が発生する。その中にはこれまでの生産技術力だけでは対応できない新たな技術課題の要素が含まれることが多いのである。

逆に言えば、このパイロット生産こそが工法技術を量産技術に昇華させる重要なプロセスであり、量産ノウハウを習得できる期間なのである。

実際にパイロット生産移行後、生産数量の増加にともない設備増設が必要になった際も、すでに開発した工法に加え、パイロット生産で構築した量産ノウハウを備えたシリコン専用加工機を開発することができた。その量産ノウハウの一例として切粉対策について説明する。

パイロット生産期間中で最も苦慮したのが、ベースマシンの切粉対策であった。シリコンの機械加工では切粉がサブ μm オーダーまで微粉化する現象がみられる。これは機械加工時に切削液にキャビテーションが発生することで切粉が粉碎され微粉化するとされている。この微粉化した切粉が機械の摺動部に入ること、大きな問題を引き起こしたのである。

通常のマシニングセンターは摺動部にある程度の切削液が付着することを前提で設計されている。しかしシリコンの切粉は硬度の高い砥粒と同じであり、摺動部に入り込んで金属表面を繰り返し研磨することで、ついには摺動部を故障させてしまった。

こうしたパイロット生産での技術課題に直面できたことで、シリコン専用加工機の開発では、設計段階から徹底した切粉対策を施し、設備の耐久性、安定性を向上させる設計を行うことができた。反対にシリコンチューブの性能に寄与しない無駄な機能はすべて排除することができた。シリコン専用加工機の開発と導入により、これまで以上の高い品質を維持したシリコンチューブを、



図7 シリコン専用加工機

しかも安価かつ安定した供給が可能となった。図7に筆者らが開発したシリコン専用加工機を示す。

6. おわりに

ここまでシリコンチューブの機械加工による工法開発と、また専用加工機の開発の必要性について、技術的側面、コスト的な側面から説明してきた。

当社では、その上位概念として製品の性能を左右するような重要な部品や加工工程は自前で賄う、生産技術開発の精神がある。

では生産技術開発と従来の生産技術とでは何が違うのか。筆者らは生産技術開発を以下のように定義している。

- (1) 製品を設計するための生産技術であって、製品に獨創性、付加価値を与えるもの
- (2) 製品を安定して生産するための技術であって、新たな技術課題を創出し、それを成し遂げるもの

この生産技術開発の理念に基づく開発によって、シリコンチューブの機械加工による工法開発、量産技術開発は達成できたと考える。

今後もさらに生産技術開発で、お客様に満足いただける製品開発に貢献してまいりたいと考えております。

最後にこの場をお借りして、開発にご協力頂きました関係部署ならびに関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 小川 仁, 升田 雅博, 大山 啓, 鴻上 裕史: 『小径穴あけ加工における油剤のキャビテーション効果 (第1報)』, 一 工作液超音波振動法に関する研究 -』精密工学会誌, Vol.72, No.5, pp.626-630, 2006年

商標

DSTJ™3000 Aceは、株式会社 山武の登録商標です。

著者所属

關 宏治	生産技術開発部 工程技術グループ
福辺 卓史	生産技術開発部 試作技術グループ