

教材作成に活用可能な発砲スチロール加工機の開発

三田 純義¹⁾・齋江 貴志²⁾

1) 群馬大学教育学部技術教育講座

2) 群馬大学教育学部美術教育講座

(2011年9月28日受理)

Development of Expanded Polystyrene Processing Machine for Educational Use

Sumiyoshi MITA¹⁾, Takashi SAIE²⁾

1) Department of Technology Education, Faculty of Education, Gunma University

Maebashi, Gunma, 71-8510, Japan

2) Department of Art Education, Faculty of Education, Gunma University

Maebashi, Gunma, 371-8510, Japan

(Accepted on September 28th, 2011)

1 はじめに

1.1 背景

人は自然の造形に感動し、それを取り入れて豊かに生活している。また、日々使う道具、生活用品の形は使いやすさを考慮して作られている。物の形を決める、デザインすることは人の生活を豊かにする上で重要な要素である。

学校教育では、教科として図画工作、美術があり、小学校、中学校を通して児童や生徒はさまざまな素材による絵画、彫刻、工芸などを学習している。また、中学校技術家庭科の技術分野では、作る物の構想し、設計すること、木材、金属、プラスチックの加工を学習している。

工業の生産活動では、製品の設計、試作においてその出来上がりの形状を評価することは重要である。このためにさまざまな方法が採られてきた。技術の進歩に伴って、造形に使われている加工法や材料も進化、多様化してきている。加工法では、レーザーによる光造形がある。これは、液状の光硬化性

樹脂をレーザー等の光ビームで一層ずつ硬化させて積層することにより成形用の型や切削工具等を用いずに樹脂の3次元立体物を精度良く作成する技術である。また、光造形を応用したもので、ラピッドプロトタイピング (Rapid Prototyping) という技術もある。これは、3次元CADから出力された3次元データを光造形によって一定間隔でスライスして断面形状を作成し、その断面形状を、一定間隔の厚みを持つ樹脂などに置き換え、順番に積み重ねることで、3次元データと同じ形状の実物モデルを作成する方法である。

このラピッドプロトタイピングの前身には、NC (Numerical Control) ヒートカッターという加工機がある。NC ヒートカッターはコンピュータで描いた軌跡に沿って、ニクロム線が直線の動きや、回転をすることで、豊かな曲面を持つ立体を造形することを可能にする機械である。その素材は発砲スチロールを用いる。

NC ヒートカッターを使った発展としては、フルモールド鋳造加工がある。フルモールド鋳造法とは、

製品の形を決める模型に、一般的な木型ではなく、発泡スチロールを使った模型を製作する。それを砂の中に埋めて固定し、その後、高温で溶かした鉄を流し込み、発泡スチロールを気化させ製品を形成する方法である。この方法は、IT技術と非常に相性がよく、大幅な省力化が図れるとともに、複雑な形の製品を短期間で製造できる^{1,2)}。

NCヒートカッターは造形教育においても大きな可能性を秘めている。現在の基礎造形教育に使用されているブロック状の素材として、粘土や木材、金属材料、石膏、樹脂材料があるが、素材となる発泡スチロールは、それらの素材と比較して脆弱であるが、形を検討する上では十分な強度を持っている。取り扱いに関しても、容易であり安定している³⁾。

このように最先端の加工技術を使った加工機というのは、性能は確かであるが、高価であり、教育の現場に導入することは難しい。

1.2 目的

児童・生徒の豊かな情操を育む造形教育においては、さまざまな素材が使われているが、そのひとつである発泡スチロールの素材としての取り扱いや加工のしやすさに着目し、教育の現場に容易に導入できる安価で、小型軽量化で持ち運びができ、取り扱いが容易な発泡スチロール加工機を開発することをねらいとする。

本研究で開発する発泡スチロール加工機は、機能として算数や数学で学習する基本図形・立体を加工できることし、発泡スチロール加工機を制御するソフトウェアを作成するには、Visual Basic (以下VBと表記する。)を用いる。

2. 発泡スチロール加工機

2.1 発泡スチロールの材料特性

発泡スチロールは、合成樹脂素材の一種で、気泡を含ませたポリスチレンであり、軽量かつ断熱性に優れ、また極めて成型や切削しやすく、安価で弾力性があり衝撃吸収性にも優れるので、破損しやすい物品の緩衝・梱包材として用いられる他、断熱性を

利用して保温・保冷が必要な物の断熱に用いられる。ポリスチレンは炭化水素なので、燃やすと水と二酸化炭素になる。しかし常温・大気中で燃焼させると、不完全燃焼を起こし大量の煤を発生させやすい。なお耐熱性の低さは逆に加工性を高めており、電熱線に乾電池からの電流を流して発生させたジュール熱を使って小さな力で切断する器具もあり、様々な手芸用、または短期間展示される彫刻の材料としても利用される。

ポリスチレンは耐熱温度が約80~90°Cなので、それ以上加熱すると軟化・融解する。軟らかく、熱で容易に融けるため、汎用の製品は刃物や電熱線で切削して、任意の形に加工される。

2.2 発泡スチロール加工機の基本仕様

発泡スチロール加工機的设计・製作にあたっては、

- ・加工する発泡スチロールの最大寸法は200mm×200mm×300mm(縦×横×高さ)とする。
- ・発泡スチロール加工機は、大人一人で持ち運びできる質量、寸法とする。
- ・発泡スチロール加工機は、小学校の図画工作や中学校の美術等の授業で活用できるよう安価なものにする。

ことを考慮し、つぎのように具体的なしくみを決定した。

①位置決め制御方式：製作する発泡スチロール加工機は教材として安価なものにすること、また、発泡スチロールを溶かして加工するので加工物の寸法精度も要求されないので、発泡スチロール加工機の位置決め制御方式はオープンループ方式とし、位置決めのための駆動用モータにはステップ角1.8°の4相ステッピングモータ(電源電圧5[V])を用いる。

②位置決めにはモータでねじを回転して位置決めする方式とする。それには、比較的安価な転造ボールネジ(ねじ外径10mm、リード3mm、長さ520mm(X軸)2本、長さ410mm(Z軸)2本)を用いる。

③モータの回転をねじに伝えるにはピッチ3.75mmのラダーチェーン、歯数20のspro

ケットを用いる。

- ④加工テーブルやヒータ（ニクロム線：線径 0.14mm）を滑らかに平行移動するには、引き出しなどに使われている安価なスライドレールを用いる。
- ⑤ステップ角 1.8°の 4 相ステッピングモータを用いて、加工テーブルを回転すると、半径によって移動量が大きいため、モータの回転を減速するためウォーム歯車による速度伝達比 30 の減速機を用いる。
- ⑥ヒータに印加する電圧は変圧器（入力電圧 100 [V]、出力電圧 0~130[V]）を用いる。
- ⑦発泡スチロール加工機は軽量にするため、構造材にはアルミニウムのアングル材、角パイプ、平板を用いる。

製作する発泡スチロール加工機の仕様は表 1 のようになる。

2.3 発泡スチロール加工機のしくみ

製作した発泡スチロール加工機を図 1 に示す。門

構えの構造とし、X 軸に垂直に Z 軸が立てられ、ヒータを上下に移動する Z 軸は X 軸によって移動する。X 軸と Z 軸を駆動するにはステッピングモータを用い、その動力はラダーチェーンを使って各軸の左右に固定されたボールねじに伝えられる。各軸のボールねじは L 字型のチャンネル材にスライダとともに固定し、X 軸、Z 軸ともに安定して平行移動できるしくみとした。

発泡スチロールを固定するテーブルは回転できる円板とし、ねじりなどの複雑な形を加工できるようにした。テーブルを回転するには、ステッピングモータを用い、その回転をウォーム歯車減速機によって減速した。

ヒータ（ニクロム線）を固定するには、ニクロム線をアルミ板で挟み、蝶ナットで固定することによって、容易にニクロム線を交換できるようにし、それらと加工機本体との間にはアクリル板を挿入し、電氣的に絶縁した。また、固定する一方のアルミ板のほうには、ウォームギアとばねを用いることによって、ニクロム線の張力を調整できるようにし

表 1 発泡スチロール加工機の仕様

X 軸、Z 軸	ストローク	X 軸：330mm, Z 軸：275mm
	最小位置決め	X 軸, Z 軸：0.015mm
	送り速度	X 軸, Z 軸：50~140mm/min
		X 軸：ステッピングモータ（ステップ角 1.8°, 相数 4, トルク 540mN・m (10pps) Z 軸：ステッピングモータ（ステップ角 1.8°, 相数 4, トルク 412mN・m (10pps)）
回転テーブル	寸法	直径 175mm
	回転角	無限
	最小回転角	0.006°/パルス
	回転方向	時計回り、反時計回り
	回転速度	0~1.7rpm
ヒータ (ニクロム線)	直径	0.14mm
	張力	最大 1.96N/cm、調整可能
X 軸、Z 軸、回転テーブルの動き		X 軸、Z 軸はそれぞれ独立、かつ、同時に動く。回転テーブルは独立に動く。
寸法		縦 650mm 横 550mm 高さ 600mm
全質量		16kg

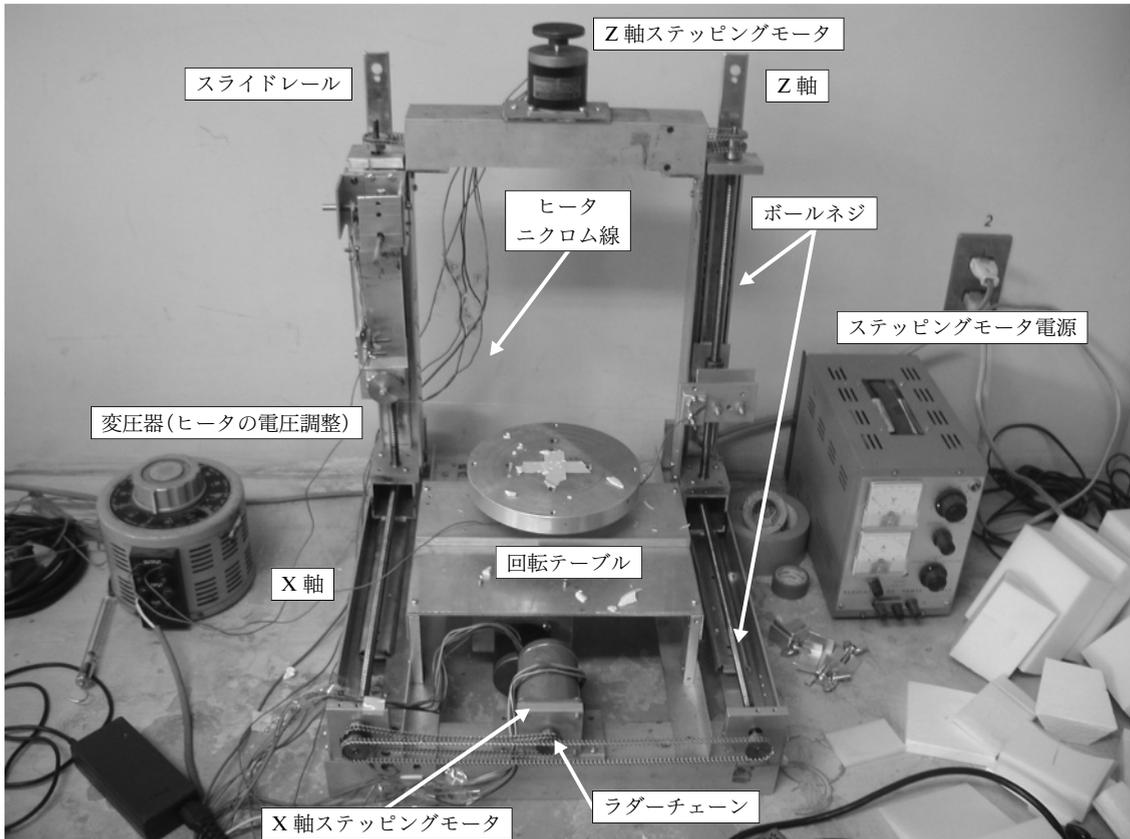


図1 発泡スチロール加工機の全体図

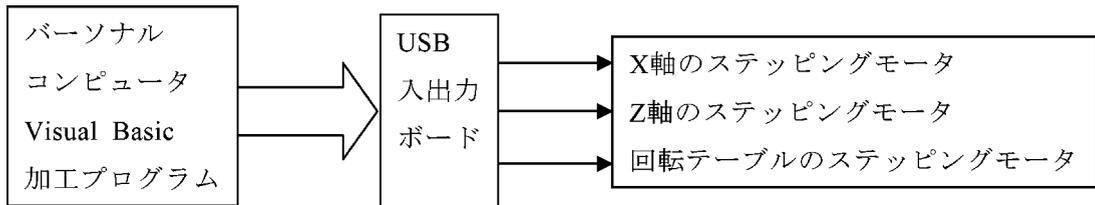


図2 発泡スチロール加工機の制御システム

た。

位だけ X 軸、Y 軸、回転テーブルは駆動される。

2.4 発泡スチロール加工機の制御システム

発泡スチロール加工機の制御システムを図2に示す。発泡スチロール加工機の X 軸、Y 軸、回転テーブルはステッピングモータで駆動される。パーソナルコンピュータからの駆動パルス信号は USB 入出力ボード、ステッピングモータ駆動回路を介して、ステッピングモータに加わり、制御命令に応じた変

3. 発泡スチロール加工機の性能評価

発泡スチロール加工機の性能は、つぎの項目で評価する。

- ①ニクロム線の位置決め精度
- ②切断した発泡スチロールの寸法精度
- ③発泡スチロールを切断するときの切断抵抗

④発砲スチロールの切断面の仕上がり

- ※ニクロム線に印加する電圧、ニクロム線の送り速度と切断面の仕上がりとの関係の評価する。
- ※評価項目③と④に関する測定器として、切断抵抗測定器とうねり測定器を製作する。

3.1 位置決め精度

テーブルを X 軸方向に 100mm、5 往復し、ダイヤルゲージにより誤差を測定する。その結果は表 2 示すようになり、最小位置決めは 0.015mm から判断すると、位置決め精度は十分と言える。

表 2 位置決め精度測定結果

往復	1 回目	2 回目
①	-0.18mm	-0.01mm
②	+0.02mm	+0.21mm
③	±0.00mm	+0.03mm
④	+0.12mm	+0.02mm
⑤	+0.01mm	-0.02mm

3.2 切断面のうねりの計測

薄いアルミ板を加工した発砲スチロールの表面に、軽く押し付けながら送ることによって、アルミニウム板がたわむ。それをひずみゲージによって測定することで、抵抗力の計測と同様に表面のうねりを測定する。図 3 に示すようにアルミニウム板の先端にボールを取り付けることにより接触面積を減ら

し、NC フライス盤を使い、加工した発砲スチロールを送り、その表面のうねりを測定する。

うねり測定器を使い、X 軸方向に送って加工した面のうねりを測定する。その結果、図 4 に示すようにうねりの最大値、最小値の差は加工していない発砲スチロールの面のうねり 0.1mm 以内にあり、加工条件に依らないことが分かった。

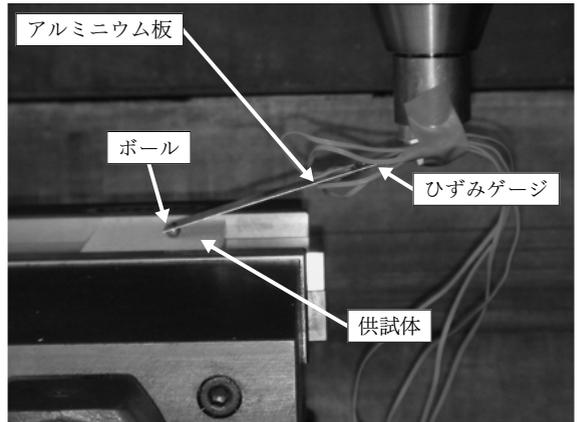


図 3 うねり測定器

3.3 切断抵抗力の計測

X 軸を送ることにより、発砲スチロールを加工するとき水平方向に作用する抵抗力を測定する。この抵抗力により発砲スチロールを載せたテーブルは水平方向にたわむ。図 5 に示すように、テーブルを 4 本のアルミニウム板で支え、その板のひずみをひずみゲージにより測定する。

ひずみゲージからの信号を増幅器に入力する。そ

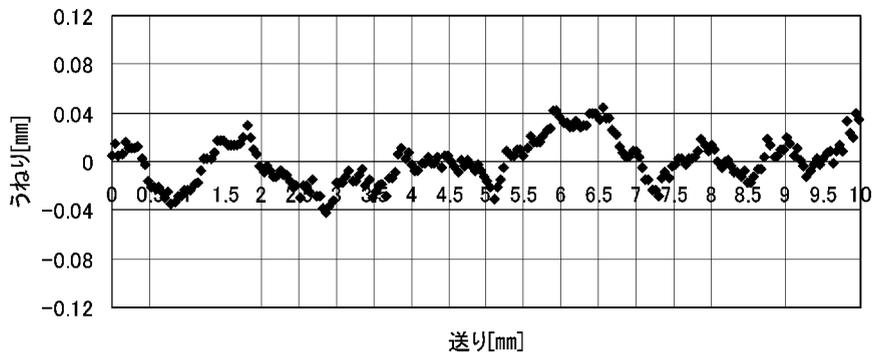


図 4 送り速度 100mm/min、ヒータ印加電圧 10V、ヒータの張力 7.84N の時のうねり

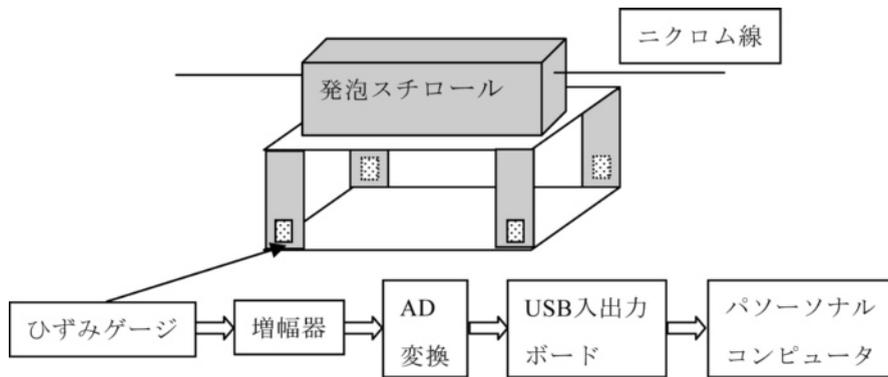


図5 切断抵抗力の計測システム

張力7.84N

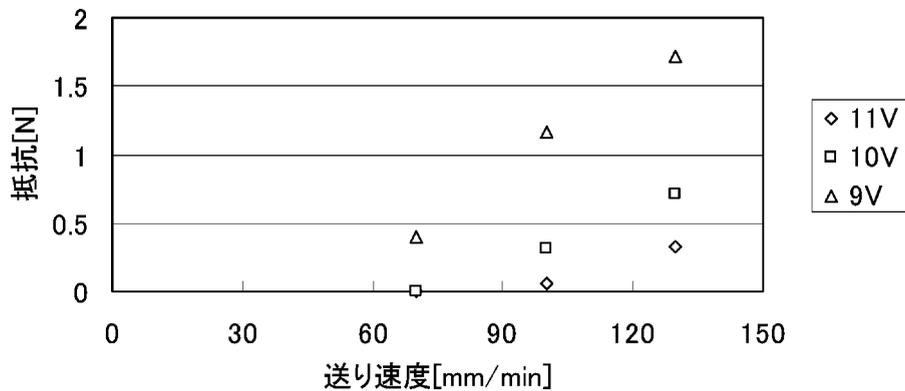


図6 張力7.84N と一定のときの送り速度と抵抗の関係

の出力電圧は抵抗に比例し、かつ、4本のアルミニウム板で支える構造により加工物の高さに依存しない。

測定は測定器を使い、ニクロム線への印加電圧（9V、10V、11V）と張力（3.9N、7.8N）、X軸の送り（130mm/min、100mm/min、70mm/min）を変えて切断抵抗を測定する。

測定には発泡スチロールの奥行きが50mm、幅が68mmの物を使い、その中心で25mm送ったときからの切断抵抗を測った。その結果（図6）、送り速度70mm/min、ニクロム線への印加電圧10V、ニクロム線の張力7.8Nの加工条件で寸法精度がよく、加工面のうねりが小さいことがわかった。

3.4 長方形断面の角柱の寸法精度

発泡スチロールをヒートカッターによって、角柱（30mm×50mm×100mm）に加工（加工条件：送り速度70mm/min、ニクロム線への印加電圧10V、ニクロム線の張力7.8N）し、切り出した角柱の長手方向に10mmごとにノギスを使って、縦と横の寸法を測った。その結果、角柱の長手方向には依存せず、縦29.0mm、横49.5mmとなり、ニクロム線の線径0.14mm、発泡スチロールの融解量を考慮すると、プログラムどおりの寸法に仕上がった（表3）。

表3 縦の寸法の測定結果

長手方向[mm]	横[mm]	横[mm]
0	29.05	49.50
10	29.00	49.50
20	29.00	49.50
30	28.95	49.50
40	28.95	49.55
50	28.95	49.50
60	28.95	49.50
70	29.00	49.50
80	29.00	49.50
90	29.00	49.50
100	29.00	49.50

4. 加工プログラムの作成

4.1 座標

製作した加工機を制御し、発泡スチロールを加工するプログラムを作成するには、加工物の形状に応じた加工位置の座標は絶対座標と相対座標を併用した。

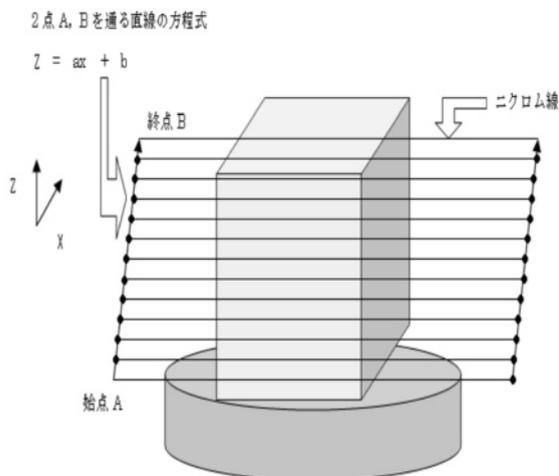


図7 2点A, B間の直線加工イメージ

4.2 機能

コンピュータからのデジタル信号によって制御できるのは、発泡スチロール加工機のつぎの諸量である。

- ・ X 軸、Z 軸の移動方向と速度
- ・ 回転台の回転方向と回転速度

NC 加工のプログラムで使われる直線補間や円弧補間⁴⁾を作成し、上記の諸量の制御と合わせてプログラムを作成して立体を加工する。

4.3 X軸、Z軸のみの制御による加工

回転台を用いずに、X 軸、Z 軸のみを動かす二次元の制御によって、正多角柱や円柱、複雑な断面を持つ立体などの造形ができる。

(1) 座標点間の直線加工

図7に示すように、入力された2点の絶対座標間を結ぶ直線に沿ってニクロム線の位置を制御し、加工対象の発泡スチロールに一つの平面を加工する⁵⁾。

(2) 座標点間の円弧加工

図8に示すように、入力された2点の絶対座標、円弧の半径 r と中心座標、円弧にそって進む方向(時計回り、反時計回り)から、2点間を結ぶ半径 r の円の円弧に沿ってニクロム線の位置を制御し、発泡スチロールに円弧状の面を加工する⁶⁾。

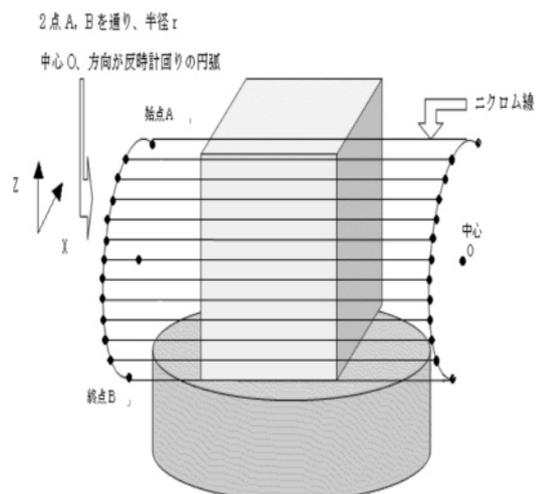


図8 2点A, B間の円弧曲線加工イメージ

(3) 正多角柱の加工

入力された正多角形の角数(自然数 n) と一辺の長さ a によって、 X - Z 平面上で一辺の長さ a の正 n 角形の多角形に沿ってニクロム線の位置を制御し、発泡スチロールから正多角柱を切り出す。

(4) 円柱の加工

正多角柱加工の応用で、多角形の角数を 60 程度することにより、円を多角形近似する。その軌跡に沿ってニクロム線の位置を制御し、発泡スチロールから円柱を切り出す。

4.4 X 軸、 Z 軸、回転台の制御による加工

X 軸、 Z 軸の動作とともに、回転台を利用し、物体を回転しながら加工する三次元制御による造形ができる。これにより二次元制御では加工できない角錐や円錐の加工ができ、さらには螺旋状の加工や球などの複雑な立体を造形することができる。

(1) 正多角柱と正多角錐

前述した回転台を使わないで、 X - Z 平面内でニクロム線の位置を制御して、正多角柱を切り出す場合、正多角形の高さは材料の発泡スチロールの寸法に依存する。しかし、回転台を利用した正多角柱を切り出す合では、正多角形の高さを任意に指定できる。

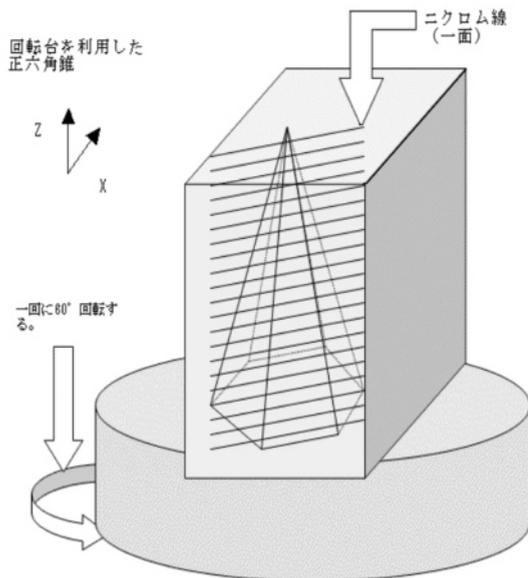


図9 正六角錐の加工イメージ (回転台)

正多角形の角数 n (自然数)、一辺の長さ a と高さ h を入力し、回転テーブルを 360° の n 分の 1 ずつ回転し、熱線を z 軸方向に動かすことを繰り返すことで、高さ h の正多角形を加工できる。また、回転テーブルの回転角を制御し、底面から角錐の頂点に向かって斜めの平面を切り出すことを繰り返すことによって正多角錐を加工できる。図9には正六角錐の加工を示す。

(2) 円柱と円錐

回転台を利用した正多角柱、または正多角錐の底面の正多角形を、回転台を利用しない円柱の加工のときの円の正多角形近似のように、回転台を利用して加工する底面を正多角形としたときに、角数 n を大きい自然数を入力することにより、底面を正多角形近似された円錐や円柱を加工することができる。例として円柱と円錐の正六十角柱を図10に示す。

(3) 螺旋状の立体

回転台の載せられた発泡スチロールを回転ことと、ニクロム線を z 軸に動かすことを一定の周期で交互に制御することにより、滑らかに発泡スチロールを螺旋状に加工できる。

4.5 加工面の仕上げ

直線補間した斜面は滑らかな面に仕上がったが、

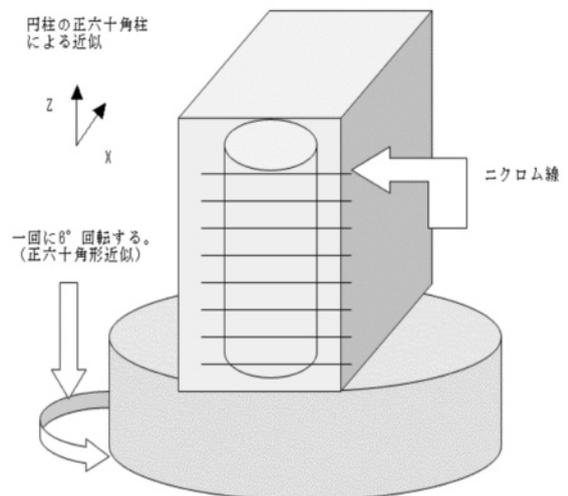


図10 正六十角柱近似による円柱の加工イメージ (回転台)

図 11 に示すように円弧補間により滑らかな円筒面とは言えない仕上がりである。



図 11 円筒面の仕上がり

4.6 加工プログラムの使い方

図 11 に示す VB のフォームをもとに、つぎの操作をすることで立体を加工できる。

〈操作方法〉

- ①始点から、任意に座標を入力していく。(X ## Y ##という書式で入力する)

- ②加工幅、送り速度を入力する。(加工幅は 1、送り速度は 70 くらいが目安)

- ③初期化、目盛、作図、加工という順序で、コマンドを押す。

- ④加工終了が確認できたら、終了コマンドを押して、プログラムを閉じる。

5. 造形立体

開発した発泡スチロール加工機と VB によるプログラムにより図 12~17 に示す立体を加工できた。

6. まとめ

X 軸と Z 軸の 2 軸によりニクロム線の位置を最小 0.015mm で制御でき、最小 0.06°ずつ回転できる

図 11 VB による加工プログラムのフォーム

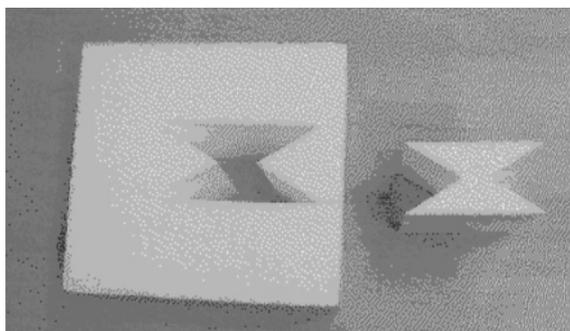


図12 多角形

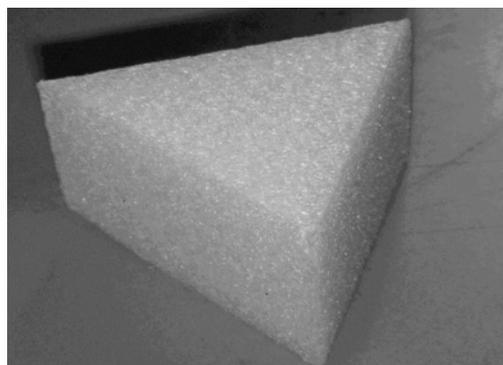


図13 正三角柱

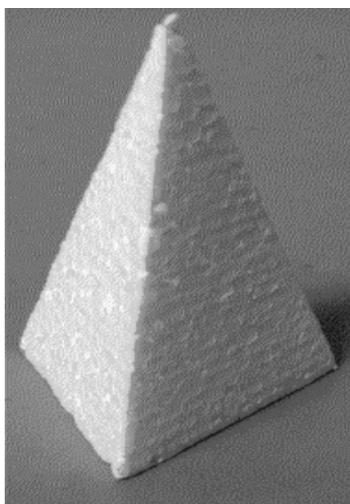


図14 正三角錐

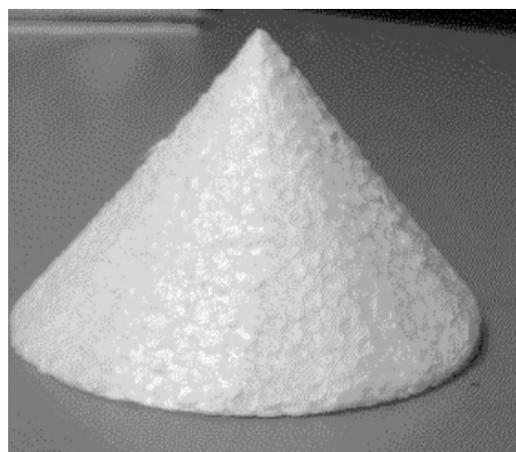


図15 円錐



図16 円柱

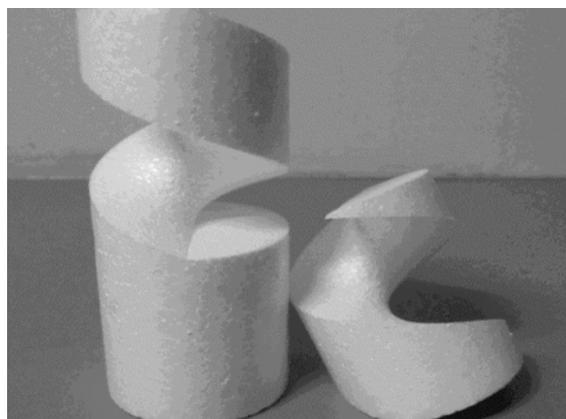


図17 螺旋状の立体

テーブルを有する学校現場の造形教育で活用できる発砲スチロール加工機を製作した。また、Visual-Basic によって、発砲スチロール加工機を制御するプログラムを作成し、多角形・正多角柱・正多角錐・円柱・円錐・螺旋状の立体の立体を造形できた。

今後、自由形状の加工、プログラムの操作性の向上、そして、造形教育への活用と実践が課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 田中智久・齋藤義夫：発砲スチロールの熱線加工メカニズム、日本機械学会論文集(C編), Vol.72, No.722, 313-319 (2006)
- 2) 杉恵貴史・田中智久・齋藤義夫：8軸制御曲面加工システムの構築とそのプログラミングに関する研究, 精密工学会春季大会後援論文集, 939-940 (2005)
- 3) 齊江貴志：博士論文「NC ヒートカッターの回転カットによる実験造形」(2005)
- 4) 池辺 潤：数値制御通論, オーム社 (1971)
- 5) 佐藤義雄：入門グラフィックス, アスキー出版 (1989)
- 6) 川口輝久・河野 勉：かんたんプログラミング Visual Basic 6 基礎編, コントロール・関数編, 応用編 (2000)