

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

近年のデジタルファブリケーション技術の認知度の向上、機器の低価格化、高性能化に伴い、企業や教育機関への導入事例が増えている。とりわけコンピューター数値制御加工機（以下、CNCとする）については、他のデジタルファブリケーション機器に比べて加工可能な寸法が大きく、家具やインテリア、建築部材の製作に対応できることから建築業界においても数多くの研究・開発がなされており、秋吉浩気による建築生産のオープンなデザイン環境の実現を目指した実践的研究をはじめ、CNCの活用を前提とした設計手法や施工方法の研究がある。また、CNCは木材の加工に適しているため、地域の林業の一部を担う小さな生産拠点にもなり得、地元産木材の新たな活用策の開拓や地産地消を目的に導入する自治体もある。このような事例は林業と建築の一貫的な取り組みとしても注目を集めている。一方で、建築分野におけるCNC加工の精度に関する研究は未だ不十分である。筆者は、数年間にわたりCNCを用いた家具や建築の製作に身を置いてきたが、加工された部材の寸法と設計寸法との若干の違いにより微調整を行う現場を多く経験してきた。CNC加工で扱う素材の多くは木材であり、材料それぞれが一律ではないため、データ上では同じ工程で加工を施したとしても様態にばらつきが生じる。このばらつきの蓄積が、施工不良や、微調整による労務の増加の原因となっている。特に、乾燥・製材された無垢材を直接加工した場合、ばらつきはより顕著になり、仕上がり寸法が設計寸法から大きく狂うこともある。ゆえに、無垢材のCNC加工は難しいとされ、工場生産で、品質の安定性が高いとされている針葉樹合板が単価的にも無垢材と遜色なく、入手もしやすいため一般のユーザーには好まれる。この傾向は都市部に限らず、山林が近く、無垢材が入手しやすい拠点でも見られている。地元産木材の地産地消を期待してCNCを活用するならば、加工が容易な合板ばかりではなく、無垢材を扱う手法を開発し、ユーザーと共有していく必要がある。そこで本研究では、手法開発の第一歩として、CNCで無垢材を加工する際の難しさの要

因となる、加工精度のばらつきを明らかにし、精度を向上させる方法について知見を得ることを目的とする。

1.2 研究の方法

まず、本研究で扱うCNC加工の概要をまとめる。次に、スギ無垢材（以下、無垢材）と比較対象として針葉樹合板（以下、合板）の2種類の素材からCNCを用いて試験体を製作し、評価を行う。それらの数値化と切削面の観察を通して、CNCの加工精度を把握する。精度の狂いが大きい場合はその要因の考察を行い、対処法を検討する。

2. CNC加工概要

2.1 三軸CNC

本研究では、三軸CNC「ShopBot」を使用する。CNCは、コンピュータ支援製造ソフトにより位置情報へと変換された設計情報を機械に送信することで加工を行う。スピンドルの先端についたドリルビット（切削刃物）が高速に回転しながら、X、Y、Z軸それぞれのモーターが駆動することで、対象物を切削する。加工可能範囲は、材料設置テーブルの大きさ（XY方向）とスピンドルの上下可動距離（Z方向）による（図1）。

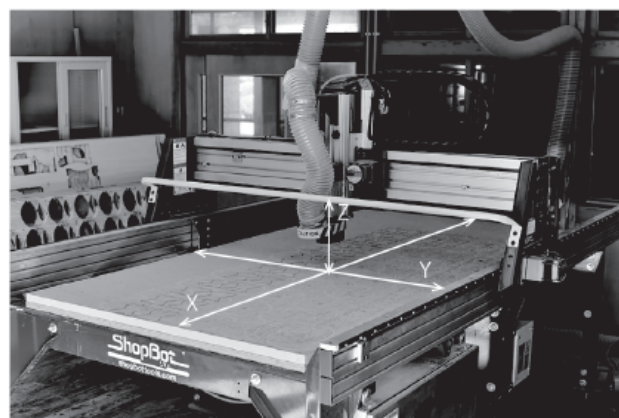


図.1 ShopBotの加工可能範囲

2.2 切削深さ

CNC加工ではドリルビットが同じ経路を複数回周回することで切削していく。1周ごとにドリルビットをZ軸の下方方向に一定距離動かすことで、目的の深さまで到達する（図2）。

2.3 輪郭加工とポケット加工

材料の厚みに対して、最終的な切削の深さをどこまで取るかによって加工を分類できる。材料の厚み以上

の深さまで切削し、材料を貫通させる加工を輪郭加工、材料の厚みに満たない深さまでの切削に留める加工をポケット加工という(図3)。

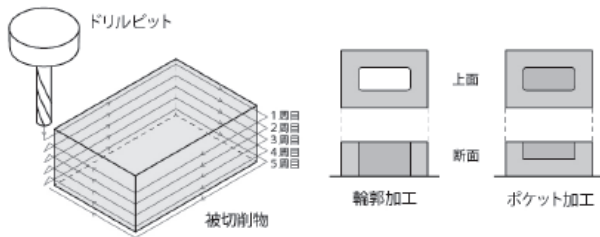


図2. ビットの周回軌道

図3. 加工の分類

3. 切削試験

3.1 試験体概要

図4に示す試験体をスギ無垢材、針葉樹合板からそれぞれ45枚ずつ切削する。外周は輪郭加工、斜線部分は深さ3mmのポケット加工を行う。材料について、寸法が異なる場合、固定に必要なビスの本数や位置関係に差異があり、切削中に材料に生じるブレも異なるため、正確な比較ができなくなる。よって、無垢材、合板ともに同じ寸法の材料を用いる。幅と長さは140mm、1,600mmとし、厚みは12mmとする。この厚みは多く流通している無垢材の規格のひとつである。合板についても、全国の資材店で取り扱われている厚みであり、多くのCNCユーザーが利用している規格である。上記の寸法で無垢材、合板をそれぞれ5枚ずつ用意する。カットデータとドリルビットは同じものを使用するため、切削工程は共通である。材料1枚あたり9つの試験体、合計5枚の板をそれぞれ切削する。ドリルビットの摩耗に配慮するため、材料1枚を切削する度に未使用のドリルビットに付け替える。

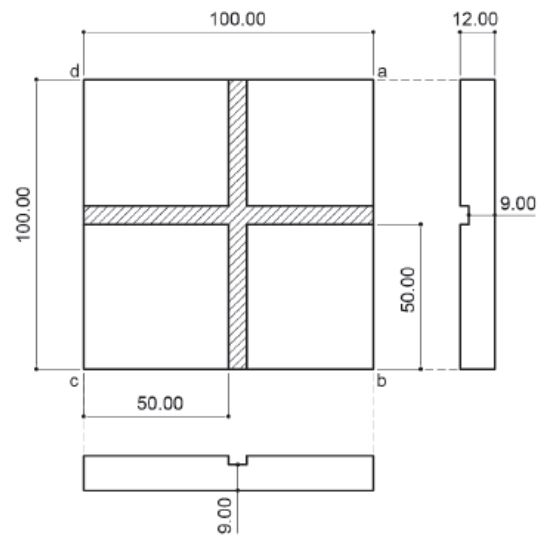


図4. 試験体の設計寸法と割付図

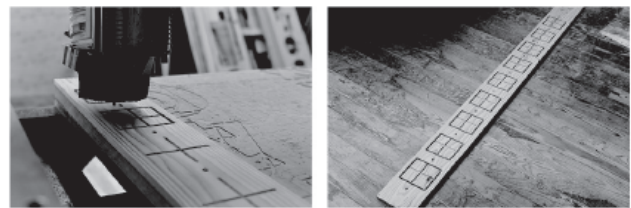


図5. 切削

図6. 切削後の材料

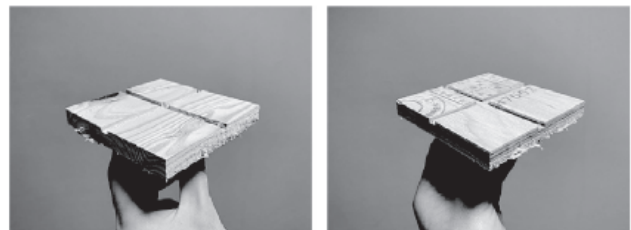


図7. 試験体(無垢材)

図8. 試験体(合板)

3.2 切削

切削に使用したCNCは、ファブラボ阿蘇南小国の保有するShopBotである。無垢材はすべて板目板であり、設置の際、材料の設置方向を一定とするため、面は木表を上側に向け、木口の年輪の本数が少ない方(元口)を辺ab側、多い方(末口)を辺cd側とした。加工の様子、切削した試験体を図5～8に示す。

3.3 測定

本研究では以下の3つの測定を行う。

3.3.1 輪郭加工精度

全ての試験体について、図9に示すD1、D2、W1、W2を電子ノギスで実測する(以下、測定i)。

3.3.2 ポケット加工精度

全ての試験体について、図9に示すx1、x2、y1、y2を電子ノギスで実測する(以下、測定ii)。

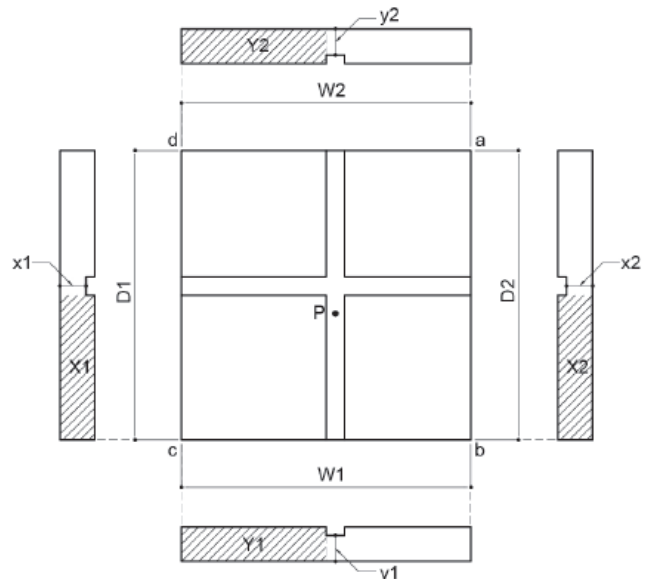


図9. 試験体の測定箇所

3.3.3 切断面のバリの量

材料の切削後、断面にささくれが生じることがある。これをバリと呼ぶ。CNC加工の現場では多くの場合、バリが生じた断面には研磨布紙による加工を施す。これにより表面を平滑にできるのだが、切削後の面に加工を重ねるため精度をより悪化させることになる。そのため、バリの量を測定することで最終的な精度の考察が可能となる。全ての試験体について、図9に示す断面の範囲、X1、X2、Y1、Y2に発生したバリのおおよその量を算定する。範囲の何割にバリが発生したか、0.0、0.1、…、0.9、1.0の11段階の係数を目視で決定する。次に、バリの高さを切断面を原点として電子ノギスで実測する。最後に計算式(1)で、バリのおおよその量を算出する(以下、測定iii)。

$$\begin{aligned} & \text{バリの量 (mm}^3\text{)} \\ & = \text{係数} \times \text{断面積 (mm}^2\text{)} \times \text{バリの高さ (mm)} \quad (1) \end{aligned}$$

また、ドリルビットは時計回りに試験体の輪郭を周回するため、刃と接触する木目の方向が辺ごとに異なる。4辺すべてのバリの出方を比較することで、一定方向に固定された材料に対する刃の進行方向が及ぼす影響の確認も行う。

4. 結果・考察

4.1 測定 i

無垢材について、D1、D2の平均値が100.36、100.37と設計寸法から大きく差が生じている。一方で、W1、W2の平均値は100.17、100.18と誤差が0.1mm代に収まっていることが分かった(表1)。これは繊維方向よりも、繊維直交方向(以下、直交方向)の精度が良いことを示している。繊維方向の切断面を観察すると、木目に従ってわずかに凹凸が発生しており、冬目(層が薄く、色が茶色い部分)が凹、夏目(層が厚く、色が白い部分)が凸となっていた。夏目の方が、冬目よりも密度が小さく、弾性が高いため、切削時に圧縮変形された部分が切削後に回復し、D1、D2の測定値が設計寸法よりも特に大きくなったと考えられる(図10)。

合板について、D1、D2、W1、W2の平均値の近さから、切削方向による精度の違いは見られなかった。本実験で用いた合板は厚さ3mmの単板(原木を薄く桂むきしたもの)の繊維方向を直交させながら4層重ねた材料なので、無垢材の繊維方向と直交方向に近い性質が層ごとに表出していると考えられる。切断面を観察すると、層ごとにわずかな凹凸が確認された。単板の直交方向の層が凹、単板の繊維方向の層が凸となっている。しかし、凹凸の大きさ自体は無垢材のものと比較すると小さかった。

表1. 測定 i の平均値 (単位: mm)

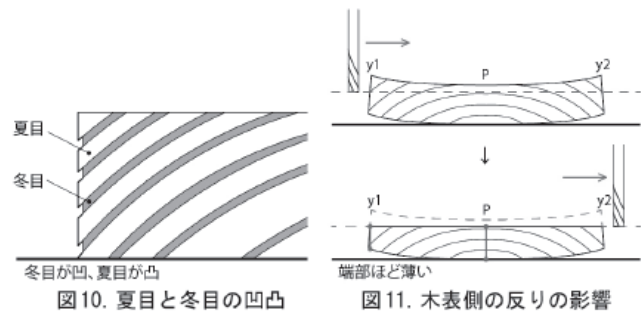
	D1	D2	W1	W2
平均値(無垢材)	100.36	100.37	100.17	100.18
平均値(合板)	100.27	100.26	100.26	100.27

表2. 測定 ii の平均値 (単位: mm)

	x1	x2	y1	y2	P
平均値(無垢材)	9.28	9.24	8.91	8.86	9.02
平均値(合板)	9.11	9.14	8.98	9.02	-

表3. 測定 iii の平均値 (単位: mm³)

	X1	X2	Y1	Y2
平均値(無垢材)	3.43	6.09	389.91	435.44
平均値(合板)	107.00	123.03	92.25	102.21



4.2 測定 ii

無垢材について、x1、x2の平均値は9.28、9.24と設計値よりもポケット加工が浅く、y1、y2の平均値は8.91、8.86と反対に設計値よりも深く切削されていた(表2)。各々の試験体の実測値を確認したところ、全てにおいてx1、x2が大きく、y1、y2が小さいわけでは無かったが、試験体の一部には木表側への反りが見られたため、その影響を探るべく追加で実測を行った。すべての試験体について、点P(直交方向のポケット加工内の電子ノギスで測定できる最も中心部に近い点)の厚みを実測した。結果は表2のように、点Pの厚みの平均値はy1、y2の平均値よりも大きかった。試験体ごとに実測値を比較した際にも、点P(中心部)の厚みがy1、y2(端部)より大きい試験体が多数見られた。この結果から、元々の材料のもつ木表側への反りにより、木口方向から見たときの端部が上方に持ち上げられたことで、y1、y2では通常よりも深く切削され、実測値が小さくなった試験体があると考えられる(図11)。x1、x2に関しては測定 i の繊維方向と同様の凹凸が見られた。夏目部分の圧縮後の回復により実測値が大きくなっていると考えられる。

合板について、x1、x2、y1、y2の平均値がそれぞれ9.11、9.14、8.98、9.02と大きな差異はなく、試験体の反りは確認できなかった。これは、繊維方向を直交させていることで反りの影響が軽減され、精度の安定に繋がったものと考えられる。夏目部分の圧縮後

の回復も一部の試験体に見られたが、わずかであり精度に影響を及ぼすほどではなかった。

4.3 測定 iii

計算式 (1) の結果の平均値を算出した (表3)。無垢材について、X1、X2の平均値が3.43、6.09に対して、Y1、Y2の平均値は389.91、435.44とかなり大きな差があった。これは直交方向の方が繊維方向に比べて明らかにバリが少ないことを示している (図12, 13)。刃の進行方向の影響について、平均ではX1、X2、Y1、Y2の順にバリが多く出ているが、すべての試験体がこの順番に当てはまるわけではなかった。切断面を観察すると、バリの多くは、夏目から発生しており、夏目の層が薄く、木目が詰まっている断面ほどバリの大きさは小さく、量も少ない。反対に、夏目の層が厚く、木目が詰まっていない断面のバリは大きく、量も多かった。このことにより、繊維方向の切削時に発生するバリの量は、刃の進行方向によらず、ドリルビットに接触する部分の夏目と冬目の配置が大きく影響すると考えられる。一方、直交方向の切削では木目の配置による影響はほとんど受けず、発生するバリは限りなく少ない。

合板について、X1、X2、Y1、Y2の平均値がそれぞれ107.00、123.03、92.25、102.21と無垢材と比較すると、大きな差異はなく、どの面も同程度のバリの量が発生していた。やはり、無垢材の繊維方向と直交方向に近い性質が層ごとに表出していると考えられる。主に単板の繊維方向の層にバリが発生しているが、大きさや量は無垢材の繊維方向のものと比較すると小さかった。ただし、繊維方向の層が大きく欠落している試験体も見られた (図14)。

5. 精度向上方法の検討

5.1 繊維方向の切削

測定 i ~ iii の結果から、無垢材を繊維方向にCNC加工した際、切削されずに残った夏目部分が寸法の誤差とバリの要因になっていることが分かった。これに対処する方法としては、一度切削した面を再度切削することが挙げられる。夏目部分の削り残しを除去することで精度の向上につながると考えられる。ただし、一度切削された部材はドリルビットの接触によりプレが生じやすいため材料の固定方法に注意が必要である。

5.2 直交方向の切削

測定 ii の結果から、無垢材を直交方向にポケット加工した際、材料の木表側への反りにより切削深さが均一になりにくことが分かった。これに対処する方法としては、木口方向から見た際の両端部に固定用のピ



図12. 直交方向切削面



図13. 繊維方向切削面

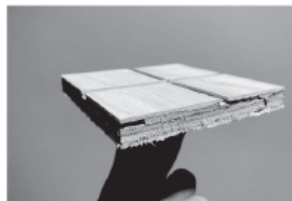


図14. 欠落した層

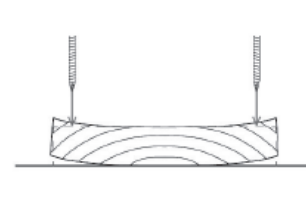


図15. 両端へのビス打ち

スを配置することである (図15)。これにより、木表側への反りに抵抗しながら、材料を設置することができる。ただし、ビスを無理に締めすぎると材料が繊維方向に割裂する可能性があるため注意が必要である。

6. まとめ

6.1 結

本研究では、無垢材と合板からCNCを用いて試験体を製作し、それらの実測と観察からCNC加工後の無垢材の加工精度の把握を行った。研究の結果として、以下のことが分かった。

①繊維方向の切削では、無垢材が合板よりも寸法の誤差が大きく、バリが発生しやすい。その要因の一つは切削されずに残った夏目部分である。

②直交方向の輪郭加工では、無垢材が合板よりも寸法の誤差が小さく、バリも生じにくい。

③直交方向のポケット加工では、無垢材が合板よりも切削深さに誤差が生じやすい。その要因の一つは、木表側への反りである。

6.2 今後の展望

本研究を通して、CNC加工後の無垢材の加工精度には切削方向が大きく影響することが分かった。4章で述べた精度向上方法については、検証が必要である。また、無垢材の長所である直交方向の輪郭加工の精度の高さを活かした設計手法も検討していく必要がある。例えば、直交断面で引っ張りに抵抗する「鎌継ぎ」のような形状であれば、精度の高い継手を製作できると考えられる。CNC加工の建築利用はまだ事例が少ないため、試作を通して様々な設計手法、加工方法を開拓できる可能性がある。

【参考文献】

- 1) 秋吉浩気；建築生産におけるオープンデザインの研究-局所分解・構成を可能とする木質三次元曲面製作技法の提案-
- 2) 建築情報学会；建築情報学へ
- 3) 住吉寅七、松井源吾；木造の継手と仕口