

自社加工した FRP 穴加工用 Drill の形状と加工物の X 線 CT 評価

背景

FRP（Fiber Reinforced Plastics：繊維強化プラスチック）はその幅広い形状実現性や、軽量化効果、耐腐蝕性等の特性故、インフラ、輸送機器、土木、遊具等幅広い産業界に適用されている。そして FRP が多く用いられるアプリケーションの一つが、液体の薬品や水などの保管を目的としたタンクである。このようなタンクの多くは注水、吐水を目的に穴加工をする必要がある。しかしながら、FRP 成形はハンドレイアウト等の手法により積層、つまり材料を積み重ねて厚みを出すコンセプトの材料であるため、穴加工の方法を間違えると加工部分に FRP 成形体の最終破壊につながる「層間剥離」を発生させる等の問題が生じる可能性がある。このため、FRP の穴加工には金属加工と異なる Drill が必要であり、様々な刃物形状が提案されているが、刃物形状妥当性や FRP 加工への適合性について定量的な評価は行われていない。

目的

FRP 向けに自社加工した $\phi 15\text{mm}$ の Drill と市販品 Drill について形状比較を行う。またこれらの Drill を用いて FRP の平板加工を実施し、加工前後の状況を目視と非破壊検査によって比較評価する。

結論

市販品 Drill と比較し自社加工 Drill の形状は加工刃物が軸に対し傾斜している上、刃物の角 R が大きいことが分かった。自社加工と市販 Drill で穴加工を行ったところ、両者の FRP 加工性はほぼ同等であるが、自社加工 Drill は市販のものと比較し加工耐久性に優れることが明らかとなった。

概要

自社加工 Drill は市販品 Drill と比較し、加工刃物が回転軸に対して平均で 10% 傾斜しており、また FRP 加工に影響の大きい刃物先端部の R（EDGE RADIUS）が 2 倍程度であることが明らかとなった。これらの Drill を用いて実際に FRP 平板を加工した結果、平板の状況に顕著な差が無かった一方、Drill の形状変化を照合計算により比較したところ、市販品 Drill は自社加工 Drill よりも同一の加工による摩耗が進行し、加工後の FRP に層間剥離が発生することが分かった（右下図）。また一度摩耗した自社加工 Drill を修正加工後、再度 FRP の加工を行ったところ、加工に問題は無かった。これにより Drill の自社加工は従来廃棄される摩耗した Drill の再利用に対しても有効であると考えられる。

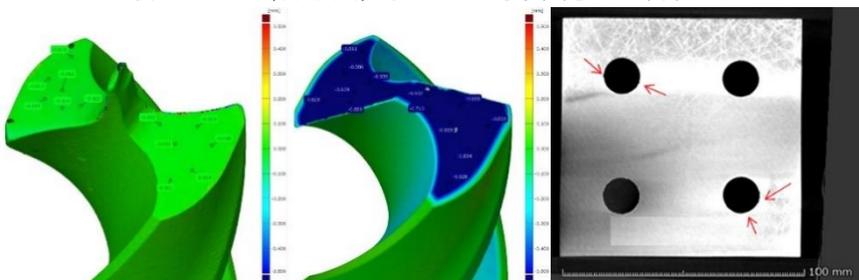


図 加工前後の形状変化

(左：自社加工品 右：市販品)

図 加工後の X 線 CT
で検知した剥離

評価準備と評価方法

評価用 Drill の準備

評価用 Drill は黒色表面処理した $\phi 15\text{mm}$ の TPT 大ノス Drill (材質：ハイス HSS シャンク径：13mm 先端角：118°) を用いた。Drill は以下の条件で準備を行った。

表 Drill 条件概要

Drill 名称	条件
A	新規購入品 (未使用)
B	新規購入後、11mm 厚みの板上に 20 個穴あけ実施
C	新規購入品を自社にて加工
D	自社にて加工後、11mm 厚みの板上に 20 個穴あけ実施
E	上記 Drill D を修正加工実施

評価用 Drill の形状検査

測定は以下の機器、条件にて実施した。非接触形状測定機は、黒色、光沢の表面を有する対象物の検査が困難であるため、下図の通り測定前に白色塗装した。用いた非接触形状測定機は三次元デジタイザーであり、干渉縞によって得られる凹凸情報をポリゴンメッシュとしてデータ表現するものである。

表 評価用 Drill 形状測定条件概要

項目	概要
形状測定機器	Steinbichler 非接触測定機 COMET5-11M
レンズ	C150 (155 × 105 × 70)
形状測定環境	温湿度管理無 (計測機器からの発熱が多いため環境管理困難)
取得データ形式	STL データ



図 塗装前 (左) と塗装後 (右) の Drill

非接触測定機における形状測定に先立ち、ドットパターンを用いた計測（干渉縞のキャリブレーション）、並びに回転テーブルに特定形状のジグを設置の上、テーブルの位相を測定することで、キャリブレーションを行った（下図参照）。

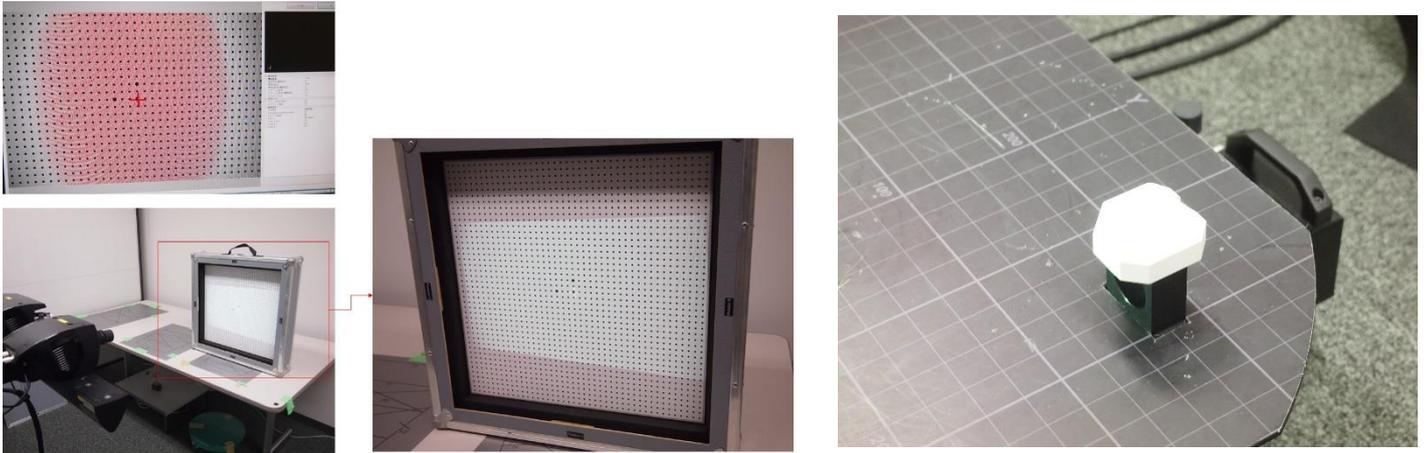


図 ドットパターンの測定（左）と回転テーブルに設置された位相測定用ジグ（右）

Drill の形状測定の様子を下図に示す。評価用 Drill に焦点を合わせ、回転テーブルを回転させながら複数側面の画像データを取得した。また、評価用 Drill の上からも計測することで上部の画像やデータが不足した側面凹凸部の計測を行った。



図 評価用 Drill の形状測定の様子

取得した形状データは STL の拡張子で取得し、形状解析ソフトである GOM Inspect を用いて評価用 Drill の形状の調査を行った。今回取得したデータには基準が無いため、下図のような円筒軸を中心としたグローバル座標を作成した。また、摩耗や追加工による形状変化を捉えるため、上述の座標を用い、Drill A と B、Drill C と D、Drill D と E の照合計算を実施した。

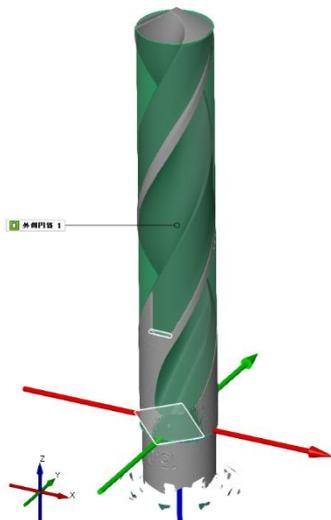


図 形状計測に用いた座標設定方法概要

Drill の形状測定については主に以下の項目について行った。また、自社にて加工した Drill C~E については、先端の立ち上がり角度を SHOULDER ANGLE として計測した。

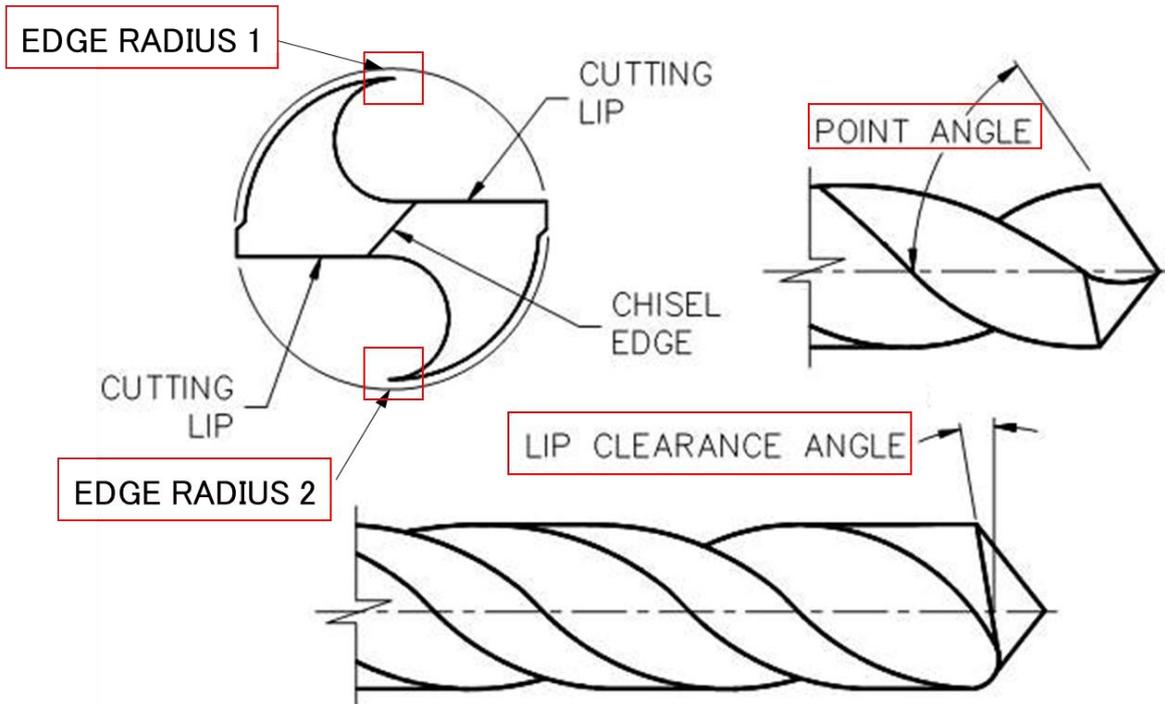


図 評価用 Drill 形状測定的主要項目

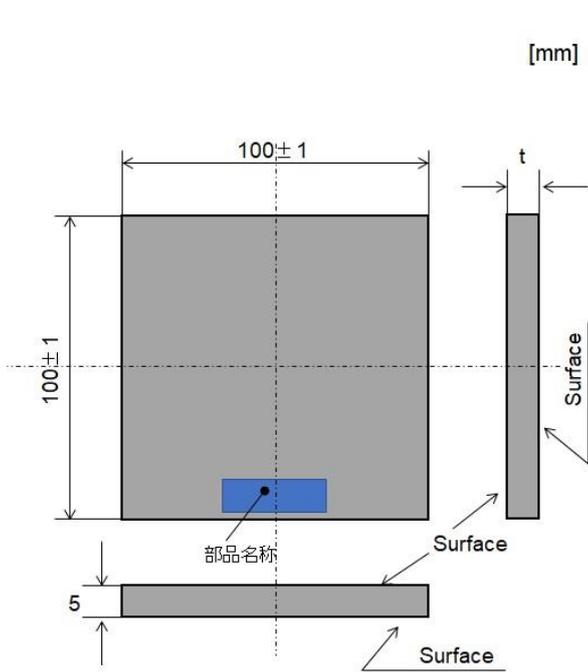
EDGE RADIUS はグローバル Z 軸に垂直な平面を用いて Drill の該当する形状面における断面を作成し、当該面における近接円を作成することで求めた。本平面作成においては、断面輪郭が刃物先端にできるだけ近くなるよう位置調整を行った。

POINT ANGLE は Drill の先端と最前部のエッジ部分にそれぞれポイントデータを作成した上で直線を引き、当該線とグローバル座標の Z 軸との角度を求めた。

LIP CLEARANCE ANGLE は最前部のエッジ部分の接線を作成の上、グローバル座標の Z 軸との角度を算出。その角度から 90° を差し引くことで求めた。

加工評価用平板作製

加工評価用平板は以下の図面に基づき 4 種類を自社にて作製した。Drill hole sample A~E-h はサンプル作製者、強化繊維やマトリックス樹脂などの主材料、型は同一とし、積層と硬化も同一日に行った。また、狙い厚みは 5mm として成形した。



Note:

- 外郭はすべて端面は垂直に加工し、加工面にバリなきこと
- 厚みは狙い値であり、公差は無し
- 厚み t の狙い値は Table による
- 製品の表面仕様概要は Table による
- 部品名称は図中の指定領域に消えないような手法で記載すること

Table

部品名称	Surface
Drill hole sample-A-h	型成形 + ゲルコート
Drill hole sample-B-h	型成形 + ゲルコート
Drill hole sample-C-h	型成形 + ゲルコート
Drill hole sample-E-h	型成形 + ゲルコート

材料

- ・強化繊維: GF
- ・マトリックス樹脂: 不飽和ポリエステル

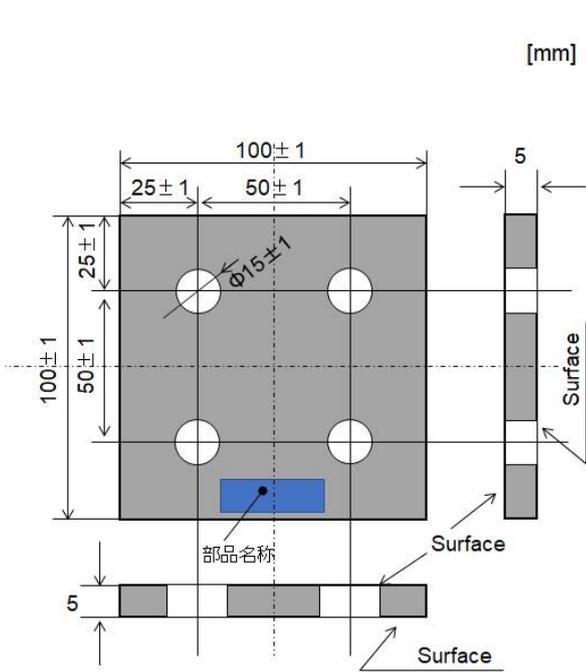
部品名称:

Drill hole sample A-h / Drill hole sample B-h
 Drill hole sample C-h / Drill hole sample E-h

図 穴あけ加工用平板図面

各種 Drill を用いた穴加工実施

加工評価用平板は後述する非破壊検査の後、Drill A～C-h、及び E を使い、ボール盤にて穴加工を自社にて実施した。加工時の回転数は 500rpm とし、作業者、加工機は同一とした。加工はゲルコート層である表層側から行った。穴加工を実施した平板の図面を以下に示す。



Note:

- 外郭はすべて端面は垂直に加工し、加工面にバリなきこと
- 厚みは狙い値であり、公差は無し
- 製品の表面仕様、穴加工要件概要は Table による
- 部品名称は図中の指定領域に消えないような手法で記載すること

Table

部品名称	Surface	穴加工使用刃物
Drill hole sample-A-h	型成形 + ゲルコート	Drill A
Drill hole sample-B-h	型成形 + ゲルコート	Drill B
Drill hole sample-C-h	型成形 + ゲルコート	Drill C
Drill hole sample-E-h	型成形 + ゲルコート	Drill E

材料

- ・強化繊維: GF
- ・マトリックス樹脂: 不飽和ポリエステル

部品名称:

Drill hole sample A-h / Drill hole sample B-h
 Drill hole sample C-h / Drill hole sample E-h

図 穴あけ後の平板図面

X線 CT 測定

20±1°Cで管理した計測室で、METROTOM 800 (ZEISS 社製) を用いた測定を行った。画像取得ソフトは METROTOM OS 2.6.13032.1 を用いた。

計測を実施したのは加工前の平板 Drill hole sample A~C-h の 3 サンプル、並びに穴加工後の Drill hole sample A~C-h、E-h の 4 サンプルであった。計測に関する主な情報は以下の通り。尚、測定日や測定者が異なる関係で測定条件に違いがあることを追記しておく。

表 X線 CT 計測に関する概要情報 (加工前 Drill hole sample A~C-h)

項目	設定	項目	設定
管電圧 [kV]	130	寸法 [ボクセル]	1222/287/1246
管電流 [μ A]	121	解像度 [mm]	0.091/0.091/0.091
再構成アルゴリズム	Feldkamp	寸法 [mm]	110.887/26.043/113.065
撮影数	1550	オブジェクト体積 [mm ³]	15301.828

表 X線 CT 計測に関する概要情報 (加工後 Drill hole sample A~C-h)

項目	設定	項目	設定
管電圧 [kV]	130	寸法 [ボクセル]	1213/192/1217
管電流 [μ A]	121	解像度 [mm]	0.091/0.091/0.091
再構成アルゴリズム	Feldkamp	寸法 [mm]	110.069/17.422/110.432
撮影数	1550	オブジェクト体積 [mm ³]	166206.498

表 X線 CT 計測に関する概要情報 (加工後 Drill hole sample E-h)

項目	設定	項目	設定
管電圧 [kV]	80	寸法 [ボクセル]	1435/386/1562
管電流 [μ A]	60	解像度 [mm]	0.081/0.081/0.081
再構成アルゴリズム	Feldkamp	寸法 [mm]	116.675/31.384/127.001
撮影数	1550	オブジェクト体積 [mm ³]	420241.45

X線 CT 測定器の外観写真、並びに遮蔽室内部の写真を以下に示す。Drill hole sample A~C-h、E-h は立てた状態で測定できるよう、ターンテーブルに乗せた。複数のサンプルを測定する場合は一回ですべて測定し、計測データを分離した。また、測定後のスキャン画像解析には myVGL 3.2.0 (VOLUME GRAPHICS 社) を用いた。

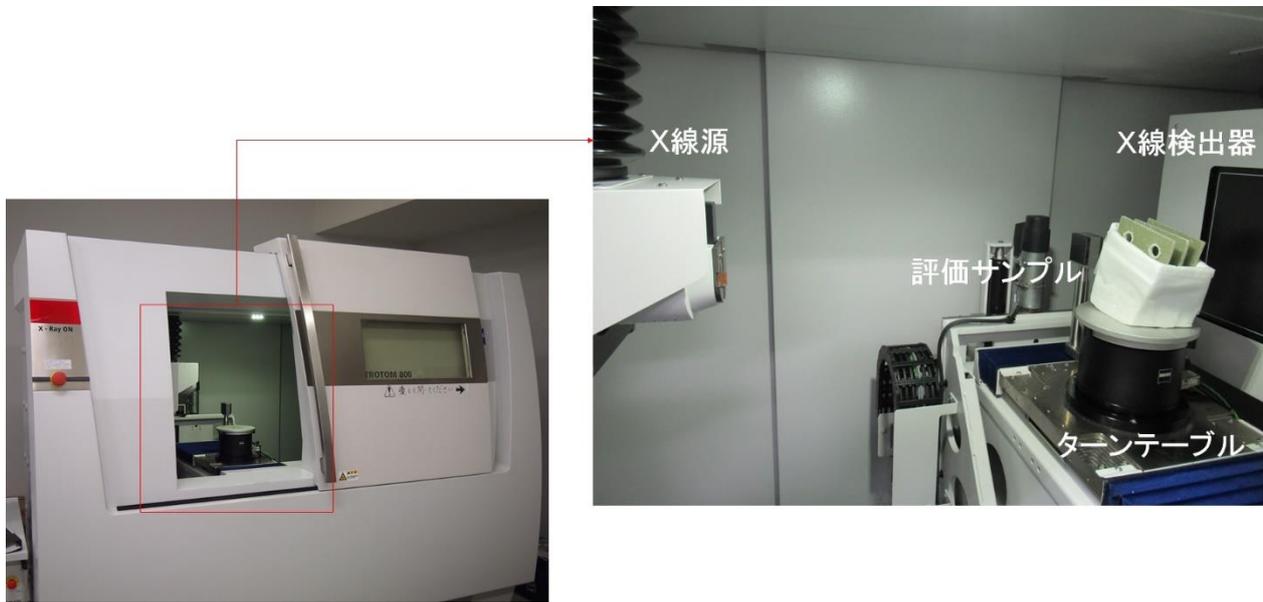


図 X線 CT 測定状況

結果

評価用 Drill の準備

評価用 Drill はすべてについて変形、割れ等の問題が無いことを目視にて確認した。また、自社における加工も問題なく行うことができた。自社加工後の Drill について、目視による変形、割れ等の問題は確認されなかった。購入状態の Drill と自社にて加工した Drill の先端形状の違いを下図に示す。

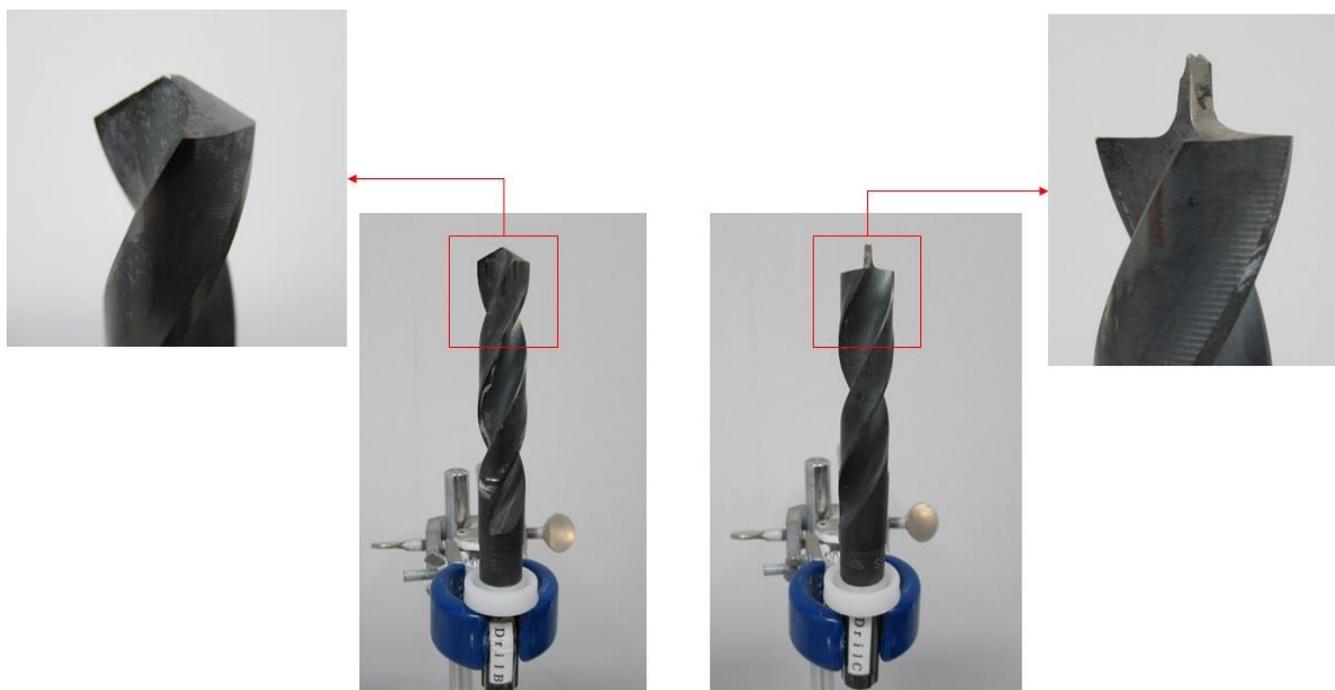


図 購入状態の Drill (左) と当社で FRP 向けに先端を自社で加工した Drill (右)

評価用 Drill の形状検査

非接触三次元測定データの取得では鋭利な部分の一部にデータの欠損が見られたものの、各種形状解析は問題なく行うことができた。

Drill A から E について、POINT ANGLE、LIP CLEARANCE ANGLE の計測結果一覧を下表に示す。

表 評価用 Drill の POINT ANGLE および LIP CLEARANCE ANGLE の測定結果

Drill	POINT ANGLE [°]		LIP CLEARANCE ANGLE* [°]	
	A	58.77	59.28	2.14
B	59.55	60.16	2.36	3.81
C	50.28	52.02	2.57	4.89
D	49.46	53.33	-2.40	1.93
E	41.87	47.81	3.09	6.04

* 測定結果から 90° 差し引いた値

POINT ANGLE については未加工の方が 60° 前後の値だったのに対し、当社で加工したものは 50° 前後となっており、先端部分と Drill 側面刃物の関係が鋭角になっていることがわかった。

LIP CLEARANCE について、未使用の市販品である Drill A と自社加工直後である Drill C や E と比較したところ、平均値で 10% 程度自社加工品が高い傾向があり、Drill の回転軸に対して刃物が傾斜していることがわかった（LIP CLEARANCE ANGLE 平均値 Drill A : 3.48° Drill C/E : 4.15° ）。複数の穴あけ加工に用いられて摩耗した Drill B や D では、刃物の摩耗に伴い角度が鈍化する傾向を示した。

POINT ANGLE と LIP CLEARANCE ANGLE について、形状解析ソフト上での実測画像を以下に示す。

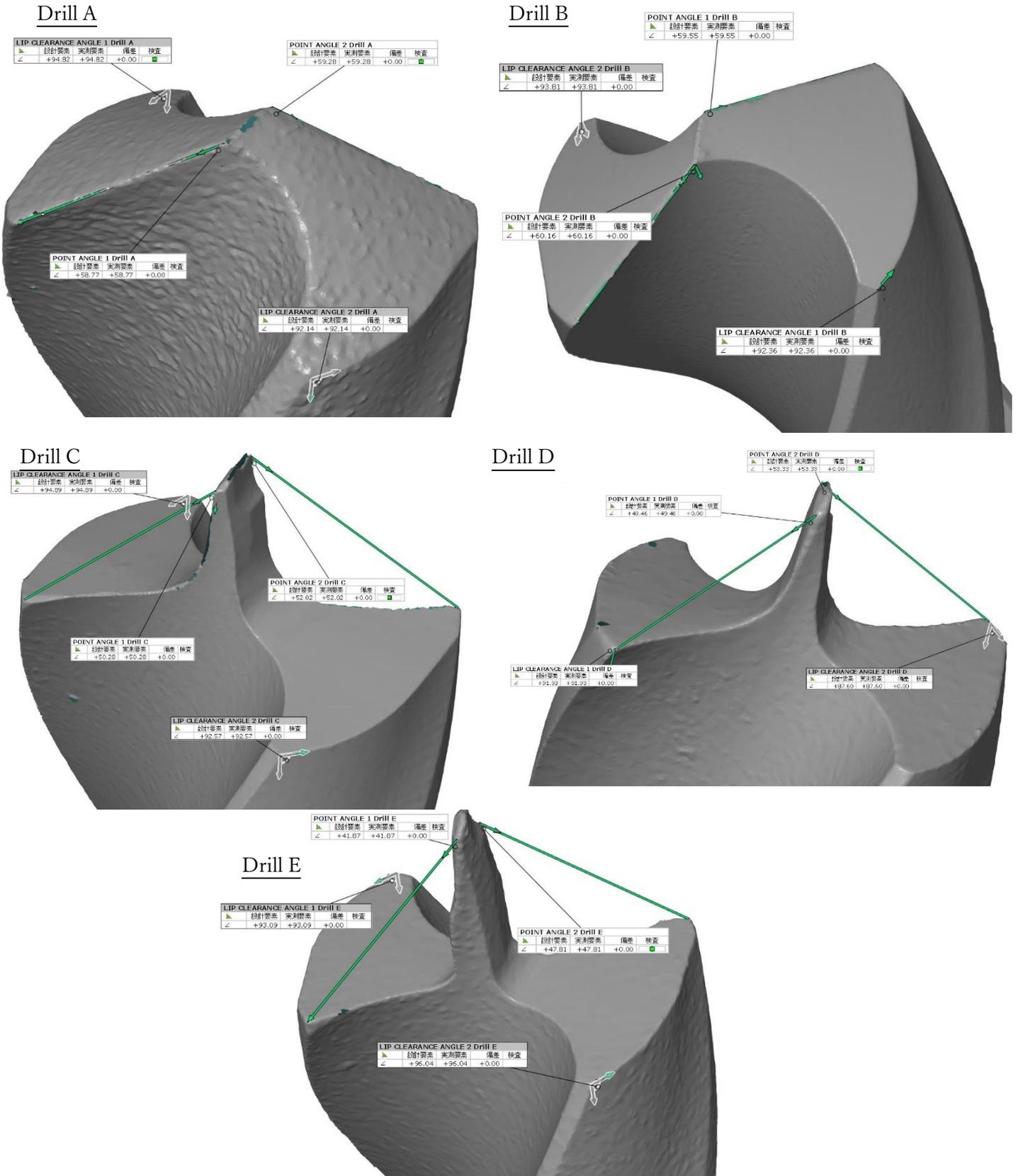


図 POINT ANGLE/LIP CLEARANCE ANGLE 実測画像

EDGE RADIUS の測定結果を下表に示す。EDGE RADIUS は加工前の未使用品 (Drill A) で 0.34 から 0.51 程度で最も小さく、穴加工による摩耗により 0.65 から 0.67 程度に上昇していることがわかった (Drill A で穴加工を行ったものが Drill B)。自社で加工したものは加工直後 (Drill C および E) で 0.55 から 0.62 程度であり、穴加工による EDGE RADIUS の顕著な変化は見られなかった (Drill C で穴加工したものが Drill D)。

表 評価用 Drill の EDGE RADIUS の測定結果

Drill	EDGE RADIUS* [mm]	
A	0.340	0.512
B	0.650	0.674
C	0.546	0.548
D	0.570	0.625
E	0.571	0.627

* 値は小数点第四桁を切り捨てたもの。

EDGE RADIUS の測定においてはグローバル座標の Z 軸に垂直な平面によって形成される断面輪郭の先端部に近接円を作成し、その直径を求めた。下図にそのイメージを示す。

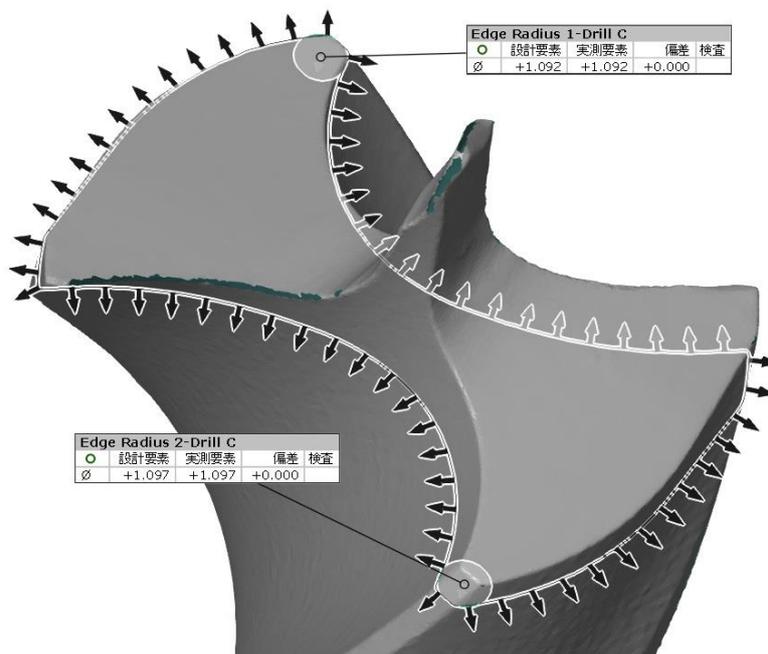


図 EDGE RADIUS の求め方

EDGE RADIUS の実測画像を下図に示す。下図の実測値は直径の値であるため、実際の値は 1/2 である。

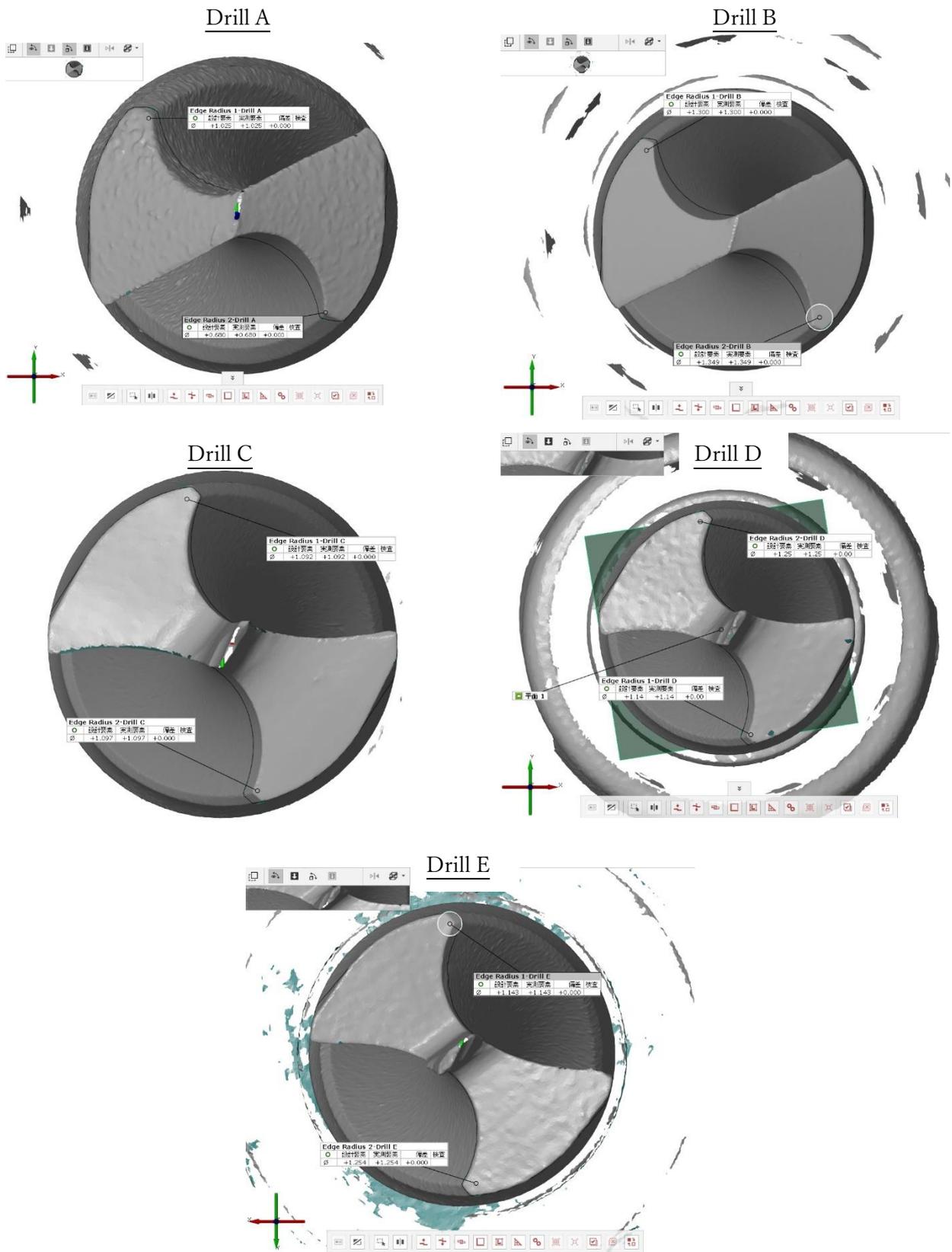


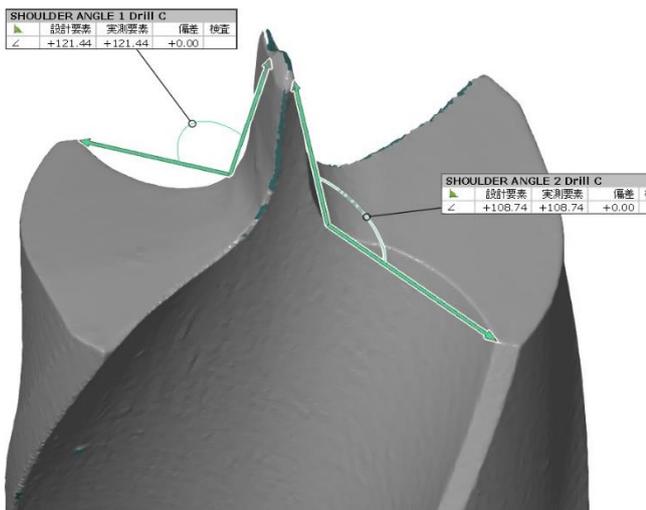
図 EDGE RADIUS 実測画像

自社で加工した Drill C、D、E について、SHOULDER ANGLE を計測した。角度の値は 96~122° の間であり、加工による摩耗、または追加工により低下する傾向が見られた。

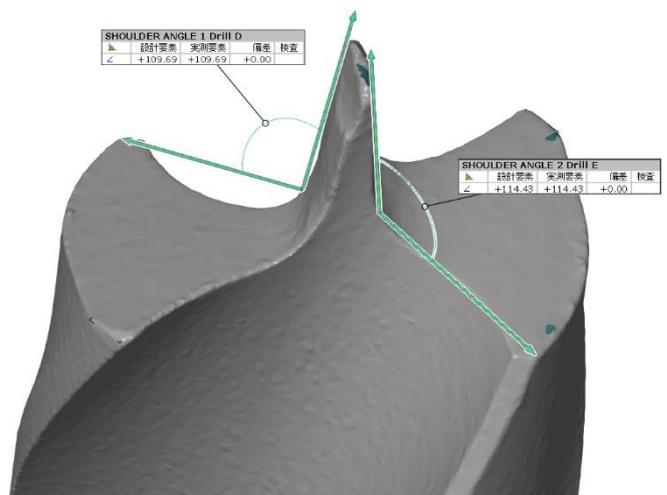
表 自社加工した評価用 Drill の SHOULDER ANGLE の測定結果

Drill	SHOULDER ANGLE [°]	
C	108.74	121.44
D	109.69	114.43
E	96.27	101.17

Drill C



Drill D



Drill E

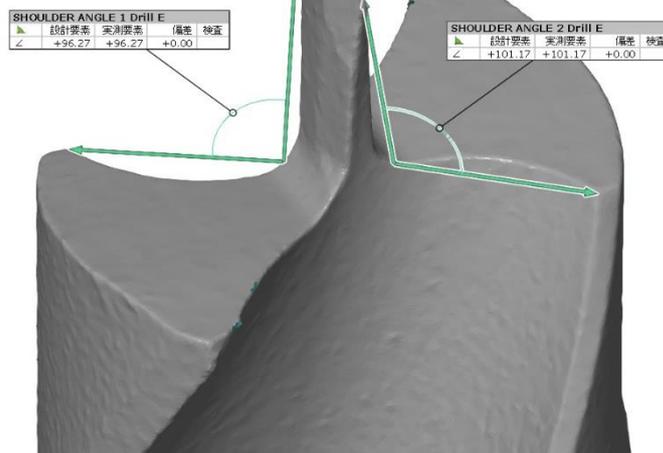


図 SHOULDER ANGLE 実測画像

以下、Drill 形状の差異を検証するために行った各照合計算結果を示す。

Drill A と B の照合計算結果を下図に示す（基準 Drill A）。穴加工による摩耗が原因で、Drill A と比較し Drill B では 0.8~1.0mm 程度減少していることがわかった。被加工物を切削する刃物先端付近は 0.4mm 程度の摩耗が見られた。

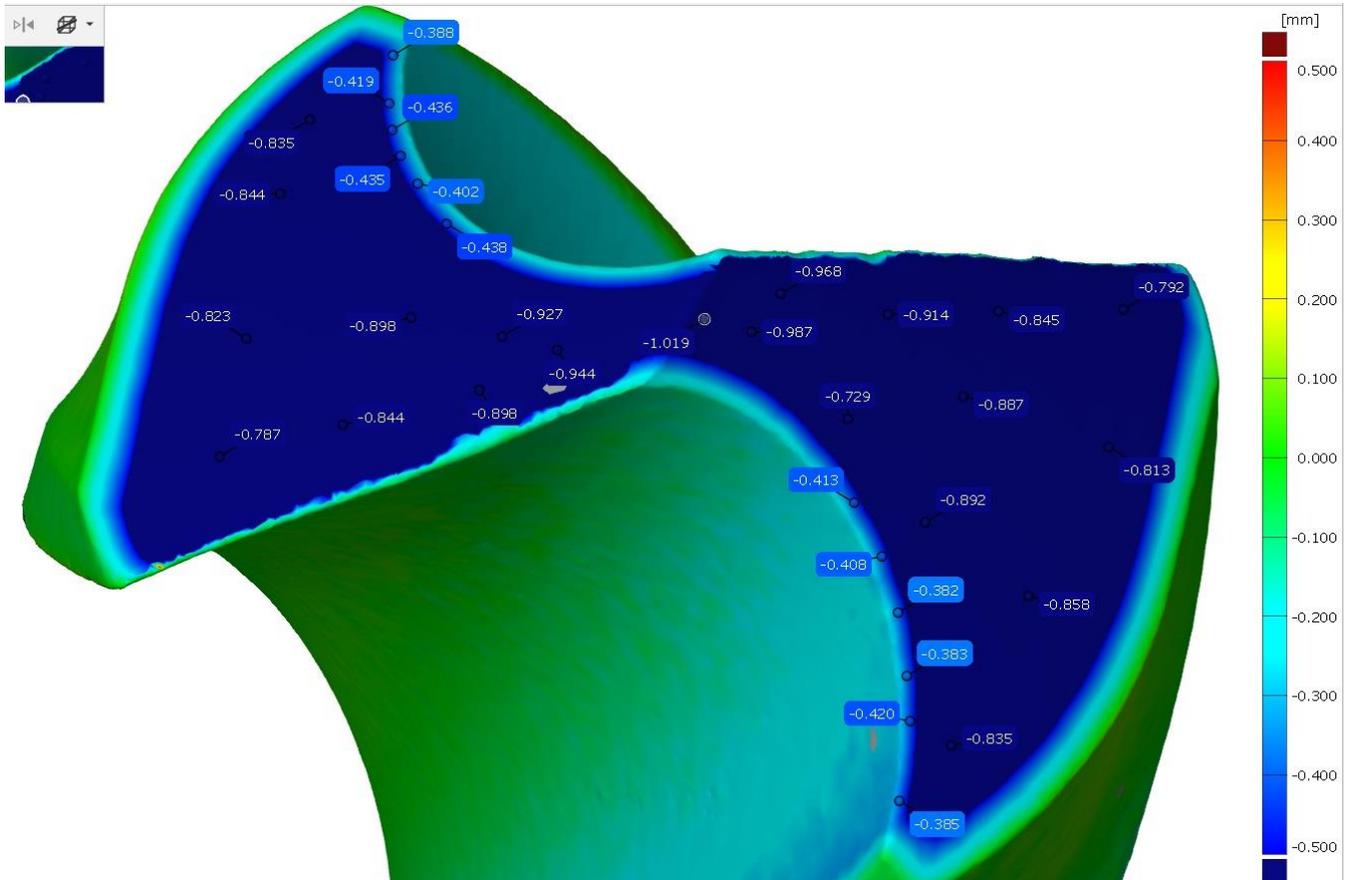


図 Drill A と Drill B の照合計算結果（基準 Drill A）

Drill C と D の照合計算結果を下図に示す（基準 Drill C）。Drill C にて板厚 11mm の板について 20 個の穴を加工したのが Drill D であるが、形状差異は全体を通じて絶対値で 0.05mm 以下であり摩耗による形状変化が小さいことがわかった。尚、一部正の値を示すものがあるが、これは照合計算時の誤差によるものである。

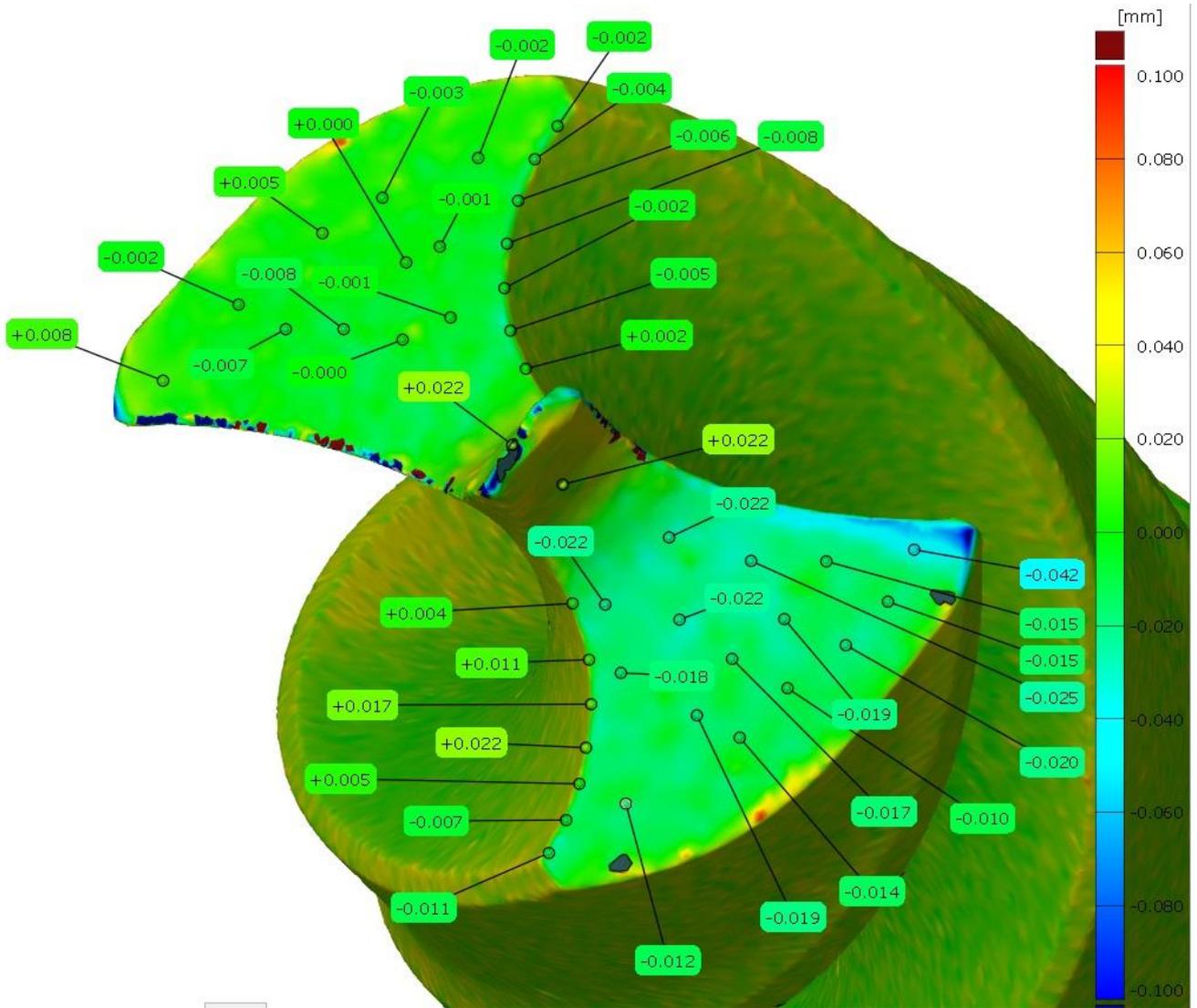


図 Drill C と Drill D の照合計算結果（基準 Drill C）

Drill D と当該 Drill を修正加工した Drill E の照合計算結果を下図に示す（基準 Drill D）。平滑部は概ね 1~2mm 程度、被加工物を切削する刃物先端近辺で 0.18~0.3mm 程度の形状変化が生じていることがわかった。

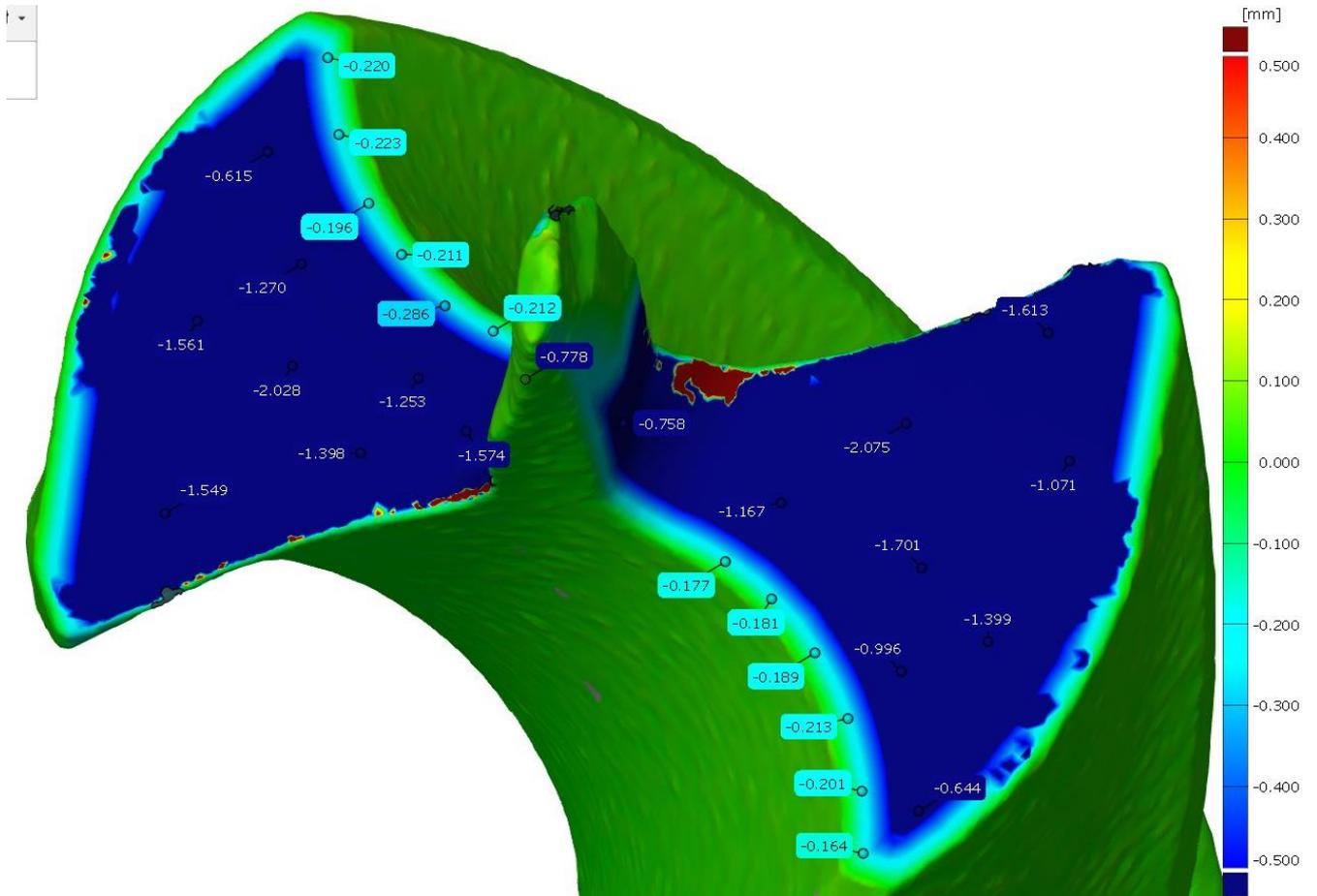


図 Drill D と Drill E の照合計算結果（基準 Drill D）

加工評価用平板作製

加工評価用平板は目立った反りなどなく成形することができた。また成形した平板を 100mm 角に加工した後も、加工端部に剥離は見当たらなかった。

各種 Drill を用いた穴加工実施

穴加工は後述する X 線 CT による非破壊検査の後に実施した。加工中は切粉が発生した（右図参照）。

穴あけ加工後の平板の外観写真を下図に示す。目立った外観異常は認められなかったが、Drill C および Drill E で加工した平板の裏面の加工穴周辺には層間剥離の疑いのある変色が認められた。



図 穴あけ加工中の状況



図 加工後の FRP 平板（左：表面 右：裏面）

X線 CT 測定

加工前の評価用平板である Drill hole sample A~C-h の 3 サンプルについて X 線 CT 検査を行った結果、空隙や層間剝離等の初期損傷は認められなかった。

加工後の Drill hole sample A~C-h、及び E-h の計 4 サンプルに関する X 線 CT 検査を行った結果、Drill A で穴加工による摩耗をした Drill B で加工したサンプルにおいて、表層（ゲルコート層）近辺における層間剝離を確認した。Drill hole sample A、B、E-h では加工による損傷は認められなかった。以下、計測を行ったすべてのサンプルについて表層、並びに下層付近の抜粋画像を示す。

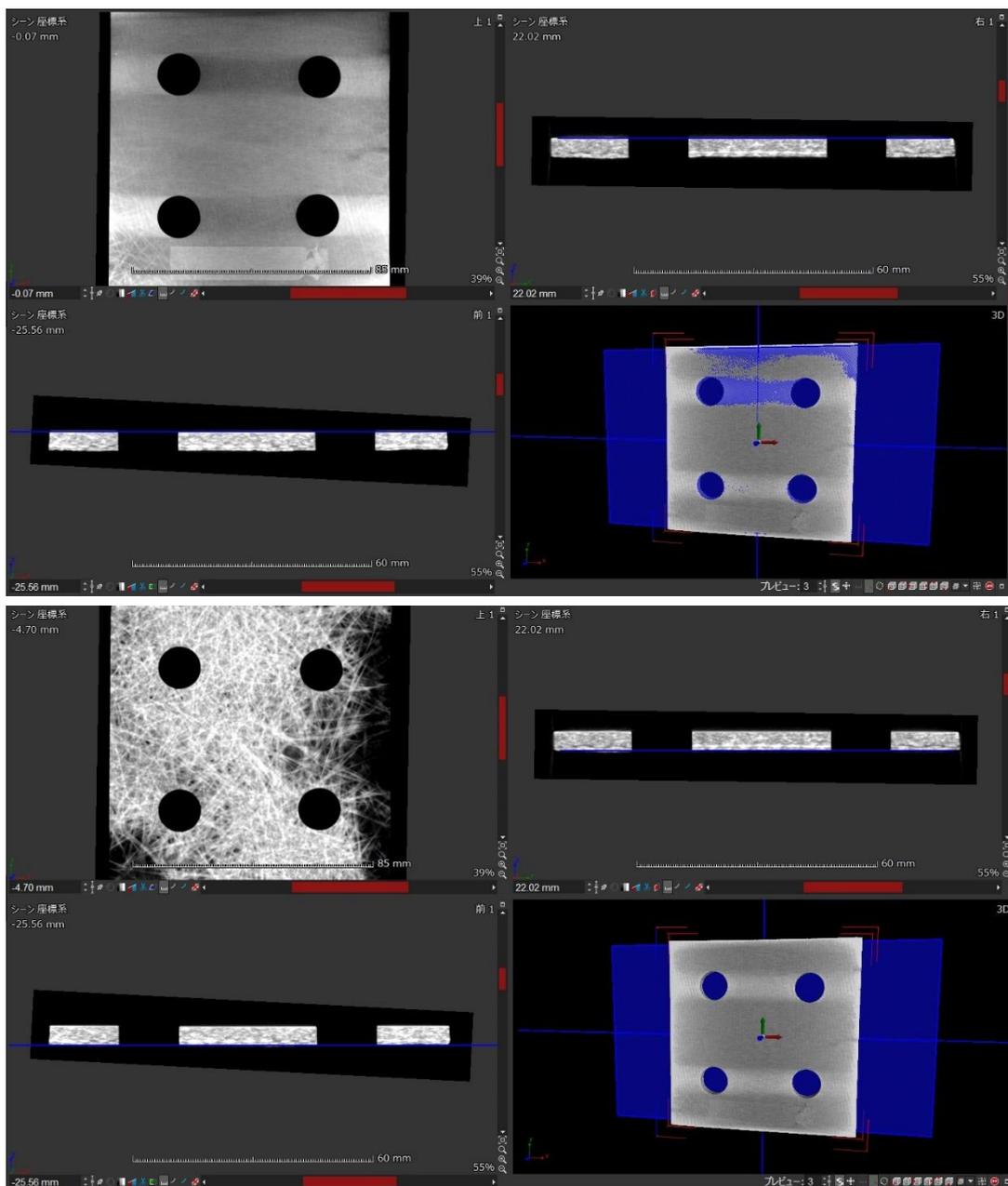


図 Drill hole sample A-h X 線 CT 抜粋画像（上：表層付近 下：下層付近）

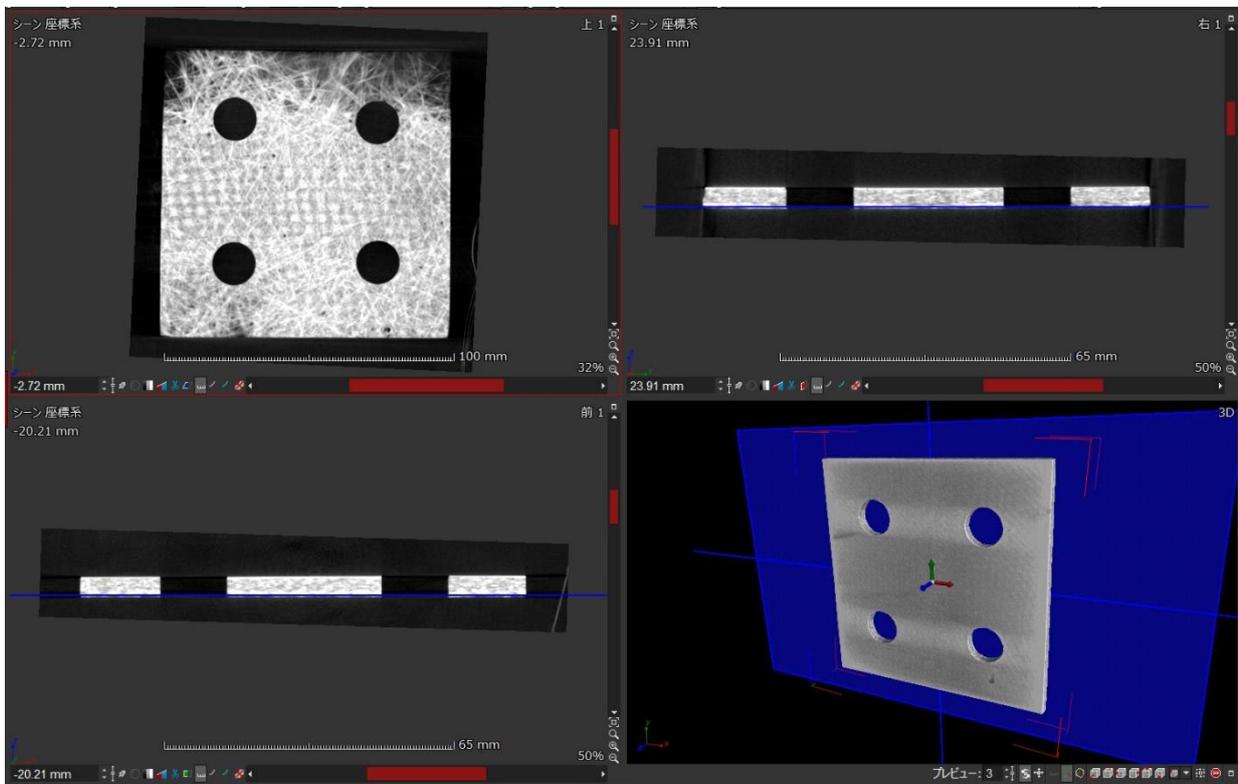
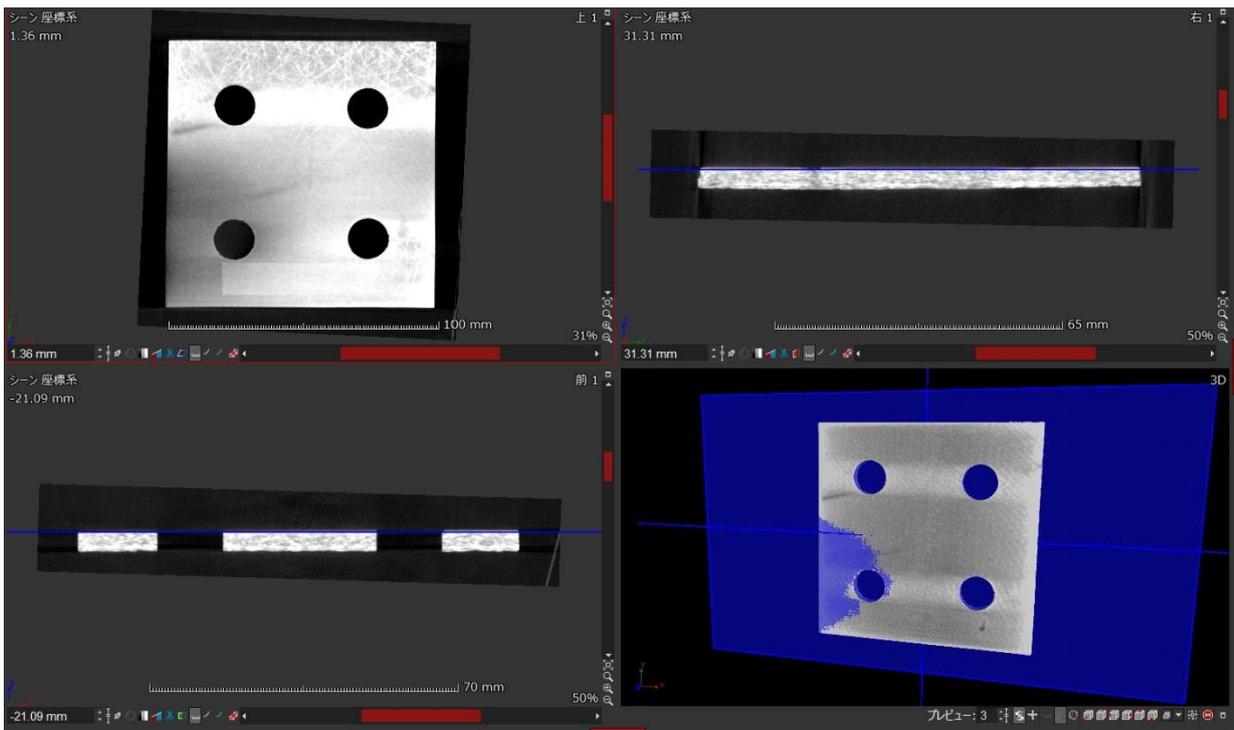


図 Drill hole sample B-h X線 CT 抜粋画像 (上：表層付近 下：下層付近)

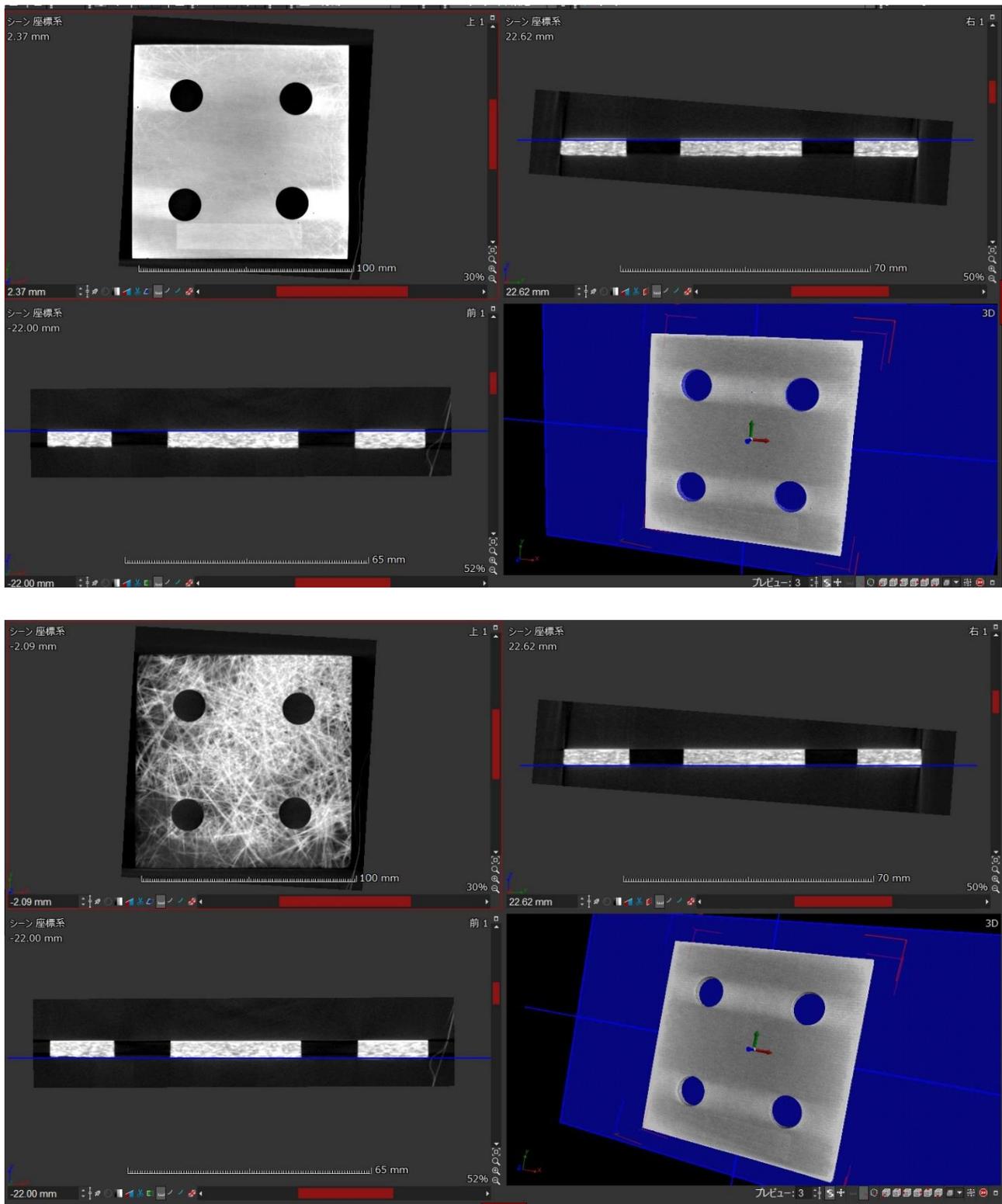


図 Drill hole sample C-h X線 CT 抜粋画像 (上：表層付近 下：下層付近)

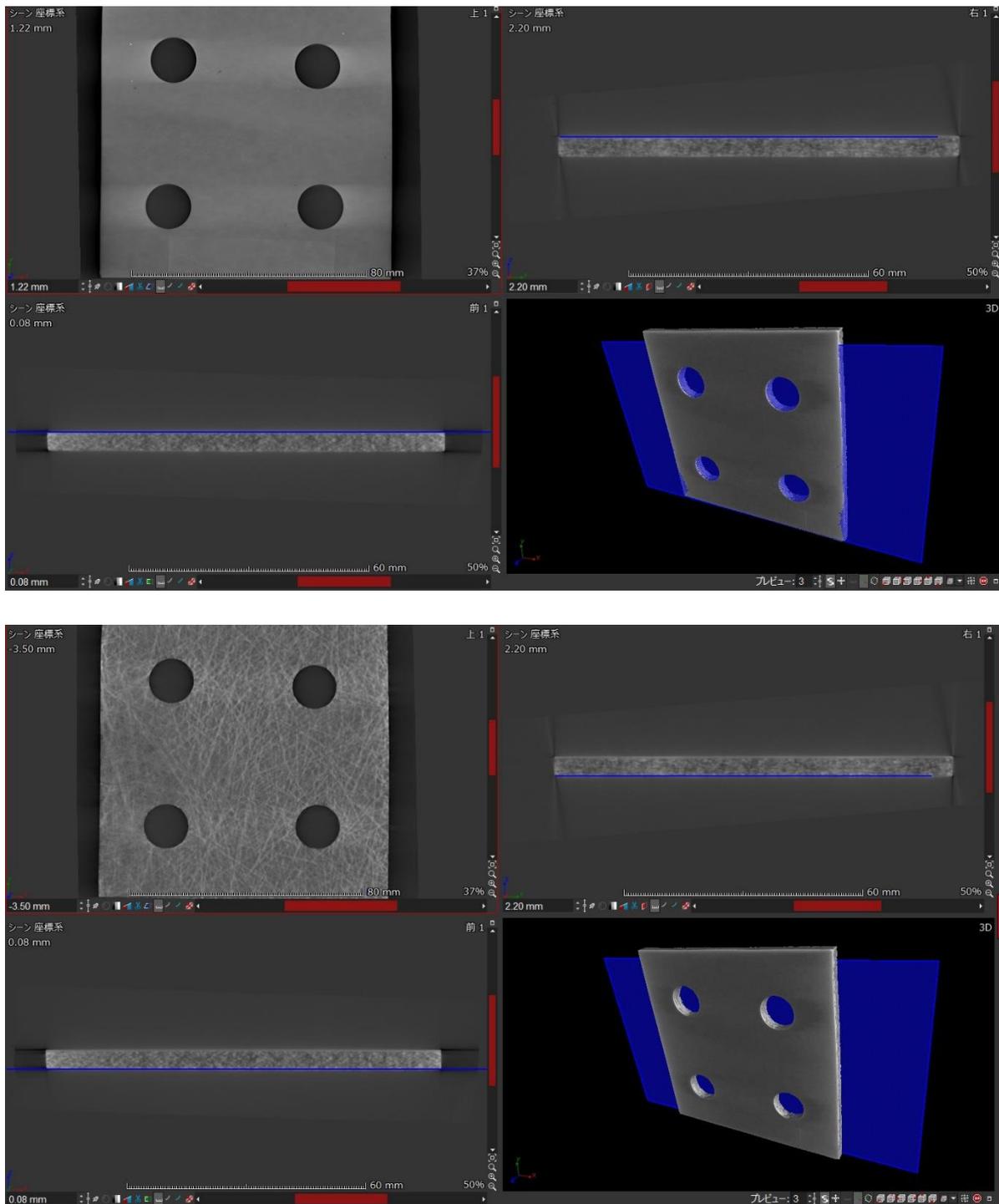


図 Drill hole sample E-h X線 CT 抜粋画像 (上：表層付近 下：下層付近)

表層付近に層間剥離を確認した Drill hole sample B-h の X 線 CT 計測結果についてより詳細を述べる。層間剥離を確認したのは、部品名称ラベルを下にしたときの左上と右下の加工穴である。層間剥離確認箇所を赤矢印で示し、また主な層間剥離の計測寸法を示したものを下図に示す。

層間剥離の寸法は周方向に 0.74~4.95mm、径方向に 0.21~0.82mm であり、周方向の剥離は概ね 1~2mm 程度、径方向の剥離は 0.2~0.5mm 程度であり、層間剥離は周方向に進展する傾向にあることが明らかとなった。

また、これらの層間剥離はすべての加工評価用平板において、中間層や下層付近（加工する面に対して裏面）には存在していなかった。

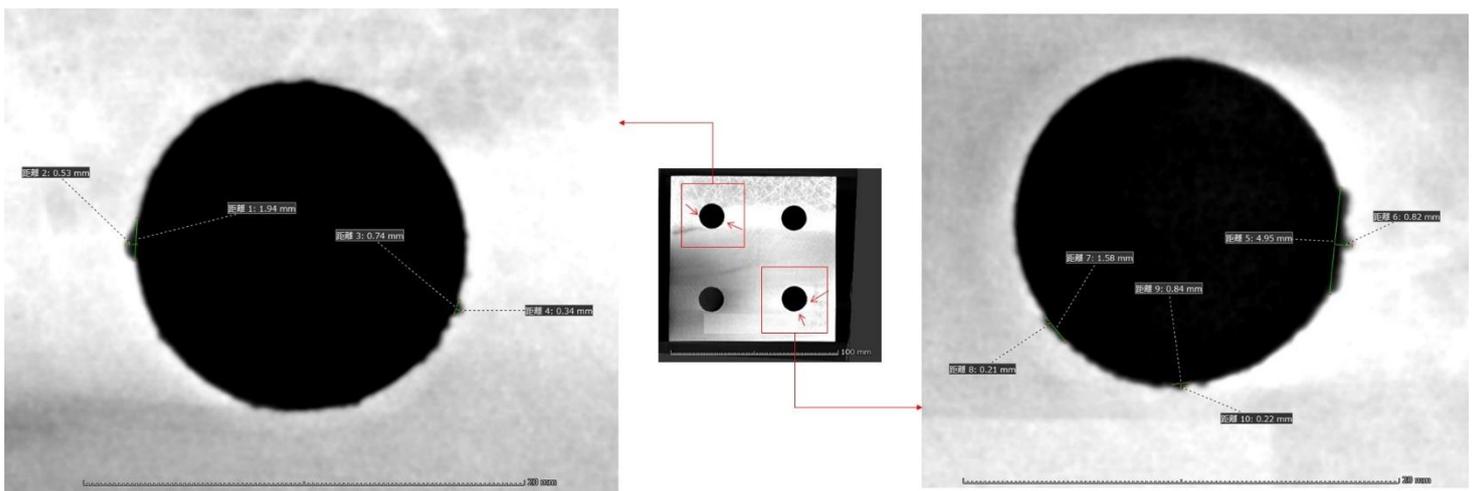


図 Drill hole sample B-h の層間剥離箇所拡大画像

考察

当社における FRP 向け加工用 Drill の修正加工について

自社加工した Drill について、長期使用で切れ味が落ちてきた場合は修正加工することで再利用しているが、具体的にどのような形状修正を行っているのかはわかっていなかった。今回の形状検証から得られた結果によって分かったことについて言及する。

POINT ANGLE については、自社にて初期加工した Drill C と比較し、修正加工した Drill E で小さくなる傾向が示されている（POINT ANGLE の実測：Drill C- 50.28° 、 52.02° Drill E 41.87° 、 47.81° ）。これは修正加工が、先端鋭利部の高さを当該部分のフィレット部から平滑部にかけての Drill 先端平面部に対して低くしているということを意味している（部位の名称は右図を参照）。さらに先端鋭利部と先端平面部の端部の角度である SHOULDER ANGLE は概ね $100\sim 120^{\circ}$ に調整されている。これらの形状は、FRP 平板加工時に最初に接触する先端鋭利部と先端平面部の距離を最適化し、Drill の軸がぶれないようにする一方、先端鋭利部による加工開始と先端平面部による加工開始のタイミングを最適化し、FRP への層間剥離につながる加工時の応力発生を低減させることにつながっていると考えられる。

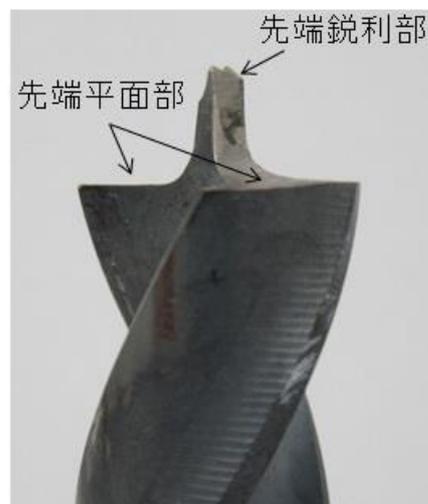


図 Drill 先端部拡大写真

EDGE RADIUS について、初期購入品の Drill A が最も小さい値（ $0.34\sim 0.512\text{mm}$ ）で刃物切削部が最も鋭利であることがわかった。Drill A で複数の 11mm 板厚の FRP 平板穴加工を行った Drill B において EDGE RADIUS が $0.65\sim 0.674\text{mm}$ に変化しており、また Drill A では加工した FRP 製の評価用平板に損傷が認められなかった一方、Drill B で加工した FRP 平板には層間剥離が生じたことから、この部分の形状変化が FRP 加工に極めて大きな影響を与えることが明らかとなった。自社で加工した Drill C と E の EDGE RADIUS は $0.546\sim 0.627\text{mm}$ であり、自社による Drill の新規、並びに修正加工によりある程度の刃物先端の EDGE RADIUS を実現している一方、新規購入品の Drill A よりも大きな値となっている。今後、自社加工 Drill のさらなる FRP 加工性向上には、EDGE RADIUS の最小化が一つの方向性となると推測する。

また Drill D と Drill E の照合計算の結果から、実際の FRP 加工による刃物の摩耗（Drill C と Drill D の照合計算結果参照）は微小であるものの、修正加工時には平滑部を多めに除去し、切削する刃物先端付近（先端平面部のエッジ）を微量研ぐということを行っていることが明らかとなった。このような形状により、切れ味の落ちてきた Drill については先端平面部を若干凹部のような形にすることで刃物が平面部

よりも先に FRP に接触させるようにし、先端平面部の刃物で FRP の強化繊維を的確に切断しながら切削することが可能になったと考えられる。

FRP 加工時の FRP 平板の層間剥離について

Drill B で加工した平板について、表層付近に剥離が発生した。FRP は積層という材料を積み重ねる構成のため、穴あけ加工時に表裏の表面付近の材料が剥離する傾向が見られる。穴加工時に回転切削による応力が生じた場合、表層付近には面外（層間）方向の力が生じる。当該現象は、加工中の切粉の発生が面外方向に確認できることから裏付けられている（右図参照）。

また、X線 CT では検知できなかったが裏面にも層間剥離が認められている（右下図赤矢印）。目視で確認できる剥離は自社加工した Drill C と E（Drill D では加工を実施せず）でも認められたことから、Drill 形状の最適化の取り組みは継続して必要であると考えられる。尚、剥離が疑われる個所について X線 CT で検知できなかったのは厚さ方向に対するスライスピッチ設定によるものと考えられる（スライスピッチの設定は $81\sim 91\mu\text{m}$ ）。いずれにしても当該変色が層間剥離か否か、ということについては断面観察等の裏付けとなる検証が必要である。

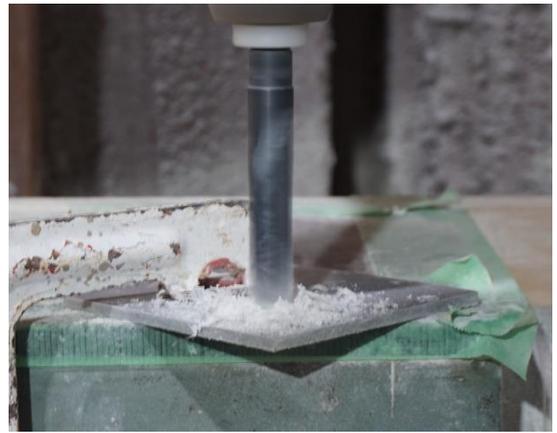


図 FRP 加工中に発生する切粉

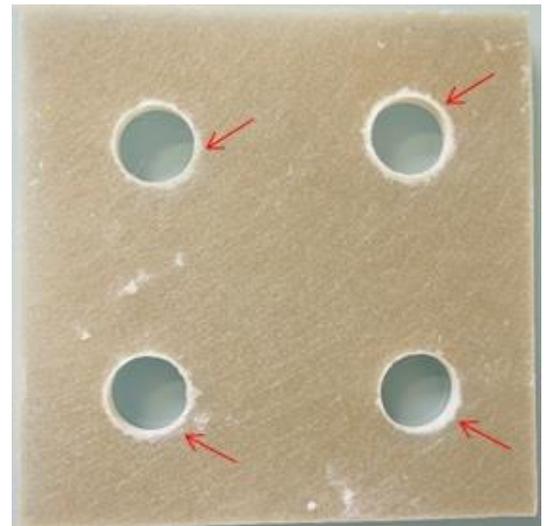


図 加工後の FRP 平板裏面

FRP 加工に対する新規購入 Drill と自社加工 Drill の有意差と今後の取り組みについて
 今回加工性の比較評価を行った新規購入と自社加工の Drill について、穴加工後の FRP 製の加工評価用平板に関する X 線 CT の計測結果等を踏まえ、FRP の加工性という観点で両者に顕著な有意差は認められなかった。

また自社加工 Drill では裏面表層に層間剝離を疑わせる変色があることから、既述の通りさらなる形状の最適化検証が必要であると考えます。

その一方で、自社で新規加工した Drill C での FRP 加工に大きな問題が無い上、ある程度使用した後に修正加工することにより FRP 加工に問題ない状態に再調整できることを Drill E の結果から確認することができた。さらに、市販品の Drill A と自社加工の Drill C を同量の穴加工を行った後の摩耗量を検証したところ、自社加工の Drill の摩耗が大幅に抑制されていることが分かった。Drill A と B、並びに Drill C と D の照合計算結果を、カラーコンターバーのレンジを合わせた上で示したものを下図に示す。自社加工の Drill C では形状変化量が 0.03mm 以下であったのに対し、市販品 Drill A は 0.7~1mm の同変化が確認された。これは、自社加工の Drill 形状が加工具の寿命延長に効果があることを強く示唆していると考えられる。

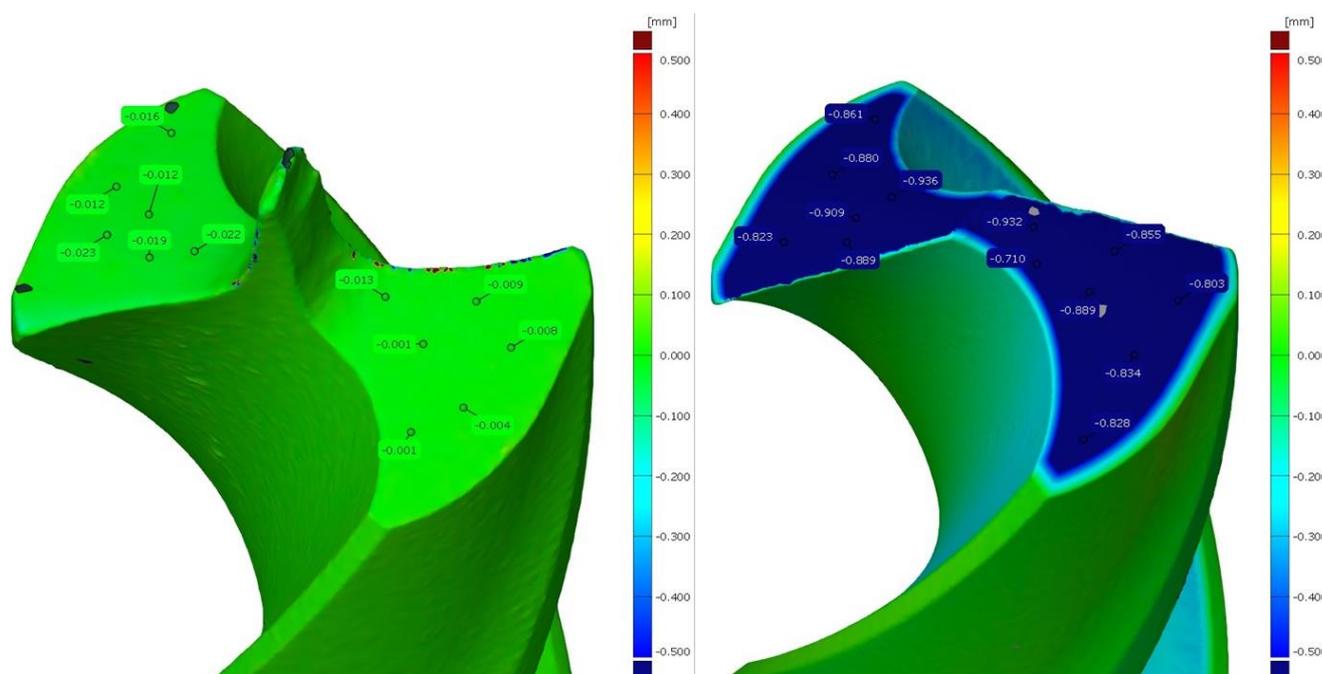


図 自社加工 Drill (左) と市販品 Drill (右) の同量加工後の形状変化

今後は、特に FRP 加工に重要と考えられる EDGE RADIUS の最小化に加え、POINT ANGLE、LIP CLEARANCE ANGLE、SHOULDER ANGLE といった Drill の性能を決める各種形状数値の安定化を実現する、Drill の修正加工工程構築を進めていくことが重要である。

まとめ

FRP の穴加工を例に、自社で行っている加工後の Drill 形状的特徴の数値化、並びに市販品の Drill との定量的な形状比較に加え、実際に FRP の加工を行うことでその形状の妥当性を評価した。今回評価した範囲では市販品の Drill と自社の修正加工 Drill にて、FRP 加工に対する優位性は認められなかった。

しかしながら、同一加工に対する加工具の摩耗が抑制されることに加え、一般的には切れ味が衰えると廃棄される Drill について、自社にて修正加工することで FRP 加工に問題が無い状態にできるということは、加工具の寿命延長の観点から重要な意義があると考えられる。

感覚的な議論に終始することの多い加工具の修正について、定量的なアプローチで形状の妥当性検証と最適化への方向性を明らかにする取り組みを今後も継続し、技術の発展と伝承を推進していきたい。

以上