

デジタルデザイン技術による陶器の設計・生産技術の開発

—多様な陶器生産システム構築事業—

亘保秀一、中村英二郎、赤嶺公一、花城可英

平成22年度から24年度までに実施した多様な陶器生産システム構築事業の一環で、陶器生産技術に関する取組を実施するにあたり、石膏型を用いた反復生産を行う際の種々の問題の解決策として、3D-CAD/CAM（デジタルデザイン）技術を活用することによる陶器原型および石膏型設計・加工技術の開発を行った。

1 はじめに

陶磁器生産において、同規格で比較的数量の多いものや、複雑な形状を反復生産する場合、機械ろくろ成形や鑄込成形のように石膏型が用いられる。その石膏型を用いた陶器生産には、様々な専門知識や熟練された高度な技術を必要とするため、技術の伝承や新たな需要に対する迅速な対応が困難な状況にある¹⁾。近年、沖縄県内では石膏型を作成できる技術者の減少に伴って、前述のような陶器製品に関する需要への対応が困難な状況となっており、図1に示すように県外および海外からの移入品に頼っているのが現状である。

そこで、県内における主として手作り中心の伝統的陶器産業とは競合しない、工業的分野における需要への対応に関する諸問題の解決策として、3D-CAD/CAM（デジタルデザイン）技術を用いた陶器原型および石膏型設計・加工技術の開発に関する取組を、多様な陶器生産システム子地区事業の一環として実施した。

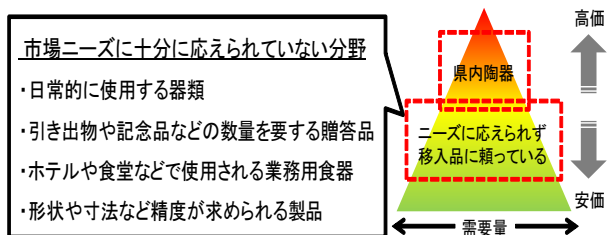


図1 県内陶器市場の概況

2 実験方法

使用する装置の概観を図2に、装置の構成を以下に示す。装置の規模は技術移転の際の導入のし易さ、ソフトウェアは汎用性を考慮し構成した²⁾³⁾⁴⁾。

- 加工機 モデリングマシン (Roland-DG MDX-540A)
 動作範囲：500(X) × 400(Y) × 155(Z)
 スピンドル回転速度：400～12000rpm
 電源：AC100V±10% 50/60Hz 7A
- ソフトウェア 3D-CAD：Rhinoceors4.0 / CAM：SRP Player



図2 原型加工装置

2-1 原型および石膏型の設計・加工のための条件整備

陶器の形状および石膏型の設計の際、焼成時における収縮や熱ダレといった素地の特性を考慮する必要がある。

そこで、焼成後の変形を予測した設計を支援するための情報として、図3のとおり、曲率（直線，R70，R35）の違いや、縁部の傾斜角度（水平，5°，10°，20°）を変化させた皿状のテストピース（計7種）を3D-CADを用い設計し、それをもとに原型加工装置で石膏型および挽きゴテを加工した。図4のとおり、7種のテストピース形状それぞれ12枚ずつ（合計84枚）を機械ろくろにより均一に成形し、1250℃（100℃/h、最高温度保持1時間）にて酸化及び還元焼成し、それぞれで焼成したものについて、直径、縁高を計測した結果を原型寸法と比較することによる収縮率と熱ダレ特性の把握について検証した。

なお、素地には、壺屋の赤3号のポールミル粉砕物（A）と、フルイ（目開き0.3mm）通過物（B）それぞれを1：1で配合したものを使用した。

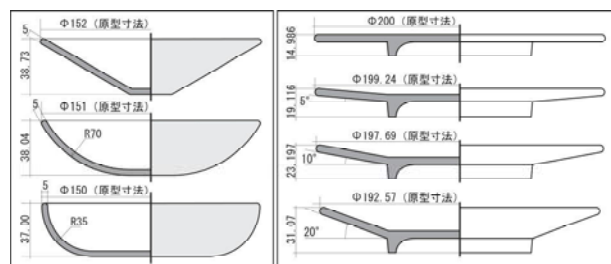


図3 各種テストピース形状側面図



図4 機械ロクロ成形したテストピース

2-2 3D-CADによる陶器原型および石膏型設計プロセス

石膏型による成形では脱型性および成形作業時に扱いやすい形状に配慮することや、石膏型を複製するためのケース型作成における諸条件など、石膏型を使用した陶器形状デザインには非常に多くの設計ノウハウが求められる¹⁾。これら陶器原型および石膏型の基礎的な設計手法はもとより、碗などの回転体形状における図面および写真からの3Dモデリング手法や、特に原型加工装置での切削加工における特性として、加工する形状とエンドミル形状との関係、割型の場合の噛み合わせ凸凹面に対するモデリングデータと加工結果の整合性を踏まえ、機械ロクロおよび鋳込み成型用石膏型形状についての設計プロセスの検証を行った。

2-3 原型加工装置による石膏型加工プロセス

3D-CADにてモデリングした型形状を原型加工装置で切削加工するため、ワークとしての石膏ブロックの準備から加工テーブル上への固定方法、最適なエンドミルの選別や加工エリアの指定・切削パス出しといったCAM

による工程設計など、加工時間・精度・作業効率に関わるそれぞれについて、テストピース用石膏型および容器試作のための鋳込み用石膏型の切削加工試験を実施することで、最適な加工プロセスを目指した検証を行った。

2-4 実証試験としての泡盛容器を想定した試作

デジタルデザイン技術による陶器生産を実証するため、泡盛容器を想定した形状（3種）について、成形法としては三ツ割石膏型の鋳込み成形とし、型の設計・加工プロセスおよび鋳込み性の検証のための試作を行った。

試作に使用した鋳込み土（泥漿）については、県内原土を使用した様々な配合で肉付き、脱型性、色味を検証した結果、最もバランスの良かった石川原土と為又原土に貫入土をそれぞれ等量で混練したもの（練り土）に、ケイ酸ソーダを0.3%と水分を適宜調整したものを使用した。仕上げ方法については、酸化・還元それぞれで焼成し、無釉2種、釉薬3色の計5種ずつを試作した。

3 実験結果および考察

3-1 原型および石膏の型設計・加工のための条件整備

テストピースの計測結果と収縮率を表1に示す。試料全体の収縮率を焼成方法の違いで見ると、直径においては酸化焼成（平均14.0%）より還元焼成（平均13.6%）の方がやや収縮率は低いのに対し、高さにおいては還元焼成（平均29.9%）の方が酸化焼成（平均23.0%）より収縮（ダレ）率が大きくなっている。

形状の違いで見ると、R（曲率）の変化別では、直線で立ち上がっているものより、緩やかな曲線の方がダレやすく、立ち上がり角度別では、フラット形状および立

表1 テストピースの計測結果と収縮（ダレ）率（※収縮(ダレ)率=原型寸法/(原型寸法-焼成後寸法)×100)

	原型寸法(mm)	Rの変化						立ち上がり角度の変化							
		ストレート		R70		R35		フラット		5°		10°		20°	
		直径	高さ	直径	高さ	直径	高さ	直径	高さ	直径	高さ	直径	高さ	直径	高さ
酸化焼成	計測値(mm)	140.0	35.1	138.0	31.2	139.0	31.3	145.0	8.5	144.0	8.8	144.0	16.0	140.0	20.8
		140.0	34.5	139.0	32.0	139.0	32.3	146.0	8.5	145.0	12.2	145.0	15.2	141.0	22.2
		142.0	34.7	139.0	31.4	140.0	31.2	146.0	10.5	145.0	10.7	145.0	15.2	141.0	22.2
	平均値(mm)	140.7	34.8	138.7	31.5	139.3	31.6	145.7	9.2	144.7	10.6	144.7	15.5	140.7	21.7
	収縮(ダレ)率(%)	13.7	16.2	14.0	22.8	13.2	20.4	14.3	27.9	14.5	34.9	13.9	21.4	14.0	17.6
還元焼成	計測値(mm)	139.0	35.1	138.0	30.3	138.0	30.8	146.0	7.5	145.0	8.6	145.0	11.1	142.0	20.3
		141.0	34.3	140.0	29.9	140.0	31.3	147.0	7.5	145.0	8.5	145.0	15.2	143.0	20.9
		142.0	35.6	139.0	30.2	139.0	30.7	147.0	6.2	145.0	11.3	146.0	12.2	143.0	18.5
	平均値(mm)	140.7	35.0	139.0	30.1	139.0	31.0	146.7	7.0	145.0	9.5	145.3	12.9	142.7	19.9
	収縮(ダレ)率(%)	13.7	15.7	13.8	26.1	13.4	22.0	13.7	44.5	14.3	41.5	13.5	34.7	12.8	24.7

ち上がり5°のものについては、特に還元焼成時においてダレと湾曲との変形が著しく、角度が上がっていく毎に変形は小さくなっている。

熱ダレの影響が大きかった形状については、総じて、縁部が波打つなどダレの生じ方が不均一であった。これについてはロクロ成形時の土のしまり具合や、素地乾燥条件（気流や温度など）の微妙な変化などが考えられる。このため、3D-CAD（モデリング）データ作成の際の変形予測技術とするには、収縮率は有効であるが、ダレについては定量的予測は困難であると考えられる。

3-2 3D-CADによる陶器原型及び石膏型設計プロセス

3D-CADによる設計において、ロクロ成形するような同心円の回転形状をモデリングする際は、中心から片側の断面形状を回転させることでモデリングできるため、最も容易である。また、図5に示すように概ねの直径が解れば、写真から曲線形状をトレースして回転断面とし、図6のようにモデリングすることも可能である。

次に、設計した形状を基に、図7に示すように断面形状外側の線は石膏型の表面形状のデータとして、内側の線は挽きゴテの形状データとしてモデリングした。



図5 写真からの形状トレース

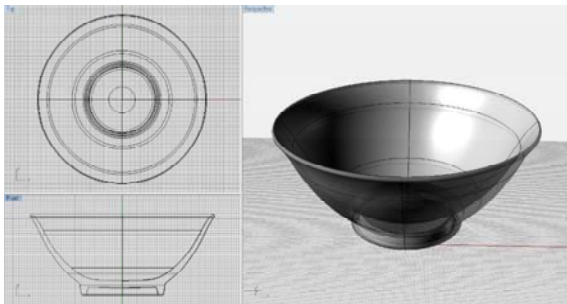


図6 器形状のモデリング

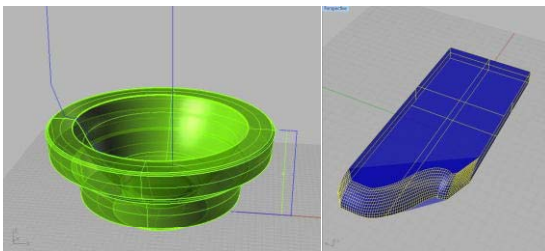
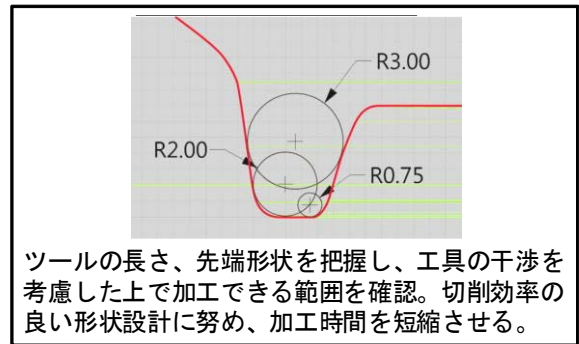


図7 型およびゴテのモデリング

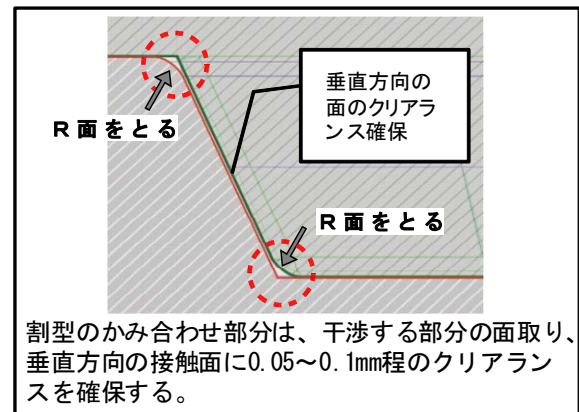
このほか、鑄込成形など回転体以外の形状においてモデリングする場合、複雑なパターン形状や左右対称となる形状、幾何形体など、3D-CADの特性を活かした正確な表現が可能となる。しかし、陶器として成形される条件（型抜け性や成形性）や熱影響（ダレや収縮）などに配慮した設計を行う必要があるため、デザインに影響を及ぼさない程度に鋭角な角やくぼみにはR面を付け、使用する坯土に応じた収縮率（機械ロクロおよび打ち込み用坯土=13%、鑄込み土（泥漿）=15%）を換算してモデリングした。

また、陶器形状の設計と同時に石膏型もモデリングするが、この場合は原型加工装置による切削加工特性を念頭に置いた形状設計をする必要がある。図8に示すように、可能な限りエンドミル（ツール）の突き出し長に関わる切削深さ、先端形状に合わせたR面とする。ツメなど凸凹の噛み合わせ部分については、内角がミル先端形状に依存するため、図9のように外角が干渉しないようにR面（R1mm程度）をとり、垂直方向の双方接触面については、面同士の間には微細な埃が噛むなどの干渉が生じるため、0.05～0.1mm程度のクリアランスを確保（※佐賀県窯業技術センターでの調査による）することで、分割面がしっかり密着するようにした⁴⁾。



ツールの長さ、先端形状を把握し、工具の干渉を考慮した上で加工できる範囲を確認。切削効率の良い形状設計に努め、加工時間を短縮させる。

図8 ツール形状に合わせた設計



割型のかみ合わせ部分は、干渉する部分の面取り、垂直方向の接触面に0.05～0.1mm程のクリアランスを確保する。

図9 ツメなど噛み合わせ部分の設計

3-3 原型加工装置による石膏型加工プロセス

石膏型を原型加工装置で製作するには、まず石膏ブロックを用意する必要がある。装置の作業領域内において様々なサイズに対応できるように、下記の5つのサイズに組み替え可能なアクリル板の型枠を作成した。その概観を図10に示す。また、ロクロなど円筒形は塩ビキャップを利用し、図11に示すように石膏ブロックをそれぞれ複数個作成した。

□ 直方形5サイズ（射込み用その他）

小：w200×d200×h130mm

中：w300×d300×h120mm、w400×d200×h100mm

大：w400×d300×h100mm、w400×d400×h100mm

○ 円柱形（機械ロクロ用）：φ200×h130mm

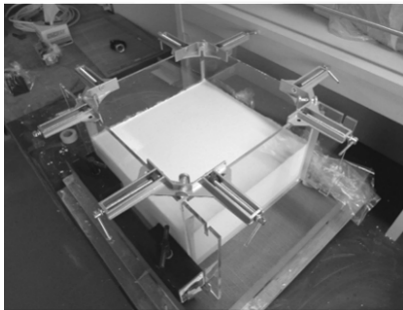


図10 型枠(左)と作成した石膏ブロック(右)

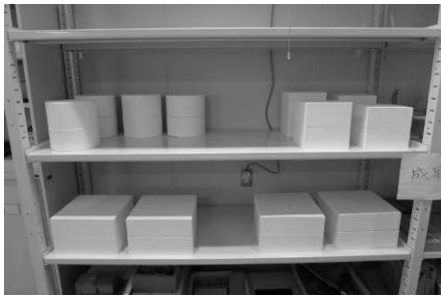


図11 型枠(左)と作成した石膏ブロック(右)

2-1で示した収縮や熱ダレ計測のテストピースに使用する石膏型作製を兼ね、原型加工装置による切削工程の検討を繰り返し行った結果、加工時間や仕上がり精度など、最も加工効率の良かった工程（8工程）を図12に示す。それぞれの工程は以下の通りである。

- ①石膏ブロックを加工テーブル上に粘着テープで固定
- ②基準面作りのための面出し
- ③位置決め・固定ピン穴開け
- ④加工テーブル上に固定ピン穴開け
- ⑤（裏返す）ピン穴を軸に加工テーブル上に固定し必要な厚みまで面出し
- ⑥型表面（器物形状側）の加工
- ⑦固定用ピン穴開け（裏返す）
- ⑧機械ロクロに固定する側の形状（シッタに合わせたダブ形状）に仕上げて完成

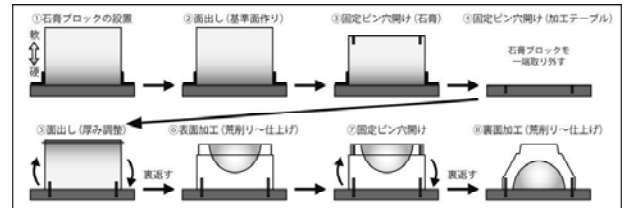


図12 原型加工装置による石膏型加工プロセス

実際の加工状況について、図13、図14に示す。加工テーブルにはケミカルウッドを設置することで、石膏ブロックを固定するピン穴を開けたり、配置の目安となる50mm升のグリッド線を入れるなどの後加工ができるようにした。固定用のピンはφ5mmのステンレス棒を15mmほどの長さで切ったものを使用している³⁾⁴⁾。

エンドミル（ツール）については、工程毎のツールの持ち替えを自動で行うATC（Automatic Tools Changer）のスロット数が4つであるため、加工試験を繰り返し行



図13 加工状況（機械ロクロ用石膏型と木ゴテ）

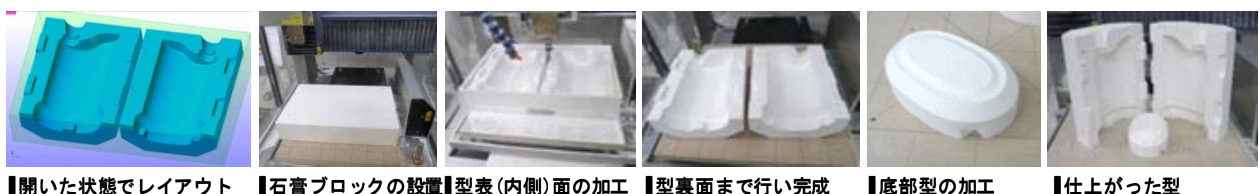


図14 加工状況（鋳込み用石膏型）

った結果、面出しや荒削りといった主に切削量の多い加工から、曲面の仕上げや内角などの細部の加工までを許容するように、以下の4種を選定した。

- ①BALL endmill (シャンク・刃径φ6-R3)
- ② " (シャンク径φ6, 刃径φ4-R2)
- ③ " (シャンク径φ4, 刃径φ1-R0.5)
- ④RADIUS endmill (シャンク・刃径φ10-R0.5)

また、加工プロセスを最適化するためには、下記項目に留意することが重要となる。

- ・型に最低限必要なサイズの石膏ブロックを用意しフライス工程を省力化する
- ・刃物毎の加工速度を把握して荒削りや仕上げなどの工程毎に最適なエンドミル(ツール)を選択する
- ・刃物の動線(作業パス)が必要最小限になるように配慮することによるパス計算量の縮小
- ・高精度が求められる部分(素地成型に必要な部分以外)は可能な限り簡略化する
- ・人手が入る工程を極力減らすよう表裏それぞれを加工する際の反転作業を最小限にする

3-4 実証試験としての泡盛容器を想定した試作

試作にあたり図15のコンセプトのもと、当該事業コーディネーターの神戸憲治氏により、数点のデザイン案を提示いただき、その中から、図16に示す手作業では表現が難しい形状でキャラクターの異なる泡盛容器3種をセレクトし製作した。

ターゲット 空港売店で土産を購入する30代以上の(普段、泡盛を購入しない)女性客

ニーズ

1. お世話になっている人へ贈る”ちょっとイイもの”(見た目、内容、価格)
2. 沖縄を感じさせる物産(この場合、泡盛&沖縄陶器)である
3. 土産として程良いサイズ・重量であり、かつ携行性に優れたパッケージ

概要

開発テーマ=「空港の売店で販売される古酒入りの泡盛瓶」(換物)
 容量・サイズ=2合(約360ml)瓶
 仕様=陶器、軸がけ、開封後の継続使用に耐えるデザイン
 価格設定=3,000円以上(お酒より瓶の魅力を強烈にアピールできるもの)

図15 泡盛容器のデザインコンセプト

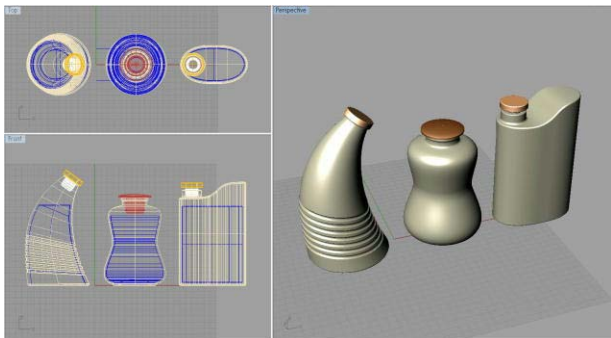


図16 デザインスケッチを基に3D-CAD化

設計の際は、焼成後の収縮率(15%)を換算し、内容量(2合)および既製のシリコン栓に合わせた注ぎ口にサイズ調整した。石膏型の設計については、内部形状より左右外側に35mm前後、底部は30mm程度、鑄込み口となる上部は35~40mm程度とし、底部分割方法は鑄込み・廃泥作業のしやすい左右割型に抱き込まれる形とした。型の分割線を決めるポイントとしては、石膏型の角が90°より鋭角にならないようにした。

原型加工装置による工程については、エンドミルはRADIUS φ10-R0.5を使用した荒削りを1~4工程、R0.5~R3のボールエンドミルを使用した仕上げを20工程で組み、合計21~24工程で50~60時間かけて切削加工した。

原型加工装置により加工された石膏型は、すでに硬化した石膏ブロックから削り出されるため、石膏の硬化時に起こる熱膨張の影響が無く、よって型のズレや歪みが出にくいため、脱型・成形性は非常に良好である。このため、図17のように割り線(バリ)が少なく、仕上げ処理などの後加工が簡素化できた⁹⁾。

焼成試作した泡盛容器については、図18に示す。



図17 型から取り出された白地



図18 試作した泡盛容器

4 まとめ

3D-CADでの設計段階において、収縮の予測や容量の確認が行えるため、焼成後のサイズ(注ぎ口と栓との合わせ込みや内容量など)を見越した型の設計・製造が可能となるほか、原型モデルを製作せず、ダイレクトに石

膏型を製造できるため、試作やデザインの変更などにも迅速に対応できる。

原型加工装置については、原型および石膏型の切削加工からコテなどの治具の加工まで許容することで、デザインから加工（生産）までの緻密な連携が可能となる。また、機械加工により石膏ブロックから削り出される高精度な石膏型のため、脱型性向上やバリ処理の簡素化も図られるとともに、これまでは成形が難しかった精巧な形状表現など、新製品開発の促進にもつながる。

このように、器物形状の検討から加工データの製作、原型加工装置による石膏型の加工や設計ノウハウの蓄積において、3D-CAD/CAM装置を活用したデジタルデザイン技術が非常に有効であることが確認できた。

おわりに

本研究は、「デジタルデザイン技術による陶器の設計・生産（多様な陶器生産システム構築事業）」（2009技009）で行ったものである。

3D-CADでの陶器デザインおよびモデリングの支援と、沖縄陶器の形状資料としてのデータベースといった活用を目的に、沖縄県埋蔵文化財センターに収蔵されている発掘された陶器の図面を中心に、合計152点の陶器形状モデリングデータ集積を行った。集積された形状については、当センターのホームページで「沖縄陶器形状デジタルデータ」としてJPEG画像にて公開している。

■沖縄県工業技術センターHPアドレス

<http://www.pref.okinawa.jp/site/shoko/kogyo/index.html>

※頁内「沖縄陶器形状デジタルデータ」にてリンク

謝辞

本研究を実施するにあたり、陶磁器デジタルデザイン技術については佐賀県窯業技術センター陶磁器部デザイン担当係長 副島潔 氏、石膏型による陶器製作技術については糸満工芸陶苑 佐久間栄 氏、泡盛容器のデザインについては神戸デザイン（当該事業コーディネーター）神戸憲治 氏、三氏には多大なるご協力とご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)松本誠一、陶通研究所：『セラミックス造形の基礎－デザインと型製作の技法－』，日刊工業新聞社（1991）
- 2)副島潔：『CAD/CAM技術を利用した型制作の自動化』，佐賀県窯業技術センター（平成17年度）
- 3)副島潔：『陶磁器にけるデジタルデザインプロセスの導入に関する研究』，佐賀県窯業技術センター（平成20，21年度）
- 4)副島潔：『デジタルツールによる陶磁器デザインプロセスの改革に関する研究』，九州大学（2010）
- 5)Rhincerosバージョン4.0ユーザーガイド，Training Manual Level 1 Version 4.0

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターに

ご連絡ください。