

平成 25 年度
慶應義塾大学
学士論文

「デジタルクラフトの実践—レーザーカッターを用いた陶器づくり」

総合政策学部総合政策学科
藤本麻子

指導教員 田中浩也准教授

2014 年 1 月

「デジタルクラフトの実践—レーザーカッターを用いた陶器づくり」

論文要旨

オープンデザインの潮流に乗って工作機械は一般市民にも手の届く存在となり、誰もがアイデアがカタチになる感動をその場で味わえるような環境が広がりを見せている。本研究は、デジタルファブリケーションとクラフトを組み合わせた「デジタルクラフト」の実践として、レーザーカッターを利用して陶芸における工作機械と手作業との組み合わせ方を模索し、ものづくりが日常化した近未来に貢献できることを願いそれらを集約したものである。

慶應義塾大学 総合政策学部
藤本麻子

目次

1. 序論

- 1.1 研究の背景・動機
- 1.2 研究の目的

2. デジタルクラフト

- 2.1 デジタルファブリケーション
 - 2.1.1 メイカームーブメントとファブラボ
 - 2.1.2 デジタルファブリケーションとハンドクラフト
- 2.2 デジタルクラフト
- 2.3 関連研究
 - 2.3.1 伝統工芸へのデジタル工作機械の介入
 - 2.3.2 ファブラボ鎌倉での職人とのコラボレーション
 - 2.3.3 陶器の装飾用顔料

3. 陶芸

- 3.1 器の歴史
 - 3.1.1 土器
 - 3.1.2 陶器
 - 3.1.3 磁器
 - 3.1.4 炉器（せっき）
- 3.2 制作工程
 - 3.2.1 土づくり
 - 3.2.2 土練り
 - 3.2.3 成形・装飾
 - 3.2.4 乾燥・素焼き
 - 3.2.5 絵付け
 - 3.2.6 施釉
 - 3.2.7 本焼き

4. レーザーカッターを用いた陶器の試作と実験

- 4.1 試作環境
 - 4.1.1 材料
 - 4.1.1.1 陶土

4.1.1.2 釉薬

4.1.2 小道具

4.1.3 機材

4.2 試作

4.1.1 1次試作

4.1.2 2次試作

4.1.3 3次試作

4.1.4 4次試作

4.1.5 5次試作

4.1.6 6次試作

5. レーザーカッターを用いた陶器づくりのレシピ

5.1 用意するもの

5.1.1 材料

5.1.2 道具

5.1.3 機材

5.1.4 環境

5.1.5 デザイン

5.2 ①土練り

5.3 ②成形

5.3.1 手びねり

5.3.2 ろくろ成形

5.4 ③削る～乾燥させる～素焼きする

5.5 ④素焼き後の素地にレーザーを照射する

5.6 ⑤施釉する

5.7 ⑥施釉後の釉薬上にレーザーを照射する

5.8 ⑦本焼きする

6. 結論

6.1 考察と展望

謝辞

参考・引用資料

1. 序論

概要

本研究の背景・目的について示す。

1.1 研究の背景・動機

3D プリンター、レーザーカッター、ミリングマシンなど様々な工作機械に恵まれた研究室に身を置き、工作機械によるものづくり＝「デジタルファブリケーション」とそれが広がった近未来に好奇心を抱いたのと同時に、手作業によるものづくり＝「(ハンド) クラフト」の魅力にも惹かれていったのは、もともとクラフトを趣味としていた私にとってはごく自然な流れだった。ファブラボ鎌倉のマスターである渡辺ゆうかさんの言葉を借りるならば、クラフトのよさは“素材の切り出しから、切り抜き、穴あけ、焼き印といった加工、製品としての仕上げまでをすべて自分の手元で行えること”にある。^[01] これは工場での大量生産では味わうことのできない、“自分でものをつくる”ことに共通した魅力と言える。一見相反するもののようなデジタルファブリケーションとクラフトだが、機械でつくるのか手で作るのかという違いはここではさほど大きな問題ではない。どちらも“自分でものをつくる”ということに関しては何ら変わりなく、前述したクラフトの魅力はデジタルファブリケーションにも適用される。

私が学部3年を終えた頃に出会ったのが「デジタルクラフト」という概念だった。機械のコンピューター制御によるデジタルファブリケーションと、古くから伝承されてきたクラフト（趣味のレベルから職人による伝統工芸に至るまで、広義だがここではその全てが含まれる）。この2つを組み合わせたデジタルクラフトは、両者の長所を活かしたハイブリッドなものづくりとして近年注目されている。ファブラボ^[02]をはじめ、一般市民が工作機械に手軽にアクセスできる環境は徐々にその数を増しており、ものづくりはより手軽に生活の中に取り入れられ始めている。そのような近未来を想像する中で、私はデジタルクラフトを通して伝統工芸の技術を誰もが身近に生活の中で感じられるよう、ものづくりの日常化に何か貢献したいという想いを抱いた。

1.2 研究の目的

デジタルクラフトというテーマの中で私が題材として選んだのは、切削・焼成が同時に行うことのできる「レーザーカッター」と、クラフトの中でも職人色が強いと思われるであろう「陶芸」という組み合わせである。

陶器はその土地の文化や入手可能な素材によって実に多様な形状や製造方法が存在する

が、どの家庭にも置いてある生活必需品だという点では古今東西に共通している。それでは近未来の一般家庭を思い浮かべたとき、ほぼあらゆるものが作れる制作環境が身近にあったら「自分で食器が作りたい」という想いを抱く人が出てくるのはごく自然な流れではないだろうか。

陶芸を素人から遠ざけている原因はいくつか挙げられるが、家庭用オーブンで焼成が可能なオープン陶土[03]は「素材」という切り口から「所要時間」という課題への解決案を提示した。そこで私は、「作り方」という切り口から「技術の習得や必要機材・道具」という障壁への打開策を探っていきたいと考え、陶芸と組み合わせる技術としてレーザーカッターを選択した。ものづくりが日常化する近未来においては、ものの設計・製造・利用がその場で行うことのできる環境へのアクセス権が広がることで、オープン陶土のように簡易的な材料を使用する以外にも多様な選択肢が見えてくるはずだ。本研究はデジタルクラフトの実践として、レーザーカッターを利用して陶芸における工作機械と手作業との組み合わせをレシピ形式にまとめ、これまで職人にしか成し得なかった技法を広く一般市民にも手の届くものとして伝え、また手軽に陶芸に親しんでもらえるきっかけとなることを目指している。

2. デジタルクラフト

概要

本項では、本研究の前提であるデジタル工作機械を使用した「デジタルファブリケーション」と、またデジタルファブリケーションと古くから伝承されてきたクラフトとを掛け合わせた「デジタルクラフト」というテーマについて整理する。

2.1 デジタルファブリケーション

デジタルファブリケーションとは、コンピューター制御による工作機械を用いた素材加工・生成の技術の総称である。レーザーカッター、CNC ミリングマシン、3D プリンターなどといったこのようなデジタル機械のデスクトップ化・パーソナル化は、DIY 精神であるものづくりをしてきたメイカー層だけでなく、これまでものづくりにあまり縁のなかった人々をも巻き込み、近年のメイカームーブメントを牽引したと言える。[04] これまで上記のような工作機械は限られた環境下で一定層の人間しか利用することができず、かつ仕事ではなく遊びの道具として使える場所はそう多くない。[05] しかしハード・ソフトのオープン化の潮流に乗ってそれらは一般市民にも手の届く存在となり、誰もがアイデアがカタチになる感動をその場で味わえる環境は少しずつ拡大し始めた。

ものづくりの楽しさを共有する「場」もオープンデザインの流れの中で門戸が開かれたものの1つだ。国内には現在6つのファブラボ（鎌倉、筑波、渋谷、北越谷、仙台、関内）に加え、私自身が知る限り渋谷近辺だけでも4つの工作機械を備えた施設（FabCafe[06]、&Fab[07]、しぶや図工室[08]、co-factory[09]）が存在している。Fab ブームの広がりとともに後者のような工作機械を時間貸し・加工の代行を行う施設は増加し、また国内ではメディアの報道が集中したことでファブラボや3D プリンターは知名度を上げたが、その一辺倒な内容によって「Fab=3D プリンター」という単一のイメージが植え付けられてしまったようにも感じる。

しかし、実際にファブラボに足を運べばそれは偏見だということが容易に分かる。国外に目を向けると、100k ガレージ、TechShop、Hackerspace など他にも様々な形態や性格をもつ「工作機械をシェアする工房」が存在している[10] が、そこにあるのは機械による全自動作業の無機質な制作現場ではなく、地域の人から世界中にまで幅広く開かれた門戸へと集う「人」と、それぞれが持ち寄るパーソナルな「ものがたり」、そしてその上にある「ものづくり」だ。これらのような工房は誰かと一緒にものづくりをする＝「Do It With Others」の精神がもたらす楽しさや喜びにあふれ、日々クリエイティブなものづくりが行われている。

る。

2.2 デジタルクラフト

デジタルファブリケーションのもたらす利点の 1 つとして、道具の設計・製造・利用をすべて近場で行うことによるスピード感が挙げられる。データの設計から既存物のカスタマイズに至るまでそれらはコンピューター上で容易に済ませることが可能で、アイデアが浮かんだらその場ですぐにプロトタイプが作り出せる。たとえ 1 度目の出来が悪くても、またすぐにデータを微調整してやり直せばいい。

これは、知識・技術の習得に長い歳月を要し、そして生み出される 1 つ 1 つの作品が唯一無二であるクラフトとは対極の世界だ。クラフトにおいて作品の出来栄を左右する「作業時間」と「職人の経験値」は、即時性や利便性が追求されてきた現代社会の中で伝統工芸の後継者が育ちにくい原因ともなり、またその衰退を助長してしまっているように見える。しかし、素人の場合は精密さこそ機械製造には劣るかもしれないが、作り手・素材・環境などの違いが生む不揃いな作品には、手づくりの「あたたかみ」や「味」といった私たちを惹きつける何かが宿っている。これはクラフトのもつ大きな魅力だ。デジタル処理による機械での製造は、その利点である作品の「精密さ」自体が人肌からの距離を感じさせてしまう要素として時に弱点にもなりうる。

機械の全自動作業によるデジタルファブリケーションと、人の手作業によるクラフト。精密さ・所要時間・触知性など両極に位置する特徴をもつこの 2 つの手法を組み合わせた「デジタルクラフト」は、両者の長所を活かしたハイブリッドな新しいもののつくりにかたとしてその単語とともに近年確立された。デジタルクラフトは決して交わることはないそれぞれの製造方法・技術を融合させ、触知性・正確さ・作業効率などといった互いの課題点を解消し、また機械に疎遠な職人にも手仕事の苦手なプログラマーにも新たなものづくりの可能性を提案する。もちろんその対象はものづくりのプロフェッショナルに留まらず、これから一層盛り上がりを見せるであろうメイカームーブメントの最中にいる一般市民に対しても同様のことが言える。あらゆる製造方法・技術を応用したデジタルクラフトは、自動化・最適化という近年の製造業の流行りに取って代わり、更には伝統工芸の技術伝承にも一役を買う存在となるだろう。[11]

2.2 関連研究

2.2.1 伝統工芸へのデジタル工作機械の介入

T. Vibrandt らによる“Digitally Interpreting Traditional Folk Crafts”(2011)

[12]の中で、デジタルクラフトの意義として以下の 3 つが挙げられている。

1. 現存する伝統工芸（特に文章として書き残しにくいもの）の技術を保護・継承する。

2. 伝統工芸品に新しいアプローチを提供する。
3. デSKTOP工作機械を利用することにより低コストで無害な伝統工芸の制作手段を実現し、若い世代の技術者に伝統工芸への門戸を開く。

伝統工芸の事例としては日本の漆器とノルウェーの木彫りを紹介しており、前者はデザインした 3D モデルのデータをウェブサイト上に公開し、後者はスケールを縮小したものをミリングマシンで切削、そしてデザイン学校でワークショップを実施した。

【図 1】 ノルウェーのデザイン学校でのワークショップの様子と生徒のたち作品



2.3.2 ファブラボ鎌倉での職人とのコラボレーション

元酒蔵を再構築してスタートしたファブラボ鎌倉[13]。立派な佇まいの建物の中でデジタル工作機械が音を鳴らしているその様子は、古いものと新しいものが混在する町・鎌倉そのものを象徴しているようだ。伝統を活かし続け、そして次世代につないでいくことを目的に「伝統と最新技術の融合」に取り組んでいる[14]ファブラボ鎌倉には、近辺に拠点を構える職人さんもよく訪れる。『Fab に何が可能か』田中浩也・門田和雄ら（2013）[01]の中では、イヌイットファニチュア (inu it furniture) [15]、クルスカ (KULUSKA) [16]とのコラボレーションから生まれたプロダクトが紹介されている。

イヌイットファニチュアと共同プロジェクトでは、時計の文字盤をレーザー加工で 54 種類つくったオリジナル時計「clock 54」[17]を制作した。従来の木工の手法で同様のプロダクトを制作する場合には、まず 54 種類の金型が必要となり、予算・時間的なコストが大幅にかかってしまう。しかし工作機械にアクセスできる環境下であれば、データさえあれば低コストで多品種少量生産が実現し、また買い手の反応を受けてすぐさま改善したものを提供することも容易にできるようになる。

【図2】 オンラインショップで販売中の clock54

(左 : 11: number W (チェリー) / 右 : 11: number W (ブラックウォルナット))



そしてクルスカとの共同プロジェクトでは、誰でも簡単に作れる「本革のスリッパ」のキットを手掛けた。あえて革をレーザーで切りきらず、切るべき部分を点線として残るようレーザー加工したこのキットは、完成品の質も保ちながら作り手が入り込める余白も確保されており、“自分で作れるようになったモノ”であふれた、ものづくりがより日常化する近未来の生活に少し足を踏み入れた気分になる。またこのスリッパはデータがオープンアクセスできるようになっており、今夏にはなんと遠く海を越えたアフリカの地でカスタマイズされ作られたというニュースがファブラボ鎌倉を賑わせた。[18]

【図3】 スリッパキット (左: 鎌倉で作られたもの / 右: ケニアでカスタマイズされたもの)



2.3.3 陶器の装飾用顔料

最後に、ここでは私と同じく陶芸にフォーカスした研究事例を紹介する。Kirstie van Noort と Rogier Arents による “Color Collision” (2012)[19]は、PH 値の変化に伴い変色する赤レタスの顔料の性質を利用した研究である。この顔料を陶器に適用し、酸化／アルカリ水に浸けることで着色するものだ。

【図 4】 着色の様子をおさめた映像



(<http://vimeo.com/52476935>)

3. 陶芸

概要

本項では陶芸の歴史的経緯を確認し、その制作工程や技術について整理する。なお以下の記述については、『陶磁』小松誠（2009）[20]、『やきもの入門』高橋伸幸（2012）[21]、日本セラミック協会ウェブサイト[22]、有田やきものアカデミー[23]を参考としている。

3.1 器の起源

【図 5】 土器



3.1.1 土器

土器とはいわば素焼き状態の焼き物を指す。窯を使わず、粘土を野焼きの状態で 700～900℃の温度で 1 度だけ焼き、釉薬はかけないが彩色されている。低温で焼成したものであるため焼き締りが悪く、また吸水性が非常に強い。そのため機械的強度は弱い。歴史的には陶磁器の前身にあたる。

土器の起源については諸説あるが、古代の人々は山火事や焚火の後に雨に打たれても水に溶けず残っている土を見て、火による土の性質変化に気付いたのではないかとされている。土器は人類が初めて化学変化を生活の道具に取り入れた事例だ。世界最古の土器としては、160,000 年前の日本の縄文土器が見つかっている。

【図 6】 陶器



3.1.2 陶器

別名「土もの」「土焼き」ともいい、原料の粘土で成形して器に釉薬をかけ、窯を使って 1100～1200℃で焼成する。土器ほどではないが吸水性があり、透光性はない。厚手で重く、指で軽くはじくと鈍い音がする。日本では瀬戸焼・伊賀焼・大谷焼が陶器に分類される。

【図 7】 磁器



3.1.3 磁器

別名「石もの」「石焼き」ともいわれる。陶石を粉にして、水を加えて粘土状にして使う。成形後に釉薬をかけ、窯で 1300～1400℃の高温焼成をする。表面がガラス質に覆われて吸水性はなく、光をかざすとうっすら透けて見える半透光性のものもある。また陶磁器の中では最も硬く、軽く弾くとガラスにも近い金属音がする。陶器よりも硬く薄手。日本の主な磁器としては肥前磁器(伊万里焼)・九谷焼などがある。

3.1.4 炉器（せっき）

別名「焼き締め」ともいい、吸水性が全く無くなるまで焼き締められたものを指す。粘土で成形し、窯を使って 1200～1300℃で焼成する。土器と陶器の中間的性質を示す。通常釉薬はかけないが、焼成において “自然釉”（燃料の灰が溶けてかかったもの）がかかるものがある。透光性はなく、軽く打つと澄んだ音がする。広い意味で炉器も陶器に含まれる場合もある。日本では備前焼・常滑焼などが炆器に分類される。

3.2 制作工程

3.2.1 土づくり

採集した土をそのまま陶芸に使えることはごく稀で、精製して制作に適した状態にする必要がある。代表的な製法に「はたき」と「水漉（すいひ）」がある。はたきとは、採集した土を乾燥させて木槌などで粉碎し、ふるいにかけて不純物を除き、水を加えて練る方法。水漉とは、水を利用して不純物を取り除く方法である。採集し乾燥させた土を粉碎後に水に沈め、数日間そのままにして水に溶けた土をよくかき混ぜる。それを放置しておくと重い不純物は沈み、軽いものは上水に浮いてくるので、沈殿した上部のきめの細かい土から底に近いきめの粗いまでを取り分ける。

3.2.2 土練り

代表的な土の混ぜ方としては「荒練り」と「菊練り」がある。荒練りは粘土の硬さや質を均一にしたり、数種類の粘土を混ぜ合わせる時に用いる練りである。荒練りができたら、さらに粘土を均質に練り、空気を抜いて成形しやすい状態にするために菊練りを行う。よく菊練りされた粘土はろくろ成形や手びねりなどもしやすい。

3.2.3 成形・装飾

粘土から器の形を作る。自分の手で作る「手びねり」には紐づくり、たたらづくり、玉づくりなどの技法がある。ろくろで成形する場合は、ろくろを回しながら粘土を押しつぶして引き上げる「土殺し」の作業を行ってから成型を始める。

成形した器が生乾きの段階で行う加工で、高台の削り出し、器の表面に型押し文様をつける「印花」、彫刻をする「彫文」、白化粧などがある。

3.2.4 乾燥・素焼き

成形した器を10日ほどかけてゆっくり乾かし、水分を抜く。700～800℃の低温で素焼きすることで素地に強度と吸水性が生まれ、絵付けや施釉をしやすい状態になる。

3.2.5 絵付け

絵付けの技術的手法には、高温で本焼きしても溶けない鉄や銅などで素焼きした素地に絵を描く「下絵付け」と、釉薬をかけて本焼きした後に釉上に多彩な色絵で加飾し低火度で焼き付ける「上絵付け」がある。

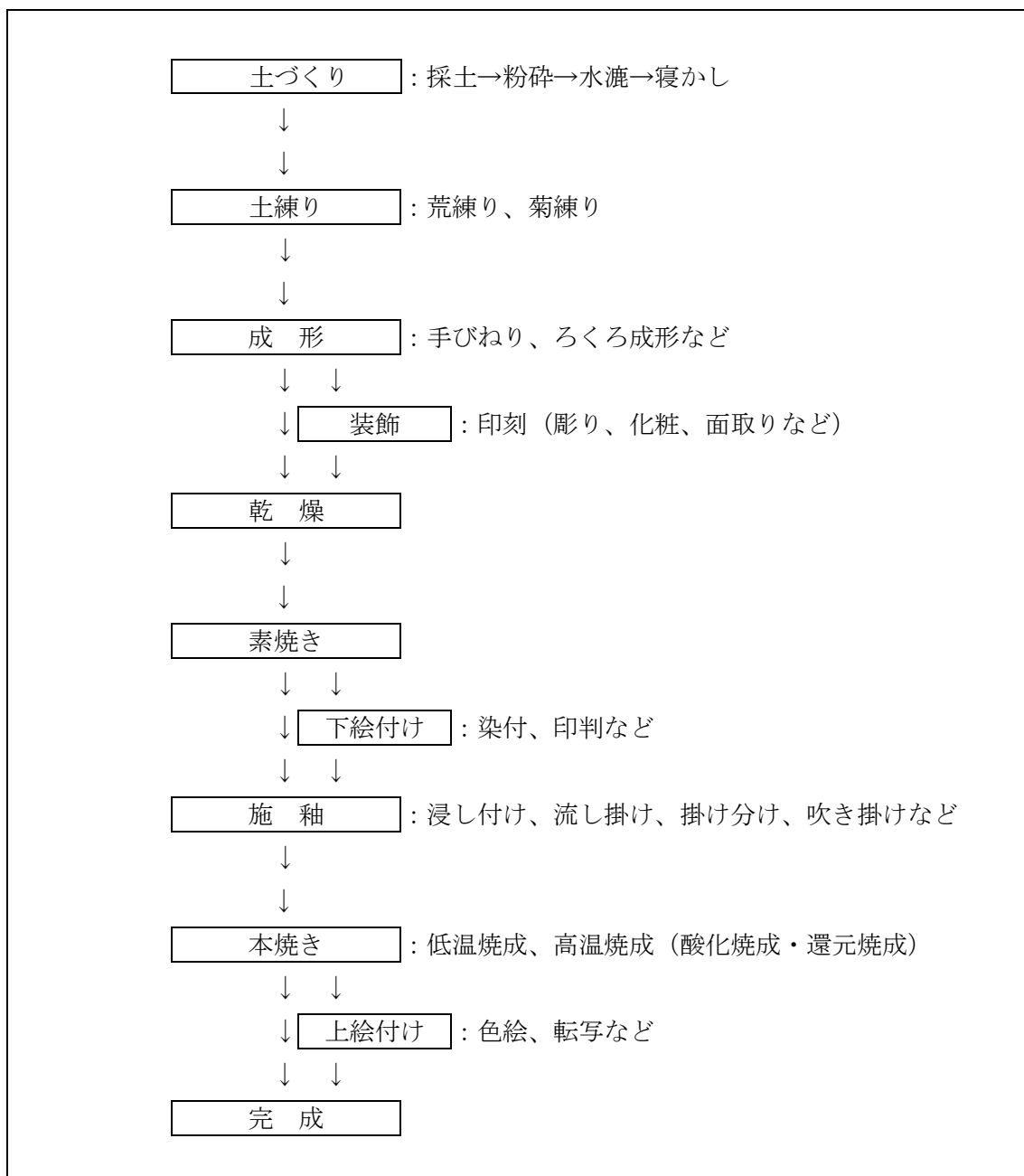
3.2.6 施釉

釉とは、陶磁器の素地の表面を覆うガラス質のものを指し、「釉薬」または「うわぐすり」とも言う。釉を施すことで水や油などの液体の吸収浸透を防ぎ、金属や木製品に比べて耐酸性に優れ腐食しない。器の耐久性・耐熱性を高めるだけでなく、装飾性をもたせることも釉の大きな役割の1つだ。施釉の手法には、釉薬の中に器をどっぷり浸す「浸し掛け」、柄杓を使い釉薬を器に流す「流し掛け」などがある。

3.2.7 本焼き

作陶の総仕上げ。1100～1300℃で数時間～数日間焼成し、表面の釉薬を焼き溶かし、ガラスの膜で覆い丈夫にする。

【図 8】制作の基本工程



4. レーザーカッターを用いた陶器の試作と実験

概要

陶芸従来制作工程にレーザーカッターの技術を組み合わせ、陶器の試作を行ってきた。その制作過程と結果をまとめ整理する。また、試作を重ねるにあたって使用した材料や機材についても記載した。

4.1 試作環境

4.1.1 材料

4.1.1.1 陶土

- ・信楽（しがらき）粘土（白系・並漉）

初心者からプロの作家まで幅広い陶芸ファンから支持されている粘土で、種類も豊富。粘りとコシがあり、作品を造りやすいのが特徴。焼成温度目安は 1230～1280℃、収縮率目安は 12.5～13.0%。

- ・オープン陶土（黒木節／エコの 2 種）

低温度（180 度以下）の焼成で実用強度が得られる特殊陶土。加熱することにより、繋ぎ材（ポリエチレン・コーンスターチ）が土の間に浸透して強度を出す。焼成目安は、160～180℃で約 30～60 分。

4.1.1.2 釉薬

- ・液体釉薬（長石釉（透明）／トルコ青釉の 2 種）

焼成温度目安は 1180～1250℃。

- ・液体釉薬（マロン釉）

焼成温度目安は 1200～1250℃。

- ・楽焼き色釉薬 A（無鉛）粉末（黄）

焼成温度目安は 850～880 度。

- ・オープン陶土用コート剤「Yu～」

オープン陶土にコート剤を塗ることにより、防水・防油となり食器等に使用できる。焼成温度目安は 100～120℃。

4.1.2 小道具

- ・ へら (No.37)
- ・ 薄刃カッター
- ・ 平線かきべら (No.7／No.13)
- ・ 線かきべら (No.3)
- ・ 仕上げ用なめし革
- ・ 切り針金
- ・ 仕上げごて
- ・ カンナ
- ・ 切り弓
- ・ 粘土用抜型

4.1.3 機材

- ・ 電子ろくろ (TP-250 型)

テーブル回転数は、50 ヘルツ 0～190 回転 (毎分) ／60 ヘルツ 0～230 回転 (毎分)。テーブルは左右両方向に回転させることができる。テーブル径は 300mm 軽合金製。ろくろ自体の寸法は幅 480×奥 575×高 450mm。

- ・ 電子窯 (らくらく窯 TMK-1)

家庭用の 100V 電源での使用が可能。昇温操作はダイヤル調整器で調節し、セットしたコーンの指定温度で自動的に焼成を終了する。最高温度は 1250℃、所要時間は約 1 日。窯出しの目安は、素焼き：2 度目の昇温から 1 時間半後／本焼き：2 度目の昇温から 2 時間半～3 時間半後。炉内寸法は幅 200×奥 200×高 200mm。

- ・ 電子窯 (Vulcan A-550)

最高温度は 1100℃、所要時間は約 2 時間。昇温操作はダイヤルで設定し、温度計で炉内の温度を目視できる。

- ・ レーザーカッター (Epilog Helix 60W)

加工エリアは横 610×縦 457 mm。使用素材や用途に合わせてスピード・パワー・周波数などの調節が可能である。スピードが速いほど彫りが深くなり、パワーが強いほど焼き色が濃くなる。また、以下でレーザーの出力値について記載する際には、 $\text{スピード}=\text{S}／\text{パワー}=\text{P}／\text{周波数}=\text{F}$ と略称を使用する。

- ・ 赤外線放射温度計 (AD-5616)

測定範囲は-60～+1500℃、最小表示は 0.1℃ (-60～+999.9℃)、1℃ (他の測定

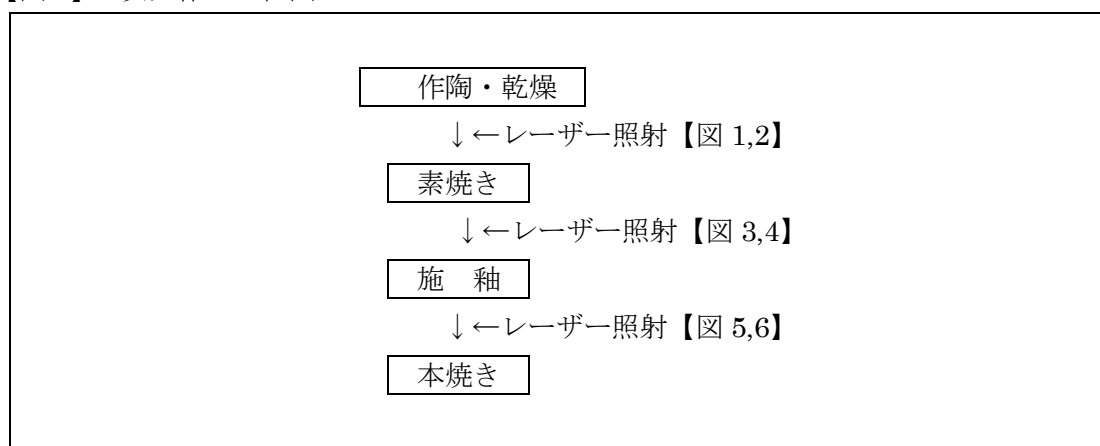
範囲)。最高・最低・平均温度・温度差分表示が可能で、連続測定機能付き。放射率は0.10～1.00まで、0.01きざみで設定（変更）可能。

4.2 試作

4.2.1 1次試作

陶芸の基本である以下の4つの工程の合間にレーザーを照射した。レーザー照射後はそれらを通常の工程に沿って最終的には電子窯で本焼きし、レーザーで切削した部分がどのような状態で焼き上がるのか完成品を検証した。

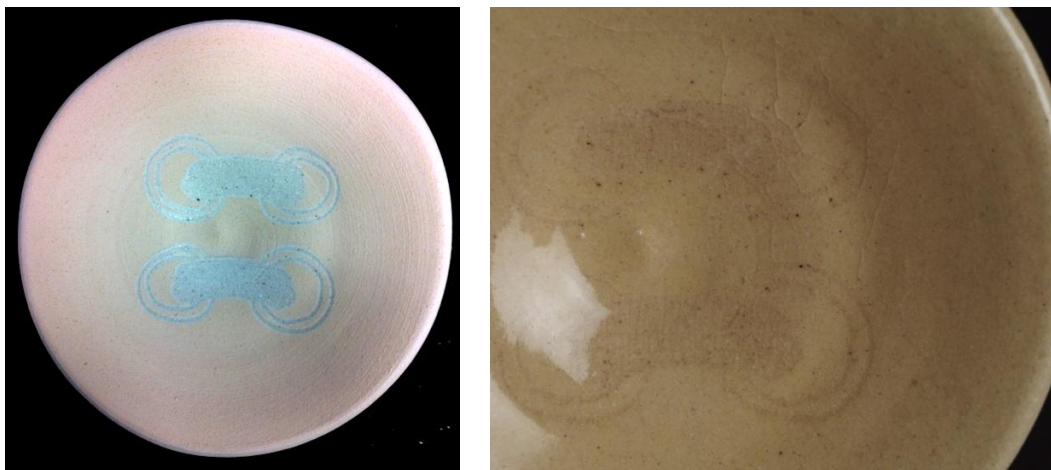
【図 9】 1次試作の工程図



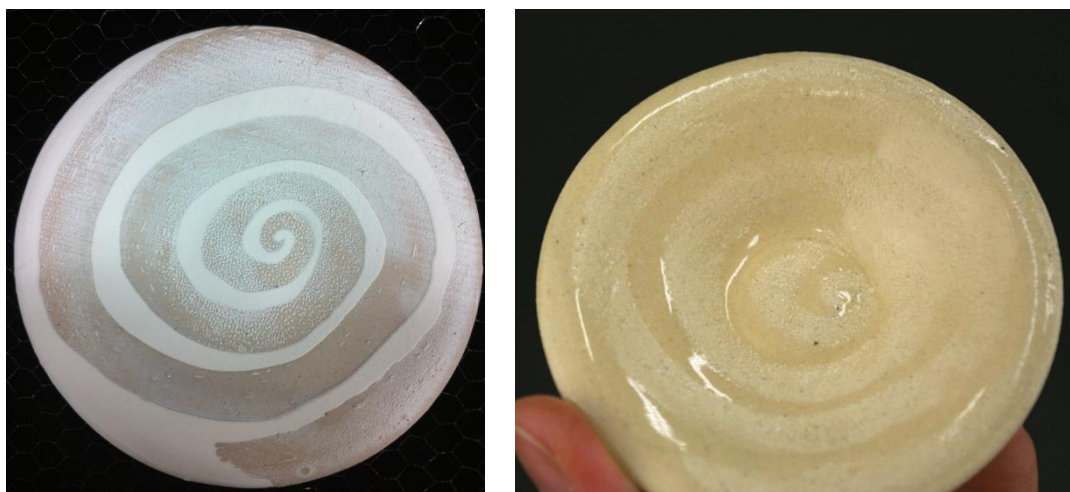
【図 10】 乾燥後にレーザーを照射したもの（左：焼成前／右：焼成後）



【図 11】 素焼き後にレーザーを照射したもの（左：焼成前／右：焼成後）



【図 12】 施釉後にレーザーを照射したもの（左：焼成前／右：焼成後）



乾燥後の段階でレーザーを照射した場合は、表面が切削され焼き色もついたが、その後窯で焼成してしまうと周囲の色と同化して加工部分はあまり目立たなくなってしまった。また素焼き後にレーザーを照射した場合も同様の結果となった。

一方、施釉後にレーザーを照射した場合は、表面を覆った釉薬が切削されたことにより、窯での焼成後にも加工した表面の釉薬の凹凸や濃淡が完成品にはっきりと表れていた。

4.2.2 2次試作

レーザーカッターで陶土にレーザーを照射し焼成することが、従来の陶芸における窯での焼成を代替できるかどうか実験を行った。今回使用したのは、オープン陶土と一般

的な陶土の2種類。表裏両面からレーザーを照射させ、それらを水に浸けて耐水性が得られたかどうかの検証を行った。

【図 13】 オープン陶土（左：レーザー照射後／右：レーザー照射前）



【図 14】 レーザー照射後の陶土（左：1度照射／右：2度重ねて照射）



【図 15】 浸水により、レーザー照射した表面とそれ以外とに分離した陶土



【図 16】 表裏両面からレーザー照射した後、手で割った陶土の破片



一見焼成できたように思えたが、レーザー照射により焼き固まったのは陶土表面のごく薄い部分にすぎなかった。水に浸けてみると、表裏から照射した際にレーザー光線が届きにくかった側面の部分から徐々に水が浸透し、やがて焼き固まっていた表面部分とそれ以外とに二分してしまった。1度だけレーザーを照射した陶土は水に浸けるとすぐさま破損し、断層状に亀裂が入った。2度重ねてレーザーを照射した陶土はそれよりも長時間水に耐えることはできたが、やはり水が浸み込むのは時間の問題であった。

一方、焼成温度が低いため家庭用オーブンでの焼成が可能なオープン陶土は、しばらく浸水させていたが一向に内側へ水が浸透していく気配はなかった。これにより、オープン陶土はレーザーを照射することで十分に表面が焼成できることが分かった。しかし、手づくりならではの凹凸がある作品の表面に隙間なくレーザーを当てるのは容易なことではない。わずかな隙間があればそこから破損が進行してしまうため、レーザー照射が甘くなってしまう側面については留意が必要だ。

また、直径約 8cm の陶土にレーザーを照射するのに要した時間は片面約 17 分、これを今回は両面に行ったので全体の所要時間は約 35 分といったところだ。ちなみにオープンでオープン陶土を焼成する際には、160～180℃で 30 分～60 分を要する。高速で一点集中的に熱を集めることができるレーザーカッターと、じっくり時間をかけて全体を熱する窯。真逆とも言える性格をもつこの両者が、全く同一の役割を果たすのは難しい。それぞれの利点を活かせるよう、機材の使い分けを心がけていきたい。

4.2.3 3 次試作

1 次試作により、施釉後の作品にレーザーを照射することで釉薬を用いた表面装飾が可能であることが分かった。これを受けて 3 次試作では、レーザー照射により切削される加工面と焼成後の仕上がりをより明確に捉えられるように、1 次試作で使用した透明の釉

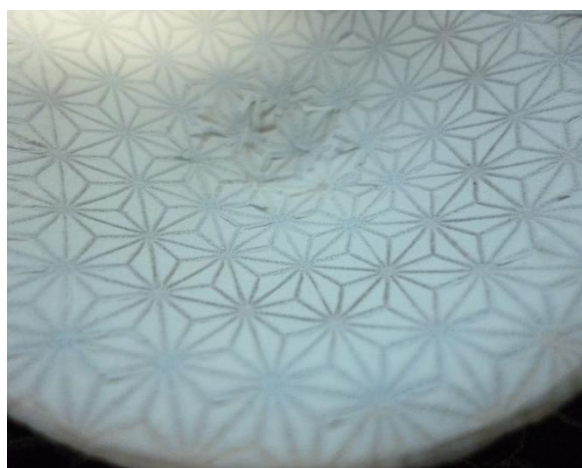
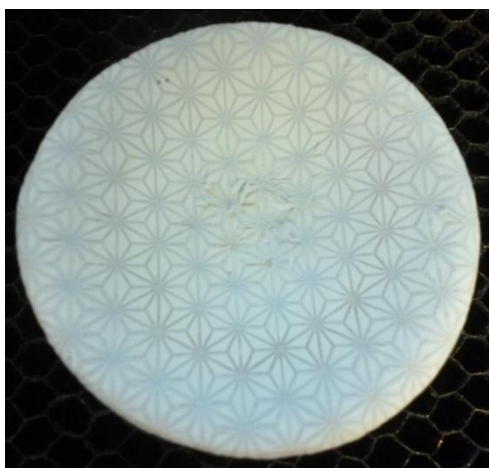
薬から発色のよいトルコ青釉に釉薬を変更した。

また表面に切削するデザインについても、1次試作では自分のスケッチをスキャンしデータ化したものを使用した。今回は手作業では絵付けが困難であろう細かなパターン（麻・青海波・タイルの3種）を採用した。

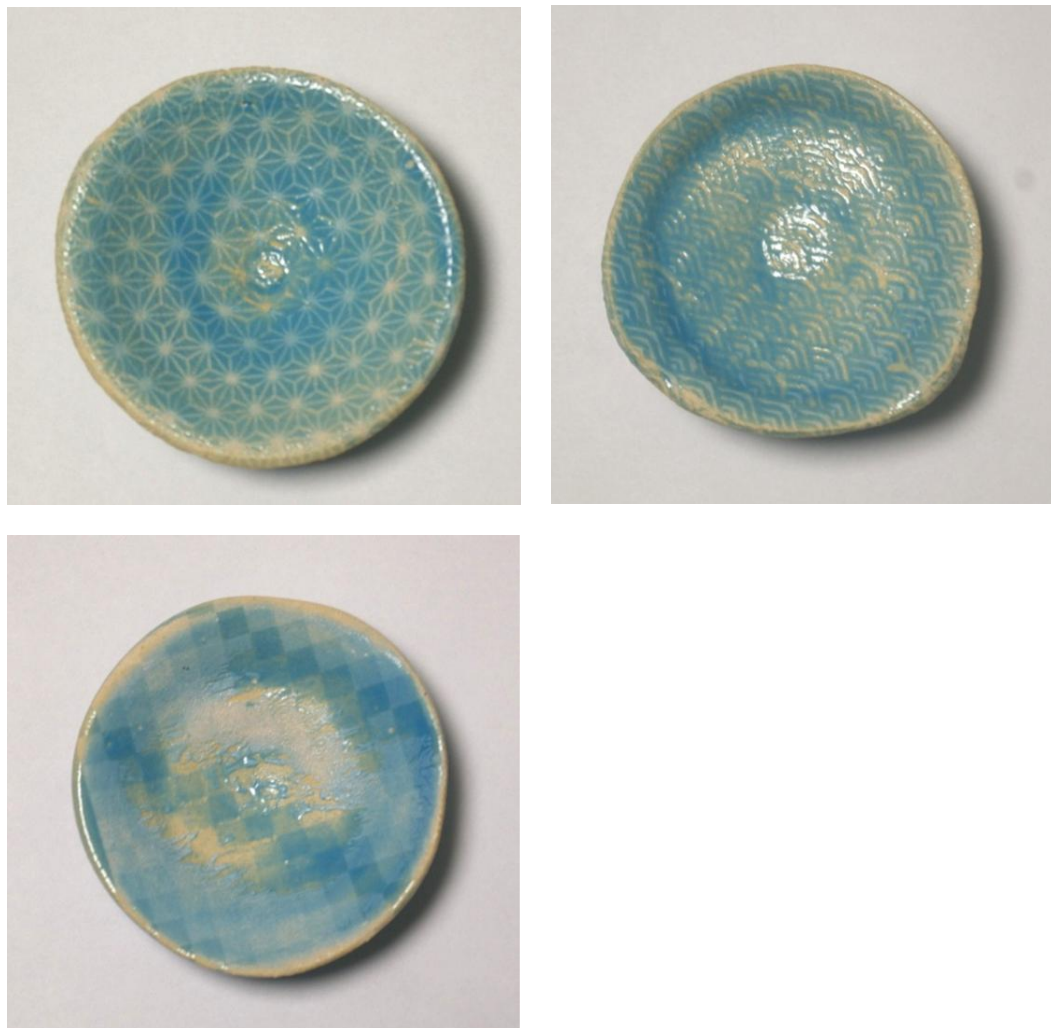
【図 17】 レーザー照射前の施釉された陶器



【図 18】 表面の釉薬をレーザー照射により切削した陶器（麻）



【図 19】 窯で本焼きした陶器（左上：麻／右上：青海波／左下：タイル）



【図 19】の麻模様に見られる濃淡の差は施釉時の不均一さが表れた偶発的なものであるが、タイル模様に見られるそれは使用したグレースケールのデータの濃淡がそのまま反映されたものだ。これにより、レーザーを照射することで削り取られる釉薬の深度と釉薬の色の濃淡に関係性があることが明らかとなり、意図的に調節できることが可能であると分かった。

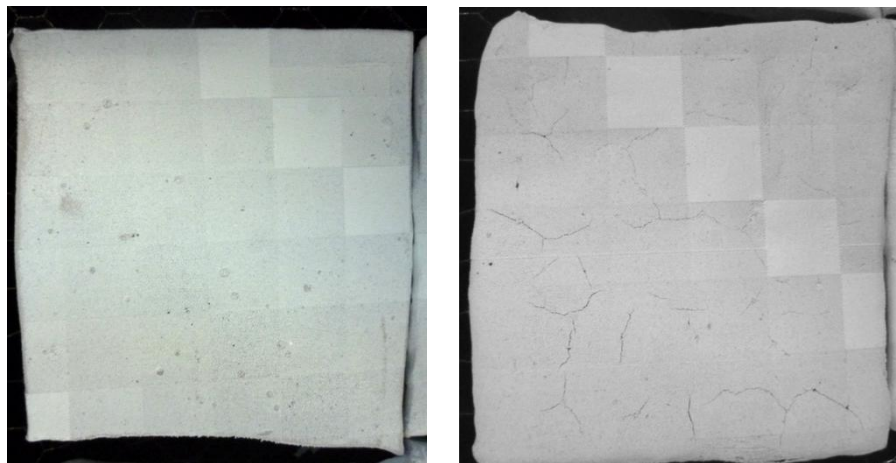
しかし、レーザー照射時には最も高さのある器の「縁」に焦点を合わせたため、窪んでいる部分へはその高低差により焦点のずれた状態でレーザーを照射することとなった。

【図 18】の拡大写真からわかるように、その結果中央に掛かった釉薬は浮き剥がれ、その状態で焼成してみると釉薬の剥がれた様子もそのまま完成品に反映された。

4.2.4 4次試作

3次試作の結果を受けて釉薬の厚みと色の濃淡との関係性をより探求すべく、重ね掛けした釉薬の上からレーザーを照射した。

【図 20】 施釉したプレートにレーザーを照射（左：釉薬 1 回掛け／右：釉薬 3 回掛け）



【図 21】 窯で本焼きした完成品



重ね掛けには気泡が入りやすいというデメリットがあり、【図 20】からもわかるように、3回重ね掛けしたものは乾燥が進行するにつれて表面がひび割れてしまう。完成品の仕上がりに大きく影響した。この試作におけるひび割れには私自身の技術不足も原因として挙げられるが、しかし重ね掛けにより釉薬に厚みのある部分は濃い色が反映されることは検証ができた。

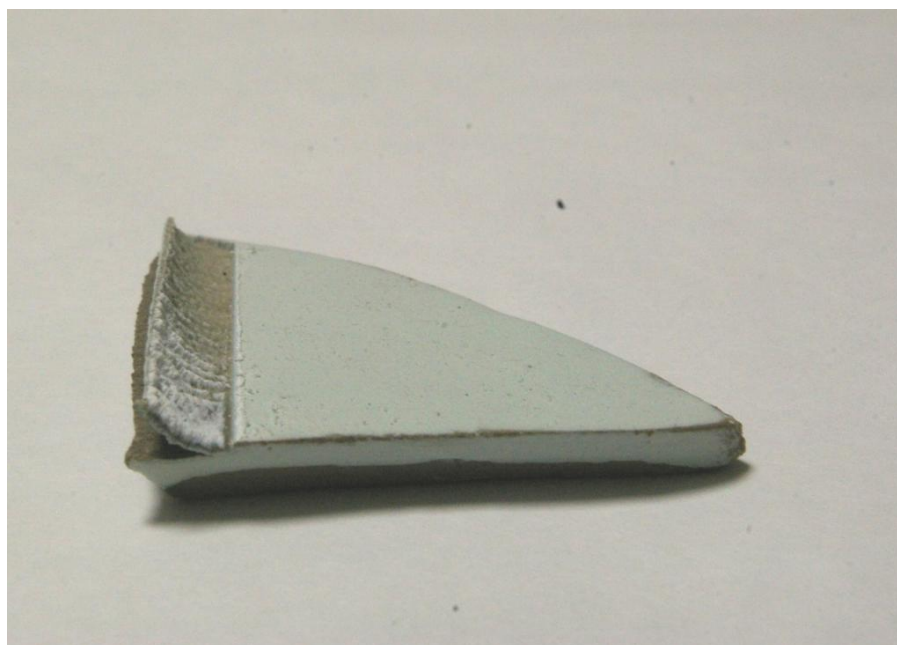
4.2.5 5次試作

レーザー照射により釉薬を溶解できるかどうか検証するために、非接触温度計（A&D 放射温度計 AD-5616）を使用し、まずは様々な素材にレーザーを照射している表面温度を測定した。

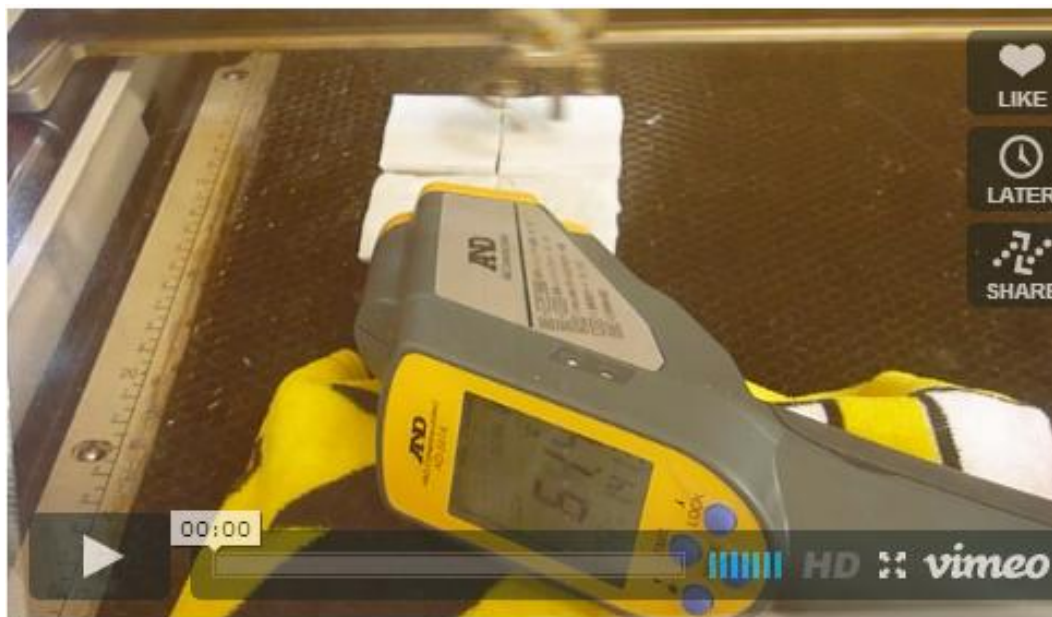
【図 22】非接触温度計によるレーザー照射時の素材の表面温度計測（アクリル）



【図 23】釉薬上から最大出力（P 100／S 1）でレーザー照射したもの



【図 24】 表面温度計測の様子



(<http://vimeo.com/79075954>)

今回表面温度を測定した素材は、アクリル、板、革、陶土の 4 種だ。それぞれに対してレーザーを照射している際の最高温度は以下のとおりである。

- ・アクリル板：117.6℃
- ・板（桜）：46.6℃
- ・革：948.9℃
- ・施釉した陶土：895.1℃

上記のように、施釉後にレーザーを照射した際の陶土の最高表面温度は約 900℃であった。そこでこれまで使用していた液体釉薬（高火度釉）から楽焼き用の粉末釉（低火度釉）に変更した。低火度釉はその名の通り溶解温度が 850～1100℃と一般的な釉薬よりも低いもので、これならばレーザーカッターでの釉薬の溶解が可能ではないかという仮説を立てた。

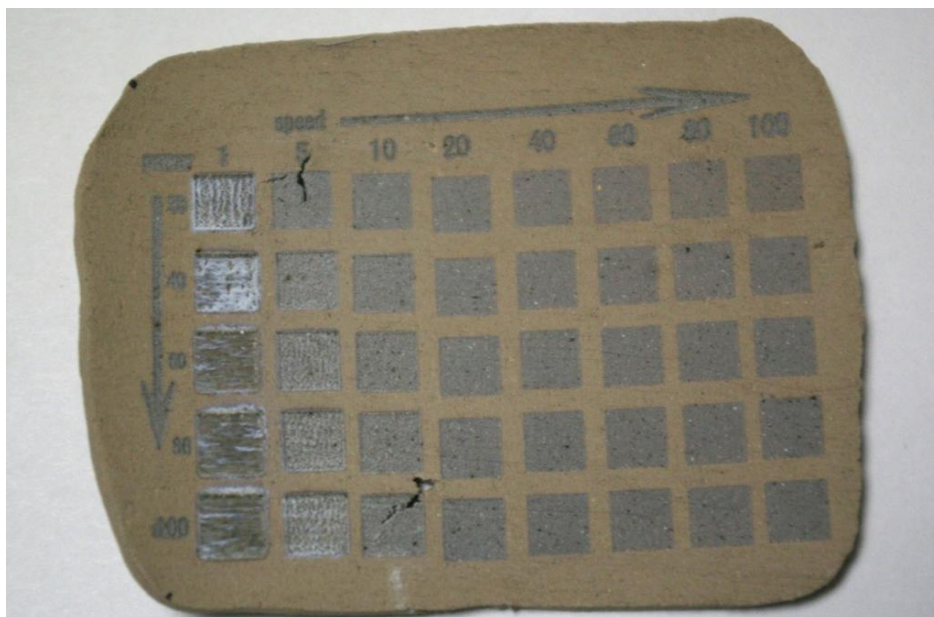
しかし結果は【図 23】から分かるように、レーザーカッターは一点集中的にレーザーを照射し高温化するが釉薬が溶解するには熱が不十分であったようで、加えられた熱により陶土に掛けられた釉薬は溶けることなく加熱された表面部分だけ徐々に反って分離してしまった。

4.2.6 6 次試作

今回は焼成前・素焼き後・施釉後の 3 種の陶土を用意し、それぞれにレーザーを照射

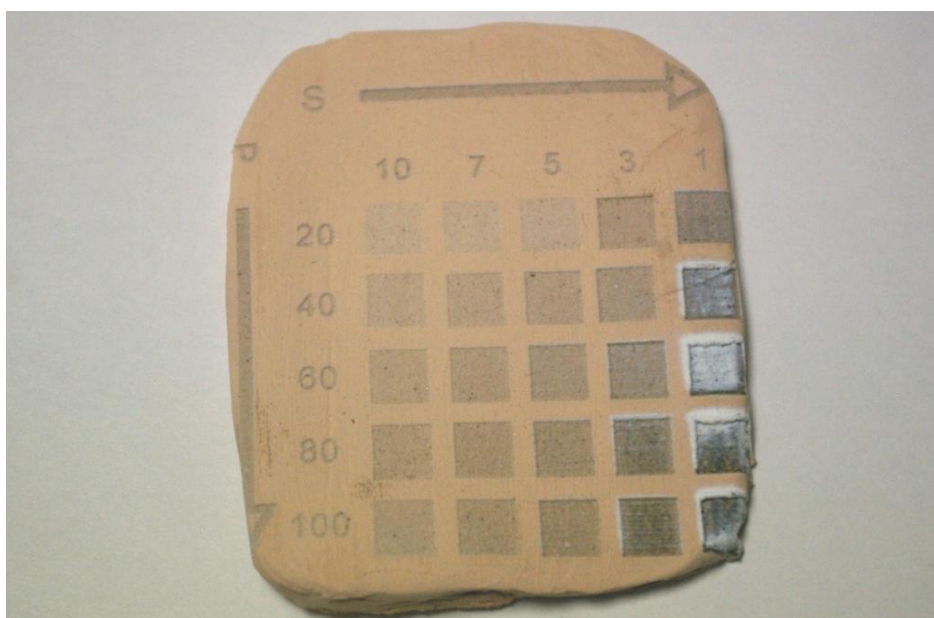
する際の最適な出力値を見つけるべくパラメーターを調整した。

【図 25】 焼成前の陶土にレーザーを照射する際のパラメーター表



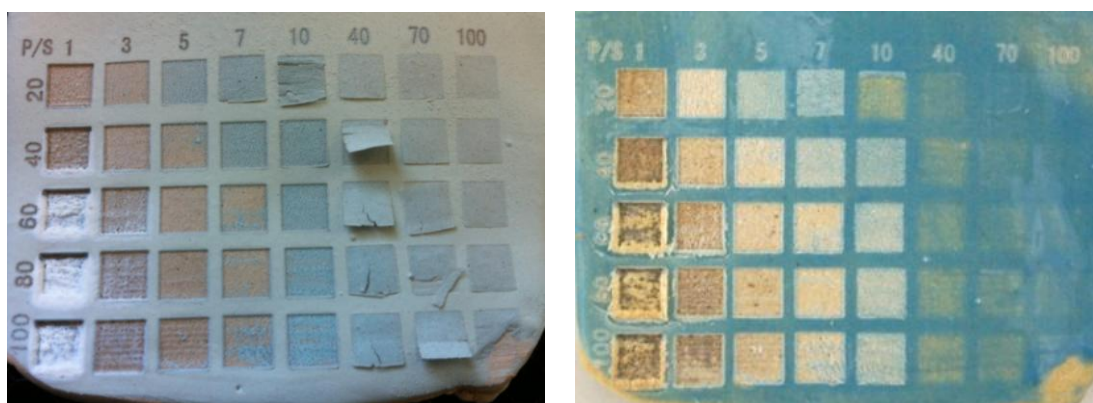
S 1/P 60~100 ではレーザーが強すぎたようで、表面が切削されただけでなく瞬間的に透明になり焼き固まった。S 1/P20~40 または S 5/P40~100 では透明にこそならなかったものの表面は白く粉をふいたような状態になった。以上の結果から、焼成前の陶土に対しては S 5/P20 以弱の数値が最適であると思われる。

【図 26】 素焼き後の陶土にレーザーを照射する際のパラメーター



S 1/P 40~100 ではレーザーが強すぎたようで、表面が切削されただけでなく白く粉をふいたような状態になった。S 1/P 20 または S 3/P 60 でもやや白く変色してしまうので、素焼き後の陶土に対しては S 3/P 40 以弱の数値が最適であると思われる。

【図 27】施釉後の陶土にレーザー照射する際のパラメーター（左：焼成前／右：焼成後）



S 1/P 60~100 ではレーザーが強すぎたようで、表面が切削されただけでなく白く粉をふいたような状態になった。S 1/P 20~40 や S 3/P 60~100 はレーザーがやや強力ですぐ表面が白くなっているのだが、S 7/P 60~100 はその逆でレーザーが微力であったために釉薬が完全に削り取れていない状態となっている。したがって施釉後の陶土に対しては、釉薬を完全に削り取る場合には S 3/P 40 から S 5/P 40 までの数値、多少削り残し釉薬の濃淡を表現する場合には S 7/P 40 から S 10/P 60 までの数値が最適であると思われる。

5. レーザーカッターを用いた陶芸のレシピ

概要

前項での試作を受けてまとめた、レーザーカッターの技術を組み合わせた陶器の作り方をレシピ形式で紹介する。

5.1 用意するもの

5.1.1 材料

陶土：2kg あれば余裕をもって制作ができる。だいたい 15cm の平皿 4 つ分。重いので通販店での購入をおすすめする。

釉薬：お好みで色を決める。釉薬の厚み・水分量がつかめるまでは液体釉薬がおすすめ。調合済みなのですぐに使うことができる。状態利用する窯の最高温度を必ず確認し、自分の作業環境で使用可能な釉薬を選ぶこと。

5.1.2 道具

ジップロック：陶土の保管に使用。

歯ブラシ、ナイフ、スプーン、フォーク：陶芸用の道具がなくとも、成形や余分な釉薬を削る際などに何かと便利。

しっぴきもしくはタコ糸：ろくろ成形をした場合、器を土塊から切り離す際に使う。

雑巾：乾いたものと濡らしたものの 2 枚用意できるとなおよい。

バケツ：大小どちらもあるとよいが、ひとまず大は小を兼ねるのでたっぷり水が入られるものを用意したい。釉の浸し掛けにも使用する。

プラスチックカップ：小バケツの代用にもなる。少量の水を溜める、釉薬の掛け流し、道具の整理など何かと便利。

板（端材でも可）：レーザーカッターが設置されている場所ならば端材がよく手に入るはずだ。厚みを測定し使用すれば、たたら板の代用になる。作業台・作品棚などの敷板としても使用できるが、例外として MDF は水の弱いためそのような使い方には不向き。

5.1.3 機材

レーザーカッター：一家に一台所持することは難しいかもしれないが、誰もが気軽に近所の工房にアクセスできるような環境が整うことを願っている。使い終わったら必ずメンテナンスをして、使用前よりもきれいにしておくこと。

電子窯もしくは家庭用オーブン：材料によって焼成温度が異なるため、それぞれに合

った機材が必要となる。窯の場合は 1200℃前後まで昇温できるものが好ましい。

電子ろくろもしくはろくろ倶楽部：ろくろ成形をする際には必須だが、手びねりや板づくりなどろくろを使わずとも成形できる手法はいくつか存在するのでお好みで。

5.1.4 環境

作業部屋：自然光が入る、風通しのよい、多少汚れても気にならない場所が好ましい。

もしくは部屋全面にビニールシートを敷き作業するとよい。近くに水場のある屋外スペースなどもよい。

水道：土の混じった濁水や釉薬をすぐに流せるよう、少なくとも水を溜めたバケツはそばに置いておく。

机：自分の腰程度の高さの丈夫なもの。土を練る際に必須。

5.1.5 デザイン

データ：レーザーカッターで切削するデザインを用意する。スケッチをスキャンして取り込んだ画像データでも、CAD ソフトで描いたものでもよい。

SD カードや USB：レーザーカッターとつながっているパソコンへデータを送る際に使用する。もしくはネット上で共有しておき、使用パソコンにダウンロードすることも可能。

5.2 ①土練り

- 1-1. すきな陶土を用意する。
- 1-2. 荒練りする。土を板の上に置き、両手の平を使って斜め前へ押し出すようにして練る。腕の力ではなく、体全体で体重を乗せるようにするのがコツ。左右両側に土が広がってきたら 90° 回転させ、折り曲げて同じように再び練る。これを土がよい具合になるまで繰り返す。
- 1-3. 菊練りする。荒練りした土をラグビーボール状にまとめて立たせる。上部側面に左手、上部上面に右手がくるようにして土に手を添え、左手で粘土を起こして右手で斜め前に向かって土を倒す。左手で土を時計回りに少し回転させながら起こし、また右手で倒す。これを繰り返すとだんだんと練ったところが菊の花びらのような状態になる。一定の力加減とリズムを心がける。
- 1-4. 土がまとまってアンモナイトのような形になってきたら、徐々に土をまとめる。急に力を抜いてしまうと空気が入りやすいので注意する。

5.3 ②成形

5.3.1 手びねり

- 2-1. 手で土を撚ってひもをつくる。なるべく均一な太さに揃えたい。
- 2-2. 輪状に1段ずつひもを積んでいく。上段と下段の土との継ぎ目を擦り上げるようにしてしっかり付ける。
- 2-3. 積み上がったら、手やコテなどを使って土を締めるように内側・外側から叩き整える。スプーンやカンナなどを使って削ることもできる。いっぺんに終わらせようとせずに、少しずつ繰り返し成形していく。

5.3.2 ろくろ成形

- 2-1. ろくろの中心を真上から見下ろし、粘土を中心に据える。手の平で土を叩きながらろくろをゆっくり回し、山なりに形を整える。
- 2-2. 更に空気を抜きなめらかにするために「土殺し」を行う。両手を濡らしたらやさしく土を包んでなじませ、滑りをよくする。ひじは自分の腿に置いて固定する。土を両手の平で挟み込み、天板近くからゆっくりと土を押して持ち上げていく。土が伸びたら今度は上から斜め前に傾けるように手を添えて、ゆっくりと押し込むと土が下がっていく。これを繰り返して粘土の中心を出す。
- 2-3. 中心がしっかりと取れたら、ある程度の高さまで土を伸ばしたところで、作りたい器に使う粘土の量を決める。指でくびれをつけて選り分ける。
- 2-4. 土取りした塊の中心に親指を垂直にゆっくり押し込み、底の厚みを考慮して器の深さを決める。今度は人差し指と中指を内側、親指を外側に添えて、ゆっくりと口を広げていく。
- 2-5. 作りたい器の深さや大きさに合わせて、更に口を広げたり、徐々に土を倒して平らにしていく。
- 2-6. しっぴきを使って器を切り離す。ろくろをゆっくりと回転させて切り離す場所に糸を当て、片手を離すと糸は自然と巻きついていくので水平に引いて土を切る。切り終えたら、両手の人差し指と中指でそっと取り上げる。

5.4 ③削る～乾燥させる～素焼きする

- 3-1. 指で押しても形が歪まない程度にまで乾燥したら、底を削ることができる。削りのタイミングは粘土の種類や作り手の好みによってそれぞれ。器を逆さにして水平に据え、底を水平に削り整える。次に高台の脇を削って高台の高さを決め、そして内側を削る。
- 3-2. じっくり日にちをかけて乾燥させる。口がやや白く粉をふくくらいが目安。乾燥があまりと窯で焼成した際に水分が水蒸気となり爆ぜるので、数日～数週間ほど自然乾燥させる。
- 3-3. 窯で素焼きする。焼成温度は 760～800℃前後。

【図 28】 素焼きした器

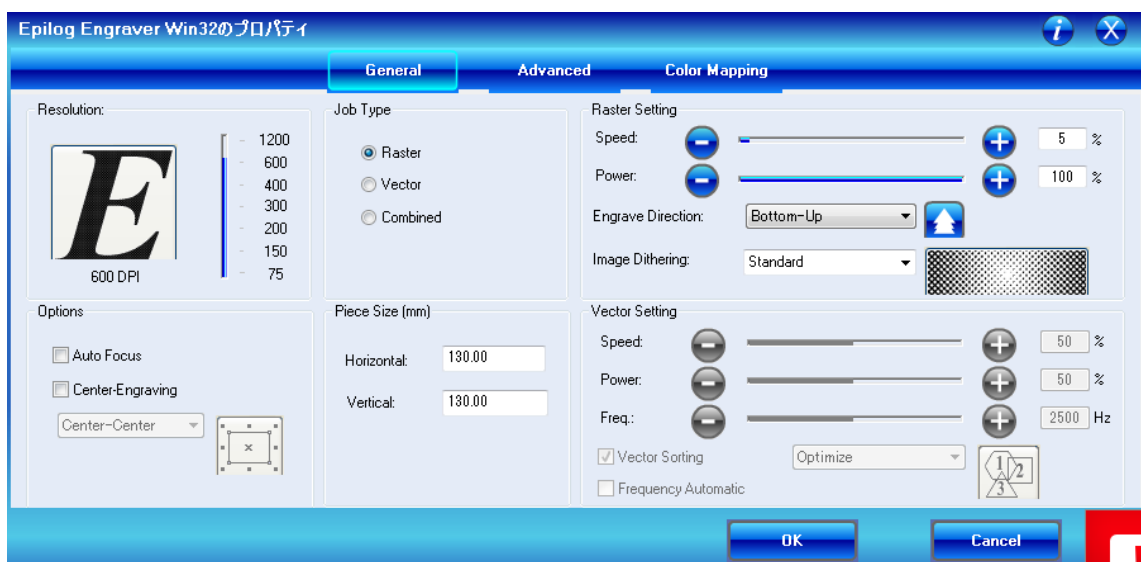


5.5 ④素焼き後の素地にレーザーを照射する

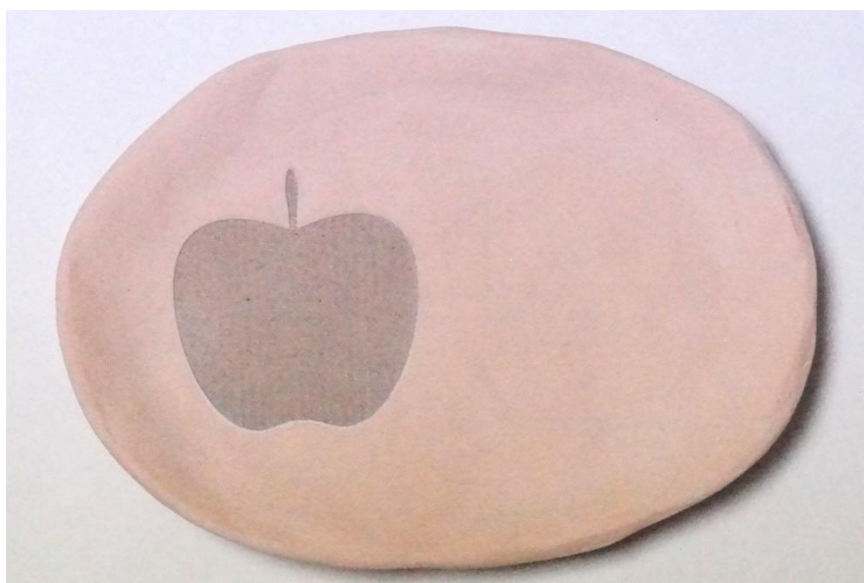
- 4-1. 作品の表面・底などに切削したいデザインデータを用意し、レーザーカッターで加工する。素地の上には釉薬がかかるので、この段階で加工し凹んだ部分には釉薬が溜まりやすく、色が濃く反映されることを念頭におく。
- 4-2. パラメーターを設定する。
 - * うっすらあまり変化を出さずに加工したい → S 7 / P 40
 - * くっきり綺麗に加工したい → S 5 / P 40
 - * しっかり濃く加工したい → S 3 / P 60

- 4-3. 器を作業台に置き、原点と焦点距離を設定する。このとき、ヘッドが器に触れぬよう中央と口との高低差に注意する。
- 4-4. 集塵機とコンプレッサーを稼働させたことを確認し、レーザーカッターのスタートボタンを押す。不具合がないかどうか、ときどきちらっと確認する。レーザーの光は目に良くないのであまり直視しないこと。

【図 29】 パラメーターを S 5 / P 100 と設定した場合



【図 30】 素地にレーザー加工をした器



5.6 ⑤施釉する

- 5-1. 高台を指で持ち、すきな色の釉薬をかける。薄すぎず、厚すぎず。釉薬の厚みは水分量で調節できる。失敗したなと思ったら水で洗い流して器をふき、乾いたら再度トライする。
- 5-2. 釉薬をかけたら乾くまでしばらく表面には触れず、作品を持ったまま静止する。色が白み始めたら乾いた合図。そっと手を離して作品を置く。

【図 31】施釉した器

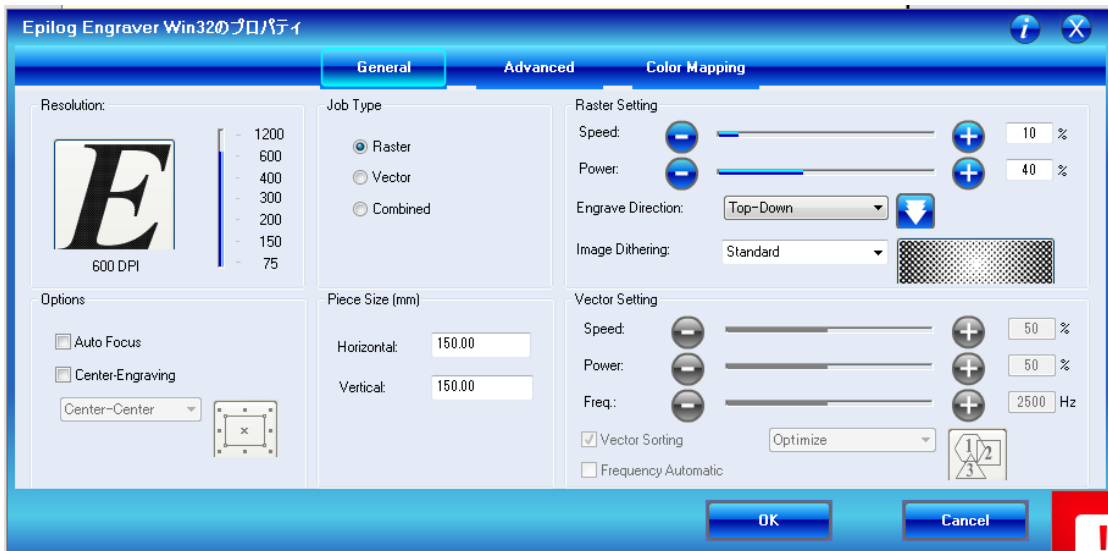


5.7 ⑥施釉後の釉薬上にレーザーを照射する

- 6-1. 作品の表面などに切削したいデザインデータを用意し、レーザーカッターで加工する。この段階で加工し凹んだ部分は、釉薬が削れる分だけ色が薄く反映される。
- 6-2. パラメーターを設定する。以下の数値はあくまでも目安であり、かけた釉薬の厚みによって最適値は異なる。

*ほんのり元の色から淡くしたい	→ S 50 / P 50
*しっかり薄い色を表現したい	→ S 10 / P 60
*くっきり素地が見えるほど切削したい	→ S 7 / P 100

【図 32】 パラメーターを S 5 / P 100 と設定した場合



【図 33】 施釉薬後にレーザー加工した器



5.8 ⑦本焼きする

- 7-1. 窯で本焼きする。焼成温度は 1200～1250℃前後。使用する釉薬の溶解点を確認すること。（施釉後にレーザー加工したことで素地が見えた場合は、本焼きの前に透明釉を吹きかけることでその部分も釉でカバーすることができる。）
- 7-2. 窯での焼成が終わってから半日以上時間をおき、十分に窯が冷えたら器を出す。熱い

うちに窯出しし陶器が急冷すると、ひび割れなどの原因となるので焦らず自然に温度が下がるまで待つ。

【図 34】 作品例



6. 結論

概要

本研究の成果を振り返り、そこから見えた課題と今後の展望をまとめる。

6.1 考察と展望

本研究では、クラフトの代表例として陶芸を取り上げ、デジタルファブリケーションとクラフトとの融合と発展可能性を模索した。融合とまで呼べる成果は出せなかったが、レーザーカッターによる釉薬の切削は陶器の装飾表現の可能性を広げることができたと言えるだろう。また、レーザーカッターを使用するにはパラメーター設定の目安としてネット上に公開されている国内外の使用事例を参照するのだが、これまでのところ陶器の素地や釉薬上にレーザー加工を施したという事例はまだ目にしたことはない。よって本研究は今後のレーザーカッターの利用者に、新たな先行事例としてよりクリエイティブな作品が生まれる下地を提供することとなるだろう。素焼き後の素地、そして施釉後の釉薬上へのレーザー照射の最適値については前述した通り。

研究を進める中で日々実感したことは、レーザーカッターと陶芸とでは「時間感覚」が大きく異なるということだ。こうして文字にしてみると当たり前のようだが、実際に長い時間を費やしてみなければ気付くことができなかったと思う。レーザーカッターの稼働時間は長くても1時間を超えることはあまりない。土を練ってから窯で焼成し器として仕上がるまで、陶芸は短くとも1週間はかかる。デジタルファブリケーションとクラフト、その両者の技術を取り入れるデジタルクラフトにおいては、それぞれの時間感覚の違いを許容して各工程に向き合うことがよりよい作品づくりのカギとなる。

また今回使用した機材はレーザーカッターが中心だったが、ミリングマシンを使用すれば木の器を切削することが可能となり、また3Dプリンターを使えば土以外の材料で出力した新しい器が姿を見せるだろう（現に今研究室では後輩たちが米粉を原料とした「食べられる器」の制作に励んでいる）。器に限らず、材や道具の性格や特性を生かした組み合わせを選び、「つくりかたをつくる」という動きがより活発になっていくことを期待している。

謝辞

環境情報学部准教授田中浩也先生には、研究会を通して2年間に渡りご指導いただきました。研究に関してはもちろん、私たちの学生生活から日本社会の動向に至るまで、先生のものづくりや仕事に対する姿勢から多くのことを学ばせていただきました。

田中研究室のメンバーとは、互いにものづくりに取り組む中で多くの時間を共有してきました。先輩方は同じ目線に立って的確なアドバイスをくださり、研究と進めていく道筋を示してくださいました。期日追われながらも楽しそうに課題に取り組む後輩たちの姿からは何度も励まされ、ものづくりをする上で大切なことを思い出させてくれました。数少ない同期の2人とは同じ悩みを共有し、励まし合えたことで、最後の最後まで妥協せずに本研究に取り組むことができました。

体育会との両立を引け目と感じていた部分もありましたが、皆さんがあたたく見守ってくださったことで引退までやり遂げることができ、また引退後も研究に集中することができました。融通のきかない頑固な面もあり、ご迷惑も多々おかけしたと思いますが、自由に研究会に携わらせていただけたことを心から感謝しています。

約半年間通ったファブラボ鎌倉では、渡辺ゆうかさんをはじめたくさんの魅力的な方々と出会いました。皆さんとの出会いが私の視野を広げ、制作意欲をかき立ててくださいました。結いの蔵に流れる穏やかな空気がこれからもすてきな人を惹きつけ、ファブラボ鎌倉が一層の盛り上がりを見せることを願っています。

ものづくり工房の柿崎勇晃さん、「マテリアルガーデン」キュレーターの小杉博俊さん、陶芸家の田中孝太さんと瑠美さんには、知識の浅い私に対してそれぞれの専門分野から本研究に関する多角的なアドバイスをいただきました。

また昨夏は Fab9 運営というとても貴重な成長の場をいただくことができました。水野大二郎先生をはじめ何度も MTG を重ねた食チームのメンバーの皆さん、会場で出会った国内外のファンキーな参加者の皆さんと共有した時間は、今でも鮮明に脳裏に焼き付いています。

最後に、生活のすべてを支えてくれた家族と、共に4年間を過ごした SFC の友人たちに感謝申し上げます。

本研究に取り組むにあたり、本当に多くの方々にご指導やご協力をいただきました。人に恵まれた学生生活でした。本当にありがとうございました。

2014 年 1 月 藤本麻子

参考・引用資料

- [01] 『Fab に何が可能か―「つくりながら生きる」 21 世紀の野生の思考』
編著：田中浩也・門田和雄、著：渡辺ゆうか・津田和俊・岩寄博論・すすたわり・
水野大二郎・太田知也・松井茂・久保田晃弘・城一裕／フィルムアート社（2013）
- [02] ファブラボ（Fablab）
- [03] ヤコのオープン陶土 <http://www.yako.co.jp/>
- [04] 『MAKERS―21 世紀の産業革命が始まる』
著：Chris Anderson、訳：関美和／NHK 出版（2012）
- [05] 『Fab パーソナルコンピュータからパーソナルファブ리케이션へ』
著：Neil Gershenfeld、監修：田中浩也、訳：糸川洋／オライリージャパン（2012）
- [06] FabCafe <http://tokyo.fabcafe.com/>
- [07] &Fab <http://andfab.jp/>
- [08] しぶや図工室 <http://shibuya.abbalab.com/>
- [09] co-factory <http://co-factory.jp/>
- [10] 『オープンデザイン―参加と共創から生まれる「つくりかたの未来」』
著：Bas van Abel・Lucas Evers・Roel Klaassen・Peter Troxler、監訳：田中浩也
／オライリージャパン（2013）
- [11] Protein(R) –Briefings <https://www.prote.in/en/briefings/digital-craft>
- [12] “Digitally Interpreting Traditional Folk Crafts”
T. Vilbrandt, C. Vilbrandt, G. Pasko, C. Stamm, A. Pasko（2011）
http://eprints.bournemouth.ac.uk/19324/1/VVP_IEEECGA11_Crafts_preprint.pdf
- [13] ファブラボ鎌倉 <http://www.fablabkamakura.com/>
- [14] 『実践 Fab・プロジェクトノート』 Fab の本制作委員会／グラフィック社（2013）
- [15] イヌイトファニチュア（inu it furniture） <http://www.inuit.jp/>
- [16] クルスカ（KULUSKA） <http://kuluska-japan.com/>
- [17] イヌイトファニチュアオンラインショップ | clock54
<http://inuit.shop-pro.jp/?mode=grp&gid=495651&sort=n>
- [18] “Open Design Now” KULUSKA x FabLabKamakura―旅するデザイン
<http://www.fablabkamakura.com/#!/news/c1g2a>
- [19] “Color Collision” Kirstie van Noort & Rogier Arents（2012）
<http://www.rogierarents.nl/ccprints.html>
<http://thisispaper.com/Kirstie-van-Noort-Rogier-Arents-Color-Collision>
- [20] 『陶磁―発想と手法』小松誠（2009）武蔵野美術大学出版局
- [21] 『やきもの入門』高橋伸幸（2012）KK ベストセラーズ

- [22] 日本セラミックス協会「日本のやきもの一歴史」
<http://www.ceramic.or.jp/museum/yakimono/contents/history.html>
- [23] 有田やきものアカデミー <http://arita-academy.jp/001.html>
- [23] iPrototype
<http://www.milanismonster.com/iPrototype/archives/category/epilog-laser>