

Research on the Innovation of the Ceramic Design Process Utilizing Digital Tools

副島, 潔
Saga Ceramics Research Laboratory

<https://doi.org/10.15017/17125>

出版情報：九州大学, 2009, 博士（芸術工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

第6章

陶磁器デザインのための焼成変形予測技術と修正技術の研究

第6章 陶磁器デザインのための焼成変形予測技術と修正技術の研究

6-1. 研究目的

陶磁器には、焼成時に大きく変形を起こすという独特の問題がある。陶磁器は粘土質の成形体を焼くことで最終製品が得られるものだが、成形時から乾燥を経て焼成するまでに収縮と変形を起こす。特に焼成時に大きく変形する。これは陶磁器の創成期から、関わる人々を悩ませてきた問題である。素材や焼成条件により変形量は様々であるが、本論文で研究対象としている有田焼の磁器原料の場合、直径 20cm 程度の皿であれば、 $\pm 5\text{mm}$ 程度の変形が生じる可能性がある。本来、磁器は精緻な仕上がりが要求され、他の陶磁器より一般の工業製品に近い存在である。精度は高いほど望ましいが、 $\pm 5\text{mm}$ 程度のものでも商品としては流通している。寸法精度の基準が厳しい給食用食器や洋食器では $\pm 0.5\text{mm}$ 程度が要求される。

有田焼に限らず、磁器を工業製品として量産する場合、多くは石膏型を使用することは先に述べた。作りたい目標の形状をそのまま拡大して型を作っても、焼成変形により目標の形状から遠ざかってしまうため、作りたい形状の製品を作ることは困難である。

今までの手作業によるプロセスでは、ある形状がどの程度変形するか、経験から大まかに予測することは行われていたものの、正確に予測することは不可能であったため、焼成テストと型の修正を繰り返す必要があった。型製作は手作業により行われていたため、そもそも製品の厚みは設計に対して正確ではない上、テストの結果に基づいて修正を行う場合も手作業によるため、正確さを欠いていた。望ましい形状まで辿り着かずに妥協して製品化する場合や、製品化を諦めざるを得ない場合も多かった(図 6-2)。このような変形は、

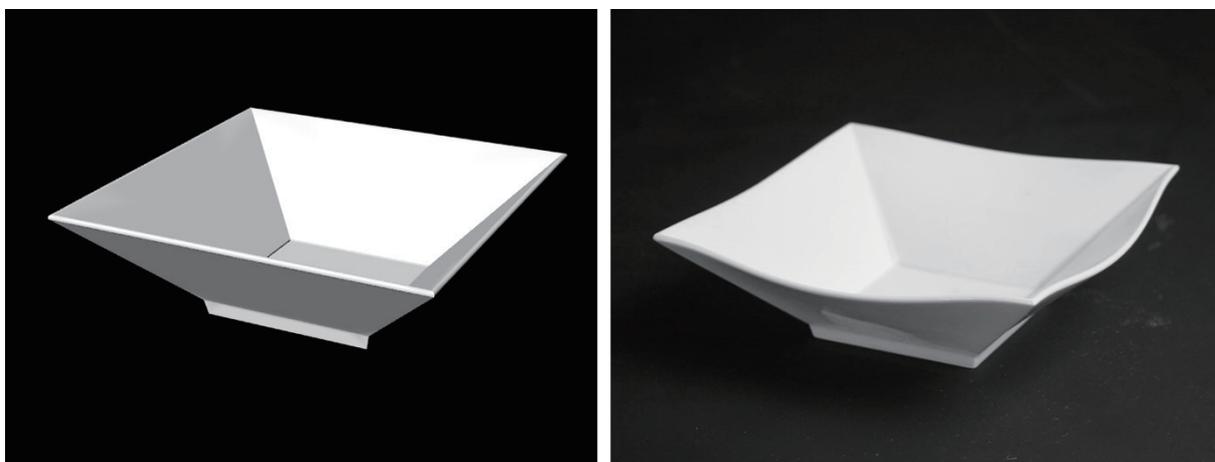


図 6-1 焼成変形の一例

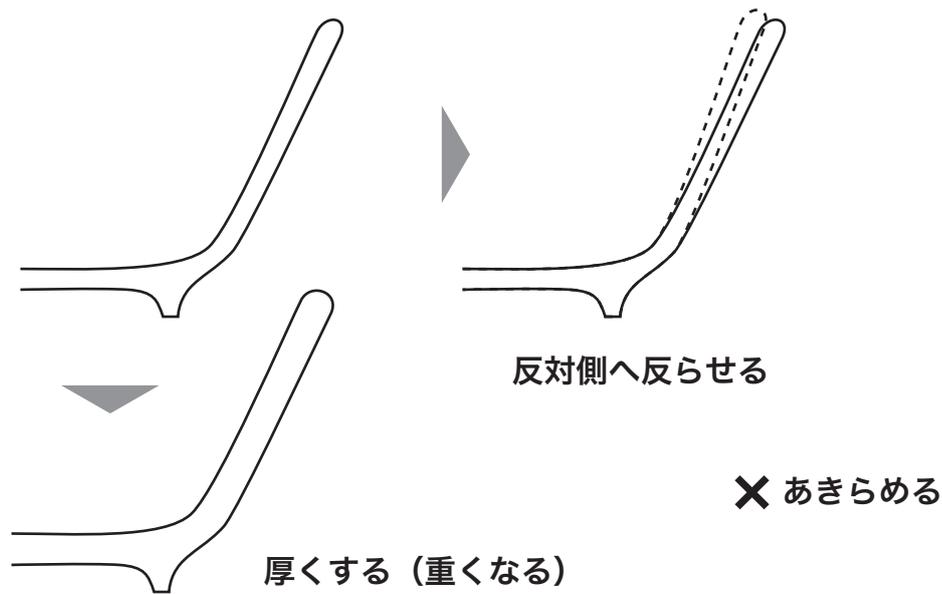


図 6-2 焼成変形への対処法

他の工業製品にはあまり見られない陶磁器特有の事象で、デザイン上の制約を大きくしている。

前章までに、デジタルツールによる 3D 形状データの制作法から RP 技術や CNC 切削による型製作までの研究について述べた。一連の成果により、信頼性と精度の高いデザインプロセスを提案することができたが、型に意図したデザインを忠実に反映でき、型の精度が飛躍的に向上したとしても、焼成変形が非常に大きいため、最終製品の精度向上への貢献は今一步である。

陶磁器の焼成時に起こる寸法上の収縮は、水平方向の収縮より垂直方向の収縮の方が大きいことが経験上知られていた。これは、多孔体であった陶磁器素地が、焼成時の高温領域で溶融・軟化し、その自重により変形するものと考えられる。実際の焼成プロセスでは、温度上昇に伴い、成分の分子間構造の変化や溶融など複雑なプロセスを伴う。これらのプロセスは明らかになっていない部分も多い。しかしながら、焼成変形の傾向と変形量を何らかの方法で予測できれば、焼成テストを低減でき、結果としてテスト段階での時間と原料の浪費を低減することにつながる。また予測に基づいた正確な型修正が行えれば、意図したデザインに忠実な製品化が可能となる。今までは製品化が不可能と思われていた形状でも、製品化が可能となることも期待される。

他の製品分野でも、製品化には種々のテストが必要であるが、コンピュータ利用技術の発達により、FEM (Finite Element Method; 有限要素法) 解析によるシミュレーションが行われ、テストが低減されるようになった。

本研究は、FEM 解析手法を陶磁器の焼成変形予測に応用し、これまでテスト焼成と修正を繰り返してきたプロセスの低減を図ろうとするものである。

6-2. 研究方法

本研究では、実際の焼成プロセスを詳細に再現した解析を行って焼成を予測する技術ではなく、デザイン段階で有効な手段となるような近似モデルを研究する。デザインから製造に至るプロセスで必要なのは、あくまで元形状と焼成結果の違いであり、この違いの近似モデルを見つけることが出来れば、デザインの実務において非常に有効なものとなるからである。

この近似モデルとして、弾性体が重力により変形する現象を利用することにした。多くの物質は弾性変形するが、その変形領域は物質によって様々である。陶磁器における焼成変形の変形量は非常に大きなもので、通常の素材では降伏点を超えて塑性変形を起こすか、破壊してしまう領域の変形を起こしている。このような大きな変形を弾性変形領域内で起こす素材は、ゴムに代表される超弾性体である。

研究に利用した FEM 解析法はそれ自体、モデルデータをメッシュ状に分割し、個々のメッシュの頂点である各節点要素が、与えられた条件でどのように変位するかを計算して実際の現象を近似的に導き出す手法である。

何らかの仮想の弾性体が重力により変形する様子を陶磁器の焼成変形の様子の近似モデルとして利用できるならば、この弾性体に重力を与えて変形する様子の FEM 解析を行うことで焼成変形の予測を行うことが可能となる。

前例として、日本の衛生陶器会社 TOTO の特許がある³¹。これは、「衛生陶器を乾燥、焼成して製造する工程において、製造条件から時間ごとの収縮量および単位応力で発生する歪みを計算し、製造工程をいくつかの区間に分割し、その区間での歪み量を発生させる見かけのヤング率およびその区間の収縮率を算出し、算出された前記見かけのヤング率および収縮率に基づいて有限要素法などの汎用構造解析プログラムを用いて各区间ごとにシミュレーションを行い発生する変形を予測する。」というものである。見かけのヤング率を使用するという点では我々のアプローチと類似しているが、各区间ごとに計算を行うことから最終段階までのシミュレーションが複雑であり、結果としての誤差が大きくなりがちである。

その他の類似の研究としては、金属板を金型でプレス成形する際に、型内で曲げられた

板が、型から外されると反力によって戻ってしまう、スプリングバックと呼ばれる現象に関するものがある。弾性係数が低く、変形量が多いほど、スプリングバック量も多くなり、FEM を利用した予測と対処法について、多くの著述がある。例えば Gan らの研究では、見かけのヤング率による正確なスプリングバック量予測と、基本形状と対比させた型設計法について、非常に参考となる示唆を与えている³²。しかしながら金属の弾性係数は大きく塑性変形と弾性変形が同時に起こる。また与えられる荷重は局所的であり、陶磁器の変形状況とは異なっている。

我々が対象としている食器を中心とした陶磁器業界では、更にシンプルな方法が必要である。

6-3. 予備実験

我々は、汎用 FEM 解析ソフトウェア COSMOS を実験に使用した。予備的な実験として、陶磁器の形状モデルで、材料特性としてソフトウェアにデフォルトで用意されているゴムに設定し、底部を固定して、モデル全体に均等に重力を掛けて変形する状態をシミュレーションし、研究の方向性この結果を陶磁器の実際の焼成変形と比較したところ、非常に似た傾向を示すことが分かった。例えば図 6-3 のように、コーヒーカップではボディに付けられたハンドルはそれ自体の重量で変形し、さらにハンドルの重量に引っ張られてボディが変形するが、この変形の傾向が非常に良く一致した。図 6-4 のような角皿では、口縁の各辺において中央部が大きく変形するものの過度に近い部分では変形が少なく複雑に曲がることも実際の変形の傾向と非常に良く一致した。以上のように、変形量は実際のものとは一致しないが、変形の傾向は一致することが分かった。

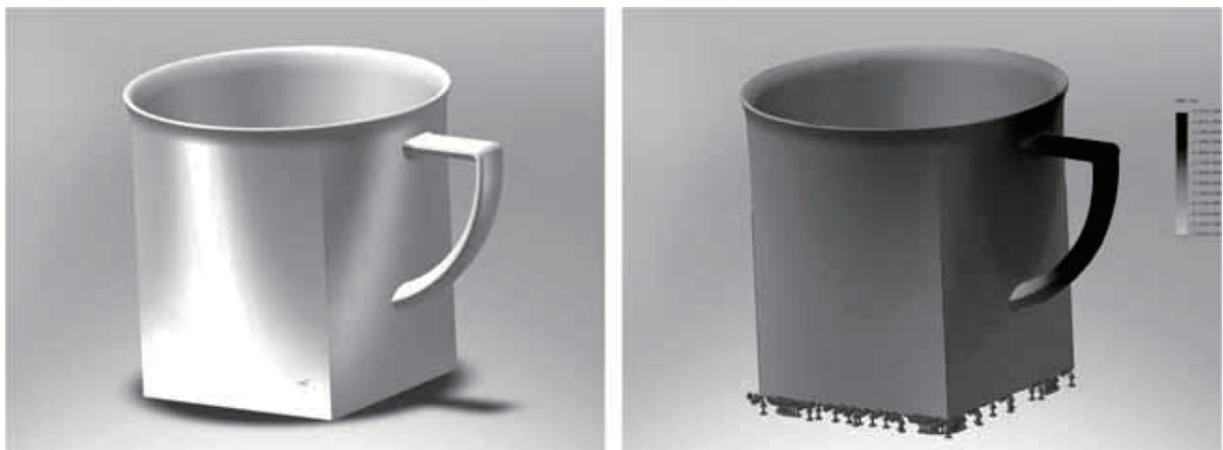


図 6-3 焼成変形予測の予備実験

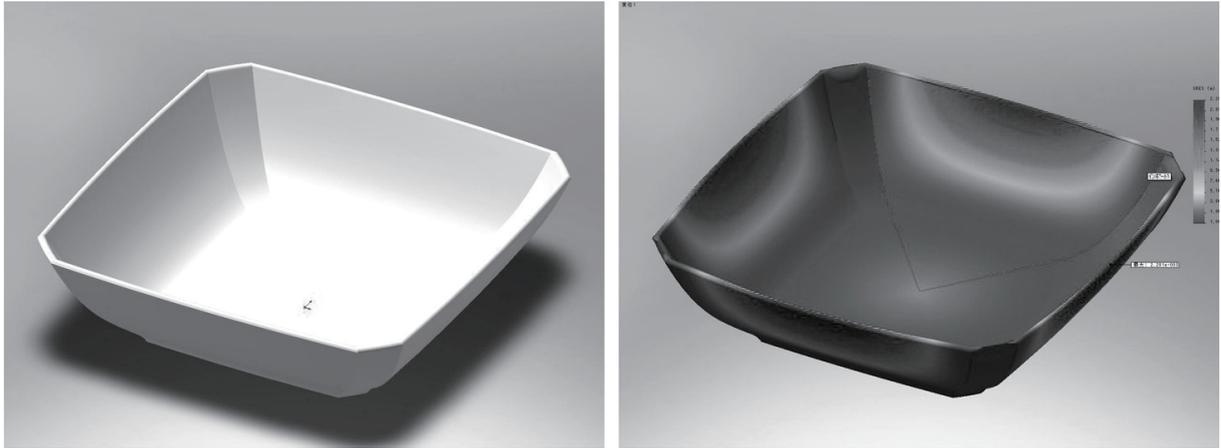


図 6-4 焼成変形予測の予備実験

正確な予測を行うためには、変形量も一致する必要がある。FEM 解析と実際のテストを比較し、変形量まで一致する条件を導き出すため、さらに次段階の実験を行った。

6-4. 実験

実際の陶磁器素材（陶土）の変形量を測定するため、実際の有田焼で多用されている天草撰上陶土で棒状のテストピースを成型し、耐火煉瓦素材のブリッジ上に置き、10 時間で 1300℃に達する標準的焼成条件で焼成した。この実験方法は、陶磁器素材の焼成変形量を測定するため、従来から行われている方法である。

焼成したテストピースの変形量を測定したところ、平均値は 5.25mm であった。また変形の状況を後述の CAD データと比較するため、3次元デジタイザとフラットヘッドスキャナでも測定した（図 6-5）。

一方で、比較用にテストピースと同様の 3D モデルデータを用意した。この 3D モデル

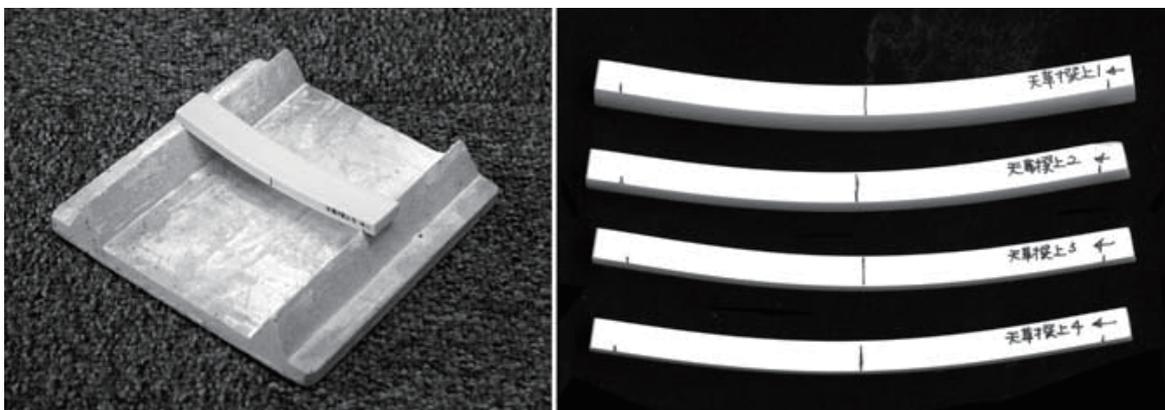


図 6-5 テストピースによる焼成変形実験

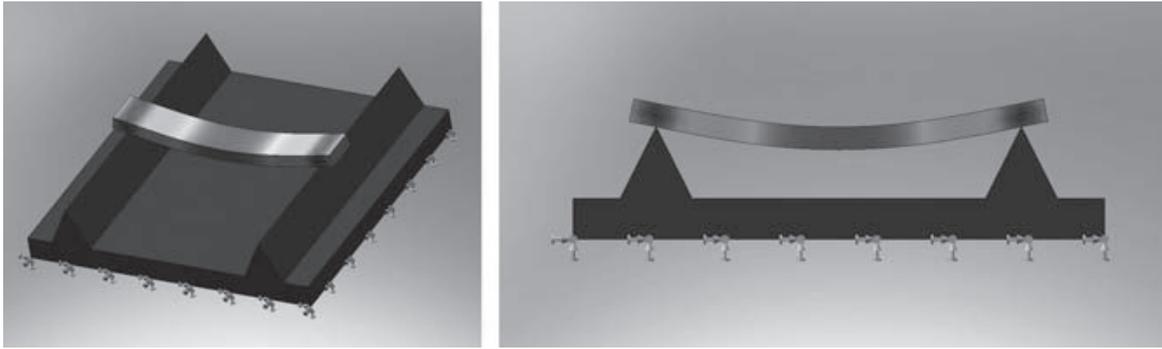


図 6-6 テストピースと同様の解析モデル

は、ブリッジ状の高剛性モデルと、磁器素材に相当する棒状のモデルの2つから出来ている（図 6-6）。CAE ソフトウェア上で、ブリッジモデルの底部は完全に固定し、ブリッジモデルと棒状モデルの接触面は、棒状モデルの変形を妨げないよう、常に接触するがスライドする固定条件とした。棒状モデルの材料特性のパラメータと、モデルに与える重力を変化させて FEM による線形静解析を行って弾性変形の傾向と変形量を求めた。この作業を繰り返し、解析結果が上記の実際の測定結果と比較して一致する条件を探った。変化させるパラメータは、縦弾性係数（ヤング率）、横（せん断）弾性係数（剛性率）、重力加速度である。基本的な物性値は、ゴムを参考にして定義した。体積変化は起こらないことを

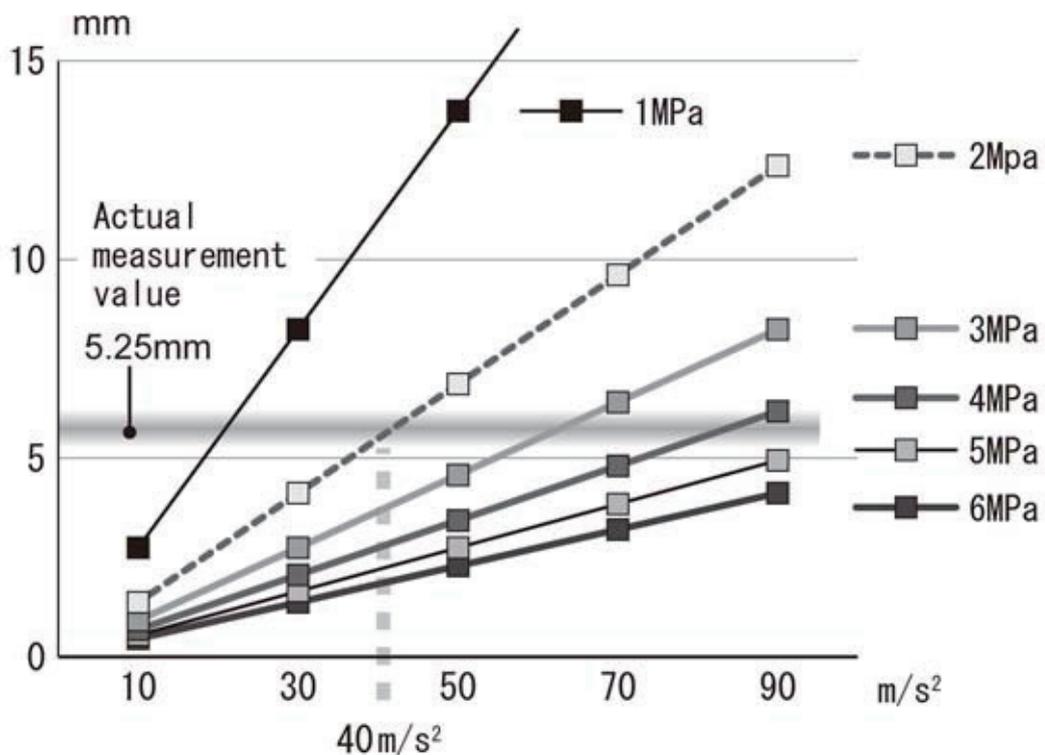


図 6-7 材料特性と重力による変異の関係

想定しており、この場合のポアソン比は 0.5 であるが、計算を終了させるため、便宜的に 0.49 とした。

弾性変形の解析実験の結果、重力を大きく与えれば変位量は一応一致することが分かったが、弾性係数 3MPa 以上の固い物性値では重力を大きく設定する必要がある、望ましい変位まで到達せずに降伏点を超えて破壊してしまう可能性が高くなる。逆に弾性係数 1MPa 以下では柔らかすぎ、変位量が過大になる。適度に柔らかい弾性係数の方が、後の予測作業に対応した微調整を行いやすく、近似モデルとして望ましいため、2MPa を適正值とした。この場合、実測値 (5.25mm) と一致するのは、重力加速度を約 40m/s^2 程度与えた場合であった。

以上の結果をふまえ、次に実際の製品に近い器形状で同様に実際の焼成試験と FEM 解析との比較を行った。FEM 解析では、先行実験と同様に、底部を固定して器形状全体に重力を掛けた。器形状の場合、棒状テストピースで有効と判断したパラメータは、そのままでは一致せず、弾性係数を約 1.5MPa まで補正する必要があった。これは焼成したテストピースが変形とともに収縮していたことと、ブリッジ台とベース間の摩擦抵抗による誤差が発生していたためであると思われる。

以上の実験で得られたパラメータにより、実証実験で使用した陶土に関しては、FEM 解析による器物の変形予測がほぼ可能となった。

6-5. ケーススタディ

前述のように得られた予測技術を、実際の製品開発に応用した。これは楕円形の深い皿

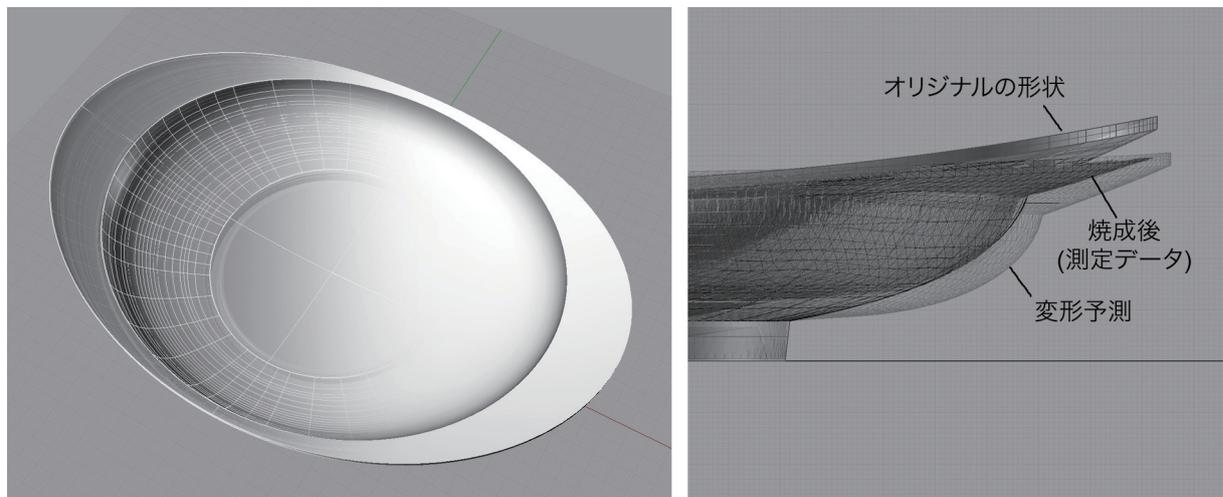


図 6-8 当初案と焼成変形予測

で、今までの手法では変形を抑えるために厚くせざるを得なかったが、変形の大きな部位を把握し、最小限の厚さを加えるに止めて、可能な限り薄く作ることを目標とした。

まず目的とする形状データを制作し、FEM 解析を行った。変形量は 12mm 程度と予想された。同時に実際に型製作を行い、試作焼成を行ったサンプルを比較した。この型製作はすべて CNC 切削により正確に行った。解析結果と試作品の比較を図 6-8 に示すが、最大で土約 2mm 程度の誤差範囲であった。この変形量は非常に大きく、予測との誤差も大きい上、実際の製品ではコントロールできる範囲を超えていると判断した。

このため、当初は円形だった高台部分を、縁の形状に近い楕円状に変化させ、高台から縁までの距離が、より均等になるよう配置した。また高台に近い部分には、最小限の厚さを加えた。

以上の変更を行い、変更した形状で再度解析を行ったところ、予想される変形量は最大 3.2mm にまでに減少した (図 6-9)。

目的とする形状を焼成後に得るためには、焼成変形の結果が目的の形状となるよう、元形状を焼成変形と逆方向に反らせておく必要がある。

予想される変形量と変形方向のベクトルは解析結果から得られるので、元形状のモデリングで使用した断面のキーカーブと、変形予測結果のモデルから同じ位置でキーカーブを抽出し、両者を比較した (図 6-10)。

比較結果から、元形状のキーカーブを境界として、変形予測結果のキーカーブと対称になるよう修正カーブを定義し、この修正カーブを元に全体を修正したモデルを製作した。

再制作したモデルで再び FEM 解析を行うと、目的とする形状との誤差は $\pm 0.5\text{mm}$ 以

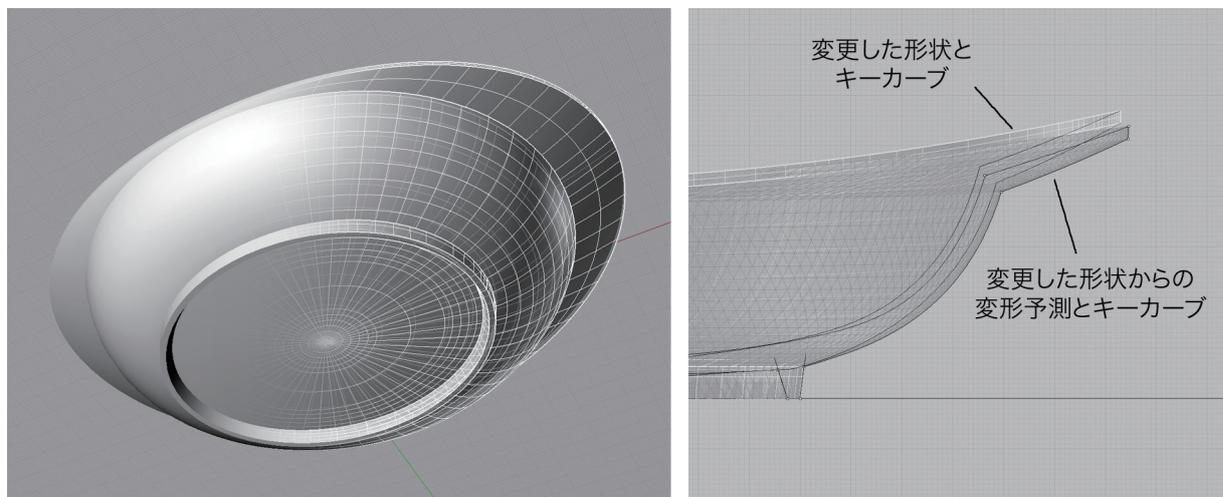


図 6-9 修正案

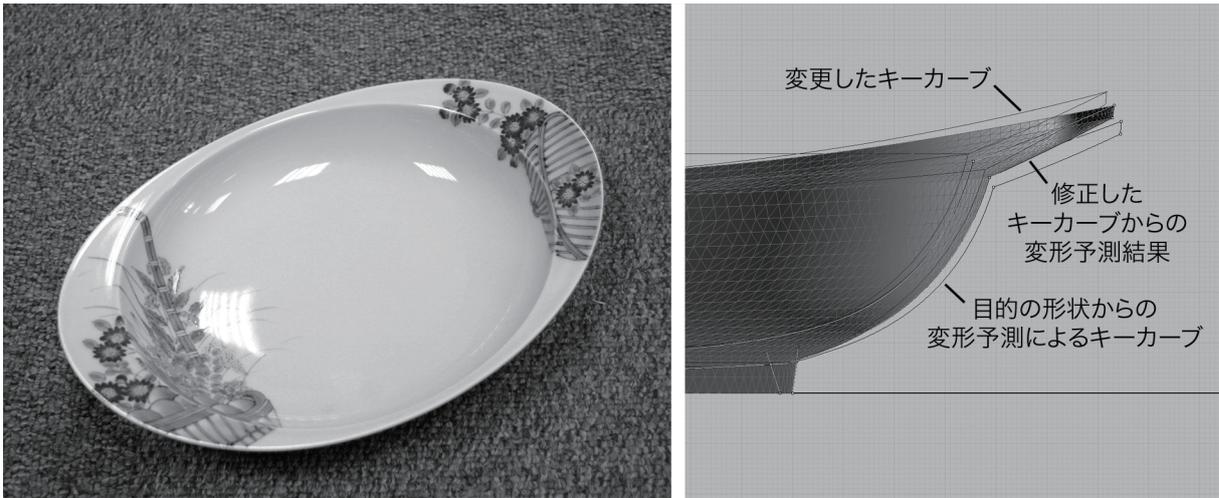


図 6-10 修正案の見込み形状と変形予測

下となった。この修正モデルデータを基に、型製作を行った。

結果として得られた試作品をデジタイザで測定し元データと比較したところ、ほぼ FEM 解析と同じ $\pm 0.5\text{mm}$ 以下の精度が得られた。従来の技術では最高でも $\pm 2\text{mm}$ 程度の製品精度だったので、飛躍的な精度向上を実現することができた。

6-6. 変形結果への対処法

さらに発展的な手法として、焼成後に目的の形状が得られるよう、FEM 解析で予測された変形と元形状を比較し、元形状を予測される変形と逆方向に変更した形状（見込み形状）を生成できるソフトウェアモジュールを用意した。このモジュールはマテリアライズ

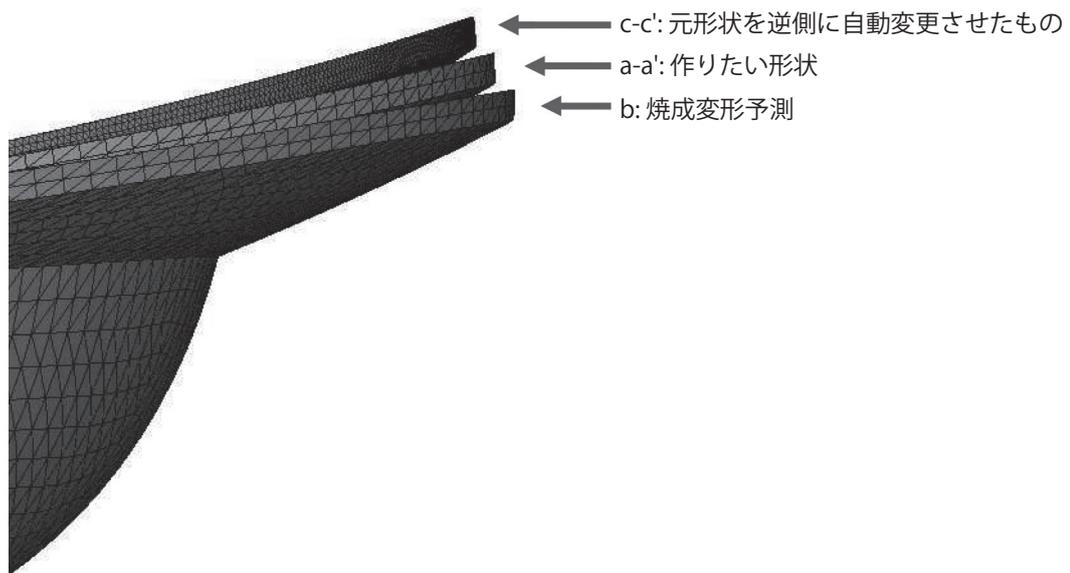


図 6-11 見込み形状の自動制作モジュール

社（ベルギー）製ソフトウェア「3-matic」上で動作するもので、マテリアライズ社の協力により完成した。これは a. 元形状の IGES データと、a'. FEM 解析用にメッシュ変換した STL データ、b. FEM 解析による変形予測後の STL データの 3 つを比較し、b. 変形予測を行った結果の STL データから a'. 元形状の STL データを軸にして c. 対称位置に変換したメッシュデータを生成し、さらに元形状の IGES データを細密な STL に変換した形状を a-c 間の位置関係に従ってモーフィング変形を行った細密な STL データ c' を生成するものである。図 6-11 はこのモジュールを用いて自動作成したデータを比較したものであるが、非常に良く一致していた。

前述のケーススタディでは、変形予測に対処した見込み形状を、基本カーブをマニュアル操作で変更して制作しなければならなかった。基本カーブを編集して形状を再制作することは、当初の形状を作る作業とほぼ同じものであり、効率的ではなかった。また、すべての部位において適切に変形を行うことは困難であり、適切に対応しきれない箇所も残っていた。

このモジュールを使用することで、すべての部位にわたって予測された焼成変形に対応した逆側の変位を与えた見込み形状を自動的に得ることができるようになった。

6-7. まとめと考察

実際の焼成変形は、使用する陶土で大きく異なり、また焼成条件でも若干変化する。従って、これらの条件が異なる場合には、パラメータも調整する必要がある。実際の予測作業を行うためには、使用する陶土に応じて弾性係数を 1.5 ～ 3 MPa の間で変化させ、焼成条件の変化に応じて与える重力を 30~50m/s² の範囲で調整する方法が良いと思われた。

一度実際の器物を焼成して変形量を測定し、パラメータの微調整を行うことで、より精度を高めることができる。同一の材料、焼成条件であれば、このパラメータを利用して、以後の様々な製品の変形予測を行うことができる。

以上の研究の結果、従来は経験に基づいた不確実な予測しかできなかった陶磁器の焼成変形予測が、試作焼成を行うことなく行えるようになった。一連のサイクルは 1 時間程度で終了することが可能で、今まで試作のために焼成を終えるまで 1 週間程度必要だったことを考慮すれば、飛躍的に短時間で、より高い信頼度で予測と修正対応ができるようになった。これはデザインプロセスにおいても飛躍的な短縮を実現した。

視覚的に変形の傾向と変形量を確認することが可能で、変形が大きいと予測される部位

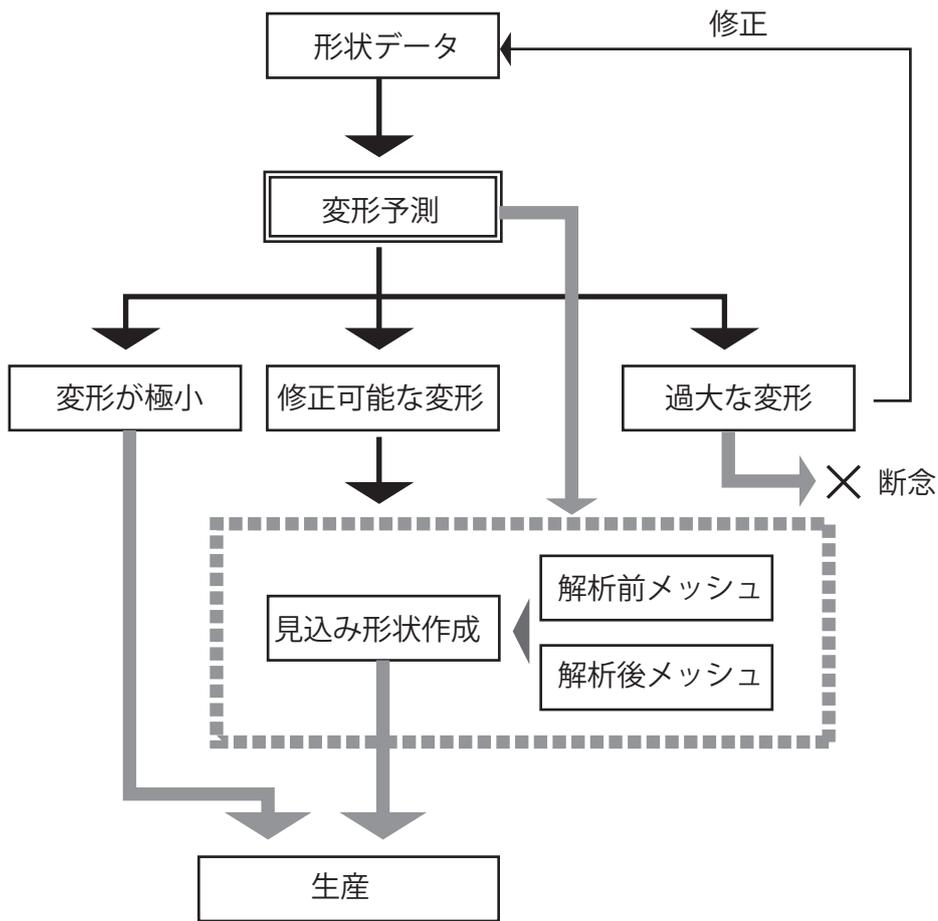


図 6-12 焼成変形予測技術のワークフロー

を特定した上で、変形予測の結果に応じて必要最小限に肉厚を増し、解析を繰り返すことにより、大きく重量を増すことなく目的の形状に近づけることが出来る。変形量が過大であれば、製品化が困難であることを判断する指針にもなる。従来のように不必要に厚みを増す必要がなくなり、試作から製品に至るまでの原材料ロスを節減することにもつながる。消費者からは重い食器が嫌われ、「軽い食器」が求められることが多くなっており、この要求にも応えやすくなる。

この変形予測手法は、CAD/CAM 技術を利用した石膏型の直接切削製作法³³と組み合わせることで、元の形状に対する修正を成型のための型に正確に反映させることができるため、製品の精度向上も期待される。