構造実験に基づいた乾漆造形手法の研究

土岐謙次[*1] ○金田充弘[*2] 尾関美紀[*3]

Study of the KANSHITU modelling technique through structural experiments

Kenji TOKI, Mitsuhiro KANADA and Miki OZEKI

Besides being a painting material, natural Japanese lacquer called URUSHI is a form-making material. While advantage of natural materials that could replace the fossil-origin item is freshly observed, the diverse character of the material has been revaluated in recent years therefore gathering URUSHI and its production are being reopened in Japan.

The method called KANSHITSU is a way of making forms by using composite material that consists of natural fiber such as hemp for the structure and URUSHI as a resin. This method has same principle as FRP (Fiber-Reinforced Plastic) and Japanese people were hundred of years ahead of their time in the way they worked on KANSHITSU before the invention of FRP in the twentieth century. Also meaning as a recycling natural material is expected.

This research reveals the possibility of KANSHITSU being able to substitute FRP positively by an experiment to test the structural physical properties of KANSHITSU as a natural composite material and also reports the process of designing and fabricating a monocoque-structured chair that is made by the method of traditional KANSHITSU.

キーワード： エコデザイン，プロダクトデザイン・マテリアルデザイン，設計論・設計方法論（デザイン論・デザイン方法論）

Key words: eco-design, product design, material design, design argument/argument of design method

1. はじめに

枯渇が危惧される化石燃料由来品に替わる素材開発において植物原料等の利点があらためて注目される中、塗料であると同時に造形素材でもある天然漆の多様な性質が注目され、全国各地で漆採取・生産が再開されつつある。乾漆は、麻などの天然繊維を骨材に、漆を母材とした複合素材で、繊維骨材を用いて母材を強化するという点において FRP(Fiber-Reinforced Plastic／繊維強化プラスチック)より遙かに先駆けて実現された素材構成的に同じ発想の技法であり、リサイクル可能な天然素材としての意義も期待されている。

本研究は天然コンポジット素材としての乾漆の構造物性に関する基礎的データを構造実験によって収集し、FRP をはじめとするさまざまな材料との比較により、サスティナブルな構造材料として造形性も含め FRP を代替しうる可能性を実証的に示すことを目的としている。また、上記データをもとに、乾漆の構造物性を用いたシミュレーションおよびその結果を活用した構造計画・設計を可能にする将来的なシステム開発を視野に入れている。この研究は平成 23 年度科研費研究「乾漆を応用した炭素繊維漆コンポジットの制作工程の最適化と構造材料としての強度試験」の一部として行われている。

本稿では上記研究計画のうち、乾漆の構造実験から得られた知見と、乾漆の伝統的な造形手法である外骨格的構成を活かした椅子のデザインおよび実制作の過程を報告する。

2. 研究の背景

かのオーギュスト・ロダンをして「彫刻の内部から膨らむようなやわらかい表現は日本人の感性によってのみ生み出すことができる」と言わしめたほどの日本古来の造形技法である乾漆は、奈良時代から平安時代中頃まで仏像や伎楽面などの彫像製作を中心として用いられた造形技法である。当麻寺の四天王や近年各地で公開され話題を呼んだ国宝興福寺八部衆像・阿修羅像などは奈良時代の乾漆仏像彫刻の代表作である。乾漆は、古くは壗（そく）または夾紵（きょうちょ）とも呼ばれ、麻や苧麻（からむし）を織り上げた布を、漆を基材とした接着剤で粘土や木材で作った型に幾重にも貼りつけ、厚みの整ったところで離型し、さらに表面に漆を塗り重ねて仕上げを行う、立体造形技術である。

上記のように造形の初期段階で型を利用するものの、基本的に乾漆はモノコックやシェルと呼べる「外骨格構造」である。現代において一般的に工業製品においてこうした外骨格構造を作る場合は主に FRP が用いられる。各種の型を利用して骨材のガラス繊維に母材となる液状合成樹脂を含浸させて硬化後、離型して形状を得る成型方法が一般的である。合成樹脂としては一般に、不飽和ポリエステルやエポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂を使用することが多い。これら合成樹脂はいずれも製造の過程で精製プラント等大規模な設備が必要であり、また出来上がった FRP は素材の分離が困難であるため、一般にリサイクルや

*1 宮城大学事業構想学部デザイン情報学科, 助教, 日本デザイン学会(正会員), 修士(美術)
Research Associate, Department of Spatial Design and Information Systems, School of Project Design, Miyagi University , Master of Fine Arts
*2 東京藝術大学美術学部建築科, 准教授, 日本建築学会(正会員), 修士(理学)
Associate Professor, Department of Architecture, Tokyo University of the Arts, Master of Science
*3 東京藝術大学美術学部建築科, 教育研究助手, 学士(工学)
Assistant Researcher, Department of Architecture, Tokyo University of the Arts, Bachelor of Engineering

廃棄処分が難しく環境負荷の高い素材である。さらに将来的に枯渇する蓋然性が高い化石燃料由来であることから、循環型もの作りに対する社会的な機運・期待にそぐわない材料であると言える。

一方、漆は酵素ラッカーゼによって空気中の酸素を取り入れ漆の主成分であるウルシオールが重合し長くつながり，さらに酸化重合により網目状に高分子を形成し硬化する天然高分子素材である。このことから塗装用途以外にも木材や陶磁器の接着剤としても利用されてきた。漆はアジア全般に植生する天然木から採取される樹液を精製して得る。接着剤として利用される生漆（きうるし）の場合、適温のもと攪拌し水分を蒸発させるだけであり、精製に大がかりな設備は不要である。樹木としての漆は通常一定範囲に植林された樹木から得られるもので、原料としての漆は計画的・持続的な生産が可能な点において環境負荷の小さい材料であると言える。また漆は化学製品に比べて硬化にやや時間を要するものの、接着力は強力でありまた酸・アルカリにも高耐性の優れた天然樹脂である。

これらのことから、漆は来るべき循環型社会においてあらためて注目すべき高機能天然素材であり、これを最大限利用する乾漆は立体構造としての再評価のもとに現代のもの作りに適した技術開発を行う余地のある未来的技法と考えられる。

これまで、乾漆は仏像などの立体造形技法として成立しているが、乾漆そのものが主構造となり自立しさらに荷重を支えるような家具や調度品はほとんど作られていない。また、接着強度や高温硬化（焼き付け）、硬化速度の改善、かぶれにくさ、耐候性など、漆の性質改善や伝統技法に関する科学的・学術的研究は様々になされてきたが、これまで荷重特性や座屈耐性といった構造材としての力学的物性の検証は行われていない。

3. 構造実験について

乾漆試験体の構造実験は、乾漆のもつ構造特性（強度・剛性）を定量的に把握することを目的とする。また、乾漆との比較対象として、カーボンファイバーに漆を含浸させたもの（以下、「カーボン漆」）を乾漆試験体と同形状で作り、同様に実験した。

3.1 試験体作成

圧縮試験用試験体は、塩ビ管（外径 60mm）に布状になった繊維（綿またはカーボンファイバー）を巻きつけ漆を含浸させる工程を繰り返し行なうことで内径を統一し層数の違うものを数パターン作成した。脱型した後上下を切り落とし高さを統一した。なお、すべてが手作業で行われるため、試験体の長さ、板厚等には若干のばらつきが生じた。

引張試験用試験体は、平板状に制作したもの（繊維に漆を含浸させる工程は圧縮試験体と同様）を JIS 規格による「金属材料引張試験片」のうち 4 号試験片を参考とし決定した形状にレーザーカッターにて切りぬいた。

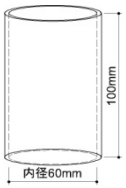

図.1 圧縮試験片形状

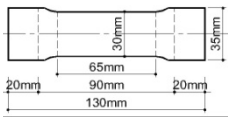

図.2 引張試験片形状

3.2 圧縮試験

圧縮試験は、乾漆、カーボン漆とも 4 層、8 層の 2 種類を各 5 体ずつ行なった。以下に代表的なものを抜粋した結果を示す。

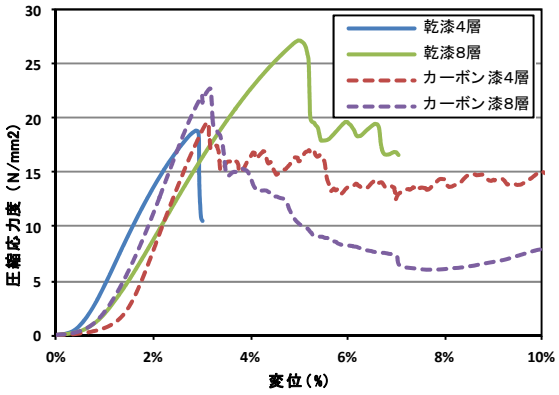

図.3 圧縮応力度－変位 曲線

表.1 圧縮試験結果

試験体種類	最大圧縮力 (N)	最大圧縮力時変位 (mm)	試験体断面積 (mm^2)	最大圧縮応力度 (N/mm^2)	平均剛性 (N/mm^2)
乾漆 4 層	6157	2.87	327	18.83	846
乾漆 8 層	18450	4.96	677	27.26	734
カーボン漆 4 層	6350	3.06	325	19.55	1186
カーボン漆 8 層	13870	3.17	612	22.68	1093

圧縮力に対し剛性、強度とも大きな差が見られなかったのは、共通で用いている漆がより影響しており、繊維による影響は大きくないと考えられる。また、最大圧縮力を超えた後、乾漆については変位が伸びず縦糸（加力方向）が切れるような状態で面が破断するが、カーボン漆については局部座屈を順に起こしながら変形が大きくなり、縦糸の破断が部分的に見られるものの、面として破断はしていない。

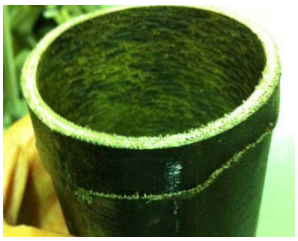

図.4 圧縮試験後試験体状況（乾漆）

図.5 圧縮試験後試験体状況（カーボン漆）

3.3 引張試験

引張試験は乾漆が 2 層、4 層の 2 種類を、カーボン漆は 1 層の 1 種類を各 5 片ずつ行なった。以下に代表的なものを抜粋した結果を示す。

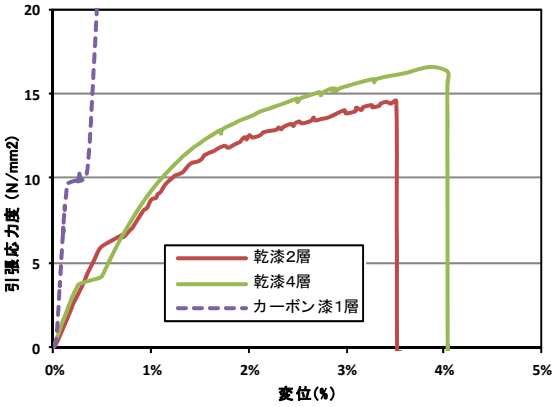

図.6　引張応力度－変位　曲線

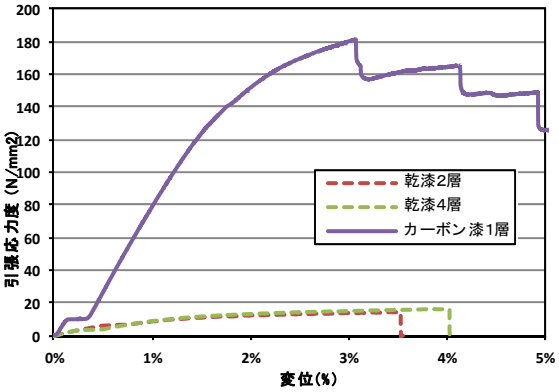

図.7　引張応力度－変位　曲線（カーボン漆最大値）

表.2　引張試験結果（弾性範囲）

試験体種類	弾性引張力 (N)	試験体断面積 (mm^2)	弾性引張応力度 (N/mm^2)	弾性域最大変位 (mm)	引張剛性 (N/mm^2)
乾漆 2 層	113	16.5	6.84	0.689	893
乾漆 4 層	110	29.5	3.73	0.231	1453
カーボン漆 1 層	116	12.0	9.66	0.124	7012

表.3　引張試験結果（最大値）

試験体種類	最大引張力 (N)	最大引張応力度 (N/mm^2)	最大引張力時変位 (mm)
乾漆 2 層	241	14.6	3.08
乾漆 4 層	491	16.6	3.48
カーボン漆 1 層	2175	181.3	2.76

弾性域での最大引張応力度（第 1 折れ点）を比較すると、乾漆 2 層に対しカーボン漆 1 層の値が約 1.4 倍となっている。また、最大引張応力度を比較すると 10 倍以上の差がある。これは引張力に対してはそれぞれの繊維が大きく影響していると考えられる。また、破断状態の違いも顕著であり、乾漆が縦糸（加力方向）のほぼすべてが破断しているのに比べ、カーボン漆は縦糸の破断が部分的に見られるものの、面として破断はしていない。

図.8　引張試験後試験片状況（乾漆）

図.9　引張試験後試験片状況（カーボン漆）

4.　椅子のデザインと実制作

定量的な数値結果を収集するための構造実験と並行して、乾漆の構造物性を実証的に検証するために人体の荷重を支えられる構造物として椅子を制作した。骨材となる繊維の強度を最大化するため一枚の布（寒冷紗）を裁断することなく折り曲げのみで構成出来ることを形態の条件とした。さらに乾漆は基本的に型による成形法であることから、離型性を考慮した形態も条件とした。以上の条件から造形可能な二次曲面で構成された形態を検討するために CAD によるシミュレーションを行った。

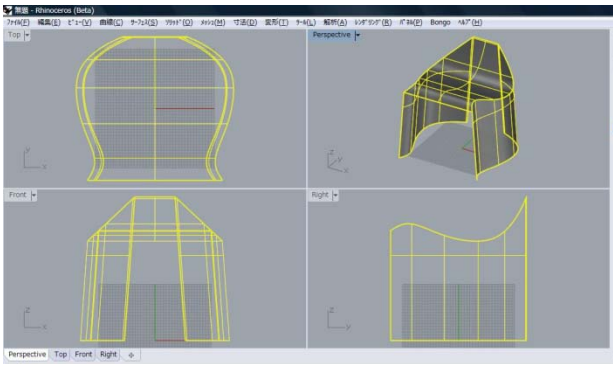

図.10　CAD による形態シミュレーション

図.11　形態スタディ

CAD によりシュミレーションされた椅子の外形をそのまま反転すると型の凹面表面データになる。この雌型設計プロセスにより型についても CAD 上で設計を行った。デジタルデータであるため、それを活用するデジタルファブリケーションツールを使っての制作も可能となった。よって、型の中でも曲線が多く

手で切ることが難しいものや、高い精度を求められるパーツについては、レーザーカッターによる木製合板の切り出しを行った。

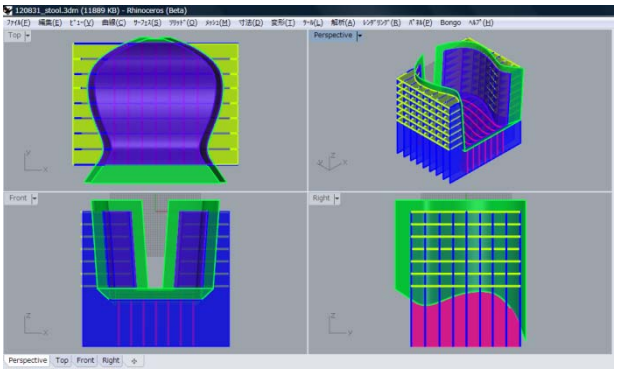

図.12　CAD による型の設計

図.13　レーザーカッターにより切り出された木製合板

型を要する脱活乾漆技法（型表面に繊維骨材を漆で貼り込んで硬化後、脱型する技法）と CAD を活用した形態定義、デジタルデータ化されることにより可能となるデジタルファブリケーションツールの活用という一連の技術の親和性が「乾漆技法」と「木型による制作」という新たな出会いを生み出したことに意義がある。

図.14　木型（上枠）

図.15　木型（下枠）

今回の乾漆椅子は、寒冷紗を漆で 8 層に積層することによって制作された。制作にあたっては漆作業を未経験の建築科学生を含む複数人からなるチームで制作を行った。

図.16　共同制作の様子

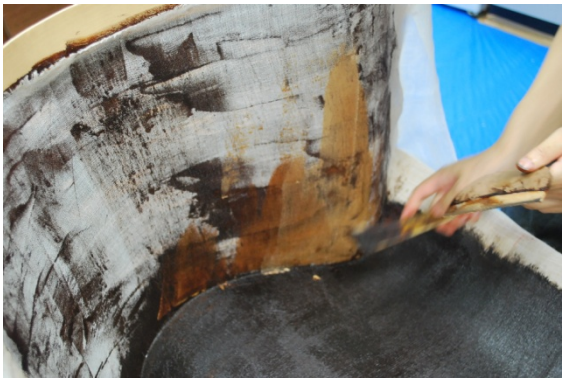

図.17　積層の様子

従来の一人の職人が行う乾漆の積層工程では、一層を漆で型に貼り込んだ後、作業当日の温湿度から判断した硬化に適した環境にムロ[注1]内部を調整して静置、硬化させた後、次層を同様に貼り重ねる工程を繰り返し行う。今回の試みでは複数人で作業経験を共有し、かつ積層技術を一般化するために行程を整理した制作マニュアルを作成した。また、作業状況や静置のための環境（温度、湿度、天気）を都度確認し記録してゆくことで、必要とされる一定の環境を保持することに務めた。これは、これまで職人の経験と勘に頼ってきた乾漆積層技術を規格化・一般化し、作業従事者固有の技術的特性に依存しない安定した製品を製作するためのガイドラインとなるものである。

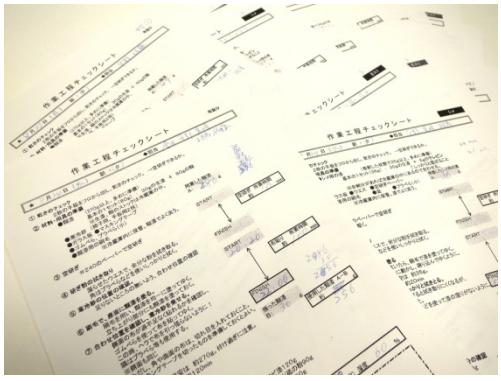

図.18　記録用紙

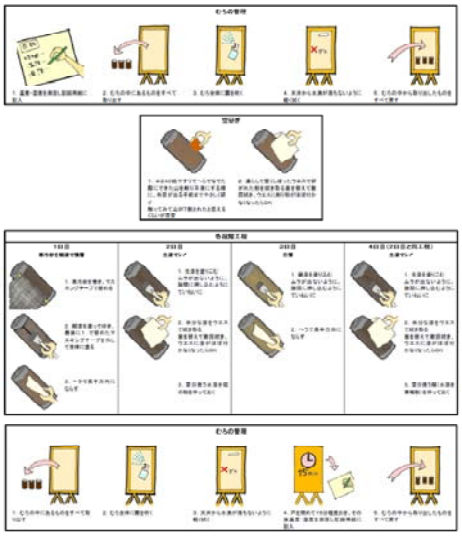

図.19　制作マニュアル

その工程の管理と技術的留意点、参加者の呼びかけはメーリングリスト上で行った。伝統的には分業で行われる漆器製作は前工程から次工程への職人間の技術的申し送りの連鎖で行われる共同制作といえる。今回はこの各積層工程間の作業の申し送りをメーリングリスト上で行うことで、関係する者全員が情報を共有することができ、一定の品質で工程を進めることができた。また、各工程を監督する専門的技術者を置くことで技術の精度を確保した。情報共有技術を利用することで、工程のオープン化を計り、伝統的な工芸技法としての乾漆のイメージを素材の構成技術として捉えなおす機会となった。

図.20　乾漆椅子
（2010 年制作）

図.21　乾漆椅子とその型
（2011 年制作）

FRP (Fiber-Reinforced Plastic)に代わる漆(Urushi)の可能性を検証するための乾漆椅子の実験制作という意味で「FRU スツール」と名づけた。着座実験では成人男性でも十分座ることが出来た。これは現在意匠登録出願中[注2]である。

図.22　着座試験

5. ま　と　め

着座実験をすることにより乾漆のもつ強度や剛性を実証的に確認した。併せて構造実験を実施することで、乾漆の構造特性を定量的に把握することができた。しかしながら、条件の少しずつ違う材料の実験を並行的に行なうことで、乾漆の実験で示す挙動や結果が何に起因するものなのかをさらに分析する必要がある。

これらの特性をより精密に把握することで、形状のもつ力学特性に対し必要に応じた材料の配置や厚さを効率的に構造計画・設計を可能にする、今後の手法の開発につながる。また、この様な定量的な計画方法により乾漆の活用範囲を広げることに貢献することとなり、ひいては FRP を代替しうる可能性についても、より実証的に検討することができると考える。

注

注1)　漆製品を静置し硬化させるための閉環境。一般には木製の箪笥様の収容箱を用意しあらかじめ内部を加湿し高湿度状態を維持することから風呂（ふろ）とも呼ぶ。

注2)　出願（申請）番号　意願 2012－　6227

参考文献

1)　小松大秀、加藤寛：漆芸品の鑑賞基礎知識、（1997）、153、至文堂

2)　森山貴之、伊村靖子：共創のかたち デジタルファブリケーション時代の創造力、(2011)、43、京都市立芸術大学ギャラリー@KCUA