

コンピュータ数値制御三軸加工機を用いた セルフビルドによる内装下地構法の開発研究

構法計画研究室 中村 協央

第1章 はじめに

1. 1. 研究の背景

2000年代半ば以降、デジタルファブリケーション^{注1)} (以下 DF) の認知度は着実に向上し、個人での利用も特別ではなくなってきた。生産方式も、工場での少品種大量生産モデルから、個人による多品種少量生産モデルへの転換が展望されるようになり、FabLab^{注2)}をはじめとした工作施設は全国的な展開を見せている。近年では DF 機材の大型化により出力寸法が拡大したことで、世界中で 3D プリンターやレーザーカッター等を用いた建築技術の研究・開発が数多くなされている。

一方日本の建築産業構造が既存ストックを活用する方向へと転じたことで、「リノベーション」という言葉の認知度が高まった。職人不足による工費上昇、ならびにインターネットの浸透によりノウハウを容易に習得可能になったことなどから、構造躯体に関係しない工事を居住者自身で行う Do-It-Yourself (以下 DIY) の広がりも顕著で、DIY を前提とした中古住宅の売買も多く見られるようになった³⁾。以上のように、建築生産過程の末端を一般消費者に開こうとする動きがあると同時に、個人が DF 機材を使用する機会も増えている中で、建築生産におけるのパーソナル・ファブリケーション^{注3)} の活用方法を探る意義は大きい。

1. 2. 先行・関連研究および事例

CNC 加工機を用いた建築工事は先行事例が多く、英国の建築家 Alastair Parvin らによるプロジェクト「Wikihouse」、慶應義塾大学 SFC 小林博人研究会による「ベニヤハウスプロジェクト」などが主要な事例として挙げられる。二者に共通するのは、CNC 加工機を用いて部材加工を行うことで、接合・組立ては素人によって行うことが可能となる、という点である。ただし、これらの事例は構造体の組立に主眼をおいているものであるため更地に建築することが前提であり、既存躯体に対しての内装施工に応用する想定はなされていない。

また、DF を用いた建築工事を試みた研究として、石田ら³⁾では 3 次元スキャナを用いた既存躯体計測と、そのデータを用いた間仕切り壁の設計・施工を試みられているが、デジタル化されたのは入力工程であり、出力工程において DF は活用されていない。

1. 3. 研究の目的

本研究は、コンピュータで数値制御された (Computerized Numerical Control) 三軸加工機 (以下 CNC 加工機 とする) の使用によって内装工事のセルフビルド化を支援しようとする研究である。内装工事の中でも特に構造形式が鉄筋コンクリート (以下、RC) 造である場合、内装部材は不陸のある躯体表面と取り合うため施工に高度な技術を要する場合が多い。そこで今回は RC 造の内装工事に着目することとし、CNC 加工機を活用することで RC 造の内装構法を簡易化することを主な狙いとする。

したがって本研究は、躯体の計測から部材の設計、部材加工、躯体への据え付けまでに至る一貫した設計・施工手法の開発、ならび

に CNC 加工機の導入がセルフビルド化に及ぼす効果の検証を目的としている。

1. 4. 本論文の構成

本論文は 4 つの章で構成される。

第 1 章では、概要として社会的・学術的背景をまとめた上で本研究の位置づけを明らかにし、研究目的を定める。第 2 章では CNC 加工機を床下地の施工に導入し、その記録をまとめた。精度・工程・コストに着目して記録を行い、比較事例として同室で行った在来構法による壁面施工についても記録した。

第 3 章では前章でまとめた記録について分析を行っており、床面と壁面の実験記録を照らし合わせることで CNC 加工機を用いた施工の特性を考察する。第 4 章においては本研究の成果をまとめるとともに、第 3 章の分析から見えてきた CNC 加工機の導入効果を踏まえ、セルフビルドにおいて DF が如何に位置付けられるかを論じる。また、実用可能性をより高めるための条件整理・提案を行うことで今後の課題を明示し、結論とした。

第2章 実施した鉄筋コンクリート造改修実験に関して

2. 1. 実験の目的

前述の通り、本研究は内装工事における CNC 加工機の導入効果を明らかにすることが目的である。そのため CNC 加工機を用いて施工した場合と、CNC 加工機を用いず在来構法で施工した場合の二者間で比較が必要であろう。よって本実験は、定量的に比較可能な工数・費用・精度に着目した施工記録を採取することが目的である。

2. 2. 立案した計画の概要

施工実験として居室の改修を行った。対象居室は神奈川県川崎市の複合施設内のオフィスである。室面積は 7.55 m²、仕上げ後の天井高は最高点で 2540mm、最低点で 2410mm である。実験前の状況は、天井および東面・北面壁は仕上げ済、その他はスケルトン状態であった。新設部は LGS 下地の上 12mm 針葉樹合板仕上げ、床面は全面 RC 造躯体現し、壁面はコンクリートブロック造モルタル仕上げ、一部仕上げの剥離が見られた。床および壁の凹凸が激しく、機能性・意匠性ともに改善されることが望まれた。与件として水平垂直がとれて且つ平滑な床・壁を新設すること、そして床をなるべく低く仕上げることが求められた。また可能な限り低予算での実施を望まれたため、今回新設した壁および床表面は比較的低価格である針葉樹合板で仕上げることにした。

2. 3. 実験における条件

実験の条件を以下に示す。

①施工実施者: 施工を行ったのは大工 1 名と筆者の計 2 名である。床パネルの設計と加工は筆者が行い、壁面の施工および床パネルの据付は原則として職人が行い、適宜筆者が補助した。

②実験に用いた材料: 本研究はセルフビルド化を指向しているため、ホームセンターで調達可能な材料を用いることを原則とした。

③実験に用いた工具: 施工にあたって、工具は主に職人の私物を

使用した。CNC 加工機に関しては、当該オフィスが入居する複合施設の 1 階にあるファブスペースが保有する機材を使用した。3 次元スキャナに関しては本学所有のものを使用した。それぞれの性能は表 1 の通りである。

2. 4. 記録および記録整理方法

本研究では当該改修工事について工程調査を行った。調査対象は現場計測から設計を経て加工、据え付けまでの全行程である。詳細な工程及び各作業に要した時間を直接観察法によって計測した。ストップウォッチを使用し、工具類の持ち替え、部材の持ち替えを主な区切りとして作業内容および時間を記録した。

2. 5. 床面の施工に関する実験記録

2. 5. 1. 床パネルの設計

既存の床面モルタルを撤去したと思われる痕跡があり、写真 1 のように全体的に不陸があった。今回の改修では床面の不陸・凹凸を 3 次元計測し、得られた 3 次元形状を CNC 加工機によって合板表面に削り出す手法を考案・援用した。24mm 厚の構造用合板を材料として用い、上部 12mm は切削せずに完全な板として残し、下部 12mm はグリッド状に構成し接地するような構成とした。これは接地面をグリッド上に限定することで、切削誤差によるガタツキを防ぐためである。グリッドはパネルのたわみが無いよう十分に強度を持つピッチとし、三六判(910mm×1820mm)を 32 等分するグリッドを基本とした(図 2)。躯体に対する固定方法は、施工時間の短縮と固定後の安定性を考慮し、コンクリートビスとウレタン系接着剤の併用とした。論文中では当構法を便宜上「CNC 床パネル構法」と呼ぶこととする。6 枚のパネルにより構成し、パネルの目地が既存壁面の目地と一致するように計画し、墨にパネル端部を合わせるように施工することとした。壁際の納まりは計測・加工・施工の各工程で誤差が蓄積することを見越し、設計上では 2mm 縮小させ逃げを取った。

2. 5. 2. 居室の 3 次元計測

3 次元スキャナの特性上、計測対象とスキャナの距離に応じて精度が変化し、近いほど高い精度で点群を取得できる。より正確な床面の 3 次元形状を取得するため、4 回に渡って計測した後 3D モデリングソフト^{注5)}を用いて点群データの合成を行った。

2. 5. 3. 床パネルの切削および据付け

加工に用いた刃物の直径は、1/4 インチ(6.35mm)、1/2 インチ(12.7mm)の二種類である。1/4 インチビットで切削をすると切削時間が膨大となるため、時間短縮のため一部 1/2 インチビットを用いた。切削後、据付けにあたってコンクリートと接する部分は腐敗のおそれがあるため防腐剤を塗布した後、丸一日乾燥させた後にウレタン系接着剤を塗布し床に固定した。ウレタン系接着剤はパネルのグリッドの中心線をなぞるように、1m あたり 15ml 程度の要領で塗布した。

2. 5. 4. 材積の記録

部材取りは図 3 のように行った。購入した 24mm 針葉樹合板 6 枚のうち平均約 70%を使用した。さらに三次元的に削り出しているため、70%のうち約 20%は木粉として廃棄している。したがって実質施工した材料は購入分の約 56%である。防腐剤は接地面に約 450ml 塗布、固定用のウレタン系接着剤は約 920ml 塗布し、コンクリートビスは 43 点打設した。

表 1 3 次元スキャナおよび CNC 加工機の性能

3次元スキャナ性能表		CNC加工機性能表	
計測範囲	0.6～130m	加工可能範囲	±0.05mm
測定精度	±2mm	加工精度	3.05m×1.52m×0.15m
測定レート	122,000点/秒 ～976,000点/秒	加工速度	15.24m/分 ～18.288m/分
レーザー照射間隔	0.19 mrad		
スキャニング範囲	鉛直方向：0～300° 水平方向：0～360°		



写真 1 既存床面 写真 2 施工後床面

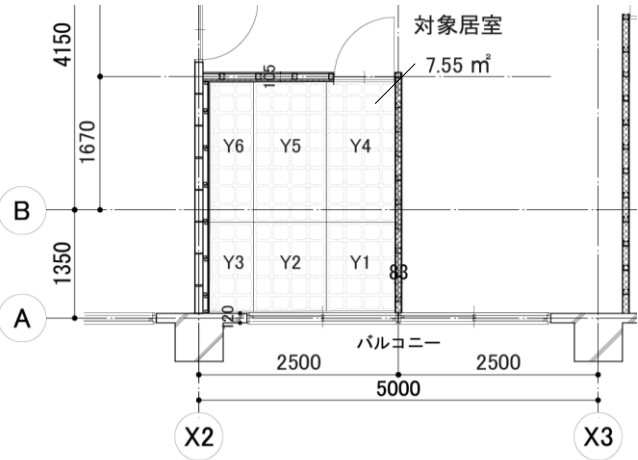


図 1 対象居室平面図・床パネル割付

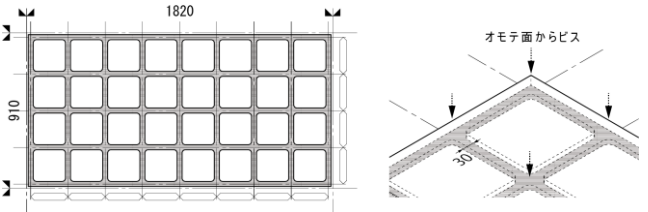


図 2 床パネルの標準モジュール

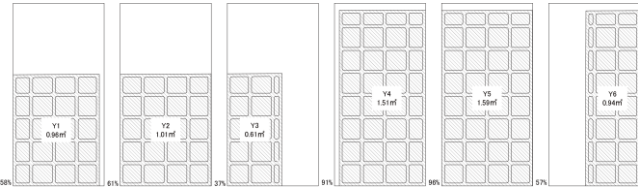


図 3 床パネル材料取り図

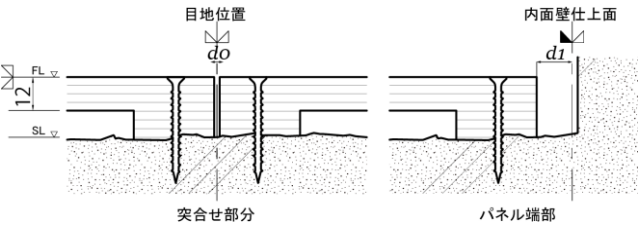


図 4 床パネル断面と組立基準面

2. 5. 5. 精度の記録

設計時に定めた施工基準面からの誤差を計測した。設計時に設定したパネル目地寸法 d_0 および内面壁仕上面からの逃げ d_1 (図 4 に示す) について実測を行った。その結果を図 5 に示す。パネル目地部分は $d_0=0\text{mm}$ 、壁際は $d_1=2\text{mm}$ として設計したが、 $\pm 2\text{mm}$ 前後の誤差が確認された。一方でパネル上面の傾斜はおよそ $2/1000 \sim 4/1000$ であり、ほぼ品質に問題がないとされる数値であった。

2. 6. 壁面の施工に関する実験記録

2. 6. 1. 壁面木下地の計画

30mm×40mm 角のアカマツ角材を用いた在来構法壁下地を計画した。壁面は仕上げ剥離による凹凸が見られたため、2m 定規を用いて大まかな不陸確認を行い、最も突出した部分から 3mm の逃げを取った位置を基準面とした。後々の解体を考慮しビスによる固定とし、壁面上端・右端に関してはそれぞれ天井、北側壁の LGS 下地に対して固定し、下端・左端はコンクリート躯体に対して固定することとした。仕上げ材を三六判の針葉樹合板とするため、上端と下端の間に 455mm 間隔で胴縁を施工し、胴縁の位置は天井仕上げの目地位置を基準とした。胴縁の振れ止めとして、約 250mm の胴縁受を胴縁の中程に配置しコンクリートブロック壁面に固定する計画とした。

2. 6. 2. 壁面木下地の施工

施工時の納まりの考え方は基本的に製作面押えである。手順は大きく 3 つに分解でき、①壁面四周に周る部材 (F1～F5) によって面を定め、②それらを定規として胴縁 (F6～F11) を配したのち、③東側壁面を押さえる胴縁受 (F12～F17) を施工する。

2. 6. 3. 材積の記録

発注した 30mm×40mm×3m アカマツ角材 10 本のうち約 90% を施工に用いた。固定用にコーススレッド 52 本、コンクリートビス 40 本を使用した。F3・F5 には防腐剤を約 70ml 塗布している。

2. 6. 4. 精度の記録

仕上げの 12mm 針葉樹合板が施工完了した状態で、レーザー墨出し器を用いて不陸の検査を行った。壁面下端を基準とした垂直面に対する面の出入りを観察したが、壁面中央部に 1mm 程度の突出が見られた程度でほぼ垂直が保たれていた。

第3章 CNC 加工機の導入効果の考察

3. 1. 工程についての比較と考察

前章の実験で得られた記録を作業分類した。記録の結果はスプレッドシートにまとめた上で『作業能率測定指針』(日本建築学会, 1990) に則って作業を分類し、使用した工具についても作業毎に記録した。床作業に関しては CNC 加工機による加工時間が膨大であることは勿論だが、表中①b に示す付随作業、②に示す付帯作業が増加している。これは CNC 加工機を動かす上で発生した作業が影響していると見られ、「DF のための手作業」が発生したことを意味している。また使用工具ごとで作業を分類すると作業時間の内訳は図 8 のようになり、材料の固定に用いるインパクト、振動ドリルは共通して高い割合を示したが、墨出し、ケガキなどの計測作業、及び加工に用いる工具が床面の施工では使用率が低い。これは計測・加工の作業が DF に置き換わり、現場合わせの作業が少なくなったことを意味している。

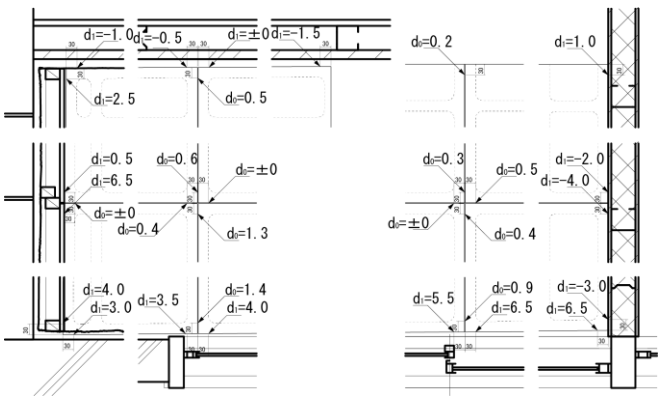


図 5 床パネル施工誤差

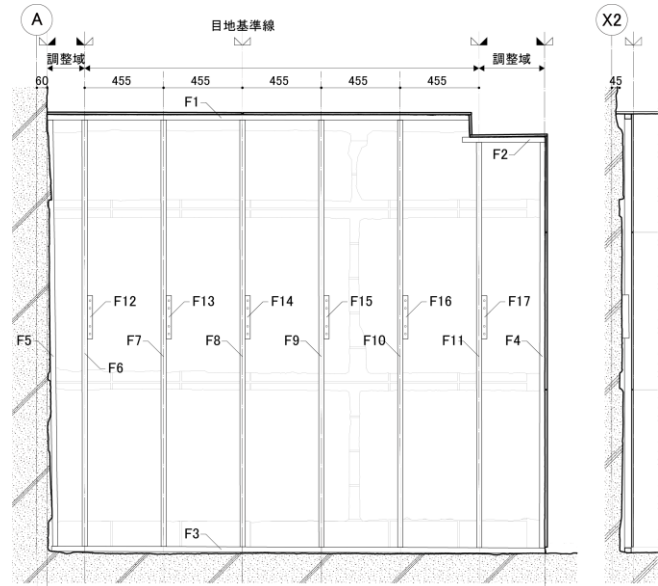


図 6 壁下地立面図・断面図

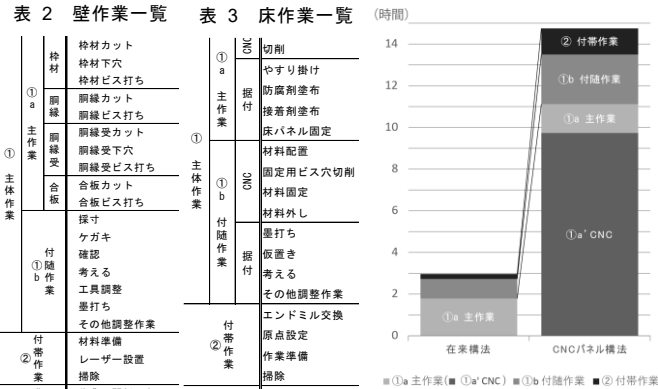


図 7 作業内容比較

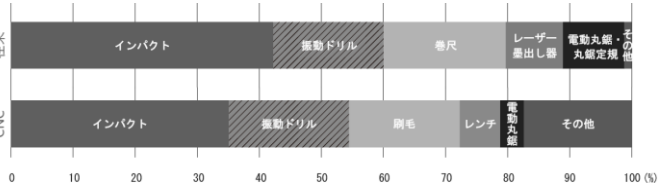


図 8 工具の使用時間割合比較

3. 2. 精度についての考察

施工後に確認できる誤差を分類すると、①計測誤差②加工誤差③施工誤差に分けられる。在来構法の工程で計測に用いた巻尺・指矩は目盛が 1mm 単位であることから測定精度は約±0.5mm、加工に用いた丸鋸の切り幅が 1mm であることから、加工誤差は約±0.5mm で発生すると考えられる。施工段階での微調整によりこれらの誤差は吸収されるはずであるが、施工精度に直接関係する墨線の幅 1mm や、基準面合わせに用いた 2m 定規の微弱な曲がり等が影響して、最終的な誤差の発生に至っているものと考えられる。

CNC 床パネル構法の誤差は、前章で述べたように 3 次元スキャナの計測誤差±2mm、CNC 加工機は加工誤差±0.05mm に加えて刃物の太さによる加工限界の影響がある(図 9)。接地点部分に 2mm の隙間が観察された(写真 3)のもこれらの誤差の蓄積が要因と考えられるが、基準値以上の水平が保たれていることを考慮すると、ここで発生した誤差を吸収する役割としてウレタン系接着剤が働いている可能性がある。また正確な確認はできなかったが、施工後の床仕上げ高さはデータ上で指定した基準面よりも高くなっていると推測される。

3. 3. コストについての比較と考察

購入した材料は大きく①使用分②未使用分③廃棄分に分類できる。使用分と廃棄分を合わせた費用を材料費とし、材料費を見付面積で割った値で比較したところ、平米あたり約 1.8 倍床のほうが高かった。この差は 24mm 合板と接着剤の使用が主に影響している。また、実費は発生していないが、使用した 3 次元スキャナおよび CNC 加工機に関して同一機材の貸出料金の相場を参照し、参考使用料金を割り出したところ、CNC 加工機は約¥50,000、3 次元スキャナに関しては約 90,000 円と極めて高額となった。いずれの機器も普及度は低く、特に 3 次元スキャナに関しては一般消費者の実用までには程遠いことは明らかである。

3. 4. 在来構法による床の試設計と考察

同一条件下で在来構法を用いた施工をおこなった場合を想定し試設計を行い、前述の実験結果と比較した。在来構法のうち、乾式二重床構法と、湿式セルフレベリング(以下、SL)構法の二種を比較対象とした。三者の工程を比較すると、養生まで含めると乾式二重床構法が短工期で 1 日、湿式 SL 構法が最も長く 9 日。コストを概算すると、材料費のみで比較すれば湿式 SL 構法が最も安く、乾式二重床構法が最も高くなった。前述の通り CNC 加工機と 3 次元スキャナの費用を考慮すれば CNC 床パネル構法が最も高くつく。仕上がり进行比较すると、湿式 SL 構法が最底床で 23mm 程度、乾式二重床構法は床束によるが三者の中では最も床仕上げ面が高くなる(図 10)。ここから分かるのは、CNC 床パネル構法は底床仕上げや、部品の少なさ、材料費の低さに優位性が認められるものの、膨大な加工時間と使用機器の特殊性には課題があることである。

第4章 結論

CNC 加工機および 3 次元スキャナを用いた床施工を実施・分析し、DF を用いた内装施工手法を提案した。工数、精度、コストに焦点をあて在来構法との比較をすることで、内装工事における CNC 加工機および 3 次元スキャナ導入の有効性、ならびに導入にあたっての問題を示した。また床と壁の施工を詳細に記録分析したことで、

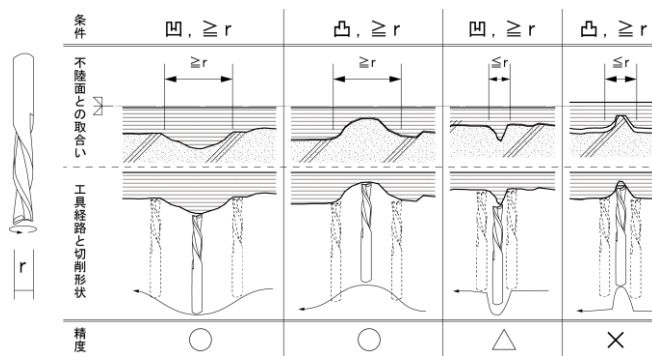


図 9 加工限界による浮きの発生

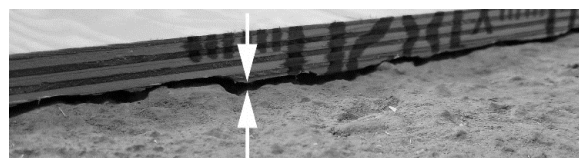


写真 3 床パネルの不陸追従

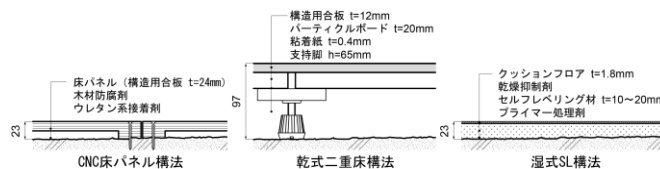


図 10 断面構成比較図

構法の違いによって生まれる作業内容や使用工具の差異を記述したことも成果であると言える。

実験により CNC 加工機の一定の有効性を示せたが、あくまで推論的であるため、複数回の実験に基づいた実証が必要である。しかし機器固有の精度や極めて高い価格など、技術発展によって大きく変化すると考えられる要素が多いことも分かった。また工程分析により、据付け時の構法が一部簡易化したことを確認できたが、セルフビルドの可能性を評価するためには多様な属性の被験者による施工実験を含めた定性調査を行う必要がある。

参考文献

- 1) 総務省情報通信政策研究所：「ファブ社会」の展望に関する検討会報告書，2014.6
- 2) (株) リクルート住まいカンパニー：リノベーション・DIY に関する意識調査，2014.12
- 3) 石田航星，嘉納成男，五十嵐健，藤井裕彦，大澤雄司，酒本晋太郎，富田裕行：内装部材のプレカット化のための 3 次元レーザースキャナを用いた計測と生産設計の手法に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第 78 巻，第 688 号，2013.6
- 4) 大野隆司：DIY による住宅改修作業の可能性に関する調査研究，日本建築学会計画系論文集，第 64 巻，第 517 号，pp173-178，1999.3
- 5) 日本建築学会：作業能率測定指針，丸善，1990.2

注

- 注1) デジタルデータをもとに創作物を制作すること全般を指す。
- 注2) デジタル・アナログ問わず多様な工作機械を備えた市民工房、およびそのネットワーク。
- 注3) Neil Gershenfeld (MIT Media Lab) により提唱された概念。コンピュータ、ネットワークを用いた個人によるものづくり全般を指す。
- 注4) 平成 12 年建設省告示第 1653 号「住宅の品質確保の促進等に関する法律(品確法)」第 70 条の規定に基づく「住宅紛争処理の参考となるべき技術的基準」を参照。
- 注5) Robert McNeel & Associates 社 Rhinoceros 3D 5.0 SR14 を使用。