研究工作支援と積層造形技術*

Engineering Support for Researchers and Layered Manufacturing

山澤建二**
Kenji YAMAZAWA

Key words

engineering support, layered manufacturing, 3d printer, additive manufacturing, rapid prototyping, vat photopolymerization, binder jetting

1. はじめに

近年高度化した科学技術の研究開発を技術的な側面から支援する組織とその設備は重要性を増し、大学や試験研究機関においては、そのための体制を整備し、さらに充実させていくことは、科学技術発展のため必要不可欠なものと考えられる。筆者が所属する理化学研究所（以下、理研）では、特に「ものづくり」により研究を支援する業務（以下、研究工作支援）とその組織（以下、工作部門）が長い歴史と伝統をもち、高度な技術により科学者とその研究を支え、また、逆に科学者の要望から新たな技術の研究も生まれてきた。本稿では、その変遷と現在の研究工作支援の状況を紹介します。また、技術研究の側面から積層造形技術の応用例を紹介し、今後の方向性について述べる。

2. 研究工作支援

2.1 工作部門の発足と変遷

理研は「我国の産業の発展に資すること」を目的に科学研究と応用研究を行う最初の総合研究所として、1917年に設立されている¹⁾。それから株式会社科学研究所（1948～1958年）の時代を経て、2017年には創立百周年¹⁾²⁾を迎え現在に至っている。理研が研究機関として変遷をたどるなか、科学者とその研究を支える工作部門は、「工作係」として1921年に、初めて組織化されている³⁾。これには、世界を舞台にして研究を進めるために必要な最先端の理化学研究用機器や精密測定器あるいは計測機器類を国内で入手することは、まだ困難な時代背景があった。しかし、科学者が考案した独創的な実験装置や試験機器類を具現化するためには、それらを製作できる技術や設備の導入と人員の整備が必要であり、その重要性を当時多くの科学者が深く認識していたことが、工作部門の発足へとつ

ながっていった³⁾。このことは、現在の工作部門はもとより大学や試験研究機関における研究支援組織の在り方にも深く関係していると考えられる。その結果、工作部門には、例えば回折格子の精密加工（ルーリングエンジン）など高度な技術が集積し、研究所の先端的研究を支える技術者の集団となり、それからの伝統を形成するに至っている⁴⁾。

工作部門発足の本来の目的は、研究室で使う実験装置や設備の製作であったが、小型の精密旋盤などの工作機械も製作していた（1934年精機部として分離・独立）。また、ガイガー・ミュラー（GM）計数管、ポケット線量計、ポケット膜厚計、摩耗試験機、セメントコンパレーターなど、それまで工作部門で試作・開発されたオリジナリティのある多くの精密機器や計測器類は外部からの要望により研究所の内外で製造販売され実用化されている（図1）。

1958年以降、工作部門は工作部（1964年）、技術部（1984年）、研究基盤技術部（1988年）、工学基盤研究部（1999年）、先端技術開発支援センター（2003年）、先端技術基盤部門（2008年）という組織名称になり、例えば粘弾性測定機やエキソ電子測定装置、超高压化学反応装置など、研究分野を横断し研究所内で用いるための試験機器の製作に主眼を置き研究工作支援業務を行ってきた。また、1993年に工作部門内に発足した、ラピッドプロトタイプングシステム開発チーム⁶⁾では、高速高精度切削や3次元CAD、5軸CAM、積層造形（光造形法）などに関する先端的な技術研究を行っており、その成果は研究所内の研究工作支援に活用され産業界にも還元されている。一方で、工作係の時代より培ってきた伝統的な技術である理化学機

図1 工作部門にて製造販売された製品の例⁵⁾

*原稿受付 令和2年6月29日

**正会員 国立研究開発法人理化学研究所 光量子工学研究センター 技術基盤支援チーム（埼玉県和光市広沢2-1）

図2 ガラス加工作業（左）と旧工作部門棟（右）

図3 研究ワーク支援業務（左）と現研究基盤技術棟（右）

図4 研究ワーク支援の実績（左）工作依頼件数と作業時間の推移（右）2019年度における組織別工作依頼件数の割合

器のガラス加工（図2）やメッキ、アルマイトなどの金属表面処理は、高度な技能を有する熟練技術者の定年退職による必然的な人員減少などもあり、近年その伝承が困難なものとなった。

このように、工作部門は科学者とその研究の需要に沿った形態で変遷をたどってきた。そして現在は、2013年度に発足した光子工学研究センター（当時は光子工学研究領域、RIKEN Center for Advanced Photonics⁷⁾）、技術基盤支援チームとして、研究ワーク支援業務を継承している。

2.2 工作部門の現況

現在工作部門では、研究所内の多様な分野の研究者からの依頼に応じて、例えば金属や樹脂の部品加工、実験装置の設計や改造・組み立て・調整あるいは技術相談など多岐にわたる研究ワーク支援業務（図3）を行っている⁸⁾⁹⁾。

研究者からの依頼による設計・製作や技術的相談は年間約500件から750件あり、これに対し作業人員は12名（技術系職員11名、事務職員1名）にて業務を遂行している。2009年度より2019年度まで、最近の約10年間における研究者からの依頼件数と作業時間の推移を図4（左）に示す。工作部門の技術者は発足時から現在に至るまでには約10人から100人を上回る時代もあったが、2020年度の当チームにおける技術系職員のうち常勤者は7名ほどで

図5 設計製作物の例（左）フラーレン製造装置^{*1}（右）顕微鏡用移動回転ステージ^{*2}

図6 小物部品製作の例（a）応力試験用治具（b）NMR用試料回転機構部品（c）蒸着用マスク（d）テフロン製容器

図7 機械設備および測定・計測機器類（左）機械加工室（中央）測定機器室（右）マシンショップ

あり、実質的には発足時の人数を下回り、近年は減少傾向にある。また、工作依頼は、図4（右）に示すように全所の研究組織、事業所・地区より受け、特に近年は物性科学や脳神経科学・加速器科学・生命科学・環境科学・医療など、化学や工学系以外の分野の研究室からの割合が増加傾向にあることも特徴的である。また、工作依頼者の身分としては、所内に在籍する国内外の任期制研究者が多くを占めている。特に研究室に在籍する大学院生など流動的な研究者の場合もあり、比較的短期間で研究成果を求められることも多い。このため、依頼内容は以前と比較し大型の実験装置や図5に示すような、外注することが困難であり、基礎的な研究を行うための試験装置や研究機器一式の設計製作が減少し、逆に既存装置の改良・改造のための小物部品の加工（図6）や治工具の製作などが近年は増加してきている。

研究ワークを行うための主な機械設備として、NCマシニングセンター（2台）、ワイヤカット放電加工機（1台）、CO₂レーザーカット加工機（1台）、CNC旋盤（2台）のほかに小型精密旋盤、汎用旋盤・フライス盤・ボール盤・帯鋸盤・シャーリング、溶接装置などが棟内の機械加工室（図7、左）に設置してあり、単品あるいは多品種少量数の研究機器用部品を中心に加工を行っている。また、工作物の形状寸法や表面性状を観察するための測定・計測機器類として、レーザー共焦点顕微鏡、デジタル顕微鏡、小型走査電子顕微鏡、3次元測定器、ビッカース硬度計等を設置している（図7、中央）。また、近年はより高度な研究

工作支援業務を行うための環境整備を推進している。さらに研究者自身が機械加工作業を行うことが可能なマシンショップ（図7、右）を別棟にて運営しており、そのため、工作機械の取り扱い安全講習会を約3カ月ごとに実施し、機械の利用希望者には受講を義務付けている。

なお、工作を依頼する研究者の要求元には受益者負担として製作費が必要であるが、2015年度より科学研究費などほとんどの外部資金が使用可能となり、さらに研究支援の利便性を広げている。

3. 積層造形技術

3.1 積層造形法の特長

積層造形法（Layered Manufacturing）¹⁰⁾は当初より製作物の利用法から、長らくラピッド・プロトタイピング（Rapid Prototyping、迅速試作品製造）ともいわれてきたが、近年は3Dプリンター（3D Printer）として産業界のみならず社会的にも広く浸透している技術である。共通した加工原理は、主に3次元CADやCT、MRIなどから作成された立体データを任意の間隔で断面化し、得られた断面形状に従い固有の材料を自動的に積層していくことにより、所望の立体物を製作していくというものである。材料の積層方法は2009年に国際的な規格団体（ASTM International）により7種類に分類され、その総称はアディティブ・マニファクチュアリング（Additive Manufacturing、付加製造法）とされた¹¹⁾。なお本稿では、造形法の特徴が最もよく表現されていると考えられることから「積層造形法」を使用した。本法の最大の利点として、製法の原理的な特長から、試作品製作時の形状的な制限が切削加工のような除去加工法と比較し少ないことが挙げられる。例えば、オーバーハングやボス・リブあるいは内部に空洞のある複雑な形状も製作可能な場合が多い。

筆者らは、特に複雑形状物の効率的で迅速な試作品製作を行うため、積層造形技術に関する研究開発を1993年より開始した¹²⁾。また、2013年より地元企業との連携（和光3Dプリンタ活用研究会）等も生まれている。

3.2 研究支援への応用

現在工作部門にて使用している積層造形技術は、液槽光重合法（Vat Photopolymerization）、材料噴射法（Material Jetting）、材料押し出し法（Material Extrusion）の3種類である。特に切削加工やレーザー加工、ワイヤカット放電加工などの除去加工が不可能な形状に対しては積層造形法を適用する機会が多い。本法は除去加工法と比較して材料の選択性に制限が多いことが課題として挙げられ

図8 液槽光重合法により作製した研究用モデルの例 (a) ニッケルメッキにより表面処理した光学部品（左：表面処理前 右：表面処理後） (b) 流路の可視化モデル (c) 動脈瘤形状モデル (d) 視覚障害者向け心臓模型 (e) CT画像より作製した歯形模型 (f) 内部に着色した分子モデル (g) 三次元立体ジグソーパズル¹⁷⁾ (h) 多面体形状モデル（左：花形300面体結晶モデル 右：14面体結晶構造回転モデルとその部品）

図9 脳神経科学研究への応用（上段）左より、マイクロドライブ、コーン、キャップ、組み立てた状態（下段）マイクロドライブにニードル、ワイヤ電極を挿入した状態¹⁸⁾¹⁹⁾

るが、素材と形状精度、サポート材の除去を勘案して造形法の種類を選択していく。液槽光重合法はエポキシ系、材料噴射法はアクリル系、材料押し出し法はABS樹脂系あるいはポリカーボネート（PC）系の素材が使用可能である。

(1) 液槽光重合法：本法は他の積層法と比較し、高い微細性と透明性が大きな特長である。筆者らは高速高精度液槽光重合装置を開発し研究支援へ活用した^{13)~15)}。図8に作製したモデルの例を示す。また、図8(f)は、ディスペンサ装置を用いて透明樹脂の内部に着色造形した例である¹⁶⁾。

また、図9は脳神経科学分野の試験研究に用いる実験用機具である¹⁸⁾¹⁹⁾。中でもマイクロドライブといわれるマウス脳への電極挿入用具（図9上段左端）は、ニードル挿入用に約0.6mmの孔が放射状に開いており、ニードル

*1 黒鉛（グラファイト）の接触アーク放電によって製造されるフラーレンの製造装置。本装置は10~100 Torrのヘリウムガス雰囲気チャンパー内において、グラファイト棒に通電加熱し、炭素のすすを発生させた後に溶媒を注入しチャンパーを回転することにより攪拌し、壁面に付着したフラーレンを回収することができる。

*2 細胞の任意の位置に数ミクロン（ μm ）の精度で電極を刺し、顕微鏡で観察しながら実験を行うための移動・回転ステージ。

図 10 結合剤噴射法により作製した多色分子模型の例 (a) 空間充填型分子模型 (左: 元素別配色 右: 特定アミノ酸別配色) (b) 表面に樹脂コーティング処理をしたもの (c) ニトリルヒドラーゼ²¹⁾ (金属酵素) の立体構造模型 (d) サブユニットの結合した分子模型 (e) 球棒型分子模型 (f) リボン型分子模型

内に直径約 35 μm のワイヤ電極を挿入するため、複雑形状と高い微細性が要求される部品である。本器具の大きさ、形状、ゲージ等は多岐にわたり、脳科学分野の研究者から数量も含め製作依頼数が近年顕著に増加しており、液槽光重合法の特長に適した応用例といえよう。

(2) 結合剤噴射法 (Binder Jetting): CG (Computer Graphics) により可視化された分子の立体構造と同等に、タンパク質分子模型実体化の要望を研究者より受け、当時単色であった本法を多色化した装置を企業と共同開発し、従来手技による製作が困難であった原子数が数千にも及ぶタンパク質の多色模型の造形を試みた¹⁶⁾²⁰⁾。その加工原理は、PDB (Protein Data Bank)^{*3)}に記述されている、化学記号と原子の位置座標で定義されたタンパク質の構造データを原子の種類ごとに形状を保ったまま STL 形式 (Sterolithography file format) に変換し、各色成分の断面データをビットマップ形式にて作成し、次に、4 色 (シアン、マゼンタ、イエロー、クリア) の水系結合剤 (バインダ) をインクジェット装置より、断面データどおりに平滑化された石膏粉末材料の表面上に吐出させ、約 0.1 mm ずつ固着させながら積層していくというものである。その結果、図 10 に示すように、原子の種類で配色され、十分に色識別性のあるタンパク質の実体モデルが得られた。

*3 X 線回折や NMR で解析した、タンパク質を主体とする生体高分子立体構造のデータベース。内容は原子座標などから成る構造情報。PDB のファイル内には物質名とそれを構成する原子の位置座標や結合に関するデータのほか、作成者、実験条件、文献などさまざまな情報があり、それらの各項目は行単位で記述されている。

図 11 結合剤噴射法により作製した人工骨 (左) 家兎大腿骨骨頭形状 (右) 尺骨・橈骨形状

3.3 研究への展開

結合剤噴射法の医療への応用として、実際に臨床で使用されているインプラント人工骨と同じ成分配合比をもつ粉末 (α 型リン酸三カルシウム) を主材料として成形を行い、得られた固着物の形状や多孔質性について調べ、本法の人工骨への適性を検討した^{22)~24)}。結合剤噴射法は、積層造形法の中でも、比較的使用する材料を広く選択でき、素材にバイオマテリアルを適用し人工骨を成形した場合、以下のような効果が期待できる^{25)~28)}。①骨の外部形状に合わせて内部の構造も創製可能となること、②溶解性や組織の侵入性など生体適合性に適した多孔質性の人工骨が得られること、③細胞の生着に適した大きさの連通孔を微細に配置した人工骨が得られること、④骨の成長に必要な骨誘導因子などの細胞や薬剤を成形の際に同時に埋入できること。本研究により作製した人工骨を図 11 に示す。

4. 今後の方向性

工作部門の機械設計製図の業務においては、製図板と用紙、T 定規、からす口などを使った手描きによる図面作成の時代から、製図機械によるドラフティング、2 次元 CAD、そして 3 次元 CAD データの作成へと移行してきた。また、機械加工においても熟練技術者の高度な技能に依存した加工から CAD/CAM データを用いた高速加工や前章の積層造形を用いた迅速な試作も広く普及している。今後、試験研究機関の支援部門においてもこのようなデジタルデータによるものづくりを行う人材の育成は必須であり、例えば組織の改廃等にもなう短期的な人員の確保のみではなく、より長期的な視点から、高等専門学校 (高専²⁹⁾) や工業系専門高等学校生など、特に若年時よりこれらの基礎的な技術を学習し、実践的な技術・知識を有する人材の積極的な登用・育成も促進していく必要があると考えられる。また、支援する技術を高度化するための研究開発にも注力する必要がある。それには高い研究能力を有する人材の確保も必要であるといえよう。例えば当該工作部門においても研究室の協力の下、光学素子等の超精密加工に関する研究³⁰⁾に取り組む技術者もあり、今後はこのような研究・技術開発型の支援も主流になるものと考えられる。

5. おわりに

本稿では、主に研究支援と積層造形技術を紹介した。試験研究機関においては、研究支援者は研究者の要望をよく理解し、研究者が考案した試験装置などを具現化し

ていく。また、研究者は研究支援者によって自身の研究が支えられているということを深く認識している。本稿 2.1 にて紹介した工作部門の発足時のように、このことが相互に認識されている研究支援組織は理想的といえよう。もちろん、技術者自身も研究支援に対する高い意識を常にもち、科学研究の将来に関わる重要な任務であるということ忘れてはならない。科学技術基本法（1995 年 11 月公布）が施行される前年に内閣総理大臣が決定した「科学技術系人材の確保に関する基本方針」[第 2 章 2-2 (2)]には研究支援業務に関する次のような一節があり、その後策定された科学技術基本計画にも反映されている。（以下、原文）

「研究者との良好なパートナーシップの下で試行錯誤を繰り返していく技術者の存在は、優れた成果を生むために不可欠である（以下略）」

現在は名実ともに科学者と技術者が両輪となって、科学技術の研究開発を推し進めていく時代となった。

参 考 文 献

- 1) 理化学研究所百年史編集委員会：理化学研究所百年史 ダイジェスト版，(2018) i, 125.
- 2) 理化学研究所百年史編集委員会：理化学研究所百年史 第 I 編（歴史と精神）および第 II 編（研究と成果），国立研究開発法人理化学研究所，(2018).
- 3) 理化学研究所百年史編集委員会：工作部の 100 年，理化学研究所百年史，第 I 編（歴史と精神），国立研究開発法人理化学研究所，(2018) 159-184.
- 4) 中央公論社，自然 '78-12 増刊，(1978) 58-68.
- 5) 理化学研究所：理化学研究所カタログ RIKEN，昭和 34 年 4 月，(1959).
- 6) 中川威雄，安斎正博：ラピッドプロトタイプングシステムの展開，理研シンポジウム第 9 回「研究を支える技術」，(1993) 39-47.
- 7) RIKEN Center for Advanced Photonics，URL: <https://www.riken.jp/en/research/labs/rap/index.html>
- 8) 山澤建二：機械工作による研究支援，理研シンポジウム 第 6 回「光量子工学研究」，国立研究開発法人理化学研究所光量子工学研究センター，(2018) 145-146.
- 9) 理化学研究所 広報室：独創的な研究をものづくりで支える，理研ニュース（RIKEN NEWS）No. 464 February 2020，(2020) 10-11.
- 10) 中川威雄，丸谷洋二：積層造形システム，工業調査会，(1996) 4-7.
- 11) ASTM International: ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (2012).
- 12) 山澤建二：光造形法をはじめとしたラピッドプロトタイプング技術について，理化学研究所研究基盤技術部，理研シンポジウム 第 10 回「研究を支える技術」，講演要旨集，(1994) 8-20.
- 13) 山澤建二，新野俊樹，中川威雄，早野誠治：ポリゴンミラーを用いた光造形装置の開発，精密工学会，秋期大会学術講演会論文集，第 2 分冊，(1996) 555-556.
- 14) K. Yamazawa, T. Niino, T. Nakagawa and S. Hayano: High Speed UV Laser Beam Scanning by Polygon Mirror, Solid Freeform Fabrication Symposium, The University of Texas at Austin, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium 1997, Austin, USA, Aug., (1997) 223-230.
- 15) K. Yamazawa, T. Niino and T. Nakagawa: Development of High Speed UV Laser Beam Scanning Stereolithography Using Polygon Mirror, Proceedings of The Sixth Japan International SAMPE Symposium, Vol. 2, Tokyo, (1999) 675-678.
- 16) 山澤建二，安斎正博：ラピッドプロトタイプングにおける多色化，No. 060-5 日本機械学会関東支部第 2 回埼玉ブロック大会（講演会），日本機械学会関東支部埼玉ブロック，講演論文集，(2006) 13-14.
- 17) 手嶋吉法ほか：3D ジグソーパズルの設計理論の構築及び製作法，2020 年度科学研究費助成事業，基盤研究（C），20309252，(2020).
- 18) A. Tomar, D. Polygalov, S. Chattarji and T.J. McHugh: The Dynamic Impact of Repeated Stress on the Hippocampal Spatial Map, HIPPOCAMPUS 00:1-13 (2014).
- 19) R. Boehringer, D. Polygalov, A.J.Y. Huang, S.J. Middleton, V. Robert, M.E. Wintzer, R.A. Piskorowski, V. Chevalereyre and T.J. McHugh: Chronic Loss of CA2 Transmission Leads to Hippocampal Hyperexcitability, Neuron **94** (2017) 642-655, e1-e9.
- 20) 山澤建二，安斎正博，加瀬究：カラー RP 機による多色モデルの製作，第 19 回ラピッドプロトタイプングシンポジウム，型技術協会，講演論文集，(2000) 63-65.
- 21) 理化学研究所総務部広報室：研究最前線 ニトリルヒドラーゼ：光と一酸化窒素でスイッチする有望酵素，理研ニュース，No. 205 July 1998，(1998) 2-5.
- 22) 山澤建二，横田秀夫，姫野龍太郎，安斎正博，鈴木裕，植原弘之，鈴木茂樹：粉末積層造形法を用いた人工骨成形法の提案—成形性の検討—，生体医工学，**45**, 2 (2007) 169-176.
- 23) 山澤建二，安斎正博，横田秀夫，姫野龍太郎，鈴木裕，植原弘之：粉末積層造形法を用いた人工骨成形法の提案—成形骨の多孔質性—，生体医工学，**47**, 2 (2009) 142-147.
- 24) 山澤建二，橋爪大輔，中尾愛子，安斎正博，植原弘之，鈴木裕：粉末積層造形法を用いた人工骨成形法の提案—成形骨の表面と内部の化学的組成—，生体医工学，**47**, 4 (2009) 359-365.
- 25) 山澤建二，横田秀夫，山形豊，安斎正博：結合剤噴射法による人工骨の成形，理研シンポジウム 第 4 回「光量子工学研究」，国立研究開発法人理化学研究所 光量子工学研究領域，(2016) 131-132.
- 26) S. Oyama, M. Watanabe, Y. Tsujimura, K. Yamazawa and H. Yokota: In Vivo Study of Stable Alpha-TCP Scaffolds Fabricated by Modified Binder Jetting, Society for Biomaterials 2018 Annual Meeting, Society for Biomaterials Proceedings 2018, (2018).
- 27) M. Watanabe, Y. Tsujimura, S. Oyama, K. Yamazawa and H. Yokota: Development of new binder jetting process for fabricating bone regeneration implants, Society for Biomaterials 2018 Annual Meeting, Society for Biomaterials Proceedings 2018, (2018).
- 28) 大山慎太郎ほか：究極のスマート材料としての 3D プリント人工骨の最適設計の実現，平成 31 年度科学研究費助成事業，基盤研究（C），19129166，(2019).
- 29) 篠崎烈，坂本武司，石橋大作，中島正寛：機械加工と測定の基礎を学ぶ高専の機械実習教育，精密工学会誌，**85**, 6 (2019) 485-488.
- 30) 竹田真宏，細島拓也，森田晋也，段昊，山形豊：非軸対称非球面の超精密加工における象限突起の低減のための加工パスの検討，精密工学会学術講演会講演論文集 2015A (0)，(2015) 221-222.

山澤建二

1987 年長岡技術科学大学大学院工学研究科機械システム工学専攻，工学修士。九州工業大学大学院情報工学研究科情報創成工学専攻，博士（情報工学）。積層造形法に関する研究と応用，精密光学機器の開発設計，プラスチック成形製品的设计等に従事。