

「花粉」の3D データ化及び3D 造形への試み



佐藤昌平 株式会社エヌ・ティー・エス

SATO SHOHEI

1. はじめに

理工系専門出版社である株式会社エヌ・ティー・エス（以下当社）では2007年にZ Corporationの3Dプリンター（Z510）を導入した。その後、3Dプリンターの活用について試行錯誤を重ねた結果、医学模型と可視化事業に事業化の可能性を絞り込んだ。特に可視化事業は、動植物の内部構造や微生物他のマイクロ世界等、肉眼では見ることのできない世界を現前化する事業であり、当社にとって表現と活動の幅を広げる挑戦でもある。

同年には独立行政法人九州大学総合研究博物館と共同研究で哺乳類の3D撮影と造形の実験を試みた。また、国立遺伝学研究所の協力を得てマイクロCTによる「アリ」の撮影を試みた（図1）。更に同年、独立行政法人産業技術総合研究所に「花粉」の3D造形を相談する等、様々な研究機関の協力の下に事業化の可能性を探ってきた。本稿では主に「花粉」のスキャニングによる3Dデータ化と3D造形の試みについて述べる。



図1 アリの撮影

2. 「不可視世界」を現前化する

「不可視」という人間が肉眼で見る事のできない世界は、想像を超えた不思議な姿を見せてくれる。とりわけマイクロの世界については、ハエやアリの恐ろしい表情やグロテスクであるが緻密に創られた臓器の表層、機械的かつ有機的な質感を持った細菌類等、まるでSF世界を垣間見ている様な感覚になる。特に最近のSEM（走査型電子顕微鏡）での観察技術の発達によって、まるですぐそこに存在するかの様な立体像を見ることが可能になり、今日では映像や書籍等でも頻繁に見られるようになった。

それでは、微細物である花粉はどうだろう。花粉症の方には病原菌同然の厄介者でしかないこの花粉は、TVCMや広告等に、突起だらけの球体としてしばしば登場しているが、実際は花粉症の代表であるスギやヒノキはあのような姿ではない。本来はトゲのない球体であったり、栗の実の様な姿をしているのである。そもそも花粉は種や科によってそれぞれ異なった姿を持つことは意外に知られていない。

この度、3Dプリンター活用による可視化事業にあたり、この花粉を題材にしたのは偶然にTV番組で観た事による。番組では多数の花粉のSEM画像が流れる美しい動画が流れており、その形状たるや極めて幾何学的かつ美的であり、尚かつあまりの見事さ故に若干の気色悪さを覚えるほどの衝撃を受けたのである。そして、その形状は驚く程多様な振り幅を持っており、同時にどのよ

うな理由で進化させてきたのか等、「自然が作り出した知られざる美の世界」に関心を持ったのである。

3. 3D プリンターを利用した RP(ラピッドプロトタイプング)

先に述べたが、2007年夏、国立遺伝学研究所の協力を得て、マイクロCTによるアリ(キバハリアリ)の3D撮影を試みた。その後、データを元に立体画像化し、3Dプリンターで立体造形までの作業を実践した。造形したものはパッと見る限りアリの外観を観察できるものではないが、参考画像で確認できる様に、このアリの頭部は脳までスキャンされているのである(図2)。要するに、この3Dアリの縦断面画像では脳から内臓まで詰まった状態を確認できるのである。



図2 アリの頭部のスキャン像

ご協力頂いた40年来のアリの研究者今井弘民氏でさえ、アリのこうしたあからさまな内部構造を観るのは初めての体験だと感動される姿に、理工系専門出版社にとって3Dの可能性を感じた。

マイクロCTは、対象物の内部を測定し、画像化できる技術であるが、そのデータを元に3Dデータを再構築し、更にデータを3Dプリンターに読み込ませ、忠実に立体造形ができるところまで技術の革新は進んでいた。これには驚きと感動を覚えた。3Dプリンターとは物体の輪郭を立体的な位置関係の中で記録したデータを読み込み、樹脂や石膏粉を素材として忠実に造形する機器である。複製目的としてプリンターと呼ばれるが、造られる物は立体物である。2Dのインクジェットレーザーのプリンターは紙にインクでプリントするが、3Dプリンターは紙の代わりに樹脂や石膏粉で、インクの代わりに色が混ざった接着剤でプリントする。元来、立体物を複製するには金型などを利用するが、3Dプリンターの場合、金型の代わりに、デジタルデータを利用するため、

当然だがPC間で送信できるほど手軽である上、劣化もなければ、複製も可能である。高速で試作・複製ができるRP、また、デジタル技術を通して忠実に実物を再現できる可能性を、アリの立体造形から感じる良い機会となった。

程なくして、不可視物である「花粉」の立体造形への計画が持ち上がった。当初は手作りの立体造形物を元にデータ化する計画も存在していたが、“デジタル技術により、実物を忠実に再現できるという感動”は、作る側も見る側も感じ得る説得力を持つものであると確信した。この確信を元に、「花粉の3Dデータ化への試み」、そして「花粉の立体造形展示の計画」という目標を掲げた筆者らの挑戦が始まった。

4. 反射型共焦点顕微鏡による試み

3Dデータ化と言っても、何から始めるべきかわからない状態からのスタートだったが、まずマイクロレベルの物体を3Dデータ化できる機器の調査を開始した。花粉は約30～50 μm ほどの大きさであるため、電子顕微鏡から3Dデータを取得できないかと手始めにネット検索にかけた結果、最初に出会ったのが株式会社キーエンスの共焦点レーザーマイクロスコープVK-9700

Generation IIという機器であった。この顕微鏡はいわゆる共焦点方式であるのだが、元は製造品や半導体の表面検査のために使用される試料反射型の機種である。筆者はまず、キーエンス社の営業の方にアポイントメントを取り、「花粉の外形を測定対象とし、SEMで観察できる様な像を3Dデータとして取り込むことはできないだろうか。」といった相談をしたところ、当社にてデモを実施して頂く事となった。急だったために、測定する花粉は当社の空き地にぽつぽつと生える雑草(おそらくオニタビラコ)の花を摘み、顕微鏡の試料台にそのままむしった雄しべをのせて測定を開始した。すると、ものの数分もしないうちに、何の変哲も無い小さな花から、図3のようなトゲと格子状の不思議な形状を持った花粉が群生する姿が映し出された。花粉のSEM画像自体は資料等で何度も見てきたが、特に有益でないからと雑草と言われてしまうような花が、マイクロレベルでこのような見事な美の世界を持っていたこと、そして自ら採取した花からその存在を確認できたということに、予想以上の感動を覚えた。

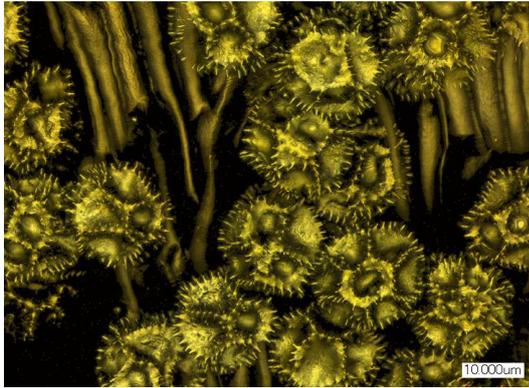


図3 オニタピラコ花粉の画像

協力：株式会社キーエンス

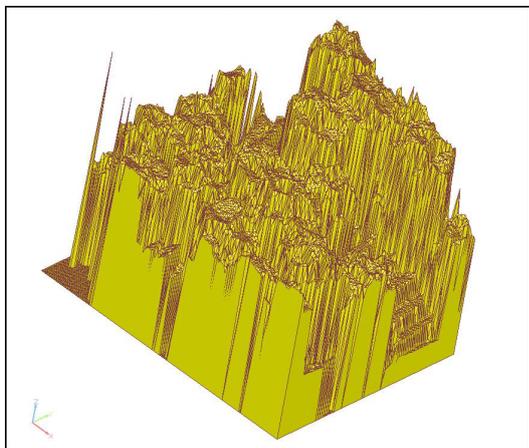


図4 (図3)のCADデータ

協力：株式会社キーエンス

ただし、問題もあった。この顕微鏡は上方から発した光の反射により高さデータを測定する形式であったため、図4のように光が回りこめない影の部分は撮影できなかったのである。CADデータへの書き出しは可能であるが造形物としては半立体でしか成立しないという結果となったが、この花粉画像を撮影したことが大きなきっかけとなり、「実物からの3Dデータ化」「サイエンスとテクノロジーにより感動を与える」という方向性が、より現実的な結果として見え始めた。

しかし、電子顕微鏡や3Dデータ自体に全く見識がなかった筆者にとって、今回のデモ以降、しばらくは「共焦点顕微鏡」＝「3Dデータ化」という図式から離れられなくなった。少ないキーワードを頼りにいくつかの産業技術センターや測定受託サービスの業者を当たったが、「直接的にCAD化」や「レーザ顕微鏡」など、あまりにも結論を急ぎキーワードを狭めてしまったせいも、似た様な原因で3D化には至らなかった。

そんな折、当社が以前よりお付き合い頂いている国立遺伝学研究所が所有するカールツァイス株式会社の共焦点顕微鏡を使用させて頂き、いくつか用意した花粉を測定にかける機会があった。前回の反射型ではなく蛍光型の顕微鏡であったため、想像していた結果とは違った像の検出法に戸惑い、その場では結局、いくつかの断層画面を取得しただけに留まった。

この時点では、蛍光型の顕微鏡の構造をよく理解しておらず、尚かつ、単純に像を直接CADデータ化するという発想しか持ち合わせていなかった。蛍光型はピンントを少しずつずらし、下から断層画像を撮影するという方法であるので、影で隠れるといった問題は起こらないため、単にCAD化が無理だからと言って以降の調査を疎かにしてしまったことは、今思い返せば大きな失敗だったと感じる。しかし、実はこの蛍光型こそが今回の3Dデータ化の大きな突破口となるものであったのだが、詳細は後に書く事とする。

5. TEMによる連続切片作成法の試み

共焦点法がうまく行かず、SEMや他の電顕での解決法を調査していたところ、大阪大学大学院工学研究科の宮澤七郎先生との出会いがあった。宮澤先生は医学生物学電子顕微鏡技術学会の名譽理事長であり、我が国におけるTEM(透過型電子顕微鏡)による資料観察の大家である。TEMでの観察は、主に試料の連続切片を作成することが前提だが、今回は花粉をマイクロスケールで数十枚スライスし、その撮影画像を元に3Dデータを制作できるとのご提案を頂き、実践して頂く運びとなった。

しかし、ここで一つ問題となったのが採取する花粉の種類、サイズ、状態を測定前にはっきりと同定しなければならない点であった。今回は立体造形した後に展示するという目的があり、実験といっても展示予定としている複数の花粉データのうち1つでも取得したいという考えと、複雑な形状を持った花粉でも再現可能か試したいという考えがあった。そこでセイヨウタンポポとアカンサスを検討したが、季節は2月。二つとも手に入らないどころか、春夏に比べれば不毛な冬はこちらの仕事の都合に合わせてはくれず、結局タンポポに近いトゲを持った黄菊と、ナデシコ科のカーネーションの花粉を選び出した。次に、花粉にも属や種間だけでなく、同じ花粉にもサイズの個体差があるため、自前の光学顕微鏡で観察して計測しようと試みたがうまくいかず、書籍やインターネットの資料と照らし合わせ、大体のサイズを割り

出した。さらに、最も大きな問題は、花粉は何も処理せずそのまま湿気にさらせば形状が変化してしまう点であった。そのため、光学顕微鏡で全体の形状をチェックし、更に輸送中に変化しないように乾燥剤を封入したポリ袋にむしった雄しべを大量に詰め込み対策をとった。当社がSEMを所有していれば鮮明な姿が確認できる上、採取した際のタイミングで測定ができれば労力は少ないのだが、確認も不鮮明であり外の環境に出すまでの間の変質を防ぐこと、機器や技術を提供して頂く先生方に花粉の特徴を説明することを、専門家でない筆者が付け焼き刃の知識で調査と説明をすることで、何か大きな間違いをしていないかと不安になったりもした。しかし、無事に先生の元へお届けするまで事なきを得て、先生のスケジュールの忙しい合間を縫って花粉の連続切片作成と撮影を行って頂いた。

完成後、頂いたプレパラートと画像を確認した際、数 $10\mu\text{m}$ の花粉にダイヤモンドカッターを使って切片作成するという職人芸にも驚かされたが、紙よりも薄い切片一枚一枚を覗くと、内部の核や組織の構造が生々しく存在する様子に目を奪われた。このままこのスライス画像を元に、DICOMデータに変換し、専用ソフトでレンダリングして3Dデータを作成するという流れであったのだが、残念ながら事前の調査不足のため、保存画像の解像度が足りず、不可能である事が判明した。そして、再度の撮影や画像の位置合わせがあまりにも困難であるため、当時はここでプロジェクトを断念したが、後に3Dモデラーの協力を得て、モデリングを施した花粉3種類の3Dデータを作成した。

次の段階では、当初予定していたX線CTの技術をさらにマイクロスケールで利用できるか調査し、最終的にCADデータまで持っていく事はできるかどうかを実践する計画を立てた。そのためには花粉でなくても同じ様なサイズの微生物をCTにかけ、データ化した例を調査したり、花粉の外形をスキャンするにはどういった方法が最適かを、もう一度原点に立ち返り洗い直す事となった。

まず、前回の連続切片法においてDICOMデータからの3D構築を調査した際、専用のソフトウェアを扱う専門業者の方から3D画像処理における様々な知識やご意見を頂いたため、ここでその一部を紹介する。第一に、現在の技術からすれば基本が球形で凹凸が激しいものがある花粉にはX線CTでの解析データを元に3Dデータ構築を実践することが望ましく、3Dプリンターでの出力が目的であれば、確実、安全にボクセルデータの作

成まで可能である。そして、X線CTにも解析対象により、様々なタイプがあり、まず生体用と産業用の二つに分かれる。大きな違いはX線発生装置の起電圧の強さであるが、工学材料を透過するには高電圧によって高速で電子を透過させなければならないが、生体を対象とした場合は、X線のエネルギーを小さくする必要があるため、電圧と加速度はより弱い物となる。また、対象のサイズによってもCTのタイプを選ぶ必要があり、人体を検査する医療CTからマイクロ観察を目的とするまでの間に、 $\text{m} \sim \text{nm}$ までの幅を持つため、花粉の解析はマイクロX線CT(分解能 μm)やTEMトモグラフィー(分解能 nm)と総称される機器が望ましい。しかも、大きく立体出力することを考えれば、できるだけ高分解能で細かな形状を測定出来た方が良い。さらに、X線CT自体は非破壊検査であるため、試料自体の形状に触れずに測定ができるといった利点がある。また花粉自体は決して電子が透過しやすいものではないが、特に蒸着などの処理は必要ない。

このような情報を元に、3Dデータ取得の可能性に再び希望が見え始めたわけであるが、マイクロX線CTやTEMトモグラフィーは一般的に受託サービスとして請負う企業は少なく、1検体であってもはるかに高額である。一つでも成果のある立体物ができれば充分であるが、測定機器以外の原因で失敗する事は避けたい。何より最も大きな問題は、花粉をCTスキャンにかけて、ボリュームレンダリングした例がないという事で、花粉は反応できるかどうか、解像度は充分か、といった部分である。しかし、それがうまくクリアできればあとはリバースエンジニアリングソフトで完成させる事ができるとわかったため、「花粉を測定するに充分であり、最も適した環境と機器を探し出す事だけ」を考え、ある程度の調査を絞り込むことができたのである。

6. X線CT法による試み

マイクロX線CT、TEMトモグラフィーといったキーワードで調査を再開し、次にヤマト科学株式会社の協力を得た。ヤマト科学社では分解能も高く、低出力の装置での解析を行っており、マウスの体毛や樹脂中のカーボンフィラーなど試料の大きさとしては近い事例があったため、当社側で解析依頼をする予定であったが、測定希望の花粉が手に入らないことなどの諸々の理由で、残念ながら保留となった。

次に、有孔虫の3DプリントとCTスキャンの閲覧ソフトを制作しているW社に相談した結果、測定成功の可

能性は充分にあるが、有孔虫と花粉の大きさには1桁の差があり、その差のために充分な解像度で測定ができない問題があった。この場合は花粉が小さすぎるといった点であるが、逆に予想である点は否めないがTEM トモグラフィーほど極微の分解能であると、花粉が大きすぎるといった問題がある。これは、X線CTの機器がそれぞれ対象としている試料仕様であるため、花粉の外形の脂質が良好な状態で可視化できるX線加速電圧、すなわち低電圧出力のX線CT機器が必要である。従って「サイズの適合性」、「低電圧出力」の2点にまで絞り込み、調査を再開したが、なかなか条件に見合う物がなく、問い合わせても透過自体が不可能ではとの声ばかり聞こえるのであった。

その後、東京大学先端科学技術研究センターの三好元介先生のご尽力により、前述のヤマト科学社がNEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の助成により開発したUSXN-10、30という機器の紹介を頂いた（図5）。

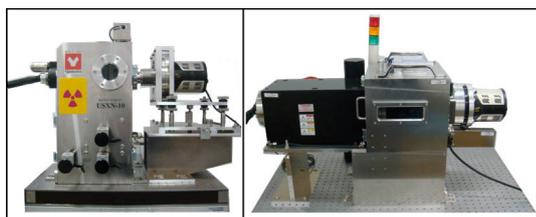


図5 USXN-10 (左) と USXN-30 (右)

協力：ヤマト科学株式会社

実は、当初からこの機器での測定を検討しており、「X線が透過するかわからない」とのことで、やはりそう簡単には条件は揃わなかったのだが、電圧の問題はクリアしており、特別に10と30の2機器を使用する測定実施の運びとなった。

その前に、前段階の話に戻るが、準備は細心の注意を払い、慎重に事を運んできた。USXNの機能だけでなく、X線の仕組み自体をもう一度調査し、前項でも書いたように花粉は温度によって大きく状態が変わる特性があるため、今回、測定を決めたセイヨウタンポポの花粉に付着したゴミや、油分を取り除き、形状を留めさせるための乾燥処理、また、輸送や保存期間中に劣化させないための薬剤処理を施すなど、一般的にSEMの観察で行うべき専用の前処理を株式会社パリノサーヴェイに依頼し、専門的な技術のもとに完了させた。次に、マイクロX線CTで良好な条件でデータ収集を行うための花

粉の保持方法を考案した。棒ガラスを加工して、約100 μm 径の試料保持ロッドを製作し、マイクロマニピュレータを用いてロッドの先端にわずかに数十 μm の花粉を接着して保持することに成功した。この後、実測に入り、花粉と判別できるほどのCTデータを測定できた。

但し、危惧されたとおりの花粉の微妙な大きさや透過率のために、データはバリが目立つ荒い像となってしまった。当社は、これを立体造形するほどの水準には至っていないと判断し、CT機器による3Dデータ構築のみに留めた。

7. 蛍光型共焦点光学顕微鏡による試み

前項のヤマト科学社の試みと平行して、第5項の連続切片法の実践後、宮澤先生のご尽力により、先生直々にお付き合いのある大学や企業を当たって頂き、結果、株式会社ニコンインステックのご協力で共焦点レーザー顕微鏡システムC2の技術のご提供による、先生のご依頼で花粉の3D測定を試みた（図6）

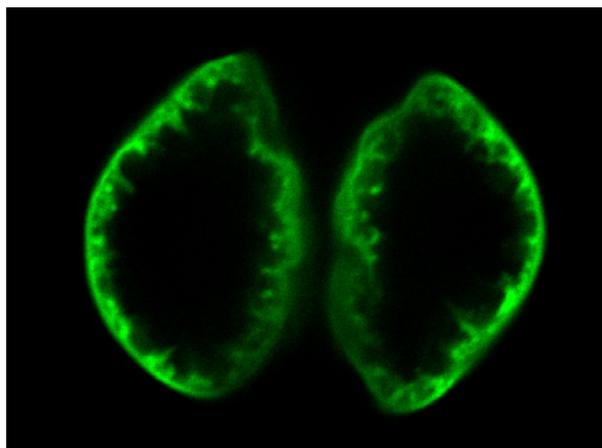


図6 マキの共焦点測定

協力：株式会社ニコンインステック

この機種はいわゆる蛍光型共焦点光学顕微鏡であり、第4項のカールツァイス社製の顕微鏡と仕組みは同じであるのだが、試料から発せられる自発蛍光を、微弱なものまで観察できるPMT（光電子増倍管）により測定し、「コンフォーカル（共焦点）」と「微分干渉」の2パターンの空間測定を行い、画面上で立体表示（図7）ができるという顕微鏡である。問題点は、花粉は特に前処理は無しで測定可能であるが、プレパラートで押さえた分だけ花粉も押しつぶされてしまう点、プレパラート用の固定液を使用するため、乾燥状態ではなく湿潤状態になる点、また、画面上での3D表示や、映像としての編集も可能であるのだが、CADなどの3Dデータの取得につ

いては、現在も可能か否か調査中であることから、未だ最終目的を果たせないままである。ただし、画面上で見ると花粉の突起や形状の解像度はよく、外形だけでなく内部構造までをスキャンし、複雑になった点群データを単純化した集合体にまとめることができた。

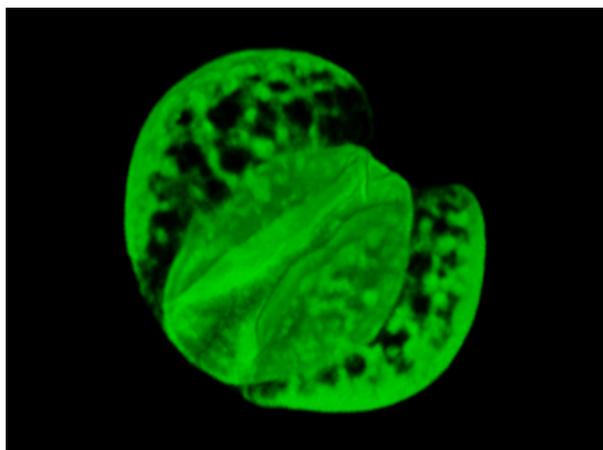


図7 (写真6)の3D構築画面

協力：株式会社ニコンインステック

8. 花粉を3Dデータ化ということ

今回、花粉の立体造形物の展示のために、「花粉の外形のみCADデータ化」という目的で調査と実践を重ねてきた。当初は“デジタル技術により、実物を忠実に再現できるという感動”に訴えることを目標としていたという意味では、現在までに満足のいく結果に達していない事が悔やまれる。しかし、幾度となく多くの大学やメーカーとの繋がりや様々な機器を試した結果は必ずしも不成功だった訳ではなく、新しいアイデアが生まれるきっかけや、筆者らの目的を再確認する機会になり得たと考えている。その発見や気付きはこれまでの項で書いてきた内容に書かれているが、何よりも強く感じることは、大事なことはテクノロジーの発展に感心するのではなく、テクノロジーによりどのような感動を与えられるかに着目することである。そして、数々のテクノロジーとの出会いは、様々な応用法を想起させ、最終的な目標のあるべき姿に柔軟性を与えてくれた。つまり、筆者らは現在、3Dプリンターでの造形化に限らず映像や写真等の多様な媒体を持ってして、不可視物の立体世界を伝えることは多いに可能であると考えている。そして、そのような広い視野に切り替え、調査と実践の最中にある。

9. 未来へ向けて

さて筆者らは今、理工系専門出版社として生物世界の3D事業に取り組んでいる。出版業界の大きな潮流となりつつある電子化の、理工系専門出版にとっての方向性の一つが、そこに潜んでいると考える。「アリ」や「花粉」で如実であるように紙媒体では出現不可能だった情報の3D電子化出版が可能になるだろう。だからこそ筆者らのみならず専門家でさえ「3Dアリ」や「3D花粉」などの未知の世界を出現させることに感動し夢中になれるのである。VR、ARと連携し微小世界のスペクタクルな立体映像が出現すれば、博物館的な新しいエンタテインメントにもなれるのではないかと想像が膨らむのである。「未来の3D社会」の姿を関係者が思い描く機会が増え、この構想が実現する日が来ることを願い本稿を終える。

【参考・引用文献】

※本論文の内容は、以下の文献より引用、一部改変の上、作成致しました。

佐藤昌平、高澤和仁：「花粉」の3Dデータ化及び3D造形への試み、日本バーチャルリアリティ学会誌、16(3)、pp.14-18、(2011)。

【略歴】

佐藤昌平 (SATO Shohei)

株式会社エヌ・ティー・エス SC事業部 開発グループ
2007年 武蔵野美術大学 造形学部 基礎デザイン学科 卒業、

同年より現職。開発グループにて展示会ディレクター、その他新規事業立ち上げに従事する。