

SIMULIA

COMMUNITY NEWS

2017 年 9 月号 #17

機能するプリント部品：
積層造形法を
デジタルで加速する

カバーストーリー
Singapore Institute of
Manufacturing Technology

 DASSAULT
SYSTEMES | The 3DEXPERIENCE® Company

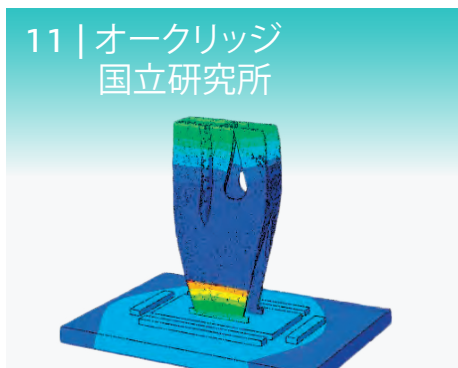
目次

2017 年 9 月号

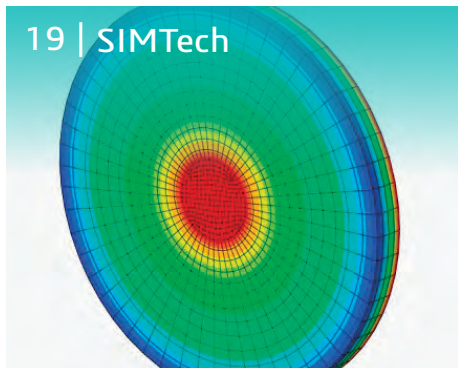
6 | ソリューション アップデート



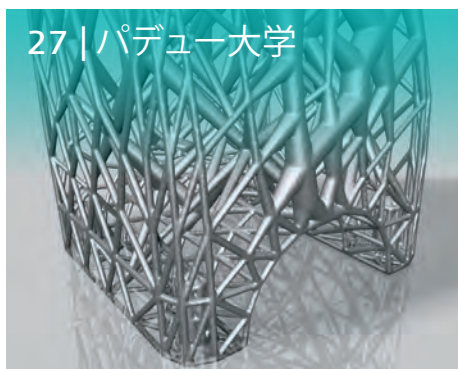
11 | オークリッジ 国立研究所



19 | SIMTech



27 | パデュー大学



3 ごあいさつ

SIMULIA CEO、Scott Berkey

4 積層造形法の飛行経路とは

Aerolytics 社代表 Bill Bihlman 氏

6 ソリューションアップデート

ジェネレーティブデザインのための積層造形技術

10 今日ある製造業の破壊

ペンシルベニア州立大学、Timothy W. Simpson 博士

11 カスタマーハイライト

オークリッジ国立研究所

14 ニュース

SIMULIA と Stratasys 社によるシミュレーション駆動型の設計と 3D プリンティング

16 ケーススタディ

The Welding Institute (TWI 社)

19 カバーストーリー

Stefanie Feih 博士へのインタビュー

22 アライアンス

Renishaw 社

24 アライアンス

nTopology 社

26 ハッカーソン

2017 エクスペリエンスの時代におけるサイエンス

27 アカデミックケーススタディ

パデュー大学

30 生産用 3D プリンターの立ち上げに際して 行うべき 3 つの事柄

3Degrees 社 CEO、Mike Vasquez 博士

31 トレーニング

積層造形のプロセスシミュレーション

寄稿者：Parker グループ、TWI 社、オークリッジ国立研究所、パデュー大学、SIMTech、3Degrees 社、Aerolytics 社、ペンシルベニア州立大学

表紙：Stefanie Feih 博士、シンガポール製造技術研究所 (SIMTech) ポリマー接合技術グループ、シニアサイエンティスト

写真：Vincent Nghai 氏、シンガポール Northern Exposure Photography 社

Dassault Systems K.K. 東京都品川区大崎2-1-1 ThinkPark Tower 20F Tel: 03-4321-3503、Fax: 03-4321-3501、
simulia.jp.marketing@3ds.com、
編集長: Tad Clarke、副編集長: Kristina Hines、グラフィックデザイナー: Todd Sabelli

3DEXPERIENCE®、Compass icon、3DS ロゴ、CATIA、SOLIDWORKS、ENOVIA、DELMIA、SIMULIA、GEOVIA、EXALEAD、3D VIA、3DSWYM、BIOVIA、NETVIBES、および3DXCITE はアメリカ合衆国、またはその他の国における、ダッソー・システムズまたはその子会社の商標または登録商標です。その他の会社名、製品名およびサービス名は、それぞれの所有者の商標またはサービスマークです。Copyright Dassault Systèmes, 2017

 SIMULIA



アディティブ・マニファクチャリング、 シミュレーションを奥深くまで追求する

存在の方も多いと思いますが、近年、積層造形法（AM）が大きな注目を浴びています。試作品だけでなく実際に機能する工業部品もプリントされるようになった結果、今では航空機エンジンに組み込まれて空を飛んだり、サーキット場でレースカーを走らせたり、発電所でエネルギーを生み出したり、人間の擦り切れた関節を置き換えたり、以前は不可能だと思われていた様々な事に利用されています。多くの人の関心を集めているのは、この破壊的技術と従来製法を置き換える（少なくとも補完する）能力で、それは、最初は少量生産品でしたが、徐々に高生産量の部品へと拡大しています。

ジェネレーティブデザインによって強化された積層造形技術が、生産部品のコンセプト開発と製造法に大変革をもたらそうとしています。しかしそうは言っても、この新技術は製造技術であることには変わりありません。モノ作りは、いかなる製法であっても、常に物理法則に支配されるプロセスであるということを、我々エンジニアは知っています。ところが積層造形法には、他のどのタイプの製法と比べても、まったく異なる複雑な物理現象が絡んでいます。それでは、その製造プロセスを最適化する場合、どのように材料挙動を予測し、積層造形設計の妥当性を検証したら良いのでしょうか。それには、シミュレーションの力を借りるしかありません。

FEA の黎明期以来、メーカー各社は競合他社に先んじるために最高のツールを必要としてきました。最適な設計案を突き止めること、そのためにエンド・ツー・エンドのソリューションを利用することが、革新的な製品を開発し、早期に市場に投入する上で極めて重要です。設計者やシミュレーション解析者、製造スペシャリストは、ジェネレーティブデザイン、工程検討、バーチャルプリント、そして形状補正のための包括的な積層造形のアプリケーションを必要としています。我々は、マルチフィジックススペースのシミュレーションによって裏付けられた**3DEXPERIENCE** プラットフォームが、簡素化され統合インターフェースを通じて、変革を実現すると確信しています。

皆様が積層造形法についてどのような考えをお持ちでも、きっと今回の *SIMULIA Community News* には関心を持たれるのではないかと思います。本号には、皆様がこのテーマについて知識を深めることができる、ユーザー事例、専門家の見解、その他の知見がたくさん掲載されています。

お話いただいた専門家の方々は、カバーストーリーに登場の SIMTech の Stefanie Feih 氏（19 ページ）、Aerolytics 社の Bill Bihlman 氏（4 ページ）、そして 3Degrees 社の Mike Vasquez 氏（30 ページ）です。SIMTech の積層造形のチームは、ポリマーと金属の両積層造形技術に幅広く取り組んでおられます。一方、Bill Bihlman 氏の記事は、航空機産業における積層造形法の可能性（そして課題）に焦点を当てています。3D プリンティングの加工および材料技術に興味がありますか？ Mike Vasquez 氏の記事は、この技術の採用を検討している企業にとって参考になります。

パデュー大学（27 ページ）やペンシルベニア州立大学（10 ページ）などの学術機関は積層造形研究の重要な基盤であり、ORNL（11 ページ）のような政府の研究機関も同様です。2017 年の

Science in the Age Of Experienceに参加できなかった方も、パデュー大学の学生たちが発表した独創的な研究について、本誌で読むことができます。他にも情報が満載です。どうぞお楽しみください。

アディティブ・マニファクチャリングは、この秋開催のいくつかの地域別ユーザー会議でも特集される予定です。皆様がそれぞれの業界で、どのようにアディティブ・マニファクチャリングの課題に取り組んでおられるのか、お伺いできればうれしく思います。

SCOTT BERKEY
SIMULIA CEO



積層造形法の飛行経路とは？

航空エンジニアが描く 3D プリンティング技術の未来

機械エンジニアであり、パイロットの資格も持っていた Bill Bihlman 氏は、大学院卒業後、Beech Aircraft 社で理想の仕事を見つけました。「私は昔から飛行機が大好きでした」と彼は話しています。「ですから、仕事で飛行機に乗れるなんて最高でした」

しかし彼は、エンジニアリングの仕事が気に入っていたにも関わらず、しばらくすると、もっと自分の視野を広げたいと思うようになりました。「エンジニアリングはクォーターバックの役割を果たしますが、巧みなビジネス戦略や優秀な製品を生み出す要素は、それだけではありません」と彼は指摘しています。「そこで私は、ビジネススクールに入り直し、いくつかの会社で働いた後、コンサルティングの仕事を始めました。私はエンジニアリング上の知見や洞察力をビジネス原則に結び付けようとしたのです」

Bihlman 氏が 2012 年に設立した Aerolytics 社は、航空宇宙関連メーカーの設計、材料選択、サプライチェーン構築などにインパクトを与えるような、意思決定を支援するため会社でした。様々な生産プロセスについて顧客に助言する中で、彼はやがて積層造形法 (AM) の潜在能力 (そしてその課題) の全体像を把握するようになりました。彼は今も、インダストリアル・エンジニアリングの博士号を目指して、自身の専門知識に磨きをかけています。2017 年の「Science in the Age Of Experience」会議で アディティブ・マニファクチャリング・シンポジウムのパネリストと講師を務めた彼には、この技術の未来に関する大局的な意見や、そのプラス面とマイナス面を現実的に見抜く力があります。

「積層造形法は、初期の盛んにもてはやされた時代が終わり、人々は慎重ながらも前向きに捉えるようになりました」と彼は話しています。「どのような先進技術もそうであるように、必ずある種

のパラダイムが存在するため、確かな技術的バックグラウンドを持っている人なら誰でも少しは懐疑的になるものです。積層造形法はもっと成熟すべきであり、私はそうなっていくと信じています」

航空機業界で積層造形法の利用が始まったのは 20 年ほど前のことです。タービンブレード端の補修用にレーザークラッド法が政府機関や民間航空会社で採用されたのです。やがて、こうした初期の採用者たちはそれを治工具にも応用し始めましたが、そこでは精度や完成度はあまり重視されませんでした。「もちろん、生産部品や飛行能力に直結するコンポーネントになると、そうした問題がより一層重要となってきます」と Bihlman 氏は指摘しています。

産業用の積層造形法が一躍注目を集めたのは、多くの人が認めて

「ダッソー・システムズは、**3DEXPERIENCE** プラットフォーム上で、**機能的ジェネレーティブデザイン**と**プロセスプランニング**や**プロセスシミュレーション**を結ぶデジタルスレッドを構築していますが、そうした実績を考えると、彼らが今後もこの分野のリーダーであり続けるのは間違いなさそうです」

—Aerolytics 社代表 Bill Bihlman 氏

いるように、数年前 GE が LEAP エンジンの燃料ノズルについて発表したときです。それは FAA から飛行認証を受けた、史上初の積層造形部品でした。「それは間違いなく画期的な出来事でした。積層造形法の正当性が認められ、この技術の適応力がはっきりと示されたのです。それは GE 側にとっても大きな賭でした。これはサプライヤーに対する注意喚起です。すなわち競争力を維持するには、価格だけでなく技術進歩にも気を配る必要があるということです」と Bihlman 氏も同意しています。

金属積層造形機は一台あたり 60 万ドルから 100 万ドルものコストがかかり、チタンやアルミの最新の合金粉末も非常に高価であるため、評価の際には単価が重要になると Bihlman 氏は述べています。「どのような生産手段であっても、一定の生産量にならして考える必要があります。ただし、積層造形法の費用対効果については、そのカスタマイズ能力が大きなメリットになります。しかし航空宇宙分野では、客室内のインテリアを除いて、カスタマイズにはあまり関心がありません。我々は機械的性質の再現性や予測可能性を重視しています」

そのため、特に飛行能力に不可欠な耐力構造の航空機コンポーネントについて言えば、大型のシンプルな航空部品において積層造形法が密閉鍛造法と競合することは当分ないだろうと Bihlman 氏は感じています。「我々はまだまだ 5 万トン級のプレス機から逃れることはできないでしょう」と彼は予測しています。「しかし、積層造形法の本来の特長である設計の柔軟性は、チタンアルミナイドなどの特殊合金でできた中空の複雑な構造体にとって重要となります。また、エンジンのタービンブレードなどでは、インベストメント鋳造法に対抗できるほどパウダーベッド・フュージョン法の競争力が高まっており、GE/Avio 社では、すでにこうした動きが本格化しています。積層造形法がもたらすもう一つのメリットは部品点数の削減ですが、それは従来の設計概念をはるかに超えるものと言えます」

航空宇宙業界ではワイヤ供給方式も使用されつつありますが、研究開発の分野ではパウダーベッド方式が引き続き優位を保つだろうと Bihlman 氏は感じています。もちろん、いずれの積層造形技術にも、ミクロ組織での品質やプロセスの再現性など、それに伴うさまざまな課題が存在します。粉末焼結法では、粉体の真球度、粒径、および粒子分布が追加の重要変数となっています。このように、材料挙動を正確に予測および管理することが、あらゆる積層造形技術の目標です。

これこそシミュレーションが力を発揮する領域です。しかし、それは決して容易ではありません。「金属 積層造形 には極めて複雑な物理現象が絡んでいます。最初に、固体（ワイヤ）または粉体を過熱状態にします。そして基本的に液体になるまで溶かした後、それを冷却して固体に戻すのです。それはうまく管理された爆破処理のようなものであり、1秒間に数万度という驚異的な速度で加熱・冷却する、信じられないようなプロセスです。従って、正確なモデリングはとても複雑な作業となります」と Bihlman 氏は話しています。

Bihlman 氏は、シミュレーションは成功しつつあると指摘しています。「私は Abaqus が強力なツールの一つであり、この分野での改良が続いていることを知っています。我々には、非常に複雑で精細なメッシュも処理できる計算パワーがあるため、ミクロ組織の予測に加え、部品レベルあるいは造形プレートレベルでの

ゆがみや残留応力の予測も可能となっています。従って、積層造形 プロセス全体を離散化し、それを全過程にわたってマッピングして、ポストプロセスの因子まで含めることができるようになるのも、もはや時間の問題でしょう。ダッソー・システムズは、**3DEXPERIENCE** プラットフォーム上で、機能的ジェネレーティブデザインとプロセスプランニングやプロセスシミュレーションを結ぶデジタルスレッドを構築していますが、そうした実績を考えると、彼らが今後もこの分野のリーダーであり続けるのは間違いなさそうです」

シミュレーションによって実現される試験のコストと時間の削減効果は、航空宇宙業界でもよく理解されていると Bihlman 氏は述べています。「積層造形の モデリングへの信頼度が増せば、認証コストも削減できるようになります。実際 FAA はずっと以前から、場合によって試験を解析で置き換えても良いと認めてきました。実スケールの試験やコンポーネントレベルの試験には法外なコストがかかるため、積層造形法 が成熟するに従い、こうしたことがますます当たり前になるでしょう。

あらゆる生産が（「インダストリー 4.0」のユビキタスの概念に示されているように）次第に自動化されるようになると、特に積層造形法においては、初期の設計段階からサプライチェーンのロジスティクスに至るまで、すべてを通じて部品の履歴を追跡できるようにデジタルスレッドを維持することが重要になると Bihlman 氏は感じています。積層造形法は複雑であるが故に、多数のデータを管理する必要があります。最終部品の完全性に影響を与えるものには、造形機の設定値、レーザー出力、走査パターン、粒子分布など、優に 100 を超える特性があるとされています。「恐らく、それらの特性の 20 パーセントで、最終部品の機械的性質の 80 パーセントが決まることになるでしょう」と彼は指摘しています。「しかし、造形補正という面では、我々が今も学習しながら微調整を試みている部分は依然として非常に多いのです」

現在のところ、多くの装置メーカーは、学習曲線の教訓、発見内容、知的財産などを独占しており、手の内を見せようとはしません。「優先権がある以上、競争はしかたありません。しかし、情報が適切にフィードバックされて、誰もがそこから学ぶことのできる公開討論会さえ開けないというのは不幸なことです」と Bihlman 氏は話しています。彼はある小規模な三次部品メーカーの経験談を語ってくれたのですが、その会社は、新しく導入した造形機の最適な設定値を見付け出すのに数か月も費やしたそうです。「彼らがその情報を造形機のプロバイダーにフィードバックしようと、目的の結果を得るために必要とした設定値や一連の作業内容を正確に説明したとき、そのプロバイダーの返答は『なるほど、GE も同じ事を言っていました！』だったそうです」

しかし進展も見られます。米国の政府研究機関や大学は、公的に入手可能な AM データの準備作業を進めており、SME と ASME もすでに標準化委員会を立ち上げています。「適切な用語体系と基本特性に基づいて積層造形技術の商業活動ができるように、我々全員がクリティカルパスの観点から定義すべきことに合意し、かつその情報を共有する必要があるのです。そうしたことは、規格を作り出すためだけでなく、公的な研究で先行するためにも絶対に必要です」と Bihlman 氏は話しています。

詳細は以下をご覧ください
www.aerolyticsllc.com

積層造形を デジタル処理で加速する 稼働部品の製作



設計

プロセスプランニング



ジェネレーティブデザインのための 積層造形技術

ダッソー・システムズは、設計、製造、実稼働性能の各段階にわたって
シームレスに機能する、積層造形用の完全な統合アプリケーション製品を
提供しています。



バーチャル
プリンティング
(もしくは造形シミュレーション)

ポストプロセッシング



ソリューションアップデート

AM とジェネレーティブデザインが、製品のコンセプト開発と製造法に大きな変革をもたらす

3DEXPERIENCE

- ・ ジェネレーティブデザインによって強化された積層造形技術が、製品のコンセプト開発と製造法に大きな変革をもたらします。
- ・ 機能部品の開発においては、設計、材料、製造を互いにつなぎ、統合し、直感的に捕捉するためのデジタルスレッドが鍵となります。
- ・ マルチフィジックスベースのシミュレーションに裏付けられた **3DEXPERIENCE** プラットフォームが、簡素化された統合インターフェースを通じてそうした変革を実現します。
- ・ 設計、解析、製造、それぞれのスペシャリストのために、ジェネレーティブデザイン、工程検討、バーチャルプリント、および設計形状修正のための包括的 AM アプリケーションを提供します。

Function Driven Generative Designer ロールによるジェネレーティブデザイン

- ・ 単一環境でのトポロジー最適化による設計
- ・ ガイド付きワークフローによる製造工程に即した部品作成
- ・ 様々なバリエーションのコンセプト形状や、有機的な詳細形状を自動生成
- ・ 物理学ベースの解析ツールに基づいた適切なビジネス上の意思決定

ADDITIVE MANUFACTURING PROGRAMMER ロールによるプロセスプランニング

- ・ 製造環境の定義とカスタマイズ
- ・ 造形プレート上での複数部品の自動配置
- ・ 最適なサポート構造の設計と生成
- ・ 3Dプリンタ用のスライシングとパスの作成およびプリント準備

ADDITIVE MANUFACTURING RESEARCHER ロールによるバーチャルプリント

- ・ 入熱量、材料、サポート構造などの入力情報をシミュレーションに自動取り込み
- ・ 最小限のユーザー操作で、内蔵のシミュレーション・ワークフローにアクセス

- ・ あらゆる AM プロセスに対応した、レイヤーレベル、部品レベル、および造形レベルでのシミュレーション
- ・ 造形品のゆがみ、残留応力、および材料挙動の正確な予測
- ・ リコーターのひっかかりなどの造形不具合の予測と修正

REVERSE SHAPE OPTIMIZER ロールによるポストプロセッシング

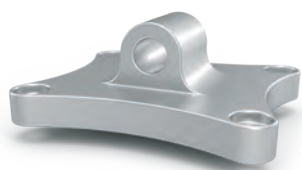
- ・ 造形効率を高めるサポート構造の立案
- ・ 造形プレートからの取り外しや熱処理など、後処理のためのガイド
- ・ ゆがみ量を初期形状から相殺させるため、形状修正のための後処理が不要
- ・ トポロジーを変えずに、高品質なモーフィング表面形状を作成
- ・ 造形部品の最終的な実稼働性能を検証

トータルとしての価値

- ・ 設計、製造、シミュレーションの各アプリケーションをネイティブに統合
- ・ オンプレミスバージョンの他に、ハイパフォーマンス・コンピューティングと可視化機能を備えたオンクラウドバージョン
- ・ AM ワークフローのステップごとにルールをカスタマイズ可能
- ・ 物理学ベースの解析ツールに基づいた適切なビジネス上の意思決定

詳細は以下をご覧ください

www.3ds.com/simulia



従来品
0.7 kg



3軸フライス加工品
0.45 kg



鋳造品
0.36 kg



積層造形品
0.295 kg

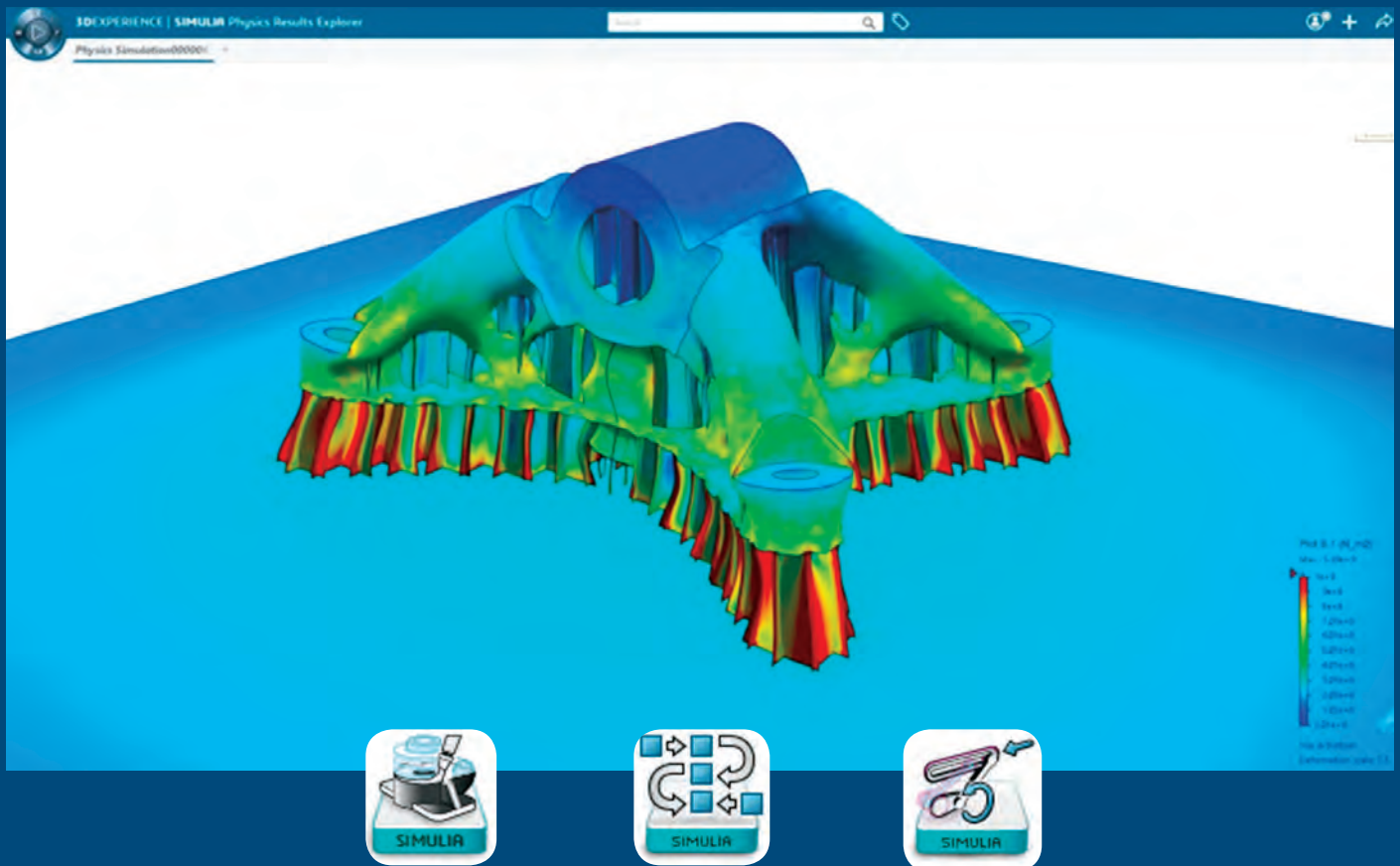
ADDITIVE MANUFACTURING RESEARCHER ロールの概要

特長

- ・レーザーの走査パス、材料の積層と凝固、熱変形と残留応力、サポート構造など、3D プリンティングの物理現象に対するリアリスティックシミュレーション
- ・粉末焼結法、熱溶解積層法、指向性エネルギー堆積法（および、ユーザー定義の）各造形工程のシミュレーションが可能
- ・複雑なシミュレーションでも簡単にセットアップできるように、ユーザーに対して高いレベルの自動化とガイダンスを提供
- ・Abaqus ソルバーの高度な技術を簡単に使えるようにしているだけでなく、上級ユーザー向けにカスタマイズ機能も提供
- ・ガイド付きのユーザー支援パネルを用いた、シミュレーションセットアップ用の段階的ワークフロー
- ・造形情報の利用、造形時間の自動設定、および一部のフィーチャーに対するサポート構造の追加

ユーザー価値

- ・設計工程と造形工程へのシームレスな統合
- ・積層造形エキスパートが利用可能な、シミュレーションのベストプラクティスを内蔵
- ・積層造形シミュレーションのベストプラクティスに従うように設定値を自動的に適用
- ・金属またはポリマーのプロセスレベル、部品レベル、および造形レベルでのシミュレーションを単一の環境で実施
- ・完成部品の残留応力や変形の低減
- ・寸法精度の改善
- ・造形プレート上での配置の最適化
- ・プリント時間と材料使用量の最小化
- ・造形プレートからの取り外しと熱処理のためのポストプロセッシング
- ・機能部品の実稼働性能の検証



3DEXPERIENCE プラットフォームを用いたバーチャル
プリンティング

今日ある製造業の破壊

Timothy W. Simpson 博士、ペンシルベニア州立大学工学部教授、積層造形法&設計大学院課程主任、ペンシルベニア州立大学 CIMP-3D センター理事

穴はなぜ丸いのでしょうか？ 答えの分かりきった質問かもしれませんが。それほど多くの人が、穴は丸いものだと思い込んでいました。実際、なぜ穴が丸いのかというと、我々が必要としてきた部品や製品の製造現場では、昔から除去的なプロセスが用いられてきたからです。除去的プロセスの問題点は、製造時に制約があることであり、それは設計できる物が限られることを意味します。

しかし今、積層造形（AM）技術によって、こうした製造のあり方が変わろうとしています。積層することによって、これまで作れなかった物が作れるようになるのです。レーザーで粉体を溶融しながら固めて、立体部品を作る方法が良く用いられます。一部の AM プロセスでは材料の変更も可能であり、たとえば、耐腐食性、耐疲労性、耐摩耗性を有する物体の、最も効率の良い最適設計を導くこともできます。

AM と 3D プリンティングは同義語ですが、これには約 30 年の歴史があります。従来、3D プリンティングは主にプラスチックやポリマーで行われていました。しかし、この 5 年から 10 年の技術進歩によって金属も使用できるようになりました。AM は、材料を除去するのではなく、付加することで設計を最適化する技術だと言えます。最新のプロセスでは、人の髪の毛の太さよりも薄いレイヤーをプリントすることが可能です。

材料を付加する AM では、材料選択と設計によって効率向上を図れるようになります。軽量でありながら強度が高く、燃料効率に優れた部品を作れるようになるのですから、これは非常に魅力的です。除去的プロセスでは作成不可能なラティス構造も AM なら簡単です。しかしそれによって部品の設計法や材料の選定法が変わってきます。実際、今ではラティス構造で細胞配置を模擬し、骨構造に似せたチタン製の股関節インプラントをプリントして、血管と組織をインプラントに速やかに一体化させることで、患者の回復を早めることも可能になっています。

プリンターのサイズは様々であり、航空機の翼桁のような部材を作成できるものもあります。このような大型のプリンターは、金属の粉末ではなくワイヤを用いてプリントします。電子ビームでワイヤに電子を照射し、それによってワイヤを加熱し溶融させて目的の形状にします。この種の AM プロセスはロボット溶接と似ています。ロボット溶接を高性能にした感じです。

ここまで AM プロセスの利点を述べてきましたが、それは今ある製造業を破壊しようとしています。破壊には良い意味と悪い意味があります。新しい技術が市場に出現すると、様々な課題が生じるのは当然です。現在、企業が 3D プリント部品を購入したいと思った場合、彼らはその部品を発送してもらうよう依頼するのでしょうか、それとも、その部品の CAD ファイルをメールで送ってもらい自社でプリントするのでしょうか。税関はどうなるのでしょうか。国境検問は？ 輸入税は？ さらに、CAD ファイルに特許はありませんが、その知財はどのように保護されるのでしょうか。こうした形のオープン・マニファクチャリングが普及すると、製造業が最もサイバー攻撃を受けやすい産業となり、その危険度は、サイバー脅威の扱いに慣れているエネルギー、水



道、IT などのシステムをも上回るというデータもあります。作業者の安全についてはどうでしょうか。プリンティングに用いられる微小粒子は、誤って吸い込んでしまう恐れや、その組成によっては爆発の危険もあり、それは、現行の消防法規や安全法規も無力化してしまいます。先導している企業についてはどうでしょうか。こうした企業の株価は、最初は新技術への期待から急騰し、その後、問題が明らかになると急落する傾向があります。最終的には、技術が成熟するにつれて株価は安定し、うまくいけば上昇するでしょうが、それもすべて、進んでリスクに挑戦し、所属する業界や市場を再定義することも厭わない企業が、そうした秩序破壊にどのように対処するかにかかっています。

こうした新技術の素晴らしい点は、それが多くのスタートアップ企業やチャンスを生み出すことです。実際、人の思い込みが限界を作っているのです。穴が丸いとは限らない日が、いつかきっと来ることでしょう。

詳細は以下をご覧ください
<https://sites.psu.edu/edog>

オークリッジ国立研究所

Lonnie J. Love 氏は、オールドドミニオン大学で機械工学の学士号と修士号を取得した後、ジョージア工科大学で機械工学の博士号を取得しました。

現在は、米国エネルギー省（DOE）オークリッジ国立研究所（ORNL）のエネルギー・輸送科学部に勤務する優秀なリサーチ・サイエンティストであり、製造システム研究グループのグループ長を務めています。彼は、先進ロボット工学と積層造形（AM）技術の研究者、指導者、ならびにイノベーターとして ORNL において多大な貢献を果たしてきました。ごく最近では、大規模かつ高速な最新の積層造形法および 3D プリンティング技術を研究テーマとしています。

積層造形法が主流の製造技術となるのを阻んでいる最大の障害とは何でしょうか、また ORNL 内に設けられた DOE の製造実証施設（MDF）では、そうした課題に対処するため、どんな事をやっているのですか？

信頼性、コスト、そして使い勝手です。

- ・設計したものがプリントできるようになると、信頼性と使い勝手が重要になります。設計ルールは造形機ごと、方式ごとに異なります。積層造形法のプロセスが異なれば、それぞれにエンジニアの設計を支援するツールが必要です。
- ・コスト、特に材料コストは多くのアプリケーションで法外なレベルです。材料によっては、ポンドあたり 50～200 ドルにもなります。さらに悪いことに、造形機も高額（50 万～200 万ドル）であり、その多くが生産速度の遅いマシン（1 時間に 1～5 立方インチ、または 1 年で 1000～2000 ポンド）です。一般に、プリンティングの正味原価は、最終部品のポンドあたりで 500～2000 ドルほどになっています。

ORNL は、商品グレードの原材料を使用できるものとしては大規模かつ高堆積速度のシステムに重点を置いて取り組んでいます。我々の目標は、最終部品でポンドあたり 20 ドルを実現することです。

ORNL と Cincinnati 社が共同開発した画期的な 3D プリンティングシステム Big Area Additive Manufacturing（BAAM）を用いて、MDF の研究チームが史上初のコンポジットカーをプリントしましたが、そのとき、この技術の可能性に期待して業界は大いに盛り上がりました。あの研究は、どの程度進行していますか？

Local Motors 社の開発した Strati カーは、積層造形法のスケーラビリティと、複合材が積層造形法に与える影響を明らかにしました。しかし同時に、いくつかの課題もあらわになりました。大きな問題の一つは表面仕上げです。低コストで高速なコーティング技術に関しては、これまでに多くの研究がなされてきました。また、キラーアプリケーションとなるのは金型類です。金型が数週間ではなく数時間で、数万ドルではなく数千ドルでプリントできるようになります。我々も、航空宇宙、自動車、家電、海洋（ボート）、プレキャストコンクリートなどの業界の金型を製作してきましたが、それはあらゆる産業にインパクトを与えています。

あなたは、小さな造形品から大型の器具や部品へと移行する手段として、大規模金属システムに期待を寄せていますか？ 今後、それがハイブリッド加工法と組み合わせられて、大型部品のプリントと機械加工が同時に行われるようになりますか？

そうなると思います。大規模金属システムは、機械加工と統合されて、マルチマテリアル（原価の安い内部コアと硬質外面の組み合わせ）へと進化するでしょう。ORNL でも、年内にコンフォーマルクーリングを備えたホットスタンピング用金型の製作をデモする予定です。

大規模金属システムの手法開発に、シミュレーションはどのような役割を果たすとお考えですか？

シミュレーションは極めて重要です。我々は部品がプリント可能であることや、期待される特性を持つことを予測できなければいけません。最初に、モデリングとシミュレーションによって部品の設計案を導きます。次にその結果を用いて、部品内の応力が最小となるツールパスを導きます。シミュレーションツールは、設計ツールに直接組み込まれるべきだと思います。

いつの日か、製造工程そのものを制御し最適化するためにシミュレーションが用いられるようになると思いますか？ そうなるとしたら、そうした制御を駆動するのに必要となりそうなシミュレーションベースの分析法とはどんなものなのでしょうか？

ええ、そう思います。しかしモデルの妥当性が検証されない限り、シミュレーションはただのアニメーションに過ぎません。私は、今後シミュレーションは様々なレベルに分かれるだろうと思います。

- ・前に述べたように、部品の設計支援ツールはモデルを削減でき



画像提供：
米国エネルギー省オークリッジ国立研究所

カスタマーハイライト



るものでなければいけません。

- すべての積層造形法には熱力学的、伝熱工学的な制限があります。そのため、積層造形システムの設計にも、モデリングとシミュレーションの大きなニーズがあります。
- プロセスとシステムの最適化（各形状で最適なインフィルパターンとは何かといった問題）には、忠実度の高い積層造形モデリングが必要です。

今回の研究では、あなたは多くの労力を費やして入念に部品の実験を行い、シミュレーションでそれらを検証しました。主流として使われるためには、製造したすべての部品に対し同じように厳しくテストする必要があるとお考えですか、あるいは、シミュレーションモデルの予測性や正確性への信頼を築く手段として、何か良いベンチマークはありますか？

前にも述べたように、主流派のエンジニアには、部品がうまくプリントできること、予想通りの特性を持つことへの自信を与えてくれるシンプルで直感的なツールが必要です。15 年前まで、有限要素解析（FEA）と設計は 2 つのソフトウェアに分かれていました。やがて、ダッソー・システムズはそれらを一つにまとめ、より効率的で使いやすいものにしました。今日、スライシングソフトウェアでも同じ問題が生じています。積層造形プロセスにも同様のアプローチを取る必要があるのです。部品のプリント方法が材料特性に影響を与えます。そのため、スライシングソフトウェアを設計パッケージに直接組み込む必要があります。設計し、スライスし、そして解析してから製作するのです。

大規模金属システムの他に、何か研究していることはありますか？ 積層造形法分野で期待されている技術があれば教えてください。例えば、大量生産を経済的に実現可能にするだけのスケール、ボリューム、サイズをもたらすような技術です。

2 つほどあります。

データ分析と人工知能（AI）：積層造形法には膨大な量のデータが関係しますが、実際、そうしたデータを用いてプロセスや設計を改善しようとしている人はほとんどいません。データを収集することでプロセスの検証や改善を行ったり、さらには造形品の認証を行ったりすることには、大きな可能性があると思います。我々の MDF にも、他の政府機関や産業界と協力して、新たな戦略やソフトウェアツール、認証の仕組みを開発し、それによって造形品の信頼性を高めようとしている専門家がいます。

マイクロファクトリー：積層造形技術が統合ワークセルの構成要素となったハイブリッドシステムがすでに出現しています。部品というよりはシステムをプリントするハイブリッドマシンの分野には巨大な可能性があります。積層造形法は、切削加工、ピックアップブレース、マルチマテリアルなどを包含したシステムの一部となれるのです。伝統的な工場は単品大量生産に向いていますが、それは集中化（例えば、巨大な自動車組み立て工場など）を意味します。私は、マイクロファクトリーとは広範な分散化を実現するものだと思います。そこでは多品種少量生産が行われ、現地生産が可能になるのです。中心となるのは、我々をまさに産業革命以前の社会に戻そうとする考えです。どの町にも鍛冶屋や大

工などの職人がいて、町で必要なものは地元の人材と資源によって現地生産されていた時代です。これこそ、第4次産業革命が実現しようとしていることではないでしょうか。

大規模金属の積層造形法のプロセスモデリングとその検証

以下は、2017年の「Science in the Age of Experience」会議において、Srdjan Simunovic氏、Andrzej Nycz氏、Mark W. Noakes氏（オークリッジ国立研究所、米国テネシー州オークリッジ）、Charlie ChinおよびVictor Oancea（ダッソー・システムズSIMULIA、米国ロードアイランド州ジョンストン）らが発表した論文の概要です。

ダッソー・システムズが最近開発した積層造形プロセスシミュレーション用フレームワークの妥当性確認が、レーザー方式の指向性エネルギー堆積法（LDED）のプロセスに対して行われています。ORNLでは、エネルギー省先進製造技術局の資金援助による研究活動の一環として、この新しいシミュレーション用フレームワークを、ワイヤ供給アーク放電方式の大規模金属の積層造形プロセスにも適用し、そのシミュレーション結果を実験結果と比較して検証しました。金属ワイヤを連続して供給しながら、ワイヤと基板の間に発生させた電気アークによって溶融させ、この溶融した金属をビードの形で所定の経路に沿って堆積させます。このプロセスをモデル化した材料堆積の数値シミュレーションでは、最初に伝熱解析を実施し、次にその温度履歴に基づいて構造解析を実施して、最終的な変形と応力状態を予測します。

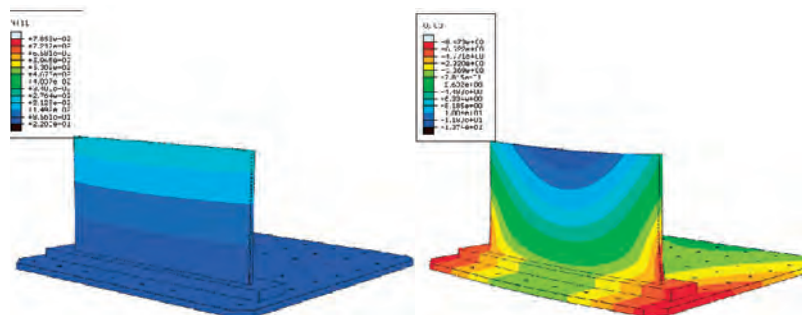
造形プレートの各面に6個の熱電対を埋め込み、さらに造形プレートの各面上のテーブルにも3個の熱電対を取り付けた状態で、部分的に固定されたカールバー部品がプリントされました。最初に、熱電対の温度測定値がシミュレーション結果と比較されました。単純化した一定の熱伝達係数を使用した場合でも、温度曲線は良く一致していました。次に、伝熱解析の温度履歴結果が、後続の構造解析にマッピングされました。このシミュレーションでは、冷却時の材料収縮によって生じたバー最上部の全体的な上向き曲げ変形が良く再現されていました。

もっと大型の薄肉構造のプリントとシミュレーションも実施されました。初期の段階では、質量の大きな造形プレートと、より低温の位置決めテーブルに向かって多くの熱が移動します。プリントが進行するにつれて、熱源から造形プレートとテーブルに向かう熱伝導の大きさが減少し、その結果、全体の温度が上昇します。プリント部品と造形バーのそれぞれに一定の熱伝達係数を使用した場合、プリントの最初の1時間に限れば、今回もシミュレーションの温度結果と熱電対の実測値は良く一致していました。しかしそれ以降は、薄肉壁が高く堆積するに従って放射伝熱効果が増大するため、シミュレーションでは冷却速度の低下が見られました。この場合、類似の積層造形プロセス用に開発された温度依存の複合熱伝達モデルを用いると、実験結果との良い相関性が認められました。

最後に、高さ2.1mの油圧ショベル用アームがプリントされました。この部品の実際のプリント時間は約4.6日間です。明らかに、シミュレーションにはこの部品の実際の造形プロセスを置き換えるだけのメリットがあります（約220万要素からなる実証モデルのシミュレーション時間は6時間程度です）。シミュレーションを効果的に利用することで、温度履歴に加えて、プリント部品の最終的な変形と残留応力の評価が可能となり、さらには各

種プリント方式の効率性も調査できることが示されました。

結論：今回の妥当性確認は、小さな部品（高さ0.01m）から大型の部品（高さ2m）までを対象としています。小さな部品では、シミュレーションのベストプラクティス開発と、プロセスモデルや境界条件モデルの校正が行われました。大型の部品では、大規模金属システムの実際の製造問題をシミュレーションする上で、計算モデリングの実現可能性が実証されました。結果として、わずかな調整を行うだけで、実験結果との良い相関性が得られるということが分かりました。



薄肉部品：伝熱解析（左）と構造解析の結果

オークリッジ国立研究所について

エネルギー省科学局の管轄下にあるオークリッジ国立研究所の実際の運営はUT-バテルが行っています。科学局は、米国における物理学分野の基礎研究をサポートする唯一最大の組織であり、今日我々が直面している緊急課題のいくつかに取り組んでいます。

今回の研究は、ORNLに設置された製造実証施設において、DOEのエネルギー効率および再生可能エネルギー局と先進製造技術局の支援の下で行われました。先進製造技術局は、アメリカ製造業のエネルギー効率を改善する新素材、情報、プロセス、ならびにクリーンエネルギー製品の製造プラットフォーム技術に関して、それらの初期段階における応用研究・開発をサポートしています。

詳細は以下をご覧ください
<http://science.energy.gov>

SIMULIA と STRATASYS 社によるシミュレーション駆動型の設計と 3D プリンティング

Stratasys 社は 25 年以上にわたって 3D プリンティングのイノベーションを先導し、モノ作りの世界に変革をもたらしてきました。積層造形 (AM) 法を利用することの付加価値により、これまで多くの成果が挙がっていますが、それは、金型が不要であることや製造工程が短くて済むことに関連したサプライチェーン上の利益によって実現されています。こうしたサクセスストーリーは、この技術の将来性を明示していますが、そのために使用された舞台裏のワークフローを調べてみると、コンセプト開発から設計そして最終部品のプリントに至るまでの陰しく困難な道のりが明らかになります。



図 1: Stratasys 社の 3D プロダクションシステム「Fortus」

例えば、トポロジーを最適化した構造が 3D プリンティングの設計ルールに適合しないと、部品コストを急増させるかもしれません。高品質な部品を得るには、物理的に部品を製造するといったコストのかかる作業が必要です。また、FDM 材料の挙動や特性を正確に評価しないと、軽量化率が大幅に低下する恐れがあります。Stratasys 社とダッソー・システムズのパートナーシップは、コンセプト開発から製造までのワークフローで生じる、こうした問題に迅速に対処することで、コスト効率が高く機能的で高性能な部品の複雑な設計を、エンジニアの皆様が無事達成できるよう応援します。現在ダッソー・システムズでは、ポリマー材料のミクロ構造を調査し設計するためのソリューション、FDM の制約条件とサポート構造の要件を考慮に入れた現実的な設計コンセプトの最適化ソリューション、さらには、予測可能で信頼性のある造形品を得るために、プロセスシミュレーションによってポリマー押し出しプロセスのプランニングを行うソリューションも提供しています。

コンピュータによる材料エンジニアリング

部品のゆがみや残留応力を予測することが、積層造形シミュレーションの重要任務となっています。これを正確に行うには、製造時の極端な温度サイクルの全過程にわたり、材料特性を完全に解明する必要があります。また、下位スケールでの物理現象を理解することが、部品レベルでの有限要素 (FE) シミュレーションを駆動するための重要な要素となります。

我々ダッソー・システムズでは、分子レベルのシミュレーションから部品レベルでの実性能のシミュレーションに至るまで、各段階でポリマーの材料設計を活用することが可能です。成分特性やミクロ組織形態は、分子動力学とメゾスケールのシミュレーションによって推定でき、それを用いて、連続体スケールにつなげることが可能なメゾスケールの FE モデルを構築できます。また、メゾスケールの RVE モデルを用いることで材料挙動の均質化が可能になり、それらは上位スケールの伝熱および構造のシミュレーションで利用されます。このようにして、変形と残留応力を予測するための部品レベルのシミュレーションが行われ、さらにその結果を初期条件として、部品の実稼働時の性能予測が行われます。

パターンニング方向、ビードのアスペクト比、空隙サイズ、スライス高さなど、FDM プロセスの様々な因子が、最終プリント部品の材料特性に影響を与えます。有限要素法によるプロセスシミュレーションを正確に実施するには、このような FDM 材料の機械的特性と熱的特性を、クーポンによる実験または RVE モデルによるシミュレーションのいずれかで評価する必要があります。Abaqus マイクロメカニクス・プラグイン (ダッソー・システムズのナレッジベース QA00000046185 からダウンロード可能) を使用すると、ボイドと結合挙動を理解することや、FDM プリント部品のモデル化および特性評価が可能になります (図 2 参照)。

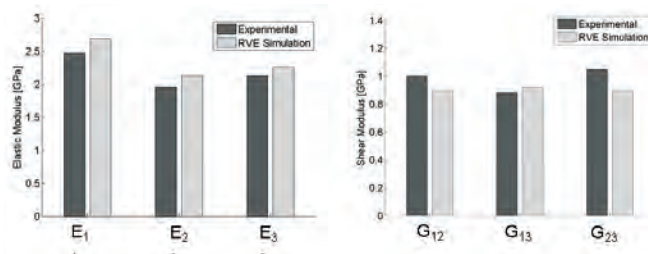


図 2: Abaqus マイクロメカニクス・プラグインを用いた仮想試験と実物試験の比較 [1]

FUNCTIONALLY DRIVEN GENERATIVE DESIGN

Functional Generative Design 除去的製造法の制約から解放された部品設計者は、最も効率的な設計案を決定するために、最新の方法論を用いる必要があります。3DEXPERIENCE プラットフォーム上で利用可能な Functional Generative Design では、プリント方向とオーバーハング部を考慮に入れながらトポロジー最適化を実施できるため、製造時に必要となるサポートの本数を削減できます。結果として得られた形状で基本の応力解析を実施すれば、高応力集中領域を特定できます。また、これらの領域の応力を低減するとき、後処理に最適な部材寸法を考慮しながら形状最適化を実施すれば、最適形状の選定も可能になります。3DEXPERIENCE プラットフォームは、ユーザーがジオメトリを再パラメータ化し再構築して、軽量で機能的な設計案を効率良く導くことに役立つ強力なツール群を提供しています (図 3a 参照)。

さらに軽量な設計案を得るため、設計空間でラティス構造やインフィル構造のノンパラメトリック寸法最適化を実施することも可能です。弊社は、ビームとシェルの寸法最適化、材料挙動の補間、ならびにマルチスケールのトポロジー最適化を実施できる各種ツールも開発しており、この場合、ジオメトリの再構築は不要になります (図 3b 参照)。

プロセス定義と製造プランニング

ダッソー・システムズの SIMULIA ブランドでは、既存および新規のあらゆるプロセスタイプに向けて、オープンでカスタマイズ可能なプロセスシミュレーション用フレームワークからなる単一ソリューションを開発しています。

プロセスシミュレーションの目標：

- ・ 独立事象（例えば、ツールパスに従った材料付加）を入力と見なして、物理現象を正確に捕捉
- ・ 残留応力と変形を予測し、熱-構造の順次連成解析で許容誤差を計算
- ・ 材料と造形の校正を行うことにより、設計と造形品の間の隔たりを縮小
- ・ コストおよび造形品質の管理に役立つプロセスマッピングと最適化

FDM プロセスのための検討：

- ・ 溶融材料の堆積を定義する詳細な経路データ、Stratasys ソフトウェアのツールパスを SIMULIA のシミュレーション入力データに変換、3DEXPERIENCE プラットフォームでのシミュレーション入力データの図式的生成
- ・ 実際の部品をサポート構造と加熱台も含めてシミュレーション、各種の要素タイプまたは汎用のボクセルメッシュによる複雑形状の表現（サポート形状の作成は不要）
- ・ 変化していく部品外表面での伝熱メカニズム（熱処理中の冷却状態を定義）、ツールパスに従った材料堆積中の要素の漸進的アクティブ化および伝熱面の時間変化
- ・ ビードの高さや幅などのプロセスパラメータを考慮した材料の特性評価、ツールパス Event Series API やユーザー配向サブルーチンの詳細ツールパスに従った材料の直交異方性と局所材料方向の割り当て
- ・ 様々なボイド効果の捕捉。堆積ビード間のボイドに等価な材料特性、ツールパスのスタイル間のボイドおよび軽量化のために設計されたボイドに対する要素の漸進的アクティブ化
- ・ 温度勾配、冷却速度、応力勾配の捕捉に必要な時間増分サイズとメッシュサイズ、時間増分サイズの簡単な変更による再現性と効率性の制御、変形と残留応力のレイヤーごとの予測解析、結合形成と層間剥離を分析するための単一レイヤーの解析（図 4 および 5 参照）。

弊社で行った初期の妥当性確認では、特別な調整なしでも結果は良く一致していました。Stratasys 社とダッソー・システムズでは、FDM プリント部品、温度履歴、および部品のゆがみ/許容誤差の予測検証に関して、継続的に共同研究を行っています。今後の検証結果にご期待ください！

[1] Mechanical Testing of FDM Parts for Process Simulation, Siddharth Dev, Christopher J. Hansen, Blake Courter, Jing Bi, Vishal Savane, Proceedings of NAFEMS World Congress, Stockholm, June 2017.

[2] Finite Element Simulation of the Fused Deposition Modeling Process, Blake Courter, Vishal Savane, Jing Bi, Siddharth Dev, Christopher J. Hansen, Proceedings of NAFEMS World Congress, Stockholm, June 2017.

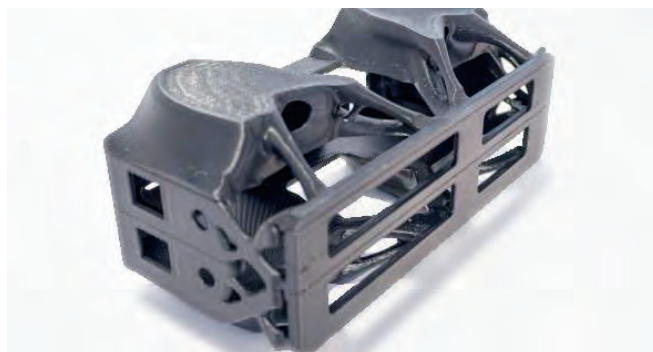


図 3a: トポロジーが最適化された宇宙ロケット用の回路ボックス

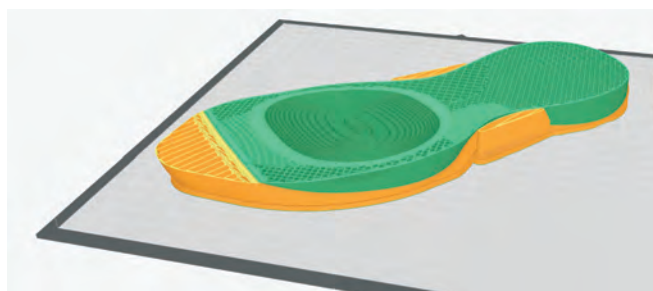


図 3b: インフィル最適化結果からのダイレクトツールパス生成 (Stratasys ソフトウェア)

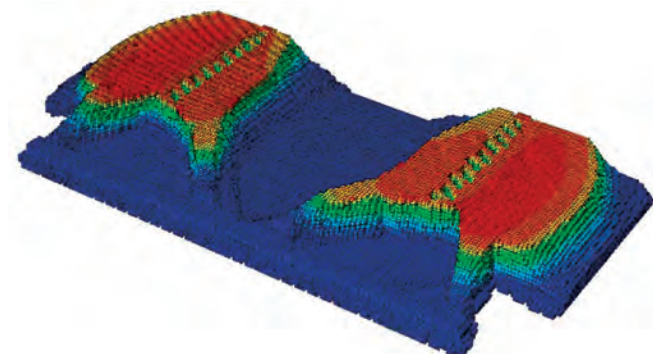


図 4: 宇宙ロケット用回路ボックスのプロセスシミュレーション

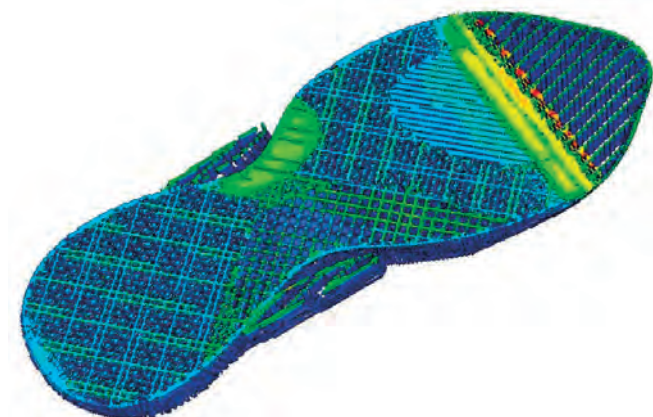


図 5: インフィル型靴底のプロセスシミュレーション

詳細は以下をご覧ください
www.stratasys.com



TWI 社による溶接と積層造形法のシミュレーション

溶接は人類最古の金属加工技術の一つです。一方、積層造形法（3D プリンティング）は最新の技術の一つです。ところが、これら 2 つの間には、思った以上に多くの共通点があるのです。そして、1946 年設立の英国ケンブリッジに本拠地を置く TWI 社（旧 The Welding Institute）の専門家ほど、この事を良く理解している人はいません。

TWI 社は、産業界で用いられる材料接合法とエンジニアリングプロセスに熟達した、世界有数の独立研究・技術機関です。同社のコンサルタント、科学者、エンジニア、そしてサポートスタッフのチームは、世界 80 か国 1,800 社以上の産業メンバーと協業しています。また、英国に 5 か所、海外に 13 か所ある同社施設では、TWI のメンバーだけでなく、毎年約 25,000 名もの学生に対して溶接および検査技術のトレーニングを行っています。

「積層造形法（AM）は、一連のマイクロ溶接であると言えます」と、TWI 社の数値モデリング・最適化グループでリージョナルチームマネージャーを務める Tyler London 氏は話しています。英国の公認技術者であり、科学者、数学者、そしてシミュレーションの技術士でもある London 氏は、オックスフォード大学で数学モデリングの修士号を取得した後、海洋、航空宇宙、石油・天然ガス分野の破壊・健全性評価に携わってきました。彼の学生時代もシミュレーションは主要なツールでしたが、2010 年に TWI に入社してアディティブ・マニュファクチャリングチームと一緒に仕事をするようになってからは、その有用さを特に実感しています。

「積層造形と溶接は、シミュレーションの手順という点でも大きな違いはありません。もちろん、積層造形ではマイクロ溶接が膨大な数になるので、シミュレーションの実行時間とメモリー容量が重要になります。しかし調査しようとしているのは、金属の相変態、冷却速度、ツールパス、残留応力、ゆがみ変形などであり、それらは間違いなく両方で類似しています」と彼は話しています。

TWI 社は 1990 年代から SIMULIA の Abaqus ソフトウェアを主要 FEA ツールとして使用し、溶接の数値モデリングに取り組んできました。彼らには、材料（構成）モデル、各種熱源のモデリング、そして校正と検証に関する深い専門知識があり、それらすべてが、最近の同社の積層造形分野への参入につながっていました。「我々には両方のモデリングノウハウがあり、自社でサンプ

ルを製作して試験する能力もあったので、複合領域のアプローチを用いて、積層造形プロセスシミュレーションを弊社の R&D とコンサルティングサービス業務に組み込むことには何の問題もありませんでした」と London 氏は話しています。

TWI 社は自社の積層造形に関する専門知識を生かして、石油・天然ガス、航空宇宙、医療分野などの多数の組織と情報交換しながら、パウダーベッド・フュージョン法（選択的レーザー／電子ビーム溶融法）、指向性エネルギー堆積型、ワイヤ供給アーク法など、各種のアディティブ・マニュファクチャリングプロセスに対する設計の実現可能性を検証しています。アプリケーションは、医療用インプラント（股関節、蝸牛管、歯科用など）から、自動車のターボチャージャー、そして航空機部品に至るまで多岐に渡ります。

積層造形のためのシミュレーション

London 氏によれば、特定の積層造形マシンの機能に精通し、正常でゆがみが少なく表面状態が良い造形品を得るには、どんな造形方向やプロセスパラメータ、レイヤー厚が必要であるか大体推測できる人であれば、単純な部品の 3D プリンティングは簡単です。「しかし、非常に入り組んだ部品や、造形時に多数のサポートを必要とする部品を製作するような場合、必要となるベストプラクティスの知識は、まだほとんど産業界に存在していないのが現状です」と彼は話しています。「何回もトライアルを行い、様々なサポート構造やレーザー出力を用いて、様々な方向で造形してみるしかないのです。そして結局、それがとても時間とコストのかかる作業だということが分かります」。過去数年間で積層造形のポストプロセス・ソフトウェアは大きく進歩しましたが、障害となっているのは最適な処理パラメータの選択であり、積層造形プロセスの基本の物理現象を適切に理解する上で、さらなる研究が必要とされています。

この新ソリューションの機能を用いると、粉末のリコーティング手順、レーザーの走査パス、プロセスパラメータなどの正確なマシン情報を FE モデルに直接入力できるようになります。

そこで、TWI 社が同社のメンバーや積層造形のコミュニティと一緒に追っているのは、どんな物を製造する場合でも、最適な設計許容範囲を示してくれるシミュレーションの能力です。「我々は、積層造形法がもたらす様々な便益や設計自由度をもっと活用できるようにしたいのです。軽量であることと製造のしやすさを両立させたいと思ったとしましょう。新しい設計案が導かれると、我々はプロセスシミュレーションを行い、ゆがみと残留応力が最小になるような最適なレイヤー厚と造形方向を決定します。そうすれば、造形時間だけでなく、必要な後処理も削減できるようになります」と London 氏は話しています。

「力学解析と伝熱プロセスシミュレーションの両方に Abaqus を使用して、これらすべてのバランスを取るようにすることが、我々が現在目指している大きな目標です。この種の活動に対しては、産業界と資金提供機関の両方から多くの要請があります」と彼は話しています。

積層造形法におけるシミュレーションの能力をテストする：選択的レーザー溶融法

選択的レーザー溶融法（SLM）はパウダーベッド・フュージョン法の一つですが、このプロセスでは、基板上に粉末の層を敷いて、ワイパーで均一にならした後、造形する 3D 部品をコンピュータでスライスした 2D 形状に沿って、この粉末層を高出力密度レーザーで完全に溶かします。溶けた粉体粒子が融合して

固化すると、部品の一つのレイヤーが出来上がります。その後、基板がレイヤー厚だけ下がって次の粉末層が供給されます。このような融合プロセスが、3D 部品が完成するまで繰り返されます。材料としては、チタン合金（Ti-6Al-4V）、ステンレス鋼、ニッケル合金（インコネル）、アルミ合金（6061）などの様々な合金が使用可能です。SLM プロセスの設計自由度のおかげで、従来の製造法では絶対不可能な、最適な材料分布を持つ複雑で軽量な部品も作成可能になります（図 3）。

しかし、SLM の処理中に部品が受ける極端な温度サイクルや急激な冷却速度は、好ましくない金属組織、高い残留応力、許容できないレベルの変形（形状欠陥）を引き起こす恐れがあります。最悪のシナリオでは、造形中にプロセス誘起の残留応力によってひび割れが生じたり、リコーティング中にワイパーを損傷させるほど変形が大きくなったりする場合があります。そのため、SLM 部品の製造時品質を向上させることが、製造工程として SLM を大規模に採用できるようにするための重要なマイルストーンとなるのです。こうした課題に対処するため、TWI 社はダッソー・システムズの SIMULIA ブランドと協力して、SLM プロセスの基礎的理解を深めようと妥当性確認の作業に着手しました。

果たして、有限要素解析は積層造形法が抱える課題に対処できたでしょうか？ 2017 年に Abaqus に導入された新しい物理学ベースの FEM 定式化を利用して、London 氏と彼の同僚は「双片持ち梁」試験片に対する AM プロセスの伝熱モデルを Abaqus/



図 1. 通常の溶接シミュレーション：溶融部のサイズと形状の比較

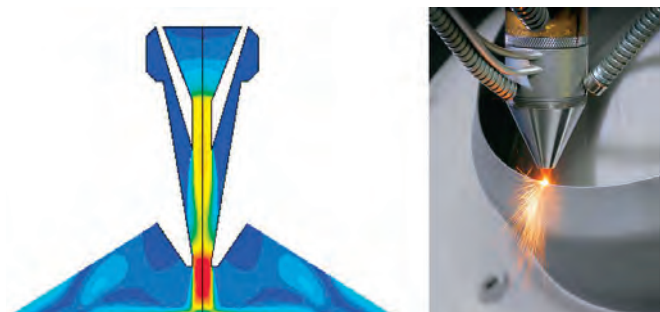


図 2. レーザー金属堆積法のマルチフィジックス・アディティブ・マニュファクチャリング予測のため、Abaqus への入力として用いられた伝熱シミュレーション結果¹

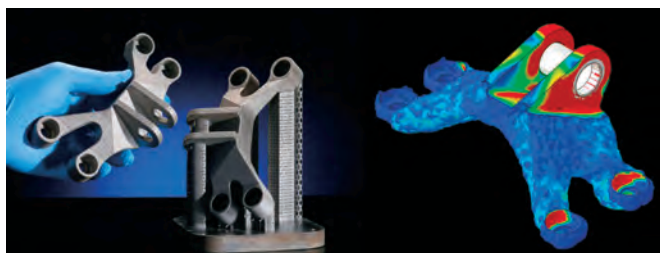


図 3. Tosca のトポロジー最適化で設計され、SLM プロセスで製作された SLM 部品²

¹ He W, Zhang L and Hilton P (2009): 'Modeling and validation of a direct metal deposition nozzle', Presented at ICALOE 2009.

² Undertaken as part of the European Commission project "MANSYS" funded under FP7-NMP Project ID 609172.



図 4. SLM で製作された双片持ち梁サンプル(上)とシミュレーション結果(下)³

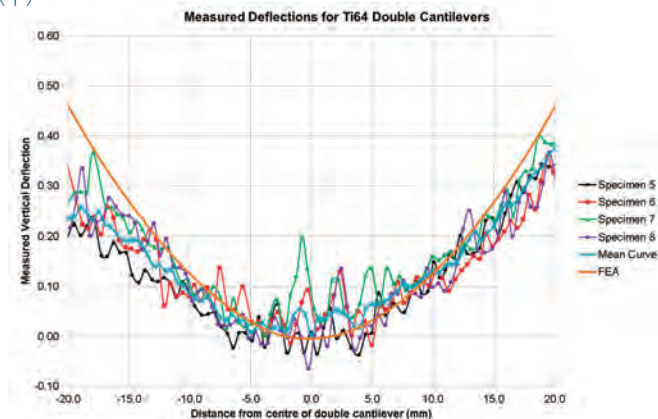


図 5. 片持ち梁の実測値と FEA 予測値の比較

³ Tripathy S, Chin C, London T, Anakalkhpe U and Oancea V (2017): 'Process modeling and validation of powder bed metal additive manufacturing', NAFEMS World Congress 2017, 11-14 June 2017, Stockholm, Sweden.

ケーススタディ

Standard で作成しました。この新ソリューションの機能を用いると、粉末のリコーティング手順、レーザーの走査パス、プロセスパラメータなどの正確なマシン情報を FE モデルに直接入力できるようになります。これら最先端の機能を用いることで、要素の漸進的アクティブ化、漸進的な加熱計算、さらには、造形が進行するにつれて変化する部品外表面の冷却計算も可能になります。

「我々は CAE を用いて CAD 形状を作成し、レーザー・アディティブ・マニファクチャリングチームに渡す STL ファイルをエクスポートしました。次にアディティブ・マニファクチャリングチームは、その部品の造形方法、すなわちレイヤー厚、レーザー出力、走査方式などを指定します。このプロセス情報を用いて伝熱モデルが作成され、さらにそこから、変形と残留応力を計算するための力学モデルが導かれました」と London 氏は説明しています。双片持ち梁自体は、Renishaw 社製の AM250 マシンで Ti-6Al-4V 粉末を用いてプリントされました。

双片持ち梁の造形が終わると、TWI 社は放電加工によって梁の表面直下でサポート構造を切断しました。切断した途端に、閉じ込められていた残留応力が残った梁構造を変形させます。この面外変形が測定されて、モデルの予測結果と比較されました。予測値と実測値は良く一致しており、その結果、自信を持ってこの新しいモデリングアプローチを適用できることが分かりました。

粉末積層造形方式から抜け出す：電子ビーム・ワイヤ供給方式

「粉末積層造形方式では複雑形状の造形が可能ですが、一方でプロセスは低速です」と、TWI 社の電子ビームグループでコンサルタントとシミュレーションエンジニアを務める Nick Bagshaw 氏は話しています。「ワイヤ供給方式であれば大量の材料を高速に堆積させることが可能です。しかし、最後に機械加工またはひずみ補正処理を行わないと、通常は最終的な寸法公差が得られません」。ただし、機械加工によって固体から最終部品を製作する場合に比べれば、材料の無駄は大幅に少なくて済みます。高堆積速度のプロセスはゆがみ変形の原因となりますが、産業アプリケーションでは、そうした変形を最小限に抑える必要があります。

そこで TWI 社は、ワイヤ供給・溶解金属積層法（ワイヤ電子ビーム積層法）（W-EBAM）の造形品質をより深く理解するため、そして W-EBAM の潜在的な産業アプリケーションを明らかにするため、W-EBAM プロセスで造形した Ti-6Al-4V 部品のシミュレーションと実験を行いました。トライアルは Hawker Siddeley Dynamics 社製 6kW ビーム出力の EB 溶接機を用いて実施されました。このマシンには、直径 1.6mm のワイヤを供給するため、チャンバー内 CNC 制御のワイヤ供給装置が取り付けられています。特注の工具が開発され、図 6 に示すように、処理中にプレートを保持するための固定手順も定義されました。

W-EBAM プロセスのモデル化には、通常の溶接シミュレーションアプローチが用いられました。これは Abaqus の「モデルチェンジ」と要素アクティブ化の機能を利用しています。各 1.5mm 厚のレイヤーは 2 回の平行パスから成っているため、シミュレーションでは、高さ 12mm～50mm の堆積範囲で温度履歴と結果として生じる構造変形が予測されました。調査したすべての造形高さ範囲にわたってモデルの妥当性が確認され、シミュレーションでは、高さが増すにつれて構造体によって引き起こされる補強効果が正確に捕捉されていました。

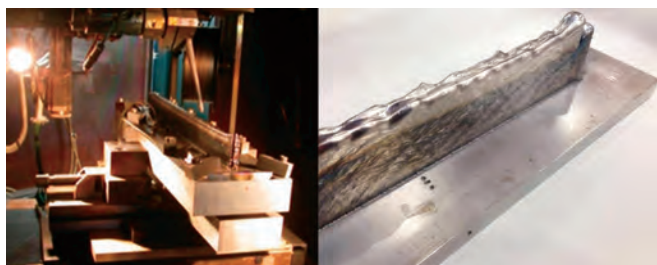


図 6. ワイヤ EBAM 試験のセットアップ(左)と W-EBAM 試験片の例

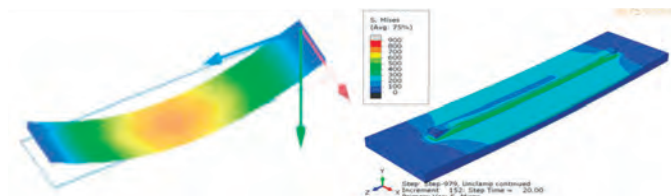


図 7. 座標測定機 (CMM) の測定値(左)と Abaqus による FEA 予測値の比較

次なるステップ

「我々は、積層造形プロセスの種類にかかわらず、温度変化と変形および残留応力を正確に予測できるような、ロバストで信頼できる手段を探索しています。最終的には、Abaqus の高度なプロセスシミュレーション機能で金属相変態モデルの校正と妥当性確認を行って、相分率、結晶の粒径と形状、そしてプリント中に生じるミクロ組織の時間変化を解明したいと思っています。目標は積層造形部品としての機械的特性を予測できるようにすることです」と London 氏は話しています。

今年の「Science in the Age of Experience conference」会議で発表された研究論文では、作業の進展している様子が示されました。そこでは、TWI 社とダッソー・システムズの協力関係が、今後数か月間で総合的能力の検証を完了するという目標の達成に貢献しています。

謝辞

本研究は、TWI の産業メンバーのために、TWI のコアリサーチプログラムの一環として行われています。

詳細は以下をご覧ください
www.twi-global.com



カスタマーインタビュー: STEFANIE FEIH 博士 Singapore Institute of Manufacturing Technology

Stefanie Feih 博士は、これまで多くの国々で学び、働き、暮らしてきました。すなわち彼女は世界人であると言って良いでしょう。彼女はドイツで STEM に親しみながら育ち、母国で工学修士号を取得しましたが、それに飽き足らず、米国コーネル大学との国際交流プログラムに参加しました。そして英国ケンブリッジ大学で TWI (The Welding Institute) との共同研究によって工学博士号を取得すると、風力、航空宇宙、海洋などの分野で用いられる軽量素材（複合材と金属の両方）の設計問題を研究テーマとして、デンマークからオーストラリアへと研究者としての道を歩み始めました。2014 年、Feih 博士はもっと業界に特化した研究環境で働きたいと考えて、Singapore Institute of Manufacturing Technology (SIMTech) に職を求めました。シンガポールは、航空宇宙関連の OEM や MRO 業界と深い関係があり、この業界では、軽量化材の調査および導入が積極的に進められています。そして積層造形法が、Feih 博士と彼女の同僚の現在の主要研究テーマとなっています。

SIMTech であなたのチームはどんなプロジェクトに携わっているのですか？

Feih: SIMTech develops high-value manufacturing technology
Feih 博士: SIMTech では、シンガポール製造業の競争力向上を目指して、高価値な製造技術の開発と人材育成を進めています。我々は、精密工学、エレクトロニクス、半導体、医療技術、航空宇宙、自動車、海洋、物流など、様々な業界の多国籍企業や地元企業と共同研究を行っています。SIMTech はシンガポール科学研究技術庁 (A*STAR) 傘下の研究機関です (www.SIMTech.a-star.edu.sg)。

SIMTech のアディティブ・マニファクチャリング (AM) チームは、ポリマー部品と金属部品の両方について、AM 技術開発に

幅広く取り組んでいます。チームが重点を置いているのは、(i) 3D AM 技術の基礎的理解、(ii) 3D AM システム用の新種および非専売の材料開発、そして (iii) 従来の製造プロセスを補完または置き換える 3D AM 技術の新たな応用です。さらに SIMTech は、地元中小企業や多国籍企業のクライアントに対して積層造形法のソリューション技術支援を行っています。また、積層造形技術の企業向けトレーニングコースも開催しています。

あなたの Abaqus ユーザー歴はどれくらいですか？

これまで 20 年間、材料研究のために Abaqus ソフトウェアを使用してきました。大学と企業の両方の講座で FE 理論も教えてきました。SIMTech のスタッフは、過去 8 年間にわたり、シンガポールで開催された SIMULIA 地域ユーザー会議に参加して、我々の研究成果や産業ソリューションを発表しています。Abaqus では、陽解法と陰解法の両方で高度な非線形解析が可能であり、材料モデルと破壊モデルが豊富に用意されているだけでなく、ユーザーサブルーチンを書いてメインコードと情報をやりとりするオプションもあります。そのため、Abaqus は汎用の研究ツールとして研究機関でも企業でも幅広く用いられています。

軽量複合材に関するあなたの研究は、現在のアディティブ・マニファクチャリング技術の研究にどのように役立っていますか？

我々は現在、金属積層造形格子構造のコアと繊維強化複合材の外板を組み合わせ、軽量材の開発に取り組んでいます。積層造形構造研究の数値的な取り組みは Abaqus で行い、すでにいろいろな所で発表してきました。また、この話題はシンガポールでの Abaqus ユーザー会議でも発表しました (図 1 参照)。

金属積層造形法には、従来製法の複合材の性能を上回るほどの軽量構造を生み出す可能性があります。しかし現在のところ、こ

カバーストーリー

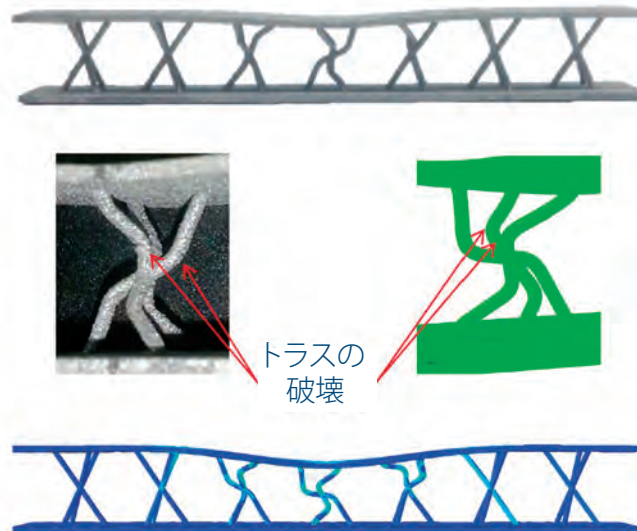
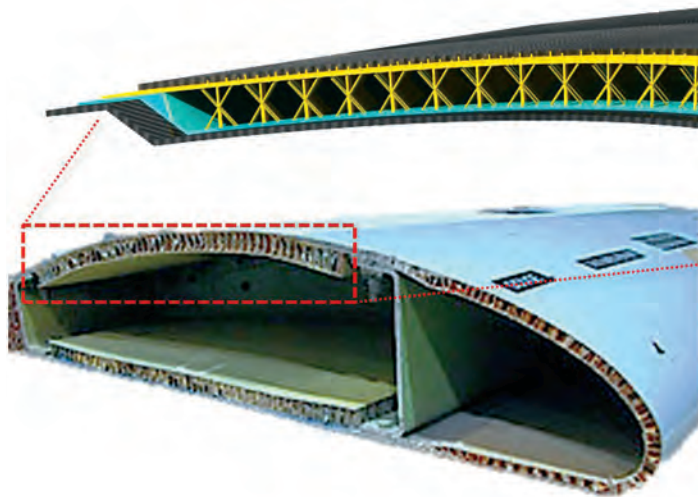


図1&2(上):3D積層造形法で製作された金属製力ゴメ格子コア構造の延性破壊モデリング(静的・動的荷重載荷時)

謝辞:本研究は、以前 Stefanie Feih 博士の生徒であった Inam Ullah 博士が、オーストラリア RMIT 大学・アディティブ・マニュファクチャリングセンターの Milan Brandt 教授の共同指導のもとで実施したものです。

のアプローチにはプリントサイズとプリント精度の面で制限があるのです。そのような訳で、我々はこれらのパラメータについて取り上げた論文を、今年5月の「Science in the Age Of Experience」会議で発表しました(図2参照)。

SIMULIA の新しい積層造形のプロセスシミュレーション用フレームワークを使用すると、固体物、パウダーベッド、プラットフォームのそれぞれを個別にモデリングでき、さらに造形の進行とともに変化する部品の伝熱面も表現できます。シミュレーションを行う際に、こうした造形の構成要素をすべて考慮することが、なぜ重要なのでしょう？ また、品質保証とコスト管理の面で、シミュレーションは積層造形法を利用するユーザーにどのように役立つのでしょうか？

プリント結果に影響する因子について、系統的に理解を深める必要があります。シミュレーションを行うときの時間的制約から、多くの研究者は、これまで周辺のパウダーベッドやプラットフォームの影響を無視してきました。隣接する部品が金属組織内の冷却速度に影響を与えているかどうかという問題や、個々の部品間に、どの程度の間隔を空けるべきかといった問題もまだクリアになっていません。さらに、パウダーベッドの現実的な熱的特性を、広い温度範囲にわたって定めることも困難です。我々のシミュレーション研究では、周辺のパウダーベッドの材料が、造形品の熱冷却速度に影響を与えていること、ならびに、プラットフォーム(通常、造形前に予熱される)が、造形品内部の温度分布に対して限定的なヒートシンクの役目を果たしていることが明らかになりました。従って、これら両方を考慮することが重要であり、プラットフォームは常にモデル化すべきです。粉体の影響は、プリント部品表面の対流現象を簡易的に表現した、熱伝達係数の調整によって考慮できます。

積層造形シミュレーション機能の開発に関して、SIMTech とダッソー・システムズ SIMULIA はいつから、どのように協力してきたのですか？

ダッソー・システムズと SIMTech の積層造形シミュレーションに関する協力関係は3年前に始まりました。ダッソー・システム

ズが積層造形の新機能についてのセミナーを SIMTech で開催した直後のことです。我々はすぐに、プリント部品に生じるゆがみ変形の予測と検証に関して相互利益を確認しました。特に大型の造形プラットフォームでは、プリント不良が時間と材料の無駄遣いという点で最大のコスト要因になります。そのため、部品のゆがみ変形やプリント欠陥を最小限に抑えるために、プリント方向やサポート構造、プリントパラメータを最適化できるよう、我々のシミュレーション能力を高めることが主要優先課題となっています。

2017年の「Science in the Age of Experience conference」会議で発表されたあなたの論文では、移動熱源を考慮するための様々な方法を比較しています(図3参照)。また、メッシュに対する解の感度も検討しています。さらに、シミュレーション時間を削減するため、HPCの利用に関する研究も行いました。AMシミュレーションの手引き書を作って、他の所員の方が容易にシミュレーションできるようにするため、ベストプラクティスを開発しているのですか？

現在のところ、シミュレーション時間が積層造形プロセスシミュレーションの最大の障害になっています。SIMULIA が開発した新しい集中熱流束モデルのアプローチを用いると、1個の要素内で複数のプリントレイヤーのシミュレーションが可能になり、計算時間が大幅に削減されます。レーザー光路が一つの要素を通過することにより、複数の要素が部分的にアクティブになります。これとは対照的に、より定評のある Goldak による熱源モデルでは、プリントレイヤーごとに非常に細かいメッシュが必要であり、結果としてシミュレーション時間はずっと長くなります。Abaqus には、同じモデリングの枠組み内に両方のアプローチが用意されています。そのため研究の立場からは、温度分布と応力分布の予測精度に関して集中熱流束モデルの妥当性を確認することが重要であり、そうすれば、シミュレーション時間の大幅削減が可能になります。長期的には、積層造形装置を扱うエンジニアリングスタッフが、プリントのスケジューリング前に、こうしたツールを使ってプリントセットアップの妥当性を確認できるようにトレーニングしたいと思っています。

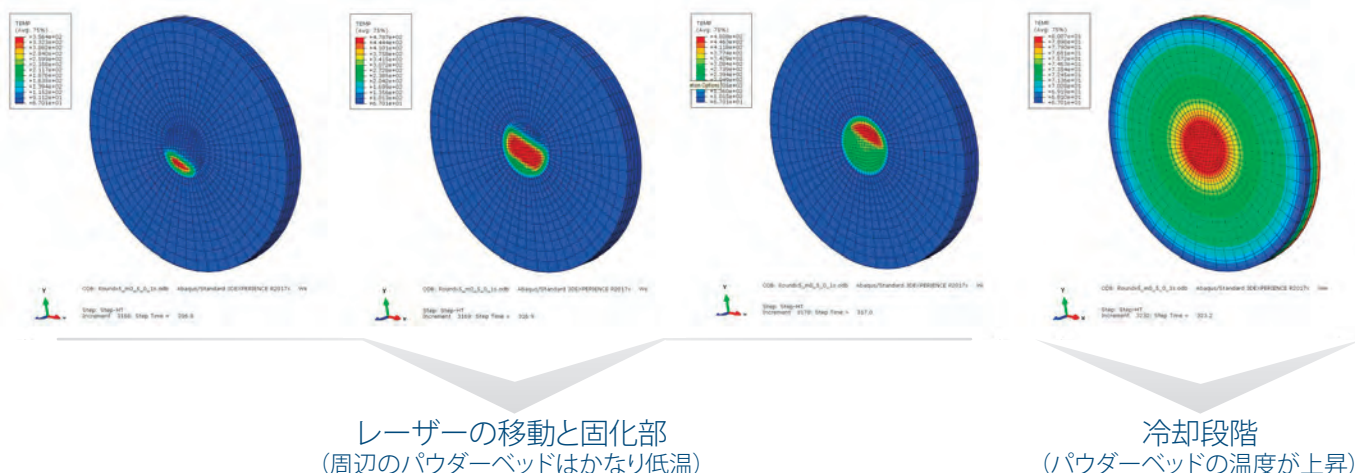


図3(上): Stefanie Feih 博士の「選択的レーザー溶融法において周辺のパウダーベッドと造形プラットフォームが3D プリント部品の熱冷却特性に与える影響」についてのプレゼンテーション画像

あなたが欲しいと思うシミュレーション機能は何ですか？ それは全体的な設計および製造と最終的な造形のワークフローにどのようにつながると思いますか？

理想を言えば、部品設計の最適化（トポロジー最適化）をプロセスシミュレーションにリンクさせたいと思います。設計プロセスでは、最適化したサポート構造も含めて、最善のプリント方向を有する最善のジオメトリを決定する必要があります。次に、ニアネットシェイプのプリンティングを可能にするため、プロセスシミュレーションによって初期ジオメトリの補正の可能性を探ります。プロセスシミュレーションでは、熱源の動き、速度、出力などのマシン固有のパラメータを、シミュレーションの入力として使用できるようにするため、積層造形プリント装置とインターフェースを取る必要もあります。こうした個々の足掛かりのすべてに対して研究が始まっていますが、産業プロジェクトとして妥当なシミュレーション時間枠となるような統一概念は、これまでのところ実現されていません。ワンストップソリューションは、ソフトウェア開発者と積層造形コミュニティにとって、いまだ野心的な課題のままです。

あなたはこれまで、軽量複合材について研究してきました。積層造形法は軽量化や部品一体化の流れにどのように適応しますか、また、それが多くの産業の未来にとってなぜ重要なのですか？

積層造形法によって、非常に複雑な一体化した部品を設計・製造できるようになり、コストのかかる組立工程と材料の無駄を削減できます。積層造形プロセスは金型が不要であり、設計反復は仮想モデルの CAD ファイルを通じて迅速に実施確認できます。今のところ、航空宇宙と医療技術の分野が業界として最先端にあります。航空宇宙産業では、特に高価な少量生産品に積層造形技術が役立ちます。一方、医療機器の分野では、標準サイズ的大量生産品から特注品へと移行するにつれて、積層造形法に対する製品需要が増大しています。それから、スペアパーツ業界は積層造形技術から多大な恩恵を受けると考えられており、スペアパーツの製造、保管、発送に関わるコストが削減されるとともに、海外の顧客にとってはリードタイムも短縮されると見込まれています。

あなたは大学でも教えていますね。働きがいを求める若手エンジニアに何かアドバイスはありますか？

今日の製造技術、データ分析、プロセス制御の飛躍的進歩によって、新しい研究分野やエンジニアリング分野が絶えず生まれています。そのため、私がおもうには、まず先入観を持たないこと、変化をいとわず、様々なことに研究的興味を持って、キャリアを通じて新たな挑戦を受け入れていくことが重要でしょう。様々な分野やアプリケーション領域で働くことにより得られる専門知識は、必ず将来のプロジェクトに役立ちます。

あなたは様々な工学分野の論文を多数書いておられます。共同研究を行うことや、研究成果を発表することに、どんな利点がありましたか？

私は多数の国際プロジェクトに参加し、英国、スイス、オーストラリア、米国の研究所や大学と共同研究を行ってきました。分野を超えた国際協調は、研究を進展させ、オリジナルの議論を発展させる上で欠かせないと思います。さらに共同研究では、他の研究機関のユニークな実験設備や装置を利用できるという利点もあり、研究の可能性が広がります。技術成熟度の低い段階で研究成果を発表することは、斬新なアイデアや成果の拡散と取り込みを可能にするものであり、将来の技術発展にとって非常に重要です。

詳細は以下をご覧ください
www.a-star.edu.sg/simtech



RenAM 500M の造形チャンバー内に置かれた Bleu カーのヒンジ部品

積層造形法のプロセスチェーンを増強する

積層造形法（AM）すなわち 3D プリンティングの技術がもたらす設計自由度は、最先端のプロダクト・イノベーションを実現するための重要な要素です。デジタル製造革命の一環として、積層造形法は複雑部品の製造を根本的に単純化し、同時に機能・性能を向上させ、重量を削減し、そして部品点数を最小化します。

しかし、こうした積層造形法の独特な能力を最大限に生かすには、積層造形法に適した設計（Design for Additive Manufacturing : DfAM）のルールやガイドラインの新要求を満たすように、関連のソフトウェアツールを最適化する必要があります。世界トップレベルの 3D 設計ソフトウェア、3D デジタルモックアップ、およびプロダクト・ライフサイクル・マネージメント（PLM）のソリューションプロバイダーであるダッソー・システムズは、Renishaw 社と協力して、妥協なきエンド・ツー・エンドの積層造形設計エクスペリエンスを実現するため、その **3DEXPERIENCE** プラットフォームを改良しました。

背景

3DEXPERIENCE プラットフォームは、設計および開発から、シミュレーション、そして信頼性解析に至るまで、製品ライフサイクル全体をサポートする 3D ソフトウェアアプリケーション一式で構成されています。

このプラットフォームは、オンプレミスまたはオンクラウドで利用でき、単一のユーザーインターフェースを介してアクセスが可能であるため、プロダクト・イノベーションのための協調作業がより簡素化され、効率化されて、「ソーシャル・エンタープライズ」の実現が促進されます。

トポロジーの最適化は 3D プリンティングプロセスの重要なステップであり、これにより、規定した空間内での材料の使用量が確実に最適化されます。ダッソー・システムズの CATIA Generative Design アプリケーションでは、製品モデリング機能が **3DEXPERIENCE** プラットフォームによって強化されています。また、ダッソー・システムズのコンパニオン製品である DELMIA ソフトウェアアプリケーションを用いると、模擬製造環境での製品設計と実験が可能になります。重要なのは、積層造形システムに必要な造形のセットアップとレーザー（走査）ツールパスをソ

フトウェアで生成し管理することです。

応力とゆがみ変形の予測も含めた、積層造形プロセス全体のシミュレーションは、**3DEXPERIENCE** プラットフォームのシミュレーション用アプリケーションを用いて実施できます。

Renishaw 社は、今回のダッソー・システムズとの共同開発において、同社の最先端の精密製造機器と計測機器を幅広く使用しました。それらは、同社の主力製品であるレーザー・パウダーベッド・フュージョン技術を用いた RenAM 500M 金属アディティブ・マニファクチャリングシステム、QuantAM 造形プリプロセッシングソフトウェア、工作機械用プロービングシステム、EquatorTM ゲージシステム、そして REVO 5 軸計測システムからなる座標測定機（CMM）です。

Renishaw 社は、造形プロセスの特性評価、設計の妥当性確認、最終切削加工の自動プロセス制御など、同社が有する様々な技術を応用しました。そして、これらが **3DEXPERIENCE** プラットフォームのアプリケーションと組み合わせられて、シームレスな AM プロセスと、必要とされたエンド・ツー・エンドの製造ソリューションが実現しました。

課題

ダッソー・システムズと Renishaw 社のエンジニアが直面した主要な課題は、両社それぞれのバーチャル環境と実環境を整合させることでした。それらは、3D 設計、試験および解析ソフトウェア、そして金属 3D プリンティングの各環境です。ソフトウェアを実際の積層造形のルールに従わせる必要があったのです。

共同開発の目標は、メーカーがコストのかかる「設計-試作-実験」のアプローチから「最初から適切に設計する」アプローチへ

Renishaw 社は、造形プロセスの特性評価、設計の妥当性確認、最終切削加工の自動プロセス制御など、同社が有する様々な技術を応用しました。

ダッソー・システムズ (USA)

と移行できるように、アディティブ・マニファクチャリングの設計・製造プロセスを合理化することでした。

具体的に言うと、プロジェクトの最終目標は、ネイティブ CAD ソースファイルを .STL ファイル形式でエクスポートする必要性をなくすることでした。エクスポートは以前から、製造エラーを引き起こしたり、製品のバージョン管理を不能にする主因となったりすることが分かっていました。

解決策

今回のソフトウェア改良プロジェクトでは、自動車産業における 3D 設計改革をデモンストレーションと実験に利用しています。すなわち、ダッソー・システムズのコンセプトカー「Bleu」用の斬新なドアヒンジの設計および製造問題がベースとなりました。

この複雑かつ軽量のダブルウィッシュボーン式のヒンジは、ダッソー・システムズと Renishaw 社のエンジニアに対して、構造最適化、マルチ材料設計、部品一体化などへの配慮を必要とする本格的な製造シナリオを与えました。

3DEXPERIENCE プラットフォーム内で作業することにより、先進的な 3D ヒンジ設計が CATIA Generative Design のを用いて作成されました。そして、DELMIA アプリケーションによって生成された関連のツールパスが、RenAM 500M システムへ出力する前の追加処理のために QuantAM ソフトウェアにインポートされました。

ヒンジ設計の調整、シミュレーション、プリンティング、詳細検査という順序のループが繰り返された後、最適な 3D 設計とプリンティングを実現するために、**3DEXPERIENCE** プラットフォームのソフトウェアに組み込むべき具体的な積層造形のルールが決定されました。

Renishaw 社は、ダッソー・システムズのために QuantAM ソフトウェア用のアプリケーション・プログラミング・インターフェース (API) を作成しました。これによって、最初から適切に設計された 3D プリンティング用ツールパスが、DELMIA アプリケーション内で生成できるようになります。

成果

今回のダッソー・システムズと Renishaw 社の共同開発の直接的な成果として、**3DEXPERIENCE** プラットフォームのユーザーは、既存のネイティブ CAD 環境内から Renishaw の積層造形システムに直接プリントできるようになります。

追加のポストプロセッシングのために、データファイルを外部システムへエクスポートする必要はありません。

この CATIA、SIMULIA、および DELMIA アプリケーションに対する機能強化は、3D 製品設計が Renishaw 社のアディティブ・マニファクチャリングシステムによる製造と、最終的な機能・性能の両面で自動的に最適化されることを意味します。結果として、部品は最初からより正確に製作されるようになり、リードタイムと材料コストの節減が実現します。

また、今回の 3D 設計ソフトウェア開発の焦点であり、プロジェクトの最終副産物であった「Bleu」コンセプトカーのヒンジの概念は、3D 設計とプリンティングによって得られる利益を改めて実証していました。

図 1 と 2 では、オリジナルの CATIA 製品モデルと QuantAM ソフトウェアで生成された最終ツールパスを比較できますが、この部品設計の進化は非常に印象的です。この場合、オリジナル部品と最適化された部品の容積はほぼ同じでありながら、ヒンジ設計からサポート構造がすべて取り除かれて、より洗練された、より信頼性の高い、はるかに簡潔な自動車部品が得られました。

SIMULIA の積層造形法・材料部門の担当部長である Subham Sett は次のようにコメントしています。「ダッソー・システムズも、Renishaw 社と同様に、3D 設計とプリンティングの技術をあらゆる種類のプロダクション環境に簡単に統合できるようにするためのソリューション開発に全力で取り組んでいます。今回のプロジェクトが成功したのも、こうした共通認識があったからです。ダッソー・システムズは、機能的ジェネレーティブデザインと物理学ベースの製造シミュレーションのソリューションを提供していますが、これらは金属 3D プリンティングのプロセスチェーンの重要部分をなすものです」

詳細は以下をご覧ください

www.renishaw.com

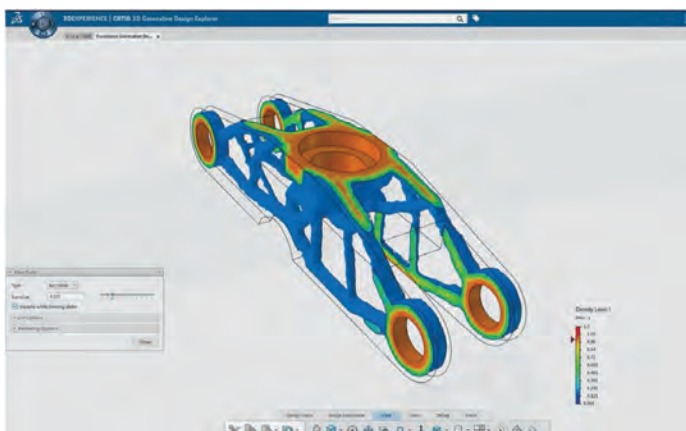


図 1: CATIA における Bleu カーのヒンジ部品

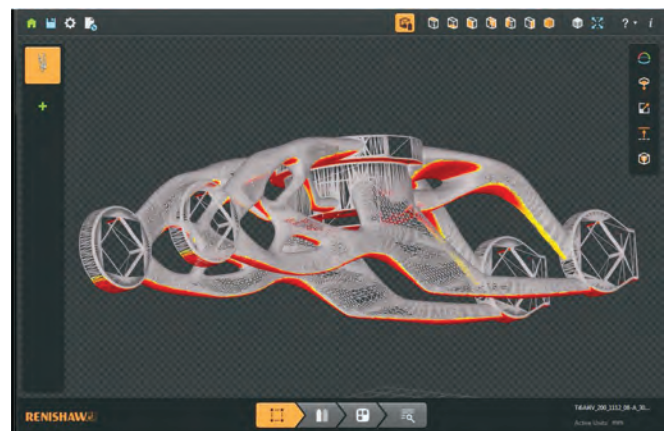


図 2: QuantAM 造形前処理ソフトウェアにおける Bleu カーのヒンジ部品



ABAQUS と nTOPOLOGY ELEMENT によるラティス設計

最近まで、ラティス構造の設計は時間のかかる困難なプロセスでした。従来の設計ツールは柔軟性に欠けており、従来の解析手法や最適化手法はエンジニアリングワークフローにうまく溶け込めませんでした。しかし、Abaqus と nTopology の新たなコラボレーションによって、ラティス構造の設計、解析、そして最適化はシームレスで反復可能なプロセスとなりました。

トポロジー

ラティス設計はトポロジーから始まります。それは、構造の節点とビームの位置および結合関係を表します。トポロジー設計によって、設計案の荷重経路と構造の剛性が決まります。ラティス構造のトポロジーはいくつかの方法で作成できます。あるものは周期的／反復的であり、あるものは非周期的／確率論的です。

トポロジーの作成方法にかかわらず、最初に設計空間を理解することが重要です。内部にラティス構造を生成しようとする固体領域を Abaqus で解析することにより、効果的かつ効率的なトポロジーの作成が可能になります（図 1 参照）。

この結果を用いて nTopology Element でトポロジー設計を行い

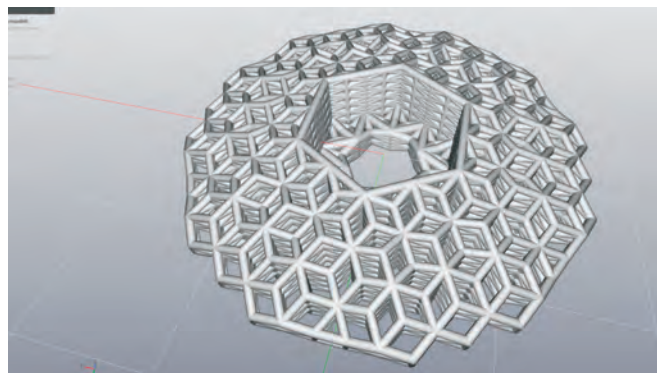


図1

ます。確率論的トポロジーでは、Abaqus のフィールド出力に基づいてビーム密度が変化します。それに対して、周期的トポロジーでは、部品の異なる領域で異なる格子セルを使用します。ここでは、可変の周期的トポロジー（すべて六角柱セルをベースとする）を用いて、部品内に異なる特性を持った領域を作成します（図 2 参照）。

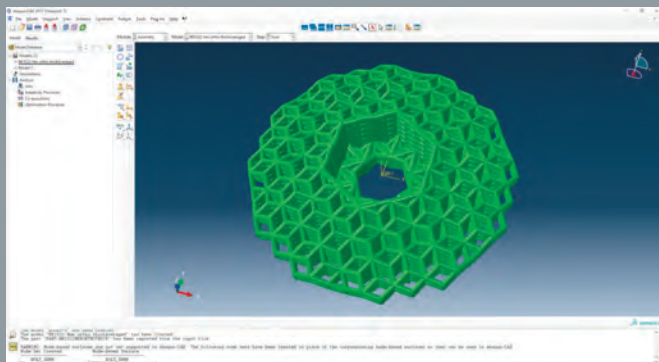


図2

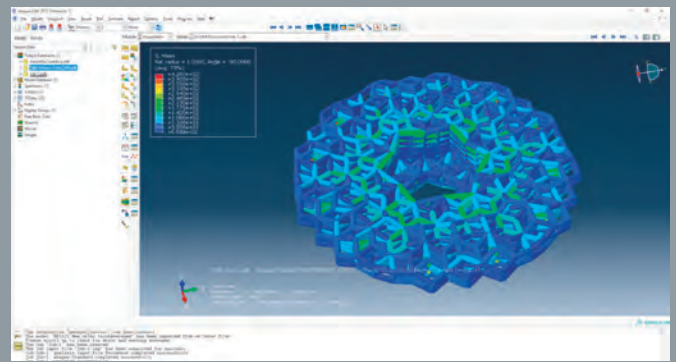


図3

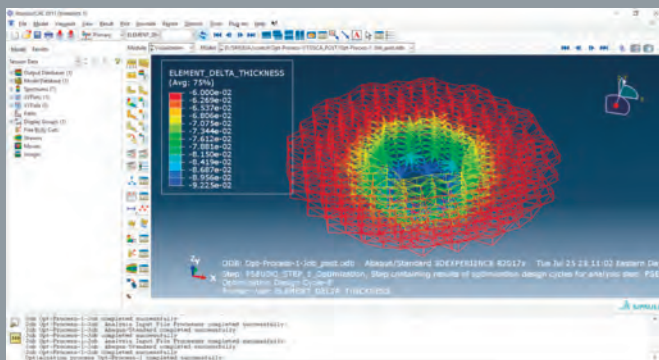


図4

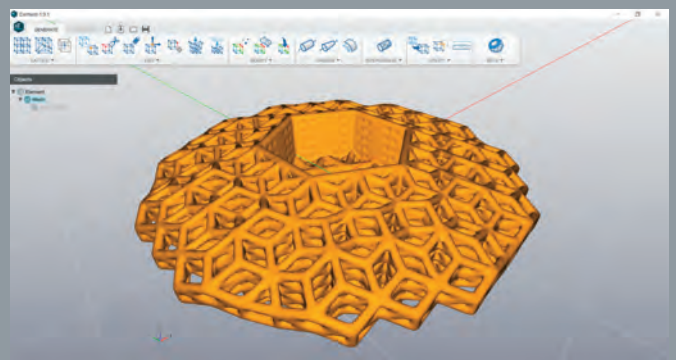


図5

トポロジーが出来上がると、再度部品を解析して、そのトポロジーの挙動を把握します。nTopology Element を使用して Abaqus の入力ファイルをエクスポートし、3D プリンティングのプロセスに基づいたデフォルトのビーム厚を適用します。そして、このシンプルなビーム解析を実行します（図3参照）。

必要であれば、この解析結果を用いてトポロジー設計を修正できます。あるいは、Tosca を用いてビーム寸法最適化を実行することも可能です。ビーム厚に対して、プリント可能範囲に収まるように制約条件を与えます。すなわち、問題なくプリントできるだけの十分な厚さと、サポート構造を不要とするだけの十分な薄さを維持するようにします。たとえ数万本のビームであっても、この最適化解析の実行は非常に高速です。また、Tosca の実績ある最適化手法を用いているため、効率的かつ信頼性できる結果が得られていることに自信を持てます（図4参照）。

最適化解析が終了して、結果に満足したなら、その設計を LTCX ファイルとしてエクスポートし、nTopology Element に読み込ませます。この段階においても、部品をプリント可能なメッシュファイル（3MF または STL を推奨）に変換する前に、必要に応じて設計を編集できます（図5参照）。

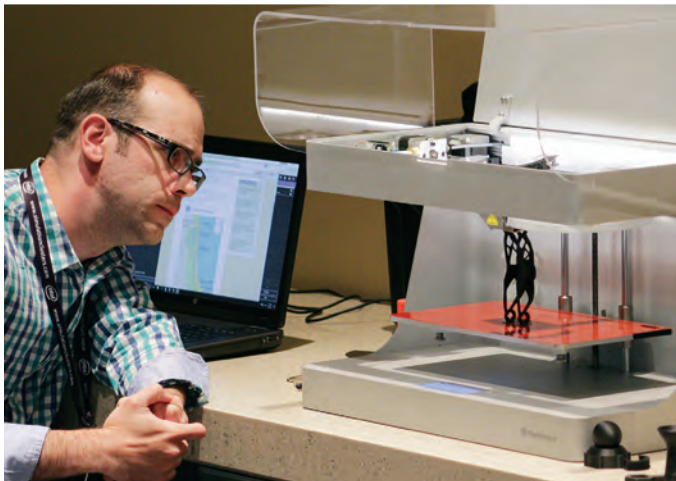
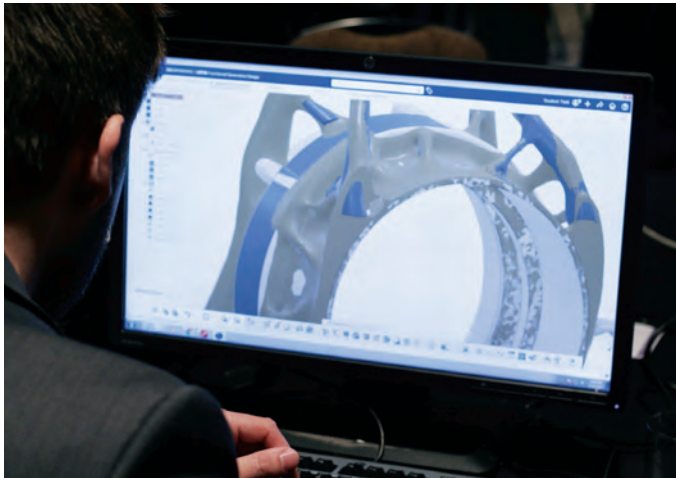
こうしたプロセスを用いることで、極めて強度重量比の高い部品、効率的な質量分布の部品、あるいは機械的性質（剛性／コンプライアンス等）が変化する部品を製作できるようになります。航空機部品を設計する場合でも、医療用インプラント、または消費者向けハイテク製品を設計する場合でも、このワークフローは、皆様の顧客が必要とする基準に合わせて簡単に調整が可能です。どのような目的であっても、このワークフローは円滑かつ柔軟に機能します。nTopology Element、Abaqus、および Tosca の詳細を是非お確かめください。

著者紹介

Spencer Wright 氏は、ニューヨークにある nTopology 社でインテグレーションと R&D のマネージャーを務めています。彼は、pencerw.com に積層造形法に関する記事を、theprepared.org にはエンジニアリング業界に関する記事を寄稿しています。

詳細は以下をご覧ください
www.ntopology.com

2017 ハッカーソン



Science in the Age Of Experienceの アディティブ・マニファクチャリング・ハッカーソンで、 各チームが設計課題にチャレンジ

今年のScience in the Age Of Experienceで、弊社はアディティブ・マニファクチャリング・シンポジウムと併せて初めてのハッカーソンを主催しました。世界各国の学生が招待され、さらにパデュー大学、ノースカロライナ大学シャーロット校、ノースウェスト大学、ノルウェイ科学技術大学の学生にも加ってもらいました。

各チームに4種類の設計課題が与えられました。また、独自の課題を持ち込むことも許されていました。nTopology社、Adaptive社など弊社パートナーによるサポートと、3DEXPERIENCEプラットフォームのFunctional Generative Design等のツールを受けて、学生たちは、ラティス、インフィル、トポロジーの最適化や造形プロセスシミュレーションなど、積層造形の世界に実在する様々なエンジニアリング問題に取り組みました。

2日間にわたり、学生たちは提供されたワークステーションに向かって懸命に作業をしました。彼らは必要なすべてのソフトウェアにアクセスできただけでなく、業界の専門家に直接質問することもできました。ハッカーソンの最後には、NNSA カンザスシティ国家安全保障キャンパス、TWI 技術センター、ならびにダッソー・システムズから成る審査団の前で、全グループが自分たち

の成果を発表しました。審査団は、デザインの美しさ、独創性、製品としての性能、製造可能性、有用性の各項目について各プロジェクトを審査しました。

判定は簡単ではありませんでしたが、最終的にパデュー大学のチームが勝者となりました。チームのLuyao Cai氏、Ke Huo氏、Subramanian Chidambaram氏の三名は、このイベントに独自の設計課題で参加し、患者固有の腕用ギブスを設計しました。

すべてのチームにお祝いを述べたいと思います。どの作品もユニークであり、よく計画され、うまく機能していました。学生たちを招待し、ダッソー・システムズが積層造形法の技術領域で何をしているのか伝えることは我々の喜びです。今回のような作品を見ると、積層造形法の未来の明るいことが容易に分かります。

パデュー大学の積層造形

研究者と学生が 3D プリンターで製作した複合材を SIMULIA のソフトウェアで改善

30 年ほど前に限定的なプロトタイピング技術として生まれた積層造形（AM）ですが、今や試作部品の有力な製法としてはもちろんのこと、最終使用部品の少量・中量生産においても、従来の製法と競合し始めるまでに成長しました。これは特に自動車と航空宇宙の分野で顕著であり、これらの業界では、消費者、政府機関、ならびにメーカーが二酸化炭素排出量の削減に向けた努力を続ける中、軽量かつ堅牢な部品に対するニーズがますます高まりを見せています。

これを実現する一つの方法は、積層造形（3D プリンティング）における複合素材の利用です。炭素繊維と工業グレードの樹脂を組み合わせると、特にこれまで（不可能ではないにしても）困難であった複雑な形状に加工した場合、極めて強度が高くかつ軽量な部品を製造できるようになります。このように、積層造形はまさに破壊的技術なのですが、まだ乗り越えなければならぬ、いくつかの大きなエンジニアリング上の障害があります。

CAMRI 誕生

これこそ、米国インディアナ州ウェストラファイエットのパデュー大学・複合材製造&シミュレーションセンター（CMSC）に所属する研究者たちの仕事です。R. Byron Pipes 教授（SCN 2017 年 3 月号参照）の指導の下、大学院生の Eduardo Barocio 氏、Bastian Brenken 氏、Anthony Favaloro 氏らは、研究用複合材積層造形装置（Composites Additive Manufacturing Research Instrument：CAMRI）を開発してきました。そして彼らは、ダッ

ソー・システムズ SIMULIA のツールを用いて様々な 3D プリンティングプロセスの仕組みを解明しようとしています。

しかし、CAMRI とは一体何でしょうか、そして、なぜ新たな 3D プリンターを開発しなければならないのでしょうか。これを理解するには、最初にもう一つの略語、EDAM を定義する必要があります。これは、押出堆積法（extrusion deposition additive manufacturing）の省略形です。現在市場には、EDAM 方式のプリンターが数種類出回っています。その多くは、基本的に、加熱した熱可塑性樹脂の細いフィラメントをノズルを通して押し出しながら、薄くスライスした CAD モデルの断面を描くように 1 層ずつ充填し、これを徐々に積み重ねていきます。フィラメントは、押し出されたとき、その下および隣の材料と結合した後に硬化するので、後続の層を最後まで次々と上に積み重ねることができます。

パデュー大学の CMSC も、あることさえなければ、こうした市販のプリンターの一つを使用していたかもしれません。しかし、目標は複合材技術について研究・開発することです。そのためチームは、炭素繊維とポリフェニレン硫化物（PPS）の特別な 50 対 50 混合物をプリントできる独自のマシンが必要だったのです。PPS は様々な用途に優れた化学的・機械的性質を示す工業グレードの熱可塑性樹脂として知られています。

“オーガニック”で行く

前述のとおり、積層造形法の最大の利点は、強さと軽さを兼ね備えたまったく新しい部品形状を作れることです。例えば、クモの巣形状やせん形状、自立する格子配列、骨やハチの巣を模したセル構造などですが、こうした有機的構造は清掃造形にとって朝飯前です。一方、そう簡単にいかないのは、これらの構造を利用した部品の設計法を確立することであり、高温と低温が接する境界部で起きていることを正確に理解すること、そして炭素繊維

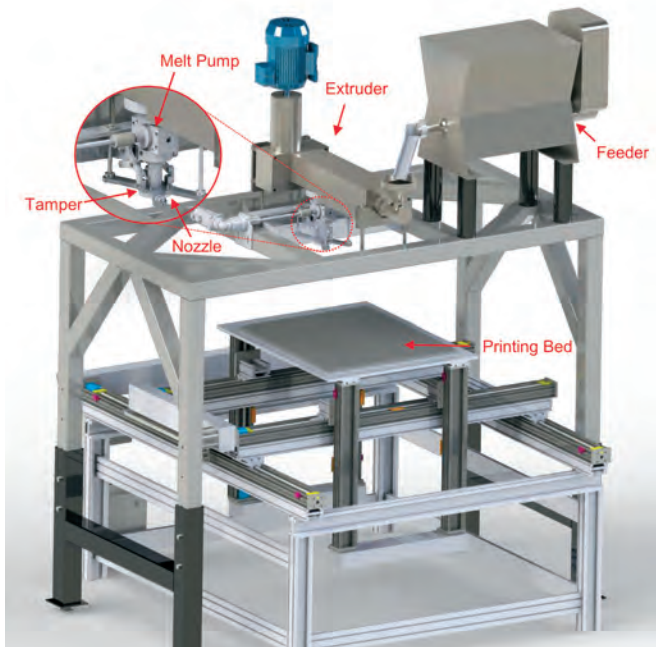


図1a:パデュー大学のCAMRI 3Dプリンター（SOLIDWORKS モデルの画像）：原料ホッパー、押出/加熱機構、およびプリント台が見える

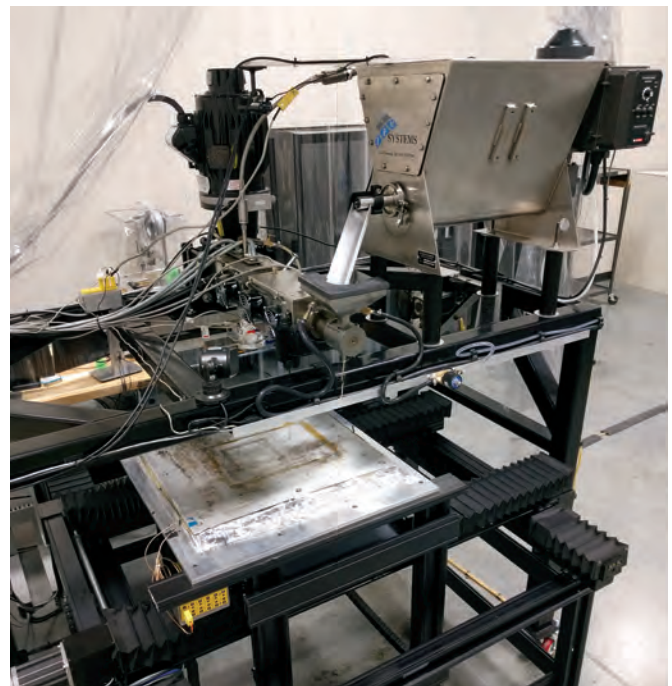


図1b:動作中のCAMRIシステム。下にあるのは可動X-Y-Z軸プラットフォーム、この上で3Dプリント部品の造形が行われる

アカデミックケーススタディ

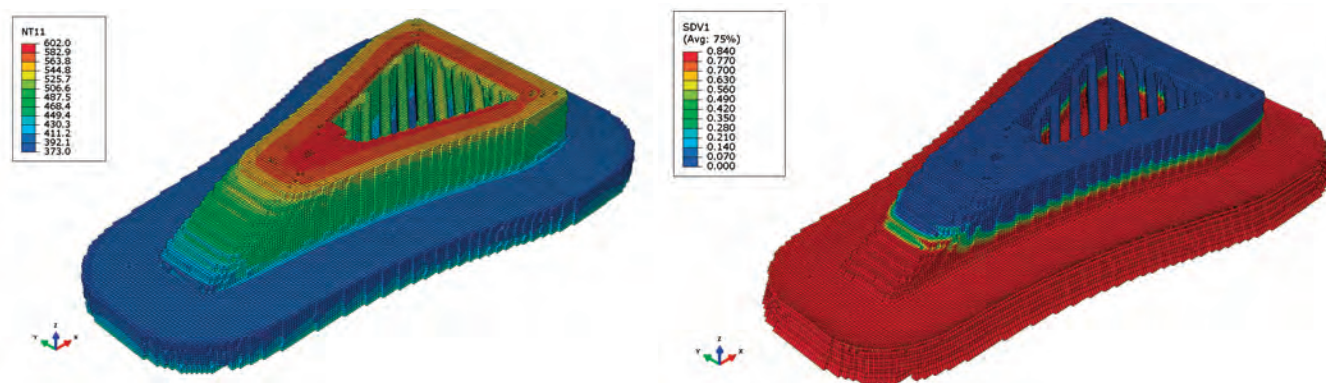


図 2a/2b: Abaqus のシミュレーション結果: 元の状態での温度 (左) と結晶化度 (右)

と周囲の熱可塑性樹脂との絡み合い状態を解明することです。そのため、チームは SIMULIA のシミュレーションツールに頼ることになりました。

設計時の状態に近づける

「通常の応力解析とは異なり、EDAM プロセスのシミュレーションでは、相依存の複雑な異方性熱粘弾性材料モデルを使用して、広い温度範囲にわたってシステムをモデル化する必要があります。さらに、実際の造形を模倣する形でモデルを拡大させていくには、個々の要素を徐々に付加できるような有限要素の仕組みも必要です」と、研究助手の Anthony Favoloro 氏は話しています。

すなわち、いろいろ大変な問題があるのです。EDAM プロセスはペレット原料を使用しており、これを混合し加熱して、押出機で造形プラットフォーム上に押し付けます。造形する 3D 形状の複雑さだけでなく、溶融した材料を、動くワークピースに連続して付加する動作も非常に複雑であるため、構造的に健全かつ精密な製品を作ることには多くの課題が伴います。層間の粘着結合力を確保するために十分な熱を加える必要があり、同時に、モデルが自立できるように、また 3D プリント部品に悪影響を及ぼす熱変形を防ぐために、十分な剛性も持たせる必要があります。最も重要なことは、設計時と製造時の部品間の差異、すなわちプロセスギャップを最小限に抑えることであると Favoloro 氏は述べています。

幸いにも、SIMULIA が提供する積層造形法の新機能のおかげで、これらすべての事が少しは簡単になりました。「我がチームは、CAMRI と同じマシン経路情報を使用する要素アクティブ化のアルゴリズムを Abaqus に実装することができました。この経路を正確に表現するため、実際のプリントジョブ中に CAMRI のサンプリングが行われ、押し出し速度とテーブル速度の動特性が記録されます。さらに、我々は ORIENT サブルーチンによって、マシン経路に依存する材料の配向を自動的に割り当てることもできます。最後に、ユーザー定義の材料モデルを介して、完全な熱粘弾性モデルが取り込まれます」と Favoloro 氏は話しています。

これらのシミュレーションによって、部品をプリントするときのインフィルの割合、インフィルタイプ、プリント速度などのパラメータに対するバーチャルな調査が可能になると、彼は付け加えています。部品の变形解析を行うことで、元のマシン経路を補正して「設計時 vs. 造形時」のプロセスギャップを最小限に抑えることや、潜在的な問題箇所を突き止めることも可能です。「こ

のように、一連のシミュレーションは、迅速かつ自信を持って EDAM プロセスを採用することに重要な役割を果たしています」と Favoloro 氏は話しています。

クールさを保つ

大学院生の Bastian Brenken 氏も同様の素晴らしい結果を得ています。「我々は Abaqus でユーザーサブルーチンのツールセットを開発し、それを用いて EDAM プロセスのモデル化を可能にしました。それは、非等温二重結晶化動力学モデルと統計的熔融モデルを組み合わせて、3D プリント部品の凝固と再溶融の同時挙動を記述しています。このようにして、プリンティングのシミュレーションでは、冷やす材料の結晶化プロセスと、高温熔融材料の新たな堆積時に生じる局所再溶融プロセスの両方のモデル化が可能になりましたと彼は話しています。」

Brenken 氏と彼の同僚は、Abaqus のユーザーサブルーチンを利用して、NACA (全米航空諮問委員会) のエアダクトをオートクレーブ成形する際に用いられる型の 3D プリンティングにおいて、その半結晶性の繊維強化熱可塑性樹脂が示す挙動を調査しました。このダクトは、飛行機胴体に取り付けて冷気をエンジン内に導くための、小さなひしゃく形のプラスチック部品です。

棒状の物体を薪のように積み上げた新しい Abaqus モデルが作られました。これはそれぞれの層内に押し出された材料のビードを表しています。そして、個々のビード間に、熱伝達、熱放射、熱接触の各境界条件が設定されて、結合形成解析のために詳細な温度と結晶化の履歴が記録されました。

「これらのシミュレーションでは、押出堆積 (EDAM) のプロセス中に、局所的なビードレベルだけでなく部品全体においても、結晶化と再溶融の生じる様子がはっきりと示されました。今回、



図 3: 写真の左上部は、プリント時のままの NACA ダクトの型であり、下部分は仕上げ加工された状態を示している

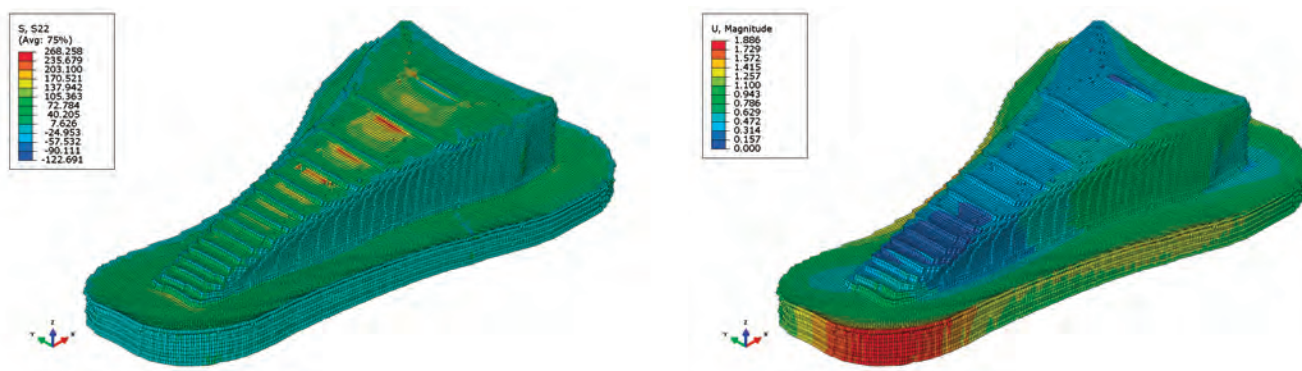


図 4a/4b: Abaqus のシミュレーション結果: 最終的な残留応力 (左) と変形 (右)

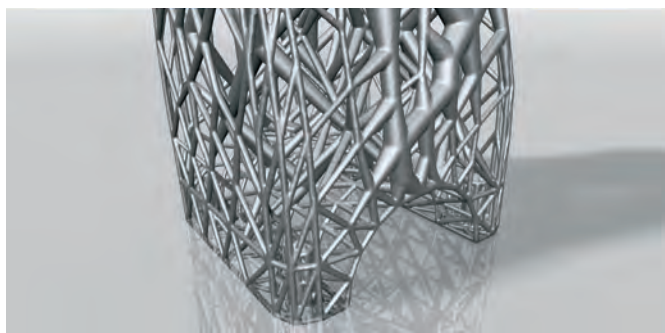
PEEK (ポリエーテルエーテルケトン) と PPS の 2 種類の複合材をモデル化したのですが、結晶化挙動が使用する材料に大きく依存していることも判明しました。Abaqus の新しい AM 機能がなかったら、このような材料特性の確認は困難だったでしょう」と Brenken 氏は説明しています。

格子に取り組む

積層造形法には大きな潜在力があるにもかかわらず、その自由形状製作能力をフルに活用した形でプリント部品の最適設計を導くには、まだ多くのなすべきことがあります。理想的構造は格子状であることが多く、それらは、逆さの樹木やランダムな形のエッフェル塔に似ています。そして、これらの複雑で一見繊細な形状は、積層造形法で製作することは簡単でも、内部の各支持梁の最適なサイズ、方向、形状を解明することは、数学的に非常に難易度の高い問題です。

パデュー大学・医用生体工学ウェルドン校の Luyao Cai 氏は、この問題に真正面から取り組んできました。彼らの格子寸法最適化プロジェクトは、人工股関節や人工膝関節から頑丈で軽量の自転車部品まで、様々なアプリケーションに対し、3D プリント支持材の重量、力学的安定性、および表面積の最も良い組み合わせを決定しようとするものです。

Cai 氏は次のように話しています。「格子構造は、設計の見地から、多くの好ましい特性を備えています。それらは、構造材の大規模ネットワークを利用した安定したデザイン、好ましい重量特性、特定用途に合わせてカスタマイズできる力学的挙動などであり、例えば、骨や細胞組織の成長を促す多孔質性の医療用インプラントを開発できます。しかし、こうした複雑な格子構造の製作が可能になったのも最近のことであり、アディティブ・マニファクチャリング技術の進歩のおかげです」



TOSCA で内部をのぞき込む

Tosca の設計最適化ツールとプラグインを用いることで、Cai 氏はほとんどの CAE モデルのサーフェスマッシュを簡単に格子構造に変換することができました。そしてそれらは 3D プリント用の STL 言語に変換する前に最適化されました。彼らは自転車のハンドル軸について最適化ルーチンをテストしました。するとそれは、17 回の反復計算で水平荷重下の剛性を向上させました。またそれは、2 時間足らずでプリント可能な構造となっていました。

さらに Cai 氏は Abaqus で人体の軟骨と軟組織もモデル化しました。それらは、彼が指摘するように、生体内で正確に測定することが事実上不可能なものです。彼は MRI の変位マップをベースとしたモデルを開発し、Tosca を使用してそれらの変位に一致するよう各要素の力学的特性を変化させ、その相対剛性分布を決定しました。こうしたモデルは、例えば膝関節の繰り返し負荷テストに利用でき、研究者は人体の内部構造を模倣したインプラントの設計が可能になると Cai 氏は話しています。「組織とステントなど医療器具との相互作用をシミュレーションできるなんて、とてもエキサイティングなことです。Abaqus は短時間で問題を解決できるので、私はかなりの時間を節約できました。素晴らしいソフトウェアだと思いますと彼は話しています。」

詳細は以下をご覧ください

<https://engineering.purdue.edu/engr>

生産用 3D プリンターの立ち上げに際して行うべき 3 つの事柄

3Degrees 社 CEO、Mike Vasquez 博士

3D プリンティングの加工・材料技術は着実に進化と向上を遂げており、この技術の生産用途の適用範囲を大きく拡大させています。

この技術の採用が、従来のプロトタイピングの枠を超えるに従い、この技術を配備する企業のニーズも急速に変化しています。もはや 3D プリント部品は、R&D チームや改革チームが単にテスト用に使用するものではなく、今では様々な最終使用部品がプリントされて商用に利用されています。しかし、多くのアプリケーションが経済的・技術的に実現可能になると、重要変数、プロセス特性、材料、および検査の文書化という点で、既存の製造プロセスのレベルに合わせるための現実的な取り組みも必要になります。

我々は、生産部品用の 3D プリンターを稼働させている、航空宇宙、自動車、医療、消費財などの業界組織と仕事をしてきましたが、その中で、生産に乗りだすときに留意すべき 3 つの重要な事柄をアドバイスしています。

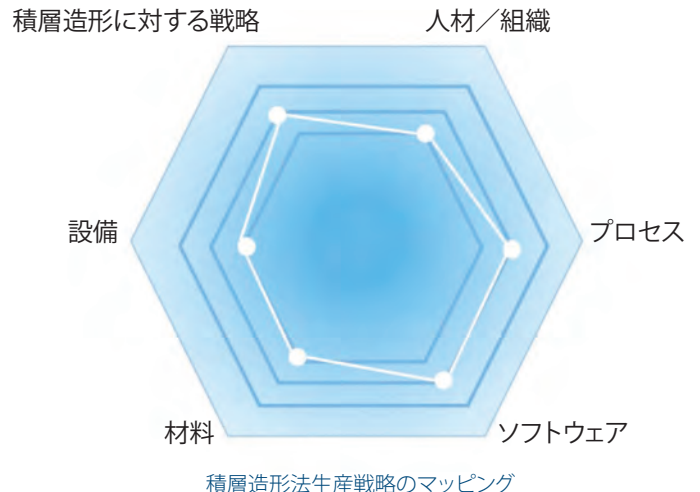
設備立ち上げの詳細を詰める

マシンに対して 1 万ドル、10 万ドル、あるいは 100 万ドルを投資したとしても、安全かつ効果的な 3D プリンティング能力を引き出すには、さらに多くの金額が必要になります。追加のコスト項目には、材料、ポストプロセッシング、安全装置、そしてトレーニングがあります。このことは、特に金属 3D プリンターに当てはまります。マシンで部品を造形した後も、熱処理、造形プレートからの取り外し、表面処理、そして仕上げ前の研磨などが必要になる場合があります。

こうしたことを経験していく中で、製作する部品のビジネスケースと、組織がいかに運用していくかという点についての社内調整が、迅速に立ち上がるか、それとも遅れを取って損失を出すかの分かれ目になることもあります。我々はしばしば、こうした初期段階にいる会社と一緒に「生産用 3D プリンターの立ち上げ」に関する評価を行っています。この評価では、積層造形に対する戦略、人材／組織、プロセス、材料、ソフトウェア、そして設備の 7 つのカテゴリーにわたって調査します。これらの項目が生産計画の段階で議論され、徹底的に検討されたか確認することが重要です。

3D プリンティングのための設計が不可欠

3D プリンティングの用途について思い付いたことが、ビジネスとしてのネジや標準ボルトの製造であれば、恐らくこの技術に投資する必要はありません。他の製造技術に勝る 3D プリンティングの最大の利点は、追加コストなしで、製品に複雑さを作り込むことができるという事実です。すなわち、3D プリンティングを使いこなすには、この利点を生かすために容易に部品の再設計ができなければいけません。多くの企業は、白紙撤回としないためにも、3D プリンティングの投資利益率を挙げようと必死に努力しています。



品質管理のための洗練されたワークフローの開発

企業がその 3D プリンティング能力を生産用に運用し始めたとき、我々が目にしたもう一つの課題は、効率性と高品質な部品開発の両方を保証するワークフローの確立でした。プロセス全体を通じて部品品質に影響を与える要因には、設計、原材料、加工、ポストプロセッシング、検査など多数あります。そして、これら上位のカテゴリーのそれぞれに文書化と管理を要する多数の変数が存在します。この問題は、規格や業界標準の開発がまだ緒についたばかりであるという事実によって、さらに複雑化しています。

結論を言えば、企業は（大企業も中小企業も同じく）、この技術を生産プロセスに組み込み始めたところだということです。そのため、学ぶべきことがたくさんありますが、同時に、適切に対処した企業が競争力を獲得するチャンスも多いのです。

著者紹介

Mike Vasquez 博士は、高度な 3D プリンティング技術の限界に挑戦している 3D プリンターの専門家です。彼はシカゴを拠点としたコンサルティング会社、3Degrees 社の創業者であり、同社は、組織がこの技術への投資を最大限に活かすことができるよう支援しています。彼はラフバラー大学でアディティブ・マニュファクチャリング技術の博士課程を修了しました。また、MIT では材料科学技術の学士号と修士号を取得しています。最近、彼は「How to Make 3D Printing Work for You and Your Business」というタイトルのベストプラクティス書を出版しました。

詳細は以下をご覧ください
www.3degreescompany.com

積層造形のプロセスシミュレーション： 2 日間トレーニングコース

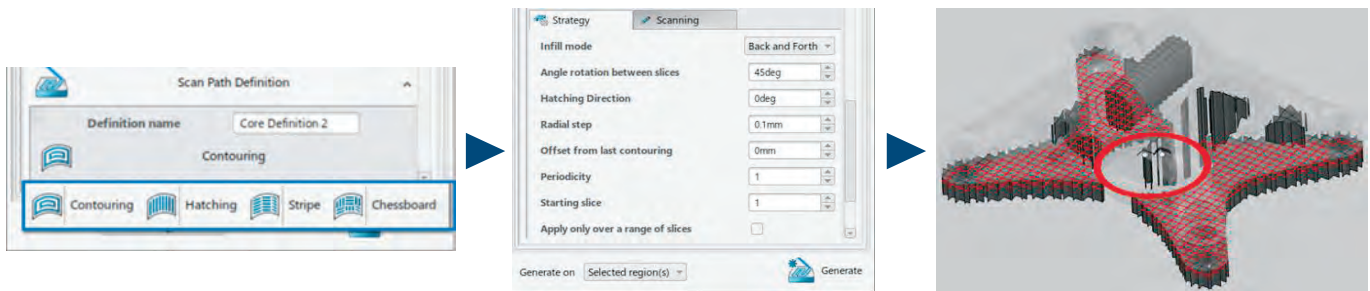
※ 社は、積層造形（AM）のプロセスシミュレーションをテーマとした 2 日間のトレーニングコースを開催しています。このクラスでは、製造プランニングからプロセスシミュレーションまで、積層造形ワークフロー全体のセットアップ方法について学びます。講義、ライブデモ、および自己完結型の実践的ワークショップを通じて、出席者は最終的に Additive Manufacturing Programmer ロールと Additive Manufacturing Researcher ロールで利用可能なアプリケーションに精通できるようになります。

Additive Manufacturing Programmer ロールの中核を成す製造アプリケーションでは、金属粉末焼結法の造形をプランニングできます。それには、ネスティング、サポート構造の生成、およびスライサーの戦略が含まれます。ガイド付きの段階を追った講義により、下記ワークフローの全ステップの予行演習が可能です。

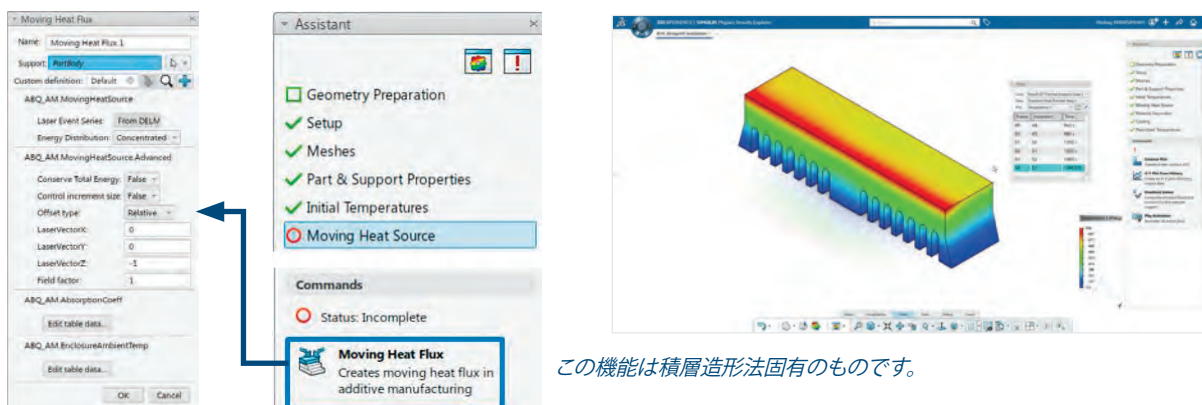
1. 造形セットアップに従った、マシンと造形トレイの選択または作成
2. 自動または手動ネスティングを使用した、部品の向きおよび位置の設定
3. ライブラリ選択または手作業による、部品のサポート構造の作成
4. マシン固有のパラメータとハッチング戦略に基づく、走査パスの指定および生成
5. 標準またはベンダー固有のフォーマットによる、データのエクスポート

Additive Manufacturing Researcher ロールでは、生成された積層造形プロセスパラメータに基づいて有限要素シミュレーションを実施できます。目的は、層ごとの造形時に部品に生じる変形、残留応力、およびマイクロ組織の時間変化を予測することです。ガイド付きの段階を追った講義では、製造アプリケーションから得られた情報を用いて、金属粉末焼結法用のシミュレーションモデルを準備するための全ステップを学ぶことができます。製造シミュレーション（伝熱、応力）が終了すると、次のステップは造形プレートの除去を模擬して、部品の最終変形を予測することになります。最後に、その他の製造プロセス（LDED、FFF など）用のインターフェースのカスタマイズ方法と、外部ツール/走査パスデータを取り込む方法について学びます。

この 2 日間コースは、できる限り多くの実践トレーニングを取り入れた形で構成されています。出席者は、独自の部品やジオメトリをクラスに持ち込むことも、様々なワークショップの題材から選択することもできるため、積層造形技術の習得が加速されます。（日本での開催は未定）



「粉末焼結法」アプリケーションにおけるハッチシーケンスの定義



この機能は積層造形法固有のものです。

「アディティブ・マニュファクチャリング・シナリオ」アプリケーションにおける移動熱源（レーザー）の指定

お近くのユーザー会議に参加しましょう！



SIMULIA は毎年秋に、プロダクト・イノベーションを強化・促進する最新のシミュレーション技術や手法について、産業界と学界の皆様が一緒になって学ぶことのできる場を提供しています。昨年は4,100名以上のユーザーの皆様が、世界中で開催された地域別ユーザー会議（RUM）やユーザーグループ会議に出席されました。これらは地域会議であるため、我々は各地の動向やマーケティング状況に合わせて内容を調整し、その地域の言語で情報を提供しています。

会議の日程と登録方法については www.3ds.com/rums をご覧ください。