

COMPUTATIONAL MECHANICS

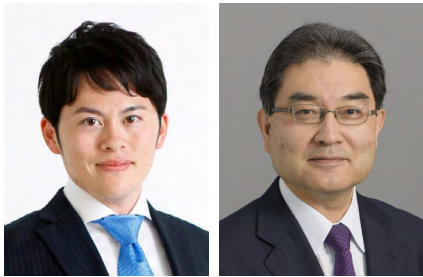
計算力学部門ニュースレター No. 70

December, 2023

目次

- 特集：金属材料の溶接と積層造形のシミュレーション
 - ・「特集にあたって」 金属材料の溶接と積層造形のシミュレーション
..... 東京大学 山田 崇恭 2
..... 慶應義塾大学 高野 直樹
 - ・溶接シミュレーションの高度化に向けた取り組み 大阪大学 望月 正人 3
..... 大阪大学 岡野 成威
 - ・オープンソース並列有限要素法構造解析ソフトウェア FrontISTR による溶接シミュレーション
..... 東京大学 林 雅江 6
..... 東京大学 奥田 洋司
 - ・理想化陽解法 FEM による溶接力学シミュレーション 大阪公立大学 柴原 正和 10
..... 大阪公立大学 生島 一樹
 - ・トポロジー最適化とメタル 3D 積層造形（基礎から応用まで）
..... 東京大学 山田 崇恭 15
 - ・ラティス構造分布最適化による金属積層造形の残留変形低減
..... 早稲田大学 竹澤 晃弘 19
 - ・3D 積層造形前のバーチャルテスト：品質保証と技術伝承のための知識融合型 CAE への期待
..... 慶應義塾大学 高野 直樹 23
- 部門からのお知らせ
 - ・M&M・CMD 若手シンポジウム 2023 開催報告 早稲田大学 竹澤 晃弘 28
..... 近畿大学 穴戸 信之
..... 筑波大学 森田 直樹
 - ・2023 年度年次大会の開催報告 東京都立大学 伊井 仁志 30

特集：金属材料の溶接と積層造形のシミュレーション



「特集にあたって」 金属材料の溶接と積層造形のシミュレーション

山田 崇恭 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構戦略研究部門 (写真左)
高野 直樹 慶應義塾大学理工学部機械工学科 (写真右)

本会の部門間交流促進の流れの中で、計算力学部門の取組みの一つとして、機械材料・材料加工部門と合同で、2021年より講習会「機械材料・材料加工のシミュレーションと計測」を下記のようにシリーズで開催しています。

第1回：3D積層造形(2021年12月1日)

<https://www.jsme.or.jp/event/21-79/>

第2回：複合材料の成形加工(2022年6月16日)

<https://www.jsme.or.jp/event/22-29/>

第3回：金属AMの応用と潮流(2023年6月20日)

<https://www.jsme.or.jp/event/23-22/>

過去3回中2回で取り上げた金属材料を中心とした3D積層造形(AM)に深い関心を示してくださった材料力学部門も2024年から加わり、3部門合同の講習会として第4回開催の準備中です。

また、2022年度の本会年次大会(富山大学にて対面開催)では、機械材料・材料加工部門が主導した部門合同企画の先端技術フォーラム「金属AMにおけるDesign for Additive Manufacturing (DfAM)を理解するために」が開催され、活発な討論と人材交流ができました。このとき登壇した山田、高野の2名が中心となり、本部門総務委員会の発案によるニュースレター特集号「金属材料の溶接と積層造形のシミュレーション」をお届けすることになりました。

溶接は、部材同士をつなぐという重要な加工プロセスの一つであり、過去には溶接部からのき裂進展により重大な事故に至った事例に学び、研究が進化したおかげで、安全・安心なインフラが供給されています。古典的な材料加工プロセスに分類されると思いますが、難加工材への応用拡大や、1990年代に入って英国で特許出願された摩擦攪拌接合(friction stir welding, FSW)が登場するなど、進化を続けています。一方で、熟練技術者の伝承という課題を常に抱えています。溶接をシミュレーションの立場から見れば、金属が溶けて固まるという現象は、偏微分方程式での記述、方程式の係数の値の取得と不確かさ、巨大構造物中の溶接箇所モデリングと解析規模など、多くの課題点が含まれています。

さて、AMに関しては、1980年代に始まっていた光硬化性樹脂を用いた光造形をご存じの方も多くおられると思いますし、3Dプリンターという用語は理工系の技術者、研究者に限らず広く知られており、最近では食品の3Dプリントも登場しました。光造形、粉末床溶融結合(powder bed fusion)、指向性エネルギー堆積(directed energy deposition)、結合剤噴射(binder jetting)、材料押出(material extrusion)、シート積層(sheet lamination)、材料噴射(material jetting)を総称したAdditive Manufacturing (AM)は、日本語では付加製造と訳されることが多いと思います。切削に代表される除去加工、除去製造と対比した用語ですが、ここでは積層造形という用語を用います。光造形のほかにもFused Deposition Modeling (FDM)やFused Filament Fabrication (FFF)として知られる樹脂材料、あるいは繊維強化プラスチックの3Dプリントも可能ですが、金属に絞れば、材料加工現象としては共通点が多い溶接

とペアで、シミュレーションの視点で纏めた特集号としました。

加工に関するシミュレーションといえば、プロセスシミュレーションが真っ先に頭に浮かびますが、AMプロセスシミュレーションにはまだまだ解決すべき研究課題が山積しており、共通点が多い溶接シミュレーションを学ぶことで、研究の進展の一助となるように意図しました。最初に、溶接部モデリングの深化や生産現場対応型の簡易シミュレーション法について、大阪大学の望月正人先生、岡野成威先生に纏めていただきました。次に、ポスト「京」プロジェクトの重点課題の一つとして実施された研究成果を東京大学の林雅江先生、奥田洋司先生に寄稿していただきました。大阪公立大学の柴原正和先生、生島一樹先生には、理想化陽解法FEMによる溶接変形予測について解説していただくとともに、AMへの応用についてもご紹介いただきました。

複雑形状の造形が可能なAMでは、計算力学の強力なツールの一つであるトポロジー最適化が活用されています。そこで、トポロジー最適化の基礎、および、AMで注意を要するオーバーハング形状を排除する幾何学的制約条件を考慮したトポロジー最適化について山田が述べます。早稲田大学の竹澤晃弘先生には、AMによる残留変形を低減するような傾斜機能ラティス構造最適化の事例をご紹介いただきました。これらは、冒頭のシリーズ講習会「機械材料・材料加工のシミュレーションと計測」において、山田が第1回講習会で、竹澤晃弘先生は第3回講習会で講演した内容がベースとなっています。最後に、ばらつきや造形不良が起こりがちなAM製品の品質保証という側面へのCAEの貢献について、シリーズ講習会第3回での話題を肉付けして高野が執筆しました。

溶接の分野では一般社団法人溶接学会、日本溶接協会が中心的役割を果たしてきました。金属AMについては、日本金属学会が一步先に進んでいる感があり、シリーズ講習会第3回では日本金属学会元会長の中野貴由先生を講師にお招きしましたが、溶接学会誌2023年9月号(Vol. 92, No. 6)では「様々な3D造形技術の最前線」の特集が組まれました。記事の中には、計算力学部門登録会員も関心が高いと思われる「機械学習による付加製造条件の適正化」という新しいトピックも含まれています。

日本機械学会の中では、冒頭の3部門合同講習会で協力関係にある機械材料・材料加工部門、材料力学部門のコロケーション開催となった2023年度講演会(2023年9月27日~29日)でも特定のセッションは組まれておらず、「その他の加工」という括りになっていました。機械学習やトポロジー最適化を含むAMのためのシミュレーション技術に関しては、日本機械学会計算力学部門が中心となって、我が国のAM技術進展に貢献できるよう、本特集号がそのきっかけになれば、この上ない幸せです。多くの方がこの分野に参入されて、活気づくことを願っています。また、溶接、AMの市販CAEソフトウェアも複数あるので、あわせて情報収集していただき、研究、業務に役立てていただければと願います。



溶接シミュレーションの高度化に向けた取り組み

望月 正人 大阪大学大学院工学研究科 (写真左)
 岡野 成威 大阪大学大学院工学研究科 (写真右)

数値溶接力学 すうちょうせつりきがく Computational Welding Mechanics

1. はじめに

有限要素法が1970年代に溶接をはじめとする熱加工現象の構造解析に適用されてから、溶接変形および残留応力に関する数値解析の研究が急速に前進し、数値溶接力学の学問体系が構築されてきた。すなわち、材料特性の温度依存性を考慮した弾塑性有限要素法が定式化 [1]-[7] され、溶接変形・残留応力の発生機構の解明などへの応用も図られてきた。近年まで、計算機の能力的制約もあり、シミュレーションの活用対象は実験室レベルの試験体や原子力プラントなどをはじめとする重要構造物に限定されてきたが、数値溶接力学の誕生からちょうど半世紀が過ぎようとしている現在、計算機環境の著しい進歩や溶接シミュレーションを高速に実施するための計算手法[8]-[10]が開発されたことに伴い相当大規模な数値解析が可能になってきている。しかし、溶接現象そのものの複雑さや、力学部分だけを見ても非線形性が極めて強く収束性に特別の配慮が必要なためか、溶接変形・残留応力に関しては、他分野に比べて数値シミュレーションの適用範囲が必ずしも十分に広がっていないのが実情といえる。

著者らの研究グループでは、そのような状況を少しでも打破し、各種産業分野のいろいろな場合において役立ててもらおうべく、溶接シミュレーションの高度化に取り組んでいる。その一つの方向性は、溶接部モデリングの深化による詳細解析であり、もう一つは生産現場対応型の簡略解析である。本紙面ではこれまでの研究開発事例の幾つかを紹介したい。

2. 溶接部モデリングの深化による詳細解析

溶接変形・残留応力の数値シミュレーションでは一般に、熱伝導解析と熱弾塑性解析が順次行われる。大まかな手順は以下の通りである。まず初めに、熱伝導解析により溶接熱源から材料への熱の投与に伴う温度分布および温度履歴を求める。引き続き熱弾塑性解析を行い、熱伝導解析によって得られる温度分布および温度履歴の情報を熱荷重として、材料の温度変化に伴う膨張・収縮や材料特性の変化を考慮して応力やひずみの変化を求める。しかし溶接部では、図1に示す各種現象が、温度場、材料挙動、応力・ひずみが相互に作用し合う連成挙動として生じることが知られており、上述のような解析上の取扱いは、実際の溶接部で生じる各種現象と比較して少なからず簡略化されたものといえる。

従来、熱伝導解析では、電流・電圧・熱効率から算出される溶接入熱の大きさを基に、断面マクロ観察で確認した溶込みや熱影響部の形状・寸法、溶接部近傍で熱電対によって測定した温度履歴が一致するように、シミュレーションにおける熱源モデル

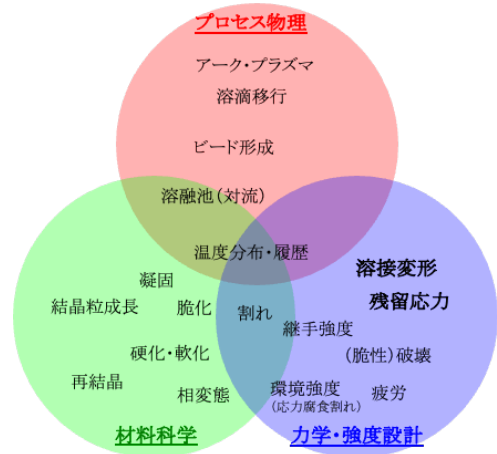
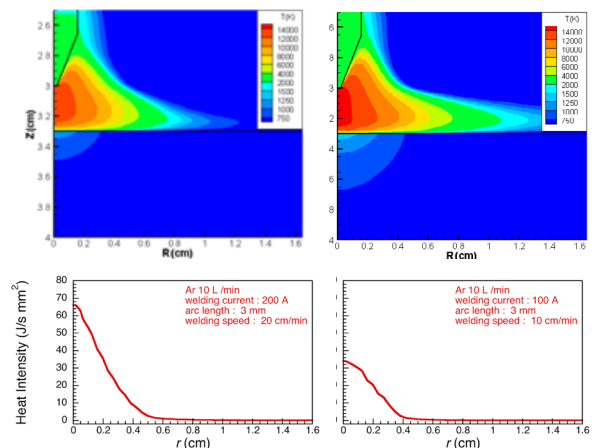


図1 溶接部で生じる各種現象の概要

(表面熱流束や体積発熱とその分布特性)を設定してきた。すなわち、数値シミュレーションの実施者が試行錯誤により決定するため、必然的に経験やノウハウによるところが極めて大きくなってしまふ。また、断面マクロ観察や温度履歴を参考とすることから容易に想像できるように、数値シミュレーションに先立つ実験あるいは既存の実験結果を参照する必要があり、数値シミュレーションのみで溶接変形や残留応力を高精度に予測することが未だに困難とされてきたことの一因でもある。

著者らの研究グループでは、溶接施工の際に設定される条件、例えば、電流、電圧、溶接速度、トーチ角度、ワイヤ送給速度などを、溶接変形・残留応力の数値シミュレーションにおいても入力パラメータとして温度場を計算する溶接シミュレーションモデルの統合化に取り組んでいる。溶接熱伝導解析における溶接入熱条件に相当する発熱の分布や大きさを、図2に示すように、TIG溶接アーク・プラズマの数値シミュレーションに基づ



(a) 高電流&高速度条件 (b) 低電流&低速度条件
 図2 溶接入熱が等しい条件での溶接熱源特性の違い

いて決定するものである。複数の溶接条件で、このような数値シミュレーションにより求めたアーク・プラズマから母材への入熱分布を用いて、溶接変形の数値シミュレーションを行なって得られた角変形を図3に示す[11]。図中にはさまざまな条件について纏めているが、溶接入熱の大きさのみで必ずしも角変形量が統一的に整理できないことを示すものであり、実験的にも示唆されていた従来知見とは異なる傾向[12]と定量的にもよく一致している。従来までの試行錯誤によって実験結果と合うように入熱条件を決定する溶接変形・残留応力の数値シミュレーションでは、このような詳細な施工条件の違いを正確に捉えることは困難であり、アーク・プラズマモデルとの統合化による溶接変形・残留応力の数値シミュレーションの高精度・高信頼性化によって初めて得ることができた評価成果といえる。

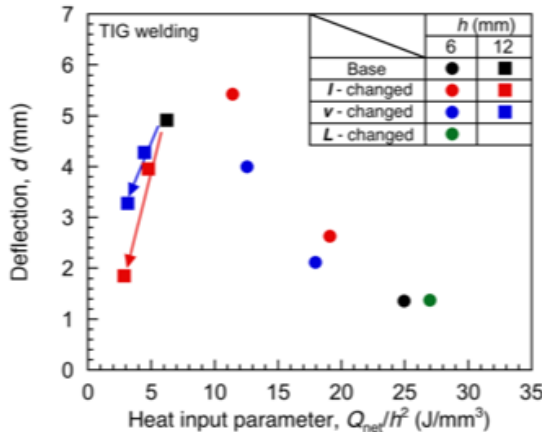
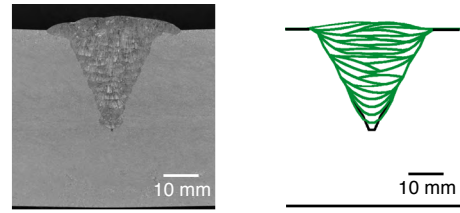


図3 溶接角変形に及ぼす溶接条件の影響の詳細評価

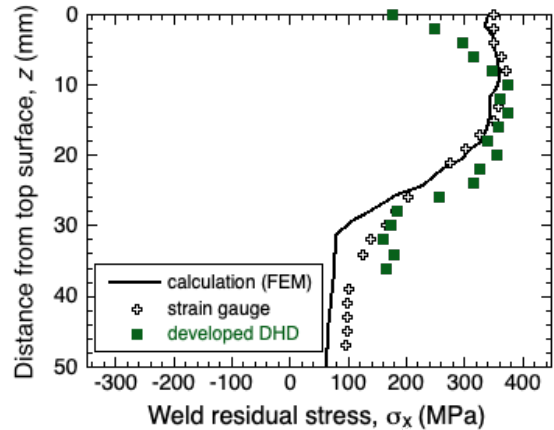
MAG溶接では、TIG溶接と異なり、溶滴移行を含む溶接アークの入熱特性を考慮すること、ならびに、溶滴移行に伴うビード形成現象(余盛)を考慮することも重要となる。MAG溶接への応用展開として、アーク・プラズマ(熱源)モデル、ビード表面形状(プロセス)モデル、熱弾塑性力学モデルを連結した溶接シミュレーションモデルの統合化にも取り組んでいる。

アーク・プラズマ(熱源)モデルでは、溶接条件を入力として入熱特性(アークからの入熱分布とワイヤ保有熱量)やワイヤ溶融速度、アーク圧力分布を出力する。続くビード表面形状(プロセス)モデルでは、アーク・プラズマモデルから求めた熱源情報を入力として熱伝導・表面形状連成計算を行い、ビード表面形状と母材の温度分布を出力する。最後に、熱弾塑性力学モデルでは、ビード表面形状計算で決定された形状に基づいて作成された有限要素モデルを用いて、各節点における温度履歴から熱弾塑性解析を行い、溶接変形・残留応力を出力する。これまでに、異なる板厚を有する溶接試験体における角変形を精度よく数値シミュレーションできることを確認している[13]他、図4に示すような厚板多層溶接継手における溶接部性状や板厚内部残留応力の高精度予測にも適用可能である[14]。

以上のように、溶接部モデリングの深化による溶接シミュレーションの高度化が進んでおり、溶接現象のより詳細な理解に繋がることが期待される。今後、さらなる発展に向けて、熱源特性制御、プロセス制御や材料組織制御などにフィードバック可能なマルチ現象融合型の溶接変形・残留応力の熱弾塑性解析手法の開発に取り組んでいくことが望まれる。



(a) 溶接部性状



(b) 溶接残留応力

図4 厚板多層溶接部における残留応力分布評価

3. 生産現場対応型の簡略解析手法

実製品・構造物における溶接変形・残留応力の予測技術として、上述のように、熱弾塑性解析を高度化した数値シミュレーション技術の開発が進められている。しかし、大型の構造物に直接適用することは未だ必ずしも現実的でなく、固有ひずみ(残留応力・変形の発生要因)を入力値とした弾性解析により大規模なモデルを短時間で計算する手法(固有ひずみ法)などの効果的な活用が望まれる。著者らの研究グループでは近年、溶接時の冷却過程で生じる熱収縮を入力値とした弾塑性解析により短時間で計算する手法(熱収縮法)の確立に取り組んでいる。

熱収縮法では、溶接中の加熱過程の熱膨張は考慮せず、溶接後の冷却過程の熱収縮のみを考慮することで溶接変形の支配因子である固有ひずみ(圧縮塑性ひずみ)を簡略的にモデル化する。図5に示すように、解析に必要な入力データは収縮ひずみ(圧縮ひずみ)と収縮領域の2つであり、溶接線に沿った3次元的な収縮領域の範囲内に様な収縮ひずみを初期ひずみとして与えて弾塑性解析することで溶接変形・残留応力を求める。

入力データの1つである収縮ひずみは、溶接後の冷却過程における熱収縮ひずみに起因するため、熱ひずみを構成する線膨

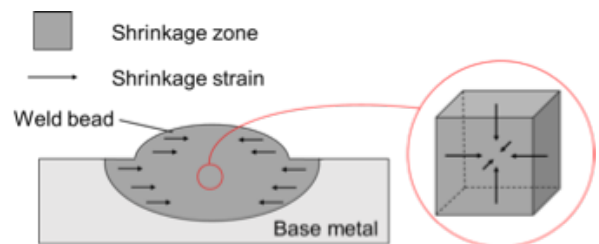


図5 熱収縮法の模式図

張係数と温度変化の積として設定する。もう1つの入力データである収縮領域は、固有ひずみ発生域が最高到達温度に応じて決まるため、溶接線に沿った各断面で最高到達温度 T_{max} が T_a 以上の領域($T_{max} \geq T_a$)として設定する。簡単のため、収縮ひずみは収縮領域内で一様とし、三軸方向に等方的に与える($\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z$)。解析に必要な材料特性は室温におけるヤング率、ポアソン比、降伏応力、加工硬化特性(硬化則、加工硬化係数)である。固有ひずみ法(弾性解析)と異なり、三軸方向に等方的に収縮ひずみを与えても、弾塑性計算の結果として異方性を有する固有ひずみ分布を生じさせることができる点で熱収縮法は有用である。なお、両端固定棒モデル[15]に基づく固有ひずみの発生特性の観点から、上述の熱収縮パラメータ(収縮ひずみと収縮領域)の設定指針の基本的考え方を提示している。

また、図6に示す自動車部材のような薄板溶接構造では、溶接中の過渡変形に起因した固有ひずみの発生特性を踏まえた上で熱収縮パラメータを適切に設定することで、熱弾塑性解析を高度化した詳細解析の結果と定量的によく一致した溶接変形を予測可能である[16]。この際、熱収縮法を用いた簡略解析では、熱弾塑性解析を駆使した詳細解析と比較しておよそ1/15程度の計算時間となり、生産現場対応型の数値シミュレーションとして今後の適用拡大が期待される。

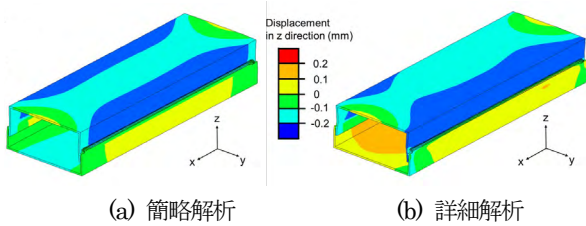


図6 自動車部材の溶接変形シミュレーション結果の一例

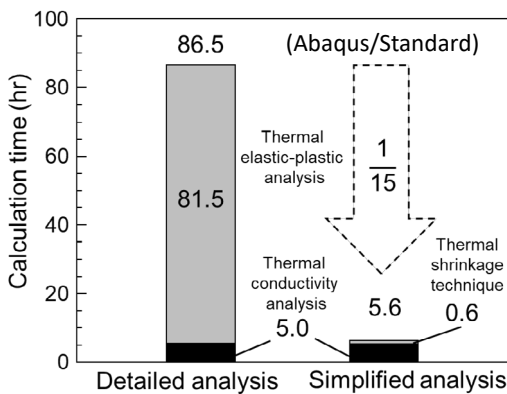


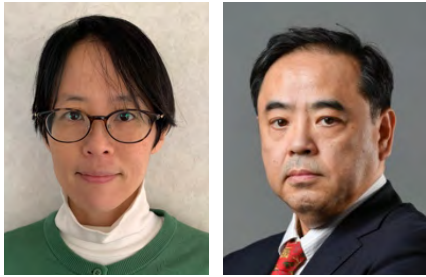
図7 詳細解析と簡略解析における計算時間の比較例

4. おわりに

溶接構造物の製作において問題となる変形・残留応力や割れの問題に対して、溶接シミュレーションはかつてのような研究者のためだけのツールではなく、設計者・生産技術者がより身近に使えるツールとして発展しつつある。今後のさらなる発展に向けては、実験計測(モニタリング)技術との「協調」や溶接部・溶接構造物の性能評価との「連携」を通して、さらに広く活用できる技術としてその役割を担っていくことが重要といえる。また、溶接分野でのこれまでの技術開発を基盤として、新しい加工技術として産業界で近年注目度の高い金属積層造形技術など、将来の加工技術への積極的な応用展開を図っていくことも期待される。

参考文献

- [1] Ueda, Y. and Yamakawa, T., "Analysis of Thermal Elastic-Plastic Stress and Strain during Welding by Finite Element Analysis", Trans. Japan Welding Society, Vol. 2, pp. 90-100 (1971).
- [2] 山田嘉昭, 岩田耕司, "熱弾塑性問題の有限要素法解析", 日本鋼構造協会 第5回大会研究集会 マトリックス構造解析法研究発表論文集, pp. 561-169 (1971).
- [3] 藤田譲, 野本敏治, "熱弾塑性問題に関する研究", 日本造船学会論文集, 第130号, p. 183-191 (1971).
- [4] 上田幸雄, 山川武人, "有限要素法による熱弾塑性挙動の解析", 溶接学会誌, Vol. 42, pp. 567-577 (1973).
- [5] Muraki, T., Bryan, J. J. and Masubuchi, K., "Analysis of Thermal Stresses and Metal Movement During Welding", Trans. ASME, J. Engineering Materials and Technology, Vol. 97, pp. 81-84 (1975).
- [6] Friedman, E., "Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Methods", Trans. ASME, J. Pressure Vessel Technology, Vol. 97, pp. 206-212 (1975).
- [7] Rybicki, E. F., Schmueser, D. W., Stonesifer, R. W., Groom, J. J. and Mishler, H. W., "A Finite-Element Model for Residual Stresses and Deformations in Girth-Butt Welded Pipes", Trans. ASME, J. Pressure Vessel Technology, Vol. 100, pp. 256-262 (1978).
- [8] 村川英一, 尾田勇, 伊藤真介, 芹澤久, 柴原正和, 西川弘泰, "反復サブストラクチャー法を用いた溶接熱弾塑性解析の高速化", 関西造船協会論文集, Vol. 2005, No. 243, pp. 67-70 (2005).
- [9] 柴原正和, 生島一樹, 伊藤真介, 正岡孝治, "動的陽解法FEMを基にした大規模構造のための溶接過渡変形・応力解析手法の提案", 溶接学会論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 1-9 (2011).
- [10] Ma, N. and Yuan, S., "An Accelerated Explicit Method and GPU Parallel Computing for Thermal Stress and Welding Deformation of Automotive Parts", International Journal of Applied Mechanics, Vol. 8, No. 2, 1650023 (2016).
- [11] 岡野成威, 田中学, 望月正人, "溶接アークの熱源特性を考慮した溶接変形の数値解析", 溶接学会論文集, Vol. 29, No. 2, pp. 77-85 (2011).
- [12] 岡野成威, 松下和憲, 望月正人, 豊田政男, 上山智之, "入熱パラメータと溶接角変形に関する実験的考察", 溶接学会論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 97-107 (2010).
- [13] 岡野成威, 宮坂史和, 田中学, 望月正人, "ガスメタルアーク溶接プロセスモデルの溶接力学シミュレーションへの応用", 溶接学会論文集, Vol. 32, No. 4, pp. 276-284 (2014).
- [14] 望月正人, 岡野成威, "改良ディーブホールドリリング法による厚板溶接部残留応力測定", 材料, Vol. 70, No. 4, pp. 315-322 (2021).
- [15] Murakami, H., Miyazaki, K., Honnami, K., Okano, S. and Mochizuki, M., "Parameter Optimization of Thermal Shrinkage Technique for Simple Simulation of Welding Angular Distortion", ISIJ International, Vol. 61, No. 7, pp. 2143-2149 (2021).
- [16] 筒井健太, 村上寛企, 岡野成威, 望月正人, "自動車部材の溶接変形予測シミュレーションモデルの適用性検討", 自動車技術会論文集, Vol. 54, No. 2, pp. 319-325 (2023).



オープンソース並列有限要素法構造解析ソフトウェア FrontISTRによる溶接シミュレーション

林 雅江 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (写真左)
 奥田洋司 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (写真右)

1. はじめに

本稿では、ポスト「京」のプロジェクトの中で重点課題⑧サブ課題Eとして実施したオープンソース並列有限要素法構造解析ソフトウェア「FrontISTR」をベースにした高度成形・溶接シミュレータの開発に関する取り組みについて報告する。

2. 構造解析ソフトウェア「FrontISTR」

「FrontISTR (フロント・アイスター) 」[1]は、超並列スパコン、PCクラスからパソコンまで、さまざまな環境で稼働するオープンソースの構造解析システムである。これまで、文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクト(平成20年度～25年度)や、ポスト「京」重点課題⑧「近未来ものづくりを先導する革新的設計・製造プロセスの開発」プロジェクト(平成26年度～30年度)のサポートを受け、開発・改良が行われてきた(図1)。またそれらのプロジェクトと並行し、平成25年4月からは、大学・企業・研究機関の研究者を中心としたユーザーコミュニティ「FrontISTR研究会」の活動を開始、平成30年には一般社団法人FrontISTR Commons[2]を設立し、FrontISTRのサステナブルな維持・発展に向けた取り組み・活動を行っている。

「FrontISTR」の特徴は、様々な環境で優れた並列計算性能を発揮できるポータビリティと広範囲な非線形解析機能のサポート、そしてユーザー独自の解析ニーズに合わせたカスタマイゼーションが可能なことである。複雑大規模問題への適用に向けた並列演算機能に関する先進性[3]と、実機応用の場面で求められる実用性を兼ね備えた構造解析ソフトウェア(表1)である。

3. ポスト「京」重点課題⑧サブ課題Eでの取り組み

先進性<並列演算機能>	
並列線形ソルバー	反復法・直接法、MPI-OpenMPハイブリッド並列、接触やアセンブリ構造解析に対応した前処理
リファイン	解析メッシュ細分化機能
実用性<非線形解析機能>	
解析種別	幾何学的非線形・材料非線形・境界非線形問題の静解析・動解析、固有値解析、熱伝導解析、流体・構造連成解析インターフェース
材料特性	線形弾性、超弾性、熱弾塑性、粘弾性、クリープ
要素ライブラリ	三角形・四角形平面要素(1次・2次)、四面体、五面体、六面体ソリッド要素(1次・2次、非適合、選択的次數低減、直交異方性、非圧縮)、三角形・四角形シェル要素(1次・2次、横層)、梁、トラス要素

表 1 FrontISTRの先進性と実用性

ポスト「京」のプロジェクトは、システムとアプリケーションのCo-designにより、社会的・科学的課題の解決に貢献できるシステムの実現を目指すフラッグシップ2020プロジェクトとして2014年4月から2019年3月まで実施された。ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題として選定された9つの課題うちの8つ目が「近未来ものづくりを先導する革新的設計・製造プロセスの開発」である。我々は、重点課題⑧サブ課題Eとして、「新材料に対応した高度成形・溶接シミュレータの研究開発」を実施した。溶接工程では、溶接金属の冷却過程における凝固・収縮によって溶接残留応力や溶接変形が生じる。残留応力や変形は、脆性破壊や疲労破壊、形状・寸法精度低下といった溶接構造物の強度・品質の低下につながるため、それらの発生を低減・防止するような溶接順序や施工条件を見つけ出すことが、製造コストの削減につながる。CAEの活用期待が寄せられる一方、材料特性の温度依存性、材料非線形性、治具や部材間の接触など、様々な非線形性の取り扱いが必要になること、さらに実際の溶接工程に即した熱源移動の模擬、溶接金属近傍で細かなメッシュ分割の必要性など、数値シミュレーションで扱うためにはさまざまな課題があり、非常にタフな問題の一つと言える。

重点課題⑧サブ課題Eでは、大規模並列計算を得意とする汎用型構造解析ソルバー「FrontISTR」をベースに、高度成形・溶接シミュレータを開発し、その性能をポスト「京」上で発揮することで、溶接構造物の適正施工条件など「ものづくり基盤」の高度化に資することを目標とした。

4. 本シミュレータの特徴

熱弾塑性解析理論に基づき、溶接工程で生じる残留応力や変形を予測・評価する手法に「固有ひずみ法」[4]や、非線形有限要素法による数値解析手法[5]があるが、本プロジェクトでは、温度変化や応力ひずみ分布、変形を過渡的に捉えることで、溶接順序や治具による拘束箇所の見直しなどよりより具体的なフィードバックにつなげられる溶接シミュレータの開発を目指し、溶接構造物全体に対する溶接工程を有限要素法による熱弾塑性解析で再現することを目指す。ベースとなるFrontISTRの熱



図 1 FrontISTR開発の経緯

弾塑性解析の流れは、外側から「時間ループ(ステップおよびサブステップ)」、「Newton-Raphson(以下NR)法ループ」、「線形ソルバーの反復法ループ」の3重ループの構造になっており、さらに接触問題が含まれる場合には、図2のような4重ループの構造となる。このうち「時間ループ(ステップおよびサブステップ)」の数や刻み幅は、溶接工程の条件(溶接パスの数や溶接トーチの速度)から決められ、実際の溶接工程の再現には、数万から数十万ステップを要する。その内側にある接触ループは、接触挙動の評価が収束するまで、NR法ループは各時間ステップにおける残差力が力学的に妥当とする閾値に収束するまで繰り返す。そのさらに内側にある線形ソルバーは、NR法の収束を達成するための修正量を求める手続きである。

そのため、線形ソルバーの収束閾値はNR法が発散しない程

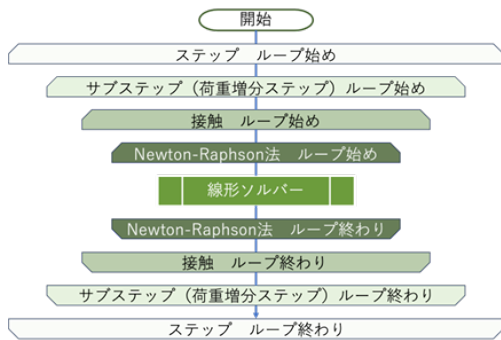


図2 接触を考慮した場合の弾塑性解析のプログラム構成

度に緩めることで全体的な計算時間の短縮化を図ることが可能であり、線形ソルバーの収束閾値を自動調節する機能を追加した。そのほか、溶接現象を再現するために追加した機能について以下に紹介する。

4.1 複雑な溶接パスを再現するための追加機能

・ダミー要素

複雑な溶接経路における多層溶接を再現するため、溶接金属領域にある要素について、入熱が開始されるまで無効化し、入熱開始とともに有効化するダミー要素を導入した。無効化の期間、ダミー要素に関する処理をスキップするだけでは熱応力解析時に不自然な変形が生じ、NR法の発散につながるため、安定して計算が行えるよう試行錯誤を経て実装を行った。

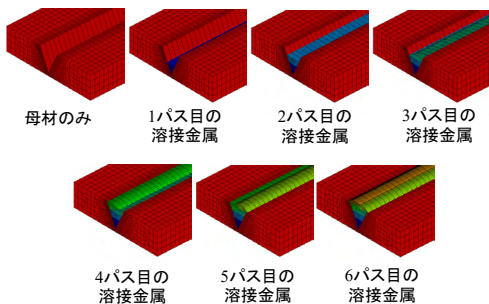


図3 ダミー要素の導入によって再現される多層溶接における溶接金属

・入熱方法

溶接条件に即した移動熱源を模擬するよう、溶接金属部の各要素に、適切なタイミング・発熱量が与えられるようプログラム内で計算できるのが理想的であるが、本プロジェクトでは入力データとして与えることとした。入力データでは要素ごとの体積発熱量とタイミングが定義される。この入力データの作成が、溶接シミュレーションを行う上でも煩雑なプロセスとなることから、プロジェクト内では、シミュレータ開発と並行し、プリ・ポスト用のソフトウェア整備も進めた。

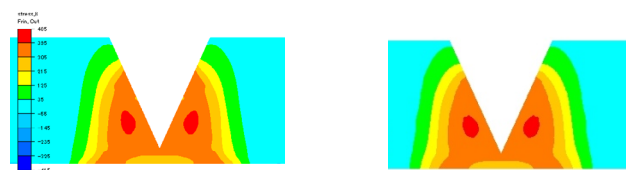
4.2 大規模化並列化に向けた機能強化

・プリプロセスツールの整備

溶接構造物には重機械フレームのように数十m規模に及ぶものが多くある。それに対して溶融部では数 μm ~mmの細かさで評価をしようとするれば要素数は数千万から数十億のオーダーに達する。FrontISTRではメッシュデータをパーティショナで部分領域(サブドメイン)に分割し、1サブドメインを1プロセスとして割り当てるSPMD型の並列計算を行うことで、計算リソースに応じて解析モデルの規模をスケールアップすることができる。ポスト「京」プロジェクトでターゲットとされた計算ノード数は数万~数十万台であり、そのようなノード数での分散並列計算を想定し、メッシュパーティショナの改良を行った[6]。また、高解像度なメッシュでの計算を効率的に実施するには、各プロセスで読み込んだ分散メッシュに対してメッシュリファインを実施するのが効率敵であり、メッシュリファイン機能も整備した[7, 10]。高精度なメッシュを用いることで、熱伝導解析では最大温度が正確に評価され、より精緻な応力分布を得ることができる(図4)。

・大規模並列接触ソルバーの開発

実際の成形過程には部品間のアセンブリ構造や固定治具との接触の考慮も不可欠となることから、多点拘束条件(Multiple Point Constraint)や接触問題を扱う場合にも適用可能な並列線形ソルバーの開発に注力した[8]。FrontISTRでは、接触問題の解法としてペナルティ法、Lagrange未定乗数法、拡張Lagrange法がサポートされているが、制約条件付き釣り合い式を厳密に扱う解法としてLagrange未定乗数法を適用する。Lagrange未定乗数法の適用により、解くべき線形方程式の係数行列が正定値でなくなる。溶接工程の長大なステップ数にわたって最内ループにある線形ソルバーの求解を安定的に継続させるため、これまで直接法が採用されていたが、大規模並列の観点からは反復法の適用が望ましく、陽的自由度消去による係数行列の正定値化を経て反復法を適用する手法[9]を採用した。数億自由度規模の例題へ適用し、直接法では解けない場合にも、反復法による求解が可能となることを確認した[10]。



(a) 5,877,760 要素

(b) 91,840 要素

図4 メッシュリファインによる鉛直方向応力分布の違い[7]

5. ターゲットアプリケーションと解析結果

以上のような要素技術の開発を経て、大規模望遠鏡架台のアーカ溶接問題[11]に本シミュレータを適用した[12]。図5にシミュレーションに用いた有限要素法モデルを示す。16本のパイプで構成され、各パイプは、パイプの周方向に走る2パス～5パスの多層溶接によって接合される。全体で横方向約5m、縦・奥行方向に約3mの大きさの溶接構造物である。溶接パス数の合計は全90パスに及び、サブステップは十数万ステップに及ぶ。

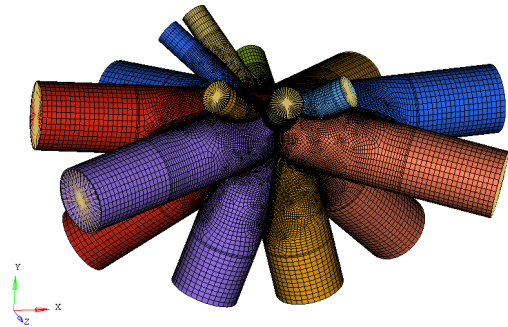


図 5 ダミー要素の導入によって再現される多層溶接における溶接金属

メッシュの規模は671,412節点で、文献[11]に従った各パスへの入熱条件（トーチ速度や入熱量）、初期温度、境界条件の下、熱伝導解析を実施する。つづいて、熱伝導解析で得られた温度分布の時刻歴結果を入力として熱弾塑性解析を実施する。非線形材料モデルにはMisesの降伏関数とマルチリニア硬化則を適用する。図6には熱弾塑性解析で得られたミーゼス相当応力の分布図を示す。

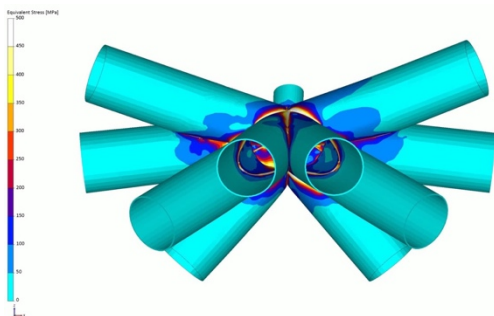


図 6 熱変形解析結果（相当応力分布 (MPa)）

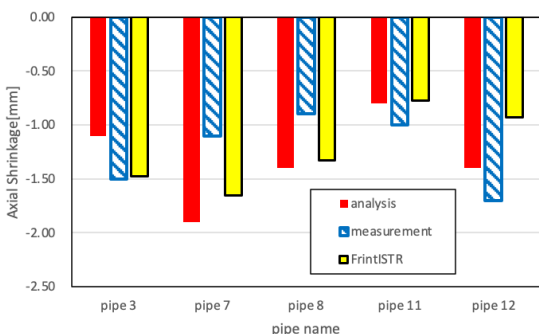


図 7 パイプの軸方向収縮量に関する先行研究との比較結果

また、図7は、文献[11]で示される各パイプに発生した軸方向収縮量の結果（数値解析および実測値）に、本シミュレーション結果を重ねてプロットしたものである。溶接パスが周方向に走ることから、収縮が軸方向に発生することや、その収縮量が1～2mm程度であることなど定性的・定量的な評価を行うことができた。つづいて、計算時間について比較すると、文献[11]ではCPU Intel Core i7 3.2-GHz、メモリ64 GBの環境で10日間程度と示されているのに対し、本シミュレータでは全90パスの熱弾塑性解について研究室のPCクラスター4ノード（ノード構成：Intel Xeon E5-2670 2.6 GHz、ノードあたり16コア、メモリ128GiB）を用いた64MPIプロセス（FlatMPI）の並列計算で約20日間を要する結果となった。溶接残留応力問題に照準を絞り、動的陽解法を基にした理想化陽解法FEMによって計算効率を高めている文献[11]の手法に対し、我々のシミュレータは動的陰解法で汎用型構造解析ソフトウェアをベースにしていることによる差が現れたと考える。

6. おわりに

産業応用における実問題は、さまざまな非線形性を有する複雑な現象・工程であり、その工程を再現するには今回のような長大なサブステップに渡る非線形計算を着実に進展させることが不可欠となる。そのための工夫一つ一つが、問題固有の性質によるところであり、実機応用をして初めて見えてくる課題ばかりである。HPCがものづくり分野の実問題解決に真価を発揮するには、そうした問題固有の非線形性を扱うための機能開発や細やかなパラメータ調整と、またその上で、並列計算機の性能を引き出すための計算機利用技術が求められる。後者の研究開発においては日々たえず進歩する計算機ハードウェアへの知識とチューニングテクニックへのキャッチアップが肝要である。今後も、さまざまなものづくり分野への適用にチャレンジしつつ、その両側面で研鑽を重ね、CAE活用によるものづくり技術の発展に貢献していきたい。

謝辞

本プロジェクトでは、実機応用の例題提供をはじめ溶接工程のさまざまな知識・知見について、大阪大学 接合科学研究所 村川英一先生、大阪府立大学 河原充様、株式会社IHI検査計測高倉大典様、IHI運搬機械株式会社 福本敏則様をはじめ多くの皆様にご指導・アドバイスをいただきました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] FrontISTRホームページ, <https://www.frontistr.com/>
- [2] FrontISTR Commons, <https://www.frontistr.org/>
- [3] 奥田洋司, 稲垣和久, 竹内光秀著, 一般社団法人 日本計算工学会 編, 計算力学レクチャーコース非線形並列有限要素法FrontISTRの理論・実装・応用, 丸善出版, 2022.
- [4] 上田幸雄, 村川英一, 麻寧緒著, 技術者のための「溶接変形と残留応力」攻略マニュアル, 産報出版, 2014.
- [5] 上田幸雄, 山川武人 有限要素法による熱弾塑性挙動の解析, 溶接学会誌, Vol.42, No.6, pp.567-577, 1973.
- [6] 奥田洋司, 橋本学, 高度成形・溶接シミュレータのための

- 分散メッシュパーティショナの開発, HPCI利用研究成果集, Vol.6, No.1, pp.9-14, 2021.
- [7] 奥田洋司, 橋本学, 溶接シミュレータのプロトタイプ開発と機能検証, HPCI利用研究成果集, Vol.7, No.1, pp.33-42, 2022.
- [8] 奥田洋司, 橋本学, 高度成形・溶接シミュレータのための分散並列線形ソルバーの性能評価, HPCI利用研究成果集, Vol. 7, No. 2, pp.96-105, 2022.
- [9] 後藤和哉, 橋本学, 奥田洋司, 陰的および陽的自由度消去法を用いた多点拘束条件処理における並列反復法線形ソルバーの収束性, 日本シミュレーション学会論文誌, Vol.7, No.1, pp.1-9, 2015.
- [10] 林雅江, 奥田洋司, 橋本学, 高度成形・溶接シミュレータのメッシュリファインによる高精度化と疎行列解法の性能評価, HPCI利用研究成果集, Vol. 7, No. 1, pp. 43-49, 2022.
- [11] Kazuki Ikushima, Toshizo Minamino, Atsushi Kawahara, Masakazu Shibahara, Hisato Yuto, Akihiro Nagai, Kazuhiko Tani, Tomoaki Tsuji, Junya Yamada, Mitsuyoshi Nakatani, Enhanced Large-scale Analysis Method and Its Application to Analysis of Multi-axial Pipe Weld, Welding in the world, Vol.60, No.5, pp.915-929, 2016.
- [12] 林雅江, 奥田洋司, 橋本学, 高度成形・溶接シミュレータの実証例題への適用, HPCI利用研究成果集, Vol.8, No.1, pp.20-32, 2023.



理想化陽解法FEMによる溶接力学シミュレーション

柴原 正和
 大阪公立大学 大学院 工学研究科 航空宇宙海洋系専攻 (写真左)
 生島 一樹
 大阪公立大学 大学院 工学研究科 航空宇宙海洋系専攻 (写真右)

1. はじめに

構造物の溶接組立工程において発生する変形は、製品の寸法精度や強度に影響することから、溶接施工前に十分に検討する必要がある。溶接時には局所に集中した入熱がなされるため、トーチ周辺の材料は溶融を伴う複雑な非線形の力学的挙動を示し、その結果として、塑性ひずみ、すなわち永久変形が発生する。こうした力学状態の挙動を熱弾塑性解析法¹⁻³⁾を用いて数値解析することで溶接変形を予測することは可能であるが、上述の通り、溶接時にはトーチ周辺に極めて強い局所的な非線形の力学的挙動を示すため、その解析には困難が伴い、従来の数値解析手法では計算時間の問題から溶接継手程度の規模の解析が限界であった。

溶接力学解析における計算規模の問題を克服するために、これまでに種々の解析手法が開発されてきた。溶接熱弾塑性解析の高速化に関する研究としては、Boitoutらによるアダプティブメッシュ法⁴⁾、Goldakらによるコンポジットメッシュ法⁵⁾、Brownらによる動的サブストラクチャー法⁶⁾などが挙げられる。また、これらの方法では構造全体と溶接熱源近傍部を分けて解析するが、村川らは、構造全体を弱非線形の領域と定義し、溶接部近傍の強非線形領域の解析と反復させることで解析の高速化を図る反復サブストラクチャー法⁷⁾を開発している。しかしながら、これらの手法はいずれも構造全体にわたる巨大な連立方程式を直接求解する静的陰解法を基にした解析手法であるため、解析実施時の計算時間とメモリ消費量が解析規模の2乗から3乗に比例することから、実機をはじめとする大規模構造物の溶接変形解析は困難であった。

本稿では、これまで筆者らが開発を進めてきた大規模溶接力学解析手法である理想化陽解法FEMの解析手法について簡単

に述べるとともに、実機構造物への適用事例および3D金属積層造形時の変形・残留応力予測への適用事例について紹介する。

2. 溶接力学シミュレーションの大規模化・高速化

2000年代から2010年代になると、高速解析法、大規模解析法が多く提案された。大阪大学接合研の村川らの研究グループでは、反復サブストラクチャー法を用いて15万要素のパイプの周溶接の問題を79時間で解析した事例が報告⁷⁾され、その後、大阪府立大学(現大阪公立大学)の著者らの研究グループにおいては、上述の“理想化陽解法FEM”が開発^{8,9)}され、500万要素、37パスの船体ブロック組立を模擬した問題の溶接変形を200時間で解析した事例について紹介された¹⁰⁾。その他、“理想化陽解法FEM”を活用し、図1に示すような多くの産業分野において使用実績を上げた。

解析の高速化・大規模化が可能になると、大きい構造物を詳細に解析できるのは当然のことながら、板レベルの解析をより詳細に、マイクロレベルまで解析できるようになるのも大きな利点である。すなわち、結晶粒レベルでの解析が可能となることから、著者らの研究においては、大規模で複雑な構造体における、溶接の進行とともに成長する柱状晶の成長の解析¹¹⁾(図2)や、その成長を含めた高温割れの解析¹²⁾を可能とした。現在においては、仮付けやタブ板、拘束治具の形状・寸法を忠実に再現し、また熱源としては、例えば、4電極による入熱を詳細にモデル化するような解析も実現した¹³⁾。

次節以降においては、“理想化陽解法FEM”の基本原理解について詳細に説明するとともに、自動車部品製造時の溶接変形予測に適用した事例について紹介する。

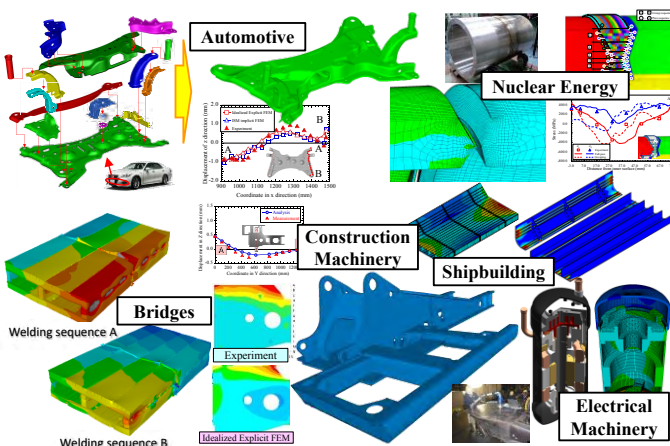


図1 様々な分野で産業利用されている理想化陽解法FEM (理想化陽解法FEMの応用事例1)

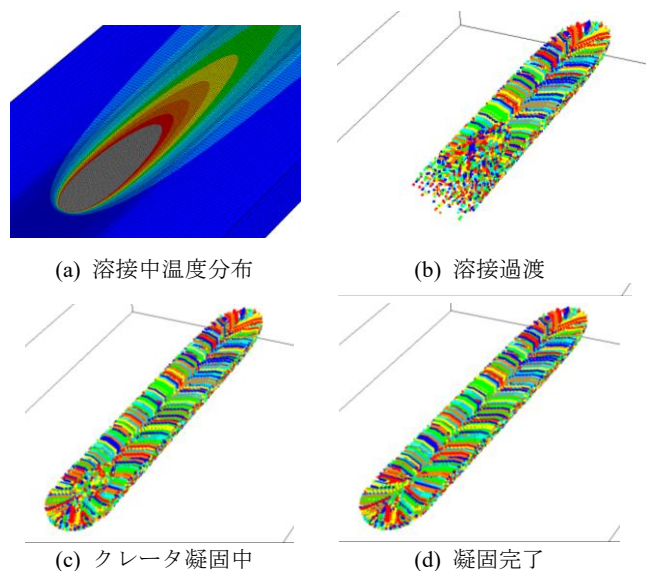


図2 柱状晶成長方向解析結果 (理想化陽解法FEMの応用事例2)

2.1 理想化陽解法FEMの基本原則

理想化陽解法FEMは動的陽解法FEMを基に構造解析の高速・省メモリ化を実現する解析手法である。ここでは、その解析理論の概略について説明する。

理想化陽解法FEMにおいては、図3に示すように以下の①②③の手順に従い解析を進める。

- ① 荷重増分，すなわち溶接過渡状態において温度増分を負荷し，その状態を保持する。
- ② 動的陽解法FEMの基礎式(1)に基づき静的平衡状態に達するまで変位を計算する。
- ③ 静的平衡状態が得られた場合には，次の荷重ステップの計算に移るために，手順①に戻る。

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] + \frac{1}{2\Delta t}[C]\right)\{U\}_{t+\Delta t} = \{F\}_t - \sum_{e=1}^{N_e} \int_{V^e} [B]^T \{\sigma\} dV - \frac{2}{\Delta t^2}[M]\{U\}_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] - \frac{1}{2\Delta t}[C]\right)\{U\}_{t-\Delta t} \quad (1)$$

ただし、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[B]$ 、 $\{\sigma\}$ はそれぞれ質量マトリックス、減衰マトリックス、変位-ひずみ関係マトリックスおよび、応力ベクトルを示し、 $\{U\}_{t+\Delta t}$ 、 $\{U\}_t$ 、 $\{U\}_{t-\Delta t}$ 、 $\{F\}_t$ はそれぞれ、時刻 $t+\Delta t$ 、 t 、 $t-\Delta t$ における変位ベクトル、および、時刻 t における荷重ベクトルを示す。また、 N_e は解析モデルの要素数、 V^e は要素の体積を示す。

ここで、質量マトリックス $[M]$ および、減衰マトリックス $[C]$ を節点集中型の対角マトリックスとすることで、式(1)のマトリックス演算は、もはや連立方程式ではなくなり、省メモリに解析を行うことが可能となる。また、上記の計算手順により静的平衡状態が得られた時点では、慣性項と減衰項の影響は無視できる程度に小さくなることから、計算手順①、②の静的平衡状態を得る過程においては、静的平衡状態に達するまでに必要となる時間ステップを削減できるように質量マトリックス $[M]$ および減衰マトリックス $[C]$ を調整することができる。本研究では、臨界減衰とクーラン条件から導出した質量マトリックスおよび減衰マトリックスを使用することで効率化を図った。

以上の計算手順を用いることで、理想化陽解法FEMにおいては、動的陽解法FEMに基づきながらも静的平衡状態への収束を考慮した解析が可能となり、静的陰解法FEMと同程度の解析精度を有し、かつ、高速、省メモリな解析が期待できる。

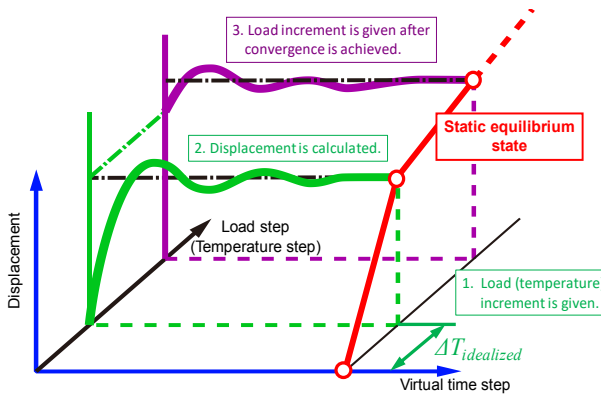


図3 理想化陽解法FEMの概念図

2.2 理想化陽解法FEMの自動車部品製造時の溶接変形予測への応用

以上の解析手法を自動車のフロントサスペンションを構成する部品の溶接変形の予測に対して適用した事例について紹介する。図4に解析モデルの全体図を示す。本モデルの最小板厚は2.0 mm、最大板厚は7.0 mmである。本モデルの要素分割の結果、節点数、要素数は、それぞれ、700,687、521,623となった。溶接条件は、電流を170 Aもしくは180 A、電圧を21 Vもしくは22 V、溶接速度を13.33 mm/sとし、全40本の溶接線に対して4段階に分けて施工する。第1段階の溶接の後、1800秒の冷却を行う。その後、第2段階の溶接の後40秒の冷却、第3段階の溶接の後40秒の冷却、第4段階の後15秒冷却し、最終的に室温まで冷却するまでの解析を行う。本解析には、CPUにIntel Core i7 3.2GHzプロセッサ、GPUにNVIDIA GeForce GTX 980プロセッサを搭載した計算機を使用した。

図5に完全冷却後の相当応力分布を示す。同図より、溶接の実施に伴い、溶接線とその周囲に大きな応力が分布していることが分かる。図9にz軸負方向から見た完全冷却後のz方向変位分布を示す。また、図7に、図6に示す下板のA-B線上のz方向の変位分布の計測結果と解析結果の比較を示す。なお、同図の変位は、図6のC点、D点、E点で構成される面からの距離として定義している。図7より、本解析は計測結果の傾向を良く再現できており、定量的にも良い一致を示していることが確認できる。また、同図より、下板はA-B線が上に凸の変形となっていることが分かる。これは、上板と下板を溶接する工程の溶接線が他の工程の溶接線より長くなっており、その位置が構造の中立面より下側であるため、溶接後の縦収縮により、中立面下側が収縮し、全体として上に凸の曲げ変形が生じたものと考えられる。

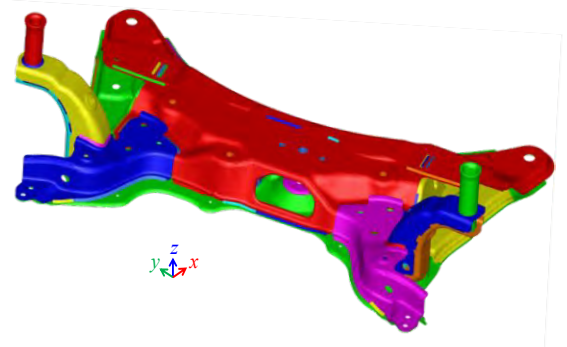


図4 自動車部品の溶接解析モデル

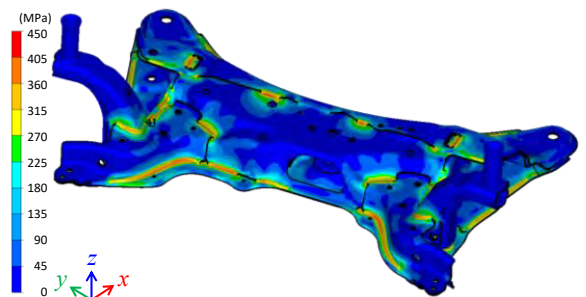


図5 完全冷却後の相当応力分布

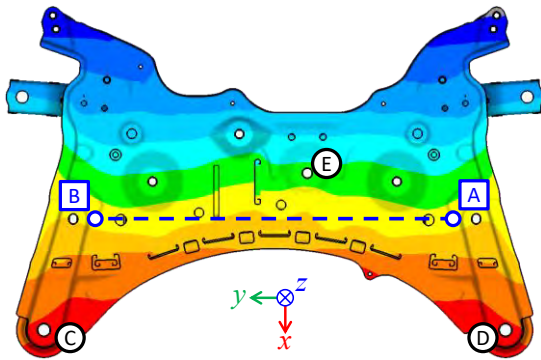


図6 完全冷却後のz方向変位分布

以上の解析の総荷重ステップ数は11,340であった。また、計算時間は約38時間であり、市販のPC一台を使用し実用的な計算時間で解析を実施する可能であることが分かった。加えて、理想化陽解法FEMによる溶接変形の解析結果は、計測結果と良い一致が得られたことから、本手法を用いることで、実機における溶接変形を高精度に予測できたとと言える。

3. 理想化陽解法FEMを用いた3D金属積層造形時の熱変形予測

3D金属積層造形においては、図8 (a)に示すように、レーザが金属粉末を溶融・凝固させつつ物体表面をジグザグと往復しながら高速に移動する。このプロセスを移動熱源としてモデル化するのは計算コストの面から困難である。そこで、同図(b)に示すように、熱源の移動を、それと等価な瞬間熱源としてモデル化する。

図9に、オーバーハング部とそれを支えるサポート部を有するカンチレバーモデルの要素分割図を示す。1要素あたりの寸法は長手方向に0.5 mm、板幅方向に0.5 mm、板厚方向に0.1 mmの等分割モデルとした。板厚方向の分割数は、一層当たりの積層厚と一致している。節点数は948019、要素数は857136である。

前項で示した実際の積層と同様、サポート部から含めて260層に対し、加熱→冷却を繰り返しながら順次積層し、積層後にサポート部をベースプレートから3.0 mmの高さで切断する製作工程を模擬した解析を実施した。図10に、参考例として、ベースプレートを除く積層厚さが3.0 mm、積層数が30の場合における面外方向の変位分布を示す。同図より、梁が反るような面外変形が発生していることが確認できる。その形状を実験結果と比較する

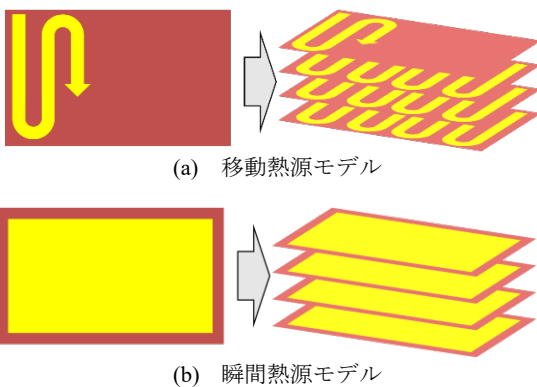


図8 熱源の簡略化

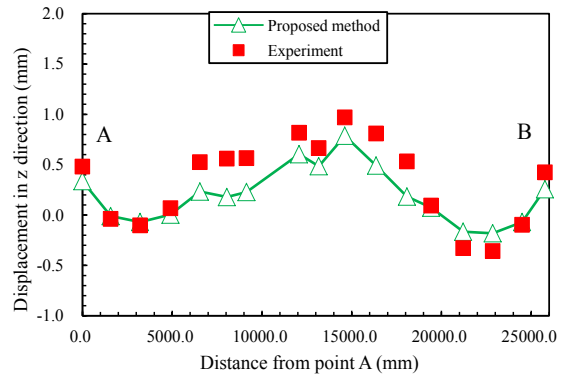


図7 A-B線上のz方向変位分布の比較

形で図11に示す。同図より、実験結果と解析結果は共に放物線状であり、両者は定量的によく一致していることが確認できる。

次に、面外変形量を積層厚さごとにまとめたのが図12である。同図は、横軸に積層厚さをとり、縦軸にサポート部切断時の梁端部(同図A部)における面外変位量を取り整理したものである。同図より、積層厚さが6.0 mm程度までは、積層厚さが大きくなるほど面外変位量は大きくなり、また、積層厚さが6.0 mmを超えるとその値が大きくなるほど面外変位量は小さくなることが確認できる。しかしながら、積層厚さが20.0 mmの場合における傾きから、積層厚さが大きい場合においても面外変形はゼロには収束しないことが推察される。

図13 (a) ~ (c)に、サポート部切断前における残留応力分布を示す。また、図14 (a) ~ (c)に、サポート部切断後における残留応力分布を示す。さらに、図15 (a) ~ (c)に積層部の幅方向中央部の断面内における応力分布を示す。図13 (a)より、切断前における長手方向の応力 σ_x は、上部部に引張り、下部部に圧縮の曲げ応力が発生していることが確認できる。それに対し、図14 (a)に示すサポート部切断後の応力は、切断前とは逆に、上部部に圧

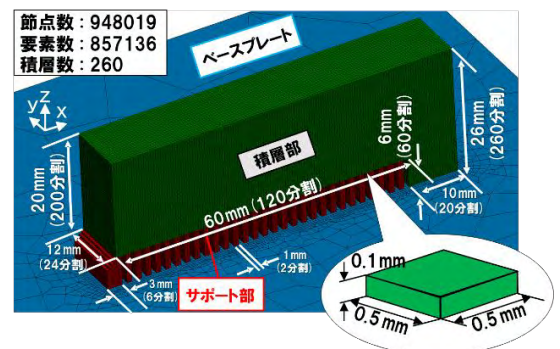


図9 カンチレバーモデルの要素分割図

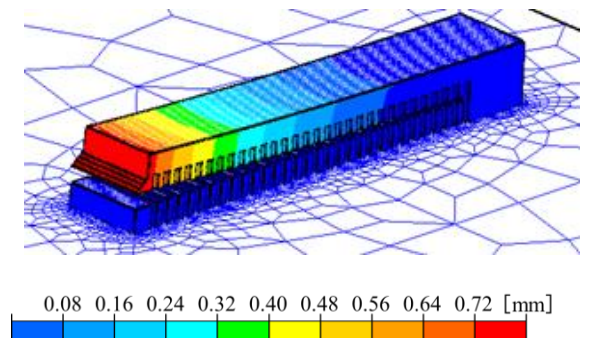


図10 3.0 mm積層後にサポート切断した場合における面外変位分布 (積層厚さ: 3.0 mm, 積層数: 30)

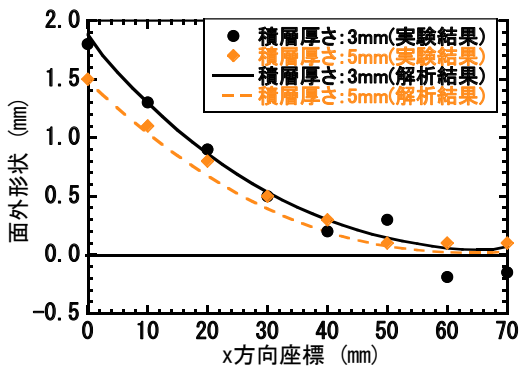


図11 面外形状における実験結果と解析結果の比較

縮、下面部に引張りの応力分布になることが確認できる。しかしながらその絶対値は小さくなっていることが分かる。次に、幅方向の応力 σ_y については、図13 (b)、図14 (b)に示す表面部に関する限り、切断前後での差はあまり無い。また、その分布に関しては、図15 (b)に示すとおり、表面部に引張り応力が発生し、内部はそれとバランスする形で圧縮応力が発生していることが分かる。この応力形態は、一般的な造形物の応力分布を表していると考えられる。さらに、図13 (c)、図14 (c)に示す板厚方向の応力 σ_z からも、左右端における表面残留応力が高いことが確認できる。このことから、造形物の残留応力は、その表面の法線方向成分以外はすべて高く、疲労強度や脆性破壊強度の観点からは望ましくないと言える。

このように、大規模・高速解析手法ある理想化陽解法FEMを用いることで、産業で用いられる実機構造体の溶接解析のみならず、溶接過渡における結晶成長やそれに影響を受ける高温割れの発生、および3D金属積層造形時の変形・応力解析等が可能になることから、本手法は従来手法では解析が極めて困難であった実用構造物の熱変形・応力解析において非常に効果的な手法であると言える。

4. まとめ

本解説では大規模溶接力学解析手法である理想化陽解法FEMについて、その手法の基本原則と、大規模複雑構造物の溶接変形予測への適用事例について紹介した。本稿で示したように、理想化陽解法FEMに基づく解析技術の開発を通して、1000万自由度クラスの溶接変形・残留応力の解析を日常的に行うことが可能となった。これにより、解析コストの大きな3D金属積層造形時のFEM熱弾塑性解析による変形・残留応力予測も可能となった。今後はこの手法を活用して、様々な未解決問題に着手する所存である。

参考文献

- 1) 上田 幸雄, 山川 武人: 有限要素法による熱弾塑性挙動の解析, 溶接学会誌, Vol.42, No.6 (1973), pp.61-71.
- 2) 藤田 譲, 野本 敏治: 熱弾塑性問題に関する研究 (その1), 日本造船学会論文集, Vol.130 (1971), pp.183-191.
- 3) H. D. Hibbitt P. V. Marcal: A Numerical Thermomechanical model for the welding and subsequent loading of a fabricated structure, Computers and Structures, Vol.3 (1973), pp.1145-1174.

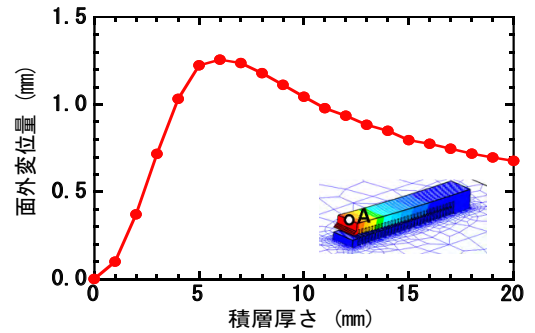


図12 積層量と切断後変形量の関係 (解析結果)

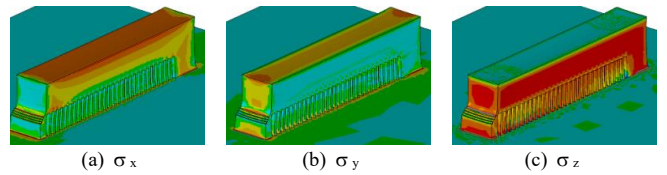


図13 サポート部切断前における残留応力分布

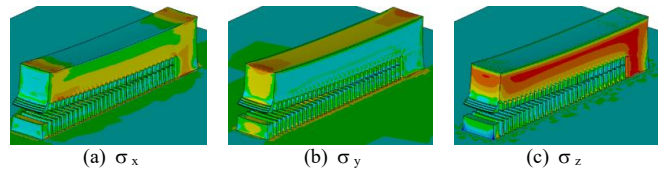


図14 サポート部切断後における残留応力分布

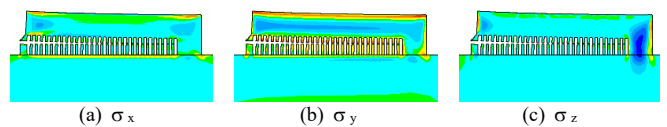
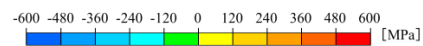


図15 サポート部切断後の建て断面内における残留応力分布



- 4) F. Boitout, J. Bergheau: The Numerical Simulation of Welding in Europe: Present Capabilities and Future Trends, Trans. JWRI, Vol.32, No.1 (2003), pp.197-204.
- 5) J. Goldak, M. Mocarita, V. Aldea, J. Zhou, D. Downey, D. Dorling : Predicting Burn-through When Welding on Pressurized Natural Gas Pipelines, Proceedings of 2000 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, (2000), pp.23-27.
- 6) S. B. Brown, H. Song: Rezoning and Dynamic Substructuring Techniques in FEM Simulations of Welding Processes, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.155 (1993), pp.415-423.
- 7) 西川 弘泰, 芹澤 久, 村川 英一: 大規模シミュレーションの実機適用, 溶接学会論文集, Vol.24, No.2 (2006), pp.168-173.
- 8) 柴原正和, 生島一樹, 伊藤真介, 正岡孝治: 動的陽解法FEMを基にした大規模構造のための溶接過渡変形・応力解析手法の提案, 溶接学会論文集, Vol. 29, No. 1 (2011), pp. 1-9.

- 9) 生島一樹, 柴原正和, 伊藤真介: GPUを用いた並列化理想化陽解法FEMの開発: 溶接学会論文集, Vol. 31, No. 1 (2013), pp. 23-32.
- 10) Kazuki Ikushima, Masakazu Shibahara: Nonlinear Computational Welding Mechanics for Large Structures, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 141, No. 2 (2018), OMAE-18-1044
- 11) 前田新太郎, 麻寧緒, 生島一樹, 柴原正和: 溶接時の柱状晶凝固成長簡易解析手法の開発, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 106, (2021), pp. 34-35.
- 12) 前田新太郎, 生島一樹, 柴原正和, 麻寧緒: 力学および冶金学的因子を考慮した溶接高温割れ解析手法の開発, 溶接学会論文集, Vol. 39, No. 4 (2021), pp. 386-395.
- 13) 前田新太郎, 沖見優衣, 生島一樹, 谷岡俊介, 木治昇, 柴原正和: 多電極片面サブマージアーク溶接時における端部割れに及ぼす諸因子の影響に関する検討, 溶接構造シンポジウム2019講演論文集, (2019), pp. 388-394.



トポロジー最適化とメタル3D積層造形(基礎から応用まで)

山田 崇恭

東京大学 大学院 工学系研究科 総合研究機構 戦略研究部門

1. はじめに

トポロジー最適化は、デバイスや材料の形状に注目し、所望の性能を最大限に引き出すための形状を計算機により設計する方法である。寸法最適化は形状パラメータを設計変数とする最適化問題、形状最適化が与えられた形状の外形を設計変数とする最適化問題に対し、トポロジー最適化は、新しい境界を生成することを含むトポロジーの変更も許容する方法論であることから、設計自由度が最も高い構造最適化手法と言える。トポロジー最適化の歴史は、1970年代と1980年代にLions, Murat, Tartarなどの応用数学者による最適形状制御の研究に端を発し、そこから数学的アプローチを中心に均質化法に基づく方法論の基本的な考え方が構築された。その後、1988年には工学分野の問題に対する最初の応用^[1]として、構造物の静剛性を最大化する設計問題の具体的な数値解析手法とその数値解析例が示され、これが起点となって工学分野においても広く研究されるようになった。その後、固有振動数や固有モード等の機械的特性の最適化のみならず、流体問題における圧力損失最小化、伝熱問題における熱拡散最大化や各種発電デバイスの効率最大化などの幅広く、デバイス及び材料の形状設計問題に展開されてきた。このように幅広い設計問題へのトポロジー最適化の展開について、多くの学術研究が行われてきたが、産業製品への展開は極めて限定的である。その原因のひとつは、トポロジー最適化により得られる設計解は、力学的に最適であっても、生産工程や組立性等を考慮していないことにある。つまり、実際の産業製品の設計課題に適用するためには、力学的な性能だけでなく、生産性や組立性などの複合的観点から最終的な設計案を決定する必要があるため、力学的特性のみを考慮したトポロジー最適化による設計案は、産業製品への展開が困難である。

他方、積層造形法は、通常の機械加工と比較して造形自由度が高い方法として注目されている。この高い造形自由度により、これまでには製造が困難とされていた設計案の採用が可能となり、設計段階の基本的な考え方に大幅な見直しが行われている。例えば、孔が多数存在する多孔体などの幾何学的に複雑な部分構造を有する構造物の造形が可能となるため、そのような複雑な部分構造の積極的な利用による高性能な機械構造物の設計法が期待されている。このように、積層造形法を最大限に活用した設計法はDfAM (Design for Additive Manufacturing) と呼ばれ、積層造形法に基づいた体系的な設計手法の構築が期待されている。

このような背景から、トポロジー最適化と積層造形の組合せは学術界のみならず産業界からも注目を集め始めている。本記事では、トポロジー最適化によるDfAMに関連する著者の研究グループの研究成果について、前回の記事以降の内容を中心に、

紹介する。なお、著者の研究グループ以外にも関連研究は多数報告^[2-5]されていることを注記する。

2. トポロジー最適化の基礎

構造最適化の基本的な枠組は、所望の設計指標を最大、または最小となる形状 Ω を求める最適化問題である。ここで、最大化または、最小化したい指標をスカラー値で返す汎関数により表現し、これを目的関数と呼ぶ。通常、目的関数は構造力学における剛性や流体力学における圧力損失などの物理的な特性で表現される。従って、評価対象とする物理現象を表現する支配方程式を満たすことを前提として、最適な形状を探索するために、支配方程式は最適化問題における制約条件となる。すなわち、構造最適化問題は次のように定式化される。

$$\begin{aligned} \inf_{\Omega \in \mathcal{U}_{ad}} J(u, \Omega) \\ \text{subject to: governing equation of } u \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 J は目的関数、 u は支配方程式の解として得られる状態変数、 \mathcal{U}_{ad} は、形状 Ω が許容される空間である。構造最適化問題の注目すべき点の一つは、状態変数 u は、一般的には陽な形の関数で記述することができず、偏微方程式の数値解析解として具体的に与えられる点である。例えば、弾性力学の変位場、流体力学の流速場がこれに対応し、有限要素法等を利用した数値解析解として与えられる。

次に、設計変数に着目すると、寸法最適化では、設計対象の形状をパラメータにより表現し、その形状パラメータを設計変数とする。形状最適化では、形状の境界を設計変数とする。トポロジー最適化では、次式で定義される特性関数 $\chi \in L^\infty(D)$ を導入し、これを設計変数とする。

$$\chi(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in \Omega \\ 0 & \text{if } x \in D \setminus \Omega \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 D は形状 Ω の存在が許容される領域であり、固定設計領域と呼ばれる。特性関数は、構造により占められている領域(以下、構造領域)では1、構造により占められていない領域(以下、空洞領域)では0をとる。トポロジー最適化は、次式に示すように、この特性関数の最適な分布を求める問題として定式化される。

$$\begin{aligned} \inf_{\chi(x)} J(\chi) \\ \text{subject to: governing equation of } u \end{aligned} \quad (3)$$

ここで注目すべき点は、特性関数の値の変更により、形状の境界の移動だけではなく、境界が新たに生成されるようなトポロジーの変更も表現できる点である。

次に注意すべき点は、最適化問題 (3) は、不良設定問題である点である。つまり、最適化問題 (3) は最適解が存在しないことが知られている。具体例としては、ChengとOlhoffのリブの最適配置問題^[6]が良く知られている。この例は、指定された質量の制約で、最適な補強リブの配置には、無限小の厚さのリブが必要であることが示されている。つまり、ある厚さのリブを考えた場合、合計質量が同じとなるような複数の薄いリブを利用する方がより良い設計解であり、さらに薄いリブを検討すれば、より良い設計解が得られるため、永遠に最適解にたどり着くことはない。このような課題を解決する手段として、設計空間の緩和法^[7]や連続な密度関数を求める問題に置き換える方法^[8]、レベルセット法による形状表現と正則化法を組み合わせる方法^[9]など、様々な手法が提案されている。

次に、トポロジー最適化アルゴリズムの概略について述べる。緩和法もしくは正則化法により不良設定問題として定式化したトポロジー最適化問題において最適設計解を求めたい。一般には、最適解を直接求めることが困難である。そのため、適当な初期設計解を与えて、形状変更を繰り返して最適設計解の候補を求める方法が一般的である。ここで、形状変更するための指針として、目的関数の設計変数による微分である、設計感度を用いる。すなわち、設計者が与えた形状に対して、設計感度に従って形状更新を繰り返すことがアルゴリズムの基本的な考え方である。そのため、この設計感度の評価が最も重要であるといえる。ただし、設計感度を用いない手法も多数^[9]あるが、ここでは割愛する。

3. 生産工程から要求される幾何学的制約条件

トポロジー最適化は、高性能を実現するデバイスを実現する設計基盤技術となる可能性があるものの、トポロジー最適化により得られる設計解は、力学的には最適であっても、製造が困難な設計解である場合が多い。前述のように、積層造形技術との有機的統合が有効ではあるが、積層造形においても製造工程から要求される制約条件がある^[11-13]。しかしながら、トポロジー最適化において、製造工程から要求される制約条件の考慮は、困難である。この課題を解決する方法として、仮想的物理モデルに基づく製造性を考慮したトポロジー最適化の考え方^[14]を提唱した。基本的な考え方は、製造性を表現するための仮想的な力学を導入することにある。すなわち、通常の物理場 u に加えて、所望の幾何学的制約要件を表現する仮想的物理場 v を導入し、それらのマルチフィジクス設計問題として、幾何学的制約条件付き最適設計問題を次のように定式化する。

$$\begin{aligned} & \inf_{\Omega \in \mathcal{W}_{ad}} J(u, \Omega) \\ & \text{subject to: governing equation of } u: \text{ usual physics} \\ & \qquad \qquad \text{governing equation of } v: \text{ fictitious physics} \\ & \qquad \qquad G(v, \chi) \leq 0: \text{ constraint for manufacturability} \end{aligned} \tag{4}$$

仮想的な物理モデルの導入により、幾何学的制約条件に対しても設計感度に基づく設計変更が可能になり、制約違反を伴う解探索が許容される。設計変数もしくは設計感度に対して制約を導入し、常に制約を満たす設計変数の更新方法と比較して、解探索の局所性を緩和し、より高性能な設計解の創成が可能になった。

しかしながら、この方法においても、制約条件が幾何学的に局

所的な条件の場合、解探索の収束性が非常に悪化する課題の本質的な解決ができていない。この課題を解決する方法として、仮想的な物理モデルの考え方を拡張した、連成型の仮想的な物理モデルを提案^[11]している。この方法の基本的な考え方は、通常の物理場と仮想的な物理場を連成させることで、通常の物理場の設計感度に制約条件の情報が含まれ、また制約条件に対する設計感度においても通常の物理場の情報が含まれる。定式化の基本的な考え方は、制約違反により目的関数が悪化するように連成させる。さらに、制約違反がない場合は、通常の物理方程式と一致させ、最終的には所望の目的を適切に評価する。

$$\begin{aligned} & \inf_{\Omega \in \mathcal{W}_{ad}} J(u(v), \Omega) \\ & \text{subject to: modified governing equation of } u(v) \\ & \qquad \qquad \text{governing equation of } v: \text{ fictitious physics} \end{aligned} \tag{5}$$

この方法により、積層造形法のためのオーバーハング形状を排除する幾何学的制約条件を考慮したトポロジー最適化問題において、収束性を悪化することなく設計解を得ることができるようになった。数値解析例を次の章で紹介する。

仮想的な物理モデルとしては、積層造形関連の制約の他、型成形制約^[15]、厚みなどの幾何学的特徴量に対する制約^[16]、複数部品からなるデバイスにおける組立性^[17]などを提案している。

4. 数値解析例

連成型仮想的物理モデルを用いた幾何学的制約条件付きトポロジー最適化^[12]の数値解析例を示す。ここでは、体積制約付剛性最大化問題について考える。設計領域は図1に示すように、直方体領域の両端を変位拘束し、上面と下面に表面力を与える。また、上面は非設計領域とする。設計対象物は、パウダーベッド方式の金属積層造形による造形を想定し、積層造形における造形方向は上面から下面とする。

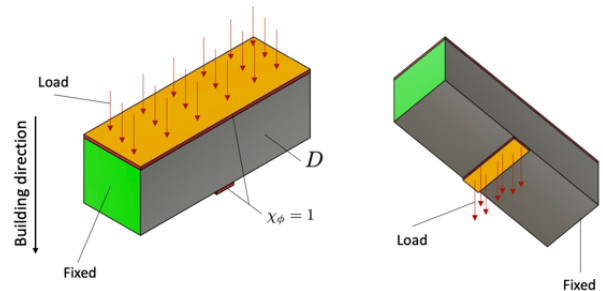


図1 設計領域と境界条件

このような設定下で、幾何学的制約条件を考慮しない場合、つまり体積制約付剛性最大化問題として得られた設計解を図2に示す。

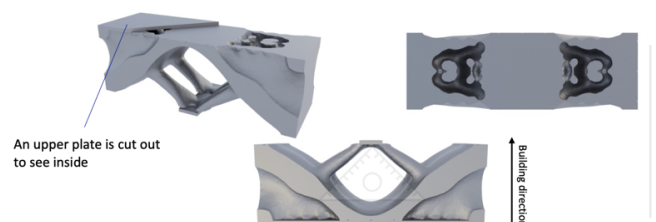


図2 幾何学的制約条件を考慮しない場合の最適構造

図2に示すように、得られた設計解は、閉じた空間があるため、パウダーベッド方式による金属積層造形の場合、金属粉を取り除く工程に支障が生じる。また、積層角度が45°を超えていることを確認できるため、造形物の品質を高く保つことが困難である。次に、金属粉が取り除き可能な幾何学的制約条件^[10]を考慮した場合の最適構造を図3に示す。

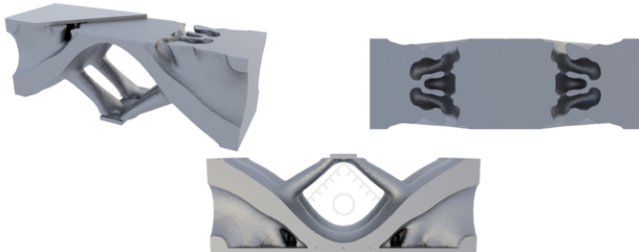


図3 金属粉の取り除きが可能な幾何学的制約を考慮した場合の最適形状

また、金属粉の取り除きが可能な幾何学的制約条件に加えて、最大積層角度を45度及び60度に制約した場合の結果を図4及び図5に示す。

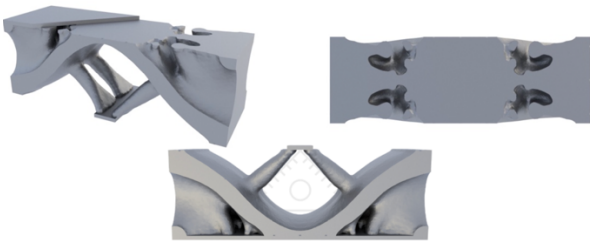


図4 金属粉の取り除きが可能な幾何学的制約条件及び最大積層度（45度）を考慮した場合の最適形状

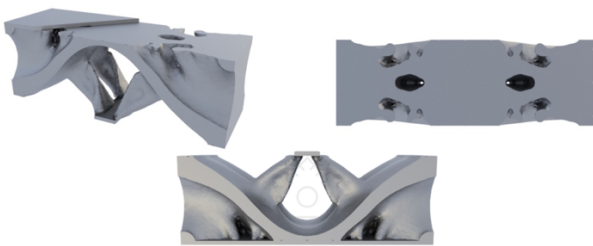


図5 金属粉の取り除きが可能な幾何学的制約条件及び最大積層度（60度）を考慮した場合の最適形状

図4及び図5で得られたいずれの結果においても、所望の幾何学的制約条件を満たしていることを確認できる。つまり、閉じた空間がなく、最大積層角度が指定された角度の範囲内となっている。ここで、トポロジー最適化における反復計算の収束履歴を図6に示す。

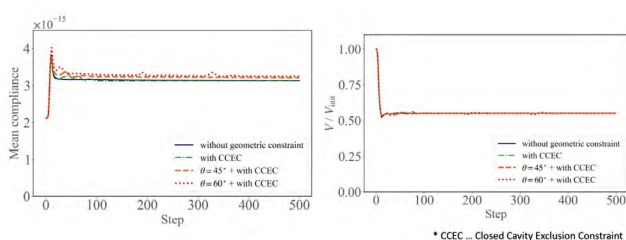


図6 トポロジー最適化における反復計算の収束履歴

図に示すように、概ね100回程度で十分に収束していることを確認できる。従って、連成型の仮想的物理モデルの導入により、トポロジー最適化における反復計算が大幅な増加を伴うことなく、適切な最適形状が得られることがわかった。

5. まとめ

DfAMとしてのトポロジー最適化の可能性について議論した。連成型の仮想的な物理モデルの考え方により、製造工程から要求される幾何学的制約条件を考慮した最適形状が得られることがわかった。今後、各種積層造形法との有機的な統合を目指して、実用的なDfAMシステムの構築を目指したい。

参考文献

- [1] Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N., Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.71 (1988), pp.197-224.
- [2] Guest, J. K., Imposing maximum length scale in topology optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.37 (2009), pp.463-473.
- [3] Allaire, G., Bühr, M., Bogosel, B., Godoy, M., Accessibility constraints in structural optimization via distance functions, *Journal of Computational Physics*, Vol.484, (2023), No.112083.
- [4] Langelaar, M., An additive manufacturing filter for topology optimization of print-ready designs, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.55, (2017), pp.871-883.
- [5] Allaire, G., Jouve, F., Michailidis, G., Thickness control in structural optimization via a level set method, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.53, (2016), pp.1349-1382.
- [6] Cheng, K. T. and Olhoff, N., An Investigation Concerning Optimal Design of Solid Elastic Plates, *International Journal of Solid and Structures*, Vol.17 (1980), pp.305-323
- [7] Allaire, G., Shape Optimization by the Homogenization Method, Springer, 2001
- [8] Bendsøe, M. P. and Sigmund, O., Material interpolation schemes in topology optimization, *Archive of Applied Mechanics*, Vol.69 (1999), pp.635-654.
- [9] Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, N. and Takezawa, A., A Topology Optimization Method Based on the Level Set Method Incorporating a Fictitious Interface Energy, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.199 (2010), pp.2876-2891.
- [10] Sigmund, O., On the usefulness of non-gradient approaches in topology optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.43 (2011), pp.589-596.
- [11] Yamada, T., Noguchi, Y., Topology optimization

- with a closed cavity exclusion constraint for additive manufacturing based on the fictitious physical model approach, *Additive Manufacturing*, Vol.52, (2022), p.102630.
- [12] Tajima, M., Yamada, T., Topology optimization with geometric constraints for additive manufacturing based on coupled fictitious physical model, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 417, (2023), No. 116415.
- [13] Feng, Y., Noda, M., Noguchi, Y., Matsushima, K., Yamada T., Multi-material topology optimization for additive manufacturing considering dimensional constraints, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 410, (2023), No. 116027.
- [14] 山田崇恭, 正宗淳, 寺本央, 長谷部高広, 黒田紘敏, 幾何学的特徴量に対する偏微分方程式系に基づく幾何学的特徴制約付きトポロジー最適化(積層造形における幾何学的特徴量を考慮したオーバーハング制約法), 日本機械学会論文集, Vol.85, No.877, p.19-00129, (2019).
- [15] Sato, Y., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Manufacturability evaluation for molded parts using fictitious physical models, and its application in topology optimization, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 92, (2017), pp.1391-1409.
- [16] Yamada, T., Geometric shape features extraction using a steady state partial differential equation system, *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol.6, No.4, pp.647-656, (2019) .
- [17] Hirose, R., Noda, M., Matsushima, K., Noguchi, Y., Yamada, T., Multicomponent topology optimization method considering stepwise linear assemblability with a fictitious physical model, *Computer-Aided Design*, Vol.166, (2024), p.103628.



ラティス構造分布最適化による金属積層造形の残留変形低減

竹澤 晃弘
早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部 機械科学・航空宇宙学科

1. トポロジー最適化と積層造形

近年、積層造形(Additive Manufacturing, AM)技術の普及が急速に進んでいる。この方法は従来の鋳造や鍛造、切削加工では製造が難しかった複雑形状も造形可能であり、極めて自由度の高い製造手法として注目を集めている。特に、金属によるAM技術が発達したことにより、強度や熱伝導性能の高い部品が造形可能になっており、試作のみならず最終製品への適用も進んでいる。

しかし、AMには従来法に比べ著しく製造時間が長いという欠点もあり、高い形状自由度を活かした付加価値の高い部品設計を行う必要がある。それに対し、設計支援ツールとして、数値計算を活用し優れた最適構造を高い自由度で導出可能なトポロジー最適化が注目されている。トポロジー最適化では中空構造を含む複雑な形状が最適解として導出される可能性があるが、積層造形を用いれば実現が難しい。実際、AMでの部品製造を前提とし、トポロジー最適化を設計に適用した例がいくつか学術論文として報告されている¹⁻³⁾。いずれの例においても、商用ソフトを活用しながら既存デザインからの著しい設計変更を実現しており、トポロジー最適化技術のAMとの高い親和性が伺える。

また、ASTMでAMに関する規格整備が進められているが、その中でトポロジー最適化の設計への活用法についても述べられている⁴⁾。明文化できない種々のノウハウはあるであろうが、トポロジー最適化とAMの組み合わせは既に一製品開発技術としての地位をある程度確立したとも言える。そのような中、トポロジー最適化とAMという技術の付加価値を更に高めるべく、様々な研究開発が行われているが、本稿ではその中の一つである最適ラティス構造の開発について取り上げる。

ラティス構造とはAMで作成される多数の空孔を含む構造の総称であり、広義のポーラス材料に属する。従来からあるポーラス材料と同様に、軽量・高剛性・高衝撃吸収能・大表面積といった特徴を活用し、人工骨や熱交換器への応用が研究されてきた。ただし、ポーラス材料の製造法は材料溶融時の発泡によるものが主であり、内部構造の詳細な制御は困難であったのに対し、積層造形によるラティス構造では意図した内部構造の実現が可能になるため、意図した性能の定量的な実現が可能であるという大きな利点がある。また、意図する性能を実現するためにラティスの粗密を場所によって変化させた、いわゆる傾斜機能構造を実現することも容易である。そこで本稿では、トポロジー最適化に極めて類似のアルゴリズムを用いて、金属積層造形の残留変形を低減した例⁵⁾を紹介する。

2. 金属積層造形における残留変形と解析法

近年、金属粉末積層造形技術が次世代の製造法として注目を集めており、試作品のみならず最終的な工業製品にも適用され

ている。金属粉末積層造形的主要な手法は粉末床溶融法と指向性エネルギー堆積法であり、レーザーや電子ビームの熱源を用いて金属粉末を急速に溶融・凝固させ、意図した三次元形状が完成するまで層ごとに成形するものである。それぞれの溶融及び凝固プロセスは溶接と同様であり、金属積層造形とはいわば溶接を無数に繰り返し三次元構造を形成するようなものである。それ故に溶接と同様に、そしてそれ以上に大きな反り残留変形や残留応力が深刻な問題となり、それはクラックや剥離などを引き起こす。現在、金属積層造形では様々な分野での需要増に伴い、成形品の大型化が求められているが、それに伴い残留変形も大きくなる。そのため、残留変形の抑制は金属積層造形における最重要課題の一つと見なされている。

この反り残留変形の発生メカニズムを図1に示す。積層造形や溶接の際に加熱された溶融金属及びその周囲は局所的な高温により膨張する。しかし、その膨張は周囲の非加熱部からの拘束力によって抑制される。溶解した金属の剛性は極めて低いため、溶接部は熱膨張を含めて周囲の構造と一体化して形成される。冷却後、溶接部は収縮して元の形状に戻ろうとするが、その形状は高温環境下で形成されたものよりも小さい。この収縮が熱歪みや残留応力の原因となる。通常の溶接とは異なり、積層造形ではこのような加熱と冷却のプロセスが繰り返されるため、溶接よりも更に複雑で深刻な熱変形となる。

このような残留変形の対策としては、予備加熱をして溶融時と冷却時の温度差を小さくする等のハードウェア的アプローチが代表的である⁶⁾。また、レーザーパスの工夫により、残留変形が低減されることも知られており、アイランドスキミングと呼ばれる、平面を小さな領域に分割した上で、それらを個別に埋めていくような手法が有名である⁶⁾。また、造形物全体の残留変形は局所的な残留変形の積み重ねであり、レーザー走査によって溶融・凝固する部位は楕円形のメルトプールとなり、熱膨張はレーザー走査方向に大きく、その垂直方向に小さいという異方的な収縮を示す⁶⁾。この特性を利用し、残留変形の低減のためにレーザーパスを最適化する試みもある⁷⁾。

この他に、サポート構造を含む造形物自体の最適設計により残留変形を低減する試みがある。残留変形の低減を目的とした構造最適化法はピッツバーグ大学のAlbert To教授の研究が

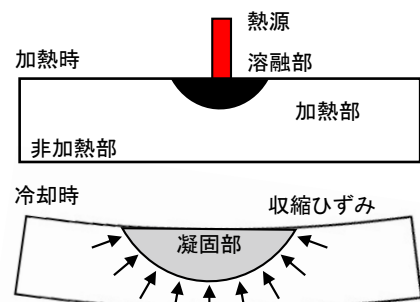


図1 金属積層造形の残留応力・変形発生原理

ループが、残留変形の近似的評価法である固有ひずみ法を用いて構築した手法が世界初である⁸⁾。ただし、初期の研究では、その最終的な変形状態のみを考慮した最適化が行われており、積層造形の過程での熱ひずみの蓄積が考慮されていないため、手法の有効性が限定されていた。

固有ひずみ法は、もともと溶接による残留応力の予測法として造船分野で開発された⁹⁾。溶接の残留応力はX線を使って直接測定することができるが、通常は表面近傍に限定されるため、厚い構造物の内部の残留応力を捉えるには不可逆的な切断工程が必要となる。これを回避するための残留応力分布予測手法が固有ひずみ法である。本来の固有ひずみ法の基本的な考え方は、溶接過程で発生する塑性ひずみを残留応力の発生源とするものであり、この塑性ひずみを固有ひずみと呼んでいる。この固有ひずみは、複雑な時間依存性プロセスを無視して最終的な溶接状態からのみ得られるものとしている。すなわち、固有ひずみの分布は溶接条件、溶接部の基本形状及び固定状態にのみ依存すると仮定される。このような仮定のもと、予測された塑性ひずみを弾性FEMの初期ひずみとして対象構造に適用する。固有ひずみの値を測定可能な応力で校正することで、構造物全体の残留応力の分布が数値的に導き出される。

以上の固有ひずみ法の発展形として、近年積層造形固有ひずみ法が提案された¹⁰⁾。最も単純な積層造形固有ひずみ法では、各層を固有ひずみを発生させる基礎単位と見なす。すなわち、各層はその生成過程を無視して、収縮方向に一樣な固有ひずみを持つことになる。反り変形はこの固有ひずみと要素活性化の組み合わせでFEMを用いて表現することができる。要素活性化を利用した溶接解析では、最終的な構造物全体をモデル化しておき、ヤング率を変化させることで構造物の生成を表現する。つまり、活性化する要素のヤング率を、応力がゼロの状態を保ちつつ、ごく小さな値から元の値に大きくする。このプロセスの概要

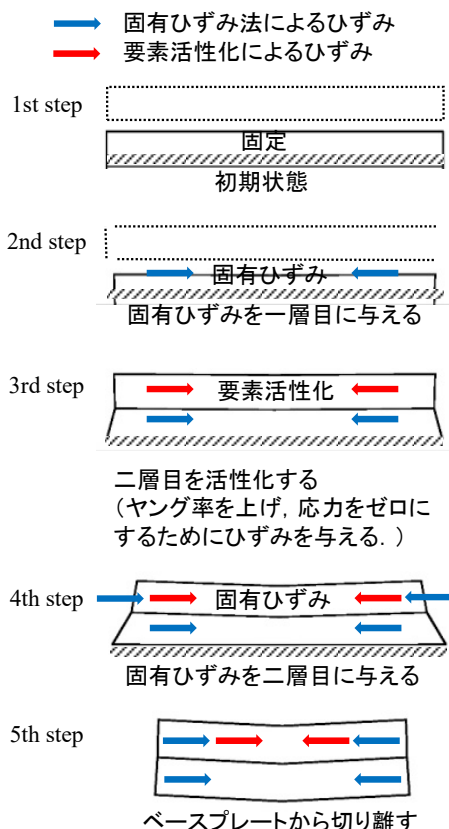


図2 金属積層造形固有ひずみ法概略図

を単純化した二つの層を用いて図2で説明する。最初のステップでは第一層のみが形成され、第二層は非活性化されている。第二段階では、第一層に固有ひずみを加える。第三段階では、第二層をゼロ応力で活性化する。つまり、非活性化状態で発生した現在の層のひずみを初期ひずみとして加えることで、ヤング率の増加で生じるはずの応力をキャンセルする。第四段階では固有のひずみを第二層に加える。結果的に二層目には一層目よりも大きな収縮ひずみが生じ、ベースプレートから切り離されたこの二層構造は上に反る。このようにして、積層造形の反り変形が近似的に表現される。

このような積層造形固有ひずみ法の一連のプロセスは仮想的な時間を与えた上で、過渡応答問題として定義されてきた。しかし、固有ひずみ法において時間は物理的な意味をもたず、単に連続するプロセスを処理する手法として用いられているに過ぎない。また、このような過渡応答問題としての扱いが、構造最適化において最終状態のみが考慮されていた理由の一つである。そこで著者らは、この固有ひずみ法に対して、漸化式を用いた単純な定式化を提案した¹¹⁾。

$$\mathbf{A}_n \mathbf{u}_n + \mathbf{B}_n \Delta \mathbf{u}_{n-1} - \mathbf{H}_n^{\text{ih}} \mathbf{K}_n \mathbf{u}_n^{\text{ih}} = \mathbf{0}, \mathbf{u}_0 = \mathbf{0}$$

ただし、 $\mathbf{A}_n = (\mathbf{I} - \mathbf{H}_n^{\text{act}}) \Delta \mathbf{K}_{n-1}$ 、 $\mathbf{B}_n = \mathbf{K}_{n-1} + \mathbf{H}_n^{\text{act}} \Delta \mathbf{K}_{n-1}$ であり、添字の n は現在のステップ、 \mathbf{K} は剛性マトリクス、 \mathbf{u} は変位ベクトル、 \mathbf{f} は荷重ベクトル、 \mathbf{H}_n^{ih} と $\mathbf{H}_n^{\text{act}}$ はそれぞれ固有ひずみと要素活性化に関する節点を指定する0-1行列、 \mathbf{u}_n^{ih} は固有ひずみに相当する固定変位ベクトルである。なお、上式の詳細な導出は文献¹¹⁾を参考にされたい。

3. ラティス密度分布最適化

この研究では、内部にラティス構造を内包するある構造物が、剛性などの他の構造性能を無視して、意図した形状を実現することのみを目的とし、金属積層造形で成形されるものとする。本手法ではこの内部ラティス構造の密度分布を最適化することで残留変形の低減を試みる。最適化では、各ラティスは実行的剛性を導出して近似的に扱い、この実効的剛性と固有歪みは設計変数に依存するものとする。すなわち、固有ひずみ法において、ある形状のラティスの単位セルは、どのような構造に組み込まれたとしても等しい固有ひずみを生み出すという仮定をする。設計変数はラティス形状の代表的な大きさとして設定し、それによりラティスの形状及び密度を変化させる。なお、実行的剛性及び固有ひずみともに、いくつかの設計変数に対応するラティスの代表形状で値を導出し、それを多項式近似で補間することにより、設計変数とそれらの値を関連付ける関数を導出する。ラティスの実効的剛性は均質化法によって計算し、固有ひずみ値は実験によるキャリブレーションで得る。そして、最適化問題はベースプレートから部品を切り離した後の残留変形量の最小化とする。

設計変数 d の更新には、勾配法の一つであるMMA¹²⁾を用いる。最適化の前に、ラティスの実効的剛性及び固有ひずみと設計変数 d の間の近似関数を構築する。最適化ループ内では、近似関数を用いてラティスの実効的剛性と固有ひずみを近似関数から計算する。各ステップの変位は、固有ひずみ法の漸化式である式(2)をFEMで解いて算出する。そして、目的関数を計算し、また、その感度を計算する。最後に、MMAを用いて設計変数を更新する。これらの手順を指定された収束基準が満たされるまで繰り返す。

4. 最適設計問題

本研究では、ラティス構造の基本形状として、図3のような形状を導入する。また、ユニットセルの長さは4 mmとする。球状の空孔を立方体のユニットセルに導入し、その半径を最適化の過程で変化させる。このラティス基本形状は、水平方向のオーバーハングが少ないため、金属積層造形の製作に適している。また、形状の異なる隣接ラティスとの間で結合の問題も生じない。なお、残った粉体を除去するために六つの小さな四角穴を導入する。

このラティスの実効的剛性は、均質化法を用いて導出する。いくつかの設計変数に対応する代表形状を用意し、その実効的剛性を計算する。球空孔の半径は $r=1/\sqrt{2}$ mmから3.6 mmまで変動するものとし、最適化を容易にするため空孔半径 r を設計変数 d ($0 \leq d \leq 1$)に $r=(1/\sqrt{2}-3.6)d+3.6$ に従いマッピングする。得られた実効的剛性は、設計変数 d に関する多項式関数を用いて近似する。材料としては、ヤング率 $E=160$ GPa、ポアソン比0.3のインコネル718を想定した。得られた実効弾性テンソルと体積分率の近似関数を図4に示す。なお、本ラティスは直交異方性のため独立成分は三つである。

設計対象として、図5に示すインコネル718製の厚さ4 mmの20 x 80 mmの直方体板を縦方向に造形する場合を考える。一番下の4 mmの層は、完全に密な材料でできたベースプレートであると仮定する。図3に示す4 mmのラティスを内部に構成し、つまり部品領域は5x10のラティスで構成され、4 mm角のボクセルメッシュを用いて解析領域を離散化する。部品層では、1つのラティスが1つの有限要素に対応しており、設計変数は各ラティスに設定される。後処理の切断を考慮して、最下層を非活性化した後の、左下部分を除いた右下部分の垂直方向の変位を反り量として評価する。なお、このモデルは固有ひずみのキャリブレーションにも使用する。

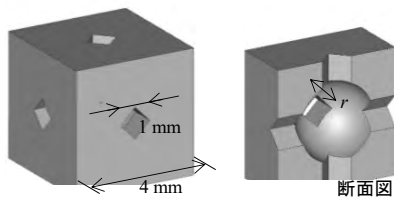


図3 ラティス基本形状

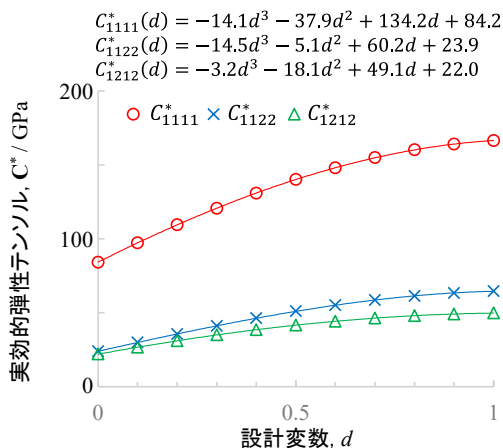


図4 設計変数と弾性テンソルの関係式

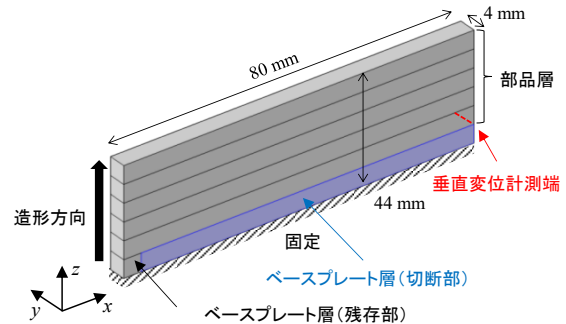


図5 最適化対象概要図

5. 実験手法

造形は著者の研究室が所有する金属積層造形装置Coherent Creator RA (Coherent Inc, USA)を用いて作製する。レーザー出力は107 Wで、集光スポットサイズは40 μmである。スキャンスピードは300 mm/sで、ハッチ間隔は40 μm、造形層の厚さは25 μmである。使用したインコネル718粉末はAmperprint 0181, Ni-SA 718 (ヘガネス社, Sweden)で、粉末の直径分布は15 ~ 45 μmである。ベースプレートには軟鋼製のφ12 x 10 mmの円形プレートを使用する。

試験片を製作後、左側のラティスを除きワイヤー放電加工機で構造の底面を切断する。そして、構造と底面との隙間を隙間ゲージで測定する。なお、レーザー変位計で試験片の右上の変位を監視し、隙間ゲージの挿入による隙間の拡大を防いでいる。各ケースにつき $n=2$ で実験を行う。

なお、固有ひずみは、金属の溶融・凝固に伴う塑性ひずみの近似値であるため、その値は実験に基づくキャリブレーションによって得られる。本研究では、図5に示す準二次元モデルの実験結果とシミュレーション結果から得られる変位とを同定することでキャリブレーションを行っている。すなわち、垂直方向の固有ひずみがゼロであると仮定し、適当な水平方向の固有ひずみを与え、切断後の隙間を導出する。これが計測した隙間の値と一致するまで、固有ひずみの値を最適化アルゴリズムで更新する。

6. 最適設計と実験検証

続いて、最適設計とその実験的検証を行う。初期の設計変数 d は均一に0.5とし、体積率83.4%に対応する。得られた設計変数の二次元分布と、それに対応する三次元形状を図6に示す。上の層ほど密度の高いラティスが配置されており、これは上部の層で

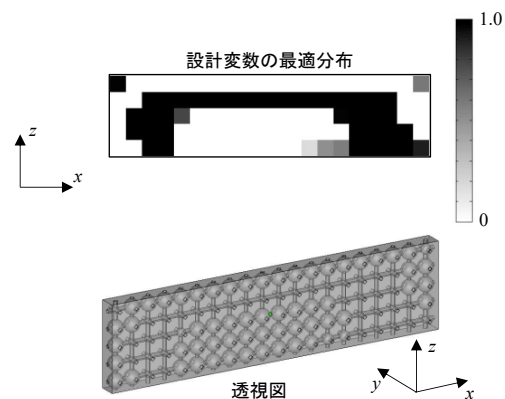


図6 設計変数の二次元最適分布と対応する詳細形状

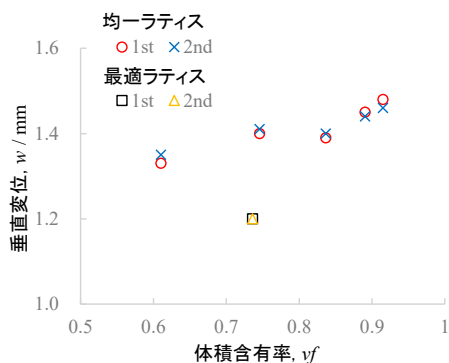


図7 試験片の反り変形値の計測結果。赤丸と青バツは固有ひずみのキャリブレーションのための均一ラティスの計測結果、黒四角と黄三角は最適ラティスの計測結果を示す。

は活性化効果により高いひずみを与えられているため、上層の剛性を弱めることで上層の内部応力の低下を狙ったためであると考えられる。また、全体に生じる曲げに対する剛性も必要であり、結果としてアーチ状の分布が形成されたと考えられる。最適ラティスの体積含有率は73.6%で、これは均一ラティスの設計変数 $d=0.23$ に対応している。図7に最適ラティスと均一ラティスの変形比較を示す。 $d=0$ の均一ラティスと比較して10.4%減、 $d=1$ の均一ラティスと比較して18.4%減と、明らかに小さい反り量が得られていることがわかる。

7. 結言

本解説記事では著者らが開発した、漸化式を用いた固有ひずみ法に基づく傾斜機能ラティス構造の最適設計法を用いて、金属積層造形の残留変形を低減するラティス構造を最適設計し、実際に造形することで実験検証を行った研究を紹介した。最適ラティス構造では均一ラティスよりも明らかに変形が小さくなり、手法の有効性が確認できた。また、近年の追加研究で本手法はレーザーパス最適化と相乗効果があることも確認できた¹³⁾。将来研究としては、他金属への適用、固有ひずみ法自体の精度向上や、更なる他の残留変形抑制手法との相乗効果の検証等が考えられる。

参考文献

1) M. Seabra, J. Azevedo, A Araújo, L. Reis, E. Pinto, N. Alves, R. Santos and J. P. Mortágua, Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components, *Procedia Struct. Integr.*, 1 (2016) 289-296.
 2) A. W. Gebisa and H. G. Lemu, A case study on topology optimized design for additive manufacturing, *IOP Conf. Series:*

Materials Science and Engineering, 276 (2017) 012026.
 3) Z. Xiao, Y. Yang, D. Wang, C. Song, Y. Bai, *Structural Optimization Design for Antenna Bracket Manufactured by Selective Laser Melting*, *Rapid Prototyping J.*, 24 (2018) 539-547.
 4) ISO/ASTM 52911-1:2019(E), Additive manufacturing -Design-Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals.
 5) A. Takezawa, Q. Chen, and A. C. To., Optimally variable density lattice to reduce warping thermal distortion of laser powder bed fusion., *Addit. Manufact.*, 48 (2021) 102422.
 6) J. P. Kruth, J. Deckers, E. Yasa, and R. Wauthl'ere, Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method. *Proc. Inst. Mech. Eng. B J. Eng. Manuf.*, 226 (2012), 980-995.
 7) Q. Chen, H. Taylor, A. Takezawa, X. Liang, X. Jimenez, R. Wicker, and A. C. To., Island scanning pattern optimization for residual deformation mitigation in laser powder bed fusion via sequential inherent strain method and sensitivity analysis., *Addit. Manufact.*, 46 (2021), 102116.
 8) L. Cheng, X. Liang, J. Bai, Q. Chen, J. Lemon, and A. To. On utilizing topology optimization to design support structure to prevent residual stress induced build failure in laser powder bed metal additive manufacturing, *Addit. Manufact.*, 27 (2019), 290-304.
 9) Y. Ueda and M. G. Yuan. Prediction of residual stresses in butt welded plates using inherent strains., *J. Eng. Mater. Tech.*, 115 (1993), 417-423.
 10) N. Keller and V. Ploshikhin. New method for fast predictions of residual stress and distortion of am parts., In *Proceedings of the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, (2014) 1229-1237.
 11) A. Takezawa, A. C. To, Q. Chen, X. Liang, F. Dugast, X. Zhang, and M. Kitamura. Sensitivity analysis and lattice density optimization for sequential inherent strain method used in additive manufacturing process. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 370 2020, 113231.
 12) K. Svanberg. The method of moving asymptotes- a new method for structural optimization., *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 24 (1987), 359-373
 13) A. Takezawa, H. Guo, R. Kobayashi, Q. Chen, and A. C. To., Simultaneous optimization of hatching orientations and lattice density distribution for residual warpage reduction in laser powder bed fusion considering layerwise residual stress stacking., *Addit. Manufact.*, 60 (2022) 103194.



3D積層造形前のバーチャルテスト：品質保証と技術伝承のための知識融合型CAEへの期待

高野 直樹
慶應義塾大学理工学部機械工学科

1. はじめに

メタル3D積層造形が我が国の幅広い産業界や医療分野に普及してから日も浅く、シミュレーション技術の急速な進歩が望まれるが、特に造形プロセスシミュレーションはマルチスケール・マルチフィジックス問題^{(1),(2)}を解く必要があるため難題である。シミュレーションのおかげで新しい製造法が提案されたということは筆者の知る限り過去に無く、いつも後追いでシミュレーション技術開発研究を行っているのは歯がゆいところである。とはいえ、メタルシートフォーミングのように、長年の研究開発の努力により、製造現場で使えるツールとなった歴史を思い出し、多くの研究者がメタル3D積層造形のためのCAE技術開発に参入されることを願ってやまない。数値的アプローチにはいろいろな切り口があると思われるので、本稿では、設計段階で、すなわち造形前に、性能評価、リスク分析を行い、造形品の品質保証を行うためのバーチャルテストとしてのシミュレーションについて述べる。

2. 医療デバイスの疲労寿命予測の事例

高品質が求められる医療分野において、特に、患者別にテイラーメイドする医療デバイスに対して、製造コスト削減という目標も同時に達成するには、複数の造形品を製造して臨床応用前に実験により強度などのチェックを行うことは避けたい。そこで、患者ごとに形状、寸法の設計を行うクラスプ(図1)という歯科補綴物の疲労寿命予測を行った事例^{(3),(4)}を紹介する。

疲労寿命は、有限要素解析 (FEA) により得た応力値、ひずみ値とSmith-Watson-Topper (SWT)の式を用いて予測した。L-PBF (laser powder bed fusion) により造形した純チタン (commercially pure Ti, grade 2) のクラスプに対する疲労試験により得たSWTの式の中のパラメータを文献⁽³⁾に与えており、設計段階でFEAを行うだけで疲労寿命が予測可能である。図2は、図1左図のClasp Aに対する予測結果 (実線) と疲労試験結果を示している。破線で示した95%信頼区間もFEA結果と定数だけで簡単に描くことができるよう工夫した⁽⁴⁾。本手法を図1中の別患者用のClasp Bに適用し、描いた疲労寿命と、そのばらつきの予測結果は、疲労試験結果 (N=22) を包含してよく一致しており、妥当性を示すことができた⁽⁴⁾。

図2の補足説明として、横軸の疲労寿命には、患者が1日3回の着脱を10年間繰り返しても把持力が発揮されるように、 10^4 回以上の性能が要求される。図2の縦軸がストロークであるのは、クラスプのアームを押し広げる動作は、片側のアームにストロークを与える疲労試験^{(3),(4)}を行ったためである。臨床で想定されるストロークの範囲では、AMによる純チタン製クラスプの疲労寿命は十分であった。なお、疲労試験片のチャッキングのため、クラスプには円筒形のチャック部を一体造形した (図3)。円筒部の造形精度確保のため、造形姿勢は図3右図としたが、チャック部が無

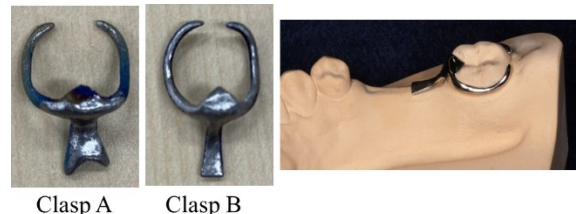


図1 患者別にテイラーメイドする歯科補綴クラスプ

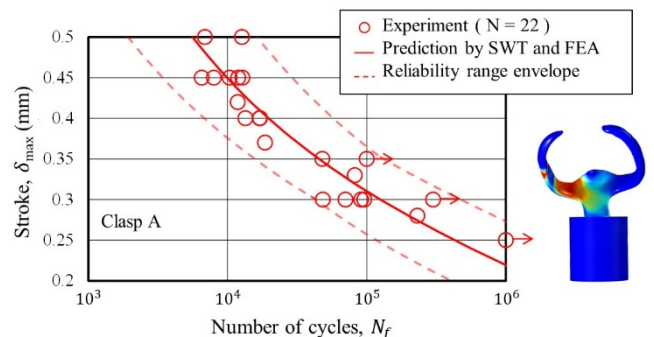


図2 Clasp Aに対する疲労寿命予測結果と疲労試験結果

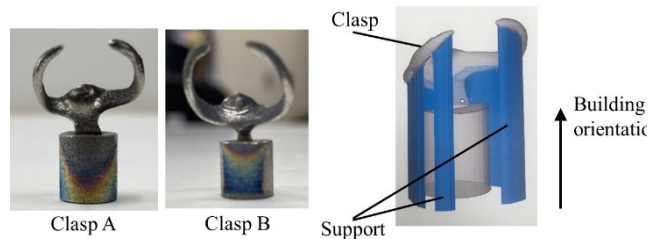


図3 疲労試験用のチャック部つきクラスプ試験片

い図1のクラスプに適した造形姿勢とは一致しない。造形プロセスの違いによる影響⁽⁵⁾について検討を続けているところである。

3. 多孔質サポートの幾何的造形不良を考慮した等価物性値

上記の造形姿勢とサポート構造は、数多くの造形プロセスパラメータの中でも、製品ごとにユーザ (造形技術者) が決定しなければならない重要なパラメータである。L-PBF方式の3D積層造形機EOS M290と、オーバーハング形状に対するサポート設定のためのソフトMagics (Materialise) を用いており、基本的なサポートは2Dラティスの多孔質体を使用している。

図4に、2Dラティスの設計パラメータであるストラット幅 w とスペーシング s 、およびチタン合金 (Ti-6Al-4V) の試験片とマイクロCT画像を示す⁽⁶⁾。ストラット幅は一定ではなく、図5のヒストグラムのようにばらつき、Magicsでの設定値0.1 mmにして平均値が0.108 mmであった。計測点 (図中のNumber of data) は1万点を越えている。このような、いわば幾何的な造形不良 (geometrical imperfection) はAMにつきものである。スペーシングは0.3 mm ~ 1.0 mmの間で多孔質サポートの密度を変化させることができる。

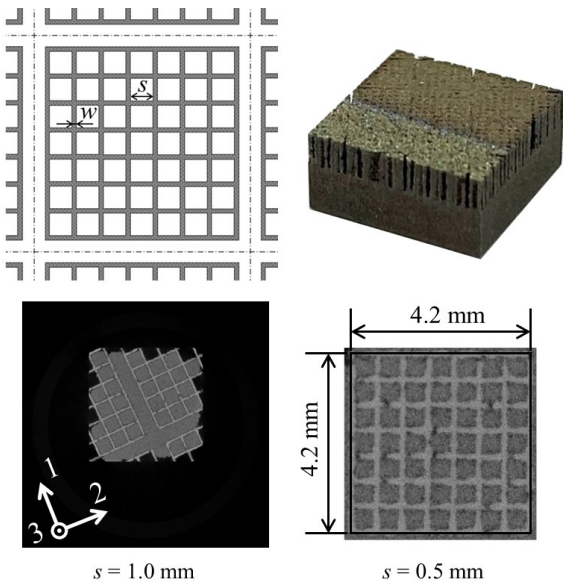


図4 多孔質サポート内の2Dラティス構造の設計パラメータ、マイクロCT画像とストラット幅のばらつき

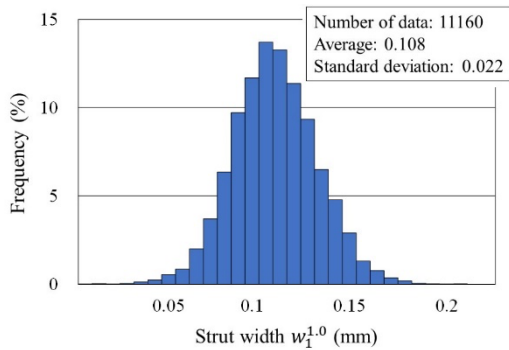


図5 不連続部のパラメータ化と統計的計測データ

さらに、図4右下のマイクロCT画像から、ストラットには欠陥（本稿では不連続部：disconnectionと称する）が見られるため、欠陥のモデル化と寸法のパラメータ化を行った。パラメータ間の相関に注意して統計的な計測を行った。統計的データベースに基づき、乱数により造形不良を配置したFEMモデル（ボクセルモデル）の一例を図6に示す。ランダムネスを含む7×7の繰り返し構造に対し、イメージベース構造解析ソフトVOXELCON（くいんと）を用いて均質化法によるマルチスケール解析を行い、サポート構造の等価なヤング率、せん断係数と熱伝導係数を予測した結果の一部を図7に示す。横軸は上記のスペーシングをストラット幅で除した s/w であり、図の右側ほどサポートの密度が低い。点線のCADデータに基づく等価物性値と比べ、実際に造形されたサポート構造の等価物性値は概して低めの値となっていることがわかった⁽⁶⁾。今後は、3D積層造形プロセスシミュレーションでサポート構造に図7の値を利用することにより、その解析精度向上が期待される。

4. 幾何的造形不良と物性値のばらつきを考慮した3Dラティス構造の特性予測

前述のサポート内の2Dラティス構造と同様に、図8に示す3Dラティス構造においても種々の幾何的精度の問題が報告されている。本研究では $t = 1$ mm、 $d = 4$ mmとした。文献⁽⁷⁾では、アルミ

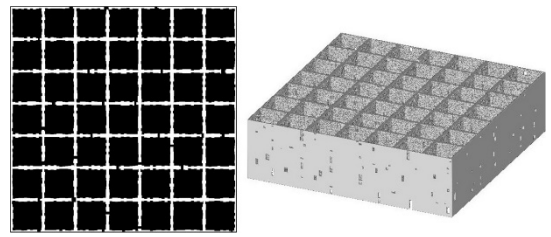


図6 造形不良（ストラット幅のばらつきと不連続部）を統計的に含むFEMモデル

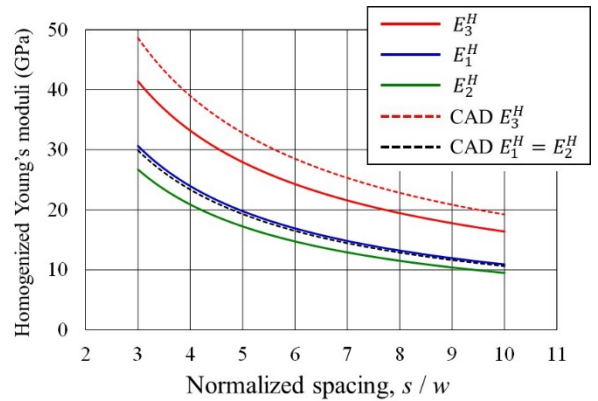


図7 多孔質サポート構造の等価なヤング率と熱伝導率

合金 (Al-Si10-Mg) に対し、ベッド温度、レーザ走査速度、造形姿勢およびサポートの影響を見出し、圧縮特性の差を実験により明らかにした。本稿では、マルエージング鋼による造形で見られた顕著な造形不良を考慮し、さらに物性値のばらつきも確率的に考慮したシミュレーション⁽⁸⁾を紹介する。

造形姿勢とサポートの決定には、ベッドへの熱伝導と造形品の熱変形、積層数と造形時間、未焼結粉末の除去、サポート除去の容易さなどの因子を考える必要があり、造形技術者の経験とノウハウに頼っているのが現状である。多孔質サポートの機械的、熱的物性値は前章の通り、多孔質体の密度の関数となるので、さらに複雑である。マルエージング鋼を用いた文献⁽⁸⁾では、国内の造形受託サービス企業3社に同じSTLデータを送付して発注したが、造形姿勢とサポートは図9の通り異なっていた。A社とB社の納品物には顕著な造形不良が見つかったため、マイクロCTにより観察した。3Dラティス構造を形成するストラットの造形不良は、Kinkモデル、Notchモデル、Holeモデルに分類してパラメータ化し、各社の造形品ごとに統計的計測を行い、前章と同様に乱数により造形不良を含むFEMモデルを生成した。

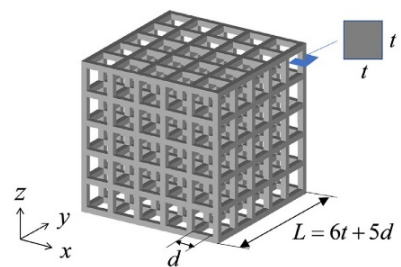


図8 3Dラティス構造

幾何的造形不良に加えて、3D積層造形された材料の物性値のばらつきも考慮した。国内の造形受託サービスが始まって間もない時期に行った文献⁽⁸⁾の研究では、造形品のみかけの密度のばらつきが3%程度であったことから、ヤング率も同様のばらつきであると仮定した。物性値（物理パラメータ）のばらつきは、物理パラメータに対するランダムパラメータが3%以下であれば利用可能⁽⁹⁾な一次漸近展開近似に基づく確率均質化法⁽¹⁰⁾により、自作のソフトウェアで解析した。モンテカルロシミュレーションよりはるかに短時間で解析できるのがメリットである。解析結果と圧縮試験による測定結果を図10に示す。赤色の実験データは試験片が1本のみであり、エラーバーがついておらず、逆に青色のシミュレーションには $\pm 3\sigma$ のエラーバーを示している。定量的には、文献⁽⁷⁾や前章の通り、ストラット断面積の影響も考慮する必要があると後にわかったが、定性的には実験結果を表現できた。

マルエージング鋼の物性値のばらつきは、後にダンベル型引張試験片を作成して実験を行った。未公表であるが、通常の再利用の粉末と未使用の粉末の試験片の実験結果を総合しても、引張強度の変動係数（COV）が1.7%であり、FPSH法の守備範囲内であったことが後にわかった。図10の結果は、プロセスパラメータを改善できなければ次も同じことが起こると仮定した事前予測になっており、造形不良やばらつきは不可避として許容した場合には、要求性能を下回らないように設計するための判断材料となる。

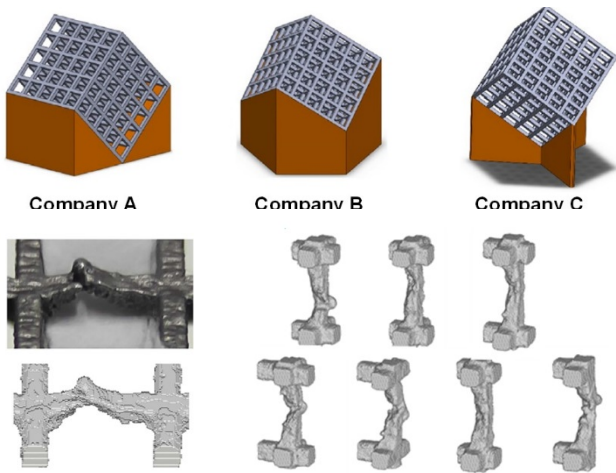


図9 3Dラティス構造の造形姿勢とサポート構造およびマイクロCTによる造形不良の観察

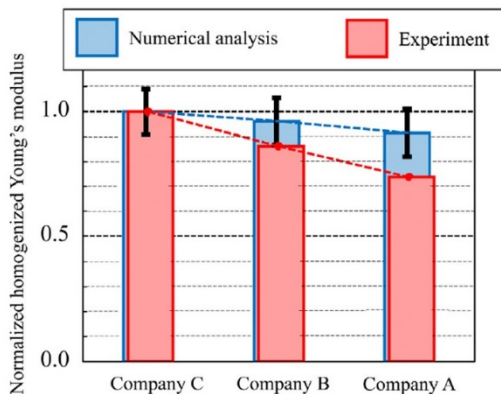


図10 3Dラティス構造の均質化ヤング率の確率的予測（青色）と実験結果（赤色）

5. 円孔の造形不良の積層角度依存性

部品中の円孔は、回転軸のため、あるいはボルト穴として組立に利用するほか、軽量化のためにも設けられることがある。本章では図11のアルミ合金（Al-Si10-Mg）の円孔つき試験片を用いた事例⁽¹¹⁾を紹介する。積層角度 θ を $52^\circ \sim 90^\circ$ の間で変化させたところ、円孔は図12のように積層角度に応じてゆがんだ形状となる。最小リガメントを用いて円孔の造形不良をパラメータ化し、前記の事例と同様に統計的データ（図13）を取得することで、図14のようなFEMモデルを確率的に生成することができる。造形プロセスパラメータである積層角度に関して内挿可能なデータとして整理することができた。ダンベル型試験片の静的引張試験のバーチャルテストでは、CADデータに基づく応力集中と、円孔のゆがみを考慮した確率的予測の間には明瞭な差異が見られた（図15）。

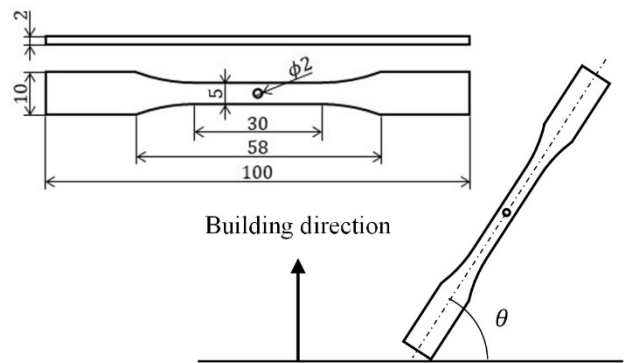


図11 円孔つきダンベル型引張試験片と積層角度

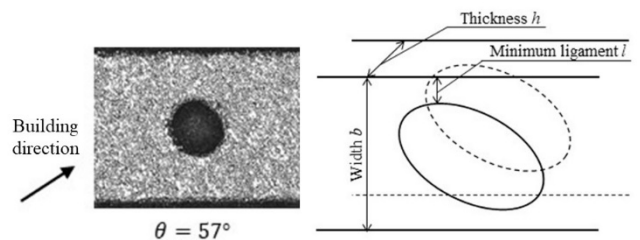


図12 造形品の円孔のゆがみとパラメータ化

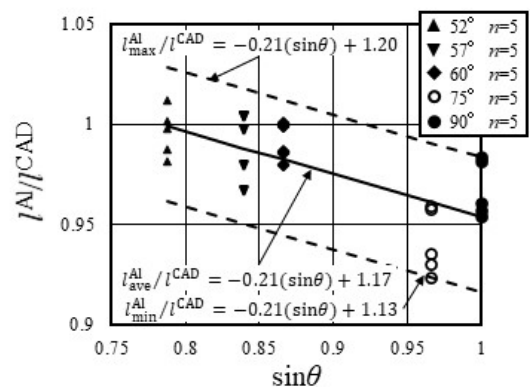


図13 Minimum ligamentと積層角度の相関性（アルミ合金）

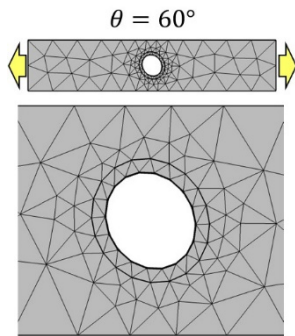


図14 統計的データベースに基づく確率的FEMモデルの例

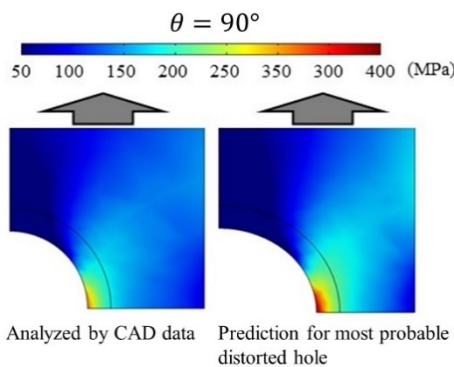


図15 引張試験のバーチャルテスト(左：CADデータに基づく解析、右：計測データに基づくバーチャルテストの結果)

別途 行ったアルミ合金の物性値の計測結果をもとにSwiftの構成則を用いた弾塑性解析では、物性値のばらつきも考慮した。円孔の幾何的造形不良の影響と物性値のばらつきの影響は、およそ6：4であり、両者とも無視できないばらつきの因子であることがわかった⁽¹¹⁾。さらに、アルミ合金に加え、1章と同じ純チタンでも調査したところ、積層角度依存性は純チタンの方が小さかった。現状のデータからは、セルフサポートされる円孔の造形精度は材の密度が関係しているのではないかと予想⁽¹²⁾、さらに密度が高い銅合金⁽¹³⁾での検討も開始したところである。

6. AMのための知識融合型CAEへの期待

上記の内容は、積層角度やサポート内2Dラティス構造設計パラメータとモデル化された造形不良の相関性の統計的データベース、ならびに、材料の物性値のばらつきのデータという造形品の実験により得た“知識”に基づいた確率的シミュレーションの結果である。CADデータに基づく設計と、実際に3D積層造形した造形品との性能のギャップは、こうした確率的シミュレーションによるバーチャルテストにより、設計段階で、つまり造形前に事前予測できると期待できる。

造形不良は失敗の経験知であり、造形プロセスパラメータの何かを変更することで改善できると期待できる。これまで熟練の造形技術者が持つノウハウは、曖昧な表現にとどまり、また、必ずしもサイエンティフィックではないことも多かったが、積極的に定量的かつ数理的な表現をするために、“知識”をランダムパラメータ化してはどうだろうか。そうすれば、計測データに基づく“知識”は大概±2σの範囲に入っているはずであるが、確率的シミュレーションでは3σや4σといった裾野分布への拡張や外挿も可能になると期待できる。偏微分方程式を解くという厳格な、逆

に、融通のきかない計算力学と、曖昧な“知識”は相性が悪いかもしれない。その壁を破るべく、図16、図17には、筆者が考えている“知識”群とCAEを組合せる「知識融合型CAE」の姿を示す。

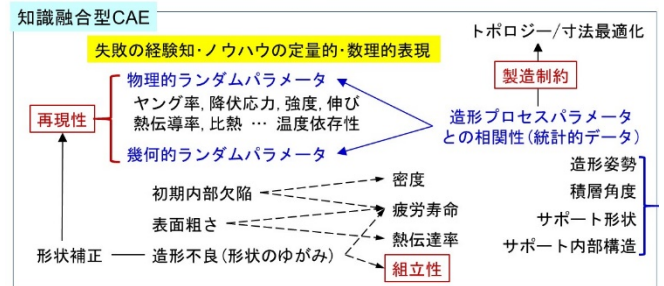


図16 CAEと融合したい“知識”群

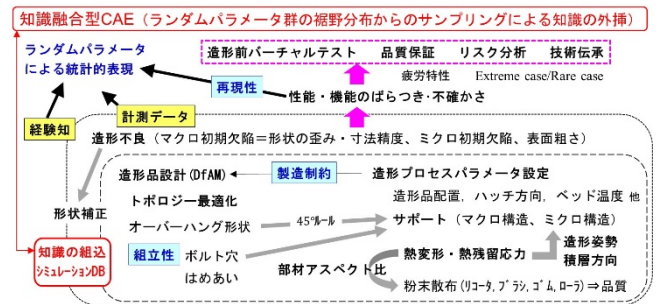


図17 製造制約、組立性、再現性の知識融合型CAEの将来像

“知識”は、オーバーハング形状に対するサポート設置の45°ルールのような「製造制約」に関する知識、円孔のような「組立性」に関する知識、ばらつきに関する「再現性」に関する知識に集約した。複雑形状の一体造形が可能なAMであるが、他の部品との組立は必要である。2章の歯科クラスプでも、疲労試験用のチャック部の円筒の幾何的精度は最優先で造形したため、本来のクラスプの造形姿勢とは異なる。製造制約や再現性に関する論文は多数あるが、組立性も無視できないことを強調したい。

この実現には、実験データが必要であり、大変と感じられるかもしれないが、自分で3Dプリンターを導入したら、造形ノウハウを取得するために誰もが行うことである。むしろ、造形不良やばらつきという現象を巧みにパラメータ化する技術⁽¹⁴⁾が必要である。補間可能な造形プロセスパラメータとの相関性を表現するパラメータ化、FEMモデルに反映できるパラメータ化には、やはり豊富な経験が必要という矛盾も秘めているが、これが実現できれば、経験の内挿により未経験の造形でも品質保証の根拠とすることができると期待できる。安全係数の値をフィジックスベースで、サイエンティフィックに決定するのは容易ではない。特に宇宙・航空や医療分野における品質保証には、AMに特有の“知識”の内挿に基づくバーチャルテストと安全係数の2本立てで万全を期してはどうだろうか。

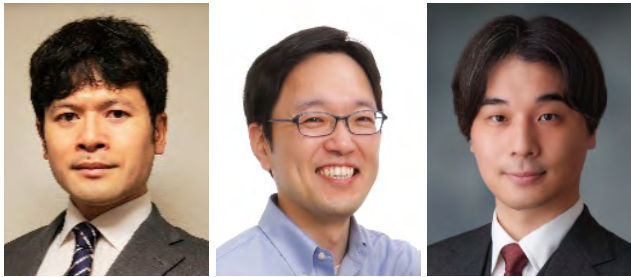
“知識”の外挿を可能とするには、多次元ランダムパラメータ空間内のサンプリングを支援する可視化などの技術⁽¹⁵⁾も必要である。内挿が基本でブラックボックス化しているAI / DL / MLとは違い、データに基づく根拠が明示的な外挿には核心的設計案の創出の可能性という夢もあるのではないだろうか。独自の“知識”となる実験事実をデータベースに加えれば、たとえばサポートの45°ルールは材料や部材寸法ごとに異なるので、材料によっては35°でも大丈夫⁽¹³⁾という実績ベースの“知識”があれば、45°ルール打破は外挿ではなく内挿である。このように、熟練

エンジニアの属人的な技術をランダムパラメータ化とサンプリング技術で数理化、定量化できれば、バーチャルテストによる品質保証だけでなく、AM熟練者の技術伝承にも貢献できるものと期待している。

参考文献

- (1) M. Bayat, W. Dong, J. Thorborg, A.C. To, J.H. Hattel, A review of multi-scale and multi-physics simulations of metal additive manufacturing processes with focus on modeling strategies, *Additive Manufacturing*, 47 (2021), 102278.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102278>
- (2) Y. Zhang, Y.-G. Jung, J. Zhang, *Multiscale Modeling of Additive Manufactured Metals*, Elsevier, (2020).
- (3) K. Odaka, S. Kamiyama, H. Takizawa, N. Takano, S. Matsunaga, Comparison of the fatigue life of pure titanium and titanium alloy clasps manufactured by laser powder bed fusion and its prediction before manufacturing, *Journal of Prosthodontic Research*, *Journal of Prosthodontic Research*, 67 (2023), pp.626-632.
https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_22_00207
- (4) K. Odaka, S. Kamiyama, N. Takano, Y. Uematsu, S. Matsunaga, Fatigue life prediction considering variability for additively manufactured pure titanium clasps, *Journal of Prosthodontic Research*, advance online publication (2023).
https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_23_00074
- (5) 菅野, 高野, 小高, 松永, 純チタン歯科補綴クラスプの3D積層造形における造形姿勢と幾何的精度に関する研究, 日本機械学会第30回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2023), (2023), MPC502.
- (6) 大嶋, 高野, 小高, 松永, チタン合金3D積層造形における多孔質サポート構造のCT-FEMによる等価物性値の数値予測, 日本材料学会第72期学術講演会, (2023), No. 319.
- (7) 高野, 瀧澤, 伊藤, 小高, 松永, 阿部, 3Dプリンティング技術により積層造形されたアルミ合金ラティス構造の圧縮特性に関する研究, *材料*, 68-4 (2019), pp.351-357.
<https://doi.org/10.2472/jsms.68.351>
- (8) N. Takano, H. Takizawa, P. Wen, K. Odaka, S. Matsunaga, S. Abe, Stochastic prediction of apparent compressive stiffness of selective laser sintered lattice structure with geometrical imperfection and uncertainty in material property, *International Journal of Mechanical Sciences*, 134 (2017), pp. 347-356.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.08.060>
- (9) L. Degeneve, N. Takano, Influence of higher orders of Neumann expansion on accuracy of stochastic linear elastic finite element method with random physical parameters, *Mechanical Engineering Letters*, 6 (2020), Paper No. 20-00228.
<https://doi.org/10.1299/mel.20-00228>
- (10) P. Wen, N. Takano, S. Akimoto, General formulation of the first-order perturbation based stochastic homogenization method using many random physical parameters for multi-phase composite materials, *Acta Mechanica*, 229-5 (2018), pp. 2133-2147.
<https://doi.org/10.1007/s00707-017-2096-9>
- (11) 田中, 高野, 瀧澤, アルミ合金とポリアミドの3Dプリンティングによる円孔つき平板の幾何的精度と積層角度の相関性, *材料*, 72-5 (2023), pp.384-391.
<https://doi.org/10.2472/jsms.72.384>
- (12) 田中, 高野, 瀧澤, 金属3D積層造形による円孔つき平板の幾何的精度に関する研究, 日本機械学会M&M2022材料力学カンファレンス, (2022), OS0519.
- (13) 水野, 高野, 阪井, 森川, 神谷, 原, 3D積層造形に適した超電導加速器によるMo-99製造用水冷式電子ビームコンバータの設計, 日本機械学会第36回計算力学講演会, (2023), OS-2703.
- (14) K. Hagiwara, S. Ishijima, N. Takano, A. Ohtani, A. Nakai, Parameterization, statistical measurement and numerical modeling of fluctuated meso/micro-structure of plain woven fabric GFRP laminate for quantification of geometrical variability, *Mechanical Engineering Journal*, 4-4 (2017), Paper No. 17-00053.
<https://doi.org/10.1299/mej.17-00053>
- (15) 高野, 石島, FRPの確率的RTM成形プロセスシミュレーションにおける裾野分布の解析, 日本機械学会論文集, 83-851 (2017), Paper No.17-00216.
<https://doi.org/10.1299/transjsme.17-00216>

部門からのお知らせ



M&M・CMD若手シンポジウム2023
開催報告

竹澤 晃弘 早稲田大学 (写真左)
 穴戸 信之 近畿大学 (写真中)
 森田 直樹 筑波大学 (写真右)

日本機械学会M&M・CMD若手シンポジウム2023が2023年8月7日(月)から9日(水)の日程で、石川県金沢市にて開催された。本シンポジウムは、材料力学部門でほぼ3年に1度開催されていた若手シンポジウムを、本年度から新たな試みとして日本機械学会分野連携企画として、材料力学部門と計算力学部の合同開催としたものである。計算力学部門からは竹澤と穴戸先生が実行委員として、森田先生が参加者として関わった。この報告記事では三者三様の感想を伝えさせて頂きたい。シンポジウムの参加対象者は機械学会員の40歳未満(申込時)の若手研究者(博士後期課程の学生も可)であり、若手研究者を中心に、中堅研究者、そしてシニアの研究者が、じっくりと意見交換を行える会となっている。元々材料力学と計算力学は親和性が高く、実験と計算の両方を行った上で両部門の講演会に参加しているという研究室は珍しくないとと思われるが、例えば計算力学部門の数値流体力学分野の研究などは材料力学とは全く異なる分野であり、若手研究者の交流を通じた異分野融合が期待された。KKRホテル金沢を講演会場と宿泊場所とし、合宿形式で昼夜を問わず研究に関する議論を行うという古き良きスタイルのシンポジウムである。

講演者数は32名であり、申込時に材料力学部門と計算力学部門のどちらで主に活動しているか調査したのだが、19名が材料力学部門、8名が計算力学部門、5名が両方という解答だった。すなわち、講演者のうち約4割が計算力学部門に関連する参加者であり、初の合同開催としてはなかなかの数字であったのではないかと。

講演はシングルセッションを中心に、一部のみパラレルセッションで行われ、ほぼ全員がそれぞれの発表を聞くことができた。若手同士の活発な議論はもちろんのこと、時にはシニアの先生から厳しい質問も飛び、決して仲良く交流するだけではない、

適度に緊張感があるセッションとなっていた。

また、基調講演として静岡大学の島村佳伸先生から、研究の話ではなく、現在の国立大学の実情や、その中で研究者としてどうあるべきかという、大学所属の若手研究者にとっては研究に匹敵する大事な内容を講演頂いた。このような議論は教員間の雑談の中で行うことはあれ、シンポジウムの公式な講演として聞くことは極めて珍しい。しかし、大学研究者はキャリアを積み途中で多かれ少なかれ、大学のマネジメントに係ることになる。たとえ国立大学とはいえ、ただ国の要求に隷従するような姿勢は、真に学生や科学技術の理想の将来を探求する研究者として望ましいとは言えない。そのため、大学の運営や現状に関して公式に議論する場はもっと用意されても良いのではないだろうかと思われた。

以上、会中に行われた講演について述べたが、このシンポジウムの醍醐味は日中の活動ではない。二泊三日の会期中、毎夜懇親会が行われ、その後は深夜まで部屋での二次会が続く。その中で当然研究交流もあるが、大半はこの場でしかできない雑談に興じる。筆者は今回穴戸先生と一緒に計算力学部門側の幹事として参加し、穴戸先生とは初対面であったが、二年違いで同大学同学科の出身ということで思い出話に花が咲いた。このような夜通しの雑談は正に学生時の研究室の雰囲気であり、久々に学生に戻ったような気持ちがあった。そもそも合宿形式のシンポジウムに参加したこと自体初めてであり、非常に新鮮な体験であった。

以上のように、本会は計算力学部門の若手研究者の皆様には研究者としての視野を拓ける大変良い機会であり、今後の参加を強くお勧めする。最後に、本会の実現に至ったのは元計算力学部門長である慶応大学の高野直樹先生が当時の材料力学部門長であった名古屋大学の荒井政大先生に掛け合ってもらったためとお聞きしている。そのご尽力に厚く御礼を申し上げ、私の



会場ロビーで談笑する実行委員達。材料力学部門の皆さんは我々を暖かく迎え入れて頂き、直ぐに打ち解けた。



実行委員長の工学院大学小川雅先生による開会の挨拶。



講演の様子. 講演者は冒頭に必ず自己紹介する.

感想を締めさせて頂く。(竹澤)

本若手シンポジウムは今回はじめて材料力学部門と計算力学部門で合同開催された。著者は学生時代から両部門のあいだをふらふらと彷徨っているが、今回畏れ多くも計算力学部門側の幹事として参加させていただいた。失礼を承知で申し上げるなら、幹事としてお声がけいただいたときに初めて本シンポジウムの存在を知り、さらにはそこにシッカリした歴史があることに驚いた。よくよく伺ってみれば、私が学生であった20年以上前にも開催されていたそうだ。その傍でアンテナに引っ掛けることもなく一度も参加しなかったことは、当時の自分自身に対して大変恨めしく思う。なぜ恨めしいのかと問われれば、それは首尾一貫してよいシンポジウム、よい交流会だったからである。

本シンポジウムは慣例的にその参加者が次回もしくは次々回の幹事という流れがある。前回までゲストであった”前若手”研究者たちが幹事として自分達の記憶を頼りに、よりよい催しにしようとしてあてもないこうでもないと準備していたのを見るにつけても、若手から見て有益なシンポジウムであろうことは容易に想像できる。加えて、若手研究者がシニア研究者と密にコミュニケーションを取れる絶好の機会でもあった。このシンポジウムでお会いできる、準備から当日までご尽力いただいた”元若手”研究者の方々は常日頃から若手を気にかけて下さる諸先輩方であり、そのような有難い先輩方と膝を突き合わせて「研究とは」はたまた「研究者とは」という話を伺える機会は師弟関係でもない限りそうそうない。シンポジウムの初日が交流会から始まるという粋な構成は本シンポジウムの雰囲気や説明してくれる最たるものではないだろうか。

肝心の中身も、若手研究者の自己紹介をも含めた研究発表、島村佳伸先生(静岡大学)の「地方国立大学の材料力学教育

者・研究者としての働き方の一例」というこれまた若手研究者必聴の、他所では聴けないような貴重な基調講演、と“ならでは”尽くしてあった。

ただ、やはり計算力学部門からの参加者が少ないのは大変残念に感じた。これは幹事である著者の力不足であったと反省するとともに、数年後に開催されるであろう次回シンポジウムへの参加資格をお持ち(残念ながら年齢制限有)の若手研究者の皆様方には是非とも今から参加を検討していただき、不明な点、不安な点があれば著者らに遠慮なくお問い合わせいただきたい。(穴戸)

筆者は前回、2019年度に静岡県伊豆の国市で開催された日本機械学会材料力学部門若手シンポジウム2019以来2度目の参加である。今回の若手シンポジウムは材料力学部門と計算力学部門の合同開催であり、日本機械学会分野連携企画としての側面を有している。筆者は博士課程在籍時に東京大学 奥田洋司先生から、その後助教として東京大学 吉川暢宏先生からご指導頂いた。両部門に馴染みのある筆者にとって、本シンポジウムは分野にとらわれず、ご経験豊富な先生方や若手研究者と議論・交流できる非常に有意義なものになった。また、この4年間で社会情勢が大きく様変わりした結果、オンラインでの講演会・シンポジウムへの参加が初めてだとの参加者もあり、印象的であると同時に、交流を広く促進できる有益な機会であると感じた。

基調講演では、静岡大学 島村佳伸先生より「地方国立大学の材料力学教育者・研究者としての働き方の一例」の題目の元、ご講演頂いた。特に、研究室を立ち上げたばかりの筆者にとって、大学教育と研究遂行、共同研究や外部資金取得など、貴重なご経験を交えた内容はたいへん鮮明に映った。一般講演では、参加者が盛況なことからパラレルセッションが生まれ、全ての参加者の講演を聴講できない点は悔やまれたが、最終的には懇親会などを通して交流を深めることができた。本シンポジウムは元々材料部門のシンポジウムとして企画・運営されていた経緯から、計算力学部門の若手講演者がまだまだ少ないと感じた。両部門から参加者が増え、更に研究交流の輪が広がっていくことに期待する。

若手シンポジウムは初日の交流会から始まる。初日の交流会を通して、若手・中堅・シニアの先生方の壁を一気に解き放ち、続く講演会で白熱した議論ができるのは、若手シンポジウムの醍醐味であると思う。最後に、若手シンポジウムの開催に尽力いただいた開催委員長 筑波大学 松田哲也先生、実行委員長 工学院大学 小川雅先生を始めとする実行委員会の先生方に御礼申し上げ、結びの言葉とさせていただきます。(森田)



二次会は部屋飲みで深夜まで続く。本会の醍醐味である。



参加者による記念写真。皆さんありがとうございました。



2023年度年次大会の開催報告

伊井 仁志
 東京都立大学 システムデザイン研究科 機械システム工学域

2023年度年次大会が2023年9月3日(日)から6日(水)まで、東京都立大学南大沢キャンパスにて開催された(写真1)。全体の参加者は1,608名(うち正員883名、特別員64名、会員外99名、学生員538名、一般学生24名)。セッション数は64件、特別講義2件、特別行事企画は43件、一般発表件数は822件(うち口頭459件、ポスター363件)となり、約30室に分かれて、多数の講演が行われた。会期中、一時強い雨が降ったが、それ以外は好天に恵まれた。5日は横浜線の遅延があり午前のセッションに少し影響するといった一幕があったものの、おおむね滞りなく全ての行事が進行した。昨年度に引き続き、全員が事前参加登録を済ませ、準備した参加証QRコードを用いて受付する形式がとられ、初日からスムーズに受付を済ませることができた。筆者は計算力学部門関連のセッションを中心に講演室を渡り歩いた。

行われた(写真2)。本フォーラムを拝聴し、デジタルツイン構築において計算力学分野が果たす役割は今後ますます大きくなることを実感した。



写真2 先端技術フォーラム「人・社会の不確かさ・複雑さを含めた拡張デジタルツインの構築を目指して」の総合討論

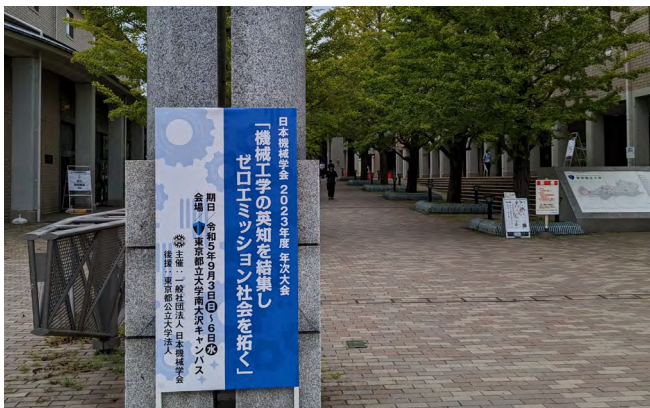


写真1 会場キャンパス正門と学会立て看板

計算力学部門関連のセッションとして、「J011 安心安全な水素社会を創る流体解析と計測技術」、「J052 燃料電池・二次電池とナノ・マイクロ現象」、「J121 IDCAE・MBDと物理モデリング」、「J122 解析・設計の高度化・最適化」、「J241 医工学テクノロジーによる医療福祉機器開発」、「W241 循環器疾患の治療デバイス・治療法の進展と工学への期待」が企画され、どのセッションも20~30名ほどの参加者があり、活発な質疑応答が行われていた。また、計算力学部門が主となった特別行事企画・先端技術フォーラム「F011 人・社会の不確かさ・複雑さを含めた拡張デジタルツインの構築を目指して」では、モノ(計測、解析モデル)とコト(人、社会のモデル、複雑ネットワーク)の不確かさを含めた拡張デジタルツインという概念が紹介され、関連する6件の講演があった。近年の機械学習分野の動向、人を意識した創造(発想)に展開するための構想、力学原理にもとづく感情の数理的表現(感情力学)、医工学分野における患者個別解析の不確かさ解析、フライトデータを用いた航行制御やバイオプロセス制御におけるデータ同化、製品設計やプロセス知の記述などについて最新の研究成果が紹介され、講演者らによる総合討論が

特別講演セッションでは、日本機械学会伊藤宏幸会長(ダイキン工業株式会社)の会長挨拶、山本良一大会委員長(東京都立大学法人理事長)の大会委員長挨拶があり、続いて山地憲治氏(公益財団法人地球環境産業技術研究機構理事長)、大橋隆哉氏(東京都立大学学長)による2件の特別講演が行われた(写真3)。山地氏の講演では「ゼロエミッション社会におけるエネルギーの姿」という題目で脱炭素を実現するためのエネルギーシステムに関する様々な取り組みが紹介され、機械工学分野への期待についてまとめられた。大橋氏の講演では「宇宙の謎を探る」という題目でブラックホールと次期X線天文衛星に関する紹介があり、それら観測に対する機械工学分野の重要性を認識させる講演であった。最後に、2024年度年次大会開催に関して松下正史次期実行委員長(愛媛大学)より紹介があった。次期大会は、2024年9月8日~11日に愛媛大学城北キャンパス(松山市)で開催される。キャッチフレーズは「機械工学で実現する日本産業変革」、テーマは「環境にやさしいエネルギー変革」、「AIを活用したデジタル変革」、「未来を担う技術人材の育成」である。

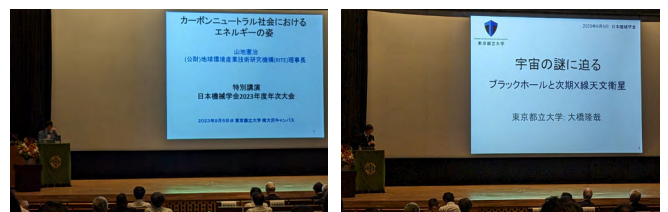


写真3 山地憲治氏(左)と大橋隆哉氏(右)の特別講演

技術展示会場では、企業を中心とした21件の出展があった。時間による来訪者のばらつきが多少あったものの、概ね盛況であった(写真4)。



写真4 技術展示会場

ポスターセッションでは、3日間にわたり各90分のセッションが5つ生まれ、学生を中心とした多くの発表があり、密な議論が交わされていた(写真5)。筆者もいくつかのポスターで質問し、有意義な議論を行うことができた。学生が一生懸命かつ真摯に対応している姿が印象的であり、対面開催の雰囲気が戻ってきたことを実感した。

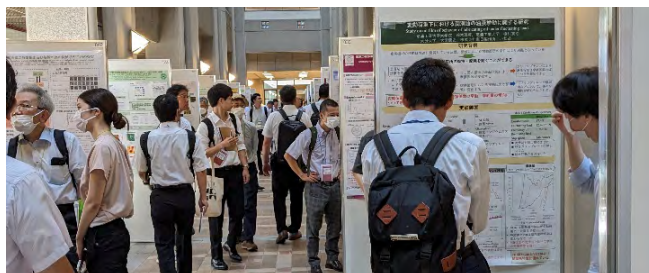


写真5 ポスターセッション

今年度は4年ぶりに4部門合同の部門同好会(計算力学部門、材料力学部門、流体工学部門、熱工学部門)が開催された。筆者

含め各部門代表委員が幹事を務め、大学・企業含む19名の方々に参加いただいた(写真6)。部門講演会では顔を合わすことのない方々と交流することができ、筆者自身も大変楽しい時間を過ごすことができた。写真掲載を承諾いただいた皆様にはこの場を借りてお礼申し上げます。



写真6 4部門合同の部門同好会(計算力学部門、材料力学部門、流体工学部門、熱工学部門)。写真右奥に萩原部門長(佐賀大学)、店橋副部門長(東京工業大学)、平野運営委員(ダイキン工業株式会社)

全体を通じて、新型コロナウイルス感染症が5類感染症に移行した後の初めての年次大会となったが、オンラインを活用しつつコロナ以前の対面の良さが感じられた大会であった。多くの部門で部門同好会も開催され、人的交流の場も戻ってきたと感じる。次回以降は全体懇親会の開催を期待したい。

未筆ながら、大会の開催にご尽力された山本良一大会委員長(東京都立大学法人)、小林訓史実行委員長(東京都立大学)をはじめ、実行委員会の皆様、および特別企画やOSのオーガナイザーの皆様に、改めて感謝申し上げます。

《各行事の問い合わせ、申込先》

日本機械学会計算力学部門担当 石澤 章弘 E-mail: ishizawa@jsme.or.jp

〒162-0814 東京都新宿区新小川町4番1号 KDX飯田橋スクエア2階 TEL 03-4335-7610 FAX 03-4335-7618

計算力学部門ニュースレター No. 70 : 2023年12月18日発行

編集責任者：広報委員会委員長 山田 崇恭

ニュースレターへのご投稿やお問い合わせは下記の広報委員会幹事までご連絡ください。

なお、各記事の文責は著者にあります。

広報委員会幹事 森 正明 E-mail: m-mori@cybernet.co.jp

サイバネットシステム株式会社

デジタルエンジニアリング事業本部 エンジニアリング事業部 メカニカル技術部

〒101-0022 東京都千代田区神田練塀町3