発 行 所 日本機械学会 計算力学部門
お問合せ 03-3560-3501

ISSN 1340-6582

日本機械学会 計算力学部門

CMD Newsletter

COMPUTATIONAL MECHANICS

計算力学部門ニュースレター No. 65 May, 2021

目次

■ 部門長の就任・退任の挨拶
・部門長就任にあたって …… 慶応義塾大学 …… 高野 直樹 …… 2
・部門長退任にあたって …… 東京大学 …… 高木 周 …… 4

■ 部門賞
・2020 年度計算力学部門賞贈賞報告 …… 名古屋大学 …… 松本 敏郎 …… 5
横浜国立大学 …… 白崎 実
・功績賞を受賞して …… 名古屋大学 …… 畔上 秀幸 …… 8
・功績賞の受賞して …… 東京大学 …… 越塚 誠一 …… 12
・業績賞を受賞して …… 近畿大学 …… 和田 義孝 …… 14
・業績賞を受賞して …… 東京工業大学 …… 店橋 護 …… 16

■ 特集 ：バーチャルエンジニアリングにおける形状設計・計算・加工技術の現状と未来
・特集にあたって …… 名古屋大学 …… 松本 敏郎 …… 18
・積層造形を念頭においたトポロジー最適設計 …… 名古屋大学 …… 加藤 準治 …… 19
・パラメータ曲面のレベルセットに基づく新しいトポロジー最適化とその応用
…… 慶応義塾大学 …… 飯盛 浩司 …… 23
・積層造形における製造性を考慮した数理モデルの開発とトポロジー最適化への展開
…… 東京大学 …… 山田 崇恭 …… 25
・3D プリント CFRP のプリントパス設計とバーチャルテスト …… 日本大学 …… 市原 稔紀 …… 28
日本大学 …… 上田 政人
・次世代ものづくりにおける 3D プリンタの将来像 …… 近畿大学 …… 京極 秀樹 …… 30
・マルチマテリアル光造形法の進展 …… 横浜国立大学 …… 丸尾 昭二 …… 34

■ 部門からのお知らせ
・2021 年度年次大会の部門企画について …… 東京理科大学 …… 高橋 昭如 …… 38

※目次の表題をクリックすると、本文が表示されます。

部門長の就任・退任の挨拶

部門長就任にあたって

第99期部門長
高野　直樹
慶應義塾大学理工学部機械工学科

この度、高木周前部門長（東京大学）の後を引き継ぎ、第99期計算力学部門長を務めさせていただきます。飯田明由副部門長（豊橋技術科学大学）、伊井仁志幹事（東京都立大学）、部門運営委員会委員、各種委員会や研究会の皆様をはじめ、関係する全ての皆様のお力添えのもとに、計算力学部門の円滑な運営とさらなる発展に努めてまいりたいと思います。

新型コロナウィルスの第一波が訪れ、緊急事態宣言の発出で始まった2020年度は、第33回計算力学講演会が中止となり、大学での研究・教育環境は大きく様変わりしました。今でこそZoomやWebexを多用していますが、年度の始めは講義のためのビデオ撮影に追われ、Zoom/Webexの使い方もよくわからず、年度間の引き継ぎを行う新旧合同総務委員会の開催も遅れ、メール審議で代用いたしました。その後は落ち着いてきて、ネット会議、メール、電話を適宜使い分けています。外出・出張が不要となるネット会議の使用頻度は驚くほど増えました。一方、私がこの1年間で最も使わなくなったのは名刺だったように思います。

未知の体験となった2020年度の部門活動に関しては、高木周前部門長の素晴らしい舵取りのおかげで、講習会「機械学習×熱・流体工学の最先端」（2020年9月25日（No.20-68）および2021年3月10日（No.21-16）の2回）の開催、CMD2020計力スクウェア研究報告集の編纂と発行（2020年12月7日付け、部門HP上で現在も無料公開中）を行うことができました。計力スクウェアの企画にご協力いただいた方々（計算力学部門ニュースレター No.64参照）に改めて感謝申し上げます。

上記の講習会「機械学習×熱・流体工学の最先端」は、熱工学部門、流体工学部門と計算力学部門による合同オンライン講習会です。日本機械学会全体として、部門間交流の促進を進めており、各部門が年度末に活動報告を行うポリシーステートメントでも、その冒頭に必須項目として部門間交流の実績と計画を記述するよう求められています。2020年9月25日に開催された第1回目の合同講習会は、参加者数188名と大盛況で、新しいウィズコロナの時代のオンライン講習会の幕開けとなりました。

2021年度には、部門間交流担当委員会を新たに設置し、熱工学・流体工学部門との合同講習会の継続的な開催に加え、別の部門とも合同オンライン講習会を開催すべく、検討を始めています。元来、計算力学部門が扱う分野は、熱、流体、材料力学、機械材料・材料加工、バイオエンジニアリング、設計工学・システム、マイクロ・ナノ工学など他分野との連携が図られており、毎年の計算力学講演会でそうしたセッションがあります。講演会での最新の研究情報の発信だけでなく、今後は、講習会を通じて、産業界に向けた情報発信にも力を注ぎたいと考えています。

計算力学部門は、CAEソフトの開発・サポートを担うベンダとユーザである製造業との関係が深い部門です。計算力学講演会の参加者に占める企業の方の割合は、2014年度には18.8%でしたが、産業界からの参加を促す企画を立て、翌年には33%に上昇し、その後も高水準を維持してきました。この流れを滞らせてはならないと、2020年度に実施した計力スクウェアでは、研究報告集の原稿71編中、28%にあたる20編が企業からの投稿でした。

また、和文・英文論文の計算力学カテゴリーのレビューを担う学術誌編修委員会も産学官の委員で構成しており、計算力学講演会では「企業におけるCAEおよび産学官連携の事例」というOSを運営いただいています。

2021年度の第34回計算力学講演会は、実行委員長の大島伸行先生（北海道大学）のもと、オンライン参加が可能なスタイルで準備が進められていますが、これまで通り多くの企業の方に参加いただけるよう、持続性がある新たな産学官連携の枠組みを構築する必要があると思います。講演会では展示ブースも設けられていましたが、出展企業にとっては、そこでの出会いは重要なものだとお聞きしています。私は名刺を使わなくなったと前記しましたが、講演会の質疑応答などでも、新たな人脈、交流という点では、まだまだ改善と工夫の余地があります。

部門間交流企画ともども、講演会での交流や産学官連携の枠組み、あるいは、講演会開催地へのバーチャル出張が楽しめる仕掛けなど、部門の皆様からのアイディア、ご提案を歓迎いたします。ウィズコロナの時代には、若手研究者の方のための新しい企画も必要ではないかと思っていますが、自分自身ではなかなか妙案を思いつきません。是非、皆様と一緒に考えていきたいと思っていますので、ご協力ご助力をよろしくお願い申し上げます。

私は30代前半のころ、日本機械学会の講演会での発表に対して、企業の方からご質問をいただき、後になって、それは大変有難い質問だったと気づいたのですが、当時は真意を理解できず、間違いではないけれども的外れな答えをしてしまいました。しかし、おそらくその質疑応答がきっかけで、私は国プロのメンバーに加えていただいたという経験があります。学会は若手研究者を鍛え、育ててくれる、と信じていますので、逆に、私が若手研究者の皆様に、そういう場をご提供したいと願っています。それは、キャリアアップにもつながる大事な機会だと思います。若手研究者向けの企画についても、知恵を拝借できれば幸甚です。

昨年度中止となった恒例事業に計算力学技術者2級（固体力学分野の有限要素法解析技術者）認定試験対策講習会があります。2021年は、オンラインで9月1日～2日の2日間のプログラム

として再開する準備をしています。認定試験受験者のみならず、数学の基礎から有限要素法の理論、数理モデリング、V&Vを含んだ内容ですので、人材教育の場としても是非ご活用ください。

この1年間を使って、第100期を迎える2022年度のための下地作りを進めていきたいと思っています。高木周前部門長が敷いてくださったCOVID-19の中での新しい部門活動を持続、発展させ、皆様にとりまして、計算力学部門での活動が新たな技術的課題や研究テーマ、あるいは学問領域の創出と、出会い、ビジネスなどにもつながっていきますよう、努力してまいる所存です。是非とも部門活動にご支援、ご参加賜りますよう、お願い申し上げます。

部門長退任にあたって

第98期部門長
高木　周
東京大学

第98期（2020年度）計算力学部門長の退任にあたり、御挨拶および御礼を申し上げます。まず始めに、この1年間の部門の運営に関しまして、副部門長の高野直樹先生（慶應義塾大学）、部門幹事の只野雄一先生（佐賀大学）はじめ総務委員会の方々、村松眞由先生（慶應義塾大学）はじめ広報委員会の方々、松本敏郎先生（名古屋大学）はじめ表彰委員会の方々、畔上秀幸先生（名古屋大学）はじめ新学術編集担当委員会の方々、さらには近藤愛美様はじめ日本機械学会事務局の方々の多大なご貢献により、この一年を乗り切ることができました。ここに深く感謝いたします。

第98期は、COVID-19の影響により異例ずくめの一年となりました。年度のはじめより、部門運営のための打合せの会議等はオンラインでの実施となり、年度はじめの段階ではオンラインで学会発表などをどのように行えるのか混沌とした状況でした。その中で、毎年実施してきた計算力学部門主催の計算力学講演会をどうするか、実行委員長の池田徹先生（鹿児島大学）はじめ実行委員会と相談をしながら様々な議論を重ね、2020年度の開催を見送ることとなりました。計算力学部門としては、対面での学会発表を諦めざるを得ない状況で苦渋の選択となりましたが、これまで毎年貢献してくださり、また学会活動を支えてくださっている産学の研究者の繋がりや研究活動を維持していくために、計算力学部門講演会に代わるものとして、計力スクエアという研究成果報告集を発行いたしました。高野副部門長と村松眞由広報委員長が、その発行に多大な貢献をしてくださいました。

さて、年度はじめの混沌とした状況下で、計算力学技術者認定試験のための対策講習会についても2020年度は実施を見送ることとなりました。一方、年度も半ばごろになりますと、オンラインイベントの実施方法や参加のメリットなどが皆で共有できるようになり、他部門との合同講習会が企画・実施されました。2020年度の事業としては、「機械学習 x 熱流体工学の最先端」の内容で流体工学部門・熱工学部門と合同のオンライン講習会が実施され、188名の参加がありました。また、その第二弾として3月に開催された講習会でも150名を超える参加者があり、これまで行われてきた対面形式での講習会の参加可能人数の上限をはるかに超えるご参加を頂きました。この分野の注目の高さを実感するとともに、日本中どこからでも参加できるオンラインならではのメリットを存分に活かし、この分野の最先端で活躍している研究者によるハイクオリティーな講習を大勢の方々と共有できるという喜びを感じました。

次年度の運営は、新部門長である高野直樹先生（慶應義塾大学）および副部門長である飯田明由先生（豊橋技術科学大学）に引き継ぎます。引き続き、コロナ禍の大変な状況が続きますが、オンラインでの企画を有効に使いながら、シミュレーションを基軸とする計算力学部門ならではのメリットを最大限に活かし、皆様の学会活動がこの分野の益々の発展に繋がっていくことを祈念いたします。

部門賞

2020 年度計算力学部門賞贈賞報告

2020 年度計算力学部門表彰委員会　委員長
松本　敏郎　名古屋大学（左）
2020 年度計算力学部門表彰委員会　副委員長
白崎　実　　横浜国立大学（右）

計算力学部門では，1990年度より部門賞として，功績賞と業績賞の2つの賞を設けています．功績賞は，学術，技術，教育，学会活動，出版，国際交流などで計算力学の発展と進歩に幅広く顕著な貢献のあった個人に贈られます．業績賞は，計算力学の分野で顕著な研究または技術開発の業績を挙げた個人に贈られます．歴代受賞者の一覧は部門ホームページhttp://www.jsme.or.jp/cmd/に掲載されています．

2020年度（第98期）は，5月に部門登録会員に向けたインフォメーションメールと部門ホームページにて「部門賞候補ご推薦のお願い」を周知し，7月10日を期日として候補者の募集を行いました．推薦のあった候補者について選考委員および表彰委員会にて慎重厳正な審査を行い，功績賞2名，業績賞2名，合計4名の受賞者を以下のように決定しました．

功績賞　畔上　秀幸　氏（名古屋大学）
功績賞　越塚　誠一　氏（東京大学）
業績賞　店橋　護　　氏（東京工業大学）
業績賞　和田　義孝　氏（近畿大学）

例年は計算力学講演会において表彰式が執り行われますが，今年度は新型コロナウイルス感染症の流行により残念ながら計算力学講演会が中止されたため，各氏には発送をもって表彰と記念品の贈呈が行われました．本報レター読者の皆様には，ご受賞4氏のご業績をご紹介し，その栄誉を広くご周知させていただきますとともに，改めて各氏へのお祝いを申し上げます．

畔上秀幸氏は，有限要素法と最適化問題を融合させた形状最適化問題の研究分野と計算バイオメカニクスの分野において，先駆的で実用的な多数の業績を挙げてきました．1988年に，後に成長ひずみ法と呼ばれるようになった有限要素法を用いた形状最適化計算法に関する論文を発表し，日本機械学会から奨励賞を受賞しました．その後，その方法を改良することによって関数空間上の勾配法の概念に基づく力法と呼ばれる計算法（後に適用範囲を拡張しH1勾配法と呼ばれる）を開発し，その論文は日本機械学会論文賞を受賞しました．この計算法に関する研究の成果は日本応用数理学会でも発表され，数学者からも関心が寄せられるようになりました．そこで，畔上氏は日本応用数理学会の中に数理設計研究部会を設立し，計算力学分野の工学系研究者と数値解析や関数解析を専門とする数理科学系研究者の研究交流の場を提供し，両分野の交流を促進するしくみをつくりました．それらの活動を通して，形状最適化に関する計算法と理論のブラッシュアップが行われました．この研究の成果をまとめた論文は，日本応用数理学会論文賞を受賞しています．

また，計算バイオメカニクスの分野では，整形外科の医師らと脊柱特発性側彎症の成因を解明する共同研究を精力的に続け，椎体の成長に伴う座屈現象であるとする仮説を数値解析によって実証する研究を行ってきました．その研究では，畔上氏が提案した成長ひずみ法が効果的に使われ，実験では容易に再現できない現象を有限要素法解析では検証可能となることが示されました．この研究成果に対して，側彎症学会ベストペーパー賞が授与されました．また，座屈現象が特発性側彎症の成因であると仮定したとき，その座屈現象の発生を遅らせるような脊柱の補強部位を同定する問題を形状最適化問題として定式化し，具体的にその問題の数値解を得ています．その結果は医師らが経験的に行ってきたことを裏付ける内容となっていました．これらの研究は，バイオメカニクスにおける計算力学の可能性を示した研究として高く評価されています．

さらに，産業界へも多数の貢献があり，畔上氏が提案した形状最適化計算法はソフトウェア会社が開発した構造最適設計プログラムの中で使われています．そのプログラムは自動車業界を中心とする様々な業界で利用され，実際の製品設計に生かされています．弾性体の剛性や強度あるいは固有振動数などの標準的な評価関数では対応できない課題に対しては，他分野や企業の研究者と協力して，数理モデルを構築し，問題の定式化から解法までを示してきました．例えば，建築の研究者からの要請に応えて，建物が地震などによって損傷を受けたとき，損傷を受ける前後における建物の固有振動数と固有振動モードから損傷部位を同定する問題を定式化し，その解法を示しました．自動車会社の研究者との共同研究では，ブレーキ鳴きを抑えるような形状最適化問題に対してその解法を示しています．自動車部品メーカーの研究者との共同研究により，電磁場を対象にした形状最適化問題として，導波管の伝送特性に関する形状最適化問題を構成し，その解法を示しています．数値流体解析の研究者との共同研究により，臨界レイノルズ数を最大化する形状最適化問題が可解であることを示しました．最近では，嚥下のメカニズムを解明するために，医用画像から得られる生体器官の形状変化から内部の筋活動を同定する問題に関して，医療や食品会社の研究者らと共同研究を行い，筋活動の様子が同定できることを発表しています．

さらに，畔上氏は最適設計に関する工学分野の横断的な国際会議の運営においても貢献しています．構造および複合領域最適化アジア国際会議（ACSMO 2016）を実行委員長として開催

し，その後も日本代表としてアジア大会や世界退会の運営に尽力しています. 日本応用数理学会では長年にわたって理事を務め，2016 年度と2017 年度には副会長として，工学と数学の交流促進に尽力しました. 計算力学部門の運営に関しては，2001 年度に計算力学部門幹事を担当し，2006年には第19回計算力学講演会実行委員長を務めています. 最近では，2019 年度から学術誌編修委員会計算力学カテゴリのマネージャーを務めています. 以上の先駆的かつ実用的な多くの研究業績に加え，学協会運営への貢献により2020 年日本計算力学連合 Computational Mechanics Award を受賞しています.

1985年 東京大学生産技術研究所 助手
1986年 豊橋技術科学大学工学部 助手
1989年 豊橋技術科学大学工学部 講師
1991年 豊橋技術科学大学工学部 助教授
2003年 名古屋大学大学院情報科学研究科 教授
2017年 名古屋大学大学院情報学研究科 教授

越塚誠一氏は，1996 年の論文において自由表面を有する非圧縮性粘性流れのシミュレーションのためのMPS（Moving Particle Semi-implicit）法を提案しました． MPS 法は，微分方程式の離散化に計算格子を必要としない離散化手法であるため，自由表面の複雑な運動を扱うことが容易であるという特徴があります. 越塚氏はこれまでにMPS 法に関する論文を多数執筆しており，それらはALE（Arbitrary Lagrangian Eulerian）法，高次精度スキーム，乱流モデル，圧縮-非圧縮同時解析アルゴリズム，表面張力モデル，気液二相流，固液相変化，流体構造連成解析アルゴリズム，大規模並列計算アルゴリズムといったMPS 法に関する手法開発と，原子力工学，船舶工学，機械工学，化学工学，生体・医療などへのMPS 法の適用に関する研究です. これらの研究は粒子法の適用範囲を大きく広げ，これによって今日では粒子法が様々な流体シミュレーションに用いられるようになりました. 日本機械学会の論文集にも多くの論文が掲載されている他，執筆したMPS 法に関する解説や書籍は，MPS 法を含めた粒子法に関する研究のまとめや入門書として，粒子法の研究者や技術者の拡大に大きく貢献しています. 粒子法や計算力学に関する代表的な国際会議でプレナリースピーカーを務めた実績もあり，越塚氏は現在では粒子法シミュレーションの研究に関して世界的に第一人者であると認められています. こうした粒子法に関する研究成果に対しては，日本学術振興会賞（2006 年）などの多くの賞が与えられています.

越塚氏は2004 年にベンチャー会社の設立に加わり，自らが考案したMPS 法の商用プログラムを開発しました. 開発された商用プログラムは自動車，素材，機械，化学，医療，食品，化粧品などの幅広い産業分野で，日本国内のみならず海外においても用いられていて，日本で開発された計算力学の商用ソフトウェアが海外に進出した例となっています. さらに，映画やゲームにも粒子法シミュレーション技術を用いてビジネスを展開し，計算力学の市場を広げることに貢献しています. こうした活動に対して，2014 年に科学技術振興機構より大学発ベンチャー表彰2014において文部科学大臣賞が授与されています.

また，越塚氏は工学シミュレーションに対するV&V（Verification and Validation, 検証と妥当性確認）の普及に関して，規格作成や学会活動などを通じて，日本における中心的役割を果たしていて，工学シミュレーションに対するV&V の書籍を共著で出版している他，日本機械学会におけるV&V に関する活動実績もあります.

学会活動としては，2013 年に日本原子力学会計算科学技術部会長，2014 ～ 2015 年に日本計算工学会長，2018 年に日本機械学会計算力学部門長を務めるなど，日本の計算力学の分野における学会活動においてリーダーシップを発揮しています. 現在は，日本機械学会理事，日本学術会議 総合工学委員会・機械工学委員会合同 計算科学シミュレーションと工学設計分科会委員 長，APACM (Asian Pacific Association for Computational Mechanics) General Council Member，IACM (International Association for Computational Mechanics) General Council Member などを務めており，国際的にも活躍しています. 日本機械学会計算力学技術者資格認定事業委員会委員を2007 年より務めており，熱流動分野の計算技術者認定事業に長く貢献しています. 日本機械学会計算力学講演会においては，オーガナイズドセッション「メッシュフリー／粒子法とその関連技術」を継続して企画しており，粒子法シミュレーションの研究の日本における代表的な学会発表の場となっています.

1986年 東京大学工学部原子力工学科 助手
1990年 東京大学工学部附属原子力工学研究施設 助手
1991年 東京大学工学部附属原子力工学研究施設 講師
1993年 東京大学工学部附属原子力工学研究施設 助教授
2004年 東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 教授
2008年 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 教授
2016年 東京大学人工物工学研究センター長（～ 2019年）

店橋 護氏は，乱流，乱流熱・物質輸送，乱流燃焼等を専門として，計算力学分野で顕著な研究業績をあげています. 乱流及び乱流熱・物質輸送に関する研究では，一様等方性乱流，平行平板間乱流，乱流混合層等の基本的なすべての乱流場を対象に世界最大規模の直接数値計算（DNS）を実現し，乱流の散逸構造として普遍的微細構造の存在を世界で初めて明らかにしています. さらに，回転乱流，MHD乱流等についても大規模DNSを実施し，それらの乱流の非等方的特性を微細渦構造に作用するコリオリ力，ローレンツ力等の外力との関係から明らかにしています. 加えて，普遍的微細構造に基づいて乱流熱物質輸送機構，抵抗低減機構，乱流騒音などの乱流に付随する各種現象を解明しています. 例えば，すべての抵抗低減法は普遍的微細渦構造により説明できることを明らかにし，これを界面活性剤やマイクロ・ファイバー添加による抵抗低減法において実証・実用化しています. 温度や物質の乱流輸送については，高プラントル数，あるいは高シュミット数乱流の大規模DNSから乱流の散逸構造とスカラー輸送の散逸構造の関係，スカラー界面のフラクタル特性等を明らかにしています. また，圧縮性乱流の解析から，乱流の普遍的微細渦構造が，乱流騒音における音源であることを明ら

かにしています.

乱流燃焼に関する研究では，従来不可能と考えられていた詳細化学反応機構を考慮に入れた乱流燃焼の3次元DNSを世界で初めて実現し，これにより乱流燃焼研究における主要な研究手法の一つとしてDNSが認知されることとなりました. 近年では，主要学術雑誌に発表される乱流燃焼研究の45％以上に乱流燃焼のDNSが何らかの形で利用されています. 世界初の乱流燃焼のDNSは，燃料としては最もシンプルな水素，幾何学形状も等方性乱流中の自由伝播という基本的な場を対象として行われました. その後，乱流燃焼のDNSはV型乱流予混合火炎，平面噴流乱流予混合火炎，旋回乱流予混合火炎等の現実的な乱流燃焼場に適用され，乱流微細構造や大規模組織構造等と予混合火炎の干渉機構，乱流予混合火炎のフラクタル特性，動的モード解析による燃焼振動・騒音と乱流火炎構造との関連性等，従来未解明であった各種現象を明らかにしています. 対象燃料については，燃料として最も単純な水素からメタン，プロパン，ヘプタン，ガソリンサロゲート燃料等と実用的な燃料に拡張され，100本以上の支配方程式群を同時に解析する超大規模DNSを実現しています. これらは，次世代自動車用エンジンに期待されるHCCI燃焼や超希薄燃焼等の実用的な燃焼場に適用され，次世代燃焼器の開発に用いられています.

上述のようなDNSを基盤とした基礎研究を通じて，高精度離散化手法の開発と検証，圧力に関する疑似輸送方程式に基づく非圧縮性流れに対する流入・流出境界条件の開発，局所ヘルムホルツ分解に基づく圧縮性流れに対する流入・流出境界条件の開発，攪乱位相にランダムライフタイムを導入する流入変動発生法等，計算力学手法の高度化・高精度化にも寄与しています. また，乱流のLarge Eddy Simulation（LES）の格子幅自己認識型SGS応力モデル，乱流予混合燃焼のLESのためのフラクタル・ダイナミックSGS（FDGSGS）燃焼モデル，さらには格子幅自己認識型FDGSGSモデル等のモデル開発も同時に行っています. FDGSGSモデルはSGS燃焼モデルとして唯一の国産モデルとして内閣府・総合科学技術・イノベーション会議・戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の「革新的燃焼技術」における次世代自動車エンジン設計用プラットフォーム「HINOCA」に搭載されており，その有効性が明らかにされています.

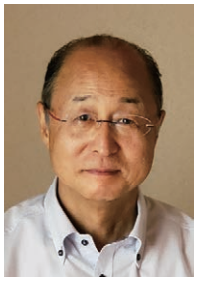
さらに店橋氏は，日本機械学会・計算力学技術者認定事業において，熱流体分野の主査を長年務めており，計算力学の普及・発展に大いに貢献しています.

1992年 東京工業大学工学部 助手
2000年 東京工業大学大学院理工学研究科 助教授
2007年 東京工業大学大学院理工学研究科 准教授
2012年 東京工業大学大学院理工学研究科 教授
2016年 東京工業大学工学院 教授

和田義孝氏は，これまでに74編（和文23，英文51）の論文を執筆しました. このうち査読付き論文は54編となります. 主にき裂進展解析，ハイパフォーマンスコンピューティングなどに関わる業績があり，特に2009年頃より重合メッシュ法および有限要素法を用いたき裂進展シミュレーションに関する技術開発，き裂進展評価に関わる研究を進めてきました. 重合メッシュ法によるき裂進展解析は複雑な全体メッシュを必要としないため，複数き裂の相互作用，複合材料，熱応力問題などのき裂進展評価が可能となりました. 2次元または平面的なき裂進展評価から3次元き裂進展評価が可能となり，この分野におけるき裂進展評価手法を大きく進歩させました. これら業績の主要な研究成果は日本機械学会論文誌および海外誌に投稿され，特に工学系論文誌としては比較的高いインパクトファクター（3.132，2.580，1.543など）を持つ論文誌International Journal of Fatigue, Engineering Fracture MechanicsおよびJournal of Pressure Vessel Technologyにも投稿されました. また，き裂進展シミュレーションに関する活発な研究活動により，日本機械学会 2011年度日本機械学会賞（論文）材料力学・材料分野を受賞しました. さらに，ハイパフォーマンスコンピューティングに関する研究活動により日本機械学会 2013年度計算力学部門優秀講演表彰を受賞しました. 第28回計算力学講演会（開催地横浜国立大学）よりオーガナイズドセッション「破壊力学とき裂の解析・き裂進展シミュレーション」の企画者として活動しています.

和田氏は近年，き裂進展シミュレーションの成果を用いて，機械学習によりき裂進展挙動を学習させたサロゲート（代替）モデルの構築に関する研究に着手し，機械学習を工学問題へ応用するための手法に関する研究を進めています. この活動により，第30回計算力学講演会（開催地 近畿大学）から機械学習の工学応用に関わるオーガナイズドセッションの企画者として計算力学部門への貢献があります. なお，この計算力学部門講演会では実行委員長を務めました. 日本機械学会および計算力学部門における顕著な貢献が認められ2019年2月より日本機械学会フェローに認定されました. 他学協会（日本溶接協会，自動車工業会）においても，機械学習に関わる研究会およびワーキンググループの主査・副主査を務めています. 167件（日本語132件，英語34件）の口頭発表を行っている他，特に機械学習に関する招待講演を3年間で十数回実施しました.

1997年 東京大学大学院工学系研究科 助手
2000年 高度情報科学技術研究機構 招聘研究員
2001年 高度情報科学技術研究機構 研究員
2002年 諏訪東京理科大学システム工学部 講師
2007年 諏訪東京理科大学システム工学部 准教授
2010年 ヴァージニア工科大学客員 研究員（～ 2011年）
2012年 近畿大学理工学部機械工学科 准教授
2017年 近畿大学理工学部機械工学科 教授



功績賞を受賞して

畔上　秀幸
名古屋大学　情報学研究科

このたびは日本機械学会計算力学部門の栄誉ある功績賞をいただき，お世話になった皆様に感謝申し上げます．また，受賞に際しての記事も書かせていただく機会も与えていただきありがとうございました．この機会に，お世話になった方々との出会いについてご紹介させていただくことで，お礼のことばと替えさせていただきたいと思います．

私と計算力学との出会いは，長野工業高等専門学校の5年生になった1976年の春に，卒業研究のための研究室配属で，希望が叶って，風間悦夫先生の研究室に配属されたときであった．その当時は，計算力学ということばはなかったと思われるが，有限要素法が発明されていて，日本でも先進的な先生方がいち早く研究を開始され，有限要素法の発展に貢献されておられた時期であった．私が生まれた年（1956年）にCloughらの有名な論文が発表されていたことから，私が成人になりかけたそのころは，コンピュータの発展ともあいまって，いよいよ，応用に注目が集まるようになっていた．風間悦夫先生は，在外研究で東京大学生産技術研究所の川井忠彦先生のもとで有限要素法を学ばれておられたことから，卒業研究では有限要素法に関わるテーマを提供してくださった．「自由水面をともなう浸透流の解析法」という題名で，いわゆるダム問題とよばれる非線形問題を有限要素法と勾配法で解くプログラムを作成したことを憶えている．「三つ子の魂百まで」のことわざのとおり，最初に出会ったこの研究テーマは，私の中で計算力学的思考回路を形成していたのかもしれないと考えている．

卒業後は，山梨大学に編入学し，有限要素法を直接使うことはなかったが，その基礎になる理論に繋がる貴重な出会いがあった．その出会いは，大学院の入学試験にことごとく落ちて，甲府で浪人生活をすることを決め，指導教員の岡田勝蔵先生からのアドバイスもいただき，山梨大学教育学部の聴講生として授業を受けていたときのことである．山梨大学では，機械工学科に10人の編入生がいて，連帯感が強く，有志で教育学部の名物教授にお願いして特別にゼミを開いてもらったり，自主的な研究会を開いて数学書を輪読したりしていた．実は，大学院に進学できなかったのは私一人で，甲府に残ることを決めたときには，自分で納得のいくまでいろいろなことを考えてみようと決意したことを憶えている．実は，妻とはこの頃に出会い，精神的に支えてもらえたことが大きかったかもしれない．機械工学の専門については，高等専門学校と大学で2回学んでいたので，あとは教科書を読み漁って，自力で理解を深めるしかなかった．そこで，聴講することに決めた科目は，数学科の授業であった．現代代数は，歯が立たず，解析学のLebesgue積分論も完全に理解したとは言えないような結末であった．しかし，鈴木俊夫先生の応用数学特論（Hilbert空間論）では，目から鱗が落ちた．

機械工学では，弾性力学，流体力学，伝熱学などにおいて，それぞれ独自の記号法でそれぞれが対象とする現象を支配する微分方程式が示され，その解が意味することについて論じられている．しかし，それらを数学の流儀で整理すれば，それらは2階の線形偏微分方程式で，つり合い型の現象であれば楕円型，時間依存型であれば双曲型あるいは放物型に分類される．Hilbert空間論の授業では，ベクトルや線形空間の定義から始まり，関数もベクトルとみなされ，それらにまつわる定理が示され，それらの意味を理解する手段として，熱方程式が使われるのであった．あげくの果てには，熱方程式の解を求めることは，関数空間（無限次元のHilbert空間）上の点を見つけることと同義であるとの結論に至るのであった．偏微分方程式で変数として扱われる空間や時間の関数を有限次元空間上で近似すれば，偏微分方程式は連立1次方程式となる．これはまさに，有限要素法そのものであると直感した．数学，おそるべしと感じ入った．これが最も強烈な「三つ子の魂」となるのであった．

浪人の甲斐あって，何とか大学院に入ることが叶い，東京大学生産技術研究所の渡邊勝彦先生の研究室に配属となった．渡邊先生は，「線形破壊力学入門」を著された岡村弘之先生のもとで最初に学位をとられた新進気鋭の理論家として知られていた．その当時，破壊力学は，航空機や原子力，さらにはダムや橋梁などの大規模構造の健全性を評価する重要な学問として大変な盛り上がりを見せていた．渡邊先生は，J積分を一般化した理論を研究されていた．私も一緒になって考えて，新しい理論を考えては，先生に説明し，ダメ出しをくらうことを性懲りもなく繰り返していた．渡邊先生は5年前に亡くなられたが，生前，初めての博士課程の学生であった私が議論を仕掛けてきたことが楽しかったとおっしゃっていた．渡邊先生の口癖は，「よく考えなさい．考えるのはタダだから」だった．渡邊先生のお陰で，弾塑性力学の神髄を理解し，き裂先端周りの塑性変形やクリープ変形を含む材料の非弾性的なふるまいを有限要素法で解析するプログラムを作成するという経験を積むことができた．この経験は，のちに思わぬところで生かされることになった．

学位取得後は，そのまま渡邊研究室の助手として採用していただいた．それから間もなくして，豊橋技術科学大学の助手へのお誘いをいただき，転任することとなった．豊橋では，沖津昭慶先生のもとで，機械力学の教育と研究をすることになった．沖津先生は，実験モード解析を研究されておられて，それに関わる研究をするようにといわれた．動力学も私の専

門に加えることができるようになったのは沖津先生のお陰である．実験モード解析に関する幾本かの論文を書いて，社会人を対象にした講習会を開催するなどして，3年が経とうとした頃，沖津先生から，自由に研究してよいよとのおことばをいただいた．

そのころ，居室を同じにする助手仲間らと勉強会を開こうということになった．各自が気になる研究の話題を紹介して，皆で議論するという雑談会であった．そこで私が紹介した内容が，Yuan-Cheng Fung先生と瀬口靖幸先生による解説記事(1)であった．そこには，生体の様々な振る舞いを力学として捉えようとしたときに浮かび上がってくる課題や生体ならではの特徴とそれを活かしたシステムについてのアイディアが記されていた．私の興味を引いたのは，Fung先生が提唱されてこられた生体器官に対する「最適作動」の原理であった．生体システムはそれぞれが正常な応力範囲をもっていて，「応力がこの範囲よりも高ければ，肥大が起こり，同じ負荷のもとで応力を減少させる．応力がこの範囲よりも低ければ，吸収が始まり，同じ負荷のもとで応力を増加させる」という仮説である．また，それに続けて，「応力制御によって正常化するというこの制御概念は生物学的にはまだ仮説ではあるが，将来の生物機械システムを設計する技術者にとっては，実現可能なアイディアであるように思う．我々は，積極的にこの方向で考えて下さるよう機械技術者にお願いしたい」と書かれていたのである．この文章に出会って，そのアイディアはコンピュータの中であれば実現できると直感した．その理由は，学生のときにき裂の有限要素法解析で，材料の非弾性的な振る舞いを計算するプログラムを書いていたからであった．応力制御のメカニズムを材料の構成則として表現することができれば，実現できると思われたのであった．一週間ほど長さの異なる二本の棒を引っ張る実験を頭の中で繰り返して，ようやくたどり着いた方法は，極めて単純なものであった．Fung先生が考えられた正常な応力を，例えば，応力をMises応力と定義して，正常な応力を平均応力と仮定する．そのうえで，線形弾性解析によって得られた応力と平均応力との差に比例して体積ひずみが発生すると仮定して，そのときの架空の弾性変形を有限要素法で解析するという方法である．計算方法は熱弾性変形解析と同じである．熱を応力の偏差に置き換えただけである．ただ，この問題は非線形問題なので，収束するまで少しずつ変形を繰り返していくことになる．

この方法で簡単な問題を解いてみると，思ったとおりの形状が得られた．沖津先生はその結果をみてよろこんでくださり，このような面白いアイディアは単著で発表しなさいといってくださった．その論文(2)の「討論」には，瀬口靖幸先生と尾田十八先生からいただいた質問に一生懸命回答していた様子が残っている．これも大変光栄なことであった．瀬口先生は，のちに解説記事でこの方法を「成長ひずみ法」とよんで紹介してくださった．

しかし，この成長ひずみ法はうまく機能しないときがあった．そのひとつは，円孔付きの無限板を2軸で引っ張ったときである．直交する2方向に1対２の分布力で引っ張ったとき，穴の境界上の応力が一様になるのは1対２の軸をもつ楕円になることは，解析解によって知られていた．しかし，成長ひずみ法の解は，いったんその楕円に近づいたあと，それに収束せずに，それを通り過ぎてき裂に向かっていってしまうのであった．

成長ひずみ法に疑念を抱いたころ，沖津先生の勧めもあって，文部省の在外研究員制度に応募し，採択されて，ミシガン大学の菊池昇先生のもとで10か月間滞在する機会をいただいた．その当時，菊池先生は，均質化理論に基づくトポロジー最適化法に関する有名な論文をMartin Philip Bendsøe先生と共著で発表されていて，ノンパラメトリック最適化ブームの火付け役として知られていた．1991年の10月末に渡米して，さっそく，菊池先生に形状最適化を研究したいと思っていることをお話した．菊池先生からは，NATO Advanced Study Institute (Iowa City, 1980) の会議録(3)にそのヒントがあるかもしれないとのアドバイスをいただいた．実は，昨年，菊池先生と対談させていただく機会をいただき，その文献は，長年気になっていたが，戸棚に仕舞われたままになっていたこと，それについて研究したいという若者が来てくれたので託したことをお話しいただいた．

外は吹雪でも重厚な建物の中は快適であった．少人数の研究者だけの居場所をいただき，そこで，会議録に収録されていたNikolai Vladimirovich Banichuk, Jean Cea, Jean-Paul Zolesio先生らの論文に読みふけった．理解できない文章にであったら，そこで立ち止まり，別の文献を調べたりして，何日もその意味の理解に費やした．こんなことができたのも，在外研究のお陰であった．

そんな中で，Cea先生の論文の中に，Hilbert空間上の勾配法について書かれた箇所に目が留まった．このとき，甲府で浪人中に出会ったHilbert空間論の授業がよみがえってきた．そのときは，漠然と，成長ひずみ法が関数空間上の勾配法と関連があればなあとの淡い期待感を抱いただけだった．

そのイメージが具体的になったのは，John E. Taylor先生の講義「Structural Optimization」を聴講させていただいた期間中であった．その講義では，弾性体でできた棒の断面積を表す軸方向に分布した関数を設計変数にして，与えられた制約の下で目的関数が最小となるような断面積を求める問題について議論されていた．Taylor先生は，力学構造の最適化問題を関数最適化問題として捉えようとされているのがひしひしと伝わってきた．実は，ミシガンに来る前から，Horákの逆変分原理を学んだ際に，このような関数最適化問題として形状最適化問題を捉えたとき，形状変動に対する評価関数の微分は勾配と形状変動の積を境界で積分した形式で与えられることを知っていた．Taylor先生の講義でそのことがよび起こされて，その積分と成長ひずみ法の関係について考えていたとき，成長ひずみ法において見落とされた項があることに気づいた．成長ひずみ法で注目している体積の湧き出しに加えて，物質が移動したときの項を足して，Gauss-Greenの定理で境界積分に書き換えてみたところ，形状微分の形式になった．その結果，成長ひずみ法の入力を体積ひずみから境界力に置き換えた方が理論的に正しいことに気づいた．この時点で，式の構造からみて，この方法はHilbert空間上の勾配法になっていると直感した．

改良版が正当な方法になっているとの確信を持てたのは，豊橋の研究室で，当時博士課程学生であった高見昭康君が数値例で確かめてくれたからであった．のちに，この方法は境界を引っ張ることから，traction method(力法，ちからほう)とよぶことにした．さらに，2015年には，密度を設計変数にした位相最適化問題の解法として，力法と同じような勾配法が見つかった．ただし，その方法では，力で引っ張る代わりに熱を発するイメージになる．そこで，それらの方法を統一して，H^1勾配法とよぶことにした．H^1はHilbert空間の性質を備えた関数空間（1階微分まで2乗可積分な関数の集合）に対して使われる記号である．

在外研究は，このように私にとってはかけがいのない期間であった．菊池先生をはじめこのような機会を与えてくださった関係者の方々に深くお礼申し上げます．しかし，本当の研究は，そのときに抱いた直感の正当性を証明することであった．

帰国後，新しい方法がすでに知られているのではないかと疑い，文献を探しまくった．しかし，形状微分を求めるまでの議論は1908年のJacques Salomon Hadamardの文献をはじめ，たくさん見つかった．しかし，それを使って形状を動かす方法は，形状変動を有限次元ベクトルで近似した上で勾配法を適用するような方法ばかりであった．その結果を踏まえて，新しい方法を提案する論文を書こうとした．しかし，簡単には書けなかった．その理由は，そもそも関数空間の素養がなかったからである．一つの授業を聴講しただけで理解できるほど浅い学問ではなかった．

それから数年ほどOlivier Pironneau先生やJan Sokolowski and Jean-Paul Zolesio先生らが著された形状最適化の専門書と格闘して，何とか新しい方法のアイディアだけを記した論文(4)を書いた．正当性を証明するには遠く及ばなかった．

豊橋で悶々としていたころ，1995年にハワイ本島で開催された計算工学の国際会議（矢川元基先生とSatya N. Atluri先生が主催）に参加した帰路，航空機の中で菊地文雄先生と座席が隣り合わせになるという幸運に恵まれた．その機会に悶々とした思いをお話した結果，私の悩みを聞いてくれそうな数学者として，当時電気通信大学におられた海津聰先生を紹介してくださった．それと同じころ，萩原一郎先生からも，何かの用件でお電話をいただいた際に，私の相談に乗ってくれそうな人として海津先生を紹介していただいたと記憶している．そのお電話をいただいた直後だったような気がするが，海津先生に電話をかけ，経緯を簡単にお話して，面談の了解をいただいた．

海津先生の研究室に午後一番にお邪魔して，話を終えたころには夕闇が迫っていた．私からの質問に海津先生は丁寧に答えてくださった． Sobolevの埋蔵定理を使って，黒板で関数空間の包含関係を説明していただいたことを憶えている．この時点では，理解できたというよりは，相談に乗っていただける先生が見つかったことの喜びの方が大きかった．

それから，年単位の間をおきながら，質問したいことがあるたびに相談にのっていただくことを繰り返した． 1997年には連名の論文を書いてはいたが，海津先生が本腰を入れて力法の数学的な解釈を論文としてまとめてくださるまでには2006年まで待たなければならなかった．その解釈は，連続関数の集合に対するコンパクト性に注目した内容であった．海津先生には，密度型位相最適化問題の定式化においても，密度を設計変数のシグモイド関数で与えるアイディアを出していただき，領域変動型形状最適化と同じ枠組みで解ける見通しを得ることができた．

海津先生に相談に乗っていただくようになってからしばらくして，当時広島大学におられた田端正久先生からセミナーで話題提供をするようにとご依頼をいただいた．クリスマスイブだったと記憶している．質問攻めにあいながらの発表で，予定の時間をはるかに過ぎてしまったが，その後は美酒鍋を囲んで歓待していただいた．田端先生には，その後もお会いするたびに数学としての立場から気になる点について貴重な助言をいただいた．特に，汎関数の微分をFréchet微分（双対空間の要素）として定義できるような問題設定を考えることが肝要であるとの指摘は，これまでの理解をまとめた書籍(5)(6)の骨格をなしている．

縁あって，2003年に名古屋大学情報科学研究科の設立に合わせて教授としてよんでいただいた．それを機に，応用数理学会にも力をいれて発表するようになった．そのためか，2005年に，会長の矢川元基先生が構想された研究部会制度の準備会メンバーの一人として推薦していただいた．それが契機となって，数理設計研究部会を立ち上げ，その活動を足掛かりにして，応用数理学会に参加されている数学の先生方と交流を深めることになった．

その中でも，大塚厚二先生と木村正人先生には，研究集会に招待していただき，有益な指摘やアイディアをいただいた．大塚先生は，私が学生時代に一般化J積分を提案されていて，同じことを研究されている数学者として記憶していた．大塚先生から声をかけていただくまでは，一般化J積分が形状最適化問題と関連があることは夢にも思わなかった．ところが，大塚先生の見立ては正しくて，一般化J積分はき裂のような特異点の形状微分になっていた．その証明で使われている補題をみていくと，それまで私が知らなかった汎関数の形状微分に対する公式が使われていた．これまでの公式は境界積分であったが，新しい公式は領域積分であった．両者は共に形状微分を求める公式ではあるが，両者の正当性を理解するのに数年を要した．大塚先生の研究室で，休日，弁当を食べながら一日議論したこともあった．その結果，新しい公式を用いれば，問題設定の仮定が緩和されたり，2階微分の評価が可能になったりといった優れた結果が得られた．

2008年には，九州大学の田上大助先生から数学科での1週間の集中講義を依頼された．この授業は，大学院で使っていた教材の間違いや不足を知る貴重な機会となった．授業では，田上先生が最前列で質問し，私がそれに答えるところを学生が聴講するということに終始した．その過程で，工学と数学の基礎知識の違いや考え方の微妙な違いを感じ取ることができた．この経験が，形状最適化という話題を通して，数学についてもある程度の内容を盛り込んだ，工学と数学の架け橋になるような本を書いてみたいとの思いが強くなったような気がする．

最近では，鈴木貴先生と土屋卓也先生らとの共同研究を通して，異なる形状微分の表現についても知ることができた．両先生

は，私が卒業研究として出会ったダム問題を数学として研究されておられることに因縁を感じている．また，数学科出身の博士課程留学生であったJulius Fergy Tiongson Rabago君と多元数理科学研究科の博士課程学生であった相野眞行君が解の存在を示すことに協力してくれた．これでようやく，形状最適化問題の定義から解法までを数学としても正当化できたのではないかと考えている．

一方，プログラミングについては，元博士課程学生の竹内謙善君が学生時代から現在に至るまで強力な貢献をしてくれている．有限要素法を用いたときの誤差評価は，元博士課程学生の村井大介君が研究してくれたお陰で完成した．2階形状微分の理論と数値検証については，共同研究相手の成富佑輔君が協力してくれた．それ以外にも畔上研究室に所属してくれた学生諸君には様々なテーマについて取り組んでもらい，興味い深い結果を出してもらえた．ここに謝意を表するしだいである．

参考文献

(1) Fung, Y. C., 瀬口靖幸: 生体システムにおける力学, 日本機械学会誌}, 88巻, 1988, pp. 290-296.

(2) 畔上秀幸: 成長の構成則を用いた形状最適化手法の提案（静的弾性体の場合）, 日本機械学会論文集 A編, 1988, pp. 2167-2175.

(3) Haug, E. J. and Cea, J. (editors): Optimization of Distributed Parameter Structures, Sijthoff & Noordhoff, Vol. 1 & 2.

(4) 畔上秀幸: 領域最適化問題の一解法, 日本機械学会論文集 A 編 , 60, 1994, pp. 1479-1486.

(5) 畔上秀幸: 形状最適化問題, 森北出版, 2016.

(6) Azegami, H.: Shape optimization problems, Springer, 2020.

功績賞を受賞して

越塚　誠一
東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

日本機械学会計算力学部門功績賞をいただき、まことに光栄です。計算力学部門にはこれまで計算力学講演会での研究発表などを通じて研究者としての私を育てていただき大変感謝しております。

あらためて計算力学講演会での発表件数（共著者を含む）を数えたところ延べ90回でした。1992年の東京での第5回講演会が最初でした。粒子法シミュレーションに関する研究に関して盛んに発表していた頃としては、2005年のつくばでの第18回講演会が12件、2006年の名古屋での第19回講演会が11件でした。特に2005年のつくばの講演会では、12件のうち6件がビジュアリゼーションコンテストへの出品で、他の6件が通常の口頭発表でした。ここにその口頭発表を記させていただくと、近藤雅裕氏「３次元ＭＰＳ法弾性体解析におけるハミルトニアン」、入部綱清氏「映像制作に向けた粒子法の大規模並列シミュレーション」、原田隆宏氏「グラフィックスハードウェアを用いたポリゴンモデルからの高速粒子生成手法」、田中正幸氏「粒子法を用いた３次元流路を流れる赤血球の変形シミュレーション」、柴田和也氏「船体の強制運動を伴う海水打ち込みの粒子法による３次元数値解析」、藤澤智光氏「商用映像制作への粒子法シミュレーションの適用」[キーノート]であり、研究内容はすべて今日の粒子法の発展につながるものであり、発表者は皆、粒子法の発展に大きな貢献をした方々でした。

粒子法の研究は、計算力学講演会で交流する研究者の方々がいればこそ行うことができたものでした。粒子法/メッシュレス法は、流体力学と固体力学の両方で、ほぼ同時に研究が盛んになりました。初期のころは固体力学の粒子法/メッシュレス法の研究の方が盛んでした。また、私見ですが、流体力学のシミュレーションの研究者はどちらかというと物理的で、流体の物理的な振る舞いを主に議論したがるのに対して、固体力学のシミュレーションの研究者は数学的で、計算手法や収束性などの数値計算に関わる議論を好んでいました。私自身は流体が専門で、新しい計算手法としての粒子法を研究していたのですが、粒子法/メッシュレス法に関する数学的議論が、流体力学と固体力学の違いを超えて、大変刺激的でした。計算力学部門には流体力学シミュレーションと固体力学シミュレーションの両方の研究者が集まっており、こうした点でとても恵まれた場でした。計算力学講演会の粒子法/メッシュレス法のセッションでも、流体力学と固体力学の研究者がいっしょに議論することを常としており、それがとてもよかったと感じています。現在でもオーガナイザーとして佐賀大学の萩原世也先生、九州大学の浅井光輝先生と粒子法/メッシュレス法のセッションを運営させていただいており、両方の分野から発表が集まっています。こうした流体力学と固体力学の両方を対象とするセッションが長年にわたって続くというのは珍しいのではないでしょうか。

それでも流体力学と固体力学での基本的な考え方の違いがあります。1例として、ラグランジュ記述について紹介したいと思います[1]。流体力学では、ナビエ・ストークス方程式における時間微分項に関連して、ラグランジュ記述は流体の運動といっしょに視点が動くもので、オイラー記述は流体の運動とは関係なく空間に視点が固定されたもの、として考えます。これは、流体力学の教科書の最初の方に必ず出てきますので、流体力学の研究者には常識です。そして、粒子法はラグランジュ記述の計算手法で、対流項が時間微分項に組み込まれるため、対流項が消えてしまい、従って、対流項の離散化を行う必要がなく、流体力学のシミュレーションにおいて長年課題とされてきた対流項の離散化の問題が消えてしまう、という風に語ります。すなわち、粒子法によって流体力学シミュレーションの長年の課題が解決するのではなく、そもそも現れないようにしてしまうということです。ところが、固体力学の粒子法の研究者は、ラグランジュカーネルとオイラーカーネルとして、図1を見せるのです。流体力学の粒子法で使うカーネル図1(a)は、固体力学ではオイラーカーネルと呼ばれます。同じ内容を、流体力学の研究者はラグランジュ記述、固体力学の研究者はオイラー記述と考えているのです。固体力学の研究者がイメージするラグランジュ記述は図1(b)で、視点の1点だけでなく、座標系の全体が物体に張り付いたものなのです。ですので、ラグランジュカーネルは、物体の変形とともに変形するものだ、と考えるわけです。流体力学の粒子法の研究者が、粒子法はラグランジュ記述の計算手法だ、と発表すると、固体力学の研究者は、いやいやそれはオイラー記述だ、と言うわけです。いきなり足元が崩されるという感じです。実際、固体力学の研究者は、有限要素法はラグランジュ記述の計算手法であると考えており、粒子法はラグランジュ記述だと流体力学の研究者が語ったとしても、特に何の魅力も感じないでしょう。

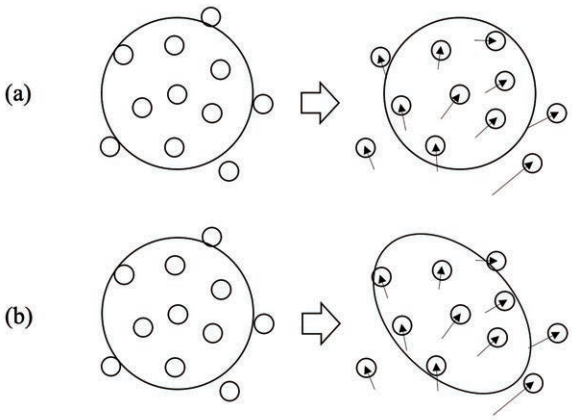


図1　固体力学の研究者が考えるカーネル：
(a) オイラーカーネル、(b) ラグランジュカーネル

カーネルは、粒子法において、粒子間相互作用を計算すべき近傍粒子を与えるものです。カーネルの中心にある粒子は、カーネル内にある近傍の他の粒子とのみ相互作用を計算して、カーネル外にある遠方の粒子とは相互作用の計算をしないものとします。固体力学の弾性体では図1(b)のカーネルが好まれます。これは物理的な理由によります。弾性体では変形に対して復元力が働き、元の形状に戻ろうとします。また、変形自体が流体に比べればあまり大きいものではありません。そうすると、初期形状でカーネルを設定し、そのカーネルを変形後も使い続ける図1(b)が、初期形状にきちんと戻るためには適切であると考えられます。もし流体力学においてカーネルとして図1(b)を使うとどうなるかを想像すると、初期条件では近傍にあった粒子が、流れによってだんだんと遠方に移動してしまい、カーネルの変形が大きくなり、やがては計算が破綻します。

固体力学の研究者に座標系が物体に張り付いているのがラグランジュ記述だと言われると、そうかなとも思いますが、流体力学の研究者としては流体力学の常識を守りたいと考えます。流体力学では、移動する物体に対して、視点のみ、すなわち座標系の原点のみが張り付いているのをラグランジュ記述と呼び、座標系全体が物体に張り付いているのとは区別します。もし、流体力学で、流体に座標系を張り付けて流れといっしょに動かしたら、あっという間にぐちゃぐちゃな座標系になってしまいます。ですので、座標系の原点のみを物体に張り付けることを考えるのは流体力学では合理的です。その上で、物体に座標系の全体を原点以外も含めて張り付けることもできて、例えば、地球に座標系を張り付けて地球と一緒に回転させることは、流体力学においても考えられます。

筆者は過去に境界適合座標法の研究をしていて、座標系の全体が流体に張り付いている場合のナビエ・ストークス方程式を扱っていました。流体力学のラグランジュ記述（原点のみ流体に張り付いている）をオイラー記述に変換すると、時間微分項から対流項が出てくるように、流体力学のラグランジュ記述から、座標系の全体が流体に張り付いている座標系に変換すると、リー微分が出てきます[2]。地球と一緒に動く座標系の例では、リー微分から遠心力とコリオリ力が現れます。すなわち、カーネルに対して流体力学では図2のような呼び方が適切でしょう（誰も使いませんが）。

しかし、著者は図2の用語が正しく図1の用語は間違っていると主張したいのではありません。流体力学と固体力学とでは、考え方に違いがあり、実は非常に基本的な用語でさえ違った概念をお互いに持っているのだということです。研究発表の場で厳密な議論をすることで初めてそれがわかります。こうした違いを知ることで、むしろ考え方の幅が広がるとともに、深く考察することにもつながります。これは研究を進めるにはとても重要であると思います。私にとって計算力学部門はそのような場でした。

さて、その後、筆者は2017年度に計算力学部門の副部門長、2018年度に部門長を務めました。部門運営では大変多くの方々にご指導・ご助力いただきました。この場を借りて感謝申し上げたいと思います。特に、私の前任の東京工業大学の青木尊之先生には様々にご指導いただき、おかげで前年を踏襲する形で私自身の役割を果たすことができました。また、幹事の東京理科大学の高橋昭如先生にはいろいろご面倒をおかけしたにもかかわらず、いつも快く丁寧に対応いただきましてとても助かりました。2017年度の計算力学講演会の実行委員長の近畿大学の和田義孝先生、2018年度の計算力学講演会の実行委員長の徳島大学の大石篤哉先生は、大変ご苦労様でした。2017年度は第30回計算力学講演会ということで、30年を記念した座談会が開かれたことをよく覚えております。しかしながら、講演会中に台風が接近し、スケジュールの変更をその場で判断するなど、実行委員長はじめ関係者のご苦労がありました。2018年度の講演会では皆で楽しくおどった阿波踊りをよく覚えています。計算力学講演会では、懇親会の出席率が高く、また、若い研究者も多く参加するので熱気があり、有意義な伝統であると考えております。はやく新型コロナが終息し、大勢が参加する計算力学講演会の懇親会が復活することを願っております。さらに、日本機械学会の大黒卓様はじめ事務局の方々にも大変お世話になり、ありがとうございました。

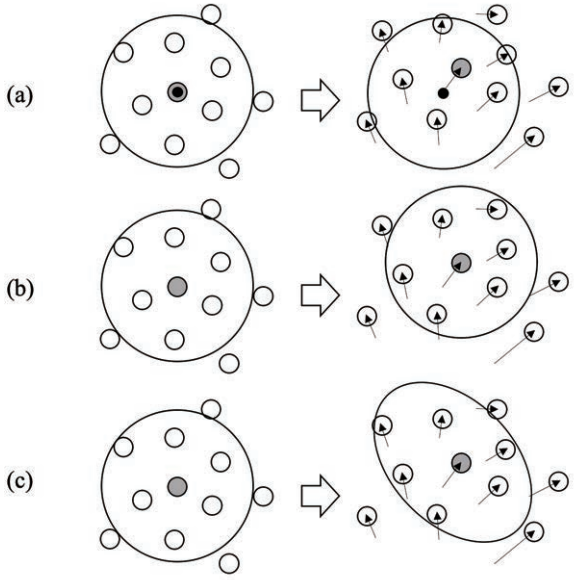


図2　流体力学の研究者が考えるカーネル：
(a) オイラーカーネル（空間に固定）、(b) ラグランジュカーネル（中心の粒子に固定）、(c) リーカーネル（物体に張り付く）

計算力学は、様々な産業において既に実用的に広く使われるようになっていて、先端的かつ効率的なものづくりには欠かすことのできない学問分野になっています。発展の勢いは続いており、これからも多くの若い研究者の活躍が期待できます。日本機械学会計算力学部門は、今後も計算力学の研究者の切磋琢磨の場を提供し続けていって欲しいと願っております。

[1]　越塚誠一「粒子法」丸善出版 (2005) p.57-58
[2]　越塚誠一「数値流体力学」培風館 (1997) p.81-83

業績賞を受賞して

和田　義孝
近畿大学理工学部機械工学科

この度は日本機械学会計算力学部門業績賞をいただき，誠に光栄に存じます．本賞は計算力学分野を牽引してきた研究者に送られる素晴らしい賞と思っております．業績賞の歴史に名前が加わり，身が引き締まる思いです．学部，修士課程時代の指導教員である，菊池正紀先生，そして博士課程では，矢川元基先生，吉村忍先生，奥田洋司先生をはじめ，多くの先生，先輩方にご指導を頂きました．これまで継続して研究してこれたことに感謝するとともに，これまでに交流させていただいた皆様にも改めて深謝いたします．

過去の業績賞の寄稿を拝読いたしますと，私の経歴など恥ずかしいと思えてしまいますが，隠しても仕方ないので記させていただきます．東京理科大学理工学部機械工学科の学生であった私は，菊池正紀先生の指導を受けることになりました．ここでは，実験と計算の両方を行う研究室という触れ込みで大変魅力的だと思い配属の希望をいたしました．昨今と比べても当時の研究テーマは幅が広く，今でももう一度やってみても良いと思うようなものでした．まさに，計算力学が成長していた時期だったかと思います．1990年代初頭は，最近流行りのニューラルネットワーク，エキスパートシステム，ファジー理論などの適用も幅広く行われていたと思います．当時はこういった技術の応用を「やわらかい」という言葉で表していたと思います．過去の記事を調べたところ「やわらかい計算力学」という講習会が，CMDニュースレター No.11にございました．一方，破壊力学はJ積分の適用限界が指摘されており，T応力やJ-Q理論などが提唱されましたが，決定的な破壊力学パラメータとはならずに古典的な破壊力学は低迷した時期と言えます．博士課程から矢川元基先生と吉村忍先生へ師事し，メッシュ生成手法の研究・開発をテーマとすることになりました．メッシュ生成といえば幾何的な計算を行いますが，ファジー理論の考えを応用した節点位置決定手法を提案しました．まさに「やわらかいメッシュ生成」です．また，このときはUMLの前身であるOMT（Object Modeling Technique）という分析方法を使ったオブジェクト指向設計，プログラミングを実践しました．プログラムのモジュールやオブジェクトを自律的に動作させるにはオブジェクト指向の考え方が必須です．抽象度の高い大規模プログラミングには現代の標準言語であるPythonでも使われているオブジェクト指向の考えはマッチします．博士号を取得後は，高度情報科学技術研究機構（RIST）で招聘研究員（後に研究員）として並列有限要素法固体地球シミュレータ・プロジェクト，通称GeoFEMプロジェクトに参加しました．このプロジェクトでは，奥田洋司先生，中島研吾先生，その他大先輩方から様々なことを学ばせていただきました．RISTに２年ほど務めさせていただきました後，諏訪東京理科大学に講師として赴任いたしました．GeoFEMプロジェクトでやり残したことも含めて大学にて研究を続けました．HPC関連の研究はやりがいはありますが，個人で行うテーマを模索し，菊池正紀先生に教えを請いながら，計算力学により破壊力学をさらに発展させるための研究を始めます．1つの成果は，重合メッシュ法による亀裂進展解析が自在にできるようになったことです．亀裂進展ごとにメッシュは作り変える必要がありますが，複数亀裂がある場合も含めて，要素生成技術に取り組みました．亀裂は簡単な形状のようですが，複数存在することまで考えるとモデリングは簡単ではありません．日本機械学会刊行の発電用原子力設備規格維持規格などが想定している亀裂やその他実用上評価すべき亀裂の形状を調査し優先度の高いものから実装するほか対処方法がありません．メッシュジェネレターを亀裂に特化することで，2次元平面に写像できる形状であればほぼ任意の亀裂形状に対応させることに成功しました．その結果，３次元混合モード下における亀裂進展解析がある程度できるようになりました．菊池正紀先生，高橋昭如先生，当時の学生と協力をして多くの成果が出たものだと思います．私が貢献できたのはそれほど多くありませんが，多くのことを学ばせて頂いたことに本当に感謝の念が絶えません．また，この頃から計算力学講演会などの破壊に関わるオーガナイズドセッションの共同オーガナイザーとして岡田裕先生，長嶋利夫先生らからお誘いを受けて今でもオーガナイズドセッションを続けさせております．破壊力学はその研究対象やこれまでの調査された事象の膨大さに圧倒され知っていることなどほんの一握りなのだと思い知らされます．

2012年頃からAI研究が計算力学の世界にも波及してきました．2015年からそろそろ適用する段階なのではと思い，当時，研究室に所属していた博士前期課程（修士）の学生に，やってみないかと声をかけたところ２つ返事でやってみたいと意思表示がありました．始める前に，重要な基礎的検討を学生と一緒に行いました．データ量とネットワーク構成がどの程度予測精度に影響を与えるのか，また，n個のニューロン，m層のネットワークの表現能力などです．これらの検討はその後，応用する際に，基本に立ち戻り考えるための重要な経験になっています．さて，応用事例として選んだ対象は，２次元亀裂進展を対象として古典的なニューラルネットワークであるマルチレイヤーパーセプトロンによるオートエンコーダーでした．ある程度の予測が可能であることがわかりましたが一方で，多くのデータが必要であることも改めて認識しました．亀裂が曲がるということ自体が実はかなり頻度の少ない現象なので，この部分のデータをどうやって増やすか（データ拡張）が高精度な予測のために重要なポイントです．2017年は近畿大学にて計算力学講演会を開催し，機械学習の工学応用に関するオーガナイズドセッションを立ち上げました．共同オーガナイザーである，

中林靖先生，荻野正雄先生，株式会社インサイトの三好昭生様には，新しい分野への挑戦を後押しいただき今でもご協力頂いていることに深く感謝しております．皆様のご協力の下，IACM参加の学会においても破壊，AIの２つのテーマについてオーガナイズドセッションやミニシンポジウムの企画をし，少しずつ国際的な活動の場を広げている状況です．ここに書ききれないほど，企業の方々や大学の先生方のご協力のもと今日に至ることができたと思っております．

最後になりますが，2020年はコロナ禍でいろいろなことが停滞した時期でもあります．ある意味，情報に触れる機会がオンラインに限られたため，情報収集という観点でも滞ったのですが，絞られた重要な情報だけに触れたことになりました．結果，思考がまとまりやるべき事への理解が深まった時期であったと思います．今後，デジタルツインやより高度な予測技術を実現するために，高度化された計算力学技術を通じて情報発信，社会実装そして後進の教育に尽力いたしたいと存じます．

業績賞を受賞して

店橋　護
東京工業大学　工学院

この度は，日本機械学会計算力学部門業績賞を頂き，誠に光栄に存じます．ご推薦頂きました部門の皆様，お世話になった多くの国内外の研究者の方々に感謝申し上げます．特に，恩師である宮内敏雄東京工業大学名誉教授には，この分野に携わるきっかけを与えて頂いただけなく，ご定年されるまでの長きにわたりに研究をご一緒させて頂けましたこと，深く感謝申し上げます．

私がこの分野の研究を始めるきっかけは，宮内敏雄先生が掲げられた「乱流混合層のダイレクト・シミュレーション」と題した卒論テーマであり，「乱流」と「ダイレクト・シミュレーション」という二つの言葉に魅かれた記憶がございます．1990年でしたので，当時日本で乱流の直接数値計算（DNS）を実施していた研究者は数えるほどでした．使用する解析方法はスペクトル法が主流で，そのプログラムの作成と高速化に多くの時間を費やしました．ご存じの通りスペクトル法は高精度ですが，膨大な計算時間と記憶容量を必要とする方法で，当時の最新スーパー・コンピュータをもってしても32^3の格子点でのDNSが最大でした．修士課程を修了する頃には，DNSコードの継続的な改良等から120^3の格子点でのDNSを可能としましたが，有効解像度という意味において当時日本で最も大規模なDNSであったと記憶しています．DNS実施自体が一つの研究成果となるような乱流DNSの創成期でした．

修士課程修了後に助手として採用頂いたのですが，その年か，あるいは2年目に，「ビジュアライゼーション研究会」が計算力学部門（私の記憶が正しければ）に設置されました．この研究会の活動の一環として何らかの企画をせねばならず，悩んだ末に乱流のDNS結果を可視化することになりました．今のように三次元可視化を自由にできる時代ではありませんでしたが，時期を同じくして隣の研究室の故・土方邦夫教授から「アニメーションを作成できるグラフィック・コンピュータを買ってあげるから，好きなものを選定せよ」と有り難いお話を頂き，当時としては最新鋭のグラフィック・コンピュータと動画作成設備を導入させて頂きました．研究会で発表する可視化画像の準備と高額可視化装置の有効利用という二つの使命を果たすため，まずは手持ちのDNSデータを可視化することにしました．ここで，可視化したDNSデータも曰くつきで，東京大学情報基盤センターから頂いた無料枠を利用して，前述の最高格子点数で自由せん断乱流のDNSを実施はしたが，計算しただけで解析せずに放置していたものでした．理由なく放置していたわけではなく，当時の乱流現象に対する理解と主流であった二次元的な可視化ではその計算は発散しているようにしか見えなかったのです．現在，流れ場を簡易的に可視化するために速度勾配テンソルの第二不変量が一般的に用いられていますが，なぜかその当時悩んだあげく速度勾配テンソルの第二不変量を三次元可視化しました．私の知る限り，それが世界初の速度勾配テンソルの第二不変量を用いた流れ場の三次元可視化であったと思います．そのとき作成した可視化画像から見えたものが，後の乱流の普遍的微細構造に関する研究に発展しました．微細スケールで乱流は普遍的なある構造を持つに違いないと直感し（思い込み），一様等方性乱流、自由せん断乱流、壁面せん断乱流等の基本的な乱流場から，回転乱流，MHD乱流，乱流熱・物質輸送，混相乱流，圧縮性乱流，乱流騒音等へとあらゆる乱流場に研究範囲を広げ，最終的に乱流の散逸構造として普遍的な微細構造が存在することを示すことができたと思っております．

純粋乱流研究に少々寄り道をしながら，乱流燃焼に関する研究も実施して参りました．自動車や航空機のエンジン，発電用ガスタービン等，高エネルギー密度でエネルギーを取り出す機器の多くには必ず乱流燃焼が用いられていますが，乱流以上に乱流燃焼には未解明な点が多く残されていました．燃焼分野の最高峰会議は隔年で開催される国際燃焼シンポジウムですが，1994年に米国アーバインで開催されたシンポジウムに参加する機会を得ました．この会議の論文採択率は非常に低く，厳選された最先端研究のみに報告が許されます．1994年当時，乱流燃焼に関する数値解析は二次元解析が精いっぱいで，計測も困難であったことから，乱流燃焼物理に関する議論も的を射たものではありませんでした．講演を傍聴しながら，乱流燃焼の三次元DNSを実施してしまえば，この議論はすべて解決できると思い立ち，帰国後すぐに乱流燃焼の3次元DNSに取り組み始めました．燃焼反応は，複数の化学種と素反応の組み合わせで表現され，可能な限り厳密に表現するその組み合わせを詳細化学反応機構と呼びます．最も単純な燃料である水素であっても，10化学種，30素反応程度が必要であり，メタンでは50化学種300素反応程度，ガソリンに至っては数百化学種，数千素反応が必要です．この素反応の中には非常に高速なものも含まれることから（いわゆるスティッフネスの問題から），当時「乱流燃焼の3次元DNSは人類には不可能」と信じられていました．そのため，世界中のどの教科書を調べてもDNSで解くべき支配方程式すら厳密なものは見つからず，自ら支配方程式を導き，それに基づいてDNSコードを作成することになりました．支配方程式を導きなおすのに1週間，DNSコードの構築に1週間から2週間と，短期間で3次元DNSの準備を進めました．ただ，最初のDNSコードから最終版まで仕上げるのに2年以上の歳月を要しました．詳細化学反応機構を考慮に入れた世界初の3次元DNSを正式に発表できたのは2000年に英国エジンバラで開催された国際燃焼シンポジウムであり，そのDNSは東京大学情報基盤センターに当時設置さ

れていたスーパー・コンピュータで2年の歳月をかけて実施されました. 一度実施可能であることが示されると，次々に乱流燃焼の3次元DNSが報告されるようになります. 近年では主要学術雑誌に掲載される乱流燃焼研究の4割以上で乱流燃焼のDNS結果が何らかの形で用いられていることから，少なからずこの分野の発展に寄与できたものと考えています.

これらの乱流や乱流燃焼のDNSデータは，機械学習によるモデル開発等に現在でも活用されており，データサイエンスとしての新たな価値も見出されています. 最後に，このような研究展開が実現できたのは，精力的に研究を実施してくれた極めて優秀な学生諸氏によるところが大きく，ここで改めて感謝致します.

特集：バーチャルエンジニアリングにおける形状設計・計算・加工技術の現状と未来

「特集にあたって」
バーチャルエンジニアリングにおける形状設計・計算・加工技術の現状と未来

松本　敏郎
名古屋大学

機械学会2020年度年次大会で、設計工学・システム部門、機械材料・材料加工部門との合同で「バーチャルエンジニアリングにおける形状設計・計算・加工技術の現状と未来」と題した先端技術フォーラムを企画・開催した。積層造形技術の発展に伴い、従来の加工法では適切でなかった構造物の形状を考えることが可能となるとともに、形状の設計法の自由度が増加し、計算力学の適用範囲が広がると考えた。これに応じて形状最適化やトポロジー最適化の手法がさらに発展すると、さらなる積層造形技術や新しい加工法の発展を刺激すると考えられる。また、新たな加工法の開発によりそれに適した材料の研究が発展するとともに、CFRPのような強化材を用いた積層造形の発展も促すことになる。また、そのような材料を用いた最適化問題は新たな計算力学の研究対象となる。このように、計算力学に基づく設計法と積層造形による加工法、加工に用いる材料の研究は図1のように相互に関係して発展すべきものでることから、トポロジー最適化などの形状設計法、数値計算手法、また金属やCFRPなどに対する積層造形手法と装置の現状と将来の位置づけについて考えてみたわけである。そこで本フォーラムでは下記のように、積層造形に関係する構造形状の最適化の計算に関する3件の講演とCFRP、金属、マルチマテリアルに対する3Dプリンタ技術の動向に関する3件の講演をお願いした。

（1）　積層造形を念頭においたトポロジー最適設計
加藤 準治（名古屋大学大学院工学研究科）

（2）　パラメータ曲面のレベルセットに基づく新しいトポロジー最適化とその応用
飯盛 浩司（名古屋大学・大学院工学系研究科）

（3）　製造に関する数理モデルの開発と積層造形における製造性を考慮したトポロジー最適化への展開
山田 崇恭（京都大学・大学院工学系研究科）

（4）　高強度CFRPの3Dプリンティングにおけるプリントパスと形状設計
上田 政人（日本大学理工学部機械工学科）

（5）　次世代ものづくりにおける3Dプリンタの将来像
京極 秀樹（近畿大学工学部（広島キャンパス）

（6）　マルチマテリアル3Dプリンティングの進展
丸尾昭二（横浜国立大学）

前半の3件は、積層造形を睨んだトポロジー最適化の概要、CADとの連携を図る上での形状のパラメータの取り扱い、加工に必要な形状パラメータの計算法と加工性を考慮した最適化法の話題提供であり、後半の3件は今後期待されるCFRPを用いる3Dプリンティング技術の現状、3Dプリンタの将来像、複数の材料の接合構造を一気に製造する3Dプリンティングの紹介である。これらの講演内容は、講演者のそれぞれの専門分野での研究内容もとにしたものである。COVID-19の影響でオンラインによるバーチャルフォーラムであったが、本フォーラムを通じて機械学会の部門横断的な情報交換の重要性が認識され、今後も本テーマについて継続的に議論することとなった。

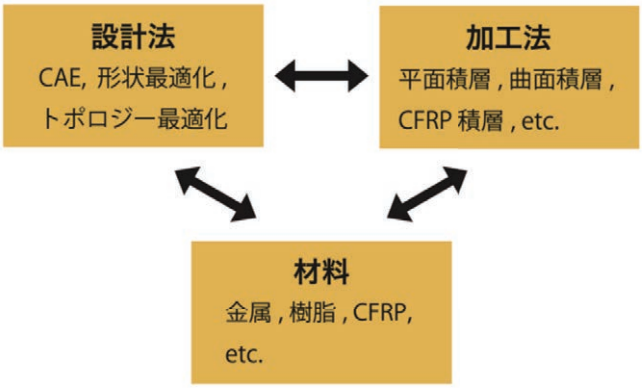


図 1.　形状設計・計算・加工技術の相互関係

積層造形を念頭においたトポロジー最適設計

加藤　準治
名古屋大学大学院工学研究科

積層造形　トポロジー最適化

1.　はじめに

筆者は，令和2年9月14日に名古屋大学東山キャンパスで開催された日本機械学会2020年度年次大会の中の「バーチャルエンジニアリングにおける形状設計・計算・加工技術の現状と未来」（企画：松本敏郎先生（名大），山崎美希氏（日立製作所），秦誠一先生（名大））と題した先端技術フォーラムにおいて，「積層造形を念頭においたトポロジー最適設計」という題目で研究紹介をさせて頂いた．本稿ではそこで紹介した研究成果について概説したい．研究内容の詳細については，文献 [1] を参照されたい．

2.　トポロジー最適化と積層造形

次世代型ものづくりの代表格である「積層造形（アディティブマニュファクチャリング）」は，近年，航空宇宙，自動車，機械，建設，医工学分野において盛んに研究開発が進められている．積層造形の主な利点は，自由形状を活かすことで構造製品の大幅な軽量化が期待できること，また，うまくデザインすれば特殊な機能を付与できる点にある．このような背景から，積層造形によるものづくりを念頭においたトポロジー最適化の研究開発が盛んに進められるようになった．トポロジー最適化は，数理的なアプローチによって構造の最適なかたちを求めるためのものであり，最近では剛性最大化などの簡単な目的関数であればCADのソフトウェアでも使用できるようになっている．

また，黎明期の積層造形では使用できる材料は，樹脂と金属であったが，現在はセラミックスやゴム系材料，モルタル，さらに連続繊維強化プラスチックも扱えるようになってきた．このような背景も後押しして，トポロジー最適化の学術研究は，材料特有の非線形性を考慮したものや有限変形挙動を考慮したもの，動的な振る舞いを考慮した最適設計法，異種材料を用いるマルチマテリアル最適設計法，構造のロバスト性能の向上を目指したトポロジー最適設計法，メタマテリアルのための最適設計法など，様々な研究が行われるようになった．また，積層造形によって比較的小さなラティスを作り，軽量化とエネルギー吸収性能の改善を図る設計法や熱輸送の高効率化を目指した設計法の開発も増えている．しかし，産業応用を意識すると，あまりにも高度な設計法や複雑な計算を前提とした最適設計法は実設計には不向きである．そのため，実用的で扱いやすい設計法の開発も進められるようになってきた．そこで，本稿では実用的な方法のひとつとして開発した「主応力方向分散制約[1]」という制約条件式を用いた方法について紹介する．

3.　最適化問題の設定

(1) 概要

構造の軽量化を図った材料体積制約付き剛性最大化は，最も実績の多い設計問題であるが，その最適構造はスレンダーな構造となることが多い．しかし，スレンダーな構造は，線形領域を超える荷重が作用したとき，あるいは荷重条件が不確かに変化すると，途端に座屈するなどの脆弱な破壊挙動を示す．このような背景から，非線形構造解析を前提としたトポロジー最適化に関する研究が報告されるようになった．これらの手法は，力学的な観点に根ざしたもので学術的にも高く評価されているが，複雑な非線形挙動を対象とする場合，そもそも順解析自体が不安定で計算が破綻しやすく，最適設計も容易ではない．このような経緯から，扱いやすい線形座屈解析を基本とした材料体積制約付き座屈荷重最大化問題を扱う研究も多く報告されている．しかし，線形座屈解析は，複雑な構造形状や荷重負荷が大きくなると実現象と大きく乖離することが知られており，信頼性に乏しい．

そこで，本研究では線形の構造解析にもとづく実用的な手法を前提としつつ，部材の細長比を制御することで構造強度を改善するトポロジー最適設計法を開発した．具体的には，一般的な材料体積制約付き剛性最大化問題に対して，「部材数を増やして部材の細長比を小さくする制約条件」を付加する方法である．提案する制約条件は，部材数の増加を促すために主応力方向のばらつき，すなわち主応力方向の分散を大きくする局所的な不等式制約条件で表現されている．また，主応力方向を表現するために角度を変数として取り扱うが，通常の算術方法では特異となることが知られている．そこで，本研究では方向統計学による統計量を表現方法として取り入れ，安定的な解の収束を可能にしている．

なお，本手法は，線形の構造解析の枠組みで剛性最大化を図りつつ，同時に非線形応答である構造強度を改善するものである．非線形構造解析を実施しない本手法の計算コストは従来の複雑な非線形応答を考慮したトポロジー最適化手法に比べて十分に小さいことを強調しておく．

(2)　最適化問題の設定

前述のとおり，目的関数は剛性最大化であり，ここでは力学的な観点から平均コンプライアンス最小化と同義であると位置づけた．以下に，本研究のための目的関数 f および不等式制約条件 g を以下のように設定する．

$$
\begin{aligned}
\min \quad & f(\boldsymbol{\rho}(s)) = \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F} = \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{u} \\
\text{s.t.} \quad & \boldsymbol{K}\boldsymbol{u} = \boldsymbol{F} \\
& g_{\mathrm{vol}}(\boldsymbol{\rho}(s)) = \frac{\int_{\Omega}\rho(s)\,\mathrm{d}\Omega}{\int_{\Omega}\mathrm{d}\Omega} \le v_0 \\
& g_{\mathrm{pri}}(\boldsymbol{\rho}(s)) = V^{\min\prime} \ge \bar{V}' \\
& 0 \le s_e \le 1 \quad (e = 1, 2, \cdots, N)
\end{aligned}
$$

ここで，u は全体節点変位ベクトル，F は外力ベクトル，K は全体剛性行列，g_{vol}は全体の使用材料体積制約，v_0 は所与の全体材料

体積比率の上限値, g_{pri} は提案する主応力方向分散制約であり, 構造強度の向上を図るための条件である. s_e は, 設計変数で各有限要素の材料体積比であり, Nは要素の総数である. ρ は, s_e にフィルターを施した後のもので, ここでは要素の密度として扱う. $\bar{V}'$は, 定数で主応力方向分散の下限値である. $V^{\min'}$ は, 計算で求められる主応力方向の分散であり, 以下の式で定義した. 主応力方向の分散値は, 局所領域内に存在する有限要素の積分点で求めた主応力およびその方向から計算されるようにしている. $V^{\min'}$ が, $\bar{V}'$よりも大きくなるように制約を課すことで, 主応力方向にばらつきを与え, それによって枝分かれを促進する制約条件となっている.

$$V^{\min'} = \left[\frac{1}{n^{\mathrm{loc}}} \sum_{l \in \Omega}^{n^{\mathrm{loc}}} \left(\frac{\rho_l^{\mathrm{loc}}}{V_l} \right)^p \right]^{-\frac{1}{p}}$$

ここで, n^{loc}は, 図1に示すように領域全体を区分する局所領域の個数, V_l はその局所領域の体積, ρ_l^{loc} は局所領域でフィルターを掛けた後の材料体積比, p はp －ノルムのパラメータで本研究では20とした. 詳細については, 文献 [1] を参照されたい.

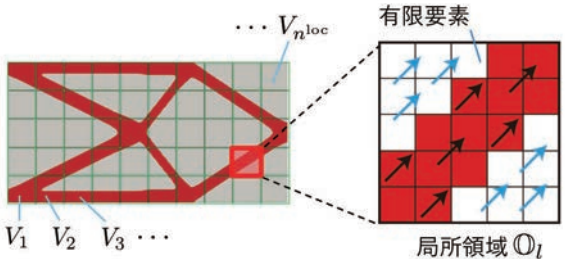


図1　局所領域と有限要素

(3) 提案する主応力方向分散制約の概念

ここでは, 構造強度の向上を意図した主応力方向分散制約について簡単に説明する. 本制約条件は構造部材の枝分かれを誘発することで, 全体の構造部材数を増やし, 部材自体の細長比を制御することを目的としている. このような制約条件を設定するためには構造部材の角度を定量的に評価する必要がある. しかし, 密度法によるトポロジー最適化の場合には設計変数が0または 1に収束していない中間密度(グレースケール) の状態においては部材の幾何学的特徴を明確に識別することが困難になるという問題が生じてしまう. また, このようなグレースケールの状態と, 設計変数が完全に0と1に収束した状態のどちらにおいても一律に構造部材の角度を評価できる方法が必要となる.

そこで, 本研究では主応力方向に基づく構造部材の角度評価方法を提案している. この手法は, 構造部材の角度はその構造部材に生じている主応力方向と大まかに一致しているという事実に基づくものである. 具体的な例として, 図2に示す剛性最大化によって得られたスレンダーな最適構造を使って説明する. ここで, ある一本の部材に着目してみると, 部材方向とそこでの主応力方向はほぼ一致し, その部材近辺の領域(局所領域)では平均的に主応力方向の分散は小さくなるはずである. 一方で, 枝分かれがある領域では, その領域での主応力方向の分散は大きくなることは想像がつく. この因果関係を利用すると, 最適化計算の中で, 任意の局所領域を定義しておき, そこでの平均的な主応力方向の分散値に下限値の制限を課すことで枝分かれのあるようなトポロジーを発生させることが可能になる.

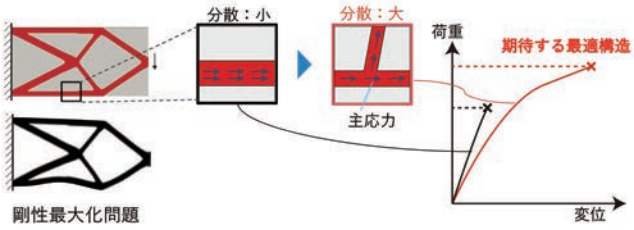


図2　主応力方向分散制約の概念図

4.　最適化計算例

(1) case-1(片持ちはり)

図3は, 左端を変位拘束し, 右端中央付近で鉛直下向きに一定の荷重を載荷した条件下において得られた最適化計算結果である. 同図 (a) は, 参考として実施した, 主応力方向分散を課さない通常の剛性最大化の結果, (b) ～ (e) はそれぞれ主応力方向分散制約の下限値を$\bar{V}'$ = 0.005, 0.08, 0.01, 0.015とした場合の最適化結果である. 下限値が大きいほど, 枝分かれを強要する条件となる. また, 図4は, 得られた最適化構造に対して, 別途, 有限変形解析を実施し, それにより得られた, 制御点における荷重－変位関係と荷重ピーク時の変形モードである. このそれぞれの変形モードは, 図3の右側にも記した.

まず, 図3 (a) の通常の剛性最大化の結果を見ると, 細長い部材で構成される単純な構造が得られたことがわかる. それに対し, 主応力方向分散制約を課した同図 (b) ～ (e) の結果は, 通常の剛性最大化の最適構造を基本としつつ, 主応力方向分散制約の下限値が大きくなるにつれて概ね部材数が増加していることがわかる. また, 上下の水平部材とそれに接する部材とのなす角度もそれに従って大きくなっており, 主応力方向分散制約の効果が反映された結果となっていることがわかる.

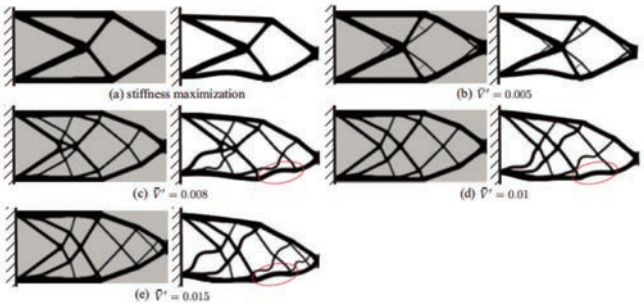


図3　最適化結果：
(a) 通常の剛性最大化, (b) ～ (e) 主応力方向分散制約を化した剛性最大化(右側の図は, 有限変形解析による荷重ピーク時の変形モード)

次に, 荷重ピーク時での変形モードを観察すると, 図3 (a) の剛性最大化の結果では下側水平部材が座屈に至っているように思われるが同図 (c) ～ (e) の構造では赤の波線で囲まれた部材において座屈と思われる変形が見られた. これは構造の中の部材

数が増加したことにより下側水平部材の細長比が小さくなることで同部材の座屈が抑制されたためであると考えられる. また, 荷重−変位関係を見ると, 初期剛性は (a) の構造が最も大きく, 主応力方向分散制約の下限値が大きくなるほどそれが低下していることがわかる. (a)の剛性最大化の結果では荷重の大きさが 1.30×10^4 Nで下側水平部材に大きな変形が生じ, 荷重耐力を失うのに対し, 主応力方向分散制約を課した (b) ～ (e) の構造ではいずれも大きな構造強度を示していることがわかる. 最も大きな構造強度を示したのは 同図 (e) に示した $\bar{V}' = 0.015$の最適構造で, その構造強度は 2.25×10^4 Nとなり, (a)の通常の剛性最大化による最適構造に対して約 1.73 倍となった.

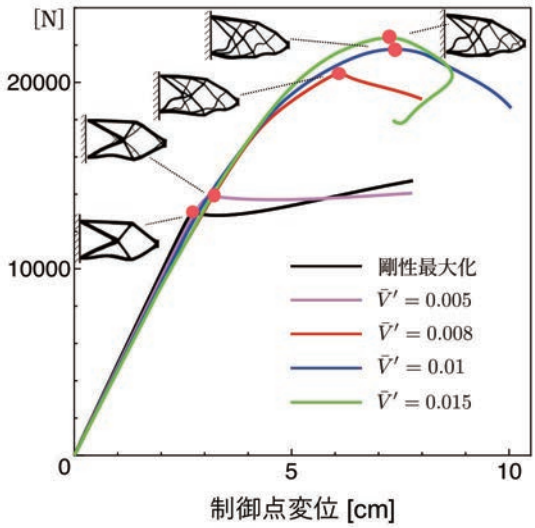


図4　case-1の荷重 − 変位曲線

(2) case-2 (3点曲げはり)

同様の例として, 単純支持はり(3点曲げ)を対象に実施した最適化計算結果を図5に示す. 先程と同様に, 同図 (a) は通常の剛性最大化の結果, 同図 (b) ～ (e) はそれぞれ $\bar{V}' = 0.005$, 0.01, 0.015, 0.02 とした場合の最適化結果である. (b) ～ (e) では, 先程の例と同様に通常の剛性最大化の最適構造を基本構造としつつ, 枝分かれの多い構造が得られていることがわかる. また, 図6は有限変形解析により得られた, 制御点における荷重−変位関係であるが, これも先程と同様に初期剛性は同図 (a) の通常の剛性最大化の結果が最も大きく, 主応力方向分散制約を課した最適構造ではわずかに低下していることがわかる. また, 構造強度については主応力方向分散制約を考慮したものが, 常に (a) の剛性最大化の結果よりも大きくなっていることがわかる. 最も大きな構造強度を示したのは同図 (c)の最適構造であり, 同図 (a) に比べて約 1.59 倍の構造強度を示した.

最後に, case-2で得られた最適構造に対して, 金属3Dプリンターで造形し, 載荷試験を行った. 造形と試験ともに本田技術研究所にて実施された. 寸法は, 最適化計算時と同じく, 幅 160 mm, 高さ30 mm, 奥行き10mm, 造形機はSLM500, 材質はAlSi10Mg, 造形条件は標準条件とし, プレート予熱200℃とした. 載荷試験の様子は図7に示すとおりで, 室温23℃の環境下でクロスヘッドスピード 1 mm/minで載荷した. 荷重載荷は, 構造が不安定になるまで実施した.

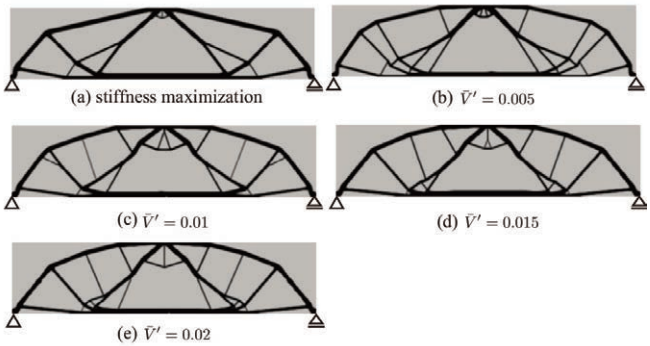


図5　最適化結果:
(a) 通常の剛性最大化, (b) ～ (e) 主応力方向分散制約を課した剛性最大化

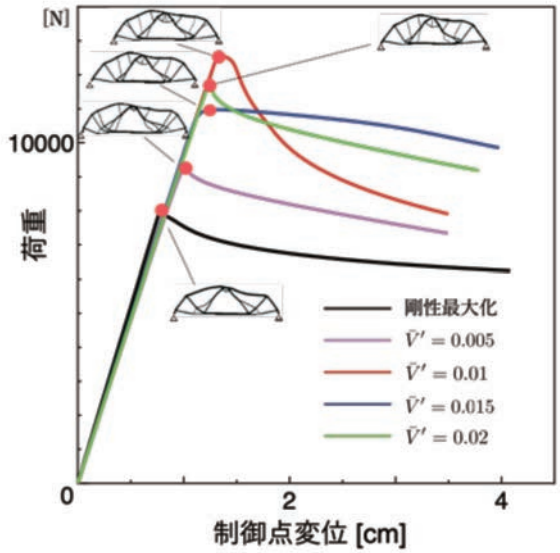


図6　case-2の荷重 − 変位曲線

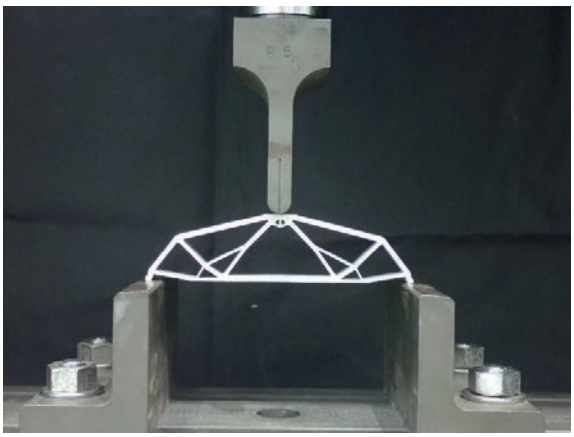


図7　造形した構造の3点曲げ載荷試験の様子
(供試体は図5 (a)のもの)

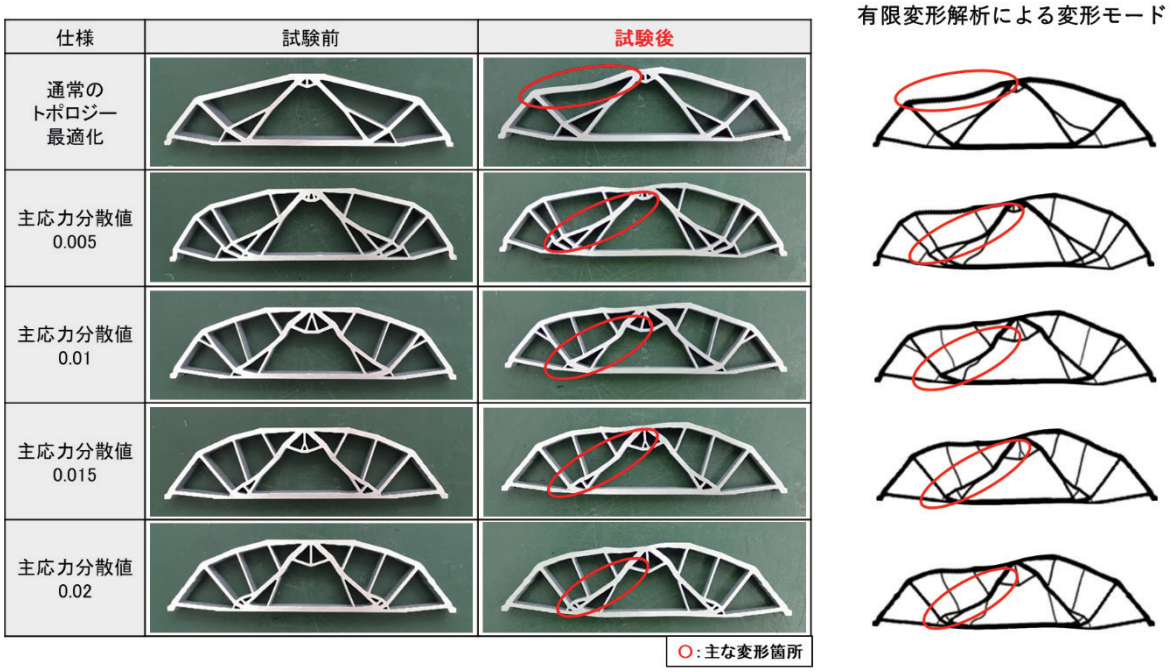


図8　金属3Dプリンターで造形した供試体と載荷試験後の供試体および変形モードの比較

図8は，左から載荷試験前および試験後の供試体写真および図6に示した荷重ピーク時の変形モードである．いずれの構造も左右対称であるため，変形後の供試体との比較をしやすくするために，解析で得られた変形モードを適宜左右反転させて表示している．図からわかるように，変形モードは試験後の変形をよく捉えていることがわかる．また，通常の剛性最大化の場合は，赤線で囲んだ部材で全体座屈が生じており，解析でもその様子が捉えられている．主応力方向分散制約を課した最適構造では，構造の内側にある部材から変形が大きくなって不安定な状態に至ることが載荷試験と解析から確かめられた．また，載荷試験で得られた荷重－変位曲線は，いずれも図6で示す荷重強度と近い値となった．

一方で，変位については，載荷試験で材料の塑性化が生じ，解析結果よりも大きな変位が生じる結果が得られた．その結果を踏まえて，本田技術研究所で新たに弾塑性有限変形解析を実施し，変位と強度の両方を比較した上で，本手法の有用性を確認した．これらの載荷試験や解析の荷重－変位曲線については，共同研究の関係上，また今後の論文化の観点からここでの掲載は控えさせて頂く．

5.　まとめ

本稿では，積層造形を念頭においたトポロジー最適設計という題目で筆者の研究グループの研究成果の一部を紹介させて頂いた．開発した主応力方向分散制約は，線形の構造解析の枠組みで剛性最大化を図りつつ，同時に非線形応答である構造強度を改善するものである．非線形構造解析を実施しない本手法の計算コストは従来の複雑な非線形応答を考慮したトポロジー最適化手法に比べて十分に小さく，実用性のある手法であると思われる．

一方で，主応力方向分散の下限値をいくらに設定すればよいか，また，荷重強度を直接制御できないなど，実際のものづくりの観点からすると悩ましい問題も残っている．これらの課題の解決については，今後の課題としたい．

最後に，これからの積層造形によるものづくりとその設計に関して個人的主観を述べておきたい．積層造形装置の大型化や高速化，多機能機種の開発も進み，製品によっては本格的な導入が検討されているようである．その際に注意すべきところは，積層造形を導入することにより，製品に求められる設計上の要求性能も高度になり，そもそもの設計が困難になることである．トポロジー最適化は，それを支援する最も有効なツールではあるが，実際の設計現場では，汎用の最適化ソフトウェアの適応範囲を超えた複雑な問題を対象にしていることが多く，結果として従前からのトライアルアンドエラーによる設計・製作に陥いる結果となる．これは積層造形の普及を妨げるひとつの要因になっており，これに対する解決方法を検討する必要があると思われる．このような状況の中，設計現場における重要な課題を汲み取り，ユーザーとソフトウェア開発者，研究者が連携して問題解決にあたる枠組みの構築が必要と考えている．

謝辞：

本研究の実施にあたり，本田技術研究所 魚住久雄氏のご協力・ご支援に心より感謝申し上げます．また，本研究の一部は，東北大学大学院在籍時の鎌田浩基君（現在は清水建設技術研究所に勤務）の修士論文に関連するものです．その貢献に対して感謝します．

参考文献：

[1] 鎌田浩基，加藤準治，京谷孝史，トポロジー最適化による構造強度向上を目的とした主応力方向分散制約の提案，日本計算工学会論文集: Paper No.20200006, 2020年

パラメータ曲面のレベルセットに基づく新しいトポロジー最適化とその応用

飯盛　浩司
慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科

1. はじめに

1988年のBendsøe and Kikuchi による先駆的な研究[1]以来, トポロジー最適化に関する研究が進められている. トポロジー最適化は, 構造最適化手法の一種であり, 設計対象物の形状を決定する問題を設計要件から定まる目的関数を最小化する材料分布の決定問題に置き換え, これを数理最適化の手法を用いて解く. 元来, 軽量高剛性の部材を創成する目的で提案され[1], これまで材料力学・構造力学の分野で発展してきた.

トポロジー最適化の近年の動向として, 材料力学・構造力学以外の工学分野への展開が盛んになってきたことは注目に値する. 例えば音波, 弾性波, 電磁波などの波動問題[2]や流体力学[3]で記述される場を対象としたトポロジー最適化に関する研究が多く見られる. 構造最適化問題は偏微分方程式の境界値問題を制約条件に持つ非線形最適化問題に他ならないから, 現象を境界値問題としてモデル化でき, その解 (と感度) が数値的に構成できるならば様々な物理を対象とできることは明らかである.

トポロジー最適化は, 寸法最適化や形状最適化などの他の構造最適化手法と比較して各段に高い設計自由度を有することから, これを用いることで抜本的な性能改善が期待できる. 一方で, トポロジー最適化による設計案はしばしば幾何学的に複雑になりすぎることがあり, 製造の観点も含めて考えると「最適」とは言い難い場合がある. 近年では, 積層造形 (いわゆる3Dプリンティング) 技術の発展に伴い, トポロジー最適化の「解」を利用できる場面も増えてきたが, それでもなお, 形状の複雑さを制御することのできるトポロジー最適化を構築することには意義がある. この目的で, 著者らは, いわゆるレベルセット法に基づくトポロジー最適化[4]において, レベルセット関数 (=その零等値面が設計対象の境界を表す) をBスプラインなどのパラメータ曲面で表現する方法[5]を提案した. 本稿では, 著者らがこれまでに開発した手法を紹介するとともに, その応用例をいくつか紹介する.

2. レベルセット法に基づくトポロジー最適化

トポロジー最適化問題は, 典型的には形状汎関数$J(u;\ \Omega)$を最小化する領域の形状Ωを求める問題として定義される. ここに, uはΩあるいはその補領域で定義される偏微分方程式の境界値問題の解である.

このような問題を解くにあたり, 領域形状をどのように表現するかがポイントとなる. レベルセット法では, スカラー値関数ϕを用いてこれを表現する. すなわち, 領域Ωにおいて正, その補領域において負をとるスカラー関数 (図1) を導入する. はしばしばレベルセット関数と呼ばれる. このようにして, 形状を求める問題はレベルセット関数の分布を求める問題に置き換わる.

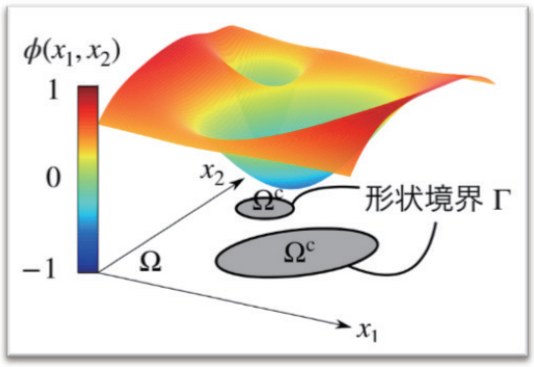


図1.　レベルセット関数.

レベルセット関数の時間発展には種々の方法[4, 6]が提案されているが, ここではAmstutz, and H. Andrä [4]の方法を採用する. [4]では, レベルセット関数の発展をトポロジー導関数とレベルセット関数の球面線形補間により記述する. このようにすることで, 時間発展方程式の解がトポロジー最適化問題の解を与えることが知られている[7]. 一方で, [4]はレベルセット関数の空間方向の基底としてuを離散化するのに用いる有限要素基底を再利用するため, 形状の幾何学的複雑さを制御する機構を持ち合わせていない. 著者らの提案する方法は, レベルセット関数を張る基底 (パラメータ曲面) と境界値問題の解を張る基底を分離することにより, 設計案の幾何学的複雑さを制御しつつトポロジー最適化を実行することができる[5].

3. 数値計算例

本節では, 提案するパラメータ曲面のレベルセットを用いたトポロジー最適化の実行例をいくつか示す.

3-1. 音響レンズのトポロジー最適化

三次元空間において, x軸負の向きに進む波長0.5の平面音波に対し, これを一点 (x, y, z)=(1.0, 1.0, -0.5) に集中させる音響レンズを考える. 設計領域として, [0.0, 2.0]×[0.0, 2.0]×[0.0, 0.2]の直方体をとり, この内部に剛体からなる音響レンズを設計した.

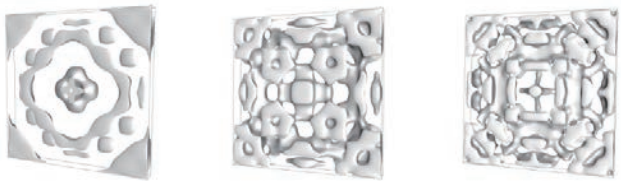


図 2. 音響レンズのトポロジー最適化例 : 左から順に , 200, 450, 800 個の B スプライン基底関数を用いた .

ここでは, トポロジー感度解析にはH行列法[8]で加速した境界要素法を用いた. レベルセット関数の空間離散化にはBスプラインを

用い, 図2に求めた音響レンズの設計案を示す. 使用した基底関数の大小により, 形状の複雑さが異なることが分かる. また, 図3に, 目的関数の履歴を示す. 形状が複雑な場合 (=設計自由度が高い場合) に, より性能の高い音響レンズが設計できていることが分かる。

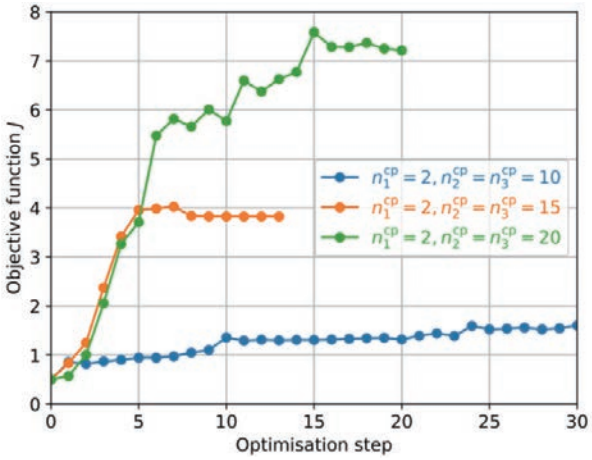


図2. 音響レンズのトポロジー最適化における目的関数の推移. 基底関数の数が多い場合 (=形状が複雑な場合) に目的関数の値は大きく(=レンズとしての性能が高く) なっている.

このように, 当手法では, Bスプライン基底関数の多寡により, さまざまな性能と幾何学的複雑さを持つ最適設計の案を創出することができる. 性能と幾何学的複雑さは多くの場合にトレードオフの関係にあることから, 製造に関する要件と照らし合わせることにより,「最適な」設計案を選択することができる.

3-2. 剛性最大化問題

次に, トポロジー最適化問題のベンチマークとして広く用いられている剛性最大化問題を解いた例を示す. 図4上に示す領域を設計領域とし, 左端が固定, 下端右下に下向き荷重がかかる場合に, 剛性が最も大きくなる線形弾性体の分布を求めた. 面積の制約は線形弾性体の面積は設計領域のそれの半分以下とした.

ここでは, レベルセット関数の空間離散化にTスプライン[9]を用いた. Tスプラインは, 基底関数の配置に関する制約をBスプラインに対するそれと比べて大幅に緩和したパラメータ曲面であり, 基底関数の「粗密」を局所的に変更することができる. したがって, これを用いることにより設計領域の一部のみが複雑な(あるいは単純な) 設計が可能となる. ここでは, 設計領域の左半分をシンプルに, 右半分を複雑にするような設定で最適化を実行した. 得られた設計案を図4下に示す. 想定通り, 設計案の幾何学的複雑さを局所的に制御できていることが確認できる.

4. おわりに

本稿では, パラメータ曲面のレベルセットに基づく新しいトポロジー最適化について概説し, いくつかの数値計算例を紹介した. 今後の課題としては, 本手法を拡張し, 形状の複雑さをアダプティブに制御するトポロジー最適化法を実現すること, その他の製造に関する制約を考慮したトポロジー最適化を開発することなどが挙げられる.

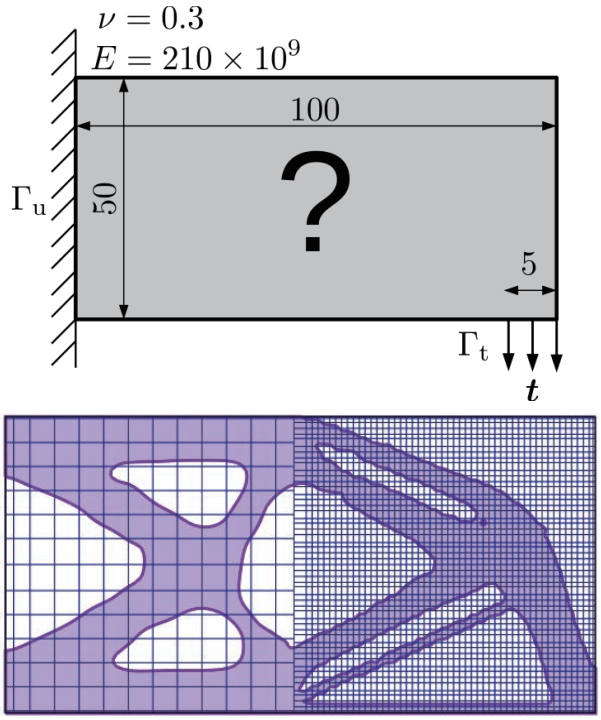


図4. 剛性最大化問題 (上) とその解の例 (下)

参考文献

[1] M. P. Bendsøe, N. Kikuchi. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1988, 71.2: 197-224.

[2] H. Isakari et al. "A topology optimisation for three-dimensional acoustics with the level set method and the fast multipole boundary element method." Mechanical Engineering Journal 1.4 (2014): CM0039-CM0039.

[3] K. Yaji et al. "Topology optimization using the lattice Boltzmann method incorporating level set boundary expressions." Journal of Computational Physics 274 (2014): 158-181.

[4] S. Amstutz, and H. Andrä. "A new algorithm for topology optimization using a level-set method." Journal of computational physics 216.2 (2006): 573-588.

[5] 飯盛浩司, 高橋徹, 松本敏郎. "B スプライン曲面のレベルセットを用いたトポロジー最適化." 計算数理工学論文集 17 (2017): 125-130.

[6] T. Yamada, et al. "A topology optimization method based on the level set method incorporating a fictitious interface energy." Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 199.45-48 (2010): 2876-2891.

[7] S. Amstutz, "Analysis of a level set method for topology optimization." Optimization Methods and Software 26.4-5 (2011): 555-573.

[8] Bebendorf, Mario. Hierarchical matrices. Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[9] T. W. Sederberg,, et al. "T-spline simplification and local refinement." ACM transactions on graphics (TOG) 23.3 (2004): 276-283.

積層造形における製造性を考慮した数理モデルの開発とトポロジー最適化への展開

山田　崇恭
東京大学大学院工学系研究科附属総合研究機構戦略研究部門・機械工学専攻

1.　はじめに

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，注目を集めている．造形自由度が高いがゆえに，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るため，設計段階の基本的な考え方の大幅な見直しが行われつつある．積層造形法を最大限に活用した設計法はDfAM（Design for Additive Manufacturing）と呼ばれており，積層造形法による造形を前提とした設計手法の構築が期待されている．その有力手段として，トポロジー最適化法が挙げられる．トポロジー最適化は，設計者の経験や力学的考察等に基づく試行錯誤に頼らずに，与えられた評価指標を最大，もしくは最小化させる形状を創成設計する手法である．与えられた形状パラメータを最適化する寸法最適化や，与えられた形状の外形形状を変更させて最適な形状を求める形状最適化と比較して，トポロジー最適化は，境界面の数などのトポロジーの変更を許容しながら最適設計解を探索可能とする最も設計自由度の高い方法である．そのため，設計者の発想を超えた設計案を提示できるだけではなく，今までにはない新しい機能を付加した新機能構造の創成も可能とするため，構造設計に留まらず，熱流体，電磁場，音波などの様々な物理特性を評価対象としたトポロジー最適化法の提案が行われている．

しかしながら，積層造形法は比較的造形自由度が高い手法ではあるものの，任意の形状を造形できるわけではない．例えば，卵の殻のような中空構造を部分構造に持つ構造は，パウダーベット方式や光造形方式には不向きである．また，造形段階における自重に耐えるための十分な剛性を持たない構造の場合は，自重を支える仮の構造，いわゆるサポート材を造形する必要がある．この場合，サポート材が除去可能な形状であることが求められる．このような課題に対して，著者の研究グループでは，積層造形における製造性を考慮したトポロジー最適化法の構築を行っている．本記事では，著者のこれまでの取り組みを紹介する．以下，2節では，トポロジー最適化の枠組について概説する．次に，トポロジー最適化の枠組の中で，製造性を考慮するための基本構想である仮想的な物理モデルの考え方について紹介する．3節では，積層造形法において要求される幾何学的制約条件について概説し，その数理モデルについて紹介する．4節では，提案手法をレベルセット法に基づくトポロジー最適化に展開した事例について紹介する．最後に5節で今後の展望について述べる．

2.　トポロジー最適化の枠組と仮想的な物理モデルの考え方

トポロジー最適化では，設計の善し悪しを判断するための指標の評価において，有限要素法を始めとする数値解析結果を用いる．そのため，トポロジー最適化の基本的な枠組は次式に示すように，状態変数uを与える支配方程式を制約条件に持つ最適化問題である．

$$\min_{\rho} \quad J[u] \tag{1}$$

$$\text{subject to:} \quad \text{governing equations for } u \tag{2}$$

ただし，Jは目的関数，$\rho(x)$は設計変数である．例えば，最大応力などを評価指標とする場合は，弾性方程式が制約条件，翼形状の揚力や抗力を評価指標とする場合は，ナビエストークス方程式が制約条件となる．言い換えると，トポロジー最適化の基本的な枠組は，目的関数や制約関数等の評価指標が，状態変数により表現されることである．さらには，状態変数を与える支配方程式の数値解析が可能であることを前提とし，支配方程式を制約条件に持つことである．

このような基本的な枠組であるから，トポロジー最適化では，力学的根拠に立脚した最適設計解を得ることができるものの，状態変数等が陽に存在しない製造性や組立性を直接考慮することが難しい．このような課題に対して，著者は，「仮想的な物理モデルの考え方」[1][2]を提唱している．この方法では，製造性を評価するための仮想的な物理場とその支配方程式を考え，その仮想的な場により製造性を評価する方法である．これにより，トポロジー最適化の基本的な枠組において，製造性を考慮した最適設計を可能にしている．3節及び4節において，積層造形を対象とした製造制約に関する適用例を示す．

3.　積層造形における製造性

積層造形における製造性について明確にする．ここでは，金属積層造形におけるパウダーベット方式を念頭に置き，二つの幾何学的条件について考える．具体的には，積層プラットフォームと平行な面を考え，造形形状を等間隔で分割した二次元形状を考え，その二次元形状の層を下から順に積み上げていくことにより，形状を造形する場合について考える．

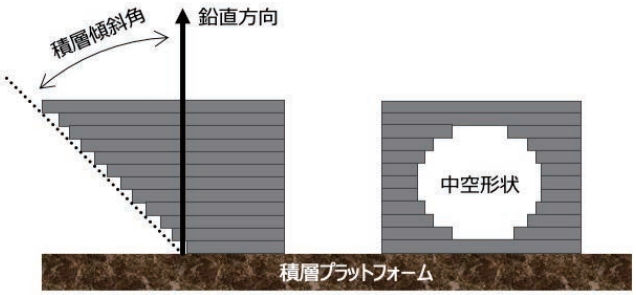


図1　積層造形における製造性

このとき，図1左側に示すように，張り出した形状（オーバーハング形状）は，造形時の自重に耐える必要があるため，積層造形傾斜角に制限を設ける必要がある．通常，サポート材と呼ばれる仮の構造物を付加的に造形し，所望の造形物の自重を支える．サポート材は，最終的に機械加工等により除去する必要があるため，追加の工程を必要とするだけではなく，サポート材が除去できない形状の場合があるため，基本的にはサポート材が不要な形状が望ましい．

次に，図1右側に示す，中空構造について考える．この場合，中空構造状の内部において，造形前の金属粉を除去することができないため，このような形状を排除する必要がある．孔をあけておき，後から孔を塞ぐことも可能であるものの，追加の工程が必要になる上に，二重の中空構造などでは，基本的にはそのような追加の工程を行うことが困難である．

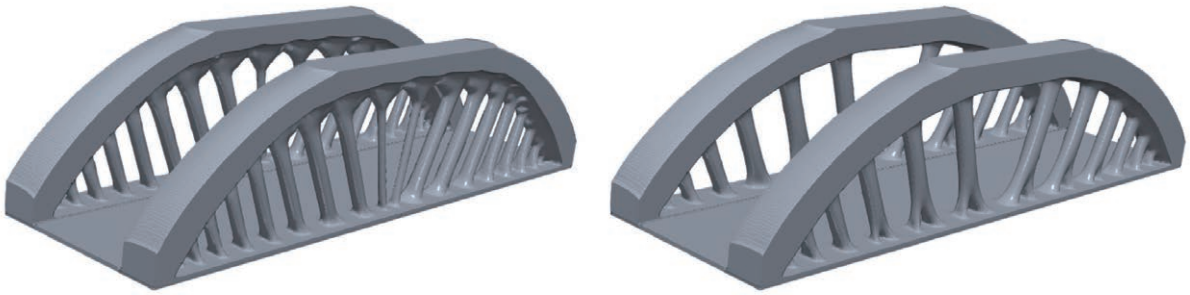
従って，考慮すべき幾何学的制約条件は，（1）サポート材を不要とする形状であることと，（2）中空構造を持たない形状であることの2点である．

4. トポロジー最適化への展開

ここでは，積層造形における製造性を考慮したトポロジー最適化の計算例について示す．方法論の基本的な考え方は，前述の通り，通常のトポロジー最適化の枠組において，製造性を表現する仮想的な物理モデルを考え，通常の物理場とのマルチフィジクス問題と考えれば良い．詳細は，文献[2]を参照されたい．

なお，方法論としての核心は，製造性を表現する仮想的な物理モデルをどのようにして，定式化するかである．幾何学的特徴量に対する偏微分方程式は，文献[3]に示すように，既に提案されているが，汎用性などの観点から，さらなる進展が必要と考えられる．

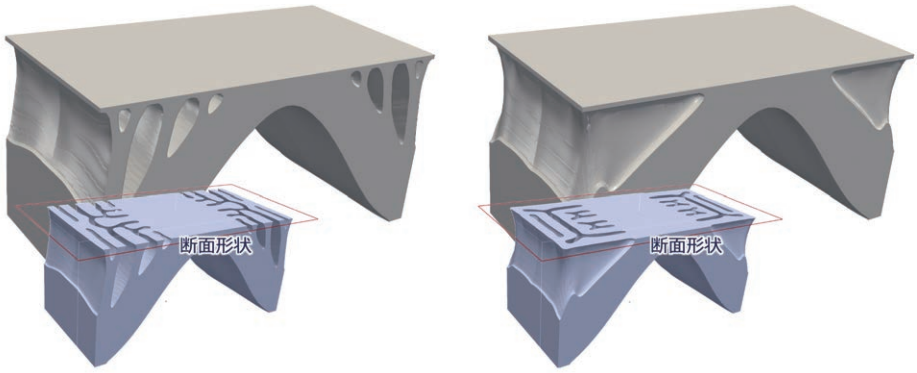
図2にサポート材を不要とする形状制約（以下，オーバーハング制約）を考慮したトポロジー最適化の結果を示す．ここで，積層方向は鉛直上向きとし，積層プラットフォームの上に平板状の非設計領域を設ける．図2（a）では，構造の上部において，水平面と平行に近い形状を排除する傾向がある．一方で，図2(b)においては，水平面と平行な部分構造を持つ形状が得られていることを確認できる．



(a) オーバーハング制約ありの場合の最適構造　　(b) 制約なしの場合最適構造

図 2　オーバーハング制約を考慮したトポロジー最適化

次に，図3に中空構造を排除する幾何学的制約条件（以下，中空排除制約）のトポロジー最適化結果について示す．ここで，上部の平板を非設計領域として，体積制約付剛性最大化問題を適用している．図2(a)に示すように，中空排除制約を考慮した場合，設計領域中の空洞領域が必ず外部と接続されていることを確認できる．一方，図2(b)に制約なしの場合のトポロジー最適化結果を示している．図に示すとおり，構造領域の内部に複雑な内部空洞を有することを確認できる．一般には，常に空洞領域を部分構造に持つ最適構造が得られるとは限らないものの，空洞排除制約が有用であることを確認できた．



(a) 中空排除制約ありの場合の最適構造　　(b) 制約なしの場合最適構造

図3　中空排除制約を考慮したトポロジー最適化

5. おわりに

ここでは，仮想的な物理モデルの考え方を紹介し，トポロジー最適化における製造性を考慮する方法について述べた．具体的に，金属積層造形を対象とした製造制約を考慮した場合のトポロジー最適化結果を示した．

今後の展望としては，多軸加工等の多様な生産工程を考慮した方法論の構築，さらには，それらを有機的に組合せた生産工程を含めた最適設計法の構築が期待される．また，仮想的な物理モデルの定式化に関しては，著者の直感に基づいて場当たり的に定式化が行われているため，方法論としての体系化には至っていない．領域に対する偏微分方程式を用いた製造性の定式化の体系化と汎用化ができれば，さらに応用範囲が広がると考えられる．

謝辞

本研究は，JSPS科研費JP19H02049の助成を受けて行われました．この場を借りて御礼申し上げます．

参考文献

[1] 佐藤勇気，山田崇恭，泉井一浩，西脇眞二，仮想的な物理モデルに基づく幾何学的制約付きトポロジー最適化（型成形及びフライス加工のための幾何学的制約法），日本機械学会論文集，Vol.83，No.851，p.17-00081，(2017)．

[2] 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異点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)．

[3] Yamada, T., Geometric shape features extraction using a steady state partial differential equation system, Journal of Computational Design and Engineering, Vol.6, No.4, p.647-656, (2019).

3DプリントCFRPのプリントパス設計とバーチャルテスト

市原　稔紀，上田　政人
日本大学大学院 理工学研究科 機械工学専攻

1. はじめに

熱溶融フィラメント成形方式の3Dプリンティングでは，熱可塑性樹脂フィラメントを加熱溶融しながら積層することによって3次元形状を造形する．この熱可塑性樹脂フィラメントに炭素繊維などの強化繊維を複合化すれば，高剛性・高強度なCFRPの3Dプリンティングが可能である[1]．

従来のCFRPの成形法では，炭素繊維を一方向に整列させたシートや，織物シートを積層する．CFRPは繊維方向に高い力学特性を発現するため，構造が受ける荷重方向と繊維方向とを一致させる必要がある．このようなCFRP積層板では，プライレベルでの積層構成最適化によって構造設計がなされる[2]．しかしながら，各層内では繊維配向が一定であることから，CFRPの異方性を十分に発揮させた構造設計にはなっていない．

CFRPの3Dプリンティングにおいては，直径が0.4mm程度のフィラメントを加熱溶融しながら付加造形するため，プリンタのノズルの移動経路（プリントパス）がそのままCFRP内部における繊維配向となり，フィラメントレベルでの繊維配向最適化が可能である．図1には，連続繊維によるCFRPの3Dプリント例を示す[3]．従って，構造内部で変化する応力分布に応じた最適なプリントパス方向，すなわち繊維配向を事前に最適化手法により求め，プリンタのノズルの移動経路を求めた繊維配向と一致させることによって，CFRPの力学的異方性を最大限に発揮させたCFRP構造が実現可能となる．

また，3Dプリンティングはデジタルデータから直接製造を行うダイレクトデジタルマニュファクチャリングである．プリントパスを3Dプリンタへ転送して製造を行うが，このプリントパスすなわち形状及び繊維配向データを用いて有限要素解析を行うことで，負荷に伴う損傷の発生と進展とを予測（バーチャルテスト）すれば，3DプリントCFRPの信頼性評価も可能となる．

本稿では，著者らによる3Dプリントパスの最適化と3Dデータに基づくバーチャルテストの例とを簡単に紹介する．

2. 3DプリントCFRPのプリントパス設計

連続繊維を用いたCFRPの3Dプリントパスの設計においては，繊維の連続性と異方性とを考慮した最適化が必要である．連続的な繊維配向を求めるために，スカラー場で駆動するストークス流れを考える[4]．すなわち，繊維配向を表すベクトル場をw，スカラー場をpとして，ストークス流れの方程式は

$$\nabla \cdot (\nabla \boldsymbol{w} + (\nabla \boldsymbol{w})^T) = p\boldsymbol{I} \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{w} = 0 \tag{2}$$

であり，このスカラー場を設計変数として，ベクトル場を有限要素法によって解くことを考える．

構造を有限要素で分割し，各節点における擬似的なスカラー場を設計変数とする．ある設計変数列p_iが与えられれば，ベクトル場w_iを求めることができる．このベクトル場から繊維配向角θを求める．

次に，直交異方性の弾性係数テンソル$C(\theta)$を用いて，材料の構成則は以下のようになる．

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\theta}(p)) \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \tag{3}$$

ここでσは応力テンソル，εはひずみテンソルである．ここではひずみエネルギー c を目的関数として，これを各節点における設計変数の値 p_iで最小化することを考える．すなわち，最適化問題は

$$\min_{p_i} c = \min_{p_i} \frac{1}{2}\int_\Omega (\boldsymbol{C} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}) : \boldsymbol{\varepsilon}\ dx \tag{4}$$

となる．

片持ち梁の先端中央部に集中荷重を負荷した二次元問題において，プリントパスの最適化を行った例を図2に示す．プリントパスは曲線状になっている．図3には従来のCFRPを想定して繊維を長手方向に一方向配向させた場合と，最適化後の曲線繊維配向を採用した場合とで，たわみを比較したものである．一方向配向した場合と比較すると，最適化に基づく曲線繊維配向によって40%程度の剛性向上が実現している．

3. 3DプリントCFRPのバーチャルテスト

3DプリントCFRPでは，プリントパス方向以外では比較的低応力状態においてもマトリクス樹脂の塑性，あるいは微視損傷の

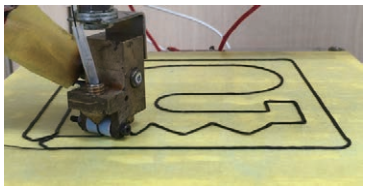


図 1 CFRP の 3D プリントの様子[3]

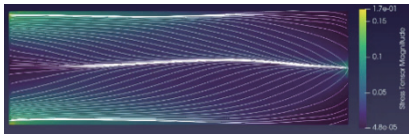


図2 最適化後のプリントパス

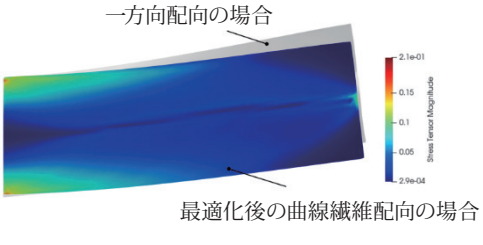


図3 プリントパス最適化による剛性向上

発達などにより非可逆的な力学挙動を示す. 複雑なプリントパスを有する3DプリントCFRPにおいては, 構造各所においてプリントパスに依存した損傷の発生及び進展が生じると考えられる. 従って, 構造に生じる損傷とそれに伴う応力の再分配とを正確に予測して, 運用時の構造信頼性を評価する必要がある. 連続体損傷力学に基づき, 3DプリントCFRPのクーポン試験片から繊維方向以外に生じる非可逆的な力学挙動を取得して有限要素法に組み込むことで, 実形状の3Dプリント品のバーチャルテストを行うことができる.

CFRPの非可逆的な損傷は, せん断応力と繊維直交方向応力, 及びその組み合わせによって生じる. Ladevezeら[5]はCFRPに生じる損傷の程度を, せん断弾性率と繊維直交方向弾性率の低下で表現した. 3DプリントCFRPにおいても同様とし, 損傷変数と呼ばれる状態量dを導入して剛性低下を考える. すなわち, せん断弾性率G_{12}については,

$$G_{12} = (1 - d_{12})G_{12}^{0} \tag{5}$$

であり, 繊維直交方向弾性率E_{22}については,

$$E_{22} = (1 - d_{22})E_{22}^{0} \tag{6}$$

とする. ここで上付きの0は非損傷状態の弾性率を表している. なお, 3DプリントCFRPにおいては初期弾性率を含む全ての量が位置の関数となり, 3Dデータに基づく繊維配向を基に場所ごとに決定する必要がある.

3DプリントCFRPでは, 塑性特性の取得において損傷の影響を受けるため, 有効応力$\tilde{\sigma}$ 及び有効塑性ひずみ$\tilde{\varepsilon}$を導入する.

$$\tilde{\sigma}_i = \sigma_i/(1 - d_i) \tag{7}$$

$$\tilde{\varepsilon}_i = \varepsilon_i(1 - d_i) \tag{8}$$

ここで, i={12,22} である.

図4にこれらの特性を実験的に取得する手法の概要図を示す. 詳細は文献6, 7を見て頂きたい.

3DプリントCFRPの非可逆的な力学挙動を組み込んだ有限要素法を使用して, S字形状の3DプリントCFRPの引張負荷に伴う非線形応答を予測した(図5). S字形状のCFRPは連続炭素繊維によるCFRPがプリント可能な市販の3Dプリンタ(MarkTwo, Markforged) を使用した. プリントパスはS字形状に沿っている. 実験と数値シミュレーションとにより得られた試験片各所での非線形応力−ひずみ応答には, 良い一致が得られた. 最終破壊はスプリッティング破壊であり, 損傷変数の大きい箇所から発生している.

4. まとめと展望

従来成形法によるCFRPの積層構成最適化から, 3DプリントCFRPにおいてはフィラメントレベルの繊維配向最適化が可能であること, 一方で, 損傷発生及び進展がより複雑になることを示し, 著者らによるプリントパス設計とバーチャルテストの例とを紹介した.

繊維配向の自由度が高いということは, 設計の難易度が高まることを意味する. 上手く設計できなければ, 材料特性を十分に発揮させられないばかりか, 損傷の生じやすい材料となってしまう危険性も有している. このために3DプリントCFRPにおいては, プリントパス設計が非常に重要である.

成形の容易さや成形時の材料廃棄がほとんど無いことからも, 3DプリントCFRPは今後様々な分野へ応用されていくと予想される. また, これまでにないプリントパス最適化と複雑形状の造形とにより, 革新的なCFRP部品創出の可能性も秘めている[8-10]. しかしながら, その設計には3DプリントCFRP特有の難しさがあり, 本稿で示したような力学応答について十分に検討する必要があり, それらを踏まえた最適化設計手法の研究も必要である.

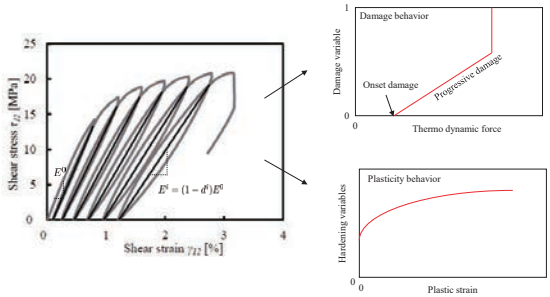


図4 3DプリントCFRPの繰り返し引張試験による損傷特性と塑性特性の取得

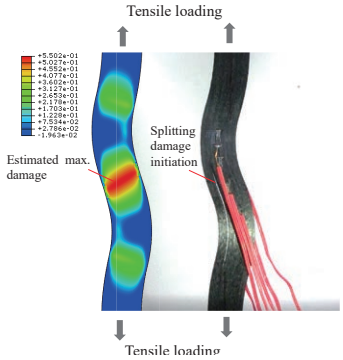


図5 3DプリントCFRPのバーチャルテスト

参考文献

[1] R. Matsuzaki, et al., Scientific Report, 6 (2018), 23058.
[2] A. Todoroki and R.T. Haftka, Composites Part B, 29, 3 (1998), pp. 277-285.
[3] 上田政人, 高強度CFRPの3Dプリンティングにおけるプリントパスと形状設計, 日本機械学会2020年度年次大会 講演論文集, 2020.9.13-16.
[4] 市原稔紀, 上田政人, ストークス流れに基づく3Dプリントc-CFRPの曲線繊維配向最適化, 第12回日本複合材料会議, 2021.3.2-4.
[5] P. Ladeveze & E. L. Dante, Composites Science and Technology, 43 (1992), 257-267.
[6] 村上澄男, 連続体損傷力学, 2008, 森北出版.
[7] N. Ichihara, et al., Advanced Composite Materials, 29 (2020), 459-474.
[8] Y. Koga, A. Todoroki, Advanced Composite Materials, 28, 2 (2019), 147-161.
[9] A. Todoroki, et al, Composite Structures, Vol. 266, (2021), 113815.
[10] M. Ueda, et al., Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. (掲載予定)

次世代ものづくりにおける 3D プリンタの将来像

京極　秀樹
近畿大学

1. はじめに[(1)-(3)]

Additive Manufacturing（AM）あるいは3Dプリンティングと呼ばれる技術は，1980年代初頭に開発された光造形に始まり，その後，パウダーベッド(粉末床溶融)，溶融物堆積（FDM），デポジション，バインダジェッティング方式などが開発された．2009年にASTM F42委員会において，7つのカテゴリーに分類され，2020年3月にJIS B 9441(表1)[(4)]としても規定された．これらの方式を利用した装置開発と併せて材料開発も活発に行われ，現在では日用品から航空宇宙分野の製品まで非常に幅広く利用されるようになってきた．具体的な製品への適用例としては，2020年にGE Aviation社が開発しているBoeing777用のGE9Xエンジンが FAAに認証され，このエンジンにはAMによる300以上の部品が使用されていると報じられている[(5)]．また，BMW社は2019年には30万個の樹脂及び金属パーツを生産したと報じられる(6)など，自動車分野における適用も増えてきている．特に，金属AM技術は航空宇宙分野，エネルギー・産業機器分野や自動車分野などにおいて，極めて需要な加工技術となってきている．このような工業製品や日用品を対象とした3Dプリンタは，その適用範囲が広がったことから研究開発が活発に行われ，その性能の向上も著しい．加えて，最近では電子基板やセンサー・アクチュエータなどを対象としたマイクロ/ナノAM装置（3Dプリンタ），臓器用3Dプリンタ，さらには建築用3Dプリンタまで幅広い分野で3Dプリンタの開発が行われてきており，将来的にも3Dプリンタの開発はますます活発化するものと予測される．

このように，AM技術は，鋳造や機械加工などの従来の加工法では成形できない形状や機能性を有する製品を製造できるとともに，デジタル・マニュファクチャリングであることからも，次世代の“ものづくり”における重要な加工技術として脚光を浴びている．加えて，このたびのコロナ禍において，サプライチェインの寸断を機に，3Dプリンタは再び大きな注目を集めている．2020年6月のNEDOの資料「コロナ禍後の社会変化とイノベーション像」[(7)]においても，コロナ禍後における“ものづくり”のデジタル化を推進することの必要性が強調されており，その中で3Dプリンタは重要な位置づけにある．このように，AM技術は，将来の“ものづくり”において極めて重要な役割を担っている．

2．AM技術の分類と開発動向

2.1　AM技術の分類

従来はラピッドプロトタイピング(Rapid Prototyping：RP)，ラピッドマニュファクチャリング（Rapid Manufacturing：RM）などと呼ばれてきた技術が，2009年に設立されたASTM F42委員会においてAMと呼ぶことが決定された．本委員会で規定されたAMの定義は、「a process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies」とされており、3次元造形体を作るために一層毎積み上げていく加工法と定義されている[(8)]。AMは，ASTM F42 委員会により7つのカテゴリーに分類された．我が国においては，ASTMならびにISOの規定による7つのカテゴリーの名称が，2020年3月にJIS B 9441[(4)]により表1に示すように規定され，AMは「付加製造」と呼ぶことになった．しかし，一般的には3Dプリンティング，我が国においては積層造形と呼ばれることも多い．表1に7つに分類されているJISによる名称と概要を示す．また，造形方式の概要を図1に示す．

2.2　3Dプリンタの開発動向[(1)-(3)]

AM技術の変遷と今後の展開について，図2に示す．現在の3Dプリンタの始まりは，光造形（（液槽光重合（VPP））といわれており，その後粉末床溶融結合（PBF）方式，材料押出（MEX）方式，指向性エネルギー堆積（DED）方式，シート積層（SHL）方式，結合剤噴射（BJT）方式および材料噴射（MJT）方式の装置が開発され，最近では樹脂，金属およびセラミックス材料さらにはマルチマテリアルに対応した新たな装置が開発されてきている．

金属材料を対象とした3Dプリンタについてみると，PBF方式の装置で注目されるのは，2020年11月に販売を開始したSLM Solutions社の600×600×600 mm^3の造形サイズで，12本の1 kWファイバーレーザーを備えており，これまでの20倍で桁違いの造形速度1,000 cc/hを有する大型装置である．また，自動車が電動化に向かうことから純銅の造形に注目が集まっており，Trumpf社では純銅造形を可能とするグリーンレーザを搭載した装置の販売を開始している．一方，電子ビームPBF方式の装置は，GE Additive社に加えて，技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）のプロジェクトにおいて多田電機（株）により開発され，三菱電機（株）のブランドで販売されている．また，日本電子（株）の装置も2021年3月に販売が開始され，高融点材料をはじめとする機能材料への展開が進むものと思われる．

DED方式については，従来のレーザと粉末の組合せによる方式と併せて，他の熱源と粉末あるいはワイヤーの組合せによる方式の装置開発が行われている．DED方式の装置の特徴は単純形状で大型製品に向いている点である．レーザと粉末の組合せによる装置開発は，TRAFAMプロジェクトにおいて東芝機械（株）（現在、芝浦機械（株））と三菱重工工作機械（株）により開発が行われた．三菱重工工作機械（株）では，大型の複合機の販売を開始しており，モニタリング・フィードバック制御機能を搭載して品質の安定化を図っている．また，最近アーク放電とワイヤーの組合せによるWAAM（Wire Arc Additive Manufacturing）と

呼ばれる方式の装置が安価で高速造形できることから注目されている．加えて，溶射技術であるコールドスプレーを利用した装置開発も行われているが，材料としてはアルミニウム合金や銅合金に限定されている．

PBFおよびDED方式では大量生産が難しいため，最近注目を浴びているのが結合剤噴射（BJT）方式と材料押出（MEX）方式で，販売台数を急速に伸ばしてきている．BJT方式では，HP社がVolkswagen社及びGKN社と連携してBJT装置を開発したことから，自動車分野の小型部品への適用の機運が高まってきているが，対象材料がステンレス鋼からニッケル基合金、チタン合金、最近では純銅まで可能となってきているものの，さらなる新たな材質への展開が必要である．また，MEX方式の装置は低価格で，樹脂用3Dプリンタ感覚で使用できることから販売台数も急速に伸びてきており，治具や試作製品などへ適用されてきている．しかし，現状ではBJT方式と同様に材質を増やしていくことが必要である．これらの方式は，いずれも脱バインダと焼結過程を必要とする方式であるため，焼結品としての特性を有する造形方式であることを認識しておく必要がある．基本的には金属粉末射出成形（MIM）と同様の方式であるため，MIMによる造形体とほぼ同等の機械的性質を有しているが，MIMのように金型を必要としない点は有利である．特にBJT方式による製品は小型精密部品が対象となり，BJT方式では大量生産も可能なため，これまで焼結材料が適用されている自動車分野や精密機器分野など幅広い分野へ展開されるものと予測される．

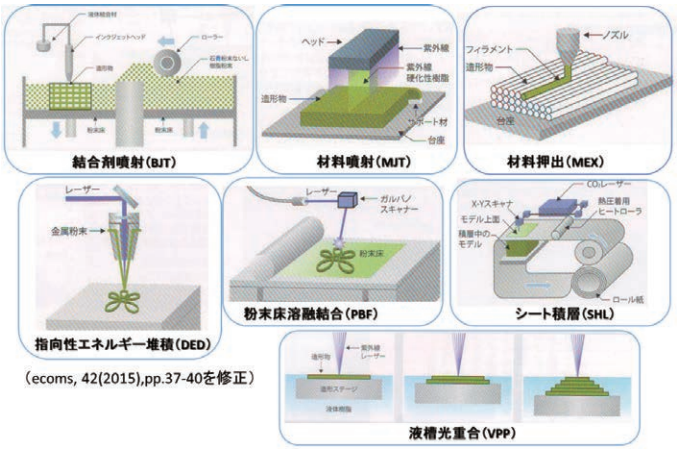
このように，金属3Dプリンタについてみると，これまでのPBFおよびDED方式に加えて，BJTおよびMEX方式の装置開発が盛んに行われている．これは，対象製品が一品生産の製品が多い航空宇宙分野，エネルギー・産業機器分野，医療分野に加えて，大量生産を必要とする自動車分野が参入してきたことによる．また，PBF方式においては，これまでの汎用機から大型製品などの対象製品に対応したカスタム化，さらには将来のスマート・ファクトリを考慮した搬送装置やロボットなども加えたシステム化へと向かいつつある．このように，3Dプリンタは対象製品に応じてカスタム化してきているとともに，大量生産に向けてシステム化してきている．

セラミックス材料に対しては，ごくわずかな材料で直接造形も可能となっているが，ほとんどは従来のセラミックス材料の成形技術に近いBJT方式やMEX方式による成形を経て，焼結して部品の製造が行われている．

樹脂材料に関しては，VPP方式，PBF方式，MJT方式およびMEX方式など幅広い方式の装置が開発されているとともに，非常に多くの材料開発が行われており，高強度や高弾性率，高耐熱などの機能を有する実用材料として幅広い分野において利用されている．樹脂造形に関しては，参考文献[9],[10]を参照頂きたい．

表1　AM技術の分類（JIS B 9441による）2020年3月制定[4]

用語	定義	対応英語
結合剤噴射、バインダジェット	液状の結合剤を選択的に供給して、粉体材料を結合するプロセス	binder jetting (BJT)
指向性エネルギー堆積法	集束させた熱エネルギーを利用して材料を溶融し、結合し、堆積させるプロセス	directed energy deposition (DED)
材料押出	ノズル又はオリフィスから材料を押出し、選択的に供給するプロセス	material extrusion (MEX)
材料噴射、マテリアルジェット	造形材料の液滴を選択的に堆積するプロセス	material jetting (MJT)
粉末床溶融結合、パウダーベッドフュージョン	熱エネルギーを利用して粉末床を選択的に溶融凝固するプロセス	powder bed fusion (PBF)
シート積層	シート状の材料を積層し、層間を結合して造形物を形成するプロセス	sheet lamination (SHL)
液槽光重合	容器内の液体光硬化性樹脂を光重合によって選択的に固化するプロセス	vat photopolymerization (VPP)



（ecoms, 42(2015),pp.37-40を修正）

図1　造形方式の概要

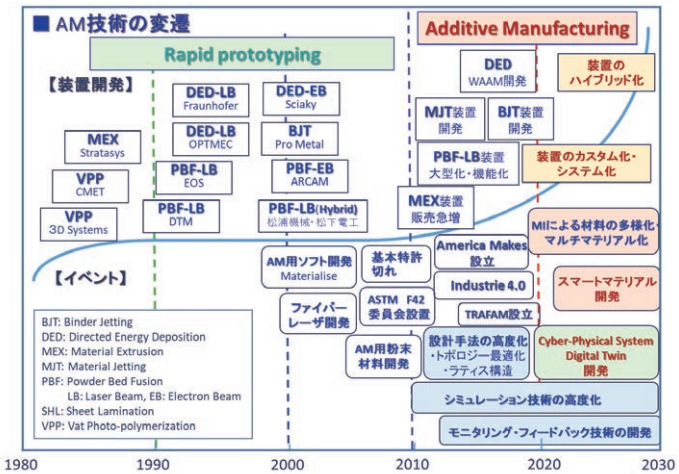


図2　AM技術の変遷と今後の展開

3．AM技術の今後の展開

3Dプリンタについては，図2に示すように，今後は幅広い分野の製品への適用が増加していくとともに装置のカスタム化やシステム化が進んでいくと予測される．加えて，マルチマテリアル化やスマートマテリアル化に向けて，新たな方式の装置開発や装置のハイブリッド化が進んでいくものと予測される．

一方，製品開発においては設計技術の開発もAM技術の特徴を活かす上で非常に重要である．このため，DfAM（Design for Additive Manufacturing）と呼ばれるAM向けの設計技術が注目されている．これは，従来の加工法では製造できない複雑高機能製品の製造が可能であるAM技術の特徴を生かすとともに，AM技術の欠点を補うための設計法である．このため，CADソフトウェアにトポロジー最適化やラティス構造作成用のソフトウェアが付加されてきており，AM技術の特徴を生かすCADソフトウェアへと大きく変化してきている．逆に，AM技術の欠点である熱変形を補うためのAM特有のサポート設計などを可能とするシミュレーションの開発も行われ，実用化されてきている．

AM技術は新たな加工法であることから，特に航空宇宙分野のユーザーからは製品の品質の安定化および品質保証が求められている．このため，今後は次のような技術開発が重要である．

(1)品質保証のためのモニタリング・フィードバック技術開発
(2)品質管理における製品の欠陥検出技術
(3)設計・製造支援のためのシミュレーション技術開発
(4)デジタルツイン開発

加えて，Industry 4.0やConnected Industryといった“ものづくり”における設計・製造・管理統合プラットフォームの構築が重要である．AM技術はデジタル・マニュファクチャリング技術の一つであることから，今後このような“次世代ものづくり”システムにおいて重要な役割を担う技術である．このため，AM技術においては，トポロジー最適化やシミュレーション技術の適用による設計技術の高度化やモニタリング・フィードバック技術の開発，さらにはAI技術やIoT技術を駆使した管理技術の開発が必須である．すでに，欧米や中国などではAMのためのデジタルツインの構築を始めており，このままの状況が続くと“ものづくり”においてますます後れを取ることになる．

ご存じの通り，このところCOVID-19の影響もあり，DX革命と呼ばれているように社会におけるデジタル化が急速に進展しており，“ものづくり”においても避けて通れない状況となっている．このため，製造分野においても欧米を中心にサイバー・フィジカルシステム（CPS）の構築が行われてきている．図3に示すように，AM技術については，フィジカル空間における重要な技術であるモニタリング技術に関して，パウダーベッドや造形体，メルトプールにおけるその場観察での欠陥検出技術，高精度・高速処理可能な画像処理技術などが急速に発展してきたことから，シミュレーション用のデータ取得が可能となってきた[11]．一方，サイバー空間におけるシミュレーション技術に関しては，粉体レベルにおけるミクロ溶融凝固シミュレーション，組織予測シミュレーションおよび熱変形予測シミュレーションが体系的に開発されてきている[12]．このため，製品の特性を予測可能な，いわゆるデジタルツインの構築が可能となってきており，各国で活発に開発が行われている．まだ課題は多いものの，我が国においてはTRAFAMプロジェクトの基礎データをデータベース化するとともに，シミュレーション技術も開発していることから，これらの技術を積極的に活かすシステムづくりを行っている．

このように，設計技術やシミュレーション技術の高度化が進むことにより デジタルツインやCPSの開発が加速し，“ものづくり”が変革していくと予測される[13]。我が国においても、AMに関する基盤技術の開発と併せて、AIや5Gを取り込んだシステム開発を早急に行う必要がある。

4．おわりに

本稿では，金属AM技術を中心とした次世代ものづくりにおける3Dプリンタの将来像について述べてきた．AM技術の進歩はここ数年の間に急速に進歩してきており，“ものづくり”の分野へ浸透してきた．このため，AM技術は欧米や中国など多くの国々において，その裾野が急速に広がってきており，これに伴って人材育成も進んでいる．我が国においてもAM技術を普及させるためには，装置導入の促進はもちろんのこと、この技術に関わる人材育成も急務である．

本稿が，計算力学部門の皆様のAM技術理解のための一助となれば幸いである．

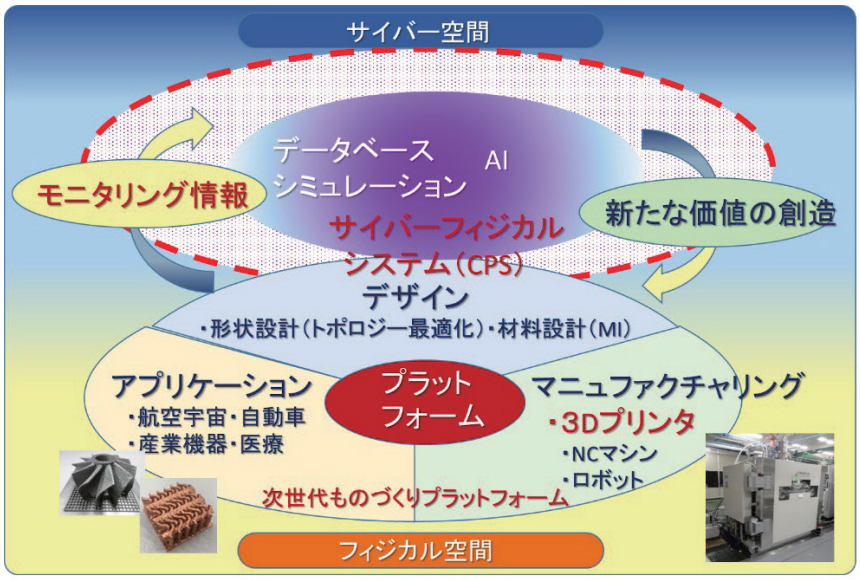


図3　サイバー・フィジカルシステムの概念図[1]

参考文献

（1） 京極秀樹, 日本機械学会誌, 122(2019), 4-7.
（2） 京極秀樹, 機械技術, 68(14)(2020), 16-19.
（3） 京極秀樹, 型技術, 35(8),(2020), 18-22.
（4） 日本工業規格, 付加製造（AM）‐用語及び基本的概念, 日本規格協会,（2020）.
（5） https://www.mpif.org/News/FocusPM/TabId/979/ArtMID/3883/ArticleID/439/GE-Aviation%e2%80%99s-GE9X-Engine-Achieves-FAA-Certification.aspx?utm_source=Informz&utm_medium=newsletter&utm_campaign=Informz&_zs=16gXb&_zl=gOOH2
（6） https://www.metal-am.com/bmw-group-opens-its-new-additive-manufacturing-campus/
（7） https://www.nedo.go.jp/content/100919493.pdf.
（8） ASTM, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM Standard F2792-12a, (2012).
（9） 山口修一監修, 荻原恒夫, 産業用３Dプリンターの最新技術・材料・応用事例, 第3 章造形材料開発の最新動向, 65-76, シーエムシー出版, (2015).
（10） 萩原恒夫監修,浅野到,近藤啓之, 3Dプリンタ用新規材料開発,第2編第2章樹脂系材料, 143-210, エヌ・ティー・エス, (2021).
（11） H. Kyogoku, T.-T. Ikeshoji, Mechanical Engineering Reviews, 7(2020), 19-00182.
（12） 京極秀樹, 千葉晶彦, 橋谷道明, 君島孝尚, 松田均, 溶接技術, 68 (2020), 66-72.
（13） M. Ghobakhloo, J. Manufacturing Technology Management, 29(2018), 910-936.

マルチマテリアル光造形法の進展

丸尾　昭二
横浜国立大学大学院工学研究院

1. はじめに

現在，複数の材料を一体造形することで高機能な3D構造体を作製できるマルチマテリアル3Dプリンティングが注目され，さまざまな造形法が開発されている[1, 2]. 例えば，インクジェット法や押し出し方式では，フルカラー樹脂の3D造形が行われており，粉末床溶融積層法では，3D樹脂構造体だけでなく，複数種の金属粉末材料を用いた一体造形も行われている[3−6]. また，3Dプリンティングの中で最も高精細な造形が可能な光造形法においても，マルチマテリアル造形を行うさまざまな造形法が提案されている[8-14].

光造形法には，Fig. 1に示すように，自由液面法，規制液面法，内部硬化法（Direct laser writing）など，さまざまな造形法がある[7]. 現在，いずれの造形法においても，複数種の光硬化性樹脂を用いたマルチマテリアル光造形が実現されている. 例えば，Zhouらは，回転ステージ上に複数の光硬化性樹脂を貯蔵するタンクを配置して，タンクを入換ながらマルチマテリアル造形を行う自由液面法に基づく造形装置を開発している[8]. Mayerらは，フェムト秒レーザーを用いた内部硬化法（2光子マイクロ光造形法[9]と呼ぶ）において，マイクロ流路を用いた材料入れ換えシステムを導入し，5種類の樹脂を用いて微小な3D樹脂構造体を作製している[10]. また，Hanaらは，同様のマイクロ流路を用いた材料供給を用いて，紫外レーザーを用いた1光子重合による規制液面法に基づく造形装置を開発している[11]. これらの流路を用いた方式では，材料を高速に入れ換えられる利点がある. しかしながら，材料の入換時の材料の浪費が多いという欠点もある. そこで，材料浪費の少ない造形法として，Kowsariらは，複数の光硬化性樹脂の液滴を配置して，それらをスライドさせて入れ替えることでマルチマテリアル光造形を行う方法を提案・開発している[12]. しかし，この方法では，樹脂の入換時の材料浪費が非常に少ないが，洗浄工程が含まれておらず，材料入換時に材料のコンタミネーションが生じるという課題が残されていた.

そこで，我々は，複数の液滴を配置した材料パレットに，2段階で未硬化の光硬化性樹脂を洗浄するシステムを搭載し，多数種の光硬化性樹脂をコンタミネーションなく一体造形できる造形装置を開発した[13]. そして，これまでに5種類の異なる色の樹脂を用いたマルチカラー造形物の一体作製などを実証した. 以下では，この複数液滴を用いたマルチマテリアル光造形法に関して，造形装置の構成や実証実験について述べる. そして，今後の展望として，マルチマテリアル光造形に適用可能な材料としてセラミックスや金属，生体材料などを用いた造形法とその応用についても紹介する.

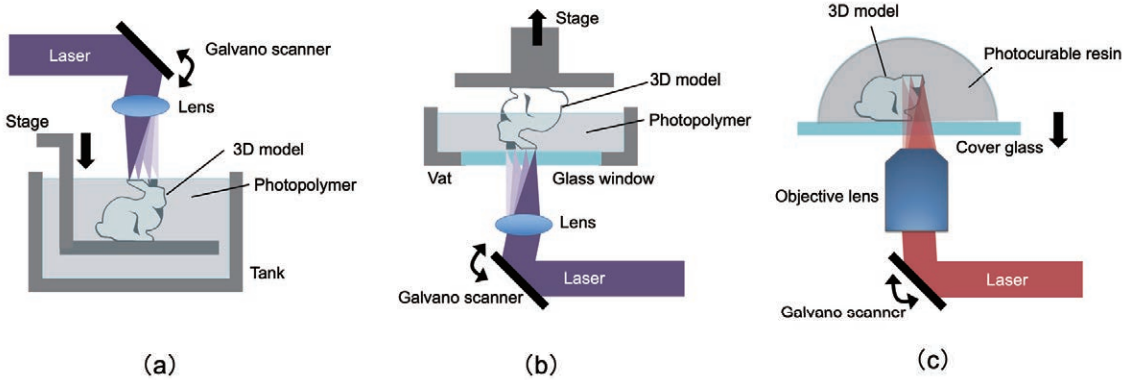


Fig. 1 さまざまな光造形法 [7]
(a)自由液面法 (b)規制液面法 (c)内部硬化法

2. 複数液滴を用いたマルチマテリアル光造形法の開発

我々は，これまでに青色レーザーを用いた1光子重合によるマイクロ光造形装置をいくつか開発している[14-16]. 今回開発した複数液滴を用いたマルチマテリアル光造形装置では，これらの造形法の中でも規制液面法に基づく造形装置 [16]を基礎として，複数種の光硬化性樹脂の液滴を配置する材料パレットと2つの洗浄用タンクを搭載した直道ステージを追加した. Fig. 2に造形装置の模式図を示す. 本装置では，半導体レーザー（波長: 405 nm）を，ガルバノミラーで2次元走査した後に，対物レンズ（開口数：0.1）によって，光硬化性樹脂に集光させる. 3D-CADモデルから形成した断面スライスデータに基づいて，ガルバノミラーを面内走査させて断面形状を硬化させ，zステージを段階的に引き上げることで3D造形を行う. また，レーザー光の焦点位置および造形過程をCCDカメラで観察することで高精細な3D造形が可能となる.

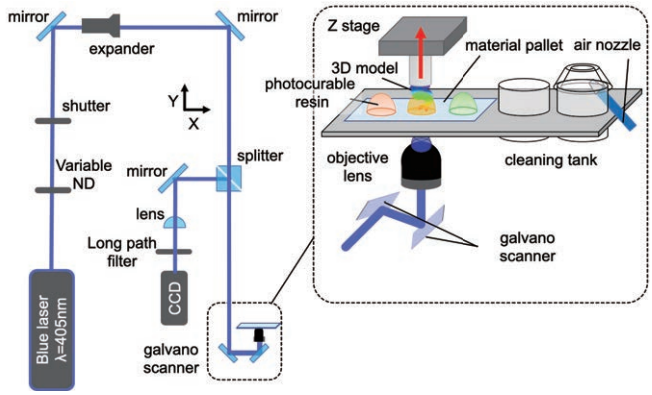


Fig. 2 複数液滴を用いたマルチマテリアル光造形装置の構成 [13]

Fig. 3に，材料の入換と洗浄を行う工程を示す．まず，Step1のように，材料パレット上面に焦点を合わせた青色レーザー光を走査させ，材料Aの液滴中で造形を行う．次に，Step2のように造形物を一次洗浄タンク内に含浸し，造形物やガラス基板の周囲に付着した未硬化樹脂をエタノールで溶解，洗浄する．そして，Step3で，1次洗浄と同様に二次洗浄タンク内で洗浄を行う．さらにStep4では，洗浄タンクから造形物を引き上げた後に，造形物に付着したエタノールをエアジェットによって吹き飛ばし，乾燥する．その後，Step5において，造形物を別の光硬化性樹脂に浸し，Step1と同様に断面形状を硬化させることでマルチマテリアル3D構造体を形成する．これらの工程を繰り返すことで，複数種の光硬化性樹脂による一体造形が可能となる．

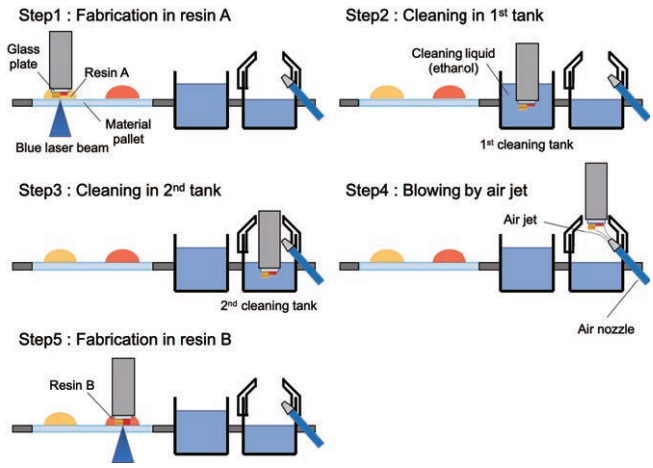


Fig. 3 複数材料を用いた造形と洗浄工程 [13]

この造形プロセスで重要となるのが，材料入換時に光硬化性樹脂に混入する気泡の除去であった．先行研究においても複数の光硬化性樹脂を入れ換えながらマルチマテリアル3Dモデルを作製する場合には，樹脂のコンタミネーションに加えて，樹脂の入れ換え時に生じる気泡が造形物に混入するという問題が報告されていた[8]．そこで，我々は，造形物を造形位置からz方向に微小距離（本実験では30μmに設定）離した状態で保持し，樹脂液滴の内部で水平移動させることで気泡を除去する方法を考案した (Fig. 4)．この動作を行うことで，材料パレットと造形物の間に挟まっている気泡を造形物から剥離して，造形領域の外に押し出すことが可能となり，造形物に混入する気泡を大幅に低減することができた．

Fig. 5に，気泡除去を行った場合と行わなかった場合の造形物の違いを示す．この実験では，評価モデルとして透明と緑色の2種類の光硬化性樹脂を用いて立方体モデルを用いた．気泡除去を行わなかった場合には，Fig. 4(d)に示したように，積層方向に直径が100μm以上の比較的大きな気泡が複数混入していることがわかる．一方，気泡除去を行うと，Fig. 5 (b),(c)に示すように，造形物への気泡の混入を大幅に抑制できることが確認された．わずかに混入している気泡の大きさは，気泡除去の動作の際に設定した微小距離と同程度の大きさであることから，この微小距離の設定を小さくすることで，さらに微小な気泡の除去も可能になると考えている．

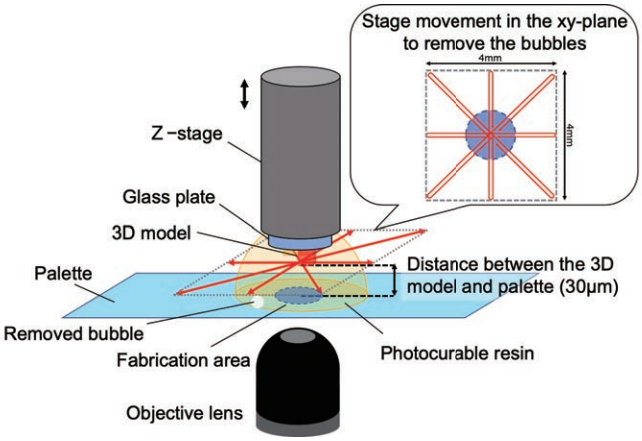


Fig. 4 造形物を水平移動することによる気泡の除去 [13]

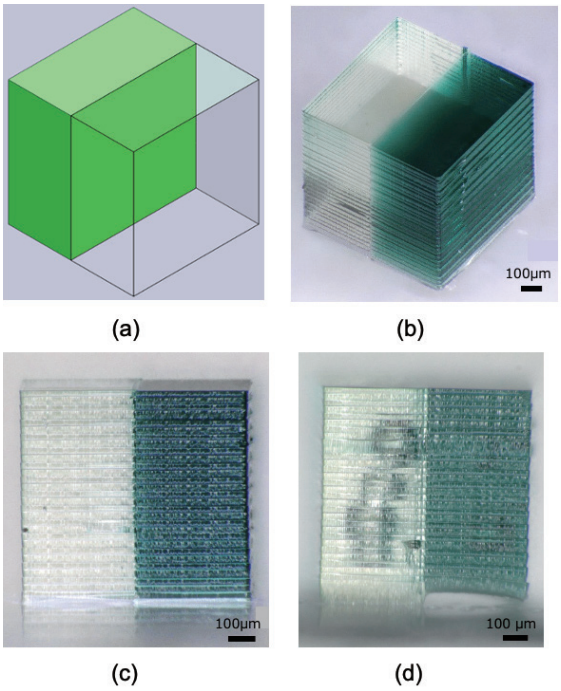


Fig. 5 気泡除去の有無による3D造形物に含まれる気泡の様子 [13]
（a）2種類の樹脂を用いた評価モデル（b）気泡除去を行った造形物（c）気泡除去を行った造形物の側面写真（d）気泡除去を行わなかった造形物の側面写真

3. マルチカラー 3D構造体の造形

本装置を用いたマルチマテリアル光造形の有効性を実証するために，我々がこれまでに開発した光硬化性樹脂[16]に，赤，青，緑，黄色の色素を添加し，透明と4色の合計5種類の光硬化性樹脂を調合した[13]. これら5種類の光硬化性樹脂を用いて，Fig. 6のようなマルチカラー立方体モデルを作製した. このモデルは，一辺が1.5mmの立方体で，積層ピッチ30μm，積層数50層で，5色の樹脂を250回交換して作製したものである. この結果から，樹脂のコンタミネーションや気泡混入を抑制してマルチマテリアル構造体を一体造形できることを実証できた.

また，Fig. 6(d)の写真から，各樹脂の吸収が重なることで黒色を表現できることがわかった. そこで，各色の樹脂の吸収スペクトルを計測し，その吸光度の大きさに応じて積層数を制御して，色調整を行うことを検討した. その結果，緑色の樹脂を9層（単層の厚さ：30μm），他の色の樹脂を各6層ずつ組み合わせることで，可視光領域の吸光度が1以上を達成でき，黒色を表現できることを確認した. この結果を用いて，Fig. 7に示した十字型モデルを作製した. この造形物は，中央の四角い枠部分に，黒を再現するために必要な4色の樹脂をそれぞれの層数重ねたモデルとなっており，中央の四角い枠部分は，上面から観察すると黒色を示している. このようなマルチカラー樹脂を用いた3D造形は，カラーフィルターなどを一体化した光学素子などへの応用が期待できる.

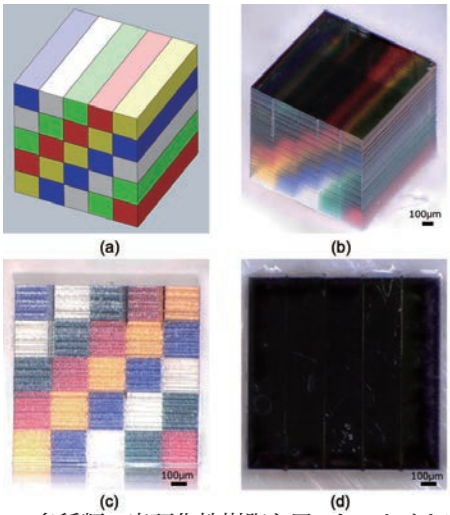


Fig. 6 多種類の光硬化性樹脂を用いたマルチカラー立方体モデルの造形 [13]
(a)CADモデル (b)鳥瞰写真 (c)側面写真 (d)上面写真

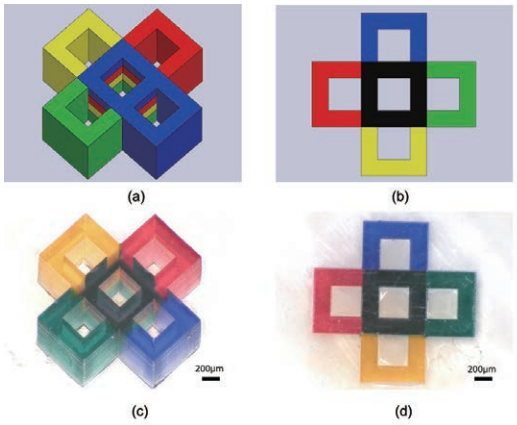


Fig. 7 色調整したマルチカラークロスモデルの造形 [13]
（a）CAD モデル（鳥瞰図）（b）CAD モデル（上面図）
（c）鳥瞰写真（d）上面写真

4. マルチマテリアル光造形の適用材料の拡張と応用展開

現在，光造形法に適用可能な材料の開発が世界中で活発に進められている. このため，本稿で紹介した研究では，色の異なる光硬化性樹脂を用いた例であったが，マルチマテリアル光造形の応用分野が飛躍的に拡大する可能性が高い. 例えば，我々は，屈折率の異なる光硬化性樹脂を用いて，回折格子や屈折率分布型レンズなどの光学素子の作製を進めている. また，光硬化性樹脂以外にもさまざまな材料を適用できる. 例えば，さまざまなセラミックス微粒子を光硬化性樹脂に混合した光硬化性スラリーを用いて，セラミックスの3D造形が行われている[17]. これらセラミックス構造体は，歯科や電子部品，機械部品などへの応用が期待されている. 我々も，バイオセラミックスの一種であるリン酸三カルシウムを用いて骨再生用の足場を作製する研究を進めている[18]. Fig. 8は，我々の青色レーザーを用いた光造形装置を用いて作製したセラミックス構造体の例である. このような従来法では加工が困難なラティス構造であっても光造形を用いて作製した成形体を焼結することで，セラミックス3D構造体を形成できる. また，最近では，ガラスの3Dプリンティングが注目を集めている[19, 20]. 我々も，横浜国立大学の飯島志行准教授らと共同研究を行っており，独自の光硬化性シリカスラリーを用いて3Dガラス構造体を迅速に作製する研究を進めている [21]. また，光重合性ゲル（例えば，ゼラチンメタクリロイルなど）などを用いたバイオ3Dプリンティングの研究も盛んに行われており，医療や創薬などへの応用が期待されている[22]. 一方，光還元反応を利用することで，金属の3D構造体を作製することもできる.例えば，Fig. 9は，我々が青色レーザーを用いた光還元によって作製した銀の2次元パターンの例である[23]. 同様の原理を用いて，規制液面法に基づく造形装置を用いて3D金属構造体を作製する研究も行われている[24]. このように，光造形法では，光硬化性樹脂だけでなく，生体高分子，セラミックス，金属など幅広い材料が利用可能となっている.

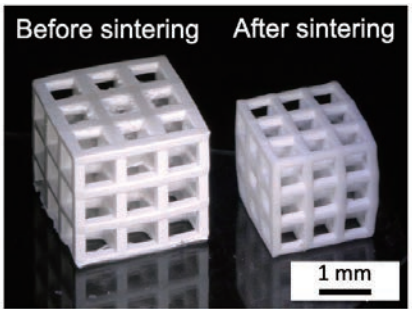


Fig. 8　光硬化性セラミックススラリーを用いて作製したラティス構造体 [18]
(a)造形物 (b)焼結体

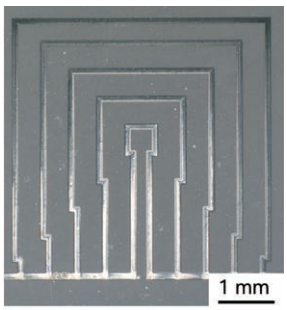


Fig. 9　光還元によって形成した銀の 2 Dパターン [23]

5. まとめ

本稿では，最も高精細な3Dプリンティングである光造形法を中心に，複数材料を用いたマルチマテリアル造形の進展について述べた. また，マルチマテリアル光造形に適用可能な材料が，樹脂からゲル, セラミックス, 金属など多様化していることも紹介した. これらの多様な材料開発に加えて，我々は，京都大学の西脇眞二教授や，東京大学の山田崇恭准教授らの協力を得て，光造形法にトポロジー最適化を適用して高機能なデバイスを創製する研究も進めている. 例えば，最適化されたコンプライアントメカニズムを用いて，細胞凝集体であるスフェロイドなどを把持するマイクロピンセットなどの開発を行っている[25]. 今後，多様な材料を用いたマルチマテリアル光造形とトポロジー最適化によって生み出される3D構造体の融合によって，さまざまな高機能デバイスの創出が期待できる.

謝辞

本研究の一部は，JST CREST（JPMJCR1905）の支援を受けて行われた.

参考文献

1) M. Vaezi, S. Chianrabutra, B. Mellor, and S. Yang, “Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review,” Virtual Phys. Prototyp. 8, 19 (2013).
2) H. Tetsuka and S. R. Shin, “Materials and technical innovations in 3D printing in biomedical applications,” J. Mater. Chem. B. 8, 2930 (2020).
3) C. Bader, D. Kolb, J. C. Weaver, S. Sharma, A. Hosny, J. Costa, and N. Oxman, “Making data matter: Voxel printing for the digital fabrication of data across scales and domains,” Sci. Adv. 4, eaas8652 (2018).
4) Y. Wang, Z. Xu, D. Wu, and J. Bai, “Current status and prospects of polymer powder 3D printing technologies,” Mater. 13, 2406 (2020).
5) C. Wei, L. Li, X. Zhang, and Y.-H. Chueh, “3D printing of multiple metallic materials via modified selective laser melting,” CIRP Ann. Manuf. Technol. 67, 245 (2018).
6) W. J. Liu, et al., “Rapid continuous multimaterial extrusion bioprinting,” Adv. Mater. 29, 1604630. (2017).
7) 丸尾昭二, “樹脂材料光造形とその応用,” 光学 47, 452 (2018).
8) C. Zhou, Y. Chen, Z. Yang, and B. Khoshnevis, “Digital material fabrication using mask-image-projection based stereolithography,” Rapid Prototyp. J. 19, 153 (2013).
9) S. Maruo, O. Nakamura and S. Kawata, “Three-dimensional microfabrication with two-photon absorbed photopolymerization,” Optics Letters 22, 132 (1997).
10) F. Mayer, S. Richter, J. Westhauser, E. Blasco, C. Barner-Kowollik, and M. Wegener, “Multimaterial 3D laser microprinting using an integrated microfluidic system,” Sci. Adv. 5, eaau9160 (2019).
11) D. Hana, C. Yanga, N. X. Fangb, and H. Leea, “Rapid multi-material 3D printing with projection micro-stereolithography using dynamic fluidic control,” Addit. Manuf. 27, 606 (2019).
12) K. Kowsari, S. Akbari, D. Wang, N. X. Fang, and Q. Ge, “High-efficiency high-resolution multimaterial fabrication for digital light processing-based three-dimensional printing,” 3D Print. Addit. Manuf. 5, 185 (2018).
13) T. Maruyama, H. Hirata, T. Furukawa, and S. Maruo, "Multi-material microstereolithography using a palette with multicolor photocurable resins", Optical Materials Express, 10, 2522 (2020).
14) S. Maruo and K. Ikuta, “Submicron stereolithography for the production of freely movable mechanisms by using single-photon polymerization,” Sens. Actuator A: Phys. 100, 70 (2002).
15) Y. Kobayashi, C. E. J. Cordonier, Y. Noda, F. Nagase, J. Enomoto, T. Kageyama, H. Honma, S. Maruo, and J. Fukuda, “Tailored cell sheet engineering using microstereolithography and electrochemical cell transfer,” Sci. Rep. 9, 10415 (2019).
16) S. Kozaki, Y. Moritoki, T. Furukawa, H. Akieda, T. Kageyama, J. Fukuda, and S. Maruo, “Additive manufacturing of micromanipulator mounted on a glass capillary for biological applications,” Micromachines, 11, 174 (2020).
17) Z. Chen, et al. “3D printing of ceramics: A review,” Journal of the European Ceramic Society 39, 661 (2019).
18) 野田洋平, 大庭敏裕, 景山達斗, 福田淳二, 丸尾昭二, “青色半導体レーザーを用いたマイクロ光造形法によるセラミックス部品の作製, ” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 講演論文集 1A1-L11 (2017).
19) F. Kotz, et al. “Three-dimensional printing of transparent fused silica glass,” Nature 544, 337 (2017).
20) R. Dylla-Spears, "Preshaping clear glass at low temperatures." Science 372, 126 (2021).
21) R. Arita, M. Iijima, Y. Fujishiro, S. Morita, T. Furukawa, J. Tatami and S. Maruo, “Rapid three-dimensional structuring of transparent SiO2 glass using interparticle photo-cross-linkable suspensions,” Communications Materials, 1, 30 (2020).
22) M. Mobaraki, et al. “Bioinks and bioprinting: A focused review,” Bioprinting 18, e00080 (2020).
23) T. Komori, T. Furukawa, M. Iijima, and S. Maruo, “Multi-scale laser direct writing of conductive metal microstructures using a 405-nm blue laser”, Optics Express 28, 8363 (2020).
24) Fantino, Erika, et al. “3D printing of conductive complex structures with in situ generation of silver nanoparticles,”Advanced Materials 28, 3712 (2016).
25) Y. Moritoki, et al., “3D-printed micro-tweezers with a compliant mechanism designed using topology optimization,” Micromachines, 12, 579 (2021).

部門からのお知らせ

2021 年度年次大会の部門企画について

高橋　昭如
東京理科大学理工学部機械工学科

日本機械学会2021年度年次大会が，9月5日（日）～ 8日（水）の期間に開催されます．本年度の年次大会は，千葉大学西千葉キャンパスを会場として開催する予定でしたが，昨今のコロナ禍の状況を鑑みて，理事会の決定によりオンラインにて開催することになりました．これに伴い，市民フォーラムが中止となりました．その一方で，本大会では「グローバル社会の分岐点に機械工学は何をすべきか？」をキャッチフレーズに「5G IoTにおける機械」，「ダイバーシティ＆インクルージョン」，「新産業革命」をキーワードとして，大変魅力的なセッションや特別企画が数多く提案されております．年に一度の部門の枠を超えた学術活動として，多くの研究者，学生，企業の方の研究発表並びに交流の機会としてご活用いただければ幸いです．本大会の詳細は大会ホームページ（https://confit.atlas.jp/guide/event/jsme2021/top）にてご覧いただけます．

計算力学部門からは，以下の特別企画（先端技術フォーラム，ワークショップ）とセッションが企画されております．計算力学に関する最先端の情報交換の場として，さらに部門の枠を超えた新しい発見の場として，計算力学部門に関わる多くの方々のご参加を心よりお待ちしております．

【特別企画】先端技術フォーラム

「人を中心とした新産業革命を日本から推進するために」
（計算力学部門，生産システム部門，設計工学・システム部門）
企画者：越塚誠一（東京大），梅田靖（東京大），平野徹（ダイキン情報システム）
講演者：伊藤照明（岡山県立大），梅田靖（東京大），長谷川功（ダイキン工業），綿貫啓一（埼玉大），平野徹（ダイキン情報システム），越塚誠一（東京大）

「宇宙工学分野における数値解析技術の展開」
（宇宙工学部門，計算力学部門）
企画者：田中宏明（防衛大）
講演者：中村和行（テクノソルバ），西元美希（宇宙航空研究開発機構），北村圭一（横浜国立大），堤誠司（宇宙航空研究開発機構）

【特別企画】ワークショップ

「高度な自動運転を実現するための数理の現状と課題」
（計算力学部門，設計工学・システム部門）
企画者：萩原一郎（明治大）
講演者：萩原一郎（明治大），古川修（明治大），岡村宏（明治大），岸則政（東京大），内田博志（福山大），谷口隆晴（神戸大），Diago Luis（明治大）

「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」
（医工学テクノロジー推進会議，機械力学・計測制御部門，バイオエンジニアリング部門，材料力学部門，機素潤滑設計部門，流体工学部門，ロボティクス・メカトロニクス部門，熱工学部門，計算力学部門，情報・知能・精密機器部門，マイクロ・ナノ工学部門）
企画者：岩﨑清隆（早稲田大），中村匡徳(名古屋工業大)，坂田泰史(大阪大学)，吉栖正夫(広島大)，佐久間淳(京都工芸繊維大)，白樫了（東京大），藤井文武（山口大）

【セッション】

「安心安全な水素社会を創る流体解析と計測技術」
（計算力学部門，流体工学部門）
オーガナイザ：松浦一雄（愛媛大），月川久義（（元）九州大），錦慎之助（鹿児島大），鈴木健吾（新コスモス電機），寺田敦彦（日本原子力研究開発機構），丸祐介（宇宙航空研究開発機構），朝原誠（岐阜大），茂木俊夫（東京大），小林弘明（宇宙航空研究開発機構），加藤喜峰（九州大），湯川宏（名古屋大）

「Society 5.0を支える「電子実装技術の最先端」：熱・信頼性制御技術」
（熱工学部門，計算力学部門，材料力学部門）
オーガナイザ：畠山友行（富山県立大），池田徹（鹿児島大），小金丸正明（鹿児島大），三浦英生（東北大），木下貴博（富山県立大）

「燃料電池・二次電池とナノ・マイクロ現象」
（熱工学部門，計算力学部門，流体工学部門，マイクロ・ナノ工学部門，動力エネルギーシステム部門，材料力学部門）
オーガナイザ：田部豊（北海道大），花村克悟（東京工業大），大島伸行（北海道大），徳増崇（東北大），鹿園直毅（東京大），橋田俊之（東北大）

「データ同化の機械工学への応用」
（流体工学部門，熱工学部門，計算力学部門，設計工学・システム部門）
オーガナイザ：大林茂（東北大），高橋俊（東海大），三坂孝志（産業技術総合研究所），菊地亮太（京都大）

「価値の共創と共存に1DCAE・MBDが果たす役割」
（設計工学・システム部門，機械力学・計測制御部門，機械材料・材料加工部門，流体工学部門，熱工学部門，計算力学部門）
オーガナイザ：大富浩一（明治大），山崎美稀（日立製作所），長沼要（金沢工業大），高橋克実（ホロンクリエイト），岩田宜之（東芝インフラシステムズ），畑陽介（ブラザー工業），福江高志（金沢工業大）

「工業材料の変形特性・強度およびそのモデル化」
（材料力学部門，機械材料・材料加工部門，計算力学部門）
オーガナイザ：佐々木克彦（北海道大），大口健一（秋田大），金子堅司（東京理科大）

「解析・設計の高度化・最適化」
（設計工学・システム部門，計算力学部門）
オーガナイザ：西脇眞二（京都大），下田昌利（豊田工業大），山本崇史（工学院大），長谷川浩志（芝浦工業大）

「機械学習×機械工学の最先端」
（熱工学部門，流体工学部門，計算力学部門）
オーガナイザ：塩見淳一郎（東京大），櫻井篤（新潟大），後藤田浩（東京理科大），深潟康二（慶応義塾大），大西領（東京工業大），下山幸治（東北大）

「医工学テクノロジーによる医療福祉機器開発」
（医工学テクノロジー推進会議，機械力学・計測制御部門，流体工学部門，計算力学部門，バイオエンジニアリング部門，ロボティクス・メカトロニクス部門，情報・知能・精密機器部門，材料力学部門，熱工学部門，マイクロ・ナノ工学部門，機素潤滑設計部門）
オーガナイザ：佐久間淳（京都工芸繊維大），白樫了（東京大），藤井文武（山口大）

《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　近藤 愛美　E-mail: m.kondo@jsme.or.jp
〒160-0016 東京都新宿区信濃町35番地　信濃町煉瓦館5F　TEL 03-5360-3503　FAX 03-5360-3508

計算力学部門ニュースレター No. 65 : 2021年5月26日発行
編集責任者：広報委員会委員長　倉橋 貴彦
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　篠崎 明　E-mail: akira.shinozaki@mizuho-ir.co.jp
みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社 サイエンスソリューション部
〒101-8443　東京都千代田区神田錦町2-3
TEL 03-5281-5415　FAX 03-5281-5331