

WCCM2016のご案内（再掲載）

吉村 忍 JACM 会長（東京大学）

12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XII) and 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM VI)が2016年7月24日（日）～29日（土）に韓国、ソウル市（Coex Convention & Exhibition Center）で開催されます。前回、第11回のWCCMは2014年にスペイン・バルセロナ市で開催されています。

詳細は会議の詳細はWEBページ：

<http://wccm2016.org/>

に掲載されております。以下に重要な締切日を列挙致しま

す。

6月18日 Registration 締切

状況により変更があるかもしれません。WEBページを適宜ご覧下さい。JACM総会ならびに2016 JACM Awards授賞式をWCCM2016期間中に開催致します。JACM会員の皆様におかれては本会議に奮ってご参加の程お願いいたします。

JACM 参加学協会紹介（その18）

JACMは29の学協会により構成されています。今回は日本伝熱学会と地盤工学会を紹介いたします。

日本伝熱学会

花村克悟（東京工業大学）

芝原正彦（大阪大学）

日本伝熱学会は、伝熱に関する学理技術の進展と知識の普及、会員相互及び国際的な交流を図ることを目的としている学術団体です。本会は、伝熱研究にかかわる研究者や技術者間の情報交換を促進するために、1961年に全国的な集まりとして作られた研究組織を母体としており、現在、会員数は約1500名です。その内訳は、機械工学、化学工学、原子力工学、冷凍空調、バイオエンジニアリング、食品工学、建築学、地球科学、など幅広い学術分野にわたる科学者や技術者で構成されています。1994年には、文部省に社団法人として認可され、2012年度からは公益社団法人として活動しています。

本会の主催する行事としては、日本伝熱シンポジウム（2016年大阪、<http://htsj-conf.org/symp2016/index.html>）やIFHT（2016年仙台、International Forum on Heat Transfer、<http://www.ifht2016.org/>）などがあります。伝熱シンポジウムにおける講演発表では、個別討論の後に全体討論の時間が設けられており、毎年、活発なディスカッションが行われております。また、2014年にはIHTC-15（The 15th International Heat Transfer Conference、<http://www.ihtc-15.org/>）が京都で開催され、43に及ぶ国・地域から、1000人を超える参加者があり、伝熱工学に関する研究発表および活発な議論が行われました。

これらのシンポジウムやフォーラムにおいては、強制対流、自然対流、ふく射、融解・凝固、熱物性、沸騰、燃焼、空調・熱機器、自然エネルギー、熱音響、電子機器の

冷却、バイオ伝熱、マイクロ伝熱、分子動力学、非線形熱流体现象と伝熱、などの一般セッションに加えて、最新のトピックに関するオーガナイズドセッションが組み立てられております。これらセッションでは、DNS、LES、RANS、LBM、DPD、MDなどのさまざまな計算力学的アプローチを用いた伝熱現象の基礎的理解や実機の設計への応用に関する最新の研究成果が報告されています。また、学会誌「伝熱」や論文集「Thermal Science and Engineering」の発行、各支部における講演会やセミナーも多数行われています。詳細な活動は学会HP（<http://www.htsj.or.jp/>）に記載されておりますので、ご興味のある方はご参照いただき、ご参加いただけると幸いです。

地盤工学会

渦岡 良介（徳島大学）

公益社団法人地盤工学会は、地盤工学の進歩及び地盤工学に関わる技術者の資質向上を図り、学術・科学技術及び文化の振興と社会の発展に寄与することを目的として活動しています。地盤工学会は、1949年に「国際土質基礎工学会」の日本支部に相当する「日本土質基礎工学委員会」として発足し、1954年には「土質工学会」として学会活動を開始しました。この間、地盤工学に関わる学術領域の拡大にあわせて、1995年に学会名を土質工学会から「地盤工学会」に変更し、1997年には国際土質基礎工学会も「国際地盤工学会」（International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering）に変更されました。2010年には公益社団法人地盤工学会として登記され、9つの支部の正会員7,597名（2016年3月末時点）からなり、建設系としては土木学会や建築学会に次ぐ規模の学会となっています。

地盤工学会は、地盤力学の基礎から、地盤や構造物の

調査・設計・施工、そして防災・環境保全までを対象としています。会員の専門分野は、土木、建築、農業、地質などであり、業種はコンサルタント、建設業、学校、官公庁が主体です。近年では、2011年東日本大震災で宅地の品質評価が問題となり、不動産業との関係も深まっています。

調査・研究活動として、様々なテーマを対象とした研究委員会が活動しています。地球規模の気候変動と地盤災害、新しい液状化予測技術の実用化、高レベル放射性廃棄物の地層処分における土質材料評価、全国電子地盤図の整備・展開、2011年東日本大震災による津波堆積土の活用や放射性物質汚染土の処理、など地震防災や環境・エネルギー問題が最近の主なテーマとなっています。特に、福島第一原子力発電所における諸課題に対して、地盤工学は地下水流動予測や各種地盤改良工法等の技術を通じて貢献しており、今後の廃炉過程でも、汚染水対策やデブリ取出し・放射性廃棄物処分において貢献したいと考えています。

年一回の「地盤工学研究発表会」を中心として、様々な国内・国際シンポジウムを開催し、学術成果は「Soils and Foundations」(英文学術論文集、年6号)、「地盤工学ジャーナル」(和文学術論文集、年4号)として発信しています。また、会員には学会誌「地盤工学会誌」を毎月発行しています。その他、近年頻発する豪雨や地震における地盤災害調査、地盤調査とそれに対応した室内試験方法の基準化活動、各種講習会と地盤工学継続教育制度(G-CPD)の運営、地盤品質判定士協議会の資格制度の運営など、技術

者の能力向上や社会貢献に努めています。

以上、地盤工学会の活動を簡単に紹介しましたが、最後にJACMとの関連について紹介します。WCCMなどでは、Computational Geomechanicsとして参加させて頂いております。Geotechnics, Geomaterial, Geo-disasterなどがキーワードです。地盤を構成する土は固体の土粒子、液体の間隙水、気体の間隙空気からなる三相混合体であり、様々な物理的・化学的作用のもとでのマルチフィジックス・マルチフェーズ解析を扱います。実務的には多孔質連続体としてモデル化して解析を行いますが、材料が自然由来であることや力学挙動の非線形性・履歴依存性が強いことから、いまだ汎用的な構成モデルも確立されておらず、地盤調査法との連携も不十分です。既に大規模演算が盛んに行われ、数値解析が設計のツールとして定着している他分野と比較すると遅れていると感じております。地盤工学会では数年前にアカデミックロードマップを作成・公開しております(webサイト参照)。地盤工学に関わる数値解析のこれまでの歩みと今後の展望を記述しましたが、さらなる発展のためには新たな発想が必要と感じております。今後ともJACMの皆様のご協力をお願いするとともに、未開の領域が多い地盤工学分野にご興味を持たれることを期待いたします。

公益社団法人地盤工学会

<http://www.jiban.or.jp/>

JACM 関連若手研究者の紹介 (その4)

JACM に関連する若手研究者の方々を順次紹介しています。その第4回として、前年度に The JACM Award for Young Investigators in Computational Mechanics を受賞された3名の先生方、岩本薫先生(東京農工大学)、竹澤晃弘先生(広島大学)、只野裕一先生(佐賀大学)を紹介します。

高レイノルズ数壁乱流の摩擦抵抗低減を 目的とした生物規範型制御

岩本 薫(東京農工大学)

この度は、The JACM Young Investigator Award という大変名誉ある賞を頂き、深く御礼申し上げます。本稿では、筆者が行っている研究内容を紹介させていただきます。

近年、関心が高まっている省エネルギーや環境保全の対策の1つとして、流れの遷移、剥離、抵抗、流体音、伝熱などの自在な乱流制御手法の確立が期待されています。また、21世紀における持続可能な社会の構築のためには、有限であるエネルギーをより一層有効利用することが肝要です。筆者らは、航空機、高速列車等、人類の安全・安心で快適な生活に欠かすことのできない高速輸送機器において、乱流摩擦抵抗によるエネルギーの損失を抑制し、省エネルギーに寄与する基礎技術を研究しています。

乱流研究は100年余りの歴史があり、古典物理学に残された最大の課題の1つと考えられています。乱流の強い非線形性と多自由度が、実用的な高レイノルズ数における乱

流制御の理論的なアプローチを長く拒んできましたが、筆者らは壁乱流の世界最大レイノルズ数の高精度シミュレーションを実施し[1]、高レイノルズ数乱流場においても壁面近傍の微細な乱流構造(図1)が摩擦や熱伝達の支配要素となることを世界で初めて明らかにしました[2]。

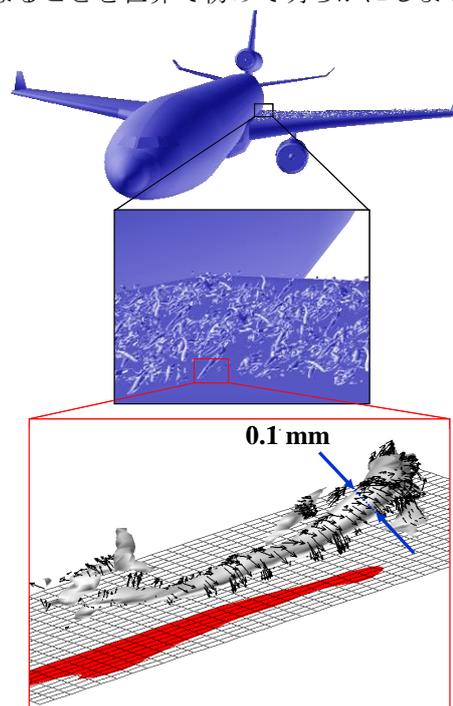


図1 壁面近傍の微細な乱流構造

また、乱流制御に重要な指標である壁面摩擦係数に関する恒等式を導出し[3]、従来必須であった経験式を使用すること無く、高レイノルズ数における乱流制御効果を定量的かつ高精度に評価し、乱流制御の実用化において最も障害となるスケールアップ問題（レイノルズ数依存性）を解明しました。例えば航空機の場合、機体表面から0.4mm以内にある表面近傍の微細な乱流構造のみを弱体化させることにより、35%の抵抗低減効果が得られます。

高レイノルズ数乱流場における乱流制御効果を理論的に明らかにしただけでなく、従来困難であった高レイノルズ数乱流場でも高い抵抗低減効果を有する複数の生物規範型の乱流制御手法を考案しました。世界最大規模の高精度シミュレーションと、従来困難であった壁面近傍の乱流場を対象としたレーザ計測を併用し、その抵抗低減効果を実証しました。例えば、鮫肌を進化させた3次元リブレット（図2）を開発し、世界最大の約12%の抵抗低減効果を確認しました[4]。

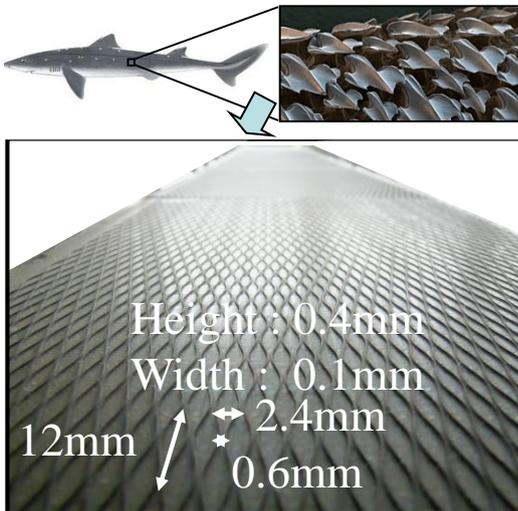


図2 鮫肌を進化させた3次元リブレット

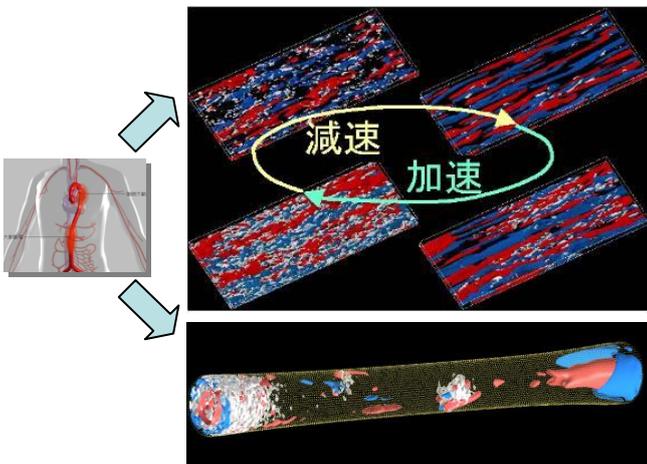


図3 血流の脈動原理を基にした脈動制御と周期的拡大縮小管内乱流の数値シミュレーション結果の一例

機体等の表面に貼るのみで抵抗低減効果が得られ、応用範囲が広いことが特徴です。また、血流の脈動原理を応用した独自の脈動制御や周期的拡大縮小管（図3）も研究し、動力源であるポンプの運転方法を変更するのみで最大約60%の抵抗低減効果を得ることを実証しました[5]。さらに、イルカ表皮を模倣した進行波状微振動壁面による抵抗低減効果を世界で初めて実証しました。理論的には約80%以上もの抵抗低減効果が得られます[6]。ナマズ等の分泌物を模倣した抵抗低減ポリマーを有する新規の船底塗料（図4）も共同研究しております[7]。

これらの独自の生物規範型制御に関する研究結果は、熱流体工学の進展に寄与し、将来の新しい機械システムの設計に有用な指針を与えるものです。現在、企業との共同研究を推進しており、世界規模の省エネルギー化に貢献することを目標に研究・開発を行っていきます。

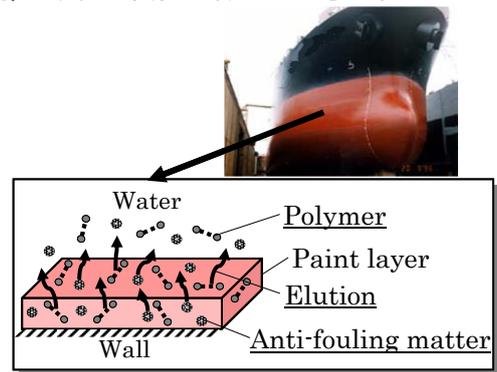


図4 ポリマーを有する新規の船底塗料

参考文献

- [1] K. Iwamoto, Y. Suzuki and N. Kasagi, "Reynolds Number Effect on Wall Turbulence: Toward Effective Feedback Control," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 23, 5, pp.678-689, 2002.
- [2] K. Iwamoto, K. Fukagata, N. Kasagi and Y. Suzuki, "Friction Drag Reduction Achievable by Near-Wall Turbulence Manipulation at High Reynolds Numbers," *Physics of Fluids*, 17, 011702, 2005.
- [3] K. Fukagata, K. Iwamoto and N. Kasagi, "Contribution of Reynolds Stress Distribution to the Skin Friction in Wall-Bounded Flows," *Physics of Fluids*, 14, pp.L73-L76, 2002.
- [4] M. Sasamori, H. Mamori, K. Iwamoto and A. Murata, "Experimental Study on Drag-Reduction Effect due to Sinusoidal Riblets in Turbulent Channel Flow," *Experiments in Fluids*, 55, 10, Paper No. 1828, 14 pp., 2014.
- [5] 相馬 顕子, 岩本 薫, 村田 章, "円管内脈動乱流の摩擦抵抗低減効果に与える圧力勾配波形の実験的解析," *日本機械学会論文集 (B1 編)*, 78, 787, pp.521-530, 2012.
- [6] H. Mamori, K. Iwamoto and A. Murata, "Effect of the Parameters of Traveling Waves Created by Blowing and Suction on the Relaminarization Phenomena in Fully Developed Turbulent Channel Flow," *Physics of Fluids*, 26, 1, 015101, 15 pp., 2014.
- [7] 歌田 裕太, 守 裕也, 岩本 薫, 村田 章, 川口 靖夫, 安藤 裕友, 千田 哲也, "平行平板間乱流に添加された直鎖状多連結ばねダンパ要素による摩擦抵抗低減の数値シミュレーション," *日本機械学会論文集 (B1 編)*, 79, 806, pp.1937-1950, 2013.

計算力学と3Dプリンタで開発する ポーラス材料

竹澤 晃弘 (広島大学)

1. はじめに

近年、3Dプリンタの産業界へ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、近年の技術進歩により、金属材料やマルチマテリアル樹脂においても微細な造形が可能になり、それはポーラス材料を直接造形できるほどである。

ポーラス材料は軽量・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が、その製造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。それに対し、3Dプリンタを適用すれば、意図した形状の内部構造を持つポーラス材料の製造が可能になる。

ただし、ポーラス材料の内部構造の設計難易度は極めて高く、人手による設計では最大限の性能を発揮することは難しい。それに対し、数値計算で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という技術がある。ポーラス材料の実効的(effective)性能を目的として、トポロジー最適化を行うことにより、意図した性能を実現する任意の内部構造が得られる。

そこで著者らの研究グループは、トポロジー最適化でポーラス材料の内部構造を設計し、それを3Dプリンタで忠実に造形して、最適な性能を持つポーラス材料を実現するという取り組みを行っている。ここでは、それらの技術の概略及び、実例として、金属3Dプリンタを用いた高剛性材料の開発、マルチマテリアル樹脂3Dプリンタを用いた熱収縮材料の開発について紹介する。

2. トポロジー最適化を用いた材料設計

トポロジー最適化では対象構造の最適化問題を、対象空間における材料配置問題と考え、その内部の各位置における材料の有無を最適化する。そのため、トポロジー(位相、穴の数)も含めた抜本的な最適化が可能である。ただし、実際の数値計算では、有無を離散的に表す変数の扱いは困難なため、仮想的な材料密度を考え、密度の濃い部分は材料あり、薄い部分は材料なしと近似的に扱う手法がとられる。また、ある単位構造があるとき、それを周期的に配置して構成したポーラス材料の実効的物性値は均質化法で計算することができる。

以上二つの計算力学手法を組み合わせ、設計対象の空間に対して均質化法による計算を行い、マクロ物性値を求めつつ、その物性値の最大化または最小化、あるいは指定した値を目指してトポロジー最適化を行うことで、設計者の意図した性能を有するポーラス材料のユニットセル形状が得られる。そして、そのユニットセルを適当な大きさで周期配置すれば、ポーラス材料モデルが完成する。

3. 3Dプリンタでの造形

3Dプリンタは、金属粉末や光凝固樹脂を、層ごとに選択的に溶融・凝固させ、積層させて三次元形状を造形する。そのため、造形の形状自由度が極めて高い。ただし、装置や材料に依存して、造形物の最小厚さや許容角度等に制約があり、それに違反するモデルは造形できない。また、

内部の金属粉末や、樹脂サポート材を造形後に除去するため、ポーラス材料はそれらの除去に十分な大きさを有する空孔が互いに接続したオープンセル構造である必要がある。3Dプリンタ用の汎用三次元データはSTLと呼ばれる形式であり、トポロジー最適化で得られた密度分布に対してアイソサーフェスを作成し、その形状をSTLファイルとして出力する。

4. 造形例

まず、金属3Dプリンタを用いた造形例を紹介する。図4(a)に示すのは、ユニットセルに等方性を持たせつつ、気孔率70%で体積弾性率を最大化した例である。最適解は当初クロズドセル構造で得られたため、強制的に粉抜き穴を空けて最適化を実施した。なお、ある気孔率における、ポーラス材料の理論的な物性値の限界値はHashin-Strinkmanの材料物性値境界式より求めることができる。今回の最適化では、数値計算上で、その限界値に対して体積弾性率で約85%を達成した。100%に至らないのは粉抜き穴の影響である。

以上の最適解をもとに、材料にマルエージング鋼を用い、レーザ溶融方式のEOS社EOSINT M280で試験片を造形した。図4(b)が圧縮試験による強度計測のための試験片である。ヤング率の数値計算と実験値の誤差は-10%程度あったが、設計値と計測値との間に明確な相関があり、数値計算による剛性設計が十分可能であることを確認した。また、強度に関する設計法は未だ検討中であるが、計測値ベースで、近似式より推定した従来のランダム気孔形状のポーラス材料強度に対しおよそ2.5倍弱の値を示した。

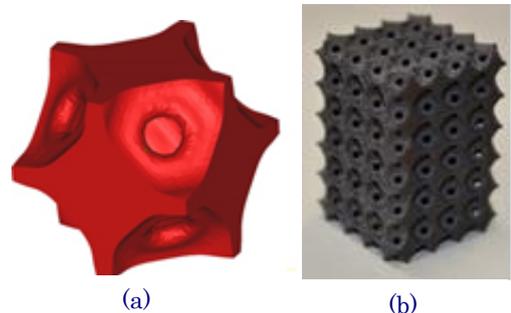


図4 等方性実現と体積弾性率の最大化を目的とした最適化例 (a)最適解 (b)試験片

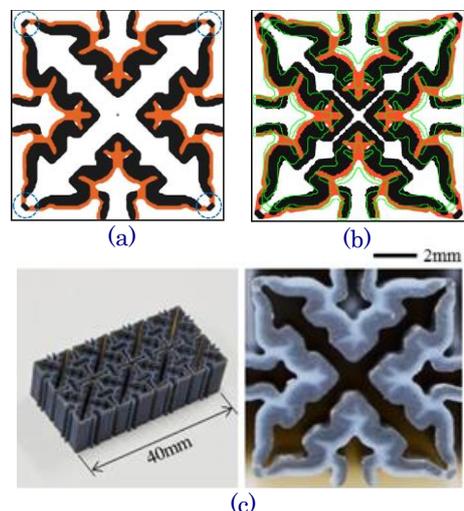


図5 マルチマテリアル3Dプリンタで負の熱膨張実現を目的とした最適化例 (a)最適解(青丸部分は人手で修正) (b)加熱時変形図(緑線は元形状) (c)試験片全体図と拡大図

続いて、マルチマテリアル光凝固樹脂 3D プリントを用いて、平面内で負の熱膨張を示すポーラス複合材料を造形した例を紹介する。図 5(a)に示すのは二次元で実効的線膨張係数を最小化した最適解である。一つの材料は高剛性・低熱膨張性を示し、もう一つの材料は低剛性・高熱膨張性を示すと設定した。この構造の温度を上昇させると、材料間の熱膨張差によるバイメタルに似た曲げが内部におこり、図 5(b)に示すような見かけ上の熱収縮がおこる。

この最適解を面外方向に引き延ばし、Stratysys 社の Objet Connex 500 で図 5(c)に示す試験片を造形した。高剛性・低熱膨張性材料として、アクリルライク材料の VeroWhitePlus RGD835 を用い、低剛性・高熱膨張性材料としてゴムライク材料の FLX9895-DM を用いた。レーザ走査式の熱膨張計で長手方向の線膨張係数を測定し、室温から約 40°C の間で $-1.18 \sim -1.12 \text{K}^{-1}$ の値が得られた。

以上のように、計算力学的手法と 3D プリントを組み合わせることで高性能な、あるいは通常材料では実現が難しい特殊な性能を有するポーラス材料が開発できる。今後 3D プリントは工業分野における更なる市場拡大が期待されており、著者らの研究グループも様々な高性能・特殊材料の実現を目指し研究を続けていく予定である。

最後に、今回日本計算力学奨励賞(The JACM Young Investigator Award) という大変栄誉ある賞を頂きましたこと、ご関連の先生方に深く御礼申し上げます。

結晶塑性論による多結晶金属の材料モデリング

只野 裕一 (佐賀大学)

この度は The JACM Young Investigator Award という栄誉ある賞を頂き、誠に光栄に存じます。簡単ながら、私がこれまでに取り組んできた研究内容について、ここに紹介させていただきます。

学生時代は慶應義塾大学工学部システムデザイン工学科の故野口裕久先生のご指導のもと、延性金属材料の塑性不安定現象に関する有限要素解析を学位論文のテーマとしていました。当時は数値解析手法が主な研究対象であったため、材料モデルは既存の古典的な弾塑性モデルを中心に用いていましたが、そもそも弾塑性モデルがどのような物理に基づいているのか、その頃から漠然とした疑問と興味を持っていました。折しも、2005 年に学位を取得した後の 3 年間、同大学同学部機械工学科の志澤一之先生のもとで助手として勉強する機会を頂き、そこで固体材料のマルチスケールモデリングに興味を持つようになりました。

実用金属の多くは多結晶材料であり、またその構造はスケール毎に様相が大きく異なる、マルチスケール構造であることが知られています。前述のような経緯から、私の興味は巨視的な材料応答がどのような微視的要因によって引き起こされるか、という点であったため、自然と対象となるスケールはメゾスケール(巨視的スケールと原子スケールの中間、おおよそマイクロメートルオーダーのスケール)へと向かっていきました。金属のメゾスケールの材料モデルとしては、結晶塑性論に基づくモデルが広く知られています。結晶塑性論のアイデア自体は決して新しいものではなく、むしろ古典的なモデルと呼べるものですが、

結晶スケールの材料挙動をシンプルかつ合理的にモデル化することが可能であり、そこから多様な材料の変形挙動を表現できるため、現在に至るまで精力的な研究が進められています。

私が結晶塑性論に関する研究を本格的に開始した 2005 年当時、鉄やアルミニウムなど立方晶金属への適用事例は既に多く報告されていましたが、マグネシウムやチタンに代表される六方最密(Hexagonal Closed-packed; HCP)構造を有する材料への適用は、世界的にもまだ始まったばかりでした。そこで、HCP 金属への結晶塑性モデルの適用と実用問題への応用をテーマに、新たな研究をスタートしました。

HCP 金属は、図 6 に示すように力学特性が異なる複数のすべり系や双晶系が活動することから、立方晶金属と比べて異方性が強く、従来のモデル化では十分にその特性を表現することができません。そこで、まず HCP 金属のすべり系や双晶系を導入した結晶塑性モデルを有限要素法へと導入し、さらに均質化法により巨視的な材料応答を表現可能なマルチスケール解析の枠組みを構築しました(Y. Tadano, Int. J. Mech. Sci, 2010)。

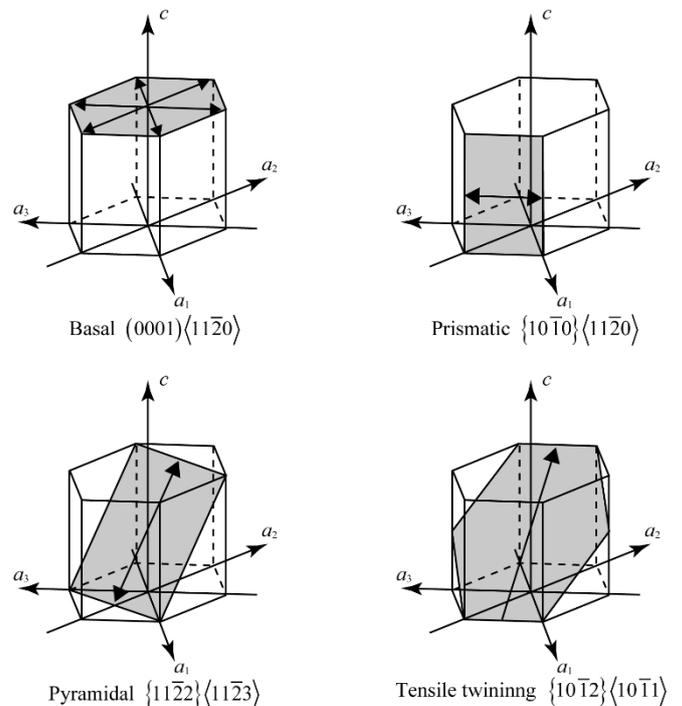


図 6 六方最密金属のすべり系と双晶系

均質化法に基づく HCP 金属の多結晶解析と並行して、結晶塑性モデルの中でも最も古典的な多結晶モデルの一つである Taylor モデル(ひずみ一定モデル)についての再検討も行いました。Taylor モデルは、多結晶を構成する全ての結晶粒が同じひずみを受けると仮定するモデルであり、HCP 金属には不適切なモデルですが(Y. Tadano et al., Key Eng. Mater., 2007)、立方晶金属に対しては、モデルの簡便さや計算コストの少なさから、現在でも広く利用されています。一方で、その定量的な妥当性については疑問も多く残されていました。そこで FCC 金属を対象に、結晶塑性均質化法に基づく多結晶モデルと Taylor モデルの詳細な定量的比較を実施し、これを通じて Taylor モデルの適用可能範囲とその限界について、体系的に整理することができました(Y. Tadano et al., Comput. Mater. Sci., 2012)。

構築した枠組の工学問題への応用としては、板材成形などで重要となる成形限界解析（板材の延性破断予測）へのモデルの適用を行ってきました。板材の成形限界予測手法として古くから用いられている Marciniak-Kuczynski 法と呼ばれる塑性不安定予測手法を、多結晶塑性均質化法と組み合わせることで、複雑な微視構造を有する材料の巨視的な成形限界を効率よく計算できる枠組を提案することができました (Y. Tadano et al., Int. J. Mech. Sci., 2013) (図 7)。また、この手法によるマグネシウムの成形限界解析についても報告しています (Y. Tadano, Int. J. Mech. Sci., 2016)。

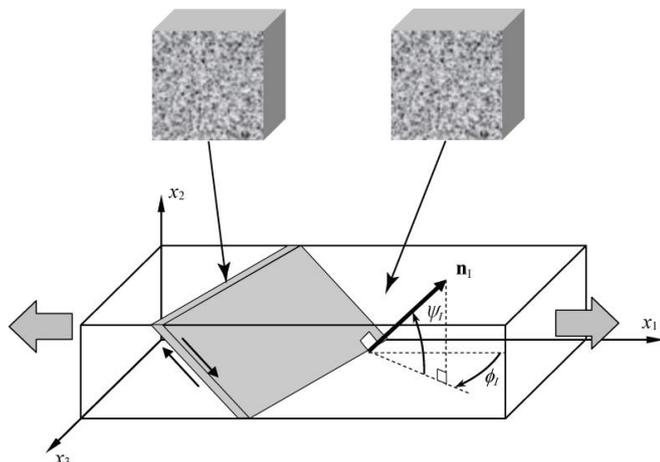


図 7 板材の塑性不安定解析モデルの概要

最近では、HCP 金属においてすべりと共に重要な塑性変形機構である変形双晶についても、結晶塑性論の枠組における新たな材料モデルの構築に取り組んでいます。変形双晶は、ある結晶粒内に鏡像関係となる新たな結晶相が発生、拡大していく塑性変形モードであり、その高精度なモデル化は依然として重要な課題として残されています。そこで、Phase-field 法と結晶塑性モデルを組み合わせたモデルによって変形双晶のメソスケール挙動を表現するモデルを構築したほか (R. Kondo et al, Comput. Mater. Sci., 2014), 図 8 に示すように変形双晶が発展していく際の体積分率を導入することで、従来の結晶塑性有限要素法の枠組への適用性が高く、計算コストの低い変形双晶モ

デルを新たに提案しています (Y. Tadano et al., Int. J. Plast., in press)。

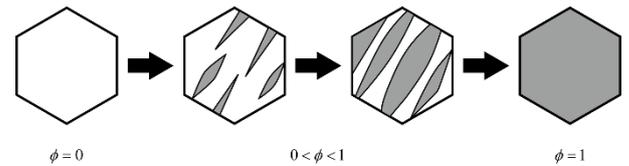


図 8 変形双晶発展の模式図

このように、結晶塑性に関する研究を約 10 年に渡って続けていますが、2015 年度には所属機関である佐賀大学の若手研究者長期海外派遣事により、カリフォルニア大学サンディエゴ校に客員研究員として 1 年間滞在する機会を頂きました。この滞在では、メッシュフリー法に関する研究で著名な Jiun-Shyan Chen 教授の研究室を訪れ、メッシュフリー法の一つである Reproducing Kernel Particle Method (RKPM) について、腰を据えて学ぶ時間を持つことができました。これまでの研究では一貫して有限要素法を用いてきましたが、最近取り組んでいる材料モデルにおいては、有限要素法の適用に困難が伴う問題が生じており、これをメッシュフリー法によって解決できる可能性に着目しています。メッシュフリー法を援用した結晶塑性解析はスタートしたばかりであり、今後どのように発展させていけるか未知数ではありますが、この滞りで得られた新たな視点と手法を用いて、今後は材料モデリングのみならず、メッシュフリー法に関する研究でも、計算力学分野の発展に貢献できるような研究を進めていきたいと考えています。

末筆になりますが、文中で触れた先生方のほかにも、九州大学 (当時)・宮崎則幸先生、山形大学・黒田充紀先生、佐賀大学・萩原世也先生をはじめとする多くの先生方からのご指導や、共同研究者の皆様、学生諸氏のご協力が無ければ、これまでの研究は為し得ませんでした。ここに厚く御礼申し上げますとともに、これからも計算力学の発展に少しでも寄与できるよう、益々精進していく所存です。

国外研究室滞在報告 (その 2)

この企画では、サバティカル制度等により国外の研究室に長期滞在した JACM 会員の方から国外の研究室滞在報告をして頂きます。

ノートルダム大学 (米国)

Computational Hydraulics Laboratory

三目 直登 (東京大学)

多くの方にとって、ノートルダムと聞いてまず思い浮かぶのは、パリのノートルダム大聖堂でしょう。「ノートルダム (Notre Dame)」はフランス語で「我が貴婦人 (Our

Lady)」の意であり、キリスト教の聖母マリアを指す言葉とされています。

ノートルダム大学は、米国インディアナ州の人口約 10 万人の街、サウスベンド (South Bend) に位置し、聖母マリアの名に恥じぬ敬虔なカトリック系の私立大学として 1842 年に設立された歴史の古い大学です。教育と研究のレベルは非常に高く、米国内では、名門私立大学の連盟アイビーリーグと比しても遜色ない大学という意味で、ヒドゥンアイビーの一つに数えられています。また、ノートルダム大学は米国のカレッジフットボールの強豪としても知られ、多数のプロアメフト選手を輩出しています。

私は、2015 年の 5 月から 2016 年の 3 月までの間、ノートルダム大学に所属する Joannes Westerink 教授を中心と

して構成された Computational Hydraulics Laboratory (CHL) に客員研究員として在籍し、研究活動を行いました。CHL では、有限要素法による 2 次元浅水長波方程式の大規模並列解析コードである ADCIRC の開発や、それらを用いた非常に大規模なハリケーンおよび高潮のシミュレーションを行っており、多くの成果を挙げています。また近年では、オハイオ州立大学やテキサス大学オースティン校の研究グループと共同で、不連続ガラーキン法を適用した大規模並列解析コードである DG-SWEM の開発や、ハリケーンなど他の解析コードとのカップリング、より高い精度と適用性をもつ 2 次元波モデルの開発等が行われています。

本報では、米国での研究生活や日常生活について紹介を致します。特に、私は 2014 年度から博士課程に在学中の学生なので、博士課程に在学中もしくはこれから進学する方の参考になればと思います。以下では、研究留学の準備、米国での研究生活、米国での日常生活、留学を経て得たことの 4 点に分けて報告をしたいと思います。

まず、研究留学の準備に関してですが、私は日本学術振興会特別研究員 DC2 を取得し、それを経済的基盤として留学を行いました。2015 年時点の特別研究員の遵守事項には、通算の海外渡航日数が採用期間の 1/2 以下であることが記されています。つまり、渡航先での研究計画が妥当であれば、最大で、DC1 であれば 1 年半、DC2 であれば 1 年間海外で研究活動を行うことが許されています。ただし事前に海外渡航届や研究指導委託等の手続きを、所属する大学や日本学術振興会に対して行う必要があります。特別研究員制度を利用することで、滞在に必要な資金をこちら側から用意できるので、受け入れ先の研究室に経済面の負担をかけないという観点から、渡航先の選択肢に幅が広がると考えられます。しかしながら、様々な大学が提携校や姉妹校などへの留学制度を持っているため、それらを利用するのも選択肢のひとつと言えるでしょう。また、後述しますが、米国では博士課程の学生が研究員として給与を得ている場合があり、その額は生活するのに十分なものである場合もあります。研究成果や研究遂行能力が高ければ、受け入れ先と交渉し、給与を得る形で留学することが可能だと思います。

次に、米国での研究生活に関して述べます。私の体験はあくまで一例であり、米国の他の大学や研究期間でそれが一般的かどうかはわかりませんが、上述したように、私の在籍した研究室では、博士課程の学生が企業や共同研究機関からの給与を得て研究を行っていました。また、私にと

って大きなカルチャーショックだったのは、受け入れ先の教員である Westerink 先生に、「君は今日から私たちの同僚なんだから、私やその他の同僚のことはファーストネームで呼んでね」と言われたことです。私はもともと比較的礼儀知らずな性格なのですぐに慣れましたが、多くの日本人にとってこれはかなりとっつきにくい価値観だと思いました。それだけを聞くと非常に環境も待遇が良いように感じますが、上記のことは、「私は学生なので」という免罪符が通用しないことを意味すると思います。研究者として非常にシビアですがエキサイティングな環境であり、とても良い経験になりました。

日常生活に関しては、私の留学先は他の大都市と比べて比較的小さな町だったので、車がないとかなり行動範囲が狭められますが、それでも様々な経験ができました。日常生活であまり不便は感じませんでしたが、交渉と主張が非常に重要だと感じました。同じ条件の部屋にもかかわらず、交渉するかしないかで家賃が異なったり、交通違反等の処遇でさえも交渉したいで変わったりといったことがあるそうです。しかし、留学を通じて語学力も大いに高まると思っていましたが、渡米してすぐにその考えは少々甘いということに気付きました。特にシミュレーション系の研究者は、単独でプログラムを実装したり、手法を考案したりといった作業が多く、自分から積極的にならないと英語をほとんど喋らずに過ごすことも可能です。私は、研究室でも積極的に会話をし、趣味の音楽活動などで現地の人々と交流したり、学内の日本語学科で TA をするなどの活動を行いました。これから研究留学を考えている学生の方々には、スポーツや料理、音楽など、ある種の共通言語となり得る手段を使って、積極的に課外活動をするを強くお勧めします。

留学を通して得たことに関してですが、当然、海外で、特に米国で研究し生活した経験から、研究遂行能力やプレゼンテーションスキル、語学力や交渉力は少なからず向上したと思います。しかし、特に語学力などは、たった一年の留学では満足なレベルには達しなかったと反省しています。私は、留学を通して得た最も重要なスキルは度胸であり、「やってみれば意外となんとかなる」という感覚かなと思っています。特に根拠はありませんが、今後おそらく国際会議などの場でこれまでよりも堂々と振る舞えると思いますし、町で突然外国の方に道を聞かれてもあたふたしないと思います。

海外での研究滞在を考えている方の参考になれば幸いです。

計算力学関連書籍の紹介（その 1）

新たな企画として「計算力学関連書籍の紹介」を始めます。通常は、第三者が紹介するケースが多いかと思いますが、本企画では書籍の魅力等をよりわかりやすくするために、著者に直接紹介して頂きます。

流体-構造連成問題の数値解析

滝沢 研二 准教授（早稲田大学）

2013 年に Wiley より Computational Mechanics Series として世界で最初の近代的な流体構造連成 (FSI) 解析の教科書として出版されました。「Computational Fluid-Structure Interaction: Methods and Applications」が、日本語に翻訳され、森北出版より「流体-構造連成問題の数値解析」として出版 (<https://www.morikita.co.jp/books/book/2863>) されました。この機会に本書および翻訳書の紹介をさせていただきます。本書はライス大学のテズドゥヤー タイフン先生

(<http://www.tafsm.org/>)と UC サンディエゴのバズィレヴス ユリ先生 (<http://ristretto.ucsd.edu/~bazily/>) と共に私 (<http://www.jp.tafsm.org/>) がライス大学に居た 2010 年から書き始め、テキサス大学オースティン校のトム ヒューズ先生の 70 歳を記念した国際学会 (<http://www.tafsm.org/TH70/>) に間に合わせるように出版したものです。本書は 3 名の著者の間で綿密に打ち合わせし、数式、語彙、画像についても統一を図り時間をかけて書き上げました。2014 年にはイスラエル工科大学の Dan Givoli 先生より IACM (International Association for Computational Mechanics : 国際計算力学連合) マガジンにおいて本書のレビューを頂いており、そちらも合わせてご覧頂きたいと思います。

本書は、10 章構成となっており、最初の 7 章までが、解析手法の核となる部分の説明、そして残りの 3 章は、実問題への適応を通し、前述の核となる技術だけでは難しい、アプリケーション特有の問題について説明するという構成となっている。技術的には、出版されてから 3 年立っているためさらなる発展があるものの、これらの基礎技術は、今日の解析にも当然必要となる技術である。

第 1 章では流体力学、構造力学および連続体力学における移動格子の基礎として space-time (ST) および arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) の定式化について解説している。本書を通し、流体力学は、非圧縮性流体に限定している。また、構造力学に関しては、極めて限定的ではあるが、流体構造連成を捉えるのに必要な基礎要素をすべて含む形でまとめている。

第 2 章は有限要素法の基礎をまとめ、静止する領域での問題を含め移流拡散方程式からナビエ-ストークス方程式までの有限要素法における定式化、安定化、離散化について説明している。有限要素法の記述は極めて限定的であるが、本書の解説を行うために必要な基礎事項をまとめている。

第 3 章は近年注目されているアイソジオメトリック解析の基礎をまとめている。こちら、限定的となっているが、後述される時間方向の高次関数化にも利用される、有限要素法の新たな高次基底関数の基礎としての特徴をまとめている。

第 4 章では 2 章で説明した問題を移動境界問題に適用している。ここで、ST 法および ALE 法の両者を解説する。これらは、同一の目的のものであり、どちらかを使えば解析が可能である。本書では、immersed boundary 法のような、格子が移動しないものについては極めて限定的な紹介に留め、移動格子法を解説している。

第 5 章が流体構造連成の支配方程式、定式化、離散化の項目である。ここでは、移動境界格子法に必要な格子の移動に関しても解説される。なお、前章と同様に、ALE 法および ST 法の両さについて説明されている。また、いわゆる“monolithic”と呼ばれる流体構造界面の離散化を同一と

する手法に限らず、流体解析用の格子と構造解析用の界面格子が一致していない (nonmatching) 場合における離散化およびその際の注意点や工夫についても解説されている。

第 6 章では、流体構造連成問題の連成方法について解説している。本項ではブロック反復連成 (block-iterative coupling) 法、準直接連成 (quasi-direct coupling) 法、直接連成 (direct coupling) 法について説明している。強連成 (strong coupling) という用語は様々な論文において、多様な意味で使われているが、本書では、ブロック反復連成であったとしても、繰り返す限りは強連成の一種であると説明している。一方で、流体および構造解析を一度しか計算せず、連成状態をチェックしない手法を弱連成 (looseley-coupled algorithm) と称している。また、これまでの流体解析は速度および圧力を同時に計算する一体型の計算手法のみを扱っていたが、それらの分離解法についても言及している。このアイデアを使い、流体構造連成解析においても分離解法の発展番として幾つか紹介している。これらについては、限定的である。また本章には、幾つかの ST 法における発展的手法も含まれる。

第 7 章は FSI 問題、移動境界問題の例題を通して、手法がどういった結果をもたらすかを解説している。

第 8 章は、心臓血管系の FSI 問題である。心臓血管系の FSI 問題は、計測の難しい血管の残留応力や、計算のために必用とされる境界条件、その他測定の難しい物性値等のため、多くの工夫を要する問題である。本章においては、それらの問題提起と基礎的な解決案を提示している。

第 9 章は、パラシュートにおける流体構造連成問題の解析について説明している。本解析は、実設計に用いられたもので、解析手法のみならず使用の仕方の重要性を説明している。

第 10 章は、風車の流体構造連成における解析例を示している。巨大風車のようにレイノルズ数が高く、変形を伴う問題に、実スケールの風車の評価が可能であるということを示している。

以上のような内容で構成されており、これから流体構造連成を始めようとする大学院生やポスドク、研究チームにとっての良いきっかけとなるような内容とするように心がけて執筆したものである。

翻訳は、トヨタ自動車の津川祐美子さんをお願いし、日本の大学院生を主な対象としました。そのため、数式番号およびリマーク等の番号を一致させることで英語版との対比を容易とし、学生にとって分かりにくいであろう箇所は意識することで、著者の意図が伝わるように努めました。また、森北出版のご厚意により、ほぼすべての画像をカラーとし、画像中の語句も日本語に訳されています。最新の情報は英語論文しか存在しませんが、この英語版と日本語版により皆様の FSI 解析研究の参考になることを願っています。

編集責任者

西脇 眞二 (京都大学)

山田 崇恭 (京都大学)