

WCCM2014 のご案内(再通知)

吉村 忍 JACM 会長 (東京大学)

11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI) が2014年7月20日(日)～25日(土)にバルセロナ(Palau de Congressos de Catalunya, Barcelona)で開催されます。前回、第10回のWCCMは2012年にブラジル・サンパウロ市で開催されています。

詳細は会議の詳細はWEBページ：

<http://www.wccm-eccm-ecfd2014.org/>

に掲載されております。JACM総会ならびに2014 JACM Awards授賞式をWCCM2014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。

COMPSAFE2014 会議報告

吉村 忍 JACM 会長 (東京大学), 岡田 裕 JACM 事務局長 (東京理科大学),
青木 尊之 JACM 副会長 (東京工業大学), 今井 陽介 (東北大学),
塩谷 隆二 (東洋大学), 只野 裕一 (佐賀大学)

1. はじめに

桜が満開を迎えた2014年4月13日(日)から16日(水)の4日間、美しい広瀬川の畔に位置する仙台国際センター(仙台市)において、The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (第1回安全・安心と環境のための計算理工学国際会議)(略称COMPSAFE2014)が開催された(写真1)。

この会議は、アジア太平洋計算力学連合APACMとしてはじめて企画されたAPACM Thematic Conferenceであり、また国際計算力学連合IACMのIACM Special Interest Conferenceとしても位置づけられた。この会議は、日本計算力学連合JACMと日本計算工学会JSCES及び東北大学災害科学国際研究所IRIDeSの共催のもと、国内31学協会の協賛も得て実行委員会を構成し、オールJapanの体制で実施された国際会議であった。

本会議の主要な議題は、(1) 地震・津波、台風・ハリケーン・サイクロン、洪水、火山噴火、地滑りなどの種々の自然災害に関わる安全や防災・減災に関わる計算理工学技術、(2) 大気や水質の汚染、放射性物質による汚染、地球環境問題、避難などの環境問題・社会問題に関する計算理工学技術、(3) 破壊、衝突、爆発などの人工物の事故や損傷に関する計算理工学技術、等であった。

昨今、IACMやECCOMAS等において様々なThematic ConferenceやSpecial Interest Conferenceが企画され、世界中で開催されているが、安全・安心と環境に関する計算理工学を主テーマとするThematic Conferenceは今回初めてであり、後で述べるように、私達主催者の予想を超えて、世界中から多くの専門家が集う質・量ともに大変充実した国際会議となった。



写真1 桜が咲き誇る広瀬川と仙台国際センター

2. 全体概要

初日のオープニングセレモニーでは、共同議長を務めた樫山和男教授(中央大学教授、日本計算工学会会長)と吉村(JACM会長)から開催趣旨とIACM, APACM, 協賛団体、参加者等への謝辞を述べる挨拶が行われ、続いて、矢川元基IACM会長(東洋大学)、Sung-Kie Youn APACM会長(KAIST, KAIST)に挨拶をいただき、会議がスタート

した。

このテーマで開催されるはじめての会議ということもあり、企画段階では約200件の講演数を想定していた。しかし、最終的には、論文投稿件数が276件で、筆頭著者の国別で見ると日本に次いで、中国（33件）、韓国（10件）、アメリカ（8件）、台湾（5件）、ドイツ（5件）、フランス（4件）、スペイン（4件）、ロシア（4件）、英国（3件）と続き、参加者総数は309名、そのうち外国人は約90名と、大変盛大な会議となった。

オープニングセレモニーの後、東北大学の今村文彦教授のプレナリー講演「Improvement of the Tsunami Simulation after the 2011 Tohoku Earthquake」で学術講演が始まった（写真2）。東日本大震災の津波被害のシミュレーション結果が紹介され、多くの聴衆が講演に耳を傾けた。また、Sergio R. Idelsohn教授（CIMNE, スペイン）、Tayfun E. Tezduyar教授（ライス大学, アメリカ）、René de Borst教授（グラスゴー大学, イギリス）、堀宗朗教授（東大）、Sung-Kie Youn教授（KAIST, 韓国）、Zhuo Zhuang教授（清華大学, 中国）らの14件のセミ・プレナリー講演が各日の午前中に2会場の平行で行われた。いずれも興味深い内容であり、同じ時間帯のもう一方の講演も聞きたかったという声も多数あった。



写真2 今村文彦教授によるプレナリー講演

また、この会議では、以下に記す22のミニシンポジウムが開かれた。

- MS1 Computational Biomechanics in Health, Safety and Environmental Problems
- MS2 HPC for Environmental Problems
- MS3 Advances in Structural Collapse Analysis
- MS4 Quality & Reliability of Groundwater Flow Simulations
- MS6 Computational Simulations in Nuclear Power Plants Subjected to Various Hazards
- MS7 Simulation-based Disaster Prediction and Mitigation
- MS8 Numerical Simulations for Natural Disasters
- MS9 Computational Reliability / Safety Assessment for Space Vehicles
- MS10 Hazard and Disaster Simulation of Earthquake and Tsunami
- MS11 Numerical Methods and Models for Multi-phase Flows with Free / Moving Interfaces and Applications
- MS12 Fracture Mechanics Analyses on Small to Large Scale Important Infrastructures
- MS13 Reliable Modeling of Turbulent Flows
- MS14 Damage, Material Instabilities and Fracture

- MS15 Computational Fluid Dynamics for Wind Environment and Disasters
- MS16 Computational Technologies in Diagnosis and Prognosis of Infrastructures
- MS17 Recent Advancement of Computational Engineering and Science for Soil-Fluid-Structure Interaction Problems
- MS18 Discrete Modeling Approach for Geo-Hazard Prediction
- MS19 Computational Aviation Safety and Climate
- MS20 Multiscale Modeling for Computational Durability and Safety Engineering
- MS21 Computational Methods for Water Environmental Problems and Coastal / Flood Disaster Mitigation
- MS22 Recent Advances in Computational Geomechanics
- MS23 Crash, Safety and Active Safety in Automobiles

1つのセッションは2時間でミニシンポジウムの場合は、キーノート講演（40分）1件と通常講演（20分）5件というのが基本スタイルであったが、オーガナイザーの判断で弾力的に構成された。どのミニシンポジウムも3日間を通して参加者数が大きく変わることもなく、最終日まで熱心に議論が行われていた。また、No-Showも非常に少なかった。発表内容はExtended abstract集としてDVDとして刊行された。

3. エクスカーション、レセプション、バンケット

COMPSAFE2014では通常の学術講演に加えて、スペシャル企画として、東日本大震災の被災と復興の状況を視察するエクスカーションを本会議前日の4月13日の午後に実施した。これはオプションであったにも係らず約110名の参加者があった。視察先は、多数の鉄筋コンクリートのビルが倒壊した宮城県女川地区であった。なお、視察に先立ち、東北大学の越村俊一教授による、東日本大震災による被害と復興状況に関する講演が行われた。視察先ではボランティアの説明を熱心に聴いている外国人参加者の姿が印象的であった（写真3、4）。

レセプションは、エクスカーションの終了後に仙台国際センターにて開催された。また、バンケットは3日目の夜に、勝山館にて開催された。バンケットの冒頭には、東北大学の田所諭教授による災害ロボットに関する講演が行われた。余興として、和太鼓が演奏され、参加者が飛び入りで演奏する場面などもあった。バンケットの最後には、次回会議は3年後に開催されることが発表された。なお、開催地は未定である。

4. ミニシンポジウムにおける講演内容

ここでは、筆者たちが参加したいいくつかのミニシンポジウムにおける様子を紹介したい。

“MS6 Computational Simulations in Nuclear Power Plants Subjected to Various Hazards”では、地震、津波、航空機落下などの様々な外的ハザードを受ける原子力発電所の健全性・安全性を評価するための最新シミュレーション技術について8件の講演があった。この分野は、しばしば原子力の専門学会や専門家の中に閉じがちなものであるが、COMPSAFE会議の中で、他のシミュレーション手法や他分野の安全・安心問題との関係において相対化されることにより、広い観点から議論が展開され、講演数はあまり多くはなかったが、充実したセッションとなった。【吉村（東大）】



写真3 越村俊一教授によるエクスカーショ事前講演



写真4 宮城県女川地区のエクスカーショ

“MS8 Numerical Simulations for Natural Disasters”では、地震・津波・台風・斜面災害など、様々な自然災害に対する数値シミュレーションに関する講演発表と議論が行われた。3つの小セッションから構成され、第1セッションは地震・地盤・落石などをテーマとし、第2セッションは津波、第3セッションは台風などの気象・気流などの講演が集められた。当日判明した若干のキャンセルがあったが、合計13件の講演発表があった。東京工業大学の岡元太郎氏による「Large-Scale Multi-GPU Simulation of Seismic-Wave Propagation and Its Application to Analysis of the 2011 Great Tohoku-Oki Earthquake」と題した東日本大震災の地震波波動伝播と逆解析による震源予測を大規模GPU計算で行う内容の基調講演があった。セッション全体の議論を通して、自然災害に対するモデル化、数値計算手法、スパコンなどによる高性能計算がバランスよく達成されることが重要であるという認識が得られた。【青木（東工大）】

大規模並列シミュレーション関連のMSとして”MS2 High Performance Computing for Environmental Problems”、“MS6 Computational Simulations in Nuclear Power Plants Subjected to Various Hazards”、“MS7 Simulation-based Disaster Prediction and Mitigation”、“MS8 Numerical Simulations for Natural Disasters”などが企画されるとともに、学会のタイトルfor Safety and Environmental Problemsにあるように、扱う問題が、地球規模、自然災害、プラント全体解析など、大規模問題となり、並列シミュレーションはどの分野においても必須であることから、多くのMSにおいても大規模並列シミュレーションに関する話題が

提供された。また今回、国際連携メンバーによるMS提案が基本となっていたことから、各MS内で、講演者のそれぞれの国で課題となっている環境問題などを扱った発表が行われ、国際的な課題共有が行われている場面も多く見られた。例えば、“MS2 High Performance Computing for Environmental Problems”では、バングラデシュでのコンクリート舗装の灼熱下における劣化による環境問題、韓国での原子力発電プラントにおける溶接接合部分の一次系環境下応力腐食割れ問題、中国での大気汚染問題、そして日本での津波、原子力発電プラント被災などについて、国内のみならずアジア地域や世界の共有問題として認識を深め、今後の研究課題についての活発な議論が行われた。

【塩谷（東洋大）】

計算破壊力学関係のMSとして、“MS12 Fracture Mechanics Analyses on Small to Large Scale Important Infrastructures”が企画された。共同オーガナイザーのShengping Shen教授が所属される、Xian Jiaotong University（中国）とZhuang Zhuo教授のTsinghua University（中国）の関係者が多く出席されていた。20件という多数の講演があった。計算破壊力学と言っても、破壊現象を材料の微視的挙動から、分子動力学などを用いて解析する材料科学に近いアプローチや、原子炉圧力容器のような実際の大規模構造物の破壊力学解析を可能にするための大規模有限要素法破壊力学解析に関する研究まで様々である。また、X-FEM（拡張有限要素法）に関する発表では、シェル要素や複合材料への適用に関する基礎的検討に関する発表があった。自動メッシュ生成を援用したき裂進展解析に関する研究や地震に関連した断層動的破壊解析、さらに高温環境下の材料損傷や複合材料界面の応力特異性に関するなど、多岐多様な研究発表が行われ、活発な議論が行われた。【岡田（東京理科大）】

マルチスケール解析関連では、“MS20 Multiscale Modeling for Computational Durability and Safety Engineering”と題するMSが企画された。マルチスケール関連セッションが、計算力学に関する国内外の講演会の定番となって久しいが、本講演会でも基礎的な解析技術から応用まで幅広い話題が展開され、ミクロスケールに起因するマクロスケールの力学応答、という切り口からの安全工学について多面的に議論することができた。イメージベースモデリングやき裂進展問題、アイソジオメトリック解析などのほか、均質化理論に基づくはり要素の定式化なども興味深いものであった。数ある講演の中でも、近年の計算力学の重要なキーワードであるValidation & Verificationにおいて重要となる不確かさに関する複数の講演が、特に印象に残っている。ミクロスケール構造のもつ不均一性がマクロスケールに及ぼす影響の振れ幅を定量的に評価することは、安全工学や信頼性設計において重要な課題であり、マルチスケール解析の今後の方向性を示唆する重要な話題であると感じた。【只野（佐賀大）】

計算バイオメカニクス関連のMSとして”MS1 Computational Biomechanics in Health, Safety and Environmental Problems”を企画した。COMPSAFEの他のMSとはやや異なる内容であるにも関わらず、シンガポールやイタリアなど海外の若手研究者も参加し11件の講演が行われた。健康問題に関するトピックとしては、赤血球や繊毛細胞など細胞スケールの計算力学モデルから人工股関節や褥瘡など全身スケールの数値計算まで幅広い問題を対象とした発表がなされた。環境問題に関するトピックとしては、細胞あるいは細胞集団スケールの微生物挙動

を精密にモデル化する研究が紹介された。「km」スケールの現象である赤潮などとはまだスケールの隔たりがあるものの、これら細胞スケールのモデルに基づくボトムアップの手法は、赤潮などの予測精度を飛躍的に向上させるかもしれない。【今井（東北大）】

5. おわりに

ビザの取得が間に合わないなどの理由から直前のキャンセルが数件ほど出たものの、当初予定していた規模の会議を成功裏に終了することができた。幸いにも、桜の満開の季節と晴天に恵まれ、海外からの参加者たちは仙台の素晴らしい自然と食・文化も堪能する一方で、東日本大震災の被災地を巡り、震災の激しい爪跡と東北の力強い復興を目撃し、大変感銘を受けた様子であった。本会議は第1回目の会議であるが、この会議を自然災害や環境問題に対して脆弱な地域を数多く抱えるアジア太平洋地域で開催することは学術的に大きな意義があった。とりわけ、この会議を阪神淡路大震災や東日本大震災の被災・復興経験と最先端の計算理工学技術をもつ日本で最初の会議を開催することは、日本が今後この分野でリーダーシップを発揮し貢献する意味でも意義があった。今回の会議の成功の一つにはJACMとJSCESが中核となりオールJapanの体制を組んで取り組んだことによるものと考えている。その中で、特にJACMメンバー及びJACM参加学会には、実行委員会、ミニシンポジウム企画、会議参加等において大変お世話になった。本会議の成功は、関係各位の皆様のおかげであり、心より御礼を申し上げる。

この会議は3年後に第2回が開催されることとなったが、開催地は未定である。いずれの開催地になったとしても、JACMとしては、次回以降もこの会議の発展に寄与していければと考えている。



写真6 東北の復興を願う和太鼓の余興



写真7 バンケットの様子

JACM 関連若手研究者紹介（その2）

JACMメルマガ新企画として、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2回として、松原仁先生（琉球大学）、今井陽介先生（東北大学）、奥村大先生（名古屋大学）、米澤宏一先生（大阪大学）を紹介します。

岩盤災害と風化機構の解明に向けた シミュレーション研究

松原 仁（琉球大学）

地球の内部構造はいくつかの層に分かれていると考えられており、その区分は鉱物や化学組成の違いによって分ける場合と変形性能などの違いによって分ける場合によって多少異なります。よく知られているのは化学的区分で、地球の内側から、内核、外核、下部マントル、上部マントル、そして地殻に区分されています。地球の表層部分にあたる地殻は、大陸地殻においては20～50キロメートル、海洋地殻では5～10キロメートルの厚さを有しており、大陸地殻は下部の玄武岩質層と上部の花崗岩質層の2層構造、海洋地殻に関しては玄武岩質層のみからなっています。地殻を構成しているのが岩盤であり、筆者が研究の対象としているものです。

さて、“岩盤”と一言でいっても、その様相は千差万別であり、材料学的・力学的特性は、それ自体が生成される時代や要因によって著しく異なります。特に、岩盤崩落等の災害は地質学的時間スケールに基づいた風化現象と、地震や集中豪雨、突発湧水等の短い時間スケールに基づいた自然現象が複雑に絡み合った後に生じるものです。すなわち、岩盤災害は、地殻における環境変化と突発的な力学的変化とが密接に関わって生じる問題のひとつと言えます。したがって、その発生メカニズムを明らかにすることは容易なことではありません。

筆者は、これまでの研究において、岩盤崩壊が生じるメカニズムについて、破壊力学に基づいた数値シミュレーション手法を用いて検討してきました。最近では、“岩石中に生きる微生物が岩の微細構造を破壊し、岩盤物性を劇的に変化させる”，という実験事実に着目し、その機構を理論シミュレーションにて解明することに挑戦しております。本稿では、これらの研究の一例として、岩盤内部に潜在している微細亀裂の幾何モデリングと亀裂の進展シミュレーションに関する研究についていくつかのシミュレーション結果を交えながら紹介し、今後の方向性について述べたいと思います。

地殻のごく表層部は様々な種類の岩石や土壌で構成されています。その構造は、多くの不連続な面や微細な亀裂が不規則に存在する極めて複雑なものです。写真1は実際にある岩盤の露頭を示したのですが、ブロック状に発達した亀裂や様々な方向に発達した亀裂群を観察することができます。この不均質性は岩盤の変形や崩壊挙動に多大な影響を与え、さらに、岩盤は地域の違いによっても多種多様な様相を呈します。

本研究では、岩盤内部の潜在亀裂を計算機上で表現するために、亀裂ネットワークモデルを採用しています。本モ

デルは、物理探査やボーリング調査のような現地調査の結果に基づき亀裂の走行や斜角を予測し、これを計算モデルに反映させるものです。具体的には、既知の観測情報をもとに確率分布関数を設定し、その亀裂ごとに、走行や斜角を決定するための不規則数を与えることで、自然のゆらぎを表現することになります。図1は本研究で作製した岩盤



写真8 岩盤露頭の様子。(a)はブロック構造を有する岩盤の露頭、(b)は微細な潜在亀裂を有する岩盤露頭

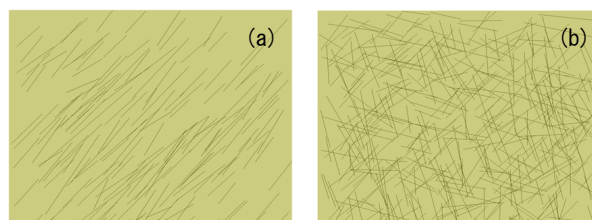


図1 亀裂ネットワークモデルの例。(a)は一定の角度を持った亀裂群モデル、(b)は様々な方向に分布する亀裂群モデル。

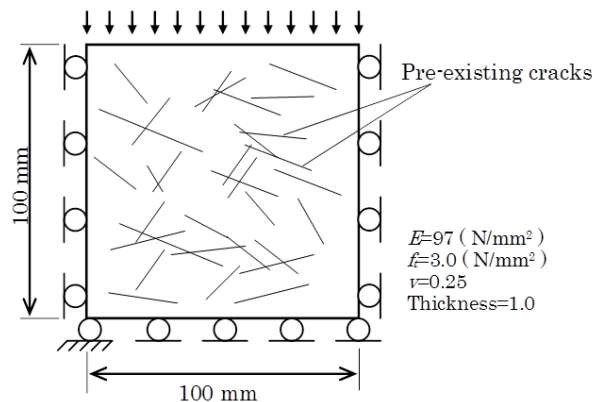


図2 上載荷重を受ける亀裂性岩盤解析モデル。

の2次元亀裂ネットワークモデルの例を示したのですが、実際の岩盤に見られる不規則的な亀裂群や規則的な亀裂群がうまく反映されたモデルとなっていることが分かります。

次に、図1(a)のような単一方向の亀裂ネットワークモデルに対して、図2に示すような等分布の上載荷重を受ける岩盤の亀裂進展解析を実行した結果を図3に示します。亀裂進展解析手法の具体的な説明は割愛させていただきますが、図3(a)に示すように、亀裂は初期の段階では亀裂ネットワークモデルで仮定された潜在亀裂に沿った形で解析領域のいたるところで進展しています。そして、解析の終盤になると、亀裂はある特定の箇所集中的に発生し、ひとつのすべり面のような亀裂集中面を形成していきます。すなわち、新たに発生した亀裂は、自然発生的に、ある特定の部分に集中化し、大規模な不連続面を形成していることが

このシミュレーション結果から分かりました。これは、亀裂性岩盤上に何らかの構造物が建造された場合、岩盤内部の潜在亀裂が短期・長期に渡って進展し、建設当初は検出されなかったような亀裂集中面が新たに形成されるという可能性を示唆しています。したがって、亀裂性岩盤に対するこのようなシミュレーションは岩盤の破壊面や損傷

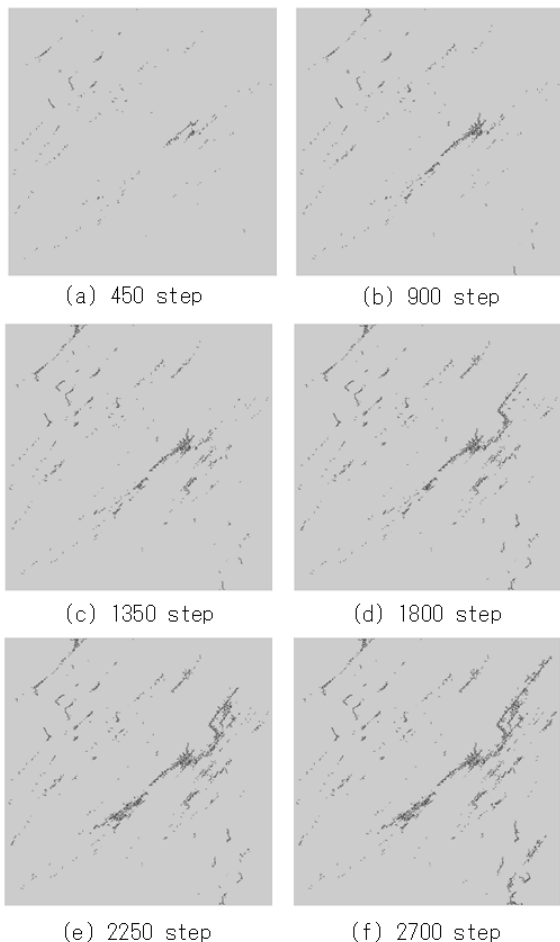


図3 亀裂ネットワークモデルに基づいた、上載荷重を受ける岩盤の亀裂進展シミュレーション。黒：亀裂部

部位の特定・事前検出に大いに役立つものと考えられます。

さて、上述のアプローチは、岩盤の破壊を力学的な視点から観察し、力学理論に基づいた支配方程式によって記述、そして計算されたものです。しかしながら、岩盤の風化は、風や雨などの力学的要因によってのみ生じているわけではなく、樹木の根圧や微生物の付着、あるいは化学反応によっても引き起こされます。例えば、写真2は、菌類とシアノバクテリアの共生生物である地衣類が岩盤表面を覆い生息している様子を示していますが、地球科学分野における最新の研究によると、地衣類は岩盤表面を侵食しながら、その分布を拡大していることが明らかになってきています。すなわち、岩盤の風化は力学的な作用のみを考慮するだけでは解決できない問題であるということです。

また、岩盤表面では写真10に示すような極めて複雑かつ奇妙な風化現象が生じる場合があります。写真10はHoneycomb Weatheringと呼ばれていますが、この現象については、未だその原因さえもが明確にされていません（現在は塩類風化説が最も有力）。

現在、筆者は上記のような力学的な考察だけでは説明が困難な問題に対して、数理生物学や物理化学をベースとし

た支配方程式に基づいた、あるいはこれらを統合した新規数理モデルに基づいた数値シミュレーションを行うことで、その理論的な解明に挑んでいます。岩盤の風化現象を解明し、岩盤災害に対する影響を評価するためには、力学的・化学的・生物学的な要素全てを複合的かつ合理的に考慮した議論が必要不可欠となります。これらを実験的に再



写真9 岩盤表面に生息している地衣類



写真10 奇妙な風化形態を示す凝灰岩

現することは、現象があまりにも複雑であるため、極めて困難であります。数値シミュレーション技術を本問題に適用する意義は、正にここにあるわけです。

岩盤の種類は限りなく存在し、その内部や表面では、風化作用が絶え間なく進行しています。物理学的風化、化学的風化、生物学的風化現象が複雑に絡み合う様を計算機上で再現できるようになるには、膨大な実験データやフィールド調査結果に基づいた新たな数理モデルの整備が必要になると思われます。また、地質学的時間スケールをベースとする風化現象と、地震や集中豪雨などの短い時間スケールをベースとする物理的挙動が、岩盤内部でどのように関わり合い、そして安定・不安定に至るのか、という極めて難しい問題も残されております。

このようなマルチスケール・マルチフィジックス問題を解決するためには、計算科学に通じた研究者のみでは難しく、岩盤力学や地殻工学、地球科学、微生物学をベースとする実験科学、フィールド科学に通じた研究者との協力が極めて重要となります。筆者も、このような学際的な研究協力体制を構築し、計算科学、実験科学、フィールド科学を統合した形の研究を行うべく、研究活動を進めております。筆者の研究が、最終的には岩盤災害の低減化に役立つことを信じて、今後もこれらの研究に取り組んでいきたいと思っています。

参考文献

- (1) 松原仁，江戸孝昭，原久夫，岩盤のき裂ネットワークを考慮した不連続体解析手法の提案およびき裂進展解析，日本計算工学論文集，No.20120017, 2012.
- (2) 江戸孝昭，松原仁，原久夫，粒状構造を有する脆性材料の離散き裂進展解析手法の開発および性能評価，土木学

会論文集 C (地圏工学), Vol. 69, No. 1, pp.31-45, 2013.

- (3) Hitoshi Matsubara and Taka-Aki Edo, Numerical simulation of lichen's propagation and weathering patterns on rock surfaces, Proc. Of COMPSAFE 2014, pp.676-677, 2014.

生体流れの計算バイオメカニクス

今井 陽介 (東北大学)

循環器, 呼吸器, 消化器など多くの器官の機能は「流れ」を基礎とするものであり, そこで生じる疾患も流れと密接に関係しています. 計算バイオメカニクスとは, すなわち生体の計算力学であり, 我々はこれを用いて, 生理現象や疾患の背景にある力学を解明することに挑戦しています.

研究対象の一つは, 微小血管内の細胞流動および接着現象です. 血液の主要な構成要素である赤血球は, 液体 (細胞質) と薄膜 (細胞膜) からなる高い変形能を有する細胞であり, 微小血管を大変形しながら循環しています. 一方, 重大な感染症の一つであるマラリアでは, マラリア原虫が赤血球に寄生し, 細胞骨格の変化などにより変形能を低下させます. さらに接着タンパク (PfEMP1) を発現し, 周囲の正常な赤血球や血管内皮細胞上のタンパク (ICAM-1 や CD36 など) とのリガンドーレセプタ結合によってこれらの細胞に接着するようになります. このような分子・細胞レベルの力学的・生化学的変化が最終的に臓器レベルの循環障害を引き起こすと考えられています. これを解明するため, 我々は赤血球膜の固体力学, 細胞質・血漿の流体力学, リガンドーレセプタ相互作用を連成する計算力学モデルを開発してきました (Imai et al, J Biomech, 2010; Imai et al, J Biomech, 2011; Alizadehrad et al, J Biomech, 2012).

実際の現象を再現するためには計算力学モデルに入力する物性値が必要になりますが, 近年の分子・細胞スケールの実験技術の向上により, 赤血球膜の力学特性やリガンドーレセプタ相互作用に関するパラメータが次第に明らかにされています. 最近新たに開発したモデルでは (図 4), 赤血球膜を有限要素法, 細胞質・血漿を境界要素法あるいは格子ボルツマン法, リガンドーレセプタ相互作用を Bell モデルに基づくモンテカルロ法で計算し, これらのパラメータを直接的に用いています. とはいえ, 生体のパラメータには幅があり, また, 未だ明らかでない物性値も多くあります. したがって一つの生理現象を理解するためには, 広いパラメータ空間をカバーするような大規模パラメトリックスタディが必須となります. これを可能にするため, 全ての計算プロセスを GPU 計算として実装し, 時には数百ケースの計算を実行しています.

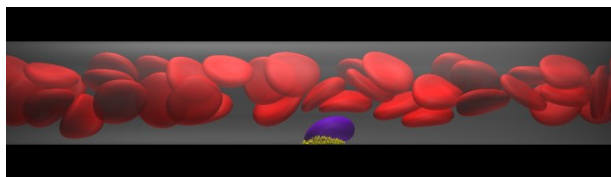


図 4 マラリア感染赤血球の微小血管壁への接着

微小血管における細胞の接着現象はマラリアなどの疾患に特有のものでなく, 通常の生理現象でもみられるものです. 例えば血小板は血管壁の損傷部位に接着し, 凝集・

凝固することによって止血します. また免疫システムでは, 白血球が血管内皮細胞に接着し炎症部位に遊走します. さらには癌細胞の血行性転移も細胞の接着現象を伴うものです. 我々は上述の手法を応用し, これら様々な細胞の接着現象の計算力学モデルを開発しています (Kamada et al, Med Eng Phys, 2012; Kamada et al, Microvasc Res, 2013; Takeishi et al, Physiol Rep, 2014; 図 5).

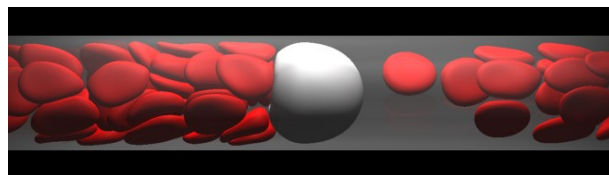


図 5 がん細胞の微小血管内の流動

ここまで循環器に関する研究を紹介してきましたが, 他の器官についても計算力学モデルを開発しています. 呼吸器では, 東京工業大学の青木尊之先生と共同で肺内気流の患者個別モデルを開発し (Miki et al, Comput Meth Biomech Biomed Eng, 2012), 吸入型薬剤の気管支への沈着量に対する息止めの効果を解析しました (Imai et al, J Biomech, 2012; 図 6). ところで PM2.5 が話題となっておりますが, PM2.5 に分類される微小粒子は吸入とともに末梢の気管支 (あるいは肺泡) まで達し, 重力や拡散によって気管支の壁に沈着します. したがって息を吸った後, 長時間息を止めると全ての PM2.5 粒子が肺深部へ沈着してしまいますので, ご注意ください.

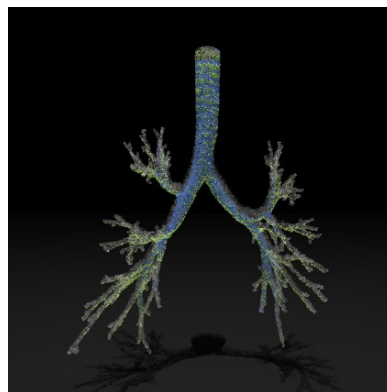


図 6 マイクロ粒子の気管支への沈着

さらに最近では, 嚥下障害や消化不良のメカニズムを解明するため消化器系の計算力学モデルを開発しています (図 7). 生体流れの計算バイオメカニクスは動脈硬化症や脳動脈瘤などを対象とした循環器系の研究とともに発展してきました. 一方で, 消化器系のバイオメカニクスはほとんど未開拓の分野であり, 多くの生理現象が推測の域を脱していません. 例えば, 「機能的ディスペプシア」という疾患は, 潰瘍や癌がないにもかかわらず胃痛や胸やけを訴えるもので, 胃の消化管運動障害が原因と考えられています. しかしながら, 胃壁の運動とそれに伴う食物流動を

詳細に可視化する方法がないため、そもそも健康な状態であっても、食物の貯留・攪拌・排出過程でどのように食物が流動しているのか十分明らかになっていません。我々は医用画像に基づく食物流動の計算力学モデルを開発し、実形状の胃内部における食物攪拌を初めて解析しました。これにより、幽門前庭部において時間平均的な再循環流れが生じており、この再循環領域で食物の攪拌が進行することが明らかになりました (Imai et al, Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol, 2013; 図 8)。余談ですが、実はこの研究は「食後すぐ横になると牛になるのか?」という疑問から出発しています。この言葉は本来行儀を戒める言葉ですが、食後はつつい横になりたくなるものであり、消化に悪いのかどうか気になるところです。計算結果によると「仰向け」はあまり食物が攪拌されず、「うつ伏せ」は良く攪拌されるようです。ただし実際に満腹のときにうつ伏せになると胃が押されて快適とは言い難いので、この件に関しては知覚も連成するような、計算バイオメカニクスのような発展が必要のようです。

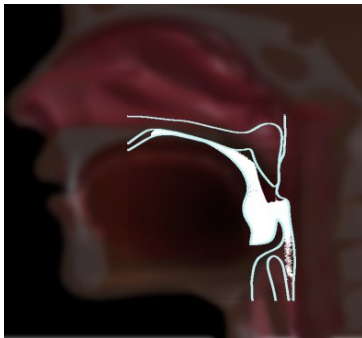


図 7 嚥下の計算力学モデル

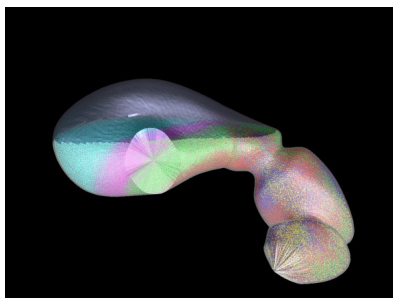


図 8 実形状胃内部の食物攪拌

さて末筆になりますが、研究を実施するにあたり多くの先生方からご指導をいただきました。特に、師匠である東京工業大学の青木尊之先生、所属研究室の前任教授である山口隆美先生（現東北大学特任教授）、現教授の石川拓司先生には多方面からのご指導、ご支援をいただきました。また多くの同僚、学生の皆様との日々の議論も研究に欠かせないものです。ここに深く感謝の意を表します。この度、日本機械学会よりご推薦いただき、文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞させていただきました。これを糧に一層精進していく所存でありますので、今後ともご指導とご鞭撻のほどよろしくお願いいたします。

固体材料のマルチスケール解析

奥村 大 (名古屋大学)

このたびは The JACM Award for Young Investigators in Computational Mechanics という荣誉ある賞を頂いたうえに、ニュースレターへの寄稿という貴重な機会を頂きましてたいへん有難うございます。

私は、名古屋大学 大学院工学研究科 計算理工学専攻の計算固体力学グループに所属しており、「固体材料の力学特性：ナノ・マイクロ・マクロ」をキーワードにして、大野信忠教授と木下佑介助教とともに研究を進めています。私はとりわけ、ハニカムや発泡体（フォーム）のようなセル状材料の微視的座屈挙動や超微細粒多結晶金属の塑性寸法効果、最近では、高分子ゲル膜の膨潤誘起パターン変態の計算を研究テーマにしています。今回は、これらの研究内容について、いくつか簡単にご紹介させて頂きたいと思います。

セル状材料とは、ハニカムやフォームのように、はり板構造の微視構造を有し、空隙を非常に多く含んだ材料のことです。したがって、超軽量であり、比剛性や比強度は高いという特徴があります。一方、圧縮負荷を受けると、微視構造に座屈が生じてしまい、この特徴は、衝撃吸収材として用いる場合には機能的に利用されるわけですが、構造材料としての利用を考えるときには、厄介な問題になります。材料力学のオイラー座屈では、生じる座屈モードと対応する座屈荷重が解析的に求められますが、セル状材料のように微視構造が複雑になると、応力状態に依存して優先的な座屈モードを系統的に評価するための数値シミュレーション手法が必要になります。大野信忠先生と野口裕久先生（当時、慶應義塾大学）とまだ学生だった私は、この問題を分岐現象としてとらえ、有限変形の均質化理論を考え、微視的分岐条件を導出し、微視的座屈の解析を行いました。図 9 は正六角形ハニカムの面内等二軸圧縮によって生じ得る座屈モードを示しています。対称性由来して 3 つの基本座屈モードが現れ、その組み合わせによって、単軸モード、二軸モード、花状モードが形成されます。これらの座屈モードは、実験でも観察されており、分岐の多重性に着目することによって、発生機構が明らかになりました。（Ohno et al., J. Mech. Phys. Solids, 2002; Okumura et al., Int. J. Solids Struct., 2002）。

多結晶金属材料は、ホールペッチ則と呼ばれ、結晶粒の微細化にともなって降伏応力や流動応力が高くなるという特性を有しています。したがって、微細な多結晶金属を作成すれば、高性能化と結びつくわけですが、従来の塑性論は寸法非依存であり、数値シミュレーションのためには塑性論を拡張する必要があります。この分野の研究は一般にひずみ勾配塑性理論と呼ばれ、塑性ひずみ勾配によって幾何学的に必要な転位（GN 転位）が表されることから、GN 転位の塑性寸法効果に果たす役割が議論されることになります。大野信忠先生と私は、転位の弾性論を用いて GN 転位の自己エネルギーを考え、理論を拡張したところ、このエネルギーは高次応力という形で粒界に作用し、図 2 に示すように、サブミクロンから数ミクロンの初期降伏応力の粒径依存性や流動応力の転位セル径依存性をうまく説明できることを発見しました（Ohno-Okumura, J. Mech. Phys. Solids, 2007）。なお、同時期に、大橋鉄也先生（北見工業大学）が、転位動力学シミュレーションによって類似の結果を得ていたことは、研究を進めるうえでとても刺激

になりました。

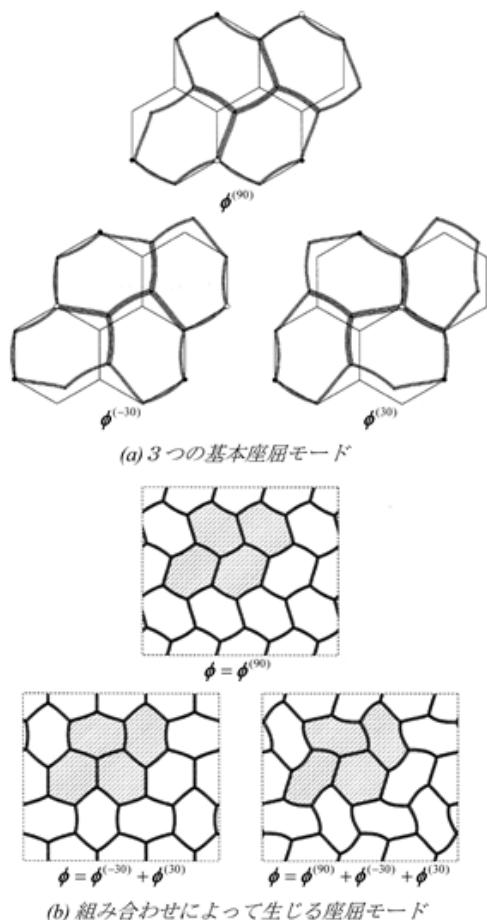


図9 正六角形ハニカムに生じる面内座屈モード

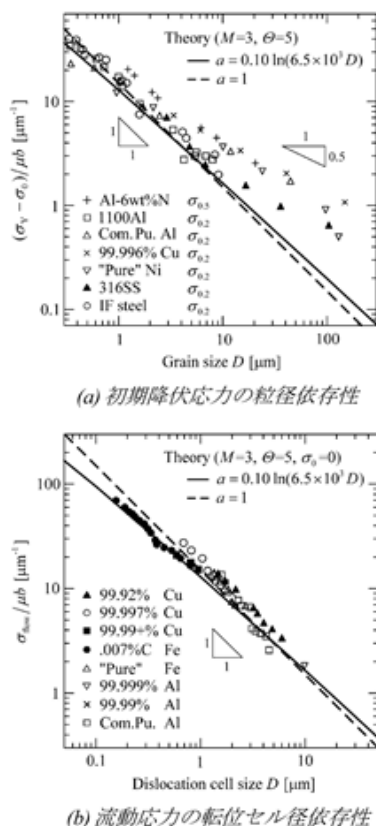


図10 GN転位の自己エネルギーによる塑性寸法効果

次に、高分子ゲル材料は相性の良い溶媒を吸収することによって膨潤します。この自発現象によって、ゲル膜には膨潤誘起型のパターン変態が起こり、条件に依存して非常に多様なパターンの出現が報告されています。したがって、このような現象の機構解明や予測技術の確立が期待されており、数値シミュレーションのための理論や手法が必要となります。ゲル内の溶媒濃度分布は一般に応力分布に依存して不均質になりますから、つり合い状態を考え、不均質な濃度分布を解く必要があります。このような理論は不均質場理論と呼ばれています。図11は円孔を有するゲル膜に生じるダイヤモンドプレートパターンの解析結果であり、パターン化は局所的に発生し、伝播することによって均質化することがわかります (Okumura et al., Int. J. Solids Struct., 2014)。円孔を含まない平らなゲル膜はより複雑なパターン変態挙動を示し、予びずみが生じるパターンを変化させることも報告されています。今後はこのような問題にも挑戦したいと考えております。

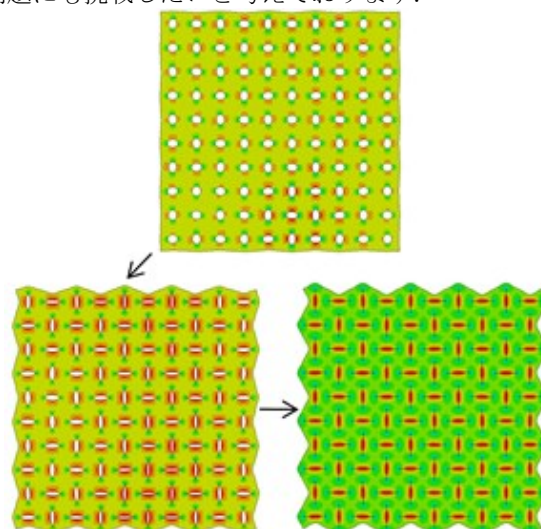


図11 円孔を有するゲル膜の潤滑誘起パターン変態

最後になりますが、大野信忠先生には、研究課題へのアプローチの仕方から、論文のまとめ方に至るまで、いつも本質をとらえた的確なご指導を頂いております。この場をお借りして、心からの深い感謝の気持ちを表したいと思います。ほかにもお世話になっております諸先生方、講演会などで頂いたコメントは励みにもなりましたし、奮起のきっかけにもなりました。また、情報交換を通じて、専門分野だけでなく他分野の知識を広め深められたことは、私の研究活動にとってかけがえのない財産だと思っております。心からお礼申し上げます。最後になりますが、これからもよりいっそう励み、微力ながらも科学技術の発展のために力を尽くす所存でございます。JACM会員の皆様方におかれましては、今後ともどうかご指導とご鞭撻のほど宜しくお願い申し上げます。

低レイノルズ数環境で用いられる プロペラの高性能化

米澤 宏一 (大阪大学)

近年、無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) が注目を集めている。特に小型の UAV は有人航空機による飛行が困難な危険区域や災害発生箇所の監視を可能にする他、撮影や輸送などの様々な商業利用を目的とした研究・実用化も広

く行われている。一方、宇宙航空開発機構 (JAXA) を中心に航空機を用いた火星探査が検討されている(1)。従来の火星探査は衛星や車両によるものであるが、航空機を用いることで衛星を用いる場合よりも詳細に、車両を用いるよりも広範囲に観測活動を行うことが可能となる。

多くの小型の UAV や現在研究段階の火星探査飛行機の推進装置には電動機を用いたプロペラが用いられている。したがって、プロペラの効率を向上させることは、飛行時間の拡大に加え、電源の小型化につながり、ペイロードを大きくすることを可能にする。しかし、小型の UAV や火星探査飛行機のプロペラは、ブレード周りの流れのレイノルズ数が小さく、有人航空機に用いられるプロペラ設計法をそのまま用いると、高い性能は得られない。そこで、著者らは、火星探査飛行機のプロペラの高効率化を目的として低レイノルズ数条件下でのブレード周りの流れの一般的な特性を明らかにし、低レイノルズ数流れで高性能な翼型の検討およびブレードの平面形が流れ場に及ぼす影響を調べている。

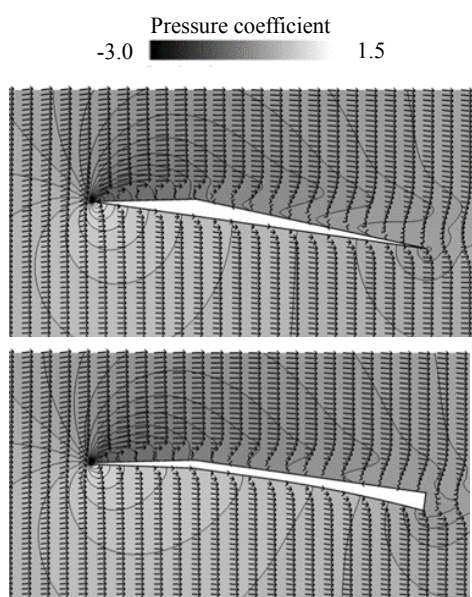


図 12 翼周りの圧力分布と速度ベクトル

図 12 に本研究で用いた 2 種類の翼型周りの圧力分布と速度ベクトルを示す。なお、圧力は (ただし、 ρ はそれぞれ主流の密度と速度) で無次元化してある。また、レイノルズ数 (Re ; 翼弦長, c : 粘性係数) は 3300 であり、自然界では蜂などの昆虫の羽根回りの流れと同程度である。通常の航空機用プロペラでは NACA 翼型に代表される流線型の翼型が用いられるが、本研究で対象としている低レイノルズ数条件下では流れが翼面から剥離しやすく、揚力が低下し抗力が大きくなる。図 12 上図は、低レイノルズ数流れで大きな揚抗比が得られることが知られている翼型(2)であり、本稿では三角形翼型と呼ぶ。一方、図 12 下図は本研究で行った数値シミュレーションによる流れの特性を調べた結果を反映して三角形翼型を改良した翼型である。これらの翼型の特徴として翼前縁が鋭く尖っている。このため翼前縁で流れが剥離し、渦が形成され低圧力が低下する。翼上面の前縁付近の面の法線ベクトルはやや上流側を向いているため、前縁剥離渦による圧力低下によって揚力向上と効力低下の効果が得られている。つまり、流線型翼型では不利益となる流れの剥離が、有益に作用している。また、三角形翼型では翼後縁でも剥離が生じ、抗力増大の原因となっていることが明らかとなった。そこで改良型翼型では後縁側の厚さを増やし剥離を抑制した。また、翼下面を円弧状にすることで揚力の増加を図った。

この結果、改良型翼型では三角形翼型に比べて最大揚抗比が 37%増加した(3)。

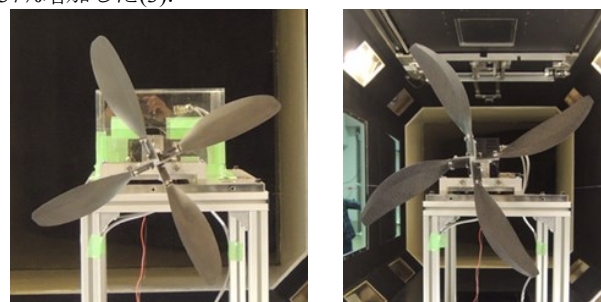


図 13 オリジナルブレード (左) と Skewed ブレード

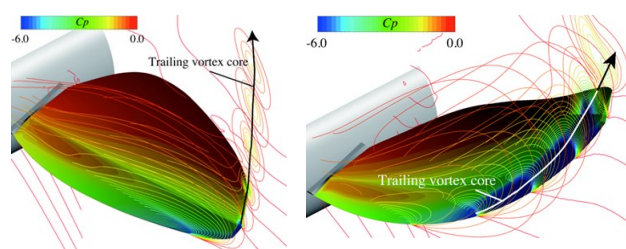


図 14 翼周りの圧力分布と翼端渦の渦芯構造

図 13 に本研究で用いたプロペラの写真を示す。プロペラのブレード形状を決定する際には Adkins-Liebeck の方法(4)を用いた。この方法では必要推力、プロペラ半径、ブレード枚数、翼型の揚抗比などを入力パラメータとして、最も効率が高くなるような翼弦長と翼のねじり角の半径方向分布が得られる。ただし、翼の積み上げ方は陽的に規定されないもので、本研究では翼弦長の 30% の位置を回転軸に垂直になるように積み上げたオリジナルブレードと、翼前縁を基準に後退角を与えた Skewed プロペラを作成し、比較した。通常の有人航空機的设计パラメータを用いると翼弦長の半径方向分布は半径方向にほぼ一定に近く、またブレードのアスペクト比(縦横比)は大きくなる。このためブレード周りの流れは半径方向速度が小さく、2 次元的となる。一方、火星大気中を飛行する場合、火星大気の密度は地球大気密度の 1 % 程度であり、必要な推力を得るには翼面積を大きくする必要がある。しかし、地球から火星までの輸送を考えるとプロペラ直径は小さくしなければならない。このため図 2 に示すようにアスペクト比は小さく、翼弦長は半径によって大きく異なる。Adkins-Liebeck 法による設計では、推力係数 CT (R はプロペラ半径) は 0.37、効率は 61% であった。しかし、同一条件で行った数値シミュレーションでは、オリジナルブレードが $CT=0.45$ 、効率は 67% が得られ、設計値よりも大きな値となった。このことは実験でも確認されている。数値シミュレーション結果から、翼面状では半径方向の流れが生じており、空力特性を変化させたものと考えられる。一方、Skewed ブレードについては、図 14 に示すように翼面の圧力分布がオリジナルブレードとは大きく異なることが判明した。この原因として翼端から生じる渦の構造が異なるためであることが判明した。Skewed ブレードでは翼端渦が翼面状に発生し、翼端付近では強い半径方向流れが生じ、主流は翼面には沿わなくなっている。しかし、プロペラ効率はオリジナルブレードと同程度または条件によってはやや高くなることが実験や数値シミュレーションから確認されている。このことは、翼端渦構造を考慮して翼形状を最適化により、さらに高効率化を図れると考えられ、現在も研究を行っている(5)。

以上のように、レイノルズ数が低い条件下でプロペラを高効

率化しようとする場合，従来の設計方法を再検討する必要がある．また，工業的な需要が低かったため，これまで回転翼周りの低レイノルズ数流れについては，流体力学的な知見は多くなく，様々な点においてさらに詳細な研究が必要である．

参考文献

- (1) 大山聖，米本浩一，竹内伸介，得竹浩，永井大樹，砂田茂，“火星探査飛行機の多目的設計探査，” 第 55 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2G01, (2011).
- (2) Azuma, A. “The Biokinetics of Flying and Swimming, Second Edition (AIAA Education Series),” American Institute of Aeronautics and Astronautics (2006).
- (3) 米澤宏一・他 8 名，“火星探査飛行機用プロペラ開発のための翼型に関する研究，” 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 62 (2014) No. 1, pp. 24-30.
- (4) Adkins, C. N., and Liebeck, R. H. : Design of Optimum Propellers, Journal of Propulsion and Power, Vol.10, No.5, pp. 676–672, (1994).
- (5) Yonezawa, K., et al., “Influence of Blade Skew on Propeller Performance in Low-Reynolds Number Flows,” Proc. Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2014.

編集責任者

西脇 眞二（京都大学）
山田 崇恭（京都大学）