

COMPUTATIONAL MECHANICS

計算力学部門ニューズレター No. 63

May, 2020

目次

- 部門長の就任・退任の挨拶
 - ・部門長就任にあたって 東京大学 高木 周 2
 - ・部門長退任にあたって 名古屋大学 松本 敏郎 3
- 部門賞
 - ・2019 年度計算力学部門賞贈賞報告 東京大学 越塚 誠一 4
 - 東京理科大学 高橋 昭如
 - ・功績賞を受賞して 東京工業大学 青木 尊之 8
 - ・功績賞の受賞に際して憶うこと 東京工業大学 岸本 喜久雄 10
 - ・業績賞を受賞して 筑波大学 磯部 大吾郎 12
 - ・業績賞を受賞して 名古屋大学 奥村 大 14
 - ・業績賞を受賞して 大阪大学 竹内 伸太郎 15
- 特集：複合材の CAE -力学・強度・プロセス-
 - ・複合材料の力学特性と有限要素法 宇宙航空研究開発機構 末益 博志 16
 - ・CFRP の非線形数値解析について 名古屋大学 荒井 政大 21
 - ・複合材料におけるマルチスケール・マルチフィジックスモデリング 東北大学 岡部 朋永 23
 - ・複合材料構造物利用に向けての CAE の重要性
 - 金属構造材料と繊維強化材料の違いの上位概念 本田技術研究所 漆山 雄太 25
 - ばらつき・不確かさを考慮した確率的シミュレーションの現状と展望
 - 慶應義塾大学 高野 直樹 30
- 部門からのお知らせ
 - ・第 32 回計算力学講演会 (CMD2019) 優秀講演表彰報告 名古屋大学 松本 敏郎 36
 - ・2020 年度年次大会の部門企画について 名古屋大学 松本 敏郎 37
 - ダイキン情報システム 平野 徹
 - 京都大学 西脇 眞二

※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98期部門長
高木 周
東京大学

この度、松本敏郎前部門長（名古屋大学）の後を引き継ぎ、第98期計算力学部門長を務めさせていただきます。高野直樹副部門長（慶應義塾大学）、只野裕一幹事（佐賀大学）、伊井仁志副幹事（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、新型コロナウイルス（COVID-19）の影響下での大変な状況での運営となりますが、計算力学部門のさらなる発展に努めてまいりたいと思います。計算力学部門は、設立後30年を超えましたが、固体力学や流体力学などの基盤的分野を骨格として、工学から理学にまたがる他分野との横の連携が図られている理想的な活動部門として発展してきております。日本機械学会の特徴の一つとして、非常に多くの領域から様々な専門を持つ人たちが集まっていることが挙げられますが、計算力学部門は、その中で、多様な専門を持つ人たちが知識を共有し、さらには新しい知識・技術を作り出す重要な役割を担っていると考えます。

さて、日本機械学会員の計算力学部門への部門登録者数は、2019年11月の時点で第1位～5位の合計で5,881名（正員）です。これは日本機械学会の23部門の中では第3位の規模になります。部門講演会である計算力学講演会では例年多くの研究発表があり、活発な活動が続いています。2019年は第32回計算力学講演会として、東洋大学の田村善昭先生を実行委員長し、多くの実行委員の方のお力により、9月16～18日に東洋大学川越キャンパスで開催されました。本講演会は特別講演2件、フォーラム2件、チュートリアル1件、オーガナイズドセッション（OS）24件、一般セッション、ポスター発表からなる充実した内容で、発表件数はフォーラム、特別講演、チュートリアル、OS、一般セッション、ポスター発表を合わせると283件、参加者は455名となりました。2020年の第33回計算力学講演会は実行委員長として鹿児島大学の池田徹先生をはじめとした実行委員会の方々のお力により、9月23～25日に鹿児島大学郡元キャンパス（鹿児島県鹿児島市）での開催に向けて準備をしておりましたが、新型コロナウイルスの影響により、どのようにするか現在検討中となっております。また、計算力学部門では、現在6つの研究会（逆問題解析手法研究会、マルチスケール計算固体力学研究会、電磁流体解析関連技術研究会、設計情報駆動研究会、解析・設計の代替モデリング研究会、設計と運用に活かすデータ同化研究会）が登録され、研究活動が行われています。

以上の研究活動の成果は、是非とも日本機械学会の英文誌 Mechanical Engineering Journalの計算力学（CM）の

カテゴリーで投稿していただき、本ジャーナルの地位の向上へのご協力をお願いしたいと思います。計算力学部門ではさらに、部門賞（業績賞、功績賞）の表彰、日本機械学会フェロー、学会賞（論文）候補者、文部科学大臣表彰「若手科学者賞」の学会本部への推薦も行っています。これらの募集に関する情報は、日本機械学会のインフォメーションメールでもタイムリーに提供されますので、計算力学部門からのインフォメーションメールの受信を有効にしておいていただければと思います。

COVID-19の影響により、現在、世界全体の状況が一変してしまい、数ヶ月前には全く想像していなかった状況となっております。少なくとも私自身は生まれてから経験したことのない生活環境の激変が生じております。仕事の仕方も大きく変化し、現時点（2020年4月）では、在宅勤務となり、講義はオンラインで実施、実験装置を利用する研究は実施できない状況にあります。このような状況下においても、計算力学に関連する研究は適切な問題設定を行えば遂行可能であり、多くの研究者・技術者にとっても、特に本年度は、計算により遂行できることのような様々な可能性を検討する重要な年になるかと察します。こういう時だからこそ、計算力学部門として何ができるか、何が残せるかを多くの方と議論できればと思っております。

皆様にとりまして、計算力学部門での活動が様々な重要な情報交換の場となることに加え、新たな技術的課題、研究テーマ等の提案、学問領域等の創出につなげていけるよう努力したいと思いますので、ご支援を賜りますよう宜しくお願い申し上げます。

COVID-19の影響で在宅勤務が続く中で。 高木 周



部門長退任にあたって

第97期部門長
松本 敏郎
名古屋大学大学院工学研究科

第97期(2019年度)計算力学部門長の退任に際しまして、一言ご挨拶申し上げます。第97期は副部門長の高木周先生(東京大学)部門幹事の白崎実先生(横浜国立大学)を始めとして総務委員会の皆様、機械学会事務局のご援助によりまして、任期を終えることができました。

計算力学部門は、ハードを意識させる機械工学の中の計算という分野横断的でソフトな技術を担っております。昔は機械工学の技術者が計算できることは当たり前であり、計算だけを取り出して研究の対象とするのはおかしいことだったと思います。しかしながら計算機の発達に伴い、機械工学の中にも計算技術に特化した研究分野が発達するとともに、このことを専門とする技術者が計算力学技術者として認定・評価されるようになってきました。現在、計算技術は高度に発展し、CADと解析ソフトウェアが融合することにより機械構造物の設計・開発過程では必要不可欠のものとなっています。設計者自らが計算尺で計算しながら設計していた昔のように、今後は計算力学の成果を組み込んだツールを駆使しながら効率的に設計するための技術がますます発展していくことでしょう。この過程でAIも大きな役割を果たしていくに違いありません。昨年の第32回計算力学講演会においてもAI関連として「深層学習と機械学習」なるOSが企画され、多くの研究発表と聴衆を集めていました。

計算力学講演会は、当部門の最も重要なイベントですが、昨年の第32回計算力学講演会は東洋大学川越キャンパスで田村善昭先生を実行委員長として開催されました。森の小径を抜けたところのモダンなキャンパスで最新の成果について大勢の参加者が議論を戦わせました。講演会中の表彰式では、部門賞として、功績賞2名、業績賞3名の方々に表彰しました。また部門講演会での講演に対しては、講演会終了後に優秀講演賞2名、優秀技術講演賞3名、および若手優秀講演フェロー賞5名の方々に表彰しました。講演会と並行して、第6回のKSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2019を、当部門と韓国機械学会のCAEと応用力学部門共催で、京都工芸繊維大学の高木知弘先生を日本側チェアマン、漢陽大学のMin Seungjae教授を韓国側チェアマンとして計算力学講演会と同じ会場で同時開催しました。韓国側から11名の参加者がありましたが、最適化やAIベース設計など最新の成果発表があり、江戸時代の雰囲気が残る小江戸蔵里での懇親会とその後の二次会では大いに盛り上がり、日韓両国の参加者の親睦を図ることができました。

2019年度は、5年前に部門から提出したポリシーステートメントに対して達成度を自己評価する年に当たっていました

ので、過去の部門活動実績報告書に基づき自己評価書を作成・提出しました。評価結果としてはさらなる活性化を求められる事項もありましたが、「活動・成果とも極めて活発であり、特に評価できる」なるAランクの総合評価をいただきました。これはひとえに、歴代の部門登録者の皆様と委員の皆様のお力とと思います。ただし、規模に見合ったさらなる活性化を期待されておりますので、ますます多様な分野における計算力学の研究と情報交換がなされますようご協力をお願いします。

さて、私の勤めも終わりに近づいたところで、新型コロナウイルスのパンデミックとなり、当部門登録者の方々も深刻な影響を受けていらっしゃると思います。このニュースレターが発行されたときに状況が改善しているかどうかわかりませんが、大学で仕事をしている者にとっても、極めて大きな影響を受けているところです。講義も会議も全てリモートで行うこととなり、講義については特に準備に忙しくしておりますが、このようなリモート講義や会議を行うツールが突然の災難にも関わらず存在していたということが大きな驚きでした。テレワークで利用するソフトウェアやシステムはすでに使われているところでは多用されていたわけで、強制的に使い始めることになった私もその便利さに驚愕しております。グループウェアを使うことにより、研究室所属の学生とも、直接顔を合わせていたときよりも頻りに濃密にコンタクトをとるようになりました。一度これを経験してしまうと、果たして講義をうけるために特定の大学に入る意味があるのかとか、講義を受けるための大学は必要ないのではないか、大学は学生に何をすべきかなど考えさせられました。リモート講義で学期を終了できるとわかれば、コロナウイルス禍が終わってももはやもとの戻るのには難しいと感じています。計算力学に限らず、機会学会は様々な講習会や講演会を行っていますが、これらの行事・イベントのこれからのありかたはきっと変わってしまうのではないのでしょうか。

次年度は部門長の高木周先生(東京大学)、副部門長の高野直樹先生(慶應義塾大学)に引き継ぎます。皆様の部門活動への一層のご支援とご協力を賜りますようお願い申し上げます。

部門賞



2019年度計算力学部門賞贈賞報告

2019年度計算力学部門表彰委員会 委員長

越塚 誠一 東京大学(左)

2019年度計算力学部門表彰委員会 副委員長

高橋 昭如 東京理科大学(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。

2019年度(第97期)には、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1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、9月開催の拡大運営委員会での承認を経て、功績賞2名、業績賞3名、合計5名の受賞者を以下のように決定しました。

功績賞 青木 尊之 氏(東京工業大学)

功績賞 岸本 喜久雄 氏(東京工業大学)

業績賞 磯部 大吾郎 氏(筑波大学)

業績賞 奥村 大 氏(名古屋大学)

業績賞 竹内 伸太郎 氏(大阪大学)

各氏には計算力学講演会における表彰式にて、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も、ご受賞5氏のご業績をご紹介します、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。

青木尊之氏は、数値流体力学と高性能計算で顕著な業績を挙げています。数値流体シミュレーションにおいて、CIP法に代表されるマルチモーメント法を一般化したIDO法を提案し、セル中心で定義される変数の体積積分値に対しては有限体積法のように厳密に保存性を確保しつつ、周囲の線積分値・面積積分・点値は高次の有限差分法のように高精度で計算を行うものとして、安定で高精度な計算手法を開発しました。保存型IDO法も開発し、応用計算でも多くの成果が得られています。

混相流シミュレーションでは、気液二相流を中心に最近でも精力的に研究を進めています。非圧縮性二相流計算に対しては、これまで半陰解法を用いるのが一般的でしたが、音速を人工的に低減し弱圧縮性流体として計算することによって、大規模計算で収束性が大きく悪化する圧力のポアソン方程式を解かない完全陽解法の計算手法を開発しました。また、長らく格子ボルツマン法は密度比の大きい気液二相流に対して計算が不安定になると言われてきた中、フィルターを導入することで計算精度を低下させることなく安定化に成功しました。その気液界面や自由界面に高解像度格子を動的に配置する適合細分化格子(AMR)法を

適用し、空間充填曲線を用いた動的負荷分散を導入することで大規模並列計算を可能にしました。2016年にはスパコン分野の最高峰の国際会議SC16で442編の論文の中からBest Paper Awardを受賞しメディアにも取り上げられました。

もう一つの大きな業績として、GPUを用いた大規模計算が挙げられます。GPUコンピューティングの世界的な第一人者として高性能計算分野を牽引されてきたことは広く知られています。青木氏が副センター長を務める東京工業大学・学術国際情報センターでは、汎用計算の高速化を目的として2008年に世界で初めて大量のGPUをスパコンTSUBAMEに導入しました。以来、計算力学への応用を中心に国内外で幅広く活躍されています。2010年には世界で初めて現業の気象コードをフルGPU計算に移植し、CPU計算に対して数10倍の高速化を達成したことで世界中を驚かせました。2011年にはフェーズフィールド法による合金の樹枝状凝固計算に対してTSUBAME2.0の4000GPUを用いて2.0ペタフロップスを達成し、高性能計算分野での最高の栄誉と言われるゴードンベル賞を受賞しました。また、東京都中心部の10km四方の領域(鉛直方向には500m)の気流に対し、1m格子を使った500億格子の計算は大きな注目を集め、新聞(一般紙)などマスコミで広く報道されました。この分野での活躍は2012年の文部科学大臣表彰、応用数学会・業績賞などでも評価されています。

また、科研費も研究代表者として基盤研究(S)(2014～2018年度)を始めとして、多くの研究課題が採択されています。日本学術振興会・学術システム研究センターにおいて、2016年から現在まで、科研費を中心とした日本学術振興会の事業に対して機械系の専門研究員として様々な業務に携わっており、プログラム・オフィサーとしても学術界に貢献しています。

青木氏は自身の研究だけでなく、GPU計算の普及を目的として東京工業大学・学術国際情報センターで、誰もが参加できる「GPUコンピューティング研究会」を主宰し、現在も950名以上が登録しており、これまでにTSUBAMEを用いたハンズオン講習会を20回以上開催しました。2009年にGPUプログラミング言語であるCUDAの国内初となる教科書を出版しました。世界のスパコン・ランキングTop500において、2008年にはTSUBAMEだけがGPUスパコンでしたが、今ではNo.1のSummit(米国オークリッジ国立研究所)を始めとして100システム以上がGPUスパコンであり、GPU計算の世界的な普及に大きく貢献したことが分かります。

日本機械学会・計算力学部門については、2003年に業績賞を受賞し、2017年度の部門長、2018年度の表彰委員会委員長を務めるなど、部門への貢献度は非常に大きく、2009年

には日本機械学会フェローとなっています。また日本計算力学連合(JACM)の副会長を6年間(2012～2018年度)務め、JACMの運営に大きく貢献してきました。2011年にはJACM Computational Mechanics Awardを受賞しています。

高性能計算分野についても、2018年度からHPCI(革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ)コンソーシアム理事を務めており、欧州のスパコン計算資源をピア・レビューで配分するPRACE (Partnership for Advanced Computing in Europe)のアジアからただ一人のAccess Committeeとなっています。また、GPUベンダーであるNVIDIAからは世界で13名(アジアでただ一人)のCUDA Fellowに認定されています。2017年度からは文部科学省に認定されている学術大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の課題審査委員長も務めています。

- 1985年 富士通研究所株式会社厚木研究所入社
- 1986年 東京工業大学大学院総合理工学研究科助手
- 1997年 東京工業大学原子炉工学研究所助教授
- 2001年 東京工業大学学術国際情報センター教授
- 2009年 同副センター長

岸本喜久雄氏は、これまでに材料力学分野、計算力学分野を中心に350編以上の論文を発表しています。その内容は、破壊力学パラメータに関する研究をはじめとして高分子系材料の強度評価、腐食・防食解析、連続体の力学解析、逆問題解析など多岐に亘っています。以下に計算力学分野に関連する主な研究業績の概略を紹介いたします。

破壊力学パラメータに関する研究：複雑な負荷を受ける機械や構造物の安全性評価に関して基礎的な研究を長年に亘って行い、破壊力学パラメータ積分の適用限界を明らかにするとともに、慣性力、物体力、熱ひずみ、塑性ひずみが存在するようなより一般的な場合にも適用可能な破壊力学パラメータを提案し、有限要素解析や実験解析などにより、その有効性を様々な場合に対して示しました。さらに、界面き裂の問題や異材接合問題についても研究を進展させました。

動的破壊力学に関する研究：衝撃荷重下の破壊や高速き裂進展問題のように物体の慣性力の影響を考慮する必要のある動的破壊問題に関して研究を行い、衝撃破壊靱性の計測法や高速き裂の動的応力拡大係数の有限要素解析手法を開発しました。

弾塑性破壊力学に関する研究：塑性変形の影響が無視できない大規模降伏状態における破壊問題に関して、弾塑性破壊に及ぼす三次元効果、回転円盤の延性不安定破壊挙動、混合モード荷重下の延性破壊挙動および異種接合材料の界面き裂の問題などを実験力学ならびに計算力学の手法により明らかにしました。

高分子系材料の強度に関する研究：高分子系材料の紫外線照射や高温高湿暴露など環境劣化の影響について研究を行い、高分子系材料を分子鎖のネットワークとして捉えて、その力学的特性を解析する手法を提案し、高分子系材料の力学的特性に及ぼすメソスコピックな領域の構造の影響を明らかにしました。

腐食・防食に関する研究：腐食・防食に関してガルバニック腐食問題を中心に研究を行い、境界要素法による解析手法を提案するとともに、その解析手法の有用性についてモデル実験を通じて明らかにしました。

連続体の力学解析に関する研究：連続体の問題に対する有限要素法や境界要素法をはじめとした種々の解析手法の適用に関

して研究を行い、回転軸の振動問題、き裂問題、弾性接触問題および波動問題など、それぞれの問題に適した解析手法を示しました。さらに、ウェーブレット変換を分散性応力波の解析に対してその有用性を明らかにするとともに、超音波法による材料損傷の評価における波形データ解析に適用して、材料の損傷状態に関する情報の抽出法を提案しました。

逆問題解析に関する研究：逆問題解析に関する研究として、ひずみ応答より衝撃荷重の時間履歴を同定する問題を中心に検討し、測定誤差の影響を低減するための効果的な種々の適切化手法を提案し、その有効性を実証しました。また、熱弾性応力測定法について研究を行い、主応力分離を精度良く行うための逆解析手法ならびに熱伝導の影響の修正法などを提案しています。

以上の研究成果に対して国内外から高い評価を得ており、数々の招待講演を行うとともに、その業績に対して日本機械学会論文賞をはじめ数々の賞を受賞しています。また、ハンドブックや事典、便覧の編集、総説や教科書の執筆を行うなど学術の普及に貢献しています。

また、海外の研究者や企業の研究者との共著論文も多く、国内外に広範な人的ネットワークを形成し、学術の発展に貢献しています。さらに、国際会議の議長、事務局長、国際雑誌の編集委員等を数多く歴任するとともに、国際理論応用力学連合の日本代表総会委員を務めるなど、国際的な学術活動に貢献しています。日米あるいは日中の若手研究者のシンポジウムの開催に尽力するなど若手研究者の育成にも大きな貢献をしています。

また、岸本氏は、学協会の組織運営においても指導的な役割を果たしています。例えば、日本機械学会においては理事、副会長、会長を、自動車技術会においては理事、技術会議議長を、日本材料学会においては破壊力学部門委員会委員長、関東支部長、理事などを歴任するとともに、日本機械学会名誉員、日本工学会、米国機械学会および自動車技術会でフェローに就任しています。さらに、日本学術会議では会員として機械工学委員会委員長を務めた後、連携会員として理論応用力学分野を中心に、また、日本工学会の会長、日本工学アカデミーの会員として、学術の普及・発展に幅広く取り組んでいます。

- 1977年 東京工業大学助手
- 1989年 同助教授
- 1995年 同教授
- 2012年 同副学長、同大学院理工学研究科工学系長、工学部長
- 2016年 同環境・社会理工学大学院長
- 2018年 同名誉教授、国立教育政策研究所フェロー、国立台湾科技大学荣誉講座教授
- 2019年 バンドン工科大学荣誉教授、長沙理工大学客座教授

磯部大吾郎氏は、建築物の大規模崩壊挙動を数値解析評価する分野の第一人者として日本を代表する研究者であり、“Finite Element Code for Impact Collapse Problems of Framed Structures, IJNME 69(12), 2007”など関連した論文を80編以上、“Progressive Collapse Analysis of Structures: Numerical Codes and Applications, Elsevier, 2017”など書籍を9冊出版しています。開発したASI-Gauss法を用い、2001年のニューヨーク世界貿易センタービルの崩壊解析が実施され、航空機が突入した際の衝撃力が全体崩壊の一因であることを示唆しました。その後、2011年のニュージーランド地震におけるCTVビル崩壊に関する数値解析

的調査結果、発破解体解析および解体計画手法の構築等に関する研究成果を挙げており、一連の研究成果は新聞、雑誌、テレビなどのメディアでも取り上げられ、NHKスペシャル「メガクエイク巨大地震」(2010年3月放送, NHK) および「シリーズMEGA CRISIS巨大危機II」(2017年9月放送, NHK) に出演し、1985年のメキシコ地震において倒壊した建物の崩壊要因を調査する数値シミュレーション結果など、建物の棟間衝突に関する研究成果を広く社会に公表しています。一連の功績が評価され、2014年4月には彬子女王殿下御臨席の下、市村学術賞貢献賞(新技術開発財団(総裁:寛仁親王殿下) 主宰)を受賞している。また、2015年5月には日本計算工学会川井メダルを受賞しました。

2003年に日本機械学会計算力学部門事業企画委員会幹事および会員部会委員、2004年には第18回計算力学講演会実行委員および計算力学部門幹事、その後、表彰担当委員会幹事や校閲委員を務めました。2011年からは日本機械学会東日本大震災調査・提言分科会委員も務めています。計算力学部門主催の計算力学講演会では、OS「衝撃・崩壊問題」(後の「固体と構造体の非線形・衝撃・不安定解析フロンティア」) および「社会・環境・防災シミュレーション」のオーガナイザーとしても活躍しています。さらに、2013年からはInternational Association for Computational Mechanics (IACM)のGeneral Council memberを務め、計算力学分野の国際会議の最高峰であるWorld Congress on Computational Mechanics (WCCM)の第12回大会(2016年, 韓国)ではSemi plenary講演を行い、数々の国際会議・国際ワークショップ(日独・日韓ワークショップ, IWACOM-III, COMPSAFE2020)では議長を務めるなど、国際的にも広く活躍しています。

- 1994年 東京大学生産技術研究所 第2部 助手
- 1995年 筑波大学構造工学系講師
- 1999年 筑波大学機能工学系講師
- 2002年 同助教授
- 2004年 筑波大学大学院システム情報工学研究科
構造エネルギー工学専攻助教授
- 2007年 同准教授
- 2011年 筑波大学システム情報系構造エネルギー工学域准教授
- 2013年 同教授

奥村氏は、計算固体力学を専門分野としており、以下の3つの研究項目に関して、インパクトがあり顕著な研究業績を挙げています。

均質化理論の有限変形問題への拡張とセル状固体の微視的分岐座屈解析: 未解明であった六角形ハニカムに生じる座屈モードの発生機構解明に成功するとともに、セル状固体全般の微視的座屈挙動を系統的に解析するためのフレームワークを構築したという点において世界的に高い評価を得ています。当時、均質化理論の非線形問題への適用はホットトピックであり、奥村氏は、有限変形を考慮した均質化理論を構築し、微視構造の分岐座屈条件や巨視的変形の不安定条件を導出しました。理論に基づく有限要素解析によって、六角形ハニカムに生じる特徴的な座屈パターンの形成には、分岐の多重発生による座屈モードの重畳が原因であることを世界に先駆けて発見し、日本機械学会賞(論文)を受賞するとともに、代表論文の被引用数は200回(Google Scholar)に達しています。さらには、分岐座屈が波動性を有する形(長波長座屈)で生じ得ることを示し、巨視的不安定条件の成立後に巨視的局所変形に至る変

形機構を明らかにしました。これらの研究では、領域分割法とユニットセル問題の相性の良さに着目し、大規模解析を巧みに達成しています。正方形ハニカムの解析では、定説を覆し、優先モードが長波長座屈によって生じることを示しました。ケルビンセルを用いた金属発泡体の影響因子解析も行なっており、日本機械学会奨励賞(研究)の受賞に繋がっています。最近では、3Dプリンタで作られたセル状固体の特異な力学特性の解析にも取り組んでおり、引き続きこの分野の発展を牽引しています。

マルチスケール結晶塑性の理論構築と塑性寸法効果解析: 現象論的であったひずみ勾配塑性理論の枠組みに対して、転位の弾性論に基づき物理的解釈が与えられることを理論的に示しており、転位論と塑性力学の力学的融合という革新性にインパクトがあり、連続体力学の教科書(Gurtin-Fried-Anandの著書The Mechanics and Thermodynamics of Continua (Cambridge, 2013))においても引用箇所が多数あります。古典塑性理論は寸法非依存であるが、実際の金属材料の塑性変形は転位の挙動に応じて寸法依存性を示します。塑性ひずみ勾配は幾何学的に必要な転位(GN転位)と関係付けられるため、ひずみ勾配塑性理論の研究が進められていたが、現象論的なモデル化に留まっていた。奥村氏は、転位の弾性ひずみエネルギーに着目し、自己エネルギーを用いてGN転位密度の自由エネルギーを導出し、ひずみ勾配結晶塑性理論を再構築しました。結晶粒モデルの理論解析では、この追加エネルギーから生じる高次応力は、初期降伏応力の寸法効果を引き起こし、粒径が数ミクロンからサブミクロンの領域において理論と実験は非常に良い一致を示すことを明らかにしました。代表論文の被引用回数は150回(Google Scholar)に到達しようとしています。さらには、構築した理論に対する有限要素離散化の手法開発に取り組み、増分解析を準陰解法型さらには完全陰解法型に発展させ、計算効率と増分安定性を大幅に向上させることに成功しました。ほかにも、離散転位塑性法の理論構築や解析に取り組み、他学会等の奨励賞や若手研究者賞を受賞しています。最近ではナノツイン構造の分子動力学解析も行なっており、マルチスケール結晶塑性の分野の発展に長く貢献しています。

高分子ゲルの材料モデリングと膨潤誘起パターン変態解析: ソフトかつウェットな材料やその構造体に現れる特異な変形機構を明らかにするとともに、膨潤現象に着目した材料モデルの高度化や数値解析手法の開発を独自に進め、計算固体力学の新しい先端研究分野を開拓しつつあります。奥村氏は、基礎モデルとして著名なFlory-Rehnerモデルがヤング率および浸透圧の体積膨潤比依存性を両立して表現できないことを示し、2つのスケーリング指数に基づく拡張モデルを提案しました。この結果として、溶媒中での引張変形によって膨潤誘起型の破損が生じ得ることが予測され、この傾向は過去の実験結果と対応することから、膨潤材料に特有の破損機構として注目されています。さらには、pH感性ゲルの膨潤誘起パターン変態の再現及び機構解明にも取り組んでおり、大変形下での膨潤過程を含んだ分岐座屈解析のための逐次的な座屈固有値解析手法を独自に考案しています。この分野の研究は、生物器官の自律的な形態形成に果たす分岐座屈変形の役割を理解し、応用するために役立つことが期待されており、2019年度から研究代表として科研費基盤研究(A)の研究課題に採択されています。

なお、奥村氏は計算力学部門に非常に大きく貢献しています。2011年度～2012年度に広報委員会幹事、2016年度～2017年度に総務委員会幹事、2018年度に表彰委員会副委員長を務めました。計算力学講演会では、2006年からOS「材料の組織・強度に関するマルチスケールアナリシス」のオーガナイザーとして参画しており、他OSとの合同ポスターセッションの立ち上げでは中心的役割を果たしました。名古屋大学で開催されたCMD2016では、実行委員会幹事を務め、フォーラム「固体・構造体に生じる不安定変形」を企画して成功させました。2017年度からはOS「固体と構造体の非線形・衝撃・不安定解析フロンティア」を企画し、部門の活性化に貢献しています。さらに計算力学技術者(固体力学分野)認定試験・対策講習会(東海地区)の実行委員・講師としての貢献もあります。

- 2003年 名古屋大学大学院工学系研究科
マイクロシステム工学専攻助手
- 2004年 同研究科計算理工学専攻助手
- 2007年 同専攻助教
- 2007年 同専攻講師
- 2011年 同専攻准教授
- 2016年 大阪大学大学院工学系研究科機械工学専攻准教授
- 2016年 名古屋大学大学院工学系研究科計算理工学専攻
客員准教授
- 2017年 同研究科機械システム工学専攻客員准教授
- 2018年 同専攻准教授
- 2019年 同専攻教授

竹内伸太郎氏は、直交格子系における流体と構造物の連成問題を通して計算力学に貢献してきました。特に粒子混相流れにおいて粒子周囲の流れおよび熱伝導性粒子による熱輸送の解析手法を構築し、あわせて固体界面近傍における非圧縮流れ場の整合性と運動量保存の両立という基礎的な問題で培った手法を膜透過流れを考慮した流体と構造物の連成解析に展開しました。以下において、各研究の要旨をご紹介します。

粒子を含む混相流れにおける粒子の変形性および熱伝導性：流体と粒子の界面で相互作用を体積力の形式で表現する埋め込み物体法を拡張することで、さまざまな粒子分散混相流れを解析するツールを開発してきました。例として、可変形粒子を含む混相流れ、気泡と剛体粒子の相互作用を考慮した三相流れ、熱伝導性剛体粒子を含む混相流れ中の熱輸送問題、および粒子間の接触伝熱を考慮した粒子混相流れ解析、粒子間の潤滑モデルの開発があります。特に粒子流れにおける熱輸送の問題では(Lagrange的に表現した界面上で温度または熱流束を指定する従来の解法に対して)界面における熱流束が法線・接線方向ともに連続になるような自然な離散化を導入し、運動する粒子の内部温度分布を考慮した混相流れの解析を可能にしました。しかし、界面をよりシャープに表現する手法が必要になり、より高精度の手法として離散化を考慮した埋め込み境界法の提案に至りました。

固体界面を含む流れの界面近傍の離散化と非圧縮流れ場の整合性を満たす離散化：界面における流体力・温度・濃度などを正確に算出するため、2013年頃よりdiscrete-forcing (DF) 型の埋め込み境界法の離散化を見直し、界面の取り扱いをシャープにする

手法を追究しました。壁近傍での人為的な補間操作から脱却し、界面の最近傍における検査体積を工夫することでセル中心で定義する速度・圧力を全て運動量保存から与え、同時に非圧縮速度場と圧力場の整合性も保証する離散化に至りました。この手法では、従来の最大の課題である壁近傍での精度低下は生じないことがわかり、中実な固体物体の表面流れに対して層流域と乱流域を対象とした精度検証により、境界適合格子法と同等の空間精度次数を達成でき、時間刻みに対する計算結果の依存性も同程度まで抑制できることを実証しました。さらに熱流束にも同様の考え方で離散化を行い、対流熱輸送と熱伝導の両方(conjugate熱輸送問題)を考慮した問題設定で、現実の金属の物性(熱容量、熱伝導率)を採り入れた計算を可能にしました。また、その手法を厚みがゼロの薄膜物体に適用し、流体と薄膜物体の相互作用問題へ拡張しました。以上の研究を通じ、直交格子系における流体と構造物の連成解析を実用レベルにしました。

選択的透過膜における膜透過流れを考慮した流体と構造物の連成解析：選択的透過膜の溶媒流れは、膜の垂直方向に流束が発生し、その大きさは膜表裏における圧力差に比例する。また膜表裏で浸透圧差が発生する場合は、低濃度の仮定の下、膜表裏の濃度差の問題に帰着できます。この問題の数値解析の難しさは、膜の両側の物理量の跳躍量を正確に解かなければならないことであり、必然的に膜のシャープな取り扱いを要します。従来のcontinuous-forcing型の埋め込み境界法では、界面をまたぐ近似デルタ関数の幅の分だけ界面が数値的な厚みをもつ可能性があり、膜の近傍における質量保存が保証されていない数値解法では正確な膜透過流束が求まりません。竹内氏はこの問題に対して、膜を厚みのない構造物として有限要素法と有限差分法による二通りの手法を提案しました。前者の離散化方針においては、膜上における圧力および濃度の跳躍量を独立変数とし、流体の運動・固体の運動、透過流束を弱形式で書き下した後、強連成の一体型解法により時間進行を行いました。検証では、運動する膜の膜上濃度の時間発展の解析解、溶媒の透過流量と膜透過係数の理論関係、など複数の独創的な課題を設定し、圧力差と浸透圧差によって駆動される膜透過物質輸送解析の基礎を世界に先駆けて固めました。一方で、血球流れのように多数の膜状粒子が流れる場などで、物質輸送解析の取り扱いをより容易にするために、差分法による膜透過問題の離散化にも着手しました。この方針では(有限要素法のような離散格子内の形状関数を持たないため)圧力の跳躍量を高精度に求めることは挑戦的な課題でしたが、DF型埋め込み境界法をさらに発展させた手法の提案に至りました。すなわち透過膜の最近傍格子点までNavier-Stokes方程式を解く際に、溶媒の透過流束を考慮した非圧縮速度場と圧力場の整合性を新たに定義し、透過膜と膜透過係数の理論関係が再現されました。

- 2001年 Monash University, Post Doctoral Fellow
- 2002年 日本学術振興会特別研究員
- 2003年 大阪大学大学院工学研究科助手
- 2007年 同研究科助教
- 2008年 同研究科講師
- 2010年 同研究科准教授



功績賞を受賞して

青木 尊之
東京工業大学 学術国際情報センター 教授

この度、日本機械学会・計算力学部門より大変栄誉ある功績賞をいただき、誠に光栄に存じます。大変ありがとうございます。恩師である故・丹生慶四郎先生には研究者としての礎を築いていただき、第80期部門長でもあらられました矢部孝先生には数値流体シミュレーションの楽しさを教えてもらい、本計算力学部門に連れてきて頂きました。現在の自分があるのはお二人のお陰であり、深甚の謝意を表します。

丹生研究室の助手の頃は慣性核融合プラズマの理論・数値シミュレーション研究を行っていました。慣性核融合はレーザーやイオンビームを用いて、直径1mm程度の固体燃料を密度が千倍にまで急激に圧縮させます。そこでは電磁流体力学的性質は表に現れず中性流体として振舞うため、その頃は極端な圧縮性流体しか知りませんでした。

丹生研究室の先輩でもあった矢部先生が東工大に戻られ、幸運にも(周りの配慮もあって)私は矢部研究室の助手(2年間)となりました。矢部先生には流体計算について本当に色々教えて頂きました。特に、流体の密度や速度を計算する際に、その空間勾配も従属変数として時間発展させるCIP法は非常に斬新で、新しいアイデアを試す毎日がとても楽しかったことを想い出します。数値計算手法の研究という分野があることも知りました。初めて計算力学講演会で発表したとき、多くの人が自分の発表を聞きに来てくれ、沢山の質問をしてくれたことにとっても感激し、自分の居場所はここだと確信しました。

研究室を独立して持つようになってから暫くは高精度計算手法の開発を中心に研究していましたが、少しずつ変わったものに興味が出てきました。最初はプレイステーション2です。使われているプロセッサがスパコン並みだという宣伝を鵜呑みにし、科研費・基盤研究(B)に申請した「家庭用ゲーム機プレイステーション2による大規模並列流体解析システムの構築」が採択され、研究室に20台のプレステ2が並びました。大学の事務からは「こんなものを大学で買っていいの?」という声が聞こえてきましたが、科研費の研究題目にあるのだから、ということで正々堂々と買うことができました。何とか流体計算はできましたが、メモリは少なく(増強できない)、ネットワークは10Base-T(内部は100Base)でしか接続できなくて並列性能は出ないし、SONYの開発関係の人にどうしてそうなのかを聞くと一言「経費削減」という回答が返ってきて、やはりゲーム機はゲーム機だという結論で終わりました。

東工大のスパコンを良く使っていたこともあり、2001年からは現所属の学術国際情報センターに異動しました。少しするとパソコンのグラフィクス・ボードに搭載されているGPUを使うと「とてつもなく早く計算ができる」という情報が流れてきました。試そうとは思ったのですがOpen GL等を使って一般の計算を描画機能に置

き換えて計算しなければならないということで、そこまではできないと思い静観していました。2006年にNVIDIA社が自社のGPUに対して、C言語の拡張でGPU計算を可能にするCUDAを発表し、コンパイラを含めた開発環境を無償で提供し始めました。これなら自分でも何とかなるかも知れないと思い、早速グラフィクス・カードを購入して試してみました。演算が早いだけなら過去にもいくつかアクセラレータ・ボードというものがありましたが、GPUはメモリ・アクセスも非常に速いことが分かり、それなら計算力学の問題に適用できると確信しました。CPU計算ではDOループやforループを使って格子計算や粒子計算を行いますが、GPUのループを使わない並列計算はとてつもなく受け入れ難いと感じました。GPUのコア数より圧倒的に多い数千万スレッドをGPUに投げ、しかもスレッドを実行する順序が指定できないのです。しかし、各スレッドにはIDが付いていて、それを格子番号や粒子番号に対応させる計算を2~3行入れればよいことが分かっただけで何という事はなくなり、計算力学の問題に対してGPUが使えるようになりました。それからは堰を切ったように次から次へとアプリケーションに適用して行きました。何しろ、どの計算もCPUの数10倍以上の速度が出ましたので、面白くてたまりません。今思うと、CPUの性能が伸び悩んでいた時代で、その1コアしか使わない計算とGPUの全コアを使う計算を比較するのですから不公平だったと言えます。その当時はNVIDIAもCUDA Zoneという世界中の様々なアプリが「×100」や「×300」高速化したなどと自慢するサイトがあり、大いに盛り上がりました。2008年に沖縄で開催された第21回計算力学講演会では「GPGPUコンピューティング」というOSを企画させて頂き、大きな会場にもかかわらず多くの立ち見の人が出るほど盛況でした。2010年には東京工業大学・学術国際情報センターで世界に先駆けGPUを4,224個導入したスパコンTSUBAME2.0が稼働し、2011年にはその全GPUを使った「フェーズフィールド法による凝固計算」(3,300億格子)で2ペタフロップスの実行性能を達成し、ゴードンベル賞を受賞することができました。この時の詳細はCMD Newsletter No.53に書かせて頂きました。今では世界最速のスパコンSummitもGPUを3万個以上搭載するGPUスパコンですし、スパコンTop500ランキングのなかの100システム以上がGPUスパコンとなっています。

GPUを使って流体計算をやっているうちに、水と空気が入り混じるような気液二相流に興味が出てきました。流体のダイナミクスが界面の激しい変形に直接現れ、流体の計算をやっているという実感が湧いてきます。気体と液体の密度が千倍も異なるため、非圧縮条件を満たすためのPoisson方程式を解くのが大変で、半陰解法を用いた多くの気液二相流計算は現在も200×200×200格子程度(1,000万自由度以下)に留まっていると思います。気液が激しく入り混じるような実際の流れでは、格子

を細かくすればするほど小さな液滴や気泡が現れ、高解像度計算の必要性を強く感じるようになりました。GPU計算の力業を使ってもPoisson方程式の収束性は改善しませんので、思い切って半陰解法から完全陽解法にスイッチすることにしました。圧縮性流体方程式を解くのですが、単にそれだけだと時間刻みが音速に支配されてしまい、時間ステップが莫大になってしまいます。そこで、音速を人工的に低減し、実際より大きい圧縮が起こりますが、非圧縮性流体として許容できる範囲で計算する弱圧縮性流体解法を開発しました。

Poisson方程式を解かなくて済むようになり、いくらでも大規模な計算ができるようになりました。しかし、均一格子を用いていると、最新のスパコンなら $10,000 \times 10,000 \times 10,000$ (1兆) 格子の計算は不可能ではありませんが、スパコンの全系を使うような計算を頻繁に行うことはできないので、流体の研究には使えません。高解像度格子を必要なところに動的に割り当てる適合格子細分化 (Adaptive Mesh Refinement: AMR) 法が必要だと強く感じるようになりました。特に気液二相流では密度変化が急峻な界面の近傍に高解像度格子を割り当てる必要があります。弱圧縮性解法はAMR法にも非常に適していて、最近の私の研究室はAMR法一色という感じになっています。1980年代から提案されているAMR法ですが、メモリ管理が複雑 (GPU化はさらに複雑) で、それに加えて複数ノードで計算するには絶えず計算負荷を均一にするような動的領域分割が必要です。モートン曲線やヒルベルト曲線などの空間充填曲線を用いて3次元格子の情報を1次元にマッピングすることにより、領域分割は空間充填曲線の切断だけの問題に帰着され、見事に解決することができました。これにより多数の瓦礫を含んだ広域の津波シミュレーションなどが可能になり、シャボン玉の膨張過程、泡沫形成などの研究を現在進めているところです。AMR法は流体構造連成問題にも非常に適していて、イルカのフリースイミングでは、イルカの周囲に1mm格子を割り当てつつ、1辺が30mの巨大水槽の中を泳ぎ回るような計算が可能になり、風速15m/sec以上の暴風の中で激しくはためく旗の乱流計算などにも適用できます。もう少しこれらの研究を進めたいと思っています。

幸運にもこれまでの研究人生において多くの素晴らしい方々と会うことができました。それは恩師であり共同研究者であり、研究室のスタッフ、学生の皆さんであり、周りの方々に支えられてここまで来たことをしみじみ実感し、感謝の気持ちで一杯です。度重なる海外出張や週末も研究に打ち込むことを許してくれている家族には、言葉で言い尽くせないほど感謝しています。



功績賞の受賞に際して憶うこと

岸本 喜久雄
東京工業大学・名誉教授

日本機械学会計算力学部門功績賞という荣誉ある賞を頂き誠に光栄に存じます。ご推薦いただきました計算力学部門の皆様方、これまでお世話になった多くの皆様へ感謝申し上げます。2018年3月に長年勤めておりました東工大を定年退職し、研究の一線を退いておりましたので、この度の受賞はこの上もなく嬉しく思います。以下では、紙面をお借りして研究をスタートした頃のことなどについてよもやま話をさせていただきます。別の機会に書いた内容と重複がありますがご容赦ください。

研究のスタートは、1974年4月に卒業研究で坂田先生、青木先生の研究室に配属されたときになります。その時に与えられたテーマは、高速進展するき裂に関する研究でした。手始めにガラスの破壊の実験を試みましたが、計測装置もなく、あまり芳しい結果が得られそうにありませんでした。そこで、スウェーデンの研究者のBroberg先生が発表した一様引張応力下での高速き裂進展の場合の解析法を参考にしながら集中荷重を受ける場合の解析に取り組むことになりました。解析手法としては複素関数を用いるもので、ひたすら留数計算を行うものでした。夏休み中、留数計算をしていたのではないかと思います。計算には苦労しましたが、幸い結果を得ることができ、私自身の最初の論文として日本機械学会論文集に「集中荷重を受けて両側に進展するき裂の破壊動力学解析」として掲載することができました。その当時は、同様の内容の論文を海外の雑誌に投稿することが許されていましてリライトして英文ジャーナルにも掲載することができました。原稿はタイプライターで作成しましたが、式を打つのが大変で、何日もかかって原稿を作成したのを記憶しています。このような経験をしたせいもあります。その後、計算機が急速に発展し、色々なことが便利になっていくのを目の当たりに経験できたことは、研究者としても幸せだったように思います。また、Broberg先生に国際会議で来日された折にお目にかかり、非常に感激したことは強く印象に残っています。その後も様々な方々と研究を通じて触れ合うことができました。このようなところにも研究をする楽しみがありました。

修士課程では、紙と鉛筆によるき裂問題の解析は辛いので、き裂問題の解析に、当時、流行し始めていた有限要素法を用いることに取り組みました。山田嘉昭先生の本を参考に、動的き裂問題解析のプログラムを手作りしました。き裂が高速進展する場合の応力拡大係数を精度良く計算するために、き裂が移動することも考慮して表現した特異要素を導入することを思いつき、また、この特異要素をき裂の進展に伴って移動させることも試みました。東工大ではまだ自由に大型計算機を使える状況になかったことから東大の計算機センターに通い詰めました。当時は、プログラムは1行を1枚のカードに穴を空けて記録する方法が使われていて、何枚ものカードを束ねてカードリー

ダに読ませて実行する方法でした。当時の東工大では、そのカードの束を係の人に預けて、あとは結果がでてくるのを待つという仕組みで、1日に1、2回程度のトライアルが精々でした。東大は各自でカードリーダを操作することが出来たのが大きな違いでした。それでも結果がでてくるまで数時間待たされました。プログラムのデバックは今では想像も出来な位に時間がかかりました。私と同じ位の世代の先生方は似たような経験をされたのではと思います。その後は、飛躍的に計算機が発達し、アイデアから成果に結びつける期間が大幅に短縮され、計算力学関係の研究論文が続々と発表されるようになりました。

なお、特異要素を用いた動的応力拡大係数の解析の研究を海外の雑誌に投稿した際に、査読者からは変位関数の非連続性や特異要素の大きさなどについて手厳しい質問があり、また、英文の稚拙さもあったので、査読は一度では済まず、何回もやり取りをしました。最後には査読者が根負けをしたのだと思いますが、お前の回答はロイヤラーの弁護のようだとのコメント付で、掲載可にしてくれました。査読でめげないことを学んだように思います。

修士課程を修了した直後に助手に採用して貰えました。それも、任期付などではありません。今では考えられない位、恵まれた環境でした。研究費の獲得についてもあまりうるさくなく、研究費が少ないなら少ないなり研究ができました。そのひとつとして、破壊問題をより一般的に取り扱えないかと考えて、RiceのJ積分の拡張に関する研究に取り組みました。その成果は、「き裂の進展挙動を記述するための破壊力学パラメータについて」という題の論文にまとめることができました。この論文は文字通り紙と鉛筆だけで作ったものです。これも後で海外の雑誌に投稿しました。この論文も査読者とのやり取りは何回かありました。この論文の英文版は現在でも引用して下さる方がいるので、査読で頑張っておいて良かったと思っています。

研究費は必要ですが、思索する時間の確保は非常に大切に思います。当時は、今と違って時間には恵まれていましたので、定式化した破壊力学パラメータの有用性を様々な場合について計算機シミュレーションや実験により示すことに研究時間を費やすことが出来ました。一緒に研究をしてくれた学生達にも恵まれていたように思います。

学位は1982年に論文博士として取得しました。その直後に家庭を持つことができました。博士論文の公聴会の発表練習を家内に手伝って貰ったような記憶が微かに残っています。その後、暫くして1987年に在外研究で家族とともにケンブリッジ大学に滞在する機会を得ました。Smith先生と奥様のYayoiさんに大変お世話になりました。Smith先生ご夫妻との交流は現在まで続いています。研究テーマは2つの表面き裂の繰り返し負荷

に伴う進展挙動に関してでした。2つのき裂がどのように成長し合体するのかを明らかにすることが目的でした。当時博士課程の学生だったWole Soboyejo君(後年、Princeton大学教授)が実験を、小生が有限要素解析を担当しました。計算の方は1日1ステップずつき裂を進めるのがやっとでした。計算機が働いている時間は、こちらは空き時間で、講義を聴講したり、家族で散歩をしたり自由に過ごすことができました。現在は、カレッジに入るのに入場料が必要ですが、当時は自由に入ることができて、のんびりしていました。在外研究で初めて国際共著論文を書くことができ、さらに、海外の大学における教育や研究の実態について学ぶことができました。在外研究はその後の教員を続ける上で貴重な糧となりました。

拙稿を書いているときは、新型コロナウイルス感染のことで世界中が大騒ぎをしている最中です。思い出すと、ケンブリッジに滞在した1987年は、ニュートンが「プリンキピア」を刊行して300年目に当たり、記念の展覧会が催されました。このニュートンの偉大な業績は、ペストの流行のためにケンブリッジ大学が閉鎖されたために故郷のウルスソープ村に戻っていた18ヶ月間のあいだに成し遂げられました。ペストという禍いが、20才の彼にじっくりと思索をめぐらす時間を与えたことが、古典力学の誕生をもたらしたと言えます。新型コロナウイルス感染で普段通りでない生活に追われていますが、これまでと違った時間の流れが、新たな学術の進歩に繋がる契機になり、禍を転じて福となす、となることを願っています。

その後は、人や環境に恵まれ、動的き裂問題に始まり、弾塑性破壊力学、界面破壊力学、異材接合強度、高分子系材料の強度、波動伝播問題、腐食・防腐問題、逆問題解析などを対象に、有限要素法や境界要素法などの計算力学の力を借りながら様々な研究を行うことができました。数式処理、セル・オートマトン、エキスパートシステム、ケモメカニクス、内部損傷のその場観察などにも手をつけましたが、正直に言うところのテーマについては期待したほどの成果が得られませんでした。しかし、自分自身の知識と経験の広がりには役に立ち、決して無駄ではありませんでした。繰り返しになりますが、穏やかな時代に研究生活をスタートし、殆ど周りからの制約を受けずに自由に研究を続けることができました。このようなことで計算力学の発展に少しでも貢献ができているのであれば望外の幸せです。

東工大を定年退職してからは、国立台湾科技大学、インドネシア国バンドン工科大学、南京航空航天大学、西安交通大学などに滞在する機会を得て、学生への講義や研究に関する議論など、現役のときとは異なる経験を楽しんでいます。また、一聴衆として国内外の学会に出席したりもしてみました。これらを通して、アジアの国々の高等教育や学術面での急速な成長を肌で感じています。我が国のこれからの学術の在り方については、良く考える必要があります。成果第一主義みたいなことでは、駄目だということは明白です。これからは、後進の人達が良い環境で研究ができるようになることを目標に微力を注ぐことができればと思います。

(2020年4月5日)



インドネシア出身の研究室の卒業生達と (2018年8月)



国立台湾科技大学での集中講義を終えて (2018年11月)



業績賞を受賞して

磯部 大吾郎
筑波大学 システム情報系

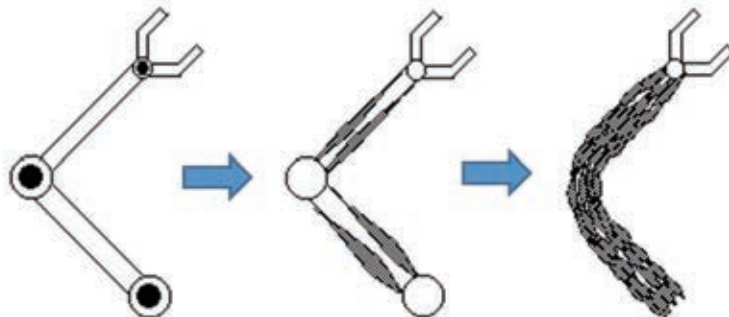
この度は、日本機械学会計算力学部門の業績賞という大変栄誉ある賞をいただき、誠に光栄に存じます。特に、部門運営委員および選考委員の方々に深く感謝申し上げます。このような賞は決して私一人の行いでいただけるものではなく、私を学生の頃から指導してくださった先生方、学会活動で多くのことを伝授してくださった先生方、これまで私の研究室を巣立っていった多くの学生に支えられて受賞できたものと考えております。本当にありがとうございました。

さて、折角の機会ですので、後輩の方々のためにも私の研究人生の原点を振り返ってみたいと思います。

学生の頃から、私ははり要素を用いた有限要素法の開発を行ってきました。とにかく一番次元数の低い次元要素のことでですから、変位関数の次数の限界などから、20世紀中盤に提唱されたTimoshenkoのはり理論1)によってほぼこの分野の理論は出し尽くされた感がありました。ところが、折しも日本に有限要素法を持ち帰って来られた川井忠彦先生が、1980年代に剛体ばねモデル(Rigid body spring model, RBSM) 2)3)を発表されました。このモデルは、複数の剛体棒とヒンジばねにより極限状態でのほりの変形を効率良く表現するモデルですが、有限要素との接点はありませんでした。すると、川井先生の弟子の都井裕先生(私の恩師です)が剛体ばねモデル内の物理的なばねの位置とはり要素の数値積分点位置の関係を発見し、これを用いたShifted Integration法(以降、SI法) 4)5)を1990年に発表されます。この手法は、塑性ヒンジが発生することが予想される位置にあらかじめ弾性ばねをシフトしておき、塑性化が判定された後に塑性ばねに変更するというもので、やや工学的なセンスが必要な手法ではありますが、有限要素ではご法度であった数値積分点のシフティングを初めて採り入れた、画期的な手法でした。さらに、ばね(または数値積分点)を材料性状に合わせて順応的にシフティングするという、順応型Shifted Integration法(以降、ASI法) 6)を都井先生と私が開発します。川井先生が剛体ばねモデルを発表した10年余り後の1993年のことでした。部材の弾性状態、塑性状態のそ

れぞれにおいて適切な位置にばね(または数値積分点)をシフティングするため、通常の有限要素法やSI法と比べても計算効率が格段に上がりました。Bernoulli-Eulerのはり理論に基づく3次はり要素およびTimoshenkoのはり理論に基づく線形はり要素の両者に対しASI法の理論体系が構築され、様々な弾塑性解析に使用されました。特に線形Timoshenkoはり要素を用いたASI法は、1点積分法を使用しているために片端での破断面を表現することができ、崩壊解析を実現するには最適手法でした。その一方で、上記の線形Timoshenkoはり要素を用いたASI法には、唯一弱点がありました。それは、いわゆる“shear locking”を防止するために次数を低減させた1点積分法を用いる必要があり、そのため要素の変位関数が線形関数で表現され、弾性状態における曲げ変位精度があまり良くない、という点です。それを克服したのが2007年に私と当時の学生が発表したASI-Gauss法7)です。これは、線形Timoshenkoはり要素2つを一組とし、弾性状態ではそれらの応力評価点をGaussの2点積分法に使用される積分点位置に配置するように、数値積分点をシフティングしておくというものです。実は、思わぬ失敗から得られた産物でしたが、弾性変位解に劇的な精度向上が見られたため、18～19世紀の天才数学者に敬意を表して名前を付け、以後様々な建築物の崩壊問題に適用しております。

さて、あまり知られてはいないと思いますが、私にはもう一面、研究者としての側面があります。実は、私が日本機械学会に投稿している論文は、ロボット制御に関する論文の方が多いかもかもしれません。私のロボット制御に関する研究は、現・東京大学生産技術研究所所長の藤井輝夫先生が、1995年に私が赴任したばかりの筑波大を訪れたことに端を発します。藤井先生は、海中ロボットで著名な浦環先生の弟子で、学年では一つ上の先輩でした。ロボットに使うリンクやモータの話になり、図1のような絵を描きながら、将来のロボット機構はこういう(図1(c)のような)微小なアクチュエータの集合体で構成されるものになると、より人間に近い動きが実現できるかもね、などという話で盛り上がりました。この絵を見て、要素分割図に似ているなあ、と思う方も多いかもかもしれません。



(a) 剛体+関節+モータ (b) 剛体+関節+筋肉組織 (c) 微小アクチュエータ集合体

図1 ロボット機構の構成部材の変遷

私も当時、思わずそう呟いておりました。それを聞いた藤井先生は、有限要素法でこのような機構を制御できないだろうか、とすかさず難題を投げ掛けてきました。もともとロボットにも興味を持っていた私は、圧電素子を使ったアクチュエータを連結し、目標とする変位に対し必要な電圧を求めるような逆解析をすれば、もしかしたら可能かもしれないと興味を持ってしまいました。そこで始まったのが、超並列有限要素ロボットの研究⁸⁾です。その後、圧電素子特有のクリープや残留変位などを補正するアルゴリズムを構築し、有限要素法を用いた制御システムを開発し、実験を行うまでに至りました⁹⁾⁻¹¹⁾。天然ゴムで4つのバイモルフ型圧電アクチュエータを連結しただけの単純な制御対象ではありませんでしたが、何しろ連続体ですので、1つのアクチュエータが変形すれば、他のアクチュエータはゴムに引っ張られて受動的に変形します。当然、目標変位に達するための電圧はその状況に応じて変化します。ところが、有限要素法はそのような状況をきちんと把握し、目標通りの変位が発生するように必要な電圧を算出してきました。実験で目標通りの変位が計測された時、私は改めて有限要素法の凄さを肌で感じたものでした。

さて、それではいよいよこのようなロボットを作ろうか、という話になった時に1つ問題ができました。前から薄々感じてはいたのですが、複雑な材料特性を持つ圧電アクチュエータを制御するのは容易ではないし、ましてや高い電圧が必要です。学術的には面白いが現実的には難しいな、ということになりました。そこで、図1を逆に遡り、現在よく使われている図1(a)のような機構の制御に有限要素法を適用できないだろうか、と検討することとなりました。そして生まれたのが、リンク系を目標通りに動作させるために必要な関節トルクをフィードフォワード的に算出する、並列的逆動力学計算法(当時はまだ関節トルク算出法と呼んでいました)です¹²⁾。藤井先生の訪問から5年後の2000年のことでした。従来の逆動力学計算は動力学方程式を用いて行い、複数のリンクによって構成される機構を直列的に扱い回帰的にトルクを算出しています。相対回転座標系に基づいているために、リンク数(関節数)が増えると指数関数的に動力学方程式が長くなる、という欠点がありました。これに対し、リンク機構を連続体として扱い、それぞれの関節での情報を並列的に扱って各関節に必要なトルクを算出するのが、有限要素法に基づいて開発された並列的逆動力学計算法です。単純な開リンク系から閉リンク系、途中で構成が変化するリンク系、柔軟リンク系や劣駆動リンク系まで様々なリンク系の制御に適用できることが確認されました¹³⁾⁻¹⁸⁾。そして2010年以降の、この手法を応用したトルクキャンセリングシステムの開発¹⁹⁾につながります。これはロボット機構を有限要素で数値モデル化することにより、内部に発生するモーメントとそれをキャンセリングするためのトルクを算出するシステムであり、まさにロボット工学と計算工学を融和させたシステムです。実は学生時代には計算工学の分野に進もうか、ロボット工学の分野に進もうか、悩んでおりました。その思いがようやく妙な形で結実した瞬間でした。

長々と記してしまいましたが、この受賞を機に、新しいことに挑戦するという初心を思い出し、学生にも伝えながら歩いていきたいと思います。そのような貴重な機会を与えていただき、どうもありがとうございました。

- 1) Timoshenko S.P., Strength of Materials, Third Edition, CBS Publishers & Distributors, 2002.
- 2) Kawai T., Some Considerations on the Finite Element Method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 16, 1980, pp.81-120.
- 3) Kawai T. and Toi Y., A Discrete Method of Limit Analysis and Its Application to Plastic Stability Problems of Structural Members, Engineering Structures, 5-1, 1983, pp.38-44.
- 4) 都井 裕, 骨組構造および回転対称シェル構造の有限要素解析におけるShifted Integration 法について, 日本造船学会論文集, 168, 1990, pp.357-369.
- 5) Toi Y., Shifted Integration Technique in One-Dimensional Plastic Collapse Analysis Using Linear and Cubic Finite Elements. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 31, 1991, pp.1537-1552.
- 6) Toi Y. and Isobe D., Adaptively Shifted Integration Technique for Finite Element Collapse Analysis of Framed Structures, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 36, 1993, pp.2323-2339.
- 7) Lynn K.M. and Isobe D., Finite Element Code for Impact Collapse Problems of Framed Structures, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 69-12, 2007, pp.2538-2563.
- 8) 藤井 輝夫, 磯部大吾郎, 黒田 洋司: 超並列有限要素ロボットの研究 -概念と基礎的検討-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'97講演論文集B, 1997, pp.873-874.
- 9) 磯部大吾郎, 中川 恒, FEMによる圧電アクチュエータ集合体のリアルタイム並列制御, 日本機械学会論文集 (A編), 65-629, 1999, pp.120-126.
- 10) Isobe D. and Nakagawa H., Real-Time Parallel Control of Connected Piezoelectric Actuators by Using FEM, JSME International Journal Series A, 43-1, 2000, pp.19-25.
- 11) 磯部大吾郎, 中村 博, 清水 隆太, 圧電アクチュエータ集合体のリアルタイムFEM制御システムの開発, 日本機械学会論文集 (A編), 66-645, 2000, pp.861-866.
- 12) 磯部大吾郎, 竹内 裕喜, 上田 健夫, 超冗長マニピュレータの関節トルク算出法 -FEMを用いた理論の展開-, 日本計算工学会論文集, 2, 2000, pp.73-78.
- 13) 磯部大吾郎, 有限要素法を用いたリンク機構の逆動力学計算, 日本ロボット学会誌, 20-6, 2002, pp.647-653.
- 14) Isobe D., A Unified Solution Scheme for Inverse Dynamics, Advanced Robotics, 18-9, 2004, pp.859-880.
- 15) 磯部大吾郎, 今泉大作, リンク系の部材剛性に依存しない統一的逆動力学計算法, 日本機械学会論文集(C編), 70-691, 2004, pp.728-735.
- 16) Isobe D., Yagi A. and Sato S., General-Purpose Expression of Structural Connectivity in the Parallel Solution Scheme and Its Application, JSME International Journal Series C, 49-3, 2006, pp.789-798.
- 17) 磯部大吾郎, 加藤 昭博, フレキシブル・リンク系のモデルベース・フィードフォワード制御, 日本ロボット学会誌, 25-4, 2007, pp.625-631.
- 18) 磯部 大吾郎, 北村 悠人, 並列的逆動力学計算法を用いた劣駆動リンク系の動力学補償, 日本機械学会論文集C編, 77-775, 2011, pp.799-812.
- 19) Isobe D., Nakayama B. and Kondo K., A Torque-Canceling System Using the Inverse Dynamics Parallel Solution Scheme, Advanced Robotics, 28-2, 2014, pp.119-132.



業績賞を受賞して

奥村 大
名古屋大学大学院工学研究科

このたびは、計算力学部門業績賞という大変榮譽ある賞をいただき、誠に光栄に存じます。私の恩師である大野信忠先生を含め、憧れの先生方がこれまでに受賞なさって来られた業績賞を私自身がいただくことになるうとは、いまだに現実感はなく、しかし大変うれしく思っております。

私は計算力学部門や計算力学部門講演会において、研究者としてのスタート地点をいただき、出会いや交流の場、成長の機会だけでなく人生の分岐点になるような多くの刺激をいただいております。本稿では、ご覧いただけるのではと思う私の記憶の断片を書き並べ、その中でお世話になった方との関わりを述べ、感謝の言葉とさせていただければ幸いに存じます。

私の学会デビューは2000年に開催された豊橋での計算力学講演会でした。当時、大学院生として名古屋大学の先生方の研究室で有限変形の均質化理論の研究を進めており、同じ研究室の松田哲也先生(筑波大学)と一緒に参加しました。ホテルの大きな会場で、自分の発表内容について、見ず知らずの先生方からコメントをいただけることは大変刺激的で、褒めてくれたりする先生もおり、松田先生とはそんな話を肴にして、大野先生からご指導をいただき、夜遅くまで机を並べ、研究活動に没頭していました。

2001年の北海道大学での計算力学講演会も記憶に残っています。11月末の開催だったこともあり、雪の降る中、キャンパスは静かに美しく、会場の窓ガラスを真っ白に曇らせて講演会は賑やかに行われていました。私はセル構造体の分岐座屈挙動の解析に取り組んでおり、慶應義塾大学の野口裕久先生(故人)のところに邪魔した時期があります。野口先生はオープンマインドな方で、大学院生の私ははじめてのおつかいのような気持ちで訪問することも多かったのですが、一人の研究者として接して下さり、研究室のゼミでの発表機会も与えて下さいました。当時、野口先生の院生だった只野裕一先生(佐賀大学)をはじめとして多くの方との結び付きをいただきました。最近でも意外なところで野口先生のお名前を聞くことがあり、影響力の大きさとお人柄を思い出し、私の本質的な性格や日頃の振る舞いを思い直し反省したりもします。

私にとって2006年の名古屋大学での計算力学講演会も思い出に残っています。大野研究室で助手となり、ひずみ勾配塑性理論の研究を始めた頃になります。大野先生にお取り計らいいただき、私はオーガナイズドセッション(OS)「材料の組織・強度に関するマルチスケールアナリシス」にオーガナイザーとして参画させていただきました。このOSには、当時、神戸大学の富田佳宏先生をはじめとして大阪工業大学の仲町英治先生、北見工業大学の黒田充紀先生といった(順不同、すべての方のお名前を上げることはできませんことご容赦下さい)、大御所の先生が多く参加しており、討論の末席に加えていただき、刺激を受けるとともに、自己研鑽の貴重な機会をいただきました。このOSは原子シミュレーションやフェーズフィールド法のOSと兄弟関係にあり、大阪大学の中谷彰宏先生や尾方成信

先生、岐阜大学の屋代如月先生、金沢大学の下川智嗣先生、京都工芸繊維大学の高木知宏先生、山形大学の上原拓也先生、広島大学の岩本剛先生とも交流を深める格好の場となりました。大野先生からこのようなきっかけをいただいたことは、私にとって幸運であったとしか言いようがなく、深く感謝するとともに、幸運を結ぶようなきっかけづくりは私の中の課題になっています。

2009年の金沢での講演会も私にとって忘れられないものになりました。私の妻とはこの講演会で出会うことになりました。妻の実家はベトナムのハノイ郊外にあり、私は妻の実家を初めて訪れたときの町の光景とそのとき受けた非現実的な感覚を忘れることができません。妻とは結婚に際していろいろ約束をしていますが、私はなかなか守れず、一方で私は妻にしっかりと支えてもらっており、感謝しようにも十分な言葉は見つからず、このようにここで記すことをご容赦いただき、日ごろの感謝の気持ちを表したいと思っております。なお、筑波大学の磯部大吾郎先生は妻の恩師だったこともあり、防衛大学の山田浩之先生、横浜国立大学の尾崎伸吾先生とも一緒にさせていただき、2017年よりOS「固体と構造体の非線形・衝撃・不安定解析フロンティア」を企画させていただいております。

私は部門の総務委員会で仕事をする機会にも恵まれ、2011～2012年度は広報委員として、2016～2017年度は部門副幹事、幹事として歴代の部門長の先生方の下で部門運営の勉強をさせていただきました。2016～2017年度の2年間は、名古屋大学から四大学工学系人材交流プログラムによって大阪大学に転出する機会をいただき、澁谷先生の研究室では、垂水竜一先生や田中展先生の進めている固体力学研究にも触れ、私にとって第3の研究マインドを認識する機会をいただきました。2015年ごろから、私は研究対象をハードマテリアルからソフトマテリアルに転換する傾向にあり、大変形下での階層的な分岐座屈現象に人類にとって重要な情報が眠っており、問題を発掘し、真実を探究すべく研究活動を進めています。この研究プロジェクトでは、田中展先生のほかに大阪市立大学の内田真先生や滋賀県立大学の伊田翔平先生にご協力をいただき、努力を重ねております。これらの話の中にも書き留めたいことはありますが、本稿では話が長くなりすぎるため、また別の機会に紹介させていただければと思います。

最後に最近、大学の同窓会イベントで座右の銘を聞かれる機会がありました。私は研究を職業とするからこそ、私自身にずっと浸み込む言葉として、「The truth makes you free」を大事にしています。Caltechのモットーは聖書の言葉から「The truth shall make you free」であり、調べたところ、米国CIA本部入口には「You know the truth, and the truth shall make you free」と掲げられているようです。ラテン語では「Veritas vos liberabit」と書くようで、Harvard大学の校章には3冊の本が開かれており、「VE」「RI」「TAS」とそれぞれ書かれています。この言葉の力を借りて、引き続き研究課題と真摯に向き合い、研究活動に邁進したいと考えております。計算力学部門の皆様におかれましては、これからもご指導とご鞭撻の程、何卒宜しくお願ひ申し上げます。

業績賞を受賞して

竹内 伸太郎

大阪大学 大学院工学研究科
機械工学専攻

このたびは日本機械学会計算力学部門業績賞をいただき、たいへん光栄に存じます。多くの先生・同僚のお世話になってまいりましたが、共同研究者でもある大阪大学の梶島岳夫先生、学会活動でいつもお世話になっている先生方、ともに研究に取り組んできた学生諸氏のご支援・ご協力あつての受賞であると存じ、深く感謝いたしております。

私は2001年に当時の指導教員である三宅裕先生の指導の下に大阪大学で学位を受けたあと、オーストラリア国 Monash University でポスドクとして研究生生活をスタートしました。いま振り返れば、当時の研究室で M. Rhodes 教授 (現・名誉教授)、S. Wang 博士 (現・豪 Curtin 大学) と粒子流れや粉体問題の新しい数値解法を始めた時が、計算力学を意識した時であると感じています。その後は大阪大学に戻り、梶島先生と粒子解像の混相流計算をはじめとする今回の業績の一部になる研究に着手しました。2007年からは東京大学の松本洋一郎先生の研究室にお世話になり、今でも親交のある多くの研究者に巡り会う機会を得ました。特に高木周先生 (東京大学) や杉山和靖先生 (現・大阪大学)、伊井仁志先生 (現・東京立大学) と一緒に流体・弾性体相互作用の Eulerian 形式の研究を議論できたのは恵まれた機会でした。東京大学在籍中には G. Tryggvason 先生 (現・米 Johns Hopkins 大学) のところを訪問する機会を得ることができ、また同大学を離任する際には S. Zaleski 先生 (仏・Sorbonne 大学) の研究室に滞在して多くの研究者に出会う幸運に恵まれました。両方の滞在をコーディネートしてくださった松本先生には改めて感謝申し上げます。

私は、直交固定格子系における流体と構造物の連成問題を通して計算力学に関わってまいりました。とくに (1) 粒子混相流れにおいて粒子周囲の流れおよび熱伝導性粒子による熱輸送の解析手法を構築し、あわせて (2) 固体界面を含む流れの界面近傍の離散化と非圧縮流れ場の整合性を満たす離散化という基礎的な問題で培った手法を (3) 膜透過流れを考慮した流体と構造物の連成解析に展開してきました。

(1) の粒子流れにおける熱輸送の問題では (Lagrange 的に表現した界面上で温度または熱流束を指定する従来の解法に対して) 界面における熱流束が法線・接線方向ともに連続になるような自然な離散化を導入し、運動する粒子の内部温度分布を考慮した混相流の解析を行いました。また、粒子間の接触伝熱を考慮した粒子混相流解析も可能にしました。しかし以下で (3) に述べる理由により、界面をよりシャープに表現する手法が必要になり、より高精度の手法として次項に述べる離散化を考慮した埋め込み境界法の開発に着手しました。

(2) では界面における流体力・温度・濃度などを正確に算出するため、2013年頃より discrete-focusing (DF) 型の埋め込み境

界法の離散化を見直し、界面の取扱いをシャープにする手法を追求してまいりました。

手法の発展の歴史の詳細は割愛しますが、当時の DF 型解法は非圧縮速度場と圧力場の整合性を考慮した離散化 (Ikeno & Kajishima, 2007) により、界面における no-slip 条件は離散的な意味で満足されるものになっていました。しかし壁近傍の第一格子における流体速度は、境界条件と壁から離れた点から補間によって決定されていたため、界面近傍において運動量保存に改善の余地がありました。そこで、検査体積を工夫することで (壁の最近傍であっても) セル中心で定義する速度・圧力を (人為的な補間ではなく) 運動量保存から求め、同時に非圧縮速度場と圧力場の整合性も保証する離散化に至りました。この手法では、中実な固体物体の表面流れに対して層流域と乱流域を対象とした精度検証により、境界適合格子法と同等の空間精度次数を達成できることがわかり、従来法の最大の課題であった (直交格子系における) 壁近傍での精度低下の本質を明らかにしました。さらに近年その手法は薄膜物体へ拡張され、流体中に置かれた厚みゼロの物体の運動を取り扱っています。

直交格子系での流体と構造物の連成における保存問題の解決を経たのち、次項 (3) として選択的透過膜における膜透過流れを考慮した流体と構造物の連成解析を実施しました。

(3) 選択的透過膜の垂直方向に発生する溶媒の流束は、膜表裏における圧力差と溶質濃度差に依存します。この問題の数値解析の難しさは、膜の両側の物理量の跳躍量を正確に解かねばならないことであり、必然的に膜のシャープな取り扱いを要することです。私はこの問題に対して、上記 (2) の DF 型埋め込み境界法をさらに発展させた手法の提案に至りました。すなわち、透過膜の最近傍格子点まで Navier-Stokes 方程式を解く際に、膜透過流束を含む非圧縮速度場と圧力場の整合性を新たに定義し、膜表裏の跳躍量を考慮した圧力ポアソン方程式に帰着させることができました。

以上が私のこれまで取り組んできた研究の概略です。しかし、いまだ再現できない現象は山積しており、今後も未解決の問題に挑み続けていきたいと考えております。また、研究を進めるにあたり、大学院生とのディスカッションはとても有益でした。全ての人の名前を挙げることはできませんが、特に佐藤範和博士、宮内優博士、深田利昭博士、谷京農博士とは議論をとおして貴重な時間を過ごしました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

特集 複合材のCAEー力学・強度・プロセスー



複合材料の力学特性と有限要素法

末益 博志
 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 構造・複合材研究ユニット
 複合材料 ふくごうざいりょう Composite materials

1. はじめに

軽量化による輸送機器の燃費向上に関する問題が大きく取り上げられ、炭素繊維強化複合材料(CFRP)が比強度・比剛性が高いことで注目されている。しかし、複合材料は金属と違って不均質な異方性材料なのでその特性を理解するのは困難であると考えがちである。木材や竹といった材料に関しては子供のころから親しんで自然に上手に使用している(と思う)。力のかかる方向に強くなるように進化したこれらの生物材料は自然界の一方強化材料であり、この材料に関する知識・経験は複合材料の挙動を理解し応用するうえで大変役に立つはずである。木材構造物では力のかかる方向に木目を合わせるし、薄板を積層した合板は、木材の特性をさらに有効に使えるように工夫した積層材料である。割りばしは繊維と直角方向の弱さを積極的に用いた例である。炭素繊維強化複合材料も木材と類似した性質や挙動を持っている。繊維と直角方向の力に弱いし、弱さを補うために積層して使っている。経験から得た知識や感覚は大変役に立つ。想像力や推理力を働かせることで数学や物理から得られるのとは違った方向から答えが見つけれられる可能性がある。また数学や物理学と関連させることで現象のより深い理解につなげることができる。

炭素繊維は、高強度アルミニウム合金の20倍の比強度、高剛性の炭素繊維は、10倍の比剛性を有する。実際には繊維を樹脂で固めるだけでなく様々な方向に配向する必要があるため、複合材料の比強度・比剛性は繊維と比較して数分の一になるが、それでも金属材料より十分大きな値を持っている。しかし、炭素繊維強化複合材料は脆性材料であるが、内部構造の複雑さのために応力集中部や破壊ひずみの小さい部位から様々な損傷が発生・進展したのちに破壊する。これは強度を低下させる原因であるが、応力集中部に広がる損傷は金属の塑性挙動のように応力の再配分を可能にし、破壊までに吸収するエネルギーを大きくし、若干であるが延性的な特性を与えている。複合材料構造の挙動を精度よくシミュレーションするには、破壊までに発生する損傷挙動を正しく表すことが必要であり、挙動の物理的な理解が必須となる。

2. 複合材料の力学の基礎³⁾

2.1 弾性特性

繊維強化複合材料は、繊維と樹脂からなる不均質な材料であるが、一般の応力解析では、繊維と直交する断面では繊維がほぼ完全にランダムに分布する(方向性がない)ので断面内

で等方と考えて図1(b)のように平均化した特性で近似的に計算する。このとき弾性特性を表すには、 $E_L, E_T, \nu_{LT}, \nu_{TL}(=\nu_{LT} \times E_L/E_T), \nu_{TT}, G_{LT}, G_{TL}(=E_T/2(1+\nu_{TT}))$ の5個の独立な弾性成分が必要になる。ここで、 E_L, E_T は繊維方向及び繊維と直角方向のヤング率、 ν_{LT} は繊維方向に引張った時に繊維と直角方向の圧縮ひずみの大きさを表すポアソン比である。Lは繊維方向(Longitudinal)、Tは繊維と直角方向(Transverse)を意味する。有限要素法で材料特性を入力する場合には一般的な直交異方性材料を表すのに必要な9個の材料定数を入力する。この時、上記の関係を失念してしまうと数学的に正しい解を得られないので注意を要する。

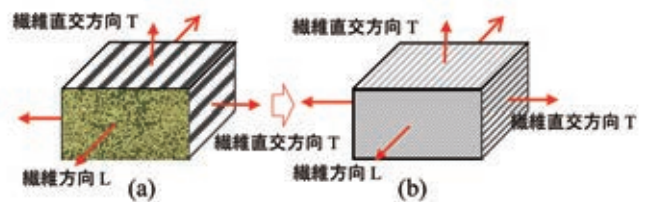


図1 繊維強化複合材料(a)と平均化した弾性特性を持つ直交異方性材料

複合材料は板として用いられることが多いので、ここでは二次元問題として話を展開する(平面応力)。図2(a)のように弾性主軸と荷重方向が一致するとき($\theta=0$)、応力とひずみの関係式は、

$$\begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_L \\ \epsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

と与えられる。ここで各係数 Q_{ij} は基本的な弾性係数を用いて

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_L}{1-\nu_{LT}\nu_{TL}}, & Q_{22} &= \frac{E_T}{1-\nu_{LT}\nu_{TL}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{LT}E_T}{1-\nu_{LT}\nu_{TL}}, & Q_{66} &= G_{LT} \end{aligned} \quad (2)$$

と表せる。弾性軸と荷重軸のなす角度が θ のとき、応力とひずみの関係式は、次式のようになり、せん断変形と引張変形が連成する($\bar{Q}_{16} \neq 0, \bar{Q}_{26} \neq 0$)。弾性行列はこの場合も対称である。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $l=\cos\theta, m=\sin\theta$ とおくと

$$\begin{aligned}
 \bar{Q}_{11} &= l^4 Q_{11} + 2l^2 m^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) + m^4 Q_{22} \\
 \bar{Q}_{12} &= l^2 m^2 (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) + (l^4 + m^4) Q_{12} \\
 \bar{Q}_{22} &= m^4 Q_{11} + 2l^2 m^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) + l^4 Q_{22} \\
 \bar{Q}_{66} &= l^2 m^2 (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12}) + (l^2 - m^2)^2 Q_{66} \\
 \bar{Q}_{16} &= l^3 m (2Q_{66} - Q_{11} + Q_{12}) - l m^3 (2Q_{66} - Q_{22} + Q_{12}) \\
 \bar{Q}_{26} &= l m^3 (2Q_{66} - Q_{11} + Q_{12}) - l^3 m (2Q_{66} - Q_{22} + Q_{12})
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

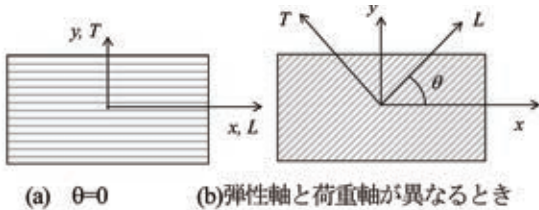


図2 座標軸と繊維角度 (傾きθで繊維の向きを表す)

CFRPは繊維方向に比べて、それ以外の方向がはるかに弱いので、一般に図3のように繊維方向の異なる層を重ね合わせて積層板として使用される。このことにより、非常に弱い方向がなくなる。力のかかる方向に繊維を多く向けるなどの設計も可能なので、設計できる材料だと言われている。

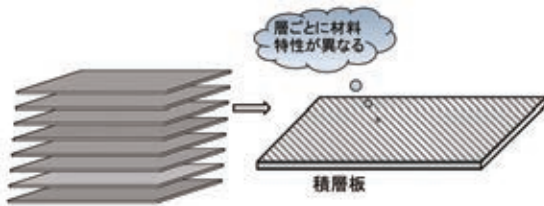


図3 様々な方向を向いた層を貼り合わせてできる積層板

積層板の弾性特性は、板理論から拡張された古典積層理論 (Classical Lamination Theory, CLT) に従って求められることが多い。この仮定により3次元問題を板の中央面の変形を求める2次元問題として扱える。古典積層理論に従うと仮定した場合、板の変形は中央面内のひずみ(ε_{x0}, ε_{y0}, γ_{xy0})と曲率(κ_x, κ_y, κ_{xy})とで表される。面内の合応力(N_{x0}, N_{y0}, N_{xy0}) およびモーメント(M_x, M_y, M_{xy}) とひずみ(ε_{x0}, ε_{y0}, γ_{xy0})および曲率(κ_x, κ_y, κ_{xy})の関係は、

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{x0} \\ \epsilon_{y0} \\ \epsilon_{xy0} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}
 \tag{5}$$

これらの係数A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}は、各層の弾性率の層厚方向の和、中央面に対する1次モーメント及び二次モーメントである。中央面に対して対称に積層した場合(対称積層板)、面内変形と曲げ変形の連成項(B_{ij})がゼロになり面内変形と曲げ変形を独立に扱える。(180/n)°ずつ回転した層を同数ずつ積層した場合(n≥3)にx_y面内すべての方向で面内の剛性が等しくなる(もちろん

ん曲げ変形や強度の方向依存性は残る)ので擬似等方性板と呼ばれる。特に、-45°, 0°, 45°, 90°の順でm回積層しさらに対称に重ね合わせた積層板([-45/0/45/90]_{ms}, Sはsymmetricを意味する)が広く使われている。

多くの市販の有限要素法プログラムで積層板を弾性問題としてモデル化する場合、積層材の繊維配向順序を与えることで古典積層理論に従って自動的に弾性係数(5式)を計算する機能が組み込まれているので便利である。この係数を使った、座屈荷重や共振振動数、さらには幾何学的な非線形性などの解析も、簡単なコマンドを入れるだけで実行できる。複合材料構造の弾性特性は、均質等方性材料に比べて複雑であるが、基本データをきちんと入力することができれば、解の収束は数学的に保障されているので、シミュレーションにおいて本質的な困難はないと考えてよい。

2.2強度特性

複合材料の破壊の予測は大変困難である。強度は、一般には、JISなどに決められている標準試験に従って測定する。直交異方性材料なので、図4のように、繊維方向と直角方向で強度が異なるだけでなく、引張と圧縮で破壊の様相が違うので結果としての強度も異なる。したがって、強度特性を表すために、繊維方向引張強度F_{Lt}、圧縮強度F_{Lc}、繊維直角方向の引張強度F_{Tt}、圧縮強度F_{Tc}、せん断強度F_{Lts}, F_{Tts}などの基本データが必要となる。

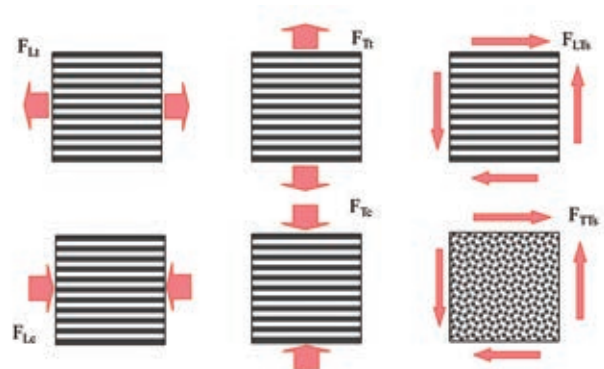


図4 繊維方向と強度

一般の構造では、引張・圧縮といった単純な応力状態とは限らず様々な応力状態が現れる。一般応力状態すべてに関して強度データを得ることはできないので、基本的な実験データから任意の応力状態での破壊や損傷の発生を推定するために破壊則が提案されている。複合材料の破壊のモデルまたは破壊の予測式は多くの研究者によって多数提案されている。例えば、最大応力説では、すべての基本応力成分(σ_L, σ_T, τ_{LT})が、強度基準内

$$F_{Lc} < \sigma_L < F_{Lt}, F_{Tc} < \sigma_T < F_{Tt}, |\tau_{LT}| < F_{Lts} \tag{6}$$

にあれば破壊は生じないと判断する。この場合、応力成分同士の連成がないという仮定である。Tsai-Hill則さらにその修正モデル(Hoffman則)では、応力成分の相互作用も考慮できる破壊則として、次式のような判定式が提案されている。

$$\begin{aligned}
 &-\frac{\sigma_L^2}{F_{Lc}F_{Lt}} + \frac{\sigma_L\sigma_T}{F_{Lc}F_{Lt}} - \frac{\sigma_T^2}{F_{Tc}F_{Tt}} \\
 &+ \left(\frac{1}{F_{Lc}} + \frac{1}{F_{Lt}}\right)\sigma_L + \left(\frac{1}{F_{Tc}} + \frac{1}{F_{Tt}}\right)\sigma_T + \frac{\tau^2}{F_{LTs}^2} = 1 \quad (7)
 \end{aligned}$$

上記のような単純な2次式で多軸応力の連成が表せるが、強度を十分精度よく推定することは困難である。応力空間の第一象限の(6)、(7)式の表す境界の形状を表示すると図5のようになる。同じ基礎データを用いても、破壊の予測荷重が異なってくるのが理解できる。強度を推定することの難しさと限界を理解して強度則を上手に使うことが設計者に求められる。

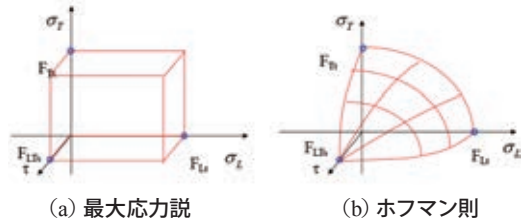


図5 強度則と応力空間

2.2.1引張強度 F_{Lt}

繊維方向の引張強度は、繊維強度に支配されていると言われるが、繊維そのものの強度は実際に定数ではない。繊維1本だけを引張ったら、繊維中の一番弱いところで破断する。したがって、繊維強度は繊維が長くなるほど弱い点が存在する確率が高くなるので確率的に弱くなる。いわゆる体積効果を示す。一方向材の強度試験をすると、繊維強度のような大きな標準偏差は生じない。これは複合材料のミクロな構造に最終強度を平均化するようなメカニズムがあるためである。図6に一方向材中に破断が生じた場合の力の流れを模式的に表した。繊維が破断したときにその力は繊維間の樹脂を通して隣り合う繊維に分散するので一本の繊維と異なり、弱い繊維の破断が直接材料の破壊とならない。力を分散させる機能が寄与するので、繊維方向強度に直接関係ないと思われる繊維と樹脂の界面の強度、樹脂の強度・靱性樹脂が破壊するまでに吸収できるエネルギーなどが関係する。

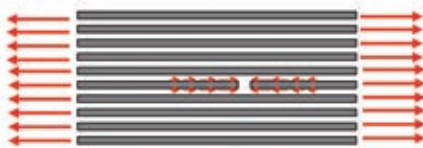


図6 繊維破断と応力の再分配

2.2.2 圧縮強度 F_{Lc}

CFRPの圧縮強度は引張強度よりもかなり小さい。繊維方向の圧縮破壊は、剛性の高い繊維が弾性率の小さい樹脂の中で座屈することによって起きると言われている。圧縮強度は、マトリックスのせん断剛性に支配され、理論的にはせん断弾性率 G_{LT} に等しくなる。しかし、実際の強度はせん断弾性率よりずっと小さいのでその理由が多くの研究者により考えられてきた。最近では繊維の初期不整が原因であるということになっているが、まだ十分に説明されたとは言い難い状況である。

2.3不均質性に起因する問題

図7に示したように複合材料中には、ミクロからマクロまで寸法レベルで異なった形の不均質性がある。ミクロレベルでは、弾性率の低いマトリックス中に弾性率の高い円形断面の繊維が存在しているため、マトリックス中に大きな応力集中が起きる。この応力集中は繊維体積含有率が高くなるほど大きくなる。この影響で一方向材は繊維と直角方向の力に対して小さいひずみで脆性的に破壊する。メゾレベルでは層ごとの不連続があるうえに、積層方向に強化繊維が配向されていないので板厚方向の強度が面内の方向に比べて小さく、層がはがれる層間剥離が生じやすい。板状の構造物の場合、普通に力を加える場合には板厚方向に力は加わらないが、三次元的に応力が発生する状況では層間剥離の問題が無視できなくなる。例えば、積層板端から板厚程度の距離にある領域、異物衝撃の衝撃点下で生じる局所的な曲げ変形、曲面部の曲げ、層と直角方向の寸法が面内方向の寸法に対して小さくない構造などがある。層間剥離は層間応力が大きくなる場所だけでなく、マトリックスクラックなどの他の損傷から層間の剥離に進展する場合がある。

発生した剥離が進展するかどうかを判断する場合、破壊力学的な考え方にしたがる。剥離(クラック)を進展させる一般化力としてエネルギー解放率という破壊力学的な物理量を用いられる。開口型の力が作用する場合、剥離先端に垂直なせん断力が作用する場合、平行な方向のせん断力が作用する場合でモードI、モードII、モードIIIと呼ばれる。これらに対応して層間剥離の進展時のエネルギー解放率が求められ、それぞれモードI、II、IIIの破壊靱性 G_{Ic} 、 G_{IIc} 、 G_{IIIc} と呼ばれる。任意の荷重状態に対処するためにこれらの破壊靱性値とエネルギー解放率(G_I 、 G_{II} 、 G_{III})を用いて、

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} + \frac{G_{III}}{G_{IIIc}} = 1 \quad (8)$$

のように進展条件を設定する。ただしモードIIIの破壊を実現させてエネルギー解放率を測定することは困難なので、解析ではモードIIの破壊靱性値を代用する($G_{IIIc}=G_{IIc}$)ことが一般的である。

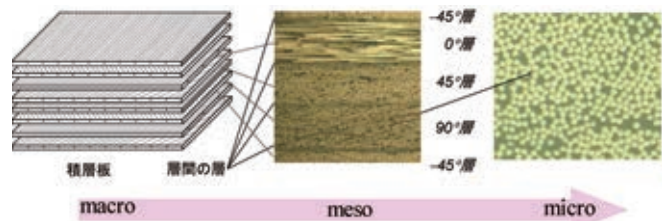


図7 積層板と各寸法レベルでの不均質性

3. 複合材料の損傷と強度

各層毎の破壊は前章で述べた一方向材の延長であるが、積層板ではそれらの破壊が互いに連成しながら損傷が進んでいき最終破壊に至る。本章で破壊シミュレーションに関連する難しさや問題点を理解してもらうために実際の破壊現象を2つ紹介する。

3.1 引張破壊

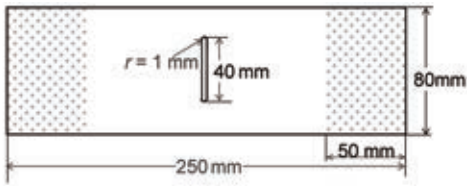


図8 試験片

高韌性のCFRP擬似等方性積層板(Toray T800S/3900-2B, [45/0/-45/90]_{2s})から作製された切り欠きを有する試験片(図8)の引張破壊挙動を示す。実験の途中で試験を中断し、X線CT装置を用いて損傷を観察した(図9)。CFRPはX線を通しやすい材料なので造影剤を損傷部に浸み込ませたうえで観察している。荷重10kNですでに小さな損傷が観察できる。この時の最大ひずみは損傷発生ひずみよりかなり低い。切り欠き表面の層間に生じる層間応力が損傷発生に関係していると推察できる。最終破断荷重より20%低い荷重(50kN)で0°層の繊維破断が生じているが、荷重が損傷近傍に再分配され最終破壊を免れている。この後、数段の損傷が進展したのち不安定に破壊した。破壊直前には0°層の繊維破断部は、全ての0°層で切り欠き先端から4~6mm(切り欠き幅2mm)に及んでいる。±45°層、90°層ではさらに大きく損傷領域が広がっている。また±45°層に生じた切り欠き端の曲面に沿ったマトリックスクラックは大きく進展し、0°層の破断進展に影響し(繊維破断と思われる損傷がこのクラックに沿う形で発生する傾向が見える)、90°層にはこのクラックに沿って繊維の破壊(圧縮とせん断の連成で生じたと考えられる)が発生している。また0°層のマトリックスクラック(スプリットिंग)が断続的な繊維破断の停止と再進展にかかわっていると判断できる。また強い損傷の生じている部分には層間剝離と思われる薄い影が見える。このように各層の損傷が互いに影響し合っていることは注目に値する。

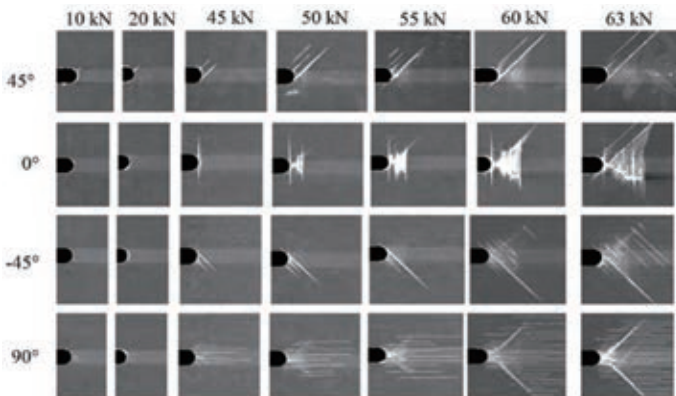


図9 荷重増加に伴って進展する損傷

この破壊現象をシミュレーションするためにはこれらの連成が表せるようなモデル化が必要となる。45°層のマトリックスクラックと0°層の繊維破断とスプリットिंगのモデル化は特に考慮する必要があると考えられる。

3.2 ボルト結合部の破壊

複合材料の弱点の一つは結合部の強度といわれているが、ボルト結合部には図10に示すように3つの代表的な破壊様式がある。シアアアウト破壊(b)とネット断面引張破壊(c)は脆性的な破壊で、圧壊(a)の場合には徐々に壊れていく延性的な壊れ方をする。構造物を設計する場合には(a)の圧壊が生じる(他の破壊が生じない)ように設計することが好ましい。

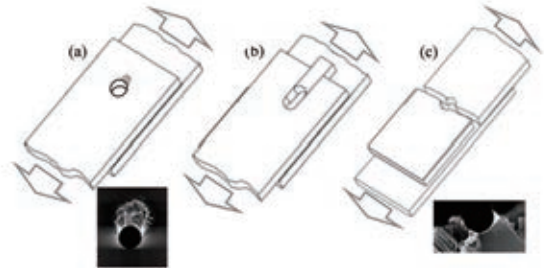


図10 ボルト結合部の破壊様式 (a)圧壊 (b)シアアアウト破壊 (c)ネット断面引張破壊

ここでボルト接合部分の強度を理解するために、図11に示した単ボルトと2連ボルトの試験片の幅wを変えて行った実験結果を紹介する。試験片の幅を小さくしていくとボルト穴にかかる力に比してネット断面にかかる応力が大きくなる。幅が大きいと圧壊、小さいとネット断面の引張破壊を起こし易くなる。図12に試験片幅と破壊荷重の関係を示す。孔の大きさが約6 mm (1/4インチ)なので、その差が孔部のネットの幅になる。単ボルトと2連ボルトのどちらの場合もネット断面破壊の強度はそのネット断面積にほぼ比例して増加していき^{注1)}、断面強度が圧壊強度より大きくなると試験片強度がボルト部の圧壊強度(破壊抵抗)となる。もちろんその強度は圧壊部の数(ボルト数)にほぼ比例する。ネット断面破壊強度は、2連ボルトの方が単ボルトより若干大きくなる。穴まわりの応力集中係数が2連ボルトの場合より単ボルトの場合の方が大きくなるためである。ネット断面破壊しないようにボルト間隔を設定すれば継ぎ手部の強度は ボルト数×圧壊強度と見積もることができる。

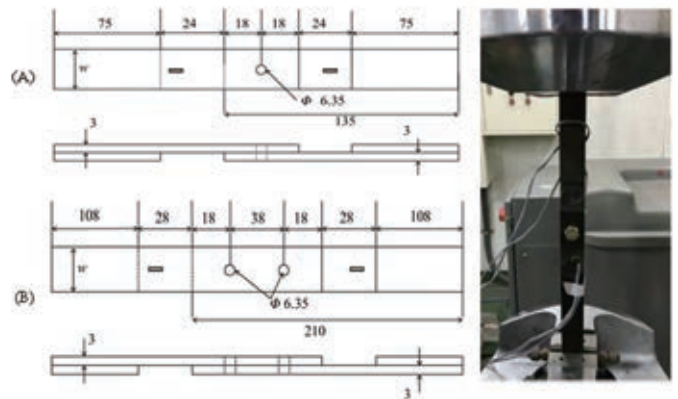


図11 試験片の概要と試験状況 (A) 単ボルト試験片 (B) 2連ボルト試験片

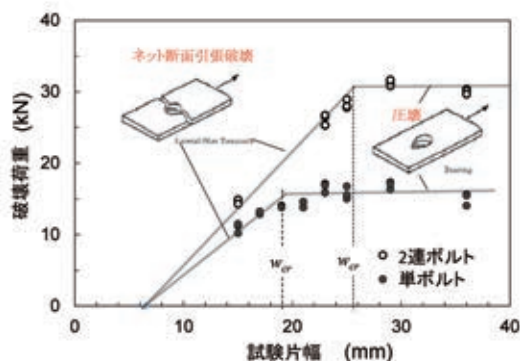


図12 試験片幅と破壊荷重

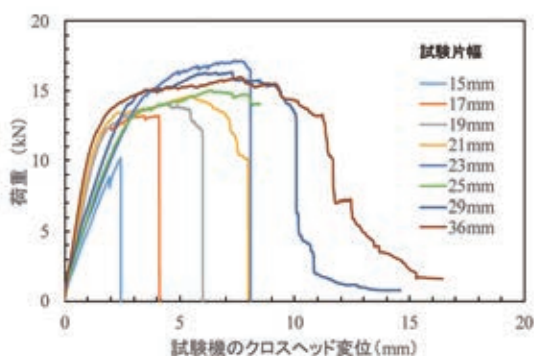


図13 荷重変位関係に及ぼす試験片幅の影響

参考文献

1. https://www.torayca.com/lineup/product/pro_001_01.html
2. T. Morimoto, H. Kato, E. Hara, T. Yasuoka, Y. Iwahori, T. Ogasawara, S. Ito, JAXA database of mechanical properties of advanced composite materials, JAXA-RM-14-004, March 2015.
3. 日本複合材料学会編, 入門複合材料の力学, 培風館, 2009.
4. H. Suemasu, K. Akagi, K. Okushi & S. Sugimoto, Failure behavior of notched CFRP laminates subjected to tensile load, Advanced Composite Materials, Published online: 26 Nov 2019.
5. 末益博志, 森本哲也, 山本直, バイパス力とベアリング力を同時に受けるFRP積層板のファスナー継手の破壊挙動, 日本複合材料学会誌, 44,6, 2018, 219-226.

図13に引張変位と荷重の関係を示す。試験片幅が小さいとほとんど延性を示さずに脆性的に引張破壊を起こす。ある幅を超えると圧壊が生じてから壊れるが、最終破壊までの伸び変形が試験片幅にしたがって大きくなっているのが分かる。これは、圧壊が進むにしたがって損傷部が幅方向にも広がり有効なネット断面積が減少し断面の引張強度が低下していくため、断面の引張強度が圧壊荷重に等しくなったときに、引張破壊が発生するためである。

4. まとめ

第2章で複合材料に関する力学的な問題を説明し、第3章で複合材料の破壊現象を2つ紹介した。複合材料は不均質な材料で内部に多くの不連続が存在し、複雑な壊れ方を示す。様々な損傷が互いに影響しながら進展し最終破壊にいたる。同じ材料を用いても、積層の順番を変える、層の厚さを変える、試験片の大きさが違うなどで時には全く異なった破壊様相を示す。複合材料の破壊挙動や強度をシミュレーションで推定することの難しさがこの点にあるが、これらの間には物理的な理由がある。この論理を数値計算に取り込んでいくことは大変やりがいのある仕事である。



CFRP の非線形数値解析について

荒井 政大
名古屋大学工学研究科航空宇宙工学専攻

はじめに

小生が所属する名古屋大学工学研究科航空宇宙工学専攻構造力学研究グループでは、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の強度評価、損傷特性評価、破壊の進展特性評価、衝撃損傷性の評価、衝撃荷重付与後の残留強度特性の評価、CFRPの非線形構成式および時間依存変形特性の評価、CFRPの粘弾性振動特性・振動減衰性の評価、波動伝播を用いたCFRPの非破壊評価など、先進複合材料に関するさまざまな研究を実験と解析の両面から実施している。今回は、そのなかで、マトリクス樹脂の非線形特性に起因するCFRPの特性解析に関する研究成果と、弾性波動伝播の逆解析に基づくCFRPプリプレグ界面の層間強度に関する評価法について紹介する。

CFRPの非線形数値解析

熱硬化性もしくは熱可塑性の樹脂をマトリクスとし、炭素繊維を強化材とする炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP)の弾性特性は、主に高剛性の炭素繊維が支配的となるが、例えば一方向CFRPの繊維直交方向における変形特性やせん断変形などでは、むしろ樹脂の特性が支配的となるため、1%を超える大きなひずみ領域における変形は樹脂の粘性や塑性の性質を強く受けることになる。そのため、高ひずみ領域におけるCFRPの変形、さらには長時間でのCFRPの変形挙動の評価、振動減衰性が重要となるような問題を対象とする場合には、樹脂の非弾性的もしくは非線形的特性を考慮した評価が重要となる。

すなわち、樹脂の非弾性特性もしくは非線形特性を何らかのモデルで表現することが必要である。そのための方法としては以下のような方法・方針が考えられる。

- (1) 樹脂を弾塑性体として扱う
- (2) 樹脂を粘弾性体として扱う^{(1),(2)}
- (3) 樹脂を粘弾塑性体として扱う^{(3),(4)}

まず、(1)については、ひずみ速度の範囲がある程度限定された変形を取り扱うのであれば、樹脂の構成式を時間非依存として弾塑性体として扱うことができる。弾塑性体に対する構成式に関しても、樹脂、金属、地盤に対して様々なモデルが提案されているが、樹脂材料においては一般的に降伏応力に対する三軸応力度を考慮すべきであると言われている。そのようなモデルとしては拡張線形Drucker-Prager基準⁽⁵⁾が知られている。降伏関数を静水圧応力やMises相当応力、偏差応力の不変量等で記述することによってひずみの増大に伴う塑性変形挙動をモデル化するものであり、有限要素解析への組み込みも容易であることから樹脂ならびに樹脂マトリクスの複合材料の応力解析には広く用いられている。

上記(2)の粘弾性体としてのモデル化は、クリープや応力緩和

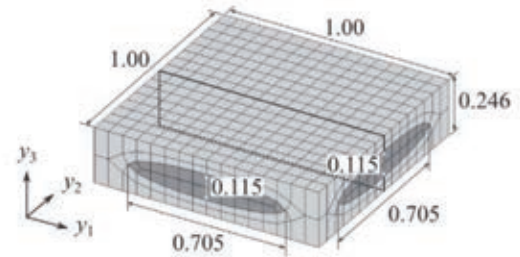


図1 [0°/90°]平織GFRP積層板の有限要素モデル⁽³⁾。

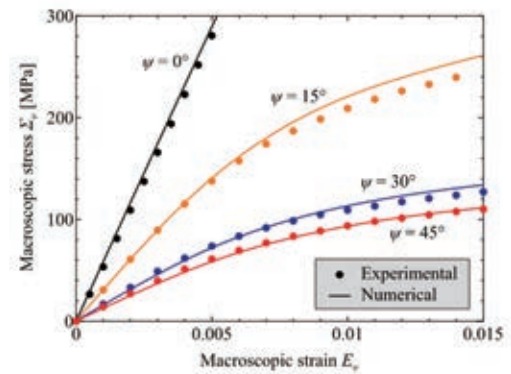


図2 [0°/90°]平織積層板の非軸方向引張におけるマクロ応力とマクロひずみの関係(実験と数値解析結果の比較)⁽³⁾。

といった樹脂の時間依存変形特性や、振動モード減衰特性を評価するうえで重要である。クリープや応力緩和といった長時間にわたる変形特性の評価では、一般には応力-ひずみ関係式をインパルス応答やステップ応答関数を用いた畳み込み積分形で表現することによってモデル化する。なお、Maxwellモデル、Voigtモデルといった粘弾性モデルは、必ずしもすべてのケースで粘弾性体の挙動を正確にモデル化できる自由度を有していないため、例えばクリープ試験により得られた粘弾性パラメータと、振動試験で得られたパラメータが異なるなどの問題がある。また本質的に後述の塑性ひずみの増加に伴う非線形特性を考慮できないため、ひずみの大きな変形には対応が難しい。

最後に(3)の粘弾塑性体としてのモデル化であるが、塑性と粘性の両者を考慮するという点では理想的である。しかしながら、そもそも荷重経路依存性があり、しかもひずみ速度依存の材料モデルを限られた範囲での材料試験で同定し得るのかといった問題は常に付きまとう。現状、金属材料の解析に用いられるようなJ2流れ則に基づく粘塑性関数を用いたモデル化が適用されることが多いが、樹脂材料における硬化関数の選定は未だに課題を抱えていると言ってよい。ここでは、図1に示されるような[0°/90°]平織積層板の非軸方向引張の応力-ひずみ関係について、

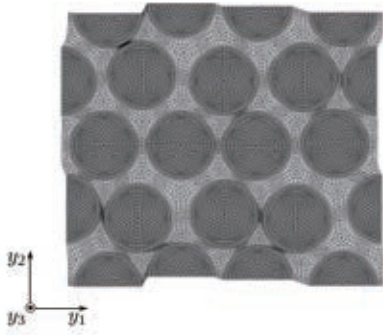


図3 一方向積層板の均質化法ユニットセルモデル（繊維のランダム配向性を考慮したもの）⁽⁴⁾。

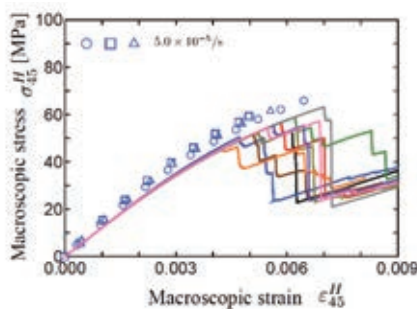


図4 一方向積層板の45°方向引張におけるマクロ応力とマクロひずみの関係（ひずみ速度=5.0×10⁻⁵/s）⁽⁴⁾。

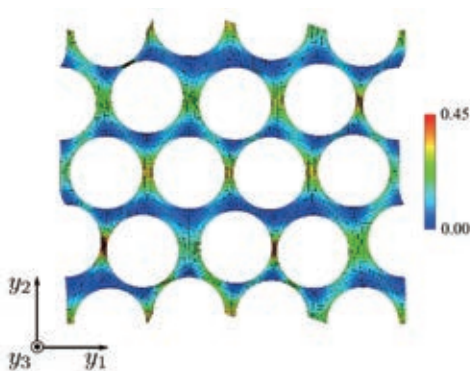


図5 マトリクス中の損傷変数の分布（ひずみ速度=5.0×10⁻⁵/s）⁽⁴⁾。

粘弾塑性均質化法の解析結果を実験結果と比較した結果を示す。図2に示されるように、主軸に対する引張方向の角度が増えるに従ってマトリクス樹脂の粘塑性の影響が強く現れるが、この解析ではその挙動を高い精度で評価できていることがわかる。

CFRPの繰り返し負荷下における損傷進展挙動を評価する場合においては、単なる塑性ひずみの考慮だけでなく損傷力学的取り扱いも必要となる。ここでは、先に述べたマトリクスの粘弾塑性構成式に加え、樹脂の損傷に対して損傷力学モデルを適用した解析結果について示す。図3に示される一方向CFRP積層板のユニットセルモデルについて、マクロ応力とマクロひずみの関係を求めたのが図4である。繊維のランダム配置を変化させた9種類のモデルを用いた解析結果と実験結果の比較を示している。全体として計算結果のほうが積層板の剛性をやや低く見積もっている傾向であるが、実験の応力-ひずみ関係を十分な精

度で再現できており、最終破断時における最大応力もほぼ同程度の値が求められていることわかる。また、図5より、繊維間距離の短い領域において樹脂の損傷度が高くなっていることが確認できる。

以上、CFRPのマトリクス樹脂の応力-ひずみ関係をどうモデル化するかという点に着目して、CFRPの非線形解析手法を紹介したが、何れの方法も現状では完璧な方法とは言い難く、特に繰り返し負荷や高ひずみ速度下におけるCFRPの損傷挙動を高い精度で評価するにはまだ課題が残されている状況である。今後さらに改良を重ねることにより、CFRPの長期信頼性や疲労特性、余寿命を評価可能な材料モデルの確立が望まれている。

(1) K. Kaku, M. Arai, T. Fukuoka, T. Matsuda, Evaluation of thermo-viscoelastic property of CFRP laminate based on a homogenization theory, *Acta Mechanica*, Vol.214, No.1-2 (2010), pp.111-121.

(2) J. Koyanagi, Y. Sato, T. Sasayama, T.Okabe, S. Yoneyama, Numerical simulation of strain-rate dependent transition of transverse tensile failure mode in fiber-reinforced composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.56 (2014), pp.136-142.

(3) K. Goto, M. Arai, T. Matsuda, G. Kubo, Elasto-Viscoplastic Analysis for Negative Through-the-Thickness Poisson's Ratio of Woven Laminate Composites Based on Homogenization Theory, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.146-147, (2018), pp.455-461.

(4) K. Goto, T. Tomioka, M. Arai, Damage-property analysis of carbon fiber-reinforced plastic based on homogenization theory, *Mechanical Engineering Journal, Bulletin of the JSME*, Vol.7, No.4, (2020), (in print).

(5) D.C.Drucker, W. Prager, Soil mechanics and plastic analysis or limit design, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 10, No. 2 (July, 1952), pp. 157-165



複合材料におけるマルチスケール・マルチフィジックスモデリング

岡部 朋永
東北大学大学院工学研究科

昨今、優れた比強度・比剛性の観点から炭素繊維強化複合材料 (CFRP) の航空機機体への適用が広がっている。今後も767後継の新型797も含め中型機や小型機への適用拡大が期待される。この記事では、数多くある複合材料でも、最も利用が進んでいる炭素繊維強化複合材料 (CFRP) に絞って紹介することにしよう。

CFRPは、ひずみや荷重が負荷されると、トランスバースクラックや層間剥離、あるいはマイクロバックリングといった初期損傷が応力集中部にて発生し、これにより剛性が減少する。このことから、現状では、必要以上に高い安全率(ひずみ許容基準)が設定されており、効率的な設計が行えない。また一般に、構造解析に受け渡される巡航時の空力荷重は揚力線理論による極めて簡単な解析モデルによって近似される例が多い。それゆえ、巡航時の高レイノルズ数・遷音速域における流れの圧縮性・粘性の効果は適切に構造や材料に反映されず、過剰な安全率の設定により損傷・破壊を回避することが一般的である。そして、このことが複合材構造設計における重量増加に繋がっている。そこで、計算力学(固体力学・構造力学・空気力学)の適用により、できる限りの無駄な安全率をそぎ落としてやろうというアイデアが、世界中から出始めている。特にミシガン大学のMartins教授のグループ[1]は、流体構造連成解析を駆使し、随伴表現による勾配法ベースの最適設計にて優れた成果を挙げている。

一般に、CFRPは、炭素繊維とマトリクス樹脂による微視的な構造を有する。また、航空機体では積層板として使用することで面内に必要な弾性特性を得る。よって、積層板内の層毎に異なる応力・ひずみが生じ、これにより複雑な破壊挙動を示す。加えて、積層板では所定のひずみが負荷されると特に応力集中部にてメソスコピックな損傷の発生が見られることが知られている。これらスケールの異なる力学挙動を、正確に把握することがCFRPの特性を活かした設計に繋がる。つまり、航空機構造にCFRPを用いるための強度解析では、複合材構造部材としてのマクロスケール、応力集中部等のメゾスケール、繊維・マトリクスなどのミクロスケールといった全てのスケール間の相互作用を考慮して設計することが重要となる。

現状の計算力学研究としては、2000年以降、汎用有限要素法を利用したバーチャルテスト研究が増えてきている。特に、米国ミシガン大学のWaas教授が中心となっているグループ[2]、英国ブリストル大学のWisnom教授が中心となっているグループ[3]、英国インペリアルカレッジのPinho教授が中心となっているグループ[4]、シンガポール国立大学のTay教授が中心となっているグループ[5]などがしのぎを削っている。2010年代に入って、ボーイング社は独自開発した破壊評価モデル

SIFT(Strain Invariant Failure Theory)の破壊データに分子シミュレーションを組み合わせる手法を国際会議などで提案した。これに続き、パーデュー大学のPipes教授との共同研究にてマルチスケール解析に取り組み、論文を公刊した[6]。これと時を同じくして、我々のグループにおいても東レ社と共同にて分子シミュレーションおよびマルチスケール解析を行い、実用上有益な成果を上げている。特に、我々は熱硬化性樹脂に特有の架橋反応を量子化学計算に基づき再現する新規シミュレーション技術を開発している。

著者の考えるCFRPの効率的な解析手法について簡単に紹介しよう(図1)。CFRP主翼の構造解析には5つのスケールが存在する。最も小さな原子、分子スケールには、材料の特性を評価する解析手法としては、著者等の開発した量子化学・分子動力学(MD)のカップリング手法を用いることが可能である[7]。MDにより算出された樹脂の特性(弾性率、線膨張係数、硬化収縮ひずみ等)をミクロスケールにおける構成則として組み込むことが出来る。

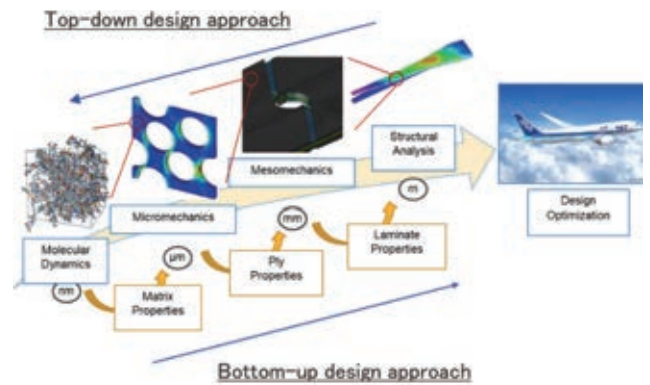


図1 マルチスケールモデリング

次に、樹脂と繊維を連続体とみなしたミクロスケールには均質化解析あるいは各種マイクロメカニクスモデルを用いるのが良いであろう。均質化解析では等価剛性だけでなく繊維と樹脂で構成された内部の損傷発生挙動を解析することができる[8]。均質化解析により、横等方性に関する5つの弾性定数と各種強度(クリステンセン[9]によれば5つ)を算出する。弾性定数は有限要素解析による構造解析に、強度はメゾスケール解析の破壊パラメータに導入する。航空機開発における積層板内の強度評価には応力集中部が考えられている(図2)。このメゾスケールの損傷・クラックには、結合力要素あるいはXFEMといった近年開発された要素メッシュ技術を駆使することが出来る[10]。

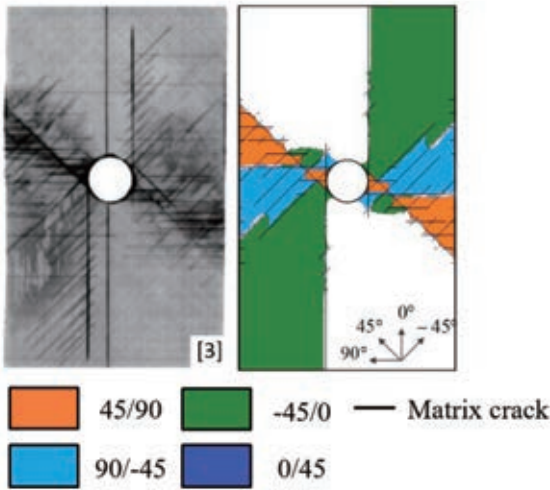


図2 メゾスコピックシミュレーション

マクロスケール解析には従来手法に基づき、構造要素を用いた有限要素解析により検討を行えばよい(図3)。ただし、この際に、複合材主翼は飛行時に大きく変形するため、空力荷重(図4)と構造内力の釣り合い状態を満足する静空弾解析を実施することが望ましい。このように、分子スケール、マイクロスケール、構造解析(つまりマクロスケール)、空力解析が互いに相関して議論をすることが最も重要である。ここでは、扱うスケールも違えば、支配方程式も違うものを一体的に検討する必要がある。これが題目に「マルチスケール・マルチフィジックスモデリング」とつけた理由である。

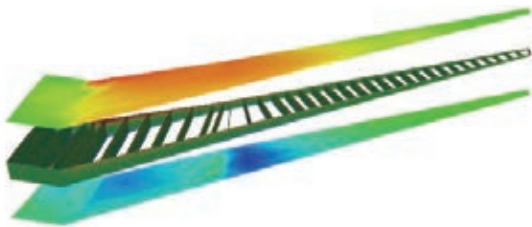


図3 構造要素による主翼設計 [11]

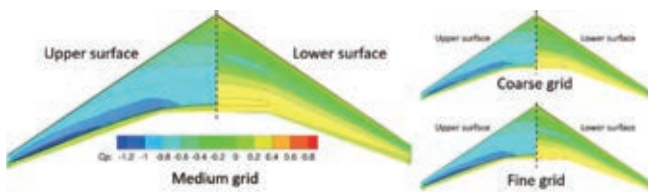


図4 オイラー解法による揚力分布 [11]

今後は、実験と計算との融合が不可欠で、かつ研究の方向性としても「解析手法の開発から、すぐには理解できないような複雑な現象の解明」に移行する時期であると著者は考えるが、これについてはまたの機会に述べることにする。

最後に、先ほど述べた私どもの研究は大矢豊大氏(東北大学)、樋口諒氏(東京大学)、阿部圭晃氏(東北大学) および研究室の皆様のお陰で行えた。感謝の意を表す。

[1] G. Kennedy, J.A. Martins, Comparison of Metallic and Composite Aircraft Wings Using Aerostructural Design Optimization, Proceedings of the 12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference (2012).

[2] C. R. Schultheisz, A. M. Waas, Compressive failure of composites, Part I: Testing and micromechanical theories, Prog. Aerosp. Sci. 32 (1) (1996) 1-42.

[3] S. R. Hallett, B. G. Green, W. G. Jiang, M. R. Wisnom, An experimental and numerical investigation into the damage mechanisms in notched composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 40 (5) (2009) 613-624.

[4] S. T. Pinho, L. Iannucci, P. Robinson, Physically based failure models and criteria for laminated fibre-reinforced composites with emphasis on fibre kinking. Part II: FE implementation, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37 (5) (2006) 766-777.

[5] M. Ridha, C. H. Wang, B. Y. Chen, T. E. Tay, Modelling complex progressive failure in notched composite laminates with varying sizes and stacking sequences, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 58 (2014) 16-23.

[6] O. G. Kravchenko, C. Li, A. Strachan, S.G. Kravchenko, and R.B. Pipes, Prediction of the chemical and thermal shrinkage in a thermoset polymer, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 66, (2014), Pages 35-43.

[7] T. Okabe, T. Takehara, K. Inose, N. Hirano, M. Nishikawa, T. Uehara, Curing Reaction of Epoxy Resin Composed of Mixed Base Resin and Curing Agent: Experiments and Molecular Simulation, Polymer, 54 (2013), 4660 - 4668.

[8] Y. Kumagai, S. Onodera, M. Salviato and T. Okabe, Multiscale Analysis and Experimental Validation of Crack Initiation in Quasi-Isotropic Laminates, International Journal of Solids and Structures, 193-194 (2020)172-191.

[9] R. M. クリステンセン, 複合材料の力学 (2015), 共立出版

[10] R. Higuchi, T. Okabe, T. Nagashima, Numerical simulation of progressive damage and failure in composite laminates using XFEM/CZM coupled approach", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 95(2017), 197-207

[11] S. Date, Y. Abe, T. Yamamoto, T. Okabe, Fluid-structural Design Analysis for Composite Aircraft Wings with Various Fiber Properties, Submitted for the publication



複合材料構造物利用に向けての CAE の重要性 金属構造材料と繊維強化材料の違いの上位概念

漆山 雄太
本田技術研究所 先進技術研究所

1.はじめに

繊維強化樹脂(以下FRP)による複合材の構造物適用が着目されるようになってから半世紀を超えようとしている。ここでは、構造物利用における構造用金属材料とは異なるFRP材料とは何者か?と考ながらCAE技術について述べる。複合材用であるFRPのそもそものコンセプトに立ち返ると、樹脂材料の強度・剛性性能を補うため、繊維により複合化された材料である。昨今ではその逆に、繊維の引張方向の高強度、高剛性に着眼し、繊維材料を構造物として使うため、形状維持を樹脂で補完するという繊維重視の考え方も一般化している。

FRPの構成材料としては、広く馴染みがあるものとして、強化繊維にはグラスファイバーあるいはカーボンファイバー、樹脂は熱硬化ではエポキシ系、熱可塑性ではポリアミド系の利用が一般的である。特に炭素繊維強化樹脂では鉄鋼材に比較して比強度、比剛性に優れることから軽量素材としての期待が大きい。ところが複合化された材料での比強度というのは、金属構造用材料の強度と同じ扱いができないことも多数あり、現実の適用にあたって、FRPは設計的にも構造物としては扱いが面倒な材料でもある。安全側で設計するとFRPは破綻しない構造材料であることは言うまでもないが、金属構造材での最適化経験から、FRPの軽量最適化を目指してチャレンジすると、そこには金属構造用材料とのいくつかの課題の違いに直面することが多い。構造CAEを駆使して、実際の構造物を手掛けてみると、なかなか、ポテンシャルを引き出せないという経験をお持ちの方もいらっしゃるかと思う。非線形、異方性、界面など、あるいは成形影響など、設計時には想定しなかった現象に取り組むが、こちらはミクロスコピックなメカニックスの探求となり、その探求が大変なことに気が付くとともに、やればやるほど原因が特定できなくなり「スパゲッティースンドローム」に陥ったご経験はお持ちだろうか?

このような「シンドロームの根源」は、すでに半世紀前から指摘されている。1971年出版の複合材料工学では、複合材は鉄鋼材など金属材料とは異なり、均質的な材料特性ではなく、実際の利用には、ミクロスコピック(引用元では微視的)、マクロスコピック(引用元では巨視的)双方の研究課題を有すること、さらに材料学、破壊力学、連続体力学と力学的視点において俯瞰しその体系化が重要であると指摘している(1)。一方で1990年代になると連続体における損傷力学(2)が有限要素法構造力学計算に応用されるようになり、複合材の構造計算のモデルとしても実用的手法が定まってきた(2)(3)。また、FRPは成形過程が材料の剛性、強度に影響を与えることが知られているが、近年では、繊維強化樹脂の成型CAEなども研究が進み、実用化の範囲が広がっており、複合材の構造利用において、CAEの重要性が実用レベルとして語れる時代になったと考える。

2.構造物利用のFRPと「スパゲッティースンドローム」

構造利用可能なFRPは繊維と樹脂のバリエーションの数ほか、選択可能な多くのバリエーションがあり、それらバリエーションの数の掛け算の数だけFRPの種類があると言っても過言ではない。Fig.1にバリエーションの分類しまだかに示す。同時に、繊維をどのような基材として用いるかという観点で分類したバリエーションをFig.2に示す。これら多くのバリエーションの組合せから選択するのがFRPの構造物設計の特徴となる。それぞれ適正な材料選択をし、製法を決めていくわけだが、構造物の重要な性能である剛性と強度は、繊維、樹脂、界面、繊維長、繊維配置、製法が総合的に影響して最終的に決まる。FRPの構造材料としての剛性・強度特性はクーボン試験によって調べるが、FRPでは、一般的な金属構造材料の(例えば鋼材に)比べ、力学特性、特に強度の決定が難しい。前述のとおり、剛性、強度については成形影響まで考えておくケースも多く、十分な範囲を網羅するには時間的にも費用的にも大がかりになる。強度設計の精度を考えてみると、金属構造材料と同じ調査規模のクーボン試験数では、FRP構造物の検討の精度はなかなか上がらないことも多い。説明のため一例を上げれば、繊維の方向の配置に着目して、剛性と強度を大きく取りたい方向に繊維を直線的に並べることで比剛性の向上が望めるという考え方がある。この複合材料の

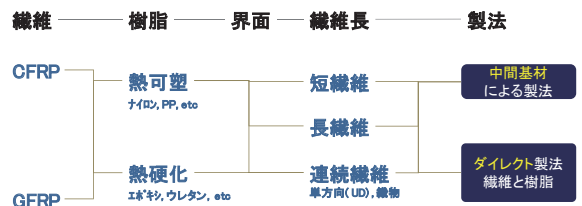


Fig.1 FRPにおけるバリエーション



Fig.2 繊維の基材選択バリエーション

基本となる複合則理論は、剛性では破綻は生じにくい、強度についてはその方向性で性能向上が望めるかといえば、YESでもありNOでもある。この曖昧な記述には、FRPの場合にはミクロスコピックな内部破壊の影響と、そもそもマクロスコピックな構造物の強度の定義の双方から考えた議論が必要となるからである。

3. 金属構造材料とFRPの違い

鋼材のクーボン試験結果と材料力学を用いて、壊れない構造物を設計できる条件について考えてみる。材料は均一に出来上がっており、材料のふるまいは熱力学的支配を受け転移が存在し、その結果、外力を受けると弾性的変形が生じたのち塑性変形が生じる。塑性変形の加工効果曲線は弾性域より上昇率が緩やかであり。塑性加工した後であっても弾性域があって、加工後の弾性域があって、厳密ではないが、降伏応力は成形前と同等としても概ね成立する。などなど、多くの暗黙知の上に強度設計が成立している。一方FRPでは金属構造材料とミクロスコピックな現象が異なるので、前述のように羅列した暗黙知が異なる。鋼材を対象とする設計や課題に対して、材料力学を実際の現場で活用するには経験が必要といわれるが、FRPでの構造物の設計ではさらにミクロスコピックな概念を理解しておくことが求められる。

繊維強化樹脂の内部破壊にはミクロスコピックレベルでFig.3に示すようにいくつかのモードがあり、それぞれ閾値が存在する。例えば最も大きな繊維引っ張り破断と繊維と樹脂間の破断応力を比較すると2桁の応力差(100倍の桁)があることもある。この意味は、等方剛性の材料であれば荷重を加えた方向でなくても、ポアソン比3の材料であれば、変形によって生じた内力で最小応力方向であっても破壊する可能性があることになる。そのように考えていくと、通常、壊れない構造物を設計するには、応力の大きな方向に着目して構造を考えていくのだが、FRPの内部では応力方向、モード毎に考えていく必要があるわけで、直感的につかむことがなかなか難しい。ここで説明のために、FRPの代表的な破壊の一例を上げると、①繊維と樹脂の界面剥離というミクロスコピックレベルで内部破壊が発生し樹脂内に進展する。②この剥離と進展同士が結合してする内部破壊の進展がある。③繊維基材一枚一枚が積層された板状のFRP(以下積層FRP)では、これら内部破壊の進展が数多く発生すると、トランスバースクラックと呼ばれる基材の一層内を貫通する破壊の進展となる。④このトランスバースクラックの数が増えてくると、層内の破壊から層間の破壊を誘発する。⑤層間破壊の進展は構造物としての破壊に至る。

この一般的な事例からみても、ミクロスコピックからマクロスコピックに至る破壊の進展にはいろんな条件が存在していることがわかる。その中で、何がFRPの構造物の強度に影響を与えるのかと考えると、最後の⑤の破壊モードは内部損傷無しで生じたのではなく、もちろん①-④の破壊起点でもない。破壊の進展そのものを俯瞰してとらえることが必要ということになる。

では、その破壊の進展はどのようにして決まると考えればよいかというと、ミクロスコピックに破壊した箇所では、荷重伝達ができないわけだから、他の部分に荷重伝達経路が移る。すなわち破壊することで内部応力の再配分が生じる。いわゆるロードパスがミクロスコピックに変わっていくのである。ロードパスの分布

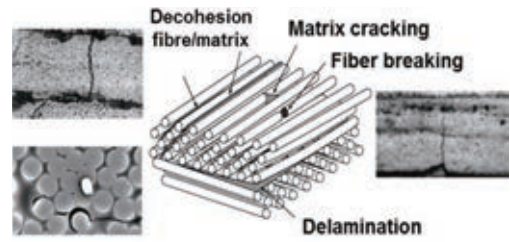


Fig.3 FRPの内部で発生するミクロスコピックレベルの破壊

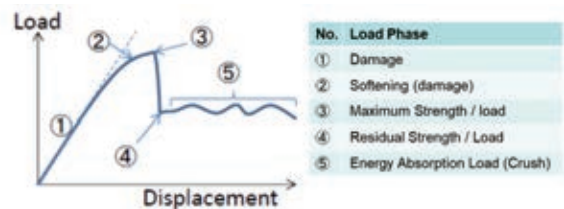


Fig.4 FRPのマクロスコピックレベルの強度の分類

は大雑把には剛性の分布によって決まるので、FRPのように均一でない材料では、均一な材料に比べ複雑さが増す。このロードパスが変化した状態から、新たな内部応力状態になり、さらに破壊起点が生まれたり、破壊進展したり、破壊進展が止まるなどを繰り返してゆく。その結果としてミクロスコピックな破壊がマクロスコピックな破壊に結び付けられる。

4. FRPの強度について荷重変位特性と内部破壊の関係

一方で、構造物の強度はマクロスコピックの視点で考えるわけだが、内部破壊の進展過程と構造物の力学的特性を紐づけながらまとめてみる。すなわちミクロスコピックとマクロスコピックの関係づけである。なお、ここでは数多いFRPの種類の中で、積層FRPを想定して話を進める。

FRPの内部破壊の進展と荷重変位の関係を模式的にFig.4に示す。構造物の設計強度は構造物の性能や機能を保証しうる最大荷重を強度とすることが一般的であるので、ここでは、内部破壊がFRP構造物の機能にどんな影響を与えるかについて、架空の構造物に架空の荷重条件を設定し、変位を徐々に増加させた場合に、内部破壊が発生していく順序に従って、以下の5つの領域に分類する。

① 初期ダメージ領域

この領域では内部ダメージが発生しているが、構造物の剛性には変化が見られない領域である。主として界面剥離のダメージが多いと思われる。複雑な荷重条件が与えられた構造物であれば、内力の分布によっては、層内を貫通するトランスバースクラック発生まで至っている場合もありうる。また、一次構造物(常に荷重負荷が与えられる基本骨格など)で、剛性・強度双方に信頼性が要求される場合には、この領域でダメージの進展が生じない条件で設計強度が設定される場合が多い。あるいは、事前に設定はしていないが、構造物の試験から、結果としてこの条件に至ることもある。

② ソフトニング領域

内部ダメージが進展してくると、構造物の剛性低下が生じる。ただし、多くの場合構造物として外見から損傷は認めら

れない。剛性機能が要求される構造物では性能低下の要因となる可能性を有する。

- ③ 最大強度
FRPの構造物としての最大荷重。多くの場合、目視できるかどうかは別にして、構造物の表面で破断、破壊など外見の破損を伴う。
- ④ 残留強度
FRPの破壊の場合、特に熱硬化の材料であると、最大強度に達した直後に、ミクロスコピックレベルで多くの箇所連鎖的に破壊進展が進むので、構造物が分断してしまうことがある。また、構造物の分断まで至らずに、最大強度到達直後に破壊進展が進まなくなると、構造物は破壊していない部分で残留強度として、強度、剛性の構造機能が保持される。このとき構造物には、破壊進展の影響として、剛性が低くなる場合、変形が残る場合、また双方の場合などがある。
- ⑤ 衝撃吸収領域
衝突エネルギーの吸収などを目的とする構造物の場合には、逐次破壊を発生させて、衝撃吸収エネルギーの増加を図る方法がある。

5. FRP構造物設計における形状、材料、成形の相互影響

構造物の設計は、形状の決定、材料の選択、製法の選択という構造物設計の基本である3要素を決めることである。FRPの場合この3要素にはそれぞれは深い相互影響があり、公差を含め、全体像を捕まえる必要がある。構造物に対する剛性、強度など、と相反する軽量化の要求レベルが高いような場合には、それぞれの影響を系統的に把握する必要がある。例えば軽量化と信頼性の両立が求められる航空機設計や、自動車の骨格構造においては、ビルディングブロックアプローチという方法が用いられる。この方法の概念はFRPの材料物性を試験片による試験で把握し、材料、形状、製造のそれぞれの影響因子と必要に応じた相互影響を調べ設計しようとするものである。模式図的にはFig.5のような絵柄がしばしば用いられている。

6. FRPのCAEにおけるマルチスケール

ここまで、ミクロスコピックからマクロスコピックに至る内部破壊の進展を把握する重要性と、設計の3要素である、材料、形状、成形プロセスが相互に影響を及ぼし合うことを述べた。ここ

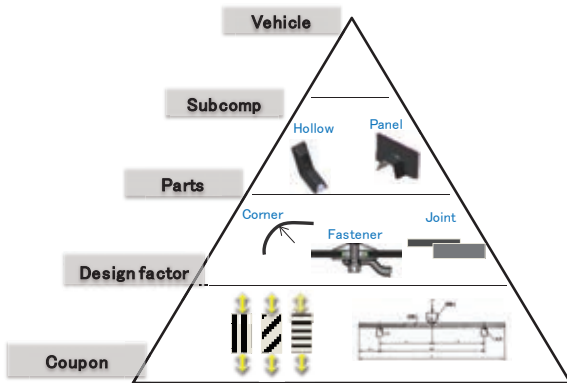


Fig.5 ビルディングブロックアプローチの説明図

までの内容から、新材料、新製法、FRPの選択子の中での新しい組合せ、また、新形状、新機能、等々の研究や開発の取組みにおいて、あるいは「新」がつかなくとも、高い要求レベルを満たすためには、より多くの因子を調査することが求められる。これらすべてを事前に実験により網羅するのは、期間と費用面で多くのコストが必要となり、より合理的なアプローチが求められる。

そこで、CAEへの期待が大きくなる。ミクロスコピックからマクロスコピックの現象を踏まえ、CAEのモデルスケールも幾つかの階層に分割することになる。積層FRPにおけるスケール分割をFig.6に示す。マクロスコピックをパネル材料のようなイメージで考えると、ミクロスケールからマクロスケールまでには、2つの中間的スケールが存在する。ここではそれぞれインフラメゾ、メゾと呼ぶこととする。

7. FRPのダメージモデル⁽⁵⁻⁷⁾

ミクロスコピックなFRP内部破壊はマクロスコピックでは剛性の低下ということで表現できる。したがってヤング率が低下する割合をダメージ d で表すことで、ミクロスケールの現象をメゾスケールの構造モデルでの計算が可能となる。

本稿では、その考え方の理解のため、基本的な定義を主に述べるので、詳細は文献を参照していただきたい。

面内のひずみエネルギー e_d は式(1)のように表すことができる。この式は2次元平面のエネルギーの式を拡張してヤング率の低下を書き足しただけである。なお、式中第2、4項では内部破壊があっても破壊をふさぐ方向で応力が生じるので d の影響を加えていない。

$$e_d^{2D} = \frac{\sigma_{11}^2}{2E_1^0(1-d_{11})} - \frac{\nu_{12}}{E_1^0} \sigma_{11}\sigma_{22} + \frac{(\sigma_{22})^2}{2E_2^0(1-d_{22})} + \frac{(\sigma_{22})^2}{2E_2^0} + \frac{\sigma_{12}^2}{2G_{12}^0(1-d_{12})} \tag{1}$$

なお、下付添字1: 繊維方向, 2: 面内繊維直行方向, 3: 面外繊維直行方向である。 $\langle \rangle_+$, $\langle \rangle_-$ 符号は正負応力を示す。 E^0, G^0 はそれぞれ破壊前の弾性係数、 σ は応力、 ν はポアソン比である。 d の値は、このひずみエネルギーによって決定される値と考える。そこで、 d の値は式(1)を d で偏微分した、Thermodynamic force (熱力学的共役力) Y 式(2)の関数とする。

$$Y_i = \frac{\partial e_d}{\partial d_i} = \frac{(\sigma_i)^2}{2E_i^0(1-d_i)^2} \tag{2}$$

Fig.7にダメージとダメージ特性所得のためのクーポン試験の概念線図を示す。繊維せん断方向ダメージ d_{12} および直行方向ダメージ d_{22} は、図中左に示すように、繰り返し荷重を与え、繰り返し

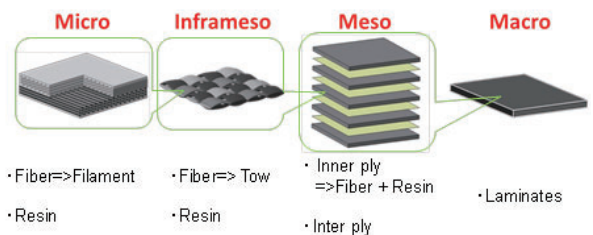


Fig.6 積層FRPのミクロからマクロまでのスケール

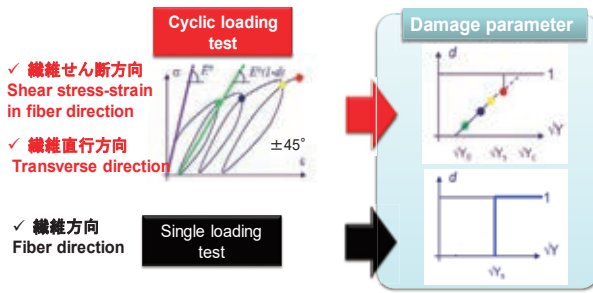


Fig.7 層内のダメージ関数と概念図

返しごとに増加するエネルギーと剛性を得ることができる。また、この線図には残留ひずみがあるのでFRPの樹脂の塑性特性も同時に測れる。ただし、現実的には、ミクロスコピックの影響から繊維直行方向（22方向）の試験では十分な実験精度が得られないことが多く、適当な配向角を選んでせん断方向計測の[45°/-45°]と組合せて算出をする⁽³⁾。

繊維方向の d_{11} ダメージは、繊維方向が弾性的特性なので、単純引っ張り試験により破断する時の Y の値を求める。ただし多くの場合、こちらもミクロスコピックな影響から、必ずしもヤング率は一定にはならない。それぞれの Y とダメージ d_{11} d_{12} d_{22} の関係は図中右側に示すようになる。

一方層間のダメージは、接着剤で用いられるコヘシブ(Co-hesive)要素が適用可能である。式(5)にモード1, 2, 3のダメージを考慮したひずみと応力との関係を示す。ここで、 γ , ε はひずみを示し、 k^0 は等価剛性の初期値である。下付添字I, II, IIIは各モードを示す。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{31} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{33} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{II}^0(1-d_{II}) & 0 & 0 \\ 0 & k_{III}^0(1-d_{III}) & 0 \\ 0 & 0 & k_I^0(1-d_I) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{31} \\ \gamma_{32} \\ \varepsilon_{33} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

こちらも、エネルギーによって剛性が低下するという考え方である。

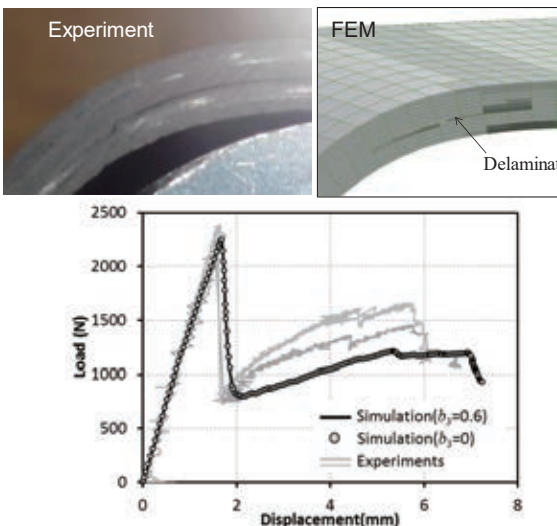


Fig.8 メゾスケールレベルの計算事例 実験との比較

これら、層内と層間のダメージモデルを組み合わせた計算事例をFig.8に示す。FRPの破壊進展の様子を上段示す。実験の写真の層間剥離位置と計算(FEM)の層間剥離位置は一致しており、FEMの計算結果には濃いグレーの部分は層内ダメージがあることを示している。下段の荷重変位線図においても、実験

と計算は最大強度、残留強度までの範囲で良好に一致しており、また、残留強度到達以降では、実験結果の個体差も大きくなる傾向もあり、計算は定性的な傾向を表している。

なお、ここで参考のために、損傷力学を応用するミクロスケールとメゾスケールの技術成熟度の違いを述べる。ミクロスケールでも繊維と樹脂の界面にダメージモデルの概念を取入れた研究がいくつか論じられている。その実用化は期待するところであるが、解析技術の成熟度には違いがあって、メゾスケールのダメージでは、特性値の所得にあたり試験片の実験方法が確立され、多くの規格試験で構成されるのに対して、ミクロスコピックレベルでは試験方法そのものも研究途上にあり、今後の発展が望まれるところである。

8. その他のFRPの破壊現象とダメージモデル

FRPの破壊進展の考え方は、動的問題である衝撃吸収、疲労問題にも有効であるという報告がなされている。衝撃吸収問題に関しては、FRPのひずみ速度依存性をいかに表現するかが課題である。2009年には速度に応じた力の発生をマクロスコピックに与える方法⁽⁷⁾が取組まれ、2019年には内部破壊のモード毎に破壊進展の遅れ係数として定義する方法を用いた研究結果が報告⁽⁸⁾されている。衝撃吸収のCAEについては、ダメージモデル以外にもまだいくつかの課題があるが、ダメージモデルについては、今後バリデーションの事例を増やし、その有効性を広く確認していくことが重要と考える。

一方疲労問題では、ダメージモデルを用いた強度問題と同様に、ミクロスコピックレベル生じる疲労によるダメージを把握する方法がある⁽⁹⁾。FRPの疲労によるダメージについては、繰り返し荷重 N 回を与えた時のダメージの値 d を実験により計測することで把握する。この特性は $\frac{d}{dN}$ 線図と呼ばれる。

Fig.10に積層FRPの疲労による剛性低下の実験結果とその計算事例⁽⁹⁾を示す。積層FRPでは少ない荷重サイクルで疲労が進む領域が存在することが知られているが、この計算結果は、同一条件の試験5回の実験結果にバラつきが大きかった事例をとり上げている。積層配向は[0/90] nsとし、最大強度の86%のサイクル荷重で疲労試験を実施したものである。グラフ横軸はサイクル数、縦軸は剛性の変化率を%で示している。剛性低下により98.5%程度になると破断が生じる。実験A090-01, 03, 02, 04の順に少ないサイクルで疲労破断に至り、05では実験終了まで破壊しなかった。この図中には2つの計算結果を示しており、86%荷重条件では破断が認められず、荷重を86%から

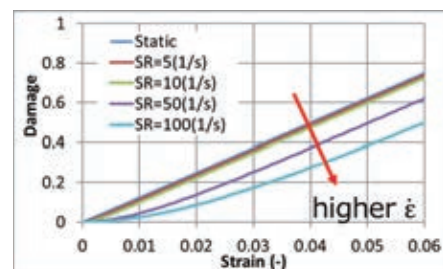


Fig.9 デイレイエフェクトによるダメージのひずみ速度依存性の事例

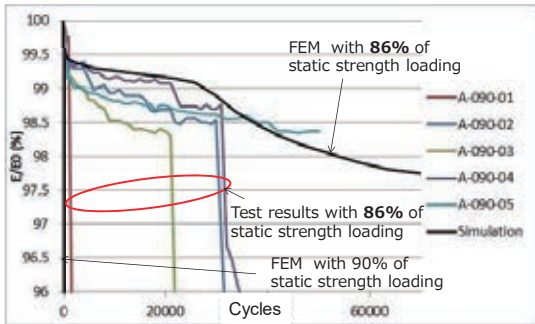


Fig.10 積層FRP疲労による剛性低下
計算と実験の比較と考察

90%とした計算結果では破断が発生する。86%の荷重で最も少ない回数で疲労破断したA090-01の結果に近く、この試験条件では低サイクル疲労の問題を引き起こす荷重の境目付近の荷重であると推察される。

9. 製造CAEとモデルスケール

FRPの成形プロセスも選択子が多く、そのすべての成形プロセスにおいて、樹脂の流動を伴って成形が成立するという点が、FRPの共通の特徴である。この流動は繊維の配置、向きなどに影響を与える。このとき、繊維束偏向であればインフラメゾスケールの解析となり、フィラメントの流動を伴う場合にはミクロスケールの解析になる。フィラメントレベルの流動についての研究例では、LFT(ロングファイバー熱可塑性樹脂)のコンプレッションモーディングについて樹脂の流動とともに決定される繊維の配置状況の算出の取組が行われている。この研究では繊維の運動と変形をモデル化し、樹脂の流動解析と連成させており、その結果が報告されている⁽¹⁰⁾。

樹脂の繊維への含侵については、CAEのスケールでみると、ダルシー流れではマクロスケールまたはメゾスケールとなり、ナビエストックス流れではインフラメゾスケール、繊維束への含侵であれば、キャパラリーアクションでミクロスケールのモデルとなる。

10. おわりに

FRPのミクروسコピック現象とFRP構造物のマクروسコピックな強度の定義などについて、概念レベルからCAEのスケールおよび事例紹介を述べた。

FRPの構造物利用については、今後ますます要求レベルの高度化が考えられ、総合的な設計検討精度向上が求められることから、CAEの果たす役割も大きい。近年では、マイクロスケール、マルチスケールの研究成果も報告されることが多くなってきたが、冒頭に述べた先人の課題指摘⁽¹⁾を踏まえると、将来に向けてのスケール分割には、前述のミクروسコピックからマクروسコピックの現象に対して、工学的な生産性についての議論も重要となる。当たり前のことではあるが、構造物を設計する時に、ミクروسコピックレベルで繊維フィラメントや繊維束の配置を設計するより、基材の配置を設定の方が楽である。また、製造現場で考えると、ミクروسコピックレベルの多点の検査より、基材の均一性をチェックの方が楽である。樹脂の評価には、構造物を制作して評価するより、ミクروسコピックレベルで評価が可能であればその方が楽である。現在では、FRP構造物を作

るには、材料から構造物に至るサプライチェーンで成り立っており、その際、材料から成形品までの工程も考慮して、スケール間と分業間の双方でインターフェイスが取れる特性値をもって体系化が進むことを期待したい。

本稿がFRPのアプリケーションを考えるときの予備知識として、あるいは、材料、製法、解析、その他の研究テーマなどに、少しでもお役に立てば幸いである。

文献

- (1) 林毅 編 複合材料工学 一章 p.18, 1971日科技連
- (2) 村上澄夫 連続体損傷力学1.2.2 p.9, 2008 森北出版
- (3) P. Ladeveze, E. L. Dante, Damage modelling of the elementary ply for laminated composites, Compos. Sci. Technol. 43 (3) (1992) 257-267.
- (4) David W. Sleight, Progressive Failure Analysis Methodology for Laminated Composite Structures, NASA/TP-1999-209107 (1999) Langley Research Center
- (5) 漆山雄太, 内藤正志, ラドベーズモデルによる複数の破壊進展を考慮した複合材の強度計算, 20145205 (2014) 自動車技術会
- (6) Naito, T. and Urushiyama, Y., Strength Analysis of CFRP Composite Material Considering Inter-Laminar Fractures, SAE Int. Journal of Mater and Manf. 8(3), (2015) SAE
- (7) Abe, D and Urushiyama, Y, Examination on Dynamic Bending Characteristics of a CFRP Beam Using a Progressive Fracture Model, Review of Automotive Engineering 30 (2009) 173-180 SAE
- (8) D. Carrella-Payan, B. Magneville, M.Hack, T.Naito, Y.Urushiyama, W.Yamazaki, T.Yokozeki, W.Van Paeppegem, Implementation of Fatigue Model for Unidirectional laminate based on Finite Element Analysis: Theory and Practice, International Conference on Multiaxial Fatigue & Fracture 11 (2018)
- (9) 内藤正志, 林誠次, 齊藤啓, Kristof Vanclooster, 連続繊維CFRPのひずみ速度依存性を考慮した動的解析, 第44回複合材料シンポジウム前刷, (2019) 日本複合材料学会
- (10) Masatoshi Kobayashi, Koji Dan, Daisuke Urakami, Ryo Nakano, "DIRECT SIMULATION FOR FLEXIBLE LONG-FIBER IN COMPRESSION MOLDING OF THERMOPLASTIC COMPOSITE", Proceedings of 15TH SAMPE SYMPOSIUM AND EXHIBITION, Numerical Modeling and Structural Design, 2C09 (2017) 26-29 SAMPE



ばらつき・不確かさを考慮した確率的シミュレーションの現状と展望

高野 直樹
慶應義塾大学工学部機械工学科

1. はじめに

複合材料の研究の中心は、強度的な信頼性が高い製品を低コスト・高サイクルで製造できる革新的な成形法の開発にあると言っても過言ではない。計算力学あるいはCAEの貢献も、当然ながら新しい成形法の開発段階での適用に期待が向けられる。しかしながら、適切な成形プロセスパラメータの探索は容易ではなく、未確定の段階では、成形品特性にはばらつきが見られるケースが多くみられる。ばらつきを考慮しつつ、その要因探索に貢献できる確率的シミュレーションについて述べる。

なお、多数の計測データに基づく「ばらつき」に対して、計測データ不足の場合や、次に成形したらどうなるか、あるいは次に何が起こるかかわからないという場合に「不確かさ」と称することにし、両者のニュアンスは異なるものの、数式表現においてはいずれも確率密度関数で表されるものとする。

2. ばらつきの要因のパラメタリゼーション

確率的モデリングにおいて、ばらつきの要因となる因子を数式的に表現するためのパラメタリゼーションが重要であり、かつ難しい。式(1)において、 L は偏微分方程式、 u は解、 f は荷重などの右辺ベクトル、 h を初期・境界条件とし、 m は材料特性(物理的パラメータ)と幾何的パラメータである。ばらつき・不確かさは、 f, h にもあるが主に m を詳細に記述する必要がある。

$$L(u(m)|h) = f \tag{1}$$

文献[1]に示したハンドレイアップ(HL)による平織GFRP積層板を例にとり、マルチスケールモデリングの必要性とパラメタリゼーションの事例を示す。図1はHLプロセスの模式図である。5名の学生が約300 mm角のパネルを1枚ずつ成形し、各パネルから5本の引張試験片を取得した。計25本の試験片の静的引張試験結果を図2に示す。無視できないレベルのばらつきが観察された。作業者間の差(inter-individual difference) ははマクロな繊維含有率と板厚で説明できたが、同一パネル内のばらつき(intra-individual difference) はマクロなパラメータでは説明できず、マイクロ構造のパラメータを考慮したマルチスケールモデリング[2, 3]の必要性が示唆された。マクロな均質化された特性を D^H 、素材の物理的パラメータを D 、繊維含有率 V とマイクロ構造のモルフォロジー A からなる幾何的パラメータ X により、

$$D^H = D^H(X(V, A), D) \tag{2}$$

と書ける。物理的パラメータは構成式中の係数として自明であるが、問題は幾何的パラメータである。HLによる平織GFRPの事例においては、式(3)～(5)と表現し、各パラメータの統計データを計測した。式中のパラメータの意味は、①: 試験片の板厚・マクロな繊維含有率、②: 試験片表面の樹脂層厚さ、③: 単位構造寸法、④: モルフォロジー、⑤: ネスティング・層間樹脂厚さ・積層ずれ、⑥: warp繊維束断面寸法、⑦: 繊維束位置、⑧: 繊維束の繊維含有率、⑨: weft繊維束断面寸法、⑩: 繊維束内の繊維含有率分布である。

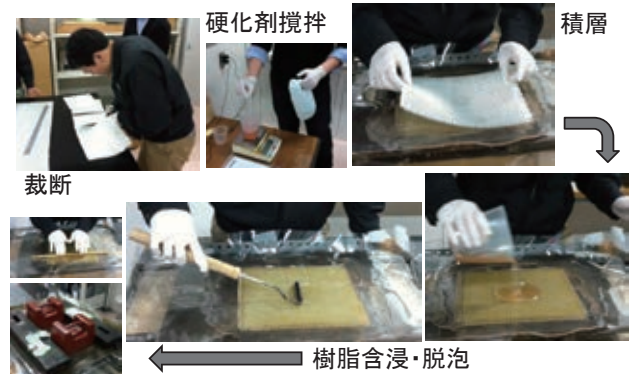


図1 平織 GFRP 積層板のハンドレイアップ(HL)成形

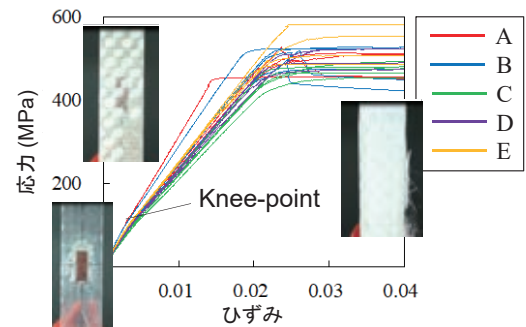


図2 HL 成形された 25 本の試験片の静的引張試験結果

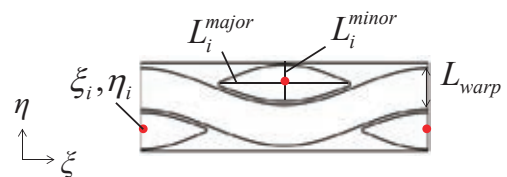


図3 平織マイクロ単位構造中の繊維束に関するパラメータ

$$X = X(\underbrace{t, V_f^{macro}}_{①}, \underbrace{L_{surf-mat}}_{②}, \underbrace{L_\xi, L_\eta}_{③}, \underbrace{A, s(\xi)}_{④}, \underbrace{L_{int-mat}, \phi}_{⑤}) \tag{3}$$

$$A = A(\underbrace{L_{warp}}_{⑥}, \underbrace{\xi_i, \eta_i}_{⑦}, \underbrace{V_f^{meso}}_{⑧}(\underbrace{L_i^{major}}_{⑨}, \underbrace{L_i^{minor}}_{⑩}, \underbrace{V_f^{micro}}_{⑩})) \tag{4}$$

$$s(\xi) = \frac{1}{2} \left(A_1 \cos\left(\frac{2\pi}{l_1} \xi\right) + A_2 \cos\left(\frac{2\pi}{l_2} \xi + \phi\right) \right) \tag{5}$$

⑥, ⑦, ⑨を図3に示す。

繊維含有率をまとめた図4から、ばらつきが成形中に生じる繊維束の変形によるものとわかる。式(5)に示したネスティングは、図5のようにモデリングにおいて使用することで、最終的に図6のような確率的モデルが生成できる。パラメータは、物理に基づくべきであり、パラメータ間の相関性も含めて計測可能であること、FEMモデル生成に利用可能であることが要件である。

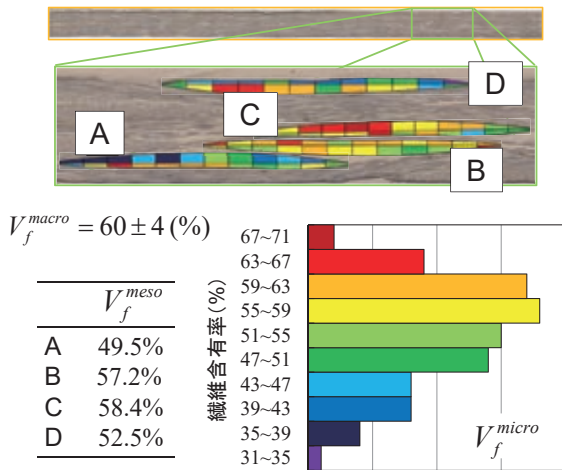


図4 繊維含有率の階層的・統計的計測データ

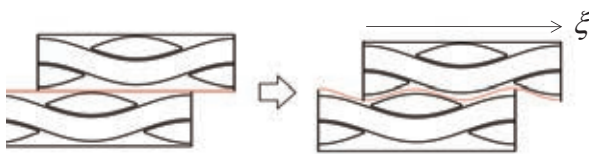


図5 ネスティングを有するマイクロ構造モデル生成

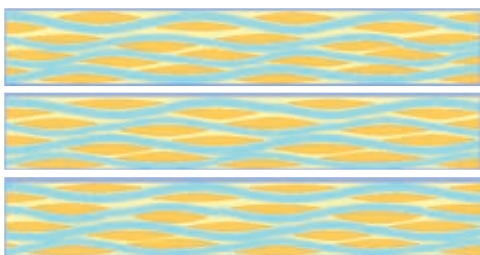


図6 確率的マイクロ構造モデルの例

図7は短繊維強化FRPのマイクロ構造モデルの例である。繊維長分布と図8に示す2つの角度により表される繊維配向分布を考慮し、Meshman_ParticlePacking (株式会社インサイト) に機能追加して、生成した[4]。図9には各繊維の繊維配向角度の分布を示す。同じ繊維長分布、繊維配向分布でも繊維配置が異なるモデルが多数生成できる。図10の小規模モデルは後に損傷進展を考慮した確率的非線形シミュレーションに用いたものである。

パラメータをGUIで明示的に利用できるCAEソフトとして、COMSOL (計測エンジニアリングシステム株式会社) がある。

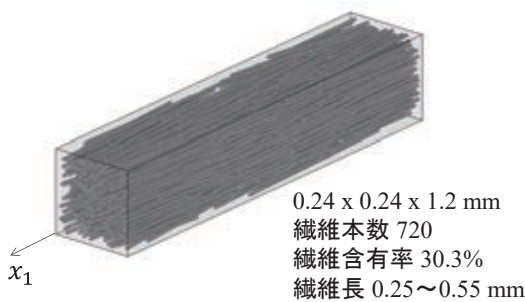


図7 短繊維強化FRPのマイクロ構造モデルの例

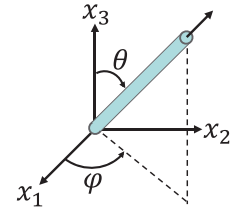


図8 短繊維の繊維配向を表すパラメータ

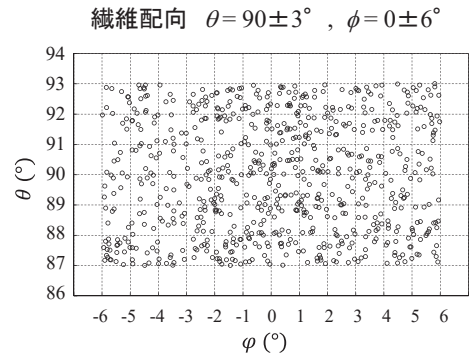
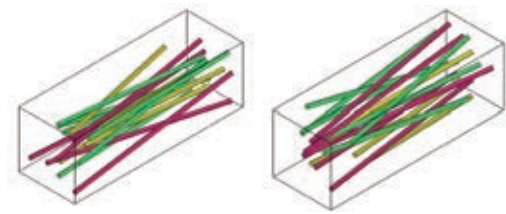


図9 短繊維強化FRPモデル(図7)における繊維配向分布



0.224 x 0.224 x 0.672 mm
 繊維長 0.645 mm (赤), 0.543 mm (緑), 0.435 mm (黄)
 繊維配向 $\theta = 90 \pm 10^\circ$, $\phi = 0 \pm 10^\circ$

図10 繊維配置のみ異なる短繊維強化FRPのモデルの例

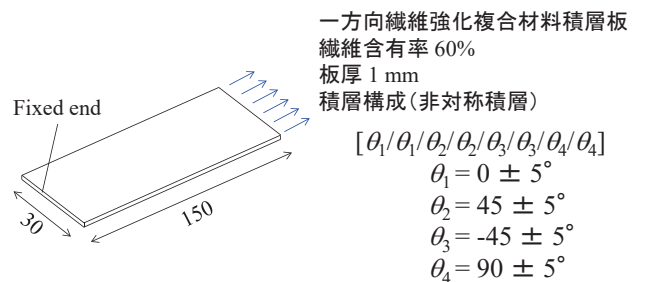


図11 積層ずれを有するCFRP非対称UD積層板の引張問題

Ver.5.4で追加された複合材料モジュールを用いて、図11の積層ずれを想定した問題に対し、各パラメータのサンプリングの総当たりで81ケースの解析をCOMSOLの機能を利用して行った結果、マクロな変位は図12のように大きくばらついた。

3. 確率的マルチスケールシミュレーション法と計算スキーム

3.1 物理的パラメータ

シミュレーション法として、前述の物理的パラメータと幾何的パラメータの内、前者を展開近似式を用いて理論的に組込んだ確率有限要素法がある。ミクロスケールの物理的パラメータDをランダム変数 α を用いて式(6)と書く。

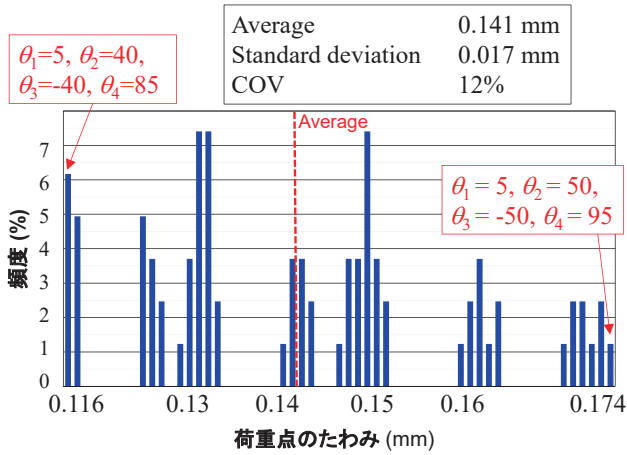


図12 積層ずれを有する非対称積層板の解析結果

$$D = D(\alpha) \tag{6}$$

ここで $\text{Exp}(\alpha) = 0$ であれば、 $\text{Exp}(D) = D^0$ となり、図13の模式図のように一次展開近似であれば、

$$D^1 = \left. \frac{\partial D}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} \tag{7}$$

である。筆者は多数のランダム変数を用いた一次展開近似と均質化法を組合せたFPSH (first-order perturbation based stochastic homogenization)法を開発してきた[5]。確率密度関数を $f(\cdot)$ と表せば、幾何的パラメータ X も考慮して後述のサンプリングを行えば、マクロ特性の確率的予測が可能となる[6]。

$$f(D^H) \equiv \sum_{j=1}^n f(X_j) f(D_{X_j}^H) \tag{8}$$

本手法を用いて確率的応答曲面の描画[6]や、試作後に実験データが得られた場合には事後確率を求めて確率予測を更新したり、観察無しに式(2)のパラメータ同定が可能となったりする[7]というメリットがある。また、図14に示す通り、均質化法における局所化計算により、ミクロ応答を予測し、確率的損傷進展シミュレーションへと発展することも可能である[4]。

一次展開近似は、図13からもわかる通り、ばらつきの程度が小さい場合に限られる。高次項の影響を考察するため、Neumann展開による簡単な2次元解析を行った事例を示す。ランダム変数 ξ を用いてヤング率(添字 i は材料番号)を

$$E_i = E_i^0 + \xi_i E_i^1 \tag{9}$$

のように展開し、式(10)の求解において、式(11)～(13)のように変形した後、式(14)と近似する。

$$\left[K^0 + \sum_{i=1}^n \xi_i K_i^1 \right] u = f \tag{10}$$

$$\left[I + \sum_{i=1}^n \xi_i Q_i \right] u = g \tag{11}$$

$$Q_i = (K^0)^{-1} K_i^1 \tag{12}$$

$$g = (K^0)^{-1} f \tag{13}$$

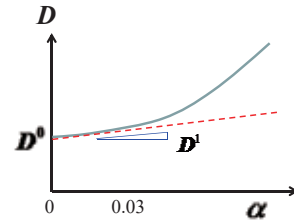


図13 1次展開近似の概念図

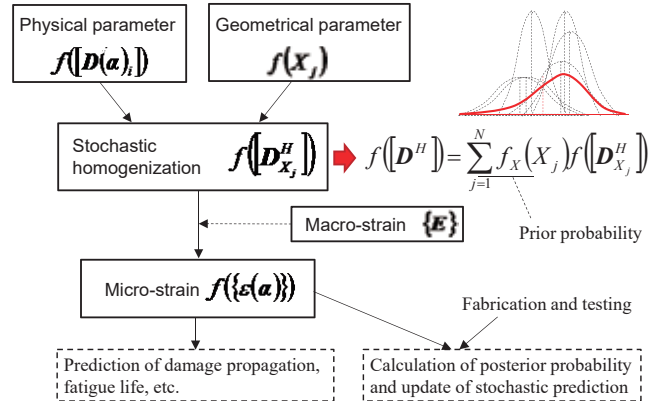


図14 FPSH法による確率的シミュレーションのフロー

$$u = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left[\sum_{i=1}^n \xi_i Q_i \right]^k g \tag{14}$$

図15に示す均質材の平板の引張問題において、ヤング率の変動係数に対して、変位の標準偏差をプロットすると、確かに1次項が有効なのは変動係数が数%の範囲であり、10～15%程度で初めて3次項の効果が見られることがわかる。高次項の影響は、応答の確率密度の裾野分布に現れることが、変動係数20%の場合の図16、図17よりわかる。

成形プロセスにおいて、たとえば硬化中の樹脂の物性や樹脂との界面のごく近傍の樹脂の物性は不確かであるが、工業用材料であれば、マクロ特性の予測において、裾野分布を除けば、一次展開近似で十分に予測可能ではないかと思われる。

非線形解析では計算コスト低減が望まれる。著者らはEBE-SCG (element-by-element scaled conjugate gradient)法によるFPSH法の求解において、前ステップの解を初期値とすることによる反復回数の低減が可能であることを示してきた[4]。

3.2 幾何的パラメータ

物理的パラメータと異なり、より大きな変動が表れる幾何的パラメータについては、展開近似のような手法が有効なケースはごく限られるため、筆者はシンプルに式(8)のようにサンプリングを行っている。

図2のような非線形問題において、ばらつきは線形範囲より非線形範囲で格段に大きくなる。同時に、想定しうるシナリオの数も無限に増える。損傷進展問題においては、あるステップの損傷域は、次のステップの初期状態となるため、幾何的パラメータの数が飛躍的に増えることになる。したがって、非線形解析の途中でサンプル数を絞り込むサブサンプリング[4]により、解析可能な計算コストの問題にする必要があると考える。こうして

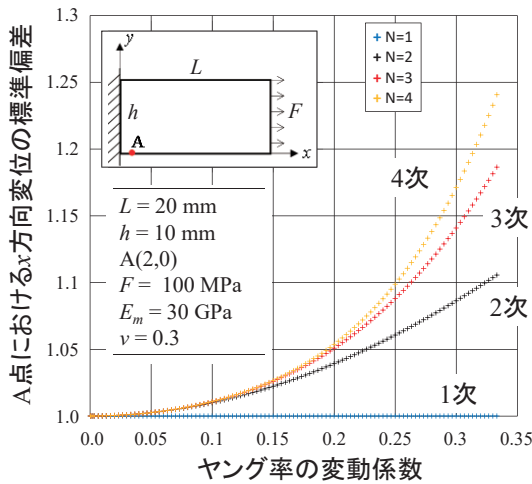


図15 入力値の変動係数と Neumann 展開の高次項の関係

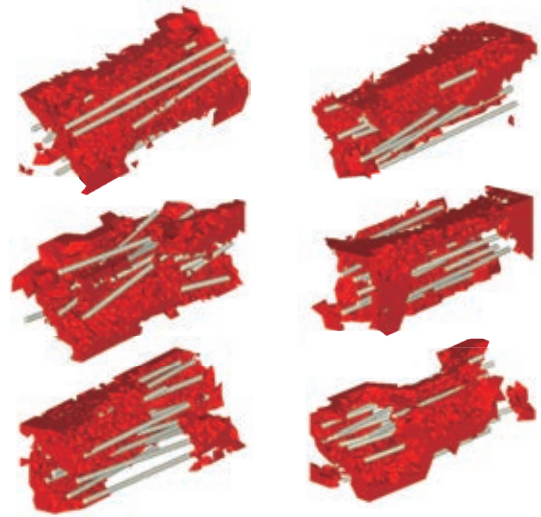


図18 短繊維強化FRPの予測された損傷進展パターンの例

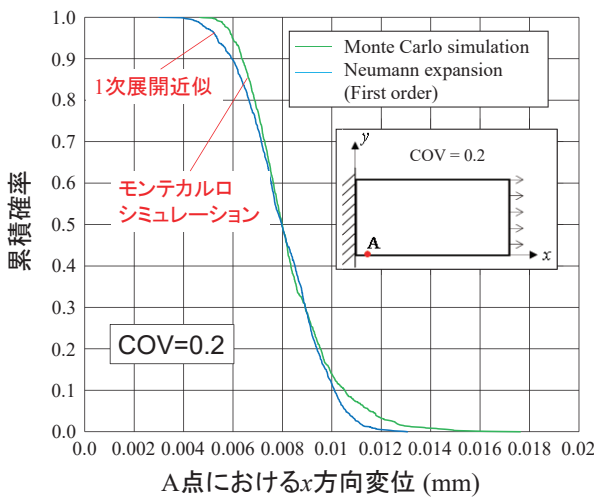


図16 変動係数20%の場合の1次展開近似の精度

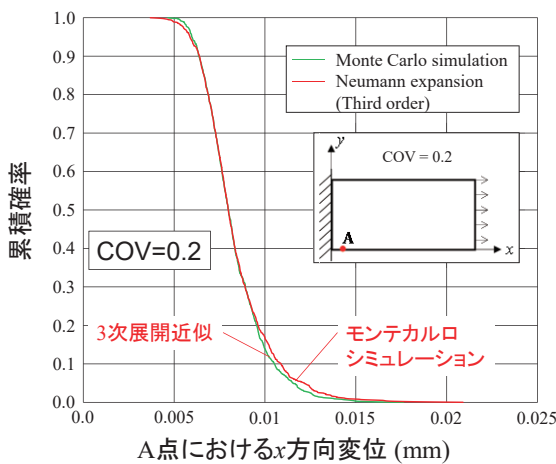


図17 変動係数20%の場合の3次展開近似の精度

図10の短繊維FRPに対して予測した、起こりうる損傷領域のごく一部[4]を図18に示す。また、この解析により、マイクロ構造モデルにおける各パラメータのばらつき・不確かさが、マクロ特性にいかんにか伝播するかを考察し、図19の通り、繊維配置の影響が大きいとの知見を得ることができた。繊維配置のパラメタリゼーションは今後の課題の一つである。

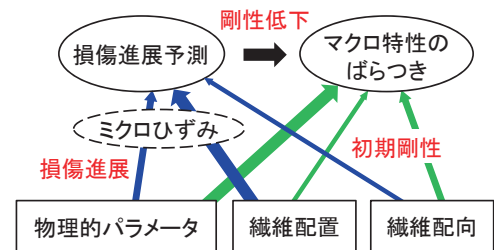


図19 短繊維強化FRPに対するばらつきの要因分析

適切なサンプリングは、モンテカルロシミュレーションでも共通の大事な作業である。確率的非線形シミュレーションの鍵を握る上記のサブサンプリング[4]については、さらに深い検討が必要である。また、Neumann展開の事例で述べた裾野確率の予測精度もサンプリングと密接に関連する。筆者は、裾野分布を高い信頼性で予測するためのSLS (stepwise limited sampling)法というサンプリング法を提案した[8-10]。多次元パラメータ空間内の分析法として、図20の三面図のように断面をとり、各断面内でQoI (quantity of interest) のばらつきを分析し、裾野分布につながるパラメータの存在範囲を不等式により制限し、制限されたパラメータ領域に重点的に(たとえば棄却法により)サンプリングする手法を提案した。

文献[10]では、図21のRTM (resin transfer molding)成形において、図22に示される樹脂含浸時間に31個のパラメータがいかんにか影響を及ぼすかをSLS法により分析し、図23のような裾野分布の詳細な解析に成功した。変動係数が7.6%もある問題において、シックスシグマの外まで予測することができた。

4. まとめと展望

本稿では、成形に起因するばらつき・不確かさを考慮するため、パラメタリゼーション、確率的シミュレーション法、サンプリング・サブサンプリングについて述べた。今後、非線形問題、マルチフィジクス問題において、ばらつき・不確かさの伝播の問題が、適切なパラメタリゼーションと感度解析などにより解決されるであろう。

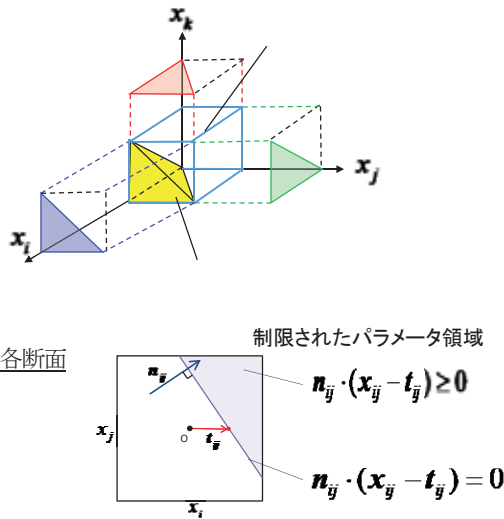


図20 裾野分布解析のためのSLS(stepwise limited sampling)法のための断面を用いた多次元パラメータ空間分析法の概念図



図21 RTM(resin transfer molding)法

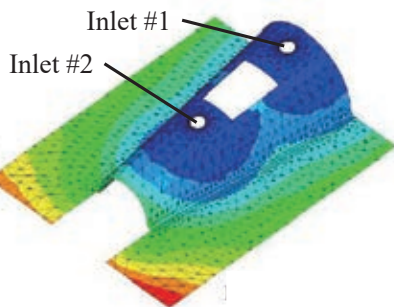


図22 樹脂含浸時間の解析結果の一例

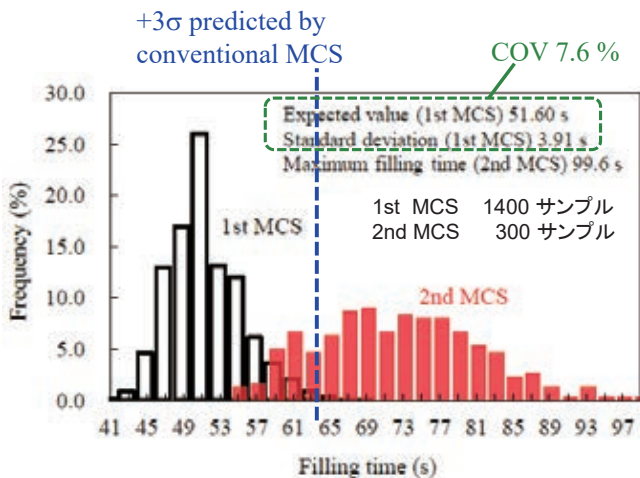


図23 SLS法による樹脂含浸完了時間の裾野分布の解析結果

今後、IoTの発展により大量の計測データが得られた場合、FRPの成形の問題に限らず、データにはばらつきが含まれると予想される。これに対応したCAEとはいかなるものかと考えると、筆者は将来像として図24のように確率的シミュレーションの予測が計測データのばらつきを内包できる姿を思い描いている。確率的シミュレーション結果は仮想実験データであり、シミュレーション時には不確定であった事前確率から計測データを用いて事後確率を求め、ばらつき低減や性能改善の対応策が得られるよう、データとモデルのシナジー効果に期待する。そのためのCAEツールとして、FPSH法やSLS法のような確率的モデリング・シミュレーション法を実装するだけでなく、ユーザの統計的思考を支援するGUIとソルバー開発に期待したい。

なお、FPSH法は、最初は多孔質な海綿骨の個体差のモデリング[11,12]のために研究開発したものであり、工学的応用としてはFRP以外にも金属3D積層造形品[13]にも適用しているので、あわせて参照いただきたい。非線形解析では相当の計算コストを要するので、今後のスーパーコンピュータ富岳を含めたHPCI環境での確率的シミュレーションの発展にも期待したい。

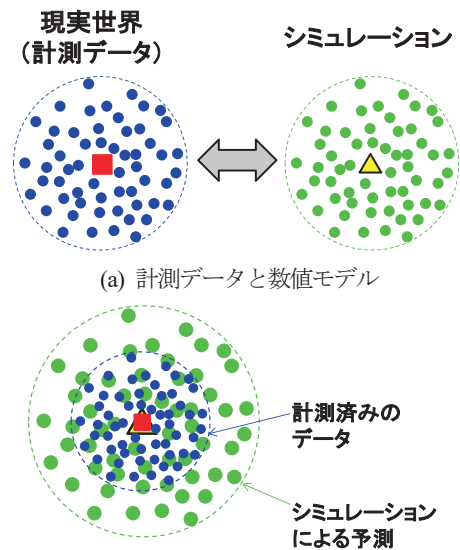


図24 確率的シミュレーションによるデータとモデルのシナジー効果創出の概念図

参考文献

[1] K. Hagiwara, S. Ishijima, N. Takano, A. Ohtani and A. Nakai, Parameterization, statistical measurement and numerical modeling of fluctuated meso/micro-structure of plain woven fabric GFRP laminate for quantification of geometrical variability, Mechanical Engineering Journal, Vol. 4, No. 4, Paper No. 17-00053, (2017).
 [2] N. Takano, Y. Ohnishi, M. Zako and K. Nishiyabu, Microstructure-based deep-drawing simulation of knitted fabric reinforced thermoplastics by homogenization theory, International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, No. 36/37, pp. 6333-6356, (2001).

- [3] N. Takano, M. Zako, T. Okazaki and K. Terada, Microstructure-based evaluation of the influence of woven architecture on permeability by asymptotic homogenization theory, *Composites Science and Technology*, Vol. 62, No. 10/11, pp. 1347-1367, (2002).
- [4] T.-D. Hoang, Y. Abe, S. Nakamura, A. Miyoshi and N. Takano, Stochastic nonlinear multiscale computational scheme for short fiber reinforced composites to study the influence of microstructural variability on damage propagation, *SN Applied Sciences*, Vol. 2, Paper No. 182, (2020).
- [5] P. Wen, N. Takano and S. Akimoto, General formulation of the first-order perturbation based stochastic homogenization method using many random physical parameters for multi-phase composite materials, *Acta Mechanica*, Vol. 229, Issue 5, pp. 2133-2147, (2018).
- [6] P. Wen, N. Takano and D. Kurita, Probabilistic multiscale analysis of three-phase composite material considering uncertainties in both physical and geometrical parameters at microscale, *Acta Mechanica*, Vol. 227, Issue 10, pp. 2735-2747, (2016).
- [7] P. Wen, K. Yokota and N. Takano, Probabilistic prediction and update of homogenized property for spherical porous material considering microstructural uncertainties, *Journal of Multiscale Modelling*, Vol. 6, No. 4, pp. 1-9, (2015).
- [8] N. Takano, M. Asai and K. Okamoto, Monte Carlo simulation of dynamic problem using model order reduction technique highlighting on tail probability, *Journal of Computational Science and Technology*, Vol. 6, No. 3, pp. 169-181, (2012).
- [9] S. Akimoto and N. Takano, Numerical prediction of scattered initial fracture load of perforated thin plate under tension by Monte Carlo FEM simulation with stepwise limited sampling, *Mechanical Engineering Letters*, Vol. 2, Paper No. 16-00316, (2016).
- [10] 高野, 石島, FRPの確率的RTM成形プロセスシミュレーションにおける裾野分布の解析, *日本機械学会論文集*, Vol. 83, No. 851, Paper No. 17-00216, (2017).
- [11] K. S. Basaruddin, N. Takano, H. Akiyama and T. Nakano, Uncertainty modeling in the prediction of effective mechanical properties using stochastic homogenization method with application to porous trabecular bone, *Materials Transactions*, Vol. 54, No. 8, pp. 1250-1256, (2013).
- [12] D. Tawara, N. Takano, H. Kinoshita, S. Matsunaga and S. Abe, Stochastic multi-scale finite element analysis of the drilling force of trabecular bone during oral implant surgery, *International Journal of Applied Mechanics*, Vol. 8, No. 6, Paper No. 1650075, (2016).
- [13] N. Takano, H. Takizawa, P. Wen, K. Odaka, S. Matsunaga and S. Abe, Stochastic prediction of apparent compressive stiffness of selective laser sintered lattice structure with geometrical imperfection and uncertainty in material property, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 134, pp. 347-356, (2017).

部門からのお知らせ



第 32 回計算力学講演会 (CMD2019) 優秀講演表彰

松本 敏郎
名古屋大学大学院工学研究科

東洋大学川越キャンパスで開催された第32回計算力学講演会における講演等について、座長および参加者に評価をお願いした結果に基づき表彰選考委員会において選考を行い、優秀講演表彰2名、優秀技術講演表彰3名、日本機械学会若手優秀講演フェロー賞5名を表彰することとなりました。表彰状を受賞者にお送りするとともに、本誌上に公開してお祝い申し上げます。

●優秀技術講演表彰

高澤 秀一 (株式会社 日立製作所)

損傷力学モデルを用いた延性破壊挙動の亀裂進展に対するひずみ速度の影響

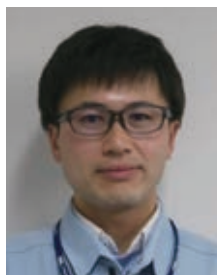
高田 尚樹 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)

保存形拡散界面モデル移流方程式への格子ボルツマン法の適用について

綿引 壮真 (株式会社 構造計画研究所)

デジタル画像相関法を用いた逐次データ同化による材料パラメータと境界条件推定

●優秀技術講演表彰



高澤 秀一



高田 尚樹



綿引 壮真



磯部 大吾郎



渡邊 則彦

●日本機械学会若手優秀講演フェロー賞



石井 秋光



市木 佑樹



菱田 湧士



古谷 拓己



渡部 愛子

●優秀講演表彰

磯部 大吾郎 (筑波大学)

ねじのゆるみを考慮した電子装置用ラックの地震時挙動再現解析

渡邊 則彦 (崇城大学)

設計応用のための効率的な空力音予測法の検討

●日本機械学会若手優秀講演フェロー賞

石井 秋光 (東京農工大学)

多結晶型超伝導材料における固相焼結過程の材料組織形成の3次元フェーズフィールドシミュレーション

市木 佑樹 (京都大学)

SrTiO₃中の余剰電子Polaronが創る単一原子フェロトロイディンティに関する第一原理解析

菱田 湧士 (名古屋大学)

ゲル膜の表面不安定から誘起される立体構造構築における影響因子解析

古谷 拓己 (中央大学)

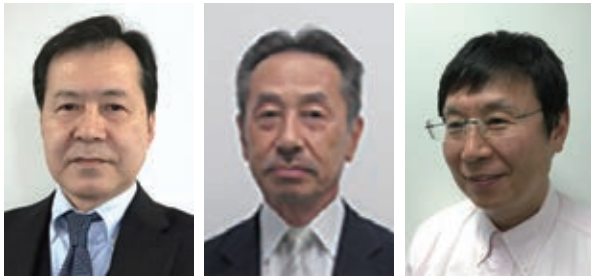
分子動力学法を用いたグラフェンのひずみ誘起ナノポーラス化に関する検討

渡部 愛子 (横浜国立大学)

自己治癒セラミックスの有限要素解析: wedge testの解析

●優秀講演表彰

2020 年度年次大会の部門企画について



松本 敏郎(左)
名古屋大学大学院工学研究科
平野 徹(中)
ダイキン情報システム(株)、CAE 懇話会
西脇 眞二(右)
京都大学大学院工学研究科

機械学会2020年度年次大会は9月13日(日)～16日(水)の日程で名古屋大学東山キャンパス(〒464-8603名古屋市千種区不老町)にて開催される予定です。会場は、JR名古屋駅からは地下鉄で30分ほどのアクセスで、最寄りの名古屋大学駅はキャンパスの中心に位置しています。

年次大会は「人・モノ・未来をつなぐ機械工学」をキャッチフレーズとして、「Society5.0を支えるイノベーション」「人・生物・機械の持続的調和社会の実現」「超少子高齢社会を豊かにする次世代技」の3つを主要テーマとしています。名古屋ならではの企画を多く用意しておりますので、

https://jsmempd.com/conference/jsme_annual/2020/から詳細をご覧くださいと存じます。

計算力学部門からの年次大会への特別企画としては、下記のように先端技術フォーラムを2件、オーガナイズドセッションを1件企画しております。

新型コロナウイルスの影響で、年次大会の開催方法についてはリモート講演の採用の可能性など今後の状況によって不確定な部分がありますが、なるべく多くの方にご参加いただき、熱心な議論をお願い致します。(松本 敏郎)

【【先端技術フォーラム】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)

機械学会2020年度年次大会(名古屋大学)にて、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した。これからは意匠設計から形状決定、解析、試作、認証・評価までを仮想空間で行う設計・開発手法が広がってくると考えられる。また、3Dプリンターなど積層造形による製造法が急速に発展していることから、従来の加工法では困難であった構造形状も許容されるようになる。このようなものづくりの過程で必要な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る。講演は下記のように、積層造形に関する構造形状の最適化の計算に関する3件とCFRP、金属、マルチマテリアルに対する3Dプリンタに関する3件を予定している。

- (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)

【先端技術フォーラム】Society5.0を支える計算情報科学基盤の深化と進展 (平野 徹)

筆者は、本年9月14日から名古屋大学にて開催される機械学会2020年度年次大会にて、東京大学・越塚教授、村上教授との共同企画として『Society5.0を支える計算情報科学基盤の深化と進展』と題した先端技術フォーラムを開催する。Society5.0に関連する先端技術フォーラムは昨年引き続き行うもので、今回は計算力学部門、設計工学システム部門、生産システム部門との協同企画として、対象プロセスを設計・製造・サービスに跨るライフサイクルをカバーし、また対象領域を製造業だけではなく、医療システム、社会システムや海洋システムへと広げ、さらに技術内容として不確かさを含めたモデリング及びデジタルツインの評価を含めて、下記8件の講演を予定している。

- (1) Society5.0を支える人・社会とシステム・サービスの不確かさを含めたモデリング・シミュレーション
平野 徹
- (2) 感性の数理モデリング(情報論を用いたアプローチ)
柳澤 秀吉(東京大学)
- (3) 構造・機能・ユーザ体験のデザイン差分マップを用いた製品×サービスの発想創出
村上 存(東京大学)
- (4) デジタルトリプレットによる新たなモノづくりとライフサイクル価値創成
梅田 靖(東京大学)
- (5) Society5.0実現を目指した社会インフラ・医療画像データに対する転移学習の適用

村川 正宏 (産総研)

(6) SOCIETY5.0の実現に向けた海洋観測・予測の取り組み

中田 聡史 (環境研)

(7) Society5.0の実現に向けた地域別電力需要推定～都市動態シミュレーションにもとづく予測～

藤井 秀樹 (東京大学)

(8) Society5.0におけるデジタルツインの不確かさを含めたV&V

越塚 誠一 (東京大学)

【オーガナイズドセッション】解析・設計の高度化・最適化

(西脇眞二)

本オーガナイズドセッションは、計算力学部門と設計工学・システム部門とのジョイントセッションとして開催している。本セッションは最適設計分野における日本のパイオニアでありかつ第一人者でいらっしゃる金沢大学の山崎光悦先生が数十年間に設立されたもので、山崎先生が金沢大学の学長になられる前に、西脇がその役を引き継ぎ今に至っている。隔年で幹事部門を交代しながら、計算力学の立場と設計工学・システムの立場の研究者が集まり常に活発な議論をしており、ジョイントセッションならではの醍醐味を感じていただける。

《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. 63 : 2020年5月15日発行

編集責任者：広報委員会委員長 村松 真由

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 西 正人 E-mail: nishi.masato@jsol.co.jp

株式会社JSOL エンジニアリング事業本部

〒104-6205 東京都中央区晴海1-8-12 晴海トリトンスクエアZ棟 5階

TEL 03-5859-6020 FAX 03-5859-6022