



COMPUTATIONAL MECHANICS

計算力学部門ニュースレター No.49

December, 2012

部門設立25周年記念特集号

目次

25周年記念に寄せるメッセージ 1

- 日本機械学会計算力学部門設立当時のことなど
矢川元基
- 計算力学部門設立25周年を祝う
白鳥正樹
- 想定外事象を無くすために
尾田十八
- 計算力学部門設立25周年を祝して
藤井孝藏
- 計算力学部門と私
宮崎則幸
- 計算力学と自動車開発の25年
安木 剛
- 計算力学への期待～設計応用という観点から～
杉村和之
- HPC環境と計算力学の相乗効果 ---進展と展望---
加藤毅彦
- 汎用FEMがもたらしたもの
小林卓哉
- 計算力学と自分探しの旅
下川智嗣
- 連続体マルチスケール解析
内田 真
- 計算力学に対する期待～人体モデリングと
日常行動シミュレーション～
宮崎祐介

- 計算力学と設計と最適化
北山哲士
- 計算力学部門25周年に寄せて
～私とコンピューターと計算力学～
松田哲也
- 研究を通して感じる計算力学の魅力
藤川正毅
- 設計情報学に懸ける想い
千葉一永
- Message
Eugenio Oñate
- Message
John Kim
- Message
Bram van Leer
- Message
Song Fu
- JSME CMD and Professor Genki Yagawa
Achievements
Wing Kam Liu
- JSME-CMD: A Great Division with Great Leaders
Tayfun E. Tezduyar

25周年記念講演会開催報告 38

- 25周年記念（2012年度）計算力学講演会
国内会議の開催報告
平野徹、屋代如月
- 25周年記念国際会議ICMS2012開催
姫野龍太郎、岡田 裕

25周年記念に寄せるメッセージ



日本機械学会計算力学部門設立当時のことなど

矢川 元基

日本機械学会 計算力学部門 初代部門長、東京大学名誉教

日本機械学会計算力学部門は、1988年に発足した。あれからちょうど25年になる。四半世紀が経過したかと思うと実に感慨深い。部門設立当時は確かにさまざまなことがあった。今から思えば、我々も若かったし、がむしゃらでもあっ

た。その当時のことを思いつくままに書くこととする。

1986年に東京で第1回国際計算力学会議（ICCM'86）（筆者と当時米国ジョージア工科大学教授であったS.N.アトルーリ博士が共同議長）（後に国際計算理工学会議に改称さ

れた)が開かれ、計算力学に関わる日本の研究者の結束が高まったことや、当時、機械学会の中に本格的な部門制を発足させようという機運が高まっていたことなどがあげられる。その頃の機械学会は縦割り伝統分野としての材料力学や流体力学といった委員会組織になっており、それらを横断的につなぐ研究組織が必要であると個人的に考えていたこともある。また、70年代後半にはクレイのスパコンが出現し、何らかの胸騒ぎがしたこともきっかけであったと思う。研究仲間であった東大三好俊郎教授(当時)らとも計算力学部門の必要性を論じ合っていた。そこで、当時委員会制から部門制に移行しつつあった機械学会内部への根回しを始めることとした。ほとんどからは前向きの対応が得られたが、計算力学をその一部に取り込んでいる伝統分野の委員長らの一部からはなかなか好意的な対応がもらえなかった。計算力学部門ができたとしてもいろんな衝突が避けられないし、計算力学部門がなくとも従来体制で十分学問を進展させることができるといったことが主な理由であった。最後には何とか説得して1988年によく部門設立にまでこぎつけたが相当なエネルギーを要したことはあった。運営委員会を設置し、筆者が部門長となり、運営委員会一致団結して、第1回計算力学講演会の準備、ニュースレター第1号発刊の準備などで大忙しであったが全員張り切っていた。第1回講演会は年明けの1989年1月に東大山上会館で開催された。発表論文数は65とこじんまりしたものであった。このこじんまりとした集会から現在の大々的な講演会にまで成長したことを考えるとまことに感慨深い。なお、編集委員長の福田収一阪大教授(当時)の大変なご努力のおかげで、ニュースレター第1号発刊も第1回講演会に何とか間に合った。

初代部門長の大事な仕事のひとつは第2代以降の部門長をどのようにして選ぶかを決めることであった。まず思ったことは、部門の大きな目的である「異なる分野を融合すること」に合致する人事でなければならないということであった。そこで、まずは構造と熱流体の専門家に交互に部門長になっていただくことにした。なお、選考は当面は話し合いとし、任期は2年ごとに交代とした。毎年開催される計算力学部門講演会開催中の夕方、有志が集まっていた飲みながら次の部門長は誰が適任かということをつらつらに議論した。何年か経つとこれが正式の歴代部門長懇談会というものになり、その懇談会で次世代を背負っていただけそうな方々から次期部門長候補を挙げていった。しばらくは構造と熱流体の2分野から交互に候補リストを挙げたが、ある時点からは、その他分野(アプリとハードの中間のミドルウェアなども含む)を加え、この3分野から交互に候補者を探していった。この方法は、今から考えてもきわめてよかったですと確信している。懇談会に集まる全員がとにかく計算力学部門をより強くするにはどのような人物に部門長になっていただくことが最良かということだけを考えていたからである。一部で心配されるような作務的なことは全くなかった。このようにして選ばれたすべての部門長はその後の計算力学部門の大きな飛躍に貢献されたことについてはご承知のとおりである。なお、最近はこの話し合いの方法が変更され、運営委員会内の選挙で決められるようになっている。これだけ大所帯になっ

たことでもありこの変更も一つの方向であると考えられる。

もう一つの大きな仕事は部門賞のことである。賞は、授与された当人にとっても更なる発展への励みになるし、周りの人たちにとっても「次は自分も」という気になり頑張ろうという気持ちにさせてくれる。表彰委員会を設置し、功績賞と業績賞を2本の柱とし、功績賞は計算力学に関するあらゆる寄与の総合的評価、業績賞はある特定の成果の評価で候補者を選ぶこととした。また、1990年10月開催の第3回計算力学講演会で第1回の表彰式を挙げることにした。表彰委員会全員一致で、1990年6月に52歳の若さで心筋梗塞のため急逝された故・瀬口靖幸大阪大学教授(当時)に第1回計算力学功績賞を授けることになった。先生は当時、逆問題、バイオ計算力学などの研究の最先端でご活躍であり、もしご存命なら計算力学に対してさらに多くの貴重な寄与をされた方である。その後は、毎年開催される計算力学部門講演会において厳しい選考を経た第一線の研究者に部門賞が授与されてきた。この中には、外国の著名研究者も多数含まれている。日本機械学会計算力学部門賞は、いまや国内のみならず世界中の研究者にとっても大変な名誉であると認知されている。この賞がここまで成長、発展してきたことは本当にうれしい限りである。

当時、計算力学の将来がどのように考えられていたかについては、ニュースレター第1号(1989年1月発行)に掲載された筆者の巻頭あいさつ「計算力学部門発足にあたり」が参考になると思われるのでその一部を以下に引用する。“日本機械学会の活動母体の一つとしての計算力学部門が発足し、本ニュースレター(第1号)が発行される頃には、1年近くが過ぎることになります。あらためて申すまでもなく世の中はますますソフト化・情報化へと変革しております。このような世の移り変わりにコンピュータ技術の進展が最大の影響を与えていることも異論はないことと思われまます。恐らくは今世紀末あるいは来世紀初頭(といっても10年ちょっと先の話ですが)コンピュータの計算能力は現在の1000倍くらいものになっていることでしょう。スーパーコンピュータで現在数100万円の連立方程式が解かれ3次元問題について言えば、 $100 \times 100 \times 100$ メッシュの固体や流れのシミュレーションが行われておりますが、いずれは数億元から数十億元の連立方程式をほんの数分以内に解き、 $1000 \times 1000 \times 1000$ メッシュの問題も簡単に扱えるようになることでしょう。逆の言い方をすれば現在のスーパーコンピュータは現在のパーソナルコンピュータ程度の、また卓上エンジニアリングワークステーションはポケコン程度のサイズになってしまうでしょう。さらには、計算能力のみならず、AIの発展により、コンピュータはますます人間の頭脳に近づくことも確実です。コンピュータハードとソフトのこのようなべき乗的発展に支えられて、計算力学に代表される計算理工学は従来理論、実験に続く自然科学における第3の学問ブランチに数えられるまでに育っております。さて、計算力学は、それ自身が先端技術として展開するとともに、既存の分野(機械学会で言えば、材料力学、熱・流体力学、機械力学、設計工学など)と密着した新たな融合体として発展するという両面を持っております。言い換えれば従来の分野を縦糸の1本1

本とすれば計算力学は横糸に相当すると言えましょう。このような縦糸と横糸が強国に結び合わさって素晴らしい織物となることが期待されます。……今後の全体方針としては、ますます聞かれた活動母体とすること、すなわち他部門、他学会との協力、国際活動を積極的に行う、ややもすれば学界中心の活動であったのを産業界の参加を強化することによりさ

らに活性化をはかることなどがあります。……”

最後に、日本機械学会計算力学部門のこれまでの発展を支えてこられた、歴代部門長はじめ多くの方々の献身的ご努力にこの場をお借りし深甚なる謝意を表したい。また、次を担う世代の各位には本部門の将来性は無限であることを確信し、部門のさらなる発展に尽くされることを祈りながら筆をおく。



計算力学部門設立25周年を祝う

白鳥 正樹

横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター

1. はじめに

計算力学部門が発足してもう25年経ったのですね。現在では機械学会の20部門の中でも最も活発な部門のひとつとして活動されていると伺っております。この盛況を喜ぶとともに、これまで多くの方々が尽くしてこられたご尽力に敬意を表します。

編集担当の小石氏から部門発足当時の秘話をと依頼されましたが、生憎そのようなとおきの話は持ち合わせておりません。一方私は日本にFEMが導入された当初から、その研究グループに参加することを得、今日の隆盛に至るまで、FEMの発展の歴史と共に歩むことができたことを望外の幸せと感じております。したがってもう少し歴史を遡って私とFEMとの関わりについて話をさせていただこうと思います。

2. 部門発足以前

私と有限要素法（FEM）の関わりの発端は、1967年私が大学院M1の学生のとときに始まる。当時東大の鷺津久一郎先生、山本義之先生、川井忠彦先生らが相次いで米国留学から帰国され、“米国では今FEMというコンピューターを駆使した構造・応力解析の研究が活発に行なわれている。については日本でもこの研究を活発に進めよう”ということで日本鋼構造協会の中にSTAN（Stress Analysis の略称）という研究会が発足した。これに京大の山田善一先生、東大の山田嘉昭先生、柴田碧先生、それに私のボスの宮本博先生などが参加し、これらの先生方の関連の研究室の大学院学生らが参加して、“FEMとは一体何者じゃ”というところから勉強会が始まった。当時東大で発足したばかりの原子力工学科の大学院の学生で私（精密機械工学科）の一年先輩に当たる矢川さん（当時は学生であったので、先生の呼称はここではつけない）が誘ってくださり、また大坪さん（船舶工学科）、半谷さん（建築学科）等も加わって、月に一度の研究会に参加した。当時としては大変に贅沢であったケーキとコーヒーが供され、それが楽しみということもあった。我々大学院生のノルマとしては、自分の研究課題に関連する文献調査とその報告を行い、お歴々の先生方の厳しい質問に耐えるということで、大変に勉強になった。

先生方は力学に通じておられるが、FORTRAN等のコンピュータ言語の習得は若い学生のほうが得意である。当時は

FEMについて系統的に解説した成書はなく、その全体像をつかむのに苦労した。大坪さんが学生仲間に声をかけて勉強会を主催し、そこでざっくばらんにあれやこれや議論をさせていただいたのが、大変勉強になった。また、当時三菱原子力に勤めておられた桜井達美さんが、わが国で初めての2次元構造解析プログラム「PLAN」を開発され、一方、川井研の助手をしておられた吉村信敏さんも独自に2次元の応力解析プログラムを開発されておられた。我々もPLANのマニュアルに示されていたフローチャートを手がかりに、先人お二人のご指導をいただきながら、それぞれの研究課題にしたがって独自のプログラムの開発にこぎつけることができた。

M2になった折にZienkiewiczの教科書が出版され、その翻訳の仕事が培風館で持ち上がり、山田嘉昭先生監修のもとで翻訳チームのメンバーの一人として参加させていただいた。この仕事を通じてやっとFEMの全体像を把握することができた。

ここで特筆しておきたいことは、当時、学科の壁というのが結構厚く、学生が学科の壁を越えて交流する機会が極めて少なかった状況の下で、STANを主導された先生方が、全くそのようなことにこだわらずに、ご指導をいただくことができたこと、またそのおかげで学科の壁を越えた若い同世代の仲間の人脈ができたことである。これはその後の私の活動にとっても大きな力になったと信じている。

そうこうするうちに学生であった若い世代の仲間たちがそれぞれ大学でポジションを得、機械学会、造船学会、建築学会、土木学会等それぞれの学会で活躍をするようになった。日本鋼構造協会では年に一度のシンポジウムが開催され、これらの活動を通じて、徐々に産業界へ普及していった。また大学および企業にそれぞれ大型計算機センターが設置されて、NASTRAN等の汎用コードも開発され、新しい手法の開発とともに産業応用が急速に進んだ（1970～80年代）。日本機械学会においても産学連携をミッションとする研究協力部会の中で山田嘉昭先生が主宰された非線形有限要素法（EPIC）研究会に次いで、矢川先生、大坪先生、三好先生らが協力して主導された有限要素法関連の一連の研究会が盛況を極め、最盛期には70社以上の参加企業を集めるという状況を呈した。機械学会研究協力部会の歴史の中でも、最も活発な活動をした研究会として語り伝えられている。

3. 部門発足の頃

80年代の後半になって、大橋先生を中心として機械学会の大規模な組織改革が議論され、その流れの中で、これまで材料力学や流体力学などの研究交流活動が委員会制で運営されていたのに対して、部門制が新たに導入されることになった。その折に、これまでの委員会活動をそのまま部門に移行したのでは、専門分野が縦割りになってしまい、専門分野がますます狭い分野に特化されて、機械工学のシンセシスの学としての特徴が失われてしまう。したがってそれぞれの専門分野に横串を通すような横断的分野を新設しようとの議論があったように聞いている。矢川先生がこの機会を的確にとらえて、この際、新たに計算力学部門を創るべし、と提唱された。当時、流体工学分野では差分法 (FDM) が、また熱工学の分野では有限体積法 (FVM) がそれぞれ活発に研究されていたが、FEMは主として材力、機力等の構造系、FDMは流体系、FVMは熱工学系のそれぞれ閉じた分野の人たちの中で研究がおこなわれており、分野を超えた人の交流は少なかった。したがってこれらの手法が計算力学として束ねられ、分野を超えた人の交流がはじまるきっかけを作ったという意味で、計算力学部門が88年に発足したことは大変に時宜を得たものであったと考えている。とはいえ、これらの手法はそれぞれの分野で極めて有力な手法として認知され始めており、それぞれの分野の研究がさらに発展していくために欠かせないものとしてとらえられていたため、これらを研究する第一線の研究者が既存の分野からごっそり抜けて新しい分野を作るということに対して、大きな抵抗があった。これらの抵抗を排して計算力学部門の発足に立ち会われた、矢川先生をはじめとするそれぞれの分野の先生方に敬意を表したい。すでに記憶が定かではないが、流体工学の分野では東大の小林敏郎先生、松本洋一郎先生、熱工学では東工大の土方邦夫先生、東北大学の齊藤武雄先生、東大の笠木伸英先生、機力分野ではいわき明星大学の清水信行先生、設計工学分野では大阪大学の瀬口康幸先生、福田収一先生、早稲田大学の山川宏先生、それに構造分野では東大の矢川先生、三好先生のほか、金沢大学の尾田十八先生、信州大学の田中正隆先生、大阪大学の久保司郎先生らが、また民間企業からは中山亘氏 (当時日立、以下同様)、加藤毅彦氏 (日本クレイ)、Raul Mendez氏 (リクルート)、小園東雄氏 (ソニー)、平野徹氏 (ダイキン)、渡邊隆之氏 (CRC) らが名を連ねておられたように思う。

初代の部門長は矢川元基先生、次いで三好俊郎先生、さらに齊藤武雄先生、白鳥、松本洋一郎先生、尾田十八先生へと引き継がれていった。齊藤先生の頃から、部門長は構造系と非構造系で交代して務めようとの暗黙の了解があり、この伝統は今なお引き継がれていると理解している。当初は部門長は2年任期であったため、副部門長の期間も含めると4年間部門運営に関わることになり、結構な重労働であった。部門発足当初から、部門講演会の企画、財政基盤確立のための各種セミナー企画と実施など、裏方としてお手伝いをさせていただいた。しかし、計算力学そのものが新しい有力な方法として時流に乗っていたため、講演会やセミナー等、回を重ねるごとに参加者が増えていくという状況で、部門運営に危惧

を覚えるというようなことはなかったように思う。むしろ、これらの活動に参画させていただいたおかげで、常に計算力学の手法の最先端の動向を学ぶ機会が与えられたこと、また、構造以外の他分野の方々と知己を得て交流の輪がまた一段と広がったことに感謝している。

以下に私が部門長をお引き受けしたときにニュースレターに書いた一文を紹介する。3人の委員長 (部門長) の下で飛躍的な発展を遂げたことが読み取れる。

「計算力学部門は今から6年前に矢川元基初代委員長の下に発足し、三好俊郎委員長のときに飛躍的な発展を遂げ、また齊藤武雄部門長 (このときから部門長と呼ぶことになった) を迎えて国際化を果たした。いまや部門登録者4600名を数え、14の技術委員会と7つの研究会を持つ、規模、アクティビティともに真に充実した部門に成長した。3人の個人的な先生方の指導力と、それを支えた運営委員会を中心とする部門メンバー諸氏の協力の賜物である」 (CMDニュースレターNo.12, March, 1992) .

私が部門長をお引き受けしたとき、それまでは部門講演会は毎回東京で実施されていたが (齊藤先生が主催された仙台の国際会議に続く部門講演会は除く)、これを全国展開すべきと考えて、信州大学の田中正隆先生に実行委員長をお願いして、長野市で開催した。どれだけ人が集まるか心配していたが、田中先生のご尽力もあって極めて盛会であった。特に懇親会は参加費をただにしたという特別の配慮もあって、若い人たちの参加が多く会場からあふれるばかりであった。この懇親会の参加費がただという伝統は今なお引き継がれているのであろうか。残念ながら田中先生はすでに先立たれてしまわれたが、計算力学部門の中であって、境界要素法 (BEM) を主導され、世界の田中として活躍されたあのアグレッシブな、しかし笑うとにこやかな童顔になる田中先生の顔が忘れられない。これを機に部門講演会はごく当たり前に全国持ち回りで実施されるようになったと理解している。

4. その後の展開—将来へ向けて

私がFEMを始めた頃は、数百元の連立方程式を解くのが大変な時代であった。したがって様々な解法を工夫して、少ないメモリーを繰り返し利用しながら、なるべく大きい問題をいかに早く解くかということに精力が注がれていた。このためには解法の特徴を徹底的に研究して、またどのメモリーエリアにはどの情報が蓄積されているかについて、動的、時系列的に把握しながらプログラムのコーディングをするという作業を強いられた。しかしこれらの作業はFEMとコンピュータの本質を理解する上で大変勉強になった。現在では構造系で数十億元、流体系で一千億元の自由度と聞いている。この40年間に実に7桁のオーダーの大規模高速計算が実現しているのである。これはこの分野の驚異的な発展を象徴的に物語るものである。現在の超並列計算機を使いこなすために、今の若い研究者諸氏は私が若い頃に経験した苦勞に増して、また一段と難しい作業を強いられているものと拝察している。

現在、工学シミュレーションは産業界のものづくり現場に浸透し、設計、加工、組み立て等ものづくりのあらゆるプロセスにおいて欠くべからざるツールとして使われるようにな

ってきた。このような状況に鑑みて、若い仲間と共に「工学シミュレーションの品質保証」という問題に取り組んでいる。あちこちのソフトウェア・ヴェンダーが主催するユーザー会に招かれて、品質保証の仕組みを構築することの重要性を説いている。普段、学会活動とは縁のないものづくり現場の設計者、解析技術者らが大勢居り、真剣に耳を傾けてくれる。



想定外事象を無くすために

尾田 十八
金沢大学名誉教授

小生は平成20年3月にそれまで41年間勤務していた大学を定年退職した。この期間は長いとはいえ、人的にも、仕事の上でも、また大学の内、外を含め割合平穩、無事に終えることが出来たと思っている。

所がその半年後の9月にリーマン・ショック（これはアメリカの大手証券会社・投資銀行リーマン・ブラザーズの経営破綻が引き金となった世界的な金融危機）が起こった。その波は瞬く間に世界を席卷し、現在もおギリシャ、スペインに代表されるヨーロッパ経済危機となつて続けている。

さらにその2年半後の平成23年3月には、わが国に東日本大震災（宮城県東南東沖130km付近を震源とするM9.0のわが国観測史上最大の地震とそれによる大津波による災害）が起こった。これによる被害の凄まじさは、死者・行方不明者が約2万人程度と今なおその正確な数すら未定であること、また被害エリア内の福島第一原子力発電所の爆発・崩壊により、現在も多くの人々がその放射線被爆を逃れて避難生活している事からも明らかである。特に原子力発電所の安全性を根底から覆し、世界各国の原子力政策に今なお大きな影響を与えている。

この二つの事象は、一つが経済事象という人の活動によって生じたものであり、もう一つは自然災害である点、一見異なる事象のように思われるが、後者の原子力発電所の爆発・崩壊は人災的側面が強いと言われている。ただ何れにしろ、この二つの事象は僅か3年の間に生じ、それらが今まだ世界的規模で社会に大きな影響を与え続けていることが問題である。

所で、前者のリーマン・ショックについては、その根源は単にアメリカ第4位の投資銀行であるリーマン・ブラザーズが、サブプライムローンと呼ばれる高リスクの住宅ローンで大規模な損失を計上し、その処理に失敗（アメリカ版住宅バブルの崩壊）したことにある。当初日本政府高官等はこれに対し、「日本の金融機関はあまりサブプライムローンに手を出していないため、欧米に比べてその影響は小さい」と楽観的に述べ、十分な対策を考えなかった。しかし行き場を失った投機マネーは、経常黒字国の日本を安全な逃避先と見做し、外国為替市場において円買いを誘発させた。この影響は長期化し株価は勿論、企業の生産活動にも大きく響き、今なお我が国の経済は低迷状況から抜け出していない。この事象に

機械学会では計算力学部門が中核になって、「計算力学技術者認定」事業が活発に行なわれている。これらの活動を通じて、また絶えず魅力ある情報を発信し続けることにより、これまで学会活動に無縁であった設計者、解析技術者らに、学会活動への参加を促すことが、本部門がさらに発展していくためのひとつのステップになるものと期待している。

対する日本高官の当初予測は明らかに誤っており、その責任は重大である。しかしそれについては、多分今流行の「想定外事象」であったからと言いつかれるであろう。

一方、後者の事象、特に福島第一原子力発電所の事故に関しては、周知の通り東京電力を始め国の原子力村の上層部の方々は「想定外事象」を連発した。事故自身は自然現象としての巨大地震がトリガーではあるが、原子炉の冷却に必要な全ての電源が津波によって喪失したこと、その結果最悪と言われる核燃料の完全溶融（メルトダウン）を引き起こしたことは、その後に出された幾つかの事故報告書では、想定できる人災であったと結論されている。

以上述べた二つの事象を考えると、経済事象であれ、自然現象によるものであれ、ある規模のものが発生したときの社会へ及ぼす影響評価の正確な予測が極めて重大であることを我々に意識させる。そしてこの作業は実験や理論モデルに頼ることが出来ず、コンピューターを用いた大規模かつ複雑なシミュレーション解析しか方法がないと思われる。つまり、このような分野こそ、計算工学、計算力学の果たす役割は大きく、従ってこれからの当部門の活躍が期待される分野であると思う。

このことに関連して近年、システム、装置などの健全性を評価する方法の一つに「ストレステスト（stress test）」のあることが原子力発電所の安全性評価の具体的方法としてマスコミに何度か登場した。これは「対象とするモデルに通常以上の負荷を掛けて、正常に動作するかを調べるリスク管理法」であるが、経済の分野でもすでに用いられている方法なのである。つまり銀行や大きくは国家の経済状況を予測する「健全性検査」の方法として具体的事例に適用されている。計算工学、計算力学はこれに視るようにはこれからは、単に工学に限定されること無く、あらゆる分野で適用されている方法を利用し、結果としてあらゆる分野を包含する社会に貢献できるタフネスさが期待される。

本部門の25周年を記念して、最近思っていることを気楽に述べさせていただいた。これからの本部門の益々の発展を祈念しております。



計算力学部門設立25周年を祝して

藤井 孝藏

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

計算力学部門が25周年を迎えるとのこと、分野の一研究者として、また部門長経験者の一人として大変喜ばしく思います。早いもので、私が部門長を仰せつかったのは15年近く前の話になります。矢川先生、齋藤先生、白鳥先生、松本先生、尾田先生と5名の先生の後をついだ形でした。改めて、当時の部門活動にご尽力いただいたたくさんの方にお礼を申し上げたいと思います。当時、計算力学に関わる活動は活発化の過程にあり、講演会など部門の活動もそれなりに充実していました。そのため、特段に部門運営に苦勞したという記憶はありませんが、ネット上の部門ニュースレターのアーカイブから自らの「就任の挨拶」を確認してみると、「CAEとかCADとかいうキーワードは計算力学のものであると同時に設計、製造といった分野とも切り離して考えることはできません。これまで縁があまりなかった設計や生産に関わる部門とも積極的に連携した企画を立てていこう」と書いています。その後10数年、シミュレーションという観点だけでなく、設計手段という意味を包含した計算力学という認識は多少なりと定着してきた気がします。

さて、少し昔話をしましょう。私は米国在住中にはじめて汎用スーパーコンピュータを利用しました。1981年代のことです。利用する方程式も国内にいたときのポテンシャル方程式からナビエ・ストークス方程式と変わっていたこともあり、そのときはスーパーコンピュータの性能を意識することはありませんでした。1983年秋に帰国し、幸い当時の最先端スーパーコンピュータを利用する機会を得ました。企業の開発現場にあった出荷前のマシンです。このスーパーコンピュータは、演算性能1GFLOPS、主記憶メモリー256MBでした。当時世界最高速で、私が所属していた航空宇宙技術研究所（NAL、現JAXA 調布）では8MFOPSの性能を持つ汎用計算機が普段の研究活動に利用されていた時代で、形の上ではいきなり125倍の性能向上になります。実際には、某F社の社員が帰宅する18時過ぎを狙って工場に出向き、夜な夜な朝までこのスーパーコンピュータを利用したわけです。米国での経験もあり、ベクトル化する技術はある程度知っていましたし、計算機も今と違って共有メモリーでしたので、スパコン向けの基本となるプログラムを用意するのは負担ではありませんでした。計算内容は、圧縮性ナビエ・ストークス方程式を解くことで、航空機の主翼周りの遷音速流れをシミュレーションするものです。よくあるように、計算の状況を把握するため「残差」なる情報を一定の時間ステップごとにプリンタに簡易出力するのですが、どんどんプリンタが動きます。20分ほどで一定の時間ステップが終了しましたが、NALでの汎用計算機に比べてあまりに速く、何か間違ったのではないかと思ったほどです。NAL汎用計算機での

計算速度と比較した結果は何と35倍でした。その後、当時NALの吉田正廣さんらの協力でベクトル化を工夫し、すぐに55倍という速度が出ました。ちなみに、この一連の研究は、通産省（当時）およびJADC（民間輸送機開発協会）がボーイング社との共同研究として進めていたYXXプロジェクトに関わるもので、当時東京大学の大学院生だった大林茂氏（現、東北大学流体科学研究所教授）と共同の研究でした。

このような高速計算機をはじめて利用したときの驚き、20分も待ってやっと出てきた1枚のシミュレーション結果カラー画像を見たときに感動のようなものを味わう機会はなかなかありません。その意味では、（もちろん、今も携わっているつもりですが！）とても幸せな時代に先端的なシミュレーションに携われたと思っています。

最近、スーパーコンピュータの国際会議で、展示会場での先端スーパーコンピュータの利用分野からFluid Dynamicsという言葉が見えなくなりつつあるようです。その研究対象は、（それら各領域の中での流体関連研究はともかく）今やナノやバイオであり、一般の工学的な流体シミュレーションはもう企業が利用する実用の時代であり、トップクラスのスーパーコンピュータを利用する先端研究は終わったとか言われる方もいます。私には驚きですが、研究ネタがないといった発言も聞えます。

再び私事で恐縮ですが、定年まで10年ほどになったとき、残りの研究生生活の考え方を整理しようと考えていました。そのとき2つの論文に出会いました。スペースがないので詳細は略しますが、それらの論文の影響により、現在の研究テーマは大きな2つの方向と、それを実現するための道具作りの研究に絞りました。流体は非線形性が強く、小さな変化が空力性能を大きく減じます。そこを逆手にとって、「小さな変化」を上手に制御することで性能を格段に向上できないかという研究を次世代スーパーコンピュータ「京」利用のテーマとして進めています。概念設計や初期設計はシミュレーションの得意とするところですが、そういった試みは意外にやられていません。概念設計は簡単なモデルで行うことが

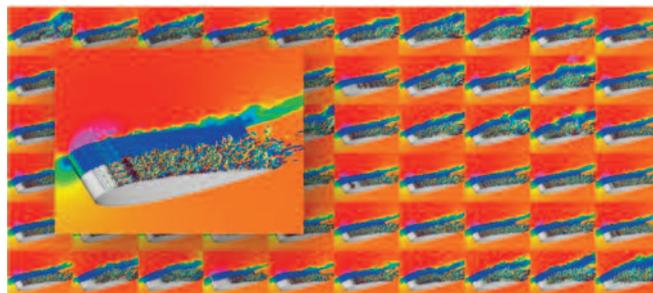


図1：小型デバイスによる剥離制御のパラメータサーベイ

多いのですが、流体の場合は先に述べた非線形性のためにそこでも高度なモデルを利用することが不可欠だと考えていることが背景にあります。

「京」利用の戦略プログラムの中で大規模のシミュレーションを実行する機会があり、東大情報基盤センターも含めた先端的なHPCI資源を利用することで、昔は1ケースの計算ですら夢のようであったLESのシミュレーションをあっという間に数十ケースとか行うことができました(図1)。

直接的な性能向上ではありませんが、同時にこれら数十ケースの流れの変化を見ていると、昔スーパーコンピューティングをはじめて使ったときと同じような感動を久しぶりに覚

えました。もちろん、科学的成果がともなってはじめて研究の価値は出るものですが、シミュレーションという観点での感動は、データ自体が多くを語るのと同様に研究への高いモチベーションにもなります。そこに計算力学の面白さもある気がします。流体を対象とした計算力学はやっと手法も道具も調ってきて、その出番はまさにこれからではないでしょうか。「やっと面白い流体シミュレーションができる時代になってきた」という思いを計算力学に携わる多くのみなさんと共有できたら、また楽しいCFDの時代が訪れる気がします。何やらとりとめのない話になってきたので、今後の部門のさらなる発展を祈りつつ、これにて原稿を終わりにします。



計算力学部門と私

宮崎 則幸
京都大学 工学研究科 機械理工学専攻

CMDニューズレターの編集担当の小石様から、計算力学部門設立25周年記念特集号に何か書くように要請されて、何を書くべきか考えましたが、表記のタイトルで私自身の25年間の計算力学部門との係わりを中心に書くことにしました。

私は、1977年に東京大学工学系研究科の原子力工学専門課程で工学博士の学位を取得しました。そのとき研究指導を受けたのは計算力学部門の初代の部門長をつとめられた矢川元基先生でした。学位取得後、日本原子力研究所で軽水型原子炉の構造健全性の研究に携わり、1983年に九州大学に移り、21年間、化学工学関連の学科・専攻で教育・研究を行い、2004年に京都大学の機械系専攻に移動し、現在に至っています。2013年の春には定年を迎える予定です。計算力学部門の設立は、1988年ですので、九州大学に移ってある程度研究が軌道に乗った頃だったと思います。したがって、大学に移ってから、大半の期間を計算力学部門と係ってきたこととなります。

機械学会では部門制度を取り入れるに当たって、学会員は希望する部門を順位付けして幾つか登録することができました。私の場合は、研究分野が計算固体力学であることと計算力学部門設立に矢川先生が深く関わったこともあり、計算力学部門を第1位に、研究分野に近い材料力学部門を第2位にしました。その後、上記の2つの部門の部門講演会を中心に研究発表を行ってきました。この2つの部門を比較すると、計算力学部門は材料力学、流体力学、熱工学、機械力学、設計工学、バイオメカニクス等とも関連性を持った部門横断的な性格を持った部門であり、私のように化学工学関連の学科・専攻に所属して計算固体力学、材料力学・材料強度の研究をしている、機械工学本流の人から見ると異端児であるようなものも、何の違和感もなく活動することができました。すなわち、京大に移り機械系の本流に身を置く前の九大在籍時に、2度の計算力学講演会の実行委員長(1996年の第9回と2002年の第15回)と部門長(2003年度)をつとめるな

ど、部門運営の中枢を担うこともできました。一方、材料力学部門においても、私の研究室からも多数、部門講演会で発表し、2011年には材料力学部門から業績賞をいただき(計算力学部門からは2001年に業績賞と2005年に功績賞をいただいています)、材料力学部門の中でも業績の点である程度目立った存在であったと思いますが、これまで、部門の運営委員になったことはありません。材料力学は、機械力学、流体力学、熱力学とともに機械工学の根幹をなす四力学の一つであることから、大学の機械工学系の学科・専攻では必ず材料力学関連の研究室があります。そのため、材料力学部門の大学からの運営委員はこのような研究室の先生がほとんどだったと思います。特に私が21年間在籍していた九州支部では完全にそのようになっていたと思います。これは、計算力学部門がもつオープンな性格とは対極をなすもののように私には思えました。このような意味で、材料力学部門に比べて、計算力学部門は私にとっては大変居心地のよい部門でした。また、私が九州大学に在籍したときに研究室に所属していたものが、教授職の公募の応じたときに、先方の機械工学・材料力学分野生え抜きの教授から「あなたは機械工学・材料力学の教育をできるのですか?」という趣旨の質問を投げかけられたことも耳にしています。これなどは、機械工学本流意識から出たもので、私からすれば看過できない言葉です。材料力学、もう少し広く捉えれば固体力学・応用力学は機械工学だけでなく、土木工学、建築工学、宇宙航空工学、船舶工学、原子力工学、材料工学など多くの工学領域に関わった学問領域であり、機械学会の材料力学部門ももっとopen-mindであってほしいと思います。

前述のように、私が九州大学に職を得たのが1983年で、計算力学部門が発足したのは1988年ですので、来年の定年までの大学在職期間の大半の期間を計算力学部門とともに歩んできたこととなります。今回、この原稿を依頼されて、過去の計算力学講演会の講演論文集を整理してみました。そう

すると、1994年の第7回の計算力学講演会（中央大学駿河台記念館で開催）以外の講演論文集がそろっていました。第7回についてはその年の手帳を調べてみたところ、丁度その期間に外国出張（シカゴで開催されたASMEのWinter Annual Meeting）に出席していたため欠席していたようです。この欠席がなければ皆勤でした。また、私の研究室から計算力学講演会への発表状況を見ると、1989年1月24日、25日に東京大学の山上会館で開催された第1回から今年の25回まで全く途切れがなく研究発表がなされています。私自身が欠席した第7回も研究室から2件の研究発表をしていました。その意味では計算力学講演会に皆勤であったといえます。皆様の参考のために第1回の計算力学講演会のセッション構成と座長（敬称略）を下記に示しておきます。なお、第1回の計算力学講演会では、いわゆるオーガナイズドセッションはなかったようです。

最適設計（中桐滋・東大）、構造シンセシス・解析システム（尾田十八・金沢大）、スーパーコンピューティング（加藤毅彦・日本クレイ）、パラレルコンピューティング（渡辺隆之・CRC）、非線形破壊力学（三好俊郎・東大）、強度評価（福田収一・阪大）、振動評価（青木繁・東工大）、破壊力学：BEM、特異積分方程式法（吉村忍・東大）、流体解析：解析手法（松本洋一郎・東大）、流体解析：特異点法（棚橋隆彦・慶大）、流体解析：乱流特殊流れ（小林敏雄・東大）、熱関連解析（宮崎則幸・九大）、動的解析（松本浩之・東工大）、衝撃解析（竹園茂雄・豊橋技科大）、応力解析：理論（白鳥正樹・横国大）、応力解析：解析的手法（結城良治・東大）、制御（山川宏・早大）、応力解析：応用（田中正隆・信州大）

このように、固体力学、流体力学を中心に、設計工学、熱工学、機械力学、制御工学等にも目配りをしていたことがうかがわれます。

手許にある計算力学講演会の講演論文集に基づいて、各回の講演総数（特別講演、基調講演、パネルディスカッション・ワークショップ・フォーラム・チュートリアルにおける講演も含む）、および宮崎研究室からの発表数に図示しておきます。ただし、前述のように第7回については講演論文集

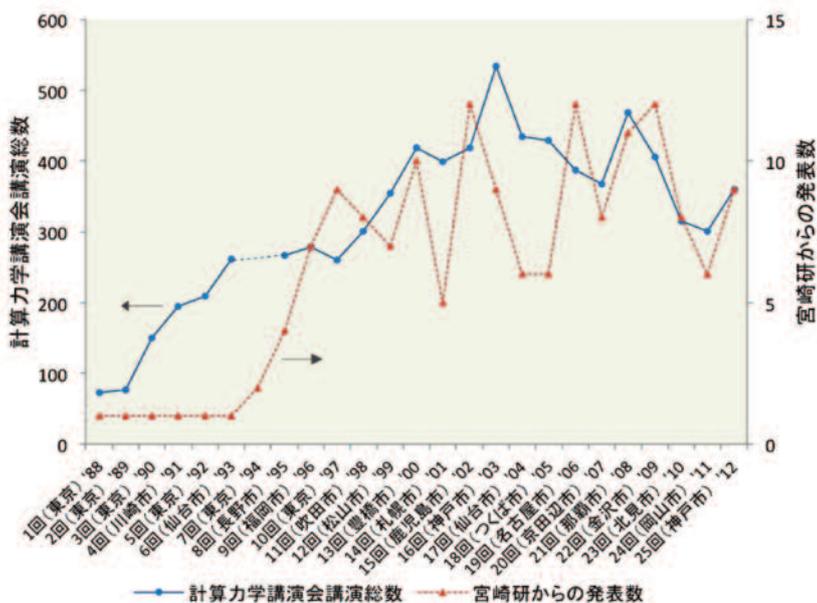


図 計算力学講演会における講演数の推移

が手許にないため講演発表総数は図示してありません。この図より、講演発表総数という観点で見ると計算力学部門も最近では少しピークを過ぎたかなと見ることができます。この理由の一つとしては、計算力学の発足に関わった世代および私のように当初から計算力学部門を講演発表の主舞台としてきた、計算力学部門への思い入れの強い世代が定年を迎えて退場しつつあることに関係があるかもしれません。また、オーガナイズドセッションの構成を見ると、過去にはあった熱工学関連、機械力学関連、制御工学関連のオーガナイズドセッションが近年は消えていることがわかります。これらの多くはそれぞれの本来の部門に戻ってしまったのかもしれませんが。今後、部門の中核を担う方々は、将来の部門の中核を担うことが期待される計算力学部門に思い入れの強い若い世代の育成とともに、計算力学／計算科学という切り口で機械学会内の他の多くの部門および他の学協会との連携を強めて計算力学部門の一層の発展に心を砕いてほしいと思います。

地球シミュレーターの後継としてのスーパーコンピュータ京の運用開始に伴い、物作りへの計算力学の適用の重要性も一層増してきています。このような、追い風をうけて、計算力学部門が一層発展することを祈念して筆を置きたいと思います。



計算力学と自動車開発の25年

安木 剛
トヨタ自動車

1. はじめに

特集テーマ「計算力学部門設立25周年」にあたり原稿執筆を仰せつかりました。企業で30年ほど計算力学に従事する立場では精緻で論理的な記事を書くことには無理を感じる

ので、自動車の開発にかかわっていて個人的に感じることを述べさせていただきます。

2. 計算力学の変遷

2012年現在、自動車メーカーでは多様な計算力学が自動車開発で使用されています。その計算機使用量に占める割合は、自動車の衝突解析と計算流体力学が大きい状況です。これらは1988年ごろから自動車開発に応用が始まり、今年で25年目を迎えました。まさに、計算力学部門設立と同じころから始まったと言えます。初期の自動車の衝突解析は1万3千節点でしたが、現在は9百万節点になりました。この様に、大規模な計算をするようになった動機はなにであったのかを自動車の衝突解析を例に振り返ってみます。

1988年の衝突解析の目的はデザインディレクションを探ることであったと思います。すなわち、自動車のラフな形状を元に図面の断面形状、材質、板の厚さなどが妥当であるかを確認することが目的でした。このような衝突解析をSame as designedと本稿で呼ぶことにします。

1998年ごろから衝突解析の目的は衝突試験の結果を定量的に予測することであったと思います。すなわち、プレス成形による降伏点の加工硬化など考慮し、ダミー人形やシートベルトなどを搭載した衝突試験車に相当するよりリアルな計算モデルで、スポット溶接接合の破断なども考慮しながら定量的に性能を予測することが目的でした。このような衝突解析をSame as builtと本稿で呼ぶことにします。

2008年ごろから衝突解析の目的は衝突試験で許容される衝突速度や衝突位置の多様な試験条件の組み合わせでも目標が達成可能性であることを予測することであったと思います。すなわち、実験計画法やモンテカルロシミュレーションで数十ケースを衝突解析し、試験条件の偏差と性能変化の程度と関連を調査し試験条件の偏差の性能への影響を少なくすることも目的でした。このような衝突解析をSame as testedと本稿で呼ぶことにします。

2012年現在では衝突解析の目的には自動車レース場で発生した事故を模擬し、その傷害発生要因を解明することが含まれています。すなわち、人体FEモデルを搭載した自動車の衝突解析により骨折や軟組織損傷などの傷害の低減効果を予測することも目的です。このような衝突解析をSame as drivenと本稿で呼ぶことにします。

この25年間でSame as designed, Same as built, Same as tested, Same as drivenと衝突解析の種類が多様化した背景には、衝突安全性能を左右する要因をより広くかつより深く理解したいとの要求から、衝突解析結果と衝突試験結果の対応に対する要求レベルが年々向上したことがあります。この要求レベル向上に応えるために衝突解析をより衝突試験にリアルに近づけたいと計算力学に関係する進歩がありました。Same as designed, Same as built, Same as tested, Same as drivenとの自動車開発での計算力学の変遷は計算流体力学や振動や強度でも概ね同様であったと思います。しかしながら、企業からの視点では計算力学の質の面で二つの課題がまだあると考えています。

3. 計算力学の質の課題

自動車開発での計算力学の質を左右する要因には解析理論

の正確さ、解析コードのロバスト性、計算モデルの忠実度があると考えます。最初に述べたように解析理論の正確さや解析コードのロバスト性など精緻で論理的なことを書くことには筆者の立場からではやや無理を感じるため本稿では弊社の計算モデルの忠実度について述べます。

自動車を比較的多数の部品の組み合わせから構成された複雑なシステムと仮定しますと、各部品の特性と部品間の接合部の特性の両者を計算力学で表現しなければなりません。部品の特性には剛性・強度に関係する材料特性値・幾何学的形状などがあり、部品間の接合部の特性には破断や干渉に関係する溶接強度や摩擦係数などがあります。

部品の特性を一定の精度で計算するために以下のような配慮をします。材料特性は納品された鋼板コイルから切り出された試験片で計測した応力・歪特性の平均値を使用します。樹脂部品では射出成形後の部品から切り出された試験片で計測した応力・歪特性の平均値を使用します。幾何学的形状はシェル要素の空間離散化方式を適切に選択し、部品の形状に応じた計算格子サイズを使用して形状のデフォルメをできるかぎり排除します。

部品間の接合部の特性を一定の精度で計算するために以下のような配慮をします。溶接接合の試験片で計測した荷重・変位の特性とミクロン単位の計算格子サイズのこの試験片のシミュレーションから得た亀裂の開始位置と進展方向ごとに破断パターンを分類し、接合強度の最大値を推定する理論式を作成します。衝突解析のたびにこの理論式で破断パターンを特定ししかし破断のリスクを評価します。

これらは言わばSame as builtの解析で忠実度を向上させるとの考えに沿って衝突解析をより衝突試験にリアルに近づけるものです。すなわち、小さな試験片レベルから実験との比較検証を積み重ね自動車の衝突安全性能の予測精度を維持するものです。しかしながら、2012年現在では衝突解析の質の維持は計算力学のエンドユーザーの前述のような地道な努力に依存するところが大と言っても過言ではなく、自動車開発での計算力学の質のひとつの課題と考えています。こまではSame as designed, Same as builtの観点でしたが、Same as testedの観点からはもう一つの課題があると思います。

もう一つの課題は、自動車を比較的多数の部品の組み合わせから構成された複雑なシステムと仮定しますと、そのシステムの複雑さを評価し、システムとしてより単純化する技術の開発だと思っています。例えば、ある性能Aに対し設計変数BとCに感度があり、BとCには交互作用があるとします。このシステムの複雑さを解消するにBとCの交互作用を解消し、できればCの感度を減少させより設計変数Bだけが性能Aの感度を持つことです。

システムの複雑さの程度を評価する試みとして、モンテカルロシミュレーションを衝突解析で行った結果を変形モードの分岐ごとにグループに分類し、同じ変形モードのグループなかでの感度と交互作用を求め、グループ間で感度と交互作用の大小を比較することが可能です。衝突解析のような材料的かつ幾何学的非線形問題では、Same as designed, Same as built, Same as testedの解析ごとに変形モードの分岐状況

が相違することで感度や交互作用の評価結果に差が生じる場合があります、さらなる評価方法の開発が必要に思います。このように感度や交互作用評価への取り組みは始まっていますが、それらを低減・解消する包括的な理論と方法について今後の進展に期待しています。



計算力学への期待～設計応用という観点から～

杉村 和之
(株)日立製作所 日立研究所 高度設計シミュレーション研究部

このたび計算力学に対する問題意識や期待について述べて欲しいという依頼を受けました。企業で計算力学に関わる研究者としての、個人体験に基づく限られた内容になりますが、私が日頃、計算力学に対して感じている問題と期待について、以下に述べたいと思います。尚、本稿では、計算力学を、Computer-aided Engineering (CAE) や設計シミュレーションと言った広義の意味で考えます。

計算力学は、数値解析をテーマとして、様々な物理現象や、様々な製品領域の、横串を通す学問として発足し、その役割を果たしてきました。多くの企業で、事業部や製品の横串を通す組織として、解析サポート部門があることなどからも、その学際的特徴は産業界でも定着したと言えます。さらに、元々は数値解析法に関する基礎学問として始まった計算力学が、CAEのような実用的側面を強調した形態に派生した流れもあります。このように、単に異分野を横断するだけでなく、その姿を目的に応じて流動的に変えていく変態能力を持つのが計算力学の特徴 (DNA) であると思います。それゆえ、そのスコープの広さは、他の工学科目の追随を許しません。

ところが、社会が望むスコープは、計算力学のスコープ拡大よりも更に速いスピードで広がっています。そのギャップが、現在の計算力学が直面している問題であると考えています。

図1に、弊社における設計シミュレーションの考え方の変化を示します。この変化を紹介することを通じて、社会が求めるスコープの変化について説明したいと思います。

まず図1 (a)は、2008年頃の設計シミュレーションのあり方を示しています。モノ (製品) の競争力強化に役立つことを最終目標として、設計シミュレーションに必要な技術要素を4層のレイヤで表現しています。最下層は解析実行のための計算機基盤 (ハードウェア) です。その上はシミュレーション技術で、物理現象の予測を行う技術です。更にその上のレイヤは、検証されたシミュレーション技術を設計に活かすための技術であり、設計探査・最適設計技術などが該当します。そして、設計実績やノウハウなどを形式知化して蓄積し、次設計に活かすためのInformation Technology的な仕組み作りが、最上位レイヤである設計プロセス支援技術になります。弊社では、設計の標準プロセスを定義して再利用する業務ナビゲータの技術開発事例などがあります。

4. 終わりに

自動車の開発にかかわっていて計算力学について個人的に感じることを述べさせて頂きました。

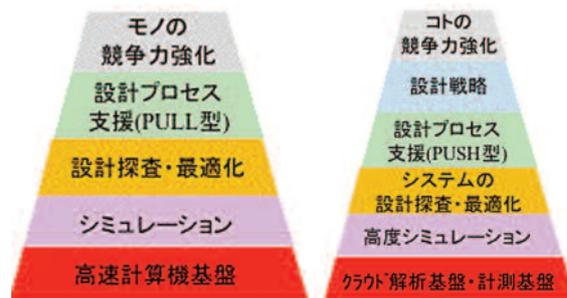
2012年社員総会にて機械学会賞 (技術功績) を頂戴いたしました。末筆ながら計算力学部門の関係各位さまからのご指導・ご鞭撻にこの機会をお借りして改めて感謝申し上げます。

一方で図1 (b)は、現在の設計シミュレーションのあり方を示しています。レイヤが増え、構成技術の質が変化しています。まず、設計の最終目的が、製品 (モノ) だけでなく、サービスやそれらを提供するビジネスモデルそのもの、即ち“コト”を創り出すことになってきています。

ハードウェアを表す最下層については、従来はスーパーコンピュータやPCクラスタといったHigh Performance Computingのための環境構築が主でしたが、現在、計算のみでなく、設計・解析ツールの共有や、ビッグデータの収集や分析などを行うクラウド解析基盤に変化しています。また、Hardware in the Loop Simulation に代表されるように、解析と計測の融合も進んでおり、計測基盤を併せ持つことも重要です。

その上位のレイヤは高度シミュレーション技術です。技術的に成熟した解析手法は市販ソフトウェアに実装され、コモディティ化が進んでいます。差別化のポイントは、解析モデルのカスタマイズ、独自の解析結果評価法、解析の大規模化などにシフトしています。マルチフィジックス解析やマルチスケール解析などは、大規模解析の事例です。大規模解析では、多くの場合、並列計算が前提となるため、市販ソフトウェアを使う場合は、ライセンス料の問題が顕在化します。これに対して、オープンソースソフトウェアの活用なども試行されていますが、長期的なメンテナンス性の確保の問題や、市販ソフトウェア側の並列計算コストの相対的な低下などがあり、単純にどちらかに移行するという状況ではありません。

その上位のレイヤは、システムの設計探査・最適設計技術



(a) 2008年頃の設計シミュレーションのあり方 (b) 現在の設計シミュレーションのあり方

図1 設計シミュレーションのあり方の変化

です。多目的最適化手法などが発展し、最適設計を適用できるアプリケーションは大きく広がりました。より大規模な設計問題を解けるように最適化アルゴリズムの改良が行われ、製品要素から製品システムへと最適化の対象が変わりました。但し、解きたい設計問題の規模は、解ける設計問題の規模を常に上回っていて、永遠に追いつくことはなさそうです。

さらに上位のレイヤは、設計プロセス支援技術です。図1(a)の時はPULL型と呼ばれる設計支援技術でした。これは設計者が自ら、必要な設計ノウハウやデータベースを参照(PULL)するというアプローチです。これに対して、図1(b)では、設計者の作業をバックグラウンドで自動的に監視・分析しながら、関連する有益な設計情報や必要な警告などを、タイムリーに提供(PUSH)するというアプローチです。データ検索技術や言語認識技術の発展がこのような技術の実現を支えています。設計プロセス支援技術は、ある程度定型化されたプロセスの知的処理を得意としていますが、動的に変化する非定型なプロセスに対する柔軟な対応が、今後の課題として残っています。

そして近年、最も重要であると私が考えているのが、最上位の設計戦略、設計方法論のレイヤです。本レイヤの役割は、設計の最終目的を合理的かつ効率的に達成するために、下層の全レイヤのあるべきアーキテクチャを決定することです。本レイヤで“戦略”を考える視座は、非常に多岐にわたり、また各々の視座でも最適な戦略策定法が体系化されているわけではありません。幾つか視座の例を挙げますと、

- 製品ライフサイクルでの全体最適化の実現（要件定義、設計、製造、保守運用の側面）
- 製品群の設計アーキテクチャの最適決定（擦り合わせ設計とモジュラー設計、その混合割合）
- コンポーネント、サブセット、システムといった製品の広さに対応した最適な解析手段の選定（詳細解析とモデルベース簡易解析の使い分け）
- 設計目的達成のための異なる方法論（理論、実験、解析、データ分析）の最適な役割分担と組合せ、融合のあり方

などがあります。このような視座は、現在の計算力学があまり貢献できていないところであり、人間の意思決定に頼っているところです。しかしながら、本レイヤがビジネスに与えるインパクトは非常に大きいので、計算力学はこれらも対象にしていかないといけません。

さて、設計シミュレーションのあり方を考えるにあたって、弊社ならではの問題についても言及してみたいと思います。自動車産業のように対象製品がはっきりしている業種では、設計目的を明確に定義しやすいので、あるべきレイヤの姿を設計しやすいという特徴があります。一方で、弊社が扱う製品は、蒸気タービン、ガスタービン、発電機、変圧器、モータ、インバータ、建設機械、一般産業機械、高機能材料・デバイス、医療機器、自動車機器、昇降機、鉄道システム、家庭電化機器など、非常に多岐に渡っております。製品

によって設計目的が変わるため最適なレイヤ構成も変わります。本来であれば、個々の製品ごとに最適なレイヤを構築できればよいのですが、このようなアプローチでは、規模で勝る専門メーカーに対抗することは困難です。そこで、会社全体として最大公約数的にあるべきレイヤ像を戦略的に考え、定義する必要が生じます。このような共通性の高い設計/解析基盤のあり方を考えるコーポレート部門が必要で、私が所属する高度設計シミュレーション研究部もそのような組織です。我々の部署では、多数の製品の設計シミュレーションにおける課題を調査して、共通の基盤技術要件を括り出し、技術開発や横展開を行っています。このような活動そのものが設計戦略を考えることに部分的に相当し、弊社のような多様な製品を持つ企業では、大切な活動になります。我々には、様々な製品知識を蓄えつつ、技術的に図1のような広がりを持つことが要求されます。このような取り組みは大変に学際的で、まさに計算力学のDNAを引き継いでいる活動と言えます。

以上述べましたように、社会の要求スコープの拡大に対して、計算力学が対応できるスコープは十分な大きさを持っておらず、もっと計算力学のDNAを強く発現させる必要があると思います。企業に勤める者としては、特に設計工学と計算力学はもっと強く融合し、スコープ拡大を加速する必要があると思います。

図1の下層のレイヤほど、より古典的な計算力学の範疇であることを考えますと、今の計算力学に求められるポイントはより上位のレイヤへの貢献です。言いかえますと、上位レイヤの目的への貢献を意識して、各レイヤにおける計算力学の技術のあり方を議論すべきであると思います。卑近な例で恐縮ですが、私が好きなゴルフで例えますと、ティーショット、セカンドショット、アプローチ、パッティングと、バーストショットを積み重ねてカップインを狙うのではなく、カップインのシナリオから逆算して考えて、各ショットを最適に構成する。そのような目的主義的なアプローチに、計算力学はシフトしていく必要があると感じます。

最後に、もう少し将来の設計シミュレーションのあり方についても、社会のメガトレンドから占ってみたいと思います。1990年以前の少品種大量生産の時代は、擦り合わせ設計による性能と品質の確保、大量生産時の品質管理が重要でした。その後、共産圏とバブルの崩壊により、グローバル化が進み、マーケットは世界に広がりました。マーケットの多様性に合わせるように、多品種少量生産に適した設計技術として、シミュレーションが大いに活用されるようになり、設計期間短縮、試作レス化などが進展しました。その後は、マーケットだけでなく、モノづくりそのものがグローバルに進出し、オープンイノベーションといったアプローチも発展しました。求められる設計技術もコンカレント設計、知識共有・伝承、製品の大域的最適化といったところにシフトしてきました。今後、グローバル化は真に現地に浸透していくフェーズです。我々にとって未知のもの割合が増えていきます。外部調達も増え、シミュレーションで評価できないことが増えていく状況になります。古典的な数値解析法で評価できない対象も含めて設計評価していく融合的な計算技術、グ

ローバルに展開された製品ライフサイクルの全体をスコープにした最適設計技術、予想外の使われ方をすることを前提に品質リスクを最小限に抑える信頼設計技術などが必要になっ

てくると考えられます。計算力学に対しては、このような新たな課題に対しても、先取りして革新的な方法論を提供して欲しいと願います。



HPC環境と計算力学の相乗効果 ---進展と展望---

加藤 毅彦
エムエスシーソフトウェア株式会社

1. はじめに

計算力学部門設立時に初代部門長である矢川元基先生のもと、初代の幹事を務めさせていただいた筆者にとっても、部門設立25周年は非常に感慨深いものがあると同時に、途中から会社の経営に携わることになり、計算力学部門の発展に十分に尽くすことができなかつたことを非常に残念に思っています。

計算力学部門設立時の目標の一つに、それまで独自に発展してきた構造力学、流体力学、熱力学等の其々の力学を縦軸とすれば、計算力学として有限要素法、境界要素法、差分法等の離散化手法を用いた数値シミュレーションにより、横軸的に体系化するというものがありました。その考え方が、現在もMulti-PhysicsもしくはMulti-Discipline と呼ばれる複合領域解析として結実しつつあるのは非常に喜ばしいことです。

本稿では、筆者が直接関与してきたHPC環境の進化とそれに伴う計算力学の進展の相乗効果に関し、レビューするとともに、これからの期待と展望に関して、産業界での活用の視点から私見を述べさせていただきます。

2. NASTRANの誕生

1960年代前半に米国航空宇宙局 (NASA) において、超音速航空機と月面着陸船の設計計画が進行しつつあり、それらの機体の軽量化と高強度化のためのシミュレーション・プロジェクトが開始されました。1963年に設立されたMSC社 (MacNeal & Schwendler Corporation) は、直接剛性法による有限要素法を展開したボーイング社のM.J. Turnerらとの競争の結果、1965年にNASAとの契約によりNASTRAN (NASA STructural Analysis) システムの開発を受注し、1968年に最初のバージョンが納入されました。1971年には初の商用化構造解析ソフトウェアとしてMSC Nastranがリリースされ、有限要素法が学術的な研究レベルから製品の設計開発レベルへと大きく進化を遂げることとなりました。

このMSC Nastranが40年以上にもわたり、実質上のデファクトスタンダードとして幅広い業種で活用されているのは、構造解析用有限要素法システムとして持続的に進化を可能とする下記のようなアーキテクチャを初期段階から採用していることが要因として考えられます。

- 1) 先進的な要素技術などを柔軟に組み込むことを可能にした解析目的ごとに独立したSolutionシーケンス (SOL) 構造

- 2) 使用者が柔軟に解析機能やプロセスを拡張できる DMAP (Direct Matrix Abstraction Program)
- 3) 大規模解析や並列処理を可能とするサブストラクチャ法 (NastranではSuper Elementと呼ばれる)

1970年代前半において、有限要素法はNASAや航空宇宙産業等における設計開発時の試作実験の代用としての先端的な活用を除けば、まだ試作実験や生産過程そして出荷後におけるトラブル発生時の原因究明に利用されることが中心でした。

スーパーコンピューティング

Control Data社 (CDC) において、科学技術計算専用的高速コンピュータCDC6600 (クロック周波数10MHz)、CDC7600 (同40MHz) を設計し大成功をおさめたSeymour CrayはCDC8600 (同125MHz) の開発停止の決定を受けて、1972年に自らCray Research社を創立し、下記のような特徴のCRAY-1 (同80MHz/写真1) を1976年に完成させました。

- 1) 配線距離を最小化させるための特徴的なC型円筒形の小型な筐体と冷却機構がおさまったベンチシート (直径2.7m)
- 2) レジスタ方式を採用したベクトル・パイプラインによるSIMD (Single Instruction Multiple Data)
- 3) 64命令セットに絞り込んだRISC (Reduced Instruction Set Computer) アーキテクチャ
- 4) 演算機構と命令機構、入出力機構の分離によるフリン・ボトルネックの解消

筆者自身、スペースシャトルの主エンジン設計開発のために開発されたBOPACE (BOeing Plastic Analysis Capability for Engines) に携わった際にCRAY-1を使用し、当時の最新汎用コンピュータであるIBM370に比べ小規模問題 (約400自由度) で10倍以上、大規模問題 (約4500自由度) では100倍以上の高速性を実感し、Cray Research入社に繋がりました。



写真1 CRAY-1

1982年にはCRAY-1を高速化し、2台から4台のプロセッサ (105MHz) と共有メモリを密結合したCRAY X-MPが完成

するとともに、1984年から1990年にかけて汎用コンピュータにベクトル・パイプライン機能を付加したSシリーズ（日立製作所）、VPシリーズ（富士通）、SXシリーズ（NEC）、VFシリーズ（IBM）などの個性的なシステムが登場し、スーパーコンピューティング時代が到来しました。

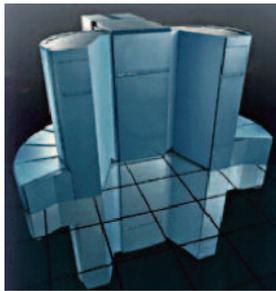


写真2 CRAY Y-MP

上述のBOPACEにおいて、複数のサブストラクチャをCRAY X-MPの複数プロセッサに分散し並列計算による高速化を試行し、その手法をMSC NastranのSuper Elementにも適用し演算時間の短縮化を実現しました。その延長線上で現在、有限要素法の並列処理の主流となっている領域分割法（DDM: Domain Decomposition Method）が開発され、矢川元基先生、吉村忍先生らと8プロセッサ構成のCRAY Y-MP'（167MHz：写真2）を2台、ネットワークで接続し1990年度のGFLOPS賞（1.744GFLOPS）を受賞しています。また前年度にも三好俊郎先生、高野直樹先生らとCRAY Y-MPの8プロセッサにおける内積型並列スカイライン法によりGFLOPS賞（1.276GFLOPS）を受賞しました。

1980年代後半には、Belytschkoの次数低減積分シエル要素を採用した陽解法有

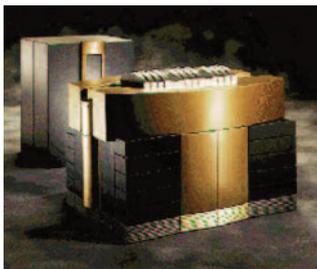


写真3 CRAY T90

限要素法プログラムPam-CrashとDyna3D（現LS-Dyna）が自動車の衝突解析に適用され、産業界における計算力学の活用はスーパーコンピュータとの相乗効果により、設計開発における設計確認（Design Verification）システム

として定着しました。1990年代前半には、複数の設計案から有力な設計候補を選択するための解析設計（Analytical Design）もしくは仮想試作（Virtual Prototyping）システムとして進化しました。1995年にはCray Research社の最後のベクトル型スーパーコンピュータであるCRAY T90（450MHz、最大32プロセッサ構成；写真3）が登場し、単一プロセッサによる大規模構造解析の演算性能ではピークを迎えました。また同時にSeymour Crayはガリウムヒ素半導体を利用したCRAY-3（500MHz、最大16プロセッサ構成；写真4）及びCRAY-4（1GHz、最大64プロセッサ構成）を開発していましたが商品化には至りませんでした。

HPCと確率論的複合領域最適設計

数多くの設計案を大規模な並列コンピュータ上で実験計画

法や遺伝的アルゴリズムにより同時にパラメータスタディを行うCAO（Computer Aided Optimization）が1994年にGeneral Electric（GE）社から分離独立したEngineous Software社のiSIGHT等により実現されました。1990年代末にはマイクロプロセッサにスーパーコンピュータで採用された高速化技術が部分的に適用されクロック周波数もGHzレベルに到達し、スカラ型マイクロプロセッサによる大規模並列処理（MPP）中心のHPC（High Performance Computing）への計算環境の著しい変革がCAOを一層加速させました。

2000年代には、各種製造業における設計/生産拠点と部品のサプライチェーンの多国化が進み、少品種多量生産から、製品の外観、性能、機能、品質、コスト、TTM（Time to Market）に関する消費者の多様化に伴った多品種少量生産へと大きな変化を遂げています。そのような環境においては、強度/振動/衝撃/機構/熱/流体/音響/電磁場/耐久性/疲労/システム制御等の複数の領域にわたった設計指標間の相互作用をモンテカルロ法等により確率論的に検討し、同時満足化させる複合領域最適化（MDO: Multi-Disciplinary Design Optimization）を設計開発プロセスの上流工程（概念設計段階）から下流工程（生産/量産段階）まで連携させて適用するシステム環境の構築が求められています。

最新のHPCシステムは、プロセッサ内のコア数とシステム全体のノード数が増大傾向にあり、クロック周波数が4GHzに到達しようとしており、SIMD拡張命令によるベクトル処理も組み込まれつつあります。またSIMD型アーキテクチャを画像処理に適用したGPUを浮動小数点演算加速用のGPGPU（General Purpose Computing on Graphic Processor Unit）として活用できるシステムも多く稼働しており、コンピュータ資源の視点からも設計開発プロセス全体に対する複合領域最適化の適用が可能になりつつあります。

これからの展望---"モノづくり"から"コト創り"へ

これからのHPC環境はクラウドも含め、関連する組織間の超高速ネットワークが中核となり、相関性のあるシミュレーションモデルを設計開発情報の知識ベースとして共有化し、ネットワーク上の複数のコンピュータで有機的に複合領域最適化を実行する協調的な環境へと進化すると考えられます。

そして材料シミュレーション技術と材料データベースの進展により、従来の設計開発プロセスにおいて複数の候補に制限されてきた材料物性値を、製品や部品の設計指標を達成するための設計変数として扱うことが可能になります。設計開発プロセスの一環として、材料物性値、材料の組成や生産方法のマルチスケール・シミュレーションを素材産業も含めた関連組織間の協調ネットワークに組み込み、Simulation Based Designをネットワーク上で多方向化することにより、CADと現場力で製品/部品を設計/生産する従来の"モノづくり"から、計算力学を駆使して性能/品質/機能/安全性/環境性/コスト等の指標を確率論的に設計/創造する"コト創り"へと進化させ、日本の製造業の国際的競争力が復活することを期待したいと思います。



写真4 Seymour CrayとCRAY-3



汎用FEMがもたらしたもの

小林 卓哉
株式会社メカニカルデザイン 代表取締役

1. はじめに

チンパンジーは道具を使うことのできる動物である。枝を得れば孔を探り、筆をとれば絵を描くことができる。しかし枝の長短を試みたり、筆の腰を試すには至らないのが野生の本来である。道具を使うことと、その比較を試みるの間には、非常に大きな隔りがある。試すという動作は、知性の産物に他ならない。我々をロッククライミングの岩場に連れて行けば、ザイルを何度も引張り、身の安全を試みるだろう。知性は我々にこのような試行の繰り返しを要求するが、同時に下手な知識があるほど、ザイルを試す意欲はむしろ失われるのが通常である。試みることは知性の産物ではあるが、単にそれだけでは経験と度胸の前に敗れることが多い。

シミュレーションという技術は、複雑系の一部をより簡単なシステムで代替させることによって、物事の本質を見きわめる試みである。いきなりザイルに生命を預けることができないから試みに引いてみるのである。単純な系、あるいは極端に複雑な系においてシミュレーションが現物主義に負けてしまうのは、現物に代わる有効な代替品を見出すことができないからである。

現象の代替品を探そうとすると、古典的な力学がそのまま役に立つ場面は少ない。しかし1950年代から60年代にかけて、FEMという新しい思考法がそこにもたらされた。この方法の特徴は工学を断片に分解し、それをゆるやかに、しかし目に見えるかたちで再統合することにある。特に商用のFEMは、散在しがちな現代工学のカケラを丹念に収集し、ライブラリとして整えることを目的に開発が続けられてきた。その足取りは既に50年になる。その間、多くのエンジニアがこれにすがり、アメの破片を口に含むようにして技術のはざまを浮上していった。浮上のあいだ、彼らは自分が工学の一員であることを改めて実感したはずである。この実感の数が、計算工学という学問のバックグラウンドを多様なものにしてきた。

忘れられがちなことであるが、実験もまたシミュレーションの一種である。ニュートンが言うExperimentum crucisの時代、これを「決定的実験」と訳してきたこれまでの世界観とは、明らかに異なる立場に現代のわれわれは立っている。

2. シミュレーションから計算へ

Fig.1を見てみよう。1950年代から70年代にかけては古典的な応用力学の完成

の時期に一致する。工学の手法が工業規格として権威化され、基幹産業を成長させた。国内では高度経済成長期と呼ばれた時代である。初めてのJIS規格は1949年に制定されている。設計の標準化という概念が国内で成立したのはこの時期である。70年代にはIBMに代表される大型計算機が実用化された。1983年発行の広辞苑第三版には、シミュレーションという用語が初めて掲載され、「システムの挙動を、これとほぼ同じ法則に支配される他のシステムによって模擬すること」という定義が明確に示された。原子力産業を中心に、（規格ではない）解析による設計・Design by Analysisという概念が提唱された時期である。

80年代の後半には、UNIX環境で作動するEWSが市場に投入された。接触や連成などアカデミックを志向した独自性を競う時代であった。UNIX機がもたらしたのは単なる計算の高速化だけではない。グラフィックスによる可視化技術が提供された。同時期にMacが現れたことを思うと、可視化は単に視野の問題を解決したにとどまらず、計算機の運用そのものを変化させたと理解できる。例えば塑性、超弾性、粘弾性といった非弾性構成則の枠組みは、70年代に汎用FEMが登場した当初から既に搭載されていた。しかし非弾性に派生する大変形や接触の問題は、可視化の実現によって初めて解析可能になったとって過言ではない。非線形最適化による材料定数の同定もしかりである。

標準化という枠組みを越え、製品をシステムとして見る方向に設計が変化していったのはこの時期ではないだろうか。CAEという用語が70年代後半に現れたのも、このような設計思想の変化を背景にしている。それから四半世紀たった今日、計算機の高速度化にともなって計算量の多寡を問うことはその重要性を失い、むしろ圧倒的な計算量を前面に押し出し

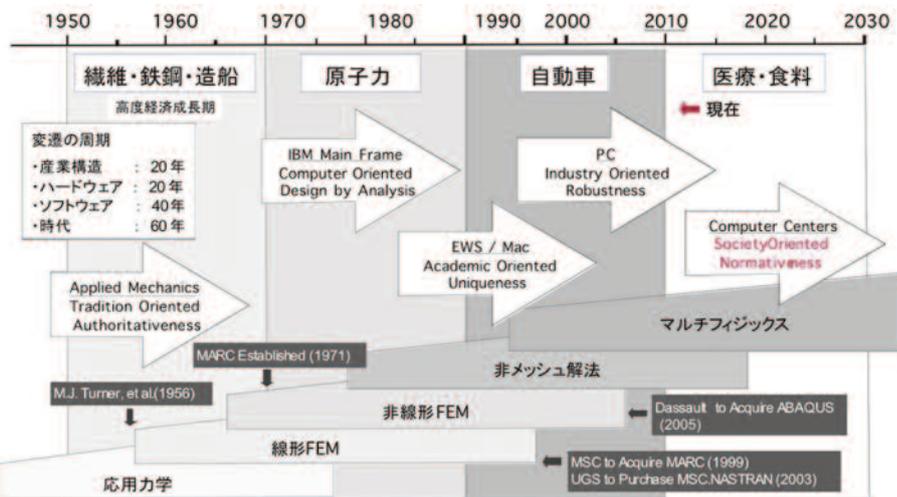


Fig.1 計算機環境の変遷とシミュレーション

て設計を行うという新しい思潮が現れても不思議ではない。エミュレーションとも呼ぶべき技術である。

Fig.1はまた、あらゆるものには耐用年数があることを示している。世代交代の周期は、産業構造20年、ハードウェア20年、ソフトウェア40年と見ることが出来る。たとえば線形FEMは50年代に開発されたが、1999年にMSC社が非線形なプロダクトであるMARCをラインアップに加えたことをもって区切りを迎えた。また非線形FEMは70年代初頭に始まり、現在は全盛の時期にある。しかし単体のソルバーとしての時代は、2005年にダッソー社がABAQUS社を買収した時点において完結したと考えられる。

3. ベンチマークの役割とその限界

ベンチマークという用語は、本来、測量技術の分野の用語である。位置や高さに関して基準となる定点を示す。たとえば「特定の点をベンチマークポイントに定め、それを基準として構造の配置を決める。」というような使い方をする。ここから派生して計算の分野では、システムを比較評価するための標準問題に対してベンチマークという用語が使われるようになってきた。CAEに関しても、マニュアルの例題、理論解との比較、あるいはユーザ会などで示される事例などは、総じてこのベンチマーク的な発想にしがっている。ベストプラクティスの提供といえればわかりやすい。

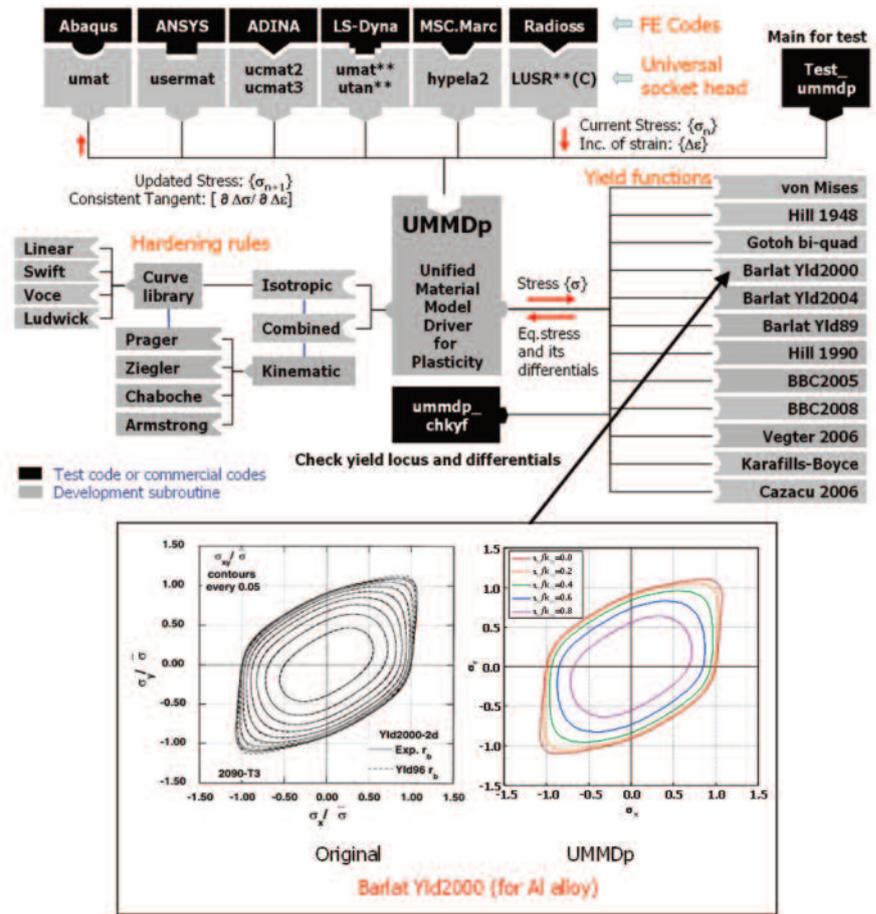


Fig.2 異方性弾塑性構成則 共用サブルーチンの開発 (2011年、非線形CAE協会・材料モデリング分科会)

たとえばTable 1は、1998年に本会から発刊された計算力学ハンドブックからの抜粋である。汎用FEMを共通の枠組みのなかで比較し、情報発信することに当時の価値があったことがわかる。いわゆる「ケーススタディ」と呼ばれる学習の

Table 1 市販のソルバーに関する調査結果 (1998年、JSME)

解析ソフトウェア名 開発社(国名) 国内取扱会社	開発年 開発言語	可能な解析の種類	連立一次方程式解法 (直接法/反復法)	固有値解法 (MK型/MCK型)	時間積分法	プリ・ポストとの接続	対応機種	その他機能等
ADINA ADINA R&D Inc.(USA) (株)電通国際情報サービス	10年 FORTRAN	線形静解析 幾何学的非線形解析 材料非線形解析 固有値解析 座屈固有値解析 動解析(過渡応答解析) 衝突解析 破壊力学解析 熱流体と構造物の連成解析	直接・スカイライン法 反復・前処理付共役こう配法 (不完全コレレスキー分解)	MK・サブスペース法 デターミナント サーチ法 MCK:ランチョス法	ニューマークのβ法, ウィルソンのθ法, 中央差分	プリ: ADINA-IN AUI, I-DEAS, PATRAN, Pro/Engineer ポスト: ADINA-IN AUI, I-DEAS, PATRAN, Pro/Engineer	SUN SPARCstation, SGI IRIS IRIX, HP 9000/700, IBM RS 6000, DEC OSF/1, Windows NT, CRAY, Hitachi(HITAC M. S), Fujitsu	
ANSYS ANSYS Inc.(USA) サイバネットシステム(株)	25年 FORTRAN	線形静解析 幾何学的非線形解析 材料非線形解析 固有値解析 座屈固有値解析 動解析(過渡応答解析) 衝突解析 破壊力学解析, 音響, 圧電, 破壊, 電磁, 流体	直接・ウェーブフロント法 反復・共役こう配法 前処理付共役こう配法	MK・ハウスホルダー法 サブスペース法 MCK:ランチョス法	ニューマークのβ法, クラウンニコルソン法, 後退オイラー法	プリ: ANSYS, I-DEAS, PATRAN, Pro/Engineer ポスト: ANSYS, I-DEAS, PATRAN, Pro/Engineer	SUN SPARCstation, SGI IRIS IRIX, HP 9000/700, IBM RS 6000, DecStation Ultrix, DEX VAX VMS, DEC OSF/1, Windows NT, CRAY, CONVEX, VP.	
MSC/ABAQUS, ABAQUS HKS(USA) 日本 MSC(株) Hibbit Karlssoon & Sorensen Inc.	17年 FORTRAN	線形静解析 幾何学的非線形解析 材料非線形解析 固有値解析 座屈固有値解析 動解析(過渡応答解析) 衝突解析, 破壊力学解析, 音響解析, 音圧構造連成解析, 伝熱解析	直接・スカイライン法, ウェーブフロント法 反復・共役こう配法	MK・ハウスホルダー法 サブスペース法 MCK:ランチョス法	ニューマークのβ法, 中央差分	プリ: MSC/PATRAN ポスト: ABAQUS/POST, MSC/PATRAN	Integration SUN SPARCstation, SGI IRIS IRIX, HP 9000/700, IBM RS 6000 DecStation Ultrix, DEC VAX VMS, CRAY, CONVEX, VP, SX, HITACHI S, Dec Alpha OSF1, NEC EWS	

手法は、この種のベンチマークを囲んで解釈を与え、何らかの結論をみちびく試みである。しかし複雑化と飽和が進んだ今日、われわれの周囲の現実、このような取り組みを容易にゆるさない。たとえばエクセルやパワーポイントといったソフトウェアは、結論よりはむしろ過程を記録・保存できる点において妙味があることを思えばよい。

Fig.2は、特定非営利活動法人・非線形CAE協会で行われている材料モデリングに関する活動の一例である。この活動には企業ユーザを中心に、アカデミック、ソフトウェアベンダーから約50名が参画し、非弾性構成則に関するサブルーチンを複数の汎用FEMのなかで共用しようという試みである。中核にUMMDと呼ばれる共通サブルーチンを置き、各種の構成則、各種のソルバーを横断的に網羅することを目的としている。当然、統合をはばむ個々の事情があるが、単に技術的な問題の解決ではなく、各社の思惑を超え、汎用FEMの運用に関する国内の共通認識を高めるのが動機的な目的である。過去3年間で異方性弾塑性に関する作業を終え、2年後を目標に超粘弾性ダメージモデルの構築を進めている。参加は自由であるので、気軽に問い合わせをいただきたい。

今日のビジネススクールでは、結論を指向した「ケースス

タディ」に代えて、「ケースメソッド」という問題発見型の教育が行われている。これは複雑系に対する当面の意志決定を目的とし、その能力をもった人材を討議によって育成する教育法である。上記Fig.2の活動はこれに近い。結論が存在することを前提に情報を提供する活動とは、明らかに異なる視点に立つものである。

Fig.1に示すように、CAEに限らずわれわれのあらゆる活動は、社会的な規範 Society Oriented Normativeness を新たな権威として受け入れる時代を迎えようとしている。ベンチマークという手法にあきたらず、たとえばASMEがV&Vを提唱するのは、その好例であろう。設計の向上、利益率の向上、キャリアの向上など、シミュレーションの役割はさまざま考えられる。しかし今日もっとも求められるのは、次のことである。

“Improve our society, because fast is never fast enough.”*

* Dale Berry, 'Customer's Use of Realistic Simulation to Improve Our Society', 2009 SIMULIA Customer Conference, UK, 2009.



計算力学と自分探しの旅

下川 智嗣

金沢大学 理工研究域 機械工学系（自然システム科学専攻）

計算力学部門は今年で25周年を迎えます。私は、1997年に卒研配属されて以来（大阪大学 北川浩研究室・マイクロ動力学講座）、計算力学分野に15年間身を置いています。つまり、研究者としての私は、計算力学分野で産声をあげ、そこで育てて頂いたこととなります。ここでは、一人の若手研究者が計算力学にどのように関わり、成長させて頂いてきたかを述べさせて頂き、これまでの自分自身の経験を通じて、この分野に対する思いを述べさせて頂こうと思います。

当時の研究室は、原子系の分野を精力的に開拓しているときであり⁽¹⁾⁽²⁾、有限変形理論、転位動力学法、分子動力学法、第一原理を幅広く取り扱う総合百貨店のような研究室でした。私の研究テーマは、分子動力学法を用いて結晶性材料の非弾性挙動を研究することでした。初めてこの分野の講演会に参加したのは、1998年修士1年のときでした（第11回計算力学講演会）。学生だった当時、自分の研究を行うことで精一杯だったため、他の研究者の発表を理解する能力が備わっていませんでしたが、異なるスケールを専門とする様々な研究者から頂く質問の意図を理解することが、原子系の計算の存在意義を模索する絶好の機会となりました。つまり、この講演会を通じて原子系に身を置く者としての自己の確立を行っていたと思います。

その後、博士（工学）を取得し、2002年から半年間異国の地（デンマーク工科大学）で修行を行いました。その研

究組織や学生・ポストドクのアクティビティに圧倒されましたが、研究の楽しさを再認識することができました。ここでは、原子系の計算を効率よく行うために開発された準連続体法（Quasicontinuum法）に関するテーマを与えられました。その手法は、原子系の解像度が不要ない領域を連続体領域で表現するのですが、原子系と連続体系の力学場の計算方法の違いから、その結合界面に物理的に意味のない力が生じてしまう問題がありました。このスケールの異なる領域の界面を滑らかに結合できる力学モデルの構築が研究の目的でした。余談ではありますが、その当時、帰国後に婚約者と結婚するために、両家の意見調整を電子メールを通じて行っていました。文化の異なる両家に挟まれていたこのときの自分の立場は、まさに原子系と連続体系の界面領域に存在している状況と同じであると気づき、「この力学問題の解決なくして、円満な結婚（式）なし！」という（不純な）意気込みで取り組みました。このようなモチベーションのお陰で短い期間でしたが、何とか一つの解決策を導き出すことができました⁽³⁾。もちろん、計算力学講演会で原子系と連続体系の関係について色々な思いを巡らせていなければ、与えられた研究テーマを断っていたかもしれません。

帰国後、2003年から現在の所属に移りました。所属した研究室の上司は全く別の分野であったので、多少の（わがままの延長上にある）孤立感を感じていました。計力講演会に

引き続き参加するのですが、異国の地で感じたアクティビティと現状の孤立感から、自分の存在感に疑問を持ち始めました。具体的には、実際の材料を取り扱っている実験系の研究者に、私の原子系のシミュレーション結果がどのように映るのか？ という疑問です。欧米では、実験系と計算系が共著の論文を出すことが通常のようにありますが、当時の私の知る限り（狭い情報ではありますが）国内ではあまりそのような傾向がありませんでした。そのため、2005年から実験系が多く所属している別の分野（日本金属学会など）に出稽古に出かけるようになりました。そこでは、計算力学の分野では当たり前の言葉が通用しないことが多かったです。そのため、とにかく丁寧に説明することを心がけました。秘めたる目的は、私の計算結果がどのように映るかを知りたいことなので、それ以前に心を閉ざされると意味がないからです。参加した当初は、予想もしなかった、かなり厳しいことも言われましたが、しつこく参加することで、実験系の人が計算に抱く疑問や期待がうっすらと理解できるようになってきました。また、実験系の研究者と固体材料の力学応答に対して議論させて頂き、計算結果を通じて考えた私の主張に興味を持って頂いたとき、とても嬉しかったことを記憶しています。それは、実験を全くしたことがない計算力学の分野で育った私でも、実験系の研究者にとって意味のある存在であると認めて頂いたと実感できたからです。計算力学（シミュレーション）を通じて構築された結晶性材料の塑性変形の知識が多少なりとも通用したということです。

少し補足致しますが、物理現象を理解するためにはモデル化をする必要があります。北川先生は、“私たちが知りたいのは、見えない、感じるができない物体の内部で何が起きているか、具体的には、応力とひずみはどのような分布をしているのか、それが未来に向かってどのように変化しているのかといったことです。”と述べられており⁽¹⁾、これを実現するために計算機内の原子に息吹を吹き込み、個々の原子の運動を追跡する手法を選択されたことに繋がります。個々の原子の運動を追跡するためには、その熱振動を数値的に取り扱う必要があるので、分子動力学シミュレーションのけるタイムステップは数フェムト秒（ 10^{-15} 秒）となります。そのため、原理的には、個々の原子の運動に基づき材料の非弾性応答が得られるのですが、取り扱える時間と空間の制約により、材料の変形プロセスを解析したい場合には、実際の実験条件よりもかなり厳しい解析条件で計算することになります（これを克服する試みが近年盛んに行われています⁽⁴⁾）。例えば、引張変形を実施する場合、分子動力学シミュレーションで実施されるひずみ速度は 10^7 1/sから 10^9 1/s程度となってしまいます。実際の実験とは 10^{10} 程度の違いがあることとなります。このような浮き世離れた解析条件

で得られる結果は、一体何を意味しているのでしょうか？

ここで、一つ例を示させて頂きます。図1に示すように、結晶粒径が5 nmから80 nmまでのアルミニウム多結晶体を計算機内に構築し、その引張変形シミュレーションを実施しました。原子の色は、その原子の隣接原子の配置により決定しており、薄い色（灰色）がfcc構造、濃い色（青、赤色）がfcc構造以外の欠陥構造となります。図1(a)は、粒径80 nmの粒内を運動している転位が粒界と相互作用を示しています。このときの流動応力（ひずみ0.1~0.2の間の平均値）は、図1(b)に示す通りであり、実際の実験で得られている粒径が約300 nmのアルミニウムの降伏応力が200 MPa程度ですので、それよりもかなり過大評価していることとなります。これは、解析モデルが平面ひずみ状態であることや（奥行き方向のモデル寸法が小さく周期境界条件を適用しているため、転位線の形状変化に幾何学的な拘束が作用している）、ひずみ速度が大きいことが原因として上げられます。そのため、塑性流動の抵抗に対して定量的な比較ができないことに繋がります。しかしながら、図1(b)に示す流動応力値と粒径の平方根の逆数の傾き（Hall-Petch係数）は、実験結果とよく対応していることを確認することができます。この傾きは、格子欠陥の相互作用（特に、転位と粒界の相互作用）に強く影響を受けていると考えられるので、実際の材料中で生じている強度の粒径依存性の発現メカニズムに対して、計算機内で生じている原子の振る舞いは本質的な素過程を含んでいることを暗示していると期待できます。また、結晶粒径をさらに小さくしていくと、結晶粒微細化に伴う軟化現象が確認できますが（逆Hall-Petchの関係）、そのときの臨界粒径も実験で報告されているものによく対応していることが大変興味深いと思います。このように、原子シミュレーションで得られる結果と実際の実験で確認されている現象がどのような関係にあるかを考えることが、実験系の研究者との共有感を構築することに繋がったと思います。

ちょうどこのころ、科研費で構造用材料に関する特定領域

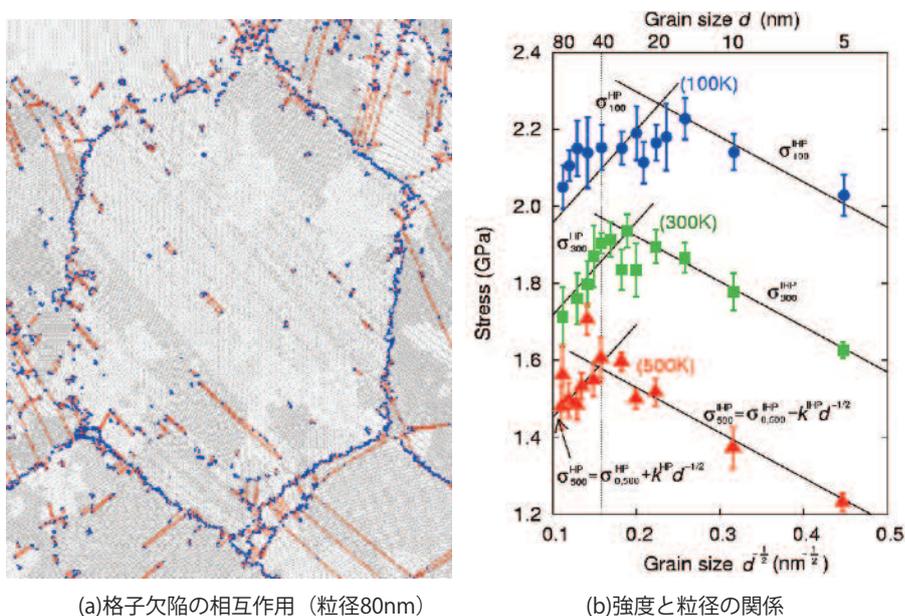


図1：原子シミュレーションにより得られたAlナノ多結晶体の力学特性と変形機構⁽⁵⁾

(「巨大ひずみ」2006年～2008年)や新学術領域(「バルクナノメタル」2010年～2014年)のプロジェクトが立ち上がり、幸いにもそのメンバーに加えて頂き、色々な実験系の方々と密に議論できる機会が増えました。実験系の研究者と議論を進めていくと、新しい内部組織を持つ材料に関わらず、既に実用化されている材料についても、実は内部で何が生じているか(格子欠陥がどのように振る舞っているか)を正確に理解できている研究者はいないということに気づきました。言い過ぎているかもしれませんが、各研究者はそれぞれの武器を用いて、直接的・間接的に格子欠陥の振る舞いの断片のみを見ていることにすぎないからです。それらを繋ぎ合わせて、実際の力学応答を支配している変形機構を構築していくのですが、その過程において、計算力学は非常に重要な存在感を示せると改めて実感することができました。また共通語には十分確立された理論があり、目指している目的は同じであるため、コミュニケーションは十分に取れると実感しました。実験系と計算系がお互いに補い合う形で進めていくことが、今後の更なる発展には非常に重要であると感じています。またこの連携を通じて、新しい力学モデルの開発に対する強い駆動力が生まれると思いました。

上記に付け加えて、私の計算力学に基づく基礎研究の延長上に、ものづくりの現場が存在しているのかという不安が、研究当初からありました。先ほど述べさせて頂いたように、実験系の先生方とコミュニケーションを取ることができるようになったので⁶⁾、それが自信に繋がり、つぎに産業界との連携に挑戦してみようと思いました(JST産学共創基礎基盤研究「ヘテロ構造制御」2010年～2015年(予定))。個人的な考えになりますが、学者同士のディスカッションでは、純粋さを追い求めるために、複雑な現実から目を背けることを許容してしまう可能性があると感じています。しかし、実際の物作りをされている方々のフィルターを通じて、計算力学に基づく研究を見てもらい、厳しく議論して頂ける機会は、私の狭い研究視野方向を、全く異なる方向に仕向ける力を与えてくれるのではないかと思います。産業界には膨大な経験、知識と情報が蓄積されているので、その研究者の方と議論させて頂くといつも感じるのは、こちらが提案するアイデアは既に新規のものではなく、私は勝手に産業界の手のひらで踊っているだけではないかという不安感です。現在は、計算力学に基づくアイデアがどのように現実のもの

のづくりの世界に貢献できるかを模索しているところです。産業界にとって価値のある存在になるためには、十分に深い学問知識が必要であり、それに基づくユニークなアイデア(力学モデル)を創出する能力が必要であると現在思っています。また、多くを仮定したモデルを用いる計算機シミュレーションを誤解なく伝える表現能力の向上も産業界との意思疎通には必要不可欠であると実感しています。

以上のように、計算力学分野に身を置き、成長させて頂いている一人の若手研究者の素直な思いを述べさせて頂きました。先輩研究者達が築き上げてきた計算力学部門を、今後益々社会的に重要な分野になるように、少しでも貢献できるように努力して参ります。そのためにも、計算力学部門を引き続き次のような(主観的かつ抽象的ではございますが)魅力ある部門になるように頑張っていこうと思えます。

- ◆ある物理現象を理解するために作り込んだ(考え込んだ)力学モデルを披露する場所であり、お互いに力学センスを磨く場所であること。
- ◆また、その力学モデルから生じる結果の解釈が、実験系の研究者にとっても魅力的であり、この場所が実験系の人達によって賑わうこと。
- ◆さらには、純粋さを追求するのみではなく、社会貢献を常に考え、産業界にとっても有益な情報と知識を提供できる場所であること。

まだまだ幼稚な考えの範疇ではあると思いますが、今後も計算力学に身を置く私自身の存在意義を探求して行きます。今後ともご指導、ご鞭撻を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

参考文献

- (1) 北川浩、日本機械学会計算力学部門ニュースレター、No. 16.
- (2) 中谷彰宏、日本機械学会計算力学部門ニュースレター、No. 42.
- (3) T. Shimokawa and J. Schiøtz, et. al., Phys. Rev. B., 69-21, (2004), 213104(1-10).
- (4) 例えば、A. Ishii and S. Ogata, et. al., Phys. Rev. B., 85-6, (2012), 064303(1-7).
- (5) T. Shimokawa, A. Nakatani and H. Kitagawa., Phys. Rev. B., 71-22, (2005), 224110(1-8).
- (6) T. Shimokawa and K. Higashida, et. al., Phys. Rev. B., 83-21, (2011), 214113(1-13).





連続体マルチスケール解析

内田 真
岡山大学 大学院 自然科学研究科

はじめに この度、計算力学部門が設立25周年を迎えたということで、記念特集への執筆の機会をいただき光栄です。私は、元神戸大学・富田佳宏教授のご指導により、連続体力学・固体力学・計算力学をみっちり鍛えていただき、現在は岡山大学にて関連する分野の研究・教育を続けております。計算力学部門では、講演会などを通じてたくさんの先生方に貴重なご助言をいただき、大変お世話になっております。今後も当部門がますます発展していくことを心よりお祈り申し上げます。

さて、私が計算力学分野の研究に携わることになった当初（2000年ごろ）、部門の中で連続体・固体力学に関する分野では、「マルチスケール」というキーワードのもと、転位の運動に基づいた寸法依存結晶塑性や、均質化法を用いた応用研究が活発に議論されていたのを記憶しています。学生だった私にとって、当時最先端の研究内容はとても難しいものでしたが、複雑怪奇な材料の変形機構に対する巧妙なモデリングや効果的なアプローチはとても斬新で、現在の私の研究内容にも大きく影響を与えています。

一方、ほぼ同様な時期に、コンピューターの処理能力の劇的な向上に伴い、分子動力学や第一原理計算といった極めて微小なスケールから材料の変形を紐解く計算技術が大きく展開していきました。また、その少し後には、フェーズフィールド法等を応用することで、材料の組織進展を予測するための理論体系が構築され、瞬く間に当部門における一つの大きな流れを形成しました。連続体力学とこれらを合わせた3分野は、計算力学講演会の発表件数の多さからもわかるように、部門を代表する重要な分野だと言えます。今後の計算力学分門の発展には、これらの分野の関連性を一層深めることで、マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションによる材料評価手法を確立していくことがとても重要な課題であると感じています。

分野を越えて連携を深めるためには、互いの分野のアプローチを理解することがとても重要です。しかしながら着実に進歩していく各分野の研究内容をフォローするのは大変です。例えば固体力学の分野の研究に取り組むためには、有限要素法、弾粘塑性構成式、大変形理論、結晶塑性理論、均質化法などに精通していなければなりません。特に均質化法は、連続体マルチスケール問題を解くための極めて有効・強力なツールですが、手法の難しさやコーディングの複雑さもあって、実用レベルに達するのに時間が掛かってしまいます。連続体のマルチスケール解析法を学ぶ上で、たくさんの論文や良著がありますが、今回、この場をお借りして、材料力学の範囲で説明する「連続体マルチスケール解析の基礎」

と、有限要素法の使用を前提とした「マトリクス均質化法」について解説したいと思います。

連続体マルチスケール解析の基礎 不均質な微視構造を持つ巨視構造体の数値解析をするためには、2つのスケールの不均一変形を同時に解析しなければなりません。このとき、最も重要なのは、「**微視領域のひずみを、巨視領域のひずみの関数で表すこと**」です。微視領域のひずみがわかれば、構成式を使って微視領域の応力を求めます。得られた応力を微視領域で体積平均することで巨視領域の応力が得られます。結果的に、巨視領域のひずみと応力の関係、すなわち巨視的な構成式を得ることができます。

さて、最も簡単な問題として、図1(a)に示すような材料AとBが負荷方向に平行に存在する2相材の1次元問題を考えます。簡単のため、両材料を弾性体とします。この場合、両相のひずみ ε^A 、 ε^B と巨視的ひずみ $\bar{\varepsilon}$ は一致しますので、

$$\varepsilon^A = \varepsilon^B = \bar{\varepsilon} \tag{1}$$

となります。これが最も単純な微視・巨視ひずみの関係式と言えます。両相の体積分率を f^A 、 f^B とすると、巨視応力 $\bar{\sigma}$ は

$$\bar{\sigma} = f^A \sigma^A + f^B \sigma^B = (f^A E^A + f^B E^B) \bar{\varepsilon} \tag{2}$$

となりますので、均質化された弾性係数 \bar{E} は

$$\bar{E} = f^A E^A + f^B E^B \tag{3}$$

です。次に、(b)について考えます。応力の釣り合いから、

$$\sigma^A = \sigma^B = \bar{\sigma} \tag{4}$$

上式とひずみに関する平均化則

$$\bar{\varepsilon} = f^A \varepsilon^A + f^B \varepsilon^B \tag{5}$$

を用いると、各相のひずみは次式で与えられます。

$$\varepsilon^A = \frac{E^B}{f^B E^A + f^A E^B} \bar{\varepsilon}, \quad \varepsilon^B = \frac{E^A}{f^B E^A + f^A E^B} \bar{\varepsilon} \tag{6}$$

これが(b)に対する微視・巨視ひずみの関係式です。式(2)と同様に計算すると、均質化された弾性係数は次式となります。

$$\bar{E} = \frac{E^A E^B}{f^B E^A + f^A E^B} \tag{7}$$

ただし、 $f^A + f^B = 1$ です。

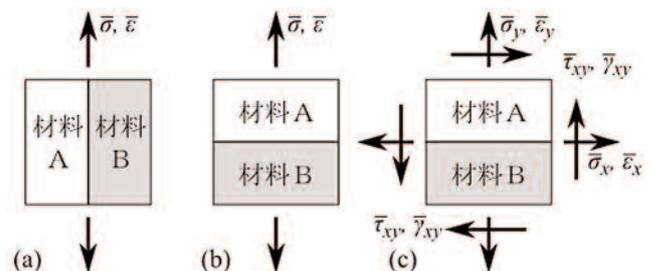


図1 2相体モデル
(a)並列モデル, (b)直列モデル, (c)2次元モデル

続いて、(c)に示す2次元状態に一般化します。各相の構成式は、次式で与えられるとします。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x^n \\ \sigma_y^n \\ \tau_{xy}^n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11}^n & D_{12}^n & 0 \\ D_{12}^n & D_{22}^n & 0 \\ 0 & 0 & D_{33}^n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^n \\ \varepsilon_y^n \\ \gamma_{xy}^n \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ただし、 Π は相を判別する指標 ($\Pi=A, B$) です。いま、(c)に示す2相が縦横無限に広がっている状態 (2相積層構造) を考えると、ひずみの連続性と応力の釣り合い条件より、下記のような条件が与えられます。

$$\varepsilon_x^A = \varepsilon_x^B = \bar{\varepsilon}_x \quad (9)$$

$$\sigma_y^A = \sigma_y^B = \bar{\sigma}_y \quad (10)$$

$$\tau_{xy}^A = \tau_{xy}^B = \bar{\tau}_{xy} \quad (11)$$

式(8)、(9)、および(10)から、次式が得られます。

$$\varepsilon_y^A = \frac{1}{D_{22}^A} \{ (D_{12}^B - D_{12}^A) \bar{\varepsilon}_x + D_{22}^B \bar{\varepsilon}_y \} \quad (12)$$

上式をy方向のひずみの平均化則に代入して整理すると、次式が得られます。

$$\varepsilon_y^B = \frac{f^A(D_{12}^A - D_{12}^B)}{f^A D_{22}^A + f^B D_{22}^B} \bar{\varepsilon}_x + \frac{D_{22}^A}{f^A D_{22}^A + f^B D_{22}^B} \bar{\varepsilon}_y \quad (13)$$

同様に、 ε_x^A 、 γ_{xy}^A 、および γ_{xy}^B について求めると、2相積層材に対する微視・巨視ひずみの関係式が次式で与えられます。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^n \\ \varepsilon_y^n \\ \gamma_{xy}^n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ Q_{21}^n & Q_{22}^n & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33}^n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\varepsilon}_x \\ \bar{\varepsilon}_y \\ \bar{\gamma}_{xy} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

ただし、

$$\begin{cases} Q_{21}^n = f^{\theta} (D_{12}^{\theta} - D_{12}^n) / (f^n D_{22}^{\theta} + f^{\theta} D_{22}^n), \\ Q_{22}^n = D_{22}^{\theta} / (f^n D_{22}^{\theta} + f^{\theta} D_{22}^n), \\ Q_{33}^n = D_{33}^{\theta} / (f^n D_{33}^{\theta} + f^{\theta} D_{33}^n) \end{cases}$$

ここで、 θ は Π ではない方の相を示しています。最終的に、2相積層材の均質化弾性マトリクス $\bar{\mathbf{D}}$ は次式となります。

$$\bar{\mathbf{D}} = f^A \begin{bmatrix} D_{11}^A + D_{12}^A Q_{21}^A & D_{12}^A Q_{22}^A & 0 \\ D_{12}^A + D_{22}^A Q_{21}^A & D_{22}^A Q_{22}^A & 0 \\ 0 & 0 & D_{33}^A Q_{33}^A \end{bmatrix} + f^B \begin{bmatrix} D_{11}^B + D_{12}^B Q_{21}^B & D_{12}^B Q_{22}^B & 0 \\ D_{12}^B + D_{22}^B Q_{21}^B & D_{22}^B Q_{22}^B & 0 \\ 0 & 0 & D_{33}^B Q_{33}^B \end{bmatrix} \quad (15)$$

積層方向が基準座標と一致していなければ、上記のマトリクスを回転させることで、任意方向の積層体の弾性マトリクスを計算することができます。式は複雑になりますが、3次元大変形弾粘塑性体の積層材に対する構成式を定式化することも可能です (内田ら、機論A77(2011), 902)。以上の流れからわかるように、微視・巨視ひずみの関係式 (式(1)、(6)、(14)) さえ得られれば、後はほぼ同様な流れで巨視的構成式を求めることができます。

マトリクス均質化法 前節では、材料力学の範囲で説明できる、極めて単純なマルチスケール問題を例示しました。それでは、任意の微視構造を有する材料に対して、微視・巨視ひずみの関係式を得るにはどうしたら良いのでしょうか。不均一な構造の変位分布を得るための手法として、有限要素法が広く普及しています。以降の説明では、有限要素剛性方程式に基づいて微視・巨視問題を解く、マトリクス均質化法を説

明します。

まず、微視構造が周期構造を有していると仮定し、その単位領域を取り出します。その領域に対し、通常の有限要素法の手続きに基づいて剛性方程式を組み立てます。

$$[\mathbf{K}]\mathbf{u} = \{\mathbf{f}\} + \{\mathbf{p}\} \quad (16)$$

ここで、 \mathbf{u} 、 \mathbf{f} 、および \mathbf{p} は、微視領域の節点変位、節点力、および粘塑性項です。また、 $[\]$ 、 $\{\ \}$ で囲まれている物理量は、節点の数の成分を持つマトリクス、ベクトルを意味します。いま、微視的な変位を、巨視ひずみ $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ による成分と、それ以外の微視的な不均一変形成分 \mathbf{w} に分けます。

$$\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{X}\} \cdot \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} + \{\mathbf{w}\} \quad (17)$$

ただし、

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x & 0 & y/2 \\ 0 & y & x/2 \end{bmatrix}, \quad \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = \{\bar{\varepsilon}_x, \bar{\varepsilon}_y, \bar{\gamma}_{xy}\}^T \quad (\text{2次元の場合})$$

式(17)を式(16)に代入し、整理すると、次式が得られます。

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{w}\} = \{\mathbf{f}\} + \{\mathbf{p}\} - [\mathbf{K}]\{\mathbf{X}\} \cdot \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (18)$$

さて、微視的な不均一変形は、対応する境界上で連続していなければなりません。そのため、それぞれの項を、周期境界点 (添え字 P)、対応境界点 (添え字 C)、およびそれ以外の領域内部点 (添え字 I) に分解し、下記の条件を与えます。

$$\begin{cases} \mathbf{w}^P = \mathbf{w}^C \\ \mathbf{f}^P + \mathbf{f}^C = \mathbf{0} \\ \mathbf{f}^I = \mathbf{0} \end{cases} \quad (19)$$

これらの条件を式(16)に代入して整理すると、次式が得られます。

$$\begin{cases} \{\mathbf{w}^P\} \\ \{\mathbf{w}^I\} \end{cases} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{K}}^{PP} & \tilde{\mathbf{K}}^{PI} \\ \tilde{\mathbf{K}}^{IP} & \tilde{\mathbf{K}}^{II} \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{Bmatrix} \mathbf{X}^P + \mathbf{X}^C \\ \mathbf{X}^I \end{Bmatrix} \cdot \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} + \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{K}}^{PP} & \tilde{\mathbf{K}}^{PI} \\ \tilde{\mathbf{K}}^{IP} & \tilde{\mathbf{K}}^{II} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \mathbf{p}^P \\ \mathbf{p}^I \end{Bmatrix} \right\} \\ = \begin{Bmatrix} \{\boldsymbol{\Omega}^P\} \\ \{\boldsymbol{\Omega}^I\} \end{Bmatrix} \cdot \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} + \begin{Bmatrix} \{\boldsymbol{\Psi}^P\} \\ \{\boldsymbol{\Psi}^I\} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{K}}^{PP} &= [\mathbf{K}^{PP} + \mathbf{K}^{PC} + \mathbf{K}^{CP} + \mathbf{K}^{CC}] \\ \tilde{\mathbf{K}}^{PI} &= [\mathbf{K}^{PI} + \mathbf{K}^{CI}], \quad \tilde{\mathbf{K}}^{IP} = [\mathbf{K}^{IP} + \mathbf{K}^{IC}] \end{aligned}$$

式(20)を用いることで、すべての点の摂動変位を巨視ひずみ $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ の関数として表すことができます。このとき、微視領域の要素のひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^e = \{\varepsilon_x^e, \varepsilon_y^e, \varepsilon_{xy}^e\}^T$ は、次式で与えられます。

$$\boldsymbol{\varepsilon}^e = \mathbf{B}^e \{\mathbf{u}^e\} = (\mathbf{B}^e \{\mathbf{X}^e\} + \{\boldsymbol{\Omega}^e\}) \cdot \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{B}^e \{\boldsymbol{\psi}^e\} \quad (21)$$

ここで、 \mathbf{B}^e は変位-ひずみ変換マトリクスです。この式が、任意の微視構造内にある要素に対する、微視・巨視ひずみの関係式となります。あとは、前節の手順に基づき、要素の構成式と応力の平均化則を用いて巨視的な構成式を定式化します。そして、巨視的な境界値問題を解くことで、巨視ひずみが計算できます。その後、式(21)と要素の構成式を用いて微視領域の要素のひずみを得ることができます。

以上が、マトリクス計算のみで説明した均質化法です。均質化法を理解するうえでとても重要な「形状関数」を用いずに説明しましたので、現在均質化法を実用的に使用している方には奇妙な説明かもしれませんが、コーディングのしやすさや拡張性も考えると有益な点もあるかと思います。本稿を通じて、連続体マルチスケール理論の普及に貢献できたら幸いです。



計算力学に対する期待 ～人体モデリングと日常行動シミュレーション～

宮崎 祐介
東京工業大学 大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻

Digital human model, Injury Prediction, Injury Reconstruction

1. 緒言

人体モデルは現象の予測と再現、多様かつ未知なるケーススタディの大量実施、人体内部状態の可視化といった特徴を有しています。個々の価値が多様化し、人間中心社会へのパラダイムシフトの渦中にある現代から未来に向けて、人体のモデル化はモノ・環境・サービス・社会システムが人間機能へおよびす影響のよりきめ細やかな評価に必須な技術となつつあります。私たちは人体モデルを活用した傷害バイオメカニクス研究に取り組んでおります。

事故・傷害の発生は空間的相互作用の観点から考えると、人間—環境—モノの三要素のシステム不調和によると考えることができます。また、時間軸の観点から考えると、傷害の発生と被害拡大は事故発生から傷害発生、被害拡大に至る三プロセスの各々の時間スケール内の因子およびその相互関係に依存します。このような事故・傷害発生から被害拡大に関わる時空間構造の解明と対策の実施には、傷害メカニズム解明・安全設計のみならず、安全知識の一般への周知、教育、治療法、行政・法的な対応に至るまでの多分野連携での取り組みが不可欠です。そこで、私たちは、工学研究者、医療系研究者、心理系研究者、メーカ等からなる多分野連携組織に参画し、傷害バイオメカニクス技術をコアとしつつ多分野の組織と連携しながら子どもの傷害予防に関する研究を行ってきました。本稿では、我々の研究紹介を行うとともに、人間のモデルと日常生活のシミュレーションに向けた計算力学に対する期待について述べたいと思います。

2. 人体モデルを活用した子どもの傷害予防工学研究

我が国における1～14歳の子どもの死因の第一位は不慮の死であり、この傾向は過去30年にわたり変化がありません。そこで、傷害情報を網羅的に収集・蓄積する傷害サーベイランスシステムと、傷害実態に応じて原因の究明と対策法を考案・実行する傷害事例研究と、その安全知識を社会に還元する危険情報の配信システムのフィードバック系により構成される循環型の研究アプローチをとっています(図1)。特に、本システムでは傷害データや乳幼児特性データをコアに各々の研究機関が密接に情報共有していることが特徴です。東京工業大学では医療機関で収集された傷害データに基づき、特に被害者個人のモデリング技術とその事例検証への応用を通じて、傷害メカニズムの解明と安全対策法の開発、モデルの精度向上を試みてきました。

収集された傷害データはミクロ的な個別事例の分析とマクロ的な統計処理に基づく分析の両面から利用されています。

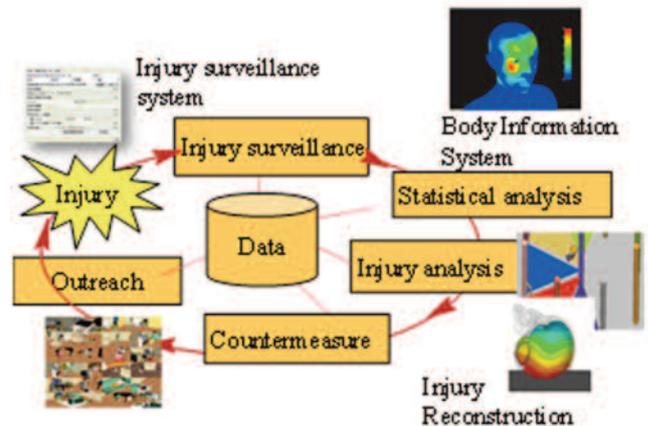


Fig.1 傷害サーベイランスと連動し、人体モデルによる定量評価を活用した循環型の傷害予防工学研究

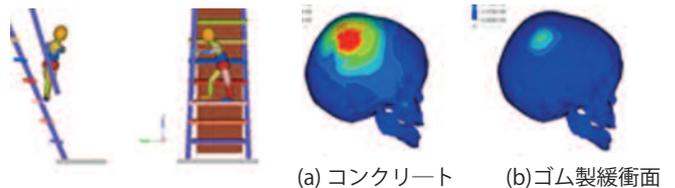


Fig.2 全身マルチボディモデルを活用した事故状況再現 Fig.3 事故状況再現シミュレーションに基づく安全対策

ミクロ的な活用例として、実症例の傷害プロセスをマルチボディおよび有限要素モデルを用いて同定することで傷害発生メカニズムを理解し、対策の提案を行っています。まず、受傷環境である公園の三次元形状計測を実施し、被害児体型を有するマルチボディモデルを用いた繰り返し計算により受傷プロセスを同定しました(図2)。さらに、FFD法による形状変換により被害児の頭部形状を再現した被害児有限要素モデルの構築を行い、頭蓋骨骨折発生リスクを評価します。さらに、緩衝面をゴム面に変更すると、図3(b)に示すように頭蓋骨骨折の発生リスクは大幅に下がります。このように定量的な傷害メカニズムの解明と予防策の提案を行うことで、遊具の床面のガイドラインや業界自主基準の改善に活用され社会へのフィードバックが行われました。傷害の予防を行う上ではその受傷状況の解明が必須となりますが、目撃者がいないもしくは証言があいまいなためそれを推定するのは困難です。人体モデルによるシミュレーションを傷害に至る時間軸情報の補完に活用しています。

また、計算力学的なモデルのみならず、個人の医用画像から忠実に人体頭部構造を再現した実験的な頭部モデルの構築も行っています(図4、5)。このモデルは実脳と動的粘弾性特性が等価なシリコーンゲルで脳を構成し、頭蓋内に存在する流体である脳脊髄液を水で代用しています。これにより頭蓋内での脳の挙動を可視化するモデルです。人体モデリングの

困難さに関する本質はその妥当性検証にあります。人体をモデル化する際には幾何学的非線形、材料非線形、流体構造連成、軟組織接触など計算力学的に困難な問題が存在します。加えて、材料特性そのものの実験的取得自体が非常に困難です。さらには、構造体としての検証は限られた屍体実験結果に頼っており、形状も材料も異なる個体に対して上記の計算力学的困難を内包する問題を解かなければなりません。このような点から実際に現場で医療行為に携わる医療関係者から、その計算精度そのものに疑問をもたれることも多々あります。そこで、私たちは医用画像から同一形状・材料特性を有する実体モデルを構築しています。それを用いて実験的に重症頭部外傷メカニズムを解明するとともに、シミュレーションモデルの妥当性検証にも活用しています。ALE法により脳脊髄液をモデル化した際に実験と同等の頭蓋内脳挙動を再現できていることがわかります(図6)。

3. 日常行動計測センサと人体モデルを統合した日常行動バイオメカニクス研究

我々の生活を取り巻く環境はパラダイムシフトの渦中にあります。情報化社会の発展による「もの」から「こと」への価値の転換、ものづくり技術の高度化による知的人工物との共同生活社会の到来、センサ群の社会展開によるデータ爆発、超少子高齢化社会の進展といった大きなパラダイムシフトです。このような時代の中で、環境や人工物の新たな価値を創出するための根源的な問題として、人間が日常生活においていかなるものやサービスを欲しているのかが明らかにすることが必要であると感じております。例えば家事や介護などをサポートするサービスロボットのような知的人工物の設計を行うにしても、それを提供される人間自身がどのような作業において疲労し、傷害を被るのか、それとも快適であるのか、実はわからないことが問題の根源ではないかと考えます。また、センサ技術の発展により人間行動データの大量収集が行えつつありますが、その活用が問題であり、超少子高齢化社会における予防医学、すなわち製品・環境の安全性・快適性評価へと展開するためには、それを運動や変形のような力学情報に変換しなければならないと考えています。

そこで、個人の力学的特性を再現したデジタル・ヒューマンモデルと日常生活計測データを統合し、日常的な人間行動の力学特性の解明を目指した日常行動バイオメカニクス研究を開始しております。図7に示すように産業技術総合研究所のセンサルーム内で乳幼児にあるがままに生活させて、日常行動を計測します。この行動計測データに基づき転倒防護反応のモーションキャプチャを実施しました。さらに、被験者個人の全身マルチボディモデルを構築し、各関節にアクチュエータと制御器を組み込み、順動力学的なシミュレーションを用いた関節トルク同定システムを構築しました。従来ではモーションキャプチャと床反力計を用いることにより逆動力学的に関節トルク計算を行っていますが、生活空間内センサを低減させることと、成長・老化による影響の予測を目指してあえて順動力学的なアプローチをとっています。将来的には、人工物に埋め込まれたセンサ群へ、時空間マルチスケールの人間の力学モデルを統合し、個人の生活の安全性や快適性を丸ごと評価し、それを人工物そのものへ提供することに



Fig.4 全身マルチボディモデルを活用した事故状況再現



Fig.5 事故状況再現シミュレーションに基づく安全対策

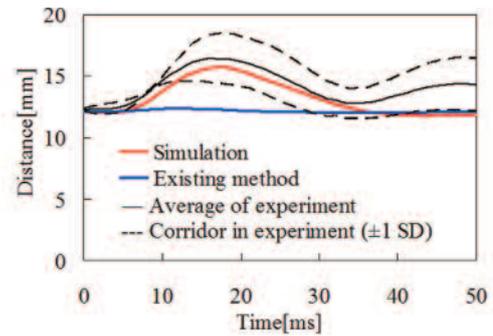


Fig.6 頭蓋骨と脳の相対変位の検証

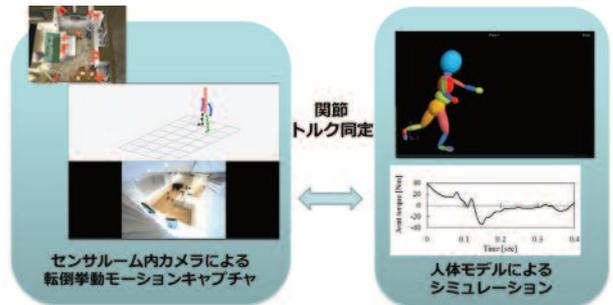


Fig.7 日常行動モーションキャプチャと人体モデルを用いた転倒防護反応に関する研究



Fig.8 日常計測と人体モデル統合による日常行動の力学的評価

による高付加価値な人工物設計・サービスへの展開ができるようになればと考えております(図8)。そのためには個人機能を再現した人体モデルが必須ですが、人間機能は非常に複雑で、その状態変数空間の次元は非常に大きいところがあります。そこで、演繹的な精密モデリングも当然重要ですが、帰納的な確率論モデルも含めたデータ同化型のアプローチが必要となると考えております。個人の日常生活シミュレーションに向けて計算力学の発展に期待いたします。



計算力学と設計と最適化

北山 哲士
金沢大学 理工研究域・機械工学系

計算力学は、コンピュータを駆使し、様々な物理現象を数値的に明らかにしようとする学問分野である。一方、関数の最小値（もしくは最大値）を解析的に求めるのではなく、数値計算的に求める最適化アルゴリズムの研究も本部門でも盛んに行われており、計算力学と最適化アルゴリズムを組み合わせ、いわゆる最適設計法は注目されて久しく、本部門講演会の「計算力学と最適化」がそれに該当するセッションであろう。筆者は最適化および最適設計法に関心があるので、これらの点について話を進めさせていただく。

進化的計算手法と称される新たな最適化手法の研究が行われるようになって久しいが、最適化アルゴリズム自体の研究・開発はほぼ飽和状態に達していると個人的には感じている。進化計算の専門家ではないので詳細な研究動向は把握していないが、Genetic Algorithm (GA)に始まり、Simulate Annealing(SA), Particle Swarm Optimization (PSO)、近年ではAnt Colony Optimization (ACO), Differential Evolution (DE)やArtificial Bee Colony (ABC)など、3字程度の英語表記できるものが流行っているようである。この研究分野では、多峰性関数の大域的最適解を求めることが一つの研究テーマであり、「進化」という言葉をうまく利用して、ひとまず大域的最適解を求めてしまう論文が非常に多いと思われる。古典的といったら失礼であるが、勾配を利用した最適化理論と照らし合わせた上で、どのような点で「進化」と言っているかを明確にすると、非常に魅力的な研究分野であると思われる。PSOが依然、活発に研究されている理由の一つは、上記の点が明確になっているためであり、今後、ABCやDEが同じ視点で議論されるとさらに研究が進むものと思われる。また、多目的最適設計問題に対して、パレート最適解集合を効率的に求める方法が非常に多く提案されているが、競合する目的関数間のトレードオフ比を定量的に算出しつつ、どのようにして最終的な設計案を絞り込むのかといったことまでを包括的に取り扱った研究は非常に少ないものと思われる。ここでもやはり、1960年代後半から1970年代の多目的最適化の理論と照らし合わせながら研究を進めると面白いかもしれない。古い書籍でいえば、志水清孝先生の「多目的と競争の原理」であり、最近であればMiettinen先生の「Nonlinear Multiobjective Optimization」などは、多目的の数理的側面を工学分野の研究者に対して比較的わかりやすく記述してある良書であると感じている。今はコンピュータを活用して多くのことができるし、最適化理論はそれほど重要ではないという時代かもしれないが、重要な視点であると個人的には考えている。

新たな研究動向として注目されている機械学習法やデータマイニングといった分野であるが、狭義ではそれぞれの用途があるため異なる考え・方法論になるが、広義の意味で応答曲面法の一つと捉えることができる。Kriging, Radial Basis

Function (RBF)ネットワーク、Support Vector Regression (SVR)やGaussian Process(GP)といった方法が注目されているが、これらの方法はガウス関数を用いて学習器（もしくは近似器）を作成しようとしている点で共通している。KrigingとSVR、RBFネットワークとの等価性に関する研究を考慮すると^(1,2)、どの方法を用いるかという議論よりも、共通となる問題点を把握することで、方法論の議論から抜け出すことが可能となる⁽³⁾。また、サンプル点と応答値から単に応答曲面を作成するだけでなく、応答曲面の最適解やサンプル点のなさそうな領域を見つけ、そこでの応答値を計算し、段階的に応答曲面を更新して、最終的に精度の高い大域的最適解を得ようとする逐次近似最適化は、計算力学と最適化の融合を考えると、極めて重要な方法論である。設計探査や設計情報学なども、多目的環境下における意思決定や可視化といった側面が取り入れられているが、基本的にはこの部類に入であろう。今後、この分野の重要性は高まるであろうし、本部門でも中心的な話題の一つとして今後も幅広く議論されることに期待したい。

計算力学では方程式を各種離散化手法によって解くため、最適化によって工学的に有用な結果を得たい場合、必要となるのはシミュレーションモデルの精度であろう。例えば、板材を対象とした塑性加工シミュレーションでは、多くのパラメータが必要となり、少しの変更によって、シミュレーションの結果が異なってくることが多い。図1は、角筒深絞りを対象としたときのしわが発生するシミュレーションの一例である⁽⁴⁾。

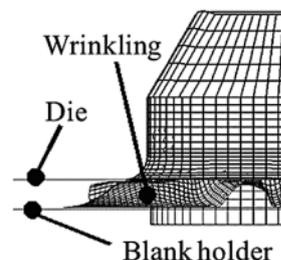


図1 しわ発生シミュレーションの様子

絞り加工などは比較的簡単なシミュレーションと思われるかもしれないが、このような解析モデルを作成するにはそれなりに時間がかかる。また、スプリングバック解析においては、材料モデルによって現象が変わるため、材料モデルの同定手法も重要な側面である。また、しごぎが入るような場合はシェル要素ではなくソリッド要素のほうが望ましいが、そうすると今度は多くの計算時間を要することになるため、効率的な計算手法が望まれる。はじめに記述したように、このような計算手法やシミュレーション技術の研究開発が、本部

門の主要な対象領域であると筆者は考えているが、計算するモデルから何を引き出したいか、言いかえれば計算結果から何をしたいのかという設計の視点を融合させることが最適設計への第一歩であると思われる。このようなことを書くと、「そんなことはわかっているし、当たり前なこと」とお叱りを受けるのは承知しているが、何人の若手研究者がこのようなことを実践できているであろうか。

最適設計については、多くのソフトウェアも販売されていることからわかるように、潜在的なニーズは非常に高いと思われる。これら最適設計関連のソフトウェアには、非常に多くの手法が含まれているため、ユーザとしてはどの方法を使えば「いい結果」を得られるのかわからないことが多いと思われる。さらに言えば、ユーザは難しい最適化理論には特に関心はなく、最適化によって結果ができればよいという程度であることが多い。一方、提供側は、多くのメニューを提示することでソフトウェアの「充実度」を表現したいのであろうが、これが逆効果の場合もしばしば起きているようである。「充実度」の高さが困惑をもたらすことも多く、結果的には最適設計ソフトは高価で使い勝手が良いとはいえない、ということにもなりうる。講演会が研究発表を通じた情報交換の場であることを踏まえれば、メニューの多さという問題をどう解消したらよいか、一部の方法に焦点を絞りじっくりと議論してもよいと思っている。メニューの多さとおいしさの間には、必ずしも比例関係が成り立つとは限らないと思うが、いかがであろうか。

さて最後に、2010年度に名古屋で開催された最適化シンポジウム(OPTIS2010)の特別講演において、常日頃からお世話になっている杉本博之先生(北海学園大学)がご講演されるということで、最適化・最適設計を研究している若手研究者に何でもよいのでメッセージを残してほしいと強くお願いしたところ、以下のような言葉を頂いたので、ここで紹介させていただきます。

1. 工学、工業である限り、解析と設計は表裏一体の関係がある。
2. すべての設計問題は、最適化問題として定式化できる。
3. 最適化問題として定式化できる問題は、すべて解ける。
4. 問われるのは、最適化問題として創り上げる発想力と独創力。
5. たくさんの「挑戦」と、たくさんの「失敗」の上に良い工業デザインが絞り出される。

筆者は上記を勝手に「杉本五カ条」と称しているが、全くその通りである。計算力学の主眼の一つは、コンピュータを用いて物理現象を解析・解明することであるが、出てきた解析結果をどのように設計に役立てるかを常に考えなければいけない。また、単に最適化手法を適用してでてきた結果、で終わることなく、最適化によって得られた結果がどのような意味を持つのかといった点を吟味する必要がある。さらに最適化アルゴリズムを構築し、各種ベンチマーク問題を通じて有効性を検討することは大切であるが、実際に直面する設計問題に対して最適化を通じて工学的に有用な結果を得たいのであれば、多くの試行錯誤を通じて自身が対象とする設計問題への理解を深め、最適化問題として定式化する創造力を養

わなければいけないことを伝えている。講演発表の多くは、時間の関係もあり、目的関数や制約条件、設計変数を示す程度にとどまっているため、最適設計は簡単のように感じる方もいらっしゃると思われるが、実は最適化問題として定式化する部分に多くの試行錯誤を要する。この試行錯誤により、真の目的や制約が明らかとなってくることが多く、さらにその過程で目的関数や制約条件の定量化の方法に対するアイデアも出てきて、最適化問題として創り上げる発想力と独創力が涵養される。論文として公表するのは難しい側面ではあるが、せめて講演会や研究会等においては、成功例のみならず、うまくいかなかった場合の例や最適化問題として定式化の際のプロセス等が報告されると、情報共有の場としてさらに効果的であろう。本部門講演会は発表10分、質疑応答5分と短く、要点を凝縮して発表する必要があるが、もう少し講演時間を多めにとってもよいかもしい。筆者も頭の中で何回も「杉本五カ条」を唱えていると、はじめは単なる解析対象であったものが不思議と最適化問題に見えてくることが多く、また目的関数や制約条件の定量化の方法のアイデアが浮かび、関連する論文を調べていることが多い。あとは、最適化問題を解くためのアプローチ(手法の選択)と結果の解釈ということになる。この「杉本五カ条」は若手研究者が見逃しがちな点を見事に指摘していると実感している。自分自身を振り返ってみても、確かに若いうちはいろいろな方法論を自分で試す必要があり、その善し悪しを判断することは非常に大切である。しかし、より大局的な視点から、単なる解析から設計へ、さらには対象とする問題を最適化問題として捉える心構えが大切であろう。最適化によって得られた結果が斬新なものではなく、いわゆる経験的なものと一致したということも多々あると思われるが、いい意味でとらえれば、経験のある部分を明らかにできたとも考えることができ、技術の伝承に役立てることが可能である。

共通の話題と成りうる計算手法等について、うまくいくためのノウハウや結論に至るまでの思考(試行)プロセス等、多少は「柔らかい」特別セッションがあると若手研究者も積極的に話に参加できるかもしれないし、偉い先生方は若手研究者に対して、注意すべきメッセージを残していただけると、今後の研究指針を立てる上で、さらには自分の研究姿勢を見直すいい材料になりますので、大変助かります。

参考文献

1. W. An, Y. Sun, (2006), An Equivalence between SILF-SVR and Ordinary Kriging, Neural Processing Letters, 23: 133-141.
2. P. Andras, (2002), The Equivalence of Support Vector Machine and Regularization Neural Networks, Neural Processing Letters, 65: 97-104.
3. Kitayama, S., Arakawa, M., Yamazaki, K., (2011), Sequential Approximate Optimization using Radial Basis Function network for engineering optimization, Optimization and Engineering, 12(4): 535-557.
4. 北山哲士、濱野智史、山崎光悦、久保達男、西川輝、木下洋、(2010), 可変ブランクホルダー力による角筒深絞り加工、日本機械学会論文集C編、76-766: 1617-1626.



計算力学部門25周年に寄せて ～私とコンピューターと計算力学～

松田 哲也

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)

非常に著名な米国のSFドラマに「スタートレック」がある。世界中に多数のファンが存在するが、私もその一人である。劇中では、人類はすでに宇宙船で星間飛行を行う技術を持っており、宇宙に点在する様々な他種族と遭遇するのである。スタートレックにはいくつかのシリーズがあるが、私は「ネクストジェネレーション」の世代であり、このシリーズは今から3世紀後の24世紀を舞台にしている。このためもちろん、科学技術は現在とは比べものにならないくらい進んでおり、コンピューターは驚くべき進化を遂げているという設定である。すると職業病からか、こんな世界なら、宇宙船並みの構造物の挙動を、材料の原子配列から考えてシミュレーションできてしまうのだろうか、などと想像することがある。究極的なマルチスケールシミュレーションである。

科学が発展し、我々が普段目にするマクロな事象が、実は目に見えないミクロな事象に支配されていることが明らかになってくると、マクロな事象をミクロな事象からボトムアップ的に説明・予測したいという欲求が生まれる。このように、物理現象を複数のスケール階層で捉え、それらを相互に関連付けて解析することをマルチスケールシミュレーションと称し、これは今日、計算力学における主要な研究分野の一つとなっている。著者もこの分野で、複合材料やセル構造体等の非弾性解析を対象に研究を進めてきた。この分野では、複数のスケールを同時に考慮する必要性から、一般に高コストな数値計算を余儀なくされるため、その発展とコンピューターの性能向上には切っても切れない関係がある。

電子式のコンピューターが登場して70年ほどが経過したが、その間の進化には目を見張るものがあった。コンピューターは、いわゆるムーアの法則に従う形で、その処理速度や記憶容量を急速に増加させ、これにより、以前なら到底実現し得なかった力学計算を現実のものとしてきた。これは、私がこの分野に携わってきたここ数十年のうちでも明らかであった。以下では、私が体験してきたコンピューターの発展の様子を、幼少期から、大学時代における計算力学およびマルチスケールシミュレーションとの出会い、さらには現在までを通して振り返るとともに、計算力学に対して思うところを、非常に雑駁ながらいくらか述べてみたい。

私が初めてコンピューターと出会ったのは、1980年代初頭の小学校低学年の頃であった。ある日、それまで見たことのない機械が突然家にやってきた。ワンボードマイコンを製作する趣味のあった父が、当時発売されて間もなかったパーソナルコンピューター、いわゆるパソコン(PC)を購入してきたのである。NEC(日本電気)製のPC-8001という機種であった。キーボードは本体と一体になっており、今から言えば随分ずんぐりとした風貌であった。しかしこのPCというものは、幼かった私をすぐに夢中にさせる魅力を持って

た。特に、BASIC言語を使用してプログラムを組むことができたのが画期的で、ゲームの自作に夢中になったことを覚えている。これが、人生における初めてのプログラミングであった。

しかしこのPC-8001は、一般向けPCとしてはまさに黎明期の機種であり、今と比べればその性能は極めて低いものであった。CPUはNEC製 μ PD780(Z80互換)であり、クロック周波数は4MHz(実動2MHz程度)、メモリはわずかに16KBであった。グラフィックスは粗く160×100ドット、出力可能な色数も8色に限られた。

私が中学生になると、我が家のPCはPC-8001からPC-8801mkIIFRという機種に取って代わられた。やはりNEC製であり、CPUはPC-8001と同じく μ PD780であったが、各種高速化が図られており、全体的な処理性能は格段に上がっていた。メモリは64KBに増強され、グラフィックス性能も640×200ドット、512色中8色出力可能と飛躍的に向上していたため、これらの性能を生かしたソフトウェアが多数世に出回った。私は、このマシンなら当時流行っていたシューティングゲームを自作できるのではないかと思い、BASICを用いて飛行機を画面に描き、動かしてみたが、動作があまりに遅かったため、仕方なくアセンブラによるマシン語プログラミングを勉強した。マシン語を用いれば、かなり高速に飛行機を動かすことができた。

しかしそのわずか数年後、私が高校生の時に家にやってきたEPSON PC-386は、CPUにIntel製80386(i386)を採用しており、クロック周波数は20MHzにまで向上していたため、BASICを用いても飛行機が目にもとまらぬスピードで動作し、非常に驚かされたものである。

高校を卒業した私は、1993年、名古屋大学工学部機械工学科に入学した。そこには、後に第86期計算力学部門長に就任される大野信忠先生がおられた。当時大野先生は、学科のとある講義にて、有限要素法(FEM)の実演をノートPCでされていた。そのノートPCの機種やスペックについては、今となっては定かではないのだが、すでにノートPCでFE解析を実施出来る時代が来ていた。私は、ノートPCでスマートにFEMの実演をする大野先生の姿と、物体の変形を自在に解析できるこの手法に感銘を受け、学部4年生の研究室配属において、迷わず大野研究室の門戸を叩いた。

大野先生は、理論的研究、実験的研究および数値解析的研究のいずれも取り組まれており、計算力学にも力を入れておられた。このため、大野研の計算機室には、当時最新のコンピューターが多数設置されており、解析プログラムを組むにあたってはまたとない環境であった。主なラインナップは、Intel i486系CPU(50~75MHz程度)を搭載したWindows PC、およびSUN等のUnixワークステーションであり、両者

に慣れ親しむことができた。これらはどれも高性能なマシンではあったが、計算負荷の高い、いわゆる重い計算になると、大学の大型計算機を使用することもあった。

そんな中、私は、均質化法を用いた繊維強化複合材料の非弾性マルチスケールシミュレーションに関する研究テーマを与えていただき、計算力学への道を歩み始めた。修士課程において、繊維強化複合材料の時間依存変形に対する均質化解析プログラムを開発するとともに、点対称境界条件を用いた解析領域（ユニットセル）の半減手法の構築に取り組んだ。解析領域を半減できれば、自由度もほぼ半減するため、解析に要するメモリが約1/2となるのはもちろん、一般的な連立一次方程式ソルバーを用いた場合、解析時間を約1/8にまで低減することができた。これにより、ほとんどの解析において大型計算機を使う必要がなくなり、大きな効果をもたらした。

博士課程に進学する頃には、IntelのPentiumプロセッサが台頭し、大野研にもそれを搭載したPCが導入された。この時点で、CPUのクロック周波数は3桁MHzが当たり前という時代を迎え、これは、解析領域を半減しなくともPCで均質化解析を実施できる計算速度をもたらした（とは言え、解析時間の短縮は常に重要であるから、以後も半減法を使用している）。その後、PentiumはPentium II、III、4と進化を遂げた。

そして今である。私は、博士課程を修了して1年助手を務めた後、名古屋大学から転出したため、しばらく時間が経過したが、聞いたところ大野研では現在、Intel Xeonを複数積んだワークステーションなどを多数保有しているそうである。そのクロック周波数は3.47GHzとのことで、私が大野研に入った当時のCPUが数十“MHz”で動作していたことを考えると、まさに隔世の感がある。私の研究室でも現在、Xeon 3.4GHzを積んだワークステーションを使用しているが、これで試しに私が大学院生の頃に行っていた複合材料のマルチスケールシミュレーションを実施してみたところ、何とわずか2秒で解けてしまった。このような背景から現在では、さらに多くのスケールを跨いだ複合材料の非弾性マルチスケール解析にチャレンジしているところである。

上記のように計算力学分野では、コンピューターの性能が向上するにつれて、これまで解き得なかった問題がどんどん解けるようになり、我々を非常にワクワクさせてくれる。この点は、計算力学の大きな魅力の一つであろう。しかし、それこそ原子配列からマクロ構造物までをつなげたマルチスケールシミュレーションができるようになるかという、現実問題、それは少なくともしばらくは無理そうである。やはり自由度が高すぎるのである。そこで重要となるのが、人間の力学的洞察である。

いずれのスケールレベルにおける解析も極めて重要であるが、我々が機械工学者である以上、最終的にはマクロスケールでの現象を押さえないという思いは強い。しかし、全てのスケールをまともに考慮してマクロまでつなげることが難しいとなれば、スケールとスケールをリンクするために、何らかの適切なモデリングが必要となるはずである。そこにおいてまさに、人間による力学的な洞察が必須となるのであり、これは決してコンピューターには任せられない仕事である。

どのようにしてミクロスケールのエッセンスをマクロスケールに反映させるのか。これには鋭い観察眼、経験とセンス、および解析対象に対する豊富な知識などが求められるであろう。このような力学的洞察の肝要さについては、大野先生から教を受けたのであるが、今更ながら非常に貴重なことを勉強させていただいたように思う。

話は少し逸れるが、計算力学において陥る可能性のある罅に、解析結果を盲目的に信じてしまうというものがある。これは非常に恐ろしいものであり、結果が1桁、2桁違っても、正しいと思ってしまうことがある。これを避けるためにも、やはり力学的洞察が重要となるのである。多角的なアプローチにより、力学的に本当に有り得る結果かどうかを判断する必要がある。これは特に、学生などの初学者に多い落とし穴であるが、ある程度経験を積んだ私も、常に戒めとして心にとめるようにしている。

すなわち、計算力学分野においては、コンピューター性能の向上と力学的洞察の両輪が重要であり、これらのどちらが欠けても立ち行かなくなってしまうであろう。前述したように、コンピューターの発展は、我々に数値計算をする上での力強さをダイレクトに与えてくれるものであり、計算力学には不可欠である。と同時に、これまでの歴史が証明してきた通り、人間の探求心は尽きることがなく、いくらコンピューターの性能が上がっても、人は常にその限界を超えたところに挑もうとするから、そこには必ず人知が求められるのである。これは結局のところ、どれだけ時代が進んでも一たとえスタートレックの時代が到来しても一同じことなのかもしれない。

ところで、計算力学部門が25周年を迎えた本年、コンピューターの性能向上に関して劇的な進展があった。スーパーコンピューター「京」の完成である。それに合わせる形でこの10月、第25回計算力学講演会、および国際会議 International Computational Mechanics Symposium 2012が神戸のポートアイランド南地区において開催され、京の関連イベントも実施された。この最新のスパコンが10 PFLOPSを記録し、世界最速となったことは記憶に新しい。このような素晴らしいハードを得た我が国は、計算力学分野において今後ますます顕著な業績を上げることだろう。実際、京を最大限に生かすための計算力学をベースとしたプロジェクトがすでに走っているが、もちろんこれは力学的洞察に裏打ちされたものである。

これからもコンピューターが発展を遂げ、その計算の可能性を広げるとともに、もう一方の車輪として常に深い力学的洞察が存在すれば、計算力学にとってまさに鬼に金棒である。そのような展開を今後も胸躍らせながら期待するとともに、微力ながら自らもその発展に尽力したいと考える一人である。この四半世紀における計算力学のすさまじい発展を思えば、スタートレックのように3世紀後と言わず、次の四半世紀後ですら驚くべき未来を迎えているに違いない。

最後になったが、改めて日本機械学会計算力学部門の25周年を心よりお慶び申し上げるとともに、貴重な寄稿の機会を与えて下さった部門に謝意を表し、本稿の結びとしたい。



研究を通して感じる計算力学の魅力

藤川 正毅
琉球大学 工学部 機械システム工学科

1. はじめに

日本機械学会計算力学部門が設立25周年とのことで、歴史の長さ・深さを本当に感じます。同時にその期間、多くの先生・研究者の方々の研究成果や学会活動があるからこそ、国内外の学术界・産業界で計算力学が必須のツールとして利用されているのだと思います。今後、私も計算力学の分野に少しでも貢献できるように、研究に精進したいと思いました。

原稿の執筆依頼を頂いた際、若手研究者を対象とした記念特集号のニュースレターで、「計算力学（或いは計算力学部門）に対する夢、期待、問題提起」などが題材と聞きました。今回、自分の研究に関連する内容を紹介しながら、一若手の研究者として感じていることを書かせて頂きました。

私の研究テーマは、「高分子材料の動特性を対象とした数値解析」に関する研究をしており、主として「材料構成則の開発、材料定数の同定、および有限要素法への実装」を中心に勉強しています。最近では「工業用ゴム材料のシミュレーション」、「新しい数値微分法の開発及び大変形問題への応用^{(1),(2)}」の研究をしています。今回は前者を中心に書かせて頂きました。

2. 工業用ゴム材料の概要と計算力学

研究対象である工業用ゴム材料は、シール材、衝撃吸収材・防振材として、様々な場所・用途で利用されています。具体的には、自動車のタイヤやゴムブッシュ、AV機器の保護パーツ、ビルの免振装置などが挙げられ、工業用製品として必須の材料と言えます。また世界の市場規模は非常に大きく、2011年度で約1055億米ドルあると言われており、今後も年率5.8%で成長する見通しとされています⁽³⁾。

ゴム材料を工業用製品として利用するためには、力学特性の把握が重要です。ただしゴムの動特性は複雑であり、一例として繰り返し引張りの引張り試験を行うと、Fig.1のような「ヒステリシス挙動」を示します。そしてこれは「変形量、（最大経歴）変形履歴、変形速度や温度」によって挙動が大きく異なる性質を有しています。

このような強い非線形性挙動を有しているため、ゴム材料の設計には計算力学が必須となります。例えばタイヤの場合、1990年代に理論解析が適用され、その後コンピュータの性能向上と共に、理論解析から計算力学（有限要素解析）へ実際の設計業務に利用された経緯があるようです⁽⁴⁾。

ここで「基礎研究から実証研究を経て市場実用化」が研究や技術開発の流れであるならば、すでに完結している分野と言えそうですが、現状は異なります。詳細は後述させて頂きませんが、近年の報告^{(5),(6)}でも見られるように、材料試験や材

料構成則など、基礎研究段階と言えるような問題でも未解決の課題が多くあります。ゴム材料の動特性の解析に関する研究は、個人的には1988年バリー・ベームが提唱しているスパイラルモデル⁽⁷⁾の渦中にあるものと感じています。

2.1 ゴムの材料試験に関する研究 ゴムの力学特性を計測する実験方法については1970年代に川端先生らが、二軸引張り試験が不可欠であることを唱えられました^{(8),(9)}。現在でもこの知見をもとに、二軸引張り試験を利用した研究が主流となっています。しかし、約40年経った現在でも、ゴムの動特性の評価に必要な（有限要素解析に必要な）JISなどの規格化は構築されていないのが現状です。これは前述のゴムの非線形挙動の複雑さに加えて、試験片の形状やデータ整理の方法など、考慮すべき事項がまだ多数あるためと考えられます。

そのため近年でも、我々のものも含めて材料試験に関する多くの研究報告が見られます⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾。これらはゴムの動特性の評価に必要な（有限要素解析に必要な）実験方法やデータの処理方法について、有限要素解析を利用して検討・評価しているものです。一見矛盾するようなアプローチ方法ですが、実際に有効かつ実用的であり、計算力学によるものづくりの重要性を研究を通して実際に感じました。

2.2 ゴムの材料構成則に関する研究 ゴムの力学モデルの開発については、主にヨーロッパを中心に研究が進められています。近年の報告ではFig.1のヒステリシス挙動を、弾塑性変形モデル、非線形粘弾性モデル、粘塑性モデル、とするなど研究者によって様々な構成則が開発されています^{(5),(6)}。これらは、従来から汎用FEMに搭載されているものと比べると計算精度は格段に向上するようです。しかし実際に実装して検討してみると、「提案されている構成則は、論文の実験条件以外の範囲では明らかに実現象と異なる挙動を示

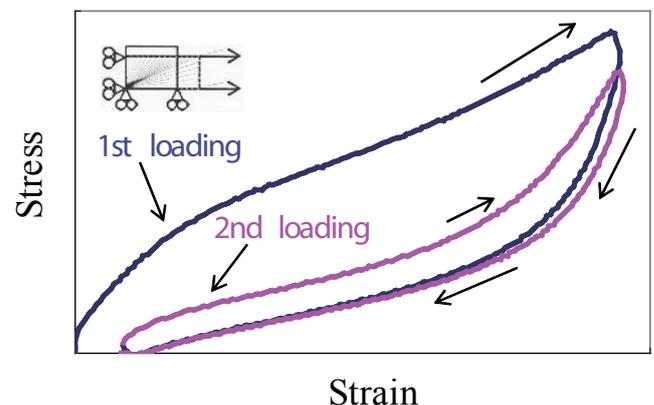


Fig.1 代表的な工業用ゴムの力学挙動の例
(繰り返し引張り試験の場合)

す」など、問題を内包している場合もあり注意が必要と感ずります。このような構成則の欠点にあたる部分は、強い非線形性を有する構成則の場合は予見するのが困難な場合が多いので、発信する研究者側も注意すべき、と個人的には感じました。

3. 研究に対する夢・目標

ゴムの力学挙動に関する研究は、前章に示したように実験・計算ともに多くの問題を抱えているのが現状です。ゴム材料の力学挙動は複雑なため、力学モデルを検討していると、自分たちが行っている実験条件の再現性のみ注意が集中しがちになりますが、きっちりと既報の実験と計算の両面を理解しながらボトムアップ式の手順で研究を進めたいと思います。そして、

1. 実験解析と計算力学を組み合わせたアプローチによるゴムの動特性の解明

を達成したいと強く思います。そしてその結果を元にして、

2. (コストや手間も考慮した) 材料試験・実験条件の提案
3. 材料定数の同定方法
4. 計算結果の妥当性の確認方法の提示 (適用範囲の明確化)

をまとめる研究を目指したいです。

つまり、計算力学 (有限要素法) という産学間で共有の武器を利用して「ゴムの動特性を評価・解析するための定跡を作りたい!」、そして「学术界のみならず、産業界にもしっかりと貢献できるような研究者になりたい!」、以上を目標にして、研究活動に精進したいと思います。

4. 計算力学 (計算力学部門) に期待すること

CAE業界の第一線で活躍されている方々が仰っていた通り⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾、ゴムの力学解析の研究分野や汎用有限要素法ソフトウェアでは、マルチフィジックス・マルチスケールの領域へ進化しています。これらは計算力学を用いて、解析対象の実現象を正確に把握するための重要なアプローチだと思えます。そしてこれらを新しく取り入れようとした場合、当然新しい分野の勉強が必要となります。資料や論文などにより独学で勉強することも可能ですが、その分野で活躍されている先生・研究者の方々とディスカッションする機会があれば、独学では得られない多くの知見が得られると思えます。私ごとですが、最近色々な研究者の方と研究の話、ものの考え方、研究に対する取り組み方、などについて話をする機会があり、この重要性を改めて強く感じました。このような経験をできる機会や場所が多くあれば、と切実に思います。現在、日本機械学会計算力学部門の他に、いくつかの非営利活動法人^{(17),(18)}の勉強会などが見られますが、より多くの種類の勉強会、そして研究機関と企業の方々が情報を交換できる場所があれば素晴らしいな、と思えます。

5. 最後に

3章では、実験・計算ともに多くの問題を内包している、と書きましたが、研究の課題などを考えているとワクワクした気持ちになります (もちろん、解析結果を見て落胆するときも多々ありますが……)。研究には困難が付きまとい、そ

れを乗り越えるために挑戦するので大変な思いをするのも重々承知しているつもりですが、それでも問題を解決する方法を考えて実行する過程や、新しい考え方との出会い、なにより達成後の先の展開を想像するとやはり気持ちが高ぶります。

記事を書くにあたり色々なことを整理してみても、やはり計算力学を用いた研究は楽しい、そして夢がある!と改めて思いました。今回の執筆を機に、これから新しい気持ちで研究に取り組みたいと思います。

参考文献

1. 藤川正毅, 田中真人, 儀間麻衣, 複素数階微分によるひずみエネルギー関数の1階・2階微分と超弾性モデルへの適用, Transactions of JSCES, 2011:20110009(2011)
2. 田中真人, 藤川正毅, 複素数階微分を用いた整合接線剛性の数値近似と大変形問題への応用, 日本機械学会論文集 (A編), 77-773, pp.27-38(2011)
3. 朝日新聞
<http://www.asahi.com/business/pressrelease/N2U201206070009.html>
4. 加部和幸, ゴム製品設計力学における最近の技術の進歩, 日本ゴム協会, 81-7, pp.264-265 (2008)
5. Stephen Jerrams and Niall Murphy (Editors), Constitutive Models for Rubber VII, CRC Press(2012).
6. G.Heinrich, M. Kaliske, A. Lion and S. Reese (Editors), Constitutive Models for Rubber VI, CRC Press(2010).
7. ウィキペディア, “スパイラルモデルで検索”
8. 山下義裕, 力学的性質研究分科会の活動における最近の技術の進歩, 日本ゴム協会, 81-7, pp.279-280 (2008)
9. Sueo Kawabata and Hiromichi Kawai, Strain energy density functions of rubber vulcanizates from biaxial extension, Advances in Polymer Science, 24, pp.89-124 (1977).
10. 藤川正毅, 神村卓武, 真壁朝敏, ゴムの二軸引張り試験における公称応力・ひずみの簡易計算法, 実験力学, 10-1, pp.104-109 (2010)
11. 川崎愛, 横塚智史, 三原康子, 小林卓哉, ゴム材料の実用的計測法 (デジタル画像相関法の応用), M&M2012材料力学カンファレンス, CD-ROM (2012)
12. 山辺純一郎, 田中史浩, 西村伸, 二軸引張り試験機によるゴムの応力・ひずみ推定法に関する研究, M&M2012材料力学カンファレンス, CD-ROM (2012)
13. C.S. Woo, W.D. Kim and H.S. Park, Finite element analysis and design of rubber specimen for mechanical test, Constitutive Models for Rubber VII, pp.439-443(2012).
14. 野口裕久, 最近の非線形解析とその動向—汎用プログラムのカスタマイズ—, Mech D&A News Letter, Vol.2008-1 (2008)
15. 現代のCAE —シミュレーションに従事するということ—, Mech D&A News Letter, Vol.2009-1 (2009)
16. 寺田賢二郎, 非線形CAEの研究動向と材料モデリング, Mech D&A News Letter, Vol.2010-1 (2010)
17. 特定非営利活動法人 非線形CAE勉強会
<http://www.jancae.org/study/>
18. 特定非営利活動法人 CAE懇話会
<http://www.cae21.org/index.html>



設計情報学に懸ける想い

千葉 一永

北海道工業大学 大学院 工学研究科 機械システム工学専攻

設計情報学 セツケイジョウホウガク Design Informatics

設計要求数(最適化に於ける目的関数数)の次元数で構成される設計空間に潜む設計情報の効率的獲得、及び有機的構造化と可視化の為のフレームワーク。革新設計実現の為の、設計者への能動的発想支援を目的とする。

1. はじめに

温故知新という言葉が座右の銘にしています。御存知、孔子の論語の一節“温故而知新 可以為師矣”から作られた言葉です。各々の文字の文学的解釈は他に譲るとして、私はこの故きを温め、という言葉には2つの意味が内包されていると(勝手に)解釈しています。即ち、1) 一般に既知な内容だけれども自分自身は未知であった事柄を新たに知る、2) 自分自身既知な知識群を有機的に体系化する、という解釈です。これまで行われてきた各分野の研究は1)の解釈に基づく力業的方法論であるのに対して、近年様々な研究分野で行われつつある異分野の融合研究領域構築という方法論は2)の解釈による方向性、つまるところ矢張り温故知新であり、研究を行うにあたり然るべき方向性だったのだらうと思うのです。私の研究に対する姿勢もこの2)の考えを根拠としています(Youngの“創造的思考の基礎たる知識を消化し、新鮮な組み合わせと関連性を持った姿として心に浮かび出てくるもの(Einsteinが直感と呼んだもの)のみが新たなアイデアを生む”[1]という考えに通底します)。

私は学生の頃からこれまで航空宇宙機の設計に纏わる研究に携わって参りました(そしてこれからも変わらず続けたいと願っています)。残念乍ら、現状、航空分野は元気がありません。自動車業界に比べ航空宇宙分野は1台の単価が高く、又設計開発期間が長大な為、おそれと参入出来ない分野であり、喩え参入しても万が一失敗した際に発生する甚大な被害に耐えられる体力のある企業は数える程しか存在しない、という経済的背景が恐らく一般的な理由として挙げられるでしょう。しかし、私は経済的理由とは別に、航空分野が不活性化原因が潜在しているように思えるのです。

航空分野と同様な状況の宇宙分野は元気です(宇宙分野に携わる方々の旺盛な活力がなによりの基であることは間違いありません)。宇宙分野にあって航空分野に無い特徴として特筆すべきは、上述した異分野融合がとても盛んだという事実です。例えば、一昔前に於ける宇宙と材料、宇宙と医学というコラボレーションは言うに及ばず、近年では宇宙と観光(例えば[2]は記憶に新しいところ)、宇宙と食、等斬新な視点による異分野融合が成されてきて、これまで宇宙と無関係だった方々が学会で御講演され、それに伴い宇宙と無関

係だった方々が興味を惹かれ学会に聴講にみえるという波及効果があるようです。

ところが航空には残念乍らこのような視点が殆ど見当たりません。産業として既に成立している航空業界に対して、成立の困難な宇宙業界には危機感が常につきまとっていることが大きな原因の一つだと推測できますが、この危機感が強烈なハンガリー精神を生んでいることは想像に難くありません。最終的に産業を後押しして下さるのは一般市民の皆様であることは間違いありません。それ故に、科学者は一般公開や市民講座の開催といった社会貢献という名前で様々な活動を通し、裾野を広げる努力を怠りません(近頃公開された首都大学東京の2研究室の手になる“START ON AIR! -VRによる近未来航空機体感プロジェクト-”[3]は、航空とデザインアートとのハイブリッド化という2)の視点から構築された大衆への斬新な魅せ方の成功例として特筆されるべきでしょう)。航空業界を戦略産業と位置付け、近い将来日本の基幹産業とするためにも、サイエンスジャーナリズム的な視点をもっと取り入れる必要があるのかも知れません。

2. 設計情報学

さて、研究者としての軸足たる研究に於いても、これまで展開してきた2)の視点を取り入れることで革新的視点が生み出される筈、という考え方の元に創出されたのが設計情報学です。以下では、背景と現状、そして今後の計画の骨子を纏めます。

御存知の通り、航空宇宙機の設計には、計算機の発達と共に数値流体力学(CFD; Computational Fluid Dynamics) 技術や数値構造力学(CSD; Computational Structural) 技術が積極的に使用されるようになり、現在重要な設計ツールとなっています。近年では、計算機の発達に伴い大規模計算が行えるようになり、情報学分野で発展してきた最適化技術とCFDやCSDといった評価手法とを組み合わせた多分野融合最適設計が航空分野のトピックスの一つになっています。これはとりもなおさず、より高忠実度(high-fidelity) の評価がこれまでより大幅に短縮された時間で行え、且つ実験回数を抑えられる為、低コストで行えるようになりつつある、ということを示しています(Mooreの法則が示す通りです)。工業製品は多分野に渡る多数の設計目標を持ち、それぞれはトレードオフ関係にあることが一般的ですが、このトレードオフの様子を直観的に把握することは、高次元空間の可視化となる為困難です。数字の羅列でしかない最適解集合(非劣解群)を如何に解釈するか、が最適化結果の真の意味を理解する必要不可欠な要素なのです。我々は通常のCFDやCSDの後処理では、得られた数値解を詳細に、亦、直観的に調べる為“可視

化”を行います。これをヒントに、同様に最適化結果の数字の羅列を何らかの形で設計空間情報を有機的に体系化、即ち構造化し、更に可視化することで、設計空間を俯瞰することに繋がり、延いては設計者への発想支援そのものに発展し、革新的設計への道が拓けるものと期待しています。又、この方法はデータベースに対する知的な情報発見手法として使用することも可能なため、当然これまで実験等で蓄積されてきたデータに応用することにより、何らかのトラブルにより実験が失敗した際にのみ発生する何らかのデータが存在するならば、そのデータを縮くことにより、失敗を未然に防ぐための設計知識が抽出でき、その初期段階での概念設計時に反映させることも可能です。即ち、安全工学分野への発展という可能性も視野に入ることになります。製品の設計には、特に規模が大きくなればなる程、その失敗確率は高くなりますが、失敗は成功の母と謂う通り、失敗から得られる情報は他の如何なるものにも代え難い財産であることを忘れてはなりません。これまで先人達の培ってきた情報を知的に解釈することで、一段高いレベルの設計或いは知識に変換することができる筈です。

そこで、航空宇宙機の設計のような大規模問題に対して、一段高いレベルの設計プロセスを、亦、俯瞰的に設計空間を見渡すかの如き直観的な設計情報の獲得、延いては革新設計に至る発想支援を能動的に行うべく、設計情報学的アプローチを創出しました。即ち、設計情報学は、大規模問題たる航空宇宙工学問題を基礎に設計学と情報学を融合したプロセスで、設計学、計算力学、情報学、統計学、更に安全工学分野に及ぶ体系化に他なりません。特に、航空宇宙工学分野は、他分野と比べ設計要求が多く(空力、安定性、構造、空力弾性、制御、推進、騒音は代表的な設計要求分野です)、且つその評価精度要求が高く、機体の複雑さ故に最適化で用いる設計変数が多くなる傾向にあります。我々は一般的に大規模問題と一言で呼称しますが、この言葉には、a) 評価に掛かる時間が大規模、b) 設計要求数や設計変数の多さという最適設計問題定義が大規模、の2点が内包されています。航空宇宙分野の設計問題はこれらいずれにも当て嵌まります。上記a) は、通常我々が扱う問題に於ける評価は、一個体あたり数日~10日を要しています。今後最適設計問題のトピックと想定している非正常現象では、これが数週間~数ヶ月と更に時間を要することになります。時間的に不可能な最適化の収束を回避して、如何に効率的に設計空間を俯瞰し構造化するかがエッセンスと成ることは間違いありません。

設計情報学は三本柱、即ち、i) 多数目的最適化手法の高度化、ii) データマイニングによる設計空間の構造化と可視化、及びiii) それらを用いた大規模実設計問題への応用、で成立しています。i) は設計空間を効率的に探索すべく、進化計算法を礎にハイブリッド手法の研究開発を行っています。設計情報学に於ける最適化手法の役割は、設計空間情報抽出の為の効率的データベース構築にあるので、勾配法やKrigingをはじめとした近似手法は現状用いず、差分進化(DE; Differential Evolution)、遺伝的アルゴリズム(GA; Genetic Algorithm)、粒子群最適化(PSO; Particle Swarm

Optimization)等の発見的手法を用いた、ハイブリッド手法を検討しています。これは、近年生物学分野で注目されている進化発生学(Evolutionary Developmental Biology; evo/devo、所謂エボデボ) [4]から発想を得て取り組んでいるものです。個体群を適当に分割して割り当てられた各手法は、独立に操作がなされ、得られた次世代個体群から抽出した非劣解群をアーカイブにストック、このアーカイブのみを共有するという極めて単純なハイブリッド化を施しています。結果は、お互いの長所を良いところ取りする(例えば多様性に優位性を持ちつつ目的関数への擾乱に対する頑健性を有する)組み合わせもあれば、足を引っ張る手法もあり、中々興味深いものです。一方ii) は設計情報学の肝です。如何に情報を有機的に体系化、構造化し、発想支援に繋げるかを検討しております。これまでに明らかになったことは設計空間内の設計情報は大きく2つに大別でき、一方は大域的設計情報、他方は局所的設計情報、となります。前者は分散解析や自己組織化マップから獲得され、後者はラフ集合理論や決定木の様な設計変数空間を分割する手法から獲得されます。大域情報は直截的に設計に使用できますが、局所情報を如何に物理現象と結びつけて設計に使用するか、が今後の課題です。iii) は実問題への応用により方法論の洗練化が図れる為、多くの問題に挑戦している(或いは念頭にある)状況です。全ての結果は、いずれ様々な形で世に送り出せるよう、そして最終的には航空産業を活性化させ日本の基幹産業にできるよう、鋭意研究を進めて参ります。

3. おわりに

高速空気力学解析に始まり、空力最適化、多分野融合最適化、を経て設計情報学へ至りましたが、これらは計算機の進歩があったればこそ為し得た結果です。Mooreの法則が示唆する20年、30年先の計算機性能に基づき、我々は今後、短・中・長期的に成すべき研究戦略を立てなければなりません。設計情報学という枠組みはあくまで道具に過ぎません。それを使って何を成すか、何を生み出すか、は個々の研究者の哲学、思想によってのみ決定されるものです。そこに必要な多角的視点を自分の研究分野と他分野とのハイブリッド化によって創出しよう、というのが私の意図するところです。常に、地に足を着けて将来に挑戦し乍ら一歩ずつ成長して参りたいと思います。

末筆乍ら、設計情報学を展開させるべく本部門に本年より設置された設計情報学研究会の幹事を仰せつかり、活動を行っております。2012年12月には感性工学をテーマに、2013年3月にはデータ同化をテーマに研究会を開催予定です。詳細は下記websiteに纏められております。入会も随時受け付けておりますので、直接私にでも御連絡頂ければ幸甚に存じます。

URL: <http://www.ifs.tohoku.ac.jp/cmd/>

参考文献

- [1] Young, J. W.著, 今井茂雄訳, “アイデアのつくり方,” 阪急コミュニケーションズ.

- [2] 株式会社大林組, “大林組プロジェクト「宇宙エレベーター」建設構想：地球と宇宙をつなぐ10万キロメートルのタワー,” 季刊大林, No.53, 2012, pp.30-59.
- [3] “START ON AIR,” available online at <http://air.mapping.jp>

[cited 6th November 2012].

- [4] Arthur, W. “The Emerging Conceptual Framework of Evolutionary Developmental Biology,” *Nature*, Vol.415, No.6873, 2002, pp.757-764.



Message

Eugenio Oñate
Director of CIMNE
Professor of Structural Mechanics, Technical University of Catalonia (UPC)
Past-President of the IACM and ECCOMAS

It is my great pleasure to congratulate the Computational Mechanics Division (CMD) of the Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) on the occasion of its 25th anniversary.

Very much has changed in the field of Computational Mechanics since 1988 when the CMD of the JSME was founded by the initiative of a group of Japanese scientists, including Prof. Genki Yagawa who was the first Chairperson of the CMD. Nowadays over 5000 engineers and researchers are enrolled in the CMD which also holds the largest body of computational mechanics societies in Japan.

In the days the CMD started, the International Association for Computational Mechanics (IACM) had been just created (it was founded in 1986). The first President of IACM was Prof. Olgierd Zienkiewicz from University of Swansea in the UK. Subsequent presidents of IACM were Prof. Tinsley Oden from University of Texas at Austin in the US (1990-1994), Prof. Alf Samuelsson from Chalmers University in Sweden (1994-1998), Prof. Tom Hughes in those days at Stanford University in the US (1998-2002) and myself from 2002 to 2010. Since 2010 the current president of IACM is Prof. Genki Yagawa.

The IACM has very much evolved over the last 25 years at the same rate that the CMD. The IACM was initially formed by a handful of organizations from different countries that were active in the computational mechanics field. Nowadays, the IACM incorporates some 50 members from 45 countries in the five continents.

Japan has traditionally been one of the more active countries in the IACM. It is one of the few countries in the world that has two associations affiliated to the IACM, namely the Japan Society of Computational Engineering and Sciences (JSCES) and the Japan Association for Computational Mechanics (JACM). Both organizations contribute some 2000 individual members to the IACM.

The CMD was instrumental for the creation of the Asian-Pacific Association for Computational Mechanics (APACM), this being the representative of the eastern world region in the IACM. The CMD has also promoted and supported many activities of both APACM and the IACM in the

Asian-Pacific region. Some examples are the 3rd World Congress on Computational Mechanics of the IACM held in Chiba in 1994 and the 3rd Asian Pacific Congress on Computational Mechanics held in Kyoto in 2007.

An important activity of the CMD in Japan is the Annual Meeting on Computational Mechanics. It inaugurated in 1988, and the latest conference has been just held at Kobe University in October 2012. Besides this conference, the CMD supports several times a year lectures, mini-symposia and other scientific events. The CMD has also greatly contributed to establishing a system for accreditation of computational mechanics engineers. Finally, I would like to highlight the publication by the CMD of an electronic journal in the field of Computational Science and Technology.

All these examples evidence the important activity of the CMD of the JSME in promoting computational mechanics and its applications both in Japan and at an international level.

For all these reasons I want to congratulate all members of the CMD of the JSME for 25 years of hard work and successful activity. In particular, I would like to express my congratulations to Profs. Genki Yagawa and Shinobu Yoshimura as the first and current Chairpersons of the CMD, respectively.

Finally, I want to express my best wishes for the future of the Computational Mechanics Division of the Japan Society of Mechanical Engineers.

Barcelona, Spain.

November 15, 2012



Message

John Kim
Rockwell Collins Distinguished Professor
Mechanical and Aerospace Engineering Department
University of California, Los Angeles

Dear Colleagues: It is a great honor and privilege to have the opportunity to express my congratulatory remarks on this occasion of the 25th anniversary of the Japan Society of Mechanical Engineers-Computational Mechanics Division (JSME-CMD).

Over the past 25 years, computational science and engineering, and computational mechanics in particular, has firmly established its role in scientific research and engineering applications. Along with experiments and theories, computations have become one of the three pillars of research tools. JSME-CMD, through its various activities and interactions with international organizations, has played a major role in advancing our capabilities of computational mechanics.

I had the pleasure of attending the JSME-CMD ICMS 2012 conference, which was held in Kobe, October 9-11, 2012. The high quality technical sessions and the vitality of the meeting, which was well attended by leading scientists not only from Japan but also from all over the world, was a

testimony to the reputation and success of JSME-CMD. A tour of the K computer (at the RIKEN Advanced Institute for Computational Science) reaffirmed my impression that JSME-CMD will continue to play its pioneering role at the frontier of computational mechanics.

With the rapid advancement of powerful computers, computational science and engineering will play even more significant roles in the future, leading us to new scientific discoveries, and enhancing the quality of our lives. I have no doubt that JSME-CMD will continue to play a major role in achieving these goals. Over the years I have enjoyed and benefitted from interactions with some of your past and present members, and I would like to take this opportunity to extend my hearty congratulations on the excellent job you have done over the past 25 years, and wish you the very best for the next 25 years and beyond.

Once again, congratulations, and happy 25th anniversary, and I look forward to more fruitful interactions with you in the years to come.



Message

Bram van Leer
Professor Emeritus of Aerospace Engineering
The University of Michigan

Thank you for your invitation to write a message on the occasion of the 25th anniversary of the Computational Mechanics Division of JSME. This email must suffice as the message, for reasons given below.

I congratulate JSME with its wisdom, 25 years ago, to establish a Division of Computational Mechanics. It was the same frame of mind that made the University of Michigan's Department of Aerospace Engineering hire me as a full professor, with the task to establish both a curriculum and a research program in CFD. It was a good time for such endeavors, as new, powerful computational methods for compressible flow were well established by 1986, and further investment in CFD and computational science in general seemed to have become almost risk-free.

Your Division honored me with its 2003 Computational Mechanics Award. This was a significant event for me, as I explained in my videotaped acceptance speech, not just

because of the honor itself, but because it came from Japan, a country that has made a strong imprint on my life. Several years in Japanese internment camps on Java when I was an infant (1943-45), harmed my eyesight, which remained a weakness during my whole life. I was told I would slowly turn blind after 55, and that prediction turned out to be accurate. I recently retired, in part because of my bad vision, and the CFD abstract I finished today may well be the last one I'll ever write. A number of journal articles and two books, I fear, will never appear.

Thus, my message today will remain short. May you witness and contribute to breathtaking developments in the next 25 years!



Message

Song Fu
Professor of Fluid Dynamics
School of Aerospace Engineering
Tsinghua University

It is my great pleasure and honor to be invited to write a few words to the Computational Mechanics Division of the Japanese Society for Mechanical Engineers (JSME CMD) on the occasion of its 25th anniversary.

It is well known that Japan has made great contributions to the development of the computational sciences, especially in the field of computational mechanics in which Japan plays a very important leading role in the international academic/research communities. One can easily see Japan's achievement in computation through WCCM's and many other international symposia. I have personally been involved in the China-Japan Workshop on Turbulence Research for some simulation. I also feel grateful for having participated two International Workshops on Advances in

Computational Mechanics (IWACOM) that highlighted the great progresses in computational mechanics in Japan and around the world.

I am fully confident that in the next 25 years and beyond Japan, especially under the leadership of JSME CMD, will achieve further great successes in the field of computational mechanics. I expect my colleagues in China will learn further from Japan. I also hope there will be more collaboration between the computational mechanics communities both in China and in Japan.

Best regards,
 Sincerely yours



JSME CMD and Professor Genki Yagawa Achievements

Wing Kam Liu, Ph.D., P.E.
Walter P. Murphy Professor of Mechanical Engineering, Northwestern University / World Class University Professor at SKKU

It is my delight and distinguished honor to write this article celebrating the 25th Anniversary of the JSME Computational Mechanics Division (CMD). JSME CMD was established in 1988 and the founding chair was Professor Genki Yagawa. Under his leadership, JSME CMD becomes a world Class leader and powerhouse not only in Computational Mechanics but also in Computational Engineering and Science. This is evident by the recognition of the role and influence of Simulation based Engineering and Science around the world. Because of the enormous impact of Computational Mechanics, many prominent projects initiated in Japan have been chaired by Professor Yagawa: Committee on Nuclear Structural Integrity, Central Research Institute for Electric Power Industries, Committee for Nuclear Research for JWES, just to name a few. More importantly, Professor Yagawa has been the Science Advisor to many Societies and Governmental Organizations such as the National Marine Research Institute, the world renowned "Earth Simulator" National Project of Supercomputer of Science and Technology Agency (STA), the Nuclear Safety Council of the Ministry of International Trades and

Industries (MITI), the "K-Computer" National Project of Supercomputer by the Ministry of Education, Science and Technology (MEXT), the Committee on Nuclear Codes and Standards, Nuclear Regulatory Commission of the Cabinet Office, the Committee for Transportation of Radioactive Materials of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, and the Committee for Computational Science and Engineering of the Japan Society for Promotion of Science (JSPS), among many others. Furthermore, Professor Yagawa has been members of many major corporations including Japan Power Engineering and Inspection Corporation and Nuclear Power Engineering Corporation.

Professor Yagawa is very active in both research and education. He has published more than 20 books, 44 edited Proceedings and Books and 400 journal articles. Among his many research areas are the large scale and parallel computational mechanics, science and engineering (e.g., Earth Simulator); Free Mesh Method, one of the fastest meshfree article methods in the world; large scale molecular dynamics simulations, nonlinear fracture mechanics and inversed problems. He has educated many prominent students. Many

of his students became famous professors around the world. I just wish to name a few as it is impossible to name all: (1) Noriyuki Miyazaki, Professor of Kyoto University, Past President of JACM, Past Chair of JSME CMD; (2) Shinobu Yoshimura, Professor of The University of Tokyo, Present President of JACM, Present Chair of JSME CMD; (3) Toshihisa Nishioka, Emeritus Professor of Kobe University; (4) Professor Hiroshi Kanayama, Professor of Kyushu University, (5) Marie Oshima, Professor of The University of Tokyo; (6) Hiroshi Okuda, Professor of The University of Tokyo; (7) Tomonari Furukawa, Professor of Virginia Tech, USA; and (8) Ryuji Shioya, Professor of Toyo University.

Professor Yagawa is the Founding Editor of the International Journal for Computational Mechanics (Springer) and the International Journal for Computational Method (World Scientific). He is the editor of the International Journal for Nuclear Engineering and Design (North Holland) and an Associate Editor for the ASME Applied Mechanics Reviews and the International Journal for Pressure Vessels and Piping (Elsevier). He is a member of the Editorial Board of many journals including Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (Elsevier), International Journal for Numerical Methods in Engineering (Wiley), International Journal for Computers and Structures (Pergamon), International Journal for Engineering Computations (Pineridge Press), International Journal for Integrated Computer-Aided Engineering (Wiley-Eastern Ltd), International Journal of Interaction and Multiscale Mechanics (Techno-Press), International Journal of Process Mechanical Engineering (IMEchE); Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Science (Springer), and Computational mechanics Series (Wiley).

Professor Yagawa has done a tremendous service to many international associations and societies. The list is so long that I wish to report only a few that I have associated with under his supervision. Professor Yagawa is current the President of IACM, the Founding Member and Secretary General of APACM, and a Member of the Congress Committee of IUTAM. He has served as the 1986 General Chairman of the International Conference on Computational Mechanics; the General Co-Chair of the International Conferences on Computational Sciences from 1988 to 1997; the 1994 Program Chair of the 3rd World Congress on Computational mechanics (WCCM); the 1997 General Chairman of the International Symposium on Parallel Computing for Engineering and Science; the 2004 and 2010 General Co-Chairman of the World Congress on Computational Mechanics; the 2007 General Chairmen of the 3rd Asian-Pacific Congress on Computational mechanics; and the 2009 General Co-Chair of the 2nd International Symposium on Computational mechanics and the 12th

International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science. Selected highlights of the 2005 Complas held in Barcelona, and the 2010 WCCM Held in Sydney are depicted in the two figures.



COMPLAS@Barcelona, 2005 (Professor Eugenio Onate (left) and Mrs. Onate (right) and Professor Yagawa (Center))



WCCM@Sydney, 2010 (From left to right: Newly elected IACM President Yagawa, IACM Asia and South Pacific Vice President Mingwu Yuen, IACM America Vice President Wing Kam Liu; and IACM Europe and Africa Vice President Peter Wriggers)



Promotion the 2016 World Congress for Computational Mechanics to be held in Seoul, Korea, the Japan-Korea-Malaysia workshop led by Professor Yagawa, Professor Moon Ki Kim, and the late Professor Young Jin Kim of SKKU was held in SKKU in 2011

To further enhance the visibility and international collaborations with international partners as well as the 2016 WCCM to be held in Seoul, S. Korea, Professor Yagawa, Professor Moon Ki Kim of Sung Kyun Kwan University (SKKU), S. Korea, and the late Professor Young Jin Kim of SKKU, have been working very closely in the past few years

organizing international workshops and conferences all over the world, two such events are depicted next.

Professor Yagawa was born in Fukuoka, Japan. He received his B.S., M.S., and Ph.D, all from the University of Tokyo, in 1965, 1967, and 1970, respectively. He became a Lecturer at the University of Tokyo and in 1971 he was promoted to Associate Professor, and became a Full professor in 1984. He was the Chair of the Department of Quantum Engineering & Systems Science (1989-1990, 1993-1994), the Chair of Graduate Program of Quantum Engineering & Systems Science (1991-1992, 1996-1997), and Councilor (1998-2000), Emeritus Professor (2004-present). From 2004, Professor Yagawa has been Professor of Computational Mechanics (2004-present) and Director of Center for Computational Mechanics Research (2005-2012) at Toyo University. Professor Yagawa has been a Post Doctoral Fellow at the University of Alabama in Huntsville, USA (1972-1973), a Research Fellow at Delft University of Technology, Netherland (1980), a Visiting Professor at Georgia Institute of Technology, USA (1986), a Visiting Professor at the University of Karlsruhe, Germany (1992) and the World Class University Professor at the Sung Kyun Kwan University, S. Korea (2008-present). Currently, he is the President of Nuclear Safety Research Association (since 2011).



High Performance Computing Workshop held in Japan, led by Professors Yagawa, Moon Ki Kim and the late Professor Young Jin Kim for the consolidation of the friendship and mutual interest in Computational Mechanics between Japan and S. Korea. It is a positive movement towards the hosting of WCCM 2016 in Seoul.

Professor Yagawa received many honors and awards. He received many Best Paper Awards from the Japan High Pressure Institute (1974 and 1984); the JSME (1975 and

1982), the JSIAM (1996), the JSST (1997), the AESJ (1998) and the ASME Best Paper Award (1990). He was awarded the Gigaflop Performance Award of Cray Research (1990), the JSME Computational Mechanics Award (1992), the International Conference on Computational Engineering Science Gold Medal (1995), the AESJ Computational Science and Engineering Award (2004), the JSME Materials & Mechanics Award (2004), the JACM Computational Mechanics Award (2004), the APACM Computational Mechanics Award (2004), the IACM Computational Mechanics Award (2004), the JWES Award (2005), the APACM Zienkiewicz Medal (2007), IACM Award (2008), the JSCES Award (2008), the Inoue-Enryo Prize (2008), and the Toray Science and Technology Prize (2009). Because of his high recognition by international scholars and societies, Professor Yagawa was awarded the most prestigious Awards from the Minister of Science and Technology Award (1998), the Prime Minister Award (2007), and the Japan Academy Prize (2009). He is a fellow of ASME (1993), IACM (1998), JSME (2001), AESJ (2004), JSIAM (2009), and JSST Fellow (2011). He is an Honorary Member of JSME (2009) and JACM (2010), and he served as an Honorary Advisor to China Standards Committee of Pressure Vessels (1985). He received an Honorary Doctor Degree from the Iasi Technical University in 2010. Professor Yagawa is a very talented Cello Player (highlighted below).



As a Cello Player



JSME-CMD : A Great Division with Great Leaders

Tayfun E. Tezduyar
 Mechanical Engineering, Rice University, Houston, Texas

It is my pleasure to provide some comments on the 25th anniversary of the JSME-CMD as a tribute to a great division with great leaders. The CMD is in fact is a great computational mechanics community with internationally recognized contributions and accomplishments. The leaders I am referring to are not only those who served as the CMD Chair, but also those who just provided intellectual and research leadership in this community.

I had the privilege of knowing nearly 50% of those who served as the CMD Chair. They have been great research leaders, benevolent mentors to the young Japanese researchers, and true gentlemen. Genki Yagawa, a good friend, who showed the vision of founding the CMD, made major contributions to computational solid mechanics, computational fluid-structure interaction (FSI), mesh generation, and parallel computing.



Yagawa and Tezduyar

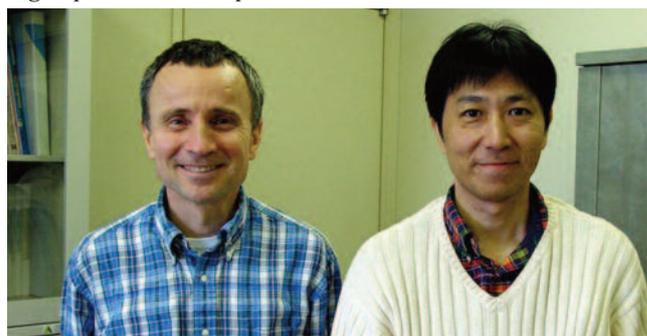
Yoichiro Matsumoto, another good friend and tireless worker, made major contributions to experimental and computational fluid mechanics and computational biomechanics, provided true academic leadership at different levels, and have been an active participant in ASME.



Matsumoto and Tezduyar

I am almost sure Kozo Fujii and I had desk spaces in the same building at NASA Ames Research Center, back

when I was a PhD student and Kozo was a postdoctoral associate. He is one of the computational fluid dynamics (CFD) research leaders, and I first knew about him with his high-speed train computations that I admired.



Tezduyar and Fujii

I am very grateful to Takashi Yabe, one of the greatest CFD researchers, for introducing me to Kenji Takizawa, a very special young star in computational mechanics, and now an Associate Professor at Waseda University. Takashi is a man with vision beyond computational mechanics.



Yabe and Tezduyar



Takizawa, Ogata, Yabe and Tezduyar

I have also known Noriyuki Miyazaki, Kazuhiro Nakahashi, Ryutaro Himeno and Takeo Kajishima for a long

time. Noriyuki made excellent contributions to computational mechanics, and he is a very fine gentleman. Kazuhiro made major contributions to CFD with moving meshes, and his flow around a bee in flight fascinated me; it was a “special forces” bee, because it was flying with its stinger out, ready to sting. Ryutaro made major contributions in computational biomechanics and also in high performance computing. Takeo approaches fluid-particle interactions in a different way, with very impressive results. He is also one of the best CFD researchers I have met. The current CMD Chair, Shinobu Yoshimura, is an excellent computational FSI researcher, with systematic studies and applications to real-world problems. He is also a good (younger) friend that I have known for a long time. I always look forward to working with him.

Shinobu and I, together with Yoichiro and Kenji, have organized the *Lectures on Computational Fluid-Structure Interaction* at University of Tokyo in March 2012. See <http://save.sys.t.u-tokyo.ac.jp/LecFSI12/>. It was very well attended. Interestingly, the first lecture series I organized in Japan was with Genki, in December 1999: *Shortcourse on Finite Elements in Fluids*. It was sponsored by the JSME-CMD, and the lecture notes were also published by the JSME-CMD. The first one with the first CMD Chair, the last one with the last CMD Chair, and I am sure there will be more to come.

I also had the pleasure of knowing (for a long time) other intellectual and research leaders in the JSME-CMD community who did not serve as the division chair. They include Nobuyuki Satofuka, an outstanding CFD researcher, a true gentleman, and a good friend. I will never forget that a giant in CFD research carved out two full days from his extremely busy schedule to welcome me in Kyoto.

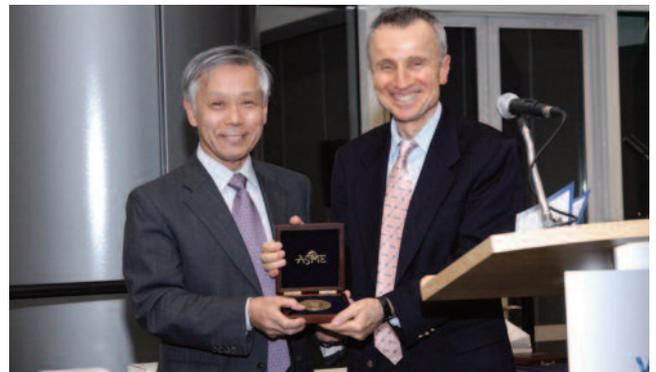


Tezduryar and Satofuka

Another good friend in the JSME-CMD community is Toshiaki Hisada, who has done great research in computational solid mechanics, has written great textbooks, has expanded to FSI, and is now doing excellent research in computational biomechanics. Toshiaki is not only a great researcher but also a researcher with great heart. Mutsuto Kawahara, who was a mentor to me when I was a young professor, propelled the finite elements in flow research in

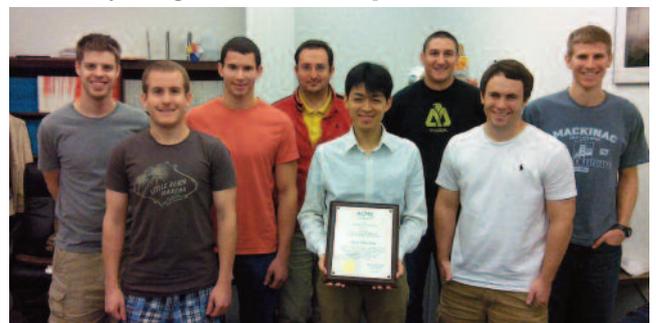
Japan, and I am always happy to see him whenever I visit Japan. He is very energetic and creative, with a good sense of humor and a very good heart. Noboru Kikuchi, elusive but one of the brightest and most creative computational mechanics researchers I have met, is also someone I have known for a long time. Clearly, he is a man destined to do great things, and he is already doing it. I am sure the JSME-CMD community is proud of his accomplishments.

Speaking of being proud of... Members of the JSME-CMD community made themselves good reputation in the ASME Applied Mechanics Division (AMD). The AMD is the largest division in the Basic Engineering Group of the ASME, and, in my opinion, the most prestigious one. Yoichiro Matsumoto was the first researcher from Japan to receive an award from the ASME AMD. He received the Ted Belytschko Applied Mechanics Award in 2010. This is a very competitive award, and I was lucky to be the ASME AMD Chair at the award ceremony. The JSME-CMD community has every reason to be proud of Yoichiro.



Matsumoto receiving the ASME AMD Applied Mechanics Award

In 2012, Kenji Takizawa received the ASME AMD Thomas J.R. Hughes Young Investigator Award. Kenji is the youngest ever to receive this award, and he is the only one outside the United States to ever receive it. The JSME-CMD community has good reason to be proud of him too.



Takizawa, the ASME AMD Young Investigator Award, and the “T-Team.”

Many, many other JSME-CMD researchers have been recognized internationally for their outstanding contributions, and I am sure there will be many, many more to come. All this makes me very proud, because I see Japan as my second home. My best “birthday” wishes and congratulations to JSME-CMD!

25周年記念講演会開催報告

25周年記念（2012年度）計算力学講演会
国内会議の開催報告

平野 徹 ダイキン情報システム株式会社（左）
屋代 如月 神戸大学大学院工学研究科（右）

2012年10月6日（土）から9日（火）の4日間、神戸市のポートアイランド南地区にて、25回目の記念すべき計算力学講演会（CMD2012）が開催され、全国から550名を超える参加者が集まりました。

開催場所も、「京コンピュータ」の設置施設（理化学研究所・計算科学研究機構：AICS）を中心として、複数の大学と研究施設（神戸大学・統合研究拠点、兵庫県立大学・大学院、甲南大学・先端生命工学研究所：FIBER、計算科学振興財団：FOCUS）に跨って、計算力学に関わる産官学の連携を象徴するバーチャルキャンパスとして開催しました（写真1-4）。各機関の担当の方々の大変なご尽力無くしては実現できなかったことであり、この紙面を借りて感謝する次第です。

今回の講演会では、24のオーガナイズド・セッションならびに合同ポスターセッション、6つのフォーラム、そして、3つの特別講演を設定しました。

特別講演として3名の方に登壇頂きました。計算力学・

HPCの過去・現在・未来を見通すことで、閉塞状況にある日本のモノづくりを大きく変えるきっかけとなればとの思いで、初日は、元東大・生産研教授で機械学会会長も務められた自動車研究所・小林敏雄所長に「自動車産業における計算力学活用の歴史」を概観して頂きました（写真5）。二日目には元三菱重工副社長の青木素直氏が「日本のモノづくりのパラダイムチェンジ」を熱く語り（写真6）、最終日にAICSの平尾機構長に「京コンピュータが開く新しい世界」を展望して頂きました（写真7）。

青木氏はグローバル製造業の新しい戦略として、新興国市場のマーケティングに根ざしたマスカスタマイゼーション・モジュール設計（MCMD）、グローバル・サプライチェーン設計、製造プロセスや実製品スケールでの数値シミュレーションによる試作レスをコアに置いた革新的開発・製造プロセスの構築を提言し、実学としてのシミュレーションが日本の製造業復活に必須であり、貢献してこそ価値があると断言



写真1. CMD2012会場全景（計算科学研究機構と計算科学センタービル）



写真2. CMD2012会場（神戸大学統合研究拠点）

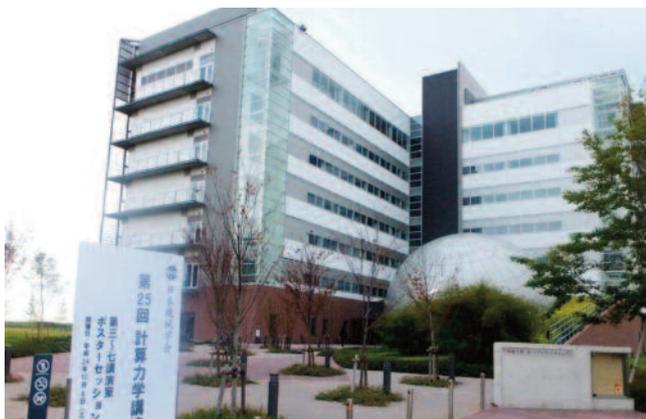


写真3. CMD2012会場（甲南大学先端生命工学研究所）



写真4. CMD2012会場（総合受付：FOCUS, 兵庫県立大・大学院）

しています。計算力学にかかわる研究者、企業人として大いに共感しました。

平尾機構長の講演では、「京コンピュータ」の Next Generation として、エクサスケール・コンピューティングが実現できればアボガドロ数の計算ができるとの表現には新鮮さを感じました。

フォーラムに関しても、例年を超えて6件のテーマを立ち上げました。CAE懇話会との共催として「オープンソースCAE」（写真8）と「企業におけるCAE活用」の2件、東大生研・加藤教授との共催として「京コンピュータと次世代ものづくり」、甲南大：FIBERとの共催として「物質材料と計算力学」、さらに京大・小山田教授に「大規模シミュレーションと可視化」を、東大・吉村教授に「社会シミュレーション」をお願いし、多様な分野横断的テーマを設定することで

機械学会以外の研究者や企業参加者も増やすことができたと思います。

また、二日目の特別講演の後に部門表彰式が行われ、今年度の功績賞は東北大・大林教授（写真9）、Texas A&M Univ. の J.N. Reddy 教授が受賞され、業績賞には東工大・天谷教授、鹿児島大・池田教授が受賞されました。

二日目の午後には、甲南大キャンパス7Fポスターフロアにおいて合同ポスターセッションも行われました。3回目の試みとなる今回は44件ものポスター発表が集まり、分野を横断しての議論が活発になされ大変盛況となりました（写真10）。

懇親会の企画では、Night Music in Kobe と題して「マルチパラダイム音楽の夕べ」を演出しました（写真11-14）。ピアノとサクソ2本に最後にボーカルが加わり、クラシッ



写真5. 特別講演1（自動車研究所・小林敏雄所長）



写真6. 特別講演2（三菱総合研究所・青木素直副理事長）



写真7. 特別講演3（計算科学研究機構・平尾公彦機構長）



写真8. 講演会場の様子（フォーラム5）



写真9. 部門賞表彰式（功績賞・東北大大林教授）

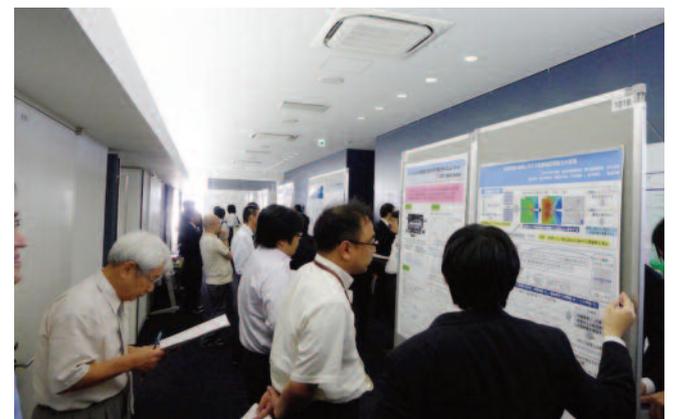


写真10. 合同ポスターセッションの様子（甲南大7F）



写真11. 神戸花鳥園での懇親会



写真12. 懇親会のアトラクション



写真13. 懇親会場の様子1



写真14. 懇親会場の様子2

クからジャズ、タンゴ、ポピュラー音楽へとジャンルを超えた白熱の演奏が続き、参加者一同も大いに盛り上がり、花鳥園という会場の独特の雰囲気と共に神戸の夜を存分に楽しんでいただけたと思います。演奏の最後に参加者の皆さんと共に「見上げてごらん夜の星を」合唱したのは大変感動的でした。

さらに、10月9日（火）には記念国際会議の初日行事として「京」コンピュータ施設見学会が設定され、国内・国際会

議両方から合計250名以上の参加者を集めて実施されました。特に、学生や若い研究者の方々には、今回の講演会の参加の大きなメモリアルになったようです。

最後になりましたが、今回の実行委員を務めて頂いた先生方、CAE懇話会からの実行委員の方々、機械学会事務局の方々、計算力学部門関係の方々、そしてなによりも参加いただきました皆様に熱く御礼申し上げます。



25周年記念国際会議ICMS2012開催

姫野龍太郎 理化学研究所（左）
岡田 裕 東京理科大学（右）

計算力学部門設立 25 周年を記念した国際シンポジウム (International Computational Mechanics Symposium, ICMS2012, <http://www.jsme.or.jp/conference/cmdconf12/index.html>) が、2012 年秋に本格稼働予定の「京コンピュータ」の設置施設 (理化学研究所計算科学研究機構: AICS) の周辺地域、神戸ポートアイランド南地区で、2012 年 10 月 9 (火) 日-11 日 (木) に開催されました。これは第 25 回計算力学講演会 (10 月 6 日 (土) -9 日 (火)) と連続する日程で同じ地区で開催されたものです。会場となった甲南大学先端生命工学研究所と神戸大学統合研究拠点は「京コンピュータ」設置施設に隣接しています。初日 (10 月 9 日 (火)) 午前は、

「京コンピュータ」の見学会が実施され、ICMS2012 参加者用の英語案内ツアー計 2 回と計算力学講演会 (国内会議) 参加者用日本語案内ツアー計 2 回が開催されました。合計で 100 名近い方々の参加があり、多くの計算力学関係者の「京コンピュータ」への期待と関心の高さを示すものと思います。

ICMS2012 には、日本を除くと 12 か国から、全体講演のために招待した 5 名の方々を含み、177 名の参加がありました。当初計画 (実は 100 名程度) よりも大幅に増え、計算力学部門 25 周年記念行事としては成功したのではないかと思います。特に、隣国である韓国から 9 名の参加がありました。9 月に年次大会開催と同時に金沢で行われた「KSME-

JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2012 at Kanazawa University”に続き、日本と韓国の研究交流の促進ができたのではないかと思います。さらに、ブラジルから2名など、遠方からも参加して下さり、実行委員長・幹事としては大変嬉しく思うところです。さらに、35歳以下の方を対象にした参加登録料を無料とする助成制度には多くの若い方々に応募頂きましたことを申し添えておきます。

10月9日(火)13時半から神戸大学統合研究拠点で行われたOpening Ceremonyでは、実行委員長(姫野龍太郎・理化学研究所)と計算力学部門長(吉村忍・東京大学)によるWelcoming Speechがあり、引き続いてJack Dongarra教授(University of Tennessee, USA)による全体講演(On the Future of High Performance Computing: How to Think for Peta and Exascale Computing)が行われました。その中でス

ーパーコンピュータの将来に関する話題が提供されました。コーヒーブレイクの後、5室に分かれてミニシンポジウム(パラレルセッション)が行われました。夜は、神戸大学統合研究拠点に隣接する「花鳥園」でレセプションが行われました。

2日目(10月10日(水))は、9時より神戸大学統合研究拠点で全体講演 Jiun Shyan Chen 教授 (UCLA, USA) “Stabilized and Regularized Semi-Lagrangian Meshfree Method for Fragment-Contact-Impact Problems”と Roger Ohayon 教授 (CNAM, France) “Modal Analysis of Fluid Structure Interaction Problems — Computational and Reduced Order Models —”がありました。メッシュフリー法や流体-構造連成解析手法に関する最新の研究成果が紹介されました。引続き、コーヒーブレイクや昼食をはさみ、ミニシンポジウム(パラレルセッション)が夕方まで行われました。



写真1 挨拶をされる吉村部門長



写真2 全体講演中のDongarra教授



写真3 神戸大学統合研究拠点(コンベンションホール)



写真, 4 花鳥園でのレセプションの様子



写真5 全体講演をされるChen教授



写真6 全体講演をされるOhayon教授



写真7, 8 バンケットで乾杯のご挨拶をされる矢川教授と歓談の様子



写真90 全体講演をされる追永勇次氏



写真10 会場となった甲南大学先端生命工学研究所入口付近

神戸クルーズディナー（バンケットディナー）では、冒頭、矢川元基先生（初代部門長・東洋大学）にご挨拶と乾杯のご発声をいただき、歓談の時を過ごしました。幸い、雨が降らず、神戸港周辺の景色を楽しむこともでき参加者の方々には喜んでいただけたのではないかと思います。

3日目（10月11日（木））も前日と同じく神戸大学統合研究拠点での全体講演でスタートしました。はじめに、追永勇次氏（富士通）“Technologies Implemented in the K Computer and Beyond”では「京コンピュータ」開発に関する話題をご提供頂きました。続いて、矢川元基先生（初代部門長・東洋大学）からは、“Some Considerations on High Performance Computational Mechanics”と題し、V&V (Verification & Validation)やエクサスケールコンピューテーションに関する話題など、今後の計算力学研究の方向性を示唆するご講演を頂きました。引き続き、ミニシンポジウム(パラレルセッション)が行われました。

ICMS2012 で実施されましたミニシンポジウムは下記の通りです。ミニシンポジウムでは一般講演だけでなく基調講演も企画され、計算力学部門25周年の歩みを振り返るとともに、これからについて考えるいい機会になったのではないかと思います。特に、計算力学の各分野をリードされてきた方々による基調講演は特に意義深いものであったのではないかと考えています。この場をお借りして、ミニシンポジウムオーガナイザーの皆様ならびに講演者・参加者の方々に御礼申し上げます。

1. **Recent Advances in Meshfree and Particle Methods** (Professor Seiya Hagihara, Saga University; Professor Seiichi Koshizuka, The University of Tokyo; Professor Rong Tian, Chinese Academy of Sciences, China)
2. **Continuum-based Multiscale Modeling and Simulation with Uncertainties** (Professor Naoki Takano, Keio University; Professor Tetsuya Matsuda, Tsukuba University; Dr. Guillaume Haïat, Université Paris-Est Laboratoire Modélisation et Simulation Multi Echelle MSME, France)
3. **Design Optimization, Exploration and Informatics** (Professor Shigeru Obayashi, Institute of Fluid Science, Tohoku University; Professor In Lee, Department of Aerospace Engineering, KAIST; Professor Carlo Poloni, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Trieste, Italy)
4. **Computational Fracture Mechanics and Structural Integrity Analyses** (Professor Hiroshi Okada, Tokyo University of Science; Professor Toshio Nagashima, Sophia University; Professor Jai Hak Park, Chungbuk National University, Korea; Professor Takehiro Fujimoto, Kobe University)
5. **Computational and Experimental Studies of Electronic Packaging** (Professor Hideo Miura, Tohoku University; Professor Soon-Bok Lee, KAIST, Korea; Professor Toru Ikeda, Kyoto University)

- 6. Prediction and Control of Turbulent Flows** (Professor Makoto Yamamoto, Tokyo University of Science; Professor Koji Fukagata, Keio University, Professor Haecheon Choi, Seoul National University, Korea)
- 7. Recent Progress in Computational Fluid Dynamics and Related Topics** (Professor Hiroshi Kanayama, Kyushu University; Professor Daisuke Tagami, Kyushu University; Professor Frederic Magoules, Ecole Centrale Paris, France; Professor Shuyu Sun, King Abdullah University of Science and Technology, Saudi Arabia)
- 8. Fluid-Structure Interaction** (Professor Kenji Takizawa, Waseda University; Professor Tayfun E. Tezduyar, Rice University, USA, Professor Yohsuke Imai, Tohoku University)
- 9. Recent Progress in Biomechanical Modeling and Simulation** (Professor Shu Takagi, University of Tokyo; Professor Xiaobo Gong, Shanghai Jiao Tong University, China)
- 10. Advances in Inverse Problems** (Professor Hirotsugu Inoue, Tokyo Institute of Technology; Professor Shiro Kubo, Osaka University; Professor Toshiro Matsumoto, Nagoya University; Professor Kenji Amaya, Tokyo Institute of Technology)
- 11. Recent Trends in Structural Optimization** (Professor Shinji Nishiwaki, Kyoto University; Professor Kazuhiro Izui, Kyoto University; Professor Seungjae Min, Hanyang University, Korea)
- 12. Recent Progress in Numerical Modeling of Heat/Mass Transfer and Combustion** (Professor Mamoru Tanahashi, Tokyo Institute of Technology; Dr. Nedunchezian Swaminathan, University of Cambridge, UK)

会議の終了後は計算力学部門の英文ジャーナル“Journal of Computational Science and Technology (JCST)”で特集号を企画します。2013年1月原稿締切、2013年7月発行を目指しています。ICMS2012の発表者の方々は奮ってご投稿下さいませようお願いたします。既に、投稿受付準備は整っています (<http://www.i-product.biz/jsme/>)。

最後になりますが、日本計算力学連合 (Japan Association for Computational Mechanics (JACM)、会長：東京都大学・吉村忍教授)には後援団体として、特に全体講演 (Plenary Lecture) 企画でご協力を頂いてきました。神戸大統合研究拠点、甲南大学先端生命工学研究所、(財)計算科学振興財団、(独)理化学研究所計算科学研究機構にもご後援頂きました。また、実行委員会委員の方々のご尽力、甲南大学先端生命工学研究所と神戸大学統合研究拠点関係者の方々のご協力にこの場を借りてお礼申し上げます。さらに、事務局担当として実行委員会委員でもある野田茂穂氏(理化学研究所)ならびに理化学研究所の柴田麻衣子氏には献身的なサポートを頂いてきました。

会議を成功に導いて下さった、ICMS2012参加者ならびに関係者各位に御礼申し上げます。

実行委員会 (国内メンバー)：実行委員長・姫野龍太郎 (理研)、幹事・岡田裕 (東京理科大学) と、実行委員会委員・池田徹 (京都大学)・大林茂 (東北大学)・梶島岳夫 (大阪大学)・加藤千幸 (東京大学)・高木周 (東京大学)・辰岡正樹 (アルゴグラフィックス)・店橋護 (東京工業大学)・高野直樹 (慶應大学)・建石寿枝 (甲南大学)・西岡俊久 (神戸大学)・西脇真二 (京都大学)・野田茂穂 (理研)・萩原世也 (佐賀大学)・福田正大 (計算科学財団)・藤本岳洋 (神戸大学)・松尾裕一 (JAXA)・屋代如月 (神戸大学)・山田貴博 (横浜国立大学)・山本誠 (東京理科大学)・吉村忍 (東京大学)

《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 川島礼二郎 E-mail: kawashima@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 03-5360-3501 FAX 03-5360-3508

計算力学部門ニュースレター No. 49 : 2012年12月14日発行

ニュースレターのカラー版 (No. 41~) につきましては、日本機械学会計算力学部門の下記URLをご覧ください。

<http://www.jsme.or.jp/cmd/japanese/sitemap/index.html>

編集責任者：広報委員会委員長 吉村忍

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 小石正隆

横浜ゴム株式会社

〒254-8601 神奈川県平塚市追分2-1

TEL : 0463-35-9640 FAX : 0463-35-9764 E-Mail : koishi@hpt.yrc.co.jp