

技術動向調査報告

調査テーマ：米国産業界活性化のための先進的 CAE (Computer Aided Engineering) 技術

平成 15 年 3 月 31 日

所属：計算科学研究部門

氏名：手塚 明

1. 概要

米国の産業界活性化の一因は、IT 技術及びナノ技術の巧みな応用であり、そのバックボーンになるのは CAE (Computer Aided Engineering) 技術であると言われている。今回の調査では、特に先進的 CAE 技術応用に焦点を絞り、以下の 5 項目について、イラク戦争勃発直前の平成 15 年 3 月 5 日から 3 月 16 日まで 11 日間、5 カ所・6 名の第一線の研究者・研究室を訪問し、技術動向調査を行った。



1. The University of Texas at Austin, Austin
2. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge,
3. Northwestern University, Evanston
4. Carnegie Mellon University, Pittsburgh
5. University of Michigan, Ann Arbor

図 1 訪問機関

・次世代流体解析

訪問先：Prof. Thomas J.R. Hughes

The Texas Institute for Computational and Applied Mathematics

The University of Texas at Austin

<http://www.ticam.utexas.edu/~hughes/>

Prof. Thomas J.R. Hughes は安定化流体有限要素解析の第一人者であり、バイオエンジニアリング等への応用も手がけており、自ら Centric Engineering Systems というソフトウェアベンチャー会社の立ち上げ経験もある。今回の調査では、流体実解析に関する米国の動向、流体解析の新しい応用分野について、調査を行った。

- ・ 多目的最適設計技術

訪問先 : Assis. Prof. Olivier L. de Weck

Department of Mechanical Engineering

Massachusetts Institute of Technology

<http://web.mit.edu/deweck/www/>

産業界における設計問題の大半は複数の現象に対する複数の設計仕様に関する複雑問題である。対象物の高機能化に伴い、その複雑度は年々上がっており、エンジニアが勘と経験で最適な設計案を導出するのは不可能に近くなっている。Prof. Olivier L. de Weck は最適な設計案を導出する多目的最適設計技術分野の俊英であり、実用化への課題とキー技術についての調査を行った。

- ・ ナノテクノロジーのためのマルチスケールシミュレーション

訪問先 : Prof. Ted Belytschko

Department of Mechanical Engineering

Northwestern University

<http://www.tam.nwu.edu/tb/tb.html>

訪問先 : Prof. Wing Kam Liu、

Department of Mechanical Engineering

Northwestern University

<http://tam.mech.northwestern.edu/wkl/liu.html>

ナノテクノロジーの実用化のためには、ナノレベルの現象制御と日常スケールでの機能発現を何らかの形で関係付ける必要がある。そのためには、原子レベルと連続体レベルの物理現象をカップリングさせてシミュレーションするマルチスケール解法がキー技術である。Prof. Ted Belytschko はマルチスケール解法のキーとなる解析手法の提案を行っている学会の重鎮、Prof. Wing Kam Liu はナノテクノロジーのためのマルチスケールシミュレーションのキーパーソンであり、同項目についての調査を行った。

- ・ 先進CAD技術

訪問先 : Prof. Kenji Shimada

Mechanical Engineering

Carnegie Mellon University

<http://www.andrew.cmu.edu/~shimada/>

一般にCADベンダーの方がCAEベンダーよりも規模が大きく、CAEベンダーがCADベンダーに吸収される事例が増えている。Prof. Kenji Shimada はCADを専門としており、CAD側から見た将来のCAEのフォーメーション、先進CADの応用分野についての議論を行った。

- ・ 米国自動車産業におけるデジタルエンジニアリング

訪問先 : Prof. Noboru Kikuchi

Mechanical Engineering & Applied Mechanics

University of Michigan

<http://www-personal.engin.umich.edu/~kikuchi/>

90年当初の米国の自動車産業の低迷からの脱却のキーはCAEの効果的な活用、さらにはそれを発展させたデジタルエンジニアリングである。デジタルエンジニアリングの第一人者 Prof.

Noboru Kikuchi を訪問し、C A E と設計との効果的なフォーメーション、戦略等についての情報収集を行った。

2. はじめに

本調査は11日間5カ所6研究者に対して、研究室を訪問し、質疑応答形式で進めたものである。報告書の内容は質疑応答の内容を要約したものであり、厳密な数値的な裏付けは取っていない事を了承願いたい。

3. 本文

以下に各調査項目の詳細を記す。

○ 次世代流体解析

Prof. Thomas J.R. Hughes

The Texas Institute for Computational and Applied Mathematics

The University of Texas at Austin

<http://www.ticam.utexas.edu/~hughes/>

<http://isihighlycited.com/author.cgi?&link1=Browse&link2=Results&id=505>

略歴

B.S. Pratt Institute - Mechanical Engineering (1965)

M.S. Pratt Institute - Mechanical Engineering (1967)

M.S. U. C. Berkeley - Mathematics (1974)

Ph.D. U.C. Berkeley - Engineering Science (1974)

1965-1966 Mechanical Design Engineer, Grumman Aircraft Engineering, USA

1967-1969 Research and Development Engineer, General Dynamics, Electric Boat Groton, USA

1974-1976 Assistant Research Engineer, University of California, Berkeley

1975-1976 Lecturer of Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley

1976-1978 Assistant Professor of Structural Mechanics, California Institute of Technology

1978-1980 Associate Professor of Structural Mechanics, California Institute of Technology

1980-1982 Associate Professor of Mechanical Engineering, Stanford University

1983-2002 Professor of Mechanical Engineering, Stanford University

1990-1992 Founder, President and CEO, Centric Engineering Systems, USA

1990-1999 Chairman, Board of Directors, Centric Engineering Systems, USA

2002- Professor of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, University of Texas, Austin

・構造及び流体に関する計算力学（有限要素法）。最近では乱流騒音解析、マルチスケール乱流解析を手がける。300編以上の論文

・United States Association of Computational Mechanics (USACM ; 米国計算力学会) 及び International Association for Computational Mechanics (IACM ; 国際計算力学会) の創立者・前会長

・CAE に関する主たる国際ジャーナル「Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering」(<http://www.elsevier.com/locate/issn/00457825>) の主宰者の一人

以下の４点について、技術動向調査を行った。

１．次世代の流体解析について

マルチスケール解析をも考慮した乱流数値解析、従来、精度上の問題があった二相流解析、これらのバイオエンジニアリングへの応用がキーとなる。乱流は局所的な挙動が遠方にも作用する現象である。そのためには、ミクロの局所的現象とマクロな全体的な現象をリンクさせて、既存の計算機資源の中で高精度な数値解析を実現するための、マルチスケール解析の研究が重要であり、９４年ぐらいから重点的に研究している。二相流解析については、VOF 法 (Volume of Fluid) に基づいたソフトウェアも市販されているが、現実問題への応用には未だ非力という側面がある。これら二つの分野には未だ解決されていない課題が山積されており、新規産業創生のキーと考えられる。

２．計算力学の新しい流れについて

原子レベルの挙動解析を考慮した有限要素法の開発が必要。原子群に対して有限要素メッシュモデルを作成、スーパーコンピュータ等、大規模並列計算機による大規模解析を前提に連続体モデルで強引に解析を行う動きもある。いずれにしても、原子レベルの挙動が日常生活スケールにてどのように具体的な機能付加・機能発現に結びつくかを解明・解析する事はナノテクノロジーの工学的研究では重要であり、有限要素法に代表される連続体力学シミュレーションと量子分子動力学シミュレーションとの、単なる組み合わせ以上の有効な解析手法を考えていく必要がある。

３．研究インフラについて

スパコン等、計算機施設はもちろん重要であるが、文献サーベイの効率化のために予算を使うべきである。文献サーベイには、例えば、ISI web of Science (<http://www.isinet.com/isi/products/citation/wos/index.html>) が便利であり、欧米の大学では文献検索と同時に即座に文献がダウンロードできる環境は当たり前である。

４．ベンチャービジネスについて

米国は無限にセカンドチャンスのある国である。一度失敗してもチャレンジ精神のある者には複数のセカンドチャンスが与えられる。各分野の非常に優秀な研究者が実はマイナーな大学出身という例は多い。米国のベンチャービジネスはこのような背景から成り立っている。しかし、このような米国におけるベンチャービジネスの実情を良く分析してみると、実は９０％以上の起業家は複数の失敗経験があり、マスコミ報道で光が当たる成功例は数パーセント以下である。しかし、一端、当たると指数関数的に事業が拡大していくため、このような負の側面は見過ごされやすいが注意が必要である。加えて、日本では、無限にセカンドチャンスが与えられる訳ではなく、可能な限り家族的なマネジメントが行われている国と理解している。流行等で安易にベンチャービジネス云々と議論するのは危険である。

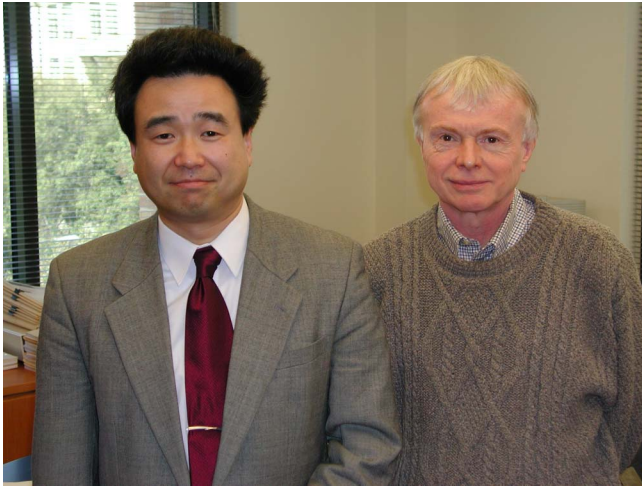


図2 Prof. Thomas J. R. Hughes



図3 Texas Institute for Computational and Applied Mathematics

○ 多目的最適設計技術

Assis. Prof. Olivier L. de Weck

Department of Mechanical Engineering

Massachusetts Institute of Technology

<http://web.mit.edu/deweck/www/>

略歴

Swiss Federal Institute of Technology ETH (1993), Diplom Ingenieur

1994-1996 Technical Liaison Engineer, McDonnell Douglas Aerospace

1996-1996 Project Manager F/A-18 Engineering Team, SF Aircraft & Systems Co.

Massachusetts Institute of Technology (1999) S.M.

Massachusetts Institute of Technology (2001) Ph.D.

2001- Assistant Professor of Aeronautics and Astronautics, Assistant Professor of Engineering Systems, Massachusetts Institute of Technology

産業界とのコラボレーションに有効な最適設計アプローチ（註1）についての技術動向調査を行った。

・ Reverse analysis

産業界から見た最適設計の一番の問題点は、以下の3点と言える。

- 1) 最適化すべき目的関数の取り方に結果が依存してしまい、最適設計案が現実には最悪の設計案になってしまう点。例えば、自動車の衝突に強い自動車車体構造の最適化と言ったときに、正面衝突のみに最適化した車体構造がオフセット衝突にも強いとは限らない。
- 2) 最適設計案が特異点的な性質を持つ場合が多く、実際に企業での使用が躊躇される場合が多い。最適設計案から少しずれるだけで、最適からほど遠い特性を示す場合もある。特に製造誤差を考慮するとロバスト性のない最適設計の導入は危険である。
- 3) 産学協同により設計最適化を進めて場合、得られた最適設計案が実際には企業内の実情より実施不可能な場合が多々あるが、企業側がすべての情報を開示するのは不可能なため、研究者側に不採択の理由が伝わらず、相互のコラボレーションが行き詰まってしまう場合がある。

産業界に必要なのは、現状より改善された複数の設計案を示す事が可能な最適設計解析手法、性能改善に種々のパラメータ調整を提案可能な手法の研究である。Reverse analysis とは、設計の改善のための方策を複数提示する方法論であり、モデル駆動型最適設計及び GA(genetic algorithm)の応用により、これが可能になる。

・ 多目的最適設計

環境問題に関する最適設計の研究は以下の点で難しい。

- 1) 基本的に複数の目的関数を対象とする最適化問題である事。例えば、製品のエネルギー消費量を減らす設計、寿命をより長くする設計、製造コスト（エネルギー）がより掛からない設計、メンテナンス費用を少なくする設計を統括した形の最適設計案導出が必要となる。
- 2) 基本的に複数の物理現象が関連する設計問題である事。
- 3) 環境問題は経済コストと微妙に関連しており、景気が悪くなれば、環境問題よりも経済効果重視の最適化目的関数の採用が好まれる等、最適化すべき目的関数が環境問題を巡る情勢によって変化する可能性がある事。

ゆえに、複数の相反する設計仕様に対するロバストな設計改善手法の研究は重要である。

・ 実験と解析との整合性の研究

通常、数値解析結果と実験結果とはぴったりは合致せず、解析結果の考察のため、お互いの関連性を持たせるために、結果グラフの平行移動、縮小拡大等のパラメータチューニング（数値解析結果の実験結果へのフィッティング）が必要となる。このフィッティングプロセスはエンジニアの勘と経験によっているのが実情だが、対象物の高機能化に伴い、これを方法論的に行う必要が議論されている。この分野では、例えば、Taguchi-method（註2）が有名だが、更に最適設計理論を用いて、数値解析結果の実験結果への自動フィッティング手法の開発が可能と思われる。

これらの研究を進めていく上で重要な事は、「現象・現実問題の検討が先、解析手法の開発はその実問題を受けて行う」という点であり、これとは反対に「解析手法の開発が先、現象・現実問題への適用は後」ではアカデミックな意味でも有効な成果が得られない事が多い。

なお、今回の訪問を機に、同研究室のポストドクターが4月に2週間、教授が2日間、産総研計算科学研究部門に滞在し、将来的なコラボレーションのための議論を行う事が決定した。



図4 Prof. Olivier L. de Weck



図5 MIT

○ ナノテクノロジーのためのマルチスケールシミュレーション

Northwestern University には 計算力学分野の強力な研究グループ (<http://www.mech.nwu.edu/fac/liu/>) があり、解析手法開発等の基礎を行っている Prof. Ted Belytschko のグループからナノテクノロジーへの応用を行っている Prof. Wing Kam Liu のグループまで幅広い活動を行っている。本訪問では、上記の二教授に対して技術動向調査を行った。

Prof. Ted Belytschko

Department of Mechanical Engineering

Northwestern University

<http://www.tam.nwu.edu/tb/tb.html>

<http://isihighlycited.com/author.cgi?&link1=Browse&link2=Results&id=515>

略歴

1965 B.S. Illinois Institute of Technology

1968 Ph.D. Illinois Institute of Technology

コンサルティング経験多数（政府系含む）

- ・構造に関する計算力学（有限要素法）。最近では、離散化モデル生成を必要としないメッシュレス手法、固定メッシュのまま任意形状の解析が可能な extended-FEM 等、新しい有限要素解析手法の研究を手がけている。300編以上の論文。ICES Medal (Int. Conf. on Computational Engineering and Sciences) 等、受賞多数。

- ・CAE に関する主たる国際ジャーナル「International Journal for Numerical Methods in Engineering」(<http://www.interscience.wiley.com/jpages/0029-5981/info.html>) の主宰者の一人

以下、extended-FEM (<http://www.tam.nwu.edu/X-FEM/>)（註3）の可能性について調査を行った。

- ・X-FEM は任意形状に適用可能か？

Polyharmonic Radial Basis Functions を用いれば可能と思われる。

- ・X-FEM は通常の連続な有限要素近似関数に非連続性を有する関数を付加する手法だが、この手法は数学的に保証されているか？

最近の論文では X-FEM に付加する embedded function にパルス関数を掛けており、数学的に全く問題はない。トポロジー最適化設計（註4）に応用した例では、通常、数学的な定式化がおかしい場合に生じるチェッカーボード型の形状が全く出てこないのが、数学的に問題がないことの証明の一つである。

- ・X-FEM における実験式部分の精度と数値解析部分の精度について

実験式部分の精度と数値解析部分の精度を評価するためには、誤差の事後評価的な手法が必要である。また、embedded function に過剰な数の実験式を入れると数値的不安定を引き起こす事がわかっており、そのための方策も必要である。

Prof. Wing Kam Liu

Department of Mechanical Engineering

Northwestern University

<http://tam.mech.northwestern.edu/wkl/liu.html>

<http://isihighlycited.com/author.cgi?&link1=Browse&link2=Results&id=105>

略歴

1976 B.S. (Highest Honors) University of Illinois at Chicago Circle

1974-1976 Research Assistant, University of Illinois at Chicago Circle/Department of Material Engineering

1976-1980 Research Assistant, California Institute of Technology/Division of Engineering and Applied Science

1977 M.S. California Institute of Technology

1980 Ph.D. California Institute of Technology

1983 Registered Professional Engineer State of Illinois License No. 062-041222

1980-1983 Assistant Professor, Northwestern University/Department of Mechanical and Nuclear Engineering

1982-1983 Assistant Professor, Northwestern University/Department of Civil Engineering

1983-1988 Associate Professor, Northwestern University/Department of Mechanical Engineering and Department of Civil Engineering

1988- Professor, Northwestern University/Department of Mechanical Engineering and Department of Civil Engineering

- ・メッシュレス手法、extended-FEM を駆使したナノシミュレーションの研究、マルチスケール解法の研究を精力的に進めている。200編以上の論文。Computational Mechanics Award (International Association for Computational Mechanics)、Computational Structural Mechanics Award (U.S. Association for Computational Mechanics) 等受賞多数。

- ・ United States Association of Computational Mechanics の会長

(http://www.usacm.org/org_presmg.htm)

量子分子動力学と有限要素法とのマルチスケール解析について、技術動向調査を行った。

量子分子動力学モデルと有限要素法モデルを単純に接合する試みが10年以上も前に行われていたが、有効な成果に結びついていない。数年前から、X-FEM の embedded function に量子分子動力学解析からの情報を入れ、有限要素解析とカップリングした研究を行い、有効な結果を得ている。しかし、この方法も embedded function の数を多くすると数値的不安定性をもたらすため、そのための研究が必要である。

量子分子動力学モデルと有限要素法モデルを接合する場合に単純につなぐだけだと解像度の悪い FE mesh の部分で波動・挙動が押し返されてくる。全体の系をラプラス変換する事により、適切な荷重項を付加する手法を見だし、その各種応用を行っている。キーとなる技術をクリアする事により、種々の応用が飛躍的に可能となった。

ナノの summer institute が NSF (National Science Foundation (<http://www.nsf.gov/>)) のファンドにより Northwestern University 7月頃開催される。米国のナノテクノロジー戦略の特徴は人材教育を包含した研究活動を行っている点である。これは、お互いが専門外の研究者同士のコラボレーションが必要なナノテクノロジー分野に有効であり、人材教育のためのセミナーを専門外の研究者が聴講する事により、異分野コラボレーションが非常に効率的に可能となる。また、カリキュラム作成のための議論を通して、異分野コラボレーションの促進が可能である。しかし、異分野コラボレーションのための努力の効果は非常に緩やかに発現して行くので、3-5年スパンの努力が必要である。

計算機環境としては、大規模PCクラスタベースのもので行っており、費用対効果を考えるとス

パソコンセンターは必要とは思わない。必要とあれば、全米各地のスパソコンセンターを利用する。

なお、両教授とのミーティングの前後に以下のセミナーを行った。産総研計算科学研究部門連続体モデリング研究グループ 松本純一特別研究員の行った転炉内の二相流解析及びマイクロインクジェットの二相流解析等を紹介し、Prof. Ted Belytschko から絶賛された。セミナーを行った時点では特許を未申請であり、提案する解析手法の詳細を隠しての一部非公表のプレゼンとなったが、Prof. Ted Belytschko、Prof. Wing Kam Liu とも、投稿中の論文を見せてくれる等、情報交換に重きを置いた姿勢であり、特許戦略ばかりを重視していると、情報が入らなくなってくる危険性がある事を肌で感じた。

MECHANICS CLUB SEMINAR

Which is better for modeling: Meshless, Fixed grid, Classical mesher, or anything else?

Date: Monday, March 10, Time: 11:00AM-11:40AM, Venue: Tech L160

Speaker: Dr. Akira Tezuka, Research Institute for Computational Science

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, JAPAN

Abstract:

FE modeling of arbitrary shaped 3D domain is still a resource of serious headache in industry. Since there are no feasible automatic meshers for HEXA element for the time being, a lot of papers have been published on the methods based on meshless and fixed grid. To the purpose of reducing the burden in modeling, I'd like to provide a small talk on two matters here; One is a new shape function with element-wise surface-mesh based serendipity hierarchical blending function to reduce the complicated process of mapped meshing, the other is a new VOF based FEM to omit remeshing process without sacrificing accuracy. The first one might be conceptually a new idea with the combination of local meshing and hierarchical blending shape function derivation, while the original blending function was proposed by Gupta in 1978 (IJNME, 12, pp.35-45). After discussing the parameter dependency on meshless method, the formulation of proposed method is explained. As for the application of the new proposed VOF, the animations of two-phase flow at steel converter and nano-ink jet, which are ill-conditioned, will be demonstrated.



図6 Profs. Belytschko & Liu (左から 2,4 番目) 図7 Northwestern University (1)



図8 Northwestern University (2)

○ 先進CAD技術

Prof. Kenji Shimada

Mechanical Engineering

Carnegie Mellon University

<http://www.andrew.cmu.edu/~shimada/>

略歴：

1983 B.S., Precision Machinery Engineering, The University of Tokyo

1985 M.S., Precision Machinery Engineering, The University of Tokyo

1993 Ph.D., Mechanical Engineering (Minor:Business), Massachusetts Institute of Technology

1989-1985 Researcher, IBM Research, Tokyo Research Laboratory, Japan.

1993-1989 IBM Japan Overseas Scholar

1995-1993 Project Leader, IBM Research, Tokyo Research Laboratory, Japan.

1996-1995 Manager, IBM Research, Tokyo Research Laboratory, Japan.

2001-1996 Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering

Carnegie Mellon University

2003- 2001 Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and the Robotics Institute, Carnegie Mellon University

present - 1998 Courtesy faculty appointment in the Robotics Institute, Carnegie Mellon University

present - 2003 Professor, the Department of Mechanical Engineering, the Department of Biomedical Engineering, and the Robotics Institute, Carnegie Mellon University

present - 2002 Courtesy faculty appointment in the Department of Biomedical Engineering, Carnegie Mellon University

・ 専門は、Geometric modeling and simulation、Mesh generation、Computer graphics 、Computational Geometry、Robotics 、Medical CAD、CAD/CAM/CAE、Human modeling and simulation.

CAD に関連する事項、研究マネジメントに関するフリーディスカッションを行った。

CAD 業界は、ここ数年、資本力の強いベンダーによる買収が相次ぎ、CATIA 等の大手の CAD ソフトと Solid Works 等デスクトップ的な CAD ソフトとに二分化されてきた。CAD データから全自動で有限要素モデルを生成する機能は未だ不十分な側面があり、メーカーサイドの頭痛の種となっている。そのため、日本 IBM 東京基礎研究所時代に留学先の M I T の博士論文として始めたバブルメッシュ (<http://www.trl.ibm.com/projects/meshing/bubble/bubble.htm>) を基本に種々の自動有限要素生成法を研究してきた。最近では、計算効率及び精度が良いために、産業界のニーズの高い六面体要素に関する自動要素分割法の研究を行っている。従来の CAD の研究課題は、既に商用ソフトに盛り込まれている場合が多く、新規分野の研究が必要である。応用研究として、医者ノウハウを組み込んだ CAD システムの開発を行っている。これは、厳密に数値シミュレーションに載せると非常に難しい数値解析課題と思われるが、CAD システム化して行くことで従来の医者ノウハウの数値化が可能となり、何らかのデータ・情報の関連性が見いだせるのではないかと楽観的な立場から期待している。

日本の研究現場の問題として、研究テクニシャンの不足の話が良く議論となる。米国では研究テクニシャンと研究者は対等である。研究テクニシャンを敵に回しては研究ができないという認識が普通。更に言えば、教授と学生も対等である。国際学会等の打ち上げ挨拶で「うちの秘書・スタッフに感謝します」という表現は米国では普通である。多様な評価軸というかけ声を具現化する方法が必要ではないか？

研究部門の構成人員数により研究費の額が決まってしまう日本のシステムは米国にいと不思議である。米国であれば、研究費を稼げたところは構成人数の拡大が可能、研究費が少なくなれば人員を抱え込む事が不可能というロジックにより動いている。この競争主義の安易な導入は考え物だが、日米の研究マネジメントの差異は意識して考察する価値はあるのではないか？

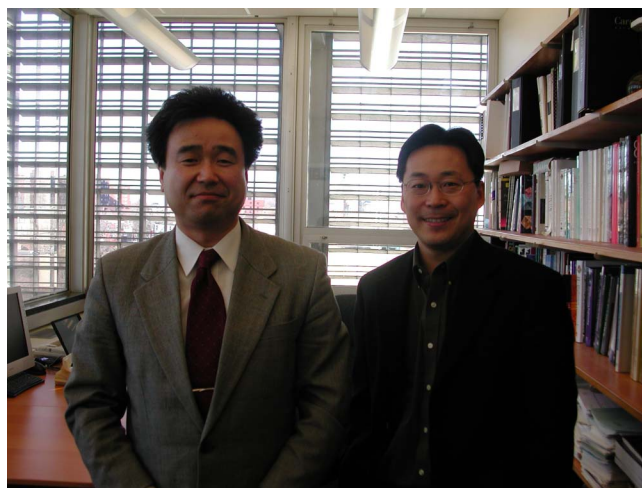


図9 Prof. Kenji Shimada

○ 米国自動車産業におけるデジタルエンジニアリング

Prof. Noboru Kikuchi

Mechanical Engineering & Applied Mechanics

University of Michigan

<http://www-personal.engin.umich.edu/~kikuchi/>

略歴

BS (Civil), Tokyo Institute of Technology, 1974.

MS (Eng. Mech.), University of Texas at Austin, 1975.

Ph.D. (Eng. Mech.), University of Texas at Austin, 1977.

1978. Post Doctoral Research Associate, Dept. of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, University of Texas at Austin,

1979-80 Assistant Professor, Dept. of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, University of Texas at Austin,

1980 - 1983 Assistant Professor, Mechanical Engineering & Applied Mechanics, University of Michigan

1983 - 1985 Associate Professor, Mechanical Engineering & Applied Mechanics, University of Michigan

1985 - Professor, Mechanical Engineering & Applied Mechanics, University of Michigan

・ 150編以上の論文。Office of Naval Research (ONR)、National Science Foundation (NSF)、National Aeronautics and Space Administration (NASA) のプロジェクトを担当。上記のトポロジー最適設計、誤差の事後評価等の研究のパイオニア。

・ 現在、豊田中央研究所理事を兼任。1st order analysis を提言。非線形 CAE 協会 (<http://www.jancae.org/>) 主宰。

デジタルエンジニアリング、研究組織のマネジメントについてのフリーディスカッションを行った。

ミシガン大学は州立大学であるが、州からの補助金の大学経営に占める割合は10%以下であり、後は産業界からの研究費、寄付金、大学病院・フットボール等の収益から成っており、いわば一種の私立大学である。現在、ミシガン大学工学部のランクは全米6位である。

(http://www.usnews.com/usnews/edu/grad/rankings/eng/brief/engrank_brief.php). 政府からのお金目当てではなく、産業界貢献のストーリーが当たった。軍事研究主体のMITとは対照的である。中西部の大学で伸びているところのほとんど（ジョージア工科大学、オハイオ州立大学、パードュー大学等）は産業界貢献のストーリーで躍進している。日本の大学の独立法人化の動きは、各大学の役割分担を考える良い機会ではないだろうか？

ミシガン大学計算機環境はUNIX中心の戦略を選択し、大型計算機センター・スパコンセンターは80年代に廃止した。数年前にUNIX、MAC中心のメディアラボを創設。学生は自由に使用可能。ソフトウェアの講習会も適宜開催。

研究組織、研究グループの性格・役割を考え、やる研究とやらない研究の区分けは大事である。民間企業がやるべき事は突き詰めて言えば、雇用を保証し、良く稼ぎ、国に出来るだけ多くの税金を納める事とも言える。国はそれらの税金の使い先を工夫し、国でなければ不可能な研究開発を実施すべきである。国が中小企業のために細々と補助金配っているというだけなら、単に一律に減税すれば良いという論理もあり得る。

何事も突き詰めて行うのが米国流である。従来の有限要素モデル（メッシュ）に拘らず、ボクセル型のメッシュによる解析、最適トポロジー設計の研究を提案してきた。

(<http://www-personal.engin.umich.edu/~kikuchi/Research/OPTISHAPE3.PDF>) デトロイトの自動車産業では、実車両を高エネルギーX線CTスキャンで輪切りにし、それを元にボクセル状の解析モデルを自動生成し、有限要素解析を行うシステムを構築。設計図と製造の実際との検証、ライバルメーカーのリバースエンジニアリングに用いて効力を発揮している。

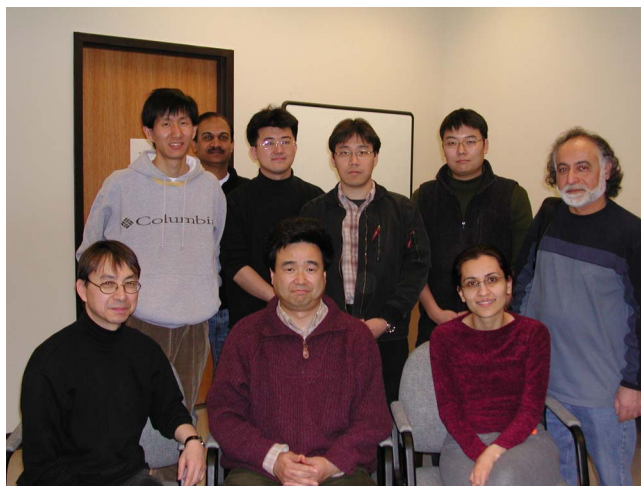


図 1 0 Prof. N Kikuchi (前列左)



図 1 1 メディアラボ

4. まとめ

今回の調査で痛感したのは、陳腐な言葉ではあるが、キーテクノロジーの重要性である。工学は真実探求の理学と異なり、正解が無数にあり解決のための方策も無数に存在する世界である。訪問した研究者のすべてが、まず、実問題に触れ、「この課題の本質は何か？この課題をやっつけるにはどうしたら良いか？」と議論をきちんと行い、それを踏まえてキーテクノロジー形成を行って、成果を出している。特に、学生がいない、マンパワーの得てして不足気味の産総研では、キーテクノロジー選択のセンスが悪いと死活問題となる。机上の空論により、概念的にロードマップ事務作業を行ってしまう産総研の文化は改善の余地ありと感じた。また、アカデミックな研究成果を有し、学会の重鎮とされている研究者達が、実は産業界のコンサルタント経験が豊富であり、産業界からのニーズを巧みに自分の研究に取り入れる事により、自分の研究の活性化を行っている仕組みが良く理解できた。産総研でもコンサルティングを奨励し、コンサルティングで企業から委託金をもらい、自己の研究の活性化に役立てるという体制を整えて行くべきと思う。

本調査によるキーテクノロジーは以下に要約される。

- ・ ナノスケール現象のマクロスケールでの機能発現のシミュレーションのため、原子レベルの分子動力学解析と連続体レベルでの有限要素解析を巧みに結びつけたマルチスケールシミュレーション技法。具体的には、extended-FEM 解析へ量子分子動力学シミュレーション結果をど

のように取り込むかの研究。

- ・ 連続体モデリング解析でネックとなっている離散化数値モデル（メッシュ）生成プロセスの非効率性の解決のための固定メッシュ（fixed mesh）解析手法の開発
- ・ バイオエンジニアリングへのCAD技術の展開
- ・ 産業界との連携を見据えた多目的最適設計等の研究

いずれの課題も、コンサルティング等の活動を通して、「始めに現象なり、企業での実問題ありき。その問題意識を元に手法開発等、シーズ研究。最終的に実問題への展開」という研究プロセスを5年ほどの時間スケールで行っていた。逆に言うと、単年度毎にプロポーザル申請するような研究予算では上記の研究遂行は困難と思われる。産総研内の研究マネジメントへ多いに参考にして頂きたい。

産総研をどのように経営していくかという参考に、過去10年間の米国大学のランキングの推移と研究費リソースの割合の変化、重点分野戦略との関連の調査を行ってみては如何でしょうか？スパコンセンターを維持するか否かは各大学の戦略により立場は様々であった。米国には国のスパコンセンターがある程度整備されており、日本とは事情が異なると思われる。オンラインジャーナル同様、スコープの狭い内部論理のみで、予算を削減する項目とするのだけは避けるべきと思う。

5. 注釈

註1：最適設計

逆問題の一種。一般に原因から結果を導出する問題を順問題、結果から原因を推定する問題を逆問題と言う。逆問題は通常、解の存在または解の一意性が保証されない悪条件問題である。通常の数値解析では形状・荷重状態・境界条件が与えられた時、応力が幾らになるかという類の順問題を扱うが、最適設計は、例えば、最大応力がある値以内の条件で最大限軽量化を行った時の形状はどのようなものになるかという逆問題を扱う。通常、順問題の試行計算を繰り返す事により、逆問題解を行う。

註2：Taguchi-method

Taguchi-method は日本人である田口玄一博士により提案された実験計画法の一種。製造のクオリティに影響を与えと思われる因子のうち、有効なもの抽出が可能。信頼性設計に有効な手法である。

註3：extended-FEM (X-FEM)

有限要素法 (FEM) は支配方程式、物質係数が与えられている任意物理現象、任意の解析形状領域に有効な汎用的数値解法であり、工業的にも非常に有効な手法である。FEM においては、まず、連続な解析領域を有限要素と呼ばれる三角形、四角形、四面体、六面体等の小領域に分割する事が必要である。また、これらの有限要素の形状が歪んでいると、精度が悪化する事が知られている。ゆえに、FEM での一番重要な問題は、解析モデリング構築、あるいは、非定常問題にて変形する解析領域に対する解析モデリング自動変更である。例えば、自動車の衝突解析自体は並列計算機にて数時間であるが、解析するためのメッシュデータの作成は市販の自動要素分割ソフト (実際には全自動ではなく、ユーザーとの対話式でメッシュ生成する半自動である) を用いても数ヶ月を必要とされる。これらは通常、自動有限要素生成技法の研究に帰着されるが、未だ、どんな形状についても有効なアルゴリズム、ソフトウェアは提案されていず、近年ではメッシュ分割を必要とせず、節点発生のみで解析が可能なメッシュレス法は提案されているが、極度の非線形問題を抜かして、解の精度にパラメータ依存性がある事が明らかとなり、解析モデリング構築の1手法とは成りえないと思われる。それに対して、既存の FEM の近似関数にある特殊な関数 (enrichment function, embedded function) を付加する事で、非常に複雑な形状や物理特性の解析が可能とされる手法、X-FEM が近年提案された。X-FEM では、例えば正方形領域の規則正しいメッシュ (生成は非常に簡単) に穴を表現する enrichment function を付加し、特別なアルゴリズム的な手当てをする事で、正方形領域に穴を有する板の解析が可能となる。X-FEM は以下の点で可能性のある手法である。日本でも理化学研究所の V-CAD プロジェクト (<http://www.riken.go.jp/lab-www/V-CAD/>) の一部に応用され始めている。

- (1) enrichment 関数の付加で高精度の解析が可能
- (2) enrichment 関数に実験式を入れる事も可能
- (3) 穴がある領域の解析も可能。ボールが落ちてくる流れ場の解析も可能

(G. J. Wagner, N. Moes, W. K. Liu and T. Belytschko (2000), "The extended finite element method for rigid particles in Stokes flow," International Journal for Numerical Methods in Engineering, 51:293, 2001)

- (4) 領域が変化する問題 (自由表面流れ, クラック, 最適設計) に有利。

(5) 例えば、基本的な 3 次元メッシュが既に切ってあれば、それを基に、少し形を変えたモデルの解析も enrichment 関数の調節で可能。(企業において、過去の解析モデルを変更して解析に使用する事が可能.)

註 4：構造体設計では、重量最小で強度最大の任意の形状を求めることのニーズは多い。設計領域に穴を発生させて形状トポロジーを変化させる事で重量最小で強度最大の形状を探索するのが最適位相（トポロジー）設計だが、その一つの方法として、有限要素法をベースに、要素をオン・オフする事によりトポロジー最適設計を行う手法が提案されている。