

米国における計算力学の進展

Advancement of Computational Mechanics in USA

都井 裕*

Yutaka TOI

1. はじめに

筆者は、生産技術研究奨励会の三好研究助成金(平成2年度)の援助を受けて、10月29日より11月10日までの約10日間、米国に出張する機会を得た。筆者の専門は計算力学(Computational Mechanics)であり、今回の出張の目的も米国における計算力学の動向調査であったが、計算力学は工学研究におけるメジャーな分野の一つであり、特に米国では、多数の研究者が計算力学の各分野でのしを削っているのが現状である。これらの全貌をわずかな期間で把握するのは、到底無理な話である。そこで筆者は、今回の出張の訪問先を、マサチューセッツ州ボストンのMIT(Massachusetts Institute of Technology)およびジョージア州アトランタのGIT(Georgia Institute of Technology)に限ることにした。GITは、筆者が1987年11月より1988年11月まで約1年間滞在した所であり、また、ここでマイクロクラッキング脆性体の破壊力学に関する共同研究^{1)~3)}を行った計算力学センター長であるAtluri教授(写真1)が、本年8月よりJer-

ome Clarke Hunsakar Visiting Professorとして母校MITの航空宇宙学科に勤務していることから、これらの両大学を訪問先とした。

2. MITにて

ボストンには、10月29日午後に着し、11月1日まで3日間滞在した。Atluri教授とは2年ぶりの面会であり、脆性体(特にセラミックス)の計算破壊力学に関する双方の研究進捗状況を話し合った。Atluri教授は計算破壊力学に関するハイレベルかつ内容の豊富な著書⁴⁾からも知られるように、この分野の第一人者である。

この2年間、双方ともに、セラミックスの変態塑性による高靱性化問題(所謂、transformation toughening)に関する研究を行っている。Atluri教授らが、ジルコニア分散セラミックス(DZC)を主たる対象として、2相材料としての構成方程式の精密化を計り、静的荷重下の伝播亀裂に対するR曲線のシミュレーションに成功している⁵⁾のに対し、筆者らは、部分安定化ジルコニア(PSZ)を対象として、応力履歴依存の内部状態変数を含む新しい構成関係式を誘導し⁶⁾、静的および動的荷重下の伝播亀裂に対する高靱性化現象の解析を行っている⁷⁾。

以上はいずれも連続体力学レベルの解析であるが、固体の破壊を問題にする以上、よりミクロな視点からの解析要求が必ず生ずる。この点に関しては、Atluri教授らが、DZCを対象に有限要素法による微視的シミュレーション⁸⁾を試みているのに対し、筆者らは、離散系力学モデル(剛体・ばねモデル)により、多結晶脆性体のマイクロクラッキング挙動の微視的解析⁹⁾を進めている、という具合に、対象固体は異なるものの、期せずして同じ方向に研究の矛先を向けていたことがわかった。これらの結晶粒レベルのシミュレーション(連続体力学と分子動力学の中間レベルのメソスコピック・シミュレーション)の将来性にはかなりの期待がもてると筆者は感じている。この準微視的シミュレーションの結果をマイクロクラッキング脆性体の連続体損傷力学モデルにおける損傷発展方程式および弾性コンプライアンスの評価に反映させる話をしたところ、Atluri教授も賛意を示された。

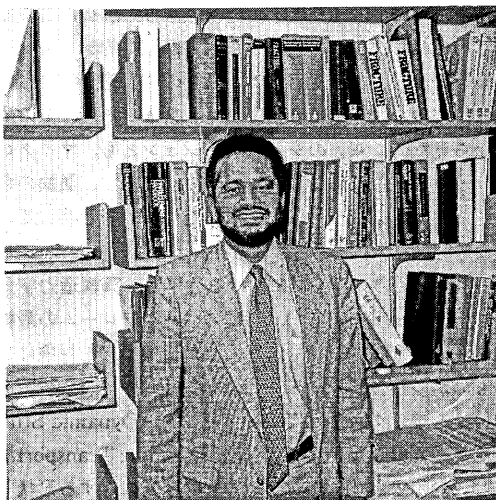


写真1 Atluri教授(MITにて)

MITのGuggenheim Buildingでは、Atluri教授の隣の部屋が、hybrid型変分原理で有名なPian教授(写真2)の部屋であった。あらかじめ約束を取り付けていたわけではなかったが、教授のご好意により2, 3時間面談する機会を得て、generalized hybrid法に関する話を伺った。有限要素法における要素の定式化手法は、近年きわ

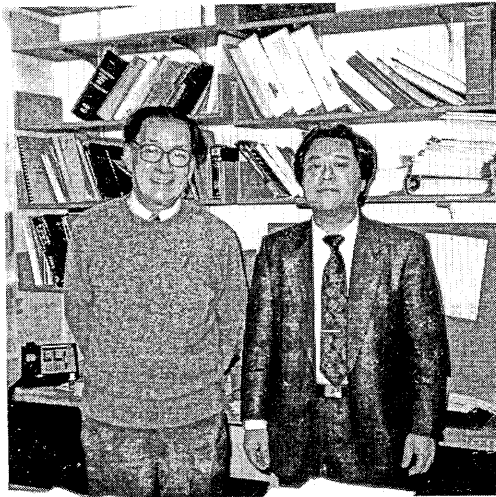


写真2 Pian教授と筆者(MITにて)

めて多彩なものとなっている。すなわち、伝統的な変位法の変種として、非適合モードの導入、free formulation, assumed strain法, modified-[B]法, モード分解法, reduced integration法, discrete Kirchhoff仮定などが考案されているし、Pian教授の創始になるhybrid法も、種々の観点から一般化の波を受けている。Pian教授は特に、Felippaのgeneralized hybrid法および同教授が考えておられる、hybrid法に非適合モードを導入する手法について熱心にご説明くださった。また、hybrid法に関する教科書をご執筆中であることを伺ったが、「いつ出来上がるかはわからないよ」とのことであった。この時、Pian教授が初めて書かれた有限要素法に関する論文¹⁰⁾および最初のhybrid法に関する論文¹¹⁾の別刷をちょうだいした。

Pian教授はすでに70才を越えるご高齢であり、形式上はリタイアされているが、依然MITにおいて研究、著述に専念しておられる。Pian教授のように、後進にとって大きな目標となる、業績・人格ともに偉大な先生が、年齢にかかわらず同じ場所で研究を継続できる米国の大学の環境はやはり好ましいものと感じさせられた。

また、MITの航空宇宙学科では、'lunch network'と称するfaculty meetingにゲストとして紛れ込む機会があった。昼食を兼ねての会合であるから事務連絡の話だけかと思っていたら、将来の研究課題のランク付け結果

に関する説明が始まったのには少々驚いた。すなわち、航空宇宙関連の各研究テーマをA(学科として強力にサポートする)、B(サポートする)、C(サポートしない)の3ランクに分類していた。OHPによる説明であり、詳細は忘れたが、engineering materialsがAランク、computational hydrodynamicsがBランク、manufacturingとchemical engineがCランクであったことは記憶している。A, Bランクはともかく、日本ではCランクはなかなか(explicitには)付けられないのではないかと感じた次第である。ほかに、流体力学・固体力学の基礎研究、あるいは実験設備としてのwind tunnelなどはareas of decreased emphasisであるとの説明もあった。

3. GITにて

11月2日にボストンを後にして、アトランタに移動した。GITの土木工学科に付置された計算力学研究センターには、Atluri教授の研究スタッフが10名程度おり、彼らと、特に計算破壊力学関連の研究テーマに関し詳細な話をすることが訪問の目的であった。MITでAtluri教授から概要を聞いた前述の諸研究の細部について、研究当事者であるDr. Ramakrishnanと、日本からの留学生であり、Ph. D.を取得したばかりの岡田裕氏から説明を聞いた。

セラミックスは、その製造過程(焼結過程)において受ける熱履歴により、内部粒子間に残留応力を有するのが通例であるが、その影響についての把握は不十分である。また、マイクロクラックを伴うセラミックスにおいて予測される、マイクロクラックの閉鎖効果およびマイクロクラック表面の摩擦効果などについても、ほとんど何もわかっていない。セラミックスの破壊問題に対する連続体力学的アプローチにおいて不可欠なこれらの情報を得るためには、よりミクロな視点からの解析が必要であり、これらがまさに前述した双方の微視的シミュレーションの動機となっている。これらの微視的解析においては、現象の物理的モデル化がポイントであり、その観点から見た時、双方のシミュレーションとも、マイクロクラックの発生条件などいくつかの点に関し、議論の余地を残してはいるが、双方とも出だしは良好と感じているようであった。

Atluri教授のグループにおける近年の計算構造力学分野の研究は、宇宙構造物、特にスペースフレームの最終強度、動的応答、振動、制御、波動伝播などを対象にしたものが多いようである。今回、Mr. Pipkinsから説明を受けたトピックスも、PDEモデリング(Dynamic Stiffness法, Dynamic Flexibility法, Dynamic Transport法などの総称であり、部材の軸方向の運動に対する形状関数として超関数を選択すれば、通常のFEMに含めることができる)とFFT(高速フーリエ変換あるいは逆ラプ

ラス変換との結合による、スペースフレーム中の波動伝播解析に関する内容であった。筆者らは、同じ空間骨組構造を対象にした研究を行ってはいなくても、解析目標が衝突などによるクラッシュ挙動あるいは動的塑性崩壊挙動であり、数値的モデル化の内容はかなり異なっている。最終強度問題に対しても、Atluri教授らがcomplementary energy法に基づく有限要素モデル¹²⁾を開発しているのに対し、筆者らはshifted integration法¹³⁾に基づく線形あるいは3次有限要素モデルを用いている。

アトラントは、筆者にとって勝手のわかる都市であり、レンタカーで意のままに動き回れたので、きわめて快適な1週間を過ごすことができた。紅葉のアーチを潜りぬけながらのドライブは、この上ない気分転換になった。

4. ま と め

三好研究助成金による米国MITおよびGIT訪問の内容を報告した。広範な計算力学分野のほんの一部の領域の話であるが、筆者にとっては自らの研究の相対的な位置を確認することができ、大変有意義な出張であった。

今回の海外出張は、国際会議出席を伴わない出張であり、余裕のある日程のもとで、旅そのものも楽しませていただいた。このような機会を与えてくださった生産技術研究奨励会に感謝いたします。

今回の出張では、MITとGITというかなり雰囲気の違いを大学を続けて訪問した。両者を比較してみると、MITは伝統ある(したがって保守的な)都市型の大学、GITは進取の気風あふれる地方都市の大学といった印象である。情報の中心にいたければMIT、じっくり研究をしたければGITと言ったら、言い過ぎであろうか。

最後に、多忙な時間を裂いて長時間お付き合いいただいた、Prof. S.N. Atluri, Prof. T.H.H. Pian, Dr. N. Ramakrishnan, Dr. R. Mondal, Dr. H. Okada, Mr. S. Pipkins, および日本から留学中の早稲田大学土木工学科の依田照彦先生、大学院生の小磯氏に謝意を表します。

(1990年12月21日受理)

参 考 文 献

1) Y. Toi and S.N. Atluri: Finite Element Analysis of Static and Dynamic Fracture of Brittle Micro-

- cracking Solids (Part 1; Formulation and Simple Numerical Examples), Int. J. of Plasticity, Vol. 6, No. 2, (1990), 169~188.
- 2) Y. Toi and S.N. Atluri: Finite Element Analysis of Static and Dynamic Fracture of Brittle Micro-cracking Solids (Part 2; Stationary and Growing Macro-Cracks Under Static Loading), Int. J. of Plasticity, Vol. 6, No. 3, (1990), 263~280.
- 3) Y. Toi and S.N. Atluri: Finite Element Analysis of Static and Dynamic Fracture of Brittle Micro-cracking Solids (Part 3; Stationary and Rapidly Propagating Cracks under Dynamic Loading), Int. J. of Plasticity, Vol. 6, No. 4, (1990), 389~414.
- 4) S.N. Atluri (Editor): Computational Methods in the Mechanics of Fracture, Volume 2 in Computational Methods in Mechanics, North-Holland, (1986)
- 5) H. Okada: Ph. D. thesis submitted to Georgia Institute of Technology, (1990).
- 6) 都井 裕: On the Constitutive Modeling of Ceramics Using a Stress-History Dependent Internal State Variable (Part 2; Transformation Plasticity), 生産研究, 41巻, 12号, (1989), 18~21.
- 7) 磯部大吾郎: 東京大学修士論文, 提出予定, (1991).
- 8) N. Ramakrishnan, H. Okada and S.N. Atluri: Computer Simulation of Transformation Induced Plasticity Using Finite Element Method, submitted to Acta. Metall., (1991).
- 9) 都井 裕, 諸 正信: 多結晶脆性体のマイクロクラッキング挙動の準微視的シミュレーション (ヴォロノイ分割メッシュによる剛体・ばねモデルの応用), 生産研究, 第42巻, 第7号, (1990), 444~447.
- 10) T.H.H. Pian: Derivation of Element Stiffness Matrices, AIAA J., Vol. 2, (1964), 576~577.
- 11) T.H.H. Pian: Derivation of Element Stiffness Matrices by Assumed Stress Distributions, AIAA J., Vol. 2, (1964), 1333~1336.
- 12) G. Shi and S.N. Atluri: Elasto-Plastic large Deformation Analysis of Space-Frames: A Plastic-Hinge and Stress-Based Explicit Derivation of Tangent Stiffnesses, Int. J. for Numer. Meth. in Engng. Vol. 26, (1988), 589~615.
- 13) Y. Toi: Shifted Integration Technique in One-Dimensional Plastic Analysis Using Linear and Cubic Finite Elements, Int. J. for Numer. Meth. in Engng., (1991), to be published.