

国際応用力学連合 '91 年度シンポジウム (IUTAM '91) —有限非弾性変形—に参加 して

木 原 諄 二
東京大学工学部 工博

1. は じ め に

国際応用力学連合 (International Union of Theoretical and Applied Mechanics) は、国連の文化活動の一環として、毎年ある大学とそこに所属する教授を指名して、シンポジウムの組織を委託し、ある特定の課題に集中した研究集会を開催している。

'91 年度のシンポジウムは、ドイツのハノーバー市にあるハノーバー大学の主催で、同大学の土木工学科の E. シュタイン教授を組織責任者として行われた。課題は、有限非弾性変形の力学的諸問題である。

シンポジウムは、国際協力委員によりノミネートされた講演者候補に主催者が依頼してなされる招待講演のみで参加者も原則として講演者に限られるクローズド・ミーティングの形式で行われるのが普通であり、今回もそのように組織された。

8 月 19 日 (月) より 23 日 (金) までの 5 日間、途中 21 日 (水) の午後の小旅行の他は、午前 8 時半から午後 5 時半まで、大学の小ホールで約 50 件の講演とポスターセッションが行われた。

筆者は有限非弾性変形に、内部応力法を併用した境界要素法について以前よりいくつかの試みを公表していた関係で、その方面の話題提供をするよう求められ、本シンポジウムに参加することになった。他はすべて力学的問題を有限要素法で解析することを前提とした講演であったので、本シンポジウムに参加して、筆者は有限要素法と有限非弾性問題との間にある問題の全容を学習する機会が与えられた。以下にその概要を紹介したい。

2. 固体の変形解析の問題/有限変形

我々が極く初歩的に考えている物体の変形は、あたかも変形しないでそのままの形でいる物体に生じるひずみといった、何とも座りの悪い概念である。温度場や電場や、流体の解析と異なり、固体の変位場の解析はその解析対象である変位によって、解析する場の境界が移動してしまうという、幾何学的非線形性を固有の性格として持っている。我々はこれを初歩的には単軸引張変形における公称応力-工業的ひずみ曲線と真応力-真ひずみ曲線との関係として教えられている。

しかし一般に物体が変形する時は、場所によってひず

み方や回転の度合いが違ったりして、単軸引張変形のように一つの真応力-真ひずみ曲線によってその時々ひずみの度合いと応力の大きさを把握することはできない。例えばはじめ x 方向に向いた棒に σ なる応力を生ぜしめたときは $\sigma_x = \sigma$ で $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$ であるが、この棒を 45° 傾けると $\sigma_x = \sigma/2$, $\tau_{xy} = \sigma/2$, $\sigma_y = \sigma/2$ となりさらに y 方向に一致させると $\sigma_x = \tau_{xy} = 0$, $\sigma_y = \sigma$ となる。このように棒のひずみ方は同じなのに棒の向いている方向によって応力状態が異なって見えるという問題もある。板ばねで円を作ったとき、円のどこでも物体として見た時は変形の状況は同じであるが、物体の外に作った座標系の枠で観測する円弧に沿って応力分布は異なってみえる。

物体がその外形を著しく変えるような変形を受けるプロセスを解析するには陽解法と陰解法とがある。前者は現在の状況から未来に向かって現在の状況を外形はほとんど変化しないと考えられる程度に、ほんの少し変えることによって、少しずつ解析を進めていく方法であるし、後者は大幅に変形を進めた未来の状況を想定して、そのプロセスを最適化してその想定した状況を確からしいものにする反復計算をする方法である。先に変形の進行によって物体の寸法が変化したり、回転が起こりその度合いが分布したりする、いわゆる幾何学的非線形性について触れたが、他に、物体の応力とひずみとが比例しない材料非線形性も解析を困難にする。変形中のひずみ分布による残留応力場の発達や、結晶の回転による異方性の発生、場所によってひずみ速度や温度が異なるため、応力-ひずみ関係を変えなければならないなど、幾何学的非線形性にも増して頭を悩ませる課題が存在しているわけである。

そして特に、幾何学的非線形性と材料非線形性とが共存する場合には、陽解法においてもこの両者の影響を定量して解析を進めなければならない¹⁾。したがって、陰解法で材料非線形問題をとりあつかうためには一段と工夫が必要である。

3. 数理塑性と塑性の原子論

有限要素法では物体の力学的性質は構成式という数式モデルによって処理されている。今回のシンポジウムを通じての一つの特徴はこの構成式を塑性の原子論モデルを考慮して組み立てようという傾向があらわれたことである。筆者は '89 年 9 月にバルセロナで行われた第 2 回計算塑性力学国際会議に出席したが、この会議と今回のシンポジウムとは一つの流れに共にのっているように思えた。しかしバルセロナ会議では有限塑性変形を陰解法で攻める場合には要素モデルの工夫と古典的な意味で構成式の特性を問題にしていた。それが、今回のシンポジウムでは、構成式の性格を原子論的、大げさに言えば物質科学的なパラメーターにおいて検討しようという動

きが見られた。いわく動的回復、いわくひずみ速度依存加工硬化、いわく変形抵抗のひずみ速度依存性、これらの要因を何とか数式モデルとしての構成式に組み入れようという努力が見られた。また変形中の集合組織の変化や回転も、現象とシミュレーションが一致しないときの口実に引き出された。しかし、金属学の世界ではすでに 20 数年前に議論されたことが、あの時代のレベルでまた開かされたのは筆者にとって不思議な体験であった。20 数年前と今とでは、我々の計算機シミュレーションの能力が格段に違うから、同じことが認識されても実際の変形のシミュレーションのレベルはそれ相当の進歩はしている。しかし認識としての金属の塑性変形に関してはほとんど変わっていない。これは 20 数年前に金属屋として材料の構成関係の研究していて、今、数値計算屋としてシンポジウムに参加した筆者のタイムトンネル体験だったと言えるだろう。

数値計算システムに利用する構成式に調節可能定数が 7 つも 8 こともあるのは多すぎるが、ことほどさように物体の力学的性質を数学的に表現するのは簡単ではない。物質科学的立場から言えば、たった 7~8 この調節可能定数で、完全な力学的性質の記述ができることは不可能と言えるからである。

4. 数値計算と構成式

構成式と有限要素法との関係でのもう一つの問題は、自由度の増大が解の精度の改善に役立たないことが、有限非弾性変形ではしばしば起こるのではないかということである。とくにせん断ひずみ集中という問題に対して、要素を細かくして収れんをはかるといくらでも集中度が増してしまう。これはバルセロナの会議では一種絶望的な様相とも見られたのであるが、今回は構成式の中にある工夫をする、すなわち応力が、ひずみ、ひずみ速度及び温度に依存する他、ひずみ勾配にも依存するような形の構成式にすることによって、解法上の問題を解決できるということが報告された。

今年 4 月に筆者がフランスのジーンズで開かれたヨーロッパ構造力学会議に参加した時には、せん断ひずみ集中はそれが生じる位置が剛塑性体の変形におけるすべり線と対応するということから、要素を細かくするとせん断ひずみ集中厚はいくらでも減少することに積極的な評価が感じられたのであるが、今回は再びバルセロナ会議の延長にもどったという感じであった。参加者の色分けによるとも考えられるが、今後の動向を見守りたいところである。しかし、ある特定の数値計算法のために物体の構成関係系をいじるということは疑問である。

5. 日本の研究

シンポジウムに参加してから、二週間たって、今感じていることは、我々の研究というものが本来の学問性を

どこまで追求しているものだろうかということである。日本人の研究は仕事ととしてはほぼ完璧に近い。しかしその仕事の枠組は既存のものであることが多い。そうであると、学会の場でも議論を行うことは難しい。本人が新しい枠組を提示したのではないから、その枠組の是非を問うことはできない。そうするとできのよし悪しの講評になってしまう。これでは本当の学会の議論にはならないであろう。

そこへいくと、ヨーロッパの研究者の多くの講演は問題を取り扱う本人独自の枠組を提示していた。したがって、議論は本人の示した新しい概念、つまり考え方を対象にして大に行われた。聞いていて非常に気持ちのよい印象を持った。たまたま、米国の大学では博士課程になると学生に「討論法」の訓練を課すということを知人から聞いたばかりであったが、欧米では学者のやるべきことは新しい概念の創出であり、それを世間に議論をもって広めていくことであるということを改めて認識させられた。

最近、日本では基礎研究への寄与が小さいのでその充実をはかるべきであるという声が高い。しかし、日本は、単に発想にすぎなかったもの、単に枠だけがあったものを発展させ、学問体系を整え科学技術の形にまとめ上げることに大いに貢献してきた。欧米での国際会議でいただく先述のような反省の念はあるものの、基礎研究への寄与に関しては、研究の実行段階以降では世界に冠たる実績をあげていると言っても過言ではない。

隴を得て蜀を望むという故事があるが、欲を言えば文化的問題により困難かもしれないが、研究を発想の段階から創造できるようになる努力と、またそれができる学者の卵の養成を大いにやる必要はあろう。日本が基礎研究にそれ相応の寄与をすると認められるのは、新しい発想に動機づけられた研究が日本から発表されるということだからである。そのような観点での教育の改革、大学院教育の見直しが必要となろう。

文 献

- 1) 木原諒二: 材料技術者のための弾塑性力学 (1961), p. 77 [丸善]

激論と興奮の 1991 McMaster シンポジウム

清 水 正 賢

(株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 工博

激論の後は競馬場で興奮のディナー。さらに驚いたのは、当日の第 9 レース (メインレース) の名称が、なんと「McMaster Ironmaking Symposium Race」。19th McMaster シンポジウムでこんな企画を行ったのは、会議の実質的な主催者、McMaster 大学の W. K. Lu 教