実用化期の複合材料技術と課題

2. 材料・構造のシミュレーションベース・デザイン[†]

高 野 直 樹* 浅 井 光 輝**
大 山 龍 男*** 小 川 孝 行****

Composites Science/Technology and New Challenges for Tomorrow's Applications

II : Simulation-Based Design of Composite Materials and Structures

by

Naoki TAKANO *, Mitsuteru ASAI **, Tatsuo OYAMA *** and Takayuki OGAWA ****

Key words : Composite materials, Simulation, Finite element method, Modeling, Accuracy

1 はじめに

線形から非線形へ、静的から動的へ、2次元から3次元へ、単なる構造解析からマルチフィジックス解析へと進展する反面、使用上の難しさも増えている現状のCAE (computer-aided engineering) ソフトと現場のギャップを埋めるべく、特にモデリングに焦点を当てて、留意点などを述べる。また、大学でも企業でもCAEやFEM (有限要素法, finite element method), 材料力学や非線形問題を扱うのに必要な連続体力学などの理論的側面に弱くなっているが、事例の紹介からその重要性を少しでもご理解頂ければと願う次第である。

FEMとは、単に偏微分方程式を数值的に(コンピュータを用いて)解く手法にすぎない。本稿で述べる構造解析では、変位、ひずみ、応力という未知数に対し、連続体力学で学ぶ力のつりあい式を、境界条件のもとに解く。ユーザが最も考えるべき点は、応力-ひずみ関係式(あるいは構成式)であり、対象とする材料を適切にモデリングする必要がある。したがって、本稿では材料モデリング、境界条件モデリングについて述べた後、数値解析の基本である近似 (approximation)・補間 (interpolation) という概念の重要性を解析精度という観点から述べる。

2 材料モデリング

2・1 異方性と座標系設定および力学の知識の必要性

複合材料、特に繊維強化複合材料ではまず第一に異方性を考慮する必要がある。異方性は難しい、と言うことなかれ、応力を左辺に、ひずみを右辺に置いた応力-ひずみ関係式ではなく、その逆の表記をしたひずみ-応力関係式のみ学べばよい。これは大抵の複合材料の教科書

に説明がある。いくつかの独立なパラメータ(材料定数)を用いて表記するかという点で整理し、必要な値を実験などで正しく求めることがシミュレーションの第一歩である。次に、FEMでは要素分割した一つ一つの要素に異方性の材料主軸を入力する。

入力法はソフトによっても異なるが、このとき注意すべき点は、材料主軸以外にもFEMではいくつかの座標系を同時に用いる点である。ユーザが認識する全体座標系x-y-z(あるいはワールド座標系)、計算上必要な(ユーザは認識不要の)正規化座標系 ξ - η - ζ 、上記の材料主軸(あるいは要素座標系を流用)、場合によっては傾斜支持するための局所座標系(節点に対して定義)である。これらの名称も教科書やソフトのマニュアルにより呼び方が異なる。混乱が起きるのは、応力やひずみを要素座標系で出力しようとする時である。

近年では、複合材料が多方面に利用されるようになり、FEMの非専門家がシミュレーションを行う機会も増えたようである。歯学分野の連名者の一人は、図1に示すような歯の補綴方法の一つであるブリッジ(固定性の義歯)に、新素材である繊維強化複合材料の適用を検討した。¹⁾ 審美性、強度など歯学的観点の説明は割愛するが、図2に示すように繊維配置の方法の他、繊維の量、繊維とマトリックス(母材)の組合せのデザインをシミュレーションで行った。最大主応力分布の一例を図3に示す。このとき、応力は全体座標系、繊維に沿った要素座標系でそれぞれ出力した。複合材料では界面せん断応力を知りたいなどの要望があるためである。主応力も検討したのだが、出力座標系を変えると異なる主応力が出力された。

[†] 原稿受理 平成17年6月10日 Received June 10, 2005

* 正 会 員 立命館大学理工学部マイクロ機械システム工学科/独立行政法人 科学技術振興機構 CREST 〒525-8577 草津市野路東, Dept. of Micro System Tech., Ritsumeikan Univ., Noji-higashi, Kusatsu, 525-8577

** 立命館大学理工学部マイクロ機械システム工学科 〒525-8577 草津市野路東, Dept. of Micro System Tech., Ritsumeikan Univ., Noji-higashi, Kusatsu, 525-8577

*** 大阪大学大学院歯学研究科統合機能口腔科学専攻顎口腔機能再建学講座 〒565-0871 吹田市山田丘, Graduate School of Dentistry, Osaka Univ., Yamada-oka, Suita, 565-0871

**** 日本イーエスアイ(株)技術本部 〒151-0065 東京都渋谷区大山町, Nihon ESI K. K., Shibuya-ku, Tokyo, 151-0065

図1 歯科補綴分野への繊維強化複合材料の適用例

図2 繊維配置のデザイン例

図3 有限要素法による最大主応力解析結果

勿論それは誤りである。最初は、予想外の結果に大発見かと思心驚かせたが、結局は市販ソフトのバージョンが古く、バグとわかった。主応力の定義を理解している者ならすぐ気づくことなので、CAE/FEMの専門家と研究チームを組むことをお勧めする次第である。市販ソフトとはいえ、こんなこともあるという一例である。

また、図4は歯の治療の一つである支台構築への繊維強化複合材料の適用に関する検討の一例である。図5に示すような荷重に対し、根尖に近い部位の歯根破折(図中下部の矢印)を起こさないように、支台の寸法をデザインするという事例である。図5はミーゼス相当応力とせん断応力分布を示す。この事例でも、どの応力成分を見るかという適切な判断が求められ、やはり構造解析を行うには力学の知識は不可欠だと言いたい事例である。

図4 歯の支台構築への適用例と要素分割図

図5 変形図と応力分布図
(左：ミーゼス相当応力，右：せん断応力)

2・2 温度依存性と強化形態(ミクロ構造)

次に取り上げたい課題は、特に成形シミュレーションで重要になる温度依存性の問題である。図6は編物複合材料の応力-ひずみ曲線の測定結果の一例であるが、網目方向による異方性と温度依存性があることがわかる。

(a) Course 方向

(b) Wale 方向

図6 編物複合材料の温度依存型異方性材料特性

このことは全体挙動（応力・ひずみ）に多大な影響を及ぼすばかりではない。温度依存性は特に母材において顕著であるため、高温下の成形シミュレーションを行う上で強調したいのは、強化形態（マイクロ構造）の大変形をも伴うという点である。つまり、図7にまとめるような相互作用を考慮し、成形プロセスデザイン上重要な温度というパラメータを決定しなければならない。一例として図8はマイクロマクロ連成を考慮して解いた編物複合材料の深絞り成形シミュレーションの結果である。³⁾成形品の特性は、成形中に大変形した強化形態により決まるのである。同様に強化形態を考慮したシミュレーションにはRTM成形の重要なパラメータである permeability の予測⁴⁾などがある。デザインパラメータに対する感度を知るという点では、実験よりも力学に立脚したシミュレーションの方が正確、安価、合目的的だと言う言いすぎであろうか

3 境界条件モデリングと非線形性

成形シミュレーションでは上記の温度依存性に加えて、接触をとともう高度な非線形問題となる。最近では熱可塑性樹脂の用途が増えていることから、その成形シミュ

図7 温度・力学特性・強化形態の相関

図8 織物複合材料の深絞り成形シミュレーション

レーションは重要である。ここでは、金属のプレス成形などで実績のあるソフトをベースに開発されたPAM-FORM（日本イーエスアイ株）によるシミュレーションの事例を紹介する。図9は、深絞り成形シミュレーションの事例であるが、パンチの温度を変えている。

図は成形後の板厚分布を示しているが、パンチの温度設定が不適切な図9(b)では、明らかにパンチと接触した部分の板厚が異常である。現実には成形中に割れるであろうが、パンチとの接触によって起こる熱伝達と熱可塑性樹脂の温度依存性がからんだ問題である。成形がclosed mold内であるため観察も困難であることを考えれば、成形プロセスデザインにもシミュレーションが有効であることが理解されよう。

図10は真空成形の手順を模式的に表したものである。

図9 パンチ温度が成形品板厚に及ぼす影響

図10 真空成形法における境界条件の変化

図 11 PAM-FORM による真空成形シミュレーション例

接触は熱伝達を起こすとともに、繊維強化された複合材料では繊維を拘束して変形モードを大きく変える要因になるから、予測が困難である。図 11 は冷蔵庫の内部パネルの成形シミュレーションの事例であるが、図 12 では図の上面にしわが入り、失敗が予測された例である。多数のデザインパラメータの絞り込みにシミュレーションは今後必要不可欠のツールとなると言えよう。

なお、これらのシミュレーションでは、温度依存性による材料非線形性、接触による非線形性に加えて、大変形という幾何学的非線形性も加わっている。図 13 ~ 図 15 は単純支持された正方形板の大変形問題であり、圧力は変形に追従した follower force の設定がなされている。使用したソフトは最新のマルチフィジックスソフト Mpact (エイシーティ株) である。ソリッド要素 ($14 \times 14 \times 5$

図 13 正方形板の大変形解析における要素分割

図 12 真空成形におけるしわ発生の予測

図 14 変形図

図 15 幾何学的非線形性と要素分割の影響

分割, 図中▲), シェル要素 (14×14 分割, 図中●) とも十分な要素分割を行えば理論解に一致する解が得られるが, 要素分割が粗い (4×4 分割, 図中◆) と誤差が大きい結果となることを示している. また, 板厚 0.1mm の約 1/2 程度 (0.05mm) のたわみを起こすと, 非線形性が無視できなくなることわかる.

複合材料の非線形問題は, シミュレーションの中でも高度な部類である. 他段階のプロセスを経る成形シミュレーションでは, 除荷 (unloading) も重要である. 除荷を扱う, すなわち履歴依存の問題を解くには正しい非線形解析手法を用いることが必須であり, 付け焼き刃の線形解析の延長では扱えない. 連続体力学, FEM の非線形の理論に立脚した実績あるソフトの使用が望ましいと言える. しかしながら, 繊維強化プラスチックなどでは, 図 16 のように除荷時の挙動は必ずしも初期弾性率でないことが考えられる. 筆者が知る限り, この現象が扱える CAE ソフトは今のところないと思うので, 相当に工夫し, それ以上に相当の苦勞をしてシミュレーションを試みているのが現状である. 加えて, 実験データの取得も重要である. 成形プロセスシミュレーションの今後の課題の一つと考える.

4 近似・補間とシミュレーションの誤差

数値シミュレーションの基本は近似と補間である. そもそも, 物理量の分布をコンピュータ内で表現するにはどうするか. たとえば, 曲線は有限個の点における値を折れ線でつなぐことを誰でも行うであろう. 2 点の情報があれば直線が描ける. 3 点の情報を使えばより近似度合いが高い 2 次曲線が描ける. 有限個の離散点 (FEM

では節点) を使って物理量の分布を知することは, 至極当然の発想として理解されよう. FEM では多項式を用いる. 通常 1 次式 (1 次要素あるいは線形要素) か 2 次式 (2 次要素) を用いる. 節点で変位や温度を求め, 要素内の任意点の値は多項式で予測 (補間) するため, ここに誤差 (近似誤差あるいは補間誤差) が入る. しかし, ひずみや応力は, 種々の理由で, 節点ではなく, 要素内に数値積分計算のために設けるガウス積分点で求める. ガウス積分点の位置はユーザには非常にわかりにくい. また, 結果のグラフィックス上の利便さから, ひずみや応力も節点で出力するソフトが大半である. この場合は, ガウス積分点での値を外挿して節点の値を出力する. 補間には内挿と外挿の 2 種類があるが, 一般に外挿の方が精度は悪い. また, 非線形問題ではガウス積分点で求めた応力を参照して次の時間ステップの計算を行うことになるため, ガウス積分点が均等に配置されているかが要素分割の決め手となる. 一度, このような見方で要素分割の善し悪しを評価してみていただきたい.

また, 最近では, FEM の教科書に載っている近似関数 (専門的に形状関数と言う) ではなく, より高精度の高性能要素を用いているソフトが多い. 図 17 の片持りの曲げの問題に対するベンチマークテストの結果 (図 18 ~ 図 21) を紹介する. 図 18, 19 のソフト C は通常教科書に載っている形状関数を用いた結果である. また, 実線は 1 次要素 (8 節点六面体要素), 破線は 2 次要素 (20 節点あるいは 27 節点六面体要素) である. ソフト A では 1 次要素の粗い要素分割でも正解が得られていることがわかる. ただし, データ作成の時に高性能要素のチェックボタンを ON にしている. 知らない人が使うと宝の持ち腐れになってしまう一例である. 図 18 ははり先端の変位を, 図 19 ははり根元の応力を示している. 変位に比べ, 応力は誤差が大きいことがわかる. 応力は上記の節点応力を出力している.

図 18, 19 は要素形状が立方体の場合であり, 理論的に最も精度が良いことがわかる. 一方, 図 20, 21 には, 上記の立方体要素 ($2 \times 2 \times 20$ 分割) のモデルを基に, はりの厚さ方向のみ分割数を増加させ, 要素形状のアスペクト比を 1:1 (立方体) ~ 1:10 (扁平) まで 6 段階に変化させたときの挙動を破線によりプロットしている. また同図には, 比較として立方体要素時の結果を実線により示している. 図 20 より, 厚さ方向の分割数増加により要素数は増加しても要素形状が扁平になることにより, ソフト B では一気に変位の精度が落ちている. 一方, 図 21 の応力では, 破線の扁平要素の方が実線の立方体要素より正解に近い値が出力されている. これは奇妙な現象であるが, 要素分割数がはり厚さ方向に増加したことにより, 応力を評価するガウス積分点の数が増え, 最大応力となるはり表面近くにガウス積分点が配置され, 厚さ方向の応力分布が正確にとらえられた結果と考えられる. 近似・補間の概念と FEM 理論を知っていれば納得できる結果であり, この結果がシミュレーションの目的を満たすか否かを判断できるが, 理論を知らなければ

図 16 繊維強化プラスチックの除荷時の挙動

図 17 片持りの曲げ問題

図 18 要素分割の粗密の影響 (はり先端変位)

図 19 要素分割の粗密の影響 (はり根元応力)

図 20 要素のゆがみの影響 (はり先端変位)

頭をかかえて、折角行ったシミュレーションも利用できずに終わるのではなかろうか。

5 マルチフィジックス解析と将来展望

CAE の分野では「マルチフィジックス」解析が研究やソフト宣伝の中心になっている。これは、構造－流体－

図 21 要素のゆがみの影響 (はり根元応力)

熱－電磁場などの連成解析のことであり、推測しにくい難問としてシミュレーションベース・デザインに大いに期待がかかるところである。前述の Mpact は数少ない強連成型 FEM によるマルチフィジックスソフトである。

ますます進展する CAE 技術と現場のギャップは広がる恐れがあり、それをくい止める努力と対策をしなければ、新しいアイデアやデザインの創出はないかもしれない。一方、諸外国製のソフトを使うばかりでは、ソフトのメニューなどが日本特有の文化や思考パターンに合わないのではないか、アイデアやデザインの創出を妨げるのではないか、という危惧もある。CAE の専門家でないデザイナーが CAE を使う時代に向け、次世代ユーザインタフェース (GUI) にも配慮した我が国独自のソフト開発が必要と考え、筆者の一人は「マルチプロフェッショナル・シミュレータ (ある専門家が異なる専門分野のシミュレーションを自由自在に行えるユーザインタフェース)」の構想を立て、模索中である。

なお、本稿を執筆するにあたり、一部は日本学術振興会二国間交流事業 ドイツ (DFG) との共同研究「MEMS のシミュレーションベース・デザインのためのマルチスケール解析法の開発」の補助を受けたことを記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 大山龍男, 中村隆志, 中村俊雄, 今西 仰, 歯科審美, **15**, 184 (2003).
- 2) 大山龍男, 中村俊雄, 中村隆志, 矢谷博文, 日本補綴歯科学会雑誌, **47**, 103 (2003).
- 3) N. Takano, Y. Ohnishi, M. Zako and K. Nishiyabu, Int. J. Solids and Structures, **38**, 6333 (2001).
- 4) N. Takano, M. Zako, T. Okazaki and K. Terada, Composites Sci. Tech., **62**, 1347 (2002).