
株式会社ファソテック

設計者CAE向け
ビジネスコラムシリーズ

「始めよう設計者CAE！」

FAJOTEC



設計者CAE向けビジネスコラムシリーズ

「始めよう設計者CAE！」 目次

コンセプト編

- 1.設計者CAEの誕生とCAEフロントローディング推進
- 2.設計者CAEのメリット（設計者CAEと専任者CAEの違い）

テクニカル編

- 3.線形解析と非線形解析の違い
 - 4.フォン・ミーゼス応力の真意
 - 5.特異点に気を付けよう
 - 6.計算結果の精度を保つメッシュサイズの日安
 - 7.仮想パーツの活用
 - 8.データマッピング
 - 9.ボリウム分割アドバンスドメッシング
 - 10.1次要素と2次要素の使い分け
 - 11.CAEテンプレートの活用
 - 12.設計者CAEステップアップに向けて
-

始めよう設計者CAE！

1.設計者CAEの誕生とCAEフロントローディング推進

2000年初頭に設計者CAEが世に唱えられて以来多くの企業に関心を持たれてきました。そして今日の状況では設計者CAEがすでに定着していたり、推進の途上であったり、まだ着手していない企業など様々です。そこで設計者CAEをこれから推進される企業の方のために、原点に立ち戻って設計者CAEの特長について以下にご紹介します。

設計者CAEとは設計者自身が設計業務の一環として有限要素法等の解析を度々実施して設計検討を行って設計品質を向上させることです。では設計者CAE誕生の背景についてお話しします。

まずCAEという言葉はComputer Aided Engineeringの略で、1980年代初めに米国SDRC社が提唱したのが始めと記憶しております。筆者は当時CAEDS（SDRC社が開発したI-DEASの別名）の技術者としてSDRC社を訪問しCAEの概念を教わり非常に感銘を受けました。

当初のCAEは実施するに当り高度な専門知識と多くの労力が必要だったので専ら解析専任者の仕事でした。そしてCAEを行う目的は試作実験の結果に対するトラブルシューティングのためであり、製品開発プロセスの下流での利用が主でした。

やがてコンピューター性能の向上とともに大規模なシミュレーションを高速に行うことができるようになり、CAEはバーチャルシミュレーション（仮想実験）による実試作実験の置き換えまたは削減のための用途に発展しました。例えば自動車の衝突解析などで、これにより試作車数を削減し開発時間の短縮や開発コストの削減に貢献するようになりました。現在このようなCAEを施さずに航空機や自動車を開発するメーカーは世の中に皆無と言っても過言ではありません。これは製品開発プロセスの中流における重要な適用です。

始めよう設計者CAE！

1.設計者CAEの誕生とCAEフロントローディング推進

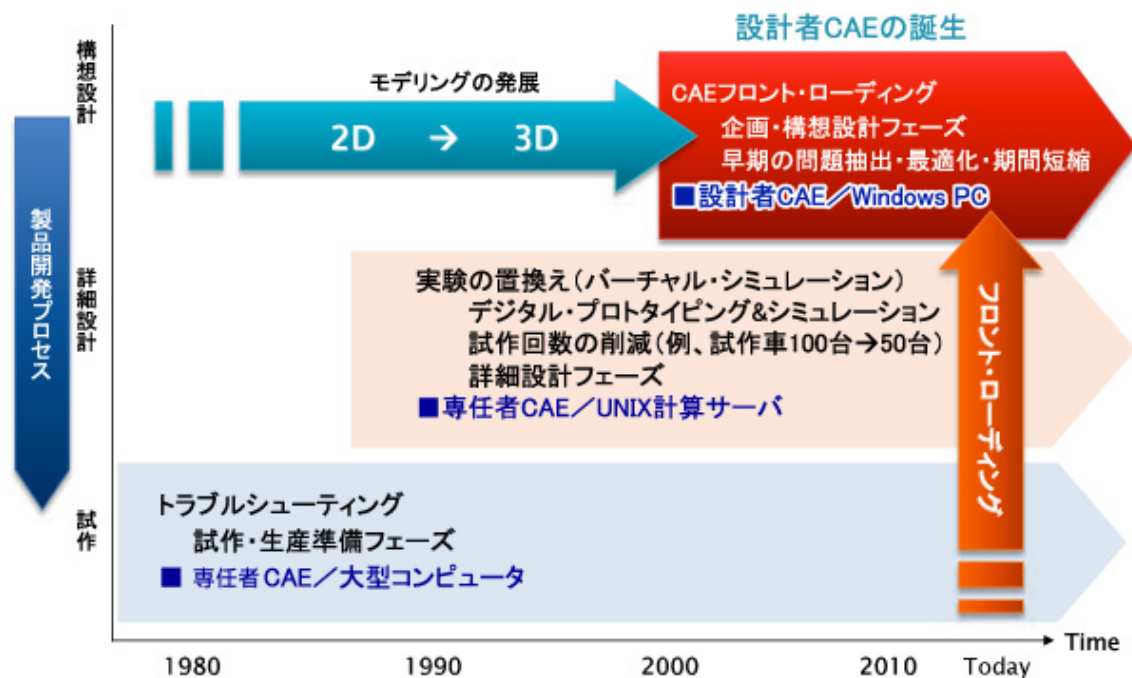


図1. CAE適用の変遷

一方設計者が行う設計作業もテクノロジーの進歩に伴い2D図面中心から3Dモデル中心へと変化しており、製品形状を3Dモデルで取り扱うことが多くなって設計者自身が3Dモデルをそのまま使って容易に解析を行う環境が整ってきました。設計検討のための簡単な解析をわざわざ解析専任者に依頼しなくても設計者自らが繰り返し行うことができるようになりました。これが設計者CAEの誕生です。

始めよう設計者CAE！

1.設計者CAEの誕生とCAEフロントローディング推進

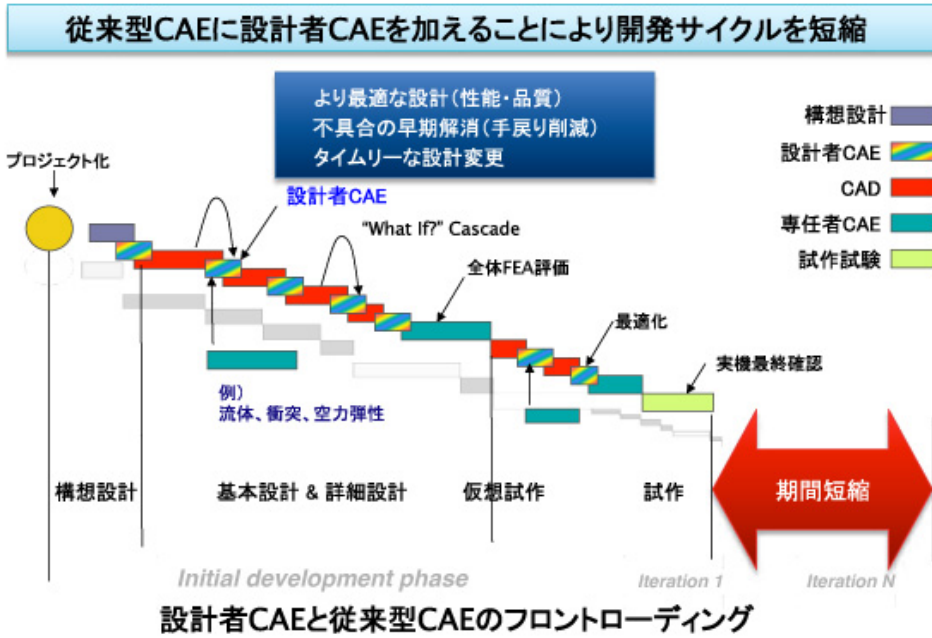


図2. 製品開発プロセスにおける設計者CAE

もう一つ設計者CAEが誕生した背景があります。それはCAEフロントローディングの必要性です。

多くの企業は競争に勝ち抜くために、省エネ性や耐久性の向上を目指して製品開発サイクルを短時間で回す必要がでてきました。試作を削減してかつ設計変更などの手戻りを極力減らして開発期間の短縮を図るためには、製品開発プロセスの上流において早期の問題抽出や最適化する設計を推進する必要があります。これがCAEフロントローディングであり、従来型の専任者CAEと新たな設計者CAEを調和して推進してこそ効果が発揮されます。

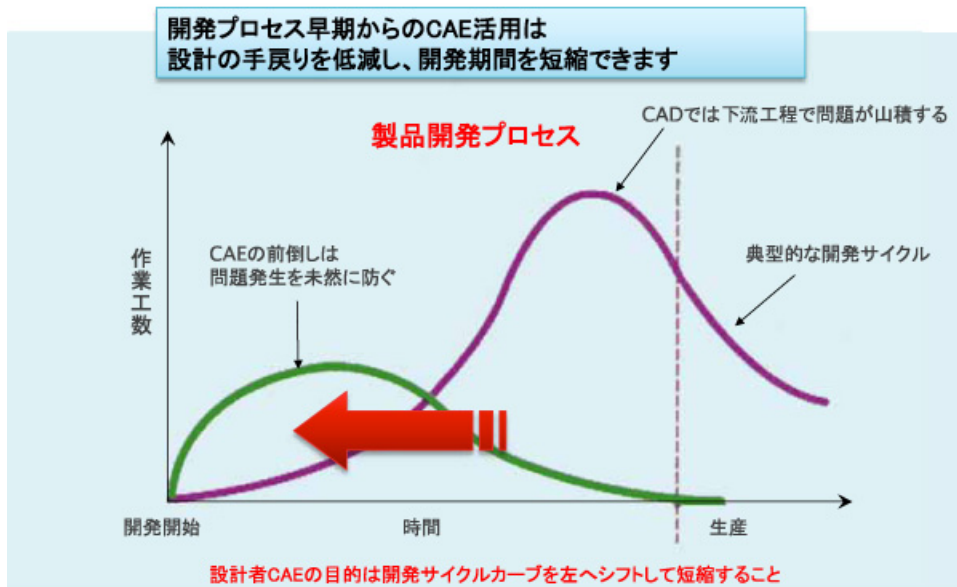


図3. CAEフロントローディング推進

始めよう設計者CAE！

2.設計者CAEのメリット（設計者CAEと専任者CAEの違い）

物を造れば売れる一昔前の頃は多様な消費者ニーズに応えて多種多様な製品を数多く揃えるために設計者は類似設計や派生設計に追われていました。そして設計作業は過去の設計の計算式や勘に頼って安全サイドに部材の寸法を決め材料を選択することが多くありました。

しかし昨今のデフレ時代は消費者の需要も消極的になり、安全・安心・省エネに優れた製品を慎重に選ぶようになり、企業は生き残りをかけて安全でかつ省エネに優れた製品を短期間に開発して差別化を図る必要に迫られています。設計者CAEは正にこの目標を実現するために用いられます。

設計者CAEの実践は部品の実形状に近い3Dモデルを使い、高度な知識を必要とせずに容易に有限要素法解析を行って、すぐにその設計の妥当性を確認することができます。従来の近似計算式のような最大値のみの評価に終始せず、製品上の応力分布やウィークポイントを観察できるため設計検討の自由度が大きく広がります。設計者CAEは勘や経験に頼っていた従来の過剰設計を回避でき、前号で述べたCAEフロントローディングと相まって製品開発の上流過程から最適な設計を目指すことができます。

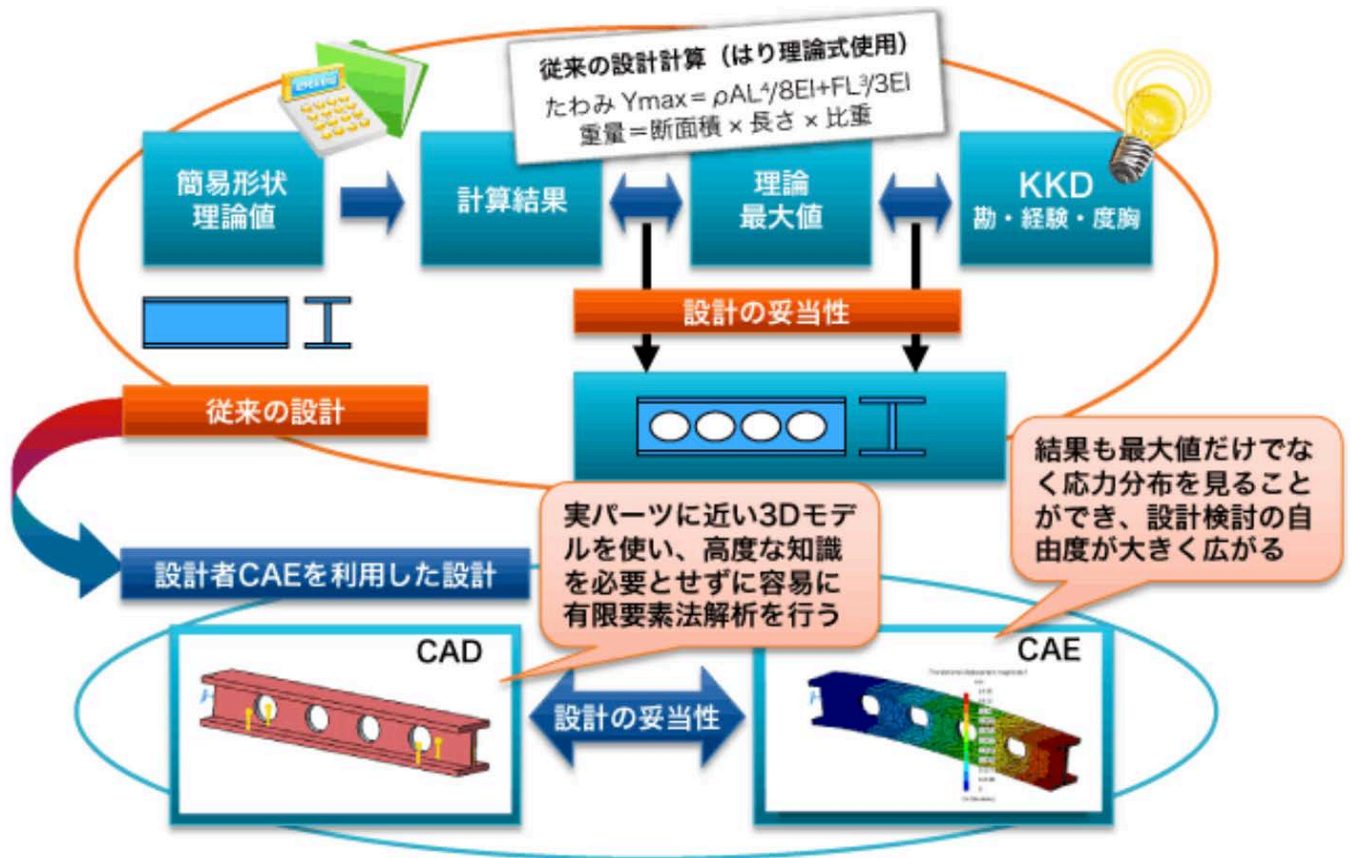


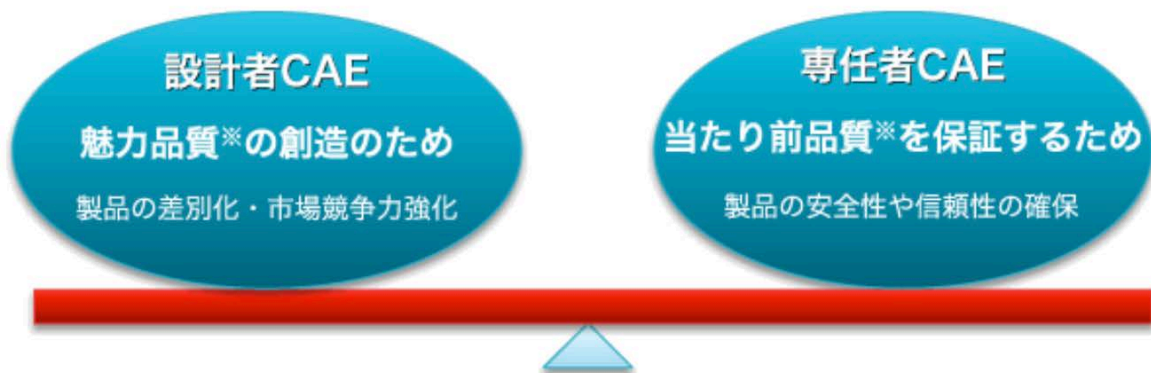
図1. 設計者CAEを利用した設計検討

始めよう設計者CAE！

2.設計者CAEのメリット（設計者CAEと専任者CAEの違い）

設計者CAEは製品の付加価値を高める、すなわち魅力品質の創造を目標にしています。一方専任者CAEは高度な解析技術を駆使して製品の安全性や信頼性を確保するために行われます。すなわち製品の当たり前品質を保証するための解析です。

設計者CAEと専任者CAEはどちらも重要なプロセスであるが狙いが異なる



設計者CAE		専任者CAE
設計者または設計部門エンジニア	解析を行う人	解析専任部門のCAEエキスパート
魅力品質の創造	狙い	当たり前品質の保証
標準的な使用環境条件	解析条件	最悪な使用環境条件
相対値比較による設計判断	結果評価の方法	絶対値による品質の確認

注) ※はミシガン大学の菊池先生が2006 JCFの講演で用いられた言葉を引用

図2. 設計者CAEと専任者CAEの違い

どちらも重要なCAEではありますが、実践する主役と狙いが異なることを理解いただければ幸いです。

次号からはテクニカルなトピックに移り、「線形解析と非線形解析の違い」と題して設計者にとってのリアリスティック・シミュレーションの必要性に触れたいと思います。

始めよう設計者CAE！

3.線形解析と非線形解析の違い

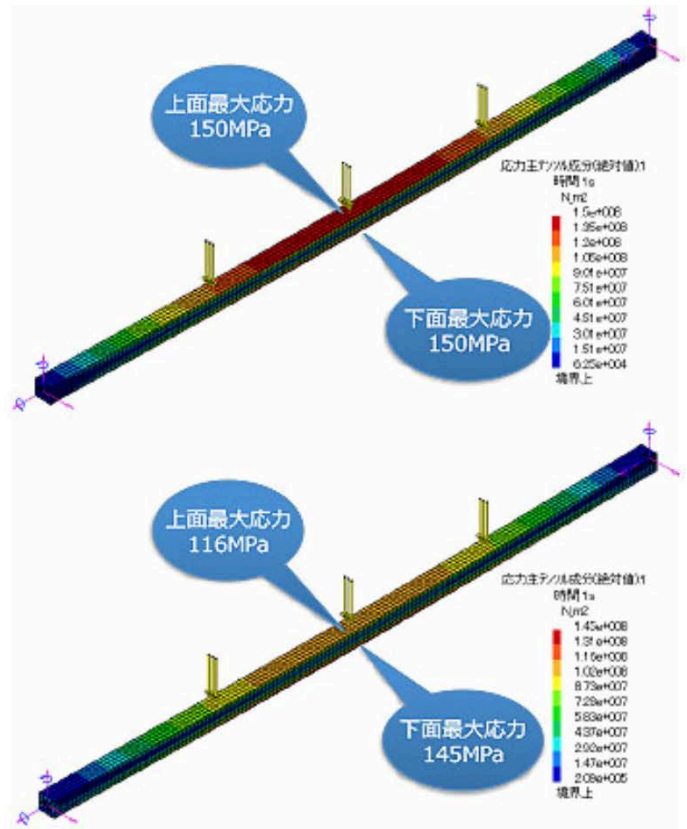
設計者CAEは線形解析から始めるのが一般的ですが、それは解析の基礎式が材料力学の理論からできているからです。しかし世の中の事象の多くは線形ではなく非線形で表現されるため、設計者CAEにおいてもよりリアルなシミュレーションが求められることが多くなり、非線形解析のニーズが高まりつつあります。非線形解析は、非線形性のタイプから大きく以下の3つに分類できます。

- 幾何学的非線形（大変形）
- 材料非線形（弾塑性、超弾性・・・）
- 接触（有限すべり、摩擦・・・）

ではお馴染みの「分布荷重が作用する両端支持ばり」を例にとって線形解析と幾何学的非線形解析による計算結果を比較してみます。

線形解析

- 上下対称の曲げ応力のみ発生する
- 材料力学の公式と同じ計算結果になる
- 荷重の大きさと最大応力は **線形**の関係あり



幾何学的非線形解析

- 曲げ応力と膜応力が発生する
- 材料力学の公式では計算できない
- 荷重の大きさと最大応力は **非線形**の関係になる

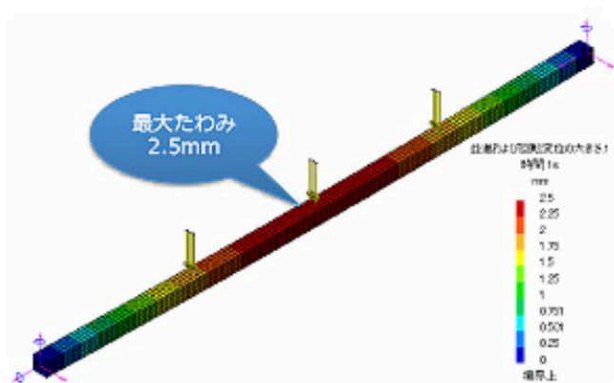
図1. 線形解析と幾何学的非線形解析の応力結果比較

まず図1のように、幾何学的非線形解析では応力が上下面に対称ではなくなります。これは中立面に膜応力が発生するためです。離れた2点間に張られた糸の midpoint を指で押さえてたわみを与えると糸はピンと張って張力が発生してたわみがあまり増大しません。この張力がはりの場合は膜応力として発生します。膜応力は有限のたわみが存在して初めてそれを分力とした力のつりあい式にて計算できます。

このように幾何学的非線形では荷重が増えると膜応力も増えるため最大応力は非線形的に増加します。

3.線形解析と非線形解析の違い

線形解析



幾何学的非線形解析

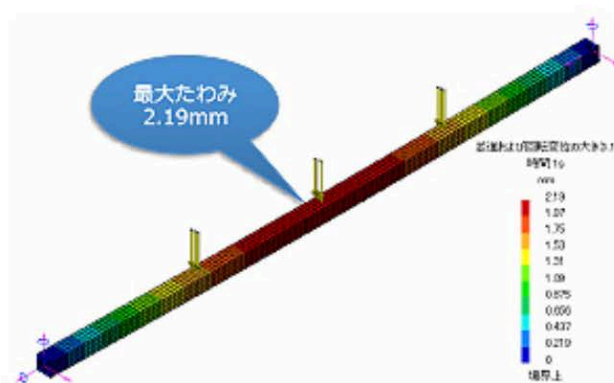


図2. 線形解析と幾何学的非線形解析の変位結果の比較

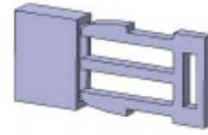
また図2のように、幾何学的非線形解析のときの最大たわみは膜応力の発生によりたわみが抑えられて線形解析のときより小さくなります。線形解析は微小変形理論（すなわち変形が限りなくゼロに近い状態での力のつりあい）に基づいているため張力は計算されず、曲げ応力だけを計算するので荷重が増えると最大応力も線形的に増加します。

従来通りの標準や規格に則った製品設計では安全サイドで設計するのが基本になるので、まずは線形解析による設計者CAEを取り入れて設計検討の自由度を広げてより良い製品を開発するのが先決と考えます。

次に最適化を追求した設計では非線形解析を用いたリアリスティック・シミュレーションを取り入れていく必要があります。その簡単な例をご紹介します。

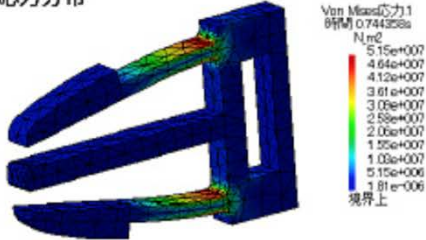
3.線形解析と非線形解析の違い

最大応力：非線形解析 < 線形解析
押し込み力：非線形解析 < 線形解析

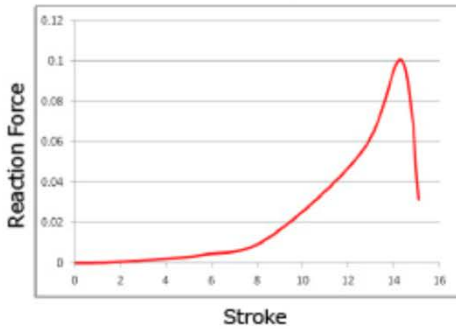


幾何学的非線形解析の場合

応力分布

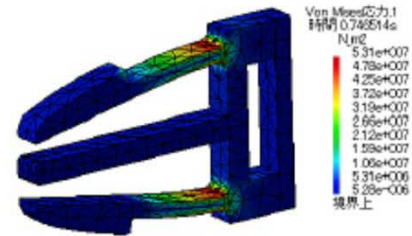


クリップを押し込む力の変化



線形解析の場合

応力分布



クリップを押し込む力の変化

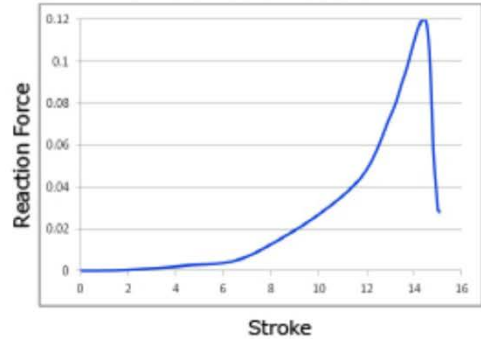


図3. バックル・クリップの最適設計に対する適用効果

図3のようなバックルのクリップを設計するとき、従来通りの線形解析で応力を計算して許容応力以下になるように安全サイドに設計すると、強度的には満足するものになります。しかし剛性を必要以上に強くすると、クリップを押し込むのに予想以上の大きな力が必要になって逆に使い勝手が悪くなります。度を越すと消費者に見放されることにもなりかねません。

幾何学的非線形を考慮した計算は線形解析と同様にほとんど手間をかけずに容易に行えます。さらに材料非線形性の考慮を追加するとより現実に近いシミュレーションができるので、耐久性に優れて、かつ使い勝手の良いバランスの優れた製品を設計できるようになります。この例のように現実の事象を模擬した解析を行うには非線形性の考慮が望ましいことが分かります。

CATIA V5のANLおよびATHは設計者が容易に使える非線形解析ツールです。設計者CAEでの非線形解析について関心をお持ちの方はぜひ弊社へお問合せください。

さて次号では、線形解析の話題に戻って「フォン・ミーゼス応力の真意」についてお話しします。

始めよう設計者CAE！

4.フォン・ミーゼス応力の真意

CATIA GPSを使って設計者CAEに取り組みはじめると、最初の一步で「Von Mises応力」に出会います。しかし「Von Mises応力」は学生時代に材料力学を学んだ人以外にとっては耳慣れないものであり、一体どのような応力なのか尋ねたくなる人が多いかと思ひます。そこで今回はこの「Von Mises応力」についてその意味と使い方をご紹介します。

まず「Von Mises応力」はフォン・ミーゼス応力と発音します。フォン・ミーゼスは人の名前で1900年代に力学分野で活躍された中欧出身の科学者です。さて、フォン・ミーゼス応力に言及する前に、材料の特性の一つである応力～ひずみの関係について簡単に触れます。応力とひずみの関係は材料の種類ごとに異なる応力～ひずみ曲線で表されます（図1サンプル参照）。

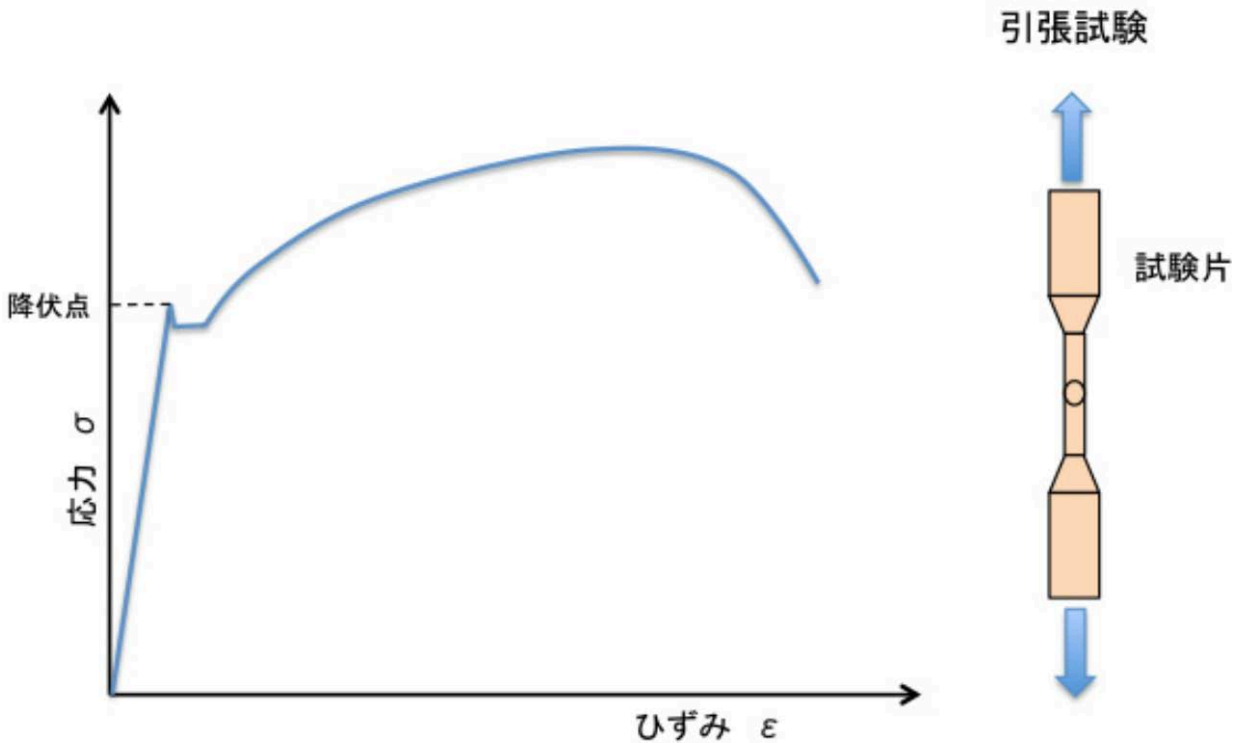


図1. 金属材料の応力～ひずみ曲線

この曲線は細長い試験片に単軸の引張荷重をかけて測定した荷重方向の応力とひずみの値をプロットして得られます。金属材料の応力～ひずみ曲線を見ると降伏点と呼ばれる屈折点が見られます。この降伏点以下の応力状態では弾性変形が生じても除荷すると元の形状に戻ります。しかし降伏点を越えると材料は永久変形が始まります。これを塑性変形と呼びます。

設計者CAEの世界では製品が使用状況下で永久変形を生じないように設計するのが一般的ですので、CAEで計算された応力が降伏点より十分小さな値（実際は安全率を考慮した許容応力）以下になるよう設計します。

始めよう設計者CAE！

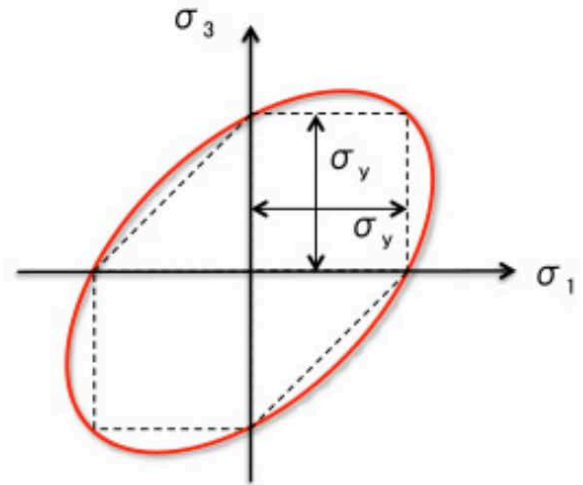
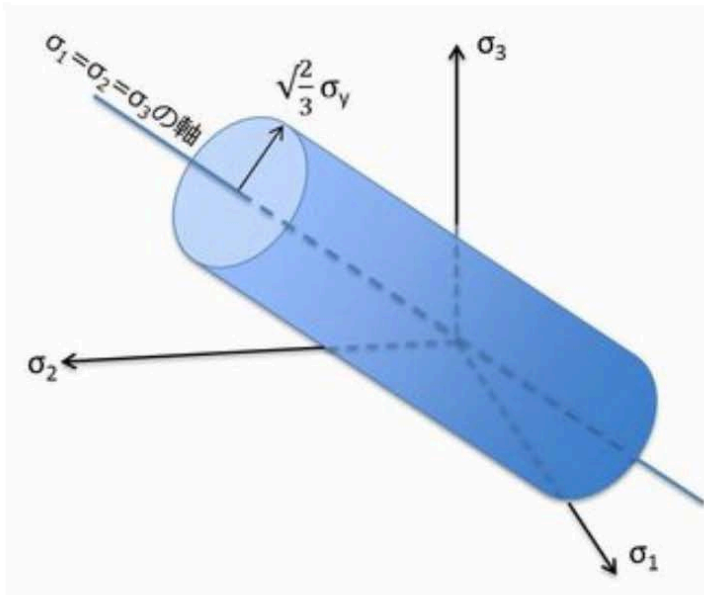
4.フォン・ミーゼス応力の真意

単軸の荷重下の場合であれば計算した発生応力を降伏点と照合して弾性範囲内であるか容易に判別できますが、荷重が2軸や3軸の複雑な環境下では応力成分が複数になりどの成分と降伏点応力を比較すべきか迷うことになります。このような多軸の荷重下の場合、ある理論に基づいてスカラー値で表現した相当応力を降伏点応力と比較し弾性範囲内かどうかを判別します。

この背景になる理論はいくつかありますが、フォン・ミーゼスはせん断ひずみエネルギー説に基づく相当応力による降伏条件を提唱しました。よって、その相当応力のことをフォン・ミーゼス応力と呼ばれています。フォン・ミーゼス応力はスカラー値で大きさは絶対値で表し、方向を持っていません。3軸の主応力空間でせん断ひずみエネルギー説を図示すると図2に示す円柱で表されます。ここで円柱の内側は弾性状態、円柱面が弾性破損基準となります。

3軸主応力空間におけるせん断ひずみエネルギー説降伏曲面

2軸主応力平面 ($\sigma_2=0$) におけるせん断ひずみエネルギー説降伏曲線



ここで、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ は主応力、 σ_y は降伏点応力

図2. せん断ひずみエネルギー説の降伏条件

始めよう設計者CAE！

4.フォン・ミーゼス応力の真意

すなわち、3軸の主応力値が円柱面上に位置すると降伏開始していることとなります。フォン・ミーゼスが唱えたせん断ひずみエネルギー説は、金属などの延性材料の特性によく合うので一般的に広く用いられており、CATIA GPSでは計算結果の応力分布を表示するときに「Von Mises応力コンター」がデフォルトになっています。以上のようにフォン・ミーゼス応力は設計者CAEにおいて、製品の許容応力と照合して強度が十分であるかどうかを判断する重要な指標となります。

なお降伏条件としてよく知られているものには、他にTresca(トレスカ)が提唱した最大せん断応力説や脆性材料の特性に合う最大主応力説があります。応力および降伏条件についてもっと詳しく知りたい方は、弊社の教育コースの受講をお勧めします。

次回は「特異点に気を付けよう」と題して、設計者が陥りやすい応力分布の着目ミスについてご紹介します。

始めよう設計者CAE！

5.特異点に気を付けよう

設計者CAEを始めたばかりの初心者の多くは、解析結果を評価するときにフォン・ミーゼス応力のカラーコンターを表示して、一番赤く染まった最大値が出ている箇所に着目します。この着目の仕方は時々適切でない場合がありますので注意が必要です。

弾性解析の場合、集中荷重が作用する点や集中応力が発生する点の応力は正しく計算されないで、応力特異点と呼ばれています。この特異点が存在する解析モデルでは特異点に最大応力が発生してしまうことが多いので、最大値のみに捕われると誤った評価を引き起こします。さらにその計算された応力値は正しい値ではありませんので、この値を評価することは避けなければなりません。なぜなら弾性解析の場合、特異点応力の理論値は無限大になるからです。

∴ 計算式を簡略化して表すと、 $\text{応力} = \text{荷重値} \div \text{面積ゼロ} = \infty$

では解析モデルに特異点が存在するかどうかの判断が必要になりますので、特異点の見つけ方の一例をお話します。

図1に示すサンプルモデルでは形状から見て切り欠き部に応力集中が起こるので、特異点の存在が想定されます。CAEのベテランはすぐに分かりますが、初心者の方は気が付かないことが多いと思います。

5.特異点に気を付けよう

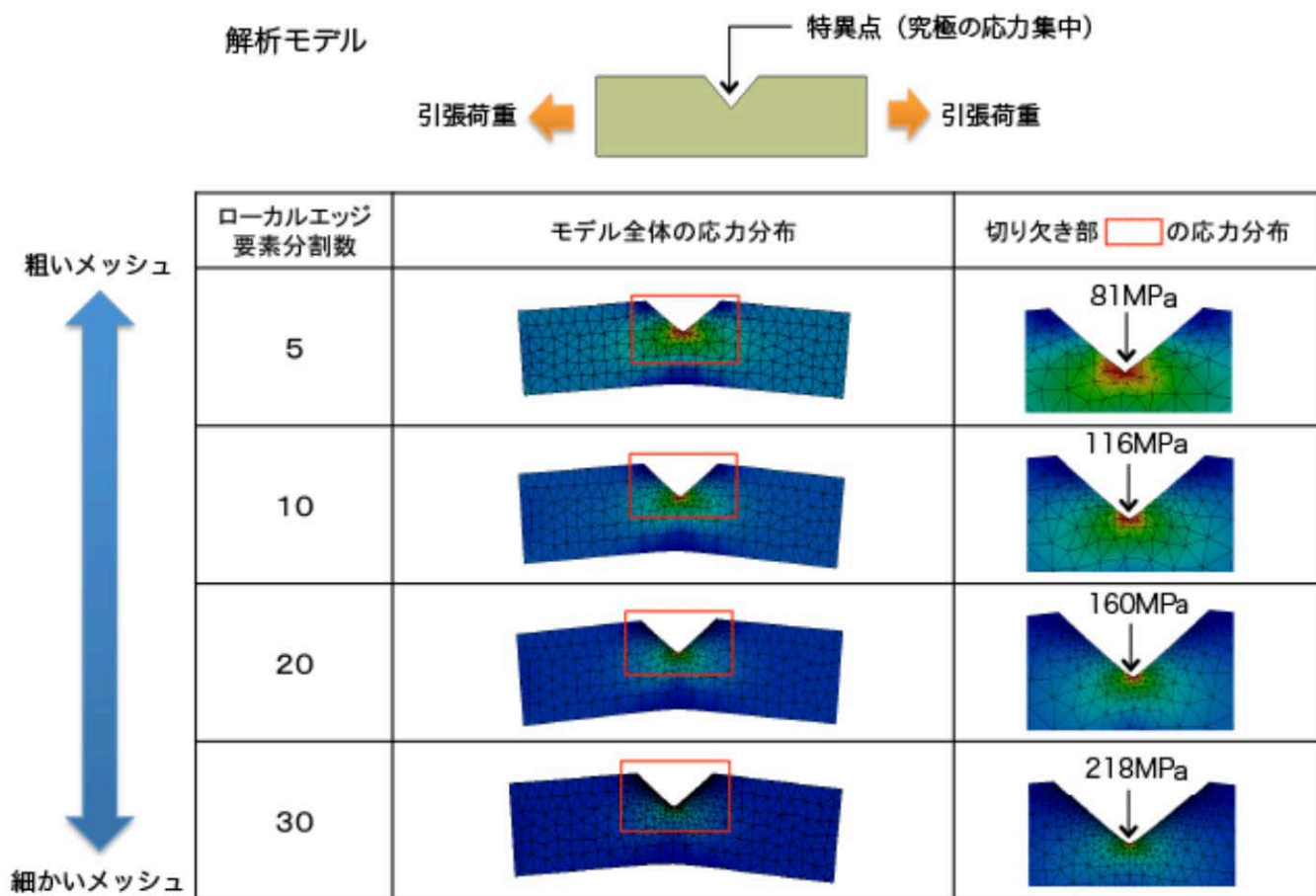


図1. 特異点のあるモデルの最大応力値変化

このようなモデルについては、徐々にメッシュ分割を細かくして計算を繰り返すと特異点の応力がどんどん大きくなり、収束することがありません。図3に応力の漸増する様子を青線で示しますが、メッシュを細かくするにつれて最大応力が増々大きくなっています。このように計算精度を上げるためにメッシュを細かくしていつまでも収束しない点があれば、それは応力の特異点ということになります。

このような特異点が存在するモデルでは特異点周辺を評価対象から外して応力の分布を見るべきです。

始めよう設計者CAE！

5.特異点に気を付けよう

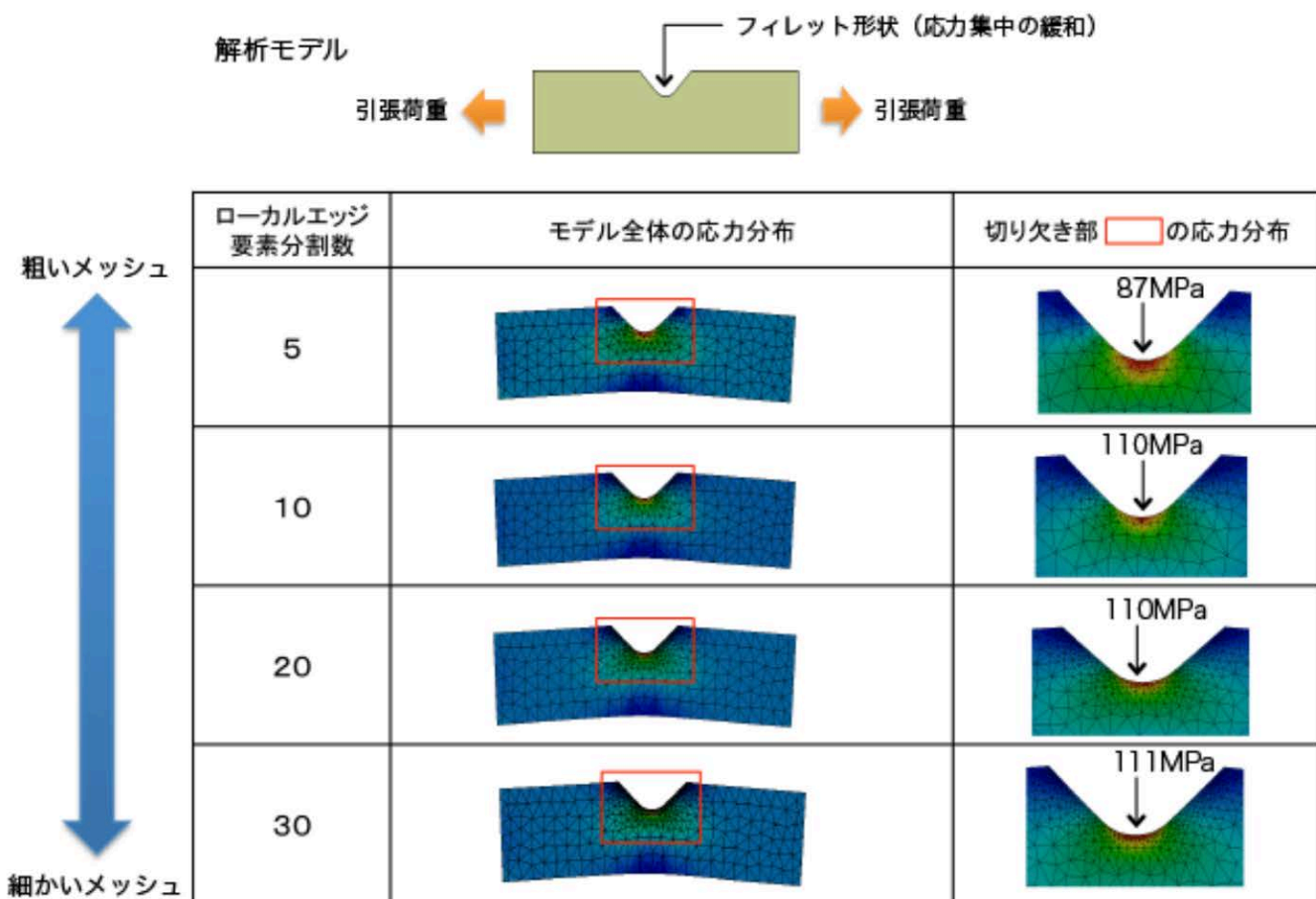


図2. 特異点のないモデルの最大応力値変化

一方、図2に示すようにサンプルモデルの特異点周辺にフィレットを施した形状に変更すると、応力集中は緩和されてメッシュ分割を細かくしていくと応力がある値に収束しています。図3に応力が収束の様子を赤線で示します。この形状のモデルは特異点が存在しなくなるので最大応力値で評価できます。また、メッシュを細かくしていくと応力値が収束しているため、得られた応力結果も良好な精度があり、評価に供することができます。

5.特異点に気を付けよう

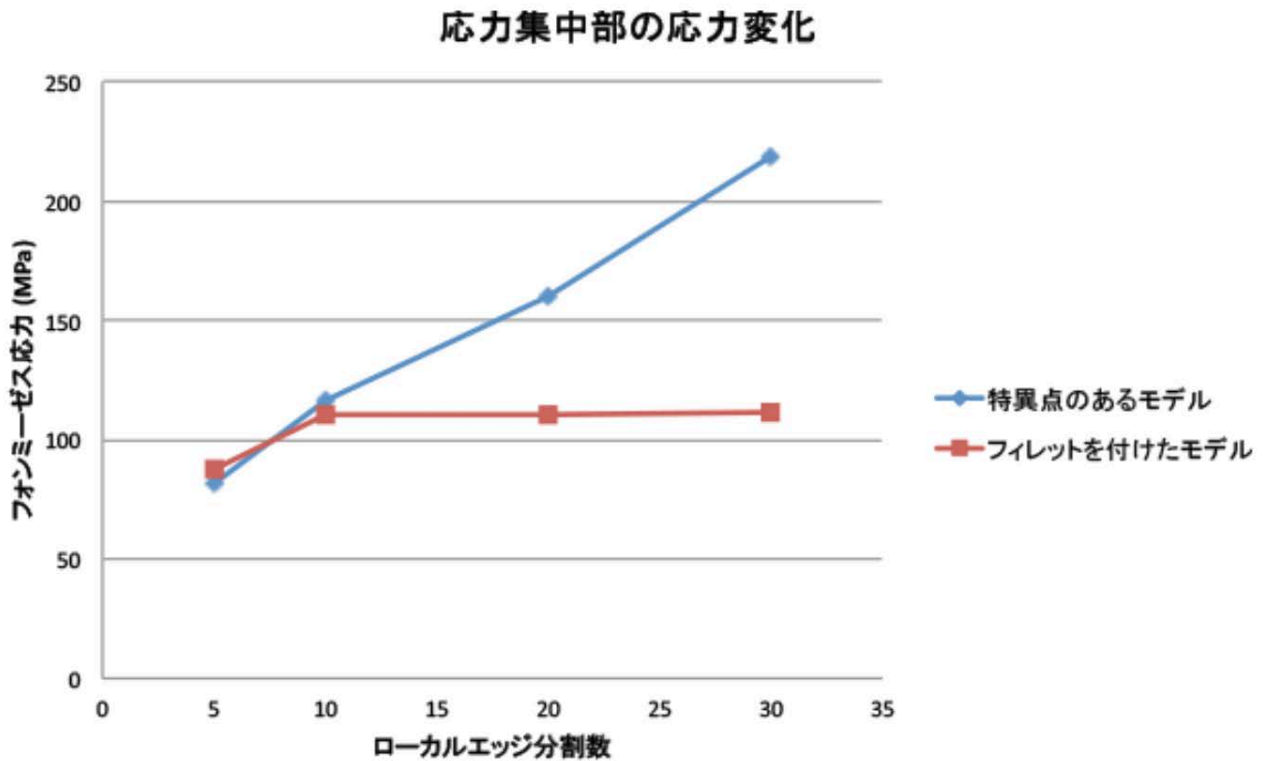


図3. メッシュ分割数に対する特異点応力の変化

応力の特異点は上記の形状のほかに、固定拘束面の境界線やL型形状の屈折点等にも存在します。

特異点への対応についてさらにお知りになりたい方は、弊社開催のCAE教育コース「設計者のための有限要素法」の受講をお勧めします。

次回は「計算結果の精度を保つメッシュサイズの目安」についてお話しします。

始めよう設計者CAE！

6. 計算結果の精度を保つメッシュサイズの日安

設計者CAEの経験が浅いときはメッシュ分割をほとんど意識せずにシステムに任せて計算する場合がありますが、経験を積んでいくにつれて、自分でメッシュサイズを設定して計算精度を良くしたいと考えるようになります。

このような場合にどのぐらいのメッシュサイズを設定すれば良いか迷うことも多いかと思いますが、昨今のCAEソフトウェアでは計算精度を保つためにメッシュサイズを最適に設定する機能が備わっているものが増えており、CATIA V5アナリシスの場合はアダプティブ機能にそれが該当します。最適なメッシュサイズに言及する前に計算精度について整理したいと思います。

現物の事象を真の基準とした場合に自分の計算が正しいかどうかは図1に示すようにモデル化誤差と数値計算誤差を把握する必要があります。前者は現物の事象をシミュレーションモデルにいかに正しく置き換えるかという精度であって、経験やノウハウに依存するところが大きく、定量化するのは困難な場合が多いです。一方、後者は有限要素法による数値解析の問題になり定量化は比較的可能です。

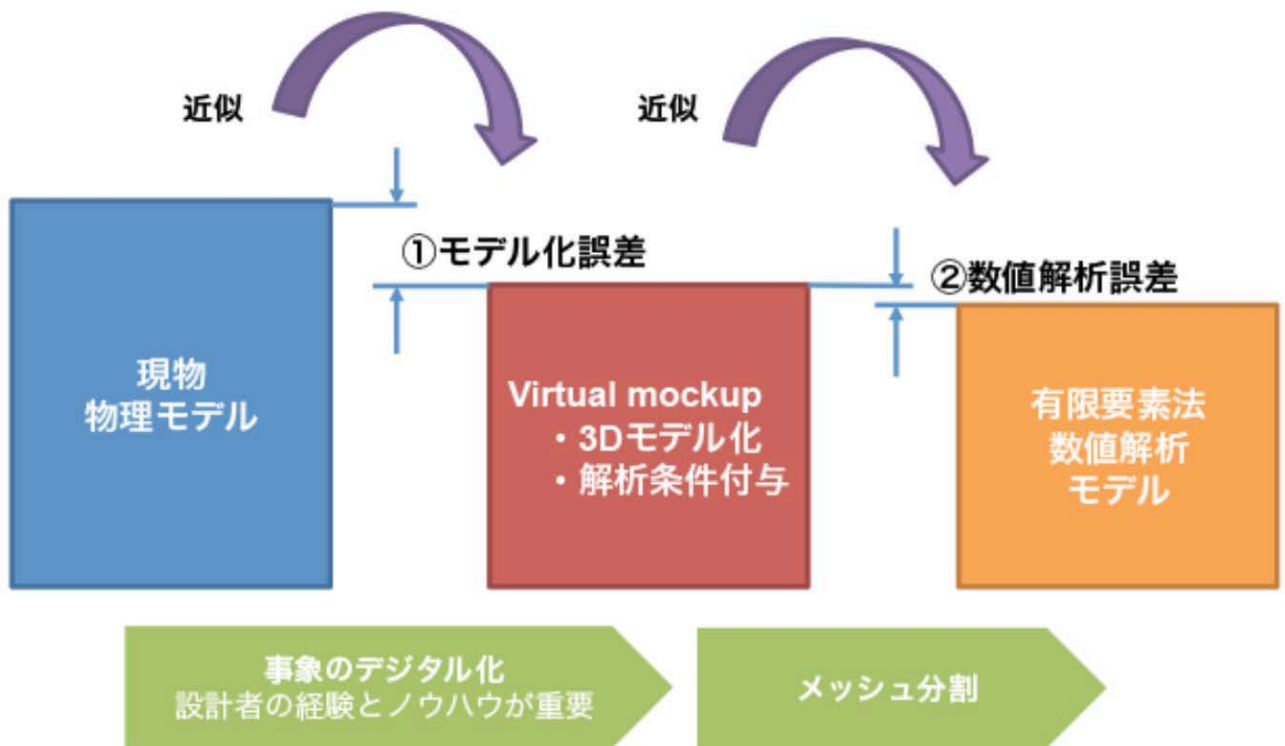


図1. CAEにおける2つの誤差

6. 計算結果の精度を保つメッシュサイズの見直し

現物の実験による測定結果とCAEによる解析結果を比較するには、この2つの誤差が含まれることを念頭において照合する必要がありますが、本稿では後者の数値解析誤差についてどのように対処して計算精度を高めるかをお話します。

金属や樹脂などでできた部品は固体の連続体であるが、有限要素法で解析する場合はその形状を有限の要素にメッシュ分割して離散化します。連続体の形状を離散化モデルに近似して計算するので自ずと誤差が生まれます。その誤差を最小限にして計算精度の高い解析結果を得るためには、できる限り細かいメッシュに分割して有限要素モデルを連続体に近づける必要がありますが、メッシュが細くなればなるほど節点数が増えて解析自由度が膨大になるため高速なコンピュータを使っても計算時間が長時間に及んでしまいます。

すなわち計算精度の向上と計算時間の短縮はトレードオフの関係になりますので、むやみに細かくすることは設計者CAEでは現実的な方法ではありません。

最近のCAEソフトウェアは要素の定式化が改良され進歩しているので、応力変化の緩やかな箇所は粗いメッシュでも精度良い計算結果が得られるようになっています。

しかし応力変化の激しい箇所はメッシュ分割をある程度細かくする必要があり、そのような箇所はメッシュ分割を徐々に細かくして応力がある値に収束するまでメッシュの細分割と計算を繰り返し行い、計算精度を上げていきます。

6. 計算結果の精度を保つメッシュサイズの目安

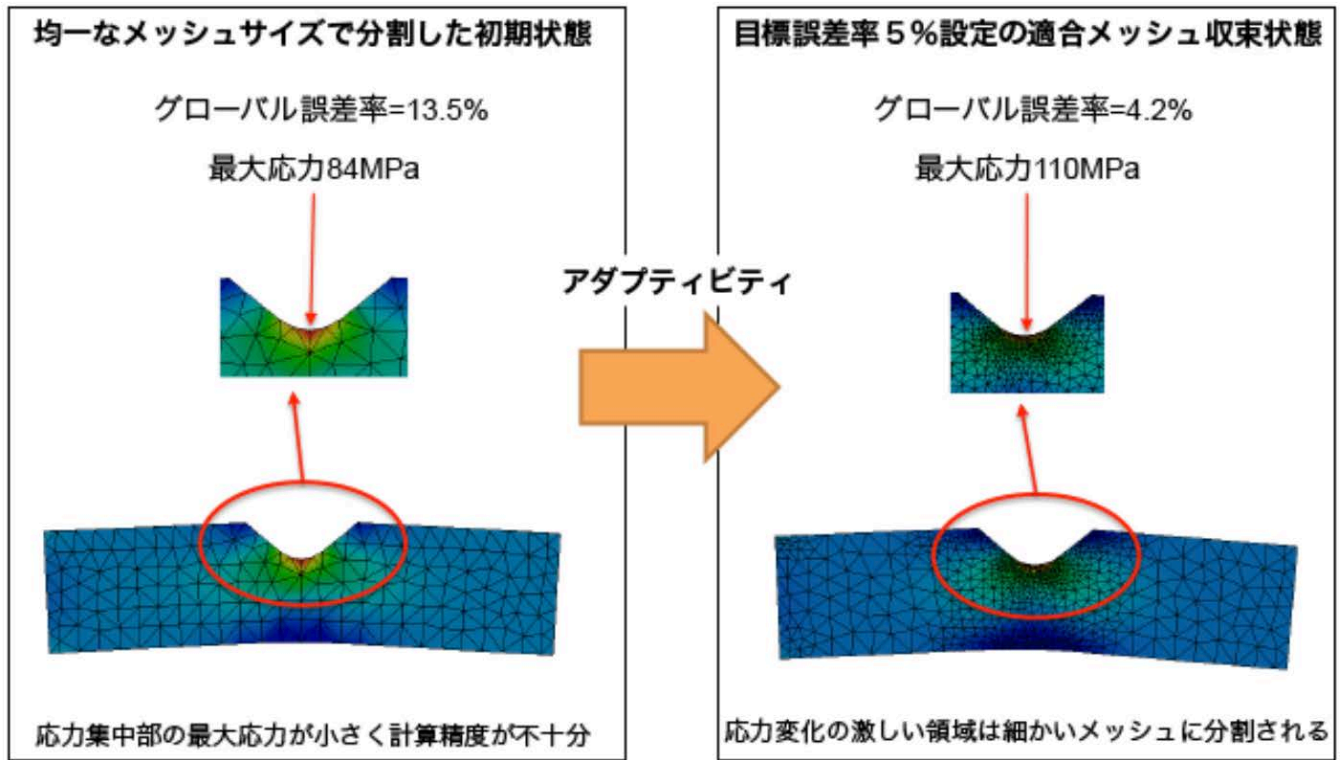


図2. アダプティビティによる計算精度を保ったメッシュ例

図2はCATIA V5 GPSのアダプティビティ機能を用いて最適なメッシュサイズを自動設定して計算精度を向上させた一例です。これは前号のコラムに掲載したものと同一モデルを使っていますが、前号の手動で細分したときと同様に応力集中部の最大応力が110MPaに収束しています。このときはグローバル誤差率の目標を5%に設定してメッシュ全体の誤差率が5%以下になるまで再メッシュ分割を自動で繰り返して計算してくれます。

またESTを使えばローカル誤差率を与えることができるので、よりきめ細かなメッシュサイズ設定により計算精度の向上が図れます。

最適なメッシュサイズについてさらにお知りになりたい方は、弊社開催のCAE教育コース「設計者のための有限要素法」の受講をお勧めします。

次号からは少し趣きを変えてCATIA V5アナリシスの便利な機能について3号続けてお話しします。まず最初は「仮想パーツの活用」です。

7. 仮想パーツの活用

CATIA GPSではASSY構成部品のうち剛性に関与しない部品はメッシュ分割せずに仮想パーツとして解析モデルに組み込むことができます。

たとえば図1のような積載物の載った架台の強度解析を行う場合、積載物は構造部材として影響しないため解析対象から外して、その自重のみを考慮して架台を単体で解析することができます。また架台根元の垂直板をボルトで取り付けている壁面は、構造部材として考慮せずに剛な接触面として境界条件を設定します。

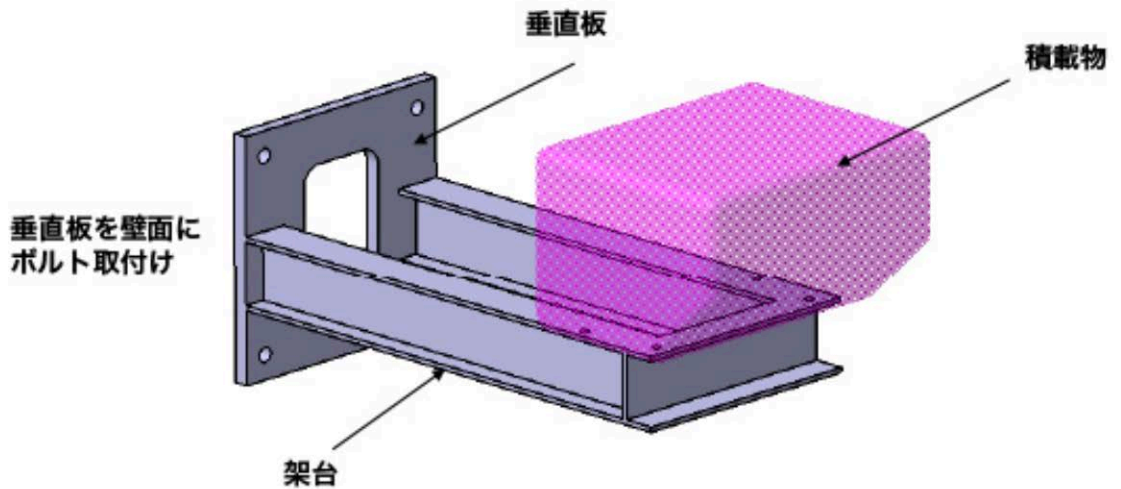


図1. 積載物を積んだ片持ち架台の強度解析

7. 仮想パーツの活用

GPSでは前者の積載物を平滑仮想パーツとして、また後者の取付け壁面を接触仮想パーツとしてモデル化することができます。GPSはこの他に剛体仮想パーツを備えており、仮想パーツがどのように結合されているかによって使い分けできるようになっています。図2にこのモデルへの仮想パーツ活用例を示します。

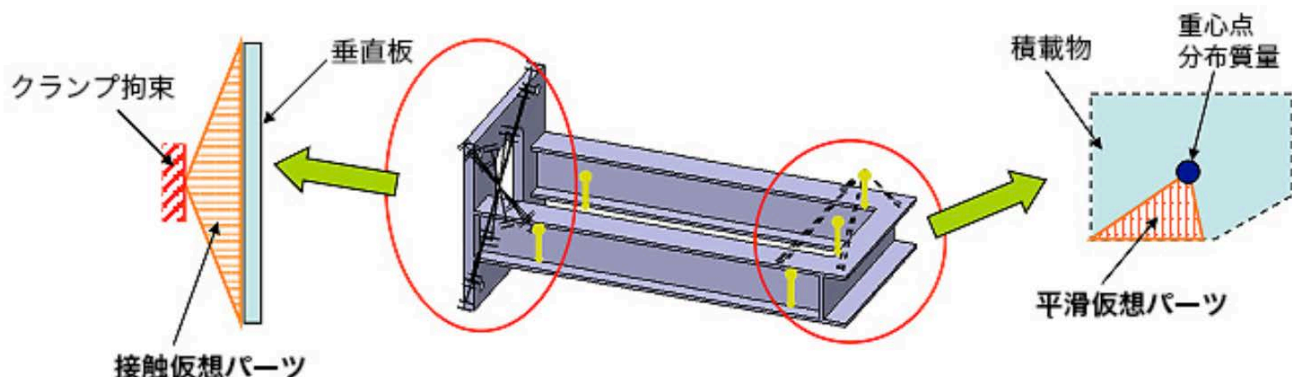


図2. 仮想パーツの活用例

積載物はメッシュ対象とせず重心位置にハンドラ点を作って平滑仮想パーツとして定義します。そしてそのハンドラ点に積載物の質量を与えます。また壁面側の境界条件は垂直板の背面に接触仮想パーツをつけて接触の条件を設定します。接触仮想パーツおよびボルト穴はクランプ拘束を設定して架台全体の剛体移動を防ぎます。

このように仮想パーツの活用により、設計者は不要な形状モデルのメッシュ作成を省略できたり、壁面接触のようなリアリスティックな境界条件の設定が可能になります。この架台の解析結果を図3に示します。このように仮想パーツを活用すると剛体壁への取付け部についてリアリスティックな変形が得られます。

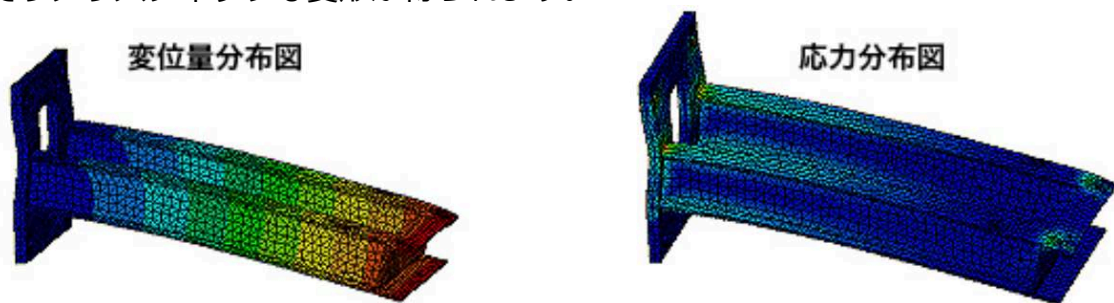


図3. 計算結果表示例

次回は実験データや他の解析結果と連携するときに役立つデータマッピングについて紹介します。

8.データマッピング

設計者CAEを行う際に、ランダムな特性あるいは関数で表現された特性をモデル全体にわたって与えることがよくあります。このような場合は関連する幾何形状に直接特性を付与することが難しいので、まずモデルを包括する空間に点群データを定義して、それから対応するモデル部位に特性値をマッピングする方法が用いられます。これをデータマッピングと呼びます。

CATIAの持つデータマッピング機能では、モデルを包括する空間に圧力分布、温度分布および板厚分布を定義してモデルにマッピングできます。

1) 圧力データマッピングの例

水面からの深さに比例する水頭圧を構造物に作用させる場合は、作用空間に圧力を線形に変化させた圧力データ点群を定義すれば表現できます。図1に外周に水頭圧が作用する円筒構造物の解析例を示します。点群の粗さはメッシュサイズより小さい方が圧力値が精度良くマッピングされます。

マッピング空間の境界ボックス表示 マッピングした圧力荷重

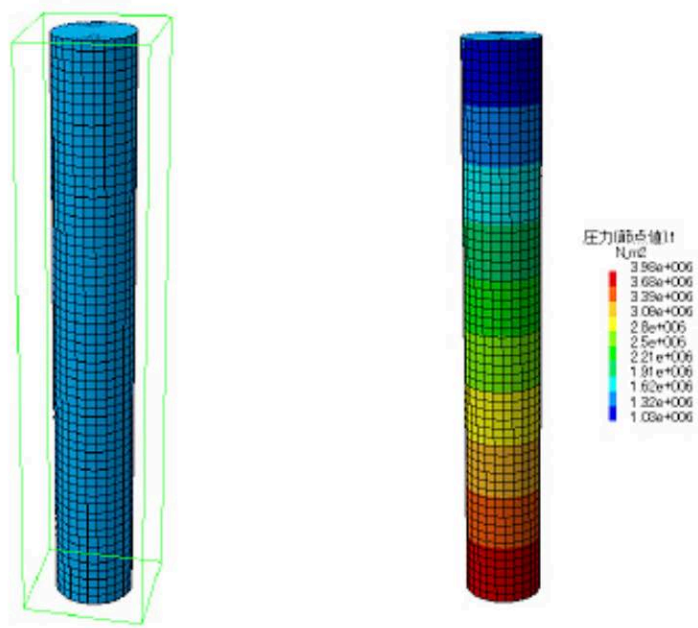


図1. 圧力データマッピング例

8. データマッピング

2) 温度データマッピングの例

伝熱解析で得られたモデル全体にわたる温度分布をデータマッピング機能を使って節点に与えることができます。図2は熱流体解析（有限差分法）で計算された格子点上の温度結果を有限要素法モデルに温度荷重としてマッピングした例です。

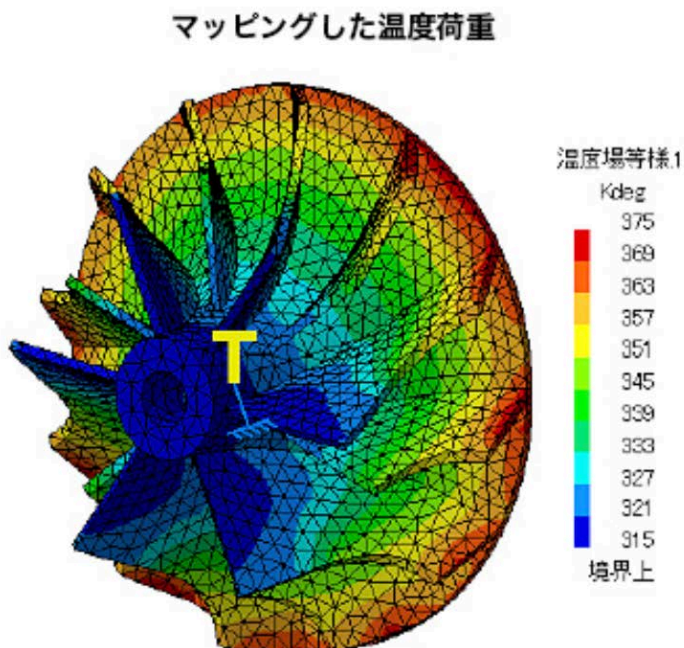


図2. 温度データマッピング例

8. データマッピング

3) 板厚データマッピングの例

成形等によって板厚が徐変する樹脂部品やプレス部品をシェル要素で解析するとき、モデル全体にわたり板厚特性を要素ごとに変化させる必要があります。このような場合にデータマッピング機能を使うと板厚分布を容易に設定することができます。マッピングする板厚分布データは実測値あるいは前段の成形解析の結果を流用することができます。

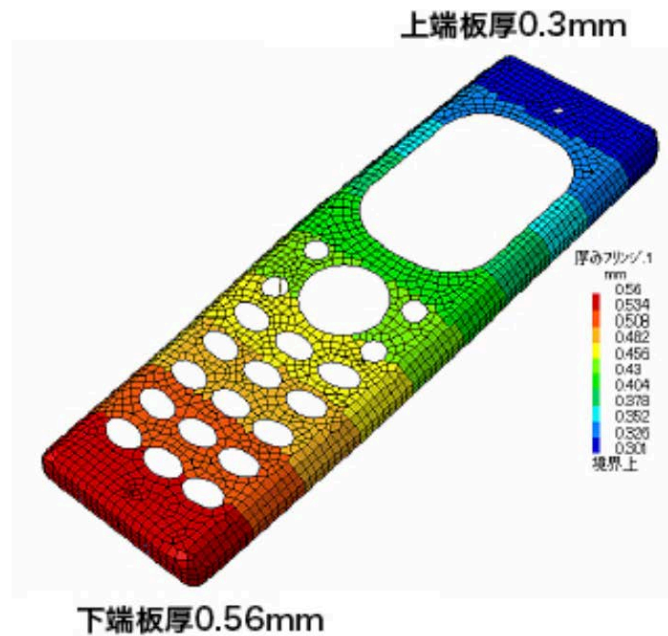


図3. 板厚データマッピング例

以上の例で示した通り、データマッピングは流体解析と構造解析、または成形解析と構造解析などの連携解析に対して連携データの受け渡しをスムーズに行えるメリットがあります。CATIAのデータマッピングについて詳しくお知りになりたい方は、弊社へお問合せください。

次号ではCATIA便利機能紹介の第3弾として、ボリウム分割アドバンスドメッシングをお話しします。

9. ボリューム分割アドバンスドメッシング

CATIA便利機能の第3弾は、GSD（*1）のボリューム分割を利用した複雑な形状にも対応できるアドバンスドメッシングについて紹介します。

CATIAアナリシスにおいて、1つのメッシュパーツには材料が1つのみ設定できます。したがって、異なる材質の部品をアセンブリして一体化した複合的な部品をモデル化する場合は、複数のメッシュパーツに分ける必要があります。CATIAでは複数のメッシュパーツに分ける方法として以下の2通りがあります。

- ① 材質の異なる部分毎にパーツに分けてアセンブリプロダクトとして解析する
- ② 材質の異なる部分を形状セットの中でボリュームに分けて、いくつかのボリュームで構成される
1つのパーツとして解析する

①の方法はパーツボディの集まりになるので、個々にGPS（*2）の自動メッシングが使えて容易にメッシュ分割できるメリットがありますが、部品間の接合面に固定結合を定義する必要があるため、接合面が広範囲になると固定結合のキネマチック自由度数が多くなり計算量が膨大になってしまい、時には計算できない場合もあります。

一方、②の方法はメッシュ分割の対象がパーツボディではなく形状セットになるのでGPSのメッシャーは使えなくなり、FMS（*3）およびFMD（*4）のアドバンスドメッシング機能を使う必要があります。本号では②の方法についてサンプルを交えて特徴をお話しします。

まず1つのパーツをボリュームに分けるには、GSDワークベンチに移ってGSO（*5）を使ってボリューム分割操作を行います。GSOはGSDのオプションモジュールです。

1つのパーツボディを複数のボリュームに分割したら、個々のボリュームがアドバンスドメッシングの対象となりそれぞれにメッシュパーツができます。材料はメッシュパーツ毎に与えることができるため、複合的な材料を持つパーツを定義できます。図1に溶接部の応力解析用メッシュ分割例を示します。

9. ボリューム分割アドバンスドメッシング

複数ボリュームの適合メッシング手法を利用

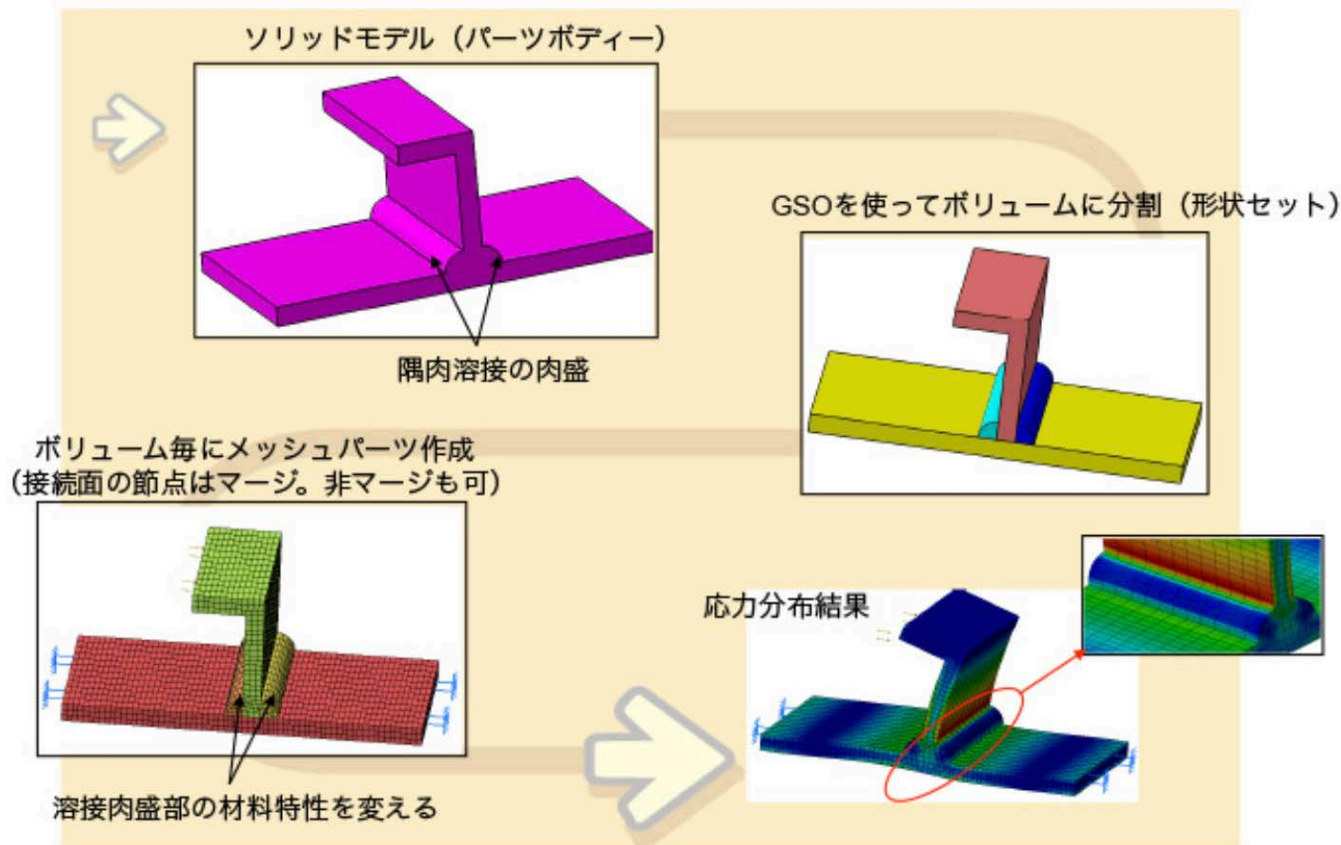


図1. 溶接部の応力解析例

隅肉溶接で接合して一体化した完成部品を、形状設計して解析する例です。完成部品は溶接隅肉部と母材では材料特性が異なるので、ボリューム分割を行い個々にメッシュパーツを作ります。順次ボリュームをメッシュ分割するとき隣接面の節点を1点にマージして一体化したり、重複させて接触状態を設定することができます。さらに工夫すれば溶接溶け込み部分の状態をよりリアルに表現できると思います。

9. ボリューム分割アドバンスドメッシング

図2は複雑な幾何形状をヘキサメッシングするためにボリューム分割とスイープ3Dを駆使した例です。

GSOボリュームによる分割とFMS・FMDによるスイープ3Dを利用

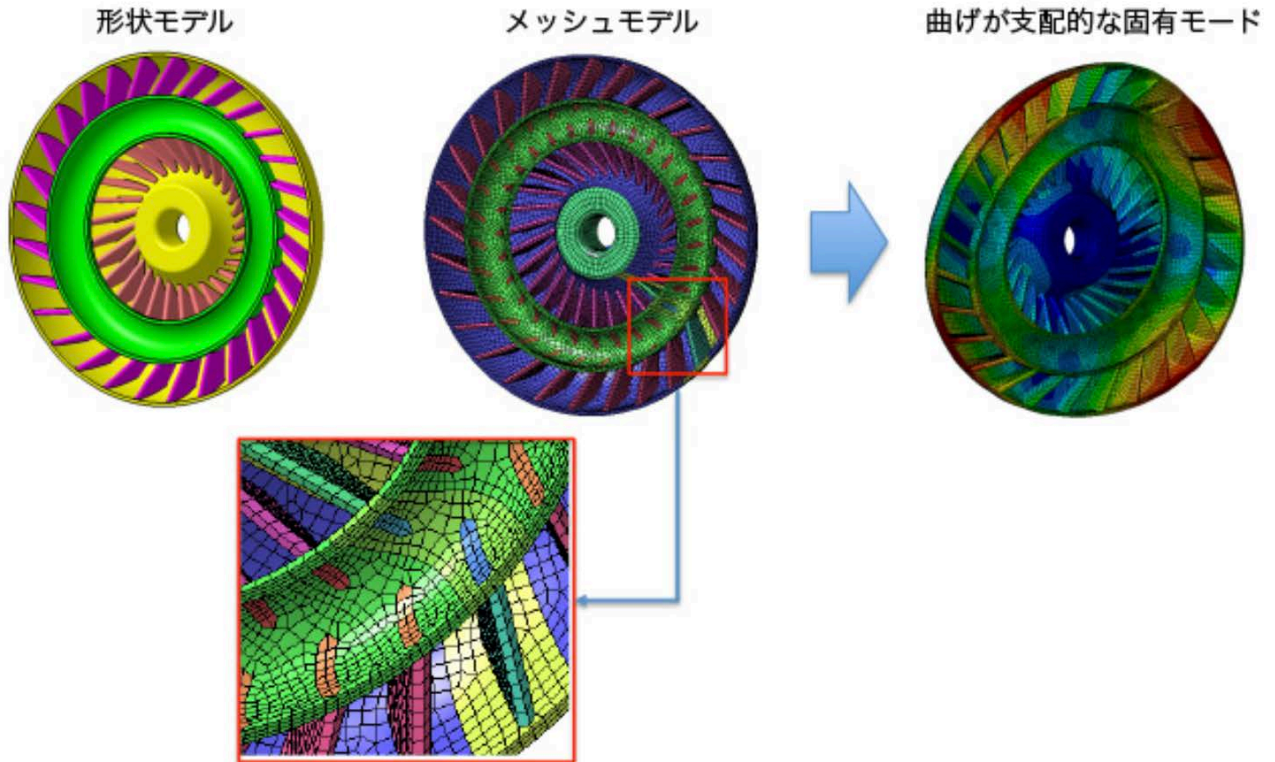


図2. 複雑形状に対するヘキサメッシング例

板厚が比較的薄い複雑な形状は、テトラメッシングを行うと板厚方向のメッシュ分割がグローバルスプリットを指定しても2層どまりなので、曲げ剛性を精度よく表現できません。また節点数が膨大になりますので、このような構造物はヘキサメッシングの方が好ましい場合があります。この例では板厚方向を3層に分割しましたが、ヘキサ要素を用いて節点数の増大を抑えています。

以上のようにボリューム分割を施すことにより、異材質が組み合わせられたパーツのモデル化や複雑な形状のヘキサメッシングが可能になります。

さらにCATIAアナリシスのアドバンスドメッシングについて詳しくお知りになりたい方は、弊社開催の教育プログラムの受講をお勧めします。

さて3回にわたってCATIA便利機能についてご紹介してきましたが、次回からはテクニカルヒントへ話題を戻し、次号では1次要素と2次要素の使い分けについてお話しします。

9. ボリューム分割アドバンスドメッシング

*1：GSD（ジェネレーティブ・シェイプ・デザイン）

ワイヤーフレームおよびサーフェス形状を作成、高度なシェイプの設計を支援

*2：GPS（ジェネレーティブ・パート・ストラクチャル・アナリシス）

設計プロセスのあらゆるフェーズにおけるコンポーネントの構造解析、モーダル解析に対応

*3：FMS（FEMソリッド）

ソリッド設計に関連づけられたメッシュを生成する高度なオプション

*4：FMD（FEMサーフェス）

複雑なサーフェスおよびワイヤフレームの高度なメッシュ機能を提供

*5：GSO（ジェネレーティブ・シェイプ・オプティマイザー）

グローバル変形技術によってGSDのワイヤーフレームおよび複数サーフェス作成機能を拡張

10.1 一次要素と二次要素の使い分け

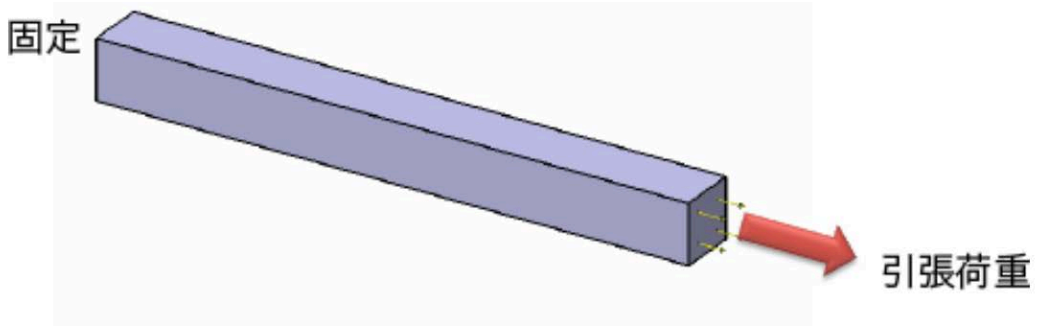
H法と呼ばれる有限要素法ソルバー（CATIA ELFINIなど）では、一般的に1次要素と二次要素の2つの要素タイプが用意されており、利用者が適宜選択して解析を行います。この選択の際にヒントになるように、1次要素および二次要素の特徴について以下お話します。

テトラ1次要素は4節点で構成され、テトラ2次要素は10節点で構成されるので、同じメッシュサイズで分割した場合に、1次要素で分割した方がモデル全体の節点数が少なくなり、同様に解析モデルの自由度も少なくなるため、計算時間が短くなるメリットがあります。しかしある程度の計算精度を保つためには、1次要素の特性上細かく分割しなければならず、それにより節点数が増えて計算時間も増してしまいます。

そもそも1次要素または二次要素と名付けられる次数とは、その要素が持っている変位関数の次数を表しています。要素の変位関数が1次関数で表現される1次要素は、変位量が要素内で線形に変化します。よって変位を微分して得られるひずみは一定の値を持ちます。これは定ひずみ要素と呼ばれることがあります。また要素の変位関数が2次関数で表される2次要素は変位が2次関数で変化するのでひずみは線形に変化します。そして応力もひずみと同様線形に変化します。

上記のように、1次要素は定ひずみになりますので、応力変化の激しい部分は十分細かく分割してその変化を表現する必要があります。

図1に定ひずみの特性を有効に使える単軸引張り状態の角棒を例に示します。



	テトラ1次要素	テトラ2次要素	理論値
節点数	189	1001	
要素数	456	456	
引張り応力 (MPa)	5.0	5.0	5.0
最大変位 (mm)	0.0143	0.0143	0.0143

図1. 引張荷重に対する計算精度比較

10.1 次要素と2次要素の使い分け

ここで角棒の断面上には均一にひずみが生じており、引張応力（垂直応力）も均一に分布しています。このような応力状態に対しては1次要素でも2次要素でも要素分割が粗くても理論値と合致した解が得られます。

図2に同じ分割数のときの1次要素と2次要素の計算結果を比較しています。

均一な垂直応力が発生する場合は、1次要素も2次要素も計算精度は変わらない

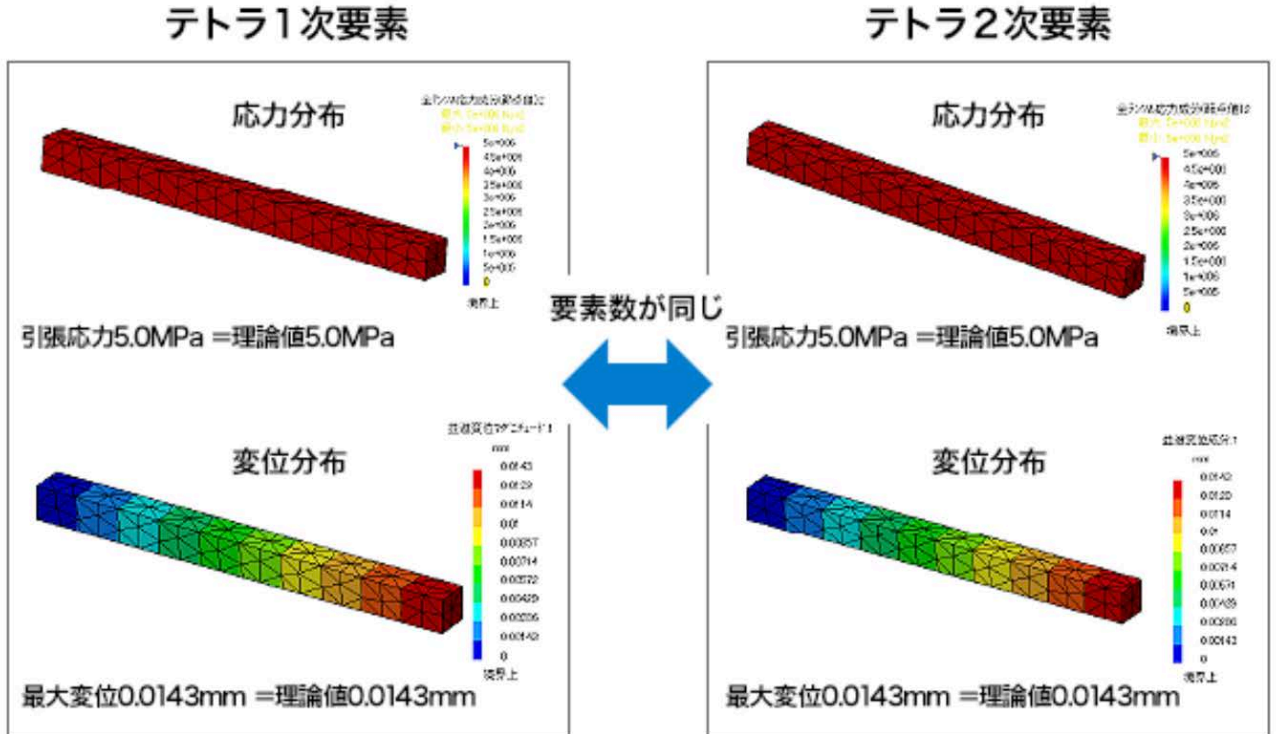
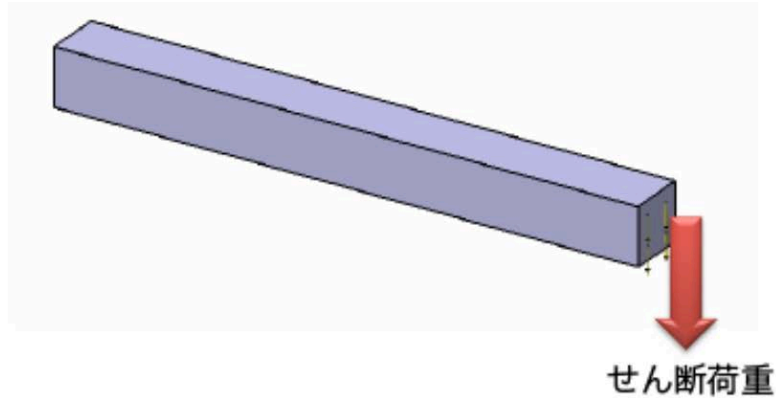


図2. 引張荷重に対する計算精度比較

10.1 次要素と2次要素の使い分け

一方、図3にはひずみの線形特性を有効に使える例を示します。



	テトラ1次要素	テトラ2次要素	理論値
節点数	1027	1001	
要素数	3534	456	
最大曲げ応力 MPa	272	302	300
最大変位 mm	5.04	5.77	5.71

図3. せん断荷重に対する計算精度比較

これは角棒にせん断荷重を作用させて角棒全般に渡って曲げ応力が発生する場合です。角棒の断面上の応力分布は、線形に変化します。これは前述のとおり、2次要素の変位関数で精度よく表現できるものになります。1次要素でこのような線形の応力分布を表現するためには、直線分布を階段状の分布で近似することになるため、やや細かく分割して近似誤差を少なくする必要があります。

始めよう設計者CAE！

10.1 次要要素と2次要要素の使い分け

図4に示す通り曲げ応力状態を1次要要素で表現するには細かく分割してもなお誤差が生じます。よって応力の結果を詳細に評価する場合はなるべく2次要要素を使うことをお勧めします。

曲げ応力が発生する場合、2次要要素は粗い分割でも計算精度は良いが
1次要要素は細かい分割でも計算精度は不十分

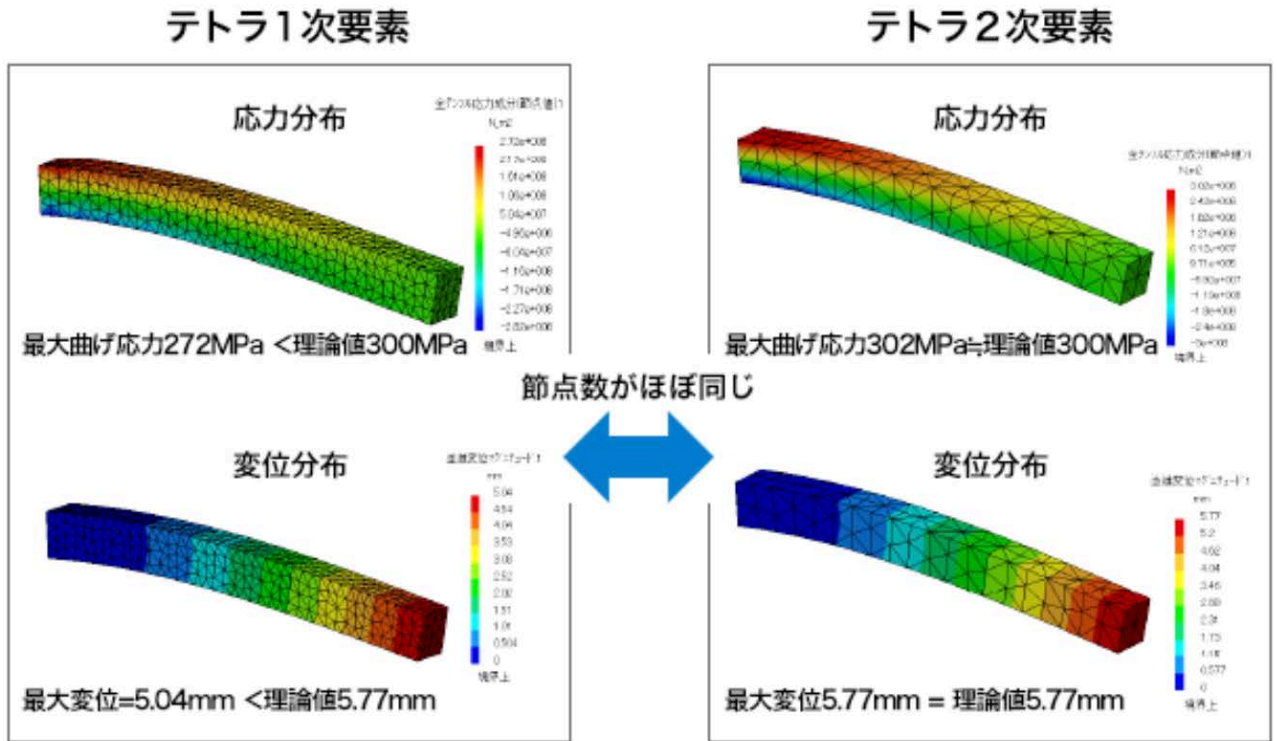


図4. せん断荷重に対する計算精度比較

応力解析と異なり、固有振動解析など剛性分布を的確に表現すればよい場合は、局所的な変化が少ないので1次要要素でも精度を確保した解が得られることがあります。もちろん厳密な精度を求めるならば、2次要要素を用いる方が安全ですが、節点数が膨大になり固有値解析などの繰り返し計算では、計算時間が膨大になってしまいます。計算精度と計算時間はトレードオフの関係にありますので、大規模モデルの計算では、1次要要素を使用して自由度数の増大を抑えて、実用的な計算時間で解を得る試みも必要になると考えます。

弊社では、CATIAアナリシスで設計者CAEを始めるときに、よく迷われる解析モデリングについて、個別にアドバイス等をご提供するCAEコンサルティングサービス（有料）を承っております。お困りの方は、ぜひお気軽に弊社窓口へお問い合わせください。

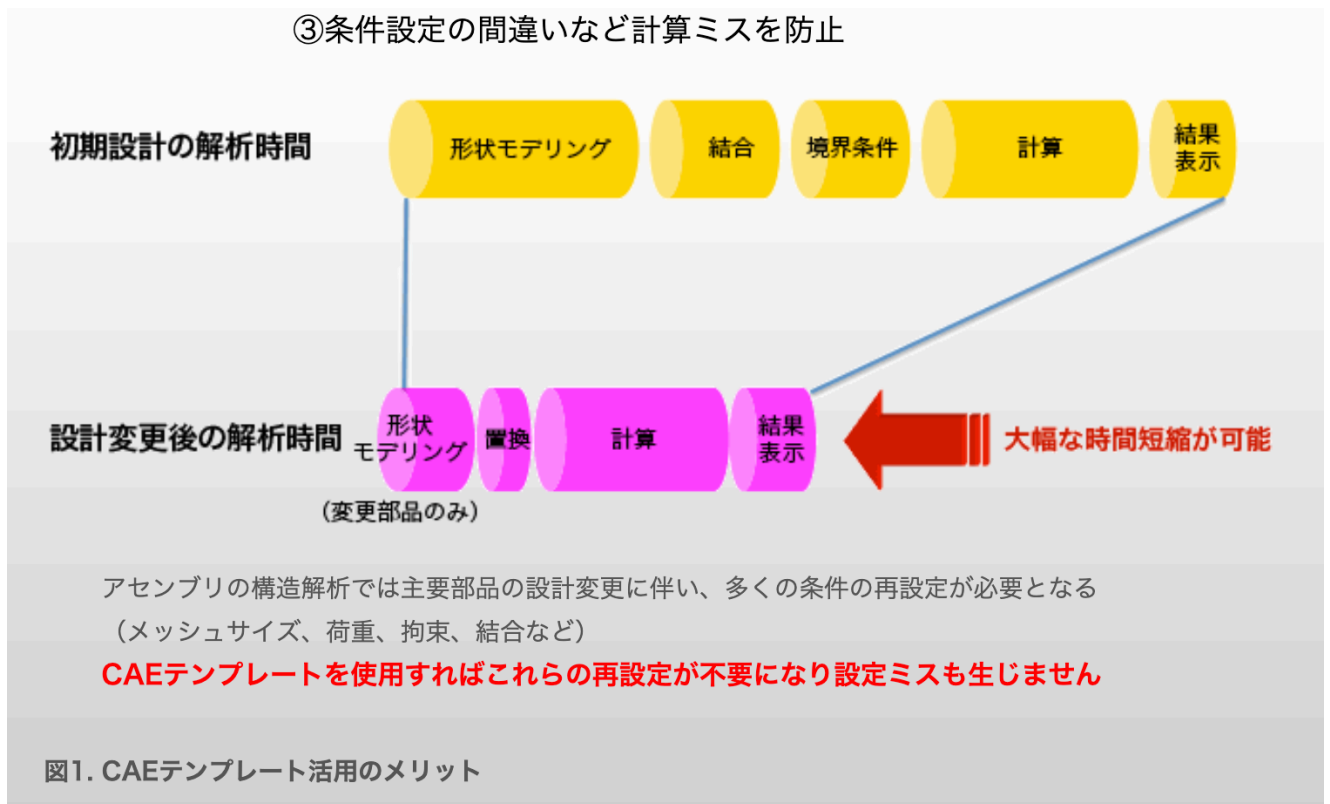
さて、本連載コラムも終盤に近づいておりますが、次号では筆者が10年ほど前に発案しました、CAEテンプレートの活用についてお話しします。

11.CAEテンプレートの活用

CAEテンプレートは、筆者が10年ほど前にCATIAのパブリケーションを利用した解析モデリングの一手法として考案した仕組みです。当時はCATIA R12が展開された頃ですがCAEモデルへのパブリケーション適用には多くの制約がありました。その後リリースアップ毎に改善されて現在は安定期に入っていると感じています。

図1に示す通りCAEテンプレートは、部品形状を全く違うものに変えたり、アセンブリ構成部品の組合せを変えた場合に、最初と同じ解析条件で繰り返し計算するための効率的な解析モデル構築手法です。

- ①解析モデリングのノウハウ組込み
- ②設計案の絞り込みなどの繰り返し解析を効率化
- ③条件設定の間違いなど計算ミスを防止



始めよう設計者CAE！

11.CAEテンプレートの活用

CAEテンプレート活用のメリットは以下になります。

- ①解析モデル化のノウハウ蓄積（CAEエキスパートによるワークフロー組込み）
- ②設計者がCAEノウハウを暗黙的に利用できる
- ③画一的な計算結果を得られるため計算ミスを防止できる

一方デメリットとしては、CAEテンプレートを解析パターン毎に作成する必要があることです。したがってすべての解析パターンをCAEテンプレートの対象とするのではなく、設計者が日常ルーチンワークとして実施する解析パターンを選別してテンプレート化すべきと思います。

設計者が、設計プロセスの上流からCAEを頻繁に取り込み、魅力品質向上を目指した製品設計を推進するには、CAEの実践をルーチンワーク化する必要があります。設計者自身が、CAEで精度の高い計算結果を得るために時間を費やして、試行錯誤することは設計者の本来のミッションと異なると考えます。CAEエキスパートによって確立されたワークフローに沿って、短時間で正しくCAEを実践できるのであればルーチンワーク化は実現します。

この実現手法の一つとしてCAEテンプレートがあります。CAEテンプレートは、図2に示すようにメッシングの対象となる形状モデル、解析条件および結合条件の設定対象となる幾何形状をパブリーケーションを施して汎用化することにより、構成を柔軟に変化させて繰り返し解析できる仕組みです。

CAEテンプレートモデル

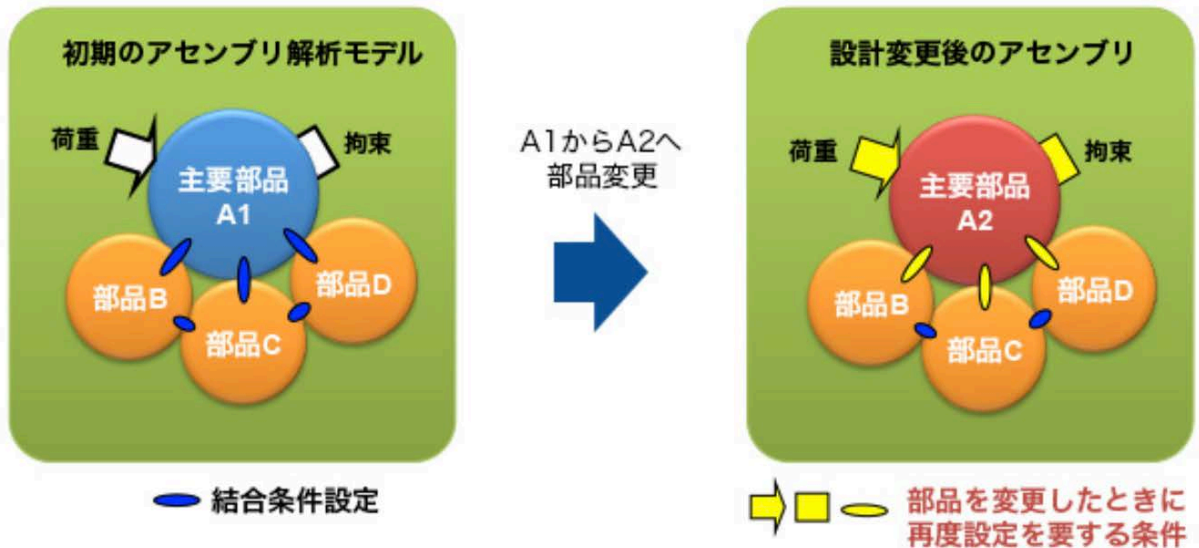


図2. CAEテンプレートのしくみ

11.CAEテンプレートの活用

図3にCAEテンプレートのデモ用サンプルモデルを示します。

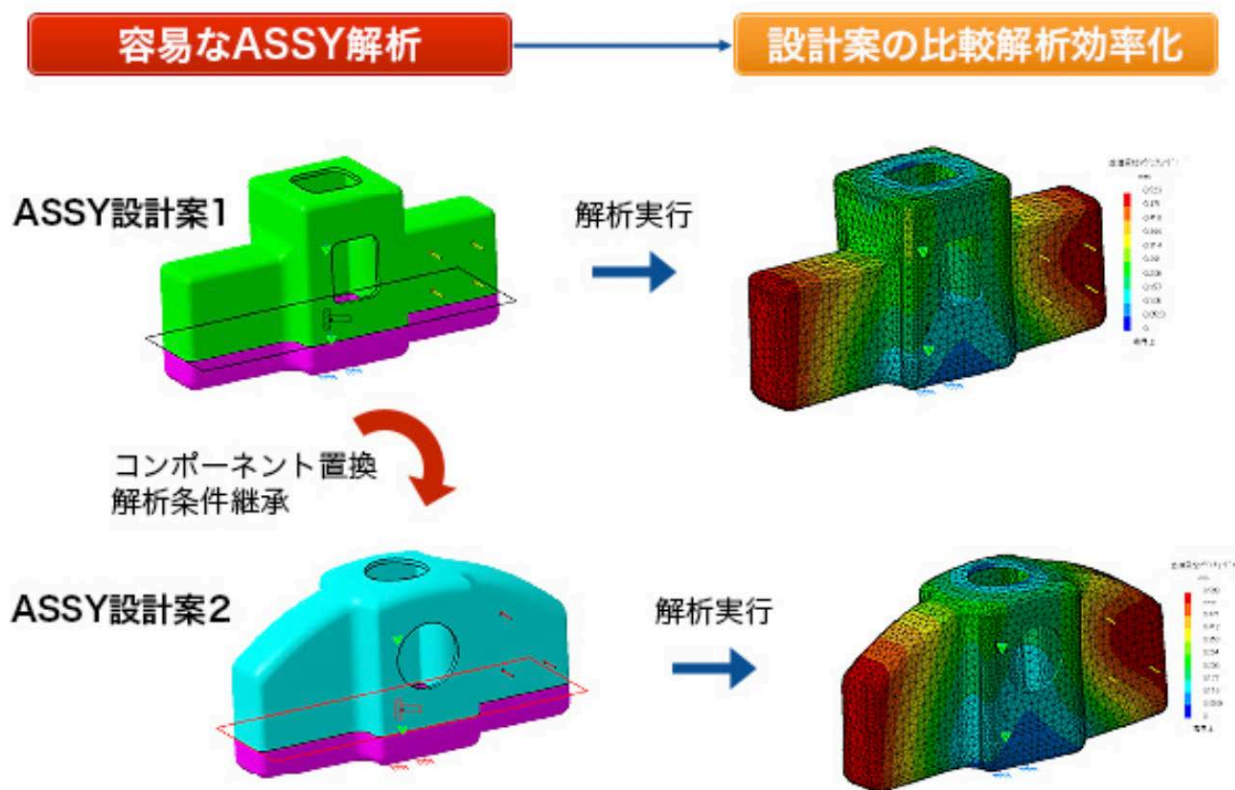


図3. CAEテンプレートモデル例

CAEテンプレートにご興味をお持ちの方は、弊社にて随時開催の「設計者CAE無料体験セミナー」にぜひご参加ください。このセミナーの中で、CAEテンプレートの利用場面を体験できます。

弊社では、CAEテンプレート以外にもナレッジやマクロによる、プロセス自動化やCAAによる専用システム開発などルーチンワーク化推進の支援メニューを準備しております。特に、CAAによる設計者CAE専用システムの開発については、開発エンジニアとCAEエキスパートのコラボにより、最近いくつも大きな実績を上げております。この実績は、「Why ファソテック」の訴求ポイントの一つであると自負しております。

ぜひ設計者CAE推進にご興味をお持ちの方は、お気軽に弊社へお問い合わせください。

さて本連載コラムも次回で最終になりますので、次号では最近の動向を踏まえて設計者CAEステップアップについてお話しします。

12.設計者CAEステップアップに向けて

設計者CAEステップアップの必要性

設計者CAEが定着するに従い、設計者は自分で行った解析の計算精度を向上させたいと望むものです。

計算精度については、コラム第6号で言及したとおりモデル化誤差と数値計算誤差の2つの要素に分けることができますが、前者のモデル化誤差は実機の現象をいかに厳密に数値モデルに置き換えるかに依存します。設計者CAEは、基本的には線形解析から始めますのでモデル化誤差が大きくなるのは仕方ありません。現実の現象は非線形性要素を含む場合が多いからです。設計者が現実により近い解析を行うには、非線形解析にも取り組まなければなりません。

また産業界の動向として安全性第一、軽量化およびエコを目指した製品開発が主流になっている現在、CAEフロントローディングの推進およびそれを実現する設計者CAEの強化が早急に求められています。

このような環境において市場競争力を高めるには、余肉たっぷりの従来設計でなく、強度を確保しつつ余分な肉を削ぎ落とした理想体すなわち最適設計が必須になっています。そして最適設計を行うには、現実の現象をより正確に捉えたリアリスティックシミュレーションへとステップアップが求められます。

例えば静的な現象のみを対象とした静解析で設計していても、動的な挙動を最適化するには動解析の取組みへとステップアップが必要になります。構造解析だけでなく流体解析や熱解析そして磁場解析へと取組みはますます分野が広がっていきます。これらの設計者CAEステップアップを駆使して魅力品質向上に努めることにより市場競争力に優れた製品開発が可能になると考えます。

12.設計者CAEステップアップに向けて

設計CAEと生技CAE

これまでのコラム各号では製品開発プロセスの製品設計フェーズでの設計者によるCAEに役立つ情報をご紹介してきました。この製品設計フェーズにおけるCAE適用を全般に「設計CAE」と呼ぶことがあります。

一方、ものづくり現場に密着した生産技術フェーズにおいてもCAE適用は以前から盛んに進められており、樹脂射出成形解析、プレス成形解析、弾性体アセンブリの公差解析、鋳造湯流れ解析、鍛造解析、複合材製造解析などがよく知られています。

この生産技術フェーズのCAE適用を「生技CAE」と呼び、簡易的な解析から高度な解析までこのフェーズに対応したソフトウェアが市販されています。

なおコラムでは、製品開発プロセスにおいて設計者自身が繰り返し行うCAEを「設計者CAE」と呼び、解析部門のCAEエキスパートが詳細に行うCAEを「専任者CAE」と名付けてきましたが、この呼び方はこの「生技CAE」の分野においても当てはまります。生技CAEにおいても設計者が行う設計者CAEはものづくり現場における加工品質の改善や最適な治具設計など生産性向上を目的として迅速かつ容易に行える解析が対象となり、一方CAEエキスパートが行う専任者CAEは金型の寿命予測や設備の安全性確保など高度な解析技術を要する詳細解析が中心になると考えます。

しかし生技CAEの分野では専任者が高度な解析を行うのが中心でした。

最近ではプレス成形解析を迅速に行い板厚減少量やスプリングバックも計算でき、かつネスティングまで最適化して得られるツールが広まってきており、生技フェーズにおいても設計者CAEが始まりつつあります。いずれにしても「設計CAE」と「生技CAE」の両分野をコンカレントに実施しフロントローディングを図ることにより、製品設計および生技検討の手戻りを大きく減少させて製品開発期間の短縮やコスト削減が図れると考えます。

最後に

弊社では製品設計フェーズでの設計者CAEステップアップとして、流体解析や熱解析などを容易に行えるソフトウェアを取り扱っております。またものづくり現場のための設計者CAEとして、プレス成形解析や樹脂流動解析などの設計者でも使えるソフトウェアも取り扱っております。

設計者CAEステップアップおよび生技CAEにご興味をお持ちの方は、ぜひ弊社へお問い合わせいただきますようお願いいたします。

著者情報



株式会社ファソテック 技術顧問 CAEコンサルタント 藤田俊之

1974年 名古屋工業大学 機械工学科を卒業、川崎重工業に入社。
10年間、化学プラントの耐震設計および航空機の強度・振動解析などの構造解析、さらに宇宙機器の開発に従事。
1984年 日本アイ・ビー・エム入社。26年間にわたりCAEDS (I-DEASの別名)、CATIAアナリシスおよびSIMULIAなどのCAEツールを担当するSEおよびテクニカルセールスを歴任し、一貫してCAE技術畑を歩む。
その後ダッソー・システムズを経て、2012年よりCAE推進をライフワークとするコンサルタントとしてファソテックに在籍し、現在に至る。

■お問い合わせ■ 株式会社ファソテック <https://www.fasotec.co.jp>

本社：〒261-8501 千葉県千葉市美浜区中瀬1-3 幕張テクノガーデンB棟21階
TEL 043-212-2512 FAX 043-212-2515 E-mail: info@fasotec.co.jp
【担当】 ビジネス企画推進部

