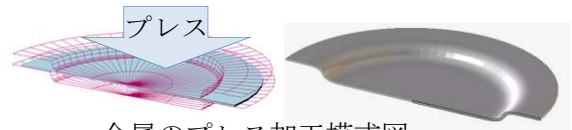


Ⅱ 超弾性体の解析

0 概要：解析の考え方/熱収縮も

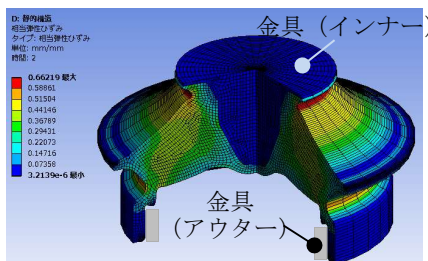
材料として非線形性もあり、また、柔らかいゴムを扱う意味で解析は金属と異なりますが、金属の板金加工品における残留応力、残留ひずみはゴムでも製造工程によるゴムの熱履歴により同様に考慮することが必要です。



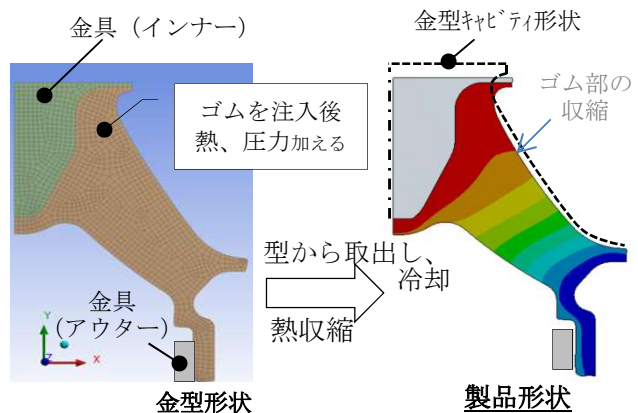
金属のプレス加工模式図

前項でも説明しましたが、

大まか言えば160℃前後に熱した金型に、接着剤を塗った金具を金型にセットし、そこへ加熱したゴムを流し込む。その後熱と圧力を加えることにより架橋という反応が進み、ゴムと金具が接着するとともにゴム自身も架橋反応により形が固定され、流動的であったゴムが変形から元の形に戻るものになります。



金型円錐型エンジンマウント

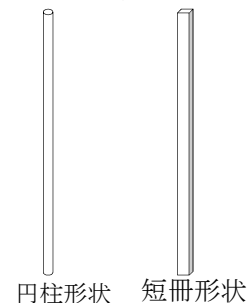


円錐型エンジンマウントの例で

金型と製品の間係を表しました。金具も全く熱で変形しないわけではありませんが、このような金具との接着製品は、金型から取り出すと室温へ戻るときの熱収縮により不均一な収縮（金具よりもゴムの収縮が大きい）があるため金属プレスの金具と同様、残留ひずみ/残留応力が発生し、後の、ひずみや特性予測精度に大きく影響してきます。

これらを解析するには、熱的解析を可能にする熱伝導度、熱伝達、比熱、熱膨張係数を定義する必要がありますので線熱膨張係数は1℃当たりの線膨張率なので、右図のように円柱、短冊形状での測定で求められます。

恒温槽にまっすぐ伸びるガイド（治具）に入れて拘束や摩擦の影響が無いように、恒温槽に入れた寸法と室温に

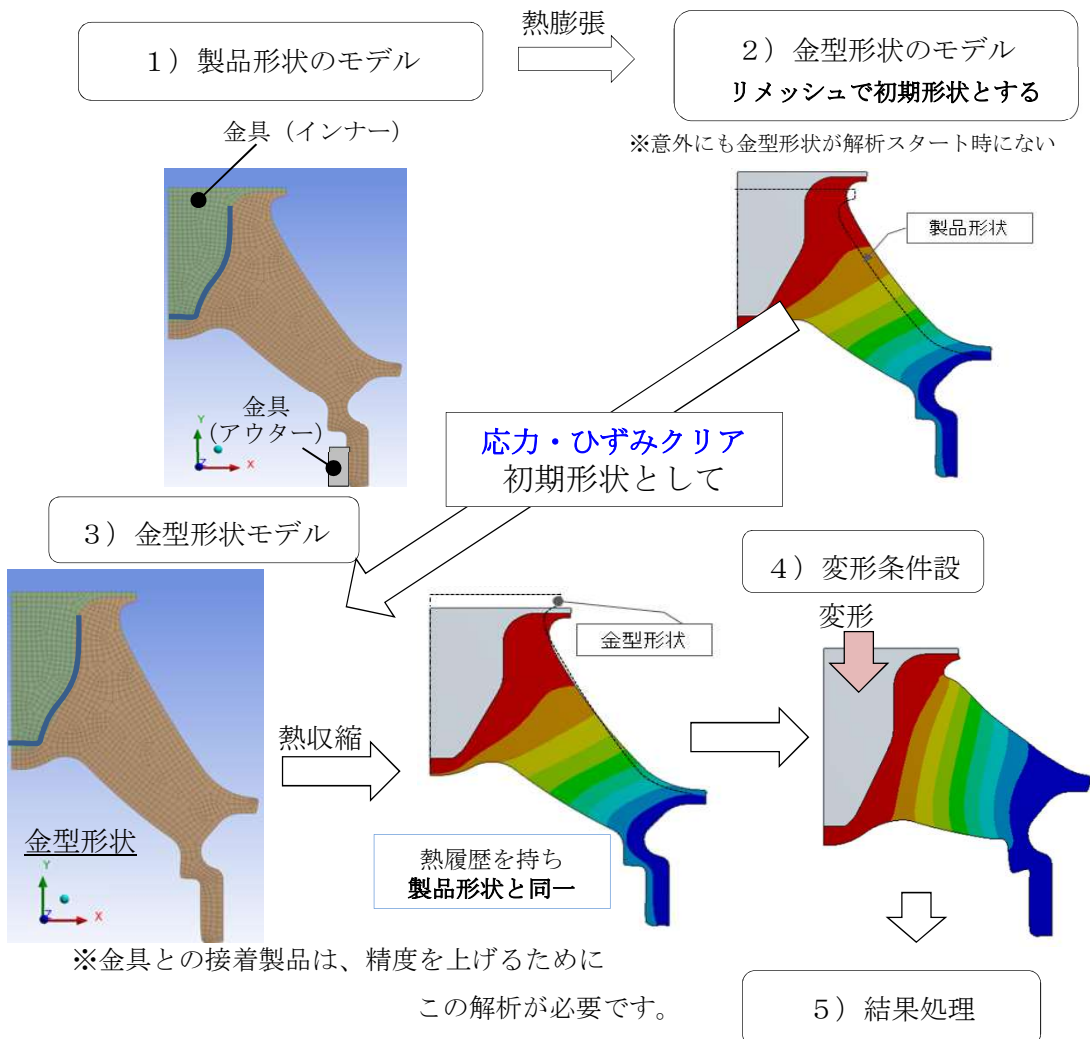


戻った寸法を、1℃で何倍（一般的 1.5×10^{-4} 程度）になるかを求めれば、その数値が使えます。熱伝導、伝達、比熱は使わない熱応力解析で十分です。

1 ゴムの解析基本フロー

解析はゴムの熱履歴を表現することで、次のようなフローになります。

本来、金型形状でのモデル化からスタートして、熱収縮⇒変形解析を行うものですが、意外にもゴム製品製造の会社でも正確な寸法入りの金型図を持っていないことも多く見られます。金型屋さんに丸投げ、設計まで任せているため金型図を持ちません。そのため製品図を熱膨張させて金型図とし、そこを起点とするため応力・ひずみをリセット（ゼロクリして、その後の熱収縮⇒変形解析を行います。



ひと手間増えることにはなりますが精度は十分に確保できるようになります。

しかし、この方法はあまり実施されていないように思います。その理由として、熱膨張解析、そこで応力・ひずみをリセットする1段階解析の手間が増えるからですが、その手間は自動化などの工夫を行うことで、増えた手間以上に工数の削減が可能です。

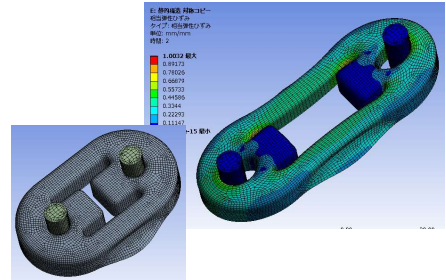
そのヒントは後述します。

熱収縮を解析の起点とするのは、金具との接着製品で右のようなゴムのみできている製品は、均一に収縮するのでこの熱収縮の表現は不要となります。

直接変形条件を与えて解析することができます。

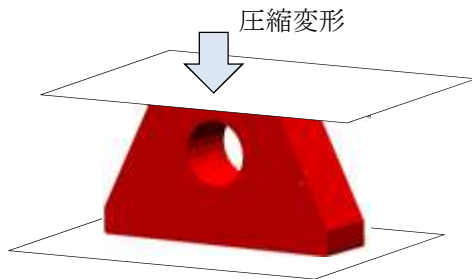
また、ゴムをある空間へ圧入するなどの加工製品は

その加工工程、圧入を表現することは解析条件で与えることになります

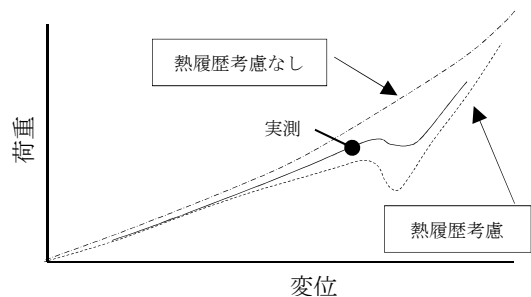


ゴム単とゴム屋さんが使う言葉ですが、金具などと接着せずゴムのみの製品を呼びます。

このゴム単でも、時には残留ひずみの影響があるのではと思われる製品を経験したことがあります。特定非営利活動法人 非線形 CAE 協会で扱った製品の圧縮特性です。



製品概要



熱履歴を考慮した場合と考慮しない場合で、実測とはまだそれほど共に一致していませんが、熱を考慮すると荷重の落ち込みが現れます。ゴム単であっても金型と接触する部位は内部より若干温度が高く、不均一になります。温度を流動解析により正確に求めています、正確に表現するとより予測精度が上がるのかもしれませんが。

このように何らかの形で、金属と同様に内部の残留応力・ひずみを考慮した解析が必要になると考えています。

2 加工工程である熱収縮を考慮する理由

金属製品と同様に、ゴムも加工工程を考慮した解析をすることで予測精度は向上すると考えています。また、経験上もいくつかの裏付けがあります。

特に超弾性体は、(第 I 章記載の) ゴムの加工工程を説明すると非常に影響の大きいことが理解できると思います。根本の理由は、金属とゴムの熱収縮率が大きく異なるため、不均一に収縮して、ゴムの側にひずみの偏りが発生するためです(残留ひずみ)。

熱応力解析などで、線熱膨張係数を使用しますが、

ゴム： $1.5 \times 10^{-4}/\text{deg}$ (一例) 金属： $1.2 \times 10^{-5}/\text{deg}$ (一例) の値で一桁違います。

単純な内外筒接着タイプのブッシュで説明します。

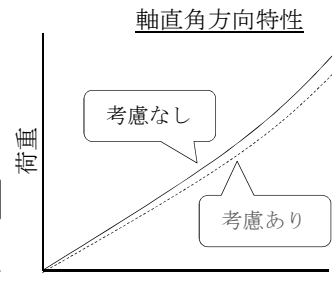
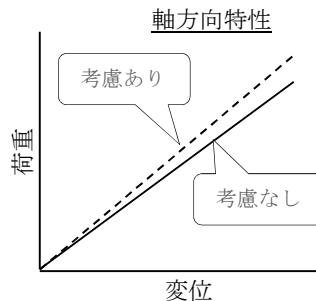
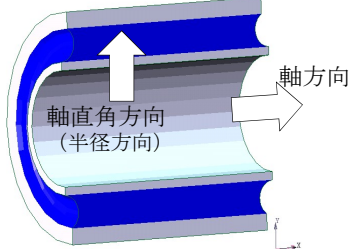
最も単純な変形は、外筒を固定して内筒を外筒と平行に移動させる軸方向変形、直行方向に移

動させる軸直角方向若しくは半径方向変形と呼びます。

防振ゴム設計に詳しい方は、絞り（カシメとも呼ばれる）工程で外筒を小さくして、残留力を緩和させる加工をしますが、ここではそのままの特性で比較します。

解析上での比較です。

外筒側固定



熱収縮を考慮した解析は、考慮しない解析より軸方向は大きな荷重（反力）、軸直角方向は小さな荷重（反力）になります。これは明らかに熱収縮によるゴムのひけ影響です。

剛性定義のずれとして、単純に材料剛性を補正する手法もありますが、片方をプラス補正するともう一方はより合わなくなります。ゴムの芯の剛性は一つなので、このような補正でこの現象を修正することはできません。しっかりと熱収縮の解析工程が必要です。

また、加硫工程では金型温度が重要になります。

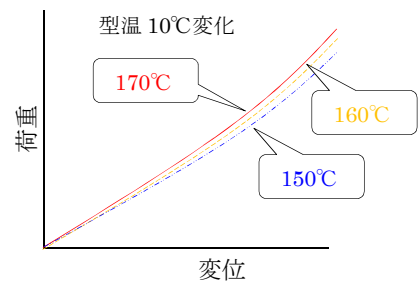
金型温度違いでの軸直角方向特性変化

このように熱収縮が影響するという事は、架橋

温度を変化させると製品の特性も変化します。

同じ金型で製造すると、金型温度で特性が変化の様子が良くわかります。

軸直角方向（半径方向）特性は、型温が高いほど荷重が小さくなります。軸方向は、この反対の傾向になります。



3. 解析条件、金属要素部の定義

まず、ゴムは柔らかいものですが、時には硬いということ、混乱させてしまうかも知れませんが、この意味を順番に説明させていただきます。ただ、解析モデルの簡略化、基礎的な考え方については、下記書籍に丁寧に分かり易く記されていますので、参照ください。

書籍：CAE を使いこなすために必要な基礎工学！ オムロン岡田浩様著

設計技術者のための有限要素法 はじめの一步 栗崎彰様著

1) ゴムの解析における金属要素の扱い

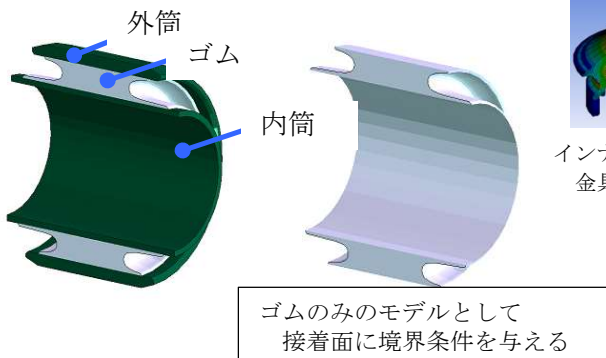
金属要素の扱いですが、金属要素独特の発生する解析誤差については、精度の項を

ご参照ください。簡単に説明すると、デフォルトの設定で金属剛性を正しく解析できるソフトが少ないことにあります。また、金属の完全固定は失敗の基と言え、金属をモデル化と固定は注意が必要です。その点を踏まえてゴムを中心とした解析の勤続部の定義を説明します。

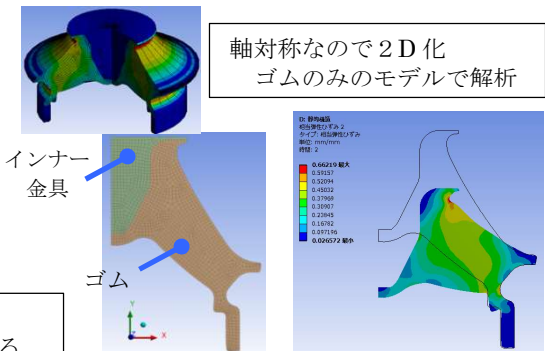
まず、金属部の応力を詳細に解析するのではなく、ゴムの特性解析などは金属とゴムの境界（接着部）は完全結合として拘束条件で対応します。

いくつかの例で説明します。基本的には、金属部はモデル化せずに変位、拘束条件、また剛リンク、カップル DOF (DgreeOfFreedom) などで定義し、金属部の要素を減らし解析時間も短縮できます。説明しきれていない面は、私も理解に悩み苦労しながら試行錯誤でやってきましたので、PPT 等の資料を整えていきますので HP を参照、お問い合わせ下さい。

<BUSH の変形>



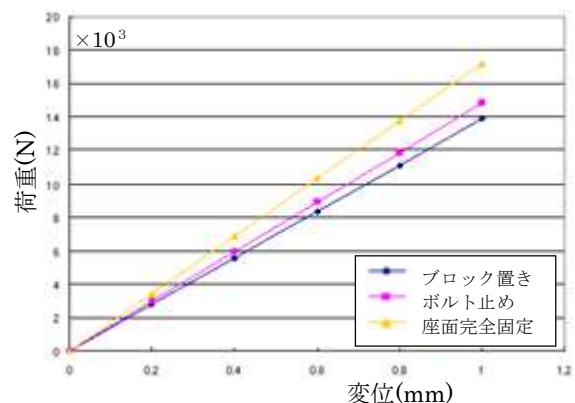
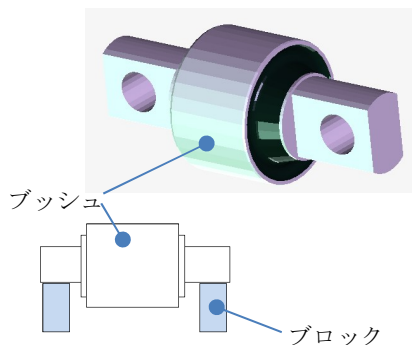
<円錐型マウントの変形解析>



2) 各パーツの剛性

i) 解析時のピンの剛性と固定方法

金属部を省略して、固定条件での解析を説明しましたが、中にはゴムの剛性に金具の剛性が負けることがあります。これが、ゴムは柔らかく硬いという表現につながります。剛性の高いブッシュでは、実験でも解析でも次のような違いは顕著に見られます。



一般的に試験方法は製品ごとに

決められていると思いますが、固定方法は

簡単に測定するため、①ブロック置き（ブロックにそのまま乗せて測定） ②ボルト止め（ボルトでしっかり固定） ③座面の完全固定（実験では不可能な方法）

それぞれ結果が違ってきます。この差を大きいと見るか小さいと見るか、その判断によって対応は大きく異なると思いますが、いずれにしてもこのような結果が発生することは理解しておく必要があります。

***** コーヒーブレーク：完全固定という言葉、開発担当とのコミュニケーション*****

少しずつ FEM 解析が周知されてくると、どこから仕入れた言葉なのか開発担当から “ここは完全固定で・・・”と言ってきます。先のブッシュの例で説明しましたが、固定方法で大きく結果が変わるものと変わらないものがあります。

解析の自動化を進めて、社内で展開をしていく中で開発担当者は、このことをそのまま実践してくれて、面白いほど落とし穴に落ちるものです。

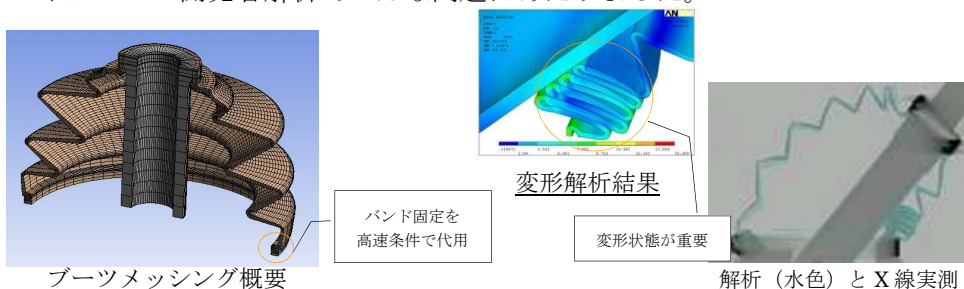
※2次元でモデルを作成できるものは、たとえ解析が3時限になってもあらゆる製品を自動化できるもので、2D-CAD⇒IGES 形状⇒解析プリ処理ソフト・自動メッシュ or 手順書に沿ったメッシング⇒条件設定とマーキング⇒自動プログラムを実行

この操作、結果処理も自動化絡めて開発担当の負担は30分程度で・・・。

落とし穴に落ちないように手順書で固める必要があり、開発担当以上に製品を良く知らなければならぬというのが私の持論です。

ただ、時間の制約も在りますので、なにをどこまで熟知するか難しい問題です。

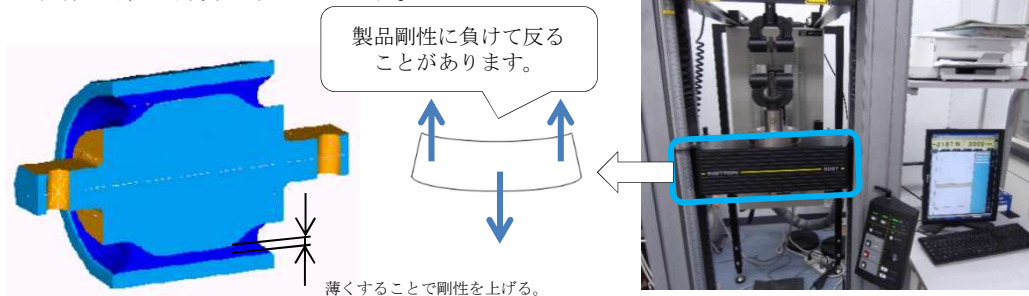
等速ジョイントブーツの開発者解析でこんな問題にあたりました。



本来バンド固定で接触解析を行うところ、バンド部を拘束条件（完全拘束）での解析を解析者担当の解析で展開しました。中には、拘束条件を安易に考えシール端部から1mmまでバンドとの隙間が空くため拘束しないのですが、そこを端部まで拘束してしまったため、耐久性に重要な蛇腹の重なり状態が正しく表現できないことがあり、後に手順書に重要項目として追記した中点がありました。（上記は正しい結果）

ii) 試験機剛性：最終的には解析で試験機の一部をモデル化する

防振ゴムの中には、非常にばね定数の高い製品があります。新幹線などに使われているものは、ゴムでも非常に硬いものがあります。エンジンマウントは200kgf程度のエンジンを4、6個で支えるのでばね定数としては数十kgf/mm（数百N/mm）程度のものが多いのですが、ブッシュは硬いもので数トン/mmという製品も少なくありません。そのため、試験機が製品の剛性に負けてしまうことがあります。試験機の梁の部分が変形します。



新幹線用防振ゴム概要

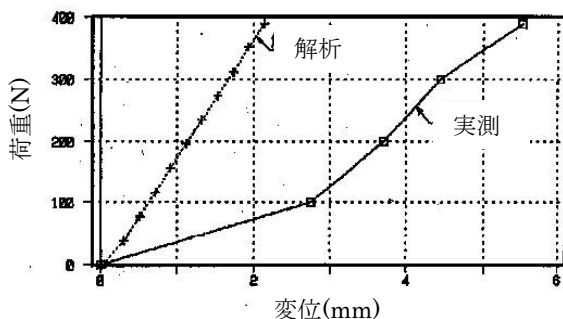
ばね測定用試験機概要

写真提供：富山県生活工学研究所提供

変位が小さくなることで、ばね定数＝荷重/変位 のため、ばね定数が見かけ上大きくなります。そのため、本当のばね定数、解析で求めるべきばね定数をしっかり考える必要があります。解析とのアンマッチをなくすることが重要で、どの方法が良いということもありますが、こんな場合、ダイヤルゲージで製品近くの変位を測定します。

***** コーヒーブレーク：測定によるもう一つの問題

支床ゴムという橋梁を支える防振ゴムがあります。製品は非常に大きなもので、測定用の試験機に乗せるのも苦労します。解析と実測の検証を行うと、次のように乖離があります。



製品の使われ方

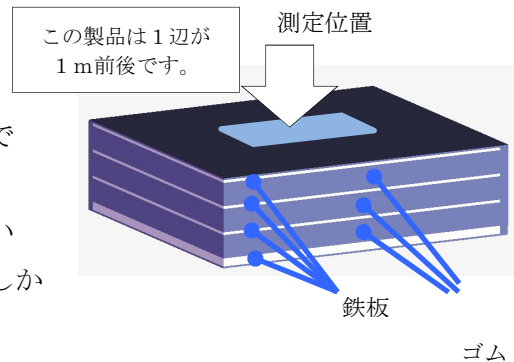
グラフに見られますように実測を解析が全く表せてません。見てすぐわかると思いますが、測定が間違っていることはおかしな現象です。

測定者（開発担当）と話しをするのですが、担当者は全面を押してます・・解析も全面を押した解析を行っています。

なかなかコミュニケーションとは難しいもので打ち合わせでは共に全面、紙に書いて前面でないことまで確認しているのにとらえ方が違い実際の測定は、見に行くと全面ではなく一部しか押していない事がわかりました。

このようなことはよくあるので確実に見て確認が必要です。

ワンポイントレッスン：防振ゴムのばね定数、特にマウントは受圧面積に比例して、厚みに反比例してばね定数変化します。中板を金属とすることで、ばねをコントロールもできますし、手計算（鉄道総研さん出版 防振ゴム参照）の計算式で、良く表現できます。



ゴム

4 材料定義における注意点

材料定義について、第Ⅰ章でひずみエネルギー密度関数について詳しく説明しました。最も簡単なネオフック式でも、間違いが少なく実測よりは必ず小さな反力値となりそこそこの予測が可能であることなど、いろいろな観点から説明しました。

1) 硬度

ゴム製品は硬度の公差があります。金属であれば、剛性が5%ずれることは、考えにくいのですがゴム材は5%、10%のずれは当たり前です。

ゴム製品の規格をよく見ていただくと分かりますが、50 Hs の製品でも 規格は 50 ± 3 Hs、若しくは良くて 50 ± 1 Hs となっていると思います。

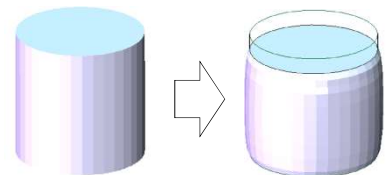
剛性で、1 Hs は5%に相当します。つまり、 ± 3 Hs ということは剛性、ばね共に $\pm 15\%$ を許容していることになります。

製品を単純なディスク形状で見ても

50 Hs と 60 Hs 製品で、剛性（ヤング率）はほぼ2倍で、全く同じ変形でも各部に生じる応力は2倍になりますが、通常、金属の耐久性

であれば応力の大きい60 Hs 製品のほうが耐久性が劣ることになりますが、ゴムは“応力で評価してはいけない”という言葉のように、**耐久性は同等です。**

細かく見ていけば、硬度が高くなると一般的に破断伸び(Tb)が小さくなりますのでまた、カーボンの比率も多くなりますので、変形時の発熱等含めて、実際には硬度の高い方が耐久性は若干劣ります。



更に、硬度測定は1つの製品でも測定が難しく、材料の分散性を伴い1Hs程度はずれることが良くあります。そのため、製品管理は製品そのものの硬度を測定するのではなく、同ロットの棒状のテストピースで管理することが一般的です。

2) 熱収縮係数

解析フローで、線熱膨張係数の設定が必要としてきましたが、なかなか製造でない各方面の方が解析するのに、製品から切り出すにしても入手が難しいも短冊状に長めのテストピースでの恒温槽での伸びを測定するなど、正確には測定する計測器があるようです。記憶の範囲ですが、以前、計測器と簡易的な伸びの測定から求めた係数は誤差範囲で一致していました。

後に、型設計の関係をまとめて紹介させていただきますが、精度向上の副産物です。

3) その他

ゴムの大変形になればなるほど、へたり（ヤング率の補正方法はすでに紹介）からの真のヤング率が求めにくい、大変形が故の変形速度、時間の関与、速度依存性など様々な問題が発生します。しかし、そこまでの問題ではなく、更には粘弾性までの検討をしないまでも、これまでの注意点を踏まえて解析を見直していくと、十分な解析精度が得られると確信しています。

ゴムには、大変形以外にも微小変形領域でペイン効果や、大変形での非線形粘弾性効果、剛に類似している樹脂やスポンジなど研究されている先生が多くいらっしゃいます。学ばなければならないことは、まだまだ山積みです。

***** コーヒーブレク：変形解析の副産物としての熱的解析 *****

変形解析を行う場合に精度を確保するため、熱的な解析を実施する中で副産物としての金型設計での成果について触れておきます。以外にもゴムメーカーは、製品形状を渡すのみで型屋さん丸投げで型設計から納品、検証して製品寸法が確保されない場合に修正するという工程を踏み、ある意味ゴム製品メーカーの金型作成コストを増大させています。さらには、社内にノウハウの蓄積する構造になっていないことが分かります。

特性予測精度を確保するため、熱応力解析での金型予測を行い、その先の熱伝導解析から最適加硫時間の定義も可能な技術にもなってきました。

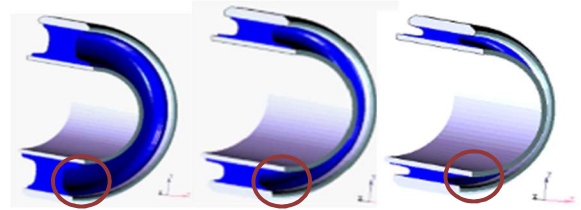
その一部をご紹介します。ゴムのみでできたゴム単といわれる製品は、各寸法に一律一定の係数を掛ければそれが型寸法ですが、まず、一般的な金具接着タイプの製品です。

<金具接着タイプ>

右のようなゴム圧違いのブッシュですが、定義方法としてはシンプルです。

金具が、加工工程を含めると公差が大きい為、細かに定義をしても、

その労力に見合った精度になりません。 ゴム厚が薄くなると冷却時、端部残留ひずみが大きくなる。



また、金型も金具と同様に膨張して、金具と同様に収縮するので相殺されると考えて、金具はあまり考慮しません。そのため、ラフにゴム部のみモデル化して一定温度膨張させた形状を金型形状とすることで、概ね精度は確保可能です。

つまり、金具は熱膨張・熱収縮を考えないということです。

ただし、ブッシュでは金具接着面が拘束されているため、型温から室温に戻るとき縮みの少ない金属に対して、ゴムの収縮が大きくひずみが発生して、これが残留ひずみとして熱時のゴムの破断強度（Eb）の低下に伴い、型から取り出しただけで端部が切れるという現状が発生したことも経験しています。また、ゴム単やシール部品では無理抜きという手法も使われ、そのとき大きなひずみが発生して切れるということもあるようです。

<金具接着タイプ：シール等精密部品>

ゴム製品でも精密部品に分類されるシールの様なものがあります。このような製品は、機能製部品であり、シール部の寸法公差が非常に厳しいことがあります。

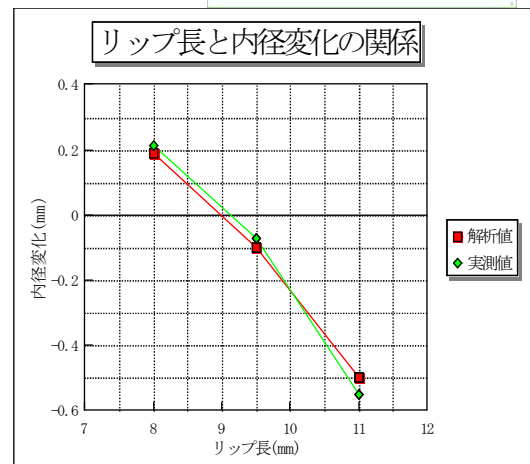
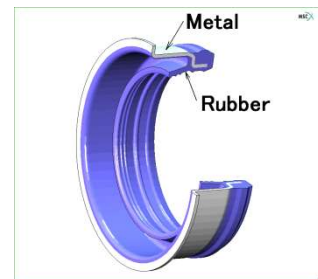
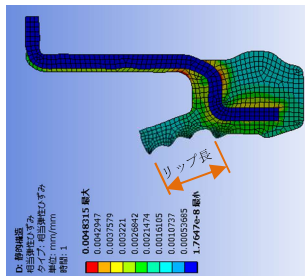
（詳細の説明はここではしませんが）

リップの長さの違いによって、短いリップのとき、金具に引き寄せられ金型から出て冷えるので本来は熱収縮で縮むはずですが、

反対に内径が大きくなることもあります。

更には、より正確に解析する場合、

この製品は金具の膨張も考慮した解析をするしないと厳しい制度を守ることができません。



＜型設計の失敗談＞

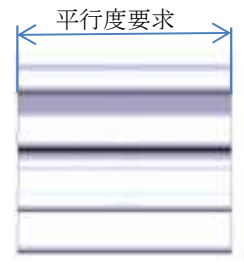
1 辺が 1 0 0 mm 程度のインペラという製品です。

船などの水かきの部分に使われる製品

ですが、中心に金具が入り、この製品も

型から取り出すと不均一な収縮になります。

外側ほどゴムボリュームが大きく、金具の拘束が無いので大きく収縮します。



内側ほど収縮小

インペラ

(側面図)

外側ほど収縮大

これらを予測して

製品公差 $\pm 0.1\text{mm}$ に

納めなければなりません。これを実際に予測した金型から製造するのですが、ある夜残業していると現場から電話が入り、予測寸法より 0.5mm も小さく金型 NG だとの連絡が入りました。冬の寒い夜の出来事です。すぐに現場に向かいましたが、その向かう途中ですでにその理由が分かりかけてきました。真冬、現場での寸法測定です

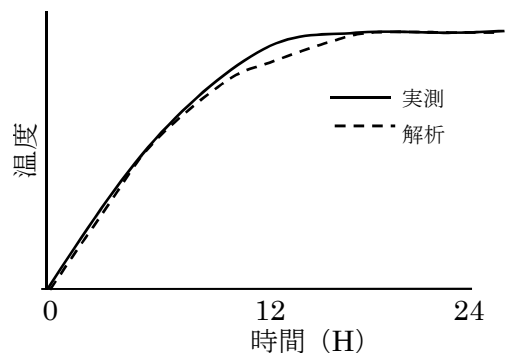
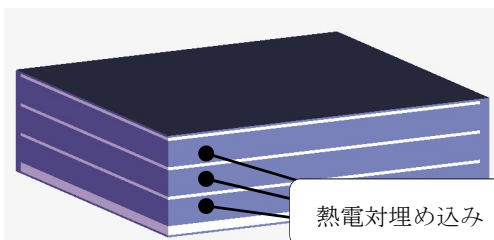
寸法は今でこそ 23°C ですが、当時は 25°C 環境の部屋で測定が決められていましたのでその点を間違えているのではと予測し、やはり現場で測ってました。結果 OK です。

熱応力解析での定義は、線熱膨張係数（抵抗度ほど大きい）と温度（型温から室温まで）ですが型温は単に加硫時の温度ではなく 100% ゴム材が充填されたときのゴム温度です。

＜加硫時間の短縮：昇温時間の予測＞

測定の失敗で紹介しました支床ゴムですが、製品は一辺が 1 m 程度の大きなものです。

そのため工法も選択肢が少なくコンプレッション成型で 24 時間という長時間加硫をしていました。何かの関係でゴム熱伝導度を定義しなければならず、検証の為にこのモデルでの昇温 vs 時間を解析と実測で比較しました。



結果から製造時間を半減、勤務体制の見直しにもつながりました。

先のインペラも、大きめに製造して研磨工程で平行度を出していましたが、それらの工程を減らす（なくす）ことができ、解析が製造コストに貢献する一面です。

更には金型設計の精度が上がると型修正工数が削減、大きなコストへの影響になります。

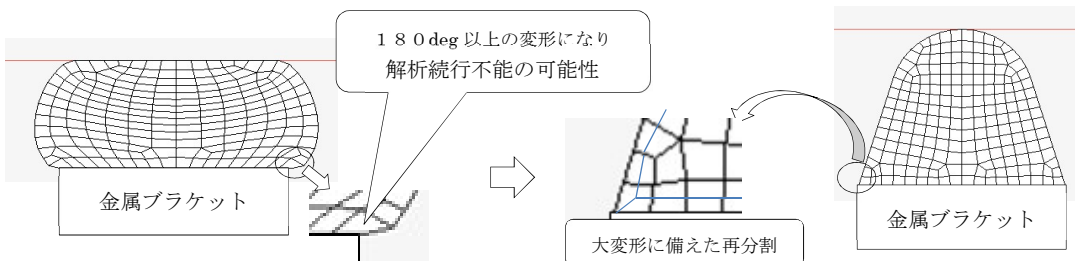
FEM 解析全体の精度が向上すると、耐久性含めて検討できるようになると作成してはいけない製品もわかるので、金型・試作・評価を大幅に削減が可能になります。

5 メッシュ：大変形、細部の変形形状を考慮したメッシング

どのようなメッシュにするか、その基本はフランスの H 社で教えてもらった“変形後にきれいな形になるように切る“というのが大前提です。当時、今のようにネットもなく、ほとんど独学でいろいろな解析を手掛けてきましたが、結論としてその変形形状をきちんと表現できる形状・大きさに切り、最後まで解析できるようにすることが大事だということにたどり着きました。

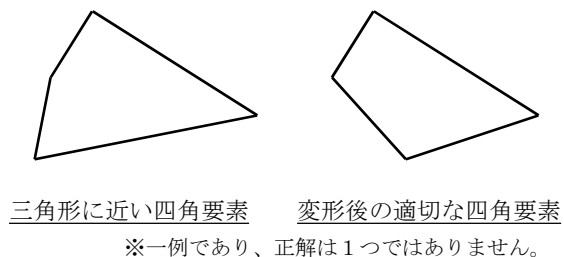
1) 大変形時のメッシュの切り方

製品設計上の問題（このような設計はしませんが実例）は認められるものの、図のようなクッションのような圧縮解析では、要素が大変形で 180deg 角度が開き解析続行不能になることがあります。そのため、先端を割るような分割も必要になります。



1992年に約1か月放り込まれたフランス H 社の中央研究所で教えていただいた経験が、今も生きていますと感じています。

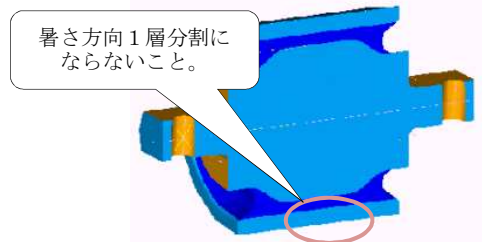
変形後に適切な形状となるような変形前の要素形状にすること“が要求され、変形前に三角形に見えるような四角形要素でも、変形後に適切な（4つの角が 90deg に近い）要素となることが、好ましいということです。



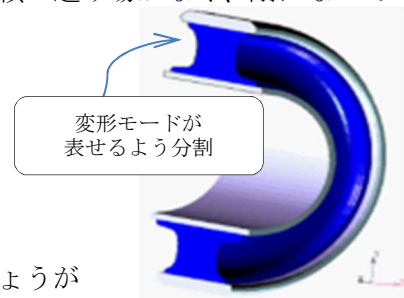
2) 必要な細部を表現できるように切る、ということ

明確な理論に基づいた分割数については、他の参考書をご覧いただきたいのですが

例えば右図、ブッシュの断面で気を付けてメッシュを確認しないと自動メッシュなど○印部が、気を付けないと全体メッシュサイズによっては厚み方向が1分割になることがあります。



要素数を抑えようと全体を粗くすると、ゴムの薄い部分が1分割になりがちです。また、断面では2分割以上になっているのに内部で1分割ということもあり、良く失敗しました。1分割になると2次要素でない限り体積の逃げ場がなく、剛になってしまうためです。右図のようなブッシュもシールの接触面も同様ですが、(精度の項でもう少し詳しく触れますが)表面の分割数も、ゴム圧が薄くなっても表面の変形モードが表せる程度で切る必要があります。

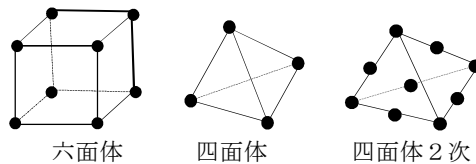


ここの表面を4分割以下で切るとは、まずないでしょうができるだけ90°を6分割以上、ここは180°なので12分割以上とすることが望ましいでしょう。小さなフィレットR部も同様に90°を6分割以上としたい。

***** コーヒーブレイク：メッシングの参考 *****

メッシングとソフトの間には深い関係があります。

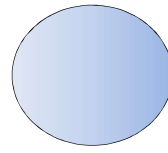
特に、ゴムの要素では四面体要素が使えるようになったのは、2000年前後は六面体が主流でしたし2Dの解析でも、3角形は使えませんでした。



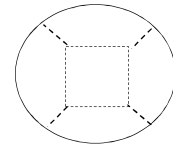
そのころ六面体メッシャーの開発も盛んでしたので様々なトライをしましたが、やはり複雑な形状を六面体にメッシングすることは難しく、既に19年以上経過した今も六面体メッシャーは実用化されていないのではないのでしょうか。

そのため、どんな複雑な形状も六面体で切る必要があり、当時のメッシャーやCADを駆使して、全体形状を六面体に大まかに切る作業を長い時間かけてやっていました。人間、3次元形状を頭の中で正確に詳細に描ける人は、そんなに多くはないと感じています。自動車メーカーの技術部長さんとお会いした時に、3D-VADが増えて開発者が図面から製品形状を思い浮かべられなくなってきたと話していたのを思い出します。当時、粘土を持ち込み、ペーパーナイフなどで如何に六面体に分割するかを、周りから見たら“また、粘土遊びしてる”としか見えなかったでしょう。

六面体へ分割する基本は、球を六面体に切ることができるか ということになります。粘土の甲斐もあって六面体に球も四面体も六面体に切ることも苦ではなくなりました。



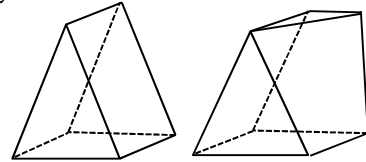
球形状



側面図（分割線）

どうしても六面体で切れないときは、一部だけ縮退要素を使います。

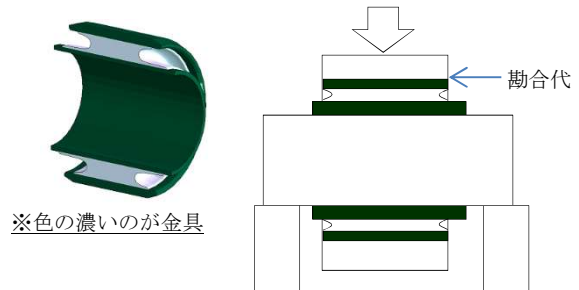
形状だけ見ると五面体（プリズムなど）形状に見えますが実際には1若しくは2辺が長さゼロの要素で、剛性が若干高くなるので、使用範囲など注意しなければなりません。



縮退要素の例

6 拘束条件

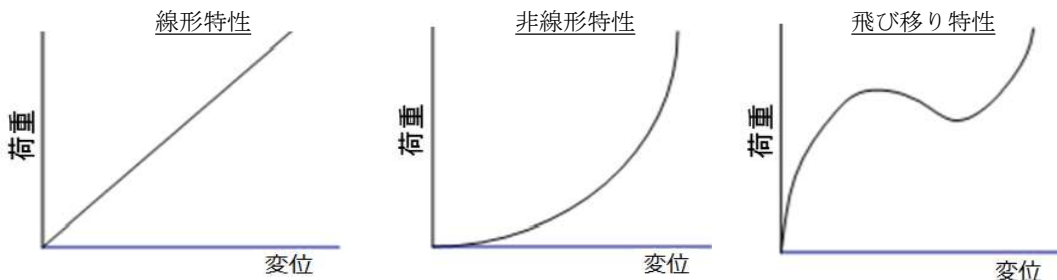
ゴムの解析のはじめで、金具は変位条件などでモデル化はしないよう説明しました。モデル化する、しない、に関わらず金具の公差・加工製品公差はしっかり確認する必要があります。その点は精度アップの項に詳しく触れますが、ここでは一般的な測定法を説明します。右のようなブッシュはそのままでは測定できません。内筒側にはピンを挿入、外筒側は厚い冶具に圧入して測定します。



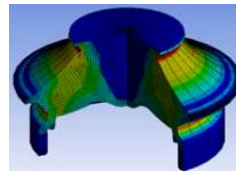
このため内径も外径も変化することを想定した条件にしなければなりません、。

7 解析ステップ：非線形ゆえのステップの難しさ

解析で求められる特性（変位 vs 荷重）曲線は、次のようなものがあります。



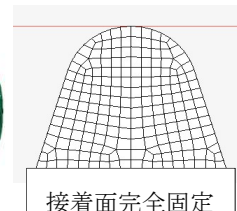
マウントやブッシュのような、
右のような製品は、ある程度
荷重を一定条件で解析が可能です。
しかし、接触を伴うような
クッションのような製品は、
荷重の与え方を工夫しな
ければなりません。では、どのようなステップで与えたらよいでしょうか。



マウント



ブッシュ



クッション

解析を変位で実施すれば、安定した解析ができるのでわざわざ荷重条件での解析を行う必要がないのではと考えられると思いますが、製品の規格は荷重範囲でのばね定数であることが多い為です。そのため、変位条件での解析では、直接にそのばね定数を求めることができないので、手間がかかり、ハードウェアの発達した時代の解析では、人の手間を省くことが最も重要なので途中で荷重調整しなければならない変位条件での解析は避けた方が良く考えます。そんな時に、どのようなステップにしたら良いか、

右に示すように非線形な特性を顕著に示す場合、次のようなトライが効果的である。
特に、接触面積が除除に増えるような変形状態で、この特性を示す場合は有効である。

・一般的なトライにおけるステップの与え方

(1) まず始めに、目的荷重を $A[\text{kgf}]$ とすると、
 A の $1/1000$ の荷重を 1 ステップとする。

(2) $1/1000$ の荷重を 10 ステップまで与える。

Total: A の $1/100$

(3) 次に(2)の 10 倍の荷重を 9 ステップ与える。

まとめると (+1/100 × 9 のため)

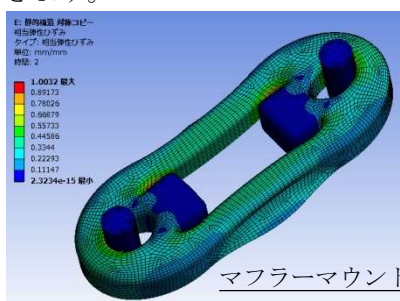
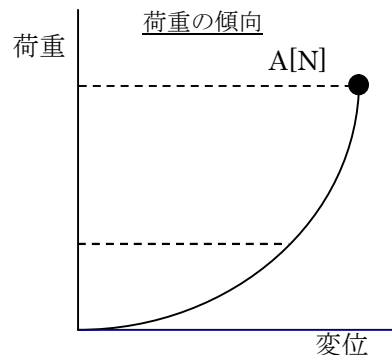
Total : A の $1/10$ になります。

(4)更に(3)の 10 倍の荷重を 9 ステップ

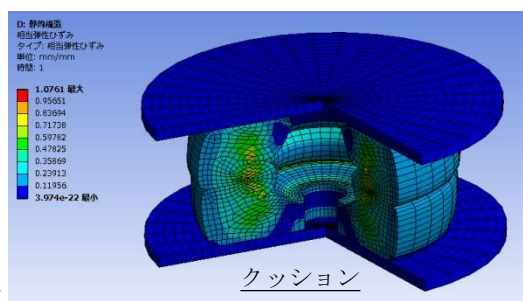
28 ステップで全荷重 A をあたえ、しか安定性があります。

経験上、9 割以上の例がこの方法で解決可能で、自動化に応用しています。

また、この方法は開発者解析にも取り入れて、初心者でも間違えなく解析ステップを簡易の設定できます。



マフラーマウント



クッション

8 解析結果の見方と注意点

i) ひずみ出力について

ゴムの評価は応力で行ってはいけない、この点は先に説明しました通りです。

しかし、ゴムは大変形が故、また° フトの癖があるので評価するひずみも注意して見なければなりません。

ソフトでは、明確にプリ処理の定義段階で、結果出力に“工学ひずみ”として表示され、それを選択できるソフトと“ひずみ”として表示のみで、どのひずみが出力されるかわからないソフトがあります。

私自身、使い始めてから数年、工学ひずみが出力されているものとばかり思いこんで結果を見ていたことがあります。そのため、結果の評価の失敗もありました。

ゴムですので、ひずみのみ解説しますが、工学ひずみ ϵ_e に対して次のものがあり、

$$\begin{aligned} \text{グリーンひずみ } \epsilon_g &= \epsilon_e + 0.5 \epsilon_e^2 & \epsilon_e: \text{工学ひずみ} \\ \text{対数ひずみ } \epsilon_l &= \ln(1 + \epsilon_e) \end{aligned}$$

として定義されます。

例えば、ゴムでは一般的なひずみ（金属ではありえないひずみ）

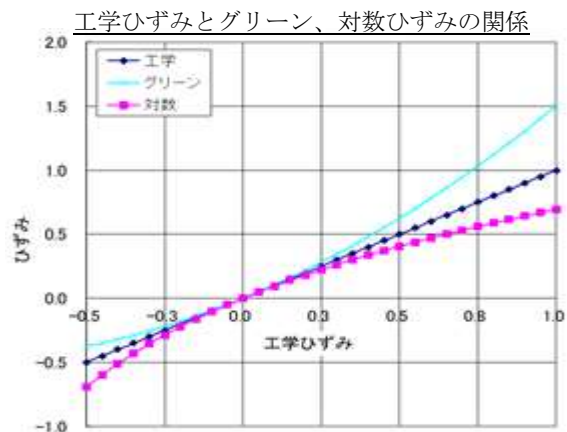
工学ひずみ 1.0 のとき

グリーンひずみ 1.5

対数ひずみ 0.7

このような出力に差があることを理解する必要があります。

確認の方法としては1要素での変形に対するひずみを確認することで、ソフトの癖を把握できます。



※マニュアルを隅々まで読み解かないと、出力が不明なコードもあります。

ii) 金属との境界でのゴムのひずみの見方

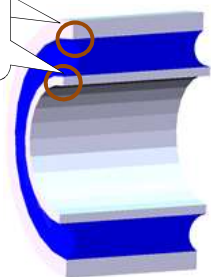
ゴムのひずみは、1.0 以上当たり前のよう結果として出てきます。

しかし、金属はその10分の1の0.1でも大きな値です。

結果、ゴムと金属のひずみは平均化され、金属は本来より大きなひずみ、ゴムは小さなひずみで現れます。

そのため、分離処理が必要な操作になることもあります。

接着面ひずみは平均化される。

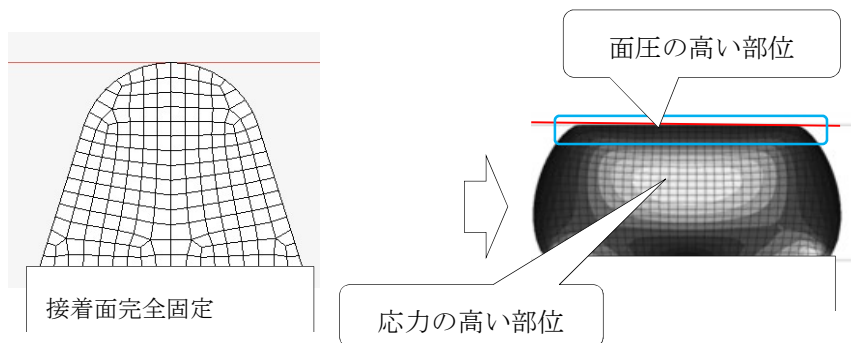


iii) 応力と面圧の違い

良く勘違いを受けていることに、応力と面圧を同じに見る、ということがあります。かなり昔、面圧がソフトの機能として直接出力できない時期に、面圧をどのように評価したらよいか思案して、サブルーチンで節点間距離と変位、反力から計算してひずみを出力させたことがあります。同時に、ベンダーさんに確認すると、応力で評価してはいかがですか、という回答をいただきました。

ただ、勘違いしてはいけないのは、図に示すように応力の高い部位は内部で、面圧の高い部位は接触表面にあるということです。

この間違いは、面圧と応力が同じ単位であるために起こると考えています。



解析は根本を考えて、地道に積み上げることで必ず良い結果を生みます。

時にはもがき、もがいているとどこからともなく蜘蛛の糸がのびてきて、“蜘蛛の糸”は失礼な言い方でした、申し訳ありません。どこからか必ず助けて頂いて、ここまでやってきました。もう少しで書き上げようとラストスパートですが、同時に、寺子屋のホームページが少し停滞しています。お役に立つ情報をどんどんアップしていこう立ち上げたのに。もうすぐ力を入れて、資料を充実させていきます。

2008年にCAE解援隊のホームページを立ち上げて、その詳細版として本年度寺子屋を立ち上げていますが、ある意味、ご恩返しの意味でできる限りの情報を表現しようとしています、なかなか文才が無いもので丁寧に表現するしかありません。

他、次のような資料も充実させていきますし、日本全国を回っていますので日程が合えば内容もご説明に伺います。この本の（あればいいなという）収益も各方面に寄付させて頂くことを友人には宣言しています。ゴムの解析、お困りの方は日程さえ合えば、各地へ移動の折、説明させて頂きます。

ご用意可能な資料 I 超弾性材料の解析用データベース作成方法

II ゴム・樹脂製品の解析、スムーズな実用化の方法

III ゴムの耐久性を考える 劣化・経年変化を考慮するには

Ⅲ 超弾性体の解析精度を向上させるための因子について

実際に直面して考えたことがうまく精度アップにつながっています。

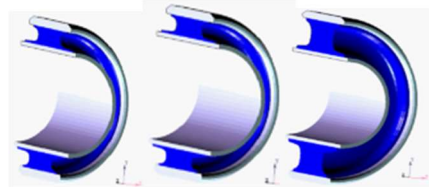
別の答えがあったかもしれませんが、各方向から見てこの方法が間違いないだろうと考えていますが、別方向からのアプローチなどありましたら教えて頂ければと思います。

1 製造工程によるゴムの熱履歴とそのモデル表現について

超弾性体の解析でも触れたモデルですが、工程を考えることは非常に重要です。加硫温度でも特性が変わることをⅡ章で説明しましたが、それは熱収縮による製品形状の違いではありません。製品形状は図面で決められるため、どのような加硫工程にしても必ず公差範囲で図面形状となります。

つまり、熱履歴で内部ひずみが異なるため、できた製品形状が同じでも特性に違いがあるということです。加硫温度を変えた場合、金型形状も変更しなければならず、同じ製品形状でも熱履歴による特性の変化ということです。

特に、加硫温度が高いほど軸方向は特性が上がり、半径方向は特性が下がるということで、熱的な解析を省くと材料剛性のみではこの違いが表現できないということです。



2 寸法公差・剛性公差

ゴム製品の寸法公差は金属に比べて非常に大きいものです。

寸法公差は精度の投球があり 1～3 級があります。

寸法	公差・1 級	2 級	3 級[単位：mm]
3 mm 以下	± 0. 2	± 0. 3	± 0. 4
3 ～ 6 mm	± 0. 2	± 0. 4	± 0. 5
6 ～ 1 0 mm	± 0. 3	± 0. 5	± 0. 6
1 0 ～ 1 8 mm	± 0. 3	± 0. 6	± 0. 8

O リングのような直径 1 mm の製品でも

1 級公差で ± 0. 2 mm、寸法が 0. 8

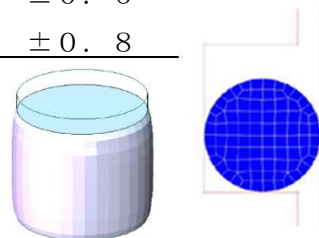
～ 1. 2 mm ですから最大寸法は、最小の

5 0 % 増しになり、ディスクのような

1 0 mm 程度の製品で 9. 8 ～ 1. 0 2 mm、約 4 % の幅があります。

この差は解析にそのまま特性の差で効いてきます。

また、ゴム製品は一般的に 4 0 ～ 8 0 H s、それ以上の 9 0 H s 以上、それ以下の 3 0 H s くらいの製品もありますが、製品の規格には硬度の幅もあります。



例えば、50Hsの規格の製品でも、全て50Hsで製造することは難しいことです。製造能力として、50Hs製品を目標としても51、49Hs製品もできることが当たり前で製品規格としては、中心硬度 $\pm 3\text{Hs}$ が一般的です。材料硬度での剛性は、1Hsで約5%の差になります。50Hs $\pm 3\text{Hs}$ の製品は、剛性がマイナス15%～プラス15%で30%の幅を持ちます。金属、鉄が温度や加工工程での剛性の差が出ても1%程度にとどまるのに対して、ゴムは10%以上の差が出ることになります。これらを踏まえたうえでの予測を行う必要があります。つまり、規格50Hsという製品でも47Hsなのか、53Hsなのか、実際に対象としている製品の予測するうえでは、対象製品の硬度を確認する必要があります。

良くあることですが、50Hs製品と思い解析していたものが47Hs製品で、特性予測が15%ずれたと言って、予測が合わないと言われ失敗と考えるお客様がいらっしゃいます。対象製品の硬度を測定することは、ゴムの解析では欠かせないことです。

正確には、1Hsで5%の差ということは、10Hsの差は25%ではなく、

$1.05^5 = 1.28$ となります。この差も寸法の差と合わさり誤差は拡大します。

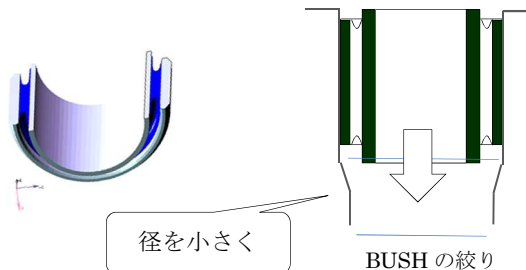
3 金具の寸法精度と絞り加工

寸法公差のもう一つの見方として、ゴムを解析しますが金具の寸法硬度もゴムの特性予測に大きく影響することがあります。寸法公差の要因は、1つは金具の厚みです。これによって、ターゲットのゴムの厚みが変化することです。

金具の寸法公差が $\pm 0.1\text{mm}$ であっても、ゴムの厚さが2～3mmであれば1～3%の差が生じます。2つ目は、

このようなBUSH製品などの加工公差です。

一般的にBUSHは加工時の残留ひずみを緩和するため、絞り工程があります。



前章でも書きましたが、治具への圧入のみでなく、絞り工程（金具の外径を小さく、ゴム厚10%程度薄くする）での製品も $\pm 0.1\text{mm}$ 程度の外径差が、ゴム厚の差となって現れます。想像していただくと分かりますが、厚みが小さくなるということはその分のゴムは長さ方向に移動し、長さと厚みのバランスを崩します。

3つ目は、BUSHはそのまま変形試験をできるわけではなく、ある一定の剛性を持った治具に圧入して変形試験、反力と変位の特性を求めます。そのとき、圧入の為それほどの勘合代はないのですが、0.2mm程度の刑の変化でもゴム形状が大きく

変化、厚み、長さの変化が顕著で図面通りの形状で解析したものと大きく異なってくるの当

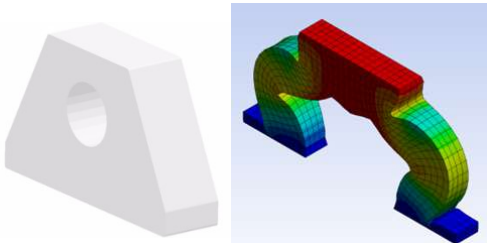
然のことです。前章でも書いたことですが、これらの剛性で特性に影響します。

4 モデリング

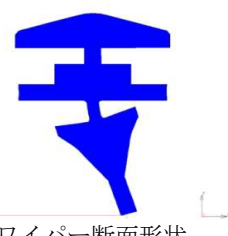
3D ソリッドで解析するか、2D に平面ひずみ、平面応力若しくは軸対称要素とするかは解析を恣率的に行うために重要な選択になります。また、3D ソリッドの解析でも、解析条件によっては2分の1、4分の1、8分の1モデルでの解析を行うことができます。これら詳細を私が説明するより、ネット上の解説など参考にいただき、ここでは特性（荷重）予測において重要な平面要素について触れておきます。

1) 平面応力と平面ひずみ

平面応力要素は、厚みの変化を許容します。つまり、厚みが変わることを計算する要素です。逆に厚み変化を許さない要素、平面ひずみ要素になります。では、どのように使い分けをするかが、分かりのように平面ひずみ要素とするには、列車のレールのように半無限に奥行きがある断面の解析などに使います。反対に厚み方向に変化が考えられる、奥行きの小さい形状は平面応力での解析が必要です。実際に3D ソリッドの解析とは若干の差（簡略化誤差）は発生するものの、選択を適切にすることである程度の精度を確保できます。ワイパーの断面の解析も断面寸法よりも十分に長さがあるので、平面ひずみでの解析が有効なようです。



平面要素適用形状



ワイパー断面形状

平面ひずみ適用形状

ソフトによってはゴムの平面応力要素がないものもありますが、ある工夫（金属の平面応力からゴムへの変換 Update 法）によって、解析することができます。

2) 要素分割の基本と精度の関係

要素分割については、様々な方法や裏付け理論がありますが、私は化学出身という履歴から、難しい理論を理解できないまま、必要に迫られて勉強して過ごしてきたため、自身でこうやったら間違いないという経験でしか話できません。これまで述べてきました、エネルギー関数の理論もある意味、必要なところをピックアップして、その部分は必ず検証して実用化してきたものです。分割数についても、同様に目的に応じた分割数を決めるという方法で考えています。

例えば、ゴムの解析には大きなものに、

- i) ばねを定義するための変位反力の解析
- ii) 変位形態を確認する、固有値を含む変形モード解析
- iii) シールリップ部の詳細な先端の変形を確認する解析

がありますが、要素分割の基本は、目的に合った結果求められればいいのではないのでしょうか。この言い方ですと、言っぱなしになってしまいますので、それぞれ簡単に解説します。

- i) ばねを定義するための変位反力の解析

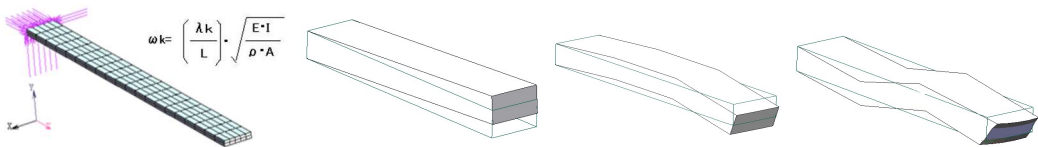
よほど非常識なメッシュ分割でなければ、反力はほとんど変わりません。
1%差が出るかです。

- ii) 変位形態を確認する、固有値を含む変形モード解析

モードが表現できる分割数。メッシュのサイズはどうしたら？

ここは何分割にしたら？ というようなことをよく質問されます。

乱暴な表現ですが、モードを表現する妨げにならない分割数ならどんな分割数でも構いません。



一般的な片持ち梁モード解析分割例

一次変形モード

2次変形モード

3次変形モード

断面から定義します。1分割はありえません。変形を阻害するという意味で、阻害について後に説明します。要素の分割数、少なくとも2層、層方向は、3層以上で切りたいが最低2層必要です。その理由は1層ですと厚さ方向に変形できません。

単純に変形を阻害しないことが、要素分割の基本と考えています。

まず断面は2×2分割で十分です。次に、曲げ方向を表現する長さ方向の分割数です。

1次モード変形であれば、阻害という意味では10分割で十分です。ちなみに2分割で試しましたが、1次モードの100分割との差は5%程度でした。

阻害しない分割という点に少し触れます。

2次モードを長手方向2分割、必ず誤差が大きくなります。分割位置を変えることで、二次モードの節と腹になる位置がずれますが、分割されている場合とそうでない場合は、大きな差が出ます。腹の位置に分割があるとき2分割でも3%程度の誤差でした。たまたまとう面もあると思いますが、二分割の位置の違いで下図に示すような分割位置での差が出てきます。

(節の位置のイメージです)



節の位置にマッチすると誤差が小さくなります。

しかし、これは結果が見えている場合、このような切り方ができますが、ある程度多めに切ることも最近のハードのスピードからはできる判断です。 3次モード以降もしかり、曲がるべき位置に分割がなされているか否かで精度がきまります。

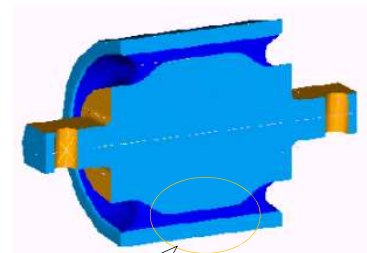
今のハードの能力をもってすれば、固有値解析であれば厚さ2×幅5×長さ20分割以上であれば、1分以内の解析が可能ですので、その10倍程度までの分割でもすぐに結果が出るので、その程度で考えてください。

注意) 要素選択については、別のソフト上の問題もありますので選択時に注意してください。

iii) 分割のちょっとした失敗で剛になる例

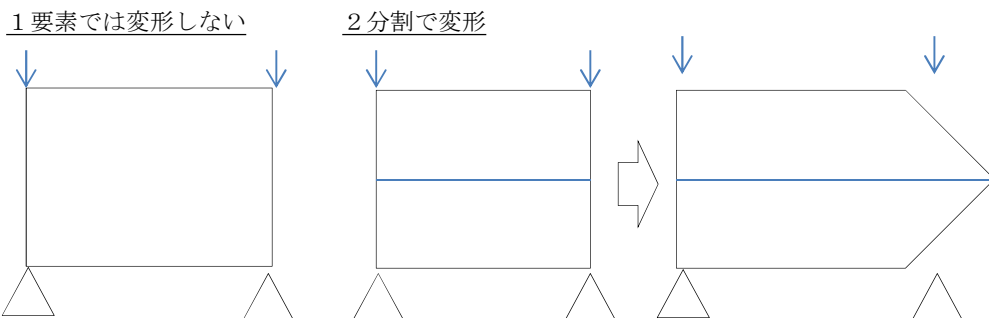
明確な理論に基づいた分割数については、他の参考書をご覧いただきたいのですが、実用面で例えば右図、ブッシュの断面で気を付けてメッシュを確認しないと、自動メッシュの場合は印部が、気を付けずに全体メッシュサイズによっては厚み方向が1分割になることがあります。要素数を抑えようと全体を粗くすると、ゴムの薄い部分が1分割になりがちです。

また、断面では2分割以上になっているのに内部で1分割ということもあり、表面のみ気にしていると失敗することがあります。



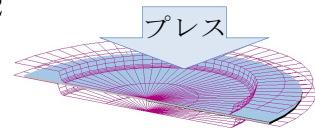
暑さ方向1分割にならないこ

1分割になると2次要素でない限り体積の逃げ場がなく、剛になってしまうためです。



一部ではこうなりますが、これをプレス変形のようなモデルで考えると

右のような変形解析を行う場合、やはり1層ではなく2層以上詳細に解析する場合、3、4層で切ることになるでしょう。



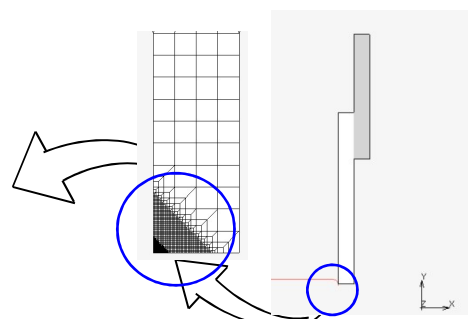
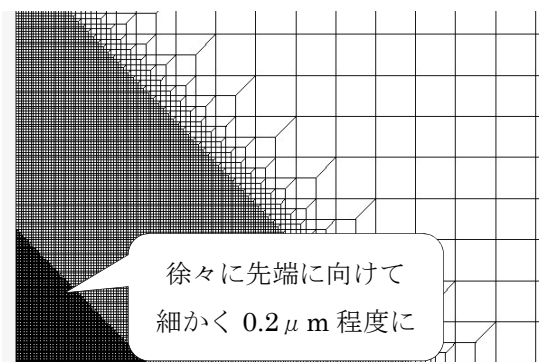
金属プレスの状況/残留応力発生

今は、コンピュータの能力があがり全体を細かく切っても解析時間が短くなっています。蛇腹ブールの解析、ソフトとハードで、1億円のシステムを1992年に買ってもらいましたが3千要素で不十分な表現でしたが、1週間かかりました。途中で設定の間違いに気づいたときは・・・という感じです。今は数万要素でも100ステップ程度であれば、ノートパソコンでも1日あれば解析ができます。人の携わる時間を節約するとうい意味では、全体を細かくするほうがいいのかもしれない。

次の例は、如何に一部を細かくして解析時間を短縮した、苦勞した例です。当時は、なかなか思いつきませんでした。

iv) シールリップ部の詳細な先端の変形を確認する解析

ブレードラバーのリップ部のモデルは、全体の変形を確認する場合は全体的をそれほど細かいメッシュで切ることとはしませんが、先端の接触状況を表現するため、先端の要素は0.2 μm 程度に切ることがあります。梁の固有値解析と同様に、必要な変形を見るため、ここでは接触幅が10 μm 程度を表現するには、それ以下のメッシュサイズにしないとなりません。



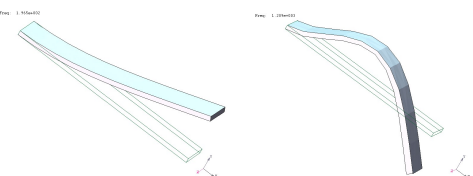
ブレードラバーの変形解析

***** コーヒーベイク：固有値解析、熱的解析に必要な質量密度について *****

梁モデルの固有値解析、まず、端部の完全固定はありえないことと、周囲までモデル化する。

金属の固定治具のモデル化が必要であること。

更には、ソフトの癖、デフォルトでは正しい剛性を



示さないため、ひずみ強化型、想定ひずみ、I のつく要素など、それぞれのソフトの注意点があります。そのほか、良く間違ってしまうのが質量密度です。解釈が少しずつ違うようです。

ツデツマが合えばいいのでしょうかね。

水の密度 $1 \text{ g/cm}^3 \Rightarrow 1 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3 \Rightarrow 1 \times 10^{-2} \text{ N/cm}^3$

$\Rightarrow 1 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$ (重力加速度を与えたとき重さを表すので 9800 mm/s^2 で割る)

$\Rightarrow 1 \times 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{sec}^2/\text{mm}^4$ となると思います。

良く、固有値解析で間違えミスをしました。ton という言葉を使う方もいますが、SI 単位系で話をしている中でてくると少し違和感を感じます。

3) モデル簡略化

モデルを簡略化した場合、解析時間の短縮という利点と引き換えになくすものも理解する必要があります。いくつか例を示して、どのようなものか触れます。

i) クランクシャフトの shell/Beam

‘90年代に全体をソリッド要素で解析すると、解析時間がとんでもないことになるので Shell と Beam (梁) でクランクシャフトの固有値を解析しました。

その際に、Shell の厚みと Beam の質量と剛性が重なり実験と合わないことを経験しました。いろいろな失敗の積み重ね、いまはなかなか失敗させてくれる上司も少なくなり大変かと思いますが。



ii) shell 要素での布表現

車の部品 (ダイヤフラムやベルト、ホースなど)、土木製品 (止水ゴムなど)、そのほかあらゆる分野に補強の布や糸が複合的に内在するも製品を解析することがあります。では、例えば、布を Shell で表現するということを考えてみましょう。

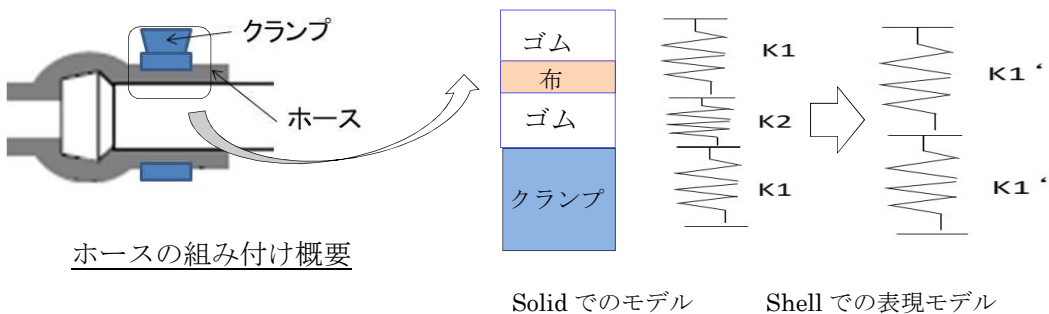
まず、shell 要素を設定する場合も種類があるので、そのソフトの癖も一緒に掴む必要があります。6 面体要素の使い方、癖を少し説明しましたが、Shell 要素も曲げ

剛性の有無も選ばなければならないはずです。布の特徴を表現するには異方性の定義も必要となり、いろいろと大変ですが、必ずソフトの癖を確認する意味で検証の解析は試してください。

図に示す、ホースの組付けですが布部分は **Shell** で表現する場合があります。

ゴムが布の網目にどの程度詰まるか、その辺の考慮も必要ですがソリッドでの解析に比べて、**shell** の布置き換えは厚み分をゴムが置き換えてしまうところにあります。

布の模倣的に表現すると、ばねの表現で模式化すると



K2 の膜部分を、 $K1 \Rightarrow K1'$ として考える必要があります。そのまま K1 での解析をするのか、 $K1'$ とするかで結果が違いますので、最終的な結果の見方を工夫する必要があります。ここでばね K は、ゴムの剛性 $K1$ と布 $K2$ の関係は、補強材としての布の役割から、 $k1 \ll k2$ となることが多いので、圧縮（クランプ締め付け）方向での表現で、圧縮のみの表現ならともかく複合的に変形する製品の $k1$ を明確に定義することは難しく、そのため、 $K1 = K1'$ として解析することが多くなると思います。その為、ホースの変形（圧縮）量は大きくなります。この誤差の補正は、少なからず精度に影響します。

Shell を使って解析すると、要素が簡略化され解析時間が短縮されるという利点がありますが、問題点としてこのようなことが残ります。また、このように軸対称でも表現できそうな、このようなモデルであれば **Solid** でも表現できますが、複雑な形状の中の異方性材としての布の定義は、方向性の定義など非常に複雑になるため、**shell** 特有の違法性材料の定義を楽に行える、この **shell** を選択するようになると思います。

5 結果の見方

摩擦については、ソフトごとに確認することをお勧めします。

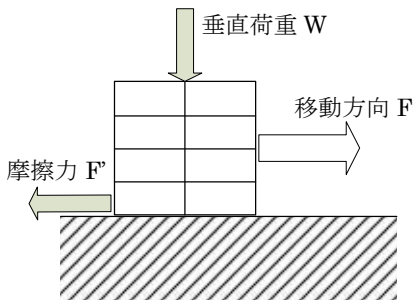
図のような簡単なモデルを作成し、

摩擦関係式

$$\text{移動力 } W = \mu W$$

(摩擦係数と垂直荷重の積)

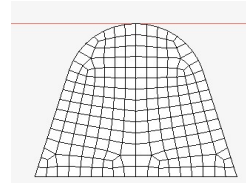
若しくは解析設定があります。



が成り立つはずですが、成り立たないソフト

摩擦についてのワンポイント

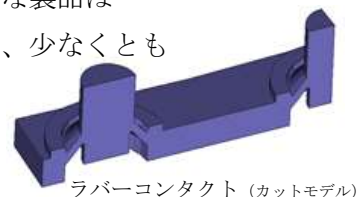
このような接触面が徐々に増えていく形状は、摩擦ゼロとした場合とゴムの大きな摩擦 1 以上とも言われる設定でも荷重-たわみ特性の大きな違いは経験上、みられません。



ゴムの摩擦定義は非常に難しいのですが、一般的に自由表面の割合 形状率で摩擦の設定が効くか効かないかの境目があります。そのため、摩擦の定義は慎重におこなう必要があります。

ゴムの特性を測る場合、右図のようなモデルで 1 回目、2 回目、3 回目の特性を考えた場合、本当に 1 回目の特性が測れているでしょうか。

この製品に限らず、ポペット、グロメットという小さな製品は測定者が測定前に指で押しているケースも多いもので、少なくとも 1 回目の測定はあきらめた方がよいと考えます。



ラバーコンタクト (カットモデル)

さらに、“ゴムは応力で評価してはいけない”として、その理由を説明しましたが改めてここで関連した結果の見方を触れておきます。耐久性を検討するうえで、やはり応力は結果を見誤る原因になると思います。

全く同じ変形であれば、ゴム硬度が高いほど応力は高く、ゴム硬度の差で中には 10 倍の応力になってしまう場合も、ゴム製品では簡単に発生します。耐久性評価は、確実にひずみの成分で見る必要があります。

ひずみについても、どのひずみを見るべきなのかは議論のあるところかもしれませんが、経験上、ある程度耐久回数を予測する指標を構築してきたつもりです。

いろいろな方と議論したいと考えていますが、なかなか耐久性については探すのが下手ということもありますが、製品の耐久性を研究している文献も少ないものです。

豊田合成様のゴム協会誌 防振ゴム材料の耐久性の一評価 [第 66 巻第 4 号(1993)]

を参考とさせていただき、20 年以上耐久性を考えてきましたが

ひずみと耐久性の関係があることはわかってきましたが、特効薬的な見方はできていません。

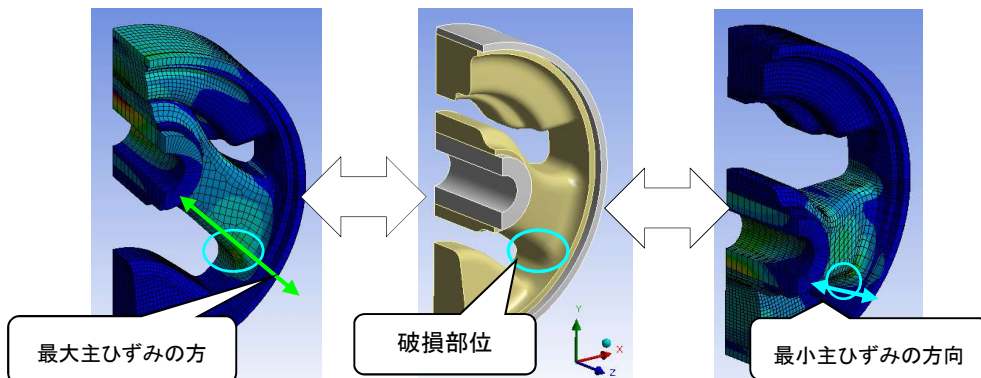
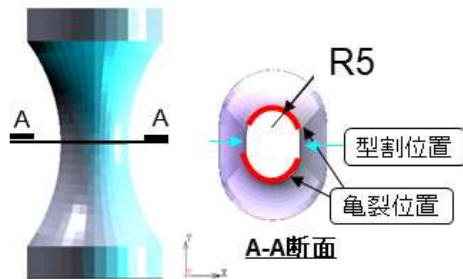
文献では、右図のようなテストピースの評価と製品の関係について触れていますが、テストピースは非常に良く工夫されていました。

ゴム特有の製造工程でできる金型の合わせ面に見えるパーティングラインという

位置をひずみが最大になる亀裂位置に

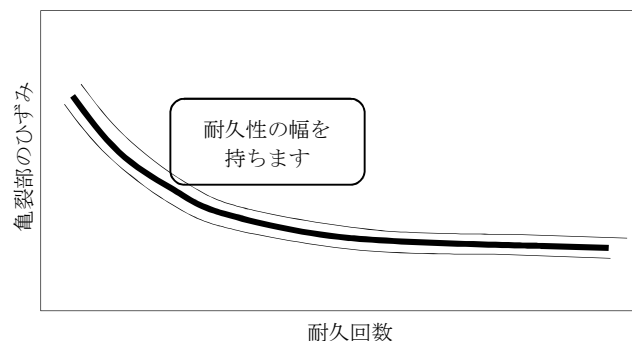
来ないように、型割位置を楕円の長円側（図参照）にしています。ひずみも3つの成分がありますので、何を指標にしたらよいのか、複合的な相当ひずみとしてみるか、難しいところです。

製品の耐久性ですが、図のようなハの字マウントのように、変形を上下に与えて耐久回数を実際に求めます。



変形は正弦波での変形を与えますが、その変形のピーク・ピークでのひずみをもとめ、実際の耐久回数（亀裂までの回数）をプロットすると右のような傾向になり、金属のSN線図のように傾向を求めることができます。

ただし、ゴム硬度により硬度が高くなるにつれて伸びが低下する傾向をひずみ÷伸び（伸び割った見時限化）との指標とすることで、幅を持った線がある程度シャープになります。



分かったことは、亀裂は

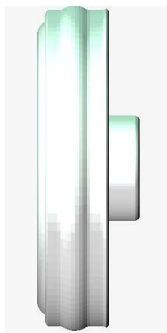
- a) ひずみと直行方向に b) 振幅ひずみの大きい位置に 発生し、
- c) 伸張時の最大主ひずみと圧縮時の最小主ひずみに関係します。

残念ながら、全ての形状に当てはまる指標としては求められていませんが、この指標は一つの正しい見方考えます。

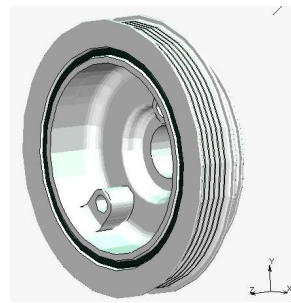
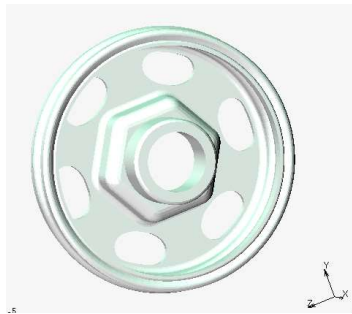
解析に携わるようになって、まず最初に直面したことがあります。今は化学系学部でも力学の勉強はあるようですが、当時最大主ひずみって何？とう状態で、解析から出てきたひずみを理解できず、初めに行った金属の解析で合っているのにひずみの方向、何のひずみと比較したらよいか彷徨ってました。

下のようなモデルを線形解析で実験との検証を始めました。

ひずみ、応力でも最大、中間、最小主ひずみという3つの直行方向のひずみがあること、モデルのXYZ方向のひずみがあること、これらを確認して更には、ひずみゲージの大きさと製品のひずみ・応力の範囲の関係、そこを見直すことで合っていることが確認できました。



プーリーハブモデル



プーリーダンパ (ゴム含む)

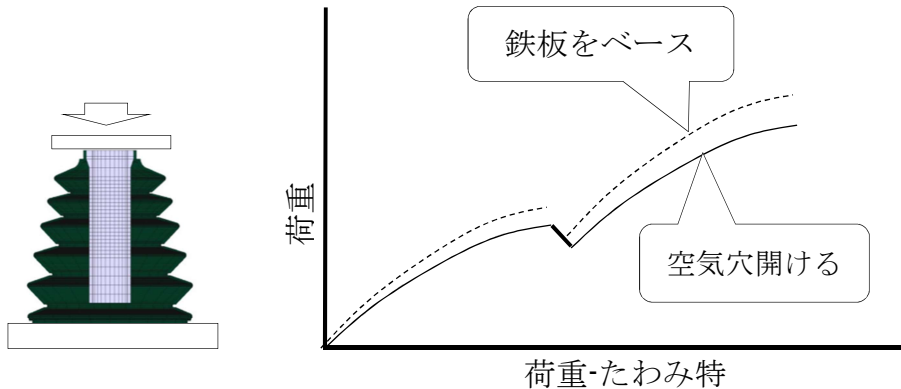
(具体的にはひずみゲージの領域の解析結果の平均を比較)

※全て6面体メッシュで作成しています。

測定によっては、内部圧力の影響も考えざるを得ない状況もあります。

単純に、ブーツを軸方向に押す実験で圧力が抜けていないことも経験しました。

上下、鉄板で挟み上から押しただけなのでシール性はそれほどないと考えていましたが、実際には内部圧力が高くなっていました。



様々な事柄が精度へ影響することがわかつていますが、注意深く見ると
 ということで、これらを解決して精度を保つことができますようになります。

----- 付録：おまけのお役立ち情報 -----

1) 解析にすぐに使えるサンプルデータ

理論と経験値では解析ができないので、実際に使えるサンプルデータをMooney 高次式の形でいくつか掲載します。

エネルギーとして非常に安定したものですので、そのまま使えるはずです。

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$$

[単位：N/mm²]

せん断弾性率	参考硬度	C10	C01	C11	C20	C30
8.4	50Hs	3.91517E+00	3.09019E+00	-1.20591E-01	-1.81958E+00	2.11019E+00
12.3	60Hs	6.33109E+00	6.93627E+00	-3.48269E-01	-3.44773E+00	4.88826E+00
17.1	70Hs	1.00124E+01	1.35490E+01	-7.90487E-01	-5.89747E+00	9.96986E+00

ネオフックとして使う場合は、 $C_{10} + C_{01} \Rightarrow C_{10}$ として使うと、初期の特性は一致します。Ogden 係数は、エネルギー安定性の面から危険なため、Mooney を一般的に使い、こちらを推奨します。そのため、Ogden 係数が必要な場合、サンプルをご用意していますので、お問い合わせ下さい。

2) 粘弾性データへのつなぎ

ブッシュのような製品は、時々、粘弾性データが必要になることもあります。

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) \sum_{i=1}^N E_i e^{-t/\tau_i} + \varepsilon(t) \sum E_e$$

と表現されるものですが、詳細はソフトの間にある等を参照していただくとして、

また、正式なデータとは別に 緩和データの一例

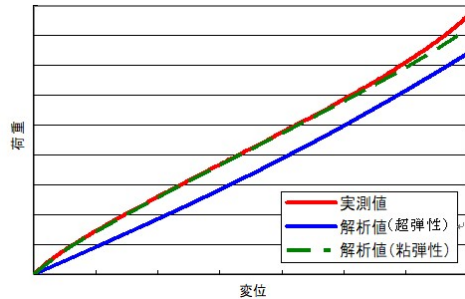
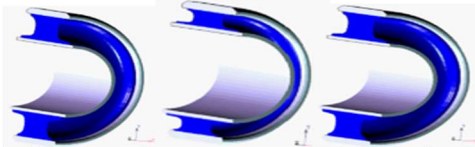
簡易データを次のような

緩和時間	10	100	1000	10000	100000
緩和係数	2.540E-02	1.760E-02	2.010E-02	6.400E-03	5.014E-02

数値で表現、解析できます。

実測と解析値で比較すると、ブッシュのような製品は初期の立ち上がりが見られる製品があります。ゴムの厚みが薄くなるほどこの傾向にあります。

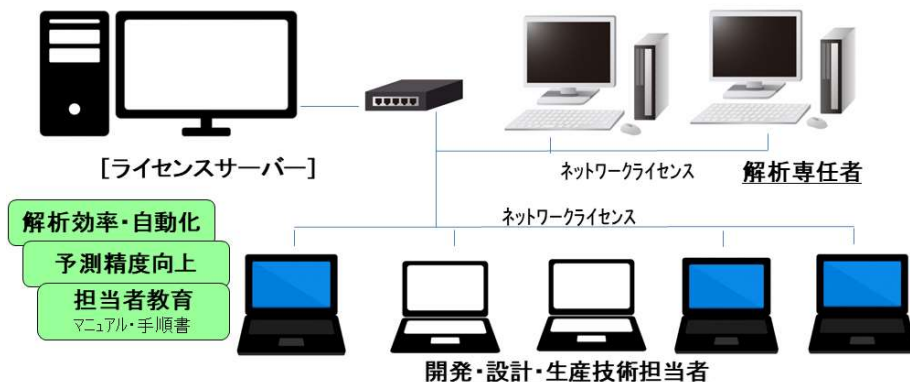
解析値は単純な超弾性よりも粘弾性データを使うことで、実測をより精度良く予測できるようになります。



熱的な収縮のみでなく、このような立ち上がりの傾向がみられるときは粘弾性データを試してみることをお勧めします。

3) 解析環境の整備

1 モデル、自分の担当の製品が30分程度の労力で解析できるとしたら果たして自分で解析するようになるのでしょうか。担当者解析を実施する環境は効率化と予測精度のレベルアップがキーポイントになります。ある程度の予測精度が確保されないとやっても無駄、という雰囲気が広まります。予測精度を確保できると、今はネットワーク環境の発達に伴い、簡単にノートパソコンで解析ができる環境を整えることができます。



- ① モデル作成 (CAD) 自動化 ② 解析の効率化 (メッシングから解析設定、結果処理)
- ③ リバースエンジニアリング

これらのキーポイントについて説明します。

① モデル作成、CAD の自動化

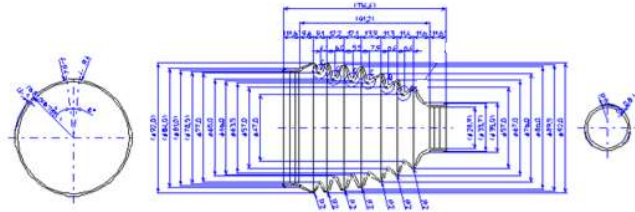
あるきっかけからブーツの蛇腹形状を予備検討した設計者の EXCEL を取り込み、1~2 分で寸法入りモデルを描けるようになりました。いろいろな外部の発表会で紹介したもの

ですが、その応用でいろいろなモデルをとマクロへの展開でより効率的に作図作業ができるように

なっています。

手順に簡単に触れますが、

(右のようなモデルを)

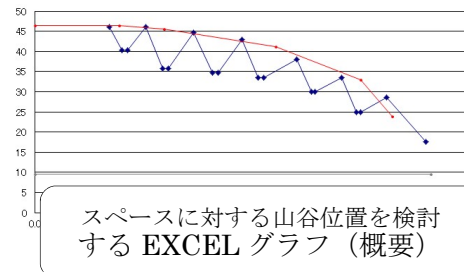


i) 設計者が山谷部の寸法検討したデータを入力

右グラフのようにスペースに対して
各山谷の寸法を必ず検討します。

それらの寸法を EXCEL ベースで
入手します。

概ね円弧と接線で作られた図形です。

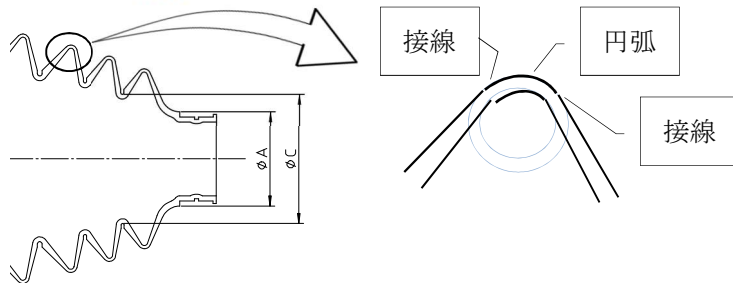


ii) 読み込んだ寸法データから自動的に円弧、直線を作成、

寸法も CAD コマンドで実行可能です。

山の頂点寸法から山谷部の肉厚を決めると弧の中心、始点と終点が決まります。

また、接線をこの弧の視点と終点から引くのですが、接線であるということは
円の中心から始点の線分と接線は 直行しているので内積がゼロと なること
を確認します。



	始点x	始点y	中点x	中点y	終点x	終点y	中心x	中心y
1山	76.27995	27.182	74.4	28.5	73.29	28.16358	74.4	26.5
2山	64.94099	31.982	63	33.5	61.89	33.16358	63	31.5
3山	53.6394	36.489	51.7	38	50.572	37.65122	51.7	36

弧の中心、始点と終点の計算シート

線を引くだけでなく、必ず確認作業（自動計算ですが）実行します。

こうして得られた寸法を PNT・・・点、ARC・・・弧 SOLID・・・実線

このようなコマンドの寄せ集め、寸法を次々に決めていきます。

ほとんどの CAD ソフトには
右のようなコマンドが必ず
あります。右のようなもの
ですが、CAD ソフトで何らか
の絵を描くとコマンドライン

```
LET LEE2 (PNT_XY 0 -20.85 )
LET LEE3 (PNT_XY -20.85 0 )
LET LEE4 (PNT_XY 20.85 0 )
LET LEE5 (PNT_XY 0 16.05 )
LET LEE6 (PNT_XY -13.90183742 -8.021310147 )
LET LEE7 (PNT_XY 13.90183742 -8.021310147 )
ARC WHITE SOLID THREE_PTS LA1 LA3 LA2
ARC WHITE SOLID THREE_PTS LA3 LA1 LA4
ARC WHITE SOLID THREE_PTS LB1 LB3 LB2
ARC WHITE SOLID THREE_PTS LB5 LB3 LB4
```

コマンドの一例

に表示されます。これを何らかの形でコピーして持ってくる、そして編集する
ことで、EXCEL 機能を使うと簡単に CAD の自動化が可能です。

一部、解説します。

LINE (線の作図) R5IE2 P6IS2 は、あらかじめ座標を定義した
R5IE2 と P6IS2 を結ぶもので、

ARC Three_PTS P6IS2 P6IE2 P6II2 として、ARC (弧) を 3 点、
これも座標を定義した P6IS2 P6IE2 P6II2 を結ぶ弧を描きます。

LINE		R5IE2 P6IS2
ARC THREE_PTS		P6IS2 P6IE2 P6II2
LINE		P6IE2 R6IS2
ARC THREE_PTS		R6IS2 R6IE2 R6II2
LINE		R6IE2 P7IS2
ARC THREE_PTS		P7IS2 P7IE2 P7II2
LINE		P7IE2 Z4

また、寸法を Dimension として VERTICAL 直行方向に表示

DIM_LINE		VERTICAL		R1OI	R1OI2	DV19
DIM_LINE		VERTICAL		R2OI	R2OI2	DV18
DIM_LINE		VERTICAL		R3OI	R3OI2	DV17

また、内径寸法を Φ DV14 などとして順に寸法を決められた位置に表示
します。さらにテキストも

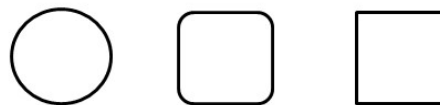
右のように準備してある位置

に表示させます。

ADD_DIM_PREFIX	' ϕ '	DV14
ADD_DIM_PREFIX	' ϕ '	DV15
ADD_DIM_PREFIX	' ϕ '	DV16
TEXT	'型番'	WW21
TEXT	'型製作年月記号'	WW22

このようなモデル化システムは、非常に労力がかかります。作る時間に比べ
て、その後の作業がどれだけ楽になるかその効果を上げるためには、共通化
が必要です。共通にできるかが

カギで、右のような 3 つの形状、
違うと見るか同じと見るかで
労力を減らすことができます。

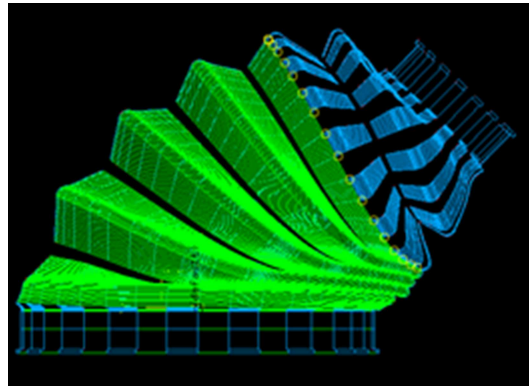


中の絵を、フィレット R をゼロとすると四角になり、直線長さをゼロにすると
円になります。これらを利用します。

解析の自動化、それぞれの解析ソフトのツールで十分に作れるものです。

更に、変形解析後のメッシュは3D-CADの自動スプライン機能を使うことで簡単に表面のみのCADモデルとして作ることができます。

解析結果をそのままコンバートして、表面が4角形のCADモデルを作るとは簡単ですが、数百MBという大きなCADモデルになります。そうすると組み付けチェックにCAD上での組み合わせで、全体モデルが大きくなるため、スプラインから表面のみのCADモデル、10MB程度のものを作成して、チェックに利用することになります。



FEMメッシュ変形図にスプラインを自動描画

これはリバースエンジニアリングの一種でしょうか。

ポイントは、如何に節点の順番をコントロールするかにあります。

自動スプラインは、各3D-CADに備わった機能ですが、節点番号はFEM解析の段階で番号付けを工夫します。

そのほか、次のような情報発信もしております。

I ゴムの二軸伸張試験

- ①二軸試験から解析用材料定数算出 ②お試し用、材料定数の提出・

II ゴム・樹脂材料の短軸試験

- ① 軸試験からヤング率、ネオフック係数($C10=E/6$)算出 軸試験からエネルギー関数 (Mooney 3次係数) 算出

III 解析コンサルティング

また、二軸試験機での実際の操作を体験していただき、回帰分析を行うお手伝いも始めておりますのでご活用ください。

謝辞

本書の出版において根本となるエネルギー関数から解析へ同志社大学坂口一彦名誉教授には、1991年から大変親身になりご指導いただき、ありがとうございました。今年（2018 年春）執筆を決断して、各方面の調整、如何にうまく表現して分かり易くするか工夫しているうちに今日となってしまいました。恩師である坂口名誉教授は今年7月に永眠されてしまい、直接、この本を届けることができず、大変残念ですが、ご恩を忘れることなく今後も皆様のお役に立てる情報を発信していければと思います。恩師との出会いは、会社員時代の顧問から、“ムーニーさんと一緒にゴムの勉強をされていた方”と紹介され、1991年の7月暑い日に大学を尋ねたところから、毎回ゴムの二軸伸張試験で当時御所のとなりにある地下の研究室で朝から晩までゴムシートを引っ張り、終わってから何度も夕食で祇園にお供させて頂き、美味しいものを御馳走になるなど、遠く群馬の山奥から京にのぼった山猿を親身になって対応していただきました。

3年前には私の長男が同志社大学に入学、スポーツで頑張っていることをご報告に伺った際は、非常に喜んでいただきました。大変、お世話になりました。

ご冥福をお祈りいたします。

本文のなかで書きましたが、困りごとでもがいていると、必ずどなたかが助け船を出していただいたことを思い出します。本書が少しでも恩返しになれば幸いです。

2003年に初めて外部講師のお仕事をアンシスジャパン様でやらせて頂き、日本ゴム協会様、サイバネット様、ニュートンワークス様での講師の経験をさせて頂き、また、非線形 CAE 協会様の勉強会や分科会、ゴム協会の分科会に参加させて頂くうちに、皆様のお困りごとを知るようになり、少しでもお役に立てないかと 2008 年に CAE 解援隊のホームページを立ち上げて、解析に関する情報を発信させて頂き、本年、更に 2018 年分分かり易くするためパワーポイントの資料を掲載できる寺子屋（ゴムの解析、寺子屋で検索）を立ち上げることになりました。

本書は、それらのまとめと共に、体系的なゴムの解析、実務的な注意点が記載される本が少ないことから、少しでもお役に立ちたいとまとめたものです。

出版に際しては、サイバネットシステム様の構造解析、平泉洋行様のゴムの流動解析でのお手伝いをいただき、感謝申し上げます。お忙しい中、こちらのわがままな要望に応じて頂きありがとうございました。また、各方面の方々には掲載許可を頂き、本当にありがとうございます。

バブルの崩壊の当時 1992 年、この FEM 解析を始めたのですがソフトとハードで約1億円のシステムを導入していただきました。こんな若輩者にシステムを与えて頂き、また、いろいろな失敗の経験をさせて頂いたことが今を作り上げてきたと感じています。昨今、失敗が許されない時代で大変かと思います。少しでも近道ができるよう、分かり易く工夫して説明するようにしてきましたが、分かり難い点はパワーポイントの資料のご用意もありますので、ホームページから若しくは直接お尋ね頂き、説明資料をご請求ください。

大変お世話になりながら、お名前を書き切れなかった方々、大変ありがとうございました。今後ともよろしくお願いいたします。

参考文献

随時、各説明のページに文献・出展を明記してきました。正確な文献名まで記載できないものもありましたが、それ以外の参考文献として下記になります。

メカニカルデザイン様小冊子（HP 掲載）も大変参考にさせて頂きましたが、一部本文に出展も記載しています。また、根本の文献は川端先生と河合先生のかかれた **StrainEnergyDensityFunctionOfRubberValcanizateFromBiaxialExtension** ですが、出展が確認できませんでした。文献そのものがありますので、必要でしたら PDF 資料を差し上げます。他、

- 1) Oden, J.T., 非線形連続体の有限要素法 2 (1980) 培風館
- 2) ゴムの物理入門 日本ゴム協会誌 第 80 巻第 1 号(2007)
- 3) ゴムの力学 川端季雄 日本ゴム協会誌 53 巻第 3-11 号(1980)

おわりに

解析を始めてわからない事ばかり、手探りでやってきましたが、何とか皆さんのお力をお借りし助けて頂きながらここまでやってきました。そのなかで、様々な方との交流の中でご指導いただいた知識を何らかの形に残したいと、サイバネットシステム様のご協力のもと本書の出版できることになりました。ゴムの解析は難しいと考えられていますが、コツコツと考えることで解決できないものはないと思いますが、昨今の開発の短期化に伴い解析についてじっくり考察する時間を与えられない時代になってきたのも確かです。

いろいろな方々にお世話になった、そのご恩に対してこの本が少しでもお役に立ちヒントになればと、できる限り多くの情報を丁寧に書いてきました。

私自身、非常に運のいい人間だと考えています。1991年に始まり、ゴムの解析で基本となるエネルギー関数の定義方法を学ぶため、同志社大学を訪問し、坂口一彦先生に出会えたことです。坂口先生は、日本合成ゴム様（現 JSR 様）で川端先生と Mooney さんと一緒にゴムの研究を始められた方で、親身にご指導いただきました。また、ゴムの大変形解析の基礎をフランスの技術提携している会社で学ばせて頂き、更に、分岐点でいろいろな方と出会いご指導いただくことができました。感謝以外の表現がないのが、今の感想です。

“ありがとうございました。”

筆者経歴

このような人間でも、このくらいできるという意味でラフに自己紹介させていただきます。高校を進学校目指して数学と理科だけは好きでしたが、英語や国語、社会は辞書や年表など見れば覚えることもないだろうと、特に英語が苦手な状態で全く勉強しませんでした。

高校は方向転換スポーツで高校に進み、オリンピックも出られるだろうと甚だしい勘違いをしながら、高校ではインターハイへ2回ほど出させてもらい、オリンピックの金メダリスト斎藤仁さん（柔道）を間近に見ながら、挫折して、今度は逃げの一步、大学をスポーツでなく、理科をやりたいと工学部に進みました。

1982年4月 明治大学工学部工業化学科入学

1986年 同大学院工学研究科工業化学専攻で進学、1988年3月修士課程修了。

1988年 株式会社フコク（自動車及びOA、一般ゴム部品メーカー）に入社

防振（マウント、サスペンションブッシュ）設計に3年間配属、研究部発足に伴い参画。主としてFEM解析を主担当として導入提案から立ち上げ、運用に至るまでグループのリーダーとして15年の実務・管理を担当し、防振製品・シール製品・樹脂ブーツ・超音波モーターの解析からの開発者自身の解析システムを効率化ともに推進してきました。設計・開発者ノウハウの構築を設計者と共に行い、解析及びCADの自動化導入による積極的に推進。

2003年～2005年 アンシスジャパン様、ニュートンワークス様、日本ゴム協会様などで講師をさせていただきました。

2005年株式会社フコクを退社、山下ゴム株式会社に入社し、前職の経験を活かしCAE部門技術構築を担当、同様に解析自動化の推進と特性予測精度の向上などに貢献。CAE解援隊HPを2008年より開設し、解析方法、材料データ構築についての技術情報配信に協力しながら、2016年に独立、現在数社のコンサルタント業務と材料測定から解析用エネルギー関数の導出を随時受託しています。

現在、解析の情報サイトを開設し、解析に有用な情報をより分かり易い情報を発信し、特に難しく系統的に説明が少ないゴムの特性定義について、お手伝いを推進していきたいと考えています。本書の分かりにくい面は、問合せサイトから遠慮なくご質問いただければできる限りの説明をさせていただきます。

寺子屋 <https://terakoya2018.com/>
連絡先: hagi@terakoya2018.com

