

# ゴムの FEM 解析

- 初心者から中級者のためのはじめの一步 基本のすすめ -

## はじめに

私の解析への関りは、“有限要素法、それって何？から始まりました。

1991年1月 FEM 解析を社内で立ち上げる部署として、その担当者としてこの CAE/FEM 解析に携わり始めて27年経ちました。特にゴム製品の解析という、材料データ定義から解析に至るまで、大変形&非線形という問題を一つずつ乗り越えて解析の予測精度を向上、解析の効率化を実践してきました。しかしながら、物理系苦手な化学系で大学進学、英語も大学で何度も単位を落としながら再履修でやっと卒業。当時の解析マニュアルはすべて英語で理解することだけで非常に苦労しながら、気が付けば今に至っています。

2000年にあるベンダーさんのユーザー会での発表で大きな反響をいただき、会社からは、“良くわからないけど社外で認められるのはたいしたものだ”ということで、大変動きやすい環境に変わったことを覚えています。

当時、1日20件程度の社内からの依頼、モデル数で100以上、時には1件の依頼書に30モデル位、自動化しないと到底やっていけないという切羽詰まった状況から自動化を推進、精度が確立され自動化から担当者が短時間で解析できる環境を作り出したことで、そこから開発担当者が自ら解析するネットワークをマニュアルと共に作り上げることができました。担当者解析による失敗も数多くありましたが、少しずつ改善を重ねてシステムを作り上げてきました。設計・開発担当者への教育と更なる自動化の推進と手順書により1時間程度の開発者への教育を行うことで、担当製品は開発者に任せて、自部門としては新規・特殊な問題を扱い、そのことで効率的にまわるようになりました。自分の製品を解析することでより大きな気付きにつながったことは、開発者にとってネットワークを構築して非常に大きな成果として感じています。ただ、今考えるとここまで一步一步進んでこれたのは、困りごとがあるともがきにもがいたことが幸いしたのか、その時々で社内外問わず必ず誰かが助けの手を差し伸べて下さったこと、皆さんの助力によるものが大きかったことでした。機密ということがそれほど厳しく問われなかった時代だからできたのかもしれない。

そのため、いつか恩返しができないかと2008年にCAE解援隊のサイトを立ち上げ、ゴムの解析についての有用な情報を発信してきました。本年、さらなる分かり易い情報発信のため、パワーポイントでの情報発信ができる寺子屋のサイト (<https://terakoya2018.com>) を開設しました。これまでのノウハウを可能な限り公開していこうと考えていますので、本書と併せてご活用ください。

本書を書くにあたり、丁寧に分かり易くということを心がけてきましたが、残念ながらうまく表現できていない面もあります。その際は、遠慮せずにHPの問い合わせから説明を求めているいただければパワーポイントのアニメなどで分かり易い説明資料をお送りさせていただきます。

それと共に HP を充実させていきます。

更に、材料サンプルの無償提供などもありますのでご活用ください。

これまでゴムの解析で試行錯誤を重ねた中で、テストピース形状によりヤング率  $E = \sigma / \epsilon$  が必ずしも成り立たないこと、また大変形であるゴム材の特徴からも簡単ではないことが分かってきましたが、当時、解析の立ち上げ段階で、この点だけで2週間近く悩むことができ、悩む時間が与えられたこと、理解ある上司やいろいろな人に支えられ、巡り会いからいろいろと教えて頂けたことを思い出し、感謝しきれません。

ある意味、終活の一環として、皆様への恩返しとしてこれらのノウハウを残せればと、それほどの知識ではありませんが、隠すことなくすべてを書き残したいと考えています。

有限要素法の理論、ソフトのアルゴリズムなどは数学的、物理的な知識が必要ですが、筆者がそこまで説明できるかわかりませんが、丁寧に分かり易く記すことでご容赦いただきたいと考えています。

少し脱線も多いです。全く役に立たない情報かもしれませんが、ある人にとっては重要な情報になりうることをコーヒブレイクとして、

記載しています。これは、いかにいろいろな方々に力をお借りして、どのように考えたかが少しでもヒントになると思います。主としてエネルギー定義の系統的なまとめとゴム特有の問題点を解決しつつ、どのように定義をするか具体的に残したかったこと、ゴムの解析は難しくないことなどを中心に、横道にそれつつ記述させて頂いておりますので、興味のないところは読み飛ばしてください。

(モデル提供もご用意があります)

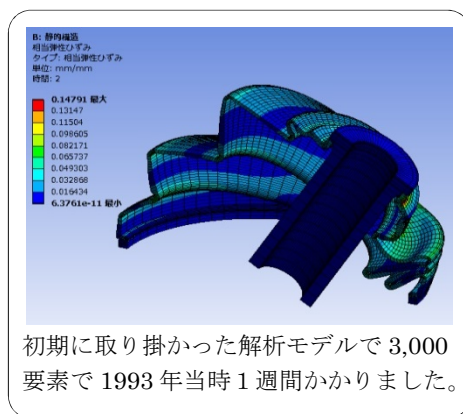
読み飛ばしたら何もなかったということにならないよう頑張って描いております。

数学、物理を逃げてきた道で今の道へ戻りながらの私でも、ある程度皆様に認めていただけるような知識を発信できるかもしれないことを踏まえて、読者の方々はより高みを目指していただけるよう説明を丁寧に入れさせて頂きます。

また、どなたかの言葉ですが、心に残っている言葉としていつも思い返している言葉から“CAEは効率化のツールである。効率化した時間を技術者が考える時間として使うべきもの”というようにツールであって、使うものです。解析システムは電卓です。

昨今の時間の流れのはやいこと、お忙しい技術者の近道を示せればと考えています。

おまけの項に、CAD/FEM 解析の自動化を進め、効率化も推進してきた概要や耐久性についての一つの考察を追加させて頂いております。



高校は進学校にもう少しで届くところでしたが、高校はインターハイも2度ほど出場するような生活で勉強を怠っており、勉強に飢えていた為に方向転換で大学は1年浪人して工学部系に化学で進学、いまは物理系で生活しております。

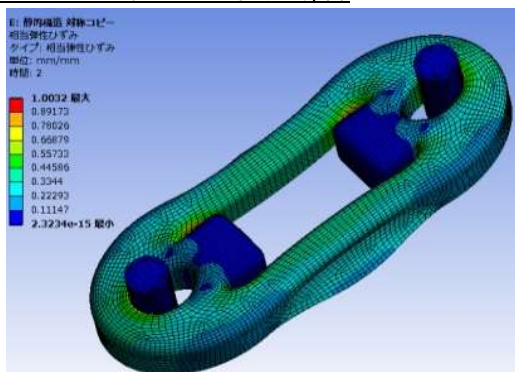
そんな私でも出来た(?)、ということを考えれば、読者の方々はたやすい道(?)かと考えています。様々な見方から説明していますので、少しでも参考・近道に繋がる資料となれば幸いです。不明な点は遠慮なくお問い合わせください。

(巻末連絡先 検索キーワード：ゴムの解析、寺子屋 2018)

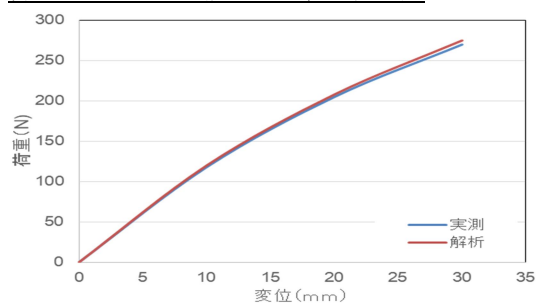
## — 解析事例 —

多くのゴム製品はばね特性を製品規格としているため、変位に対する反力(荷重-たわみ特性)で示すことが多いので、その予測の精度をグラフで表しました。実測と解析が良く一致しているため、グラフ線図が1本に見えることもあります。

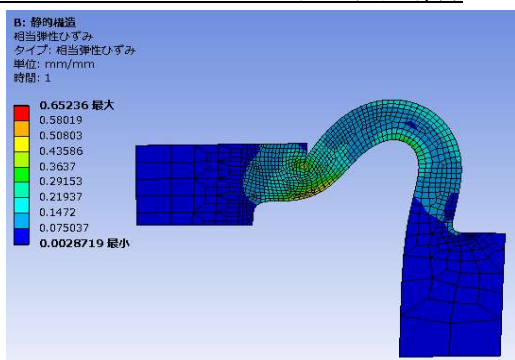
### マフラーマウントの変形解析



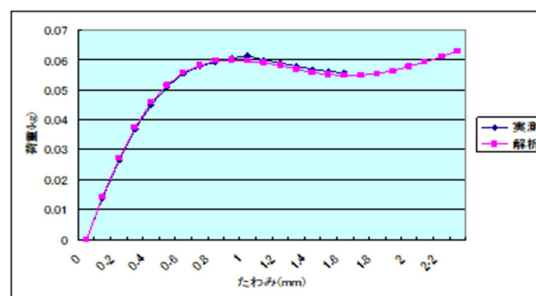
荷重-たわみ特性 (反力と変位の関係)



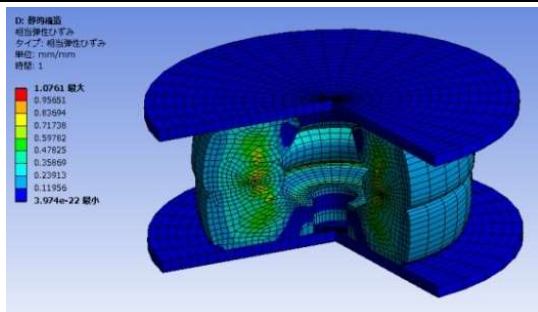
### ラバーコンタクトのクリック特性解析



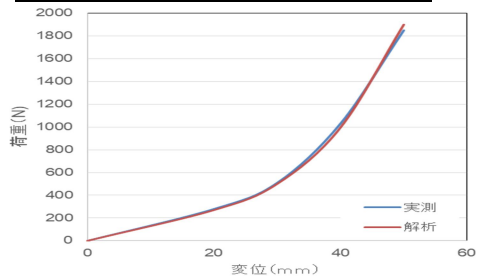
荷重-たわみ特性 (反力と変位の関係)



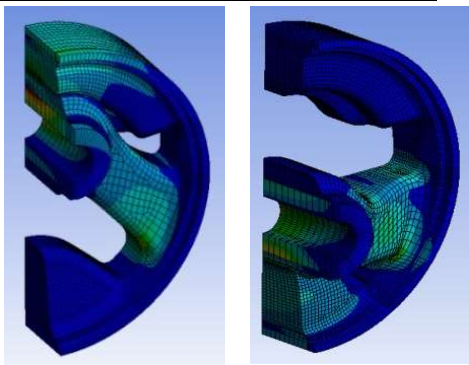
### ラバークッションの変形解析 (50%圧縮まで)



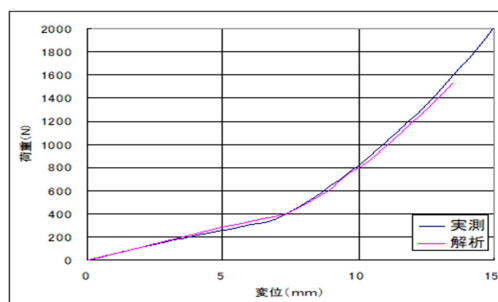
荷重-たわみ特性 (反力と変位の関係)



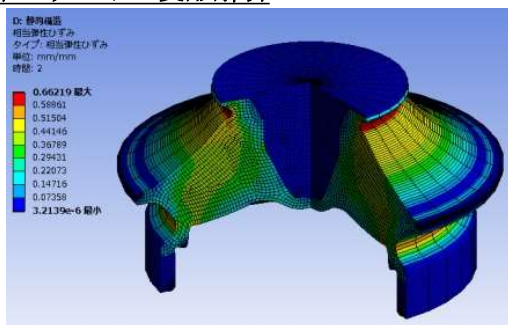
### ハの字型エンジンマウントの変形解析



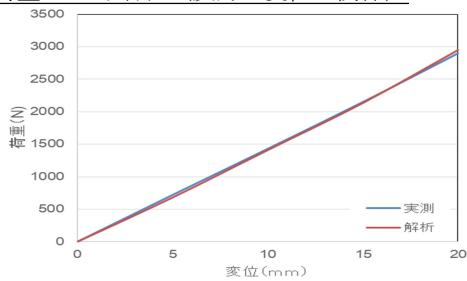
荷重-たわみ特性 (反力と変位の関係)



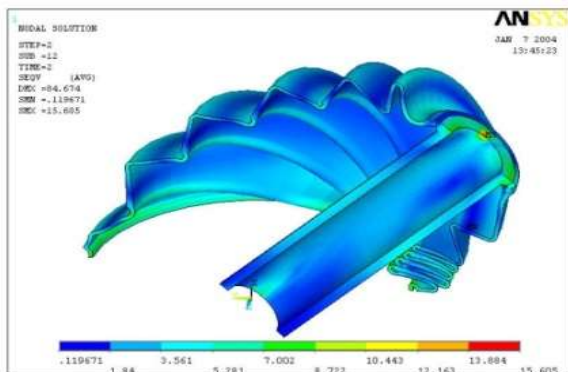
### 円錐マウントの変形解析



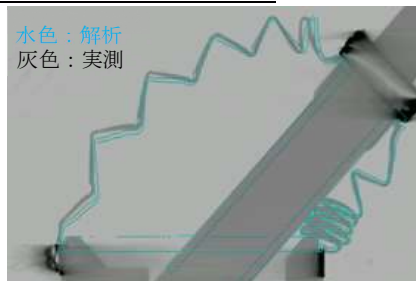
荷重-たわみ特性 (反力と変位の関係)



### 等速ジョイントブーツの変形解析



X線測定での変形形状比較



--- 目 次 ---

## I ゴムの解析用材料データについて

- 1 ゴムと金属材料の違いについて
- 2 ゴムの解析概要            ・ ・ ・ II章の前に少しだけ
- 3 ゴム材料について
  - 1) ゴムとは、ゴムを良く知ること
  - 2) ゴムの特性の基礎
    - ・ 何回目の特性か            ・ ゴムの履歴効果    ・ ゴムの熱時の剛性について
    - \*\*\*\* コーヒーブレイク：硬度とせん断弾性率の関係
- 4 ゴムの物理的材料定義について
  - 1) ゴム材料の定義：エネルギー関数
    - ネオフック式、Mooney-Rivlin 式、Mooney 高次式、Ogden 式など
  - 2) 解析用材料定義、測定から係数回帰の方法
    - ① 変形状態の名称
    - ② 二軸試験の意義
    - ③ 製品が圧縮領域なのになぜ伸張試験で表現するか
    - ④ 二軸試験機について
    - ⑤ 試験機の原理と有効断面について
    - \*\*\*\* コーヒーブレイク：簡易二軸試験機（一軸拘束用）
    - ⑥ 二軸試験から得られるデータ
    - ⑦ どのデータを収集、使用するか
    - \*\*\*\* コーヒーブレイク：二軸試験機の正当性確認
    - ⑧ 実際の回帰例 一軸拘束二軸試験の実際・ ・ ・ 回帰まで
      - 具体的に手順を追って、データ測定から調整、回帰と検証まで説明します。
  - 3) エネルギー関数と特性線図の関係
  - 4) Mooney 式及び Ogden 式の回帰係数とヤング率の関係
  - 5) そのほかのエネルギー表現の工夫
    - \*\*\*\* コーヒーブレイク：エネルギー関数、二軸試験私の関わり合い
  - 6) 各定義式の優位性
    - \*\*\*\*\* コーヒーブレイク ゴムの非線形性の利点
  - 7) 二軸試験ができないとき 一短軸試験への倍数という考え方
    - \*\*\*\*\* コーヒーブレイク ゴムの変形は良く合う変形合う、だから勘違いします
- 5 ゴムの物理的材料定義について ーPart 2 ー
  - 1) ネオフック式での精度

2) ネオフック式の係数  $C_{10}$  定義について

- ① 基本的な共通課題：ゼロ点はどこですか？
- ② ヤング率  $E = \text{応力 } \sigma / \text{ひずみ } \varepsilon$  の式は正しいか
- ③ ダンベルと短冊の違い

\*\*\*\*\*コヒーブレク：材料データの平均ということの弊害

- ④ 短冊以外での測定：伸張測定ではなくディスクの圧縮測定では
- ⑤ 真のヤング率を求めるには

\*\*\*\*\* コヒーブレク：体積弾性率の変化による計算結果への影響

## 6 I章のまとめ：エネルギー関数の定義

## 7 超弾性から粘弾性

\*\*\*\*\* コヒーブレク：この時代の管理者の役割、分業と任せるということ

## II 超弾性体の解析

## 0 概要：：解析の考え方/熱収縮も

## 1 ゴムの解析基本フロー

## 2 加工工程である熱収縮を考慮する理由

## 3 解析条件、金属要素部の定義

- 1) ゴムの解析における金属要素の扱い
- 2) 各パーツの剛性

## i) 解析時のピンの剛性と固定方法

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

## 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

\*\*\*\*\*コヒーブレク：測定によるもう一つの問題

## 4 材料定義における注意点

- 1) 硬度 2) 熱収縮 3) その他

\*\*\*\*\*コヒーブレク：変形解析の副産物としての熱的解析

## 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

- 1) 大変形時のメッシュの切り方
- 2) 必要な細部を表現できるように切る、ということ

\*\*\*\*\* コヒーブレク：メッシングの参考

## 6 拘束条件

## 7 解析ステップ：非線形ゆえのステップの難しさ

## 8 解析結果の見方と注意点

- i) ひずみ出力について
- ii) 金属との境界でのゴムのひずみの見方

iii) 応力と面圧の違い

### III 解析精度を向上させるための因子について

- 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
- 2 寸法公差・剛性公差
- 3 金具の寸法精度と絞り加工
- 4 モデリング

1) 平面応力と平面ひずみ

2) 要素分割の基本と精度の関係

- 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) 分割のちょっとした失敗で剛になる例
- iv) シールリップ部の詳細な先端の変形を確認する解析

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

3) モデル簡略化

- i) クランクシャフトの shell/Beam
- ii) shell要素での布表現

5 結果の見方

----- 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
- 2) 粘弾性データへのつながり
- 3) 解析環境の整備

謝辞

参考文献

おわりに

筆者経歴