振動・音響シミュレーションの事例と ゴム材料のモデル化

井戸 浩 登

Applications of the Noise and Vibration Simulation and Its Constitutive Modeling for the Rubber Material

Hiroto IDO (Siemens K.K., Arena Tower 14F, 3-1-9 Shin-Yokohama Kohoku-ku, Yokohama 222-0033, Japan)
hiroto.ido@siemens.com

This article shows some applications of the numerical simulation for noise and vibration analysis in the industrial design field. In these applications, we often need an adequate constitutive modeling of the rubber material to describe the behavior of the rubber parts accurately. This article introduces an activity of the subcommittee meeting for non-linear material modeling, organized by Japan Association for Non-linear CAE (NPO), which help us to develop/study the modeling of the rubber material in FEM simulations.

(Received on April 22, 2016)

Key Words : FEM Simulation, Acoustic Simulation, Vibration Analysis, Constitutive Models for the Rubber Material, Japan Association for Nonlinear CAE

1. は じ め に

ゴム材料は、安定した品質の部品を安価で大量に生産できる反面、機械設計においては非常に扱いにくい面がある。

機械設計では、構造の形状とその材料特性を組み合わせながら、設計者が意図した挙動を安定して再現させるための諸元を決めなければならない。ゴム材を使った設計は、大変形に伴う接触や座屈、材料における荷重-変位関係の非線形性、温度変化に伴う特性の変化や繰り返し荷重によるダメージ…など、多くの課題を有しており、これらの機械特性を考慮して設計を進め、金型の試作および修正コストを低減するには、高度な構造シミュレーションの技術が必要となる。さらに、商品に実装する段階では難燃性や有害なガスの発生に関する基準もクリアしなければならない。

しかし、製品に必要な機能や性能を「形状」に落とし込むことができれば、他の材料と比べて、幅広い用途で活用できる素材でもある。図面諸元からゴム部材の挙動を

正確に予測できるようになれば、試作レスでの設計検討が可能になり、適用部品の多様性も広がることから、産業界では有限要素法（FEM：Finite Element Method）を中心とした数値シミュレーションを利用する機会が増えてきている。

2. 解 析 事 例

ゴム部材が関係する幾つかの解析事例を紹介する。

2.1 ゴム部材で支持されたパネルの透過音解析

自動車では、グラスランで周辺を支持された窓ガラスや、ウェザーストリップが密着した状態でのドアなどを介して、音が車室内外へ透過する。音は空気を媒介して伝達す

井戸 浩登；シーメンス(株) PLM事業部 シミュレーション&テスト (〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜3-1-9アリーナタワー14階)。1986年、中央大学理工学部精密機械工学科卒業。1986年～(株)豊田中央研究所、1990年～ソニー(株)、2008年～LMS(株)、2015年～シーメンス(株)。専門は、振動・音響工学。NPO非線形CAE協会理事。

るため、実際には支持部材を含むガラスやドアなどの構造体を振動励起することで、音が内外の空間へ伝播する（透過するように見える）。このため、透過音の予測では、構造と音場の連成問題を解く必要がある。閉じた空間を含む透過音の場合、音場と構造振動はお互いに影響を及ぼすため、システム行列において連成項を考慮した「強連成」として解析するのが一般的である（Figure 1）。

このとき、パネルを支持するゴム部材は大きく変形することで密着性を高めるが、変形時の応力-ひずみ関係は非線形を有しており、さほど大きくないひずみ領域であってもパネルの支持剛性は大きく変化する。また、ゴム部材自身の振動特性も透過音に寄与するため、グラスランやウェザーストリップの剛性も考慮しなければならない。

このため、支持部材を含むパネル透過音の数値シミュレーションでは、ゴムの超弾性を考慮して初期変形を求め、その変形と応力状態を考慮したまま動的な解析を行う必要がある。

最初に行う静的な変形解析では微圧縮性を考慮した超弾性を扱うためにゴム材料のひずみエネルギー関数として Ogden モデル¹⁾を使用し、接触部における反力が均一であるかどうかをチェックする。均一な密着度を検証すると同時に、極端な荷重のばらつきが生じている場合は支持剛性

にも影響を与えるため、設計諸元の変更が求められる。Ogden モデルの係数は、単軸引っ張り、均等二軸引っ張り、純せん断の試験データをもとに同定される（Figure 2）。

次に、この変形状態を維持したまま行う動解析においては、ゴム材における剛性の周波数依存性を考慮しなくてはならず、周波数関数としての複素弾性係数や一般化 Maxwell モデルなどの粘弾性モデルが利用される。応力やひずみなどを求める解析では、応力緩和係数を基にモデル化される場合が多いが、振動解析では周波数依存の複素弾性率（貯蔵モジュラス、損失モジュラス）を直接定義するモデルを利用することが多い（Figure 3）。

透過音の評価指標としては、パネル前後のエネルギー比で定義される「透過損失」（TL：Transmission Loss）が用いられる（Figure 4）。パネル前後の音圧差による「騒音減衰量」（NR：Noise Reduction）は音源の特性を含んだ数値となるため、設計対象となる構造体そのものの評価には適さない。また、自動車や列車に用いられている合わせガラスでは、中間層に周波数依存の動特性を持つフィルムが挿入されており、この部分の素材にも周波数関数としての複素弾性係数を定義したモデルが適用される。

従来は、構造と音場の連成解析において、構造をモーダルパラメータで扱うことが多かったが、「構造側で局所的な減衰を定義したい」「高周波数帯域ではモード密度が高

Figure 1 構造と音場の連成解析（透過音）

Figure 3 粘弾性モデルの例

Figure 2 材料試験と材料定数の同定（超弾性）

Figure 4 パネル透過音（透過損失）の予測

いので自由度の低減につながらない」などの理由から、最近ではシステム行列をダイレクトに連成させて解く直接積分法がよく利用されている。

2.2 メカデッキの制振および衝撃緩和ダンパーの設計

光学センサーを有するCD、DVDなどのオーディオ機器におけるメカデッキでは、振動や衝撃を緩和するパッシブな支持機構として、ゴムダンパーが用いられる場合がある。

設計者はダンパーの断面形状を変えることで、要求される緩衝性能を作り込むが、衝撃荷重を想定した設計検討では、接触を含む大変形の挙動を予測しなければならない (Figure 5)。

この解析でも、超弾性体と粘弾性を考慮した解析が必要となり、ゴム材料のモデリングが解析精度に大きな影響を与える。線形システムの振動解析では、経験による減衰値や実験的に同定された減衰値などを用いて解析する場合があるが、振動現象におけるエネルギー消散のメカニズムがダンパーの変形挙動や材料そのもので形成される場合は、システム全体やモードに依存する減衰値ではなく、材料特性の粘性項として扱う方が設計の見通しが良い。このため、ゴム材を超弾性・粘弾性モデルとして扱い、動的な挙動を解析することが多い。

2.3 多層の多孔質材吸音シートを用いた静音設計

吸音材によって騒音の低減を図る場合、単一素材の吸音シートでは、音の波長に見合う厚みを設定しなければ効果

Figure 5 振動・衝撃緩和ダンパー

Figure 6 多孔質材による多層吸音シートの設計

が低い。そこで、多孔質材のシートを多層に組み合わせることで、より薄いシートでも吸音効果をあげるような設計が行われる。航空機の壁内や、建築・自動車の内装に用いられる吸音材をはじめとして、最近では一般的な機械設計でもよく利用されており、とりわけ低減すべき騒音の周波数帯域が既知である場合は、表面に被膜を張り付けることで、任意の周波数での吸音効果を高める検討が行われる。最近ではゴムを利用した多孔質素材や被膜が利用されることもあり、対象となる製品に合わせた吸音シートの開発が行われるようになった (Figure 6)。

この手の吸音材設計では、各部材でそれほどの大変形が想定されるわけではないので、線形材料としてモデル化しても構わない場合が多いが、多孔質材内部の音場を Biot 理論²⁻⁴⁾ で扱う場合は、構造体モデルの材料定数として複素弾性係数などが求められる。Biot 理論は、本来、地震波伝播の研究において、水（圧縮性流体）と土壌（弾性構造体）の間の相互作用によるエネルギー減衰を弾性波伝播理論に導入したものであるが、その後多くの研究者によって音響分野へ拡張された。市販されている音響解析ツールでは Johnson-Champoux-Allard のモデル⁵⁾ に基づく定式化を採用しているものが多いようである。1998年に N. Atalla らが発表した定式化⁶⁾ では、FEM 音響解析において洗練された定式化が導入され、任意形状での構造と流体、被膜間での連成解析が容易に扱えるようになった。現在では、吸排気系のダクトなどで、多孔質材が充填された任意形状の空間における音響特性を予測する事例などが増えてきている。

2.4 駆動伝達機構におけるベルトの振動・騒音解析

ゴムベルトを介して力を伝達する機構において、発生する騒音を抑えるためには、回転変動やトルク変動が加わったときの伝動ベルトの振動を抑える必要がある。このベルト振動を予測するには、実稼働状態において歯車とベルトのかみ合いにより発生する荷重を予測する必要があり、ゴムベルトや歯車プーリーなどの変形体を含む運動・機構解析 (Multi-Body Dynamics) のシミュレーションが利用さ

Figure 7 駆動時におけるベルトの振動解析

れる (Figure 7)。

噛み合い次数の騒音はベルトの弦振動に起因するもので、張力と共に変化するベルトの共振周波数が噛み合い周波数と一致することにより振幅が増大する。起振力はベルトの歯先と歯底の両方で発生することから、それぞれの接触荷重を抑制することでベルト振動の低減を図る。より高い周波数帯域における騒音はプーリーとの隙間にある空気のエントに起因するため、騒音を低減する方法としてはベルトの歯の形状や表面状態による噛み合いの滑らかさの向上や、噛み込み時に空気を逃しやすい構造にする検討が行われる。

3. 数値シミュレーションでの課題と取り組み

市販されている非線形FEM構造解析プログラムでは、ゴム材料を扱うための材料構成則として、あらかじめ幾つかのモデルが用意されている。先の解析事例でも紹介したように、超弾性モデルでは, neo-Hookeian, Mooney-Rivlin, James-Green-Simpson, Ogden, Arruda-Boyce などが、粘弾性モデルでは Kelvin-Voigt モデルや一般化 Maxwell モデルなどが良く知られているが、実際にこれらの材料モデルを数値シミュレーションで利用するためには、その構成則で定義された式の係数を入手する必要がある。

しかしながら、これらの係数を求める試験方法は既存の JIS 試験等では規定されていないものが多く、かつては、ゴム材を提供するメーカーに問い合わせても、その材料定数や試験データを持ち合わせていないという状況が多くみられた。このため、産業界では各解析担当者が自らこれらの材料定数を入手しなければならず、モデル化の妥当性や解析結果の検証を含め、手探りの状態が続いていた。

2005年に特定非営利活動法人 (NPO)「非線形CAE協会」(理事長: 寺田賢二郎教授 (東北大学))⁷⁻⁸⁾ によって「ゴム分科会」が立ち上げられ、産業界から50社ほどが参加して、「材料試験」→「構成則における係数の同定」→「検証解析」→「汎用ソフトでの解析データの作成」を実践する試みが行われた。

当時、ゴム材の二軸引張試験機を有している研究機関は少なく、滋賀県立大学の山下義裕先生や、山梨大学の吉田純司先生の研究室の設備を借りて実験を行った。

この分科会では

- 1) 出典背景のわかる試験データの収集
- 2) 自らが加工可能な電子データの配布
- 3) 汎用のFEM構造解析コードで使えるサンプルデータの作成
- 4) ゴム材料のモデル化に関する基礎理論の勉強と情報収集

を目的とし、市販のメジャーな構造解析コード (ABAQUS, ADINA, ANSYS, LS-DYNA, MSC/MARC) で計算する場合の参考となるように、簡単な解析事例の入力ファイルもデータベースに加えられた。これらの成果に関しては、現在、電子データと共にWEB上で一般公開されている⁷⁾。

実際に設計で用いる素材に関しては、その都度、新たに試験をして材料定数を同定する必要があるものの、その試験方法やデータの加工法、同定作業のプロセスなど…、実務での道筋が明確になったという点では有益であり、また「とりあえず、解析を始めてみたい」という初心者に対しても、ひな形となる解析データが提供されている点は実務的で、産学が共同で運営しているNPOらしい取り組みと言えるかもしれない。

この分科会活動は、金属材料や樹脂材料に関しても拡張しながら、2008年より「材料モデリング分科会」(会長: 吉田純司准教授 (山梨大学))と名称を変えて、継続されている。

金属材料に関しては、市販の構造解析ソフトには装備されていない降伏関数を、汎用のFEM構造解析コードに組み込むための試みとして UMMDp (Unified Material Model Driver for Plasticity) が瀧澤英男准教授 (日本工業大学) より提案され、参加者の有志と共にプログラムが開発&検証されている⁹⁻¹¹⁾。(UMMDpは近日中に公開されると期待している。)

ゴム材に関しても、市販の構造解析ソフトには装備されていない構成則を組み込むための試みとして、寺嶋隆史氏 ((株) 明治ゴム化成) を中心に参加者の中から有志が集い UMMDr (Unified Material Model Driver for Rubber) の開発が行われている¹²⁻¹³⁾ (Figure 8)。

このUMMDrでは超弾性体を軸に、ダメージと粘弾性体の構成則が扱えるようになっており、超弾性ダメージとしての Mullins 効果や有限ひずみ粘弾性などが扱える。UMMDrは、変形勾配テンソル成分を入力すると、Total Lagrangian型の定式化に基づいて第2Piola-Kirchhoff 応力と対応する整合接線係数を計算するが、必要に応じて Update Lagrangian型への変換および相対 Kirchhoff 応力

Figure 8 UMMDrの構成

のJaumann速度に関する接線係数を出力することも可能で、使用する商用コードの仕様に合わせて指定することができる。直前の収束点での内部変数を格納する状態変数は、上位プログラムからUMMDrが呼び出されるたびに更新され、各構成則に依存する変数は下部モジュールとしてサブルーチン化し、UMMDrの主プログラムから呼び出す仕組みになっている。

大学の先生方、ソフトウェア・ベンダーの有志、企業でシミュレーション実務を担当しているエンジニアが、公開されている論文を持ち寄って輪講を開き、自らが手を動かしてプログラムの作成・検証を行う取り組みは、かなりレベルの高いものでありながら、初心者にも参加できるように門戸を開いている点も評価したい。これらの活動を通して、参加者には非線形FEM構造解析の仕組みについての知見が蓄積され、解析レベルの向上が図られているように思う。

4. 最 後 に

ゴム材料は従来から様々な機械部品で利用されてきたが、その豊かな機械特性を再現できる高精度なシミュレーション技術と、各構成則モデルにおける材料定数の入手を含む利用環境が整備されることで、より多彩な設計検討が可能となり、利用範囲が広がって行くことを期待したい。

謝辞

非線形CAE協会および材料モデリング分科会に参加されている皆様のご厚意により、一部のデータを掲載させていただきました。ここに感謝を申し上げます。

References

- 1) Ogden, R. W.: *Proc. Roy. Soc. London A*, **326**, 565 (1972)
- 2) Biot, M. A.: *J. Acou. Soc. America*, **28**, 168 (1956)

- 3) Biot, M. A.: *J. Acou. Soc. America*, **28**, 179 (1956)
- 4) Biot, M. A.: *J. Appl. Phys.*, **33**, 1482 (1962)
- 5) Allard, J. F.; Atalla, N.: "Propagation of Sound in Porous Media (Second Edition)", John Wiley & Sons, New York (2009)
- 6) Atalla, N.; Panneton, R.; Debergue, P.: *J. Acou. Soc. America*, **104**, 1444 (1998)
- 7) Non-Profit Organization "Japan Association for Nonlinear CAE": Hyperelastic & Viscoelastic Data Base for Rubber-like materials(English). <http://www.jancae.org/annex/annexDB/index.html>
- 8) Umez, Y.: *J. Japan Soc. Comp. Eng. Sci.*, **12**, 1527 (2007)
- 9) Takizawa, H.: *Japan CAE Column in EnginSoft New Letter* **8**, 46 (2011)
- 10) Takizawa, H.; Kuwabara, T.; Yoshida, J.: *Transactions Japan Soc. Comp. Eng. Sci.*, **16**, A-5-2 (2011)
- 11) Oide, K.; Takizawa, H.; Yoshida, J.: *Transactions Japan Soc. Comp. Eng. Sci.*, **20**, D-3-4 (2015)
- 12) Terajima, T.; Takizawa, H.; Yoshida, J.: *Transactions Japan Soc. Comp. Eng. Sci.*, **20**, D-3-1 (2015)
- 13) Oide, K.; Kobayashi, T.; Yoshida, J.; Sugiyama, T.: *The 28th Computational Mechanics Conference in Japan Society of Mechanical Engineers*, **122** (2015)

日本語表記参考文献

- 7) 特定非営利活動法人非線形CAE協会：材料分科会公開データベース（日本語） <http://www.jancae.org/annex/annexDB/index.html>
- 8) 梅津康義：特定非営利活動法人非線形CAE協会の紹介 日本計算工学会 学会誌, **12**, 1527 (2007)
- 10) 瀧澤英男, 桑原利彦, 吉田純司：NPOにおける汎用コードへの異方性塑性構成式組込み活動 日本計算工学会 第16回計算工学講演会論文集, **16**, 講演番号A-5-2 (2011)
- 11) 生出佳, 瀧澤英男, 吉田純司：汎用FEMのユーザサブルーチンを使用した異方性材料の解析システム 日本計算工学会 計算工学講演会論文集, **20**, 講演番号D-3-4 (2015)
- 12) 寺嶋隆史, 瀧澤英男, 吉田純司：NPO活動による超弾性体ダメージ粘弾性体構成則の汎用FEMコードへの組込み 日本計算工学会 計算工学講演会論文集, **20**, 講演番号D-3-1 (2015)
- 13) 生出佳, 小林卓哉, 吉田純司, 杉山俊幸：ひずみ・振動数依存性を考慮したゴム材料構成則の汎用FEMへの組み込み 日本機械学会 第28回計算力学講演会論文集, 講演番号122 (2015)