

部品の弾性変形を考慮したサスペンション特性解析

Analysis of Suspension Characteristics Considering the Elastic Deformation of Parts

塚 越 誠* 首 藤 拓 也*
Makoto TSUKAGOSHI Takuya SHUDO

要 旨

サスペンションアライメント特性のシミュレーション計算において、部品の弾性変形を考慮することで予測精度が向上することを確認した。その中で、サスペンションの全主要部材、サブフレーム及びボデーの弾性変形を考慮することによりタイヤ接地点への横入力コンプライアンスを精度良く求めることができ、各部品の寄与度を明確にすることができた。また、ツイストビームアクスルのように大変形をともしなう場合においても、大変形を考慮した弾性体モデル化手法を開発することによりアライメント予測精度を向上することができた。これらの予測手法を設計現場で活用するために、設計解析支援ソフトウェアを開発した。

ABSTRACT

Taking the elastic deformation of parts into account in calculations to simulate the characteristics of suspension alignment was confirmed to improve prediction accuracy. Taking the elastic deformation of the main elements of the overall suspension, the sub-frame, and the body into account made it possible to accurately determine the side force compliance at the tire contact point with the ground, and also to clarify the contribution made by each of those parts. Development of an elastic body modeling method that accounts for significant deformation made it possible to improve the accuracy of alignment prediction, even in parts such as the twist beam axle that undergo significant deformation. Software was developed to assist with design analysis so that these prediction methods could be utilized in practical design work.

1. はじめに

サスペンションのジオメトリ設計を行なう際には、従来より機構解析ソフトでアライメント特性解析を行ってきた。機構解析ソフトを設計者が使うにはデータ作成の負荷が高いため、設計者向けの簡易なデータ入力ツールを開発し、主要なサスペンションポイント座標とブッシュの非線形パネ特性を入力することでアライメント特性解析を容易に行なうことができるようになった。

しかしながらこれまでの機構計算のモデルはサスペンション部品をすべて剛体として扱っているため部品の弾性変形が考慮されておらず、アライメント計算結果に実測との差異が生じることが分かっている。

今回、機構モデルの中にサスペンション部品やサブフレーム及びボデーの弾性体モデルを取り込み、弾性変形を

考慮したアライメント特性解析を行った。また予測精度や各部品の寄与度の検証を行なった。

また車両開発において実用的にこの手法を利用していくためのモデル化技術と、モデル化を容易に行なうことができる設計解析支援ソフトウェアの開発を行なったのでここに報告する。

2. 機構と構造の連成シミュレーション

2.1. 概要

弾性体の変形や応力計算は、モデルの形状を微小領域に分割し、荷重と変形を隣合ったすべての微小領域間で互いに連成させる有限要素法が用いられるが、機構モデルの中で弾性体を利用するためにこの有限要素法をそのまま取り入れることは実用上不都合を招いてしまう。すなわち機構

モデルは静的、動的にかかわらず時刻歴に沿って動くものを扱う計算をするので、すべての計算ステップにおいて弾性体の変形状態を計算する必要があり、計算量が膨大になるため実用的なターンアラウンドが得られない。そのため現在の機構解析ソフトでは、弾性体を機構モデルに取り込む方法としてモード合成法が用いられている。

2.2. モード合成法

一般に部材の弾性変形はその固有モードの重ね合わせで表現出来るが局所変形を表現するには高周波数成分まで含む非常に多くの固有モードを取込む必要がある。サスペンション部材のように荷重入力点が明確な場合は、その点への入力による変形モード(即ちスタティクコレクションモード)と比較的少数の固有モードの重ね合わせで局所変形まで精度良く表現出来ることが知られている(1)。この手法は主に振動解析で使われる部分構造合成法のうちの拘束モード法に相当する。この手法を用いることで通常数万から数十万の自由度を有する FEM モデルから採用モード数だけの自由度を有するモデルへと大幅に自由度数を減らすことが出来る。

2.3. モードの選択について

サスペンション特性解析で用いる静的な力学的つり合い計算では慣性による自由振動は起こらないので、すべての荷重入力点に対するスタティクコレクションモードの重ね合わせのみで部材弾性変形を十分表現出来ると予想される。それを確認するため二つの解析を行った。まずダブルウィッシュボーン形式サスペンションのナックル及びロアアームを弾性体としてモデル化しスタティクコレクションモードのみを用いて解析した場合と最低次から3番目までのノーマルモードを同時に含めて解析した場合とを比較し、アライメント変化に差が出るかを見た。接地点に横力をかけた際のトー角変化を Fig. 1 に示す。どちらの場合でも差がないことを確認出来た。他の特性についても同様である。

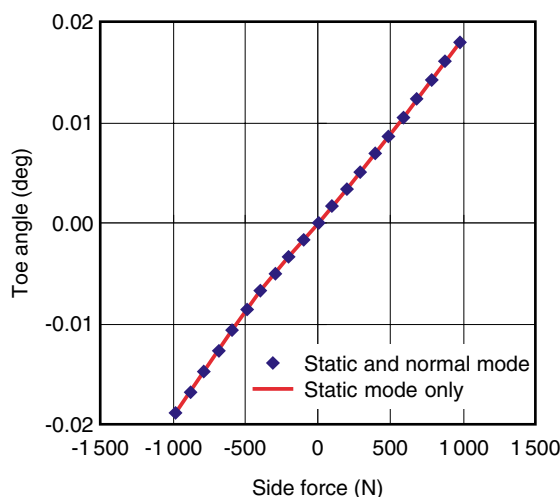


Fig. 1 Comparison of alignment

次にフロントがダブルウィッシュボーン、リアがマルチリンク形式のサスペンションでボデー、サブフレーム、主要サスペンション部材を弾性体とした4輪モデルでスタティクコレクションモードのみを用いて解析した場合と 100Hz までの固有モードを同時に含めて解析した場合を比較し、サスペンション部材のボデー取付点の変位に差が出るかを見た。接地点に横力をかけた際の取付点の変位を Fig. 2 に示す。どちらの場合でも差がないことを確認出来た。

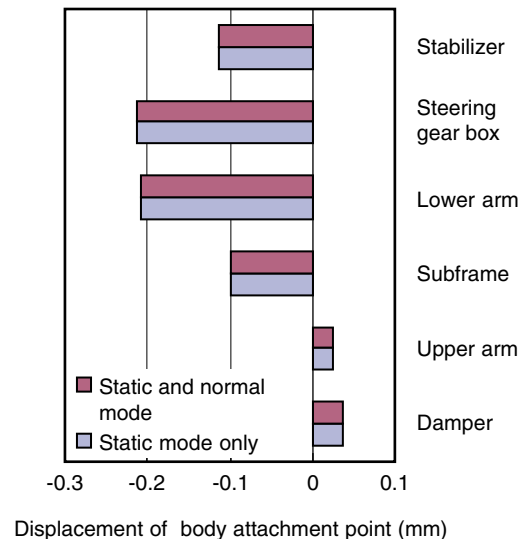


Fig. 2 Comparison of displacement

3. 予測精度の検証

3.1. 弾性体を取り入れた場合と取り入れない場合の比較
弾性体として働くアームを含むサスペンションを用いてアライメント特性の検証を行なった。アームを弾性体としてモデル化した場合と剛体としてモデル化した場合の前後力対トー角比較結果を Fig. 3, 横力対トー角の比較結果を Fig. 4 に示す。

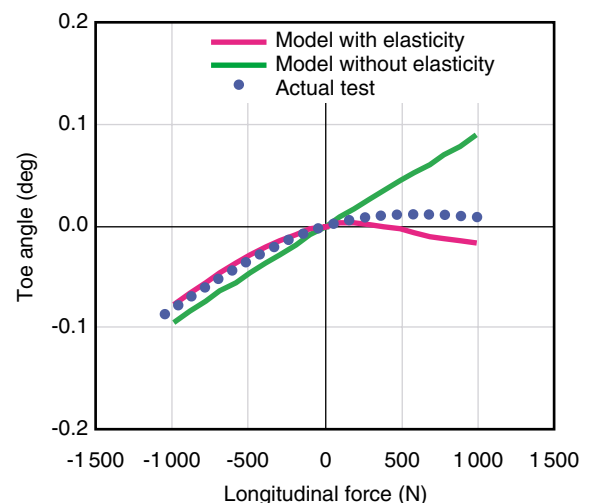


Fig. 3 Comparison of toe angle vs. longitudinal force

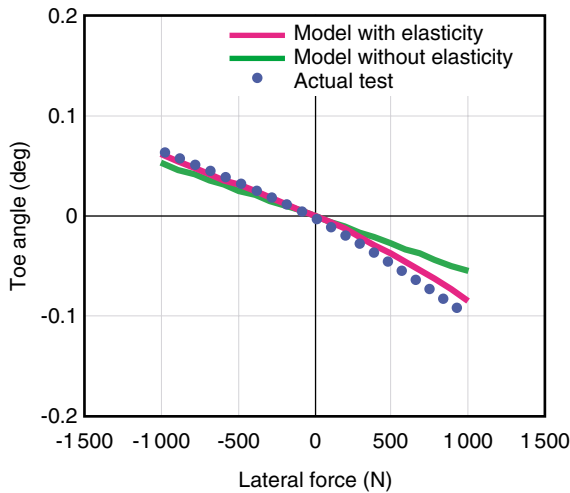


Fig. 4 Comparison of toe angle vs. lateral force

アームを剛体としたモデルは変化率が直線的になっているのに比べ、弾性体を取り入れたモデルは前後力の向きによって特性が変化する様子が実測と同様に表われている。これはブッシュの前引き方向と後引き方向のバネ剛性の差により、ブッシュのたわみと弾性体の変形量のバランスが変化したためと考えられる。

3.2. 弾性体の剛性違いの比較

サスペンション部品の軽量化対策などで板厚や部品形状が変更されるとアライメント特性へも影響を及ぼすことが分かっている。そこで弾性体の剛性を変化させ特性の変化を比較検証した。検証の際ベースに対して明らかな差を出すため剛性が大幅に変化するように改修を行なった。モデルにも同様の改修を行ない、アライメント特性の比較を行なった。前後力対トー角の比較結果をFig. 5に、横力対トー角の比較結果を Fig. 6 に示す。

結果として弾性体部品の剛性の違いによるアライメント特性への影響度合いを忠実に再現していることが確認できた。

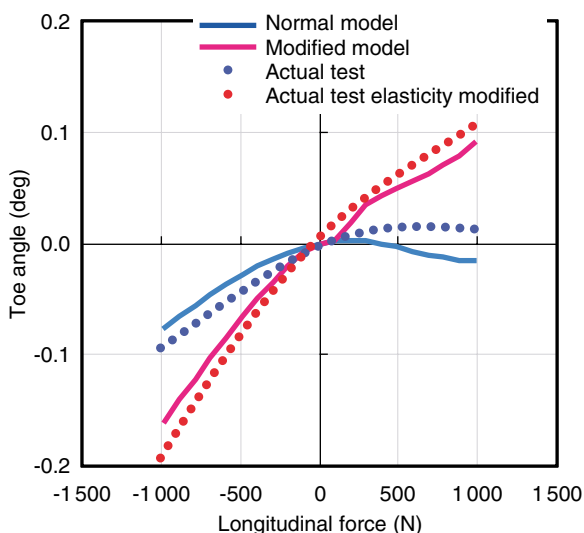


Fig. 5 Comparison of toe angle vs. longitudinal force

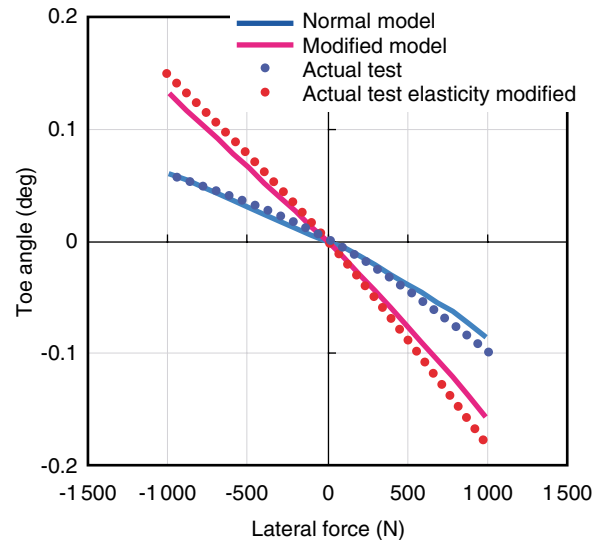


Fig. 6 Comparison of toe angle vs. lateral force

3.3. 接地点横剛性の予測精度検証

ボデーやサブフレームの弾性変形の影響を受けるとされている接地点横剛性について、計算精度の検証と各部剛性の寄与度の分析を行なった。

接地点横剛性は官能評価において車両の旋回応答性に影響があるとされるひとつの指標である。計測方法はタイヤの代わりに剛体とみなせる金属の円板を取り付け、接地点に相当する位置から横力をかけて横変位を測る。従ってここで測定されるのはタイヤの変形量を含まない車両のみの特性である。

変位の因子としてサスペンションブッシュやサブフレームマウントブッシュのたわみ、ナックルやアームなどサスペンション部材の弾性変形、サブフレームとボデーの局所的及び全体的な弾性変形が考えられる。今回のモデルでは全てのサスペンションアーム、サブフレーム、ボデーを弾性体として扱った。モデルの概観を Fig. 7 に示す。

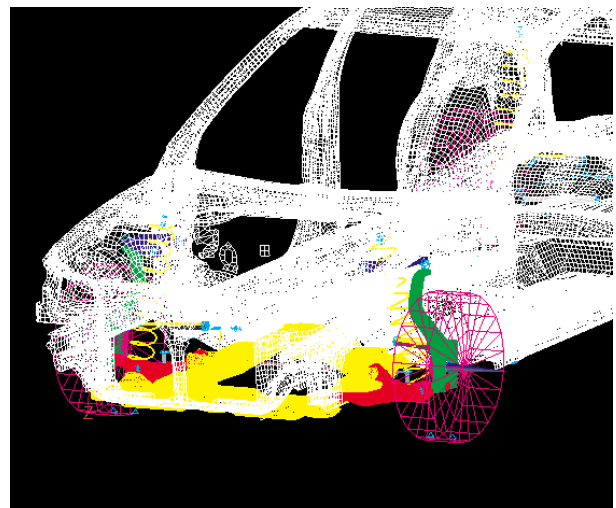


Fig. 7 Simulation model including elasticity of body, sub-frame and suspension

検証結果として弾性体を取り入れたモデルは剛体として扱った場合に比べ、きわめて実測に近い特性を示すことが確認できた。フロントサスペンションの横力対接地点横変位を Fig. 8 に示す。また、弾性体を全く含まないモデルからひとつひとつ弾性体にしていき変位量の変化を追うことで各部品の寄与の大きさを確認することが可能である。

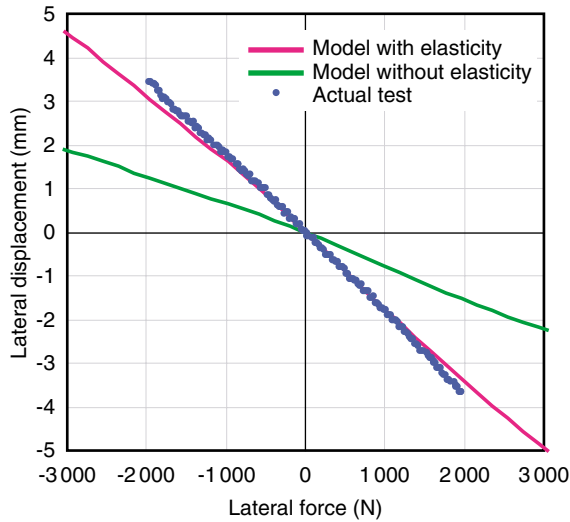


Fig. 8 Lateral compliance of front suspension

3.4. ツイストビームアクスルのモデル化について

ツイストビーム式のサスペンションでは左右輪が逆相にストロークする場合、ビーム部分に大きなねじれ変形が発生する。線形微小変形を想定している FEM モデルではこのような大きな弾性変形の際には初期位置からの微小変形形態がそのまま線形に拡張されるため、Fig. 9 に示すように実際とはかけ離れた変形形態になってしまう。従って、この部分を単に弾性体としてモデル化するだけでは不十分である。そこで、ツイストビームの FEM モデルを Fig. 10 に示すように数個に分割し、機構解析ソフト上で再び結合するというモデル化手法によって解析した。モデルの概観を Fig. 11 に示す。

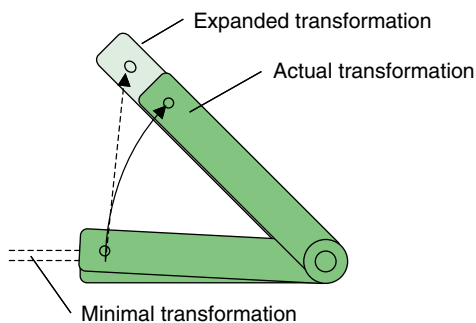


Fig. 9 Side view of twist beam axle

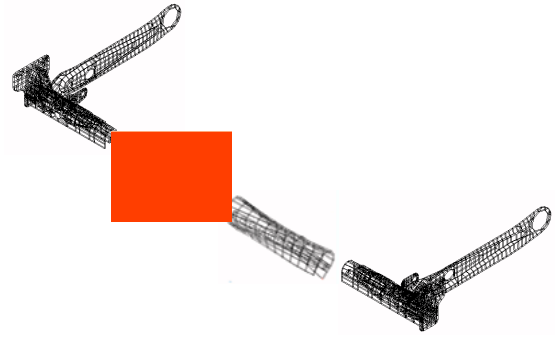


Fig. 10 Segmented FEM model of twist beam

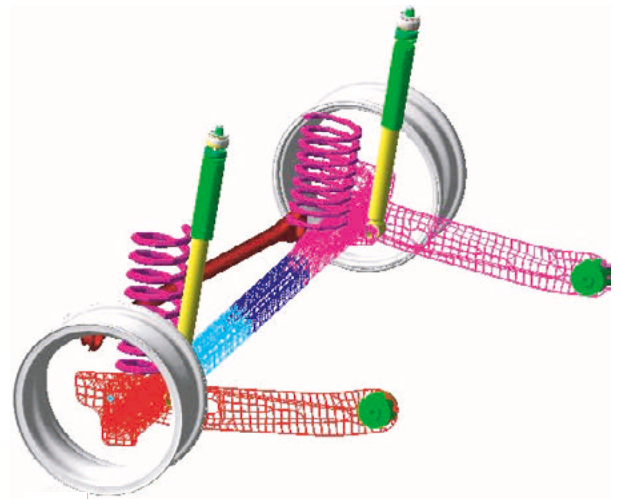


Fig. 11 Suspension model with multi FEM segments

分割した FEM モデルそれぞれのスタティックコレクションモード算出を行なった後、複数の別個の弾性体としてサスペンションモデルに取り込み、分割面上の要素どうしを機構解析ソフト上で結合した。こうすることで大変形時の部品の弾性変形と、分割された各部の独立した移動と回転の運動とが同時に表現できるようになり、計算精度が向上することを確認できた。サスペンションを左右逆相でストロークさせたときのホイールセンタ軌跡の比較を Fig. 12 に示す。

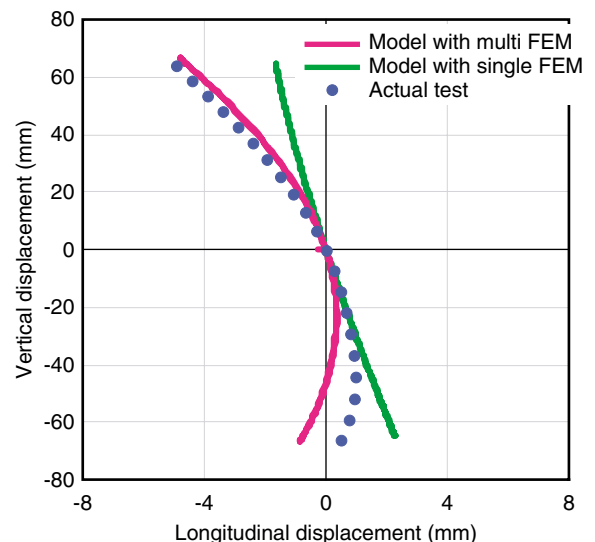


Fig. 12 Wheel center locus from side view

4. 設計支援ソフトウェア

4.1. 概要

機構モデルに弾性体を取り込んで解析する技術はシャーシ開発に大変有効ではあるが、解析者は機構解析及び構造解析両方のスキルを必要とする。そのため、一般の設計者が利用するのはかなり困難である。一方、サスペンションの機構解析やサスペンションアーム単体の FEM 解析は普及した技術であり、それぞれのモデルは日常的に作成されている。従ってこれらを簡便かつ効率的に結合、計算、後処理することができれば、設計者にとって実用的な解析技術になる。そこで機構モデルに FEM モデルを取り込むプロセスを自動化し、さらに計算、後処理まで一括して行なうソフトウェアを開発した。Fig. 13に全体の処理フローを示す。処理の流れとしては大きく3段階あり、(1)FEMモデルの前処理(2)FEM計算と機構モデルとの結合(3)結合モデルの計算と後処理 となっている。ソフトウェアの操作画面を Fig. 14 に示す。

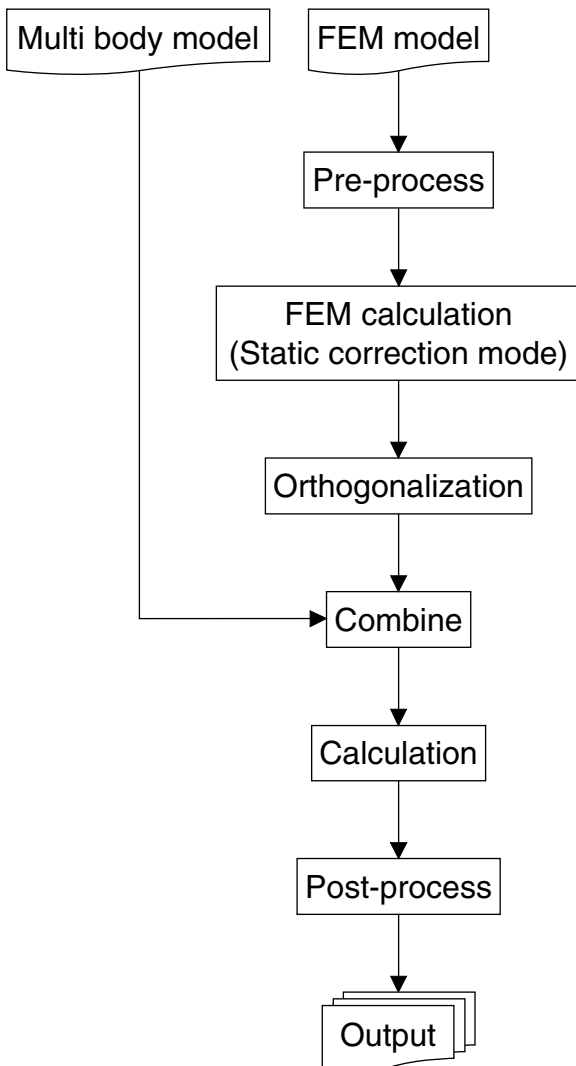


Fig. 13 Flow chart of automated process

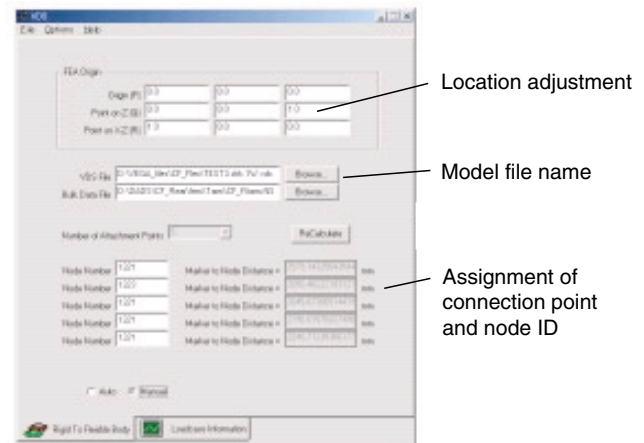


Fig. 14 Software operation panel

4.2. 座標変換と鏡面モデル生成

機構モデルと FEM モデルの結合時に元のモデルの基準座標系が異なる場合は、互いの取付点が一致しないという問題が発生する。従って一致するようにどちらかを座標変換しなければならない。そこでソフトウェアが FEM モデルの節点座標を機構モデルの座標系に変換して書き換える。また、4 輪モデルでは左右 2 輪分の対称な FEM モデルが必要となる。このため片側のみの FEM モデルから鏡面对称な FEM モデルの生成を行なう。

4.3. 節点番号自動検索と境界条件生成

機構モデルと FEM モデルの結合にあたり、両者の取付点(ジョイント及びブッシュ)定義に FEM モデルの節点番号の情報が必要である。これを既存の FEM モデルから得るにはそれをプリプロセッサに読み込んで節点情報を調べる必要があった。しかしプリプロセッサの操作は一般の設計者には馴染みのないものである。そこでソフトウェアが FEMモデルの節点座標を読み取って機構モデル側の各取付点座標位置と比較し、一番近い節点を自動的に探し出し一覧表示してユーザに知らせる。表示の例を Fig. 15 に示す。また、ここで決定された節点番号を元に、FEMモデルからスタティックコレクションモードを算出するための境界条件設定もこのとき同時に生成する。

Point	Point Coordinate	Node Number	Distance (mm)
"A"	2188	8649	0.00
"E"	2744	8653	0.10
"F"	2576	8651	0.00
"D"	2711	8650	0.00
"S"	2521	8652	0.04

Fig. 15 Automatic search of node number connected to multi-body model

4.4. 取付点座標ずれ修正

設計検討のプロセスで弾性体との取付点の座標値を変更したい場合、通常では機構モデルと FEM モデル両方の変更が必要となる。そこで Fig. 16 に示すように FEM モデル側の節点座標を機構モデルと一致するように自動で書き換えを行なう。またこれにより、微小な範囲ならば FEM モデルを作り直すことなくデータ入力ツールの座標値を変更するだけで取付点の異なるモデルを生成できる。

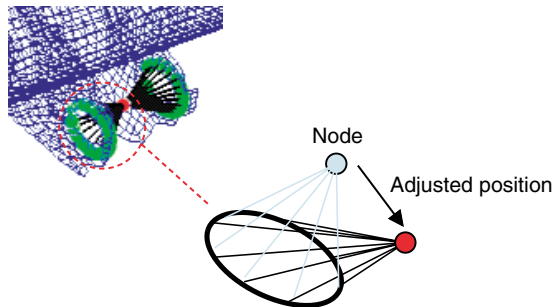


Fig. 16 Automatic adjustment of node's local position

4.5. 弾性体自動分割

ツイストビームの FEM モデルを使用する場合は、ユーザは分割を開始する端点の節点番号を指定する。ソフトウェアは端点の節点から分割面沿いに隣り合う節点を検索し、それを境にモデルを分割する。また分割面は後に機構ソフト上で再び結合させるのを容易にするため、節点をいくつかの剛体要素にまとめる。切断面の処理の様子を Fig. 17 に示す。

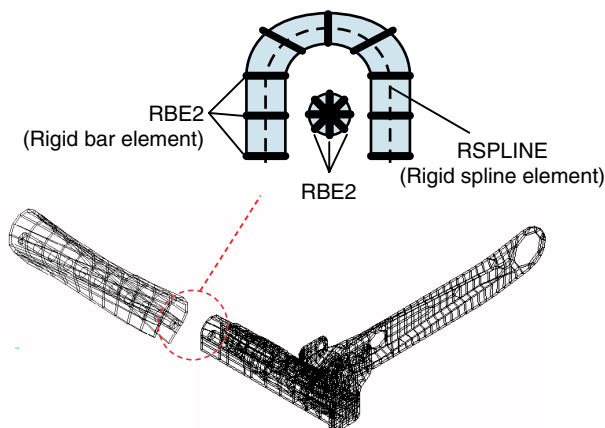


Fig. 17 Arrangement of elements at section

4.6. FEM 計算とモデル結合の自動化

前処理の終了した段階で計算実行を指示すると、FEM ソルバに渡されスタティックコレクションモードを計算する。計算結果ファイルは機構モデル内に読み込まれて対象の剛体部品との置き換えが行なわれ、機構と弾性体の結合モデルが作成される。結合モデルの例を Fig. 18 に示す。

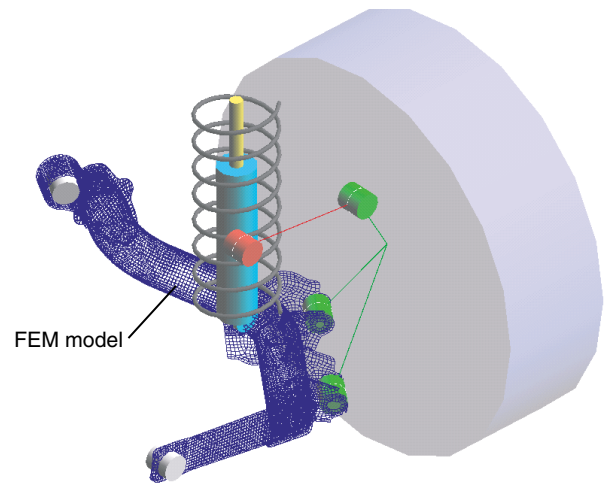


Fig. 18 Combined multi-body and FEM model

4.7. 結合モデルの計算と後処理

結合されたモデルは引続き機構解析ソルバに渡され静的な時刻歴挙動(Quasi-static)が計算される。計算後に設計者が確認したい項目は、計算結果から必要な項目を抜き出して定型化されたスプレッドシートを生成し、性能評価に必要な各種の表及びグラフが容易に得られるようになっている。

グラフ出力の一例を Fig. 19 に示す。

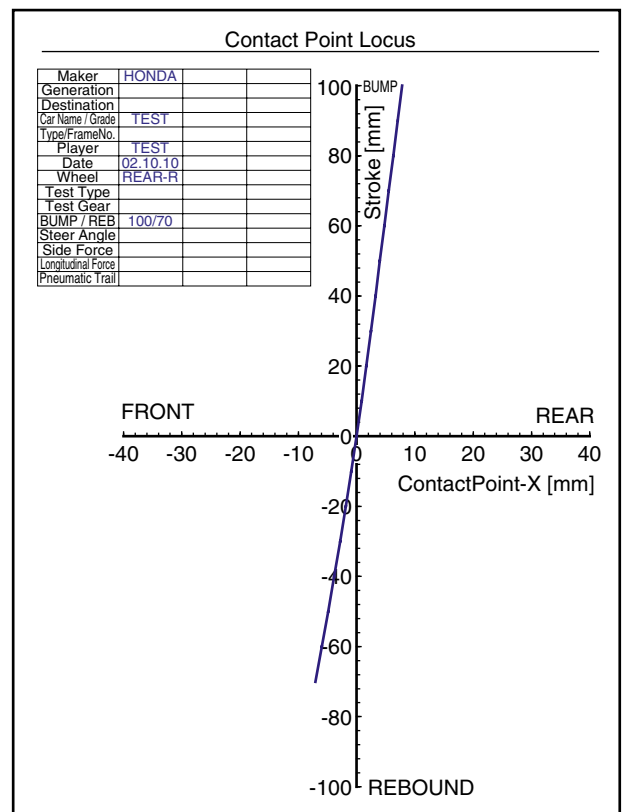


Fig. 19 Example of result output

6. まとめ

機構モデルの中に弾性体を取り込んで弾性変形を考慮することにより、サスペンション及びシャーシの解析精度が大きく改善することがわかった。接地点横剛性のようなボデー、サブフレーム及びサスペンション各部の剛性がすべて寄与する特性においてもそれらの FEM モデルを機構解析ソフト上で組み合わせることで接合部ブッシュの非線形バネ特性を含めてモデル化することが可能であり、これにより個々の弾性体部品はそれ自体の弾性変形と、非線形ブッシュのたわみによる部品全体としての移動、回転の運動を同時に考慮した計算を行なうことができる。このことは FEM 解析ソフトで同様に複数の FEM モデルを統合し、一つの大きな線形 FEM モデルとして計算した場合よりも精度良い結果が得られることを示している。

またツイストビームのような大きな弾性変形を伴うサスペンションの解析に非線形 FEM 解析技術を用いずに従来の線形 FEM モデルでも実用的に使用できる分割化によるモデル化手法を構築した。これには煩雑なモデル作成作業が必要であるが、結合に用いる FEM モデルをあらかじめ読み込んで結合点情報の読み取りや加工を行ない結合モデル作成までを自動で行なうプログラムを開発することにより実用的な技術とすることができた。

参考文献

- (1) Craig, R. R., and Bampton, M. C. C.: Coupling of Substructures for Dynamic Analyses, AIAA Journal, Vol. 6, No. 7, p. 1313-1319(1968)

■著 者■



塚越 誠



首藤 拓也