

研究報告

FOAのサスペンション機構設計への応用

杉浦豪軌，水谷義輝，西垣英一

First Order Analysis for Automotive Suspension Design

Hideki Sugiura, Yoshiteru Mizutani, Hidekazu Nishigaki

要 旨

トーションビーム式サスペンションは，FF車の後軸用として世界的な主流になっている。この方式のサスペンションでは，左右のトレーリングアームをつなぐトーションビームを，コーナリング時には剛に，段差乗り越し時には柔にするような設計の最適化が求められる。ここでは，設計者が簡便に扱える，本サスペンション用に開発したFOAソフトを紹介する。

キーワード サスペンション，トーションビーム，設計，FOA

Abstract

The elastic properties of a torsion beam suspension determine the kinematic performance of the suspension. In this paper, we introduce a design program for the torsion beam suspension based on the FOA concept, and confirm its usefulness using simple examples and experimental evaluations.

Keywords Suspension system, Torsion beam, Design, FOA

1. まえがき

FF車のリヤサスペンションとして，世界的にみても多く用いられているトーションビーム式サスペンションは，少ない部品点数と簡素な構造を特長とする (Fig. 1)。本サスペンションは，ボデーにブッシュを介して取り付けられる2本のトレーリングアームと，それらを連結する1本のトーションビームから構成されている。トーションビームは，コーナリング時の横力を支える剛性を求められるのと同時に，段差乗り越し時に左右輪を別々に変位させるよ

うな柔軟性も求められる。したがって，トーションビーム式サスペンションを設計する場合には，構成が単純な反面，構成部材の剛性と柔軟性の相対的なバランスを十分に考慮することが必要となる。サスペンションの企画段階において，アライメント変化やコンプライアンスステアに関する性能予測計算は必須であるが，構成部材の剛性バランスの影響を受けるトーションビーム式サスペンションの場合にはそれが一層重要となる。

トーションビーム式サスペンションの機構的な特性を計算する手段として，有限要素解析や機構解析¹⁾が

用いられてきた。しかしながら、多くの設計者にとって、企画段階において有限要素モデルや構成部材の弾性特性を考慮に入れた複雑な機構解析モデルを作成し、それらを使って計算することは、時間的にも技術的にも大変な労力が必要となり、困難なことが多い。

そこで、本研究では、モデリングや解析に関する専門の知識や技術がなくとも取り扱いが可能な設計者向けCAEとして、ファーストオーダーアナリシス (First Order Analysis)²⁾を提案するとともに、トーションビーム式サスペンションを対象にしてサスペンション特性を算出する設計ツールを開発し、例題や実験検証をもとにその有効性を確認する。

2. トーションビーム式サスペンション用FOA

2.1 設計対象の階層的情報構造

従来型のCAEにおけるモデルの構成は、部材の位置情報もその部材の単体としての情報（断面特性や材料特性など）も混在した形である。FOAにおいては、設計対象をFig. 2に示すような階層的な情報構造により構成し、効率的かつ簡単な操作性を実現している。すなわち、階層における最上層ではレイアウトなど全体構成に関する情報のみを扱う。部材に関してより詳細に検討したい場合には、その下の階層に移り、特定の部材ごとについてのみ検討することが可能である。最終的には、最下層、すなわち、ある部材に特化された設計対象を設計者が操作することで、最上層、すなわちサスペンション全体の情報に紐込まれ、特定部材ごとのサスペンション全体に及ぼす影響を解析することが可能となる。

このような階層的情報構造は、設計者が常用するパソコンの表計算ソフトMicrosoft / Excelのスプレッドシートを利用すれば容易に実現できる。

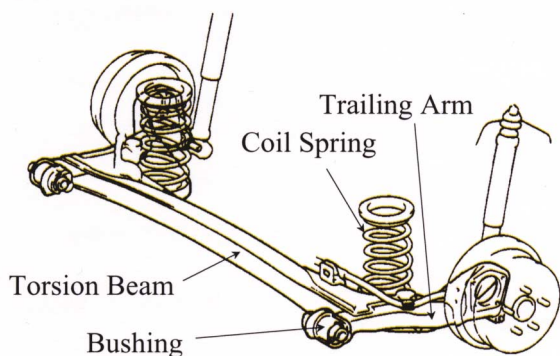


Fig. 1 Torsion beam suspension.

2.2 設計ツールの具体的な構成

FOAの具体的な構成例をFig. 3に示す。Fig. 3(a)が最上層のシートであり、シート上のスクロールバーをマウスで動かすという簡単な操作で、各部材のレイアウト等、全体構成について設計案を入力することができる。ここで、例えばトーションビーム単体に関して検討する必要がある場合、表示されているトーションビーム部分をクリックすることにより、Fig. 3(b)に示すシートに切り換わり表示される。このシートにおいて、トーションビーム固有の断面形状、材料特性、湾曲量、補強の有無などの情報を入力することによってトーションビームの全体形状を検討し、後述する自由度縮退計算により、開き断面形状特有の力学的特性を考慮しながらサスペンション全体の設計案に紐込むことができる。ここで、さらに断面形状を変更するのであれば、シート上の断面形状をクリックすることで、Fig. 3(c)に示す開き断面専用の編集シートが表示される。このシートでは、一般のCADプログラムと同様のマウス操作を用いた断面形状編集機能だけでなく、後述する断面二次モーメント、断面二次極モーメント、図心、せん断中心等の断面特性計算機能も持ち合わせているため、設計変更ごとに表示される特性値を参考にしながら断面形状を検討することが可能である。その他の部品、トレーリングアームについても同様な手順で設計検討を進める。ブッシュやコイルスプリングは、最上層でその位置を決めれば、あとはブッシュ剛性やバネ定数を決めるのみとなる。

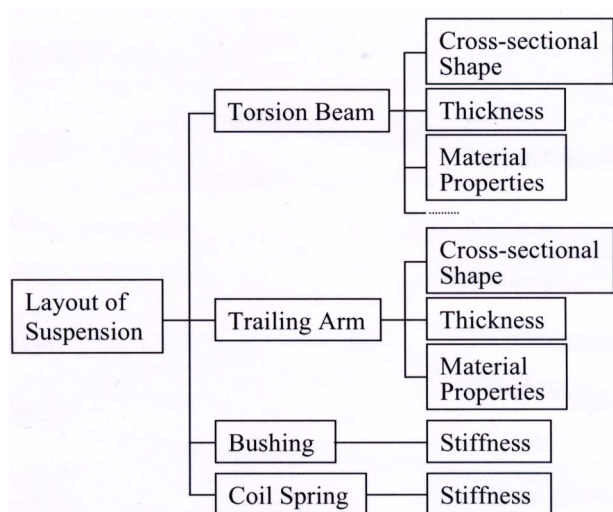


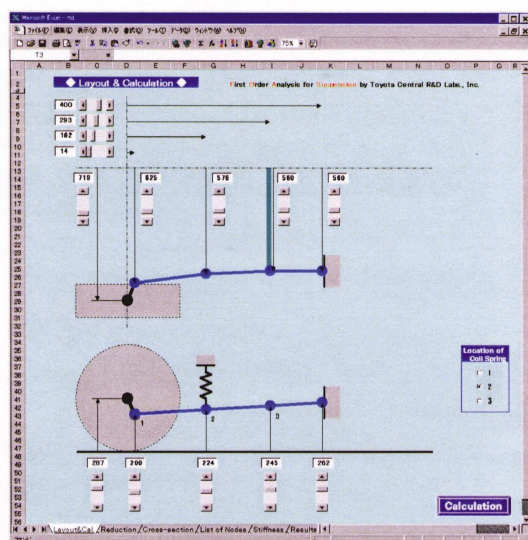
Fig. 2 Hierarchical data structure of torsion beam suspension.

2.3 設計対象の特性解析

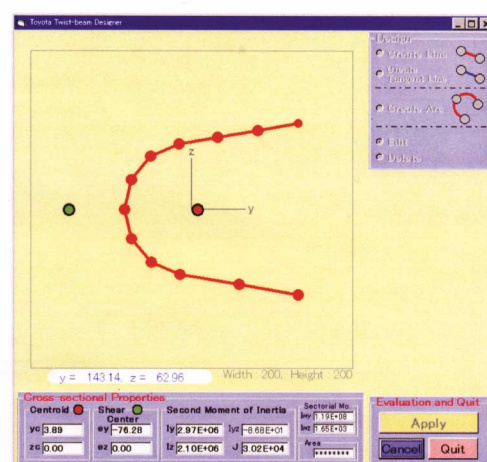
上記の手順により設計案が出来上がったら、本設計ツールの最上層に戻り計算ボタンをクリックすることで、コンプライアンス特性やアライメント変化などのサスペンション特性が計算され、Fig. 3(d)に示すシート上に表示される。ここでは、サスペンションを複数の梁要素と剛性マトリックスにより表現して、適切な境界条件を与えた上で、線形有限要素解析によりコンプライアンス特性を、非線形有限要

素解析によりアライメント変化を計算している。いずれの計算もパソコン上で動作する内製ソルバーを利用したものであり、計算時間も長くて十数秒である。

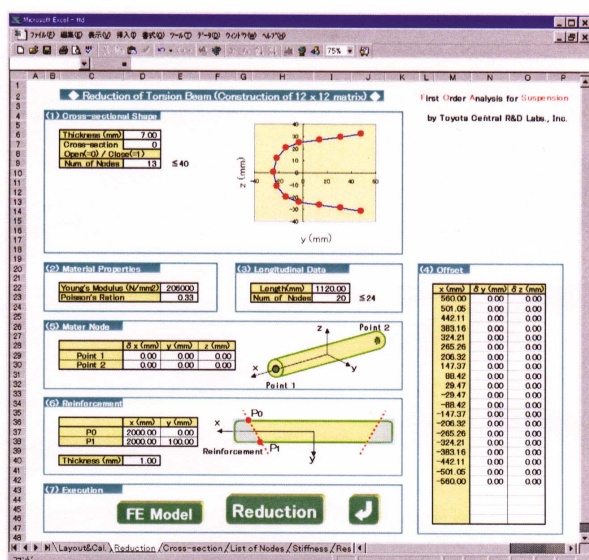
以上がFOAの考え方に基づいた本設計ツールの操作手順である。さらに、開き断面形状のトーションビームに関しては、前述したように、専用の計算機能を用意して設計者を支援できるように考慮している。以下にその計算方法について簡単に述べる。



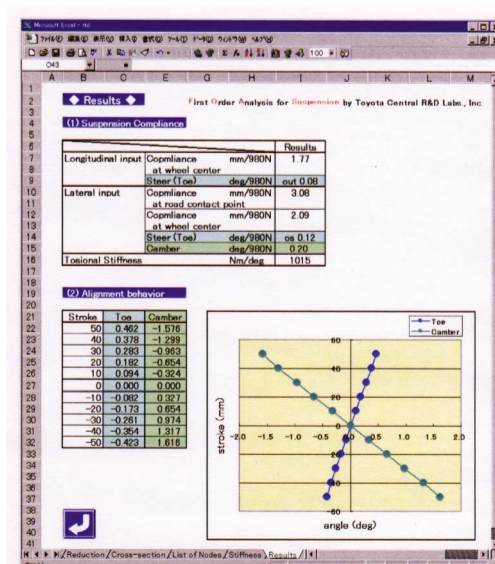
(a) Top sheet



(c) Sheet of CAD for cross-sectional design



(b) Sheet for torsion beam design



(d) Sheet for numerical results

Fig. 3 Design program for torsion beam suspension.

2.4 断面特性計算

一般的なトーションビームは、ねじり剛性を低くする目的で開き断面形状となっている。その断面特性において、トーションビームの剛性バランスを示す断面二次モーメントと断面二次極モーメント、そして、アライメント変化に大きな影響を及ぼすせん断中心は重要な指標である。本プログラムで用いた計算方法について以下に述べる。

Fig. 4に示すように、トーションビームの断面を、 $y-z$ 座標系上において $n_{\max}$ 個の線要素群で表現する。 n 番目の線要素の板厚を t_n とし、各線要素をさらに $k_{\max}$ 個に分割した上で、分割されたそれぞれの小線要素の図心を (y_{ck}, z_{ck}) とし、小線要素の長さを Δs_k とする。Oden³⁾によれば、このときの断面二次モーメントは、

$$I_y = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} \frac{z_{ck}^2}{1 - y_{ck}/R} t_n \Delta s_k \quad (1)$$

$$I_z = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} \frac{y_{ck}^2}{1 - y_{ck}/R} t_n \Delta s_k \quad (2)$$

$$I_{yz} = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} \frac{y_{ck} z_{ck}}{1 - y_{ck}/R} t_n \Delta s_k \quad (3)$$

として計算される。ここで、 R はトーションビームの長手方向の曲率半径である。他方、断面二次極モーメントについては、開き断面の場合、

$$J = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} \Delta s_k t_n^3 \quad (4)$$

閉じ断面の場合、

$$J = \left(\sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} r_k \times \Delta s_k \cdot i \right)^2 / \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} \frac{\Delta s_k}{t_n} \quad (5)$$

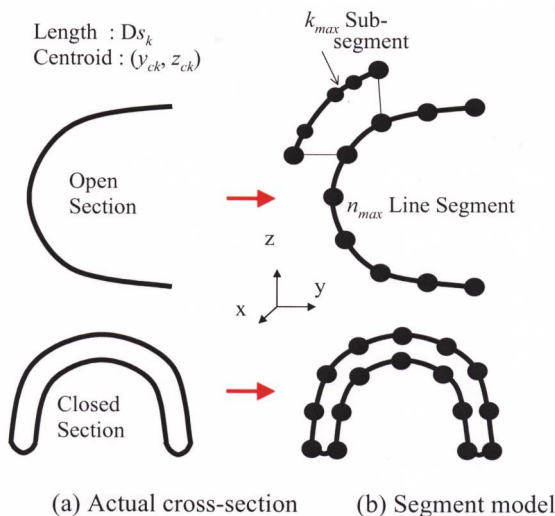


Fig. 4 Cross-sectional model using line segments.

となる。ここで、 r_k は小線要素 (s_k^n, s_{k+1}^n) の方向ベクトル、 Δs_k は小線要素 (s_k^n, s_{k+1}^n) の両端を結ぶベクトル、 i はビーム長手方向の単位ベクトルである。

また、図心を原点とした場合のせん断中心の位置は、

$$e_y = -2 \frac{I_z I_{oy} - I_{yz} I_{oz}}{I_y I_z - I_{yz}^2}, e_z = 2 \frac{I_y I_{oz} - I_{yz} I_{oy}}{I_y I_z - I_{yz}^2} \quad (6)$$

となる。ここで、

$$I_{oy} = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} Q_y r_k \times \Delta s_k \cdot i \\ = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{n'=1}^n \sum_{k'=1}^k \frac{z_{ck'}}{1 - y_{ck'}/R} t_n \Delta s_k r_{k'} \times \Delta s_{k'} \cdot i \quad (7)$$

$$I_{oz} = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} Q_z r_k \times \Delta s_k \cdot i \\ = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{n'=1}^n \sum_{k'=1}^k \frac{z_{ck'}}{1 - y_{ck'}/R} t_n \Delta s_k r_{k'} \times \Delta s_{k'} \cdot i \quad (8)$$

であり、 Q_y と Q_z は断面一次モーメントである。

2.5 有限要素モデルと自由度縮退計算

トーションビームの設計案をサスペンション全体の設計案に組込むために、自由度縮退計算を利用する。まず、前述の編集プログラムによって描画した断面形状を長手方向に引伸ばしてトーションビームの3次元形状を作成する。これをプログラム内部で有限要素モデルに置き換え、その剛性マトリックスをトーションビームの両端点における12自由度の剛性マトリックスに自由度縮退計算によって自動変換する。こうして作成された有限要素モデルの形状は、Fig. 5に示すような3次元表示でも確認が可能である。このモデルにおいて、トーションビームを形成

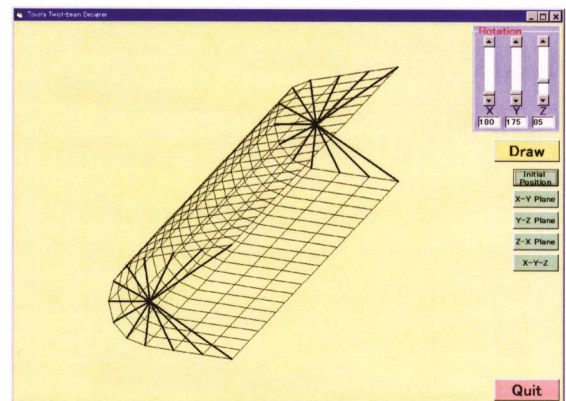


Fig. 5 Finite element model of torsion beam on 3D confirmation program.

するシェル要素と2箇所の縮退点の間を十分に剛な梁要素を用いて接続することで、トレーリングアームへの剛な組込みと確実な荷重伝達を可能にしている。

ここで、トーションビームに有限要素モデルを用いる理由は、(1)図心とせん断中心が離れる断面特性や、(2)トーションビームの湾曲、ならびに、(3)補強板の追加等、当サスペンション形式特有の設計自由度を織り込むためである。さらに、有限要素モデルの自由度を縮小して組込むことにより、計算時間の大幅な短縮、ひいては実用性の向上に配慮している。

有限要素モデルを12自由度の剛性マトリックスへ縮退する手法には、Guyanの方法⁴⁾を用いた。有限要素モデルの剛性マトリックスを K とすると、縮退点として残される節点を表す記号 m と取り除かれる節点を表す記号 s と用いて、以下のような部分マトリックスで表現できる。

$$K = \begin{bmatrix} K_{mm} & K_{ms} \\ K_{sm} & K_{ss} \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、変換マトリックス

$$T = \begin{bmatrix} I_{mm} \\ -K_{ss}^{-1}K_{sm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

を用いることで、縮退点に関する自由度が残された剛性マトリックスが以下ようになる。

$$K^R = T^T K T \quad (11)$$

最終的に、このマトリックスがトレーリングアーム間に自動的に組込まれる。

3. 検証

3.1 操作性

本設計ツールと現状のCAEについて、操作という観点から比較してTable 1に示した。本設計ツールを用いた場合、計算時間が長くても2～3時間程度、簡単な設計変更に伴うパラメータ検討であれば数分で回答が得られるので、設計者は日常的な設計検討に用いることができる。

また、日常的に使用しているパソコンの表計算ソフト上で操作できるということは、EWS (Engineering Work Station) 上の汎用CAEソフトを扱うというような特別な知識や技術、あるいは他部署に依頼するという手続きが必要でなくなる。このことは、“ちょっとしたひらめき”を力学的に検討したり、デザインレビューの最中に供したりできる可能性を持つものと考えている。なお、汎用性の面においても、本設計ツールのそれぞれのシートは簡単に分離・結合できるため、他のサスペンション形式に容易に適用が可能となると考えられる。

3.2 計算精度

本設計ツールにより算出されたコンプライアンス特性とアライメント変化について計算精度を検証する。Table 2に、様々なコンプライアンス特性について、Fig. 6に、左右輪がそれぞれ逆相に変位した場合のアライメント変化について計算値と実験値を示した。

Table 2ならびにFig. 6より、計算値と実験値は良好

Table 1 Comparison between FOA and current CAE.

	FOA	Present CAE
Design phase	Concept design	Detail design
User	Designer	Analyst
Hardware	Personal Computer	Engineering Work Station
Time	2～3 hours	2～3 weeks

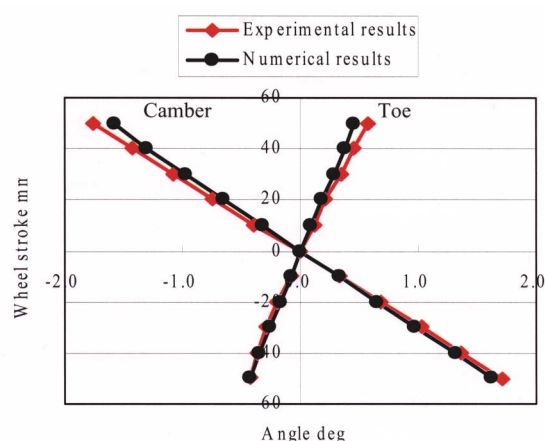


Fig. 6 Alignment behavior with respect to rolling motion.

Table 2 Properties of suspension compliance.

		Numerical results	Experimental results
Longitudinal input	Compliance mm/980N at wheel center	1.78	1.68
	Toe deg/980N	out 0.08	out 0.08
Lateral input	Compliance mm/980N at road contact point	3.08	3.46
	Compliance mm/980N at wheel center	2.09	2.03
	Toe deg/980N	os 0.12	os 0.11
	Camber deg/980N	0.20	0.26

な一致が見られ、設計案の良否を判断するような企画段階に充分供し得る設計ツールと判断される。

3. まとめ

本報では、ファーストオーダーアナリシス (First Order Analysis) のサスペンション機構設計への応用として、トーションビーム式サスペンションを対象にした設計ツールを開発し、例題をもとにその有効性を検証した。以下に、その結果を示す。

- (1) 本設計ツールにより、設計者はパソコン上の簡単な操作でサスペンションの企画段階における、基本的な設計と特性評価が短時間に可能となる。
- (2) 算出されたサスペンション特性は、企画段階において設計案の良否を判断するのに十分な精度を持つことを実験的に明らかにした。

参考文献

- 1) Sugiura, H., Kojima, Y., Nishigaki, H. and Arima, M. : "Trailing Twist Axle Suspension Design Using ADAMS", FISITA F2000 G306 (2000)
- 2) Nishigaki, H., Nishiwaki, S., Amago, T. and Kikuchi, N. : "First Order Analysis for Automotive Body Structure Design", ASME DETC2000/DAC-14533, (2000)
- 3) Oden, J. T. : "Mechanics of Elastic Structures", (1967), McGRAW-HILL
- 4) Guran, R. J. : "Reduction of Stiffness and Mass Matrices", AIAA Journal, 3-2(1965)

著者紹介



杉浦豪軌 Hideki Sugiura

生年：1967年。

所属：第14研究領域。

分野：設計者向けのCAEに関する研究・開発。サスペンション設計。
学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。



水谷義輝 Yoshiteru Mizutani

生年：1955年。

所属：第14研究領域。

分野：車両の構造強度に関する試験・研究。荷重計測センサ開発。



西垣英一 Hidekazu Nishigaki

生年：1961年。

所属：第14研究領域。

分野：ボデー構造の初期設計法に関する研究。
学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。
工学博士。