

自動車ケーブル類レイアウト検討のための 非線形有限要素法ソルバ

Nonlinear Finite Element Method Solver for Design of Automotive Cable Layout

首 藤 拓 也*

Takuya SHUDO

要 旨

自動車ケーブル類のレイアウト検討のためにシミュレーションツール内で用いる非線形有限要素法ソルバを新たに開発した。この手法は静的陰解法と静的陽解法を組み合わせたハイブリッド解法を特徴としている。この手法を用いることで従来の反復法では計算が収束しないモデルにおいても最後まで計算ができるようになった。さらに解析精度向上のためケーブルのクランプ端部の剛性のモデル化手法を構築した。クランプの種類ごとにライブラリ化をおこなうことにより設計者が簡単な操作で短時間に精度良くレイアウト検討ができるようになった。開発したハイブリッド解法とライブラリは弊社のケーブル類解析ツールとして国内外の研究開発拠点で実運用されている。

ABSTRACT

A new nonlinear finite element method solver has been developed for use in a simulation tool for the design of automotive cable layouts. The solver uses a hybrid method combining static implicit and static explicit methods. The use of this method has made it possible to complete calculations for models for which calculations did not converge on a solution using conventional iterative methods. A method of modeling the stiffness of the clamp-end of a cable was also developed in order to increase the accuracy of analyses. The formulation of modeling templates for different types of clamp has made it possible for designers to conduct accurate cable layout designs in short periods using simple operations. The developed hybrid method and library are in use as cable analysis tools in Honda research and development centers in Japan and overseas.

1. まえがき

自動車にはブレーキホース、ヒータホース、パーキングワイヤ等数多くのケーブル類が使用されている。Fig. 1にブレーキホースの例を示す。ホースは周辺部品間の隙間を縫うように大きな曲げやねじりを受けながら配置される。自動車のサスペンションは上下にストロークし、かつ転舵がなされる。そのような状況ではブレーキホースは初期配置からサスペンションの動きに追従し大きな曲げと共にねじれを受ける。このようにケーブル類は周辺部品の動きに追従し揺動するので、周辺部品と干渉をしないようにレイアウトする必要がある。

開発初期段階のレイアウト検討では、周辺部品の位置や形状が変わる可能性が高く、その変更に応じてケーブルのレイアウトを繰り返し検討する必要がある。そこで短期間

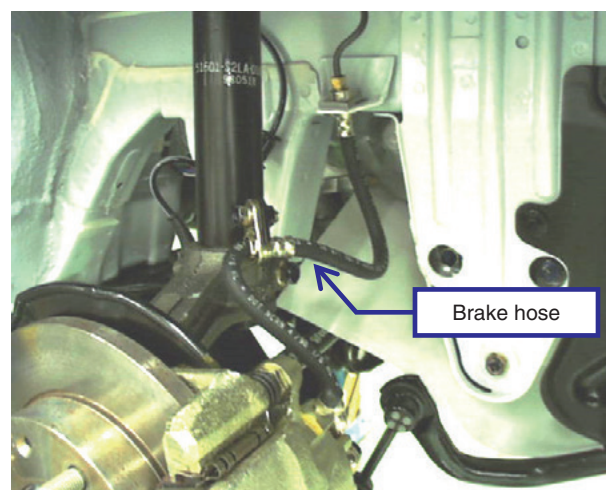


Fig. 1 Brake hose

*四輪 R&D センター

でレイアウト検討をおこなうためにこれまでシミュレーションを援用した設計がおこなわれてきた。

Fig. 2 にツール概要を示す。設計者がケーブル類のレイアウト検討用ツール上でケーブル形状を簡便に設定し、材料名、クランプの種類と位置を指定すると、ツール内部で梁要素を用いた非線形有限要素法 (Nonlinear Finite Element Method: Nonlinear FEM) に基づくモデルが自動作成され、ソルバによる計算結果をツール上に表示し変形形状や梁要素の断面力等を確認することができる。

従来のレイアウト検討用ツール内では幾何学的非線形性、材料非線形性⁽¹⁾を考慮した FEM モデルに基づいて非線形方程式を陰解法を用い反復法で解いていた。これまで純曲げが支配的な変形に関してはケーブル類が大きく変形しても実物の変形状態を予測できていた。しかしケーブルが大きくねじられながら曲げられる場合には反復計算が収束せずに途中で止まってしまう、レイアウト検討をおこなえないという課題があった。反復法による計算が収束しなくなる領域では外部からの微小な入力により変形状態が大きく変わってしまう、物理系として不安定な状態にあると考えられる。このような現象は陽解法を用いることで計算可能ではあるが、数値安定性を確保するために荷重増分を小さく設定せざるを得ず計算時間が増大してしまう。したがってそのような非線形現象に対しても短時間で確実に解を求められることが望まれる。これまでレイアウト検討ツールの中では市販のソルバを使用していたが、ケーブルが曲げられながら大きくねじられる現象に対し短時間で確実に解を出すという観点で満足できるものはなかった。

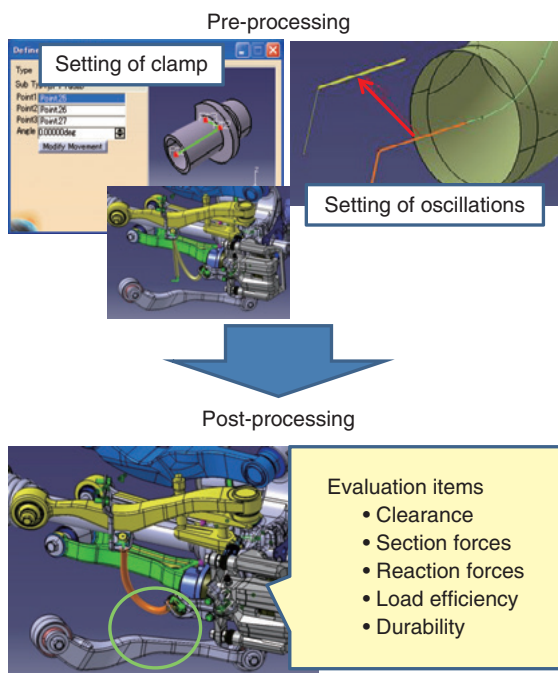


Fig. 2 In-house tool for cable layout design

一方で計算の収束性以外にも計算精度に課題があった。Fig. 3 に示すようにクランプとホースが結合されている場合に結合部でホースが局所的に曲がる場合がある。従来のレイアウト検討ツール内ではそのような現象の物理モデル化がおこなわれていなかったため、解析予測精度が十分でなくレイアウト検討を精度良くおこなえないことが課題となっていた。ケーブル類が局所的に曲がる現象のモデル化手法を新たに構築し、従来手法に比べ精度を向上させることが求められる。

またクランプ部の剛性をモデルに追加するには FEM 用のモデル化手法やソルバに関する専門知識が必要となり、設計者自身が短時間で必要な有限要素モデルを作成することは容易ではない。したがって設計者が短時間でレイアウト検討をおこなえるよう自動化が望まれる。

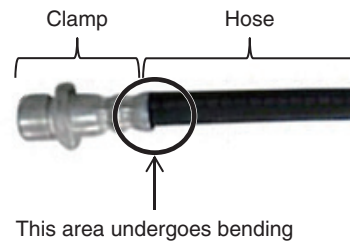


Fig. 3 Connection between clamp and hose

2. 開発のねらい

本稿では下記4点を主要なねらいとした。

- (1) 計算の収束性を保ちつつ確実に解を求められること。
- (2) 従来手法と同等の計算速度を有すること。
- (3) クランプとの結合部剛性を考慮した計算をおこなえること。
- (4) 設計者がソルバに関する専門的な知識がなくても従来通り簡易な操作でレイアウト検討をおこなえること。

以下に開発したソルバとクランプとの結合部剛性のモデル化手法について述べる。

3. ハイブリッド解法

3.1. 考え方

従来、静的な非線形現象の数値モデルである非線形方程式を解く手法として静的陰解法⁽²⁾が主に使われてきた。静的陰解法はある荷重を与えた時点において力の平衡が取れるまで解の予測値から開始し、Newton-Raphson 法等の反復法で予測値を修正させながら解を求めていく方法である。反復の中では幾何学的非線形性や材料非線形性が考慮される^{(3),(4)}。この手法は設定荷重負荷時の物理量を正確に求めることができ、完全安定な時間積分法であるので増

分量も大きく取れる^{(3),(4)}。また計算時間も収束性に問題ない現象の計算であれば他の手法に比べ短時間で済む。

しかし非線形性に起因し反復法では収束しない場合がある。以下に例を示す。Fig. 4(a)に座屈の概念図を示す。座屈が起こると解曲線は変曲点を有し変曲点付近で接線勾配が急変するので反復法による非線形方程式の求解は容易でない。Fig. 4(b)には解の分岐の概念図を示すが非線形方程式の解に一意性はないために解の分岐が起こりえる。例えば図中のa点とb点は解曲線上にあるが、入力荷重は異なるのに同じ変位を有する状態を示している。具体例として配索されたブレーキホースに微小な荷重を与えるだけで異なる変形状態に落ち着いたり、薄板のスナップスルーのように解のモードが急変する場合がある。

上記のように非線形性の強い現象を数値解析する場合に、静的陰解法では計算途中で収束せずに計算を継続することができなくなる場合がある。そこで計算を最後まで安定しておこなえる手法が望まれるが、そのような手法の一つとして反復法によらずに静的釣り合いを求めながら解を順次求めていく静的陽解法⁽⁵⁾がある。

静的陽解法は、反復を繰り返すことなく要素ひずみや節点の回転量の増分等が許容内で収まる範囲で増分量を決定していく手法である。この手法では安定して最後まで解を求めることはできるが、数値安定性の確保のために荷重増分を大きく取ることができないので陰解法に比べ計算時間が増大してしまう。そのため計算全体の中で静的陽解法を利用する部分は最小限になる工夫が必要である。

そこで陰解法と陽解法の利点を組み合わせて陰解法で求解できる領域では陰解法を用い、陰解法では求解できない領域では陽解法を用いるというハイブリッド解法を考案した。

ハイブリッド解法のフローチャートをFig. 5に示す。まず静的陰解法を用いて求解をおこなう。その後、非線形性が強くなり反復法による求解ができなくなったと判断された場合 (Condition A)、静的陽解法に切り替え求解を続ける。その後は静的陽解法で求解を続けるが、非線形性が弱くなり再び陰解法で求解可能と判断された場合 (Condition

B)、静的陰解法に戻り求解を続ける。上記の処理を計算が終了するまで継続する。

3.2. 静的陰解法から静的陽解法への切り替え

静的陰解法では収束しないと判断された場合 (Condition A)、静的陽解法へ切り替えるがその切り替え法は以下のとおりである。まず指定回数反復をおこない収束しない場合は時間増分 (荷重増分) を縮小し (Cutback) 再度指定回数反復計算をおこない収束値を求める。上記操作を指定した試行回数 Cutback を繰り返しても収束値を求められない場合は、静的陰解法による求解はできないと判断し静的陽解法に切り替える。

3.3. 静的陽解法から静的陰解法への切り替え

静的陽解法のまま最後まで計算をおこなうこともできるが、計算時間低減のために静的陰解法でも計算可能な場合 (Condition B) は静的陰解法への切り替えをおこなう。その際静的陰解法への切り替え後すぐに反復法による収束がおこなえずに再び静的陽解法に戻ることにならないようにしなければならない。したがって座屈点などの非線形性の強い領域は避けて切り替えをおこなわなければならない。

一般に静的陽解法では非線形性が増すと残差が増加していくことが知られている⁽⁵⁾。そこで残差がある値より小さくなった時点で静的陰解法へ切り替える。

また収束しない典型的例として座屈や解の分岐が考えられるが、それらは以下のように特徴付けられる^{(3),(6)}。

- (1) 座屈点では剛性行列の行列式はゼロとなる。
- (2) 分岐点では剛性行列の固有ベクトルと荷重ベクトルは直交する。

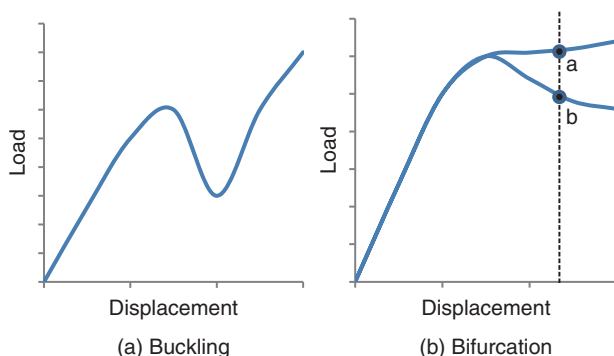


Fig. 4 Typical nonlinear phenomena

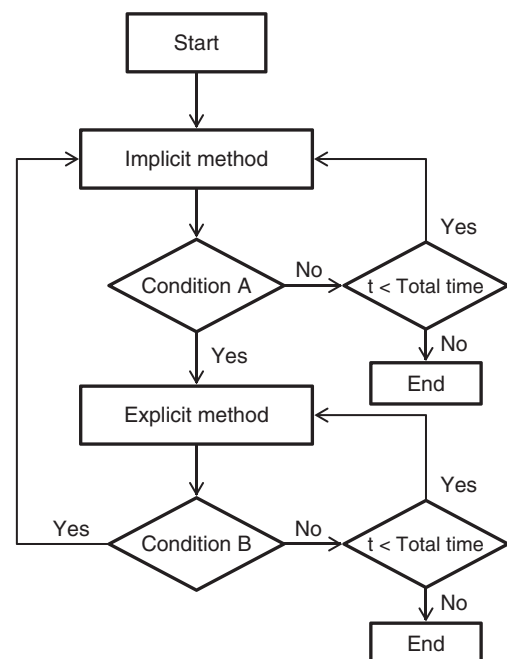


Fig. 5 Flowchart of hybrid method

Table 1 Comparison of three solver algorithms

	Elapsed time	Increments
Static implicit	No convergence	No convergence
Static explicit	38 min	47283
Hybrid	6 min	487

Table 2 Comparison of solver speed

	Elapsed time	Increments
Static implicit	13 sec	124
Hybrid	15 sec	132

上記のことから剛性行列の行列式、固有ベクトル、および残差に依存した切り替え判定則を考案した。剛性行列の固有値、固有ベクトルを毎回求めることは計算時間の増大につながるため、それらは残差の値により算出するかどうかを判断する。また固有値を求める場合であっても Sturm-Liouville の定理⁽⁷⁾を援用し最小限の演算で済む工夫をおこなって計算時間を低減している。

上記手法を用いることで静的陽解法の使用を最小限に抑え、精度の低下や計算時間の増大を抑えられる。

以上のように静的陰解法と静的陽解法を組み合わせるハイブリッド解法を用いることで、静的陰解法では収束しない計算においても確実に解を求める手法を確立した。

3.4. 従来ソルバとの比較

本手法の有用性を確認するために、従来のソルバでは収束しないモデルを用いて静的陰解法、静的陽解法、ハイブリッド解法の三つの手法で計算をおこない計算終了までの時間と刻み数 (Increments) を比較した。Table 1 に結果を示す。静的陰解法では計算途中で収束せず止まってしまう。静的陽解法では最後まで計算をおこなっているが時間刻み幅が小さくならざるを得ないために Increment 数が増え計算時間も増加してしまう。ハイブリッド手法では最後まで計算をおこなっており、かつ計算時間も静的陽解法単独の場合と比べ大幅に短縮できた。また Table 2 に従来使用していたソルバでも収束するモデルを使用して従来のソルバと開発したソルバとの計算時間の比較結果を示すが同等の計算時間でおこなえることを確認できた。以上のことから本手法の優位性を確認できた。

4. クランプ部剛性のモデル化手法検討

1章で述べたように、一部のケーブル類ではクランプとケーブルの結合部の曲げ剛性が弱いために結合部が局所的に曲がる変形が起こる。しかし従来の計算モデルではこの剛性が考慮されていなかったため局所曲げを計算上表現できていなかった。

そこでケーブルがクランプ部に対し相対的に回転できるモデル化法を構築しそれに対応するソルバ機能を開発し

た。Fig. 6 に概念図を示すが、クランプ端部の節点と、その点と同位置にあるケーブル上の節点間にケーブル軸方向と直交する二軸まわりの相対回転自由度のみを有するジョイント (ユニバーサルジョイント) を定め⁽⁸⁾、その二軸まわりに回転ばねを定義した。さらに相対回転角度を規制するために回転方向のストッパを定義した⁽⁹⁾。ストッパは内部的に接触モデルに置き換えられ回転角度がしきい値を超えた場合は接触拘束⁽¹⁰⁾を課した。

Fig. 7 にケーブル左側端部を固定しもう一端を揺動させケーブルを曲げた場合の変形形状を示す。クランプ部の曲げ剛性がモデル上考慮されることでケーブル全体の変位方向が実測値に近づいた。

また追加されたモデル化部分は全て 1 次元モデルであり自由度の増加が抑えられているので計算時間の増加は少なく、かつ簡易的なモデル化でケーブル類のレイアウト検討を十分な精度でおこなうことができることを確認した。

しかし、提案するモデル化手法では従来のモデルに対しいくつかの有限要素を追加し、かつクランプの種類に応じた剛性値を与える必要がある。それらの作業をおこなうにはソルバの使用法や FEM 用のモデル化ツールに関する詳細な知識が必要であり、設計者が短時間で解析をおこなうのは容易でない。そこでモデル化作業負担低減のためにモデルのライブラリ化をおこない専用のレイアウト検討ツール上で簡易な操作でモデル化がおこなえるようにした。

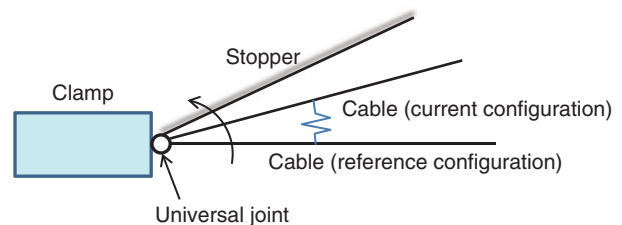


Fig. 6 Schematic image of stiffness of end of clamp

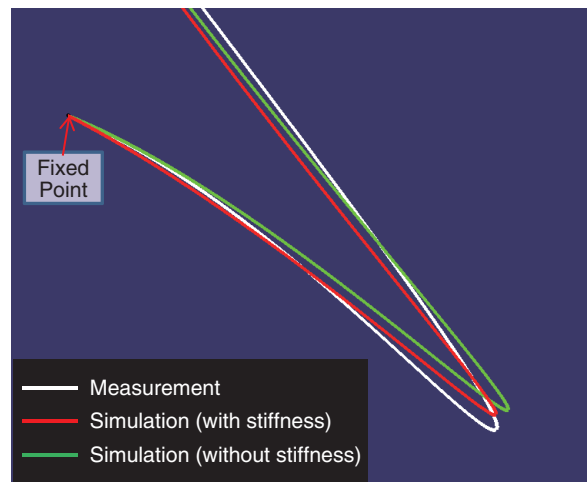


Fig. 7 Contribution of bending stiffness of clamp to cable deformation

Fig. 8 に示すように設計者は専用のツール上で赤点で示されるケーブル端部の3点の座標を指定した後、所要のクランプの種類を選択すればツール内部で材料特性に応じた結合部の曲げ剛性がモデル内に反映され、かつユニバーサルジョイントや接触条件等も自動で設定される。このツールを使用することで設計者は従来よりさらに精度の高い検討をおこなえるようになった。

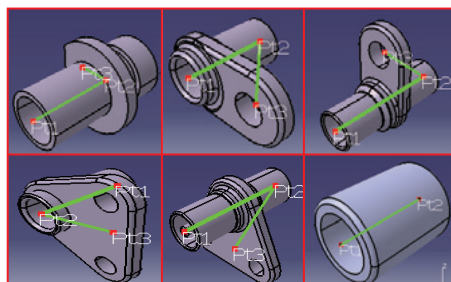


Fig. 8 Library of clamps

5. 検証

5.1. 上下ストローク時の比較

平面上に置かれた車両にブレーキホースを配索した際のホースの変形形状を実測結果と比較した。開発したソルバで計算し干渉が起こりやすい周辺部品との最小距離を比較した。Fig. 9 にシミュレーション結果を、Fig. 10 に実測結果を示す。ホースとの干渉が起こりやすい部位であるブラケットおよびキャリパとホースとの同位置での距離を比較している。この比較部位はケーブルの曲率半径が最も小さく予測が容易でない箇所であるが、距離の最大差は7%程度でありレイアウト検討には十分な精度であることを確認した。

5.2. ストロークと転舵の複合入力時の比較

サスペンションの上下ストロークと転舵を同時におこなった場合の一例を Fig. 11 に示す。これはタイヤを上下に±60 mm ストロークさせた場合と、各ストローク位置で最大30度までの転舵をさせた場合に、ブレーキホースが揺動した後の変形形状を比較したものである。実線がシミュレーション結果、点線が実測結果を示す。ストロークのみの場合、ストロークと転舵を同時におこなった場合ともおよそ実測値を再現できておりストロークと転舵によりブレーキホースが大きくねじられながら曲がる場合でもレイアウトには十分な精度であることを確認した。

上記の検証結果より設計者がレイアウト検討をおこなう場合にクランプ部に局所曲げが発生する場合でも精度上問題なく、かつ従来は収束しなかったモデルでも確実に解を

求められるようになった。本稿で紹介したソルバやライブラリ機能はレイアウト検討ツールとして国内外の研究開発拠点で使用されている。

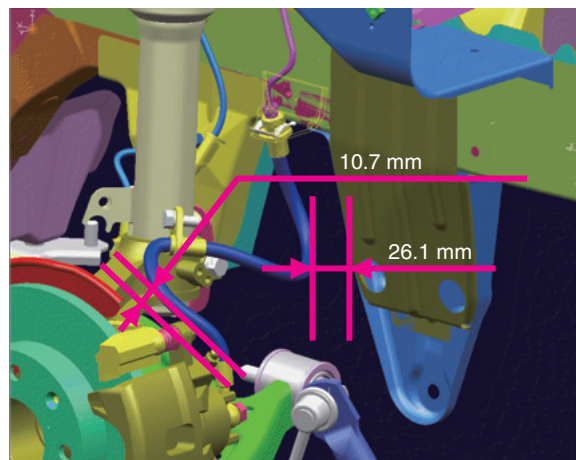


Fig. 9 Simulation result

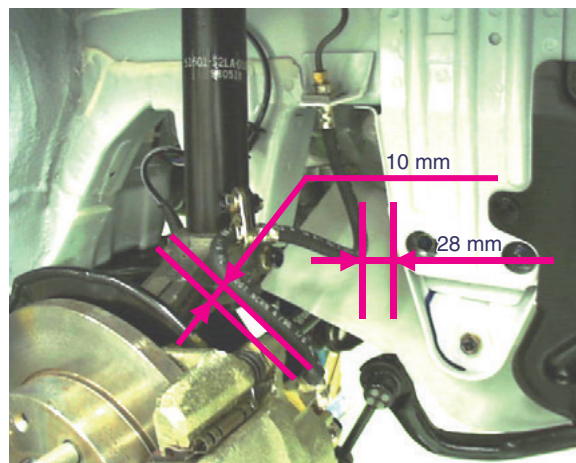


Fig. 10 Measurement result

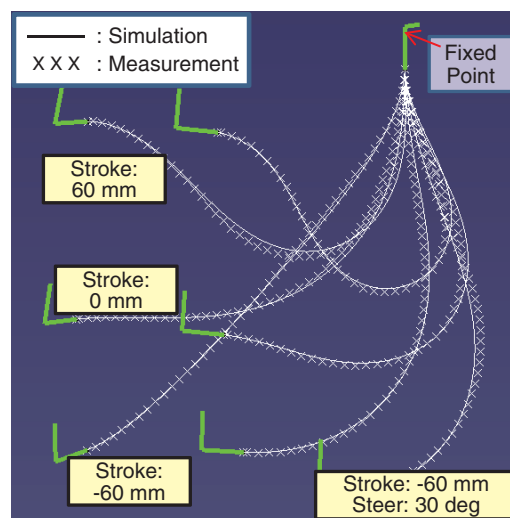


Fig. 11 Comparison of measurement and simulation results

6. まとめ

自動車用ケーブル類のレイアウト検討を短期間で精度良くおこなうため以下をおこなった。

- (1) 収束性を保ちつつ確実に解を求められる手法として静的陰解法と静的陽解法を切り替えて解を求めるハイブリッド解法を考案し独自開発した。
- (2) 従来手法で収束していたモデルでも従来と同程度の計算時間でできるようにした。
- (3) クランプとケーブルの結合部の曲げ剛性を考慮できるモデル化手法を構築し解析精度を向上させた。
- (4) 設計者が簡易な操作で解析を実行できるよう必要なクランプをライブラリ中から選択できるようにし、ツール内でモデルを自動生成することで短時間でレイアウト検討をおこなえるようにした。

参考文献

- (1) Bathe, K. J.: Finite Element Procedures, (2007)
- (2) Belytschko, T., Liu, W., Moran, B.: Nonlinear Finite Elements for Continua And Structures: 676p., (2000)
- (3) Chrisfield, M. A.: Nonlinear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Vol. 2, Wiley, (1997)
- (4) Noguchi, H., Hisada, T.: Integrated FEM Formulation for Total/Updated-Lagrangian Method in Geometrically Nonlinear Problems, JSME, Series A, Vol. 38, No. 1, p23-29, (1995)
- (5) 浜孝之: 静的陽解法有限要素法によるチューブハイドロフォーミングに関する研究, 早稲田大学博士論文, (2004)
- (6) 富田佳宏: 数値弾塑性力学, 養賢堂, 227p., (1990)
- (7) 森正武, 数値解析, 共立出版, 291p., (2002)
- (8) Abaqus Theory Manual, V6. 10, (2010)
- (9) Hughes, T. R. J.: The Finite Element Method, Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, 260p., (2000)
- (10) Wriggers, P.: Computational Contact Mechanics, Springer, 518p., (2006)

■ 著 者 ■



首藤 拓也