

3D オートメッシュを用いた有限要素解析の トランスミッション開発への適用

Application of Finite Element Analysis Using 3D Auto-mesher to Transmission Development

永井 滋* 内田 孝尚*
Shigeru NAGAI Takanao UCHIDA

要 旨

3D モデルを有効活用するため、金型作製に転用可能な細かいフィレット、抜き勾配等を含む詳細形状モデルを無修正で有限要素解析の実施を目指し、3D CAD システムと連携した 3D オートメッシング機能と 3D モデル品質の改良を行った。その結果 100MB を越える 3D 詳細形状モデルをオートメッシュにより CAE モデル化し、トランスミッション設計現場において設計者による有限要素解析が可能となった。

ABSTRACT

In order to effectively utilize 3 dimensional models, a 3D auto meshing function linked with a 3D CAD system and 3D model quality were improved with the aim of performing Finite Element Analysis without modification on detail models including detailed fillets, draft angles and other complex shapes which can be applied to die manufacture. As a result, 3D detail models with a data volume in excess of 100 MB could be converted to CAE models by auto meshing, allowing design staff to perform Finite Element Analysis at the transmission design site.

1. まえがき

設計ツールの 3D 化移行に伴い、エンジン、トランスミッション等の casting 部品についても金型作製に転用可能な細かいフィレット、抜き勾配等を含む詳細形状モデル(以下 3D 詳細形状モデル)主体の設計となった。これら 3D 詳細形状モデルを用いた設計は、ワークステーションの計算時間の問題、3D CAD システムのオペレーション機能不足、設計者のモデリングスキル不足等の理由から、2D 図設計よりも工数がかかる状況であったが、ワークステーションの性能向上、3D CAD システムの機能向上、設計者のスキル向上もあり、徐々に工数的問題は減少方向に向かっている。

3D による設計の主な利点として、3D レイアウトによる他部品との干渉チェック、ラピッドプロトタイピングによる実形状チェック、3D 詳細形状モデルの金型作成転用等が挙げられる。しかし、これらは設計者にとって、2D から 3D への移行で発生した工数増加に値するメリットとはならなかった。

そこで設計者に対する 3D 化のメリットの一つとして、設

計者自身が 3D 詳細形状モデルを直接用いた有限要素解析を実施する事が考えられた。

以上の様な背景から 4 面体要素オートメッシュ機能向上を行い、これまでオートメッシュは困難と考えられていた大型の 3D 詳細形状トランスミッションケースモデルのメッシングが可能となった。その結果、大型 3D 詳細形状モデルであっても、設計者による有限要素解析実施の可能性のある事がわかった。

2. 3D オートメッシュ改良のねらい

設計者が有限要素解析を行うにあたり、有限要素解析ソフトウェアの習得や 3D 設計ツールからその解析ソフトウェアへの 3D モデルデータ変換の必要が出て来る。これら多くのソフトウェアの使い方を覚える作業は設計者に大きな負担である。

これに対し、当社の標準 3D CAD システムの一部である有限要素解析機能を解析に用いる事が出来れば、上記 2 項目に対し次の利点がある。i) 基本操作やユーザーインター

フェースが共通であり、容易に有限要素解析機能の習得が可能となる。ii)データ変換の必要が無い。

以上より設計者への有限要素解析導入には、現在社内で使用している有限要素解析機能を備えた 3D CAD システムの使用が効率的であると考えた。

設計者による 3D 詳細形状モデルの有限要素解析実施のためには、3D CAD システムの標準機能であるオートメッシュ機能を改良し、設計者が 3D モデルによる設計を行いながら、同一の 3D CAD システム上で短時間のうちに有限要素解析が出来る様にする事が必要である。(Fig.1 参照)

2.1. 従来の CAE モデル

これまで 3D 詳細形状モデルの有限要素解析を行うためには、細かいフィレット、微小な面、微小な穴等の細かい形状を省略した有限要素解析専用の 3D モデルが必要であった。これは主に以下の 2つの理由によるものである。i)オートメッシュが、細かい形状に追従してメッシュを生成する事が困難、ii)メッシュ生成後、そのCAEモデルが計算機の数、能力を越えた節点数、要素数となる。

また、多くの場合、少ない要素数、節点数であっても計算結果精度の良い 6 面体要素を用いるか、少ない工数で適度な結果が得られるシェル要素を部分的に用いたマニュアル(手動)メッシュで対応せざるを得なかった。これは、主に計算機の少ない資源を有効に活用し、精度の良い結果を得るためである。

参考としてシリンダブロック等のエンジン部品では、CAE 専任者が CAE モデル作成に 200 時間を越える場合があった。また応力分散のために作られたリブの簡略化や除去に対しても、要、不要の判断など、多くのノウハウが必要であった。

2.2. 設計者が行う有限要素解析

前節で述べた理由から、有限要素解析は CAE 専任者が行う事が一般的であり、設計者による有限要素解析は工数的観点から行われて来なかった。また、一般的に設計者は勘と経験により形状を決定し、試作品を作り、実測テスト結果から設計諸元を決定すると言う手段を取ってきた。

しかしここ近年オートメッシュの性能が向上し、手のひ

らに乗る程度の大きさで、小さなフィレット等の微小な面を多く持たない部品であれば、オートメッシュを用いてメッシュを生成し、引き続き計算を行う事も可能となった。実際に小さな部品に対しては設計者が設計作業の中で有限要素解析が可能となって来ている。また実際に実測テストを省略し、有限要素解析結果のみで諸元決定しているものも存在する。

設計者が自ら有限要素解析を行うメリットとして、i)実物が無くてもその場でテスト結果をシミュレート出来るため、アイデアの有効性をリアルタイムに確認出来る。ii)その部品に関する周囲のレイアウト、製品コスト、金型構成等の制約を熟知しているため、効率的に対策案を打ち立てる事が可能。iii)自分自身の設計アイデアを短時間内で繰り返し確認可能となり、設計的センスの向上につながる。等が挙げられる。

ここで紹介する大型部品の一つであるトランスミッションケースの場合は、全体が曲面とフィレットで構成されており、平面がほとんど無く、これまでオートメッシュは困難であった。また、マニュアルメッシュを行う場合、メッシングに時間がかかるのみならず、最大応力発生部位を省略した解析が行われる可能性があり、フィレットの除去等の形状簡略化に関して多くのノウハウが必要となる。以上のように解析時間と精度の問題からトランスミッションケースの有限要素解析はほとんど行われなかったが、一方、トランスミッションケースの様な大型で複雑な形状の部品に対しても有限要素解析が適用出来るオートメッシュは、短時間で精度の良い有限要素解析実施が可能となるため、待望されていた。

2.3. オートメッシュの方向性

近年ハードウェアの進歩が著しく、高速化と低価格化が進み、ワークステーションが以前の大型コンピュータに近い能力を備えるまでになって来た。

このハードウェアの進歩を考慮すると、i)小さい面やフィレットの除去を含む個別のノウハウの構築。ii)時間をかけたマニュアルメッシングの実施。iii)節点数、要素数の減少。と言う従来の考え方を元に CAE モデルを作製するよりも、3D詳細形状モデルをオートメッシュでメッシングし、CAE

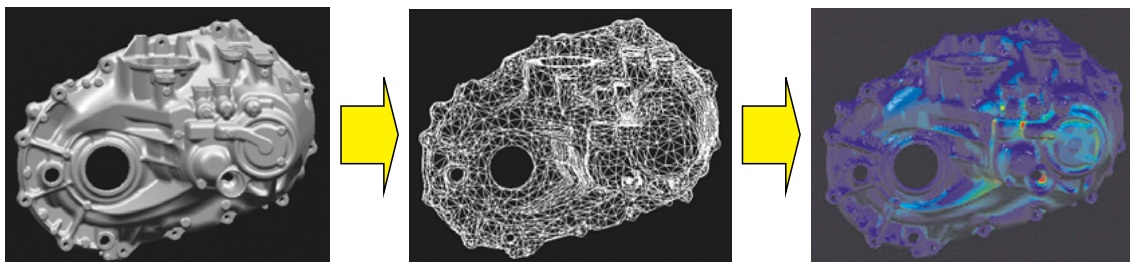


Fig.1 Finite element analysis of a 3D detail model with 3D auto-mesher

モデルを作成した後、有限要素解析を行う方がより効率的であることが容易に理解できる。

また、3D詳細形状モデルのオートメッシュが可能であれば、解析結果精度を論じる際、有限要素解析ソルバ精度のみならず、今後は3D詳細モデルの形状精度、メッシング後のCAEモデルとしての形状精度についても論じられる事が可能となり、多方面から結果精度追求が可能となる。

以上よりオートメッシュに求められる機能として、i)3D詳細形状モデルのオートメッシュが可能なる事。ii)計算時間や全体的な計算精度最適化のため、節点数、要素数のコントロールが可能なる事。iii)注目部の精度向上のため、局所的な細かい要素サイズが定義可能な事。と、以上3点が挙げられる。

3. 3D オートメッシュの改良

設計者がトランスミッション開発の中で有限要素解析を実施するために、この3Dオートメッシュに必要となる機能は以下の2項目である。

- i)メッシュが確実に生成出来る事(=時間の効率的な利用)
- ii)要素品質が良い事(=解析結果精度確保)

これらを3Dオートメッシュ機能改善に際して具体的目標としたものが以下の2項目である。

如何なる3D詳細形状モデルに対しても

- i)メッシュ成功率 90%以上
 - ii)Length ratio 10 以下
- (メッシュ成功率、及び Length ratio については後述。)

3.1. 具体的評価方法と条件

上記目標達成のため、メッシュ成功率、及びLength ratioの具体的評価方法を決めた。

3.1.1. 評価方法

i)メッシュ成功率

メッシングを行った全回数を母数とし、3D CADシステムに統合された有限要素解析ソルバの要素品質基準を満たすメッシュが得られた回数との比を式(1)のように「メッシュ成功率」として定義した。

$$MS = VM / MT \quad (1)$$

但し、MS:メッシュ成功率、VM:計算可能なメッシュが得られた回数、MT:メッシングを行った回数

i)Length ratio

計算結果精度確保のために Length ratio の最悪値をチェックした。

ここで「Length ratio」とは一般的に「Aspect ratio」と呼ばれているものである(Fig.2 参照)。

また、Length ratio 以外の Jacobian, Shape factor 等の要素品質項目についても有限要素解析ソルバが許容出来るか

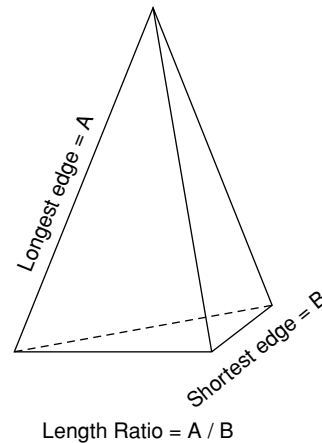


Fig.2 Length ratio

否かのチェックを同時に行った。

要素品質基準の中で Length ratio を基準とした理由は以下の3点である。i)生成されたメッシュの要素品質チェックにおいて、頻繁に有限要素解析ソルバの基準値を越えたのは Length ratio だけであった。ii)計算結果精度に直接的な影響を及ぼす。iii)計算結果精度確保の指標として適当な要素品質項目の一つである。

メッシュの中に要素品質基準値を越えた要素が一つでもある場合、計算は流れない。一般的に15以上のLength ratio 値を持つ要素は避けるべきであると言われている。

3.1.2. 評価条件

i)評価用モデル

評価を開始した時点で存在した3D詳細形状モデルを、評価用モデルとして任意に5つ選定した。

Fig.3にそれらのモデルの一部を示す。また、各図中の数字はモデルのサイズである。

ii)メッシング条件

ここでは、Size と Absolute Sag の2つのメッシングパラメータを組み合わせてテストを行った(Fig.4, Fig.5 参照)。

Size と Absolute Sag の2つのパラメータは、3D詳細形状モデルをメッシング後、節点数約15万(要素数約8~9万)となるよう設定した。この15万節点と言う数字は現在開発で用いられている設計用ワークステーションで使用可能な4GBの一時記憶領域でほぼ確実に計算可能な節点数である。

また、最初の評価で設定したメッシングパラメータ(Size と Absolute sag)は、その後の評価においても同じ組み合わせを使用した。

3.2. 評価結果

上記評価方法及び条件に従い、3Dオートメッシュの評価を行った。

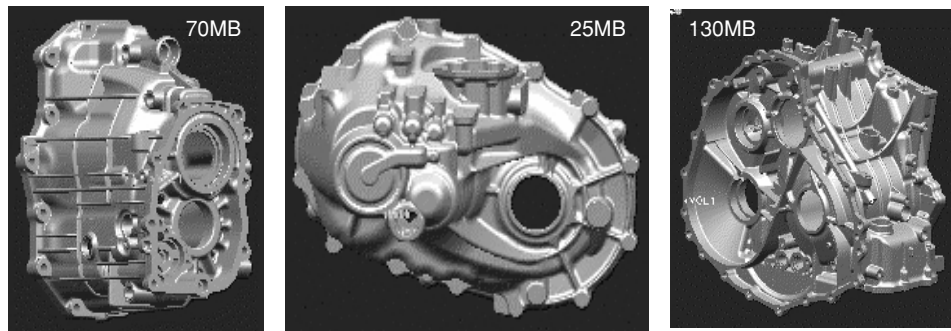


Fig.3 Evaluation models

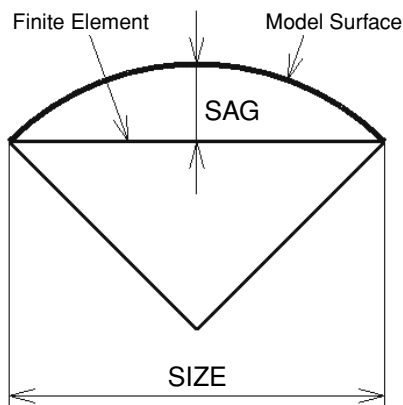


Fig.4 Size & sag

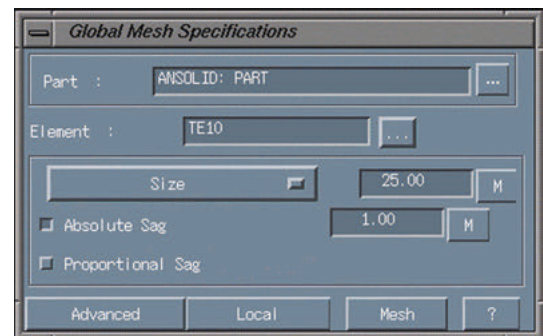


Fig.5 Meshing parameter set window

3.2.1. Step 1 テスト

- ・ 目的：機能詳細調査
- ・ 結果：5モデル平均のメッシュ成功率は約 15%であった。

このメッシュ成功率 15%と言う値は、10 回メッシングを行い、計算に使えるメッシュが得られる回数が2回未満と言う事である (Table 1 参照)。限られた時間の中で多くの業務をこなしている設計者にとって、メッシュ成功率が15%ではメッシング作業自体が負担となる。

以上より、このバージョンのオートメッシュは、このままでは設計者による有限要素解析には使えないと判断した。

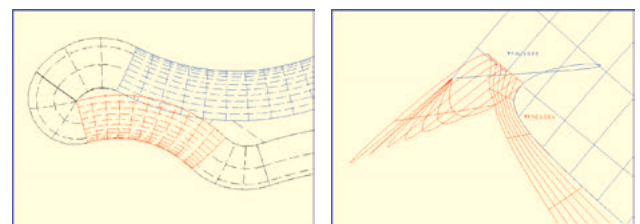
- ・ メッシング結果分析：

Step 1 評価において 85%を占めるメッシング失敗(以下、メッシングエラーと記す)を分析すると、大きく次の2つに

分類する事が出来た。i)3D 詳細形状モデルに原因があるエラー、ii)メッシュプログラムに原因があるエラー。

i)3D 詳細形状モデルに原因があるエラー

メッシングエラーを引き起こす 3D 詳細形状モデル上の問題となる部分は、3D CAD システムの標準トレランス (0.1mm)以下の微小部分であり、その代表例としてFig.6のような「面の重なり」と「面の捩じれ」がある。



Overlapped face

Twisted face

Fig.6 Problem geometry examples

Table 1 Step 1 result

Model	A	B	C	D	E	Total
Meshing trials	44	42	18	38	12	154
Mesh success	5	2	0	9	7	23
Mesh success rate	11.36%	4.76%	0.00%	23.68%	58.33%	14.94%
Meshing failure details						
3D model quality	28	6	18	17	4	73
Element quality	8	32	0	10	1	51
Others	3	2	0	2	0	7

これらの微小部分はメッシングエラーとなった時点で赤丸表示されるが、3D CAD システムが自動的に作成した形状であり、メッシング開始以前に見つけ出す事は非常に困難である。

このことから 3D 詳細形状モデルに原因があるエラーを根本的に回避するためには、3D CAD システムのモデリング機能向上による 3D 詳細形状モデル自体の品質向上が必要となる。

この根本的解決策以外に、3D 詳細形状モデルに原因のあるエラーの回避策が2つある。

- ・メッシュプログラムを変更する方法—モデルの低品質部分を適度に無視する様、メッシュプログラムを最適化する。
- ・3D モデルを修正する方法—赤丸で示された問題発生部位を設計者が修正してエラー発生を回避する。この方法は 3D モデリングに絡む事項であるため、ここでは省略する。

ii)メッシュプログラムに原因があるエラー

このエラーとして多いのがLength ratio(要素品質)の問題である。メッシングが正常終了しても、50 以上の Length ratio 値を持つ要素がある場合、計算には使用不可である。この Length ratio 問題解決のためにはメッシュプログラムが粗悪品質要素を生成しない様、改良する必要がある。

この他には「プログラムエラー」と呼ばれる、メッシュプログラム自体がエラーを起こし、メッシングを異常終了するものがある。

- ・次バージョンへの対応：

Step 1 結果から、メッシュプログラムに対して次の3項目の変更を行った。

- 3D 詳細形状モデル上の低品質部分を無視出来る様にする。
- Length ratio 値の改善

iii)バグフィックス。

3.2.2. Step 2 テスト

- ・目的：メッシュ改良目標達成度確認
- ・結果：メッシュ成功率 88%と言う成功率の大幅な改善が得られた。(Table 2 参照)

ここでの大きな変化点は、全メッシング回数に対する基準値 50 以上の Length ratio 発生割合は全体の 33%から 2 %へと大きく減少した事である。

しかし、負の Jacobian 値を持つ要素の生成と言う別の問題が発生した。負の Jacobian 値は有限要素解析計算が不可能となる条件である。

- ・次バージョンへの対応：

Step 2 結果から、負の値の Jacobian を持つ要素の生成が無いようメッシュプログラムの変更を行った。

3.2.3. Step 3 テスト

- ・目的：メッシュ改良目標達成度確認
- ・結果：負の値を持つ Jacobian の発生は皆無となったが、メッシュ成功率が 88%から 86%へと落ちた。また、Length ratio によるメッシングエラー発生率も、2 %から 5 %へと増加した(Table 3 参照)。

3.3. 評価まとめ

以上より、Step 1 ～ Step 3 で以下の如くメッシュ機能向上が図られた(Fig.7 参照)。

- ・5モデル平均メッシュ成功率は 15%から 86%となった。

内訳として

- ・Length ratio 50 以上のメッシングエラー発生率は 33%から 5%へと減少した(5モデル平均値)。
- ・3D 詳細形状モデル品質によるメッシングエラー発生率は 47%から 8%へと減少した(5モデル平均値)。

以上のように、ほぼ目標に達成したと言える。

Table 2 Step 2 result

Model	A	B	C	D	E	Total
Meshing trials	44	42	18	38	12	154
Mesh success	37	41	10	36	11	135
Mesh success rate	84.09%	97.62%	55.56%	94.74%	91.67%	87.66%
Meshing failure details						
3D model quality	7	1	3	2	0	13
Element quality	0	0	2	0	1	3
Others	0	0	3	0	0	3

Table 3 Step 3 result

Model	A	B	C	D	E	Total
Meshing trials	44	42	18	38	12	154
Mesh success	38	38	11	33	12	132
Mesh success rate	86.36%	90.48%	61.11%	86.84%	100.00%	85.71%
Meshing failure details						
3D model quality	6	0	2	5	0	13
Element quality	0	4	3	0	0	7
Others	0	0	2	0	0	2

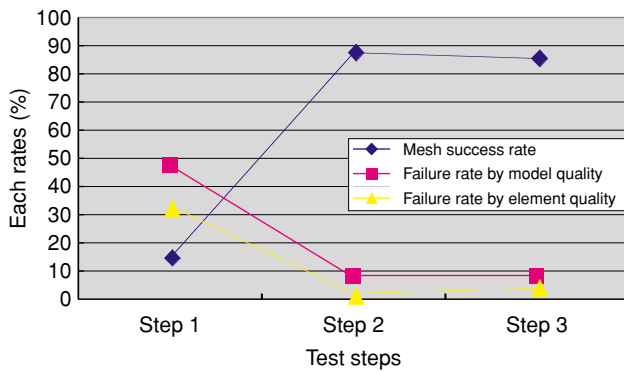


Fig.7 Transition of results (5 models average)

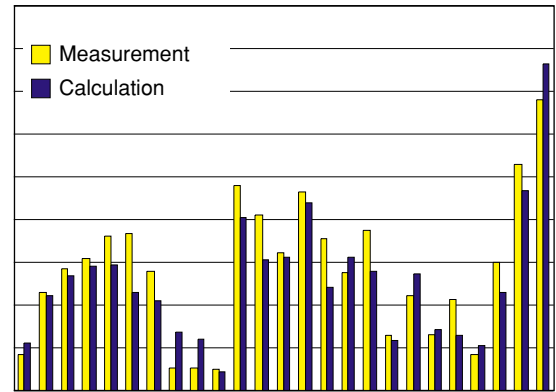


Fig.9 Comparison of measurement and calculation

4. 応力解析実例紹介

ここでは実際にこのオートメッシュを用いて実施された設計者による単体部品応力解析例を紹介する。

Fig.8 に実際の応力解析例を示す。この解析例のモデルは、有限要素解析に際してフィレット除去やモデル修正等は一切行われていない 3D 詳細形状モデルである。

これらは 4 面体 2 次要素による節点数約 15 万(要素数約 9 万)の解析例である。

従来は、専任者がトランスミッションケースのマニュアルメッシングのみを行うのに約 80 時間かかった(フィレット無し、節点数約 2 000)。しかし現在では、ワークステーション上で境界条件付加に約 10 分、オートメッシュを含む計算が約 45 分で終了する。参考として、メッシングだけに要する時間は、計算時間約 45 分中の 7～8 分である。

Fig.9 は Fig.1 に示されるモデルの有限要素解析結果と、ひずみゲージによる応力測定結果の各測定点における比較である。設計諸元決定に対して、傾向、絶対値とも有効な結果であると言える。

5. まとめ

以上より、

- i) これまで不可能と言われて来た 3D 詳細形状モデルのオートメッシュが可能となった。

- ii) 設計者自身による有限要素解析が実現し、実際の設計現場で活用される様になった。

- iii) 設計者による有限要素解析導入により、設計変更回数、実測テスト回数が減った。

6. あとがき

従来解析専任者に有限要素解析を依頼し、結果が出るまでに数日から数週間かかっていたが、現在はこのオートメッシュ機能を用いて 3D 詳細形状モデルの有限要素解析が約 1 時間で終了するようになった。3D オートメッシュを用いた有限要素解析は、設計者にとって無駄となっていた解析結果待ち時間を激減し、短時間で設計仕様が検討できるツールとなりつつある。

設計者自ら有限要素解析を用い、精度の高い仕様決定が行われる事で、実測テスト回数が削減され、開発効率向上が着実に進みつつある。

7. 謝辞

設計者が有限要素解析を行える様、筆者らのコンセプトを理解し、筆者らと共に具体的目標値を設定し、3D オートメッシュの機能改善に積極的に対応して頂いた仏ダッソーシステムズ社に心から感謝の意を表します。

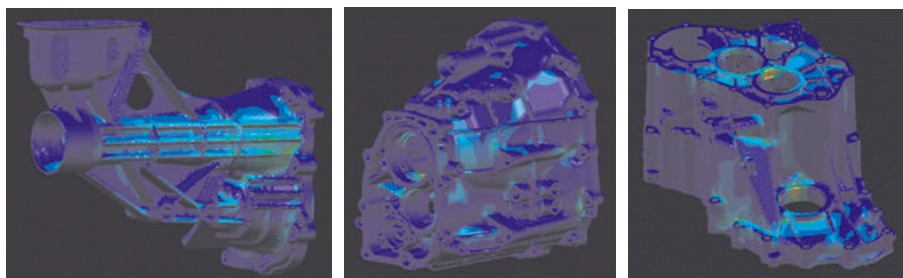


Fig.8 Finite element analysis examples of 3D detail models

8. 参考文献

- (1) 三好俊郎:有限要素法入門, 東京, 培風館, 1994, p.179-183
- (2) 東町高雄:有限要素法のノウハウ, 東京, 森北出版, 1993, p44-47
- (3) 高橋勝雄, 高橋幸敬, 錢場克己: パワープラント振動解析への大型計算機の利用, 自動車技術会, 学術講演前刷集 901, p65-68 (1990)
- (4) Semba, K., Takahashi, K. et al.: Finite element eigenanalysis of frontwheel drive powertrain, 7th IMAC Vol.9. (1989)

■ 著 者 ■



永井 滋



内田 孝尚