

自動車用トランスミッション開発における 設計者の行なう CAE 解析例と今後の方向性

Practical Examples and Future Directions for CAE-Based Development for
Automobile Transmissions by Designers

内 田 孝 尚*
Takanao UCHIDA

永 井 滋*
Shigeru NAGAI

小 山 重*
Shigeru KOYAMA

要 旨

3次元(以下 3D)CAD システムが自動車用トランスミッションの設計開発に導入されて数年が経過した。この 3D CAD システムで設計される 3D モデルを用いた砂型試作品精度が金型量産品レベルまで向上した。また、CAE 解析用の自動メッシュ作成機能が向上したことから、設計者自身が設計作業の中でこの機能を用いて試作品及び量産品の型作成に用いられる 3D モデルをそのまま CAE 解析に用いて、部品の詳細仕様を決定する製品開発が普及した。これらの設計現場改革の次ステップとして、CAE 解析機能をより設計者向けに環境整備することで、設計者が部品単体の CAE 解析を行なうだけでなく、より難度の高いアセンブリモデル CAE 解析も設計作業の中で活用できる可能性のあることが判明した。

ABSTRACT

Three-dimensional (3D) CAD systems have been used for design and development of automobile transmissions for several years. These systems have been improved to the point that they can be used to design sand castings which have precision equivalent to that mass-produced from die molds. Since automatic meshers for CAE analysis have improved so much, it has become increasingly common practice for designers to use, as is, the 3D models of prototype parts and mass products in CAE analyses to make decisions on the detailed specifications of components. The next step in this revision of CAE systems is to re-create them as a more designer-friendly environment, and allow designers to use these systems to perform CAE analyses not only of individual components, but also of assemblies, a much more difficult task.

1. まえがき

近年、3D CAD システムを用いた設計が発達し、2次元(以下 2D)図を 3D モデル化するのではなく、設計初期から 3D 設計する手法が主流になりつつある。エンジン、トランスミッション等の鋳造部品についても金型作成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)で設計検討を行なうようになりつつある⁽¹⁾。これに加えて、3D 詳細形状モデルが CAE 解析モデルとして用いることが可能となった⁽²⁾。このため、設計者自身が CAE を用いた設計検討を行なうことが容易になった。ここでは、自動車用トランスミッションにおける 3D 設計の開発効果例と今後の設計者の用いる CAE の方向性を示す。

*栃木研究所

2. 3D 詳細形状モデルと試作品精度

トランスミッションケースやエンジンのシリンダブロック等の鋳造部品は、金型で量産製造されるが、仕様検討のための試作品は砂型を用いて、少量生産される。Fig. 1 に示す 3D 詳細形状モデルを用いた開発が定着する以前の試作品の砂型は 2D 図を読み取りながら、人の手により製作された。このような手法で作られる砂型による試作品は、設計者が意図した形状とは多少の違いが生じていた。その理由の一つとして、設計者の意図が 2D 図では完全に表現しきれないことがあげられる。また、金型量産品製造のための仕様が 2D 図に織り込まれてなかった等の理由があった。これらの要因によって、試作品が設計者の意図や量産品と違った形状になる可能性があった。開発上流から量産まで共通の 3D

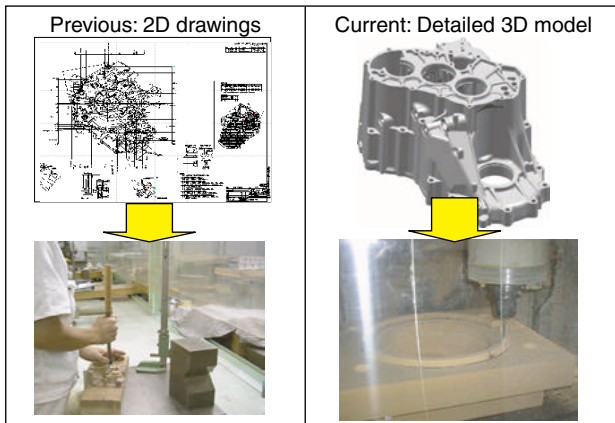


Fig. 1 Comparison of designing methods for sand mold manufacturing

詳細形状モデルを用いた設計が主体となった今日では、その試作品の精度は飛躍的に向上した。その理由は、設計者の意図と造りの考え、経験を設計上流で仕様に織り込み、それらを直接 3D 詳細形状モデル形状に完全に表現できるからである⁽¹⁾。Fig. 1 に示すように、その 3D 詳細形状モデルを用いて直接 NC マシンにて砂型を切削するため、設計者の意図と造り部門技術者の経験が実際の試作品形状にほぼ 100% 反映されることになる。

3D 詳細形状モデルを用いた試作品と従来の試作品精度の違いを設計形状から割り出された重量(設計重量)と比較した結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 の縦軸は設計重量値と試作物重量値の重量比を示す。

従来の砂型試作品重量は、設計重量に対し、約 10% 増となっていたが、3D 詳細形状モデルを用いて直接砂型を NC マシンによって切削する新しい方法での砂型試作品重量は、金型を用いて製造される量産品の重量精度とほぼ同じ $\pm 2\%$ 以内に収まる。このことから金型量産品と同等重量で、同等形状の鋳造部品を試作段階で入手可能となったと言える。

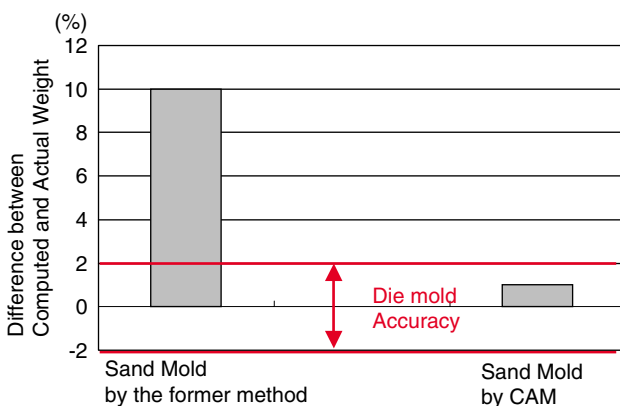


Fig. 2 Comparison of error in prediction of casting weight

3. 3D 詳細モデルでの単体部品 CAE 解析

従来の CAE 解析を行なうには、CAE 解析用ソフトウェア(以後、CAE ソルバ)の専門的なオペレーション技術とその CAE ソルバに対応する CAE モデルを作る技術が必要であった。このため、設計者やテスト開発者とは別の専門技術を持った CAE エキスパートと呼ばれるエンジニアが存在していた。この CAE エキスパートが設計者の提出した 2D 図や 3D 図を用い、Fig. 3 に示すようなフィレット、抜き勾配、ボルト穴等を省略した CAE モデルを作成し、CAE 解析を行っていた。また、時として、CAE エキスパートが設計者の代わりに解析結果の判断まで対応してきたこともあった。

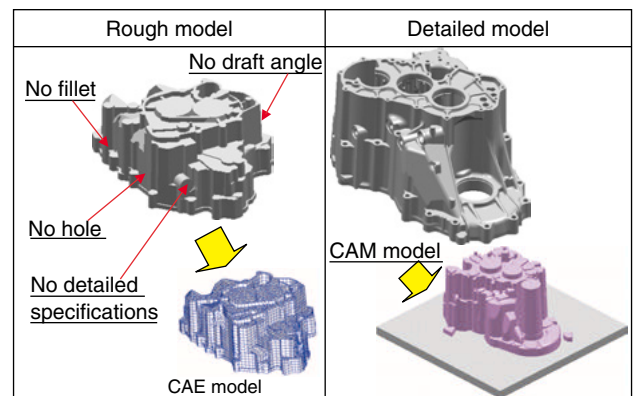


Fig. 3 Definition of rough & detailed models

CAE モデルの形状を簡略化するのは、計算機の計算容量限界を越えないために、CAE モデルの大きさを抑えるのが目的であった。そこで、少ない要素数、節点数であっても精度の良い結果を得るため、比較的高い計算精度がえられる 6 面体要素を用いる手法を進めてきた。また、CAE エキスパートの作業時間を削減するために、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る手法でも対応していた⁽³⁾。これらは計算解析限界内で有効に計算結果を出すための手段であったと考えられる。このように、当時の CAE ソルバの操作性や解析条件設定に専門性が強いだけでなく計算限界を意識した CAE モデル作成技術が必要であった。そのため、設計者が CAE 解析を用いて設計諸元決定を行うことのできる設計ツールと成り得てなかったと思われる。

Fig. 4 はトランスミッションを例に開発から量産までの流れを示す。試作品ができるまでは、主に CAE による解析で諸元の検討が行われる。2 章で記述したように、量産金型品とほぼ同じ精度の試作砂型品が入手できる今日では、試作品を用いたテストで量産金型品を用いたテスト結果と同じレベルの判断が得られるようになった。このテスト結果

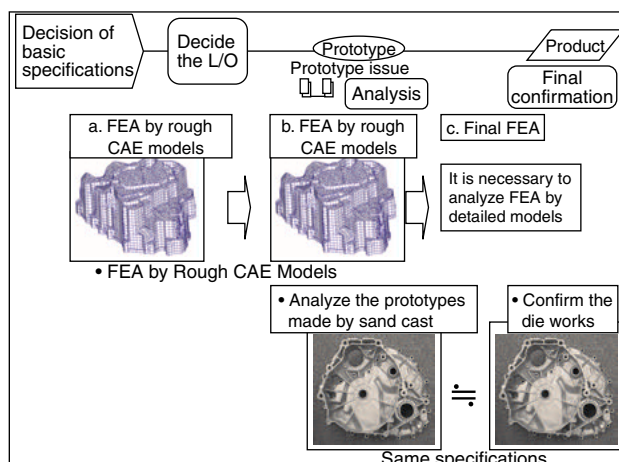


Fig. 4 Transmission development flow and models

をもとに形状を見なおすことは、量産品を直接見直しを行なうことと同じレベルの精度が必要となる。Fig. 4 の c Final FEA は従来行われていた CAE エキスパートの作る形状簡略化された CAE モデル解析では各部位詳細形状の影響を判断できないことが分かる。このため、詳細形状の影響まで判断できる簡略形状ではない CAE モデルでの解析が必要となる。このように試作品の精度が上がることで、試作品テスト後の CAE モデルに、より高い形状精度要望が生じたことになる。

3.1. 3D CAD-CAE の狙い

3D 詳細形状モデルの有限要素解析実施のためには、詳細形状まで CAE モデル化する強力なオートメッシュ機能が必要となる。3D 詳細形状モデルのオートメッシュ機能については前報^{(2), (4)}で述べているので割愛する。

そこで、開発の中での CAE 解析を有効に用いるためには、設計者が 3D モデルによる設計を行いながら、同一の 3D 設計ツール上で短時間のうちに有限要素解析ができるようにすることが必要である。Fig. 5 で示すように設計者の意図が 3D 図上に表現されると同時にその諸元の機能も CAE 解析で判断できることになる。

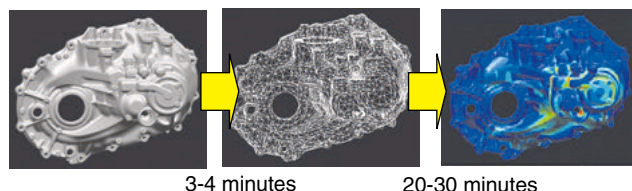


Fig. 5 The detailed model and the result

3.2. 設計者による応力解析例

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^{(2), (4), (5)}。

Fig. 6 に実際の応力解析例を示す。この解析例のモデル

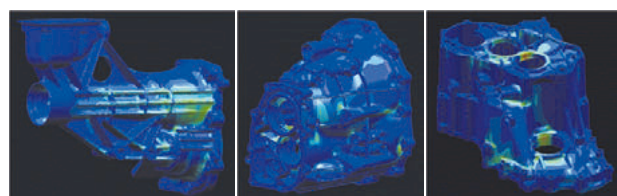


Fig. 6 Examples of FEA in detailed models

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だけでなく、金型品での抜き勾配も含まれた金型作成転用可能な 3D 詳細形状モデルである。

解析例の条件は 4 面体 2 次要素による約 15 万節点、約 9 万要素である。

従来は、CAE エキスパート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フィレット無し、節点数約 2000 で約 80 時間以上かかった。一方、この 3D 詳細形状モデルによる解析では、境界条件付加に約 10 分、ワークステーション上で行われるオートメッシュを含む計算時間が約 30 分に短縮された。また、メッシングだけに要する時間は、3～4 分である。

3.3. 固有値解析例

固有値解析に対する 3D 詳細形状モデルでの対応例を紹介する⁽⁵⁾。

テストで明確になった課題は 2.3kHz に大きな放射音が存在し、著しく騒音が悪化することである。この音振動のテスト結果をもとに 3D 詳細形状モデルを用い、CAE 解析を行なった。Fig. 7 はリブ等個々の設計諸元の固有値に対する影響を CAE 解析にて判断し、騒音悪化の原因であった 2.3kHz にあった固有値を 4.1kHz に上げ、大きな放射音改善を行なった例である。

このような CAE を用いた固有値解析は以前にも行なわれていたが、金型品の抜き勾配も含まれた 3D 詳細形状モデルをそのまま CAE 用解析モデルとして設計者が解析を行なうことは不可能であった。

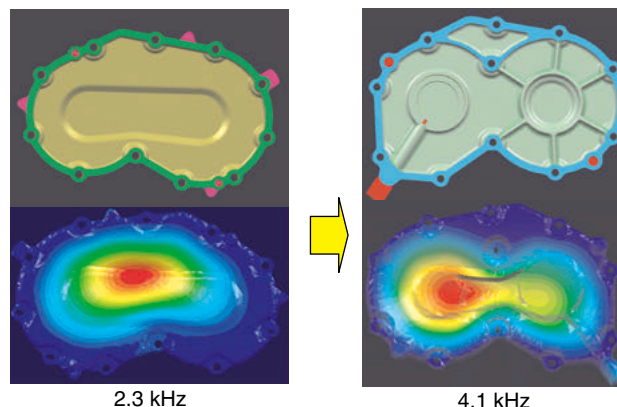


Fig. 7 Modal analysis by FEA

これらの設計者が CAE 解析を用いたトランスミッション開発での効果例を Fig. 8 に示す。従来の開発に対し、3D 詳細形状モデルをそのまま CAE モデルとして用いた開発での設計変更回数は約 1/3 と大幅に減少している。

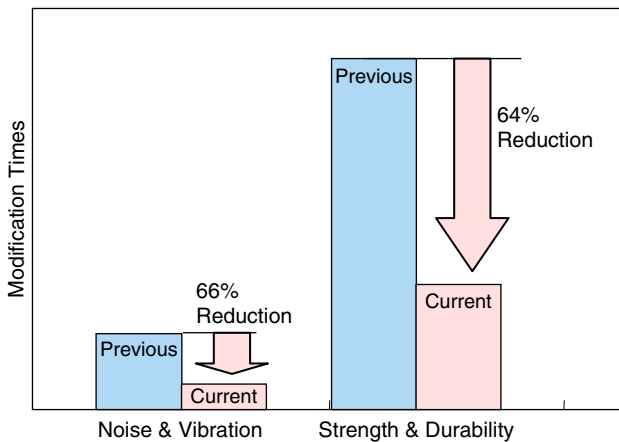


Fig. 8 Revised specifications of the transmission die mold parts at start of production

4. 設計者によるアセンブリモデル CAE 解析

4.1. アセンブリモデル CAE 解析の狙い

強度、剛性、固有値解析を設計者とテスト開発者が自ら CAE 解析し、部品単品の諸元決定を行った例を 3 章にて記述した。

部品単体での機能評価を机上で行なう時の最大の課題は解析条件の設定である。解析条件は設計上の目標要件と過去のテスト結果をもとに設定する。これらの解析条件は個々の部品単位での条件ではなく、各部品が組み合わされた状態を基準に検討されることが多い。例えばトランスミッションの入力トルクから各部軸受け等に加わる荷重とその方向を求め、それを基準に各部品の解析条件を決定する。CAE の計算精度に対する議論は多いが、解析条件に対する精度検討は解析者にゆだねられることが多く、参考となる論文や報告例も少ない。もともと設計者は各部品に加わる荷重、変位等を算出し、過去事例を踏まえ設計諸元を決定していた。その部品にかかる力の使われ方を正確に予測した設計者ほど軽量コンパクトな設計を行なっていたと言える。設計者が自ら CAE 解析を行ない解析条件を検討することで、精度の高い解析条件が設定される。しかしながら、新しい L/O 設計、新機能の部品設計では、各部品にかかる力を予測することが難しい。これらの各部品にかかる力などの解析条件を求めるため、CAE エキスパートに依頼して、非常に粗いメッシュの CAE モデルによる簡略化されたアセンブリモデル CAE 解析を行なうこともあった。このアセンブリモデル CAE 解析で得られた各部品にかかる力を解析条件として用いて部品単体 CAE 解析を行なうこともあ

る。もし、諸元の簡略化されたアセンブリモデル CAE 解析ではなく、3D 詳細形状モデルを用いたアセンブリモデル CAE 解析を行なうことが可能ならば、部品単体への解析条件も考慮した各部品の強度・固有値等の解析結果が高精度で得られることになる。

例えば、トランスミッションのケース剛性を評価する時、ケース単体の CAE 解析は容易であるが、その解析条件のひとつとしてケース合わせ面に加わる荷重を予測する必要がある。このような解析条件がユニット単位のトランスミッションとして CAE 解析を行なうことが可能ならば、合わせ面に加わる荷重条件も解析中の結果として得られる。当然このようなアセンブリモデルを用いた大規模解析は時間をかけて CAE エキスパートにより既に行なわれており、CAE 解析例としては、珍しいことではない。しかしながら、設計段階で設計者による 3D 詳細形状モデルを用いたアセンブリモデル CAE 解析は高度な CAE 解析技術を必要とすることと解析のための時間がかかることからほとんど行なわれていなかった。

そこで、設計者が設計作業として、短時間で実行できる 3D 詳細形状モデルを用いたアセンブリモデル CAE 解析環境の構築が次ステップの明確な課題となる。

4.2. アセンブリモデル CAE 解析と効果例

単体部品の CAE 解析を設計者が自ら行なうようになったと同時に複数の部品を組み合わせたアセンブリモデル CAE 解析を設計者自ら行なう試行が既に始った。その例を Fig. 9 に示す。

本トランスミッションは 2 つの外側ケースで構成されており、これらの 2 つのケースを各々結合し、これに、ギヤとギヤシャフトの円筒上簡易モデルを別途製作、アセンブリモデル CAE 解析を行なっている。このような解析手法は既に、CAE エキスパートにとっては一般的な手法と言える。大きな違いは数時間以上費やしていた CAE 解析の接触定義等の前処理時間が、今まで CAE エキスパートが用いていた CAE ソルバに比べて、数分の 1 以下になったことである。3D CAD システムに組み込まれた CAE 解析用ソフトウエ

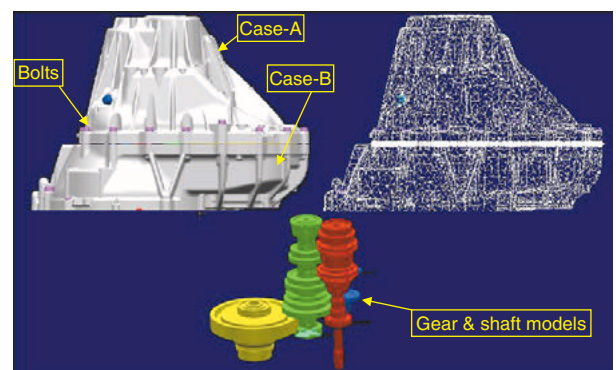


Fig. 9 Assembled models

ア(以後、CAD-CAEシステム)では、この前処理作業が簡略化されていることと、その作業が同じ設計 CAD 上で行なえることから大きく工数を削減でき、設計者自身によるアセンブリモデルCAE解析を用いた設計検討が可能になりつつある。

Fig. 10は、このアセンブリモデルを用い、ケース放射音発生への対策手法を探るため、設計者自らが固有値CAE解析を行なった例である。このモデルを用いた対策結果の一部を Fig. 11 に示す。いくつかの部品が連成された状態での詳細形状評価が設計者自らによってできるようになった。

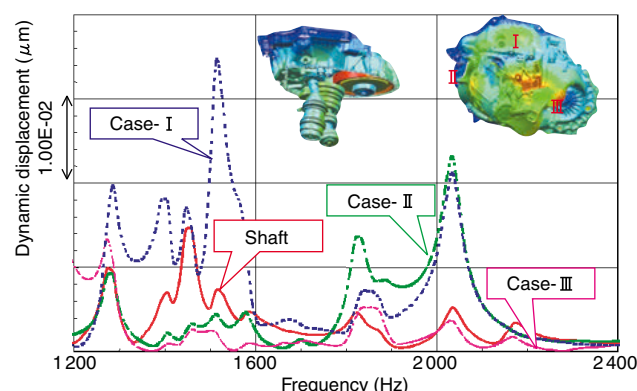


Fig. 10 Dynamic displacement of an assembled model

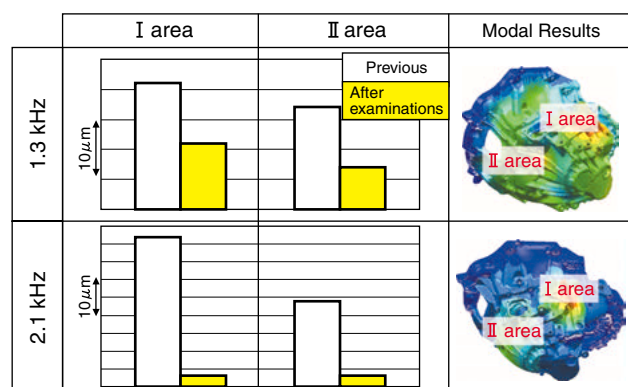


Fig. 11 Results of countermeasures

4.3. 設計者によるアセンブリモデル CAE 解析の今後

CAD-CAEシステムを用いたアセンブリモデルCAE解析は、CADモデルをそのままCAEモデルとして用いられることと、接触定義等が従来のCAEソルバよりはるかに簡便なことから、3章で説明した単体部品のCAE解析と同様に設計者による解析が一般化すると考えられる。次世代のCAD-CAEシステムを用いたCAEの作業ではその準備に費やす時間が現在のCAD-CAEシステムに比して数分の1以下

になることが判明している。設計者がアセンブリモデルCAE解析を行なえる事実を設計者自身が既に実感したと同時に4.2で記述したギヤ・シャフト類の詳細形状モデル化要求も必然的に生じている。全ての部品が3D詳細形状モデルを用いたアセンブリモデルCAE解析ではサイズ肥大により、計算機とCADシステムの計算限界を超える課題のため現在のところ解析不可能である。システムによって多少の違いがあり、現状使用されているCAD-CAEシステムの計算限界の正確な値を述べることは難しいが、解析モデルの大きさが百万自由度程度、2000～3000コンタクト要素程度と考えられる。筆者も含めた設計者の希望するアセンブリモデルCAE解析を行なうためにはシステム及びCAD-CAEソフトウェアの改良が必要である。この領域の解析をストレス無く簡便に解析ができるようになることが、全ての設計者共有の課題と筆者は考える。

5. まとめ

3D詳細形状モデルを用いた開発により、

- 1) 砂型試作品精度が量産金型品レベルまで向上した。
- 2) 試作部品のテスト結果が量産部品を用いたテスト結果とほぼ同等な判断が可能な精度であるから、試作部品を用いたテスト後のCAE解析では、詳細形状の判断可能な3D詳細形状モデルを用いたCAE解析が必要となった。
- 3) 設計者自身が設計作業の中で3D詳細形状モデルを用いたCAE解析を活用できるようになった。
- 4) 従来、CAEエキスパートのみが行っていた高度なアセンブリモデルCAE解析を設計者自身が設計作業の中で活用できることが判明した。

6. あとがき

3D詳細モデルを用いた開発により、設計の早い段階で造りの技術が織り込まれるようになっただけでなく、設計者自身による有限要素解析が可能となり、有限要素解析技術も設計者の有効なツールとなってきている。このように今まで造り技術者やCAEエキスパートの技術や情報であった内容までも、開発上流で設計者が判断し、仕様に反映する開発形態となっている。CAD-CAEオペレーションの簡便化がなされ、設計者が自らCAE解析を行なう流れもできた今日、次のステップとしてアセンブリモデルCAE解析を行なう流れが明確に見えている。その阻害要因は現行のCAD-CAEにアセンブリモデルサイズに対する解析限界が存在することである。この課題を設計者とCADベンダとの間で共有し、ハードウェアも含めたCAD-CAE解析環境向上を早急に行なうことが将来の設計開発技術向上の鍵と言える。

7. 参考文献

- (1) 島田宏美, 石濱陽一郎, 久保田和, 内田孝尚:3Dメディアを用いたトランスミッション設計手法の構築, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.2, p.107-114 (2002)
- (2) 永井滋, 内田孝尚:3D オートメシヤ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, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.1, p.117-124 (2001)
- (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, p.65-68 (1990)
- (4) 内田孝尚, 永井滋:自動車用トランスミッションにおけるバーチャル開発へのアプローチ例自動車技術, Vol.56, No.6, p.71-76 (2002)
- (5) 禰久和臣, 関根明子, 両方雅行:エンジンマウントにおけるギヤ振動伝達予測技術, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No1,p.145-150 (2001)

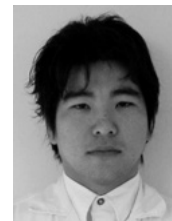
■ 著 者 ■



内田 孝尚



永井 滋



小山 重