

二輪車の振動予測における結合部のモデリングについて

Connector Modeling of Motorcycles on Vibration Prediction

桑 原 博 幸*

Hiroyuki KUWAHARA

福 井 要 治*

Youji FUKUI

要 旨

図面に基づき二輪車の振動予測をするためには、コンポーネント間の結合特性が不確定である。そのため、ボルト締結に着目し、テストピースによる結合特性を実験して解析法を検討した。さらに、詳細な FEM モデルを作成し、MSC/NASTRAN の非線形 GAP 静解析により結合部の接触領域を求めた。その領域を高剛性のバネ要素に置き換えた正規モード解析により、各モードの共振周波数がほぼ一致することを確認した。この手法を実機に適用するとともに、コンポーネントの結合部に NASTRAN の RESVEC 計算を適用し、FEM モデルを改良した。

ABSTRACT

When predicting motorcycle vibration using data from drawings, connecting characteristics of each component was uncertain. Therefore, using test pieces, we tested connecting characteristics of bolt fastening, and an analysis method was considered. A detailed FEM model was created, and a contact domain of the connector was calculated by nonlinear-GAP static analysis of MSC/NASTRAN. An analysis of the normal mode by converting the domain into a spring element of high rigidity was performed, and matching the resonance frequencies of each mode were confirmed. Applying this method to an actual motorcycle and applying RESVEC calculation of NASTRAN to connectors of a component improved the FEM model.

1. はじめに

二輪車においてフレームは、エンジン、動力伝達装置、ステアリング、サスペンション等を連結する車両の基幹部品である。フレームはそれらの重量を支える十分な強度、車両の運動性能に関係する適正な剛性、さらに乗員に対し許容できる振動特性を同時に考慮されなければならない。これらの要素は相互に関係しており、高度にバランスのとれた構造が要求される。フレームやエンジンは多種多様に存在しており、車両性能や用途によって、それらの要素バランスを変更している。また、二輪車の特性上、軽量、コンパクトは最重要課題であり、エンジンをフレームの剛性の一部として利用したり、チェーン駆動という動力伝達装置の制約からエンジンを剛にフレームに結合している場合が多い。これらの条件下において、強度、操縦安定性等、他部門との連携を取りつつ振動解析を行っており、特に、解析の基本となる有限要素モデルにおいては共用を前提に作成されている。

2. コンポーネントモデルの作成

フレーム、マフラなどのコンポーネントのモデル化にお

いて、近年のデジタル技術の進展は、有限要素モデルの詳細化を進め、精度的に大きな進展が見られた。従来、モデル作成に多大な工数を要していたが、近年の図面の 3D 化はモデル化を容易にし、ほぼ図面作成と併行して、コンポーネントの有限要素モデルが作成できるようになってきた。各コンポーネントのモデル化技術は完成車の振動予測精度に影響を与え、かつ、溶接や圧入などの不確定な要素においては実験モーダル解析によって、日々、モデル化技術の精度向上を行なっていくことがきわめて重要である。

また、二輪車における完成車の振動予測の周波数範囲としては、エンジン回転数で約 10 000r/min で、2 次振動を考慮すると、330Hz まで必要である。実験モーダル解析および結合点でのポイントインピーダンスを利用し、コンポーネントモデルの精度向上を実施した。

2.1. モーダルモデルの精度向上

従来から、完成車モデルで正しいモーダルモデルを得るためには、完成車モデルで必要な 2.5 倍程度の周波数帯でコンポーネントのモーダルモデルが必要であると言われていた。これは 330Hz まで二輪車の完成車振動を予測するためには、コンポーネントは 800Hz まで正しく表わす必

要があり、また、この周波数範囲で良いモーダルデータ抽出のために非常に高い測定技術を必要とする。計算とテストのMAC(Modal Assurance Criterion)マトリクスの低下の多くが不十分な測定に起因し、初期のMACマトリクスが不正確であると、正しいモーダルモデル更新は難しくなる。効率的なモデル精度向上のための手順は、モードシェープもしくはモーダル周波数に関する感度が計算できる個別のグループに、コンポーネントモデルを分割することである。これにより、モデルの欠損、溶接、接触、板厚等のモデル化不具合が分かる。二輪車フレームのFEMモデルの例と更新したモデルによる計算とテストのMAC値を Fig. 1 に示す。

2.2. ローカル剛性の活用

正しい結合特性はコンポーネントの結合点の振動予測精度に依存するので、結合点に焦点を合わせるのは非常に重要であり、ポイントインピーダンスを利用し検証した。ポイントインピーダンスは同じ点での局所力の入力による局所の振動応答(一般的に加速度)の伝達関数である。MSC-NASTRAN において、剛性挙動を引き起こすローカルモードをV70.0から計算することができる。これらのモードは、正規モード解析で欠けている剰余剛性を補うので、残りのモード(RESVEC; Residual Vector)と呼ばれる⁽¹⁾。剛体モード、弾性モード、および剰余モードを考慮することにより、非常に正しい伝達関数を容易に得ることができる。Fig. 2にRESVEC を考慮した場合と 500Hz までの弾性モードのみから合成した伝達関数の例を示す。ポイントインピーダンスは、(1)剛体挙動、(2)共振挙動、(3)剛性挙動、(4)ローカル共振挙動の4つの状態に分けることができる。

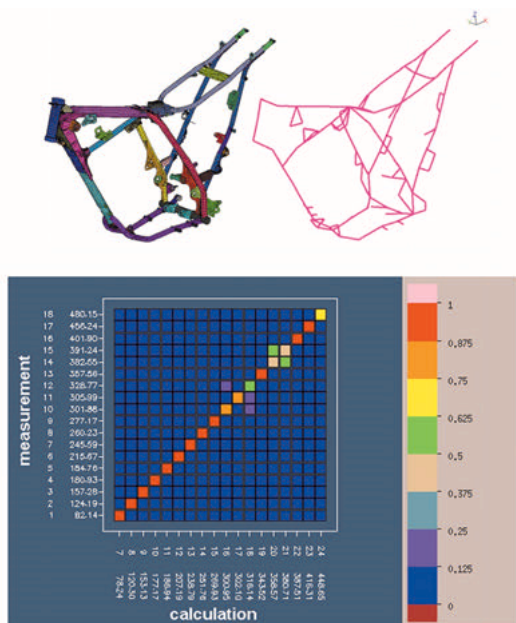


Fig. 1 Model and modal updating results of a motorcycle frame

一般に結合点は何らかの弱点を誘引する領域であるので、剛性挙動の影響はコンポーネントの結合に少なからず影響を及ぼす。一般に、剛性挙動は高い周波数におけるローカルモードのプレ共振挙動である。結合特性を正しく表現するためには、この剛性挙動を発生させるローカルモードを含んでいるモーダルモデルを得ることが重要である。結合部のローカル剛性が考慮できれば、前述のように十分に高い周波数まで、共振挙動を表わすモデルの更新を実施する必要はなくなる。したがって、完成車モデルで必要となる周波数帯の 1.5 倍(約 500Hz)までコンポーネントのモーダルモ

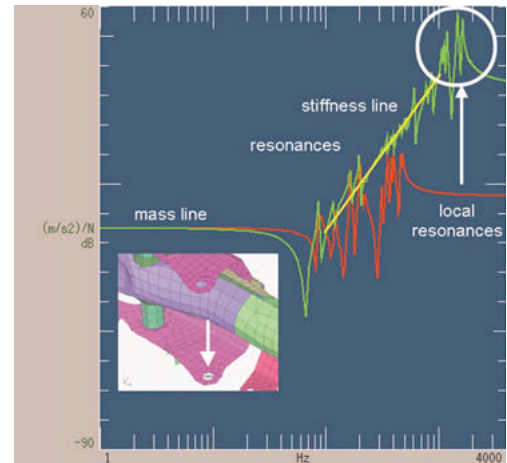


Fig. 2 Frequency bands for driving point FRF

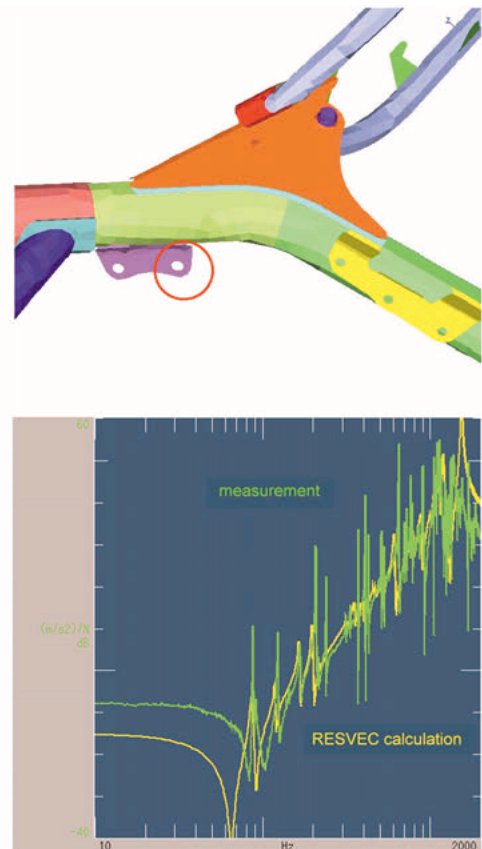


Fig. 3 Local model and driving point FRF updating procedure

デルを更新し、また、ローカルな剛性効果を正しく表現するためにポイントインピーダンス測定を利用した方が良い。RESVECを用いて計算された伝達関数とポイントインピーダンスを比べ、Fig. 3 で示すような局所のモデル化(溶接、圧入等)の、精度向上が可能となった。

3. コンポーネントの結合

二輪車のコンポーネント同士を結合する部分の要素として、ボルト締結、ベアリング、ブッシュ等があるが、その結合特性の把握が振動予測をはじめとして、あらゆる解析できわめて重要な要素である。システムの振動予測手法として、部分構造合成法等があるが、部品間の結合は一般にFig. 4 で示すように6自由度のバネで代表させていた。

しかしながら、これらのバネは実験的に求めており、多くのテストによるデータベースが必要であった⁽²⁾。また、大きく構造が変化した場合、対応できないことがあったり、類似の結合部を利用したりして、自ずと予測精度は低くなっていた。これらの問題を解決するため、二輪車の代表的な結合手法であるボルト締結をより解析的に把握できる手法を試みた。そこで結合部の現象を詳細に理解するために、単純な結合部を形成するテストピースとフレームの一部を切り出した単純モデルで解析を行った。最後に実際の二輪車のエンジンとフレームの結合の事例を示す。

3.1. テストピースの場合

テストピースは、二輪車のエンジンマウントを想定し、

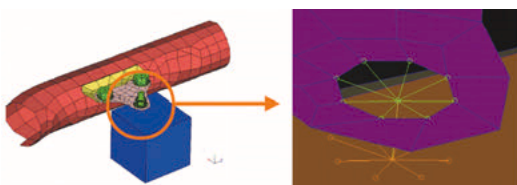


Fig. 4 Conventional connector modeling

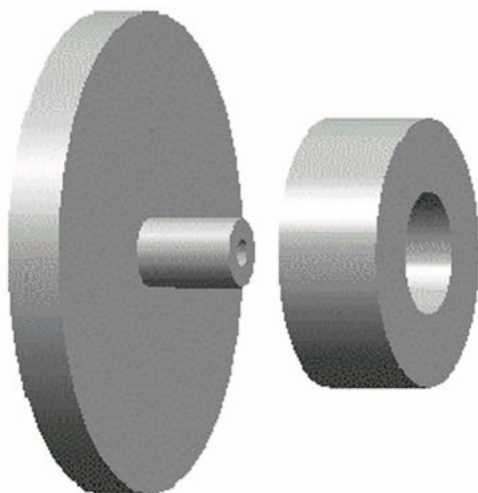


Fig. 5 Structure of test piece

Fig. 5 のように二分割の部品を M10 のボルトで結合している。ボルトの軸力はボルトの側面に 2 枚の歪ゲージを貼付して管理した。表面粗さはフレーム、エンジンの結合部と同等の加工レベルである。実験的にボルトの軸力や取り付けられる板厚等を変化させて、固有振動数との関係を調べた結果、取り付けられる板厚の変化に大きく影響されることが分かった。

そこで上記テストピースの Fig. 6 に示すような詳細な部分解析モデルを作成し、NASTRAN の非線形 GAP 解析を行い、接触領域の変形を調査した⁽³⁾。解析時間の低減のため、1/4モデルを使用している。モデル化条件として、GAP 要素はボルトフランジと薄板は剥離が生じないと考え、カラーと薄板の接触部分のみに設定し、ボルトフランジと薄板の間は固いバネで結合した。軸力を 1000N で解析した変形図を Fig. 7 に示す。これより、軸力を与えると薄板部分はカラーから剥離していることが分かる。また板厚を変更して同じ解析を行い、GAP 要素の Reaction Force と半径方向の距離をグラフ化すると Fig. 8 に示すようになる。

Reaction Force の正の部分がカラーと薄板が固く接触している部分と考えられ、取り付けられる薄板の厚さとも接触領域が増加していることが分かる。接触領域が分かったところで、その接触領域のみを固いバネ(1e4N ~ 1e5N/

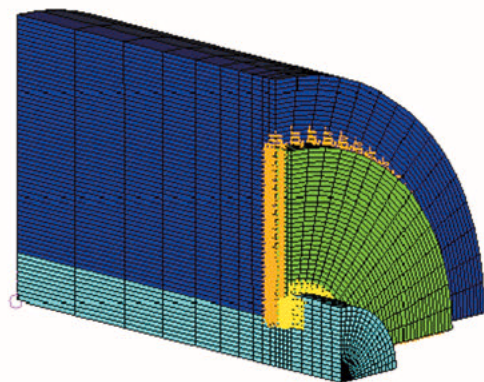


Fig. 6 Fine mesh model for GAP analysis

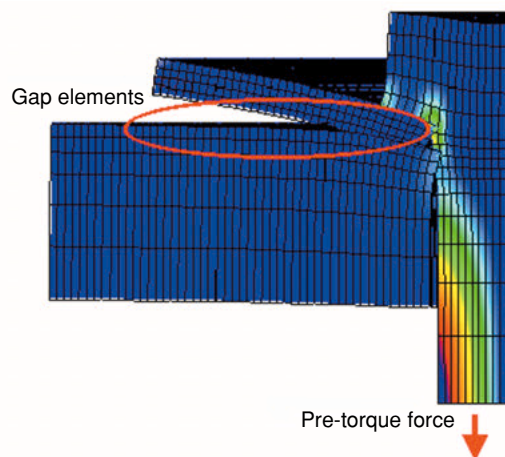


Fig. 7 Deformation result

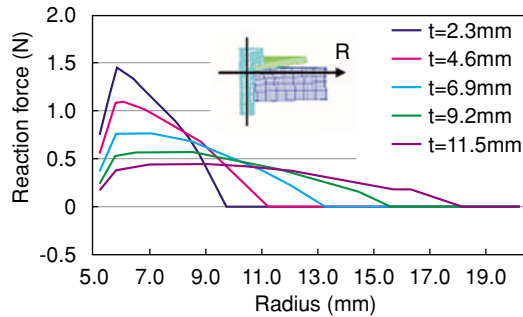


Fig. 8 Determination contact area radius by reaction force of GAP elements

mm)で結合し、再度モデル化を行い正規モード解析を実施して、測定値と比較検証を行った。計算のフローを Fig. 9 に、Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12に各板厚に対する計算とテスト結果および参考のための一体物の共振周波数を示す。薄板の板厚に関わらず、良く共振周波数は一致し、モデル化手法の妥当性が確認できた。

3.2. フレームの切り出しモデル

次に二輪車のエンジン、フレームでよく適用されている結合部について解析を行う。解析モデルのフレーム部分は

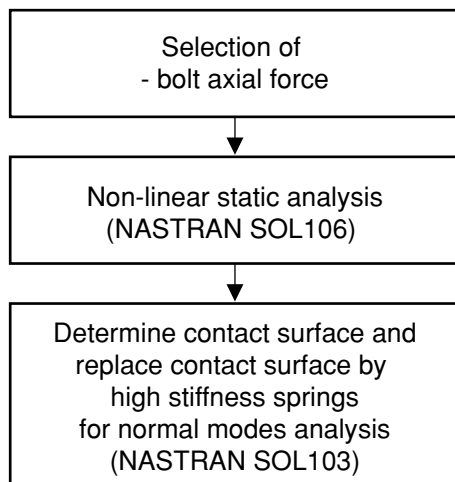


Fig. 9 Analysis flow

実際のフレームの一部を切り出し、切口の両端で拘束、また、エンジン部分は直方体のブロックのモデルとする。テストに供した実物と FEM モデルを Fig. 13 に示す。このように簡単化することにより、わずかの確認できるモードの共振周波数があり、加振テストによる結果を Fig. 14 に示

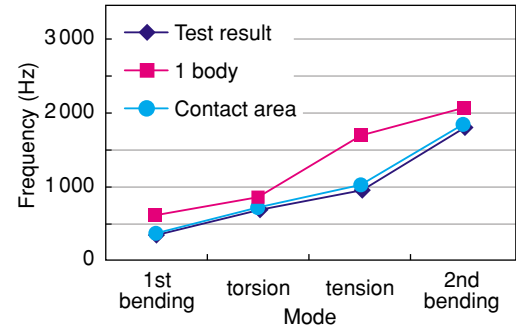


Fig. 10 Natural frequency of test-piece (t=2.3mm)

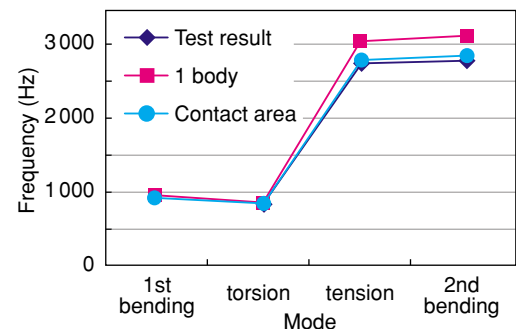


Fig. 11 Natural frequency of test-piece (t=4.6mm)

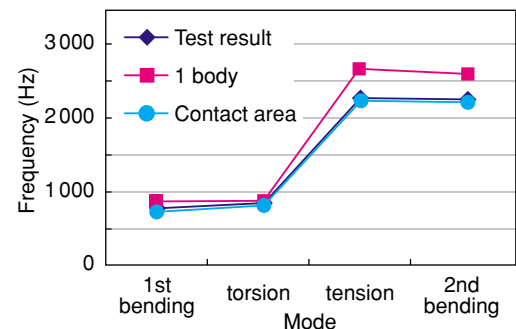


Fig. 12 Natural frequency of test-piece (t=11.5mm)

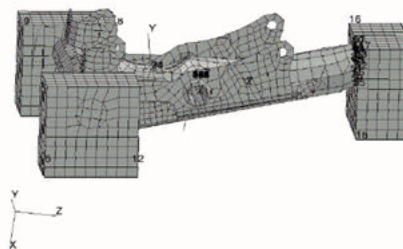


Fig. 13 Simplified model of engine frame connection and FEM model

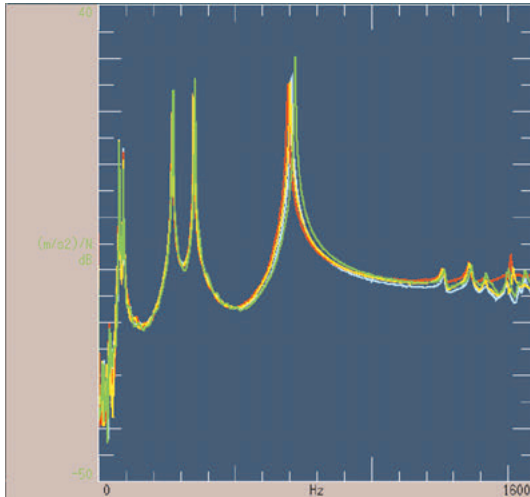


Fig. 14 Impact test result for reciprocity

す。この加振テストは再現性の確認のために行い、ボルトの軸力は締め付けトルクにより管理した。800Hz 付近のモードは繰り返しによるバラツキが大きい。これは主にネジの締め付けトルクの管理に起因していると考えられる。前節のテストピースにおいては 3.2kHz まで大きなバラツキは発生しなかった。

また、エンジンとフレームのマウント部の間は製造上の関係から、0.5 ~ 1.0mm 程度の公差がある。ボルト締結のモデルを作成するにあたり、Fig. 15 で示されるように4つの領域にGAP要素が考えられるが、同図で示すように、取り付け形状による精度を低下させることなく GAP 要素は、2つまで減少することも可能である。

ボルトとナットの間に軸方向で反対の力を加えることにより、ボルトの軸力を表すことができる。最大軸力を指定して MSC-NASTRAN の GAP 要素を用いた非線形静解析を行い、その直後に正規モード解析をリスタートすることにより、各モードの共振周波数に対する初期公差や軸力の

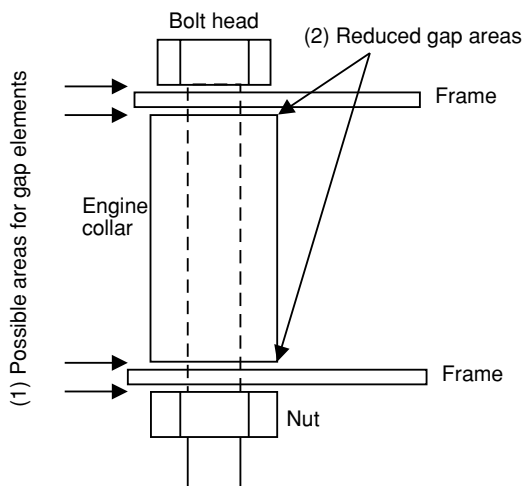


Fig. 15 Possible areas for using GAP-elements, Reduced number of GAP-areas

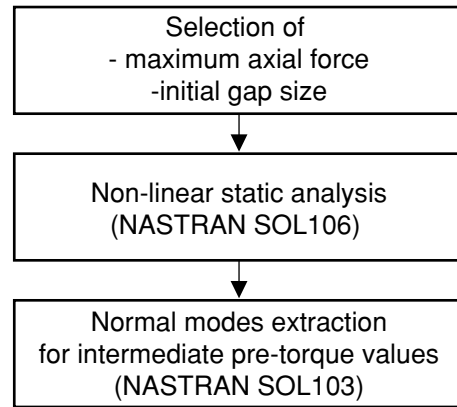


Fig. 16 Analysis flow

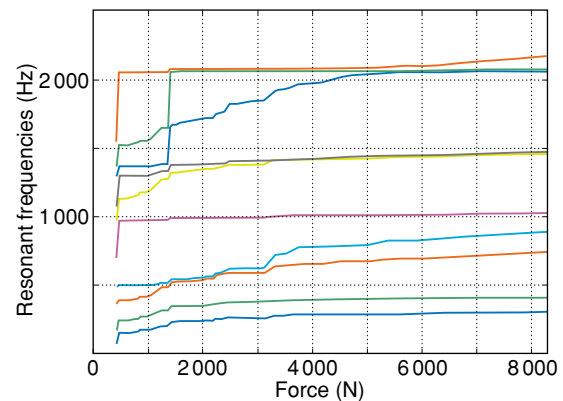


Fig. 17 Effect of bolt force on resonance frequencies

影響がわかる。その解析フローを Fig. 16 に、解析結果を Fig. 17 に示す。横軸はボルトの軸力で縦軸は共振周波数である。軸力を上げていくと段階的に隙間が閉じられ、軸力とともに各モードの共振周波数が増加していることが分かる。また上昇の割合はモードに依存している。

また、同図で示すように、二輪車の実用の周波数範囲(0-330Hz)では、ボルトの常用の軸力である 8000N 付近では軸力を変化してもほとんど共振周波数に大きな影響がない。したがって、その領域では高剛性のバネによってGAPを置き換えることも可能である。しかしながら、周波数範囲をより高い周波数まで拡大すると、GAP 解析の影響が出てくるようになる。本解析では、ボルト接触領域近傍においては、きわめて詳細なモデルを使用することが非常に重要である。また、本方法では全体的な挙動を把握する上では都合が良いが、結合部のモデルの精度を上げようとすると、メッシュサイズをさらに細かくする必要がある。完成車を本手法で行うことは計算資源との兼ね合いも出てくる。

3.3. エンジンとフレーム結合モデル

次に、実際のエンジンとフレームの結合について検討した。エンジンとフレームの結合の FEM モデルを Fig. 18 に示す。実用領域の 0 ~ 330Hz の周波数帯では、エンジンは剛体モデルとして扱い、結合されるエンジンのカラー部

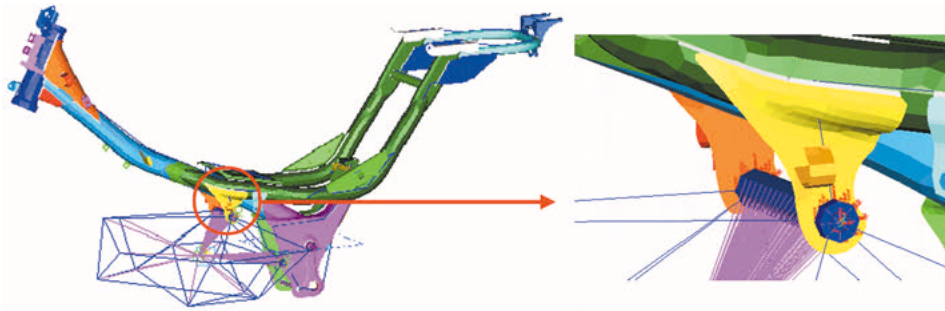


Fig. 18 Engine-frame FEM model (by developed method)

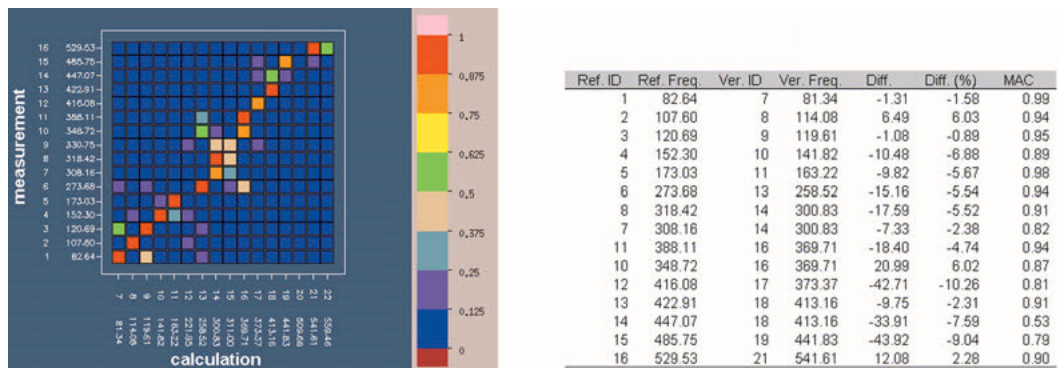


Fig. 19 MAC value of calculation and measurement results (by developed method)

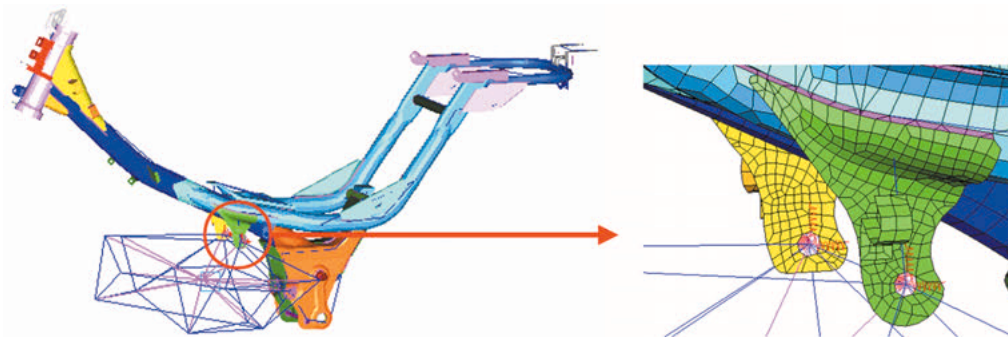


Fig. 20 Engine-frame FEM model (by conventional method)

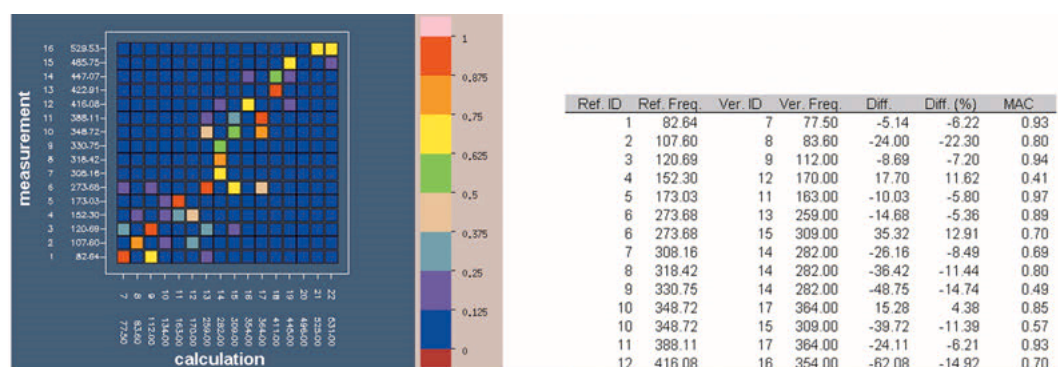


Fig. 21 MAC value of calculation and measurement results (by conventional method)

分を除き剛体要素で作成している。エンジンのカラー部分とフレームのハンガー部分を詳細に作成し、テストピースの場合と同様に面で接触するようにモデル化を行い、固いバネで結合している。このエンジンとフレームの結合モデルの計算およびテストの MAC 値を Fig. 21 に示す。きわめて MAC 値が高く、周波数誤差もほぼ 5 % 以内に収まっており、モデル化の妥当性が得られた。

参考までに、従来の手法によるモデルと計算およびテストの MAC 値を Fig. 20, Fig. 21 に示すが、結合部のバネ定数はテストによって同定することが必要であり、また、Fig. 4 で示したように被結合部であるハンガーの剛体接続点のあいまいさなどにより、同定される結合特性のバネ定数は変化し、不確定要素が多い。かつ、今回実施した 5 回程度の同定では十分な MAC 値が得られていないことが分かった。

従来の手法では、熟練者がよく形状を理解した上で、結合特性を選定していたが、本手法では、結合部を詳細にモデル化することだけで、精度の良い結果が得られた。

4. 結論

本稿では、二輪車の振動予測に関し、重要な結合特性の内容を紹介した。以下に結論を示す。

- (1) 実験的に求めていたコンポーネント間の結合特性を GAP 解析を利用することにより解析的に求めることができるようになった。
- (2) RESVEC 計算を用いることにより、結合部のローカル剛性のモデルの精度向上が可能となり、さらに、精度を低下させることなく採用する弾性モードの数を減らすことができた。

参考文献

- (1) 山崎, 高木, 山本: Residual Vector を適用した ADAMS 弾性体モデル構築手法の開発, MSC Software ソリューションフォーラム 2000 事例・論文集
- (2) 田中, 三枝: 振動モデルとシミュレーション, 東京, 応用技術出版, 1984, p.281-289
- (3) 禧久, 関根, 両方: 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 No.1, p.145-150 (2001)

■著 者■



桑原博幸



福井要治