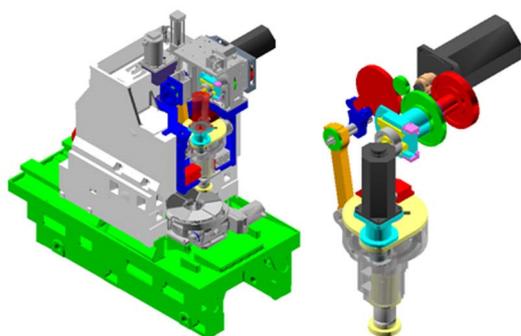


大規模マルチボディダイナミクスによる機械挙動の高精度予測

On the Accurate Motion Prediction with Large Scale Multi-body Dynamics Simulation



金澤 宏幸*¹
Hiroyuki Kanazawa

小林 哲平*²
Tetsuhei Kobayashi

菊池 寿真*³
Toshimasa Kikuchi

当社では、工作機械、新交通システム、風車など多数の部品で構成される製品において、構造部品の振動特性や機械要素部品の荷重伝達で構築される動力学解析(マルチボディダイナミクス:以下 MBD)の適用を進めており⁽¹⁾、製品性能の事前予測による性能向上及びロバスト性向上に努めている。本報では、機械振動が製品性能に直結する歯車加工機械を対象に、MBD を適用する過程において振動計測とのコリレーション^(注)を加えることで、高精度な解析モデルを構築したので、その概要を紹介する。

(注)コリレーション: 実測結果と解析結果の比較評価により解析モデルの剛性、減衰値などの見積もり誤差を低減していくこと。

1. はじめに

当社では各種製品の開発効率化及び品質向上のために、多体系の構造体の振動特性や接触/摩擦といった機械要素を含んだ動力学解析(MBD)の適用を進めている。MBD とは、複数の機械要素で構成される部品、および複数の部品で構成される製品(システム)を多体(マルチボディ)と定義した時、部品レベルから製品レベルの相互に連結された多体の動力学(Dynamics)を解析する数値解析技術を指す。MBD は、その導入当初、機構学による挙動評価や干渉問題を対象にしていたが、近年技術の進展により機械剛性/振動特性を考慮した振動評価やトライボロジーとの連成問題に拡張され、現在では流体力や熱変形との連成問題も考慮できるようになりつつある。

本報で取り上げた歯車加工機械を含む工作機械におけるCAE(Computer Aided Engineering)では、3D-CAD による形状設計と機械の加工反力に対する変形といった静剛性及び振動解析による固有値評価を行っていたが、加工性能評価は製品試作後の実機試験で判定し、加工精度などの要求仕様に適合する様に調整と試験確認を必要とした。すなわち、要求仕様への適合性を機械の静剛性や振動特性による事前評価で完結させることが難しく、試作機による試行錯誤が必要であり、結果的に開発期間の長期化と開発コストの増大を招く例もあった。

今回、加工条件の変更により加工精度(機械精度)が変化するギヤシェーパー⁽²⁾⁽³⁾を対象に、MBD に振動計測評価技術を加え、解析モデルの高精度化により振動発生要因を推定して対策効果を事前に評価可能としたので、以下に紹介する。

*1 技術統括本部総合研究所機械研究部 主席研究員
*3 機械・設備システムドメイン工作機械事業部技術部

*2 技術統括本部総合研究所機械研究部 技術士(機械)

2. 従来のモデル化手法

今回、課題とした事象は、歯車加工時の工具振動による歯面のうねりの発生であるため、当初はモデル化対象を、加工に直結するカッタヘッドと呼ばれるコンポーネントに限定して取り組んだ(図1)。さらに、部品形状などから剛性が弱いと推測される部位に対して、図2に示すような弾性変形モデル化手法を採用したが解析結果と実機挙動の計測結果の比較は図3に示すように実機の振動挙動は再現できなかった。

この結果から、ギヤシェーパの機械全体の剛性/振動特性の問題が影響していると推定し、解析モデルの拡張と振動計測結果とのコリレーションによる解析モデル化の精度向上に取り組んだ。

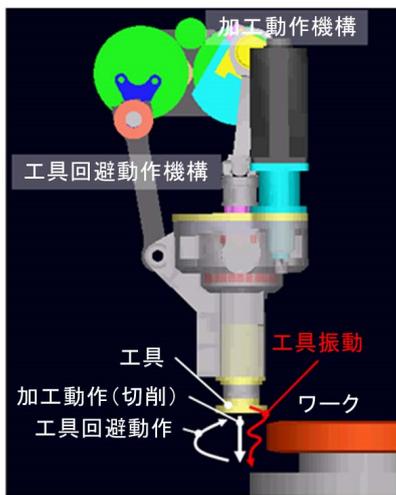


図1 カッタヘッド部とその加工動作

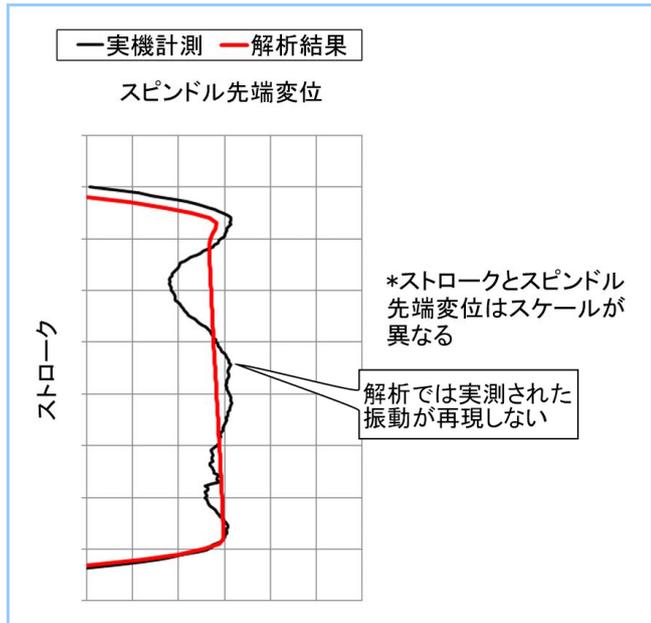


図3 解析結果(従来モデル化手法)と実機計測結果の比較

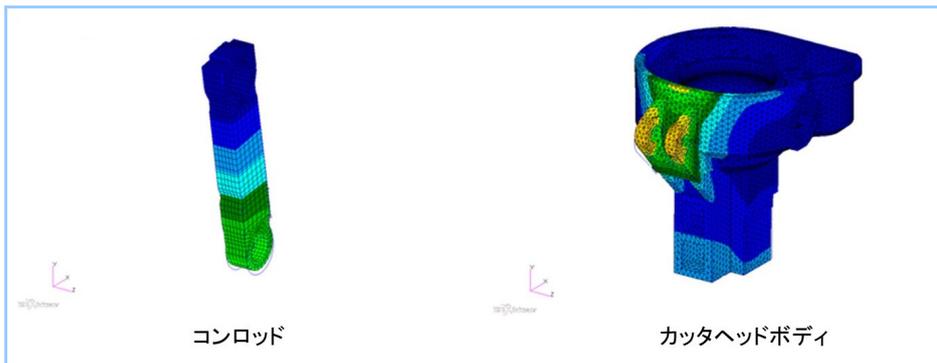


図2 弾性変形モデル化対象部品

3. 高精度大規模 MBD モデル構築事例

3.1 モデル化範囲の拡張

前章に述べた通り、本課題は機械全体の剛性/振動特性に起因すると推定し、解析モデルを図4に示す範囲まで拡張した大規模 MBD モデルとし、ベッド、コラム及びサドルといった構造体は弾性体要素として定義した。この時、部品間の結合要素となるリニアガイド、ボールジョイント、油圧シリンダなどについて剛性値はメーカー公称値や設計データを使用した。

(1) 弾性体部品及び結合要素のモデル化方法

図4に示す全体モデルにおいてベッド、コラム及びサドルを弾性体部品として定義した。モ

モデル化手法は振動モードの必要次数の成分を抽出するCraig-Bamptonのモード合成法⁽⁴⁾を適用している。解析手法としては FEM モデルを作成し、固有値解析で固有振動数とそれに関連する振動モードの抽出を行う。MBD は時刻歴応答解析である為、弾性体要素を FEM 解析で直接解く手法ではタイムステップごとに収束計算を実行することになり非常に効率が悪い。本報で採用したモード合成法は、振動問題を取扱う場合に計算負荷を大幅に軽減できるため有効である。

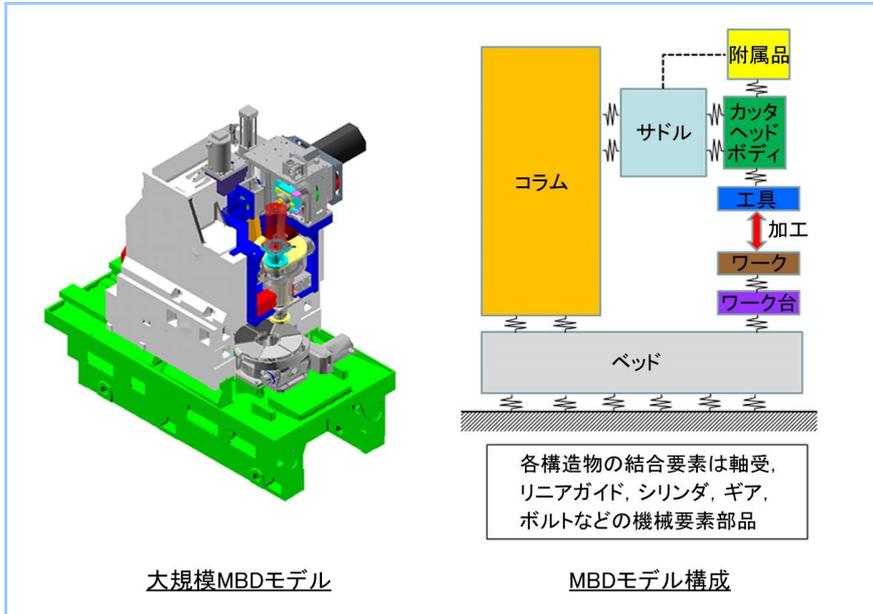


図4 大規模 MBD モデルとモデル構成

(2) 大規模モデルによる解析結果

モデル化範囲を拡張した大規模モデルによる解析結果と実機挙動の計測結果の比較は 図5 に示す通りであり、実機で確認されたような振動的な挙動が再現できることを確認した。しかしながら、振動振幅及び振動周波数において、依然として差異が残る、実機における発生事象の究明及び振動抑制の対策検討に適用するには更なる精度向上が必要であった。

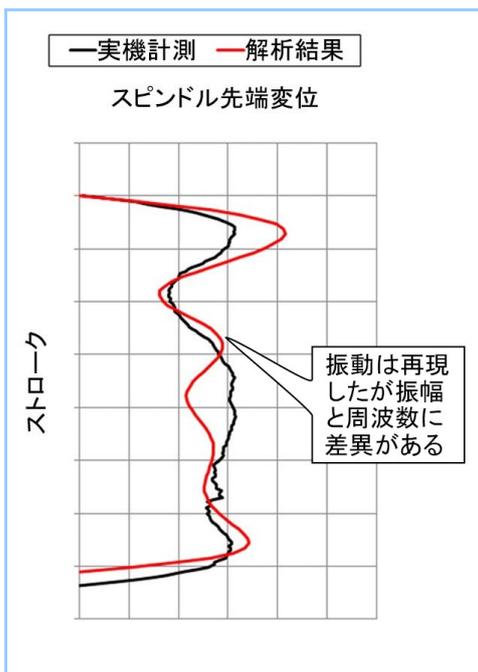


図5 解析結果(大規模モデル)と実機計測結果の比較

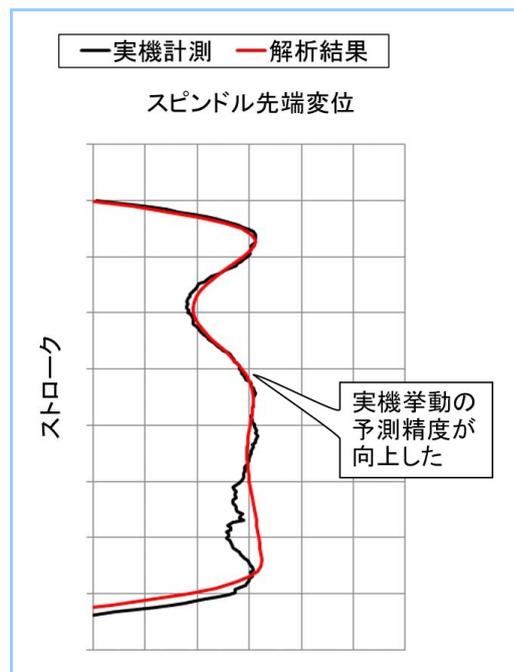


図6 解析結果(高精度大規模モデル)と実機計測結果の比較

3.2 実機振動計測

そこで、実機の振動特性把握及び実機振動計測結果と解析モデルのコリレーションを目的として振動計測を実施した。計測手法としてはハンマリングによる加振と加速度計による加速度計測を採用した。工具先端からの荷重伝達特性(加速度)を計測し、実機挙動の計測結果(図5他)から着目する周波数帯を目途付けし、実機固有振動数を抽出した。

3.3 コリレーションによるモデル精度向上

実機計測結果と解析結果のコリレーションにおいて、部材の剛性及び減衰値の見直しを図るパラメータはベッドとコラム(静圧軸受, ボールねじ), コラムとサドル(リニアガイド, ボールねじ, 油圧シリンダ), サドルとカタヘッド(軸受)とし、実機の固有値と MBD の固有値解析結果の誤差を目的関数として最適化計算を実施した。最適化計算は粒子群最適化 (PSO: Particle Swarm Optimization) を使用した。PSO とは群知能の一つで鳥や魚の群れの振る舞いを基にした発見的手法の一つで、多目的探索を行う発見的最適化手法である。

その結果、高精度大規模モデルによる解析結果は図6に示す通り実機挙動と一致し、実機挙動の予測精度向上を図ることができた。このモデルを用いて評価することにより、加工時振動はカタヘッドに実装されている Y 軸モータ重量とモータフランジの持つ固有値と加工条件が重畳することであると同定できた。

振動発生原因(部位)と周波数が特定できたため、有効な減衰特性を持つ防振材料を適用し、工具振動による歯面のうねり量を低減することが出来た。

4. まとめ

本報では、加工時振動に関与する構造体と機械要素部品の組合せによる大規模 MBD モデルを構築するに当たって、振動計測結果とのコリレーションにより高精度化が可能であることを確認し、実機運転で顕在化する加工条件の違いによる振動現象が再現可能になることを紹介した。

今回は実機が存在しており、実機挙動との誤差を低減する手段として振動計測結果とのコリレーションをとった。しかしながら調整したパラメータは汎用機械要素部品であることから、一度計測し取得したデータを流用可能なようにデータベース化していくことで計測作業なしでモデル化精度を向上していくことが可能になる。このように MBD 技術は実機製作および運転後に初めて把握できる製品性能を事前予測することを可能とし得る技術であり、試作試験及び試行錯誤により最適化してきた調整作業を大幅に効率化する上でも有効な手段であると考えられる。今後も製品開発における開発期間の短縮や設計段階での適用による製品性能向上及びロバスト性向上に活用していく。

参考文献

- (1) 長谷川他, フォークリフト開発を支えるマルチボディダイナミクス技術展開, 三菱重工技報 Vol.47 No.2 (2010) P24
- (2) 菊池ほか, お客様の生産性向上に貢献する最新歯切り技術, 三菱重工技報 Vol49 No3 (2012) P27
- (3) 菊池ほか, 高付加価値な歯車の加工を実現するギヤシェーパの最新技術, 三菱重工技報 Vol52 No3 (2015) P14
- (4) R.R. Craig and M.C.C Bampton. Coupling of substructures for dynamic analysis. AIAA journal, Vol6 No7 (1968) P1313