

特 集 論 文

高速・高剛性5面加工機 MVR-D χ の開発High-Speed High-Rigidity 5-Face Milling Machine MVR-D χ 

山村 洋之*¹
Hiroyuki Yamamura

吉川 睦*²
Mutsumi Yoshikawa

桑 隆行*³
Takayuki Kume

田内 拓至*³
Hiroyuki Tauchi

谷川 佳史*³
Yoshifumi Tanigawa

近年、大形部品加工においては、より効率的な加工を目指し、更に高い重切削能力を追求するだけでなく、高送り工具を使用した加工も、小径のドリル・タップ加工も行いたいという要求が高まってきている。この要求に門形5面加工機で対応するには、重切削が可能な高剛性構造と高剛性・高トルク主軸を有し、かつ高送り工具に対応できる高速性、小径工具に対応できる高い主軸回転数を有するという相反する要求を解決する必要があった。この問題を当社の保有する解析技術を駆使して解決し、MVR-D χ を開発・発売した。これにより従来機以上の加工能力が可能となった。

1. はじめに

原動機・産業機械・建設機械などの重厚長大産業は近年の BRICs を中心とした需要増を背景に、設備増強を図っており、高効率加工機の潜在的な要求が高まっている。

この要求に応えるためには、従来どおりの深い切り込みでバリバリ削る重切削ができ、高送りカットによる重切削が可能で、かつ小径の工具へ対応できる高い主軸回転数が必要となる。

当然の事ながら、非切削時間の短縮も行う必要があるため、今まで以上の早送りの高速化も実現しなければならない。

この実現のためには、

- 構造体は高剛性、かつ軽量であること。
- 主軸は低回転域から剛性高く、かつ高回転まで回ること。
- 送り系は高い推力を持ち、かつ高速送りに対応できること。

の3つの技術が必要である。

この問題を解決する技術的な取組みを中心に、MVR-D χ の開発を紹介する。

2. 機械の構成

図1に示すように、主軸ヘッドを備えた門形構造物の中をテーブルが前後方向(X)に動く。

門形構造はコラムブリッジとクロスレールで構成さ

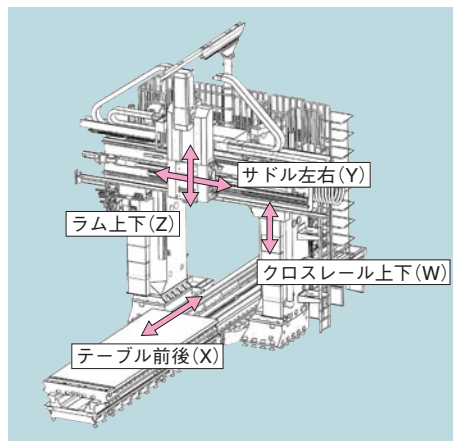


図1 機械構成

れクロスレール前面に主軸を備えたラム・サドルがある。クロスレール全体の上とサドルを貫通するラムの上下で主軸の上下移動(W・Z)を行い、サドルがクロスレール前面を横方向に移動することで、主軸が横方向(Y)に移動する。

ワークはテーブル上に載せX方向に移動する。

また各軸はボールネジとリニアスケールにより、精密に駆動。ラム上部に配置したギヤボックスで、主軸を回転しテーブル上に積載された加工ワークを切削する。

3. 機械の仕様

機械仕様の設定に当たってはモジュラ設計を取り入れ、あらゆるニーズにマッチした仕様の洗い出しを

*¹ 工作機械事業部技術部大形機設計課長

*² 工作機械事業部技術部大形機設計課主席

*³ 工作機械事業部技術部大形機設計課

表1 主仕様一覧

		MVR28/34D χ	MVR33/39D χ	MVR38/44D χ	MVR43/49D χ	
テーブル作業面 (mm)	幅	2000	2500	3000	3500	
	長	4000～		5000～		
各軸移動量 (mm)						
テーブル送り	X 軸	テーブル長 + 1000				
サドル左右 有効ストローク	Y 軸	4300	4800	5300	6000	
		3400	3900	4400	4900	
ラム上下	Z 軸	標準1000・オプション1200				
クロスレール上下	W 軸	1200～3200 (門高による)				2200～3200 (門高による)
主軸仕様						
主軸回転数	(min ⁻¹)	7～4000				
主軸出力	(kW)	37 (連続)／45 (30分定格)				
各軸送り (mm/min)						
テーブル	早送り X 軸	～24000		～20000		
サドル左右	早送り Y 軸	30000				
ラム上下	早送り Z 軸	15000				
クロスレール上下	早送り W 軸	標準3000・オプション5000		5000		
最大切削送り		X・Y・Z 10000 W 3000・5000				
ATC 収納本数	(本)	60～				
工具最大長さ	(mm)	標準500・オプション800				
工具最大質量	(kg)	30				
ATT (アタッチメント) 装着可能なATT		標準：ダミープレート ライトアングルヘッド (30kW) ユニバーサルヘッドなど各種対応可能				
NC装置		FANUC 31i				

行って、標準・オプション・お客様ごとのカスタマイズ部を切り分けてユニットのモジュール化・標準化を進め、テーブル幅2000～3500、テーブル長4000～10000以上、積載質量100tonまで対応し、門高も2050～4050とニーズに合わせた豊富な機械サイズを準備し、さらに納期短縮も図った。表1に主な仕様を紹介する。

4. 高剛性を実現する技術

4.1 最適な構造体の素材選定

高い切削能力を発揮するためには高い剛性が必要である。ここで言う“剛性”とは静剛性を示すのが一般的だが、切削加工は振動現象を伴うため、機械に要求される高い剛性とは振動しにくいこと、つまり高い動剛性も必要である。

振動しない構造にするには、振動を支配する“バネ定数”・“減衰係数”・“質量”の3つのファクタをバランス良く成り立たせる必要がある。従来機は高い弾性係数を持つ鋼の溶接構造体を用いていたが、FEM解析を使用して、弾性係数が鋼に対して劣る鋳物構造でも、質量の増加を最小限とし溶接構造と同等の静剛性を確保できるようになった。

各構造体である、ラム・サドル・テーブルの材質は従来同様鋳物を使用し、高速化のために剛性を維持し

た上でできる限り軽量化を計り、クロスレール・コラム・ブリッジ・ベッドの材質は従来の溶接構造体から鋳物に変更し、解析技術を駆使してより動剛性を高めることとした。

4.2 目標静・動剛性の決定

機械の切削能力と、静・動剛性値の関係は、いまだ完全に解明されていない問題である。

そこで当社では過去に製作した種々の機械の切削能力と静・動剛性の関係をまとめ、データベース化することで、目標切削能力から目標静・動剛性を決定している。

このノウハウを用い、MVR-D χ の静・動剛性目標値を決定した。

4.3 高い剛性を実現する構造体の形状決定プロセス

今まで機械構造体の形状は、まず機械のどこにウィークポイントがあるか知り抜いたベテラン設計者の経験と勘で構造体の形状を決め、FEM解析で目標剛性を達成していることを確認し決定していた。この方法では、目標剛性を一回で達成することができない場合が多く、形状決定に時間を要する原因の一つとなっていた。

この問題は、剛性を決定する多くの条件を同時に勘案することが困難であることが原因と考え、解決策として品質工学を利用して機械の基本寸法を決定する方

法を採用した。

品質工学を用いることで、設計的に実現可能なすべての寸法パターンを網羅でき、切削方向や位置の変化による剛性変動を最小にし、かつ軽量・高剛性を実現できる基本寸法を導くことができた。

次にこの基本寸法を基に各構造体のモデルを作り、FEM解析を行って構造体の全ての部材に対して、応力の高い部材は肉厚を上げる・リブを追加するなどの補強を行い、応力の低い部材は肉厚を減らす・鋳抜き穴を空けるなどの軽量化を行った。このプロセスを全ての構造体で行うことで、質量増加が最小限でかつ高剛性な形状を導き出すことができた。

最後に決定した構造体を組合せ機械全体の解析を行い、各部のつながりが良いかを確認、微修正を行って目標仕様を満足させ、最終形状を決定した。この方法によって主要構造体を板金構造から剛性面で不利な鋳物に変更したにもかかわらず、質量アップをミニマムに抑えかつ静剛性・動剛性は従来機同等以上とすることができた。

4. 4 MVR-D χ の剛性

動剛性の実測とFEM解析値の比較を図2に示す。実測・解析ともに目標動剛性を満足しており、かつ固有値の周波数・ピークの高さも良く一致している。

動剛性解析は種々の境界条件を考慮する必要があるが、今までは動剛性精度の良い予測は困難であったが、数多くのノウハウを蓄積することで、計算精度が向上し、その結果計算段階で非常に精度良く解析できるようになった。この高い計算精度と剛性を作り込む設計プロセスの相乗効果で、MVR-D χ は剛性バランスが非常に良い機械となった。

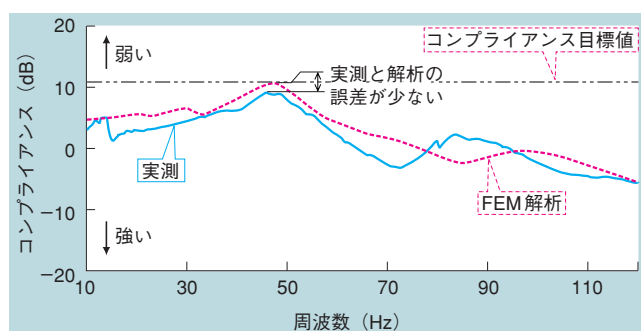


図2 MVR-D χ 動剛性実測値・計算値比較
計算精度が高く、精度良く予測できている。

5. 高速性を実現する技術

5. 1 主軸の高速化

バリバリ削る重切削では、大きな切削荷重が発生し、これに耐え得る高剛性主軸が必要となる。剛性を上げ

るには、ベアリングの予圧を大きく取るが、予圧を上げすぎるとベアリングの発熱が大きくなりそのままでは高速回転ができなくなる。

この問題を解決するには、精度良く熱解析を実施し、より良い冷却方法を検討する必要があるが、通常ベアリングの発熱や、各部品間の熱伝達率などが精度良く推定できず、なかなか精度が上がらない。しかし当社では各種製品で培ったノウハウを有し、正確な熱解析が可能であるため、図3に示すように、ベアリングの発熱を効率よく冷却し、ベアリングの温度上昇を最小限にすると同時に、熱変位の原因であるラム本体の温度上昇を抑えることができた。この技術によって7～4000 min⁻¹のどの領域でも高精度・高能率に削れる主軸が完成した。

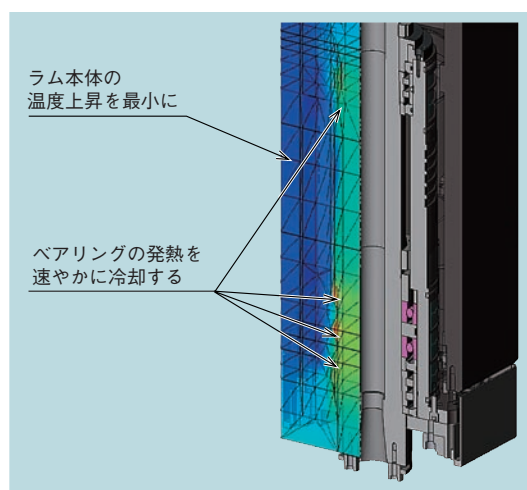


図3 主軸熱解析結果

5. 2 Y軸早送りの高速化

本機のY軸ガイドには、剛性が高く、送りの高速化にも適し、さらにY軸移動によるラム・サドルのヨーイングも抑制できるリニアローラガイドを採用した。また、Y軸送りモータの能力を更にアップすることで、送り推力を維持しながら、従来から24 m/minと高速だったY軸早送りを30 m/minと更に高めた。

これによって高剛性・高精度を維持しながら非切削時間の短縮も図ることができた。

5. 3 Z軸ツインフィード

Z軸の早送りは15 m/minと従来機と変化はないが、油圧シリンダによるラムのバランス装置を廃し、ツインボールネジ駆動とした。これによって送り剛性を向上、さらに重心駆動となるようボールネジの配置にも配慮することで、バランス装置の発生する力と駆動装置の発生する力の不一致により発生していたモーメントを原理的に0にした。この変更により高精度な駆動を実現することができた。同時にバランス装置を廃し

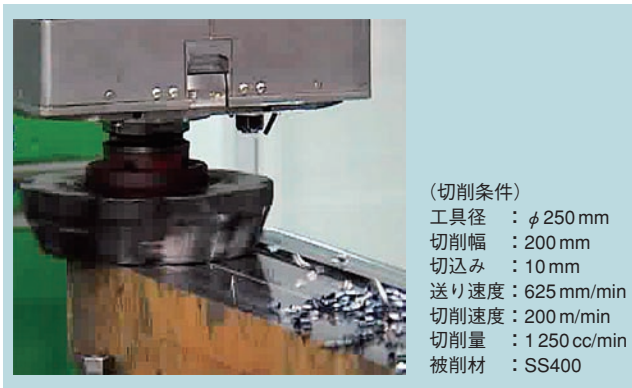


図4 フライス切削
ラム主軸のフライス加工とその条件.



図5 エンドミル切削
ラム主軸のエンドミル加工とその条件.

たことで、工作機械の中で最も電力を消費するユニットの一つである油圧ユニットを小形な物に変更でき、消費電力も抑えた。

6. 加工例

これまで説明してきた技術によって得られた高い剛性を背景に、従来機で使用していた Φ 200 のフライスカッタより、さらに剛性が必要となる Φ 250 のカッタを用いても、深切り込みで1 250 cc/min と従来機以上の加工を実現し、ヘリカルエンドミルに関しては従来機 560 cc/min から 1 050 cc/min へと倍近い能力向上を達成した (図4, 図5)。

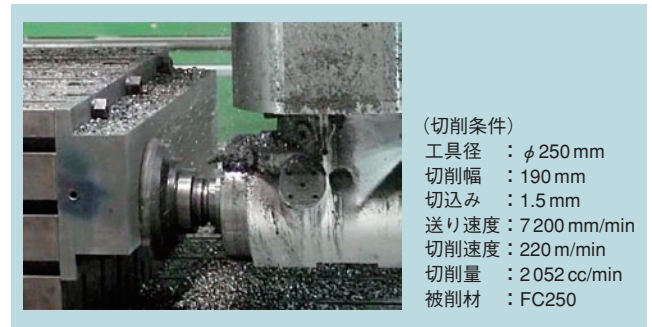


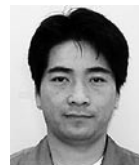
図6 ライトアングルヘッドによるフライス切削
高送りカッタを使用したライトアングルヘッドのフライス加工とその条件.

また、近年一般的になってきた高送りカッタを使用した加工では横主軸で 2 000 cc/min 以上の切削量を達成しており、本機の剛性の高さを証明している (図6)。

7. ま と め

MVR-D χ はモジュラ設計を取り入れた幅広い機械仕様への対応と、当社が持つ豊富な解析ノウハウを結集して開発することにより、高速性と高剛性を両立し、今まで以上に多様な加工に対応できるようにした。

今後も本機で得られたノウハウをいかし、幅広いニーズに対応したコストバリューに優れた機械を提供していく。



山村洋之



吉川睦



糸隆行



田内拓至



谷川佳史