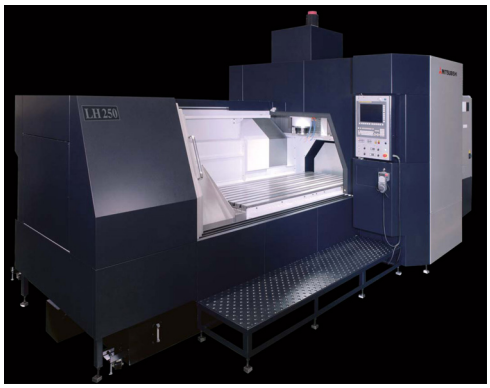
高精度門型マシニングセンタ LH250 の 高速・高能率加工実現技術

Technology for High Speed and High Performance Milling of High-Precision Double Column Machining Center LH250



本多 秀[*1] Shigeru Honda
佐藤 欣且[*2] Yoshikatsu Sato
重川 英文[*2] Hidefumi Omokawa
若本 弘幸[*3] Hiroyuki Wakamoto

工作機械のラインアップをワークサイズで見ると，業界全体で見てもマシニングセンタと大形機の中間機種があまりなく，大形機で対応していることが多いようである．しかし大形機で扱うサイズのワークに対する要求精度も厳しくなってきており，機械性能だけでその精度を満足することが難しく，オペレータの技能に頼って対応している市場が増えてきている．そこで当社が保有している小型精密加工機μV1 の長時間安定化技術と大形門型機の製造技術を融合し，小型精密加工機並みの加工精度を実現した LH250 を開発した．高速主軸を標準化し長時間高精度加工を実現した本機の搭載技術の特徴と性能，加工精度について述べる．

1. はじめに

市販品の多くが小形化，薄型化していく中で，人間が座る，作業する，乗るなど小形化できないものや，モータのようにさらなる高出力を求められ大型化している製品もあり，製品によっては従来のマシニングセンタのラインアップではサイズ的に足りないため，大形門型機等にて対応してきた．しかし製品の効率化，高機能化等に伴い加工の要求精度が高まってきており，機械性能だけでは要求精度を満足することが難しく，技能に頼って対応している分野が増えてきている．

当社においては高精度加工をターゲットとした小型精密加工機μV1 を開発済で，要素技術として長時間高精度加工技術を有しており，技術の多くは機械サイズに関係なく適用可能である．本技術と大形門型機の製造技術を融合，高速主軸を標準化し小型精密加工機並みに長時間高精度加工を実現した高精度門型マシングセンタ LH250 を開発した(表1)ので，その搭載技術の特徴と性能，加工精度について紹介する．

表1 LH250 主要仕様

テーブルの大きさ	(mm)	2500 x 1000
最大積載質量	(kg)	3000
各軸ストローク(X×Y×Z)	(mm)	2500×1000×600
主軸テーパー		HSK-A63
主軸径	(mm)	φ80
主軸回転速度	(min^{-1})	Max 20000
主軸出力	(kW)	22/18.5
工具収納本数	(本)	40 (Opt:60)
機械所要床面の大きさ	(mm)	7380×3300
機械高さ	(mm)	3593
機械質量	(kg)	21000

*1 工作機械事業本部技術部 次長
*2 工作機械事業本部技術部 主席技師
*3 工作機械事業本部技術部

2. 高精度門型マシニングセンタ LH250 のコンセプト

本機は従来の大型マシニングセンタが切削除去量にこだわる設計が多いのに対し，付加価値の高い高面品位の加工を実現することを主目的に開発されている．特に国内の加工においては粗加工を既に実施された素材から加工することが増え，中仕上げ，高精度な仕上げのみの加工が多くなってきている．そのため現在一般的にこのサイズの機械に採用されている 6000min^{-1} 回転程度の BT#50 相当主軸では加工速度があがらず，また主軸熱変位も必要に応じて補正技術を採用するレベルに留まっているため，安定して高面品位を確保することが難しく，機械の特性を理解した技能者によってのみ加工精度が得られているのが現状である．そのため本機は通常はオプションで設定されている BT#40 相当で 20000min^{-1} 回転主軸を標準搭載し，自身の発熱等を徹底的に除去することで従来では実現できなかった安定した加工精度，加工面品位を機械の特性を知らなくても得られることを主目的とした．また単に仕上げ加工だけしかできないのでは，粗・中仕上げ加工機から仕上げ加工機へのワークの段取り替えが発生し生産効率があがらなくなるため，BT#40 相当で十分な切削力を持つことも合わせて開発の条件とした．さらに大形のマシニングセンタにおいては輸送時の大きさ，重量の制限があり，現地セットアップ時間を短縮するために，機械本体を分解することなく，道路交通法制限内で輸送できる最大サイズを機械サイズの条件とした．

3. 高精度門型マシニングセンタ LH250 搭載技術

3.1 徹底した発熱抑制技術

一般的に機械サイズが大きくなることに伴い加工精度が悪化する要因のひとつに温度変化に伴う機械の姿勢変化があげられる．機械サイズが大きくなると姿勢変化による機械熱変位の絶対量が大きくなるため，温度に対する感度をより抑えなければ小型機械と同等の精度は確保することが難しい．温度変化に伴う姿勢変化については機械が設置された室温変化による姿勢変化と機械自身の発熱に伴う姿勢変化に分けることができ，今回の開発時には機械自身の発熱を極力排除することで長時間機械を使用することに伴う姿勢変形を少なくすることを実現している．マシニングセンタにおいて機械自身の発熱とは主に，主軸，送り軸と強電盤をはじめとする電気機器によるものであり，LH250 開発時に特に対策を実施した主軸，送り軸の冷却技術について述べる．

LH250 は一般的なマシニングセンタではオプション扱いになっている 20000min^{-1} の主軸を標準化した．高速主軸は多くの場合剛性が低いことと，発熱が大きいことから標準化することが見送られてきたが，小型精密加工機 μV1 にて採用した主軸内，外部冷却とベアリングへの特殊潤滑を採用することで初期予圧をあげ，かつ最高回転数での発熱を抑え込むことに成功し，主軸回転に伴う主軸の伸びを最小にした（図1）．主軸の冷却油は主軸の出口部の温度が機械のベース温度と常に一致するように冷却をコントロールし発熱に応じて冷却された油を循環させることですばやく熱を除去し，一定温度にすることを実現している．今回はベアリングサイズも大きくなっており，小型精密加工機より発熱も大きいため，主軸フロント軸受部の内部冷却は冷却効率をあげられるように特殊な冷却回路を追加し，強化した．この結果 20000min^{-1} まで主軸を回転させても主軸やベアリング部の熱膨張が抑えられ，初期組込み状態のままで回転するため，ベアリングとハウジングの隙間も最小にでき，かつ予圧も高めに設定することが可能となり，高精度でかつ高剛性な主軸を実現している．主軸の熱変位量の推移について図2に示す．

従来のグリースやオイルエアー等で潤滑されている主軸では安定までに長時間を要し，暖機運転が常識となっている．LH250 は電気的補正を一切使用せずに主軸を冷えた状態から最高回転させても 12 分で熱変位が安定し，変位量も 2μm 以内となっており，その後の変位量も ±0.2μm 以内で安定している．本数値であれば従来のような暖機運転をしなくても問題ない量となっており高速主軸を標準化したことによる熱変位の影響を排除することに成功している．

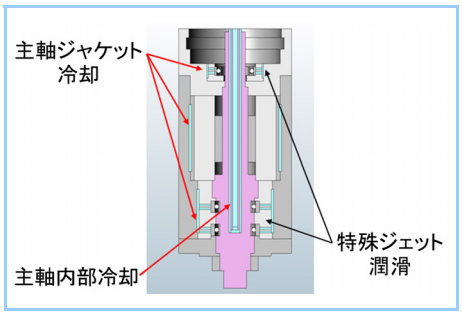


図1 主軸冷却技術

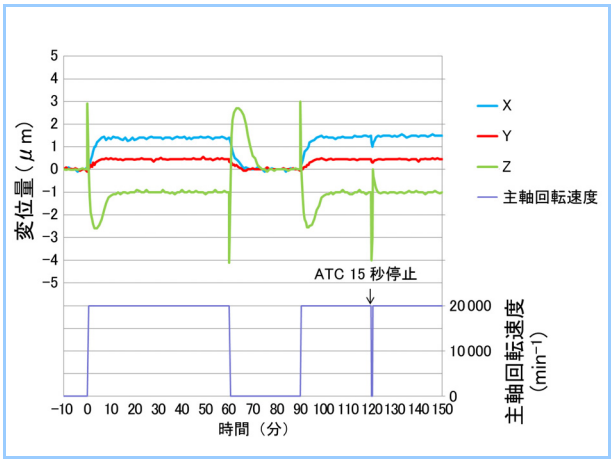


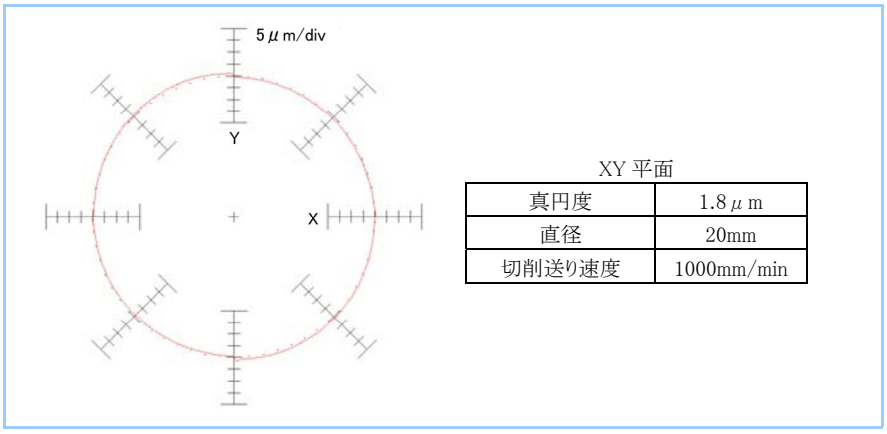
図2 主軸熱変位量

また主軸から発生する熱が本体に伝わり，2次的な遅れ熱変位等の発生を防いでおり，主軸暖機時の初期伸びだけを注意すれば他の要因で変位が発生することがなく安定した状態を長時間得ることができる．

送り軸は高性能主軸を生かすため，主軸が移動するY軸，Z軸に摺動面を採用した．一方，長手方向のX軸には最大3000kgのワークが載り，重量に関係なく送り制御を一定にするため，摩擦係数が少ないボールガイドを採用した．また駆動には剛性の高いファインピッチのボールネジを採用した．本構造から送り系に関する発熱部分は駆動モータ，サポートベアリング，ボールネジになり，LH250 は各軸の各要素の冷却を徹底した．駆動サーボモータにおいては発熱が機械本体に伝達されないように締結フランジ部に冷却を実施し，カバー内に設置されるX軸モータにおいてはカバーにファンを取り付け，空気を循環させて温度上昇を防止している．またボールネジはねじの内部に冷却油を循環させ，さらにサポートベアリングを潤滑させることで発熱を抑えている．また従来は取付けブラケットのみを冷却していたボールネジナット部もナット内冷却を実施し，移動体への熱影響が出ないようにした．このように送り軸に対しても冷却を徹底することで，繰り返し送り軸を移動させても機械の姿勢変形に影響が出ないように配慮した．摺動面についてもY軸の基準面は移動体重量が掛かるため面圧が高くなり，高速送りが連続すると発熱するため，摺動面直下の部分に冷却液を通し，本体への発熱を同じく抑制している．

3.2 高精度送り機構

LH250 は高精度，高面品位を得るために送り軸の追従性について小型精密加工機並みの追従が可能なように各機器を選定している．サーボの追従性が十分確保できるモータサイズの選定とそのサーボモータを生かせるボールネジ剛性を組み合わせた．さらに小型精密加工機で採用している独自の制御チューニングを実施し，その結果平面2軸の同期にて加工する円加工においては，小型精密加工機並みの真円度 1.8μm を実現した（図3）．



XY 平面

真円度	1.8μm
直径	20mm
切削送り速度	1000mm/min

図3 真円度測定値

3.3 作り込み技術

LH250 の高精度を具体化する際，最大の課題は長手X軸方向の精度をどのように確保するかであった．最大 3000kg のワークが搭載されても，フルストロークで 10μm 以内の真直度を確保するために，機械ベッドの剛性とベッドを加工する加工機の精度まで確認し具体化した．初めに 3D-CAD にて最大ワークを搭載した状態で変形量のシミュレーションを実施し，機械の最終精度が許容値内(ベッドにおいては全長で 0.001mm 以下の変位)になるよう機械剛性の検討を行った(図4)．次にベッド加工を行う加工機の静的精度を測定し，ベッド長さの 6000mm 長で真直度 2μm 以内の精度となる部分が確保できるように機械を調整し，一番精度の良い位置にベッドをセットアップし加工を実施した(図5)．その結果ガイド取付け部の真直度は 4μm が確保され，最終的に LH250 完成時におけるX軸真直度は目標 10μm/2500mm に対し 5.3μm/2500mm を達成した．

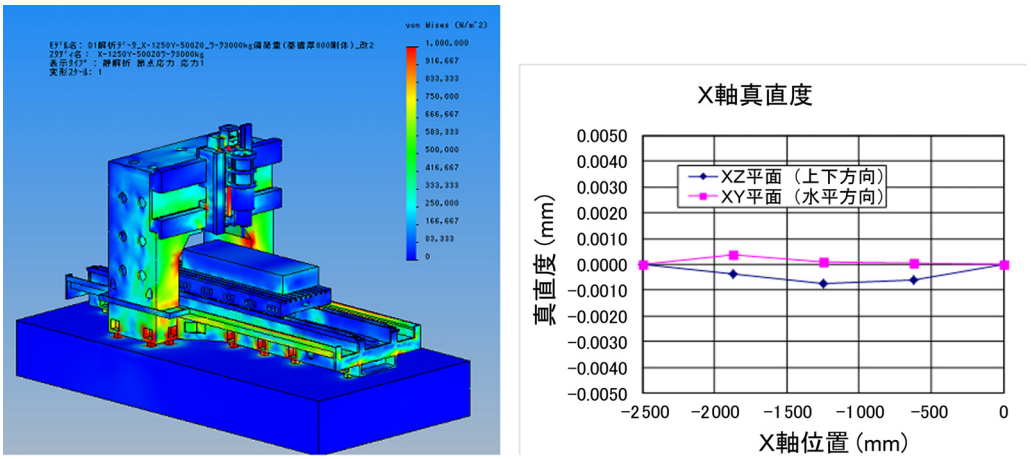


図4 X軸真直度解析

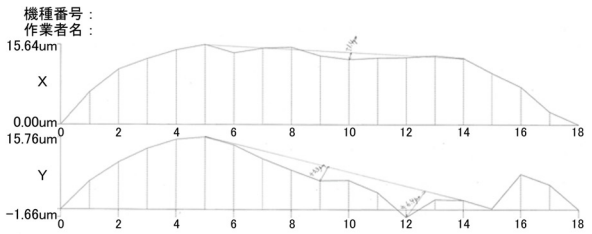


図5 ベッド加工機精度調整およびベッド加工

4. 高精度門型マシニングセンタ LH250 の加工結果

4.1 ダイプレート加工

LH250 の高い加工精度を実証するため，順送金型のダイプレートを想定したテストワーク(図6)の加工を実施した．加工条件を表2に示す．

図6 ダイプレート テスト加工ワーク

表2 ダイプレート加工条件

ワーク	材質			S50C		
	大きさ(mm)			2 200×300×30		
工程	工具			加工条件		
	種類	径 (mm)	刃数	主軸回転速度 (min^{-1})	送り速度 (mm/min)	切込み (mm)
Φ38 穴	ボーリング	Φ38	1	1 500	450	0.02
Φ22 穴	ボーリング	Φ22	1	3 300	825	0.02
Φ100 穴	ラフィング エンドミル	Φ10	2	7 000	700	0.03

テストワーク加工後の測定結果は，6箇所のφ38mmのボーリング穴のピッチ精度でX軸長手方向 2000mm で 2.3μm となった．また計 34 箇所のφ22mm のボーリング穴のピッチ精度も全て±2μm 以内に収まっている．また，エンドミルでの円弧加工によるφ100mm の穴の真円度は 1.9μm となり，小型精密加工機並みの加工精度を達成できた．

4.2 成形用金型加工

LH250 の高品位で安定した加工を実証するため，自動車のシート部のCFRP製部品の成形用金型（図7）の加工を実施した．加工条件を表3に示す．

最終仕上げ加工には，約 20 時間を費やしているため，その間の温度変化による機械の姿勢変化が発生すると，加工面に段差が生じる．LH250 の徹底した発熱抑制技術により姿勢変化が抑えられ，結果金型の加工面には段差は確認されなかった．また，金型の隅部など加工方向が変わる屈曲点においても，LH250 の高精度送り機構により，食い込みなどの加工形状乱れも無く，非常に高品位な仕上がり面となった．

表3 成形用金型加工条件

ワーク	材質			FC250			
	大きさ(mm)			1 000×500×400			
工程	工具			加工条件			
	種類	径 (mm)	刃数	主軸回転速度 (min^{-1})	送り速度 (mm/min)	切込み (mm)	ピック (mm)
粗加工1	ラジアス エンドミル	Φ32	3	2 200	2 640	1.0	22.0
粗加工2	ボール エンドミル	R10	2	3 500	2 640	0.9	1.0
中仕上1	ボール エンドミル	R10	2	4 800	2 450	0.9	0.5
中仕上2	ボール エンドミル	R8	2	5 000	3 000	0.6	0.4
中仕上3	ボール エンドミル	R8	2	5 000	3 000	0.4	0.3
仕上げ	ボール エンドミル	R8	2	5 000	2 200	0.22	0.15

図7 成形用金型テスト加工ワーク

図8 CFRP 成形品

実際に加工した金型を用いて，CFRP の成形も実施した(図8)．通常切削加工のみでは加工面の面形状が転写されて成形品の表面が荒れてしまうため，金型の表面を手仕上げで磨くが，今回手仕上げ無しの加工面そのままを用いて成形した．成形品の表面は非常に滑らかで商品として遜色なく，磨きレスを達成できるほどの高品位な面を LH250 によって得られることが実証できた．

4.3 高能率加工

LH250 においては，高精度な加工のみならず，高能率な加工も可能であることを実証するため，鋼材およびアルミの重切削加工を実施した．加工条件を表4に示す．

鋼材で 400CC/min，アルミで 2000CC/min を達成し，BT#40 相当の主軸では十分な切削を実現できた．

表4 重切削加工条件

ワーク材質	工具			加工条件			
	種類	径 (mm)	刃数	主軸回転速度 (min^{-1})	送り速度 (mm/min)	切込み(mm) 径方向	切込み(mm) 軸方向
S50C	ラフィングエンドミル	Φ20	4	1600	2500	8.0	20
A5052	ラフィングエンドミル	Φ20	2	8000	12000	8.4	20

5. まとめ

高精度門型マシニングセンタ LH250 に搭載した高速・高能率加工を実現するための技術とそれによる加工結果を紹介した．先般開催された第 26 回日本国際工作機械見本市(JIMTOF2012)に機械及び加工ワークを出展し，来場者に高い評価を得ることができた．工作機械のラインナップが少ないサイズのワークを高精度に加工できることにより，従来技能に頼り生産効率が悪かったことが改善されるだけでなく，ワークを分割するなどして精度を確保していた部品が一体化できるなど，最終製品の設計にも好影響を及ぼす可能性も出てくると思われる．

今後様々な業種のニーズをくみ取り，機械のオプションやアプリケーション等を充実させ，広く製造業の発展に貢献できるよう努力していく所存である．