特 集 論 文

熱変位極小化高精度マシニングセンタ

Extreme High Precision Machining Center with New Effective Thermal Displacement Countermeasures

久 良 賢 二　白 澤 博 典　水 田 桂 司
川 水 努　若 井 宗 弥

シンプルで効果的な機体温度均一化技術の組合せとその効果の数値解析による仕様最適化により，普及機並みの価格ながら，同じ軸径で世界最速クラスの主軸回転中においても工具と被削材の相対熱変位を世界最小とする±５μm以下に極小化した立形マシニングセンタを開発した．熱変位低減技術として新たに機体の温度変化速度を均一にするための機体全体の断熱カバー，機内空気の循環と攪拌，熱源の温調油冷却及び熱伝導遅れを考慮した熱変位補正を実施している．これらは事前解析により有効な部材に効果的に適用している．本報では，本機の主な仕様とともに，用いた手段が熱変位を低減する原理とその実証試験結果を説明する．

1. ま え が き

工作機械は一貫して工程短縮，加工精度向上が求められているが，近年の金型業界を中心に製品の差別化とコストダウンのためますますその要求が高まっている．これらのニーズにこたえるべく，世界トップクラスの30 000 min^{-1}主軸を搭載しながらも運転中の熱変位を従来の±20 μmから±５μm以下とした高精度立形マシニングセンタM-V 50，M-V 50 FMを開発した（**図１**）．本機は使用回転速度全域において振幅が３μm^{p-p}以下の30 000 min^{-1}高速主軸（FM機），シンプルで効果的な熱変位低減技術のほかに，指令値に対する経路誤差をゼロとするFM（Fine Mold ）制御が適用されており，従来にない高速･高精度･高品位面加工を実現している．本報は本機の特徴と，その中でも特に熱変位に対する適用技術とその効果を述べる．

2. 本機の特徴

本機の主な仕様を**表１**に示す．特徴は以下①～⑦のとおりである．この中で①～③は高精度化，④～⑤は高生産性，⑥～⑦は操作性にかかわる．

① FEM剛性解析による構造適正化により，ヘッドストック，テーブルの移動で発生する変形，たわみ，振動を低減．
② 本体各部の温度変動均一化対策と変位補正により熱変位を±５μm／日以下に低減．

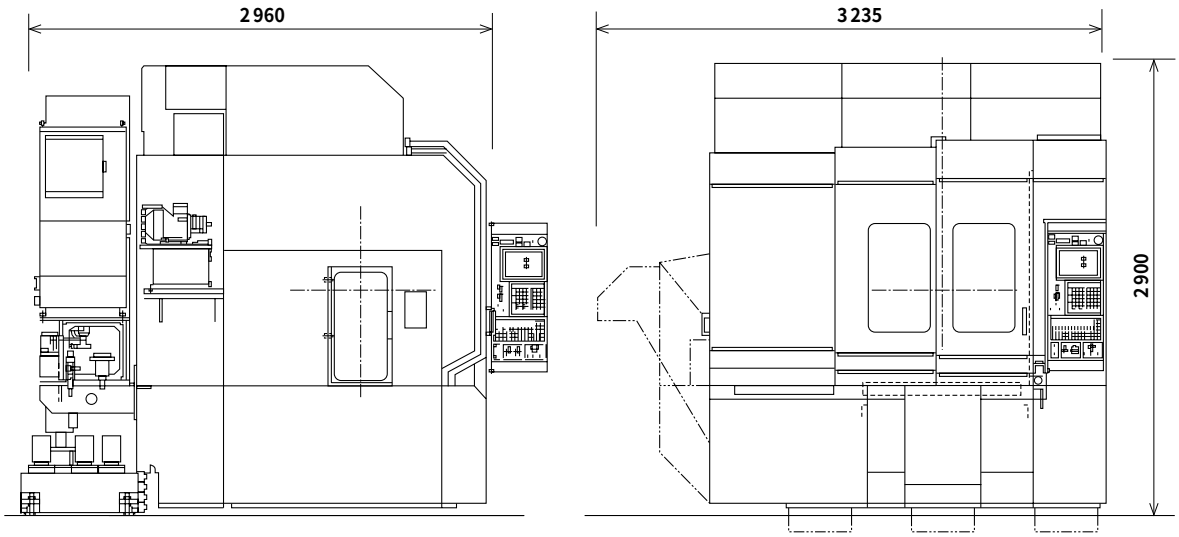

図１　M-V 50 FMの主な外寸　カバーを含む機体の全幅，全高，全奥行き．

表１　M-V 50 FMの主な仕様

機械名				マシニングセンタ M-V50FM
軸移動量	X軸（サドル）		(mm)	800
	Y軸（テーブル）		(mm)	510
	Z軸（ヘッドストック）		(mm)	450
早送り速度X，Y，Z軸			(mm/min^{-1})	24
主軸	標準	主軸回転数	(min^{-1})	14 000（BT40）
		主軸モータ出力	(kW)	30 min／連続 22.0／15.0
		主軸径	(mm)	φ80
	オプション	主軸回転数	(min^{-1})	30 000（HSK-F63）
		主軸モータ出力	(kW)	5 min／連続 22.0／18.5
		主軸径	(mm)	φ70
テーブルサイズ			(mm)	510×1 000
ATC工具収納本数	標準（オプション）			15（24，40）
機械質量			(kg)	13 000

③ テーブル送りガイドを静圧案内面としワーク重量による精度変化を防止.

④ 14 000 min^{-1}の高剛性主軸と30 000 min^{-1}の高速主軸を用意し，切削対象適用範囲を拡大.

⑤ 高速ATCを採用し，加工サイクルを短縮.

⑥ 作業者つま先空間確保による機械への接近性向上により，工具脱着や加工状況の確認など作業性を改善.

⑦ 長期使用データ分析結果を反映した切りくず処理及びシール構造により信頼性を向上.

この中で高精度化に関しては熱変位が最大の障害となるが，気温の変動に対する対策はもとより，回転数の３乗で上昇する軸受の発熱を伴う主軸の高速化に対する対策が必要となる．そこで本機には新たに主として４つの熱変位低減技術を適用している．次章にてその原理と効果を実証試験結果とともに説明する.

3. システム構成

3. 1　熱変位の原因

工作機械で問題とする熱変位とは，被削材と工具の相対変位である．本機の場合，X（幅）方向は対称構造とすることにより熱変位を生じにくくしている．Y（前後）及びZ（上下）方向に関しては，被削材と工具の構造的なつながりが**図２**のように示され，テーブル，ベッド，コラム，サドル，ヘッドストック，主軸がかかわっている．これらの部材の温度差が変動するときその反りと伸縮による熱変形の総和が熱変位となる．温度差を変動させる原因となる主な熱源が図２に示されている．温度差の変動を簡単に温度変化速度で考えるとき，部材jに対する熱源iの伝熱のコンダクタンスをC_{ji}，その熱容量をCap_j，熱源iとの温度差をΔT_{ji}として以下のように表現できる.

$$\frac{dT_j}{d_\tau}=\frac{1}{Cap_j}(C_{j1}\Delta T_{j1}+C_{j2}\Delta T_{j2}+\cdots+C_{jn}\Delta T_{jn}) \qquad (1)$$

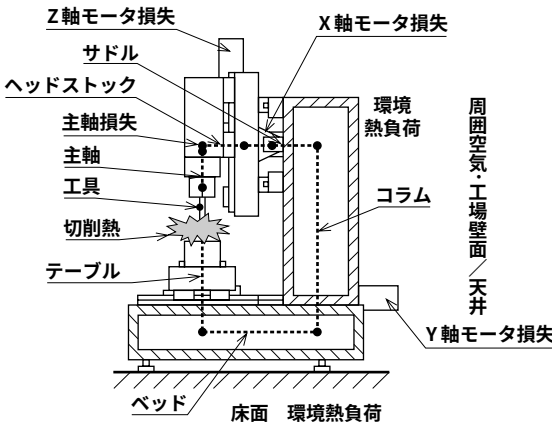

図２　主要部材の構成と主な熱源　熱変位にかかわる主な構成部材とそれに対する主な熱源の分布.

このことから，熱変位すなわち部材間の温度変化速度はC_iとCapの比あるいはC_iが異なるほど大きくなりやすいことになる.

3. 2　熱変位対策の思想

式（１）より温度差の変動を低減するには原則的に，（１）部材の熱容量を充分大きくして温度変動幅自体を小さくする，（２）一つの熱源に対するコンダクタンスを他に対して支配的に大きくし温度変動の位相をそろえる，（３）熱源の温度変動幅自体を低減する，ことが有効であることが分かる．この中で部材の熱容量はその肉厚に依存するものの肉厚は一般に必要剛性等から制限されるため（１）は現実的でない．（２）の具体的手段として温度制御した液体を循環させる方法が考えられるが，複雑な構造体に対しては伝熱面積が限定されるうえ，液体温度の制御精度に限界がある．そこで新たに空気を利用してその温度に物温を追従させる方法を考える．具体的には機内空気を循環させながら部材表面に吹き付ける．さらに外乱として機体外周表面が受ける環境からの熱負荷の変動を低減するため，機体外周を断熱カバーで囲う．このカバーは同時にその内側で容易に空気の循環路を形成し，機内空気に対し温度差が変動する外気の混入を限定し，機内空気の温度を安定に維持する．（３）の具体策としては，主要な熱源に冷却油を循環させる．主軸の軸芯冷却もその一つである．冷却油温度は機内空気温度に追従する代表的部材温度としてベッド下面の温度に追従させる．以上の対策は主として部材の表裏の温度差による撓み変形を抑制する．部材の単純な伸縮差による熱変位は，その部材温度を測定しそれからリアルタイムで伸縮量を計算し送りの原点移動により補正する．直接温度が測れない主軸については，外筒温度からの従来の一次遅れに加え，新たに熱伝導遅れを考慮した補正式を採用する.

3. 3　対策効果の解析的予測

対策案の効果の確認とその装置仕様の最適化のため，数値解析により機体温度と熱変位のシミュレーションを実施する．解析手段としてFEMを用い，熱的外乱として気温の日周変動，主軸や送りモータの発熱，切削熱，摩擦熱を考慮する．FEMモデルを**図３**に示す．熱伝導のほかにリブで仕切られた部材の各壁面ごとに空気との熱伝達，環境及び壁面同士の放射伝熱，機内外の空気の入替えによる熱移送，冷却油

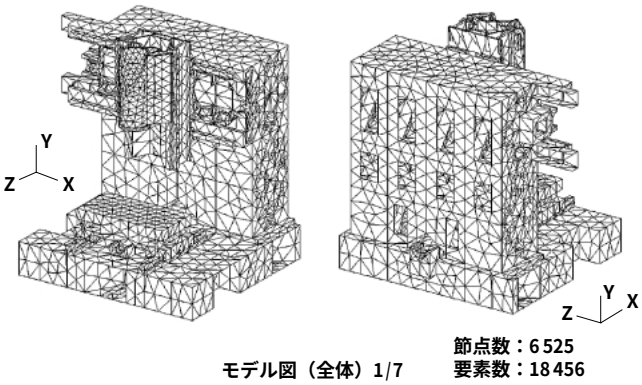

図３　FEM要素分割モデル　機体の温度分布と熱変位を解析するための共通FEM要素分割モデル.

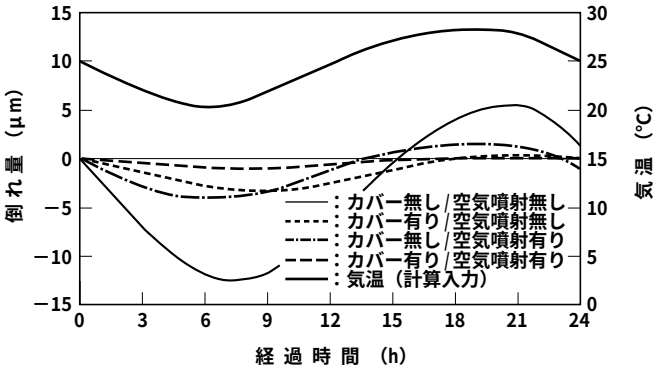

図４　対策手段別の効果の比較　気温変化時のコラムの反りによる熱変位を対策手段別に解析した例.

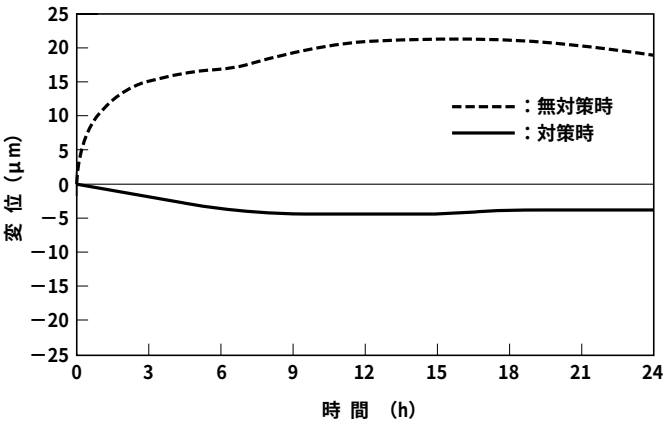

図５　FEMによる前後(Y)方向熱変位の解析例　FEMによる被削材と刃物の機体前後(Y)方向熱変位解析例．対策により目標の±５μm以内に入ることを予測.

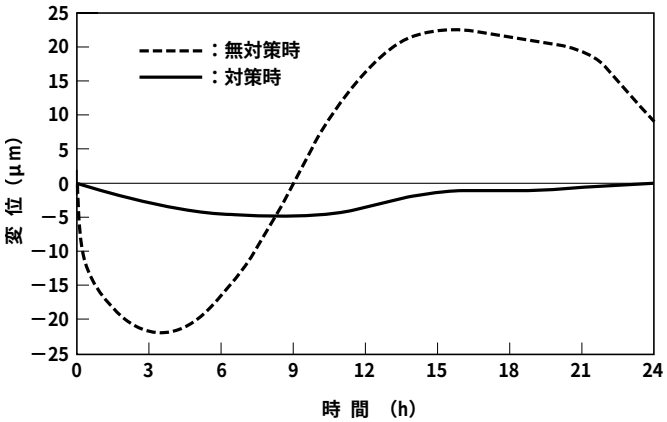

図６　FEMによる高さ(Z)方向熱変位の解析例　FEMによる被削材と刃物の機体高さ(Z)方向熱変位解析例．対策により目標の±５μm以内に入ることを予測.

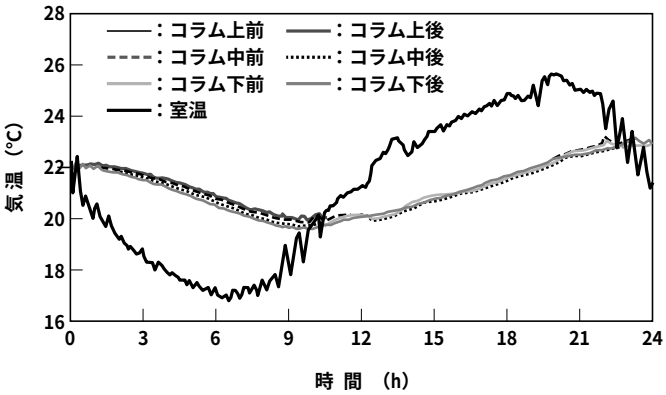

図７　気温変動に対するコラム各部の実測温度　室温が変動したときのコラム面板各部の温度測定結果．部材温度は全点がほぼ等しく変動している.

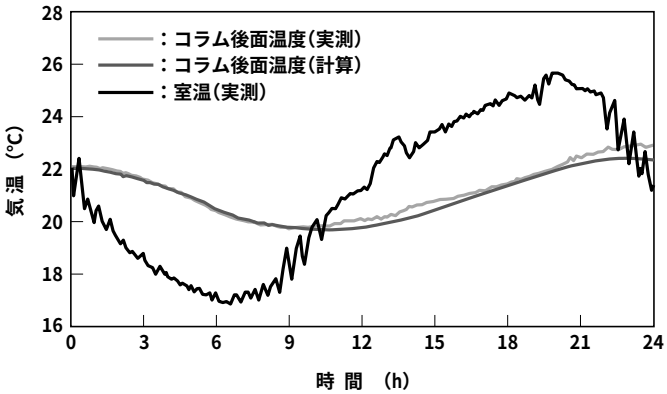

図８　気温変動に対する解析値と実測値の比較　室温の変動を与えたときのコラム温度の実測値と解析値の比較．両者はよく一致し解析モデルが信頼できることが分かる.

路での熱伝達を考慮して境界条件を設定する．このモデルにより温度と熱変位を連成して解析する．パラメータとして断熱カバー厚さ，設置面積，機内空気風量，通風ダクトの主要寸法，冷却油循環量を変更し，最適解を求める.

図４に気温が日周変化するときのコラムの反りによるY方向熱変位の解析例を各対策別に示す．循環空気の噴射と断熱カバーは単独でも有効であるが，それを併用すると相乗的な効果があることが分かる．このときの機体全部材によるY，Z方向熱変位の解析例をそれぞれ**図５**，**図６**に示す．Z方向は無対策時に±20 μm変位しており，これは普及機の標準的な実績値であるのに対し，これに対策を行うと±５μm以下になることが示されている.

4. 実　証　試　験

事前解析結果を基に断熱カバー，機内空気攪拌，熱源冷却及び主要部材の測定温度による変位補正を立形マシニングセ

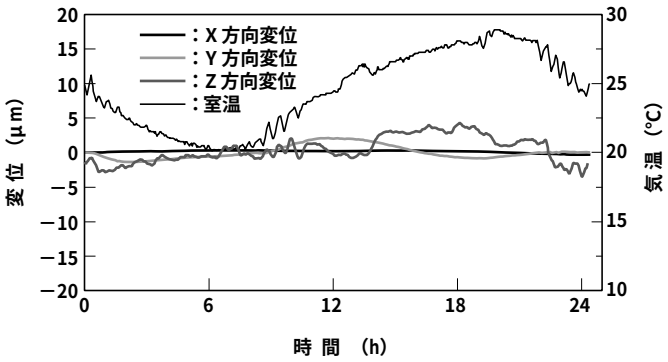

図9　熱変位実測結果（気温変化時）　気温を変化させたときの各方向熱変位の実測結果．いずれの方向も熱変位が±5 μm以内となっている．

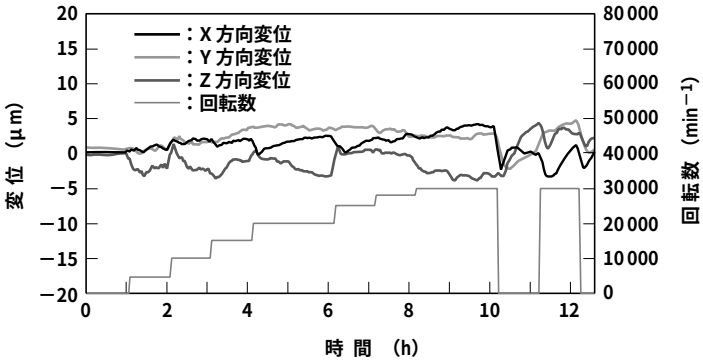

図10　熱変位実測結果（主軸回転時）　主軸を回転させたときの各方向熱変位の実測結果．いずれの方向も熱変位が±5 μm以内となっている．

ンタM-V50 FMに適用し，実環境下で熱変位を測定した．気温が変化したときのコラムに関する前後面の上中下各部の温度を**図7**に示す．このときの気温変動幅は国内晴天日の屋外での標準的な値である．工場内の温度変動幅は温調が無くとも一般的にこれより小さくなり，厳し目の条件設定としている．高さの違いにより若干の差があるものの前後の差は時間が経過してもほとんど生じておらず，これより前後の反り変形がほとんど生じずまた伸縮についてもいずれか一箇所の温度測定で全体に伸縮を精度よく予測できることが分かる．**図8**にこのときの気温を与えて解析したコラム後面の温度を実測値と比較して示す．計算と実測はほぼ一致しており，事前の解析モデルは信頼できる精度であることが分かる．気温が変化したときの熱変位の実測結果を**図9**に示す．結果はX，Y，Z全方向とも，24時間内の変位が±5 μm以内となっている．**図10**に主軸を回転させた場合の変位を示す．回転数は30 000 min^{-1}まで段階的に上昇させているがいずれの回転数でも回転中の変位が±5 μm以内となっている．

5. む　す　び

立形マシニングセンタの熱変位を従来の1/4とすることをねらい，シンプルで巧妙な手段として新たに（1）断熱カバー，（2）機内空気攪拌，（3）熱源冷却，（4）熱伝導遅れモデルの変位補正を採用した．事前解析により装置仕様を最適化し，新開発の立形マシニングセンタM-V 50 FMに適用した結果，気温変動に対する変位と世界最高速クラスの主軸回転中の変位がともに目標の±5 μm以下となることを実証した．今後この技術を他の機種にも適用し，高速・高精度を提供できる製品をそろえていく．

久良賢二
工作機械事業部
技術部
要素技術開発課

白澤博典
工作機械事業部
技術部
要素技術開発課

水田桂司
工作機械事業部
技術部
要素技術開発課
主席 工博

川水努
技術本部
広島研究所
実験課

若井宗弥
技術本部
広島研究所
機械プラント研究推進室