

博 士 論 文

5 軸制御マシニングセンターの運動精度と加工精度向上
に関する研究

2015年

赤井 孝行

目次

第1章 緒論	
緒論	1
参考文献	
第2章 DBB5 精度測定法の原理	
2. 1 緒論	9
2. 2 DBB3 測定法	10
2. 3 DBB5 測定法	14
2. 4 旋回軸系に存在する運動誤差原因の診断法と軌跡パターンについての理論的 考察	16
2. 5 DBB5 法の測定精度についての検討	24
2. 6 結論	25
参考文献	
第3章 運動精度測定と運動誤差原因の診断	
3. 1 緒論	28
3. 2 対象工作機械	28
3. 3 測定手順と測定条件	33
3. 4 運動誤差の測定結果と考察	40
3. 4. 1 直進軸	40
3. 4. 2 旋回軸中心のオフセット誤差と角度誤差	43
3. 4. 3 旋回軸固有の運動誤差と誤差原因	47
3. 5 結論	49
参考文献	
第4章 同時5軸制御時の運動精度	
4. 1 緒論	52
4. 2 測定法と測定条件	53
4. 3 測定結果と考察	56
4. 4 結論	61
参考文献	

第5章	旋回軸と直進軸のサーボ特性の違いによって生じる運動誤差	
5.1	緒論	63
5.2	旋回軸と直進軸のサーボ特性の差により生じる運動誤差軌跡の理論解析	64
5.2.1	旋回軸と直進軸の同期運動により作る円運動	64
5.2.2	運動条件の設定とサーボ情報の入手法とその表示	65
5.3	測定方法と測定条件	68
5.4	測定結果と考察	71
5.5	結論	80
	参考文献	
第6章	旋回軸のアライメント誤差の補正	
6.1	緒論	83
6.2	旋回軸のアライメント誤差の補正実験の概要	84
6.3	測定装置と方法	86
6.3.1	旋回軸のアライメント誤差の測定法	86
6.3.2	補正実験の対象機	86
6.4	補正実験の結果と考察	87
6.5	結論	90
	参考文献	
第7章	同時5軸制御による加工性能と同時3軸制御の比較	
7.1	緒論	92
7.2	加工対象とする部品形状	92
7.2.1	コア円錐台形状ワーク	93
7.2.2	溝付キャビティ円錐台形状ワーク	93
7.2.3	ベベルギヤ形状ワーク	94
7.3	加工機械と加工条件	96
7.3.1	加工機械	96
7.3.2	加工条件	96
7.3.3	加工精度と仕上げ面あらさの測定法	98
7.4	実験結果と考察	99
7.4.1	コア円錐台形状ワークを加工する場合	99
7.4.2	溝付キャビティ円錐台形状ワークを加工する場合	101
7.4.3	ベベルギヤ形状ワークを加工する場合	103
7.4.4	形状の複雑さと加工時間の関係	105
7.5	結論	106
	参考文献	

第8章 結論	
8.1 本研究の成果	108
8.2 今後の課題	111
謝辞	112
付図1	113
付図2	114
付図3	115
付図4	116
付図5	117

第1章 緒論

5軸制御マシニングセンターは、1960年代に最初に欧米で開発され^{1.1)1.2)}、図1.1(a)(b)に示すようなインペラーやタービンブレードで代表される航空機部品の加工など複雑形状部品や金型の加工に使用されていたが、現在ではそれだけにとどまらず、図1.1(c)(d)に示すような一般産業用や自動車部品のギヤハウジング、リングギヤ、バルブディストリビュータなどの複雑形状部品の加工に広く使用されるようになった^{1.3)1.4)}。



(a) インペラー



(b) タービンブレード



(c) バルブ部品



(d) リングギヤ

図1.1 5軸制御マシニングセンターで加工される複雑形状部品

ただ、これらの部品においては、形状は複雑であるけれども、精度的には $50\mu\text{m}$ 程度の形状精度や位置精度が必要とされる程度であり、必ずしも高精度部品とは言いがたかった。逆に国内では $10\mu\text{m}$ 程度の高い精度が必要な金型の加工には5軸制御マシニングセンターはほとんど使用されてこなかった。

これは 5 軸制御マシニングセンターの加工精度，ひいてはその原因である運動精度が悪かったのがその主な原因であった。欧米と異なり，日本においては，金型はある程度の形状精度とともに，表面の滑らかさが非常に強く要求されているので，金型の表面にキズ，段差，溝，大きなあらさなどの欠陥が残るのを極端に嫌ったためであった。それらの欠陥は運動軸（＝制御軸）の反転時に生じやすく，軸数が多い 5 軸制御マシニングセンターでは 3 軸制御マシニングセンターに比べて格段に不利であった。また需要が少なかったために 5 軸制御マシニングセンターや 5 軸制御用の CAM システムが高価であったことも，その普及に悪影響を及ぼしていた。

ところが近年にいたって，5 軸制御マシニングセンターの良さが見なおされて，国内でもその需要が増大しつつある。同時 5 軸制御加工が必ずしも必要でない場合でも，旋回軸はワークのインデックス用に用い，残りの直進軸の同時 3 軸制御で加工を行い，ワンチャックで 1 部品の形状全てを加工する方が，加工能率や部品全体の精度が確保しやすいことが広く認識されたためである。また，従来はいくつかの別々に加工した部品を組み立ててユニットにしていたものを，1 部品として加工し，組立作業を合理化した方が有利であるものがかなりあることが分かってきたためである。副次的には 5 軸制御マシニングセンターや 5 軸制御用の CAM システムの価格がかなり安くなってきたことも原因している。

必要な運動精度さえ確保できれば，5 軸制御マシニングセンターによる加工は 3 軸制御マシニングセンターによる加工よりも以下の点で有利である。

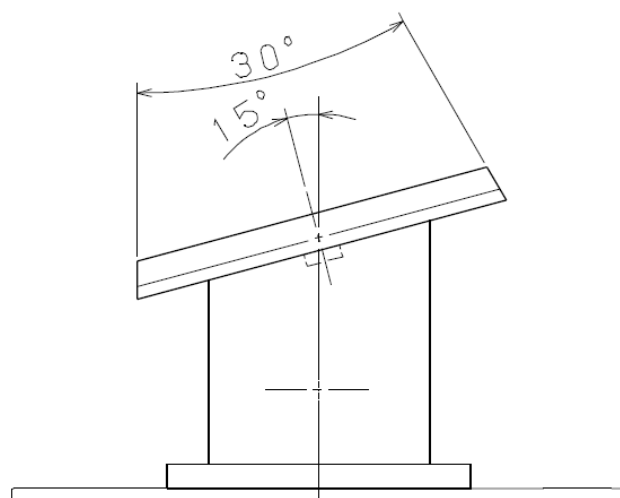
- 1) 3 軸制御機では加工できないアンダーカット部の加工が同一セットアップでできる。
- 2) ボールエンドミルを用いる場合は最適な工具傾斜角で切削でき，仕上げ面あらさを小さくでき，工具寿命を長くできる。
- 3) 加工点への接近性がよいので，工具の直径 (D) に比べて，その突き出し長さ (L) の比 (L/D) を小さくでき，びびり振動の発生を抑制し，高能率で加工できる。
- 4) スクエアエンドミルが使用できる場合には，側刃を用いて加工することにより，工具の直径 (D) と長さ (L) の比 (L/D) をさらに小さく取って，加工することができ，高能率で高精度な加工が行える。
- 5) 複雑形状の場合でも，ワークのセットアップをほとんど変えずに部品全体を加工でき，加工能率の向上と全体としての部品精度を向上させることができる。
- 6) 工程集約して加工した方が，工程分散して加工するよりも，機械のアイドル時間が減少でき，生産性を向上させることができる。

これらの理由により，5 軸制御マシニングセンターの有利さを生かすために，その加工精度ひいては運動精度を 3 軸制御マシニングセンターなみに向上させることが切望されてきた。しかし，一方では 3 軸制御マシニングセンターの精度キャリブレーションの威力を発揮している DBB 法 (Double Ball Bar) はそのままでは 5 軸制御マシニングセンターの精度キャリブレーションには使えず，他に有効な精度キャリブレーション法がなく，工作機械メーカーは非常に困っていた^{1.5)}。

従来、5軸制御マシニングセンターの精度検定用にはわずかにNAS979にテーパコーン試験法が規定されていたのみである^{1.6)}。これは図1.2に示すようなテーパコーン形状をストレートエンドミルを用いて同時5軸制御で加工し、その断面の加工形状誤差を真円度測定機で測り、その大きさを機械の精度を評価する方法である。これで一応の5軸制御マシニングセンターの加工精度の評価ができるように見えるが、この方法は厳密なものではなく、松下らが考察しているようにワークの位置と加工条件次第では機械の運動精度に無関係に $5\mu\text{m}$ 程度の真円度がだせる条件が存在し^{1.7), 1.8)}、大半の5軸制御マシニングセンターのメーカーでは、この条件に極めて近い条件でテーパコーンの加工試験を行っており、それらの機械が高精度である証明のように扱っているなどの問題も生じている。



(a) 加工中の状況



(b) 加工形状

図 1.2 NAS979 の規定に基づいて行われているテーパコーン加工による精度評価法

また、近年ヨーロッパでは3次元測定機のキャリブレーション法によく似たマスターボールを一種のタッチプローブで測定する図1.3に示すR-テストと呼ばれている方法で5軸制御マシニングセンターの精度評価を行う方法が提案されている^{1.9)}。この方法で概略の運動精度を知ることはできるが、厳密性に欠ける上、そのままでは運動誤差原因の診断に使うことは困難である*注。工作機械メーカーにとっては、単に運動誤差が測定できるだけでなく、残存する誤差原因を追究し、それらを取り除くことにより、一層の高精度化を図ることが運動誤差測定と同様に非常に重要である。

*注：これは現状のR-テスト法について言ったことであり、この方法を拡張すれば本研究で行う方法に準じたものにできる可能性を持っている。

このような状態であったところ、2008年に、図1.4に示すようなDBB5法と称する5軸制御マシニングセンターの精度キャリブレーション法が垣野らによって開発された^{1.11)}。この方法は従来のDBB法（以後新しいDBB5法と区別するためDBB3法（図1.5参照）と略称する）を拡張したもので、同一のセットアップでほとんどすべての運動誤差を測定できるだけでなく、運動誤差原因の診断ができるなどの利点がある。



(a) 検出プローブ



(b) 測定状況

図 1.3 ヨーロッパで開発された R-テスト法

そこで本研究では、このDBB5法を用いて5軸制御マシニングセンターの運動誤差原因を診断し、一層の運動精度向上、ひいては加工精度向上のための構造の改良についても研究を行うこととした。また、この測定法を用いれば回転軸のオフセット誤差と角度誤差からなるアライメント誤差の測定ができる。これらの誤差はCNCやCAMシステムを用いた補正によってかなり軽減できるはずであるので、補正法を用いた運動精度向上についても研究する。さらに、これらの機械が加工対象とする高精度な複雑形状部品について、種々な方式で加工を行い、同時5軸制御を用いた加工法の利点についても研究する。

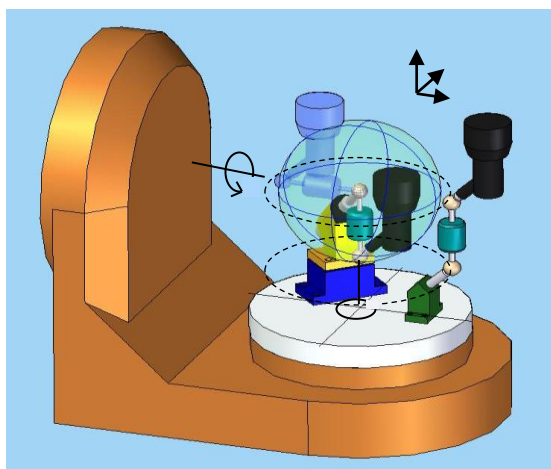


図 1.4 DBB5 測定法の測定原理と測定領域

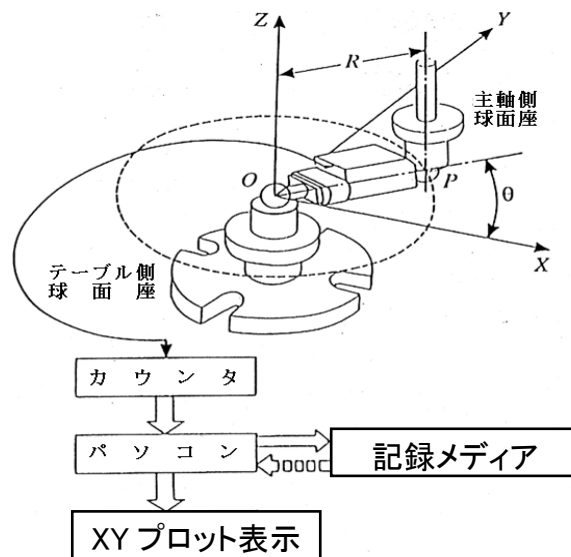


図 1.5 従来の DBB3 運動精度測定法

本研究の構成は次のようになっている。

第 1 章は、本研究の目的と概要を述べている。

第 2 章では、従来は主に 3 軸制御マシニングセンターの運動精度診断に用いられてきたダブルボールバー (DBB3 法) を改良して、新たに 5 軸制御マシニングセンター向けに DBB5 測定法の原理を考案している。さらに本研究の基礎となる DBB5 精度キャリブレーション法の原理について DBB3 法と比較しつつ考察している。

第 3 章では、回転軸に DD モータ駆動 (ダイレクトドライブ) 機構を有する本研究で主に対象としているテーブル・オン・テーブル型の 5 軸制御マシニングセンター NMV5000 に、この DBB5 測定法を適用して精度キャリブレーションを行っている。その後、実際に 5 軸制御マシニングセンターの運動誤差軌跡から直進および回転軸に関する運動誤差原因の診断を行っている。また、回転軸にローラギヤカム変速機を有する従来型の 5 軸制御マシニングセンターの運動誤差との差についても考察している。

第 4 章では、現在行われている NAS979 規格に基づいたテーパコーン加工実験に準じた同時 5 軸制御時の運動精度の評価を DBB5 法で行う手法に取り組んでいる。その結果、本機に存在する改良すべき点について検討するとともに、実際にテーパコーン切削を行った場合に得られた加工形状誤差と運動誤差との比較検討をしている。

第 5 章では、回転軸と直進軸のサーボ特性の違いによって生じる運動誤差について検討している。すなわち、1つの回転軸と1つの直進軸を同期させて円運動を行わせた場合に生じる運動誤差を解析して求める式および診断法を構築している。特にサーボ系の位置フィードバックループのゲイン K_p を種々変更して、回転軸における DD モータ駆動機構と従来

のローラギヤカム変速機を有する機構との差について比較検討している。

第6章では、旋回軸B, Cのアライメント誤差を構成するオフセット誤差と角度誤差について、DBB5法を用いた回転測定法を考察し、さらにその測定結果に基づきNCを用いたそれらの誤差のソフトウェアによる補正法について検討している。さらにテーブル・オン・テーブル型とトラニオン型の旋回軸の構造について、その適用性の違いについて検討している。

第7章では、5軸制御機の有利さを活かして、円錐台形状をモチーフにして複雑さを変化させたワークを実際に加工し、従来の同時3軸制御加工の結果と比較し、加工精度と加工能率を比較検討している。特に高精度な5軸制御マシニングセンターを用いた場合について、加工現象を考慮しながらワークの複雑さの度合いとの関係を検討している。

第8章は、以上をまとめた本研究の結論を示している。

参考文献

1. 1) 日本工作機械工業会, 5 軸マシニングセンタの運動精度試験方法に関する調査研究, Vol. 3(2009), 37.
1. 2) 日本工作機械工業会, 5 軸制御マシニングセンタ精度検査規格標準化説明会資料, Vol. 1(2008), 20.
1. 3) 株式会社森精機製作所, NMV5000DCG カタログ, (2008), 18.
1. 4) 機械技術 進展する 5 軸制御加工技術, Vol. 55 No. 8(2007), 52-53.
1. 5) 垣野義昭ほか, DBB 法を用いた NC 工作機械の精度検定法, リアライズ社(1989).
1. 6) NAS979 : Uniform cutting test- NAS(National Aerospace Standard) series, metal cutting equipment test specifications, (1969), 34-37.
1. 7) 松下哲也ほか, テーブルチルト型 5 軸制御工作機械によるテーパコーン加工精度, 精密工学会誌, Vol. 74, No. 6, (2008), 632.
1. 8) M. S. Uddin et al : Prediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors, Precision Engineering, Vol. 32, No. 2(2009), 194-201.
1. 9) ISO 10791 1 : 1998, Test conditions for machining centers-Part 1 Geometric tests for machines with horizontal spindle and accessory heads (Horizontal Z-axis).
1. 10) ISO 203-4 Test codes for machine tools Part 4 : Circular test for numerically Controlled machine tools(2005), 藤田純ほか, 象限切り替え誤差の理論解析, 精密工学会誌, Vol. 67, No. 1(2001), 152.
1. 11) Y. Kakino et al. : Measurement of Motion Accuracy of Five Axis Control Machine Tools by Using Double Ball Bar Method DBB5, Proceedings of ISFA 2008, (2008), JS006, 1-4.
1. 12) 垣野義昭, 井原之敏, 清水敬一, 中川秀夫, 竹下虎男, C 工作機械の運動精度に関する研究 (第 8 報) —スケールフィードバック値を利用した DBB 測定法の改善—, 精密工学会誌, Vol. 61, No. 3(1995), 430-434.
1. 13) H. Schwenke et. al., Geometric error measurement and compensation of machines—An update, CIRP Abals- Manufacturing Technology, Vol. 57(2008), 660-675.
1. 14) 小池伸二, 5 軸制御立形マシニングセンタ D500 の開発, 日本機械学会誌, Vol. 112, No. 1084(2009), 67.
1. 15) M. Boujelbene, A. Moisan, W. Bouzid, S. Torbaty, Variation Cutting Speed on the Five Axis Milling, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 21, No. 2(2007), 7-14.
1. 16) Y. Boz , H. Erdim, I. Lazoglu, Modeling Cutting Forces for Five Axis Milling of Sculptured Surfaces, Advanced Materials Research, Vol. 223(2011), 701-712.

- 1.17) J-TECT, 型加工工程設計支援システム Mill-Plan /UH 5Axis, J-TECT Engineering Journal, No. 1011(2013), 80-81.
- 1.18) 加藤教之ほか, 円すい台加工と模擬した 5 軸制御マシニングセンタの 3 次元円弧補間運動軌跡の解析, 日本機械学会誌論文集 (C 編), Vol. 78, No. 787(2012-3), 234-245.

第 2 章. DBB5 精度測定法の原理

2. 1 緒論

前章で述べたように、最近国内で既に相当数の 5 軸制御マシニングセンターが産業界で使用されているにもかかわらず、実用的で精度的にも十分な精度キャリブレーション法がなかった。立形マシニングセンター（同時 3 軸制御）や横形マシニングセンター（同時 4 軸制御）の精度キャリブレーション用に広く普及している DBB3 法は、そのままでは 5 軸制御マシニングセンターの精度キャリブレーションには使用できず、前述したように他にも有効なキャリブレーション法がなく、工作機械メーカーは非常に困っていた^{1.5)}。したがって、5 軸制御マシニングセンターで加工された部品の精度は低く、国内では 5 軸制御機の得意とするはずの金型加工における使用例*1は極めて少なかった。

近年、3 次元測定機の精度キャリブレーション法によく似たマスターボールを一種のタッチプローブで測定する図 1.3 に示した R-テスト法がヨーロッパで提案されている^{2.1), 2.2), 2.3)}。この方法では概略の運動精度を知ることはできるが、厳密性に欠ける上、点群での測定であり、DBB 法のように運動誤差軌跡を連続測定していないので、そのままでは運動誤差原因の診断に使うことは困難である。ただし、前述のように今後研究を進めれば、後述する DBB5 法と同じような機能を持たせることも可能と思われる。また微細な溝加工を行って幾何誤差を推定する方法についても研究されている^{2.4)}。

国内では、最近垣野らが従来 of DBB3 法を改良した DBB5 測定法と称する 5 軸制御マシニングセンターの運動精度を測定する方法を開発した^{1.9), 2.5), 2.6)}。この方法は従来 of DBB3 法と同様に運動誤差軌跡を測定するだけでなく、数回のセットアップの変更でほとんどすべての運動誤差が測定できる。DBB5 法の利点の 1 つは運動誤差を軌跡として表すので、運動精度の厳密な評価が行えるだけでなく、運動誤差原因の診断が精度よく行え、誤差原因を取り除き、一層の精度向上を図るために必要な情報が得られることである^{2.7), 2.8), 2.9)}。

そこで本章^{2.10)}ではこの DBB5 測定装置を用いた 5 軸制御機の正確な運動精度測定法を研究開発するとともに、回転軸の運動誤差原因を診断する方法を研究開発し、実機への適用を行うこととした。

*1 脚注：金型加工に用いられている立形マシニングセンター（3 軸制御）はおおむね 5 μ m 程度の運動精度が出ているものが多い。

*2 脚注：東京農工大のグループも並行して同様な研究を行っている。

本章の第 2.2 節では、まず従来の 3 軸制御機用の DBB3 測定法の原理を紹介し、第 2.3 節では新しく開発された 5 軸制御機用の DBB5 測定法の原理を紹介するとともに、DBB3 法との共通点と異なる点などについて考察を行っている。第 2.4 節では DBB5 法を用いて行う旋回軸系に存在する運動誤差原因を運動誤差軌跡から抽出する診断法について考察している。第 2.5 節では、製作した DBB5 測定機の測定精度について考察している。第 2.6 節は以上をまとめた本章の結論である。

2. 2 DBB3 測定法

垣野らが開発した DBB3 測定機と測定法の概要を図 2.1 と図 2.2 に示す^{1.5)}。図 2.2 に示すようにバーで連結された 2 個の高精度な球を磁気で球面座に吸着させ、一方の球をテーブル側の座に取り付け、他方を主軸側の球面座に取り付ける。球面座は事実上 3 点のみで球と接触し、支持している。このような簡単な方法で $0.2\mu\text{m}$ 程度の回転精度をもつ球面座が作れる。テーブル側（または主軸側）の球を中心として、主軸側（またはテーブル側）の球を CNC で半径 R の直進 2 軸の同時制御（ $(X-Y)$ 、 $(Y-Z)$ 、 $(Z-X)$ の各平面で）を用いて円弧補間運動をさせる。その運動を行っている 2 球間の長さの変化量 ΔR を 2 つの球を繋いでいるバーに内蔵させたスケールで検出し、それを拡大表示して位相角 θ （=バーの角度的な移動量）に応じて基礎円上にプロットする（図 2.3 参照）。

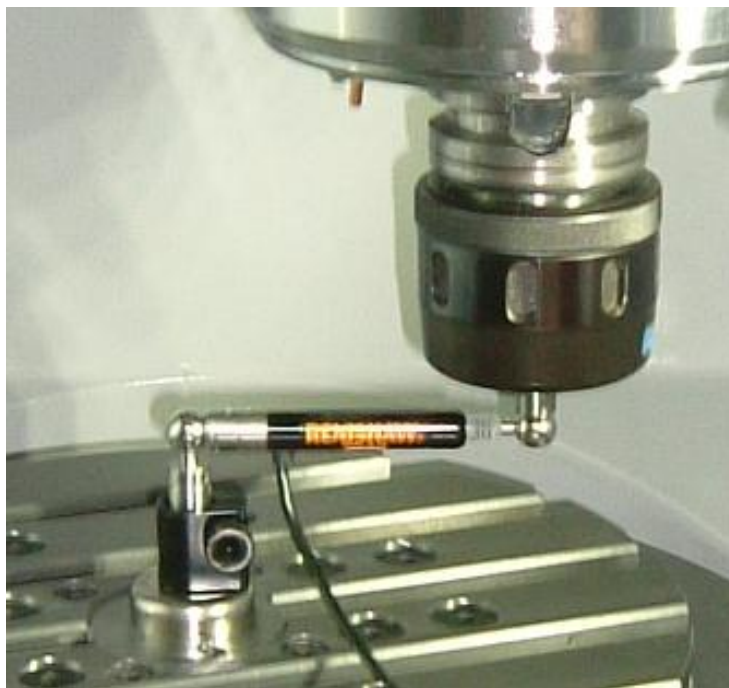


図 2.1 従来の DBB3 測定機（Renishaw 社製）（分解能 $0.1\mu\text{m}$ ）

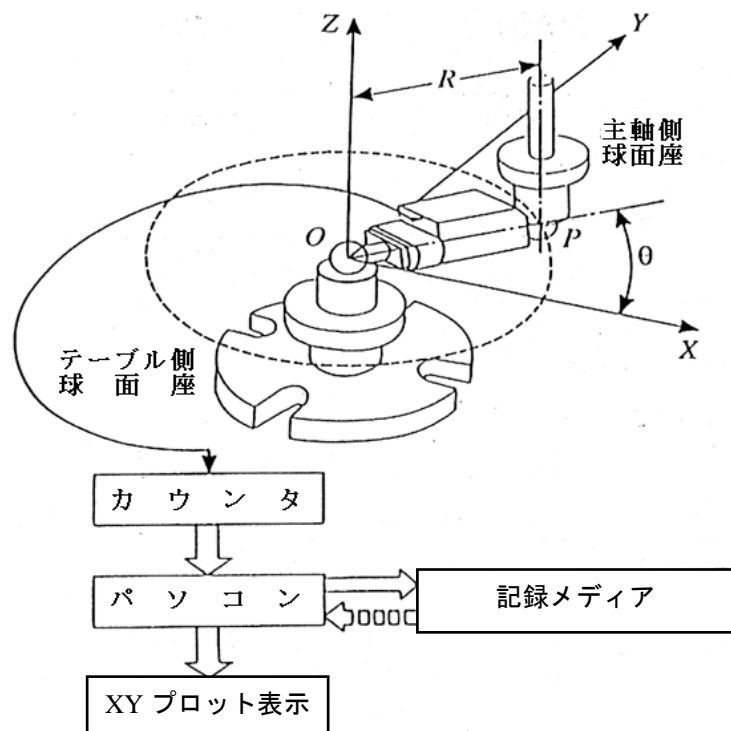


図 2.2 DBB3 法における運動誤差軌跡の作成法

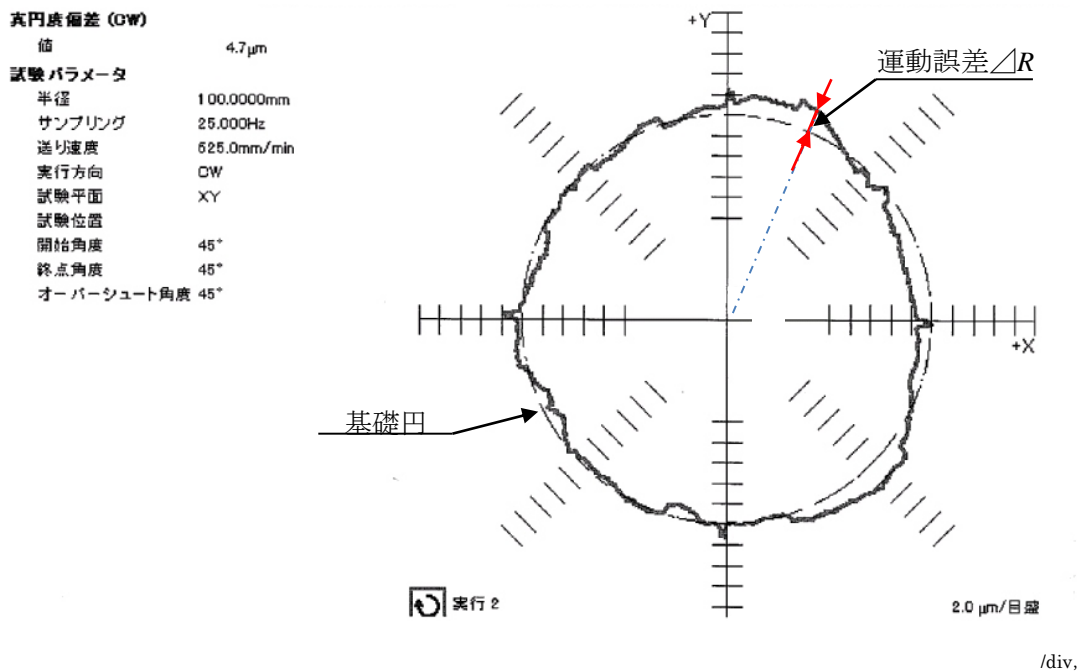


図 2.3 DBB3 測定法で測定した運動誤差軌跡の例

このようにして得られた運動誤差軌跡をもとに、最小領域円半径差で評価したその大きさで運動誤差である真円度誤差の大きさを評価するとともに、測定された運動誤差軌跡に存在する各種の軌跡パターン（第 2.4 節で後述）を抽出して、その大きさから、機械に存在する運動誤差原因とその大きさを診断する^{1.5)}。

DBB3 法で運動誤差を測定するに際して、2 球間の距離の変化量 ΔR と各軸が有する誤差（誤差ベクトル (ΔX , ΔY , ΔZ) で与えられるとする) の関係は次式で与えられる。

$$(R + \Delta R)^2 = (X + \Delta X)^2 + (Y + \Delta Y)^2 + (Z + \Delta Z)^2 \quad (2.1)$$

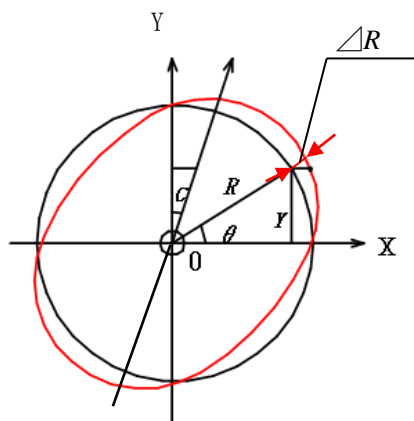
これを展開し、2 次の微小項を省略すると、

$$2R\Delta R = 2X\Delta X + 2Y\Delta Y + 2Z\Delta Z$$

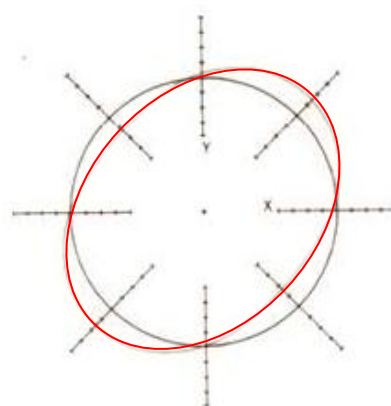
$$\Delta R = (X\Delta X + Y\Delta Y + Z\Delta Z) / R \quad (2.2)$$

ここで、 ΔX , ΔY , ΔZ は運動誤差原因に特有な誤差ベクトルで与えられる X, Y, Z 方向の機械系の誤差である。式 (2.2) は DBB3 法の基礎式である。

式 (2.2) から誘導される運動誤差原因と誤差ベクトルと軌跡パターンの関係を直角度誤差を例にとり示す。いま、XY 軸間に誤差原因として直角度誤差 c のみがある場合には、 $c = \tan c$ として誤差ベクトルは次のようになる（図 2.4(a) 参照）。



(a) 直角度誤差 c



(b) 軌跡パターン (= 付図 2(g))

図 2.4 直進軸 X, Y 間に直角度誤差が存在した場合の軌跡パターン

$$\Delta X = c \cdot Y$$

$$\Delta Y = 0$$

$$\Delta Z = 0$$

これを式 (2.2) に代入すると、

$$\Delta R = c \cdot X \cdot Y / R$$

となる。これに $X = R \cos \theta$, $Y = R \sin \theta$ を代入すると

$$\Delta R = cR/2 \cdot \sin 2\theta$$

が得られる。

これを基礎円上に運動誤差軌跡としてプロットすると、図 2.4(b)のように楕円状のパターンとなる。DBB3 法で誤差原因の診断に用いられる直進軸系の軌跡パターンを付図 1~5 に示す。それらの導出プロセスについては文献 1.5) に詳しいので、ここでは省略する。

図 2.1 から分かるように DBB3 測定では、XY 平面については 360° にわたって運動誤差を測定できるが、セットアップを変えない限り、そのままでは球と取付具やテーブルなどが干渉するので、YZ, ZX 平面については 180° 強についての範囲でしか測定できない。通常はセットアップを変えての測定は行われない。その理由は Z 軸方向の精度は X, Y 軸方向の精度ほどには重要とされないことが多いこと（ただし、金型加工用の機械では重視されている）、および測定時間の短縮のためからである。DBB3 法で測定した立形マシニングセンタの運動誤差軌跡の 1 例を図 2.3 に示す。

前述のような制約は存在するが、DBB3 法は簡便で精度よく（測定精度 0.5 μm）、運動誤差を測定できるだけでなく、付図 1~5 に示した軌跡パターンを用いて直進送り軸系に存在する運動誤差原因の診断が行えるので、ISO230-4:1996 に採用され、一般に広く普及している。

2. 3 DBB5 測定法

垣野らが開発した DBB5 測定機と測定法の概要を図 2.5 に示す。また、その測定領域と測定パターンを図 2.6 に示す。この DBB5 法が従来の DBB3 測定と異なる点は次の通りである。

- 1) バーと球を繋いでいる支持部が X, Y, Z 軸に対して 45° 傾いた方向に出ている。
- 2) EROWA のチャックを用いてテーブル側球面座の位置を軸方向に変化させることを可能にしている。
- 3) 芯合せのための微動装置が付加されている。

1) はセットアップを変えずに XY 平面だけでなく、YZ, ZX 平面でも 360° にわたって運動誤差を測定できるようにするためバーや取付具の干渉を避けるための改良である。2) は回転軸のアライメント誤差であるオフセット誤差と角度誤差を測定するための工夫である。すなわち、軸方向位置の異なる 2 平面で運動誤差軌跡を求め、その円の中心位置のずれとその変化量から回転軸のオフセット誤差と角度誤差を求める。ただし、EROWA のチャックを用いて Z 軸方向に高さを変えた場合には X, Y 方向の座標がわずかではあるが変化する可能性があるため、それらは予め高精度な 3 次元測定機を用いてキャリブレーションしておいて、補正する必要がある。

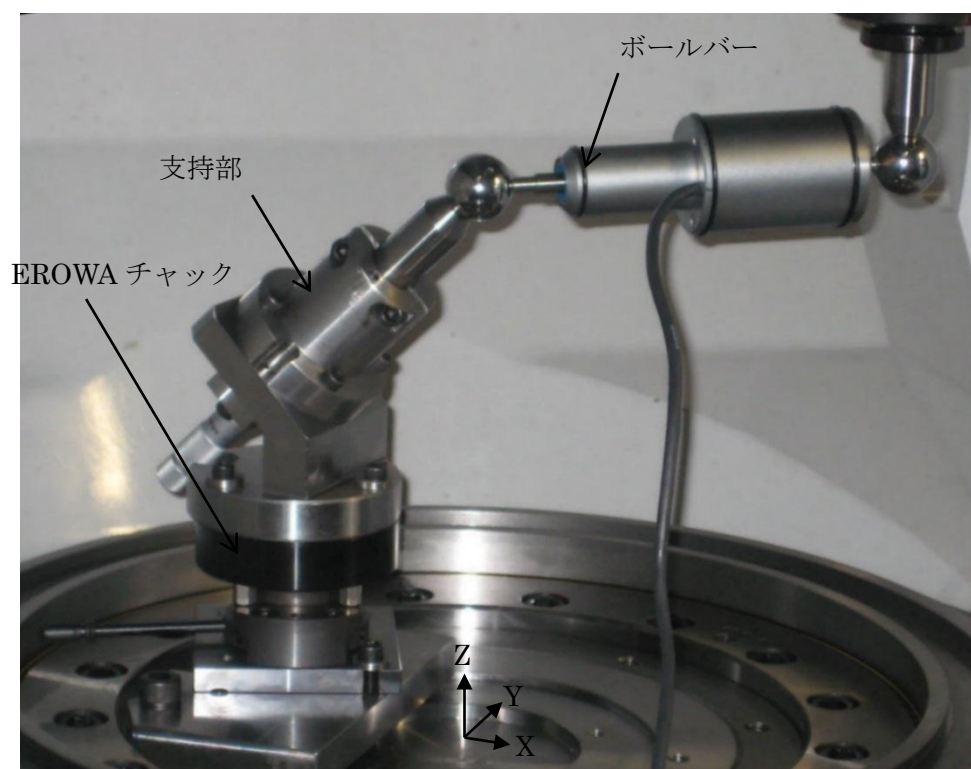


図 2.5 新たに開発された DBB5 測定機

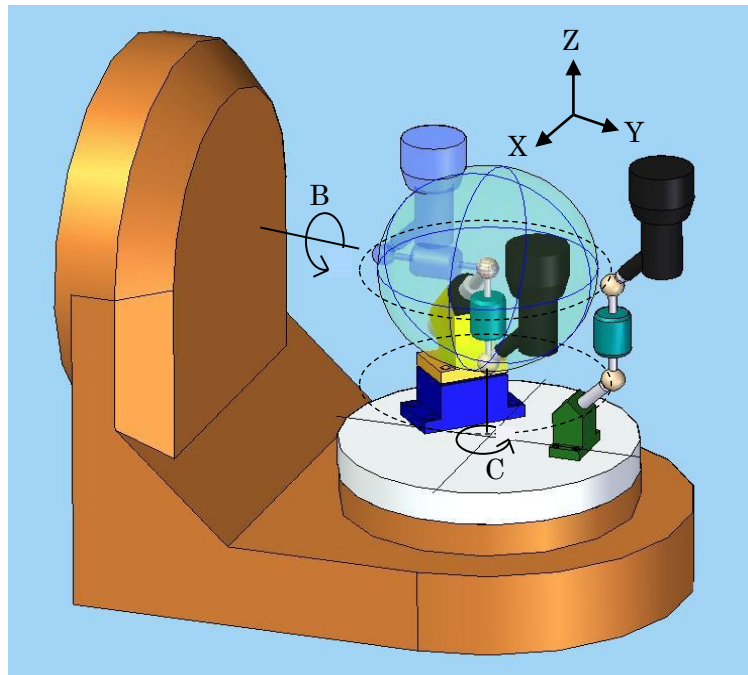


図 2.6 DBB5 測定法の測定原理と測定領域

旋回軸のオフセット誤差とは図 2.7 に示すように旋回軸中心がそれに直交する平面において直進軸中心とずれているオフセット量 (ΔX_C , ΔY_C), (ΔZ_B , ΔX_B) をあらわし, 角度誤差とは旋回軸が法線方向とずれている角度量 (ΔC_X , ΔC_Y), (ΔB_Z , ΔB_X) で表される. オフセット誤差は原則として B, C 軸の交点を含む XY, YZ, ZX 平面で定義するものとする. 交点からずれたオフセット測定においては, 測定平面を明示して表示するか, B, C 軸の交点を含む平面での量に換算して表示する.

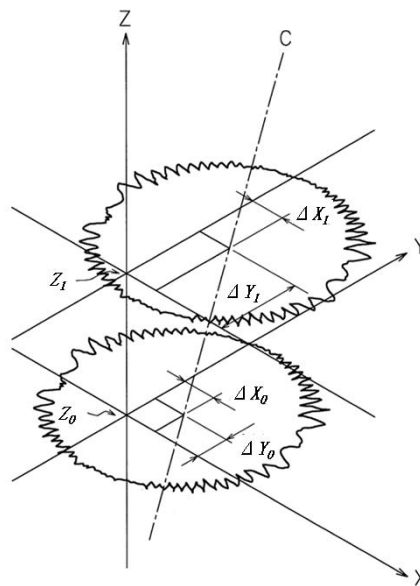


図 2.7 旋回軸のオフセット誤差と角度誤差の定義と測定法

それらは図 2.7 に示す運動誤差軌跡から次式によって定義され、算出することができる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_c &= \Delta X_0 \\ \Delta Y_c &= \Delta Y_0 \\ \Delta C_x &= (\Delta X_1 - \Delta X_0) / (Z_1 - Z_0) \\ \Delta C_y &= (\Delta Y_1 - \Delta Y_0) / (Z_1 - Z_0) \end{aligned} \right\} (2.3)$$

もう 1 つの旋回軸である B 軸についても同様である。

ただし、現段階では旋回軸のオフセット誤差や角度誤差は 1 次成分のみを対象とし、2 次成分以上はそれらが小さいものとして、無視する。この仮定の妥当性については将来実測データに基づいた検証が必要である。特殊な構造の機械においては、これが当てはまらない場合が存在するかもしれない。

2. 4 旋回軸系に存在する運動誤差原因の診断法と軌跡パターンについての理論的考察

同時 5 軸制御が行われている機械においても、運動精度の基本は各軸に固有の誤差と軸間のアライメント誤差が小さいことが基本であることは同時 3 軸制御機と変わりはない。違いは同時 5 軸制御機では通常同時 3 軸制御機には存在しない旋回 2 軸を有することである。また、運動誤差原因を正しく診断しようとするれば、同時に動く軸数が少ない測定結果 (= 運動誤差軌跡) を用いる方が有利であることも変わらない。

DBB5 法における直進軸 X, Y, Z の運動誤差原因の診断法は基本的には文献 1.5) で詳しく述べられている DBB3 法における運動誤差の診断法とまったく同じである。すなわち、DBB 法の基本式(2.2)に誤差原因から定まる誤差ベクトル (ΔX , ΔY , ΔZ) を代入することにより求められる軌跡パターンを測定で得られた運動誤差軌跡から抽出し、その大きさを求めることにより、誤算原因の大きさを知る。

DBB5 法では直進軸に加えて、新たに旋回軸についての運動誤差原因の診断法が必要である。これも直進軸系と同様に運動誤差軌跡に存在する軌跡パターンを抽出して診断する。ただし、旋回軸のアライメント誤差であるオフセット誤差と角度誤差は前述したように図 2.7 と図 2.8 の運動誤差軌跡の中心を求め、それらから式(2.3)を用いて算出する。

旋回軸駆動系に存在する誤差原因として、図 2.7 に示した座標軸の誤差 (オフセット誤差と角度誤差) の他に、旋回軸系に固有の角度スケールの誤差、変速機構に存在するバックラッシュ、支持軸受に固有の誤差、サーボ系に起因するロストモーション、スティックモーション、速度指令の変動の過大なために発生する振動、および旋回軸駆動系のサーボゲインと直線軸駆動系のサーボゲインとの不一致、旋回による重力作用点変化による弾性変形などがある。それらが単独で存在した場合の軌跡パターンの代表例を図 2.8~図 2.18 に示す。このうち、1) ~8) はラジアル方向の運動誤差である。この他旋回軸には、9) ア

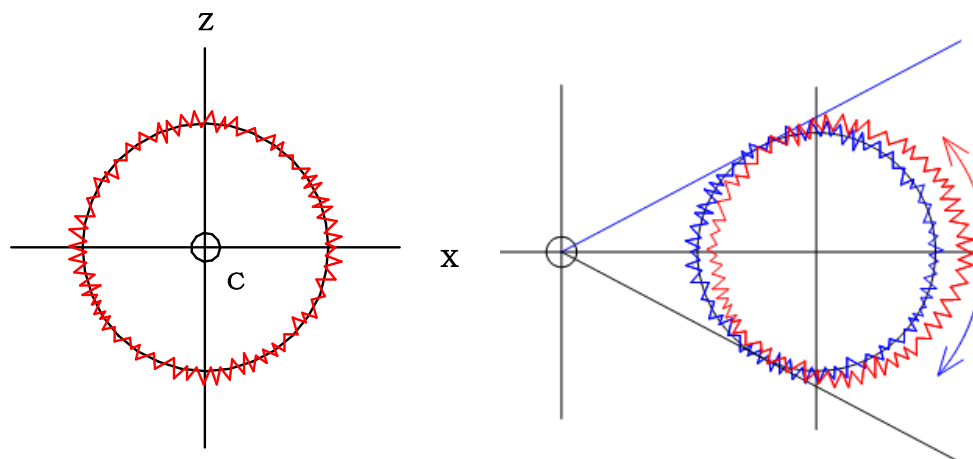
ンギュラー方向の運動誤差と、10) アキシャル方向の運動誤差が存在する。

以下、これらについて詳しく考察する。

1) バックラッシュとロストモーション (図 2.8)

旋回軸の駆動用にウオーム変速機構などの変速機を使用すると、運動方向反転時にかなり大きなバックラッシュやロストモーションによる誤差が発生する。直進軸駆動系の象限切替時(運動方向反転時)については現在ではバックラッシュやロストモーションはほとんど発生しないように工夫されている。象限切替時以外に発生する段差は旋回軸駆動系から生じていると見なすことができる。しかし、念のため直進軸にはバックラッシュとロストモーションが生じていないことを、予め XY, YZ, ZX 平面での測定で確かめておく必要がある。

C 軸中心を Z, X 軸の原点においた場合には(以下標準測定と略称する)、運動誤差軌跡には図 2.8(a)に示すように何も現れない。C 軸中心を X 軸方向に $2R$ だけずらした場合には(以下オフセット測定と略称する)、同図(b)のような軌跡パターンが現れる。これらの図には判別しやすいように、高次山成分を加えて示している。



(a) 標準測定

(b) オフセット測定

図 2.8 旋回軸のバックラッシュとロストモーションが原因する軌跡パターン

2) スティックモーション (図 2.9)

直進軸駆動系と同様に、旋回軸駆動系でも運動方向反転時にスティックモーションが発生し、パルス状の突起が生じる。ウオーム変速機などを用いている場合にはサーボ系の位置ループゲイン Kp が小さくなっているため、スティックモーション量は大きくなりがちである。前述のように旋回軸系が原因するパルス状の突起は象限切替時以外の場所で発生しているものと考えられる。この場合、ロストモーションによるものと

スティックモーションによるものを簡単には区別できない。

回転軸のスティックモーション原理的に図 2.5~2.6 の通常の DBB5 測定のためのセットアップでは測定できない。すなわち、回転軸のスティックモーションを測定するために測定円の中心(球の中心)を回転軸の中心においた場合(標準測定の場合)は、図 2.9(a)に示すような突起となる。オフセット測定した場合には、第 5 章で詳述するが同図(b)に示すように C 軸の運動方向が反転するところで、鋭い突起となって現れる。これは両者の中心を一致させた場合には回転軸の追従誤差がノンセンシティブになるからである。バックラッシュやロストモーションとともに、このスティックモーションの測定法について第 5 章で詳しく考察する。

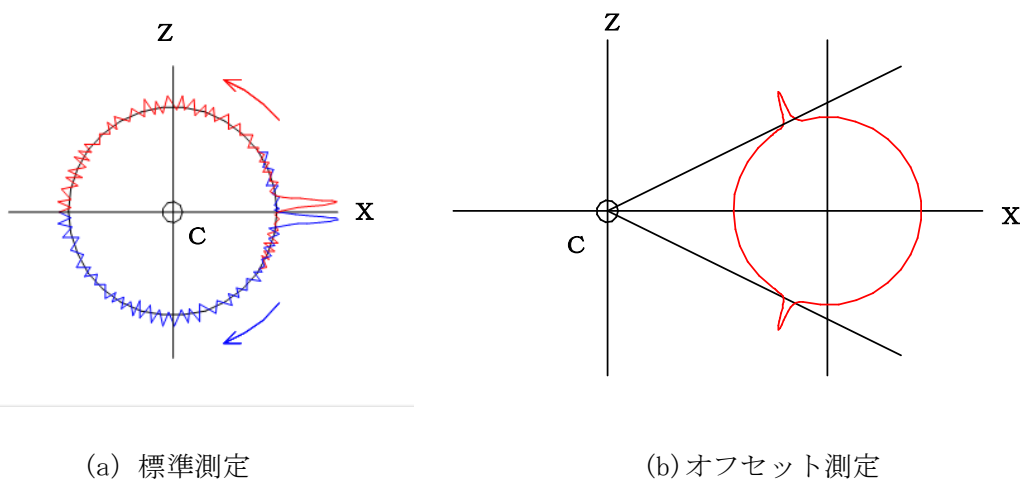


図 2.9 回転軸のスティックモーションが原因する軌跡パターン

3) 速度指令が過大なために発生する振動 (図 2.10)

速度指令(あるいは速度変化)が過大なために発生する振動は、その限界値以下で使用するため、通常は直進軸系では生じない。しかし、回転軸系ではある輪郭形状に沿った工具パスを CAM で作る場合に回転軸がどの程度の送り速度で移動するかがオペレータにはイメージできない場合があり、場合によってはかなり早い送り速度および速度変化になっている場合がある。このような場合にはその回転軸についてサーボ系が不安定になり、機械系の振動を誘発することがある。

オフセット測定した場合には、図 2.10(b)に示すように回転速度が速くなる左側で振幅が急激に大になって現れる。通常測定の場合には同図(a)に示すように、位置 $Z=0$ の左側で最大振幅となって現れる。

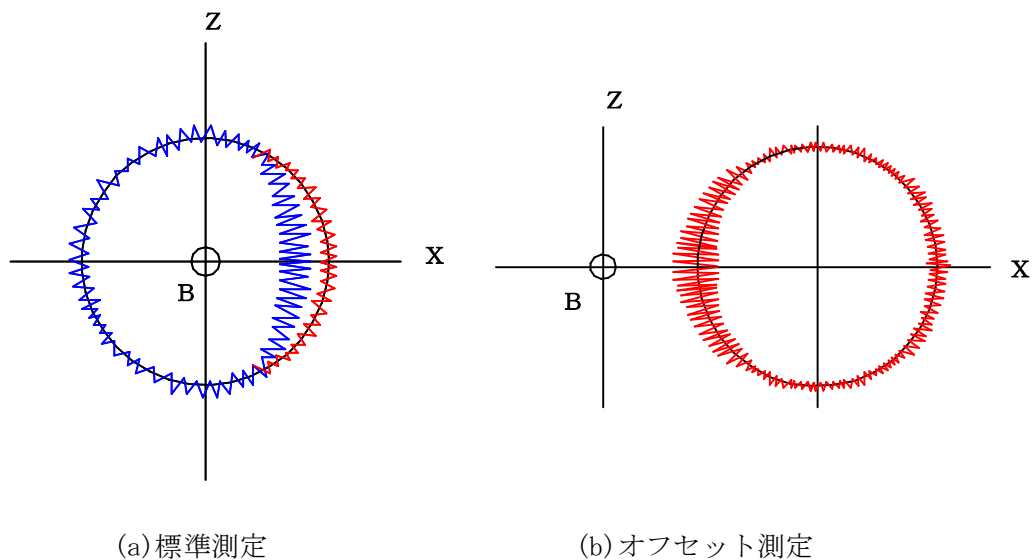
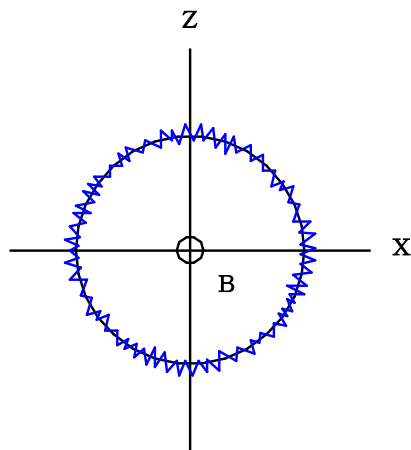


図 2.10 旋回軸の速度指令が過大なために発生する振動による軌跡パターン

4) 角度スケールの誤差 (図 2.11)

精度が低いロータリーインダクトシンスケールなどは検出系のノイズにより数 arcsec 間隔のピッチで高次山成分が現れることが多い。ほとんどの 5 軸制御機では旋回軸には角度検出器が付けられている。分解能の非常に小さい角度スケール (100 万分割以上) が使用されている場合には高次山成分は小さくなる。この場合には、通常測定、オフセット測定ともに変動の少ない高次山成分となって現れる。



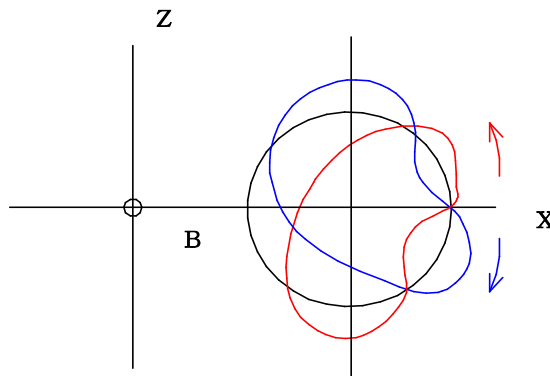
(標準測定)

図 2.11 角度スケールの誤差による軌跡パターン
(=高次山成分)

5) 直進軸系と旋回軸系のサーボゲインの不一致 (図 2.12)

高速で輪郭加工を行う機械では、直進軸系のサーボゲイン Kp と旋回軸系のサーボゲイン Kp を一致させる必要がある。両者の間に不一致があるとその量と送り速度に応じた運動誤差が現れる。これについては第 5 章で詳しく考察する。

オフセット測定の場合には図 2.12 に示すように、通常の直進 2 軸で円弧補間した時の軌跡パターンを少し崩したような軌跡パターンとなって現れる。運動方向を反対にした場合には運動誤差の符号が逆転するので、判別しやすい。

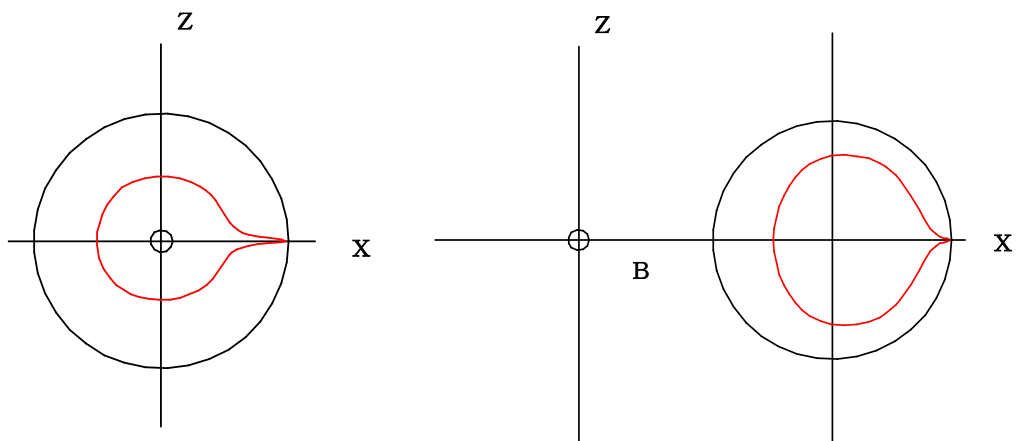


(オフセット測定)

図 2.12 直進軸系と旋回軸系のサーボゲインの不一致による軌跡パターン

6) サーボ系の応答遅れによる半径減少の軌跡パターン (図 2.13)

サーボ系の応答遅れによって図 2.13 に示すような軌跡パターンになる運動誤差が現れる。この誤差を小さくするためには、位置ループゲイン Kp を大にすることや、フィードフォワードゲイン Kf を大にすることが有効である。



(a) 標準測定

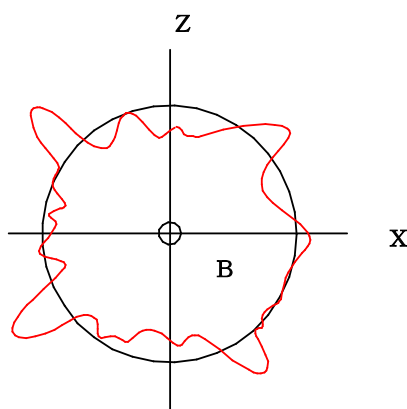
(b) オフセット測定

図 2.13 サーボ系の応答遅れによる半径減少の軌跡パターン

7) 変速機に固有の誤差 (図 2.14)

ウオーム変速機やピン式変速機を用いる場合には (後述する図 3.3 参照), 変速機構に固有の山数に関連した運動誤差が現れることがある. たとえば, 使用されているピンの数の $1/2$ の山数で運動誤差が現れる. しかもそれらの振幅の大きさが不ぞろいであり, かつ非常に大きく現れる場合があるので注意を要する.

通常測定の場合には, 位置誤差の大きいところで, 図 2.14 に示したように特異な突起となって現れる. この突起の大きさは一定しない. また, この突起の位置はくり返し測定した場合に徐々に移動して行く.

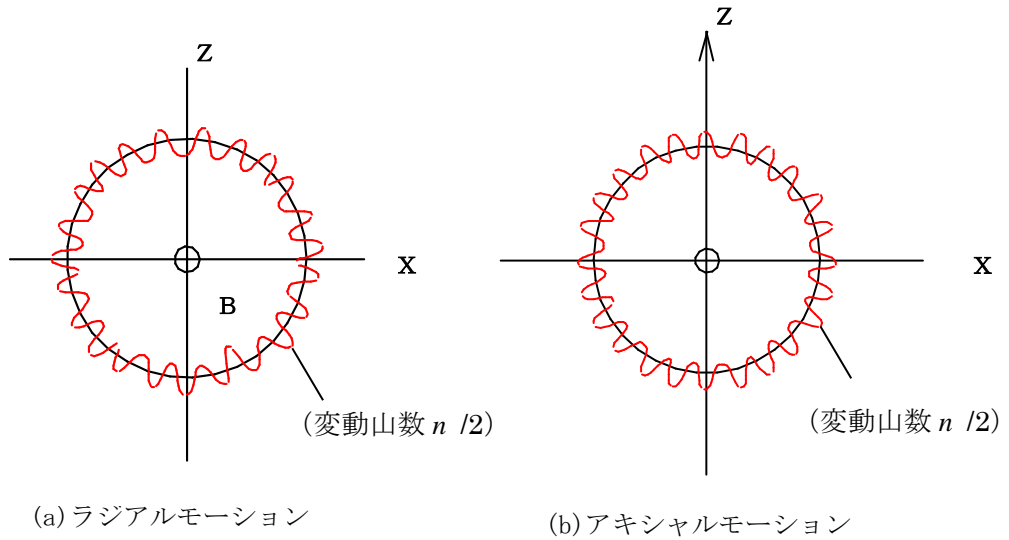


(標準測定)

図 2.14 変速機に起因する軌跡パターン

8) 支持軸受に固有の誤差 (図 2.15)

回転軸の支持軸受として, 多用されているクロスローラー軸受の場合には, 使用されている転動体 (ローラー) の数 n の $1/2$ の山数で周期的な誤差成分が現れることがある. 他の軸受の誤差や駆動用モータが原因する誤差も同様に現れることがある. 転動体の寸法のふぞろいや軌道面の誤差などが直接の原因である. 通常は, ラジアル方向にもアキシャル方向にも同数の山成分となって現れる. この山数は転動体の数 n のほぼ $1/2$ となることが多い.

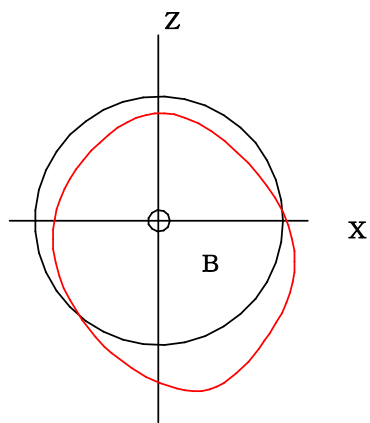


(標準測定)

図 2.15 支持軸受 (クロスローラー軸受) に起因する軌跡パターン (ローラ数 n)

9) 旋回による重力作用点変化による弾性変形 (図 2.16)

B, C 軸が旋回した場合などに, 移動体 (ワークと取付具を含む) の姿勢が変化するので, 重力の作用点 (=重心) が変化し, 移動体に弾性変形が生じる. このタイプの運動誤差は機械の構造に依存するので, その軌跡パターンはさまざまな形になる. 図 2.16 はその一例にすぎない.



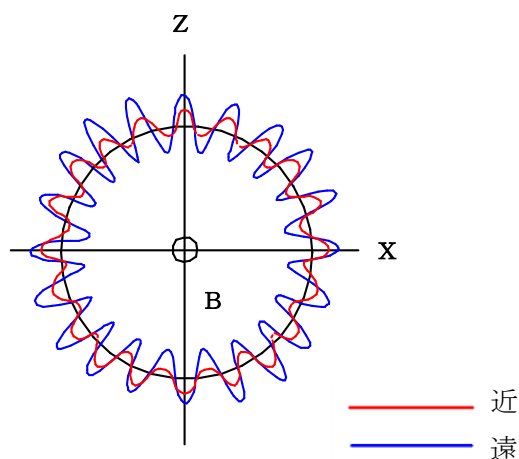
(標準測定)

図 2.16 旋回による重力作用点変化による弾性変形に起因する軌跡パターン

10) 旋回軸のアンギュラーモーション (図 2.17)

旋回軸系にアンギュラーモーションが存在すると支持部からの距離に比例してラジアル誤差が増大する. したがって, 軸方向に離れた 2 点でラジアル誤差を測定することに

より，アンギュラーモーシヨンの大きさが判別できる．アンギュラーモーシヨンの原因は以上の 1) ～8) すべての原因で生じる可能性がある．

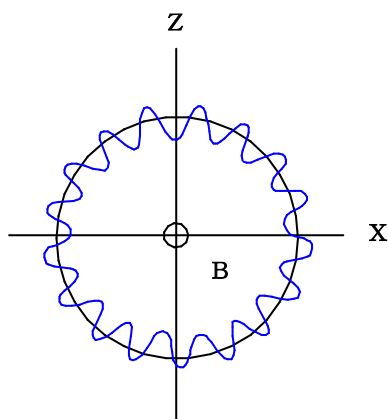


(標準測定)

図 2.17 旋回軸のアンギュラーモーシヨンに起因する軌跡パターン

11) 旋回軸のアキシャルモーシヨン (図 2.18)

旋回軸のアキシャルモーシヨンは以上のラジアル方向に生じる運動誤差とは異なり，軸方向に生じる運動誤差である．その原因は主に支持軸受の不良にある．その一例を図 2.18 に示す．これは 7) の軸方向成分と表現することもできる．



(標準測定)

図 2.18 旋回軸のアキシャルモーシヨンに起因する軌跡パターン

10) , 11) は通常の DBB5 法のセットアップでは測定できないので，図 2.19, 図 2.20 に示すような付加的なセットアップを用いて測定する．ただし，実際には旋回軸の支持軸受としてアンギュラーコンタクト球軸受が用いられている場合は，これらの誤差は非

常に小さいので、これらの測定を行う必要性は低い。

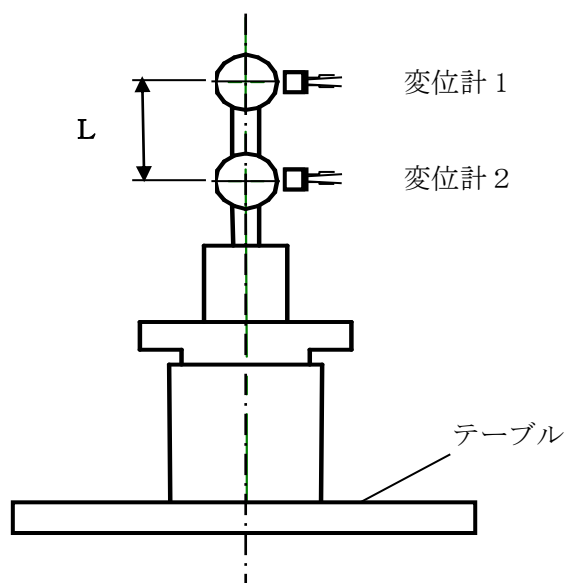


図 2.19 旋回軸のアンギュラーモーションを測定するためのセットアップ略図



図 2.20 旋回軸のアキシャルモーションを測定するためのセットアップ

2. 5 DBB5 法の測定精度についての検討

DBB5 測定機では球の支持バーを X, Y, Z 軸に対し 45° 傾いた方向に取り付けているので、DBB3 測定機に比べて製作上種々の困難が生じる。その主なものは次のとおりである。

1) 球に穴をあけることによる回転精度の低下

DBB5 法では放電加工であけた穴の近傍まで、球面座が接近する。DBB3 測定ではこのように接近することはない。したがって、マスター球に放電加工で穴をあける際に、マスタ

一球の穴付近の形状精度が低下すると、それによって回転精度、ひいては測定精度が低下するので、細心の注意が必要である。

- 2) バーと支持部の干渉を避けるために、バーの突き出し長さを大にすることによる測定半径 R の増大。

中小型機の場合は、測定半径 R が大になると、ストロークの関係上、 360° の測定範囲が取れない場合が生じる。これを避けるために測定半径 R をある程度以下に抑える必要がある。しかし、実際には干渉を避けるために、半径 R を長くしなければならないことが多い。そのため連結バーを傾けて測定する必要があるが、そうすると感度が低下する問題が生じる。

- 3) 測定系の剛性低下

DBB5 法では、回転軸を回転させて運動誤差を測定する必要がある。したがって、マスター球を支持しているバーの姿勢が大きく変化する。この際にその中心位置が移動しては正確な測定ができない。これを防ぐために、支持部を含めて、測定系の剛性を大にしておく必要がある。

- 4) 測定位置の変更に伴う誤差の抑制

回転軸のオフセット誤差と角度誤差を測定するためには、軸方向位置を変えて運動誤差軌跡を求める必要がある。本研究では EROWA のチャックを用いて、それを実現しているが、この場合にも若干の位置の変動が生じる。これを予め高精度な 3 次元測定機で求めておく必要がある。

DBB3 法では $0.5\mu\text{m}$ 程度の測定誤差しか生じていないが、DBB5 法では $1\sim 1.5\mu\text{m}$ 程度の測定誤差が生じているものと推測される。ただし、分解能は両者とも $0.1\mu\text{m}$ と同じである。

2. 6 結論

本章では従来の 3 軸制御マシニングセンターの運動誤差測定用の DBB3 測定法と新しい 5 軸制御マシニングセンターの運動誤差測定用の DBB5 測定法を比較して、考察した。その主な内容は次のとおりである。

- 1) DBB5 法では球とバーを繋ぐ支柱を X, Y, Z の 3 軸に対して 45° 傾けることにより、球の位置を変更することなく、XY, YZ, ZX 平面について 360° の運動誤差軌跡を測定できるようにした。
- 2) EROWA のチャックを用いてテーブル側球面座の位置を軸方向に変化させて、1) の測定および C-XY, B-ZX の同期測定を行うことにより、B, C 回転軸のアライメント誤差であるオフセット誤差および角度誤差を測定できるようにした。
- 3) 1) と 2) の測定が同一セットアップで測定でき、運動誤差測定の精度が向上し、測定に要する時間を短縮できるようにした。

- 4) 付加的な測定を行うことにより旋回軸自体に存在する運動誤差を精度よく測定する方法を開発した（ただし，アンギュラーモーションの測定は除く）。
- 5) 旋回軸に存在する運動誤差原因として，座標軸の誤差（オフセット誤差と角度誤差）の他に，角度スケールの誤差，変速機構に存在するバックラッシュと固有の誤差，支持軸受に固有の誤差，サーボ系に起因するロストモーション，スティックモーション，速度指令の変動の過大なために発生する振動，サーボゲインの不一致などからなるラジアルモーション成分とアキシヤルモーション成分，アンギュラーモーション成分がある．それらが単独で存在した場合の軌跡パターンを標準測定の場合とオフセット測定の場合について求めた。
- 6) DBB5 測定法の測定精度について考察した結果，測定精度は $1\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 程度であることを確認した。

参考文献

2. 1) S. Weikert, R-test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools, CIRP Annals -- Manufacturing Technology, Vol. 53, No. 1 (2004), 429-432.
2. 2) B. Bringmann, W. Knapp, Model-based 'Chase-the-ball' Calibration of a 5-Axes Machining Center, CIRP Annals -- Manufacturing Technology, Vol. 55, No. 1 (2006), 531-534.
2. 3) 機械と工具, IBS 社製 5 軸加工機回転軸較正システム R-Test, Vol. 53, No. 8 (2009), 72-73.
2. 4) 山本通, 長谷部孝男, 堤正臣, 微細溝切削による 5 軸制御マシニングセンタの幾何誤差推定方法の開発, 精密工学会誌, Vol. 77, No. 8 (2011), 776.
2. 5) Y. Kakino et al., 'Measurement of Motion Accuracies of FIVE -AXIS Machine Tools by Using the Double Ball Bar Method DBB5', Proceedings of ISFA 2008, (2008), JS006, 1-4.
2. 6) Y. Kakino et. al., Measurement of Motion Accuracies of Five Axis Machine Tools by Double Ball Bar Method DBB5, Proceedings of ISFA 2008, JPS-2479 1-4.
2. 7) 黎子椰, 垣野義昭, 川島章弘, 井原之敏, 山路伊和夫, 脇坂宗生, 5 軸加工機における回転軸系の運動誤差原因の診断に関する研究 (第 1 報) ——回転誤差の診断法と診断手順——, 精密工学会誌, Vol. 69, No. 5 (2003), 703-709.
2. 8) 斎藤明德, 堤正臣, 牛久健太郎: 5 軸制御マシニングセンタのキャリブレーション法に関する研究 (第 2 報) ——同時 3 軸制御運動を用いた位置偏差および角度偏差の推定——, 精密工学会誌, Vol. 69, No. 2 (2003), 268-272.
2. 9) 高山直士ほか, '5 軸制御マシニングセンタの精度向上に関する研究 (トラニオン型テーブル・オン・テーブル型の運動精度の比較)', 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 76, No. 7 (2010), 79-85.
2. 10) 茨木創一, 垣野義昭, 赤井孝行, 高山直士, 山路伊和夫, 小川圭二, 'ボールバー測定を用いた 5 軸制御工作機械の運動誤差の診断 (第 1 報) ——誤差成分の分類と改良型ボールバー装置 (DBB5) の開発——', 精密工学会誌, Vol. 76, No. 3 (2010), 333-337.

第3章 運動精度測定と運動誤差原因の診断

3.1 緒論

本章^{3.1)}では、DBB5 測定法を用いて、新たに開発されたテーブル・オン・テーブル型の 2 台の 5 軸制御マシニングセンターNMV5000 (機械 A, 機械 B) と従来型のトラニオン型の 5 軸制御マシニングセンターSuperMiller (機械 D) の運動誤差を詳細に測定し^{3.2)}、運動精度、誤差原因、測定能率などについて検討する。さらに、これらの機械が従来の金型加工用に使われている高精度な立形マシニングセンターや横形マシニングセンターに比べてどの程度の運動精度を持っており、精度的に見てどのような部品の加工に使用できるかを検討する。機械 A, B は基本的な構造としては同じであるが、部分的に異なるユニットが使用されている。すなわち、機械 A は標準機であり、C 軸の軸受にアンギュラーコンタクト玉軸受が使用されているが、機械 B はクロスローラー軸受が使用されている^{3.3)}。

また DBB5 法によって測定された運動誤差軌跡を分析して、送り駆動系に存在する運動誤差原因を診断し、本機を一層高精度にするためにはどうすればよいかについて考察する。この手法については黎らが先行してかなり詳しく研究しているので、それを参考にして研究を行う^{3.4), 3.5), 3.6), 3.7)}。

比較のために従来のトラニオン型の 5 軸制御マシニングセンター (機械 D) についても DBB5 測定法を用いて運動誤差を測定し、どの程度運動精度がテーブル・オン・テーブル型の機械と異なるか検討する。ただし、第 2 章で述べたように旋回軸のスティックモーションなどは通常の DBB5 法のセットアップでは測定できないので、第 5 章で直進軸と旋回軸のサーボ特性の違いを測定する方法 (オフセット測定) を用いて詳しく検討する。

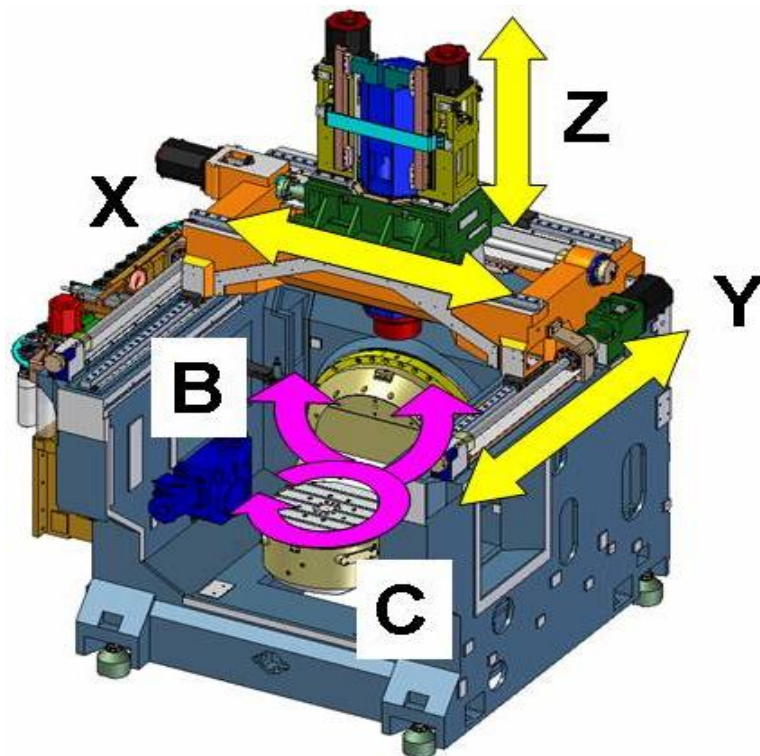
本章の第 3.2 節では DBB5 法を用いた運動精度の測定対象とする 5 軸制御マシニングセンターNMV5000 と従来型のトラニオン型の 5 軸制御マシニングセンターSuperMiller の構造と主な仕様について述べる。第 3.3 節では測定手順と測定条件について考察している。第 3.4 節では DBB5 法を用いて測定された運動誤差軌跡について考察するとともに、残存する運動誤差原因を直進軸系と旋回軸系について考察している。第 3.5 節は以上をまとめた本章の結論である。

3.2 対象工作機械

本章で主な測定対象機としている 5 軸制御マシニングセンターNMV5000 (機械 A) の構造の概要を図 3.1 に示し、その主な仕様を表 3.1 に示す。本機 (機械 A, B) が従来のトラニオン型の 5 軸制御マシニングセンター (機械 D, 図 3.2 参照) と異なる構造上の特徴は以下の通りである。



(a) 外観



(b) 軸構成

図 3.1 新たに開発された 5 軸制御マシニングセンターNMV5000 の外観と軸構成

表 3.1 NMV5000 の主な仕様

軸移動量	X, Y, Z 軸 : 730, 510, 510mm B 軸 : $-180^{\circ} \sim +160^{\circ}$, C 軸 : 360°
テーブル作業面の大きさ	$\Phi 500\text{mm}$
主軸最高回転速度	12,000 [20,000] min^{-1}
早送り速度	X, Y 軸 : 50 m/min Z 軸 : 40 m/min B 軸 : 50 min^{-1} C 軸 : 120 [1200] min^{-1}
工具収納本数	31 [61, 91, 121, 181] 本
ツールシャンク形式	BT-40 [HAS-A63]

- 1) 主軸を直進軸 X, Y, Z の 3 軸で駆動し、ワークが搭載されるテーブルを旋回軸 B, C の 2 軸で駆動している。これは両機種とも同じである。
- 2) 旋回軸の配置がテーブル・オン・テーブル方式になっている。また、B 軸の移動範囲が 340° , C 軸の移動範囲が 360° と非常に大きい。したがって、旋回軸中心の位置が明確に定めやすい^{3.8), 3.9)}。トラニオン型の機械 D では C 軸の移動範囲は 360° であるが、B 軸の移動範囲は 190° と狭い。したがって、B 軸の中心位置が明確に定義できない(図 3.2 参照)^{3.7)}。
- 3) 直進軸の駆動を X, Y, Z すべての軸について重心駆動(DCG, Driven of Center of Gravity)にしている^{3.10), 3.11), 3.12)}。このため全ての直進軸をダブルボールねじ駆動にしている。
- 4) 旋回軸 B, C を DD モーターで駆動し、ウオーム変速機構などを用いていない^{3.13), 3.14)}。また、C 軸の最高回転数は 1200/min と高速であり、旋削加工に用いることができる。さらにそのために C 軸の支持軸受として一般によく用いられているクロスローラー軸受でなく、アンギュラーコンタクト球軸受を使用している。ただし、高速回転しない B 軸の支持用には従来どおりクロスローラー軸受けが使用されている。トラニオン型の機械 D では、旋回軸 B 軸の駆動用にローラギヤカム変速機構を用いている(図 3.3 参照)^{3.15)}。
- 5) 直進軸の位置検出に分解能 $0.01 \mu\text{m}$ のインダクトシンスケールを用い、旋回軸の角度検出に 840 万分割のロータリーインダクトシンと従来用いられたことのない非常に小さい分解能の検出器を用いている。

1) の理由は組み立てしやすくするためと、精度を出しやすくするためである。また副次的には雰囲気温度変化による主軸の熱変位を小さくするためである。2) の理由は組み立てやすく、各軸のアライメントをとりやすく、精度を出しやすくするためである。3) の理由は移動体の重心近くを駆動することによって、移動体に加わる回転モーメントをできるだけ小さくし、移動体の姿勢変化を小さくして運動精度をよくするためである。4) の理由は従来使われてきたウオームとウオームホイールなどの変速機を使用すると^{3.16)}、運動伝達時にバックラッシュの影響が出て、運動精度が悪くなるのを避けるために、ダイレクトドライブ構造を採用した。またアンギュラーコンタクト球軸受けを用いている理由も運動精

度を良くするためと高速回転を可能にするためである。5) の理由は分解能を小さいスケールを用いることによって、高精度を期待するとともに、サーボ系が原因する誤差を小さくして、仕上げ面あらさを小さくするためである。

同じ構造の2台のNMV5000, 機械A, 機械Bと比較のために従来のトラニオン型の5軸制御マシニングセンターSuperMiller (機械D) の運動精度を同様の方法で測定する。従来の5軸制御マシニングセンターは過半がこのトラニオン型の構造を採用していた。この機械の構造を図3.2に示す。機械BはC軸の支持軸受としてアンギュラーコンタクト球軸受の代わりにクロスローラー軸受を用いている。

機械Dの主な仕様は次のとおりである。

- ・制御軸, ストローク, 送り速度
 - X : 600mm, 45m/min
 - Y : 425mm, 45m/min
 - Z : 450mm, 45m/min
 - B : -20° ~ 110°
 - C : 360°
- ・ボールねじ : 外径 45mm, ピッチ 16mm
- ・位置検出器
 - X, Y, Z : ロータリーエンコーダ 100,000 分割 (セミクローズドループ方式)
(直進距離換算で 0.000016mm /パルス)
 - B, C : ロータリーエンコーダ 3,604,000 分割 (クローズドループ方式)
- ・主軸 : 12,000/min, BT40, 22kw
- ・NC : FANUC16M
- ・B軸変速機 : ローラギヤカム変速機構 (図3.3参照)

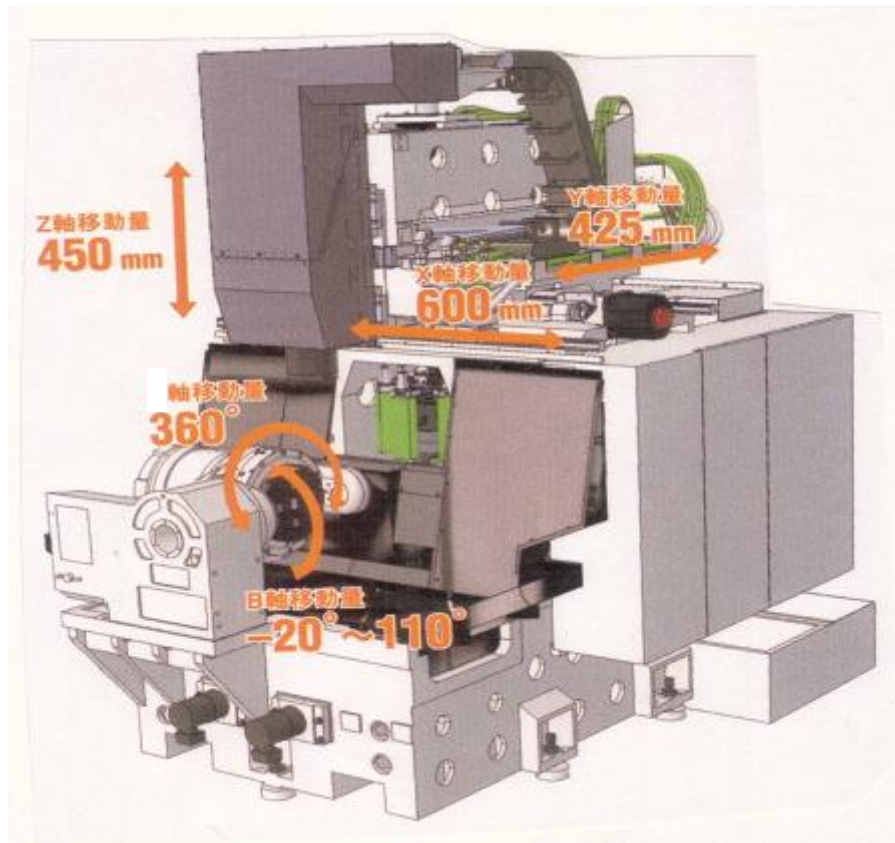


図 3.2 比較の対象とした従来のトラニオン型の5軸制御マシニングセンター(機械D)の構造

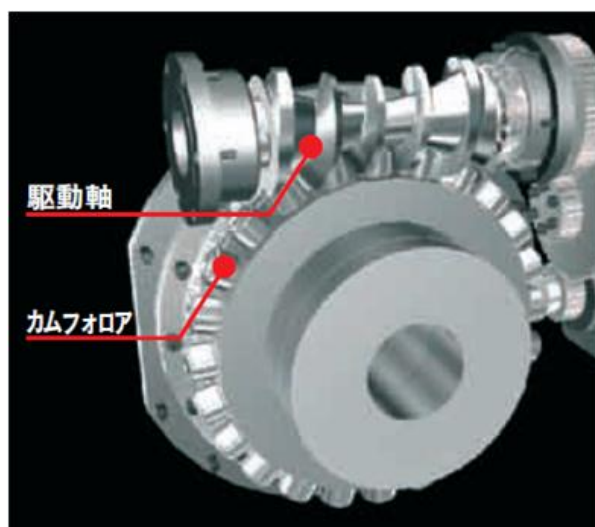


図 3.3 ローラギヤカム変速機構

3. 3 測定手順と測定条件

DBB5 測定法を用いる場合の運動誤差軌跡の測定手順は次の通りである。

- 1) 図 2.5 に示したように B, C 軸の交点に一方の球が位置するように測定装置をセットアップして, XY, YZ, ZX の 3 平面について直進軸を同時 2 軸で円弧補間運動させた場合の運動誤差軌跡を測定する。(B, C 軸のどちらか一方だけどちらかの軸方向に一定量移動させて測定しても良い。実際にはこのような測定しかできない機械がほとんどである。)
- 2) EROWA のチャックを測定機の下方に挿入し, 一定距離だけマスターボールを Z 軸方向に移動させ, XY, YZ, ZX の 3 平面について 1) と同様の測定を行う。
- 3) C 軸の回転と XY 軸の円弧補間運動を同期させて, Z 軸方向の移動量 (偏差) を測定する。
- 4) B 軸の回転と ZX 軸の円弧補間運動を同期させて, Y 軸方向の移動量 (偏差) を測定する。
- 5) セットアップを変えて, テーパーコーン切削を模して同時 5 軸制御で運動させた時の運動誤差軌跡を測定する。

基本的な運動精度のキャリブレーションとしては以上の測定で十分であるが, 対象機械にどのような運動誤差原因が存在するかをより厳密に診断するために, 図 3.4~図 3.6 に示すような方法を用いて以下の付加的な測定を行う。

- 6) B, C 軸を単独で動かし, 直交する直進軸方向の運動誤差成分を測定する。
- 7) B, C 軸のアライメント誤差であるオフセット誤差と角度誤差を図 3.7 に示すように別の測定法で測定する。
- 8) 旋回軸のアキシヤルモーシオンは測定するが, アンギュラーモーシオンの測定は原則として行わない。その理由は後述するように, 本機においてはラジアルモーシオンが非

常に小さいので、それを軸方向に異なる 2 点で測定すると、測定誤差が大きくなり、ほとんど意味をもたないからである。

それらの詳しい手順は次の通りである。

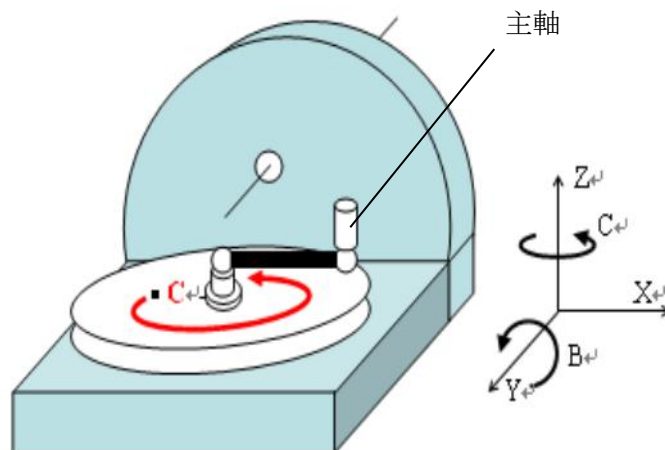


図 3.4 旋回軸単独の運動誤差測定法（ラジアルモーション）

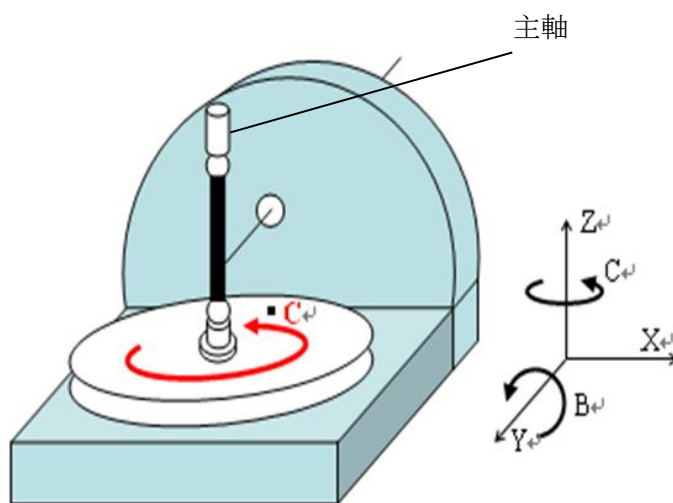


図 3.5 旋回軸単独の運動誤差測定法（アキシヤルモーション）

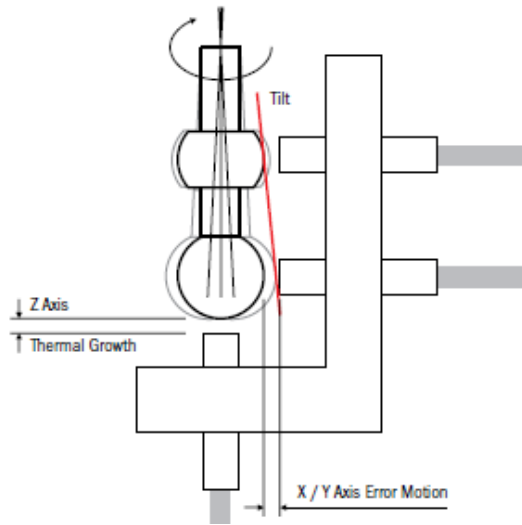
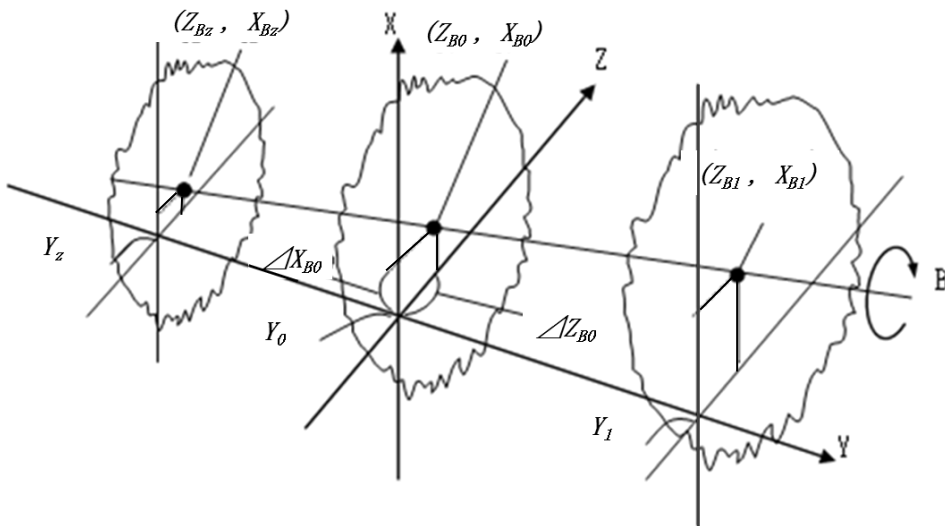


図 3.6 回転軸単独の運動誤差測定法（アンギュラーモーシオン）



オフセット誤差円の中心座標： (Z_{B0}, X_{B0})

オフセット誤差： $\Delta Z_{B0} = Z_{B0}, \Delta X_{B0} = X_{B0}$

角度誤差： $\Delta B_z = (Z_{B1} - Z_{B2}) / (Y_1 - Y_2)$

図 3.7 回転軸のオフセット誤差と角度誤差の測定法

(1) 回転測定法

本研究において研究対象としているテーブル・オン・テーブル型の 5 軸制御マシニングセンターは他の構造の機械に比べて、第 1 回転軸の回転角度範囲が大きく取れるので、図 3.8 に示す回転測定法が有効である。同図(a)は B 軸旋回時の X 軸方向の運動誤差成分 ΔR_{XB} を測定するためのセットアップで、同図(b)は B 軸旋回時の Z 軸方向の運動誤差成分 ΔR_{ZB}

を測定するためのセットアップである。図 3.8 に示す測定を Y_1, Y_0, Y_2 の 3 位置において行うことが望ましい。これらの 3 位置（あるいは 2 位置）での測定によって得られた運動誤差軌跡からその中心位置 (Z, X) を求め、B 軸のオフセット誤差 ($\Delta Z_{B0}, \Delta X_{B0}$) と 1 次角度誤差 ($\Delta B_Z, \Delta B_X$) を求める。

ここで、アライメント誤差は、オフセット誤差と角度誤差で表現され、例えばテーブル中心 Y_0 位置でのオフセット誤差は、

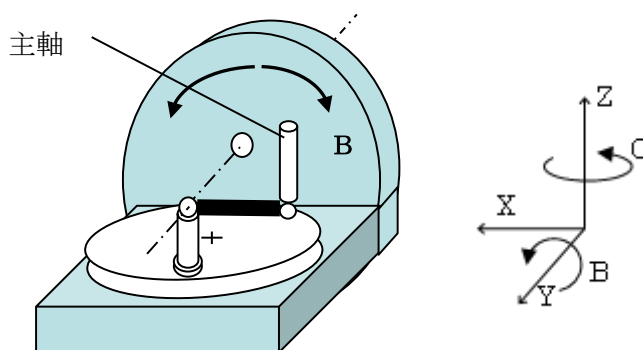
$$\begin{aligned} \Delta Z_{B0} &= Z_{B0} \\ \Delta X_{B0} &= X_{B0} \end{aligned} \quad (3.1)$$

また、 Y_1, Y_0 2 点での測定によって求められる角度誤差は、

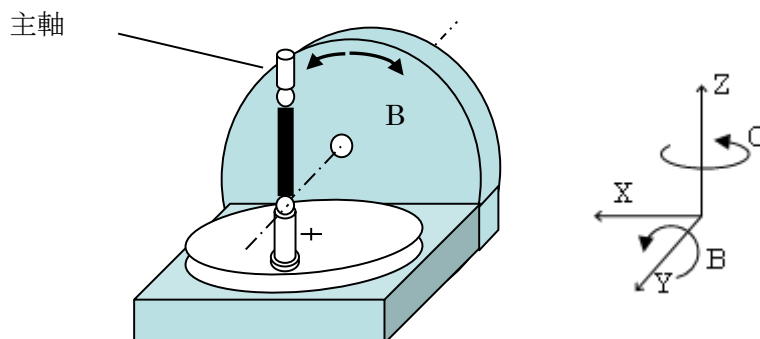
$$\begin{aligned} \Delta B_Z &= (Z_{B1} - Z_{B0}) / (Y_1 - Y_0) \\ \Delta B_X &= (X_{B1} - X_{B0}) / (Y_1 - Y_0) \end{aligned} \quad (3.2)$$

で定義される。

機械本体や測定器具の干渉が少なく、 270° 近くの旋回角度範囲について図 3.8 の測定が行えれば、測定精度上の問題は少ない^{3.5)}。 ΔR_{XB} など干渉が生じて 150° 程度の旋回角度についてしか測定できない場合は、測定機の取り付け位置を変えて、図 3.9 に示すようにできるだけ大きい旋回角度での測定を行うことが望ましい。



(a) X 軸方向の運動誤差成分 ΔR_{XB} を測定するためのセットアップ



(b) Z 軸方向の運動誤差成分 ΔR_{ZB} を測定するためのセットアップ

図 3.8 B 軸旋回時のオフセット誤差と角度誤差の測定法 (回転測定法)

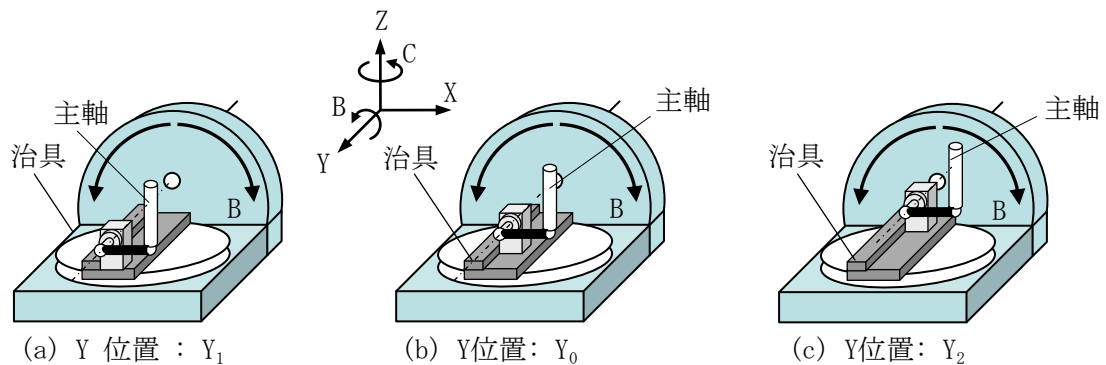


図 3.9 測定機の取り付け位置を変えての回転測定法

Y_1 , Y_0 , Y_2 における回転中心が直進軸である Y 軸上にあることを確認するために、図 3.10 に示す測定用のジグを用いる。このジグのベースの側面を主軸にとりつけたインジケータでトレースして、2 球間の間隔においてインジケータで検出される Y 軸とジグのベースの側面の平行度が $1 \mu\text{m}/300\text{mm}$ 以下に入るようにする。このように予備的な調整をした後、2 つの球の側面を同様に測定し、その平行度が $1 \mu\text{m}/300\text{mm}$ 以下になっていることを確認する。

図 3.9 に示された (a) と (c) に置かれた球の中心の位置がそれぞれ Y_1 , Y_2 に相当する。 Y_1 の位置では B 軸の旋回角 360° についての回転測定が可能であるが、 Y_2 の位置ではテーブルと DBB 支持具の間に干渉が生じるので旋回角 150° についての測定しかできない。そこでセットアップを先の図 3.14 に示したように対称の位置に移して、不足分の測定を行う。

テーブル側の DBB 球 Y 位置： -171mm 付近 (Y_1)， -319mm 付近 (Y_0)， -482mm 付近 (Y_2)
 B 軸測定範囲： $0^\circ \sim 200^\circ$

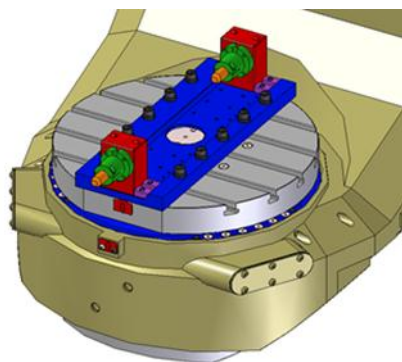


図 3.10 回転中心が直進軸である Y 軸上にあることを確認するための測定用のジグ

(2) アキシャル同期測定法

図 3.11(a)に示すように、Z 軸と X 軸を円弧補間させながら、B 軸を回転させる。そのとき、DBB の 2 球間のアキシャル方向の距離の変化量を測定し、図 3.12 に示すように座標軸上にプロットする。Z、X 方向の中心のずれ量 ΔL_z と ΔL_x を求め、次式により、X 軸周り、Z 軸周りの角度誤差を求めることができる。

$$\Delta B_z = \Delta L_z / R, \quad \Delta B_x = \Delta L_x / R$$

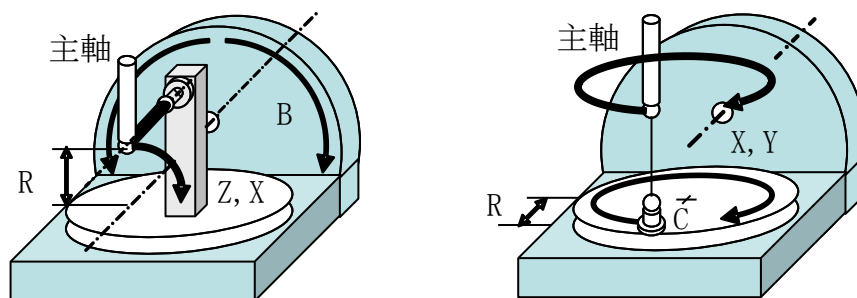
この方法を用いる場合、前 2 者と異なり、1 箇所の Y 軸位置で測定すれば良いので便利である。図 3.11(b)に示すように、第 2 回転軸（機械 A の場合は C 軸）の場合、ほとんど干渉が生じないので 360° の回転角度についての測定が可能である。第 1 回転軸である B 軸の場合は干渉が大きいため、 190° 程度しか回転角度をとれない。ただし、この方法を用いる場合にも Z、X 両軸の運動誤差がこの測定に影響していないことを予め確認しておく必要がある。なお、機械 A の測定時の DBB 測定位置や回転角度の範囲は以下のとおりである。

(B 軸測定)

- ・ テーブル側 DBB 球 Y 位置： -423mm
- ・ テーブル側 DBB 球 Z 位置： テーブル上面から 202mm
- ・ B 軸測定範囲： $0^\circ \sim 190^\circ$
- ・ 円弧補間半径 R ： 122mm

(C 軸測定)

- ・ C 軸測定範囲： $0^\circ \sim 360^\circ$
- ・ 円弧補間半径 R ： 154mm



(a) B 軸のアキシャル方向同期測定法

(b) C 軸のアキシャル方向同期測定法

図 3.11 アキシャル同期測定法

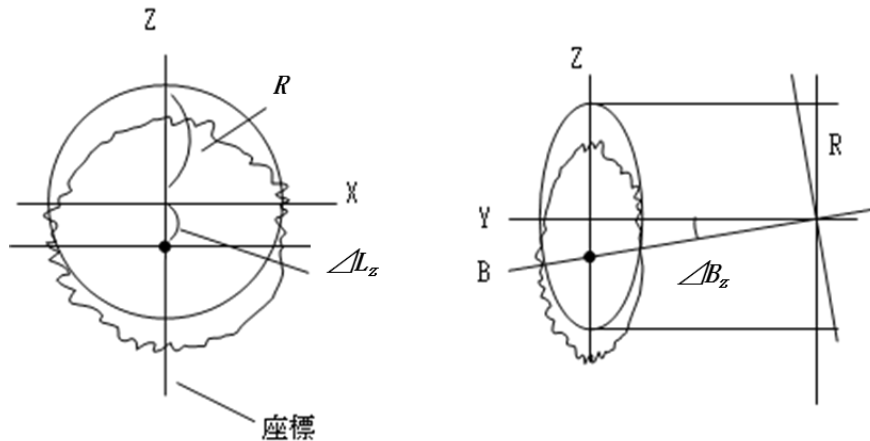


図 3.12 アキシヤル同期測定法の測定結果を用いた角度誤差の算出法

(3) ラジアル同期測定法

ラジアル同期測定とは図 3.13 に示すように、2 点、あるいは 3 点の Y 軸位置において、B 軸の旋回運動と Z、X 軸の円弧補間運動を同期運動させ、その同期運動中のラジアル方向の 2 球間の距離の変化量を測定するものである。B 軸に運動誤差がなければ、図 3.13 に示す 2 球間のラジアル方向の距離は一定になるはずである。しかし、実際には駆動系に運動誤差が存在するので、2 球間の距離は変化する。そこで、Z 軸方向と Y 軸方向について 2 球間のラジアル方向の距離の変化量を測定し、極座標上にプロットして運動誤差軌跡を求め、それらの中心位置を定め、それらの差から式 (3.1) と式 (3.2) よりアライメント誤差を求める。ただし、この方法を用いる場合には事前に Z、X 軸の運動誤差が小さいことを確認しておく必要がある。

テーブル・オン・テーブル型の機械といえども、この測定法では C 軸テーブルが乗っている B 軸サドルを旋回させるので、干渉が生じ、測定区間は 190° 程度しかとれない。この場合にも、測定機の取り付け位置を対称に変えて、図 3.14 に示したようにできるだけ大きい旋回角度での測定を行うことが望ましい。なお、機械 A の測定時の測定位置と旋回角度範囲は以下の通りである。

- ・ テーブル側の DBB 球 Z 位置： -80mm 付近 (Y_1) , -423mm 付近 (Y_2)
- ・ B 軸測定範囲： $0^\circ \sim 200^\circ$
- ・ 円弧補間半径 R ： 122mm

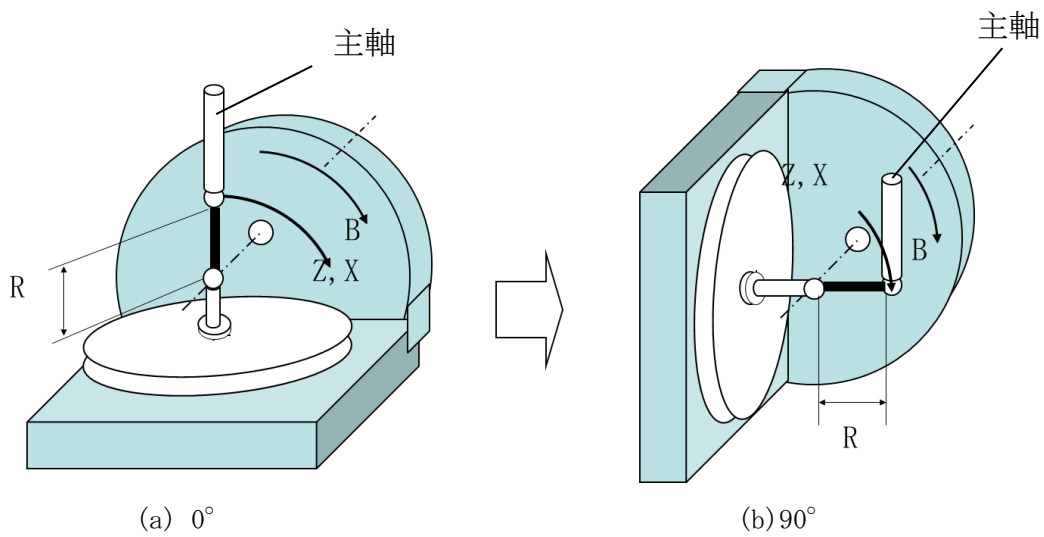


図 3.13 ラジアル同期測定法

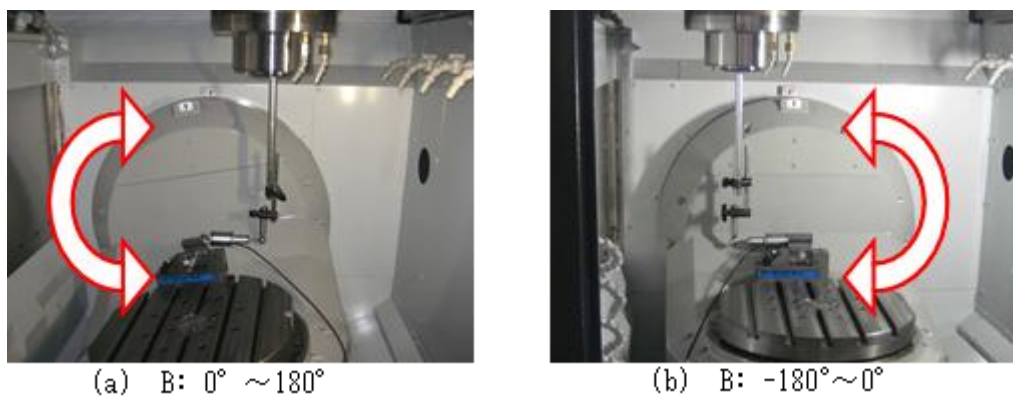


図 3.14 旋回角度範囲を大きくとる工夫の実例

3. 4 運動誤差の測定結果と考察

3. 4. 1 直進軸

DBB5 法を用いて、B、C 軸の交点から Z 軸方向に 80mm 移動した点に球中心を置いた時、機械 A(NMV5000)の XY, YZ, ZX 平面において、同時 2 軸制御で円弧補間運動 ($F=500\text{mm}/\text{min}$) を行かせた際に測定された運動誤差軌跡を図 3.15 に示す。それぞれの平面で測定した運動誤差は真円度で評価すると、 $3\mu\text{m}$ 、 $7.5\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ となり、非常に良好である。

X, Y, Z 直進軸に存在する運動誤差の主なものは次の通りである。

- 1) YZ 軸間の直角度誤差が $7\mu\text{m}/350\text{mm}$ 存在する。
- 2) ZX 軸間の直角度誤差が $2\mu\text{m}/350\text{mm}$ 存在する。

これらの直角度誤差は、XY 軸間の誤差が小さいことからわかるように、主として Z 軸(ラ

ム)の垂直移動の際に生じたものであり、Z軸の案内面の精度を高めることにより、さらに改善できるはずである。X、Y、Z各軸の真直度誤差はすべて $2\mu\text{m}/300\text{mm}$ 以下と非常に小さく、本機が十分精度よくできていることがわかる。

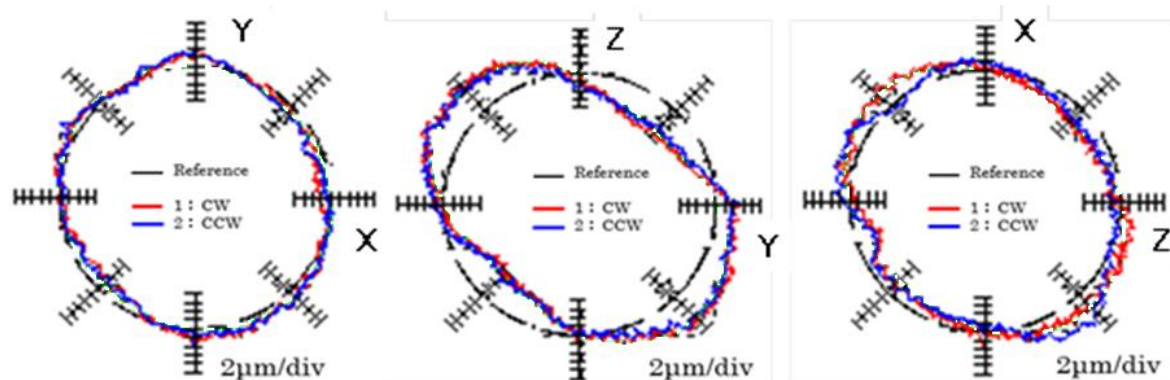


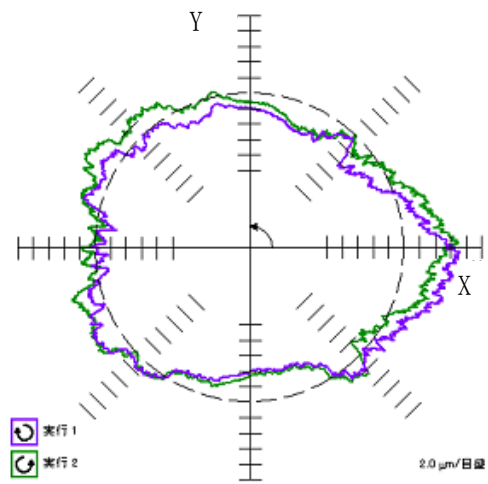
図 3.15 直進軸の円弧補間時に測定された運動誤差軌跡

また、象限切替時の段差やスティックモーションによる突起はほとんど認められない。さらにサーボノイズが主原因である高次山成分は $0.1\mu\text{m}$ 程度と非常に小さい。これは主として使用している直進軸用の位置検出機の分解能が $0.01\mu\text{m}$ と非常に小さいためである。

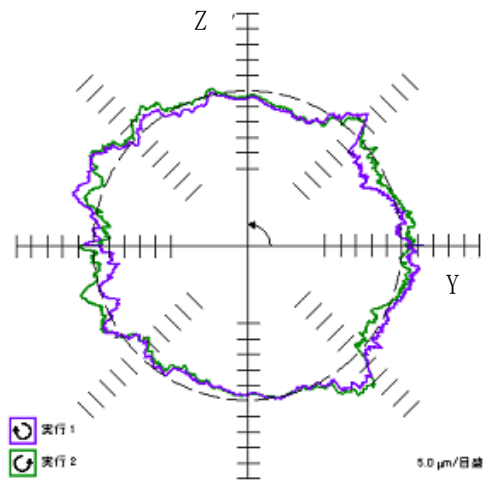
比較のために、従来のトランシオン型の5軸制御マシニングセンター(機械D)の運動精度をDBB5測定法で測定した結果の一例を図3.16に示す。XY(360°)、YZ(360°)、ZX(360°)平面の運動精度はそれぞれ $11\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 、 $14\mu\text{m}$ となり、機械Aに比べてかなり運動精度が悪いことがわかる。また3.4.3項で後述するが、このトランシオン型の5軸制御マシニングセンター(機械D)はローラギヤカム変速機を用いているため、同図(a)、(b)に見られるようにA軸に山数24で振幅が不ぞろいな誤差成分がかなり顕著に現れている。

また、比較のために従来の金型加工用に使われている高精度な立形マシニングセンターの運動精度をDBB5法で測定した一例を図3.17に示す。XY平面、YZ平面、ZX平面における運動精度はそれぞれ4、5、 $5\mu\text{m}$ である。機械Aの運動精度は従来の金型加工用に使われているこの立形マシニングセンターの運動精度とほぼ同程度であり、5軸制御機である本機の構造が非常に複雑であることを考慮すれば、5軸制御機としてかなり妥当なものであることを示している。

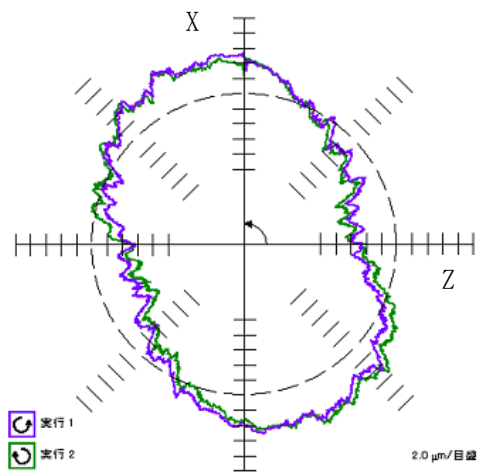
このように本機の直進軸の運動精度は金型加工に使われている3軸制御立形マシニングセンターとほぼ同程度であるので、十分金型の加工に使用できると判断した。



(a) XY 平面



(b) YZ 平面



(c) ZX 平面

図 3.16 トラニオン型の 5 軸制御マシニングセンター (機械 D) の直進軸の運動誤差軌跡

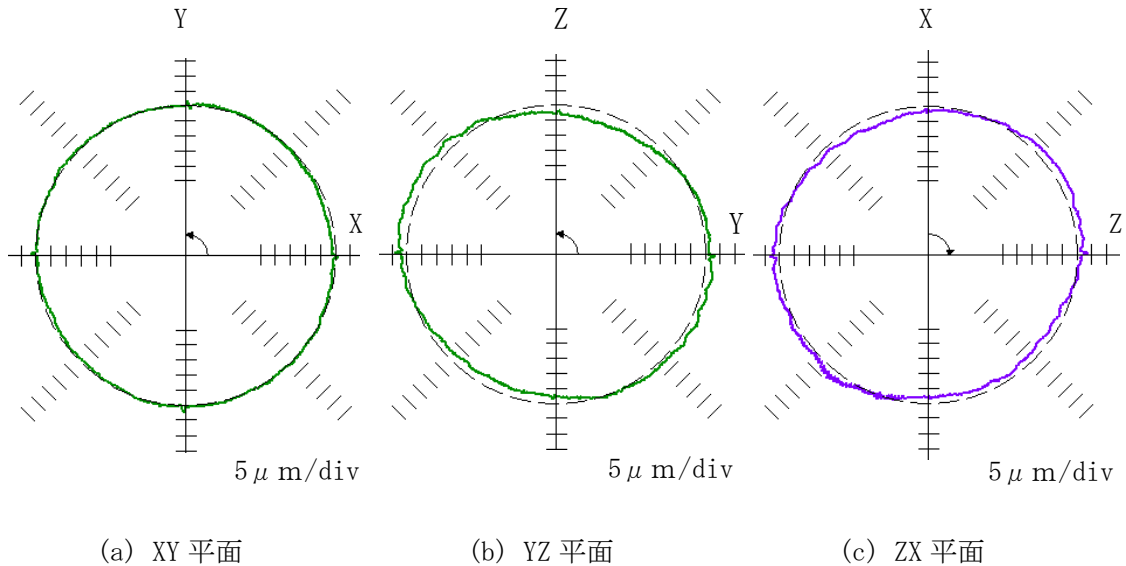


図 3.17 金型加工用に使用されている立形マシニングセンターの運動誤差軌跡の一例

3. 4. 2 旋回軸中心のオフセット誤差と角度誤差

(1) 回転測定

機械 A の Y_2 ($Y=-482.2\text{mm}$) の位置において回転測定法で測定された B 軸のラジアル方向の運動誤差軌跡 ΔR_{ZB} , ΔR_{XB} を図 3.18 に示す. 同図(a)に示す B 軸の同一方向旋回時の Z 軸方向ラジアル誤差 ΔR_{ZB} の運動誤差軌跡から読み取った一方向再現性は非常に良好で $1\mu\text{m}$ と非常に小さい. また CW 方向旋回時の軌跡と CCW 方向旋回時の軌跡の差から読み取った双方向再現性も $2\mu\text{m}$ と非常に小さく, この倍率のプロットでは CW 方向と CCW 方向の軌跡の区別がつかないほどである. それに対し, 同図(b)に示す X 軸方向ラジアル誤差 ΔR_{XB} については一方向再現性は $2\mu\text{m}$ と小さいが, 双方向再現性は $3\mu\text{m}$ と少し大きい.

3 つの Y 軸断面 Y_1 , Y_0 , Y_2 で測定された運動誤差軌跡 ΔR_{ZB} , ΔR_{XB} を同一図面に重ねてプロットしたものを図 3.19 に示す. これらの運動誤差軌跡の中心座標の位置から読み取った B 軸の旋回時の回転中心の座標 ΔZ_B , ΔX_B を Y 軸座標上にプロットしたものを図 3.20 に示す.

Y_1 , Y_0 , Y_2 の 3 位置での回転中心の位置はほぼ一直線上にあることが分かる. これより B 軸のアライメント誤差は 0 次成分であるオフセット誤差と 1 次成分である角度誤差で表してもそう大きな誤差は生じないことが分かる. これより, $Y = 0$ の点でのオフセット誤差と角度誤差は次のようになった.

$$\Delta R_{ZB0} = 12.5\mu\text{m}, \quad \Delta B_Z = 17\mu\text{m}/300\text{mm}$$

同様に回転測定法を用いて測定された B 軸のラジアル方向の X 軸方向成分 ΔR_{XB} である図 3.19 の運動誤差軌跡から読み取った B 軸旋回時の回転中心の座標も図 3.20 中に示す. ΔR_{XB} については 2 点の Y 方向位置でしか測定しなかったため, 2 次の角度成分の大きさを知らることができない. オフセットと 1 次の角度誤差はそれぞれ次のようになった.

$$\Delta R_{XB0} = 1.5\mu\text{m}, \quad \Delta B_X = 2\mu\text{m}/300\text{mm}$$

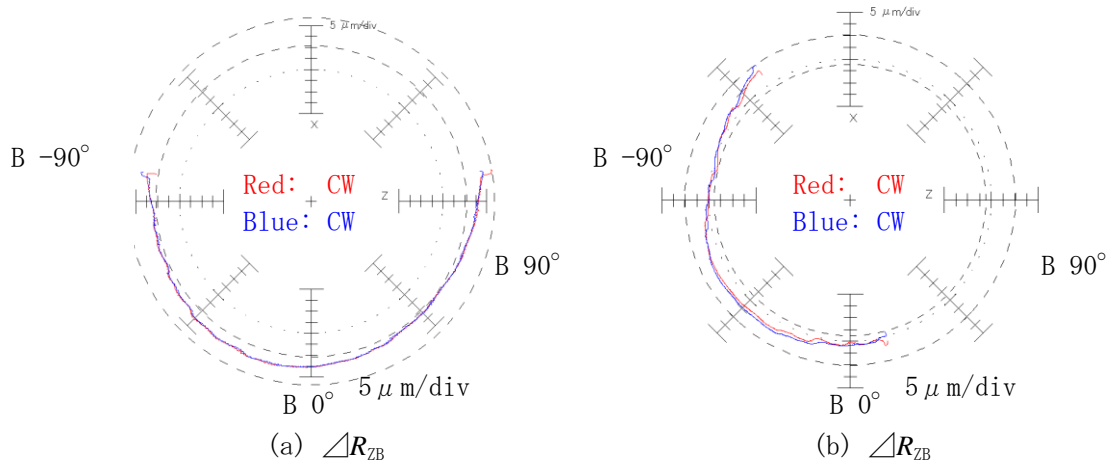


図3.18 回転測定法により測定されたB軸の運動誤差軌跡 (機械A)

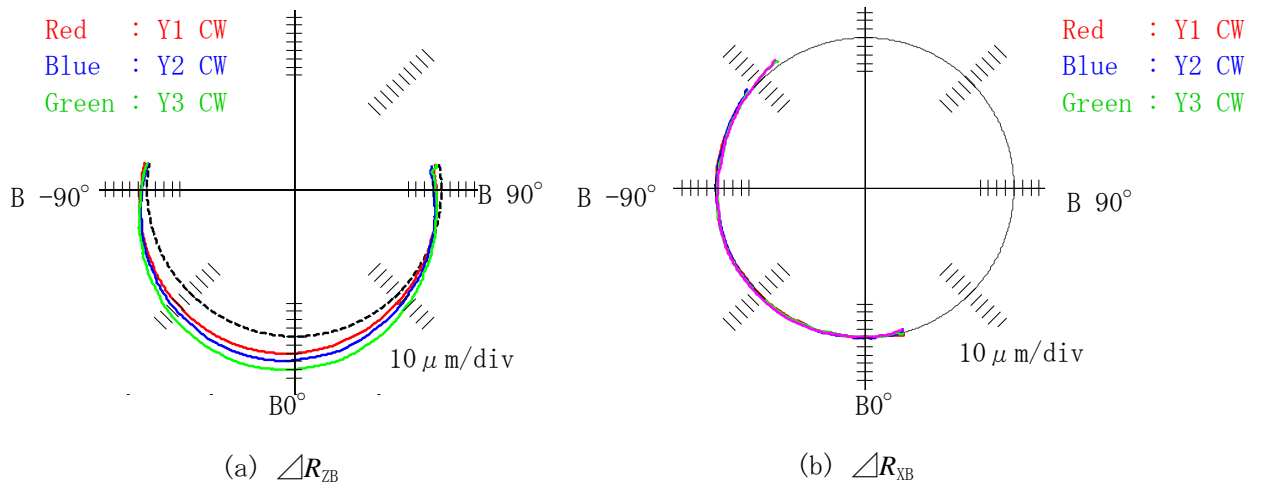


図 3.19 回転測定法で測定された B 軸のラジアル方向の運動誤差軌跡 $\triangle R_{ZB}$, $\triangle R_{XB}$

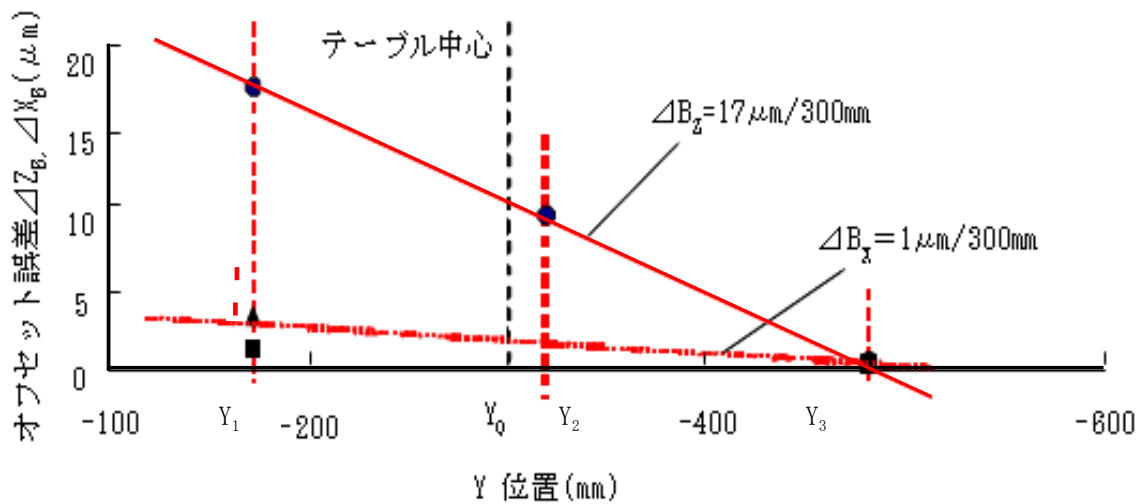


図 3.20 3つの Y 軸断面で測定された運動誤差軌跡 $\triangle R_{ZB}$, $\triangle R_{XB}$

(2) アキシャル方向同期測定

図 3.11 (a) に示したアキシャル方向同期測定法で測定された B 軸回転時の運動誤差軌跡を図 3.21 に示す。これと他の測定データを組み合わせて読み取った B 軸のテーブル中心で定義されたオフセット誤差と角度誤差は次のようになった。

$$\begin{aligned} \triangle X_{B0} &= 0.5 \mu\text{m}, & \triangle Z_{B0} &= 10 \mu\text{m} \\ \triangle B_x &= 1 \mu\text{m}/300\text{mm}, & \triangle B_z &= 20 \mu\text{m}/300\text{mm} \end{aligned}$$

以上のように、アキシャル方向同期測定で測定した B 軸のアライメント誤差は、回転測定法で測定した値と非常に近い値になった。

同様にアキシャル方向同期測定法で測定した C 軸回転時の運動誤差軌跡を図 3.22 に示す。これと他の測定データを組み合わせて読み取った B 軸のテーブル中心で定義された C 軸のオフセット誤差と角度誤差は次のようになった。

$$\begin{aligned} \triangle X_{C0} &= 0 \mu\text{m}, & \triangle Y_{C0} &= 2 \mu\text{m} \\ \triangle C_x &= 0 \mu\text{m}/300\text{mm}, & \triangle C_y &= 2 \mu\text{m}/300\text{mm} \end{aligned}$$

ここに示したアライメント誤差のうち、オフセット誤差 $\triangle X_c$ 、 $\triangle Y_c$ の値はアキシャル方向同期測定に当たって予備的に必要な C 軸中心と Z 軸の芯合せの際に得られた値である。

これより C 軸のオフセット誤差、1 次の角度誤差ともに B 軸のそれらよりもかなり小さいことが分かった。その原因としては、C 軸のアライメント誤差の測定は従来の方法でもかなり正確に測定できるので、B 軸の調整が済んだのち、最終的に C 軸の調整を行っているためと考えられる。また C 軸のアライメント誤差は以上のようにかなり小さいので、B 軸の場合とは異なり、第 6 章で後述するように NC 補正試験は行わなかった。ただし、補正による運動精度の向上は、回転軸の双方向再現性誤差が限界となるので、さらに運動精度を向上させるためには、回転軸の双方向再現性誤差を減少させることが不可欠である。

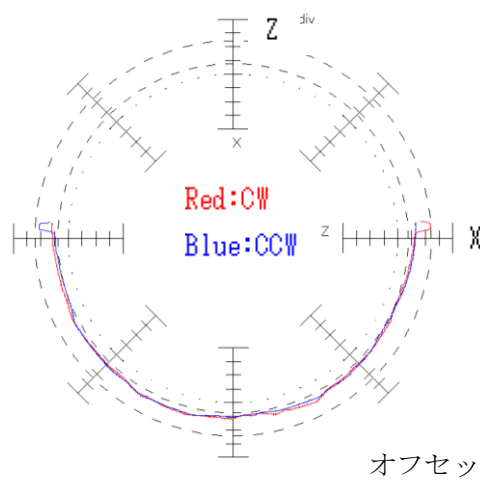


図 3.21 アキシャル方向同期測定法で測定された B 軸回転時の運動誤差軌跡 (機械 A)

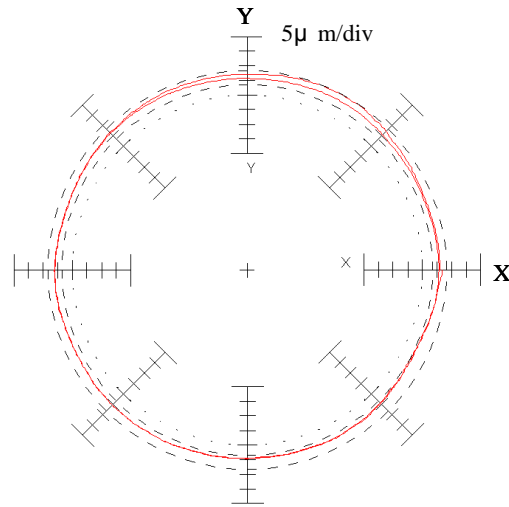


図 3.22 アキシャル方向同期測定法で測定した C 軸回転時の運動誤差軌跡 (機械 A)

(3) ラジアル方向同期測定

図 3.13 に示したラジアル方向同期測定法で測定された B 軸回転時の運動誤差軌跡を図 3.23 に示す。予めこの同期再測定の際に確認が必要な YZ 軸の円弧補間運動時の運動誤差を測定したが、 $7\mu\text{m}$ 存在した。これは主として YZ 軸間の直角度誤差によって生じていた。図 3.23 より読み取った B 軸の原点でのオフセット誤差と角度誤差は次のようになった。

$$\begin{aligned} \Delta X_{B0} &= 3\mu\text{m}, & \Delta Z_{B0} &= 2\mu\text{m} \\ \Delta B_x &= 0.5\mu\text{m}/300\text{mm}, & \Delta B_z &= 10\mu\text{m}/300\text{mm} \end{aligned}$$

ラジアル方向同期測定法で得られたこれらのアライメント誤差は回転測定法やアキシャル方向同期測定で得られた値とは数 μm の差があり、やや測定精度が悪かった。これはテーブル側の球を B 軸上の 2 点に正確に設置することの困難さからきているものと思われる。この誤差を小さくするためには適切な取り付けジグの改良が必要である。

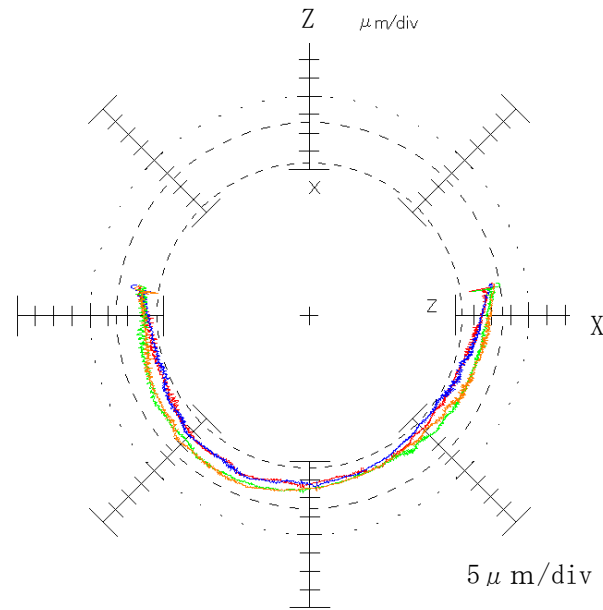


図 3.23 ラジアル方向同期測定法で測定された B 軸回転時の運動誤差軌跡 (機械 A)

3. 4. 3 回転軸固有の運動誤差と誤差原因

本機 (機械 A) の回転軸系に固有の運動誤差測定において以下のような測定結果が得られた。

- 1) テーブルの近傍で測定した B 軸のラジアル回転誤差は図 3.24 に示すように $1\mu\text{m}$ 以下であり, C 軸のラジアル回転誤差も $1\mu\text{m}$ 以下であり, ともに非常に小さかった. これは支持軸受として精度の高いアンギュラーコンタクト球軸受を使用したためである. それに対し, 機械 B のクロスローラー軸受を用いた場合は図 3.25 に示すように $2\mu\text{m}$ 程度の回転体の数の $1/2$ (21 山成分) 特有の周期的な誤差が生じていた.

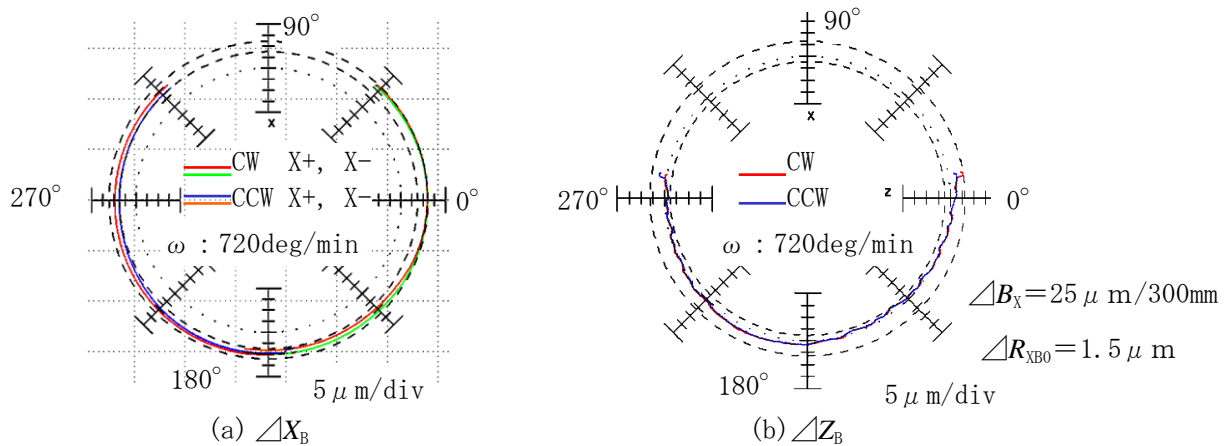


図 3.24 テーブルの近傍で測定した B 軸のラジアル回転誤差 (機械 A)

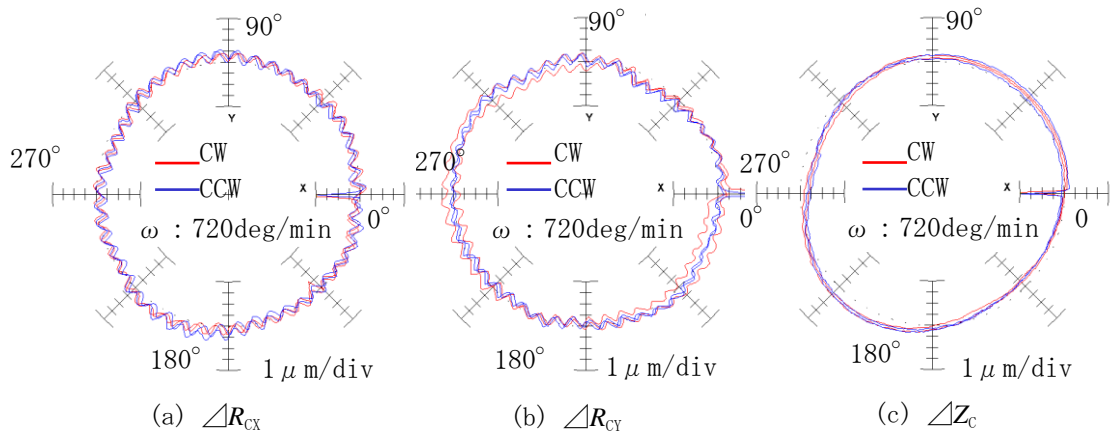


図 3.25 C 軸回転時に測定されたラジアルおよびアキシャル運動誤差軌跡 (機械 B)

- 2) 直進軸系と回転軸系のサーボゲインにある程度の不一致がある。現在のサーボゲインの設定値でもっと高速で輪郭運動をさせると、輪郭運動誤差が大きくなるので、もっと厳密にサーボゲインの一致を図る必要がある。これについては第 5 章で詳しく検討する。
- 3) B 軸のアンギュラーモーシオンは $3\mu\text{m}/300\text{mm}$ 程度、C 軸のそれは $1.5\mu\text{m}/300\text{mm}$ 程度であった。ただし、アンギュラーモーシオンの測定法については測定精度に問題があり、さらに改良が必要である。
- 4) 図 3.26 に示すように C 軸のアキシャルモーシオンは $1\mu\text{m}$ 程度とかなり小さかった。B 軸のアキシャルモーシオンは機械の構造から生じる干渉のために測定を行うことができなかった。

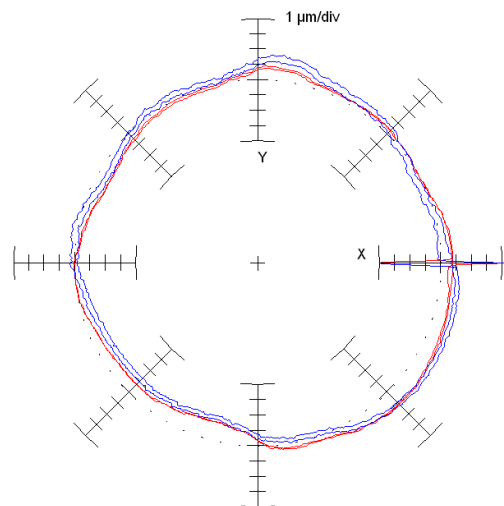


図 3.26 C 軸のアキシャルモーシオン (機械 A)

- 5) 図 3.3 に示すようなローラギヤカム変速機を用いた機械においては、図 3.16 に示したようにローラピンの数の半分である 24 山成分の誤差が生じ、しかも局所的に $6\mu\text{m}$ という非常に大きな誤差が存在した。

3. 5 結論

新たに開発されたテーブル・オン・テーブル型の 5 軸制御マシニングセンター NMV5000 (機械 A, 機械 B) と従来型のトラニオン型の 5 軸制御マシニングセンター (機械 D) の運動精度を DBB5 測定法で測定し、得られた運動誤差軌跡から運動誤差原因を診断したところ、次のことがわかった。

- 1) 機械 A について直進軸の運動精度測定を行ったところ、最大の運動誤差は YZ 平面における真円度 $7\mu\text{m}$ であり、運動精度の目標値 $10\mu\text{m}$ をクリアできた。すなわち、YZ 軸間の直角度誤差が $7\mu\text{m}/350\text{mm}$ 存在した。これが運動誤差の最大値を決めていた。ZX 軸間の直角度誤差が $2\mu\text{m}/350\text{mm}$ 存在した。これらの直進軸系の運動誤差の主たる原因は Z 軸用の直線案内の直角度誤差であり、これを修正すればさらに高い運動精度が得られる。
- 2) 機械 A について高次山成分は直進軸、旋回軸ともに $0.2\mu\text{m}$ 以下と非常に小さい。さらに、B 軸のオフセット誤差と角度誤差はそれぞれ $\angle Z_{B0}=12.5\mu\text{m}$, $\angle X_{B0}=1.5\mu\text{m}$, $\angle X_B=17\mu\text{m}/300\text{mm}$, $\angle Z_B=2\mu\text{m}/300\text{mm}$ と $\angle X_B$ を除いて、かなり小さかった。C 軸のオフセット誤差と角度誤差はそれぞれ B 軸のオフセット誤差と角度傾き誤差はそれぞれ $\angle X_{C0}=0\mu\text{m}$, $\angle Y_{C0}=2\mu\text{m}$, $\angle X_C=0/300\text{mm}$, $\angle Y_C=2\mu\text{m}/300\text{mm}$ とかなり小さかった。
- 3) 機械 A について付加的に行った測定から、B, C 軸のラジアル回転誤差は $1\mu\text{m}$ 以下であり、運動精度は非常に良い。B, C 軸ともにアキシヤル回転誤差は $1\mu\text{m}$ 程度であり、非常に小さかった。B 軸のアンギュラーモーシオンは $3\mu\text{m}/300\text{mm}$ 程度、C 軸のそれは $1\mu\text{m}/300\text{mm}$ 程度であった。
- 4) 機械 B について比較のために測定したクロスローラー軸受を支持軸受として用いた C 軸には振幅 $2\mu\text{m}$ で転動体の数の 1/2 の山数をもつラジアルモーシオンとアキシヤルモーシオンが存在した。
- 5) 比較のために従来型のトラニオン型の 5 軸制御マシニングセンター機械 D についても DBB5 法で運動誤差を測定したところ、運動誤差は機械 A に比べて 2 倍以上大きかった。また、従来機にはローラギヤカム変速機構やクロスローラー軸受に起因する大きな運動誤差が存在していたが、機械 A にはそれらは存在していなかった。
- 6) 本機の運動誤差は金型加工で従来用いられている 3 軸制御立形マシニングセンターや横形マシニングセンターのそれらとほぼ同程度であった。

参考文献

3. 1) 高山直士, 赤井孝行, 脇坂宗生, 竹内芳美, 5 軸制御マシニングセンターの精度向上に関する研究 (旋回軸のアライメント誤差の測定と補正), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 77, No. 782, (2011), 3951-3960.
3. 2) 株式会社森精機 SuperMiller カタログ, (2006), 8-13.
3. 3) 藤井健次 クロスローラーベアリングの剛性解析 精密工学会誌, Vol. 74, No. 2, (2008), 145-149.
3. 4) 黎子椰, 垣野義昭, 川島章弘, 井原之敏, 山路伊和夫, 脇坂宗生, 5 軸加工機における回転軸系の運動誤差原因の診断に関する研究 (第 1 報) ——回転誤差の診断法と診断手順——, 精密工学会誌, Vol. 69, No. 5 (2003), 703-709.
3. 5) 坂本重彦, 稲崎一郎, 塚本穎彦, 市来崎哲雄: ボールバーによる 5 軸マシニングセンターの組立誤差同定法, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 63, No. 605 (1997), 262.
3. 6) 茨木創一, 澤田昌広, 松原厚, 森雅彦, 檜原圭蔵, 垣野義昭, ボールバー法を用いた複合加工機のミリング主軸旋回軸の動的運動精度測定法, 精密工学会誌, Vol. 73, No. 5 (2007), 583.
3. 7) C/Hong, S. Ibaragi, A. Matsubara, Influence of Position Depending Error of a Rotary Axes on a Machining Test of cone Frustum by Five Axis Machining Tools, Precision Engineering, Vol. 35, No. 1 (2011), 1-11.
3. 8) N. Takayama, H. Ota, K. Ueda, Y. Takeuchi, 'Development of Table-on-Table-Type Five-Axis Machining Center, : New Structure and Basic Characteristics', IJAT, Vol. 5, No. 2 (2011), 247-254.
3. 9) 高山直士, 太田秀仁, 植田健介, 竹内芳美, 'テーブル・オン・テーブル構造を持つ 5 軸制御マシニングセンターの開発 (旋回角度がアライメント誤差の推定精度に及ぼす影響)', 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 77, No. 777 (2011), 542-548.
3. 10) 平元一之, 加工品位と加工精度の両立を可能にする重心駆動理論 (DCG), 機械設計, Vol. 48, No. 1 (2004), 45-48.
3. 11) 杉本好昭, 平元一之, 重心駆動を採用した高精度マシニングセンターの開発, 第 5 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 日本機械学会, (2004), 161-162.
3. 12) 株式会社森精機製作所, NMV5000DCG カタログ, (2008), 12-16.
3. 13) M. Mori, M. Fujishima, K. Kashihara, M. Horikawa, Development and Application of a Direct Drive Motor for Performance Enhancement of Versatile Machine Tool Systems, Annals of the CIRP, Vol. 54, No. 1 (2005), 337-340.
3. 14) M. Mori, M. Fujishima, S. Ibaraki, K. Kashihara, Performance Enhancement of Integrated Machine Tool through Use of Direct Drive Motor, Proceedings of 2006 International Symposium on Flexible Automation (2006).

- 3. 15) SANKYO. RollerDrive カタログ, (2014), 2-7.
- 3. 16) 三菱複リードウオームギヤセットカタログ, (2012), 2-14.

第4章 同時5軸制御時の運動精度

4.1 緒論

第2章、第3章で述べた DBB5 測定法では、同時2軸制御時の測定が大半であり、最大でも同時3軸制御時の運動誤差しか測定していない。これは主として対象機に残存する運動誤差原因を正確に追求し、これに対する種々の対策を実施することによって運動精度を向上させることを工作機械メーカーとして最大のターゲットにしているからである。もちろん、これらの同時2軸制御時の運動誤差を総合することによって、全体としての運動誤差を評価することができる。

また、前述したように実際の機械部品においても、現時点では同時5軸制御で加工しなければならない部品はそう多くない。従来から同時5軸制御で加工されている代表的な部品としては図4.1に示すようなタービンブレードやインペラーなどがある。またごく最近行われたものとして同図(c)に示すスパイラルベベルギヤがある。従来は専用のスパイラルベベルギヤ加工機でないと加工できなかったスパイラルベベルギヤが同時5軸制御のマシニングセンターを用いたエンドミル加工でできるようになった。

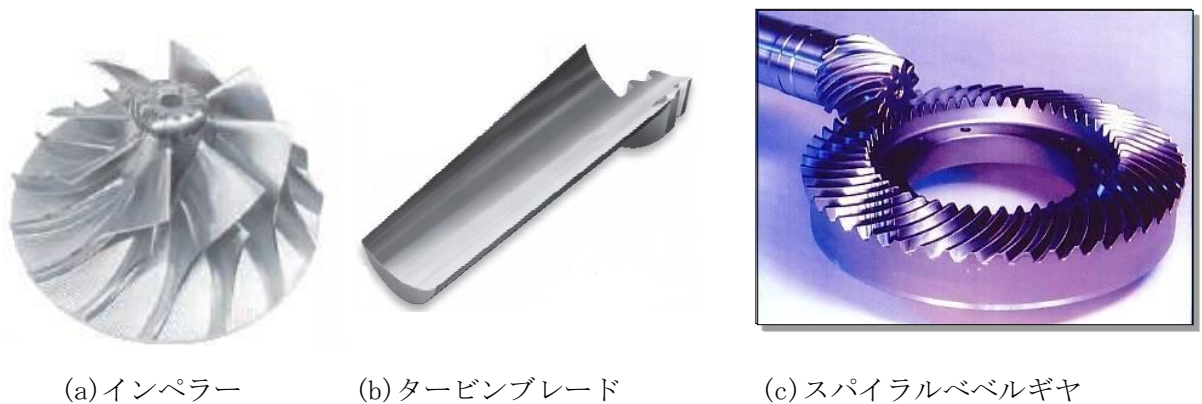


図4.1 同時5軸制御で加工される複雑形状部品

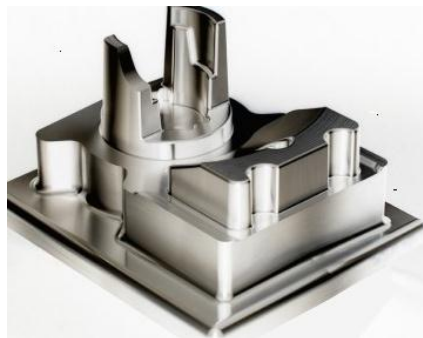


図4.2 奥行きが深い金型の例

金型加工においてもアンダーカット部が存在するような特殊なものを除けば同時 5 軸制御でしか加工できないものはそう多くない。同時 4 軸制御による横形マシニングセンターを用いて大半の金型の加工はできる^{4.1)}。しかし、図 4.2 に示すような複雑な金型の場合は同時 5 軸制御で加工すると有利な点も多い。これについては第 6 章で詳しく検討する。

同時 5 軸制御時の加工精度を検定する方法として、前述のように NAS979 に規定されているテーパコーン形状を加工し、中心軸に直角断面の真円度プロファイルを真円度測定機で測定し、その大きさを評価する方法がある^{1.6)} (図 4.3 参照)。以前はこれ以外に同時 5 軸制御時の精度を評価する方法がなかったため、この方法は広く普及し、使われている。しかし、NAS979 にはどのような位置と姿勢でテーパコーン形状を加工するかが規定されておらず、その選定は工作機械メーカーに任されている。そのため現状では工作機械メーカーは加工誤差が小さくなる条件を選んで加工しているため、正確な精度の評価にはなっておらず、一応の目安を与えるものでしかない。これについては松下らが詳しく考察している^{1.7)}。

そこで本章^{4.2)}では、このテーパコーン加工に準じた条件を用いて最新の 5 軸制御マシニングセンターに対して、その問題点と改善を目的に同時 5 軸制御で運動させた時の運動誤差軌跡を DBB5 測定機で測定し、厳密な精度評価を行う方法について井原らの方法を参考にして研究することとした^{4.3), 4.4), 4.5), 4.6), 4.7), 4.8), 4.9)}。ただし、前述のような問題を避けるため、従来行われているテーパコーン切削よりもずっと厳しい形状と位置の条件で行う。

本章の第 4.2 節では非常に厳しい条件の下で DBB5 測定法を用いてテーパコーン切削を模した同時 5 軸制御時の運動誤差軌跡を測定する方法について考察し、第 4.3 節ではこの方法を用いて機械 A (5 軸制御マシニングセンター NMV5000) の運動誤差の評価を行うとともに、実際にテーパコーン切削を行い、得られた加工形状誤差と運動誤差を比較し、本方法の妥当性について考察している。第 4.4 節は以上をまとめた本章の結論である。

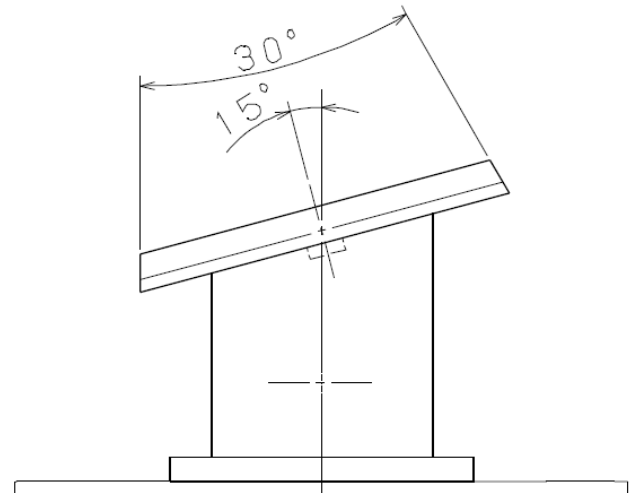
4. 2 測定法と測定条件

従来から用いられているテーパコーン形状を同時 5 軸制御で加工する場合にワーク形状に転写される機械の運動誤差を測定するために用いるセットアップを図 4.3 に示す。一般にはテーパコーン加工は図 4.3 に示す中心軸の傾斜角 15° 、半頂角 15° のものが多く用いられているが、前述のように、これは特異な条件であり、運動誤差が非常に小さく評価されてしまうので、不都合である^{1.7)}。

そこで本研究では、図 4.4 に示すようにテーパコーンの中心軸の傾斜角 45° と最も厳しい (=運動精度が悪くなる) 条件で加工と運動誤差の測定を行うこととした。同様に、テーパコーンの半頂角も 30° と大きくし、条件を厳しくする。また DBB 装置の 2 球間の距離を $R=200\text{mm}$ とする。図 4.5 はこの場合のセットアップと測定状況を示している。



(a) 加工中の状況

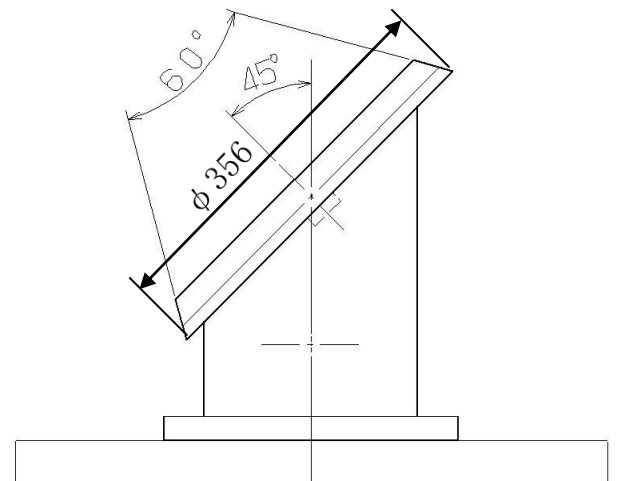


(b) 加工形状

図 4.3 従来から行われているテーパコーン切削の一例 (NAS979)

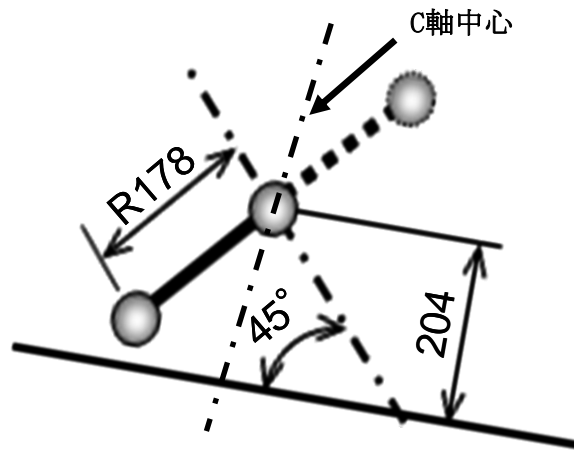


(a) 加工中の状況

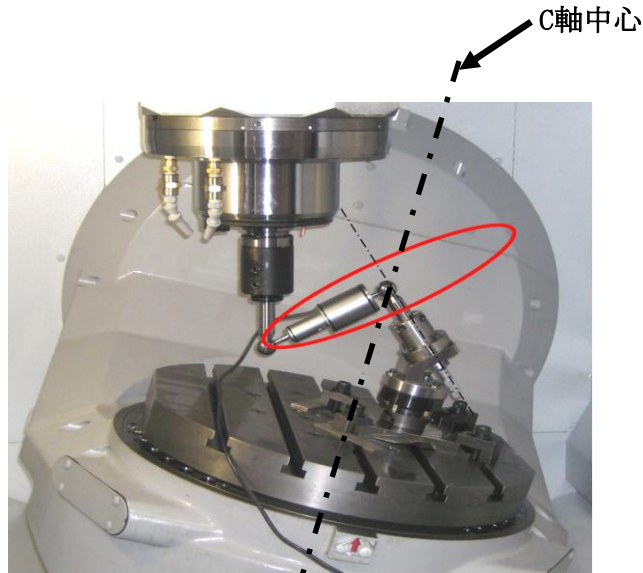


(b) 加工形状

図 4.4 提案しているテーパコーン切削の形状



(a) DBB5法を用いた運動誤差の測定法の原理



(b) 測定セットアップ

図 4.5 DBB5法による同時5軸制御時の運動誤差測定法

以上のような条件で同時5軸制御時の運動誤差測定を行うための工具パスの計算はグラフィックプロダクツ社製のCAMソフトTOOLS-NXを用いて行う^{4.4)}。その際、真円軌道からの工具パスの最大許容ずれ量(トレランス)は $1\mu\text{m}$ とする。1周のパスについての平均的な線分長は $0.59\mu\text{m}$ となる。

測定に用いる条件は次のテーパコーン切削と同じ条件とする。測定はCW方向とCCW方向について行う。ただし、送り速度は500, 1000, 2000mm/minと3段階に変化させる。また各種の補正は有効とし、最も運動誤差が小さくなるような状態で測定することとする。

図4.4の形状のテーパコーンを加工する場合、同時5軸制御で運動させる場合の直進軸X, Y, Zと回転軸B, Cの移動範囲は次のようになりに広い範囲にわたっている。括弧内

は同時 3 軸制御の場合の移動範囲である.

X : -165.991~165.991mm (-141.421~141.421mm)
Y : 0~234.747mm (-141.421~141.421mm)
Z : 0~234.747mm (-141.421~141.421mm)
B : - 60.0~0° (0°)
C : - 45.0~45.0° (0°)

比較のために、以上の測定と同じ工具パスで同時 5 軸制御運動を行わせて、ストレートエンドミルでテーパコーン形状を加工し、その加工形状誤差（真円度プロファイル）を真円度測定機で測定し、運動誤差と比較する.

その時用いる切削条件は次の通りである.

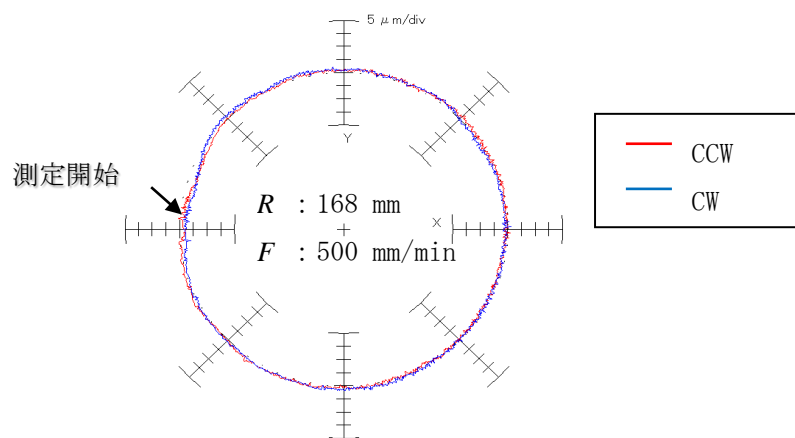
工作機械 : 機械 A
ワーク材質 : アルミニウム合金 A5052
ワークの厚さ : 20mm
ワークの半径 : 200mm
工具 : コーティング超硬エンドミル $\phi 30$ 4 枚刃
主軸回転数 : 4000/min
半径方向切込み : 0.05mm
1 刃当たりの送り : 0.03mm/tooth (送り速度 500mm/min の場合)
運動方向 : CW 方向
クーラント : 使用せず (ドライカット)
真円度測定機 : Rank Taylor Hobson TALYROND 290 (カットオフ山数 50)

4. 3 測定結果と考察

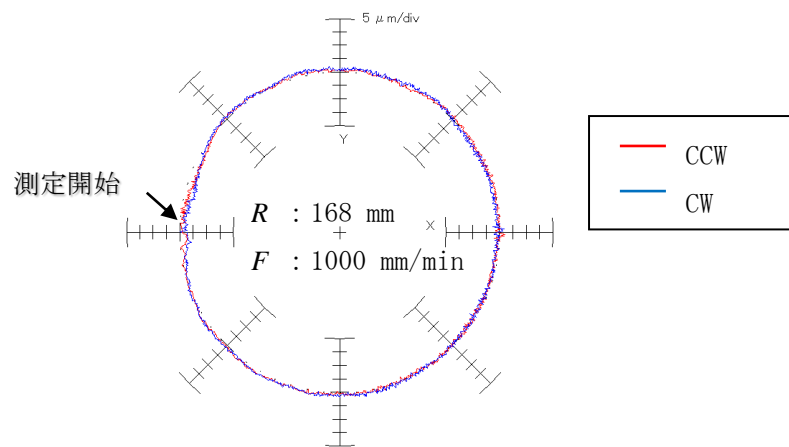
送り速度を $F=500, 1000, 2000\text{mm/min}$ に変えた場合に DBB5 測定法を用いて測定した同時 5 軸制御運動時の運動誤差軌跡を図 4.6 に示す. 参考までにボールエンドミルの先端点 (=球中心) が通る軌跡を X, Y, Z の同時 3 軸制御で運動させた時に測定された運動誤差軌跡を図 4.7 に示す. 同時 3 軸制御で運動させた場合の真円度誤差は $F=500\text{mm/min}$ の時に 5.4 (CW) , 5.8 (CCW) μm であるのに対し, 同時 5 軸制御で運動させた場合の真円度誤差は 6.3 μm (CW) , 5.7 μm (CCW) と両者はほとんど同じである.

一般に同時 5 軸制御で運動させた場合の方が同時 3 軸制御の場合に比べて, 運動誤差が大になると思われるが, 今回の測定結果は両者がほぼ同じ大きさになっている. これは機械 A では第 3 章で考察したように, YZ 軸間の直角度誤差が $7\mu\text{m}/300\text{mm}$ とかなり大きく, YZ 平面の運動誤差を大にしている. 同一の円軌跡を描かせた時にも, 同時 5 軸制御で運動させる場合には, B, C 軸も運動するので Z 軸の移動量は同時 3 軸制御の場合の 83% と小さく, かつ B, C 軸にも大きな運動誤差がないので, 同時 5 軸制御時で運動させてもほとんど

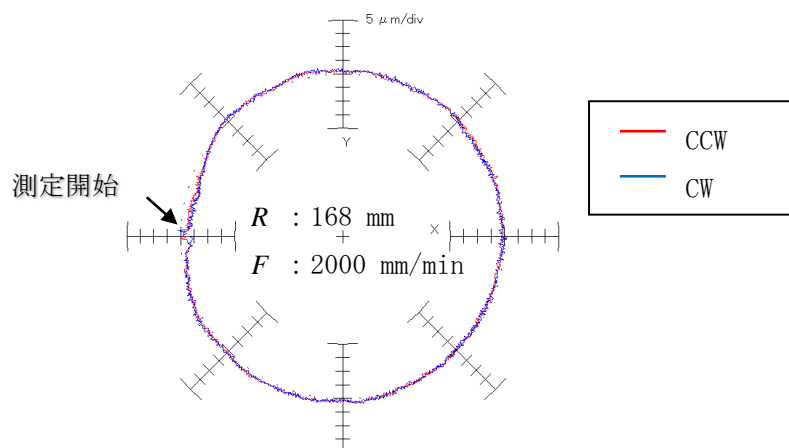
同じ大きさの運動誤差になったものと思われる。



(a) $F = 500 \text{ mm/min}$



(b) $F = 1000 \text{ mm/min}$



(c) $F = 2000 \text{ mm/min}$

図 4.6 DBB5 法で測定した同時 5 軸制御運動時の運動誤差軌跡

このことから、機械の運動誤差原因を正確に診断するためには、DBB5 法と言えども同時に多数の軸を動かさず、なるべく少数の軸を用いて同時制御で円運動させ、かつ移動範囲を大きくとる方がよいことが確認された。これは DBB3 法でも同じである。

以上のような測定を行うための、初期の予備的な測定の際に図 4.8 に示すように $\theta = 330^\circ \sim 30^\circ$ の範囲で高次山成分の振幅が最大で $10\mu\text{m}$ とかなり大きくなる現象が生じた。この測定時には機械構造にも振動が生じていた。これはこの条件では、B 軸の指令速度の変化が $\theta = 330^\circ \sim 30^\circ$ の範囲で $50(\text{deg}/\text{min})/\text{div}$ と大きくなり、サーボ系が不安定状態になり、それに誘発されて生じた機械構造の振動が原因していることが分かった（旋回軸に存在する運動誤差原因 (3) によって生じたもの。19 ページの図 2.10 を参照）。これについては、第 5 章でも考察する。この考察に当たっては、DBB5 測定のほかに、サーボガイドを用いて、制御軸の位置フィードバック値などを測定したデータを用いている^{4.9)}。サーボガイドを用いる運動誤差の測定は次章で多用するので、その詳細な説明は本章では省略する。

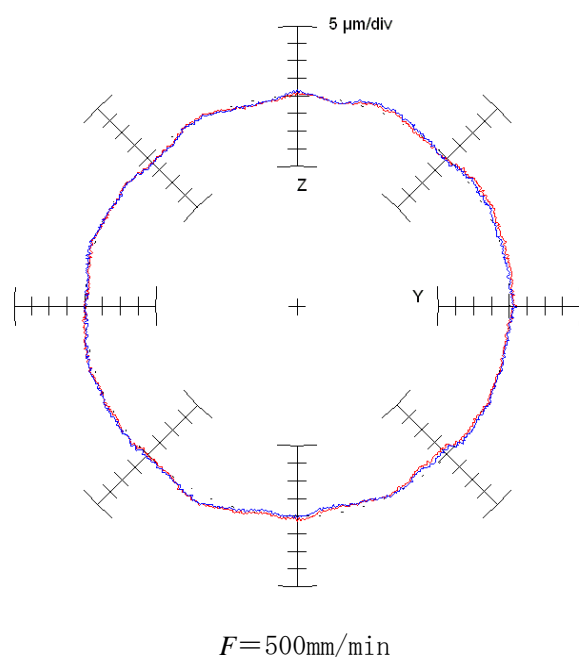


図 4.7 DBB5 法で測定した同時 3 軸制御運動時の運動誤差軌跡

そこで、指令速度にスムージング処理をほどこして線分ごとの速度変動をなめらかにしたり、工具パスの計算の際のトレランスを $1\mu\text{m}$ 以下と小さくして、線分ごとの速度変動を小さくすることで、この現象を抑える手法を用いて運動精度測定を行った。図 4.9 はそのようにして得られた測定結果である。このように処置することにより、高次山成分は $1\mu\text{m}$ 程度に減少した。

同時 5 軸制御で加工する場合には通常は CAM ソフトを使って NC プログラムを作成する。

この場合にはプログラマーは、旋回軸がどの程度の速さ（角速度）で運動するのか予測することが出来ない。出来てきたプログラムをかけて、空運転してみて、ようやく振動が生じていることが分かるのみであるので、注意を要する。

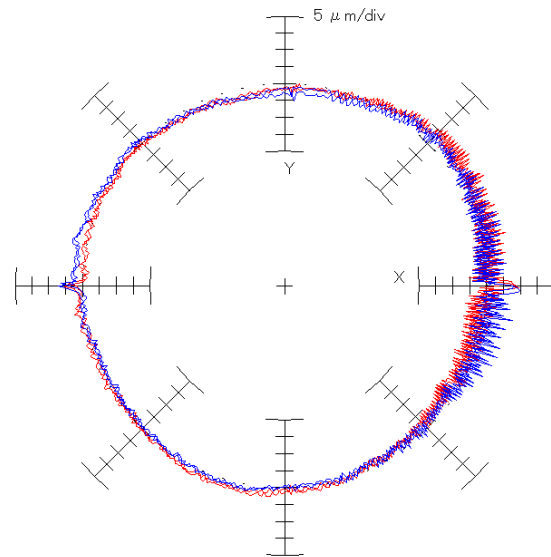


図 4.8 同時 5 軸制御で運動させた場合に、B 軸の送り角速度変動に起因した振動が生じた時に測定された運動誤差軌跡（トレランス： $3\mu\text{m}$ 、 $F: 2000\text{mm/min}$ ）

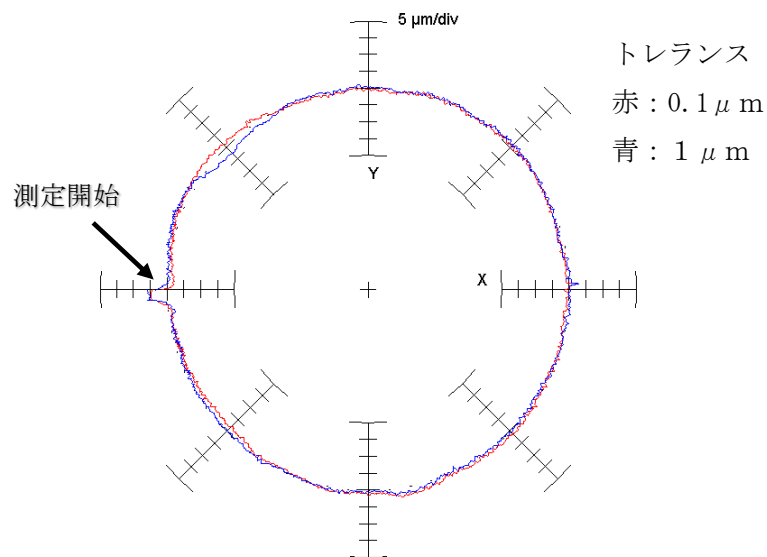


図 4.9 トレランスを小さくして、B 軸の送り角速度変動を小さくした場合に測定された運動誤差軌跡（トレランス： $0.1\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 、 $F: 2000\text{mm/min}$ ）

図 4.4 に示したテーパコーン形状を同時 5 軸制御で加工した場合の加工形状誤差 (= 真円度プロファイル) を真円度測定機 Rank Taylor Hobson 290 で測定した結果 (カットオフ山数 50) を図 4.10 に示す. この加工形状誤差の真円度は $4.9\mu\text{m}$ となった. ただし, 加工実験においては, 工具のアプローチ, エスケープにともなう同一箇所での 2 回切削による切削抵抗の変化によるエンドミル工具のたわみが原因する加工形状誤差を小さくするために, 円弧と直線の繋ぎの部分に小さな円弧部を挿入するなど十分な注意を払っている. この処置をしないと, 2 回切削による局所的な凹みが生じる.

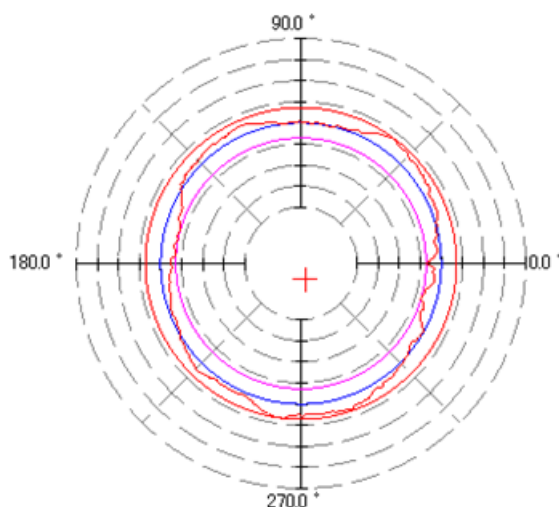


図 4.10 図 4.4 に示したテーパコーン形状を同時 5 軸制御で加工した場合の加工形状誤差 ($2\mu\text{m}/\text{div}$)

このようにして得られた加工形状誤差の真円度プロファイル (図 4.10) を図 4.5 の方法で同条件で測定された運動誤差軌跡 (図 4.6) と比べると, 両者はほぼ対応している. ただし, 加工形状誤差の方が $1\mu\text{m}$ ほど運動誤差よりも小さい. これは加工形状誤差の測定の際に用いた真円度測定機に内蔵されているフィルターによって高次山成分がカットされたために生じた現象であると考えられる.

図 4.5 に示した DBB5 法による運動誤差測定に要した準備時間と測定時間はそれぞれ 50min, 20min であり, 合計 70min を要した. それに対して, NAS979 に準拠したテーパコーン加工と加工形状誤差の測定に要した準備時間と測定時間はそれぞれ 40min, 30min であり, 合計 70min を要した. ただし, これらの準備時間の中には NC プログラムの作成に要した時間 30min は含めていない. どちらの方法も同程度の時間を要しているが, テーパーコーン加工と加工形状誤差を測定する方法は従来から行っており, 習熟した方法であるのに対し, DBB5 法は初めて行う方法でジグも整備されておらず, 習熟もしていない状態での作業である. 専用のジグを開発して調整に要する時間を短くすることによって, トータルの

所要時間を 20min 程度まで短縮することが可能と思われる。

これより、多大の時間と経費のかかるテーパコーン加工試験の代わりに、DBB5 法によるテーパコーン加工を模した同時 5 軸制御による運動誤差測定を用いた方が時間的にも大いに有利な可能性があることが分かった。

4. 4 結論

同時 5 軸制御でテーパコーン形状を加工する場合の運動誤差を DBB5 法を用いて測定するとともに、同様の測定を同時 3 軸制御時についても行い、運動誤差を比較した。また、同時 5 軸制御で実際に同一のテーパコーン形状をストレートエンドミルで加工し、加工形状誤差（真円度プロファイル）を測定し、運動誤差軌跡と比較した。その結果、次のことがわかった。

- 1) 現在行われている NAS979 規格に基づいたテーパコーン加工試験に準じた同時 5 軸制御時の運動精度を DBB5 法を用いて行う測定法を開発した。
- 2) テーパーコーンの中心軸の傾斜角 45° 、半頂角 30° 、半径 200mm という厳しい条件下でテーパコーン加工を模擬した同時 5 軸制御時に測定された本機の運動誤差は $6\mu\text{m}$ 前後であり、かなり良好であった。
- 3) 同じ条件で加工されたテーパコーンの断面の真円度誤差は $5\mu\text{m}$ であり、運動誤差よりも少しだけ小さかったが、運動誤差軌跡と真円度プロファイルの形状はほぼ対応していた。これは形状精度測定時に用いた測定機に内蔵されているフィルターのためである。
- 4) 先端点が同じ経路になる同時 3 軸制御時の運動誤差は $5.5\mu\text{m}$ 程度であり、同時 5 軸制御時とほぼ同じであった。その原因は、YZ 軸間の直角度誤差が影響する移動範囲において、同時 5 軸制御時の方が同時 3 軸制御の場合よりかなり短く、かつ回転軸 B、C の運動誤差がかなり小さかったためである。
- 5) DBB5 法を用いた測定に要した時間は 70min と従来のテーパコーン加工と加工形状誤差の測定に要した時間と同程度であったが、ジグなどを整備すれば 20min 程度に短縮できることがわかった。
- 6) 回転軸の移動速度（角速度）が非常に速くなる条件で運動させると、それに伴って機械構造の振動が誘起され、振幅 $10\mu\text{m}$ の高次山成分が生じることがわかった。一方、回転軸の移動速度（角速度）を小さくした条件、あるいはその速度変動を小さくした条件下で測定すると、当該振動の現象は生じなくなることも確認できた。

参考文献

- 4.1) 高山直士, テーブル・オン・テーブル型の新型 5 軸制御マシニングセンタの開発, 大阪大学学位論文, (2011), 110.
- 4.2) T. Akai, Y. Kakino, K. Ueda and K. Ogawa, The Measurements of Motion accuracy of 5-Axis Machining Center - Motion Accuracy of Simultaneous 5-Axis Control-, Proceedings of 2010 ISFA, JPS-2479, (2010), 1-4.
- 4.3) 井原之敏, 田中和也, 多軸工作機械での円錐台加工試験に対応したボールバー測定法 (第 1 報) -主軸旋回形 5 軸 MC でのボールバー測定と実加工との比較-, 精密工学会誌, Vol. 71, No. 12 (2005), 1553-1557.
- 4.4) 堤 正臣, 佐伯智之, 木落清志郎, 崔 成日, 井原之敏, 四角すい台の仕上げ加工に基づく 5 軸マシニングセンタの工作精度試験方法の開発, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 780 (2011), 3137-3148.
- 4.5) 加藤教之, 堤 正臣, 土橋 祐, 弓座大介, 崔 成日, 井原之敏, 同時 5 軸制御による円すい台仕上げ加工試験用 NC データの解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 780 (2011), 3149-3160.
- 4.6) 加藤教之, 堤 正臣, 土橋 祐, 佐藤隆太, 弓座大輔, 崔 成日, 井原之敏, 円すい台加工を模擬した 5 軸制御マシニングセンタの 3 次元円弧補間運動軌跡の解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 787 (2012), 964-975.
- 4.7) 加藤教之ほか, 5 軸制御マシニングセンタによる円すい台加工と等価な 3 次元円弧補間運動のボールバー測定における感度解析, 日本機械学会誌, Vol. 78, No. 791 (2012), 323-334.
- 4.8) Matsushita T, The accuracy of cone frustum machined by five-axis machining center with titling table, Proceedings of 2007 JSPE Spring Annual Conference, 2007. 187-188 (in Japanese).
- 4.9) 松下哲也, 松原厚, テーパーコーン DBB 測定によるテーブル旋回形 5 軸制御工作機械の幾何誤差の同定と補正, 精密工学会誌, Vol. 77, No. 6 (2011), 594-598.

第5章 旋回軸と直進軸のサーボ特性の違いによって生じる運動誤差

5.1 緒論

旋回軸の駆動に従来のウォーム変速機などを用いた5軸制御マシニングセンターでは、旋回軸のサーボ特性が低いので、直進軸のサーボ特性をこれに合わせてと機械全体としてのサーボ特性は非常に低くなりがちであった。しかし、実際にはこのように旋回軸と直進軸のサーボ特性をマッチングさせることは当時からほとんど行われてこなかった^{3,8)}。その理由としては、加工の現場では旋回軸はワークのインデックス用のみ用いて、加工は直進3軸の同時制御で行われることが多かったので、旋回軸のサーボ特性は加工精度に関係しなかったからである。

もちろん同時5軸制御で輪郭形状の加工も行われていたが、加工の対象となる部品は主としてインペラーやタービンブレードなどであり、それらの部品に対しては加工形状誤差として $50\mu\text{m}$ 程度という当時でも大きな公差が許容されていた。そのため特に旋回軸のサーボ特性を向上させなくても実用上大きな問題とはならなかった^{5.1),5.2)}。しかし、同時5軸制御を用いて金型加工を行う場合にはもっと厳しい加工精度ひいては高い運動精度が要求される。すなわち、日本では金型加工の場合には一般的に $1000\text{mm}/\text{min}\sim 2000\text{mm}/\text{min}$ という送りで加工して、加工形状誤差を $10\mu\text{m}$ 以下にすることが必要であるとされている^{5.3)}。

金型加工のように直進軸と旋回軸を同期制御して輪郭加工を早い送り速度で高精度に行うためには、直進軸のサーボ特性と旋回軸のサーボ特性を共に高める必要がある。そのために、まず本章では、その基礎として、1つの旋回軸と1つの直進軸を同期させて円運動を行わせる際の位置フィードバック値を検出して、DBB法とよく似た運動誤差表示法を用いて運動誤差軌跡を表示し、両者のサーボ特性の違いによって生じる運動誤差量を解析し^{5.4)}、高速送りで能率よく加工しても輪郭運動誤差ひいては加工形状誤差を小さくする方法について研究することとした。

本研究で対象としている2台の5軸制御マシニングセンターの内、機械Aは旋回軸B、Cは共にDDモーター駆動されているので、旋回軸のサーボ特性はローラギヤカム変速機を用いた従来型のもの(機械D)よりかなりよいはずである。そこで本章^{5.5),5.6),5.7)}では、本機と従来機の性能を比較するために実際に2軸の同期制御を行った場合の運動誤差軌跡の測定を行い、どの程度改善できているかについて考察する。

直進軸と旋回軸のサーボ系の違いによって生じる運動誤差を測定する。その測定は、サーボガイド(FANUC社製)を用いて行う^{5.8)}。ただし、サーボガイドを用いた測定では位置検出器のところで測った位置のフィードバック値を検出して、運動誤差を算出している。

そこで、DBB3 法を用いて同じ 2 軸の同期円運動を行わせて、テーブルと主軸端の間の相対的な運動誤差の測定も併せて行い、このサーボガイドを用いて測定する方法の妥当性についても検討する。そのため、限られた条件の下ではあるが、DBB 法を用いて測定された機械系の誤差を含めた運動誤差と比較する。

本章の第 5.2 節では旋回軸と直進軸のサーボ特性の差により生じる運動誤差軌跡の理論解析を行い、第 5.3 節では本章で用いる測定方法と測定条件について述べ、第 5.4 節では得られた測定結果とそれを解析した結果について考察する。第 5.5 節は以上をまとめた本章の結論である。

5. 2 旋回軸と直進軸のサーボ特性の差により生じる運動誤差軌跡の理論解析

5. 2. 1 旋回軸と直進軸の同期運動により作る円運動

本章では、1 つの旋回軸 (C) と 1 つの直進軸 (X) を同期させて円運動を行わせる場合の両軸のサーボ特性の差によって生じる運動誤差について検討する。すなわち、直進軸と旋回軸を同期させて円弧補間運動をさせた時に、どの程度の偏差の小さい円軌跡を描くかを考える。同時 3 軸制御で運動させる場合よりもこのように同時 2 軸制御で運動させた場合の方が、運動誤差の解析をやりやすいからである。そして、同様の測定を直進軸と旋回軸の組み合わせを変えて行う。

旋回軸系においては、同一の工具送り速度 F (mm/min) が指令された時の旋回速度 (=角速度) は旋回軸中心からの距離 r によって異なるので、どこに旋回軸中心があり、どの大きさの半径で運動を行うかが、問題である。本章では、実際の加工でよく使われるであろう位置を考え、かつ測定半径 R として、ある程度の大きさが必要であることを勘案しながら、図 5.1 に示す位置と半径で一定の工具送り速度 F (mm/min) で円運動を行わせた場合について検討する。

すなわち、直進軸において、ある点 (主軸中心=工具中心を想定) が X 軸上の点 X_0 (=100 mm) を中心にして、X 軸上を半径 R (=50mm) で、

$$X = R \cos \omega t \quad (5.1)$$

で運動する場合を考える。ここで t は時間、 ω は角速度である。

一方で旋回軸の旋回角度 C として

$$Y = (X_0 + R \cos \omega t) \tan C = R \sin \omega t \quad (5.2)$$

なる関係の旋回角度 C を考えると、図 5.1 中の点 Q が点 P_1 を始点として、 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$ の順

に、X 軸上の点 X_0 を中心にして、半径 R で円運動する。この運動中の半径方向の誤差 ΔR より、DBB 法に良く似た手法で、運動誤差の解析が可能になる。すなわち、加工形状誤差に対応した法線方向の偏差の軌跡を描かせることができる。

5. 2. 2 運動条件の設定とサーボ情報の入手法とその表示

実用面も考慮し、送り速度を $F=625, 2000\text{mm/min}$ として、1つの直進軸と1つの旋回軸の同時2軸制御（例えば X-C）で円運動をさせるための指令値を図 5.2 に示す。

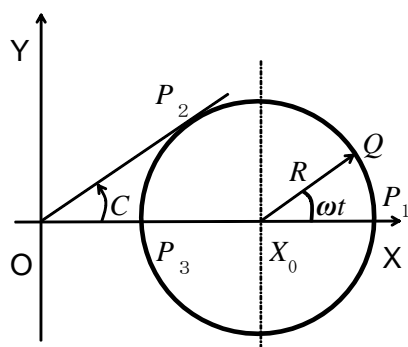
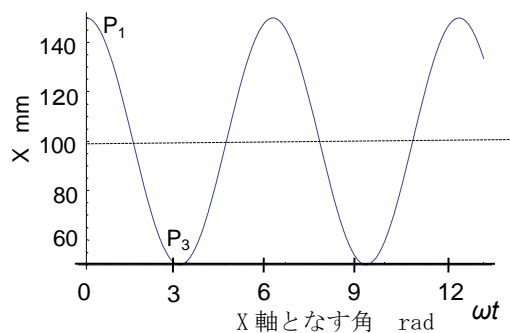
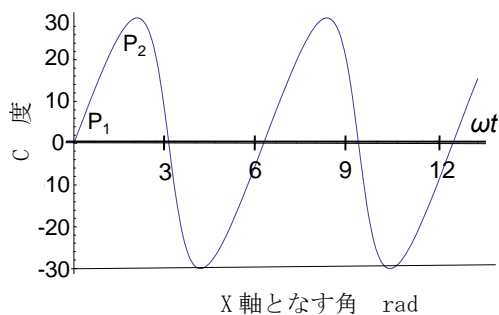


図 5.1 1つの旋回軸と1つの直進軸を同期させて描く円運動



(a) X 軸



(b) C 軸

図 5.2 同期させて描く運動円における各軸の運動指令の例

横軸は点 X_0 を中心にして点 Q が X 軸となす角 {式(5.1)の ωt } で示してある。図 5.2(a) より、当然であるが、点 P_1 および点 P_3 において直進軸である X 軸の運動の向きが反転している。図 5.2(b) より、旋回軸である C 軸においては、点 P_2 で運動の向きの反転が生じている。また C 軸の角速度は一定ではないが、大きな変動も生じることなく、比較的なめらかであることもわかる。この運動において、サーボガイド (FANUC 社製) によりサーボ系の位置の指令値と位置検出器で検出した位置フィードバック値を比較して分析する。この際、図 5.3 に示すようにフィードバック位置の誤差の運動方向に対する法線方向成分を基礎円上に描かせて運動誤差軌跡を求める。法線方向成分のみを用いるのは、DBB 法と同様に接線方向成分は加工形状誤差には影響しないためである^{5.9)}。この運動誤差軌跡を解析して、両軸のサーボ特性の違いによって生じる運動誤差原因を診断する。位置フィードバック信号は CNC の指定端子から取り出し、サーボガイドに入力するだけであり、きわめて簡単にデータの取得ができる。

旋回軸には、半径方向の長さの誤差 ΔL と旋回角度誤差 ΔC があるとすると、点 Q の実際の位置 (X', Y') は次のようになる。

$$X' = (L + \Delta L) \cdot \cos (C + \Delta C) \quad (5.3)$$

$$Y' = (L + \Delta L) \cdot \sin (C + \Delta C) \quad (5.4)$$

ΔL , ΔC は十分に小さく、これらの 2 次の項を無視すると、誤差ベクトル (E_x, E_y) は

$$E_x = X' - X = \Delta L \cos C - L \Delta C \sin C \quad (5.5)$$

$$E_y = Y' - Y = \Delta L \sin C + L \Delta C \cos C \quad (5.6)$$

となる。これらの関係は図 5.3 に示すように、運動誤差の法線方向誤差 ΔR が次のように求められることを示している。

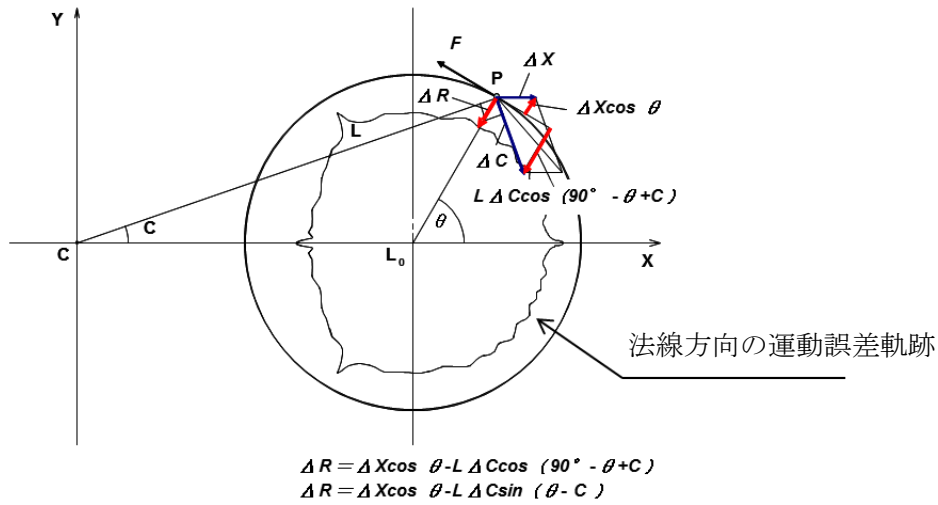


図 5.3 加工形状誤差に対応させた運動誤差軌跡

旋回と直進軸の円弧運動における ΔR は、それぞれ指令値を
(X, Y), (L, C)として

$$X = L \cos C \quad (5.7)$$

$$Y = L \sin C \quad (5.8)$$

一方で,

$$X = L_0 + R \cos \theta \quad (\text{ただし, } X_0 = L_0 \text{ とすると}) \quad (5.9)$$

$$Y = R \sin \theta \quad (5.10)$$

ここで, Q' (X', Y') (実際の位置) = ($L + \Delta L, C + \Delta C$) なので

$$X' = (L + \Delta L) \cos (C + \Delta C) \quad (5.11)$$

$$Y' = (L + \Delta L) \sin (C + \Delta C) \quad (5.12)$$

すなわち,

$$X' = (L + \Delta L) [\cos C \cdot \cos \Delta C - \sin C \cdot \sin \Delta C] \quad (5.13)$$

$$Y' = (L + \Delta L) [\sin C \cdot \cos \Delta C + \cos C \cdot \sin \Delta C] \quad (5.14)$$

よって,

$$X' = L \cdot \cos C \cdot \cos \Delta C - L \cdot \sin C \cdot \sin \Delta C + \Delta L \cdot \cos C \cdot \cos \Delta C - \Delta L \cdot \sin C \cdot \sin \Delta C \quad (5.15)$$

$$Y' = L \cdot \sin C \cdot \cos \Delta C + L \cdot \cos C \cdot \sin \Delta C + \Delta L \cdot \sin C \cdot \cos \Delta C + \Delta L \cdot \cos C \cdot \sin \Delta C \quad (5.16)$$

ここで ($0 < \Delta C < 1$) とすると, ΔC は一般に微小なので $\cos \Delta C \cong 1$, $\sin \Delta C \cong \Delta C$ として

$$X' = L \cdot \cos C - L \cdot \Delta C \cdot \sin C + \Delta L \cdot \cos C - \Delta L \cdot \Delta C \cdot \sin C \quad (5.17)$$

$$Y' = L \cdot \sin C + L \cdot \Delta C \cdot \cos C + \Delta L \cdot \sin C + \Delta L \cdot \Delta C \cdot \cos C \quad (5.18)$$

となり,

ΔL も一般に微小であり、誤差（微小量）の 2 乗 $\Delta L \cdot \Delta C \doteq 0$ とすると

$$X' = L \cdot \cos C - L \cdot \Delta C \cdot \sin C + \Delta L \cdot \cos C \quad (5.19)$$

$$Y' = L \cdot \sin C + L \cdot \Delta C \cdot \cos C + \Delta L \cdot \sin C \quad (5.20)$$

で、式(5.7) (5.8)を式(5.19) (5.20)に代入すると

$$X' - X = \Delta L \cdot \cos C - L \cdot \Delta C \cdot \sin C \quad (5.21)$$

$$Y' - Y = \Delta L \cdot \sin C + L \cdot \Delta C \cdot \cos C \quad (5.22)$$

となる．一般に DBB 表示では、 $E = (\text{実際の位置}) - (\text{指令値})$ とすることで、実際の工作物の仕上げ精度の正負を一致させている．よって、 $E_X = X' - X$ 、 $E_Y = Y' - Y$ により

$$(R + \Delta R)^2 = (X + E_X - L_0)^2 + (Y + E_Y)^2 \quad (5.23)$$

において、同様に誤差 ΔR 、 E_X 、 E_Y も微小で、それらの 2 乗項を微小として無視すると、

$$\begin{aligned} \Delta R &= (E_X \cdot X - L_0 \cdot E_X + E_Y \cdot Y) / R \\ &= (E_X \cdot R \cdot \cos \theta - L_0 \cdot E_X + E_Y \cdot R \cdot \sin \theta) / R \end{aligned} \quad (5.24)$$

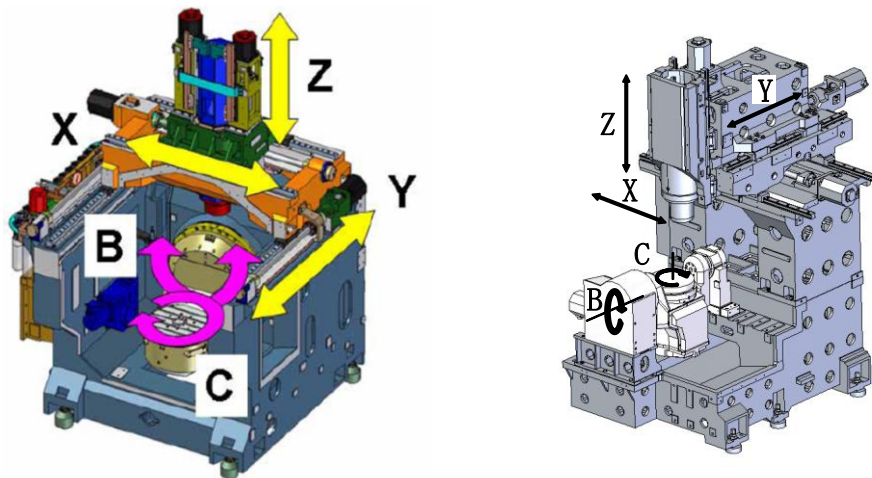
すなわち、図 5.3 で $\omega t = \theta$ として、

$$\Delta R = (E_X \cdot R \cdot \cos \omega t - L_0 \cdot E_X + E_Y \cdot R \cdot \sin \omega t) / R \quad (5.25)$$

という関係の表示を行うことにする．

5.3 測定方法と測定条件

旋回軸系の構造の異なる 2 台の 5 軸制御マシニングセンター(機械 A, 機械 D)について、旋回軸と直進軸のサーボ特性の差によって生じる運動誤差軌跡を測定する．それらの構造の概要と主な仕様を図 5.4 と表 5.1 に再掲する．テーブル・オン・テーブル型の機械 A はともに 2 つの旋回軸の駆動をダイレクトモーターで行っており、インダクトシンスケールが使用されている．



(a) 機械 A (テーブル・オン・テーブル型) (b) 機械 D (トラニオン型)

図 5.4 対象とする 5 軸制御マシニングセンターの概略構造

表 5.1 対象とした 2 台の 5 軸制御マシニングセンターの主な仕様

機種		機械A	機械D
全体構造	型	テーブル・オン・テーブル型	トラニオン型
	ストローク (mm)	X730, Y510, Z510	X600, Y425, Z450
第1旋回軸	軸受けの種類	クロスローラー軸受け	アンギュラーコンタクト玉軸受け
	変速機	なし (DDモータ)	ローラーギヤカム
	最高回転速度	50min ⁻¹	30min ⁻¹
	標準Kp1	70 1/s	60 1/s
第2旋回軸	軸受けの種類	クロスローラー軸受け	アンギュラーコンタクト玉軸受け
		アンギュラーコンタクト	
	変速機	なし (DDモータ)	ビルトインモータ
	最高回転速度	120min ⁻¹ 1200min ⁻¹	200min ⁻¹
標準Kp2	70 1/s	60 1/s	

この測定に際しては、原則として FANUC 社製のサーボガイドを用いて、各軸の位置フィードバック値を検出する。DBB 法を用いて測定する場合には、主軸とテーブル間の機械位置の誤差を直接測定できるが、サーボガイドを用いる場合には、その測定値に機械系もっている運動誤差を加えないと、厳密には加工形状誤差とは対応しない。

X-C 補間時の運動誤差軌跡の測定に際しては、フィードフォワードゲイン K_f 、補間後加減速、ピッチ誤差補正、バックラッシュ補正などはすべてゼロに設定して、CNC に内蔵されている補正機能は全てオフにしている。その理由はそれらが測定結果を不正確にすることを避けるためである。

送り速度が、直進軸と旋回軸のサーボ系の応答に対して、どのような影響があるかを調べるために、直進軸の送り速度を 2000mm/min, 5000mm/min, 8000mm/min と変化させる。旋回軸の送り速度は直進軸の送り速度に対応させて変化させる。

表 5.2 機械の各軸のストロークと標準設定されている位置ループゲイン K_p

機械	軸	ストローク	K_p [1/s]
機械A	X	730mm	60
	Y	510mm	60
	Z	510mm	60
	B	160~180°	60
	C	0~360°	60
機械D	X	600mm	60
	Y	425mm	60
	Z	450mm	60
	A	-20~180°	60
	C	0~360°	60

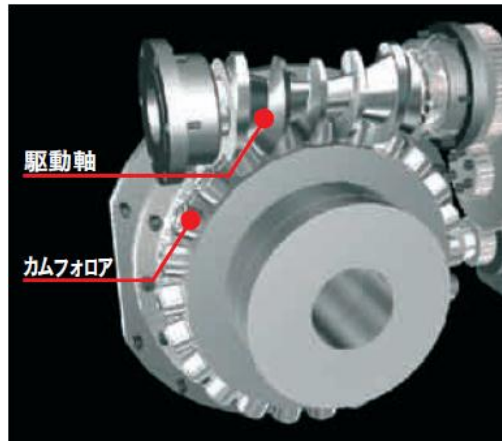


図 5.5 ローラギヤカム変速機

トラニオン型の 5 軸制御 MC である機械 D の B 軸の駆動は，サーボモータとローラギヤカム変速機を用いて行っている（図 5.5 参照）． C 軸の駆動は旋盤用の主軸モーターと同じ形式のものが使用されている．そのため，C 軸の最高回転数は 2000/min と高いが，厳密な速度制御は行われておらず，静的な角度位置の制御（オリエンテーション）のみが行われている．

以上，各回転軸の駆動機構をまとめると以下のようなになる．

機械 A	スケール	B :	DD モーター駆動
		C :	DD モーター駆動
機械 D	スケール	B :	ローラギヤカム変速
		C :	旋削用主軸モーターによる駆動

これらの回転軸のサーボパラメータとして，標準値は，表 5.2 に示す値が設定されている．位置ループゲイン Kp はすべての軸が 60 1/s で同一となっている．

前述のように，同様の測定をスケール位置でなく，加工精度に直接関係するテーブル位置と主軸先端位置の相対関係として DBB3 測定法を用いて図 5.6 のようなセットアップで行い，得られた運動誤差軌跡をサーボガイドで測定した結果と比較して，サーボガイドを用いた測定法の妥当性について検討する．

図 5.6 に示すように DBB3 のバーを 71° と大きく傾けると，誤差検出の感度が低下するが，市販されている DBB3 装置の場合には小さい測定半径の装置がないので，やむをえない．また，DBB3 測定に際しては熱変形によって指定位置が変位すると，測定結果がその影響を受けるので，熱的に安定した状態で測定することに注意している．

測定条件は以下の通りである．

- ・ 対象機械 : 機械 D（トラニオン型）
- ・ 円の中心位置と半径 : 図 5.6 と同じ（オフセット測定）
- ・ 送り速度 : 628mm/min

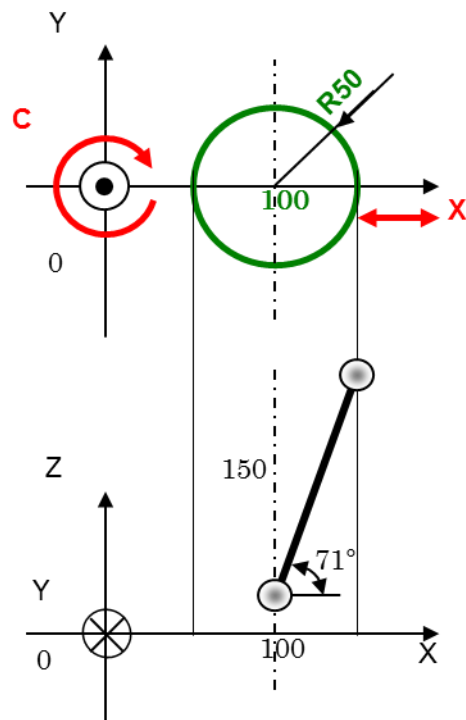
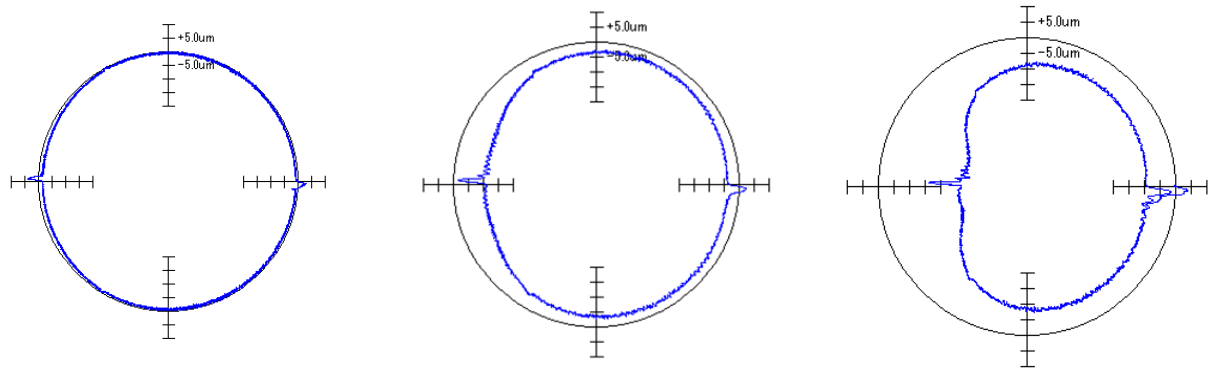


図 5.6 DBB3 法を用いた X-C 補間時の運動誤差の測定法

5. 4 測定結果と考察

機械 A の X-C 軸間で円弧補間運動をさせた場合にサーボガイドを用いて測定された運動誤差軌跡に与える送り速度の影響を図 5.7 に示す。どの条件でも、円の左端でのマイナスの運動誤差の量が増大しているが、送り速度が大になると、その影響はより大きく出ている。すなわち、送り速度が $F=2000\text{mm/min}$ の時には、その量は $3\mu\text{m}$ であったが、 $F=5000\text{mm/min}$ の時には $10\mu\text{m}$ 、 $F=8000\text{mm/min}$ の時には $25\mu\text{m}$ と顕著に増大している。これは、直進 2 軸の円弧補間で現れる半径減少と全く同じ現象によるものである。円の右端よりも、左端の方で大きくなるのは、C 軸の移動速度が右端に比べて 2 倍になるためである。



(a) $F=2000$ mm/min

(b) $F=5000$ mm/min

(c) $F=8000$ mm/min

図 5.7 X-C 補間時の運動誤差軌跡の測定結果 (機械 A)

($Kp=120$ 1/s div: $5\mu\text{m}$)

機械 A の X-C 軸間で円弧補間運動をさせた場合にサーボガイドを用いて測定された運動誤差軌跡を図 5.8 に示す. 各軸の位置ループゲインを標準設定値よりも小さい同図(a)に示す $Kp=30$ 1/s から, $Kp=215$ 1/s まで 15 1/s ずつ増大させたところ, 同図(c)に示すように, $Kp=215$ 1/s でサーボ系が不安定になった. この場合には, 後の図 5.14(a)に示すように, 直進軸の X 軸が回転軸の C 軸よりも先に不安定になっていた.

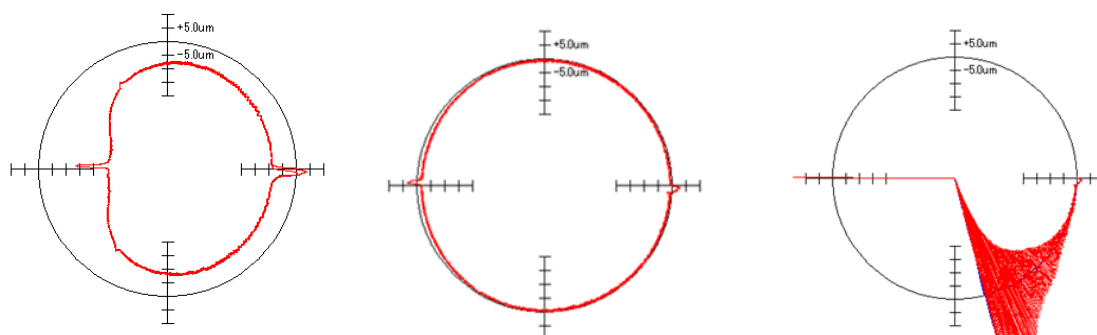
図 5.8(a)は C 軸の位置ループゲインを $Kp_c=30$ 1/s, 同図(b)は $Kp_c=120$ 1/s とした時に測定されたものである. $Kp_c=30$ 1/s の時には, P_3 点 (図 5.1) での半径減少量は $25\mu\text{m}$ に達しており, P_2 点でのスティックモーション量は約 $3\mu\text{m}$ であった. それに対し, 位置ループゲインを $Kp_c=120$ 1/s とした場合には, P_3 点での半径減少量もわずか $1.5\mu\text{m}$ と非常に小さくなり, C 軸反転に伴うスティックモーション量も $1\mu\text{m}$ と非常に小さい. ただし, サーボノイズが原因している高次山成分は $0.5\mu\text{m}$ から $1.5\mu\text{m}$ と増大した.

同様に機械 A の X-B 軸間で円弧補間運動をさせた場合の運動誤差軌跡をサーボガイドを用いて測定した. 各軸の位置ループゲインを $Kp=60$ 1/s から $Kp=195$ 1/s まで 15 1/s ずつ増大させたところ, 図 5.9(c)に示すように, $Kp=195$ 1/s でサーボ系が不安定になった. この場合には, 後の図 5.14(b)に示すように, 直進軸の X 軸が回転軸の B 軸よりも先に不安定になっていた.

同様に機械 A の Z-B 軸間で円弧補間運動をさせた場合の運動誤差軌跡をサーボガイドを用いて測定した. 各軸の位置ループゲインを図 5.10(a)に示す $Kp=60$ 1/s から $Kp=210$ 1/s まで同様に变化させたところ, $Kp=195$ 1/s でサーボ系が不安定になった. この場合には, 後の図 5.14 (c)に示すように, 回転軸の B 軸が直進軸の Z 軸よりも先に不安定になっていた.

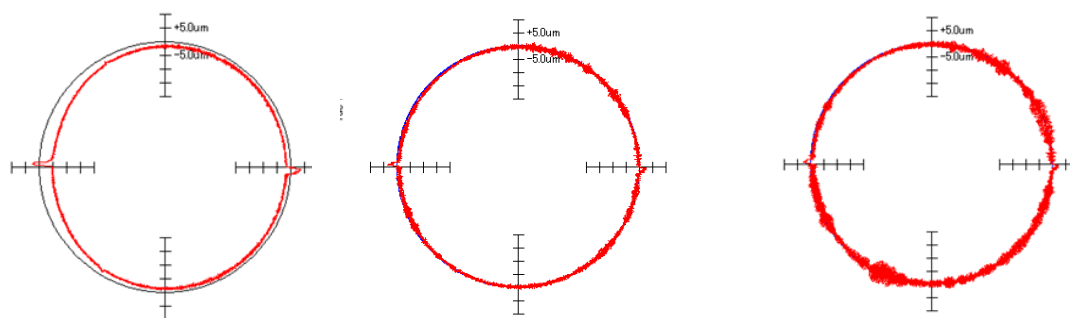
同様に機械 A の Z-C 軸間で円弧補間運動をさせた場合の運動誤差軌跡をサーボガイドを用いて測定した. 各軸の位置ループゲインを図 5.11(b)に示す $Kp=60$ 1/s から $Kp=230$ 1/s まで同様に变化させたところ, $Kp=230$ 1/s でサーボ系が不安定になった. この場合には,

図 5.14(d) に示すように、直進軸の Z 軸が回転軸の C 軸よりも先に不安定になっていた。



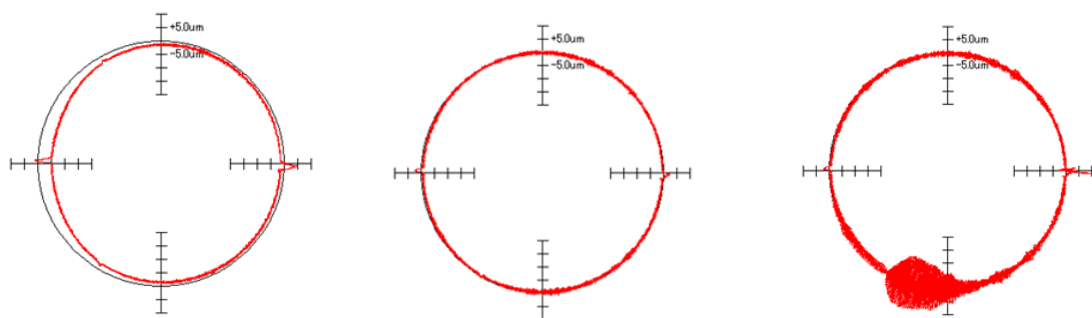
(a) $Kp=30$ 1/s (b) $Kp=120$ 1/s (c) $Kp=215$ 1/s

図 5.8 X-C 補間時の運動誤差軌跡の測定結果 (機械 A)
($F=2000\text{mm/min}$, 1div: $5\mu\text{m}$)



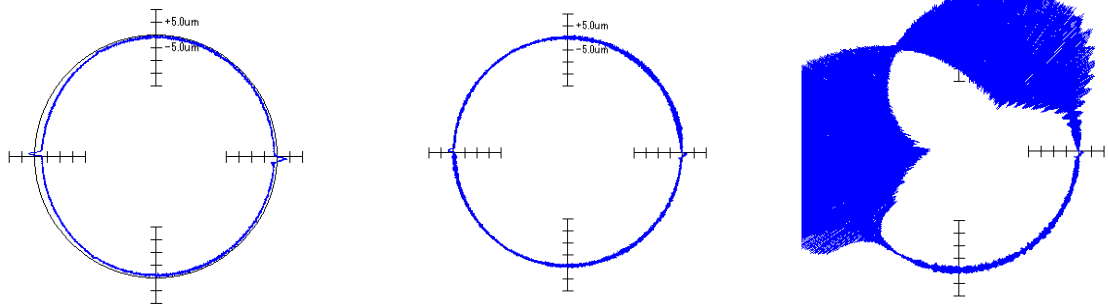
(a) $Kp=70$ 1/s (b) $Kp=180$ 1/s (c) $Kp=195$ 1/s

図 5.9 X-B 補間時の運動誤差軌跡の測定結果 (機械 A)
($F=2000\text{mm/min}$, 1div: $5\mu\text{m}$)



(a) $Kp=70$ 1/s (b) $Kp=180$ 1/s (c) $Kp=195$ 1/s

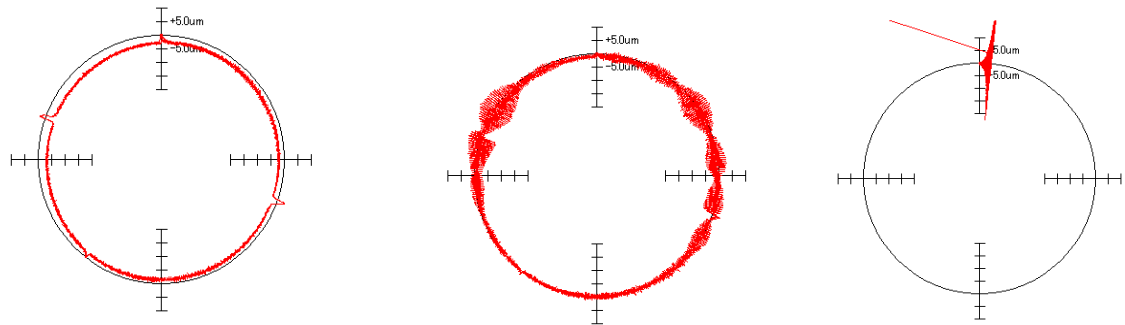
図 5.10 Z-B 補間時の運動誤差軌跡の測定結果 (機械 A)
($F=2000\text{mm/min}$, 1div: $5\mu\text{m}$)



(a) $Kp=70 \text{ 1/s}$ (b) $Kp=220 \text{ 1/s}$ (c) $Kp=230 \text{ 1/s}$

図 5.11 Z-C 補間時の運動誤差軌跡の測定結果 (機械 A)

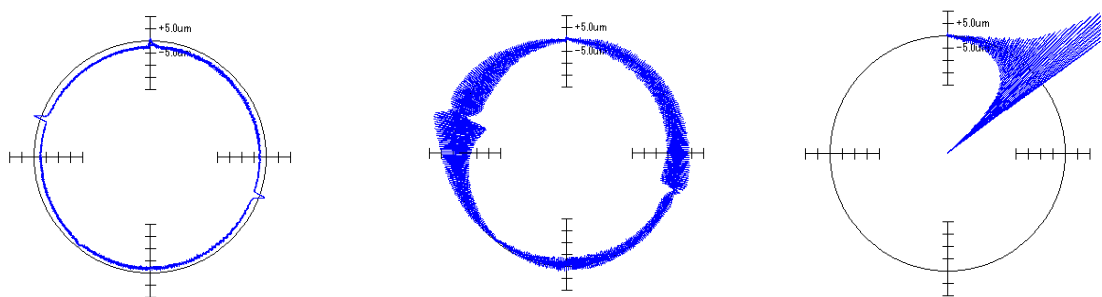
($F=2000\text{mm/min}$, $1\text{div}:5 \mu\text{m}$)



(a) $Kp=70 \text{ 1/s}$ (b) $Kp=135 \text{ 1/s}$ (c) $Kp=150 \text{ 1/s}$

図 5.12 Y-B 補間時の運動誤差軌跡の測定結果 (機械 A)

($F=2000\text{mm/min}$, $1\text{div}:5 \mu\text{m}$)



(a) $Kp=70 \text{ 1/s}$ (b) $Kp=120 \text{ 1/s}$ (c) $Kp=135 \text{ 1/s}$

図 5.13 Y-C 補間時の運動誤差軌跡の測定結果 (機械 A)

($F=2000\text{mm/min}$, $1\text{div}:5 \mu\text{m}$)

同様に機械 A の Y-B 軸間で円弧補間運動をさせた場合の運動誤差軌跡をサーボガイドを用いて測定した。各軸の位置ループゲインを図 5.12(c)に示すように $K_p=70$ 1/s から $K_p=210$ 1/s まで同様に变化させたところ、 $K_p=135$ 1/s でサーボ系が不安定になった。この場合には、後の図 5.14(e)に示すように直進軸の Y 軸が回転軸の B 軸よりも先に不安定になっていた。

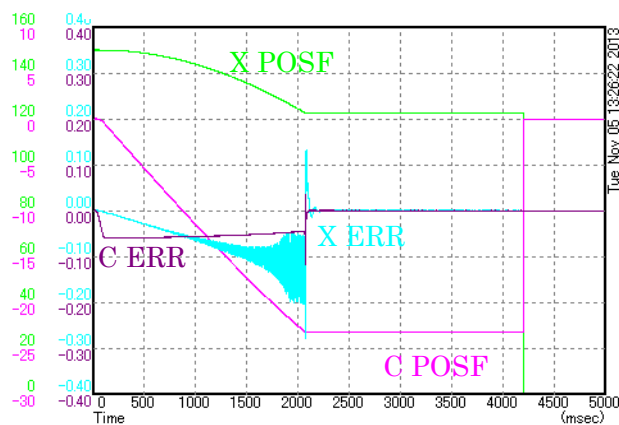
同様に機械 A の Y-C 軸間で円弧補間運動をさせた場合の運動誤差軌跡をサーボガイドを用いて測定した。各軸の位置ループゲインを図 5.13(b)に示すように $K_p=70$ 1/s から $K_p=210$ 1/s まで同様に变化させたところ、 $K_p=120$ 1/s でサーボ系が不安定になった。この場合には、後の図 5.14(f)に示すように直進軸の Y 軸が不安定になっていた。

以上をまとめると、表 5.3 のようになる。

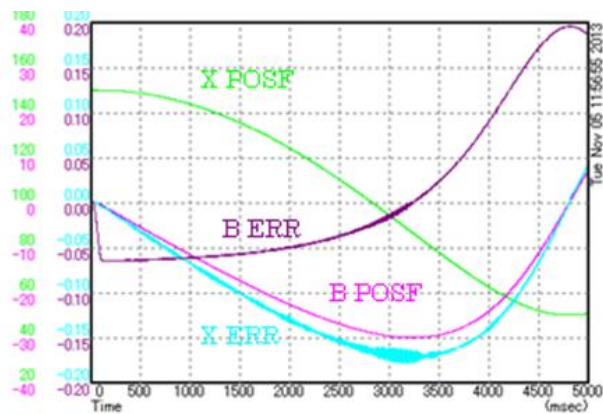
また、不安定時（発振時）の各軸の位置フィードバック信号をまとめて図 5.14(a)～(f)に示す。回転軸系に着目すると、C 軸に比べ軸中心のイナーシャが大きい B 軸が不安定であった。

表 5.3 機械 A の円弧補間時の際に不安定になった位置ループゲイン K_p と制御軸

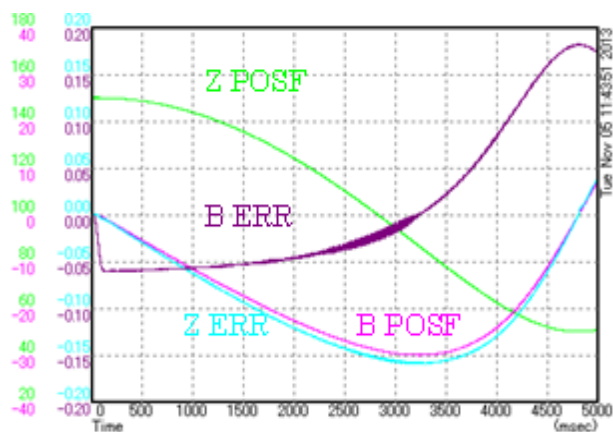
補間軸	K_p 1/s	不安定になった制御軸
X-C	210	X
X-B	195	X
Y-B	135	Y
Y-C	120	Y
Z-B	210	B
Z-C	230	Z



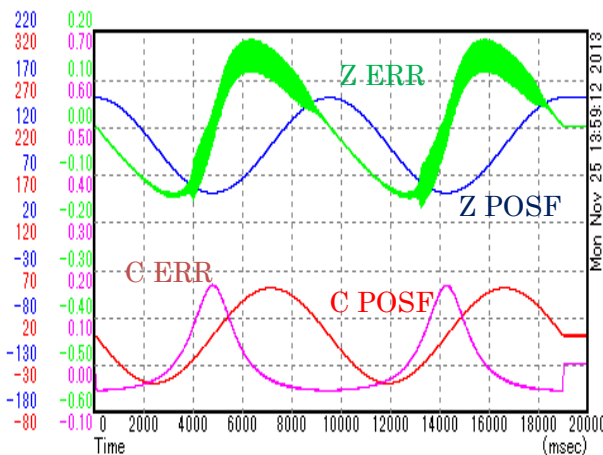
(a) X-C 軸 $Kp=210$ 1/s



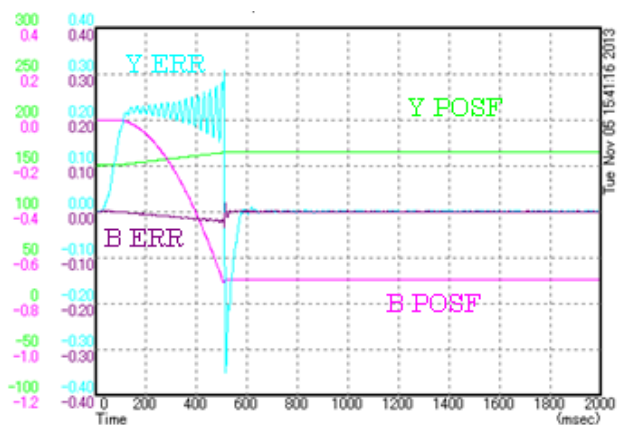
(b) X-B 軸 $Kp=195$ 1/s



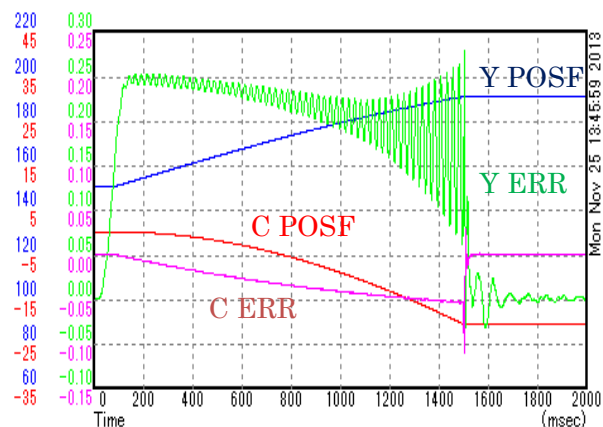
(c) Z-B 軸 $Kp=210$ 1/s



(d) Z-C 軸 $Kp=230$ 1/s



(e) Y-B 軸 $Kp=135$ 1/s



(f) Y-C 軸 $Kp=120$ 1/s

図 5.14 発振時の各軸の位置フィードバック (POSF) と位置偏差 (ERR) (機械 A)

5 軸制御 MC といえども、実加工においては旋回軸よりも直進軸の使用頻度の方がはるかに高い。また、DD モータ駆動すれば、旋回軸のサーボ特性は直進軸と同程度かそれ以上に向上できていることが表 5.3 より分かった。後述するように、フィードフォワード制御によっても、かなりの程度運動誤差を小さくできるが、DD モータ駆動すれば、これを使用せずとも運動誤差を小さくすることができるので、その利点は大きい。例えば、フィードフォワード補正では小さくすることが困難なスティックモーションによる突起を小さくするのにも有効である。

逆にいえば、旋回軸のサーボ性能が DD 化によって大きく向上したので、今後は直進軸のそれを一層向上させる必要性が明確になってきた。5 軸制御 MC では、全体構造をコンパクトにまとめるために、直進軸のストロークを短くせざるをえず、それを支えているキャリッジの長さも 3 軸制御の MC に比べて短く、摺動抵抗も小さいことがその原因の 1 つであると推定される。

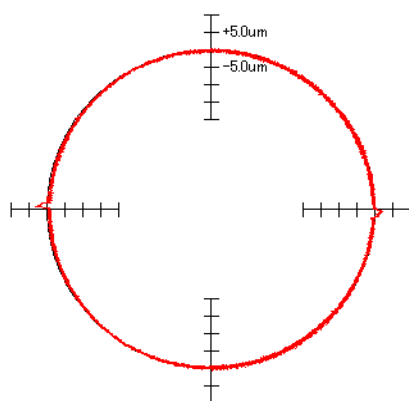


図 5.15 フィードフォワードゲイン $K_f=1.0$ とした場合の運動誤差軌跡
(機械 A ; X-C 軸の円弧補間, 円弧半径 $R=50$ (mm), 送り速度 $F=2000$ (mm/min),
 $K_p=195$ 1/s)

X-C 補間時の運動誤差を小さくすることは、フィードフォワード補正によっても行える。(他の場合も同じ。) 図 5.15 は機械 A において、フィードフォワードゲインを $K_f=1.0$ にした場合に測定された運動誤差軌跡である。直進軸 X に $3\mu\text{m}$ 、旋回軸 C に $1\mu\text{m}$ のスティックモーションは残っているが、それを除くと輪郭形状誤差はほぼ 0 になっている。

円弧補間時の大きな運動誤差の原因であるサーボの応答の遅れによる半径減少 ΔR は、

$$\Delta R = -\frac{1}{2R} \left(\frac{F}{K_p} \right)^2$$

で表される。図 5.1 の運動をさせた場合には、点 P_3 では点 P_1 の 2 倍の角速度 (F_c) で旋回軸が回転するので、点 P_3 での半径減少量は点 P_1 での値の 4 倍の量になる。また、点 P_1 は運

動の開始点でもあり，終了点でもあるので，速度が急加減速される．したがって，半径減少量が急速に変化するので，全体としての誤差パターンとしては一種の突起のようにも見える．また，位置ループゲイン K_p を大にすると，その2乗に反比例して，半径減少量は少なくなる．

以上の結果をまとめて，現場で使用するために必要な簡易的な軌跡パターンを図 5.16 に示す．直進軸と旋回軸のサーボ特性の不一致による運動誤差としては，半径減少（不一致が原因ではない），スティックモーション，高次山成分がしばしば現れる．さらに，特殊な変速機が使用されている場合には，その伝達誤差によって生じる運動誤差軌跡が現れることがある．これに加えて，旋回軸の回転に伴う固有の運動誤差が生じる．

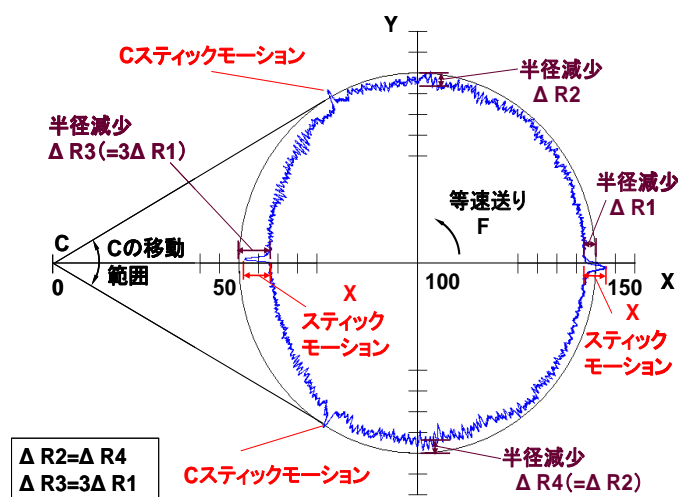


図 5.16 直進軸 X と旋回軸 C を同期運転した場合の運動誤差軌跡に現れる各種の軌跡パターン

機械 D の X-B 軸間で補間円運動をさせた場合にサーボガイドを用いて測定された運動誤差軌跡を図 5.17 に示す．各軸の位置ループゲインを $K_p=60$ 1/s から $K_p=105$ 1/s まで 4 段階に変化させたところ，同図(c)に示すように， $K_p=105$ 1/s という小さな値でサーボ系が不安定になった．この場合には，旋回軸の B 軸が不安定になっていた．

ローラギヤカム変速機を介在させている機械 D の第 1 旋回軸の B 軸ではこのように $K_{pA}=105$ 1/s という小さな値で，旋回軸サーボ系が発振した．ローラギヤカム装置は，装置内部で与圧を与えることで，伝達誤差を小さくしているが，やはりある程度のバックラッシュが存在する噛みあいもあるので，旋回軸の位置ループゲインを $K_p=105$ 1/s まで大きくすると，サーボ系が不安定になったものと思われる．このような場合には，DD モータ駆動を用いることによって，旋回軸のサーボ特性を大きく向上させることができることが分かった．

機械 D の C 軸は，前述のように，旋盤主軸として開発されたものをそのまま使っており，

速度制御は行われていないので、厳密には他の軸と性能の比較を行うことは意味がない。しかし、参考のために同様の測定を X-C 軸について行った。その測定結果を図 5.18 に示す。

同図(c)に見るように、 $Kp=180$ 1/s にしたところ、サーボ系が不安定になった。以上をまとめて、表 5.4 に示す。

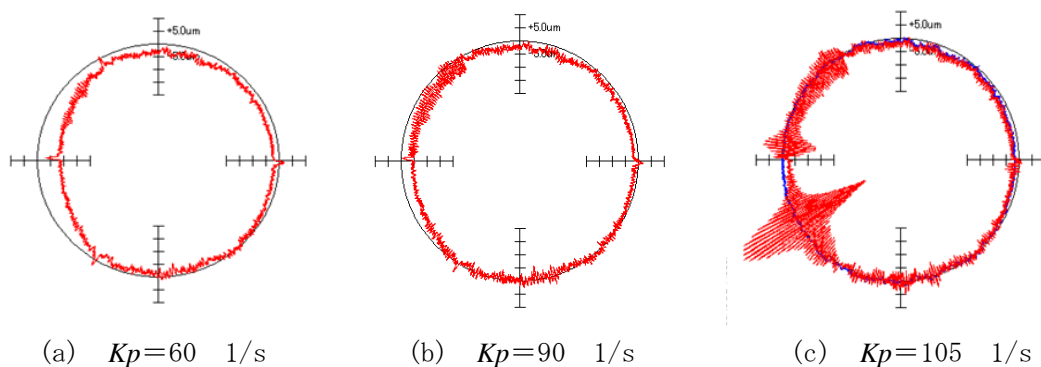


図 5.17 X-B 補間時の運動誤差軌跡の測定結果 (機械 D)
($F=2000\text{mm/min}$, $1\text{div}:5\mu\text{m}$)

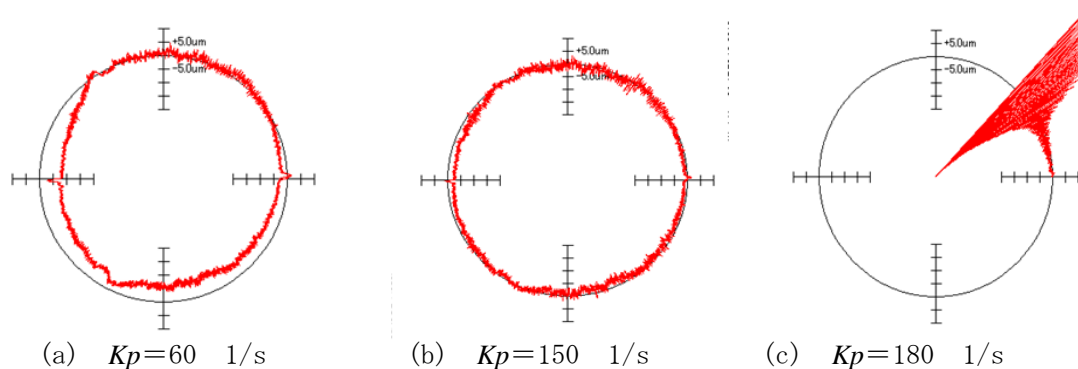


図 5.18 X-C 補間時の運動誤差軌跡の測定結果 (機械 D)
($F=2000\text{mm/min}$, $1\text{div}:5\mu\text{m}$)

表 5.4 機械 D の円弧補間時の発振周波数と制御軸

補間軸	Kp 1/s	不安定になった制御軸
X-B	105	B
X-C	180	X

以上の測定結果はすべてサーボガイドを用いて行った測定で得られたものであり、前述のように位置検出器における位置フィードバック値を用いたものである。これらの結果が実際の機械のテーブル（ワーク）と主軸（工具）の相対位置の差として測定された運動誤差とどの程度対応するかを検討するために DBB3 測定を行った結果と比較する。図 5.6 に示した DBB3 装置で測定された運動誤差軌跡を図 5.19(b) に示す。これをサーボガイドで測定

した運動誤差軌跡（図 5.19(a)）と比較すると、DBB3 法による測定結果では主としてサンプリングレートと検出器に内蔵されているフィルタのため高次山成分がカットされているのを除けば、両者はかなりよく一致しており、機械 D の場合には機械構造が原因する運動誤差はあまり大きくないことがわかる。したがって、機械 D の場合には、実用上測定が容易に行えるサーボガイドを用いた測定で十分であることが確かめられた。

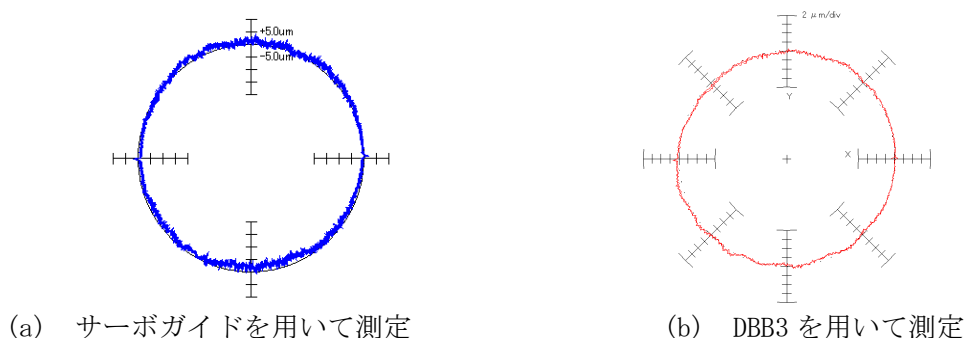


図 5.19 サーボガイドの DBB 法で測定した運動誤差軌跡の比較
(X-B 軸, 機械 D, X-A 軸同期, 送り速度 628mm/min, $K_p=60$ 1/s)

5. 5 結論

5 軸制御マシニングセンターを構成している旋回軸と直進軸のサーボ特性の差によって生じる円弧補間運動中の運動誤差軌跡をサーボガイドと DBB3 法を用いて測定した。そのために、2 つの軸の送り速度とサーボ系の位置フィードバックループのゲイン K_p を種々に変更して、それらが運動誤差に及ぼす影響を調べた。また、直進軸と旋回軸の組み合わせを種々に変えて、測定と解析を行った。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 測定を行った範囲内では、サーボガイドを用いて検出した位置フィードバック値を用いて、描いた運動誤差軌跡は、DBB3 法を用いて直接検出した運動誤差軌跡とは、高次山成分を除いて、非常によく対応していた。DBB3 法ではメカニカルフィルタのため、高次山成分がカットされるので、この結果は非常に妥当である。
- 2) 2 つの方法で測定した運動誤差軌跡が非常に良く似ていたことから、測定を行った 5 軸制御マシニングセンター（機械 D）に存在する機械系の運動誤差は比較的小さいことが分かった。
- 3) 機械 D の第 1 旋回軸であるローラギヤカム機構を用いて駆動している B 軸系では、位置ループゲインを $K_p=105$ 1/s にしたところ、サーボ系が不安定になった。
- 4) 機械 A の第 1 旋回軸である DD モータを用いて駆動している B 軸系単体では、位置ループゲインを $K_p=210$ 1/s と大きくした時に、サーボ系が不安定になった。この例が示すように、旋回軸のサーボ特性を向上させるためには、DD モータを用いることが非常に

有効である。

- 5) 機械 A の第 2 旋回軸である C 軸系では、位置ループゲインを $K_p=225 \text{ 1/s}$ と大きくした時に、サーボ系が不安定になった。B 軸系よりも K_p が大きくできたのは、C 軸の軸中心イナーシャが B 軸のそれよりもはるかに小さいことが原因している。
- 6) ステックモーションによる運動誤差を除けば、 $K_f=1.0$ のフィードフォワード補正を与えることによっても、運動誤差を非常に小さくすることができた。
- 7) 以上をまとめて、1 つの旋回軸と 1 つの直進軸で円弧補間運動させた場合に現れる典型的な軌跡パターンを図 5.16 のように作成した。

参考文献

- 5.1) 垣野義昭, 井原之敏, 中津善夫, NC 工作機械の運動精度に関する研究 (第3報) -サーボ系の性能が運動精度に及ぼす影響-, 精密工学会誌, Vol. 53, No. 8(1987), 1220-1225.
- 5.2) 垣野義昭, 井原之敏, 佐藤浩毅, 大坪寿, NC 工作機械の運動精度に関する研究 (第7報) -DBB 法による5軸制御工作機械の運動精度の測定-, 精密工学会誌, Vol. 60, No. 5(1994), 718-722.
- 5.3) 中川平三郎, 廣垣俊樹, 西村駒次, 垣野義昭, 喜田義宏, 大塚裕俊, 金型用焼入れ鋼のエンドミル加工に関する研究, 精密工学会誌, Vol. 67, No. 5(2001), 834-838.
- 5.4) 垣野義昭, 井原之敏, 清水敬一, 中川秀夫, 竹下虎男, 工作機械の運動精度に関する研究 (第8報) -スケールフィードバック値を利用した DBB 測定法の改善-, 精密工学会誌, Vol. 61, No. 3(1995), 430-434.
- 5.5) 赤井孝行, 廣垣俊樹, 小川圭二, 垣野義昭, 5 軸制御マシニングセンターの旋回軸と直進軸のサーボ特性の違いにより生じる誤差と複雑形状の加工性能の考察, 同志社大学理工学研究報告論文, Vol. 55, No. 2(2014), 134-144.
- 5.6) 赤井孝行, 脇坂宗生, 廣垣俊樹, 丸山優馬, 小川圭二, 垣野義昭, 5 軸制御マシニングセンターの直進軸と旋回軸のサーボ特性の違いによる運動誤差の考察, 砥粒加工学会学術講演会論文集 (ABTEC2013), (2013), 289-290.
- 5.7) 赤井孝行, 脇坂宗生, 廣垣俊樹, 小川圭二, 垣野義昭, 工作機械の直進軸と旋回軸のサーボ特性の違いによる運動誤差の考察, 砥粒加工学会誌, Vol. 59, No. 2(2015), 91-94.
- 5.8) ファナックパラメータ説明書 B-65270JA/07, (2007), 201.
- 5.9) 堤正臣, 多軸制御工作機械の機構及びサーボ系誤差を考慮した工作精度の予測とその同定, 科学研究費補助金 (基盤研究 (B) (2)) 研究成果報告書, Vol. 5(2007), 42-58.
- 5.10) 佐藤隆太, 横堀祐也, 堤正臣: 5軸制御マシニングセンタにおける直進軸と旋回軸の動的同期精度, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 1(2006), 73.
- 5.11) 垣野義昭, 井原之敏, 亀井明敏, 伊勢徹, NC 工作機械の運動精度に関する研究 (第1報) -DBB 法による運動誤差の測定と評価-, 精密工学会誌, Vol. 52, No. 7(1986), 1193.

第6章 旋回軸のアライメント誤差の補正

6.1 緒論

テーブル・オン・テーブル型の機械構造が5軸制御マシニングセンターにとっては第1旋回軸の可動範囲を大きく取れるとともに機械の操作性に優れているなどの利点をもつことに加えて、高い運動精度を得るのにも適していることが実測結果で確認され^{6.1)}、さらにシミュレーション解析によっても確認されている^{6.2)}。本章^{6.3)}においては、このように優れた構造のテーブル・オン・テーブル型の機械構造においても残存する可能性の高い旋回軸のアライメント誤差をNCで補正することによって一層の運動精度を向上させる方法について研究する。

5軸制御マシニングセンターは3つの直進軸に加えて、2つの旋回軸を有している。このように多数の制御軸を有する機械においては、旋回軸のアライメント誤差を組立時の調整によって無視しうるほど小さくすることは非常に難しい。なぜなら、機械本体の構造に第1旋回軸駆動系を取り付ける際に、アライメント誤差を小さくしようとして取付面の擦り合わせ調整をするが、そのために分解・組立・精度測定を何度も繰り返すことは非常に大きなコストアップ要因になり、実用上不可能である。また、アライメント誤差の正確な測定それ自身も第3章で述べたようになり面倒な作業である。さらに、測定に際して、DBB法^{6.4), 6.5), 6.6), 6.7), 6.8), 6.9)}を用いるとしても、組立を終え、NCがオンの状態にならないと運動誤差軌跡の測定、ひいてはアライメント誤差の測定はできない。アライメント誤差の大きさがある程度の精度で分かっても、この状態からアライメント誤差を小さくするように取付け面の摺り合わせを再調整することは、前述のようにコスト的に中大型機においては非常に困難である。

そこで、テーブル・オン・テーブル型の5軸制御マシニングセンターである機械Aを対象として、精密に組み立ててもなお残存する旋回軸のアライメント誤差をNCで補正することによって運動誤差を小さくすることを試みる。すなわち、組立が終了した段階で、NCをオンの状態にして、機械の運動誤差軌跡をDBB5法で測定し、それを基にして旋回軸のアライメント誤差を測定し、これを補正值として入力してNC補正を行い、運動時の旋回軸のアライメント誤差を小さくするもので、大変手数のかかる組立調整作業の短縮と機械の高精度化を図ろうとするものである。ただし、補正ができる範囲は、DBB装置の測定精度やセッティングの正確さによる誤差を勘案すると2~3 μ m/300mmが限度である。

また、本章においても旋回軸のアライメント誤差は、文献(6.1)、(6.2)と同様にオフセット誤差と1次の角度誤差しかもたないものとする。2次以上の角度誤差成分は小さいものとして無視する。逆に言えば、2次以上の角度誤差成分が大きい場合には、本方法をそれに適用できるように改良する必要がある。

本章の第 6.2 節では、アライメント誤差の NC による補正の方法について検討する。第 6.3 節では、旋回軸のアライメント誤差の測定に用いる方法について考察する。第 6.4 節では、これらの測定法を用いて測定された運動誤差の測定結果と補正結果について考察する。さらに、補正に要する作業時間を求め、それが実用に耐えられる時間であるか、検討する。第 6.5 節は、以上をまとめた本章の結論である。

6. 2 旋回軸のアライメント誤差の補正実験の概要

旋回軸のアライメント誤差を正確に補正するためには、旋回軸のアライメント誤差の測定値が正しく得られていることと、測定を繰り返した場合の繰り返しの誤差（ランダム誤差）が小さいことが前提となる。アライメント誤差の測定値の正確さの程度は、旋回軸の旋回角度範囲の影響を強く受けることが文献(6.2)で確かめられている。そこで、本研究では補正実験の対象機として図 6.1 に示すように旋回角度範囲の大きく取れるテーブル・オン・テーブル型の 5 軸制御マシニングセンターである機械 A を選んだ。

また、前述のように旋回軸のアライメント誤差は全領域で一様と仮定する（図 6.2 参照）。すなわち、図 6.2 のように 0 次成分であるオフセット誤差と 1 次の角度誤差成分のみが存在し、2 次以上の角度誤差成分はないものと仮定する。第 2 旋回軸（本機の場合は C 軸）のアライメント誤差は当然のことながら第 1 旋回軸（B 軸）の影響を受ける。通常、第 2 旋回軸は 360° の旋回が可能な構造となっていることが多い。したがって、全体の運動精度に対する影響としては通常は第 1 旋回軸である B 軸のアライメント誤差の方が第 2 旋回軸のそれよりも大きい。また、構造の制約から定まる測定系の干渉も一般的には第 1 旋回軸の方が大きい。

NC 補正は 5 軸制御マシニングセンター用の CNC に内蔵されている補正機能を使用して行う。すなわち、測定されたオフセット誤差については、NC が持っている原点補正機能を用いて補正する。角度誤差については、B 軸をその誤差量だけ予め真直度補正機能を用いて補正する。

補正值を入力した後、回転測定法を用いて、Y 軸の 3 ヶ所の位置で、ラジアル運動誤差軌跡を測定し、その回転中心を読み取って、Y 軸の各位置にプロットして、補正後のアライメント誤差を求め、補正前の値と比較する。

5 軸制御マシニングセンターに限らず、マシニングセンターという 3 次元空間を移動する機械の運動誤差が、全移動空間において測定できれば、各点の誤差ベクトルと符合が異なる補正ベクトルを指令値に加算することによって、補正する方法が一見汎用性があり、有効のように見える。しかし、各点が 6 自由度の誤差を持っているので、姿勢変化が存在する場合には、この方法では位置の誤差（3 自由度）は補正できるが、姿勢変化量（3 自由度）の補正はできない。したがって、運動誤差の原因別に 1 つずつ小さくする方法（＝本章で提案する方法）の方が一見迂遠に見えようとも正攻法であると言える^{6.9), 6.10), 6.11)}。

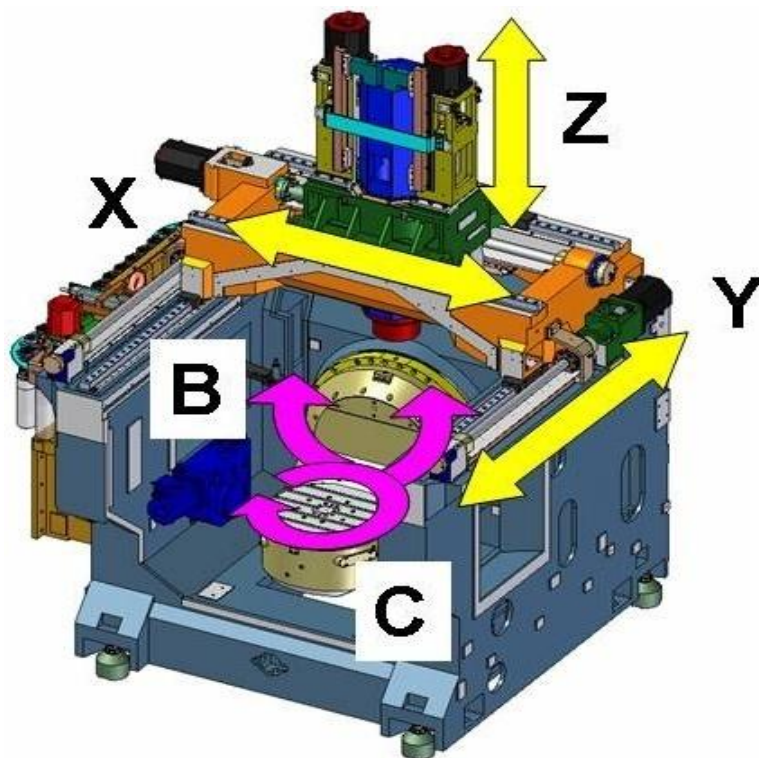
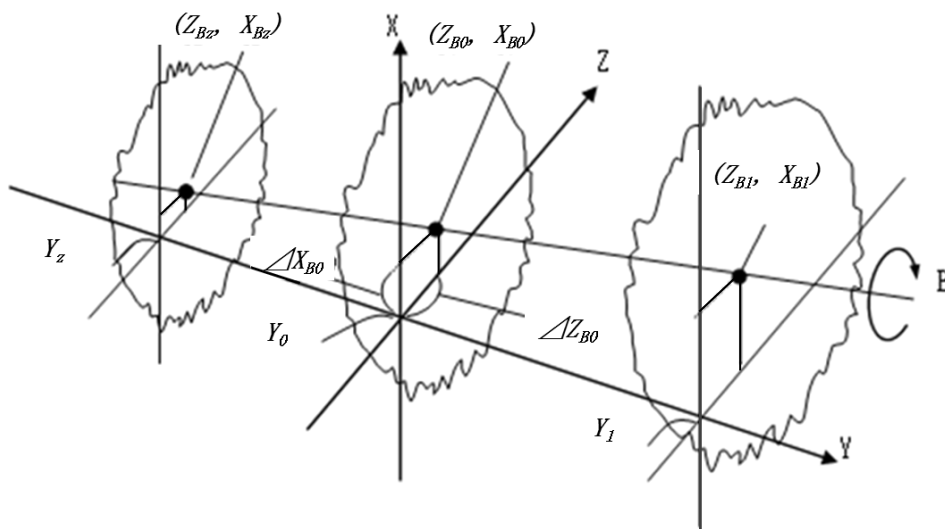


図 6.1 テーブル・オン・テーブル型の 5 軸制御マシニングセンター機械 A の概要



オフセット誤差円の中心座標: (Z_{B0}, X_{B0})

オフセット誤差 : $\Delta Z_{B0} = Z_{B0}, \Delta X_{B0} = X_{B0}$

角度誤差 : $\Delta B_z = (Z_{B1} - Z_{B2}) / (Y_1 - Y_2)$

図 6.2 旋回軸のオフセット誤差と角度誤差の定義

6. 3 測定装置と方法

6. 3. 1 旋回軸のアライメント誤差の測定法

本研究で使用する旋回軸のアライメント誤差の測定法の基礎は，垣野^(6.7)，坂本^(6.8)，齋藤^(6.9)らにより既に先行して研究されており，本章で用いる測定法は第3章での測定で用いたものと同じである．DBB5法を用いた5軸制御マシニングセンターの運動誤差の測定法全般については文献(6.1)に詳しく，かつ第3章で詳しく述べてきたので，ここでは省略する．DBB5法を用いて旋回軸のアライメント誤差を測定する方法としては，測定に時間を要するが，測定精度の高い回転測定法を用いることとした．

6. 3. 2 補正実験の対象機

図6.1に示したテーブル・オン・テーブル型の5軸制御マシニングセンター（機械A）をアライメント誤差の測定と補正の対象機として使用する．その主な仕様を表6.1に再掲して示す．また，この機械の第1旋回軸であるB軸の主な仕様を表6.2に示す．

表 6.1 機械 A の主な仕様

軸移動量	X, Y, Z 軸 : 730, 510, 510mm B 軸 : $-180^{\circ} \sim +160^{\circ}$ C 軸 : 360°
テーブル作業面の大きさ	$\Phi 500\text{mm}$
主軸最高回転速度	12,000 [20,000] min^{-1}
早送り速度	X, Y 軸 : 50 m/min Z 軸 : 40 m/min B 軸 : 50 min^{-1} C 軸 : 120 [1200] min^{-1}
工具収納本数	31 [61, 91, 121, 181] 本
ツールシャンク形式	BT-40 [HAS-A63]

表 6.2 第1旋回軸（B軸）の構成

旋回範囲	$-180^{\circ} \sim +160^{\circ}$
旋回速度	50/min
駆動方式	ダイレクトドライブ（DD）方式
支持軸受け	クロスローラー軸受け

6. 4 補正実験の結果と考察

第3章で行った機械AのB軸のアライメント誤差を回転測定法で測定した結果を図6.3に再掲する。これは図3.20と同じものである。これより、B軸にはアライメント誤差として、次のものが存在することが分かった。

- ・オフセット誤差 (Y_0 において)

$$\triangle R_{ZB0} = 12.5 \mu\text{m}$$

$$\triangle R_{XB0} = 1.5 \mu\text{m}$$

- ・角度誤差

$$\triangle B_z = 17 \mu\text{m}/300\text{mm}$$

$$\triangle B_x = 2 \mu\text{m}/300\text{mm}$$

これより、旋回軸BのX軸方向のオフセット誤差は $1.5 \mu\text{m}$ 、角度誤差は $2 \mu\text{m}/300\text{mm}$ と、ともに非常に小さいので、これらについては補正は行わなかった。Z軸方向のオフセット誤差は $12.5 \mu\text{m}$ 、角度誤差は $17 \mu\text{m}/300\text{mm}$ とかなり大きいので、これらについて補正実験を行うこととした。

オフセット誤差については、Z軸方向の原点位置を $-12.5 \mu\text{m}$ だけ移動させる。角度誤差については、B軸のZ軸方向への傾きを、CNCの補正機能の1つである真直度補正を用いて $-17 \mu\text{m}/300\text{mm}$ だけ与える。このように補正值を入力した後、再度回転測定法を用いて Y_1 、 Y_2 、 Y_3 の位置で、補正前と同様にラジアル運動誤差軌跡を測定した。

その測定結果の一例を図6.4に示す。3つの断面位置で得られた補正後の運動誤差軌跡は中心点が移動している以外は補正前の運動誤差軌跡とほとんど変わっていない。これらの補正後の測定結果から読み取った運動誤差軌跡の中心点を読み取り、図6.3の上書き加えたものを図6.5に示す。この図から読み取った補正後のアライメント誤差の大きさは次のようになった。

- ・オフセット誤差 (Y_0 において)

$$\triangle R_{ZB0} = 1.5 \mu\text{m}$$

- ・角度誤差

$$\triangle B_z = 3 \mu\text{m}/300\text{mm}$$

補正後のアライメント誤差は、補正前と比較して、無視しうるほど小さくなったことが分かる。

これらのアライメント誤差についての一連の測定と補正に要した時間を表6.3に示す。3つの測定法の中ではアキシヤル方向同期測定法が測定のためのセットアップ変えの回数が少なく済むので、測定時間が最も短くなっていることが分かる。専用の測定ジグを用いたり、測定手順に習熟すればこれらの作業時間は比較的容易に半減できるものと考えられる。

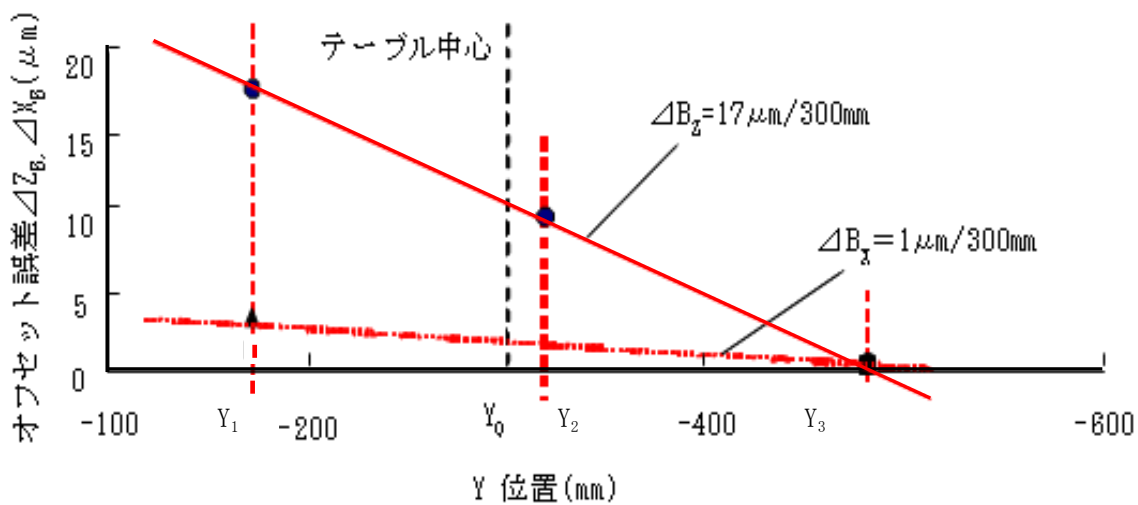


図 6.3 機械 A の B 軸について回転測定法で測定されたアライメント誤差

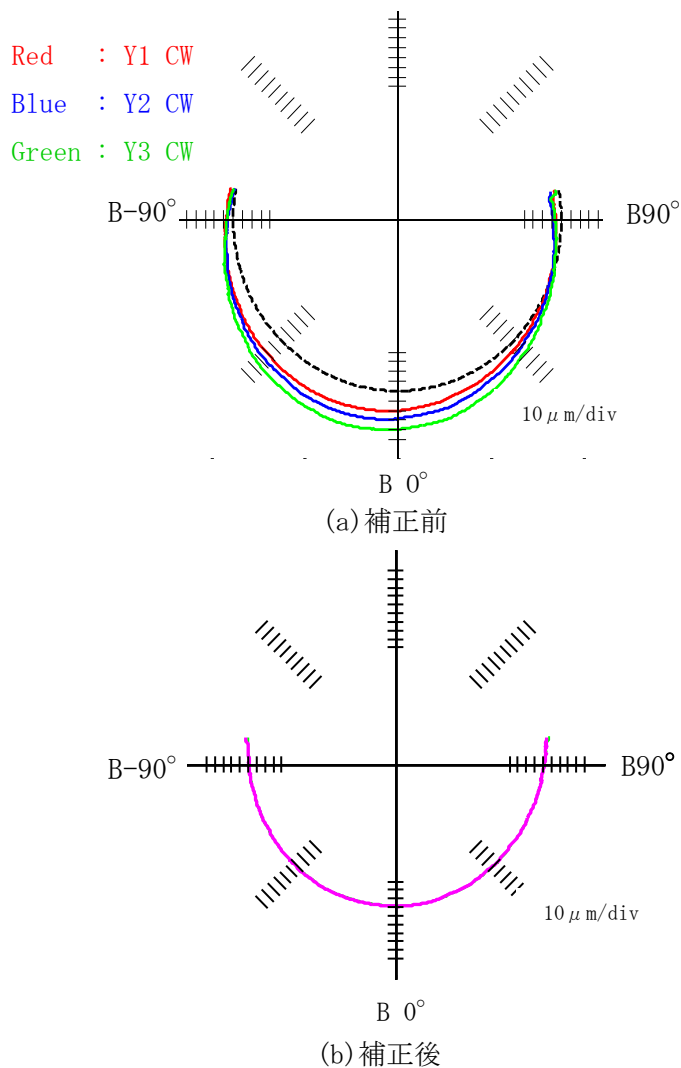


図 6.4 測定された B 軸回転時のラジアル回転誤差の軌跡

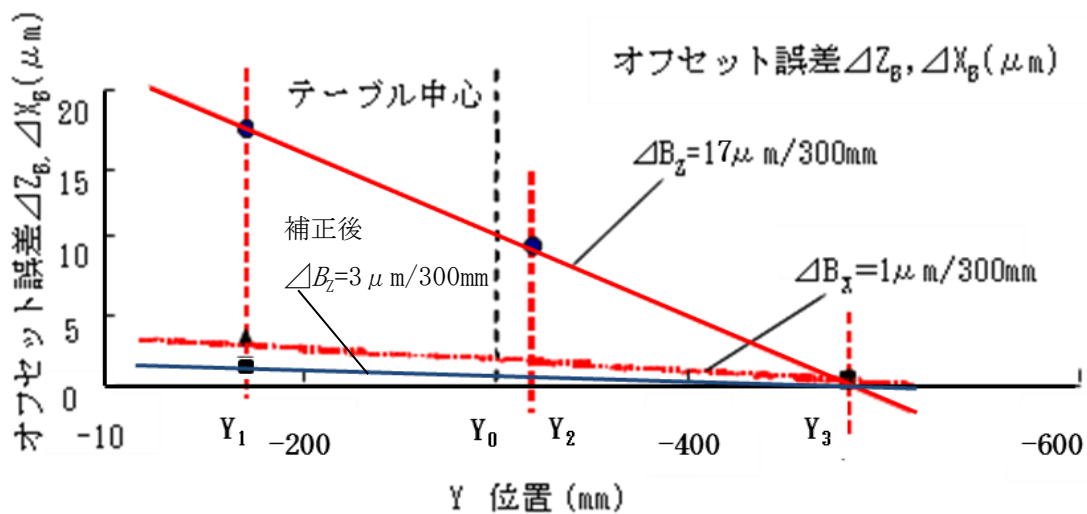


図 6.5 3つのY軸断面で回転測定法を用いて測定された補正後のB軸のアライメント誤差

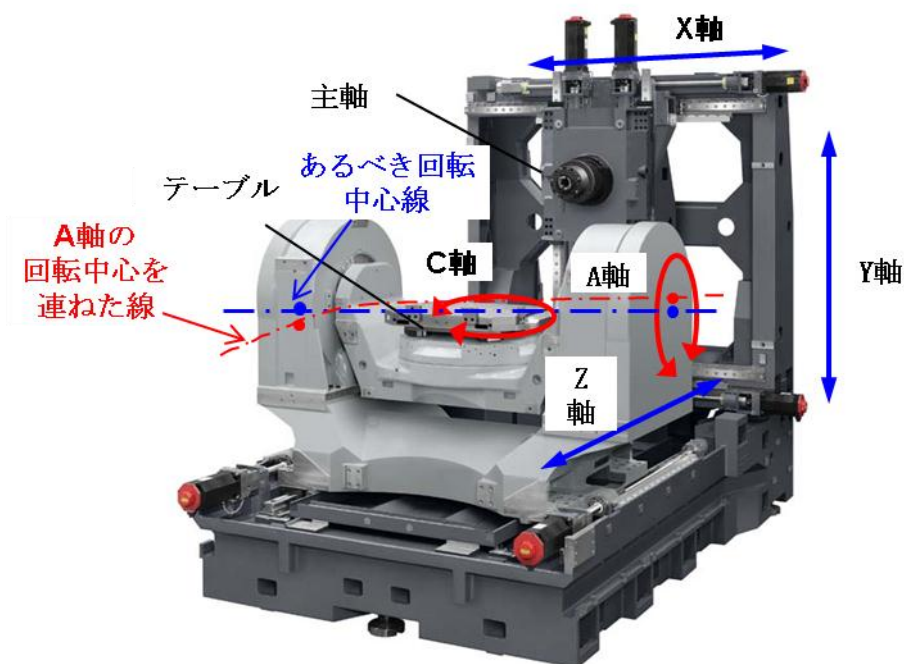


図 6.6 トラニオン型の5軸制御マシニングセンターの第1旋回軸(A)に存在するアライメント誤差

この程度の作業時間であれば、工作機械メーカーにとってもそう大きな負担にならないので、このようなアライメント誤差の補正法は有用であると判断される。ただし、前述のように補正の効果は運動誤差の再現性の範囲内に限定されることは言うまでもない。補正によってより一層のアライメント誤差の低減を図るためには双方向再現性誤差を小さくする必要はある。

テーブル・オン・テーブル型の本機の場合は、6.2 節で述べたような非常に簡単な方法でアライメント誤差の補正ができるが、トラニオン型の機械の場合には、非常に面倒である。すなわち、アライメント誤差の内、角度誤差が大きい場合には、図 6.6 のようになっているので、旋回角度の補正を数値を入れるだけでは補正できず、例えば A 軸を支持している両端の軸受けの位置の再調整が必要になり、その作業は非常に面倒である。

表 6.3 旋回軸のアライメント誤差の測定法による測定時間の相違

測定方法	補正前測定		計算時間と 処理時間	補正後の再測定		合計時間 min
	準備時間 (回数)	測定時間 (回数)		準備時間 min	再測定時間 min	
回転測定法	80 min (4 回)	30 min (4 回)	30 min	60 min (3 回)	30 min (4 回)	230 min
アキシャル方向同期測定法	20 min	10 min	20 min	—	10 min	60 min
ラジアル方向同期測定法	40 min (2 回)	20 min (2 回)	20 min	20 min (1 回)	20 min (2 回)	120 min

6. 5 結論

本章では機械 A の第 1 旋回軸である B 軸について、回転測定法で測定されたアライメント誤差を NC で補正する方法の有効性について研究した。その結果、次のような結論が得られた。

- 1) アライメント誤差の内、オフセット誤差については、NC が持っている原点補正機能を用いて、原点位置を補正し、角度誤差については、B 軸にだけ予め逆方向に真直度補正機能を用いて補正するという簡単な方法で補正実験を行った。
- 2) 補正值を入力した後に、アライメント誤差を再測定したところ、図 6.5 に示すようにオフセット誤差、角度誤差ともに非常に小さくすることができた。
- 3) 回転測定法を用いてアライメント誤差を測定し、補正值を計算して、入力し、再測定して補正の有効性を確認するのに要した作業時間は約 4 時間であった。有効な測定専用のジグを用いれば、これらの測定、補正に要する時間は半減できるので、アライメント誤差の補正法は非常に有効と判断される。
- 4) テーブル・オン・テーブル型の本機の場合には、上述のように角度誤差の補正も容易に行えるが、トラニオン型の機械の場合には角度誤差が大きいと、旋回軸の支持軸受けの位置の再調整が必要になり、非常に面倒である。

参考文献

- 6.1) 高山直士, 太田秀人, 植田健介, 竹内芳美, “5 軸制御マシニングセンタの精度向上に関する研究 (トラニオン型とテーブル・オン・テーブル型の運動精度の比較)”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 76, No. 772 (2010), 3261-3267.
- 6.2) 高山直士, 太田秀人, 植田健介, 竹内芳美, “5 軸制御マシニングセンタの精度向上に関する研究 (旋回角度がアライメント誤差の推定精度に及ぼす影響)”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 77, No. 777 (2011), 542-548.
- 6.3) 高山直士, 赤井孝行, 脇坂宗生, 竹内芳美, “5 軸制御マシニングセンターの精度向上に関する研究 (旋回軸のアライメント誤差の測定と補正)”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 77, No. 782 (2011), 3951-3960.
- 6.4) Kakino, Y., Ibaraki, S., Ogawa, K. and Ota, H., “Measurement of Motion Accuracies of Five-Axis Machine Tools by Using the Double Ball Bar Method DBB5”, Proc. of International Symposium on Flexible Automation 2008, (2008), JS006, 1-4.
- 6.5) Akai, T., Ueda, K., Ogawa, K. and Kakino, Y., “The Measurements of Motion Accuracy of 5 Axis Machining Center- Motion Accuracy of Simultaneous 5 Axis Control”, Proc. of International Symposium on Flexible Automation 2010, (2010), JPS2479, 1-4.
- 6.6) 茨木創一, 垣野義昭, 赤井孝行, 高山直士, 山路伊和夫, 小川圭二, “ボールバー測定を用いた 5 軸制御加工機の運動誤差原因の診断 (第 1 報) -誤差成分の分類と改良型ボールバー装置 (DBB5) の開発-”, 精密工学会誌, Vol. 76, No. 3 (2009), 333-337.
- 6.7) 垣野義昭, 井原之敏, 佐藤浩毅, 大坪寿, “NC 工作機械の運動精度に関する研究 (第 7 報) -DBB による 5 軸制御工作機械の運動精度の測定-”, 精密学会誌 Vol. 60, No. 5 (1994), 718-722.
- 6.8) 坂本重彦, 稲崎一郎, 塚本穎彦, 市来崎哲雄, “ボールバーによる五軸マシニングセンタの組立誤差同定法”, 日本機械学会論文集 (C 編) Vol. 63, No. 605 (1997-1), 262-267.
- 6.9) 齋藤明德, 堤正臣, 牛久健太郎, “5 軸制御マシニングセンタのキャリブレーション方法に関する研究 (第 2 報) -同時 3 軸制御運動を用いた位置偏差および角度偏差の推定-”, 精密工学会誌 Vol. 69, No. 2 (2003), 268-273.
- 6.10) 登根慎太郎, 加藤教之, 堤正臣, 幾何誤差の測定及び補正による 5 軸制御マシニングセンタの工具経路精度の向上, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 78, No. 794 (2012-10), 227-238.
- 6.11) S. Ibaraki, C. Oyama, H. Otsubo, Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by static R-test, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 51 (2011), 190-200.

第7章 同時5軸制御による加工性能と同時3軸 制御の比較

7.1 緒論

5軸制御マシニングセンター(以下, 5軸制御MC)の加工性能は最近非常に向上してきた。中でも最新のテーブル・オン・テーブル型の5軸制御MCにおいては, 運動精度が非常に優れたものが出現してきた^{7.1)}。例えば, 直進軸のXY, YZ, ZX平面についてDBB5法で測定した運動誤差は $4\mu\text{m}$ 以下と高精度な立形MCのそれとほとんど変わらないものさえ出現してきた^{7.2), 7.3)}。また, 旋回2軸の運動精度も非常によくなり, そのアライメント誤差の1つである角度誤差を $2\sim 3\mu\text{m}/300\text{mm}$ 以下にすることができるようになってきた^{7.4), 7.5), 7.6)}。オフセット誤差は一層容易に測定と補正ができる。その一方で実際に加工現象の特徴を考慮しながら, 最新の5軸制御MCを用いた場合の加工能率, 実加工された工作物の表面品位や加工精度を考慮した報告はほとんどなされていないようである^{7.7), 7.8), 7.9), 7.10)}。

そこで本章^{7.11)}では, 前章までの成果で示した様に優れた運動精度を持つテーブル・オン・テーブル型の5軸制御MCを用いて, 複雑さの異なる種々の円錐台形状をモチーフにしたワークを加工し, 従来の立形MCを用いて直進3軸だけで加工した場合に比べて, どの程度の加工能率と加工精度が得られるかを比較することとした。5軸制御MCは直進3軸に加えて, 旋回2軸を有しているので, 立形MCよりも当然高価である。故にその価格の差に相応した性能を発揮せねばならない。

ただし, 加工対象とするワーク形状は, 立形MCでも加工可能な形状に限定し, 原則として立形MCの直進3軸を用いてボールエンドミル加工によって得られた加工精度と同程度の精度を持つワークが旋回軸も併せ用いることによって, どの程度能率よく加工できるかを中心にして検討することとした。

7.2 加工対象とする部品形状

図7.1に示す円錐台形状とその形状をモチーフにした複雑さの異なる2種類の形状(合計3種類)のワークの仕上げ加工を対象とすることとした。これらのワークはすべてアンダーカット部のない形状としている。アンダーカット部があると, 立形MCでは特殊な取り付けジグや旋回軸がないと加工できず, 比較することが困難であるので, 対象としない。また一般に, エンドミル加工現象において, 使用する工具の突き出し長さ L と工具直径 D の比(L/D)が重要なパラメータになる。そこで L/D に着目しながら考察を進める。

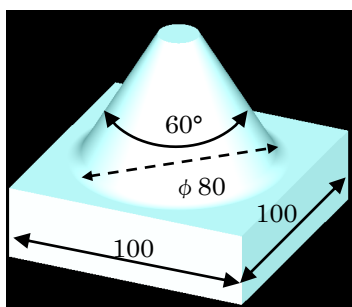
7. 2. 1 コア円錐台形状ワーク

図 7.1(a)に示した円錐台形状のコア状のワークをボールエンドミルで加工する。この軸中心に直交する 3ヶ所の断面の真円度プロファイルを測定して比較する。この形状の場合は直進 3 軸のみを用いる場合（ケース 1）と、旋回軸 C も用いて加工する場合（ケース 2）で切削条件をまったく同一にできるので、機械の運動誤差の影響のみを抽出することができる。

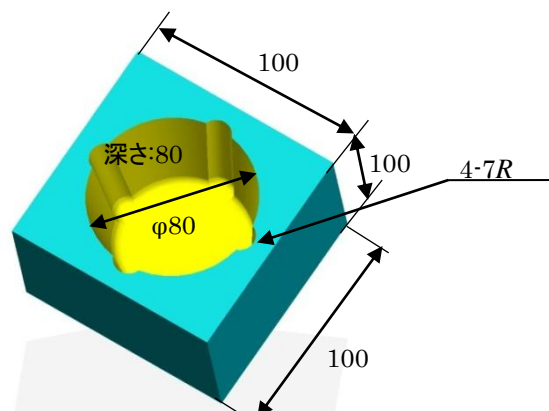
また、この測定は円形断面について行われるため、加工精度の評価が比較的簡単に行える。これは直進 2 軸の円弧補間運動の精度と旋回軸の回転精度の比較になる。また、稜線の仕上げ面プロファイルを測定して、仕上げ面あらさと真直度を比較する。

7. 2. 2 溝付キャビティ円錐台形状ワーク

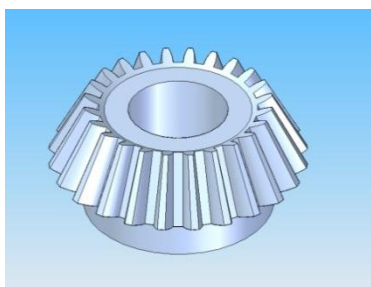
図 7.1(b)に示した溝付キャビティ円錐台形状のワークをボールエンドミルで加工する。加工精度と仕上げ面あらさは図 7.1(a)の円錐台形状ワークに準じた方法で測定し、評価する。このワーク形状も、直進軸のみの同時 3 軸制御加工の場合（ケース 1）と旋回軸を用いる場合（ケース 2）で加工が可能である。しかし、（ケース 1）の場合は、突き出し長さが例えば $L/D=4$ と短い場合は工具のアクセス性が悪いので、 $L/D=7$ と大にせねばならず、加工能率と加工精度が悪くなる。それがどの程度の差になるかを検討する。そのため、半径 7 mm の円形断面溝のものを対象とする。



(a) 円錐台形状ワーク



(b) 溝付キャビティ円錐台ワーク



(c) ストレートベベルギヤ形状ワーク

歯車の種類	ストレートベベルギヤ
モジュール	5
歯数	17 枚
歯幅	38mm
平均円すい距離	121.5mm
ピッチ円すい角	25.278 度
材料	プリハードン鋼材

図 7.1 加工対象としたワーク形状

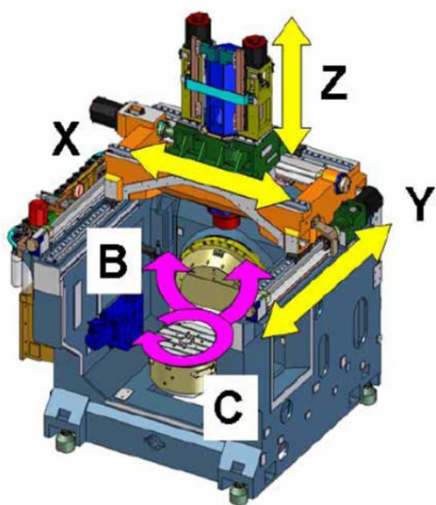
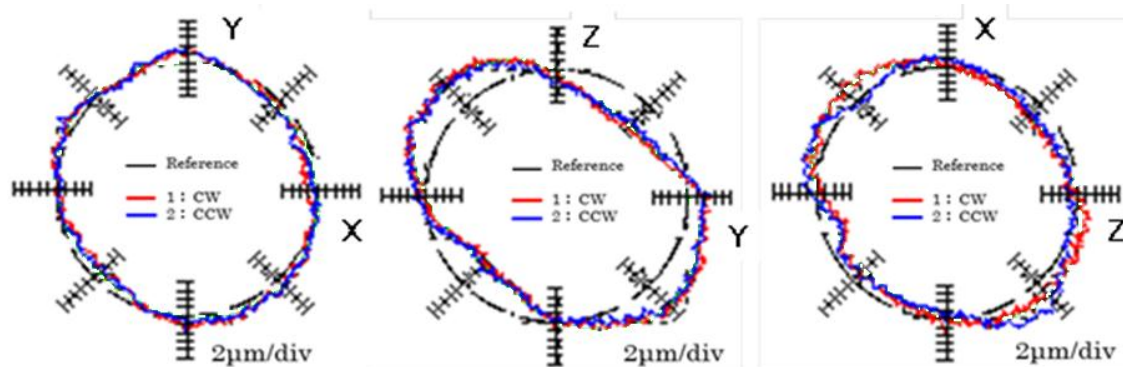


図 7.2 テーブル・オン・テーブル型
5 軸制御 MC の概略構造 (機械 A)

表 7.1 テーブル・オン・テーブル型
5 軸制御 MC の仕様 (機械 A)

Workpiece size [mm]	φ700×450
Workpiece weight [kg]	300
Stroke X [mm]	730
Y [mm]	510
Z [mm]	510
Stroke of 1st rotating axis B[deg.]	-160 ~ +180
Stroke of 2nd rotating axis C [deg.]	360
Feed rate X [mm/min]	50
Y [mm/min]	50
Z [mm/min]	40
B [min ⁻¹]	50
C [min ⁻¹]	120
Spindle speed [min ⁻¹]	12000



(a) XY平面

(b) YZ平面

(c) ZX平面

図 7.3 直進 2 軸で円弧補間運動をさせた時に測定された運動誤差軌跡

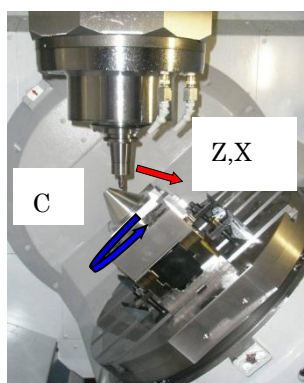
7. 2. 3 ベベルギヤ形状ワーク

大型のスパイラルベベルギヤは、従来は Klingernberg 社製の専用機を用いて加工されてきたが、最近では 5 軸制御 MC とスクエアエンドミルを用いても加工できるようになってきた^{7.5), 7.6)}。本研究では、高精度・高能率加工が要求される複雑な形状の部品として、これがどの程度達成されているかを検討することとした。ただし、簡易化のため小型のストレートベベルギヤの加工を対象とする。

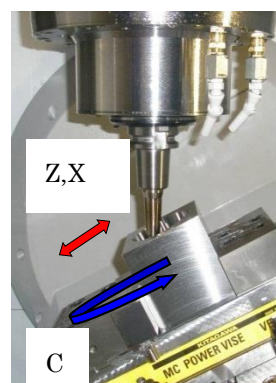
図 7.1(c)に示したベベルギヤ形状ワークを直進 3 軸のみを用いてボールエンドミルで加工する場合 (=立形 MC で加工する場合に該当, (ケース 1)) と、旋回軸と直進軸を用いてスクエアエンドミルの外周刃で加工する場合 (ケース 2) の加工能率と加工精度を比較する。ボールエンドミルで加工する場合は原則として等高線加工を行う。

エンドミル工具を用いて比較的硬い材料を加工する場合はびびり振動を誘発しやすく、それを避けるために切削条件は緩くせざるをえない。またびびり振動が生じていない場合でも、切削抵抗によって工具とその支持系が弾性変形しやすいので、加工形状誤差が増大する恐れがある。

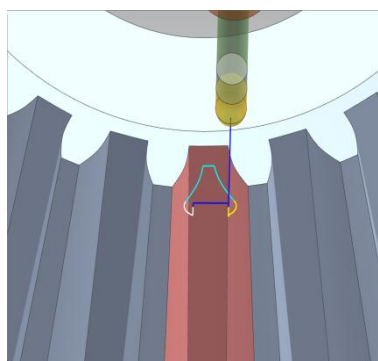
以上の点を考えると、かなり良い加工形状精度や仕上げ面あらかさが要求される仕上げ加工の場合には必ずしもスクエアエンドミルを用いた方がはるかに高能率で加工できるとは限らない。そこで、どの程度の加工能率の向上が図れるかをこのモデルワークを加工する場合について検討することとした。



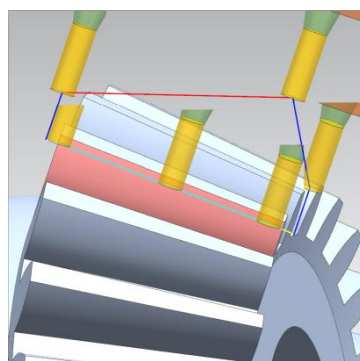
(a) 円錐台形状ワーク



(b) 溝付キャビティ円錐台形状ワーク



(ケース 1) ボールエンドミルによる
同時 3 軸制御加工



(ケース 2) スクエアエンドミルによる
同時 5 軸制御加工

(c) ストレートベベルギヤ形状ワーク

Red line: rapid feed
 Blue line: rapid approach/retract
 Yellow line: cutting feed approach
 Light blue line: cutting feed
 White line: cutting feed retract
 B and C axis are slightly rotating during cutting feed motion shown by blue line.

図 7.4 回転軸を用いた加工における運動の与え方

7. 3 加工機械と加工条件

7. 3. 1 加工機械

最新型のテーブル・オン・テーブル型の5軸制御MC(前章までの機械A)を用いて図7.1に示した3種類のワークを加工し、加工精度と加工能率を比較する。その機械の概略の構造を図7.2に示し、その主な仕様を表7.1に示す。

DBB5法で測定した本機の直進軸の運動誤差軌跡の一例を図7.3に示す。これらの図から明らかなように本機の直進3軸については高精度な立形MCの運動精度と同程度の運動精度を有している。

旋回軸の運動精度には全体構造と駆動機構や軸受けの違いがかなり大きく影響する。たとえば、アライメント誤差を小さくできるテーブル・オン・テーブル型の機械ではアライメント誤差の1つである角度誤差を $2\sim 3\mu\text{m}/300\text{mm}$ と非常に小さくし易い。これら各種の運動誤差軌跡の測定と補正については前章を参照されたい。

7. 3. 2 加工条件

(1) 加工試験1(コア円錐台形状ワーク)

図7.1(a)に示したコア円錐台形状ワークを直進3軸のみを用いてボールエンドミル加工する場合(=立形MCで加工する場合に該当、(ケース1))と、旋回軸と直進軸を用いてボールエンドミル加工する場合(ケース2)の加工能率と加工精度を比較する。2つの場合とも等高線加工を行う。旋回軸も用いて加工する場合の運動の与え方を図7.4(a)に示す。粗加工はどちらの方法で加工しても所要時間はあまり変わらないので、仕上げ加工についてのみ比較する。その加工条件は次のとおりである。

直進3軸で加工する場合(旋回軸を用いる場合も同じ)

ボールエンドミル: TiAlNコーティング超硬合金製 2枚刃

直径: 10mm

ワーク材質: プリハードン鋼 NAK55 (40HRC)

突き出し長さ: 40mm ($L/D=4$)

主軸回転数: 10000min^{-1}

送り速度: 1000mm/min (これと等しい周速をC軸回転で与える)

加工方法: 等高線ヘリカル加工

加工ピッチ: 0.15mm (カスパ高さ= $0.5\mu\text{m}$)

取代: 0.1mm

(2) 加工試験2(溝付キャビティ円錐台形状ワーク)

図7.1(b)に示した溝付キャビティ円錐台形状を直進3軸のみを用いてボールエンドミル加工する場合(=立形MCで加工する場合に該当、(ケース1))と、旋回軸と直進軸を用い

てボールエンドミル加工する場合（ケース 2）の加工能率と加工精度を比較する。（ケース 2）の場合の加工に用いる運動の与え方を図 7.4(b)に示す。

直進 3 軸のみで加工する場合（ケース 1）の切削条件は次のとおりである。

ボールエンドミル： TiAlN コーティング超硬合金製 2 枚刃
直径 : 10mm
ワーク材質 : プリハードン鋼 NAK55 (40HRC)
突き出し長さ : 70mm ($L/D=7$)
主軸回転数 : 6000min^{-1}
送り速度 : 1200mm/min
加工方法 : 等高線ヘリカル加工
加工ピッチ : 0.15mm (カスプ高さ=0.5 μm)
取代 : 0.1mm

旋回軸を併用して加工する場合（ケース 2）の切削条件は次のとおりである。

突き出し長さ : 40mm ($L/D=4$)
送り速度 : 2000mm/min
その他は直進 3 軸で加工する場合と同じ。

(3) 加工試験 3（ベベルギヤ形状ワーク）

図 7.1(c)に示したベベルギヤ形状ワークを直進 3 軸のみを用いてボールエンドミルで加工する場合（=立形 MC で加工する場合に該当，（ケース 1））と，旋回軸と直進軸を用いてスクエアエンドミルで加工する場合（ケース 2）の加工能率と加工精度を比較する。ボールエンドミル加工（ケース 1）の場合は等高線加工を行う。スクエアエンドミルと旋回軸運動も用いて加工する（ケース 2）場合には，B 軸を $0^\circ \sim 20^\circ$ に徐々に傾けて下から上へ送りをかけて加工する。1 回の送りはボールエンドミルで加工する場合のカスプ高さと同しくなる B 軸の角度変化とする。加工に用いる運動の与え方を図 7.4(c)に示す。

ボールエンドミルを用いて直進 3 軸で加工する場合（ケース 1）の切削条件は次のとおりである。

ボールエンドミル： TiAlN コーティング超硬合金製 2 枚刃
直径 : 4mm
ワーク材質 : プリハードン鋼 NAK55 (40HRC)
突き出し長さ : 38mm ($L/D=9.5$)
主軸回転数 : 6000min^{-1}
送り速度 : 1200mm/min
加工ピッチ : 仕上がり形状に沿って 0.18mm (平均)
 (カスプ高さ：2.6 μm になるようにピッチを変化させる)
取代（半径方向切込）： 0.1mm

ダウンカット

スクエアエンドミルを用いて同時5軸制御加工する場合（ケース2）の切削条件は次のとおりである。

スクエアエンドミル：TiAlNコーティング超合金製 2枚刃

直径：4mm

突き出し長さ：18mm ($L/D=4.5$)

主軸回転数：6000min⁻¹

送り速度：1200mm/min

加工ピッチ：仕上がり形状に沿って工具を移動させた場合にカスプ高さがケース1と同じ量（=2.6μm）になる角度ずつB軸の角度を変化させる。（Bの角度を67.1°から64.1°まで徐々に変化させる。1回の変化量の平均値0.035°）

送り経路に沿った平均ピッチ：0.34mm

ダウンカット

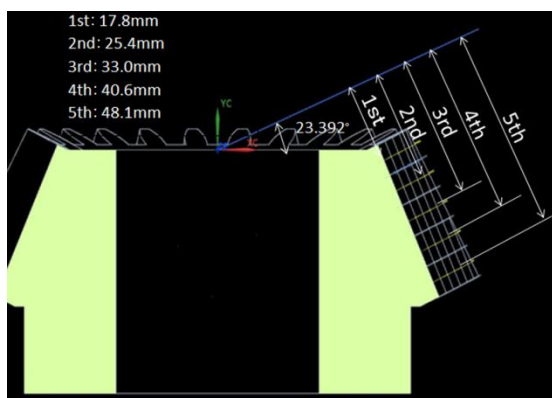


図 7.5 ベベルギヤの加工偏差の測定箇所

ボールエンドミルを用いた場合、この条件ではびびり振動が生じて、仕上げ面あらかが大になることが考えられる。したがって、スクエアエンドミルで加工した場合と同程度の加工形状誤差と仕上げ面あらかでボールエンドミル加工するにはどの程度の切削条件で加工すればよいかわからないので、上に挙げた以外の切削条件のうち、送り速度と主軸回転数を次のように10%ずつ小さくして加工する。

スクエアエンドミルの場合に比べて：50，40，30%

7.3.3 加工精度と仕上げ面あらかの測定法

加工されたコア円錐台形状と溝付キャビティ円錐台形状の真円度，真直度，仕上げ面あらかの測定には，次の測定機を用いる。

真円度プロファイルの測定：真円度測定機 Taryrond290

真直度プロファイルの測定 : 3次元測定機 Falcio-Apex9166

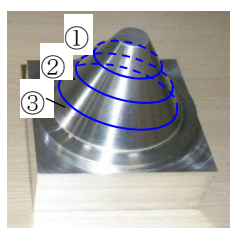
表面あらさ測定機 : 表面あらさ計 Form Tarysurf PGI 1200

ベベルギヤの加工精度については、Mitutoyo 製 3次元測定の計測機能である CAT-1000 を利用してベベルギヤの IGES 形式の 3次元モデルを 3次元測定機ソフト内に取り込んで計測プログラムを作成し、形状測定を行い、設計データと計測データの偏差としてタッチプローブで検出する。その際に用いた測定点を図 7.5 に示す。このソフトを使えば、測定の際にプローブは設計データで定義された歯面に対して法線方向からアプローチさせることができる。

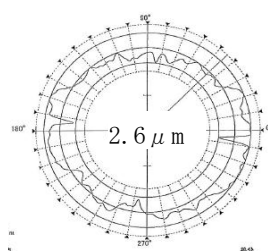
7. 4 実験結果と考察

7. 4. 1 コア円錐台形状ワークを加工する場合

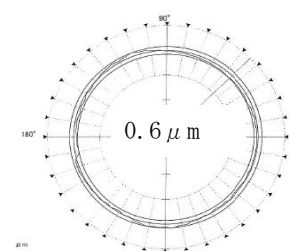
直進 3 軸のみを用いてコア円錐台形状ワーク (図 7.1(a)) を加工した場合 (ケース 1) の加工時間は 31 分 3 秒であり、 回転 1 軸と直進 2 軸の同時 3 軸制御加工の場合 (ケース 2) は 31 分 32 秒と、ほとんど差がない。これは切削条件を完全に同一にしてあるので、当然の結果であり、わずかに直進 3 軸のみを用いた方が加工時間が短いのは、CNC の補間処理に伴う時間がわずかしかなかからなかったためと思われる。ここでいう加工時間とは、前述のようにすべての準備を終え、NC のスタートボタンを押してから加工が終了して、エンドの信号が出るまでの時間であり、厳密に言うと、切削時間とエアカット時間の和で定義される時間である。通常、加工時間に含まれる工具交換に要する時間は、この部品の場合は工具交換しないので、0 としている。



測定位置



(a) 直進3軸制御加工



(b) 回転軸+直進 2 軸制御加工

図 7.6 円錐台形状ワークの加工形状誤差 (真円度プロファイル)

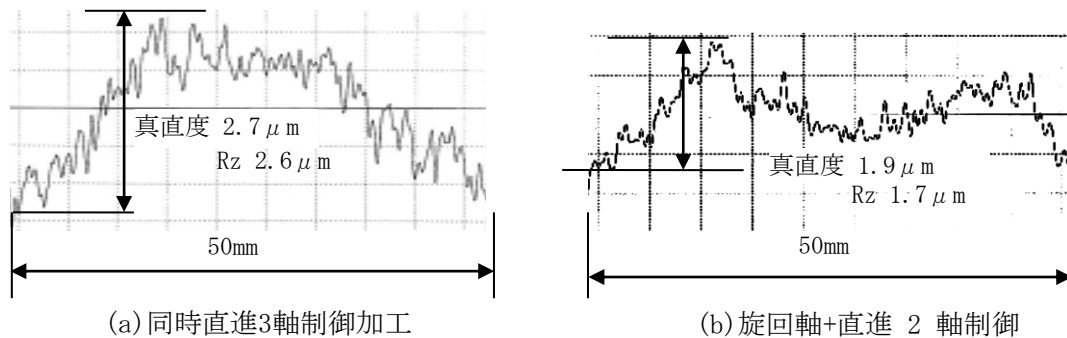


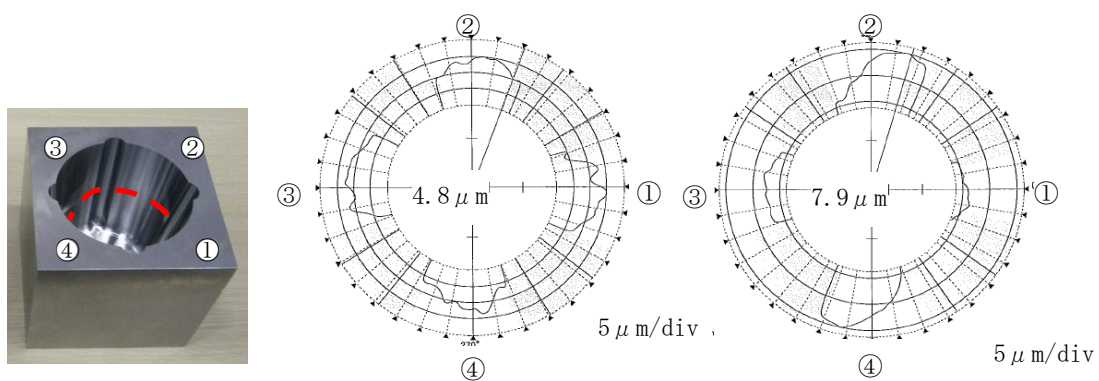
図 7.7 円錐台形状ワークの加工形状誤差（稜線の真直度と面あらし）

2つの異なる方法で加工されたワークの3つの断面における真円度プロファイルと3つの稜線における仕上げ面プロファイルを測定した。その代表的なプロファイルを図 7.6, 図 7.7 に示し, それらから読み取った真円度, 真直度, 仕上げ面あらしも図中に記した。

2つの異なる加工法で加工されたワークの仕上げ面あらしはどの断面においても $2.6\mu\text{mRz}$ でほぼ等しく, 真円度は直進軸のみの円弧補間で加工した場合(ケース1)も $3\mu\text{m}$ と小さかった。それに対し, 回転軸Cも用いた場合(ケース2)は真円度が $1.2\sim 1.6\mu\text{m}$ とさらに小さくなった。C軸テーブルからの高い断面ほどわずかではあるが, 真円度が悪くなっているのは, C軸のアンギュラーモーションのためではないかと思われる。

結局, この2つの加工法では切削機構と切削条件は両者で全く同一になっているので, この加工形状誤差の差は直進2軸X, Yの円弧補間時の運動誤差とC軸のラジアル方向の運動誤差の加工形状誤差への反映度を比較したことになる。すなわち, 図 7.3(a)からわかるようにX, Y軸の円弧補間運動で円を描かせた場合には $4\mu\text{m}$ の真円度誤差が生じているのに対し, C軸のラジアル方向回転誤差は $1.5\mu\text{m}$ 程度であり, かなり小さいことが原因しているものと思われる。

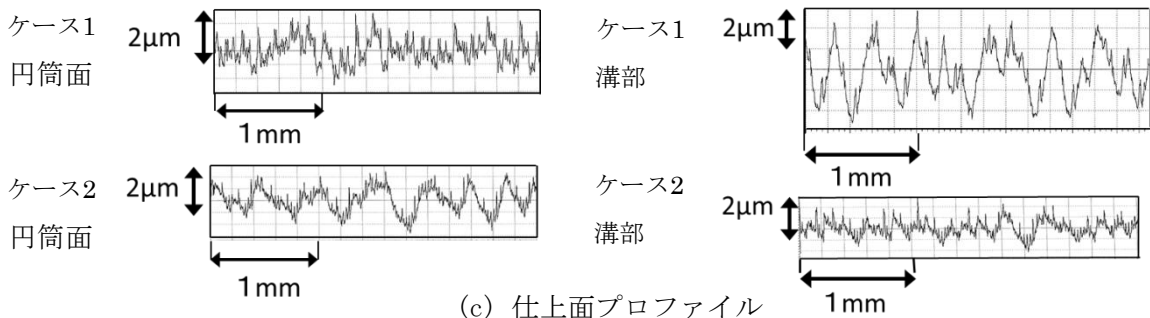
しかし, 5軸制御マシニングセンターでは円錐台形状ワークを加工する場合常にこのような加工法が選ばれるとは限らない。これとは異なった方法で加工される場合には, 必ずしも回転軸を回転させて加工する方が常に高精度な加工が行えるとは限らない。それはボールエンドミルの切れ刃上の加工点の移動, 切削抵抗の方向などが加工形状誤差に影響するからである。



測定位置 (a) 旋回 1 軸+直進 2 軸制御加工 (b) 同時直進 3 軸制御加工
 図 7.8 キャビティ円錐台形状ワークの加工形状誤差(真円度プロファイル)
 (底面から45mm位置で測定)



(a) 同時直進 3 軸制御加工した場合 (b) 旋回 1 軸+直進 2 軸制御加工した場合



(c) 仕上面プロファイル
 図 7.9 溝付キャビティ円錐台形状ワークの稜線の仕上げ

7. 4. 2 溝付キャビティ円錐台形状ワークを加工する場合

直進軸のみを用いて溝付キャビティ円錐台形状ワーク(図 7.1(b))を加工した場合の加工時間は表 7.2 に示すように 1 時間 28 分 28 秒(ただしテーパ形状部のみ)であった。旋回軸も用いたインデックス同時 4 軸制御加工で同じワークを加工した場合には 55 分 12 秒(ただしテーパ形状部のみ)であった。

図 7.1(b)の溝付キャビティ円錐台形状ワークを加工する場合には、旋回軸も用いる加工の方が加工時間は 38% だけ短く、加工能率が約 1.6 倍に向上した。もちろん、ワーク材料が硬い場合や立壁部分の長さが長くなったり、立壁の角度が急になるほど、 L/D の大きい工具を使って加工するので、この加工能率の向上の度合いは大きくなる。逆にワーク材料が柔らかい場合や立壁部分の長さが短い場合、立壁の角度が緩やかになるほど、加工能率の向上の度合いは小さくなる。

表 7.2 同時 4 軸制御加工と直進 3 軸制御加工による加工誤差の比較
(溝付キャビティ円錐台形状ワーク)

加工方法	真円度 [μm]	真直度 [μm]	面あらし [μm]	加工時間 [分]
同時直進 3 軸制御加工	7.9	2.5-3.1	5.9	88.5
同時 4 軸制御加工	4.8	1.6-4.6	2.6	55.2

3つの断面における真円度プロファイルと3つの稜線における仕上げ面プロファイルを測定した。その代表例を図7.8, 図7.9に示す。これらから読み取った仕上げ面あらし, 真円度プロファイルおよび真直度プロファイルと比較して表 7.2 に示す。比較的平坦な円錐部の仕上げ面あらしは2つの加工法で $2.6\mu\text{mRz}$ とほとんど同じであるが, 直進3軸のみで加工した場合の溝部の仕上げ面あらしは $5.9\mu\text{mRz}$ あり, 平坦部のほぼ2倍になっている。この原因は用いた切削条件が $LD=7$ の工具を用いる場合には過酷で, 溝部を加工した時にびびり振動を誘発したためである。仕上げ面あらしはびびり振動が生じないように切削条件を緩くすると良くなるが, それによって加工能率は大幅に低下する。

溝部を除いた真円度も2つの加工法でかなり異なっている。すなわち, 直進3軸のみを用いた加工で得られた真円度は $8\mu\text{m}$ であったのに対し, C軸を回転させて加工した場合には $5\mu\text{m}$ とかなり小さかった。稜線の真直度もほぼ同じ結果になった。すなわち, 直進3軸のみを用いた加工で得られた真直度は $3\mu\text{m}$ 弱であったのに対し, C軸を回転させて加工した場合には真直度は $2\mu\text{m}$ とかなり小さかった。

表 7.3 ベベルギヤ歯面の仕上げ面あらし ($\text{Rz } \mu\text{m}$)

位置		5 軸制御加工 (ケース 1)		3 軸制御加工 (ケース 2)	
		左歯面	右歯面	左歯面	右歯面
縦	1	1.3	1.5	7.8	2.4
横上	2	1.7	1.8	6.9	8.3
横中	3	1.7	1.8	8.0	8.4
横下	4	1.8	1.9	9.3	8.0

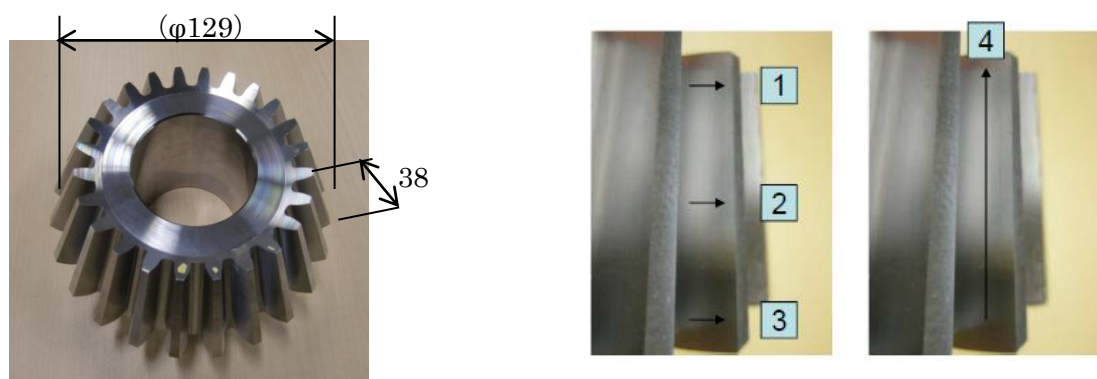
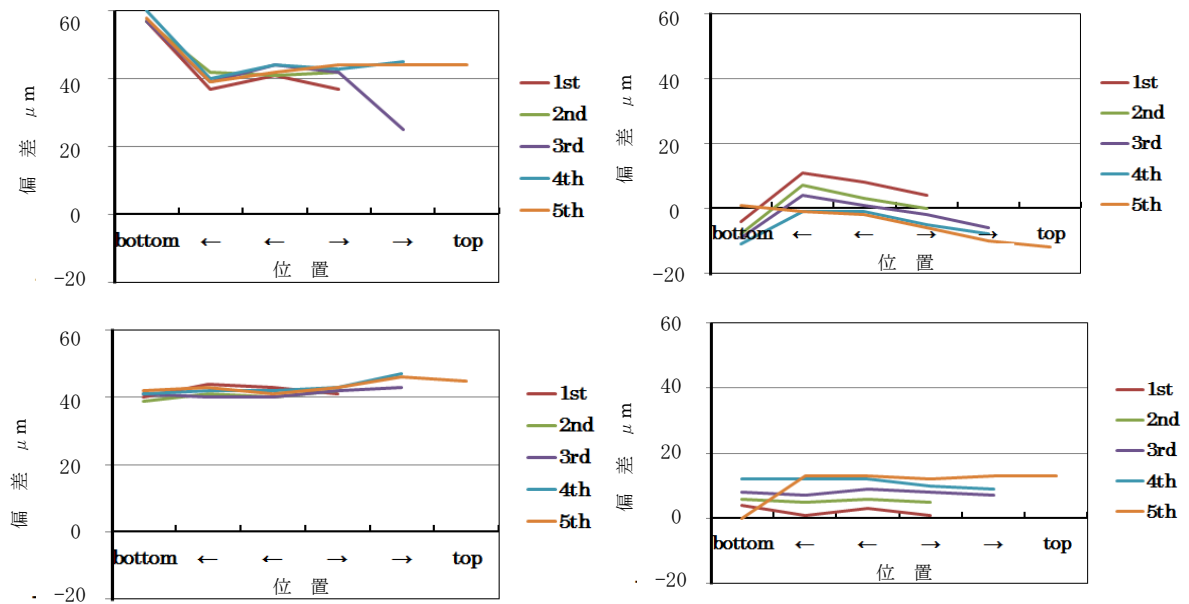


図 7.10 ベベルギヤ歯面の仕上げ面あらし測定位置



(a) ボールエンドミル直進同時3軸で加工した場合 (b) スクエアエンドミルで加工した場合

図 7.11 ベベルギヤの加工偏差の分布

7. 4. 3 ベベルギヤ形状ワークを加工する場合

7. 4. 3. 1 ボールエンドミルとスクエアエンドミルによって生じる加工能率の差

直進 3 軸のみを用いてベベルギヤ形状ワーク (図 7.1(c)) の 1 溝分をボールエンドミルで加工した場合 (ケース 1) の CAM で計算した加工時間は 4 分 56 秒 (ただし 1 溝の両歯面のみ, カプス高さ $2.6\mu\text{m}$ として得られた NC プログラムを使用) であった. ただし, 主軸回転数 6000min^{-1} , 送り速度 $1200\text{mm}/\text{min}$ としている. スクエアエンドミルを用いて 5 軸制御加工した場合のそれは (ケース 2) 2 分 46 秒 (上記の 56%) となった. この場合の平均的な送りピッチはケース 1 で 0.18mm , ケース 2 で 0.34mm となった. 計算上の加工時間の差の大部分はこの平均送りピッチの差によって生じている.

実際の加工時間はケース 2 の場合で, 4 分 6 秒かかり, CAM での計算値より 48% 長くかかった. これは CAM での計算値には ATC による工具交換時間や送り速度の加減速に要する時間などが含まれていないためである.

7. 4. 3. 2 工具の LD の違いによる加工能率の差

以上のように使用工具による加工法の違いによっても, 44% の加工時間の差が生じるが, ボールエンドミルを用いて加工する場合には $LD=9.5$ と工具の突出し量が大いいために, 加工の際に生じるびびり振動を避ける目的で, ケース 1 の場合には主軸回転数と送り速度を 5 軸制御加工の 40% 程度に抑えるので, 推定される所要加工時間は 12 分 20 秒とかなり長くなる.

両ケースについて同じ加工条件で試し加工を行って, 仕上げ面あらさを測定し, ケース

1 の場合どの程度送り速度を低くしたら、びびり振動が抑制されるかを調べた。その結果、送り速度を 30%程度に低くすれば、十分であることが分かった。それに基づいて、送り速度と主軸回転数を共に 30%に下げて、加工実験を行った。この場合、実際に加工に要した時間は 18 分 26 秒となり、スクエアエンドミルで加工した場合の 4.5 倍もの時間がかかった。その時得られた仕上げ面あらさは $4.2 \mu\text{mRz}$ となった。

7. 4. 3. 3 ボールエンドミルとスクエアエンドミルの違いによって生じる仕上げ面あらさの差

仕上げ面あらさは測定した 3 ヶ所の平均で、ボールエンドミルの場合は (50%送り) のとき $10.8 \mu\text{mRz}$, (40%送り) のとき $4.8 \mu\text{mRz}$, (30%送り) のとき $4.2 \mu\text{mRz}$ となり、スクエアエンドミルの場合は $3.4 \mu\text{mRz}$ となった。スクエアエンドミルの場合は、計算上期待されるあらさ $2.8 \mu\text{mRz}$ にかなり近いが、ボールエンドミルで加工した場合には計算上期待されるあらさよりかなり悪くなった。

7. 4. 3. 4 3 軸制御加工と 5 軸制御加工の違いによる加工精度の差

3 軸制御加工 (30%送り) と 5 軸制御加工の 2 つのケースで加工したベベルギヤの加工偏差を 3 次元測定機で測定した結果を図 7.11 に示す。

1) スクエアエンドミルを用いて同時 5 軸制御加工した場合には、加工偏差の量は左右の歯面においてそれぞれ $10 \mu\text{m}$ 程度とかなり小さい。この加工偏差は後述する同時 3 軸制御加工の場合に比べて約 1/5 程度と小さく、かなり精度よく加工できていると言えよう。

2) ボールエンドミルを用いて同時 3 軸制御加工した場合には、2 つの歯面ともに歯底で最も偏差量が大きくなり、歯先に行くに従って右側歯面では減少し、左側歯面ではほぼ一定になっている。その偏差量は歯底で $70\sim 80 \mu\text{m}$ に達し、同時 5 軸制御加工の場合に比べて、 $60 \mu\text{m}$ 程度も大である。ただし、このベベルギヤの場合は歯底と歯先から約 1mm の歯面では歯車間での接触は生じないので、実用上は無視してもよい。

そこで、この部分を外して加工偏差を評価すると、右側歯面の偏差は $40\sim 60 \mu\text{m}$ の範囲に入っており、その変化量は $20 \mu\text{m}$ しかない。歯底で加工偏差が $60 \mu\text{m}$ と大になった原因は、歯底部をボールエンドミルで加工する時には先端のボール部の広い範囲でワーク材との干渉が生じ、切削抵抗が大になるだけでなく、その作用方向がより水平方向に近くなり、工具の弾性変形量が大になったために生じたものと思われる。また、副次的には細くて、突き出し長さの長い工具の先端部に切削抵抗が作用するので、工具の弾性変形量がこのように大になったものと思われる。

切削速度、送り速度をもっと小さくすることによって、びびり振動の発生を抑制し、仕上げ面あらさを小さくすることは可能である。切込み (=仕上げ加工の取代) や 1 刃当たりの送りを小さくすると、切削抵抗もある程度まで小さくできるので、加工偏差は小さくなるはずである。本研究では取代を 0.1mm として仕上げ加工を行ったが、これは通常行わ

れている歯車の加工に倣った条件であるが、このような 2 つのケースの比較としては少し過酷すぎたかもしれない。

本研究では、工具摩耗による加工精度の低下は研究対象とはしていないが、ボールエンドミルを使う 3 次元加工では、工具の先端部のボールのところでのみ、加工するため、工具摩耗が進行しやすく、加工精度が低下する可能性がある。それに対し、5 軸制御加工ではスクエアエンドミルの側刃を使って加工するため、ワークとの接触部が移動しているため、工具摩耗の進行が抑制される。そのため、加工精度の低下がボールエンドミルの場合に比べて小さくなる。ただし、スクエアエンドミルでは凹形状は加工できないという限界がある。

7. 4. 4 形状の複雑さと加工時間の関係

以上の 3 種類の形状のワークを加工した場合の加工能率と加工精度の測定結果をまとめたものを表 7.4 に示す。形状が単純なコア円錐台ワークの場合には、3 軸制御加工と 5 軸制御加工で加工時間はほとんど同じである。次に、溝付キャビティ円錐台形状ワークの場合にはほぼ同じ仕上げ面あらさと加工精度を得るためには、3 軸制御加工では 5 軸制御加工よりも 1.6 倍程度長い加工時間を必要とする。すなわち、工具の L/D が同じであっても加工法の自由度が増大する効果で約 1.5 倍程度の加工能率の改善が得られたものと考えられる。さらに形状が複雑なベベルギヤの場合には、ほぼ同じ加工結果を得るためには 4.5 倍程度の加工時間を必要とした。すなわちこの場合は 3 軸制御から 5 軸制御加工で工具の $L/D=9.5$ から 4.5 に改善しており、その場合に工具径 D が同様なら系の固有振動数は (L/D) の二乗に比例して 4.5 倍高くなる。そのため加工現象におけるびびり現象などの動的安定性の差による加工能率の差が生じたものと考えられる。

このように、 L/D が同じであっても加工現象の改善により、さらに L/D が異なる場合にはその二乗に比例するように、ワーク形状が複雑になればなるほど、5 軸制御加工の方が加工時間が大きく短縮されることが確認された。また、加工精度についても両者はほぼ同等かそれ以上に加工できており、高精度な 5 軸制御 MC を使用すれば、直進 3 軸制御加工の方が加工精度で有利であるとは言えないことが確認された。

また、スクエアエンドミルを用いて加工できる形状については、できるだけこれを使う方が加工能率と仕上げ面あらさの点からも数 10%~3 倍程度改善でき、かなり有利である。

表 7.4 ワーク形状の複雑さによって決まる仕上げ加工の加工能率と加工精度

形状	加工機	加工能率		加工精度		
		加工時間 [分]	比率	真円度 [μm]	真直度 [μm]	仕上げ面あらさ [μmRz]
コア円錐台	3 軸制御 MC	31.0	0.98	2.6	2.7	2.6
	5 軸制御 MC	31.5	1.00	0.6	1.9	1.7
溝付キャビティ 円錐台	3 軸制御 MC	88.5	1.60	7.9	2.8	5.9
	5 軸制御 MC	55.2	1.00	4.8	3.1	2.6
ストレート ベベルギヤ(1溝)	3 軸制御 MC	18.4	4.50	偏差 40-60		6.5
	5 軸制御 MC	4.10	1.00	偏差 10		1.5

7. 5 結論

種々の形状をしたプリハードン鋼製のワークをテーブル・オン・テーブル型の 5 軸制御 MC で加工した場合の加工能率と加工形状誤差を立形 MC で加工した場合と比較した結果、次の結論が得られた。

- 1) 図 7.1(a)に示した単純なコア円錐台形状の場合は、どちらで加工しても仕上げ面あらさは $2.6\mu\text{mRz}$ とほぼ同じであったが、真円度と真直度は 5 軸制御 MC の旋回軸回転を用いて加工した場合は $3\mu\text{m}$ 程度であり、直進 3 軸のみで加工した場合の $5\mu\text{m}$ よりもかなり小さかった。この原因は C 軸のラジアル回転誤差の方が X, Y 両軸の円弧補間時の運動誤差よりも小さかったためである。
- 2) 直進 3 軸で加工しようとする $L/D > 7$ のボールエンドミルを用いないと加工できない図 7.1(b)に示した溝付キャビティ円錐台形状の場合は、立形 MC で加工するよりも、5 軸制御 MC で加工すると加工能率が約 1.6 倍に向上した。加工された仕上げ面あらさは両者ともに $2.6\mu\text{mRz}$ であったが、真円度と真直度は突き出し長さの短い工具で加工できる 5 軸制御 MC の方が格段によかった。ただし、溝部の仕上げ面あらさは直進 3 軸で加工するとびびり振動が生じて、 $5.9\mu\text{mRz}$ と大きくなった。これを避けるためには、切削条件を緩くして、びびり振動の発生を抑える必要がある。
- 3) 図 7.1(c)に示したストレートベベルギヤ形状の仕上げ加工においては、ボールエンドミル加工と同程度の加工精度 ($40\mu\text{m}$) と仕上げ面あらさ ($4.2\mu\text{mRz}$) を得ようとする、スクエアエンドミルを用いた 5 軸制御加工の場合にはボールエンドミルを用いた 3 軸制御加工の場合よりも 4.5 倍程度の加工能率を上げることができた。
- 4) ワーク形状が複雑になればなるほど、5 軸制御加工の方が加工時間が大きく短縮されることが確認された。また、加工精度についても両者はほぼ同等に加工できており、加工現象も考慮することで高精度な 5 軸制御 MC を使用すれば、3 軸制御加工の方が加工精度で有利であるとは言えないことが確認された。

参考文献

- 7.1) 林幹二, WorkNC によるスムーズな 5 軸加工への挑戦, 進展する 5 軸制御加工技術, 機械技術, Vol. 55, No. 8(2007), 56-57.
- 7.2) 石井克彦, ゴム製品の金型加工に対する 5 軸制御加工の応用, 日本機械学会誌, Vol. 111, No. 1073(2008), 32-33.
- 7.3) 小泉孝宏, 水上祐一, 芦内幸太, 高精度加工を実現する最新 5 軸制御マシニングセンターと智能化技術, 型技術, Vol. 28, No. 12(2013), 68-69.
- 7.4) 山形智, 法橋辰哉, 青山英樹, 佐野記章, 5 軸制御によるエンドミル・ラジラスエンドミルを用いた超高能率曲面加工, 型技術, Vol. 28, No. 12(2013), 52-53.
- 7.5) Cihan Ozel, Ali Inan and Latif Ozler, An Investigation on Manufacturing of the Straight Bevel Gear Using End Mill by CNC Milling Machine, J. of Manufacturing Science and Engineering, Trans. of the ASME, Vol. 127(2005), 502.
- 7.6) 増田拓也, 森重功一, C-Space を用いた 5 軸制御加工のための工具経路精製法—スクエアおよびラジラスエンドミルによる加工への対応—, 精密工学会, Vol. 78, No. 1(2012), 57.
- 7.7) 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, 川口二俊, 堀内貴弘, 5 軸制御マシニングセンタによる切削点送り速度ベクトル一定化条件下でのエンドミル工具経路に関する研究, 精密工学会誌, Vol. 76, No. 8(2010), 912.
- 7.8) 廣垣俊樹ほか, 5 軸制御マシニングセンタで創成される仕上げ加工面の考察—ボールエンドミル加工における切削点一定化の効果と最適加工条件の設定法—, 精密工学会誌, Vol. 75, No. 10(2009), 1238.
- 7.9) K. Suto, E. Aoyama, T. Hirogaki and K. Ogawa, Investigation of Rotational θ -Axis and Linear Z -Axis Operation based on Power Consumption with Desktop Five-Axis Controlled Machine Tools, Key Engineering Materials, Vol. 516(2012), 510-515.
- 7.10) W. Jywe, Detecting assembly for a Multi-Axis Machine Tool, US Patent, US007852478B1.
- 7.11) T. Akai, M. Sasaki, T. Hirogaki, K. Ogawa and Y. Kakino, Study on Machining Performance of Complex Shape Workpieces on a 5-axis Machining Center, Journal of SME Japan, Vol. 4(2014), 5-16.

第8章 結論

本章では、これまで述べてきた各章の結論の要点をまとめ、本研究によって得られた成果を明確化している。

8.1 本研究の成果

本論文では、5軸制御マシニングセンターの加工精度の向上のために、その基礎をなしている運動精度の測定法と旋回軸の誤差原因の新たな診断法を開発し、それを用いて5軸制御マシニングセンターの運動精度と加工能率を向上させる方法について考察と検討を遂行した。

第2章から第7章までに得られた結果を総括すると以下のようになる。

第2章では、主に3軸制御マシニングセンターの運動精度診断に用いられてきたダブルボールバー法 (DBB3) を改良して、新たな5軸制御マシニングセンター向けにDBB5測定法の原理を考案した。すなわち、DBB5法では球とバーを繋ぐ支柱をX, Y, Zの3軸に対して45°傾けることにより、球の位置を変更することなく、XY, YZ, ZX平面について360°の運動誤差軌跡を測定できるようにした。さらに高精度な着脱再現性を有するEROWAのチャックを用いてテーブル側球面座の位置を軸方向に変化させて、前述の測定およびC-XY, B-ZXの同期測定を行うことにより、B, C旋回軸のオフセット誤差および角度誤差を測定できるようにした。その結果、これらの測定が同一セットアップで測定でき、運動誤差測定の精度が向上し、測定に要する時間を短縮できることが予測される。また、付加的な測定を行うことにより旋回軸自体に存在する運動誤差も測定し、誤差原因を診断する方法を開発した。その結果、本計測も機械の開発段階では行うべきであることがわかった。さらに旋回軸に存在する運動誤差原因として、座標軸の誤差 (オフセット誤差と角度誤差) の他に、角度スケールの誤差、変速機構に存在するバックラッシュと固有の誤差、支持軸受に固有の誤差、サーボ系に起因するロストモーション、スティックモーション、速度指令の変動の過大なために発生する振動、直線軸駆動のアンギュラーモーションとアキシアルモーションなどが存在するが、それらが単独で存在した場合の軌跡パターンを解明した。

第3章では、運動精度測定と運動誤差原因の診断を遂行した。すなわち、DBB5測定機を用いて新開発の5軸制御マシニングセンターNMV5000の運動精度を測定したところ、運動誤差 $7\mu\text{m}$ と金型加工に用いられる立形マシニングセンター並の運動精度であり、大変良好であることがわかった。測定を行った条件のもとでは最大で運動誤差は $7\mu\text{m}$ 以下であり、金型加工などの分野における実用性を考慮した運動精度の目標値 $10\mu\text{m}$ を達成できた。YZ軸間の直角度誤差が $7\mu\text{m}/350\text{mm}$ 存在した。これが運動誤差の最大値を決めていることも判明した。また、ZX軸間の直角度誤差が $2\mu\text{m}/350\text{mm}$ 存在し、XY軸間の直角度誤差が

2 $\mu\text{m}/350\text{mm}$ 存在することも明確化できた。高次山成分は直進軸，旋回軸ともに 0.2 μm 以下と非常に小さいこともわかった。さらに回転測定法で測定した B 軸のオフセット誤差と角度誤差はそれぞれ $\Delta R_{ZB0} = 12.5 \mu\text{m}$ ， $\Delta R_{XB0} = 1.5 \mu\text{m}$ ， $\Delta B_z = 17 \mu\text{m}/300\text{mm}$ ， $\Delta B_x = 2 \mu\text{m}/300\text{mm}$ とかなり小さいことも判明した。アキシヤル同期測定法で測定した C 軸のオフセット誤差と角度傾き誤差はそれぞれ $\Delta X_{C0} = 0 \mu\text{m}$ ， $\Delta Y_{C0} = 2 \mu\text{m}$ ， $\Delta C_x = 0 \mu\text{m}/300\text{mm}$ ， $\Delta C_y = 2 \mu\text{m}/300\text{mm}$ と一層小さかった。また B 軸および C 軸の回転誤差は 1 μm 以下であり，非常に良いことがわかった。以上の診断結果に基づくと，本機に存在する運動誤差の主たる原因は Z 軸の案内の誤差であり，これを修正すればさらに高い運動精度が得られることもわかった。さらに比較のために従来のトラニオン型の 5 軸制御マシニングセンターについても DBB5 法で運動誤差を測定したところ，運動誤差は開発機に比べて 2 倍以上大きかった。また，従来機の旋回軸にはローラギヤカム変速機構やクロスローラー軸受に起因する大きな運動誤差が存在していたが，開発機においてはそれらがない構造を採用しており，機械の構造的な問題が大きいこともわかった。すなわち開発機の運動誤差は 5 軸制御にもかかわらず，従来の 3 軸制御立形マシニングセンターや横形マシニングセンターのそれらとほぼ同程度であることがわかった。一方で，アライメント誤差の測定法として回転測定法，アキシヤル方向同期測定法，ラジアル方向同期測定法の 3 つの方法が有効であることが判明したが，それぞれの方法には長所と短所が存在し，干渉が生じず，旋回角ができるだけ大になる測定法を機械構造に応じて選ぶべきであることもわかった。B 軸について回転測定法とアキシヤル方向同期測定法で得られたアライメント誤差はほぼ同じ値であった。ラジアル方向同期測定法で得られたアライメント誤差はこれらの値とは数 μm の差があり，やや測定精度が悪いことも解明することができた。

第 4 章では，同時 5 軸制御時の実加工も考慮した運動精度について検討した。すなわち，NAS979 規格に基づいたテーパコーン加工に相当する同時 5 軸制御時の運動誤差を測定する新たな方法を開発した。その結果，提案した DBB5 法を応用して測定した運動誤差は，テーパコーン加工したときの加工形状誤差とよく対応していた。したがって，テーパコーン加工試験を提案する方法で十分代替できることを示した。実加工後に加工ワークを評価する手法に比べ，提案手法はジグなど整備することで計測および評価に要する時間を大幅に短縮でき，工業的に極めて有効な手法となることもわかった。

第 5 章では，5 軸制御マシニングセンターを構成している旋回軸と直進軸のサーボ特性の違いによって生じる運動誤差について検討した。すなわち，1 つの旋回軸と 1 つの直進軸を同期させて円運動を行わせた場合に生じる運動誤差を解析的に求める式を構築した。さらにサーボガイドを用いてフィードバック位置の誤差の検出に適用したところ，直進軸と旋回軸のサーボ系の違いによって生じる運動誤差を正確かつ容易に測定できた。測定した運動誤差軌跡は DBB3 法を用いて測定した運動誤差軌跡と非常によく対応しており，サーボガイドを用いて十分高精度な測定が行えることがわかった。また，これらの方法で測定した半径減少量は理論解析で求めた値とかなりよく一致することも確認できた。さらに 2 つの

軸の送り速度とサーボ系の位置フィードバックループのゲイン K_p を種々に変更して、それらが運動誤差に及ぼす影響を調べた。また、直進軸と旋回軸の組み合わせを種々に変えて、測定と解析を行った。その結果、旋回軸のサーボ特性を向上させるためには、減速機を介さない DD (ダイレクトドライブ) モータを用いることが非常に有効であることもわかった。最後にこれらの結果をまとめて、1つの旋回軸と1つの直進軸で円弧補間運動させた場合に現れる典型的な軌跡パターンも明確化した。

第6章では、旋回軸のアライメント誤差のソフト補正について検討した。すなわち、第3章で得られた測定結果 (回転測定法) を用いて NC 補正を行い、アライメント誤差の再測定をしたところ、B 軸の Z 方向の角度誤差は $17 \mu\text{m}/300\text{mm}$ が $3 \mu\text{m}/300 \text{mm}$ に減少することがわかった。Z 方向のオフセット誤差は $12.5 \mu\text{m}$ が $1 \mu\text{m}$ 以下に減少することもわかった。B 軸の X 方向の角度誤差は、 $2 \mu\text{m}/300\text{mm}$ と測定精度と同等レベル程度に小さいために補正は実施していないが、誤差が大きい場合は Z 方向のときと同様、補正により角度誤差の低減が期待できることがわかった。しかしながら、ソフト補正による運動精度の向上は、旋回軸の双方向再現性誤差が限界となるので、さらに運動精度を向上させるためには、旋回軸の双方向再現性誤差を減少させることが不可欠であることもわかった。また、これらの一連の測定と補正に要した時間は1~4時間で、再調整の組立とすり合わせに要する時間に比べるとはるかに短いこともわかった。これらの方法に習熟すれば作業時間はさらに短縮できるものと考えられ、極めて有効な手法であることが判明した。

第7章では、直進3軸と旋回2軸を用いた同時5軸制御と直進3軸だけを用いる同時3軸制御の加工性能の比較を行った。単純形状であるコア円錐台形状の場合は、どちらで加工しても仕上げ面あらさは $2.6 \mu\text{mRz}$ とほぼ同じであったが、真円度と真直度は5軸制御 MC の旋回軸回転を用いて加工した場合は $3 \mu\text{m}$ 程度であり、直進3軸のみで加工した場合の $5 \mu\text{m}$ よりもかなり小さかった。この原因は C 軸のラジアル回転誤差の方が X, Y 両軸の円弧補間時の運動誤差よりも小さかったためであることがわかった。一方、直進3軸で加工しようとする L/D (工具直径 D に対する工具突き出し長さ L に対する比) >7 のボールエンドミルを用いないと加工できない溝付キャビティ円錐台形状の場合は、直進3軸制御で加工するよりも、5軸制御で加工することで加工能率が1.6倍向上することが確認できた。加工された仕上げ面あらさは両者ともに $2.6 \mu\text{mRz}$ であり、真円度と真直度は突き出し長さの短い工具で加工できる5軸制御の方が格段に良いことがわかった。ただし、溝部の仕上げ面あらさは直進3軸制御で加工するとびびり振動が生じて、 $5.9 \mu\text{mRz}$ と大きくなる場合も存在することがわかり、これを避けるためには、切削条件を緩くして、びびり振動の発生を抑える必要があることも判明した。さらに複雑形状となるストレートベベルギヤ形状の仕上げ加工においては、ボールエンドミル加工と同程度の加工精度 ($40 \mu\text{m}$) と仕上げ面あらさ ($4.15 \mu\text{mRz}$) を得ようとする、スクエアエンドミルを用いた5軸制御の加工の場合にはボールエンドミルを用いた3軸制御の加工の場合よりも4.5倍程度の加工能率を上げることができるとわかった。すなわち、ワーク形状が複雑になればなるほど、5軸制

御の加工の方が加工時間が大きく短縮されることが確認された。また、加工精度についても両者はほぼ同等に加工できており、加工現象も考慮することで高精度な 5 軸制御マシニングセンターを使用すれば、従来考えられていたような 3 軸制御の加工の方が加工精度で有利であるとは言えないことが確認された。

第 8 章では、本研究で得られた成果を総括し、第 1 章で述べた本研究の目的が達成されたことを示した。

以上により、5 軸制御マシニングセンターの加工精度の向上のために、その基礎をなしている運動精度の測定法と回転軸の誤差原因の新たな診断法を開発し、それをを用いて 5 軸制御マシニングセンターの運動精度と加工能率を向上させる方法についての指針を示すことができ、当該分野における工作機械業界の技術発展に大きな寄与をすることができた。

8. 2 今後の課題

本研究においての、今後の課題として 2 つの問題が残されている。その 1 つは研究手法についてであり、ほかの 1 つは具体的な 5 軸制御マシニングセンターの構造改善法についてである。前者については、実用的な展開を図るためには測定の準備時間と測定時間の短縮が不可欠である。その為には、各種のジグの製作と使用法の工夫が必要である。後者の構造改善法については、1) Z 軸キャリッジを長くして、真直度の向上を図るべきである。それにより、立形の 3 軸制御マシニングセンターに負けない高精度な機械を実現すべきである。もう 1 つは、回転軸である B 軸に重いワークが載せられた時に問題となる曲げ変形を抑制する為の B 軸の支持受けの強化である。これらの残された課題を解決し、次世代の 5 軸制御マシニングセンターの開発に向けて一層の技術革新を進めていく必要があるものと考えられる。

謝辞

本論文をまとめる機会を与えていただくとともに、ご懇篤なるご指導、ご鞭撻を賜りました同志社大学教授 廣垣俊樹博士に深く感謝いたします。

また本論文を作成するにあたり、ご懇切なるご教示、ご助言を賜りました同志社大学教授 青山栄一博士に感謝の意を表します。

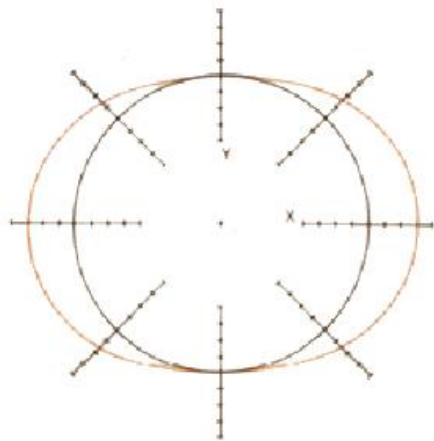
さらに本研究の端緒を与えていただただけでなく、研究全般にわたりご指導、ご教示を賜りました京都大学名誉教授 垣野義昭博士に深く感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、所属する DMG 森精機株式会社の皆様には多大な援助を承りました。代表取締役社長 森雅彦博士、専務取締役 高山直士博士 専務執行役員 藤嶋誠博士には、ご指導いただくと共に学位取得の機会を与えて頂きましたことを深く感謝申し上げます。

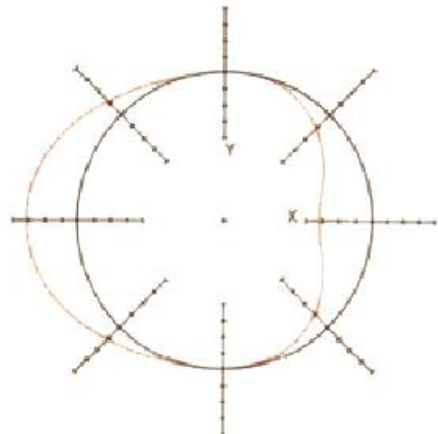
次に本研究を共に進めて頂きました DMG 森精機株式会社 制御技術部 脇坂宗生氏 東京 S C 加工技術部 佐々木麻倫子氏 電装部 小崎順氏 品質保証部 森重男氏にも深く感謝の意を表します。

さらに本文の執筆作業をするにあたり、編集や図作成の手助けをしてくれた小型機開発部の鈴木亜矢さんにもお礼申し上げます。

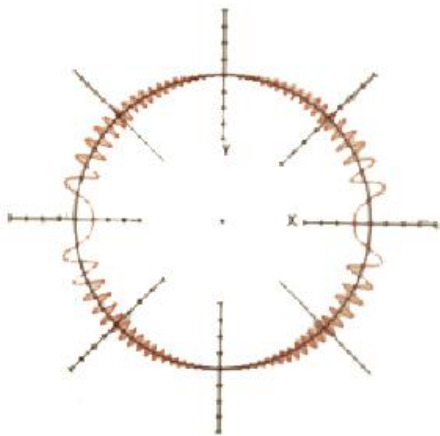
2015年2月
赤井孝行



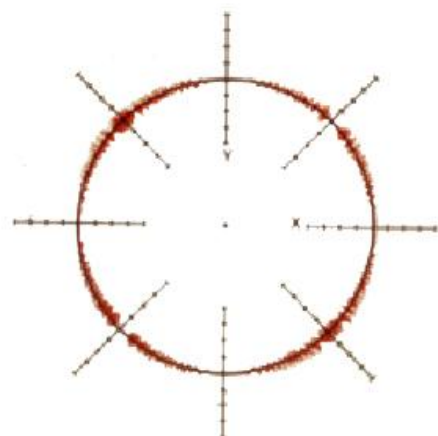
(a) リニアスケール(ボールねじ)の一樣な1次の伸縮



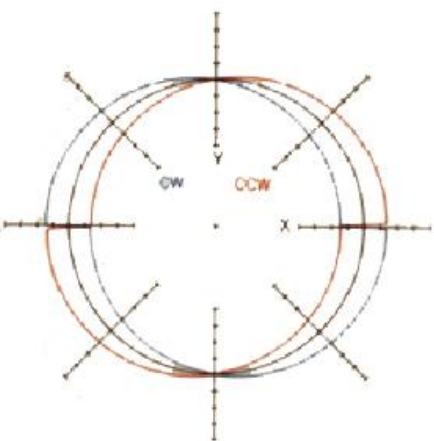
(a') リニアスケール(ボールねじ)の一樣な2次の伸縮



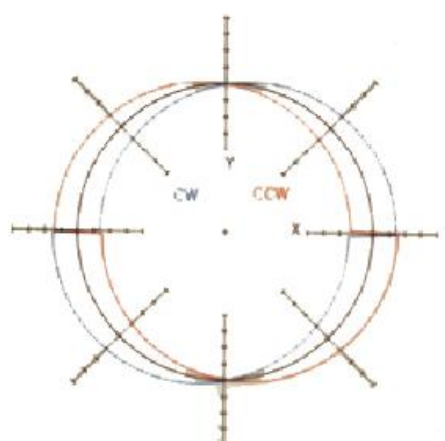
(b) リニアスケール(ボールねじ)などの周期的誤差



(c) 検出器ノイズ

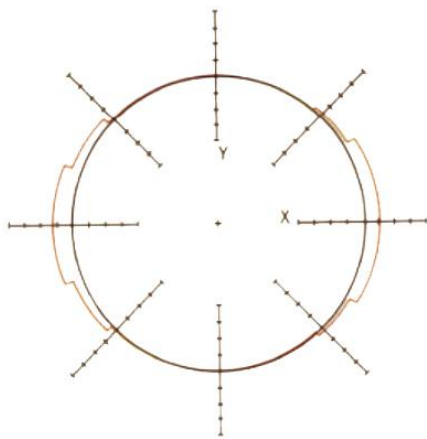


(d) バックラッシュ

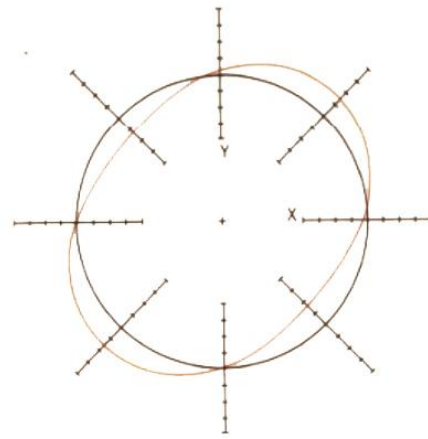


(e) バックラッシュ補正

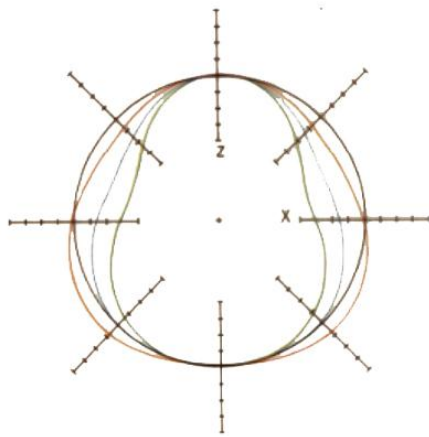
付図1 直進軸系に存在する運動誤差原因とその軌跡パターン(その1)



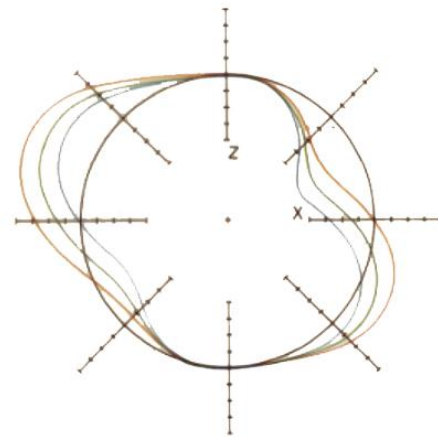
(f) ステップ状ピッチエラー補正



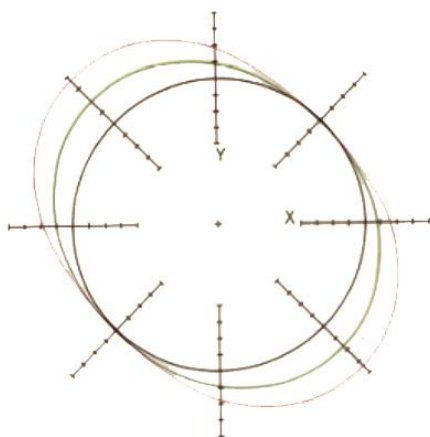
(g) 直角度誤差



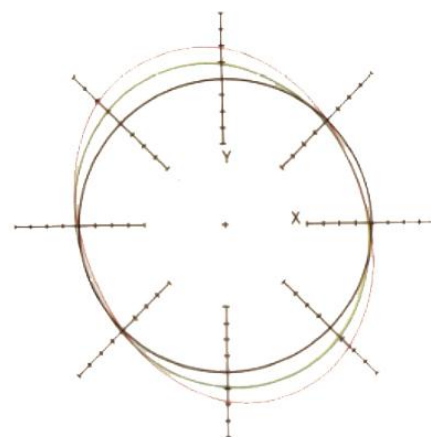
(h-1) 案内の2次の真直度誤差



(h-1') 案内の3次の真直度誤差

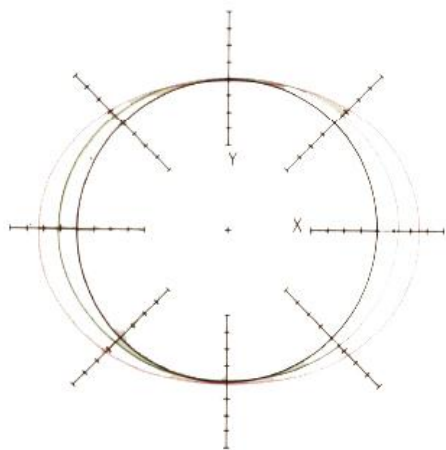


(h-2) 基礎の据付不良
(サドルが弾性変形する場合)

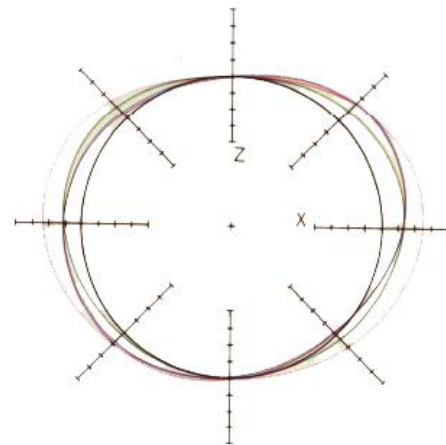


(h-2') 基礎の据付不良
(サドルが剛体の場合)

付図2 直進軸系に存在する運動誤差原因とその軌跡パターン(その2)

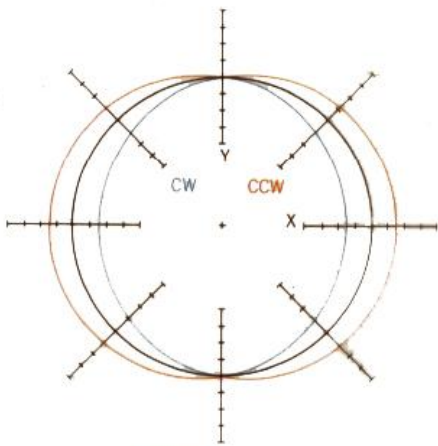


(a) XY 平面の軌跡パターン

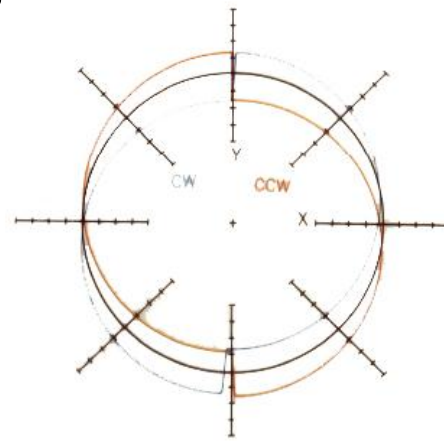


(b) ZX 平面の軌跡パターン

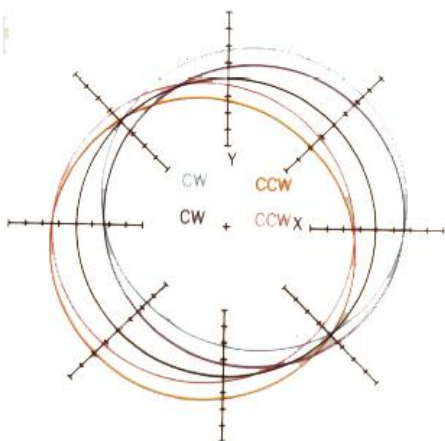
(h-3) 重量移動
(ピッチング b_x)



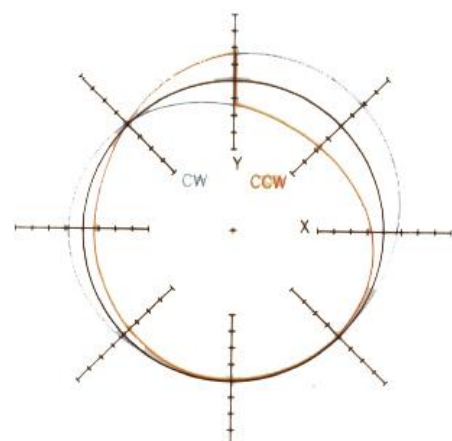
(i-1) 主軸頭ローリング (b_r)



(i-2) 主軸頭ピッチング (a_r)

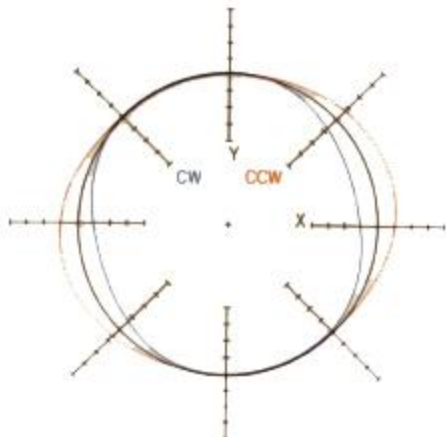


(i-3) 主軸頭ヨーイング (c_r)

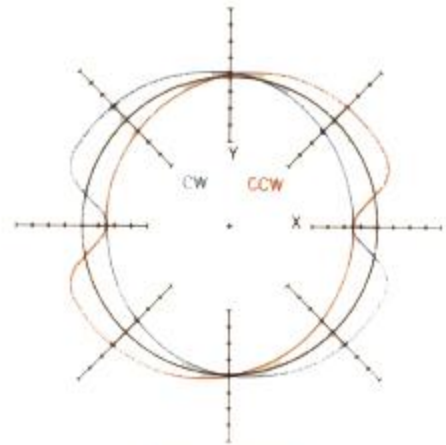


傾向付けがある場合の主軸頭ヨーイング (c_r)
(ヨーイングがY座標の1次関数の場合)

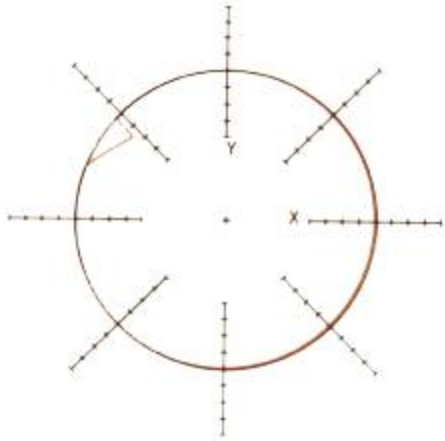
付図3 直進軸系に存在する運動誤差原因とその軌跡パターン(その3)



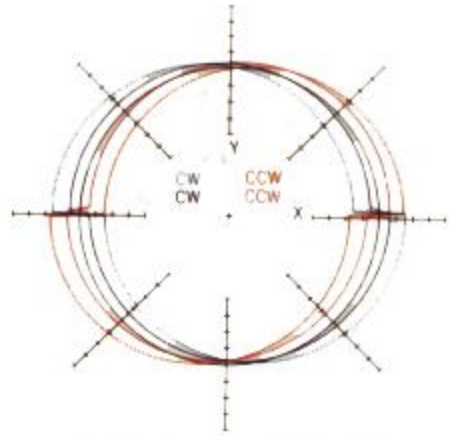
傾向付けがある場合の主軸頭ヨーイング (c_Y)
 (ヨーイングが Y 座標の 2 次関数の場合)



緩やかな段差



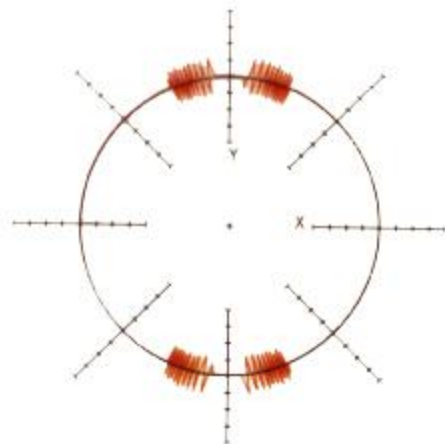
(k) ホースの干渉・カバーのひきずり



(l) ロストモーションの軌跡パターン

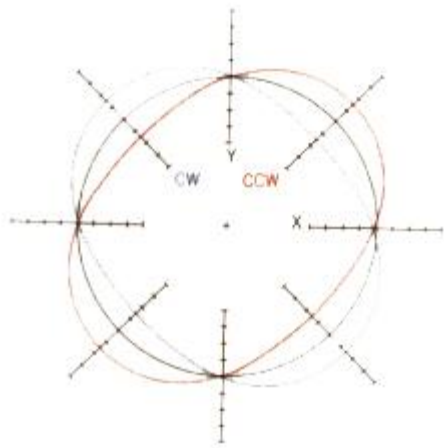


(m) スティックモーション

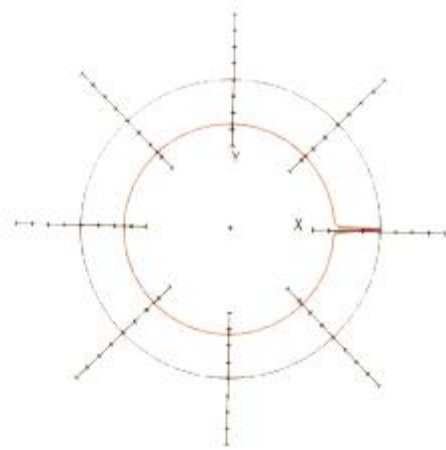


(n) スティックスリップ

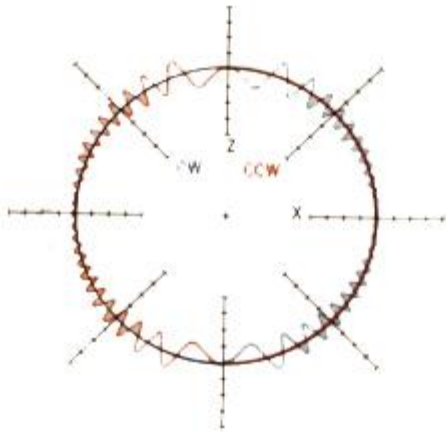
付図 4 直進軸系に存在する運動誤差原因とその軌跡パターン(その 4)



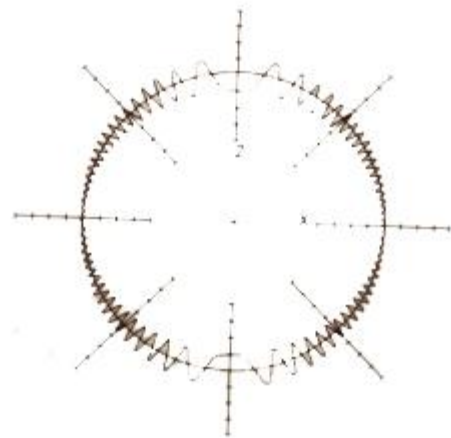
(o) 位置ループゲインの不一致



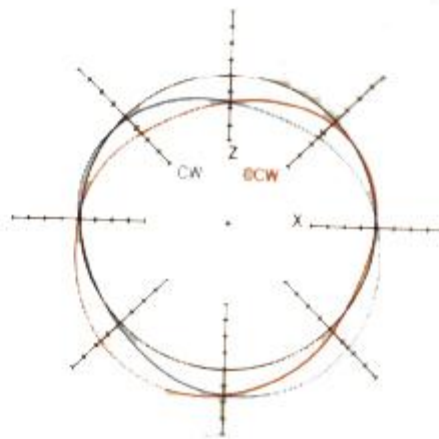
(p) サーボの応答遅れによる半径減少



(q) 油圧バルブの振動



(q') チェーンの振動



(r) 動圧による浮き上がり

付図5 直進軸系に存在する運動誤差原因とその軌跡パターン(その5)