



# 精密加工に求められるリニアステージ技術

## Linear Stage Technology Required for Precision Machining

伊藤 文夫 Fumio Ito

自動化、省力化を推し進めることのできるFA装置には位置決め機構(ステージ)が多く使われている。なかでも精密加工装置用のステージは高精度化が進んでおり、加工時の位置決め精度や速度安定性が求められている。当社では機電一体の設計思想のもと位置決め精度と速度安定性の向上を実現した。本稿ではこれらについて紹介する。

In FA equipment that can promote automation and labor-saving measures, positioning mechanisms (stages) are often used. In particular, stages for precision machining equipment are becoming increasingly more precise, and positioning accuracy and speed stability are required during the machining process. At CKD NIKKI DENSO, improvements in positioning accuracy and speed stability were achieved by adopting the design philosophy of integrating mechanical engineering with electronics. This paper presents an overview of the linear stage technology.

### 1 はじめに

近年顕在化してきた人手不足の問題に対し、自動化、省力化を推し進めることのできるFA装置に対する需要は高まる一方である。FA装置には位置決め機構(ステージ)が多く使用されており、FA装置の一つである精密レーザ加工装置でも、精密移動などにステージは使用されている。

レーザ加工は、既存の刃物による加工方法から置き換えるなど新たな適用事例が広がっており、市場が広がっている。さらに、レーザ加工を行う際の加工精度の要求も高くなってきており、当社でも精密レーザ加工装置向けに位置決めステージとしての要求が多くなっている。

この装置に求められる性能として具体的には、位置決め精度と速度変動率の良さが求められる。

たとえば穴あけのピッチを $1\mu\text{m}$ の誤差以内で加工していく要求に対しては位置決め精度が重要となる。また、レーザの照射ムラの低減にはワークを移動する際の速度変動をより少なくすることでワークへの照射エネルギーを均一に与えることができるため、その速度変動率の低さが重要な性能となる。

そこで、このような超精密加工に求められるリニアモータステージの概要と技術について紹介する。

### 2 ステージについて

#### 2-1 ステージの構成要素

ステージを構成している要素部品を示す(Fig. 1)。

駆動にリニアモータを採用しており、リニアモータは、一般にステージの固定側であるベースにマグネットを敷き詰めたマグネットベースを固定し、移動側に巻き線コイルを樹脂モールドしたコイルユニットを配

置することで固定側と移動側に相対的な力を発生させ移動側を駆動させる構造となっている。

これに加え当社製高性能サーボドライバと高分解能リニアエンコーダの組合せにより、フルクローズ制御を行った精密な位置決めと高応答動作性能を可能とするダイレクトドライブステージ製品となっている。

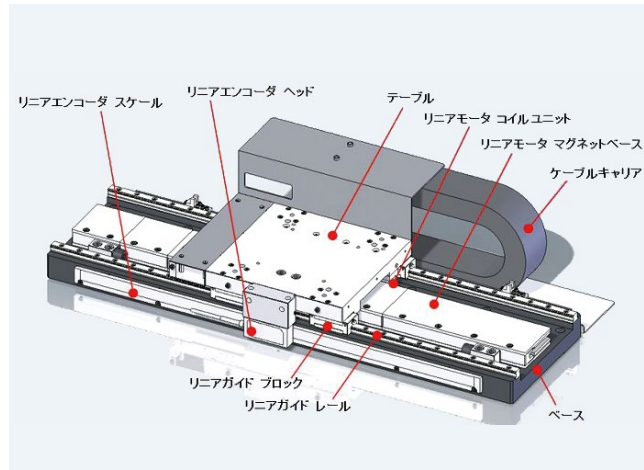


Fig. 1 リニアモータステージ構成要素

本製品はユーザにて仕様検討の際の多種の要望に応えられるよう、カタログ上でモータ容量、ストローク、エンコーダ分解能などを自由に選べるようにしている。

また、ステージの用途としては形状変更やストローク変更などのカタログ仕様以上の要求もあり、カタログ製品に対してカスタマイズして柔軟に対応することも多い。

Fig. 2~ 5はその対応事例の一部である。

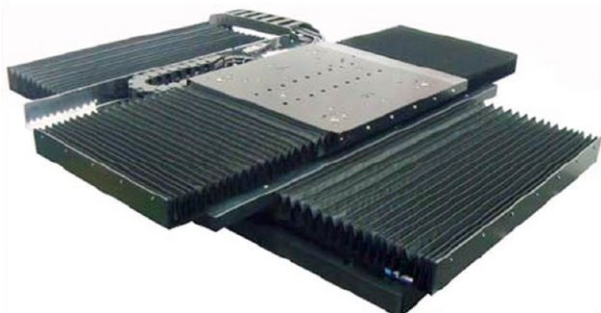


Fig. 2 ジャバラ仕様



Fig. 3 XYθ仕様 (当社薄型DD使用)

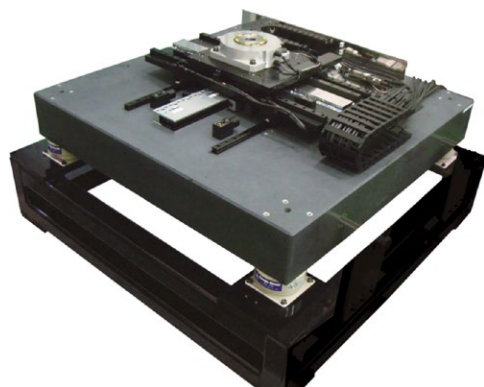


Fig. 4 石定盤除振台付き

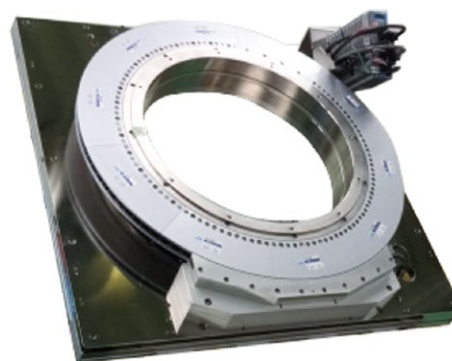


Fig. 5 大中空径回転ステージ (当社円弧型リニアモータ使用)

## 2-2 リニアモータステージのメリット

位置決め機構を有するスライドテーブルは世の中にボールねじやラック&ピニオン駆動など多種存在するが、リニアモータステージのメリットを以下に示す。

### ・機械性能の向上

ボールねじには必要なカップリングなどの中間機構が不要になるため、駆動系の剛性が高まり、機械共振点を高めることが可能となり、サーボモータの制御特性をダイレクトに機械装置に反映させることができる。

これにより、応答性能、速度安定性能、位置決め精度などの機械性能が大幅に向上し、装置の高品質化、高生産性などが可能となる。(Fig. 6)



Fig. 6 ボールねじとリニアモータ駆動ステージ

### ・省スペース化

中間機構が不要になるため機械の小型化、設計自由度が向上する。特にスライドテーブルが複数(多ヘッド)必要な場合には、機構の小型化が大幅に可能であり、リニアモータのメリットが活かせる。

### ・環境性の向上

中間機構が不要になるため、機械的な騒音が減少する。また、中間機構部の摩耗による粉塵もない為、クリーン化が図れる。油圧からの電動化の場合は、油漏れなどが無くなり、環境性、安全性が向上する。

### ・メンテナンスの軽減

中間機構の破損、調整、摩擦寿命による交換などのメンテナンスが不要となる。

### ・長距離駆動

長尺のボールねじステージで懸念されるたわみ、機械共振点の低さが無い為、長距離かつ高速の動作が可能となる。

これらが、一般的なりニアモータステージの特徴であるが、具体的な事例として超精密加工のためにステージに要求される要素である位置決め精度や速度変動率の向上のための事例を紹介する。

## 3 位置決め精度の向上

### 3-1 支持剛性の向上

一般的にXYステージは1軸ステージ2台を直交して単純に積み重ねただけのスタック構造となっているものが多く、この場合単軸ステージを設計するだけで容易に多軸ステージを構成できるという利点がある。しかし、XY軸構成とした際に上軸ベースフレームの支

持点が狭いためにテーブルスライド時の荷重位置変化による構造体の変位が大きくなるデメリットがある。

これに対し当社ステージはXYのスタック構造において同じ1軸ステージを2台積み重ねる構造ではなく、XYの上軸ベースフレーム構造体の支持点位置を最適化することでテーブルスライド時の荷重位置変化による構造体の変位を低減させている。この反面、各構成部品を最適化するために部品の共通化が難しく組立工程も複雑となり手間のかかるものになってしまうが製品の剛性向上のためには必要であり設計の基本としている。(Fig. 7)

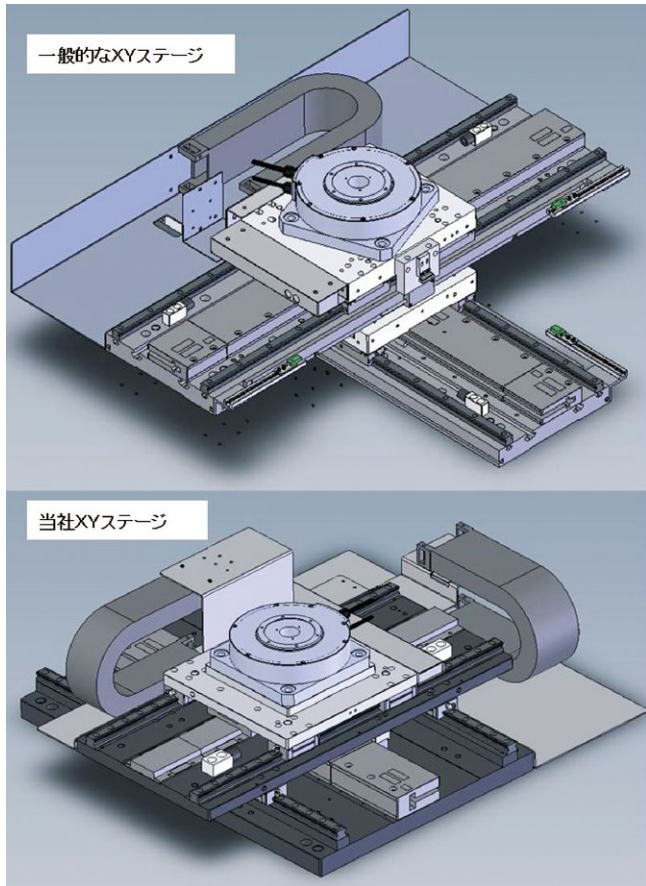


Fig. 7 XYステージ支持構造の違い

### 3-2 アップ誤差の低減

寸法や位置の計測において精度を高めるためには、測定物と測定器を同一軸上に配置する必要があるとのアップの原理に従うことが望ましいとされている。

しかし一般的なXYステージでは駆動源のリニアモータ部と位置検出のリニアエンコーダの位置を進行方向に対して同一軸上に設置することは困難なため、アップ誤差はどうしても避けられない。

アップ誤差の低減のためには、

- ・モータ駆動位置とリニアエンコーダ位置を同一線上にする
  - ・モータ駆動位置とテーブル重心を同一線上にする
- などが有効である。

当社のXYステージではリニアエンコーダヘッドの

外形寸法が小型のものを採用することで、リニアモータとエンコーダの配置が極力同一線上になるよう配置設計している。

また、自社開発の薄型でかつ推力密度の高いリニアモータを採用することで、重心を低くしつつ必要な推力を確保することが可能となっている。

さらにXYθステージとする際にも小型、薄型DDモータのラインアップより適する容量のDDモータを搭載できることからテーブル面のローハイト化が可能となる。つまり、同一線上かつ近くに配置することで限りなく同軸上に近づくことからアップ誤差が大幅に低減されている。また、ローハイト化により低重心も達成できステージの剛性が高くなり制御特性も向上される。

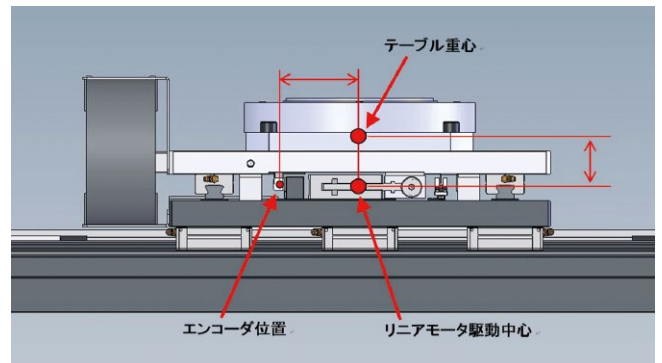


Fig. 8 モータ駆動位置とエンコーダ位置、テーブル重心の近接化

### 3-3 テーブルの走り精度の向上

高精度加工には、テーブルが移動する際の走りの軌跡の真直度や設置面に対する平行度、テーブル面の角度変化量の指標であるピッチ、ヨーの姿勢精度なども重要である。(Fig. 9)

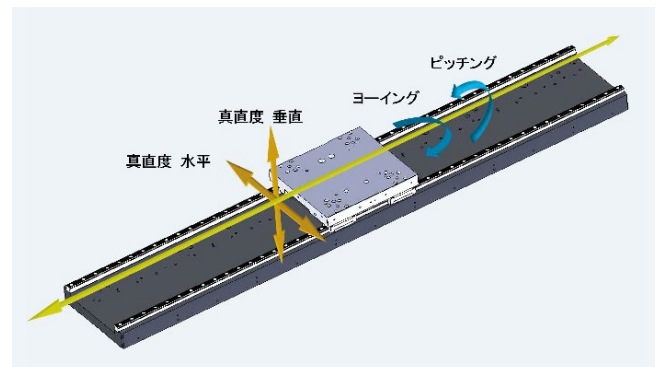


Fig. 9 ステージ機械精度

走り精度の高精度化のためには、次の3項目が重要である。

#### ・ステージ構造体の剛性確保

剛性確保のためには質量増が避けられないが、構造体の最適な支持点設計により質量増加を抑えつつ剛性を上げている。さらに、同じ質量条件でも断面性能がより高くなる断面寸法を設計解析で導き出すことでも軽量でありながら剛性の向上を実現している。

・直動軸受の設置位置の最適化

直動軸受のレールの設置スパン、スライドブロックの設置間隔によって走り精度は大きく影響を受ける。このため小型軽量化を確保しつつ、直動軸受の配置寸法を最適化することで走り精度の高精度化を実現している。

・直動軸受の組付け精度向上

直動軸受の組付け精度は、テーブルの走り精度に直接現れてしまう要素である。

直動軸受の取り付け精度の把握のために当社では真直度測定器を自社開発しステージの組み立て工程に適用している。これにより直動軸受の取り付け精度の把握が現場で容易に可能となり、テーブルの走り精度の高精度化を実現している。

これらにより、多種ある直動軸受の中でユニット化され扱いやすく比較的安価と言われているボール転動式のリニアガイドを採用しつつ、走り精度の高精度を達成している。その一例として、テーブル幅220mm、動作ストローク1000mmという長いストロークにおいて真直度2 $\mu$ m以下、姿勢精度ピッチング、ヨーイング5秒以下を実現している。(Fig. 10、11)

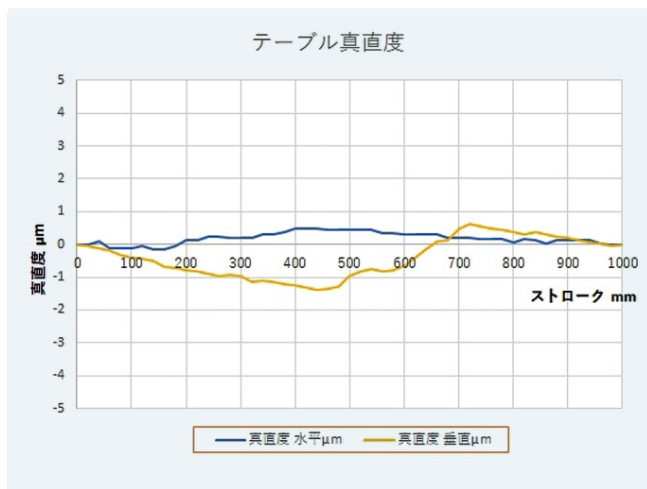


Fig. 10 テーブル真直度(水平方向、垂直方向)

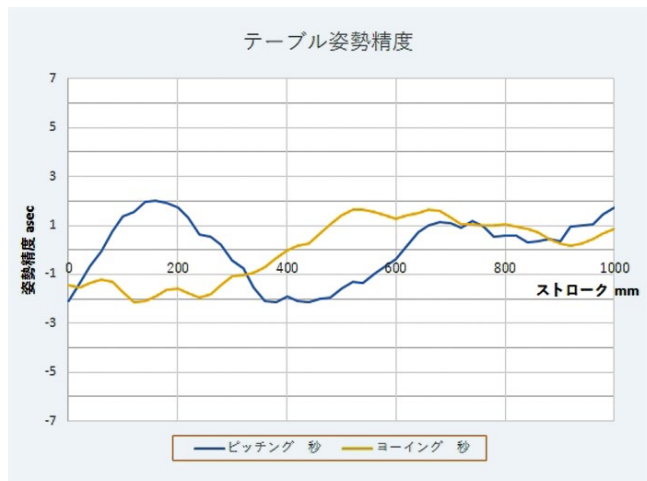


Fig. 11 テーブル姿勢精度(ピッチング、ヨーイング)

3-4 温度上昇の低減

温度上昇による熱膨張の変化も、位置精度が変化してしまうため超精密加工には障害となる。

この対策として水冷リニアモータを開発しステージに採用している。

リニアモータの特徴である非接触駆動により、接触部分が少ないためステージにおいて主な発熱源は少なく、コイル部が主となる。この特徴のために冷却部を集約しやすく発熱の排除が容易にかつ、効率的に熱量を取り除くことができる。

ここでコアレスリニアモータNLD-AM40型(最大500N)にて負荷率44%運転時の温度変化の一例を示す。(Fig. 12)

ステージの温度上昇を自然空冷時8.9K上昇に対して、水冷時0.7K上昇に低減しており、同時に低熱膨張のリニアスケールを採用することでステージの1m当りの熱膨張量を自然空冷時5 $\mu$ mから水冷時0.5 $\mu$ mの精度に向上することが可能となった。

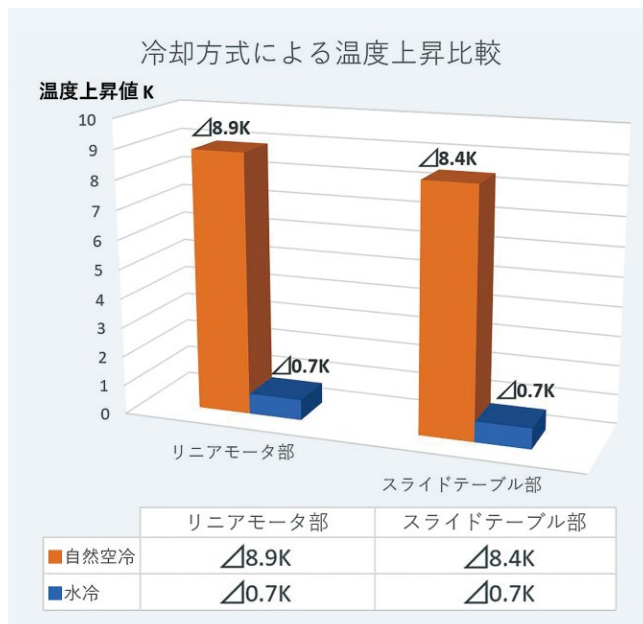


Fig. 12 冷却方式の違いによる温度上昇比較

3-5 リニアエンコーダの精度

リニアエンコーダは、等間隔に位置を刻んだスケールとそれを読み取るリードヘッドから構成されている。

リニアエンコーダで検出される位置の精度は、スケール自体のピッチ誤差により誤差が発生する。

この誤差は、スケールに刻まれている目盛の間隔の誤差であり、採用するスケールの精度等級にもよるものである。いずれにしてもこの誤差は避けられないため、ステージ出荷時に位置決め精度をレーザ干渉式距離計で測定し、位置決め精度を補正することで位置決め精度1 $\mu$ m以下を実現している。(Fig. 13)

また、ユーザの現場での温度などの設置環境が大きく異なることもあるため、そのような場合にはステージ設置後の位置決め精度補正作業も行っている。

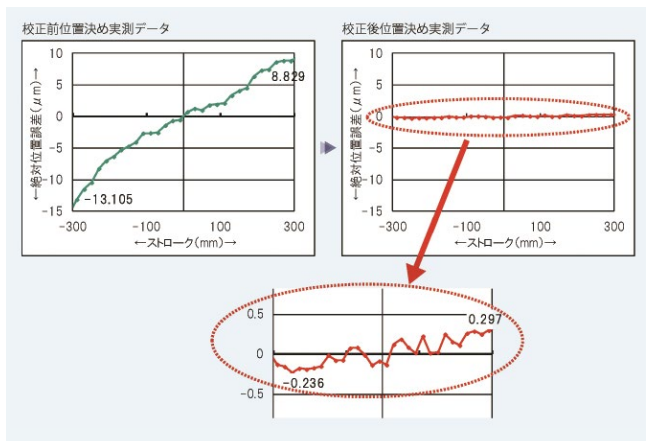


Fig. 13 位置決め精度の補正機能

#### 4 速度変動率の向上

レーザ加工品質の安定のためにはステージの速度変動率の良さも重要である。

速度変動を低減するために、モータでは磁束の最適化などを行うことでトルクリップルを低減させている。

また、速度変動率が要求される場合には、鉄心コア型リニアモータではなくコアレスリニアモータが有利である。

モータ推力をモータ体積で除した単位体積あたりの推力は鉄心コア型リニアモータのほうが優れるため高加速度動作には有利であるが、ユーザの動作パターンを検討したうえでモータ能力計算を行い、加速性能と速度変動率のバランスを考慮してステージにコアレスリニアモータを採用することが多い。

一例として、速度10mm/s時において測定サンプリング50Hz時に速度変動率がコア付リニアモータ:  $\pm 0.25\%$  に対して、コアレスリニアモータ:  $\pm 0.08\%$  であり、コアレスリニアモータを採用することで速度変動率が向上している。(Fig. 14)

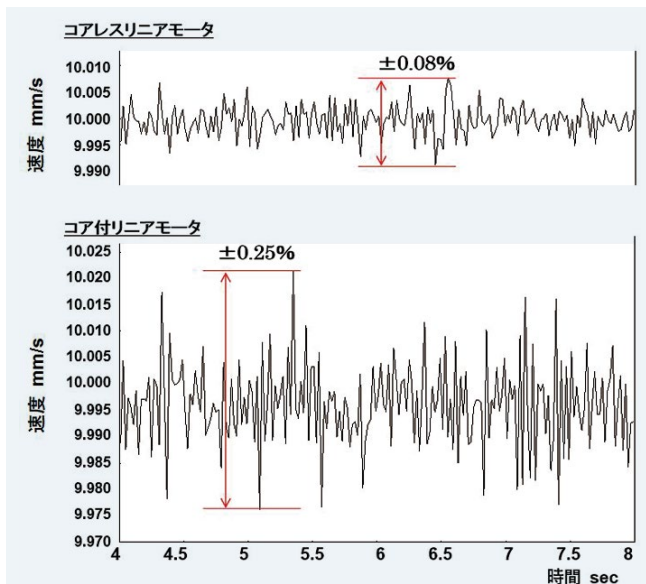


Fig. 14 速度変動率の比較

この他に、サーボドライバの電流制御の分解能、精度、キャリア周波数を上げることで速度変動率の向上を実現している。制御も自社開発のメリットを活かし追加機能など容易に組み込みでき、トルクリップル補正機能やフィードバックフィルタ機能などの速度変動率向上のためのドライバ調整パラメータも用意されている。

#### 5 おわりに

以上のように、本ステージはお客様の望む超精密加工用ステージに対応できる製品構成になっている。この他にも特徴として、配線設計が面倒なケーブルキャリアが標準で設置されていることや、サーボモータのゲインチューニングが出荷時点で実施されているなどユーザが即時にステージを使用可能な製品となっている。

ユーザに本ステージを採用いただくことで装置中のステージ部分のユーザの設計、組立の工程を大幅に省略することができる。

今後、生産技術の高度化、多様化、更にはプロセス技術の進展によりますますリニアステージへの要求は高まっていく。創業以来の企業理念である機電一体の製品開発を推し進め、CKDグループの一員として社会の自動化に寄与していきたいと考える。

#### 執筆者プロフィール



伊藤 文夫 Fumio Ito  
CKD日機電装(株) 技術部 LD技術課  
Linear & Disc motor Development Division  
CKD NIKKI DENSO CO., LTD.