

# 高出力レーザー用ミラーの加工のための数値制御EEM加工機の試作研究

平岡大治 浜崎耕二 松村謙二郎

## Research on Developing a Prototype of NC EEM Machine for Machining Mirrors Used for High Power Laser

D. HIRAOKA K. HAMASAKI K. MATSUMURA

EEM (Elastic Emission Machining), invented by professor Mori at Osaka university, is proved that it can make perfectly flat surface in a level of atom size.

In this paper we will introduce a newly developed EEM machine that all the numerically controlled stages are set in a tank filled with ultra-pure water containing machining powder, and also every driving or guiding components are constructed with hydrostatic system using ultra-pure water.

- |             |            |
|-------------|------------|
| 1. はじめに     | 7. 加工機本体   |
| 2. EEMの基本原理 | 8. 主軸ユニット  |
| 3. EEMの特徴   | 9. 水静圧システム |
| 4. 試作研究の内容  | 10. 制御装置   |
| 5. 材料選定     | 11. おわりに   |
| 6. 全体システム   |            |

### 1. はじめに

EEMとは、大阪大学森勇藏教授の発明による世界最先端の超精密加工法であり、原子レベルで平坦な完全表面が得られることから、次世代科学を支える基盤技術として期待されている。

当社では、20数年前より森教授の御指導のもとで加工機の開発を進めてきた。この度、科学技術振興事業団から題記のテーマを受託し、新しいタイプの数値制御EEM加工機を試作したので以下に紹介する。

### 2. EEMの基本原理<sup>1)</sup>

EEMは、微細粉末粒子表面の反応性を利用した固体表面間反応にもとづく超精密加工法である。本加工法では水の流れを利用して粉末粒子を輸送し、過大な運動エネルギーを与えずに加工物表面に作用させる(図1)。

加工物表面との反応性のある粉末粒子では両表面原子間が化学結合するため、その近傍の価電子状態が変化し、加工物表面原子のバックボンドの結合エネルギーが減少する場合がある。このとき、粉末粒子が水の流れによってさらに輸送されることにより、原子単位の加工現象が

生じるのである(図2)。このように、EEMは従来の化学研磨に対して、“粉末粒子表面の反応性を利用した化学研磨”と考えることができる。

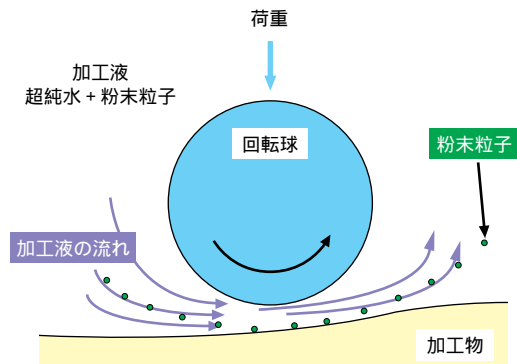


図1 加工物表面への粉末粒子の供給方法  
Method for transporting powder particles onto work surface

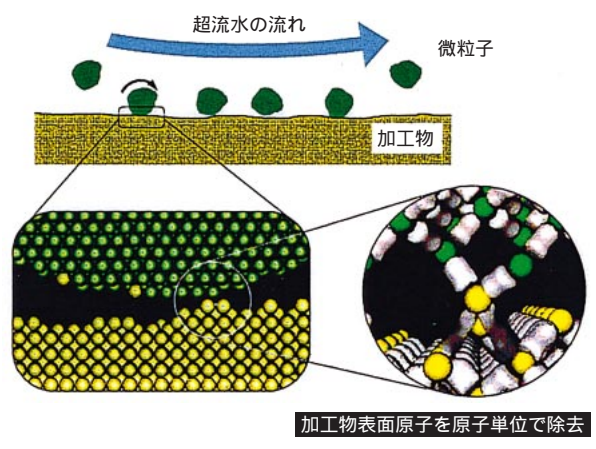
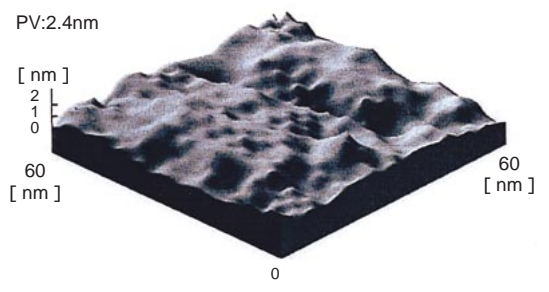


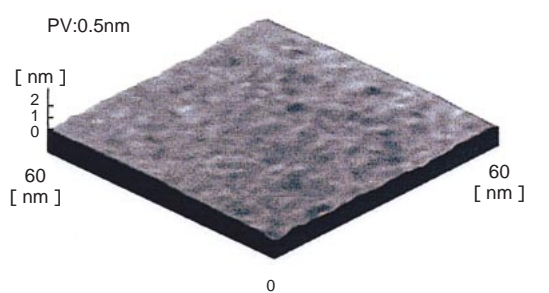
図2 EEMのメカニズム  
Mechanism of EEM

3. EEMの特徴<sup>1)</sup>

EEMでは、粉末粒子表面原子と加工物表面原子が相互作用するサイトのみが加工されるので、加工物表面上の微小な凹部では加工が起こらず、自動的に原子サイズのオーダーで平坦な表面が得られる(図3)。



(a) 超LSI用のSiウエハ表面

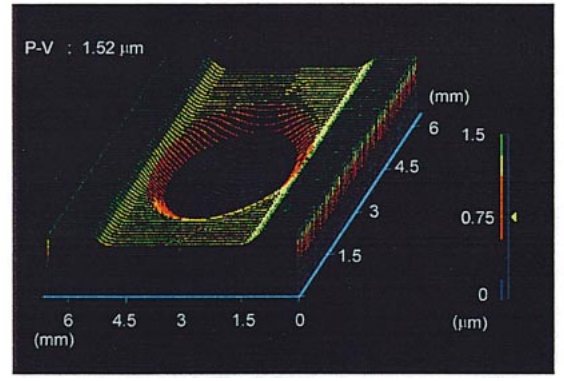


(b) EEM加工面

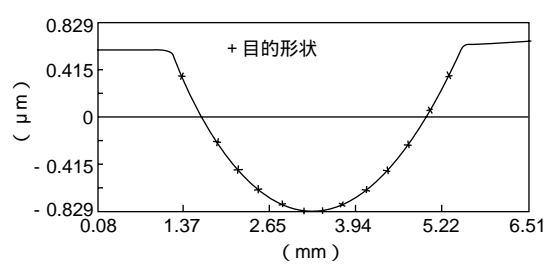
図3 STMによる観察  
Observation by use of STM

また、EEMによる超精密数値制御加工システムでは、制御された水の流れによって微細粉末粒子を加工物上の特定の領域のみに作用させることができるため、加工物表面上の各点を必要な量だけ加工することによって原子レベルで平坦な表面をもつ任意曲面(形状精度0.01 μm以上)

を創成することができる(図4)。



(a) WYKO TOPO-3Dによる測定結果



(b) 中心線上の表面形状と目的形状との差

図4 石英の球面形状加工  
Spherically machined quarts

4. 試作研究の内容

本研究は、EEMを利用して高出力レーザー用ミラーの加工を行うための数値制御加工機を開発するものである。具体的には、1996年度から運転が始まったシンクロトロン放射光施設 Spring-8 で使用される X 線ミラーへの適用を考えており、世界最高出力の X 線を有効利用するために、トロイダルと呼ばれる複雑な形状のミラーを原子レベルで凹凸なく仕上げるのが要求される。

ところで、化学反応を利用したEEMにおいて、加工現象を高次元につねに安定に維持するためには、加工雰囲気制御が極めて大切であることが明らかになってきている。開発した加工機では、加工液の汚染の原因となる加工環境からの不純物の混入を避けるために、加工液で満たされた密閉系の加工槽内に数値制御用ステージ全体を設置したものであり、さらにステージ本体による加工液の汚染を防ぐために、すべての駆動、案内機器要素を超純水の静圧システムで構成した。

このように、本研究は世界に例のない加工システムの実現にチャレンジしたものであり、超精密加工の未来を開くものとして期待される。

重点開発項目は、

良好な環境でのEEMを実現し、加工現象を安定化させるために、クリーンな環境を汚染しない超純水静圧軸受システムの開発。

完全に超純水加工液中に没しながら稼働することのできる加工機本体の開発。

加工液のクリーン化のための精製システムの開発。

トロイダルミラーと軸対称ミラーの加工が可能で、ステージ構成、および姿勢制御技術の開発。

であったが、本報では特に加工機本体と超純水静圧システム、制御システムについて概要を紹介する。

5. 材料選定

装置を製作するにあたり、超純水中で安定かつ溶出の少ない材料を使用することが絶対条件となった。

考えられるいくつかの材料について溶出試験を行い、ある種のセラミックスやSUS316, SUS304, アルマイトなどを使用可能なものとして選定した(図5)。

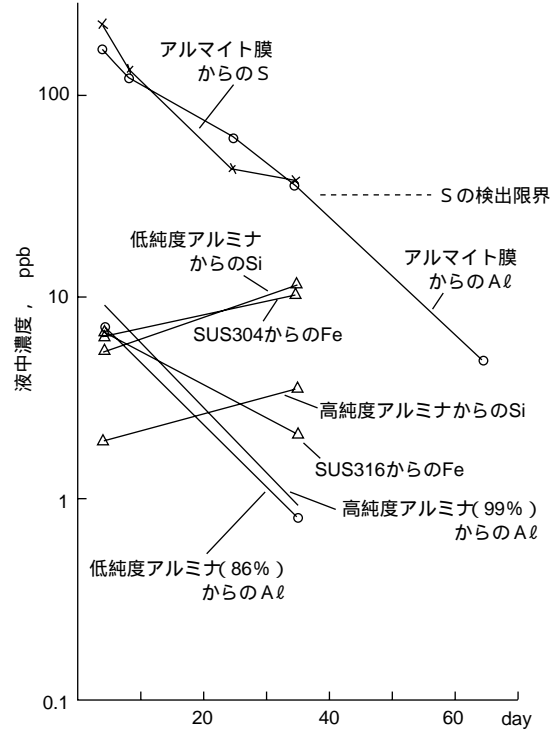


図5 超純水500cc中に表面積25cm<sup>2</sup>から溶出した金属イオン濃度(溶出テスト期間4日)

Dissolved metal ion concentration into 500cc ultra pure water from material surface of 25cm<sup>2</sup>. (Test period; 4 days)

6. 全体システム

図6に数値制御EEM加工システムの構成を示す。加工機本体と制御装置の他に、液面制御タ

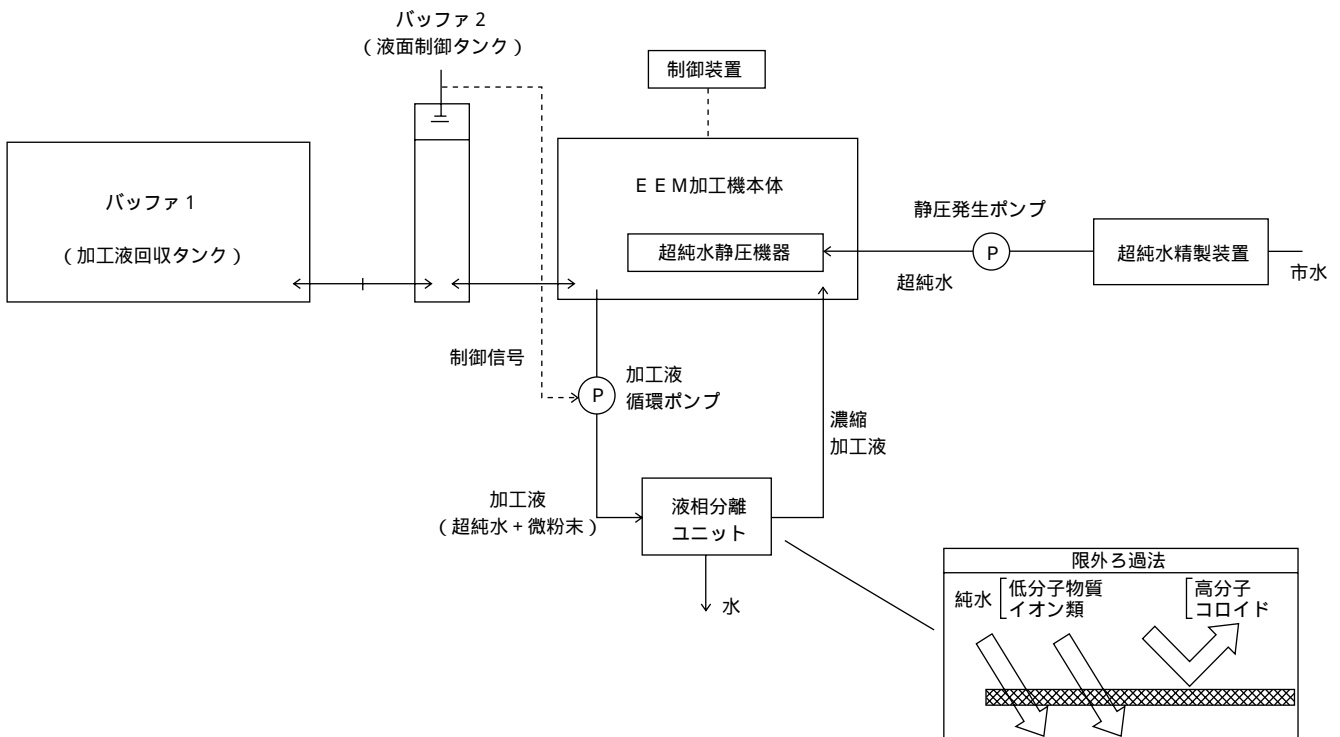


図6 数値制御EEM加工システム  
NC EEM machining system

ンク，加工液回収タンク，液相分離ユニット，超純水精製装置より構成されている。

超純水製造装置から供給される超純水は，加工機本体の超純水静圧機器に供給されるが，これにより加工槽から同量の加工液があふれ出し，あふれ出た加工液は液面制御タンクに導かれ，タンク内の水面を押し上げる。

タンク上部に取り付けた超音波センサーでこの変位を検出し，液相分離ユニットへの循環ポンプを制御することで，あふれ出る加工液と同量の液相分をこし出すことができ，加工槽内を常に一定の水位に保つことができる。

さらに加工液の液相分が，順次新しい超純水と入れ替わるので，常に安定した加工環境を維持することができる。

以下に加工機本体と制御装置の仕様を示す。

1) 加工機本体

- 外形寸法.....2 880( W )×1 780( D )×1 760( H )mm
- 軸 数.....X - Y - 軸，主軸
- 軸 受.....超純水静圧スライドベアリング，スピンドル
- 送り機構.....超純水静圧ねじ
- ストローク.....X 600 mm Y 200 mm
- 分解能.....1 μm
- 加工物.....500×100×50 mm トロイダル 300 mm 円盤

2) 制御装置

- 制御方式.....パソコンとの高速データリンクによるCNC制御
- 入力データ.....前加工での計測データから求められた1 mm メッシュ毎の速度データ
- 制御軸数.....X軸，Y軸，軸，主軸スピンドル
- 加工速度.....0.1mm/min ~ 600mm/min
- 制御範囲.....EEM加工機本体，加工液精製循環装置

7. 加工機本体

図7に外観写真を，図8に斜視図を示す。加工機本体ベースの上にX軸テーブル，Y軸テーブル，軸を積み重ね，ベース上に別途取り付けたコラムに，回転加工球とその加圧機構を含む主軸ユニットを設置する構造となっている。

外部からの加工液の汚染を防ぐために，これらはすべて超純水加工液で満たされた密閉系の

加工槽内に設置され，さらに加工機自身による加工液の汚染を防ぐためにすべての駆動，案内機器要素をしゅう動部を持たない超純水静圧システムで構成している。

加工槽はベース部分と側壁部，蓋部よりなり，試料の取り付け時など必要に応じて分割して取り外すことができる。ここでは紹介しないが，巨大な加工槽を持ち上げるために，ウルトラクリーンルーム(大阪大学，クラス1レベル)内で使用できる専用リフターを別途開発した。

また，装置の組立てはウルトラクリーンルーム内で行われたが，完全洗浄された部品ゆえに特殊な組立技術を必要とするなど，作業は困難を極めた。

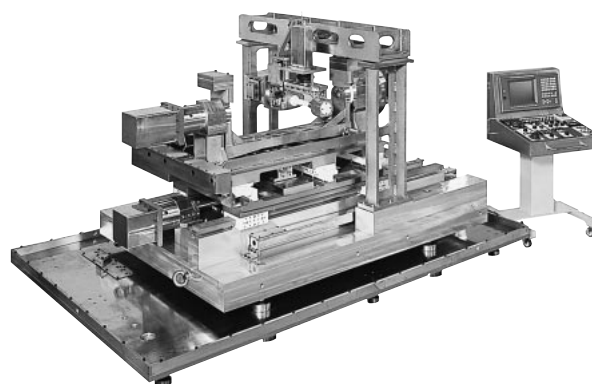


図7 加工機本体外観状況  
Appearance of the machine

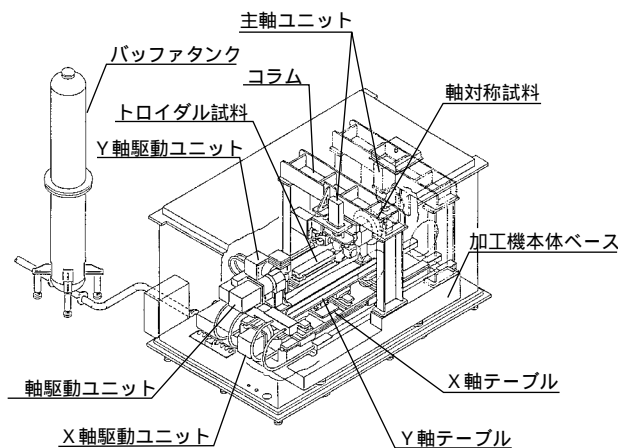


図8 加工機本体斜視図  
Drawing of the machine

8. 主軸ユニット

図9に主軸ユニットの内部構造を示す。リニアアクチュエータによる推力が加圧用ばね、ロードセルを介して加工球に伝わり、試料への押し付け力となる加圧機構を開発した。ロードセルからの信号が設定値に達した時点でリニアアクチュエータの前進を止めることにより、その後は加圧用ばねによる安定した加工圧を得ることができる。

図10にトロイダル試料と軸対称試料を加工する時のイメージ図を示す。

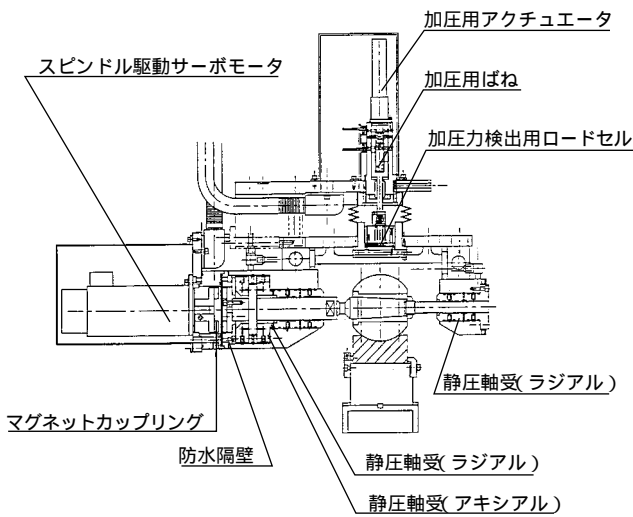


図9 主軸ユニット内部構造  
Inner structure of the spindle unit.

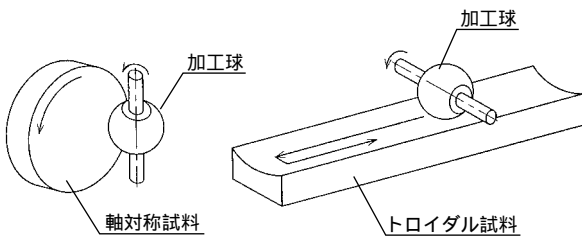


図10 加工イメージ図  
Image of machining

9. 水静圧システム

図11に静圧システムの基本原理を示す。微小な軸受すきまに高圧の流体を噴出することにより浮上し、非接触で荷重を受けることができる。本装置では、超純水を潤滑流体として使用することにより、加工液中への設置を可能にしたが、超純水の供給量に制限のあることから、最小限の流量で目標の性能を達成することが要求された。すなわち、最小の軸受すきまにするための最適設計と、高精度の加工，組立て，調整技術

が要求された。

設計にあたり、テストサンプルを製作し、理論式の妥当性について検証を行った。その結果、一部補正を行うことにより、油静圧の理論式を水静圧に適用できることを確認した。

また、補正式にもとづいて設計した最終部品について流量測定を行い、計算値とよく一致することを確認した(図12, 図13)。

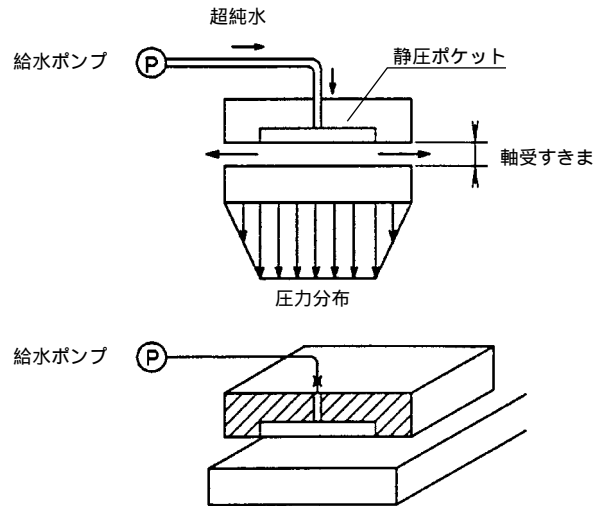


図11 静圧システムの基本原理  
Theory of hydrostatic system

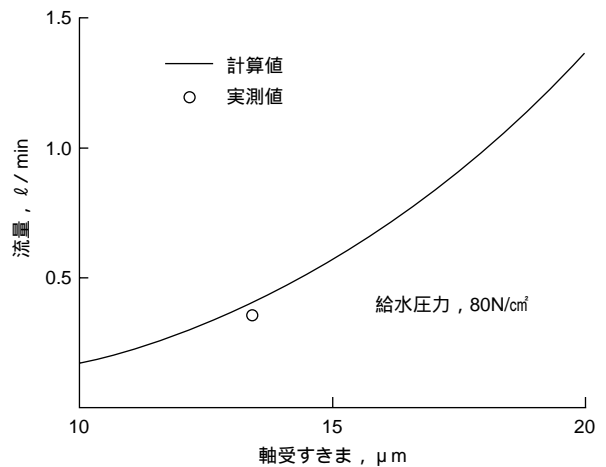


図12 軸受すきまと流量の関係  
(Y軸スライドベアリング)  
Relation between bearing gap and water flow.  
(Y-axis slide bearing)

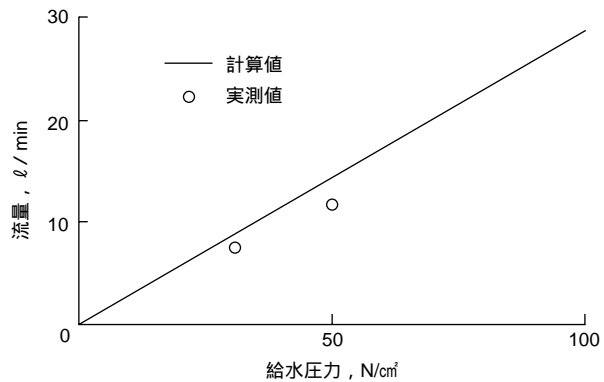


図13 給水圧力と流量の関係(Y軸静圧ねじ)

Relation between supplying water pressure and water flow. (Y-axis hydrostatic screw)

図14 ~ 図16 に開発した主要要素部品の外観状況を示す。潤滑流体の特異性を考慮した静圧ポケット部の形状や、角度剛性を持たせるためのポケットの配置など種々の工夫が施されている。

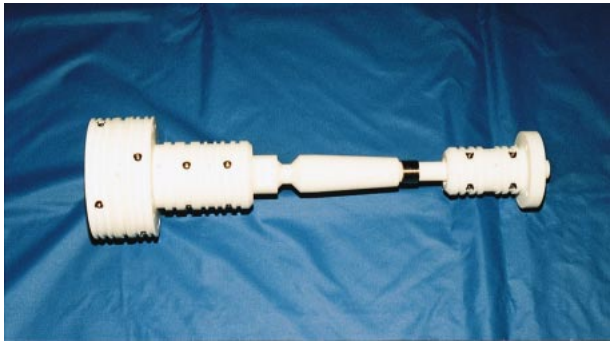


図14 主軸とサポートベアリング(セラミック製)  
Spindle and support bearing

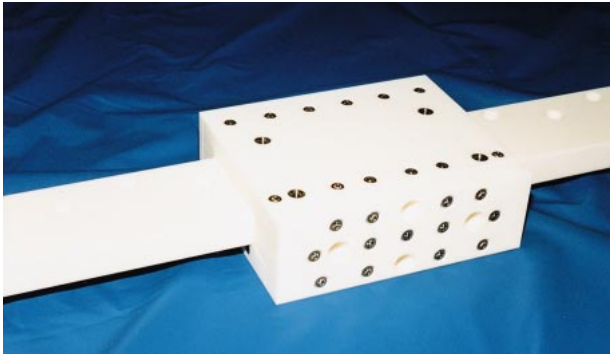


図15 X-Yスライドベアリング(セラミック製)  
X-Y slide bearing



図16 静圧ねじねじ: SUS製,  
ナット: アルマイト処理アルミ製)  
Hydrostatic screw

10. 制御装置

図17に制御ブロック図を示す。前加工での計測データから変換された速度データを基に加工プログラムを自動的に作成し、CNCに移動指令を送るが、この時、データの途切れによる機械の停止が起こらないようにパソコンで制御するなど工夫を施した。

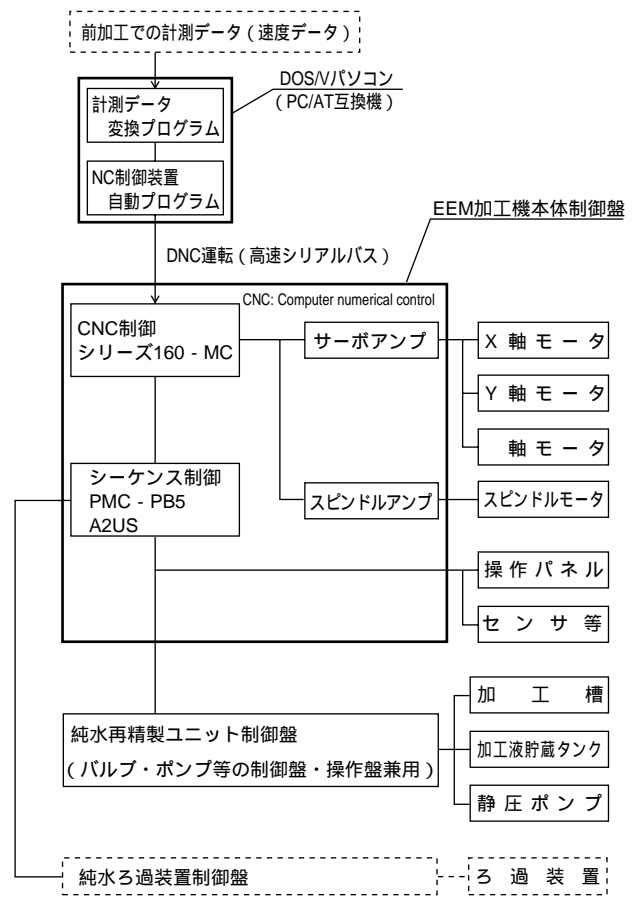


図17 制御ブロック図  
Block diagram

また、機械本体以外に、加工槽内圧力制御や静圧システム圧力制御なども同時に行うことができる。

## 11. おわりに

開発した各要素を組み合わせることにより、超純水加工液で満たされた密閉系の加工槽内に数値制御ステージ全体を設置するという、世界に例のない加工システムの試作に成功した。この成果は、当社の加工技術と静圧・動圧軸受の研究開発で培ちかってきた技術を結集したものである。現在、装置は大阪大学のウルトラクリーンルームで稼動されており、例えば槽内の有機物分子濃度が20ppb以下の値を示すなど、所期の目標を達成している。実際の加工結果については、今後の大学での成果を待ちたい。

最後に、本試作研究にあたりご指導ご協力を頂きました大阪大学、京都工芸繊維大学の先生方、ならびに科学技術振興事業団の関係者の方々に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 森 勇藏, 安武 潔, 遠藤勝義, 山内和人: 次世代を担う原子・電子レベルの先端技術, 精密工学会誌, vol. 62, no. 6 (1996) 769.

## 筆者



平岡大治\*

D. HIRAOKA



浜崎耕二\*\*

K. HAMASAKI



松村謙次郎\*\*\*

K. MATSUMURA

\* 総合技術研究所 基礎技術開発センター  
軸受研究開発部

\*\* 軸受事業本部 生産技術センター  
生産技術開発部

\*\*\* 軸受事業本部 生産技術センター  
生産技術部