

遠心力による真空チャック面変形の実験およびFEM解析*

横山 和宏*¹, 小林 敬司*²
森 脇 俊 道*³, 鈴木 賢 治*⁴Experimental and Numerical Analyses of Change in Shape
of Vacuum Chuck Surface due to Centrifugal ForceKazuhiro YOKOYAMA, Keiji KOBAYASHI,
Toshimichi MORIWAKI and Kenji SUZUKI

This paper deals with the change in shape of the front surface of vacuum chuck employed for ultra precision machining due to the centrifugal force generated by the rotation of the spindle. Displacement, change in shape of the front surface and the diametrical expansion of the chuck made of aluminum are analysed experimentally under several contact conditions. Deformation analyses of the chuck by FEM based on several models for the ordinary contact condition are also carried out to compare with the experimental result. It is clarified that the axial and radial deformations of the aluminum chuck agree well between the experiment and the FEM analysis based on a model with fixed contacts at the interface between the chuck and the spindle. Deformation of another type of chuck consisting of a combination of steel and aluminum parts is also analysed.

Key Words: Ultra Precision Machining, Contact Problem, Modeling, Finite-Element Method, Chuck, Centrifugal Force, Deformation, Interface

1. 結 言

超精密ならびに高精度な加工を実現する上で、工作物の無ひずみ取付法の研究や工作物を取付けるチャックなどの変形防止が重要であり、これらに関する報告^{(1)~(3)}がなされている。超精密加工に用いられる主軸は高い回転速度において使用されることが多い。主軸の回転速度が高速になると、主軸ならびにこれに固定するチャックなどの治具に作用する遠心力が大きくなる。上述した構成部品のなかでも、工作物に直接接触する真空チャックの平面度が変化すると、工作物が変形するので加工精度に影響を及ぼすと考えられる。このため、例えば磁気ディスク基板の超精密切削加工においては、真空チャック前面にセルフカットを施し、セルフカット時と同一の主軸回転速度において加工するという現実的な方法が講じられている。

他方、異なる主軸回転速度においても、上記チャック前面の平面度変化が極めて小さくなるように設計することが可能であれば、より有益であると考えら

る。そこで、遠心力によるチャック前面(：ディスク基板を吸着する面)の平面度変化が極めて小さなチャックの構造設計を数値解析を援用して実施することを目標とする。一般に、チャックと主軸はボルト(もしくはテーパとボルト)を用いて締結されている。このような複合体を数値解析する場合の解析精度は、構成部品の接触面をどのようにモデル化⁽⁴⁾⁽⁵⁾するかによって大きく左右されると考えられる。

本研究では、数値解析を援用した構造設計の基礎となる接触面のFEMモデルの妥当性について検討を行う。まず、チャック・主軸間の接触状態が異なる場合について、アルミニウム製チャックにおけるチャック前面の変位・形状変化ならびにチャック直径の膨張を実験により明らかにする。つぎに、通常の接触状態を適切に表現できるFEMモデルについて実験値と比較して検討する。さらに、このFEMモデルを鋼とアルミニウムとを組み合わせさせた構造のチャックに適用し、FEMモデルの妥当性を検証する。

2. 実験とその結果

2・1 実験方法 本研究で使用した実験装置の概要を図1, 2に示す。主軸の前面にアルミニウム製のチャックをボルト4本で締結している。主軸駆動用3相

* 原稿受付 平成3年2月25日。

¹ 正員, 新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。² 新潟大学大学院 (現: 三菱マテリアル(株))。³ 正員, 神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町1)。⁴ 正員, 新潟大学教育学部。

誘導モータの回転子はテーパを用いて主軸に締結している。使用回転数は 720~7 200 rpm であり、主軸受への供給空気圧力は 539 kPa とした。図 1 に示すようにチャックを固定した状態で、ダイヤモンドバイトを用いチャックの前面をセルフカット(主軸回転数 1 000 rpm)してある。

遠心力によるチャック前面の変位を測定するため、容量形微小変位計(日本 ADE 社製マイクロセンス)のプローブを主軸中心線と同一高さの水平面内に、図 2 に示すように複数個設置した。プローブ A と E は主軸中心線に関して対称に配置している。これは、回転に伴う主軸中心線の傾きが生じた場合にも、この傾きにもとづく変位成分を補正してチャック前面の形状変化を算出するためである。

主軸を手回しにより低速度で回転させた後、加速して予定の回転速度で運転する。その後、減速し 180 rpm に達したとき、直流制動を作用させて主軸を停止させる。この間のプローブ A, B, ..., F によるチャック前面の変位 a, b, \dots, f を A/D コンバータ、パーソナルコンピュータを用いて同時サンプリングした。サンプリング周波数は 150 Hz である。変位はいずれも前面(：作業側)側への変位を正とする。

2.2 チャック前面の変位 測定したチャック前面の変位の記録例を図 3 に示す。同図中の Start 前および Stop 後において、主軸を手回しにより回転させている。この際、変位信号が上下に小さな振幅で振動するのは、チャック前面が角度方向の各位置において完全には平坦でないことによるものと考えられる。そこで、Start 前・Stop 後に主軸を手回しにより低速度で回転させて、得られる振動変位の中央値を静止中の変位とした。

Start の直後に、いずれの変位も急速に変化している。すべての変位の変化形状がほとんど同一であることから、チャックの前面が並進変位していることがわかる。この変位はチャックを固定した主軸のスラスト軸受が変位することに基づくものである。その後の加速期間中(図 3 の 6~12 s の間)においては、遠心力の増加とともに各変位が減少しているの、チャック前

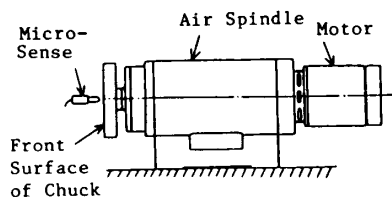


図 1 実験装置(側面図)

面が後退(図 2 において、下方へ移動)していることがわかる。

回転速度が一定の期間における変位信号はいずれもほぼ直線であるので、この直線を延長した図 3 中の破線の Start 時ならびに Stop 時における変位と、上述した静止中の変位との差(例えば、 dL_{Sa} , dL_{Ea})を、遠心力によるチャック前面の変位とする。この変位が、チャック・主軸間の接触状態により、どのように異なるかを明らかにするため、異なる接触状態(4 種類)の場合について測定した結果を図 4 に示す。スペーサなしの場合はチャックと主軸が直接接触している。スペーサを用いる場合には、厚さ約 0.2 mm のスペーサ(ケント紙)をチャックと主軸との接触面の間に挟み込んでいる。外周リング形スペーサ(内径 50 mm, 外径 60 mm)の場合は 4 本の固定ボルトすべての外側で接触し、内周リング形スペーサ(内径 20 mm, 外径 32 mm)の場合はボルトすべての内側で接触するように用いた。ワッシャ形スペーサ(内径 8 mm, 外径 14 mm)の場合はそれぞれのボルトに 1 個ずつ使用した。図 4 の結果から、いずれの回転速度においてもチャック

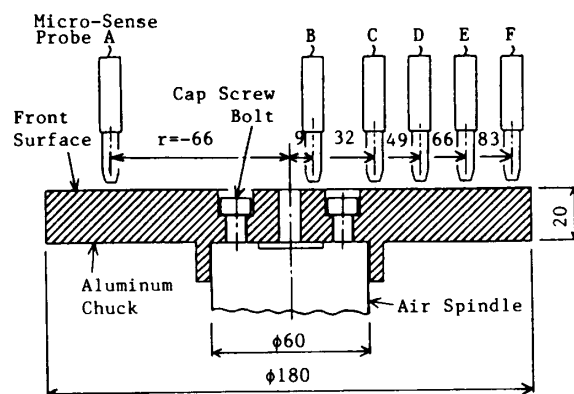


図 2 チャック面変位の測定法(平面図)

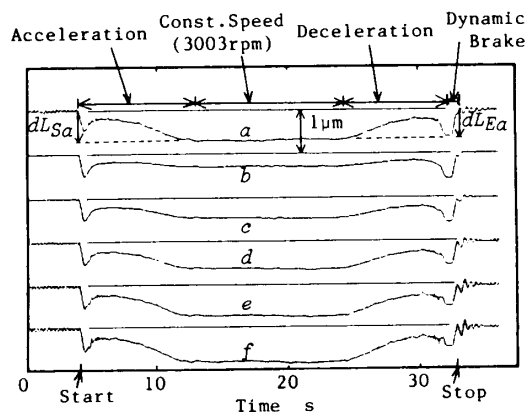


図 3 チャック前面の変位の記録例

クの中央部に比べて外周部がより大きく後退するとともに、高速になるほど後退量が大きくなっていることがわかる。なお、図4の変位は、スラスト軸受部の並進変位、スラスト軸受-主軸前面間の収縮ならびにチャック自体の変形に基づく変位の総和である。

2.3 チャック前面の形状変化 本研究では、チャック前面の形状変化に注目している。そこで、1組の変位(a, b, \dots, f)について、主軸中心線に関して対称な位置の変位 a と e を結ぶ直線(図4中の二点鎖線)に平行で、変位 f を通る直線とそれぞれの測定変位との差を用いて、チャック前面の形状変化を求めた。その結果を図5に示す。いずれの回転数においても、中央部が凸となるように変形することがわかる。

一般に、一様な厚さの円板に遠心力が作用すると、外周部に比べて中心部はその厚さが大きく収縮するので、中央部が凹なる変形を生じる。しかし図2に見られるように、主軸先端の直径に比べて大きな直径でかつ比較的薄い円板(チャック)に遠心力が作用すると、図4, 5に見られるように中央部が凸の形状変化を示す。これは、以下の理由によるものと考えられる。すなわち、チャック・主軸間の固定面において接触しているチャック側ならびに主軸側の2点の半径方向変位について考察する。直径が大きなチャックに作用する遠心力は大きいので、チャック側の接触点は外周方向に大きく変位しようとする。これに比べて主軸側の接触点は、直径が小さな主軸に作用する遠心力が小さいので、小さな変位を示す。チャックと主軸は図2に示すように締結されているので、接触面においてチャック

側の接触点の外周方向への変位が抑制される結果、中央部が凸の形状変化を示すものと考えられる。

スペーサなしの場合に対し、外周リング形スペーサ・ワッシャ形スペーサ・内周リング形スペーサの順に形状変化が小さくなっている。これは、接触点の位置が主軸の回転中心に近いほど接触する2点間の変位の差が小さいので、上述した変位抑制の効果が小さいことによるものと考えられる。

3. FEM による解析

3.1 チャック・主軸間の接触面の FEM モデル ボルト固定による締結部の変形を詳細に検討した報告⁽⁶⁾がなされているが、微小な要素を用いているのでチャックなどの大きな物体に同様の手法を用いると要素数が多くなる。本研究では、すでに締結されているチャック・主軸の遠心力による全体的変形に注目しているので、比較的粗い要素分割で解析できるほうが望ましい。そこで、く形断面のリング状要素を用い、チャックの節点数90・要素数68、主軸の節点数369・要素数299の回転対称体として解析を行った。スラスト軸受の厚さ方向の中央の節点変位を零に拘束している。使用した物性値を表1に示す。

前章の実験結果に示すように、接触面の状況がチャック前面の形状変化を左右するので、FEM解析を援用してチャックの構造設計を実施するには、接触面の適切なFEMモデル化が必要である。

ここでは、図6に示す接触面FEMモデルについて検討を行う。同図(a)のモデルは、固定ボルトの中心に位置する節点1個を共有(同一変位とする。)としている。接触面内のほかの節点は、変位が相互に干渉

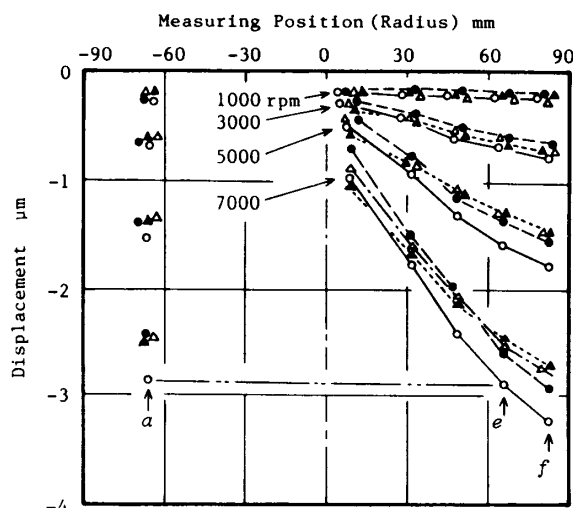


図4 チャック前面の変位

- : スペーサなし
- : 外周リング形スペーサ
- △——△: ワッシャ形スペーサ
- ▲——▲: 内周リング形スペーサ

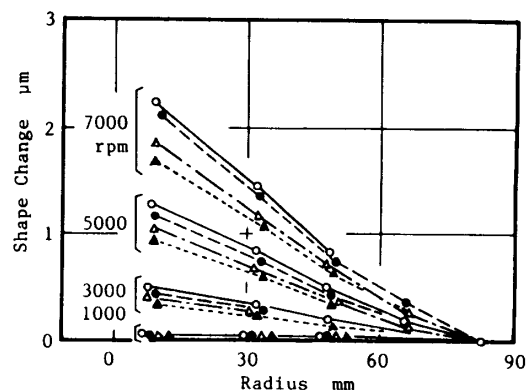


図5 チャック前面の形状変化

- : スペーサなし
- : 外周リング形スペーサ
- △——△: ワッシャ形スペーサ
- ▲——▲: 内周リング形スペーサ

表 1 チャック・主軸の物性値

	Material	Density g/cm ³	Young's Modulus GPa	Poisson's Ratio
Chuck	Aluminum (JIS:A5056)	2.7	68.6	0.34
Spindle	Stainless Steel (JIS: SUS420J2)	7.75	205.9	0.3

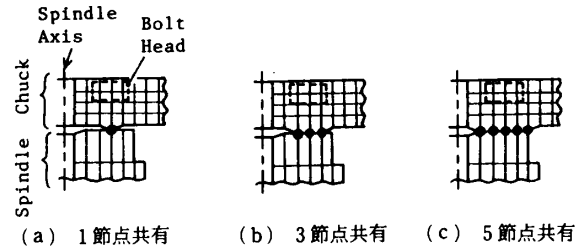


図 6 チャック・主軸間接触面の FEM モデル
●：共有節点

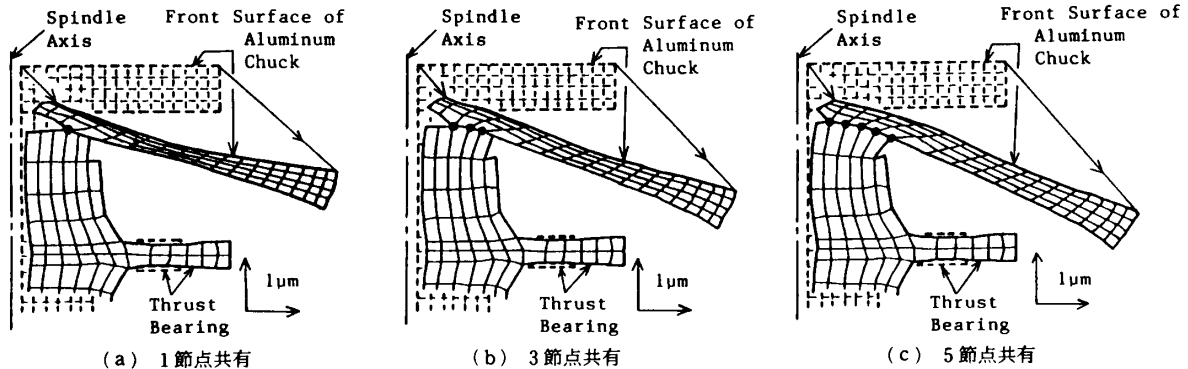


図 7 遠心力によるチャックの変形
.....：変形前(0 rpm) ●：共有節点
---：変形後(7 000 rpm)

しないよう、0.2 mm のすきまをあけた状態で解析を行っている。図 6(b) は節点 3 個を共有とし、同図(c) は見かけ上の接触面に含まれる全節点 5 個を共有としたモデルである。

3・2 チャック前面の形状変化 図 6 の各モデルを用いた場合の FEM 解析により得られた変形状況を図 7 に示す。いずれもチャック外周部の変位に比べて中央部の変位が小さいので、中央部が凸なるようにチャック前面の形状が変化している。チャック・主軸間の接触面の共有節点の内側では接触面のすきまが増加していることがわかる。図 7(a), (b) において、共有節点の外側の接触面が重なり干渉しているかのように見えるのは、変位を拡大表示していることによるものであり、出力した変位の数値から確認したところ変形後も約 0.2 mm のすきまが存在している。

図 7 の解析結果から測定位置 F($r=83$ mm) の変位を基準として、チャック前面の形状変化を実験値と対応させて整理した結果を図 8 に示す。共有節点が少ない場合には、実験結果との差が大きい。見かけ上の接触面に含まれる全節点 5 個を共有した FEM 解析結果は、通常の締結状態(：スペーサなし)における実験結果とよく一致している。これは、一般に構成部品の接触面が平坦もしくはわずかに中低形状に仕上げられるので、図 6 に示すようにボルト頭部の直径より広い領

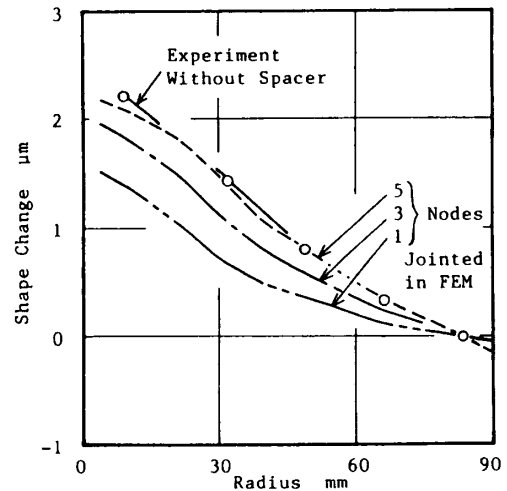


図 8 チャック前面の形状変化(7 000 rpm)

域で接触圧が作用し、2・3 節において考察したように接触面上の節点変位が拘束されることによるものと考えられる。

回転速度によるチャック前面の平面度変化を、実験ならびに FEM 解析により求めた結果を図 9 に示す。測定点 B($r=9$ mm) と F($r=83$ mm) との変位の差を用いて表示した。5 節点を共有とした FEM 解析の結果は、いずれの回転速度においても実験値に良く一致することがわかる。

3.3 チャック直径の膨張 遠心力によるチャック直径の膨張を測定するために、図1に示すチャックの前面から5mmの位置にマイクロセンスのプローブ2個を上下方向に対向させて設置した。測定記録の例を図10に示す。得られた Start 時ならびに Stop 時の直径膨張量(：図10の dL_S , dL_E)を FEM 解析の結果とともに図11に示す。図7に示すようにチャック前面の変位がチャックの半径(90mm)に比べて小さい(したがって、チャック前面の傾きが小さい。)ので、直径膨張量に関しては、図6のいずれのモデルでも実験値によく一致する結果が得られる。

本章の検討結果から、本研究で取り扱う程度の締結部接触状態変化に対応する変形を解析する場合には、通常の締結状態を表現する FEM モデルとして、見か

け上の接触面に含まれる全節点5個(図6(c)参照)を共有とするモデルが適切であると考えられる。

4. 組合せチャックの変形

前章までにおいては、図2に示す単一構造のアルミニウム製チャックを主軸に固定した場合について検討を行った。他方、直径3.75インチのディスク基板など比較的小さな工作物を加工する場合には、主軸・チャック間の締結ボルト用の穴がチャック面に露出しない構造のチャックを用いる必要がある。ここでは、前章の結果得られた接触面の FEM モデルを、鋼とアルミニウムとを組合せたチャック(図12参照)に適用して、上記接触面モデルの妥当性を検討する。図12の主軸とチャック鋼部との接触面ならびにチャックのアルミニウム部と鋼部との接触面に含まれる各節点(●印で示す。)を共有としている。FEM 解析により得られたチ

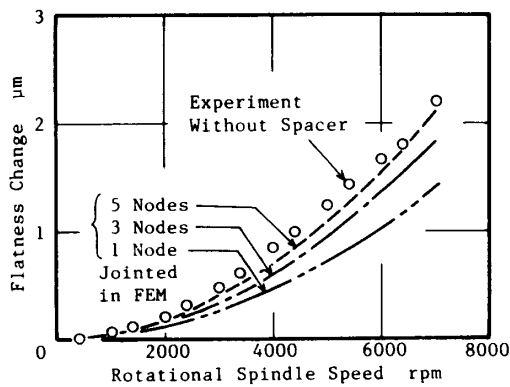


図9 チャック前面の平面度変化(回転速度の影響)

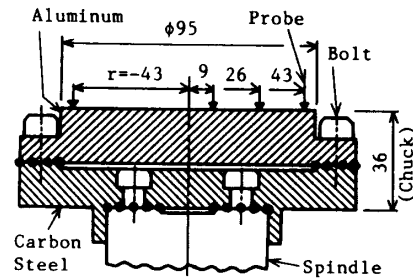


図12 組合せチャック

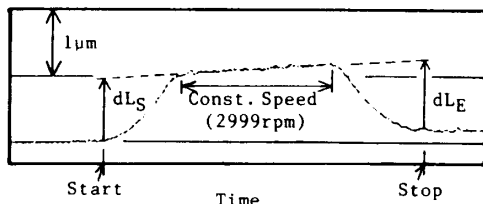


図10 チャック直径の膨張の記録例

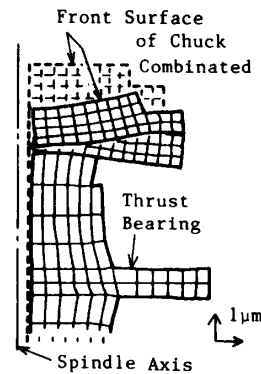


図13 組合せチャックの変形
 : 変形前(0 rpm)
 --- : 変形後(7 000 rpm)

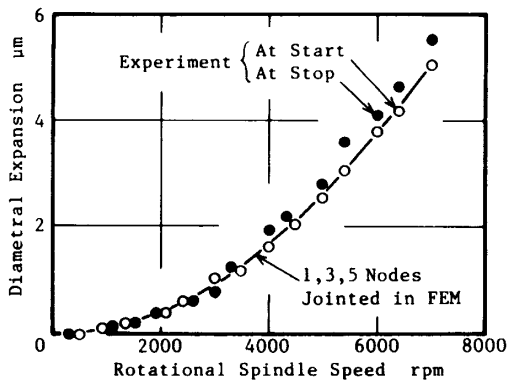


図11 チャック直径の膨張

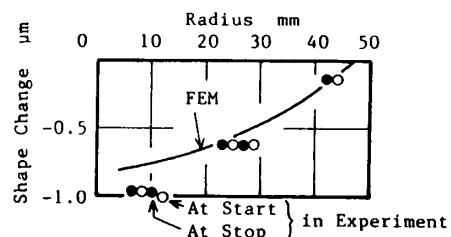


図14 組合せチャック前面の形状変化(7 000 rpm)

チャックの変形状況を図13に示す。チャックの鋼部は図7に示した単一構造のチャックとほぼ同様に変形するが、アルミニウム部は中央部が凹なる変形を示すことがわかる。FEMによる解析結果と実験結果とを比較して図14に示す。実験値の $r=43\text{ mm}$ における変位とFEM解析結果の $r=43\text{ mm}$ における変位とを一致させて表示している。実験値はFEM解析結果に比べてやや大きな形状変化を示すものの、FEM解析を援用してチャックの構造設計を行うにはほぼ十分な精度が得られていると考えられる。

以上の検討から、見かけ上の接触面に含まれる全節点を共有とするFEMモデルはほぼ妥当なものと考えられる。

5. 結 論

遠心力による平面度変化が極めて小さなチャックの構造設計をFEM解析を援用して実施することを目標として、チャック・主軸間の接触面のFEMモデルについて検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 接触面で互いに接する各点は、自由な変位を拘束し、チャック前面の形状変化に影響を及ぼす。

(2) 接触面となるチャックならびに主軸の各面

は、一般に中低形状に加工されているので、ボルト頭部の大きさに比べかなり広い範囲において、節点変位が同一であるというFEMモデルが成立する。本研究で取り上げたチャック・主軸の場合にあつては、見かけ上の接触面に含まれる全節点の変位を同一としたモデルで、実測値とよく一致する結果が得られた。

(3) このモデルを鋼とアルミニウムとを組合せたチャックの各接触面に適用して、FEMモデルの妥当性を確認した。

本研究を行うにあたりご協力いただいた(株)不二越・伊庭剛二氏、牧本良夫氏、NTN(株)・猿田正弘氏、三上孝氏、また、卒研学生としてご協力いただいた岩崎正彦君〔現：新潟日本電気(株)〕、江田毅君〔現：三協アルミニウム工業(株)〕に感謝する。

文 献

- (1) 新野・ほか1名, 機論, 51-471, C(1985), 3125.
- (2) 高沢, 精密機械, 39-2 (1973), 186.
- (3) 和田, 精密機械, 48-11 (1982), 1421.
- (4) 伊東, 機論, 54-500, C(1988), 807.
- (5) 小泉・ほか2名, 機論, 44-384 (1978), 2861.
- (6) 清水・ほか2名, 精密機械, 49-11 (1983), 1528.