

5 自由度制御型磁気軸受の製作

○磯谷俊史,中西幸弘,白木尚康,立花一志,足立勇太
名古屋大学全学技術センター 工学系技術支援室 装置開発技術系

1. はじめに

平成 25 年度,我々は研究室からの依頼を受け,磁気浮上技術を応用した 5 自由度制御型磁気軸受の設計・製作を行った.装置製作には,モノづくりを行う上では欠くことができない多彩な要素が集約されている.本装置の製作では作業グループを形成し,若手を対象に一連で行われる作業の実践を通して,機械を構築する基礎能力を養わせる育成プログラムが併せて実施された.筆者はこれまで旋盤・フライス盤・ワイヤ放電加工機等を用いた部品加工を主に行い,加工知識・技術の習得,そしてその向上に力を注いできた.創意工夫を取り入れた設計・製作を通しての装置製作は初めての経験であり,本装置の製作を通して行われた育成教育の対象者である.本装置の製作において,筆者は機械設計・機械製図・機械加工・組付調整といったモノづくりで行われる一連の作業工程を通して(図 1),共同製作者の指導・助言のもと実践を積み研鑽した.本稿では書面の制約もあり,特に新たな気持ちで臨んだ機械設計工程での内容を中心に,5 自由度制御型磁気軸受の製作過程を紹介する.



図 1. モノづくりの流れ

2. 研究室との連携

5 自由度制御型磁気軸受の開発は研究室により立案され,まとめられた装置構想概略図(以降『発案』)(図 2)を基に我々が設計・製作を行った.求められる基本性能を満たす装置製作を行うためには,『発案』の意図をよく理解し,装置の目的を明確にさせることである.また,磁気浮上技術に関する知識を備えることは,装置設計を行う上で有意と考え,研究室の先生より研究概要について講義頂いたのをはじめ,製作全般を通して,研究室との連携を大事にした装置製作になるよう心がけた.

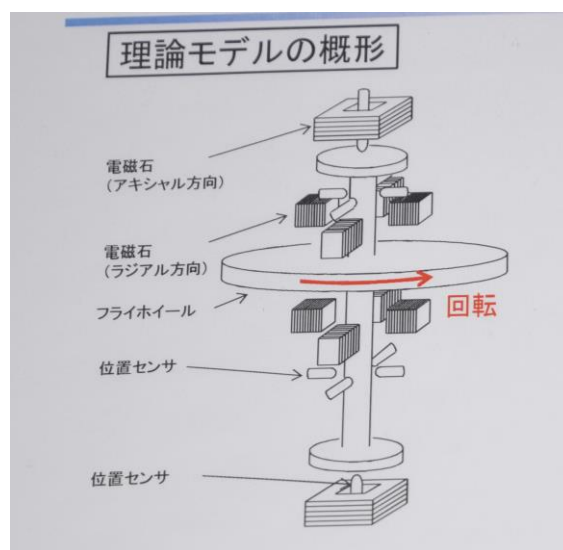


図 2. 装置概略図(発案)

3. 装置の目的

ロケットエンジンを例に挙げると,用いられるターボポンプは高速回転機械であり,軸振動に対して高い回転安定性が要求される.その軸振動を抑制し安定化させるためには,危険速度域を超えた時に発生する自励振動に起因する,精細な振動解析が必要であり,回転系と静止系との接液部・接ガス部に発生する,ロータダイナミクス流体力(以降 RD 流体力)を把握することが必要不可欠になる.また,その他,多くのター

ボ機械においても同様に RD 流体力のモデリングが盛んに行われている。本装置の目的は、回転軸を非接触浮上させる磁気軸受の制御システムを構築し、振動解析を行う上で測定対象物以外の影響を受けない、高精度な計測を可能にすることにある。5 自由度制御型磁気軸受は、RD 流体力を計測する装置の中核を担う機構である。

4. 装置の概要

電磁石により非接触支持される回転体(軸・フライホイール)は、前後・左右・上下の並進 3 自由度、前後・左右の傾き 2 自由度の合計 5 自由度を有している(軸回転の 1 自由度は外部からの駆動力に支配されるため除かれる)。前後・左右の並進 2 自由度及び傾き 2 自由度を 2 組のラジアル電磁石により位置・姿勢制御を行い、上下方向の並進 1 自由度を 2 組のアキシヤル電磁石により位置制御を行う内部構造である。その他、回転体の 5 自由度運動の位置計測を行うため、4 つの位置センサが適所に設置される。また、研究室より、回転体系の全長は 30cm 以下、そして机上で実験ができる装置サイズが提示された。

5. 機械設計

機械設計はアイデアを形として具現化する過程であり、概念設計・基本設計・詳細設計の三段階を経て進展する(図 3)。概念設計は、機械を構築する上でどのような原理を用い、どのように実現するかを考える過程であり、最終的に簡略図で機械が表現される。前述したように、本装置における概念設計『発案』は研究室で行なわれている。

次に行われる基本設計は、『発案』の意図に従い、

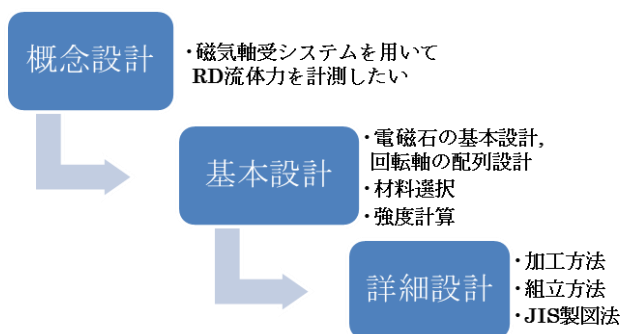


図 3. 機械設計の流れ

装置の基本構造を具体化する過程である。本装置ではこの基本設計以降の過程を、研究室との連携を大事に、我々が主体で作業を進めた。基本設計の内容として、最初に各磁気軸受の基本構造を設計し、その配列位置を最適化する作業を行った。その他、既製品を用いる部材の選定、各部品素材の選定、軸とフライホイールの締結法の選定、また軸が回転体に及ぼす回転トルクを算出し、耐力試験値と比較検討する検証作業もこの基本設計で行った内容である。

最後に行われた詳細設計では、加工方法から組付け方までを考慮して詳細な形状・寸法を決定した。

本装置は製図作業も含めた全ての設計・製図において、3次元 CAD システム(SolidWorks)を活用して作業を行った。なお、本装置の設計を滞りなく行うためには、ある程度の機械構築の経験が必要である。そのため、筆者は作業グループが進めた作業内容の進捗を見守ることで機械設計とその流れを学んだ。

6. 磁気軸受系の設計

磁気軸受系は、本装置の性能を大きく左右する重要部である。電磁石の仕様選定と磁気回路設計が、研究室内で綿密に行われ基本設計が提案された。次に、我々が他部品との組付けに関わる加工仕様を整え、詳細設計を完了させた。電磁石の材料には、ロータを含め製鋼メーカーから提供された快削ケイ素鋼を用いたが、この材料は磁性材料として広く一般的に使用されるものである。

6.1 アキシヤル電磁石

図 4 に詳細設計を終えたアキシヤル電磁石を示す。電磁石は、ボビンをアクリルで作成し、それに銅線(φ 0.9mm)を多層に巻いてコイルを形成し、外形部の鉄芯に圧入する内部構造である。外形部とロータとの間に、磁気回路を構成することで吸引力を発生させる仕組みである。アキシヤル電磁石は重力方向の位置制御を担うため、最大吸引力は回転軸系の想定重量 2.5[kgf]から十分に余裕を持った設計を行い、実測値で 44[N]を計測した。

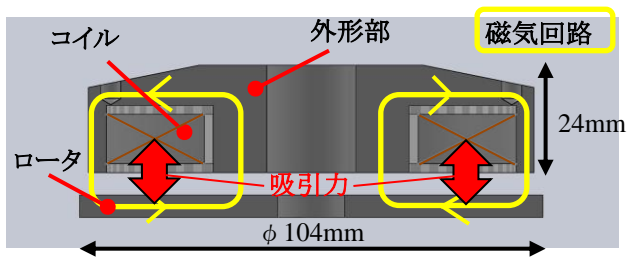


図 4. アクシヤル電磁石

6.2 ラジアル電磁石

図 5 にラジアル電磁石を示す。アクシヤル電磁石と同様にボビンをアクリルで作成し、それに銅線(φ 0.6mm)を多層に巻いてコイルを形成し、ステータの鉄芯部に圧入する構造である。本装置で設計したラジアル電磁石は、前後・左右の 4 方向の吸引力を発生させる 8 極型磁気軸受と呼ばれるもので、最大吸引力は実測値で 12.2[N]を計測した。

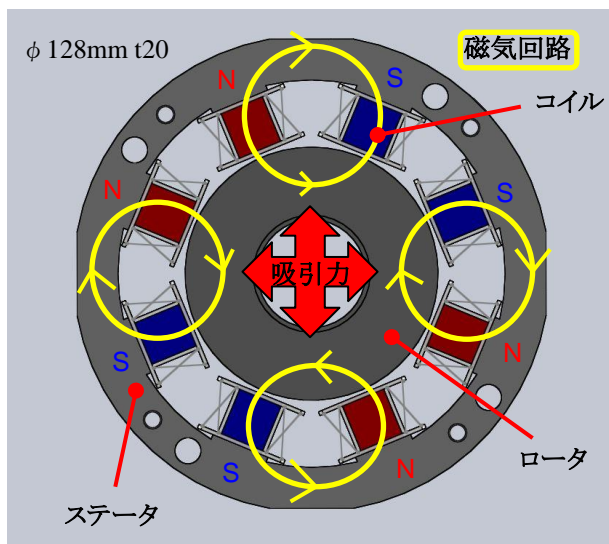


図 5. ラジアル電磁石 (8 極型)

7. 回転軸の設計

各電磁石の詳細設計が完了したことで、次に回転軸の設計を行った。回転軸の材質は、ロータとの磁束を遮蔽しなければいけないことから非磁性体 SUS304 を選定した。また、回転軸系は理論計算上で剛体としたいことから、軸径は質量と剛性とのバランスを考慮しφ 15 を選定し、表層に硬質クロムメッキ(メッキ層 10μ, 硬度 HV750~)が施された既製品シャフトを用いることにした。

8. 電磁石の配列

回転軸の設計が終わったことで、次に電磁石系の配列を考えた。回転軸系を構成する部品は、回転軸、アクシヤル電磁石ロータ 2 個、ラジアル電磁石ロータ 2 個、そして回転を安定化させる役割のフライホイールである(図 6)。前述したように、本装置は次のステップとして RD 流体力の計測器に発展させるため、回転軸の両端には関連部品を付加する装置構想がある。そのため『発案』での電磁石配置を見直し、配列が中心に対して軸対称体であることに配慮しながら、電磁石系全ての配置を再考した。図 6 に回転軸に配列する電磁石位置の変遷を示す。各電磁石の配置は研究室との検討を重ね、いくつかの基本設計を経て確定された。アクシヤル電磁石ロータについて、回転軸系の軽量化を図り二つのロータを一体化した。また一体化されたロータは大きな慣性モーメントを有するため、フライホイールを最終的に構成から外した。

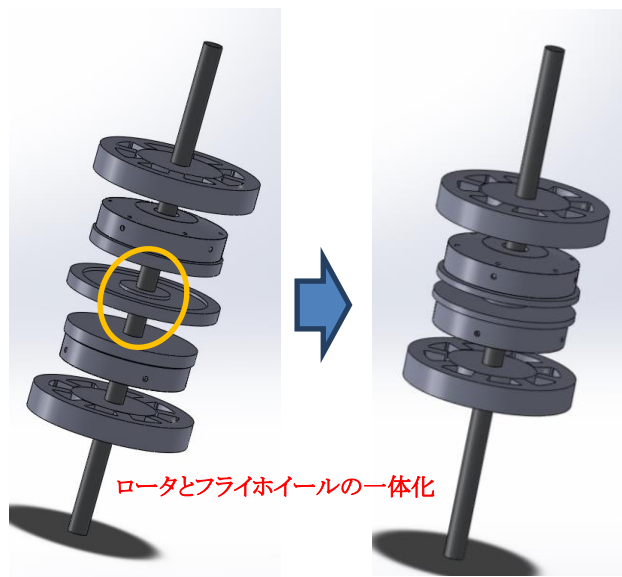


図 6. 電磁石配置の変遷

8.1 回転軸への固定

電磁石の配列が決められた後、回転軸と各ロータを固定する方法を検討した。固定方法については我々と研究室双方での実績もあり、最良と判断した焼ばめ・メカロックの二つを採用した。図 7 に示すように中央部アクシヤル磁気軸受ロータについては、軸対称体にしたいことから、一方からネジを締め付けるメカ

ロックは妥当ではないと判断し焼ばめを適用した。また、ラジアル電磁石ロータ(2 個)については、組付け調整時に脱着可能でなければいけないことからメカロックを適用した。

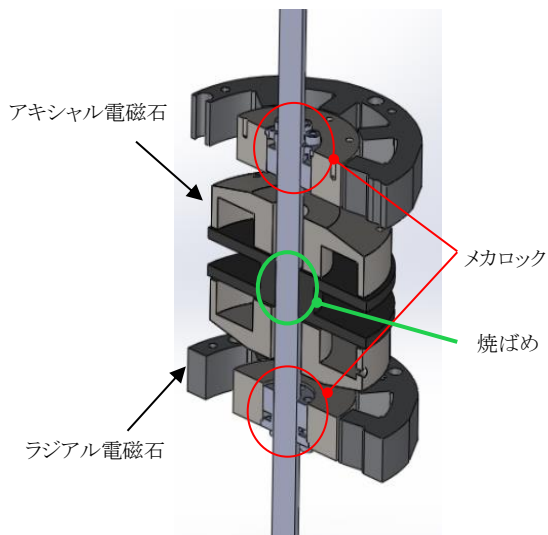


図 7. 回転軸への固定法

焼ばめの固定を採用するにあたり、電磁石に用いた材料の熱膨張係数から温度毎の寸法変化量を算出し、締り代が異なる試験片(軸と円盤)を多数用意して焼ばめ及び耐力試験を実施した。そして、耐力を十分満たし、焼ばめ作業も容易に行えると判断した締り代を選定した。また、焼ばめによりロータを取り付けた後には、偏心と軸方向の振れをなくすため旋盤加工を施すこととした。メカロックについては、メーカーから耐力試験値のデータが公表されているため、耐力試験は省略した。ロータ装着時の偏心と軸方向の振れ幅については、装着試験を行い許容範囲内であることを確認した。

9. ハウジング

図 8 にハウジングを示す。アキシャル・ラジアル電磁石を一对として収納する構造であり、ラジアル電磁石の水平方向位置を 4 本のネジで微調整する機能を持たせた。並列されたハウジングは、それぞれ向きは異なるが機能は同じであり、4 本のシャフトで連結され固定される(図 8)。ハウジングには位置センサ固定台、後述する補助軸受等の付帯機構を固

定する、装置の土台的な機能・役割を持たせる設計を行った。

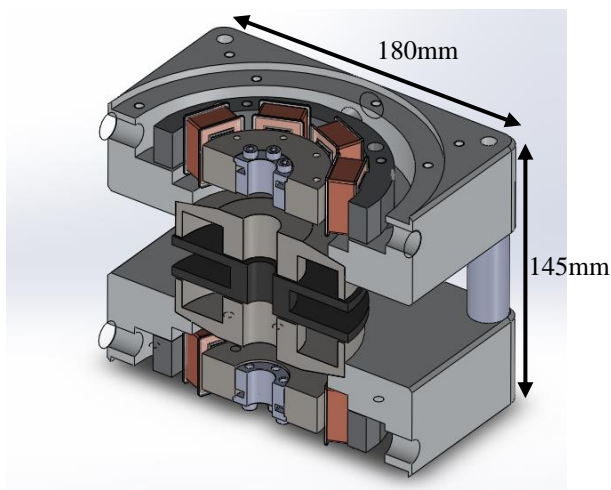


図 8. ハウジング

10. 補助ベアリング

図 9 に補助軸受を示す。一体で回転体の前後左右、及び上下方向の動きを制限する機能を持つ。アキシャル・ラジアル電磁石それぞれのロータとの隙間に対し、補助軸受はその半分程度の移動量で回転軸に触れるように設計した。また、高速回転中の回転体は大きな運動エネルギーを持つため、電磁石に接触した場合、軸、電磁石、及びセンサの破損に繋がる恐れがある。そのため、補助軸受の機構にはスラスト及びラジアルベアリングを組み込み、接触部には樹脂材を用いて衝撃を緩衝するいくつかの工夫を施した。

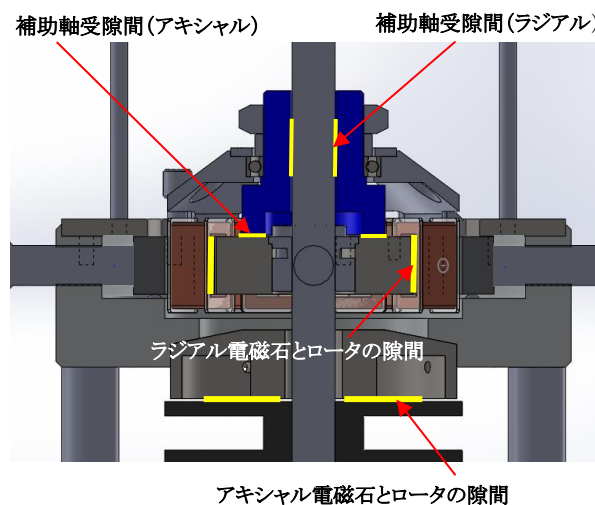


図 9. 補助ベアリング

11. 組付け・調整

図 10 に今回製作した全部品を示す。一部既製品（メカロックなど）を含むが、ほぼ全ての部品について、我々作業グループが部品ごとに分担を決め分業で製作した。次の図 11 に示すのは組立調整の作業風景である。組立調整を行うにあたり、若手職員と研究室の学生が協力して組み立てた。組立の際、図 12 に示すスペーサを用い、アキシアル電磁石とロータのクリアランス、ラジアル電磁石と補助ベアリングとのクリアランスの調整も併せて行った。また、ラジアル電磁石ロータの組み付けは、トルクレンチを用い適正トルクで締め付けた。軸を傾けたときに各ロータがどこにも干渉しないことを確認した。(図 13)

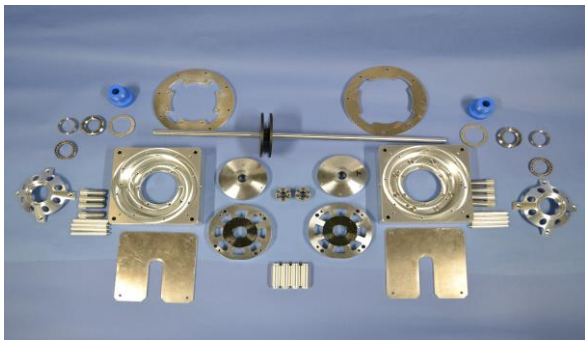


図 10. 製作部品

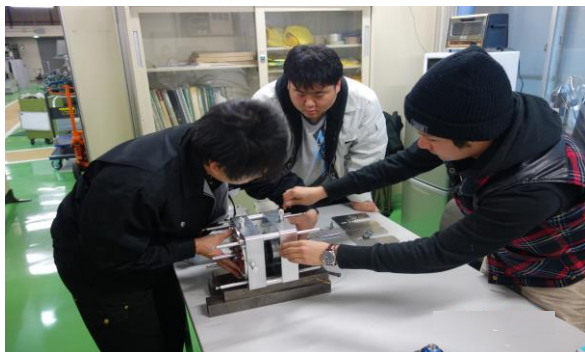


図 11. 組み付け作業

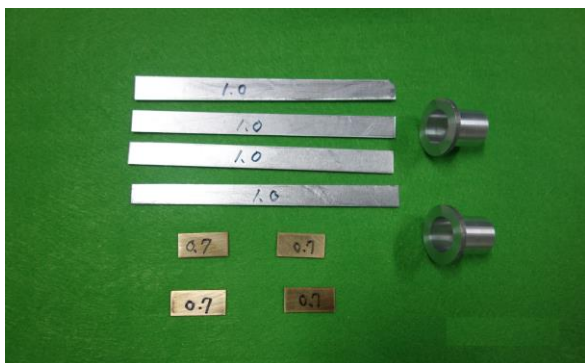


図 12. スペーサ

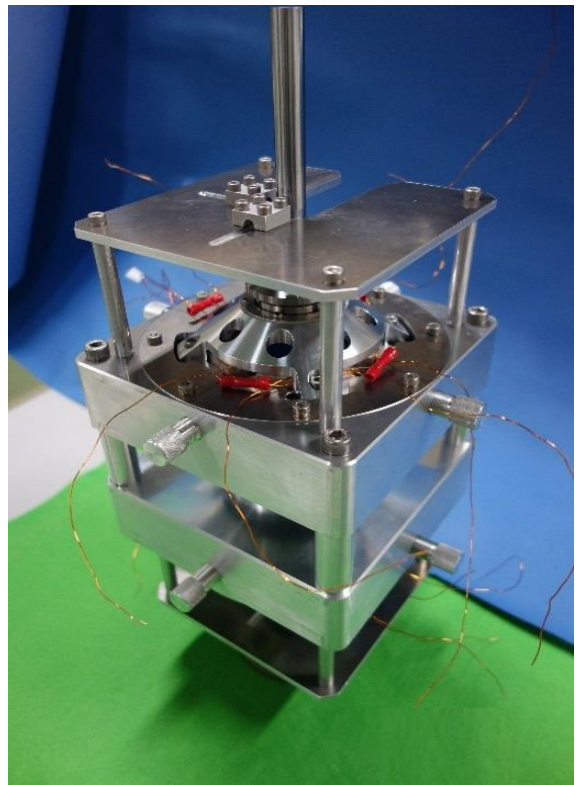


図 13. 組付・調整完了

12. まとめ

筆者が本装置の設計・製作を通して研鑽した内容は多岐にわたり、その経験は、近い将来、自ら行うモノづくりの基盤になるものと実感している。

また、本装置製作の中では、作業グループの先輩方とモノづくりについての話をする機会を多く持った。その中には本装置製作に若手を迎え入れ、育成教育を行った目的の基にある考えを伺い知ることができた。その内容についてまとめてみた。

【設計工程】

機械設計はアイデアを形として表す作業であり、通常、正解というものではなく、作りたい物の目的に沿うか否かである。設計者の知識と経験値により、その機能には大きな差が生じる。機械構築の経験が無い筆者にも、必要になる基礎力は通常業務の中でも十分に養えることを教わった。通常業務において持ち込まれる図面には、CADシステムを用いて体裁は整えられていても、モノづくり経験の少なさ、機械加工に無知なことから、不自然でバランスの良くない設計も中には見受けられる。そのような作品は図面通りに加工するのではなく、その部品の目的を知り、必

要なら機械設計を自ら再考し、自らの図面で加工するような、丁寧な取り組み姿勢がその力を養うことになる。また、依頼者の相談に乗り、より良い製品の提供に努めることは、研究支援の意味において我々が担う重要な役割である。

【製図工程】

製図行程については本稿で触れていないが、教本を用意し JIS 製図法の基礎を学んだ上で機械製図を行った。製図はモノづくりにおける世界共通の言語、意図の伝達手段である。人が幼い頃から国語を習うように、モノづくりを志す者なら、製図法に基づいた基礎的な図面の読み書きができるよう、通常業務を通して実践を積むことが大切である。また、学生から加工相談を受けるとき、あるいは実習等で図面を書かせるとき、加工に携わるものならではの製図アドバイスを与えることは、教育支援の意味において技術職員の果たせる大きな役割である。

【機械加工】

我々の職場において、機械加工はそれ自体が最終的な目的ではなく、機械構築を行う上で必要になる、一つの重要な工程と捉えるべきである。機械加工を掘り下げ、高い技術を備えることも近い将来には必須であるが、まずは旋盤、フライスを始めとした機械加工、その他、放電加工、ロウ付け・溶接など、幅広くモノづくりの手法を備えることが大切である。我々の職場は大学である。モノづくりを行う総合力を高め、それを製作業務および技術相談、ならびに実習およびモノづくり講座等に幅広く還元することが、研究および教育支援の両面において我々技術職員が担う重要な役割である。

【モノづくり】

大学において、モノづくりを行う環境を考えてみる。研究室には研究目的を達成するために実現したい『発案』が数多く存在し、我々にはそれを形として表せる技術と経験を備えている。実験装置の製作は、研究目的に関連した専門性の高い知識が不可欠であるが、自身の不足部は研究室との連携を密に取って補えば良い。大学は質の高いモノづくりが行える、非常に恵まれた環境であることを認識しておくことが大事である。まずは一通りの加工に自信がついた後、

自ら装置製作を行ってみることである。そのためにはモノづくりを応援してくれる研究者と、通常業務を通して、持ちつ持たれつ、繋がりを深めておくことが大切である。そして『何か作りたい装置はありませんか』である。

13. 終わりに

本稿では、設計工程で行った内容とその流れを紹介するのみに留めた。当工程において筆者は主体的な役割を担ったわけではないが、工程で行うべき内容を体系的に理解し、まとめることも大事と考えたからである。本稿の内容について、口頭発表の場では、本装置製作を通して、自らが実践した事象を中心に紹介する。

また、本装置製作を通して、終始において協力いただいた学生・院生の卒業論文、及び修士論文発表を、作業グループの全員で聴講した。本装置製作は、モノづくりを経験し研鑽を積んだだけではなく、2人の学生が力を注いだ研究集大成の、一役を担うことができたと思うと喜ばしく感じた。また、今後もお世話になった研究室とも繋がりを大事にして、近い将来、力を蓄え自らが主体となった装置製作を行えればと考えている。このような機会を与えていただいた研究室、ならびに技術部装置開発技術系の皆様には、この場を借りて深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 名古屋大学工学部 電子機械工学専攻 2013年度卒業論文 「5 自由度制御型磁気軸受・剛性ロータ系の実機製作と挙動解析」:神谷航平
- [2] 「機械設計 基礎の基礎」:平田宏一 日刊工業新聞社
- [3] 続・「機械設計 基礎の基礎」-スキルアップ編-:平田宏一 日刊工業新聞社
- [4] 2012年 改訂第2版 機械工作テキスト:名古屋大学全学技術センター 教育・研究技術支援室 装置開発室