

平成27年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高精度で信頼性の高いアブソリュートエンコーダの製品化に向けた技術開発」

研究開発成果等報告書

平成 28年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社緑測器

目 次

第 1 章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的および目標	1
1-2 研究体制	2
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	5

第 2 章 本論

2-1 3 トラック軸一体型磁気式アブソリュートエンコーダの製品化に向けた技術開発	6
2-2 3 トラック中空型磁気式アブソリュートエンコーダの製品化に向けた技術開発	13
2-3 誤差補正機能付磁気式アブソリュートエンコーダの製品化に向けた技術開発	14

第 3 章 全体総括

3-1 研究開発成果	23
3-2 研究開発後の課題	23
3-3 事業化展開	23

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

我が国における工作機器製品は、国内外から高評価を受けており市場競争力も高い。しかし、近年は新興国の台頭もあり、競争力の維持・強化のためには、製品加工や精密計測に必要とされる位置決め技術は益々高度化している。

現状の位置計測センサの原理は光学方式が主流であるが、高分解能化が進む反面、耐環境性及び低コスト化との両立が困難という課題がある。他方式では、回転差動トランス等の原理を用いたアブソリュートエンコーダがあるが、検出信号の内挿誤差の影響により分解能に見合う精度を実現できない課題を抱えている。

(2) 研究目的及び目標

位置決め技術高度化の実現に向けた要求事項は多岐に渡るが、川下製造業者共通の課題は、高精度化、安全性及び信頼性、低コスト化である。

高精度化を実現するためには、高分解能化は重要な課題であるが、環境条件及びセンサ構成部品の経時的変化に伴って劣化する真値からの偏差である「正確さ」を、長期間に渡って高い水準に維持できる、真に高精度な位置決め技術が望まれている。

また、近年では安全性及び信頼性に対するニーズが急速に高まっている。工作機械やロボット等では作業の高度化や複雑化・長時間化が進んでおり、センサの電源喪失やその他外乱による位置データの喪失は生産性の低下につながる。特に、医療や福祉のサービスロボットでは介護者や被介護者の人命を脅かす恐れがあり、電源復帰時には一切の動作が不要で位置計測が可能な真にアブソリュートであることが望まれている。

また、設備・機器の稼働環境によっては、湿気、熱、埃、振動、衝撃、外部磁界、電磁波、等、様々な外的要因があり堅牢、環境耐性が望まれている。

これらのニーズに対して、高分解能、堅牢性等、個別要求に対応するセンサは市場供給されているが、高価であるという課題もある。

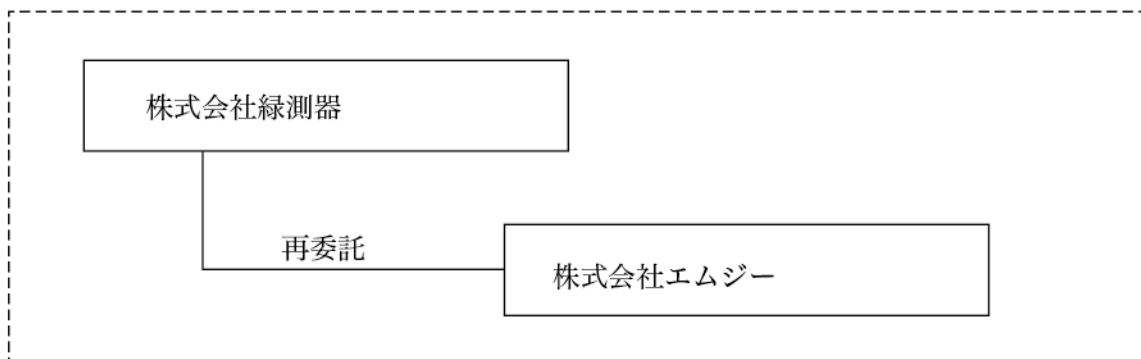
高分解能・高精度、耐環境性、堅牢性、安全性に低コストを加えた総合的な性能を有する位置決めセンサが望まれており、前述の背景とニーズを踏まえ、「高精度3トラック磁気式アブソリュートエンコーダ」と、センサ信号の内挿誤差を補正可能とする「誤差補正機能付磁気式アブソリュートエンコーダ」の開発を行った。製品化に向けた、実施内容及び開発目標を以下に示す。

実施内容		開発目標
① ②	3 トラック軸一体型磁気式アブソリュートエンコーダの製品化に向けた技術開発	1) 回転スケール用着磁装置の設計及び製作 2) 磁気スケール媒体(φ32.6mm)の高精度化に向けた技術開発 3) 3 トラック軸一体型アブソリュートエンコーダの試作機の製作及び検証 4) 3 トラック一体型 MR センサの開発

実施内容		開発目標
③	3トラック中空型磁気式 アブソリュートエンコーダ の製品化に向けた技術開発	1) 磁気スケール媒体（φ130mm）の高精度化 に向けた技術開発 2) 3トラック中空型アブソリュートエンコー ダの試作機の製作及び検証
④ ⑤	誤差補正機能付磁気式アブ ソリュートエンコーダの製 品化に向けた技術開発及び 計測値の信頼性向上に向け た技術開発	1) 「中空型アブソリュートエンコーダ」及び 「軸一体型アブソリュートエンコーダ」の 試作品の製作及び検証 2) 内挿誤差を補正する技術開発 3) 計測値の信頼性向上に向けた技術開発
⑥	プロジェクトの管理・運営	1) 株式会社緑測器において、本プロジェクト の管理を行う 2) 本研究の実用化に向けた到達の度合いを検 証、事業化に向けての課題等について、研 究実施者との調整を行う。 3) 再委託事業者が作成する証憑書類につい て、指導・確認を行う。 4) 研究開発推進委員会を委託契約期間内に3 回程度開催する。

1-2 研究体制

(1) 研究組織（全体）



統括研究代表者 (PL)

株式会社緑測器

取締役 技術部 部長 土屋 勝英

副統括研究代表者 (SL)

株式会社エムジー

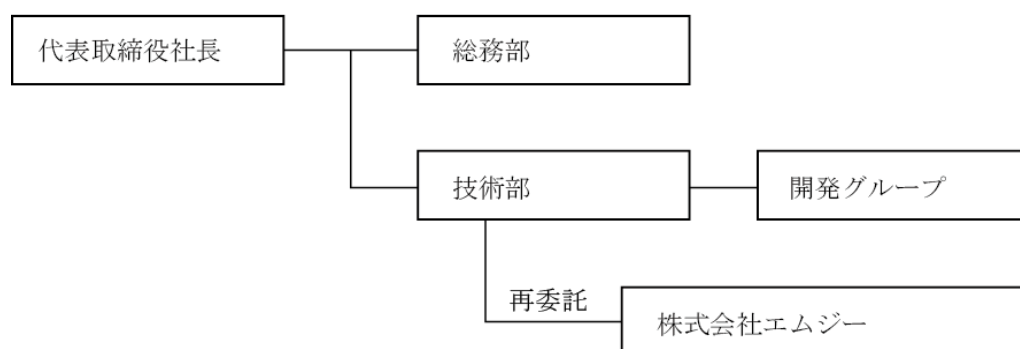
マグネット製造部 部長 吉田 和仁

(2) 管理体制

① 事業管理機関【株式会社緑測器】

(業務管理者)

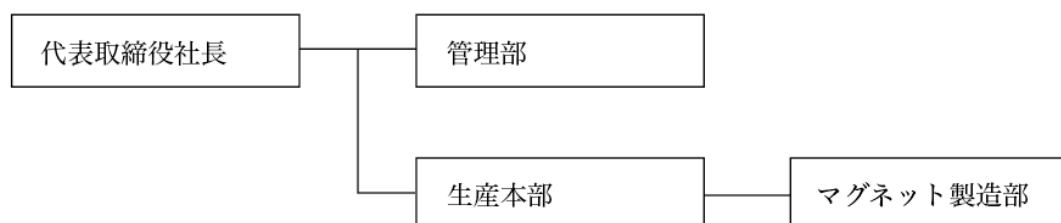
(経理担当者)



② 再委託先【株式会社エムジー】

(業務管理者)

(経理管理者)



(3) 管理員及び研究員

① 事業管理機関【株式会社緑測器】

(管理員)

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
土屋 勝英	取締役 技術部 部長	⑥
壬生 捷利	技術部 顧問	⑥
中井 恵利子	管理補助員	⑥

(研究員)

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
土屋 勝英(再)	取締役 技術部 部長	① ② ③ ④ ⑤
壬生 捷利(再)	技術部 顧問	① ② ③ ④ ⑤
佐藤 衛	技術部 開発グループ リーダー	② ③ ④ ⑤
花田 博之	技術部 開発グループ 研究員	① ② ③ ④ ⑤
岩永 信晃	技術部 開発グループ 研究員	① ② ③ ④ ⑤
平 雄介	技術部 開発グループ 研究員	② ③ ④
未至磨 和人	技術部 開発グループ 研究員	② ③ ④ ⑤
駒場 英夫	技術部 開発グループ 研究員	② ③ ④
土谷 秀樹	技術部 研究員	① ② ③ ④ ⑤

② 研究機関【株式会社エムジー】

(研究員)

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
吉田 和仁	マグネット製造部 部長	① ② ③ ④ ⑤
朝倉 秀孝	マグネット製造部 マグネット技術管理課	① ② ③ ④ ⑤
伊藤 太一	マグネット製造部 マグネット技術管理課	① ② ③ ④ ⑤

(4) 研究開発推進委員会委員及びアドバイザー

氏名	所属・役職	備考
土屋 勝英	株式会社緑測器 取締役 技術部 部長	PL
吉田 和仁	株式会社エムジー マグネット製造部 部長	SL
壬生 捷利	株式会社緑測器 技術部 顧問	
佐藤 衛	株式会社緑測器 技術部 開発グループ リーダー	
花田 博之	株式会社緑測器 技術部 開発グループ	
岩永 信晃	株式会社緑測器 技術部 開発グループ	
平 雄介	株式会社緑測器 技術部 開発グループ	
未至磨 和人	株式会社緑測器 技術部 開発グループ	
駒場 英夫	株式会社緑測器 技術部 開発グループ	
土谷 秀樹	株式会社緑測器 技術部 研究員	
朝倉 秀孝	株式会社エムジー マグネット製造部 マグネット技術管理課	
伊藤 太一	株式会社エムジー マグネット製造部 マグネット技術管理課	
笹田 一郎	九州大学 大学院総合理工学研究院 融合創造工学部門 教授	アドバイザー
佐々木 慎也	川崎重工業株式会社 精密機械カンパニー 技術本部 機器第三技術部	アドバイザー
下津 臣一	富士フイルム株式会社 R&D 統括本部 光学・電子映像商品開発センター 技術マネジャー	アドバイザー

1-3 成果概要

本研究開発では、高精度 3 トラックアブソリュートエンコーダと、誤差補正機能付アブソリュートエンコーダの製品化に向けた技術開発に取り組み、計 4 機種(①高精度 3 トラック軸一体型、②高精度 3 トラック中空型、③誤差補正機能付軸一体型、④誤差補正機能付中空型)の研究開発を実施した。

①は、専用着磁装置の製作を行い、磁気ドラム、センサ機構、センサ信号処理・デジタル信号処理回路の基本的な原理検証を終了し、2 回の試作機の製作・検証・改善を行い、概ね、設計通りの性能が得られる事が確認でき、ほぼ目標が達成され、製品化の目処が立った。

②は、①に対し大型、中空型となるが、技術的難度、市場ニーズの分析結果より、他 3 機種を優先としたため、磁気ドラムの試作に留まり、目標未達となった。

③④は、複合誤差の抽出・補正、センサ機構、センサ信号処理・デジタル信号処理回路の基本的な原理検証を終了し、試作機の製作・検証・改善を行い、概ね、設計通りの性能が得られる事が確認でき、製品化の目処が立った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社 緑測器

東京都羽村市神明台3-2-8

担当者 土屋 勝英

電 話 042-554-6717

FAX 042-554-5230

E-Mail tsuchiya_k@midori.co.jp

第2章 本論

2-1 3トラック軸一体型磁気式アブソリュートエンコーダの製品化に向けた技術開発

(1) 回転スケール用着磁装置の設計及び製作（株式会社緑測器、株式会社エムジー）

〈実施概要〉

当該エンコーダを実現するためには、波長 λ の目盛が形成されたメイントラックと、設計パラメータである拡張数 n を介して $n\lambda = (n+1)\lambda_a$ なる関係を有する波長 λ_a の目盛が形成された拡張トラック1と、これら2種類の波長の目盛を所定のルールに従って形成した拡張トラック2を有する磁気ドラムが必要となる。

本研究開発では、3トラックの磁気目盛を高精度に形成する回転スケール用着磁装置の設計及び製作と、磁気ドラム上に磁気目盛を形成するための高精度着磁ヘッドの設計及び製作を行った。

〈成果1〉

拡張数 $n=16$ 及び $n=32$ に準拠した3トラック構成の磁気ドラムの着磁と、着磁精度（着磁ピッチ精度、信号歪）の評価機能と、偏心調整支援機構を盛り込み、偏心調整作業の効率化と高精度化を実現する、回転スケール用着磁装置を完成させた。16bit～22bit分解能と、2種類の目盛が混在する高精度で特殊な磁気目盛が生成可能となった。

Tab.2.1.1に製作した回転スケール用着磁装置の概略仕様を、Fig.2.1.1に写真を示す。

Tab.2.1.1 回転スケール用着磁装置の概略仕様

項 目		仕 様	備考
着磁 制御	最小着磁ピッチ	100 μ m	
	最大着磁ピッチ	1mm 以上	
着磁 パターン 編集	着磁ピッチの混在	2種類の着磁ピッチを混在可能	
	拡張数設定範囲 (1)	16、32	2進系列
	拡張数設定範囲 (2)	10～40	10進系列
着磁精度 評価	ピッチ精度評価	全トラック	
	信号波形歪評価	2次～7次までの高調波成分	



Fig.2.1.1 回転スケール用着磁装置

〈成果 2〉

また、磁気ドラムの製作には、着磁装置だけでなく着磁仕様に適合した着磁ヘッドが必要となる。本研究開発では、回転スケール用着磁装置から出力される記録信号を元に、100 μ m と 200 μ m 着磁ピッチに対応可能な高精度着磁ヘッドの設計と製作が完了した。

(2) 磁気スケール媒体の高精度化に向けた技術開発（株式会社緑測器、株式会社エムジー）

〈実施概要〉

当該エンコーダでは、磁気ドラム媒体としてプラスチックマグネット（以下プラマグ）を想定しており、高精度化を達成するためには、磁気特性が均一で寸法精度の高い磁気ドラムを製作する技術の確立が課題となる。

Fig.2.1.2 に当該エンコーダ用に設計された $\phi 32.6$ mm 軸一体型磁気ドラムの外観写真を示す。また、エンコーダ機構部と磁気ドラムとの関係概略図を Fig.2.1.3 に示す。



Fig.2.1.2 $\phi 32.6$ mm
軸一体磁気ドラム

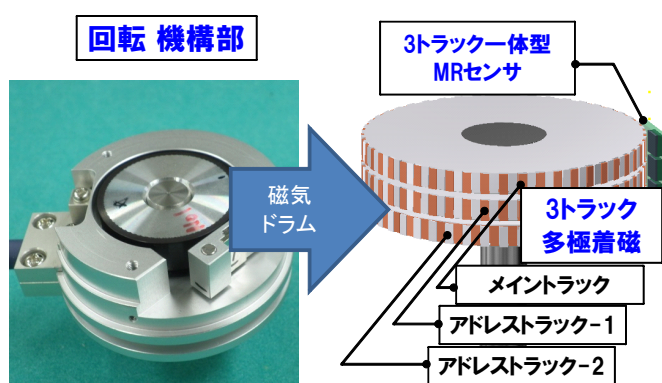


Fig.2.1.3 エンコーダ機構部と磁気ドラムの構造

平成 26 年度より、磁気ドラムの高精度化を達成するため、Tab.2.1.2 に示す精度目標を設定し、着磁波形、着磁電流及び着磁パターン等の最適化により、高精度磁気ドラムを安定的に生産するための技術開発に取り組んだ。

Tab.2.1.2 磁気ドラムの精度目標

項目	精度目標値
単ピッチ精度	±0.1%以内
累積ピッチ精度	0.5%以下
振幅変動	5%以下
外周フレ	5 μ m 以下
面フレ	3 μ m 以下

〈成果〉

高精度な磁気ドラムを製作するためには、回転スケール用着磁装置のパラメータの最適化が必要となるが、平成 26 年度には、以下に示す着磁パラメータに着目し高精度化に取り組んだ。

- 1) 着磁電流（着磁ヘッド電流）及び着磁パルス幅
- 2) 着磁時の回転速度
- 3) 着磁段数

上記の条件最適条件により、単ピッチ精度は 0.2%までの精度が得られたが、目標とする 0.1%には不足となった。

平成 27 年度は、更に精度目標達成に向けた総合的な改善活動を実施した。主な取組みと実施内容を Tab.2.1.3 に示す。また、その検証結果を Tab.2.1.4 及び Fig.2.1.4 に示す。

Tab.2.1.3 磁気ドラム高精度化への取組み

精度悪化要因の抽出	精度影響	実施内容
計測系ノイズの影響	ピッチ精度の暴れ、中点バランスの変動	ノイズ低減対策を実施
機械的振動の影響	ピッチ精度の暴れ	防振対策の実施
着磁パラメータ	ピッチ精度、高調波歪みの悪化	条件の見直し、最適化
フレ精度の改善	センサ Gap の変化（振幅変動）	組立て、加工方法の変更

Tab.2.1.4 磁気ドラム性能一覧

精度目標	設定目標値	達成値
単ピッチ精度	±0.1%以内	0.1～0.2%
累積ピッチ精度	0.5%以下	0.35%
振幅変動	5%以下	4%以下
高調波歪率	(2%以下)	1.2%以下
外周フレ	5 μm 以下	1.2 μm
面フレ	3 μm 以下	12.3 μm

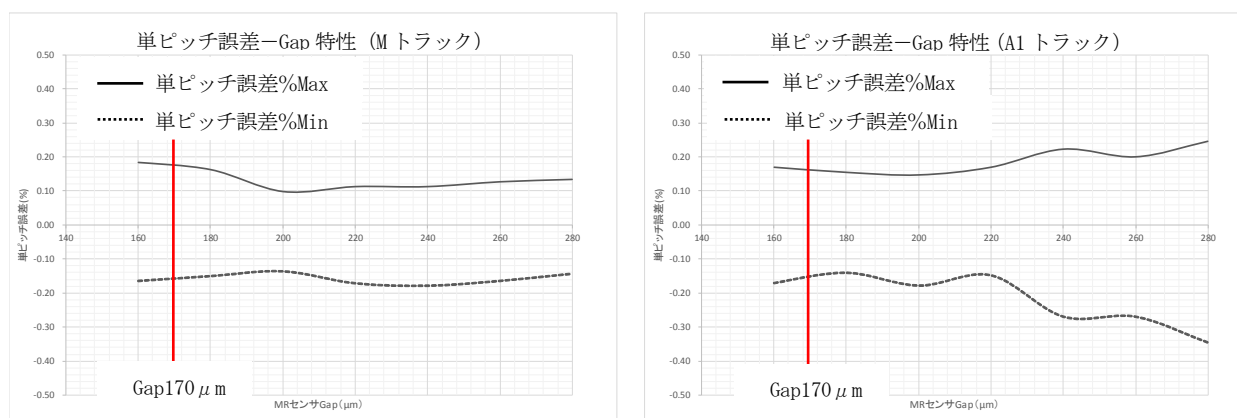


Fig.2.1.4 単ピッチ精度特性（メイン、A1トラック）

以上の結果により、磁気スケール媒体の高精度化に向けた技術開発に関し、精度面に関する目処を立てることができた。しかしながら、製品化に向けては、工程能力の検証、コストなどに対する課題も残されている。今後、生産技術の確立に向け、取組みを継続する計画である。

(3) 「3トラック軸一体型磁気式アブソリュートエンコーダ」の試作機の製作及び検証
(株式会社緑測器)

〈実施概要〉

3トラック軸一体型磁気式アブソリュートエンコーダの事業化に向け、3トラック方式でのアブソリュート検出技術を確認させるため、平成25年度、26年度においては、回転精度を確保するための機構部、磁気目盛からの信号を検出するための3トラック一体型MRセンサ、MRセンサと磁気目盛の相対変位を位相の変化として取り出すセンサ信号処理回路、3系統の位相変調信号からアドレス判別と絶対位置を生成するデジタル信号処理回路の各要素開発に取り組んだ。

平成26年度、27年度は、各要素技術開発の成果の集約として、エンコーダの試作品を製作。試作品の検証を行い、製品仕様の決定に向けた検証を進め、製品製作技術の確立に向けた作業に取り組んだ。

〈成果〉

①平成26年度に製作した試作機（プロト1st）の検証

平成25年度、26年度の研究開発においては、3トラック方式でのアブソリュート検出を実現させるために、各要素開発に取り組んできた。その成果を集約し、平成26年度末に完成した試作機（以下、プロト1st）を用い、各要素開発の妥当性について製品レベルでの検証を行った。Fig.2.1.5に試作機（外形φ58mm、シャフト径φ10mm）の写真を示す。

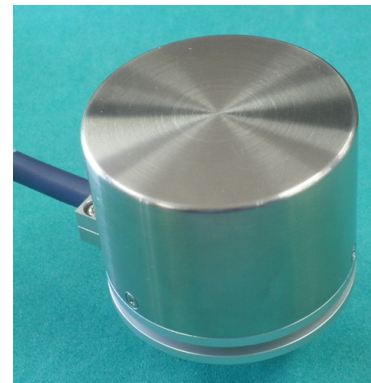


Fig.2.1.5 試作機（プロト1st）

Fig.2.1.6に示す結果のとおり、検出精度14bit（最大誤差87秒、 $0.024^{\circ}/360^{\circ}$ ）が得られた。

また、この結果により、3トラック方式のアブソリュート検出の基本的な動作に問題のないことが確認された。

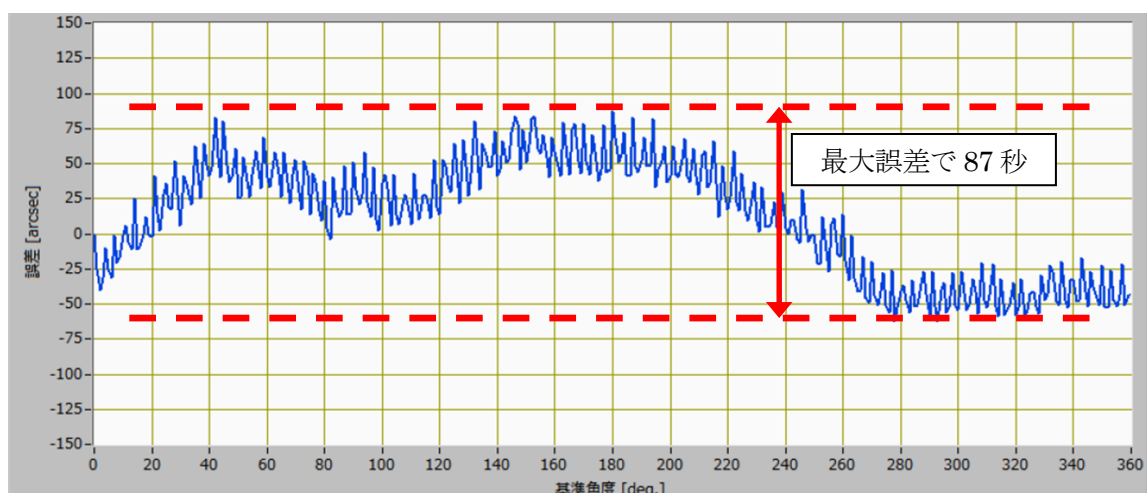


Fig.2.1.6 プロト1st 精度検証結果

以上により、プロト 1st 試作品では、基本的なアブソリュート検出は問題のないことが確認できた。しかしながら、製品化へ向けては、プロト 1st の結果より、Tab.2.1.5 に整理される課題が抽出された。特にアナログ、デジタルの回路設計においては、ノイズ低減、コストの観点より、大幅な設計変更の必要性が生じた。

この課題解決に向け回路及び基板設計の見直しを行い、プロトモデルの再試作（プロト 2nd）を実施した。

Tab.2.1.5 プロト 1st 検証結果からの抽出課題

項目	課題
磁気ドラムの高精度化 機構設計	磁気ドラムの着磁品質及び磁気ドラムの組込精度（偏心、直角度）の精度影響への定量化が必要。
電気回路設計	1)ジッタノイズ 14ns（目標 3ns） ・基板パターンの大幅な設計変更が必要。 2)回路部品のコスト低減が必要 ・製品想定価格を考慮すると 1/2 の原価低減が必要 ・回路設計の大幅な見直し（小型化、コスト）が必要 3)アドレス判別における判定マージンの妥当性の検証が必要 4)耐環境性の検証が必要
製品取付構造	顧客の製品取付時の偏心ズレ、角度ズレの影響評価が必要 （カップリング選定、或いは、設計・製作、取付仕様／制限）

②製品化に向けた再試作品（プロト 2nd）の製作及び検証

製作したプロト 2nd 試作機を用い、総合的な検証を再度実施した。各要素開発における実施内容、成果及び課題についての概要を Tab.2.1.6 に示す。

Tab.2.1.6 プロト 2nd 検証概要

開発要素	実施内容	成果	課題
機構部設計	1) 磁気ドラムの外周 フレ改善検討	加工方法を変更し、1 μ m 台に改善	加工方法の確立、 面フレの改善
	2) 外部磁界影響の検証	影響ありを確認 0.04deg./1 回転@0.7mT	シールド対策と機 構部設計の最適化
センサ信号 処理回路設計	センサ信号品質の検証 （PM リップル、ジッタ ノイズ）	ノイズ対策効果と考えら れる若干の改善効果を確認	ノイズ低減含むセ ンサ信号品質の改 善
デジタル信号 処理回路設計	アブソリュートデータ の抽出及び検証	アドレス判別 ミスを確認、内挿誤差（1 次、2 次 成分）の影響と判明	内挿誤差の改善、 アドレス判別 ミス の是正

いずれの要素開発においても、製品化に向けての課題はあるものの、基本的な動作検証を終了し、概ね、設計通りの性能が得られる事が確認でき、製品化の目処を立てた。

(4) 3トラック一体型 MR センサの製作及び検証 (株式会社緑測器)

〈実施概要〉

3トラック軸一体型磁気式アブソリュートエンコーダを実現させるためには、磁気ドラム上に形成された信号を検出するセンサとして3トラック分のセンサが一体的に形成された、3トラック一体型MRセンサが必要となる。

製品化に際しては、高精度だけでなく小型化と低コスト化が競争力の源泉となるため、MRセンサの試作仕様の決定に際しては、感磁部形状や出力信号の引出方法や引出線数を含む感磁部構造の最適化及び磁気ドラムとMRセンサの相対的な位置関係（位置ズレ）を考慮したトラック構造の最適化に関する研究開発活動に取り組んだ。

〈成果〉

平成 25 年度は、Tab.2.1.7 に示す 3 種類の原理試作品を完成させた。磁気ドラム及び MR センサの構造最適化を目的とし、磁気ドラム条件は複数設定とし、各条件による特性差が評価可能な仕様とした。

Tab.2.1.7 「3トラック一体型 MR センサ」の原理試作品 概要

	トラック配置 *			素子抵抗値 (Ω)	備考
	上	中	下		
パターン A	M	A1	A2	1,200	高感度タイプ
パターン B	M	A1	A2	2,350	低感度タイプ
パターン C	A1	M	A2	2,350	同上

* M：メイントラック、A1：拡張トラック 1，A2：拡張トラック 2

平成 26 年度は、これらセンサの位置ズレに関する特性評価を行った。結果の概要を Fig.2.1.7 に示す。この結果から、クリアランスが狭くなるトラック位置においては高調波歪の増大（特に 5 次高調波歪）を招くことが明らかになった。従って、精度要求の高いメイントラックに関しては、磁気ドラム及び MR センサの中心位置に配置することが望ましいという結論に至り、総合的な観点から、「パターン C」を候補として選定した。

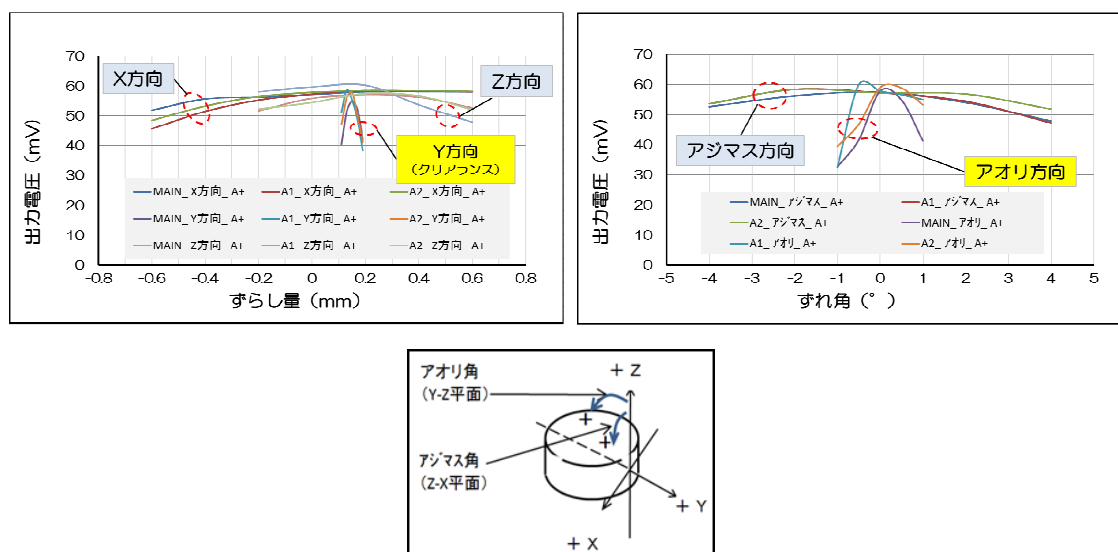


Fig.2.1.7 位置ズレと MR センサ出力電圧の評価結果

平成 27 年度は、MR センサのパターン構造及び端子構造の最終決定に取り組むため、高調波歪み対策パターンの最適化を主目的に、MR センサの 2 次試作を行った。

Tab.2.1.8 に試作仕様の概要を示す。

Tab.2.1.8 「3 トラック一体型 MR センサ」の 2 次試作品 概要

	パターン D	パターン E
高調波歪対策	ピッチ変更品	5 次高調波対策追加品
特性概要	1 次試作と同等の磁気特性	1 次試作と磁気特性が変化する可能性がある
センサ寸法	8×10mm、全長 32.6mm (FPC 部含む)	

これらの試作品を用い、平成 26 年度と同様に位置ズレによる評価を実施。今回の関心事である、高調波歪の抑止効果を確認するため、Tab.2.1.9 及び Fig.2.1.8 にクリアランス (Y 方向) 特性の結果について示す。

Tab.2.1.9 クリアランス特性結果の比較

検証項目	条件	1 次試作品 タイプ C	2 次試作品 タイプ D	2 次試作品 タイプ E
クリアランス (Y 方向) 特性	3 次、5 次歪が 1%以下となるクリアランス条件と、その時の出力電圧	200 μ m 以上、出力 100mV	250 μ m 以上、出力 80mV	200 μ m 以上、出力 105mV

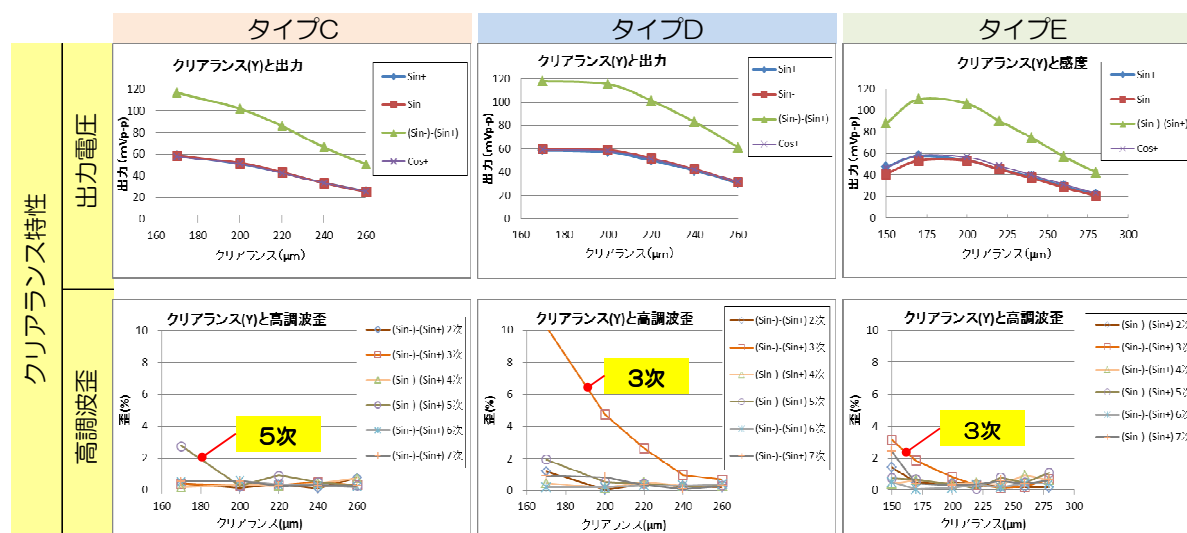


Fig.2.1.8 各 MR センサのクリアランス特性

いずれの MR センサも長短はあるが、高調波歪を抑制するための適切なクリアランス設定及び位置ズレに関する許容範囲の管理により使用可能と判断した。

以上により、製品化に向けた 3 トラック一体型 MR センサの最適化については概ね完了し、製品化への目途が立った。

2-2 3トラック中空型磁気式アブソリュートエンコーダの製品化に向けた技術開発

磁気記録媒体の高精度化及び高分解能化に向けた技術開発として、大径磁気ドラムの製作のための技術開発、及び 3 トラック中空型アブソリュートエンコーダ用機構部の確立に向けた設計と検証を行った。

(1) $\phi 65\text{mm}$ 磁気ドラムの製作及び機構設計（株式会社緑測器、株式会社エムジー）

〈実施概要〉

大径磁気ドラムの開発にあたっては、磁気ドラムの成形や寸法精度などについて、非常に高い要求精度が求められる。まずは基礎的な研究を行うため、平成 25 年度に $\phi 65\text{mm}$ の磁気ドラムを製作し、製品仕様である $\phi 130\text{mm}$ 磁気ドラムの製品製作技術の確立を目指した。

〈成果〉

a) 精度検証

平成 25 年度に完成した回転スケール用着磁装置を用い、 $\phi 65\text{mm}$ の磁気ドラムに $100\mu\text{m}$ 、2048 極を着磁したとき、従来機に比較して着磁ピッチ精度を 1/10 程度にできる見通しが得られた。

b) 大径磁気ドラムの製作に向けた基礎研究

磁気ドラムの大径化に伴い、これまでの経験から、成形後のドラム割れが懸念されていた。平成 26 年度には、この課題を解決させるため、プラスチックとプラマグの 2 材成形による大径磁気ドラムの実現に取り組んだ。

$\phi 65\text{mm}$ 磁気ドラム及び試験片等を用い、成形条件の見直し、2 材成形部分のせん断強度に関する試験（引っ張り、ズレ強度）を行い、プラスチックとプラマグの融着に必要な基本的な成形条件について明らかにした。

c) エンコーダ機構部の試作設計

$\phi 65\text{mm}$ 磁気ドラムを用いた、エンコーダ機構部の試作設計を実施。構造の概要と試作機の写真を図 2.2.1 に示す。組立後の中空シャフトのフレ精度確認では、約 $4\mu\text{m}$ 程度である事が確認され、基本設計は概ね妥当であるとの判断に至った。

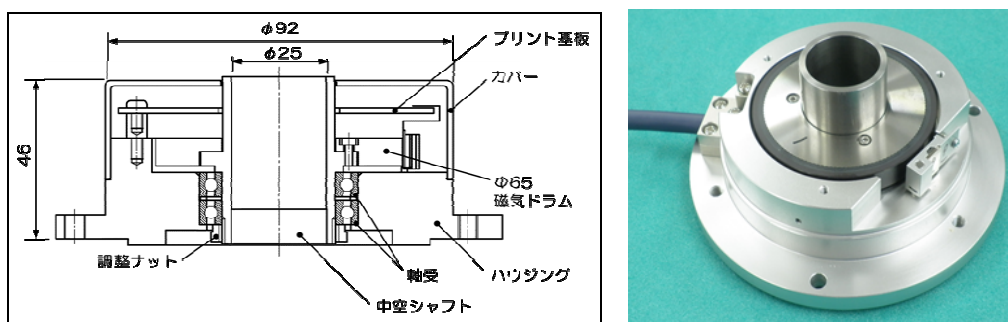


Fig.2.2.1 中空型エンコーダの試作品

(2) $\phi 130\text{mm}$ 磁気ドラムの製作（株式会社緑測器、株式会社エムジー）

平成 27 年度は、 $\phi 130\text{mm}$ の磁気ドラムへの適用を目的に、割れ対策に関する 2 材成形条件の最適化に取り組んだ。成形条件の最適化にあたっては、 $5\times 6\text{mm}$ (30mm^2) の試験片を、5 因子、2 水準の条件で準備し、せん断強度試験による結果から、融着強度を決定する主因子を求めた。

その結果、主要因として 2 因子に絞り込まれ、成形収縮、熱膨張収縮による破断応力、引っ張り弾性率の観点から、十分な融着強度が得られる 2 因子についての成形条件を明らかにした。また、プラスチックがプラマグ変形に負けないためには、十分な断面積を確保する必要があり、その値を 2 倍程度の余裕率を見込んで、最適比率を決定し、 $\phi 130\text{mm}$ 磁気ドラムの形状に適用した。この設計に基づき金型製作を行い、完成した試作品の写真を Fig.2.2.2 に示す。製品化に向けては、技術的難度、市場ニーズの分析結果より、他 3 機種を優先としたため当初目標は未達、磁気ドラムの試作に留まった。



Fig.2.2.2 $\phi 130\text{mm}$ 磁気ドラムの試作品

2-3 誤差補正機能付磁気式アブソリュートエンコーダの製品化に向けた技術開発

(1) 各要素技術開発及び試作設計（株式会社緑測器、株式会社エムジー）

〈実施概要〉

本研究開発では、提案技術を用いて 12bit の分解能と 11bit の精度（計測値の信頼性）を有し、センサ信号の内挿誤差を補正可能とする、1 回転 1 周期型の誤差補正機能付アブソリュートエンコーダの製品化に向け、平成 27 年度から、各要素技術開発及び試作品の設計・製作を行い、誤差補正技術の確立と製品仕様の決定に向けた検証を進め、製品製作技術の確立を目指した。

〈成果〉

1) 磁気回路・機構部設計

MR センサおよびマグネットの周囲部品の配置を決定するため、シミュレーションにより磁束密度分布を検討した。この際、軸一体型エンコーダは直径 $\phi 5\text{mm}$ 、厚さ 2mm、中空型エンコーダは外径 $\phi 34\text{mm}$ 、内径 $\phi 22\text{mm}$ 、厚さ 2.5mm のいずれも径方向着磁の磁石を使用し、以下の条件を満たす構造を検討した。

- ・ MR センサの動作に十分な磁束密度が得られること。目標：10mT～17.5mT。
- ・ 組立時の位置ズレに対する影響が小さいこと。目標： $\pm 0.2\text{mm}$ の組立裕度。
- ・ 外部磁界の影響を少なくできること。目標：外部磁界 10mT に対して変動 0.1mT 以下。

磁界シミュレーションにより、印加磁界の均一性、周囲の磁性体及び外部磁界に対しての変動影響等に留意し、Fig.2.3.1 に示す軸一体型、Fig.2.3.2 に示す中空型の試作形状を決定した。

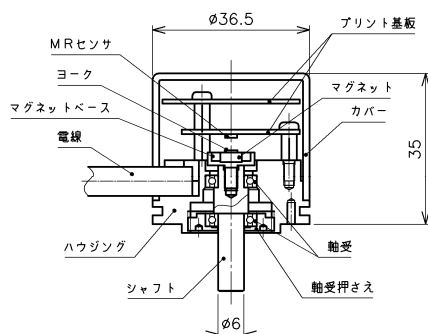


Fig.2.3.1 軸一体型エンコーダ試作構造図

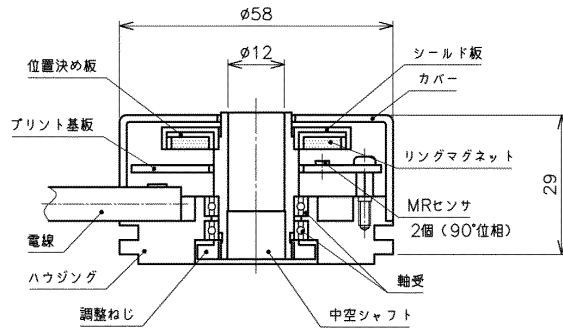


Fig.2.3.2 中空型エンコーダ試作構造図

2) センサ信号処理回路の設計

中空型アブソリュートエンコーダ及び軸一体型アブソリュートエンコーダの 2 製品に関するセンサ信号処理回路については、平成 25 年度から 26 年度に取り組んだ要素開発の研究成果を用いた。試作及び製品化に向けて、1 回転 1 周期型に適用するセンサ信号回路の最適化を行い、プロトタイプ用基板を製作した。回路、基板設計において、特に留意した点を以下に示す。

- ・MR センサの選定と使用方法の決定
- ・小型化、原価低減を目的とした部品選定
- ・耐ノイズ性を考慮した、基板パターン配線、部品配置の最適化

3) デジタル信号処理回路設計

1 回転 1 周期出力型アブソリュートエンコーダの精度目標 11bit (分解能 12bit) を達成させるため、本研究開発の提案技術を用い、誤差補正技術の確立に向けた技術開発に取り組んだ。

具体的には、Verilog HDL を用い、平成 27 年度より誤差補正プログラムの設計に着手した。制作したプログラムを、シミュレータを使い動作確認した結果、想定通りの動作及び結果が得られている事を確認、プログラム設計を完了させた。

また、センサ信号処理回路設計と同様、「ノイズ対策」、「原価低減」を目的に、デジタル処理回路の最適化を実施し、プロトタイプ用基板の製作を行った。

(2) 高精度化に向けた内挿誤差を補正する技術開発及び計測値の信頼性向上に向けた技術開発 (株式会社緑測器)

〈実施内容〉

設計した誤差補正プログラムの妥当性を早期に検証するため、プロトタイプとは異なる、1 回転 1 周期型エンコーダの原理モデルを製作。誤差補正プログラムを組み込み、誤差テーブルの作成と誤差補正前後の精度を測定し、誤差補正プログラムの検証を実施した。

Fig.2.3.3 に誤差補正前の精度測定結果を示す。誤差補正前の最大誤差は 7.5bit (1.94°) であった。

次に、誤差測定で得られた誤差テーブルを適用し、誤差補正後の精度を測定した結果を Fig.2.3.4 に示す。誤差補正後の最大誤差は 10.7bit (0.22°) であり、誤差補正による実質精度改善に関する効果が実証され、精度目標である 11bit を概ね達成できる目途を立てた。

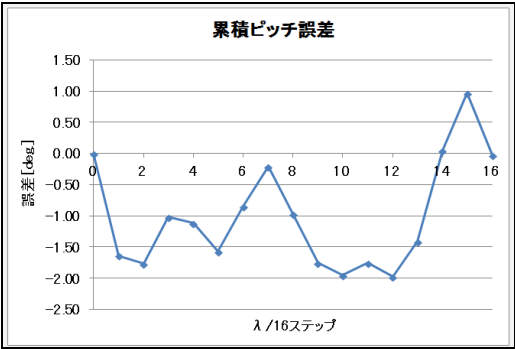


Fig.2.3.3 誤差補正前の精度(7.5bit)

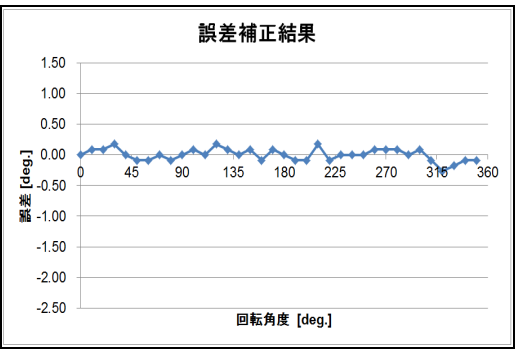


Fig.2.3.4 誤差補正後の精度(10.7bit)

(3) φ36mm リングマグネットを用いた「中空型アブソリュートエンコーダ」及びφ5mm マグネットを用いた「軸一体型アブソリュートエンコーダ」の試作品の製作及び検証（株式会社緑測器）

1) プロトタイプ（試作品）の製作

〈実施内容〉

誤差補正機能を有するアブソリュートエンコーダの製品化のため、各要素開発における成果を集約し、検証用プロトタイプ（試作品）を製作した。

〈成果〉

中空型アブソリュートエンコーダの写真を Fig.2.3.5 に、軸一体型アブソリュートエンコーダのプロトタイプの写真を Fig.2.3.6 に示す。また、Tab.2.3.1 にプロトタイプの概要を示す。



Fig.2.3.5 中空型の外観



Fig.2.3.6 軸一体型の外観

Tab.2.3.1 1回転1周期出力型のアブソリュートエンコーダ概要

項目		中空型	軸一体型
外形寸法	軸径	中空径：φ12 mm	φ6 mm
	外径	φ58 mm	φ35 mm
分解能		12 bit/回転 （精度 11bit）	

2) プロトタイプの検証

〈実施内容〉

製作した試作品を用い、中空型アブソリュートエンコーダ、及び軸一体型アブソリュートエンコーダの各要素開発における製品レベルでの検証（含む環境試験）を実施した。

〈成果〉

実施内容、成果及び課題についての概要を Tab.2.3.2 に示す。

いずれの要素開発においても、製品化に向けての課題はあるものの、基本的な動作検証を終了し、概ね、設計通りの性能が得られる事が確認でき、ほぼ目標が達成され、製品化の目処を立てた。

Tab.2.3.2 プロトタイプの検証結果概要

開発要素	実施内容	成果	課題
機構部設計	1) MR センサへの印加磁界	印加磁界（実測値）≒ 10mT で設計通り	特になし
	2) リングマグネットの信号歪改善	Bθ方向の歪原因は、反磁界影響と判明、製品としては Br 方向を使用する方針に決定	特になし
	3) 外部磁界影響の検証	影響ありを確認 ＜軸一体＞ 0.53deg./1 回転@1.3mT ＜中空型＞ 2.29deg./1 回転@1.3mT	シールド対策と機構部設計の最適化が必要
センサ信号 処理回路設計	1) センサ信号品質の検証（PM リップル、ジッタノイズ）	目標値は、ほぼ達成 PM リップル：約 2% ジッタノイズ：約 11ns	信頼性向上に向けては、更なるノイズ改善が必要
	2) 温度ドリフト検証	影響ありを確認 最大誤差：2～3deg.@85℃ 原因は DC 成分の温度ドリフト影響	温度ドリフト対策が必要
デジタル信号 処理回路設計	1) 誤差補正後の精度検証	＜軸一体＞ 10.7bit (n=3) ＜中空型＞ 10.4bit (n=1) いずれも、誤差補正の拡張により 11bit まで改善することを確認済み	補正精度向上に向けた技術開発と生産技術の確立
	2) シリアル通信仕様の検討及び設計	プログラム開発に着手、SPI（2 種）、SSI、ASI 方式に対応する	通信仕様の妥当性検証が必要

(4) 計測値の信頼性向上に向けた技術開発

本研究開発では、提案技術を用いて 12bit の分解能と 11bit の精度（計測値の信頼性）を有し、センサ信号の内挿誤差を補正可能とする、1 回転 1 周期型の誤差補正機能付アブソリュートエンコーダの製品化に向け、平成 26 年度に完成した精度測定装置を用い、試作したエンコーダの精度測定および誤差補正技術の開発に取り組んだ。

1) センサ信号に重畳する誤差の自動調整に関する技術開発

〈実施内容〉

誤差補正機能付きエンコーダに関し、エンコーダの位相変調信号（PM 信号）から誤差要因別情報を抽出し、それを基に、誤差調整手順を指示するプログラムの制作及び検証を行った。

〈成果〉

エンコーダの位相変調信号（PM 信号）から「誤差要因別情報」を抽出するために、エンコーダの PM 信号を A/D コンバータで収集し処理する。エンコーダからのパルスをデータ収集のスタートとして、回転ステージに内蔵された基準エンコーダのパルスを分周して A/D コンバータのサンプリングトリガとしている。

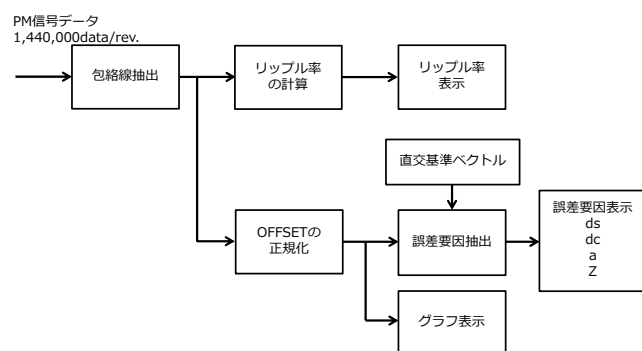


Fig.2.3.7 誤差要因別情報の抽出のための
ソフトウェア・ブロック図

Fig.2.3.7 に誤差要因別情報の抽出プログラムのブロック図を示す。また、Fig.2.3.8 に PM 信号のサンプリングと包絡線抽出をした結果を示す。

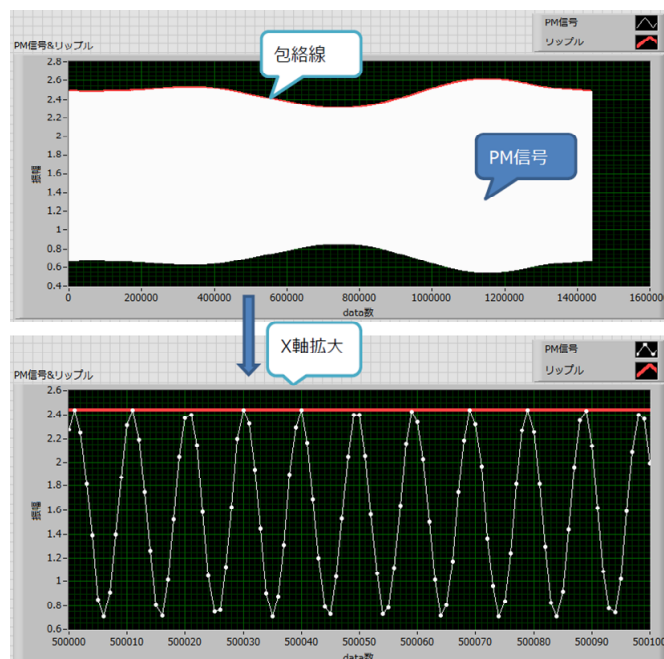


Fig.2.3.8 PM 信号のサンプリングと包絡線抽出

Fig.2.3.9 に実際のプログラムによる画面表示を示す。これは調整前の状態で、初期値（電子ボリュームなどの設定は中央値）に設定されている。

右上の①は、求めた上側包絡線と下側包絡線のそれぞれのリップル率を計算し、数値で表示している。①のグラフは上側包絡線を青色で、下側包絡線を赤色で示している。OFFSET を正規化しているので振幅 1.0 を中心に振れる。縦軸は固定スケールにしてある為に、スケールアウトしている。

②のグラフは、リップル波形をフーリエ解析して高調波歪成分の分布を見ている。このグラフも縦軸は固定スケールなので 1 次成分はスケールアウトしている。

③は、リップル波形から誤差要因別情報を抽出して表示している。

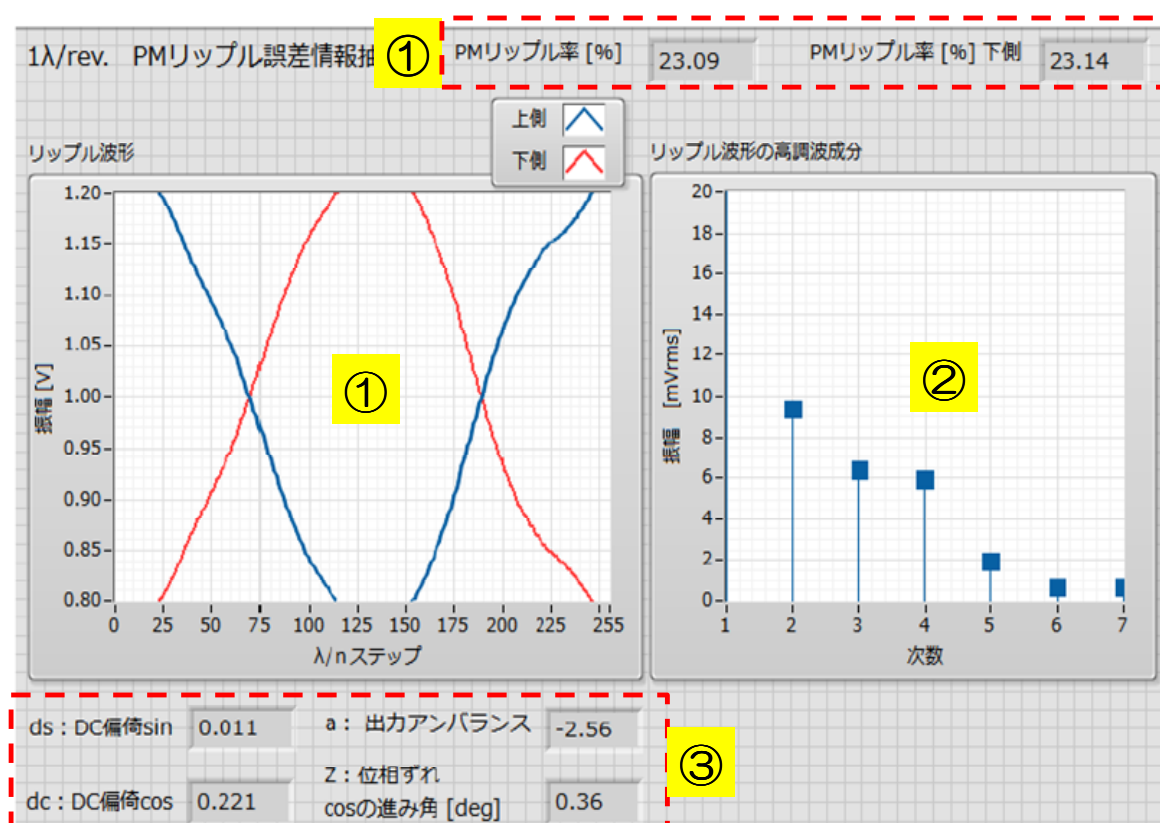


Fig.2.3.9 PM リップル表示・調整プログラムの画面（調整前）

Fig.2.3.10 に示す内容を例に、実際の調整動作について説明する。

最初に①の DC 偏倚 ds と dc を比較して大きい方、この例では、dc がゼロに近づくように DC 偏倚調整のための電子ボリュームを設定すると、リップル波形の振幅が小さくなりリップル率が小さくなっている。更に②でも比較して大きい方の ds を調整すると③のようにリップル率が改善する。

このようにして、PM リップル波形から誤差要因別情報を抽出し、手動ではあるが、電子ボリュームを調整することで内挿誤差を補正する技術を開発することができた。更にサンプル数を増して調整アルゴリズムを確立すれば、自動調整が可能になる。

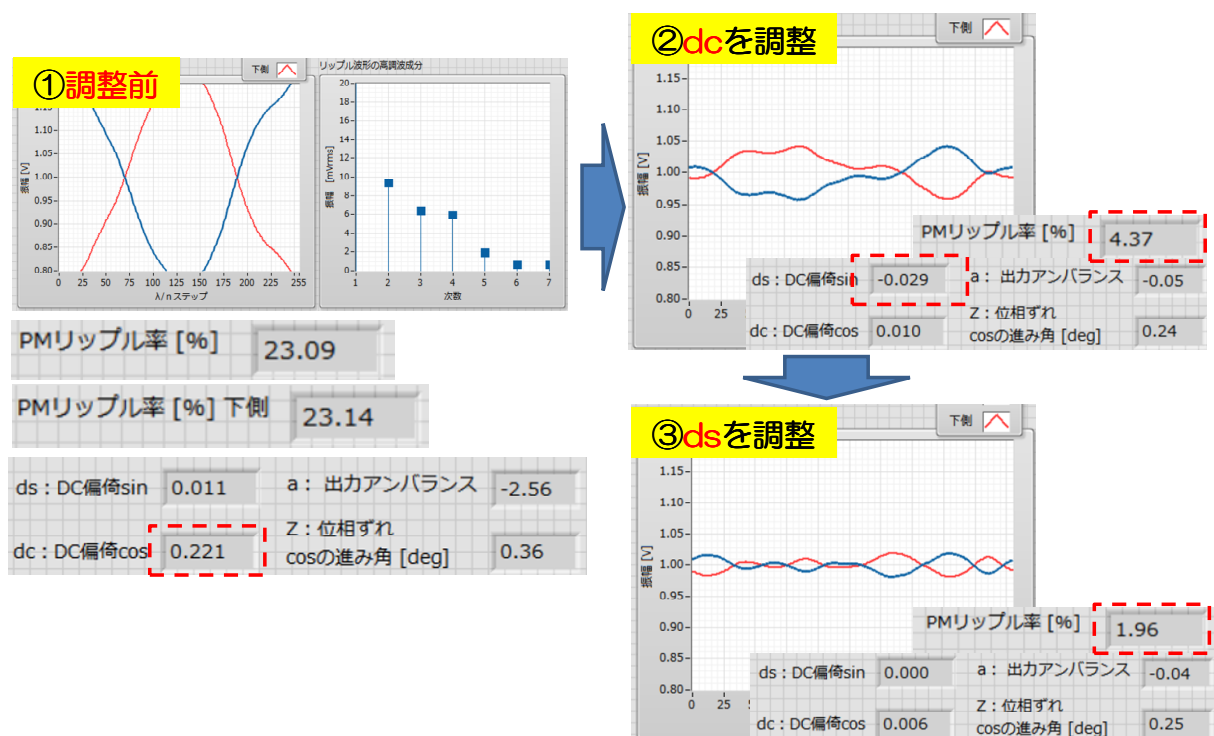


Fig.2.3.10 PM リップル調整の手順

2) 内挿誤差を補正する技術開発

〈実施内容〉

センサ信号に重畳する誤差の調整は、1 周期成分または 2 周期成分の一部（3 次高調波成分が 2 周期成分として現れる）までであり、それ以上の高調波歪については調整しきれない。そこで、直線補間による誤差補正技術により、調整しきれない内挿誤差を補正する必要がある。

ここでは、エンコーダ内で誤差補正演算するためのパラメータを提供するために、累積ピッチ誤差測定により誤差テーブルを求める技術開発について示す。

〈成果〉

直線補間による誤差補正技術により、精度測定装置にて計算された「誤差補正テーブル」の出力結果について、Fig.2.3.11 に示す。

現在は、誤差テーブルをファイルに書き出し、誤差テーブル設定プログラムでファイルを読み出して、エンコーダ内の EEPROM に書き込む操作を手動で行っているが、将来は自動化が可能となる。

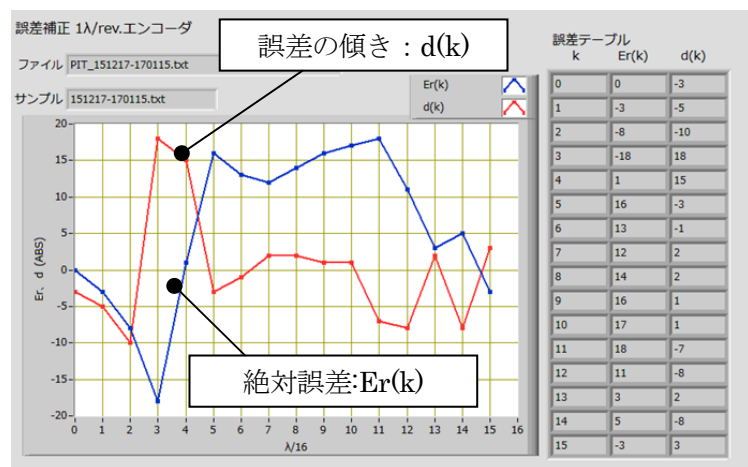


Fig.2.3.11 誤差テーブル表示画面

3) 測定の信頼性向上に向けた軸偏心調整およびエンコーダ取付方法の最適化

〈実施内容〉

エンコーダの精度測定において、回転ステージの回転中心とエンコーダの軸の中心との間に偏心があると、それは角度誤差となって現れる。

3 トラック型エンコーダの磁気ドラム（直径：D = 32mm）について、角度精度を試算してみると Tab.2.3.3 のようになる。もし 19bit 相当の精度計測をするなら偏心誤差は約 $0.2\mu\text{m}$ 以下に調整する必要がある。

また、エンコーダを相手（モータの回転軸など）に接続する場合、偏心、偏角、軸方向変位等のアライメント誤差を生じる。このようなアライメント誤差を吸収するためにフレキシブルカップリングを介在して接続することになる。しかしながら、それでもアライメント誤差の許容範囲（精度保証可能範囲）があり、エンコーダメーカーとしてはそれを提示する必要がある。

そのため、顧客取付許容度の仕様提示を目標に、エンコーダ取付方法についての検討及び検証を実施した。

〈成果〉

1) 軸偏心調整の最適化

軸偏心の測定と調整手順指示プログラムを製作し、リニアゲージにより偏心量を測定し、調整量を指示するプログラムが完成した。Fig.2.3.12 に偏心調整後の軸偏心調整プログラムの画面を示す。

また、測定及び調整の概要については以下に示す通りである。

- ・リニアゲージを対象に当てて、回転ステージを 1 回転させ変位量を測定
- ・LSC（最小二乗円）により偏心量を計算し、回転ステージ XY テーブルの調整量を指示（画面右下）
- ・フーリエ解析図により、偏心による 1 次成分が減少＝偏心調整完了を表している。

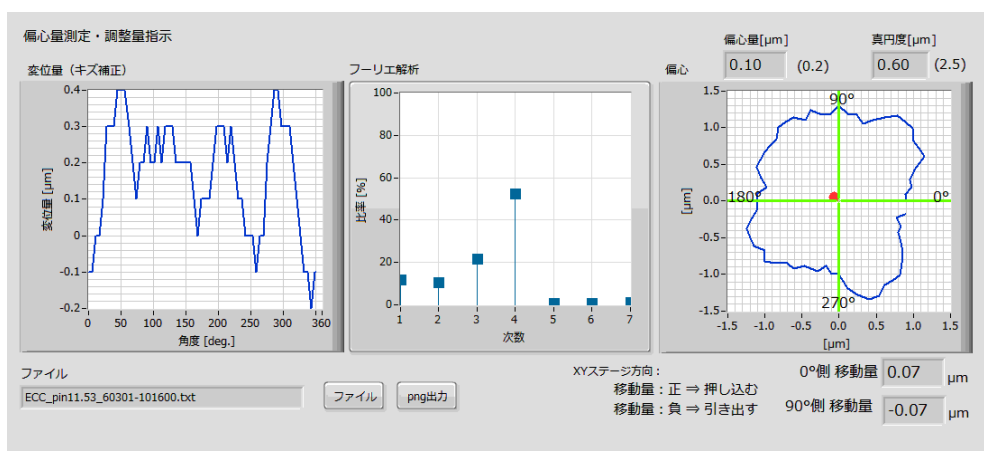


Fig.2.3.12 軸偏心調整プログラムの画面（調整後）

Tab.2.3.3 偏心誤差と角度精度の関係

D [mm]		32	
ε [μm]	θ [deg.]	θ [arcsec]	θ [bit相当]
0.1	0.000358	1.289	19.9
0.2	0.000716	2.578	18.9
0.3	0.001074	3.867	18.4
0.4	0.001432	5.157	17.9
0.5	0.001790	6.446	17.6
0.8	0.002865	10.313	16.9
1.0	0.003581	12.892	16.6
2.0	0.007162	25.783	15.6

2) エンコーダ取付方法の最適化

偏心のパラメータとして、

①カップリングの取付位置を水平方向にずらすことによる回転中心と中空軸中心の偏心

②カップリングの取付板を傾けることで回転軸と中空軸に傾きを持たせる (Fig.2.3.13) の二通りとした。この時のエンコーダのアブソリュート出力の誤差、及びヒステリシスの変化を評価対象とした。

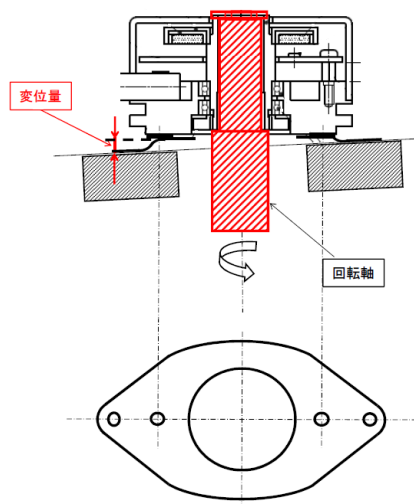


Fig.2.3.13 中空型エンコーダ用カップリングの評価方法 (傾き)

アライメント誤差の吸収効果について最適化を行うため、中空型エンコーダに適用する板バネ式カップリングの形状、板厚等の条件をどうすべきか検討し、形状的には 2 種類の板バネ式カップリングを試作し、検証を行う事とした。軸一体型エンコーダについては、市販のフレキシブルカップリングを選定済みであり、中空型、軸一体型と共に、アライメント誤差の許容範囲を提示する計画である。

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

1) 高精度3トラック磁気式アブソリュートエンコーダ

- ・φ58mm 軸一体型：

プロト機製作により、原理検証をほぼ完了し、製品化への目途が立った。

- ・φ180mm 中空型：

他開発品を優先、試作磁気ドラムの製作に留まった。

2) 誤差補正機能付き磁気式アブソリュートエンコーダ

- ・プロト機製作により、原理検証をほぼ完了し、製品化への目途が立った。
- ・精度測定装置を製作し、エンコーダ評価結果により、完成の目途が立った。

3-2 研究開発後の課題

今後は製品化に向け、詳細な性能評価、製品仕様の決定、工程能力・製造工数の検証、製造原価、工程設計、等、自社の開発プロセスで製品検証を行い、製品の完成度を高める予定である。また、事業化に向けた活動は本格的にはこれからであるが、以下の課題が想定される。

1) 厳しい価格要求

継続的な原価低減活動、製品の強みのアピールが必要。

2) 高い完成度

「開発プロセス」の確実な実施が必要。

3-3 事業化への展開

3トラック及び誤差補正機能付アブソリュートエンコーダのカタログ製品販売は、3トラックは2017年4月、誤差補正機能付は2016年10月を予定している。

研究開発の残件、今後抽出される課題への対応は、基本的には現状の体制を維持することを予定している。

また、事業化に向けては、製造ラインが必要となること、販売体制の構築には社内の既存組織も必要となるため、研究開発体制に加え、社内関連部門を含めたプロジェクトを予定している。

市場の情報収集・分析を強化・継続実施し、業界のスピードに対しニーズに合った製品企画ができる様取り組む予定である。