

【公開版】

平成 29 年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「革新的巻線技術による在宅用人工呼吸器向けマイクロモータの開発」

研究開発成果等報告書

平成 30 年 3 月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 公益財団法人 滋賀県産業支援プラザ

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	3
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第2章 本論	8
第3章 全体総括	18
【1】補助事業の成果	18
【2】研究開発後の課題・事業化展開	20

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 研究背景

わが国の抱える大きな課題の一つとして少子高齢化問題が提起されている。

65歳以上の高齢者は 2025 年には 3,657 万人となり 2042 年にはピーク（3,878 万人）を迎える予測が報告されている。

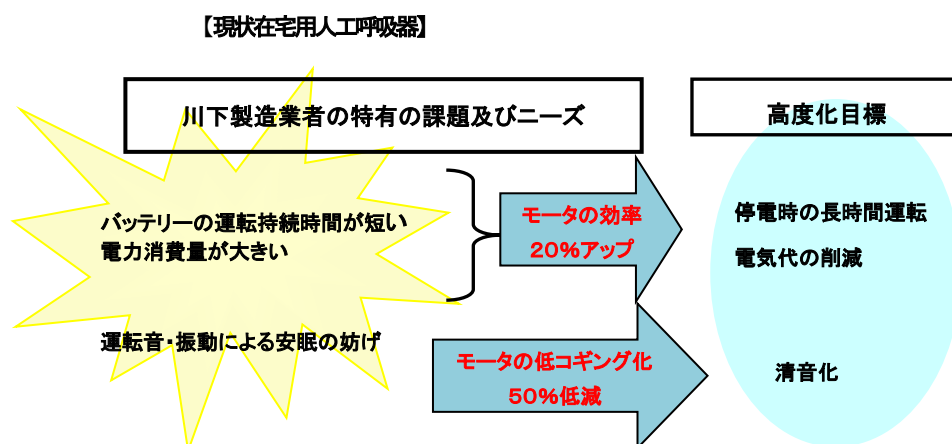
高齢とともに環境因子による侵襲が蓄積され その結果呼吸器疾病の占める割合が多くなることが学界で発表されている。

また 終末期の治療場所として 60%以上の国民が「自宅で療養したい」と回答していて 在宅用治療機器使用の要望がある。 その結果 在宅医療機器に組み込まれその機器のニーズに見合った性能が得られる部品の事業化も切望されている。

② 研究目的及び目標

中小ものづくり高度化法の指針で 医療機器の川下製造業者特有の課題として「高いユーザビリティの実現」のニーズがある。

在宅用人工呼吸器の現状の課題及びニーズは在宅用人工呼吸器の内部バッテリーのみで駆動出来る運転時間を延ばす事と低騒音化である。



機器中でも全体入力の約85%が消費されているモータの効率を上げることで内部バッテリーでの運転持続時間の延長ができ、同時に騒音の加振源であるモータの電磁コギングを低減することで人工呼吸器の低騒音化も実現できる。

具体的には在宅用人工呼吸器に組み込まれるマイクロモータの従来品に対して

【公開版】

モータ効率 20 ポイント向上と、モータの電磁コギングを従来品の半減を目標とすることで、在宅用人工呼吸器のバッテリー駆動での運転時間を長く出来ることと低騒音化を目的とし研究開発を行った。

③ 目的及び目標に対する実施結果

『当初目的及び目標に対する実績』

- ・モータ効率

目標値は従来品に対して20ポイントの向上は得られなかったが4ポイントの効率改善が得られた。

- ・モータ 電磁コギング

従来品に対して半減の目標は実現できなかったが20%電磁コギング低下の成果が得られた。

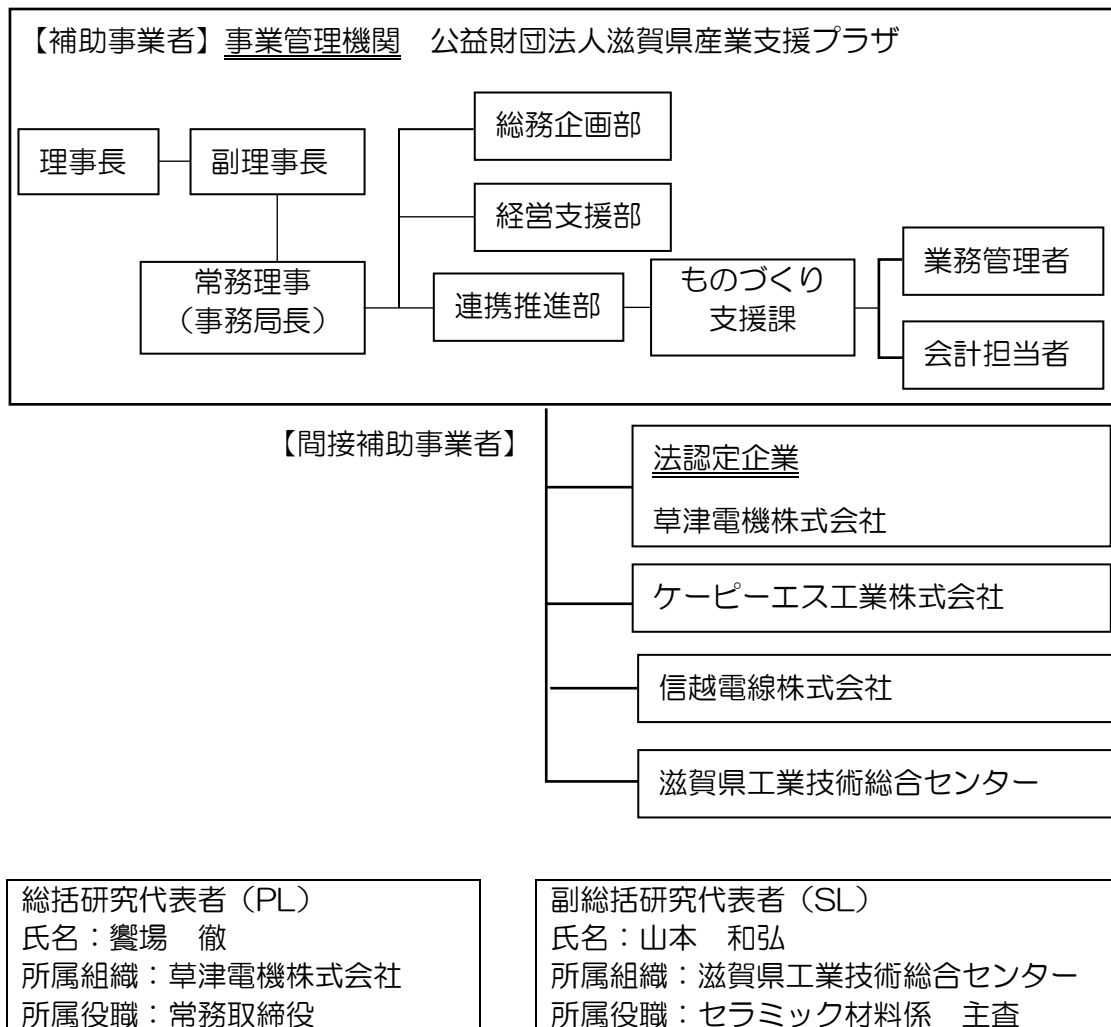
『追加した目的及び目標に対する実績』

- ・負荷付き（フロア）状態でのモータ加減速追従性

設定した時間内に低速から高速回転に、高速から低速回転に交互に追従する特性を駆動回路の改善も含んで目標を達成した。

1-2 研究体制

(1) 研究組織・管理体制



(2) 研究者・協力者

① 研究者氏名

【間接補助事業者】 草津電機株式会社

氏 名	所属部署・役職	実施内容 (担当テーマ)
饗場 徹 (PL)	常務取締役	【1】 【2】 【3】 【4】
下村 徹	技術部 部長	【1】 【2】 【3】 【4】
伊藤 秋良	技術部 主査	【1】 【2】 【3】 【4】
村嶋 翔太	技術部 主務	【1】 【2】 【3】 【4】

【公開版】

【間接補助事業者】ケーピーエス工業株式会社

氏 名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
只熊 睦	専務取締役	【4】
三代 輝	技術部 課長	【4】
野島 健一郎	技術部 係長	【4】

【間接補助事業者】信越電線株式会社

氏 名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
保科 隆雄	取締役 特品部長	【2】
加藤 護	特品部 特品課 技術営業	【2】
倉島 甲太	特品部 特品課 技術営業	【2】

【間接補助事業者】滋賀県工業技術総合センター

氏 名	所属部署・役職	実施内容（担当テーマ）
山本 和弘（SL）	セラミック材料係 主査	【3】 【4】
木村 昌彦	電子システム係 主任主査	【3】 【4】
川口 和弘	電子システム係 主任技師	【3】 【4】

② 事業管理機関

【事業管理機関】公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

氏 名	所属部署・役職	実施内容
田中 勝晴	連携推進部 部長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
篠原 弘美	連携推進部 ものづくり支援課 課長	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務
山本 博之	連携推進部 ものづくり支援課 参与	プロジェクトの進捗把握・管理、指導業務、間接補助事業先との連絡調整業務

③ 協力者

氏 名	所属部署・役職	実施内容
下地 忠雄	（元大手医療機器開発責任者）	技術指導・相談 特性要求・評価
大石 昌弘	日本精工株式会社 関西支社 販売技術部	技術相談 軸受情報提供

1-3 成果概要

本研究開発は、草津電機株式会社が家電・産業用モータの開発で培ったものづくり技術を活かし、日本人に適した省電力と低騒音化の在宅用人工呼吸器を実現する為、高効率と低電磁コギングのマイクロモータを開発し患者のQOLの向上に貢献する事を目的とする。具体的には 独自に考案した革新的巻線技術「平角銅線を使用した階段状に中心をずらしながら同周長で巻線する構造(テーマ1)」と「その構造を実現する工法(テーマ2)」並びに ヨークコアに「アモルファス合金(テーマ3)」を採用する事で高効率を実現し、在宅用人工呼吸器の内部バッテリーでの運転持続時間を延ばし、且つモータの低コギング化の実現により機器の低振動・低騒音化を実現した。

テーマ【1. 平角線を1巻毎に階段状に中心をずらしながら同周長で巻く方式でのモータ性能への最適値組合せ課題への対応】

- ・3種類の巻線仕様で試作を行い モータ性能に大きな影響が無い事を確認した。 その内の1種類(平角線の厚みが厚いもの)は機械加工時電線に過度な力が加わり表面に傷発生の課題が有り 評価の選択肢から外した。
- ・残る2種類の仕様での評価を行い モータとして電磁コギングの評価を行い 構造的に最大にずらしたピッチの方がコギングが小さくなった。

テーマ【2. 新規の巻線工法確立課題への対応】

テーマ【2-1】新規の巻線工法1

1巻毎に平角線の厚み分だけ治具が移動しその隙間に正確にずらしながら巻き取り、加熱して仮溶着する巻線工法の試作検討を行ったが 巻線コイル両端(コイルエンド)部にシワが発生して改善できずに本巻線工法の実現を断念した。

次項の巻線工法2で研究開発を進めた。

テーマ【2-2】新規の巻線工法2

平角線を同芯状に巻き取った後にコイルを1巻き毎にずらしてコイル成形する巻線工法2の確立を行い、同工法で3種類の仕様でコイル試作を実施完了してモータの評価を行った。

テーマ【2-3】6個のコイルを円筒状に成形する

上記【2-2】巻線工法2で試作作製した3種類の平曲げコイル成型品の各々のコイルをR成形した後に、その6個のコイルを組み合わせて円筒状に成形してステータ完成を試作完了してモータの評価を行った。

テーマ【3 アモルファス合金材の採用課題への対応】

モータのヨークコア（磁路）として Fe 基アモルファス合金を採用して2種類（巻取り方式と積層方式）のヨークコア構造で研究開発を行った。

巻取り方式はモータフレームへ組込み時巻取り外周部の割れや破断が頻発しモータ組立が出来なかったため、この方式は断念した。

積層方式で試作を完成させてモータに組込み性能評価を実施した。

テーマ【4 評価技術の確立への対応】

【4-1】モータ効率（損失）

モータ効率が目標ポイント迄はアップしなかったが、その要因の考察が出来たので今後の効率改善のヒントとなった。

また、ヨークコアとして採用した Fe 基アモルファス合金は、機械加工及び熱加工による材料歪みにより損失増加するが、歪み取り焼鈍で損失低減しモータ効率がアップすることを確認した。

【4-2】ヨークコアの焼鈍

Fe 基アモルファス合金の歪み取り焼鈍の温度条件を400℃と実験で見極めることが出来た。

【4-3】モータ負荷（ブロー）として性能評価

試作品で当初目標にした風量特性が得ることが出来た。

また、耐久性に関しても対象部品の運転時の温度を測定して目標を満足することを確認した。

研究期間中に川下企業から追加要求されたブローの加減速追従性に関しても要求性能が得られた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

連携推進部 ものづくり支援課 参与 山本 博之

〒 520-0806

滋賀県大津市打出浜2番1号 コラボしが21内

電 話 077-511-1414 FAX 077-511-1418

E-mail h-yamamoto@shigaplaza.or.jp

【研究開発機関】

草津電機株式会社

常務取締役 饗場 徹

〒 525-8501

滋賀県草津市東草津二丁目3番38号

電 話 077-563-5115 FAX 077-563-0307

E-mail t-aiba@kusatsu.co.jp

第2章 本論

テーマ【1 平角銅線を1巻毎に階段状に中心をずらしながら同周長で巻く方式でのモータ性能への最適値組合せ課題への対応】

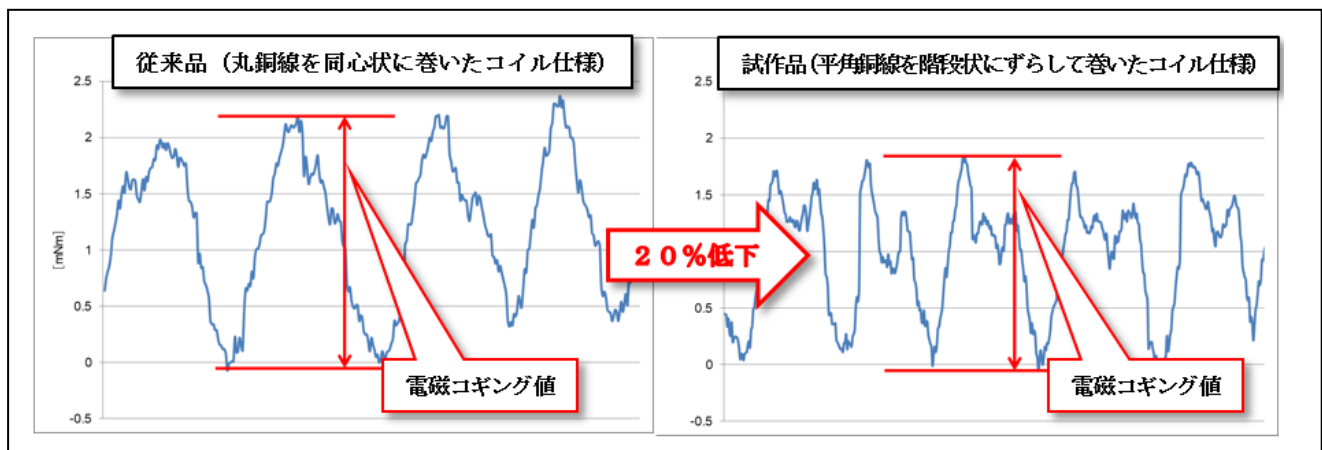
研究開発の目的及び目標を実現する為にモータ構造はスロットレスブラシレスDCモータを選定した。この場合 磁石ロータと外側のヨークコア（磁路）の間（空隙）に銅線を巻いたコイルが存在する。



厚みの薄い平角銅線を使用して空隙を小さくすることでモータの高効率を研究開発した。

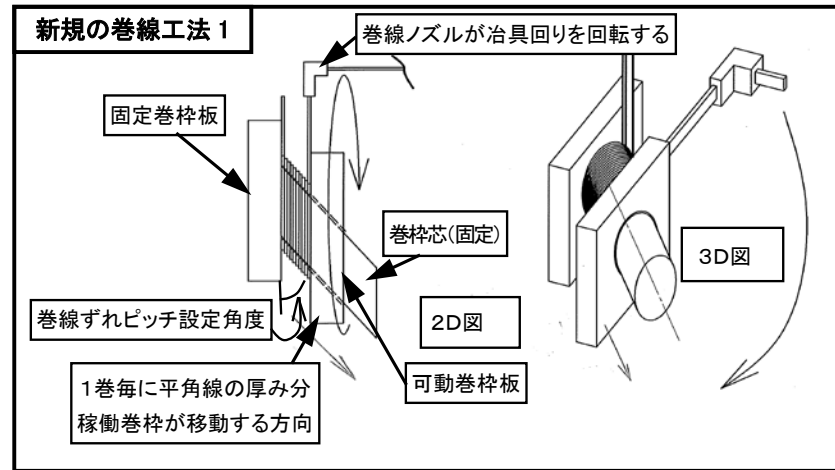
試作可能で仕様が異なる2種類の（同じ断面積で40%厚みが異なる）平角線を使用して試作モータの効率評価を実施した。両者では大きな差が無かったが従来仕様よりも4ポイント効率がアップした（目標値は20ポイントのアップ）。

また、平角銅線を1巻き毎に階段状にずらすピッチの2種類評価を行い モータとして電磁コギングの評価を行ったが 構造的に最大にずらしたピッチの方がコギングが小さくなった。この結果 従来品（丸銅線を渦巻状に巻いた仕様）よりも20%コギングが低下した（目標値は従来品の50%低減）。



テーマ【2 新規の巻線工法確立課題への対応】

テーマ【2-1 新規の巻線工法1】



固定巻枠板に角度を設けて巻枠芯が結合され、その巻枠芯に稼働用巻枠板が1巻毎に平角線の厚み分だけ移動し、その隙間に正確に巻き取り、加熱して仮溶着する巻線機構造。

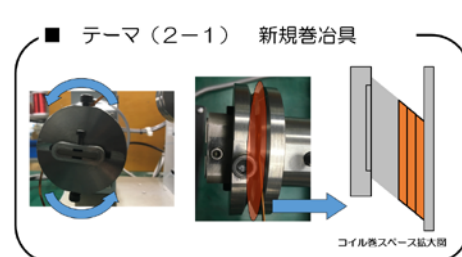
(例：平角銅線0.15mm×0.75mmを1コイル毎0.25mmのピッチずれで巻く場合は、稼働用巻枠板のずれは0.15mmで、巻線芯の巻線ずれピッチ設定角度は37.9°)

研究開発テーマ【1】の要因因子の「1巻毎の中心をずらすピッチ」はこのピッチ設定角度で調整する。

巻線工法1を実現する為に、研究開発専用に巻線機・巻線用治具や工具を作製して「平角線を1巻毎に階段状に中心をずらしながら同周長でのコイル成形」を実現した。具体的には下記巻線機を製作して研究開発を実施した。

(巻線機は下図左側写真 スピンドル方式巻線機)

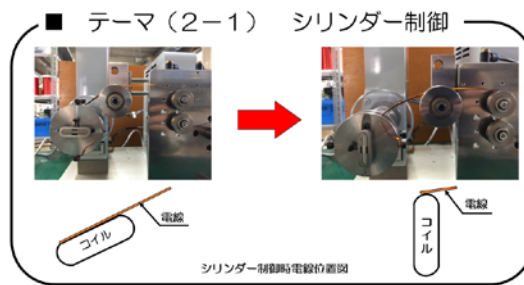
(巻線治具は下図右側写真)



【公開版】

（下図 改良巻線機 シリンダー制御）

（下図 2年目問題点）



上図右側が2年目研究開発の問題点であり 3年目でそれを解決する為に 上図左側シリンダー制御で検討を実施し且つ 下記検討を行ったが問題点を解決できなかった。

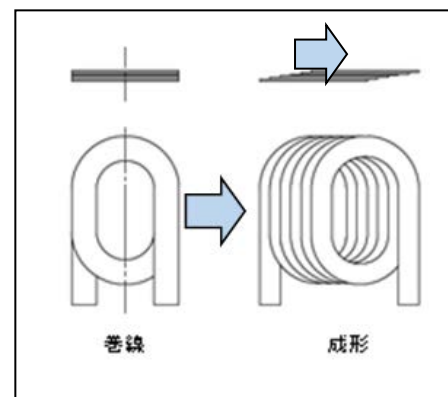
- ① 巻治具の見直し検討については、内Rのキズ解消として治具の磨き精度を上げた。
- ② 巻線速度及びテンションの条件出しについては、 巻線速度を最遅としテンションの規格値1.5kg基準前後のテンション値にしての実験を行った。

上記結果より巻線工法1での研究開発は断念し 次項の【2-2】新規の巻線工法2で本研究課題を進めた。

テーマ【2-2 新規の巻線工法2】

巻線工法2は右図のように同芯状に平角線を巻き取った後にコイルを1巻き毎にずらしてコイル成形する方法の研究開発を行った。

巻線工法2を実現する為に 研究開発専用に巻線機や巻線用治具や工具を作製（次頁）して「平角線を同芯状に巻き取った後にコイルを1巻き毎にずらしてコイル成形」を実現する研究開発を実施した。

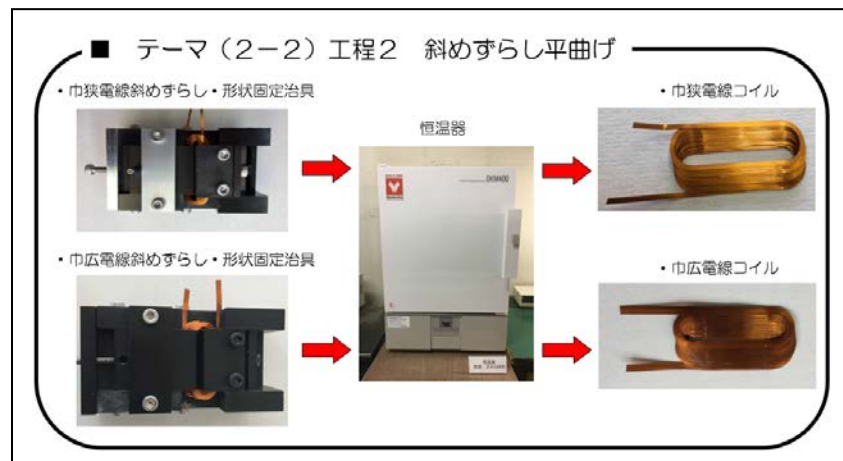


【公開版】

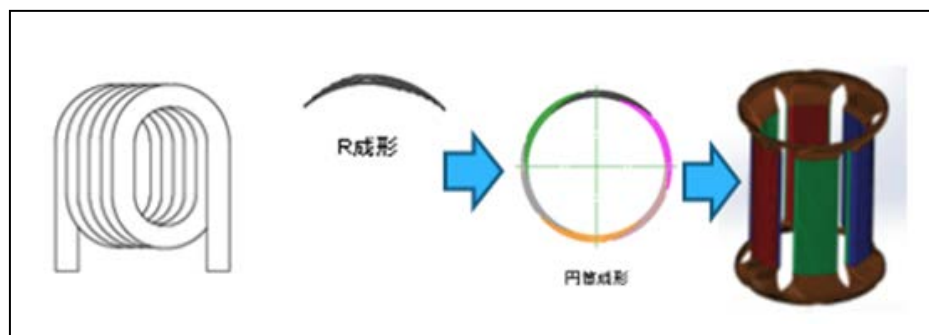
3種類の仕様（平角線違い、ピッチ違い）で下記にて試作を行った。



上記の（2-2）巻線工程で平角線を同心形状で巻取り試作を行い その後下記にて1巻き毎にコイルをずらして平曲げの試作を完了した。



テーマ【2-3 6個のコイルを円筒状に成形する（下図 R成形及び円筒成形）】



上記【2-2】で試作作製した3種類の平曲げコイル成型品の各々のコイルを上図のようにR成形した後に その6個のコイルを組み合わせせて円筒状に成形してステータ完成を試作した。

右図左側の治具を作製して右側R成形を3種類の試作コイル仕様で各6個の試作を行った。



このテーマ（2-3）工程3で作製したR成形コイル6個を1組として右図（テーマ（2-3）工程4 円筒成形）の治具で6個を組み合わせ



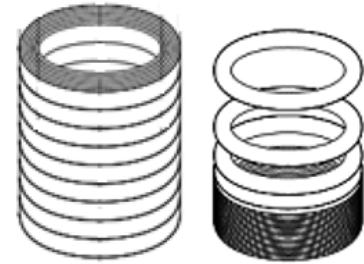
わせて円筒状のツツミ状に成形してステータ完成とする試作を作製した。

3種類のコイル仕様の違う試作品を右図のようなステータ完成として試作作製した。



テーマ【3 アモルファス合金材の採用課題への対応】

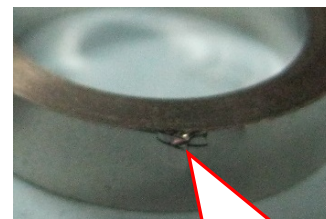
モータのヨークコア（磁路）として高速回転時に低損失（低鉄損）特性が得られる Fe 基アモルファス合金を採用して右記2種類（巻取り方式と積層方式）のヨークコア構造で研究開発を行った。



巻取り方式はモータフレームへ組込み時外周部の割れや破断が頻発しモータ組立が出来ずに この方式を断念した（下図）。

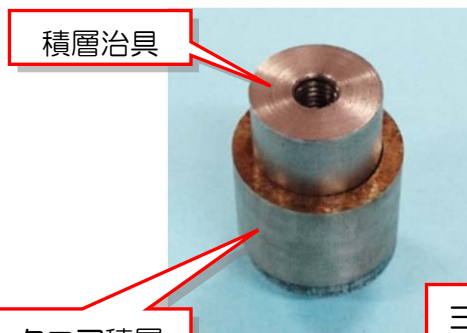


巻取り外周部に割れ発生



巻取り外周部に破断発生

積層方式で試作完成（下図）させてモータに組込み性能評価を実施した。



ヨークコア積層



ヨークコア積層品のモータフレーム組込み

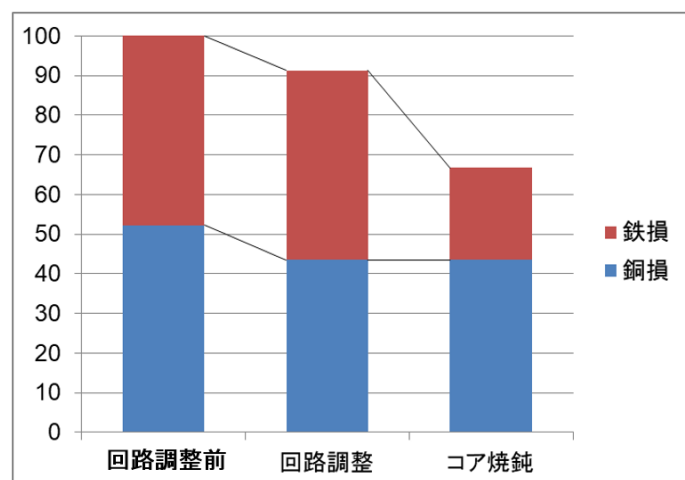
テーマ【4 評価技術の確立への対応】

【4-1】モータ効率（損失）

の考察

モータ効率の検証の為にモータ損失に関して考察を行った。モータ損失を（機械損は無視して）鉄損と銅損に分ける。

試作モータを駆動回路の



【公開版】

調整無しでの損失から 回路調整すると 10%損失が減少する。 その後ヨークコアを焼鈍すると鉄損が改善して更に25%程度損失が減少した。 しかしながら銅損が改善せずにその損失全体の2/3と大きな割合となった（前頁の右表）。

銅損が大きくなった要因は、コイルの両端（コイルエンド）部が巻数毎に重なり合い全体にコイルの周長が長くなり その結果巻線抵抗が大きくなったことに起因する。

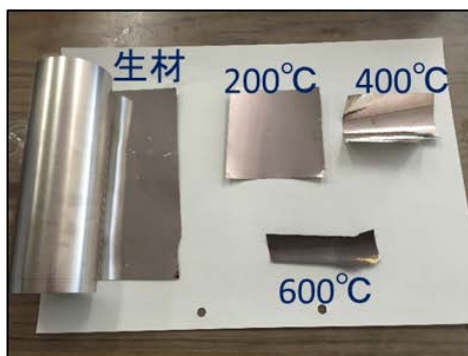
【4-2】ヨークコア加熱による影響の考察

ヨークコアを加熱することにより、加工歪みが生じたアモルファス材料の特性改善に影響を及ぼす。 その検証と対策に関して研究を実施した。

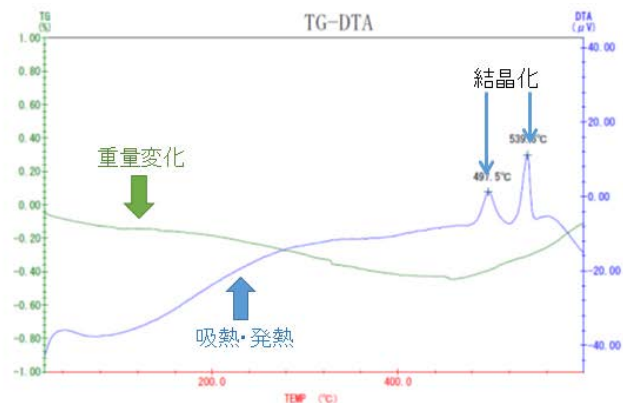
【4-2-1】熱処理による影響の熱収支と重量変化での結晶化の考察

アモルファス材料単体を600℃まで加熱した場合の熱分析を行った結果 500℃近辺から結晶化が起きることを確認した（下図）。

熱処理したサンプルの写真



熱分析(熱収支と重量変化)

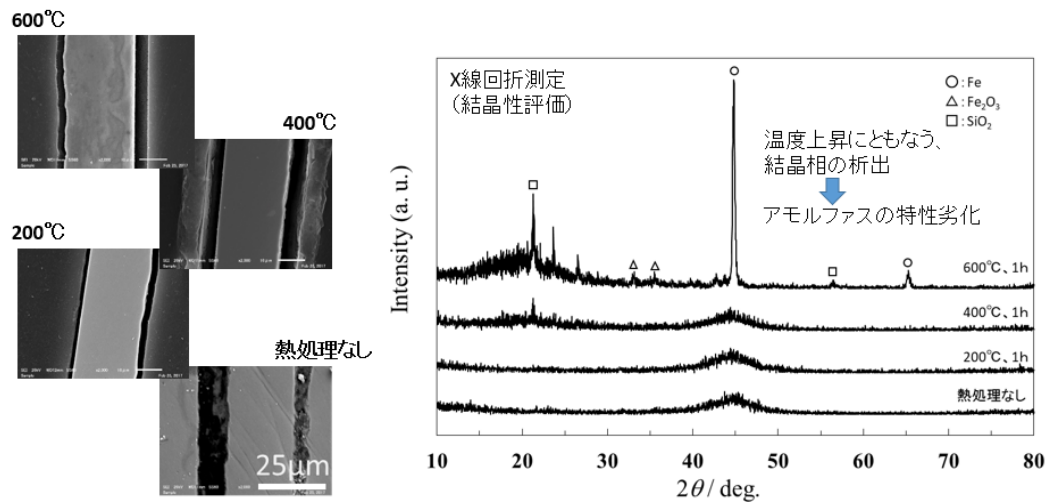


【4-2-2】熱処理による影響のX線回折測定での結晶化の考察

アモルファス材料単体を加熱処理無し、200、400、600℃まで各々1時間加熱した場合の材料分析をX線回折測定で行い 400℃までは材質的に大きな変化が無く特性の劣化が無い事を確認した（次頁 上図）。

蛍光X線による成分分析の結果(ファンダメンタルパラメーター法) wt% (成分分析)

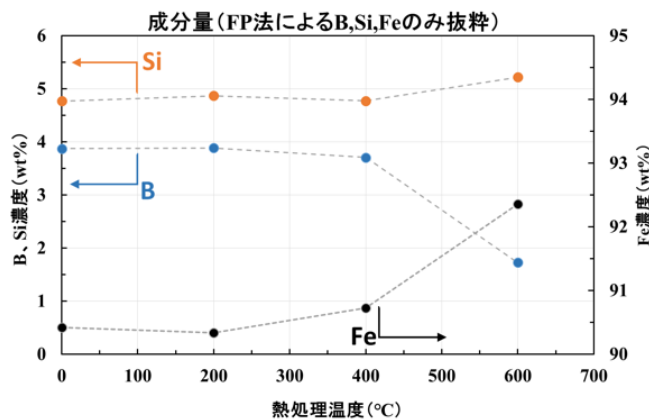
B	C	O	Na	Si	P	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
4.22	0.52	0.71	0.01	5.46	0.02	0.11	0.11	88.59	0.06	0.18



【4-2-3】熱処理による影響の成分測定での考察

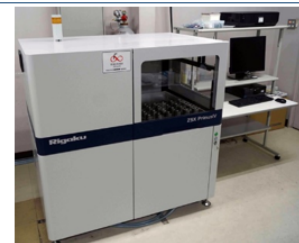
アモルファス材料単体の成分測定による熱影響からも 400°Cまでは大きな影響は見られなかった(下図)。

バルク体の各熱処理温度における成分測定



バルクの測定では温度が上がると成分的な差異(Bの減少、Feの増加)が観測された。熱影響を検出する手段となる可能性があるが、

波長分散型蛍光X線分析装置



ホウ素(B)などの軽元素に対しても感度が高い成分分析装置(マッピングも可能)

最小空間分解能(0.5mm)でのマッピング測定では有意差が観測されず、今回の微量試料測定には適用できなかった。

【4-2-4】焼鈍による鉄損値改善の考察

アモルファス材料をヨークコアに加工する場合に機械加工及び熱加工による材料歪みが生じて鉄損値が増加する。その対策として焼鈍を行うが【4-2-1】～

【4-2-3】までの考察から 400°C以下(350°C)にてヨークコアを加熱焼鈍

【公開版】

(下図) して鉄損値を半減させた(結果は13頁【4-1】の図を参照)。



焼鈍処理

処理条件

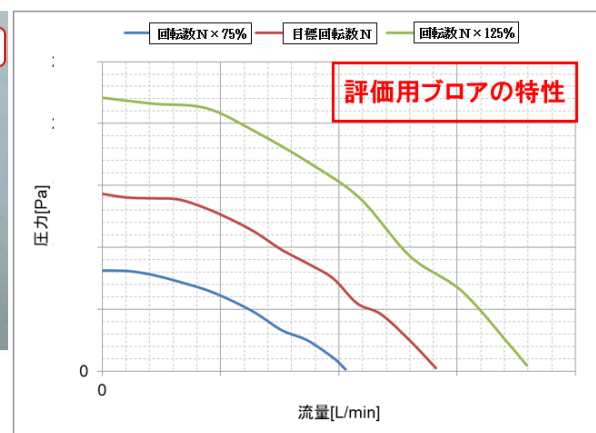
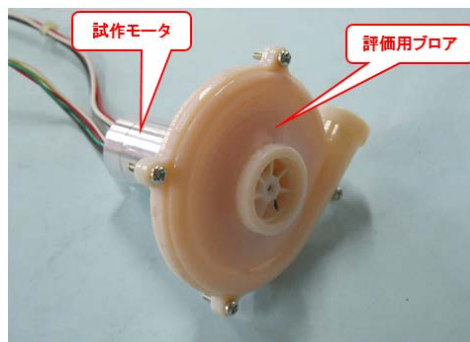
- ① 炉中に窒素充填
- ② 2時間かけて350℃に昇温
- ③ 350℃で1時間放置
- ④ 炉中にて徐冷

マッフル炉(機-18)

【4-3】 研究開発したモータのプロアとしての性能評価

【4-3-1】 プロアの目標回転数での圧力・風量特性

研究開発した試作モータにプロア用部品を試作製作して組付け、評価用プロア完成として目標の回転数で想定した圧力・風量特性を得ることが出来た(下図)。

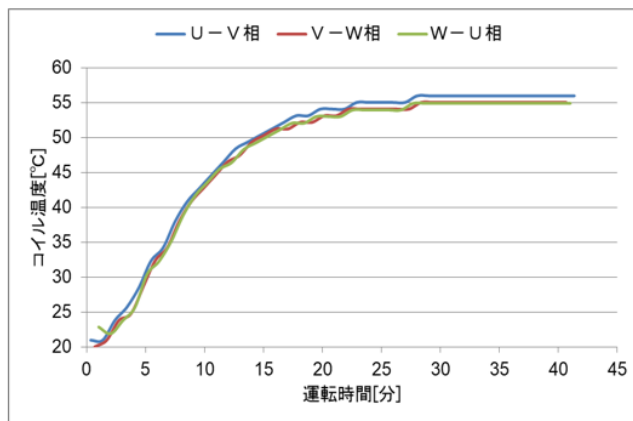


【4-3-2】 モータの耐久性評価

モータの耐久性を評価する為に【4-3-1】で試作したプロアを目標回転数で最大負荷点(静圧0状態)にて温度上昇試験を実施しコイル温度が55℃(温度上昇値 35deg)のデータを得た。これはB種絶縁階級以下で目標値を達成した

(下図)。

また、耐久性に最も支配的である軸受けの寿命についても軸受けの型式並びに軸受けグリース型式に対して軸受け温度が十分低いので目標の耐久時間は満足できるとの結果を得た（研究開発に参画頂いたアドバイザーである軸受けメーカーからもその判断をする助言を頂いた）。



コイル温度上昇確認結果
目標: 130°C以下(B種絶縁階級)

試験条件

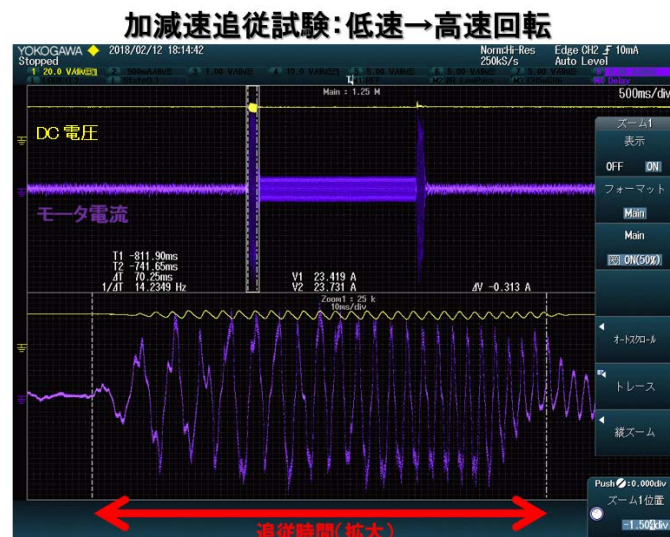
- ・回転速度: 目標回転数、連続
- ・ファン風量: 最大負荷状態(静圧0)

考察

- ・目標回転数の最大負荷でもコイル温度が約55°Cで有り、E種絶縁階級(120°C)への使用にも問題無い。

【4-3-2】プロアとしてモータの加減速追従性評価

研究期間中に川下企業からプロアの加減速追従性の課題の提供を受けて 目標に追加して実施した。 設定された時間以内に低速から高速回転に 高速から低速回転に交互に追従する特性を駆動回路の改善も含めて評価試験を行い目標達成していることを確認した(右図)。



最3章 全体総括

【1】補助事業の成果

【1-1】モータ単体での評価

【1-1-A】モータ効率

平角線を使用して試作モータの効率評価を実施した結果 従来仕様よりも4ポイント モータ効率がアップした（目標値の20ポイントのアップは未達成）。

【1-1-B】モータ電磁コギング

平角銅線を1巻き毎に階段状にずらすステータ巻線を採用することにより モータの電磁コギングの評価を行い 従来品（丸銅線を渦巻状に巻いた仕様）よりも20%コギング低下の成果が得られた（目標値の従来品の50%低減は未達成）。

【1-2】Fe 基アモルファス合金の焼鈍

モータのヨークコア（磁路）として高速回転時に低鉄損の Fe 基アモルファス合金を採用して研究開発を行った。 この材料をヨークコアに加工する場合に機械加工及び熱加工による材料歪みが生じて鉄損値が増加する。その対策として焼鈍を行うが本研究の考察で400℃以下（350℃）にて加熱焼鈍すれば鉄損値を半減できることを確認した。 また 温度500℃近辺から結晶化が起きることも確認した。

【1-3】ブローでのモータ評価

【1-3-A】風量特性

研究開発した試作モータにブロー用部品を試作製作して、評価用ブロー完成として目標の回転数で想定した圧力・風量特性を得ることが出来た。

【1-3-B】ブローとしてモータの加減速追従性評価

設定された時間内に低速から高速回転に 高速から低速回転に交互に追

【公開版】

従する特性を駆動回路の改善も含み評価試験を行い目標達成していることを確認した。

【1－3－C】ブローとしての耐久評価

試作ブローを目標回転数で最大負荷点（静圧0状態）にて温度上昇試験を実施し、コイル温度が55℃（温度上昇値 35deg）のデータを得た。これはB種絶縁階級以下で目標値を達成した。

又 耐久性に最も支配的である軸受けの寿命に対しても軸受けの型式並びに軸受けグリース型式に対して軸受け温度が十分低いので目標の耐久時間は満足できる（研究開発に参画頂いたアドバイザーである軸受けメーカーからその判断をする助言を頂いた）。

【1－4】成果の全体まとめ

平角銅線を1巻き毎に階段状にずらしてステータとする工法を確立しステータ完成の試作を完成させた。

また 磁路としての試作ヨークコアにFe基アモルファス採用して、加工歪みによる鉄損失を焼鈍により軽減させる磁気特性改善の検証を行った。

上記部品を採用してモータの効率と電磁コギングの改善の結果が得られた。電磁コギングは構造的にズラせる最大のピッチの方が有利であることが確認できた。

ブローとしてのモータ評価に関しても風量特性および加減速追従性に関しては目標を達成出来た。

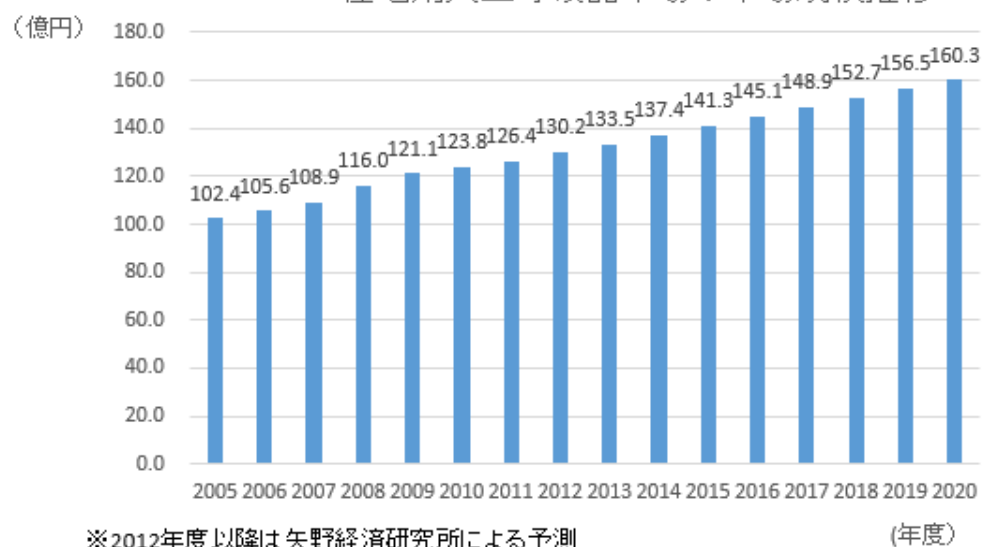
【2】研究開発後の課題・事業化展開

【2-1】想定している具体的なユーザー、マーケットの課題及び市場規模

計画当初に想定していた川下企業が研究開発期間中に医療機器事業から撤退したが、当初計画通り最優先のマーケットとして医療機器業界をターゲットとして新たに販売先（ユーザー）のマーケティングが今後必要となり取り組んでいく。

最終製品のターゲットの市場規模は下記の当初計画通りの推計である。

＜在宅用人工呼吸器市場の市場規模推移＞



矢野経済研究所推計による在宅用人工呼吸器市場規模

2015 年度 (141.3 億円) 2016 年度 (145.1 億円) 2017 年度 (148.9 億円)

2018 年度 (152.7 億円) 2019 年度 (156.5 億円) 2020 年度 (160.3 億円)

【2-2】事業化展開

製品の事業化に至る今後の展開に関して下記を計画する。

事業年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度
追加研究	特性改善		フィールド試験		
設備投資		設備導入			
製品生産		量産試作		生産開始	
製品販売					販売開始

【公開版】

製品の売上規模と事業化時期に関して下記を目論む。

事業年度	2023 年度	2024 年度	2025 年度	2026 年度
売上高 (千円)	6000	32000	85000	120000