平成３１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

「モータ積層コアの損失計測技術の高度化とシステム開発」

研究開発成果等報告書

令和２年５月

担当局　九州経済産業局
補助事業者　公益財団法人　大分県産業創造機構

目　次

第１章　研究開発の概要
１－１　研究開発の背景・研究目的及び目標
（１）　研究開発の概要及び背景、当該分野における研究開発動向
（２）　モータ積層コアの損失計測の現状
（３）　従来技術での課題と新技術
（４）　研究開発と解決方法
１－２　研究体制
１－３　成果概要
１－４　当該研究開発の連絡窓口

第2章　本　論
２－１　【Ⅰ】熱的測定方法の開発
２－２　【Ⅱ】熱的外乱技術除去技術の開発
２－３　【Ⅲ】計測装置のユニバーサルデザイン化
２－４　【Ⅳ】モータ積層コアの損失計測の実証
（１）　モータ積層コア溶接の影響の測定
（２）　実機電気自動車のモータ積層コアの磁束密度測定
（３）　汎用モータ積層コア計測用永久磁石ロータの数値解析による設計・製作
（４）　永久磁石ロータを使用した測定装置の設計と製作
（５）　製作した装置による測定

最終章　全体総括
３－１　事業の成果
（１）熱的測定法の開発
（２）熱的外乱除去技術の開発
（３）計測装置のユニバーサルデザイン化
（４）モータ積層コアの損失計測の実証
３－２　事業化計画
（１）顧客ニーズ
（２）販売戦略
（３）知財戦略
（４）標準化

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）研究開発の概要及び背景、当該分野における研究開発動向

資源エネルギー庁の調査によれば、産業用モータは多様な用途で使用されており、国内普及台数は約 1 億台（平成 21 年度省エネルギー整備導入促進指導事業報告書）、世界の小型モータ市場では 1 兆 9,891 億円（2014 年㈱富士経済調べ）と普及台数、市場規模共に大きい。さらに、エネルギーの有効利用の観点と CO2 排出量抑制の環境規制に対応するため、図 1 に示すようにプラグインハイブリッド自動車や電気自動車などは 2035 年には世界市場で 1700 万台と新たな市場が見込まれ、動力源として使用されるモータの小型化や高効率化のニーズは今後ますます増える。

最近では、フランスに続いてイギリスが環境面から 2040 年以降のガソリン車・ディーゼル車の新車販売禁止を打ち出したことで、電気自動車の急速な拡大が見込まれる。

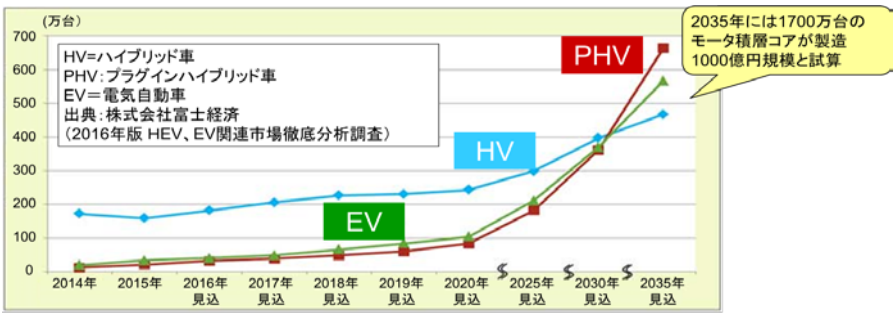


図１　ハイブリッド自動車、電気自動車などの世界市場予測

（２）モータ積層コアの損失計測の現状

電気自動車用モータ積層コアは、生産工程を経るごとに加工応力等による損失が増加し、図 2 に示す近年の研究成果によると完成品ではカタログデータに比べ 2 倍以上に損失が増加する。現状ではモータ積層コアの製造の評価は機械的な品質管理（寸法精度）のみで、磁気的な品質管理はされておらず、インラインで評価できる計測方法も確立されていない。しかしながら、電気自動車用の駆動モータにおいて、モータの損失がそのまま出力低下、航続距離の低下を招き、モータ積層コアの磁気的な品質管理が不可欠であると自動車メーカーは認識し始めている。

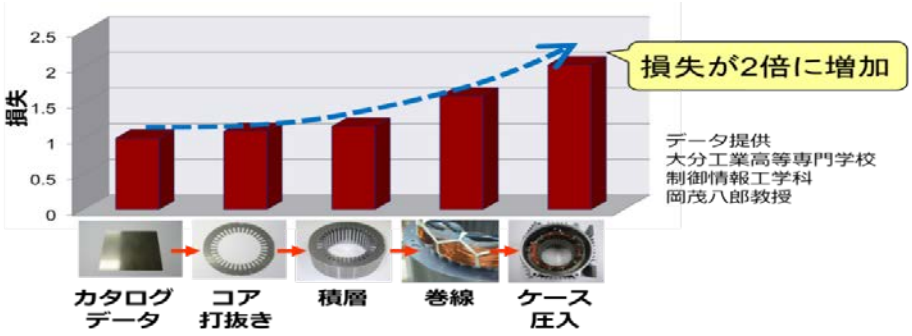
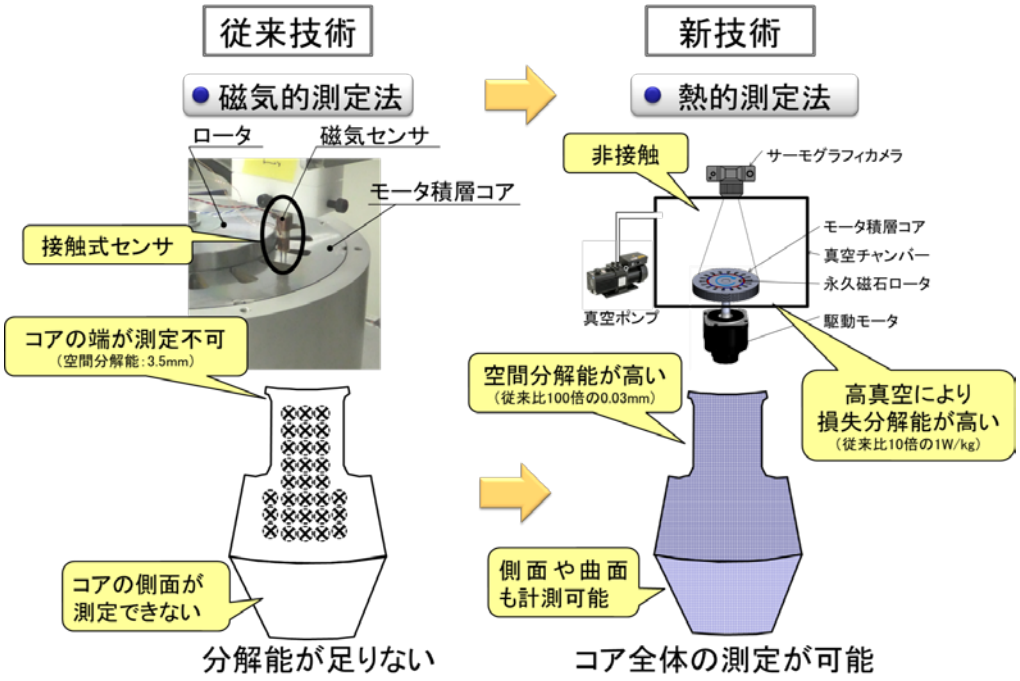


図２　モータ積層コアの生産工程と各工程における損失

加工工程毎の損失を測定するには、一般的なコアの厚みである 0.5mm の 1/10 以下の 0.05mm と従来比 100 倍もの微小な空間（以下、空間分解能と記す）を計測する必要があり、従来の計測技術では計測不可能である。さらに、1W/kg 程度の損失を温度変化で評価する場合、1 秒間に 0.003℃の温度上昇を計測する必要があり、従来比 10 倍の感度での計測が必要である。今後、電磁鋼板の薄板化により、さらに高い空間分解能が望まれる。

（3）従来技術での課題と新技術



＜課題＞

1．端部や小型のモータ積層コアが計測できない
- 磁気センサのサイズにより小型モータやモータ積層コアの残留応力の影響が計測できない。
- 計測時間が長いためモータ積層コアの量産の品質管理に利用できない。
- 熱的測定法の精度に影響する阻害要因の除去ができない。

2．モータ積層コア計測データの不足
- モータ積層コアの残留応力の影響を直接評価する計測装置がない。

＜特徴＞

1．従来比空間分解能 100 倍（0.03mm）
- 高性能サーモグラフィカメラ使用により空間分解能向上。
- 非接触で短時間計測が可能になり、量産用品質管理に使用可能。

2．従来比損失分解能 10 倍（1W/kg）
- 高真空状態で計測により計測精度が向上する。
- 微少温度変化を用いた非破壊試験等への応用も可能

図３ 従来技術と新技術

（4）研究開発と解決方法

先の開発では、従来の空間分解能 3.5mm に対し 10 倍を達成したが、今後の技術進展も見越して、より微少な損失を計測するために空間分解能を従来比 100 倍（0.03mm）以上に向上、及び、モータの回転による風の影響を排除し、損失分解能を従来比 10 倍（1W/kg）に向上することが研究課題となる。

モータ積層コアの損失（鉄損）計測における計測精度は、図 4 に示すように、内部の ①熱伝導、②熱伝達、③放射熱の誤差要因に影響される。そのため、計測精度を向上するにはそれらの影響を小さくすることが重要となる。

国立大学法人大分大学が持つ特許第 5048139 号は、サーモグラフィカメラからのデータを数多く取得し統計的な手法によりサーモグラフィカメラの温度分解能の拡大を行うものである。具体的には、サーモグラフィカメラから得られる数十万枚（データ容量数百 GB）の熱画像を基に温度勾配を求め、統計処理により図4の①熱伝導、③放射熱が排除でき、モータ積層コアの局所的な損失が分かる技術である。また、先の研究開発で顕在化したモータの回転による風の影響を排除するため、モータの周辺を真空状態とし、図4に示す②熱伝達を排除する。これにより、誤差要因の①、②、③がすべて排除でき、得られた結果は損失のみが残り、計測精度の課題が解決される。

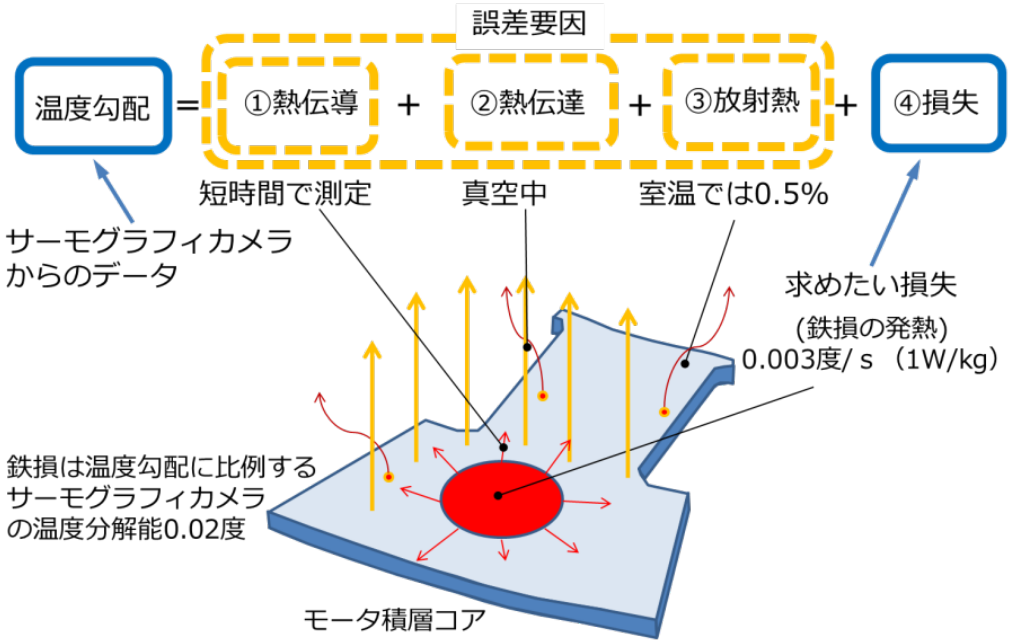


図４ 熱的測定法の原理

１－２　研究体制

本研究課題では図５の研究実施体制図に示すように、（公財）大分県産業創造機構を事業管理法人とし、㈱ブライテック、（有）FACT、大分大学、大分県産業科学技術センターで実施する。㈱ブライテックでは研究総括及びソフトウェア設計を含む計測器設計、製造を実施する。（有）FACT ではソフトウェアデザインを担当する。大分大学では計測結果の評価と学会活動を実施し、大分県産業科学技術センターでは計測技術シーズの提供と実証試験を実施する。アドバイザーとして、自動車メーカーのトヨタ自動車九州（株）及び、日本の磁気計測の第一人者である同志社大学の藤原教授と㈱JFE テクノリサーチを迎え、トヨタ自動車九州（株）にはモータ積層コア製造上の技術的なアドバイスをお願いする。そして、藤原教授にはモータ積層コア計測の現状や計測結果のアドバイスをお願いし、㈱JFE テクノリサーチには産業界が必要とするニーズのフィードバックをお願することで、学術界的、産業界的立ち位置を把握して、開発側の独りよがりにならないように留意した実施体制とした。平成 30 年度より（株）三井ハイテックをアドバイザーに迎えモータ積層コア製造の打ち抜きや積層工程中の製造技術的なアドバイスをいただくことになった。

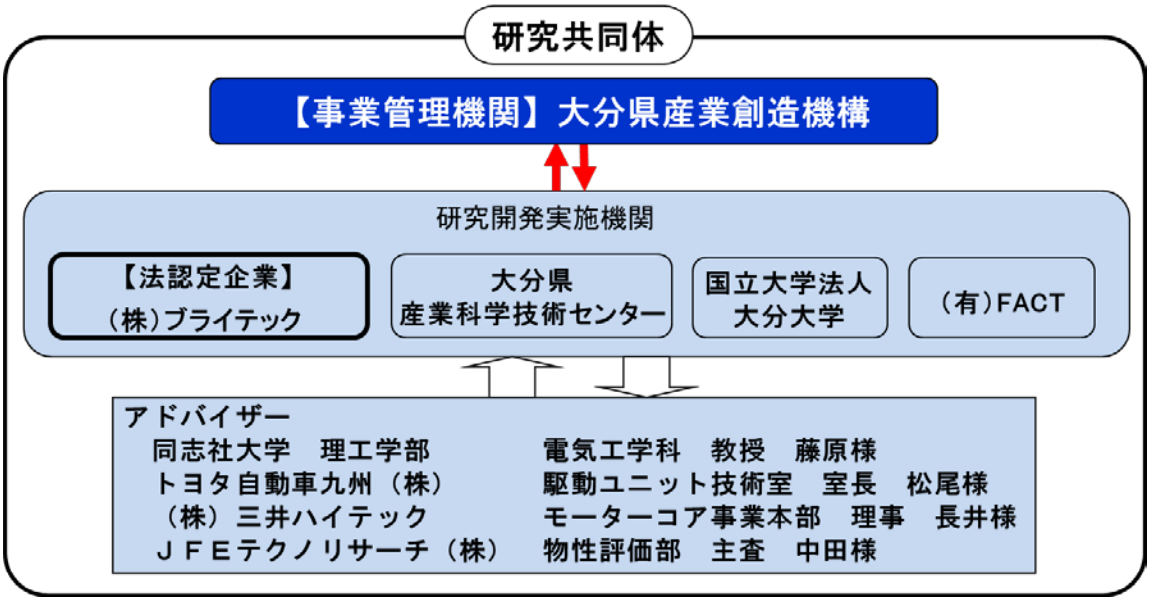
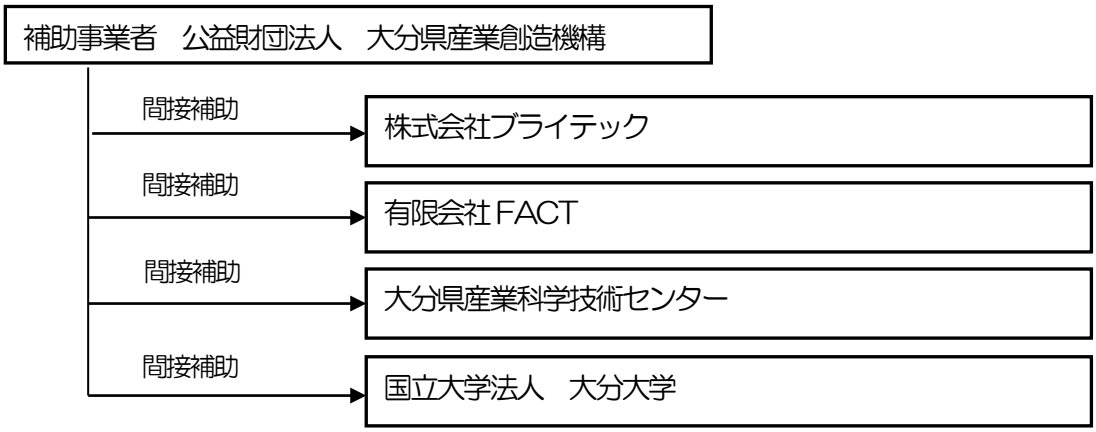


図５ 研究実施体制図

＜履行体制図＞



株式会社ブライテック

氏　名	所属・役職	実施内容（番号）
相原　茂 後藤　俊介 上杉　健斗 甲斐　直人 貝谷　信幸 岩田　洋幸	技術部　部長 技術部　開発Ｇ 技術部　開発Ｇ 技術部　開発Ｇ 技術部　設計Ｇ 技術部　設計Ｇ	【Ⅰ】熱的測定法の開発 【Ⅱ】熱的外乱除去技術の開発 【Ⅳ】モータ積層コアの損失計測の実証

有限会社 FACT

氏　名	所属・役職	実施内容（番号）
後藤　保広	代表取締役	【Ⅲ】計測装置のユニバーサルデザイン化

大分県産業科学技術センター

氏　名	所属・役職	実施内容（番号）
下地　広泰 池田　哲 沓掛　暁史 竹中　智哉 伊野　拓一郎	電磁力担当　主任研究員 電磁力担当（総括）主幹研究員 電磁力担当　主幹研究員 電磁力担当　主任研究員 機械担当　研究員	【Ⅱ】熱的外乱除去技術の開発 【Ⅳ】モータ積層コアの損失計測の実証

国立大学法人　大分大学

氏　名	所属・役職	実施内容（番号）
戸髙　孝	理工学部　創生工学科電気電子コース　教授	【Ⅳ】モータ積層コアの損失計測の実証
佐藤　尊	理工学部　創生工学科電気電子コース　助教	

アドバイザー

氏　名	所属・役職	実施内容（番号）
松尾　基史	トヨタ自動車九州（株）駆動ユニット技術室室長	モータ積層コアの要求仕様や量産時の評価に対する問題等のアドバイス
長井　亮	（株）三井ハイテック　モーターコア事業本部　理事	
藤原　耕二	同志社大学　理工学部　教授	磁性材料の機能評価と電気機器の特性解析のアドバイス
中田　崇寛	JFE テクノリサーチ（株）磁性材料評価センター　主査	磁性材料・電磁応用機器分野の評価・技術のアドバイス

１－３　成果概要

本研究課題の成果状況を目標達成度一覧表にまとめた。４つのサブテーマを掲げて研究を行い、達成度はいずれも 100%である。

表１ 目標達成度一覧表

サブテーマ	目標値	達成度	達成根拠	コメント
【Ⅰ】 **熱的測定法の開発** 高速サーモグラフィカメラを用いた測定装置の製作及びソフトウェアの作成	空間分解能 100 倍	１００%	50mm レンズおよび接写リングにより分解能が 0.024mm であることを確認した。	
【Ⅱ】 **熱的外乱除去技術の開発** 熱伝達遮断のための真空装置開発	損失分解能 10 倍 (1W/kg の実証)	１００%	0.55W(0.6T 測定時)に相対誤差 0.10%であることを確認した。	最大真空度 5×10^{-4}Pa を確認した。
【Ⅲ】 **計測装置のユニバーサルデザイン化**	ユーザーテスト評価が５段階評価で４以上	１００%	ユーザーテストを実施し評価結果が 4.3 であった。	装置構成をイラストにしわかりやすくした。
【Ⅳ】 **モータ積層コアの損失計測の実証** 【4-1】モータ積層コア溶接が損失に与える影響のデータ化 【4-2】実機電気自動車のモータ積層コアの磁束密度測定 【4-3】汎用モータ積層コア計測用永久磁石ロータの数値解析による設計・製作 【4-4】永久磁石ロータを使用した測定装置の設計と製作 【4-5】上記の製作した装置による測定 【4-6】モータ積層コアのインライン判定装置の試作・評価	損失誤差 10%以内	１００%	単板磁気試験器とサーモグラフィカメラによる損失測定結果で磁束密度が 1.6 T の相対誤差は 9.7%で最大値であることを確認した。製作した実証用モデルでの測定結果を示す。 ・永久磁石ロータによる測定 ・回転中のモータのロータ磁石の損失測定 ・モータコア曲面の測定 ・インライン判定装置	

１－４　当該研究開発の連絡窓口

【研究開発機関】

株式会社ブライテック　技術部　相原　茂
〒８７０－０１０７
大分県大分市大字海原７３９番地３
電話：０９７－５７４－７８９９　FAX：０９７－５７４－７８３０
E-mail：shigeru_aihara@btec-net.co.jp

【事業管理機関】

益財団法人　大分県産業創造機構　地域産業育成課　主査　宇都宮　良枝
〒８７０－００３７
大分県大分市東春日町１７－２０　ソフトパークセンタービル
電話：０９７－５３７－２４２４　FAX：０９７－５３７－４３２０
E-mail：oric27@columbus.or.jp

第2章　本論

2-1 熱的測定法の開発

高速サーモグラフィカメラを用いた測定装置の製作及びソフトウェアの作成

熱的計測法において計測精度と計測時間はトレードオフの関係であり、計測時間を長くすると熱伝導の影響が大きくなり、結果として計測精度が悪化する。このため、撮影速度とシャッタースピードの高速化が要求される。図６に示すように、空間分解能とサーモグラフィカメラの焦点距離はトレードオフの関係があるため、最適な設定距離を設計した。

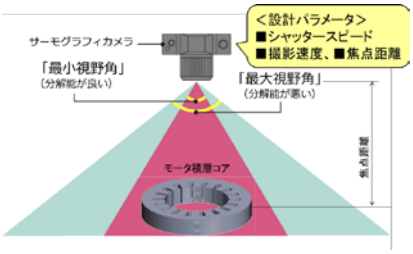


図６ サーモグラカメラの空間分解能と計測精度への影響因子

測定が高速でフレームレートが 1,000FPS 以上、及び空間分解能 0.03mm 以上を満たすレンズ及び、接写リングを選択した。サーモグラフィカメラは FLIR 社の X6901sc を選択した。サーモグラフィカメラの仕様を図７に示す。

項目	仕様	備考
型式	FLIR X6901sc	
検出器	Indium Antimonide	
解像度	640×512	
検出帯域	3.0-5.0μm	
フレームレート	1004[Hz]	フルウィンドウにて
インターフェース	Camera Link、他	

図７ サーモグラフィカメラ仕様

図 8 に導入したレンズ及び接写リングの外観と、空間分解の測定結果を示す。その結果、50mm レンズ及び接写リングにより分解能が 0.024mm であることを確認し空間分解能 100 倍の 0.03mm 以上の目標を達成した。

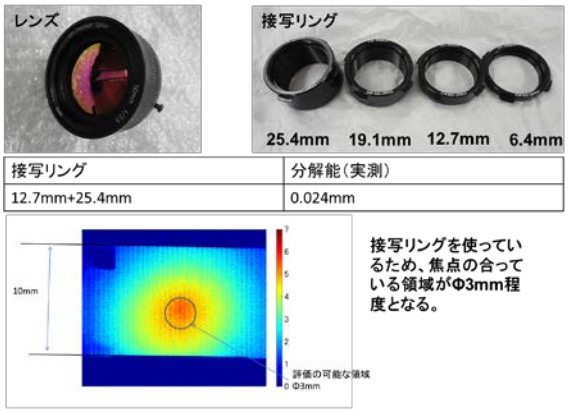


図８ サーモグラカメラの空間分解能の測定結果

サーモグラフィカメラから得られる数十万枚の熱画像を基に温度勾配を求め、統計処理により損失を表示するアルゴリズムについては大分県産科技センターで開発し、計測ソフトウェア開発を（株）ブライテックが行なった。開発ソフトウェアにはこれまで㈱ブライテックが計測用途で使用実績のあるナショナルインスツルメンツ社が販売するグラフィック型言語によってプログラミングできるLabVIEW を活用し内製化した。この開発用ソフトウェアの活用により、開発期間の短縮と、製品化後のメンテナンスを容易化できる。図８に熱画像処理方法、図９に計測フローを示す。

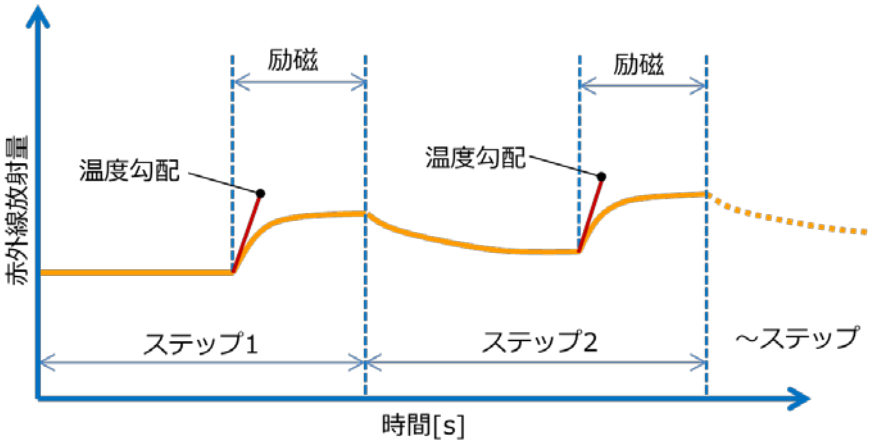


図８　熱画像処理方法

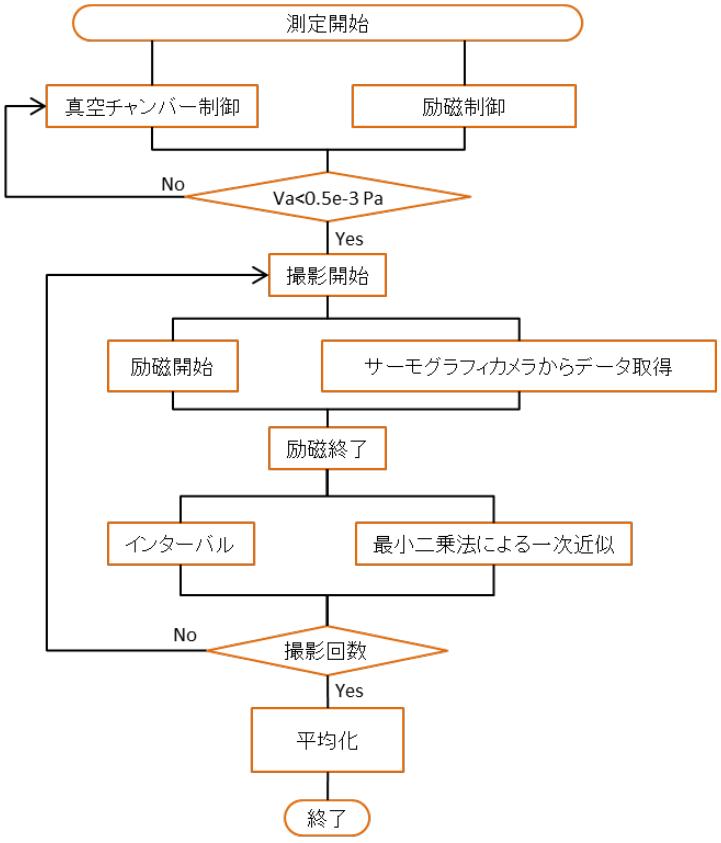


図９ 計測フロー図

画像データの処理は膨大なデータ量になるが、動画のようなリアルタイム性が無いこと、画像から即時の判断が不要であるため、画像データ処理の高速性よりも正確な処理ができることを優先し、ブライテック技術者が中心になりデータ処理のアルゴリズムを確立した。

ユニバーサルデザインコンセプトの簡単で分かり易い使い方、認識しやすい表示や表現を行うためにサーモグラフィカメラ制御ソフトウェアは表示画面をタブで切り替えを構成とした。図 10 に測定中の画面を示す。左下にサーモグラフィカメラの観測画面、右下にその温度データから温度勾配を計算した結果となり、上の画面に平均化した温度勾配を表示している。

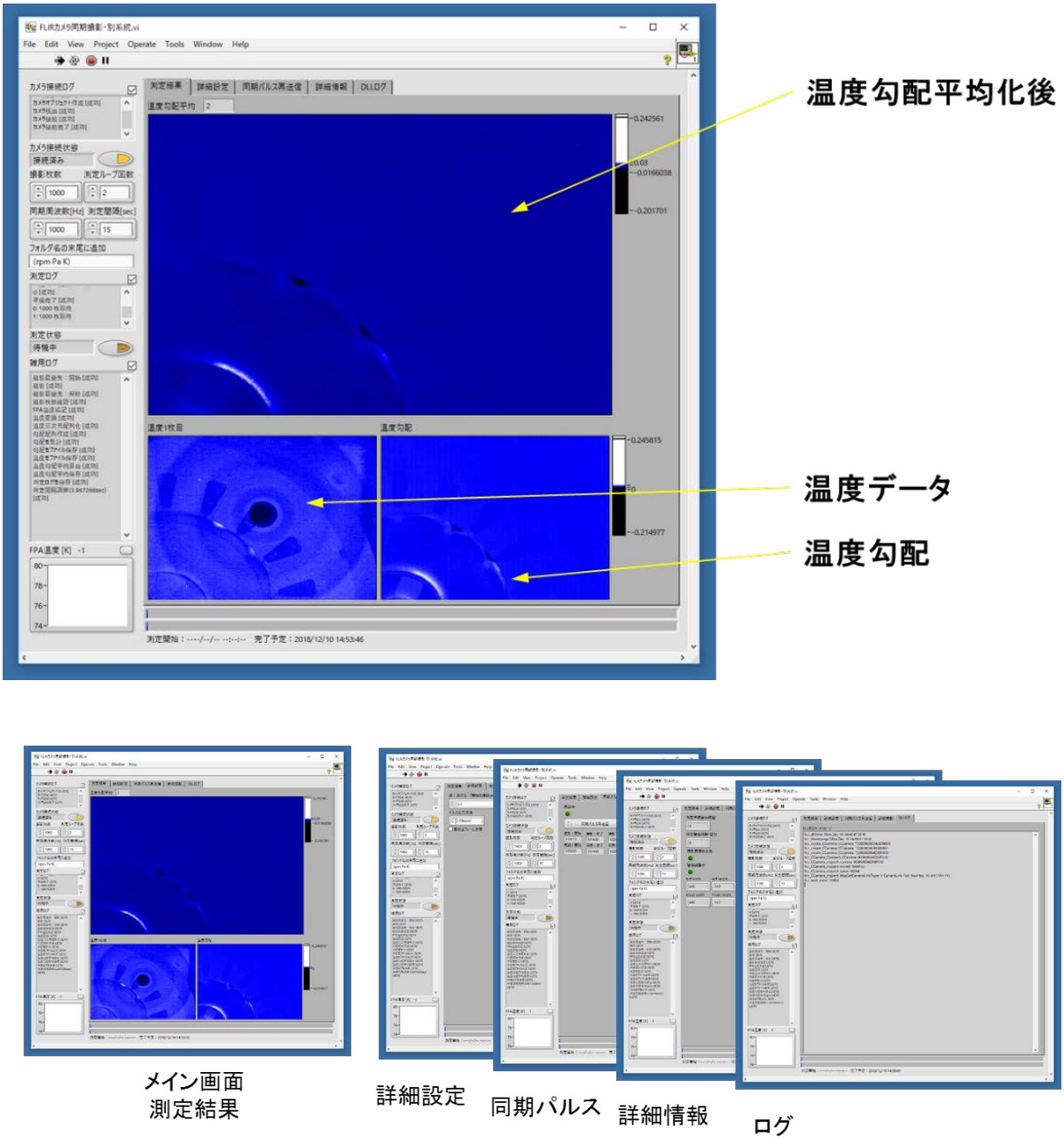


図 10 データ処理ソフトウェアの動作状況

2-2 熱的外乱除去技術の開発

大気の移動による熱伝達の遮断を目的に、サーモグラフィカメラのレンズを真空チャンバーに接眼できる真空チャンバーの設計を行った。また、図 11 に示すように熱的外乱除去の効果を狙うために、高真空でかつ、高速に真空引きが可能なターボ真空装置を選定した。真空装置の設計には、設計・製作実績のある大分大学・大分県産業科学技術センター、アルバック九州㈱にアドバイスを頂いた。

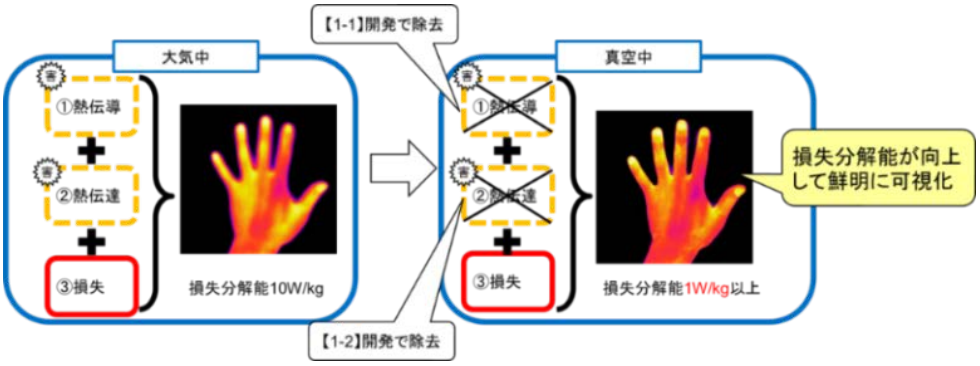


図 11 熱的外乱除去の効果

設計した真空チャンバーと周辺機器を図 12 に示す。設計当初は測定モータのロータを真空チャンバー外より駆動する予定であったが、外部からの回転導入に加わるトルクが大きいことから軸受が高額であり、また、回転導入部と被測定モータの軸合わせが難しくなるため、駆動モータも真空チャンバー内部に設置する構造とした。

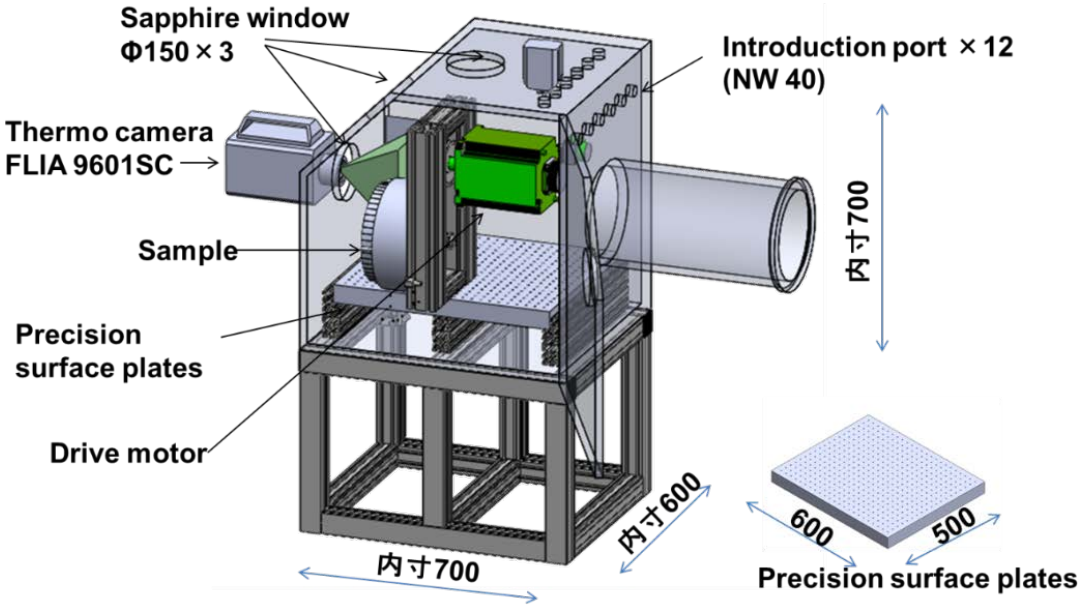


図 12 設計した真空チャンバーと周辺機器

なお、アウトガスの発生は避けられないが、ターボ分子ポンプを大型にすることでガスの排出時間を短くし、配線用部材はテフロン樹脂被覆材、潤滑材は真空グリスを使用しアウトガスの低減を行った。真空チャンバーで使用するモータはベアリングのグリスを真空グリスに変更するなどの対応を行った。アルバック製のドライ真空ポンプ CR60B-SAC200V（最大排気速度 920L/min）とターボ分子ポンプ大流量型 UTM-80FWM（最大排気速度 920L/min）の構成とした。製作した真空チャンバーと周辺機器を図 13 に示す。

表２に示す通り、真空装置完成後に動作試験を行い最大真空値 5x10-4Pa を確認した。

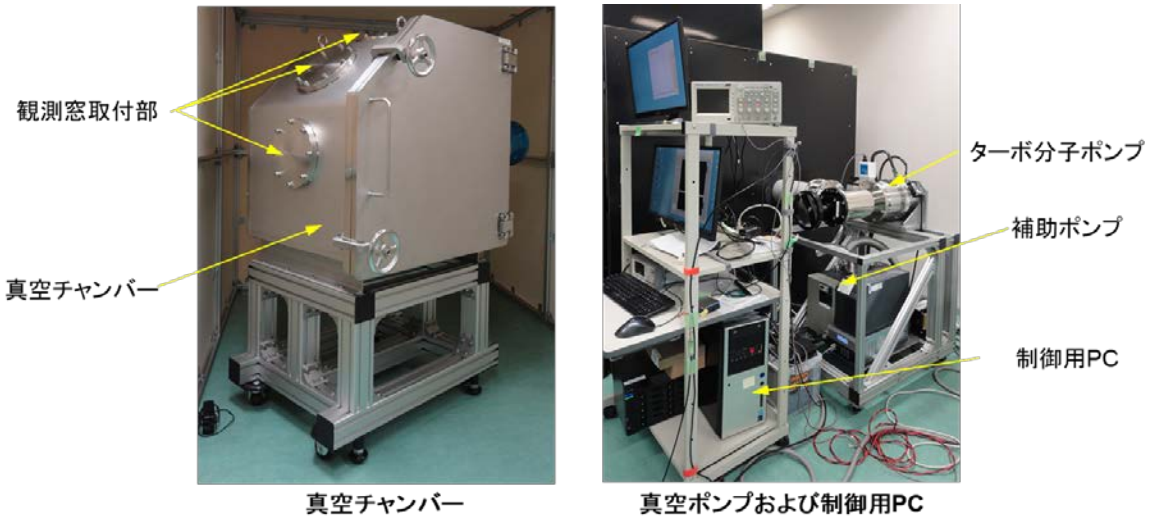


図 13 製作した真空チャンバーと周辺機器

表２ 製作した真空装置の最大真空度

項目	圧力[Pa]
真空度	$5x10^{-4}$

モータ積層コアを測定に際し、熱測定と磁気測定方法の差を確認するために熱測定と磁気測定を同時に行える装置を製作した。図 14 に本開発で使用したオープン磁路型の単板磁気試験機の概要を示す。試料の中央部をサーモグラフィカメラで撮影できるようにし、磁気特性測定とサーモグラフィカメラでの損失測定を同時にできるように工夫したものである。試料は無方向性電磁鋼板 50A470 で寸法は幅 30mm 長さ 300mm である。B コイルは試料中央に直接巻線している。励磁波形は弊社製磁束密度波形制御装置（Bcon）により磁束密度波形を正弦波に制御している。H コイルは２つを試料表面に配置し、試料表面の磁界強度を線形近似により計算した。鉄損 Wi は式(1)より計算した。ここで、ρは材料密度、f は周波数である。

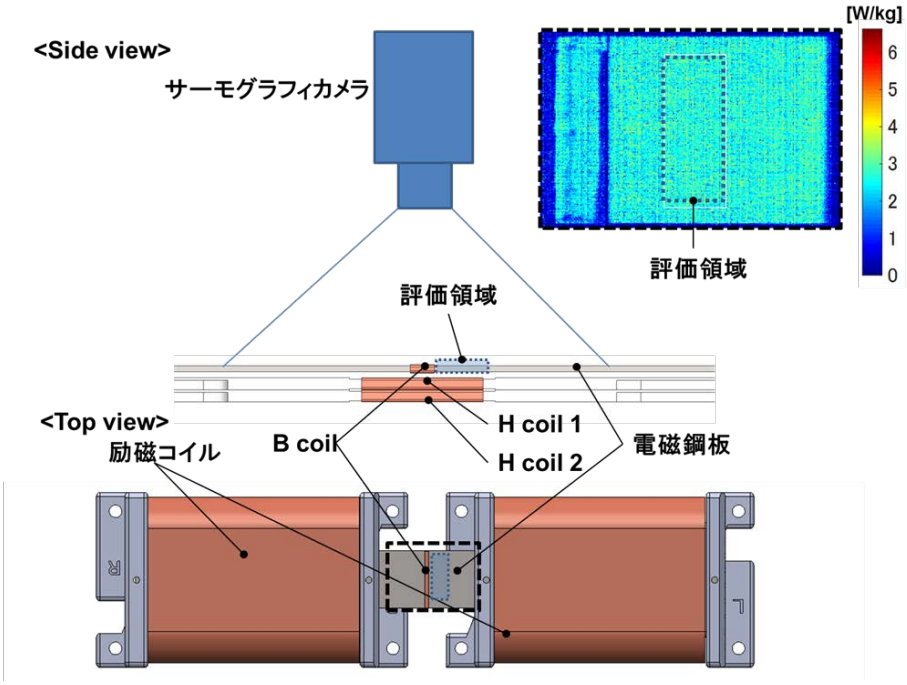


図 14　オープン磁路型単板磁気試験機の構造

$$W_i = \frac{f}{\sigma}\oint HdB = \frac{f}{\sigma}\int_0^t H\left(\frac{dB}{dt}\right)dt \qquad (1)$$

オープン型磁路単板磁気試験器の測定精度を確認するために従来の単板磁気試験器を使用して比較を行った。図 15 は磁気特性測定系統図を示す。図 16 は磁化曲線を示し、図 17 は鉄損曲線を示す。1.2T までは従来のクローズ型磁路とオープン型磁路の単板磁気試験器の測定結果は同様の値を得られている。1.2T を超えると、漏れ磁束によりオープン型磁路の単板磁気試験器の測定で磁界強度と鉄損が減少することがわかる。

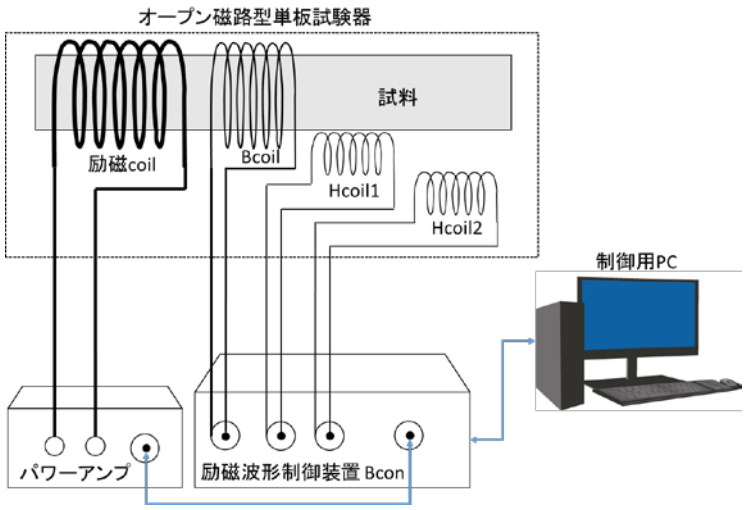


図 15　測定系統図

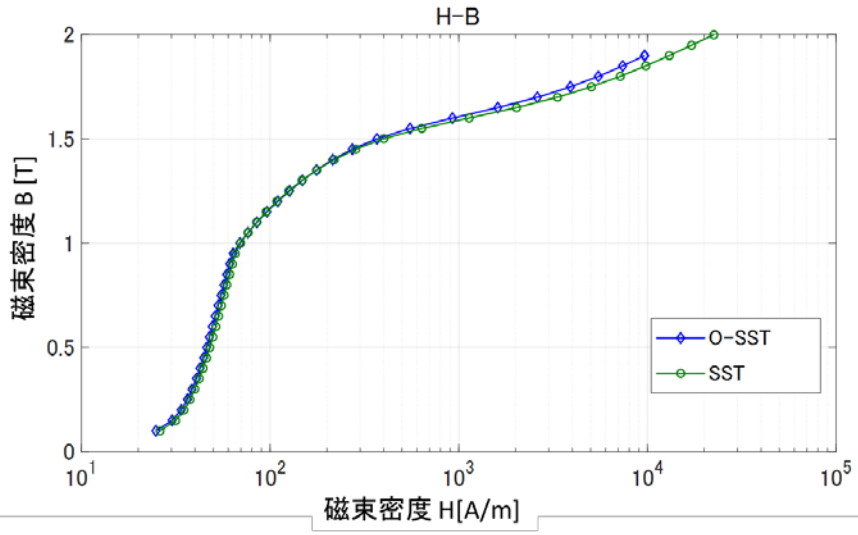


図 16　磁化曲線

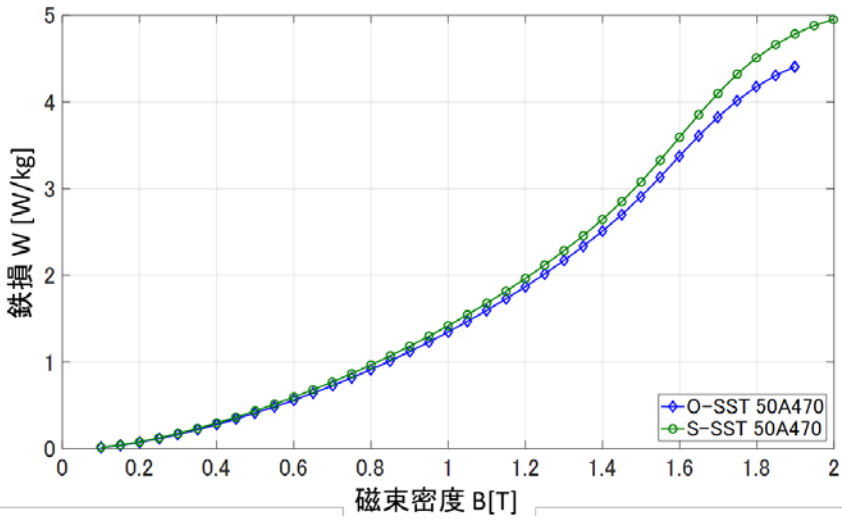


図 17　鉄損特性

オープン型磁路単板磁気試験器を使用し、磁気特性の測定と図 18 の構成による熱的測定による鉄損の差を確認し、鉄損が 1W/kg 以下の領域において相対誤差 3.5%以下で測定できることを確認した。図 19 に測定風景と測定結果を示す。

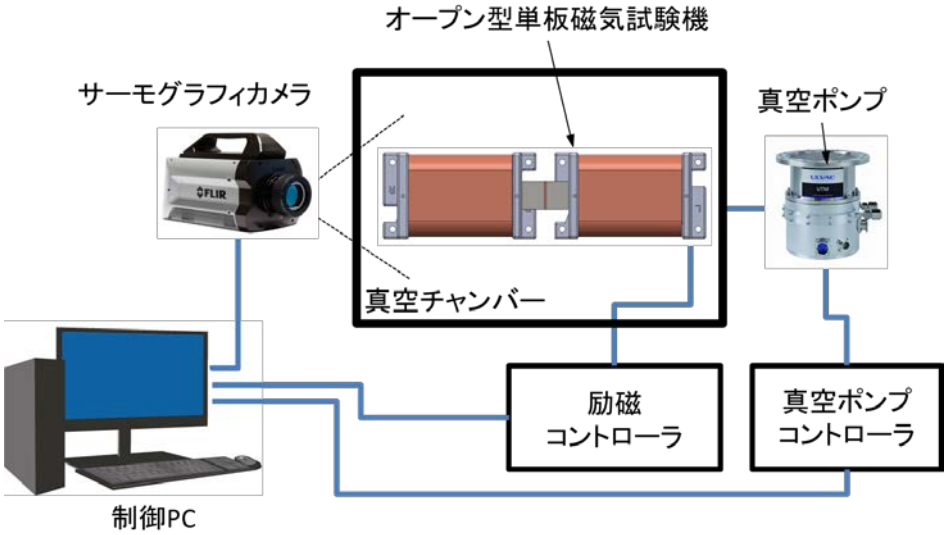
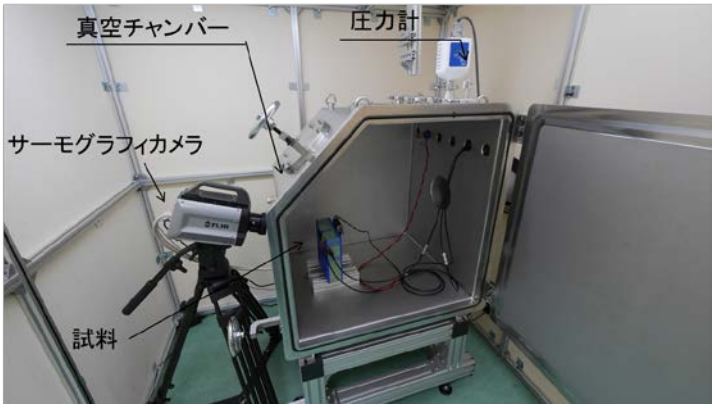


図 18　熱的測定法構成図



1W/kg以下の測定領域が相対誤差3.5%以下で測定が可能

Bmax	磁気特性	サーモ	相対誤差
[T]	[W/kg]	[W/kg]	[%]
0.6	0.55	0.55	0.10%
0.8	0.88	0.91	3.50%
1	1.3	1.21	-6.80%
1.2	1.78	1.65	-7.50%
1.4	2.41	2.25	-6.30%
1.6	3.24	2.93	-9.70%

図１９　測定風景と損失分解能測定結果

2-3 計測装置のユニバーサルデザイン化

2-1、2-2 で開発した装置のユーザーインターフェース開発を行う。ユーザーが容易かつスムーズに計測装置を使用できるように操作性・機能性の向上を表 3 に示すデザインコンセプトにより行なった。デザイン評価（使い勝手）については 10 名程度のオペレータに使用してもらいアンケート調査を行なった。また、オペレータの動きについても記録し、操作に迷っている箇所を特定した。㈲ＦＡＣＴではそれらの計測を実施し、その結果をデザイン担当にフィードバックし、改善を行なった。

表３ デザインコンセプト

項目	細目
簡単で分かり易い使い方	見ただけで使い方がわかる
	分かり易くなじみのある用語や表現
	適切は操作ボタンの配列や数
	現在の動作状況がわかる明確なUI
	分かり易く簡単な操作条件
	カスタマイズがし易いか
認識し易い表示や表現	操作部は識別しやすくする
	情報の見やすさ、見分けやすさ
	表示する情報量は適切にする
	見やすい図や文字
	情報の表現手段は複数用意する。
安全性及び利便性	誤操作防止を配慮する
	誤操作時や、やり直したい時に容易に復帰できる
	危険防止を配慮する

GUI の改良とともに誤操作を防ぐために、リークバルブを電磁弁にして自動化し、大バルブは閉位置を検出するセンサを取り付けた。図 20 に制作した GUI を示す。

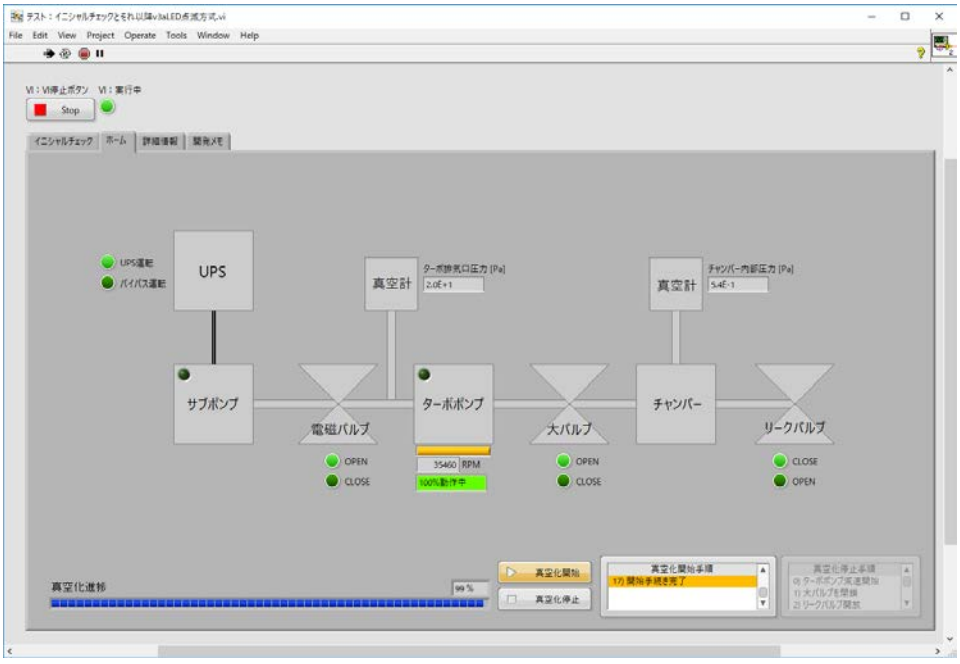
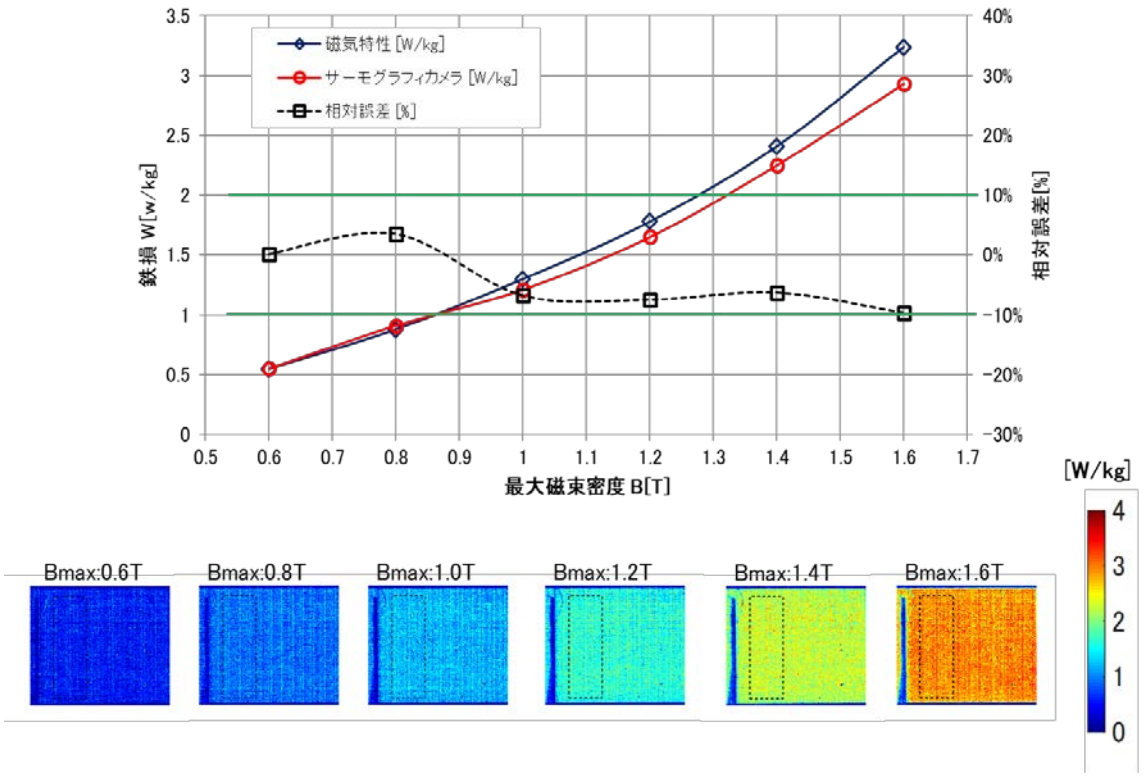


図 20　真空チャンバー操作 GUI

2-4 モータ積層コアの損失計測の実証

2-2 で製作したオープン型磁路単板磁気試験器を使用して磁気特性と熱的に損失を測定した結果を図 21 に示す。磁束密度が 1.6T の相対誤差は-9.70%で最大で、0.6T の相対誤差が 0.1%で最小値であることが確認できる。また、同図に各磁束密度で得られた鉄損分布を示す。測定領域で鉄損が均一に発生することがわかる。



項目	条件
励磁時間	1s
測定インターバル	60s
測定回数	50 回
真空度	0.5×10^{-3}Pa

図 21　磁気特性と熱的測定の相対誤差

（1）モータ積層コア溶接の影響の測定

モータ積層コアを部品としての入手は難しいため、図 22 に示すように市場から誘導モータを入手してモータ積層コア側面に溶接を施し、測定用モータを製作した。モータ積層コア固定のための溶接箇所を、図 23 に示す箇所に設定し、それぞれの損失分布をデータ化した。測定は図 24 に示す構成で行った。

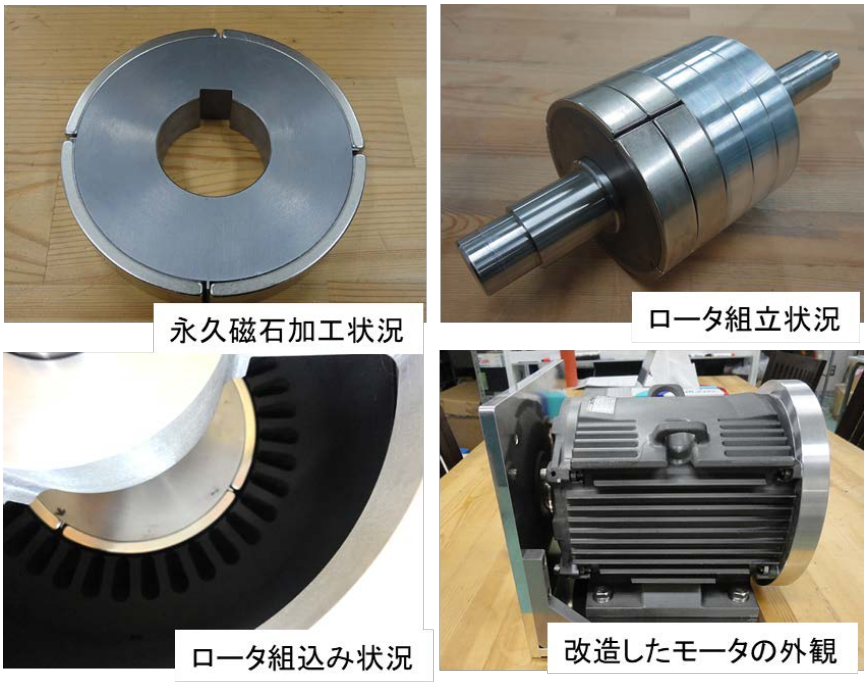


図 22　永久磁石ロータと改造した誘導機の構造

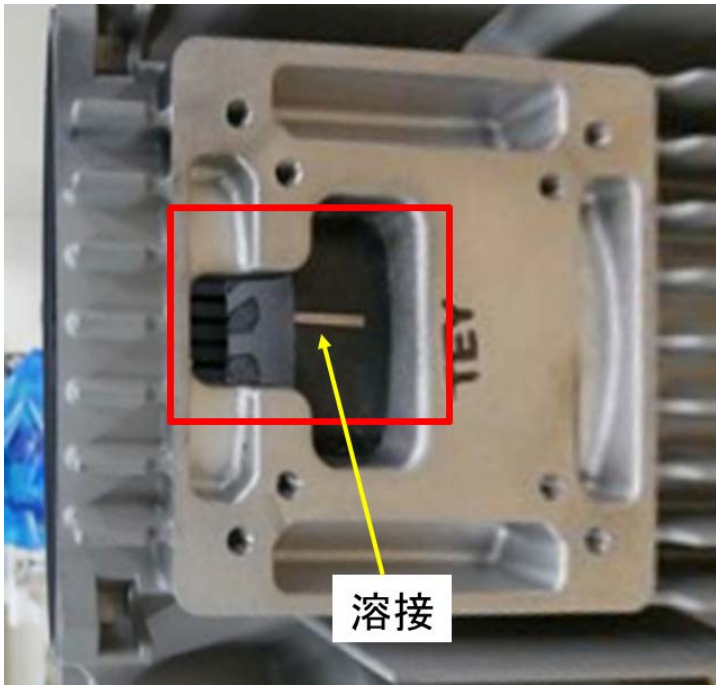


図 23　改造した誘導モータと溶接箇所

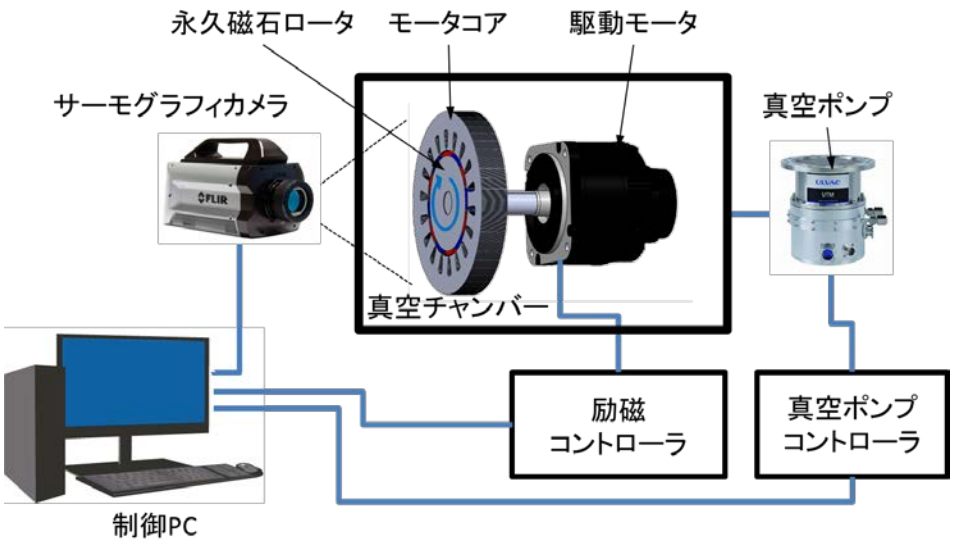
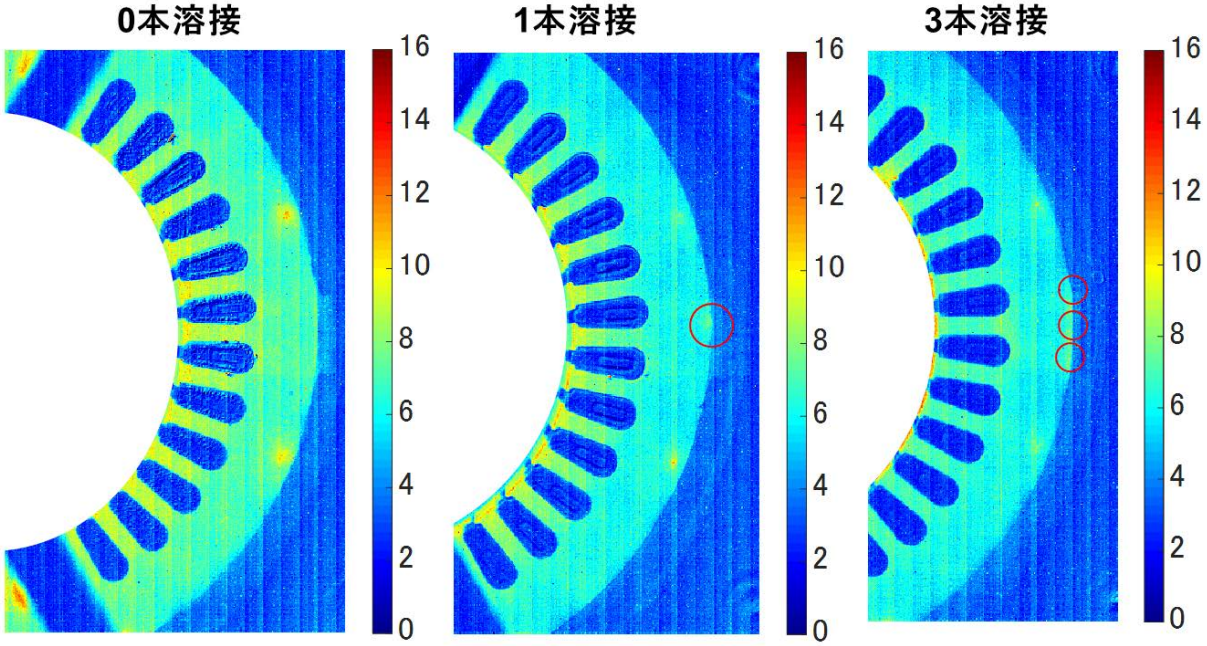


図 24　熱的測定法構成図

測定したステータコアの損失分布を図 25 に示す。高い損失が溶接した箇所に現れることがわかる。また、ステータコアのバックヨーク部分は溶接本数が増える毎に損失が低くなっており、溶接の影響により磁束が流れにくくなっていると思われる。



項目	条件
ロータ回転数	1200rpm
励磁時間	0.5s
測定インターバル	300s
測定回数	1044 回
真空度	4.5×10^{-3}Pa

図 25　溶接の影響の測定結果

（2）実機電気自動車のモータ積層コアの磁束密度測定

実機電気自動車のモータ積層コアの磁束密度を実測し、今後測定する際の磁束密度の指針とした。図 26 に分解した駆動用モータのティースに探りコイルを巻いた測定準備状況を示す。この探りコイルを巻線したモータを再度車に戻し、運転中のティースの磁束密度を測定した。その結果を図 27 に示すように、電気自動車の実働状態での動作点は磁束密度 1.7T 程度であることを確認した。

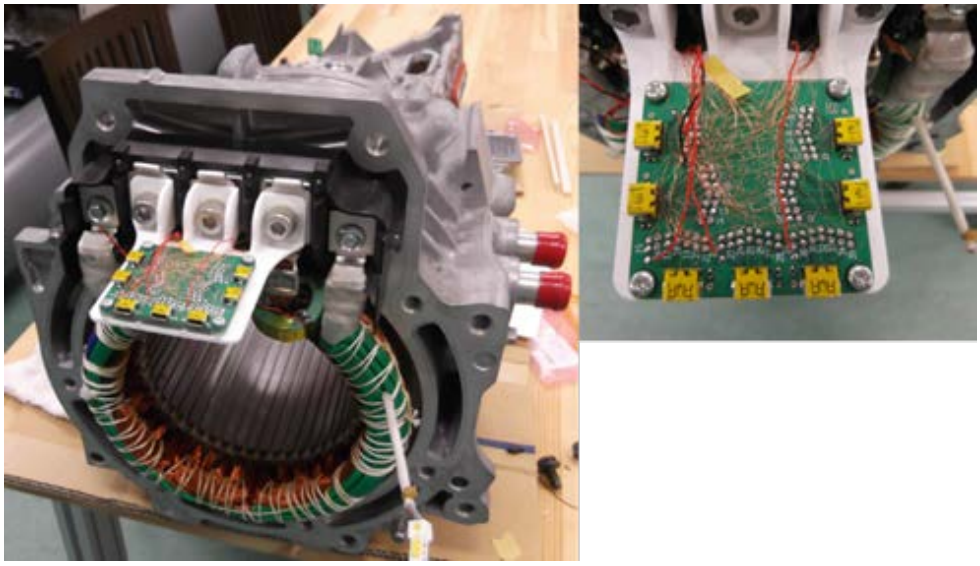


図 26　電気自動車の駆動用モータの測定準備状況

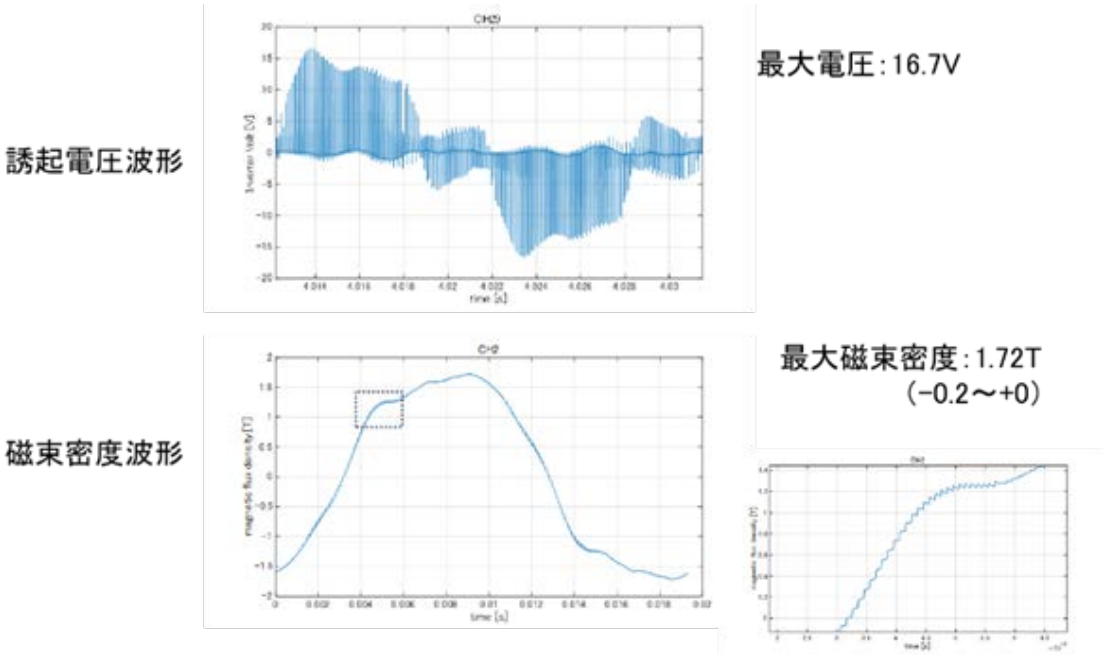


図 27　電気自動車の駆動用モータティースの最大磁束密度

（3）汎用モータ積層コア計測用永久磁石ロータの数値解析による設計・製作

永久磁石式ロータを使用した測定用モータの設計を数値解析により設計した。ロータ表面に永久磁石を貼り付ける形状とし、ロータの材料はアルミと鉄のバルクを比較し、渦電流の影響が小さくなる鉄のバルクとした。測定用モータの形状と解析結果を図28に示す。

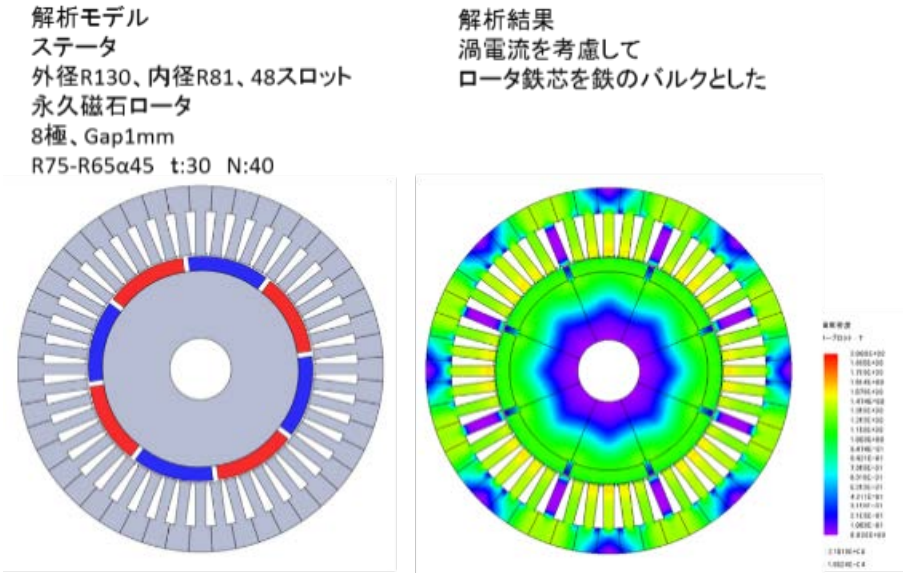


図28　測定用モータのギャップ中の磁束密度

（4）永久磁石ロータを使用した測定装置の設計と製作

製作したモデルモータとモデルモータドライブ機構を図29に示す。定格出力7kWのACサーボモータからタイミングベルトでモデルモータを駆動した。

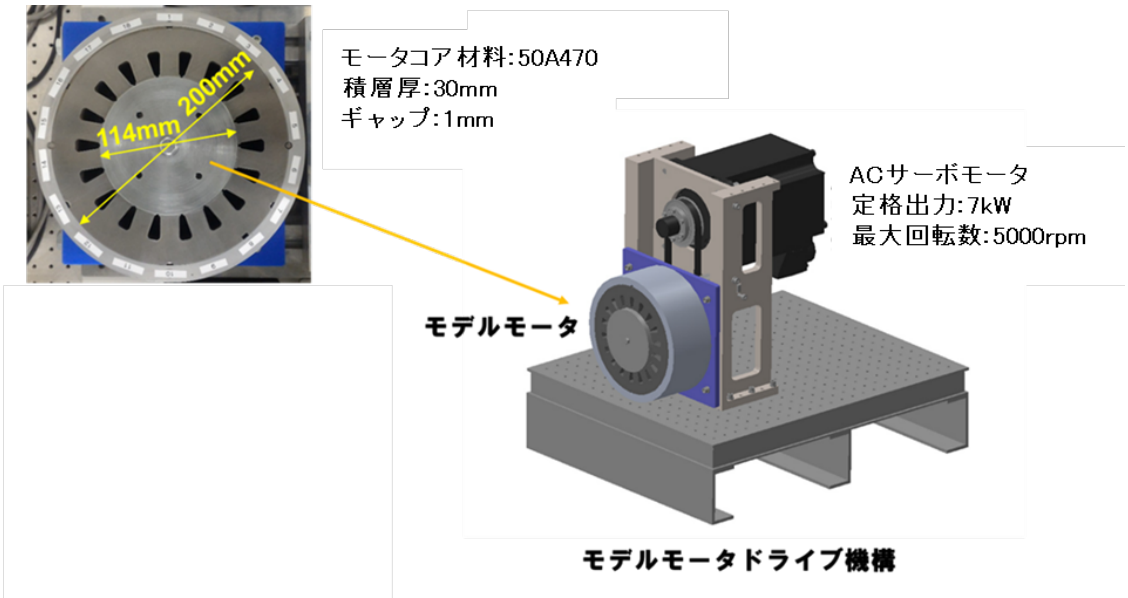


図29　モデルモータとモータドライブ機構

（5）製作した装置による測定

a．永久磁石ロータモータによる測定

50A470 材を使用したモデルモータをモータドライブ機構により回転させることで熱的に測定を行った。図 30 にモデルモータの設置状況を示す。図 31 にモデルモータと駆動装置を示す。

熱的に測定した結果と磁気センサで測定した結果は同様傾向を示すことが確認できた。図 32 に結果を示す。磁気センサでは測定ができなかった外周部まで測定できていることがわかる。

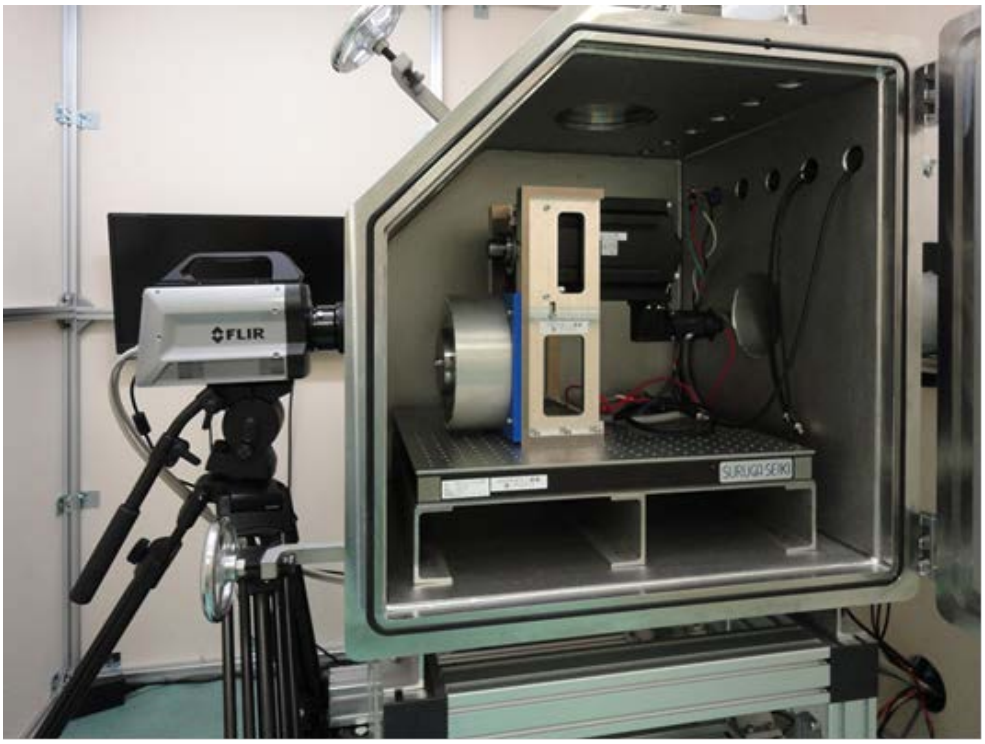


図 30　モデルモータの設置状況

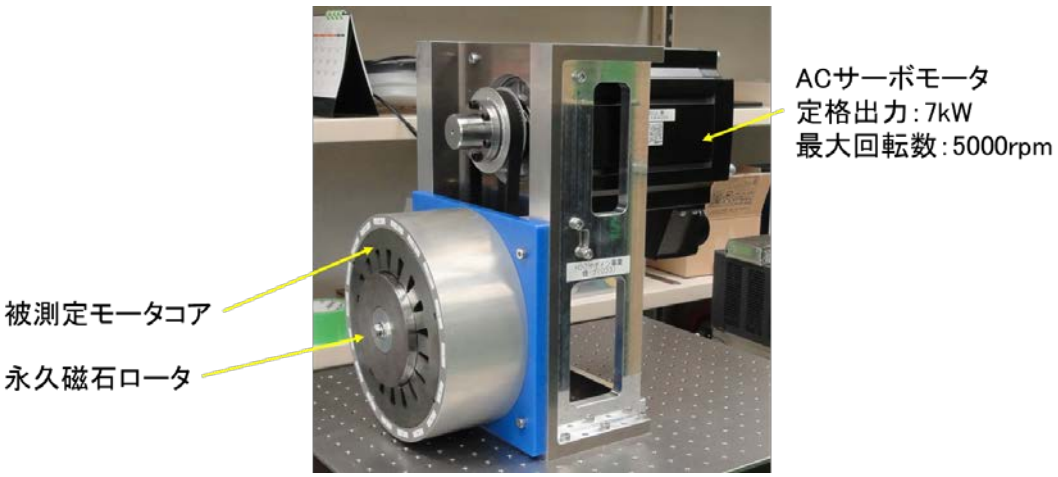
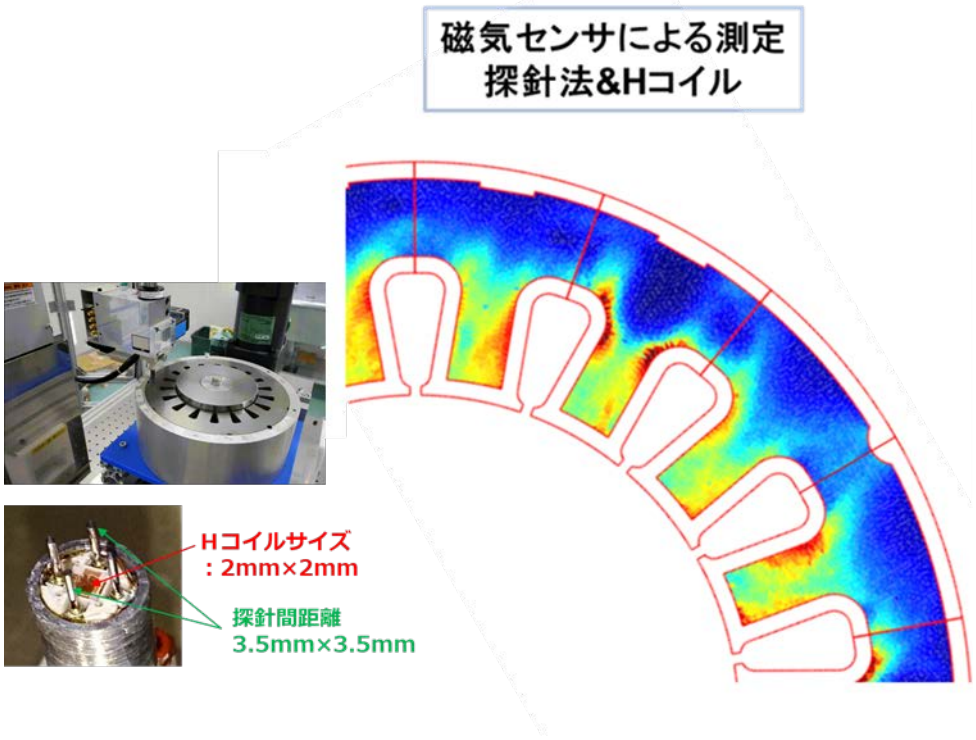
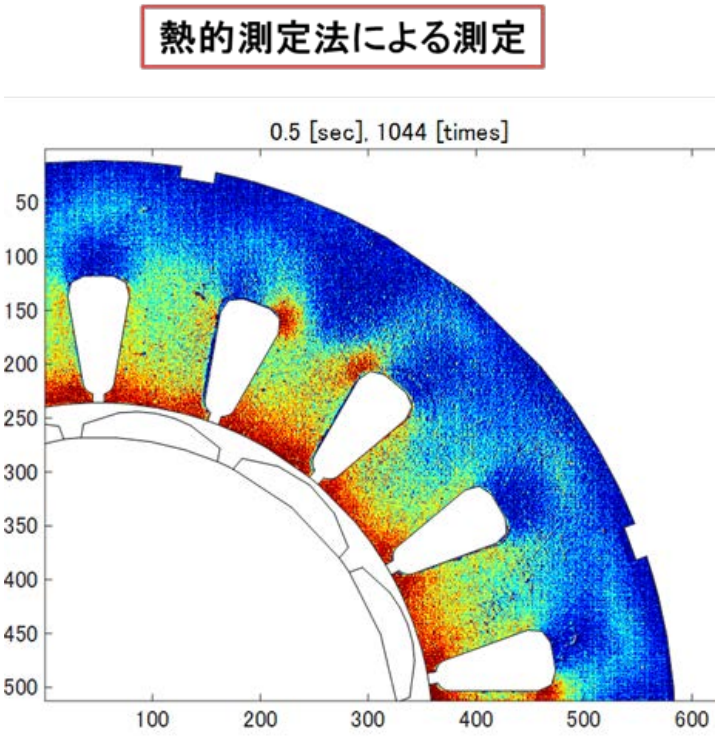


図 31　モデルモータと駆動装置





項目	条件
ロータ回転数	1300rpm
励磁時間	0.5s
測定インターバル	300s
測定回数	1044 回
真空度	4.5×10^{-3}Pa

図 32　磁気測定と熱的測定結果の比較

b．回転中のモータロータ磁石の損失測定

導入したサーモグラフィカメラは高速で撮影出来る他に同期して撮影出来る機能を持つため、回転している物体を静止しているように撮影できる。この測定では、表面磁石式ロータの発熱を測定するために、2-4(1)で製作したロータ駆動装置と誘導機を改造した永久磁石式のロータのモータを使用し、負荷として各相に50Ωの負荷を付け測定した。その結果、回転中の永久磁石ロータの磁石部分の損失を測定できることを確認した。図 33 に測定風景、図 34 に測定した結果を示す。図 35 にモータと磁石の位置関係をわかりやすくした図を示す。

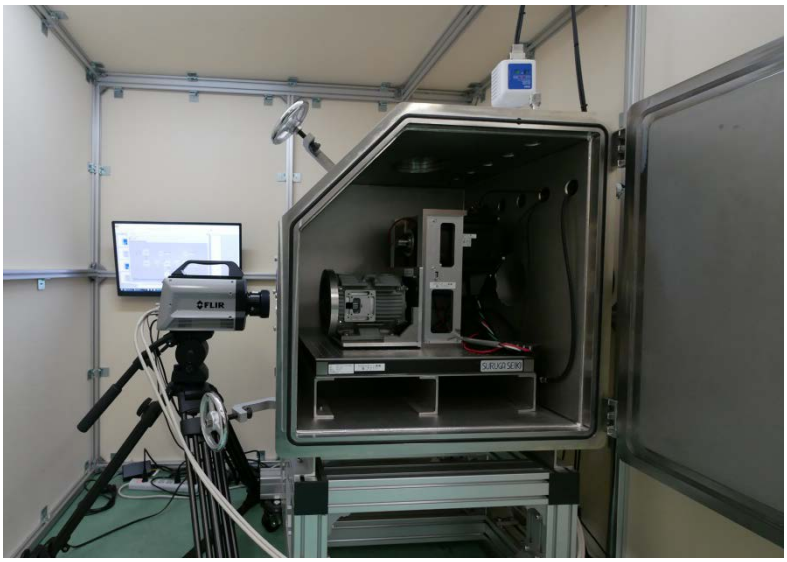


図 33　測定風景

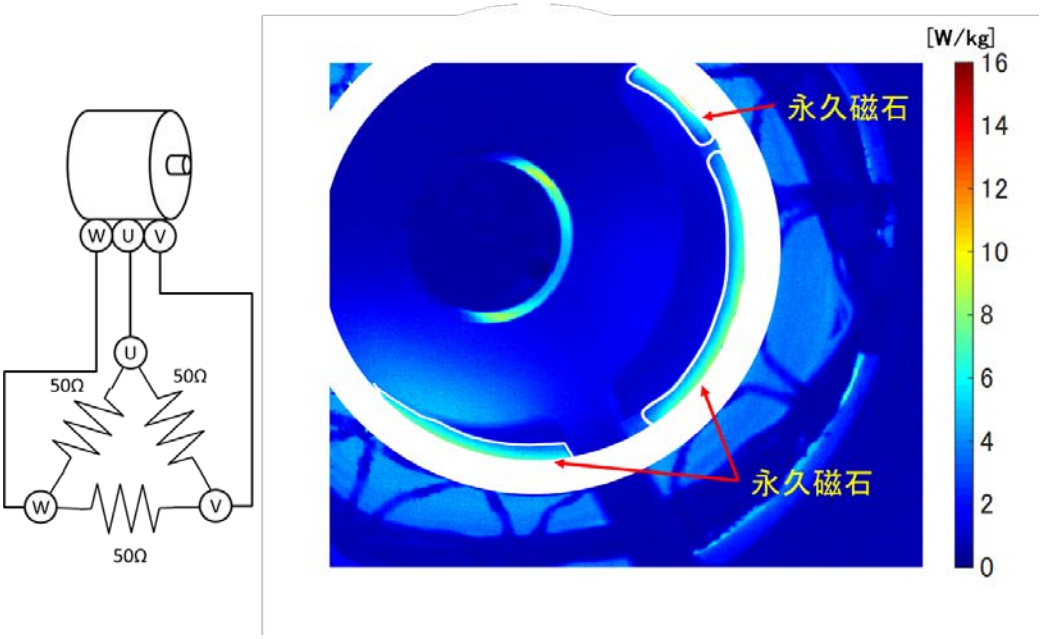
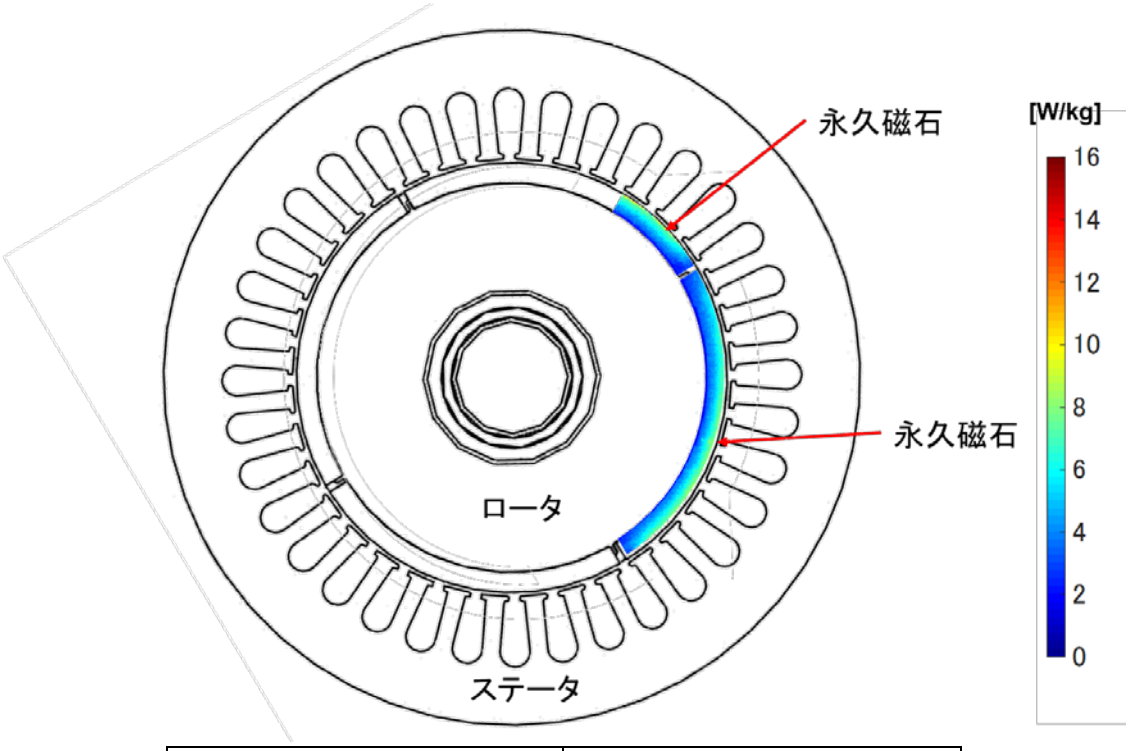


図 34　モータの負荷接続状態と磁石の発熱状況



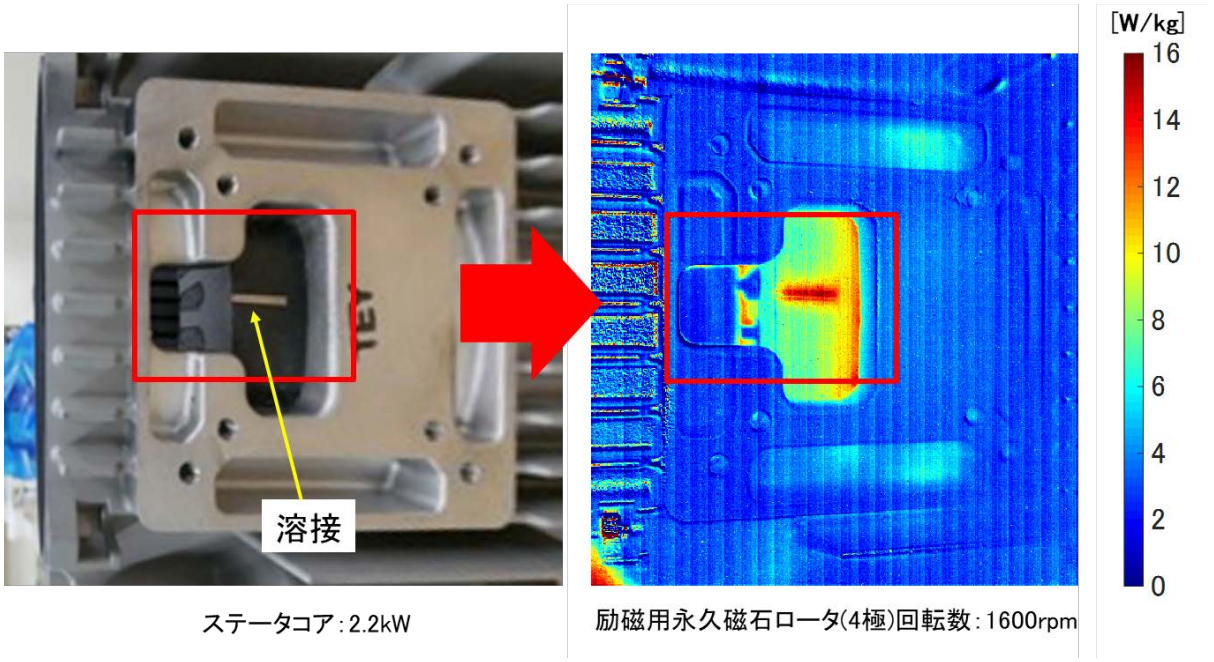
項目	条件
ロータ回転数	1200rpm
励磁時間	1s
測定インターバル	300s
測定回数	150 回
真空度	4.5×10^{-3}Pa

図 35　モータと磁石の位置

c．モータコア曲面の測定

サーモグラフィカメラによる測定は磁気センサによる測定と異なり、非接触で測定が可能であるため、平面だけでなく曲面も測定できる。測定例としてステータコア側面の曲面部分の測定を行った。ステータコア側面にステータコアが短絡するように一本の溶接を行った。

ステータコアの溶接の状況と測定結果を図 36 に示す。溶接部分に高い損失が現れていることがわかる。従来の磁気センサでは測定できない箇所であり、サーモグラフィカメラによる損失分布測定の有用性がわかる事例である。



項目	条件
ロータ回転数	1600rpm
励磁時間	1s
測定インターバル	300s
測定回数	200 回
真空度	4.5×10^{-3}Pa

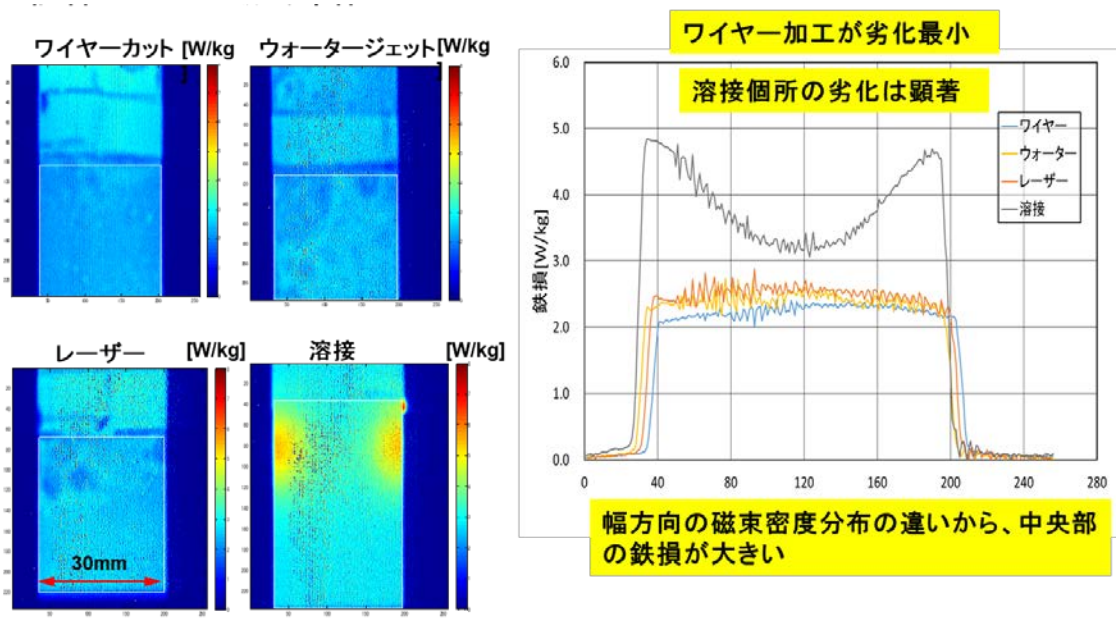
図 36　溶接箇所とステータコア曲面の測定結果

d．短冊試料の加工方法の違いによる影響の測定

2-4 の磁気特性と熱的測定の相対誤差を測定するために使用したオープン型単板磁気試験機を使用して、電磁鋼板の加工方法の違いならびに積層溶接が鉄損分布に与える影響を測定した。測定試料は 50A470 を 30mm 幅に加工する際にワイヤー放電加工、ウォータジェット加工、レーザー加工により行った。また、あわせて試料を２枚重ねに中央の両側を溶接した試料を作成した。

磁束密度は 1.6T とした。測定結果を図 37 に示す。加工による鉄損の違いは、レーザー加工の鉄損が一番大きく、以下順番にウォータジェット加工、ワイヤー放電加工であることがわかる。また、横方向の鉄損分布を見ると中央部の鉄損が大きい。これは横方向の磁束密度分布の違いである。

溶接箇所の鉄損はワイヤー放電加工の倍以上あり、溶接箇所の劣化は顕著であることがわかる。



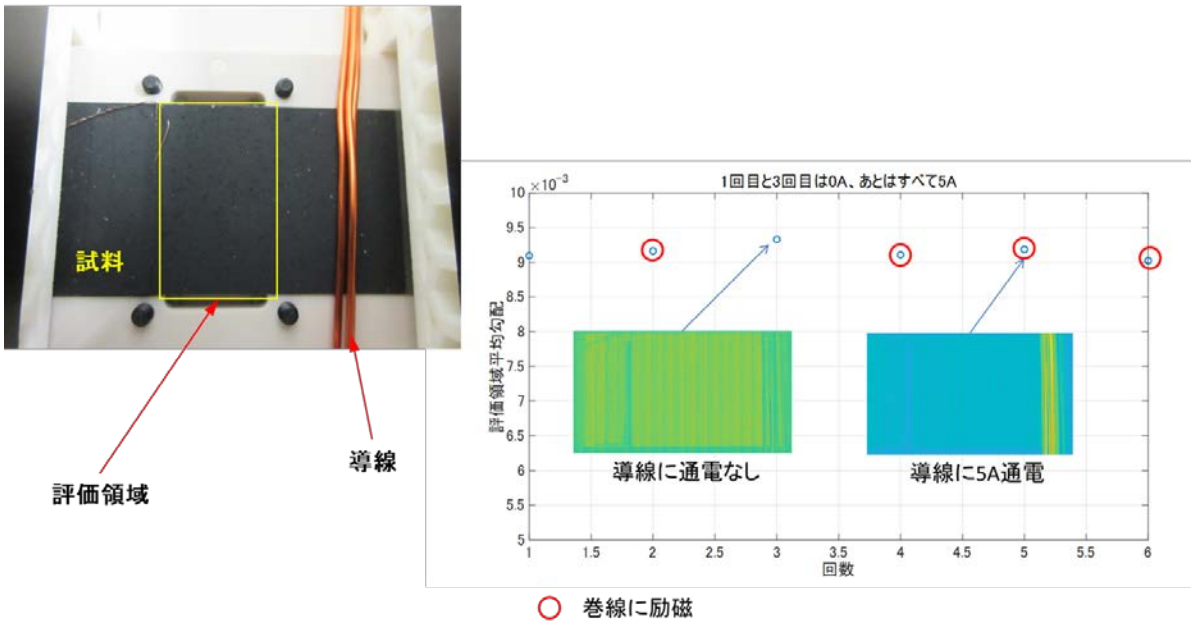
項目	条件
試料	50A470 RD
B コイル巻数	３ターン（試料に直巻）
磁束密度	1.6T
励磁時間	3s
測定インターバル	60s
測定回数	200 回
真空度	4.5×10^{-3}Pa

図 37　短冊試料の加工方法の違いによる鉄損分布の違い

e．測定領域近くにある発熱源の影響

測定領域近くに発熱量の極端に大きい発熱源があると発熱量が小さい領域がマスクされて測定できないことが想定されたため、短冊試料の測定領域近傍に導線に置き 5A を通電し測定を行った。

その結果を図 38 に示す。通電なしと 5A 通電で評価領域平均勾配に差がないことが確認でき、極端に大きな発熱源があっても測定に影響が無いことが確認できた。



項目	条件
試料	50A470 RD
B コイル巻数	3 ターン（試料に直巻）
磁束密度	1.5T
励磁時間	1s
測定インターバル	30s
測定回数	50 回
真空度	4.5×10^{-3}Pa

図 38　測定領域外の反射の遮蔽効果の確認

ｆ．モータ積層コアのインライン判定装置の試作・評価

現在開発中のサーモグラフィカメラを使用した熱的なモータ積層コアの損失計測技術は高精度であり最先端技術となるが、より簡便にモータ積層コアの出来映えをモータ積層コア製造工程中のインラインで測定したい要望があり、実際に製造工程中のモータ積層コアを磁気的な測定を行うと工程による劣化を確認できたことから、２０１９年度に川下ニーズを勘案してモータ積層コアの製造工程の品質管理（良否判定）が分かるインライン判定装置（内挿コア法）の試作およびその評価を行った。

内挿コア法の測定概要と測定結果を図３９に示す。U 字状のコアに励磁コイルと磁束検出用の探りコイルの巻線を施した内挿コアをステータコアのティースに押し付けて励磁し、磁気特性を測定する。測定は全てのティースの測定を行った。ステータコアは電磁鋼板 50A470 を接着で積層したものと 35A300 を溶接により積層したものを用意した。50A470 の鉄損が 3.6W/kg であるのに対し 30A300 が 3.0W/kg であることが確認でき、内挿コア法によってもステータコアの損失の違いが測定出来ることが確認できた。

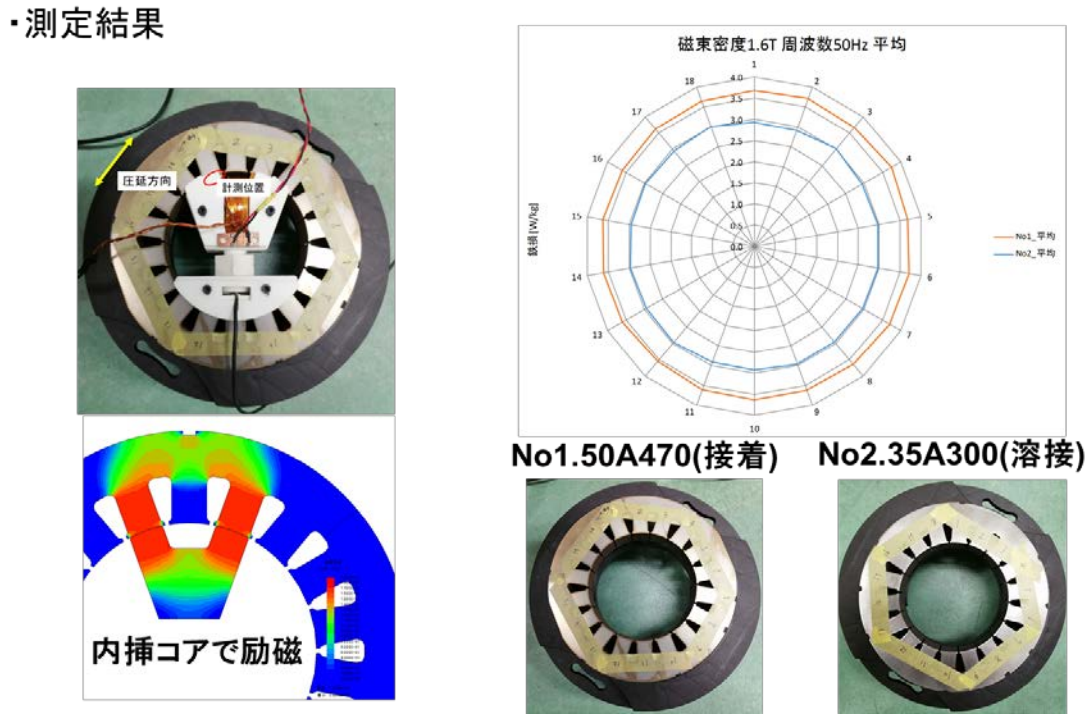


図39　内挿コア法により測定概要と測定結果

第3章　全体総括

3－1　事業の成果

（1）熱的測定法の開発

高速サーモグラフィカメラを用いた測定装置の製作及びソフトウェアの作成を行った。高速サーモグラフィカメラとして FLIR X6901sc を選定し、50mm レンズ及び接写リングにより分解能が 0.024mm であることを確認し空間分解能 100 倍の 0.03mm 以上の目標を達成した。

（2）熱的外乱除去技術の開発

熱伝達遮断のための真空装置開発として、大型の真空チャンバー及び大容量のターボポンプを組合せ、最大真空度 5×10-4Pa を確認し、オープン型単板磁気試験機により磁気特性による鉄損とサーモグラフィカメラによる損失を測定し 0.55W/kg(0.6T 測定時)に相対誤差 0.10%であることを確認し、目標である損失分解能 10 倍（1w/kg の実証）の目標を達成した。

（3）計測装置のユニバーサルデザイン化

真空チャンバーを制御するバルブやターボンプの GUI 画面をイラスト化することや、バルブを電動化および電動化できないバルブには開閉位置確認センサを取り付けることで誤操作をなくした。その結果ユーザーテストの評価結果が 5 段階で 4.3 となり目標の 4 以上を達成した。

（4）モータ積層コアの損失計測の実証

モデルモータ及びモータ駆動装置やオープン型単板試験機により磁気特性により鉄損とサーモグラフィカメラによる損失誤差が最大で 9.7%であることを確認し、目標の 10%以内を達成した。また、実証用のモデルによりモータ積層コアの溶接の影響や回転体の測定により装置の有効性を示した。

内挿コア法によるモータ積層コア損失の評価装置の試作と評価により、モータ積層コア良否判定用のインライン測定装置に対応できることを確認した。

全体のまとめ

モータ積層コアの鉄損を評価装置の試作及び精度検証により技術を確立した。また、モデルモータや誘導機を改造したモータを使用して測定を行うことで装置の有用性を実証した。

3－2　事業化計画

本開発のサーモグラフィカメラによる熱的損失可視化装置は自動車産業やロボット産業などで多く使われているモータの高性能化につながる測定を行うもので、サンプル測定を進め、ユーザーに評価をもらい、令和２年度から販売を開始する。

（1）顧客ニーズ

■電気自動車用モータ

電気自動車、ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車、燃料電池自動車など、モータで駆動される自動車は、近い将来ガソリン自動車よりも多くなることが予想され、駆動用のモータの高効率化は必須である。駆動用のモータに必要な仕様は小型・軽量、高出力、高効率、低騒音、低振動など要求項目は多岐に渡るため、要求仕様に近づくためには実機の計測が必要不可欠でありニーズが高い。

■ロボット向けモータ

ロボット産業の市場予測から、製造分野の伸びもさることながら、あらゆる分野での市場の伸びが著しい。それら製品に組み込まれるモータの自重が製品性能に影響するため小型・軽量、高出力が要求され、それらの開発には実機の計測が必要不可欠でありニーズが高い

■汎用産業用モータ

汎用の産業用小型モータにおいても効率規制が日本でも開始され、世界的な動きとなった。モータが使われる製品の高性能化や小型化が進むと同時にモータそのものの設計変更も検討しなければならず、まさに本装置を活用して精度の高い計測により、規制に対応する指針を得られる。

（2）販売戦略

■受託測定サービスの展開方法

通常の開発業務として、この計測装置を使用して頂く「顧客の知りたい欲求」に即応するために「受託測定サービス」をあげ、これを重視している。モータは、国内のみならず海外にも大きな市場があるものの、当面は国内での技術・製品の周知と展開を重点とし、受託測定サービスでの地盤を築く。

■展示会、商談会、学会などでの周知活動

モータ積層コアの損失計測実証データを基に、モータ積層コアの磁気特性の品質管理の重要性を示し、本計測技術の有用性を周知する。また、国内外の展示会、商談会への参加を積極的に行う。そして、各研究段階における成果発表などを、学会や論文発表で行う。これらの活動により、計測装置、計測法についての周知および、受託測定などのサービスの紹介を行う。

■中小機構の受発注マッチングサイト（J-GoodTech）などの活用

マッチングフォーラムでのプレゼンテーションや、J-GoodTech 登録の 2,500 社などへのアプ

ローチを行う。

（3）知財戦略

知財戦略として、本事業で使用した特許 5048139 号を補う技術をとして、高機能化、分解能向上に関して新たに特許化を進める。

（4）標準化

国の方針としても、国際標準化への対応が求められており、本研究成果で確立される測定法は、いち早く国際標準として規格化を検討する意義があると考えている。これらを念頭に、測定の精度管理を行えるよう、・作業手順の策定（マニュアル化）、・電気学会研究会へのテクニカルレポート対応、・これまでの標準測定法との差異の定量化、などを実施する。国際標準化については「国際標準化アクションプラン」にもとづき、基準認証政策課（経済産業省、産業技術環境局）の指導をいただきながら、実現に向けて取り組みを進める。