

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「SOFC アノードガス再循環用次世代ブロワの開発」

研究開発成果等報告書

平成27年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 よこはまティーエルオー株式会社

再委託先 株式会社キャップ

澤村電気工業株式会社

## 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
- 1－2 研究体制  
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)
- 1－3 成果概要
- 1－4 当該研究開発の連絡窓口

### 第 2 章 本論

## 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

燃料電池の中で作動温度が 800~950℃と高く、発電効率が一番高い方式である SOFC は、定置式発電システムとして現在盛んに開発が進められており、発電容量 0.7kW の SOFC は既に熱併給型家庭用燃料電池（エネファーム）として普及しつつある。

しかし現状の発電効率は約 45%と、既存の大規模発電所の平均効率約 40%に比べて顕著な差がないため、排熱を利用した総合効率で優位性を発揮する「熱主電従型」にならざるを得ず、貯湯タンクが満タンになると発電を停止する形で運用されている。よってこの方式のまま発電容量を増大させると湯量も比例して増えてしまうので、発電効率を更に向上させ、発電のみでも投資回収できる形にしないと家庭用以外での普及は困難な状況にある。上記状況の打開策として、高温の燃料ガスであるアノードガスを高温ブロワで再循環させる方法が注目されている（図1参照）。アノードガスを再循環させると、アノードガスに含まれる水素の利用率が 70%程度であったものが 90%にも向上、その結果発電効率が約 45%から約 60%に飛躍的に向上する。また水素はメタンなどの原燃料と水との改質反応 ( $\text{CH}_4+2\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{CO}_2+4\text{H}_2$ )で生成するが、再循環により電池のアノードに生成するピュアな水を改質器に供給する事が可能となり高純度浄水装置や水の供給装置が不要となり、SOFC システムの小型・軽量化、低コスト化にも大きく貢献する。

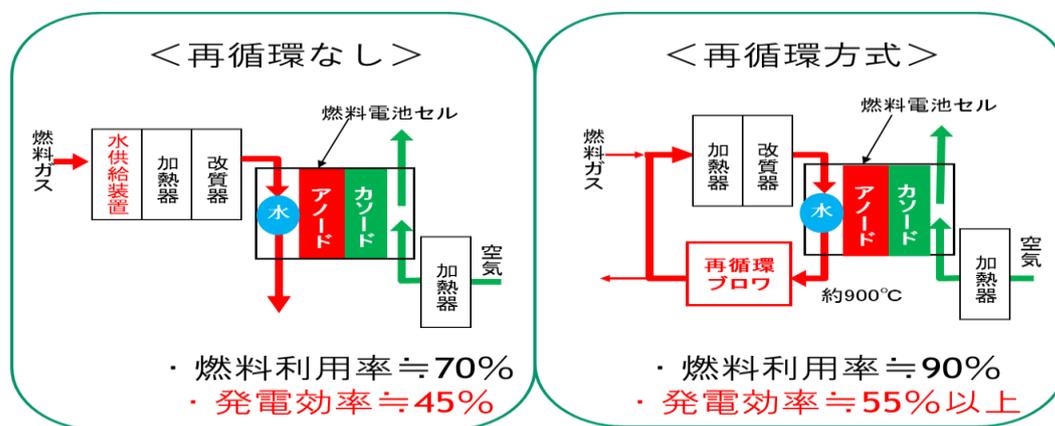


図1.SOFCの再循環方式

アノードガス再循環方式の 5~50kW 級 SOFC は、定置式小型分散電源として、例えばコンビニエンスストアチェーンの各店舗や小規模病院などに設置され、通常時には経済的な発電システムとして、また災害時には地域コミュニティーのための非常用電源としての機能が期待されている。この計画実現には、発電効率向上だけでなく、設置スペースのコンパクト化、低コスト化も非常に重要なニーズである（図2参照）。



図 2：定置式 SOFC

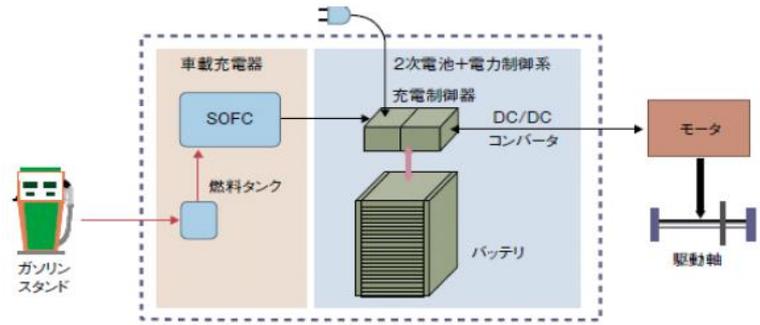


図 3:SOFC レンジエクステンダーの模式図

さらに最近、電気自動車の航続距離を延長するための補助電源であるレンジエクステンダーとして SOFC を電気自動車に搭載する方法が注目されている（図 3 参照）。レンジエクステンダーの燃料は、既存インフラ（ガソリンスタンド）をそのまま使用できるガソリンが望ましい。電気自動車と共にエコカーとして注目されている燃料電池車には作動温度の低い PEFC の採用が有力視されているが、PEFC の燃料は現実的に水素に限定されるため電気自動車のレンジエクステンダーとしては、燃料にガソリンも使用可能で発電効率の高い SOFC が好適である。SOFC システムにおいてガソリンから水素を取り出す水素改質のためには多量の水が必要であるが、自動車に加湿装置とピュアな水を搭載するのは困難なため、アノードガス再循環のニーズは非常に高い。但し、SOFC を車載するには小型・軽量化、低コスト化が非常に重要で、当該 SOFC に搭載される高温ブロワにも当然、小型・軽量化、低コスト化が要求される。

これらのニーズから、モーターの回転動力を流体エネルギーに変換しながら伝達し、高温ガスの有する熱エネルギーを殆ど損失することなく送風可能な動力伝達装置である当社製高温ブロワを SOFC アノードガス再循環用に採用することが、川下製造業者にて検討されている。しかし SOFC の本格的普及のためには低コスト化、小型・軽量化、長寿命化が必須である。よって当然の事ながらアノードガス再循環用次世代ブロワにも、より一層の低コスト化、小型・軽量化、長寿命化が求められている。

最高温度 950℃のアノードガスを再循環させるブロワは、ガス温度を低下させない断熱構造、完全ガスタイト構造が要求され、且つ、軸受やモーター等内部部品を高温から守るための冷却機能を併せ持つなど専門的な知見と高度な設計技術が必要となる。よって SOFC アノードガス再循環ブロワを製作可能なメーカーは非常に少ない。その中で(株)キャップは製鉄所向けに高温用セラミックスブロワを手掛けてきた経験を活かし、下表に示す国内外の燃料電池開発メーカー 9 社に主にラボテスト用として従来技術のアノードガス再循環ブロワを 26 台供給してきた（表 1 参照）。

当初のラボテストの段階では、高温ガスを完全ガスタイトで安定して循環できる高温ブロワで十分であったが、燃料電池としての商品化を前提としてアノードガス再循環用次世代ブロワの性能を考えると連続運転寿命と消費電力と量産時低コスト、小型・軽量性が非常

に重要となる。今般、当該川下製造業者はラボテストの段階を脱し、SOFC 実商化のステージへ向かいながら進捗している。本研究開発は、川下製造業者の要求に対応し、SOFC アノードガス再循環用次世代ブロワの性能を向上させ、SOFC の本格的普及の一助となるものである。

国内納入先	海外納入先
東京ガス(株)、大阪ガス(株)、三菱重工業(株)、新日本製鐵(株)、川崎重工業(株)	FuelCellTechnology 社 (カナダ) SiemensPowerGeneration 社 (米国) バルチラ社 (フィンランド)、Acumentrics 社 (米国)

表 1. 従来技術の SOFC アノードガス再循環ブロワ納入実績

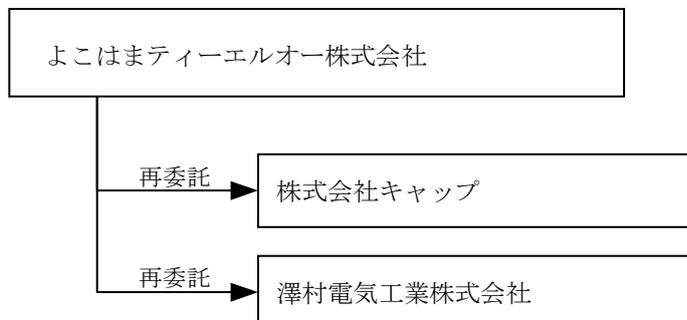
<研究開発項目と目標値>

- 【1】 動圧空気フォイル軸受の開発：ヘリンボーン型動圧空気軸受による良好な非接触浮上連続運転及び良好な起動停止の実現
- 【2】 ブロワ内蔵高速モーターの開発：センサーレス制御 DC ブラシレス内蔵モーターによる 60000rpm の達成。
- 【3】 3次元ターボ型コンプレッサーホイールの開発：ブロワ効率 60%以上の達成、量産対応：ロストワックス製法の確立
- 【4】 ブロワ全体設計及び試作：冷却機構設計（内臓モーター温度 100℃以下）、危険速度計算により本ブロワが安全に運転できることを確認。試作ブロワによる性能試験、冷間/熱間試験による評価の実施。

1-2.研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織 (全体)

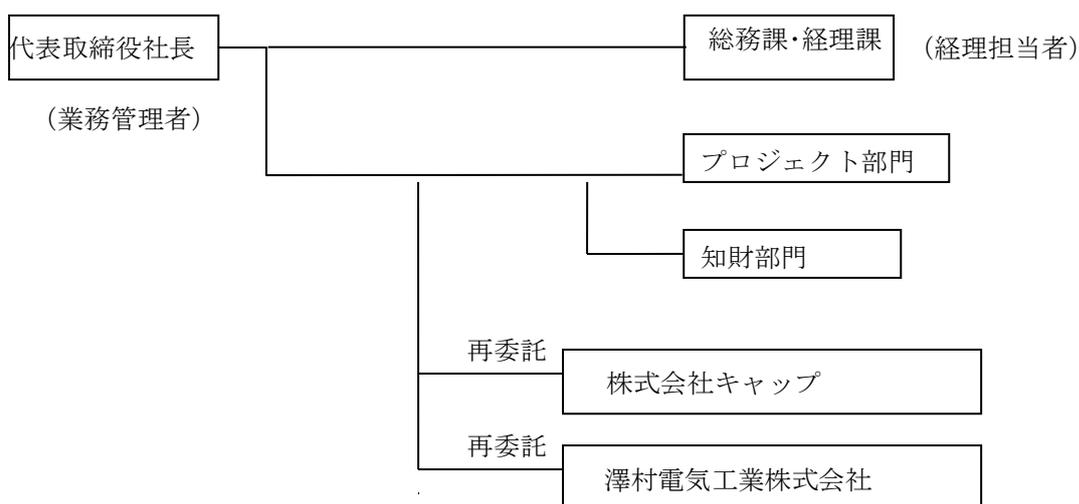


総括研究代表者 (P L)  
株式会社キャップ  
代表取締役 佐藤公彦

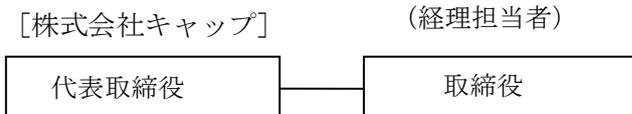
副総括研究代表者 (S L)  
澤村電気工業株式会社  
技術部設計課 課長 早川光章

2) 管理体制

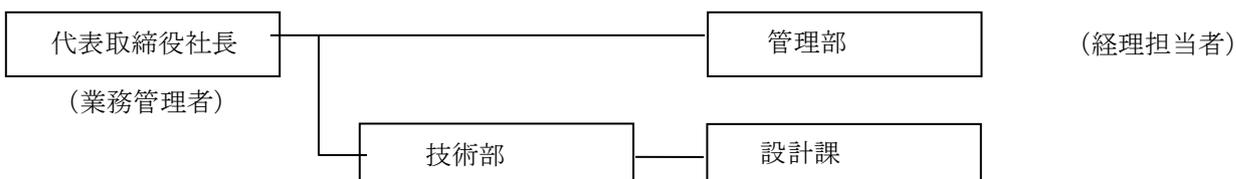
①事業管理機関 [よこはまティールオー株式会社]



- ② 再委託先 (業務管理者)  
 (経理担当者)



[澤村電気工業株式会社]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 よこはまティーエルオー株式会社

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
鬼山 和彦	プロジェクト部門	【5】

【再委託先】

(研究員)

株式会社キャップ

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
佐藤 公彦	代表取締役	【1】【3】【4】

澤村電気工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
早川 光章	技術部 設計課 課長	【2】【4】
蓮井 慧	技術部 設計課	【2】【3】【4】

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

よこはまティーエルオー株式会社

(経理担当者) 総務課・経理課課長 稲光 教子

(業務管理者) 代表取締役社長 井上 誠一

(再委託先)

株式会社キャップ

(経理担当者) 取締役 佐藤 敦子

(業務管理者) 取締役 佐藤 敦子

澤村電気工業株式会社

(経理担当者) 取締役管理部長 大平 洋幸

(業務管理者) 代表取締役社長 澤村 宏一

(4) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
佐藤 公彦	株式会社キャップ 代表取締役	委 PL
早川 光章	澤村電気工業株式会社 技術部設計課 課長	委 SL
蓮井 慧	澤村電気工業株式会社 技術部設計課	委
嘉藤 徹	独立行政法人産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループグループ長	アドバイザー(謝金、旅費)
上條 元久	日産自動車株式会社 総合研究所 主任研究員	アドバイザー(謝金、旅費)
山崎 洋文	川崎重工業株式会社 技術研究所 環境システム研究部 基幹職	アドバイザー(謝金、旅費)
塚本 修巳	横浜国立大学大学院 名誉教授	アドバイザー(謝金)
鬼山 和彦	よこはまティーエルオー株式会社 プロジェクト部門	委

1-3 成果概要

【1】動圧空気フォイル軸受の開発

- ・フォイル型はマイクロガスタービン等で採用実績があるが、ローター軸とステーター軸との偏心が大きい為、モーター駆動では成立しないことが判明。

今年度はヘリンボーン型軸受の開発に注力した。

- ・ハードディスクで採用されているヘリンボーン設計のブロワ回転軸への適用が成功し、単体回転試験において良好な非接触浮上連続運転及び良好な起動停止の実現に成功し連続運転寿命 10 年間の目途を得た。

## 【2】ブロワ内蔵高速モーターの開発

- ・最高回転数 6 万 rpm・最高出力 300W のセンサーレス制御によるモーター/ドライバーを設計・試作した。
- ・モーター単体回転試験を実施し 6 万 rpm まで良好な運転状態を確認した。
- ・回転制御面の改善にも成功しモーター効率 80%を達成した。
- ・片持ち式超高速回転モーター用の「自動位置決め方式バランシングマシン」を当該ブロワの回転軸のバランシングに活用し、非常に高精度のバランス調整を得た。

## 【3】3次元ターボ型コンプレッサホイールの開発

- ・昨年度はコンピュータシミュレーションによる流体解析と遠心応力解析を行い、高効率ホイールとスクロールを設計し、計算によるブロワ効率 72%を得たが、実測効率は 55%に留まった。今年度は昨年度までに開発したホイール設計を基に隙間の最適化を図り目標効率であるブロワ効率 60%を得ることに成功した。
- ・上記設計図(3次元 CAD ファイル)を基にロストワックス工法によるホイールを試作した。本工法の実現により量産時コストダウンの目途がたった。

## 【4】ブロワ全体設計及び試作

- ・温度分布計算、危険速度計算を実施し熱間運転時のモーター温度が 100℃以下に保たれる事、6 万 rpm までの運転範囲に危険速度が無い事を確認した。
- ・第 3 次試作ブロワを完成させた。
- ・当該試作ブロワを用いて性能確認試験を実施し、前年度約 55%であったブロワ効率が 60%まで向上した。
- ・空冷軸受冷却システムの高効率化に成功し従来比 4 倍の高性能システムを得た。これにより、より高温・高速仕様に対しても空冷システムを適用可能となった。
- ・川崎重工業殿において実際の SOFC システムにブロワが設置され、実際の発電試験が実施されており、ブロワは順調に機能し発電効率向上に寄与している。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理機関

氏名：鬼山和彦

所属組織名：よこはまティーエルオー株式会社

所属役職：プロジェクト部門 スタッフ

Tel : 045-339-4441 Fax : 045-340-3541

E-mail : kiyama63@ynu.ac.jp

プロジェクトリーダー

氏名：佐藤公彦

所属組織名：株式会社キャップ

所属役職：代表取締役

Tel : 045-595-1701 Fax : 045-595-1702

E-mail : k-sato@cap-co.jp



・またスラスト方向の軸受は図 1-2 に示すスパイラル溝付き動圧スラスト軸受を採用した。

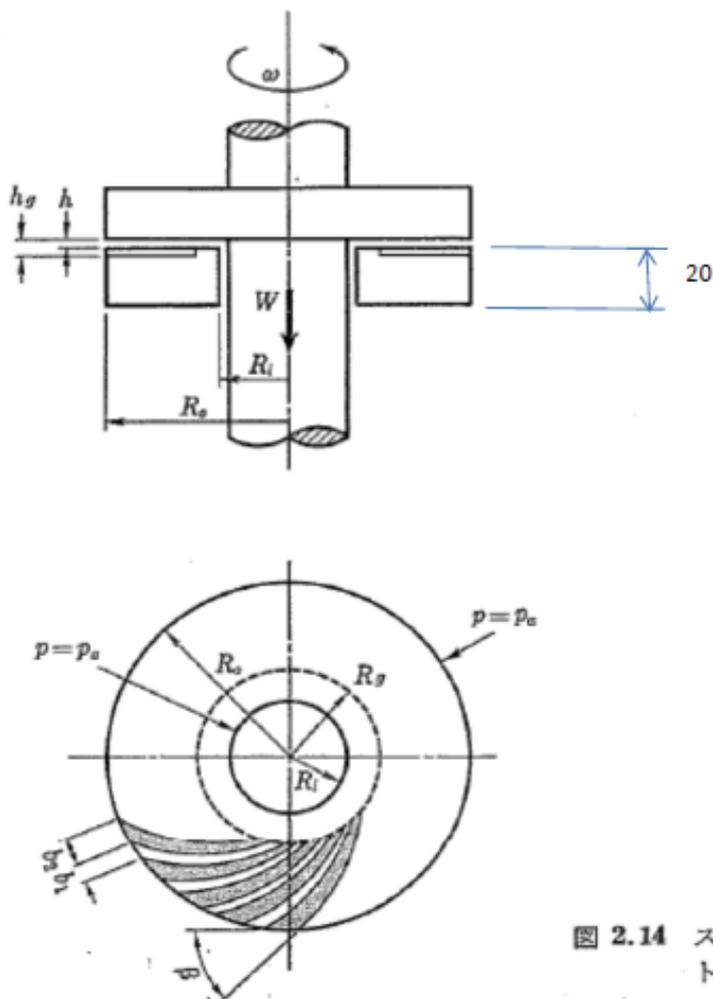


図 2.14 スパイラル溝付き動圧  
ト気体軸受の構成

軸受外半径	$R_o$	mm	20
軸受内半径	$R_i$	mm	10
溝数	$N_g$		16
軸受隙間	$h$	$\mu\text{m}$	19
$(R_o - R_g) / (R_o - R_i)$			0.74
溝週端部半径位置	$R_g$	mm	12.6
隙間比	$h_g / h$		4
	$h_g$	$\mu\text{m}$	76
溝深さ	$hh$	$\mu\text{m}$	57
$b_1 + b_2$		mm	7.85
溝幅比	$b_1 / b_2$	m	0.636
溝幅	$b_2$	m	4.8
ランド幅	$b_1$	m	3.05
流入角	$\beta$	$^\circ$	18

図 1-2

- ・ 図 1-3～1-6 にヘリンボーン溝が付設されたブロワ軸及び周辺部品を示す。

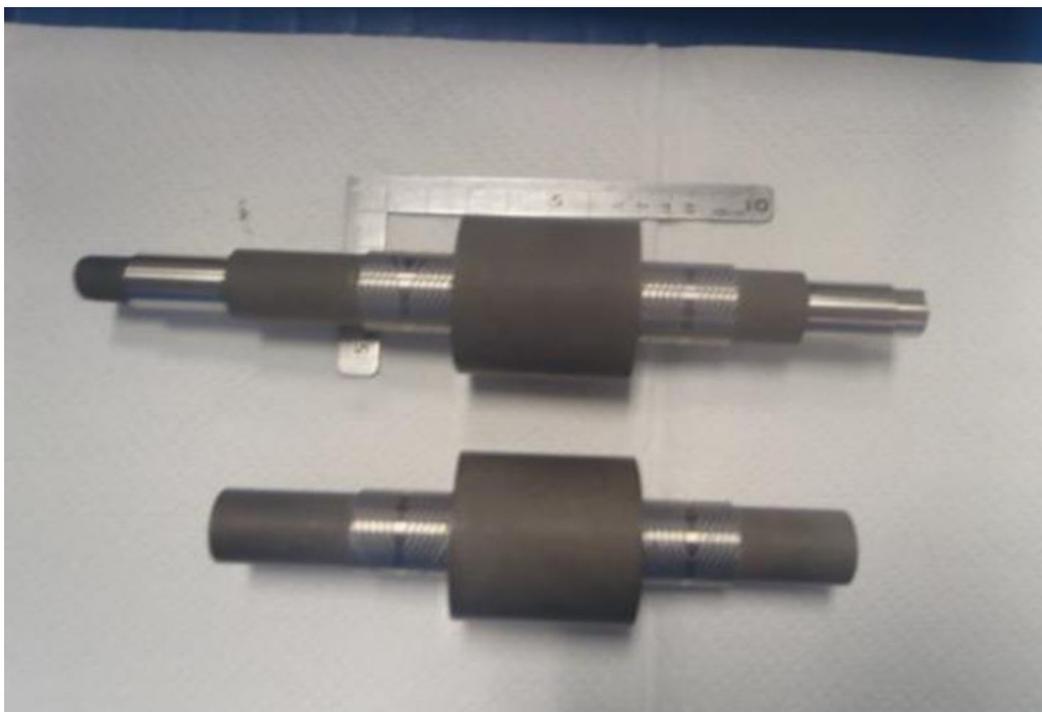


図 1-3

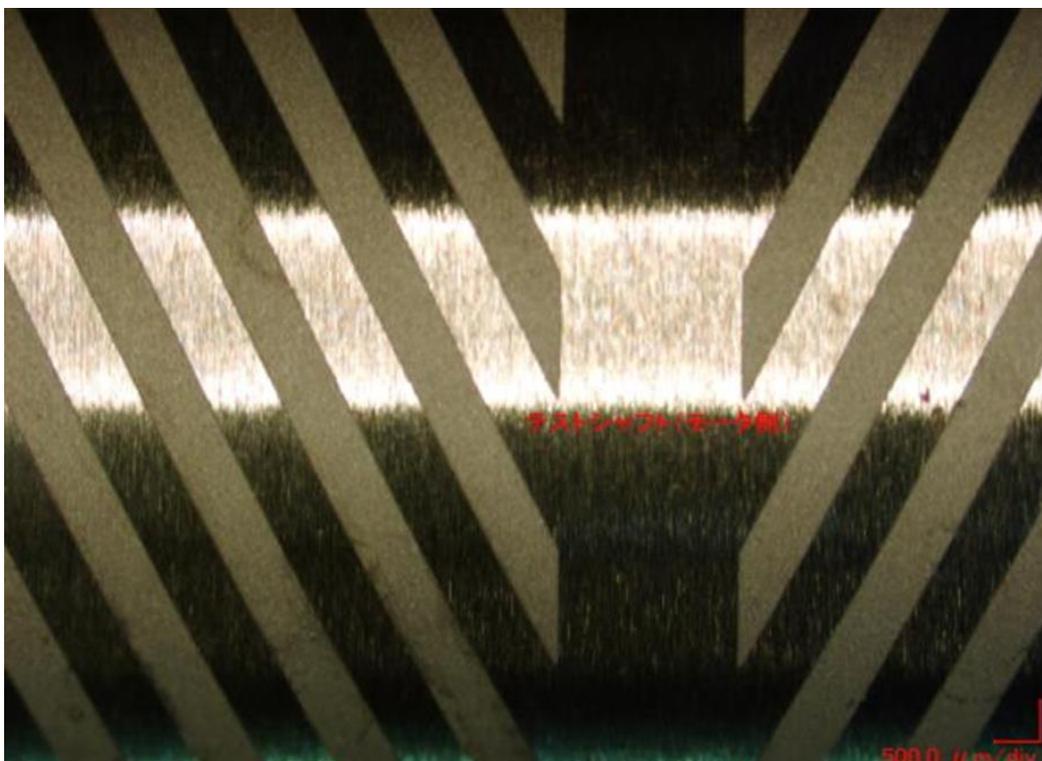


図 1-4

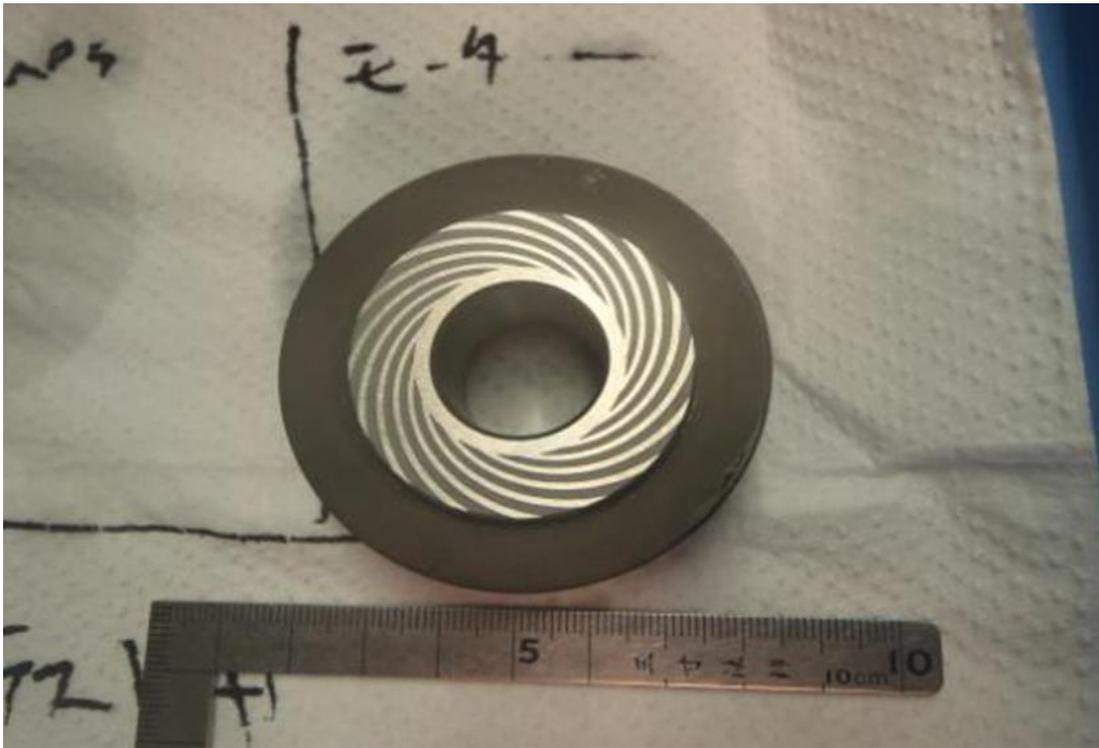


図 1-5

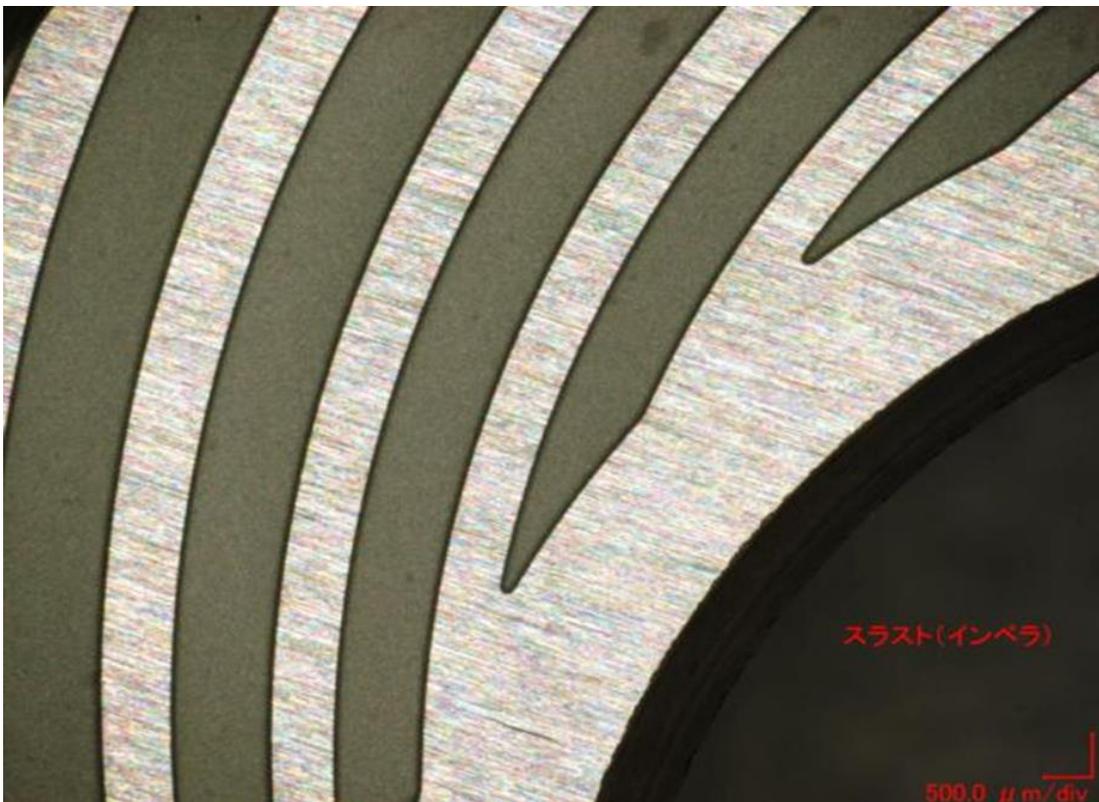


図 1-6

・ヘリンボーン型動圧空気軸受とスパイラル溝付き動圧スラスト軸受を搭載したブロワの構造設計を完了した。設計図を図 1-7 に示す。図 1-8 に示す単体回転試験装置も内部は同じ設計としている。

#### 【1-2】単体回転試験

図 1-8 に示す動圧軸受単体回転試験装置を製作し、コンプレッサホイールを装着した試験用ローターを用いて回転試験を実施した。モーターは 1.5 kW 高速内蔵モーターを用いており最高回転数は 20000rpm である。



図 1-8

・表 1-1 に回転試験結果を示す。単体回転試験において良好な非接触浮上連続運転及び良好な起動停止の実現に成功し連続運転寿命 10 年間の目途を得た。

試験条件	・内蔵 1.5kW モータ ・20000rpm ・隙間： $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ 相当
試験結果	良好な非接触浮上連続運転 及び良好な起動停止

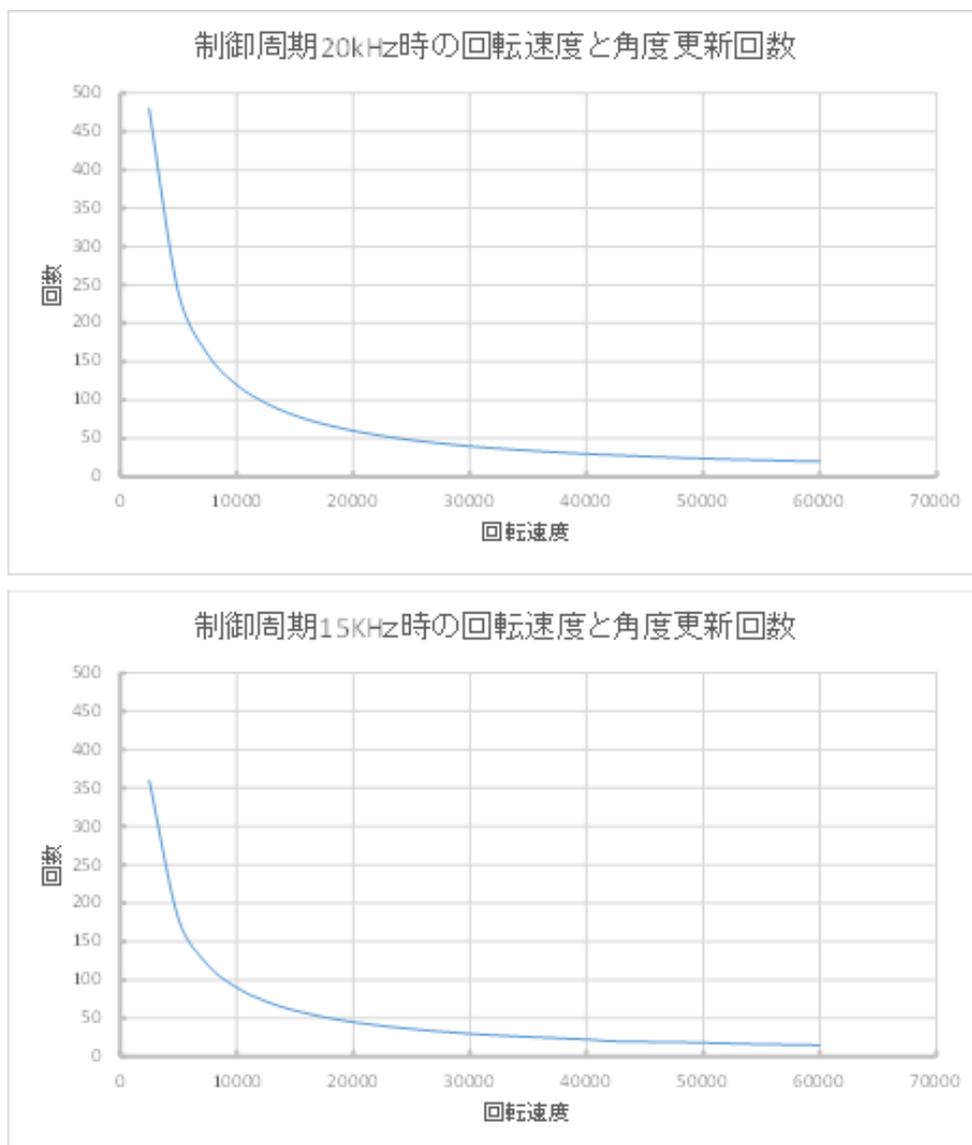
表 1-1

## 【2】ブロワ内蔵高速モーターの開発

### 【2-1】ドライバの設計・試作【2-2】センサレス制御の設計

#### ① 60000rpm での安定制御技術確立の検討

図【2-2】-1は、モーターの回転速度が上がった際に制御がモーターの軸角度を更新できる回数を縦軸にしたグラフです。上から 20kHz、15kHz です。この数値は電流制御周期です。センサレスベクトル制御では電流制御周期に同期してロータ角度を更新します。60000rpm 時の角度更新回数は 20kHz : 20 回、15kHz : 15 回となります。ベクトル制御では、電流波形を正弦波とする制御のため角度の更新回数は正弦波の波形にするため重要となる。



図【2-2】-1

図【2-2】-2は、角度更新回数の検討を行った。

正弦波となるには15回あれば十分となるが、その約半分では形状はかろうじて正弦波となっている。このあたりが限界と思われる。

60000rpmにて、安定性と効率を考慮した場合電流制御周期は15kHz以上とする必要となることがイメージできる。

2013年度のものよりも高速にベクトル演算できれば、出力電流がよりきれいな正弦波となり、安定性と適切な角度による制御ができることから効率も向上することが期待できる。

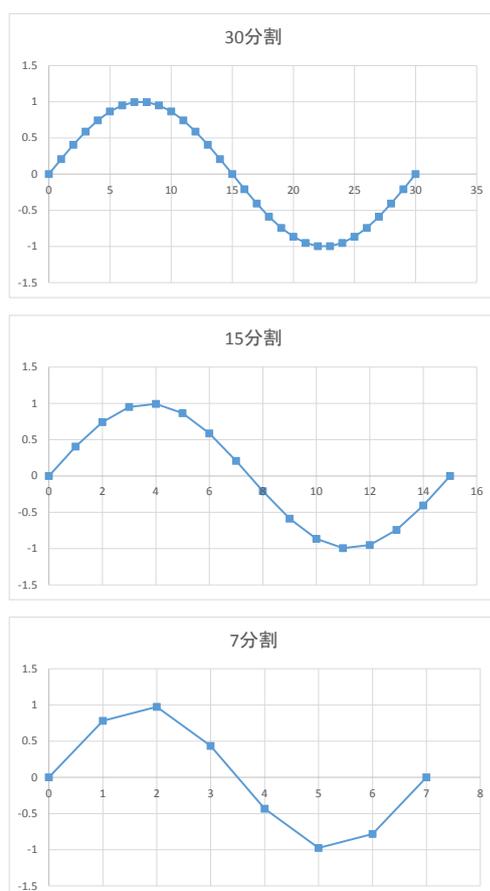
高効率制御は、複雑なベクトル制御をブロックモデルとして改良点を確認しやすくする目的を実現することを実施した。

その実現のために、Simulinkによる制御シミュレーションをマイコンに直接実装する技術を今年度は全面的に採用した。

その結果、電流制御の周期を30kHzまで上昇させることに成功しました。

この新しいプログラムにて、60000rpmの安定制御を確認しました。

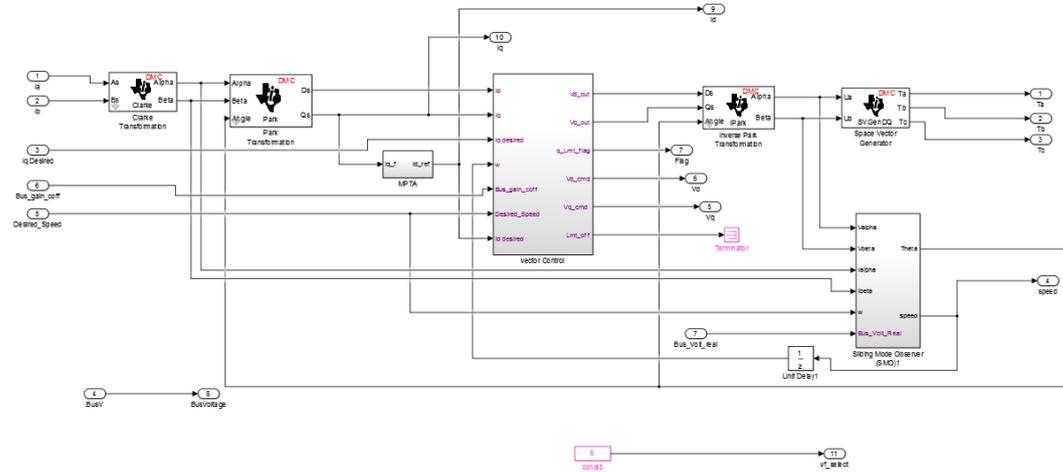
制御系は150000rpmで追従できることをシミュレーションにて確認した。



図【2-2】-2

② モデルベース開発と組み合わせ、モータ制御効率の 80%を狙う制御の設計

図【2-2】-3：ベクトル制御の制御モデル



図【2-2】-3

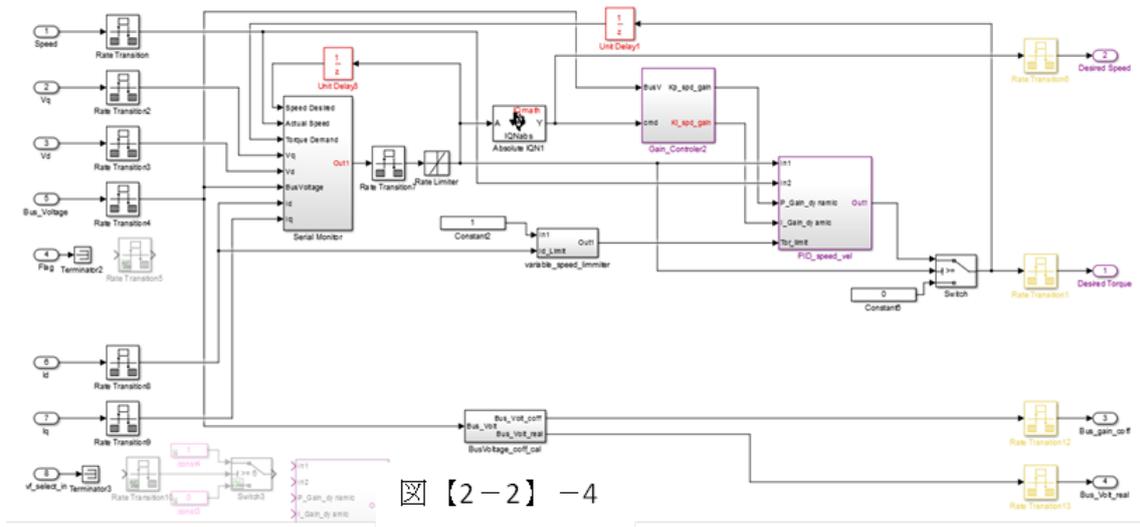
効率 80%を狙うために、“① 60000rpm での安定制御技術の確立”で検討した、電流制御周期の高速化以外に

MPTA(最大トルク制御)を組み込みました。

MPTA とは、目標とするトルクを最小限の電流となるように、電流位相をコントロールする技術。

電流制御周期にて MPTA を実施し、負荷の変動に対していち早く適切な電流位相を割出、高効率化を狙った。

図【2-2】-4：速度制御の制御モデル



図【2-2】-4



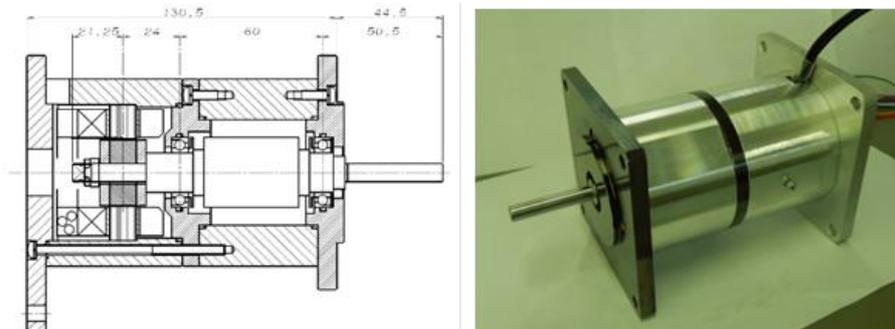
## 【2-3】 モータ設計

### ① 60000rpm 連続テスト可能な試験モータ枠と軸受の設計

2014年1号 <改良版単体試験装置>

40000rpm 付近までの特性試験用として製作、疑似ブローとして製作

軸受部：アンギュラ 振動考慮型

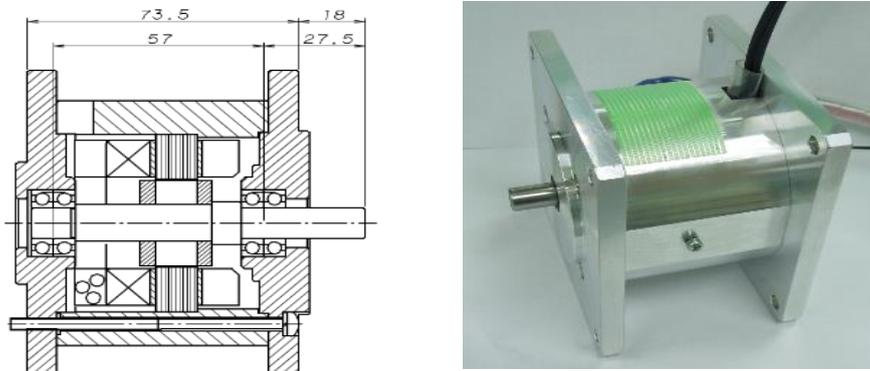


図【2-3】-1

2014年2号 <強化型改良版単体試験装置>

60000rpm 連続試験、およびモータ単体時の効率試験用として製作

軸受部：アンギュラ 2段構造 外輪部圧入固定



図【2-3】-2

無負荷での高速回転テストにおいて、図【2-3】-1 ホールセンサでは 25000rpm 以上で動作が出来なかった。

しかし、2014年度開発したセンサレスベクトル制御では 40000rpm 以上の回転速度に到達できた。

図【2-3】-1 のモータの軸受周りに問題があると思われ、40000rpm とした。

図【2-3】-2 のモータでは、ホールセンサ制御でも 50000rpm にて安定動作の確認ができた。

センサレスベクトル制御は 60000rpm にて安定した回転を実現できた。

図【2-3】-1のモータは軸受周りの設計に問題があったと思われる。

回転テストからセンサレスベクトル制御はホールセンサ制御よりも、モータを堅牢に制御できる一面がある事が分かった。

#### 【2-4】モーター単体回転試験

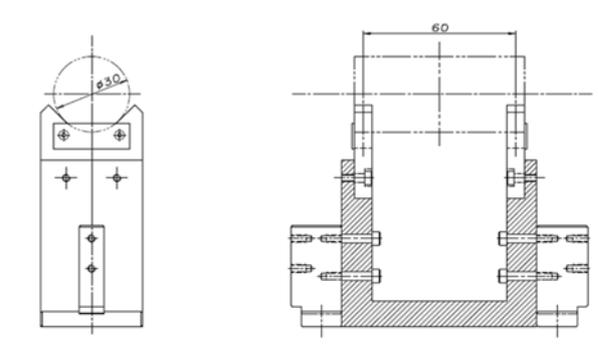
##### ① バランシングマシンの改良

これまでの作業の中で最も調整に時間がかかっていた軸受台の無調整用台座を設計した。

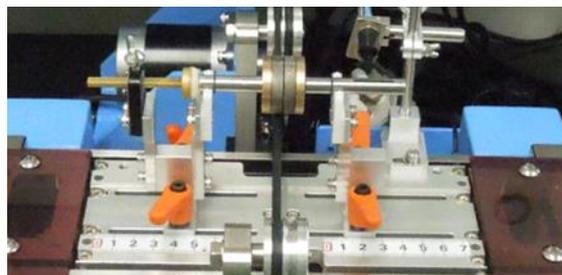
図【2-4】-1は無償性台座のスケッチ

図【2-4】-2は従来の方式の台座

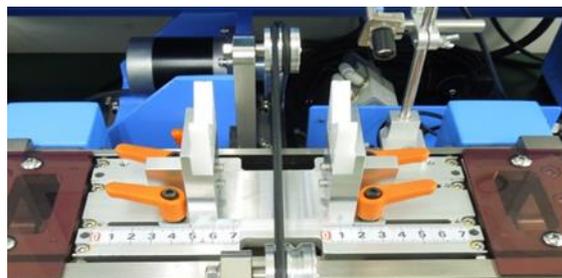
図【2-4】-3は図【2-4】-1を組み付けた状態



図【2-4】-1

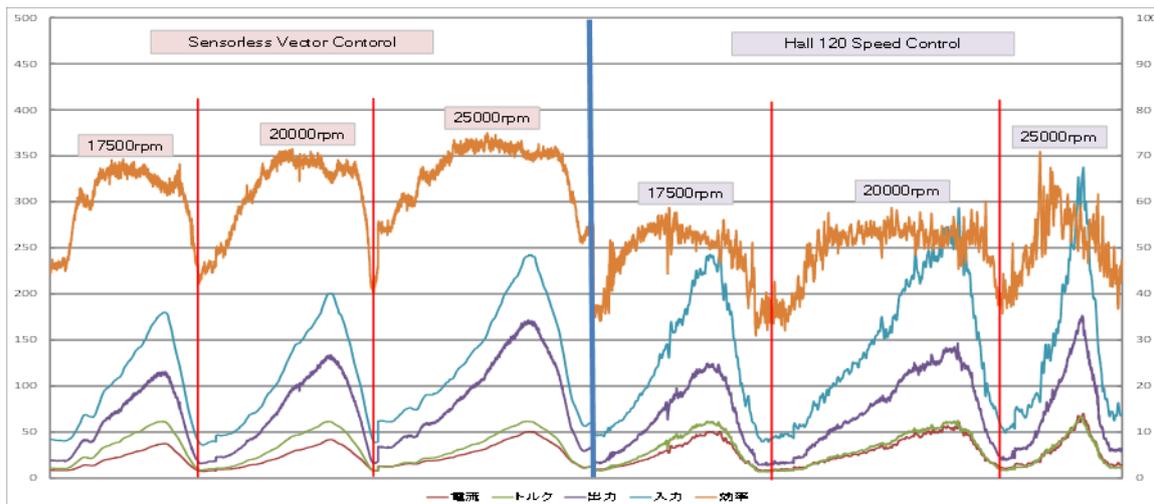


図【2-4】-2



図【2-4】-3

## ② モータ特性試験装置



図【2-4】-4

図【2-4】-4は今年度のモータ特性試験装置での試験結果です。

この特性試験時に図【2-2】-5モータ動作時のモニタプログラムにてトルク装置で測定する数値と

モータ制御ドライバから出力されるトルクデータの数値を確認しました。

この数値から図【2-3】-2のモータの効率試験を実施。

負荷は軸に摩擦を与えるシンプルな試験で実施、モータの効率を検証しました。

10000rpm～60000rpmまで効率は約77%(測定値：74～80%ばらついている)でした。

定格の20%程度以上かけると効率はほぼ横ばいとなる。

制御と組み合わせて動くモータですが、モータだけとしてみた時の効率は80%以上あると考えられる。

出力軸にて80%を超えるものを提供するためには、ベアリング、モータつくりの影響を考慮した、

モータ(ステータとロータ)を準備すれば達成できると考えられる。

### まとめ

○モデルベースデザインによるセンサレスベクトル制御にてモータを60000rpmで制御技術

○高速回転モータの軸受の設計技術(バランス、特性なども含む)

○80%を超えるシステムを提供するための検討事項の習得

従来の技術では制御もモータも到達しきれるものではありませんでした。

しかし、この3年で蓄積できた技術は澤村電気にとって、

今後の製品を開発するうえで財産となるものとなりました。

### 【3】 3次元ターボ型コンプレッサホイールの開発

#### 【3-1】 流体解析、設計

・ブロワ効率については昨年度、計算効率 72%を有するホイール設計に成功したが、実測効率は 55%に留まった。計算効率に関しては既に限界に近づいてきているため、今年度はホイールとケーシングの隙間を最適化することによるブロワ効率向上を目指した。

・図 3-1 に示す通りホイールとケーシングの隙間を従来の 0.5mm から 0.3mm にすることでブロワ効率が昨年度 55%から 60%に向上し目標を達成した。

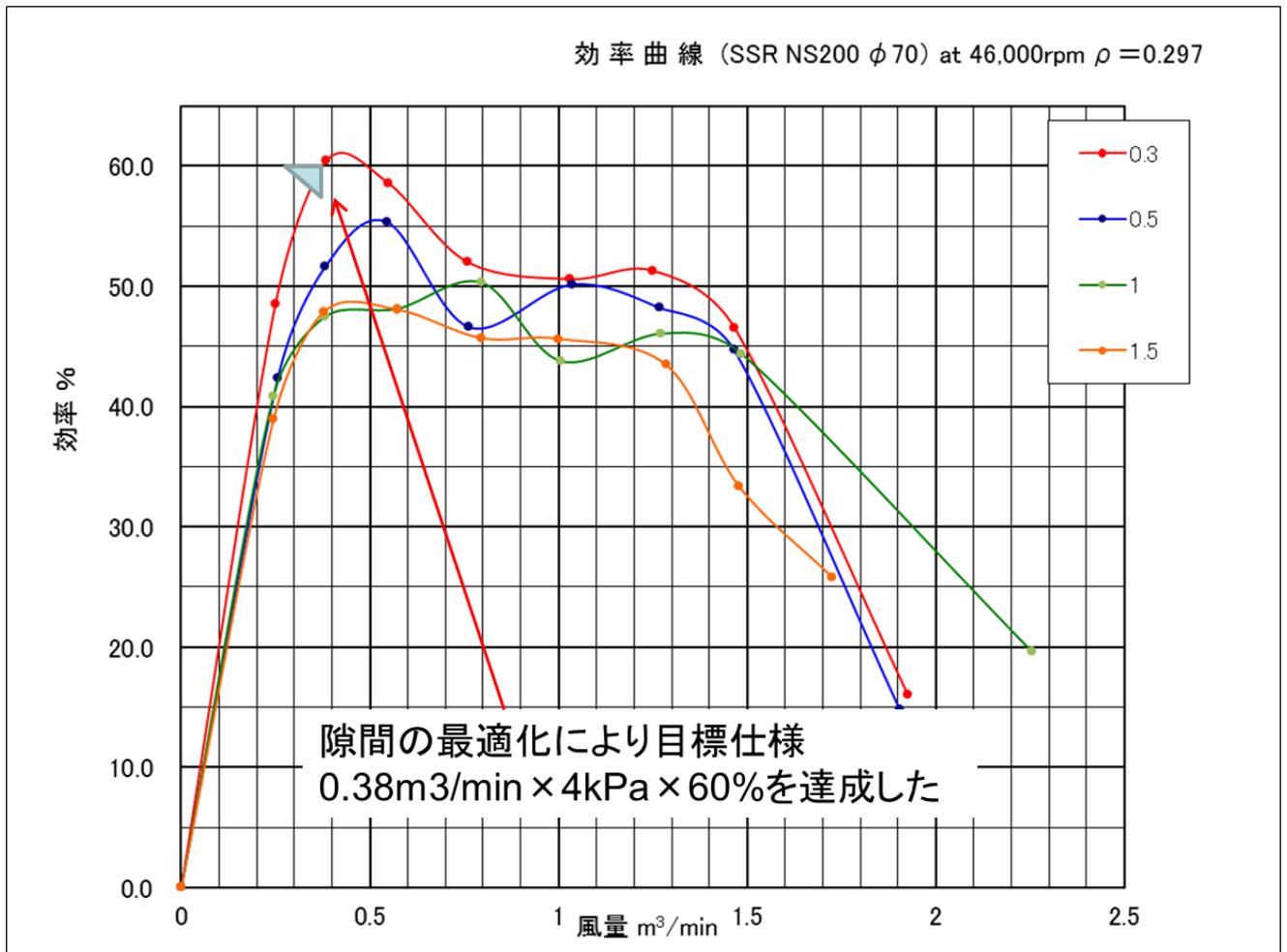


図 3-1

・図 3-2 にブロワ効率向上の経緯を示す。

H24年		H25年		➔	H26年	
計算効率	67%	計算効率	72%		計算効率	72%
実測効率	48%	実測効率	55%		実測効率	60%

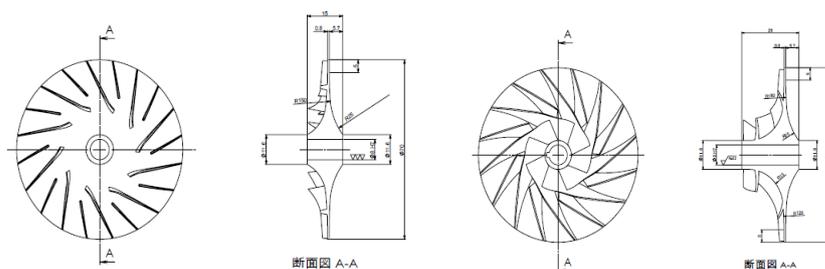


図 3-2

【3-4】ホイールのロストワックス製法による試作

- ・ホイール設計図(3次元 CAD ファイル)を基にロストワックス工法によるホイールを試作した。本工法の実現により量産時コストダウンの目途がたった。
- ・図 3-3 にワックス中子、図 3-4 に鋳造品の写真を示す。



図 3-3



図 3-4

【4】ブロワ全体設計及び試作

【4-1】温度分布計算、危険速度計算

・今年度、さまざまな使用条件（計算条件）に対応可能な温度分布解析プログラムを作成した。これにより客先から提示される様々な使用条件ごとに温度分布解析を実施し、内蔵モーター温度を100℃以下に維持可能な冷却性能を決定するなどが可能となった。

図4-1にその概要を示す。

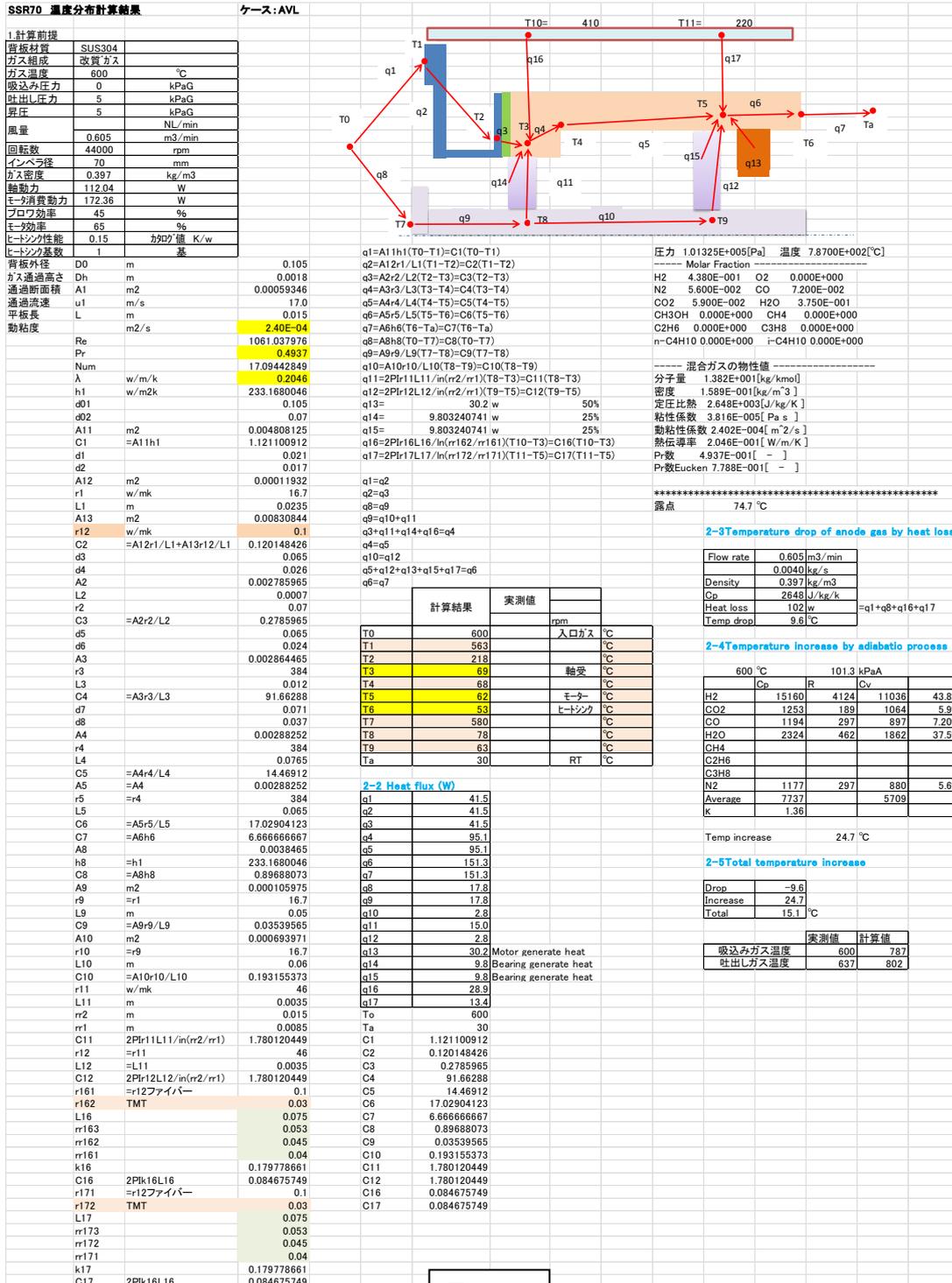


図 4-1

【4-2】 詳細設計 【4-3】 部品製作 【4-4】 組立

・前項までの開発結果を基に第3次試作ブロワの詳細設計を行いブロワを試作した。

図4-2が第3次試作ブロワの写真である。



図 4-2

・本開発のブロワの特徴の一つとして空冷軸受冷却システムがある。これはブロワ吸込み温度が 800℃に達してもブロワ内部の軸受箱温度を 100℃以内に維持する事を空冷で実現するシステムで非常に画期的な技術である。今年度は空冷軸受冷却システムの主要構成要素である冷却ファンとヒートシンクの組み合わせを最適化し、従来比 4 倍の高性能システムを得た。これにより、より高温・高速仕様に対しても空冷システムを適用可能となった。図 4-4 に最適化試験概要図を示す。

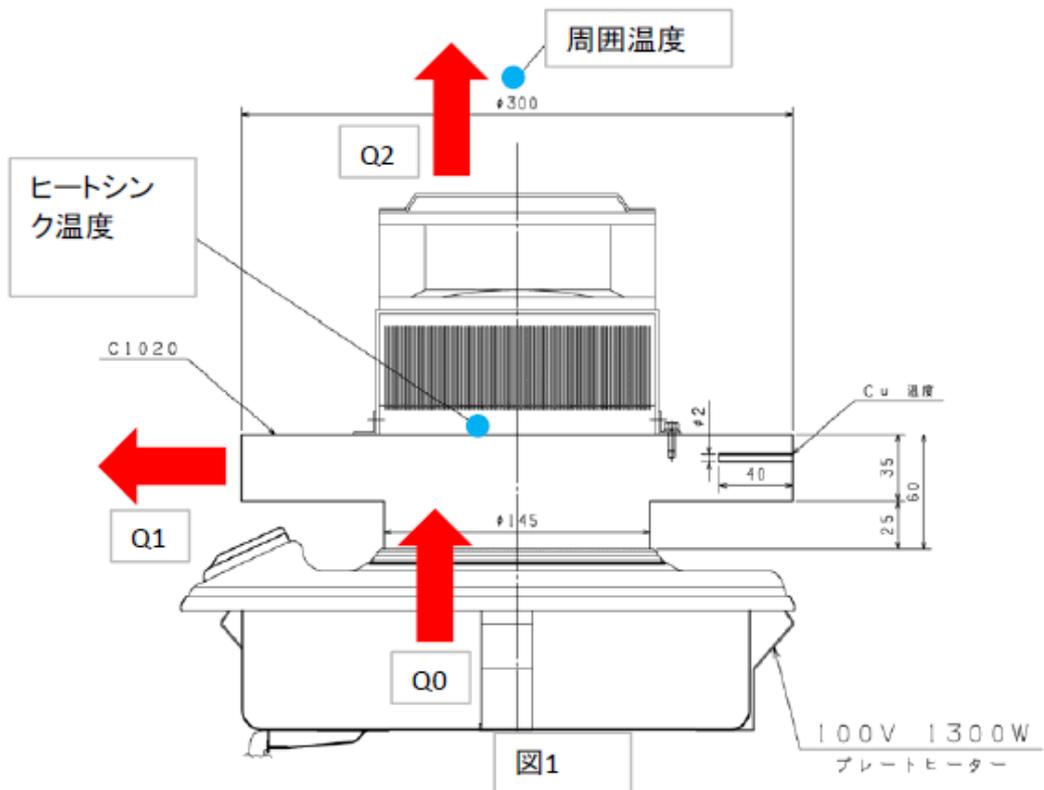


図 4-4

#### 【4-5】冷間/熱間回転試験

・昨年度より川崎重工業殿にて本ブロワの実証試験を実施頂いている。今年度は各種要素試験を経て実際の発電試験にブロワを使用いただいている。使用状況は非常に順調で発電効率向上に大きく寄与している。図4-5に連続運転中のブロワの運転記録を参考までに示す。

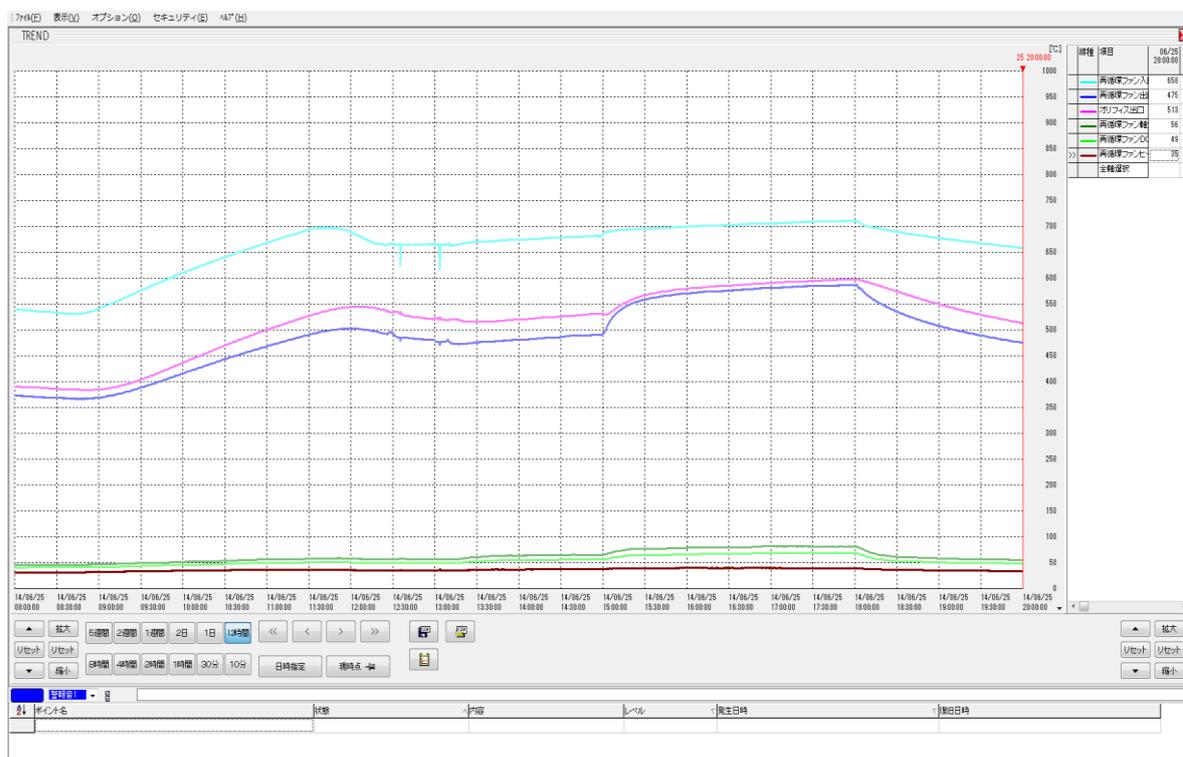


図 4-5

・本ブロワの販売開始に備えて第 11 回 European Fuel CELL FORUM に試作ブロワを出展した。アノードガス再循環による発電効率向上技術の注目度は非常に高く、本ブロワも非常に高く評価された。その状況を図 4-6 に示す。



図 4-6

#### 最終章

1 本開発のブロワの特徴の一つとして空冷軸受冷却システムがある。これはブロワ吸込み温度が 800℃に達してもブロワ内部の軸受箱温度を 100℃以内に維持する事を空冷で実現するシステムで非常に画期的な技術である。今年度は空冷軸受冷却システムの主要構成要素である冷却ファンとヒートシンクの組み合わせを最適化し、従来比 4 倍の高性能システムを得た。これにより、より高温・高速仕様に対しても空冷システムを適用可能となった。

2 本ブロワの販売開始に備えて第 11 回 European Fuel CELL FORUM に試作ブロワを出展した。アノードガス再循環による発電効率向上技術の注目度は非常に高く、本ブロワも非常に高く評価された。今後の事業化展開がしやすくなった。