

平成 28 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

「自然空気（GWP=1）を冷媒として用いる極低温冷凍空調機の開発」

研究開発成果等報告書

平成 29 年 5 月

担当局 東北経済産業局

補助事業者
公益財団法人山形県産業技術振興機構

目 次（例）

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

1－1－1 研究背景

1－1－2 研究目的

1－1－3 開発目標

1－2 研究体制

1－3 成果概要

第2章 本論

2－1 研究開発概要

2－2 冷凍温度技術の高度化の研究内容

【1-1】冷凍吐出温度性能の向上

【1-2】フィードバック回路追加による温度制御機能の向上

2－3 環境負荷低減の研究内容

【2-1】冷凍空気の大流量化

2－4 コスト削減の研究内容

【3-1】摺動部のオイルレス化

【3-2】発電・回生システムの構築

第3章

3－1 複数年の研究開発成果

3－2 研究開発後の課題・事業化展開

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

1-1-1 研究背景

現在、冷凍空調機器業界では環境負荷低減への対応が強く求められている。特に、冷媒に関しては、フロン類冷媒が使用不可となり、現在使用されている代替フロンである HFC（Hydrofluorocarbon）も地球温暖化係数が高い。これにより、自然冷媒や地球温暖化係数の低い冷媒を用いた冷凍空調機器の開発および実用化が強く求められている。また、近年の大幅な電気料金の値上げによりエネルギーコストの上昇も大きな問題となっており、コストダウンにつながるエネルギー使用効率の向上、省エネルギー性能の向上が急務となっている。

1-1-2 研究目的

先述の問題点を解決すべく、当社保有の特許技術である『XY 分離クランク機構およびこれを備えた駆動装置（特許第 5393907 号、平成 25 年 10 月成立）』を応用した自然空気を冷媒とする極低温冷凍空調機器を開発し、地球温暖化係数の低減（GWP=1）およびエネルギーコストの削減を目指す。

1-1-3 開発目標

本事業は、「（三）製造環境に係る技術に関する事項」の中にある目標のうち「1 製造環境に係る技術において達成すべき高度化目標」の「川下分野横断的な共通の事項」にある「①川下製造業者等の特有の課題及びニーズ」における3つの川下ニーズを解決することを目標とした。川下ニーズと課題をア～ウに示す。

ア. 高機能化

- ・川下ニーズ：冷凍空調温度範囲の向上

イ. 低負荷環境下での製造

- ・川下ニーズ：冷媒コスト削減

ウ. 低コストでの製造

- ・川下ニーズ：冷凍空調機電気使用量削減、メンテナンスコスト削減

ア～ウに対応する高度化目標の項目における開発目標は以下の3つである。

ア. 当該技術が持つ諸特性、諸機能の向上として「冷凍温度制御技術の高度化」

イ. 環境負荷低減として「環境負荷低減」

ウ. コスト削減として「コスト削減」

これら3つの目標に対し、5つのサブテーマを設定し研究開発を行った。高度化目標とそれに対応する研究開発項目・サブテーマを表1に示す。

表1 川下ニーズと研究開発項目

高度化目標	研究開発項目・サブテーマ
【1】冷凍温度技術の高度化	【1-1】冷凍吐出温度性能の向上 【1-2】フィードバック回路追加による温度制御機能の向上
【2】環境負荷低減	【2-1】冷凍空気の大流量化
【3】コスト削減	【3-1】摺動部のオイルレス化 【3-2】エネルギー回生システムの構築

1-2 研究体制

本事業は、2つの研究実施機関が研究を進め、これらを山形県産業技術振興機構が管理機関として統括した。研究体制図を図1に示す。

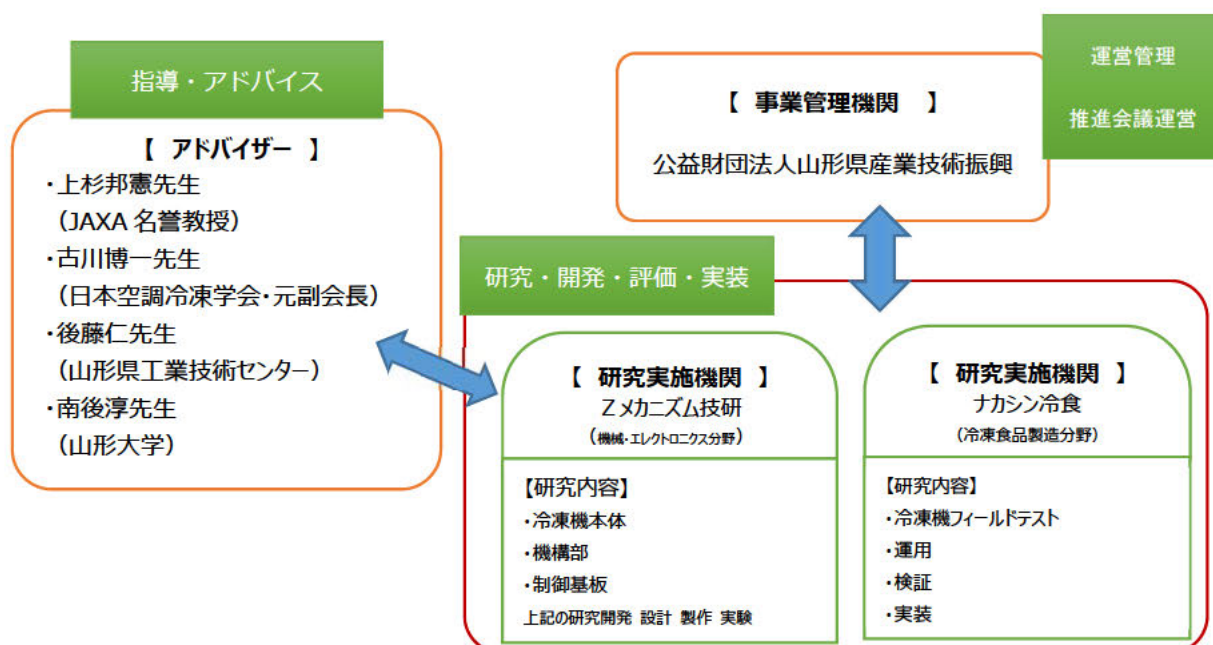


図1 研究体制図

研究開発は主に Z メカニズム技研が行った。この研究開発で出来た機械をもう一つの研究実施機関であるナカシン冷食は実際の製品製造の凍結方法など具体的な冷凍機運用方法提供と凍結実験の補助を行った。ナカシン冷食は、多品種の冷凍食品生産を得意としており、その結果を都度研究開発に反映させることで、事業化を短期間で達成することを目指した。

1-3 成果概要

表2に本事業のサブテーマとその成果概要を示す。本事業は3つの川下ニーズを解決するため、幾つかの実用化に向けた解決課題について整理した。これらから、研究開発の課題を5つのサブテーマに整理し研究開発を行った。

【1】冷凍温度技術の向上については2つのサブテーマを設定した。1年目においては【1-1】冷凍吐出温度性能の向上、2～3年目においては【1-2】フィードバック回路追加による温度制御機能の向上について研究開発を行った。

この研究開発によって、バルブの開閉時間を自由に変化させ供給する流量を制御するユニバーサルサーボバルブ（本事業にて特許取得）を開発した。また、フィードバック回路とシステム基板を開発しバルブの動作スピードを制御することで温度制御機能を備えた。これらを連動させ膨脹機から吐出する冷凍空気の温度制御を行う計画だった。現在、補完研究としてユニバーサルサーボバルブとの連携による温度制御機能の実装を進めている。

【2】環境負荷軽減については、事業期間3年間を通して【2-1】の研究開発を行った。

この研究開発によって、XY分離クランク機構を応用したミラー配置XY分離クランク機構コンプレッサと膨脹機（鏡像配置機構について特許取得）を開発した。これを用いて、低次振動（1次振動、2次振動など）を打ち消し静粛性が高く、吐出流量も膨脹機一台あたり2000L/minとなり、計画当初の1000L/minの倍量を吐出する機械とすることが出来た。また、この低次振動を打ち消す機構は他の容積機械についても応用が可能であり、適用範囲が広い技術として開発できた。

【3】コスト削減については2つのサブテーマを設定した。事業期間3年間を通して、【3-1】摺動部のオイルレス化と【3-2】発電・回生システムの構築の研究開発を行った。

この研究開発によって、XY分離クランク機構を応用した往復摺動摩擦試験機を製作した。

また、発電・回生システムについては、予定していた 1.4kW の回生を確認し冷凍システムを動作系への回生を確認した。現在、補完研究として往復摺動摩擦試験による実験を行っている。

表 2 本年度補助事業の取り組み

高度化目標	研究開発項目・サブテーマ	成果の概要
【1】 冷凍温度技術の 高度化	【1-1】 冷凍吐出温度性能の向上 【1-2】 フィードバック回路追加による温度制御機能の向上	モータ制御ハードウェア、各種ソフトウェア各基幹部分の製作（ユニバーサルサーボバルブ、膨張機での回生など）
【2】 環境負荷低減	【2-1】 冷凍空気の大流量化	ユニバーサルサーボバルブの開発 XY 分離クランク機構を用いた膨脹機と圧縮機の開発
【3】 コスト削減	【3-1】 摺動部のオイルレス化 【3-2】 発電・回生システムの構築	往復摺動試験機の開発 回生システム開発ならびに検証

1-4 当該研究開発の連絡窓口

Z メカニズム技研株式会社

代表取締役 吉澤匠

電話番号：0238-26-0060 FAX:0238-26-0001

Email：takumi.yoshizawa@zmechanism.jp

第2章 本論

2-1 研究開発概要

本研究は、5つのサブテーマについて研究開発を行った。また、本研究開発を行うシステムを図2ならびに表3に、それぞれのシステムの役割と構成を示す。

システムは大きく3つに分かれている。このシステムは、圧縮空気を膨張させる際に圧縮空気にPMモータによって発電させ、空気を持つエネルギーの一部を電力として回生する。これによって、発電するPMモータを制御し膨張機に与える負荷をコントロールして生成する冷凍空気の温度を変化させることが出来る。

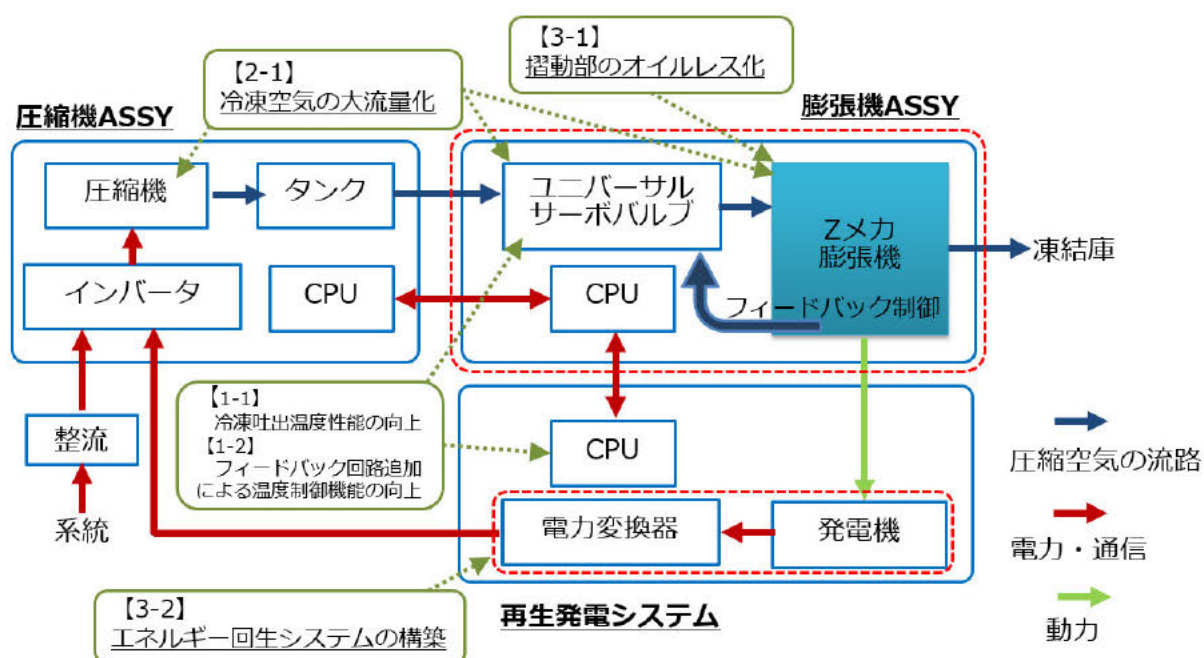


図2 システム概要図

表3 それぞれのシステムの役割

ASSY 名称	主な構成機器	システムでの役割
圧縮機 ASSY	容積型圧縮機 タンクユニット アフタークーラ など	自然空気を 0.7MPa まで圧縮し、ASSY 内で常温まで冷却する。これによって、常温の圧縮空気を生成して膨張機 ASSY へ圧縮空気を供給する。 冷凍空気は圧力によって温度が決まるので、この圧縮機 ASSY での圧力コントロールが空気冷凍機の温度制御の要となる。

膨張機 ASSY	膨張機 ユニバーサルサーボバルブ など	圧縮機 ASSY から送られてくる常温の圧縮空気を大気圧に膨張させ、冷凍空気を生成する。この膨張する際に、膨張機に接続されている PM モータを回転させることで、圧縮空気の持つエネルギーの一部を電力として回生する。また、ユニバーサルサーボバルブによって、供給する空気量を調整する。
再生発電システム	回生発電システム 電力変換器 測定装置 など	膨張機に接続されている PM モータによって回生発電された電力を、圧縮機 ASSY へ供給する。また、膨張機に接続されている PM モータを制御し、生成する冷凍空気の温度を副次的に制御する機能を有する。

2-2 冷凍温度技術の高度化の研究内容

【1-1】冷凍吐出温度性能の向上

具体的な研究内容

冷凍吐出温度性能の向上を課題とした本テーマにおいては、冷気を吐出する際の温度の安定性が課題となっている。研究開発している空気冷凍機は、膨張機と呼ばれる冷凍空気を生成する機械へ圧縮空気を供給し断熱膨張させることで、冷凍空気を生成する。供給される圧縮空気の圧力と流量によって、吐出温度は変化する。よって、安定した冷凍空気生成を得るには、膨張機に供給する圧縮空気の圧力と流量をコントロールする必要がある。

すなわち、吐出する冷凍空気の温度の温度変化によって、膨張機へ供給する圧縮空気の圧力などを制御する必要がある。本テーマにおいては、この制御を行うにあたって、多点・高速計測による高速温度制御技術の研究開発を行う。

重点的に実施した項目

本サブテーマは、第 1 事業年度（平成 26 年度）から研究を開始し、第 2 事業年度まで研究開発を行った。

第 1 年度は、当初予定していた CPU からテキサス・インスツルメンツ（TI）社製に変更し、長期間安定供給と都度アップデートが柔軟に行うことが可能な CPU ボード、ADC ボードの設計を行った。

第 2 年度は、CPU ボードの製作と ADC ボードなどを製作し、本事業で必要な高速

多点計測をする基板を製作しシステムの基盤となる技術を整えた。これにより、本事業で開発した CPU ボードや ADC ボードは、最新機器のもつスピードと、最新の OS までカバーすることができる柔軟な接続環境を構築でき、ボードの拡張が自在に行えるという特徴を持つ。

目標の達成について

このサブテーマについては、多点・高速計測による高速温度制御に用いる CPU ボードと ADC ボードなどの基板の開発を行い、圧縮空気の圧力と流量をコントロールするためのシステムの構築を行い、予定通りに基板とシステムの構築を行った。これは Windows 系の OS それぞれのバージョン（windows7、8、10）に対するドライバも開発し、アップデートに柔軟に対応することが出来るシステムとして構成した。

これによって、【1-2】フィードバック回路追加による温度制御機能の向上において開発するサーボバルブの制御系に対する基盤となるシステムを整えることが出来た。システムは図3にあるような回生発電システム（コントロールユニット）にて構成され、3年間の研究開発事業を通して使用した。

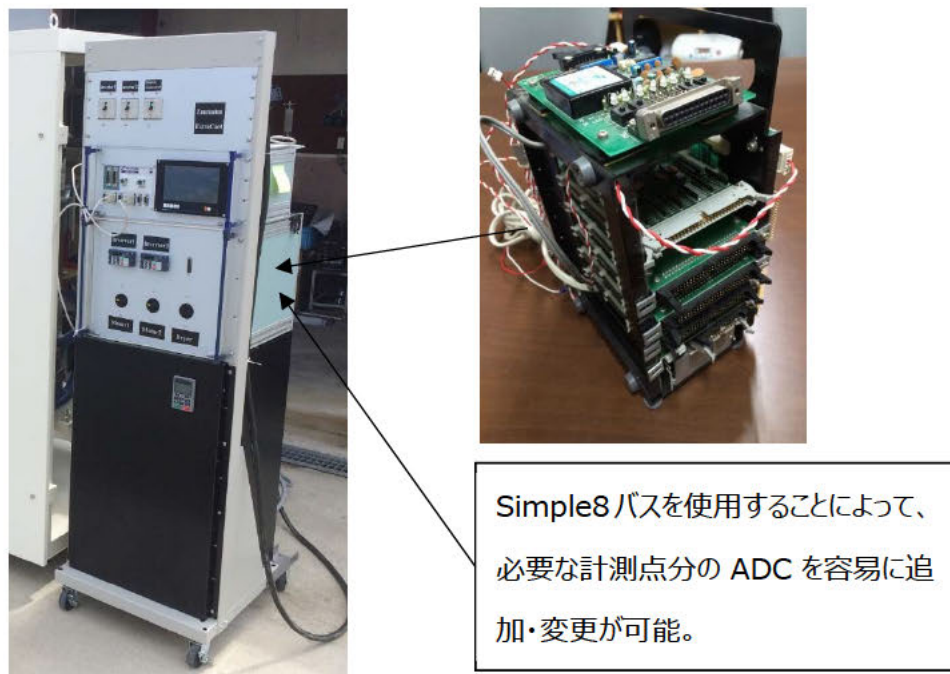


図3 回生発電システム（コントロールユニット）

【1-2】フィードバック回路追加による温度制御機能の向上

具体的な研究内容

冷凍吐出温度性能の向上を課題とした本テーマにおいては、冷気を吐出する際の温度の安定性が課題となっている。研究開発している空気冷凍機は、膨張機と呼ばれる冷凍空気を生成する機械へ圧縮空気を供給し断熱膨張させることで、冷凍空気を生成する。この吐出する冷凍空気の温度の温度変化によって、膨張機へ供給する圧縮空気の圧力などを制御する必要がある。本テーマにおいては、多点・高速計測による結果をフィードバックし、冷凍機全体の制御を行うために必要となるフィードバック回路の研究開発を行う。

重点的に実施した項目

このサブテーマは、【1-1】冷凍吐出温度性能の向上の成果を基にして研究開発を勧めるものとして計画しており、第 2 事業年度（平成 27 年度）から研究を開始し第 3 事業年度まで研究開発を行った。

図 4 に、各ユニットと制御・フィードバックの構成概要図を示す。

第 1 年度は、「吐出する冷気の温度により、膨張機にかかる負荷の割合を制御するためのハードウェアおよびソフトウェアの開発」を目標としている。そのため PM モータの回転数を制御することで負荷を変動させる内容で開発を進めた。

第 2 年度は、「フィードバック回路追加による温度制御機能の向上（ $+35^{\circ}\text{C}$ ～ -75°C ）」を目標として開発を行った。これを達成するため、①別のサブテーマで設計製作したサーボモータバルブによる温度条件制御システムの開発と、②膨張機に接続した PM モータの回転数を制御することで負荷を自由に変更できるシステム開発を進めた。特に、サーボモータバルブは膨張機の動作と完全に同期させなければならない。そのため、サーボモータの特性調査からそれを用いた同期プログラムへの反映とバルブ動作までリソースを大きく使用した。

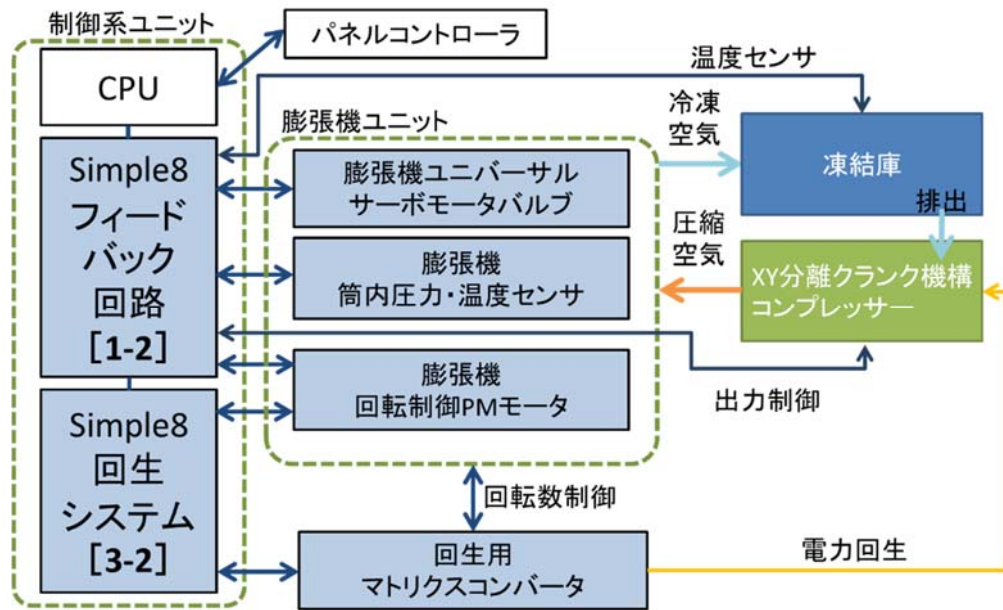


図4 各ユニットと制御・フィードバックの構成概要図

目標の達成について

①別のサブテーマで設計製作したサーボモータバルブ（図5）による温度条件制御システムの動作確認図を図6に示す。膨張機の回転と同期させながら、バルブの開閉幅や開閉タイミングを、自在に変更出来るのがこのシステムの特徴である。これは、本事業期間内に特許として成立させることが出来た。

開発については、サーボモータバルブ本体部分に由来する調整項目が多く、実験とプログラムの微調整に時間を要した。当初目的としていた温度制御向上について、+40℃領域での空気吐出を確認した。一方の低温領域側については、事業完了時点において-50℃までの冷気を吐出することを確認している。

また、②膨張機に接続した PM モータの回転数を制御することで負荷を自由に変更できるシステム開発については、【1-1】で研究開発を行った基板類と制御プログラムにて、膨張機本体の回転数を 200～600rpm まで自由に設定可能となった。これにより、コンプレッサ圧力だけでなく、膨張機本体で温度の制御を可能にした。

これら2つの制御方法を組み合わせた温度制御機能の向上については、現在補完研究を行っており、サーボモータバルブの定格回転数動作で、膨張機の回転数に完全に同期動作が行えることを確認した。引き続き補完研究にて開発を継続しており、圧縮空気の条件を変え、圧力と冷凍温度の生成条件を整理する。

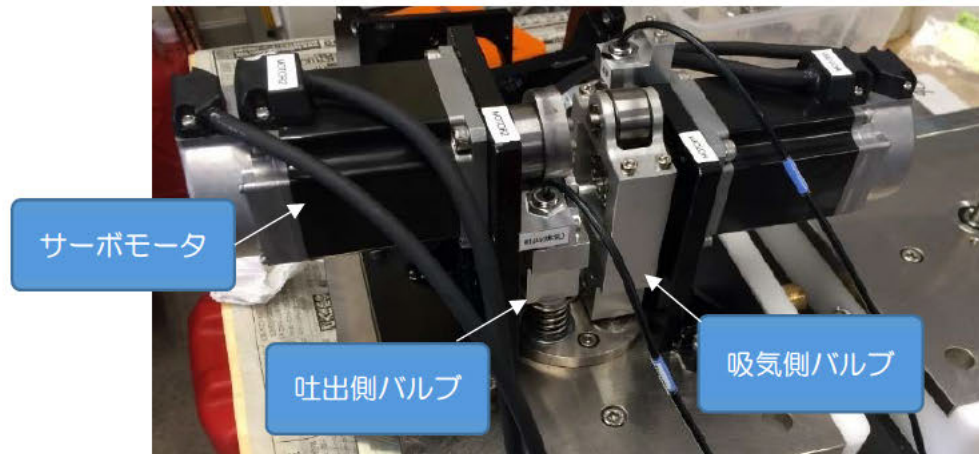


図5 サーボモータバルブの構成

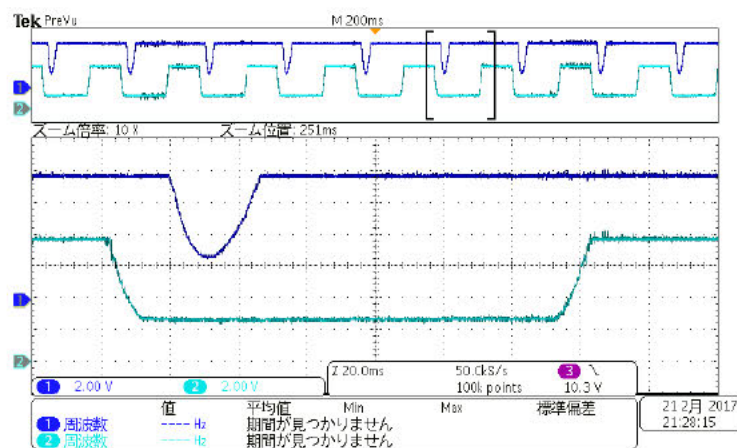


図6 サーボモータバルブの制御状態

2-3 環境負荷低減の研究内容

【2-1】冷凍空気の大流量化

具体的な研究内容

実用的な大流量を課題とした本テーマにおいては、吐出する冷気の流量を増加させることを研究内容としている。プロトタイプ空気冷凍機は、 -75°C の冷凍空気を毎分 100 リットル吐出する事ができた。 -75°C の冷凍空気を 2 分間で生成するプロトタイプを事業化するためには、流量を増加させることが求められる。事業化へ向けては、平成 27 年度で毎分 600 リットル、平成 28 年度までに毎分 1000 リットル/台（吐出流量 1 m^3 以上）を目標として進めている。

重点的に実施した項目

本サブテーマは、第 1 事業年度（平成 26 年度）から研究を開始し、第 3 事業年度（平成 28 年度）まで事業期間を通して研究開発を行った。

内容としては、主に機械要素系の研究開発で、①圧縮空気を膨張させ冷凍空気を生成する膨張機と、②圧縮空気を生成する容積型コンプレッサ、③膨張機に圧縮空気を供給するユニバーサルサーボバルブの 3 つの研究開発を重点的に行なった。

①膨張機について

膨張機試作 1 号機的设计ならびに製作は第 1 事業年度に行い、次いで第 2 事業年度において動作実験をし、吐出流量と生成できる冷凍空気を確認した。図 7 に実験装置写真を示す。この実験において、目標値・流量 600 リットル/min を上回る 1000 リットル/min を達成できたが、冷凍空気の温度が -45 度程度となり、目標値に届かなかった。この実験の後に、コンプレッサを変更して追加実験を行い、従来の容積型圧縮機では本事業で必要とする圧力と流量の条件を満たさないことが明らかになり、新たに圧縮機を設計する必要がある事が判明した。また、バルブタイミングを変えることで冷凍空気だけでなく、加熱した空気を吐出できることがわかり、ユニバーサルサーボバルブの基本的な発想も得ることが出来、最終的に特許として成立となった。

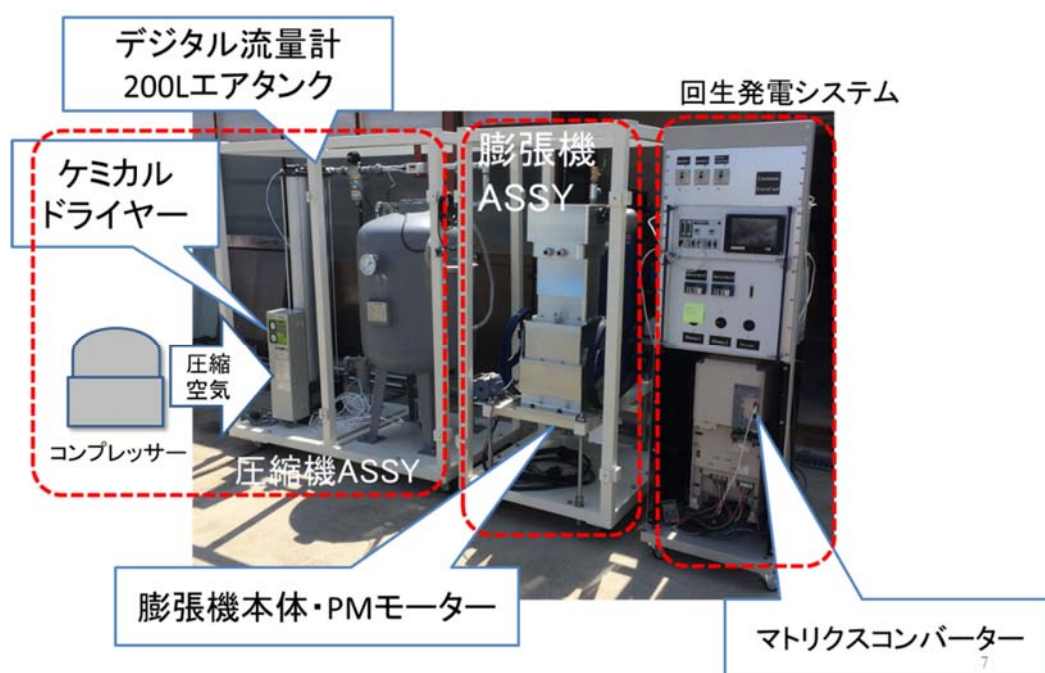


図 7 第 2 年度（平成 27 年 6 月）実験で使した凍結装置

また、膨脹機本体については、共同で実験を行ったナカシン冷食からの実際の工場での運用を想定した意見をもとに、工場内での取り回しが簡易で、本体振動を大幅に抑制した膨脹機に再設計した。この再設計を行った試作 2 号機（図8）を事業年度の後半に製作した。この機構は、試作 1 号機駆動機構に用いている XY 分離クランク機構が唯一キャンセルできなかった回転モーメントを機構上で解決できるものとして特許を出願し、本事業完了までに特許として成立した。2 次振動以降の低次振動を抑制することが出来るため、この機構はコンプレッサへも応用した。

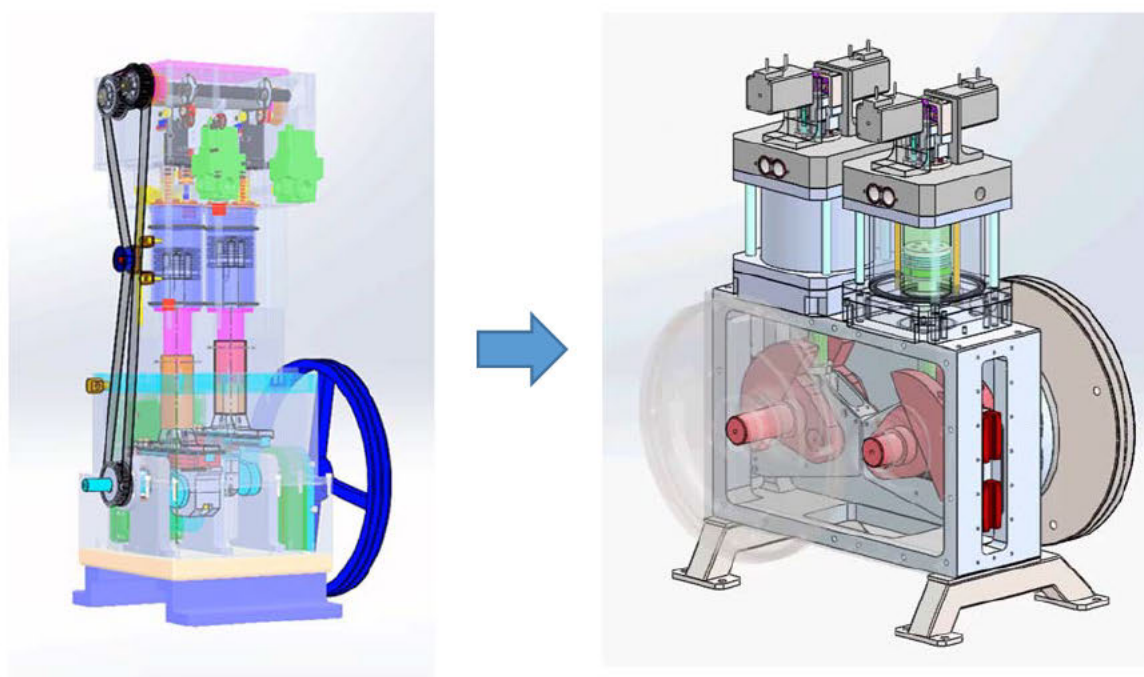


図8 膨脹機の内部機構変更

②容積型コンプレッサ

容積型コンプレッサは、第 3 事業年度で導入した。これは、新たに考案した XY 分離クランク機構を鏡像（ミラー）配置とすることで、外部のリニアバランサを用いることなく低次振動を打ち消すことが理論上可能であることを特許申請書類において表記している。これ実証するために実際のモデル（図9）とコンプレッサの小型試作機を製作し、実証試験によって低次振動が発生しないことを確認し、コンプレッサの実機製作を進めた。

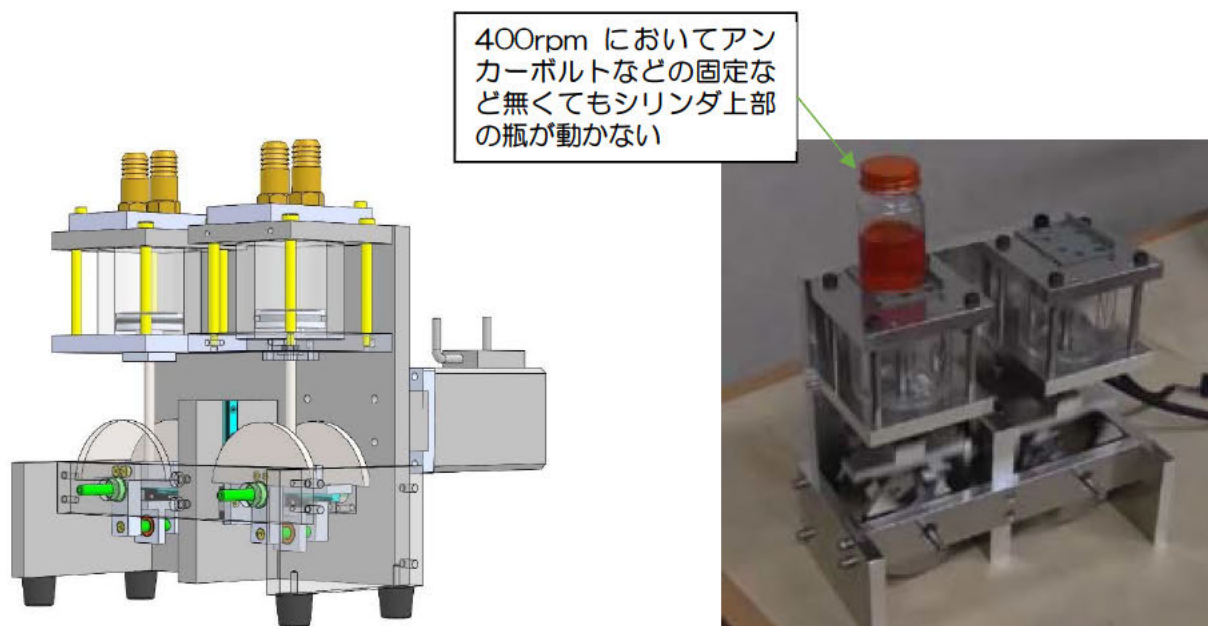


図9 XY 分離クランク機構鏡像（ミラー）配置実証試験モデルと振動の確認実験

この結果を用いて新たに取得したコンプレッサは、最終的に 2064L/min の流量を得ることが出来た。これは平成 27 年度に追加実験で使用したコンプレッサ（オーバルピストン）から比較して約 30% 向上した結果となり、計画当初の 1000L/min から比べると 2 倍の流量を達成することが出来た。また、FFT 解析で振動を測定した結果、図 10 に示すように、本体振動の原因となる低次振動領域である 200Hz 以下の低周波振動域での振動が非常に少ないことが確認できた。

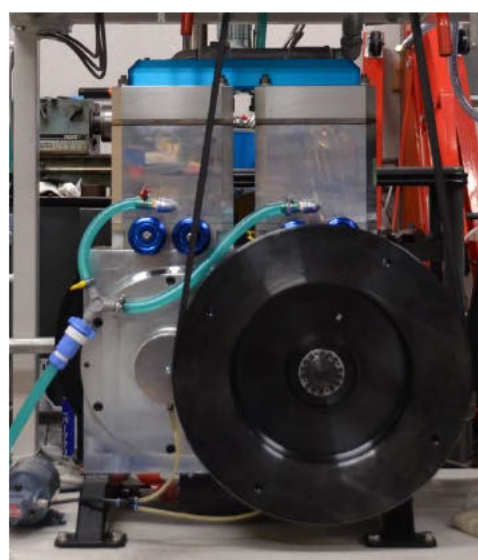
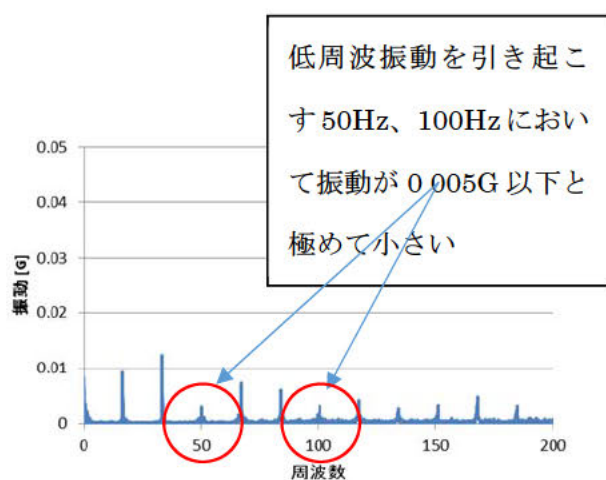


図 10 取得したコンプレッサの FFT 解析結果とコンプレッサ実機写真

表4に、本事業で用いたコンプレッサの変遷を示す。従来の機構を用いたコンプレッサでは困難であった大径ピストンによる動作を、クロスヘッドを用いることなく出来ることから、消費電力、本体サイズ、使用圧力の主要なパラメータは良好な結果となった。最初の実験で用いた3台のコンプレッサを用いたときから比較すると消費電力は50%に削減でき、圧力は15%改善、流量は70%向上した。

また、このコンプレッサを用いた際の実験においては、 -60°C の冷氣吐出を確認しコンプレッサ変更による有効性を確認した。

表4 コンプレッサの比較表

	①鹿児島で用いた コンプレッサ	②再実験で用いた コンプレッサ	③開発した コンプレッサ
コンプレッサの 種類	スクロールコンプレッサ レシプロコンプレッサ	XY分離クランク機構 リニアバランサー付き コンプレッサ	XY分離クランク機構 フルバランス コンプレッサ
使用台数	スクロールx2台 レシプロx1台	1台	1台
使用実流量	1200 L/min (1100rpm)	1600 L/min (600rpm)	2064L/min (600rpm)
使用実圧力	0.6 MPa	0.7 MPa	0.7MPa
定格動力	合計20 kW	11 kW	11kW
静粛性	×	○	◎
その他		● オーバルピストン ● 振動を打ち消す為のリニアバランサーを外部に使用	● 真円ピストン ● 機構自体で振動を全て打ち消すフルバランス機構

③ユニバーサルサーボバルブ

計画当初は、ソレノイドを用いた電磁バルブの開発を予定していたが、10Hz 駆動(600rpm)ではバルブのリフトに必要な力が不足していることから、サーボモータを用いたバルブに変更した。

第2事業年度の動作実験の結果をもとに開発したサーボモータバルブは、従来のリンク機構を組み合わせたロッカーアーム方式と異なり、バルブ自体をサーボモータによって直接的に開閉を行うシステムである。デジタルサーボは、エンコーダの角度情報を用いて位置補正するためのサーボパルスを発生させている。これにより位置ずれが発生せず、膨張機の回転に同期した、所謂、電子ベルト動作ができることから、自在に開閉タイミングを調整することが出来る。これを平成27年度に取得した膨張機

(2号機、図9)と組合せ、流量と温度を自在に制御するためのシステムとして構成を試みた。

当初、サーボモータのみで動作させていたが、サーボモータの位置決めをする際、リトライする場合がある。このモータドライバのリトライ時破損防止措置が動作を阻害していた。これを回避するには①サーボモータ自体の大型化と②ギアドライブ追加によるトルク増大の2通りの方法があるが、①は膨張機に搭載する際に部品が干渉する部分があったことから②(図11、サーボモータバルブVer.2)を採用し再調整を進めた。しかしながら、ギア自体の誤差と、エンコーダのパルス誤差が互いに累積しタイミングが徐々にズれてしまうことが判明した。これを解消する方法を検討した結果、プログラムによる割り込み制御と同期リセット演算を行うことで解決を試みた。この時点において事業期間満了となり、当初予定していた同期動作については現在補完研究として開発を進めている。

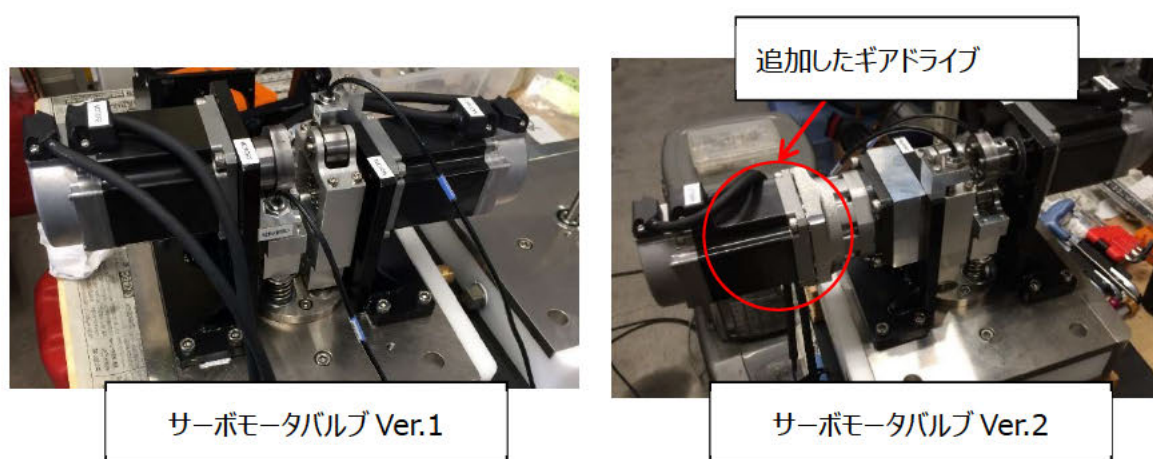


図 11 ユニバーサルサーボバルブ

目標の達成について

この研究開発によって、XY 分離クランク機構を応用したミラー配置 XY 分離クランク機構コンプレッサと膨張機(鏡像配置機構について特許取得)を開発した(図12)。これを用いて、低次振動(1次振動、2次振動など)を打ち消し静粛性が高く、吐出流量も膨張機一台あたり2000L/min となり、計画当初の1000L/min の倍量を吐出する機械とすることが出来た。また、この低次振動を打ち消す機構は他の容積機械についても応用が可能であり、適用範囲が広い技術として開発できた。

また、ユニバーサルサーボバルブについては、流量の調整などを自在に行うこれまでにない新型のバルブであり、これについても事業期間中に特許として成立した。

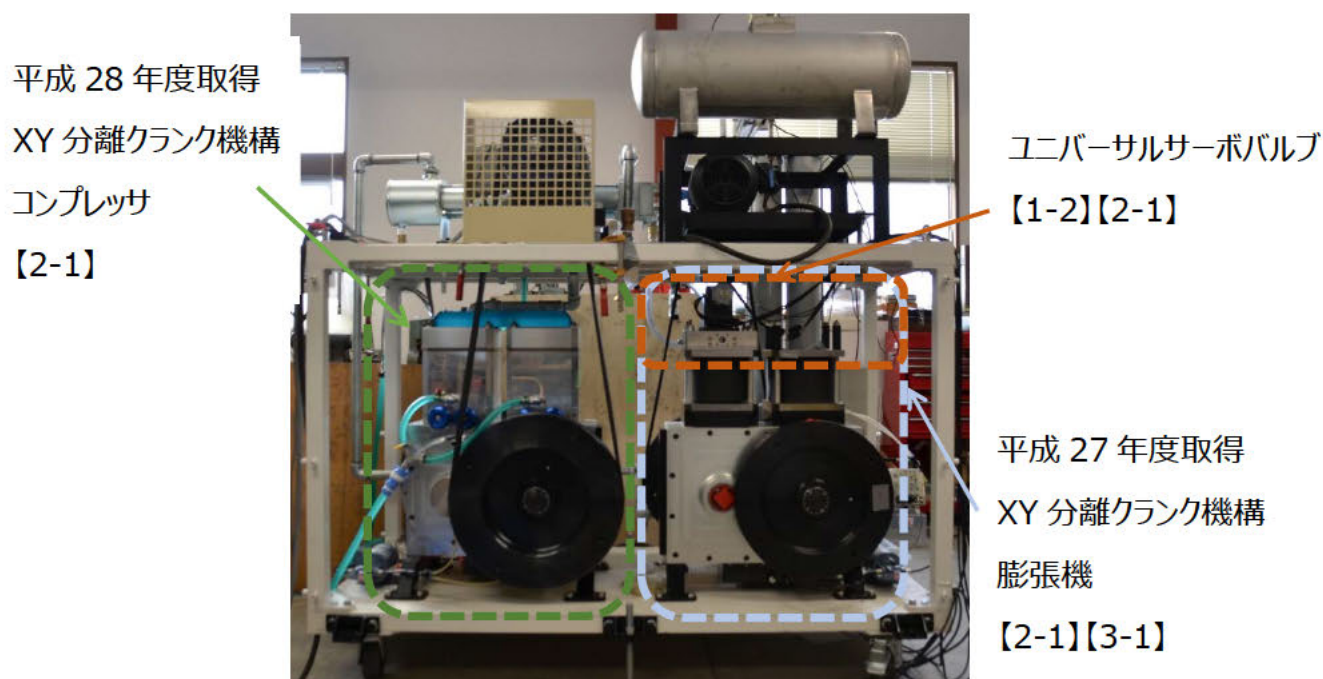


図 13 実際の冷凍機本体構成

2-4 コスト削減の研究内容

【3-1】摺動部のオイルレス化

本テーマは、機構の摺動部オイルレス化を課題とし研究開発を進めている。事業化を目指す空気冷凍機は、食品冷凍分野を最初のターゲットとしている。そのため、異物混入などを確実に排除する必要があり、極力オイルを用いない機構が望ましい。また、摺動部をオイルレス化することにより、部品点数の削減などの環境面での効果もある。本研究においては、これらの課題を達成するために摺動部の実験が必要となる。しかしながら、現在市場にある摩擦試験機はピンオンディスクと呼ばれるタイプのものが主流となっている。これはディスクを回転させ試験片を垂直に押し付ける試験機であり、本テーマが必要とする往復摺動のデータを取得するのは困難である。よって、本テーマにおいては既に往復摺動試験機としての実績を持つ XY 分離クランク機構を用いた試験装置の開発を行う。次いで、これを用いて往復摺動実験データを取得し、オイルレス化に必要な条件の研究開発を行う。

重点的に実施した項目

摺動部のオイルレス化を実現するには、摺動部材同士を往復摺動させ、それぞれの素材がどの様に損耗したかを確認するための往復摺動試験機が必要となる。本サブテーマは、第 1 事業年度（平成 26 年度）から研究を開始し、第 3 事業年度（平成 28 年度）まで事業期間を通して研究開発を行った。図 11 に試験機の全体と機構の概要を示す。

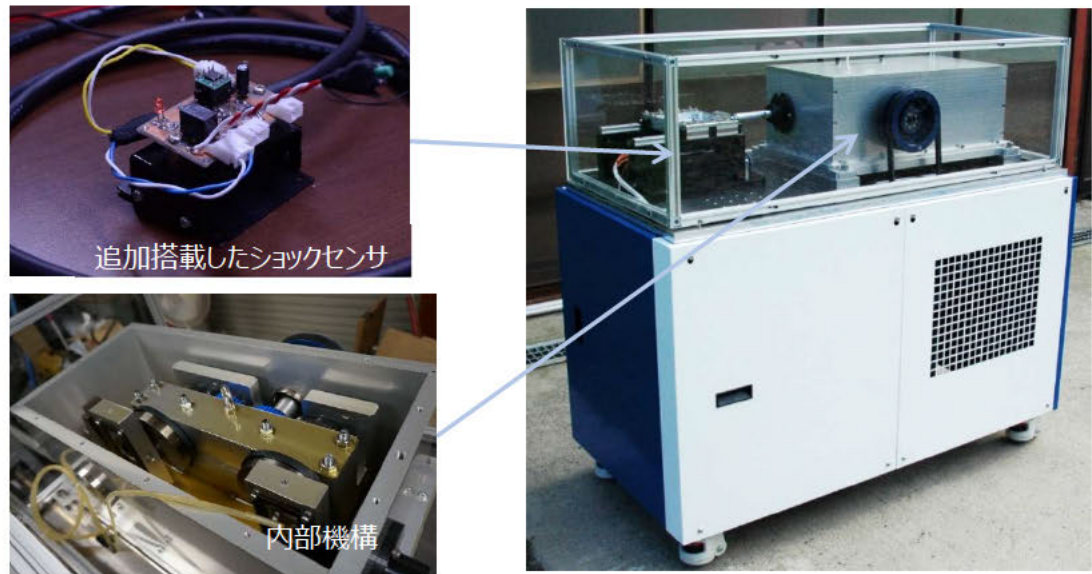


図 13 往復摺動摩擦試験機

第 1 事業年度では主要機構部分の設計などを行い、第 2 事業年度では組立ならびに動作テストを行った。第 3 事業年度では安全対策のためのショックセンサなどのセンサ類の追加し、危険振動を自動的に察知して停止する機能を追加するなどした。この内部機構を応用したものが、先述の膨張機とコンプレッサ内部機構となった。従来機構の首振りによる加振が発生せず、静粛性の高い試験機とすることができた。

目標達成に関して

従来のスライダークランク機構を用いた往復摺動試験機では、振動ノイズの影響により、動作実験には不向きである。そのため、低振動性と静粛性を目的とした試験機が必要となった。本事業で開発した往復摺動試験機は、膨張機が実際に動作する 600rpm での実験が行えるスペックとして構成し、実験では実際にこの回転数で動作することを確認した。

これを使用しての実験を補完研究にて行っており、この実験結果を用いて素材同士の組み合わせによる最適化を進める。

【3-2】発電・回生システムの構築

具体的な研究内容

エネルギー回生システムの構築を課題とした本テーマは、空気冷凍機を実用化するに当たり非常に重要な研究開発となる。吐出する冷気の生成においては、膨張機へ供給する圧縮空気に仕事をさせることで流体の持つエネルギーの一部を使用し、膨張過程において温度を押し下げる効果がある。また、これは圧縮空気の仕事を電気に変換しエネルギーの一部を再利用することで、消費電力を削減するという側面も持つ。これによって冷凍空気の生成と消費電力の改善の2つの長所を得ることができる。

これを実現するには、①出力電力を一定にでき、②電力容量がキロワットオーダー、③出力電圧が数百ボルトオーダーの DC-DC コンバーターが必要となる。しかしながら、これら①～③すべての条件を満たす DC-DC コンバーターがないため、これを研究開発する必要がある。

重点的に実施した項目

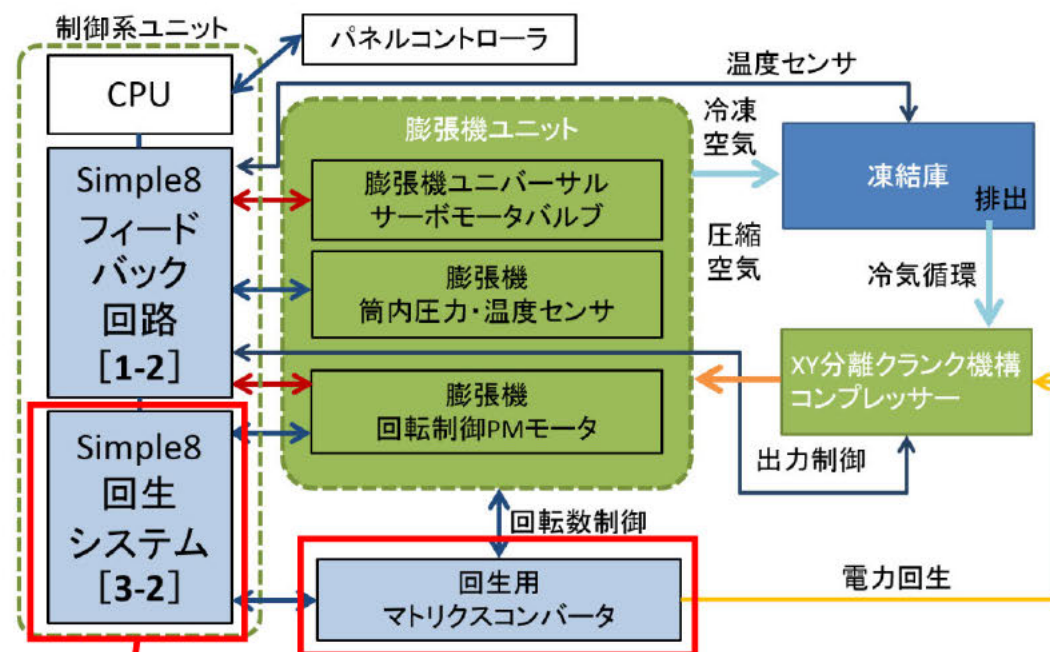
本サブテーマは、第1事業年度（平成26年度）から研究開発を始め、第3事業年度（平成28年度）まで事業期間を通して研究開発を行った。

図14にシステム全体の制御構成図と本サブテーマの位置づけについて示す。これは主に膨張機のPMモータから回生発電を行う。内容としては、①回生発電システムを用いて膨張機に接続したPMモータによって回生発電を行う際の機械制御と、②サブテーマ【1-2】フィードバック回路追加による温度制御機能の向上で開発したプログラムとの連携について開発を行なった。

この回生発電を行う理由には、消費電力の抑制の他、生成する冷凍空気の温度制御が行えるためである。圧縮空気が膨張する際に、膨張機に接続されたPMモータを用いて回生発電を行うが、この時の回生発電負荷によって、生成される冷凍空気の温度が変化する。これは圧縮空気の持つエネルギーの一部に仕事をさせて電力として取り出すことで発生する減少である。このため、回生発電による負荷を与えなかった場合は生成される冷凍温度が高くなる。よって、本システムは圧力の他に回生発電による負荷によっても温度を制御する事ができることから、重点的に開発する項目とした。

目標達成に関して

第2事業年度の実験において、実際に回生発電させた電力をコンプレッサ ASSY へ供給できることを確認した。また、第3事業年度においては、フィードバック回路などとの連携を行えるようにし、最終的に計画と同じ 1.5kW の回生を確認できた。



- 圧縮空気が膨張する際に、膨張機に接続された PM モータを用いて回生発電を行う。この回生システムを介して、コンプレッサへ電力を供給する。
- この時の負荷によって、生成される冷凍空気の温度が変化する。これより、本システムは圧力の他に回生発電による負荷によっても温度を制御する事ができる。

図 14 システム全体の制御構成図

第3章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

3年間を通して、5つのサブテーマによる実用化・事業化に向けた研究開発を行った。

システムとして生成する流量（サブテーマ【2-1】）については、当初予定していた 600～1000リットル/minの目標値を上回る2000リットル/minを生成することに成功した。冷凍温度については、事業完了直前の実験においては-50℃～-60℃の冷凍空気の生成を確認した。これに対して目標値は-75℃であり、若干の不足が有るが現在行っている補完研究（サーボモータバルブなど）の成果によって、この数値は達成できるものと見込んでいる。

また、計画当初に設計した膨張機とコンプレッサは、内部機構を鏡像（ミラー）配置することで回転方向のモーメントもバランスすることに成功し、振動の原因となる低次振動を大きく改善することができた。同時に、流量については先述のように目標値を上回る値を確認し、メカニズムとしては当初の目標達成に大きく寄与した。

冷凍システムとしての本体サイズは、表 5 に示すように最終的に各種要素を集約する50%程度の小型化とすることが出来、実際に流通している冷凍コンテナへ搭載することができる大きさになった。

表 5 冷凍機本体構成サイズ

ユニット	サイズW×H×D [mm]	これまで 3 つのユニットで構成していた冷凍機本体を、平成 28 年度は 1 つのユニットに集約・小型化
平成 27 年度使用膨張機ユニット	750×840×1750	
平成 27 年度使用コンプレッサ （鹿児島実験）	1230×925×1480	
平成 27 年度使用タンクユニット	1500×800×1740	
平成 27 年度製作・膨張機 平成 28 年度取得・コンプレッサ	1800×1740×800	

回生発電システムをはじめとする電子機器系（サブテーマ【1-1】、【1-2】、【3-2】）の開発については、サーボモータバルブの開発に大きく時間的なリソースが割かれたが、それ以外の要素についてはほぼ計画通りの進捗となり、回生発電については目標値 1.4kW を達

成を確認した。

以上より、流量と回生発電の目標値を事業期間中に達成でき、冷凍温度のみ現在行っている補完研究によって達成する見込みとなっている。

また、数値目標とは別に、表6のように複数の特許が事業期間中に成立した。これは容積型流体機械に広く応用できるもので、事業期間中に開発した鏡像（ミラー）配置 XY 分離クランク機構コンプレッサは別の用途にも展開できる。補完研究完了後に、これについては並行して事業展開を考えている。

表 6 本事業において取得した特許一覧

高度化目標	取得特許
【1】 冷凍温度技術の高度化	Zメカニズムサーボバルブ機構 特許番号 5839519 号
【2】 環境負荷低減	XY 分離クランク機構を備えた駆動装置 特許番号 5843184 号 XY 分離クランク機構を備えた駆動装置（ミラー配置） 特願 2015-239743（特許査定済み）

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

研究開発後の課題であるが、第一は現在広く使用されている二元冷凍方式（2つの冷媒を用いる冷凍方式）への適用である。現在の冷凍業界は化学冷媒方式から自然冷媒方式への転換が求められている。二元冷凍方式も同様に、現在使用されている自然冷媒は、①毒性があり危険性の高いアンモニアと②炭酸ガス（CO₂）が広く用いられている。この方式のアンモニアでの冷却部分に空気冷凍機を適用すれば、完全に無害の二元冷凍方式とすることができる。これについての展開も視野に入れているが、炭酸ガス冷媒で用いる電磁膨張弁などの使用条件を冷凍サイクルとともに検討する必要がある。これについては、本事業にてアドバイザーとして数々のご助言を頂いた古川博一先生と引き続き検討を進めている。

第二にメンテナンスチェーンの構築が問題となる。これについては、既存の冷凍機メーカーとの提携という形が必要になってくるため、親和性の高いメーカーとの提携がどの段階で可能となるかが事業展開の鍵となる。

次に、事業展開については、研究開発を共同で行ったナカシン冷食の生産ラインへ導入予

定となっている。また、これとは別にシンガポールの大手海運会社とのリーファコンテナ用冷凍機の開発が、サポイン事業完了後からスタートすることになっており、現在開発についての協議を行っている。こうした川下企業への展開は研究開発中から出てきており、補完研究後の耐久性試験などを経て市場への展開を行う。

ターゲットとする市場は、主として業務用などの冷凍機を使用している市場と冷凍コンテナ市場をターゲットとする。国内、海外ともに大きなマーケットであり、合わせると約 1 兆円の巨大市場となる。空気冷凍機の開発は、この市場に参入することにより、事業化の可能性が高い技術である。また、先述の二元冷凍方式を用いた展開を行えば、大型店舗のショーケースなどの市場へも展開することができる。

- ・業務用冷凍分野：約 5000 億円
- ・大型業務用冷凍分野：3000 億円
- ・輸送用冷凍分野：2000 億円

市場規模は、食料品の流通のグローバル化・品種多様化によって 15%の拡大を続けており、シンクタンクによっては今後 20 年間引き続き成長が続くというレポートもある。

また、急速冷凍の分野において、最近注目されているのが医療分野である。IPS 細胞などのバイオ関連の研究室・医療用急速冷凍機のニーズは年々高まっており、2012 年には海外を中心に 31.6 億ドル（約 3790 億円）のマーケットが存在している。研究開発の激化に伴い、この分野は今後 20%成長が見込まれる有望な分野となっている。現在の急速冷凍は化学冷媒を用いるものが主であることから、極低温冷凍空気を生成できる本システムはこれに対しても有効な手法であることから、今後、この分野の調査を行い展開を模索する。