

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「ターボファン一体成形用メカトロ金型技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成26年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 タマティーエルオー株式会社

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
1-2 研究体制	2
1-3 成果概要	6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第2章 小型エアータオル用省エネターボファン設計	
2-1 はじめに	8
2-2 本年度の目標及び結果	8
2-3 「流体力学シミュレータ」の開発	8
2-4 「流体力学シミュレータ」の評価	11
2-5 RPモデルによる省エネターボファン設計	14
2-6 RPモデルによる省エネターボファンの評価	17
第3章 アクチュエータ内蔵金型の開発およびターボファン成形評価	
3-1 はじめに	22
3-2 本年度の目標及び結果	22
3-3 第3次アクチュエータ内蔵金型の開発（昨年度の継続）	22
3-4 第4次アクチュエータ内蔵金型の開発	25
3-5 第4次試作ターボファンの特性評価	31
第4章 冷却用小型ターボファンの最適構造化	
4-1 はじめに	41
4-2 目標	41
4-3 冷却用小型ターボファンの最適構造化の開発	41
4-4 冷却用小型ターボファンの最適構造化の開発評価	43
第5章 環境対応型プラスチック材を用いたターボファン開発	
5-1 はじめに	47
5-2 目標	47
5-3 環境対応型プラスチック材を用いたターボファン開発	47
5-4 環境対応型プラスチック材を用いたターボファン開発評価	49
第6章 全体総括	
6-1 研究開発成果	53

6-2	研究開発後の課題・事業展開	56
6-3	おわりに	58

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

ターボファンは、モーター回転トルクなどを利用し、気体を効率よく送出する機械要素で、大型から小型まで、産業用から家庭用まで広範囲に利用されている。ここでは、近年その市場が拡大しているエアータオル、自動車用カーエアコンの送風用ターボファンに注目し、直径100ミリ付近、厚さ15ミリ、9枚前後の羽根を有するプラスチック製ターボファンを標準として、多翼スライド構造のメカトロ金型の開発により、一体成形での生産を実現させる技術開発を目指す。

従来技術は、下板・翼・上板を別個に製作し、それらを接合して、ターボファンを組み立てるため、ターボファンとしての強度が不足することに加え、効率的な生産様式を採用することができなかった。さらに、エアータオルやカーエアコンで求められる、高精度で強靱な小型ターボファンの仕様を満足することは、ほとんど困難であった。

開発中の多翼スライド構造のメカトロ金型は、金型コア内部で、ターボファンの下板・翼・上板などを射出成形時に一体成形する技術である。このメカニズムをコンパクト化することで、直径が50-100ミリの小径ターボファンも一体成形できる。すでにメカトロ金型の主要なアイデアは知財化されており、これからの小型化技術・ターボファン形状設計技術などを融合することにより、さらなる事業化に向けての技術の高度化が期待される。

本プロジェクトでは機械加工技術を基に、シミュレーション技術・型技術を用い、科学的根拠やデータの裏づけによって、ターボファン一体成形のためのより高度なメカトロ金型の開発を行い、製品化に向けての基盤整備を進める。その上で、ターボファン技術の川下産業のニーズを解決する。

【本年度の目標】

本年度は、高性能エアータオル用ファンの実現と、より小口径のPC冷却用ターボファン実現に向け、下記の具体的な目標を立て開発を行う。

【エアータオル用省エネ一体成形ファンの開発】

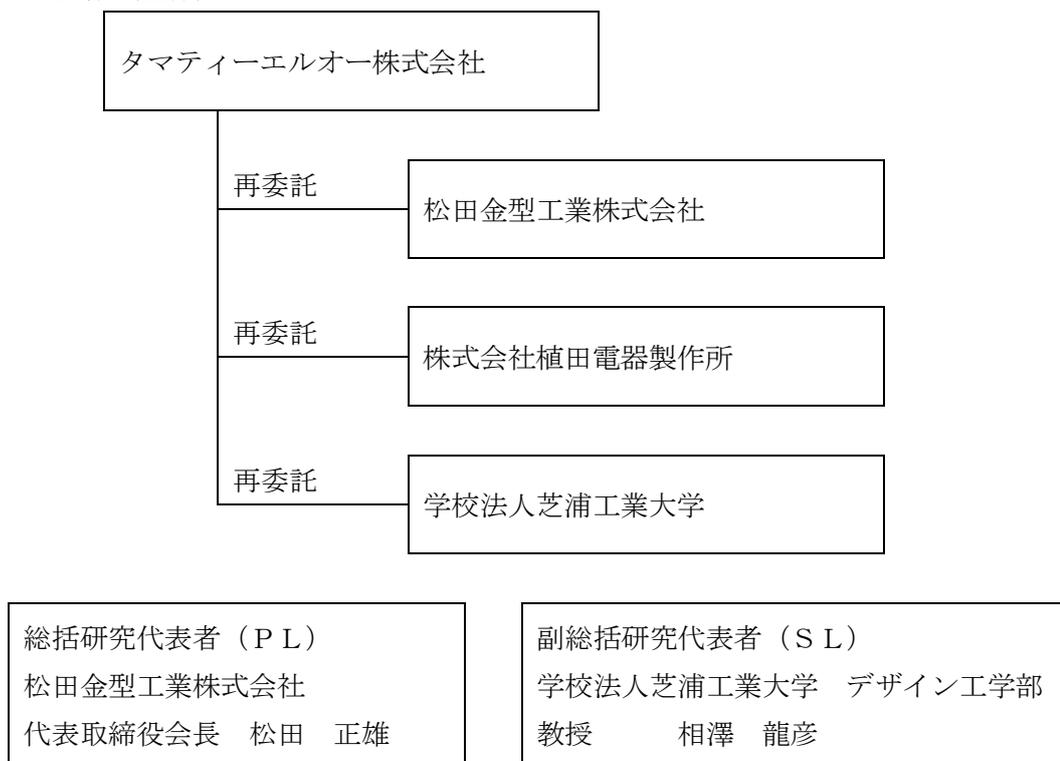
- ①エアータオル仕様を満たす外径φ100-115の最適形状ファンを設計する。流体力学シミュレータとファン特性試験結果の比較検討を行い、最終的には、一体成形可能なファン形状の中で、送風機の性能を最大限に向上させるファン形状を研究し、一体成形を可能とする高性能ファンの構造を選定し、設計を確定する。
- ②外径φ100-115のターボファン用のアクチュエータ内蔵金型を設計、試作し、射出成形性、形状寸法精度などを検討する。

【PC冷却用ターボファンの開発】

- ③ PC内スポットクーラーとしての用途が考えられる外径φ10小型ターボファン用モールド成形装置を製作し、プラスチック一体成形ファンを試作し、その特性を評価する。
- ④ PC内スポットクーラー用外径φ10のターボファンについて、生分解性ポリマーでの一体成形を行い、成形性、ファン特性を評価する。

1-2 研究体制

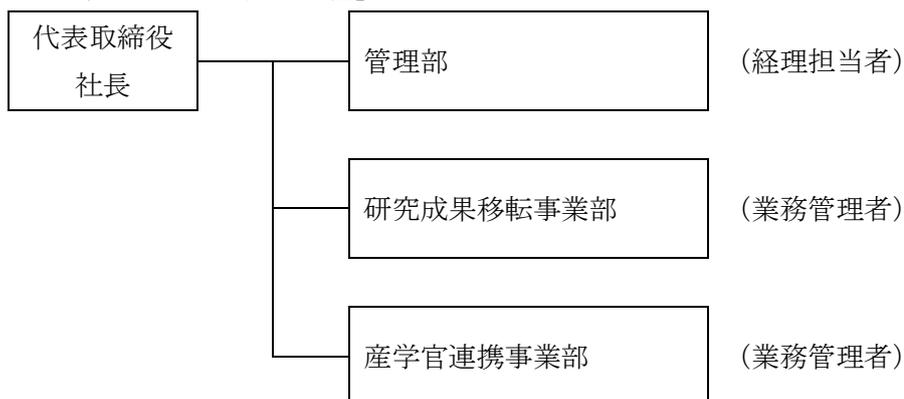
1) 研究組織 (全体)

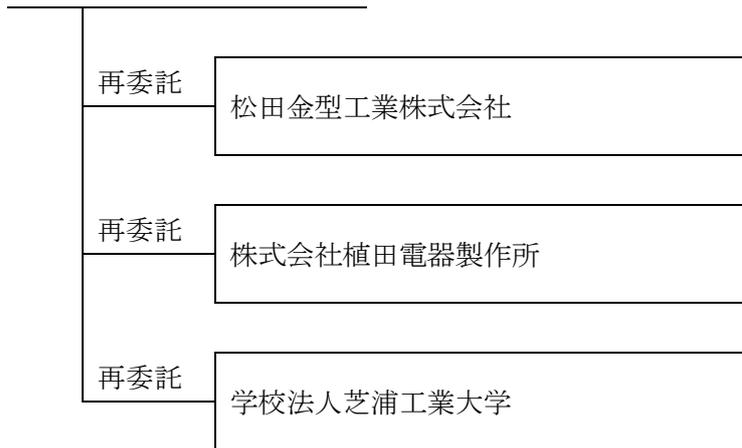


2) 管理体制

①事業管理機関

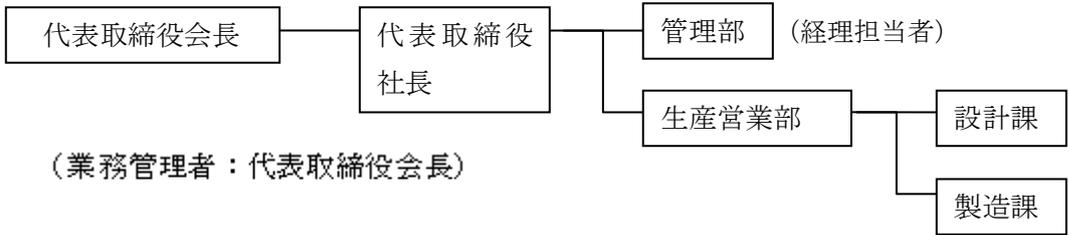
[タマティーエルオー株式会社]



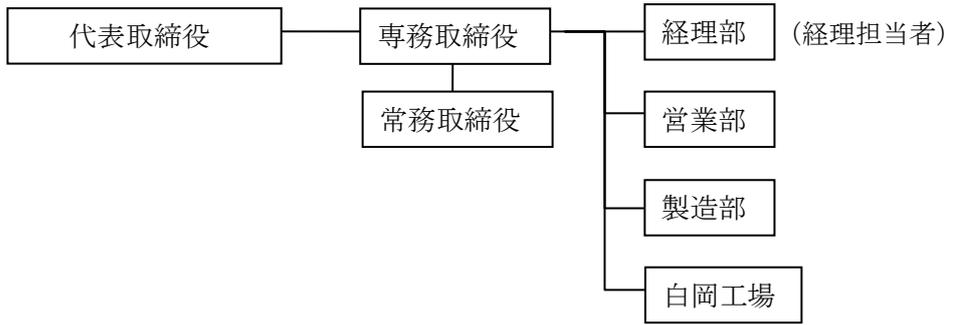


② 再委託先

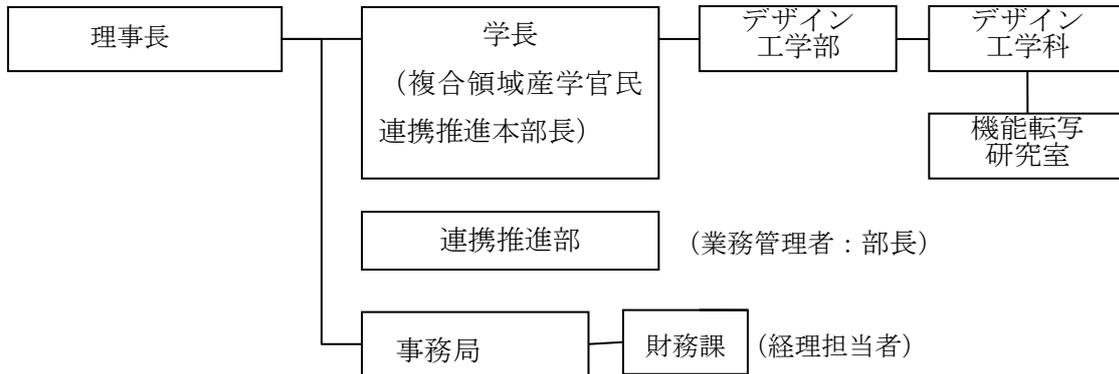
[松田金型工業株式会社]



[株式会社植田電器工業] (業務管理者：専務取締役)



[芝浦工業大学]



3) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 タマティールオー株式会社

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
山県 通昭	産学連携事業部長	⑤
松永 義則	研究成果移転事業部長	⑤

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
松永 義則	研究成果移転事業部長	①

【再委託先】

(研究員)

松田金型工業所

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
松田 正雄	代表取締役	① ～④
松田 雄一	生産営業部 専務取締役	① ②④
下川 秀行	生産営業部設計課員	① ④
奥根 真次郎	生産営業部製造課員	②
山田 利夫	生産営業部製造課員	②
清水 博	生産営業部製造課員	②
長瀬 由季	生産営業部製造課員	③

株式会社植田電器工業所

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
植田 和男	常務取締役	②
植田 好司	専務取締役	②
榊谷 武彦	製造部 部員	②
小関 啓太	製造部 部員	②
田代 裕規	製造部 部員	④

芝浦工業大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
相澤 龍彦	教授	① ～④

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
松田 正雄	松田金型工業株式会社 代表取締役会長	PL
相澤 龍彦	学校法人芝浦工業大学 デザイン工学部 教授	SL
松田 雄一	松田金型工業株式会社 代表取締役社長	
植田 和男	株式会社植田電器製作所 常務取締役	
植田 好司	株式会社植田電器製作所 専務取締役	
芦江 伸之	TOTO株式会社	アドバイザー
土元 裕一	ホンダエンジニアリング株式会社	アドバイザー（謝金、旅費）
小澤 烈	KISCO株式会社	アドバイザー
福岡 新五郎	地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター	アドバイザー（旅費）
井深 丹	タマティーエルオー株式会社 代表取締役社長	
山県 通昭	タマティーエルオー株式会社 産学官連携事業部長	
松永 義則	タマティーエルオー株式会社 研究成果移転事業部長	事務局委

1-3 成果概要

【エアータオル用省エネ一体成形ファンの開発】

① 小型エアータオル用省エネターボファン設計

ターゲットを市販されているエアータオル用φ110ファンに変更し最適設計を実施した。松田金型工業の3DCADで作成した実モデルをターボファン+空気層のモデルに導入部、排出部まで含めたモデルを加えて解析する「流体力学シミュレータ」の基礎を構築した。計算は低回転数での翼内流動解析まで行った。

解析式に基づくPR法によるターボファン設計システムの構築を行なった。光造形試作ファンと、回転数一定、流量一定条件下でL18直交実験を行うことによりに無限枚数翼理論に基づくパラメータ設計が可能であることを見出した。φ110ファンについて、パラメータ設計を使った最適設計を実施した。

② アクチュエータ内蔵金型の開発及び成形評価

昨年度の課題を解決し、昨年度開発した第3次試作金型を改善した。その結果、安定な連続成形が可能になった。

本年度のターゲットを現在市販されている高性能エアータオル用φ110ファンとして、第4次アクチュエータ内蔵金型を開発した。開発では、3次までの金型開発のノウハウとファン最適設計の整合を取った。成型可能なファン形状に対応する第4次金型設計を実施し、試作金型を完成した。成形性評価を実施し、良品の取れる条件を確立した。連続成形試験は、サイクルタイム45秒（目標30秒）で実施中に45ショットで不具合が発生、量産性の確認が未達となった。

第4次試作ファンは、アルミファンよりもJISB8330準拠特性評価で40W、模擬試験装置で20W消費電力が減少した。

現在対策金型を試作したが、連続成形性評価は未完である。今後の補間研究として実施予定である。

【PC冷却用ターボファンの開発】

③ 冷却用小型ターボファンの最適構造化

ABD樹脂を用いて、小型直翼ターボファンの成形実験を行った。前年度において課題となったプロセス時間の短縮化による最適化を中心に検討を行った。

小型ターボファンの土台径・羽高さにかんしては、標準偏差が0.03mm以下を達成でき、本成形プロセスの精度・信頼性が確認した。

⑤ 環境対応型プラスチック材を用いたターボファン開発

環境対応型プラスチック材としてホモタイプ・ポリ乳酸を用い、同材の高温変形特性を考慮した負荷・温度プログラムを開発して、直翼ターボファンを作成した。詳細な解析により、製品中に光学顕微鏡で検出できるポア・欠陥がないことがわかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

タマティーエルオー株式会社

研究成果移転事業部長 松永義則

TEL : 042-570-7240

FAX : 042-570-7241

E-mail : matsunaga@tama-tlo.com

第2章 小型エアータオル用省エネターボファン設計

2-1 はじめに

小型エアータオル用ターボファンの形状寸法、特に翼部位ならびに上板・下板の形状の最適化は、ターボファン性能特性を決定する上できわめて重要である。この設計方法には、二通りの方法がある。1つは、ターボファンの CAD モデルを入力として、関連する空気層部位をすべて解析モデル化し、ターボファンの回転に伴う空気流動を 3 次元シミュレーションで求め、その時の圧力分布ならびに流速分布から、ターボファン特性を求める方法である。後述するように、この方法には、有限要素解析シミュレータを用い、ターボファン形状から解析モデルを作成する作業が必要となる。

他の1つは、有限翼列理論あるいは無限翼列理論からの解析式をベースに、対象とするターボファン形状のラピッド・プロトタイプ・モデル (RP) を作成し、その実験データからターボファン特性を設計する方法である。この方法は、ターボファン形状が決定している場合に、RP で比較的安価にモデルを作成し、実際の特性データを求めることができる。ただし、未定あるいはアイデア段階のターボファン形状を検討することには不向きである。

本章では、この2つの方法に関して、前者はモデル構築作業を中心に説明、後者では実際の設計方法について述べる。

2-2 本年度の目標および結果

本年度は、ターボファン設計法としての、流体力学シミュレータを開発するとともに、解析式に基づく RP 法によるターボファン特性設計の2つを行い、エアータオル用ターボファンの設計ベースを構築することを目標とした。

その結果、流体力学シミュレータに関しては、

- 【1】ターボファンの CAD データからのターボファン+空気層のモデル化
- 【2】ターボファン導入部ならび排出部を含むエアータオル評価
- 【3】低回転数での翼内流動解析

を中心に開発を行い、流体力学シミュレータの基礎を構築した。今後、高回転数までのターボファンシミュレーションを、補完研究として実施、後述する RP 設計結果を再評価するとともに、種々のターボファンの事前設計解析を進めていく。

解析式に基づく RP モデリングによる設計では、設計因子の吟味に加え、省電力・省ノイズに向けたターボファンパラメータの評価を行い、ターボファン形状の最適化範囲を明確にした。

2-3 「流体力学シミュレータ」の開発

ここでは、3次元ターボファンシミュレータの開発手順を述べる。第1は、エアータオル

用ターボファンCADモデル（松田金型工業作成）から解析モデル作成である。図 2-1 に示すように、ターボファン翼構造内の空気層をそれぞれソリッドモデルとして定義し、それぞれ別個に有限要素モデルへ変換する。翼部分は剛体とし（補完研究では、この部分を弾性体とし、3次元流れとの連成についても考察する）、空気は壁に沿って流れる境界条件を設定した。またターボファンの上板、下板も同様とした。

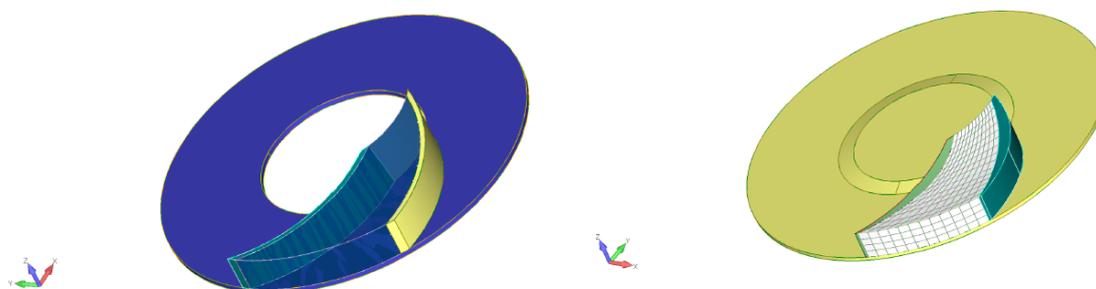


図 2-1： CAD データからの流体力学シミュレータモデルの作成手順。翼間の空気層を1つのソリッドモデルとして表現し、それを自動要素分割機能（一部、本解析用に修正、機能を追加）にてモデルを構築する。

次に、同様にして、ターボファン全体のモデル化を図 2-2 に示すように行った。

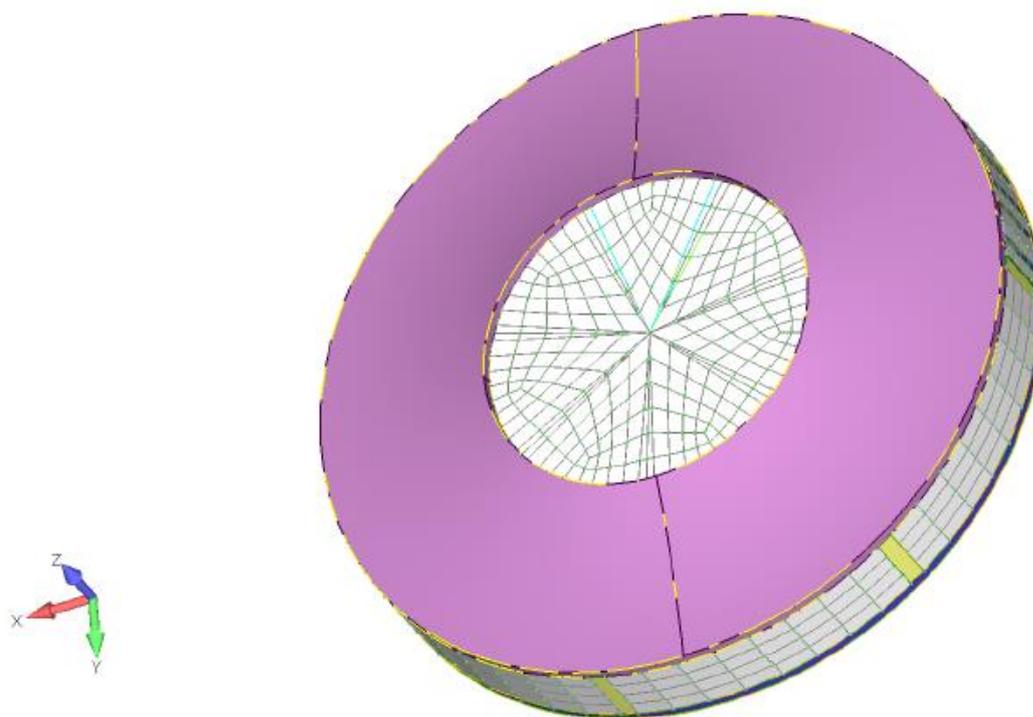


図 2-2： ターボファンの一体モデル。回転送付を CAD 形状モデルならびに解析モデル

について行うことで、ターボファン翼部分の空気層を表現するモデルを構築した。

最後にターボファンモデルの入口、出口のモデルを作成した。まず、ターボファンモデルへの空気導入部のモデルを補助形状モデルとともに、図 2-3 に示す。

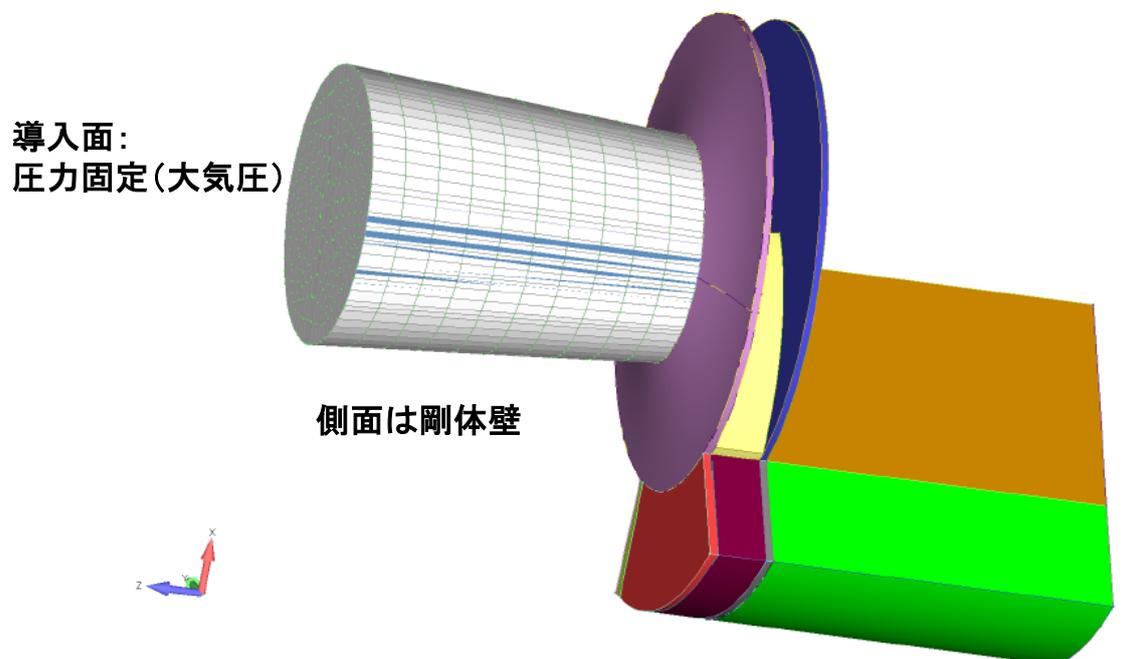


図 2-3：ターボファンモデルへの空気導入部のモデル。

一方、ターボファンから導出される空気層流を伝達する出口部分のモデル化を行った。結果を図 2-4 に示す。

ターボファンモデルの
下部に設置

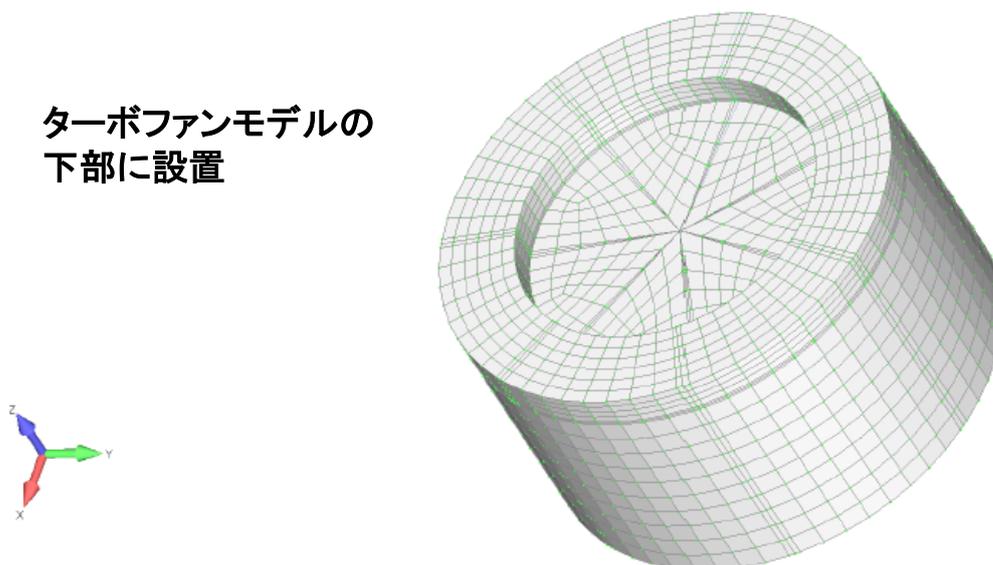


図 2-4： ターボファンから導出される空気層流を伝達する出口部分のモデル。
上記の各部位より、エアータオルにおけるターボファンによる空気層の流動全体を評価する。まず形状モデルと解析モデルを図 2-5 に示す。

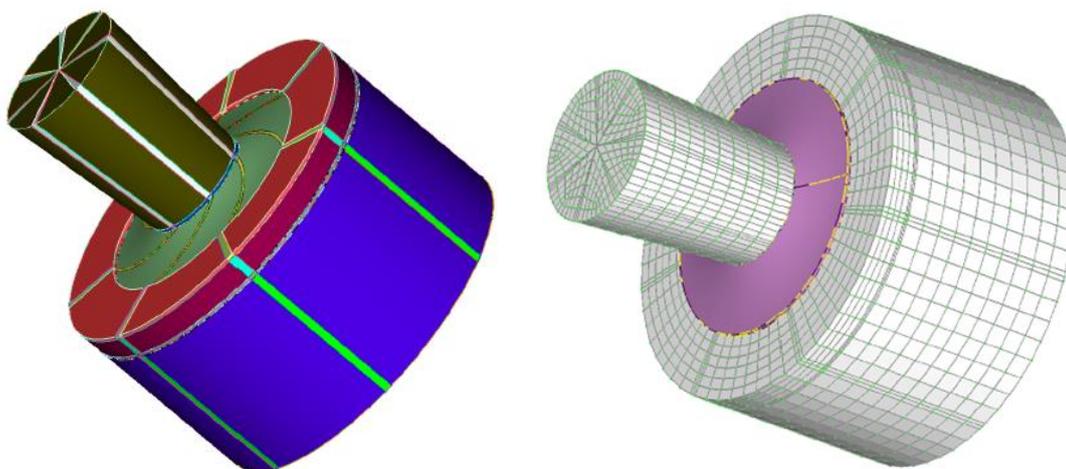


図 2-5： エアータオルにおけるターボファンによる空気層の流動全体

2-4 「流体力学シミュレータ」の評価

構築した流体力学シミュレータの評価では、以下の5つを条件として解析作業を行い、特に翼内の流体解析を行った。まず5つの条件を示す。

- 【1】 中心のターボファン吸引部位の空気層は、ターボファンとともに回転しないと、フルモデルでは、入口導入空気層と連結する。境界条件は設定せず、回転するターボファン・翼部位の空気層と入口導入空気層と連結するのみ。
- 【2】 ターボファン内部の空気層は、翼とともに回転するため、慣性力・コリオリ力の加速度を受ける。
- 【3】 ターボファン内部の空気層は、前述したように、中心部の固定空気層と連結するとともに、出口では、出口出力空気層（これも固定）と連結する。
- 【4】 境界条件は、剛体壁以外には、ターボファンモデルでは指定しない。
- 【5】 初期条件は、流れなし、圧力ゼロとする。

特に、ターボファン・翼回転に伴って流動する空気層と固定している空気層との連結チェックは重要で、詳細を以下に示す。またコリオリ力・遠心力ともに、加速度力としてシステムのユーザー関数として指定するため、回転数に応じて加速度力の再計算が必要となる。またターボファンの構造面に関しては、それらすべてを剛体壁指定にしないと計算が安定しないこともわかった。なお、解析では、圧力バウンダリーを入口導入面で指定し、

計算を行った。

全体の3次元モデルは、3万要素あまりの6面体要素群となる。全体形状を複数のソリッドモデルとして表現しているため、解析モデルもソリッドモデルとほぼ一対一対応で作成することになり、全体の解析モデルの健全性を評価するには、各要素のエッジの連結・面接続を検証しなければならない。

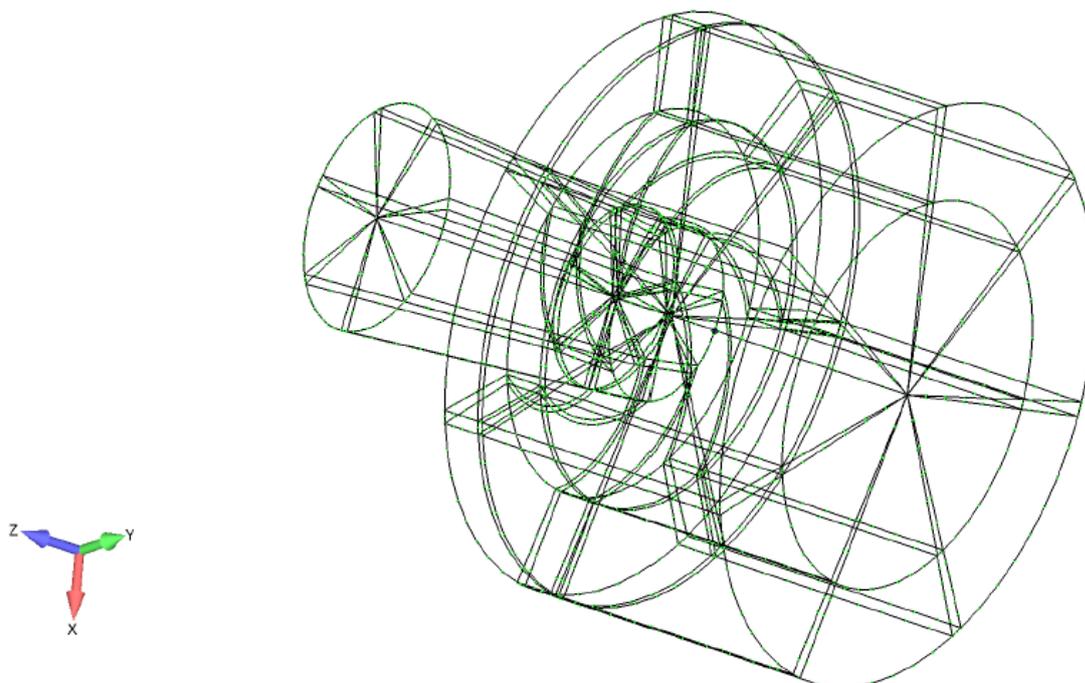


図 2-6： 各要素のエッジ接続性を評価した全体モデルのエッジ像。

エッジ接続チェックでは、システムの機能を追加し、自動で接続チェックできるように設定した。図 2-6 にチェック作業後のパターンを示す。すべての中間エッジは、必ず同一エッジを共有する 6 面体要素があるため、もしすべてのエッジですべての 6 面体要素モデルが正しく連結されていれば、残ったエッジは外径線のみとなる。図 2-6 に示されたエッジはすべてソリッドモデルの外径線のみであり、このことから解析モデルの健全性は保証された。6 面体要素の面の接続に関しては、目視によるチェックで、再チェックを行い、全体モデルを作成した。

次に、回転数を変化させながら、全体モデルの解析を以下の条件で行った。

- 1) 3次元非圧縮定常流解析 (6面体要素)
- 2) 空気流入部：圧力バウンダリー (大気圧) 相当。
- 3) 空気排出部：ここは圧力・流速の境界条件はなし。ただし、解析の安定性のため、流速の絶対値が過大にならないように制御。

- 4) 翼部に接する空気層壁：前述しているように、ユーザー関数を開発し、慣性力とコリオリ力を加速度力として付与。ただし、回転数は定数として与えているため、回転数ごとにシミュレーションを行う必要あり。
- 5) 空気層：流速が 100 m/s 以下クラスであると想定し、物性値を規定し。
- 6) アルゴリズム：定常流解析であるため、反復計算を行い、誤差評価・エネルギー評価を行って、安定化解を求めている。

回転数が 3000 r p m までは安定に計算ができ、それ以上の回転数の指定では、全体モデルの要素数に依存して不安定性が生じ、出力データ表示にも異常が見られたので、以下では、3000 r p m での翼部位の流速分布、圧力分布を求めた。結果を図 2-7 に示す。

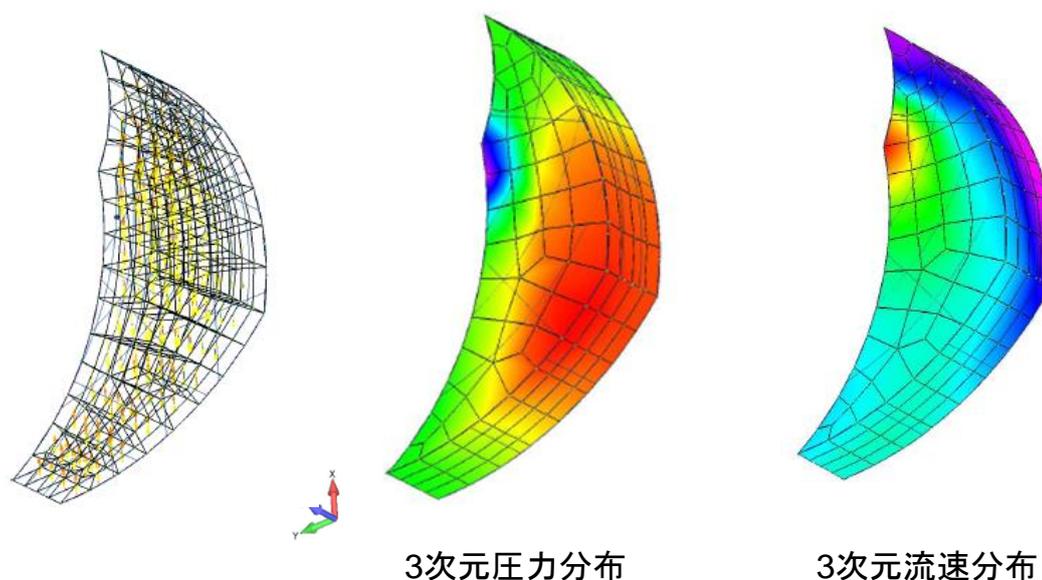


図 2-7： 回転数 3000 r p m での翼部の圧力・流速分布。

これより、ターボファン内部の空気層は、翼により圧力をうけることで、翼出口から高速で空気を吹き出すことがわかる。

ターボファンの 3 次元流体力学シミュレータの開発に、かなりの労力を払い、ターボファン形状データから設計までの一貫システムを目指したが、最終解析部分は未完となった。解析データの作成に関しては、CAD 形状データからの作成手順は確立できた。2014 年度からの補完研究の中で、学生と一緒にシミュレーション解析を完成させ、実験データの比較をする。特に、翼列とその形状に力点をおき、シミュレーション結果の蓄積をしていく予定である。

2-5 RPモデルによる最適省エネターボファン設計

平成24年度には、光造形試作ファンを使った評価が設計に使えること実証した。さらにファン形状に関するパラメータ設計に実験計画法のL8直行表を適用したが、ターボファン理論との整合性が見られなかった。

当初、高性能エアータオルに使う予定のファンをターゲットにする方向で検討を開始した。しかし、現評価装置のモーター仕様では、パワー不足で上記の特性は実現できないことがわかった。

ターゲットとして「現在製造中の高性能エアータオルに使われているファン」を目標とすることとした。

ターボファンを設計するにあたり、流体力学的な理論と、強度設計に必要な理論がある。これらをまとめると、図2-8のようになる。理論から、設計に必要な形状パラメータを図の右下にリストアップした。出口半径、回転角速度は、目標ファンで予め与えられている。設計では、それ以外の赤字で示したパラメータについて検討する必要がある。

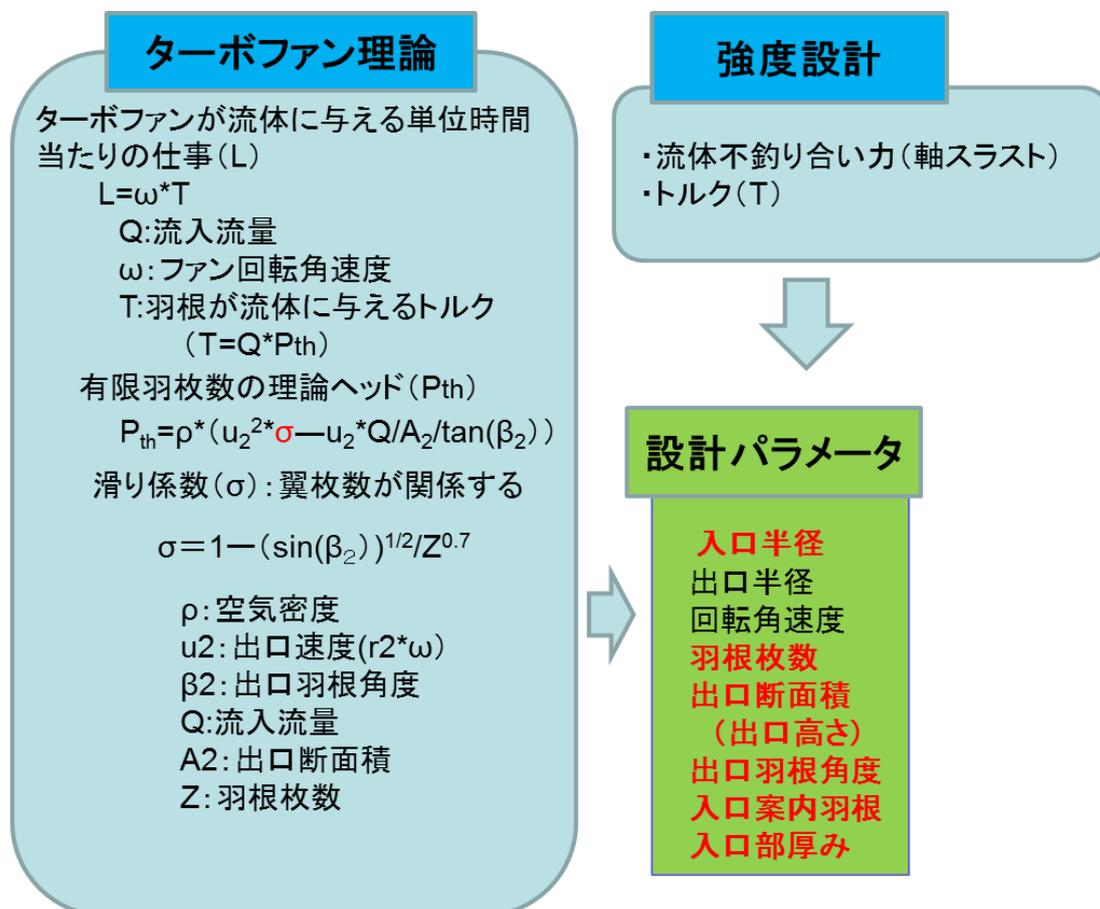


図2-8 ターボファン設計に必要な理論

昨年度適用したL8では下記の問題点があった。

① 各パラメータは2水準で最適値を求めるには水準が少ない。
② 交互作用を無視して割り付けるため、バラつきが大きくなり、検定精度が落ちる。
そこで、今年度は、最近設計分野で使用されている L18 を使って設計を試みた。L18 は下記の特徴を持つ。

- ① 2水準を1因子と3水準7因子までを調査可能である。
- ② 頼性の向上：L18 では、1つの因子の水準の効果の調査に18個のサンプルで評価している。逐一実験で各因子に18個のサンプルを作成した場合は144回の実験が必要でそれに匹敵する。
- ③ 交互作用の調査：できるだけ主効果の交互作用が小さい方が良いが、最終的には水準は固定するので交互作用の大きさ求めてもあまり役には立たない。交互作用の有無は確認実験で確認する。
- ④ 安定性の評価：さらに重要なのは、1つの因子を調査する時に、それ以外の因子の水準を変えていること。直交表で得られた要因効果図は、他の因子の水準が多少変わった場合でも成立する平均的な効果を示す。自ずと安定して良い条件が選ばれ易くなる。多くの因子が入った直交実験は外側にノイズを取らなくても良いとも言われる。
- ⑤ ノイズとの交互作用：さらに安定性評価のために、積極的に外側にノイズを割り付けているのは、制御因子とノイズ因子との交互作用を調査し、ノイズに強い条件を選択するためである。制御因子とノイズとの交互作用が無いと改善できない。

ターボファン設計因子としては、図2-8をもとに下記を選んだ。

- ・ 入口半径
- ・ 出口断面積（出口高さ）
- ・ 入口部厚み（入口高さ）
- ・ 羽根枚数
- ・ 出口羽根角度
- ・ 入口案内羽根の有無

下記を L18 に割り付けた。割り付けた結果を次ページ表3-1に示す。各 No に対応するファン形状を 3D-CAD にて設計し、18個の形状の異なるファンを光造形にて試作した。光造形により異なる18種類のファンを1週間で作成できた。図2-8に18種類の試作ファンの写真を示す。

表 2-1 設計パラメータの L18 への割付

No.	入口案内翼	入口径	出口角度	翼枚数	出口高さ	入口高さ
1	あり	40	25	7	8	12
2	あり	40	35	9	10	13.5
3	あり	40	45	11	12	15
4	あり	50	25	9	12	15
5	あり	50	35	11	8	12
6	あり	50	45	7	10	13.5
7	あり	60	25	11	10	15
8	あり	60	35	7	12	12
9	あり	60	45	9	8	13.5
10	なし	40	25	9	10	12
11	なし	40	35	11	12	13.5
12	なし	40	45	7	8	15
13	なし	50	25	7	12	13.5
14	なし	50	35	9	8	15
15	なし	50	45	11	10	12
16	なし	60	25	11	8	13.5
17	なし	60	35	7	10	15
18	なし	60	45	9	12	12



図 2-9 試作光造形ファン

2-6 RPモデルによる省エネターボファンの評価

表2-1の割付に基づき、18個の光造形試作ファンについて特性試験を行なった。試験は、JIS準拠流量試験装置を使用した。

(1) 一定静圧条件による評価

実験は、静圧を制御し、一定静圧下で、流量、電力、回転数、騒音を測定した。測定結果の1例として、流量—静圧特性を図2-10に示す。

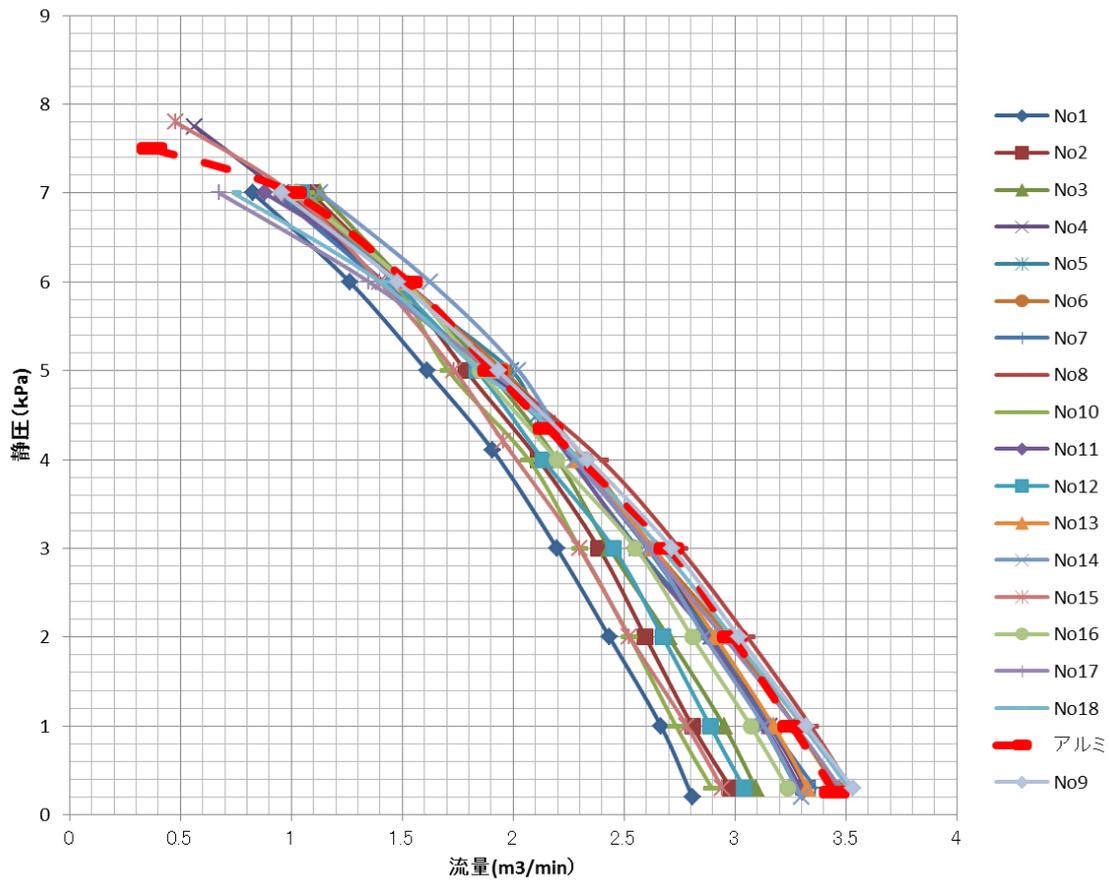


図2-10 静圧を制御したL18試験結果（流量—静圧特性）

これらの結果を、静圧1kPa（流量大）、6kPa（流量小）について、実験計画法L18にもとづき、要因効果を調べた。

調査したパラメータの効果を表2-2に示す。

表 2-2 要因効果の分析

	圧力(kPa)	案内翼	内径	出口角度	枚数	出口高さ	入口高さ	日変化	誤差
流量	1	-	** (54%)	△(5%)	-	△(10%)	△(4%)	-	28%
	6	-	△(0%)	△(7%)	△(0%)	△(1%)	△(13%)	34%	45%
電力	1	-	-	** (65%)	-	** (19%)	-	1%	16%
	6	-	△(1%)	** (50%)	-	*(8%)	△(3%)	*(18%)	20%
騒音	1	-	*(19%)	*(27%)	-	5%	*(15%)	-	34%
	6	-	-	*(27%)	-	-	-	△(7%)	66%
回転数	1	-	△(0%)	** (59%)	△(1%)	** (32%)	△(2%)	-	7%
	6	△(1%)	** (13%)	** (54%)	△(3%)	** (19%)	*(3%)	-	6%

** : 信頼性水準 1 %、* : 信頼性水準 5 %

△ : 誤差に繰り込まなかった要因

%は寄与率

出口角度が、電力、騒音、回転数のいずれにも寄与している。しかし、6kPa（流量小）では、過半が誤差であり、十分な精度の実験になっていない。

(2) 一定回転数、一定流量条件による評価

これまで、JIS のファン特性試験法に基づき、モーター特性を含む総合的な試験を行ってきた。この場合、モータートルク特性の温度依存性などのばらつきが含まれて解析されるため、ばらつきが大きくなる傾向があった。

大学などの研究機関では、モーター回転数を一定に制御し、モーターのトルク特性を除いて特性試験を行っている。今回、手で回転数と差圧を一定にするよう調整し、形状パラメータだけの影響を取り出し、その影響を調査した。実験は、図 2-1 1 に示すように回転数をモーター電圧によりコントロールし、バルブでオリフィス差圧をコントロールして行なった。

流量 : 差圧 60Pa ± 1 Pa

回転数 : 回転数 19100 ± 50rpm



測定システム
 デジタル回転計: HT-5500 (小野測器)
 電力計: SHW3A (システムアートウエア)
 差圧計: WO81 (山本製作所)
 圧力計: WO81 (山本製作所)
 騒音計: NL-42 (リオン)
 ファンから1mの距離に設置
 FFT: SA-78 (リオン)
 サーマルプリンター: DPU-414

図 2-1 1 回転数を制御する流量試験装置

実験方法の変更により、表 2-3 に示すように、静圧、電力の誤差が 10%以下となり、1%信頼性水準での安定した解析が可能になった。

表 2-3 解析方法による実験の安定性の違い

低流量域(1.5m³/min付近)での要因解析

測定日	流量		静圧	電力		
	8/19,8/20,8/22	9/12	9/14	8/19,8/20,8/22	9/12	9/14
条件	静圧一定		回転数、流量一定	静圧一定		回転数、流量一定
案内翼	-	-	-	-	-	** (4%)
入口径	-	** (55%)	** (16%)	-	** (17%)	** (9%)
出口角度	△ (7%)	△ (8%)	** (52%)	** (50%)	** (52%)	** (54%)
翼枚数	-	-	-	-	-	* (2%)
出口高さ	-	-	** (12%)	** (8%)	* (12%)	** (25%)
入口高さ	△ (13%)	-	** (9%)	-	-	* (2%)
日変化	34%	-	-	18%	-	-
誤差	45%	33%	9%	20%	15%	4%

上記をもとに各パラメータの影響を表 2-4 にまとめた。

本年度の L18 直交実験と H24 年度の実験結果 (L8 直交実験) は傾向の違う結果が得られた。下記の 2 点から本年度の L18 実験の結果は、十分設計に使えると判断した。

- ① 誤差寄与度が小さいことから、信頼性のある実験が行われている
- ② 本年度の L18 直交実験は、無限翼枚数の理論とは、傾向が一致している。

理論と実験結果から、出口角度が最も寄与の大きいパラメータで、次に出口高さとなる。これは、理論ヘッドに陽に現れているパラメータ (β_2 : 出口角度、 A_2 (出口断面積)) である。他のパラメータは圧力損失を通して影響している。

$$P_{th} = \rho * (u_2^2 * \sigma - u_2 * Q / A_2 / \tan(\beta_2))$$

さらに本解析から小口径のファンでは、有限翼枚数による補正 (σ) は、必要ないことがわかった。

表 2-4 各パラメータの影響

	案内翼の有無	翼枚数	入口径	入口高さ	出口角度	出口高さ
電力	<p>あり なし 案内翼</p>	<p>翼枚数</p>	<p>入口径(mm)</p>	<p>入口高さ(mm)</p>	<p>出口角度(°)</p>	<p>出口高さ(mm)</p>
静圧	影響なし	影響なし	<p>入口径(mm)</p>	<p>入口高さ(mm)</p>	<p>出口角度(°)</p>	<p>出口高さ(mm)</p>
騒音	影響なし	影響なし	影響なし	影響なし	<p>出口角度(°)</p>	影響なし

これらの結果から、高性能エアータオル用ターボファンの最適ファンの設計は、表 2-4 に基づいて実施する。

上記の結果から、低消費電力化と高静圧は同時に満足しない。そこで、消費電力を小さくすることを主目的し、出口角度を小さく、出口高さを低くするように設計した。

出口角度：25°

出口高さ：8mm

第3章 アクチュエータ金型の開発およびターボファン成形評価

3-1 はじめに

今年度は、高性能エアータオル仕様を満たすターボファン用アクチュエータ内蔵金型を開発する。

具体的には、第3次試作金型の課題として残っている量産性改善を実施する。次に高性能エアータオル最適ターボファン形状を実現するアクチュエータ内蔵金型を開発する。特に、昨年度で得られた結果を考慮し、アクチュエータの動作と成形プロセスとの同期化をさらに進め、ファン成形時、時系列的に安定した動作が可能な金型の設計を行う。

3-2 本年度の目標及び結果

本年度は、最終的に高性能エアータオル仕様を満たす外径 $\phi 100-115$ の最適形状ファン設計に基づく量産性の良いターボファン用アクチュエータ内蔵金型を開発することを目標とした。

開発を下記のスケジュールで進め、高性能エアータオル用ガラス入りナイロンターボファンの成形に成功した。

- 【1】 第3次試作金型改善による量産性改善
- 【2】 第4次試作金型の設計・試作
- 【3】 第4次試作金型によるターボファン試作
- 【4】 第4次試作ターボファンの特性評価

特性評価の結果、従来のアルミターボファンファンよりも JIS 準拠の特性評価で40W、エアータオル模擬試験装置で20W消費電力の小さいターボファンが実現した。

量産性の最終確認ができなかったため、今後の補間研究の課題とする。

3-3 第3次アクチュエータ内蔵金型の開発（昨年度の継続）

（1） 第3次試作金型の改善

昨年度2月から3月に実施された2次試作金型によるターボファン成形性試験において以下のような不具合が生じた。

2/27：成形機に取り付けて動作確認中に動きスライドの動きが悪くなる。金型破損の可能性があり、試験中止。

3/7：一部、スライド機構を改善して、第2回成形試験実施したが、前回より改善せず。試験中止。

3/18：スライド機構の見直しして、第3回成形試験実施。2ショットまでは動作し、1個製品が取れた。3ショット時、スライド不具合でアングュラーピンが破損し、試験を中止した。

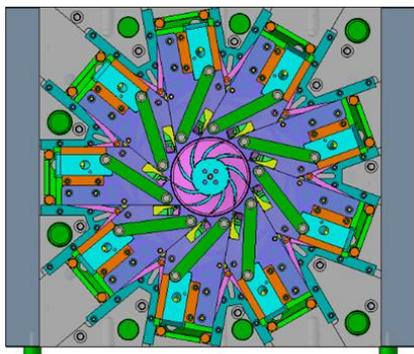
不具合点を見直した結果、以下のように原因を推定した。

図（Ⅱ）はスライドが開いている状況であるがスライドの動作が良すぎて戻る動きが有

り、上部の三か所のスライドが下向きに移動したため、アンギュラーピンの位置がズレて、スライド破損を引き起こした。

24年度2号型（ファンφ107）

I 閉じた状態



II スライドが開いた状態

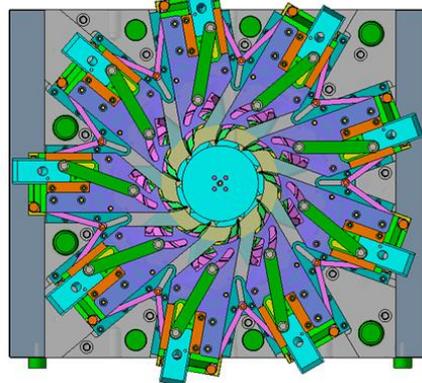


図3-1 第3次試作金型の動作

スライドの動作が良すぎて戻る動きを防止するため、図3-2に示すようにスライド内にストッパーを追加して、スライドが外側へ開くような移動したとき定位置に確実に止まるように対策を施した。

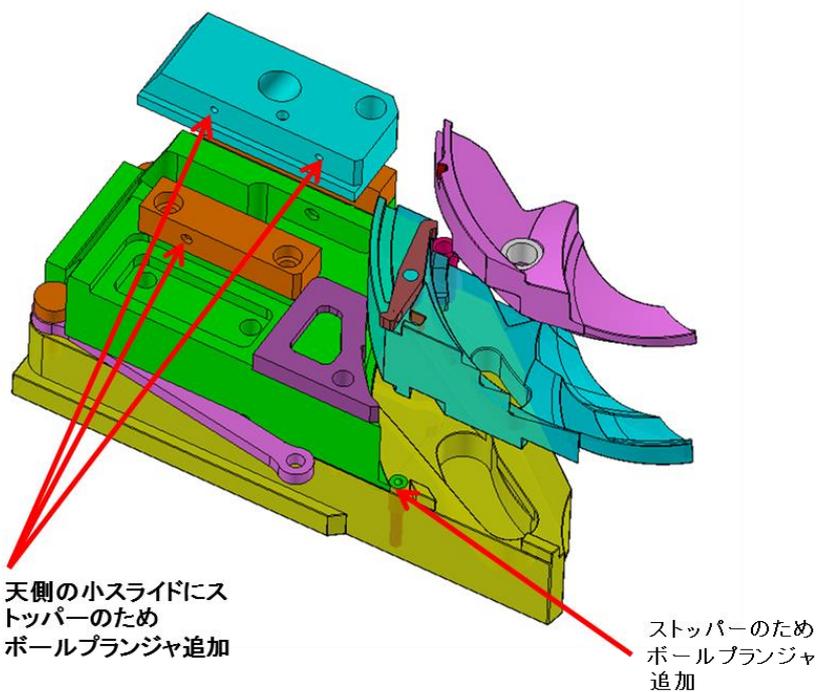


図3-2 スライドの改善点

(2) 昨年度改善金型の成形性評価：連続試験

昨年度の未達成となっていた連続試験を実施した。

実施日：9月10日

実施場所：植田電器製作所 白岡工場

図3-3に試験の状況を示す。サイクルタイム45秒で連続170ショットを実施したが、金型に問題なく、成形ができた。



(a) 成形試験機



(b) 金型が開いている状態



(c) 成形品

図3-3 成形試験実施状況

連続成形時に、材料温度の影響で徐々にスライド部分の温度が上昇する。100ショット目と170ショット時のスライド部分の温度上昇を次ページの図3-4に示す。

試験では、金型温度を45°Cに設定し、プラスチック温度を80°Cに設定した。温度80°Cの領域がスライド先端部分で拡大しているのがわかる。先端部分の温度上昇は、バリ発生の要因、熱膨張によるスライド機構動作不良の原因となるため、抑える必要がある。サイクルタイムを45秒から短縮すると金型冷却時間が短くなり、上記不具合を起こす可能性が上がる。先端部分の冷却は、本金型の課題である。

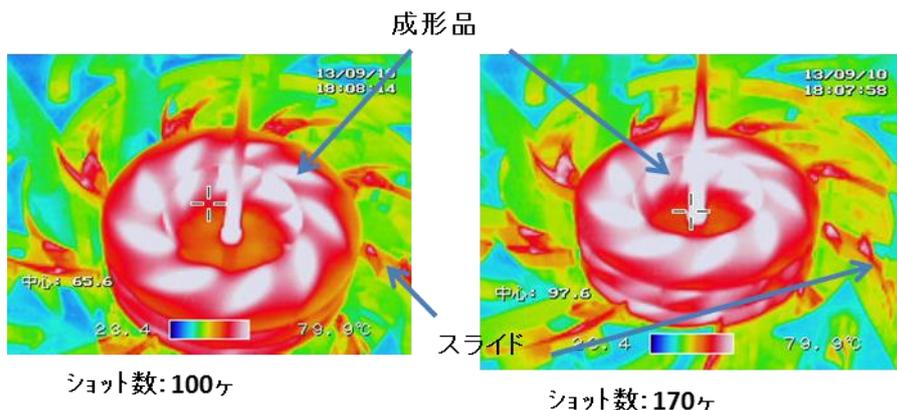


図 3-4 成形時の温度分布

3-4 第4次アクチュエータ内蔵金型の開発

(1) 第4次試作ファン形状の決定

平成25年度の目標は、高性能エアータオル用のターボファンのプラスチック化およびそのアクチュエータ金型の開発である。当初、提示されたターボファン仕様は、まだ実用化されておらず、比較対象品となるアルミターボファンがない。そこで、現在市販されている下記製品に使われているターボファンを目標に設定した。

目標ファン：高性能エアータオル用ターボファン

外径：110mm

出口角度：38度

出口高さ：10mm

入口径：40mm

入口高さ：15mm

光造形品と使用したパラメータ設計から、消費電力を抑えるために下記条件要求された。

- ・ 出口角度：出口角度が小さいほど消費電力は減少する
- ・ 出口高さ：出口高さが低いほど消費電力は減少する
- ・ 翼枚数：理論上は、翼枚数が多いほど電力が大きくなるが、実験からはその傾向が見られなかった。

対象アルミターボファンは翼枚数が11枚である。金型設計からは、コスト、構造両面で翼枚数すなわちスライド本数は少ないほうが良い。今回の試作ファンは2-6の結果にもとづき翼枚数9枚とした。

出口角度は、理論および実験から出口角度が小さいほうが消費電力は少なくなる。一方、スライドの設計からは、出口角度が小さくなるとスライドが干渉する。ファン外径110mmの条件で3次元CADのシミュレーションを繰り返し行いスライド機構が設計可

能な最小出口角度と出口高さを求めた。次ページ図3-5に3DCADを使ったシミュレーションの概要を示す。

図

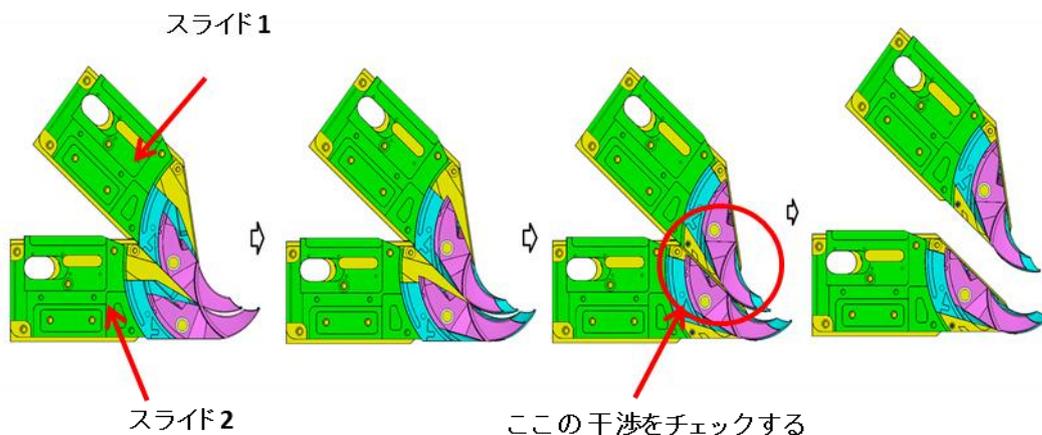


図3-5 3DCADによる干渉シミュレーション

その結果、試作ファンの設計値を下記のように定めた。

外径：110mm

翼枚数：9枚

出口角度：30度

出口高さ：8.5mm

入口径：55mm

入口高さ：12mm

(2) 第4次試作金型の設計

ファン形状がφ107からφ110に大きくなり、さらに出口角度が38°から30°に減少したためにスライド距離が増加した。その結果、金型の大きさを10%大きくしなければならず、昨年度の金型から下記のようにベースサイズを変更した。

金型ベースサイズ：500×500→550×550に変更

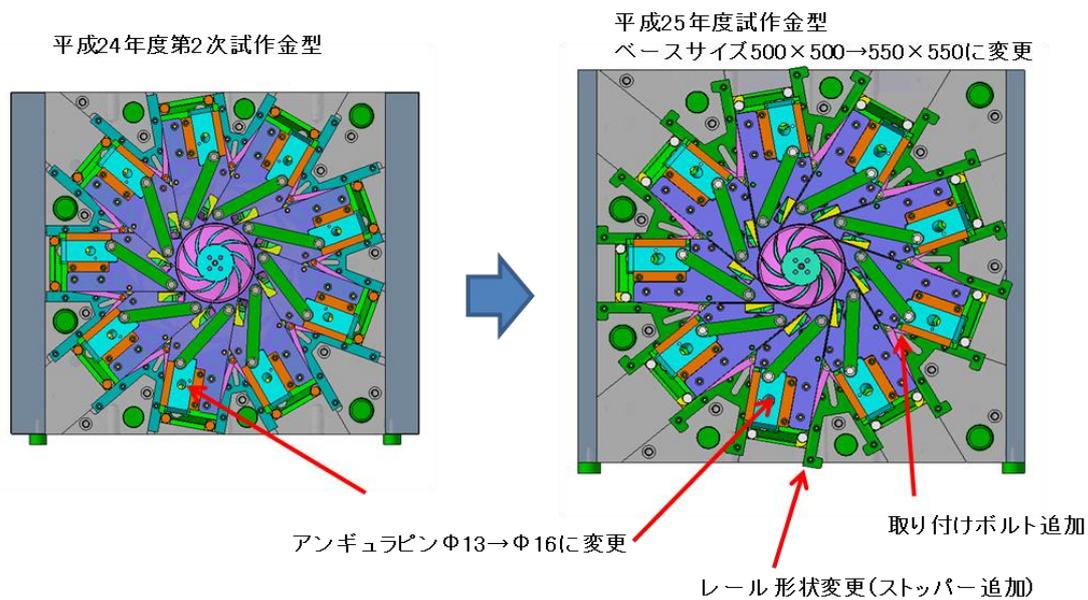
さらに、量産性を改善するために、以下の項目の改良を実施した。

- ① スライドの円運動が相互に悪影響が出ない設定で金型の剛性を高める設計をした。
- ② ライド内のラチェットの作動の改善（耐久性の改良）
- ③ アクチュエータの仕掛け作動の耐久性を高めた（生産性向上）
- ④ ファン製品の性能向上のための要望を金型設計に受け入れる。

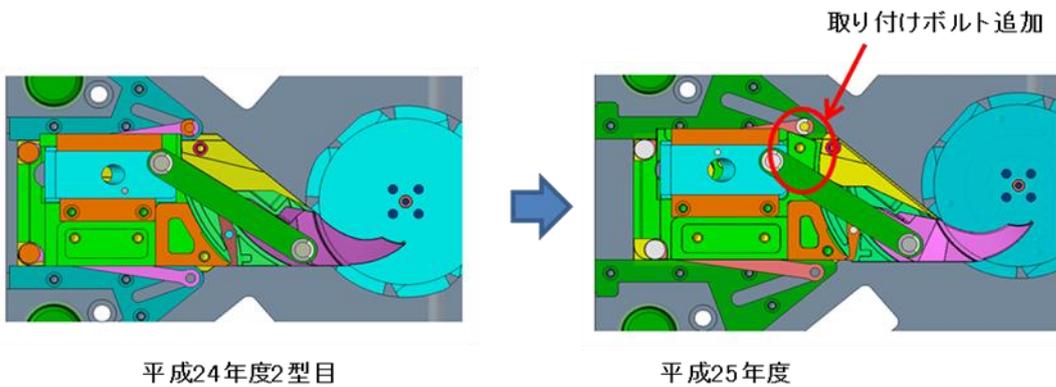
スライド先端の温度上昇については、成形装置側（植田電器製作所）で対策をとるので、

本試作金型で、積極的な対策は行わないこととした。

試作金型への改善点を図3-6に示す。



(a) 金型全体概略図



(b) スライド機構概略図

図3-6 試作金型の概略

(3) 第4次試作金型の製造

次ページ図3-7に部品製造および組み付け時の状況を示す。スライド加工には平成23年度導入のメカトロ金型作成用高精度切削装置を使用している。



メカトロ金型作成用高精度切削装置



スライドのマシニング加工



切削終了のスライドパーツ



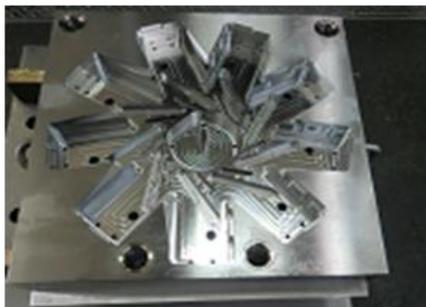
スライド



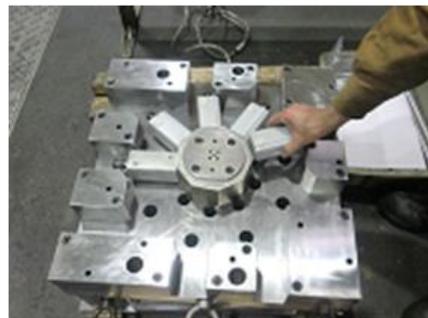
スライド 上部の仕上げ加工



可動側プレート



固定側プレート



油圧シリンダ組込作業

図 3-7 試作金型の製造状況

(4) 第4次試作金型の成形性評価

実施日：

2月3日：成形条件設定

実施場所：植田電器製作所 白岡工場

昨年度までの試作金型は、成形条件設定時に不具合が見られ、金型の修正を実施していた。本年度の成形条件設定は、問題なく実施され、本年度の試作金型の完成度の高さを示した。試作金型の外観と得られた試作ファンを図3-8に示す。



(a) 試作金型の外観

(b) スライドが開いた状態

(c) 試作ファン

図3-8 試作金型と試作ファン

2月4日：連続試験

連続成形時のスライド先端部温度上昇を防止するため取り出し機に冷却機構を追加した。冷却エア吹付けは型が開いている状態で実施されるので、冷却効果を十分出すには、型が開いている時間を長くする必要がある。

図3-9に冷却エア吹付装置付き取り出し機の写真を示す。型が開いた状態で6箇所からエアを吹き出して冷却する構造である。



図3-9 冷却エア吹き出し装置付き取り出し機

ファン成形の1サイクルを図3-10に示す。

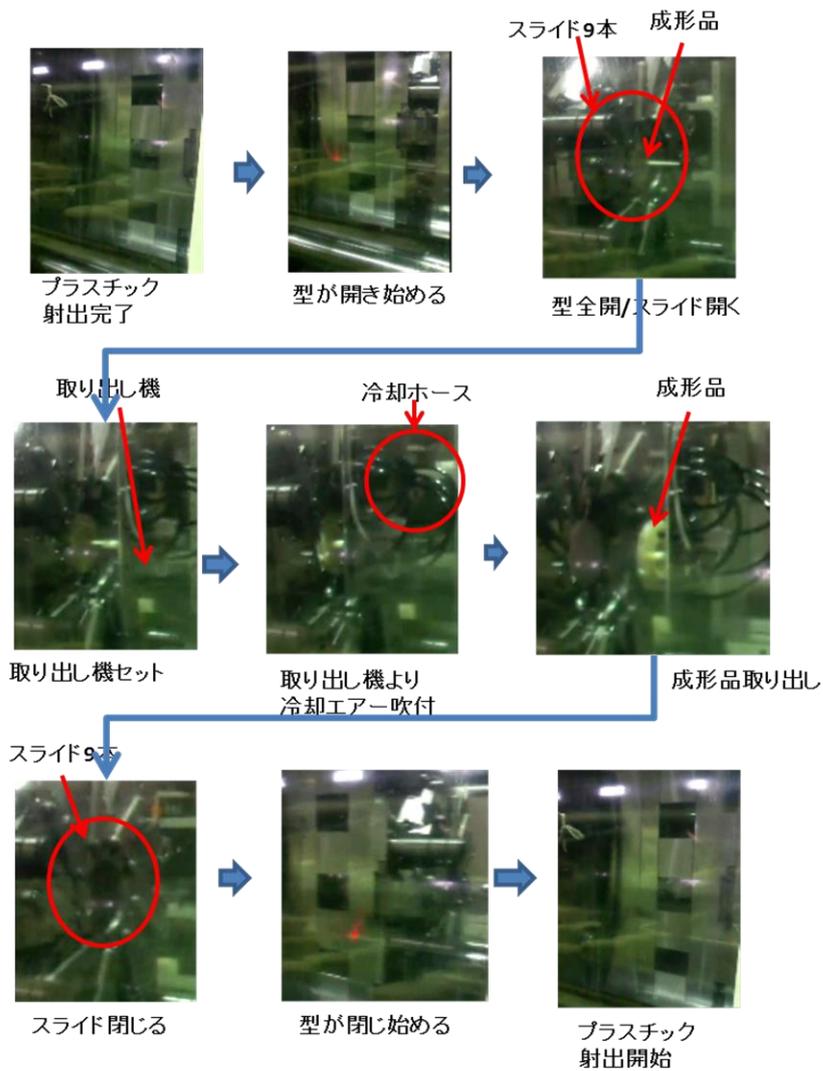


図 3-10 成形 1 サイクル

連続成形も、動き出しは問題なかったが、45 サイクル付近で、型開閉時にアンギュラーピンが破損したため、試験を中断した。

(5) 試作金型の改良

ピン破損の原因として、下記の 2 点が考えられる。

- ① スライド機構の組立調整時に締め付けが強すぎ、動作が固くなっていた
- ② スライド先端の冷却不足

上記対策のため、次ページ図 3-11 に示すように試作金型側にエア吹き出し口を設け冷却する構造を改造した。

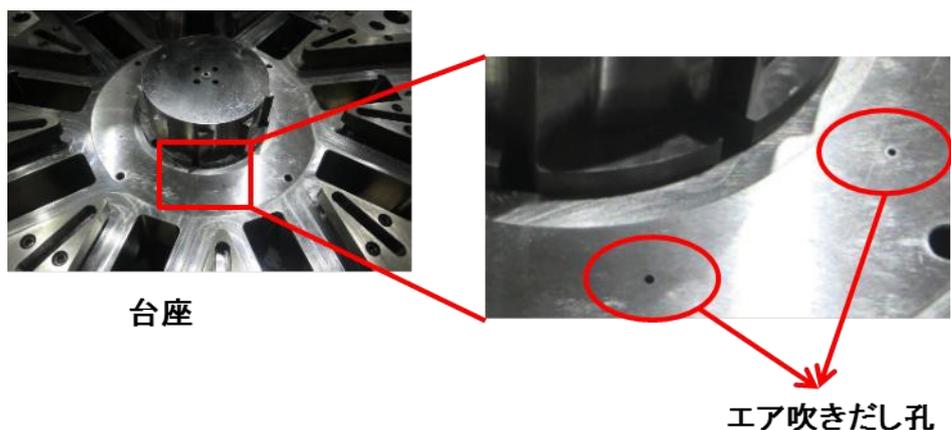


図 3-11 エア吹き出し孔付試作金型

さらに、ファンモータとしての評価に耐えうるファンカバーをプラスチックで製作するための金型を設計、試作した。



図 3-12 ファンカバー用試作金型

3-5 第4次試作ターボファンの特性評価

(1) JIS B 8330 に準拠した特性評価方法

一般にターボファンの特性は、以下の項目によって測定される。

送風機全圧、送風機静圧、空気量、回転速度、軸動力、騒音
これら物理量の測定は、下記の JIS により規定されている。

JIS B 8330 送風機の試験及び検査方法

JIS B 8340 ターボ形ブロア・圧縮機の試験および検査方法

JIS B 8330 は、圧力比約 1.3 未満の遠心送風機、軸流送風機、斜流送風機などを、常温・常圧の空気を用いて工場で行う試験方法で、この圧力比を超える場合、JIS B 8340 を適用する。今回の試験は、小型ターボファンを扱っている。想定される最大静圧は 10 kPa 以下で、圧力比は 1.1 以下のため、以下の特性試験は JIS B 8330 に準拠した。

① 試験設備

実際に使用した試験設備の概要を図3-13の写真に示す。空気流は、左から右に流れる。直管部で空気量測定用オリフィスを通じた空気は、空気槽に入り、風速を減じた状態から試作ターボファンに吸い込まれる。ターボファンで圧力を増した空気は、モーター部から外部に吐き出される。

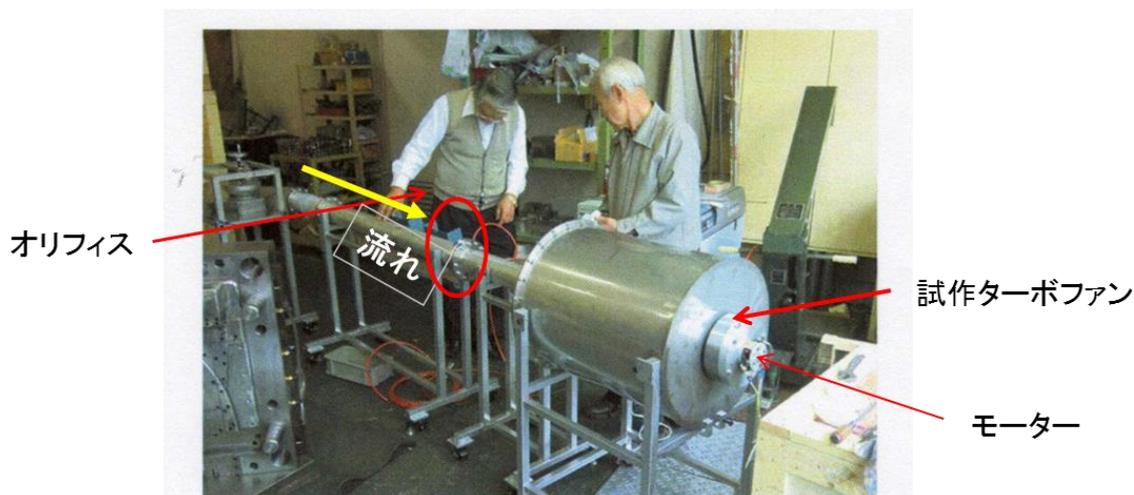


図3-13 送風機特性試験設備の全体写真

② 測定システムと測定機器

測定システムを図3-14に示す。

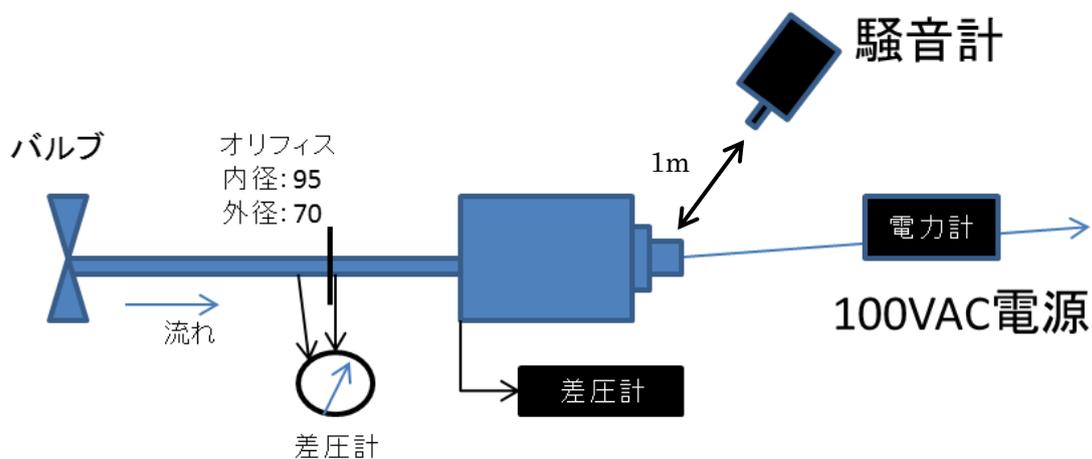


図3-14 ターボファン特性の測定システム

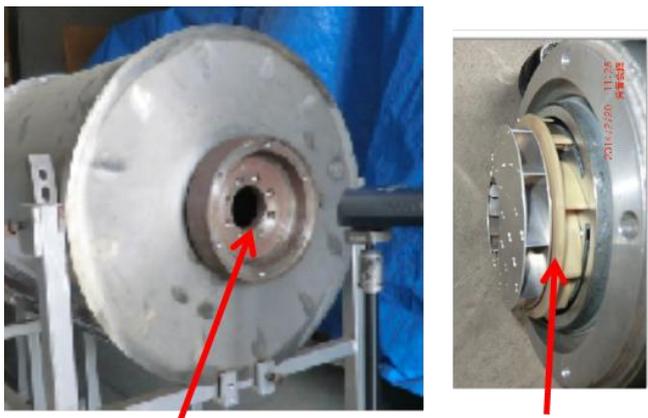
ファン回転時に発生するファン入ロー出口間の圧力上昇（静圧）は空気槽と外部大気間の圧力差で測定する。測定にはレンタル品のMT210を使用した。

ファンの風量は上流のオリフィスで測定した。オリフィス差圧は、既設置のマノスターゲージを使用し、オリフィスの差圧から流量への変換は、JIS B8330 に従った。

測定装置の諸元を以下に示す。

- ・オリフィス：外径φ95、内径φ70
- ・オリフィス差圧計：(株)山本電機製作所マノスターゲージ【微差圧計】
WO81PR300DV レンジ 300Pa、1.5%FS
- ・空気槽差圧計：(株)山本電機製作所 マノスターゲージ【微差圧計】
WO81PRN10E レンジ 10kPa、1.5%FS
- ・騒音計：リオン(株) 普通騒音計 NL-27 JISC1509-1 クラス 2
- ・回転計：(株)小野測器 接触・非接触ハンディタコメータ HT5500
6.0rpm～99,999rpm
- ・電力計：ワットアワーメータ SHW3A
MAX1500W

ファンモータとファンの装置への取り付け部を図 3-15 に示す。高精度ファンモータのカバーを外しファンの付け替えのできる取り付け部を試験装置のタンク側に固定されたファンカバー部に固定する。ファン形状が変わってもファンカバー部は一定のため、2次流の効果が、実際のファンモータとは異なる。ファン形状を変えながら試験するのでカバーの効果については、本評価装置では、無視する。



ファンカバーに相当

ファン取り付け部

図 3-15 試作ファンの試験装置への取り付け部

(2) JISB8330 に準拠した第 4 次試作ターボファン特性評価結果

ファン駆動用モーターとファン取り付け部は高性能エアータオルに使われているモータ(定格 750W) を使用した。

試作プラスチックファンとアルミファンを比較した結果を以下に示す。試作プラスチックは 4 個のファンの平均値を示し、アルミファンは 4 回の繰り返しの平均値を示している。

試作プラスチックファンはナイロンとして表示、アルミファンはアルミと表示した。

① 静圧—流量特性

高流量側では、アルミファンと試作ファンの静圧はほぼ同じであるが、2m³/min 付近から乖離し、アルミファンに比較して試作ファンの静圧が小さくなる。これは、光造形的设计と一致している。

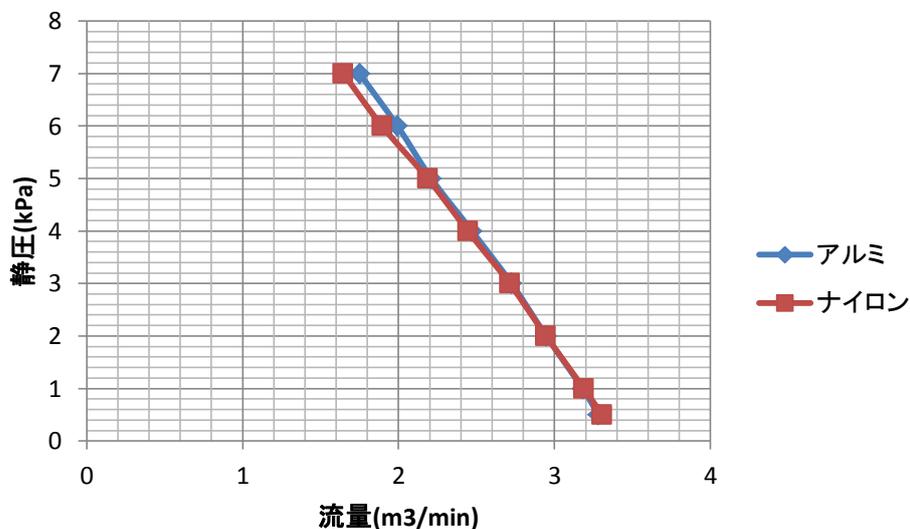


図 3-16 静圧—流量特性

② 電力—流量特性

測定領域全体で、試作プラスチックファンの消費電力はアルミファンより約 40w 小さい。これは、出口角度が 38 度から 30 度になった影響である。

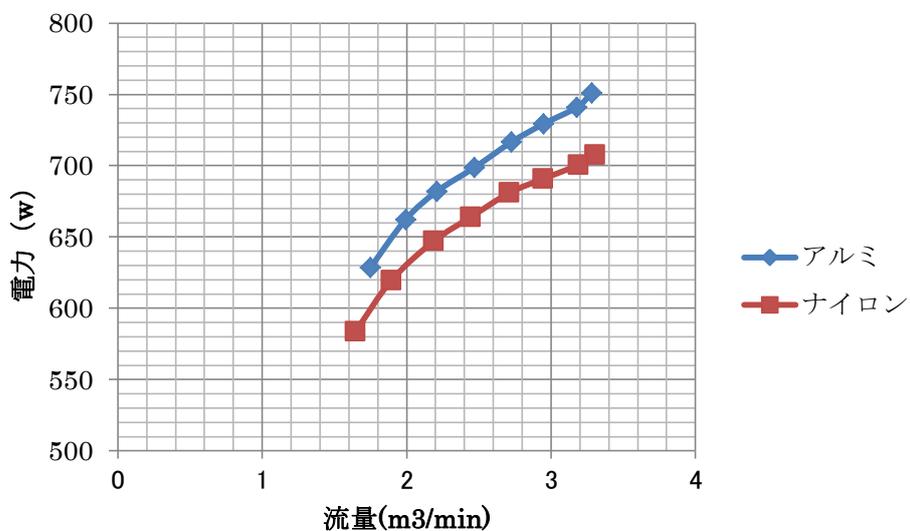


図 3-17 電力—流量特性

③ 回転数—流量特性

測定領域全体でナイロンファンは回転数が大きい。これは、電力が小さいという特性と

一致している。

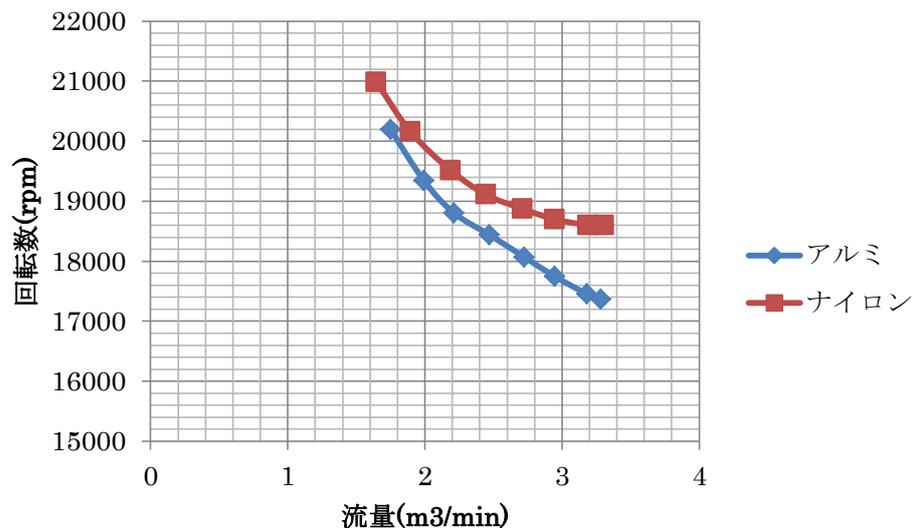


図 3-18 回転数—流量特性

④ 騒音—流量特性

ナイロンが 2, 2.5m³/min 付近で極大を持っている。これは、回転数に比例する騒音である。一般的にサージングが生じる流量域での流れ不安定とファンのマスバランスのくずれにより引き起こされる騒音である。この騒音は、4 個のファンで常に出るわけでないことから、モーター軸への取り付け状況などにも関係していると考えられる。

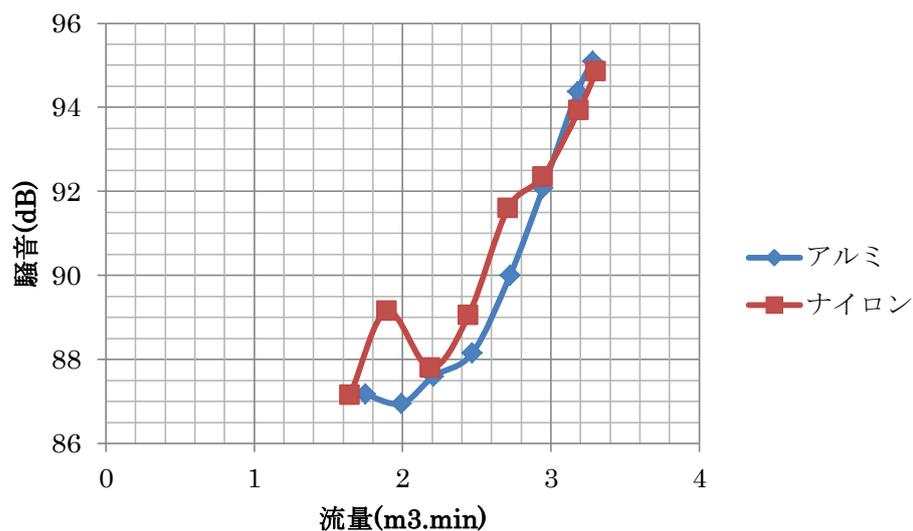


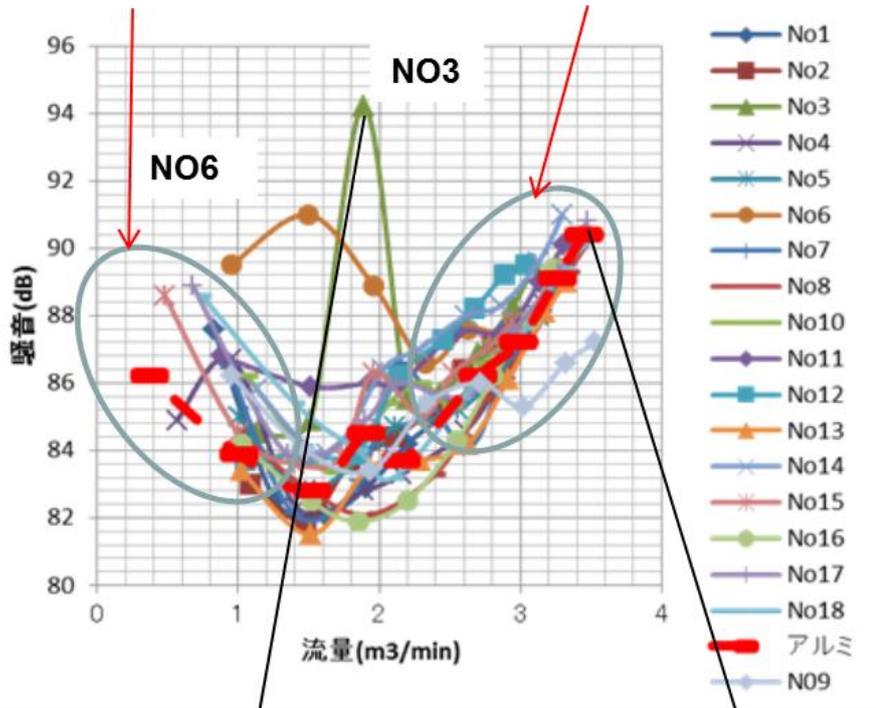
図 3-14 騒音—流量特性

騒音のスペクトル解析の結果をもとに上記の騒音の原因を解析した。その概要を図 3-15 に示す。

流量と騒音の関係

ファン出口流れ騒音

モータ出口吹き出し騒音



騒音のスペクトル解析

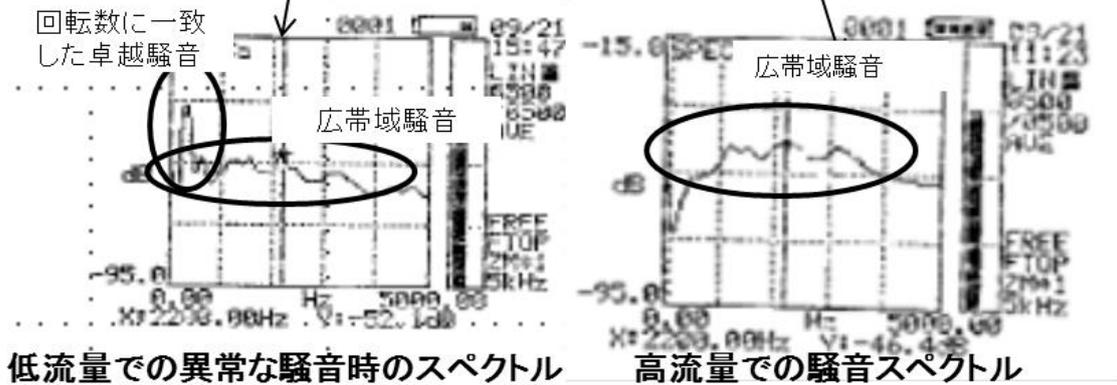


図 3-15 騒音の原因推定

- ① 騒音の流量による増加は、広帯域騒音の増加による。騒音源は、ファンよりもモーター出口と思われる。
- ② 低流量域で騒音が流量の減少とともに増加する。原因は、ファン回転数が増加し、ファン出口流れが増加するための内部騒音による。

③ 低流量域での騒音の異常な増加は顕著な卓越音による

- ・回転数に一致した騒音
- ・回転数 x 翼枚数の振動数の騒音

原因は、低流量域の流れが不安定性とファンのマスアンバランスが干渉する点であるが、対策は、今後の課題である。

⑤ 回転数—電力特性

回転数と電力の特性は、モーターの特性を示している。従って、アルミファンとナイロンファンでは一致するはずである。実際に、両者の重なった領域ではほぼ一致した特製が得られている。

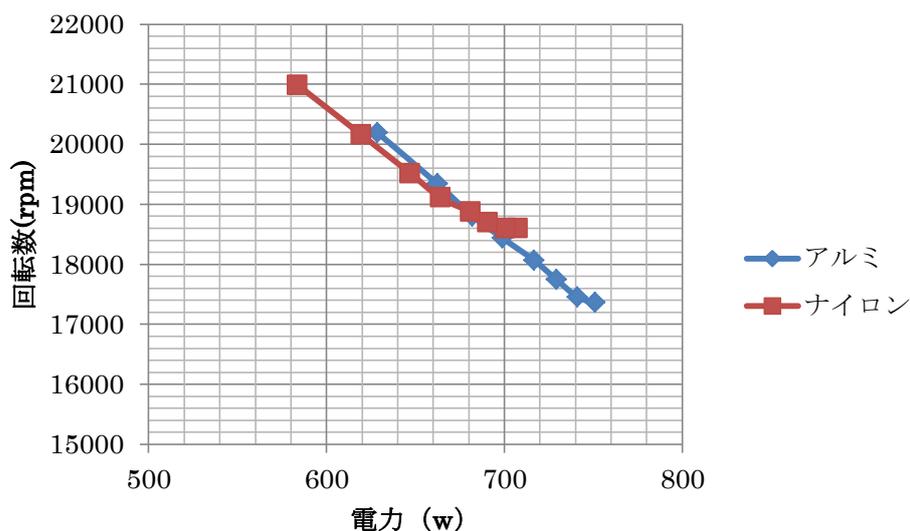


図 3-16 回転数—電力特性

(3) エアータオル模擬装置によるファン特性評価方法の概要

試験設備の項で述べたように、JIS 準拠風量試験装置は、固定形状のファンカバーでの評価となり、それぞれのファンに合ったファンカバーとなっていない。また、ファン上流側で絞るのでファン入口は不圧になり、下流側の吹き出し口に静圧がかかった状態の評価になっていない。

エアータオルの吹き出し口から 100m/s の風が吹き出す構造のエアータオルも模した模擬特性評価装置を試作した。図 3-17、18 に装置の概要と写真を示す。

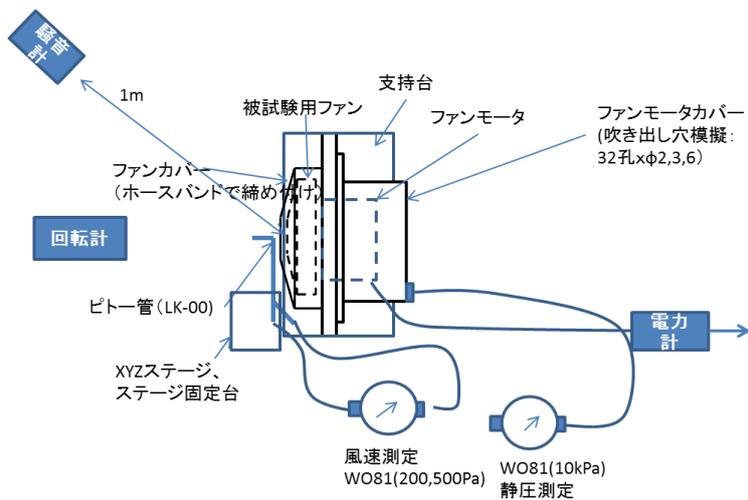


図 3-17 エアータオル模擬特性評価装置



図 3-18 エアータオル模擬装置の写真

ファンカバーは試作ファンの形状とモーターに合った形状が必要である。個別に3D-CADで設計し、光造形によって試作した。ファンカバーの写真を図3-19に示す。

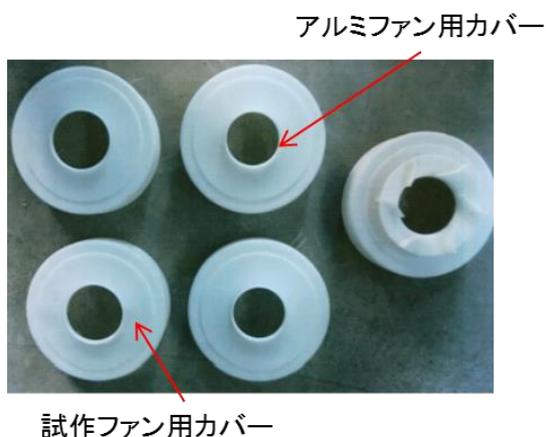


図3-19 試作ファンカバー

(4) エアータオル模擬装置による第4次試作ターボファン特性評価結果

ガラス入りナイロン試作ファンとアルミファンの電力-静圧特性の評価結果を図3-20に示す。緑の▲が試作ファン、紫の●がアルミファンの結果である。各々のファンには、ファン形状に合ったカバーを取り付けている。参考に、JIS 準拠試験装置の結果を載せた。

エアータオルの吹き出し口を模擬しているのでいずれのファンでも7kPa以上の静圧が発生している。電力は、試作ファンの方が20w小さい。同時に静圧も0.2kPa試作ファンが小さい。

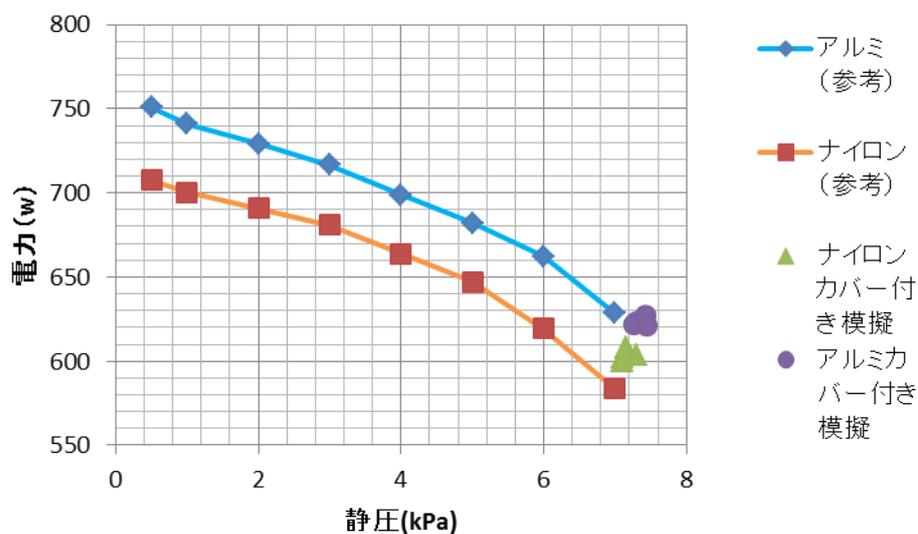


図3-20 電力-静圧特性

結果は、設計の狙いと一致している。ただし、電力は JIS 準拠特性試験装置では 40w の差であったので、ファンモータとしての評価では、1/2 に減少しているが、傾向は同じである。

騒音—静圧特性を図 3-21 に示す。騒音は、87-88dB でアルミファンと試作ファンに差はなかった。また、JIS 準拠流量特性試験機での結果ともほぼ一致している。

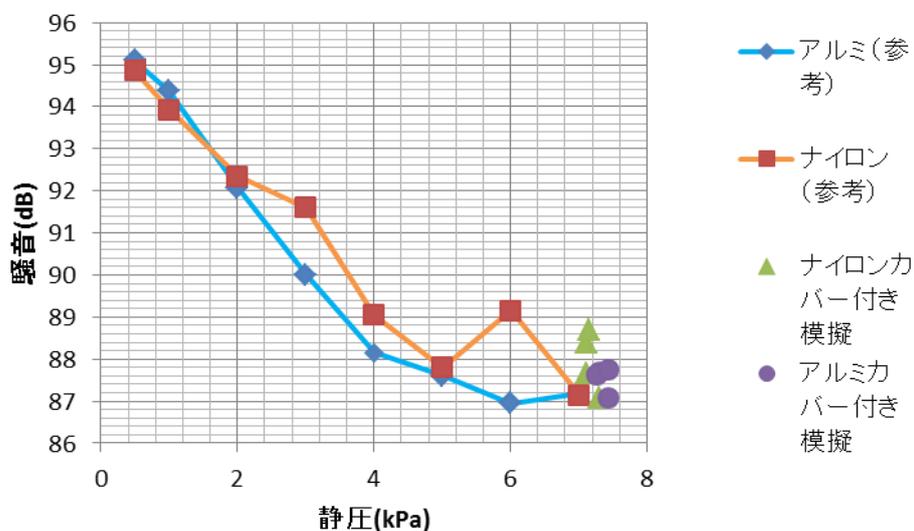


図 3-21 騒音—静圧特性

電力—回転数特性は、モーターに固有の特性である。従って、ファンの違いの影響を受けないはずである。図 3-20 に回転数—電力特性を示す。実際に JIS 準拠流量特性試験機でとった参考値のカーブ上に試作ファン、アルミファンは乗っている。

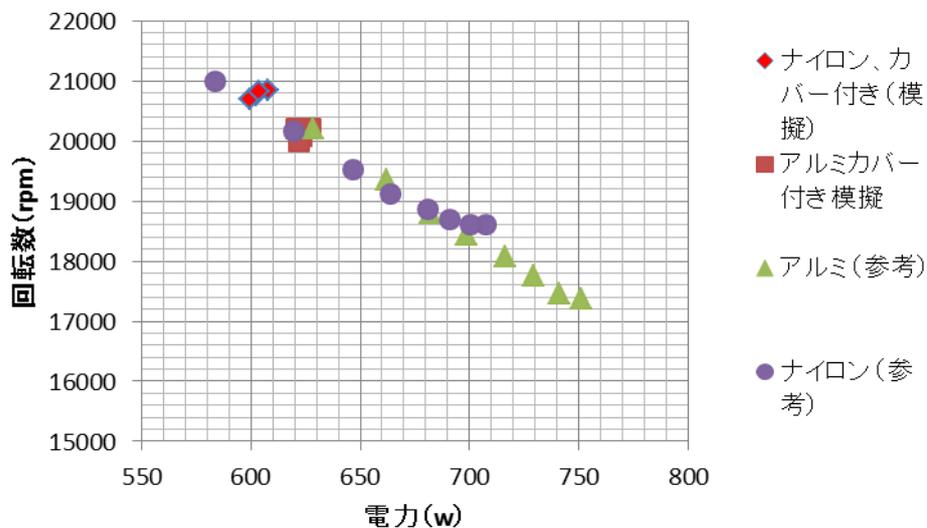


図 3-20 回転数—電力特性

第4章 冷却用小型ターボファンの最適構造化

4-1 はじめに

CPU あるいはパワー半導体・レーザー固定端子など、局所的に発熱する部位を冷却する場合、冷却水などの配管スペースがないことが多く、必然的に強制空冷・強制冷媒輸送などの手法を用いることになる。台湾など PC 生産拠点が林立している先端産業では、小型ターボファンによる CPU の冷却設計が求められ、その最適構造化が不可欠となっている。

ターボファンの生産には、主として射出成形プロセスが利用されているが、ターボファンの形状寸法が小さくなればなるほど、プラスチック素材を金型キャビティー内に射出するためのゲート部・スプルー部・ランナー部などの締める割合がきわめて大きくなり、廃棄すべきプラスチック量が増大する。さらに小型部品ゆえの素材の高度化をはかるにも、原材料の低使用率は大きな阻害要因となる。

本研究開発では、小型モールドプレス装置を用い、粒状・粉状のポリマー素材から小型ターボファンを生産するプロセスを検討してきた。小型ターボファンには、翼構造として直線型形状をもつターボファン（以下、直翼ファン）および中小ターボファンと同様に斜め形状を呈しているターボファン（以下、斜翼ファン）がある。平成 24 年度の研究開発では、直翼ファンの生産プロセスを確立し、その成形精度について詳細な検討を行ってきた。本年度はさらに成形プロセスの短縮化をはかるとともに、成形精度に関する検討をさらに深めた。また斜翼ファンに関しては、金型形状ならびに成形プロセスの改良を行い、斜翼ファンの一体成形を行った。

4-2 目標

本年度は、直翼ファンの生産プロセスの効率化を軸に、最適構造化を進める。斜翼ファンに関しては、金型の改造を行い、一体成形プロセスを確立し、小型ターボファンの生産プロセスのプロトタイプを構築する。

4-3 冷却用小型ターボファンの最適構造化の開発

ABS 樹脂を用い、生産プロセスの効率化として、予備加熱時間の短縮を行い、成形性について調査した。図 4-1 に直翼ファンの製品図面例を示す。

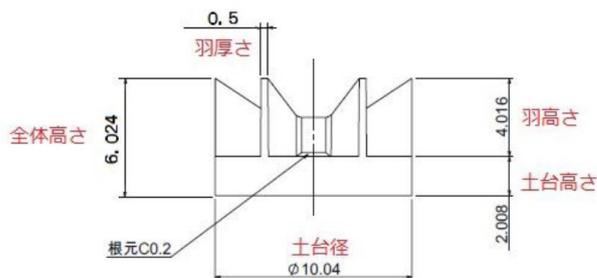


図 4-1 直翼ファンの製品図面例。

モールドプレス成形では、製品土台方向から粒状の ABS 樹脂を予備加熱、投入するため、土台径は金型キャビティ寸法を直接反映するが、土台高さは、プレスの剛性とモールドプレス成形法に依存して決定する。

当該モールドプレス成形手順を図 4-2 にまとめて示す。

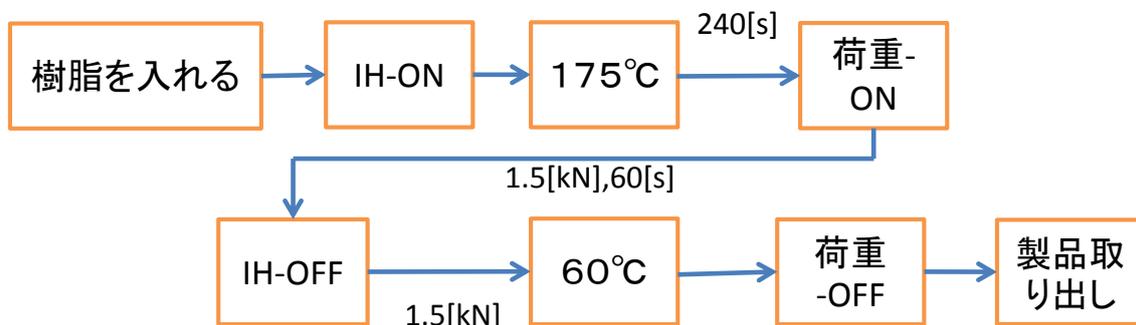


図 4-2 モールドプレス成形の作業手順を示す。

このプロセスで課題となるのが、240 秒としていた予備加熱時間であり、保持温度、プレス荷重に関しては、一定とした上で予備加熱時間の短縮化を行った。結果を図 4-3 に示す。

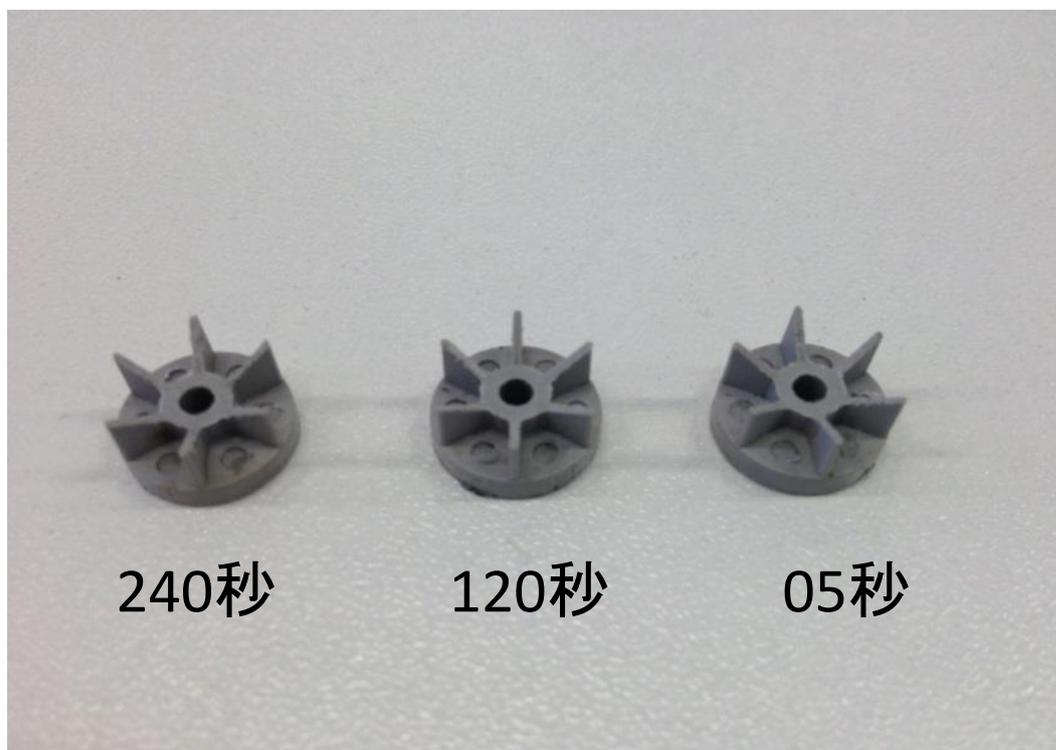


図 4-3 予備加熱時間を変化させた場合の成形した直翼ファン形状の変化。

予備加熱を 5 秒に短縮しても、形状寸法とも高精度で成形できるようになったため、図 4-2 のプロセスにおいて、予備加熱をほぼ省略したプロセスで成形できることを見出した。

以下の実験では、この予備加熱を省略した成形方案で進めた。

次に、斜翼ファンの成形プロセスの最適化を検討した。平成 24 年度においては、成形した斜翼ファンに、翼成形時にバリが発生し、あるいは翼部分に欠陥が生じていた。これは、コア分割型としたことに原因があると考え、図 4-4 に示すように、一体型へと変更を行った。なお、図中の旧金型（左）では、分割コアの取り付けすることで、型高さの調整などを行っていた。新型では、すべてを一体化することで、バリあるいは欠陥の原因になっている型不具合を減少させた。



図 4-4 コア分割型から一体化構造の金型への変更

この結果、斜翼ファンの生産は図 4-5 に示すように、形状再現性も良好になり、その精度評価も可能になった。

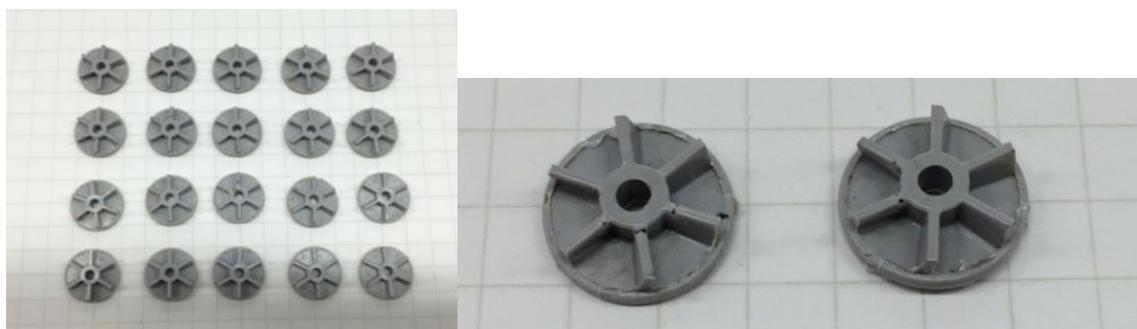


図 4-5 成形した斜翼の成形した製品例

4-4 冷却用小型ターボファンの最適構造化の開発評価

ここでは、直翼ファンならびに斜翼ファンを 20 個作成し、その形状再現性について、測定ならびに統計処理により、最適構造化した小型ターボファンの評価を行った。なお、参照データとしては、金型キャビティの実測値ではなく、金型図面での形状データとし、各部位の平均寸法ならびに標準偏差を実測した。

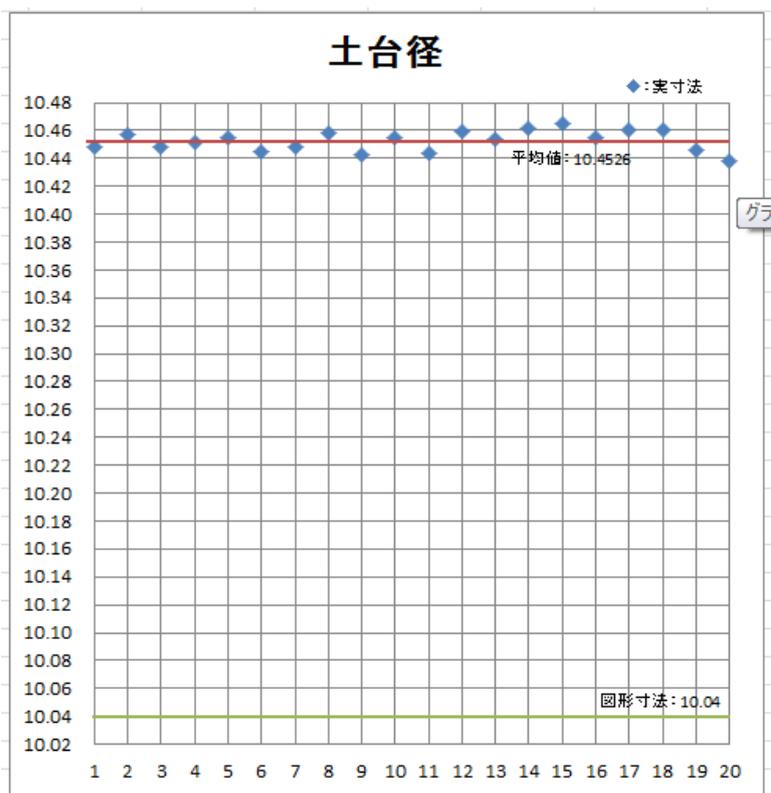


図 4-6: 直翼ファンの土台径の変化。ほとんど誤差はなく、きわめて良好な成形性が確保されている。なお、実測された偏差の主たる原因は、投入する主原料の測定誤差（0.01g 以下の測定重量誤差）によるものである。

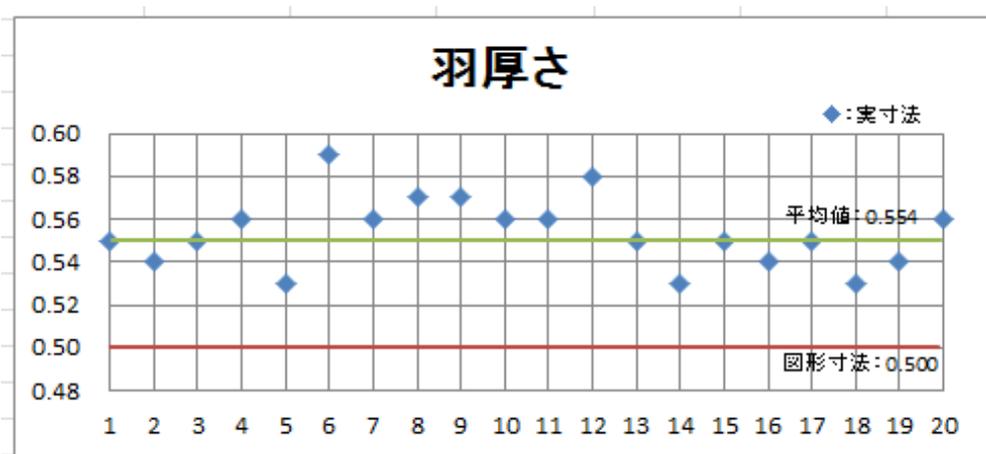


図 4-7: 直翼ファンの羽厚さの変化。直翼部位も土台径と同様に、比較的良好な精度で成形されている。

上記の図 4-6、4-7 に示すように、直翼ファンに関しては、実用に耐えられる形状精度で、製品がモールドプレス成形できることがわかる。

次に斜翼ファンについて調査する。図 4-8 に示すように、製品全体の形状寸法は、一体構造化することで格段に精度が向上した。これにより、モールドプレス成形を用いて連続プレス成形で製品を生産しても、ほぼ良品を創出できるレベルには達している。

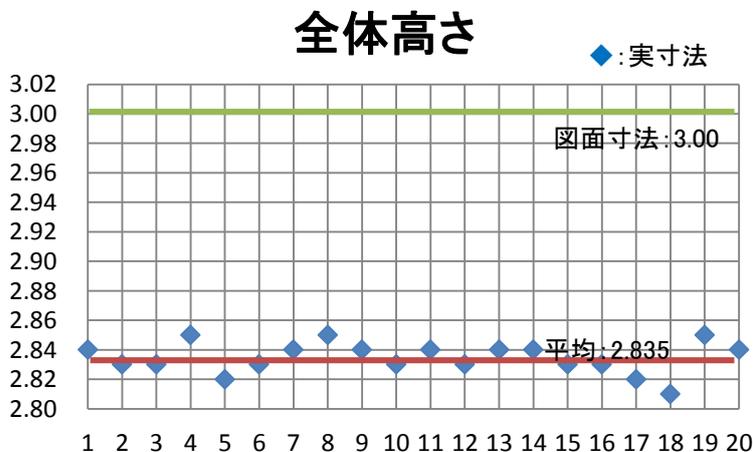


図 4-8： 斜翼ファンの製品高さの変化。成形性が大幅に向上したため、製品の高さ形状（モールドプレスではプレス剛性の影響で形状誤差が生じやすい）の誤差も減少した。

一方、斜翼ファンの詳細部位では、まだ検討すべき点が多い。例えば、図 4-9 に示すように、斜翼ファンの土台径では、平均径 10.941mm に対して、標準偏差 0.014mm ではあるが、なお素材重量ばらつき以上の誤差が観察される。

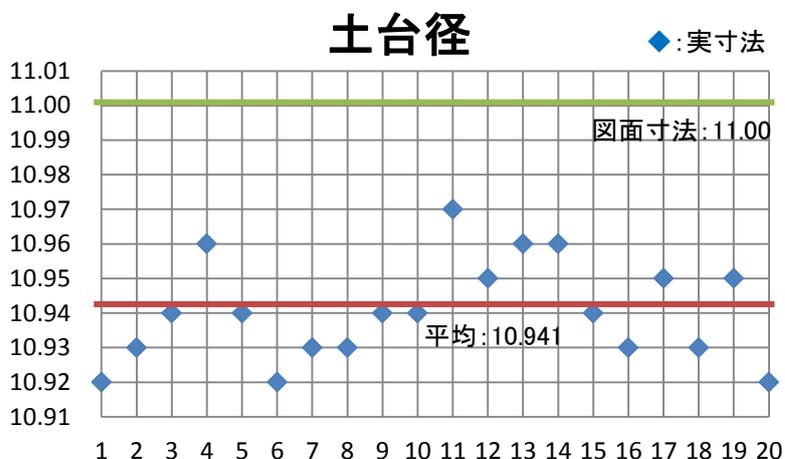


図 4-9： 斜翼ファンの土台径の変化。直翼ファンと異なり、土台と斜翼部位が一体で成形されるため、斜翼の成形精度が土台径にも影響を及ぼす。

一体構造化技術は、小型ターボファンにおいても、重要な技術であり、今後、表 4-1 に示すような課題を克服することで、さらに微小なターボファンなどの流体力学素子のプラスチック部品化に寄与できると考える。

表 4-1： 斜翼ファンの型構造・成形方法の変革の必要性。

不良	製品の欠陥 1. バリ	製品の欠陥 2. 気泡	底部分に 材料形状が残る	温度上昇が 不安定
原因	金型に隙間 がある	表面固化後に内部が 収縮している	圧力の掛かり方が不均 等, 材料形状が不定	PID制御が不 安定
解決策	金型構造の 見直し	圧力保持時間を延長 する, 圧力を均等に かける	型の調整, 材料を一定 量・一定形状でストック する	PID制御の比 例ゲイン見直 し

第5章 環境対応型プラスチック材を用いたターボファン開発

5-1 はじめに

環境対応型プラスチック材料には、プラスチック材そのものがすべて生分解性を有するものと、生分解性プラスチックと通常のプラスチック材とのポリマーアロイ材の2種類がある。前者の代表がポリ乳酸（PLA）である。

PLAは生分解性プラスチックとバイオマスプラスチックの両方に属する結晶性プラスチックであり、乳酸が重合し長くつながった高分子である。乳酸にはL-乳酸とD-乳酸の2つの光学異性体が存在する。そのためポリ乳酸の中でもL-乳酸のみが重合したポリ-L-乳酸（PLLA）、D-乳酸のみが重合したポリ-D-乳酸（PDLA）、L-乳酸とD-乳酸の両方からなるステレオコンプレックスポリ乳酸（scPLA）等様々な種類のものがあり、それぞれ異なる特性を持つ。

ここでは、特に成形性にも優れているホモタイプPLAを対象にする。

ホモタイプポリ乳酸とはポリ-L-乳酸またはポリ-D-乳酸のようにL-乳酸もしくはD-乳酸のうちどちらか一つのモノマーからなるポリ乳酸である。一般的なポリ乳酸は結晶化速度が遅くそのため耐熱性に問題があったが、添加剤等を加えることで結晶化速度を速めたポリ乳酸なども開発されている。

本研究開発では、このホモタイプポリ乳酸の粒状素材から、直翼ターボファンを、モールドプレス法で成形するプロセスを実験的に検討し、それを確立する。

5-2 目標

環境対応型プラスチック材としてホモタイプ・ポリ乳酸を用い、同材の高温変形特性を考慮した負荷・温度プログラムを開発して、直翼ターボファンを作成することを目標とする。特に製品の形状寸法の実測とその詳細な解析により、製品精度の評価からPLAからの小型ターボファン成形に関する妥当性を実証する。

5-3 環境対応型プラスチック材を用いたターボファン開発

本年度は、より成形性にすぐれたホモタイプPLAを用いて、直翼ターボファンのモールドプレス成形プロセスの確立を目指した成形実験を行った。

図5-1に成形に用いた。ホモタイプPLA粒状素材を示す。吸湿性が高いため、成形実験の前にあらかじめ恒温機に入れ70[°C]で24時間以上乾燥させた。なお、PLAの成形性を支配する第1因子は、結晶化プロセスである。結晶化時間が成形時間と比較して長いと、成形挙動は不安定になりやすく、特にポアや引けなどの欠陥が一度成形中に生成すると、それを除去することは困難になりやすい。本ホモタイプPLAでの取り扱いでは、結晶化促進効果のある添加剤を配合し、60[s]以内に十分結晶化できるようになっている。これにより、成形プロセス中に結晶化が進むように工夫した。



図 5-1： 出発素材としての粒状ホモタイプ PLA 素材。

ホモタイプ PLA（以下、PLA 1 と称す）の成形プロセスを示した。成形温度は 200[°C]とした。また、樹脂を結晶化させるために製品成形後金型温度を 120[°C]で 60 秒間保持し、その後超高周波 IH を停止させ、金型温度が 80[°C]に達した時点で製品取出しを行った。使用した樹脂は製品 1 つにつき 0.240[g]である。

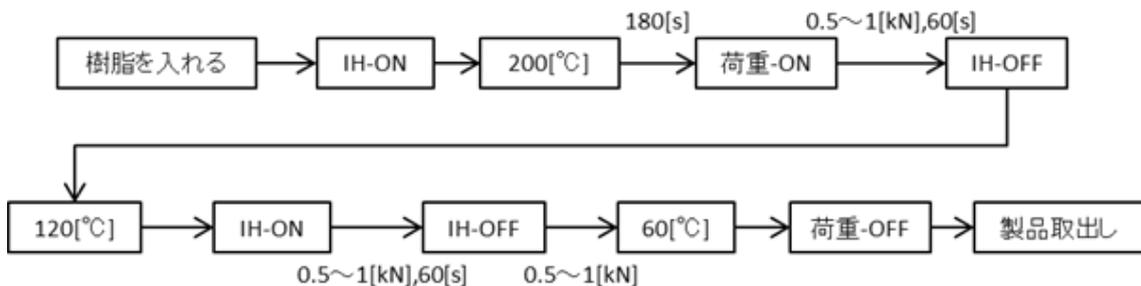


図 5-2： PLA 1 の代表的な成形プロセス。

図 5-3 に PLA-1 を用いて成形したターボファンを示す。前述したように、PLA-1 は吸湿性が高く、吸湿したまま加熱すると加水分解を起こすが、成形前に樹脂を乾燥させておいたため加水分解は起こさなかった。ポリ乳酸を素材に用いる場合には、本研究で行ったように、事前の素材処理がきわめて重要で、事前処理なしで成形を行うと、全く製品形状にならないか、ポアなどの欠陥が容易に発生することになる。

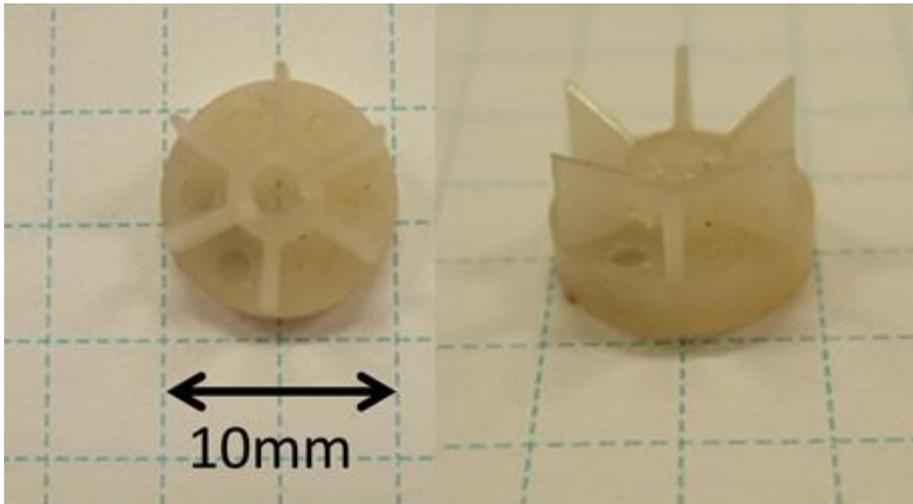


図 5-3： 成形したホモタイプ PLA の直翼ターボファン。

5-4 環境対応型プラスチック材を用いたターボファン開発評価

環境対応型プラスチック材を用いてモールド成形した直翼ターボファンの精度チェックを行った。ここでは、最初に PLA1 製直翼ターボファンの直径を測定し、CADデータとの比較を行った。図 5-4 に示すように、20 個の製品において、その標準偏差は $10\mu\text{m}$ 以下であり、高精度の成形を実現できた。

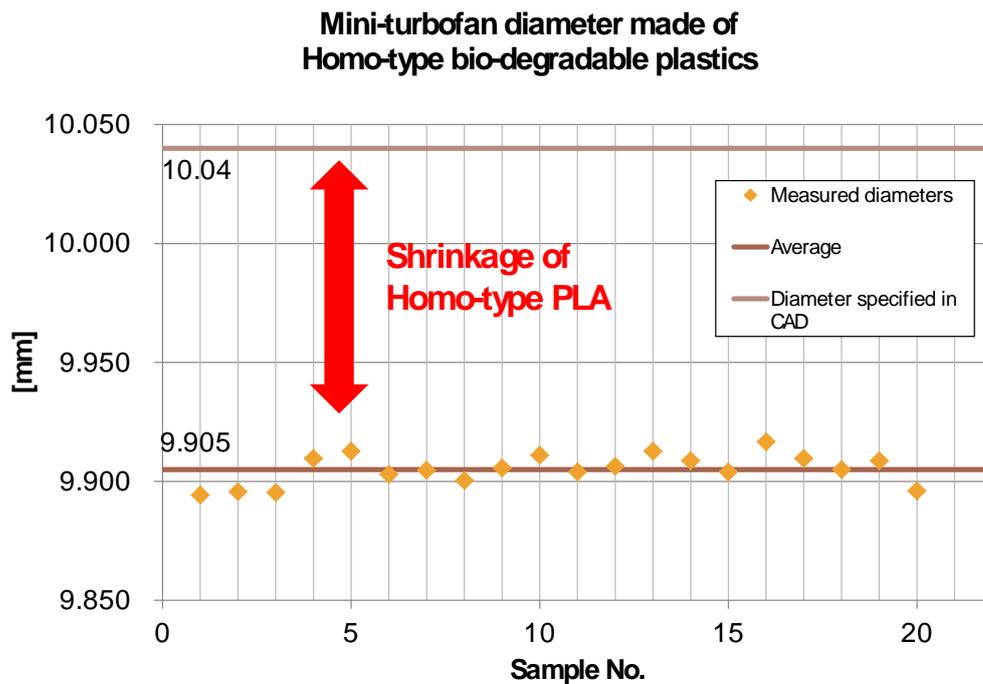


図 5-4： PLA1 製直翼ターボファンの直径の変化。

一般に結晶性の高いプラスチック材料は、ABS 樹脂など結晶化を伴わないポリマーと比較して、固化時の収縮量が大きくなる。PLA 1 の場合にも、図 5-4 に示すように、CAD 図面との相違は、この収縮ひずみによるものである。

次に、成形した直翼ターボファンの羽厚さについて調査した。第 4 章でも述べたように、直翼ターボファンの成形は、基本的に一体成形であるために、ターボファン直径と同様に、金型キャビティー寸法に準じた成形精度が達成されると考えられる。

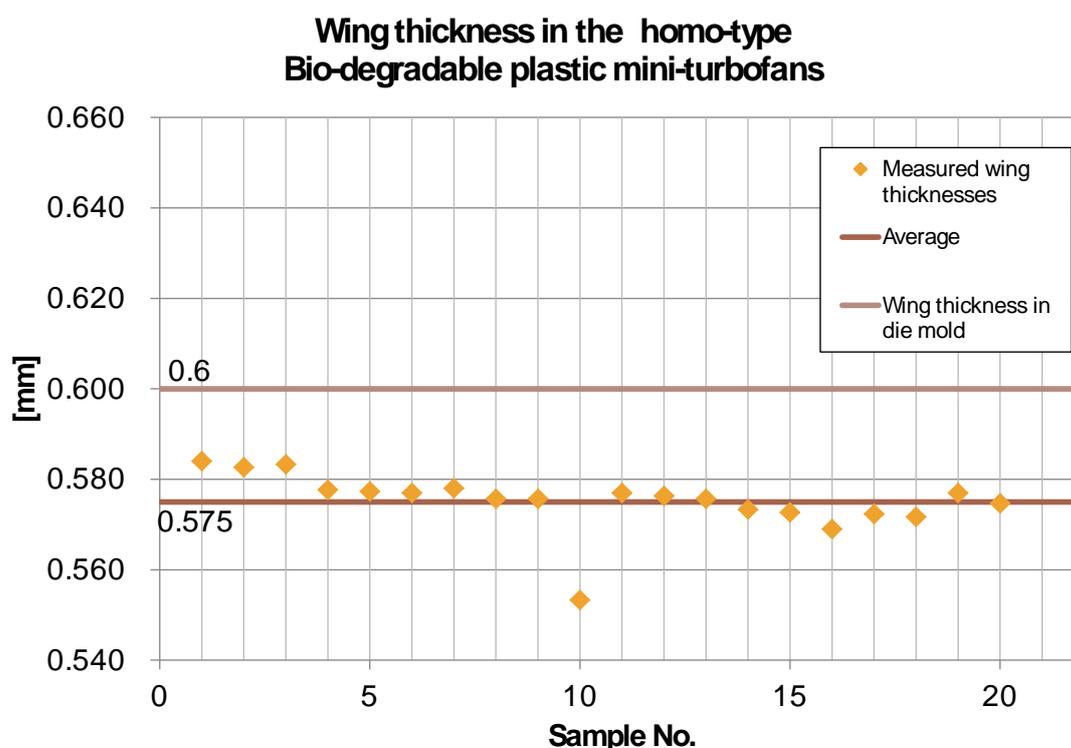


図 5-5： PLA 1 製直翼ターボファンの羽厚さの変化。

図 5-5 に示すように、標準偏差は 0.006 mm (6 μm) であり、きわめて高精度で直翼が成形されていることがわかる。なお、CAD 寸法との相違は、PLA 1 の固化時の収縮ひずみによるものであり、CAD 数値 0.6mm と実寸 0.575mm との差異は、あらかじめ収縮量を CAD 中で補正しておけばよい。

第 4 章の直翼ターボファンならびに斜翼ターボファンの ABS 樹脂による成形性からも推察されるように、モールドプレス成形の基本的な課題は、負荷方向の形状精度がプレス条件で決定することにある。射出成形では、固化するプラスチックがキャビティー内で、ほとんど全面で金型が形状保持されているのに対して、モールドプレス成形では、負荷方向の製品寸法、たとえば直翼ターボファンの場合、その高さは、プレス荷重とストロークによって決まる。したがって、固化中にオーバーロード側に負荷をかけると、ほとんど収縮

無で高さが CAD 寸法近くまで形成されるが、固化中にストロークを一定保持すると、収縮時の負荷が低下し、収縮量が大きくなる。実際、図 5-6 において、実験サンプル番号 1-4 までをオーバーロード側で成形中に荷重を負荷し、ストロークを増やすと、製品の高さと CAD 中の高さ寸法とが近くなる。一方、製品番号で、5 番以降は、ストローク一定で負荷をあまり大きくしない場合には、所定の収縮ひずみが生じる。

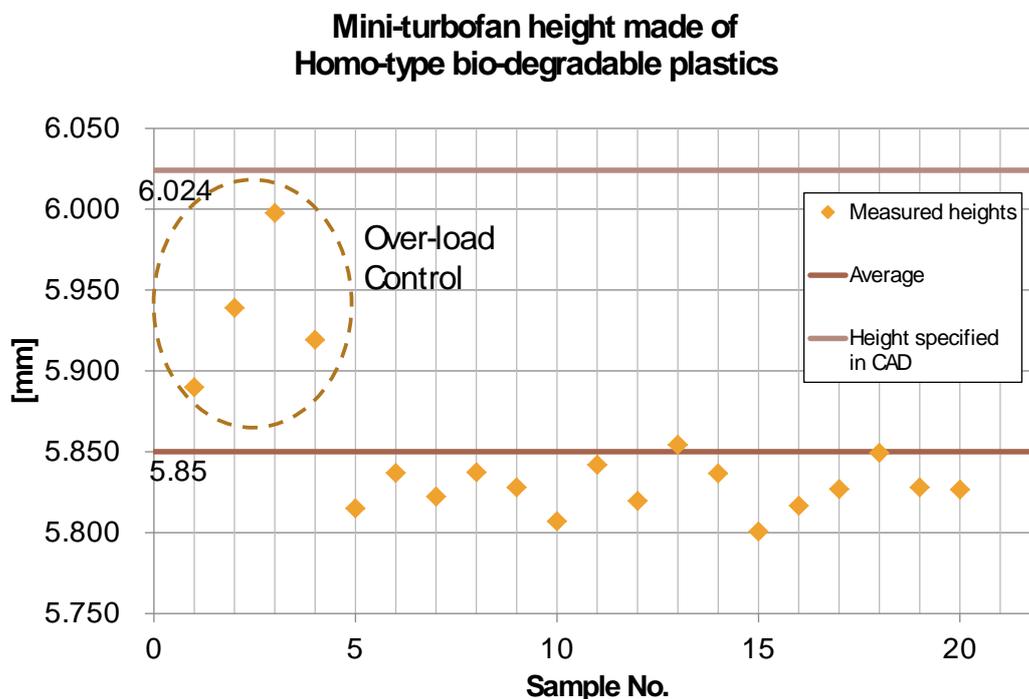


図 5-6： PLA1 製直翼ターボファンの高さ寸法変化。

このモールドプレスの特徴を活用すると、成形中の負荷変動・ストローク制御を工夫することで、射出成形プロセスと同等あるいはそれ以上の形状寸法精度で、1 g 以下の微小部品、さらに 1 m g 以下の超微細部品の成形が可能となる。すでに金型キャビティーで決定する形状寸法に関しては、10 μ m 以下の標準偏差で製品形状寸法を再現することができていることから、この負荷制御性を加味することで、モールドプレス法は、微小プラスチック部品の生産様式に新しい局面を開くことができる。

最後に、当該ホモタイプ・ポリ乳酸と標準的なプラスチック材である ABS 樹脂との間で、本直翼ターボファンに関する成形性の比較をしておこう。表 5-1 に、モールドプレス成形による作成した 20 個の直翼ターボファンの外径、高さおよび羽厚さに関して、その標準偏差を比較してみた。なお、高さに関しては、上述のオーバーロード試験によるデータは除去してある。

同表より、ホモタイプ・ポリ乳酸を用いても、製品形状寸法の標準偏差が拡大すること

はなく、ABS樹脂と同等あるいはそれ以上の精度が達成できることがわかる。

表5-1：直翼ターボファン製品形状の標準偏差の比較。単位はmm。

直翼 ターボファン	ABS 樹脂	ホモタイプ ポリ乳酸
ファン外径	0.008	0.006
ファン高さ	0.038	0.020
羽厚さ	0.004	0.006

第6章 全体総括

6-1 3年間の研究開発成果

(1) 小型エアータオル用省エネターボファン設計

① 「流体力学シミュレータ」の開発

初年度：「流体解析シミュレータ」のチューニング・専用化の準備を開始した。シミュレーション結果と実際のファン形状との突合せなどは来季の課題となる。

2年度：試作と同一モデルを使い流体解析シミュレータの実モデルへの適用に必要な気体部分の要素分割、境界条件設定方法など基礎を確立した。

3年度：ターボファンのCADデータからのターボファン+空気層のモデル化、ターボファン導入部ならび排出部を含むエアータオル評価、低回転数での翼内流動解析を中心に開発を行い、流体力学シミュレータの基礎を構築した。

今後、高回転数までのターボファンシミュレーションを、補完研究として実施、後述するRP設計結果を再評価するとともに、種々のターボファンの事前設計解析を進めていく

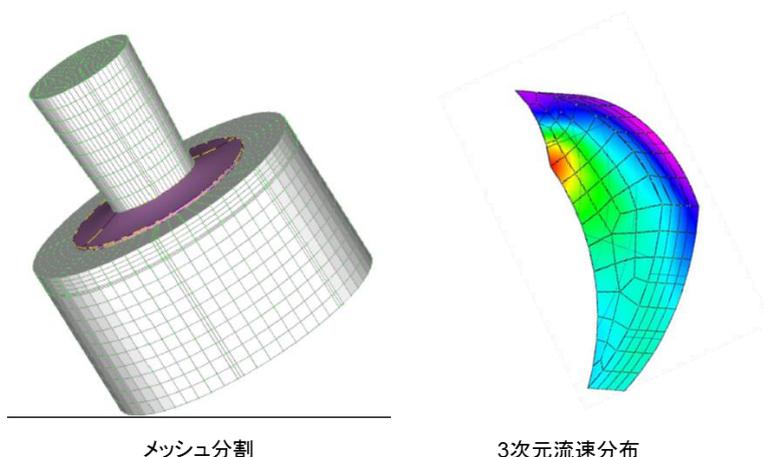


図3-1 流体力学シミュレータによる解析

② 解析式に基づくRP法によるターボファン特性設計

初年度：評価装置の整備をJIS B 8330（送風機の試験及び検査方法）に準拠して実施した。

2年度：ターボファン汎用理論にもとづいたパラメータ選定と光造形試作品を使った実験を組み合わせた最適ファン形状の設計プロセスの確立をおこなった。外径φ107ターボファンで光造形品による評価が可能であることを実証した。ファン形状をパラメータとしたL8直交実験を光造形品に適用して、設計が可能であることを見出した。

3年度：回転数と流量を一定に制御したL18直交実験によりファン形状に関するパラメータ設計が可能であることを実証した。



ファン特性評価システム



金型3DCADとリンクした光造形品試作体制

No.	入口案内 径	入口径	出口角度	翼枚数	出口高さ	入口高さ
1あり	40	25	7	8	12	
2あり	40	35	9	10	13.5	
3あり	40	45	11	12	15	
4あり	50	25	9	12	15	
5あり	50	35	11	8	12	
6あり	50	45	7	10	13.5	
7あり	60	25	11	10	15	
8あり	60	35	7	12	12	
9あり	60	45	9	8	13.5	
10なし	40	25	9	10	12	
11なし	40	35	11	12	13.5	
12なし	40	45	7	8	15	
13なし	50	25	7	12	13.5	
14なし	50	35	9	8	15	
15なし	50	45	11	10	12	
16なし	60	25	11	8	13.5	
17なし	60	35	7	10	15	
18なし	60	45	9	12	12	

実験計画法(混合直交表L18)に基づく設計システム

図3-2 解析式に基づくRP法によるターボファン特性設計

(2) アクチュエータ内蔵金型の開発およびターボファン成形評価

3年間にターゲットとなるアルミ製ターボファンを選定して、そのプラスチック一体形ファン用アクチュエータ内蔵金型を開発した。開発は、大枠で4回実施され、その中で、さらに金型の改造を実施した。次ページの表にターゲットとなるファンと試作金型の概要を示す。

初年度：φ80ファンをターゲットとして金型開発を行った。(1次) 金型製造において、導入したメカトロ金型作成用高精度切削装置を使用し、精密スライド部品の製作が可能になった。開発した試作アクチュエータ内蔵金型によりφ80ターボファンのABS樹脂一体成形に成功した。連続試験中にアクチュエータが破損する不具合が発生し、この原因追求および対策については、来季の課題とした。

2年度：高精度エアータオル片面吹き出し用φ107用ターボファンをターゲットに開発を実施した。前年度の課題点に対する対策を組み込んで第2次試作金型の開発を行った。2次試作は、成形性不十分および高精度アルミファンを上回るファン特性は得られなかった。

パラメータ設計の結果を使い最適形状ファンを目指す3次試作金型を開発した。成形試験を実施し、サンプル入手はできたが、スライド機構に課題が見つかり連続成形試験は未実施。ファン特性試験から高流量域で高精度アルミファンを上回る特性のファンが実現した。

3年度：前年度の積み残しである3次金型の量産性を上げる対策を行った改善品を開発し、連続成形3時間を達成した。次に量産性に関する知見を入れ高性能エアータオル用ファンをターゲットとした4次試作金型を開発した。試作金型は、成形性は満足したが連続成形性で課題が残った。一方、ファンは、ファン特性試験で20Wの低消費電力化を達成した。

表3-1 アクチュエータ内蔵金型およびターボファン成形の開発まとめ

開発年度		H23	H24				H25		
目標ファン	目標	φ90	φ107				φ110		
	写真								
金型、ファン試作回数		1次	2次	2次改善	3次	3次改善	4次		
試作品	金型	サイズ(口)	400	500			500	550	
		スライド機構数	7	9			9	9	
		写真							
	ファン	外径	81	107			107	110	
		翼枚数	7	9			9	9	
		翼形	平板	平板			流線型		流線型
		写真							
試作結果	成形材料	ABS	ABS	ABS	ガラス入りナイロン	ガラス入りナイロン	ガラス入りナイロン		
	成形性試験	○	×	○	○	△	○	○	
	連続試験 (30秒x150回)	×	—	△	△	—	△	×	
	cycle時間(秒)	45	60	60	60	60	45	60	
	最大連続SHOT回数	40	—	270	160	—	170	45	
	課題	スライドベース破損	入ロバリ発生	—	55秒50ショットからバリ発生 45秒30ショットからバリ発生	アンギュラーピン破損	—	アンギュラーピン破損	
	対策	—	・スライド蓋強化 ・ラチェット機構改良	・ロッキング機構改善	—	スライド剛性アップ(翼出口角度25°→40°)	スライドストッパー追加	対策中	

(3) 冷却用小型ターボファンの最適構造化

初年度：φ10高さ5mmの小型ファンを狙い、小型ターボファン用モールド成形装置として縦型成形装置の設計仕様を固め、金型設計を完了した。

2年度：小型ターボファン用モールド成形装置を完成し、外形φ10ファンの試作を実施し、モールド条件を確立した。

3年度：ABD樹脂を用いて、小型直翼ターボファンの成形実験を行った。前年度において課題となったプロセス時間の短縮化による最適化を中心に検討を行った。小型ターボファンの土台径・羽高さにかんしては、標準偏差が0.03mm以下を達成でき、本成形プロセス

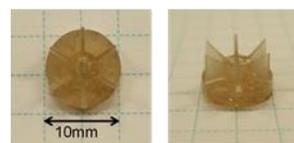
の精度・信頼性を実証した。



モールドプレス装置



ABD樹脂



ホモタイプ・ポリ乳酸

図3-3 小型ターボファン用モールド装置と小型ターボファン

4) 環境対応型プラスチック材を用いたターボファン開発

初年度：生分解性ポリマーについては、成形性評価を簡易型で整形できることを評価した。

2年度：生分解性ポリマーとしてポリ乳酸樹脂を選定した。小型ターボファン用モールド成形装置で生分解性ポリマーの外径φ10ファンを試作実施し、生分解性ポリマーについても、成形できることを確認した。

3年度：環境対応型プラスチック材としてホモタイプ・ポリ乳酸を用い、同材の高温変形特性を考慮した負荷・温度プログラムを開発して、直翼ターボファンを作成した。詳細な解析により、製品中に光学顕微鏡で検出できるポア・欠陥がないことがわかった。

6-2 研究開発後の課題・事業展開

(1) 研究開発後の課題

① 流体力学シミュレータのファン・金型設計システムへの組込

流体力学シミュレータのファン・金型設計システムへの組込みおよびより効率的なファン形状（エアロfoil形状など）を補間研究として進める。

掃除機クラスのファンについては、ほぼ設計体制と金型設計のノウハウを獲得した。工場フロアなどより大口径ファンに関しては、金型設計ノウハウはサポインで得られたものが使える。しかし、ファン形状変更に関して特性予測ができないため、金型製造のしやすい形状変更など積極的な改善提案が難しい。

流体力学シミュレータによる解析をこのような特性予測に使用してより効果的なファンを提供するよう技術を整備してゆく。

② アクチュエータ内蔵金型の量産性確認

補間研究として、最終の金型改造が連続成形可能であることを確認し、十分な量産性を有していることを実証する。

(2) 研究開発後の事業展開

松田金型工業では、既にプラスチック一体成形ファンに関する金型事業を平成22年度モノづくりからの開発品を新製品として事業化している。サポイン終了後は、3年間で得られた各種ファン形状に関するアクチュエータ内蔵金型を新製品として直ちに販売してゆく。具体的にはサポインで得られた成果を新聞、国際金型展などで広く公開し、認知を得る方向ですすめる。

これまでのマーケット調査から、ターボファンはファン径 10mm クラスから 300mm に及んでいる。各マーケットはそれぞれ図 3-4 に示すようなニッチマーケットを形成している。

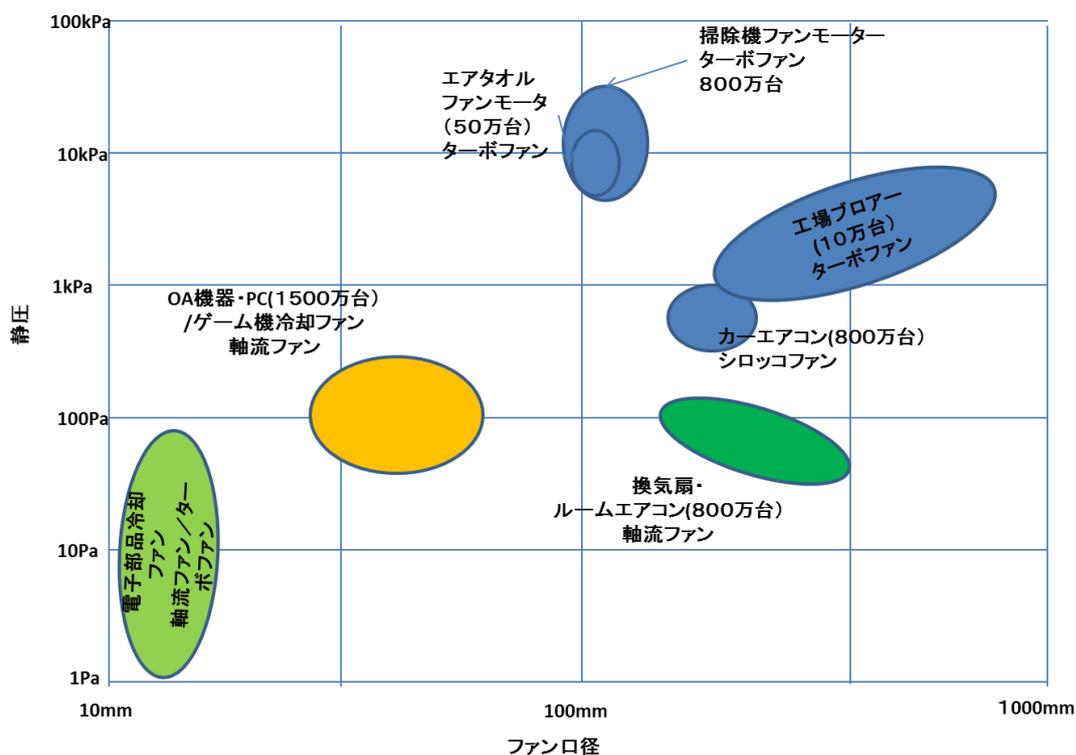


図 3-4 ターボファンのマーケット

- ・ エアータオル用ターボファンは、下板・羽根・上板を接合したアルミ製送風用ターボファンが大半である。各社ごとに羽根の枚数や角度などの研究開発が進められ、形状も複雑になっているのが現状である。ユーザーからはターボファンの高効率化/低騒音化が望まれている。エアータオル向け市場への参入は、エアータオルメーカーを通じてエアータオル用ファンモータを攻略する。

- ・ カーエアコン分野では、1990年代から消音化が開発テーマとなり、多くの改良が進

められてきた。2000年頃から省エネ化が進められ、シロッコファンの採用、ラジアルファンの採用が進んでいる。一体成型によるファンは型構造に限りがあるが、組立てファンより強靱性が保持できるので非常に利点が多い。自動車冷却用ファンに関しては、デンソーが先行しており、競合の中で本ターボファンの特徴（一体成型による省エネ・ノイズレスなど）で差別化する。アドバイザーであるホンダへの売り込みを先行させる。

・電子部品用プラスチックファンは既に射出成形品などが使われている。今回開発した小型整形装置を試作品開発用と位置づけ市場を新たに開拓する。電子部品冷却用小型ファン市場への売り込みは、主として台湾メーカーへ売り込みを図る。

6-3 おわりに

平成23、24、25年度の3年間にわたり、タマティーエルオー(株)の管理人および松田正雄松田金型工業(株)代表取締役会長のPL、相澤龍彦学校法人芝浦工業大学教授のSLのもとに研究開発を進めてきた。本研究開発を委託された関東経済産業局、アドバイザーとして貴重なアドバイスを頂いた関係各位に厚くお礼申し上げます。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。