

第2章

自作模型ジェット エンジン

紹介

貴方自身の模型ジェット エンジンを自作することは、貴方が考えているより複雑ではありません。最終的にここで示すシングル段式コンプレッサーとタービンを持つ構造とすれば、最も簡単な構造となります。

ではありますが、独自のタービンを作ること考えている読者様は、内在する問題を低く見なしてはいけません。いくつかの油断ならない落とし穴があります。例えば、これらの出力発生器具は、ひとつの油断のならない性質があります。もしエンジンが運転しない時、少なくとも、経験の浅い製作者に対して、その原因を調査する助人はいません。

これが意味することは、最初に貴方はタービンが正しく且つどのような作動をするか、技術的に理解している必要があります。貴方のエンジンを搭載して機体が飛行することを望むのでありましたら、エンジン本体は極めて高い回転数で運転することが求められます。これは、ローター出力軸が高い工作精度で製作されていることが条件となります。ベアリングの装着座は、精密に機械加工がなされ、出力軸は厳密な公差内で回転しなければなりません。動的バランスを良く調整することも必要です。故に、これらを厳守して極めて精密な加工を行い、アマチュアとして、可能な限りの範囲において、特別の道具を揃える必要があります。しかし、これらは全式完備されなくても良いでしょう。

エンジンが好調に運転するには、小さな部品の一つ一つが精密に加工され、正確に組み立てられていることが必要です。これについて、まず、ローター出力軸の組み立て、各ブレードの角度、圧縮燃焼室の組み立て、以上を精密に組み立てすること。模型ジェット エンジンは、これらの一つでも不備であると、機嫌を損ねてしまいます。

筆者は自作模型ジェット エンジンで好調な製品を知っていますが、タービン羽根輪は理論数値に基づいていないものがあり、同時に理論数値に基づいて成型されていないもの、コンプレッサー羽根輪に大きな隙間があり、デヒューザー ガイド羽根が機械加工時に破断したものがあります。

本章で記述するエンジンは、自動車用ターボチャージャーの径66mmのコンプレッサー羽根輪を利用する — マイクロタービン (Micro-Turbine) — です。エンジン本体の重量は、組立によりませんが1100g～1200gの範囲となり、中間サイズの模型飛行機に搭載するのに良い大きさです。エンジン本体の外径は110mm、全長は235mmです。エンジンは燃料にJET A1 ケロシンが必要になります。スロットル全開時、約3barの圧力で燃料が噴射されます。ベアリングはケロシンにより潤滑され、

この目的のため、ケロシンは2サイクル オイルにより 3 %の混合がなされます。 これにより、分割給油のためのタンクが不要になります。 本機は、排気ガス温度を意識的に低くなるよう設計していますので、エンジンの取り扱いが簡単になります。

これにより、私達は特別の耐高温度性の材料を使う必要が無くなりますが、最大スラストは40Nとなります。 タービンの材料として、ステンレス鋼の高アロイ ニッケル クローム材を使用します。 もし、耐高温度性の材料を利用することが出来る場合、安全に僅かな高回転数を上げることが出来ます。 タービン羽根輪はインコネル 713材、NIMONIC 90材、或いは他の耐高温度材を使用することで、テスト ベンチにおいて約105000rpm時、エンジンは問題なく50N以上のスラストを発生します。 これらの羽根輪は、ほとんどの場合、インコネル 713材による精密な成型によるものです。 これらの羽根輪は共通して外径66mmであり、自動車用タービン エンジン用に加工されており、問題なく利用できます。

これらの既設部品はとても精密に加工され、高い性能を示します。この自動車用ターボチャージャーの組み付け品である、スティック筒状型の圧縮燃焼室及びアキシアル タービンはたくさんの優位点があります。 これらのタービンはパワフルなエンジン用であり、始動性が良く、補助器具が全く必要となりません。 この組み合わせの高い効率に関する証明は、最初に図面化され、5～6社が同様の理論に基づいて生産を行っていることで判ります。 これに装着されるコンプレッサーとタービンの寸法は、標準的な模型飛行機を十分なスラストで飛行させるために十分なスラストを発生します。 50Nを希望することができますが、組立状態により60Nを希望することも可能です。 この数値は10kgの模型飛行機を離陸させるに十分なスラストです。 私達の経験では、ほとんどの模型飛行機はこの重量より軽量ですし、50Nでも十分なスラストでしょう。 もし模型飛行機が非常に軽量で細身である場合、機体速度はかなり高速になりますので、操縦者は飛行中の機体操作に充分、注意しなければなりません。

ここで紹介する設計品は、より高いスラストの発生が可能です。 実用試験時、タービンの回転速度を増加することにより可能ですが、このアイデアはお勧めできません。本章で紹介するエンジンの最大回転数は、既に説明した通り、105000rpmに制限されます。 この回転数は圧力比2.0の場合です。 本エンジンより得ることの出来るスラストは、部品加工に使用する加工機の精度により変化します。 圧縮燃焼室、タービン ガイド羽根、タービン羽根輪の精度が変化すると、エンジンの発生する出力も変化します。もし、上記に記載する最高回転数よりも高い回転数を求める場合、設計上の耐久性を短くする可能性があります。 特に過剰な高回転によりベアリングの耐久性により異音が短時間で発生する等の問題が発生します。

どのような道具が必要になるでしょうか

私の目的は、本章に記載するエンジンをアマチュアの方にも組み立てることが出来る図面を準備することです。溶接装置が必要になりますが、材料の厚みは一般的な厚みとしています。外部購入品は、ベアリング、コンプレッサー羽根輪及び付随する小物となります。タービン羽根輪は自作できますが、専門の工場により既設加工された性能の良い部品として広く販売されていますので、これらが入手して利用する方法があります。キャスト成型のタービン羽根輪は、より高い回転域において安全であり、これにより貴方のエンジンを更にパワフルにするでしょう。自作によるタービン羽根輪の効率は、加工精度次第であり、製作にもかなりの時間が必要になるでしょう。

最近では、新しい加工機材がアマチュアにも簡単に入手できるようになり、タービンの関連部品が CNC 加工機や TIG 溶接機により高精度且つ軽量に加工できるようになりました。この可能性を進展させるべく本章において、更なるプロフェッショナル版として記述しています。

模型ジェット エンジンを組み立てるにあたり、一般的な金属加工に利用する道具があれば充分です。但し、堅固な旋盤として、少なくとも中央部計測で全長 200 mm、且つ全高 120 mm の製品が必要です。左締の逆ねじを切る機材があると大変役に立ちます。これは特別の器具を購入する費用が節約できます。そのほかの機材として、精密ドリル盤、金属切断機、小型グラインダー、銀ロー付け道具、電気溶接機です。MIG/MAG 溶接機或いは TIG 溶接機があれば、これらはとても利用価値が高いですが、絶対必要品ではありません。他に必要な計測道具として、ノギス、マイクロメーター、ダイヤルゲージです。シート金属材料を加工する上で、やっそこ或いはこれに同様の道具があれば便利です。

模型ジェット エンジンのほとんどの部分は薄い金属シートより加工されています。これらはエンジン本体のケース、圧縮燃焼室及びスラスト ノズルです。金属シートは同時にクリップ、ストラップ、スラストパイプ、及びタービンに組み付けるその他の部品です。残念ながら、シートの厚みが 1 mm 以下である時、精密な溶接をすることは困難です。とりわけ、ステンレス鋼材或いは薄い耐高温度材に適応されます。この場合、点付け溶接が良く、貴方の持参する機材でもこれらの作業はそれほど困難なく対応できるでしょう。もし TIG 溶接機がない場合、模型ジェット エンジンを自作するためのスポット溶接機を自作することが良いでしょう。

本章で説明する設計は簡素ですが、非常に効果的です。必要となるのは 300W のトランスです。トランス部品単体として入手することが可能ですが、古い溶接機より取り外して利用することも可能です。重要な点はプライマリーの 240V 部が未使用状態であることで、セカンダリー部は状況により取り去ることが出来ます。注意深い作業を行えば、金属製のコアを取り外すことなく、巻き線を切断することが出来ます。

次の段階は、可能な限り断面積の大きなワイヤーを入手します。自動車用ジャンパースタートのケーブルが良いでしょう。3～4Vの無負荷電圧を得るため、コアーの上にケーブルを2～3回巻きつけます。真鍮接点のある半田電極棒が良いですが、銅接点であれば更に良いです。トランスのプライマリー部に足踏み式のスイッチを接続します。ブリッジ用として、60Wフィラメント電球を接続することをお勧めします。スイッチが切断されると、バルブが抵抗として作動します。溶接機が作動中、電球はぼんやりと点灯します。電極が接点しますと、電球は明るく輝きます。これで溶接を開始することが可能です。

主電源は致死する電圧であり、スポット溶接機の組み立ては、240VのAC電源に接続する前に専門電気工士に事前確認の依頼を、絶対に忘れないこと。

溶接部は、金属シートの両側を挟み、トランスのプライマリー側に接続された足踏みスイッチを短時間踏み込みます。この時、双方の電極棒が両面で正確に対面し合うことが重要です。溶接時、必ず、溶接マスクを着けること。一方の電極棒を固定し、他方を手作動とすることも良い方法です。この時、手持ちハンドルを木或いは耐熱プラスチックで作ると良いでしょう。

この簡単な溶接機は、僅かな努力により、薄いステンレスシート鋼を効果的に溶接します。僅かな練習をすることで、スポット（点付け）溶接が出来るようになるでしょう。極めて薄い金属シートの場合、電流値を僅かに減少させます。これは圧縮燃焼室、排気スラスト用パイプの加工時等です。最も簡単な方法は、トランスと電極間の直流抵抗により、にジャンパーケーブルを追加して、これを金属シートに接続します。

材料の選定

高温ガスに触れる部分を除き、エンジンは貴方が入手可能な標準的部品で組み立てることが可能です。タービン、タービンノズル、ガイド羽根、圧縮燃焼室、スラストノズルのみ高温に耐用する金属を選択します。

金属産業界は、通常の金属よりも数倍耐熱の高い、数百種類のアロイ材を開発しています。これらの材料の殆どは、1.4或いは2.4で始まる材料番号が付いています。少量の高耐熱材を個人が入手することは困難ですし、これらの材料を加工することは安易ではありませんが、私の経験では、ニッケルコバルトを基本としたアロイ材の切断は、アマチュアの使用する道具で加工すると表面に“しわ”が生じる事があります。十分な時間をかけて切断、穴あけ加工を行うようにします。短い時間で作業を行うと、材料及び道具共に相当の熱を生じます。切削工具や切断工具はすぐに切れなくなりますが、金属側はそのままの状態に残ります。従いまして、十分な量の切削油を使用し、時間をかけてゆっくり作業を行います。

エンジン本体は高温と張力の大きさに関係します。材料の耐用限度を過ぎる負荷を受けますと、エンジン本体はすこしづつ変形が生じます。この反発性のある変形は、エンジンが停止すると消滅し許容できますが、材料の劣化が進みますと恒久的な変形が生じ、時間が経過するほどに変形が激しくなります。この変化進展具合は、材料固体の強度により変化します。故に、温度変化に大きく関与していると言えます。ステンレス鋼材及び他のニッケルクローム鋼は650度Cを超えると急速に強度が低下します。故に、これらの材料を使用する場合、耐用限度の温度となるよう排気温度を低くなるよう設計する主な理由です。B/1000値を含む材料強度表はエンジンを製作する上で重要になります。この数値表は、当該材料が負荷と温度を受けて1000時間使用後の状態を示します。

しかしながら、実際の破断は金属表面の数%に直線的な亀裂が生じます。実用上、模型ジェットエンジンの過負荷はブレードの根元部が損傷するものではありません。過剰回転数によりエンジン本体がすさまじい状態で停止します。すなわち、タービン羽根輪がねじれてケース内部を塞ぐこともあります。更に重要な認識は、材料の剥離抵抗で、少なくとも800度Cです。この温度は、一番高い温度を受けるタービンノズルガイド羽根部に適用します。継続的に受ける材料の消耗による剥離抵抗は、材料亀裂に繋がります。

一般的に標準のニッケルクローム鋼は入手が簡単です。薄い金属シート材は建材商より購入することも可能です。タービン羽根輪に使用する厚い金属材の良い入手先は、廃棄物商で、特にステンレスシート材は金額が高いため、別個に収集されています。外観的にこれらの材料は錆びない材料として認識されています。これらの材料を探す時、磁石が良い友達となるでしょう。もし幸運な場合、材料の一部に材料番号が記されているのを見つけることができるでしょう。そして、材料表を参考にして、当該の材料が模型ジェットエンジンに適用できるかどうか確認できます。標準的なアロイ材の含有率は、クローム18%及びニッケル8%であり、これらにモリブデン、マンガン、ニオブウム或いはチタニウムを含んでいればより良いです。その他の入手可能な材料手段は、化学産業用の機材を生産する企業です。これらの企業は、酸及び耐熱値の高いポンプや器具を製造するため高アロイ鋼を使用しています。ある種のステンレス鋼は、内部結晶体による腐食に耐用性があり、これらの材料は船舶の建造に使用されますが、特にエンジンの組み立て部品として利用されます。ここで利用されている多くの材料は **Nitronic 50** (1.3964) です。筆者はこの材料より複数個のタービン羽根輪を製作しましたが今日においても問題ない状態です。

コンプレッサー羽根

私達の模型ジェット エンジンに必要とされるコンプレッサーは KKK 社ターボ チャージャーに使用すべく生産された部品です。これは補充部品として購入することが可能です。この部品は極めて精密に動的バランス取りが行われており、そのために模型用に使用することが出来ます。

これらの羽根輪は、ターボ チャージャーを生産する会社様直接ではなく、公認のサービス店で特別に入手できます。電話帳の案内欄等で検索されると良いでしょう。コンプレッサー羽根輪には、何ら特別の加工を行う必要はありません。

この羽根輪（5 3 2 6 1 2 3 2 0 3 7）は、6 6 mmの直径があり、インレット部径は4 2 mm、ブレードの高さは5 mmです。基本仕様別により他に、別2種類のコンプレッサーがあり、こちらを試用することも可能です。これら3種類の羽根輪は同一の型より生産されています。異なる部分は機械加工による端面の面取です。この差異は出力の発生、回転数の違いとなります。別2種はインレット部径が4 6 mmあり、高回転域において秀でた性能を示すでしょう。しかし、購入価格は僅かに高額になります。それぞれの場合において、タービンが通常一般的に使用されますと、最高回転数を増加しなければならない等、この差異は悪い方向になるでしょう。別2種の羽根輪（5 3 2 6 1 2 3 2 0 3 8 及び 5 3 2 6 1 2 3 2 0 2 2）ですが、これは直接の交換品として使用できます。これらのうち、いずれかを使用する場合、コンプレッサー デヒューザー システムの羽根高さを6 mmまで増加する必要があります。後者の羽根輪を使用する場合、コンプレッサー カバーの形をこれに合うよう、微調整するのみです。その他のエンジン部品類は変化なしに使用することが可能です。

エンジン本体の組み立て

シャフト出力軸を作る

シャフト出力軸には熱処理鋼を使用します。出力軸を作るための証明された良い方法は、強度番号1 2. 9の大きな機械ネジを使用します。この番号のネジは、たいていの場合、M16 x 1 8 0 或いは M20 x 1 8 0です。特別取扱店より入手することができます。もし他の材料を使用する場合、十分な強度のあるものを選択します。水圧シリンダー用プッシュロッドは強度もあり良いでしょう。これらはいずれも4 2 CrMo 4 鋼です。多くの場合、プッシュロッドは窒化处理で強化されています。グライNDER処理加工を行う前に、薄い硬質レイヤーを取り除く必要があります。出力軸は高い強度が求められますが、砕け易い性質のものは良くありません。出力軸は単に破損して

はならない部品です。 以上、諸々の金属の弾性係数は、殆ど差異はありません。

従いまして、総ての出力軸の厳密な曲げ速度は、ほぼ同一です。 ステンレス鋼はタービン用出力軸に対して不向きです。 一般的に販売されているステンレス鋼の熱伝導率はアロイ鋼に比して約4倍悪く、故に高熱のタービン羽根輪の高熱が短時間に分散しないことになります。 チタンも良くないでしょう。 アロイ鋼が出力軸には良い材料です。

チタン製出力軸のねじ切り根元部が機械及び熱の負荷により変形し易い特性があり、安全性の見地より、この材料は使用しないほうが良いでしょう。 タービン羽根輪と出力軸の間に隙間がありガタが生じる時、ねじ切り部全体が破損することになります。 チタンは低い弾性係数を持っているため、曲がり速度の危険度において、出力軸の材料として優位性はありません。

最初の作業は旋盤により出力軸を粗加工します。 良好な作業のため、タングステン製バイトを使用すると良いでしょう。 この段階では、寸法は大きめ加工します。

後々の工程でねじ切り作業を行うため、タービン部の軸側を数 mm 長で径 6 mm、コンプレッサー部の軸側を数 mm 長で径 4. 8 mm として、これらのネジきり部が直線であることを確かめます。

出力軸の無地部分の中心出しを行い、軸両側に中心穴を開けます。 ここで、両側の中心穴を利用して、最終寸法に合わせて、円柱状に切削加工します。ベアリング装着部、コンプレッサーとタービン装着部は 1 0 0 分の 1 mm 寸法で管理加工します。 ダイヤルゲージを利用して、出力軸の中央部と肩部の同心円度を確認します。 最大公差は 1 0 0 分の 2 mm 以内です。

出力軸の両側ネジは反転（逆）ネジです。 この工程は、これ以外の作業方法としないこと。他の方法は適用しません。 この作業には専用のタップとダイスの購入が必要となりますが、この購入金額を惜しまない事。

出力軸には間隔設定用の環状部品が必要になります。 2 個必要になります。 一つはコンプレッサー側、一つはタービン側です。 このインナー スリーブを加工するとき、極めて高い注意が必要です。 すなわち、軸上にガタが無いこと及びインナー穴あけはリーマーにより仕上げます。 この2つの端面はそれぞれ精密に平行であること。 この検査のため、ネジ式マイクロ メーターの使用をお勧めします。 いかなる寸法不良は、出力軸が正確に回転しないことになり、この不良はさまざまなバランス不具合をこの部位に発生する原因となります。

出力軸トンネルとベアリング

出力軸トンネル（番号7）はアルミより作ります。 コンプレッサー羽根側のボール ベアリング受け部は、必ずベアリングの良好な座り装着としなければなりません。

そしてベアリング本体出っ張りは端面に正確に同一であること。これとは対照的に、タービン羽根側のベアリング装着部は出力軸とトンネルの差動の増長に合わせて、僅かに大きめの加工とします。これはベアリング部の温度が高くなるためで、この寸法上の“遊び”は100分の1mmであること。もし、冷間時、このベアリングが僅かにきつい装着であるとき、この心配はありません。アルミ材の熱伝導による伸縮は鋼鉄材よりも大きいため、これらの部品が運転時の温度に達する時、正しいクリアランスとなります。

出力軸トンネルの部品はタービン端末のベアリング用のスラストばねです。このばねは、ベアリング本体に本来の与圧を加えます。このばねの正しい圧力は15Nであり、この数値を大きく超えてはなりません。与圧ばね本体は、数本のばね条によります。この与圧ばねの張力に調整が必要な場合、ばねとベアリングの間にスリーブを挿入して行います。初期のテスト運転時、ベアリングに初期与圧は必要ではありません。本設計品に使用されるベアリング形状は、一般的なボールレース式を使用します。フランジレース式ですと、ばね張力が高くなります。それぞれの場合において、一般的なベアリングの使用で良い結果を期待することができます。もし、貴方が常用回転数について、10000rpmとするなら、約20フラインクの耐用性となります。ボールのケージは鋼材或いはプラスチック材で良いでしょう。ベアリングは定期的に目視検査します。真鍮ケージ製のベアリングは不適合です。シリコン窒化処理ボールのベアリングは更に長い耐久性があり、少量でも入手可能です。

出力軸の最終部品は潤滑システムです。オイルパイプ（部品番号16）は、図に示すように細い真鍮チューブを曲げて作ります。オイルパイプは、出力軸をコンプレッサーのデヒューザー羽根部にねじ込む時、3個の空気ダクト穴の1箇所にはさむようにして取り付けます。出力軸は、ソケットねじで高張力耐用により、緩み止め材を塗布の上、指定部位に固定します。出力軸の延長部分はそのままエンジン本体を貫通しコンプレッサーカバー部に延長します。次に、潤滑チューブは、短いフレキシブル製のチューブを利用して燃料配管用のTバルブ管に接続します。

タービン ノズル ガイド羽根システム

タービン ノズル ガイド羽根システム（部品番号11）は、エンジン本体の最も複雑な部品の一つです。本システムは2つの主要な作動があります。タービン羽根に排気ガスを供給、そして出力軸トンネルを保持することです。ハウジングの保持フランジ部（部品番号11.5）は排気ガス流壁として作用します。最初の加工はインナーリング（部品番号11.1）を加工します。この部分は適当なチューブ或いはシート金属を適切な形状に曲げ加工して使用することもできます。図面に示すように11個のブレード位置を罫書き、金属用のこぎりで切断します。耐久性のため、刃の長さを短くす

ると良いでしょう。 ノズル ガイド羽根システムには材料の選択は、耐高温度材を選択しますが、ステンレス鋼の使用でも良いでしょう。 ブレード（部品番号 1 1. 3）を僅かに大きめの寸法で加工し、およその形状で曲げます。

次に、これらにインナー リングを装着します。 ここで貴方がガイド 羽根システムを前面より目視した時、それぞれの羽根は可能な限り重なりあっていなければなりません。 ブレードの先端側より内部を見ること以外、内部が見えない形状です。 羽根の角度は外側に向けて 1 ～ 2 度の角度で傾けても良いです。 最終的に、それぞれの羽根を内側より指定位置に溶接します。 出力軸トンネル（部品番号 1 1. 2）を溶接します。 次に、ノズル ガイド 羽根を図面の寸法に合わせて切削研磨します。 貴方の旋盤に研磨装備があればこれを利用すると簡単です。 最終工程は、ブレードのインレット入口部とアウトレット出口部の形状を丸く研磨します。

次に、フランジを加工し、タービン ジャケット（1 1. 4）を指定位置に溶接します。 ここで、部品の内側を旋盤により、正確な円形となるよう切削します。 インナー セクションを仮装着し、ノズル ガイド 羽根の装着端面に印をつけ、タービン基部に約 3 mm の深さで切込みを入れます。 羽根とタービン基部の隙間は 1 0 分の 1 mm 程度であれば、エンジンが運転温度になると消滅します。 それぞれのノズル ガイド羽根はタービン基部にシングル溶接により取り付けます。 この段階において、羽根システムを旋盤に取り付けます。 作業に問題が無ければ、部品は真円で回転します。 ここで出力軸トンネル用の指定図面寸法を加工します。

タービン羽根

技術的見地において、タービン羽根（部品番号 1 2）は貴方が考えているほど、難しくはありません。 実際の羽根は 6 mm 厚の金属シートより加工します。 素材を切り出し、出力軸用の中央穴に空洞を開けます。 高耐熱材に穴開け加工を行う時、低い回転数で行い、切削油を使用します。 リーマーを使用して正確な寸法となるよう仕上げを行います。 次に素材は、低い回転数により、旋盤で寸法に合わせて加工します。 タングステン製バイトを利用すると良いでしょう。この時、羽根輪の外径寸法を約 1 mm 大きく加工します。 次に、4 6 mm の羽根輪に 1 9 個のブレードを切り分けます。 HSS 鋼付きの一般的な金属用のこぎりでの作業を行えるでしょう。 ゆっくり、しかし、十分な圧力を込めて切削します。 切削油を塗布して作業を行うと良いでしょう。 インコネル 6 2 5 或いは NIMONIC 9 0 等、超高耐温度材を使用する場合、のこぎり刃 1 枚で、約 5 c m の距離切断で交換すると良いでしょう。

タービン羽根をガス トーチを使用して赤熱するまで加熱します。 1 組のプライヤー或いは、はさみ等を利用して時計周りの方向へ 3 0 度から 3 5 度の角度でねじります。

最終的な羽根の角度は、タービン羽根形状の最終仕上げ時に行います。これはドリルに円形カッターを取り付けて作業します。最初の工程は外径を44mmに切削することです。すなわち、タービン羽根輪をディスクカッターに対して約35度の角度で固定し最終的な寸法となるよう研磨します。

ここで羽根の形状加工を開始します。粗いエポキシ製の研磨リングを使用して、主に圧縮燃焼室に面する部分の余分な部分を研磨し、図面に示す形状となるよう加工します。この段階で微小な変化は大きな問題ではありませんが、それぞれの羽根は僅かにキャンバー円弧を描く形状であること。羽根の形状は焼く15mm半径の線状です。羽根の根元部の十分な強度を確保するため、ブレードの厚みは羽根輪の中心部へ向かうにつれて増加する形状であること。ブレードの先端部厚みは0.7mm以上としないこと。ブレードは後方へ向けてテーパ付とし、ブレード前面は円形を持たせること。

それぞれのタービン羽根の角度を検査します。正確に34度とします。この数値と違う羽根がある時、プライヤー等を利用して調整します。旋盤の心棒を利用して羽根輪をクランプし、正確に回転するかどうか確認します。次に寸法通りの形状に最終切削を行います。タービン羽根を先述の回転やすりを使用して研磨します。

羽根をびかびかに研磨しても、大きな出力増加とはなりません。タービン羽根等、特別の耐高温度材は一度アニール（焼き戻し）処理を行うと内部負荷より耐用性がより強くなります。材料別のアニール温度及び時間は関連する書籍等で検索下さい。

キャスト製のタービン羽根は本エンジンに対して非常に好い選択です。ブレードの角度及び形状は一般的に高回転用として設計・生産されています。最善の結果は、タービンノズル羽根がタービン羽根と互いに良い効率を生み出す組み合わせとなることです。もし貴方がキャスト製タービン羽根を保有されていたら、ノズルガイド羽根は僅かに外周方向へ平らに加工します。羽根輪は外径8mmの穴に装着します。キャストの余剰部は、旋盤の低速回転で小さな案内穴より開始して、削り取ります。羽根輪は旋盤のチャック内側よりクランプします。或いは、穴の開いたアルミリングを羽根輪の上に巻きつけて保護し、是を外側よりクランプしても良いでしょう。重要なことは、タービン羽根輪は可能な限り円滑且つ正確に回転することです。8mmの穴あけについて、最善の方法は8mm径のタングステン鋼のコンクリート工事用ドリルを次のように改良して使用します：ドリル先端を鋭角にする。同時に先端を僅かに、径7.8mmに調整する。次にリーマーにより正確な内径の調整加工を行います。タービン羽根の直径を図面に示す正確な寸法に加工します。再度、タングステン鋼のバイトを使用すると良いでしょう。作業時、必ず眼球保護めがねを着用する事。グラインダーがありましたら、これで最終寸法まで研磨します。キャスト製タービンの隙間クリアランスは非常に狭いです。それぞれの隙間において0.2mm以上にはなりません。

専用にキャスト加工された羽根輪は、卓越した耐久性があります。従いまして、十分な強度がありますが、許容範囲の回転数以上の数値を超えて回転させないこと。

タービン羽根輪の原生産企業様による基本仕様表を良く参照します。

バランス取り作業

タービン羽根輪のバランス取りはタービン出力軸に装着の上、行います。装着は正確に行います。羽根輪が僅かの固さを感じながら軸に装着されるような正確加工が必要です。新品のベアリング、径22mm ISO608を装着します。ベアリングにはグリースが塗布されていますが、これはケロシンあるいはガソリンで拭き取ります。

ここで、セラミックベアリングを使用するとより好いです。この段階で全体を綺麗にします。微小な金属破片が一つでもあると、バランス取り作業時に問題となります。

バランス取り作業専用のベアリングセットを予め準備されます事をお勧めします。

そして、これらベアリングを外部の塵やごみの混入がないよう、管理保管します。

出力軸、ベアリング及びタービン羽根輪を内部径22mmの金属チューブに挿入します。

次の作業は、出力軸を組んだチューブを平坦な台座に置き、注意深く且つ継続して前後に約4分の1周回転させます。この作業は出力軸を自動的に、重い側が底面になるような動作となります。この部分についてタービン羽根輪にフェルトペン等により記しを付けます。このブレード部分の素材を、グラインダーを使用して注意深く研磨削除します。グラインダー作業を行う時、タービン羽根のベアリングをテープで保護します。羽根輪の内側より決して素材を研磨削除しないこと。バランス取りを行う時、羽根輪本体に決してドリル加工で研磨削除或いは不均衡な形状の加工をしないこと。キャスト製羽根輪を使用している時、可能な限り、バランス取りはリング部より素材を研磨削除します。作業時、リング部や羽根部が弱体化するような作業は、絶対に行わない事。

少しの練習作業により、全体のバランスが合う作業感覚を得る事ができるでしょう。

そして円滑に回転する軸を得る事が出来るでしょう。ここで記述している方法は、必要十分な精密さがあります。清潔なベアリングを装着した状態で、出力軸のバランス取りが完了しましたら、アッセンブリーに使用可能です。

コンプレッサー システム

コンプレッサーカバー（部品番号1）を最初に作ります。この部品は、図面に示すようにブロック固体より加工します。ここで重要な部分は、コンプレッサー羽根を包む部分です。この部分は羽根輪との隙間が一定の0.3mmとなるようにします。

42.6mmの内径に対して素材を回転させ、機械加工により切削が正確にできるよう、内側をチャックにクランプします。ここで説明する以外のコンプレッサー羽根を使用す

る場合、同様の数値で適合するように加工します。本書に説明するように加工してください。コンプレッサーを持ち上げ、更に削除できる部分がないかどうか繰り返し確認します。満足できましたら、そのほかの部分について、図面に沿って加工します。取り付け台座部のねじ穴は、更に工程が進むまで、穴あけはしません。

デヒューザー 羽根ホルダー（部品番号3）を図面に合わせて加工します。ベアリング冷却用の空気ダクトは、出力軸がホルダーに接合する部分に機械加工することにご注意下さい。それぞれのダクトは5 mm 幅、取り付けねじの付近に設定します。ダクトは深さ1 mmですが、これで充分です。

コンプレッサーで圧縮された少量の空気は、これらのダクトを通過し、同時に、燃料の混合オイルが吹き付けられます。空気は両側のベアリングを吹き付け出力軸に沿って後方へ流れます。

コンプレッサー カバー用固定ネジ3個は、外径84 mmの位置に M4 ネジをタップ加工します。デヒューザー羽根用の溝を表面に野書きます。そして、電気のこぎりで切断します。標準のこ刃は約1 mmの幅があります。3個の溝はねじ穴の中心より正確に溝きりがなされていること。1 mm厚の金属シートよりデヒューザー羽根（部品3.1）を、僅かに大きい寸法で切断します。エポキシ接着剤で固定する部位の強度を強化するため、18枚中15枚の羽根接合ラインに沿って、さら穴を開けると良いです。固定用ねじが一致するまでスロット部にブレードは接着しないこと。

接着剤が硬化しましたら、コンプレッサー カバーの形状に合致するようデヒューザー羽根を微調整します。デヒューザー羽根座を出力軸トンネルにねじで固定し、本体を旋盤にクランプの上、良く切れる切削工具によりブレードを加工します。コンプレッサー羽根輪の直後部分は、特別重要な部分であり、この部分のブレード高さは正確に5 mmとしなければなりません。ガスが偏向する部分の後方で発生するブレードとケースの間に位置するアキシヤル側のいかなる隙間について重要ではありません。

コンプレッサー羽根に出力軸を挿入し、コンプレッサー カバーの中心出しを行い、取り付けねじの位置を野書きます。ブレード ダクトを通過するねじ穴よりデヒューザー羽根部をねじ固定します。次に、残りのデヒューザー羽根3個を取り付けます。それぞれの羽根を2分割し、エポキシ接着剤により、ねじ穴に沿って正確に接着します。

他の方法として、デヒューザー羽根を固形ブロック材より機械加工します。これは貴方が精密 CNC 自動切削機械を保有している場合です。羽根は21度の角度で開始します。ラジアル/アキシヤル羽根は2個のリングに作ります。M2 ねじ山を15個のラジアル羽根部に加工してカバー取り付けねじとなります。従いまして、コンプレッサー カバーが問題なく装着するよう微調整します。アキシヤル羽根部の直径は、初期値として98 mmです。故に、各羽根長は一定の6 mmです。

圧縮燃焼室

本体は薄いステンレス シート材より加工されます。 適合する材料は0.3 mm厚のシート材です。 入手可能であれば、この厚みのシート材を使用します。 もし入手が不可能である時、0.5 mm厚のシート材を使用します。 この部材は注意をして正確に溶接します。 前部フロント カバー（部品番号9.2）は硬木或いはアルミ材で成型した型に圧着して形成します。 前部はなだらかなキャンバー（そり）が付くように加工します。 圧縮燃焼室の前部カバーの曲率はプライマリー部にかけて、なだらかな曲線率とるように加工します。この形状により、空気流量の滞留部を減少する作用が生じ、不燃焼の燃料は更に迅速に再燃します。 外部ジャケット（部品番号8）及び圧縮燃焼室の内部セクションは微小の“がた”も無いように接合します。 空気の流量が漏れないよう、この部分に僅かの隙間もないことが重要です。 圧縮燃焼室全体として、ノズル ガイド羽根システムとの接合は“きつめ”とならないよう注意します。 通常、圧縮燃焼室の構成部品は他の構成品と組み付けた時、極めて堅い組み合わせになります。 もし、希望があれば、この構成部品は、後の工程で溶接することができます。 これら3種の金属シートを圧縮燃焼室のジャケットに溶接します。

最初に金属シートに穴を開けてから溶接しても良いですし、溶接してから金属シートに穴を開けても良いです。 いずれの場合でも、径4 mm以上の穴は、打ち抜きパンチ式で行うと、皿状の穴となり、バリの発生も防ぐことができます。 これらの寸法による穴により冷たい空気がジェット状に流入します。 凹み付穴は最初に1 mm小さい寸法のドリルを使用し、次に図面指定のドリルで穴あけを行います。 他の穴あけ加工については通常の注意を以って作業をします。

燃料噴霧チューブ（部品番号8.4）は外径6.35 mm、内径5.55 mmステンレス鋼（1/4 インチ） チューブです。 それぞれのチューブは全長70 mmより加工し、片方の末端を径8 mmにベル状に広げます。 この作業は、チューブを旋盤にクランプし、センター パンチをチューブ中心に当てて緩やかな速度で行うと良いです。 チューブを図面に示す寸法に曲げます。 噴霧チューブは図面に示す位置に、硬質半田付を行うと良いでしょう。

次にインジェクター リング（部品番号10）を作ります。 インジェクター チューブは医療用注射針より加工します。 これらの注射針は、先にインジェクター リングに仮装着後、銀ロー付で固定します。 各インジェクターが均等に噴霧しているかどうか、プロパン ガスを使用することで試験できます。 燃料噴霧チューブと同じ材料を使用して燃料噴霧パイプを半田付けします。 燃料ラインは短いパイプを接続してエンジン外部へ導きます。 専用のニップルを装着の上、燃料配管とします。 インジェクター リングは Inox ワイヤーにより指定位置に固定します。 圧縮燃焼室の後部にこのワイヤーを通すための穴を開ける必要があるでしょう。 インジェクター チューブは燃料噴霧チュ

ープ内部に挿入するため、この形状に合うよう微調整する必要があります。

本体ハウジング

ジャケット（ハウジング、 ケース）に最適な材料は薄いステンレス シート材です。この材料を半田付するかスポット溶接します。 一般の鋼鉄シート材もジャケットに適用できますが、完成時の外観があまり美しくありません。 テール エンド後端部（部品番号 15. 2）のみステンレス シート材で作る必要があります。 この部品は旋盤により一枚材より引き伸ばすことも出来ます。 この作り方ですと、滑らかな円形の美しい外観になり、且つ丈夫な構造になります。 このために最も簡単な工作方法は、アルミ材より型を作ります。 この型は、特別な形状や R をつける必要はありません。 テール エンド後端部はスポット溶接或いは半田付作業が簡単になるようジャケットに可能な限りきつめに装着するよう加工します。 切削加工時に、材料を焼き戻し作業すると良いでしょう。これらの作業により、3 部品は切断面の綺麗な円錐状の形状になるでしょう。

作業にあたり、ジャケットの全長を図面寸法よりも 2 mm 長く加工しますと、何らかの修正時に便利です。 ジャケット （部品番号 15. 1）はコンプレッサー カバー（部品番号 1）との装着時、きつめではないこと。 図面に合わせて、ジャケット後部に燃料供給パイプ用の穴を開けます。 同時にテール エンド後端部に圧力抜きニップル（部品番号 18）を装着します。 使用しないニップルは、断面積が小さいので、エンジン回転中閉じる必要はありません。 補助燃料の供給パイプについても、この工程で取り付けます。 エンジン本体を組み立てる時、燃料噴射ノズルに沿って正確に挿入します。もし貴方がジャケットを一般の鋼鉄材より製作された場合、組み立てが完了しましたら、耐熱塗料を製造社の指示により塗布し乾燥させます。

個々の完成部品の組み付け

個々の完成部品は図面に示すとおりに組み付けます。 出力軸トンネル、コンプレッサーデヒューザー部、ローター及びジャケットを仮組みします。 コンプレッサー カバーは 3 箇所のねじ固定部により、手ねじの締め付け程度で仮固定します。 これらのねじを手止めする時、コンプレッサー羽根輪が中心部に位置すること。 出力軸は、コンプレッサー羽根輪、 スペーサー、コンプレッサー用ベアリングの次に、タービン羽根輪とベアリングを装着の上、後部へ続きます。

ノズル ガイド羽根部とジャケットは恒久的に固定します。 本体を仮組みする時、ガイド羽根部の耳フランジに 4～5 枚のアルミ ホイルを挟んで固定します。 10 箇所の

ねじにより固定しますが、この時、ねじの締め順番は、自動車のバルブ カバーねじを締め付ける手順のように、対角方向に均等な締め付けトルクで行います。 次に圧縮燃焼室を本体に装着し、燃料配管パイプをニップルに緩み止めバンドを利用して固定します。この接続方法は簡単ですが、圧縮燃焼室がノズル ガイド羽根部により位置決めがなされるため、確実な方法です。 個々の部品を組み付ける時、補助燃料供給チューブを燃料噴霧チューブの一つに正確な位置で装着することが重要です。

次に、コンプレッサー部を出力軸トンネルと合わせて本体に装着します。 ある長さのテフロン テープを振り“コード” 状にします。 そして、コンプレッサー カバーに機械加工された溝に敷きます。 尚、細いゴム バンドがあればこちらが良いでしょう。 オイル流れがある時、ゴム バンドがこれをはじきます。 外側に絶縁テープを一巻きします。 初期の低圧力による実験時、絶縁テープが効果的に作用します。

次に、本体後部よりタービン羽根輪を装着します。 この時、フィラー（隙間）ゲージを使用して、間隔が0. 2 5 mmとなるよう精査します。 コンプレッサー羽根輪を出力軸に、手ねじで締め付け固定します。 手先の締め付けトルク程度であること。 ここは逆（半時計周りの締め付け方向）ねじです。 次にスラスト ノズルを装着します。ここでは、ノズル フランジ部の2～3箇所ですねじ止めするのみで充分です。本体後部は、ねじ止め用の穴とねじ切りがたくさんあります。 エンジンを分解する時、出力軸を後方へ引き抜きます。 これで、スラスト ノズルとベアリングと圧ばねが無い状態ですが、エンジン本体が仮組み完成です。

はじめてエンジンを運転する前に

最初に貴方の模型ジェット エンジンを運転する時、プロパン ガスを使用します。プロパンは、圧縮燃焼室で良く燃焼しそして計測しやすいため、初期テスト時に使用します。 もし可能であれば、5 k gのプロパン ガスの容器とこれに装着する挿入ガンを準備します。 より小さな容器ですと、エンジンを始動する時、問題が生じます。 これはシステムとして十分なガス圧を供給する必要があるためです。 キャンプ用製品の転用は良くありません。 ケロシン燃料配管パイプにガスを接続します。 エンジンを始動回転させるには、スターター 送風器具或いは圧縮エアーが必要になります。 実際上、ローター直接回転の自動式スターター モーターを取り付けることもできますが、少々面倒な作業になります。 送風量が強いほど、エンジンの始動回転がし易くなります。掃除機の回転ファンは良い始動用スターター ファンになります。 他の器具として、圧縮圧を計測するための U 型チューブが付属する水圧計が必要になります。 これは本体の未使用ニップルに接続します。 水圧計の1 c mは1 ミリ bar （0. 0 0 1 bar）に該当します。

ベアリング潤滑オイルを準備します。 20ml のミシン オイルをオイラー タンクに詰めます。 これをエンジンの第2接続口よりオイルを注入します。これで本体の注入システムよりベアリングにオイルが供給されます。 エンジンがケロシンで運転される時、オイル潤滑は燃料混合式で行われます。

屋外の堅固な取り付け台座に、薄手のシート材により取り付けバンドを加工し、両側2個の締め付けねじにより、エンジン本体を固定します。 この段階では、スラスト計測用ゲージは必要ありません。 エンジンの補器類を接続します : オイル、 圧力計 そしてプロパンです。 助手の方に、タービン羽根輪が観察できるようエンジン斜め後方に立っていただきます。 初期始動時、タービン羽根輪はさくらんぼ（チェリー）の赤い色より明るい色になりません。

実際の始動は簡単です。

- 始動用ファンを前面ローター部に吹き付けます。
- 次に、始動用ファンを前面ローター部より離します。
- スロットルを僅かに開けて、電池式点火スティックにより本体後方排気部よりガスに点火します。
- ぽっぽっ、という軽い爆発音と共に、排気部より火炎が後方へ出ます。
- この時点で、スロットルを更に（しかし僅かに）開けます。
- 同時に、始動用ファンを前面ローターに吹き付けます。
- ローター回転速度が上昇し、同時に圧力が増加します。
- エンジン本体の組み立て精度が正しく出来ていれば、本体の圧力は水圧計数値で、少なくとも30cmを示します。
- 始動用ファンを前面ローター部より離します。

この状態で、エンジンはある程度の高回転で運転しているはずです。 タービン羽根輪の先端が僅かに赤みを帯びているでしょう。 この時、エンジン本体に振動が発生、羽根輪の回転音が不調である時、本体の破損を防ぐため、即座にガスの供給を止めます。

エンジン本体の温度が冷えるのを待ち、不具合部を精査します。 もし、出力軸が滑らかに回転し振動が無い状態で、エンジンの調子が出ない場合、精査する箇所はたくさんあります。 ノズル ガイド羽根とタービン羽根の形状が正確な加工寸法になっているかどうか精査します。 更に一点、精査する部分は圧縮燃焼室です。 エンジン本体の温度分配が均等であるかどうか、内部を確認します。 もし、排気炎が見える時、圧縮燃焼室を精査します。 この場合、燃料噴霧リングを精査します。 検査後、再度試験をしますが、プロパン ガスでエンジンが満足して回転するまでケロシンで運転始動を行わないこと。

ケロシン燃料を使用してベンチ テストを行う前に

最高回転域でエンジンの試験をする時、堅固なテスト ベンチが必要になります。 特にケロシン燃料を使用し、燃料供給の補器類を接続する場合、特別なベンチが必要になります。 ケロシン燃料でエンジン始動試験を行う時、必ず、以下に説明する注意を良く参照して下さい。 とりわけ、エンジン本体の側面の位置に、助手や見学者が立たないようにします。 同時に、エンジン本体後方にも人が立たないようにします。

燃料ポンプ、 燃料タンク及びその他の補器類

テスト ベンチの空き空間に約 1 L に燃料タンクを装着します。 燃料タンクはガソリン、ディーゼル、 ケロシンに耐用性があること。 芝刈り機のプラスチック製タンクは十分な耐用性があります。 燃料タンクと燃料ポンプの間に燃料フィルターを装着します。 自動車の燃料用フィルター或いは RC 模型エンジン用の大型フィルターが良いでしょう。 燃料ポンプはギアー式で数々の種類がありますが、残念ながら、総てのポンプがケロシン耐用型ではありません。 一般的に、真鍮製ギアーのポンプを推奨します。 KAVAN 社製品に良いものがあります。 これは DC 12 V 作動品のみ入手可能ですが、DC 10 V で十分な噴射圧を準備します。 燃料ポンプを操作するには、私達は電気式フライト速度コントローラー或いは可変電圧用コントローラーが必要になります。

燃料ポンプとエンジンの間に、燃料バルブが必要になります。 このバルブは、高品質の耐久性が高く微調整が出来る製品が必要です。 養魚槽用に設計されたエアー バルブが効率よく作動します。 この時、このエアー バルブと同一に使用するホース類も入手します。 燃料供給用の配管において、安価で簡単なもの、例えば PVC チューブなどはジェット 燃料の供給に抵抗を生じるため良くありません。 この種の配管ホースは、プラスチック化現象、として知られる問題があります。 しかし、ケロシン燃料はこのプラスチック化現象に対して問題ありません。 使用後結果として、数ヵ月後、配管ホースが堅くなりますが、材質本体の強度が増すのみです。

料理用の秤をテスト ベンチに取り付けると、エンジンのスラストを計測する時、簡単に行えます。 圧力計も同時にベンチに取り付けます。 圧力計はエンジン本体の未使用ニップルに接続します。 約 1.5 bar まで計測できるものを使用します。 この計測値が正確であれば、エンジン本体の試験運転を安全に行うことが出来ます。 計測値直読式が良いでしょう。 模型ジェット エンジン本体は車輪付きの移動式台に装着します。 その他、エンジン本体へ接続する配管は、移動式台の移動に影響しないように行うこと。 移動式台は料理用秤にチェーン等で接続します。

ケロシン燃料でエンジンを運転

エンジンがケロシン燃料で運転する時、回転速度は燃料の供給量による、この事を良く認識する必要があります。この点について、ジェットエンジンの最高回転速で回転する機械は他にあまり無いでしょう。これはどのような事かと云いますと、少しの不注意により許容限度を超える回転に安易に達してしまいます。もし、出力がこの許容限度を超えますと、一般的な結果として、タービン羽根輪が碎けてケースが破損します。従いまして、圧力計を絶えず目視確認します。或いは、回転計を確認します。後日、エンジンを機体に搭載時、燃料ポンプの出力は、エンジン回転数が許容範囲を超えないように、制御しなければなりません。

次に、燃料タンクに J E T A 1 ケロシン燃料を満たします。ベアリング潤滑用に模型ジェットエンジン専用の潤滑オイル或いは2サイクルエンジン用潤滑オイルをケロシン1Lに対して30mlを混合します。もし、ケロシンを入手することが出来ない時、ディーゼル燃料を使用することも出来ます。潤滑オイル用のチューブは透明なものを利用し、T型分流コネクターを使用しますと、潤滑供給が問題なく作動しているかどうか、目視確認することが出来ます。引き込み脚用に使用するPVCホースが良いでしょう。本書の図式に合わせて、総ての配管類が接続完了しましたら、エンジンを始動することができます。

- エンジン本体のガス用接続ニップルにプロパンガスを接続します。
- 先に説明した方法と同様に送風ファンの作業をします。
- 先に説明した方法と同様にエンジンを始動します。
- エンジンが始動回転しましたら、即、燃料ポンプを作動させ、流量バルブを注意深く開けます。
- タービンの回転速度が増加し、圧力計数値が減少します。
- 送風ファンとプロパンガスは不要になります。
- エンジンスラスト計測用移動台車が動き出します。
- 圧力計が少なくとも0.1barを示すまで燃料バルブを開けます。

この圧力により、回転数は約35000rpmを僅かに超える数値となります。

エンジンのアイドル速度は、この流量バルブで設定します。

エンジンはこの状態より、少しずつ回転数を上げることが出来ます。初期の始動試験において、タービン車輪を鏡等で目視確認することが重要です。一般的に、回転速度が上昇すると、排気ガス温度は下がります。そして、赤熱光は見えません。5～6回の始動試験の後、エンジン回転数を成功的に増速することができます。この後、エンジンの始動回転時毎、エンジン本体の振動と異音に注意します。もし、貴方のタービンがス

ステンレス鋼材より製作されている場合、本体の最大圧は0.7 bar を超えないこと。

Halt 等、他の高耐熱材を使用されている場合、ベアリングを保護するため最大圧は1 bar を超えないこと。 標準の天候且つ気圧において、この数値でエンジンは約105000 rpmで回転します。

数度の始動試験が完了しましたら、エンジンの始動に慣れることでしょう。 ここで重要な部分は、送風ファンがいつ必要になるかの判断し、いつタービンがアイドリング回転になるか、という点でしょう。 数回の始動練習により、模型ピストン エンジンの始動と同じくらい容易に始動できるようになるでしょう。

異なるコンプレッサーを使用する時の概略説明

出力増大のための要求は、模型家の間では熱い願望です。 エンジンのスラストを増大するには、2つの方法があります。

現状のエンジンを更にパワフルにする、或いはより大きなエンジンを製作する、とうことになります。 私の考えとしては、後者の方法が良いです。 少なくとも、理論上、エンジン本体より幾分の出力増加は、ガス温度を増加させ回転数を増加させることで可能ですが、アマチュアへの作業技術を遥かにこえる技量が求められます。

以下の項において、模型ジェット エンジンに関する本質的な寸法と断面図を記述します。 この情報は、自動車用ターボ チャージャーを基本に用いて模型ジェット エンジンを製作する上における、事前経験となるよう記述します。 このアプローチは、この種の殆どのコンプレッサー羽根輪はほぼ同一の幾何学的形状を持ち、故に、算出する数値はほぼ同一です。 勿論、ここで述べる数式は、異なる羽根輪が算出する出力と圧力に近似するよう期待はできません。 この理由により、貴方が製作するガス タービンの性能を保証するものではありません。 そして大型のエンジンを製作するとき、“以前に製作経験があること”を追加して記述します。 これにより、製作者は誤った作業を避ける事が出来ます。 もし、貴方が使用を予定する自動車用ターボ チャージャーのコンプレッサーに関する性能表を入手することが出来るようでしたら、以下の項で記述する内容を更に価値のあるものとする事が出来るでしょう。

自動車用ターボ チャージャーで同一寸法の物は、トラック用ターボ チャージャーに使用されています。 コンプレッサー羽根輪のみ部品として入手する場合、エンジン修理工場或いはスクラップ ヤードより入手することが出来るでしょう。 或いは、修理用純正部品として購入することも出来るでしょう。 レトロ（後方）カーブ付羽根輪の使用も良いでしょう。 重要な寸法部分は、羽根輪の空気出口部におけるブレードの高さ h 及び羽根輪の外径 d_2 です。 これらの数値が高くなるほど、出力が増大し、故にスラストが増大します。

私達は、模型家は基本となる寸法は本書図面に示す数値及び製作上の注意に従うことを強く推奨します。一例として、もし貴方が径90mmの羽根輪を使用する場合、この時、寸法の拡大率は $90/66 = 1.364$ となります。圧縮燃焼室に加工する穴の径は、この拡大率に基づいて変更します。

しかしながら、穴を開ける数量は、そのまま、変更しません。燃料噴霧チューブと噴射ニードルは、先に記載に数値により変更します。尚、それぞれの形状は変更しません。少なくともスラストは、コンプレッサー羽根輪が同一の幾何学形状である時、 1.364 の2乗 $=1.86$ 倍になります。故に、外径の大きな羽根輪は、60N以上の出力の発生となり増大させます。排気ガス温度を低下させることが出来れば、輻合式排気コーンを装着することが出来ます。

総てのデータは同一の単位（メトリック法）です。計算値はエンジンの回転速度が300m/秒時の数値です。

最大回転速度はより低くなります。これは寸法効果によるものです。筆者の経験では、タービンに特別耐高温材を使用した場合、最大回転数は $104000 / 1.364 = 77000 \text{ rpm}$ となり、故に、タービン材質は僅かにグレードを下げる事が出来ます。もし、貴方がより高速でエンジンを回転させる場合、出力軸の負荷曲がり強度を再計算します。たくさんのコンプレッサー羽根輪は、羽根輪裏側に補強が施されています。この結果として、質量が増え、重心位置が希望しない位置にあります。充分な高速による負荷曲がりに対する耐用を得るため、これに合致する太い出力軸を使用し、故に大型のベアリングを使用します。いかなる場合において、羽根輪に追加加工をすることは絶対に行ってはなりません。これを行いますと、高速回転域において嚴重な問題が発生する可能性があります。

模型ジェット エンジンの性能を最大に活用するには

この項において、私達は小さなガス タービンが更にパワフルとなるよう取り組むことの出来る技術について考えてみます。この総ての情報は、該当する機材が既に可動品であり、貴方が模型ジェット エンジンの取り扱いが出来ることを前提とします。

ジェット エンジンのスラストを増加させるには、理論上、主に2つの方法があります。最大回転数を増加する そして 全体の効率を上げる、これにより増加した運動エネルギーにより更なるスラストを産出。しかし、エンジンの速度を上げると問題が現出します。ある短い期間、どの模型ジェット エンジンについても高い回転数で使用することが出来ます。しかし、これは耐用時間を著しく短くします。従いまして、私達は、効率化の限度を決めて行うことになります。

コンプレッサーとタービンを含むローター システム全体と機械的損失の効率を最も良

く示すのは、排気ガス温度です。

エンジン本体のいかなる改善度合いは、排気温度を計測することでモニターすることができます。もし、貴方が排気ガス温度を600度C以下に管理することが出来るとした場合、排気コーンを狭くして更にスラストを得ることが出来ます。

これを行いますと、僅かに排気温度が上昇しますが、しかし、エンジンの排気速度は増大し、更に多くのスラストを得ることが出来ます。

筆者の経験によると、模型ジェットエンジンの回転性能を最大限に改善するについて圧縮燃焼室の効率を上げる方法があります。ホットスポット、これは燃焼室内部に点在する小さな部分が異常に赤熱すること、をシステムの改良により取り除きます。

サーモメーターを利用して、燃焼室内部の温度の低い部分を検索します。温度の低い部分は、ガスが殆どタービン周辺に押し出されることが無く、効率を低下させます。これに対する最善の方法は、プライヤーを利用して燃料噴射パイプの曲げ曲率を変化させ、再度、試験運転を行います。この試験運転は、プロパンガスで行うと良いでしょう。

燃料噴射チューブの曲げ率、方向はそれぞれのエンジンにより異なります。最善の形状を探すことは試験運転しかありません。Kurt Schrecklingの図面にあるような、コイル巻き式噴射チューブを装着した圧縮燃焼室を使用している場合、Hot Spotsとの改善方法について、彼の示す方法を利用します。例えば、圧縮燃焼室の空気流入経路の調整及びインジェクターの開口部をワイヤーで狭くする等です。貴方の製作された圧縮燃焼室による平均排気ガス温度が100度Kよりも低い場合、性能の良い圧縮燃焼室と云うことが出来ます。圧縮燃焼室の適当な位置に、穴数を増やしても、性能を改善することは出来ません。これとは全く反対に、圧縮燃焼室に大きな穴がある場合、全く効率的な作動をしません。

効率を上げるもう一つの方法は、エンジン部品を加工し組み付ける時、可能な限り精密に行うことです。とりわけ、ガスが高速で流れる部分は精密に加工します。コンプレッサーデヒューザー部がこの精密加工部に該当します。コンプレッサーよりデヒューザー羽根部本体への接合部は、可能な限り滑らかであり、均等であること。デヒューザー羽根は前部より後部へテーパが付く、総ての羽根が図面記載の角度であること。コンプレッサーを研磨しても効率に変化はありません。一方、コンプレッサー表面は、オイル混合物とごみのため初期の輝きが失われます。他方、ある程度の粗さは空気の流れが剥がれなくする効果があります。

タービン部の隙間を減少すると、極めて高く効率が改善します。しかしながら、この隙間が0.25mm以下であるとき、これは既に貴方の最善加工数値内です。タービン羽根輪は大きなポテンシャルを持っています。タービンエンジンの専門家は、タービン羽根根元をより厚くすることで流量の偏向を改善します。

タービンとコンプレッサーの相性を決めることは、微妙な関係です。それぞれの精度を限定することは困難であり、アマチュアが利用できる機材では厳密に精査が出来ません。

本項における目的は、貴方が使用しているローターは最大の効率で運転しているかどうかを確かめることです。 これを行うには、精密なスタンドによりコンプレッサーとタービンの羽根曲がり形状を精査することになります。 しかし、模型ジェット エンジンにおける羽根輪について最大の誤りは、貴方が僅かの経験を得ることで知ることが出来ます。 小さな旗形状の金属シート材によりタービン羽根の後部におけるガス流の方向を検査することが出来ます。 タービンの回転方向に対して、反対方向へ、巻き角度が15度以下であれば普通状態です。 より大きな偏向渦巻きは一般的に、大きな反動レベルを示します。 タービン ノズル ガイド羽根部の断面を狭くし、一方、ローター部の断面を拡大するとこの問題は改善します。 両方の影響は、ブレードの高さ或いはブレードの角度を調整することで改善することが出来ます。 もし、回転方向において除去できない渦巻き流がある場合、上記に反対の対処法です。 ブレードの角度をプライヤーで変更することも経験上の改善として利用できます。 たいいていの場合、数 mm の変更で極めて大きな変化があります。 もし、エンジン内部の流量状態について全体図が知りたい場合、それぞれの部位におけるベクトル図を作成すると良いでしょう。

以上の方法により、改善作業が完了しましたら、排気ガス温度が大きく低下したことを思います。 ここで僅かに狭い排気コーンを装着すると良いでしょう。 これにより排気速度を増加させ、故にスラストを増加します。 しかし、排気ガスの不適切な渦巻き流及びタービン羽根後部の渦巻きに充分注意します。

全体において可能であれば、ガスの増速が渦巻き方向になることを防ぐため、排気コーンの外側寸法を変更しないことが最善です。 この結果として、コーンの軸上に無い流量により、断面部が効果的部分に狭くなり、そのための排気ガス温度が上昇します。 もう一つの改善点として、内部コーンを拡大することでノズルをより狭くすることです。 ここで再記になりますが、これらを行うに付いて、貴方は模型ジェット エンジンの実験によることを認識しており、いかなる場合であっても、エンジン全開時、排気温度が650度C以上とならないよう、充分に注意します。

以上

訳 : (株) ルミナー エアー モデルス

注記 : 個人の勉強であり、誤記・誤訳は予め了承下さい。

補足添付資料

1. 小型品 : Micro-Turbine
2. 相当回数の改善後、この Mini Turbine はスラスト 4 0 N を発生
3. トランスフォーマーを転用したこのスポット溶接機により厚み 1 mm までの金属シート材を接合することが出来ます
4. 別紙表参照
5. エンジンが信頼性を持って運転するには低い排気温度が非常に重要 (5 5 7 度 C)
6. Micro-Turbine の圧縮燃焼室 (後部より)
7. ローター羽根を研磨する
8. デヒューザー システム背面の冷却チャンネル溝と潤滑用チューブ
9. 別紙表参照
- 1 0. 別紙表参照
- 1 1. Micro-Turbine の断面図 (各番号は別紙 1 0 の部品表に対応)
- 1 2. 完全に平坦な面上で出力軸のバランス取りを行う
- 1 3. 別紙表参照
- 1 4. タービン ガイド羽根 システムの内部リング
- 1 5. ブレードとスタビライザーを同時に溶接
- 1 6. 出力軸は大きな寸法の自動車用ソケット ボルト、 M 1 6 x 1 8 0 より加工する

- 1 7. 出力軸を抜き取った後のエンジン後面 出力軸トンネルが見える
- 1 8. 半完成のタービン羽根 2 1 枚羽根付も効率が良い 但し筆者の不注意により
画像品は失敗作
- 1 9. **Micro-Turbine** のローター (右 コンプレッサー羽根、 左 タービン羽根 及
び出力軸のアッセンブリーをローターと本書では呼称)
- 2 0. 別紙表参照
- 2 1. 別紙表参照
- 2 2. 加工初期段階のデヒューザー フランジ (耳)
- 2 3. 完成後のデヒューザー システム (中央の羽根輪はコンプレッサー)
- 2 4. 圧縮燃焼室 分解品 丸い環状品は燃料噴射チューブ
- 2 5. 別紙参照
- 2 6. 別紙参照
- 2 7. プロパン ガスで燃料噴射リングをテストしているところ
- 2 8. エンジン本体は簡単に各部品コンポーネントに分解できる
- 2 9. 始動用ファンとして改造された掃除機
- 3 0. 自動車用真空掃除器より製作された始動用ファン 画像品はファン風が弱くエン
ジン本体に直接送風する必要がある
- 3 1. エンジン テスト ベンチにおけるエンジンの配置と補器類の接続
- 3 2. エンジン始動試験後のテスト ベンチ 屋外において騒音問題の発生しない
場所で始動試験を行うこと

3 3. テスト ベンチにおいてほぼ全開で運転する Micro-Turbine

3 4. コンプレッサの圧力が 0. 8 5 bar であってもスラスト ゲージはほぼ最大値を示している

3 5. 同一の模型ジェット エンジンを計算する場合の定則

重要な径と角度についての表

コンプレッサの形状

レトロ カーブ付

数値 : d_2, h

$$d_3 = 1.12 \times d_2$$

$$d_4 = 1.67 \times d_2$$

$$\alpha = 21^\circ$$

ブレード数 = 1 8

ラジアル チップ付

数値 : d_2, h

$$d_3 = 1.1 \times d_2$$

$$d_4 = 1.7 \times d_2$$

$$\alpha = 18^\circ$$

ブレード数 = 1 8

圧縮燃焼室の穴径計算時の縮尺

$$f = \sqrt{(3030 \times d_2 \times h)}$$

燃料噴射チューブの数

$$(18200 \times d_2 \times h)$$

$$f = \sqrt{(2600 \times d_2 \times h)}$$

燃料噴射チューブの数

$$(16000 \times d_2 \times h)$$

タービン ガイド羽根部

$d_a = d_2$ として

$$2$$

$$d_1 = \sqrt{(d_2 - 6.8 \times d_2 \times h)}$$

$d_a = d_2$ として

$$2$$

$$d_1 = \sqrt{(d_2 - 5.3 \times d_2 \times h)}$$

$\alpha_{ngv} = 30^\circ$ の時

ブレード数 1 1 或いは 1 3

$\alpha_{ngv} = 30^\circ$ の時

ブレード数 1 1, 1 3 或いは 1 7

タービン羽根

$$d_a = d_2 - 2 \times \text{Gap} = 0.99 \times d$$

$$d_a = d_2 - 2 \times \text{Gap} = 0.99 \times d_2$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{d_2^2 - 7.2 \times d_2 \times h}{2}} \quad d_1 = \sqrt{\frac{d_2^2 - 5.8 \times d_2 \times h}{2}}$$

$\alpha_{\text{wheel}} = 34^\circ$ の時

ブレード数 19 或いは 21

$\alpha_{\text{wheel}} = 34^\circ$ の時

21 或いは 23

* 表 3.7 を同時に参照

3.6 中間速度で運転している **Micro-Turbine** 排気コーンより火炎等の発生がありません 排気ガス温度は 550 度 C 故にタービン羽根輪は赤熱していません

3.7 一般的な成功例より得られた定則値によるデータ

コンプレッサー羽根輪

タービン羽根輪

コンプレッサー デヒューザー部

タービン デヒューザー部

3.8 短い排気コーンのある模型ジェット エンジン 僅かに大きめの断面部により 最大スロットル時の流速は約 230 m/秒

3.9 排気コーンを最大効率となるよう改良した **Mini - Turbine**

これによりエンジン発生のスラストが約 10% 増加 一方、排気ガス温度は一定で変化していない

以上

2012 年 9 月現在

訳 : (株) ルミナール エアー モデルス

注記 : 個人の勉強用であり、誤記・誤訳は予めご了承下さい。

別紙

4 破損までの時間/引っ張り負荷 一般的な材料によるタービン羽根輪 (N/mm²)

材料番号	化学式	商品名	張力 σ_B /	600度C	700度C	800度C
2.4816	NiCr15Fe	Inconel600	1000		80	40
2.4634	NiCo20Cr15	Nimonic105	1000	853	490	245
2.4632	NiCr20Co18Ti	Nimonic90	1000		373	117
2.4964	CoCr20W15Ni	L605、HN25	1000		216	118
1.4981	X8CrNiMONb1616	BohlerT255	1000	290	140	55
1.4841	X15CrNiSi2520	Ferrotherm4148	10000	130	44	20
1. 4300	X12CrNi188	Stainless Steel	100000	100	40	

σ_B / =時間後破損

- 9
- Part 6 (出力軸)
 - Part 4 (スペーサー ディスク)
 - Part 13 (スペーサー ディスク)
 - Part 17 (与圧スプリング)
 - Part 7 (出力軸トンネル)
 - Part 14. 1 (外部コーン)
 - Part 14. 2 (内部コーン)
 - Part 14. 3 (取って)
 - Part 14. 4 (スペーサー)
 - Part 14. 5 (取り付け用リング、2箇所)

ディスク幅は使用するタービン羽根により調整
自由長において15Nの張力があること

単位 : mm

部品番号	必要数量	部品名称	材質	寸法・他
1	1	コンプレッサー カバー	アルミ	加工
2	1	コンプレッサー羽根輪	Al-Si アロイ	出来上がり品 KKK5326 123 2037
3	1	コンプレッサー デヒューザー部	アルミ	付属部品の転用
3.1	18	ガイド羽根	アルミ	1mm厚 シート材
4	1	スペーサー ディスク	鋼鉄	加工
5	2	ボール ベアリング	ISO608	G3 シールド無し セラミックであれば尚良い
6	1	出力軸	ネジ材12. 9	機械ネジより加工
7	1	出力軸トンネル	アルミ	加工
8	1	圧縮燃焼室 カバー	ステンレス鋼	スポット溶接
8.1	1	圧縮燃焼室 スリーブ	ステンレス鋼	シート材、0. 3~0. 5mm厚
8.2	1	後部セクション	ステンレス鋼	シート材、0. 5mm厚
8.3	1	エンド ピース	ステンレス鋼	シート材、0. 5mm厚
8.4	6	スティック	ステンレス鋼	1/4インチ 或いは 6mm チューブ
			Inconel601	
9	1	圧縮燃焼室 内部セクション	ステンレス鋼	半田付
9.1	1	内部チューブ	ステンレス鋼	シート材、0. 3~0. 5mm厚
9.2	1	前部セクション	ステンレス鋼	シート材、0. 5mm厚、プレス
10	1	インジェクター リング	真鍮	半田付
10.1	1	インジェクター リング	真鍮	径4mm、50mm
10.2	6	インジェクター ニードル	医療用注射針	サイズ2、径0. 8mmx40mm
10.3	1	ガイド	M4	キャップ ネジ (穴あけ)
11	1	タービン ノズルガイド羽根	ステンレス鋼	付属部品の転用
			Inconel601	
11.1	1	内部リング	ステンレス鋼	加工
11.2	11	トンネル ガイド	ステンレス鋼	加工
11.3	11	羽根	ステンレス鋼	シート材、0. 7~1. 0mm厚
			Inconel601	
11.4	1	タービン ジャケット	ステンレス鋼	シート材、1. 5mm
11.5	1	フランジ (耳)	ステンレス鋼	シート材、1. 5mm
12	1	タービン羽根	耐高温材	加工 或いは 転用
13	1	スペーサー ディスク	ステンレス鋼	精密加工
14	1	スラスト ノズル	ステンレス鋼	スポット溶接
14.1	1	外部コーン	ステンレス鋼	シート材、0. 3~0. 5mm厚
14.2	1	内部コーン	ステンレス鋼	シート材、0. 3~0. 5mm厚

14.3	3	取って	ステンレス鋼	シート材、0.5mm厚
14.4	1	スペーサー	ステンレス鋼	シート材、0.3mm厚
14.5	2	取り付けリング	ステンレス鋼	シート材、0.5mm厚
15	1	ケース本体	ステンレス鋼	スポット溶接、半田付
15.1	1	ジャケット本体	ステンレス鋼	シート材、0.3mm厚
15.2	1	後部セクション	ステンレス鋼	シート材、0.5mm厚、プレス
15.3	3	穴部補強材	ステンレス鋼	シート材、0.5mm厚
15.4	1	ガイド	鋼鉄	チューブ、径5mm x 12mm
16	1	潤滑用チューブ	真鍮	径3mm x 30mm
17	1	与圧スプリング	鋼鉄	スラスト圧 15N
18	2	排圧ニップル	真鍮	径6mm
19	1	T 分流コネクター	真鍮 他	市販品
20	1	補助ガス インジェクター	真鍮 他	市販品

* ねじ、ナット、クリップ等他小物部品は表示されていません。

- 13 Part 11 (タービン ノズルガイド羽根)
 Part 11. 1 (内部リング)
 Part 11. 2 (トンネル ガイド)
 Part 11. 3 (羽根)
 Part 11. 4 (タービン ジャケット)
 Part 11. 5 (フランジ 耳)

Part 19 (T 分流コネクター)
 To lubrication 潤滑油へ
 Syringe needle 0.45x30 半田付
 Coming from fuel pump 燃料ポンプへ
 To the engine エンジンへ
 Drilling 径2mmの穴あけ

Part 18 (排圧ニップル 拡大図)

Part 20 (部品18を利用して、医療用注射針サイズ 2を図のように挿入し半田付する)

20 Part 12 (タービン羽根)

21 デヒューザー システム

Part 3 (コンプレッサー デヒューザー部)

Part 3. 1 (ガイド羽根)

代替のデヒューザー ブレード

詳細: 冷却空気用溝 (後面より見た時)
冷却空気用溝の深さ 1mm

詳細: アキシャル羽根 (円周部に30個)

25 圧縮燃焼室

Part 9 (圧縮燃焼室 内部セクション) Spot Weld: スポット溶接

Part 9. 1 (内部チューブ) Countersink: 皿穴加工

Part 9. 2 (前部セクション) Soldered: 半田付

Part 8 (圧縮燃焼室 カバー)

Part 8. 1 (圧縮燃焼室 スリーブ)

Part 8. 2 (後部セクション)

Part 8. 3 (エンド ピース)

Part 8. 4 (スティック)

Part 10. 1 (インジェクター リング)

Part 10. 2 (インジェクター ニードル)

Clips center the combustor (3 times around the periphery)

圧縮燃焼室の中央部へクリップ掛け (円周部に3箇所)

Fuel line, leaves the engine through the compressor cover of the back of the housing

燃料供給用パイプ、ハウジングの背面部のコンプレッサー カバーを通してエンジン外部へ

Cross section A-B (enlarged)

A-B部の拡大断面図

Half of the needle is pushed into the ring (10.1)

部品番号10. 1のリングに注射針の全長半分を挿入して半田付

- 26 Part 15 (ケース本体)
 Part 15. 1 (ジャケット本体)
 Part 15. 2 (後部セクション)
 Part 15. 3 (穴部補強材)
 Part 15. 4 (ガイド)
- Part 18 (排圧ニップル)
 Part 20 (補助ガス インジェクター)
- Part 3 (コンプレッサー デヒューザー部)

When assembled the needle should lie inside of a stick dia 5
組み付け時、ニードルは径5mmのチューブに挿入

Spun, without special former or radius
この部はたたき出し、特別指定の形状やR数値はありません。

6 times around the periphery
円周部に6箇所

For sealing 1mm wide and deep
シーリング用として幅1mm、深さ1mm

以上

2012年 9月現在

訳 : (株) ルミナー エアー モデルス
注記: 個人の勉強用であり、誤記・誤訳は予めご了承下さい。

900度C
21
93
39
59

