

## 航空機に搭載される空調システムに関する技術動向

### 1. 航空機に搭載される空調システムとは

一般的に空調装置と言うと、居住空間の温度を調節し、さらに湿度や空気の質も改善するという機能が主体である。しかし、高々度を飛行する航空機において、機外環境の変化にかかわらず機内を乗員・乗客にとって快適に維持するためには、「与圧」「換気」及び「温度調節」の3つが必要不可欠な基本機能となる。これらの使命を達成するため、航空機に搭載される空調システムは常に清浄な空気を適切な温度で供給しなければならない。

特に「与圧」は、キャビン（客席）やコックピット（操縦席）の機内空間を、日常活動ができる気圧に維持することであり、3つの機能の中では最も重要となる。例えば、12,000mを巡航する航空機にとって、万一「与圧」の機能が停止し、機内空間が機外と同じ圧力（約0.2気圧）まで減圧してしまうと、数秒で生命が脅かされるという危険な状態となる。

「換気」についても、狭く密閉された機内空間では、機能が停止すると二酸化炭素の濃度が急激に上昇し、短い時間で呼吸に支障がでるレベルに達する。このため「換気」は、規定に定められた空気量（一人当たり約250ℓ/分）が確保されなければならない。

機外空間は、地上1気圧の熱帯の高温多湿環境から、航空機が巡航する成層圏下層の約0.2気圧で極地より寒冷な-70℃という環境まで存在する。このため、航空機に搭載される空調システムは、この広範囲の変化にも対応し「与圧」「換気」「温度調節」の3つの機能を発揮しなければならない。このように、航空機において、その機能を発揮するためには、他分野の空調装置とは異なったシステム設計が必要となる。

### 2. 航空機用空調システムの基本的な形態

「温度調節」のみならず、「与圧」「換気」の機能を得るためには、機外の薄い空気を圧縮した後、適度な圧力に調節し（これを「調圧」と呼ぶ）、機内に供給することが必要となる。

このために、一般的に航空機用空調システムにおいては、他分野の空調装置ではあまり用いられていない、空気自身を冷媒とした「エアサイクル方式」が採用されている。旅客機などのほとんどの航空機では、地上においてはAPU、飛行時にはエンジンのコンプレッサで圧縮された空気の一部を抽出し、これをエアサイクル空調システム（以下「ACS」と呼ぶ）と呼ばれる空調装置で空気の温度と流量を調節し機内に供給すると同時に、与圧装置で機外へ排出する空気流量を調節して機内圧力制御を行っている。このように、エンジンからの圧縮空気を活用することで、非常にシンプルで小型軽量の「与圧」機能を有する空調システムが実現される。エンジンから抽出される圧縮空気を「抽気」または「ブリードエア」と呼んでいる。

航空機に搭載される空調システムの基本形態を図1に示す。また空調装置の外観の一例を図2に示す。図1に基づき、このシステムの作動について説明する。

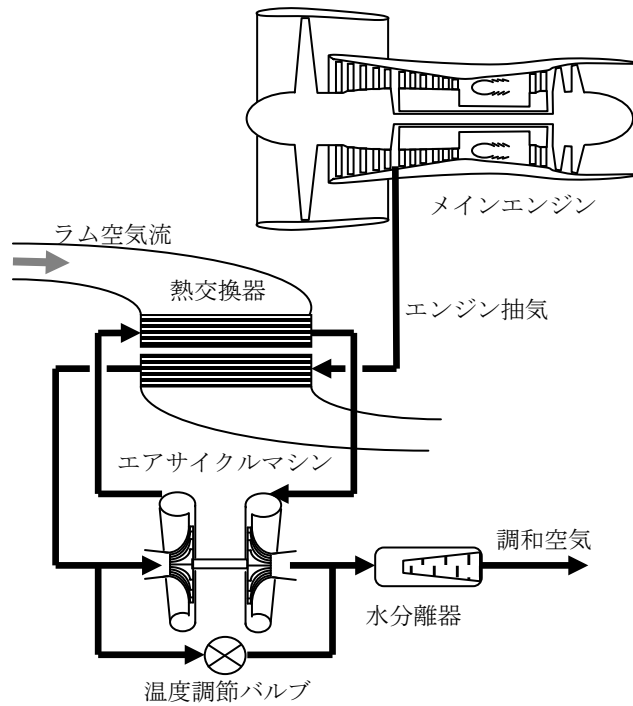


図1 航空機空調システムの基本的な形態

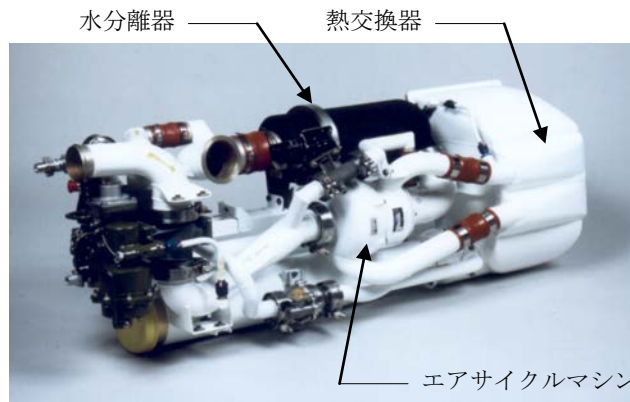


図2 航空機空調装置の形状の例

現在の航空機では、プロペラ機のターボプロップ式をはじめ、ターボジェット式、ターボファン式などの「ガスタービンエンジン」が使用されている。「ガスタービンエンジン」は、コンプレッサ部⇒燃焼器部⇒タービン部の3部構成が基本となっている。エンジンに入った空気は、コンプレッサ部で圧縮されて高温・高圧になり、燃焼器部においてさらに高温となって、タービン部で断熱膨張してエネルギー回収が行われる。タービン部で軸動力として回収される以外のエネルギーは、排気によるスラストとして利用される。

空調システム用の「抽気」は、エンジンのコンプレッサ部で特定の段数まで圧縮された

空気の一部を抽出したものである。エンジンから抽出された「抽気」は、機内圧力よりも高い圧力で、温度も常温より高い状態になっている。このため空調システムに導入される際に、熱交換器においてラム空気との熱交換により冷却されるのが一般的である。

空調システムに入った「抽気」は、エアサイクルマシン（以下「ACM」と呼ぶ）によって再度圧縮される。このACMは、遠心翼車によるコンプレッサとタービンが一体で回転する構造で、自動車や船舶エンジン用のターボチャージャと同じような形態を有する機器である。しかし、扱われる空気は空調用の清浄な空気であるため、ターボチャージャと異なり、空気自身の動圧によって回転部を非接触で支持するオイルレスタイプの動圧ガス軸受が一般的に採用されている。

ACMのコンプレッサで断熱圧縮され、高温・高圧になった空気は、熱交換器によって再度冷却された後、ACMのタービンにて断熱膨張し、適度な温度と圧力となって機内に供給される。タービンでは空気の膨張エネルギーが軸動力として回収され、ACMのコンプレッサの動力として活用される。なお、タービンの温度が必要以上に冷却される場合には、ACMのコンプレッサ部に入る空気の一部は、断熱圧縮～冷却～断熱膨張の過程をバイパスして、膨張後の冷気と混合する。この結果、空調システムによって最適な温度にコントロールされた空気を得られる。バイパスラインを流れる空気の流量を調節するバルブを「温度調節バルブ」と呼ぶのはこの機能によるものである。さらにタービンにおいて、空気中に多量の水蒸気が含まれていると、空気が断熱膨張する際に、水蒸気の一部は細かい霧状の水滴に凝縮する。そこで、この水滴を捕獲するためにタービンの下流部には水分離器が装備される。

エアサイクル方式による空気の状態変化をT-S線図上で示すと図3に示すようになる。この過程は、ガスタービンの場合とは逆の過程となることから、熱力学的には「逆ブレートンサイクル」と呼ばれている。

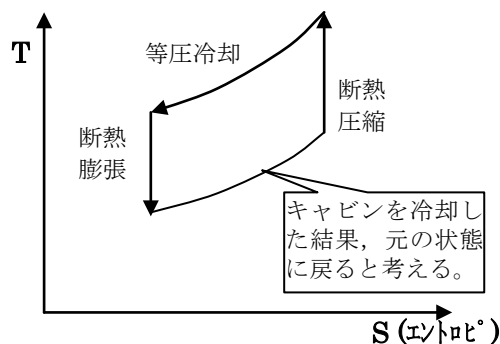


図3 エアサイクルのT-S線図

### 3. 航空機用空調システムの様々な形態

図1の基本形態は、ACMのコンプレッサとタービンの2つの翼車が存在するため「2ホイール」方式と呼ばれている。また、システムを流れる空気の圧力変化は、一旦高いレベルに引き上げられるため、靴紐を引っ張り上げるという意味の「ブーツストラップ」方式という名称があり、図1の形態は、「2ホイール・ブーツストラップ・サイクル」と呼ばれる。

航空機に搭載される空調システムの形態は、図1の基本形態から、機体の特性や規模に応じた改善が行われ、様々の形態に発展している。

例えば、取り込まれた空気内に含まれる水蒸気の除去方法の改善がある。図1では断熱膨張した際に発生する霧状の水滴を、タービン下流でフィルタ状のもので捕獲する水分離の方式であるが、図4に示すような、圧縮された状態の空気のまま、膨張前に一旦冷却して水分除去を行う「高圧除湿方式」の採用が広がっている。この方式は、高圧状態でより低い露点となる点に着目して水分除去の効率を高めたものである。

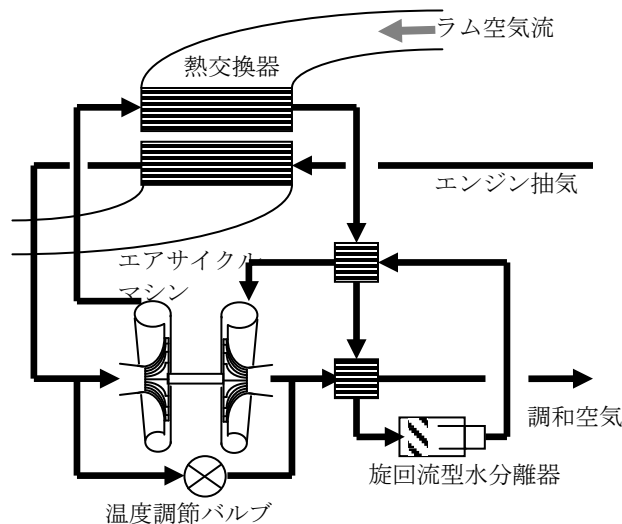


図4 高圧除湿方式の形態

さらに、最近の旅客機に搭載の空調システムでは、ACMの翼車の数を増やした「3ホイール」や「4ホイール」の方式が実用されている。

「3ホイール」方式は、現在の航空機用空調システムの主流となっているもので、その形態は図5に示すとおりである。APUまたはエンジンのコンプレッサ部からの高温・高圧抽気は、抽気系統と呼ばれる部分で温度・圧力を所定の値まで調整されたのち、ACSの一次熱交換器でラム空気との熱交換により冷却され、ACMのコンプレッサで圧縮されて、さらに高圧になるとともに温度上昇する。この空気は二次熱交換器で再度ラム空気との熱交換により冷却され、リヒータ、コンデンサと呼ばれる2つの熱交換器と水分離器からなる除湿回路を経て除湿される。次に、除湿された高圧空気は、ACMのタービンにて断熱膨張し低温の空気となる。ACMは、タービンとコンプレッサ及びファンの翼車が同軸上にあり、タービンでの断熱膨張

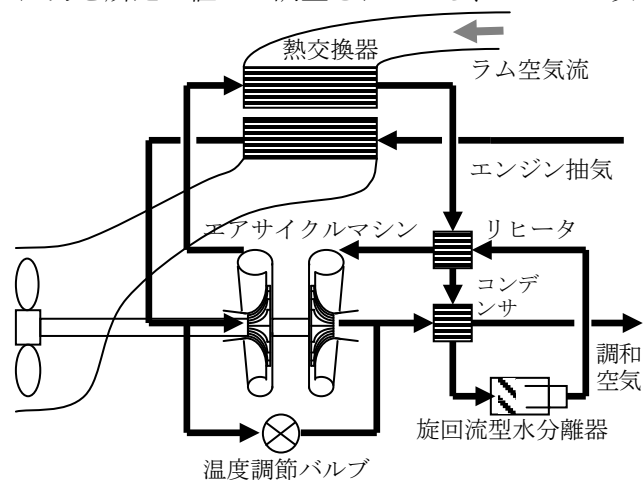


図5 3ホイール・ブーツストラップ方式

で得られる動力は、コンプレッサ仕事とファン仕事に費やされる。ファンは、地上及び機体の低速飛行時に熱交換器の低温側通路にラム空気を引き込む。タービンを出た空気は、コンデンサの低温側通路を経て調和空気となり、機内再循環空気と混合されて機内へ供給される。最大冷房の際には、ACS 出口空気温度は $0^{\circ}\text{C}$ 以下に冷却することができる。

図6に示す「4ホイール」方式は、さらに膨張タービン部の膨張過程を2段に分割し、上流段のタービン膨張で生じる冷気を用いて水分凝縮を行った時の熱エネルギーを回収するものである。

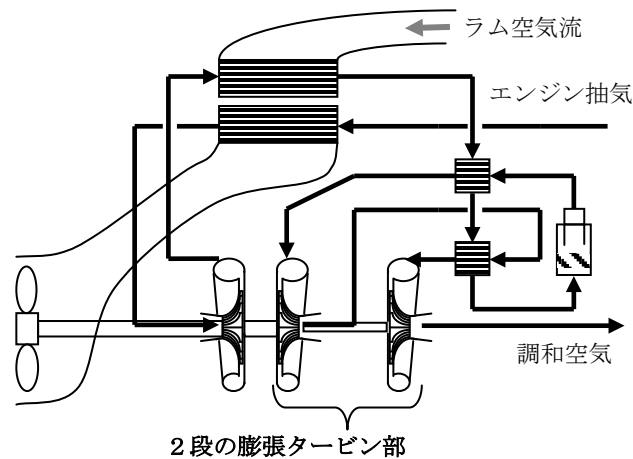


図6 4ホイール・ブーツストラップ方式

#### 4. 今後の航空機用空調システムの動向

エンジンから噴射する空気の運動エネルギーで推力を得ているジェットエンジンにおいて、コンプレッサから圧縮空気を抽出することは、その効率を著しく低下させ、航空機の燃料消費量の増加をまねく。また、空調システムの運用コストの7割以上は燃料消費によるものであり、これを低減することは運用コスト低減に大きく寄与するものである。このような理由から、すでに現行の空調システムにおいて前項に述べたように、抽気圧力や流量の低減を目指して、除湿方式の改善による供給空気温度の低下や機内再循環空気の利用等により、抽気流量を機内の換気に必要な新鮮空気量まで低減しており、換気空気を全てエンジンのコンプレッサ部から抽気する限りは、これ以上抽気流量を減らすことは困難なレベルに達している。このような中で、エンジンのコンプレッサ部からの抽気流量を大幅に削減する新たな空調方式について、当社で実施した研究概要を紹介する。

##### 4. 1 ハイブリッド空調システム

旅客機においても環境適合性や省エネルギーは重要視されており、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ などの排出量削減、騒音の低減及び低燃費を目指したエンジン開発が行われてきた。この結果、現在の旅客機に使用されるターボファンエンジンは、コンプレッサで圧縮されるコア空気に比べて、ファンで加速する空気を大量に流して推力を得る高バイパス比のターボファンエンジンが主流になってきている。空調システムとして、この高バイパス比のエンジンに適合するためには、エンジンのコア空気から抽出する抽気エネルギーの低減、すなわちエンジンの

コンプレッサ部から抽出する空気の圧力を低くし流量を減らすことが最も重要であり、航空機の燃費低減に寄与できることになる。

上述の背景から、換気空気源の一部として、エンジン負荷の小さいエンジン・ファン抽気を利用することにより、エンジンのコンプレッサ部からの抽気流量を必要換気流量の2分の1程度に抑えることで空調システムの燃料消費量を低減するハイブリッド空調方式が考案されている。高々度飛行時のエンジン・ファン抽気の圧力は、与圧された機内圧力よりも低いため、機内へ供給するのに十分な圧力まで圧縮する必要がある。これを達成するため、ハイブリッド空調システムでは、タービン動力に加えて必要な場合には駆動力をアシストする電動モータを内蔵したモータアシステッド・エアサイクルマシン(以下「MACM」と呼ぶ)を新たに開発している。

### (1) ハイブリッド空調システムの作動概要

ハイブリッド空調システムの系統図を図7に示す。ハイブリッド空調システムは、地上及び低高度飛行時のノーマルモード(図7(a))と高々度飛行時のエコノミーモード(図7(b))の2種類の作動モードを有している。

#### (a) ノーマルモード

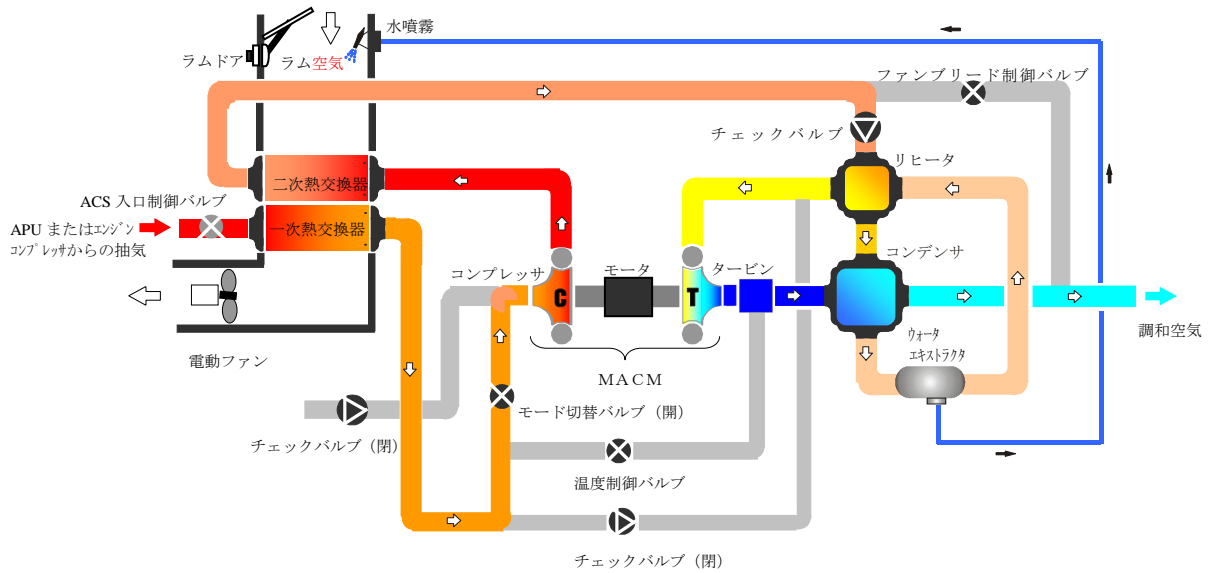
ノーマルモードは、地上及び低高度飛行時に使用され、従来のACSと同様の作動であり、エンジンのコンプレッサ部からの抽気は一次熱交換器でラム空気と熱交換されて冷却されたのち、MACMのコンプレッサで圧縮されて高温・高圧となり、次に二次熱交換器で再度冷却される。地上及び低速飛行時のラム空気は、電動ファンにより吸い込まれる。二次熱交換器を出た抽気は、リヒータ、コンデンサと呼ばれる2つの熱交換器と水分離器からなる除湿回路を経て除湿される。水分を除去された高圧空気は、リヒータで暖められて取り残された水分が蒸発し、MACMのタービンで断熱膨張し低温空気となる。この膨張によって得られる動力は、タービンと同軸上にあるコンプレッサの圧縮仕事に利用される。タービンを出た低温空気はコンデンサの低温側を経て、再循環空気と混合され機内へ供給される。機内への供給空気の温度制御はラム空気の流量調整とACMをバイパスする温度制御バルブの開度調節により行い、流量制御はACS入口制御バルブの開度調節により行われる。

#### (b) エコノミーモード

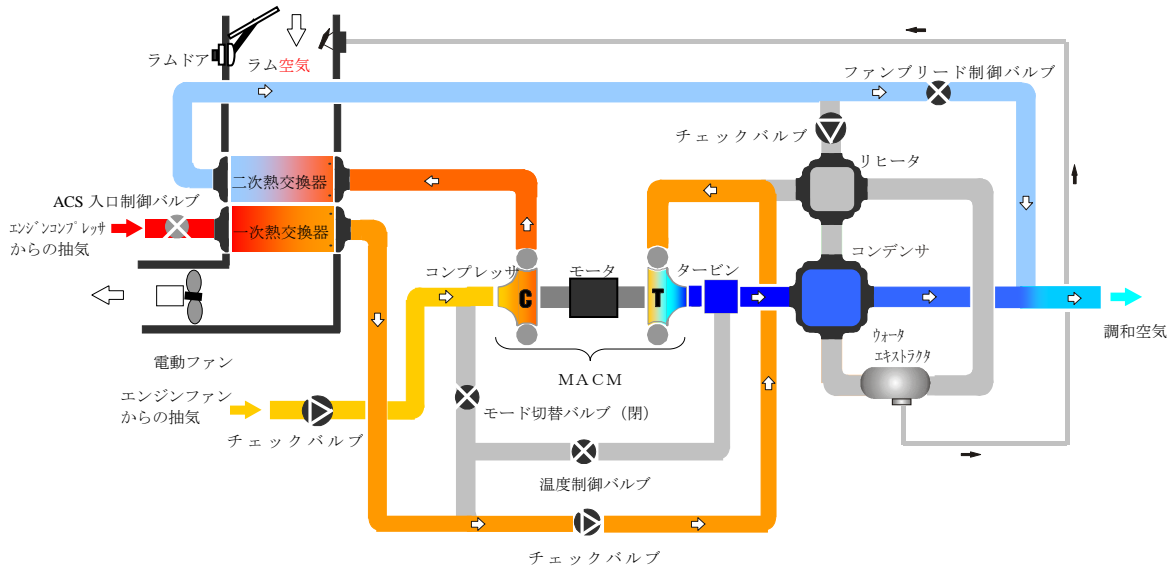
エコノミーモードは高々度飛行時に使用され、エンジンへの負担の少ない低圧のエンジン・ファンからの抽気をMACMのコンプレッサで圧縮し、機内への供給空気の一部に利用することで従来の空調システムに比べて抽気の圧力及び流量を極限まで低減する。エンジンのコンプレッサ部

からの抽気は一次熱交換器でラム空気との熱交換で冷却されたのち、MACMのタービンで断熱膨張し低温空気となる。一方、エンジン・ファンからの低圧抽気は、タービンで得られる動力と電動モータの駆動力によりMACMのコンプレッサで機内圧力まで圧縮され、二次熱交換器で冷却されたのち、タービンからの空気と混合される。供給空気の温度制御は、ラム空気の流量と温度制御バルブの開度を調節することで行い、流量制御は空調システム入口制御バルブの開度調節により行う。

### (2) フライトパターンと燃料消費低減効果



(a) ノーマルモードの作動



(b) エコノミーモードの作動

図7 ハイブリッド空調システム系統図と作動モード

システム設計にあたっては、座席数 80 の旅客機をターゲットにし、典型的なフライトパターンにおいて、その燃料消費量の低減効果を予測した。1フライトあたりに空調システムが消費する燃料消費量は、システム重量と、各フライト条件におけるラム空気流量、消費電力及び抽気量をもとに、燃料消費係数のデータ等を用いて計算できる。このようにして、1フライトあたりに空調システムの作動によって消費される燃料を評定した結果を図 8 に示す。ハイブリッド空調システムにより、空調システムが消費する燃料を従来の空調システムに比較して約 20%低減することが可能との結果が得られた。これは、全運用時間の約 6 割に達する巡航時において、ハイブリッド空調システムではエンジン・コンプレッサからの抽気流量を大幅に低減できるためである。

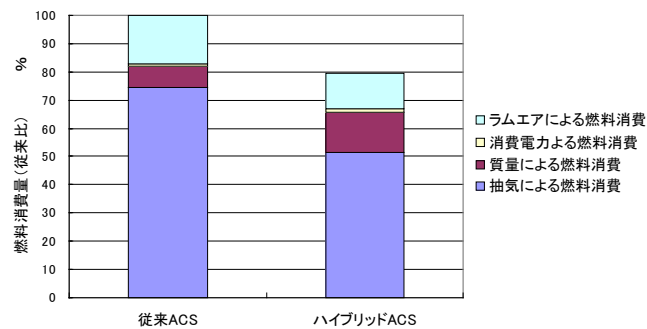


図 8 燃料消費量の比較

### (3) 試作品による評価

MACM 試作品の外観写真を図 9 に示す。MACM の回転体は、両端にタービン及びコンプレッサ翼車、中央部にモーターロータを有している。モーターは、最大出力 10kW の DC ブラシレスモーターとし、コンプレッサ出口圧力をモニタしながら、回転速度をモーターコントローラで制御する方式である。軸受は、メンテナンス不要で高速回転に適した動圧ガス軸受を採用している。軸受及びモーターの冷却には、タービン入口空気を用いている。



図 9 MACM 外観



地上におけるシステム評価では、高度 35,000 ft 巡航時の条件までを模擬した定常性能試験を実施した。各試験条件において、所期目標の性能が得られることを確認し、実機への適用においても図 8 の予測どおり約 20%の燃料消費低減効果がある見通しを得た。

#### 4. 2 先進空調システム

エンジンからの抽気を一切行わず、代わりにエンジンから電力を供給し、電動機により機外からの空気を直接圧縮する「ノンブリード方式」を採用した空調システムについて、旅客機への採用計画がある。

このような状況を鑑み、当社では「ノンブリード方式」の採用に加え、機内空気を循環精製し擬似新鮮空気として再利用する先進空調システムの研究を行っている。巡航時における空調システムでのエネルギー消費の大部分は、機外から取り込む新鮮空気の圧縮に要するものであるため、機内の再循環空気を新鮮空気に精製し再利用できれば、大幅なエネルギー消費削減が可能となる。

なお、この研究ではエネルギー消費のみならず、①燃料タンクの爆発事故防止のための窒素<sub>0</sub>空気供給の機能、②機内の酸素分圧改善のための酸素富化空気供給の機能、③機内の湿度を一定以上に維持し異常な乾燥を防止する機能なども併せて実施している。最終的には、これらを統合した総合的な新しい空調システムを目指している。研究対象の空調システム例を図 10 に示す。

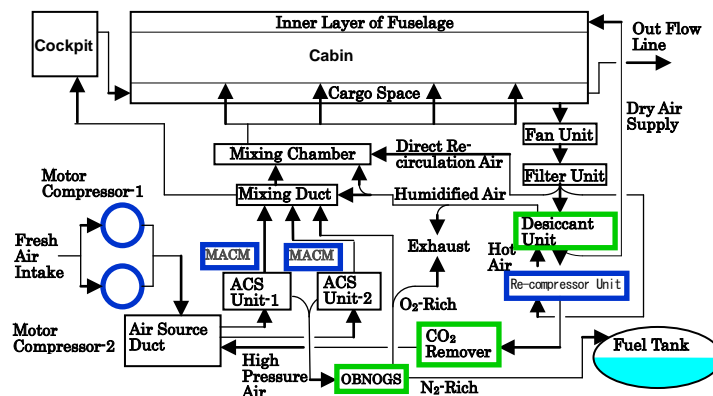


図 10 先進空調システムの例

特に②機内の酸素分圧改善は、高齢者等でも安心できる「空の旅」を提供することを目指すためのものである。巡航時の機内圧は、機体への圧力負荷を考慮し、標高 2,438 m相当の圧力まで低下する設定がなされているが、これは心肺機能が衰えた乗客にとって、血中酸素分圧低下という不安要因となる。そこで、酸素分圧のみを地上分圧に近づけることで、機体強度に影響を与えずこの問題の解決を図るというものである。

このように航空機用空調システムにおいて、「省燃費」「安全性」「快適性」について日進月歩で改善されている。

#### 謝辞

本稿で紹介した「ハイブリッド空調」の研究は、(財)航空機国際共同開発促進基金を通

じて経済産業省からの助成金を受けた「先進ハイブリッド空調システム」の開発の一部をまとめたものであり、技術検討にあたっては、(財)日本航空機開発協会ならびに(財)日本航空機エンジン協会の方々に旅客機及びエンジンに関する情報を頂くなど多大なご協力を賜りました。また、「先進空調システム」の研究は、経済産業省からの委託により、(財)日本航空機開発協会から、航空機用先進システム基盤技術開発事業の一環としてご指導をいただき実施しました。この場をお借りして関係の方々に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Code of Federal Regulations, Title 14, §25-831
- 2) 佐藤・安藤・瓜生・小原：島津評論 Vol157(2000.8), PP. 33-39
- 3) DeFrancesco, G.L., SAE, Technical Paper No. 932056 (1993.7)
- 4) 斎藤善夫、「航空エンジン用ファン圧縮機の最近の技術進歩」、日本ガスタービン学会誌、21巻84号(1994)
- 5) 殿村兆史、「高バイパス比ターボファンエンジンの開発動向」、日本ガスタービン学会誌、21巻84号(1994)
- 6) Hisashi Mitani, Hidefumi Saito, 「New Concept ECS for Civil Aircraft」, SAE, ICES, 2002-01-2421 (2002)
- 7) Mecham, M: Aviation Week&Space Technology, March28, 2005, pp46-50
- 8) 「H16 年度航空機先進システム基盤技術開発成果報告書」日本航空機開発協会発行, H17年3月, pp. 223-323
- 9) 斎藤・高尾・酒井・小原, 「先進空調システム」, 第43回飛行機シンポジウム, pp594-600(2005)

KEIRIN



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。