

R2-7 航空機の与圧・空調システム ～ 機内環境と新型コロナウイルス感染症 ～

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の感染拡大により、世界は社会・経済に大きな打撃を受けている。感染拡大防止のため各国はロックダウンや入出国制限などいろいろな対策を講じているが、経済との両立も課題となっている。このような状況下で、航空運送需要も未曾有の落ち込みを経験しており、エアラインのみならず航空機メーカーにも大きな影響が出ている。

このような社会情勢の中で、航空機を利用した移動に伴う COVID-19 への感染リスクを心配して、社会では航空機内の空調環境についての関心が高まっている。本解説では、航空機の与圧・空調システムについて概説し、航空機の機内環境での COVID-19 感染リスクが低いことを説明する。

2. 航空機の機内環境での COVID-19 感染リスク

2020 年 10 月の IATA のプレス・リリース¹⁾によると、IATA は 2020 年初頭からの 12 億人の乗客の中から COVID-19 に感染した可能性のある事例を分析した。その分析に基づき、機内での COVID-19 の感染リスクは非常に低いとの研究結果を発表している。また、IATA に協力して航空機メーカーの Airbus、Boeing、Embraer の各社は、数値流体力学（CFD）による機内環境のシミュレーションを実施し、機内の空気循環システムにより、客室内の粒子の動きがコントロールされ、ウイルスの拡散が抑制されていることを検証した。検証結果では、機内での COVID-19 の感染リスクが低い要因として、

- ✓ 機内換気が良いこと
- ✓ 機内の天井から床への縦の空気の流れ
- ✓ HEPA（高効率粒子状空気）フィルターの装備
- ✓ 客室シートの背もたれによる自然なバリア効果
- ✓ 乗客が全員前を向いて着席、対面での会話が制限されていること
- ✓ 前後方向の空気の流れが最小化されていること

などが挙げられている。

またそれとは別に、米国国防総省が行った実機を用いた実証実験でも、機内感染リスクは「極めて低い」と結論づけられた。報道²⁾によれば、約半年の調査では飛行時間で計 38 時間、着陸状態で計 45 時間、300 回の検出テストを実施。新型コロナウイルスと同じ大きさの粒子を客室の区域ごとに放出し、乗客に見立てたセンサーを区域ごとに計 42 個設置し粒子の拡散を観測した。機内の換気機能については、空気循環システムやフィルター装置で 6 分以内に客室内の粒子のほぼ 99.99% を除去できたとした。また、感染に至る可能性が高い量の粒子を吸入するには、感染者が 1 人いる機内で 54 時間の飛行時間が必要になるとも指摘されている。

3. 与圧・空調システムの概要

民間航空機は、巡航時には高度1万メートル以上の高高度を飛行する。この時の機外の環境は外気温度 -50°C 、気圧0.2気圧程度で、そのままでは人間が生きていける環境ではない。このため、機内は与圧・空調システム(図-1)により 24°C 、0.7~0.8気圧程度にコントロールされ、客室で乗客が快適に過ごせる環境が作り出されている。

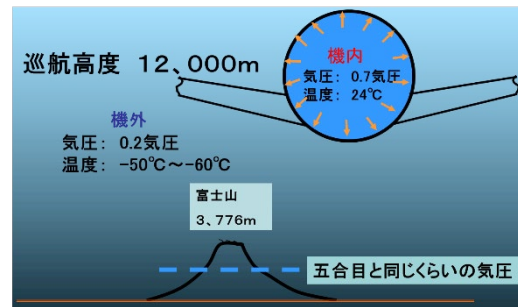


図-1 与圧・空調システム³⁾

与圧・空調システムは、エンジンもしくはモーター駆動の圧縮装置からの圧縮空気を動力源としている。システムを構成するおもな機器は、主翼付け根のフェアリング部分の下部(非与圧域)の通称エアコン・ベイと呼ばれるエリアに、左右2系統が装備されている。システムは2重装備となっており、片方のエアコン・システムが故障しても、一定条件下で運航が継続できるように、独立してコントロールされている。コントロールは自動化されているが、操縦室から手動でコントロールすることもできる。また、操縦室や客室で温度をコントロールすることができる。

4. 与圧システム (Pressurization System)

航空機の上昇に伴い、外気圧は徐々に下がっていく。与圧システムは、飛行高度の上昇に合わせて、機内外の気圧差を増加させながら、機内気圧を高く保っている。また、降下の際には、逆に飛行高度に合わせて機内外の気圧差を徐々に減少させながら、着陸時に外気圧と等しくなるように機内の気圧を調整する。上昇・降下中は、機内の気圧の変化率を一定に制限することで、耳などへの影響を緩和して、快適性を高めている。特に降下時には、上昇時に比べても変化率を小さくすることで人体への負担を軽減している。

巡航中には、機体内外の気圧差(ΔP と記す)は最大となるが、機体構造の強度および繰り返し荷重負荷を考慮して、 ΔP はコントロールされている。 ΔP は、機種によって異なり、777型機では8.6 psi(Pound per Square Inch)、787型機では8.6~9.43 psiでコントロールされている。(炭素繊維構造の機体のほうが大きな ΔP を取ることができる。)ちなみに、このような ΔP 条件下では、機体構造には 1m^2 あたり6 ton以上の圧力がかかる。

機内の圧力は、胴体後方部に装備されているアウト・フロー・バルブ(図-2)(787型機の場合は胴体前方部にも装備)によりコントロールされている。空調システムから機内に供給される加圧された空気が機外に流れる流量を、アウト・フロー・バルブの開度で調整することにより、機内の気圧を調整する。上空では外気圧が低いために、この排出扉を開けることで、機内の空気が機外へ吸い出される。一方で機内に供給する空気量よりも排出量が多くなると、客室内部の気圧が下がりすぎってしまうため、適切な気圧になるように開度を常にコントロールしている。このアウト・フロー・バルブは3つのモーターが取り付けられているが、フェイルセーフの観点からそれぞれ独立してコントロールされている。



図-2 アウト・フロー・バルブ⁴⁾

また、安全装置として、機内外の気圧差が設定された MAX ΔP 以上になったり、また逆に機内が負圧状態となったりしたときには、それぞれ Positive/Negative Pressure Relief Valve が働き、機内外の気圧差を下げ、機体構造にかかる圧力を軽減するシステムも装備されている。

また、通常の巡航中は、機内の環境を考慮した最大客室気圧高度 (Max Cabin Altitude) も設定されている。設定値は、777 型機では 8000ft (標高 2400m 程度、0.74 気圧)、787 型機では 6000ft (標高 1,800m 程度、0.8 気圧) で、巡航中はこの制限の中で機内の気圧をコントロールする。

加えて、機内の気圧低下が発生した場合には、客室の気圧高度が一定値 (777 型機は 13,500ft、787 型機は 15,000ft) を超えると、自動的に座席天井から酸素マスクが落ちて乗客の呼吸を確保するシステムも装備されている。

図-3 に、航空機 (737 型機) の与圧エリアを示す。操縦室や客室、貨物室は与圧されているが、それ以外の着陸装置の格納エリアや主翼、レドームや胴体尾部などは与圧されていない。

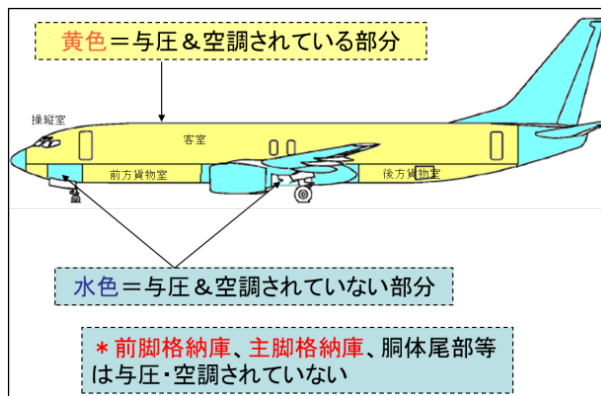


図-3 航空機の与圧エリア ③

5. 与圧・空調システム (Air Conditioning System)

5.1 ブリード・エア・システム (Bleed Air System) (図-4)

777 型機など従来の航空機の与圧・空調システムの動力源は、エンジンから得られるブリード・エアである。エンジンの圧縮機から抽気されたブリード・エアは、与圧・空調システムのほか、機体の防氷装置、エンジンのスタートなどでも使われる。このブリード・エアは、空気温度約 200°C、圧力は 40 psi (約 2.7 気圧) である。機内では、複数あるエンジンから得られるブリード・エアは専用のダクトで相互にバック

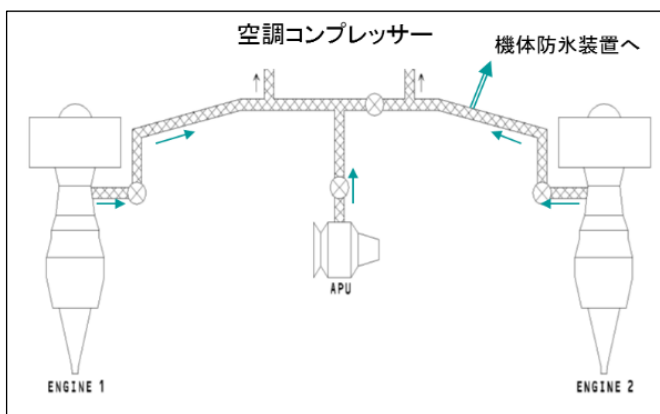


図-4 ブリード・エア・システム ③

アップできるように接続され、バルブでコントロールされながら、空調システムをはじめとする機体の各システムに供給される。また、機体後部に装備されている補助動力装置 (Auxiliary Power Unit: APU) もブリード・エアを供給する能力を有し、ブリード・エア供給のバックアップとして機能している。

787 型機では、エンジンからのブリード・エアに代わり、電動モーター駆動のキャビン・エア・コンプレッサーから圧縮空気が供給される。従来のエンジンの圧縮機から抽気するデザインでは、エンジンに大きな負荷がかかり、エンジン効率を下げる一因となっていた。電動モーター駆動に置き換えることで、各フライト・フェーズにおけるエンジン出力のロスを軽減し、燃費効率の向上を図ることができる。また、機体の軽量化、信頼性向上にも寄与す

ると Boeing 社は解説している。

5.2 空調装置 (エア・サイクル・マシン)

空調装置は、航空機の翼のつけ根にあるエアコン・ベイに格納されている (図-5)。エンジンやキャビン・エア・コンプレッサーから供給される高温高压の空気と、翼の付け根にある空気取り入れ口から取り込まれる低温の外気から、空調装置は圧力、温度を調整した空気 (Conditioned Air) を作る。

機内に供給される空気は常に新鮮であることが求められ、およそ3分で入れ替わるように設計されている。航空機の設計上の要件として、1人当たり毎分

0.25kg (0.55lbs) 以上の新鮮な空気の供給が求められている (FAA, Federal Aviation Administration の CFR25.831)。また、787 型機の客室内気圧における容積換算は一人あたり毎分約 250L 以上であるため、これを満たす以上の能力を有したエアコン・システムが、常に大量の新鮮な空気を供給している。

また 777 型機で概算すると、与圧エリアの容積が約 20,000cubic feet(約 600 m³) であるのに対して、装置は毎分 6,500cubic feet(約 190 m³) 程度の Conditioned Air の供給能力がある。

COVID-19 感染拡大防止の対策として挙げられている「室内の換気」について、航空機の機内はこのように優れた換気環境にある。

5.3 冷暖房機能

空調システムは、主に、エア・サイクル・マシン、外気を使って冷却する熱交換器、及び機内循環を促すリサーキュレーション・ファンから構成されている。図-6 に 787 空調システムの概略図を示す。(循環機能については後述)

機体外部から直接取り込まれた大気は、キャビン・エア・コンプレッサーで一度圧力を上昇させてから、一部の空気がエア・サイクル・マシンへ送られる。

エア・サイクル・マシンに送られた空気は、再度コンプレッサーにより圧縮され、熱交換器を通過して冷却させられた後、コンプレッサーと同軸にあるタービンに送られてタービンを回転させる。熱交換器は上空の低温空気を使用して冷却するが、地上停留中はエア・フロー確保するため、熱交換器にとりつけられているラムファンを回転させることで、強制的に冷却を行っている。

タービンを通過した空気は、プレナムもしくはミキサーと呼ばれる空気貯めに送られる。



図-5 空調装置³⁾

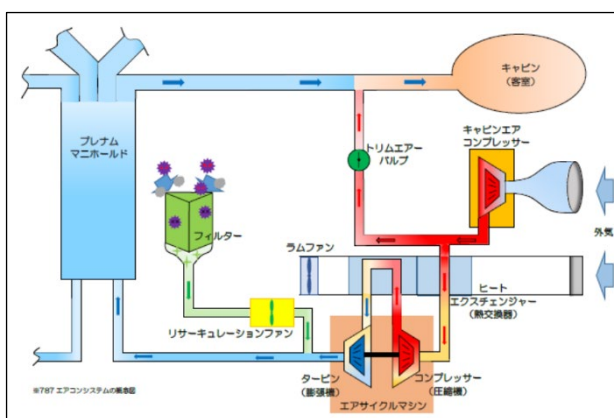


図-6 787 型機空調システム概略図⁴⁾

ここには独立してコントロールされている2つのエア・サイクル・マシンを通過した冷却空気が混流され、このプレナムから操縦室および客室へ配管を伝って空気が送られる。

プレナムから送付される空気は冷却されているが、前述のキャビン・エア・コンプレッサーにて圧縮された一部の高温空気を、トリム・エア・バルブを通過させて適量を混ぜ合わせるにより、操縦室や客室では各々の場所に応じた適切な温度に調整が出来るようになっている。このようにして客室への空気は生成され、また温度調整されている。

操縦室へ供給される空気には後述の循環空気は混合されず、常に外気から作られたフレッシュ・エアのみが供給される。これは、万が一客室火災が発生し煙が充満した場合に、エアコンを通して操縦室内に煙が逆流しないようにするためである。またコックピットは、出入口の扉から客室の煙が侵入することを防ぐために、客室内よりもわずかに高い気圧に維持されている。結果として、コックピットは COVID-19 感染防止対策が強化されている状態にあるといえる。

6. 機内への空気の供給 (Air Distribution System)

Conditioned Air は、翼の下部のエアコン・ベイからいったん機体の最上部にある、客室天井にある配管を通過して、各座席上部のエアグリルから機内へ供給され、その後は客室側面の下部に流れ出るように設計されている。(図-7 参照)

このように、機内のエア・フローは、上から下への縦方向が基本である。客席シートの背もたれのバリア効果により客室内の前後方向への空気の流れは制限されており、客室内の飛沫等の拡散が抑えられると考えられる。

客室の天井裏と客室床部の貨物室には、循環用のファン(リサーキュレーション・ファン)が取り付けられており、常にファンが回転して客室の空気を吸い込んでいる。そこで吸い込まれた空気は HEPA(High-Efficiency Particulate Air) フィルターを通過した後、プレナムに戻され混流され、改めて温度調整をして再度客室に供給される。

HEPA フィルターの性能は、JIS 規格で「 $0.3\mu\text{m}$ の粒子を 99.97%以上捕集できる」と定められており、花粉や空気中の微粒子物質 (PM2.5) などが除去される。日本ウイルス学会では COVID-19 の粒子は $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ としており、フィルターの目よりも小さいが、フィルター中の粒子は滞空時間が長くなるほど、慣性効果や拡散効果と呼ばれるメカニズムで、繊維に捕集される確率が高まるとされていることから、99.97%の捕集が期待できる。

なお、ボーイング 787 型機では、約 $60\times 40\times 14\text{cm}$ (幅×奥行き×高さ) の HEPA フィルター3 枚が三

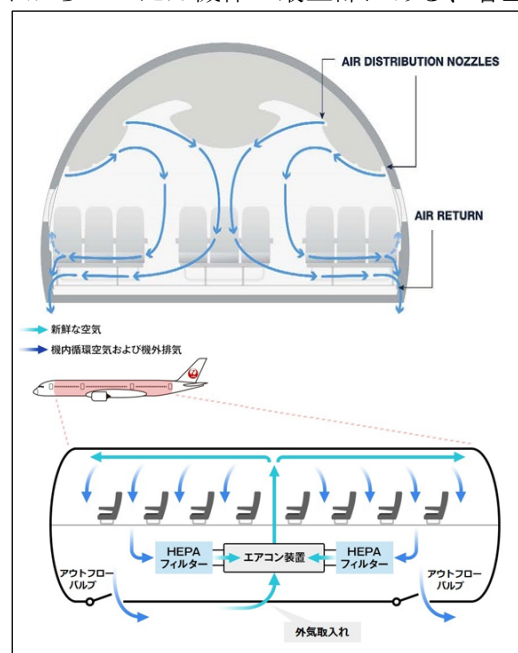


図-7 機内エア・フローと機内循環⁴⁾



図-8 HEPA フィルター(787 型機)⁴⁾

角柱のようなホルダーに取り付けられており（図-8）、これが客室床下にある貨物室後方に2基収められている。また客室天井裏には、形の異なる筒状のHEPAフィルターが1基用意されている。2基の三角柱フィルターは1年弱（3000飛行時間）、天井裏の筒状フィルターは約2年（8000飛行時間）で定期的な交換が実施される。

7. おわりに

航空機の与圧空調システムについて概説し、航空機の機内環境でのCOVID-19感染リスクが低いことを説明した。しかし、乗客の関心は機内での感染リスクだけではない。空港を含め、航空機を利用するためのすべての動線においてCOVID-19感染のリスクを下げる対策が採られていることが、安心して航空機を利用するために必要である。

このためにICAOでは、COVID-19感染症予防のガイダンス⁵⁾を発表している。ガイダンスは、各国や地域機関との協議に加え、世界保健機関(WHO)などの国際機関からの助言のもとに策定され、乗客と業務にあたる従業員双方の感染リスクを下げることを目的として、「空港」「航空機」「乗務員」「貨物」の4分野での推奨項目が制定されている。航空会社もこのガイドラインに基づいて、COVID-19感染拡大防止の対策を行っている。

本解説が、少しでも航空機に関わるみなさんの役に立てば幸いである。

参考文献

- 1) IATA Press Release No.81 Date: 8 October 2020
Research Points to Low Risk for COVID-19 Transmission Inflight
- 2) ロイター記事 October16, 2020 (2020年10月19日閲覧)
“Coronavirus exposure risk on airplanes very low, U.S. defense study finds”
<https://www.reuters.com/article/us-health-coronavirus-airlines-idUSKBN2702S7>
- 3) 空気調和衛生工学会 2013年11月87巻記事
「航空機の与圧・空調システム」阿部泰典
- 4) 日本航空技術協会発行 航空技術 2020 10 (2020年10月発行) 記事
「民間航空機の空調システムの紹介」山本健太郎
- 5) ICAO Council Aviation Recovery Taskforce (CART)
“Take-off: Guidance for Air Travel through the COVID-19 Public Health Crisis”
<https://www.icao.int/covid/cart/Pages/CART-Take-off.aspx>