

平成 30 年度 航空機関連技術動向調査
報告書

平成 31 年 3 月

目次

1. 装備技術の動向.....	8
1.1 システムに関わる技術.....	8
1.1.1 油圧系統.....	8
1.1.2 操縦系統.....	8
(1) アクチュエータ	
(2) FBW システム	
1.1.3 脚系統.....	9
(1) 電動走行システム	
1.1.4 電源系統.....	10
(1) 燃料電池	
(2) リチウムイオン電池	
(3) 軽量発電機	
1.1.5 表示・操作系統.....	12
(1) 表示	
(2) 操作	
(3) マニュアル等の読み取り	
1.1.6 防水系統.....	15
(1) 防水	
(2) 着氷の探知	
(3) 防水剤	
1.1.7 空調・与圧系統.....	16
1.1.8 推進系統.....	17
1.1.9 燃料系統.....	17
1.1.10 客室機内システム.....	18
(1) 格納庫と座席	
(2) 熱可塑複合材製の座席	
(3) 亜麻繊維による内装材	
1.1.11 飛行記録機器.....	19
(1) In flight Safe Monitoring System	
(2) 飛行データの実時間送信	
1.2 空力に関わる装備技術.....	19
(1) 摩擦抵抗低減技術	
(2) <u>揚抗比改善</u>	

(2 a) <u>次世代能動高揚力装置</u>	
(3) <u>超音速機のソニックブーム低減等技術</u>	
(4) <u>騒音の低減</u>	
(5) <u>気流探知</u>	
(6) 迎角計	
(7) 空気力推定技術	
(8) <u>空力形状可変技術</u>	
(9) ボルテックス・ジェネレータ	
(11) <u>翼端折り曲げ</u>	
1.3 飛行性能に関わる装備技術.....	41
(1) オーバーラン防止システム	
1.4 飛行特性・制御に関わる装備技術.....	42
(1) Integrated Resilient Aircraft Control	
1.5 構造に関わる装備技術.....	44
(1) 構造ヘルス・モニタリング	
(SHM: Structural Health Monitoring)	
(2) ヘルス・モニタリング用の感歪塗料	
(3) 次世代3次元X線コンピュータ断層撮影装置	
(4) 耐雷性付与用のコーティング	
(5) 知的航空機構造	
(6) 複合材構造機体の疲労試験	
(7) 空中CO ₂ から炭素繊維	
(8) 複合材 vs 金属	
(9) 熱硬化CFRPと熱可塑CFRP	
(10) 繊維方向調整の炭素繊維複合材	
(11) <u>人工蜘蛛糸による複合材</u>	
1.6 空力弾性に関わる装備技術.....	50
(1) フラッタ試験機	
(2) Active Aeroelastic Wing	
(3) 大アスペクト比/低剛性/能動制御付きの翼	
(4) <u>フラッタ振動吸収システムの実証試験</u>	
(5) <u>風洞試験時の実時間フラッタ特性推定手法</u>	

1.7	製造・整備に関わるイノベーション.....	53
	(1) 製造管理記録	
	(2) 3D印刷	
	(3) UAVを用いた整備	
	(4) 噴霧印刷(Aerosol Jet Printing)	
	(5) B777、B787組立の自動化	
1.8	総合技術.....	56
	(1) 環境適合を含む総合技術	
	(2) 自動化/自律運航技術	
	(3) 故意の墜落に対する対策	
	(4) 旅客機のハック	
	(5) 内側から透明に見える胴体	
	(6) 今後のチャレンジテーマ	
	(7) 解決すべき5つの課題	
	(8) NASAの有人実証試験機(X-Plane)	
	(9) トラス支持翼機体	
	(10) 複合精密進入の飛行実証	
	(11) 窓の技術	
	(12) NASA-New Aviation Horizon計画	
	(13) UTC社の将来予測	
	(14) Airbus社の将来予測	
	(15) <i>Big Data</i>の分析	
1.9	数値模擬の発展.....	86
	(1) CFDツール	
	(2) 数値モデルによる機体健全性管理	
	(3) コンピュータ・モデルによる合金の改良	
	(4) <i>量子計算</i>	
2.	新技術適用の候補となり得る将来機.....	89
2.1	ジェット旅客機.....	89
	(1) Airbus社	
	(2) Boeing社	
	(3) Bombardier社	
	(4) Embraer社	
	(5) ロシアメーカー	

(6) <u>中国商用飛機有限公司</u> <u>(COMAC : Commercial Aircraft Corporation of China)</u>	
(7) Rekkof 社 (オランダ)	
(8) インド国内の各機関	
(9) ONERA (フランス)	
2.2 ビジネスジェット機.....	100
(1) Cessna 社	
(2) Embraer 社	
(3) 中国航空工業集团公司 (AVIC : Aviation Industry Corporation of China)	
(4) Honda Aircraft Company	
(5) XTI 社 (米国, デンバー)	
2.3 ターボプロップ機.....	102
(1) ATR 社 (フランス、イタリア)	
(2) Bombardier 社	
(3) 中国メーカ	
(4) KAI (Korean Aerospace Industries 社)	
(5) Hindustan (インド)	
(6) RAI (インドネシア)	
(7) 座席数 70 席-140 席クラス機体の開発トレンド	
(8) 新型ターボプロップ機	
2.4 超音速機.....	104
(1) 欧州	
(2) 米国	
<u>2.4A 極超音速機</u>	113
2.5 回転翼機.....	113
<u>2.6 Urban Air Mobility (UAM)</u>	113
3. 自動車業界から航空機業界への参入について.....	115
3.1 航空機技術の特徴—自動車技術との違い.....	115
(1) 安全性／信頼性	

(2) 厳しい環境条件	
(3) 重量軽減	
(4) 離陸・着陸フェーズの存在	
(5) 操縦者のワークロード	
3.2 ニーズと新技術.....	116
(1) 社会及び運用者からのニーズ	
(2) 新技術の志向	
3.3 参入分野	
(1) 搭載システムのエネルギー源としての電池	
(2) <u>電気推進システム</u>	
(3) 制御等	
3.4 <u>新製品の創出</u>	124
4. 特記事項	128
4.1 IoT(Internet of Things)による価値の生産性向上.....	128

目的

我が国、特に中部地域の航空機産業が海外メーカとのグローバルな競争に打ち勝ち、次世代航空機の受注の獲得を目指し、強化すべき技術の方向性を見いだすことを狙って、そのベースデータとすべく海外航空機関連企業・研究機関等の技術動向調査を行う。

調査内容

低炭素社会への急激な転換、中国、アジア新興国の台頭など、航空機産業の情勢が大きく変化している中で、この地域が優位な地位を確保するためには、一定の国際的評価を受けるまでに成長した構造体の設計・製造技術の維持・発展とともに、今後は新たに、装備システム／装備品に関わる新技術の創出が必須である。この装備システム／装備品は、複雑で多種類の機能を発揮する能動的な製品であり、その付加価値は極めて高く、広範囲に亘り高度な技術力を有する我が国の工業界が挑戦していくべき領域である。

以上の観点から、国内装備品メーカによる世界の装備品市場の開拓促進の支援に向けて、欧米の機体メーカ及び装備品メーカ等が次世代機に適用すべきと想定している装備システム／装備品に関連する先進的な技術等について、その研究開発の動向を調査する。

調査方法

装備システム／装備品の動向について、平成 26 年 3 月に既に報告されているので¹⁾、これ以降の動向について、関連雑誌等²⁾で公開された内容をその時期に沿って取り纏める。ここで、本報告書の著者の見解を公開情報と区別しコメントとして記述する。

注 1) 平成 26 年版 日本の航空宇宙工業，平成 26 年 3 月，一般社団法人 日本航空宇宙工業会（海外の情報も網羅されている）

注 2) Aviation Week & Space Technology／Aviation Week
Flight International／Flightglobal
企業、公的機関の HP、
新聞、
インターネットにて公開された情報情報

<注記>

本資料は、経済産業省中部経済産業局「平成 26 年度新産業集積創出基盤構築支援事業（中部航空宇宙産業新クラスター形成支援事業）」で作成した資料に、平成 27 年度以降に実施した調査結果を追記したものである。

平成 30 年度の調査で追加・修正した項目を目次にてアンダーライン付き斜体太字で示し、その内容を当該項目に対応する本文にてアンダーライン付き斜体太字で記述する。

1. 装備技術の動向

1.1 システムに関わる技術

1.1.1 油圧系統

従来の油圧の主流は 3,000 psi であるが、5,000 psi とすることにより、油圧配管を細く、作動量を少なく、アクチュエータのシリンダ径を小さくできることから、操縦システムの重量軽減、応答性能向上を実現できる。A380, B787 では適用済みであり、今後の開発機では 5,000 psi が主流となる見通しである。

1.1.2 操縦系統

(1) アクチュエータ

(a) 電気機械アクチュエータ

Airbus 社が A320 のエルロンに電気機械式アクチュエータを適用して、2015 年までに、主翼舵面の電動化を実現する予定である。

(b) 電気油圧アクチュエータ

Embraer 社が KC390 の従来型の操縦・油圧系統を、BAE Systems 社製 FBW システム及び Goodrich 社製電気油圧作動アクチュエータに置き換える予定である。

(c) Synthetic Jet Actuator

GE 社が研究している“ Synthetic Jet Actuator ”は空気噴出速度が 220 m/s ($M = 0.7$) の世界記録をもっている。大きさは 75 mm×75 mm、厚さ 6 mm で、電圧で変形するピエゾ電子セラミックでできた板を 2 枚合わせて、鞆のように作動するもので、毎秒 150 回開閉できる。現在は計算機メーカーが冷却ファンの代替に検討している。

(d) ロシアの電気アクチュエータ

Rostec(ロシアのハイテク工業製品の開発・生産・輸出助成を担う国家コーポレーション)傘下の TechnoDinamika 社はロシア通産省の研究委託で、Irkut MC-21 の各種システムに電気アクチュエータを適用して全電化航空機の研究を進めている。アクチュエータは水平安定板の駆動、貨物扉の開閉及び APU 空気取入口の開閉を行うもので、水平安定板系統は予備を含めて 2 重になっている。油圧系統と圧搾空気系統を除去することで簡素な構成になり信頼性が大きく向上し、整備要求が減少することのこと。

(2) FBW システム

(a) ピストン機への適用

Diamond Aircraft 社は、ピストン機として初めて、DA42 を FBW システムで飛行させた。これにより、このクラスの機体でも、自動離陸・巡航・着陸を可能とするシステムの実現を可能とする道が開けたことになる。

コメント；

FBW システムは、多重システム管理構築に要するコストに対する重量軽減効果、制御による運動能力向上、運用制限へのケア・フリー、整備性等のメリットの程度から大型機に適用されてきたが、FBW をフィードフォワードとして使う等、simple FBW とすることにより軽飛行機クラスにおいても採算がとれるようになってきているものと考えられる。

1.1.3 脚系統

(1) 電動走行システム

主脚又は前脚に装備した電動走行システムにより、ゲートからエンジンスタート地点、着陸地点からゲートまでをエンジン不作動、牽引車無しにて走行することを可能としている。これにより、燃料消費重量削減と共に、空港周りの NO_x、CO₂ 排出量を大幅に削減することができる。

このシステムについては、以下の 4 社が各々の方式で開発に携わっている。

(a) Wheel Tug 社

- ・ 前脚の車輪に Chorus Motor 社の高出力多相電動モータを使用し、APU で駆動するシステムであり、EL AL 航空の B737-800 にて、評価中である。このシステム装備により 300 Lbs の重量増となるが、地上走行用燃料を節約できることから、離陸重量の増加は無い。
- ・ A320 及び B737 用の Wheel Tug System を含む Aircraft Wheel & Brakes の供給について、Parker Aerospace 社と連携している。
- ・ このシステムの有効性及び費用対効果について実績データを積み上げるために KLM オランダ航空の協力を得て、同航空会社の機体で評価を継続している。

(b) Honeywell 社, Safran 社

Honeywell 社と Safran 社が EGTS 社 (Electric Green Taxing System)

なる JV を立ち上げ、APU により主輪を駆動するシステムを開発し、2013 年パリエアショーにて A320 に装備して実証した。

2016 年からは新型機適用、現有機改造用として販売の予定である。

(c) L-3 Communications 社 — 米国の装備品メーカー —

主輪を APU により駆動するシステムであり、Lufthansa 航空の A320 にて実証した。

(d) DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)

前輪を燃料電池で駆動するシステムであり、A320 にて実証した。

コメント；

電動走行用システムの装備による重量増 W_1 により運航時の必要燃料重量が増加する（この増加量： W_2 ）。一方、地上走行用燃料の重量は減少する（この減少量： W_3 ）。このシステムが採用される条件は、装備コストが適正で、 $W_3 > W_1 + W_2$ である。

本システムは、空港周辺のエミッション問題については有効であるが、消費燃料重量の観点からは、“航続距離／巡航速度”の値が大きい路線では効果が低く、適用がマイナスになる領域もあると考えられる。（——>短距離路線に使われるであろう。）

1.1.4 電源系統

化石燃料の消費削減、低エミッション化の為に“更なる電氣化”を目指して、燃料供給により継続利用できる「小型軽量、耐航空機搭載環境性等を満たす航空機用燃料電池」の研究開発が加速されており、比較的、小規模なシステムについては殆ど実用レベルに達して試行されている。

(1) 燃料電池

- Airbus 社は 2015 年までに A320 に、90 kW の水素燃料電池を搭載し、客室娯楽系統、照明、空調等のエネルギー源とすることにより、燃料消費を 15%低減する計画である。
- Boeing 社と IHI 社は、航空機向け再生型燃料電池システムの飛行実証に成功した。（世界初）
試験は、B737-800 を使って行なわれ、離陸前から上昇の間に、燃料電池からギャレーに電力供給を行い、発電によって生成した水から水素を

取り出し、再び発電に使うとのサイクルを実証した。

- Liebherr 社はドイツ国家計画の下で、A320 neo に適用を目指して電池駆動の高揚力装置及び脚を研究している。

(2) リチウムイオン電池

航空機に搭載されている電池はエンジンのスターター用、電子機器のバックアップ用の電源として使用されており、鉛蓄電池、ニッケルカドミウム電池が使用されてきたが、高容量、高エネルギー密度、軽量であるリチウムイオン電池に置き換えられつつあるが、その過程で、B787 のバッテリー故障が発生した。以下にその経緯を追う。

- 1月7日に Boston 空港に駐機中の JAL 機の後部電気室で電池火災が発生したこと、更に1月16日に ANA 機が飛行中に前方電気室の電池の発煙警報で高松空港に緊急着陸したことから、FAA は B787 に対し、電池の安全が実証できるまでの飛行停止（緊急 AD）を命じ、これを受けて欧州、日本、インドで当局が B787 飛行停止を決めた。
- Boeing 社は 2014 年 3 月 15 日にセル損傷の可能性の最小化、充電方法の改善、故障時の閉じ込めの 3 部分の改修案を示し、故障を発生させない、拡大させない、機体への影響を防ぐとの 3 重の防護手段をとることとした。具体的には、電池、格納箱、充電器を再設計し、電池の製造工程及び試験の管理を強化した。
- 改修したリチウムイオン電池システムは、飛行試験にて平常時、異常時ともに設計意図通り機能することが確認され、FAA は 4 月 19 日にこの改善設計を承認した。更に、4 月 26 日、航空会社に機体の改修を提示するとともに、飛行停止の解除と改修コストの推定値（1 機当たり \$ 465,000）を発表した。
- 2014 年 12 月 2 日、NTSB (National Transportation Safety Board) は、バッテリーシステムを構成する 8 個のリチウムイオン電池のうち 1 個が内部でショートし、連鎖的に異常な高温となる「熱暴走」を起こしたと指摘。Boeing 社と FAA が、バッテリーシステムで「熱暴走」が起こる潜在的な可能性を綿密に調べなかったとして、認証過程に甘さがあったと批判し、GS ユアサ社に対し、電池の安全性が確保されるよう製造工程を検証し、従業員への適切な訓練の徹底を勧告し、FAA には、新技術を伴う

設計に関する安全性評価を改善するよう勧告した。

Boeing 社はこれまで、トラブルの再発防止策として、8 個の電池を絶縁テープで囲み、無酸素状態にできるステンレス容器に収める改善策を講じ、運行再開が認められていた。

コメント；

本事案の当事者は FAA, Boeing 社, Thales 社, GS ユアサ社であり、いずれも公聴会に呼ばれて証言を求められたが、最終的には、FAA, Boeing 社, GS ユアサ社にのみ改善勧告が出て Thales 社に対しては無い。これに対して、関係者の間で疑問の声が挙がっている。これについて、Thales 社と GS ユアサ社の間で締結された契約書の内容を知らずしての意見はここでは控えることとする。

(3) 軽量発電機

Liebherr 社は、抽気による与圧空調系統を発電機によって置換可能であることを実証する試験を計画している。このような系統は現在は B787 にしかない。B787 では与圧、空調、主翼防氷系統を電化する為に 1.4 MW の発電機を装備しているが、これは小型機には重量大で経済的ではない。Liebherr 社では現在の 50 kW に対し 100 kW の軽量発電機を開発している。この試験は長期開発計画の一部で、次世代 150 席機が開発される時には準備を完了している予定である。

1.1.5 表示・操作系統

(1) 表示

航空機事故の要因の 70~80% がヒューマンエラーであることから、パイロットが負担なく、適正に判断し、行動できる様に表示装置の革新化が図られている。

(a) ヘッドアップ SVS (Synthetic Vision System)

FAA が、Rockwell Collins 社の統合航法機器システム ” Fusion ” を使った Global Vision 操縦室のヘッドアップ SVS の認証に特別要件^(*)を発行した。

(*) 航空機的设计の特徴が前例のない又は通常と異なる場合で、既存の基準に適切な基準がない場合に、追加して設定する要件。

- ・ 「人工視界により外視界が歪められないこと」を要求。これは赤外線カメラを使った EVS (Enhanced Vision System) にも適用。
- ・ スティック、スロットルに手を置いた状態で SVS を ON/OFF 可能のこと。

(b) 先進 SVS

2002年にUniversal Avionics社(米・アリゾナ州)のExocentric Synthetic Vision(上後方から前方の人工視界)が認証されて以来、当局は従来の消極的態度を変えつつある。今後、全画面三次元表示を取り入れることにより、更なる先進化が加速される。

(c) Enhanced Flight Vision System

FAAは2004年にGeneral Aviation用に制定したEFVS基準を2016年11月に改定した。2004年基準は赤外線(IR)センサーによる前方視界のビデオを幾つかの記号と共にHUD(Head-Up Display)上に重ねることで、高度100ftにて眼で滑走路を視認できるまでの直線進入が許された。最も精度の高い精密進入でも高度200ftでの滑走路視認が要求されるので、EFVSを装備すれば他機が代替飛行場に向かう時も着陸可能な場合が増える。2004年以来982機が装備したが大半は大型ビジネス機で、例外的にFedEx(貨物輸送会社)のMD10/11、B757/767/777、A300/310にて利用を認められていた。2017年3月からの新基準では航空会社やエアタキシーにも使用が認められ、着地並びに滑走からのロールアウトにて利用可能となる。更に重要なのは、複合視界装置(CVS=Combined Vision System)の利用も可能となる。即ち地形、障害物の3次元表示による人工視界とIRカメラの映像を組合わせた装置が飛行の全フェーズで利用可能となる。また未だ認証を得た機器はないがHead-mount displayの使用も認められる。

(2) 操作

(a) タッチスクリーンと音声認識

Honeywell社、Rockwell Collins社、Thales社等でタッチスクリーン技術、音声認識技術を応用した次世代操縦機器の研究が進められている。特に、Honeywell社及びFAAが共同にて、Crew Interface Motion Simulation研究所にて各種タッチスクリーンとその配置について、米大陸横断の模擬飛行にて評価が行なわれている。ここでは、スクリーンに2度タッチ、または力を入れて押した場合のみ入力として受け入れることにより意図しない不用意な操作を排除することになっている。また、従来のスイッチ、ボタンのうち消火ボタン等の安全性に関わる最重要のものは残す方向である。音声認識技術については、会話の途切れ、間投詞、アクセントの違いの取り扱い等に課題あり、航空機器への適用には更なる研究が必要である。

(b) Thales 社のタッチスクリーン

Thales 社は、パリエアショーにて展示した“2020 Avionics”にて、「近い将来、操縦室パネルは大型 iPad に似たタッチスクリーンに転換される」と述べている。

即ち、

- ・パイロットはスクリーン上での指の操作により経路変更、エンジン制御を行う。
- ・離陸後、路線図に変更され、航空路監視情報、他機との距離等のデータが表示される。

(c) Honeywell 社のタッチスクリーン

Honeywell 社の技術者とヒューマン・ファクタの専門家は、タッチスクリーン、音声認識、仮想副操縦士等の Man-Machine interface を研究している。これは次世代輸送機、ビジネス機の操縦士の負荷軽減と安全性向上を目標として、これまでの研究では、最初に適用されるのはタッチスクリーン表示器となる見通しである。Honeywell 社は FAA との 2 年契約の「利用可能性評価」（インプット・エラー、操作時間を従来操縦室機器と比較評価すること）にて、その種々の表示方式、搭載場所について操縦士操作模擬実験室で試験を行っている。これらの成果を FAA は基準作成に、Honeywell 社は製品設計に活用する。これまでの結果では digital-resistive タッチスクリーンをセンター・ペDESTAL に配置するのが最適となっている。一般消費者向け電子機器では projected-capacitive 型が普及しているが、誤操作や冷たい手或いは手袋を着けた手を考慮すると航空用にはリスクが高い。

コメント；

パイロットの認識ミスを防ぐ為にも、表示／操作方式の改善が必要であるが、パイロットの人間工学的特性を配慮し、人間-機械系として包括的なシステム設計のもとでの改善案が求められると考える。

なお、表示に関わる要素技術は、将来は窓無し客室内壁への表示（窓無しによる胴体軽量化）にも適用される可能性有り。

SSBJ (Supersonic Business Jet) / SST (Supersonic Transport) の着陸時、迎角を大きくする必要から、先方視界確保の為、機首を折り曲げなければならないが、高信頼性の SVS を使うことにより、折り曲げ機構を無くして重量軽減に寄与することができる。

(3) マニュアル等の読み取り

FAA は American 航空に対して、紙ベースのチャート、マニュアルに替えて、操縦室で iPad を使用することを認めた。

乗客の電子機器使用については、10,000 ft に達するまで禁止である。

コメント；

マニュアル類は極力、搭載コンピュータ内の操縦に関わるソフトウェアに組み込み、パイロット・ケアフリーの方向に向かうことにならないかと思われる。

1.1.6 防氷系統

(1) 防氷

- ・ 米 Battelle 研究所では、軽量・省エネルギーにて適用可能な電導の CNT (Carbon nanotube) を含有した防氷用塗料を開発中である。これを使用する場合、まず金属面への下塗りを行い、次にこの CNT 含有塗料を塗り、更に保護膜、通常の表面塗料を塗ることになる。
- ・ Harvard 大学が翼表面に多孔性の層を生成させた上に、水と親和性のない液体で覆い、孔で保持した液体にて氷点近くで氷を付着させない様にする技術を開発した。
- ・ Fraunhofer 研究所 (独) では、ナノ材料の電導層を主翼前縁 (複合材) の層間に埋め込み、前縁を 120 °C まで熱する方式を開発し、風洞試験 (気流温度: -18 °C) にて着氷が融解されることを確認している。この場合、複合材に金属を組み合わせるときには問題となる様な疲労破損は発生しない。
また、形状記憶材料を使って、温度に対応したパルス制御により脈動的に構造体の体積を変えて除氷するシステムを開発中である。これにより、従来のラバー・マットより 80% のエネルギー節約となる。
更に、融解した水が翼にて再着氷しない様な撥水用コーティング技術の開発も目指している。ここではフッ素を使用しているため腐食・紫外線に対する耐久性に難点があり、その解決が課題である。

(2) 着氷の探知

- ・ GKN Aerospace / 欧州各メーカーの合同チームは、「光学的着氷センサー」と「氷結量を精密に監視するための分析技術」を組合わせた「完全自動

翼上着氷探知システム」を開発し、その飛行試験を完了した。このシステムでは翼、ナセル、ロータ等の表面にセンサーを装着して、光ファイバーにて翼光の反射光を測定して氷の質、厚さ、場所を特定できる。

- Fraunhofer 研究所（独）では、光学センサーを活用して着氷探知／除氷監視を行う着氷警報システムの開発を目指している。
- Zodiac 社（フランス）が開発した視覚的着氷探知による前縁電熱除氷システムは、着氷気象下で常時ではなく必要な時だけ作動させることが可能となる。

コメント；

着氷探知システムの研究の背景は以下の通りである。

近年の着氷条件下での事故を分析すると、着氷条件下に遭遇していることにパイロットが気付かずに、防氷システムを作動させていない為に、事故に至ったケースが多かったことが判り、当局が着氷探知を義務付けたことによる。このシステムは従来、極めて高価であったことから、低価格化が求められる。

（3）防氷剤

Rice 大学が開発したグラフェン(炭素同位体の一種で、炭素原子 1 個分の厚みしかない平面状の物質)を用いる防氷剤は、7° F 以上では着氷しない超撥水能力を付加して更に改良された。エポキシ内のグラフェン・ナノリボンを吹き付けた薄膜の防氷剤は、実験室での-4° F の環境でヘリ・ロータブレード上の氷を溶かす能力を示し、また電導被膜は低電圧の負荷で電熱が 1 cm 厚の氷を溶かした。高価なグラフェン・シートの代替品ナノリボンは、Rice 大が開発した工程で炭素ナノチューブを用いて作成され、エポキシ膜内に埋め込むと互いに結合して電導体になる。ナノリボンは通電によりブレード前縁を 200° F 以上に加熱し、非常な低温では加熱して雪氷を溶かす必要があるが、7° F 以上の緩やかな条件下では超撥水性を付加することで着氷を防ぐ。

1.1.7 空調・与圧系統

• Liebherr 社が、狭胴機用発電機が抽気による与圧空調系統を置換可能であることを実証する試験を計画している。(2015 年)

• A320 で全電化空調の飛行実証試験 (2016 年)
Airbus 社は EU Clean Sky 研究の下で A320 の全電化空調(e-ECS)の飛行試験を行った。

同時に視覚的着氷探知系統も評価した。Liebherr 社が開発した e-ECS は 540volt で駆動される 50 kW の電動ターボ圧縮機が、抽気に代えて外気を吸入して燃費を改善する。只、腹部のスcoop吸気口から地上でも十分な量の空気を吸入するための強力な高速回転電動ターボ圧縮機は騒音が大きく、これに対処するため、GKN 社は防音の為に 3D 印刷により 1 mm 厚のチタンハニカムから作られる金属フィルターを開発した。Zodiac が開発した視覚的着氷探知による前縁電熱除氷システムは、着氷気象下で常時ではなく必要な時だけ作動させることが可能となる。

1.1.8 推進系統

推進系統は、エンジンの推力を自在かつ安全に制御するため、エンジン取付装置、エンジン空気取入装置、エンジン制御装置、エンジン計器、冷却・換気装置、防火装置、防氷装置から構成されている。

この系統に関する新技術としては、エンジン前面・空気取入口への着氷を防止する防氷システム及び着氷検知システム等があるが、これについては 1.1.6 項を参照のこと。他方、運用中の機体にて関連する部位のトラブルとしては、下記が報告されている。

- ・ 不適合内容

B747-8I の外側エンジンを支持するストラットの一部分が破損するケースにおいて、主翼にフラッタが発生することが、解析によって判明した。

- ・ 原因

B747-400 と比べて、主翼より後方の胴体長が 50 インチ長く、機体尾部に燃料を搭載していること。

- ・ アクション

FAA は、主タンクと尾部タンクとの間の燃料配管を除去して、両者を分離することを指示。

コメント；

B747-400 と比べて長くなった胴体の尾部（自由端）が燃料搭載によって重くなり、胴体曲げ振動数が低下し、結果として主翼の固有振動数に近づくことによりフラッタ速度が低くなるのではないかと。

1.1.9 燃料系統

燃料系統は、燃料タンク、燃料移送・供給、加圧、ベント、燃料排出、燃料計量、防爆の機能を有する系統から構成されているが、近年、飛行条件に応じて最適な

重心位置となる様に燃料移送をコントロールするシステムが使われている。

コメント；

重心制御の自動化は全機抵抗低減の手段の一つである。これにより、巡航中の縦静安定余裕を許容限界まで小さくして、トリム抵抗を低減することを狙っていると考えられる。

1.1.10 客室機内システム

(1) 格納庫と座席

Airbus 社は、A320 neo Plus にて Delta 航空の要求により、頭上格納棚に納まらない程の大容量の手荷物を収納できる可動格納庫及び A320 の座席を 2 列増やすことができる様なスリム座席の開発を行う。

(2) 熱可塑複合材製の座席

Exlipseat 社のチタンと熱可塑材によるエコノミー座席は 1 席当たり 8.8 Lbs と軽く 16 G の衝撃に耐え、部品点数は従来製より 1 オーダ少ない。この座席は最近 EASA (European Aviation Safety Agency) に承認された。

参考：熱可塑複合材について

熱可塑複合材の適用が熱硬化複合材や金属に代わって増えてきた。航空機業界では熱硬化型の生産設備や治具への投資が比較的新しいので移行は緩やかであるが、自動車業界の熱可塑への移行に便乗して航空機業界でも生産量が増えている。熱可塑型は加熱で軟化し、溶けるが冷却すれば性質を損なうことなく再硬化し、素早く生産できて性能も良い。但し、高強度部位には不向きである。

(3) 亜麻繊維による内装材

航空機の内装市場は好況で、2016 年には \$12B に達する。一方で今後の新型機や改良型の投入で 2023 年には年間 1000 機が退役するが、そこでは多くの内装材が廃棄される。美しい内装も材料の殆どはプラスチックやガラス繊維複合材で、廃棄時には環境に悪影響を与える。そこで Boeing 社は環境に優しい亜麻繊維を用いた内装材を開発している。亜麻繊維は布に織られて、特殊な非ハロゲン耐炎加工が施され、レジンを含ませて成形される。

コメント；

- ・ 座席等の客室機内システムの特徴は、同一機材であっても各エアライン毎に

仕様が異なる点である。(→関連メーカにとって、魅力的)

- ・ 座席は機体重量の約3%も占めることから、上記(2)、(3)に示す様に繊維材料を使って軽量化が図られている。

軽量化技術を得意とする我が国メーカにとって、更にシェアを拡大できる分野である。

1.1.1.1 飛行記録機器

(1) In flight Safe Monitoring System

Star社が開発した In flight Safe Monitoring System の有効評価について、FDR (Flight Data Recorder) の代替として、Pakistan 航空 A310-300 を使って実証試験を実施中である。

これは FOQA (Flight Operational Quality Assurance) が求める全てのデータをモニターすることが可能となる。

(2) 飛行データの実時間送信

- ・ IATA 会長は「マレーシア航空 MH370 便のような行方不明事件を2度と起こさない為に、飛行データの実時間送信を真剣に検討すべきだ。ただ1日10万便の総てのデータ送信は技術的実用性に疑問があり、ICAO、機器メーカ、探索/救難専門家などを含む IATA Task Force Team が現在及び近い将来利用可能な技術を含めて検討するべきである。実行には法規制当局、機体メーカ、機器メーカ、航空会社に関連し、また全世界一律に採用できなければならないので、慎重に検討する必要がある。」と述べた。
- ・ ICAO は、2015年2月3日に国連航空安全部会の High level Safety Conference において、航空機の位置を15分間隔で Tracking する新基準を推奨した。これまで、一部のエアラインでは自主的に ACARS (Communications addressing and reporting system) や、他のシステムを使って Tracking が行われていたが、義務付けされたものではなかった。

1.2 空力に関わる装備技術

(1) 摩擦抵抗低減技術

摩擦抵抗の低減として、表面処理/塗装及び層流制御の2種類の方法が考えられている。前者は比較的容易に低コストで対応できることから、既存機への適用が試みられている。後者は自然層流化と層流制御を複合した HLFC (ハイブリ

ッド層流制御) が実機適用レベルに達しており、新製機に使われ始めている。
以下、関連記事にてこれまでの経緯を辿る。

(a) 表面処理/塗装等

- Easyjet 社 (英国) はアクリル光沢剤 (微少の溝、孔を埋めるナノテク・ポリマー) を使って機体表面を滑らかにし、汚れを防ぐことにより空力抵抗を低減させる計画である。
- 乱流域の摩擦抵抗低減として、機体表面へのリブレット成形 (V字の縦溝成形) を適用すると効果があることが知られているが、これはある限られた条件下にて有効であり、これから外れると、むしろ抵抗増になる。
(参考: 鮫の体表面では、部位によって溝の深さ、形状が異なる。)
また、溝の深さが極めて浅く耐久性、メンテナンスに課題がある。
この様な現状に対して、Surry 大学 (英) の D. Birch 博士は電界により歪み、圧力が発生する EAP (Electric-active Polymer) を活用することにより新しい展望が開けると予想している。
- Lufthansa 航空では 2 機の A340 の主翼と胴体の表面に、腐食に耐えて汚れをはじくラッカーの表面塗装にリブレットを押し印した 10cm×10cm の被覆パッチを幾つか貼り付けて、耐久性の飛行試験を行っている。またドイツの生産技術大学では、シリコンの型と被覆を高温処理するために、紫外線ランプを用いて機体表面に微細構造のラッカーを適用する方法を開発中である。
- NASA では、スパン方向の乱れ波長の 1/3~1/2 の間隔で高さ 10~12 μ m、直径 1~1.5 mm の突起を翼の前縁に設置し、この波長と異なる波長の波を発生させ、波を互いに干渉させることによって境界層内のスパン方向流れの摩擦抵抗低減を狙う研究を実施しており、Cessna0-2 を用いた飛行試験では、層流の範囲を 30%コードから 60%コードまで拡大することができた。
- AFRL (米国: Air Force Research Laboratory) では、再認証が必要となるような外形の大きな変更を伴わない表面加工又は塗装等による簡単な抵抗低減策を探している。1989 年には A320 の表面の 70%を粘着 Riblet で覆って抵抗 2%減に成功したが、整備と耐久性の問題の為に採用に至らなかったが、今では Fraunhofer 社が耐久性の高い表面塗装に微細縦溝を刻印する方法を開発した。

- リブレット被膜の塗装

Lufthansa Technik は大型民間機の揚力面にリブレット被膜を自動的に形成する工程（特殊塗料に微小な溝をロボットで刻印）を開発した。鮫の肌から着想した微小縦溝は翼面の乱流接触面を小さくして抵抗を減らす。これまで溝付表面をつくる実用的方法が見つかっていなかった。溝付接着膜の貼付は重量増を齎すこと、煩雑な工程となること、定期的交換（溝の埋まり対応）のためが必要であること等が問題であった。本工程は紫外線に透明な雌型原版を連続帯状にして、特殊な塗装を施した被膜表面に押し付けて紫外線で硬化させ、剥がすと雄型が残る様にしたものである。このリブレットにより燃料消費が 1.5%削減される。

(b) 層流制御

- Airbus 社では、超大型双発機 NLR (New Long Range) 計画が浮上しており、HLFC を適用した 470 席、8,150 n.m の超大型双発機概念設計を進めている。要素技術の熟成の為に、Clean Sky 1 では 2015 年に A340-300 改修機による自然層流翼の飛行実証が、Clean Sky 2 では前縁吹き出しによる高速飛行実証が計画されている。
- Boeing 社と NASA により Ames 実大風洞にて “Sweeping jet” AFC (Active Flow Control) 付きの B757 実大尾翼の試験で、方向舵効きの 20~30%増大が確認された。必要な時に横力を 20%増強して垂直尾翼を 17%縮小し、燃費 1~2%節減を目指すものである。双発機の大きな垂直尾翼は離陸時の片発停止による大きな偏揺れモーメントを抑えるために必要となるが、大きな方向舵角での剥離を AFC で抑えて横力を増強し垂直尾翼を縮小することを目指している。次は、Boeing 社の実証機計画で 2015 年の飛行試験により Sweeping jet のアクチュエータ配置と流量を最適化する予定である。
- Boeing 社は B787-9/10 及び B777X-8/9 に HLFC システムを適用する。同社が商用機に対する実用的な LFC システムを追求した結果、非常に単純なシステムとなり、付着した昆虫などは飛行の合間に地上で通常の圧力洗浄で除去できるとのことである。
- 層流実証機 (Breakthrough Laminar Aircraft Demonstration for Europe = BLADE) の左翼上面外板を使って A340 自然層流実証機の超円滑翼の

組立が始まる。低抵抗自然層流を保つための円滑面製造には高い精度が要求されるため、両外翼（右翼上面外板は GKN 製）の最終組立に数か月を要し、2016 年中期に Airbus 社に送られ、A340 の外翼と交換され、2017 年 9 月以降に飛行する。資金面では、BLADE の 2017 年 3～8 月の地上試験と 9～10 月の飛行試験までが Clean Sky 1 の資金で行われ、残り 78 時間の飛行試験は Airbus 社などからの別途の資金で行う。この層流外翼には新補助翼が含まれ、複雑な改修と安全性証明に時間がかかる。なお、SAAB の左外翼は前縁と上面外板が一体であるが、GKN の右外翼は別部品で機械的に結合される。

この実証機試験のために A340 が 2 年間専有されることになり、垂直尾翼端には外翼の流れの計測に表面温度を感じる赤外線カメラが、主翼端には実荷重での表面の曲りと波度を測る別のカメラが装着される。設計意図通りに成功すれば、高度 22,000 ft 以上で自然層流となり $M = 0.75$ で通常の乱流翼より 8%抵抗減で、800n.m の路線で 4.6%燃料減となる。

- ・ 主翼、尾翼、特に抵抗を増す剥離に敏感な部分の流れを精密に制御することにより、大幅に燃費、汚染排気、騒音を削減できる。欧州では 4 年で Eu37M を投じ、AFLoNext (Active Flow-Loads & Noise Control on Next Generation Wing = 次世代翼での荷重及び騒音の能動流れ制御) の研究 (15 か国、40 社が参加、Airbus 社が取り纏め、期間 2013 年 6 月～2017 年 5 月) にて空気流、騒音及び振動の制御技術の向上を図っている。ここでは巡航での抵抗減少のための HLFC、HBPR エンジン装備した機体の離着陸性能向上のための AFC (能動流れ制御) および振動対策が中心であり、既存の流れ制御技術を深化させて、Clean Sky 2 研究に引き継ぐ予定であり、2016 年に DLR の A320 による脚とフラップの受動騒音制御及び 2017 年に垂直尾翼の HLFC の二つの飛行実証を行う。この HLFC は A320 の垂直尾翼を改修して、小孔の開いた前縁での吸込みで低速の境界層を除去し、乱流への遷移を遅らせて低抵抗層流域を拡大し、圧縮機による能動 HLFC と B787-9 の尾翼同様に尾翼内外の圧力差による受動的制御を試みる。主翼と尾翼に適用すれば 9%抵抗低減可能との推算である。但しこれらは中長距離機にのみ有効で A320 への適用は考えていない。AFC は外翼、翼とエンジン・パイロン結合部及び翼後縁での 3 種を検討する。外翼では翼端デバイスの活用で巡航燃費 2%減を目指し、AFC のアクチュエータには、エンジンの抽気によるパルス・ジェットと空気供給を必要とせず膜の電氣的振動で流れにエネルギーを与える 2 種があり、この差を 2016 年に TsAGI の風洞試験で確かめる。

通常の高揚力装置では前縁スラットの外端で流れが剥離してウイングレットに当たる。そこで AFC にて剥離領域を高揚力性能を損なわない場所に動かす。この AFC は主翼後縁で、流体 Gurney フラップ（揚力を増すために後縁から垂直に下ろす小さな面）を開いて行われる。後縁での循環を増すためにアクチュエータを開いた気流の吸込み或は噴出、曲面デバイスによるコアンダ効果の活用を考えている。騒音低減では主脚とフラップ後縁の流れ干渉とフラップ外端を対象とする。ここでは多孔泡状金属によるフラップ外端、主脚のカバー、間隙シールなどが有望である。振動制御では、CFD/FEM 結合の振動予知ツールを開発し、脚扉などにて振動要因を見付けて事前に解決することを目指している。

(c) プラズマ活用等

- Lockheed Martin 社と Texas A&M 大学は、導体と誘導体間に電流を流すことにより、Dielectric Barrier Discharge Plasma 状態としてスパン方向に気流を発生させて、摩擦抵抗を低減させる研究を実施中である。
- AFRL では “動的ラフネス”、“化学流れ制御”、“スマート VG” 及び “プラズマ加熱” に関する研究を行う機関を募っている。“動的ラフネス” はモーフィング表皮の瘤、峰で乱流化を制御するものであり、“化学流れ制御” は表皮の撥水性、親水性で滑り易くするものである。“スマート VG” とは形状記憶合金などにより剥離を感知したら VG を起ち上げて流れを活性化し、不要時には格納して抵抗を下げるもの、“プラズマ加熱” とは遷音速飛行時の局所衝撃波に対し、加熱により亜音速化又は衝撃波位置の変更を目指すものである。

コメント；

これまでの技術動向から抵抗低減技術は下記の方式に分類される。

- ① デバイス無しにて、空力形状の工夫のみで順圧力勾配を維持して、遷移を遅らせる自然層流翼
 - ② 境界層吸い込み、吹き出し等の制御により層流域の拡大を目指す能動的層流制御
 - ③ 分散型突起により横流れ不安定による遷移を抑える受動的層流制御
 - ④ 上記①と②を組み合わせたハイブリッド層流制御 (HLFC)
 - ⑤ 高いレイノルズ数域にて、縦溝(リブレット)を機体表面に貼り付けて、機体近傍の乱流ストリークの挙動を抑える乱流摩擦抵抗低減デバイス
- 以上の空力に関わる新技術コンセプトの成否は、MEMS (Micro

electro-mechanical System) 技術、流れの吸い込み・吹き出し技術、受動的デバイスの微細加工、表面処理の技術（含：製造／メンテナンスの低コスト化）等の一定レベルまでの進歩に依存する。

上記③の最近の技術例：

大きい後退角を持つ超音速機では翼幅方向の横流れにより擾乱が乱流に遷移し、抵抗が増加する。Aerion 社が開発中の SSBJ AS2 は超音速自然層流翼で燃費低減を図るが、この主翼は直線翼で、NASA が追求している大きい後退翼が必要な機体形状により衝撃波形を緩和する低ブーム設計ではない。

NASA は大きい後退角の主翼で層流を保つために DRE (Distributed Roughness Elements) を F-15 の胴体下に搭載して、 $M=2.0$ までの飛行試験を計画している。乱流境界層による表面摩擦は超音速機の抵抗の半分を占める。後退角 65° の主翼前縁に沿って小突起を並べた DRE は境界層の層流から乱流への遷移を遅らせると期待されている。DRE は Tollmien-Schlichting 波と呼ばれる横流れ擾乱を緩和する。横流れは基本的に締め出されて成長しない。境界層は最終的には乱流に遷移するが、その位置が後方に移る。

20 世紀末にいくつかの DRE が亜音速で試験されたが、何れも超音速では効果が無かった。超音速境界層制御効果を有する DRE は粗さの高さが微小ではむしろ効果は少なく、ある程度の高さが必要である。

F-15 では幾つかの DRE が試験され、層流の度合いは DRE 装着部位の温度分布を赤外線カメラで計測する。高温は乱流による摩擦抵抗が大きいことを示す。

(d) Finlet

Vortex Control Technology (VCT) 社は、長さ 25in、高さ 2.5in のアルミ製ストレークを後胴下部両側に各 3 枚取付ける抵抗低減デバイス (Finlet) の認証取得を計画しており、最初の適用機は B737NG である。CFD による解析では 1% の抵抗低減が見込まれる。現状では B737 の主翼後方の胴体下面両側に沿って形成される渦が後方に流れるに伴って巻き上がり、尾部下側の流れを加速して抵抗を増やしている。これに対して、Finlet により渦を押し下げて流れを真直ぐにして抵抗を減らすことになる。

(2) 揚抗比改善

(a) クルーガフラップ

EU 資金で DLR (独) が次世代層流翼の高揚力装置としてクルーガフラップを研究している。これは層流域を乱す鋭い段差、隙間およびリベットの頭などを除去すると共に、フラップを翼に統合しようとするものであり、燃費を 7% 節減

できるとのことである。

(b) GLA (突風荷重緩和) 含みのウイングレット

ウイングレットは誘導抵抗減少に役立つが、これは翼幅拡大でも可能で、翼幅が格納庫や空港ゲートで制限される場合や既存翼改修時にはウイングレットが最も有効である。しかし翼端で揚力を発生させるため突風遭遇時などは翼根の曲げ荷重が増え、構造補強が必要で重くなり既存形態へのウイングレット追加は高価になる。能動突風荷重緩和は余り普及していないが、最初に L-1011 で認証され、A320 や B787 の FBW 機に用いられている。Tamarack Aerospace の “Atlas active winglet” システムはビジネスジェットに翼構造の補強なしでウイングレット追加を可能とし、Cessna Citation Jet の CJ、CJ1、CJ1+などで EASA の認証を取得した。ウイングレット内側後縁に付加した「補助翼」の自動制御により突風荷重を緩和し、翼曲げ荷重を最小化してウイングレット追加による構造補強や重量増を防いでいる。通常のウイングレット形状が翼荷重の為に制限される時にこのシステムは最適形状の採用を可能とするが、他にも安定性の増強や乗心地の改善にも役立つ。

(c) Blended Wing Body (BWB) 形態

BWB 形態は通常の Tube & Wing 形態と比較して、燃費、汚染排気、騒音、航続距離の面で優れているが、幅広い胴体による旅客輸送には必ずしも適さないことから、最初は貨物機を考えていたが、最近では通常の尾翼を有する HWB との比較に関心が集まっている。BWB 形態は低速での縦制御能力増強と高揚力装置が焦点で、胴体上部エンジンの排気を後縁エレボンに吹き付けて揚力を増すと共に縦制御にも利用しようとする試みや、前縁クルーガフラップ、後縁操舵面の応用、胴体腹部のボディフラップなどの高揚力デバイスについて風洞試験にて確かめられている。双発の X-48C 無人実証機を再利用することにより、エンジンを前方に移すことによる騒音遮蔽効果増大の効果を確認しようとしているが、ここでは低速での吸入口偏流、圧力回復、抵抗増、高速でのナセルと胴体上面とのチャンネルフロー、ナセル衝撃波、尾部との干渉抵抗、スピレージ抵抗などが問題になってくる。

Boeing 社が BWB 形態機の設計を次の様に更新した。

・多目的軍用輸送機として人員降下や貨物投下の為に後方に搭載されたエンジン
の間を上下対称に開くクラムシェル型貨物扉とし、上側には Boeing 社特許の
エレボンが装備され、縦操縦に供される。

・離陸/上昇性能改善の為に前縁スラットが内舷まで延長された。これは NASA が 2020 年代以降の UEST(Ultra Efficient Subsonic Technology)X-plane 実証機のために契約したリスク低減研究によるものである。UEST には BWB の他に、Boeing 社が買収した Aurora Flight Science 社の横二重泡型胴体の D8 と Boeing 社の遷音速トラス支持翼機がある。この他 Lockheed Martin 社の HWB と Dzyne の BWB ビジネス機も (リスク低減研究の契約は無かったが) UEST 候補から外れたわけではない。

BWB のリスク低減は次の 4 分野で行われた。

①推進系と機体の統合、②非円筒型与圧胴体の為の注入複合材構造 Prseus (Pultruded Rod Stitched Efficient Unitized Structure)、③改良高揚力装置による高角度離陸上昇による騒音影響域の縮小、④大型 BWB の操縦性向上

(d) 小型機の揚力胴体形態

リジョナル機(RJ)、ビジネス機(BJ)、狭胴機(NB; Narrow Body)、広胴機(WB; Wide Body)について、Tube and Wing 形態と Blended Wing Body (BWB) 形態、揚力胴体形態(LFC; Lifting-Fuselage Configuration)との比較は以下の通り。

BWB 形態は機体が大きいくほど空力的及び構造的に効率がよい。

カナダ民間機業界は RJ や BJ を開発し、次は NB に広げていて、航空研究は小型機の効率向上に集中している。UTIAS(University of Toronto, Institute for Aerospace Science)の研究では揚力胴体形態(LFC)が T&W より燃費が 8.2%向上すること。RJ、NB 及び WB の T&W、BWB 及び LFC 形態の比較によると、BWB の空力的利点は小型になるほど減ってきて、WB では燃費 10.9%減となるのに対して RJ では T&W と同等になってしまう。

総ての機種で BWB の空力効率は優れているが重量増加となるので、必ずしも抵抗や燃費が減るとは限らない。

UTIAS によると、最適解は RJ や NB では細長胴体と主翼の形態、WB では BWB 形態に近づくとのこと。濡れアスペクト比が増せば空力効率は良くなる(*)。LFC の胴体揚力は全揚力の 25~32%で BWB の 31~34%より少ないが T&W の 12~13%よりは多い。MIT の研究による“横二重泡扁平胴”の D8 形態では 19%だから、LFC は D8 と BWB の間になる。貨物室は、大型 LFC では床下となるが、RJ では厚みが増して抵抗が増えるので、客室外側の翼への移行部分に置く。

RJ で BWB より LFC が優れるのは主に濡れ面積が小さい為である。前者は T&W より 14%大きいが後者は 10%である。しかもそれは翼幅を広げた為で、濡れアスペクト比は T&W の 43%増しである。100 席 LFC の巡航時の燃費は、巡航高度 36,000ft で T&W の 6.1%減だが、この高度を 44,000ft にできれば 8.2%減となる。

なお、LFC の非円筒形与圧胴の重量ペナルティは縫合複合材構造等で最小化でき

るであろう。

(*) コメント

$(C_L/C_D)_{\max}$ が「濡れアスペクト比 $=b^2/S_{\text{wet}}=A/(S_{\text{wet}}/S_{\text{ref}})$ 」の1/2 乗に比例する故である。 b :翼幅, S_{wet} :濡れ面積, S_{ref} :主翼面積

(e) 分散配置フラップ

航空機の翼は飛行中の平均的な条件で最適化されており、飛行の大部分は設計条件から外れていて、空力性能は完全には最適化されていない。

NASA が研究中の分散配置フラップ・システム VCCTEF(=Variable Camber Continuous Trailing- Edge Flap)は全翼幅にわたって多くの小さなフラップを配置し、主翼が荷重で変形しても各々が独立に作動し、条件に応じて翼断面形状を変えるシステムである。VCCTEF の最適化計算には強力な計算能力が必要で、スパコンが使用される。

従来翼に対する優位性の判定においては、飛行条件に応じてフラップが最適化される翼について、システムの重量増を考慮して燃料節減重量を評価すること、更に複雑になるシステムの信頼性の観点から、ライフサイクルにわたる慎重な検討が必要である。

(2 a) 次世代能動高揚力装置

・ドイツの国立共同研究センターでは次世代能動高揚力装置を使って、高効率で静かな STOL 機を研究している。欧州での長期的航空旅客増大見通しに対しては、出発地と目的地近くの小空港で離発着して door-to-door 旅行時間を短縮できる STOL 機の開発が重要である。更に空港騒音の低減も必要である。この STOL 機は、後縁吹出しコアンダ・フラップとドループ前縁を備え、片翼各 6 個の分散配置電気圧縮機が吹出し用圧縮空気を供給する。翼上ナセル形態で胴体が側方へのファン騒音を遮蔽すると共に、超高バイパス大口径ファンの搭載を可能とし、脚については短くて軽量・低騒音とすることができる。100 席、航続距離 3000 km、 $M=0.74$ の機体が考えられているが、抵抗の大きなコアンダ・フラップは進入時に出力増による高騒音を招くので、通常の3度の最終進入経路に代えて7.5度の深い経路が検討されている。

・Slotted Fowler Flap(SFF)は揚力係数が大きく増加するが、作動装置が気流中に突出することによる抵抗増がある。単純ヒンジ・フラップは突出物による抵抗増を避けることができるが、主翼面積とキャンバーを増すことはできない。NASA は複雑な機構や抵抗増無しで SFF と同等の揚力増大をもたらす能動流れ制御(Active flow control=AFC)装置を組み込んだ単純フラップを装備する主翼を開発しており、最近、

一連の風洞試験を終えた。単純フラップで SFF と同程度の揚力係数を目指すが、面積増とスロット吹き出しの利点が無いことを補うためにフラップ・キャンバーを増し AFC を用いた。風洞試験は、B777 に類似の翼にて片翼幅 9.64ft の 10%縮尺模型を使い内舷及び外舷のフラップに 3 種類の AFC アクチュエータが組み込まれて実施された。流れを再加速するためにフラップの前縁に近い肩の部分に 2 列の圧搾空気アクチュエータが埋め込まれている。着陸時、通常の SFF の下げ角度 37° に対し単純フラップは 50° まで下げられるので、そこでの剥離を抑えるために 1 列では不十分で 2 列になっている。SFF に匹敵するためには単純フラップの揚力係数増加分として 0.5 の増加が目標であり、試された 3 種のアクチュエータのうち 1 種が目標を達成した。他の 2 種は吹き出しジェットをフラップ全幅上に連続的にスイープするものと、2 列の孔から交互にスイープするものであり、前者の揚力係数増大は 0.3 にとどまり、後者は更に低かった。

(3) 超音速機のソニックブーム低減等技術

(a) NASA の超音速実証機計画

- NASA は、新しい技術と設計手法の組合せにより、陸上超音速飛行を許容できるまでソニックブームのレベルを低減する為の技術提案を準備中である。FAA は現在、陸上超音速飛行を禁じているが、これを変更する基準制定には、現実的な環境下でのソニックブームに対する住民の反応を調査する必要がある。そのための実証機は現在 Lockheed 社及び Boeing 社が研究している形態がベースになる。この提案が認められれば、SSBJ の研究開発に取り組んでいる Gulfstream 社及び Aerion 社にも参加が求められる予定である。
- 低ブーム設計ではエンジン装備位置が重要である。通常の翼下装備形態では衝撃波を拡散させるために翼形状に注意する必要がある。翼上に装備するなら衝撃波は上方に向かうので地上には影響しないが、エンジン性能に悪影響がある。NASA はその影響を調べるために Lockheed Martine 社機案と Boeing 社機案の各々の小型模型を用いて風洞試験を行う。同時に超音速機の推力や巡航効率に影響するエンジンへの空気流も調査する。
- 現時点及び一定時間後のソニックブームの影響範囲とその強度をディスプレイ上に示し、操縦士が飛行経路を変更できることが陸上超音速飛行が許容される鍵になるとして、NASA はブーム影響地域の反応データを収集するための飛行試験を計画している。

コメント

- ・ 将来の超音速輸送機の運航時には、騒音、ソニックブームの影響範囲と強度を操縦士に示し、飛行経路を選択する為の表示システムを装備することになる。
- ・ 環境保全の為に、ソニックブーム低減は、騒音エミッションの低減に続く第三の要請である。この解決無しには、当局から SSBJ, SST の陸上飛行は許可されず、機体の商品価値が大幅に劣ることになる。このソニックブーム低減の為に、基本的には揚力分布を機体軸の前後方向に拡げることが有効である。
- ・ SSBJ, SST の空力形状は、①巡航時の揚抗比の要求、②離着陸の揚抗比／最大揚力係数の要求、③ソニックブーム低減の要求の全てをクリアする必要がある。

最近、公表されている SSBJ (Aerion 社, Spike 社) の主翼形状は、矩形である。これは①と②のハーモナイズの結果であり、③については、“機体規模：小”，“巡航マッハ数をコンコルドの 2.0 M よりは小”としてクリアしようとしていると考えられる。

(b) 地対空実機シュリーレン写真

シュリーレン写真はこれまで風洞の中の縮尺模型で利用されてきたが、NASA は地対空シュリーレン写真技術 (GASPS (Ground to Air Schlieren Photography System)) で実機の衝撃波を捉えた。MetroLaser 社が開発し、NASA が試験した GASPS は二つの望遠鏡とデジタルカメラを使い、光源として太陽を利用し、撮影後の画像処理ソフトにより処理を行った。NASA の試験は低ブーム機研究の一環で、太陽の前を通過する機体を手動で撮影したものであるが、この実機シュリーレン写真は空気取入口、尾部からの衝撃波を模型より精度良く捉えている。今後は更に精度の高い写真を撮るために、機体の GPS データを地上に送って、自動的にシャッターを切ることを目指している。

コメント；

望遠鏡，デジタルカメラ，画像処理ソフトから成るシステムであり、優れた光学製品技術を有する我が国のメーカーの参入が期待できる。

(c) 外形形状の変化による低ブーム化

SST の機体形状は巡航マッハ数で最適化されているが、Boeing 社は異なるマッハ数や迎角にも対応させるために形状記憶合金を用いて広範囲で低ブームとな

る様に外形を変化させる可能性を追求している。機体からの衝撃波が空中を伝播する時に合体して強い前方及び後方ショックとなってN型波形を形成して地上で大きな爆発音となるのを防ぐために、僅かに形状を変化させる。これにより、鈍い音に変わる。マッハ数の変化はブーム波形の前半に影響し、迎角の変化は後半に影響すること、及び機首部下面、主翼後方下面の広い範囲及びエンジン空気取入口周囲の形状変化がブーム波形に対して最も感度が高いことが判ってきており、今後更なる最適化を目指していくとのことである。

(4) 騒音の低減

2018年から新大型機にはChapter14-7EPNdBの騒音基準が適用されるが、小型機用エンジンの騒音低減は難しいことから、55t以下の機体には2020年まで適用が延期される。

(a) 全機の騒音低減

(i) NASAのツール

NASAは概念段階にある航空機の騒音特性を電算機で模擬する可聴化(Auralization)ツールを開発中である。これは、技術者が熟知しているデザインとは異なる音響特性を持つ形態等、即ちエンジン騒音が機体で遮蔽されているHWB(Hybrid Wing Body)旅客機、複数プロペラを備えた分散電気推進によるジェネラルアビエーション機及び個人航空輸送等の需要に応じて新たな運航方法を見出すため等の研究に使われている。

このツールの進歩は、信号処理技術とその精度等の進歩によっており、計算予測、風洞試験および飛行試験データの情報、騒音源の解析、観測者までの空中伝播および主観的計測を可能とする試験環境の再生等の要素から成り立っている。

(ii) リジョナル機

- ・ 欧州では、ターボプロップ機、GTF(Geared Turbofan)又はOpen rotor搭載の90~130席リジョナル機の騒音低減技術開発に積極的である。ここではATR社が最も成果を挙げている。
- ・ リジョナル機では脚と高揚力装置からの騒音が大きい。“Clean Sky”(Eu1.6B)及び“Clean Sky 2”(Eu4B)では、ATR社がリードする“Green Regional Aircraft”の低騒音形態計画でターボプロップ機の脚と高揚力装置の騒音低減技術を実証研究中である。そこでは低騒音の新形態が研究され、高翼で主脚がATR42/72のように胴体スポンソンに格納される90席双発ターボプロップ機も検討されている。現在は“Allegra”計画で幾つかの有望な実大前脚および1/2縮尺の主脚がイタリア

Pininfarina 設計室の風洞で試験されている。

- “Allegra”での最善形態の実大主脚が、“Artic”計画でオランダ DNW-LLF 風洞で試験される。“Allegra” (Eu2M) と “Artic” (Eu1.4M) を取りまとめるダブリンの Trinity College は “Wenemor” (Eu2M) 計画で 130 席 Open rotor 搭載機の騒音を評価している。ここではプッシャー型／トラクター型、L 字、T 字、U 字型尾翼の組合せが試験された。
- “Allegra”では前脚と主脚の低騒音形態が評価された。前脚では 2 車輪のハブの覆い、2 タイヤ間の風防、前脚室扉を傾けるスポイラー、穴開きフェアリング、また主脚では穴開きフェアリング、脚室内吸音材、外部ハブ覆い、2 車輪の軸フェアリングなどが検討された。

(iii) エンジン騒音の遮蔽

- 空港容量増大を妨げる騒音制限の緩和に十分な騒音低減技術の最大の手段は地上へのエンジン騒音を機体で遮蔽することであり、過去 5 年間 NASA は胴体による騒音遮蔽のため BWB (Blended Wing Body)、HWB 形態を研究してきた。これにエンジン、機体および脚の騒音低減を加えて、2025 年就航の機材の騒音目標について、NASA は Stage4=42 dB と定めた。これは Stage4=10 dB の現用機材の騒音面積を 80%減らすことになる。しかし、旅客の受容、緊急脱出の観点から、必ずしも総ての人が HWB を現用長距離双発機の代替とは考えていない。そこで NASA は HWB の空力、音響的特徴の理解を深める一方で、2 階建胴体の側方にエンジンを搭載して離陸側方騒音を胴体で遮蔽する MFN (Mid Fuselage Nacelle) 概念と主翼後縁上に空気取入口を置いて前方ファン騒音を地上から遮蔽する OWN (Over the Wing Nacelle) 概念を考え始めた。
- Boeing 社が設計した HWB 貨物機については、エンジン音遮蔽に加えて HBPR (High Bypass ratio) エンジン、先進吸音材、前縁デバイスと脚の低騒音化対策の効果で Stage4=38.7 dB が実現可能であることが示された。他にもコアとバイパス流の混合を改善するシェブロン排気口及びジェット排気の後流にあるジェット騒音源を上流の排気口近くに移して遮蔽効果を増すことなども研究されている。
- Boeing 社の MFN 概念の B727 の騒音レベルは Stage4=28 dB と予測され、

B787 の Stage4-18 dB を凌駕した。遮蔽だけでも翼下エンジンより 4 dB 下がり、高アスペクト比で LFC の主翼は、着陸速度を 20 kt 低くして機体騒音を緩和した。全幅連続の後縁フラップとクルーガ前縁スラットは着陸時は隙間を開けるが離陸時は騒音源除去のために閉じられる。BPR = 13.5 のターボファンは排気速度と騒音を下げる。NASA では更に追加の騒音低減技術で Stage4-36 dB が達成可能と予想している。これを実現する為には、ファン騒音低減のための回転部、静止ベーン周囲への吸音材装着、ファン後方とコア騒音を遮蔽する 10° 傾いた排気口、ジェット騒音を下げるシェブロン、進入時のスラット隙間シールが含まれる。BPR = 15 の GTF を使えば MFN は Stage4-40~42 dB となる。HWB での研究成果が MFN を極めて競争力のある形態にした。

(b) 高揚力装置

- スラット騒音はスラット下面からの剥離流がこの後縁付近に衝突することにより生じることから、下面側形状を整形する Slat cove filler にて広帯域騒音を低減させることが試みられている。只、この場合、スラットを展開後に下面形状を変形させることが必要となる。また、スラットのコードを従来より長くする VLCS (Very Long Chord Slat) について DLR にて研究されている。
- フラップ騒音は、フラップ端渦の非定常な流れ場から発生することから、この渦を弱める為にはフラップ端と翼を連続的に滑らかにつなぐ様な形状 (Continuous mold line link) について研究されている。
- フラップ端形態は、端面と翼厚×1.5 幅の上下面にレーザ・ドリルで微細孔を開け、その孔から空気が内部を上下、前後に通過できるように吸音材を用いた格子状通路を設けたもので、上下の圧力差を減らしてフラップ端から出る渦を弱めると共に音波を消散する。
- NASA ではスラット騒音にて、下げ位置で背面の凹みを埋める “Slat cove filler” で流れを変え、乱れと騒音を減らす研究をしてきた。狭い場所に格納でき、繰返し作動と空力荷重に耐える機構を成立させる為には、引込時に変形し、下げ時に跳ね戻る弾性形状記憶合金による “凹み埋め” を開発した。今後 75% 模型に使用してアクチュエータ荷重と材料の変形を計測し、風洞試験から飛行試験に進む予定である。

コメント；

高揚力装置に騒音低減デバイスを装備することによって最大揚力係数が低下すると、進入速度を大きくせざるを得なくなり、その結果、速度の5乗（経験則）に比例して騒音レベルが高くなる。従って、このデバイスは空力性能と騒音レベル、更にはメンテナンス上簡素なシステムであるとの3つの要求のすべてを満足することが必要となり、現時点で実用レベルに達しているデバイスはない。

(c) 降着装置

- ・ 降着装置騒音は、この装置の構成品によって気流が乱されることにより、更に、それが下流の脚に当たることによって発生する。更に収納部の開口部からも騒音が生じる。
- ・ 対策としては、空力フェアリングが研究されているが、以下のことに留意する必要あり。
 - － フェアリングカバーにより、放熱効率が低下しないこと。
 - － 重量増加を極力抑えること。
 - － 収納空間に影響する体積増加を抑制すること。
 - － フェアリング取付けによって目視検査に悪影響が出ないこと。
- ・ Langley 社にて、車輪間フェアリング、脚収納室の伸縮網カバー等が低周波騒音を大きく低減させる。
- ・ 脚では孔あきフェアリングが有効である。無孔フェアリングは流れを加速し他の物体と干渉して騒音を強める。前後ストラットと主脚柱の干渉を緩めるフェアリング及び車輪間のブレーキのフェアリングは有効であったが、後者はブレーキ冷却上の問題で不採用とした。脚収納室の伸縮網カバーが極めて有効で脚騒音を 2～3 dB 下げた。フラップと脚騒音は合計で 4 dB、60%低下すると予測される。

(c 1) 高揚力装置/降着装置

JAXA は飛翔 (Cessna Sovereign) による飛行試験で、フラップと脚の改修により機体騒音が 4.4dB 低減したことを確認した。フラップの改修コンセプトは以下の3点である。

- ・ 下面両側端に突き出た丸い縁 (PRLE=Protruding Rounded Lower Edge) を取

付け、側端での気流の乱れを抑え、上側の渦を側端から遠ざけて有害な干渉を減らす。

・上面側端の小さな障害物で局所流れを剥離させ、側端での渦発生による騒音を拡散する。

・上面前縁付近のボルテックス・ジェネレータによって側端渦を拡散する、脚に関して、最初の飛行試験では脚柱と車輪の間を多孔板で覆った。2度目の試験では脚柱の覆いを更に細かい多孔板に変え、脚室上流縁に流れ偏向板を取付け、脚室扉内側を多孔板で覆い、車軸は騒音伝達を防ぐ為にシールを被せた。これらの改修により広い周波数帯、特に低周波の脚室騒音を 4dB 下げることができた。将来、MRJ に適用する場合、フラップと脚に同様の対策が考えられるが、他に、前縁スラットの裏側の凹みによって発生する気流の乱れを緩和する必要がある。

(d) エンジン技術

エンジンの主な騒音源としては動翼騒音、ガスジェット騒音、燃焼騒音がある。ターボファンエンジンや Open Rotor では Fan 動翼騒音が最も大きい。

- ・ Swept-Fan 翼による動翼先端に生じる衝撃波低減
- ・ 低 Fan 回転数により Fan 圧縮比を低くし、空気流速を低速化
- ・ 動翼と静翼の距離、および枚数比の最適化による空力干渉低減
- ・ ケース、ナセルへのハニカム等吸音ライナーの適用
- ・ ファン空気流とコアジェット流の混合促進効果を持つ、シェブロンノズルの採用

等が対策としてとられている。

(5) 気流探知

(a) EADS 社

EADS 社の研究センターは、LIDAR (light detection and ranging) を利用して飛行中、前方の 3 次元空気流を遠隔探知するシステムの研究を推進している。LIDAR は最大 1 秒先を把握することができ、垂直および水平方向の突風に自動的に反応する。LIDAR は、通常の低空で埃やその他の物体による散乱のみを感知するのではなく、毎秒 60 回の紫外線パルスの放射で、窒素と酸素分子による散乱をも感知し、4 光線で物体の 50~200 m 先の空気の運動方向を検知するもので、同一システムで高空の晴天乱流と空港での後流渦、ウインドシアを測定できる。また、飛行中の速度、温度、圧力、密度等の空気データも測定でき、

火山の噴火灰の測定で安全運航にも利用可能である。また、これは精度が良いので計測センサーと飛行制御システムの連結により突風の影響を緩和する事ができ、センサーを更に小型化して飛行制御システムに組み込む事も目指しているが、実用にはなお10年を要する。また空港近辺での後流渦の全体把握のための光パルス照射法も開発中である。欧州では空港空域が混雑してくるので、突風や後流渦を正確に把握して、航空機の前後、上下間隔を短くすることによる混雑緩和が重要になってくる。また中長距離の突風探知により、乗員、乗客に警報を発することも研究されている。

(b) DLR

DLR では EU の資金により、赤外線レーザーで前方にある晴天乱流の兆候を示す空中の僅かな変化を探知する装置を開発した。これは赤外線レーザービームを飛行方向に照射し、機体に戻ってくる光の散乱を計測して、前方の空気分子の密度と空気の動きの情報を得て、経路上の乱れを予測するものである。現在は9マイル前方までの乱れを把握することができるが、これを20マイルに延ばすべくシステムの改善を行い、飛行試験にて評価を行っているところである。

Gust load に対する対策としては

- ① GLA 制御による
- ② 気流探知により、gust を避ける

の二つの方法があるが、①は制御システムを構築しなければならず、安全性の観点（安定余有、システムの信頼性）及びコスト面から②（フィードバック制御が必須ではない）の方が優れている。

(c) JAXA、三菱電機

JAXA と三菱電機は RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) に機上晴天乱流探知システムについての認証基準の設定を要請した。このシステムは乱流事故半減が目標であり、2018年3月に Boeing 社の 777F エコ実証機に搭載して飛行試験が行われた。この Doppler Lidar は航空機の前方にレーザービームを照射し、空気中の水滴や塵などのエアロゾルからの反射を受けて、(天候レーダでは見えない) 晴天乱流を探知する。エアロゾルの密度が減り、反射光が弱い高度 40,000ft で 9 km 先の乱流を探知できる。1.9KW の原型システムは 300m の分解能を有し重量は 148kgf であるが、離着陸の為にのみ使用する場合は更なる小型軽量化が可能である。

(6) 迎角計

軽飛行機の操縦失敗を調査していた FAA と産業界の共同委員会は 2012 年 9 月の最終報告にて、このカテゴリーの機体の死傷事故を低減する 23 項目の安全対策の

中で迎角計装備を第 1 位とした。委員会は、迎角計はこの業界では広く用いられていないが、失速余裕を警告する利点を広く認知すべきだと結論付けた。18 年間、実験機、軽飛行機の迎角計を製作してきた Depo Star 社の創立者は、失速速度警報は翼の揚力限界に関わる間接的な警報であるのに対して、迎角計は直接に翼の揚力限界を示すと述べている。Depo Star 社の売上は伸びており、Honeywell 社の子会社と Joint Venture を形成することに至っている。

コメント；

通常、速度が警報のもととなっているが、重量及び気流の大きさ等によっては、必ずしも正しい空力特性を表わす指標とはなっていない。

迎角計は、価格と信頼性の観点（少なくとも 2 重冗長とする必要あり）からその装備が敬遠されてきたが、空力特性が迎角、横滑り角、マッハ数、動圧に依存し、このうち迎角の影響が最も大きいことから、これを警報のもととすることは理に適っている。

(7) 前進翼機

DLR（独）では、A320 と同サイズ機体の巡航速度 0.78 M で前進翼の自然層流化により空力抵抗 18%減、燃費 9%改善を達成する見通しを得た。これはエンジン後胴搭載に対応して採用した T 尾翼、胴体のエンジン搭載部補強、及び胴体曲げモーメント増大による重量増で一部相殺されているが、更なる空力研究でエンジンの翼下搭載を実現すれば、重心位置改善、胴体曲げモーメント緩和で燃費 13%減が実現できる。鍵は前進翼の欠点である翼端失速を複合材構造で防ぐことにある。次世代機の出現時期には、DLR はこれを実用化するとしている。

(8) 空気力推定技術

ドイツ国家航空研究計画の予算で DLR と Airbus 社がリードする研究の一つに高揚力飛行検証（HINVA = High-Lift In-Flight Validation）計画がある。現時点にて、翼の高揚力システムによる複雑な流れについては、CFD による最大揚力の導出は精度も信頼性も不十分である。ETW のような極低温高レイノルズ風洞での試験も十分ではない。HINVA の目標の一つは、ETW と飛行試験から導出される最大揚力係数の差を 2%以下にすることである。その為の研究としては A320 による飛行試験、ETW での風洞試験および CFD 解析からなる。最初の飛行試験では基本的な定常／非定常の圧力、流れの遷移、翼変形などの基本データ収集と巡航及び着陸形態の流れの可視化を行った。第 2 の飛行試験は二つに分かれ、飛行中の PIV (Particle Image Velocimetry) による翼上の流れの可視化と流れの詳細データ取得に計測器具を使用することであった。ここでは、エンジン後方とナセル・ストレークから

の渦と主翼境界層との干渉イメージを得るために、二つの緑色レーザと窓に装着された 4 個のカメラが使用され、飛行は細かい水滴がレーザで光って見えるように夜間の雲の中で行われた。2 回目の飛行では A320 の主翼とフラップの上に、境界層の速度分布を得るために走査される圧力レークと表面摩擦を測るフィルム・センサーが装着された。

(9) 空力形状可変技術

- DLR では、GFRP 積層材を異なった剛性を有する様に積層して、前縁内部に装備したアクチュエータで、最適な空力形状に変形させる可変形状前縁（モーフィング前縁）を開発中である。これは、翼本体と前縁とのギャップをなくし、層流の持続、揚抗比の向上を実現するものであり、最近の風洞試験にて、抵抗低減、騒音低減を確認した。
引き続き、除氷、鳥衝突、耐雷等の課題を解決し、スラットの代替としての実用化を目指している。
- Boeing 社、Airbus 社は B787、A350 で長距離巡航性能改善のために、燃料消費による重量変化に対し荷重分布を変えて最適化するために調節可能な後縁フラップを開発した。これらは部分的な解で、翼の大部分は剛体のままで柔軟ではない。最近の形状記憶合金、ピエゾ電気アクチュエータを用いても生物のような柔軟構造とすることは現時点までは実現できていないが、研究は依然として継続されている。
- FlexSys 社（米国）が、主翼後縁全体が連続的に柔軟に変形するフラップを開発している。幅 18.5 ft の FlexFoil と呼ばれる後縁は、 $-9\sim 40^\circ$ の範囲で変形し、スポイラー、スピード・ブレーキ、ファウラ・フラップなどの代わりをする。最終的には多目的操舵面、トリム抵抗低減、荷重軽減による高アスペクト比翼実現などに使用できる。これには結合部はなく、柔軟構造は変形するが固くて強い。アクチュエータの力と変形を受け持つ様に構造内部がアレンジされ、そのエネルギーを翼全体に分散させる様な構成となっている。
試験用の Gulfstream ビジネス機は後縁フラップが FlexFoil 連続操舵面で換装される。この技術で 4~8 %、新型機なら 12 %まで燃費節減が可能で、更に騒音を低減し、整備費削減の利点もある。
- ウイングレット専門の Aviation Partner 社はで飛行試験をした可変翼技術の商業化のための JV を設立する。GulfstreamIII の後縁フラップを置換

した FlexFoil 翼可変システムは NASA の ERA 計画で 50 時間の飛行試験を実施した。柔軟な複合材後縁は -9° （後縁上げ） $\sim +40^{\circ}$ （後縁下げ）まで変形し、翼幅方向には $30^{\circ}/\text{sec}$ で捩れ、340 KCAS/0.75M、垂直荷重倍数 2 まで確認された。この連続可変後縁はフラップ端の間隙を無くして、巡航抵抗低減、構造荷重緩和による重量軽減、及び離着陸騒音低減が期待でき、 $M = 0.80$ までの試験を計画している。また KC-135 にて可変フラップタブによる燃費節減と荷重低減効果を評価する 2 年に亘る飛行試験も予定されている。JV では種々の応用が考えられる中で、18~24 か月で FAA の耐空性承認取得を目標に、全飛行状態に亘ってキャンバーと断面形状を最適化するウイングレット、前縁の空気圧ブーツによる防氷システムの置換及び間隙と段差のない後縁フラップの開発を目指す。

・ NASA が Gulfstream III を使って実施してきた研究について：

第一段階は、主翼と繋がった可変形状柔軟フラップ (Adaptive Compliant Trailing Edge) の空力効率の研究であり、

第二段階は、そのフラップと主脚を覆う多孔整流板の騒音低減効果の評価のために飛行試験を実施した。ACTE フラップは左右端が柔軟構造で主翼とつながっており、離着陸時の抵抗と騒音の低減効果をもたらすと共に巡航中はこれを捩じることで揚力分布を変えて突風応答を緩和し重量軽減を可能とした。更に、フラップ騒音低下に効果がある。

脚騒音を低減する為には、これを覆う多孔整流板が検討された。これは脚周りの圧力差を緩和して騒音低減を目指すものである。

コメント；

翼のキャンバーを変えて、揚抗比 $Lift/ Drag$ を向上させることは、戦闘機の旋回性能を向上させる為に特に有効である。（このことが、本研究に軍の関与が大きい理由である）

民間機においては、巡航時、燃料消費による機体重量変化に対応して $(Lift)^{0.5}/(Drag)$ を極力大きく（最大化又は若干小さくして高速性を優先する場合もあり）する様なキャンバーとする為にアクチュエータ及びその配置と構造様式を包括して設計することになる。

- ・ 高揚力前縁スラットは大きな空港騒音源となっているが、NASA と Texas A&M 大学は共同で、空力性能を損なわずに騒音を低減することを目的として、2次元に簡略化した「正確に復元する超可塑記憶合金による Slat-cove filler（スラットの凹みを塞ぐもの）と呼ばれるスラット構造成形法」

を設計・製作した。現在は翼の後退角、先細効果による 3 次元性を取り入れたシステムを研究している。

- ドイツ航空宇宙センターでは EU の NOVEMOR (Novel Air Vehicle Configuration) 計画の下で、リジョナルジェット機翼端の前縁可変ドループ・デバイスを設計・製作した。このデバイスは最適積層された連続柔軟外皮であり、電気的リニア・アクチュエータと超弾性 Ni-Ti 合金から成る「位相学的に最適化された柔軟な機構」で駆動され、Bristol 大学での風洞試験で、実空力荷重の下で効果的に変形することが確認された。
- カナダ Quebec 州の航空宇宙研究革新共同体では、電動アクチュエータで駆動される可変外翼を製作した。パートナーには Bombardier 社、カナダ Thales、イタリア Napoli 大学、Alenia 社などが含まれている。風洞試験において、制御された翼の広い層流域が赤外線と Kulite センサーで計測され、CFD による推定結果と比較検証された。
- 鳥のように柔軟に翼を動かす技術の最大の問題は翼内に収納する機械的な変形機構が非常に重くなり、円滑な空力面の利点を相殺すると共に複雑な機構が信頼性の低下を招くことである。MIT と NASA は (単なる可動フラップでない) 全体が柔軟な翼を考案した。小型軽量の同一構造片を多数並べ、翼端を一对のモータによって振る機構と組合わせている。この翼は、多くの同一構造断片の重複による或る種の外皮であり、必要な空力的円滑性を保ちながら動く。この翼の風洞試験結果では、1/10 の重量で通常翼の最低限の空力特性を満たすことが確認でき、飛行試験にも成功し、当面、無人機での運用を検討している。航空機以外にも、無限に曲がるロボット、高層ビル、橋など柔軟で強力な利点を生かす構造に適用範囲を広げることも可能である。
- 可変形態翼によって、将来の BWB の揚抗比を飛行条件に応じて最適化することができる。今後 3 年の間に運用中の旅客機を使って、柔軟な舵面を有する翼の効果が実証される。100 年以上前に固い翼にフラップを付けることを考案し、その恩恵を受けた航空機による航空輸送は今や年間売上高 \$700B に達した。しかしその 25% は燃料に費やされ、航空会社は今年漸く \$39B という僅かな利益しか得ていない。ただ機体もエンジンも効率はピークに達していて更なる改良は容易ではない。しかし飛行状態に応じて翼の形状を変え、揚抗比を最適化するという有望な手段が残されて

いる。Gulfstream IIIのフラップ位置に変形状舵面を装備した試験結果では、最大12%の燃費削減に成功した。フラップが離着陸の時だけ揚力や抗力を変えるのに対し、これは飛行を通じて主翼後縁の曲率を変えながら揚抗比を最適化する。しかも騒音低減の効果もあり、乱流中の揺れを抑えることも可能である。NASAと米空軍はGulfstream IIIにこのFlexFoilを後付けして、2014年から22回の飛行実証を行った。

- ECは2017年にHorizon 2020研究の中で“Smart Morphing & Sensing (SMS)”計画に3年間の資金投入を決め、低速風洞試験用の実大電動翼断面の製作を支援する。電動翼は形状記憶合金(SMA)と piezo電気アクチュエータを結合したもので、翼キャンバを滑らかに変形させる。電氣的に作動するSMAは低周波数の大きな変形に、piezo電気アクチュエータは高周波の素早い変形に用いられる。SMAによる高揚力フラップは従来の航空機のように両端を分割されずに、連続的にキャンバを変化させるので効率が良い。巡航ではpiezo電気アクチュエータが後縁を振動させる。アクチュエータに付随するセンサーとプロセッサは閉回路を形成し、最適周波数での1mm単位の変動で流れを制御し、抵抗と騒音を削減する。これは抵抗と騒音を抑えるのに後縁の羽を振動させる猛禽を真似たものである。最大の問題は実大翼に対するpiezo電気アクチュエータの適性である。EC資金によるSMS研究は2020年5月からA340による飛行試験を行う。これにより旅客機では最終的に3~4%の燃費節減が期待されている。

(10) ボルテックス・ジェネレータ

Edge Aerodynamix社は、裏面に接着剤が付いた熱可塑ポリウレタン(TPU)の薄いテープ(CVG: Conformal Vortex Generator)によって、抵抗を低減する手法を見出した。同社はFAAのSTC取得を目指しており、1機のB737で年間80万ドルの燃料を節減することができるとの見通しである。長さ30ftのCVGをスラットの後縁から5mm離して、エンジンの外側から翼端まで翼幅方向に貼付する。テープの前縁は波型で後縁は鋸歯型である。STCは世界に6400機あるB737-300から-900ERまでをカバーするが、B757/B767やA320/A330への適用も計画している。テープは基本的には(塗装作業の間隔である)8000時間は使えるが、損傷すれば長さ15インチ単位で補修可能で、Edge社は顧客の航空会社に機材の生涯に亘って補用品を無料で提供する代わりに、每期節減できた燃料費の35%を徴収する。機材数を考えれば数十億ドルの収入になる。現在16社が興味を示しているが、まだSTC取得前なので契約には至っていない。巡航中は格納されているスラット/主翼前縁付近で後向き段差を生じており、この段差は比較的小さいが主翼効率を大きく低下させる。

既に Boeing 社もスラットやスポイラの後縁を 60%薄くする空力形状改良で燃費が 1~2%改善されることを見出している。飛行試験での高速写真で、段差では非定常衝撃波が生じていることが確認され、層流から乱流に遷移して抵抗や客室の振動と騒音を増やしている。CVG の形状が乱流を緩和する鍵である。テープ前縁の波型流路は、流れがスラット後方の段差に溢れ出す時に自然に形成される渦を崩壊する吸込み器として働き、テープ後縁の鋸歯型流路は流れを再度、層流化する。全体としてテープは翼舷方向に流れ下る多くの渦を発生し、その結果、安定した弱い衝撃波で客室の振動と騒音を減らし、層流域を増やして抵抗を減ずる。M=0.78 で巡航する B737-500 で 8%減、経済巡航の M=0.74 では 4%減となる。航空会社は抵抗低減量は約束されないが実現分の一定割合を支払えばよい。表面摩擦低減策は従来からも試みられてきており、例えば Airbus 社は 1980 年代に Riblets(微細の縦溝を穿った粘着テープ)を考案したが、1~2%の抵抗減を実現するには機体の広い面を覆う必要があった。小さな垂直フィンの VG では境界層を再活性化して、高速及び低速の失速特性を改善できるが、VG 自体が抵抗を生じる。Boeing 社は B787-9 で垂直及び水平尾翼前縁付近に多孔壁を設け、差圧を利用して境界層を吸い込んで層流域を拡大し抵抗減を図っているが、運航中に孔が詰まる問題がある。これらに対し平滑な TPU は必要面積は小さく、単純で悪い副作用はない。

(1.1) 翼端折り曲げ

NASA にて翼幅適応翼(SAW=Spanwise Adaptive Wing)の研究がなされている。これまで、翼端折り曲げにより方向安定を改善し、尾翼のサイズと抵抗を減少させることができることを飛行試験で確認した。ここでは想定より少ない折り曲げ角度で横・方向の安定操縦性が改善され、方向舵無しで方向保持が可能なが示された。今後、飛行中に翼端折り曲げ角度を調節して抵抗を最小化する制御則を評価するための飛行試験を計画している。技術評価試験機(PTERA=Prototype-Technology Evaluation and Research Aircraft)は B737 の 11%縮尺の機体であり翼幅は 176in であり、両翼端の 15in 幅をヒンジラインに埋め込んだ形状記憶合金で上下 75° まで折り曲げられる。深く折り曲げると揚力を失うので 30~40° 程度が揚力損失を最小にする。SAW では最初の飛行試験(3回実施)を終了するまでに 1.5 年を要した。次の飛行試験では飛行制御則に翼折り曲げ角度を組み込んだソフトウェアを評価する。そこでは方向舵の制御はなく、方向制御は折り曲げ翼で行われ、折り曲げ角度は抵抗最小、即ち必要推力を最小にするよう制御される。

1.3 飛行性能に関わる装備技術

(1) オーバーラン防止システム

(a) Airbus 社, EASA

Airbus 社は、着陸時の機体の運動エネルギー、着陸位置、着陸停止能力を総合的に判断して、着陸復行を行うか否かの決断及び着陸後のブレーキ・逆推力の使用の要否について、パイロットに情報を提供するシステム (Runway Overrun Protection System) を開発した。このシステムは A350 に標準装備とするとともに、他機種にも後付け装備を可能としている。

EASA は新製機に対してこのシステムの装備義務化を提案している。但し現用機への後付けは要求していない。

(b) Boeing 社, FAA

Boeing 社の事故要因調査によると、CFIT (Controlled flight into terrain) 事故は減少しており、Loss of Control 事故は一定レベルで変化無し、滑走路オーバーランによる死亡事故は増加傾向にあるとのことである。

29 件のオーバーラン事故を分析すると、「①進入／着陸速度、②着陸位置、③減速停止装置の使用」に関する不適切な状況認識が事故原因であることが判った。

これを踏まえて、Boeing 社は Embraer 社と共同にて、オーバーラン事故低減を目指して、パイロットの状況認識をサポートする様に視覚と音声による支援システムを開発しており、B737NG の顧客に、Primary Flight Display で操縦士に擬似人工視界を提供する。ここでは、滑走路逸脱防止情報として次の 4 つの状況認知情報を示す。①飛行経路ベクター、②滑走路境界線、③延長された滑走路中央線、④着地後の残りの滑走路長。他には着陸復行開始の指示、進入高度と速度に基づき算出されるオーバーラン警報と着地時のスピード・ブレーキ警報がある。なお、FAA もこのシステムを認証している。

コメント；

着陸進入時に、飛行データから接地速度、接地位置を推定し、タイヤと地面の摩擦係数 (管制から路面状況の情報を受けてベースデータから推定)、滑走路上の停止位置を推定できることから、基本的に判断は可能と考えられる。コックピット内の表示システムにてパイロットに知らせることになる。

1.4 飛行特性・制御に関わる装備技術

(1) Integrated Resilient Aircraft Control

NASA Aviation Safety Program にて、航空機が不都合な状況下 (ポストストール／ディパーチャ、着氷状態等) に陥ったときに、パイロットが容易に、安全な継続飛行と着陸ができる様な制御則の開発を行っている。

ここでは、NDI (Nonlinear Dynamic Inversion) 及び MRAC (Model Reference Control) の適用について研究している。

- NDI

機体運動を決定するデータ類(空力データ, 慣性データ等。これらは設計段階にて推定される)を制御則内に保有し、舵角コマンドに対して、機体運動を予想できる状態としておくことにより、パイロットの好む応答モデルに追従するために、逆に必要舵角を求める様に、制御則が構築されている。ここで、空力特性の実機と推定値との違い等から発生するモデル応答と実応答との差をゼロに収束させるために、更にエラー補償ロジックが組み込まれている。

この様に、基本的にかかなりの精度で判っている空力特性を扱うので、比較的簡素なロジックでモデル追従性を達成でき、更に、エラー補償を適正に設計することにより、全体として、安定性も確保できる。(①)

他方、判っていない状態、想定されていない状態に対しては、対応できない。(②)

- MRAC

規範モデルと実応答とのエラー(各エラー要素の 2 乗の和)の時間変化率が常に零以下となるようにパラメータ調整ロジックを設計して、実応答をモデルに追従させる方式である。即ち、空力特性が判っていなくても、空力特性そのものを推定してモデル追従性を目指すことができる。(③)

他方、空力特性が全く不明でも、強引にその状態を推定して、目的を達成することから、十分な安定性確保の保証が困難になる。

個々のケース、即ち、軸系、故障・損傷等の程度(正常状態からの不完全さの程度)に対応して、Degraded モードとして許容される特性の範囲内にて、必要な安定余有を確保させる必要がある。

- NDI/MRC 融合

飛行制御則として、前(2)項(a)(①)の利点をもつ NDI の採用は有効であるが、故障状態では、(②)の欠点があり、これに対しては、(③)の利点をもつ MRAC を(ベースとしての NDI に融合する方式で)活用する。

コメント；

安全性に対する FAA の考え方(現実の事故をベースとした対処、事故の直接要因となった部位の信頼性向上等)を十分に理解した上で、民間機への適用を

検討すべきと考える。

1.5 構造に関わる装備技術

(1) 構造ヘルス・モニタリング (SHM: Structural Health Monitoring)

(a) Boeing 社

Boeing 社が Teledyne Control 社と共同で開発したヘルス・マネジメント・システムを Air China 航空の B737 に装備し、ACARS (Aircraft Communications Addressing Reporting System : デジタルデータリンクの一種) を使ってデータを地上に送信し、その解析によって、整備効率の向上、定時運行の確保に貢献している。

(b) 欧州内の共同研究

AE (Acoustic Emission)、ガイド波¹⁾、光ファイバーを用いた計測システムを統合して²⁾、練習機 (Hawk T1A) のウィングポッドに搭載して、飛行試験により AHMOS (Advanced Structural Health Monitoring System) の実証を行っている。

センサーの信頼性を向上し、検査の為に機体の分解が必要な箇所を減らして、更に検査を自動化する³⁾ことにより、検査費用が「数百万ポンド/機」程度低減する見通しである。

注1) 長距離伝播性の超音波

注2) センサーの種類に対して検知可能な損傷の種類が限られているので、全体をモニターする為には、多種類のセンサーの統合が必要となる。

注3) 膨大なデータを速やかに処理すること。

(2) ヘルス・モニタリング用の感歪塗料

Rice 大学にて Carbon nanotube を混入した感歪塗料が開発された。この塗料を金属表面に塗ると、近赤外線照射により圧縮または引張を受けた箇所が光り、塗布面全体の応力分布マップを作成することができる。

これにより、(従来の歪センサーでは構造体全体の歪の把握ができず、また特定の方向の歪しか検出することができなかったが)、構造健全性を容易に確認できる。また、全ての方向についての歪を検出することが可能となる。

(3) 次世代 3次元 X線コンピュータ断層撮影装置

日立製作所が産業技術総合研究所、東大、光子発生技術研究所 (検査装置ベンチャー、近江八幡市) と共同にて、航空機などに用いられる厚さ数 10cm の大型

部品の内部構造をスキャンし寸法も検査できる様な次世代の 3 次元 X 線コンピュータ断層撮影装置を開発し、2015 年度に実用化する計画である。複雑形状の鋳造部材と組立部品の非破壊検査が可能であり、製品開発時の試作工程を短縮できる。

(4) 耐雷性付与用のコーティング

非導電性炭素繊維を使用する複合材構造体は複合材の上に金属箔を積層することにより導電性を与えているが、この場合、重量増加、工程／コスト増加に繋がっている。

これに対して、Lord 社（米）が、金属箔の 1/2 程度の重量で耐電性を与えることができる導電性エポキシ・コーティング「Ultra Conductive」を開発中である。

これは粘着フィルム又はスプレーの一種であり、炭素繊維を積層する前に治具面に適用され、オートクレーブ内で、熱硬化されることにより、構造体の全方位に導電性が与えられる。

ここで、重量軽減量は、狭胴機で 400 Lbs 程度、広胴機で 1,200 Lbs 程度である。Lord 社では、2013 年に飛行試験を行い、認証を得て、量産に繋げる予定である。

コメント；

今後、適用率が増加していく複合材料について、その特性にばらつきがあること、非破壊検査が容易でないこと等から、運用中に生じた微細な損傷を検知することで破壊を未然に防ぎ、複合材構造の信頼性を確保する為に構造ヘルスマニタリングシステムは必要な技術である。

我が国においても「次世代構造部材創製・加工技術開発（複合材構造健全性診断技術開発）プロジェクト（METI）」にてシステムの開発・研究が行われており、2020 年頃に既存機への適用を目指している。

(5) 知的航空機構造

知的航空機構造（SARISTU = Smart Intelligent Aircraft Structure）の研究により、翼の設計は、空力と構造を別途に考案するものではなく、抵抗低減、騒音緩和、構造健全性監視、重量軽減、その他の要求を統合設計の中で検討できることが判った。この計画には Airbus 社、Alenia 社、Aermacchi 社、Bombardier 社などの欧州業界 64 社が参加し、翼と胴体に関して多くの実証試験や破壊試験までを含む巨大な統合研究計画となっている。そこには統合センシング、可変構造および多機能材料の 3 大技術分野を含んでいる。統合センシングでは光ファイバーおよび超音波技術による形態監視、損傷探査、衝撃感知被膜など、可変構造では可変前縁ドループ、可変後縁フラップ、可動ウイングレット後縁など、また材料

では耐損傷性が高いナノ（CNT（カーボンナノチューブ）強化）複合材、電導性、軽量化などが研究の対象となっている。TsAGI で風洞試験が実施された大型実証翼は可変形状舵面、ナノ複合材、構造健全性監視などの多くの要素を含んでいる。樹脂マトリックスに CNT を注入する方法では CNT が塊になる傾向がある。これは複合材硬化により CNT 注入樹脂を固定化することで防げるが、産業規模では難しい。代わりに SARISTU では CNT の薄膜を炭素繊維層の間に入れて、その層間に樹脂を注入する方式としている。電導性の増加は、（落雷防止対策の必要性が無くなりはないが）火花を避けるための燃料タンク端の防護を減らし軽量化できる。第 2 段階は航空機に自己感覚能力を与えることである。ここでは構造の中に光ファイバーと音響センサーを組み込み、損傷の有無を調べ、直ちに対処が必要か、50 時間以内かを知らせる。光ファイバー健全性監視センサーは主翼桁間、小骨、縦通材基部、点検孔周囲に作り込まれ、音響センサーは主翼外皮に用いられる。第 3 段階は航空機を環境に対応できるようにすることである。後縁に光ファイバーを置き、形態を認識して、自ら制御する。フラップは多重ヒンジを備えていて、連続的に対応して形態を変更できる。また、ウイングレットが突風に遭遇すると翼が衝撃を受けることから、これが主翼強度確保の重要な設計要因となっているが、ウイングレット前縁の圧力センサーが突風を感じて後縁タブを操作することにより、標定荷重を緩和することができる。可変前縁ドループは後退翼上の隙間や段差をなくして円滑化し低抵抗の層流を保つ。柔軟な内部作動前縁はガラス繊維製で、防氷ヒータマット、落雷防止網および耐蝕チタン薄膜外皮の層から成り、厚さは極めて薄い（1.2mm）。

（6）複合材構造機体の疲労試験

Boeing 社は、B787 の 5 年に亘る実大疲労試験結果を分析中である。詳細な整備要求は未だ明かされていないが、20 年以上の運航で本格的な整備は 1 回で十分なことが明らかになっている。試験は 2009 年開始予定だったが翼胴結合部の再設計が必要となり、18 か月遅れの 2010 年 8 月に開始され、これまでに設計寿命 44,000 サイクルの 3.6 倍の 165,000 サイクルが負荷され、高い疲労強度と耐蝕性が実証されている。金属部品では設計寿命の 40% で主脚支持構造のスクリーが剪断破壊して設計変更と SB 発行に繋がり、設計寿命の 1.75 倍で金属結合棒端末突起の破壊が起きているが、複合材構造では重大な欠陥は見つかっておらず、不適合発見は B767 や B777 の場合より少なかった。

（7）空中 CO₂ から炭素繊維

George Washington 大学は、空中の CO₂ を炭素ナノ繊維に転換することに成功した。太陽光発電による弱い電流を高温溶融塩のタンク内の電極に流すと、塩が空

中の CO₂ を吸収し始め、電極基板上に炭素繊維を形成する化学反応を引き起こした。1 時間 1 g のナノ繊維製造と同じ低エネルギーのニッケルと鉄の電極を用いて 10 g に容易に拡大できたが、この工程の工業化は困難でないが、商業化には時間がかかるとの指摘がある。炭素ナノ繊維（直径 100 ナノメートル = 10⁻⁷ m 以下）は炭素分子の層からなる円筒構造で、軽量・高強度の航空宇宙複合材部品を生産できる。MIT は同じ工程で製造した炭素ナノチューブが Li-ion 電池の電極からの電力を 10 倍にすることを発見した。炭素ナノチューブは 1 原子の厚みでできた管状の材料で、ナノ繊維より小さい。電導率は 100 万倍以上で、耐雷性に優れた新構造が考えられ、平面表示盤、マイクロ電子通信、レーダ吸収被膜などへの適用も考えられる。従来の炭素ナノ繊維やナノチューブの製法はアルミ製法の 30~100 倍の生産エネルギーを要し高価であったが、George Washington 大学の転換製法はニッケルと鉄の電極によるので安価である。

(8) 複合材 vs 金属

- CMC

現在、競争が激しい分野はエンジンに使用される CMC (Silicon Carbide Ceramic 繊維と Ceramic マトリックスの複合材) である。Ni 合金部品の 1/3 の重量であり、軽量化は周囲の部品に相乗効果をもたらす。また CMC は金属より耐熱性が高く、高温部の金属部品は融点の 90% に達しているが、第 1 世代 CMC は 200~300° F、最終的には 400° F の高温化が可能で、燃費を向上させることが可能である。燃焼室内壁、ベーン、シュラウドなどの静止部品に、最終的にはブレードなどの重要回転部品にも適用される見通しである。NASA は 20~30 年以内にディスクを除く総ての高温部品が CMC になると予測している。実際に GE 社は Leap の第 1 段 HPC シュラウド、GE9X の燃焼室内壁と第 1 及び第 2 ノズルに適用するが、回転部品への適用も試みられている。Leap での CMC は燃費を 2% 向上させるが、最終的には 10% 向上が可能である。コストは代替品より非常に高いが量産と経験で低コスト化に努めている。

- ポリマー複合材 (PMC)

エンジンでは CMC が徐々に金属から置き換えられているが、機体では PMC が普及してきた。A350 では PMC : 53%、Al : 19%、Ti : 14%、鋼鉄 : 6%、その他 : 8%。B787 では PMC : 50%、Al : 20%、Ti : 14%、鋼鉄 ≤ 10% となっている。C-Series でも後胴、尾胴、主翼、エンジンナセルなどに適用して 2,000 Lbs 軽減した。PMC は金属部品より 20~25% 軽く、理論的には全体で 60% 軽くできる。更に疲労や腐食がなく整備費は 60% 削減可能である。製造工程でも利点があり、B787 は B747 と比較して削孔は僅か 1%、ファスナーや部品点

数も 1/3 である。この簡便な構造が、Al の 4 \$/Lbs に対し PMC の 10 \$/Lbs という高い素材コストを補っている。PMC 構造で素材の 2/3 は無駄になっているが、そのコストは 15%に過ぎない。ただ技術の進歩で適用範囲は広がり、特に自動車産業への普及では大幅なコスト低減が期待される。

Boeing 社によると、B787 では荷重に対して複合材構造強度を十分に適合できなかったが、データの集積で改善され、製造と検査が速くなり、素材費は下がり、性能は向上しており、B777 X の主翼にも適用される。最大の弱点である層間剥離に対しては、剥離しても耐荷可能となる様な設計技術、検査法、修理法が良く判ってきたと述べている。腐食や亀裂がないので点検口を設ける必要もなく、金属よりも検査・整備の必要性が少ないが、複雑な診断機器、要員の特別訓練、オートクレーブなどの高価な加工施設を必要とする。これらに対しても種々の研究が進められており、超音波では微細な亀裂や小穴に対し発見が難しく、サーモグラフィ、シェアログラフィでは分厚い構造に対応できないとの限界に対して、スイスの CSEM 社は“Phased-Contrast X 線”による NDT 法を開発している。NASA の PRSEUS 研究は複合材構造の更なる 10% 軽量化、オートクレーブを使用せずに大型部材の製造を可能とし、コスト低減を狙っている。

- ・ 金属

Alcoa 社によると、2000 年以降に航空機用 Al や Al-Li 合金を 65 種以上開発してきたが、先進金属はバルクヘッドや取付け金具などの高い、複雑な荷重に耐える部品では本質的に PMC より有利で、10%以上軽量化できる。PMC 部品を繋ぐ胴体フレームや B787 の主翼小骨はアルミであり、脚は鋼鉄である。また摩擦攪拌溶接や付加製法などの製造法改善にも取り組んでおり、金属の付加製法は小型の複雑な部品に適していることが判ってきている。幾つかのエンジン部品を一体で製造し、漏れや冷却も減らして効率を上げており、また 50~90%捨てていた高価な Ti のような金属の無駄がなくなり、極めて有効である。

更に複数の部品から組立てていた金属部材を、今では材料塊から単一部材として効率よく削り出せる高速機械加工法も開発されている。

(9) 熱硬化 CFRP と熱可塑 CFRP

熱可塑樹脂の非強化型はソフトドリンクの瓶や椅子などの消費財で普及しているが、ガラス繊維、炭素繊維の母材には使われていない。炭素繊維の積層材に液体熱硬化樹脂を含ませ、高圧オートクレーブ内で硬化させる技術開発は容易であるが、熱可塑樹脂は室温では固体状態で、炭素繊維で強化するためには熔融点ま

で加熱する必要があり難しい。これは、1990年代初期に F-70/100 の貨物室床、A330/340 主翼の内舷前縁、A400M の操縦室床に適用され、A380 の主翼前縁に採用されてから注目され、2007 年に Gulfstream G650 の方向舵と昇降舵に、続いて Dassault Falcon-5X でも同じ部材に採用された。

熱可塑複合材の製造上の問題が解決されるなら下記の様な利点がある。

- ① 熱硬化型より粘りがあり薄くして軽量化が可能である。
- ② リサイクルが可能である。熱硬化型は溶かすことができない原料のため、再使用不可であり、B787/A350 の退役時には問題となる。熱可塑型は溶かしても化学的には変化せず再使用が可能である。
- ③ 熱硬化型は材料に使用期限があり在庫管理や製造時期に注意を要するが、熱可塑型には使用期限がなく無期限に保管できる。

なお、固体状態の熱可塑樹脂を溶かして炭素繊維と混ぜ成型する過程は、液体熱硬化樹脂を炭素繊維に浸み込ませオートクレーブで硬化する過程より、長い時間を要し、今後、民間機の生産量が増えると問題になる。

2011 年に KVE Composites 社(オランダ)は熱可塑複合材部品の熔接法の開発を始め、Fokker 社が A380 に“抵抗熔接”法を適用したが、高い空力荷重に耐えられず、“誘導熔接”法に改良して特許を得た。これは G650 や Falcon-5X にも適用された。その製造工程は完全に自動化されている。

(10) 繊維方向調整の炭素繊維複合材

Automatic Fiber Placement 装置は複合材翼の製造では手作業の積層を代替してきたが、個々の繊維層を調整して構造荷重に正確に沿わせる様にはできない。通常の複合材翼では各層は 0° 方向(後退角に沿って配置)、これに対して $\pm 45^\circ$ と 90° の方向に重ねられる。Aurora Science 社は、翼根から翼端まで繊維の方向を常に荷重パスの方向に沿って配置する翼の製作を可能として、NASA が目指している軽くて高剛性の高アスペクト比、低抵抗の翼を実現する。これは Passive Aeroelastic Tailored 翼と呼ばれ、繊維方向が直線ではなく荷重パス方向に沿った複合材外皮になっている。AFP 装置は通常は $0.5\text{in} \times 16 = 8\text{in}$ 幅の繊維を配置するが、曲率の小さな曲線配置には $0.25\text{in} \times 8 = 2\text{in}$ 幅の繊維が使用される。

(11) 人工蜘蛛糸による複合材

Airbus 社は AMSilk(ドイツ)と共同で Biosteel 繊維と呼ばれる人工蜘蛛糸による複合材を開発している。これは既に Adidas の運動靴に使われており、耐衝撃性と柔軟性に優れた軽量構造を可能にしている。この繊維は蜘蛛糸蛋白質による生物重合体で、蛋白質は蜘蛛の遺伝子を挿入されたバクテリアの発酵により生産され

る。航空業界では Airbus 社が初めて Biosteel を扱い、これは炭素繊維より優れた柔軟性を有しており、将来航空機の斬新な設計や製造方法が可能になる見通しである。

1.6 空力弾性に関わる装備技術

(1) フラッタ試験機

NASA では、Lockheed Martin 社の Skunk Work 研究所が設計した MUTT (多用途技術試験機) X-56A で、軽量・高効率の高アスペクト比翼の将来機の実現を目指す為の飛行試験を行う。MUTT は翼幅 28 ft、総重量 480 Lbs で、細長いフレキシブル翼を持つ将来機を模した無人機である。適用を目指している高高度長時間滞空 UAV、大型長距離機に対して相対的に小さく、必ずしも正確な空力弾性の相似模型ではないが、類似の空力弾性現象を示す。ここで、MUTT は安全に飛行が続けられる機器とフラッタ制御/GLA のコンセプトを実証する。複数の主翼と制御機器を搭載した胴体が用意され、主翼破壊時には機体は落下傘で回収される。将来は、まず無人偵察・探査機に適用されるが、2035 年頃には民間機にも適用可能とする。

(2) Active Aeroelastic Wing

NASA では、B737-800 と同等の胴体で同じ性能を有する無尾翼旅客機を研究中であり、全表面積、重量、抵抗の減少で燃費 60%減の見通しを得た。

この機体の主翼は軽量化を図り、振り剛性を意図的に小さくし、Active Aeroelastic Wing としている。

縦操縦は、高速アクチュエータで前・後縁に装備した舵面を動かし翼端を振ることによる。また、横操縦は、補助翼の逆効き、方向操縦は翼端の抵抗差を利用する。

なお、低速では、縦操縦は昇降舵付きカナード (引込式)、方向操縦は操縦席下方の全可動式方向舵による。

コメント；

- ・ 制御対象が弾性翼であるので、この制御用アクチュエータは機体運動制御用のそれよりも 1 オクタード高い周波数域まで十分な応答特性を有することが要求される。
- ・ このシステムの故障は直ちに機体ロスに至るので、その故障確率は extremely improbable としなければならないが、その実現性はかなり厳しいのではないか。

(3) 大アスペクト比/低剛性/能動制御付きの翼

- ・B787 の主翼が上方に撓んだ形状になっている理由は、この主翼が軽量で低抵抗を目指した細長い平面形をした柔軟な炭素繊維複合材構造であるためである。

この傾向は高性能を求める次世代主翼で一般的なものになる。B787 の主翼のアスペクト比は 11 で先行型 B767 の 8 より大きい。将来は更に大きく、軽量、柔軟になり、飛行荷重緩和及びフラッタ防止に新たな工夫を要する。NASA の大アスペクト比翼計画では、構造剛性の最適化と舵面制御による受動的及び能動的空力弾性テーラリングを研究している。2030 年~2035 年の実用化を狙う N+3 機においては、翼は高性能化と層流化のために一般的に細長く薄く、柔軟で軽量となる。但し、舵面制御によりキャンバ、曲げ及び振りのモードを変えて、時々刻々の主翼形状を変化させる。高アスペクト翼の抵抗減少と重量増加の相反する特性を最適化させる為、受動的空力弾性テーラリングを行っている。主翼は空力荷重の下で自然に上向きに曲がり外に反るが、テーラリングでは主翼がこれを打消し内側に反るように、主翼の構造設計（含：材料選定）を行う。空力弾性テーラリングは過去に X-29 にて前進翼の主翼ダイバージェントを防ぎ、X-53 の柔軟な翼を振ることで横転可能にした。実用機には未だ適用例が無いが、NASA はこれを適用することにより 5~10%の軽量化が可能としている。

- ・2015 年以降、NASA、Aurora 社、Boeing 社及び Minnesota 大は柔軟な高アスペクト比翼の技術実証共同研究を行っている。そこでは B777 に似ていて、アスペクト比を 9 から 13.5 に増やした共通形態(CRM=Common Research Model)が用いられている。

- ・Aurora 社は二通りの受動空力弾性テラ翼を試作している。

- CFRP 主翼で標準の 0° , 90° , $\pm 45^{\circ}$ の繊維配置に代え、自動繊維配置機を用いて空力荷重の下で翼の変形が偏る様に繊維を配置し、受動的荷重緩和と空力弾性安定性増加でフラッタを避ける。CRM の 27%縮尺となる長さ 39ft、アスペクト比 13.5 の繊維配置外皮による CFRP 桁間を製作する。

- Georgia 工大と協働で 3D 印刷によるトポロジー最適化した桁間を実証する。この技術は伝統的な桁と小骨を排除し、荷重分担に必要な場所にだけ材料を置くもので、付加製造法で可能となり、外形は不変で桁内部は鳥の骨のようである。トポロジー最適化は総ての荷重条件に対し、立方形に分割された翼内部の各々で材料の要否を決定し、桁間を中空にする。翼全体を扱うにはスパコンが必要であり、流線方向の小骨や翼幅方向の桁に替り、直交の動植物のような支持梁構造が上下の外皮を継ぐことに

なる。Georgia 工大は 3D 印刷機的能力制限で 12ft 幅の桁間を樹脂の溶融除去法で製造し、静強度試験と振動試験を行う。

・Boeing 社は NASA の IAWTM(Integrated Adaptive Wing Technology Maturation) 計画で能動空力弾性制御の風洞試験を行っており、運動荷重及び突風荷重の緩和、フラッタ防止、燃費最小化、制御則最適化法までを評価している。IAWTM 翼は 3 補助翼と 3 フラップを有し、これらの後縁には別々に作動する 11 個のミニ単純フラップがある。これらの小舵面に働く空力荷重は小さく、アクチュエータも小さくて軽く、全飛行範囲にわたり翼形状を調節して、空力効率を最大化し抵抗を減らす。Boeing 社は IAWTM を選ぶ前は VCCTEF(Variable Camber Continuous Trailing Edge Flap=可変キャンバ連続後縁フラップ)と回転レーク翼端を考えていた。VCCTEF は 42 個のフラップを有し、機体重量と飛行条件が変わる度にキャンバを変える。しかし 10%模型に全てのアクチュエータを装備するのは難しく、風洞試験用の翼としては IAWTM が選ばれた。

・NASA と Minnesota 大との共同開発による PAAW(Performance Adaptive Aeroelastic Wing)計画では、X-56 を使い飛行試験用柔軟翼を開発し、最初の CFRP 高剛性翼の試験が終わっている。この飛行試験で NASA はオープンループ制御の飛行実証を行った。更に、NASA は GFRP 柔軟翼の制御システムを開発する。これは、飛行中の形状を測定する FOSS(光ファイバ・センシング・システム)を翼に組み込み、これにより取得したデータによって時々刻々の形状を認識して、光ファイバ・フィードバックを用いて構造振動モードを吸収するものである。

(4) フラッタ振動吸収システムの実証試験

NASA は Lockheed Martin 社が製作した X-56A 実証機で、将来の燃料効率の高い航空機の軽量で低抵抗の細長い柔軟な翼について、そのフラッタ振動を吸収するシステムの飛行試験を行った。フラッタ振動を飛行領域外とするためには、十分な剛性の翼を必要とするが、これでは重量が重くなる。X-56A では制御システムにより積極的にフラッタ振動を吸収することを目指している。NASA はこの無人機で 110kt でのフラッタ振動を吸収できることを実証した。この技術により、1980~90 年代に FBW システムで機体の静安定要求を緩和したのと同様に、フラッタを避ける為の剛性要求を制御によって緩和して重量軽減を実現できる。一機目の X-56A は米空軍研究所の為に製作され、当初、炭素繊維による強剛性の翼で飛行し、続いて、ガラス繊維の柔軟翼にてフラッタ振動吸収システムを評価するために飛行試験を実施しようとしたが離陸フェーズで墜落した。2 機目の X-56A は十分な剛性の翼で 8 回の飛行後に、墜落時のシステムと異なる制御システムにより、フラッ

タ速度推定の空力モデル改善に使用され、その後、高速でのフラッタ振動を吸収するシステムの実証飛行に移行した。これまで、胴体自由度を含む低周波のフラッタ振動の吸収に成功し、更に試験を継続中である。

(5) 風洞試験時の実時間フラッタ特性推定手法

将来航空機の翼は抵抗低減と重量軽減の為に細長く柔軟になり、フラッタ余裕を正確に予測する事が重要になる。Embraer 社は、NLR(オランダ)及び DLR(ドイツ)と共同で、風洞試験中に実時間でフラッタ特性を評価する手法を実証した。ここでは速度 $M=0.7\sim 0.9$ の異なる迎角で、大きく撓む非常に柔軟なガラス繊維翼の模型で評価された。翼には多くの歪ゲージと圧力素子が取り付けられ、翼の振動が記録され、DLR が開発した固有振動数と減衰率を実時間で分析する新手法が用いられた。これは試験中にフラッタが発生して模型が破壊される前にフラッタ余裕を推定する手法であり、将来航空機の試験を効率的に行うことを可能にする。この計画は Embraer 社がフラッタ特性予測法を確立する為のもので、NLR と DLR は模型の設計で協力し、NLR が製作し計装した。試験は Amsterdam の DNW 高速風洞で行われ、DLR が実時間分析を行った。

1.7 製造、整備に関わるイノベーション

(1) 製造管理記録

MAINtag 社 (フランス) は、2010 年から Airbus 社と共同にて、部品の識別と製造ライン上の追跡として RFID (Radio Frequency Identification) タグの活用を進めてきていたが、この度、A350XWB 部品用タグの供給について、同社と複数年契約を締結した。更に、Airbus 社の主要なサプライヤーである Thales 社、Safran 社、Goodrich 社、Parker 社、Recardo 社、Honeywell 社等とも、複数年契約を締結した。

(2) 3D 印刷

- ノルウエーの Norsk Titanium (NTI) 社は米政府と提携して、3D 印刷による航空機及びエンジンの部材製造設備を導入する。NTI はチタニウム線材から航空機部品の製造を可能とする「プラズマ・アークによる直接金属堆積技術」を開発した。この製造設備を米政府が建設・保有し、NTI がリースして運営し、2018 年には年間 1,000 ton のチタン部品の製造が可能となる。これまで 55~75 週間のリードタイムを要し、材料歩留まりが 10~20 : 1 であったチタン部品の、3D 印刷は 20 Lbs の部品を CAD を用いて 2 時間で製造できる。印刷部品の脆性や亀裂進展性が改良され、通常の金属部品と同等の機械的性質を有し、設計の自由度を広げる。高強度で軽量のチタン部材

は航空機にて使用されているが、素材と完成品の重量比が大きく、機械加工費も高価である。最終形状に近い印刷部品は材料費も加工費も少なく、コストを 50~75%を削減できる。NTI の推定では、B787 にはこの工程で印刷できる部品が 1,000 個程度あり、年産 144 機で \$ 360 M のコスト節減が可能になる。これまで 200 Lbs の鍛造材から 20 Lbs の部品を製造していたが、3D 印刷では 30 Lbs の材料から仕上げ加工のみで製造できる。NTI は 1,800 個の試験片を製造し、認証のためのデータを FAA とメーカーに送り、次は実部品の製造と認証に移る。製造機械は最初は 50 台であるが、100 台導入して年間 2,000 ton まで拡大可能である。大きさは 1,000×500×300 mm まで可能であり、材質強化のため真空に代えてアルゴンの中で加熱、冷却、焼鈍が行われ、鍛造並みにできる。

- 3D 印刷の一般的な付加製法 (Additive Manufacturing) は、材料の平板層を積み上げて複雑な部品を作り上げるが、Arevo Labs では種々の方向の 3次元面を有する複合材部品の製造が可能となる「ロボットによる付加製造装置」を考案した。その装置は ABB Robotics の小さな 6 軸産業ロボット IRB120 と高性能炭素繊維強化熱可塑複合材を積み上げる端末器から成り立っている。ソフトウェアは大型 ABB ロボットにも適用可能で、部品の CAD モデルをロボットの付加積み上げ指示に変換できる。ロボットは 6 自由度可動で 3D 付加製造を可能とし、また積み上げ指示を検証したり、部品製造を最適化する動的模擬装置も含まれている。このロボットのサイズにより 1,000 mm³ から 8 m³ までの部品製造が可能となる。
- チタン等の金属構造製造用 3D 印刷機
Airbus 社は、米 Sciaky 社の EBAM 110 エレクトロン・ビーム大型 3D 印刷機を導入して、3D 印刷にて航空機のチタン構造を製造する予定である。EBAM 110 は Sciaky 社の数十年にわたるエレクトロン・ビーム溶接の経験から開発され、エレクトロン・ビーム可動照射機で熔融金属線を溶かしながら積層して金属部品を製造し、大きな航空機構造部材、エンジン部品の 3D 印刷と溶接ができる最も良く知られた 3D 印刷機で、70×47×63in の箱の中で作動する。航空宇宙向け 3D 印刷はまだ初期段階で、これまでは主にこの機械による材料、工程及び品質の確認が行われた。この結果、品質は鍛造部品を上回り、工程も数週間/数カ月から数時間/数日に短縮され、材料の無駄も大きく減少することが判明した。
- 長さに制限のない 3D 印刷機

3D 印刷について、大きな制約の一つは、材料の積み上げ速度が遅い事もあり、小さくて複雑な部品に限られる事である。1980 年代からの 3D 印刷の先駆者 Stratasys 社は、熱可塑複合材の長手方向の積み上げに制限のない 3D 印刷実証機 ; Infinite Build 3D Demonstrator を試作した。幅 101 cm、高さ 76.2 cm で、胴体内の管類の長い部品が製作可能である。Boeing 社は、この Demonstrator を研究施設内に設置し、非常に大きい一体の客室内装パネルを製作した。

この印刷機は側面に押出機構を置き、部品を（下から上に印刷する代わりに）横軸に沿って長手方向に印刷する。高級な航空機部品用ではあるが、強度の低い細断炭素繊維を含んだ熱可塑樹脂のみが取り扱えて、客室部材や治具等に限定される。連続炭素繊維を取り扱える end-effector は現在、開発中であり、内装パネルは、航空機客室向けに適切な Ultem 9085 を含む多量の微粒子が螺旋押出機に供給されて熔融温度で 0.07in の厚さに積み上げられる。これを Ultem 1010 に変えれば、簡素な複合材流し型を印刷できる。

B777X 主翼外板の型などは高級治具材料を必要とし極めて高価であるが、Stratasys 社の印刷機が成功すれば低コスト代替品ができる。安価なプラスチック治具は非常に有用であり、細断炭素繊維熱可塑複合材の開発が進展すれば需要の多い客室内装の製作に使える。また開発中の連続炭素繊維による高強度の熱可塑樹脂複合材の印刷が可能となれば、熱硬化樹脂より強度が高く、より軽い機体の実現が可能となる。

(3) UAV を用いた整備

Airbus 社は A330 の整備にて、小型 UAV による外観検査を試行している。

これにより、機体表面検査の時間短縮を目指す。UAV は高精度カメラを搭載し、予め定めた機体表面の経路を自動飛行制御システムを活用して飛行する。映像は自動的に 3 次元数値モデルに変換されて、分析用データベースとして記録され、損傷の履歴を明らかにする。整備員が可動式昇降台で機体に近づいてデータを取得する場合は 2 時間を要するが、UAV では 10~15 分で可能となるとともに、整備作業の安全性が向上する。LCC の EasyJet 社では既に整備場にて損傷の点検に利用している。

(4) 噴霧印刷(Aerosol Jet Printing)

近代の航空機は複雑な電子機器と回路盤に依存している。しかし電子機器が小型で稠密になるに伴い回路盤の設計製作が非常に難しくなっている。NASA では通常の印刷回路盤製作の物理的限界を克服して、狭い空間に多くの部品を詰め

込める噴霧印刷を検討している。この工程は平面、曲面、球面、更には柔軟な面に印刷可能である。噴霧印刷は他の 3D 印刷同様に CAD 図面に誘導されて材料を積層する方式であるが、材料(粉末プラスチック、金属粒)を回路盤の正確な場所に溶解したり融解するのではなく、微小水滴となった材料の濃い霧を正確に制御したビームで吹き付けるものであり、1 回当たり 10 μ から数mmまでの厚さで吹き付け・積層を行う。

(5) B777、B787 組立の自動化

Boeing 社は技術投資戦略の一環で B777 胴体製造にて新手法を開発している。胴体の組立製造工程で、現在は手作業で実施される 6 万本以上のファスナーの孔明けと装着は工員が胴体内部と外部で同調して行う難しい作業で、怪我の半分以上がこの工程で起きている。FAUB (Fuselage Automated Upright Build) と呼ぶ先進製造技術は、自動化されたロボットで胴体パネルを結合し、作業時間の短縮と職場の安全性及び製品の品質向上を目指している。今後 2、3 年で B777/B777X 生産で実用化される。このロボット・システムについては KUKA Systems が設計するが、同社は既に塗装や他の孔明け作業では実用化を達成している。

Boeing 社は B787 組立工員に部品やツールを運ぶ要員を自動ロボット車両にて代替することを計画している。各自動車両は工員が作業に 2 時間の作業で必要とする部品とツールのキットを搭載しており、作業終了と同時に次の車両が現れ、工員の次の 2 時間の作業が始まる。只、この自動誘導車両 (AGV) は新しい着想ではなく、B787 の複合材中央翼を供給する FHI 西半田工場では AGV で構造物をオートクレーブに搬入していることに倣ったものであり、Boeing 社はこの AGV を作業の流れを分単位で測定・監視する自動システムの如き手段として導入する予定である。

B787 の開発が 3.5 年遅れ繰延生産コストが約 \$30B も積み上がっていて、これを 1300 号機までの残りの生産で回収する必要がある、一層の効率向上を目指して、この AGV を使って生産ラインの改良を行うものである。

1.8 総合技術

(1) 環境適合を含む総合技術

前項までにて、既に挙げられてきた要素技術から成る。

(a) 欧州の研究開発

(i) Clean Sky 計画

- ・ 2001 年に、ACARE (the Advisory Council for Aeronautics Research in Europe) が民間航空機の運用機数の予測に基づき、環境保全の為に 2020

年までに(2000年との比較において)1乗客・km当りCO₂, NO_x, 騒音レベルを各々50%, 80%, 50%減じなければならないと発表し、続いて2008年2月に誕生したClean Sky JTI (the Clean Sky Joint Technology Initiative)により欧州委員会と企業との間での官民協力が合意され、CSJU (the Clean Sky Joint Undertaking)の管理のもとに、研究がスタートした。(～2017年末)このClean Sky JTIは官民の共同出資により運営されている。

- 2020年において、2000年と比較して下記目標を達成する。
 - － 燃料消費及びCO₂排出量を1乗客・km当り50%低減¹⁾。
 - － NO_x排出量を80%低減¹⁾。
 - － 騒音を50%低減¹⁾。
 - － 航空機の製造、メンテナンス、廃棄に関わる環境上の影響を低減することにおいて実質的な進歩を遂げる。

ここで、CO₂排出量50%低減については以下の組合せで目標を達成する。

機体技術	: 20～25%
エンジン技術	: 15～20%
運行管理技術	: 5～10%

注1) ACAREの発表通り。

- 研究期間は2008年2月～2017年末であり、以下の6プログラムから成る。

No.1: Smart Fixed Wing Aircraft

大型旅客機、ビジネス機を対象とする。

- 主翼にて層流化促進 (passive, active)、斬新な尾翼形状、操縦舵面の改善及び荷重コントロール等にて、全機抵抗10%減を目指す。
- CROR (Counter Rotating Open Rotor) の適用にて、燃料消費率20%減を目標とする。
- 騒音遮蔽の機体形状とすることにより騒音レベルの10dB低減を目指す。

(ビジネス ジェット機)

(水平尾翼の両翼端に垂直尾翼を結合しU字型の尾翼とする案)

— Airbus社、SAAB AB社 —

No.2 : Green Regional Aircraft

リジョナル機を対象とする。

- 抵抗低減／必要推力の低減
自然層流システム、防氷システム、高揚力システムの統合、脚形状の空力的最適化により、燃料消費量の低減、騒音レベルの低減を目指す。
FBWにより荷重コントロールを実施。
高揚力装置／脚を空力的にリファインすることにより、アプローチ、着陸時に騒音と抵抗を低減。
- 全電動化
空気圧パワー、油圧パワーを電動式に置き換える。
- 航路・任務管理
航路・任務管理により離陸－巡航－着陸の最適航路を自動的に指示し、燃料消費量の低減を図る。
- エンジン
新エンジン（open rotors）を搭載。
- 風洞試験
2015年には新形態の90席ターボプロップ機と130席Geared Turbofan engine機とOpen rotor engine機のエンジン搭載位置比較に関わる風洞試験が計画されている。

— Alenia Aeronautica 社、EADS CASA 社 —

No.3 : System for Green Operations

- 航空機用エネルギー管理
 - 全電動化
主電源からの配電管理
油圧駆動、空気圧駆動の除去→電動化
 - 熱管理
- 航路、任務の管理

— Thales Liebherr 社 —

No.4 : Eco-design

機体構造、装備システムの設計において、環境に配慮。

リサイクルも考慮した材料の選定、油圧駆動を電動駆動に置き換え等

— Dassault Aviation 社、Fraunhofer Gesellschaft —

No.5 : Green Rotorcraft

革新的ロータブレード (active twist)、胴体、尾翼に層流制御、電動化 (油圧駆動削減)、飛行管理等の技術により、
CO₂ : 26~40%削減、
NO_x : 53~65%削減、
騒音レベル : 10dB 低減
を目指す。

— Agusta Westland 社、Eurocopter 社 —

No.6 : SAGE- Sustainable and Green Engine

リジョナル機、狭胴機、広胴機、ヘリコプターの各々に対応したエンジンについて、最適化を図る。→性能向上、CO₂ 及び NO_x を削減。
— Rolls-Royce 社、SAFRAN 社 —

(ii) Clean Sky 2 計画

○ プログラム

- 2014 年~2020 年に、Clean Sky 1 計画で開発された技術の実機による実用化推進と更なる先進技術の開発を行う。最終目標は、「2050 年までに CO₂ 排出量を 2000 年のレベルに対して 75% 減少させる」である。
- 研究費は 2017 年終了の Clean Sky 1 の Eu1.6B に対し、2023 年終了の Clean Sky 2 は Eu4.05B に大幅増額となる。このうち EU の拠出額は Eu0.8B から Eu1.8B に増え、残りは業界が負担する。

○ 対象とする先進技術

・ More electric 技術

- 2015 年末に A320 試験機による more-electric 技術実証の飛行試験を計画している。A320 eFTD (electric flight test demonstrator) では高圧直流電力供給、電気 ECS、2 種の主翼電気防氷装置、及び新レーザ着氷センサーが試験される。これは Clean Sky の中の Systems for Green Operation 計画の下で実施されるもので、POA (Power Optimized Aircraft) と MOET (More Electric Technology) の先行研究がある。POA では 2002 年~2006 年に Eu99.2M で非推力消費低減に貢献する機体システムを特定し、MOET では 2006 年~2009 年に Eu66.5M

でそれらを飛行試験レベルまでの技術を開発した。今度の飛行実証ではそれら More-electric システムを、製品開発に着手できるレベルまで引き上げる。B787 や軍用機の一部では 270V DC が用いられているが、Clean Sky では 540V (+/-270V) を用いる。そこでは Silicon の能力を超えるので SiC のような “wide band-gap” 材料を用いた動力装置が研究される。現在の 1~2 kW/kg の電子動力では A320 で 600 kg 重量増となり利点が消えるので、競争力を得るには 16 kW/kg が必要になる。2014 年は 70 kW ターボマシンの電気 ECS が地上試験されるが、飛行試験用には 50 kW のものが製作される。二つの電気防氷システムが外翼スラットに装備されるが、左翼は二つの電熱ヒータ、右翼は加熱被覆と電子機械システムになる。前者は防除氷でエネルギー消費が少ないが、後者は前縁の衝撃振動で氷を割り、振り落すので更に効率が高いが除氷でしか使えない。従来 180 kW を要した防氷は電熱システムでは 50~70 kW、電子機械式では 5~10 kW にできる。また eTDF では翼面上の二つの縦孔から波長の異なるレーザを照射する着氷検知システムの試験も行う。

- Clean Sky の外では技術レベルの低い more electric の研究もある。ドイツの国家研究で Liebherr 社は、油圧システムを無くして整備費低下を目指す “電池駆動の高揚力装置と降着装置” を研究している。駆動モータは現用 28V DC で充電される電池によるので、115/230V AC のモータより簡単、軽量、安価である。Li-ion 電池は巡航中に充電されて、3 回の着陸復行と 4 回目での着陸が可能ないように設計される。これは現用機の電気システムを大変更することなく、後付や改善が可能である。

- More electric 以外の技術

- “Smart” 固定翼機計画では 2014 年 6 月に A340-300 の層流翼実証機への改造が始まった。外翼を 2 種の自然層流翼パネルに交換するもので、左翼は Saab 社が製作する複合材製の前縁と上面パネル、右翼は Aernova 社が製作する通常構造でクルーガフラップが前縁に装着された形態となる。また飛行実証と並行して、段差、隙間を避ける為に、前縁と上面カバーを

統合した実大構造を実証する為、“Smart”層流翼地上実証機が組立てられる。

- 2014年夏にはA340-300によるオープンロータ実証機の初期設計検討が、またSNECMAの実証エンジンを後胴に搭載するパイロンの初期設計が始まった。ギア付きオープンロータの地上試験は2015年末、飛行試験は2020年に実施される。
- 高揚力低速飛行と振動制御を兼ねた「ビジネス機の“Smart”フラップ地上実証機」の最終設計検討も実施される。
- 騒音遮蔽のためのU字型尾翼の地上実証機は2014年末に完成した。
- “Green”リジョナル機計画では、Al-Liと先進複合材による主翼桁間、筒状胴体、および操縦室の地上実証機が完成する。2015年のATR72による飛行試験のために複合材上部クラウン・パネルが製作される。
- 2014年には90席ターボプロップ機用の低騒音主脚と前脚の風洞試験および130席Jet用の能動荷重制御付き遷音速層流翼の風洞試験が行われた。
- 2015年のATR72による飛行試験に先立って、“Copper bird”地上リグでMore-electricシステムが試験された。
- SAGE計画で、RR社は60,000~95,000 Lbsクラスの3軸ターボファンの複合材ファンシステムと軽量低圧タービンの実大試験を行う。また2015年末に運転を計画している次世代ギア付きターボファンの製造組立を行う。

○ 2015年度動向

欧州はEu4Bを投入するClean Sky 2 (CS2) 官民共同研究計画における大規模な機体技術実証によって、2030年以降にA320等を代替する新型狭胴機に適用する技術の研究を進めている。2008年~2017年のClean Sky 1 (CS1) の成果を基に推進されるCS2では機体の統合技術実証 (ITD) が

重要項目の一つであり、大型旅客機、高速ヘリコプターおよびリジョナル機の3つの統合機体実証プラットフォームにより、革新的構造、高効率機体等を実用レベルにまで引き上げて、新機体が市場に出るまでの時間を短縮し、欧州の競争力を強化しようとしている。

機体の ITD には次の9技術分野がある。①エンジン・機体の統合、②低抵抗の層流主翼とナセル、③柔軟な翼と新胴体形状の遷音速機、④高性能多機能舵面、⑤多機能で居住性の高い客室、⑥低コスト複合材構造の次世代翼桁間、⑦TP用の最適化された高揚力可変翼、⑧機体や翼構造への電気系統の統合、⑨ヘリコプター用複合材と圧胴。

革新的構造分野ではオープンロータ及び UHB エンジンと後胴を高度に統合最適化した形状の研究がある。また CS1 でエンジン騒音遮蔽のために U 字型尾翼の形状が研究された。層流分野では自然および複合層流のエンジンナセルの実証と自然層流翼の大規模な試験、CS1 で改修される A340 層流実証機の飛行試験が実施され、また高揚力形態での層流化も追及される。高速機分野では、繊維方向を整えた複合材を用いる主翼の空力・構造最適化設計、抵抗低減のための前胴形状とシステム統合、低密度多機能材料による金属胴体の改善設計、複合材桁間と金属部分胴体（材料組み合わせ）の次世代 A320 後継機用地上実証供試体が含まれる。制御分野では、突風荷重軽減、フラッタ防止、高効率多機能舵面、電気防水を組み込んだ可動前縁等がある。

(b) 米国の研究開発 — NASA N+3 計画

(i) 目的

飛行性能及び環境適合性について更なる先進化を目指し、2030年～2035年に投入する機体へのブレーク・スルーとなりうる技術を取得することを狙い、目標は下記の通りである。

2030年～35年 (N+3) の目標

(2005年との比較)

燃料消費	:	70%低減
NO _x 排出量	:	75%低減
騒音	:	71 dB 低減

(ii) 研究概要

NASA は前項の目的に沿って、3世代先の亜音速／超音速民間輸送機に関する概念検討の実施につき、6企業／大学と契約した。これらの計画の概要は以下の通り。

No.1 : Advanced Concept Studies for Subsonic Commercial Transport
Aircraft Entering Service in the 2030-2035 Time Period
— Northrop Grumman Systems Corporation —

No.2 : Advanced Concepts Studies for Supersonic Commercial Transport
Aircraft Entering Service in the 2030-2035 Time Period
— The Boeing Company —

コメント ;

カナード形式として、揚力分布を前後方向に拡げてソニック
ブームの低減を狙っている。

No.3 : Aircraft and Technology Concepts for an N+3 Subsonic
Transport

- Λ 型の機首（上部面：フラット，下部面：斜面）によって揚力
中心を前進させて尾翼に要求される下方揚力を減らし、尾翼を
小型・軽量としている。また、胴体を Double bubble の Lifting
Body として、胴体上面の空気流を後部エンジンの吸い込みにて
加速して、胴体にわずかでも揚力を発生させる狙いか。これに
より、主翼の分担揚力を少なくしており、主翼面積が小さい。
- エンジン位置の機軸からのオフセットを短くすることにより、
（エンジン片発停止時のヨーイングモーメントが小さくなり）
垂直尾翼面積を小さくすることが可能となっている。
- 胴体上の境界層をエンジンが吸い込むことにより、胴体抵抗を
低減させている。

— Massachusetts Institute of Technology —

この機体は MIT が（2035 年頃に A320, B737 の後継として、70%の
燃費向上にて 2035 年頃運航を目指す）N + 3 機として提案したもので、2 通路胴体で B737 より抵抗は大きいですが、翼、脚の重量が軽減され、尾翼は小型化されている。胴体後背面に置かれたファンでの BLI（Boundary Layer Ingestion ; 境界層吸込み）により、燃料効率向上を目指している。エンジンの適当な埋め込み場所と胴体上面の乱れた流れの中での小型軽量エンジンの作動効率、胴体とエンジンの

統合法と胴体境界層吸込みによる燃費向上率が研究されている。ポッド懸吊型のように自由流中のファン後流では余分な運動エネルギーが失われているが、推進機関が流速の低い境界層中に埋め込まれた時には損失が少なく、小さなエネルギーで同一推力が得られる。この利点はファンが境界層を再活性化して抵抗を減らすことで実現される。問題はこれが高荷重で作動するファンと機体で成立するか、乱れた境界層中で作動するファンに過度な効率損失がなく、全機として総合的に効果があるかである。現時点では、効率低下2%の目標に対し0.5%との良い結果が得られている。20年後のN+3世代までには研究が進み実現の可能性がある。P&W社では2035年に向けて小型コア・エンジンの研究が、MITでは胴体尾部および尾翼形状の研究が続いている。

コメント；

低動圧の一様でない空気流をエンジンに取り入れることになり、エンジン側では、

- ・ 比燃費の低下
- ・ ディストーションによる機械振動発生の可能性が大きくなる

等のマイナス面があり、機体と推進システムとのトレードオフ設計を要する。

No.4 : NASA N+3 Supersonic-Three Generations Forward in Aviation Technology

— Lockheed Martin Corporation —

コメント；

- ・ エンジンを尾翼で覆うことにより空港騒音を低減する。
- ・ 尾翼を結合することにより、誘導抵抗を低減する。

No.5 : Small Commercial Efficient & Quiet Air Transportation for 2030-2035

— GE Aviation —

コメント；

- ・ open rotor にて、空港騒音を低減。

- open rotor と水平尾翼のクリアランス確保の為、T-tail を選択。

No. 6 : Subsonic Ultra Green Aircraft Research

機体規模 : B737 クラスの双発機, 154 人乗り

スパン : 200 ft (主翼折りたたみ可)

航続距離 : 3,500 n.m

動力 : ジェットエンジン (離陸時),

バッテリー (巡航時)

バッテリーの性能

現在の技術 : 170~180 W・hr/kg

目標 : 750 W・hr/kg

バッテリー候補

リチウムイオン電池又は

リチウム空気電池

CO₂ 65%減 (バイオ燃料使用 : 80%減), NO_x 85%減,

燃料消費 70%減

— The Boeing Company —

- 高剛性、複合材翼の B787 にてアスペクト比 9、C-Series でアスペクト比 11 を実現しているが、NASA では柔軟構造のフラッタ能動制御でアスペクト比 15 の片持翼が可能と考えている。一方 NASA の 2030 年~2035 年に導入する「燃費 60%削減が目標の将来機” N+3”」の研究に対し、Boeing 社はタービン・電気複合推進などと組合せてアスペクト比 19 の TBW (Truss Braced Wing=トラス支持翼) を提案している。これは B737 クラスの機体であるが翼幅は 113 ft から 173 ft に伸び、地上では B777X の提案と同様に長い翼端が折り畳まれる。問題はトラス支持による干渉抵抗増とフラッタ抑制のための構造重量増である。この点に関して NASA と Boeing 社共同の 15%模型風洞試験が実施される。ここでは、能動制御によるフラッタ抑制と突風荷重軽減の有効性および干渉抵抗が少ない低抵抗を確認する。風洞は NASA LRC の Transonic Dynamic Tunnel で、使用されるガスは空気密度の 3 倍以上となる分子量 102 の冷凍媒体 R134A である。風洞中での模型の挙動を再現できる FEM と機体設計ツールの組合せによって、

実機に換算すると、予測幅の中の軽い方の構造で実現できることが判った。続いて通常の高速および低速の風洞試験が行われる。

- NASA の亜音速固定翼機研究計画で過去 4 年間 Boeing 社が GE 社と共同で取り組んできた超低排出の Sugar Volt 航空機の一つに“hFan”ガスタービン・電力複合エンジンがある。巡航時の燃費 60%減、Nox80%減および離着陸時の騒音；Stage4-71 dB、Nox80%減の要求に対し、第一案は小さなコア・エンジンで高圧部の作動を強化してバイパス比と全圧比を増す事であるが、従来の Tube & Wing 形態ではバイパス比 12、全圧比 40 が限界で多くは望めない。第二案は BWB 背面後縁に分布して埋め込まれた多くの小電動ファンによる推進である。第三案がこの“hFan”で、超高圧縮比コアによるガスタービンと電池による電動モータで巨大なファンを駆動するものである。上昇中、特に高高度では HBPR エンジンの出力は低下するので電動補助が有効である。巡航ではガスタービンを停止し電池だけで駆動するので全く排出物がない。降下も電力駆動によるが着陸に備えてガスタービンが再点火される。但し着陸後は直ちに停止し車輪の電力駆動で走行する。離陸での電力補助は騒音低減にも有効である。
ただファンによる発電で電池を充電することは考えていない。問題は電池の重量で、実用的には現在の 0.1 kWh/kg の 7~8 倍の 750 WH/kg 程度の性能が必要になる。

コメント；

アスペクト比を大きくすることにより誘導抵抗を低減させて、スパン大により翼根の曲げモーメント大となるのを避ける為に翼下にストラットを追加している。

(c) 米国の研究開発 — NASA ERA 計画

NASA が ERA (Environmentally Responsible Aviation) 計画として、3 社に資金を提供して、2025 年に運航開始の大型旅客機に適用されるべき技術 (含：2 世代先の環境適合性技術) を取得する。

仕様

巡航マッハ数 : 0.85

航続距離 : 7,000 n. m
ペイロード : 50,000~100,000 Lbs

環境適合性の目標は下記の通りである。

燃料消費 : 50%低減 (1998年技術との比較)
NO_x排出量 : 75%低減 (1998年技術との比較)
騒音 : 42 dB 低減 (現行の Stage4 との比較)

(i) 計画概要—第1期

以下の3プログラムから成る。

No.1 : BWB 機

Geared Turbo Fan エンジンと尾部形状にて空港騒音を低減。

— Boeing 社 —

No.2 : 双胴機

- Scaled Composites 社が設計した White Knight (宇宙船 Space Ship One を空中で打ち上げる為の打ち上げプラットフォーム型ジェット輸送機) を改良。

Flying Wing

- ノースロップ社の YB-35, YB-49, B-2 等で培われた技術の民間機への適用。

— Northrop Grumman 社 —

No.3 : Box Wing 機

主翼の先端と水平尾翼の先端を連結することにより、全機の誘導抵抗を低減。

垂直尾翼の両側に超高バイパス比エンジンを搭載。

— Lockheed Martin 社 —

(ii) 計画概要—第2期

2015年9月完了に向けて新技術の実用化促進のために、次の8項目の統合技術実証 (ITD=Integrated Technology Demonstration) が計画されている。この統合目標は現状に対し8%抵抗減、10%軽量化、15%燃料消費率向上、75% NO_x 減、1/8の騒音低減である。

①AFCにより垂直尾翼の横力発生能力を20%増強することで大きさを17%縮小して1~2%の抵抗減が期待できる。2014年初に地上試験、2015年に飛行

試験が計画されていて、アクチュエータの大きさ、配置、作動性、動力源などを含めて実証する。また AFC のみならず HLFC ではクリーンな前縁が不可欠であり、飛行による昆虫蓄積、対策を施した表面への影響の調査も含まれる。

(Boeing 社)

②HWB 形態中央胴の複合材による長さ 30 ft の低コスト軽量一体耐圧構造 PRSEUS (pultruded rod, stitched, efficient unitized structure) について 2015 年に評価試験が行われる。(Boeing 社)

③重量、騒音および抵抗減が期待できる Morphing 技術適用の可変翼 FlexFoil を Gulfstream 3 に装備して、その作動性、フラッタ特性を飛行実証する。両翼にある 14 ft のフラップの両端 2 ft が可変構造で、操舵時にも固定翼と滑らかに連結している。(FlexSys 社)

④離着陸時の NO_x を 88% 削減する燃焼器を研究室で評価する。これにはセラミック複合材の耐久性試験が含まれる。(P&W 社)

⑤大幅な騒音と燃費削減を目指した吸音ライナー、ガイドベーン、新世代ファン、短い吸入口等による第 2 世代 UHB (超高バイパス) 統合推進器を研究室で評価する。(P&W 社)

⑥燃費改善を目指した高負荷の高圧圧縮機を研究室で評価する。(GE 社)

⑦降着装置とフラップの空力形状の改善、FlexFoil、小円環がついたフラップ端、多孔壁で曲がりくねったチャンバーをもつフラップ等による騒音低減効果について飛行実証を行う。ここでは、4.4 dB の低減を期待している。

(Gulfstream 社)

⑧HWB 形態の研究は N+3 機の研究も兼ねているが、ITD では翼胴と背面にある大きな UHB エンジンとの統合を目指しており、特に低速時のエンジン運用性が重量である。2015 年 3 月に模擬タービンによる低速風洞試験が予定されている。

(d) 米国の研究開発 — RCEE 計画

米国では官民共同にて、燃料の 2/3 を消費する輸送機、タンカーを対象に省エネ革新形状 (RCEE=Revolutionary Configuration for Energy Efficiency) 研究計画の第 1 期 (2009 年~2011 年) で燃費 90%削減を目標に形状を探索し、第 2 期 (2011 年~2015 年) で特定形状の詳細を研究している。Boeing 社は第 1 期でペイロード 20 t までの機体に全電気・トラス支持翼機を、40 t では複合電気分散推力設計を、100 t では複合電気推進の HWB を提案し、第 2 期では分散推力の複合電気推進機の詳細を詰めている。一方 Lockheed Martin 社は第 1 期で HWB を選択し、第 2 期で前胴と主翼の BWB 形状と通常の後胴と尾翼を結合した形状が大型貨物の空輸に最適であることから詳細を検討中である。この形状で貨

物を 100 t 搭載し、6,500 ft 滑走路から離陸し、3,200 n.m を飛行する機体の特徴は、優れた空力形状、新エンジン、及び軽量構造である。洗練された空力形状で抵抗を 45%低減し、巡航速度を $M=0.7$ から 0.81 に上げた。主翼と統合された前胴が揚力の 25%を負担し、翼根は外に張出して翼幅増を可能とし、アスペクト比 9 の重量でアスペクト 12 相当を達成できる。HondaJet の様にエンジンを翼内側後縁の上に搭載する形態はエンジン吸入流による吸上げ揚力もあり、翼下懸吊より揚抗比が 5%優れ、最大揚力係数は 15%向上し、構造は全体で 18%軽い。C-17 の C-5M エンジンに対して燃料消費率は GEnx が 25%、RR 社の Ultra Fan が 30%、GE 社の Open-rotor が 35%低く、これらと空力効率向上と軽量化で、燃料消費は C-17 より 70~80%削減できる。

(e) 米国の研究開発 — Boeing 社

- Boeing 社は 2012 年末に改修した B737-800 のエコ実証機による飛行試験で、量産品質のウイングレットが層流を維持することを確認して、B737Max の最終線図確定に間に合わせた。環境適合技術実証機の有用性を認めた Boeing 社は、2020 年前後に採用可能な機体、システム、推進装置、操縦室などの新技術評価のために、次は B787 飛行試験機と改修した B757 の 2 機の実証機で飛行試験を行う。B787 実証機では、推進装置や材料分野では CMC (セラミック複合材) のノズル、ナセルやパイロンの熱制御によりインコネルやチタンの高価な耐熱金属部材から複合材への転換、コネクティビティ (飛行中の Internet、iphone、TV 等への接続) 分野、操縦室分野ではタッチスクリーン、HUD 上の情報表示、合成視界、尾部防護、低騒音離陸のための前後縁高揚力装置操作の飛行制御則、飛行力学分野では主翼計装による実データと CFD との相関調査、ナセルの層流域拡大、飛行試験効率向上の分野では試験装備の MEMS 化、配線不要の無線結合などが挙げられている。また B757 実証機では方向舵の AFC により大舵角での剥離を遅らせ横力増大で垂直尾翼を小型化する。更に、空力形状のモーフィング、層流化、先進 APU、混雑空域での速度管理表示装置、B777X など重要になる地上衝突防止装置などが実証される。
- 2014 年末に、B787-8 飛行試験 4 号機に 25 項目の新技術を反映して、実証飛行試験を始めた。新技術には、NASA の空港進入時の飛行間隔管理プログラムで開発されたソフト、防氷塗装を施した翼、重量軽減のための飛行試験機器の無線結合、悪天候用着陸支援装置を備えた空港での “Type D” プロトコルによる計器着陸装置、外翼に装着された B787 製造時の廃材を再利用した複合材アクセス扉等がある。この実証飛行試験は

運航効率向上や燃費／排気／騒音の低減を目指している。

(f) ロシアの研究開発

ロシアは2016年～2025年の10年にわたる新民間航空機研究計画を始めるが、NASAのERA計画(Environmentally Responsible Aviation)及び欧州のClean Sky計画に倣っている。規模は\$6B/10年でNASAの\$550Mとほぼ同じ、技術を飛行実証レベルに引き上げるのが目的で、\$200Mの国際共同研究参加費も用意されている。研究課題は2012年に起草された“2030年の航空科学技術の見通し”に示されているが、欧州のACAREによる戦略研究課題に類似している。即ちロシア国家R&D計画は、新航空機形態(長距離広胴機、中短距離細胴機、グリーン・リジョナル機、低ブームSST、およびSTOL機)、エンジン(UHBとオープンロータ)、材料構造、各種系統および特定技術(空力、高揚力装置、機体/エンジン統合、アビオ)を対象とするが、NASAのように回転翼機やATMは含まれない。最初の主要な研究は2016年から3年間で\$150～200Mが投入される“2020航空機”で、第2期はERAやClean Skyと同様に実証機の飛行になる。これらは2016年～2025年に新型機開発支援費を含んで\$27Bが投入される航空産業開発計画の一部である。ただ業界の負担は未決定である。

(g) カナダの研究開発

カナダ産業省は航空、宇宙、防衛、安全保障に関連する、研究室と製品開発の間をつなぐ新たな研究開発計画の2回目を募集している。この技術実証計画(TDP)の1回目は昨年9月に公募し、4月14日に締切られて、この秋に50%政府補助の選定計画が発表される。今回は6月27日に締切られて、2015年3月に選定結果が発表される。飛行実証レベル達成が目標の5年にわたる大型実証計画が対象である。これはOttawa州政府によるStrategic Aerospace and Defence Initiativeで、製品化直前までの技術レベルを目標とする。TDPはカナダのOEMまたはTier 1が対象で、少なくとも中小企業1社とカナダの大学を含まねばならない。外国メーカーも参加できるが費用は全額自己負担になる。予算は最初の4年がC\$110M(US\$100M)、最後の年がC\$55Mで、最多は3計画で、1計画当たりC\$54Mが割当てられ、5年続くと期待されている。

コメント；

欧米では、環境適合技術の開発に国が巨額の資金を投入して飛行実証レベルにまで熟成させ、それを民間会社が開発機に適用し、“高付加価値商品を競争力を有する適正な価格”にて売り上げを伸ばすとの経済システムが構築されている。ここで、環境適合技術の開発は納税者のコンセンサスを得やすい上に、民間航空

機の商品価値を高める殆どすべての技術を網羅していることから、極めて有効なテーマであると考えられる。

(h) Boeing 社／Embraer 社

Boeing 社は Embraer 社と共同で E170 をエコ実証機として、ブラジルで主に安全性と環境保護に関する技術実証飛行試験を行った。Boeing 社のエコ実証試験は 2012 年に B737-800 を用いて始まり、B757-200、B787-8 と続き、今回は初めて他社の機材を利用した。試験項目及び成果は次の 5 項目である。

①前縁スラットの下面凹みを埋めて翼前縁との間の剥離流を抑えることで空力騒音を 10dB 削減できた。

②通常ピトー静圧管で得るエアデータをレーザセンサーでの計測から算出する光学エアデータ・センサー LIDAR (Light Detection and Ranging) と太陽光との干渉の有無に関わる実用性を実証した。

(これはピトー管の予備、近距離擾乱探知等に応用できる。)

③先進被膜と称する防氷塗装が通常の塗装と同様に取り扱えることを示した。実着氷気象での試験は未実施であるが、実験室では防氷効果、腐蝕・耐久性が確認されている。

④層流から乱流への遷移点を計測するレーキ型の自動境界層計測装置 (BLDS=Boundary layer data system) の実用性を、主翼と垂直尾翼にて確かめた。

⑤砂糖きびの搾り滓からのブラジル産バイオ燃料を 10% 混入した航空燃料の実用性を示した。

Embraer 社はこのエコ実証機共同試験で Boeing 社との将来の協調を期待している。

(2) 自動化／自律運航技術

将来、民間航空機のシングルパイロット化、無人化又は地上での遠隔操縦の実用化に向けて研究が行われている。これは、運航コストの削減 (訓練費用も含む)、操縦士の不足に対応する為である。この為には、機体側のシステム／要素技術 (センサー、コントローラ、制御則、操縦デバイス駆動機器等)、機外インフラ (地上インフラ、衛星) のイノベーションが必要であり、装備システムの開発につながる。

以下において、目的及び志向を見出す為の関連する情報を示す。

(a) シングルパイロット化／無人化

- ・ 航空貨物会社の FedEx (Federal Express) 社、UPS (United Parcel Service) 社は、今後 10~15 年以内に、貨物機を「1 搭乗操縦士+1 地上遠隔操縦

士」又は「地上遠隔操縦士のみ」にて運航する予定である。

- 米議会は FAA に対して 2015 年 9 月 30 日までに民間無人機 (UAS = Unmanned Aircraft System) を安全に米空域に組込むことを求めている。FAA によると、期限までには大枠が決まるだけで、全空域で全カテゴリーの UAS の運航に必要な耐空性、運航基準が決まる訳ではない。期日までに重量 55 Lbs 以下の小型 UAS の基準ができ、種々の UAS の性能と相互運航の可能性を検証するために、全米で 6 か所の試験場所を設け、完全な統合に必要な「探知－回避」と「誘導－制御」の初期要求性能を研究する。また一部の公的機関及び国防省は限定空域で FAA 認証の「探知－回避」システムで飛行できるようになるが、多くの UAS の運航は更に先になる。
- 将来の混雑空域での自動管制では、次世代 ATM と連携して操縦士が介入する余地はなくなるとの見通しがある。操縦士の通常の役割を全て自動にすることは比較的容易だが、問題は予期されていない事態への対応である。例えば、US Air 社の A320 にて両エンジン鳥吸込みによりハドソン川に不時着水した事例などがある。これらを極めて稀なケースと看做す人もいるが、普段でも小さな故障を操縦士が大事に到るのを防いでいる場合も多いと考えられ、操縦士のいないリスクを正確には把握できていない。また無人システムでは誰が最終的責任者かと言う法的問題もある。
- BAE 社の Jetstream(19 席のターボプロップ機)が英国 Wharton-Inverness 間往復 800 km を地上の操縦士が監視する中で、離着陸以外は搭乗操縦士が操縦することなく飛行を完了した。またこの飛行では、民間飛行空域で無人機が他機からの距離を確保維持するための自動衝突回避に必須な探知回避技術について試験を行った。ここでは意図的に回避すべき標的が使われた。
- 現在最も自動化された無人機 Global Hawk において、状況認識のループには人が介在していて、不具合発生時には、急遽人が介在して問題を解決しなければならない。自律化では不確かな情報に基づく場合でも人ではなく機械が決定を下し、予め計画されてはいない振舞いをする。今後は自動化から自律化にパラダイムが移行する。そのシステムは自らの状況を監視し、形態を変え、最適化し、修復することが出来る。人がこれらを機械に委ねるには、新たな validation、verification の方法が必要になる。高度な信頼できる自律化の達成には、今後数十億ドルの

研究開発費を要すると NASA は述べている。

- 航空輸送が広範な手段に発展する為には、空中及び地上での自律制御技術の確立が必須である。只、ここには航空管制、安全、騒音、及び全天候での運航能力等の技術的、法制的及び社会的問題がある。
一例として Stanford 大学と NASA による電気 VTOL 地域公共輸送機 Hopper がある。これは 30 席の電池／電気、燃料電池、または複合電気推進によるタンデムロータ・ヘリで、混雑した都市での道路や鉄道を代替する「航続距離 100 n.m 以内の短距離機」である。電気推進システムは重量が重い、ターボシャフト機よりエネルギー消費は少ない。低い人口密度と複雑な地形で通勤が長距離になるサンフランシスコ湾岸地域で、Hopper 数百機を用いて 1 日 3 万人の乗客を数十の発着場の間で数千便の輸送を行う模擬では、完全自律運航が可能な機材による単一操縦士による運航、発着場での自動充電または電池交換等、空中と地上で高度な自動化が必要であることが判明した。短い区間での飛行及び VTOL はエネルギー消費の大きな輸送モードである。空域とインフラ問題が解決できれば、市街地の地上輸送の混雑を回避できる可能性がある。近々に実現可能なエネルギー密度 500~600 WH/kg の電池技術により、10 年以内に短距離機は実現できる見通しである。
また 2~3 年の内に実現可能な Joy Aviation の個人用 VTOL 電気推進航空機 S2 (2 席) もサンフランシスコ地域での使用を目標にしている。高効率、冗長性および低騒音のために、主翼と尾翼に 12 基の電動プロペラを備え、VTOL 時には上に向き、巡航時には戻す。200 n.m 以内を毎時 200 n.m で飛行するよう設計された S2 (価格：20 万ドル) は、車より 5 倍速く、2 席ヘリ Robinson R22 より 2 倍速い。エネルギー消費は車の 1/5、ヘリの 1/10 であり、1 n.m 当りの運航コストは車の 0.60 ドル、R22 の 1.30 ドルに対し 0.20 ドルである。安全性向上、騒音低減、及び効率、排気、乗心地、信頼性、運航コストなど現在の弱点を乗り越えるために、自律制御と電気推進を小型機に適用するのに最適である。自動制御技術は飛行を容易に、安全にして操縦士不足を解消する。操縦士の一人化が重要な一歩で、エアタキシーの商業化を可能とし、最終的に無人操縦旅客機を目指すことになる。
- DARPA は Alias (Automated Labour in-cockpit Automation System) 計画で操縦室内へのロボット導入を研究している。これは移動可能で、機体の耐空性を損なわずに 1 日で着脱可能、1 か月で他機にも適用可能とな

ることを要求している。DARPA の希望は、操縦室は 1 乗員＋搭載自動機器とし、同一インターフェースを有する地上運航者とで航空機を運航することである。初歩的模擬試験では、Beechcraft King Air の地上模擬装置に計器表示盤と舵面操縦装置を加えて、運航者が単一表示盤と音声制御で機体に命令できるように改修し、自動システムが操縦する King Air が衝突回避及びエンジン・与圧・自動操縦装置・補助翼などの故障に対処する飛行を実証した。Alias は最終的には、地上から管理される完全無人運航の開発につながる。

- FedEx 社の CEO は、近い将来に小型貨物機は無人機になるかも知れないが、社会受容性、安全、運航の柔軟性などの点で当分の間、大型貨物機は訓練された操縦士が必要と思うと述べた。更に、安全性のために先進技術の応用を考え、地上からの支援も検討している。ADS-B 及び遠隔乗員支援で操縦士の能力を強化する技術が必要と述べていると述べた。
- NASA と Rockwell Collins 社は、「シングルパイロット + 地上副操縦士（遠隔支援）」にて飛行する新技術の可能性を研究する。この概念は既に長年検討されてきたが、NASA が取り上げたことで実現性が増してきた。

コメント；

- 二人操縦士の搭乗を義務付けられている機体では、二人の操縦士が役割を分割して適正なワークロードとしていること及び相乗効果により飛行安全が確保されている。従って、一人の操縦士が全役割を負うことになった場合、この相乗効果分が無くなることから、このコンセプトの実現はかなり困難である。「一人（飛行）＋一人（地上）」の方式も本質的に同様である。
これらの研究は、パイロット支援システムの開発として、安全余裕を大きくすることに貢献するので、この視点から、今後も情報収集に努める。
- 無人化については、監視、調査（位置確定等）、貨物輸送等ペイロードが人でない機体のみを対象とせざるを得ないと考えられる。

(b) 人間－機械系

- 自動化の危険
自動化が増えても人為的ミスは減らず、航空事故の最大の原因になり続けている。今では過去数 10 年間に自動化の行き過ぎによるリスクが指摘さ

れている。我々が対応してきたことは、計算機が行うことを監視するのに人間を使うことだったが、これは全く逆であった。計算機が我々を監視し、何か間違ったら警報を出す方が優れている。

- 近代的自動システムの問題点

2013年6月のAsiana航空214便B777-200ERのSan Francisco空港での事故に関する答申でNTSBは冒頭に、乗員達は不十分な訓練で自動システムが如何に影響しあうかを十分理解しないまま過度に依存していたと述べ、更に自動化は航空の安全に貢献しているが、一方で複雑なシステムは設計者が予期しなかった新たな問題を生み出していると付け加えた。ただAsiana航空が、「事故の一因はBoeing社の自動スロットル、自動操縦装置、更には訓練マニュアルの複雑さが理解と直感的行動を妨げていることにあるとのNTSBの指摘に同意する。」と述べたのに対し、Boeing社は、検討するとしたものの、自動システムでの2億飛行時間、5500万回の離着陸に及ぶ安全記録を示し、それが事故の一因とすることに反対した。NTSBはB777の速度維持システムの再設計の必要性を検討すべきだと述べ、飛行中の全ての時点で十分な出力を確保するように自動システムの改修を推奨した。

この事故の特徴は、世界的大空港での良好な視界の下で乗員達は無故障の航空機を安全に飛行させることが出来なかったということである。NTSBの答申は航空輸送業界全体への重要なメッセージを含んでおり、事故は起こるべくして起きたもので、今まで無視してきた業界の怠慢を告発するものである。業界がこれまでに近代的自動システムを用いた近代的航空機を操縦する近代的操縦士を養成してこなかったことが原因である。類似の事故の前例は多く、最も似ているのは2009年2月にトルコ航空のB737-800がアムステルダム空港で最終進入中に失速した事故である。業界はこの操縦士と飛行機の不マッチについて何をすべきか知っているのに、殆どの国や航空会社は必要な変更を行っていない。過去25年、近代的航空機は安全性を向上させてきたが、最近事故が起こる度に、(業界が真剣になりさえすれば修正可能な)「操縦士と飛行機の不マッチ」が原因とされることが増えてきた。

- 操縦士の認識

殆どの操縦士は異常事態を正確に扱える。しかし、高度に複雑で自動化された操縦室では稀に失敗が起きる。FAAと業界の民間航空安全チーム(CAST)はNASAと協力して、より良い操縦室設計法と事故分析で明らかになった人-機械インターフェースでの間違いを避ける訓練法を見出すため

に、数年間の多方面にわたる研究を始めた。背景には CAST の機体状況認識分析チームが 2001 年～2010 年に起きた 18 件の事故及び不具合事件から抽出した 12 項の共通主要課題がある。監督当局は姿勢認識の喪失とエネルギー（位置エネルギー + 運動エネルギー）状況認識の喪失を含む重要分野の更なる研究の必要性を認めた。操縦士達の複雑な誤認識は、操縦士を驚かせた予期せぬ出来事に対する不適切な対応、思い込みに捉われることで起こる。研究者達は実飛行や模擬飛行で操縦士達を観察し、統一的評価指針を見出すことでより良い操縦室の設計手法開発を目指している。

- ・ 脳の監視による操縦士、管制官の活動改善

欧米で巨額の費用を投入し何年も研究してきた「人の脳全体」を解明し模擬しようとする試みは情報技術を根本的に変え、航空分野にも影響を及ぼすのは必然の成り行きである。既に神経技術の進歩により、脳の監視法を操縦士、管制官およびシステム運用者の活動改善に適用して成果を上げている。コンピュータは常に人が介在するという通常ではない使われ方をする。このとき、コンピュータは、人が業務を遂行できなくなるほど多くの情報を供給して、人を圧倒してしまうことがある。ユーザ達がシステムの中で常に重要な役割を続けられるようにシステムが構築されているか、或は彼らをシステムの外に追い出してシステムの破綻に至らしめることはないかに留意する必要がある。人間の限界を考えないシステム設計は多くの問題を惹起し、運航者には訓練コストが高かつき、効率、安全性が低下し、メーカーにとっては認証取得のコストが高くなる。難しい作業では脳の多くの領域が働くが、慣れたよく訓練された作業では必要な領域だけが働く。脳の数十億の神経内で電流が流れて電界を作り、それに伴う電圧を頭蓋骨表面で探知して、脳内で起きていることを推測できる。コンピュータによる触覚や視覚でのフィードバックを与えながらの操縦士訓練で脳の反応を計測すれば、最適なフィードバックを設計することが可能となる。

コメント；

飛行安全性は、“航空機 + 操縦士” (pilot in the loop) の特性から決まってくる。ここで、航空機の自動化が進展し、操縦士がこれに依存し続けることで操縦スキルが衰え、緊急のときに適正な対応をとれなくなる傾向にある。従って、“航空機（自動化の領域と深度≡X） + 操縦士（スキル≡Y）”の全体システムとして安全性が最大となる様に、Xを決めることが望ましい。このとき、{X} と {Y} 及び {X, Y} と {全体システムの安全性}

の対応関係を実証的に把握しておく必要がある。

但し、自由に放任しておく、技術者・研究者は技術的にできることは実現するとの傾向性があるので、産学官が共同にてガイドラインを設定することが望ましい。

- 人間 vs 機械

Airbus 社と Boeing 社は各々操縦の自動化を取り入れているが、何を最善とするかに関してはコンセプトが異なる。基本的に Airbus 社は自動装置中心であり、Boeing 社は人間が中心である。Airbus 社は人間の能力を利用するよりも操縦士の錯誤排除を優先し、自動装置が操縦士の決定を無視する様になっている。全ての航空機には超えてはならない物理的限界があり、正常な運航ではその飛行限界を超えるべきではないと考えている。Boeing 社は逆に人的錯誤排除よりも操縦士の生理学的・心理学的能力を利用することを優先し、自動装置は操縦士の決定を支援することに用いる。Embry-Riddle 航空大学のヒューマン・ファクタ専門家は、高度に自動化された操縦室での操縦士の行動、特に緊急時の行動について、多くの操縦士から意見を聴取した結果から、Boeing 社の方が優れていると考えている。ただ、双方共に単純なボタン操作で自動装置を解除でき、操縦を操縦士に戻せる。但し Boeing 機では操舵桿に強い力を加えることで自動装置は解除されるので、突然の緊急回避運動等で有効だが、Airbus 機のサイドスティックは力を入れても速く動かしても解除できない。自動操縦装置は自動化の一部でしかない。両社のコンセプトの明らかな差異は FCC (Flight Control Computer) の中にあり、(両社共に FCC 中にソフトで飛行限界を定義して防護しているが) Airbus 社は強固に防護していて、コンピュータ故障時を除き、事情に拘わらず操縦士は限界を超えられない。反対に Boeing 社の設定は緩やかで操縦士は必要なら限界を超えられる。Airbus 社のコンセプトでは自動装置は操縦士よりも状況を熟知しており、殆どの場合で最終決定権限を持っているが、Boeing 社では個々の、固有の運航状況を最も良く評価できる操縦士が最終決定をすべきとしている。

他方、Boeing 機では操舵桿の動きは他の操縦士の操舵桿と同調しているが、Airbus 機のサイドスティックは独立していて、操縦士は他の操縦士の操作を知ることができない。同様に Airbus 機では自動操縦装置の操作もサイドスティックに伝わらないし、自動スロットル制御もスロットル・レバーに反映されない。即ち Airbus の自動装置の透明度を欠いている。Boeing 機の FBW 設計では自動操縦装置や自動スロットルの命令は操舵桿やスロットル・レバーに反映される。また Boeing 機では操舵桿に Airbus 機にはな

い人工操舵力が与えられている。これらのため Boeing 機で操縦士は本能的に機体の動きを認識し、自動装置の透明度が高く、事態の認識に優れている。自動装置が Airbus 機の如く複雑になると透明度が減り、分析的決断が要求され、人の機能は低下して混乱を招き易い。

- Boeing 社の自律飛行の研究

Boeing 社は今後 2 年間で、旅客、貨物の輸送にて操縦士 1 名又は無人による運航が安全性も含めて現行運航システムに完全に包含され得るか否かの研究の一部として、自律民間機の飛行試験を計画している。既に Moses Lake で改修機により自律タクシーを試験中で、間もなくシミュレータによる自律飛行アルゴリズムが評価される。2018 年には Cessna Caravan 改修機による飛行試験、また試験の一部として 2019 年には B787 エコ実証機によるエンジン始動、プッシュバック、タクシー、地上旋回と離陸滑走の自律地上運航試験が計画されている。これは最近の空・海・陸での自律機の研究を利用しようとするもので、自律自動車の話題が多い中で Boeing 社の技術ベースは Phantom Work が製造した自律潜水艦や無人機 Scan Eagle の経験による。他にも DARPA の Aircrew Labor In-Cockpit Autonomous System (ALIAS=自律システム下の操縦室における乗員業務) 計画で自律運航が現用機の乗員業務を減らし、安全性が向上することを示している。次は自律システムを改良・拡張し固定翼と回転翼双方に装備可能として認証を目指す。Boeing 社の研究の目的は操縦室を無人化とすることはなく、自律システムが安全性も含めて現行運航システムに完全に対応しうるかを確認することである。問題は旅客が年平均 4.8%で増大するのに伴って必要となる「20 年間で 150 万名の操縦士」の訓練設備が不足することが出発点である。従来とは異なり、軍関連からの操縦士供給では間に合わなくなってきた。米国だけで年間 40,000 名もの死者を出す自動車産業と殆ど死者ゼロの航空機産業とは自律運転の意味が全く異なる。

- (c) 操縦安全機器

2011 年パリエアショーにて、Rockwell Collins 社等の機器メーカーが社有機について下記に示す様な最新安全機器を紹介した。

- 地図表示システム
- 客室与圧喪失時に機体を自動的に低空に誘導するシステム
- 使用する滑走路の間違い／衝突回避の警告を他機と送受信する機器
- パイロットに問題が起きた場合に、機体を水平飛行に戻す為のパニック

回避用ボタン

(d) 無人機による機体点検

LCC の EasyJet 航空は Bristol 大学ロボット研究室と協力して、機体損傷の目視点検に代えて小型無人機群を用いる実証を計画している。厳しい落雷で 100 ヶ所以上を損傷した A319（目視点検に二日を要した）に対し、ハンガー内で小型 4 発ヘリを用いて機体表皮を高分解能ビデオで撮影することから始めるが、長期的にはレーザによる 3 次元マップを自動的に理想的なコンピュータ・モデルと比較して損傷を評価することを目指す。

(3) 故意の墜落に対する対策

Germanwing 機の墜落事故（2015 年 3 月 24 日、副操縦士の故意による墜落事故）の後、緊急時にコンピュータに旅客機を操縦させる可能性が論じられている。有力な技術は存在するが、全権を委ねられるコンピュータの実現には未だ時間が掛かる。限界はあるが、例えば F16 に採用されている衝突回避技術が一つの解答になり得る革新技术と考えられる。NASA の技術者は衝突回避ソフトの改良を始めたが、まだ地面に衝突しそうな危険な接近と空港で正常に進入している時を区別して有効な回避運動を取るよう自動操縦装置を再設計することができていない。できたとしても、それが問題を解決するよりも他の多くの問題を惹起しないと FAA に証明するには何年もかかるだろうし、悪意のある操縦士が飛行機を墜落させるには燃料を捨てたり遮断したりと他にも種々の方法がある。技術だけで回避することは不可能である。一方で地上の操縦者が遠隔操縦することも考えられるが、これも通信機能を破壊されたりハッキングされる可能性がある（次の（4）項を参照のこと）。Germanwing 事件以前から NASA は、何十億ドルの経費節減を目指して、単一操縦士と地上支援での運航を研究してきた。故意の墜落は防止可能だが、2001 年 9 月～2013 年 12 月の間で世界中の無人軍用機は 400 回墜落しており、その 1/4 は通信機能喪失である。当面の次善策は操縦室を常に 2 乗員とすることであろう。FAA は既に要求していたが、Air Canada、Air Berlin、或いは Norwegian は事件後に運航規程を改定し、2 乗員操縦室で 1 名が離席する時は戻るまで他の乗員または客室乗務員が入らねばならないとしている。

(4) 旅客機のハック

あるサイバー安全保障研究者は商用機内通信網を“ハック”して、飛行中のエンジン推力増加に成功したと述べた。彼はデンバー～シカゴ間の B737-800 の乗客となり、ラップトップ・コンピュータと座席下の IFE 機器とを特殊電線で繋ぎ、エンジン指示計と乗員警報システムを操作し、その痕跡は IFE から確認され

た。

(5) 内側から透明に見える胴体

Tecnicon Design 社 (仏) は Ixion と名付けた透明な胴体概念を創出した。外部の高分解能カメラによる映像を胴体円筒内面の柔軟ディスプレイに投影して、機体内部から胴体が透けて外部が見えるようにする。このディスプレイはビデオ会議などにも使用できる。

(6) 今後のチャレンジテーマ

NASA は 2014 年の航空研究再構築において、次の 20~40 年の戦略的挑戦に焦点を絞り、以下の 6 計画を推進することとした。これらには 2015 年 10 月から年間 \$1.5~2M を使い、実施期間は 18~30 か月である。①電気推進機の重量軽減のために機体構造を電池とする、②自律無人機のための信頼できる“Pilot in Box”の開発、③飛行中に形状変更可能な柔軟軽量複合材構造の製造、④電気推進のための自己修復絶縁機能を有する高電圧・可変周波数の駆動と動力配分、⑤雛鳥のように飛行を学べるツールの開発、⑥航空機の老化を予測する“Digital Twin”(実機を模擬した数値モデル)の開発。

(7) 解決すべき 5 つの課題

2030 年代中期以降に投資すべき課題は以下の通りである。

○“Cleaner”; A320neo (2016 年) は A320 (1988 年) より燃費 15%減、2020 年には 20%減が期待されているが、20 年で 15~20%減では不十分である。欧州では 2050 年までに 2000 年の排出の 75%減を目標にしている。従来は主にエンジンの高バイパス比化に頼ってきたが、それも P&W の GTF 開発には 20 年、\$10B を要し容易ではなかった。今後は空力抵抗削減、軽量構造、高効率エンジン、システムの電化、運航の円滑化、未来型の機体形態、エンジン等、広い分野での努力が必要になる。NASA では Tube & Wing 形態でも、超高バイパスあるいは GTF エンジンを Gull 翼または翼上に搭載し、柔軟な高アスペクト比翼に能動フラッタ制御、自然および複合層流制御などを適用すれば、2030 年代には CO2 削減 60%は可能だが、それ以上は HWB (Hybrid Wing Body)、TBW (Truss Braced Wing)、揚力分担胴、埋め込みエンジンによる境界層吸い込み等が必要とされている。電気推進は 2 席機から始まったが 2030 年には 100 席機以下の複合電気推進が可能とみられるが、それ以上ではエンジンと機体を統合した分散配置推進などを考える必要がある。最終的には化石燃料離れが必要で、人造ケロシンが液体燃料の延命を図れるとしても、CO2 排出を削減し続けるには電池を航空用に進歩させるか他の高密度エネルギー貯蔵手段が必要になる。

○ “Quieter”；騒音のために空港の新設・拡張は難しく、ヘリ・ポートを市街地に維持するのも難しくなっている。今後の超音速機、無人機、エアタクシーなどの導入でも騒音が問題になる。従来はエンジンの高バイパス比化が燃費も騒音も下げてきたが、限界に近付いた。更なる高バイパス比化はナセルのないオープンロータになる。NASA の予測では T&W 形態で次の 10～15 年に StageIV (-20～30dB：累積) のクリアは可能であるが、騒音を空港内に限定するには-40～50dB が必要で、これには従来とは異なる機体形態でエンジン騒音を地上から遮蔽し、脚やフラップ/スラットにも騒音緩和策が必要になる。NASA の研究では、T&W 形態で超高バイパス・エンジンを後部胴体側面；“Mid-Fuselage” に搭載し、地上へのエンジン騒音を主翼と胴体で遮蔽することで-30～40dB にできるが、-40～50dB とするには HWB 形態でエンジンを背面に搭載する必要がある。

○ “Faster”；NASA は 80～100 席機のソニックブームを模擬できる X-Plane を設計中で、巡航速度は $M=1.6\sim 1.8$ であるが燃費は Concorde の 1/3 でソニックブームは 105PNLdB から 75PNLdB に減じることができるとして、2019 年から地上住民の反応データを収集する飛行実証試験を始める。Aerion 社の機体は 12 席、 $M=1.5$ であり、Airbus 社の支援で 2016 年中にローンチ、2023 年就航予定で、Fractional Ownership 会社の FlexJet 社から受注している。Boom Technology 社の機体は 40 席、 $M=2.2$ で、2017 年末までに実証飛行試験を行う。亜音速機のビジネスクラスと同等の運賃としていて、Virgin Galactic 社から受注している。共に海上のみ超音速飛行で、陸上では亜音速飛行とする。

○ “Closer”；世界の多くの都市は地上輸送インフラを超えて膨張し、道路や鉄道の拡張は極めて高価となり、空飛ぶ自動車、個人航空機或はエアタクシーなどと呼ばれる第 3 の都市交通機関を必要としている。但しこれらには安全、認証基準、運航費、簡便な利用法、空域統合、騒音、排気等の面でまだ障害は高い。そこで、無人(操縦士なし)の自律システムで電気推進を組合わせたシステムの可能性が高いが、市街地での VTOL UAS による宅配便で経験を積むことが手掛かりになると予想される。

○ “Cheaper”；格段の進歩を狙った B787 の開発は予想より非常に複雑で極めて高くなった。もっと効率良く安価に開発されるべきである。統合設計ツールの進歩や計算機による分析/最適化などが開発時間を短縮しコストを下げてきたが、一方で材料から製造法までの進歩が技術者の仕事を複雑にしている。3D 印刷は従来設計も製造も難しかった部品の製作を可能にしている。Airbus 社も Boeing 社も次の計画は前例より高くできないことが分かっている。次期新型狭胴機の登場は 2030 年以降であろうが、それまでには十分な技術進歩が期待される。」

(8) NASA の有人実証試験機 (X-Plane)

○ 米政府は NASA 航空部門が提案する有人実証試験機 (X-Plane) による研究について、10 年間で \$ 10.6 B の予算要求を承認した。もし議会を説得できれば、2017 年は 2016 年の \$ 640 M を 23% 上回る \$ 790 M を使うことができ、2023 年には 20 年ぶりに \$ 1 B を超えて \$ 1.3 B に達して ERA 計画 (2015 年 9 月までの 6 年間に NASA が \$ 400 M、民間が \$ 240 M を投じた) で開発した技術を実証するための有人大型 X-Plane 計画が実行できる。

○ 亜音速機研究

- ・ Lockheed Martin 社が参加する HWB
(軍民双方に適用可能)
- ・ FAA と Aurora 社が参加する D8 (横二重気泡型広胴の旅客機)
(NASA と FAA の CLEEN-2 (Continuous Lower Energy Emission & Noise-2) 研究資金により、これまでに燃費は B737-800 の 71% 減に達するとの見通しを得て、現在は Aurora 社が有人実証機の設計を始めている)
- ・ Boeing 社が参加する BWB
(空軍が次期輸送機に長い航続距離と短距離離着陸性能の双方を要求することに関して、Lockheed 社が提案する HWB に対抗しようとするもの)
- ・ Boeing 社参加の TBW (Truss Braced Wing = 支持翼)
等

○ 超音速機研究

大型実証機により低ブーム形状の効果と市民の受容限度を実飛行試験で調査する必要があり、過去数年はこの飛行調査を提案してきた。しかし議会の意向が問題で、最初に恩恵を受けるビジネス機市場は議員の支持が少ない。ただ Airbus 社が Aeron 社と提携したため雇用問題で成功する可能性はある。

(9) トラス支持翼機体

トラス支持により主翼アスペクト比を B747-8 の 8、B787 (複合材) の 11 に対して 19.55 にできて誘導抵抗を低減し、かつ遷音速での造波抵抗、摩擦抵抗の低減で、片持ち翼より 5~10% の燃費削減が可能である。そこではフラッタ防止に要する剛性確保のための重量増が問題であるが、2014 年~2015 年に実施された 15% 縮尺の空力弾性半模型風洞試験の結果で内翼は通常の片持ち翼より剛性が低くてよいことが確認された。また、4.5% 縮尺、翼幅 7.7ft、後退角 12.5° の全機模型によるトラスと主翼の干渉試験も行われ、トラスを翼下面に直接鋭角にピン結合した場合と下面に垂直に立てたパイロンを介した場合について評価され

たが、直接結合の方が僅かに抵抗が低かった。なお結合部近傍の干渉を調べるための圧力計測は極めて難しかった。薄翼の縮尺模型では、トラスには全く孔（静圧孔）をあける余地がないため、PSP(感圧塗料)手法に頼らざるを得なかった。PSPは蛍光分子を含む塗料で酸素濃度を感知し、光を当てると高压では暗くなり、低压では明るく輝く。模型上の静圧孔データは感度を較正するために用いられた。

(10) 複合精密進入の飛行実証

FAAとBoeing社はB737-900ERを用いて2016年8月にSan Francisco空港で、衛星ベース計器着陸システム(GLS=Satellite-based instrument landings)に地上補助システム(GBAS=Ground-based augmentation system)を組合わせた運航性能(RNP=Required Navigation Performance)による複合精密進入について、運行及び空港騒音の観点からの利点を検証する飛行実証試験を行った。このシステムは数値進入経路とGPSに対する修正係数を送信して、Multimode Receiver(MMR)を備えた航空機を設定精密進入経路に沿って飛行させる。

San Francisco空港では離着陸スロットを増すための平行滑走路での同時進入の飛行実証なども行われた。現在はCat-1進入しか認められていないが、FAAは2019年中期までにCat-3進入も利用可能とする計画である。

(11) 窓の技術

有機LEDの進歩にて、将来航空機の窓を全く無くして、客室内壁曲面のスクリーンにパノラマ視界を投影することが考えられる。しかし有機LEDの信頼性は現時点では十分でなく、更に、窓の外を見たいとの乗客の要望は強く、その実現性は不透明である。

この技術に得るためには、PPG社がB787に供給した電気クローム窓の技術からの発展が考えられる。これは物理的ブラインドに替えて、電気クロームの反応を応用して透明板の間に挟んだ電導ジェルを暗くする方式で、旅客や乗員がボタンで明暗を変えられる。(只、現時点ではブラインドのように完全には暗くすることはできていない。)

(12) NASA-New Aviation Horizon計画

NASAはこれまで小型無人技術実証機で研究を続けてきたが、2016年に発表したNAH(New Aviation Horizon)計画では、燃料効率、騒音、汚染排気の改善を目指す亜音速及び超音速の大型有人技術実証機X-planeを試作する。既にMaxwell社の分散配置電気推進技術実証機X-57とLockheed Martin社による小型低ブーム超音速技術実証機QueSSTは初期設計を完了していて、前者は2018年に、後者は2020年に初飛行を計画している。この他に2021年以降に向けて5チーム

から UEST(Ultra Efficient Subsonic Transport=超高効率亜音速機)の有人 X-Plane の提案がある。これらは①MIT の考案で Aurora Flight Science 社が設計する横二重泡型揚力胴体の D8、②Boeing 社が提案する BWB、③TBW(Truss Braced Wing=トラス支持翼機)、④Dzyne 社の BWB リジョナル・ジェット及び⑤Lockheed Martin 社の HWB である。

(13) UTC 社の将来予測

United Technology Corp(UTC)は Goodrich を吸収し、更に Hamilton Sundstrand 社と合併して、従業員 41,000 名を擁し、年間売上高\$15B (60%は国外からの受注)のスーパーサプライアになった。同社の社長によると、「今後の航空宇宙の大きな技術傾向は更なる電化と智能化である。自動車では 20 年前に Toyota Prius が複合電化によって 12sec で 60mph まで加速したが、現在では全電化の Tesla Model-S が 2sec でそれを実現している。智能化も進み平行駐車や公道での手放し走行もできる。車のセンサーの数や知能化は過去 20 年間で幾何級数的に増大した。同じことが航空機でも実現されるであろう。それは軽飛行機、小型機、商用機へと進展していく。そこでは、発電、配電、交流から直流への変換及び蓄電の 4 要素が重要である。また、数値革命も大きな可能性を持っている。Big data によりメーカーは航空機全体を最適化し、航空会社は整備能力や天気予報を考慮しながら運航全体を予知的に最適化できる。我々は世界中に 50 の MRO 拠点をもっているが、補用品の流れを最適化して当日又は次の日に顧客に届けることを可能とする。」とのこと。

(14) Airbus 社の将来予測

Airbus 社の技術担当役員によると、「現在売上高の 2/3 は大型旅客機であるが、VTOL の分野で革新と新技術が期待でき、それは旅客機にも波及するだろう。電気 VTOL (eVTOL)は電池、モータ及び電力などの電気技術の集約であり、それに自律飛行、炭素繊維複合材による低コスト大量生産などで実現されるが、いずれの技術も自動車産業で進展している。ヘリコプターの最重要要素はギアボックスであるが、これが電気分散推進の新形態になる。ギアボックスは製造も難しいが、その能力は eVTOL では利点にも新規参入者の障害にもならない。電池のみでは長距離飛行はできないが、市街地での移動に有効である。ヘリコプターはコストが高く騒音が大きくて普及しなかったが、eVTOL はこれを解決して、市街地での 3 次元輸送を可能とする。市街地、住民、規制当局の受け入れに疑問はあるが開発の価値はある。この成功については完全には保証できないが、失敗した場合でも技術は他に適用可能であり、一方、成功すれば巨大な成果を齎す。Airbus 社では Silicon Valley の A3 支社が今年中に 1 席の電動ティルトウ

イング機 Vahana の自律飛行を目指しており、ドイツで4席の4電動ダクトファンによる CityAirbus が2018年末までに飛行する。固定翼では30KWのE-Fan 1.0に続き2MW級の双発電気実証機E-Fan Xを計画しており、将来の20~30MW級の細胴機を目指している。複合推進は全電気に比べると排気汚染は少ないが、多くの小さなモータによる分散推進は空力形状を改善し重量と抵抗を減らす。吹き出しで揚力を増して翼を小さく、推力の差動による制御で方向舵を小さく、境界層吸入で燃費を抑えることができる。推力とシステムの電化で種々の形態が考えられ、T&W形態である必要はない。電化の次の課題は設計、製造における数値化である。即ち、数値モデルにより設計要求への適合度を検証しつつ、設計サイクルを短時間に繰返して最適化し、製造面では製造上の制約を設計モデルに反映する。例えば、熱可塑複合材で制約が緩和されれば、その最も製造し易い構造が設計される。

(15) Big Data の分析

Airbus 社は、Palantir Technologies 社と提携して Big Data を共有し、機体の信頼性、生産工程の改善を目指している。

Big Data の分析 に関して Airbus 社のこれまでの成果及び見解は以下の通り。

・数ヶ月にて、ある構成品の耐久性に関する理解が深まる事を実証した。また新たに利用可能となったデータ処理方法により、数年内に操縦室の革新をもたらすかもしれない。

・分析によりデータを情報に変えることができる。航空業界のデータを一か所に集めた次の段階はそれらを如何に統合するかである。

-データは必ずしも関連付けられていないプログラム・ソフトから抽出されてくる。Palantir 社と共同で遂行しているの Skywise 計画の最初の目標であった「航空会社からの全運航データの関連付け」は1~3日で可能になった。

-有効な分析結果を得る為に多くの参加者からデータを集めるが、一方で参加者の間でデータの秘密保持の要求がある。各データは秘密の程度によって識別され、参加者の資格によりデータの一部または全部を見られる。

-取扱い難い集積とならぬよう、データは注意深く選別される必要がある。

・天候を含むデータを閲覧した Liebherr 社は、エンジン・ブリード・バルブの運航不具合や早期交換の実績を分析して、雷雨が部品の老化を加速する事を見つけ新たな整備基準を設定した。これで部品を取り外さずに故障信号の間違いを判断する事が可能となり、整備コストや運航休止時間を削減できた。またこの計画は広範囲のデータの全般的な分析で、搭載機器の運航中の動作を把握することができることを実証した。また EasyJet 社は「機体の予定外休止」を大幅に減少させている。生産面ではサプライチェーンでの安定生産の確保

に役立ち、早めの対策を必要とする場合の兆候を見出した。また繰返される部品欠如の基本的原因の分析を可能にし、更に、組立現場への部品到着時期の予測も可能となった。

1.9 数値模擬の発展

(1) CFD ツール

CFD の更なる能力開発のために“克服すべき問題点”を指摘した NASA への報告書では、「CFD は航空機空力設計を根本的に変えたが、過去 10 年間は停滞し、高性能計算技術のパラダイム・シフトに追従できていない」と述べられている。演算法の開発が滞り、スーパーコンピュータの使用が限定されて、CFD は狭い範囲の設計ツールにすぎなくなっている。最近の CFD は、通常のハードウェアにのみ適用可能で、多くの経験がある問題にのみ信頼性がある。スーパーコンピュータはパラダイム・シフトの最先端にあつて、現在の CFD のアルゴリズムとソフトウェアの再構築が必要な状況である。Exascale への移行は現在の最速計算機の 1,000 倍であるが、運用方法が基本的に不変であれば莫大な電力を必要とする。今日、最速スーパーコンピュータは中国の天河 2 号で、計算速度は 33.9 petaflops であるが、2030 年までに最先端高性能計算は 30 exaflops に達し、機体全周の乱流模擬、ターボファンの非定常作動、弾性機体の多目的最適化などに十分な能力を有する。しかし現最速計算機は 2gigaflops 毎に 1watt の電力を消費する。天河 2 号は全速計算に 18 megawatt を必要とするが、exascale では最小で 500 megawatt、通常は 1~2 gigawatt が必要となる。NASA Ames の 40×80 ft 風洞は 101 megawatt で年間費用は\$300~400 M であるので、何らかの基本的変更が必要である。1,000 倍の計算力が必要でも、現在の petascale 計算機と同等の 20 megawatt 以内に抑えねばならない。

(2) 数値モデルによる機体健全性管理

2035 年頃には顧客は新製機と共に、当該機体、エンジン及び各種系統の数値モデルを受領することになる。設計、開発、試験及び生産、更には製造中の欠陥に至るまでの情報を含む数値モデルが運用寿命の尽きるまで機体に付随する。飛行状況を正確に反映しながら、模擬した数値モデルを実機データと比較して不適合箇所を識別し、必要な整備を知らせ、残存寿命を予測する。“数値化された航空機”はモデルに基づく擬似試作と飛行試験による設計から模擬認証に至るまで、数値ツールの能力を新たな水準に押し上げるものである。しかしその実現には空力の CFD や構造の FEM などの設計ツールを発展させ、統合するのに、政府や業界による多額の投資が必要である。計算工学は過去 50 年長足の進歩を遂げたが、機体、エンジンを完全に数値模擬するには、ソフトの更なる開発が必要である。

米 NRC は 3 月の“2030 CFD ヴィジョン”において、飛行限界内の全てで完全な機体モデル化を達成するには、模擬による分析や設計技術の更なる進歩が必要であるとしている。Boeing 社の技術者によれば、1980 年末～1990 年初には CFD に多大の投資が行われ格段に進歩したが、その後の 20 年はその検証に費やされて停滞している。Stanford 大学の教授は、「計算能力は 7 年で 100 倍になるが、最近必要な風洞試験回数は減っていない。ソフトの進歩が停滞している。」と指摘している。今では CFD 無しでは機体もエンジンも設計できないが、複雑な課題の計算結果が常には正しいとはいえず、現実的な解であるか否かの解釈が問題になる。なお数値模擬は技術の蓄積にも重要である。今日の設計サイクルは 5～10 年であり、技術者は会社生活で 2～3 回経験できれば幸運である。如何に経験を積み上げ、蓄積するか。ここにも数値模擬が役立つ場所がある。

Airbus 社の予知整備方式

Airbus 社は予知整備手法として、二つの手法を研究している。第一の手法は、2016 年以来 Delta 航空と共同で研究してきた PRM (Prognostics and Risk Management) であり、航空機に搭載した監視システムから飛行中に特定のパラメータを収集し、ACARS で地上に送りアルゴリズムによりシステムの劣化を計算・探知するものである。40 機の A330 のバルブ、乗員酸素システム及び熱交換器の 3 部品を監視する PRM を用いて年間 55 万ドルを節減した。第二の手法は、EasyJet との共同研究によるもので、Airbus 社のクラウドに集積された種々のデータに運航者の経験に基づくアルゴリズムを適用して故障を予知する。以上二つを結合すれば整備費を 5~10%節減できると考えている。

(3) コンピュータ・モデルによる合金の改良

米軽量材料製造改革研究所にて構成された LIFT (Lightweight Innovation for Tomorrow) チームは企業、大学と共同にて、コンピュータ・モデルによる①Ti 合金および②Al-Li 合金の性能予測の研究を始めた。

- ① GE 社と Ohio 州立大は、エンジンの Ti 部品の材料開発、部品設計及び製造の時間とコストを半減させるコンピュータ・ツールの開発計画を率いている。Ti は高価であるにも拘わらず、エンジンの重要部品の設計を検証するために多くの試験部品を作っては壊さねばならない。コンピュータ・モデルは新設計の材料と試験コストおよびリード・タイムを減らす。最も興味があるのは、固相溶接界面に形成される大きく変形した微細構造内の耐疲労および衝撃荷重性能を予測する計算法の開発である。
- ② UTRC 社はタービン・エンジンの Al-Li 部品の製造工程における材質の変化をモデル化して模擬予測するツールの開発を率いている。これらの最新の合金

は種々の分野で大きく改善されているが、原子構造から最終部品まで多くの段階でその性能を予測する統合されたコンピュータ・モデルを必要としている。Al-Li 合金は木材と似た微細構造を有していて、曲げる方向で異なる振舞をするため、最終微細構造を予測するために結晶変形モデルを開発する。このモデルにて部品を構成した時の合金の機械的性質を推定する。

ここで、Boeing 社が Ti 研究の、Lockheed Martin 社が Al-Li 合金研究のパートナーである。LIFT は製造改革のための米国立ネットワークの一つで、他には 3D 印刷、複合材、数値設計、光学、電力制御素子等に関する研究がある。

(4) 量子計算

Airbus 社は、2019 年に 1 年を費やして、量子計算の専門家から、計算流体力学、翼桁最適設計等の重要な問題に適用する量子計算技術活用手法の提案を公募している。Airbus 社では、「我々の最も難しく複雑な問題を解決することで、新たに利用可能な計算能力を試し、評価する貴重な機会を提供し、この技術の更なる合理化と進歩を促す。量子計算は現在 航空機設計で使われている高性能計算ツールを代替し、航空機の設計、製造、飛行試験に関する常識を一変させる可能性がある」と述べており、以下の 5 つの課題が提示された。

- ・最近、短距離路線が増えてきており、上昇及び下降中の燃料消費最適化、即ち時間短縮と燃料消費の相対的コストの最適化問題を解く革新的方法。
- ・精密な計算流体力学の計算には相当の時間を要するが、量子計算アルゴリズム又は量子計算と通常計算の複合化で、更なる計算時間の短縮を可能にする方法。
- ・空力問題での偏微分方程式の解法には複雑な数値計算法を含み計算コストが高い。最近では連立方程式を解くためにディープラーニング・アルゴリズムを用いた神経回路網が開発された。そこで量子計算によりこの手法を更に強化する方法。
- ・通常計算では多目的最適化設計は難しいが、量子計算は異なる要素を同時に評価して広い設計空間を探索できる。そこで主翼桁構造の強度を保ちながら重量を最小化する翼桁重量最適化に量子計算を適用する方法。
- ・重心位置及び胴体搭載重量等の運航上の制限の下で、最適搭載形態算出に量子計算を適用する方法。

これらの課題に対する優秀な提案者には、Airbus 社の航空力学専門家との共同作業の機会が与えられる。

2. 新技術適用の候補となり得る将来機

2.1 ジェット旅客機

(1) Airbus 社

A320 の後継として、空力形状、コックピット、材料、エンジン等に革新技術を適用する A320 - X を 2025 年頃に市場投入が予想されている。

その継ぎとして、A320 neo (new engine option) によって 100～200 席クラス市場における競争力を維持するとの方針である。

(a) A320 neo

○ 変更内容

A320 のエンジンを CFM International Leap - 1A

又は、P&W PW1100G に換装。

○ 改修の対象機体

A319 (124 - 156 席)

A320 (150 - 180 席)

A321 (185 - 220 席)

○ 競合機と優位内容

・ B737 MAX

・ Bombardier C-Series (100 - 149 席)

－ 経済効率 : 同等

－ A320 neo の方が、座席数大。航続距離大。

○ Clean Sky 研究の活用

A320 neo の各種システムの改善には A300/310、A320 シリーズ開発で使用した Iron bird を利用しての、more-electric 機に向けた電子/油圧アクチュエータの研究がある。SAID (Single Aisle Incremental Development) は欧州 Clean Sky 計画の下で 2015 年の飛行試験を目指した A320 電気飛行実証機の開発を進めるなかで生まれたもので、高圧直流電力供給、電気 ECS、2 種の主翼電気防水系統、及び新型レーザ着氷検知器が含まれる。

(b) A350

(i) A350-900

- ・ 基本型
- ・ 座席数／航続距離 : 314 席／8,100 n. m
- ・ 競合機 : B787-10 X

(ii) A350-1000

- ・ 長胴型
- ・ 座席数／航続距離 : 350 席／8,400 n. m
- ・ 競合機 : B777-300 ER
- ・ 変更内容
 - － エンジン
Rolls Royce Trent XWB のコア部分を改良し、推力 93,000 Lbs から 97,000 Lbs に増強。
- ・ 航空会社の不満
 - － 中東の高地高温空港にて、離着陸性能が劣る。-900 との間で、エンジン互換性無し。

(iii) A350-800

- ・ 短胴型
- ・ 座席数／航続距離 : 270 席／8,500 n. m

(現時点では不透明)

- ・ JAL が、中長距離路線用の更新機材として Airbus 社の A350 の導入を決定し、A350-900 18 機、A350-1000 13 機からなる確定 31 機、及びオプション 25 機の購入契約を締結している。今後、両社は 2019 年の A350 運航開始を目途に準備し、6 年程度で更新する。
- ・ Airbus 社は A320 neo では短い開発期間で最大の性能改善を得るために推進機関と空力的改善に絞ってきたが 2014 年 10 月からの飛行試験を控えて、次は 2020 年を超えて A320 の競争力を維持するために、アビオニクス、客室、その他のシステム改善に目を向け、SAID 計画或は A320 neo Plus 計画と呼ばれる種々の改善案を検討する。ただ Airbus 社は現在特に具体的な計画があるわけではなく、常に全製品の連続した改善を進めている一環だとしている。2020 年代までの競争力維持のための各種系統、アビオニクス、客室内装などの段階的改善は最終的に 2020 年代末から 2030

年代初にかけての A320 後継機の準備を行うことになる。

- Airbus 社との協力による Hamburg 大学の A320 後継機研究では、地上インフラを変える必要のない高効率の機体を求めて、最適化された通常ジェット機として、126～218 席の 1 通路と 2 通路の “Box Wing” 形態およびターボプロップが検討されてきた。“Box Wing” による抵抗減は翼の重量増で相殺され、運航コストは A320 より 20% 高くなった。一方、ストラット支持の高翼機で T 型尾翼の、層流技術が適用された “Smart Turboprop” の運航コストは 17%、燃料消費は 36% 低くなった。

参考 : A380

Airbus 社は A380 の生産を 2018 年に打ち切る可能性を示した。A380 を購入した航空会社は 2014 年は無く（購入したリース会社はある）、市場動向を見誤った可能性があることを初めて認めた。

(2) Boeing 社

(a) B737 MAX

2025 年頃の運航を目指して先進技術を適用した B737-X の開発を行うこととし、その継ぎとして B737 MAX を位置づけている。

- 変更内容
B737 NG のエンジンを CFM International Leap-1B に換装。
 - * 現計画では、ファン直径は 69.4 inch。地上とのクリアランス確保のため、前脚柱を 4.5 inch 長くする予定。
- 改修の対象機体
B737-700/800/900 のファミリーに対応して、B737-7/8/9 とする。
- 競合機と優位内容
A320, A320 neo
 - A320 より燃料消費率向上 16%
 - A320 neo より燃料消費率向上 4%
- 新技術実証計画
B737-800 改修機を使って、以下の新技術を検証する予定。
 - － Adaptive Trailing Edge

- － 可変ファンノズル（飛行条件に応じてファンノズル面積の最適化を可能ならしめる。）
- － 燃料電池（ギャレー照明、他）・・・IHI と共同開発
- － Hybrid Laminar Flow Control (B787-9 向け)
- － 航路最適化ソフト (B787-9 向け)

構想検討の結果；

- ・ テールコーンを延長し、水平尾翼付近の胴体を整形する。
- ・ エンジンと地上とのクリアランスを十分に保つ為に、前脚を 8 inch 延長する。
- ・ （重量低減、整備コスト低減の為）スポイラーを FBW にて作動。
- ・ 将来の衛星航法に備えて大型操縦室飛行ディスプレイを採用する。
- ・ 数値制御電気式空調（Honeywell 社）により、旅客数に応じて客室の圧力を制御する方式として、更なる燃料低減を目指す。
- ・ 翼端デバイスは、上下に開いた二股のウイングレットとする。

(b) B787-9 , -10

○ B787-9

変更内容

－ HLFC

尾翼の抵抗低減：垂直尾翼前縁に HLFC 装置を装備。

－ ナセル

自然層流形状

－ 構造

尾翼の桁を外板を Co-Cure

○ B787-10

・ 変更内容

－ B787-9 の胴体長より 15%延長。

－ 座席数 320 席、航続距離 6,800 n.m

－ エンジン GEnx（最大推力 74,000 Lbs）

又は Trent 1000

・ 競合機と優位内容

A350-900 に対して 11%、

A350-1000 に対して 5% 燃費向上。

(c) B777X

- Boeing社はB777Xの金属製胴体の製造において生産レートを上げる為に、先進自動製造方式の試験を開始する。
- Boeing社はロボット組立技術を用いてB777Xの金属胴体の組立法を変える方式に取り組んでいる。この自動化技術は組立の途中で胴体を回転させるのに用いた起重機や円筒形治具を不要にする可能性がある。
- B777Xの設計が進み、顧客の要求に応えるため翼幅が0.61 m (2 ft) 延長されて71.8 mになった。折畳翼端が延長されたもので、地上で折畳まれた状態では従来通りB777-300ERと同じ64.8 mになる。なお翼幅71.8 mはB747-8より3 m長い、A380より8 m短い。また外舷フラップが薄くなり、フラッタ防止の為、剛性を増すため2分割されたので、フラップは外、中、内の3枚になった。中央翼は複合材との比較でアルミ製に変更し、抵抗が大きかったシェブロン・ノズルは、排気をバイパス・ダクト内で外気と機械的に混合してショックセルを消す、軽量・低抵抗のCMC (Ceramic Matrix Composite) 製新型ノズルに交換した。また、最大推力を102,000 Lbsから105,000 Lbsに増すため、ファン径が132 inchから135.5 inchに拡大された。

(3) Bombardier社

(a) CSeriesの開発

- CS100は飛行試験に27か月を費やして2015年末にカナダTCを取得した。この飛行試験ではParker AerospaceのFBWシステム、レジン注入複合材主翼パネル、ConstelliumのAl-Li胴体パネル、P&WのGTF、Rockwell CollinsのProLine Fusion統合アビオ等の新技術を用いた構成品のトラブルが多く発生して、当初予定期間を大幅にオーバーした。なお、この機体は2016年前半にスイス航空にて運航が開始される。

• CSeriesの構造とシステム

-CS300は、胴体に第3世代Al-Liを、主翼にレジン注入炭素繊維複合材等の先進材料を使うことにより、A320neoやB737Maxより重量をかなり軽くすることができた。Al-Li胴体は疲労や腐蝕に強いだけでなく、地上支援機材により損傷を見つけ易く修理し易い。

- (エポキシ・レジン含浸炭素繊維ではなく、) 乾燥繊維による工程で複合材構造を製作した。これは世界初であり、主翼の小骨付き上下外板、前後桁は真空

袋内の型に収納してオートクレーブに入れられ、低圧低温状態にてレジンを注入され、高温高圧状態を2時間続けることによりエポキシが硬化される。

-エンジン抽気で作動する窒素強化空気システムにより、中央及び左右の燃料タンクは霧状燃料の発火を抑えることができる。

-2系統、3チャンネルのコンピュータ管理空気システムにより、エンジン、APU 或は地上支援機材からの圧縮空気が制御され、2系統のエアサイクル機器が操縦室と客室の空調を行う。またこのシステムが 8.8psi 与圧、アビオ冷却、主翼前縁とエンジン空気取入口の防氷及び燃料タンクの防爆を行う。

-APU と外部からの抽気が主エンジンを始動する。

-2チャンネルの火災探知消火システムがエンジン、APU、前後荷物室、レスト・ルーム及び客室の火災と過熱を探知する。

-エンジンと APU が 115V、75KVA の可変周波数交流発電機を駆動し、APU は高度 36,500ft までの全電力と 41,000ft までの一部電力を供給する。全交流電源が失われた時に自動的に作動する RAT が一部の交流を供給する。

-3変圧整流器が交流を 28V 直流に転換する。直流電源が使えない時に Ni・Cd 電池が APU 始動、必須及び緊急の電源及び電動脚ブレーキに用いられる。

-各エンジンも永久磁石発電機を有しており、飛行及びエンジンの制御用の緊急電力を供給する。

-3系統の 3000psi 油圧システムが第1及び第2飛行制御、脚、前輪ステアリング及び推力リバーサ・システムを駆動する。

-Brake by wire システムが電動ブレーキを作動させる。

(b) 耐空性証明用飛行試験の期間短縮

Bombardier 社は、CSeries の耐空性証明取得の最終フェーズである飛行試験の期間短縮を狙って、飛行試験の一部を地上試験で代替する為に、そのツールとして ISTCR (Integrated System Test and Certification Rig) を完成させた。

(4) Embraer 社

(a) 第二世代の E-jet

○2013 年後半に第二世代 E-Jet 開発開始を計画している Embraer 社は、従来より 15%燃費節減と騒音低減が期待できる P&W 社の GTF を搭載し、機体側では、Blended winglet 付きの新主翼、FBW システム、電動タクシングシステムを採用する。76 席の E-175 には MRJ 用 PW1200G と同じファン径 (142 cm) の PW1700G が、90~120 席の E-190/195 には C-Series 用 PW1500G と同じファン径 (185cm) の PW1900G が提案されている。

E-jet の近代化計画は下記の通りである。

- ・ 性能向上として、
 - － PW1700/1700G エンジンの搭載
 - － 新主翼
 - － Honeywell 社製第 2 世代統合電子機器 Primus2 の採用
(現行のディスプレイ 5 枚から 13 inch×10 inch の大型ディスプレイ 4 枚に変更。地図・人工視界の表示, HUD との連携が可能となる。)
 - － NGFMS (次世代飛行管理システム) の利用
Smart Landing システム (Honeywell 社) を含む。
- ・ 燃費低減として、
 - － 余分な抽気を削減して空調, 防氷系統を最適化
 - － APU 吸入口の改良
- ・ 整備費低減として、
 - － 外部照明に長寿命 LED を採用
 - － 過去 10 年の実績に基づき、基本的点検間隔を 6,000 時間から 7,500 時間に延長
 - － 機器を監視して不具合を予測するシステムを導入 (将来)
 - － 目視点検が困難な後方扉周辺に対し疲労と腐食を探知するシステム (Scheduled Structural Health Monitoring System) を装備
- ・ その他
無線機上娯楽システム, 客室の頭上収納エリアを拡大

○現用 E-jet の空力的改善を進めており、特に E-175 には B787 の外翼に似せて浅い角度で延長し、殆ど翼と一体化した長いウイングレットが装備される。機種共通の改善点は、水平尾翼と尾胴の間隙縮小、テールコーン、客室扉の雨樋、前脚フェアリングおよび空調用ラムエア扉の形状改善等である。これにより E-175 の燃費改善率は 5% となって競合機 CRJ-900 より 4% 優るが、他の 3 機種 E-170/190/195 の改善量は 1~2% である。これはエンジンが換装される E-jet E2 の市場投入が E-190/195/175 の順に 2018 年、2019 年、2020 年であることによる。

○E190-E2 の TC 飛行試験

市場投入は E190-E2 が 2018 年、E195-E2 が 2019 年、PW1700G を搭載する E175-E2 は 2020 年の予定である。

Embraer 社として、リジョナルジェット機に初めて Full-FBW を適用するが、これまでに、ビジネスジェット機クラスでは Legacy500/450 に、軍用輸送機では KC-390 において経験がある。

主翼は更新されて GTF の PW1900G を搭載している。

E190-E2 はエンジン換装だけでなく、新設計の翼、小型化した尾翼、脚・システムの改善などで 75%は新部品である。それにも拘らず成熟度には自信があり、初飛行の 45 日後には Farnborough に姿を現した。2000 時間が目標の飛行試験を始めて 3 ヶ月で既に 160 時間に達した。過去の経験だけでなく、徹底した地上試験の実施が役立っている。

燃費は旧型式より 16%改善するが、11%はエンジン、3.5%は空力、1.5%は第 4 世代 FBW による。水平尾翼は E-190/195 の 280ft² から 250ft² に縮小された。A320neo ではエンジン・スタートに時間を要する問題があるが、A320neo のコア・マウントに対し E190-E2 ではファン・マウントなので 15~30 秒を要するだけで問題ではない。

E190-E2 (106 席) の航続距離は、E190 (106 席) より 400n. m 延びて 2800n. m になる。

(b) 将来機計画

2025 年以降の市場投入を狙って下記の構想にて、新規の狭胴機体を開発すると発表している。

- ① 高アスペクト比の翼を採用する。
- ② エンジンの両側に尾翼を配置する。(これにより騒音を遮断)

高アスペクト比翼について、各種翼端デバイス、フラッタ特性の研究を進めており、TsAGI で風洞試験を終了した様である。

高アスペクト比翼の実機例はこれまで U-2 機等に限られていたが、軽量・高強度の材料開発により、2025 年頃には旅客機においても実現可能であると見られている。なお、Bombardier C-Series に対抗する機体を開発する計画はない。

(5) ロシアメーカー

(a) Irkut 社 Yakovlev 設計局

- 150~212 席クラスのジェット旅客機 MC-21 (-200、-300、-400 の 3 クラス) を開発中である。
 - ・ 構造材料 : 複合材の適用率 ; 40%
 - ・ エンジン : Aviavigate 社 (ロシア) 製 PD-14
又は PW1000G (geared turbofan)
 - ・ 競合機 : A320、B737

- ・ 運航費 : 12~15%低減
- ・ 初飛行 : 2014 年末
- ・ 運航開始 : 2017 年

○ MC-21 は UTC Aerospace Systems の子会社 Ratier-Figeac (フランス) が 20 年以上に亘って開発してきた “Active Sidestick Controller” を大型商用機としては初めて採用する。このコントローラによる FBW 作動システムは商用機操縦室での状況認識を大きく進歩させ、操縦士の操縦が互いに明らかになって素早い修正操縦が可能となり、安全性向上に大きく貢献する。互いに無関係のサイドスティック・コントローラはこれまでに幾つかの事故の原因と疑われてきた。

(b) Sukhoi 社

SSJ100 (Sukhoi Superjet 100) 型機 (78 席、98 席) について、更にストレッチ型 (100~130 席) を開発する予定である。

(c) ツポレフの姉妹企業 : JSC “Russian Avia Consortium” Corp.

Rosavia (ロシア) は、昨年 3 通路の扁平楕円断面の胴体で 300~350 席、航続距離 3,500 km (1,890 n.m) の大型中距離機 の概念を発表した。(これは “Frigate Ecojet” と名付けられて、離発着枠の制限がある大空港からの運航を目標とする) 2018 年~2019 年初飛行、2021 年就航予定としており、開発加速のためにこの 7 月初に “Frigate Ecojet” 社を設立した。今年末に ETW (ミュンヘン) で 2 度目の風洞試験を始めると共に、長さ 14 m の胴体部分供試体による耐圧試験を IMA (ドレスデン) で行う。推力 18~25 t のエンジンが必要であるが、A320 neo 用の GTF PW1100G (35,000 Lbs)、Leap-1A (32,900 Lbs) では小さ過ぎ、RR の Trent1000 (69,200 Lbs) が西欧製エンジンでは最も近い候補となると共に Aviadvigatel (ロシア) の GTF PD-18R、同社の PS-90A20 も候補としている。このクラスの需要の 50%は航続距離 2,500 n.m 以下だが、航空会社は柔軟性を求めて長距離機を好むので、この 10~15 年の需要は 600 機程度であり、250 機販売できれば十分としている。年産 25 機が目標で、生産地として西欧または東欧を検討していて、ロシア内は候補ではない。

(6) 中国商用飛機有限公司

(COMAC : Commercial Aircraft Corporation of China)

(a) C919

- ・ 座席 : 156~163 席
- ・ 詳細設計 : 2012 年末完了予定

- ・ エンジン : CFM International Leap-1C
- ・ 油圧、燃料系統 : Parker Aerospace 社
- ・ APU : Honeywell 社

TC 取得の遅れを回避する為、複合材の適用率を当初計画の 20%から 10%にまで下げている。初飛行は 2015 年第 2 四半期（当初の予定より約 1 年遅れ）となり、TC 取得はその 2 年後の予定である。なお、エンジン（CFM Leap-1C）の TC は 2015 年 6 月に取得する予定である。

(b) ARJ21

中国の Civil Aviation administration of China (CAAC) は、ARJ21-700 型機に対して、2014 年 12 月 30 日、Type Certification を発行した。

(c) 新型機(TBW、BWB)研究

2018 年 4 月に BWB(Blended Wing Body)形態 (縮尺モデル) で飛行試験を実施した。この機体は主翼付根付近の前後縁が大きく張り出した形状で、尾翼は V 字型である。

2018 年 8 月には “V1-plus” と呼ばれる縮尺モデルの TBW(Truss-Braced Wing=支持翼型) 形態にて飛行試験を行った。TBW は低抵抗の薄翼で、誘導抵抗の少ない細長い高アスペクト比翼を軽量で実現することを狙っている。この形態は 1950 年代に Hurel-Dubois (フランス) が、最近では Boeing 社が NASA の委託を受けて試験を行った。“V1-plus” は尾翼と前翼を備え、主翼前方の胴体が長い。主翼に搭載の 2 基のトラクタ・プロペラと H 型尾翼に搭載の 2 基のプッシャ・プロペラは電動である。“V1-plus” は直線翼の亜音速機であるが、NASA と Boeing 社は後退角のある遷音速機 TTBW(Transonic TBW) 形態の風洞試験を実施しており、2019 年以降に飛行試験を計画している。

(7) Rekkof 社 (オランダ)

Rekkof 社は、Fokker100 についてエンジン換装、翼端をウイングレット形状とした Fokker100 改良型 (Fokker100 NG) をブラジルの新工場で製造する予定。

これは Bombardier CS-100 より 1 座席当り 65 kg 軽い。

(8) インド国内の各機関

インド上級委員会が 90 席リジョナルジェット機の開発計画の支持を政府に報告。「6 年以内の初飛行を目指して 2012 年に技術作業を開始するべきである」としている。National Aerospace Laboratory が主導し、Hindustan Aeronautics 社と共

同にて内外パートナーを選定して、設計は官民共同の合弁会社で行う。

- ・ 需要予測 : インド国内 1,000 機 (～2025 年)

- ・ 性能
 - － 座席 : 90 席、70 席
 - － 航続距離 : 2,500 km (90 席)
3,175 km (70 席)
 - － 必要滑走距離 : 1,400 m
- ・ 構造 : 複合材構造
- ・ 操縦 : FBW
- ・ 胴体 : 直径 ; 2.94 m、4 列席
- ・ エンジン : 低エミッションのエンジンを採用する。

(9) ONERA(フランス)

ONERA では機体とエンジンを統合する難問に挑戦している。NOVA (NextGen ONERA Versatile Aircraft) は A320 より 20%燃費向上を目標にしているが、それには超高バイパス比の大きなエンジンを扱わねばならない。バイパス比は 16:1 で A320 neo、B737 Max 用の Leap エンジンより 50%高く、フロントファンは巨大で、そのために抵抗も大きい。また NOVA の胴体は揚力を分担するよう設計されており、この二つを統合する必要がある。第 1 案はエンジンを翼下に搭載し、Gull-Wing 形態にして、脚が非常に長くなるのを避ける、第 2 案はエンジンを後胴に搭載する案であるが抵抗が大きい、第 3 案は高アスペクト比翼で翼端には下向きウイングレットを装備して、V 字型尾翼として後胴にエンジンを搭載する、第 4 案は T 字型尾翼として後胴にエンジンを搭載する。NOVA の揚力胴体は空力効率が 5%高いが、この周囲を流れてエンジンに流入する空気流は速度が不均一でエンジン効率を下げる。そこで、揚力胴体周囲の流れの円滑化、速度を均一化するエンジン空気吸入口および歪曲流でも効率よく作動するブレードを追求している。また翼と胴体の双方が揚力を出すので、各々の揚抗比を計測する方法を探している。胴体周囲を流れる空気流はエンジンに流入するので、通常の風洞試験で抵抗と推力を区別するのは難しい。20%燃費向上内訳は、10%はエンジン設計により、残り 10%は空力形状改善と境界層吸入設計によると推定されている。NOVA は 180 席、航続距離 3,000 n.m のジェット旅客機として設計されているが、これらの技術を採用したターボプロップ機やビジネス機も 2030 年には就航可能と考えられている。

2.2 ビジネスジェット機

(1) Cessna 社

- Citation Latitude ビジネスジェットを開発中であり、2014年3月に飛行試験用の機体をロールアウトし、2015年の市場投入を目指している。
主要公表データは下記の通りである。
乗客数：10人，航続距離：2,500 n.m,
PW306Dを2基搭載，価格：US\$14.9 Mill
- RR社のAE3007エンジンを搭載したCitation Xはこのほど $M = 0.935$ の運航承認を取得して非軍用機で最速の機材となった。Citation Xの初飛行は1990年代中期で、これまでは $M = 0.92$ で運航されてきた。これまでの最速BJはRR社のRB725エンジンを搭載したGulfstream社のG650($M = 0.925$)であった。

(2) Embraer 社

- Legacy500
2012年11月27日に初飛行に成功し、2014年10月10日に量産初号機を引き渡した。
 - 12人乗りビジネスジェット機
 - 航続距離3,000 n.m
 - 巡航マッハ数0.78同機は、Cessna Latitude、Bombardier Learjet 70/75と競合する。
技術上の特徴は下記の通り。
 - 操縦システム：Fly By Wire方式 (Parker Aerospace社製、Embraer社、BAE社も関与)
 - 構造：胴体が複合材製 (Embraer社として初)
- Legacy600/650
開発済みであり、市場投入されている。
 - 12人乗り (ビジネスジェット仕様)，
19~37人乗り (旅客機仕様)
 - 航続距離3,400 n.m
 - 巡航マッハ数0.78同機は、Bombardier Challengerシリーズと競合する。
技術上の特徴は下記の通り。

－ 操縦システム：Fly By Wire 方式

(3) 中国航空工業集团公司 (AVIC: Aviation Industry Corporation of China)

Airshow China 2012 にて China New Generation Business Jet: 「長い航続距離、高速巡航、広い客室を目指した大型ビジネスジェット機」を公表した。

(4) Honda Aircraft Company

Honda jet ではエンジンの翼上搭載にて、後胴からエンジン支持構造を除去して重量軽減と客室容積の拡大を図った。この方式の問題点は翼上空気流の加速により抵抗発散マッハ数を下げることであるが、ホンダは CFD と風洞試験で巡航 L/D が後胴搭載よりも 5% 向上するエンジン搭載場所を見つけた。エンジンは翼より後方にあり、空気取入口からのファン騒音は翼に遮蔽されて静かで、ナセルはパイロンから内側にずれていて地上での作業を容易にしており、複雑に湾曲したパイロンは巡航中の横力発生を抑え、パイロンと胴体間の流れは滑らかで自然層流翼にて低抵抗を実現している。翼上搭載が優れている他の理由は 2025 年頃に出現する大口徑 UHB ターボファンを搭載する場合である。NASA が要求している「2025 年までに燃費 50% 削減」に対し、LM (Lockheed Martin) 社は細長い後退翼と前進翼を翼端で結合した箱型翼で、地上から高い後部の前進翼に UHB エンジンを搭載する形態を提案したが、ファン騒音は遮蔽されていない。

RR 社が LM 社に提案した Ultra Fan は直径 174 inch で、重量、抵抗の面からダクテッド・ファンの限界と思われるが、BPR は直径 102 inch の B777 用 Trent 800 の 6 に対して 5 倍になり、燃費は 22% 改良される。LM 社は米空軍研究所用の輸送機の概念設計にて、通常の後退翼で空気取入口を地上から離し、翼上面への排気流による STOL 性を狙って、UHB エンジンを翼上に搭載する形態を研究している。多くのエンジン搭載位置を CFD で検討し、後縁上部搭載にて $M \times L/D$ が改善されることを確認したことから、UHB エンジン搭載ではホンダ方式が有望である可能性が高い。

(参考) エンジン翼上搭載機の実機例 ; VFW614

長所は下記の通り。

- ・ 離着陸距離の短縮
(最大揚力係数の向上により、失速速度が低くなる故)
- ・ 未整備空港でのエンジンへの異物の侵入の可能性を下げられる。
- ・ 主脚を短くできる。
- ・ 主翼が地上への音を遮断する。

VFW614 の主要データ ;

乗客数	: 40 ~ 44 名
巡航速度	: 700 ~ 720 km/h
航続距離	: 2,010 km
離陸距離	: 6,325 m
エンジン	: RR/SNECMA M45H 2基
初飛行	: 1971年4月

(5) XTI 社 (米国, デンバー)

6 席の VTOL ビジネス機を開発する計画である。この機体の推進は、左右の主翼に装着され上向きから前向きに 90° 変角できる 2 基と、後胴に埋め込まれる 1 基の合計 3 基のダクテッドファンエンジンによる。

2.3 ターボプロップ機

消費燃料が少なく経済性の高いターボプロップ機は、飛行時間の短い近距離区間では依然として需要が高いことから多くの開発計画あり。

(1) ATR 社 (フランス、イタリア)

ATR-600 の後継機として、90 席クラス機を検討中。(今後 20 年間で、1,000 機程度の需要を予測)

- 胴体材料 : B787 の胴体に使用した複合材よりもアルミ合金が適当と結論。
- 複合材の場合、機外の振動、騒音を透過し易い。
- 胴体外板に先進アルミ合金を使用することにより現行より 7% 重量減。
但し、フロアビーム、バルクヘッドは重量削減、耐食性向上の為、複合材とする。
- 製造法 :
Boeing 社と共同で Mandrel wound-carbon fiber production process (円筒形の型に複合材プリプレグを巻いてオートクレーブ処理をして胴体バレルを製造する一体成形手法) を開発。
→ ターボプロップ機に適用。(Boeing 機と競合しない)
- 90 席用エンジン : PW127 の後継。(燃費 15% 以上の改善要)

(2) Bombardier 社

Q400 (70 席) のストレッチタイプ (90 席) について、現時点で市場投入時期は不確定である。但し、同社にこの開発以外の選択肢はない。胴体は相当に細長く、脚長が今のままでは離陸引き起こしが問題である。

ATR72 に対して高速の Q400 が売れないのは燃費が悪いためである。PWC の検討では、98 席で巡航速度 600 kph の機体で、エンジンパワー 4,500~4,850 kW 以上

は不要との結論になっている。

(3) 中国メーカー

(a) 西安航空機

2015年運航開始の70～90席のMA700を開発中である。(2016年初飛行との情報もあり)

MA700は26.5tの機体で、巡航速度650kphが可能な5,000kW(6,700shp)の大出力エンジンを想定している。これは最近SingaporeのChangi空港で低速のATR72がジェット機の円滑な運航を妨げるとして、ATR社の1slotをジェット機の2slot分と数えられたことによる。将来の北京空港の混雑などを想定したもので、高高度空港での運行にも適応できる。

(b) ハルビン航空機

19席のY-12(P&W社製PT-6搭載の双発機)の近代化として、Y-12Fを開発中である。この機体の複合材適用率は7～12%となる予定。

(4) KAI (Korean Aerospace Industries 社)

- ・ 90席クラスターボプロップ機の開発を目指す。(リジョナルジェット機には参入しない。) エンジンはP&W Canada社製を採用する。
- ・ 技術と市場面から海外メーカーの協力が不可欠であるが、自主性重視のため、Q400派生型を主張するBombardier社との協調は成立しなかった。
- ・ この機体は現Q400の巡航速度667kphより更に速い680kphを目指している。

(5) Hindustan (インド)

- ・ HindustanとNALの共同で開発するリジョナル旅客機RTA70は、70席から90席へと大型化する計画で開発費は\$726M、2020年市場投入の予定である。
- ・ この機体の巡航速度は現ATR72の510kphと同等の550kphを目指している。

(6) RAI (インドネシア)

インドネシア航空機製造大手レジオ・アビアシ・インダストリ(RAI)は2014年4月8日、フランスのソフト大手ダッソー・システムズ社と共同で、国内線や近距離地域を結ぶ小型ターボプロップ機「R80」(座席数80席)の開発・製造を行うことで合意したことを明らかにした。ダッソー・システムズが機体設計を担当し、RAIは機体のプラットフォームを製造し、2017年に初飛行を予定している。

(7) 座席数 70 席-140 席クラス機体の開発トレンド

Seat-Mile コストの観点から、機体サイズの大型化の傾向あり。

即ち、

- ・ 125～140 席クラスの機体から 160～180 席クラスに要求が移行しつつある。
(「A319、B737-700」から「A320/A321、B737-800/-900」へ。)
- ・ 110 席以下クラスの機体を製造しているメーカーが、高効率エンジンの採用により、120 席を超えるクラス機体の市場への進出を試みている。
- ・ 70 席クラス機、90 席クラス機は 100 席クラス機に移行しており、70 席クラスのジェット機はターボプロップ機に置き換わっている。

(8) 新型ターボプロップ機

燃料高騰と短距離旅客の増大で 2013 年は 1990 年以降初めて、出荷された 20～99 席機の約半分がターボプロップ機であった。500 n.m 以下の路線では、高高度にて効率よく巡航できるターボファン機より、中高度巡航のターボプロップ機の方が効率が良い。ただターボプロップ機は速度が低いだけでなく、プロペラの騒音、振動で乗客の乗り心地を犠牲にしてきたが、過去長らくプロペラの研究はされてこなかった。Dowty Propeller 社では数年前には利用できなかった CFD により、性能向上だけでなく、ナセルと翼の干渉を研究し、プロペラ全体の配置を再検討している。8 枚のプロペラ翼を円周方向に不均等に配置したり、4 枚ずつを前後にずらすなどで可聴周波数を変えることも研究されている。NASA と Georgia Tech が米防衛省の次世代ヘリ、無人機のロータを共同で開発した CFD 技術は、Dowty、UTC にも供給されており、数年の内に新型ターボプロップ機の出現が期待されている。

2.4 超音速機

(1) 欧州

(a) HiSAC (High Speed Aircraft)

Sukhoi 社 (ロシア)、Alenia 社 (イタリア)、Dassault 社 (フランス) が Environmentally Friendly High-speed Aircraft、HiSAC、Research Project の一環として、SSBJ の研究 (超音速層流翼、カナード翼形状等) を実施している。

(b) TsAGI (ツアギ) / Sukhoi 社

- ・ TsAGI (ロシア中央航空流体力学研究所)、Sukhoi 社がサイレント SSBJ の初期設計を開始した。後胴の上部に 4 発のエンジンを搭載し、2 つの垂直尾翼、先細の主翼を有する形状である。

- ・ エンジンは、ファン騒音削減のために吸入口での吸音材面積が増えるように長いナセルに格納され、その搭載位置は、機体の前部及び垂直尾翼を含む後部が地上への騒音を遮蔽するように、幅広扁平胴体の背面位置である。

この結果、離陸上昇時の主騒音源はエンジン排気になるので、ジェット速度を大きく下げる必要がある。(NASA ではジェット騒音を下げするために、追加のバイパス流路のある “Three-Stream” エンジンを研究している) TsAGI では 2025 年にも試作機 (巡航マッハ数は 1.8) の飛行を計画している。

(c) HyperMach Aerospace 社 (英国)

2011 年の Paris Air Show で発表した機体を更新し、仕様:「航続距離 6,500 km、最大マッハ数 4.5、乗客数:35 人」の Sonic Star Supersonic Business Jet を公表した。

エンジンは 65,000 Lbs 推力の H-Magjet 4400 hybrid turbofan ramjet engine であり、Sonic Blue 社 (米国) が開発中である。

(2) 米国

(a) Gulfstream 社 / NASA

「Gulfstream IV (実機) / 新エンジンナセル / Rolls Royce 製 Tay651」にて、エンジン安定動作に関わる地上試験を実施している。

エンジン諸元

- ・ 巡航マッハ数 : 1.7
- ・ 最大出力 (@離陸) : 15,000 Lbs
- ・ バイパス比 : 3

続いて、Supersonic Business Jet の特許申請用図面を公表した。特徴は、伸縮可能な機首、傾斜胴体、可変形状の主翼、ソニックブームを軽減するエンジン・インレット (Relaxed isentropic inlet: エンジン性能を劣化させずに、ソニックブームも低減する様に inlet を改善) 等である。

(b) Aerion 社

- ・ 超音速ビジネスジェット機 (1.6 M、8~12 席) を提案している Aerion 社は、NASA と共同で実施した飛行試験で主翼が超音速でも大部分で層流を保てる事を確認し、主翼前縁の製造許容誤差を明らかにできたと発表した。一方、去る 5 月に従来の候補エンジンであった P&W 社の JT8D は新た

な空港騒音規制を満たすには改修コストが高いため 18 か月以内に新エンジンを選定するとしていたが、GE 社が Passport 20 エンジンの超音速機用に改修することを検討中と明かした。なお、Aerion 社は機体サイズと航続距離を再検討しているとのことである。

- Aerion 社は従来の低バイパス比 JT8D エンジン双発の SSBJ が新騒音基準に適合できないため再設計を余儀なくされていたが、このほど AS2 と名付けた 3 発機案で、2021 年に TC 取得を目指す新戦略を発表した。航続距離を大西洋横断から太平洋横断へ、パートナーとなる OEM (Original Equipment Manufacturer: 他社ブランド品の製造) に一任ではなく共同で型式証明を取得し、生産を目指すことに転換した。自然層流の主翼は残されているが、胴体は客室が Gulfstream 社の G450 と同等になるよう拡大・延長される。尾部搭載 3 発エンジンは各推力 16,000 Lbs が必要で、選定にはなお数か月を要するが、GE 社が Bombardier 社の Global7000/8000 向けに開発中の Passport エンジンの提案に興味がある。主翼は前縁がチタンの複合材だが、胴体の材料は未定。テーパした胴体でも効率的に製造できるなら複合材にしたいと述べている。また設計終了後は従来のように 1 社の OEM に全てを委ねるのではなく、Aerion 社が認証取得と生産を自ら管理して、複数の OEM に詳細設計、サプライチェーン管理、部材認証を委ねる。また初期概念フェーズまでは Aerion 社が資金を負担し、パートナーには負担を求めないとしている。
- Aerion 社は過去 10 年に \$100M 以上を投じて、New York~London を 4 時間以内で飛行できるビジネス機の基本設計を行っている。価格は \$100M 以上とのこと。超富裕層から 25 万ドルの前渡金で 50 機分の LoI を得ており、今後 20 年で 600 機の需要を予測している。ただ Global 6000 の \$60M に対し高価であり、燃費も悪くて運航費も高いので、「売り」である「プライバシーと時間短縮」の価格に対する価値を疑う人もいる。しかし Gulfstream 社でも $M = 0.925$ で巡航できる \$65M の G650 の人気が高く、引渡しは 2017 年との有様で、超高価格は問題ではないとみている。Boston の Spike Aerospace Inc. では巡航速度 $M = 1.6$ の S-512 を 2018 年に就航させるとしている。この機体は抵抗減のため窓がなく、内装壁の大型スクリーンに外景を投影する。NASA は 2010 年以來、Boeing 社及び Lockheed Martin 社と共同で陸上超音速飛行に必要な低ブーム形状を研究してきたが、実用化は 2025 年以降としている。そこで Aerion 社は巡航速度を海上では $M = 1.6$ 、陸上では亜音速飛行としている。

- Aerion社とAirbus社防衛宇宙部門は小型超音速輸送機開発での協調に合意した。Airbus社は上級技術者をRenoに派遣して、民間機の空力、構造、FBW飛行制御および認証取得に関する専門知識を提供する一方で、Aerion社は超音速機に関するこれまでの膨大な研究成果、固有の設計ツール、特許取得済みの空力形状でAirbus社の高性能機開発を支援する。Aerion社のSSBJ AS2はマッハ1.6、12席、4,750 n.m、最大離陸重量 = 52,200 kgで、2019年初飛行、2021年就航を目指している。超音速飛行が許される領域では航続性能最大の $M = 1.4$ で、超音速飛行禁止の陸上では $M = 0.95$ で、ソニックブームの影響が小さければ超音速飛行が許される陸上では $M = 1.15 \sim 1.20$ で巡航する。2018年から適用になる空港騒音基準 Stage5 / Chapter14 に適合するために、従来のJT8D双発から新エンジン3発とし、離陸時には低騒音化のため最大離陸推力を絞る。機体は軽量複合材構造とし、主翼の90%層流化により抵抗を20%下げる。まずは超音速飛行に適したLBPエンジン開発のためのコア・エンジンを選定し、次いでTier1サプライヤー選定を始める。価格は\$100M以上であり、20年で600機の需要を見込む。
- Aerion社はAS-2に関して、2014年、Airbus社防衛宇宙部門と設計及び型式証明取得に関する協働に合意した。2021年初飛行、2023年就航が目標で、欧州のサプライチェーンで製造した主要部材を、米国の港湾隣接工場で最終組立を行う。Airbus社は複合材胴体構造をアルミに変更することを促すなどで参画度合いを深めているが、実は超音速ビジネス機よりも、その高亜音速 $M = 0.95$ での層流翼技術の方に興味があると見られている。2014年に立案した計画に対して早くも2年遅れとされているが、設計には未だ幾つかの問題がある。その一つは、2014年にICAOが制定した新騒音基準であり、従来の低バイパス比のJT8Dに代わる推力17,000 Lbsクラスの新エンジンが必要になったことである。一方、ICAOとFAAは機体サイズで騒音基準を変えていることから、機体の速度や経済的影響の大きさの観点からも騒音基準に柔軟性を持たせるように陳情している。
- Aerion社はSSBJ AS2の型式証明を2017年末までに申請する予定である。この時期は、FAAが55,000 kg以上の新型機に騒音基準 Stage-5 (=ICAO Chapter-14)を適用する前である。AS2の最大離陸重量は55,000 kg以下(2020年まで Stage-4 が適用される) であるが、計画が進んで重量増となる場合

に備えている。但し申請後5年以内のTC取得が条件である。エンジンについては2候補があるとしているが、いずれも性能と騒音の間で調整を要すると思われる。超音速巡航には推力15,000LbsでBPR=1~2が最適であるが、騒音基準をクリアするためには4以上が必要で航続性能が犠牲になる。
巡航マッハ数：最大巡航マッハ数 M=1.5、ブーム小の巡航マッハ数 M=1.2、
航続距離：長距離巡航:M=1.4で4750n.m、長距離亜音速巡航:M=0.95で5,300n.mである。

開発においてはAirbus社がシステムと構造を支援する。

1機\$120MでFractional OwnershipのFlexjet社が20機発注している。

(c) Boeing社

この10年間、Sonic Cruiserの概念検討が続けられてきており、騒音低減、低ソニックブームを実現する形状について2012年4月に特許を取得した。

特徴は次の通り。

- ・ 主翼前方にカナード付き、主翼はデルタ翼とする。
- ・ エンジンを主翼上面、垂直尾翼間に設置し、更に排気口を可変シェブロンとすることにより空港騒音を低減する。

(d) NASA資金を使った超音速機の研究

(i) NASA

○ N+1(近未来)、N+2(2020~25年)、N+3(2030~35年)の各時点で利用可能な技術による超音速機の研究に加えて、

- ・ LANCET (Lift and Nozzle Change Effect on Tail Shock)
- ・ Quiet spike
- ・ SCAMP (Superboom Caustic Analysis and Measurement Program)
- ・ WSPR (Waveform and Sonicboom Perception and Response)

等のプログラムが進行中である。

更に、2012年に、米空軍とLockheed Martin社が共同研究を行ったX-56A MAD (Multi-utility Aeroelastic Demonstration Program)を引き継ぎ、2012年秋には、FaINT (Farfield Investigation of NO Boom Threshold)にてソニックブームに関わる諸現象を観測した。(このプログラムには、JAXA、他が参画している。F/A-18の超音速飛行によりソニックブームの諸現象について、地上、上空で計測を行い、ソニックブームが地上に到達しない現象、上方に伝播して数100マイル前方の地上で遠雷の様に聞こえる等の現象を観測した。これらの現象は飛行条件、気象の差異に敏感であった。)

NASA では、今後、ソニックブームのレベルを操縦室に表示し、パイロットが速度、経路、形状を変化させてレベルを調整することが可能となる様なシステムの研究及び空港騒音、高高度大気汚染、エンジンの材料／軽量高強度構造、細長い機体の空力弾性等の課題の解決を目指した研究を続ける予定である。

- NASA は 2009 年に Lockheed Martin 社と Boeing 社に別々に低ブーム超音速機の初期設計とその模型風洞試験を委託し、Lockheed 社は 3 発の 100 席機を、Boeing 社は翼上にエンジンを装備した特異な形態の 70 席機を提案して、研究を続けている。NASA の机上解析では、105 PLdB のソニックブームを 75PLdB まで低減可能であるが、2013 年に報告された風洞試験結果においてこれが確認されたことから、次のステップとして、実飛行で検証する X-Plane 計画の承認を求めるといった。重量 300,000 Lbs までの機体のブーム音響特性を模擬できる離陸重量 25,000 Lbs、長さ 100 ft の X-Plane による飛行実証データは 40 年以上前に決められた陸上超音速飛行禁止の規制を覆せる可能性がある。2 月に予算が承認されれば、2017 年迄に詳細設計を行い、2019 年に初飛行が可能となる。

ICAO は CAEP(航空環境保護委員会)の中に超音速機グループを設立し、基準を変更するには代表的な機体の実飛行による市民の反応データ、反応を測定する方法の検証および機体承認手順の確立が必要であるとしている。NASA の二人の科学者、Richard Seabass と Albert George は民間機の陸上超音速飛行が禁止された 1969 年頃までに、機体のサイズおよび形状とソニックブームを関係付ける基本数式を開発していた。2003 年に NASA はその数式を適用して Northrop F-5E の機首形状を改修し衝撃波の圧力上昇緩和を実証したが、機首形状の変更だけでは不十分なことが判明し、低ブーム化のための全機形状最適化に新たな設計ソフトが必要になり、低ブーム形状が抵抗増を招く問題を解決する必要も生じた。他の問題は人間の耳に対する許容度で、F-15A によるフィールド試験と地上の音響室での聴感試験で、70~80 PLdB の目安を得た。これは室内で車の通過音を聞く程度である。これが実現可能と確信したことが、X-Plane の予算要求に繋がっている。Lockheed 社の機体 1044-2 は Concorde と同じ 100 席機で直接比較できるが、航続距離 3,900 n.m より 40%長く離陸重量は 185 ton より 14%軽い。Lockheed 社の設計も Boeing 社の設計も共に低ブームの要求を満たしながら、燃費は NASA の 300%向上要求に対し 250%を達成している。1044-2 は Concorde

の RR 社製 Olympus エンジンの重くて複雑なインレットに対し、緩慢な圧縮と無抽気のインレットを使用し、GE 社が米空軍と研究している可変サイクル・エンジンを採用している。ただ 2021 年以降強化される空港騒音基準に対し更なる努力が必要とされている。

(ii) Lockheed Martin 社/NASA

Lockheed Martin 社は、NASA の N+2 研究で、経済的運航が可能な低ブームの SST の概念設計を実施し、その結果、巡航マッハ数：1.7、航続距離：5,000 n.m (太平洋路線) / 4,000 n.m (大陸横断)、座席数：80 席の仕様を目標にするとの結論を得た。

Lockheed Martin 社の Skunk Work では、超音速ビジネス機と旅客機への道を開く NASA の低ブーム実証機の初期設計を始めた。単発の QueSST (Quiet Supersonic Technology) 機は陸上超音速飛行を実現するために、形態の工夫により衝撃波の強度が住民に受容可能になる様に設計される。その最終目標は 100~120 席超音速旅客機的设计指針を得ることであるが、直接的には近未来のビジネス機開発に適用可能であることである。NASA ではソニック・ブームを住民に迷惑をかけない範囲に下げられれば、2020 年代中期以降に 350~500 機の SSBJ と 500 機以上の SST の需要があると考えている。

現在の航空機では超音速巡航で N 字型衝撃波の形成を防ぐことは不可能で、QueSST の設計では機首、操縦室、エンジン吸気口、主翼、尾翼及び排気口からの衝撃波が空气中を伝播する時に集積しないように設計する。各部位からの衝撃波が別々に地上に届く様にしておくと、穏やかな S 字型波形になる。全長 94ft の QueSST は Concorde の 105PNLdB の N 波より 20 倍静かな 75PNLdB のサイン波となるよう設計される。単発機でありそのエンジンを胴体後方上部に背負うことから吸気口の影響を遮蔽し、またカナード、垂直尾翼端のミニ T 型尾翼及び通常の全可動水平尾翼の揚力面を含む特殊な形態で揚力分布と衝撃波の強度を調整して、地上に届くまで集積を防いでいる。長く伸びた機首と前方カナードで操縦士は視界を得られないので、TV カメラによる外界視認システムを備える。

2017 年に実施する風洞試験により得られるデータは総て業界で共有され、2019 年末に飛行する X-Plane の設計・製作にて、対等の条件で競争できる。2020 年から始まるソニック・ブーム評価試験には、海外の研究機関も参加できる。QueSST が Edward AFB の外で飛行できるようになれば、2021~2023 年にはソニック・ブームの住民への影響を調査する飛行試験を実施する。

(iii) Boeing 社/NASA

N+2、N+3 の資金にて、「低ブーム技術」、「構造、材料、推進、システムの要素技術」、「市場性」を研究中である。低ブーム SSBJ は 2020 年頃実現可能であり、2030 年～2035 年には大型 SST の実現が可能との見直しを得ている。

(iv) Gulfstream 社/NASA

超音速ビジネスジェットのスニックブーム基準策定に向けて研究中である。

(e) Spike 社

開発状況 (2015 年) :

巡航速度 $M = 1.6$ 、最高速度 $M = 1.8$ 、乗客 18 人の超音速ビジネス機 Spike-S512 を開発中である。価格は \$80M で、New York～London を 4 時間未満で飛行できる。(FAA が陸上超音速飛行を禁止していること、Boeing 社、Lockheed Martine 社、NASA が、スニックブーム低減のために超音速機の設計を見直しているが、いまのところ成果は出ていないことから、海上飛行時間を示している) Spike 社には Airbus 社、Bombardier 社、Gulfstream 社出身の技術者がおり、世界初の超音速ビジネス機の製造を目指す数人の企業家や投資家なども加わっている。完成時期は 2018 年末が目標である。

Spike Aerospace 社が、以下の変更を行うことを明らかにした。

- ・ エンジン搭載方式 (即ち後胴背面搭載) を変更する。
- ・ エンジン (JT8D) は 2020 年からの ICAO の騒音規制 Chapter14 を満足しないのでエンジンを換装する。
- ・ V-tail を通常の尾翼形状に変更する。
- ・ 航続距離を 3,500 n.m から 5,000 ~ 6,000 n.m に延長する。

コメント ;

超音速機であるが、主翼形状は Aerion 社、Spike 社共に短形である。(後退角大/小アスペクト比の翼ではない) これは、翼面上のクロスフロー (翼根から翼端方向の流れ) による乱流遷移に伴う抵抗増を避けて、流れの方向を比較的、層流化の容易なコード方向とすることを狙った為であろう。更に、この形状は、ビジネスジェットの使用目的に沿う様 (アクセスの利便性) に良好な離着陸特性をもたらすことにもなる。

→ 超音速流の層流化デバイスに装備技術が適用される。

S-512 の開発動向 (2016 年) :

NASA は X-plane の QueSST (低ブーム超音速実証機) により、ブーム騒音に対する

市民の反応データを収集する予定である。現時点では、受容可能値として 75PLdB を仮設定していることから (Concorde のブーム騒音 106PLdB)、陸上超音速飛行が許されるのは 70PLdB 以下と考えられる。S-512 の初期研究では 75PLdB を目標としたが 70PLdB に改善する自信があるとのことである。なお S-512 は最高巡航速度 $M=1.6$ 、座席数：8~18 席、航続距離は陸上で 4200n.m、海上で 6,200 n.m である。主翼には全幅前縁フラップと多機能後縁フラップを備えている。空力設計は殆ど CFD によっており、CD-Adapco 社の STAR-CCM+ 模擬ソフトを使用し、空力的に興味深い特徴は、巡航条件にて、造波抵抗とソニックブームの低減対策として、前方衝撃波 (bow-shock) を整えるために機首を細くして曲げ、主翼を大後退角として前縁を丸くしていることである。オフデザイン条件では前後縁フラップを作動して空力効率を調整している。ソニックブーム解析では、機体から出る衝撃波とその伝播システムのモデル化に CFD を用いている。

コメント： 当初、直線翼を提案していたが、結局、通常の超音速機並みに大後退角主翼に落ち着いた様である。これは、巡航時のソニックブームを許容値以下とすることを優先したためか。大後退角主翼としたことによる離着陸性能の低下に対しては、全幅前縁フラップと多機能後縁フラップの装備によって対処している様である。

・ S-512 の開発動向 (2017 年)

無人小型実証機を使って、S-512 の低速空力特性を評価する飛行試験を実施している。一方、これと並行して、20,000Lb エンジン搭載の双発機を設計しており、2018 年中期に高速域の試験を、更に 2019 年末までに乗員が搭乗する超音速域の飛行試験を行う。これらの結果を用いて無制限に陸上にて超音速飛行が可能な、22 席、航続距離 6200n.m の S-512 を設計する。2021 年迄に初飛行、2023 年迄に就航を目指す。

(f) Boom Technology 社 (デンバー)

NASA が研究中の低ブーム・低マッハの機体とは異なり、主として海上を $M=2.2$ で飛行する。機体は 45~55 席、三角翼の複合材製であり、エンジンは 3 基搭載で、長さ 170ft、幅 60ft であり、航続距離 4500n.m までの路線で高頻度運航によりコストを下げる。2023 年までの TC 取得を計画しており、2017 年末には最初の 10 機を仮発注した Virgin Galactic 社の製造部門 The Spaceship 社と共同で 1/3 縮尺試験機 XB-1 で飛行試験を始める。XB-1 は長さ 68ft、幅 17ft、総重量 13,500lb であり、エンジンは GE J85-21 (3,500lb) を 3 基搭載し、 $M=2.2$ 巡航にて航続距離 1,000n.m を目指している。

2. 4 A 極超音速機

Boeing社は、今後20~30年での実現を目指して、大西洋を2時間、太平洋を3時間で横断できる巡航速度M=5の旅客機の研究を始めた。最終形態は未定だが、B737より小さいが長距離ビジネス機よりは大きな機材が目標で、Concordeの2.5倍、現用ジェット機の6倍の速度になるM=5で、95,000ftを巡航する。まず、軍民兼用の極超音速実証機を試作して2023年~24年の飛行試験開始を目指す。機体は先進チタン合金で、エンジンはスクラムジェットの必要はなくターボラムジェットとする予定である。また冷却システムにも利用可能なメタン燃料の研究も行われる。メタンは重量当たりの熱量がJet A燃料より高いが体積が大きくなるため、両燃料の併用も検討される。

2. 5 回転翼機

Agusta Westland社が2013パリエアショーにて”Project Zero”ティルトロータ技術実証機を展示した。これは全電気無人ティルトロータ機であり、回転翼機の新技术を実証する様に設計されている。主翼に埋め込まれたティルトロータで垂直上昇及び水平飛行を行い、揚力の大半は固定翼で得られる。なお、同社は2017年を目標にティルトロータAW609を開発中である。

2. 6 Urban Air Mobility (UAM)

○有人又は無人のUrban Air Mobilityは航空業界で最も革新的分野であり、技術的、運航的及び社会的問題をメーカ、運航者及び規制当局が適正に取り組むことにより成熟した市場に発展するであろう。

・推進方式;2023年頃までには短距離路線での小型eVTOL推進に十分な蓄電池技術が発達すると見通して全電気無人機を選択するグループと、短期的には複合電気推進の方が優れていて市街地内より長い距離の運航を目指すグループに分かれる。当初は高価で寿命が短くても、ある程度の期間を経て新しい化学物質を用いて高エネルギー密度電池が出現するか否かが重要なポイントであろう。

・形態;UAM機は主翼の有無で大別される。無翼機は無人マルチコプターの大型版で、巡航での空力効率劣るが低速での短距離飛行には最適である。一方、有翼eVTOLはロータでの垂直飛行から翼での水平飛行に移行するものであり、高速で巡航距離は長い、揚力用と推進力用のモータを必要とするか、又はティルト翼と偏向ダクトを必要とし複雑である。

・安全性;市街地の低空域で1日数千回も飛行するので旅客機と同等の安全性が要求される。特定のeVTOLではエンジンの故障時に(ヘリコプターの様な)オートローテーションや(飛行機の様な)滑空ができない。従って補助電気推進機又は低空低速で利用できる打上落下傘等の利用が考えられる。

・認証;多くのeVTOLは分散配置電気推進から自律飛行制御まで、これまで認証された

ことが無い機能を有しており、これ等の認証基準は未だ存在せず、EASA、FAAにて検討中である。

・騒音;市街地で運航されるため安全性及び環境面で市民に受け入れられることが重要である。電気モータは基本的に静かであり、分散配置電気推進ではファン径が小さく翼端速度が低くダクトは騒音を遮蔽するが、推進系と機体の干渉が騒音源になる可能性がある、

・空域;一つの街の既に確立された ATM 空域外で多くの UAM 機が飛行する。UAM 機の低空飛行を管理する UTM(無人交通管制)システムが企業体から提供されねばならない。

・生産;高密度市街地空輸の実現には、(従来の航空機産業が経験したことのない) 1,000~5,000 機の eVTOL の製造能力を要する。CFRP 製の eVTOL を自動化された高生産レート組立ラインで製造する必要があるが、高性能を求める為に自動化は容易ではない。

・インフラ;エアタクシーは最初は既存のヘリポート等から始まるだろうが、高密度運航にはビル屋上及び屋上駐車場の転用が必要になり、最終的には旅客の乗降、充電、他モードとの連絡が可能な専用離発着設備が必要になる。

・資金;eVTOL 計画は 100 以上あるが生き残るのは数社であろう。Lilium 社は\$90M を、Volocopter 社は\$30M を調達し、JoyAviation 社はトヨタ社、JetBlue 社及び Intel 社が投資し、Google 社の共同設立者 Larry Page は Kitty Hawk 社の Flyer と Cora eVTOL に投資している。

○Airbus 社は eVTOL の Vahana 及び CityAirbus から Skyways 無人機宅配システム及び Voom ヘリコプター予約サービスまでの計画を纏めて UAM 部門を設立した。その UAM 部長は AIAA 学会で、UAM に関する技術は揃っており、基準も整いつつあり、サプライチェーンも OEM の製品開発を支える準備ができているとして、輸送業界にエアタクシー・サービスの検討を促した。2025~27 年にはサービス開始可能で 2032 年には産業規模が \$50B に届く。ただ機材が占めるのは半分以下で、Airbus 社ではその他の運航や交通管理などにも関わっていくと述べた。世界中の巨大都市は成長を続け、そこでの輸送手段は道路、鉄道及び航空から選択しなければならない。Voom サービスは Sao Paulo 及び Mexico city にてヘリコプターで市街空輸が可能な事を実証したが、運航費が高いため限界がある。eVTOL は静かで、安価で、容易にヘリコプターの代替が可能である。最終的に自律無人機とすれば運航コストは極めて低くなり、従来の市街交通を補いその 3~5%を占めてビジネスが成立するまでに 15 年とかからない。大市街の中心地が複数になってくると、今でも可能な飛行距離 20 マイルの全電気機と 150 マイルの複合電気機が必要となろう。1980 年代にソフトウェア会社がハードウェア・メーカーと消費者の間に入ってきて、今では Uber 社等のソフトウェア会社がハードも作り始めた。Airbus 社や Boeing 社も従来の Business-to-Business から Business-to-Consumer に変わる必要がある。

3. 自動車業界から航空機業界への参入について

3.1 航空機技術の特徴—自動車技術との違い

自動車業界から航空機業界に参入する際の分野、技術項目等について検討する際に、両者の技術上の基本的な違いを認識しておくことが重要であるので、これについて以下に纏める。

(1) 安全性／信頼性

航空機の場合、システム故障に対して、「飛行の続行及び着陸」が安全に行えない様な故障の発生確率は extremely improbable (10^{-9} 回以下／飛行時間)であることが要求される。自動車の場合は、システム故障に対して路面上での処置となり、要求される故障発生確率は、航空機の場合程厳しくは無い。

(2) 厳しい環境条件

航空機搭載装備品／システムの環境条件は以下の通りで、自動車の場合より厳しい。

- ・ 温度 : -45 ~ +70 (°C)
- ・ 気圧 : 4.44 ~ 169.73 (kPa-abs)
- ・ 振動 : PSD 0.08 (G^2/Hz)
- ・ 湿度 : (上限) $95 \pm 4\%$
- ・ 衝撃 : 通常運用 6 (G)、耐クラッシュ 20 (G)
- ・ 運用定加速度 : -1.0 ~ + n (G)

$$n = 2.1 + 24,000 / (W + 10,000), \quad W: \text{離陸重量 (Lbs)}$$

(3) 重量軽減

航空機の飛行中の空力抵抗は摩擦抵抗と揚力依存抵抗の和であり、後者は、揚力の増加に対応して大きくなる。(自動車の場合は揚力依存抵抗は殆どゼロ)

例：ある装備品 E の重量が 50 kg 増加すると、航空機の場合、離陸重量は 100~150 kg 程度増加する。(航空機の飛行性能は殆どの場合、重量に比例して劣化する。)

(4) 離陸・着陸フェーズの存在

自動車は、「速度ゼロ——>走行速度——>速度ゼロ」を連続的に状態変化無しに可能であるが、航空機の場合、失速速度までの加速、失速速度以下の減速・停止は地上で行うことになり、離陸・着陸フェーズが存在し、ここで状態変化を起こさざるを得ない。この困難さ故に、航空機の事故の 7 割 (時間比率に換算すると更に深刻になる) はこのフェーズで発生する。

例：離着陸時のパイロットワークロードの軽減、空港騒音の低減の必要性

(5) 操縦者のワークロード

航空機の場合、自動車と比較して、操縦士のワークロードは極めて大きい。即ち、航空機は3次元空間の運動であり、自由度が6（重心速度：3方向、回転：3軸周り）、操縦デバイスは4（縦、横、ペダル、スロットル）であり、自動車の場合より操作が複雑である。また、事故に繋がる要因が多いことから、飛行中、注視すべき情報（計器、周辺の目視、管制・他機との交信）も多い。緊急時には、故障部位を除く残った正常構成品の機能を駆使して飛行を続行し（その場に止まることはできない）、着陸まで安全に操縦しなければならない。

3.2 ニーズと新技術

(1) 社会及び運用者からのニーズ

航空機、自動車に対するニーズは下記の通りで、殆ど同等である。

環境適合性（含：省エネルギー）
安全性、
経済性（含：省エネルギー、定時性、整備性）

(2) 新技術の志向

前 3.1 項にて述べた如く、要求レベルに差異があるが、航空機技術の目指す方向は自動車のそれと殆ど同等である。

即ち、

軽量化、
燃料消費率の向上
電気化、
自動化、
マンマシンインターフェース改善、
高密度運航（航空機）／交通流円滑化（自動車）

3.3 参入分野

自動車業界から航空機業界への参入分野の候補は以下の通りである。

(1) 搭載システムのエネルギー源としての電池

当面は、航空機の数 10 kW クラスの非常用電源／機内分散電源に採用することを狙って、「固体高分子型燃料電池」を使用したシステムを開発する。その後、高効率期待できる「固体電解質型燃料電池」の技術進捗に基づき、数 100 kW

からメガワット・クラスの補助電源又は主電源への採用へと展開していく。

ここで航空機用としての技術課題は以下の通りであり、

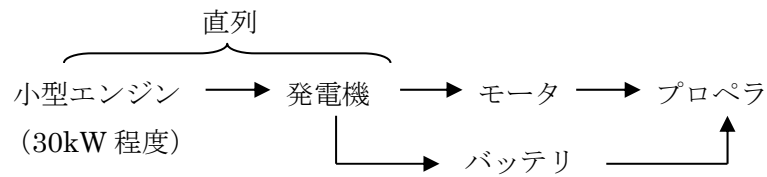
- ・ 小型／軽量化
システムレベルで出力密度 1~3 kW/kg を達成すること。
- ・ 耐運用環境性
厳しい運用条件（加速度，振動，衝撃，温度等）のもとで、短いシステム起動時間及び起動・停止の繰り返しサイクル運転ができる作動信頼性を確保すること。

これらの課題に対して、自動車の燃料電池の開発過程で得られた知見の活用が考えられる。

(2) 電気推進システム

現在、以下の通り、航空機の電気推進としては、全電動方式（電動モータ使用，超電導モータ使用），ハイブリッド方式（直列式，並列式）の2方式が考えられており、パワーにおいて大きくかけ離れているが、自動車電気駆動システムの要素技術及びその開発の過程で得た知見等の適用により、課題解決が期待できる。

- ・ Yuneec 社
2009年6月、e430 がリチウムバッテリー／電動モータ推進による飛行に成功した。充電時間3時間、充電費用5ドルにて1.5~3時間の飛行が可能である。
- ・ Cessna 社
Bye Energy 社と共同にて Cessna172 の電気推進システムを開発中である。
- ・ Sikorsky 社
S-300C のエンジンをリチウムイオンバッテリー／電動モータ (Hybrid 社製) に置き換える。
- ・ Diamond 航空機社／Siemens 社
2011年パリエアショーで展示された「ハイブリット方式の電気航空機：E-Star（二人乗り機体）」のコンセプトは下記の通り。



(離陸・上昇時に使用する)

- 電池のエネルギー密度として現状の 2~3 倍が実現できればエンジンは不要となる。
- モータ出力が現状の 10 倍程度までなら、上記コンセプトで良い。100 倍以上では、超電導モータとすべき。

- Pipistrel 社 (スロベニア)

200 馬力のエンジンと電動モータ併用の 4 人乗りハイブリッド型航空機を開発中である。燃費は 10 gal/H で、同クラス機の 50% 程度となる。

- EADS 社

EADS 社が 2011 年パリエアショーで超電導モータ使用の電気航空機を展示した。

コンセプトは下記の通り。

- 推進 : 機体前部のコンテナ内の電池で、機体後部のモータを使ってシュラウド内の反転プロペラを回転。
- 電池 : エネルギー密度 1,000 kW/kg
(現リチウムイオン電池の 5 倍のリチウムエア電池となる)
- モータ : パワー密度 (目標値) 7~8 kW/kg の超電導タイプ。
(液体窒素で高温部を冷却要)

2010 年 9 月に IW (EADS Innovation Works) と ACS (Aero Composite Saintonge) は 9 馬力のピストン双発機を電気モータ×4 で置き換えた、375 Lbs の単席 Cri-Cri を飛行させ、今年末には電動ダクテッド・プロペラで訓練機 (座席数: 2) を目指す E-Fan の飛行を計画している。Cri-Cri と E-Fan は蓄電池によるものであるが、2011 年 6 月に EADS 社と Siemens 社及び Diamond 航空機はハイブリッド電気駆動システムを試験するために、HK36 モータグライダーを改修した DA36 E-Star を飛行させるためのチームを組み、1 年後の 2012 年 6 月に小型 Wankel エンジン、発電機及び蓄電池からなる 80kW 直列ハイブリッド駆動システムによる E-Star 2 の飛行に成功した。E-Fan と E-Star は EADS

の CO₂ 排出削減に向けた電動航空機研究の一環であるが、他に RR と共同で商用機の主翼に分散して埋め込んだ電動ファン×6 をタービンエンジンで駆動する E-Thrust 概念の研究もある。また EADS 社と Siemens 社はミュンヘン工科大学との PowerLab で、300~600 kW の軽量・高効率の発電機・モータについて 4 年に亘る研究をしており、その後 300 kW 単発から 600 kW × 4 発までの実証機が想定されている。これらは欧州航空研究革新勧告委員会が 2050 年までに 2000 年比で CO₂ ; 50%減、NO_x ; 90%減、騒音 ; 65%減を環境保全の目標と決めた EC の Flightpath 2050 計画を支援する EADS 社の研究である。Cri-Cri の E-Fan は GA 用訓練機として実用化可能で、主翼内の蓄電池×2 が推力 340 Lbs のダクテッド・プロペラを駆動し、タクシー、離陸加速時には中央の主脚を駆動する。E-Star 2 は Siemens 社の軽量小型電動モータによる直列ハイブリッド駆動で、発電機は Austro Engine の小型 Wankel エンジンで駆動され、EADS IW 社が主翼内の蓄電池 × 2 を用意する。モータは 65 kW を連続して供給でき、離陸上昇では蓄電池で 80 kW まで増強され、巡航中は内燃機関が常時 30 kW でファンの駆動と蓄電池の再充電を続ける。PowerLab は動力密度は 10 kW/kg が目標で、Siemens 社によると遠くない将来にメガワット・クラスの動力系統が可能となり、50~100 席機に適用して CO₂ 排出を 25%削減できるとのことである。

- Airbus 社

2011 パリエアショーにて、Airbus 社のハイブリッド電気旅客機、即ち電池とガスタービン発電機で駆動される電気ファン・モータ及びメガワット級電力からの発熱を避ける技術等を含む“E-Thrust”が 2050 年代の機材として展示された。Airbus 社はこのアイデアを 90 席リジョナル機計画として推進しようとしている。3 年以内に全電気 2 座席機を市場に投入し、続いて大型化したハイブリッド派生型の“E-Thrust”を開発する計画である。大型化は容易でないかもしれないが、極めて静かな 2 座席原型機は空港騒音の重要性を示すであろう。Airbus 社は、最終的には 90 席リジョナル機を目指す「ハイブリッド電気推進システムによる軽飛行機」の商品化を進める。騒音、CO₂ 排出を大幅に削減する実用的電気ファン推進システムは夜間便を禁じているリジョナル路線を開拓し、Bombardier 社、Embraer 社が卓越しているリジョナル機市場参入への道を開くであろう。90 席 E-Thrust の開発日程は不明であるが、4 月 25 日に Bordeaux-Merignac 空港にて E-Fan 純電気双発原型の初飛行が公開され、今後生産される 2 席及び 4 席機が発表された。Airbus 社は、60 kW 双発原型機の飛行は E-Thrust が必要とする電力密度 10 kW/kg のメガワット級に向けた技術的に大きな第一歩だとしているが、電池技術の開発も重要だと指

摘している。なお E-Fan は子会社の Voltair 社が製造販売を行う。

- NASA

NASA ではハイブリッド分散電気推進が民間航空での格段の進歩となるかを確かめる為に地上及び飛行試験での研究が始まる。11 月には先ず幅 31 ft の翼に 18 個の電気駆動プロペラを装備し、トラックに搭載しての走行試験で利点を検証する。次の 5 年で、全電気ジェネラルアビエーション、ヘリコプター、タービン／電気複合リジショナル機、安全とエネルギー効率向上のために機体の周囲に多くの小さなエンジンを分散配備した大型輸送機に適用できる「1~2 MW の発電可能な小型高密度電気モータ」の技術も開発する。分散電気推進は空力と推進効率を劇的に改善し、騒音／汚染排気／エネルギー・コストを低減する。ジェネラルアビエーションでは更に安全、乗心地、高運航費の改善にもなる。但しペナルティもある。即ち、蓄電池の重量当たりのエネルギー保有は航空燃料より大幅に劣り、価格も高い。ただ電気モータは広い回転数範囲でタービンやピストンよりも効率が高く、重量当たりの出力も大きい。静かで、小さく、信頼性が高く、汚染排気も少なく、エネルギー・コストも航空燃料より低い。そして航空機設計に重要なことだが、効率と重量当たりの出力はサイズによらない。大きなペナルティ無しに、大きなモータと同じ出力を多くの小さなモータで出力可能で、それらはどこにでも搭載できる。

NASA の資金により、産業界はタービン・電気複合推進を研究しているが、問題はエネルギーの蓄積で、大型機には電池エネルギー密度の劇的改善が必要なことが指摘されている。そこで NASA はジェット燃料によるターボ発電機が電氣的にファンを駆動して推進力を得るとき、空力的に推進効率も改善するようにそれらを機体に組込んだ分散推進に注目した。しかし、その概念は今日の Tube & Wing 形態と大きく異なるため、開発や市場の受け入れに時間を要する。それで NASA は RR 社と UTRC 社に、もっと簡単で早期に狭胴機に適用可能な複合電気技術の研究を委託し、ガスタービン・コアと電動モータの双方を用いて低圧軸とファンを駆動することで、通常の航空機よりも燃費と CO2 排出を削減する可能性を研究している。初期研究では有望な技術を見出したが、複合化ではガスタービンのバイパス比だけでなく、電池とモータの出力密度と設置場所、電気部品の効率と重量、熱管理とのトレードなど、幾つかの新たな問題点も明らかとなった。次の段階では同軸並列複合エンジンの概念設計を行う。UTRC 社は次世代細胴 Tube & wing で双発エンジンを翼下に装備した通常形態で、ガスタービンの低圧軸にモータを加えたものを研究し

ている。NASA はこのような近未来に実現可能な技術の開発を希望している。一方 RR 社はコアとガスタービンに組込まれたモータでファンシャフトを駆動する並行複合エンジンによる B737 クラスの機材を検討している。現用機のエンジン推力は離陸時の 1 発停止条件で定まっているが、これを離陸時には電池からの電力によるモータで補助することで小さなガスタービン・エンジンが採用でき、巡航中は最も効率が高い回転数でタービン・エンジンを駆動して、巡航推力を得ると共に蓄電池への充電を行う。これで全体として燃費と CO2 排出を削減できる量は電池及びモータの重量当たりの性能に大きく依存する。電池重量が無視できるなら 10%の燃費改善が可能であるが、現在の 120~200WH/kg レベルの電池技術では重量増が 30,000lb に達する。これを 16,000lb に抑えれば得失なしであり、1KWH/kg が実現できれば重量増は 5,000lb で、5%の燃費節減が可能になる。NASA と MIT の研究では 10~15 年以内に 1~1.5KWH/kg が達成可能としているが、それでもなおコスト、寿命、大きなモータの設置場所等の問題があり、実現までには 20 年を要するだろう。

- P&W 社

P&W 社によると、電気航空機の技術は進歩を続けているが、技術の革新的飛躍が必要である。第一に B737 程度の商用機では巡航中に 10 MW を必要とし、電池技術は 50~100 倍改善されねばならないと考えている。今の技術では 1/100 の距離しか飛行できない。このようなエンジンを作ることはできるが、新たに複雑な超電導技術を必要とする。この場合、乗員、乗客を保護する為に電磁遮断壁が必要となり、更に重量が増加する。

- RR 社

RR 社では過去 10 年、エンジンを航空機以外のシステムを含めて最適化するために、自らの製品が組み込まれる他のシステムを理解する必要があり、電気技術、電子工学および制御の技術を高めてきた。例えば客室空調は従来はエンジンからの安価な抽気によってきたが、特に離着陸で大きな推力が必要なときは最適ではなく、B787 では発電機による電力に代えた。防氷システムも熱い抽気に代えて伝熱マットが B787、C-Series で採用された。他にもエンジンで直接機械的に駆動された油圧システムのポンプは車の油や水のポンプと同様に電力で駆動される方が、単純で効率が高い。多くのシステムを電気システムに含めることで、個々のシステムの臨界要求に対する過剰仕様を緩和する効果も期待できる。欧州が研究する E-Thrust 計画ではガスタービンで発電した電力で、分散配置された複数のファンを駆動し、機体表面の境界層を吸入して推力を得ることで数 10%の効率向上を目指している。更には電気システムの重量は増えても、

推力偏向により揚力を得ることで主翼を縮小し、効率向上を図ることも考えられる。

- トヨタ社、JAXA、NASA

2014 年末にトヨタ社は温室効果ガス（GHG）無排出車としては最長の走行距離を有する水素燃料電池車の量産を始めた。これが水素燃料の将来性に関する議論を再燃させている。宇宙分野では数十年燃料電池を使っており、無人機メーカーも電池を燃料電池に置換して滞空時間を延ばしてきた。しかし商用機向けの技術は未確立である。最近では GHG 排出の削減を目指して、短期的には 4 席のジェネラルアビエーション機から長期的には B777 サイズの長距離機までの電動航空機に対し燃料電池の有用性が見直されている。

自動車、無人機では PEM（Proton Exchange Membrane = 陽子交換膜）燃料電池が使われてきたが、最近では燃料のエネルギー転換効率が高く、水素以外の燃料も使える高温 SOFC（Solid Oxide Fuel Cell = 固体酸化物燃料電池）が研究されている。航空燃料との比較で電池のエネルギー密度が低いことと航空機向け水素燃料供給施設がないことから、NASA は SOFC を用いる電動軽飛行機の初期研究を始めた。一方 JAXA では、ターボ・電気複合分散推進による将来の大型機のために、SOFC・ガスタービン複合システムを検討している。これは水素とジェット燃料の双方を使う。NASA の初期研究では、電池性能、安全問題および空港での供給インフラの欠如という電動航空機の 3 障害に取り組むために、軽飛行機の実証機への転換を計画している。その計画では Boeing 社が DARPA の無期限滞空無人機“Vulture”のために開発した燃料電池技術を使う。

“Vulture”は夜間の動力供給のために太陽エネルギーを貯蔵して動力に再生する装置を持っている。

- 国際共同研究の必要性

電動旅客機実現には動力の貯蔵、転換、伝達の問題を解決する必要がある。Airbus 社は、電気および複合電気自動車の走行距離延伸に必要な電気／機械エネルギー貯蔵の R&D について、Chrysler 社、Ford 社および GM 社が米先進電池組合を形成しているのと同様に、航空業界の共同研究を提案している。Airbus 社は欧州 2050 年航空ビジョン（2000 年比で CO₂；75%減、NO_x；90%減、騒音；65%減）の環境保護目標を達成するための手段として、電気推進に取り組んでいる。その“eThrust”概念は複合電気推進旅客機で、タービンで発電して電池に貯蔵し、超電導電線とモータにより主翼後縁上面に埋め込まれた分散ファンを駆動する。2017 年には 4 席の複合電気推進軽飛行機

E-Fan4.0を製作する。eThrustにはkW → MW、100 Amp → 1,000 Amp、250 Volts → 1,500 Voltsへの飛躍が必要になる。E-Fan1.1はエネルギー密度180 Wh/kgのリチウム・ポリマー電池によったが、商用 eThrust では最低 800 Wh/kgが必要となり、Airbus 社、Boeing 社、Lockheed Martin 社、GE 社、UTC 社、Siemens 社、更には FAA や EASA も含めた共同研究組合が必要であろう。

・ 電気推進航空機（平成30年度動向）

○Airbus 社では単席で、自律 eVTOL の Vahana のバックアップ用 2 号機が完成した。Vahana は前後のテイルト翼に各 4 個のロータを備える機体で、自律、探知、回避の技術開発を行っており、2018 年 1 月にホバーを行った。但し、未だ水平飛行には移行していない。Airbus 社では、この他に 4 席の客室の上部で 4 個の同軸二重ロータ・ダクトドファンを Siemens 社の強力モータで駆動する CityAirbus を開発している。また Audi 社及び Italdesign 社との共同による「客室を飛行モジュールと路上走向モジュールの間で交換する Pop・Up 概念」も開発中で、1/4 縮尺模型を飛行させており、更に実大原型も検討中である。

○Ampaire 社(米)は Cessna337 Skymaster をリジョナル機用電動推進試験機に改修している。機首部の Piston エンジンで駆動されるトラクタ・プロペラは残し、尾部のプッシャー・プロペラを電池による電動モータで駆動する。ハワイのコミュータ Mokulele 航空の路線で飛行実験が行われる予定である。

○ Bye Aerospace 社(米)は日本の Subaru-SBI 革新基金から多額の投資を得て、2 席の電池駆動 Sun Flyer 2 軽飛行機について FAA Part23 の認証取得を計画している。

○ORR 社は強力モータを開発する YASA 社等と共同で、Siemens 社が 2017 年に Extra330LE で記録した電気航空機の最速 210mph を越えて 300mph 以上の速度での飛行を計画している。翼幅 24ft の単席機で、6000 個のセルによる出力 750KW の電池で、3 基の軽量モータ YASA750R を駆動しプロペラに 500hp を供給する。

○Israel の Eviation 社は全電気リジョナル機 Alice を開発中で、リスク・シェアリング・パートナーとして FBW システム、操縦室を担当する Honeywell 社及びプロペラ担当の Hartzel 社等が参画しているが、目標とする 2021 年末の TC 取得にはなお \$200M の資金を必要とする。最初は Kakan 社(韓国)の Li-ion 電池と Siemens 社の電気モータを使用するが、後で顧客が選択可能とする。Alice は 9 席で、両翼端と尾部に 3 個の電動プッシャー・プロペラを有し、翼端に装備するプロペラは翼端渦の中で推進効率を増している。MTOW は 6,350kgf で、エネルギー容量は 900KWhr(参考: Tesla S は 100KWhr)、航続距

離は (240kt で巡航して) 540n. mile であり、最大出力は3個の電気モータで 800KW=1,070shp で、滑走路長 700m で離陸可能である。最も近い競合機材は Cessna Caravan で、MTOWは 3,600kgf で、625shp ターボプロップ1基、航続距離は (186kt で巡航して) 1020 n. mile である。即ち Alice の方が重く、高馬力で速いが航続距離は短い。

(3) 制御等

(a) 操縦・運航の自動化

自動車の場合、混雑した道路での自動運転技術が追求されており、航空機の運航機数増加に対応した高密度運航技術への適用に有効に活用される可能性がある。

(b) 衝突防止システム

自動車の衝突防止システム技術を次世代の空中衝突防止システム即ち「接近情報の提供と、垂直方向だけでなく水平方向も使って操縦士に指示する」システムの要素技術への適用が期待できる。

(c) 衝撃解析手法

自動車の衝撃解析シミュレーションシステムを、航空機分野における鳥との衝突シミュレーション解析やタービンブレードの異物衝撃解析システムに適用できる。

(d) 音質

自動車ドアを閉じる時の高級感ある音質の発生技術を航空機、特にプライベート・ジェット機、SSBJ 等に適用することが期待できる。

3.4 新製品の創出

欧米のベンチャー企業が、自動車／航空機の融合製品として“空飛ぶ自動車”を開発している。

現時点での欧米の開発状況は以下の通りであり、未だ未完成であることから後発から挑戦の余地あり。

○ 米国 Scaled Composites 社

ハイブリッド方式（並列型）の飛行自動車：BiPod
(モデル 367) を開発中である。

速度 : 200 mile/h

航続距離 : 700 mile
胴体 : 双胴
車輪 : 4 輪
駆動 : エンジン → 後方2 輪、エレベータ、プロペラ
リチウム電池 → プロペラ

○ 米国 Terrafugia 社

- Transition と呼ばれる空飛ぶ自動車は、2007 年当時に MIT の学生だった設計者が始めた計画で、2009 年の初飛行以来 100 時間以上の飛行試験を続けている。高速道路を走って空中を飛行することは予期した以上に難しく、実用化は 2016 年が目標となっている。自動車と航空機双方の安全規制当局は説明を受けており、CFRP 製の機体重量は初期より重くなり、複雑化し、予定価格は約 28 万ドルである。
- 2012 年 3 月に量産原型機が初飛行し、FAA の LSA (軽スポーツ機) 型としての認証を目指している。4 輪、並列二人乗りであり、主翼は両座席の間に畳み込み、100 hp の Rotax 912 エンジンで後輪及び 2 尾翼の間のプッシャープロペラを駆動する。100 mph で飛行し 65 mph で走行可である。LSA の限界である“最大離陸重量 1,320 Lbs 以下、失速速度 45 kt 以下”に対して、“1,800 Lbs、54 kt”の例外を申請している。

• Geely 社からの新規投資で Terrafugia 社は 2 席の “Transition” を 2019 年に出荷しようとしており、2023 年に eVTOL の空飛ぶ車を計画している。

○ フランス Vaylon 社

高度 300m 以下を飛行する“空飛ぶ自動車”を研究しており、既に特殊用途を評価している仏軍用調達部門 DGA と共同実験を行った。民間用では 10 万ユーロ (13.2 万ドル) での販売を目指している。

○ スロバキア政府/ Aeromobil 社

• 2017 年完成まで 3 年間の支援を決めた “AeroMobil 3.0” は 2014 年 10 月に初飛行、この 5 月に事故で 900 ft から落下傘で回収され、運転手は無傷であり、機材は補修後に飛行を再開する。これは 4 輪、並列二人乗りであり、主翼は後方に折畳み、100hp Rotax 912 エンジンで前輪とプッシャープロペラを駆動する。124 mph で飛行し 99 mph で走行可である。離陸路長短縮のため主翼取付角が可変であり、離陸速度は 81 mph、離陸路長 660 ft。失速速度は 37 mph である。

・スロヴァキアの Aeromobil 社は、Terrafugia 社（中国 Geely 社が所有）と共同で開発する eVTOL エアタクシーの計画を発表した。この4席の“Aeromobil 5.0”は、2020年に量産が始まると期待されている2席のSTOL“Aeromobil 4.0”に続くもので、7-10年以内に市場に投入される。このeVTOLは飛行と共に路上で走行するように設計されている。“4.0”は航続距離700kmで都市間で使用する様に設計されているが、“5.0”は自律飛行と路上走向を組合わせた都市内の乗合エアタクシーを目指している。“4.0”は飛行時は翼を広げ、路上では胴体に沿ってこれを折畳むが、“5.0”はその翼端に電動ロータを備えている。水平飛行での推力は電気プッシャー・プロペラにより、ロータは垂直のまま回転し続ける。“4.0”では尾輪と懸架装置は尾翼の一部であるが、“5.0”では飛行中の安定操縦性を改善する為に別の尾翼が（後方に延びた）ブームに支えられている。“4.0”は複合電気推進で、後部に搭載したターボチャージャー付き内燃機関が、飛行中はプロペラを駆動し、地上では前輪を駆動するモータの為に発電する。“5.0”は全電気推進であり、“4.0”は2018年に試験を計画している幾つかの空飛ぶ車の一つである。

○ オランダ

・“PAL-V” (Personal Air and Land Vehicle) は2012年に初飛行。3輪、前後二人乗り、240hp エンジンにより空中はジャイロコプタで、2翼のロータとプッシャープロペラを展開し、尾翼は後に伸び、ロータマストは上に伸びる。飛行速度は31~112 mph、離陸路長は540 ft である。

・PAL-V International は2019年に空飛ぶ車“Liberty”の認証取得を目指している。前後2席で地上では3輪車で、空中では安全の為に100hpピストン・エンジン2基によるオートジャイロになる。

○ Samson Motor 社

機体名“Switch blade”は3輪、並列二人乗り、主翼は前方に折畳まれ車体の下に格納され、垂直尾翼には2枚の方向舵がある。道路ではモータサイクルとして、空中ではFAAのアマチュア製実験機としての認証を目指している。180hp Motus V4 モータサイクル・エンジンで後輪とその間にあるダクテッド・プロペラを駆動し、160 mphで飛行し100 mph以上で走行可で、\$95,000で販売予定である。

○ Carplane 社

Carplane (社名と機材名が同じ)は独 Braunschweig にあつて、EU と Lower Saxony 州の資金で原型機が製作された。双胴型で、間に着脱式主翼を格納する。151hp エ

エンジンが地上では車輪を、空中ではプッシュャープロペラを駆動する。260 ft 以内で、45~50 kt で離陸し、260 ft で着陸停止できる。欧州のVLA(Very Light Airplane) 基準での認証を目指していて、主翼の着脱式では制限の 750 kg より軽いが、自動展開・格納機構付では 795 kg となり、例外申請を要する。

4. 特記事項

4.1 IoT(Internet of Things)による価値の生産性向上

(1) 航空機産業における IoT, FoF (Factory of the future)

・航空機製造の状況は数値世界と物理的世界の密接な統合に向けて大きく転換中で、最終的に航空機生産とその他の関連事業に関する総ての重要工程が連結される。この転換は Industry 4.0、e-Factory 等の種々の呼称があるが、総て“将来工場”を意味している。完成すれば会社は顧客の要望によりよく応え、経営効率が改善され、製品改革が加速される。航空機産業界は 20 年前の自動車業界の足跡を辿っており、多くの主要機体メーカーと幾つかのサプライヤーは先進工場と技術導入に大きな投資をしている。競争圧力が高まるにつれて、数値化を進める会社が成功する一方で、現状維持に固執する企業は苦しんでいる。主要下請会社では全速力で前進しているが、下部下請会社では生産方法の転換に近未来の利点を見出していない会社が多い。

・コンピュータ設計と IoT が相俟って航空機的设计・製造のパラダイムを変える。航空と他分野との接続が増えてきて、既に接続しているシステムや利用可能なデータの更なる有効利用と接続範囲拡大が始まる。次の段階は更に価値の高い、従来無関係だった航空機内及び工場内の諸システムと接続される。従来の接続はエンジンのような高価な製品に限られていたが、今ではセンサーとあらゆる所との接続のコストが下がり、対象は重要な構成品に限らない。企業は接続を全製品とそれらを取り巻く総てのシステムに広げ、将来製品のコスト削減や品質・信頼性の向上のための方策を探している。

接続は設計・製造を以下の様に変える。

- Flexible Electronics (FE: 伸縮する電子回路) が構成品、工具及び作業者を認識し、接続する。
- 設計ツールが必要なデータとそのセンサーの設置場所の決定を助ける。
- 部品の品質と製造の容易性に関する実時間データが設計を変える。
- Augmented Realty (AR : 拡張現実) が物理的设计限界を取り除く。

IoT に関し業界は僅か 2 年のうちに、航空及びその他の市場で、企業が製造する総ての製品がデータを送り返すための正しい接続を行い、フィードバックを得る様に設計される所まで進んだ。設計段階でのセンサーの型や設置場所の決定を助けるツールに加えて、現在、外部への接続手段を持たない構成品及び諸システムに埋め込まれて、探知・通信ができる技術が利用可能になってきた。その一つは製造中の構成品と構造の上に印刷できる FE である。IoT 改革は探知・通信・データ分析を越えて、組立ラインから整備基地までの作業者の性能改善の為に、集められた情報の新たな可視化までを含むようになった。これらは数値世界と物理世界

との結合、即ち IoT の最終的姿である AR を含んでいる。

探知の分野では Boeing 社と Lockheed Martin 社が 2015 年 8 月にオバマ政権が設立した NextFlex ; 複合 FE 製造革新研究所で国防省からの \$75M/5 年の資金により、探知・通信のための適応型 FE の産業利用を加速している。“FE” は航空機の構成品と諸システム及び製造ツールと機械を通してデータ収集と接続を多様化する。Boeing 社はその技術を重い電気配線を軽量印刷金属で置換する方法を研究してきた。適応型 FE による大きな外部アンテナは接続のための抵抗増を減らし、同じ技術は機内の小型センサーにも使え、最終的には無線センサーを目指す。これらは 3D 印刷により航空機構造に適用して様々な設計ができる。

NextFlex はセンサーとの通信に加え、人と機械の接点を改善したり、将来の工場での製造作業を円滑にして航空機製造を支援する、ウェアラブル電子機器やソフト・ロボティックスの技術も開発する。工場での最初の問題はペーパーレス化で作業者にタブレットを与えるが、これでは仕事上の正しい情報を与えるという本当の問題は解決していない。ツールの中に情報を得るセンサーだけでなく、IoT で工程を管理する電子機器を埋め込む。従来の製造工程では作業の種々の段階で品質検査が行われたが、IoT 導入工場では実時間で情報を集めて品質の適否を判定できる。

AR は始まったばかりである。現在、殆ど総ての製品は物理的境界で多くの複雑さを有し、それが限界をもたらしている。AR は多くの物理的複雑さを数値環境に移せる。一方、使用者として我々は製品の性能について柔軟性があり、使用に当たって必ずしも人間の作業者が関与する必要はない。その製品から出てくる総てのデータにより、実時間で物理的製品を数値的に表現できる時、製品を設計する方法は大きく変わる。

(2) 航空輸送業界における IoT

・民間航空では、客室娯楽設備や通信をインターネットに頼り始めたが、間もなく総てがインターネットに繋がる。操縦士、客室乗務員、整備員、運航者など総てがSATCOMを通した電子通信に頼ることになる。旅客には見えないが、IoTとは物理的機器を世界的に繋げたものである。物理的機器とは家庭の温度調節器、エレベータ、玩具、配電盤、RFIDタグ、印刷機、監視カメラからスマホまで、建物、自律自動車、電子機器、データリンク、ソフトウェア、センサー、作動機器を備えた総ての物を指す。これらからデータを集め、生産的に情報交換できる連結網は総てのことを可能にする。

・現在は新たな産業革命 (Industry 4.0) の入口にいる。航空輸送業界は幾つかの理由で最初の採用者になり得る。第 1 に多額の資本を要する産業で機材の休止

時間は高くつく。IoT は機材の稼働時間を上げる。第 2 に多くのデータが利用可能である。B787 や A350 等の新世代機は“空飛ぶコンピュータ”で、飛行毎にギガバイトのデータを集め、膨大な旅客データに近付ける。また、航空会社は漸く IoT 利用に必要な新技術に投資する資金を稼ぎ始めたが、歴史的に運航や顧客のデータを用いた基本的なビジネス改革よりも、当面の問題解決に多くの人手をかけてきた。

その理由は；

- 空港、運航機材、乗員、旅客のデータが統合されず、デジタル戦略が小さな分野毎に分かれている。例えば旅客に対しては発券予約、地上サービス、運航及び客室娯楽を扱う技術部門に限られる。
- 記録的利益を得ても、現システムの維持にだけ投資される。潜在的投資効率向上に関する理解が無い。
- 技術や整備部門は部品を予備的に交換してでも機材の稼働時間向上に集中し過ぎてている。また、従業員はデジタルデータによる良否判定を嫌い、組合はデジタル化による効率向上を嫌う。
- 機体 OEM が出来る事と航空会社に提供できる事との間にギャップがある。OEM が優れた柔軟な解に近づくには航空会社の運航を良く理解する必要があるが、解が柔軟になるほど航空会社は自ら自由に複数の機材群に適用したくなる。

(3) IoT 分野における日独の協力

2017 年 3 月 20 日、ドイツのハノーバーで始まった欧州最大級の IT 見本市 CeBIT にて、日独両首相は IoT の国際ルール作りに協同で取り組む方針で一致した。また、これに合わせて、両政府は IoT 分野での協力強化を盛り込む「ハノーバー宣言」に調印した。

平成30年度 航空機関連技術動向調査
報告書

平成31年 3月

製作発行：一般社団法人中部航空宇宙産業技術センター
