

2022年5月28日

講師：松田 宏

## 講演「空飛ぶ機械の今昔 航空機の歴史」レジメ

### 1. 表紙

こんにちは。講師の松田宏です。「空飛ぶ機械の今昔（いまむかし）」という副題で航空機の歴史をお話しします。写真は南シナ海上空で積乱雲が圏界面に達して横に流れてできた「かなとこ雲」です。

### 2. 自己紹介

<略歴> 1947年(昭和22年)生 山形市出身 山形大学理学部物理学科卒業。

運輸省東京航空交通管制部・航空管制官(航空路管制)、

日本電気・システムエンジニア(航空管制システム開発)、

三菱総合研究所・主任研究員/室長

(航空管制方式の調査研究、人工衛星運用管制システム開発など)、

日本ヒューレットパッカード・コンサル事業推進室長/シニアコンサルタント/人材開発部長

(情報戦略、コンサル事業推進、人材開発)、

松田宏コンサルティング株式会社・代表取締役

(航空交通管制・航空交通管理/情報システム/人材開発)

<所属団体など>

航空交通管制協会(ATCA-J)、航空・鉄道安全推進機構(ARSaP)、航空運航システム研究会(TFOS)、日本シンクタンクアカデミー(JTTA)、異分野交流サロン

### 3. 本日の話題

Part-1:航空機の分類と環境

Part-2:航空前史

Part-3:ライト兄弟～第二次世界大戦

<休憩>

Part-4:第二次世界大戦～超音速旅客機

Part-5:ジャンボ旅客機～ハイテク機

Part-6:航空交通管制

質疑応答

(注1)各 Part の最後に「一分間クイズ」があります。答え合わせは質疑応答の前に行います。

(注2)話の合間にちょっと面白いビデオもご覧いただきます。

(注3)詳しいことを知りたい場合はこのレジメのキーワードを使ってネット検索して下さい。

#### 4. 歴史の時間軸

航空機の歴史は人類の歴史のごく一部で非常に短い、人間が始めて空を飛んだのは18世紀末(蒸気機関車が19世紀初め)、今日の話は古代ギリシャから古代中国とルネサンス期を経て、18世紀末～現在

#### 5. Part-1 航空機の分類と環境

#### 6. 航空機とは何か(法律上の分類)

原動機なし: 空気より重いもの(グライダー) / 空気より軽いもの(気球)

原動機あり: 空気より重い(固定翼機、回転翼機、ティルトローター機) / 空気より軽い(飛行船)

#### 7. 航空機ではないもの

(旧定義: 人間が機内にいないもの、自由に飛行できないもの)

空気より重い(ハンググライダー、パラグライダー、小型模型航空機、ロケット) / 空気より軽い(係留気球)

#### 8. 無人航空機(ドローン)

航空法改正でリモコン機や自動操縦機の規制強化、

目視内の遠隔操縦飛行 / 目視内の自動・自律飛行 / 目視外(補助者なし)

無人地帯 / 有人地帯

民間: 測量 / 監視 / 警備 / 点検 / 農薬散布 / 宅配など

軍用: 偵察 / 監視 / 攻撃(武器搭載 / 自爆)など

#### 9. 大空の環境(人間には過酷な世界)

対流圏と成層圏、圏界面、国際標準大気(ISA): 高度毎の気温と気圧を定義

平均海水面(MSL) = 海拔 0m... 気温 15°C、気圧 1013hPa

4000m... 気温 -11°C、気圧 616hPa      8000m... 気温 -37°C、気圧 356hPa

10000m... 気温 -50°C、気圧 264hPa      12000m... 気温 -56.5°C、気圧 193hPa

航空機の飛行高度: プロペラ式旅客機 / ターボプロップ式旅客機 / ジェット旅客機

高い山: ...エベレスト(8848m)、富士山(3776m)

高地の都市: メキシコシティ 2240m、アジズアベバ 2400m、ラサ 3650m

#### 10. ジェット気流

中緯度の高高度を西から東に吹く強い風、冬に強くなる、2～3月に日本列島付近、春になると北上

200hPaの高層気象図の例(2016年2月27日)、シベリヤ南東部 -60°C、北極海に近いシベリヤ北部 -66°C、房総半島の東南 -54°C、最大風速 195 ノット(≒時速 360Km。新幹線: は 320Km)

#### 11. 参考: 高度(altitude)と高さ(height)

高度(altitude): 平均海水面(MSL)からの高さ: 標高

QNH方式: 平均海水面の気圧で規制(低高度)

(注)管制機関が地域の気圧データを通報(例:”altimeter 2992”)

Flight Level (FL) 方式: 平均海水面の標準気圧で規制(高高度)

(注)地域の気圧により実際の高度は変動

高さ(height): 地表からの高さ

(例)最終進入の決心高さ(Decision Height : DH)、電波高度計

(注)平均海水面(MSL)の気圧の表現:

29.92mmHg(水銀気圧計の水銀柱のインチ表記) または 1013hPa(メートル法表記)

## 1 2. 参考: 低温で起きる問題

- \* 燃料に混入した水分が凍結 ⇒ エンジン停止 [対策]燃料タンクの水抜き
- \* 翼やプロペラの前縁に水分が着氷 ⇒ 揚力や推力の低下 [防氷ブーツなどの防氷装置]
- \* 燃料が凍結 ⇒ エンジン停止 [対策]融点の低い燃料を使用/飛行高度を下げる  
(日常生活での低温体験)

家庭用冷蔵庫の冷凍室(-20℃)。最低気温の日本記録(旭川 1902 年:-41℃)、  
冷凍倉庫内の温度(海産物など:-30℃、マグロ専用:-60℃)

## 1 3. 大気圏と宇宙

地球の半径は約 6300km(赤道付近がやや膨らんだ楕円)、  
大気圏は 50km(薄皮まんじゅうの皮)、ジェット機の高度記録 37.5km(Mig25)、  
国際宇宙ステーションの軌道は 400km、GPS 衛星は 22,000km、静止衛星は赤道上 36,000km

## 1 4. 一分間クイズ-1: あなたがこれまでに体験したことがある最悪の気象は?

- |                |
|----------------|
| ① 最低気温(スキーなど): |
| ② 最高高度(登山など):  |
| ③ 最大風速(台風など):  |

## 1 5. Part-2 航空前史

### 1 6. ギリシャ神話「イカロスの翼」

クレタ島ミノス王は迷宮を設計したダイダロスを息子イカロスと一緒に塔に幽閉、  
ダイダロスは鳥の羽を集め、蠟で固めた翼を作って脱出飛行を計画、  
息子イカロスは父の忠告を聞かず高く飛び過ぎて蠟が溶け墜落死した(注:父は生存!)

17. 絵画に描かれたイカロス(航空図書の出版社名にも)

ルーブル美術館の天井画など

18. レオナルド・ダビンチの飛行器械

レオナルドダビンチ(1452-1519)はイタリア・ルネッサンス期の科学者&芸術家、  
名画・モナリザの作者、  
発明メモに回転翼式飛行器械、旧全日本空輸(現 ANA)社章、羽ばたき式飛行器械も

19. リエンタールのグライダー

ドイツのオットー・リエンタール(1848~1896)がグライダーの飛行実験に成功(1891)、  
20年間鳥の羽による飛行を研究、ハンググライダーで小高い丘から飛行して詳細なデータを記録、  
実験中の突風による墜落死

20. 二宮忠八の動力飛行機

リエンタールのグライダーのニュースを知りゴム動力の模型飛行機を作り飛行に成功(1893)、  
徴兵され陸軍病院勤務。軍に有人機開発の援助を願い出たが日清戦争中で断られた、  
後年、英国王立航空協会が縮小モデルを試作し飛行に成功  
⇒ライト兄弟以前に飛行機の原理を発明したと認定

21. 諸葛孔明の熱気球「天灯」

古代中国の後漢から三国時代に活躍した軍師、  
竹と紙で作った風船の中で油をしみこませた布を燃やす熱気球「天灯」を発明、  
本来は戦場での通信用だったが今は春節(旧正月)の祝賀行事

22. モンゴルフィエ兄弟が熱気球

フランスの兄弟(兄ジョセフと弟ジャック)が熱気球の飛行に成功、初めは鶏や豚を載せて実験、  
1783年の公開実験で2名が搭乗して最高高度910m 距離9kmを25分で飛行、  
兄ジョセフはルイ16世から貴族に叙せられたが弟のジャックは内気な性格で田舎に留まった

23. ガス気球

空気よりも軽い気体・水素の発見、ジャック・シャルルが水素を入れたガス気球で初飛行(1783年)、  
アンリ・ジファールが蒸気機関飛行船の飛行に成功(1852年)、  
日露戦争でロシア軍が偵察気球を使用(1905)

24. 一分間クイズ-2: レオナルド・ダビンチの飛行器械は実際に飛べたと思いますか? その理由は? (周りの人と相談してください)

① Yes/No

② 理由:



## 25. Part-3 ライト兄弟～第二次世界大戦

### 26. ライト兄弟による初の動力飛行（1903年12月17日：航空記念日）

オハイオ州デイトンで自転車屋をしていた兄ウィルバーと弟オリバーのライト兄弟が開発、ノースカロライナ州キティーホークで複葉機（ライトフライヤー）による動力飛行に成功、1回目 12 秒 37m、2 回目 12 秒 53m、3 回目 15 秒 61m、4 回目 59 秒 260m、当時の権威ある物理学者は空気よりも思い器械が空を飛ぶことなどあり得ないと否定声明

### 27. 木製羽布張⇒鋼管構造⇒全金属製

初期の飛行機は木製の骨組に羽布張 ⇒ 木製モノコックを経て鋼管溶接構造に羽布張に、大西洋を初めて無着陸横断したスピリット・オブ・セントルイス号も郵便飛行機を改良した鋼管羽布張構造

### 28. 硬式飛行船(1)

ドイツのツェッペリン伯爵が大型硬式飛行船を開発(1228年)、全長 237m、切手も発行、豪華客船の客を奪い大西洋横断定期路線も、世界一周飛行中のツェッペリン号が日本に飛来(1929年)

### 29. 硬式飛行船(2)

ニューヨークのエンパイアステートビルの屋上には飛行船係留装置と乗客待合室、不燃性のヘリウムガスはアメリカでのみ産出(戦略物資として輸出禁止)  
⇒ドイツは飛行船に可燃性の水素ガスを使用(浮力が大きすぎグランドピアノを搭載)、大西洋横断の飛行船の運賃は豪華客船と同額⇒速くて快適なので富裕層が競って利用、ヒンデンプルグ号がアメリカで爆発炎上事故(1937年5月6日。米国東部ニュージャージー州レイクハースト海軍飛行場にて。原因不明：陰謀説や落雷説など諸説あった) ⇒ 急速に衰退

### 30. 余談：飛行船の巨大格納庫

米軍は国内で産出するヘリウムガスを使用して軍の偵察任務に長く運用、NASA エイムズ研究所(カリフォルニア州)のモフェット飛行場には今も元米海軍の巨大格納庫 Hanger One が残る(1930年代に建設)、取り壊しに莫大な費用がかかるため

### 31. 郵便飛行の発達（星の王子様は砂漠に不時着した郵便飛行士の幻想かも）

作者のサンテグジュペリ(1900～1944)は郵便飛行士、フランス南部から西アフリカのダカールを経由して大西洋を横断、南米の南端まで郵便物を輸送していた、何度も不時着や墜落を経験、物語に登場する赤いバラは妻コンスエロ(ベネズエラの富豪の娘)

### 32. 参考：航空文学の誕生

サンテグジュペリにより航空文学という新分野が誕生、

主な作品: 南方郵便機／夜間飛行／人間の土地／戦う操縦士、「夜間飛行」という香水が有名  
(注) 新潮文庫版では夜間飛行に南方郵便機が含まれている

### 3 3. 旅客機の出現と発達

郵便機に乗客を乗せるようになり、後に旅客機が出現(郵便物も運んだ)、  
ユンカース F.13(乗客4名)、ボーイング 247(乗客10名)、ダグラス DC3(乗客 21～32 名)、マーティン M130  
(飛行艇。乗客 43 名。愛称:チャイナクリッパー)

### 3 4. 戦争が技術進歩を加速

戦闘機: 零戦、P51D、Me262A(初のジェット戦闘機)、爆撃機: B10、B17、B24、B29

### 3 5. 一分間クイズ-3: あなたが郵便飛行士なら、次の地域を何に頼って目的地に向かいますか?

(周りの人達と相談してください)

- ① 西アフリカの砂漠地帯:
- ② 南大西洋:
- ③ 南米のジャングル地帯:

### 3 6. <休憩>

### 3 7. Part-4 第二次世界大戦～超音速旅客機

### 3 8. 大都市を支えた大空輸作戦

ベルリン大空輸(1948～1949)はソ連による封鎖で孤立した西ベルリン市民200万人の生活物資を空輸した、  
使用したのはC47輸送機(DC3の軍用型)とC54(DC4の軍用型)、往復の燃料を搭載してとんぼ返り飛行、  
レーダー管制により3分間隔で飛行、西ベルリン市民は毎日新鮮な牛乳が飲めた、

### 3 9. 音速の壁を突破

米空軍のチャック・イエーガー大尉が操縦するロケットエンジン式実験機 X-1 が音速の壁を突破(1947)、X-1  
はワシントンのスミソニアン航空宇宙博物館に展示、  
機体: 全長 9.42m、幅 8.53m、高さ 3.3m、自重 3.171Kg、全備重量 5,550Kg、推力 2.722Kg、最高速度 M1.45、  
本人が書いた自伝はベストセラー、C.イエーガーは少将まで昇進

### 4 0. ジェットエンジンの出現

ライト兄弟の自作ピストンエンジンは4気筒12馬力、フォード・トライモーターのような星形エンジンが主流、  
朝鮮戦争でソ連製ジェット戦闘機 Mig15が優勢に、米空軍がジェット戦闘機 F86を開発して戦局を挽回、日

本では国産ジェットエンジンが開発され自衛隊のジェット練習機 T1 に搭載

#### 4 1. ジェットエンジンの構造

吸気口から空気を吸い込みタービンにより圧縮して燃焼室に送る、  
燃料を噴射して燃焼させ膨張した高速の排気により推力を得る  
排気エネルギーの一部でタービンを回転させ圧縮機のタービンを回転させる

#### 4 2. ターボプロップエンジンの構造

ジェットエンジンのタービンの高速回転を歯車で落としプロペラを回す、排気を下に向けるのは推力のため

#### 4 3. ターボファンエンジンの構造

吸気口の前で大きな扇を回転させジェットエンジンの周囲を通して後方に流す方式、  
ジェットエンジンを通る空気と外側を流れる空気の比率をバイパス比という、当初の軍用機や小型旅客機は1  
程度、B747/A300など大型旅客機用では4前後、最近のものは8以上

#### 4 4. ジェット旅客機の出現

ジェット旅客機が出現、最初の英国製コメット Mk.I は就航後に空中分解事故が続出、  
機体を回収し調べたところ上空との気圧差による収縮を繰り返した金属疲労によると判明、  
改良型が開発され日本路線にも就航、DC8 や B707 など大型ジェット旅客機も開発された

#### 4 5. 超音速旅客機 (Super Sonic Transport:SST)

英仏が超音速旅客機コンコルド(Concorde)を共同開発(就航:1976~2003)、英仏が“e”の有無で紛糾、全  
長 62m、全幅 26m、最大離陸重量 186t、巡行速度マッハ 2.04、巡航高度 18,000m、  
衝撃波が問題(海上に出てから超音速飛行)、乗客 100 人で料金はファーストクラス並、  
パリのシャルル・ドゴール空港でのもらい事故(2000)をきっかけに運航を終了

#### 4 6. 1 分間クイズ-4

あなたが世界初の超音速実験機の操縦を打診されたら引き受けますか？

① Yes/No

② 理由は？

#### 4 7. Part-5 ジャンボ旅客機～ハイテク機

#### 4 8. ジャンボ旅客機 (大型旅客機による空の旅の大衆化が進んだ)

B747-100 はロッキード社との米空軍の大型輸送機開発競争に負けたボーイング社が旅客機に設計変更、  
結果的にベストセラー旅客機になった(ロッキード社の大型輸送機は米空軍の C-5A に)、

ターボファンエンジン×4, 強力な高揚力装置(フラップ)、多数の着陸脚が特徴、長距離型の B747-SP、短距離型の B747-SR、貨物型の B747-F などが作られた。

#### 4 9. 大型化の歴史(1)

次々に新型旅客機が開発され大型化が進んだ、機体の長さや最大離陸重量を比較、YS-11(最大離陸重量 24t)、B727-200(37t)、DC8-30(152t)、B747-400(413t)、大型の双発機が出現して機体が小さくなる傾向に:B777-200(247t)

#### 5 0. 大型化の歴史(2)

客席が総二階の超大型機 A380-800 が出現(560t)

#### 5 1. 参考:信頼性向上による双発機の増加 (長距離路線の主役が交代)

昔は洋上でエンジンの一部が停止しても飛行を継続できるよう3~4発が必須だった、エンジンの信頼性が各段に良くなり洋上飛行時間の制限が緩和された  
(Extended Twin-engine Operational Performance Standards: ETOPS)  
60分→90分→120分→180分→240分→330分→370分(A350-900)

#### 5 2. 大型化の歴史(3) (超大型機から逆戻り)

超大型機/4発大型機の問題点:採算がとれる乗客確保が大変、ETOPS 効果で路線構造が変化  
[ハブ&スポーク構造(大型機による長距離路線+小型機による短距離路線)の組合せ]  
→[中大型双発機による直行路線]  
⇒超大型機/4発大型機が売れない!  
エアバスA380は製造中止、ボーイング B747-8も生産終了予定

#### 5 3. 旅客機の長距離化

チャールズリンドバークの大西洋単独無着陸飛行(5810km)、  
DC3(2400km)、DC6(5000km)、DC8(9000km)、B380-800(15000km)、B787-8(16000km)

#### 5 4. 旅客機の巡航速度 (速度は亜音速で頭打ち)

レシプロエンジンのプロペラ機からターボプロップ機になり巡航速度が向上、ジェット化によって更に高速化、  
DC3(270km/h)⇒YS11(460km/h)  
しかしそれ以降の変化はわずか  
⇒B737(M078≒840km/h)、B777(M084≒910km/h)、B747-400/B787/A380(M085≒920km/h)

#### 5 5. 省エネ化

高効率エンジン、電動式操舵装置、新素材による機体重量軽減、LED 照明/電気式空調、電子シャッター、飛行管理システム(FMS=コンピューター)による最適飛行など



## 5 6. 操縦室のハイテク化

日本航空が見学者用に保存している DC8-62 は機械式計器が中心のクラシックな操縦室、  
B747-200 から電子表示式の計器(操縦士 2 名 + 航空機関士が搭乗)、  
B747-400 ハイテクジャンボ(操縦士 2 名で運航)、飛行管理システム(FMS)による高度な自動化

## 5 7. 参考:最新式旅客機の操縦室

B777-200ER、B787-9/10/11、A380-800

## 5 8. 参考:自動操縦による技量の低下

サンフランシスコ国際空港でアジアナ航空 214 便が着陸に失敗して炎上(B777-200ER、2013 年 7 月 6 日)

原因:自動操縦に依存しすぎ技量が低下した操縦士の初歩的なス(最終進入中の速度  
低下を見落としていた) ⇒ 米連邦航空局(FAA)は低高度での手動操縦を推奨

類似事例:鉄道車両

自動運転の発達で運転士の仕事は監視中心に。運転技量の低下が懸念  
⇒車庫への出し入れや特定の時間痰に手動運転

## 5 9. 1 分間クイズ-5

気温 15°C の音速は 340m/秒で、気温が 1°C 下がると 0.6m 遅くなります。

①気温-45°C の音速は何 m/秒ですか

②気温-55°C の音速は何 m/秒ですか。

## 6 0. Part-6 航空交通管制

### 6 1. 世界発の旅客機の空中衝突

1922 年 4 月 7 日にパリ北方 110Km、上空 150m で衝突(全員死亡)、

北行機: Farman F-60 パリ発、ロンドン行(乗員 2 名)

南行機: de Havilland DH-18A ロンドン発 パリ行

原因: 霧雨で視界不良、両機の操縦士は地上の道路を見て飛行(前を見ていなかった)

⇒関係者が再発防止策を協議、無線機搭載、方向探知機導入、公式な航空路の設定など

### 6 2. 初期の航空管制

旗で離着陸を指示した Flag Man(FAA)、管制塔(管制官が無線電話と信号灯で離着陸を指示)、  
複数の方向探知機で飛行機の現在位置を監視、無線電話で位置通報を受け経路や高度を指示

6 3. 現在の航空管制:空港 (背景:通信/航法/監視の技術進歩)

場面監視レーダー(ASDE)、管制塔、飛行場管制、  
空港監視レーダー(ASR+PSR)、マルチラレーション、ターミナルレーダー管制

6 4. 現代の航空管制:航空路 (背景:通信/航法/監視の技術進歩)

航空路監視レーダー、全地球測位システム(GPS)、インマルサット(INMARSAT)、  
デジタル通信(Controller-Pilot Digital Link Communication: CPDLC)、  
遠隔無線通信施設(RCAG)、航空路管制&洋上管制

6 5. 参考:日本周辺の航空交通(Flightradar24 による俯瞰図)

交通量の多い路線は左右に分けて複線化

6 6. セパレーション(管制間隔)の種類

縦間隔(Longitudinal Separation)、横間隔(Lateral Separation)、垂直間隔(Vertical Separation)

6 7. 縦間隔の短縮

国内: 位置関係による時間差 ⇒ レーダーによる距離

洋上: 位置通報による時間差 ⇒ GPS による距離

6 8. 横間隔の短縮

国内: 無線標識を結ぶ航空路 ⇒ レーダー監視による広域航法

洋上: 航法と通信能力に対応 ⇒ GPS 航法と衛星通信

6 9. 北太平洋の飛行経路の変遷

当初: 任意の経路(気象条件を考慮した最も経済的経路)

1970 年代(ベトナム戦争中・後期):

大型軍用輸送機 C141 と民間旅客機(速度差問題を解消するため専用経路 NOPAC-1 を設定、

民間機(B707 や DC8 など)は北側 100NM と南側 100NM 以南を飛行して交通流を分離

現在: 50NM 間隔の 5 本の並行経路を設定

以南は日米の管制機関が毎日協議して複数の標準経路(PACOTS)を設定

7 0. 参考:現在の北太平洋の航空交通(Flightradar24 による俯瞰図)

西行便は NOPAC 最北経路とアラスカ北部からオホーツク海経由でソウル/北京方面への経路

東行便は NOPAC 南側経路とそれ以南の PACOTS 経路、南東からの西行便はハワイからの到着機

7 1. 短縮垂直間隔(Reduced Vertical Separation Minima: RVSM)

昔は FL290以上の垂直間隔は高度計の誤差を考慮して 2000ft だった、

ジェット旅客機が主流になり 2000ft の垂直間隔では交通量を処理できなくなった、

機体毎の定期精度認証、自動操縦による高度変更時、空域安全性の計測的監視を前提に 1000ft に短縮、日本にも空域安全性管理機関 JASMA を設置(全世界に 12 か所)、高度測定装置(HME)も3か所に設置

7 2. 参考:航法精度が良すぎて空中衝突(ブラジル内陸部。2006 年 9 月 29 日)

関係機: ①ゴル航空・B737-800(空中分解して墜落。乗員乗客154名全員死亡)

②エクセル航空・ERJ-135/Legacy600(近くの空港に緊急着陸)

状 況: 同一経路を同高度で飛行 ⇒ 空中衝突(原因不明:管制システム?)

(B737 の主翼の 1/3 の部分に ERJ の主翼のウイングレットが当たった)

7 3. 1 分間クイズ-6

巡航飛行中に上方から対向する航空機が降下してくるのが見えました。航空管制官は上昇を指示しましたが、衝突防止システム(TCAS)は降下を指示しています。あなたはどうしますか?また、その理由は?

① 回答:

② 理由:

7 4. ご清聴ありがとうございました。

7 5. 1 分間クイズの答え合わせ

クイズ-1:

クイズ-2:

クイズ-3:

クイズ-4:

クイズ-5:

クイズ-6:

7 6. ご質問は?

(メモ)

以上