

いまむかし
空飛ぶ機械の今昔

航空機の歴史

2022年5月28日

講師 松田 宏

自己紹介



松田 宏

(略 歴) 1947年(昭和22年)生 山形市出身

- 山形大学理学部物理学学科卒業
- 運輸省東京航空交通管制部・航空管制官
- 日本電気(株)・システムエンジニア(航空管制システム)
- (株)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、人衛星運用管制システム開発など)
- 日本ヒューレットパカード(株)・シニアコンサルタント／室長／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) 代表取締役社長

(所属団体等)

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

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 第二次大戦後～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)各パートに1分間クイズ
- (注2)合間にビデオもご紹介
- (注3)詳しいことはネット検索で



B747-8F

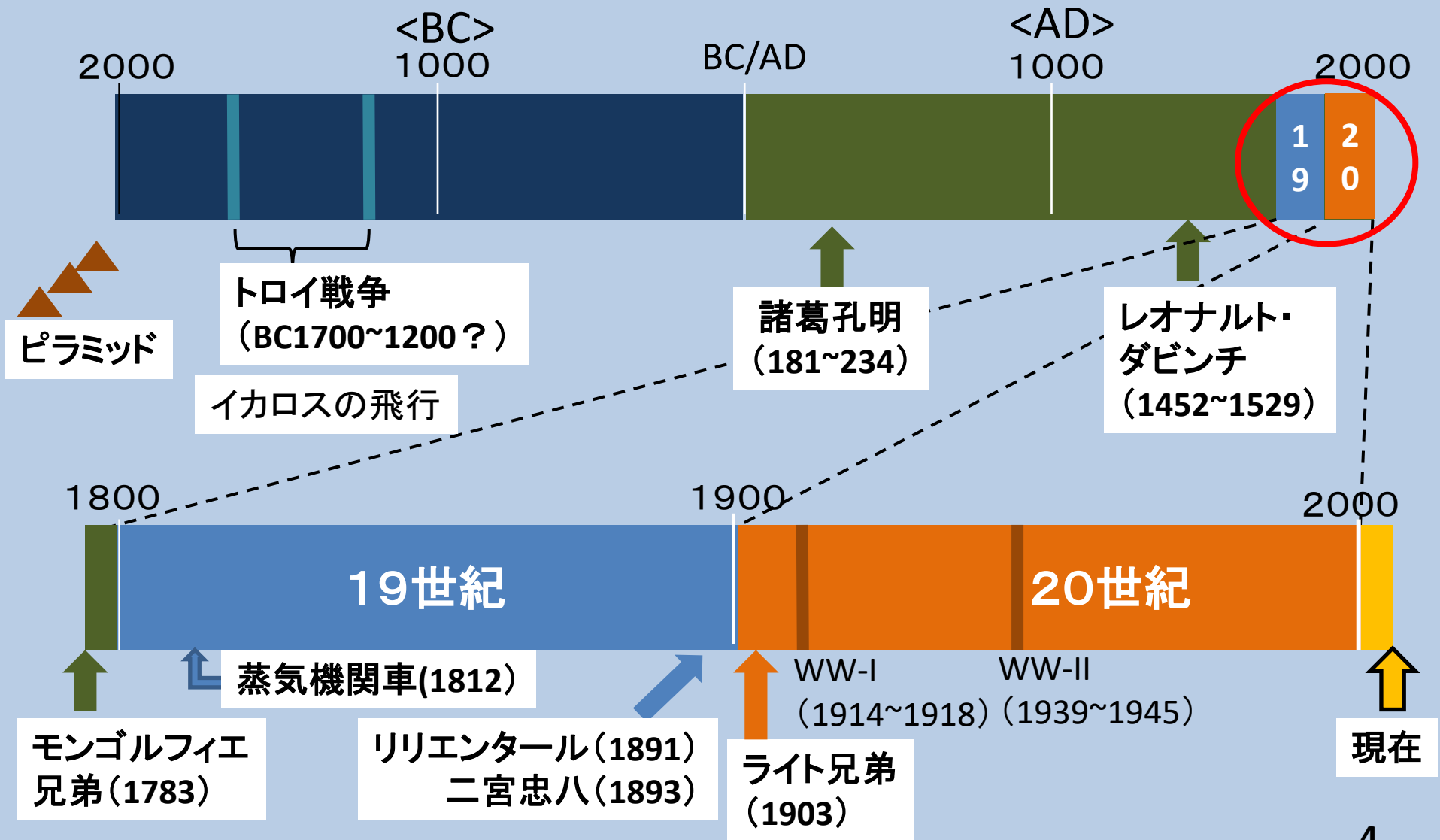


GEnxエンジン



巨大な着陸脚

歴史の時間軸





Part-1

航空機の分類と環境

航空機とは何か(法律上の分類)

| 原動機 | 空気より重い | 空気より軽い |
|-----|--|---|
| なし | グライダー(滑空機)  | 気球(熱気球、ガス気球)  |
| あり | 固定翼機(飛行機) 回転翼機(ヘリコプター) ティルトローター機(回転翼+固定翼)    | 飛行船(軟式、硬式)  |

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)

空気より重いもの

ハンググライダー、パラグライダー、
模型航空機(200g未満)、
ロケット



空気より軽いもの

係留気球



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

<区分>

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

民間ドローンの用途

測量、監視、警備、点検、
農薬散布、宅配など



宅配ドローン

軍用ドローンの用途

偵察、監視、攻撃(武器搭載／自爆)、
通信など



軍用ドローン(固定翼)



軍用ドローン(回転翼)

大空の環境

(人間には過酷な世界)

(国際標準大気:ISA)

高度

(気温、気圧)

12000m

(-56.5°C,193hPa)

10000m

(-50°C,264hPa)

8000m

(-37°C,356hPa)

6000m

(-24°C,472hPa)

4000m

(-11°C,616hPa)

2000m

(2°C,795hPa)

平均海面(MSL)

(15°C,1013hPa)

ジェット旅客機



ターボプロップ旅客機



プロペラ式旅客機



↑ 成層圏

↓ 対流圏

圏界面

エベレスト8848m



富士山3776m



<標高の高い都市>

ラサ 3650m

アジスアベバ 2400m

メキシコシティ 2240m

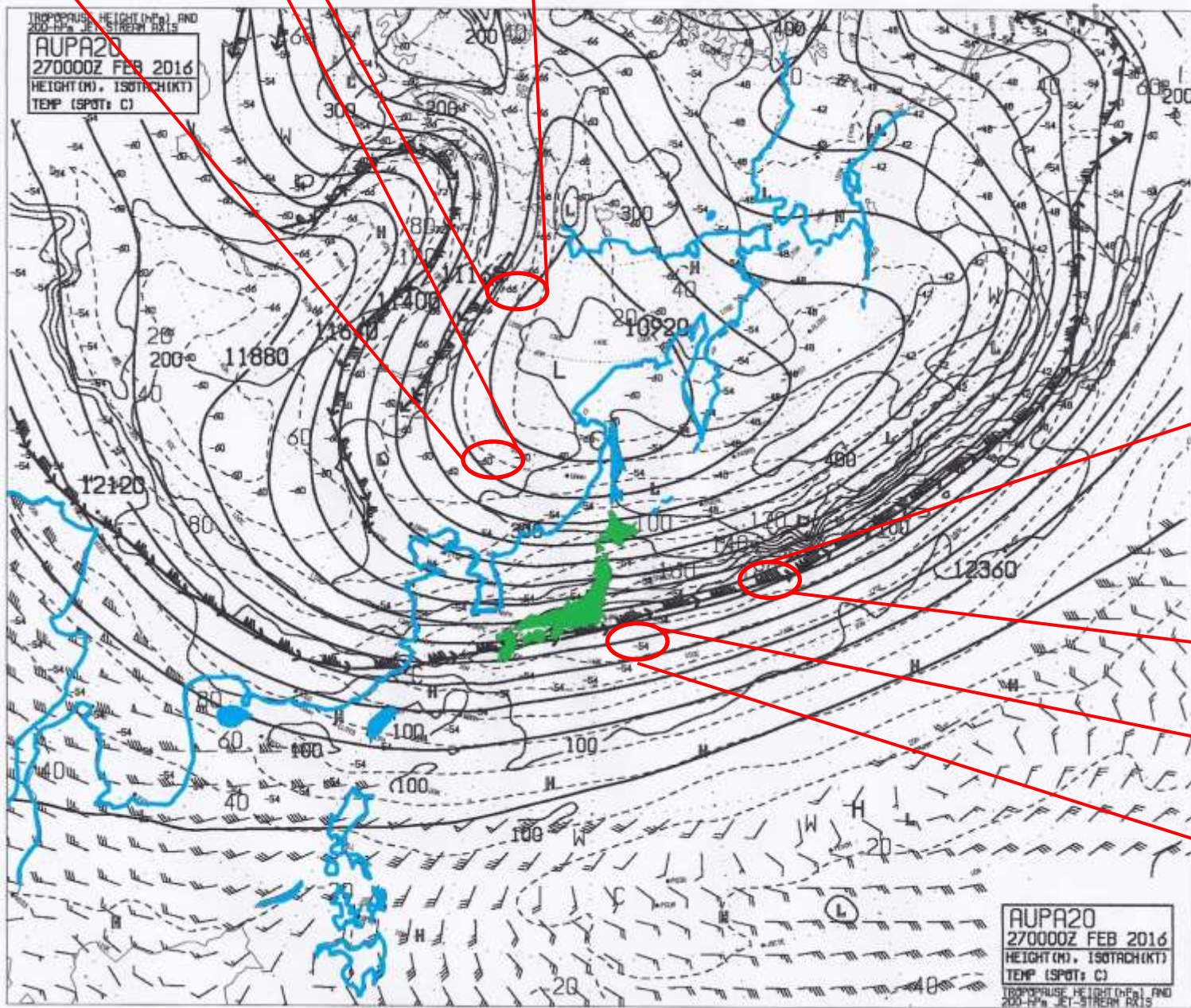
気温 -60°C


気温 -66°C

ジェット気流

200hPa等圧面
(11000~12000m)
高層天気図

2016年2月27日
00:00世界時間
(09:00日本時間)




風速195ノット
≒360km/H

気温 -54°C

資料:気象庁
解説:松田 10

参考：高度 (altitude) と高さ (height)



QNH
(規制値)

二針式気圧高度計

高度



QNH
規制値

Flight Director

高度 : altitude (平均海水面からの高さ: 標高)

<QNH方式>

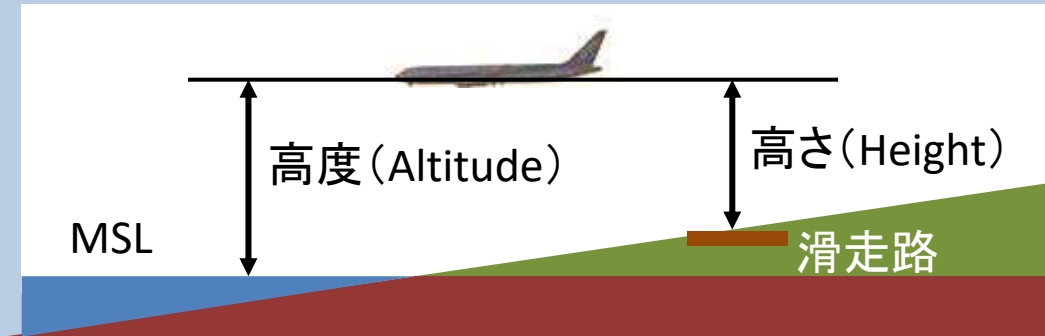
平均海水面 (MSL) の気圧で規制 (低高度)
(注) 管制機関が地域の気圧データを通報

<Flight Level (FL) 方式>

平均海水面の標準気圧で規制 (高高度)
(注) 気圧により実際の高度が変動

高さ : height (地表からの高さ)

(例) 最終進入の決心高 (Decision Height)
電波高度計の表示



(注) 平均海水面 (MSL) の標準気圧
29.92 inch Hg (水銀柱のインチ表記)
1013 hPa (メートル法表記)

水銀気圧計



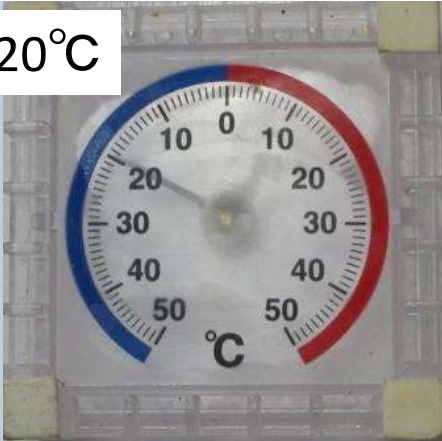
参考：低温で起きる問題



防氷ブーツ

日常生活での低温体験
(家庭用冷蔵庫の冷凍室)

-20°C



最低気温の日本記録

旭川(1902年) -41°C

冷凍倉庫の温度

海産物など: -30°C

マグロ専用: -60°C



■ 燃料に混入した水分が凍結
→燃料が供給されずエンジン停止
[対策]燃料タンクの水抜き

■ 翼やプロペラの前縁に水分が氷着
→揚力や推力の低下
[対策]防氷ブーツなどの防氷装置

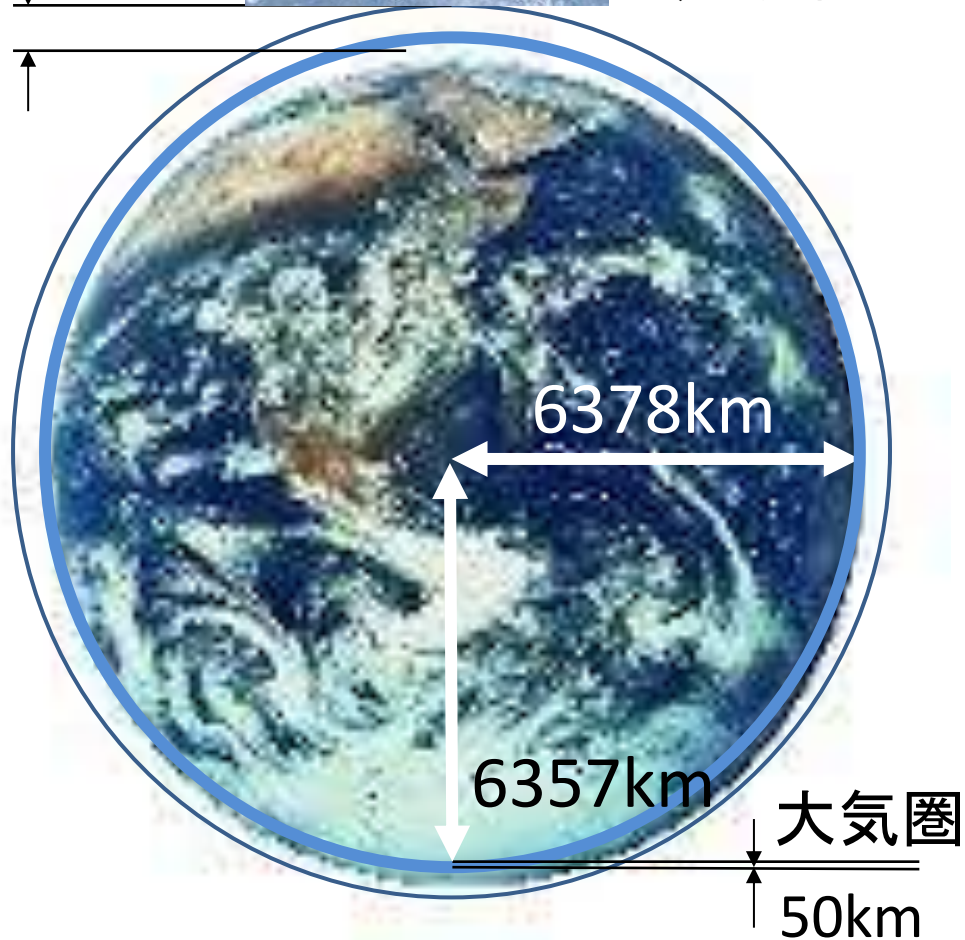
■ 燃料が凍結
→燃料が供給されずエンジン停止
[対策①]融点の低い燃料を使用
[対策②]飛行高度を下げる

大気圏と宇宙



国際宇宙
ステーション

400km

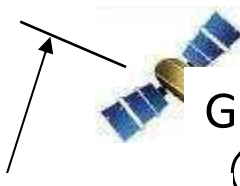


(注) ジェット機の高度記録: 37.5km (Mig25)



静止衛星
(赤道上)

36,000km



GPS衛星
(周回)

22,000km

北極

南極

赤道



1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状態は？

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



Part-2

航空前史

ギリシャ神話「イカロスの翼」

- * ミノス王が宮殿地下の迷宮を建設後、設計者ダイダロスと息子を塔に幽閉
- * ダイダロスは鳥の羽を集め、ロウで固めた翼を作り脱出飛行を計画
- * 息子イカロスは父の忠告を聞かず太陽に近づきすぎ、翼が溶けて墜落死



父ダイダロス
(生存！)

息子イカロス
(17世紀に作られたレリーフ)

ミノスの迷宮(クレタ島)

絵画に描かれたイカロス

(航空図書の出版社名にも)



1819、メリージョセフ・ブロンデル
(ルーヴル美術館)



ドメニコ・ピオラ、1627-1703

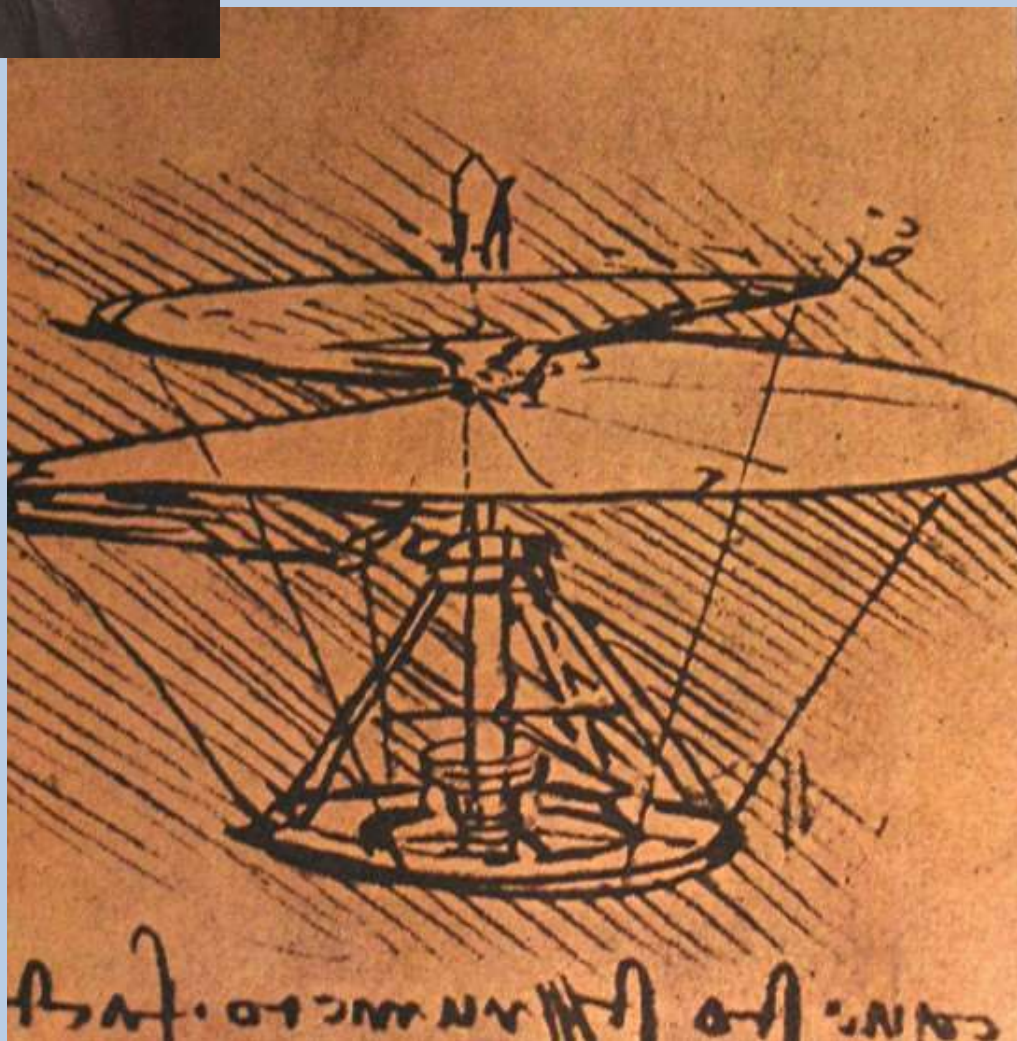


レオナルド・ダビンチの飛行器械

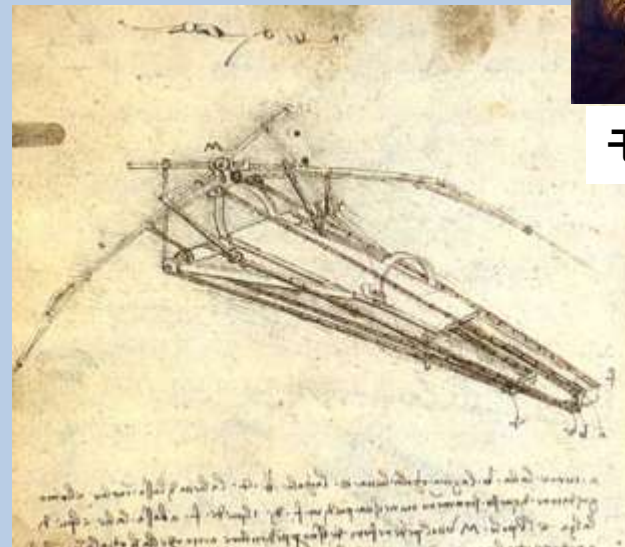
(1452-1519: 科学者 / 芸術家)



モナリザ



発明メモ: 回転翼式飛行器械



同・羽ばたき式飛行器械



全日本空輸の旧社章

リリエントールのグライダー



リリエントールのグライダー飛行実験

20年間、鳥の羽根による飛行を研究。
ハンググライダーを作り、小高い丘から飛行
詳細なデータを記録。
実験中に突風により墜落死。



1891



オットー・リリエントール
(1848～1896)

二宮忠八の動力飛行器



二宮忠八の玉虫型飛行器(1893)
縮小模型・復元モデル



二宮忠八
(1866～1936)



徴兵され陸軍病院に勤務
(聴診器用のゴム管を利用)

- * ゴム動力によるカラス型飛行器で36mの飛行に成功(1893)
- * 日清戦争中で軍の援助が得られず実機開発を断念
- * 英国王立航空協会が縮小モデルで試作し飛行に成功。
→ ライト兄弟以前に飛行機の原理を発明した人物と認定。

諸葛孔明の熱気球「天灯」

(元は戦場での通信用。今は春節の祝賀行事)

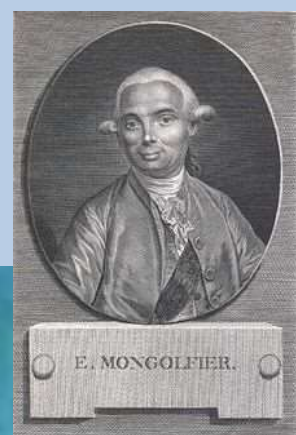


(写真: Lion Travel)

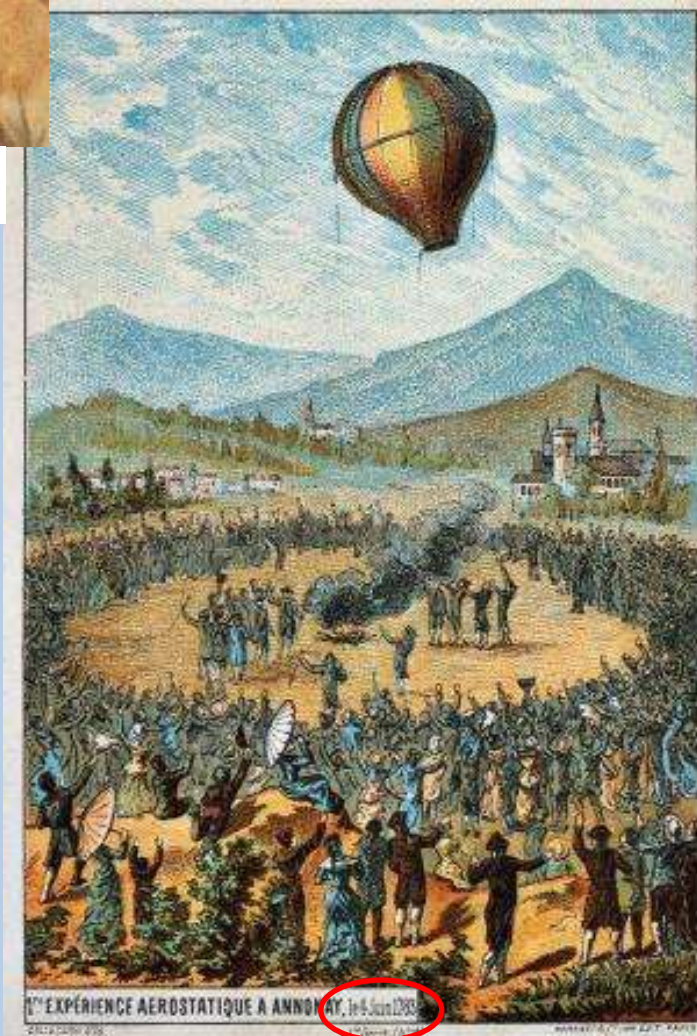
モンゴルフィエ兄弟の熱気球 (発明の功により兄はルイ16世から貴族に)



兄ジョセフ



弟ジャック



1783年



2名搭乗、高度910m、距離9km(25分)

ガス気球

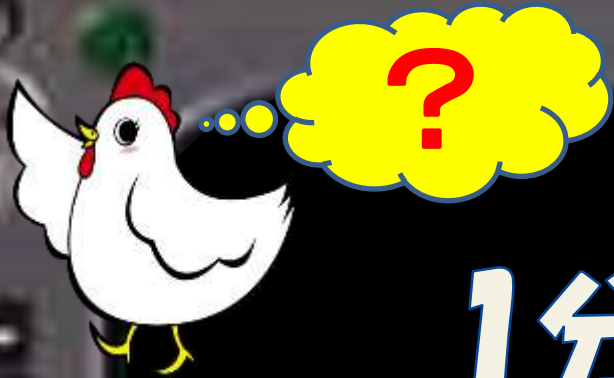


アンリ・ジファールの蒸気機関飛行船
(1852)



ロシア軍の偵察気球
日露戦争時(1905頃)


ジャック・シャルルの
ガス気球の初飛行
(1783)
(絵は後世のもの)



1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？
(周りの方達と相談して下さい)

- ① Tes/No
- ② その理由は？



Part-3
ライト兄弟～
第二次世界大戦

写真:松田



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)



兄:ウィルバー

弟:オリバー

| | | |
|-----|-----|------|
| 1回目 | 12秒 | 37m |
| 2回目 | 12秒 | 53m |
| 3回目 | 15秒 | 61m |
| 4回目 | 59秒 | 260m |



ノースカロライナ州キティーホークにて

権威ある物理学者があり得ないと否定！



ライト兄弟の自転車屋

木製羽布張→鋼管構造→全金属製



アンリファルマン III (木製羽布張)



フォッカー E.III (鋼管溶接構造)



ドベルデュサン レーサー (木製モノコック)



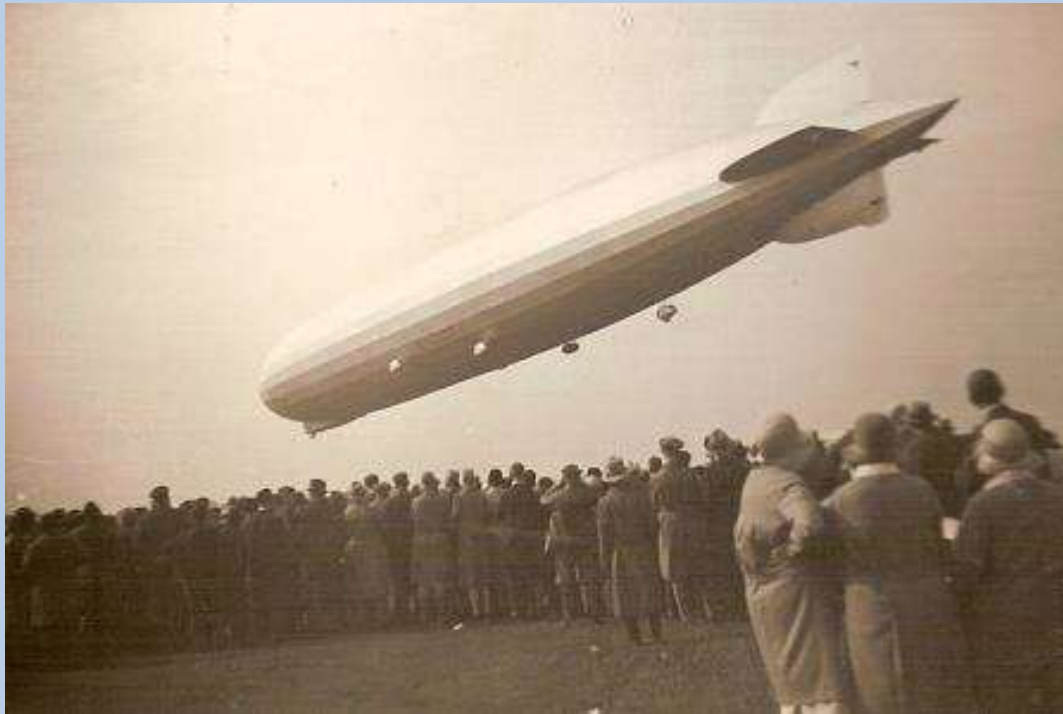
スピリット・オブ・セントルイス号
(ライアンNYP-1: 鋼管羽布張)

硬式飛行船(1)

(世界一周飛行や大西洋横断定期路線も)



グラーフツェッペリンの
記念切手



グラーフツェッペリン号
全長237m(1928)



日本の霞ヶ浦に飛来した
ツェッペリン号(1929)

硬式飛行船(2)

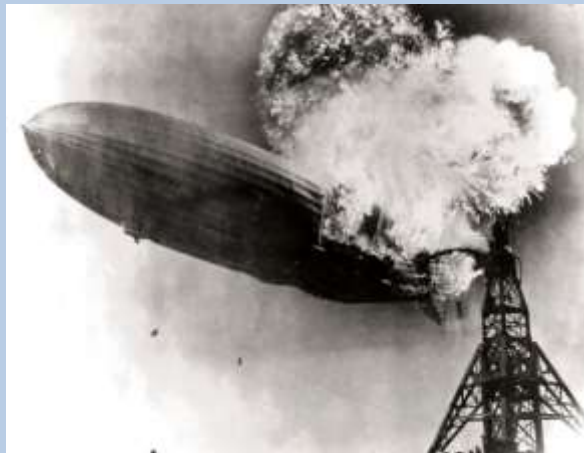


ニューヨークのエンパイア
ステートビルの屋上には
飛行船の係留装置と乗客
待合室があった

* 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は禁止)

⇒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

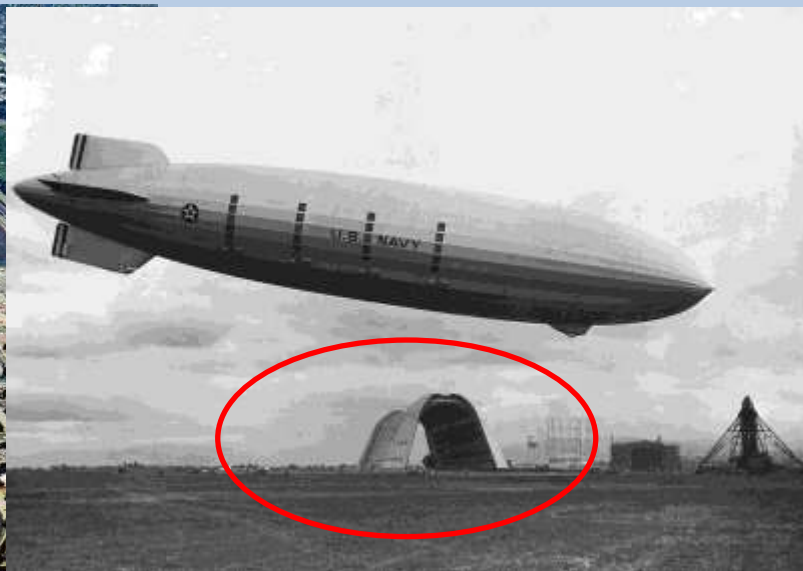


ヒンデンブルク号爆発炎上
(1937年5月6日。米国東部
ニュージャージー州レイク
ハースト海軍飛行場にて。
原因は不明:陰謀説、落雷説
など諸説あった)

⇒急速に衰退

余談：飛行船の巨大格納庫

(米軍はヘリウムガスを使用し、偵察任務で長く運用)



↑米海軍モフェット飛行場
(カリフォルニア州)の
巨大格納庫Hangar One
(1930年代)



←現NASAエイムズ研究所
(カリフォルニア)

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？)



フランス南部から
西アフリカ経由で
南米の南端まで
郵便物を空輸



サンテグジュペリ
(1900~1944)



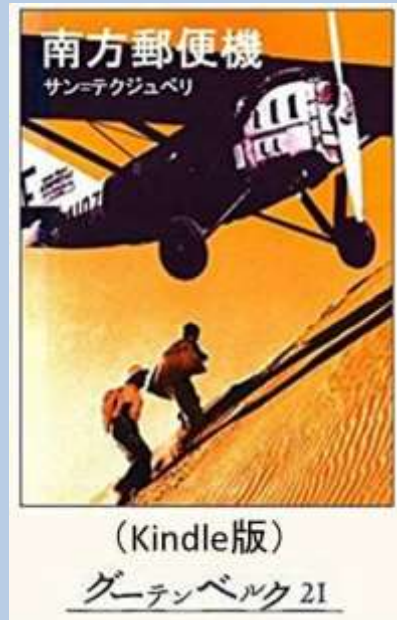
妻コンスエロ



書籍表紙: Amazon.com
地図: Google+松田



参考：航空文学の誕生 (サンテグジュペリの主な作品)



香水「夜間飛行」



(出典)
書籍表紙: Amazon.com
香水容器: ゲラン社

旅客機の出現と発達

(郵便物+旅客⇒旅客+郵便物)



ユンカース F.13(乗客4名)



ダグラス DC3(乗客21~32名)



ボーイング 247(乗客10名)



マーティン M130 (乗客43名)
愛称:チャイナクリッパー

戦争が技術進歩を加速

零戦



B10



P51Dマスタング



B17



B24



Me262A



ジェット戦闘機

B29






1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？
(周りの方達と相談して下さい)

- 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

<休憩>



Part-4
第二次大戦後～
超音速旅客機

大都市を支えた大空輸作戦

(ベルリン大空輸: 1948年6月~1949年9月)



牛乳の空輸



輸送機を歓迎する市民



あらゆる生活物資を空輸

レーダー管制で3分間隔で飛行

ソ連による封鎖で孤立した西ベルリン市民200万人を空輸で支えた大作戦



到着したC47輸送機



離陸を待つC54輸送機

音速の壁を突破



音速を突破したX-1実験機
(1947)



展示されている実験機 X-1
(スミソニアン航空宇宙博物館)



チャック・イエーガー大尉
(1923-)

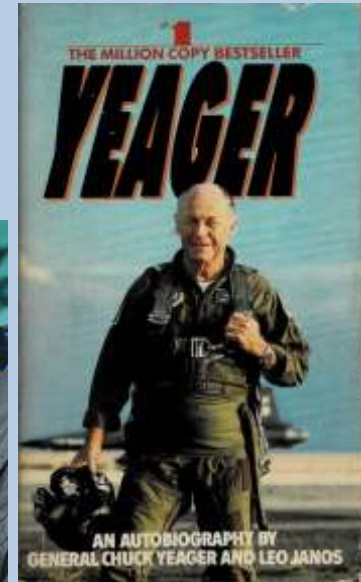


XLR11ロケットエンジン

| | |
|---------|---------------------|
| 全長: | 9.42m |
| 全幅: | 8.53m |
| 全高: | 3.30m |
| 自重: | 3,171kg |
| 全備重量: | 5,550kg |
| 推力: | 2,722kg |
| 最高速度記録: | <u>M1.45</u> |

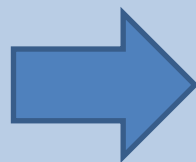


C. イェーガー少将



自伝

ジェットエンジンの出現



ライト兄弟のピストンエンジン
(4気筒12馬力)



Mig15



F86

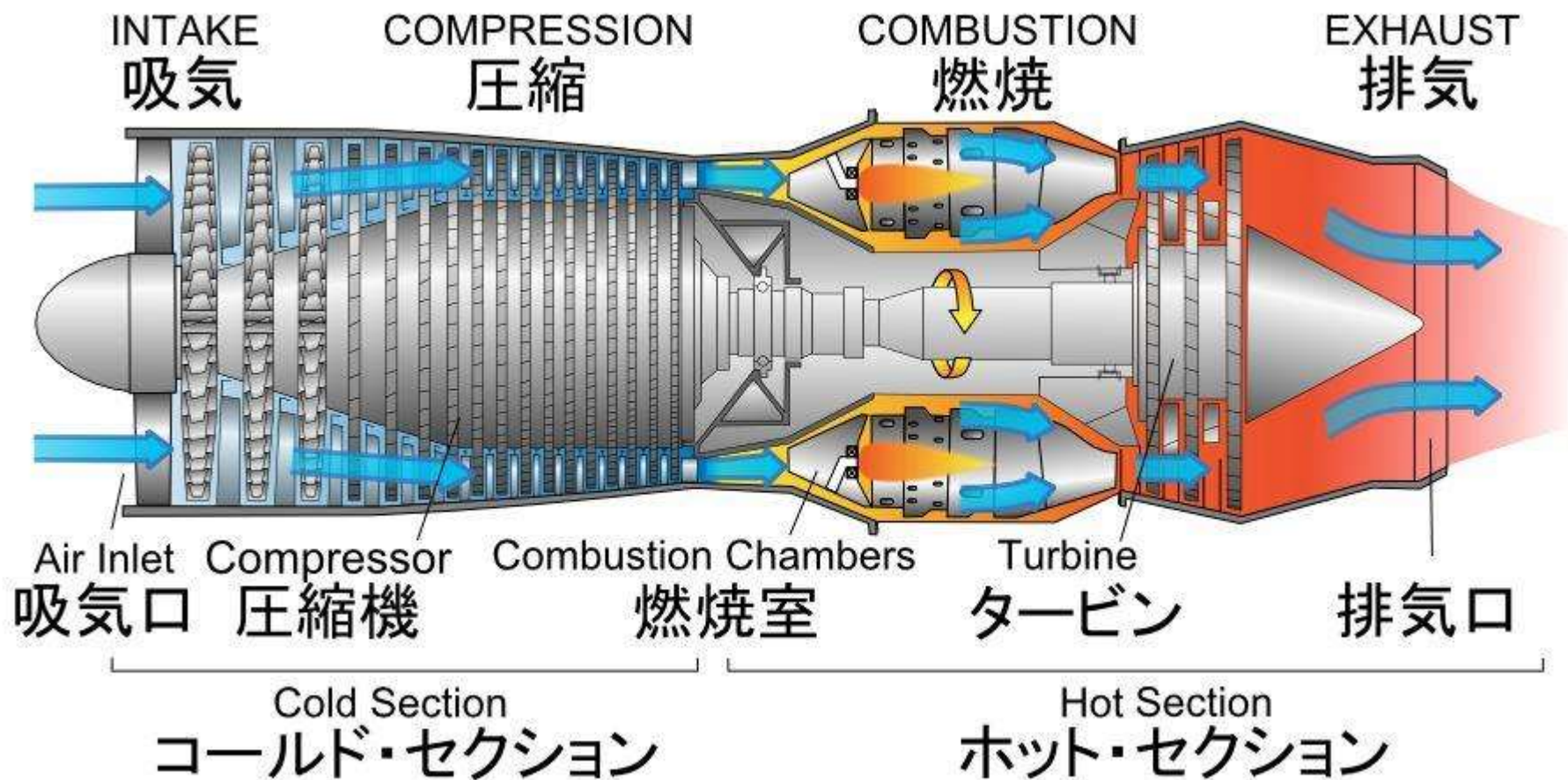


戦後初の日本製
ジェットエンジン(T1搭載)



フォード・トライモーターの
星型エンジン

ジェットエンジンの構造



ターボプロップエンジンの構造



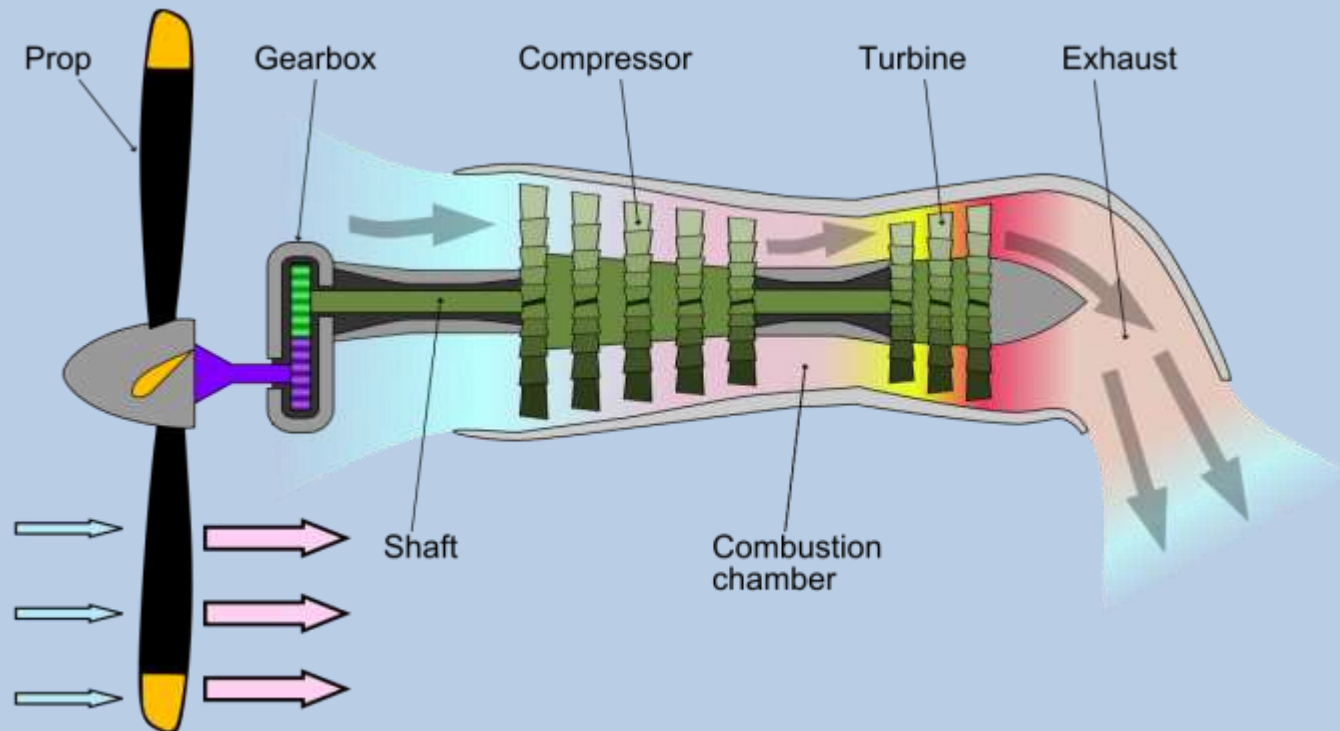
ボンバルディアQ300



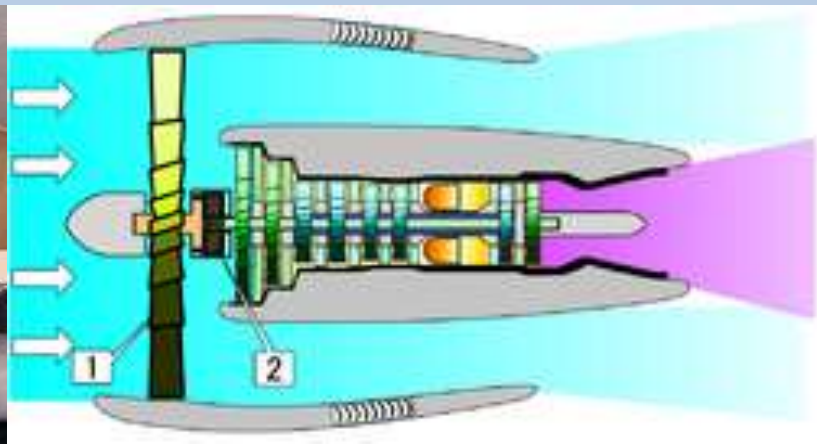
YS11



エンブライエルEMB-120



ターボファンエンジンの構造



B747/A300搭載
PW-JT9D

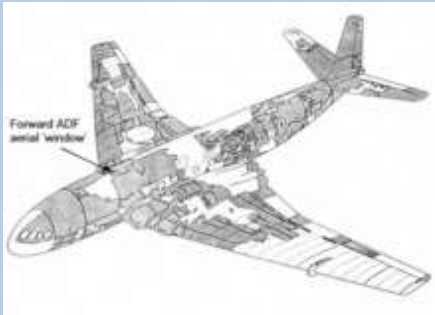
B787搭載
RR Trent 1000



B777搭載
GE90

ジェット旅客機の出現

コメット Mk. I (空中分解事故が頻発)



回収され復元された
コメット Mk. I 型機
(金属疲労の発見)

コメット Mk. III (改良型)



DC8

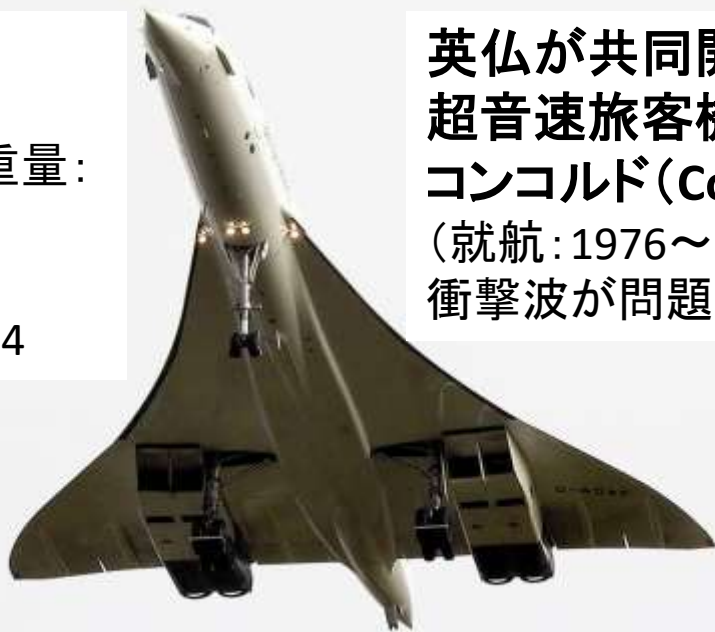


B707

超音速旅客機

(Super Sonic Transport SST)

全長: 62m
全幅: 26m
最大離陸重量:
186t
巡航速度:
マッハ2.04



英仏が共同開発した
超音速旅客機
コンコルド(Concorde)
(就航: 1976~2003)
衝撃波が問題

“e”の有無で
英仏が紛糾



客室のマッハ計
(2.01を表示)



パリCDG空港でもらい事故(2000)



定員100人の客室
(料金はファーストクラス並)



高度18000mの空



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受けますか？

- ① Yes/No
- ② 理由は？

An aerial photograph of a vast desert landscape, likely the Sahara, showing rolling sand dunes and a winding road. The scene is captured from a high angle, with the sun casting long shadows across the terrain.

Part-5

**ジャンボ旅客機～
ハイテク機**

ジャンボ旅客機

(大型旅客機による空の旅の大衆化)



B747-100



C-5A

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 ⇒ ベストセラー旅客機 (1969年に初飛行)

- ターボファンエンジン×4
- 強力な高揚力装置
- 多数の着陸脚



B747SP (長距離型)



B747SR (短距離型)



B747-200F (貨物型)

大型化の歴史(1)



YS-11 (24t)



B727-200 (37t)



DC8-62 (152t)



B747-400 (413t)



B777-200 (247t)

()は最大離陸重量

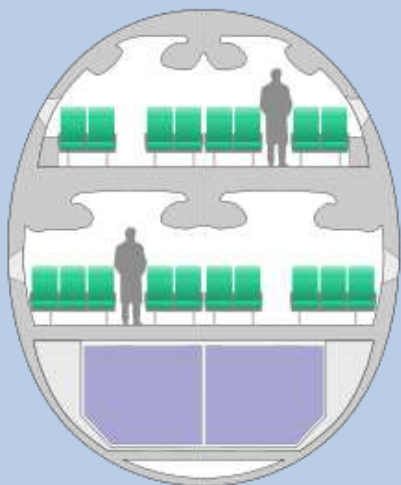
大型化

縮小化



大型化の歴史(2)

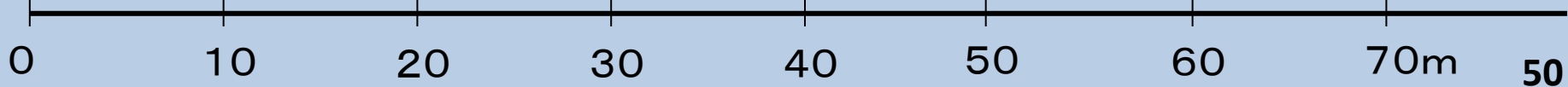
(超大型機の出現)



全席エコノミー
なら840席



A380-800
(560t)



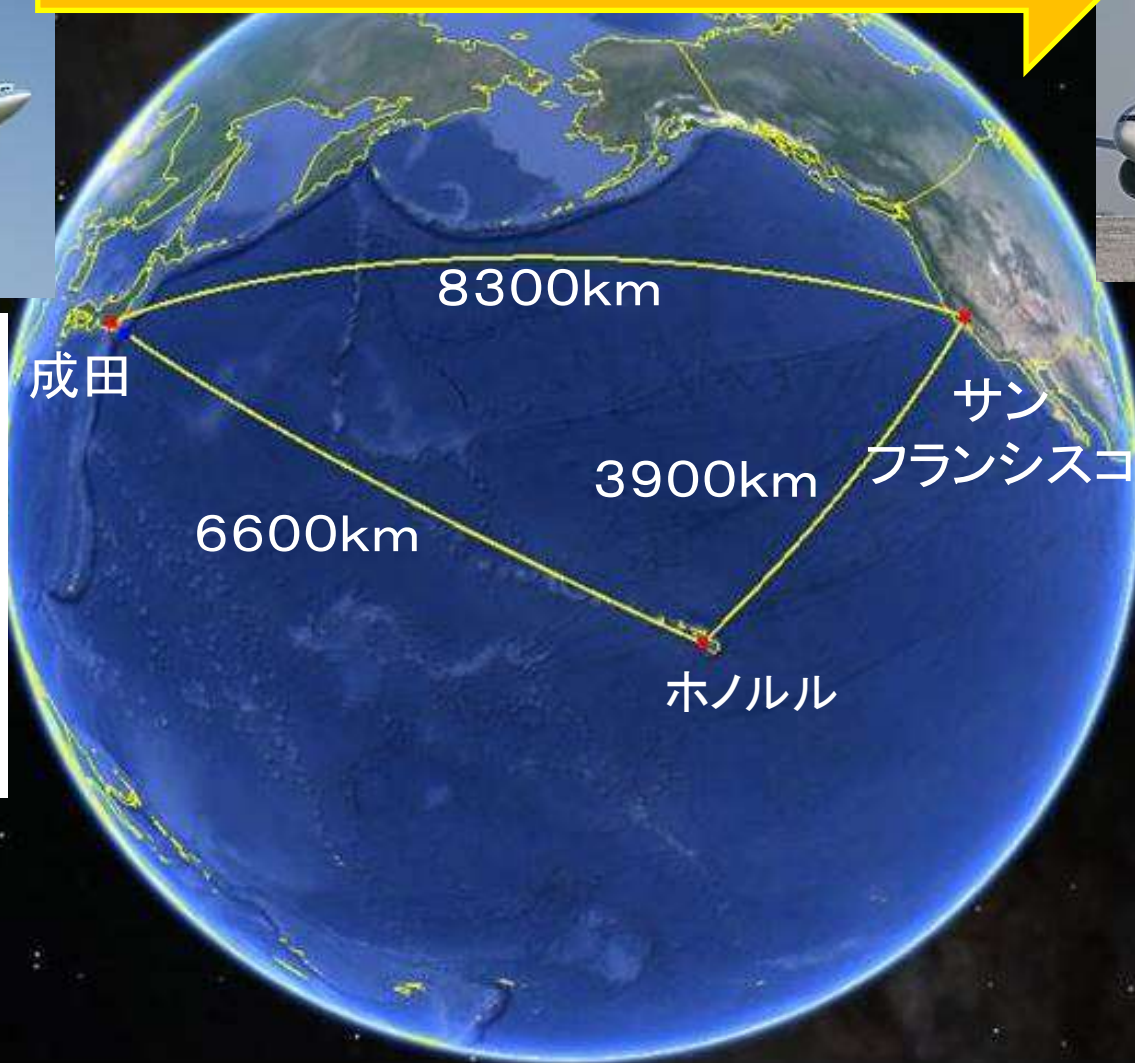
参考：信頼性向上による双発機の増加

(ETOPS: Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards)

3～4発機

長距離路線の主役交代

双発機



洋上でエンジンが故障しても飛行を継続できる

⇒洋上の長時間飛行には3～4発機が必須だった(昔)

洋上飛行時間制限の緩和(今)
(ETOPS)

60分

⇒ 90分

⇒120分

⇒180分

⇒240分

⇒330分

⇒370分

地図: GoogleEarth
+ 松田



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

採算が採れる乗客確保が大変

ETOPS効果で路線構造が変化

[ハブ&スポーク方式]

大型機による長距離路線 +
小型機による近距離路線 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



A380

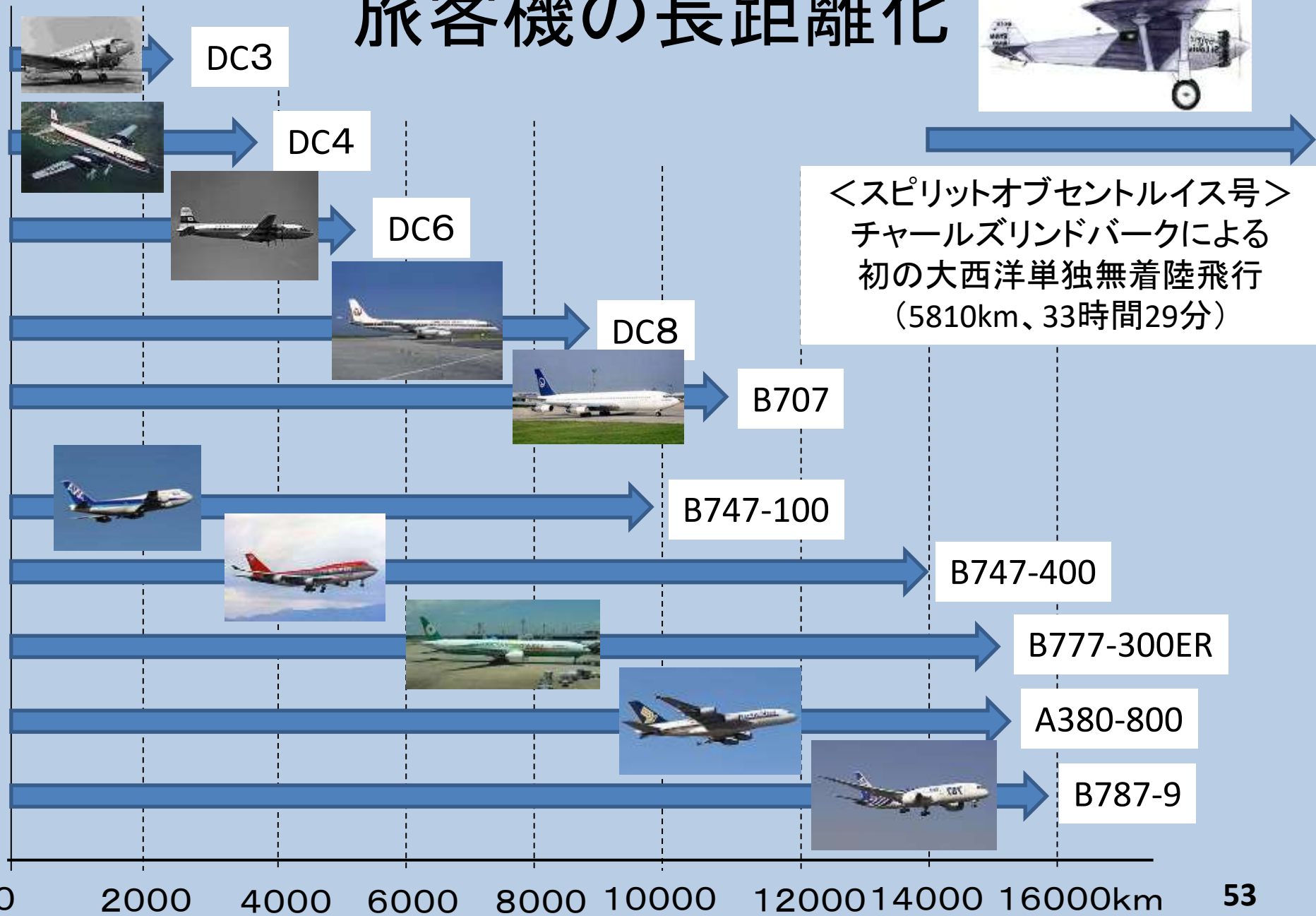


B747-8F



自転車のハブとスポーク

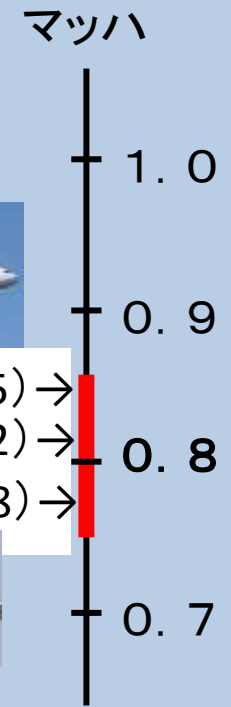
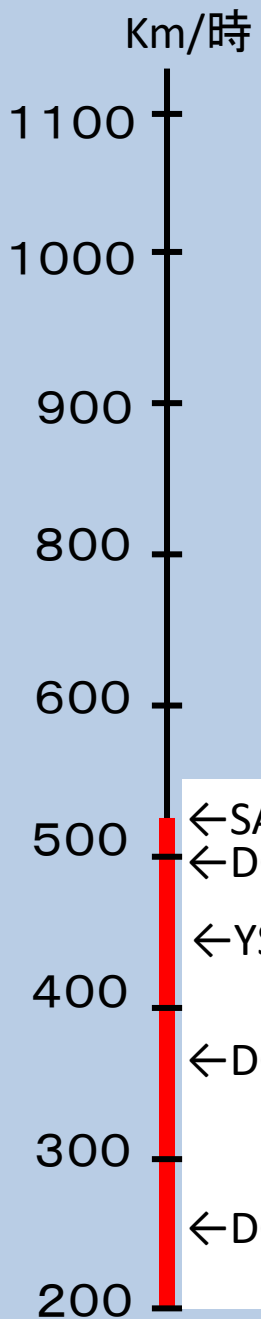
旅客機の長距離化



<スピリットオブセントルイス号>
チャールズリンドバークによる
初の大西洋単独無着陸飛行
(5810km、33時間29分)

旅客機の巡航速度

(速度は亜音速で頭打ち)



(注) 1マッハの速度は
気温で変化

- ← SAAB340
- ← DC6
- ← YS11
- ← DC4
- ← DC3



旧式の数値計
(単位: ノット)



最新式の飛行
状態指示計器

左側: 速度計
中央: 姿勢
右側: 高度計
昇降計
下部: 方位計

省エネ化



低燃費エンジン



LED照明／電気式空調



電動式操舵装置



電子シャッター



飛行管理システム(FMS)



新素材による機体重量軽減

操縦室のハイテク化

DC8-62



飛行管理システム(FMS)の操作パネル

B747-400ハイテクジャンボ
(操縦士2名)



B747-200(操縦士2名+機関士)



参考：最新式旅客機の操縦室



B777-200ER



B787-9/10/11



A380-800

参考：自動操縦による技量の低下



類似事例：鉄道車両



＜サンフランシスコ国際空港で着陸に失敗し、炎上したアセアナ航空214便 (B777-200ER) 2013年7月6日＞

原因：自動操縦に依存しすぎ技量低下した操縦士の初歩的なミス (最終進入中の速度低下見落し)

⇒ 米連邦航空局 (FAA) は低高度での手動操縦を推奨

自動運転の発達で運転士の仕事は監視中心
運転技量の低下が懸念

⇒ 車庫への出し入れや特定時間帯に手動運転



1分間クイズ-5

気温 15°C の音速は $340\text{m}/\text{秒}$ で、気温が 1°C 下がると $0.6\text{m}/\text{秒}$ 遅くなります。

- ① 気温 -45°C の音速は？ ($\text{m}/\text{秒}$)
- ② 気温 -55°C の音速は？ ($\text{m}/\text{秒}$)



Part-6

航空交通管制

世界初の旅客機の空中衝突



ファルマン F-60
パリ発 ロンドン行
(乗員2名)



1922年4月7日
パリ北方110km
高度150m
(全員死亡)



デハリバンド DH-18A
ロンドン発 パリ行
(乗員乗客5名)

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

(出典: Wikipedia
地図: Google Earth)



関係者が集まり再発防止策を協議
⇒ 無線機の搭載、方向探知機の導入、公式な航空路の設定など

初期の航空管制



旗で離着陸を指示した
Flag Man (写真:FAA)



管制塔



複数の方向探知機を使い
飛行機の現在位置を監視



管制官が無線電話と
信号灯で離着陸を指示



無線電話で位置通報を
受け経路や高度を指示

現代の航空管制：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



羽田空港の新旧管制塔



空港監視レーダー
(ASR + SSR)



飛行場管制



ターミナルレーダー管制

マルチラレーション
(MLAT)

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
(ARSR+SSR)



全地球測位システム(GPS)



インマルサット(INMARSAT)



航空路管制
& 洋上管制



東京航空交通管制部の管制室

デジタル通信
(CPDLC)



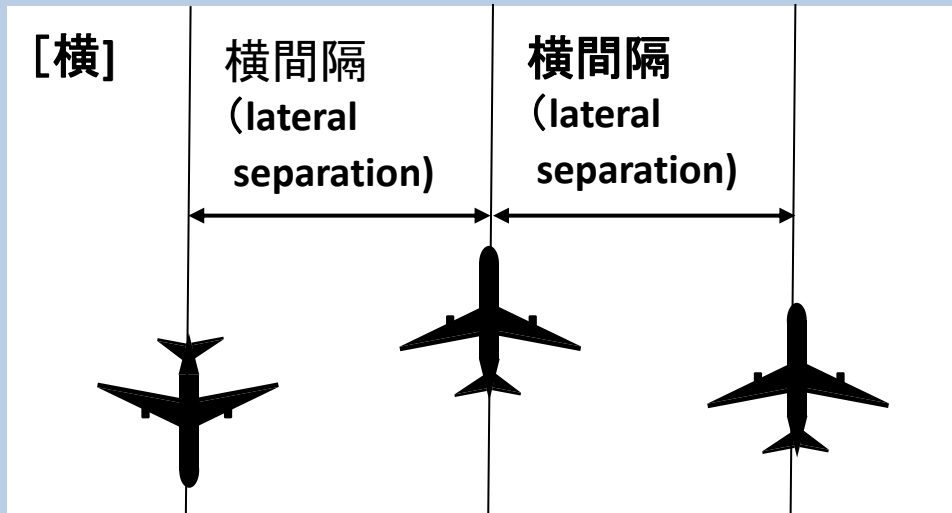
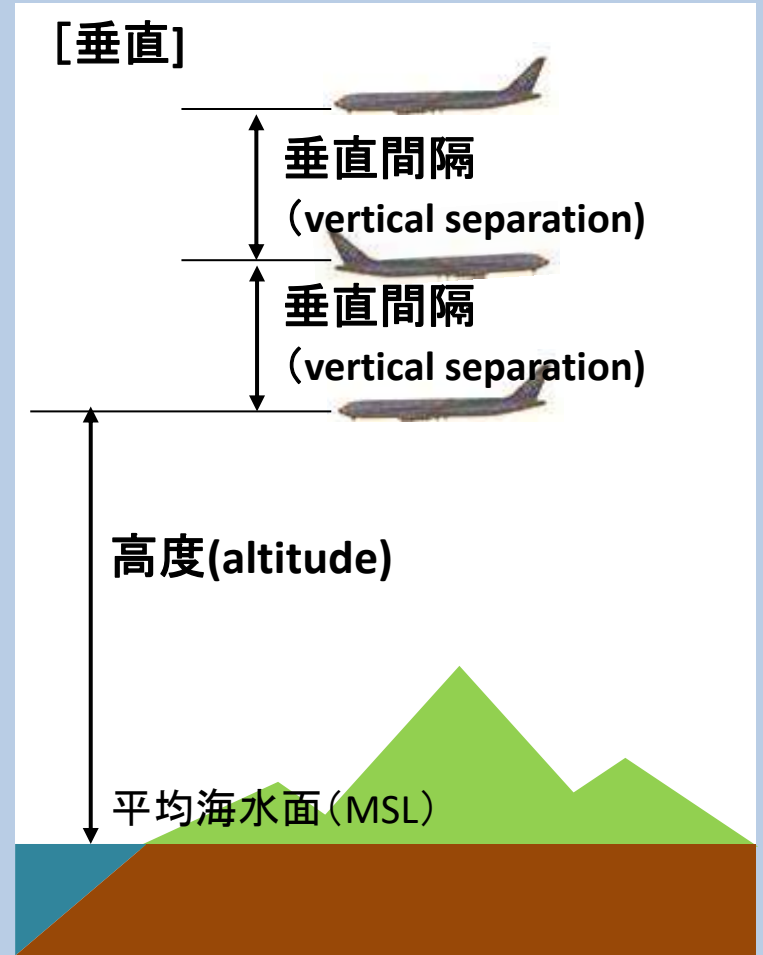
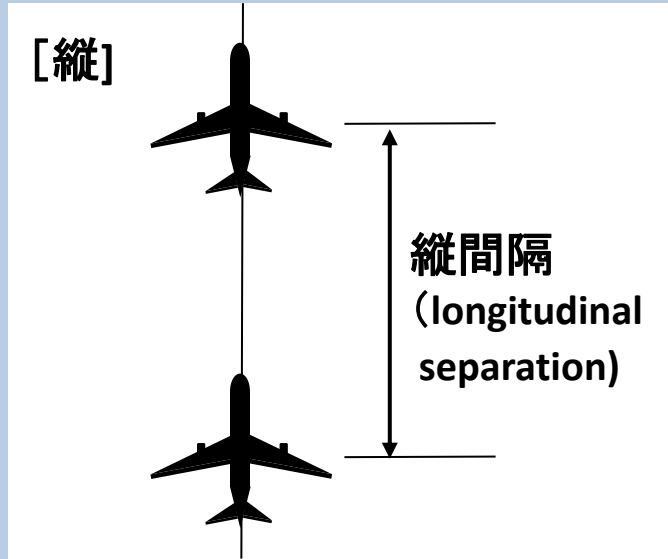
遠隔無線通信施設
(RCAG)

参考：日本周辺の航空交通



2018年5月23日 1054JST(0154UTC)
出典：Flightradar24

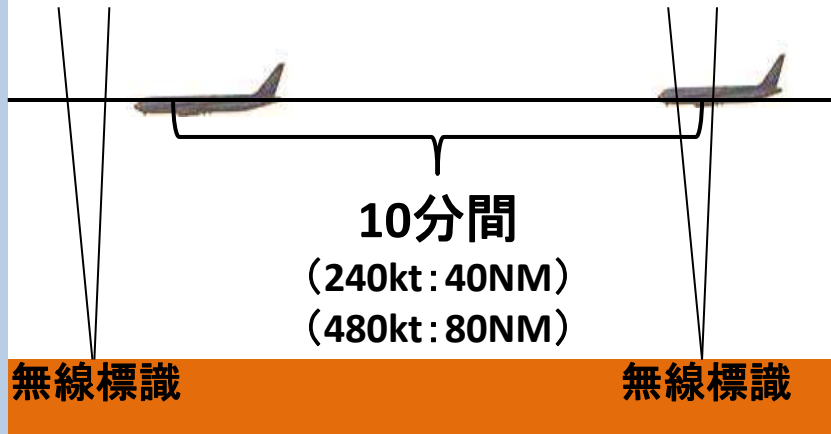
セパレーション(管制間隔)の種類



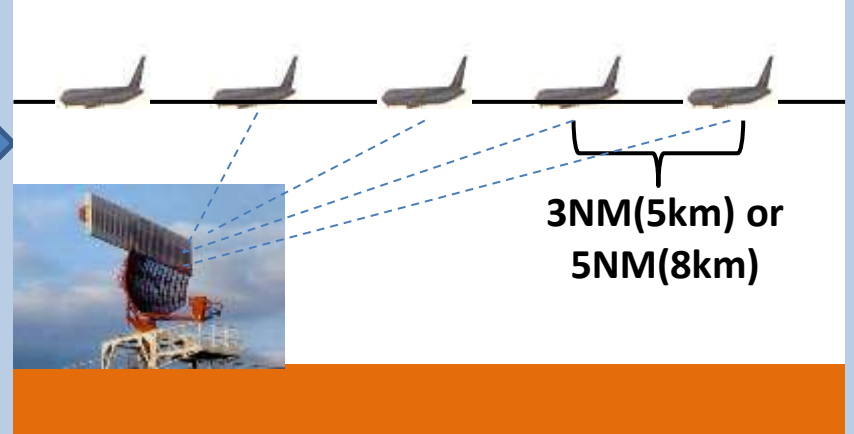
縦間隔の短縮

【国内】

位置通報による時間差

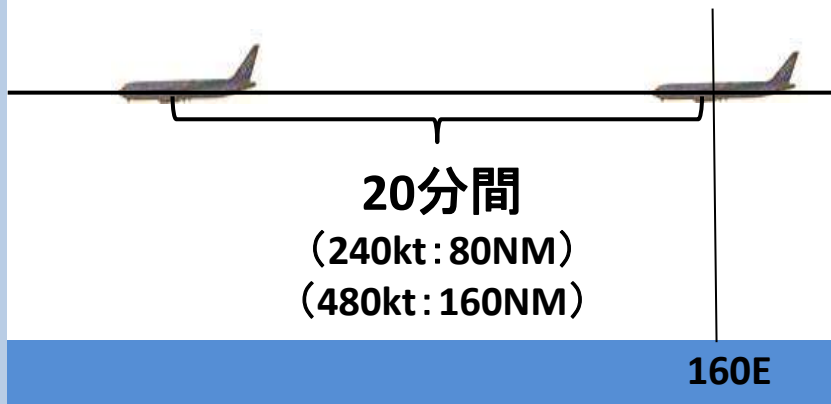


レーダーによる距離

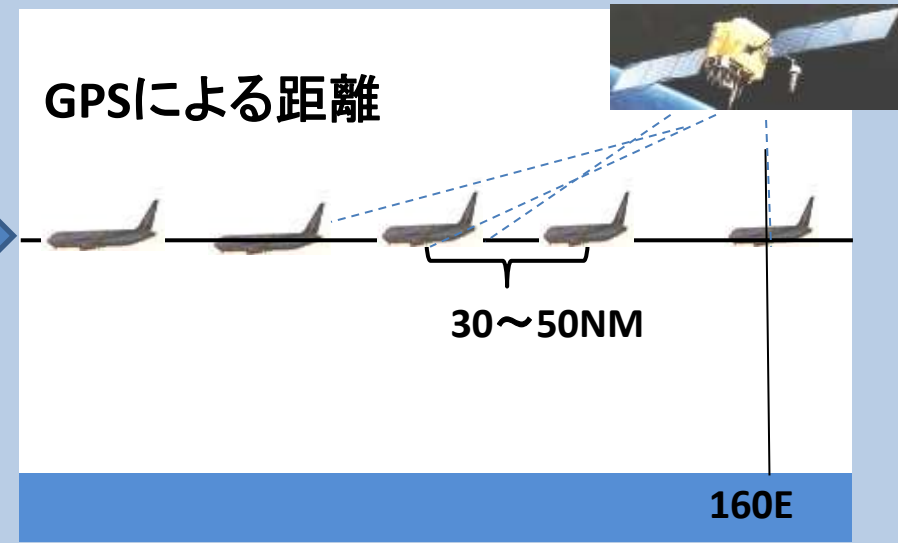


【洋上】

位置通報による時間差

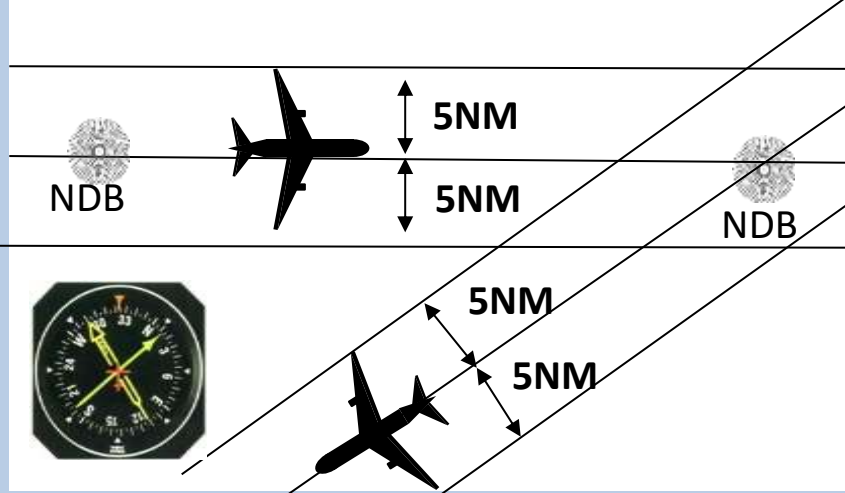


GPSによる距離

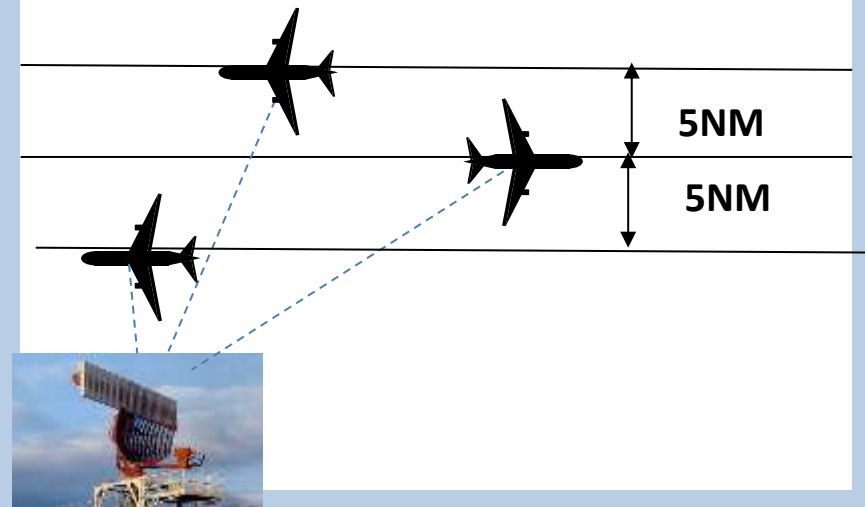


横間隔の短縮

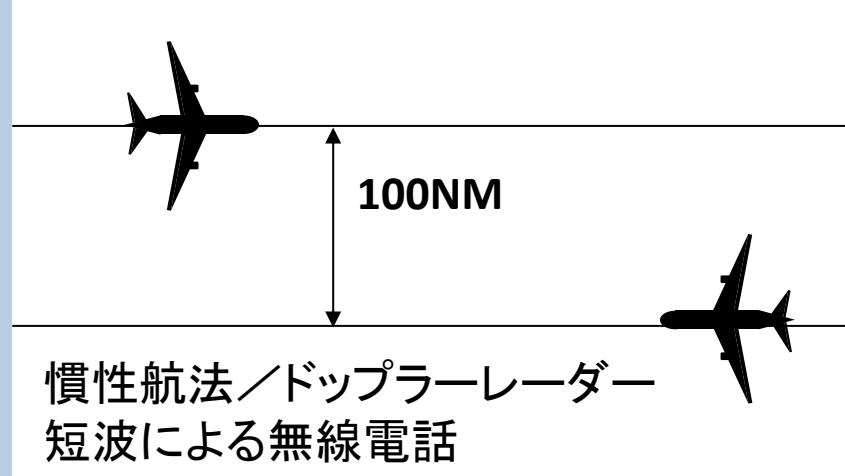
【国内】無線標識を結ぶ航空路



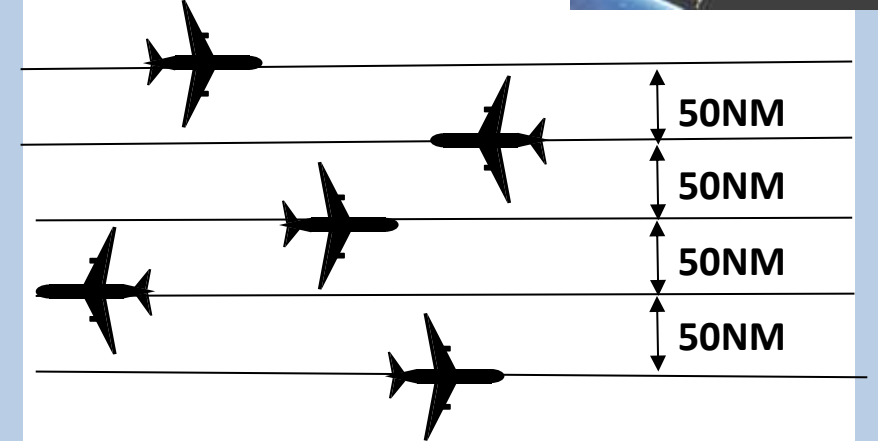
レーダー監視による広域航法



【洋上】航法と通信能力に対応



GPS航法と衛星通信



北太平洋の飛行経路の変遷

任意の経路

(気象状態を考慮した最も経済的経路)

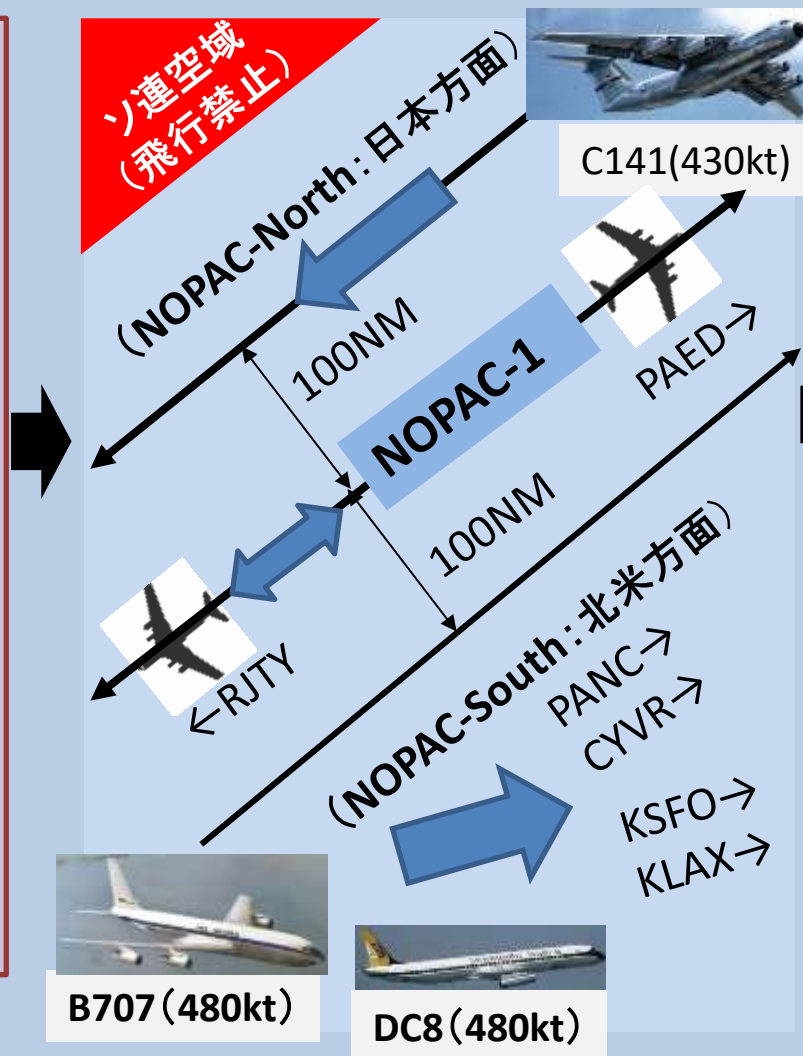


B707 (480kt)

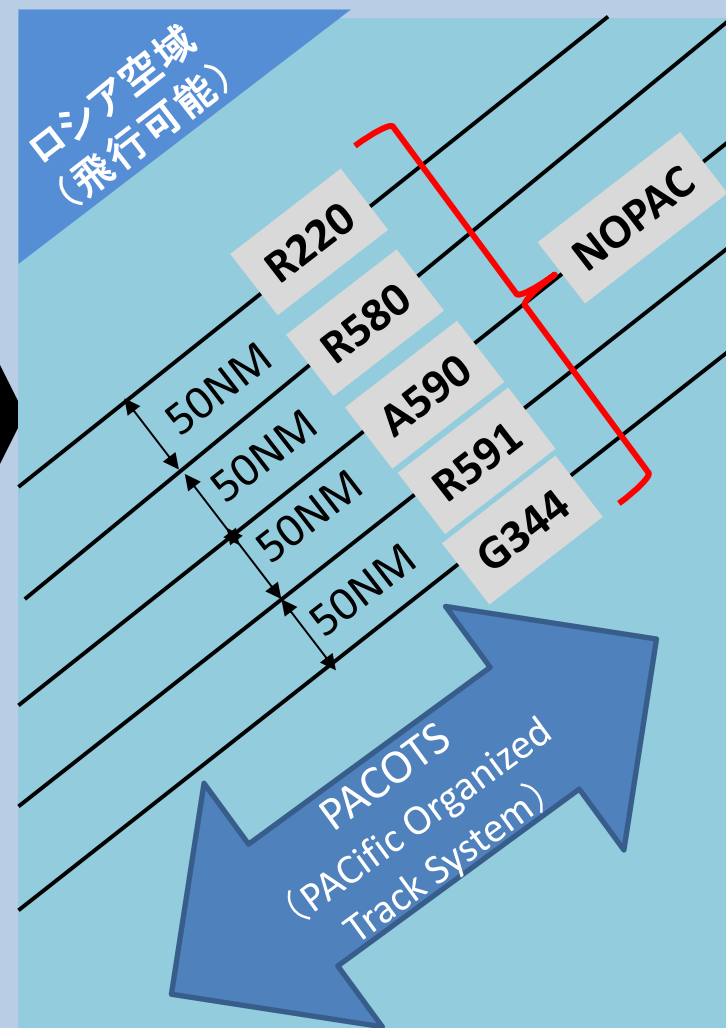


DC8 (480kt)

当初



1970年代(ベトナム戦争中・後期)



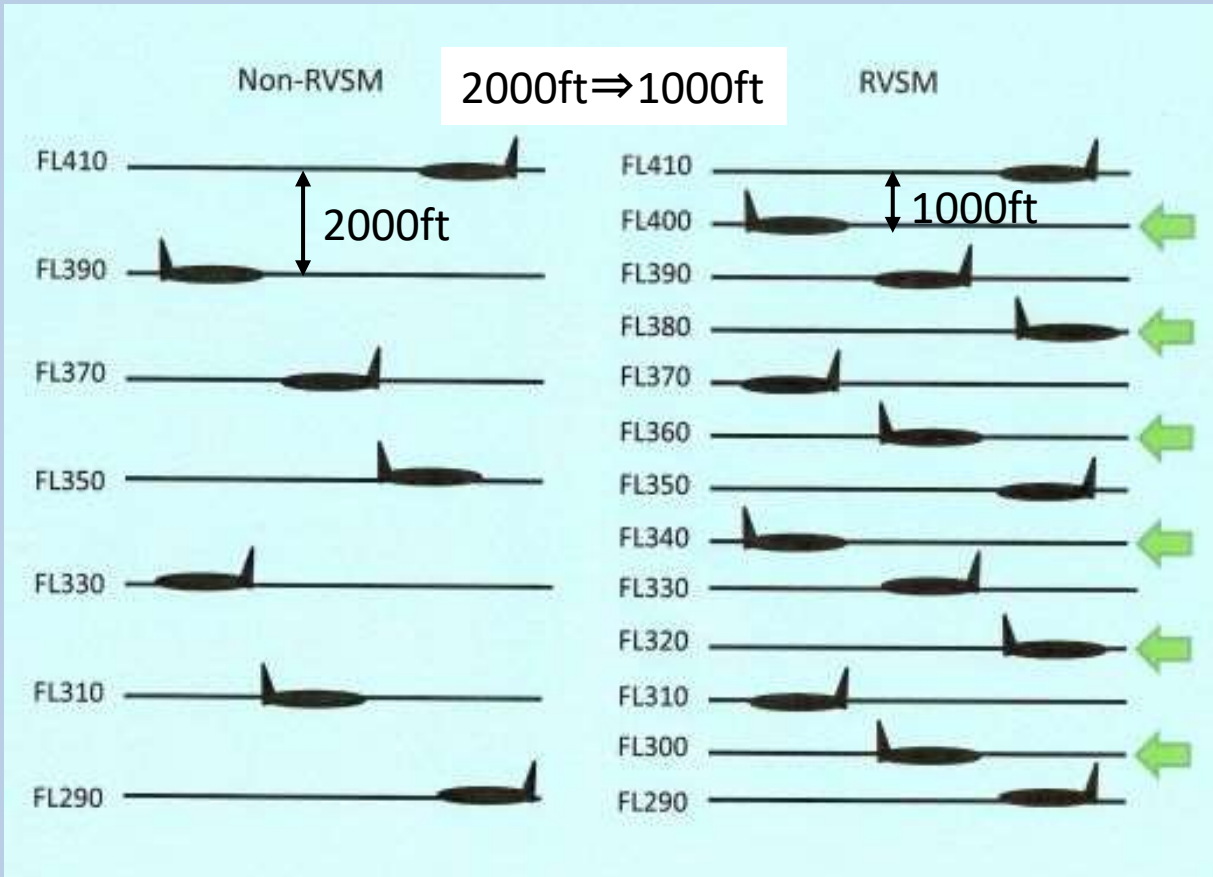
現在

参考：現在の北太平洋の航空交通



短縮垂直間隔

(Reduced Vertical Separation Minima: RVSM)



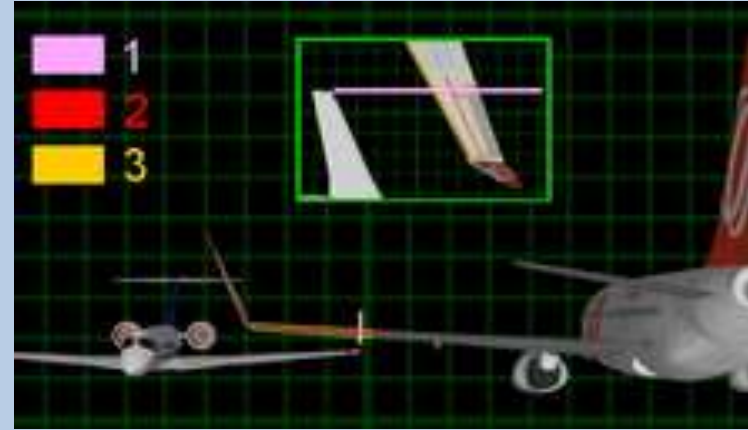
RVSMによるすれ違い
(撮影機を入れ3機)

(短縮の条件)
機体毎に定期的精度認証
自動操縦による高度変更
空域安全性の継続的監視



日本の空域安全性監視機関JASMA(全世界に12か所)

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型機

(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/Legaxy-600型機

(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?)

対策案：経路を右にランダムに0/1/2NMずらすSLOP (Strategic Lateral Off-set Procedure: SLOP) 方式(本来は後方乱気流対策)



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。

- ① あなたはどうしますか？
- ② その理由は？

ご清聴
ありがとうございました



松田 宏

1分間クイズ <答え合わせ>

クイズ-1: 最悪の気象状態

クイズ-2: ダビンチの飛行器械

クイズ-3: 何を頼りに飛行

クイズ-4: 超音速実験機の操縦

クイズ-5: -45°C の音速

クイズ-6: 管制指示とTCAS

The image features a dense network of blue lines and nodes overlaid on a map of a city. The nodes are represented by small green and blue circles, and the lines represent connections between them. A large white rectangular box with a blue border is centered in the image, containing the Japanese text "ご質問は？".

ご質問は？