

航空機ビジネスプロフェッショナル養成講座

航空機概念設計

2020.10.24

1. 民間航空機概要

- ◆ 民間航空機の分類
- ◆ 世界の民間航空機メーカー
- ◆ 航空機業界のM & Aの動向
- ◆ 航空宇宙技術の波及効果

2. 航空機開発とは

- ◆ 航空機の特徴
- ◆ 航空法
- ◆ 航空機開発の流れ

3. 商品企画/構想設計

- ◆ 市場調査
- ◆ 狙う市場と需要予測
- ◆ 市場要求と開発能力
- ◆ 市場要求仕様の例

4. 概念設計（諸元策定/空力設計）

- ◆ 航空機レベルの要求定義
- ◆ 初期概念スケッチ
- ◆ 機体コンセプト検討
- ◆ 諸元策定
- ◆ 空力設計の流れ
- ◆ C F D解析/風洞試験

1. 民間航空機概要

- ◆ 民間航空機の分類
- ◆ 世界の民間航空機メーカー
- ◆ 航空機業界のM & A の動向
- ◆ 航空宇宙技術の波及効果

民間航空機の分類

ビジネス機 (General Aviation)



大型民間機 (Trunk Liner)



Boeing 提供

リージョナル機 (Regional Aircraft)



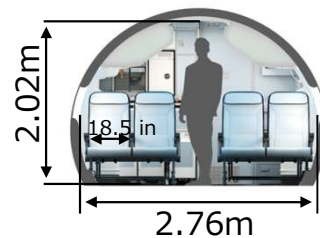
三菱航空機 (株) 提供

超音速旅客機 (SST)



民間航空機の分類：単通路機

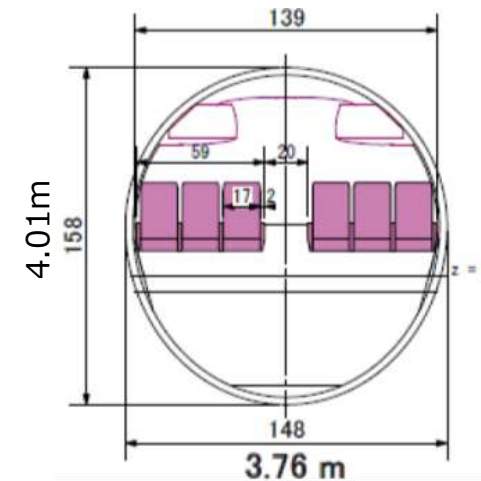
SpaceJet M100



座席数
航続距離
巡航速度
最大離陸重量

84
3,540km
M0.78
42.0t

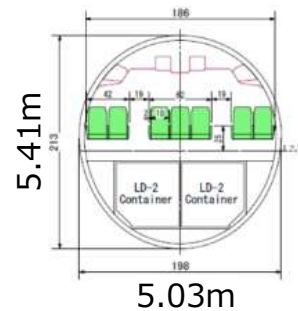
737-900ER



180
5,926km
M0.79
85.1t

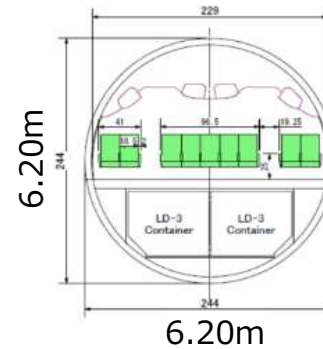
民間航空機の分類：双通路機

767-300ER



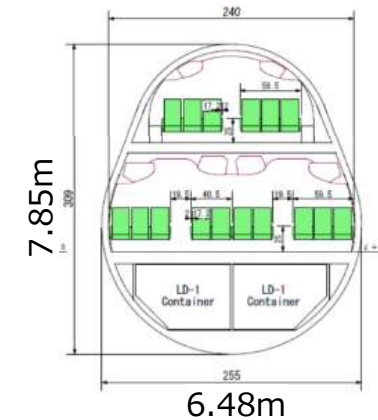
座席数 218
航続距離 11,037km
巡航速度 M0.80
最大離陸重量 187t

777-300ER



386
14,492km
M0.84
352t

747-8I



467
14,815 km
M0.86
435t

世界の民間航空機メーカー

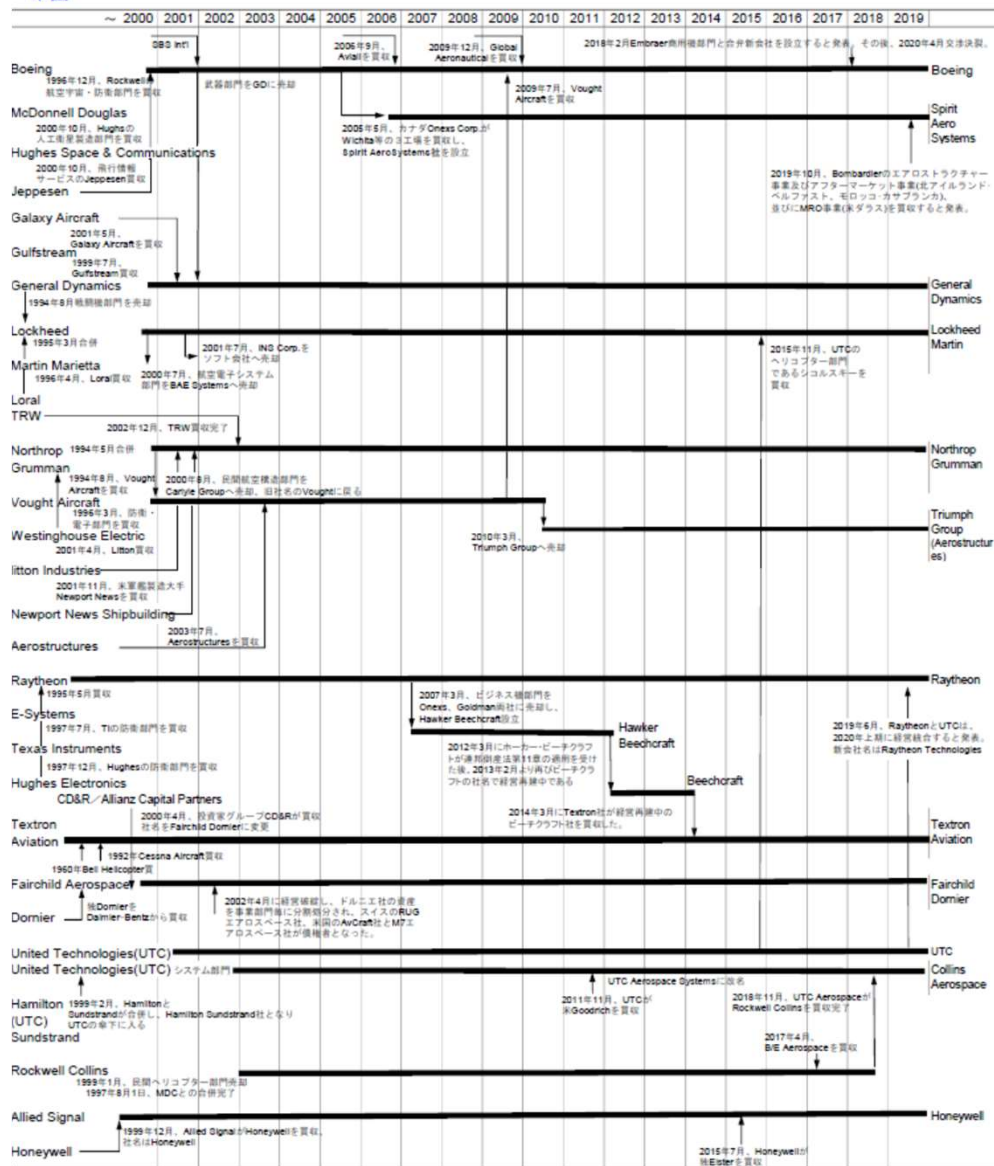
- ◆OEMは集約傾向にあるが、ロシア、中国及び日本が新規参入中。
- ◆OEMは、モジュール単位で生産(設計込みのケース有)をSubtier Makerに委託。
 - ・外部リソース(開発費、設備費、人)活用で、ビジネスチャンス拡大、初期投資軽減。サプライチェーンマネジメント確立が重要。
 - ・Tier 1は、先進国の北米(OEMからの分社化のケース有)、欧州、日本が主体。Tier 2は、低賃金でコスト競争力のある韓国、中国、東南アジアなど増加傾向。Boeingは、内作取り込みとTier 2直接発注でTier 1外しを指向。

	北 米	欧 州	その他
中大型Jet旅客機 (100席以上)	Boeing(米) Bombardier(加)	Airbus(欧)	CRAIC(中/露)* COMAC(中)*
Regional Jet / Turboprop	Bombardier(加)	ATR(仏/伊)	Embraer(伯) UAC(露) COMAC(中) MITAC(日)*

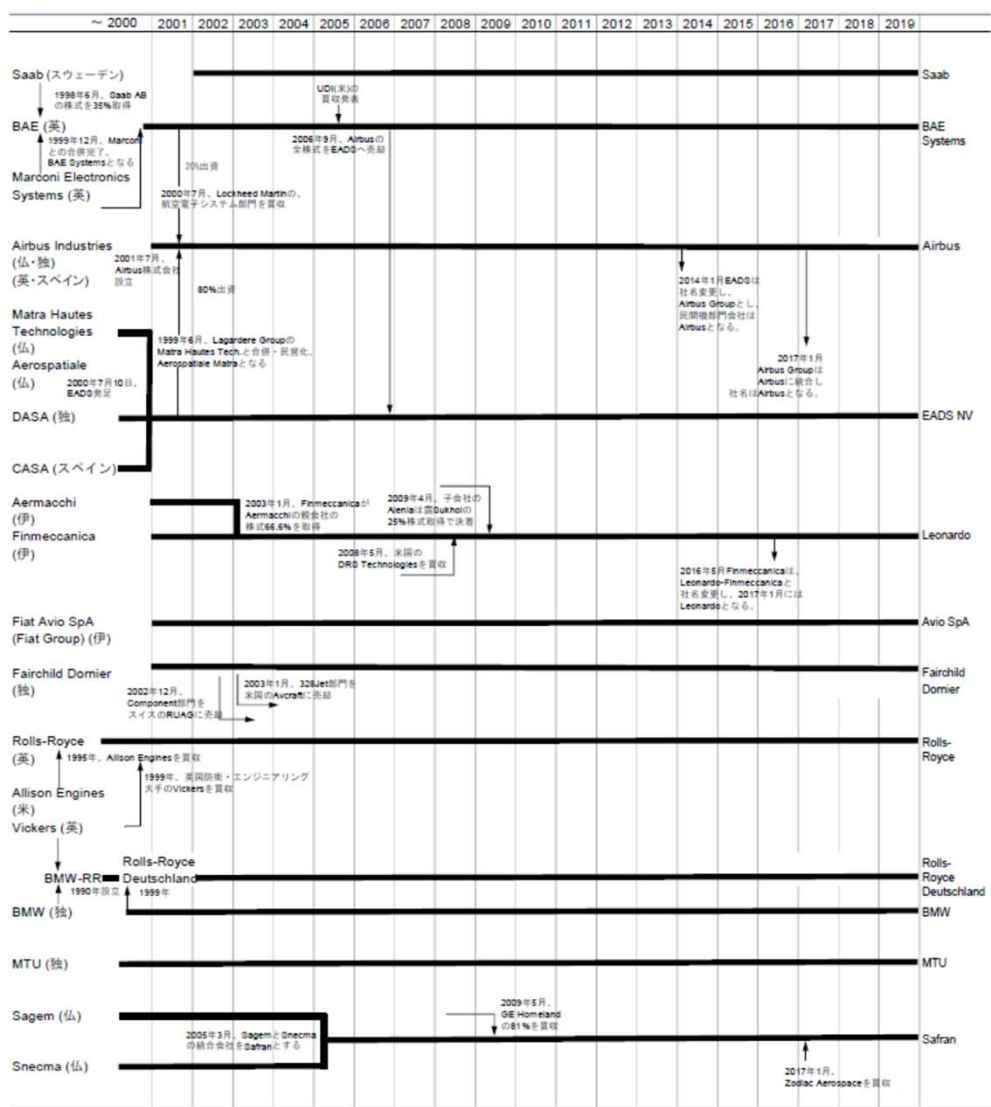
* 開発中

航空機業界のM&A（合併・買収）の動向

米国



欧州



出典: (一財)日本航空機開発協会

航空宇宙技術の波及効果：他産業への波及

- ・高信頼性、軽量・高付加価値を実現するため、部品・素材に厳しい技術的要求。
- ・航空機で実用化された技術は自動車など他の産業分野に波及し、製造業全体の基盤に。

金属加工技術

例)「ジュラルミン」
「チタン材ボルト」



素材技術

例)「炭素繊維複合材料」



http://www.carbonfiber.gr.jp/english/tanso/images/plane02_b.jpg

システム・制御・ 電気電子技術

例)「アンチスキッドブレーキ」
「フライ・バイ・ワイヤ」
「ミリ波レーダー」



空力・構造設計技術

例)「数値流体解析」



部品・素材産業の高度化

車両、医療機器

例)「リニアモーターカー」
(アルミ合金)
「自動車」(〃)
「骨折補強器具」
(チタン合金)



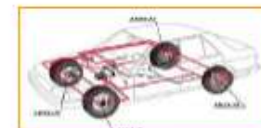
自動車、鉄道、電力

例)「ボンネット・フード」
(炭素繊維複合材)
「新幹線機首」(〃)
「風力発電」(〃)



自動車

例)「アンチロックブレーキシステム」
「ステア・バイ・ワイヤ」
「衝突防止レーダー」



船舶、鉄道、自動車

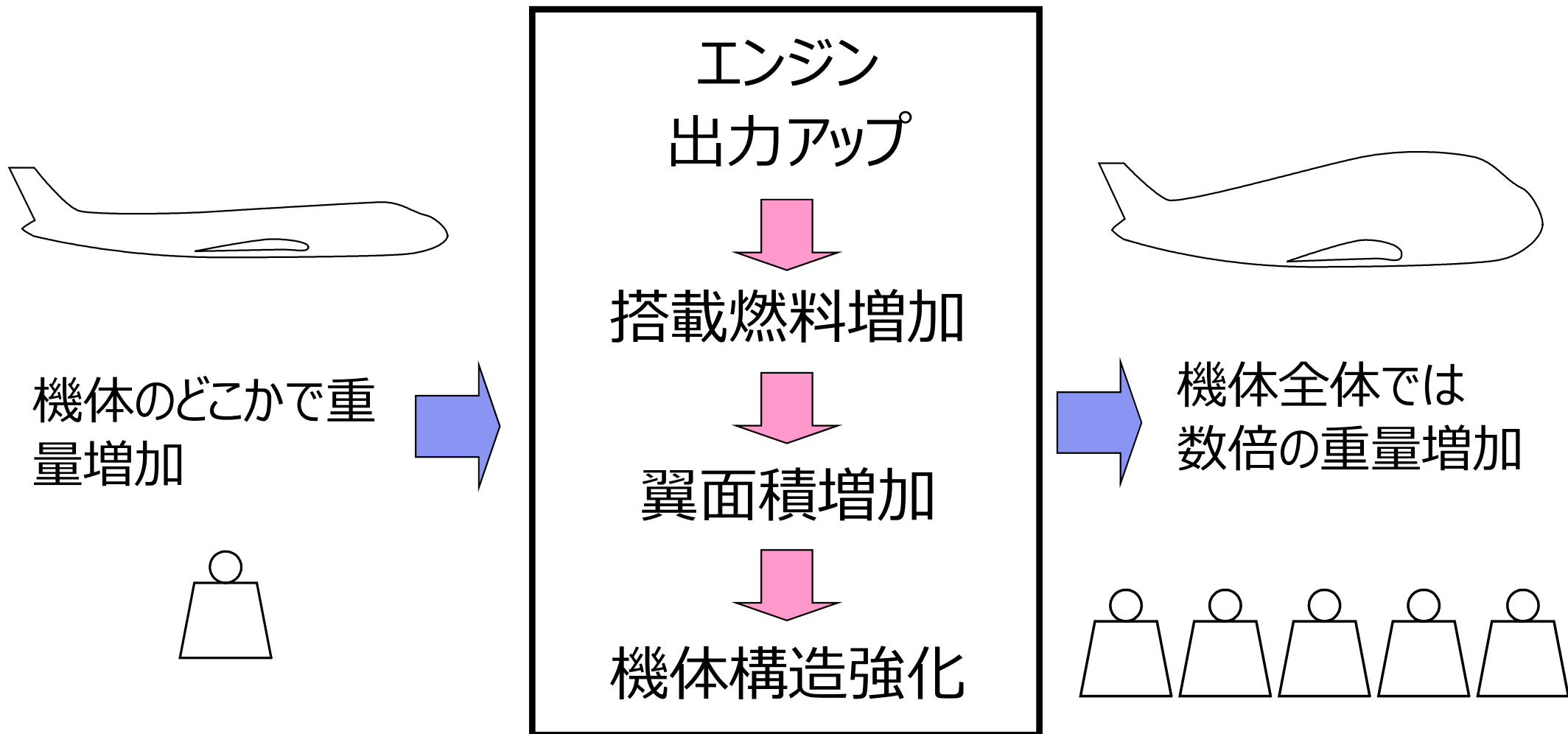
例)「船体等の周りの流れ解析」

出典：経済産業省製造産業局：H21.6.8「わが国の航空機産業政策の現状と展望」より

2. 航空機開発とは

- ◆ 航空機の特徴
- ◆ 航空法
- ◆ 航空機開発の流れ

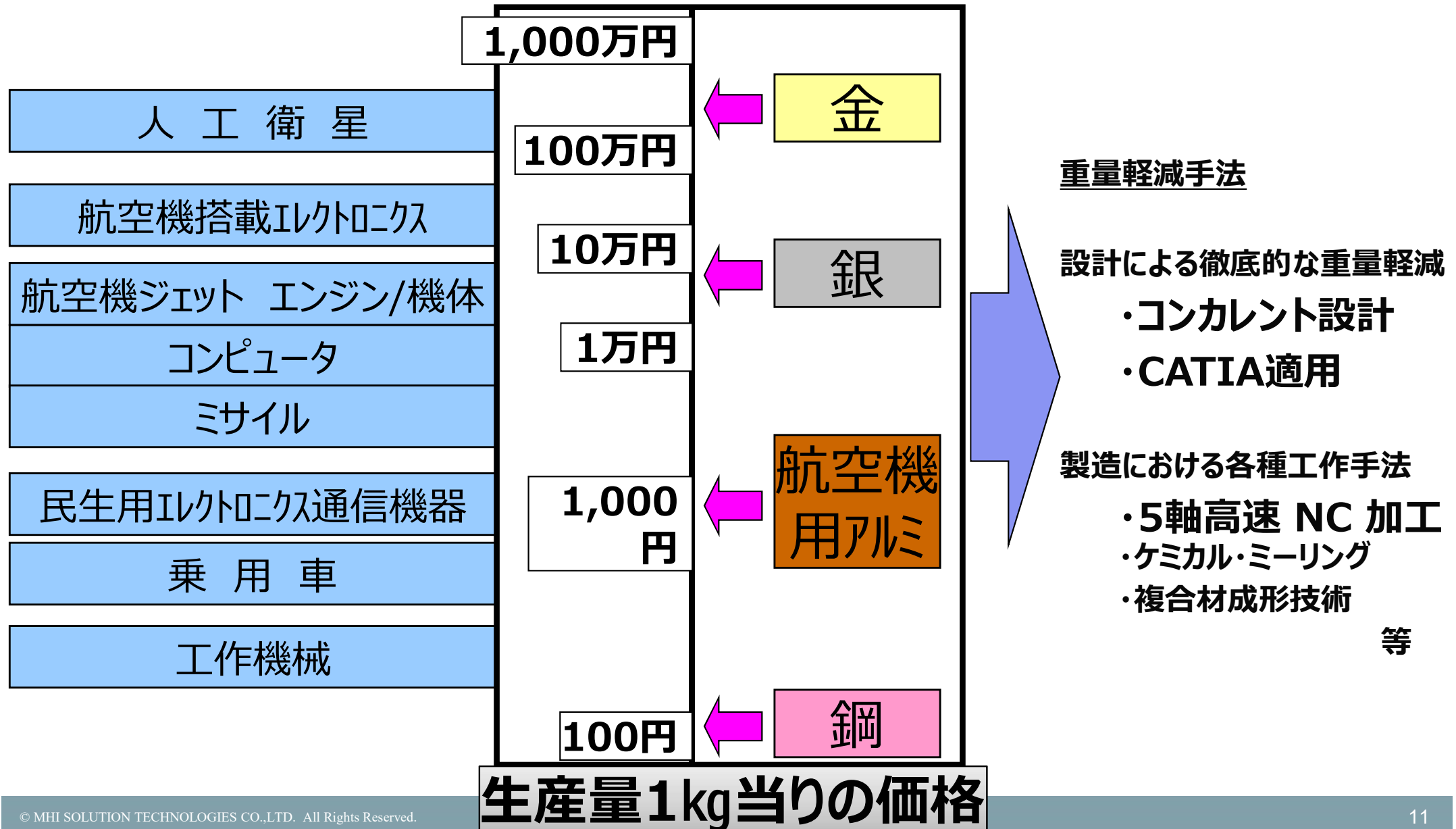
航空機の特徴：軽量化の追求



極限まで軽量化を追求する必要がある

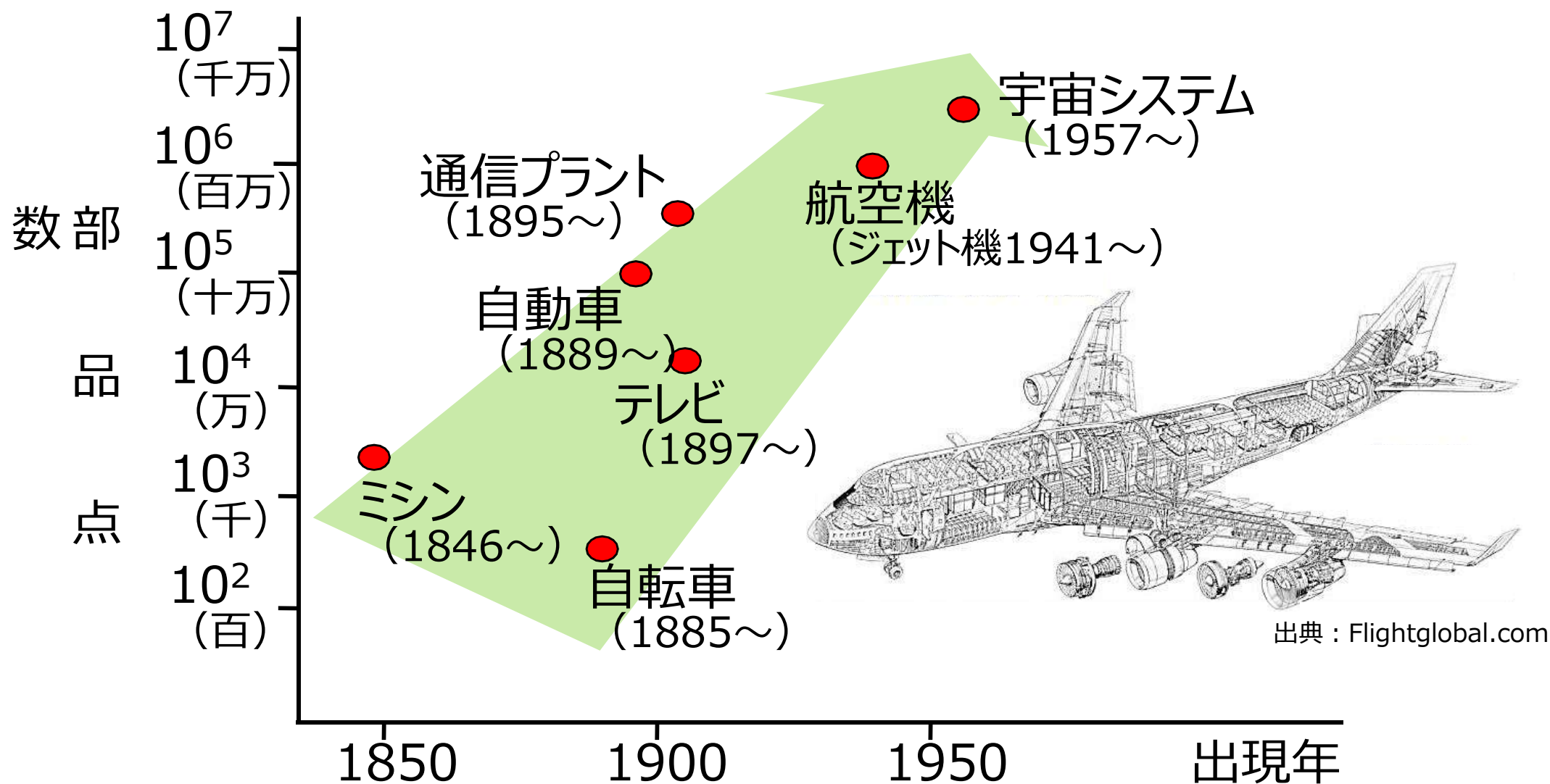
航空機の特徴：軽量化の追求

- ・極限まで軽量化を追求する必要がある

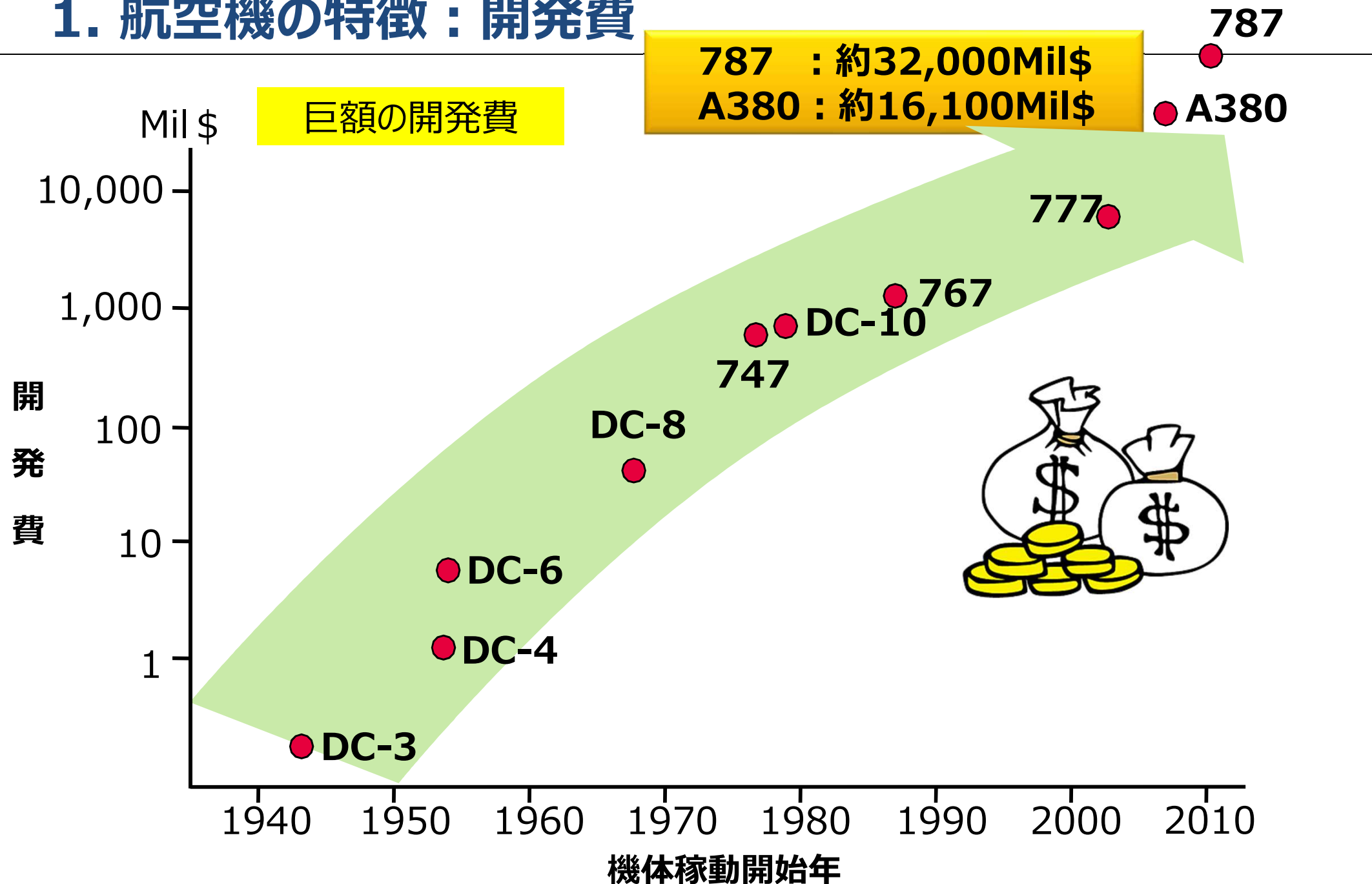


航空機の特徴：部品点数

航空機は高度／複雑化した技術集約製品（B747-400では部品点数は約600万点）

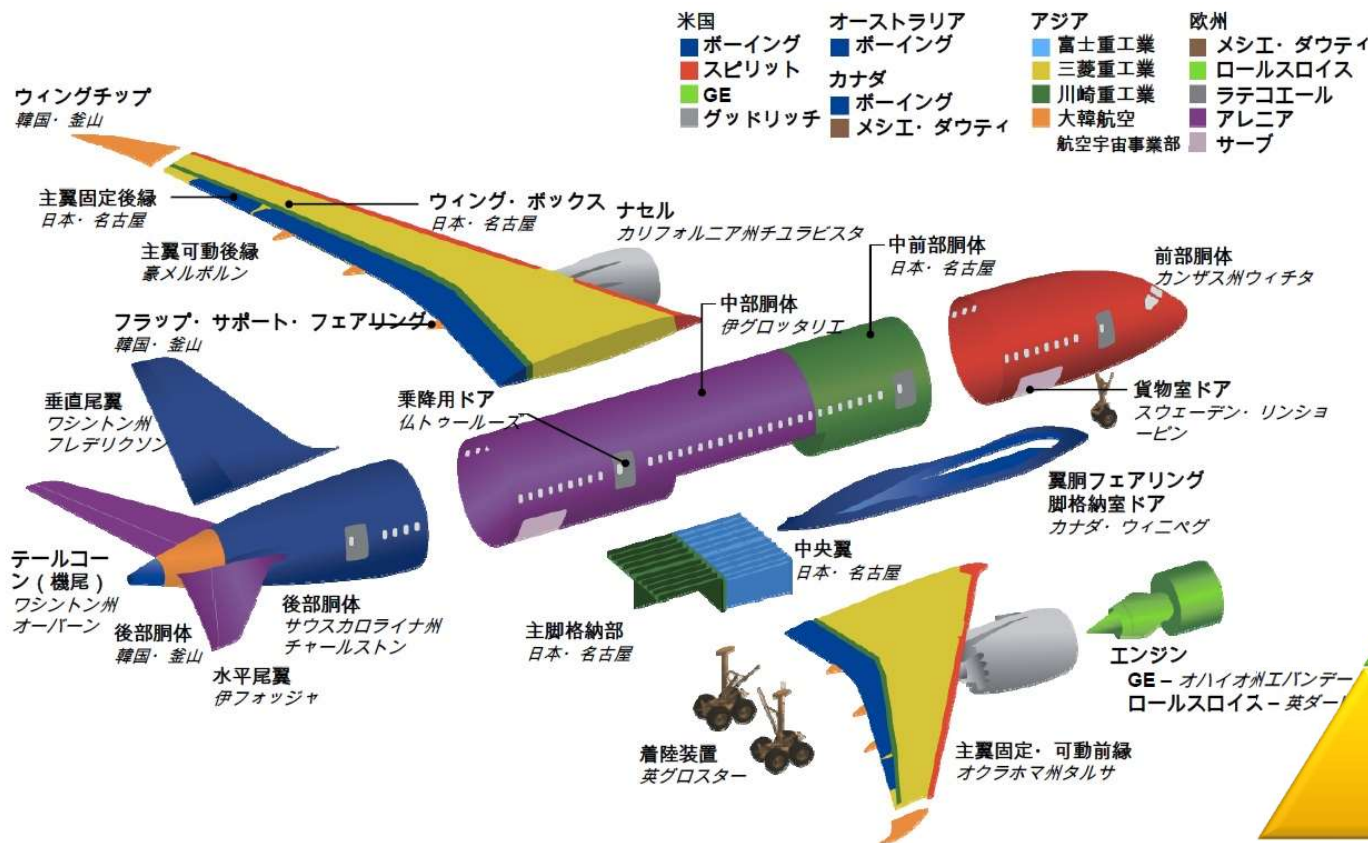


1. 航空機の特徴：開発費

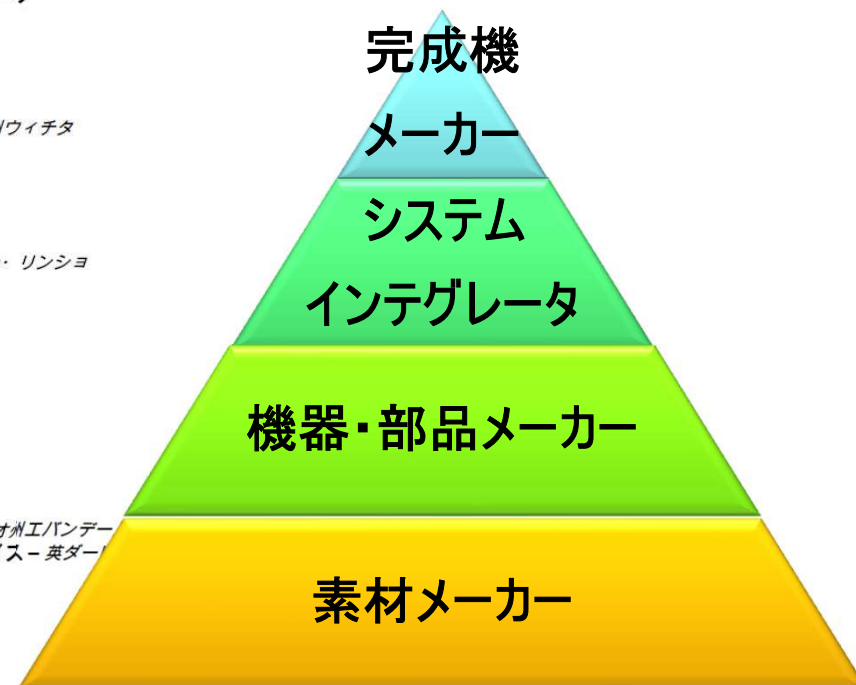


航空機の特徴：開発体制

巨額の開発費 ⇒ 国際的な共同開発体制によるリスクの分散



Boeing 787での分担



完成機メーカーをトップとした
階層構造

航空機の特徴：参入障壁

安全性要求/規定が厳格

耐空証明と型式証明の取得

- 納入部品は全数検査
- 工程の定期検査

トレーサビリティ

- 設計・製造から廃棄までのライフサイクル渡る履歴管理
- 全製品/部品の作業記録

品質マネジメントシステム

- JIS Q 9100

特殊工程認証

- Nadcap*
(溶接,化学処理,表面処理,熱処理,非破壊検査,等)

*:National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program

業界が寡占状態

大中型機



リージョナル（小型）機



エンジン



装備品



材料



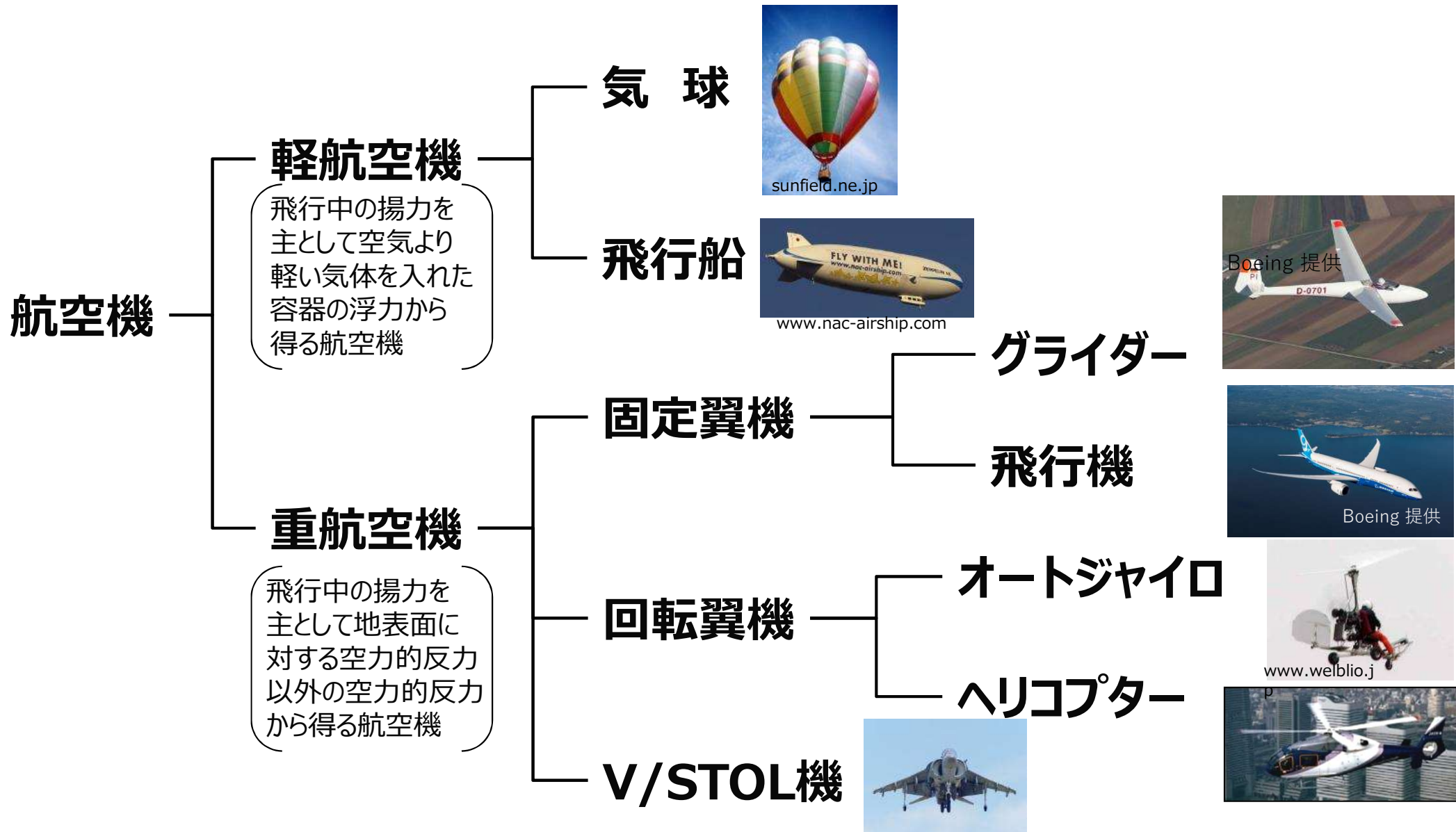
- 日本の空を飛ぶ航空機を作るには、航空法を遵守する必要がある。
- 航空法の目的（航空法 第1条）

国際民間航空条約の規定並びに同条約の附属書として採択された標準、方式及び手続に準拠して、航空機の航行の安全及び航空機の航行に起因する障害の防止を図るための方法を定め、並びに航空機を運航して営む事業の適正かつ合理的な運営を確保して輸送の安全を確保するとともにその利用者の利便の増進を図ることにより、航空の発達を図り、もって公共の福祉を増進することを目的とする。
- 航空機の定義（航空法 第2条）

「航空機」とは、人が乗って航空の用に供することができる飛行機、回転翼航空機、滑空機及び飛行船その他政令で定める航空の用に供することができる機器をいう。

航空法：航空機の分類






- ・航空機の分類は航空法より以下となる。



航空法：航空機の分類

- 航空機は、飛行用途に応じた機体構造・強度に設計される。
耐空類別とは、その用途に合わせた設計基準を示し、その用途に応じた飛行を行えば耐空性（安全な飛行に耐える性能）が保証できるとしたものである。

例：飛行機

耐空類別	摘要	制限運動荷重倍数	機体例
飛行機曲技 A (Acrobatic)	最大離陸重量5,700kg以下の飛行機であって、飛行機普通Nが適する飛行、及び曲技飛行に適するもの	6.0	 mari.cocolog-nifty.com
飛行機実用 U (Utility)	最大離陸重量5,700kg以下の飛行機であって、飛行機普通Nが適する飛行及び60°バンクを超える旋回、錐揉、レジーエイト、シャネル等の曲技飛行（急激な運動及び背面飛行を除く。）に適するもの	4.4	 gallito.com
飛行機普通 N (Normal)	最大離陸重量5,700kg以下の飛行機であって、普通の飛行〔60°バンクを超えない旋回及び失速（ヒップストールを除く。）を含む。〕に適するもの	3.8 ～ 2.5	
飛行機輸送 C (Commuter)	最大離陸重量8,618kg以下の多発のプロペラ飛行機であって、航空運送事業の用に適するもの（客席数が19以下であるものに限る。）	3.8 ～ 2.5	 Gulf.or.j
飛行機輸送 T (Transport)	航空運送事業の用に適する飛行機	3.8 ～ 2.5	 Boeing 提供

航空法：耐空証明と型式証明

● 耐空証明

航空機は、有効な耐空証明を受けているものでなければ、航空の用に供してはならない（航空法第11条）

耐空証明の検査基準は、強度、構造及び性能の基準（施行規則第14条・附属書第1）、騒音の基準（附属書第2）、発動機の排出物の基準（附属書第3）である（航空法第10条、第4項）

型式証明を受けた航空機や輸入航空機は、一部検査を省略できる（航空法第10条、第5項）

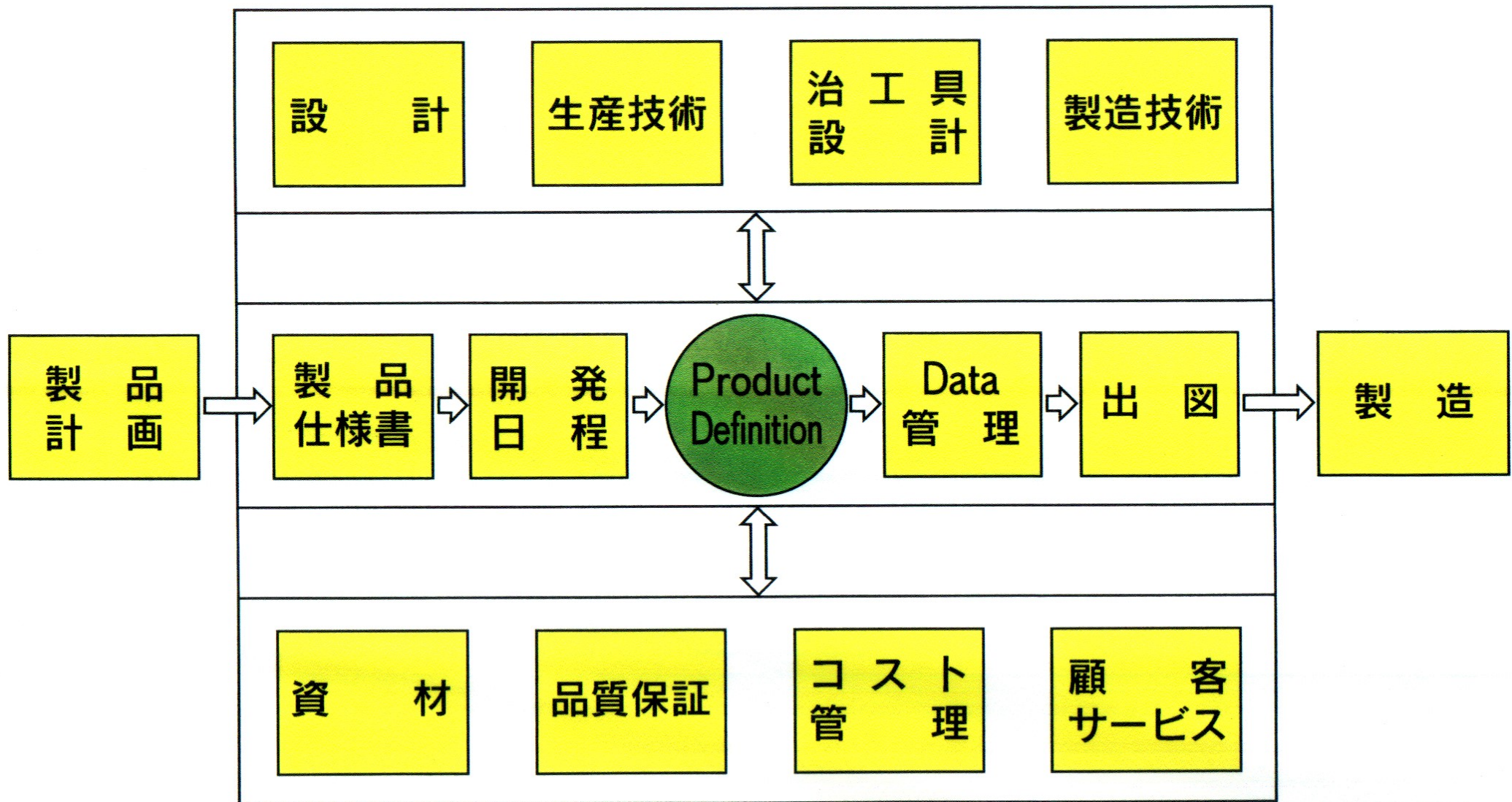
● 型式証明

航空機の型式が、航空法10条第4項の基準に適合するときに型式証明する（航空法第12条）

型式証明の検査は、当該型式の設計並びにその設計に係る航空機のうち1機の製造過程及び現状について行う（施行規則第18条）

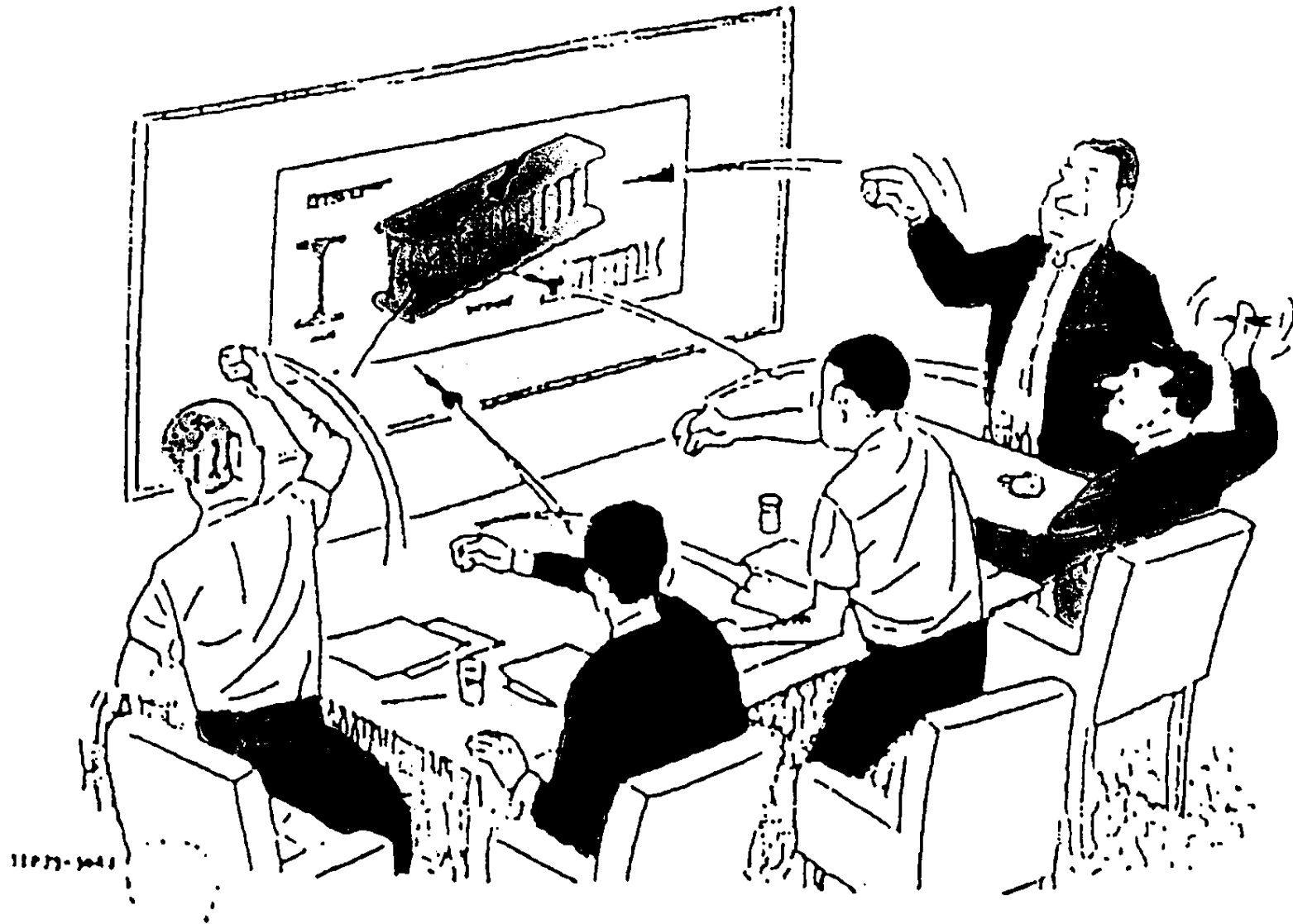
航空機開発の流れ：設計開発手法

コンカレント設計開発



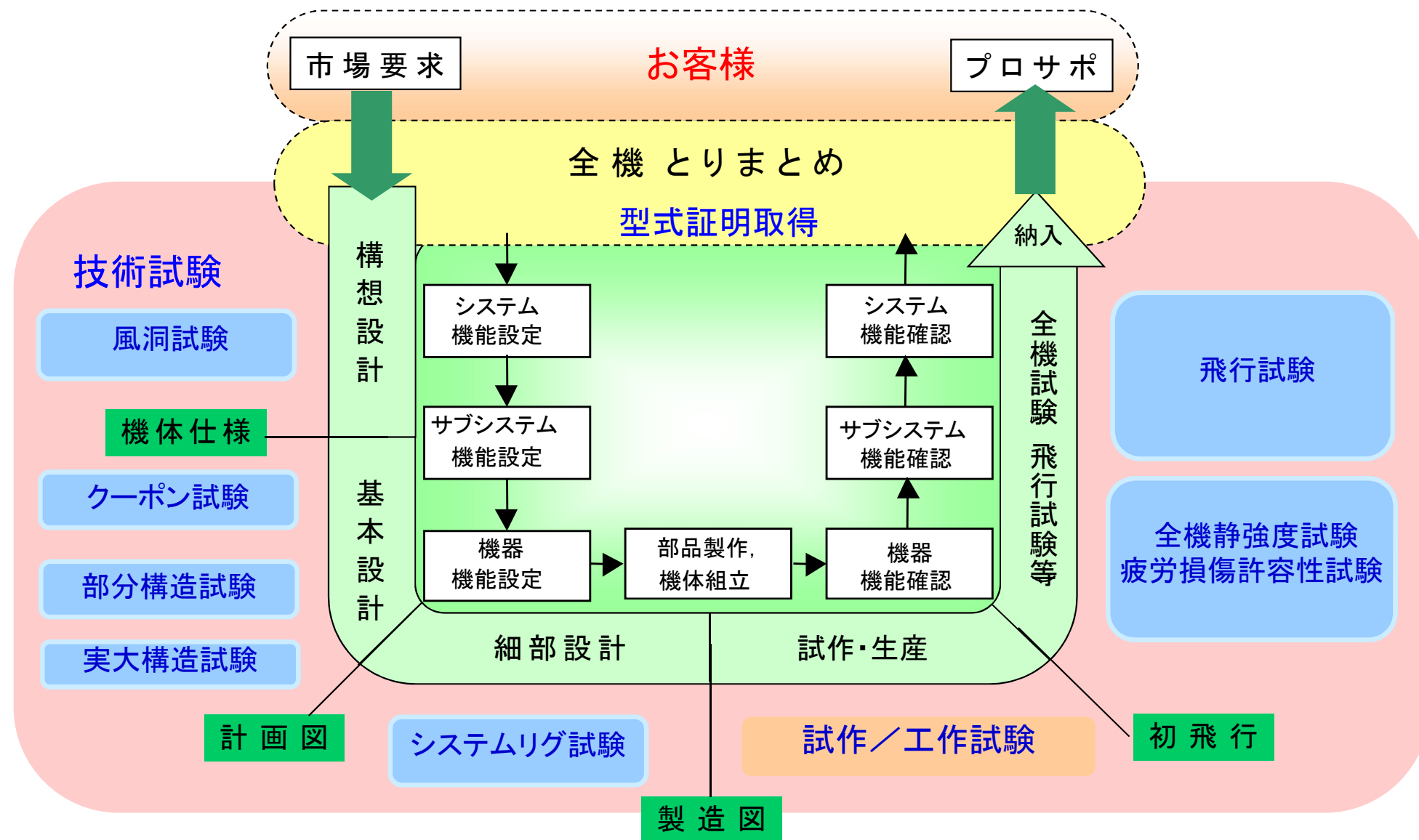
航空機開発の流れ：設計開発手法

コンカレント・エンジニアリング・プロセス



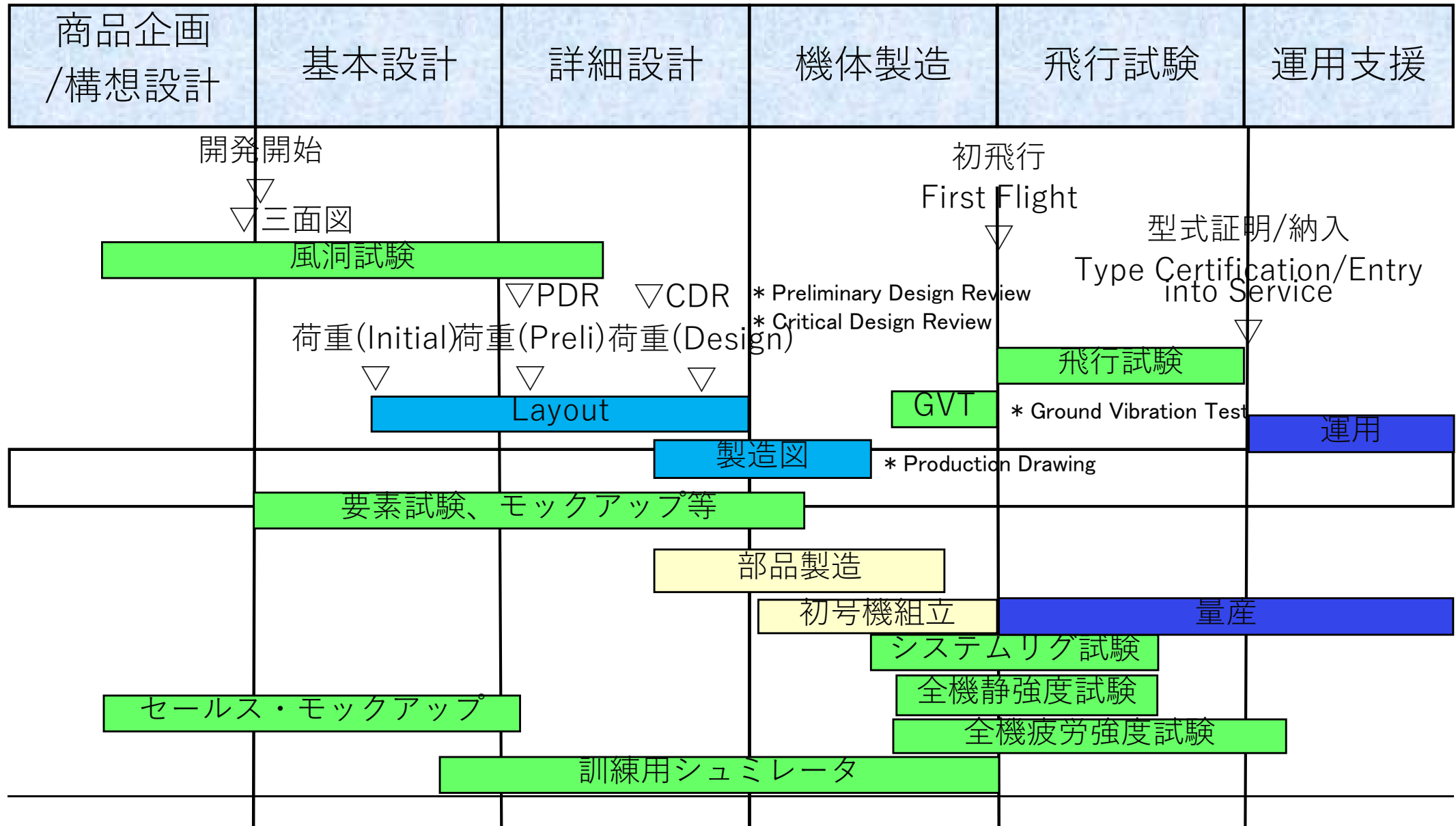
航空機開発の流れ：概念図

- 航空機開発とは、お客様からの要望に始まり(市場要求)、それに基づく各設計段階での設定を試験により確認し、最後にお客様へ納入し運用を支援(プロサポ)していく一連の作業である。



航空機開発の流れ：開発スケジュール

• 航空機開発flow とmajor milestone



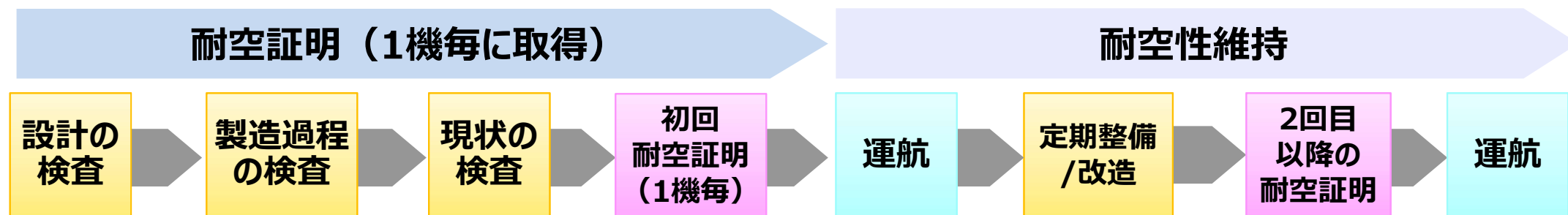
航空機開発の流れ：耐空証明と型式証明

耐空証明：安全に飛行できる機体であることの証明

『正しく**設計**され，正しく**製造**され，正しくメンテナンスされている（**現状**）』

型式証明：安全に飛行できる型式であることの証明

『**設計・製造過程**が安全性及び環境適合性の基準を満たしている』



型式証明（機種毎に取得）

↑ 同じ型式であれば耐空証明を受けるための設計・製造の検査の一部を省略可



航空機の開発
(設計・試験)



製造・検査（量産）



運航（使用開始）



定期的な整備

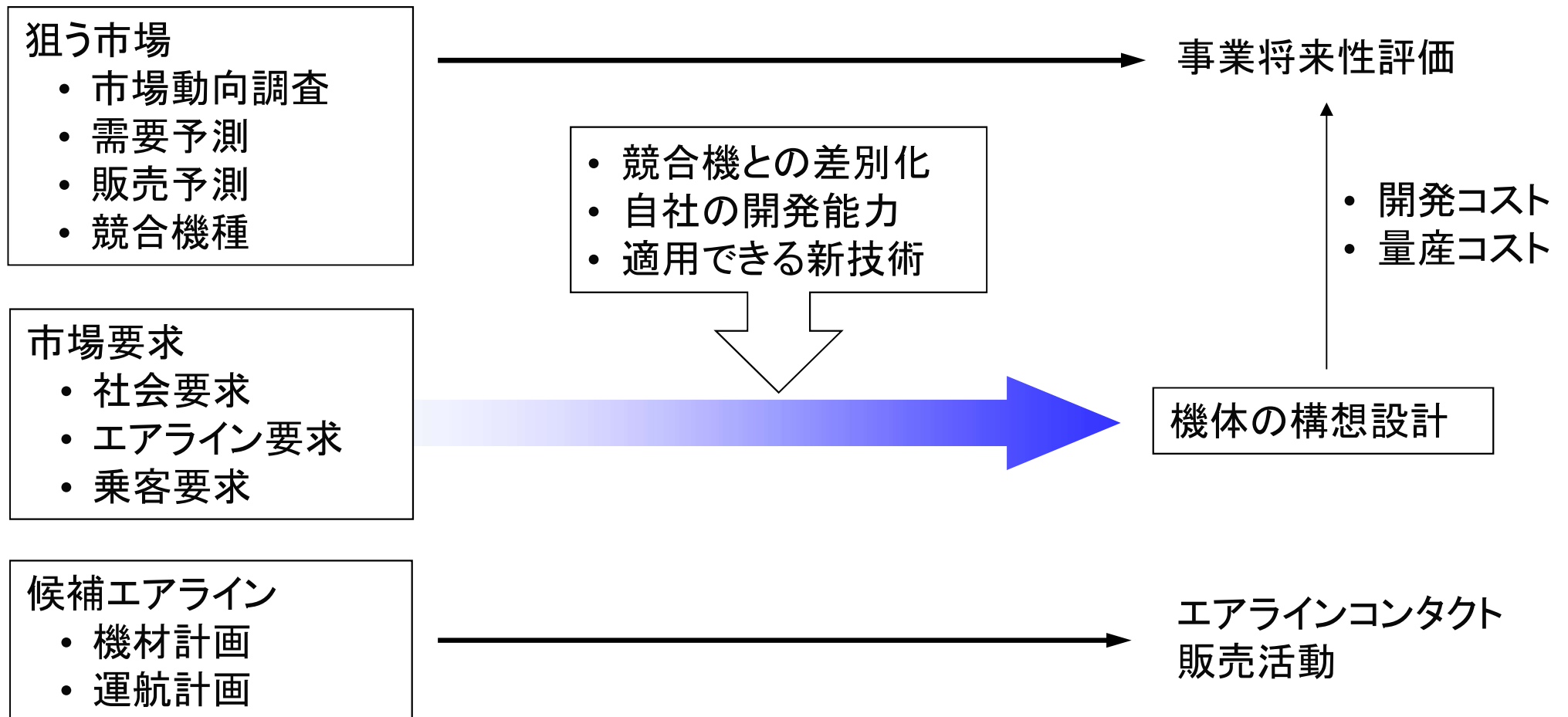
3. 商品企画/構想設計

- ◆市場調査
- ◆狙う市場と需要予測
- ◆市場要求と開発能力
- ◆市場要求仕様の例

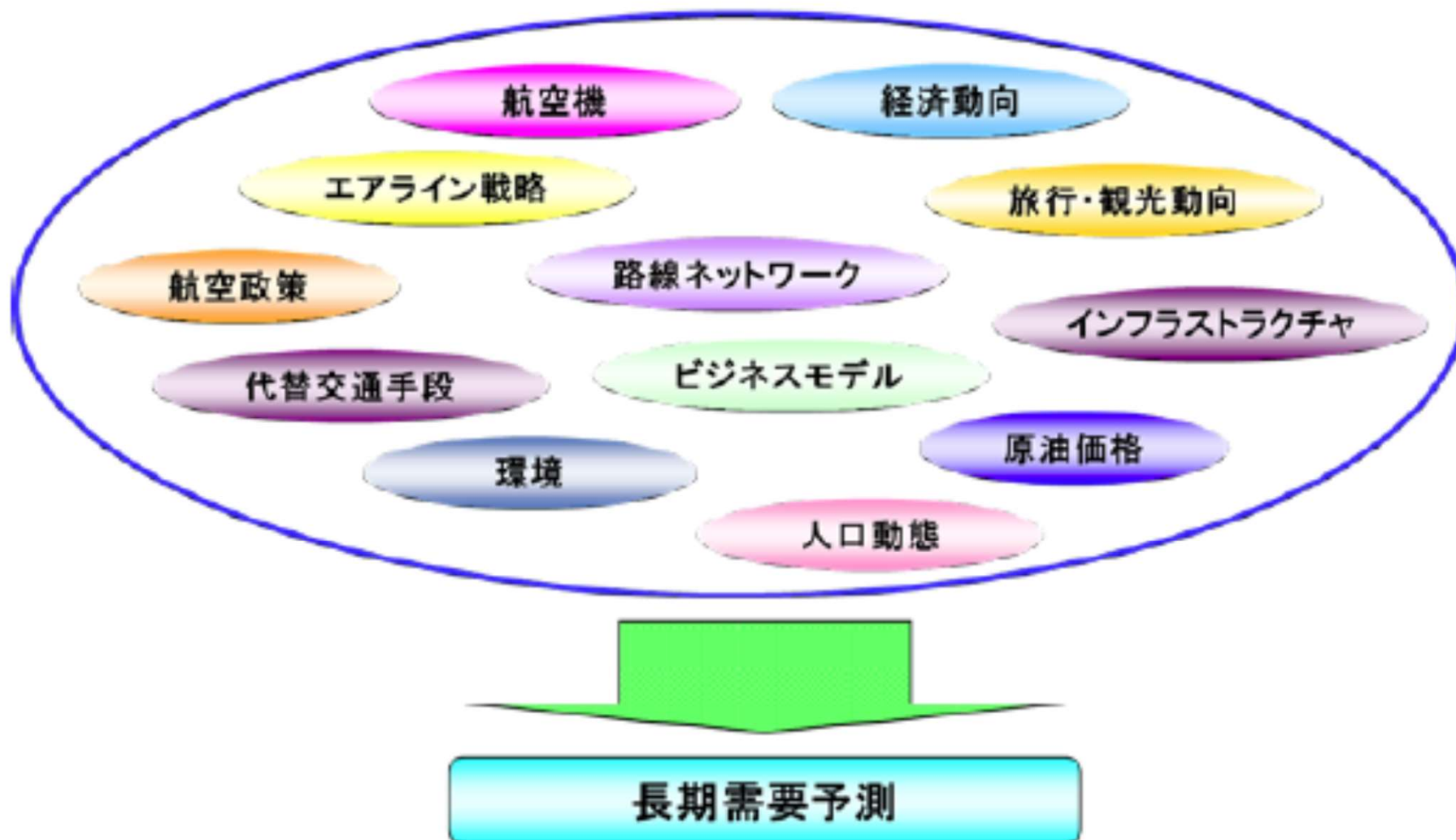
3. 商品企画/構想設計

- 民間航空機開発における商品企画は、市場調査により「狙う市場」、「市場要求」、「顧客候補エアライン」を明確にし、競合機との差別化や自社の開発能力と適用できる新技術を評価した上で機体の構想設計を行い、開発開始を決心させる作業である。

市場調査



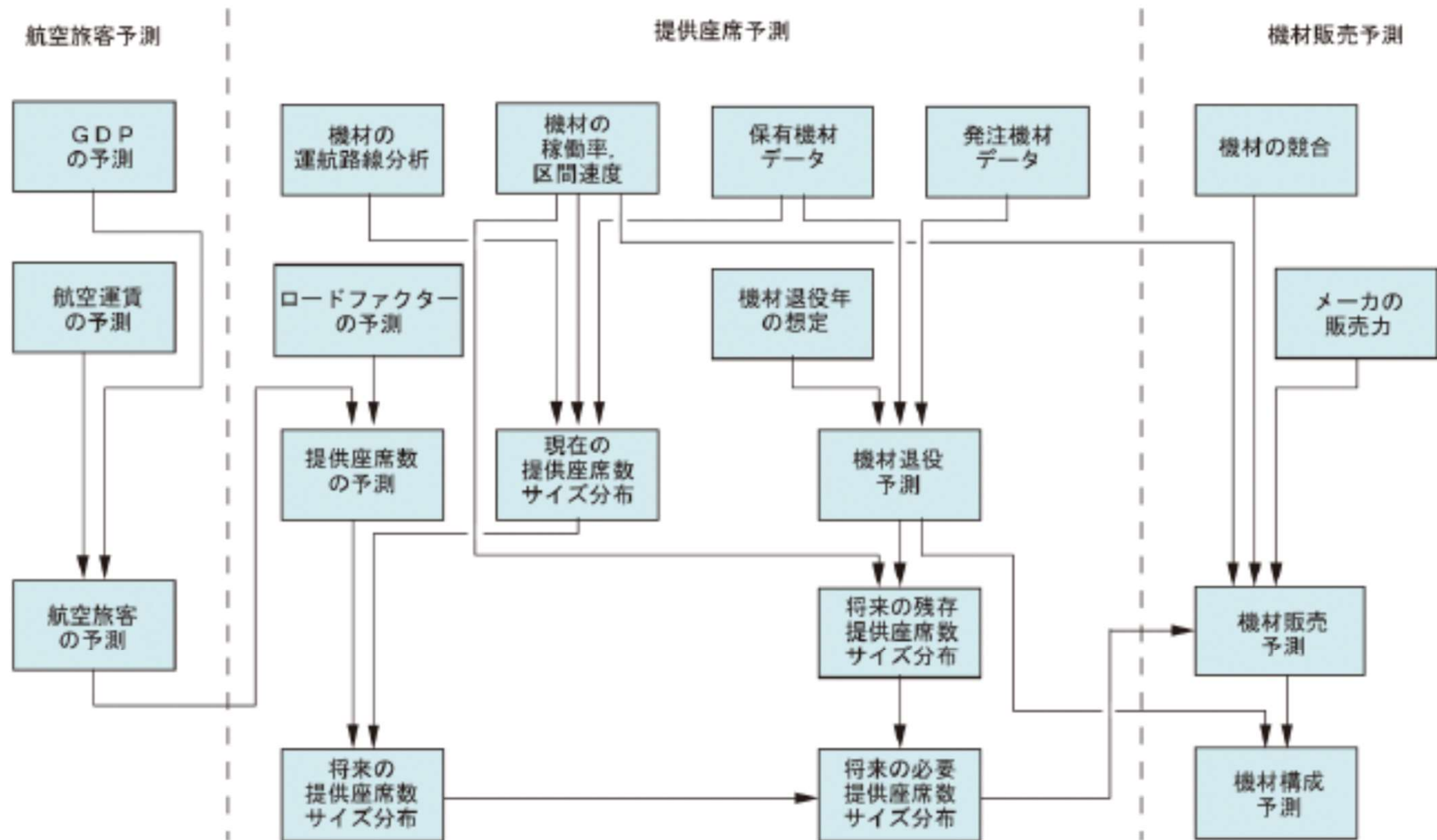
需要予測で考慮される内容



出典：(一財)日本航空機開発協会

市場調査：需要予測フローチャート

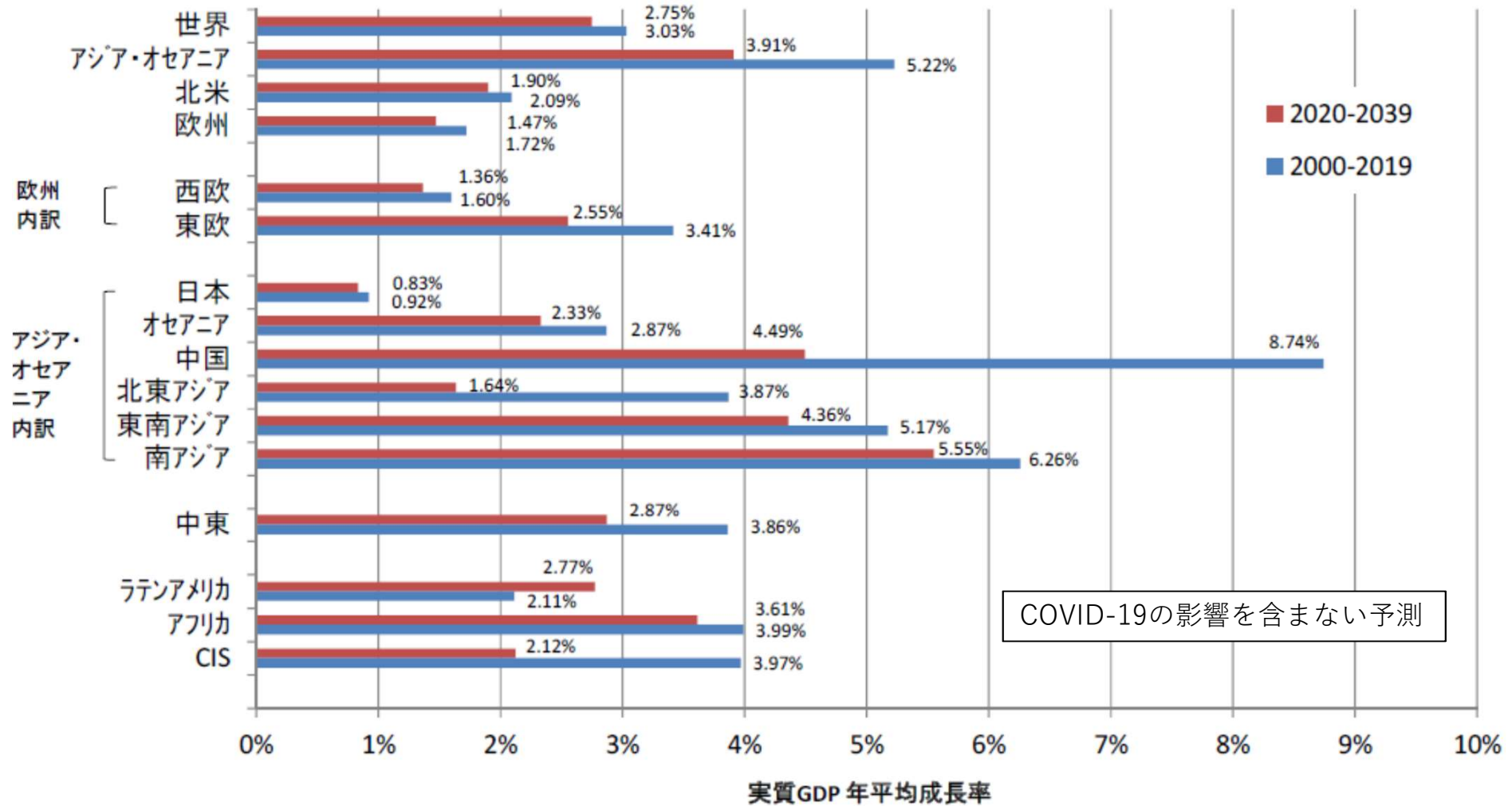
世界マクロ需要予測フローチャート



出典：(一財)日本航空機開発協会

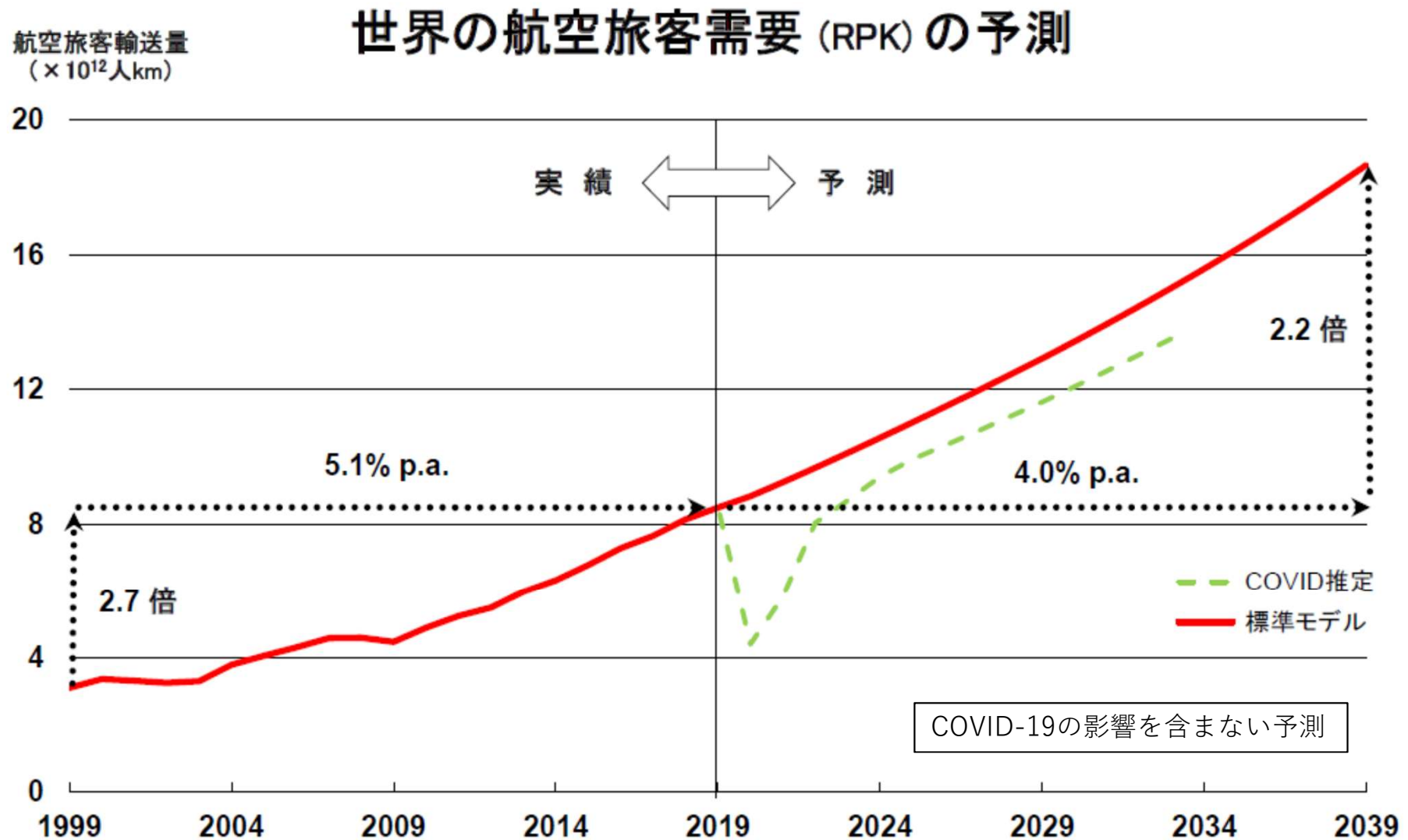
市場調査：地域別経済予測

地域別 経済予測(実質GDP成長率)



出典：(一財)日本航空機開発協会

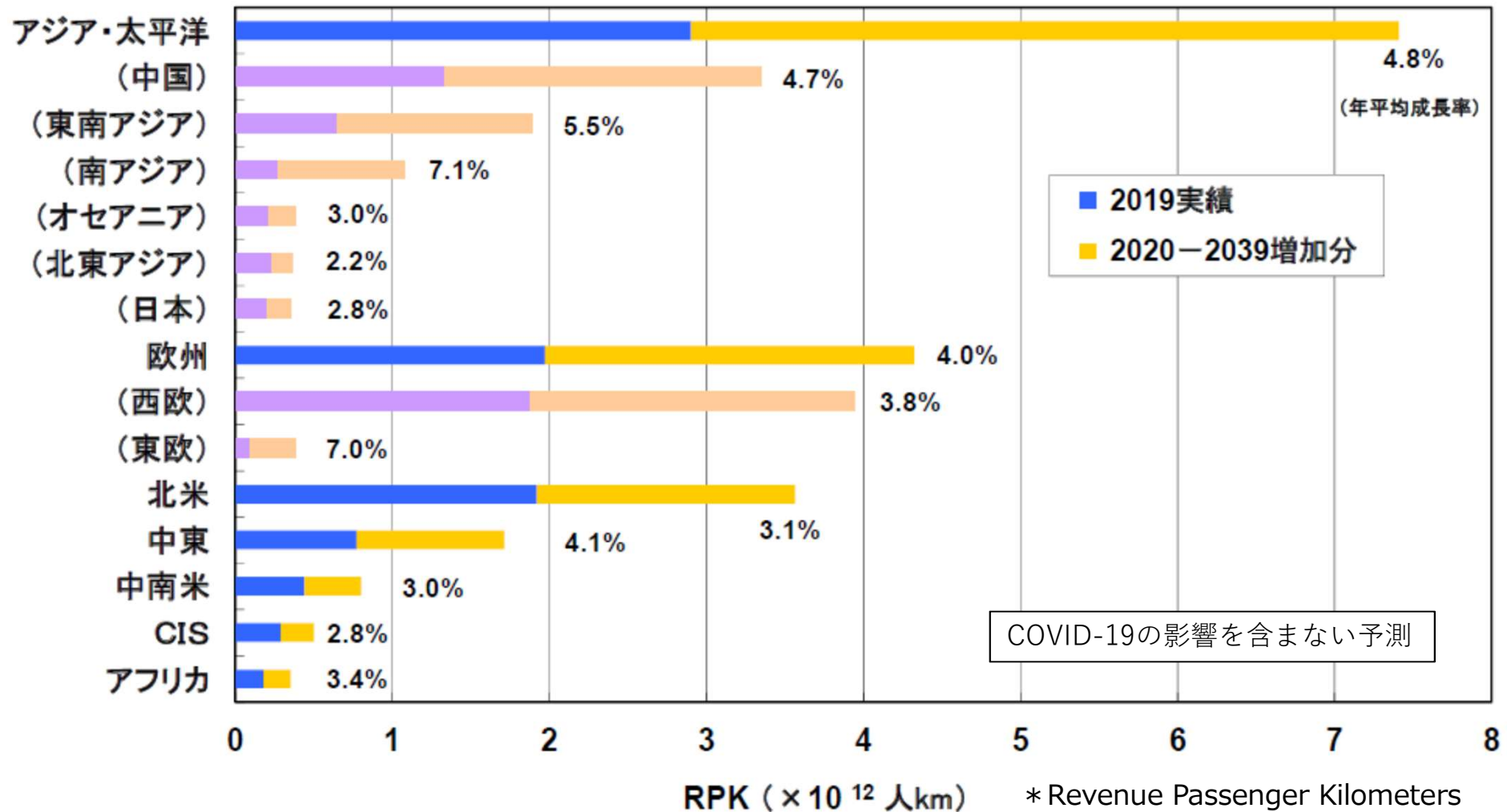
市場調査：航空旅客需要予測



出典：(一財)日本航空機開発協会

市場調査：航空旅客需要予測

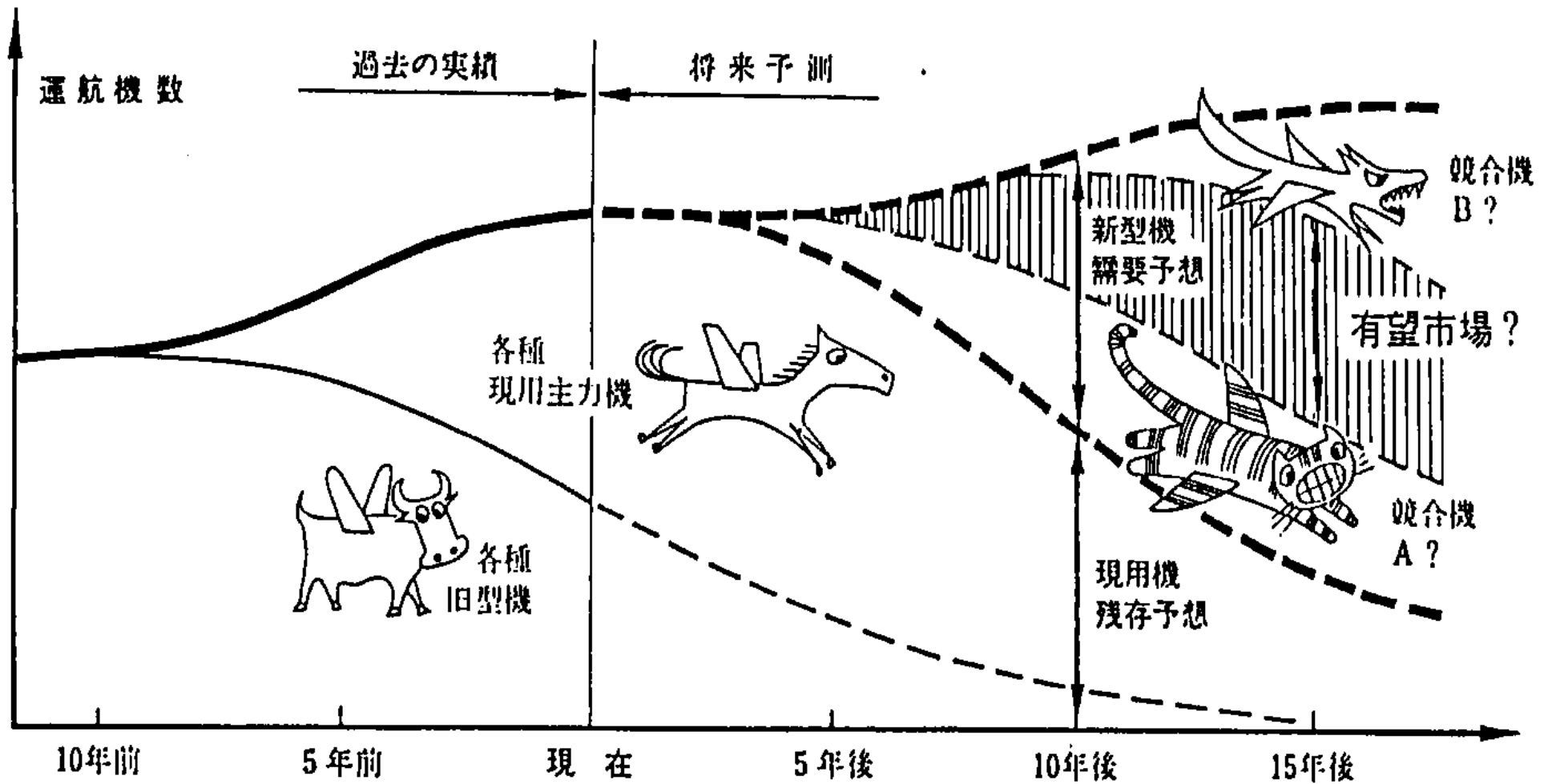
地域別 航空旅客需要予測結果



出典：(一財)日本航空機開発協会

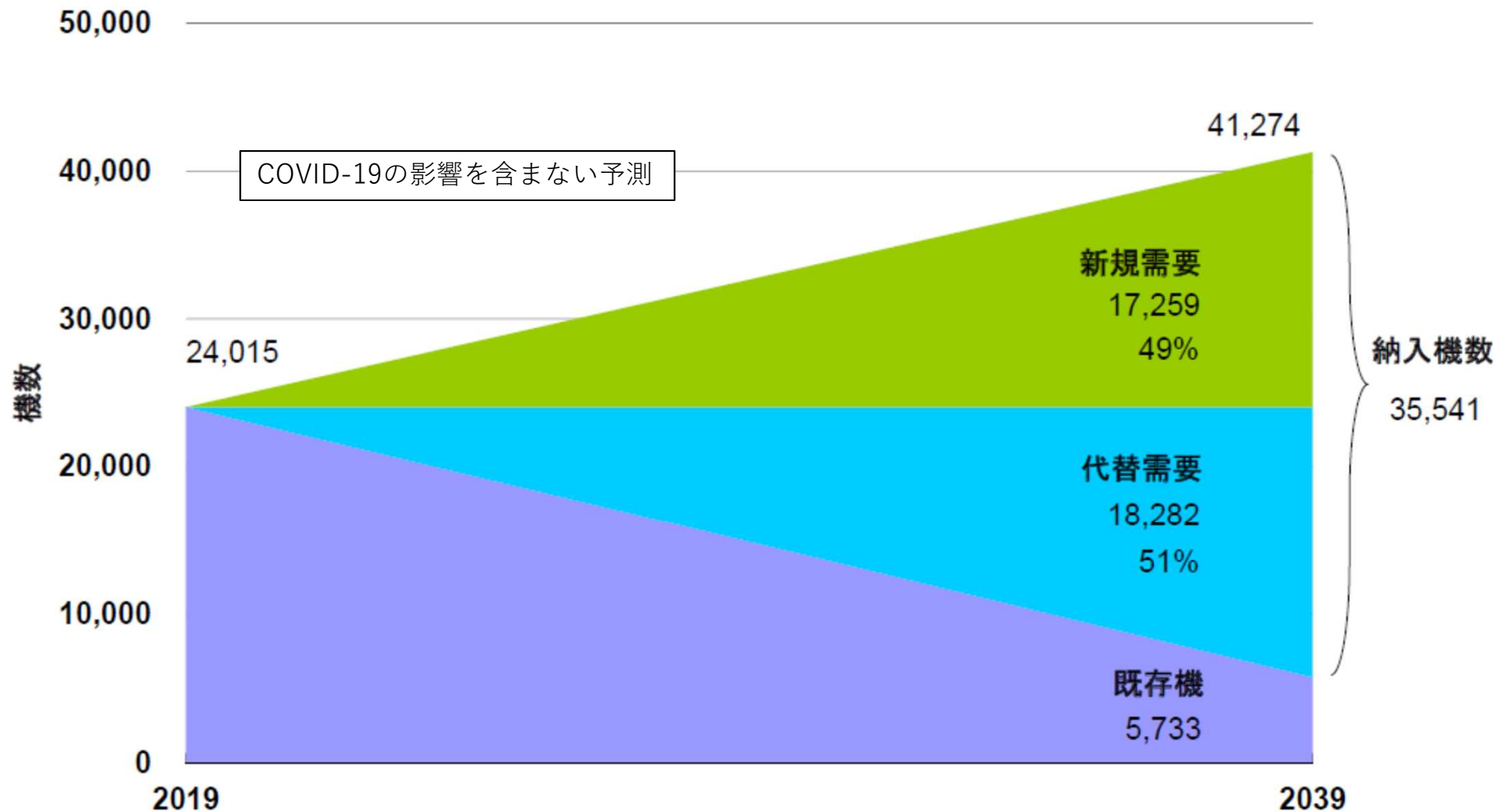
狙う市場と需要予測

- 過去の機体運航機数実績と将来予測をもとに、競合機の占有も考慮して新型機の需要予測を立てる。



狙う市場と需要予測

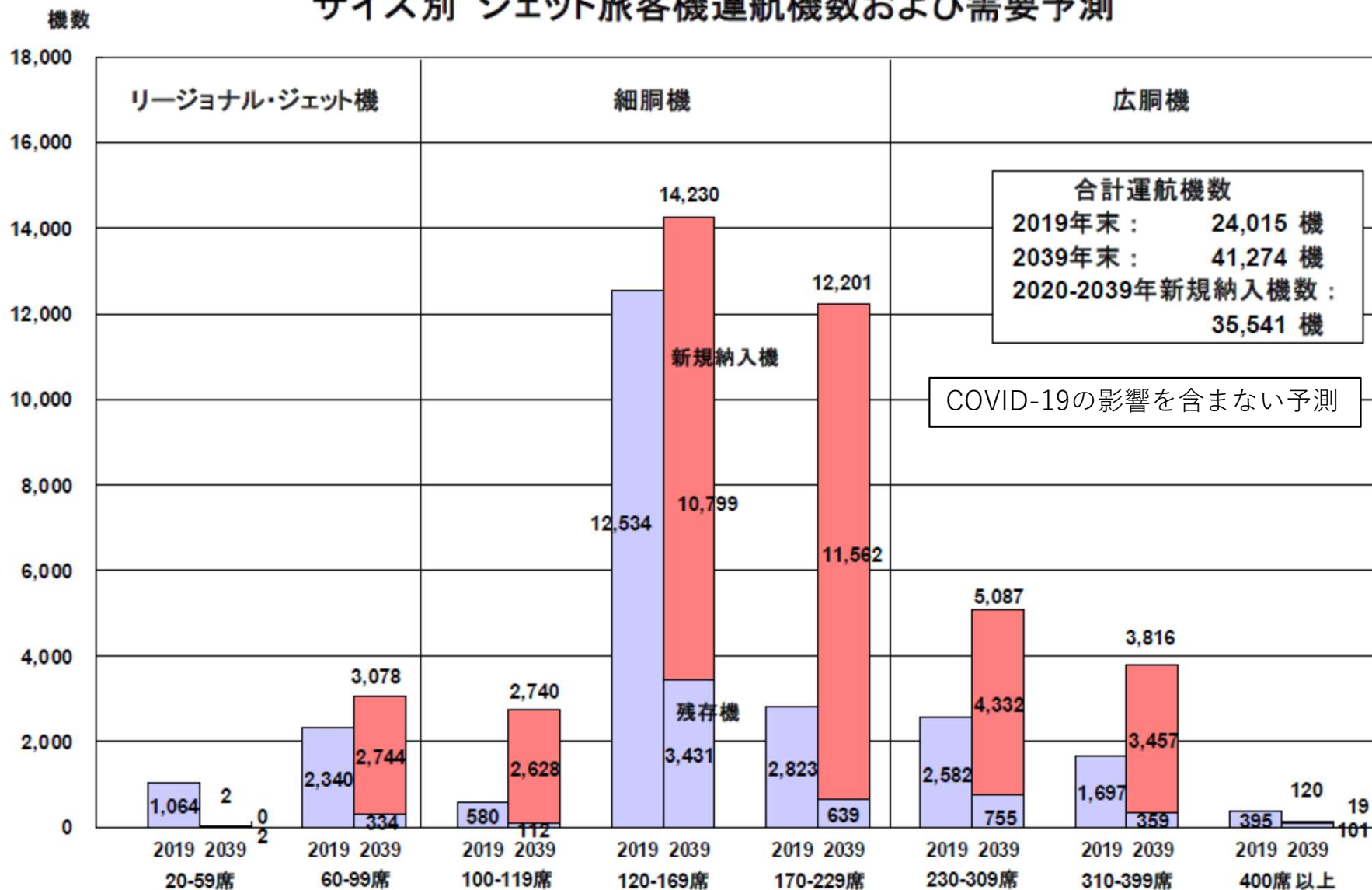
ジェット旅客機の需要予測結果



出典：(一財)日本航空機開発協会

狙う市場と需要予測

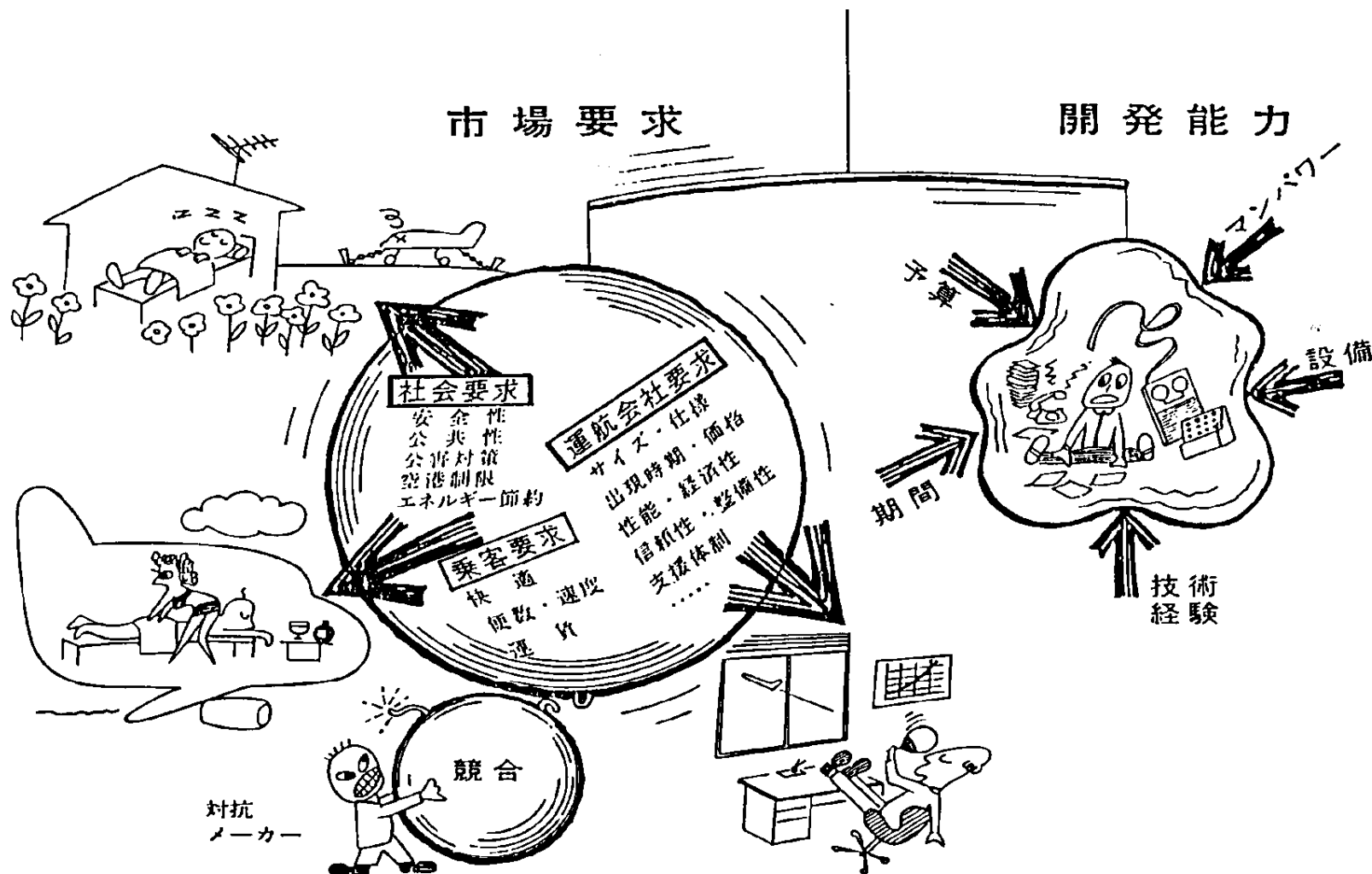
サイズ別 ジェット旅客機運航機数および需要予測



出典：（一財）日本航空機開発協会

市場要求と開発能力

- 多様な市場要求に対して、競合機との差別化や自社の開発能力と適用できる新技術を勘案し「設計要求仕様」を設定する。



市場要求仕様の例

機体を開発する際には、最初に市場調査により得られた具体的な市場の要求を「**市場要求仕様**」としてまとめる。

(例)

項目		市場要求仕様
性能	航続距離	1,300nm (約 2,400km)
	最大巡航速度	0.76 マッハ
	着陸進入速度	130kt (約 240km/h)
	離着陸距離	1,500m
	片発停止上昇限度	13,000ft (約 4,000m)
	最大巡航高度	35,000ft (約 10,700m)
客室	シート幅	18in (約 46cm)
	シート・ピッチ	32in (約 81cm)
	通路幅	20in (約 51cm)
貨物室	貨物容量	乗客一人当たり 8ft ³
	貨物重量	(23lb/bag × 2.5 個/乗客)+500lb
その他	信頼性	実証済みのシステム・部品を採用
	整備性	地上整備設備を最小とする
	騒音	ステージⅢを余裕を持って満足させる
	エンジン排気	排気ガス(NOx)の少ないエンジン選定

4. 概念設計（諸元策定/空力設計）

- ◆ 航空機レベルの要求定義
- ◆ 初期概念スケッチ
- ◆ 機体コンセプト検討
- ◆ 諸元策定
- ◆ 空力設計の流れ
- ◆ C F D解析/風洞試験

航空機レベルの要求定義

- 概念設計とは、市場要求・客先要求・T/C要件（法令/規制）を基に、機体仕様を策定し、次フェーズの基本設計に対する航空機レベルの設計要求（DR&O）を定義する作業のこと。

要求仕様

市場要求

- 乗客・貨物
- 飛行速度・高度
- 航続距離
- 運用効率
- Turn Around Time
- Dispatch Reliability
- 機体価格
- 運航コスト
- Direct Operating Cost

設計要求

耐空性基準 / FAR

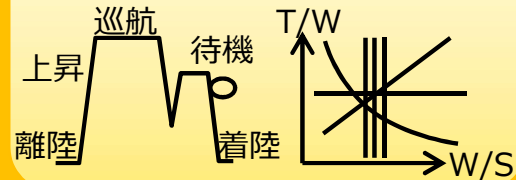
- 安全性
- 信頼性

概念設計

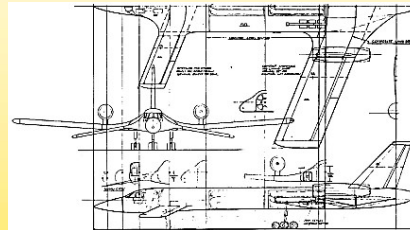
機体コンセプト検討



性能推算・諸元策定



全機アレンジ



基本設計要求

DR&O

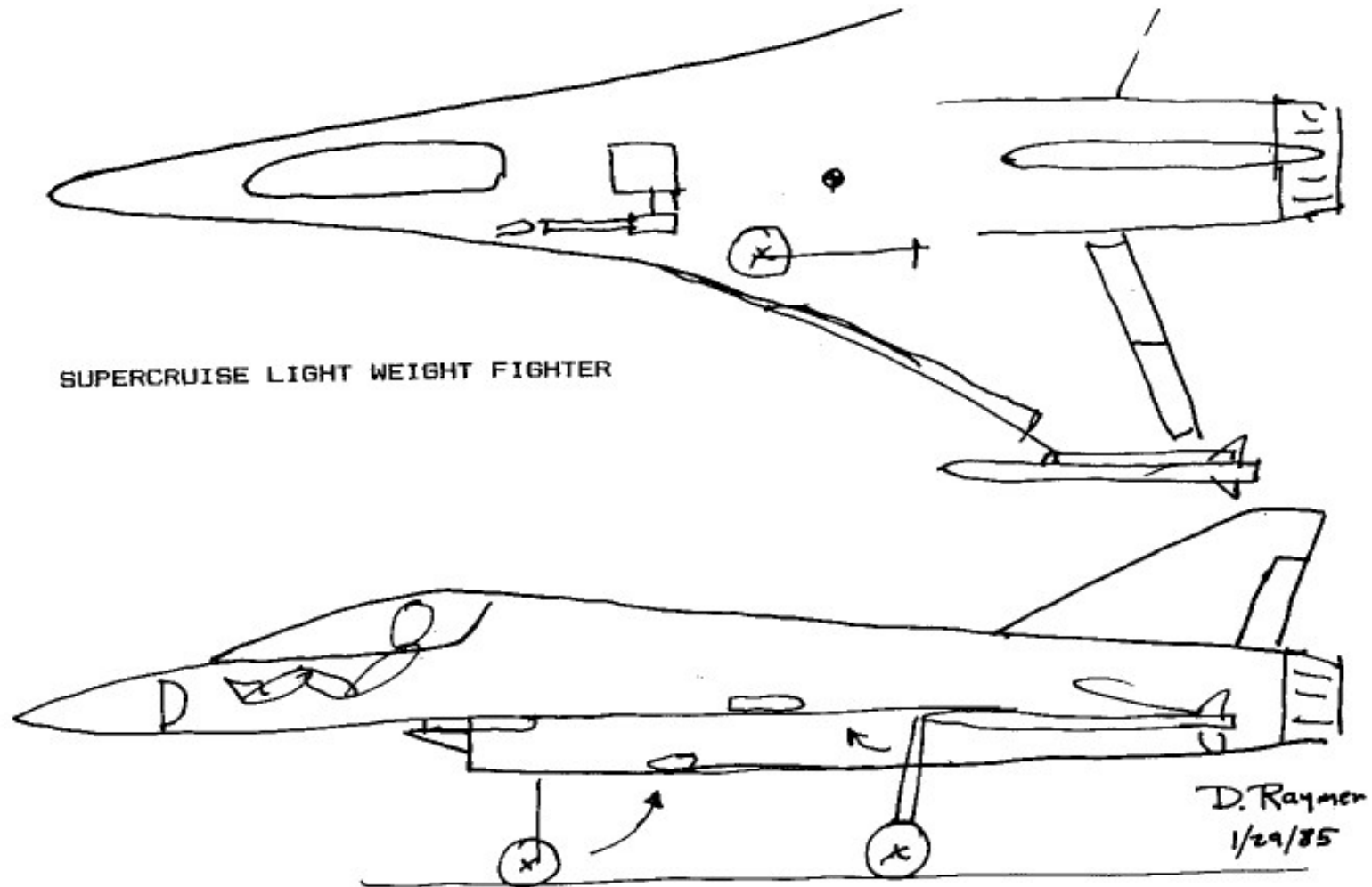
Design Requirements & Objectives

- 機体諸元
（主翼/胴体/尾翼/エンジン）
- 重量
- 性能
（燃料消費率/揚抗比）
- 構造様式・材料・強度
- 荷重
- 各種装備システム仕様
（エンジン）
- 整備性

基本設計へ

写真：左上：popsci.com, 右上：dailymail.co.uk, 左下：ardz21.blogspot.com, 右下：aerospace-technology.blogspot.jp
全機アレンジ図：Aircraft Design: A Conceptual Approach

機体コンセプト検討：初期概念スケッチ



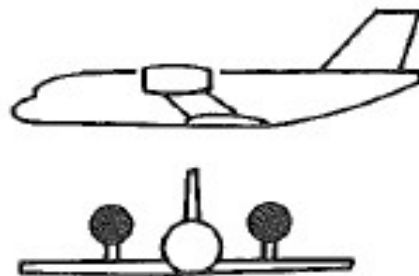
初期概念スケッチの例
Initial Sketch

Aircraft Design: A Conceptual Approachから引用

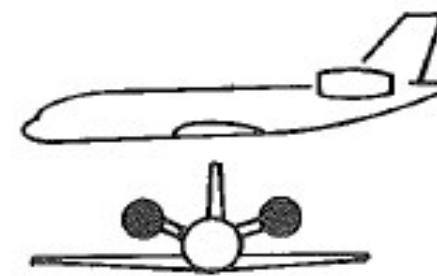
機体コンセプト検討：エンジンマウント方式



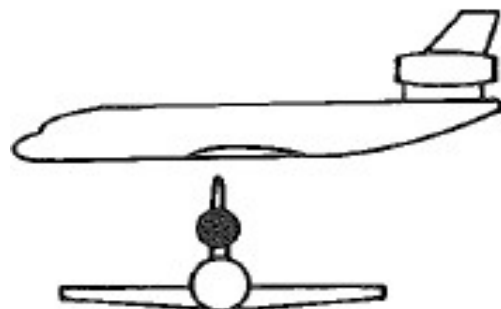
UNDER-WING



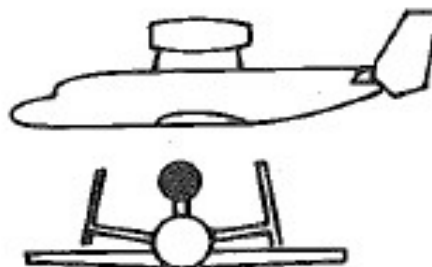
OVER-WING



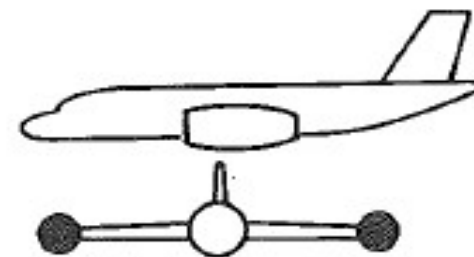
AFT-FUSELAGE



TAIL



OVER-FUSELAGE

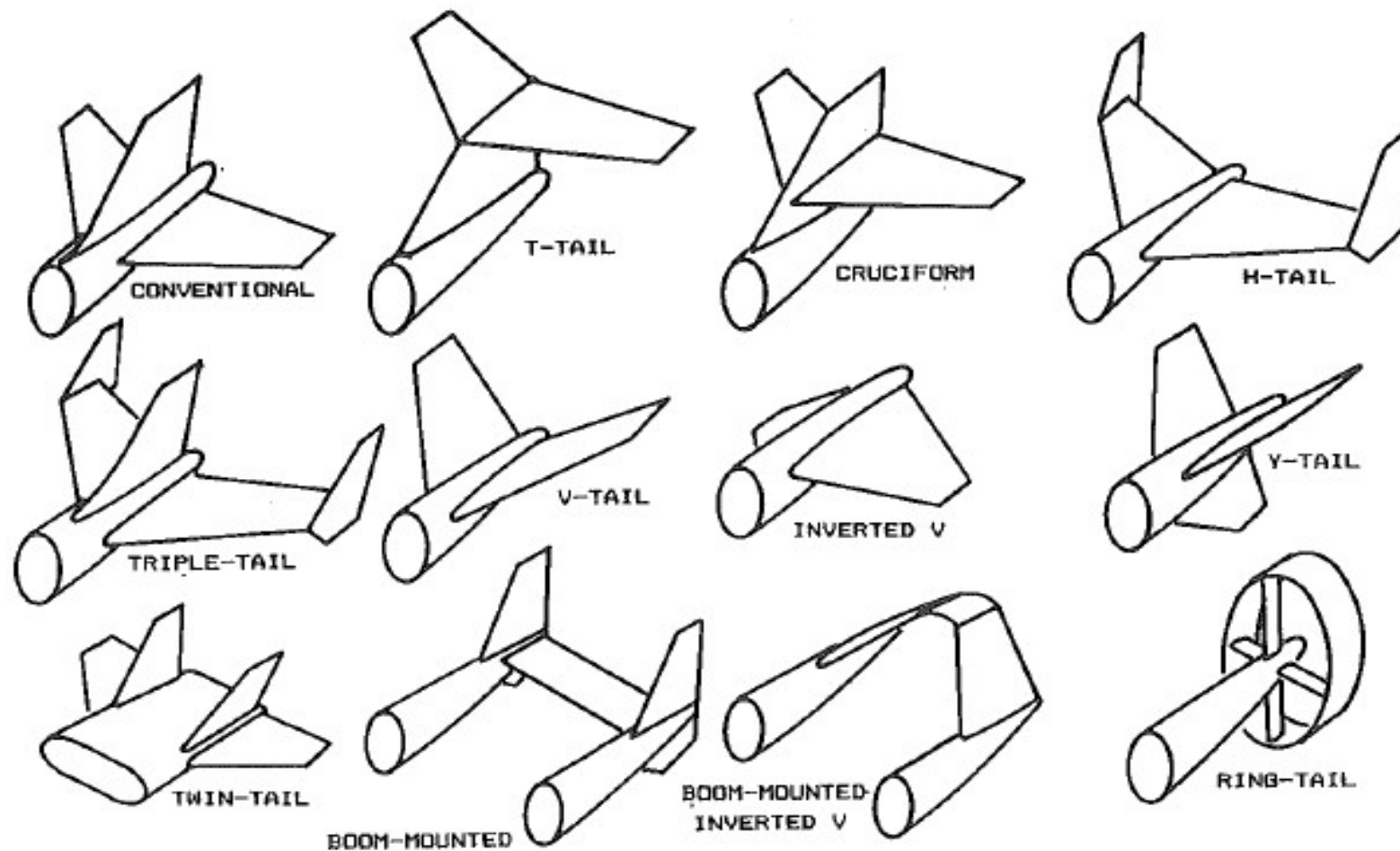


WINGTIP

ポッド（ナセル）搭載ジェット機の場合

Aircraft Design: A Conceptual Approachから引用

機体コンセプト検討：尾翼形態



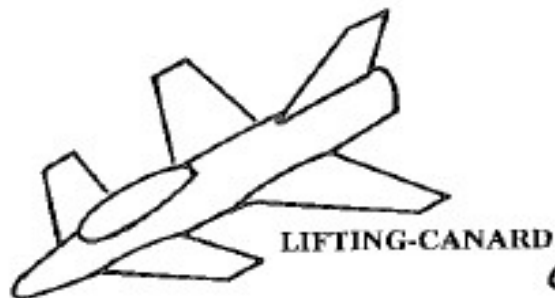
尾翼形態例

Aircraft Design: A Conceptual Approachから引用

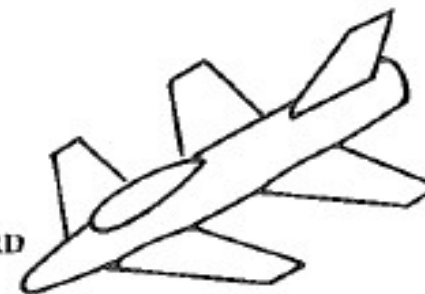
機体コンセプト検討：尾翼形態



CONTROL-CANARD



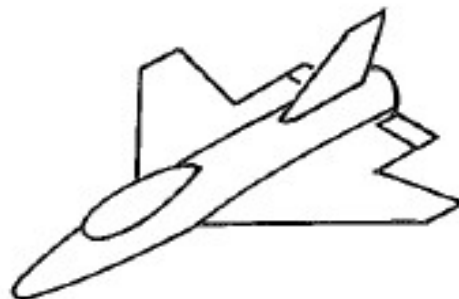
LIFTING-CANARD



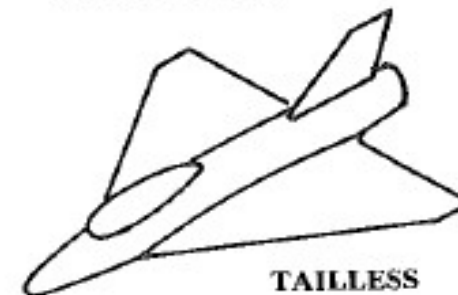
TANDEM WING



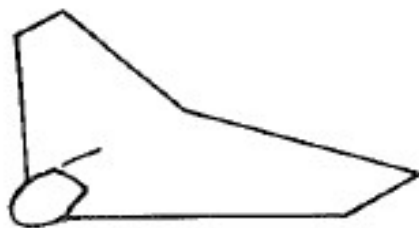
THREE-SURFACE



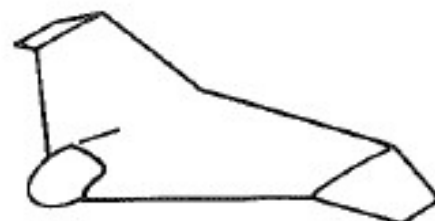
AFT-STRAKE OR BACK PORCH



TAILLESS



FLYING WING



DROOP WING OUTER PANELS

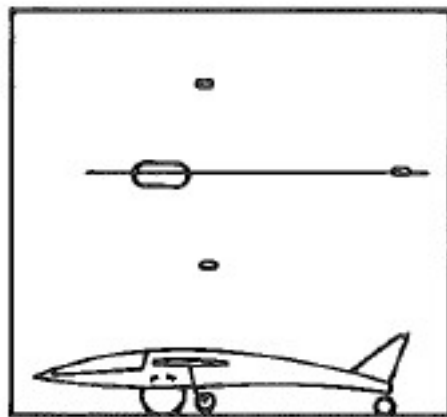


WINGLETS

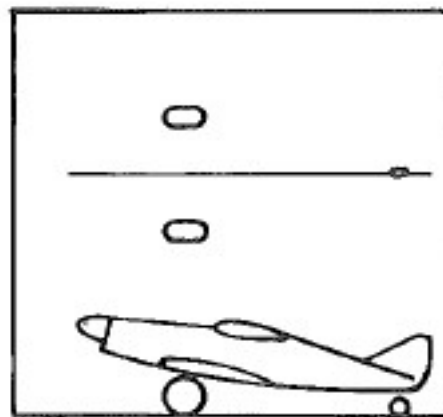
尾翼形態例

Aircraft Design: A Conceptual Approachから引用

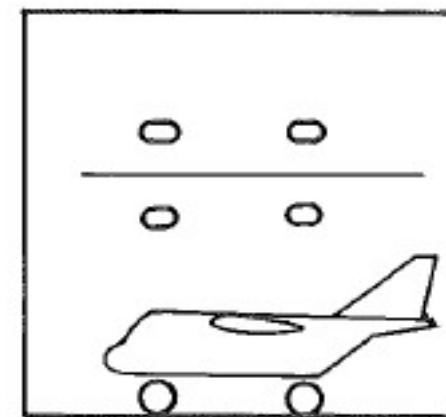
機体コンセプト検討:脚配置



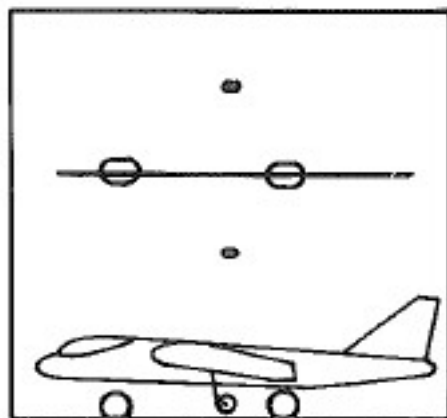
SINGLE MAIN



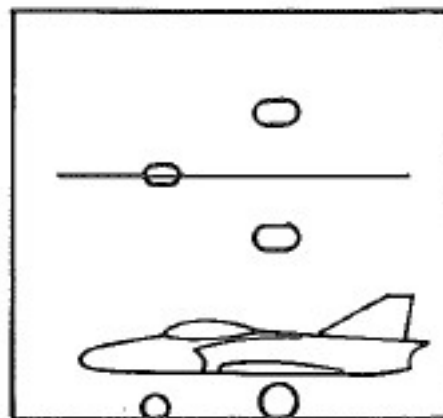
TAILDRAGGER



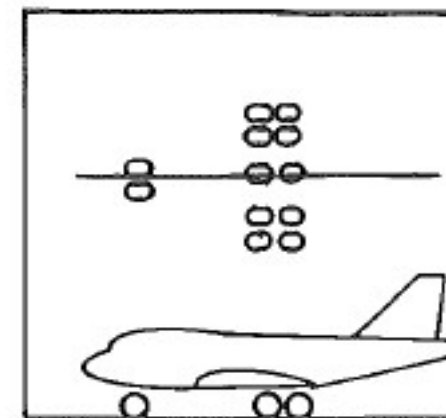
QUADRICYCLE



BICYCLE



TRICYCLE



MULTI-BOGEY

脚配置例

Aircraft Design: A Conceptual Approachから引用

機体コンセプト検討:胴体・座席配置



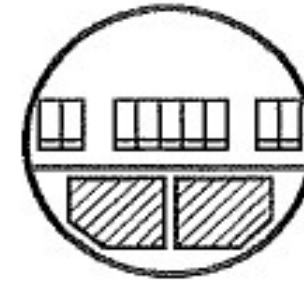
(a) A320



(b) B737



(c) DHC-7



(d) DC-10

胴体断面例



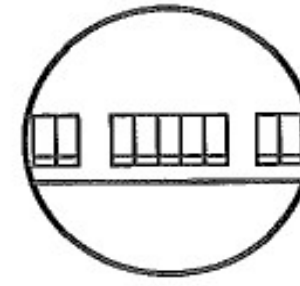
(a) DC-9



(b) A320



(c) Fokker-50



(d) DC-10

座席横配列例

飛行機設計法から引用

機体コンセプト検討：戦闘機の例

- 要求性能仕様が同一でも異なる形態が成立し得る例



YF-22



YF-23

出典：Lockheed Martin及びNASA ホームページより

機体コンセプト検討：737の例

737開発当時のconfiguration trade-off studyの事例



出典: FLIGHT INTERNATIONAL

機体コンセプト検討：将来機の事例



出典：NASA/Boeing

- 2030～2035年頃実現目標
- 燃費は既存機比70%減
- 離陸時などパワーが必要な時はガスタービンエンジン、巡航時は電動モーターで駆動するハイブリッドエンジン



出典：NASA/Lockheed Martin

- 2030～2035年頃実現目標
- 尾翼のない全翼形態
- スラストベクタリング



出典：NASA/MIT

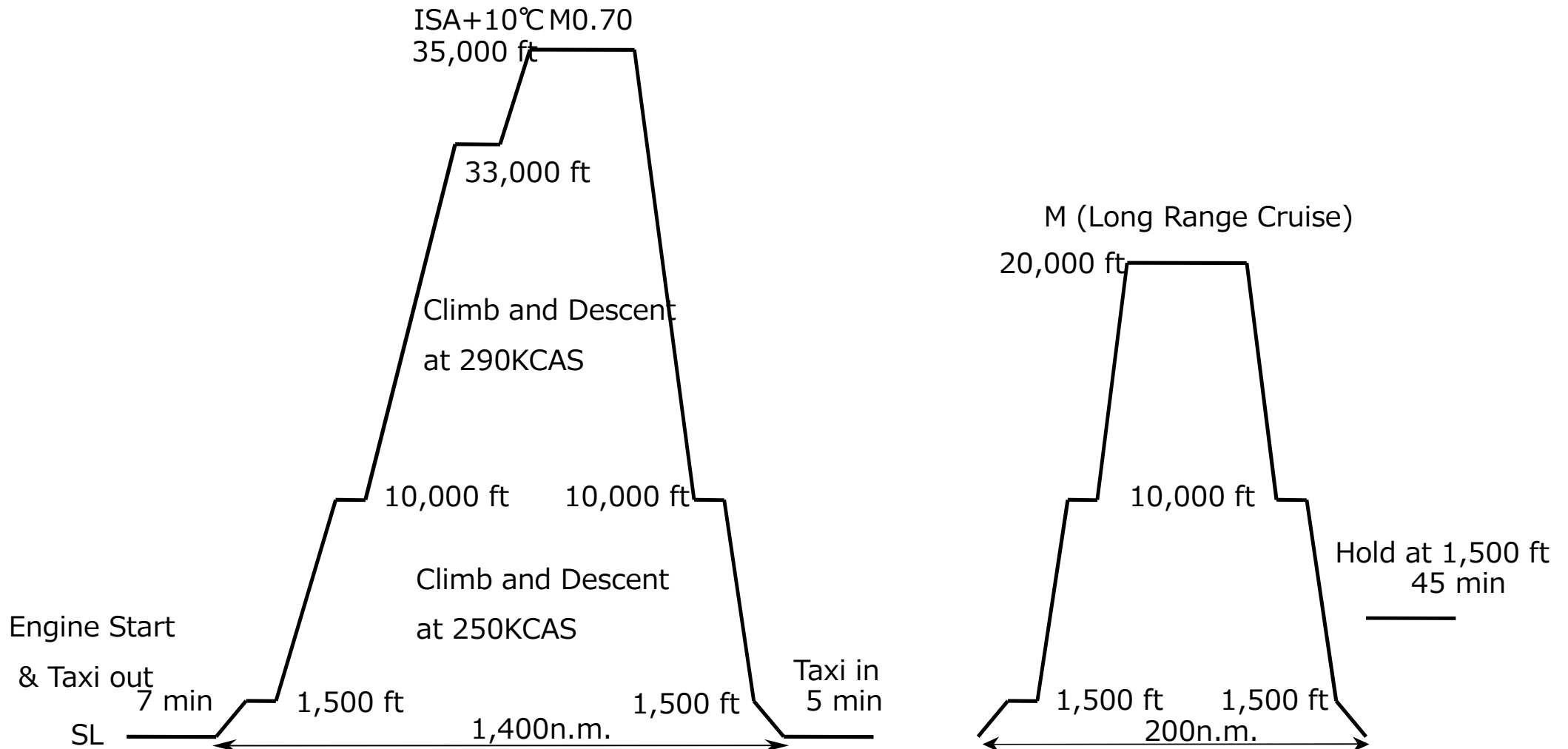


出典：NASA/MIT

- 2030～2035年頃実現目標
- “Double Bubble”胴体
- エンジン騒音を胴体・尾翼で遮蔽

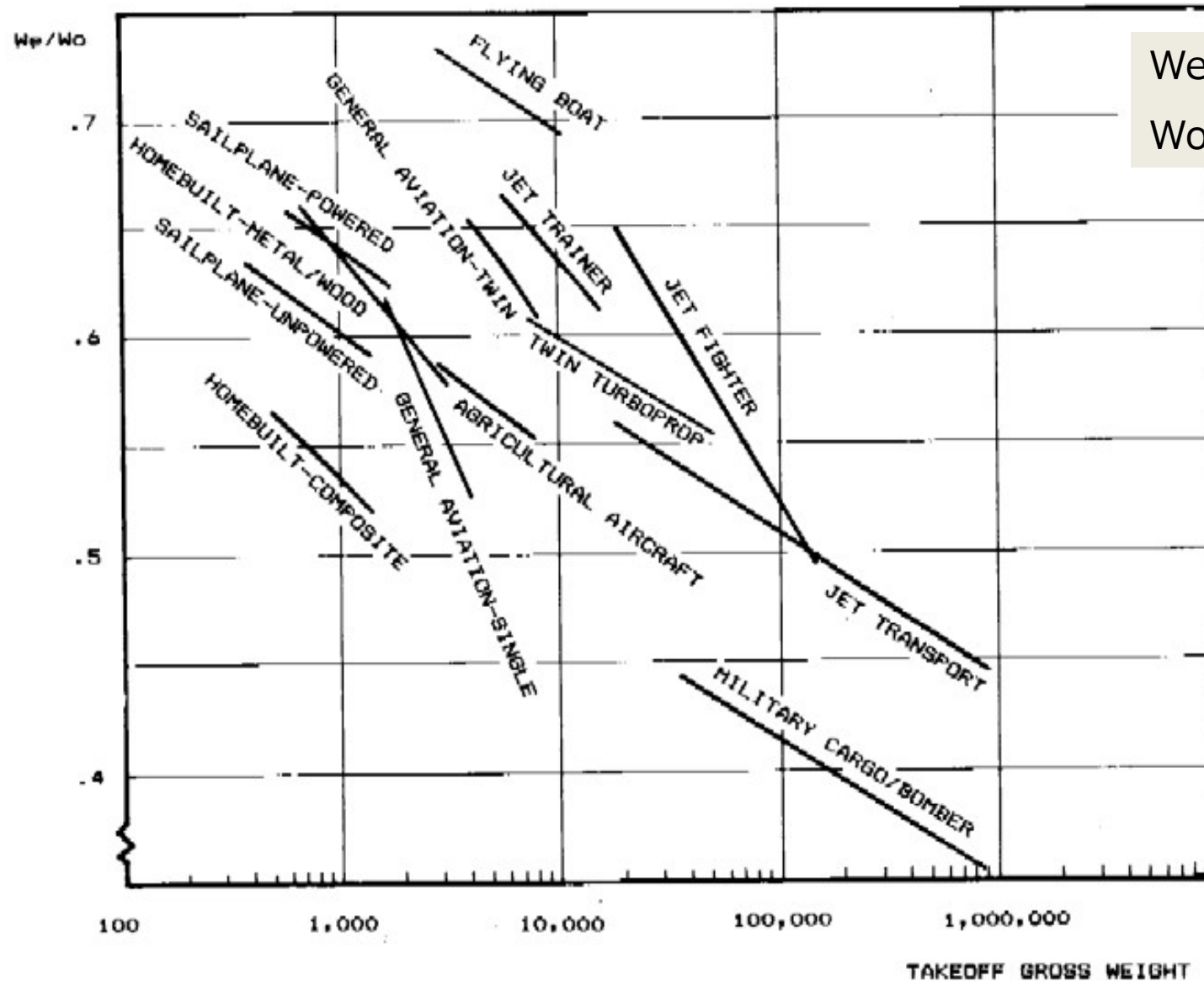
諸元策定：設計ミッションプロファイル

- 設計ミッションプロファイルに従ったシミュレーションを行ない、必要な燃料量、エンジン推力、主翼面積、機体重量、性能を求める



諸元策定：統計値の活用（機体重量）

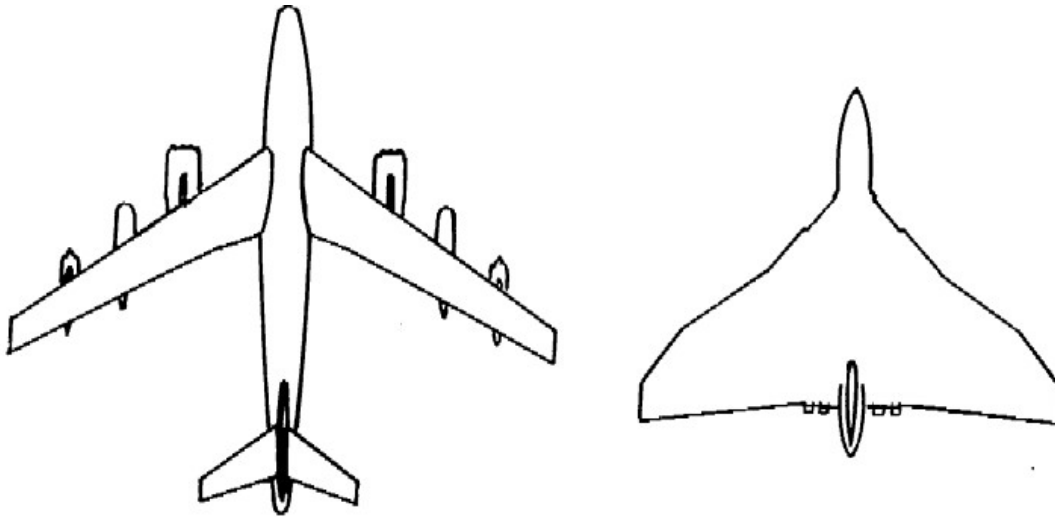
●Empty Weight Fraction Trends



W_e : Empty Weight
 W_o : takeoff gross weight

出典：D.Raymer ; Aircraft Design : A Conceptual Approach, AIAA Education Series

諸元策定：統計値の活用（揚抵比）



	<u>B-47</u>	<u>AVRO VULCAN</u>
S reference	1430	3446
S wetted	11300	9600
SPAN	116	90
Swet/Sref	7.9	2.8
ASPECT RATIO	9.4	3.0
WETTED ASPECT RATIO	1.2	1.1
L/D max	17.2	17.0

Fig. 3.4 Does aspect ratio predict drag?

出典：D.Raymer ; Aircraft Design : A Conceptual Approach, AIAA Education Series

デルタ翼機は、通常翼機と比較した場合、全機ぬれ面積に対し主翼面積の比率が大きい。

つまり、揚力を発生する主翼の割合が高いため、多少アスペクト比（A R）が小さく空力効率が悪くても、全機としての効率（L/D）が同等となる。



諸元策定：統計値の活用（揚抗比）

- 統計データから、同種の機体は、濡れアスペクト比と最大揚抗比 $(L/D)_{\max}$ には相関があることがわかっている。

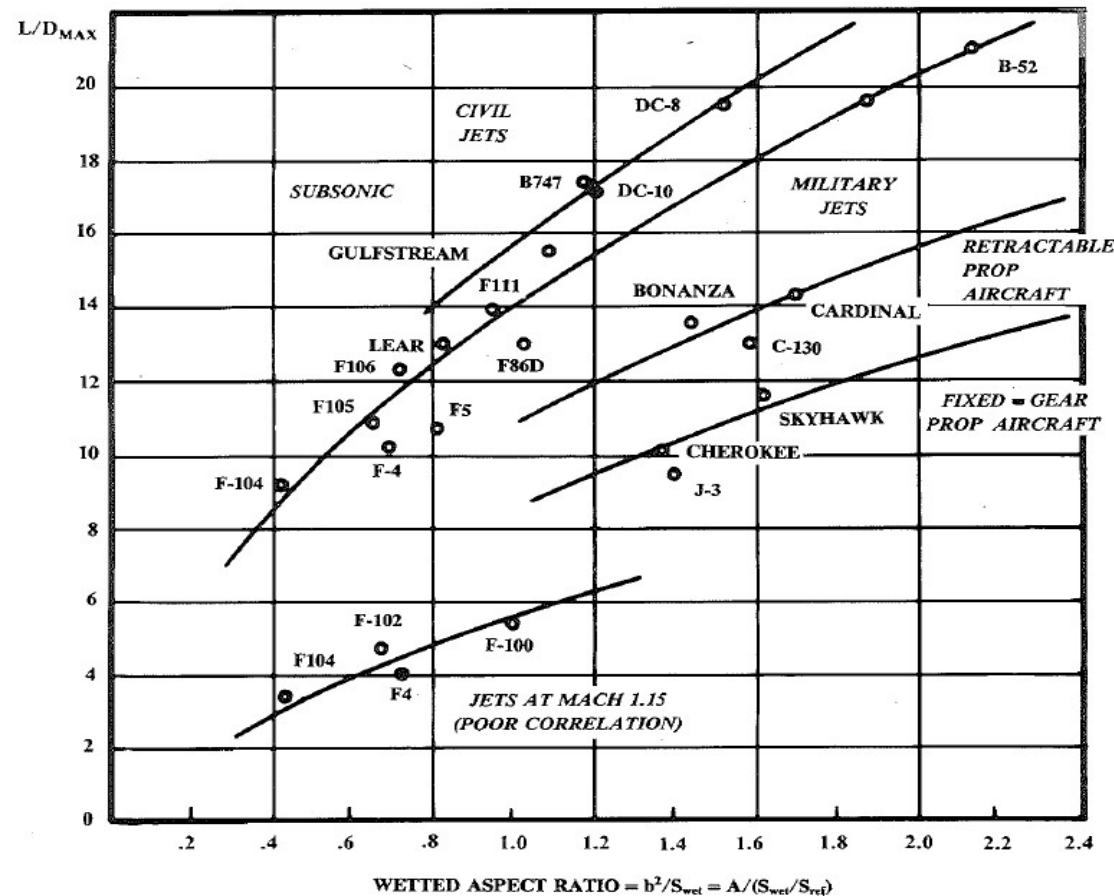


Fig. 3.6 Maximum lift to drag ratio trends.

Aircraft Design: A Conceptual Approachから引用

$$\text{ここで濡れアスペクト比} = \frac{b^2}{S_{\text{wet}}} = \frac{AR}{S_{\text{wet}}/S}$$

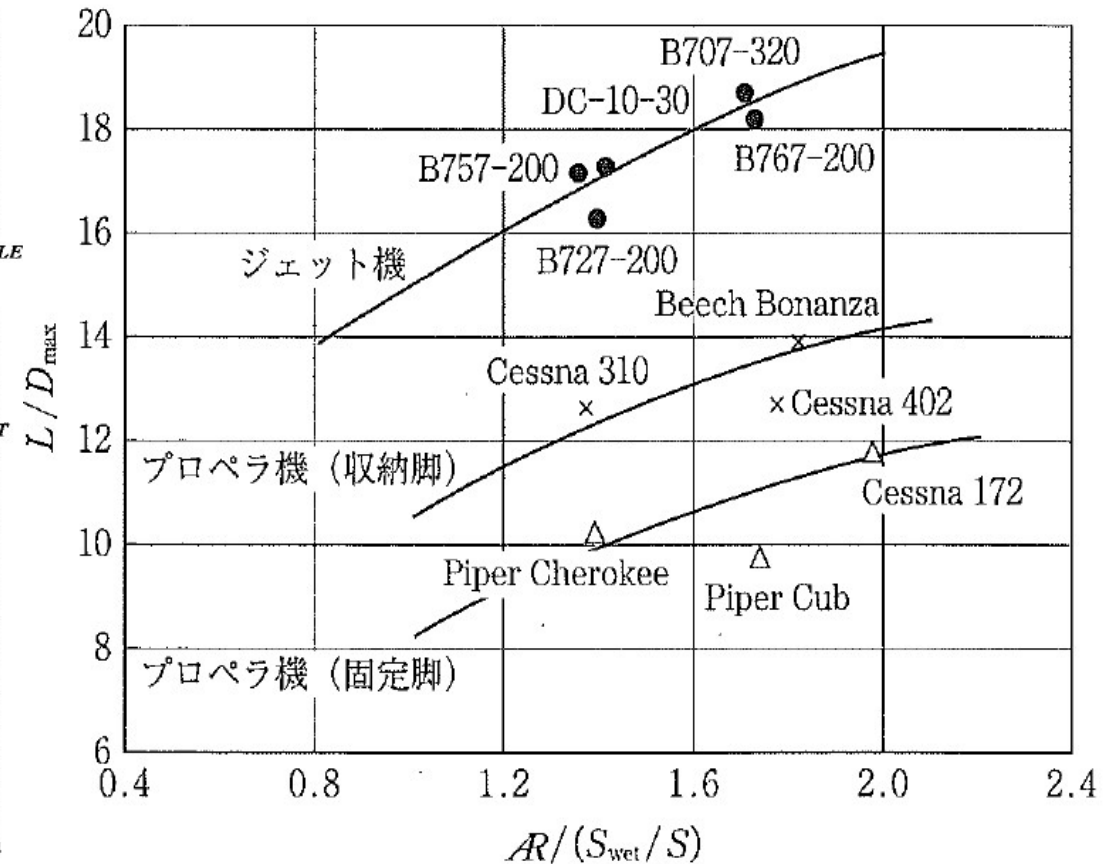
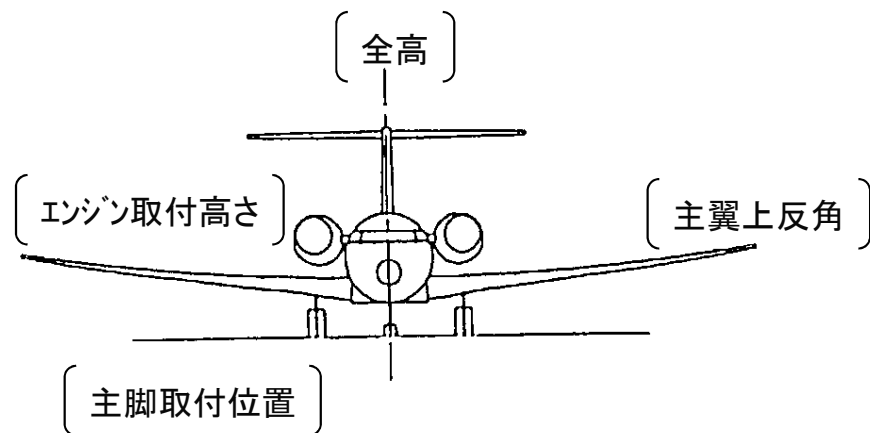
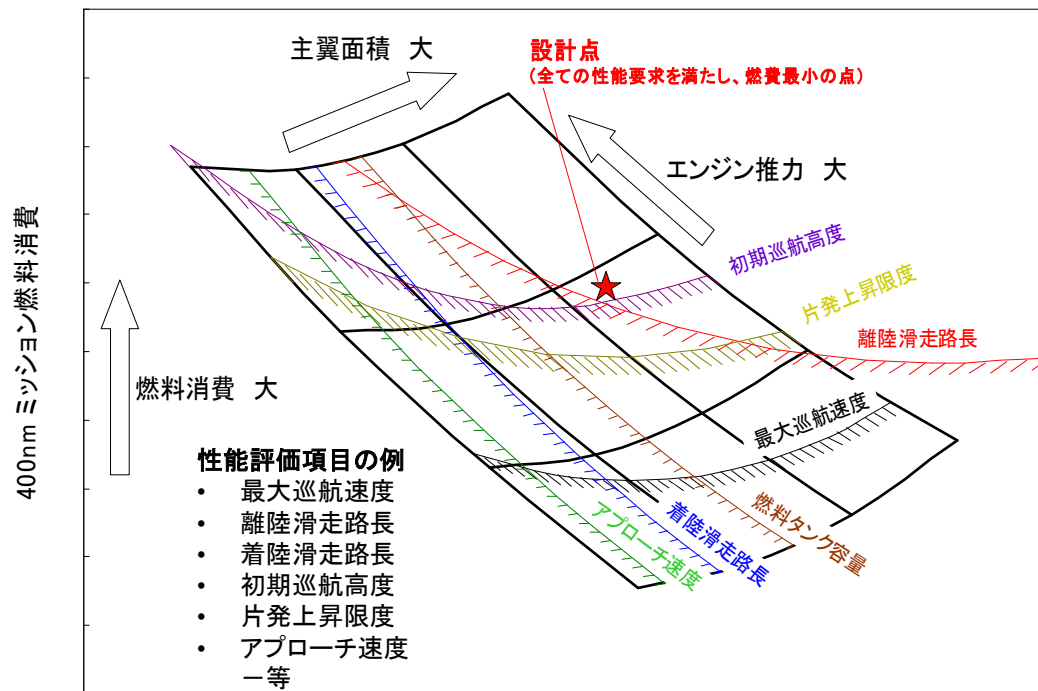


図 4.3 濡れアスペクト比と揚抗比（最大値）の関係

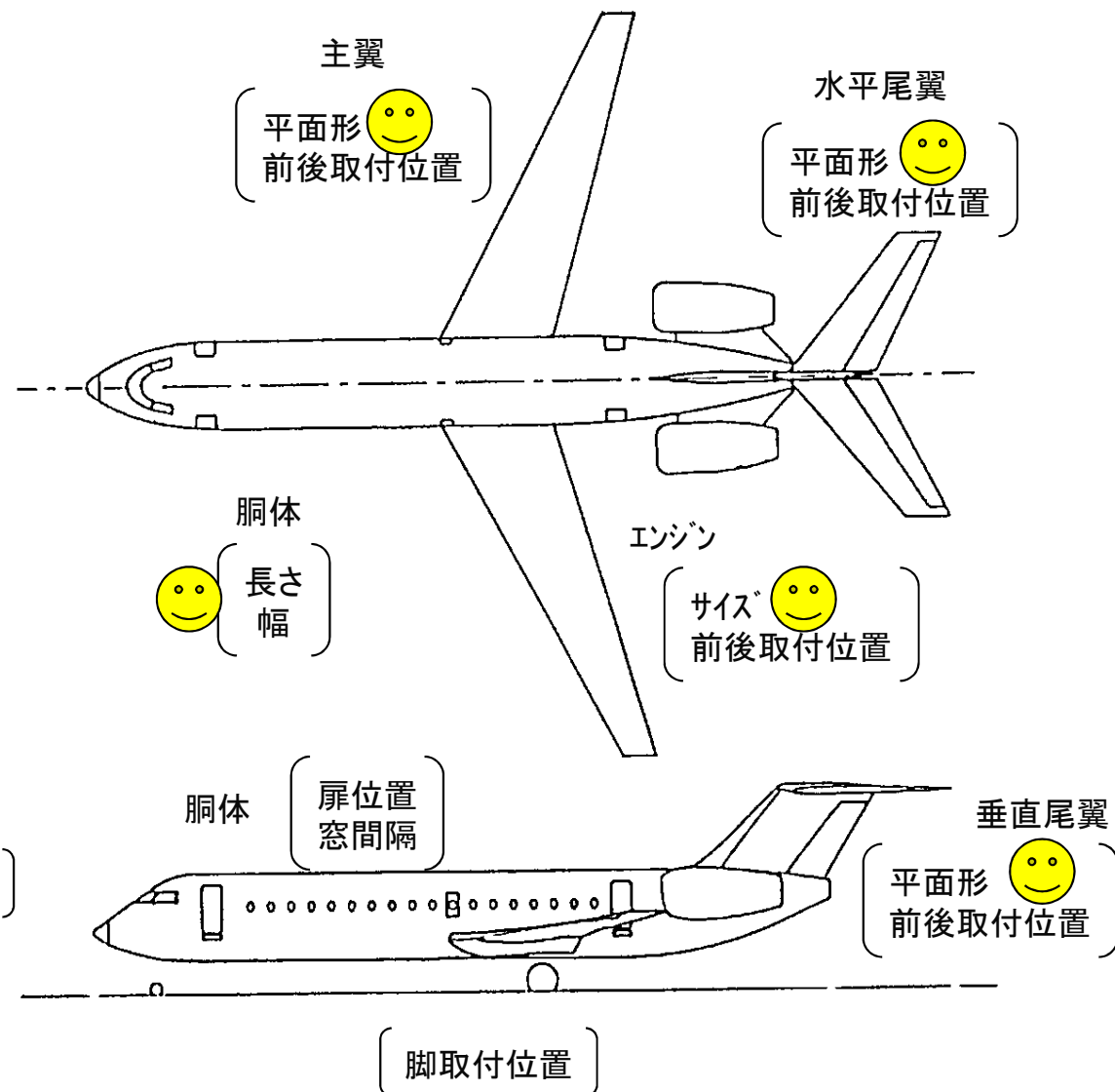
飛行機設計法から引用

諸元策定：主翼存在領域と全機アレンジ

サイジング結果 - カーペットチャート



😊: 機体諸元策定で扱うもの



諸元策定：クリアランス要求の例

【Tail Down Angle】

尻すり角に余裕があること

【Roll Clearance】

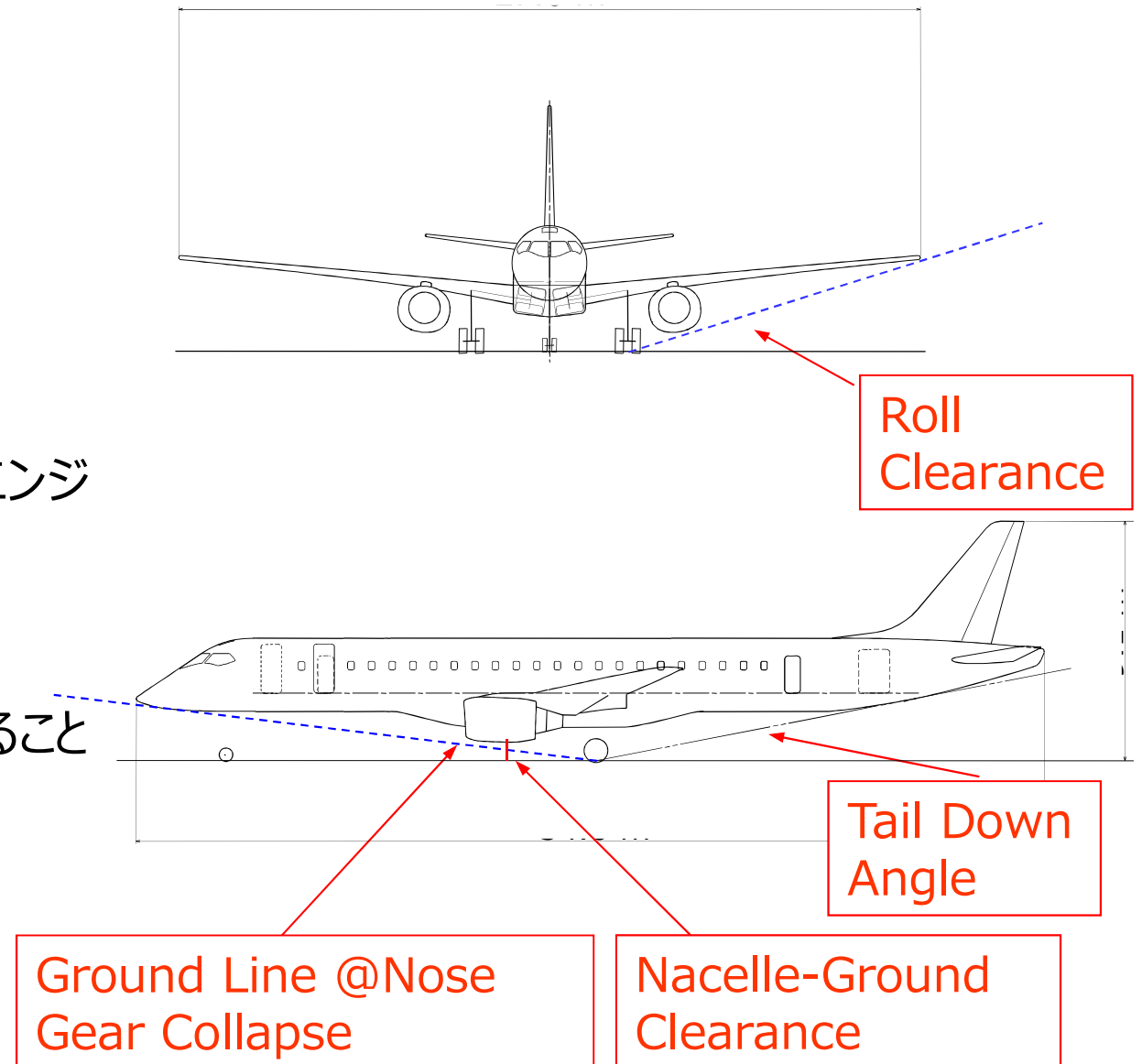
地上付近でのRoll動揺を考慮

【Nose Gear Collapse】

前脚不作動時の非常着陸においてエンジンが破損を受けないこと

【Nacelle-Ground Clearance】

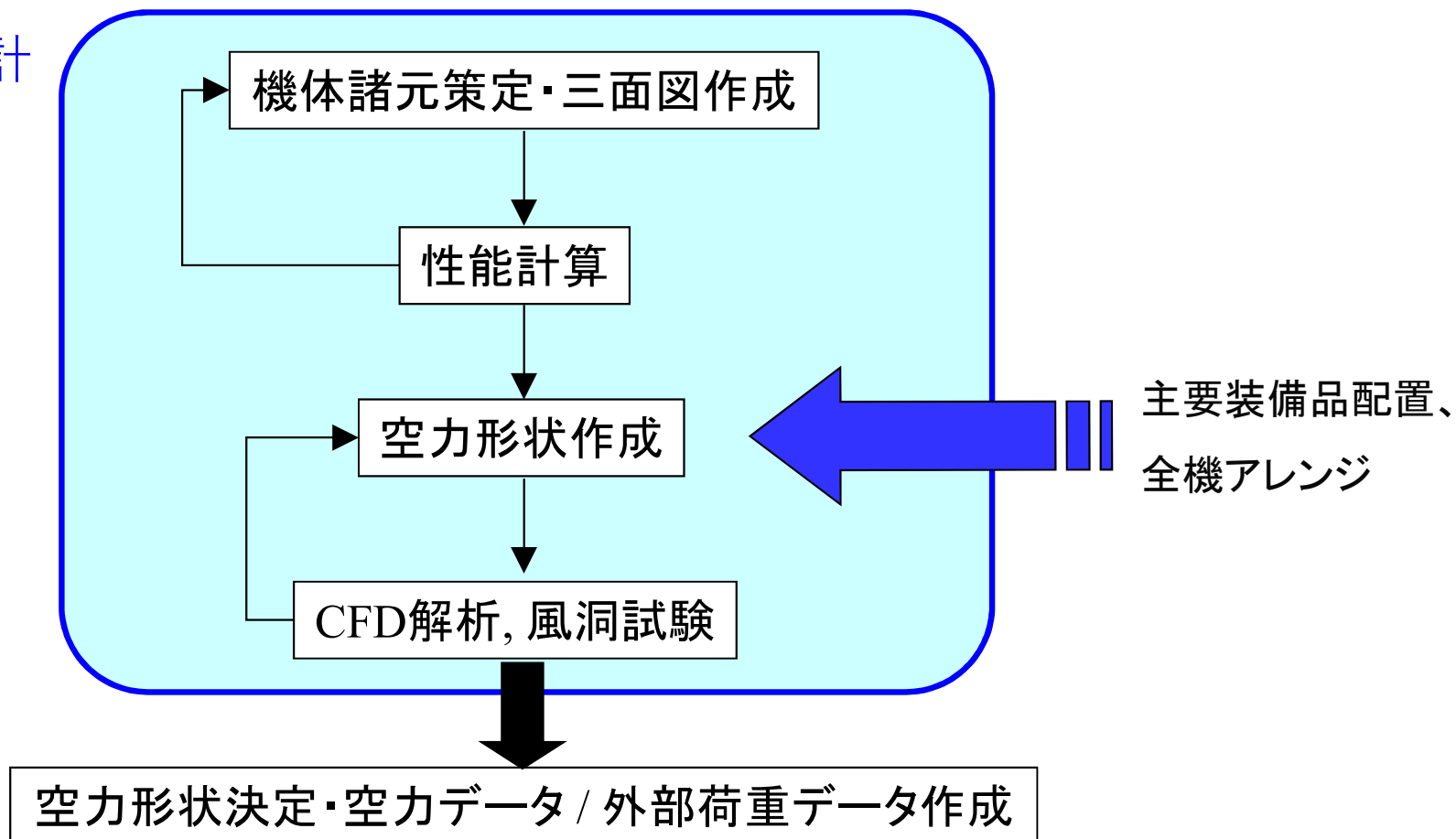
ナセル下端が地上から十分離れていること



空力設計の流れ

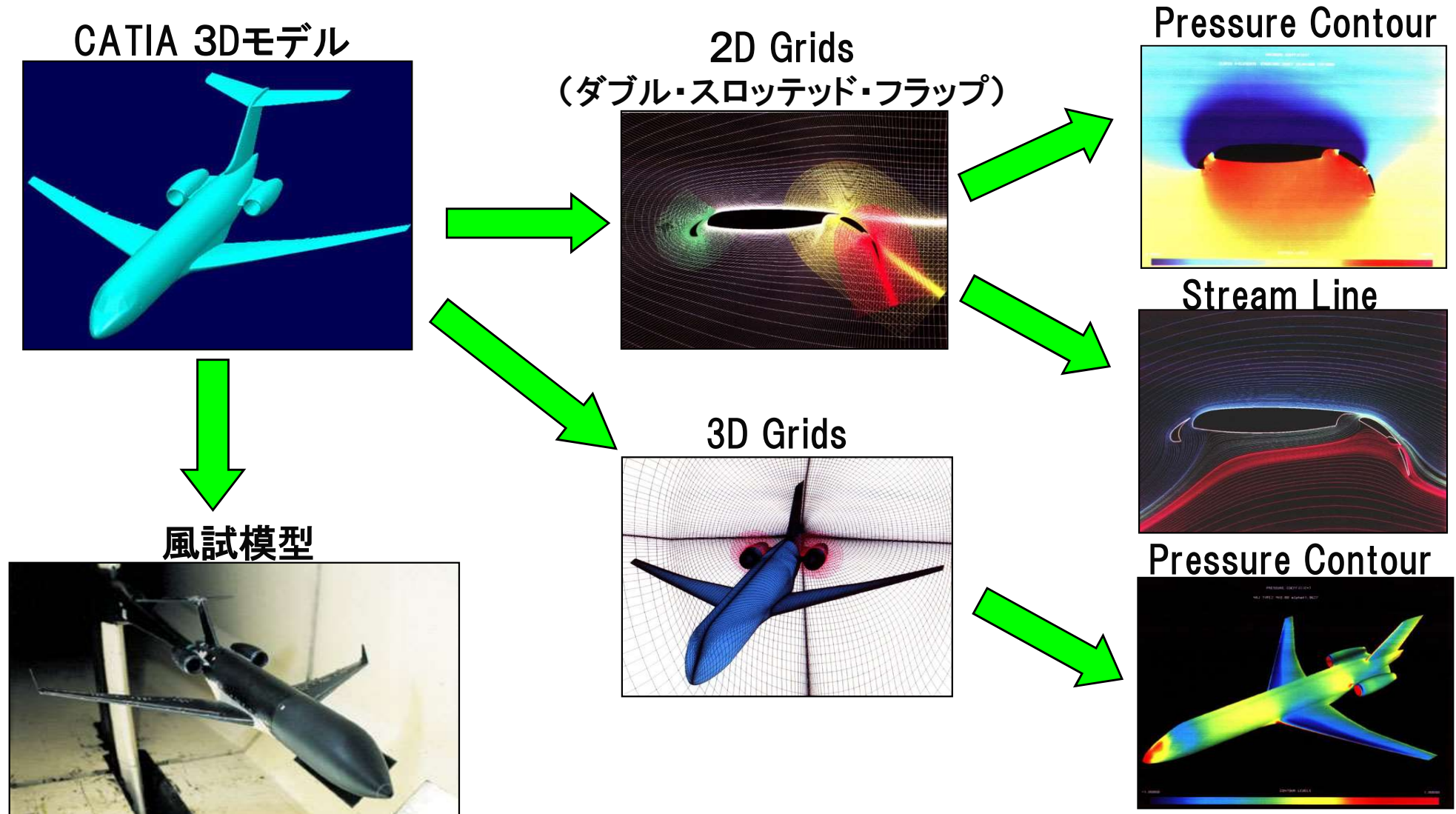
- 空力設計は、設計要求及び安定性・操縦性の要求を満たす機体諸元・性能の設定、及び高揚力装置等の設計を行い、要求される空力性能及び特性を満たした空力形状を決定する作業である。
また、構造/装備設計に空力荷重等の必要な設計データを提供する。

空力設計

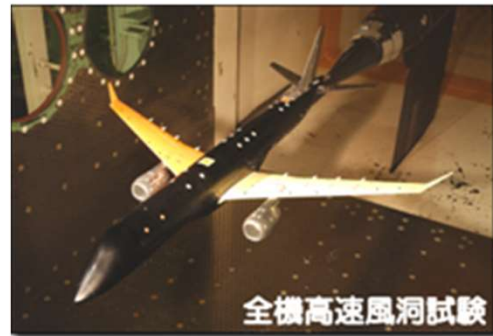


CFD解析/風洞試験

- 機体形状は、空力性能や圧力分布をCFD解析や風洞試験を実施して算出し、それらが要求される値に収束するまで形状の変更・修正を繰り返すことによって決定される。



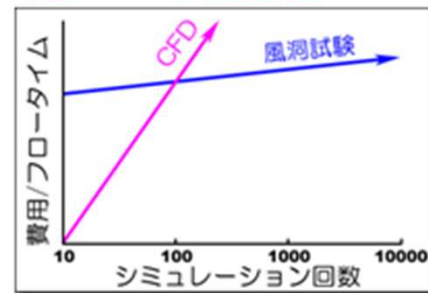
CFD解析/風洞試験：ツールの使い分け



風洞試験

- 剥離や失速等の非線形空力現象の把握

- 高いデータ生産性

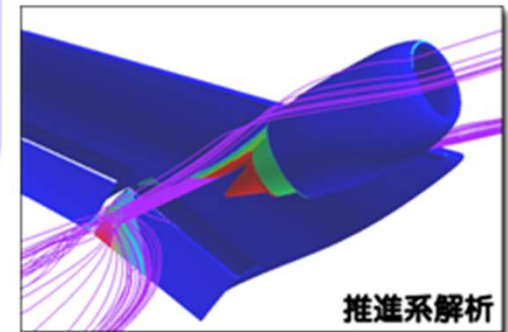
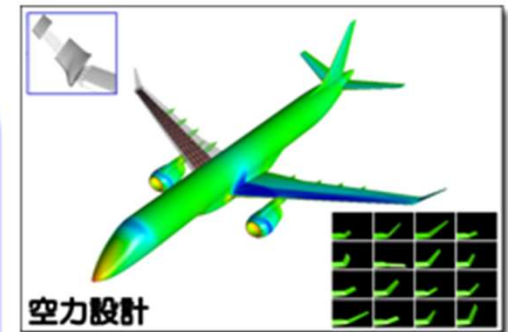


CFD

- 最適化技術を取り込んだ効率的な形状設計
⇒ 設計コスト/期間の削減

- 実機性能の推算
(Re数効果、推進系効果)
⇒ 大規模風試の削減

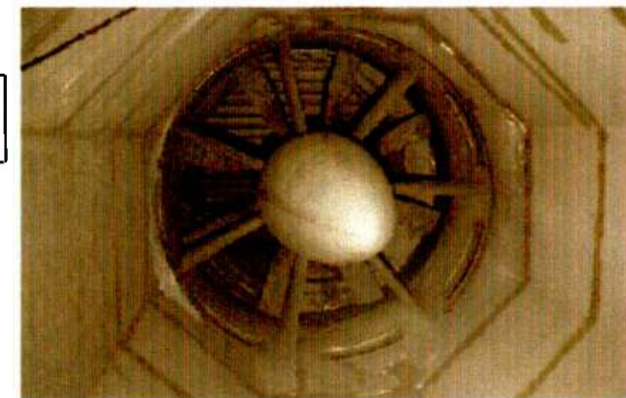
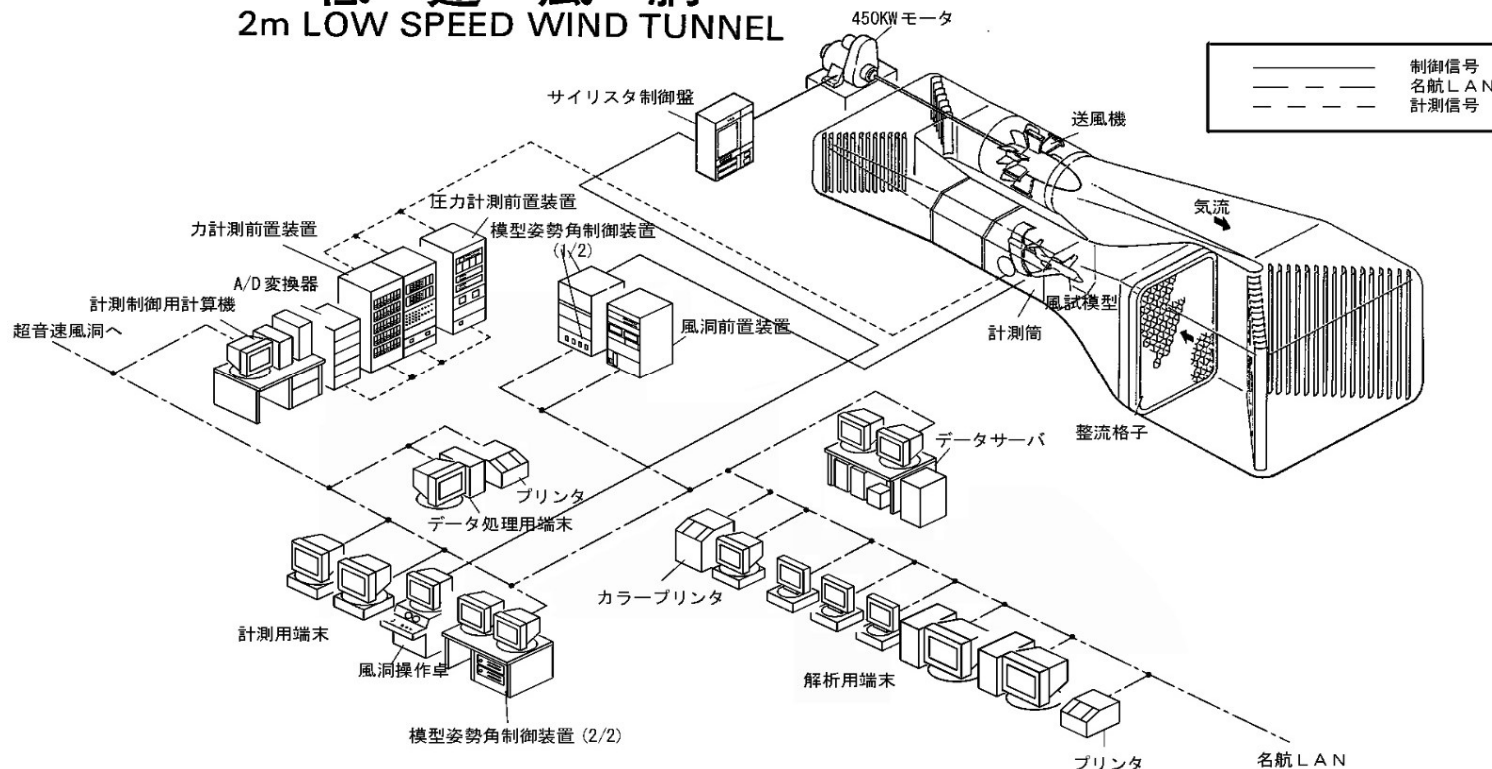
風洞試験とCFDの相互補完



スパコン+CFD活用による風洞試験の削減：ボーイングの例
Boeing 767(1980年代の開発)・・・風洞で77の異なる翼を試験
Boeing 787(2000年代の開発)・・・風洞で5の異なる翼を試験
(NASA CP-2004-213028)

国内風洞試験設備（MHI低速風洞）

低速風洞 2m LOW SPEED WIND TUNNEL



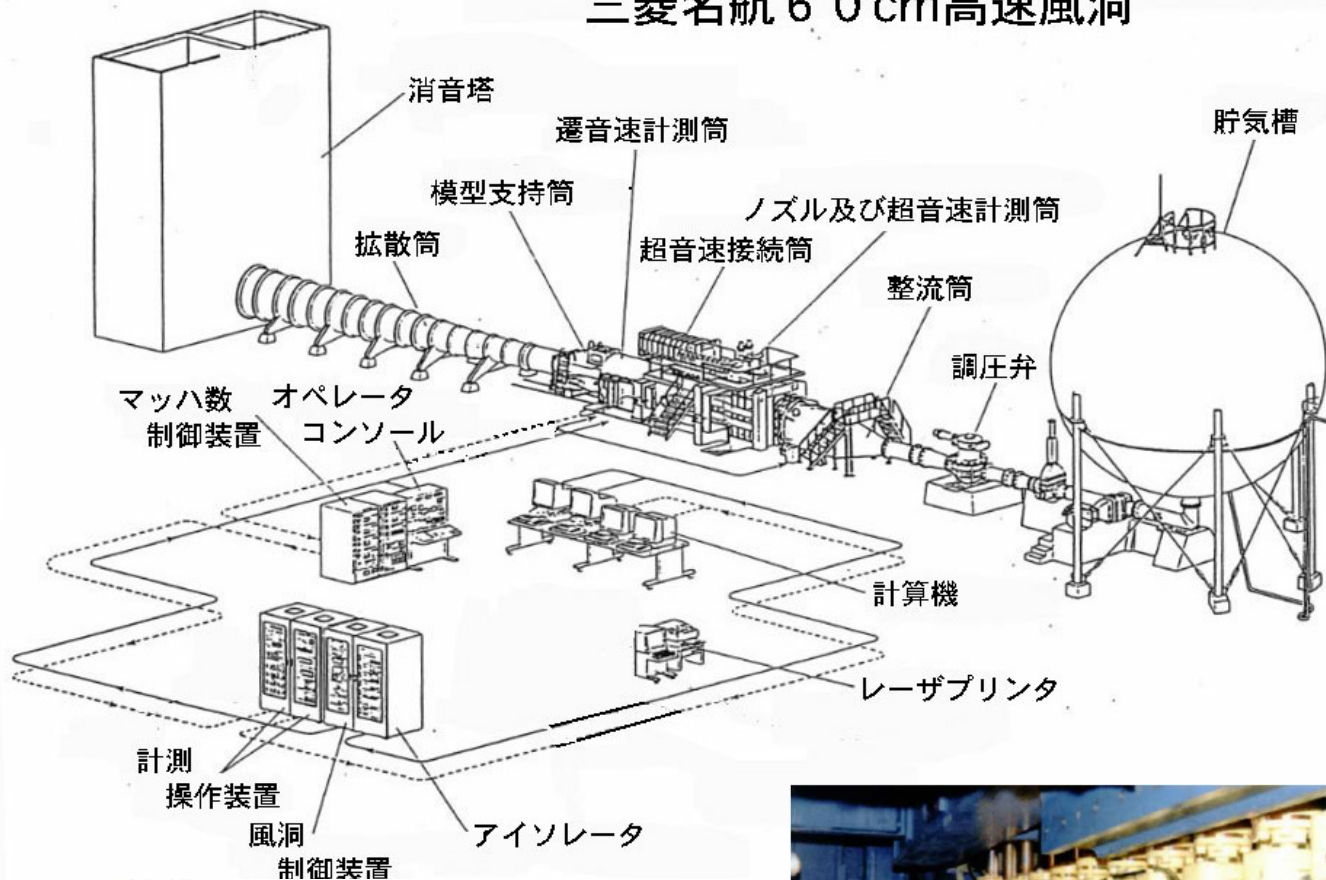
●主要目 Specifications

型式 Type	単回路密閉型（ゲッチンゲン型式） Goettingen type
計測部 Test section	幅2.0m×高さ1.8m八角断面×長さ2.5m（絞り比約5:1） 2.0mW×1.8mH×2.5mL octagonal (Contraction ratio 5:1)
風速 Speed	最大約100m/s, 常用60~70m/s 風速変動±0.25%以内 Max.100m/s Reg.60-70m/s Variation ±0.25%
動力 Power	450kw直流電動機, 遠隔制御装置付 450kwDC motor
送風機 Fan	8枚羽根, 可変ピッチプロペラ 8blades, variable pitch



国内風洞試験設備（MHI高速風洞）

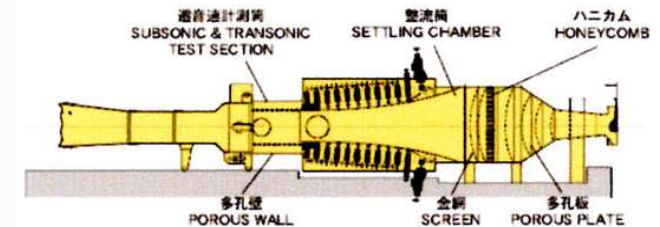
三菱名航 60 cm高速風洞



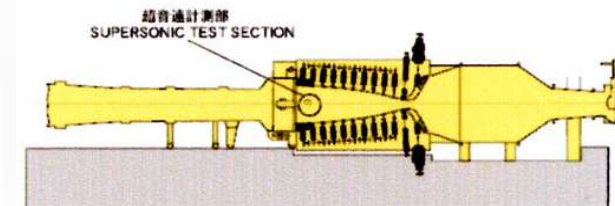
主要目

GENERAL DESCRIPTION

形式 TYPE	間欠型吹出式 INTERMITTENT BLOW DOWN
計測部 TEST SECTION	0.6m×0.6m
マッハ数 MACH NUMBER RANGE	0.4~4.0
計測時間 MEASURING TIME	20sec



遷音速試験状態
TRANSONIC TESTING CONFIGURATION



超音速試験状態
SUPERSONIC TESTING CONFIGURATION

建設時期 1968.9

CONSTRUCTION (DESIGN/PRODUCTION:MHI)

気流特性改善 1981.11~1982.6

FLOW QUALITY IMPROVEMENT

計測/制御システム更新 1987.4~1987.9

MEASURING & CONTROL SYSTEM ENHANCEMENT

特徴

SPECIAL FEATURES

1. 我国で最初の三音速風洞

THE FIRST TRISONIC WIND TUNNEL IN JAPAN

2. マッハ数高精度制御

HIGH ACCURACY MACH NUMBER CONTROL

3. 非定常空気力のオンライン取得処理

ON-LINE ACQUISITION AND PROCESSING

OF UNSTEADY AERODYNAMIC DATA

4. 光学計測専用カート(感圧塗料)

OPTICAL FLOWFIELD MEASUREMENT SECTION

MOVE THE WORLD FORWARD

mitsubishi
heavy
industries
group