

## 雑談・飛行機（その1）改

古屋 信明 （2022年6月）

### 1. はじめに

「ようやくに成田に向かう機影見てなにか嬉しき梅雨晴れの空」（読売新聞歌壇への川島隆さんという人の入選歌、2020年7月）。

飛行機を隠していたのは雨雲だろうか？ 否、コロナ禍に違いあるまい。そう、私もしばらく飛行機に乗っていないな……。最後は2019年9月のサンクトペテルブルク、モスクワ旅行の日本航空 B(ボーイング)787 型機だ。

旅行よりもっと身近なお楽しみである友人たちとの飲み会も、高校同期会を含めて途絶えてしまった。それは、発生源の中国が初期対応に失敗し、さらに WHO(世界保健機関)が中国に付度して全世界へすぐには警告を発しなかったことによる、新型コロナウイルスの 20 年2月以降のパンデミックのせいだ。この過程の疫学的真実をもう少し知りたいと思っていた。オーストラリア政府も同様な要求をしたが、中国から返ってきたのは貿易上の報復措置であったし、さらに 22 年2月に始まったロシアによるウクライナ侵略の大騒動があるから、コロナも有耶無耶になってしまいそうだ。

ロシアに行ったのは、昔から日本と何かと因縁があり、1世紀近く時代遅れの権力の在り方は怖いけど(プーチン大統領ただ一人の判断で始めた道理のない戦争の、しかも野蛮な戦い方が象徴している。その上すぐ核兵器に言及する)、エリートたちの芸術性は高く、一般の人々は純朴な感じがするこの国を一度は訪ねてみたいと、ずっと思っていたからである。もっとも興味の多くは、日露戦争や第2次世界大戦、その結果としての北方領土問題やシベリア抑留などの重い歴史に根差している。今にして思えば、19 年によく行っておいたものだ。この先、普通の日本人が安全快適にロシアを旅行できる日は、近い将来にはないだろう。

本州四国連絡橋公団時代、親しい先輩にロシアが好きな人がいて、彼は1週間かけて鉄道でシベリ

アを横断し、2大都市以外にも足を伸ばすぐらいの熱心さであったが、私の方は、見知らぬ国、しかも私の下手な英語では(端からロシア語はダメ)町でトイレを探すのにも苦勞するだろうから、添乗員のいるツアーである。しかも防衛大学校退職後に再開した海外旅行では、お金もないのにビジネスクラスを利用してしまい、家内と「もうエコミーには乗りたくないね」と散財した何回目かである。

サンクトペテルブルクは、バルト海的最奥・フィンランド湾に面した街で、帝政ロシア時代の首都の雰囲気格調高く残っていて美しく、北の海の淡い匂いが満ちていた。私は司馬遼太郎の「坂の上の雲」が好きで、あの長編を何回か読んでいたから、冬の宮殿(エルミタージュ美術館)や、その前に広がる宮殿広場に歴史の舞台を訪ねているという喜びを感じたし、今はラトビア共和国に所在するリバウ軍港から出撃したバルチック艦隊が地球を半周してはるばる対馬海峡までやって来て(その大航海に示されたロシア人の粘り強さに感嘆する)、日本海軍連合艦隊に大敗した(1905 年)ことで、国力が尽きかけていた日本はかろうじて日露戦争に負けずに済んだ、ことを教えられた。

サンクトペテルブルク(なんとプーチンの出身地である)の街並みはその頃とあまり変わらないだろう。しかし、その頃の東京はどれぐらいの町、あるいは村であったらうか？ よくぞ日露戦争に負けなかったものだ、とサンクトペテルブルクにいる間、何回も思った。そしてモスクワでは、クレムリンの城塞、赤の広場とカラフルな玉葱型帽子の塔を持つワシリイ寺院の組み合わせもお伽の国のようで、帝政ロシアの財力と美的センスもすごい、と感嘆した。

さて、頭の体操としてまとまった文章を久しぶりに書いてみたいという気分になり、テーマは飛行機にすることにした。このような時、プラットフォームを提供してくれる同期会ホームページの存在はありがたい。誰かが読んでくれるだろう、という励みになるか

らである。読んでくれるかも知れない人は、同期会内部とは限らない。1999年に載せてもらった「マディソン郡の橋やカバードブリッジの話」を、インターネットで読んだとメールをくれた人が2人いた。

現役の頃の私の生業の中心は橋であった。橋の設計と飛行機の設計には共通する部分もある。また明石海峡大橋のような長大吊橋の設計、なかでも風による振動に対する設計では先輩である航空工学から多くを学んだ。しかし、大地に固定され、飛行機のような念入りなメンテナンスを前提とせず、長期間(本四は200年間を目指している)風景の一部になって人々の生活を黙々と支える橋(構造物)と、人を乗せて、さまざまな環境(温度、気圧、天候など)の中を高速で移動する飛行機(機械)とで、設計の難しさの中身が同じであるはずがない。

飛行機の各部は必要な強度を保ちつつ、無駄は排除してできるだけ軽く作らなければならない。また、いったん離陸すれば空中停止はできないのだから、機体やシステムの信頼性は高くなければならない。圧倒的に飛行機の設計は複雑で、精緻で、人が行う工学的努力の極限のように思える。

だから私も飛行機が好きで、社会人になった頃からたくさんの本を読んできた(事故の話も含めて)。県立千葉高同期会の仲間には元日本航空の機長さんがいるし、専門家でもない私がうだうだと同期会ホームページのファイルを重くする必要はないのだが、許して下さい。「飛行機? ふん!」という人も少なくないだろうけど、面白く書くように努めます。

## 2. ライト兄弟の成功、1903年

人類初の動力飛行に成功したのがアメリカのライト兄弟であることは、誰もが知っている。彼らは自転車屋を営んでいたが、空を飛ぶなどという得体の知れない夢に取りつかれた息子たちを心配して手紙を書いた父親に、If you are looking perfect safety; you will do well to sit on a fence and watch the bird... (もし完璧な安全を望むのなら、塀の上に座って鳥が飛んでいるのを見ていればよい)と返事したそうである。

鳥のように空を飛びたいという人類の夢は古くからあり、あのレオナルド・ダ・ビンチも羽ばたき飛行機のスケッチを残している。19世紀後半に入ると、人間の体重では羽ばたき飛行は無理で、飛行機のメカニズム(揚力と推力を用いる)が必要とわかり、種々のデータも蓄積されるようになってきた。

ライト兄弟は、もちろん先人たちの成果を利用してはいたが、彼ら独特の着想・工夫・努力によって、動力により離陸して宙に浮かび、しかも操縦(パイロットの意思のままに上昇・下降と旋回をする)可能な空飛ぶ機械を創り上げたのである。図-1はライト兄弟の作った1号機である(ライトフライヤー1と呼ばれる)。旅客機であれセスナのような小型機であれ、現代の常識的な飛行機の形態と比べれば、全く異なることに驚かれるかもしれない。こんな物が本当に空を飛んだのか、と。

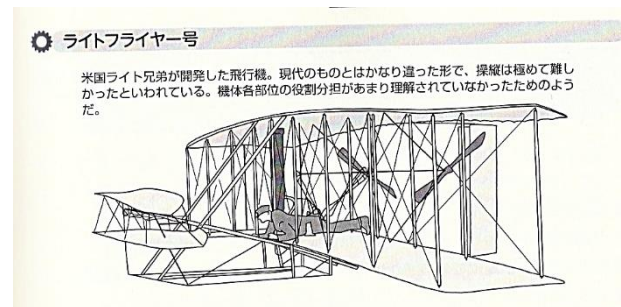


図-1 ライトフライヤー1号機 [1]

図-1において、機体は左に向かって飛んでいる。一番先頭にある水平翼は、上下方向の操縦をする昇降舵にあたる。主翼(幅 12.3m)は断面が薄い2枚で構成される複葉で、翼型を保ち、強度と剛性を確保するために、たくさんの支柱と張線で補強してある。下翼の中央に、余分な空気抵抗にならないように操縦者は腹ばいになって、操縦桿を握っている。その横に、別な機械技師の助けを得つつ自分たちで作り上げたガソリンエンジン(12馬力)1つを置いて、動力をチェーンで2つのプロペラに伝え、このプロペラが推力を生んで機体を前進させる。主翼後ろには、左右方向の操縦のための方向舵がある。飛行機が旋回するためには、主翼に発生する揚力を曲がりたい方向に傾ける(左右の主翼揚力に差をつける)ことが必要であり、その後の全ての飛行機

では主翼後縁にある補助翼を用いているが(p7)、ライトフライヤーでは主翼後縁を左右で逆方向になるように振じるという仕組みになっていた。そして、各種条件を満たすとして選んだノースカロライナ州キティホークの砂丘に敷いた木のレール上を、台車ごと滑走して離昇し、砂の上に橇で着地した。機体は木、布、ワイヤーで作られて、重量は318kg。

1903年12月17日の初飛行で、1回目は滞空12秒・距離37m、4回のうち最高は59秒・260mであった。兄弟はその後も改良を続けて、05年のフライヤー3号機では、エンジンを強化したこともあって滞空38分・距離39km、操縦性が良くて「8の字」飛行ができ、十分に実用の域に達していた。

このように、「飛行機は作れる」ということが一旦わかると、たくさんの方が参入してきて工夫をこらし、より性能の高い機体が登場してきた。科学技術の成果は、先駆者が考えるよりはるかに容易に後継者に追いつかれるのである。ライト兄弟は間もなく舞台から姿を消した。2003年、ライトフライヤー1号の100周年を記念してレプリカが作られたが、うまく飛ばなかったという。飛行機のシステムとしては荒削りのところが多かったから、ライト兄弟にしかできない操縦のコツがあったのであろう。

### 3. 飛行機はどのように空を飛ぶのか

#### 1) 巡航状態と揚抗比

図-2は、巡航状態(水平・等速度飛行)の現代の飛行機に働く力の釣合いである。絵はB747として描かれている(図-4も)。私にはたくさんの思い出がある機体だが(皆さんも同じでしょう)、残念ながら日本の空からは引退してしまった(外国機は飛来)。

飛行機の重量(*Weight*、国際線なら例えば200~300トン超。離陸直後は燃料が多いからもっと重い)は、主翼に働く揚力(*Lift*)によってぴったり支えられている。「ぴったり」でなければ、飛行機は下降か上昇してしまう。また、飛行機は高速で大気中を進んでいるから、抵抗(*Drag*、形状抵抗、摩擦抵抗、誘導抵抗に分類できる・・・後述)が働く。この抵抗にぴったりと釣り合う推力(*Thrust*)をエンジンが発生している。

図-2にはしかし、まずい点があって、それは力の矢印(ベクトル)が上下方向(*L*と*W*)と前後方向(*D*と*T*)とで同じに長さに描かれていることである。正しくは、前後方向の矢印の長さは上下方向の1/10~1/20ぐらいに描くべきである。つまり、飛行に必要な推力は揚力(すなわち重量)の1/10~1/20ぐらいでよい。

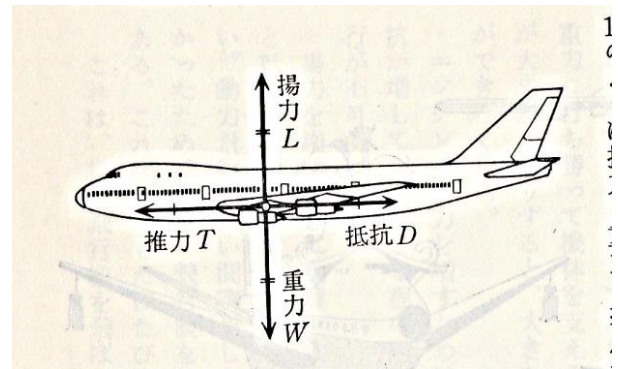


図-2 巡航状態の力のつり合い [2]

飛行機はロケットとは違い、推力をぶんぶん振り回して力任せに飛んでいるのではなく、翼に生じる動的揚力を上手に利用しているということである。これがヘリコプターになると、推力と重量の比率は1/1強になる。だからこそ、ヘリコプターは滑走することなく浮揚し、ホバリング(空中停止)も可能なのだ。

この比率の逆数(10とか20)を揚抗比といい、飛行機的设计における重要なパラメーターである。揚抗比とは呼ばないが、この種の係数(重量とそれを前進させるのに必要な推進力との比)はいかなる乗り物にも存在して、速度域に応じて最適なモードと値が変わる。

具体的には10とか30km/hという低速で水の上ならば、船の揚抗比が大きくて数百とか数十、ただし速度上昇に伴い水の抵抗が急増するから揚抗比は激減していく。50とか100km/h超の中速域ならば、鉄道や自動車は経済的になり、揚抗比は数十というところ。もちろん、どの速さでも鉄道は自動車に勝つ。さらに時速数百kmという領域になれば、飛行機が一番経済的な乗り物になる。遅いけど船



は多量の荷物を安く運べる、急ぐなら金がかかるが飛行機を使え、という極めて常識的な選択になる。

ただし飛行機では、線路や道路を延々と建設する必要がなく、出発地と目的地の間の施設整備があまり要らない(とびとびに航行援助無線施設と不時着用飛行場があればOK)。さらに、海上はもちろんのこと、政治状況が許せば地形とは関係なく、ほぼ直線で結べる(大圏航路)という利点もある。

ウクライナ戦争の日本への影響の一つは(ウクライナの人々の苦しさ・悲しさに比べれば口にするのも憚られるが)、ヨーロッパへのフライトにシベリア上空を通過する(ほぼ)大圏航路を使えないことである。ロシア領空を迂回するために、2~3時間も余計にかかっている。しかし、今の旅客機は航続性能が高いから、我々にはなつかしいアラスカのアンカレッジへの給油着陸の必要はない。

## 2) 揚力係数と抗力係数、迎え角、抵抗の中身

図-3は、ある形をした飛行機の全機模型(プラモデルみたいに、主翼+胴体+エンジン+尾翼の全てがそろっている)の風洞試験の結果例である。模型(翼のみのこともある)を風洞の中にセットして、風を吹かせて模型に作用する空気力(揚力と抗力「抵抗」)を測ることを風洞試験といい、ライト兄弟の頃から飛行機研究・開発の重要ツールであった。

図-2のような機体模型を風洞の中に入れて、お尻と下面を棒で支え、その棒の根元に力を検出するセンサーをつけておいて左から風を当てれば、前者で抗力を、後者で揚力を測ることができる。図-3ではもう一工夫をしてあって、測定された空気力を気流の動圧と主翼面積との積で割ることで無次元係数(揚力係数、抗力係数と呼ぶ)を算出し、これらを縦軸に、横軸は計測した時の翼の迎え角として表現している。

グラフの縦軸を測定された空気力(例えばkg単位)そのままとしても良い。グラフの形は変わらない。しかしそれでは、気流速度、空気密度(高度で異なる)、主翼面積などが変わる時にはどう修正すれば良いのか? また異なる形の飛行機の性能比較も簡単ではない。

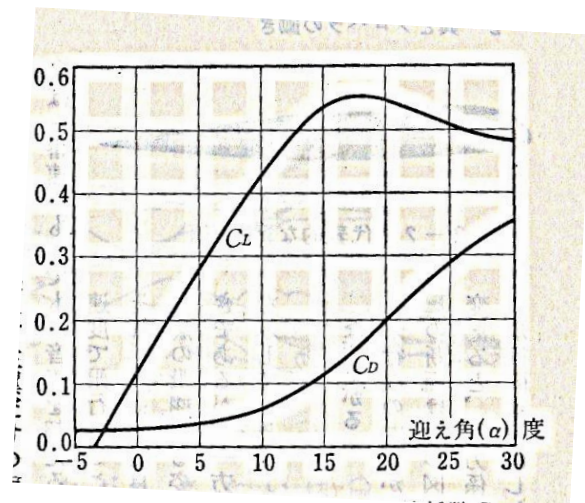


図-3 揚力係数  $C_L$ ・抗力係数  $C_D$ (縦軸)と迎え角(横軸)の関係 [2]

無次元係数の形で試験結果を整理するのは、その物理現象を支配する要因とその相互関係がわかっているからであり、普遍性を高めるためである。

気流の動圧とは、「 $1/2 \times$  空気密度  $\times$  気流速さの2乗」で求められ、気流が持つ運動エネルギーを意味する。空気密度は海面高度では水の  $1/780$  である( $1\text{m}^3$ で  $1.3\text{kg}$ )。主翼面積は上から翼を見下ろした時の投影面積で、B747 ならば実機では  $511\text{m}^2$  である。迎え角とは気流が主翼に対してどのような角度で当たるのかを表す、大切な量である。気流が翼に対し下側から当たるのなら(飛行機が頭上げになっている)プラス、上側から当たるのなら(頭下げになっている)マイナス、と定義される。

B747 が重さ 300 トンで巡航しているとすれば、翼面  $1\text{m}^2$  あたり 588 kg を支えていることになり(翼面荷重といい、大切な設計パラメーター)、これを空気密度の低い高空(10,000m ならば地上の  $1/3$ )で頑張る訳だから、マッハ 0.8(およそ  $240\text{m/s}$ )程度の速さが必要になる。マッハとは、飛行速度と音速(海面上ならば  $340\text{m/s}$ 、高空では気温が低いから小さくなり  $10,000\text{m}$  では  $300\text{m/s}$ )との比である。

図-3でわかるのは揚力係数が迎え角に比例して大きくなり、ある迎え角(ここでは 17 度ほど)で最大となった後に低下し始めること(これが失速。つまり気流が翼上面のカーブに沿って流れることができ

ずに剥離してしまっている)、抗力係数は迎え角5度強までは微増だがその後は急増するということがある。失速状態に陥れば揚力は減り抗力は増加するから、回復できない時には飛行機は墜落する。

さて、揚力係数と抗力係数の値をグラフから読み取り、前者を後者で割れば揚抗比が求められる。概算で、迎え角2度で揚抗比は 7.5、5度で 8.8、7度で 9.2、10度で 7.2、15度で 4.6 ということだろうか。つまり、この機体は迎え角5〜7度ぐらいの頭上げで飛ぶのが一番効率的ということになるが(揚抗比が9前後)、余り高性能機ではないみたいだ。現代のジェット旅客機では揚抗比は 15 から 20 弱ぐらいのはずだ。

飛行に最適な迎え角は、運用方針(最経済速度よりは時間短縮に重きを置くとか)、その時の重量や高度などで変わり、ジェット旅客機は頭上げ(軍用機もそうみたいだ)2〜3度で巡航している。だから、客室乗務員は食事を配るカートが下り坂になるように、機首の方から後ろ向きに押すのである。余談ながらビジネスクラスでは、カートを使わずにギャレーから個々にトレイを持ってくる。気流が悪くて揺れたら大変だな、と思いつつわくわくとした気分で見ているが、運賃差を納得させる演出の一つなのであろう。

飛行機を飛行機たらしめているパーツは揚力を発生させる主翼であるから、揚力係数が大きく抗力係数が小さな翼型(主翼を気流の流れる方向で切断した断面形のこと)の開発が、いろいろな国で長い間行なわれてきた。容易に想像できるように、アメリカの蓄積が圧倒的である。

翼型の風洞試験結果も図-3のような形で表現されるが、全機の結果より高い性能(翼型にもよるが揚力係数で 1.6 とか)を示す。それは全機模型では、主翼下にぶら下がったエンジンが気流を乱して揚力を減少させる。主翼と胴体の付け根部分の空力干渉や、尾部にあって突風に対する安定確保や操縦上大切な垂直尾翼や水平尾翼も抗力を生む。

しかし、二つの試験結果の違いのもっと本質的な理由は、胴体および尾翼に作用する摩擦抵抗と、

揚力を発生させることに伴う誘導抵抗が、翼型だけの試験では再現されていないことにある。

空気はさらさらしていると思われるかもしれないが、実は粘性を持っていて(粘性の最たるものが蜂蜜のドロリ感)、動いている物体の周りの数mmから十数cmの範囲(境界層という)の空気がまとわりついて摩擦抵抗になる。例えば新幹線の抵抗の9割ぐらいは、蛇のように長い車体表面に作用する空気の摩擦なのである。だから、車体(特に窓の周りや連結部)は、摩擦抵抗を大きくしないために滑らかに成形されている。

ゴルフボールには滑らかさと正反対のディンプルがついているのではないかと、疑問に思われるかもしれない。ボールは非流線形であるから気流は必ず剥離するので、その形状抵抗を小さくするためには境界層が乱流であったほうがよい。ディンプルは乱流境界層を成長させる。一方、流線形物体表面の摩擦抵抗を小さくするためには、表面を滑らかにして層流境界層を保つことが望ましい。

新幹線先頭車両は高速化に伴ってずいぶん細長くなってきたが、それは形状抵抗を低減させるよりは、トンネルに高速列車が突っ込んでいってトンネル内空気を圧縮するので、これが出口側で噴き出すことによる騒音を和らげることが目的である。

きれいな流線形に設計されているジェット旅客機では、形状抵抗は全抵抗の 1 割以下、摩擦抵抗が 5割ぐらいになる。機内騒音の原因にはエンジンもあるが、ほとんどは機体表面の境界層中に生じた渦である。つまり、機体と空気の大きな摩擦を音で教えられているのだ。私は乗ったことはないが、旅客機として唯一マッハ 2.2 の超音速で高度 20,000 mを飛行していたコンコルド機(2003年に運航停止)では、その摩擦で機体が加熱され、外気温は-50度以下であるにもかかわらず、客室の壁に手を当てるとほのかに暖かいと聞いたことがある。

さて、全抵抗の4割程度を占める誘導抵抗というのは、翼が揚力を生んでいるがゆえの代償である。したがって飛行機独特の抵抗である。

なぜ揚力が生じるかという疑問に対する答え方の一つに、ベルヌーイの定理がある。これによれば、

「流体(空気なり水)の持つ速度エネルギーと圧力エネルギーの和は一定」である。つまり、流体に関するエネルギー保存則である。翼は上面側が膨らんでいて、下面側はほぼ直線である。そのため、翼前縁で上下に分かれた気流のうち上側を通るものは加速され、運動エネルギーが増加して圧力エネルギーは低下する。逆に下側を通る気流はやや減速して圧力エネルギーが高まる。その結果、翼の上には吸い上げられ、下からは押し上げられ、その合計が揚力になるのである(吸い上げが主役)。

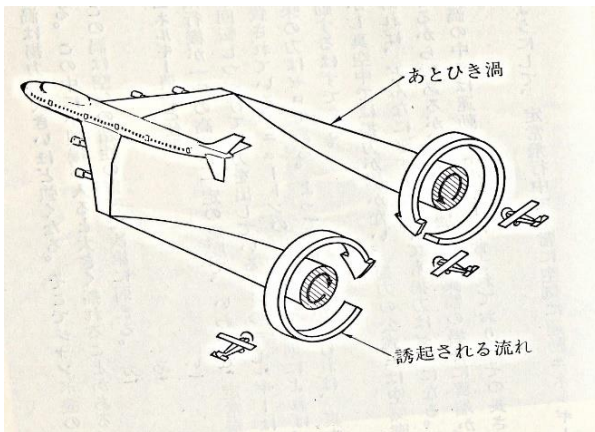


図-4 揚力発生に伴う翼端渦 [2]

流体は、圧力の高い所から低い所へ流れる性質も持つ。現実の飛行機の主翼は有限幅であって端があるから(翼型だけのいわゆる2次元風洞試験では翼端はない)、翼端で下面の高圧部から上面の低圧部に這いあがる流れができて、渦(翼端渦またはあとひき渦)を作る。飛行機は前進しているから、図-4 に示すようにこの渦を引きずりながら飛んでいくことになり、これが誘導抵抗になる。

図に小型飛行機が描かれているが、大型機を作る翼端渦の回転速度は40~50m/s に達することがあるため、渦に巻き込まれると事故になる可能性を暗示している。そのため空港周辺での飛行機の間隔は、翼端渦が十分に拡散するように飛行機の重さとその組合わせに応じて(B747、B777 のように重い飛行機は大きな揚力を要するので渦が強く、軽い飛行機は渦の影響を受けやすい)、3、4、5マイルに管制されている。羽田空港への着陸機は、首都圏の卓越風向(北西)の関係で木更津上空から東京湾を横断してくることが多いが、見晴らしの良

い所に行くと、昼も夜も管制官がこの間隔を守らせて、行儀よく次々と降りてくる飛行機が見える。

ここでマイルとは海里(nautical mile)のことで、地球の経緯度1分に相当する1852mである。飛行機や船のように、番地で表せない領域を行動する乗り物は経緯度で位置を表現するから、距離は海里で示し、速度の単位には「海里/時」であるノットを用いるのが便利である。飛行機の世界表示には原則的にノットを使うが、高高度に上がればマッハ数を用いる。

翼端渦を低減する基本的な方法は、平面形が細長い主翼を用いることである。発生する揚力の大きさに比べて、主翼端を這い上がってくる気流が相対的に小さくなるからである。グライダーや「琵琶湖鳥人間コンテスト」に登場する機体の主翼は、ものすごく細長い。鳥でも、あまり羽ばたかずに悠々と滑空する大型の鳥(アホウドリ、オオワシ、コンドルなど)は、細長い羽を持っている。現代機では、ウィングレットと呼ばれる小さな垂直板を主翼端部に取り付けて、這い上がろうとする気流の邪魔をするという工夫もする(付けていない機種も多いが)。

翼上面を通過する気流が加速されると述べたが、気流速度がマッハ1を超えるとそこは超音速流れになり、衝撃波が発生して抵抗が急増する(衝撃失速という)。この場合の気流速度とは飛行速度そのままではなく、主翼の軸線に垂直な成分である。そこでジェット旅客機では後退翼を用いて(図-4)、気流速度を後退角 $\theta$ の $\cos\theta$ 倍に小さくして衝撃失速の発生を遅らせるという工夫をしている。B747 ならば  $\cos 37.5^\circ = 0.793$  という後退角効果になる。つまり、「マッハ 0.8 強の飛行速度×後退翼効果×翼型ゆえの加速」=「翼上面の気流速度マッハ1以下」が成立し、ジェット旅客機は衝撃失速を避けられる速度で巡航していることになる。

### 3) どう旋回するのか

飛行機の上昇・下降が、坂道を上り下りする自動車と同様に、エンジン出力を高める・低めることで実現できるのは自明であろう。



飛行機は3次元空間を自由に運動できるように、操縦翼面(動翼とも)と呼ばれる可動部分を主翼や尾翼の後縁部に取り付けてあり、これを動かすことで気流から力を得て、飛行機の姿勢を変えることができる。水平尾翼後縁には昇降舵がついているから、これを上下させて(操縦輪/操縦桿を手前に引く、あるいは向こうへ押すことによって)機首を上下させ、主翼の迎え角を変えて揚力を変化させるという方法もある。エンジン操作より圧倒的に反応が速い。

それならば、飛行機はどのように向きを変えているのであろうか。

どんな乗り物でも曲がるためには、カーブの内側に向かう向心力を必要とする。自動車では、ハンドルを切ることで前輪が内側に向き、タイヤはやや横滑りをしてタイヤ面に直角方向の横力(向心力)を生む。これでカーブできるが、乗っている人には遠心力となる。

飛行機では、主翼後縁に補助翼と呼ばれる動翼がついていて、パイロットが操縦輪を左右に倒すことで動き、また左右の補助翼は逆方向に動くような仕組みになっている。図-5(改善余地のある図だが)は機体の後方から見ている。パイロットは左旋回をしようと操縦輪を左に倒したので、左補助翼が上がって左主翼の揚力は減り、右補助翼が下がって右主翼の揚力は増えるため、機体は前後軸の周りを左に傾く(バンクする、ロールするともいう)。その結果、揚力  $L$  は左に傾き、その水平分力( $L \cdot \sin \phi$ )として左に向かう向心力が発生して、左旋回できる。

上手な水平旋回であれば、機体重量と揚力の鉛直分力( $L \cdot \cos \phi$ )は釣り合っているから、旋回中の揚力は直進していた時より増加しなければならず(速度低下を避けるのならエンジン推力 up が必要)、その増分を人は自分の体重増加として感じる。図-5はバンク角とその増加の関係を示す。旅客機のバンク角は通常 30 度までだから、増加率は  $1/\cos 30$  度 = 1.15 になる。15%増だから感じないかもしれないが、これが  $G$  である。

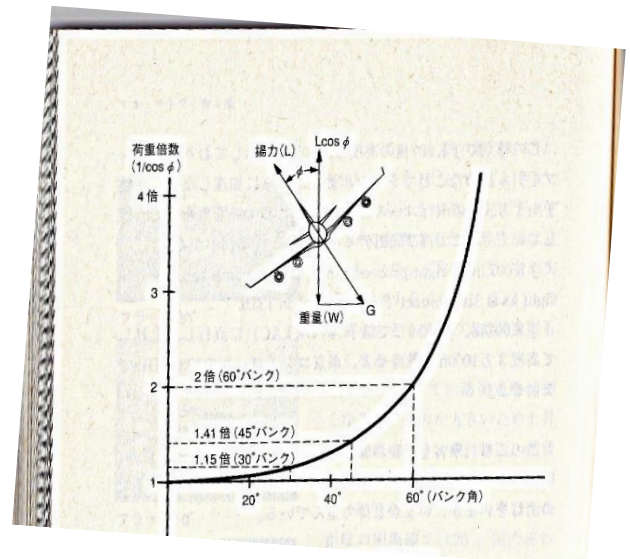


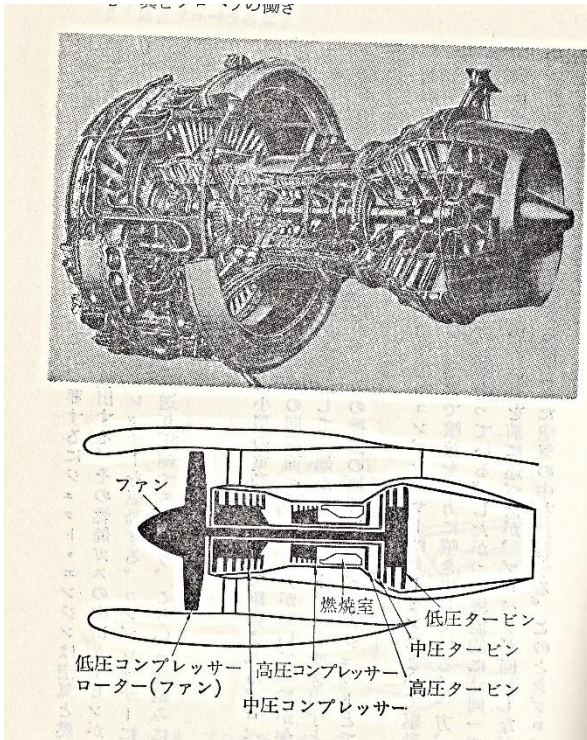
図-5 旋回時のバンク角と荷重倍数 [3]

防大時代に航空自衛隊の F15 戦闘機に乗せてもらった時のことを「雑談その2」に書くが、私は5Gで give-up したため、その時のバンク角は 78 度になる(パイロットたちは格闘戦で勝つために7G~8Gまで頑張る)。

船もローリングするが、主体的にローリングするのは舵を切った時だけで(遠心力で外側に傾く)、波に揺られて受動的に左右に揺れることの方が多い。だから、海が荒れている時に小さな船のエンジンが故障すると、波に対して船首を立てることができなくなり、波に横腹をさらして、揺れが激しくなって転覆する危険が増す。2022年4月の知床観光船の沈没原因かもしれない。

#### 4) ジェットエンジン

図-6 は現在広く用いられているターボファン・ジェットである。下は概念図、上は内部構造を斜め後ろからみた図である。左から吸い込んだ空気をまずファンで加速する。エンジンを前から見た時に見える羽がファンであり、回転軸先端のスピナーには鳥を驚かすための目玉模様が描かれていることが多い。ファンで加速された空気のはほとんどは、そのまま後方へ噴き出され(バイパス流という)、現代のエンジンならば推力の過半になる。



図—6 ターボファン・エンジン [2]

残りの空気は、コンプレッサーで密度が何十倍にもなるように圧縮され(高空の薄い空気では力が出ない。地上を走る車でも排気のエネルギーで羽を回して空気密度を高めるといふターボ過給がある)、次に燃焼室でジェット燃料(成分的には灯油に近い)が吹きこまれて高温高圧のガスとなる。このガスはタービンに吹き付けられて、ファンとコンプレッサーを回転させるためのエネルギーが回収され、最後にジェット噴流として後方へと噴出する。コンプレッサーから下流側をコアエンジンとよぶ。ターボファン・エンジンを横から見ると、前方が太く途中から細くなるが、太い部分にファンが収まっていて、細い部分はコアエンジンの後ろ半分にあたる。

ジェットエンジンおよびそれを用いた戦闘機は、第2次世界大戦中には開発されていた。その時にはコアエンジンだけから成っていて、これをターボ・ジェットという。戦後、民間機にも速度向上のためにジェットエンジンを用いるようになると、ターボ・ジェットの燃料消費の多さ、騒音の大きさが問題になってきた。そこでエンジンの先端にファンを置いて、エンジンからの噴流と飛行速度との差を小さくして燃費向上、ジェット噴流をバイパス流(冷たく、圧縮

度は低い)で包み込んで騒音軽減、という工夫がなされて成功し、バイパス比はだんだん大きくなって各種旅客機の発展を支えてきた。B777(新しい政府専用機もそう)ではバイパス比は 9.0、推力は1基で 52.3 トン(8割がファンの寄与)という力持ちである。

## 5) 与圧～酸欠にならないように

飛行機が遠くまで、速く、しかもたくさんの旅客・貨物を積んで経済的に飛ばうとすれば、翼面荷重を大きくして、抵抗が小さくなる空気の薄い高空を行かねばならない。そのためには、高空でも酸素分圧(海面上で  $1013\text{hPa} \times 21\% = 213\text{hPa}$ 。この濃度にヒトは慣れ親しんで進化してきた)を、人に害がないレベルに保てるように機内気圧を高める必要がある。これが与圧である。なお、コロナ禍に伴ってパルスオキシメーターが検査器具として重宝されたが、動脈血中の酸素分圧を健全状態を 100 とし

て表すのである。通常、飛行高度 7200mまでは機内高度は0m(海面上)、飛行高度 10,500mでは機内高度 1350 m(八ヶ岳高原ぐらい)となるように、それ以上の飛行高度でも 2400m(例えば北アルプスの涸沢)に維持できるように与圧装置が設けられている。どんな飛行高度でも機内高度を海面に保とうとすれば、胴体の強度を高めねばならず、機体が重くなり過ぎる。1500m程度という機内高度はほとんどの人には分からないであろう(機内で飲むお酒の酔いが早い、を除いて)。与圧システムに故障があったり、機体に穴が空いて減圧したりして、機内高度が 3000mを越えると、座席の上から個人用酸素マスクが落ちてくるはずである。

気圧の低い状態に置かれると低酸素症になる。苦痛はなく、本人は気づきにくい、一番大切な臓器である脳が真っ先に影響を受けて、判断力の低下、意識混濁、意識喪失、やがては死に至る。与圧装置の不具合に気づかずに高度を上げて(コックピットで警報はガンガン鳴ったはずだが)、やがてパイロットが気を失い、自動飛行で飛び続けて最後は燃料切れで墜落したという事故が、ビジネス・ジェツ



ト機だけでなく、定期旅客便でさえもある(キプロスで 2005 年、121 人死亡)。

与圧に用いる圧縮空気は、ジェットエンジンのコンプレッサーから抽出する。ところがこの与圧は、胴体の構造設計に難しい課題を持ち込むことになる。

地上にいてドアを開放し、旅客貨物の積み下ろしをしている時の機内は地上気圧そのままである。離陸して高空に上がると、与圧による機体内外の気圧差が最大  $6 \text{ トン}/\text{m}^2$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$  というと 機内 0.8、機外 0.2 の差) というような大ききで、胴体を膨らませる。この力に対して一番効率的に抵抗できるのは円形であるから(薄い板で済む)、旅客機の胴体は円形にすることが多いが、1回の飛行で最初の形と膨らんだ形の繰り返しを1回経験することになる。

このような繰返し載荷は、設計が適切でなく(荷重が集中するような形状であるとか)、またひび割れ発生の起点になる微小欠陥(打ち傷、溶接ミスなど)があると、そこから徐々にひび割れが成長していき(1回の載荷で  $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ mm}$ 、あるいはもっと小さい)何万回～何百万回というような繰返しの後に、残っている部分が荷重をついに支えきれなくなって一気に破断する。設計上の繰返し回数は飛行機で何万～十数万回というレベル、橋では何百万回というようなレベルである。

大型機の与圧を最初に実用化したのは、我々日本人には憎き米軍の B29 爆撃機である。与圧機体が被弾して穴が空くと、構造破壊が拡大する可能性(風船に針を突き刺したように)があるので戦闘空域に入る前に与圧は抜いたが、日本上空に達するまで乗員は酸素マスクなしに活動できた。

B29 には別な技術的先取りもあった。「遠くまで、たくさんの爆弾を積んで高速で飛びたいのなら、翼面荷重を大きくして、必要な揚力を速度で稼ぐこと」という原理を貫いたのである。つまり、実在の滑走路に合わせて飛行機を設計するのではなく、飛行機に合わせた長い舗装滑走路を造ること、である。米軍の高い土木施工能力は、上陸・占領した南太平洋の島々のジャングルをブルドーザーで切り開き(日本軍は人力でやろうとした)、舗装された長い滑走路をすぐさま建設できた。

つまり B29 は、ジェット旅客機開発の基礎となった機体と言える。戦後、ジェット旅客機の開発が始まり、世界初はイギリスのコメット機であった。しかしコメットは 1952 年に商業運航を開始した後、何回かの事故のあと、与圧による疲労が原因ではないかと強く疑われる事故が 3 回続いて、耐空証明が取り消され運航禁止になった。これに対しチャーチル首相が、英国銀行の金庫が空になろうとも事故原因を解明するとして、徹底的に調査し、与圧と疲労破壊の関係について大きな知見を得ることができた。

イギリスがこのように悪戦苦闘しているうちに、後発のアメリカのボーイング社とダグラス社が、コメットより大きく遠くまで飛べる旅客機を開発してしまい、商業的にはアメリカの一人天下になった。ヨーロッパに国際共同のエアバス社が設立され、最初の機体 A300 が運航開始したのは 74 年のことである。

事程左様に、飛行機の発達には疲労との戦いでもあった。今でも、高速回転するために強烈な遠心力を受けるエンジンのファンあるいはタービン(高温にも曝される)の疲労で、墜落に至ることはまずないものの、ぽつりぽつりと重大インシデントが発生している。

日本の技術者に一番衝撃的な疲労に起因する事故の記憶は、1985 年 8 月 12 日の御巣鷹山である。JAL の B747(登録番号 JA8119)が群馬県の山中に墜落して、520 人の方が亡くなった事故である(生還者は 4 人)。これは残念ながら世界の航空史上、単機の事故としては最悪であった。8 月は我々にとって、広島・長崎そして終戦という重い思い出が続き、死者を悼む時なのであるが、そこに工学上の失敗が一つ加わってしまったことになる。

この機体は 78 年 6 月に伊丹空港に着陸する際、後部胴体の下面を滑走路に接触させ(尻もちをついた)、客室後部にある圧力隔壁(与圧を受け止めるための後ろ向きに凸のお椀型の壁)を変形させるというトラブルを起こしていた。そこで製造元のボーイング社の技術者を日本に呼んで修理してもらったのだが、その修理が適切でなくて、疲労強度が本来の 70% 程度しかないような仕上がりにってしまった。

そして修理後 12,319 回目のフライトで、伊丹をめざして羽田を離陸後の相模湾上空、高度 7300m 付近において、今までひっそりと少しずつ、しかし確実に成長してきた、圧力隔壁を形作る板を綴り合わせていたリベットの孔周りの疲労クラックが相互に繋がって、2~3m<sup>2</sup> の開口を作ったのである。

飛行機の運航は、もちろん定期的な点検を前提にする。1985 年当時の規則では実施間隔の短い順で(つまり内容の薄い順)、飛行前点検、A 整備、B 整備、C 整備、D 整備に分かれていて、C 整備は概ね 3000 飛行時間毎に行われるようになっており、事故前の最後は 84 年 11~12 月にかけて実施された。後部圧力隔壁に対しては基本的に目視検査である。事故後の調査報告書は、「その C 整備時に、リベット孔から伸びたクラックは最大 19 か所で見え、最大長さは両側にそれぞれ 1cm に達していた(ただし幅は非常に小さい)はずである。多数の疲労ク

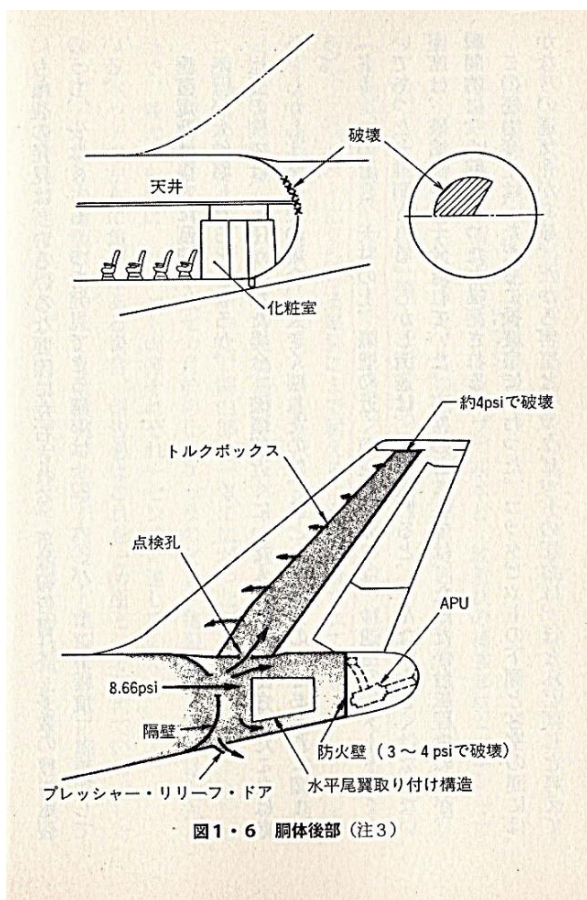


図1・6 胴体後部(注3)

図-7 御巣鷹山事故における与圧空気による機体後部へのダメージ [4] (図中の単位「psi」は1平方インチあたり1ポンド[=0.703 トン/m<sup>2</sup>]というアメリカ流のヤード・ポンド系)

ラックのうち少なくとも1つを発見できた確率は、14~60%程度と推定される」と評価している[4]。

図-7に示すように圧力隔壁破壊後、客室内の与圧空気(圧力は 6.09 トン/m<sup>2</sup>)はその開口部からどっと隔壁後方に流出して垂直尾翼内に入り、トルクボックスという垂直尾翼の主強度部材を破裂させるとともに(ボックスは内圧に対しては設計されていない)、尾翼後縁についている方向舵(機首を左右に振るための動翼)を脱落させてしまった。

そして何よりも致命的だったのは、方向舵に繋がっていた油圧配管4系統が同時に切断されて作動油が流失し、以降、飛行機のコントロールに不可欠な操縦翼面(補助翼、昇降舵、そして方向舵)全てを動かすことができなくなった。油圧は大切だから、全てのエンジン(B747 ならば4基)で作り、配管も重複させてどれかがダメになっても他がバックアップする、という設計になっているが、JA8119 の場合は全てが失われたため、機体はこの後機長らの必死の操作に反応せずに、30 分余りの迷走飛行を続けて墜落に至ったのである。

私はこの機体に4回乗ったことがあり、最後は 79 年2月であった。修理を終えて運航に復帰した直後の頃ということになる。

「雑談・飛行機(その1)」はここで擱筆して、「その2」では航空自衛隊の F15 戦闘機に乗せてもらった体験談を書かせて頂こうと思います。

**参考文献:** もちろん何十冊かの本で得た知識でこの雑文を書いたが、直接に図を引用した本のみを示しておく。

- [1] 東野和幸編著「飛行機メカニズムの基礎知識」、日刊工業新聞社
- [2] 近藤次郎・著「飛行機はなぜ飛ぶか」、講談社ブルーバックス
- [3] 岡地司朗・著「ジャンボジェットを操縦する」、講談社ブルーバックス
- [4] 加藤寛一郎・著「爆発JAL123 便」、だいわ文庫

以上