

(1) 旋回 Turn

図 2.4 は、一定の重量で、水平直線飛行 **Straight & level flight** しているときと同一の迎え角で旋回したときのバンク角と T_r の関係を示したものであるが、旋回中は、荷重倍数 n (第4章 1 節参照) が増加するので見かけ上の機体重量が nW に増加するため、バンク角が大きいほど、特に低速度域で抗力 D 、すなわち T_r が大きく増加し、また V_{MD} が大きくなる。このため、直線飛行を行っているときには、飛行速度がフロントサイドにあっても、旋回中はバックサイドに入ってしまうこともあり得る。

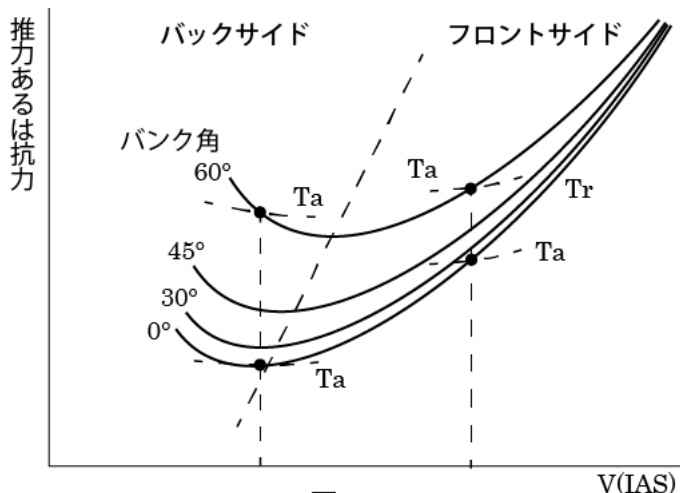


図 2. 4

(2) 高高度の飛行

前述のように、高度とともにフロントサイドが狭くなって巡航速度が V_{MD} に近づくため、高高度では、巡航速度からの減速が比較的小さくてもバックサイドに入ってしまうことがある。

(3) 空中待機

空中待機 **Holding** では、燃料消費量をできる限り少なくする方が良く、そのためには滞空時間 **Endurance** 最大となる速度で飛行すればよい。この速度は、一定の燃料流量 (単位時間当り燃料重量) に対する推力が速度によらず一定とすれば、タービンジェット機では V_{MD} であるが、実際には、燃料流量当りの推力は速度とともに減少する。

図 2.5 は、クリーン形態 (フラップおよび着陸装置上げ形態) **Clean configuration** における燃料流量 W_f と推力の関係および必要推力曲線を表したものである。これで明らかなように、燃料流量

最小速度 V_{FF-min} は V_{MD} よりやや小さい速度となる。一般に、現用のタービンジェット機では、空中待機速度 **Holding speed** は $V_{FF-min} \sim 1.1V_{MD}$ の速度となっているので、速度安定はほぼ中立であり、旋回中はバックサイド速度域に入ることがある。待機経路 **Holding pattern** における高度間隔は、比較的 low 高度では 1,000ft しかなく、外乱によって速度が減少して高度が下がると、安全のために定められた下方の他機との高度間隔が失われることに注意しなければならない。特に、旋回中は T_r が増加することにも注意を払う必要がある。

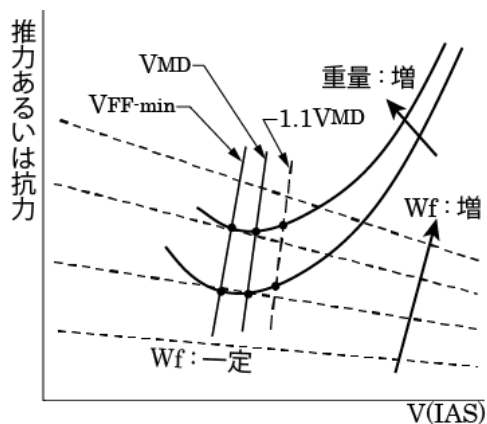


図 2. 5

第4章 乱気流

航空機に揺れを与えるような大きさの渦の運動、またはその渦を含んだ大気乱流を乱気流あるいはタービュランス Turbulence という。乱気流には、雷雲 Thunderstorm、山岳波 Mountain waves、ジェット気流 Jet stream およびその近傍の寒帯・亜熱帯前線、地上付近の前線面 Front、ウィンドシア Windshear などによるものがある。山岳波は、山の標高の 1.5~2 倍程度の高度までが一般的であるが、山脈の風下側に上下に振動する波動を生じ、大気重力波との相互作用などにより、その乱気流域が鉛直方向に伝播して圏界面にまで及ぶことがある。また、フライトレベル FL390 程度の高度を巡航しているとき、揺れはほとんどないものの、最大連続推力でも巡航速度を維持できず、高度を下げざるを得なかったという事例がある。飛行データ記録装置 FDR の解析によると、原因は高高度に達した波動の下降気流域を通過したためであると推定されており、著者も奥羽山脈の風下側上空を飛行したとき、同様の経験をしている。このような山岳波やジェット気流などによる晴天乱気流 Clear Air Turbulence : CAT によるものは、その存在が眼や航空機搭載レーダーRADAR では把握できないので、目視による回避は困難である。

なお、ウィンドシアについては、第5章を参照されたい。

4・1 飛行荷重

飛行荷重 Flight load は、飛行している航空機に加わる荷重で、運動荷重 Maneuvering load と突風荷重 Gust load に分けられる。運動荷重は、パイロットの意図的な操縦による運動で加わる荷重であり、突風荷重は、飛行中に水平方向あるいは垂直方向の突風により加わる荷重である。航空機の構造はこれらの荷重が加わることを考慮に入れて設計されており、航空機が実際に運用されている間に予想される最大の荷重を制限荷重 Limit load という。飛行中に定められた制限を越えた激しい運動を行ったり、乱気流や激しい突風 Gust に遭遇すると、機体に加わる荷重が制限荷重を超え、機体に有害な変形が残ったり、破損することがある。そこで、安全率 Factor of safety を 1.5 として制限荷重に 1.5 をかけたものを終極荷重 Ultimate load とし、これに対して少なくとも 3 秒間は破壊せずに耐えられるように設計されている。ただし、終極荷重が 3 秒以上作用するとすぐに破壊するというわけではなく、実際には、強度に多少の余裕があることが多い。航空機が水平直線飛行をしているとき、機体は重力加速度 g で鉛直下方に引っ張られている $1g$ の状態にあるが、旋回などの運動をしたり、突風を受けると、見かけの重量が大きくなって、いわゆる G がかった状態になる。荷重倍数 Load factor : n は、航空機に作用する荷重と実際の機体重量の比によって、 $1g$ の状態からどの程度 G がかかっているかを表すもので、耐空性審査要領などでは、航空機が運用可能な範囲の荷重倍数の値が耐空類別に定められており、これを制限荷重倍数 Limit load factor という。

4・2 運動包囲線図

運動包囲線図 Maneuvering envelope は、設計対気速度 Design speed (機体構造強度や空力特性

などの設計および証明の基準として定められた速度)に基づいて、飛行機の運動可能範囲を対気速度(EAS)と荷重倍数 n によって示したもので、この範囲内におけるすべての運動に対して強度が確保される。

図 4.1 は、輸送 T 類で設計最大重量が 50,000lb 以上の飛行機の運動包圍線図であり、制限運動荷重倍数 Limit maneuvering load factor は、フラップ上げのとき、+ 2.5 および -1、フラップ下げのとき、+ 2.0 および 0 となる。

ここで、 V_C 、 V_A 、 V_D 、 V_F が設計対気速度であり、それぞれ設計巡航速度 Design cruising speed、設計運動速度 Design maneuvering speed、設計急降下速度 Design dive speed、設計フラップ下げ速度 Design flap speed である。この他に次節で述べる最大突風に対する設計速度 Design speed for maximum gust intensity : V_B がある。運動包圍線図は機体重量により変化する。

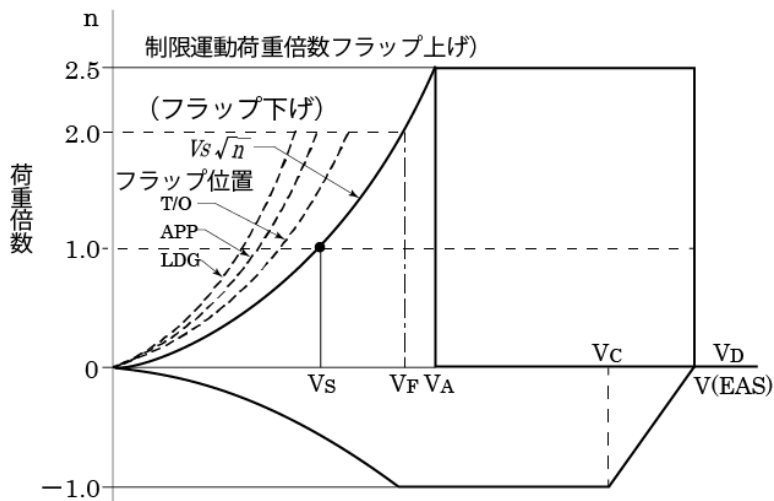


図 4. 1

設計巡航速度 V_C : 正および負の制限運動荷重倍数までかけることができる最大の速度で、強度上巡航に用いられる最大速度

設計運動速度 V_A : 主操縦舵面 (エレベーター、ラダー、エルロン) を最大限に使用しても、制限運動荷重倍数を超えない最大速度

規定では、 V_A は、 n を V_C における制限運動荷重倍数 (この機体では 2.5)、 V_S をフラップ上げ状態・設計最大重量 W における失速速度とすると、 $V_A \geq V_S \sqrt{n}$ を満たす速度とされている。

設計急降下速度 V_D : フラッターFlutterなどを避けるために制限される、その飛行機が出し得る最大速度

設計フラップ下げ速度 V_F : フラップ下げの状態で、その飛行機が出し得る最大速度であり、離陸 T/O、進入 APP、着陸 LDG に使用されるフラップ位置に応じた値が設定される。

飛行中、特に有視界飛行を行っているときは、後方乱気流を回避するのはパイロットの責任であり、後方乱気流が存在する確率が高い領域および回避要領については、AIM-J : Aeronautical Information Manual Japan あるいは FAA Advisory Circular 90-23G に詳しく解説されている。要約すると、大型機の後方で離陸を行うときは、先行機の後方乱気流はローテーション地点付近から発生するので、その地点の手前で浮揚する、着陸を行うときは、先行機の後方乱気流は接地点を過ぎるとほぼ消滅するので、必要着陸滑走路長に問題がなければ、先行機の接地点より滑走路の内側に接地する、平行滑走路がある場合は、風上側の滑走路を使用する、などが基本となる。なお、米国および欧州の航空当局は、航空交通の効率性および安全性向上のため、Re-categorization : RECAT と呼ばれる新しい後方乱気流方式を ICAO に提案している。これは、現基準の算定基礎となっている最大離陸重量に加えて、主翼翼幅、最終進入速度、機体の横揺れへの対応性に基づく後方乱気流間隔を設定しようというものである。

巡航時に短縮垂直間隔運航 Reduced Vertical Separation Minimum : RVSM operation を行っているときには注意すべき点がある。RVSM 運航は、巡航で利用される高高度の定められた空域において、垂直間隔を、通常の 2,000ft から 1,000ft に短縮して行う運航であり、定められた装備・条件に適合した機体相互間に 1,000ft の垂直間隔が適用される。RVSM 運航を行っているとき、B747 級以上の機体から生成された渦流は、4 節で述べたように 1,000ft を超えて降下することがあるので、下方の飛行機は後方乱気流に遭遇することがある。このため、洋上において RVSM 運航を行っている飛行機は、オフセット Offset 飛行を自動的に行うことができる機能があれば、後方乱気流を回避するために、定められた飛行経路の中心線から多少の距離を限度としてオフセット飛行することが認められている。この場合、風上側へのオフセットが望ましい。

6・7 後方乱気流に遭遇したときの回復操作

低高度で後方乱気流に遭遇したとき、機体の姿勢を立て直して安全に着陸するために許容されるバンク角変動について、バンク角と最低許容高度の関係を測定する実験が、有視界気象状態 Visual meteorological condition : VMC および計器気象状態 Instrument meteorological condition : IMC に分けて、シミュレーターを使用して実施された。それによると、VMC において、姿勢回復可能な最低許容高度は 100ft で、バンク角は 6~8° となり、IMC においては、最低許容高度は 200ft で、バンク角は 7° となった。この高度の違いは、フレア開始までの、パイロットが状況を認識するために必要な時間の差である。これより低高度で遭遇した場合は、回復操作が困難になるばかりか、状況によっては着陸復行する余裕もなくなり、着陸 Hard landing に至ったという事例もある。

後方乱気流による影響は、一時的なものであり、適切な操作を行えば回復することができる。過去の事故および重要事象 Incident では、後方乱気流に遭遇して通常と異なる飛行姿勢になったとき、その状態を悪化させるような対処操作が原因になっていることが多い。例えば、5 節で述べたように、主翼で生成された渦流遭遇時のロールによって機体が水平方向に流されると、それまでのバンク角変動と反対のバンク角変動を生じる領域に入る可能性があり、最初に生じたバンク角変動に対抗した操舵が大きいと、水平に流された後に生じる反対方向のバンク角変動が重なって非常に大き

なバンク角変動になってしまい、ロールアップセット（第8章参照）に陥る可能性がある。このような状態になることを避けるため、パイロットは操舵する際、エルロンとラダーの操舵が急激にならないように注意深く行うべきである。ラダーについては、急激にロールしたとき、バンク角変動に対抗してラダーを使用すると、その量によっては望ましくない機体の応答運動を招くことがある。特に大型機では、過大かつ過剰なラダーペダルの操作によって、尾翼部分の構造強度限界を超える荷重をかける可能性がある。これは次のような過程で生じる。ラダーを操舵することにより機体には、偏揺れ **Yawing** と横揺れ **Rolling** が生じる。例えば、**図 6.9(a)**のように左ラダーを使うと、ラダーは機体の縦(前後)軸より上方に取り付けられているため、ラダーによって垂直尾翼に働く横力により最初右に横揺れする(ラダーのエルロン効果という)が、右主翼が前方に出ることにより揚力が増加するので、その後左に横揺れし、それが継続する。このため、横揺れをラダーの操舵によって抑えようとすると、感覚的に混乱することがあるので注意しなければならない。また、パイロットのラダー操舵が大きくなるほど、大きな横滑り角 **Sideslip angle** が生じ、その結果、大きな横揺れが生じる。大きく急激なラダー操舵は、ゆっくり操舵し維持したときに生じる横滑り角より大きな横滑り角を生じ、この過大な偏揺れはロール率を増大させる。この急激な横揺れに反対側のラダーを使って対処すると、偏揺れと横揺れは大きな振幅で振動することになる。このようなラダーの踏み替えの繰り返しによる連続した過大な偏揺れによって生じる横滑り角は、一方向への急激なラダー操舵によるものより大きくなる。**図 6.9(a)**のように左ラダーを使うと、ラダーによる垂直安定板 **Vertical fin** に働く横力に対し、横滑り角による相対風によって生じる垂直安定板に働く横力は反対方向になるので、垂直安定板の荷重は軽減される。しかし、**図 6.9(b)**に示すように、この右への横滑りの過程でラダーを大きく急激に右へ踏み替えると、横滑り角によって生じる横力に、ラダーによって生じる横力が加わり、垂直安定板に大きな荷重がかかって構造設計上の制限荷重や終極荷重を超える可能性があり、設計運動速度 V_A 以下で飛行していても、このような交互に繰り返す最大操舵を行うと、機体構造は破壊に至ることがある。

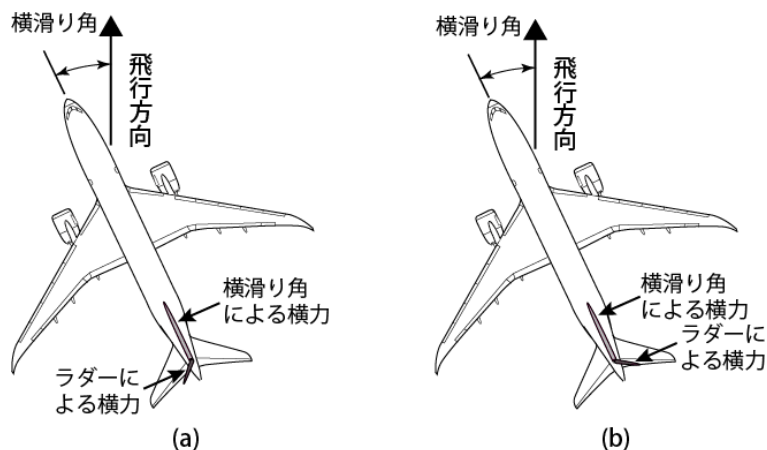


図 6.9

以上述べたことから、高度と状況が許すならば、渦流に入っている間、機体の姿勢を過剰にコントロールしてしまうよりも、むしろ機体が渦流を通過するに任せ、その後、機体の姿勢の回復操作を行う方が良い。また、自動操縦装置を使用していて引き続き使用できるならば、自動操縦装置を外して手動で操縦するより自動操縦装置に回復操作を任せる方が良い。ただし、自動操縦装置が外れてしまったとき、手動で機体の姿勢をコントロールできるように常に備えておかなければならない。

6・8 事例

1) アメリカン航空 A300-600 (ニューヨーク ジョン・F・ケネディ国際空港 2001年11月12日)

同機は、先行した B747 から 1 分 40 秒ほどの間隔を空けて、同じ滑走路から離陸し、離陸上昇中に 2 回の後方乱気流に遭遇して墜落した。管制機関は、両機の間定められた後方乱気流管制間隔を設定していた。NTSB の調査によると、墜落原因は垂直尾翼が機体から分離し、操縦不能となったため、垂直尾翼分離前に機体には左右に振幅をもつ横滑りが発生し、横滑り角は左 4°→右 1°→左 7°→右 12°と振動しており、この結果、終極荷重を上回る制限荷重の 2 倍の荷重がかかり、垂直安定板根元に発生した過大な曲げモーメントによって垂直尾翼が分離した。垂直尾翼を分離させるような機体の過大な横滑りの振幅は、後方乱気流の直接の影響ではなく、後方乱気流に遭遇したときのパイロットの過大なラダーペダル操作によって生じたものと結論されている。

2) エア・カナダ A319 (シアトル航空路管制センター管制空域 2008年1月10日)

同機は、フライトレベル FL350 から FL370 に上昇中、10.7NM 先行する B747 による後方乱気流に遭遇し、乗客・乗員に負傷者が出たため、カナダのカルガリー空港に緊急着陸した。カナダ運輸安全委員会で行われた飛行データ記録装置 FDR の解析によると、後方乱気流内で、機体は数回横揺れし、また垂直方向の荷重倍数は正・負に振動し、高度を 1,000ft ほど失った。後方乱気流に遭遇したとき自動操縦装置を使用していたが、3 秒後に解除されて手動操縦に移行し、その後の 15 秒間で、大きなエレベーターとエルロン操舵が繰り返され、左右のラダーの踏み替えが数回行われた。これらの操作の結果、左右の横揺れが続き、バンク角は最大で 55° に達した。また、横方向と垂直方向の加速度も振動し、横の荷重倍数の振幅は -0.46 G ~ +0.49 G、垂直の荷重倍数の振幅は -0.76 G ~ +1.57 G となり、垂直安定板にかかった荷重は、設計限界より 29%大きくなった。

3) リージョナルエクスプレス SAAB 340B (シドニー シドニー国際空港 2008年11月3日)

同機は、滑走路 34R に最終進入中、滑走路の手前 7NM (高度約 2,400ft) で、滑走路 34L に平行進入中の A380 の後方乱気流に遭遇して一時的に機体のコントロールを失い、乗客が軽傷を負った。オーストラリア運輸安全局の調査によると、この時 A380 は、滑走路 34L の手前 3.7NM の地点を通過しており、同機の左前方の位置を飛行していた。また高度 2,400ft の風は、風向 246°、風速 35kt で、左からの横風であった。機体は、後方乱気流内で、最初バンク角が左へ 52° 変動し、同時に 8° 機首が下がった。その直後、逆方向の横揺れにより水平姿勢を通り過ぎ、

バンク角が右 21° となり、300～400ft の高度を失った。後方乱気流遭遇以前、自動操縦装置は使用されていたが、機体の姿勢変動が大きいため、自動操縦装置はパイロットによって解除され、その後、着陸まで手動操縦で飛行した。

- 4) 読売新聞社 セスナ 560 サイテーション V (東京 東京国際空港(羽田) 2006 年 6 月 30 日)
- 同機は、滑走路 16L に進入中、空港の東約 8.5NM の地点 (JONAN ポイントの 1.8NM 手前)、高度約 2,000ft において、先行する B747-400D の航跡の僅かに北東で後方乱気流に遭遇し、垂直加速度の変動により、機体は上下動して搭乗者が重傷を負った。運輸安全委員会の調査によれば、タワーに管制移管された時点では、先行機 (ヘビー) ・後続機 (ミディアム) に対する後方乱気流間隔基準 5NM が保たれていたが、その後、先行機が減速したため、遭遇時点では約 4.6NM に減少しており、また先行機はこの地点を高度約 2,200ft で通過していた。このときの高度 2,200ft の風は、風向 230°、風速 26kt であった。なお、先々行機の B767-300 から発生した後方乱気流も影響した可能性がある。