

# 大型機の後方乱気流の中の小型機の飛行

東京大学名誉教授 東 昭

この内容は、去る平成11年3月17日に開催された第21回ヘリコプターセミナーでの講演をまとめたものです。  
(編集委員会)

飛行中、大型機の後方に小型機が入ったらどういふことになるのだろうか。私の話は実験したのではなく、全てコンピューターの中で、大型機の後方乱気流の中に小型機を飛ばし、それがどうなるかという結果を出したものです。

この問題については、今から20何年か前に、NASAが実験をしています。ボーイング747を飛ばして速度を変えたり、フラップや脚を出したり引き込めたり、飛行形態をいろいろ変化させ、機体からは煙を出して渦がどのように巻くかを調べました。さらに、その後ろから双発の小型飛行機を飛ばし、747から発生している渦のさまざまな場所に接近させて、小型機が大型機の後方乱気流に入ったらどのような影響を受けるかについてかなり詳細に調査研究をしています。その実験結果から、小型機は相当の距離をとらないと危険だということが明らかになりました。

その後、今から10数年前になりましたら、私がメリーランド大学にいました時にFAAの人が訪ねて来まして、小型の飛行機が受ける影響については分かったがヘリコプターについてどうなるかは分かっていないので、理論的に解明できるものならやってみて、その後で、状況によっては実験もしてみたいという話がありました。そこで私達が計算を始めたわけですが、その結果\*がこれからお話しする内容ということになります。

実は、NASAの飛行部長をされていた方が航空宇宙

技術研究所に来られた時に、NASAが実験した時のフィルムを持ってこられました。我々は、それを見た時に後方乱気流の強さにびっくりしたものです。今日そのフィルムを持参して見ていただくつもりでしたが、事務所の引越しをした時にどこかに紛れ込んでしまったのか、見つかりませんでした。見つかりましたら操縦士協会にビデオテープにして提供しますので、機会がありましたら見てください。乱気流にもみくちゃにされる小型機のように、実によく分かります。

飛行実験は風の無い日で、地上で発煙筒を炊くと煙がほとんど垂直に上がって行きます。飛行機の真後ろは強い吹き下ろしになっていて、その吹き下ろしの反力として揚力を得ていますから、400トン近い機体を浮かすために翼幅を直径とする円柱分の空気が下に押しやられます。その押しやられるスピードが速いので、押しやられる空気を埋めようと外からの空気が流れ込みます。翼端の外は吹き上げになっているので、そこには強い渦が来ています。B-747を低空で飛ばして煙の直ぐ横を通過させて、その渦が煙のところに行きますと、煙が突然キューツと巻きまして747の渦に沿って凄いい勢いで巻かれて行きます。分のオーダーで巻いているのですが、そういう強い渦があるということを見せられます。

その後は、初めに紹介しましたように、上空に上がってさまざまな飛行形態で煙を出しながら飛びま

\*Saito . S , Azuma . A , Okuno . Y , and Hasegawa . T (1987) : Numerical Simulations of Dynamic Response of Fixed and Rotary wing Aircraft to a Large Aircraft Wake . No.7-1, Thirteenth European Rotorcraft Forum , (September 8 ~ 11, Arles , France)

す。この煙を目標に小型機が接近して行くのですが、なかなか煙の中にまでは入れません。その手前まで行くと渦に弾き飛ばされてしまうのです。そういうものを撮ったフィルムなのですが、今日は、それと全く同じような内容をコンピューターのうでで検討しましたので、その結果について話をします。

この翼端から渦が出ているのですが、この渦は馬蹄形をしているので、我々は馬蹄形渦 (Horse shoe vortex) と言っています。この中、この翼の後流側は全部吹き下ろしです。その吹き下ろし速度の分布がここに示されていて、この渦の外側は強い吹き上げです。

翼の内側は、我々は、この中にも渦があるとみなしています。

ここの所に飛行機が真横から突っ込んで行ったらどうなるか、真後ろから突っ込んだらどうなるか、斜めに突っ込んだ場合にはどういう運動をするのかというのが図1(上)で、図1(下)は全く同じように、ヘリコプターがこの渦の中に突っ込んで行ったらどうなるかという計算をしたものです。

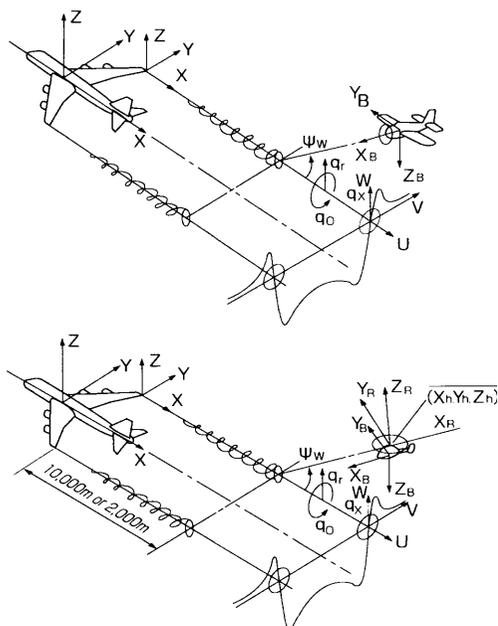


図1 Geometrical relation among a vortex generating airplane, its trailing vortices and a disturbed AIRCRAFT

渦の強さの関係は

$$\text{重量} = \text{揚力} = \text{空気の密度} \times \text{空気の翼幅} \times \text{飛行速度} \times \text{渦の強さ (循環)}$$

先行機の翼の周りにぐるぐるっと速度を積分してやります。翼の中に渦があるとみなしていますので、その周りに、前から翼の上を通過して後方へず～っと積分してきて下を通過して前方へ、そして完全に前で閉じてやる、つまり1循環させた速度の積分をしてやりますと、それがCirculation = 循環と呼ぶものです。それに空気密度、翼幅b、そして速度Vを掛けたものが揚力Lとなります。つまり重量と釣り合います。

Circulation

$$W \cong L = \rho b V \Gamma \quad \text{or} \quad \Gamma \cong W / \rho b V$$

where  $W/b$  is the span-loading

この循環が渦の強さを表していますので、これをもう一度書き直しますと

循環 (渦の強さ) は、重量を空気の密度 × 翼幅 × 飛行速度で割ったものです。

したがって、この循環が強いということは強い渦があるということですから、強い渦というものはどういう時にできるかというと、

- 1) 重量が重いと当然強い渦ができます。大型機であればあるほど強い渦ができます。
- 2) 分母に翼幅がありますから、翼が長いものは強さが減少します。ボーイング747のような長い翼を持った飛行機に対して同じ重量で戦闘機のような短い翼の飛行機があったとすれば、翼の短い飛行機の方が強い渦を出します。したがって、戦闘機が編隊飛行をする時などは、後ろの機体は強い渦の影響を受けることになります。
- 3) 速度は、巡航時のように速ければ渦は小さくなり、離着陸時のように遅いと強くなります。同じ重量を支えるのに1秒間に100mしか進まない飛行機に対して、1秒間に300m進む飛行機では、その間に影響を受ける空気の量のはるかに増加します

ので、渦の強さは弱まります。

このように、この渦は速い速度で飛んでいる時よりも遅い速度の時に強くなりますので、離着陸の時のように重量が大きくて速度の遅い時に強く、特に着陸の時には他機と全く同じ進入経路を飛行することになりますので運航上の問題が生じてくるわけです。そのためFAAでは、先行の大型機と後続機の最小間隔を次のように規制しています。

Spacing required by FAA

Behind a large wide-body jet

Small business jet ( $w < 5.7\text{ton}$  or  $12,500\text{痕b}$ ): 11km or 6naut. mile

Larger transport ( $w < 136\text{ton}$  or  $300,000\text{痕b}$ ): 9.0km or 5naut. mile

Wide-body transport ( $w > 136\text{ton}$ ): 7.4km or 4naut. mile

先行の大型機の後ろを飛ぶに当たっては、やはり後続の小型機のパイロットの方が、より注意が必要ということです。

表1は、私達が計算のモデルとして使用した機体のデータで、先行機は翼幅が59.6mですから約60m、翼面積が511m<sup>2</sup>、飛行速度が94.4m/s、約190kt、質量が約200トンの機体です。

表2は後ろに続く機体の諸元です。後ろには3種類の航空機を飛ばしました。モデルAは1トン以下の小さな飛行機です。モデルBは、28トンクラスの飛行機、もう1機はヘリコプターで、BK117クラスの機体になります。こういう機体を飛ばして、それぞれどうなるかという計算をしました。

表1 Dimensions of a preceding airplane.

Items		Dimensions
Wing span	$b_A$ (m)	59.6
Wing area	$S_A$ (m <sup>2</sup> )	511.0
Flight speed	$U_A$ (m/s)	94.4
Mass	$m_A$ (kg)	$2.11 \times 10^5$

表2 Dimensions of a three types of aircraft

Items	Airplanes			Helicopter
	Model A	Model B		
Gross mass	$m$ (kg)	980.0	28,557.2	2,850.0
Moment of inertia of body	$I_x$ (kgm <sup>2</sup> )	1,460.0	80,850.0	2,380.0
Moment of inertia of body	$I_y$ (kgm <sup>2</sup> )	1,770.0	539,000.0	7,314.0
Moment of inertia of body	$I_z$ (kgm <sup>2</sup> )	3,070.0	1,342,600.0	5,560.0
Product of inertia	$J_{xz}$ (kgm <sup>2</sup> )	778.5	0.0	1,057.0
For Main Wing				
Span	$b$ (m)	9.42	30.5	---
Mean aerodynamic chord	$c$ (m)	1.525	3.205	---
Wing area	$S_A$ (m <sup>2</sup> )	14.0	92.9	---
Aspect ratio	AR	6.34	10.0	---
Sweep angle	$\Lambda$ (deg)	0.0	0.0	---
Dihedral angle	$\Gamma$ (deg)	7.0	5.0	---
Setting angle	$i_w$ (deg)	2.5	0.0	---

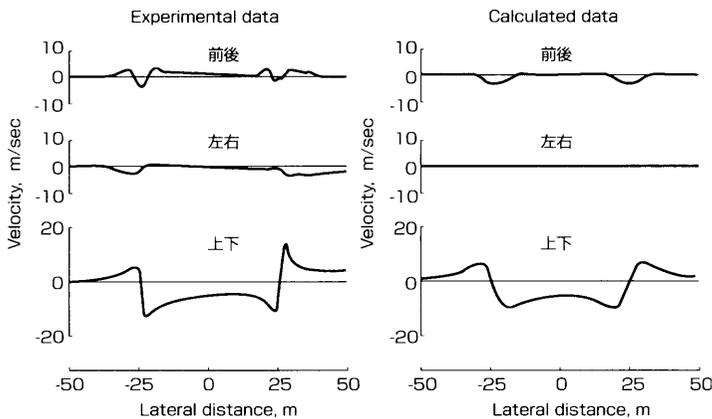


図2 10,500m後方における誘導速度の3成分

次に、私達の計算が正しいか、実際に合っているかどうか確認しなければなりませんので、アメリカで実機を飛ばして得られたデータと比較してみました。

図2の左はアメリカで行われた実験で、大型機の後ろの吹き下ろしの分布がどうなっているか実測したものです。

たとえば、プラス50というのは、後ろから見て右翼の50m右側、-50mというのは、同じく後ろから見て左翼の50m左側で、ここに描かれているプラス側の部分が吹き上げです。大型機の翼端の外側が吹き上げで、中に入ると途端に強い吹き下ろしになって、中央部は少しへこんでいますが右翼のちょっと外側に出ると急激に吹き上げになり、ここが渦のあるところです。これが大型機の約1万メートル後方で計測したものです。

我々は、それと同じような条件で理論計算をして、その結果を比較してみました。右の図がそれで、形を見るとだいたい合っていますので、我々の計算は間違っていないと言えると思います。実際のフライトで1万メートルも離れますと、上空のタービュランスによる乱れなども入りますので、理論計算と多少の違いが出るのはやむを得ないことだろうと思います。

どのくらいの吹き上げになっているかを見ますと、この右翼端のところでは5~6m/sですが、この吹き下ろしが10数m/sになっていますので、この速度

差が20mもあり相当強い渦があるということです。

この右側から接近しますと、最初に強い吹き上げがあって、渦に入ると途端に吹き下ろしに遭遇するという形になっています。もし先行機の翼の平面型が楕円形をしていますとこの吹き下ろし域は平らになります。平らにならないのは、ポーイング747クラスの機体では後退角のあるテーパー翼ですから、この真中の辺りが少しくぼんでいます。強い吹き下ろしは翼端側にあります。

後ろから見て、翼の中央辺にも細かい渦は必ず出ていますが、数キロ先に行きますと渦が翼端の1本の大きなコアの周りに回った渦になってしまっていて、後ろの方では前に話しました馬蹄形の渦になってしまいます。パイロットの皆さんはよくご承知でしょうが、雲の中に入ると翼端から渦が出るのが見えることがあります。あれは途中からも出てくるものが、1コードも離れた所ではほぼ完全にまわって1本の渦になっているのです。

コアの大きさがどのくらいになるかということ、中心のコアは、だいたい翼端の翼弦とほとんど同じくらいになります。ですから大型機なら大きく、小型機ならほぼそれに比例して小さくなります。あとは、その周りに強い、さきほどと書いたCirculationがあるということです。

以上は1万メートル以内のケースですが、図3は1万メートル以上の例です。

1万メートル以上になりますと、私の計算は1万メートル以下と同じような形をしているのですが、実験の方は大気中の乱流で形が崩れて消えています。従って、この計算は1万メートルを超え、特に2万メートルくらいになりますと、そのタービュランスで渦が無くなる程度についての、私の見積もり方が甘かったということになります。ですから、これからお話しする私の計算は、先行機から1万メートル以内の所の計算は合っているけれども、それより遠いものについてはかなり怪しいな、

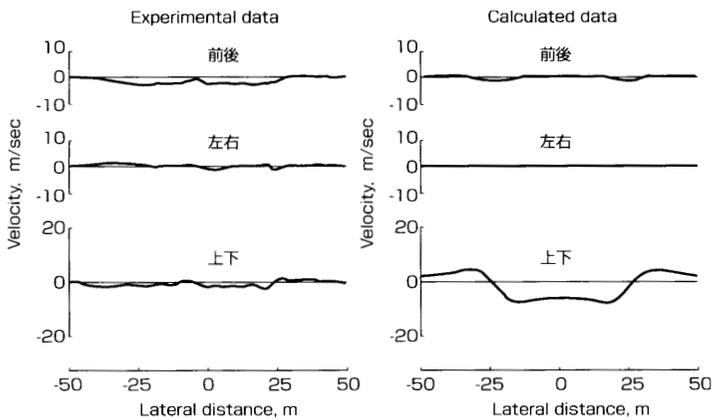


図3 24,000m後方の誘導速度

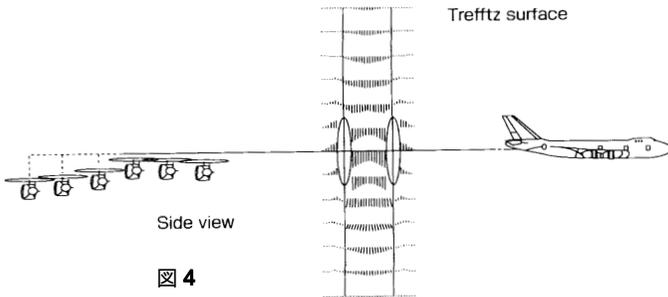


図4

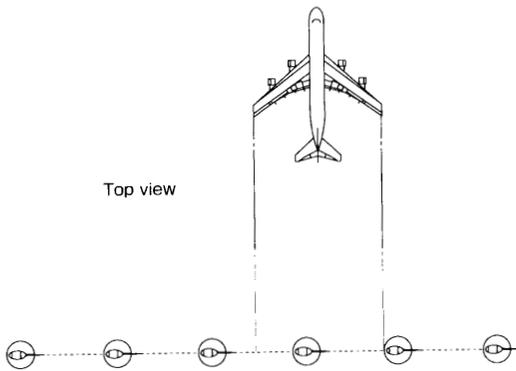


図5

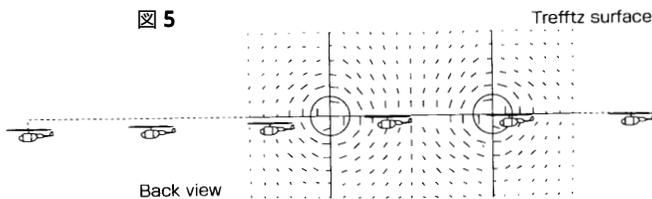


図6 真横からの突入(ヘリコプター)

ということになりそうです。従って、今日ご紹介するのは、1万メートル以内の話に限るようにします。

ここにジャンボ機が飛んでいます。この後ろにメッシュ、スクリーンのようなものを置いて、もし後続機から空気の流れが見えらしたら、どうなっているかなという、吹き下ろしの具合を表したものが図4です。

図5は上から見た図で、翼端から馬蹄形の渦(先に と書いた Circulation)があつてこの内側は強い吹き下ろし、この外側は強い吹き上げです。

そこにヘリコプターが突っ込んで来た場合の計算をしたということです。

図6は真後ろから見た図で、ここは吹き下ろしで、矢印は吹き下ろしの速度を、その長さで表しています。

そこにヘリコプターが入って行ったらどうなるかという計算をしました。

もちろん、同じことを飛行機でもやっています。

次は時間的な変動がどうなるかということです。(図7)これは747ではなくてコンペア990で計算した例なのですが、左はNASAが行った飛行実験のデータで、右が我々がやった計算値です。

この横軸は時間です。時間が経過すると、時間といっても、0から右端が5秒ですから数秒、つまり渦を突っ切る数秒の間がどんなことになったかということを示します。

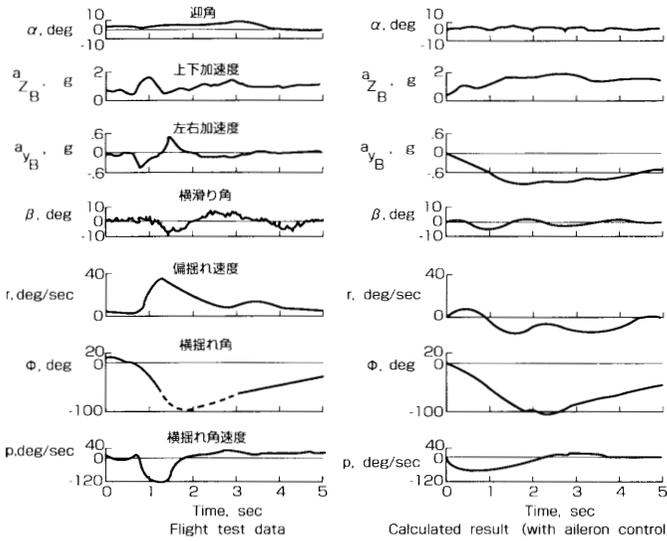


図7 コンペア990の後流へ5,180m後方で突入した例

は迎え角です。迎え角がどう変わったかということです。

は、縦のGです。加速度が何Gになったか、1Gで飛んできて渦の中に入るとググーツとGが増えて変動します。

ここまでは何とか計算が合いました。縦の動きです。ところが横の方、横のGがどうなったかとか、ロールのレートがどうだとか、ヨーのレートとか、横滑り角がどうなったとか同じような計算をやっているのですが、残念ながらこちらの実験値と計算とはあまり合わなかったのです。何が違ったかということ、実はこの時の操舵記録が無いのです。つまり、どういう舵を使ったのかというデータが無いものですから、計算の方では単に渦の真中に向けて飛ばしています。一方実機のほうでは、渦の外側で弾き飛ばされ、弾き飛ばされようとしながらも無理に渦の真中へ進むような操舵をしているのです。

したがって、操舵量が違いますが、この2つの図が合わないのは当然と言えば当然なのです。しかし、私たちの計算が眉唾になっては困るので頑張ったのですが、残念ながらこの操舵量についての細かいことが分か

らなかったのではなんとも言えません。いつか機会があれば、次には操舵量のデータもきちんと取り入れて合わせれば、必ず良い結果が得られるものと期待しています。

そういう計算の結果、いまは横軸に時間をとって時間と共に機体の応答がどう変わったかという話をしました。

次は、最大どんな影響を受けたかということです。

まず、先行する大型機と後ろの小型機との距離を5,000m、10,000m、15,000m、20,000mとった場合です。後ろから近づいていく距離が離れると、渦は摩擦、粘

性で消えてしまいますから、計算は、これ以上は不確実になりますという範囲までやってあります。

図8はモデルA機のピッチ角の最大がどう変わったか、ロール角の最大値がどう変わったか、ヨーはという図です。真横から行った時は(  $\omega = 90^\circ$  )最初に凄い吹き上げがありますから、まず吹き上げに突っ込んで機首がグーンツと上がります。次に中に入ると10数m/sの吹き下ろしがありますから、そこでガクツと下げられることになるのが普通の飛び方ということになります。その時のピッチ変化、迎え角変化、ロール角変化、ヨーの変化です。以上のように真横から行ったとき(  $\omega = 90^\circ$  )は、ピッチ角の変動はありますが、ロールとかヨーはそれほどありません。

中の図は、まずピッチレート、つまり頭上げの角速度が顕著に出ます。5,000mくらいのところの渦を

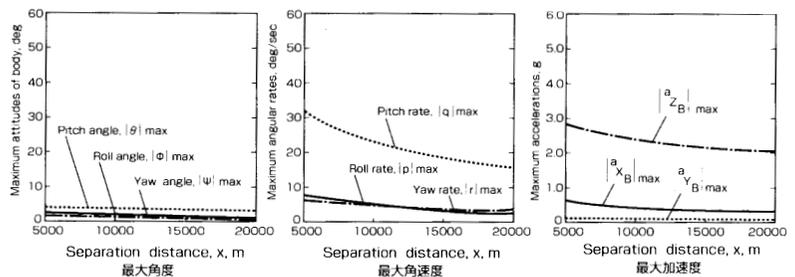


図8 モデルA機の応答(  $\omega = 90^\circ$  )

真横から突っ切ると、強い頭上げのレートが出ます。しかも、20,000mも後ろでもかなり大きなレートになります。下の方の線は、ロール・レートとヨーの角速度で、真横から突っ込んだ場合はたいしたことありません。

右の図はGです。やはり上下方向のGが大きく出ます。1トンクラスの小型機が大型機の5,000m後ろを真横から横切った時の上下のGは、2G以上になります。それに対して横方向のGや前後方向のGは、たいしたことありません。

したがって最も顕著なのは、機首上げの角速度と、上下方向のGが3Gくらいから2万メートルくらい離れても2Gくらいの強いGに会うということです。

次にモデルBの20トンクラス的双発機の場合ですが(図9)機体が大きくなりますので、同じように真横から突っ込んで、先ほどの小型飛行機よりは影響がソフトになります。やはりピッチレートは大きく出ます。

上下方向のGは1Gからぐ~っと出るはずなのです

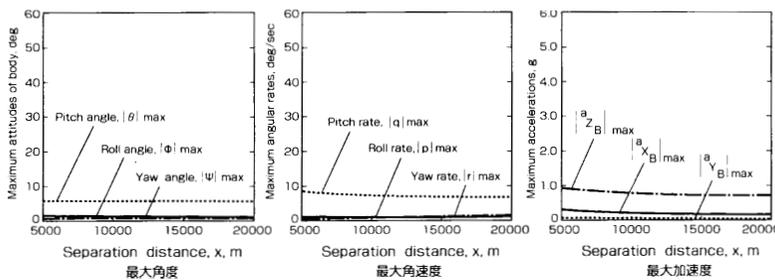


図9 モデルB機の応答(  $\omega = 90^\circ$  )

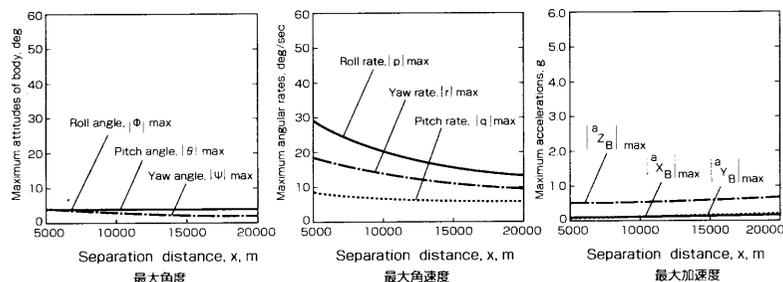


図10 ヘリコプターの応答(  $\omega = 90^\circ$  )

が、それ以下に落ちかかっているのは、降下しているためです。前後方向のGや横方向のGはたいしたことありません。

先ほどのモデルAの1トンクラスの飛行機と比べると、このクラスの機体になると横から突っ込んだ場合はそれほどではない、ということです。

次はヘリコプターが真横から突っ込んだ場合です。(図10)

ヘリコプターは、姿勢の変化はそれほどありません。飛行機の場合はピッチレートが大きく、ロールレートはあまり出なかったのですが、ヘリコプターの場合はロールレート、横方向の角速度が大きく出てきます。

Gの方はたいしたことありません。ヘリコプターの場合は、回転面に吹き上げや吹き下ろしを受けるので、回転面は左右に傾きます。上下方向の影響を受けて、飛行機ですとピッチングして機首が上がるのですが、ヘリコプターの場合は回転面が左右に揺さぶられますので、機体の方としてはロールレートやヨーレートが出たりすることになります。最も大きいのがロールレートで、ピッチングはそれほど出てきません。そういう変動をします。

全体としてGは極端に少なく、先ほどの小型機ですと3Gなどというデータも出ていましたが、上下方向のGはほとんど出ません。回転面はグラグラとくとき、機体も多少は揺れるようですが、それほど強いGにはならずに通過してしまうということのようです。

今度は、後続機を真後ろ(  $\omega = 0^\circ$  )から突っ込ませてみました。(図11)

まずモデルAの小型機です。小型機が4度の上昇角で下から

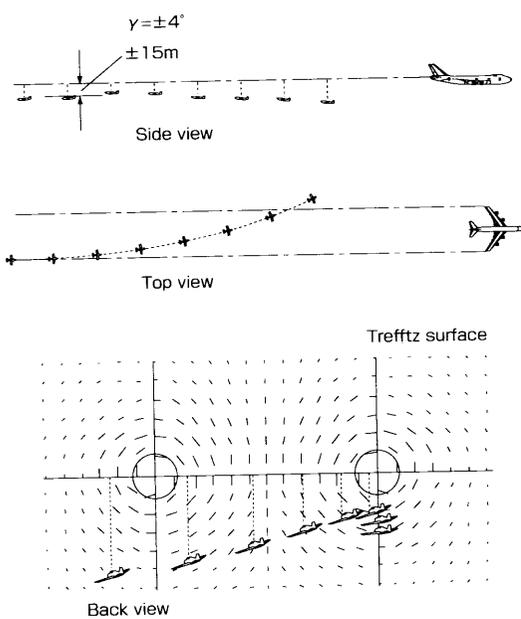


図11 モデルAの応答(  $\omega = 0^\circ$  )

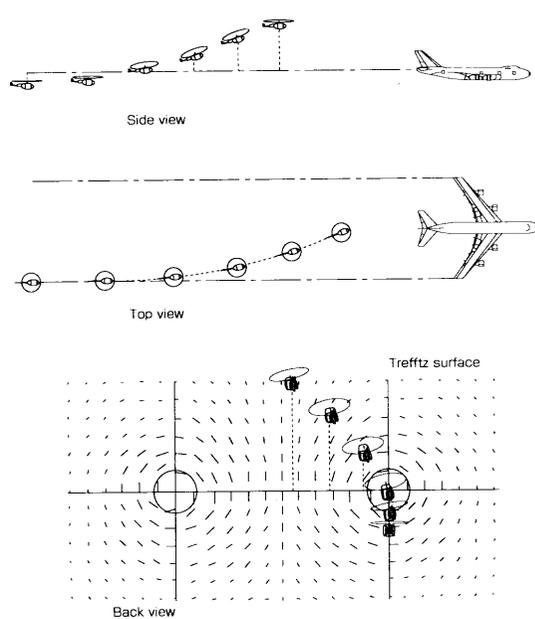


図12 ヘリコプターの応答(  $\omega = 0^\circ$  )

近づいて行きます。

最初は2度くらいからやりたかったのですが、2度ですと初めから渦の中にはいってしまうので4度にしました。しかし、突っ込む前に強い吹き下ろしのために渦の中に入ることができないのです。機体は左にバンクして、そのまま左に逃げてしまいます。

この真後ろから見た図ですと、下から渦に向かって上昇して行くのですが、直ぐに振られて左に流されてしまいます。

渦芯の中に入ることが容易なことではないのです。

ではヘリコプターの場合はどうなるかということです。(図12)

飛行機と同じような飛び方をさせてみますと、渦の中を突き抜けることができるのです。影響は受けるのですが、前にも話しましたように回転面は揚力面ですから影響を受けるのですが、自由なヒンジがありますので、下の方の機体はそれほど影響されずにそのまま上昇を続けて上に抜けることができます。

この真上から見た図では、内側に入りはじめるあたりが渦の上に抜けたところで、上に抜けながら中

に入り込みます。

真後ろからの図は、右翼の強い渦が回っているところへ下から突っ込んで行ってその中に入り、そのまま左に傾きながら上昇して行くというものです。

こうして見ると、ヘリコプターは飛行機に比べて、渦の影響を受けることは遥かに少ないと言えます。飛行機は翼が長いものですから、真横に突っ切る場合はそれほどでもないのですが、吹き上げ吹き降ろしのあるところでは強いロールに遭遇するようです。

図13は、モデルAの小型飛行機が5,000m後方に真横(  $\omega = 90^\circ$  )から突っ込んだ場合で、上昇角を振ってあります。

横軸に機体の経路角、0は水平飛行、6は6度で上昇、6は6度の角度で降下しながら渦に接近して行った場合にピッチロール、ヨーという機体の姿勢角が最大どのくらいになるかというものです。

注目すべきは、真後ろから降下しながら渦に近づいて行ったときが、ロールアンクル角がもっとも大きくなるということで、100度を越すようなバンク角になります。

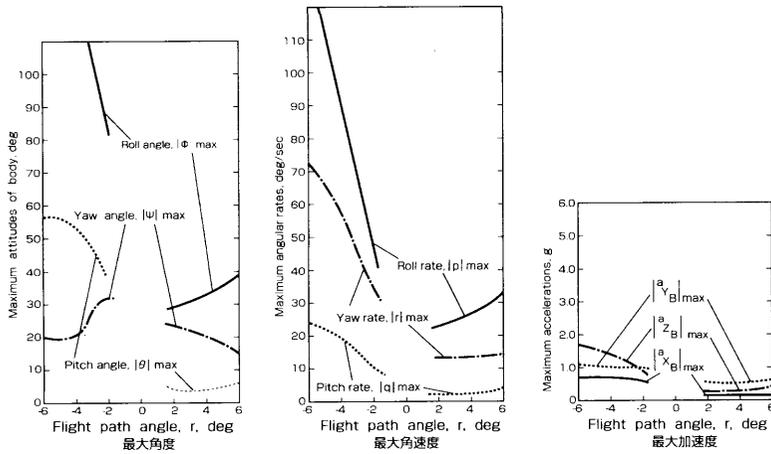


図13 モデルAの応答(x = 5,000m後方、 $\omega = 90^\circ$ )

ロール角で、その他では、たとえばヨーは - 6 度で降下した場合で50数度、ピッチ角が30度くらい上げられるとかです。ともかく、降下しながらの接近がもっとも厳しくて、上昇は降下に比べれば少し楽になるということです。

次に真中の(b)は、ピッチ、ヨー、ロールのレートです。ピッチレートはたいしたことありません。やはりバンクが大きくなるロールレートで、百数十度/sのロールレートで左にぐんぐんと振られるわけです。NASAが行った実験で、双発機の中にカメラを積んで近づいて行く写真があって、渦に近づいた途端にビャーッと煽られて、左に傾きながら、ほとんど垂直に落とされて行く様子が写されていますが、計算でも同じような結果が出ています。

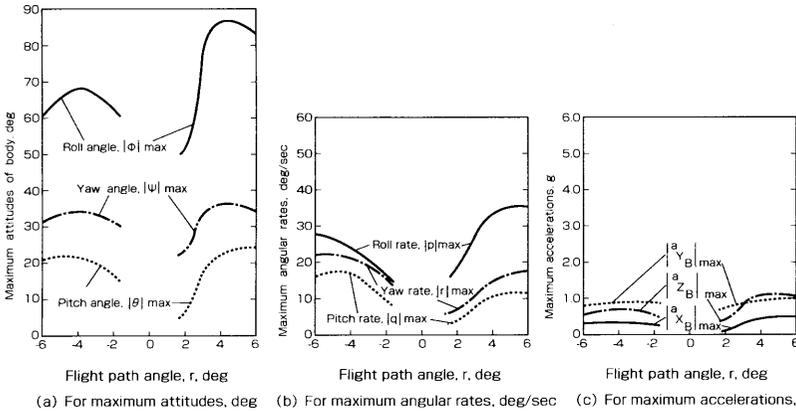


図14 モデルBの応答(x = 5,000m後方、 $\omega = 90^\circ$ )

右側の(c)のGについては、それほどものは出ていなくて、真後ろから行って最も強いところでも2Gまではありません。つまり、飛行機が真後ろから近づいたときは、Gはたいしたことはいないけれども、横方向に強く大きく煽られるということです。

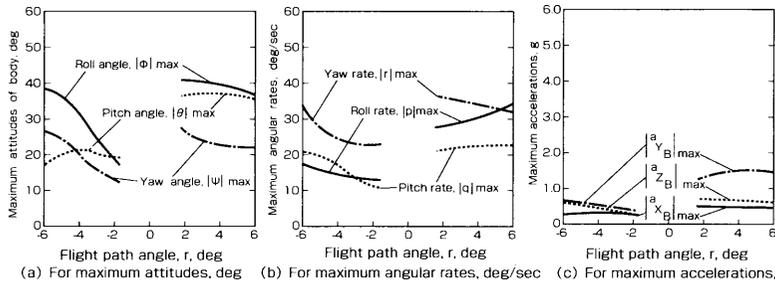
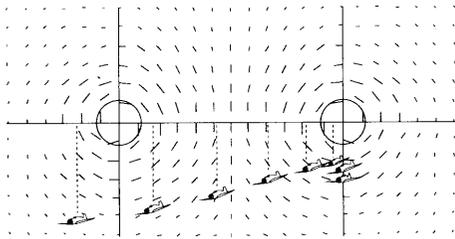


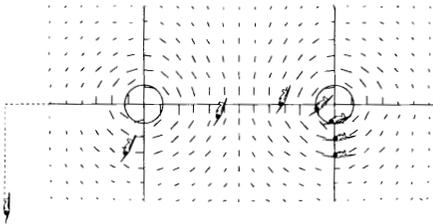
図15 ヘリコプターの応答(x = 5,000m後方、 $\omega = 90^\circ$ )

水平に近づいた場合はそれほどでもなく、上昇でもたいしたことありません。それでも40度くらいにはなってしまいます。ともかく、一番大きいのは

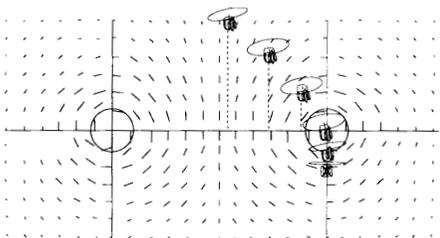
図14は、モデルBの20トンクラスの飛行機を同じ条件で飛ばしたものです。やはりロール角が大きくなりますが、先ほどの小型機が100度を越えるバンクに



(a) For model A



(b) For model B



(c) For helicopter

図16

なったのに比べると、精々60度から70度程度にとどまります。

レートについては、やはりロールが出ますが30度/sくらいで、小型機よりは緩やかになっています。Gについてもたいしたことはありません。

ヘリコプターが同じように上昇角6度から降下角6度の範囲で大型機の後方乱気流渦に接近した場合の結果が図15です。

やはり降下しながら接近する場合のロール角が大きいのですが、

それでも40度くらいで、飛行機が

らすればずいぶん楽になります。水平になると、ロール角は半分以下になります。

レートについても、ロールで30度/sくらい、ヨーレートは少し強く出ます。しかし、渦の中を突き抜けて飛んで行くことができたわけですから、飛行機との比較で言えばはるかに影響は少ないと言えます。

Gについても、上昇のときは少しありますが、たいしたことはありません。

いま話しました様子を真後ろから見たらどうなるのか、が図16です。

1トンクラスの小型機は、この渦の中に入る前に蹴飛ばされてしまって、流されてしまいます。

20トンクラスになりますと影響がすくないので、渦の中に入って行きますが、渦の中に入ると凄い吹き上げと吹き下ろしがあるので急激にロールさせられて、左に大きくバンクしながら落とされて行きます。

これに対してヘリコプターの場合は、真後ろから近づいて行きますと、割合にスルスルと抜けて上に行ってしまいます。やはり、ヘリコプターは乱気流や渦に強いんだと思います。

次は大型機の後方乱気流に斜めに突っ込ませた場合の検証です。

やや下から接近して上昇しながら斜めに横切っていくとどんな影響を受けるのかを計算してみました。

図17は飛行機の場合の例を真後ろから見たものです。

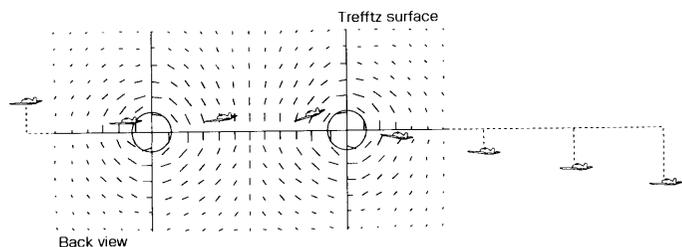


図17 (a) For airplane

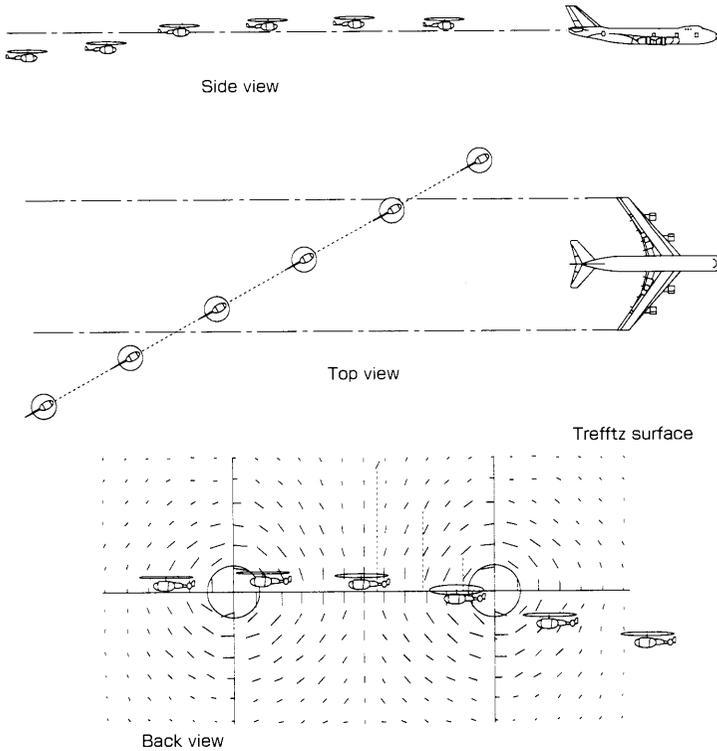


図18 (b) For helicopter

同じことをヘリコプターで計算したものが図18で、ヘリコプターは、この斜めの場合でもやはり影響は少なく、無事に通過して行きます。

真後ろから見てみますと、吹き上げのところに中を通過して、次の渦に入って更に外に抜けて行きます。

今度は横軸に大型機の後方乱気流に突っ込んだ角度( $\psi$ )を、0から90度までとり、縦軸に機体の变化した最大角度、最大角速度、及び最大加速度をとりました。 $\psi=0$ 度というのは真後ろから突っ込んだ場合、90度というのは真横から突っ込んだ場合です。(図19)

まずモデルAの小型機では、真後ろよりも少し斜めから行っ

た場合がロール角がもっとも厳しくなって、20数度で突っ込んだ場合の最大バンク角が40数度、接近する角度が深くなるにつれてロール角は小さくなっていきます。90度では、ロールはほとんど出ないで、吹き上げ、吹き下ろしを横切るのでピッチ、前後の変動が厳しいということになります。

同じくレートで見ても、接近の角度が30度付近でロールレートが最大になり、真横になりますとロールレートはほとんど問題無くなり、ピッチレートが非常に大きくなります。

Gについても上下方向のGが大きくなり3Gを超えるのは、30度付近で、そこから真横までほとんど3Gを超えた状況が続きます。

次にモデルBの20トンクラスの飛行機で見ますと、真後ろで非常に大きなバンク角が出ます。しかし、

角度が深くなると、たいしたことはなくなります。(図20)

レートについても、ほとんど同じ傾向が出ています。ロールレートは真後ろが最大で、真横に近づくとしたがつて小さくなります。ピッチレートはほと

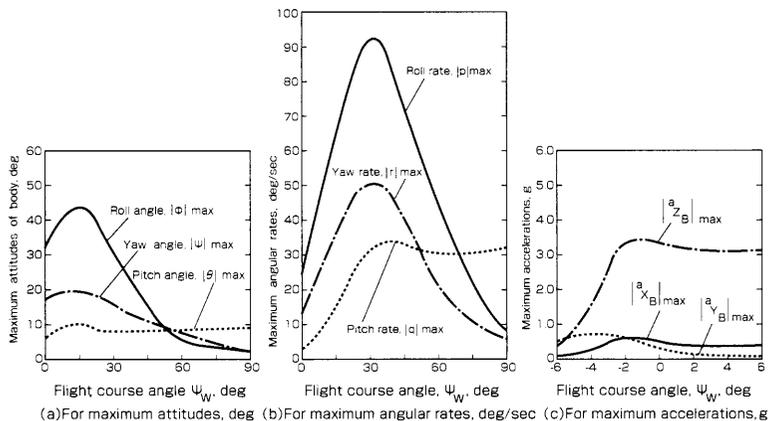


図19 モデルAの応答 ( $\psi=5,000$ m後方、 $\psi=5^\circ$ )

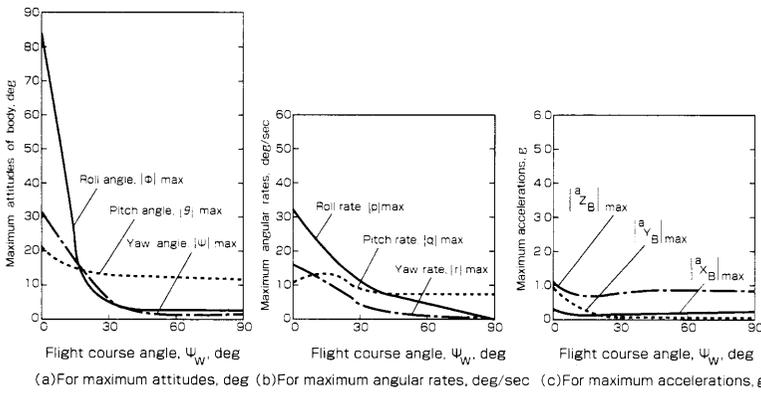


図20 モデルBの応答( =5,000m後方、 =5° )

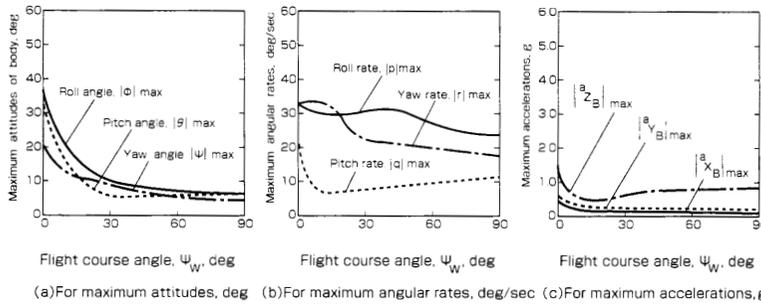


図21 ヘリコプターの応答( =5,000m後方、 =5° )

んど変わりません。

Gについては、1Gちょっと程度で、真後ろでも真横でも、上下方向についてはほとんど問題ははありません。

同じことをヘリコプターで見ると、真後ろから突っ込んだ時にバンク角は40度くらい出ましたが、真横になると横方向の運動はほとんど出ません。

ロールレートは割合最後までありまして、真後ろから行っても30度/sくらいのレートがありますし、真横から行ってもかなりあります。またヨーレートもかなりあります。ピッチレートは、ほとんど影響を受けません。

Gも最初の所、真後ろのところちょっとありますが、その他はたいしたことありません。せいぜい1G、水平飛行とそれほど変わらない状態で通過しています。

航跡に対して  $\omega=30$ 度の角度で、下から5度の上昇角で突っ込んだ時の様子を示したのが図22です。

上からモデルAの1トンクラスの飛行機、中央が20トンクラスの飛行機で、下がヘリコプターです。

やはり1トンクラスの飛行機が一番振られます。モデルBの20トンクラスの機体になるとだいたい安心して飛べます。

ヘリコプターについてもそれほど影響は受けていません。

その比較を表したものです。

ここでは先行機との距離が =5,000m、10,000m、15,000m、20,000m離れたときに、渦と機体とがどのくらい離れているか、どのくらいまで近付くことができたかという計算の結果です。(図23)

この一番上の線がコアの大きさです。左端の5,000mの所で5m弱、離れるに従って回りの空気を巻き込んでいきますので、だ

んだん大きくなってきます。

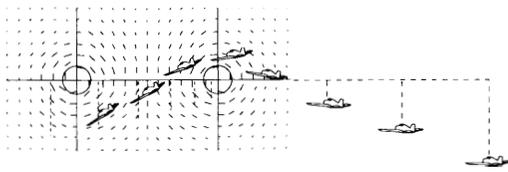
20,000m付近では7~8mになります。

それに対してヘリコプターの場合は中を突っ切ることができますが、1トンクラスの飛行機では1mとか2mというところで、それ以上近付くことが出来ません。

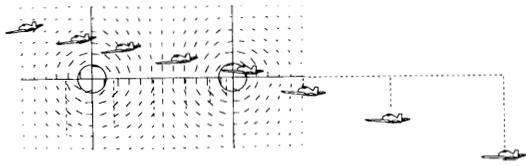
次は6度の上昇から6度の降下まで、フライトパスの角度を変えた場合にどのくらい近付けたかという話で、真後ろから入った場合のもので、真後ろからの接近ですので、割り合い渦の中に入りやすい状態です。10,000mにもなりますと渦が大きくなりますので、入りやすくなります。

右の図の  $w=0$  は真後ろ、 $90^\circ$  は真横ということで、進入の方角を変化させた場合に大型機の後方乱気流のコアにどれだけ近付けたかということです。

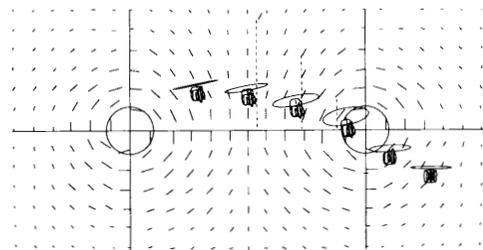
小型機では、真後ろからの接近した場合は10mくらいまでしか近付くことができません。渦の中に入る前に弾き飛ばされてしまいます。ヘリコプターは、どんどん中に入って行くことができます。



(a) For model A



(b) For model B

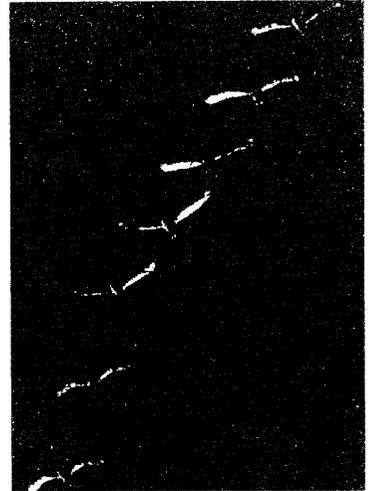


(c) For helicopter  
=5,000m後方、 $\gamma=5^\circ$ 、 $\omega=30^\circ$

図22

以上が大型機の後方乱気流の具合の悪い影響についての話ですが、今度は少し夢のある話です。次の写真を見てください。

これは白鳥が編隊飛行をしているところです。いままで話してきましたように、この先頭の白鳥は、飛行機と同じように後ろに渦を引きずって飛んでいます。そして、次の白鳥はその渦のわずかに外側



ぎりのところを飛んでいます。

つまり、次の白鳥は下降流の外側の吹き上げ、上昇流のところを飛んでいるのです。その次の白鳥もぎりぎり、翼端がちょっと中に入るくらいのところを飛んでいます。このように後に続く白鳥は、どれも先行する鳥の少し外側の、吹き上げの領域を飛んでいるということです。

斜めとか鉤型とかの隊形が見られますが、いずれも真後ろに続いて行くのではなくて必ず少し外側をとんでいます。つまり、白鳥は自分が少しでも楽ができるように上昇気流の中を飛ぶようにしているのです。

では、どのくらい楽ができるのかということを実験してみました。鳥の場合で10数パーセントは得をしているのではないかと思います。

そこで、鳥が10数パーセント得をしているのなら、B-747を同じように飛ばしたら後ろの飛行機はどのくらい得をするのか、ということを実験してみました。

その結果が図24ですが、編隊飛行と言っても自衛隊のブルー

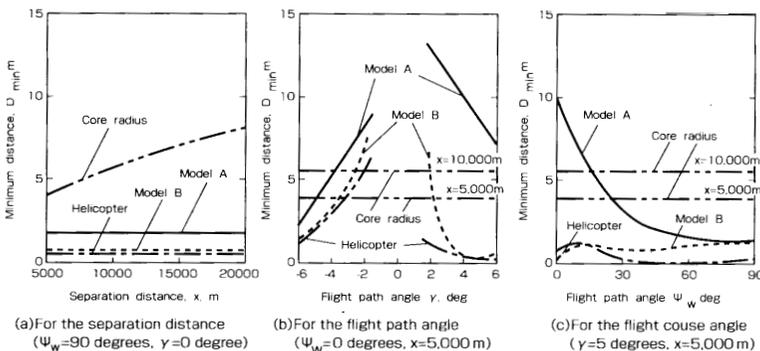


図23 渦芯との最小接近距離

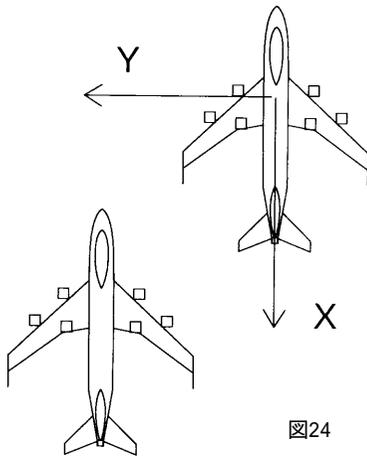


図24

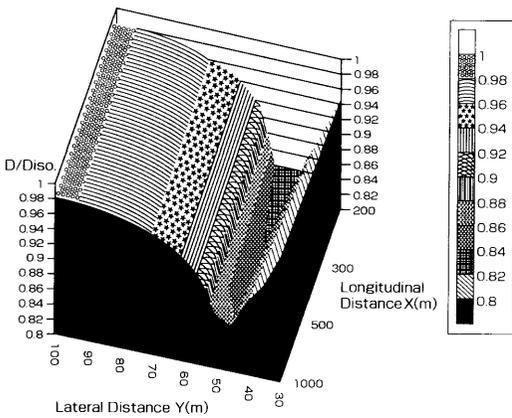


図25

インパルスがやるような極く接近した編隊ではありません。十分な前後間隔をとった（その前後方向の距離は数千メートルから1万メートルとっていいような）話ですから、危険を伴うものではありません。もちろん先行機は得をするものは無いわけですが、後続機がどれだけ得をするかという計算です。

図25は立体図なのでちょっと見難いのですが、右下の数字は、200mを基点に、300m、500m、1.000mと後ろに離れたらどうなるかということ。下の線は30mを基点に、100mまで、横方向に離れたらどうなるか。縦の線は、上下方向に離れたらどうなるかということです。

その時にどれだけ誘導抵抗が減るか、つまり吹き上げの中に入りますので、全体としては抵抗が減って燃料が節約できます。その節約できる割合を書い

てあります。

これで見ますと、直ぐ真後ろの200mくらいのところを飛んでいるのが一番良いのですが、1km離れていても10数パーセント燃料が節約できるということになります。

上下方向で言いますと数メートルの範囲、できれば2～3メートルの範囲にあれば非常に良い。しかし、10mも上下差が開いてしまうと渦の吹き上げの影響を受け難くなってしまいます。ですから前後方向はともかく、できるだけ渦の直ぐ傍で吹き上げの領域に入っていると後続機は非常に得をします。少なくとも10パーセントくらいの燃料が節約できますというのが、計算の結果です。

10パーセントというのは、最近747や外にもウイングレットを付けた飛行機がありますが、あの効果がたしか1～2パーセント程度だと思しますので、それと比べればけた違いの、非常に大きな効果だと言えます。

ただし編隊を組んで有効な位置を維持していくためには、たいへんなテクニックと細かい推進力の調整が必要になりますので、パイロットにかかる負担が非常に大きくなります。

あまり頻繁に推進力調節をやっていると、そのために燃費が増えてしまったのでは、せっかくの節約が意味をなさなくなってしまうのではないかと思います。

そこで私の提案は、ぜひ自動制御機器を使って（最近GPSもDGPSを使って精度の良いものが出ていますので）メートル以内の制御が容易になったし、場合によってはレーザーを使って先行機との位置を確認すれば、相当精度の良い自動制御系を組み上げることができると思います。こうしたものが実用化されれば、精度の高い編隊を自動的に組むことも可能になるでしょう。将来は、遠距離を飛ぶ機体はぜひ編隊を組んで飛んでいただきたいな、と思うのです。特にアメリカ行きは便数も非常に多いですし、管制などもずいぶん楽になると思います。

時差の関係もあって、夜の8時とか9時とか、だいたい似たような時間に出発する便が多いですから、成田を離陸して1時間後に太平洋上で編隊を組んで、10時間ほど飛んでシアトル上空に着いたら、

ロスアンゼルス行きとサンフランシスコ行きが離れて目的地に向かう、次はシカゴ行きが離れて、というようなフライトができればたいへんな燃料の節約になるので、いろんな所で提案しているのです。

先行機については何のメリットも無いのですが、今日はJALの何便、明日はユナイテッドの何便というように各社が回り持ちでリーダーをやればいいでしょう。

ただ、理論計算だけでは不足ですから、ぜひ実験をやって欲しいと航空会社にも自衛隊にも申し入れているのですが、不景気風の影響もあって残念ながらまだ実現していません。大型機では海上自衛隊の哨戒機が編隊飛行にも慣れているようですので、長距離の飛行の時などにやっていただいて、およそのデータでも出してくれると非常にありがたいのだがなと思っています。