

低騒音STOL実験機「飛鳥」の操縦評価*

中村 勝**, 照井 祐之**

Evaluation of STOL approach and landing of the Quiet STOL experimental aircraft "ASKA"

Masaru NAKAMURA and Yushi TERUI

Abstract

The quiet STOL experimental aircraft "ASKA" was developed by the National Aerospace Laboratory (NAL) and flight tests were conducted at Gifu airfield between April 1, 1986 and March 31, 1989.

This report describes the flight evaluation of STOL approach and landing problems.

Keywords : flight evaluation, STOL approach and landing

概 要

「飛鳥」は航空宇宙技術研究所で研究開発されたSTOL技術を実証するための実験機である。飛行試験は岐阜飛行場で1986.4.1から1989.3.31の間行われた。この報告書は飛行試験機関を通じて行ったSTOL着陸形態時の飛行、特にSTOL進入着陸時の操縦評価について報告するものである。

1. まえがき

STOL実験機「飛鳥」は低速度かつ急角度の着陸進入により、飛行場周辺の騒音の低減及び短い滑走路での離着陸を実現する動力式高揚力技術を確立する目的で開発された実験機である。エンジンの低騒音技術やUSB方式を採用したエンジン排気による揚力の獲得等新しい技術を取り入れ、実際の飛行によりその有効性を実証するために飛行試験が行われた。「飛鳥」は、昭和52年度に基本設計が開始されてから8年後の昭和60年10月28日初飛行が行われ、翌61年3月20日まで13回の製造メーカーによる飛行試験が行われた。この間領収前の確認のために航空宇宙技術研究所（以下NALという）職員の同乗飛行が行われ、3月31日NALが領収した。NALの領収後、平成元年3月31日までの間、NALによる97回、176時間10分の飛行試験が行われた。飛行試験の期間に行われたSTOL進入着陸の回数は121回であった。

飛行試験はメーカーの操縦士を含む4名の操縦士で行われたほか、NASAの操縦士2名による飛行評価も行われた。この間にSTOL進入着陸の操作手順、操縦手法が

確立されていった。

本レポートは、「飛鳥」の飛行試験期間に飛行実証を行ったSTOL形態の飛行、特にSTOL進入着陸時の操縦法について概略を述べるとともに、操縦に従事した立場からSCASを含む操縦システム及びSTOL操縦法について評価するものである。

NALが行ったSTOL実験機の特徴である低速度で、かつ急角度の進入から着陸接地前のフレアー、そして接地、着陸滑走、停止といった一連の操縦操作の中で行われるSTOL操縦法について、CTOL機の操縦法との相違を動力式高揚力機の飛行性の面から述べるとともに、その操縦法について記述し、評価を行う。また、STOL操縦法の評価に焦点をあわせて述べるのでSTOL実験機「飛鳥」のシステムやSCAS制御則の詳細はそれぞれの技術成果資料を参照されたい。

2. 記号、略号

	Angle of Attack
	Side Slip Angle
CMD	Command
	Approach Angle

* 平成9年7月17日受付 (received 17 July 1997)

** 飛行実験部 (Flight Research Division)

OB	Outboard Flap Angle
USB	USB Flap Angle
	Pitch Attitude Angle
CP	Co-Pilot
CTOL	Conventional Take Off and Landing
EFC	Engine Failure Compensation
FPC	Flight Path Control
GP	Glide Path
HUD	Head Up Display
INS	Inertial Navigation System
LOC	Localizer
OEI	Outboard Engine Inoperative
P	Pilot
PAPI	Precision Approach Path Indicator system
PCA	Pitch Attitude Control Wheel Steering
PCR	Pitch Rate Control Wheel Steering
ROLL CMD	ROLL Command
RWY	Runway
SCAS	Stability and Control Augmentation System
STOL	Short Take Off and Landing
USB	Upper Surface Blowing

3. STOL実験機「飛鳥」の概要

3.1 「飛鳥」の主な特徴

- a. 「飛鳥」は、C-1輸送機を改造して、わが国で開発されたFJR-710/600Sエンジンを主翼上面に4基搭載している。
- b. エンジンの排気を主翼上面に沿って流すことにより高揚力を得るUSB方式を採用している。
- c. エンジンの抽気を主翼前縁及び補助翼前縁から吹き出すことによって、低速飛行時の主翼の揚力を確保するとともに操縦性を確保している。
- d. 安定操縦増大装置（SCAS）を装備して低速時の飛行の安定性及び操縦性を確保している。
- e. 進入着陸時の速度がCTOL機では飛行できない低速で、飛行領域がバックサイド領域である。また、進入角度がCTOL機の2倍の6度と急角度である。
- f. エンジンを主翼上面に配置することによって離着陸進入時の地上への騒音を軽減している。

3.2 「飛鳥」の操縦システムの概要

操縦システムは機力操縦方式となっており、かつ、SCASをエンゲージしたSTOL形態では舵面を動かすアクチュエータとコントロール・コラム、ホイール、ラダーとの間はフライバイワイヤ、即ち電気式操縦方

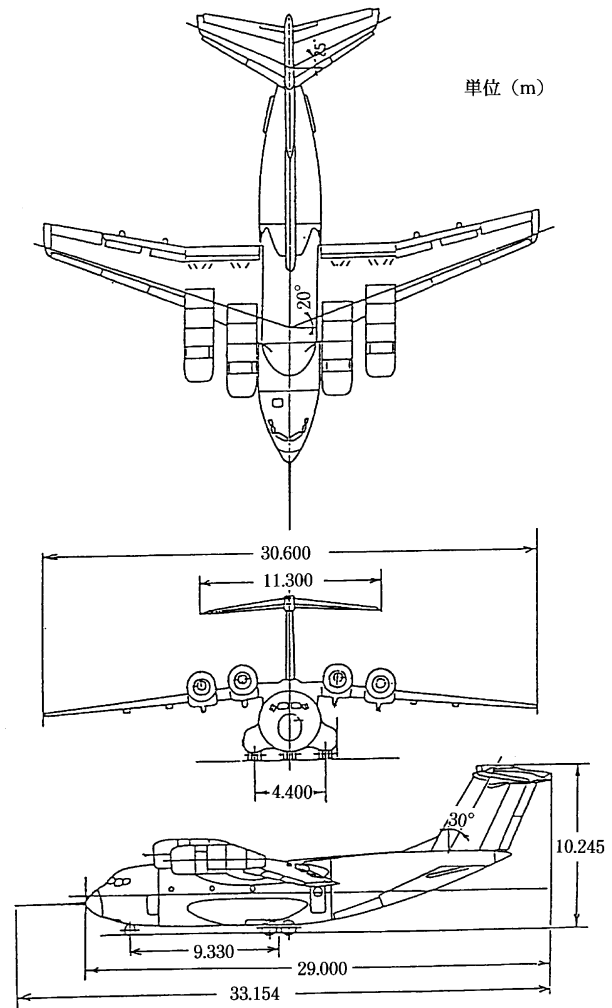


図3.1 NAL式STOL-1型機 三面図

式を採用している。（図3.2.1～図3.2.4参照）

「飛鳥」は短い滑走路での離着陸能力を飛行実証するための実験機である。着陸進入時の設計速度は37m/s（72KTCAS）で、従来の航空機では飛行できない低速である。従って操縦舵面の効きも速度の低下とともに劣化し、進入中外乱等に遭遇して航空機の姿勢が変化した場合に修正のための操舵応答が鈍くなる。特にSTOL進入中にエンジン故障（OEI）が発生した場合には姿勢の変化が不意に、かつ急激に起こるので姿勢の立直しが難しくなる。このような状態をコンピュータの助けを借りて航空機の姿勢を一定に維持するのがSCASである。図3.2.5に縦軸及び横・方向軸のSCAS制御則の機能構成を示す。飛行中はSCASからの電気信号によりその機体姿勢を保持している。操縦士のコントロール操舵はSCAS信号に加重されて操縦士の意図した機体のコントロールを行う。操縦士はSCASが維持している航空機の姿勢をオーバーライドして所望の姿勢に修正し、操縦する。従って、飛行している領域がバックサイド領域で進入着陸時の操縦法が異なる以外

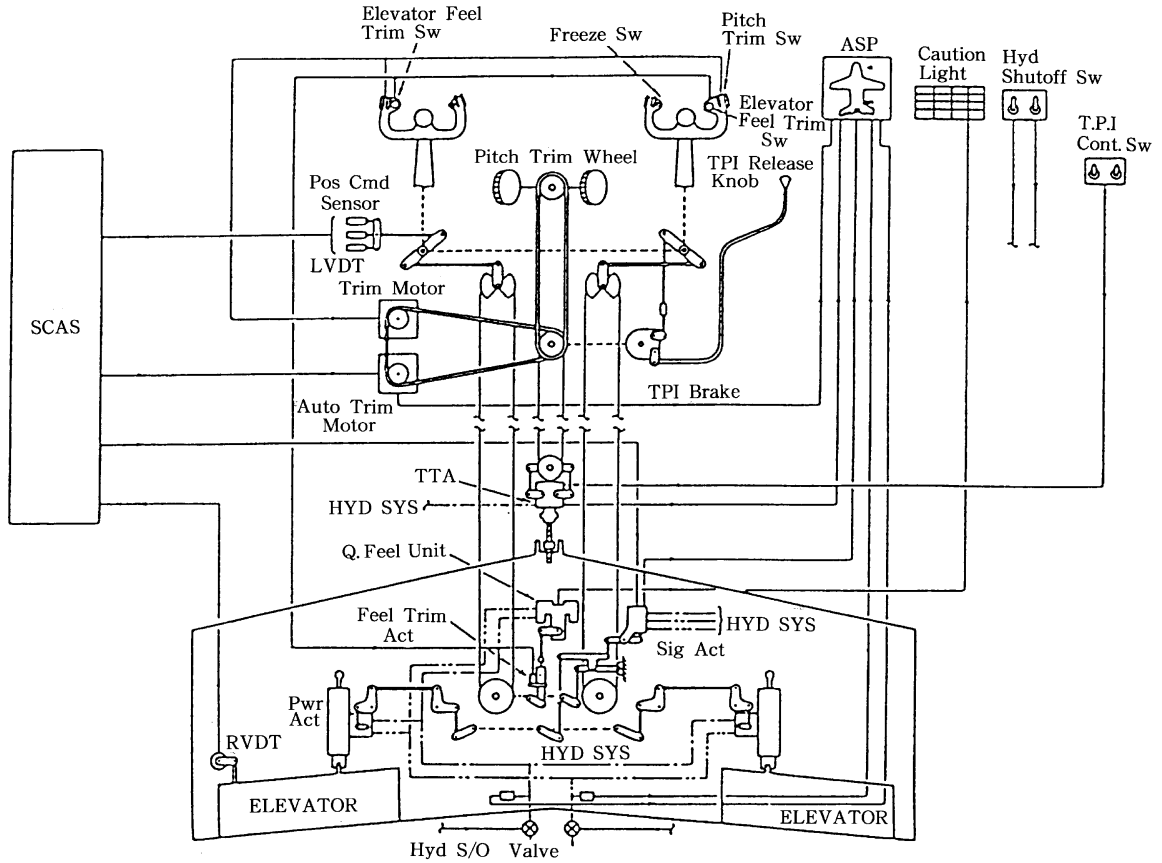


図 3.2.1 縦操縦系統

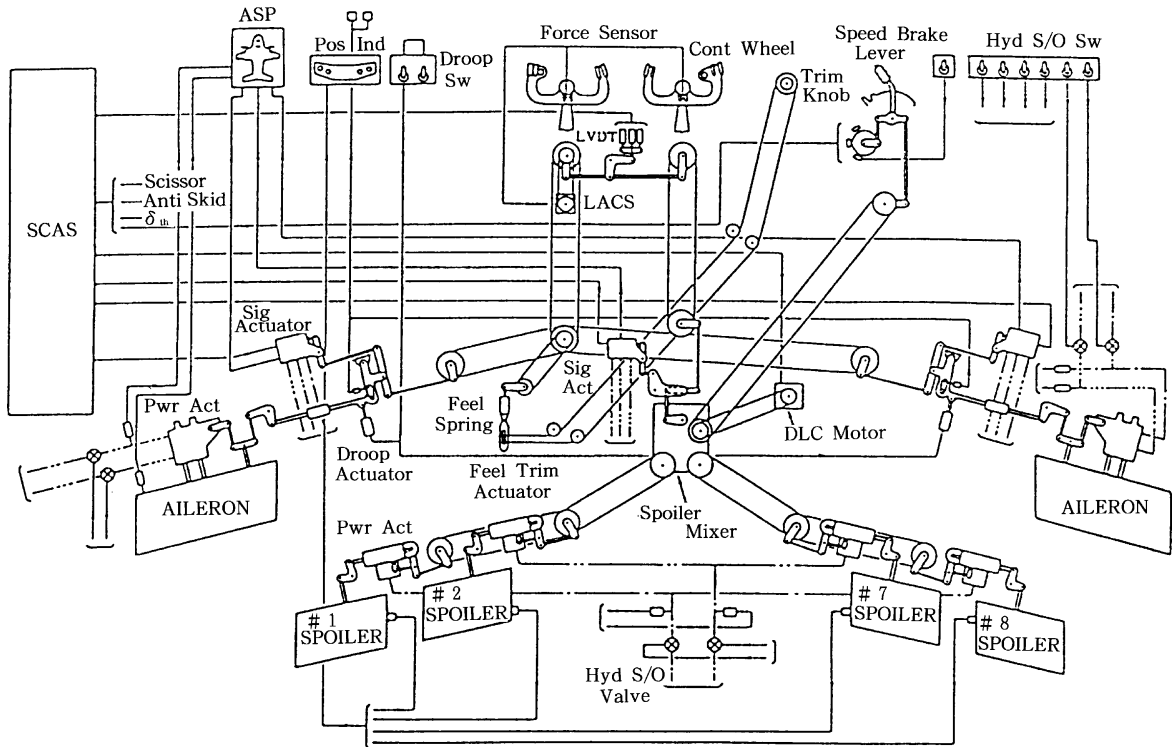


図 3.2.2 横操縦系統

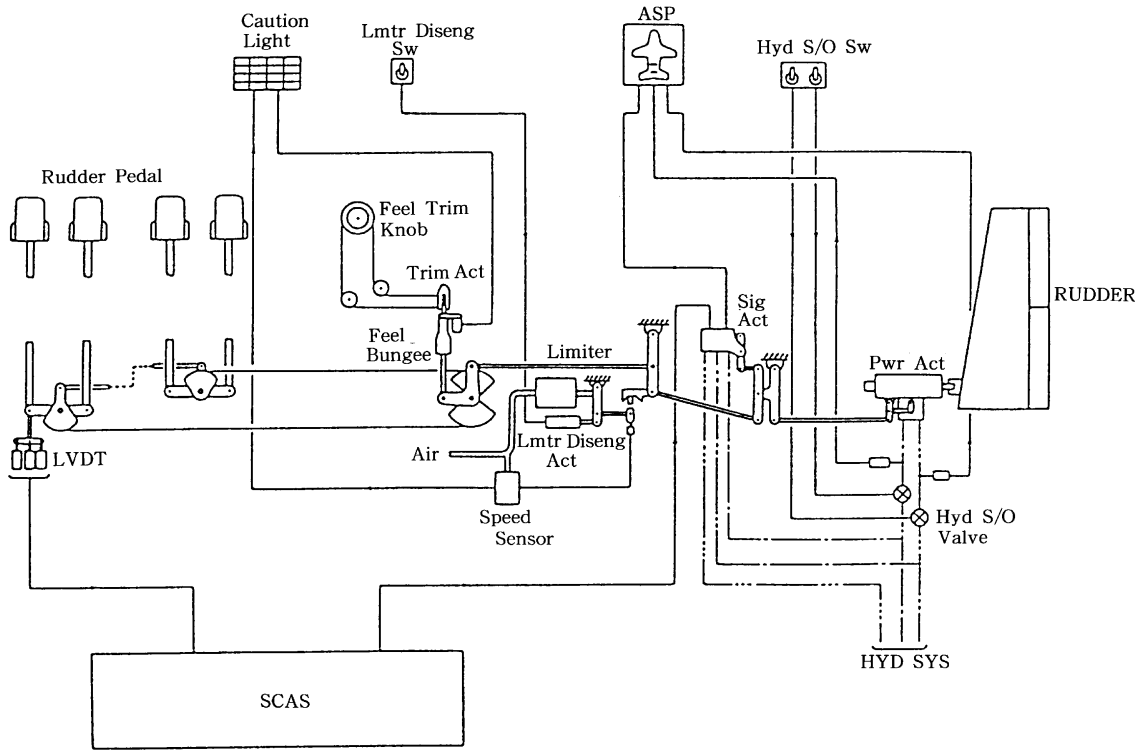


図 3.2.3 方向操縦系統

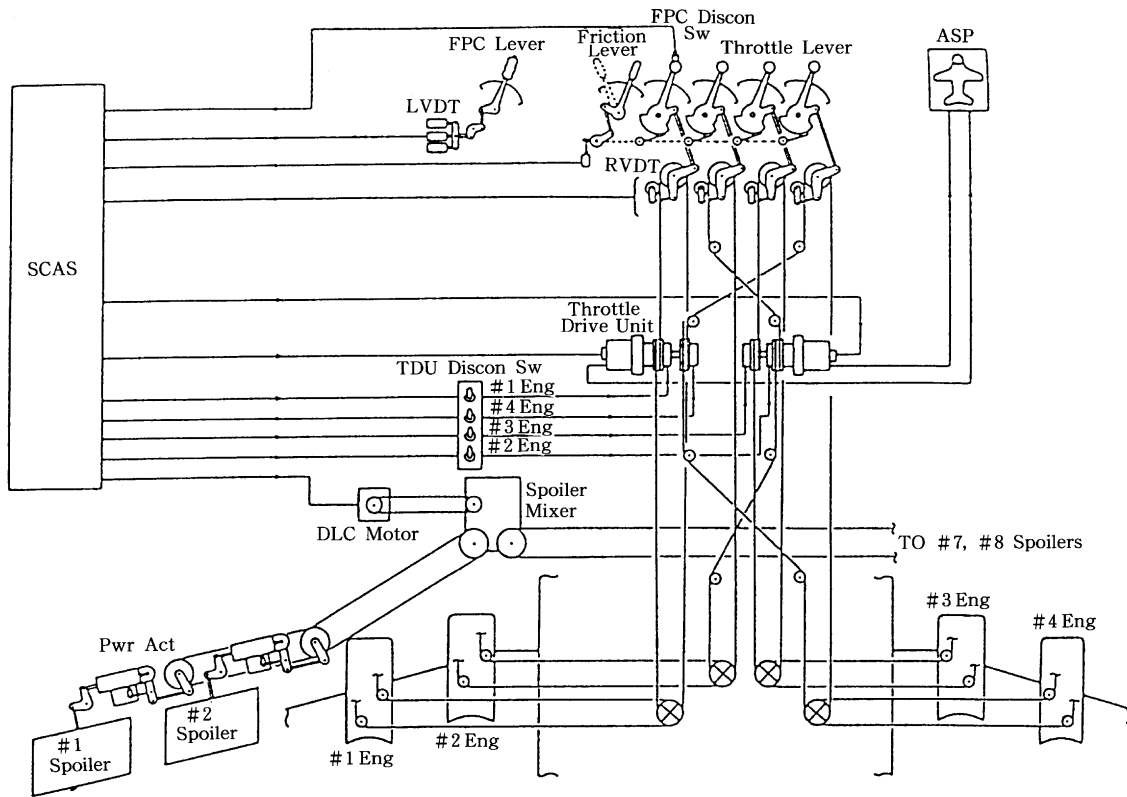


図 3.2.4 FPC 系統

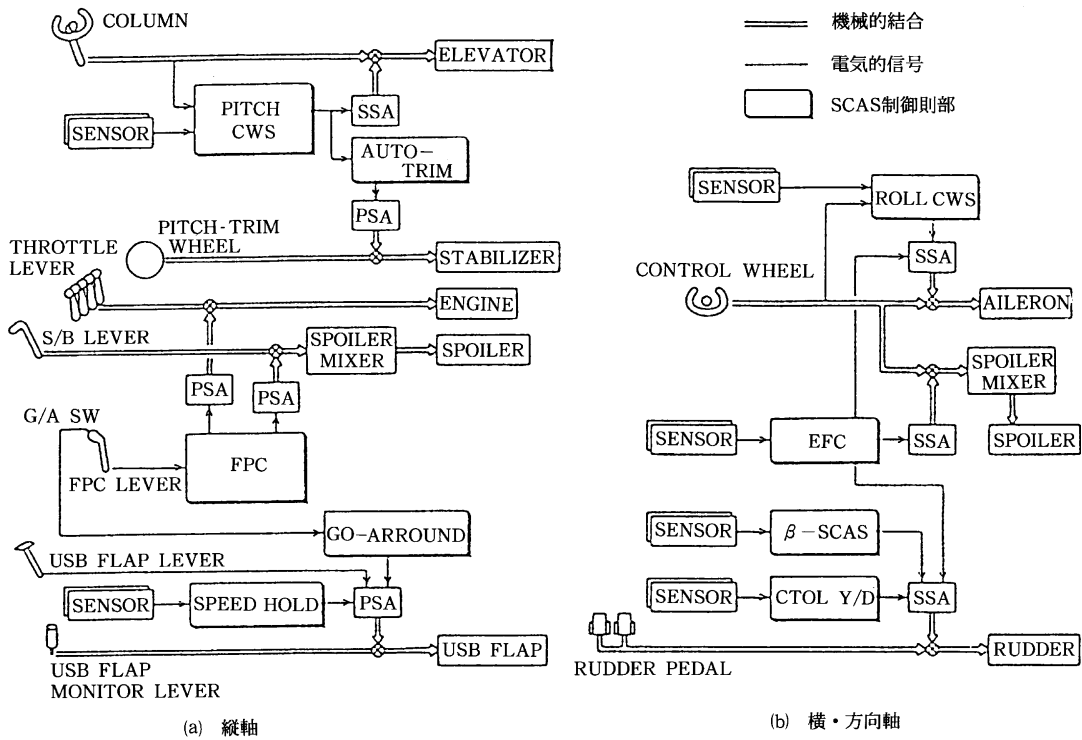


図 3.2.5 SCAS 制御則の機能構成

は、従来の航空機の操縦と殆ど変わらない安定した着陸進入が可能である。SCASが故障した場合の着陸進入は、パワーを増減するとピッチ姿勢の変化と同時に揚力の変化が生ずるために一定の進入角（6度）を維持して安定した進入を行うには、操縦士にかなりワークロードがかかる状態となる。

(1) 縦操縦系統

縦操縦系統にはPCAとPCRが装備されている。PCAは従来機と同様にコントロール・コラムの変位量によりピッチ姿勢をコントロールする方式でコントロール・コラムの位置によってピッチ姿勢が保持される。コントロール・コラムの位置はコントロール・コラム上にあるフィルトリムを操作することによって所望

の位置にセットできる。また、PCRはコントロール・コラムの中立位置からの操舵力に応じたレートコマンド信号によりエレベータが操舵され、操舵力が零になるとその時のピッチ姿勢を保持する。この2つの方式は研究用として装備され、任意に選択できる。

(2) 横方向操縦系統

横方向操縦系統にはRoll CWS, β -SCAS及びEFCがある。

左右の旋回時にはバンクが所望の角度になったらコントロール・ホイールを中立に戻すと機体はその時のバンクを保って旋回する。同時に Commandが作動して（偏揺）が0になるように機体の偏揺を止め調和のとれた旋回を行う。また、離陸途中特に外側エンジ

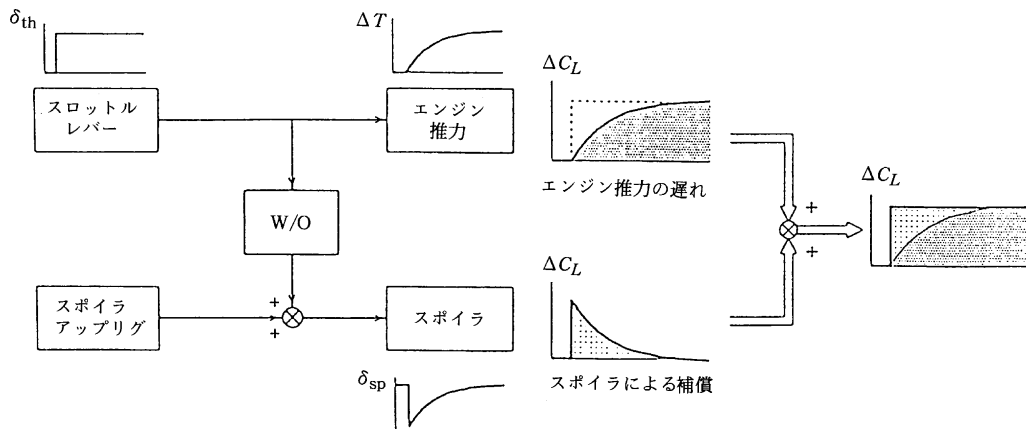


図 3.2.6 経路制御則の原理

ンが故障した場合に、故障エンジンの推力喪失により揚力減少に伴うロールと同時に偏揺が急激に発生するので、操縦士が機体姿勢を立直す余裕がない。このような状況のときにEFCが作動して初期の姿勢変化を防止し機体の姿勢を維持する。

(3) FPC系統

STOL機の着陸進入において、パワーのコントロールはFPCレバーを使用する。図3.2.6に示すようにFPCレバーは4本のスロットルを1本のレバーで操作すると同時に主翼上面のスポイラをコントロールしている。進入中の進入パス修正は、飛行姿勢は一定のまま、FPCレバーをコントロールしてパワーを増減すると同時に、スポイラをアップリグ位置から一時的に閉閉してパワー操作に対する初期のパス応答を良くして、パスのコントロール性を向上している。

4 . STOL操縦法

4.1 CTOL機とSTOL機の飛行特性

「飛鳥」の進入着陸時の飛行領域はCTOL機では飛行できない低速、高迎角の領域である。

図4.1.1に示すようにCTOL機の場合、着陸進入中機首を下げれば速度が増加し、高度が低下する。また、機首を上げれば速度が減少し、高度が上昇する。このような飛行領域はフロントサイドといわれる。CTOL機の場合は着陸進入中もこの領域を飛行している。一方、STOL機「飛鳥」の場合はこれとは全く逆の飛行領域バックサイドを飛行している。即ち、飛行中に機首を下げると速度が増加するが高度は逆に上昇する。また、機首を上げると速度が減少し、同時に高度も益々降下していく。従って着陸進入中に進入パスが高くなった場合、これを正規のパスに修正するために、コラムによって機首を少し下げやると、速度が増加し、

着陸進入時のSTOL機とCTOL機の飛行領域

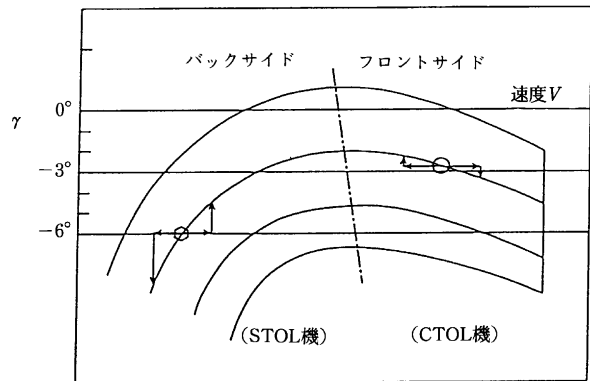


図 4.1.1 STOL機とCTOL機の飛行領域

CTOL機の場合は高度が下がって正規のグライドパスにもどってくるが、「飛鳥」の場合は逆に高度が上がって益々正規のパスより高くなってしまふ。また、機首を上げた場合は逆になる。図4.1.2は設計形態(USB/ OB40/ 65)での飛行試験の結果得られたV-線図、また、図4.1.3はフラップの下げ角度を改善された最終形態(USB/ OB60/ 65)で得られたV-線図である。印は着陸進入速度の点である。

4.2 CTOL操縦法とSTOL操縦法の相違

図4.2はCTOL機とSTOL機の操縦法の相違を示したものである。CTOL機ではフライトリファレンス(FR:速度)をパワーで、フライトパス(FP)をコントロールコラムでコントロールしている。一方STOL機では速度をコントロールコラムで、フライトパスをパワーでコントロールしている。

従って、着陸進入中進入パスが高いときCTOL機の場合は機首を少し下げることによって進入パスを修正し、同時に速度が増えるのでパワーを少し絞って速度

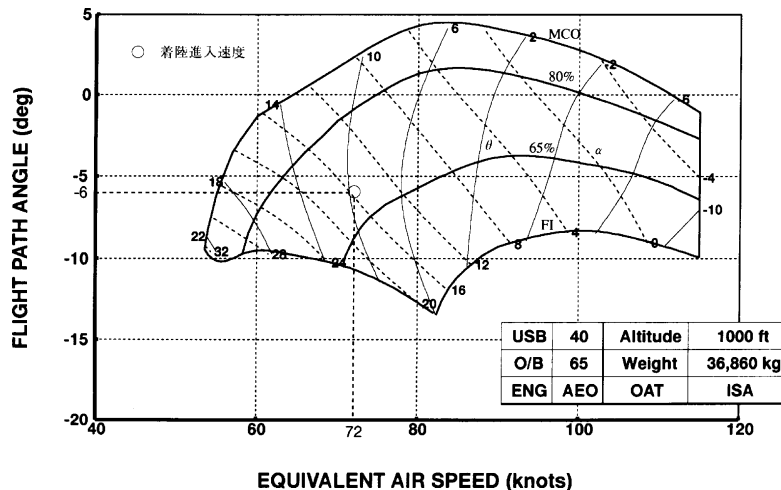


図 4.1.2 「飛鳥」のSTOL着陸形態のV-γ線図

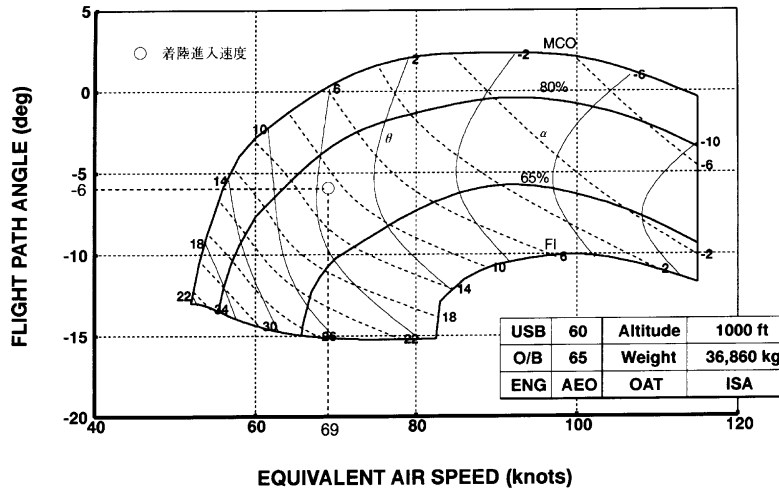


図 4.1.3 「飛鳥」のSTOL着陸形態のV-γ線図

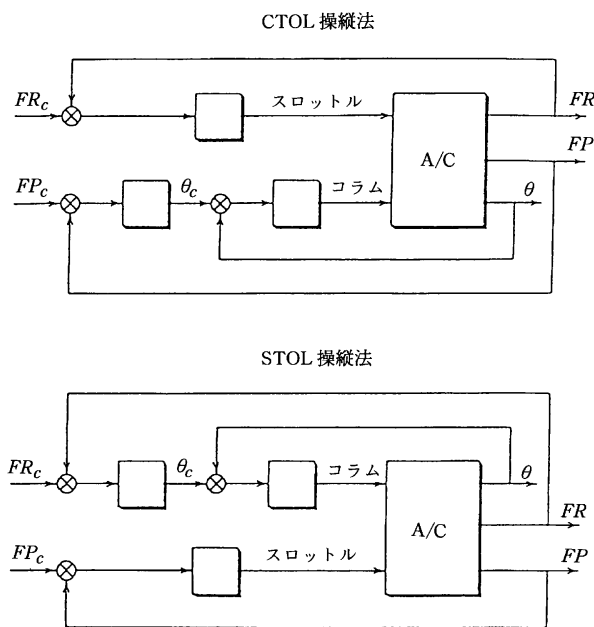


図 4.2 進入着陸時操縦法の相違

を維持する。進入パスが正規のところまでもどってきたら機首をもとにもどして修正するとともにパワーをもとにもどして速度を維持する。これらのコラムによるピッチコントロールとパワーによる速度コントロールは同時に行われている。

STOL機「飛鳥」の場合は、進入パスを修正するために機首を下げると速度が増加するとともにパスが益々高くなるので、ピッチ姿勢は変えずに速度を一定に保ったままFPCレバーでパワーを少し絞ることによって揚力を減らし、高度を下げてパスを正規のクライドパスに修正する。正規のパスにもどってきたらパワーをもとにもどして正規のパスを維持する。滑走路に近づいて、着陸接地するためのフレア（又は返し操作）についても、CTOL機の場合は高度約15mになったらコン

トロールコラムで徐々に機首を起してパス角を浅くしながら、着陸姿勢にしてゆく。この間徐々に高度を下げて滑走路へ接近してゆく、着陸接地時の沈下速度が制限以下になるように円滑な返し操作を行う。

STOL機「飛鳥」の場合は、この返し操作についてもコラムによる機首の返し操作ではなくて、進入中のピッチ姿勢を保ったままFPCレバーでパワーを少し加えることによって沈下率を制限内に減らして接地する。（進入中のピッチ姿勢は概ね着陸姿勢になっている。即ち進入角 -6度、進入速度37m/s（72KT）のときピッチ姿勢は約10度である。このときの迎角は約16度である。飛行試験の進捗に伴い、着陸地点の視認性を改善するため、後半にフラップ下げ角度が USB/OBを60/65に設定され、進入速度を35.5m/s（69KT）に変更して進入着陸を行ったが、この最終着陸形態ではピッチ姿勢が下がって約5度である。このときの迎角は約11度である。ピッチ姿勢が約5度下がったことにより前方視界は大幅に改善された。）

このようにCTOL機とSTOL機とでは着陸進入中の操縦法が異なる面もっている。

5. SCASシステムの制御則に対する操縦性評価

ピッチ姿勢のコントロールでPCAとPCRのどちらがSTOL進入着陸時の操縦に適しているか、実機の飛行前にシミュレータによる評価を繰り返し行った。また、実飛行においても上空で模擬進入操作を行った。PCA方式は在来機の操縦法であり、他の航空機と変わらない。在来機と同様にトリムをとる要領で、所望のピッチ姿勢になったらフィードトリムでプレッシャーを0にすればよい。PCR方式はコントロールコラムを中立にすればその時の飛行姿勢を一定に保持してくれる利点はあるが、コントロールコラムに操舵力が少しでも

残っていると、それに応じて機体のピッチ姿勢が変化していくので、所望の姿勢になったらコラムに前後のブレーキをかけないように十分留意する必要がある。

結論的には、在来機の操縦法と同じPCAが、在来機の操縦法を身につけている操縦士にとっては自然な操縦感覚が得られ、違和感がないので実際のSTOL進入着陸時にはPCA方式を使用した。

STOL着陸進入中は外乱によって姿勢が変化しやすいので、ピッチ姿勢の保持はPCA方式が操縦しやすい。Roll Command, Commandによるバンクの保持、旋回時のバンク・コントロール及び調和は安定して操縦しやすい。FPCレバーによる進入パスのコントロールは、スポイラのアップリグ量が15度アップに改善されてからパス応答が良くなり、パスの修正、維持が正確にできるようになった。

6. STOL進入着陸

6.1 STOL進入着陸の手順

上述のようにSTOL機の進入及び着陸時の飛行領域はCTOL機と異なり、バックサイド領域である。STOL進入着陸を行う場合、場周経路を飛行し巡航飛行形態からSTOL着陸形態へと飛行形態を変更してゆく(図6.1.1参照)。即ち、チェックリスト手順に従って着陸前点検を行い、脚を下げ、フラップをCTOL形態(USB15

/ OB15)にし、速度を69.5m/s(135KT)に減速する。更にフラップをSTOL離陸形態(USB20/OB30)にし、速度を59.2m/s(115KT)にさげる。ベースレグに入ったらフラップをSTOL着陸形態(USB40/OB65)に下げ速度を進入速度37m/s(72KT)にする。(最終形態ではフラップをUSB60/OB65にしてピッチ姿勢約5度を保持すると速度は35.5m/s(69KT)で維持される。)同時にSCASの「PCA」、「ROLLCMD」、「CMD」、「EFC」各モードをエンゲージし、場周高度457m(1500ft)、速度37m/s(72KT)(最終形態では35.5m/s(69KT))を維持してファイナルレグに最終旋回する。ファイナルレグに入ったらFPCレバーをエンゲージし、以後の飛行はFPCレバーでパワーコントロールを行う。コントロールコラムでピッチ姿勢を一定にして速度37m/s(72KT)を保持しつつ、FPCレバーでパワーをコントロールして高度を維持する。RWYの接地点左側に設置してあるPAPIにより、進入角-6度のパスに近づいたらピッチ姿勢は一定のまま、FPCレバーを少し上げて降下を開始しパス(PAPIの白白赤赤)にのる。飛行形態をSTOL着陸形態に変更した後は、SCASをエンゲージして飛行するので、低速でも飛行姿勢は安定しており、操縦時の3舵の効きも十分ある。PAPIにより6度のパスを維持して進入する。パスの修

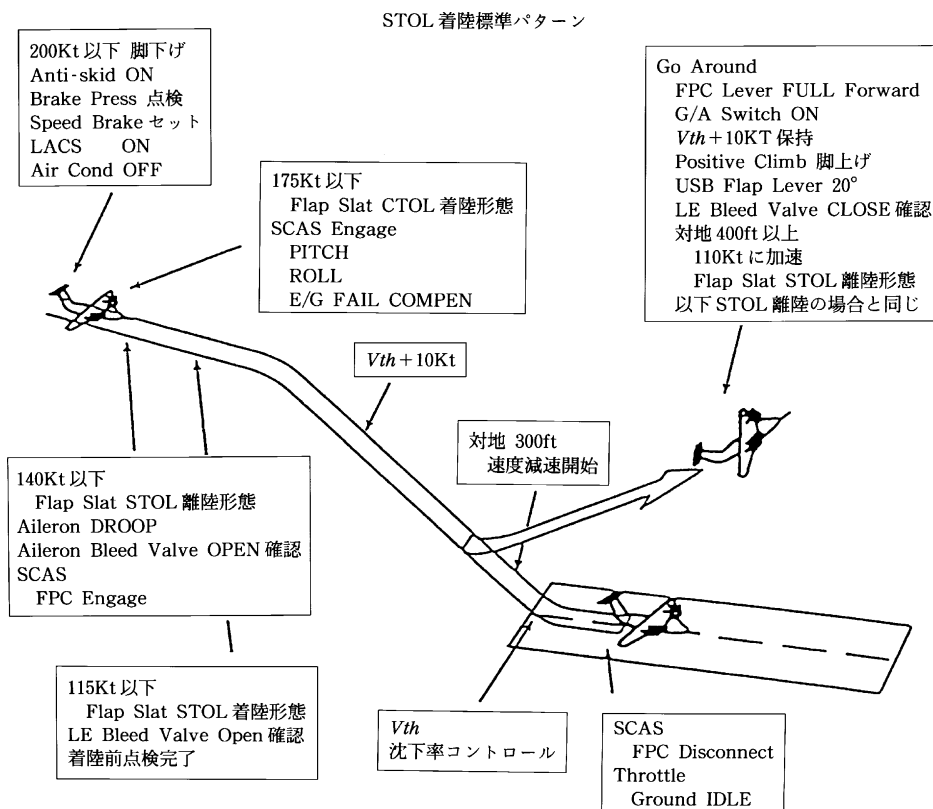


図 6.1.1 STOL標準着陸パターン

正はFPCレバーにより行う。FPCレバーではエンジンパワーを調整すると同時に主翼上面にある4つ（左右2枚ずつ）のスポイラを開閉する。FPCレバーをエンゲージするとスポイラが約15度開の位置にセットされる。FPCレバーによりパワーを増減するとスポイラも同時に15度を中心として一時的に閉位置になったり、開位置になったりする。パワーの位置がそのままであるとスポイラはウォッシュアウトされてゆっくりともとの15度位置までもどる。これは進入中のグライドパスを修正するためにパワーを増減した場合、エンジンの推力の増減がすぐ操作についてこず、機体の応答が遅れ、パスの修正が遅れるので、エンジン操作による初期応答の遅れを改善するために、スポイラの開閉によって直接揚力をコントロールできるようにしてある。これによりパワー操作に対する機体のパス応答は殆ど遅れることなく追従し、精確にグライドパスを保持することができる。

主翼外側2枚のスポイラは、エルロンとともに横のコントロールにも使用されており、横コントロールの応答をよくしている。パワーの増減は高度の変化となって現れるが、速度の変化は殆どない。

また、SCASが機体の姿勢を保持しているので、パイロットが操舵しなければ機体の姿勢は殆ど変化せず、一定の姿勢が保持される。しかし、外乱がある場合は機体姿勢がわずかに変化し、それによって飛行経路からずれていくのでパイロットによる修正操舵が必要となる。進入速度が遅いので横風がある場合は風の影響を受け易く、進入経路から流され易くなる。CTOL機の場合より大きなクラブが必要である。進入中は速度のコントロールが重要である。速度が変化すると、これによって降下率が変化し、結果的にグライドパスが変化する。これが更にFPCレバーによるパワーの修正を必要とする。従って進入中はコラムでピッチ姿勢を一定に保持しておくことが重要である。

実角表示のHUDを装備しているので、ピッチ姿勢はHUDのピッチ角表示で細かく識別できる。速度が遅いので滑走路への接近速度もゆっくりしている。

滑走路に近づき、フレアー高度（約15m）に近づいてきたらピッチ姿勢は変えずにFPCレバーによるフレアーに備える。「飛鳥」は滑走路に近づくと機首下げの傾向が強くなると同時に地面効果による空気のクッションの効果が顕著である。フレアー高度になったらFPCレバーを少し出してパワーによるフレアーを行い、進入角を浅くして接地時の沈下率を調整する。また、接地点は、もうすぐ接地する頃になると、機体の前下方にかくれて見えなくなるが、およその接地点はそれまでの飛行経路から予測できる。設計形態

（ USB40 / OB65 ）では進入中のピッチ姿勢が高いため前下方視界が悪く、接地点の視認性に難があったが、最終形態（ USB60 / OB65 ）では約5度と低くなったため、前方視界が良く接地点の視認が容易になった。フレアー中は機首下げモーメントが次第に強くなっていくので機体のピッチ姿勢が変わらないようにコラムを支える必要がある。しかし、CTOL機のようにコラムを引いて機体のピッチ姿勢を引起こしてはならない。引起こしを行うことによって降下率が増加し、それによって地面効果による空気のクッションの効果が打消されてしまう。むしろ接地の直前には、支えているコラムを少しゆるめる程度にして機首がわずかに下がるくらいにすると、クッションの効果がよく働いてスムーズに接地することができる。

ここで接地時の沈下率制限との関係について述べると、図6.1.2（ ， 印）のように「飛鳥」はSTOL進入時の進入角 - 6度、進入速度37m/s（72KT）では、無風時の降下率は3.9m/s（762.2ft/min）また、速度35.5m/s（69KT）では3.7m/s（730.4ft/min）である。主脚の設計強度は3.05m/s（10ft/s）に制限されているので、接地する前にパワーによるフレアーを行って、3.9m/s（762.2ft/min）から3.05m/s（600ft/min）以下にする必要がある。FPCレバーの操作はパス変更に対する効きが顕著で、フレアー高度になったらレバーを少し出すことによって容易にパス

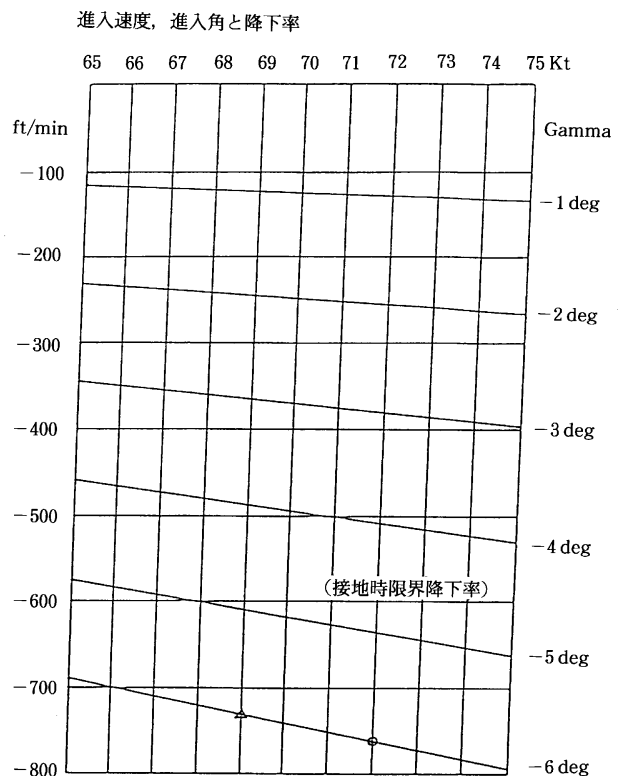


図 6.1.2 進入速度，進入角と降下率

を浅くして、沈下率を修正することができる。接地直前の沈下率（即ち降下率）が制限の3.05m/s（600ft/min）以下になっているかの確認は在来の昇降計では定常値に落ちつくのが遅れるので参考にならない。接地直前の降下率については、CTOL機と同じように滑走路と周辺の外部視覚情報に基づいて判断することになる。飛行試験の後半に入りHUDにINS装置からの降下率が表示されたほか、速度ベクトル（ \vec{v} ）、速度トリムベクトル（ \vec{t} ）が表示されるようになってからは、進入中の機体の進行方向（ベクトル）を、滑走路中心線、進入角度の方向に向かうようにコントロールして保持し、フレアーして接地する直前には目安として速度ベクトルが $-1 \sim -2$ 度となるようにパーシャルパワーによるフレアーを行うことによって接地時に沈下率を主脚の接地制限以下に抑え、安全な範囲で着陸することが容易に判定できるようになった。接地直前の降下率については、パワーでフレアーしつつコントロールすることが難しいので、安全な沈下率が得られる進入角度になるように速度ベクトルによってコントロールの方が操縦上容易になる。（ $-1 \sim -2$ 度で接地した場合は、速度37m/s（72KT）でも、接地時の沈下率は -0.65m/s （127.3ft/min） $\sim -1.29\text{m/s}$ （254.5ft/min）であり、十分安全な範囲にある。）機体が接地したらFPCレバーを一杯しぼりパワーを下げる。主脚が接地すると、オート・アーム位置にセットしてあるスポイラ（左右各2枚）が主翼上面で開き、機体が再度浮き上がるのを抑える。しかし、「飛鳥」は地面効果が大きく、接地してCTOL機のように機首をすぐ下げると、再度主脚が地面を離れ少し浮揚してしまう。従って接地したらそのままコラムを保持し、機首が下がり始めたらゆっくりとコラムをゆるめて機首を下げる。接地後着陸滑走距離を短縮するため過早に機首を下げようとすると、予想以上に機首が下がり易く、また、地面効果のために機体が再度一時的に浮揚してしまう傾向が強い。

FPCレバーは一杯にしぼってもグランドアイドルにはならず、エンジンパワーはフライトアイドルに近い位置にあるので、機体が接地して地上滑走に移行したら、No.1スロットルレバーにあるFPCディスコネクトスイッチを押してFPCモードを切り放し、4本のスロットルレバーによる操作に変更して、4本のスロットルレバーをグランドアイドルにしぼる。着陸復行に備えて地上滑走に移行するまではFPCレバーによるパワー操作を行う。しかし、FPCレバーはSCASを経由してスロットルをコントロールしているので、SCASが確実にエンゲージされていることを確認しておく必要がある。

前脚が接地したらコントロールホイールをCPにホルドさせて翼を水平に保ち、Pはステアリングハンドルに持ちかえる。以後の方向保持はステアリングハンドルで行う。

このころには速度は概ね30.9m/s（60KT）以下になっているので、滑走路中心線を滑走しながら、左右のブレーキを均等に使用してタクシー速度まで減速する。（飛行試験においては着陸距離の実データを収集するため、着陸滑走中左右のブレーキ（アンチスキッド装備）を一杯踏んで滑走路上で一時停止した。）

ブレーキを一杯踏んで減速中の方向保持はステアリングハンドルによって容易にコントロールでき、直進は容易である。しかし、停止直前になると、直進が難しくなり、少し左または右に向きを変えようとする傾向がある。これは低速になると、アンチスキッドの作動が不確実となり、左右のブレーキの効きに差が生ずるためである。

6.2 進入着陸時の操縦評価

最終形態（USB60/OB65）では、ピッチ姿勢が約5度で着陸進入から着陸までの間の前下方視界が良いので、PAPI、接地点を含みRWY全体を視認しながら進入できる。図4.1.3のように速度一定35.5m/s（69KT）の時、ピッチ姿勢がパワーに関係なく約5度で一定であり、ピッチ姿勢を保持することによって速度が保持できるため、進入時にはピッチ姿勢の保持を主にして、FPCレバーでパスコントロールを行えばよいので操縦しやすくなる。

また、進入復行する場合も最初からピッチ姿勢が低いので姿勢変更が少なく復行時の操縦がしやすい。SCASが正常に作動している状態では、低速度でも在来機と変わらない操縦性と安定性を持っている。ピッチ姿勢の保持はPCA方式とPCR方式ではそれぞれ利点があるが、PCR方式はSCAS故障の場合に在来機と同じ操縦法に帰る必要があるので、不意にSCAS故障が発生した場合の対応が遅れる恐れがある。在来機と同じ操縦法であるPCA方式が良いといえる。

しかし、操縦者のそれまでの飛行経験と慣熟度に大きく左右される部分もあるので今後の課題である。精確なパスコントロールが要求される進入、特にフレアー、接地については、操縦士のFPCレバー操作に対するパス応答の遅れの影響が大きい。最終的に設定されたOKDFPCではFPCレバーによるパスの変更修正が容易にできるようになった。

着陸進入時の降下率は接地時の制限を超えるが、フレアーから接地までは、HUDに表示されている速度ベクトルをコントロールし進入角を浅くすることによ

て十分安全な範囲内で接地することができる。また、速度ベクトルの表示がない場合でも、在来機と同様にRWY及びその周辺の外部視覚情報により降下率を判定し制限範囲内で安全に着陸可能である。

7. STOL進入復行

STOL進入復行は、実飛行試験の開始前に、特に進入中のエンジン故障を想定してシミュレータにより、高度ロスや加速等の性能、安全性、操縦性の検討や操縦士の慣熟のために行われた。実飛行試験では幸いエンジン故障がなく、復行も全発で行われたので実証するにはいたらなかった。

STOL進入を途中で中止して復行する場合は、FPCレバーを一杯前方に出し同時にFPCレバーの上部にあるGO AROUNDスイッチ（トグルスイッチ）を前方に押すことにより、STOL着陸にセットされているUSBフラップがGO AROUNDフラップ（20度下げ位置）まで上がり、揚力として使われていたパワーを前進力に変えて加速を良くしている。（最終形態では USB30度まで上げるように改善された。）

この間もSCASをエンゲージしているので機体姿勢は安定に保持されている。

SCASがエンゲージされていない場合（即ちベアーの状態）は、USBフラップのUPに伴うピッチトリム変化が大きくパワーを加えたとき機首下げの傾向が強い。また、USBフラップがSTOL着陸になっている状態でも、パワーを増減すると機首が上がったり、下がったりしてトリム変化が大きい。機首の変化に伴って速度の増減、あわせて高度が増減するので、航空機の動きは複雑となり、進入から上昇に移行するまでのコントロールが難しくなる。

STOL進入復行時の問題点は、STOL進入中に1エンジンが故障した場合（OEI）に、少ない高度ロスで安全な上昇を確保して復行できるかということであった。STOL進入中はかなり深いバックサイド領域を飛行しているので、突然のエンジン故障によって速度が更に低速となった場合には益々深いバックサイド側に移行してゆく。残りのエンジンパワーで高度ロスを抑え、加速するには余剰パワーが足りなくなり、復行できなくなる。従って出来るだけ速く速度をつけてフロントサイド側に移行する必要がある。これを解決するために、米国におけるSTOL実験機（QSRA）の飛行実績をもつNASAのパイロット、技術者の提言を取入れ、設計時に設定されたUSBフラップ上げ速度を速くして加速能力を改善する対策がとられた。その結果、復行時の高度低下を抑え、加速を良くして安全に復行できるようになった。

8. 飛行試験に使用したPAPI、HUD等の評価

8.1 PAPIによる進入

PAPIはICAOの基準に基づく、航空機の着陸進入時に進入角を表示する光学的地上装置である。進入中の航空機から見える赤色と白色の組み合わせによって進入角度の高低を判別できるようになっている。PAPIはSTOL進入着陸を行うためにRWYの左側に設置された。（図8.1.1図8.1.2参照）

灯火はICAOの基準に準拠してSTOL進入用のほか、CTOL進入用も併設された。

STOL進入着陸を行う場合、飛行形態をSTOL着陸形態にして、SCASをエンゲージし、FPCレバー使用で最終進入経路を高度457m（1500ft）、速度37m/s（72KT）で進入してくる。遠方にいる間はPAPIの灯火は4灯とも赤色を示し、正規のパス（6度）よりも低いところにいることを示している。進入を続けていると外側の灯火が1灯白色に変わりパスに近づいていることを示し始める。更に滑走路に近づくると2灯が白色となって白白赤赤の灯火に変わり、正規のパスになったことを示す。それぞれの灯火のパス表示の角度は0度20～30分づつの幅がある。白白赤赤になった時点で

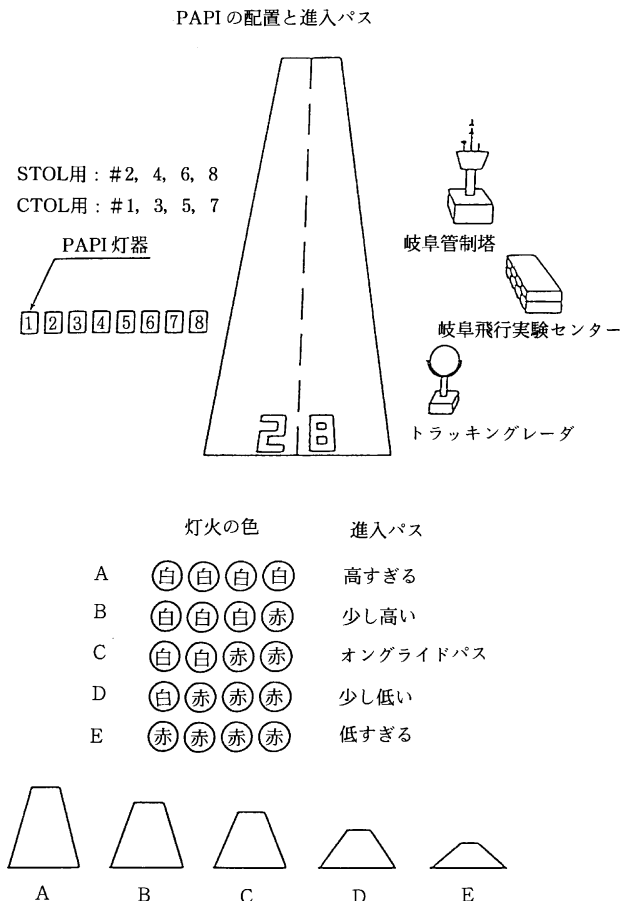


図 8.1.1 PAPIの配置と進入角の見え方

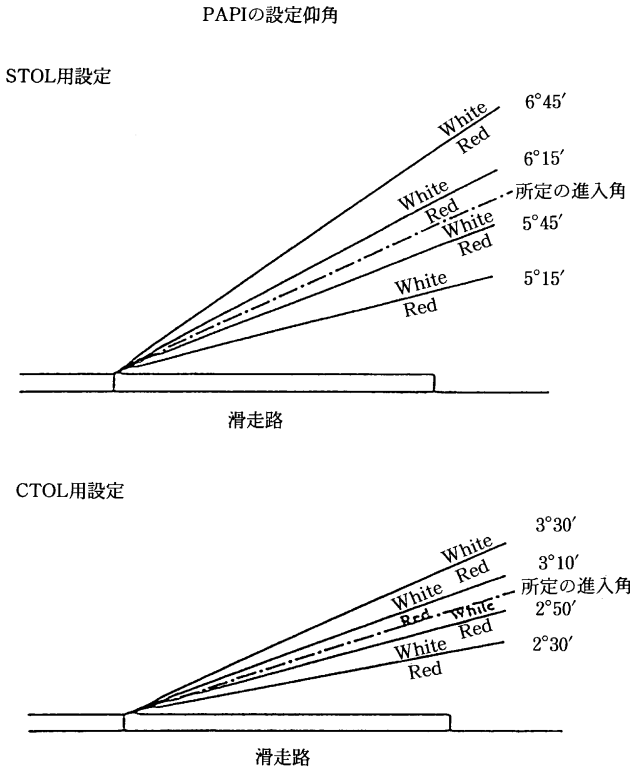


図 8.1.2 PAPIの設定仰角

F P C レバーを少ししぼり降下進入に入る。降下率の目安は3.9m / s (760ft / min) である。以後は正規のパス（白白赤赤）が引き続いて視認できるようにパスコントロールを行う。正規のパスからはずれて高くなり「白白白赤」, または低くなり「白赤赤赤」となった場合の正規のパスからのずれ（高低差）は3,704 m (2NM) 地点で32.6m (107ft) となり、パスのずれがわずかでも灯火の色の組み合わせにより明瞭に識別できる。進入を続け滑走路に近づくにつれてこの高低差は直線的に少なくなり、正規のパスからのずれに対する灯火のセンシティブティーは上がってくる。そのため正確な進入角度を保持するようにF P C レバーによりパワーを常時調整する必要がある。特にガスト等により気流が乱れているときは上昇下降気流が存在し、パスが変化するのでパワーコントロールを小刻みに行う必要がある。PAPIは進入滑走路の左側に設置してあるので滑走路に近づくとき着陸する滑走路の方向とグライドパスを表示しているPAPI灯火との方向がずれてくる。

STOL進入の場合、スレショルド（滑走路端）を通過するときの高度は26.3m (82.6ft) で、このころまではPAPIの表示も視認することができる。しかし、もうすぐ着陸のためのフレア操作を行う時期にきているので、以後はPAPIからはなれて、前方の滑走路中心線及び接地点、滑走路周辺の目標を全体的に目視し、進入方向を保持して進入を続け、フレア高度になったらF P C レバーを少し出してパワーによるフレアを行

う。従ってPAPIによる進入は概ね滑走路端を通過した直後くらいまでである。

8.2 HUDによる進入

(1) STOL実験機で滑走路に対してSTOL進入着陸を行うのは初めてのことである。従って上空で十分模擬進入を行い、安全に着陸進入ができるか、操縦上の問題や性能上の問題について把握しておくことが必要である。また、上空では実際の進入着陸時と異なり、STOL進入時に設定された進入角6度に沿って正確に進入パスを把握する手段がない。

そのために高空における模擬進入、低空模擬進入、そして実STOL着陸というステップバイステップで、安全を確認しながら飛行試験を進めるためにHUDが装備された。HUDには機体姿勢を表す模擬水平線とピッチ姿勢、方位角、バンク角表示の基本的な情報とともに、模擬滑走路と進入パス、模擬滑走路までの距離のほか、高度、速度、STOL機で重要な（迎角）及びその余裕等を表示して、操縦士が進入中安全に正確に6度のパスを把握できるように情報が表示される。

「飛鳥」には、飛行試験がSTOL進入着陸試験段階に入ってからP席（左コックピット）に装着された。進入パス（グライドパス）とコース表示はHUDの最適表示を研究するため図8.2.1～図8.2.3に示すように3種類（モードA、B、C）が設けられ、飛行中に随時コックピットで選択できるようにされた。当初の間は、STOL進入着陸時、HUDの表示が前方目標と重なって表示（緑色）されるため、前方目標（滑走路及びその周辺目標）の視界を維持する上でさまたげになり、わずらわしい感じがあった。ひとつの要因はSTOL進入そのものが、STOL着陸へ向けた一連の操縦で初めてのものであり、進入中のグライドパス（6度）の基準は着

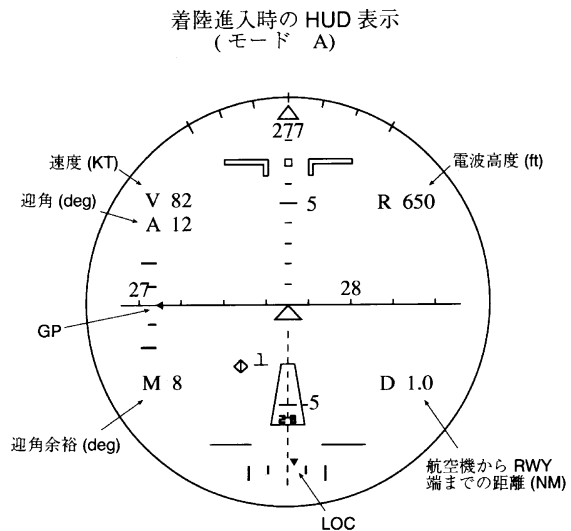


図 8.2.1 HUDの表示（モードA）

陸滑走路左側に設置されたPAPIにより行っているの
 で、研究用に装備されたHUD（信頼性が保証されたも
 のではない）について、その表示が正しいか、動きは
 どうか、の評価を同時に要求されていたためである。
 飛行試験の後半に入り、HUDの表示が精度よく、かつ、
 不具合発生等もなく、信頼性がでてくるに従い、
 HUDは飛行試験をステップバイステップで行い、安全
 に飛行試験を実施するうえで有効な表示装置となっ
 た。特に、STOL着陸の際は、HUD表示の速度ベクトル
 （航空機の進行方向を表示、横風がある場合は機首
 方向とは一致しない）と速度トリムベクトル（加速し
 つつあるか、減速しつつあるかを上下方向の矢印で表
 示）は非常に有効で、速度ベクトルはフレアーして接
 地直前の降下率制限の判定を容易にした。

(2) HUDによるSTOL進入着陸

HUDはコックピット左側のP席の前方に取付けてあ
 り、パイロットが正規のアイポジション（Eye Position）
 に着席した状態で、HUDの表示情報が全て視認でき
 るようになっている。

HUDに表示される情報は、航空機の姿勢、方位のほ
 か、高度、速度、迎角、迎角余裕、降下率、速度ベク
 トル、トリムベクトル、接地点からの距離、模擬滑走
 路、設定経路角、エイミングポイント等である。各モ

ードについて、モードAでは図8.2.1のように在来機と
 同様のグライドパス（GP）とローカライザー（LOC）
 表示が左側及び下方に示される。

モードBでは、図8.2.2のようにGPとLOCコースのず
 れを経路位置誤差として三角形（ Δ ）で表示してい
 る。

三角形の頂点は常に航空機の前方400mにあり、航空
 機とともに移動する。正規のパス上にいるときは一
 の如く一本の線として表示される。正規のパスよりも下
 にいるときは Δ 形となり、また、上にいるときは ∇ 形
 となって表示され、三角形の底辺が接地点を示してい
 る。また、コースの右側にいる場合は三角形の底辺が
 反対に左側にずれる。丁度コース上にいてパスがずれ
 ているときは二等辺三角形になる。

モードCは図8.2.3のようにHUDの正面上部にフライ
 トディレクタがあり、ピッチコマンド、ロールコマン
 ド、フライトパスコマンドを表示する。正規のパス上
 にいるときは一本の線で表示され、エアクラフトシン
 ボルと一致している。

結果的には経路位置誤差を三角形で表示するモードB
 がコントロールしやすく、多用されることになった。

HUDの表示情報は着陸進入中、前方の実滑走路と重
 なって表示され、飛行姿勢は表示されている実水平線
 からのピッチ姿勢が実角度で示される。従ってピッチ
 姿勢の1度の表示目盛が従来の姿勢指示器の表示に比
 べると3倍に拡大されているので微小なピッチ姿勢の
 変化も読み取れ（0.1度まで識別可能）、姿勢保持も精
 確にコントロールできる。

このことは進入角の保持に敏感に影響する速度の変
 化を最小限に保持することを可能にしている。あわせ
 てHUDの左上部に表示される速度表示（KTCAS）、迎
 角（度）及び左下部に表示される迎角余裕（度）の修

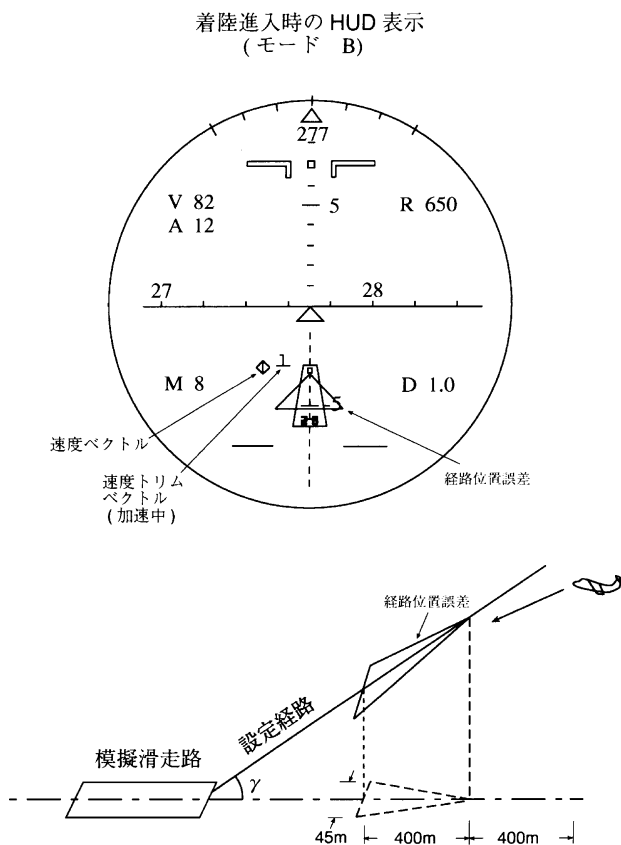


図8.2.2 HUDの表示（モードB）

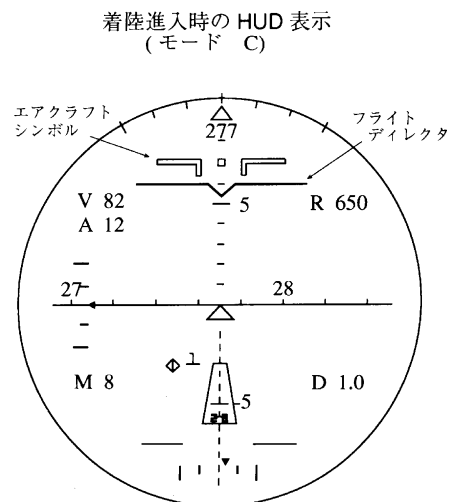


図8.2.3 HUDの表示（モードC）

正、保持を容易にしている。また、グライドパスについては設定経路角表示（ -6 度）に設定）が実R/W上のエイミングポイント（目標接地点）に一致するようにパスをコントロールすることにより所望のパスが保持される。

STOL進入着陸時に、HUDに地上のトラッキングレダによる航空機の位置情報をもとに表示されているパスはPAPIのパスとよく一致していた。

9. まとめ

STOL機の操縦において在来型航空機と最も異なるところは、進入着陸時のパスコントロールである。即ち進入角が在来型航空機の2倍の急角度であり、進入中に正確なパスを維持するためにパワーで調整していることである。また、フレアー高度から接地までの沈下率の調整もパワーを少し加えることによってパスを浅く調整し、接地制限内の安全な沈下率で着陸する。飛行試験の期間にSTOL着陸は121回行われた。この間にSTOL機操縦に関して得られた評価は下記のとおりである。

(1) STOL進入着陸時に、SCASのPCAとPCRのどちらが良いかについては、操縦士によって評価が分かれた。結果的には在来型航空機の操縦法と基本的に同じPCA方式のほうが、違和感がなく、自然な操縦法であるので、PCAを使用した。

PCR方式は、コラムの操舵力を0にしていると、ピッチ姿勢は一定に保持される利点があるが、操舵力が少しでも残っていると、それに応じてピッチ姿勢が変化していくので、ピッチ姿勢が所望の姿勢になったら、コラムに前後のプレッシャーをかけないように注意する必要がある。在来機の操縦に慣れた操縦士は、飛行中姿勢の変更や修正のとき、在来機の操縦法になりやすく、姿勢保持に混乱を招く恐れがある。今後の課題である。

(2) FPCレバーにより、正確に進入パスを保持することができる。経路制御モードの改善が行われた結果、進入中のFPCレバーの操作に対するパスの初期応答遅れがなくなり、パス・コントロールの精度は格段に改善された。

(3) 「飛鳥」のようにパワー操作によるピッチ変化が大きく、横安定の足りない航空機では、全エンジンが正常の場合はSCASなしでも進入着陸が可能と考える

が、特に1エンジンが故障した場合(OEI)に操縦士の対応に余裕がなくSCASの装備は必須である。

(4) PAPIによりSTOL進入を行ったが、正確な進入ができる。

PAPIは滑走路端を過ぎるころから見えなくなるが、以後の進入は滑走路及び周辺の外部視覚情報により進入して高度を判定し、フレアーして安全に着陸できる。

(5) 飛行試験の後半になって、HUDの取付による飛行情報の表示により、正確なピッチ姿勢と -6 度の進入角を、速度ベクトルによりFPCレバー操作に伴う予測のとコースを、また速度トリムベクトルによって増速/減速の方向と大きさを瞬時に把握できるので、正確な進入角度の維持とフレアー開始から接地までの沈下率を調整するうえで非常に有効であった。

(6) 進入時の速度が低速度であるために、風の影響を受け易く、ガストやタービュランスによってコースやパスが変化しやすいが、SCASエンゲージでは在来機と変わらない安定性と操縦性をもっている。

(7) 着陸進入時の前下方視界は、特にSTOL進入時にピッチ姿勢が高いと接地点が視認できない状況が起きる。最終形態ではピッチ姿勢が約5度になったので良好な視界が得られた。

(8) 実飛行の前にシミュレータでの検討や慣熟を行うことによって実飛行時のSTOL進入着陸時の手法を効率よく感得し、実際の着陸時に有効に活用することができた。

「飛鳥」は実験用航空機として終了したが、本格的な実用機が続いて出てくることを期待したい。

参考文献

1. STOL推進本部；低騒音STOL実験機の基本設計，航空宇宙技術研究所資料TM - 452，1981.12
2. STOLプロジェクト推進本部飛行試験室；低騒音STOL実験機「飛鳥」の飛行試験による着陸形態の検討，航空宇宙技術研究所報告TR - 1113，1991.5
3. STOLプロジェクト推進本部飛行試験室；低騒音STOL実験機「飛鳥」の経路角制御と着陸操縦性，航空宇宙技術研究所報告TR-1183，1992.11
4. 低騒音STOL実験機 - NAL式STOL - 1型(C-1QS) - フライトマニュアル，1989.3.31
5. 村上義隆他；STOL実験機用PAPIの設置と性能試験結果，航空宇宙技術研究所資料TM - 579，1988.1