

# 超音速旅客機

## (SST = Supersonic Transport)



みずの ひろし

水野 洋  
三菱重工株式会社(顧問)

### まえがき

これまでに実用化されたSSTは有名なコンコルドが唯一の例です。1976年の就航から2003年の退役まで、英国航空とエアフランスが四半世紀以上も運航を続け、安全で信頼性の高い超音速での航空輸送が可能なることを実証しました(図1)。1960年代初期のアナログ電算機と真空管の時代に操縦系統を電子・油圧自動制御としたり、燃料移送で無尾翼機の重心を調整するなど、当時の最新技術を駆使しましたが、機体は重く、燃費も劣り、十分な航続距離が確保できませんでした。またその後の空港騒音規制やソニックブームによる陸上超音速飛行の禁止などで路線が限定され、そのうえ燃料価格の高騰もあり1等の25%増という高運賃のため、広くは普及しませんでした。ここでは①コンコルドに代表される第1世代SSTの開発と運航、②超音速飛行の特徴と問題点、③次世代SSTの研究を紹介します。

### 第1世代SSTの開発と運航

#### コンコルドの開発

世界で初めて音速、即ちマッハ1(以後M=1と略記)

を超えたのは米軍の実験機で1947年のことでした。しかしSSTで先行したのは1952年に世界初のジェット旅客機コメットを就航させた英国でした。1954年に王立航空研究所で検討が始まり、数種の研究機による実験を経て、1961年にはプリストル社提案のM=2で110席の4発機案に絞られ、主翼平面形は細長い三角翼を発展させた、後のコンコルド(図2)に近い形状に到達していました。一方、フランスでも1957年に政府がメーカーの提案を募り、シュド社が1961年のパリ航空ショーで展示した模型は秘密だった英国案と酷似していました。両社の提案で1962年に英仏両政府は分担比率50:50での共同開発・生産協定に調印しました。それから15年、7倍に膨張した開発費、騒音規制や石油ショックなどの度重なる危機を乗り越えて、1976年の就航に漕ぎ着けたのは、この政府間協定に計画中止条項がなかったためと言われています。1969年に英仏双方で試作機が初飛行し、改修を重ねて1973年には量産型1号機が飛び、さらに3年の飛行試験を経て漸く1976年に型式証明を取得しました。量産型は1979年の製造中止までに16機生産され、エアフランスと英国航空に各7機が引渡されました。



図1 コンコルドの最終飛行(Wikipedia)

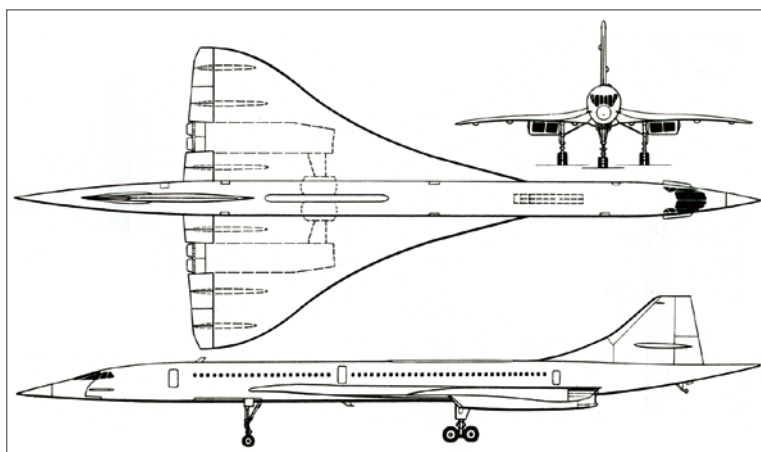


図2 コンコルドの三面図(Jane's年鑑)

## 米国のSST

米国を代表するパンアメリカン航空までがコンコルドを発注したため、航空機産業の優位を脅かされた米国は1963年に大統領がSST開発を表明しました。米国が民間旅客機開発に国費を投じたのは、後にも先にもこの時だけです。コンコルドをはるかに超える $M=2.7$ で250席の機体について、ボーイング社は離着陸時に主翼を左右に展開する極めて野心的な可変後退翼機(図3)を提案して機体主担当に選ばれましたが、問題点解決に手間取り通常の固定三角翼機に変更して1969年に漸く大統領の試作決定にたどり着きました。しかし、この頃になって次第に環境問題が人々の関心を集め、空港騒音やオゾン層損傷の危惧などからSSTは非難的にされ、1971年末の米議会でSST予算は否決されました。この間にボーイング社は一方で当時の長距離機707やDC-8の2倍にもなる350席の747を開発して1970年初より就航させていました。この機体はSST就航の暁には貨物機に転用すべく2階に操縦室を設けていましたが、航空会社もリスクの高いSSTより大型機による運賃低下で航空輸送の大衆化を図る方に傾いていました。

## ソ連のSST

1962年頃よりTu-144と呼ぶSSTの計画が始まっていたようで、1965年のパリ航空ショーに模型が展示され、コンコルドより僅かに早い1968年末に試作機が初飛行しました。量産型は機首部に引き込み式前翼を装備するなど大幅に改修され、1975年に貨物便が、1977年に旅客便がモスクワ～アルマータ間に就航しましたが、翌年には早くも理由不明のまま飛行を中止しました。試作機を含み17機が生産されました(図4)。

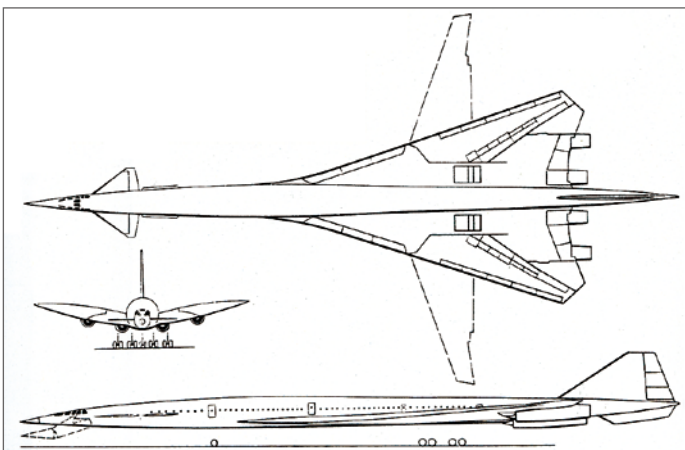


図3 ボーイングの可変後退翼機案 (Jane's年鑑)

## コンコルドの運航

1976年に英国航空はロンドン～バーレン～シンガポールとロンドン～バルパドス線に、エアフランスはパリ～ダカール～リオデジャネイロ線に就航させましたが、空港騒音規制の例外としてニューヨークとワシントンに就航が認められたのは1977年からでした。ただし、このとき既にソニックブームを理由に米領土内の超音速飛行は禁止されていたため太平洋方面には運航できませんでした。機材は両政府からの無償貸与でしたが、高運賃で運航が維持できるだけの収入が得られるのは米国路線だけで、他の路線はまもなく運休しました。同時多発テロによる需要の低迷、航空業界の世界的自由化による低運賃競争の激化、老朽化による整備費増大などで、2003年に両航空会社はコンコルドの退役を決めました。

## 超音速飛行の特徴と問題点

### 超音速飛行

亜音速飛行では表面で流れが剥離しない流線型の機体には、基本的に摩擦抵抗だけで圧力抵抗は働きません。但し、空気を押し下げて機体重量に等しい揚力を得る翼には誘導抵抗が生じます。これを小さくするには、できるだけ左右に広い縦横比の大きな翼にします。典型的な例はグライダーです。旅客機では構造重量との兼ね合いで縦横比は概ね8～10に抑えられます。その場合の機体の空力的特性を示す揚力:L(重量に等しい)と全抗力:Dの比、揚抗比(L/D)は概ね16～18で、重量の16～18分の1の推力で水平飛行できます。一方、超音速飛行では機首を頂点として後方に



図4 ソ連のSST, Tu-144 (Wikipedia)

広がる円錐面に、空気を圧縮して機体通過の余地を与える圧縮波（衝撃波とも呼ばれる）が形成されます。また機体に沿って空気が広がる流れでは膨張波が発生します。そのため機体には摩擦抵抗のほかに造波抵抗が働きます。これを抑制するには胴体は細く、翼は薄く、その先端や前縁は尖らせます。造波誘導抵抗の減少には揚力を得る主翼を前後に細長くするのが有利です。その結果はコンコルドのような縦細形状で、翼縦横比は1.82、L/Dは7.5前後となっています。

なお亜音速機でもM=0.8~0.9の高速で巡航する機体は局部的に超音速となり衝撃波が発生するので、抵抗増緩和のために主翼などには後退角をつけます。これが通常の亜音速ジェット機の形状で、これより低速のプロペラ機などは直線翼です。

また、超音速飛行では空気の断熱圧縮による空力加熱の問題があります。飛行高度11~20kmでの気温は-57℃ですが、最高温となる機首などの澱み点ではM=1で-14℃、M=2では+116℃となり、コンコルドでは耐熱アルミを使用し、熱膨張を考慮した構造になっています。米国がめざしたM=2.7のSSTでは+258℃にもなるので構

造はチタン合金でした。超音速飛行でのもう一つ厄介な現象はソニックブームです。機体が発生する衝撃波は余り減衰せずに地上に達し、ダダンと落雷のように聞こえます。それは重量や断面積の大きな機体ほど大きい音になります。

#### コンコルドの燃費

燃費は必要推力と飛行時間に比例しますが、前者はL/Dに、後者はMに反比例するので、燃費はM×(L/D)に反比例します。コンコルドはM=2、L/D=7.5で、競争相手の747-400がM=0.85、L/D=17なら、コンコルドの方が燃費は少ない可能性があります。その上、飛行時間が短いので乗員費は減り、年間飛行回数は増えて収入が増えます。これがSSTの狙いです。しかし、高速と空力加熱にも耐える構造のコンコルドの座席当りの自重は75%重く、高速のため推進効率が低いので推力当りの燃料消費率は巡航で85%高く、さらに離陸や上昇の推力増強にアフターバーナー（排気管内に燃料を追加噴射して点火する）を使用したので、実際の燃費は座席当たり3.5倍にもなりました。

#### 環境問題

航空輸送が発達し運航便数が急増した1960年代末から

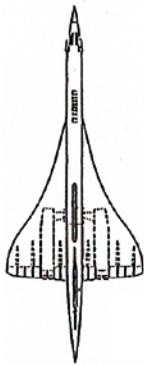
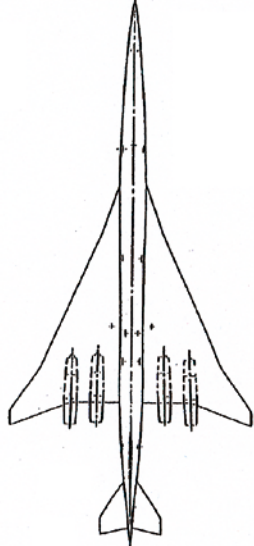

要目	コンコルド	次世代超音速旅客機	747-400
座席数	100	300	450
巡航マッハ数	2.05	2.20	0.85
航続距離（哩）	3,550	5,500	7,340
最大離陸重量（トン）	185	399	395
平面図 （同一縮尺）			

図5 次世代SSTの案(SJAC資料)

空港騒音の規制が始まりました。コンコルドのエンジンは超音速で推力を得るため排気速度が高く、さらに離陸でのアフターバーナー使用で、低騒音化は極めて困難でした。また巡航ではオゾン濃度が最も高い高度22kmに近づくので、排出するNOX（窒素酸化物）がオゾン層に悪影響を及ぼす恐れが指摘され、米SST開発中止の一因になりました。さらに1970年代になると米国はソニックブームのために領土上空での民間機の超音速飛行を禁止しました。

### 次世代SSTの研究

次世代SSTの研究は、米国では最初の計画が中止された直後の1970年代中期から、欧州や日本では1980年代後半から始められ、1990年代にはボーイング社の主導で日本の業界グループも加わった国際8社の共同研究に発展しました。テーマは機体の抵抗低減と軽量化およびエンジンの燃費低減による経済性の向上と環境問題への適合に尽きていました。

#### 機体仕様

巡航マッハ数について、米国は高価なチタン耐熱構造が必要な初期のM = 2.7から軽量耐熱複合材が利用でき、かつ東京～ロサンゼルスを1日2往復可能なM = 2.4まで下げましたが、欧州勢はコンコルドでの経験を利用できるM = 2.0付近を主張していました。座席数と航続距離について、747-400の450席、7340哩に経済的に対抗するにはコンコルドの100席、3550哩では不足で、250～300席で東京から米西海岸や北部欧州に到達できる5500哩が必要でした(図5)。この仕様をコンコルド時代の技術で実現すると離陸重量が700トンを超えますが、亜音速機と市場を争うには環境問題に適合した上で400トン以下にする必要があります。このため機体形状の工夫、構造や装備の軽量化、エンジンの改良が必要でした。なおSSTの構造や燃料の重量削減は機体全体の再設計で6～7倍の効果を生みます。

#### 新技術

主翼平面形では超音速性能改善と同時に空港騒音低減とソニックブームを避ける陸上での亜音速飛行を配慮して、超音速一辺倒のコンコルドとは大きく異なる、翼幅の広い



図6 JAXAの低抵抗SST実験機(JAXA提供)

クランクド・アローと呼ぶ形態が選ばれました(図5の中央)。これは離着陸滑走路長短縮にも有効です。軽量化では各種耐熱複合材とその大型一体構造や機首を折り曲げずに視界を確保する人工視界装置、低抵抗化では自然層流域の拡大や翼胴一体化による正面面積縮小、エンジンでは騒音規制を満たすための大型吸音装置や可変サイクルエンジン、さらにオゾン層への影響を避ける低NOX燃焼器などが研究されました。これ等の研究が実用化できれば、座席当りの燃費は亜音速機の2倍程度に抑えられると考えられました。

#### おわりに

ボーイングは1997年に経営方針を転換して自己資金による大規模なSST研究から手を引き、欧州勢も超大型機A380開発で余裕を失い、前述の国際共同研究の枠組は消滅しました。また最近の更なる原油価格の高騰と地球温暖化対策としての炭酸ガス排出抑制はSST開発に対する逆風となり、現在世界では近々の実現をめざした研究はされていません。しかし、航空輸送における高速化の要求は普遍的で、有用なSSTの実現は東海道新幹線の例を見るまでもなく、航空輸送の更なる飛躍の発展をもたらすことは確実で、そのため各国で地道な研究が継続されています。日本でもJAXA(日本宇宙航空研究開発機構)が2005年の低抵抗SSTの実験(図6)に続き、無人機による低ブーム機体形状の実験を計画しています。[RRR]

#### 文献

久世紳二, 旅客機の開発史, 日本航空技術協会出版, 2007