

第1章

序論

1-1 近年の航空機開発における動向

現在世界では多種多様な航空機が開発されている¹。これは利用者ニーズの多様化を意味している。航空機メーカーはニーズを的確に分析して市場を差別化し、分析結果をもとに供給する新たな製品計画を立てる。同時に有利な販売経路を選び、販売促進努力を重ねることで需要の増加及び新たな市場開発を図ることになる。これら企業活動は航空機メーカーに限るものではなく、他業種での企業活動と全く同じだということを改めて認識させられる。

では航空業界における市場の差別化とはどのようにして行うものなのか。その答えは、現在開発され市場に投入されていく航空機の種類や特徴から判断することができる。航空機製造のトップメーカーであるアメリカBOEING社²とヨーロッパAIRBUS社³、この両社の開発する航空機に注目すると市場をどのようにして差別化しているか明確になってくる。例えば、BOEING社が2008年就航を予定している787型機、それに対抗してAIRBUS社が2010年就航を目指すA350型機は共に“経済性の向上”を特徴に市場を差別化し、その市場の中で競争を繰り広げている。またAIRBUS社が2007年就航予定としているA380型機、それに対抗してBOEING社が開発している747-8型機は共に“輸送力の増加”を特徴とした市場の差別化を行い、その中で自社製品のシェア拡大につとめているわけである。市場情勢を睨んだ生き残りをかけた航空機開発がなされており、そこには明確な市場の差別化が見取れる。

他に“柔軟性”という差別化も存在する。BOMBARDIER社⁴に代表されるリージョナルジェット機は通常の大規模旅客機に比べ、効率良く柔軟に目的地に到達することができる。小型旅客機という利点を最大に活かした差別化であり、今後の航空予測においてもハブ&スポーク型ではニーズに対応できない都市間の移動に大きく役立つものと考えられる¹。

しかし例に挙げた“経済性の向上”あるいは“輸送力の増加”といったある程度成熟した技術では、今後明確な差別化を続けることは難しい。特にトップメーカーではなく市場への参入を試みるメーカーにとっては、差別化できる航空機を開発すること自体が困難であるといえる。日本を始め新たな航空機メーカーが進出するためには、高い技術力が必要な上に市場の差別化をいかにうまく行うかが益々大きな課題となるであろう。

1-2 新たなニッチ

航空市場の差別化は、航空市場における“ニッチ”の探索と大きく関係している⁵。“ニッチ (niche)”とは、もとは像や花瓶などを置く壁のくぼみのことを意味し、そこから派生して

“最適な場所” という意味を持つようになった。ニッチは特定の用途や目的に特化したものであり、一般企業にとってはニッチを探し当てることは自社の得意市場の獲得を意味するわけである。またそのニッチが市場の主流になることもあり得る。ニッチは所詮ニッチであるが、その割にニーズが高いものが必ずあり、航空機市場においても新たなニッチを探り、市場を差別化していく必要がある。

航空市場に残されたニッチとは何か。その1つと考えられるのが“高速化”により差別化される市場である。2003年超音速旅客機Concorde⁶ (Fig. 1.1) が営業飛行を終え、超音速旅客機が運航していない状況が続いている。超音速旅客機が実現すれば、長距離路線の利用者は最大の苦痛である長時間飛行から解放され、また時間価値の増大に伴う時間短縮による誘発効果は巨大な市場を創造し、今後予測される航空輸送需要のさらなる増大にも十分対応できると考えられる。しかし現在このニッチにあてはまる航空機は就航しておらず、非常に魅力ある市場が残されているといえる。



Fig. 1.1 超音速旅客機 Concorde⁶

1-3 超音速旅客機開発の背景

超音速旅客機 (SST) 開発の歴史は古い。1969年に初飛行を成功させた Concorde は、イギリス・フランスの共同開発による世界初の超音速旅客機であった。その飛行速度はマッハ数 2.0 と現在主流となる遷音速旅客機の約 2 倍以上である^{7,8}。当時の時間価値からしても Concorde の就航機数は順調に増加するものと思われた。しかし先に運航が開始されていたアメリカ BOEING 社の 747 型機の影響や、1970 年代の 2 度にわたり起るオイルショックの影響を受け、航空会社からキャンセルが相次いだ。また運航を開始した後も Concorde の経済性の悪さや、ソニックブームによる騒音問題等が問題視され、就航機数はほとんど増加しなかった。

2000年7月25日 AIR FRANCE 機がパリのシャルル・ド・ゴール空港を離陸直後に墜落・炎上し、地上で巻き込まれた犠牲者を含め 114 人が死亡するという大惨事が発生した⁹。この事故を機に Concorde の老朽化が指摘され、2003年10月24日に最後の営業飛行を終え、後継機の登場を待たずに超音速旅客機は姿を消した。

超音速旅客機 Concorde は商業的に成功したとはいいがたい。しかし航空史がようやく 100 年を越えた現在、その内 30 年間もの間超音速飛行を続けてきたことは賞賛すべき偉業である。また 30 年間に及ぶ飛行から、今後超音速旅客機を開発するにあたり十分な知識と技術を我々に与えてくれた。この事実は、近い将来超音速旅客機が実現することを期待させるものである。

Concorde が就航を終えた後も主流となっている遷音速旅客機とスピードによる差別化を試みるため、新たな超音速旅客機の研究・開発は行われている。2003 年 BOEING 社は音速旅客機ソニッククルーザーの開発に着手し、巡航マッハ数 0.95~0.98 というスピードの差別化を試みた。しかし現在この計画は凍結されたままとなっている。

欧州では Concorde の後継機となる超音速旅客機の開発への動きが活発になってきている。2005 年 6 月に仏航空宇宙工業会 (GIFAS) と日本航空宇宙工業会 (SJAC) が超音速旅客機の共同研究で合意した¹⁰。今後 3 年間に機体仕様・耐熱複合材・エンジン騒音対策等について研究を行っていく。またビジネス用としてマッハ数 1.6~1.8 で 10 人乗り程度の小型超音速旅客機 (SSBJ) の開発も欧米で共に盛んに行われている¹¹⁻¹³。

このような超音速機実現へ向けた世界動向は、高速化による航空市場のニッチの存在を明示しており、また開拓されるであろう新たな市場の魅力を示すものである。その一方で、未だ超音速旅客機が実現していない背景には克服すべき技術的課題があり、我々はその解決策の構築に挑戦していく必要がある。

1-4 技術的な課題

新たな超音速旅客機を実現させるためには、克服すべき 3 つの課題が考えられる。まず環境適合性を考慮したエンジン開発、次に燃費・運航費・保守費等を含む経済性の向上、最後にソニックブーム¹⁴による騒音問題の克服である。とりわけソニックブームによる騒音問題は超音速旅客機実現へのボトルネックであり、約 30 年にわたり運航していた Concorde もこの問題に苦しみ、居住地である陸上付近沿岸から 35 海里までは亜音速での飛行に制限された。“高速化”を売りにした超音速飛行機であったが、実際に超音速が可能である区域は非常に限られたものとなってしまった⁹。Fig. 1.2 はソニックブームの影響範囲を図式的に表しており、地上の広範囲にブームが広がる様子がわかる¹⁵。また Fig. 1.3 には実際のロンドン、パリへの飛行経路を示しており、白い帯状部分はソニックブームがカーペット状におよぶ範囲を示している。このようにソニックブームは非常に広範囲に及ぶ現象であり、その騒音問題はスウェーデンの航空学研究所教授のポー・ルンドベルグ教授により超音速飛行批判の目玉にされるようになった。ニッチの存在がすでに認識されているにもかかわらず、未だ Concorde に次ぐ新たな超音速旅客機が実現していない原因は、ソニックブーム問題が解決できずにいるからであるといえる。

ソニックブームによる騒音問題は超音速機に固有の問題である^{16, 17}。ソニックブームとは

超音速で飛行する航空機の各部から発生した衝撃波が、大気中を伝播する間に整理統合され、地上において Fig. 1.4 のようにN波として観測され、その急激な圧力変動に伴って2つの強い爆発音が起る現象である。地上で観測されるソニックブームの強度は一般に Fig. 1.5 のようにN波の立ち上がりの最大圧力上昇量 (Peak pressure level) と立ち上がり時間 (Rise time), 持続時間 (Duration time) などによって評価される。超音速旅客機 Concorde のソニックブーム強度は、最大圧力上昇量でおよそ2~3 psf¹⁸ (psf=lb/ft²) であり、その音は近くで起る落雷に相当するといわれており、新たな超音速旅客機実現の際にはソニックブーム強度を0.3 psf 以下に抑えることが必要とされている¹⁹。

現在ソニックブーム低減の基本的な考え方のひとつに、機首を鈍頭にして強い衝撃波を発生させる方法が考えられる^{14, 20}。先端の鋭い飛行機では発生する衝撃波は弱いですが、衝撃波の合併により遠方場でより強い衝撃波を生ずることになる。これに対して先端の鈍い飛行機では衝撃波に続く膨張波との干渉により、遠方場では減衰によって衝撃波は弱まることになる。これにより地上で観測される圧力波形を一般のN波ではなく、Fig. 1.6 のような低ブームと呼ばれる波形にすることができる。同様に機体形状を最適化することで低ブーム波形を実現する研究も行われている²¹。

また欧米では小型の超音速ビジネスジェット (SSBJ) の実現を目指し研究開発が行われている。これは機体自体を小型化させることで発生する衝撃波の規模を小さくし、ソニックブームの低減を図るものである。ソニックブーム問題の現段階での回避策としては妥当だが、そのまま Concorde クラスの大型超音速旅客機にスケールアップ可能な技術ではなく、騒音問題の抜本的な解決方法は確立されていないといえる。言い換えれば、もしソニックブームの解決法が構築できれば、超音速旅客機実現の扉を開くことになるわけである。

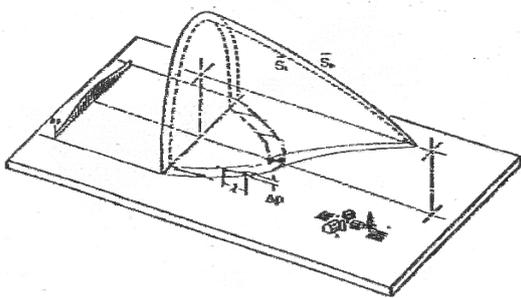


Fig. 1.2 ソニックブームの影響範囲¹⁵

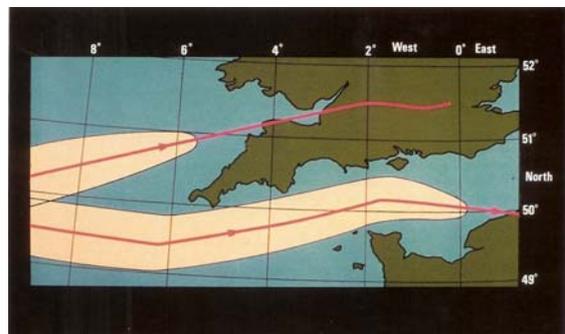


Fig. 1.3 Concorde 飛行経路⁹

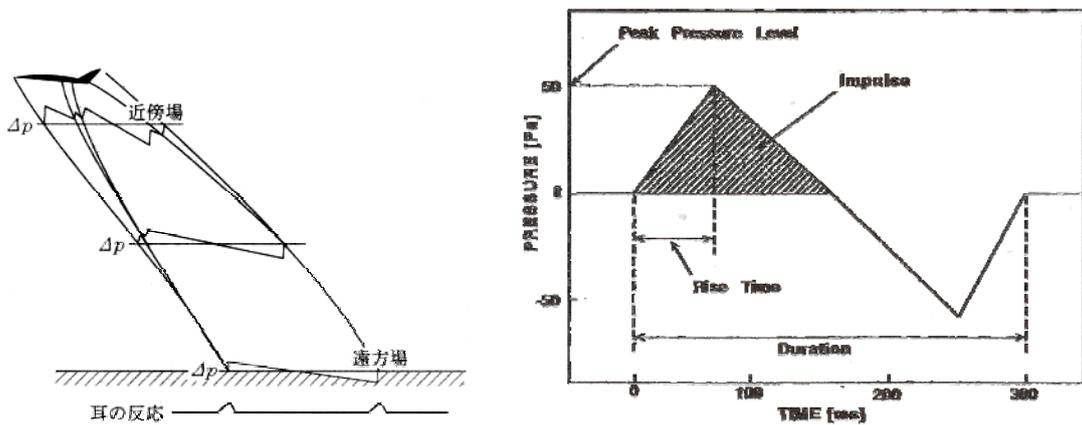


Fig. 1.4 伝播にともなう圧力波形の変化¹⁴ (左図)

Fig. 1.5 N型圧力波形¹⁶ (右図)

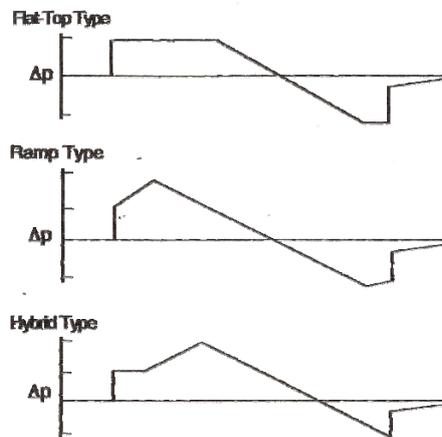


Fig. 1.6 低ブーム圧力波形¹⁶

1-5 複葉翼というコンセプト

本研究は複葉翼を用いて衝撃波を相殺し、地上に到達するソニックブームを根本的に削減するという、全く新しい超音速飛行における騒音問題の解決法を提案するものである^{22, 23}. このコンセプトは超音速における薄翼理論²⁴に基づく二枚平板とBusemann複葉翼のメリットを活かし、超音速飛行におけるソニックブームを削減するというものである。

超音速飛行におけるソニックブーム低減法として、例えば Darden の方法^{18, 25}を用いた低ブーム設計法がある。この方法は、F 関数²⁶をいくつかのパラメータを用いて表し、目標とする圧力波形を実現する様にそれらのパラメータを決定することで、その F 関数に対応する等価軸対称物体を求める方法である。これにより最適等価断面積分布を超音速機体に適用し、低ブーム最適分布に近づけるわけである。これは地上に到達する強い圧力波形である N 波形を崩していくことでソニックブームを低減するという手法である。しかし現在のところ同時に機体サイズも小さくしない限り、人に不快感を与えない基準値である 0.3 psf 以下は実現で

きていない。本研究は地上に到達する波形を最適低ブーム波形へ変形させることで低ブームを実現するのではなく、根本的に超音速で発生する衝撃波を削減することで、低ブームを実現する。

1-6 本研究の目的

本研究では Busemann 複葉翼型を中心に、超音速流中での 2 次元および 3 次元流れにおける二枚翼衝撃波干渉の様子を明らかにする。その結果から複葉翼を用いたソニックブーム低減の可能性及び二枚翼特有の空力現象について考察する。また、これらの結果については実験により詳細な検証も行われた。第 2 章では波形パラメータ法^{27, 28}を用いたソニックブーム評価も行っている。ソニックブームの地上圧力波形を求める方法として、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析から近傍場圧力波形を求め、短時間でブームを推算する方法が構築されており^{29, 30}、本研究ではその方法を用いた。また二枚翼については基本的な空力特性の確認を行っている。CFD 解析は独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発した UPACS コード³¹、および非構造格子ソルバーの TAS-flow solver^{32, 33} (Tohoku university Aerodynamics Simulation code-flow solver) を用いた。

1-7 本報告書の構成

本研究課題の研究においては、いくつかの世界的に誇れる成果が得られている。しかし、それらを総じて記述するにはかなりのページ数を必要とするため、第 1 章から第 7 章に本研究課題において開発された根幹要素を簡単にまとめ、詳細な内容については主要な発表論文を添付することで代用することとした。

以下に本報告書の構成を記す。第 2 章では超音速旅客機実現のボトルネックとなっているソニックブーム低減法として、複葉翼理論を提案する。複葉翼を用いたソニックブーム低減のコンセプトは、2 次元超音速流れにおける薄翼理論により得られる二枚平板の衝撃波低減効果、また Busemann 複葉翼を用いた衝撃波干渉効果を合わせることで、発生する衝撃波自体を削減しソニックブームを低減させるというものである。得られた結果から、複葉翼によるソニックブーム低減は可能であることを実証している。第 3 章では Busemann 複葉翼の空力特性を CFD 解析から得ている。低ブーム二枚翼型の設計を行っていく上で基本的特性の把握は重要である。また Busemann 複葉翼には、その形状特有の問題といえるチョーク現象が存在するため、様々なマッハ数に対して解析を行い、詳細に考察している。チョーク現象回避方法は今後の研究課題ではあるが、回避方法のコンセプトについてはいくつか方法を言及している。第 4 章および第 5 章では、より現実的機体設計に取り組むため、逆設計法を用いた二枚翼型の設計、また 3 次元効果を検討するため二枚翼の空力設計にも取り組んでいる。また、第 6 章および第 7 章では実験的研究結果を報告し、とくに第 6 章では計算結果との比較・検討を行っている。

参考文献:

- [1] <http://www.jadc.or.jp/jadcfct.htm> “平成 16 年度超高効率民間輸送機に関する調査研究 (平成 17 年 3 月),” 財団法人日本航空機開発協会, 2005.
- [2] The BOEING Company, <http://www.boeing.com/>
- [3] The AIRBUS Company, <http://www.airbus.com/en/>
- [4] The BOMBARDIER Corporation, <http://www.bombardier.com/index.jsp>
- [5] 大林茂, “市場競争力に基づく新しい航空機設計法の研究,” 科学研究費研究成果報告書, 平成 14 年 3 月.
- [6] <http://www.concordesst.com/bafleet.html> Adrian Meredith, British Airways Picture.
- [7] 吉田憲司, “超音速旅客機の空力形状に関する要素研究について,” 日本航空宇宙学会誌, 第 42 巻 第 486 号, 1994 年 7 月.
- [8] Rech, J. and Leyman, C. S., “A Case Study by Aerospatiale and British Aerospace on the Concorde,” AIAA Professional Study series.
- [9] Brian, Trubshaw, Concorde the Inside Story, Sutton Publishing Limited, 2000.
- [10] “日仏航空機産業による超音速旅客機に関する共同研究について,” 経済産業省 News Release, 平成 17 年 6 月 14 日.
- [11] David, C., Aronstein and kurt, L., Schueler, “Two supersonic Business Aircraft Conceptual Designs, With and Without Sonic Boom Constraint,” *Journal of Aircraft*, Vol. 42, No. 3, May-June, 2005, pp. 775-786.
- [12] Preston, A., Henne, “Case for Small Supersonic Civil Aircraft,” *Journal of Aircraft*, Vol. 42, No. 3, May-June, 2005. pp.765-774.
- [13] I. Kroo, “Unconventional Configurations for Efficient Supersonic Flight,” *VKI lecture series on Innovation Configurations and Advanced Concepts for Future Civil Aircraft*, June 6-10, 2005.
- [14] 牧野光雄, ソニックブーム その現象と理論, 産業図書, 東京, 2000 年.
- [15] Glass, I., I., *Shock Waves and Man* (高木和喜訳), 丸善, 1987.
- [16] 牧野好和, 青山剛史, 岩宮敏幸, 綿貫忠晴, 久保田弘敏, “低ソニックブーム圧力波形実現のための空力設計法に関する研究,” 航空宇宙技術研究所報告 TR-1406, 2000.
- [17] 吉田憲司, “ソニック・ブームの低減技術,” 乗り物まわりの流れと騒音講習会, 1994.
- [18] 牧野好和, 杉浦貴明, 綿貫忠晴, 久保田弘敏, 青山剛史, “近傍場におけるソニックブームの数値推算,” 第 14 回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, 航空宇宙技術研究所特別資料, SP-34, 1997, pp. 263-268.
- [19] <http://www.ifs.tohoku.ac.jp/edge/SSF.htm>, 大林茂, “サイレント超音速飛行実現のための実験・計算融合研究”

- [20] Sasaki, D., Yang, G., and Obatashi, S., “Automated Aerodynamic Optimization System for SST Wing-Body Configuration,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.46, No.154, February 2004, pp.230-237.
- [21] Sasaki, D. “Adaptive Range Multi-Objective Genetic Algorithms for Aerodynamic Design problems,” ph. D Dissertation, Department of System Information Sciences, University of Tohoku, Japan, March 2004.
- [22] Kusunose, K., “A New Concept in the Development of Boomless Supersonic Transport,” First International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, November 2004.
- [23] Kusunose, K., Matsushima, K., Goto, Y., Yamashita, H., Yonezawa, M., Maruyama, D. and Nakano, T., “A Fundamental study for the Development of Boomless Supersonic Transport Aircraft,” AIAA Paper 2006-0654, January 2006.
- [24] Liepmann, H. W., and Roshko, A., *Elements of Gas Dynamics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1957, pp.107-123, pp.389.
- [25] Darden, C., M., “Sonic-Boom Minimization with Nose-Bluntness Relaxation,” NASA TP-1348, 1979.
- [26] Whitham, G. B., “The Flow Pattern of a Supersonic Projectile,” *Communication on Pure and Applied Mathematics*, Vol. 5, No. 3, pp. 301-348, 1952.
- [27] Thomas, C. L., “Extrapolation of Wind-Tunnel Sonic Boom Signatures without Use of Whitham F-function,” NASA SP-255, pp. 205-217, 1970.
- [28] Thomas, C. L., “Extrapolation of Sonic Boom Pressure Signatures by the Waveform Parameter Method,” NASA TN D-6832, June 1972.
- [29] Makino, Y., Suzuki, K., Noguchi, M., and Yoshida, K., “Nonaxisymmetrical Fuselage Shape Modification for Drag Reduction of Low-Sonic-Boom Airplane,” *AIAA Journal*, Vol.41, No.8, 2003, pp.1413-1420.
- [30] 山下博, “超音速飛行融合研究に向けたソニックブーム計算法の構築,” 東北大学卒業論文 2004.
- [31] Takaki, R., Yamamoto, K., Yamane, T., Enomoto, S. and Mukai, J., “The Development of the UPACS CFD Environment,” *High Performance Computing, Proc. of ISHPC 2003*, Springer, pp.307-319, 2003.
- [32] Ito, Y., and Nakahashi, K., “Surface Triangulation for Polygonal Models Based on CAD Data,” *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.39, Issue 1, May 2002, pp.75-99.
- [33] Nakahashi, K., Ito, Y. and Togashi, F., “Some Challenge of Realistic Flow Simulations by Unstructured Grid CFD,” *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 43, 2003, pp.769-783.