- 17) Jones, R. T.: The Minimum Drag of Thin Wings in Frictionless Flow, *J. Aero. Sci.*, **18** (1951), pp. 75-81.
- 18) Ginzler, I. and Multhopp, H.: Wings with Minimum Drag Due to Lift in Supersonic Flow, *J. Aero. Sci.*, **27** (1960), p. 13.
- 19) Kogan, M. N.: On Bodies of Minimum Drag in a Supersonic Gas Stream, *Prikl. Mat. Mekhan.* **XXI**, No. 2 (1957), pp. 207-212.
- 20) Heaslet, M. A. and Fuller, F. B.: Drag Minimization for Wings and Bodies in Supersonic Flow, NACA Report 1385 (1958).
- 21) Sears, W. R.: On Projectiles of Minimum Drag, *Quart. Appl. Math.*, **4** (1947), pp. 361-366.
- 22) Haack, W.: Geschussformen Kleinsten Wellenwiderstandes, Lilienthal-Gesellschaft, Bericht 139, 1947.
- 23) Lomax, H. and Heaslet, M.: Recent Development in the Theory of Wing-Body Wave Drag, *J. Aero. Sci.*, **23** (1956), pp. 1061-1074.
- 24) Bonner, E.: Expanding Role of Potential Theory in Supersonic Aircraft Design, *J. Aircraft*, **8** (1971), pp. 347-353.
- 25) Wood, R. M. and Miller, D. S.: Impact of Airfoil Profile on the Supersonic Aerodynamics of Delta Wings, *J. Aircraft*, **23** (1986), pp. 695-702.
- 26) Mann, M. J. and Carlson, H. W.: Aerodynamic Design of Supersonic Cruise Wings with a Calibrated Linearized Theory, *J. Aircraft*, **31** (1994), pp. 35-41.
- 27) Kulfan, R. M. and Sigalla, A.: Real Flow Limitations in Supersonic Airplane Design, *AIAA Paper* 78-147 (1978).
- 28) Jameson, A. and Alonso, J. J.: Automatic Aero-Dynamic Optimization on Distributed Memory Architectures, *AIAA-96-0409* (1996).
- 29) Reuther, J., Jameson, A., Farmer, J., Martinelli, M. and Saunders, D.: Aerodynamic Shape Optimization of Complex Aircraft Configurations via an Adjoint Formulation, *AIAA 96-0094* (1994).
- 30) Burgreen, G. W. and Batsal, O.: Aerodynamic Shape Optimization Using Preconditioned Conjugate Gradient Methods, *AIAA J.*, **32** (1994), pp. 2145-2152.

なお、以上のほかに抵抗低減および革新航空機に関する文献は膨大な数に上る。次のレビューは多くの論文のリストを含んでおり、参考になるであろう。

- A) Bushnell, D.: Supersonic Aircraft Drag Reduction, *AIAA 90-1596* (1990).
- B) NATO: Aircraft Drag Prediction and Reduction, *AGARD Report No. 723* (1985).
- C) Bushnell, D. M. and Hefner, J. N., ed.: Viscous Drag Reduction in Boundary Layers, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 123, *AIAA* (1990).

一 特 集

航空機における空力的諸問題について*1

(回転翼機を中心に)

中 館 正 顯*2

Key Words : Aerodynamics, Aircraft, Helicopters

著 者 紹 介

中館 正顯 (正会員)

昭和24年生。青森県出身。昭和52年東京大学大学院工学系研究科航空学修士課程修了。同年富士重工業(株)に入社。現在、航空宇宙事業本部宇都宮製作所第1技術部所属。固定翼航空機の空力設計・開発を経て回転翼航空機の空力設計に従事。AHS会員。

1. は じ め に

ヘリコプタを代表とする回転翼航空機の開発においては、これまでに、設計上の問題が数多く発生している。空力関連に限定しても、好ましくない飛行性や性能の未達等が初飛行後に明らかになり、大きな設計変更に至っているケースが少なくない。これらの設計変更の多くは、精度のよい解析と十分な風洞試験やシミュレータ試験を実施していれば避けられた可能性がある。

本稿では、外国における空力上の諸問題の例を紹介し、分析し、開発リスク低減の観点から何が必要とされているのか、私見を交えて述べる。

*1 平成8年4月9日、日本航空宇宙学会第27期年会講演会にて発表。平成8年9月2日原稿受理 Aerodynamic Problems in Aircraft

*2 富士重工業株式会社航空宇宙事業本部 Masaaki NAKADATE

2. 開発における空力的諸問題

第1表に、飛行試験段階で判明した、ヘリコプタの飛行性に関わる問題の例を示す。メイン・ローターと機体の尾部の空力干渉に起因するものについてまとめたものである。半数以上の機種で、固定翼機では地上滑走中に通過してしまう、低速域の問題が発生しているのが特徴である。非常に多くの機体が問題に直面しており、特性改善のために多大な費用と時間を必要とする設計変更や改修を行っている。

このような問題の原因として考えられる空力的メカニズムの複雑さについてシングルローター・ヘリコプタを例に説明しておく。ヘリコプタ周りの流れ場は、揚力と推力の発生を兼ねるメイン・ローターのダウンウォッシュ、固定翼機に比べ太く短い胴体やナセルの

後流（ダウンウォッシュ、サイドウォッシュ、剥離渦）とテール・ローター、垂直尾翼、水平尾翼、テール・ブーム等が複雑に干渉している。しかも、メイン・ローターやテール・ローターの回転に伴う旋回流、周期的に発生する翼端渦による非定常の影響が、流れ場を一層複雑にしている。

第1図はAH-64の設計変更とその効果を示すものである。変更後は水平尾翼とメイン・ローター、テール・ローターの空力干渉が改善されて、横進時のペダルの小刻みな操舵が大幅に減少している。第2図は、第3図に示す空力的なメカニズムで発生するCH-53Eのフレア（引き起こし）時のピッチアップを抑える設計変更である。フレア時に、メイン・ローターのダウンウォッシュを受けにくい位置に水平尾翼の取り付けを変更するとともに、右舷のみとして面積を減らし

第1表 飛行試験において発生した飛行性の問題¹⁾

Rotorcraft	Flight Test Problem	Empennage	Reference
YUH-61 A	Yaw "Kicks", Lateral Control	Modified	P. F. Sheridan, R. P. Smith (1979) ref. 2 C. C. Crawford (1990) ref. 3
SA-365 N	Yaw "Kicks", Tail Shake (High Speed Descend)	Unchanged (Pylon Fairing and Hub Cap)	P. Roesch (1980) ref. 4
BK-117	Tail Shake (High Speed Descend)	Modified	H. Huber, T. Masue (1981) ref. 5
AH-64	Low Speed Control, High Speed Pitch-Up	Redesign	C. C. Crawford (1990) ref. 3 R. W. Prouty (1989) ref. 6 C. C. Crawford (1987) ref. 7
YAH-63	Flying Qualities, Lateral Control	Modified	C. C. Crawford (1990) ref. 3
UH-60 A	Tail Shake, Lateral Control Low Speed Pitch-Up	Redesign	C. C. Crawford (1987) ref. 7 K. C. Hansen (1989) ref. 8 R. W. Prouty (1989) ref. 9
CH-53 E	Low Speed Pitch-Up, Pitch-Sideslip Coupling	Redesign	K. C. Hansen (1989) ref. 8 R. W. Prouty (1989) ref. 9
S-76 A/B	Low Speed Pitch-Up, Pitch-Sideslip Coupling	Redesign	K. C. Hansen (1989) ref. 8 R. W. Prouty (1989) ref. 10
EH-101	Low Speed Pitch-Up, "Shuffle"	Redesign	K. J. M. Lenorvitz (1990) ref. 11 C. B. Paggi (1990) ref. 12 R. W. Prouty (1994) ref. 13

第1図 水平尾翼の設計変更⁶⁾—AH-64—

第2図 水平尾翼の設計変更⁹⁾—CH-53E— 第3図 ピッチアップの空力的メカニズム⁹⁾ 第4図 飛行試験で明らかになった性能未達 (ホバリングのパワー余裕不足)⁹⁾

ダウンウォッシュによる影響の減少を図っている。

第4図は、性能に関する問題の例である。必要パワーの過小見積りによってホバリングにおけるパワー余裕が不足するという、性能の未達も多くの機種で発生している。

飛行性と性能、いずれの問題も、初期設計段階で十

分な空力解析や風洞試験を実施していれば未然に防げたケースも少なくないと指摘されている。

3. 風洞試験—今後の開発に何が必要か

風洞試験の今後を論ずるに先立ち、これまでの風洞試験を概観する。第5図に示すように、ヘリコプタの

第5図 開発における風洞試験時間の比較³⁾第2表 風洞試験時間の内訳³⁾

	YUH-60	YUH-61	YUH-63	YUH-64
PRE-FIRST-FLIGHT				
Airfoil Sections	130	IR&D	84	514
Airvehicle	500	2278	293	432
Full Scale T/R	—	55	50	—
Subtotal	630	2333	425	946
POST-FIRST-FLIGHT				
Airfoil Sections	—	—	96	—
Airvehicle	1470	1615	321	886
Full Scale T/R	160	97	24	—
Subtotal	1630	1712	451	886
PRODUCTION	455	N/A	N/A	623
GRAND TOTAL	2715	4045	876	1832

注：下線の合計値は計算が合わないが、差が小さいので出典のまま示す。

開発における風洞占有総時間数は固定翼軍用機の5千～2万時間、固定翼民間旅客機の1万～3万時間に比べ、最長のボーイング360でも5千時間程度と、流れ場の複雑さにも拘わらず少ない結果になっている。図には省略されているが、ティルト・ローター機のV-22は1万時間である。更に第2表からわかるように、UH-60（YUH-60）では3/4以上、AH-64（YAH-64）でも半分程度の試験が、初飛行後の改善対策のために費やされており、YUH-61を除き初期設計段階での時間は極端に少ない。風洞試験を重視しなかったことが遠因となって、前章で述べた問題が発生していると言うことができる。

ここで、風洞試験の時間が短くなっている原因の一つと考えられる、試験の難しさについても説明しておく。ヘリコプタの風洞試験、中でも回転ローター付の試験でローターの性能取得が可能なものの場合、模型

製作や計測精度の観点から、最低でも計測部の高さと幅が3～4m以上の風洞において、100馬力級のモーターで直径2～3m以上のローターを駆動するという大規模なものとなる。模型や試験装置の振動によって、試験領域が制限されることもある難しい試験ではあるが、試験技術自体は確立している。ヘリコプタの各種風洞試験については、文献15)を参照されたい。

もう1つ近年の例を紹介し、風洞試験の課題を抽出する。第6図は、ユーロコプター社のタイガー攻撃ヘリコプタの水平尾翼設計変更である。同ヘリコプタは回転ローター付の風洞試験を実施したにも拘わらず、このような問題が発生しているの、その原因を定量的に検討する。ヘリコプタの飛行を模擬するには、回転ローター付の風洞試験において、風洞風速とメイン・ローターのダウンウォッシュ速度の比を実機と一致させる必要がある。ホバリング及び十分速度が低い飛行においてメイン・ローター回転面を通過するダウンウォッシュ速度 v は、

$$v \approx \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} = \sqrt{\frac{\rho A V_{tip}^2 C_T}{2\rho A}} = V_{tip} \sqrt{\frac{C_T}{2}}$$

但し、 T ：メイン・ローター推力
 V_{tip} ：メイン・ローター翼端速度
 A ：メイン・ローター円盤面積
 ρ ：大気密度
 C_T ：メイン・ローター推力係数
 $(= T/(\rho A V_{tip}^2))$

低速域を模擬する場合でも、計測精度、風洞気流の安定性等の観点から風洞風速を極端に下げることにはできないので、ダウンウォッシュ速度を大きくする必要がある。しかし、上式において、実機で0.6～0.7マッハの V_{tip} を更に大きくするのは圧縮性の影響を考えると現実的ではない。また、推力係数については平方

根でしか効かないので、ソリディティ（ブレード面積とローター円盤面積の比）を大きくして推力増大を図っても効果には限界がある。従って、ホバリングから10~20 kt (約5~10 m/s) 程度の低速を模擬するためには、

- ・低速域の風洞風速安定化、天秤計測精度の向上（試験装置、模型の軽量化も必要）
- ・高 C_T 域での試験を可能にする（試験装置の重量増を抑えつつ駆動パワーを増大する）

等、まだ克服すべき課題が少なくない。

結論として、今後の開発におけるリスク低減の観点から、

- ・低速域におけるローターのダウンウォッシュが模擬できる風洞試験技術の確立

を重要課題の一つとして挙げておきたい。ヘリコプタ特有の、横進や後進飛行における特性を把握するためにも重要性は高い。更に、ホバリング状態から実際の飛行状態にトリムさせつつ風洞風速を連続的に変化させる試験が可能になれば、一層有効なデータが得られるであろう。また、メイン・ローターの翼端渦とテール・ローターの空力干渉（ディスク・ボルテックス）に起因すると言われている、テール・ローターの効きの喪失LTE (Loss of Tail Rotor Effectiveness) のように複雑な空力現象を調べるにはテール・ローターのモデル化も必要になる。

4. 空力解析—今後の開発に何が必要か

前章では、ヘリコプタの風洞試験が難しいことと、克服すべき課題を中心に述べた。風洞試験の難しさゆえ、風洞試験を補完すべく、空力解析技術の重要性がクローズアップされる。第7図は、富士重工業における解析例である。この例ではメイン・ローターを、ダウンウォッシュを有する円盤として表現するパネル法が用いられており、ローターと機体の干渉が解析可能である。最近では、ブレードを回転させる非定常のパネル法も開発されており、ディスク・ボルテックス等の解析にも利用できる可能性がある。

一方、高速飛行中の前進側ブレードの翼端マッハは遷音速に達するので、メイン・ローターの空力設計、騒音設計、性能解析及び騒音解析の観点からは、圧縮性のローターCFDが不可欠となる。第8図は、移動格子を用いた回転ローターのコードの例である。

前進飛行や剥離のない条件ではパネル法も有効であるが、横進や後進飛行では胴体剥離の影響が無視できない。また、高速飛行中の後退側ブレードは失速に至ることもあり、粘性の影響が無視できない。更に、前進飛行中のブレードは1回転のなかで迎角とマッハ数が変化しており、現象は非定常である。従って、今後のヘリコプタの空力解析には、

- (1) ローターのダウンウォッシュが模擬できる機

第6図 水平尾翼の設計変更^{13,14)}—タイガー攻撃ヘリコプター

第7図 VSAERO-ROTORを用いたヘリコプタ周りの空力解析 (富士ベル式205B型)¹⁶⁾

第8図 回転ローター CFD (オイラー・コード)¹⁷⁾

体周粘性流コードの実用化

(2) 回転ローターの非定常粘性流コードの実用化の二つを重要課題として挙げておきたい。実用化というのは、ロバスト且つ現実的な時間で計算可能であり風洞試験や飛行試験で検証されているということである。

5. お わ り に

最初の民間ヘリコプタの型式証明から、今年で丁度50年になる。その間、数多く発生している設計上の問題のうち、空力関連について諸外国の例を紹介、分析し、試験や解析の不足がその要因であることを述べてきた。しかしながら、試験や解析の不足がヘリコプタの設計、特に空力設計に携わる技術者の怠慢によるものとは考えていない。ヘリコプタのメイン・ローターは細長い弾性体であり、空気力、弾性力、慣性力が複雑に絡みあう動的特性をもっている。この複数の領域にわたる特性と機体や機体各部の共振をはじめとした、飛行安全に関わる課題の克服の方が優先されていたことが原因ではないかと考える。近年は、このような特性を解析する統合解析プログラムの発達にも目覚ましいものがある。これらの精度向上に伴い、ヘリコプタの空力技術についても、来るべき21世紀に向けて一層の向上が望まれる。

参 考 文 献

- 1) Hamel, P., Gmelin, B., Langer, H.-J., Huber, H. and Braun, D.: Rotorcraft Model Testing at DNW —Experience and Perspectives—, Ten Years of Testing at DNW 1980-1990, October 1990.
- 2) Sheridan, P. F. and Smith, R. P.: Interactional Aerodynamics —A New Challenge to Helicopter Technology, American Helicopter Society 35th Annual Forum, May 1979.
- 3) Crawford, C. C., Jr.: Rotorcraft Analytical Improvement Needed to Reduce Developmental Risk —The 1989 Alexander A. Nikolsky Lecture, J. American Helicopter Society, January 1990, pp. 3-22.
- 4) Roesch, P.: Aerodynamic Design of the Aerospatiale SA 365N-Dauphin 2 Helicopter, 6th European Rotorcraft and Powered Lift Aircraft Forum, September 1980.
- 5) Huber, H. and Masue, T.: Flight Characteristics Design and Development of the MBB/KHI BK 117 Helicopter, 7th European Rotorcraft and Powered Lift Aircraft Forum, September 1981.
- 6) Prouty, R. W. and Amer, K. B.: The YAH-64 Empennage and Tail Rotor —A Technical History, American Helicopter Society 38th Annual Forum, May 1982.
- 7) Crawford, C. C., Jr.: Risk Reduction Cost Avoidance for Full Scale Development Begins with Concept Formulation, AGARD-CP-424 (1987).
- 8) Hansen, K. C.: Handling Qualities Design and Development of the CH-53E, UH-60A and S-76, Royal Aeronautics Society Helicopter Handling Qualities and Control Conference, November 1988.
- 9) Prouty, R. W.: Tail Modification Made During Flight Test, Rotor & Wing International, 23, 7 (1989), pp. 22-24.
- 10) Prouty, R. W.: Why S-76 Models Require Different Tails, Rotor & Wing International, 23, 8 (1989), pp. 18-19.
- 11) Lenorvitz, J. M.: Tail Redesign Considered for Ship-Based EH-101, Aviation Week & Space Technology, June 11, 1990.
- 12) Paggi, B.: EH-101 Flight Test Program —Current Status and Future Testing, AIAA-90-1296-CP (1990).
- 13) Prouty, R. W.: The Horizontal Tail: A Good News/Bad News Design, Rotor & Wing International, 28, 1 (1994), pp. 76-78.
- 14) Rongier, P. and Telekl, A.: One Year of Tiger Flight Test, 18th European Rotorcraft Forum, September 1992.
- 15) 中館正顯: ヘリコプタの風洞試験と飛行試験—開発最上流の試験と開発を締め括る最下流の試験—, 防衛技術ジャーナル, 14, 5 (1994), pp. 26-42.
- 16) Clark, D. R. and Maskew, B.: Aerodynamic Modeling of Helicopter and Tilt Rotor Configuration, American Helicopter Society 39th Annual Forum, May 1983.
- 17) Boniface, J.-C., Mialon, B. and Sides, J.: Numerical Simulation of Unsteady Euler Flow Around Multibladed Rotor in Forward Flight Using a Moving Grid Approach, American Helicopter Society 51st Annual Forum, May 1995.