

0.5m 極超音速風洞におけるマッハ 5 AGARD-B 標準模型 6 分力試験

津田 尚一、小山 忠勇、平林 則明、渡利 實 (JAXA)、関根 英夫 (JAST)、
木伏 淳子 (株スペースサービス)、中村 晃祥 (JAST)

Force Tests of an AGARD Calibration Model B in the JAXA 0.5m Hypersonic Wind Tunnel at a Nominal Mach Number of 5

Shoichi TSUDA, Tadao KOYAMA, Noriaki HIRABAYASHI, Minoru WATARI (JAXA),
Hideo SEKINE (JAST), Junko KIBUSHI (Space Service) and Akiyoshi NAKAMURA (JAST)

Abstract

Force tests were carried out using an AGARD-B calibration model in the JAXA 0.5m Hypersonic Wind Tunnel (HWT1) at a nominal Mach number of 5. The aerodynamic characteristics of the AGARD-B calibration model were obtained successfully. The experimental results showed good agreement in comparison with those of other wind tunnels. The data obtained at the experiment and other tunnels were correlated well with the free stream Mach number.

1. はじめに

JAXA0.5m 極超音速風洞 (以下, HWT1) は 1965 年に完成し, ノズル出口直径が 0.5m, 通風時間が最大 120 秒, ノズルを交換することによりマッハ数 5, 7 及び 9 の試験が可能である^[1]. 1995 年には 1.27m 極超音速風洞 (以下, HWT2) が既設の HWT1 と設備を一部共用する形で増設された. HWT2 はノズル出口直径が 1.27m, 通風時間が最大 60 秒, 固定ノズルによるマッハ数 10 の世界最大規模の極超音速風洞である^[2]. HWT1/HWT2 の全体図を図 1.1 に, HWT1 を図 1.2 にそれぞれ示す. HWT1 のマッハ数 5 及び 7 ノズルについては近年, それぞれ詳細なマッハ数校正試験が行われた^[3].

気流校正試験結果のみからでは得られない空力特性への影響は, 標準的な単純形態の模型を用いた標準模型試験により詳しく調べることが重要である. HWT1, HWT2 ではこれまで HB-1, HB-2, AGARD-E 等の標準模型を使い風洞の検証が行われてきたが, 有翼形状の標準模型試験は行われていない. 近年, 有翼形態の極超音速飛行体に関する研究開発が予想されるため, 有翼形態における空力特性への影響を確実に把握する必要性が高まってきた. AGARD-B 模型は有翼形状の標準模型のひ

とつとして, 古くから多くの国内外の超音速及び極超音速風洞で試験が行われている. 今回, HWT1 において AGARD-B 標準模型によるマッハ数 5 の 6 分力試験を行い, 空力特性データを取得した. 本試験結果を他風洞の実験結果及び異なるマッハ数での結果と比較し, 検討する.

2. 風洞試験

2.1 AGARD-B 標準模型とベース圧配管

本試験に用いた AGARD-B 模型の諸元を表 2.1, 模型概略を図 2.1 にそれぞれ示す. 測定室内の模型支持装置 (スティング) に取り付けられた同模型を図 2.2 に示す. 本模型の寸法は後部胴体直径 (48mm) を基準に定められている. 両翼は後退角 60 度のデルタ翼, 翼スパンは 192mm, 全長は 408mm である. 模型材質は SUS304 である. 天秤の取り付け部には断熱材としてジルコニアを使用し, 天秤温度ドリフトを防ぐよう配慮した. 両翼は取り外しができるように設計し, 翼無し形態の試験も見える.

ベース圧力を測定する圧力配管 (SUS 管 内径: 2.0mm, 長さ: 約 35cm) を模型後端部の上下対称位置に配し, スティングの貫通孔を通して圧力センサと接続

した。ベース圧力測定（2点）は5psiのKuliteセンサを使用した。2つのKulite圧力センサをAGARD-B模型後端部から導かれたベース圧力配管2本（上下対称位置）にそれぞれ接続し、支持部内に納めた。

2.2 計測系

6分力計測はHWT1用天秤（φ18天秤）を使用した。天秤各分力の秤量、精度等を表2.2に示す。天秤各部の6箇所に熱電対が取り付けられており、天秤各部の温度上昇をモニターできる。本試験の風洞基準量（よどみ点圧力、よどみ点温度、測定室圧力等）、迎角、6分力、ベース圧力、天秤温度等のデータ収集、処理は極超音速風洞データ処理装置により行った。データは1KHzでバーストモードによりサンプリングし、100個を単純平均し0.1秒さきぎみの時歴データとした。

2.3 試験条件

試験ケースを表2.3に示す。本試験の気流条件は、よどみ点圧力は $P_0=1.0\text{MPa}$ 、 1.5MPa 、よどみ点温度 $T_0=420\text{℃}$ 、通風時間は36秒とした。マッハ5ノズルの場合、空気流量が大きく、空気加熱器の流量制限の関係からよどみ点圧力 P_0 は 1.5MPa 以下に制限される。迎角 α の変角モードはスイープモードを基本とし、そのデータ精度確認のためにピッチアンドポーズモード（ステップの変角）の変角も行った。

3. 実験結果と検討

3.1 基本空力特性とデータ再現性

図3.1によどみ点圧力 $P_0=1\text{MPa}$ 、よどみ点温度 $T_0=420\text{℃}$ 、迎角 $\alpha=-8\sim+10^\circ$ （基本ケース）のCL:揚力係数、CMS:ピッチングモーメント係数及びCD:抵抗係数の縦3分力の空力特性結果を示す。同図中の◇はベース圧力による補正無しの抵抗係数CDであり、補正後の抵抗係数（fore-body drag coefficient）CDFが□である。ベース圧による補正量は約0.005である。迎角 α に対する対称性は非常によいことが分かる。データ再現性の確認のため#4168（黒印）と#4176（赤印）の2ランの結果を比較してみると、両者の誤差は ΔCL で約0.2%であり、良好な再現性を示すことが分かる。尚、通風中の天秤温度上昇は 1℃ 以内であり、迎角 $\alpha=0^\circ$ 一定の試験結果から天秤出力の温度ドリフトについては問題のないことを確認した。

迎角 α の変角モードの違いによるデータ再現性について見てみると、図3.2に示すように、赤印で示すスイー

プモード（ $\alpha=-8\sim+10^\circ$ を20ステップで変化）と黒印のピッチアンドポーズモード（ $\alpha=-5, 0, +5, +10^\circ$ の各ステップを4秒間保持）、緑印で示す $\alpha=0^\circ$ 一定の3ランの比較においても非常によいデータ再現性を確認できた。

3.2 翼の有無による比較

AGARD-B模型は2枚の 60° デルタ翼を備えているが、これらの翼を取り外し胴体だけの翼無し形態の試験も行った。翼有り（黒印）と翼無し（赤印）形態の比較結果を図3.3に示す。翼効果としてCDFは翼有り形態の方が約29%高く（ $\alpha=0^\circ$ ）、CLは翼有り形態ではほぼ直線的に変化するが、翼無し形態では低迎角（ $\alpha=-4\sim+4^\circ$ ）では変化量が小さく、全体では非直線的な変化を示す。CMSについて見ると両者とも直線的な変化であるが、その傾斜は翼有り形態が約14%小さいことが分かった。

3.3 他風洞（AEDC）結果との比較

今回得られたデータを他風洞のAGARD-B模型の実験結果と比較した。図3.4は1957年、1960年にArnold Engineering Development Center（米国）で行われたマッハ数5.0の結果と比較したものである^{[4],[5]}。AEDCでの実験データの迎角範囲は $\alpha=-4\sim+10^\circ$ について報告されている。揚力係数CLについては本データ（赤印）、AEDC57（青印）、AEDC60（黒印）の3つともによく一致している。ベース圧補正後の抵抗係数CDFではAEDCでの1957年データと1960年データに差があり、その原因は明らかではない。本試験のCDFは迎角に対する対称性も非常に良く、連続性も優れていることが分かる。ピッチングモーメントCMSについては $\alpha=-4\sim+6^\circ$ の範囲ではほぼ一致するが、 $\alpha=+6\sim+10^\circ$ の範囲でAEDCデータが本データよりやや小さい値を示す。

3.4 超音速領域からのマッハ数的つながり

AGARD-B標準模型は極超音速風洞だけでなく超音速風洞においても多くの実験が行われている^[6]。図3.5にAEDCにおけるマッハ数M2.0～6.0の超音速風洞（12-inch SWT, 40-inch SWT（Tunnel A）, 50-inch M6, 8（Tunnel B）, 50-inch M10（Tunnel C）の極超音速風洞の4つの風洞で得られた各マッハ数における $\alpha=0^\circ$ のCDFを示す。これらのAEDCデータと国内のJAXA 1m×1m SWT(JAXA SWT1)でのマッハ数1.4～4.0（赤丸）の結果、マッハ数5.1（HWT1）の本試験結果（黒丸）を

比較した。全データの傾向を多項式による近似曲線で表した。本試験の値は近似値に対してやや高いがマッハ数的つながりは良好と判断する。

揚力傾斜 CL_α についてみると上述の AEDC の4つの風洞に JAXA SWT1 のマッハ数 2.0 ~ 4.0 (赤丸) の結果と本データ (黒丸) を比較したものを図 3.6 に示す。全データの傾向を近似曲線で表した。今回の試験データが近似曲線と非常によく一致することが分かり、マッハ数変化の比較においても妥当な結果を示し、十分な信頼性を有する結果が得られたと考える。

3.5 シュリーレン写真

今回の試験では、HWT1 に設置されている光学観測装置によるシュリーレン画像の撮影を同時に行った。本実験で撮影した AGARD-B 標準模型の $P_0=1\text{MPa}$ 、マッハ数 5.10、迎角 $\alpha=-5.0, +5, +10^\circ$ のシュリーレン写真を図 3.7 に示す。

4. まとめ

HWT1 において AGARD-B 標準模型のマッハ数 5 の 6 分力試験を実施した。本試験の結果を要約すると次の通りである。

- 1) マッハ数 5 の AGARD-B 模型の空力特性データを取得できた。迎角に対する対称性、連続性は非常に良好である。再現性においても ΔCL で誤差は約 0.2% であり、安定した信頼性の高い結果が得られた。
- 2) 他風洞(AEDC)での AGARD-B 模型による試験結果との CL については良く一致している。CDF については本結果の迎角に対する対称性は非常に良く、連続性についても優れている。AEDC 12-inch SWT データとの比較においてもほぼ一致する。CMS については迎角 $\alpha=-4 \sim +6^\circ$ の範囲ではほぼ一致するが、 $\alpha=+6 \sim +10^\circ$ の範囲では AEDC データが本試験データよりやや小さい値を示す。
- 3) 超音速から極超音速にわたるマッハ数変化に対し、CDF についてはその値がやや高めであるが、連続的につながりがある。 CL_α については非常によいつながりを示す。この結果から本試験結果の妥当性、信頼性を示すと判断する。
- 4) 今後、今回得られた結果を検証するためにもマッハ数 7 及び 10 の試験を行い、一層の AGARD-B 標準模型の空力特性データの充実が肝要と思われる。

参考文献

- [1] 極超音速風洞建設グループ；50cm 極超音速風洞の計画と構造, NAL TR-116, 1966.9.
- [2] 空気力学部；大型極超音速風洞の計画と構造, NAL TR-1261, 1995.2.
- [3] 関根, 平林他；0.5m 極超音速風洞マッハ数 5 及び 7 ノズル校正試験, JAXA-RR-05-043 2006.2.
- [4] Schueler, C. J. ; Lift, Drag, and Pitching-Moment Characteristics of AGARD Calibration Models A and B at Mach Numbers 3.98 and 4.98, AEDC-TN-57-9, May 1957.
- [5] Coats, J. D. ; Force Tests of an AGARD Calibration Model B at $M=2.5$ to 6.0, AEDC-TN-60-182, July 1960.
- [6] R. K. Matthews and L. L. Trimmer ; FORCE AND PRESSURE TESTS OF AN AGARD CALIBRATION MODEL B AT A MACH NUMBER OF 10, AEDC-TDR-64-31, Feb. 1964.

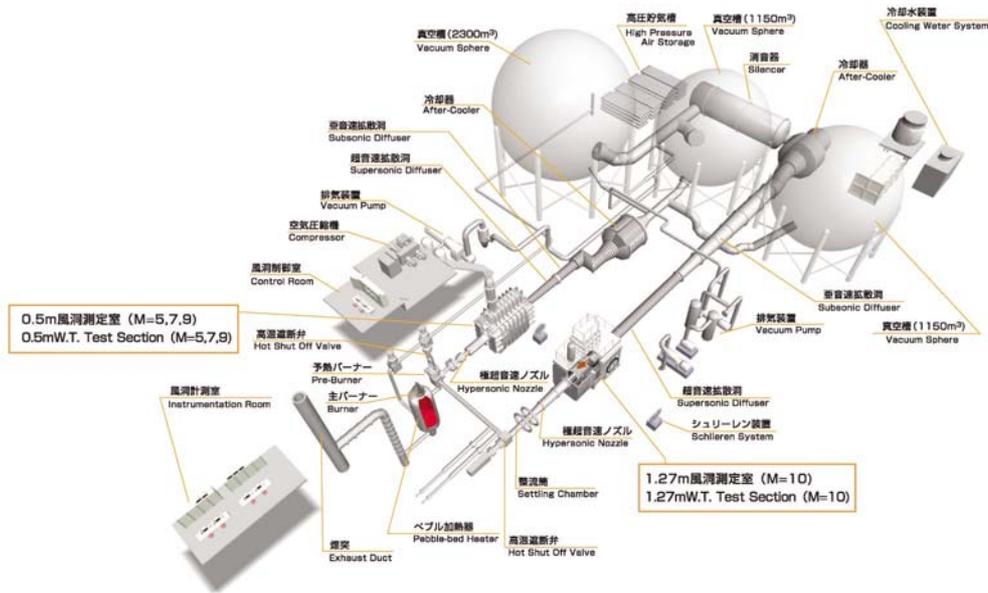


図 1.1 0.5m/1.27m 極超音速風洞全体図



図 1.2 0.5m 極超音速風洞

表 2.1 AGARD-B 標準模型諸元

模型名称	AGARD-B 標準模型
胴体基準直径	0.048 m
全長	0.408 m
基準長	0.1108 m
基準面積	0.01596 m ²
翼	60° デルタ翼, 4%円弧翼
モーメント基準点	0.2853 m (模型先端から)
重量	27.44 (N)

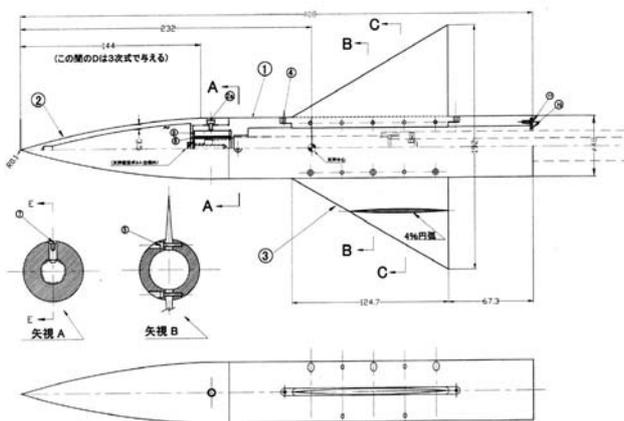


図 2.1 AGARD-B 模型概略



図 2.2 AGARD-B 模型外観

表 2.2 6 分力内挿天秤 日章電機(株)製 LMC-6522-18S-Z70

力/モーメント	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
容量 (単位)	147 N	294 N	686 N	7.8 N-m	24.5 N-m	9.8 N-m
精度	0.18% F.S	0.07% F.S	0.03% F.S	0.24% F.S	0.07% F.S	0.09% F.S

表 2.3 AGARD-B 標準模型試験ケース (M=5)

CASE	Run No.	P0 (MPa)	T0 (C)	迎角 α (deg)	変角 Mode
1	4167	1.0	420	-8 ~ +10	スイープ
1R	4168	1.0	420	-8 ~ +10	スイープ
2	4169	1.0	420	0	ピッチアンドポーズ (P&P)
3	4170	1.0	420	-8 ~ +10	スイープ
4	4171	1.0	420	-5.0, +5, +10	ピッチアンドポーズ (P&P)
5	4172	1.0	420	+10 ~ -8	スイープ
6	4173	1.0	420	-8 ~ +10	スイープ
7	4174	1.0	420	-8 ~ +10	スイープ
8	4176	1.0	420	-8 ~ +10	スイープ
9	4175	1.5	420	-8 ~ +10	スイープ
10	4177	1.5	420	-8 ~ +10	スイープ
11	4178	1.0	420	-8 ~ +10	翼無し, スイープ
12	4180	1.0	420	-8 ~ +10	翼無し, スイープ
13	4179	1.5	420	-8 ~ +10	翼無し, スイープ
14	4181	1.5	420	-8 ~ +10	翼無し, スイープ

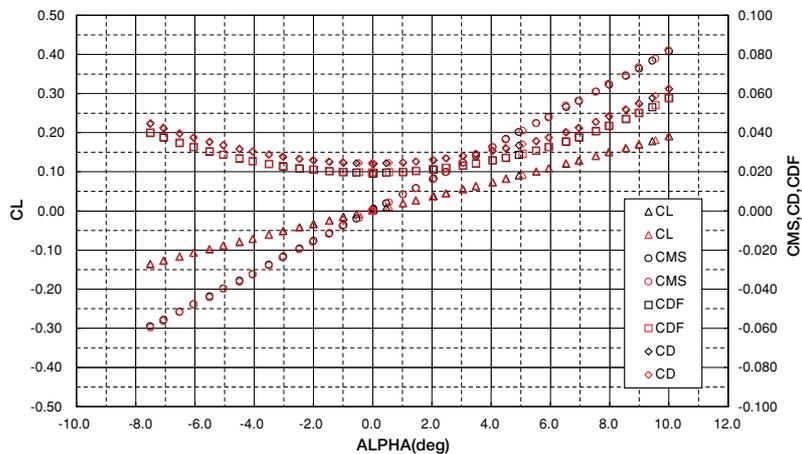


図 3.1 縦 3 分力特性とデータ再現性 (#4168 と #4174)

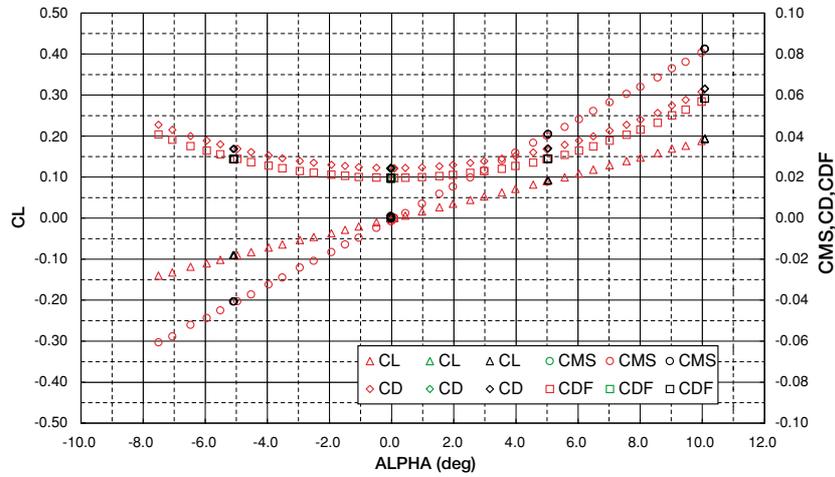


図 3.2 スイープモードとピッチアンドロールモードの比較

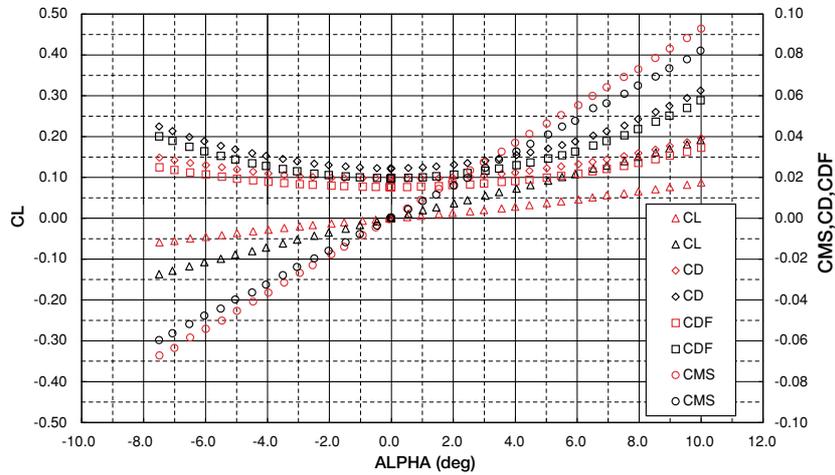


図 3.3 翼有/無形態の比較 (黒：翼有, 赤：翼無)

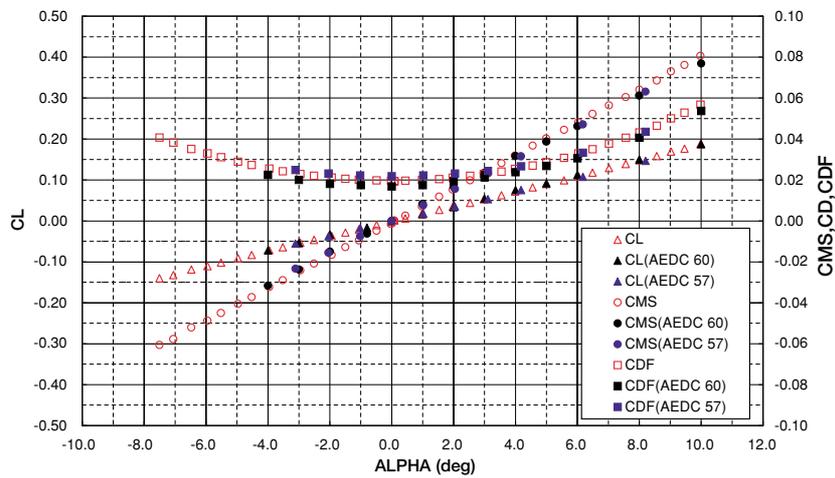


図 3.4 他風洞 (AEDC) との比較 (AEDC60:Ref5, AEDC57:Ref4)

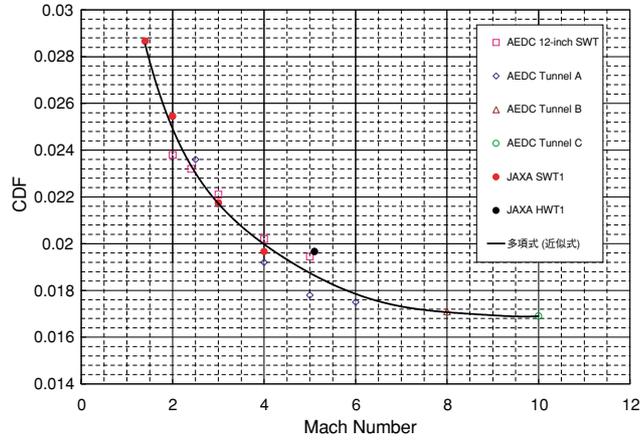


図 3.5 マッハ数と CDF ($\alpha=0\text{deg}$)

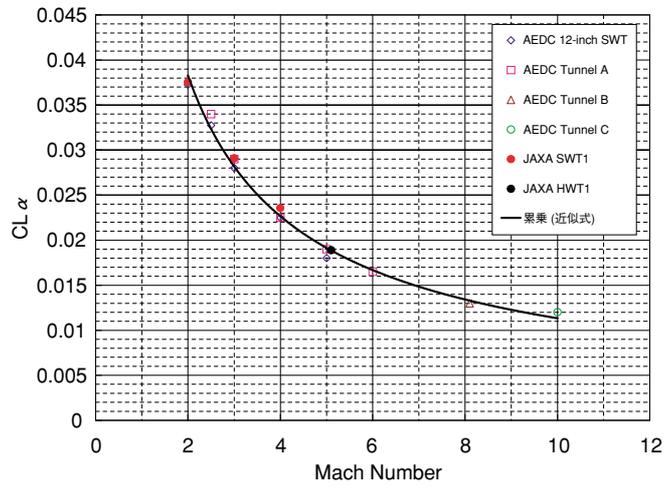


図 3.6 マッハ数と CL_α ($\alpha=0\text{deg}$)

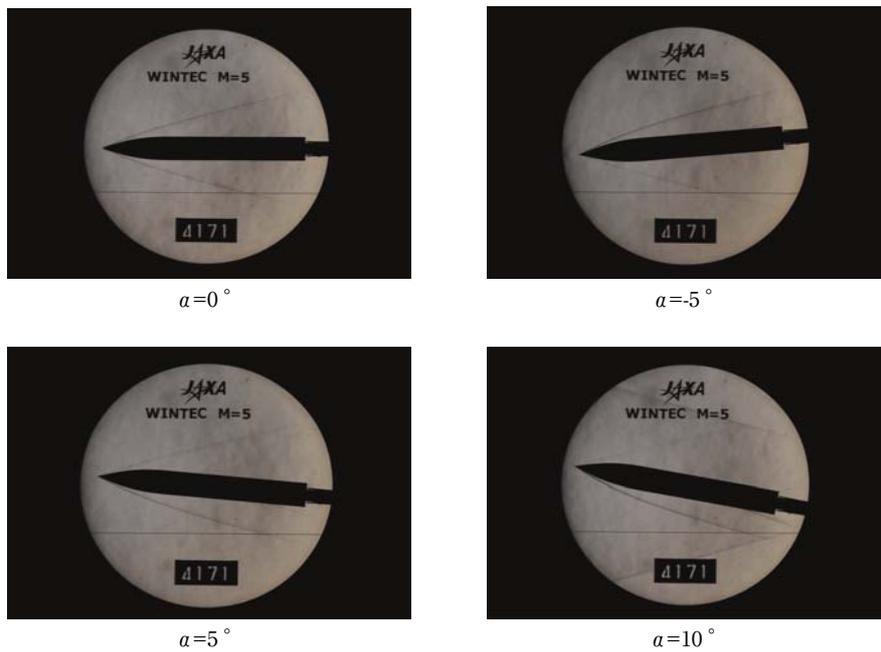


図 3.7 AGARD-B 模型シュリーレン画像 ($M=5.1$)