

東京大学柏キャンパス極超音速風洞の気流特性について

今村 幸¹, 綿貫 忠晴², 鈴木 宏二郎¹, 柏風洞ワーキンググループ³

¹東大新領域 ²東大工学系 ³東京大学

Flow Characteristics of UT-Kashiwa Hypersonic Wind Tunnel

by

Osamu Imamura, Tadaharu Watanuki, Kojiro Suzuki, and Kashiwa Wind Tunnel Working Group (Univ. of Tokyo)

ABSTRACT

In this study, the flow characteristics of UT-Kashiwa hypersonic wind tunnel are obtained by measuring the Pitot pressure distribution. In this wind tunnel, the Mach 7 and 9 hypersonic nozzles are inherited from its predecessor facility in UT-Komaba Campus. From a viewpoint of the operation safety and cost, the maximum stagnation pressure at Kashiwa facility is 950 kPa, which is much lower than at Komaba facility (5 MPa). To evaluate the uniformity of the freestream of this tunnel, the Pitot pressure traverse was conducted for the Mach 7 nozzle by using the rake of 11 Pitot tubes with 20mm intervals in the radial direction. The measurement has been done at every 30 or 45 degrees in the circumferential direction and also at some streamwise locations. The Mach number calculated from the settling chamber pressure and the test-section static pressure is nearly 7, which is almost the same as the Mach number obtained from the Pitot pressure (about 14 kPa) on the center line. The Pitot traverse shows that the uniform flow core with 120 mm diameter is formed both at the nozzle exit (200 mm in diameter) and at the center of the test section. Such ratio of the core diameter to the nozzle exit diameter seems quite reasonable, comparing to other existing hypersonic wind tunnels. The cross-sectional Mach number distribution shows slight deviation from the axi-symmetric pattern because of the misalignment of the nozzle and the test section to the tunnel center line. Consequently, the highly uniform Mach 7 flow is obtained in this facility, though the nozzle is used under the off-design operation pressure, that is, the off-design Reynolds number.

1. はじめに

東京大学では、千葉県柏市の柏キャンパスに極超音速高エンタルピー風洞を設置、調整中である。本設備は極超音速飛行技術や高エンタルピー流における研究開発に対して有意であると思われるが、今後の運用に際して風洞の気流特性に関する知見は重要である。本報告では、極超音速風洞において、ピトー圧を測定することでその特性について調査した。以下にその詳細を示す。

2. 東京大学 極超音速風洞の概要

東京大学 極超音速高エンタルピー風洞は、1960年初頭に東大駒場 II キャンパスに建設された超音速気流総合実験室および高温気流燃焼実験室が前身である。当該設備は 1989年に旧東京大学航空研究所(現、JAXA 宇宙科学研究本部)から東京大学工学部に移管され、東京大学 新領域創成科学研究科の創立(1998年)を契機に柏キャンパスへの移設および整備が計画された。旧設備の再利用可能な部分を利用して設置工事が進められ、2006年3月に設置工事が完了、各種試験を終了した後、2007年1月に公開された。

本風洞では、極超音速風洞と高エンタルピー風洞の2つの運転モードがあり、極超音速気流(マッハ7以上)もしくは高エンタルピー気流(1000K以上)を生成することが可能である。2つの運転モードは高温高压ガスの生成過程までを共用しており、高温高压の空気は高压貯気槽に蓄えられていた高压空気が調圧された後、加熱器内にて予め熱せられたペブルと熱交換することによって得られる。極超音速風洞の運転では、この高温高压の空気を極超音速ノズルに導入し、後方に空気冷却器と真空槽を備えることによって、測定部で極超音速気流を実現している。極超音速風洞主要部の概観図を図1に示す。ノズルについては、設計マッハ数が7および9のノズルを実験により取替え可能となっているが、本報では一般に用いているマッハ7のノズルを利用した場合について報告する。前述のように本設備は移設されたものであるが、前身の設備との相違のひとつはよどみ点の圧力が約5MPaから約1MPaに変更されたことである。実際に多くの実験において、ノズル上流の圧力は本風洞の最大圧力950kPa(A)に調圧されている。ノズル自体は

旧設備のものをそのまま用いているため、本風洞ではノズルの設計点を外れたところで運用していることになり、これは気流検定を必要とする理由のひとつである。なお、ノズル出口の直径は共に200mmであり、通風可能時間は60秒である。

ノズル上流の温度(よどみ点温度と仮定)は加熱器内でのペブルとの温度交換によって決まるが、現在までの試験最高温度は1050Kである。図2に典型的なよどみ点圧力 p_{01} およびよどみ点温度 T_0 の履歴を示す。共にノズル上流で計測したものである。 p_{01} は風洞が起動後にすぐに一定となり、およそ $952 \pm 1 \text{ kPa(A)}$ にて推移している。一方でよどみ点温度は定常となるまでおよそ20秒を有することがわかる。本報告で行った検定試験の気流条件を表1に示す。 T_0 については、ほぼ定常になった値が表1に示されている。なおマッハ7の気流が生成していると思われる測定室内には絶対圧計が設置されており、その値 p_{∞} (気流静圧と仮定)と全圧 p_{01} を用いて求めたマッハ数を表1にあわせて示してある。これらの実測マッハ数は、ノズルの設計マッハ数である7に非常に近いことがわかる。

なお、測定部においては模型の投入機構を有しており、本報告においても投入モードを利用して、風洞起動後にピトー管を気流内に投入することで実験を行っている。

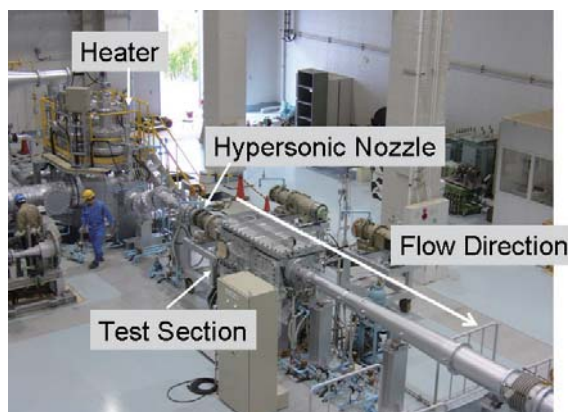


図1 極超音速風洞概観

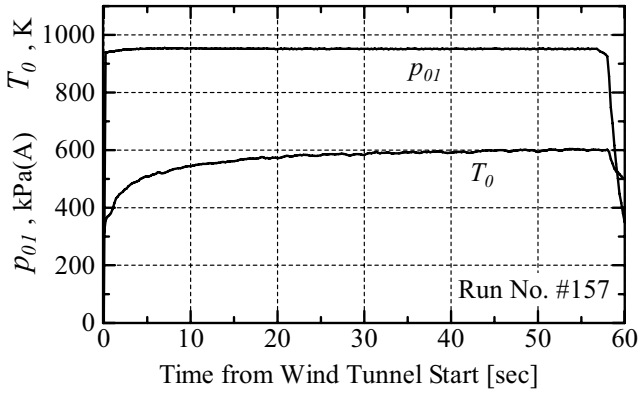


図2 よどみ点圧力およびよどみ点温度の履歴

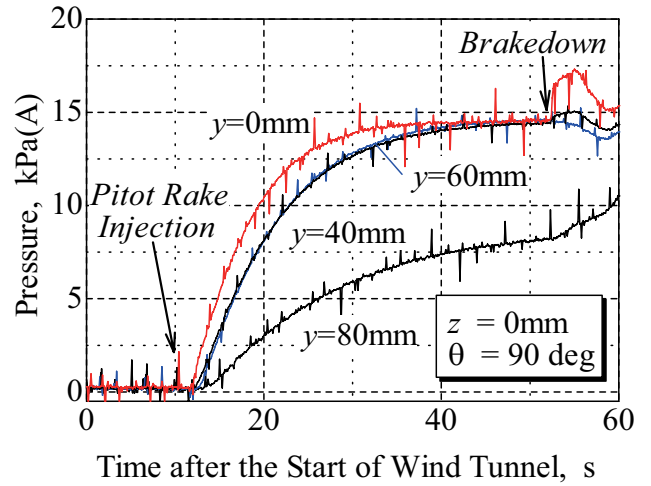


図5 ピトー圧の時間履歴

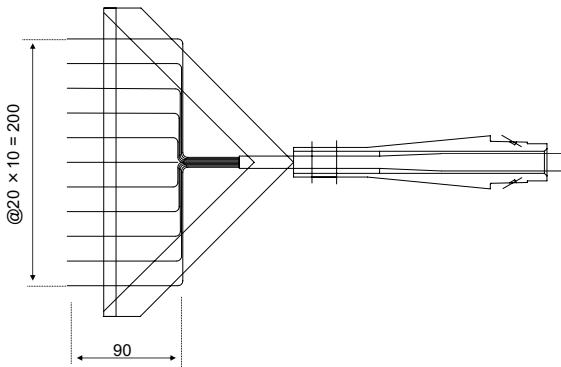
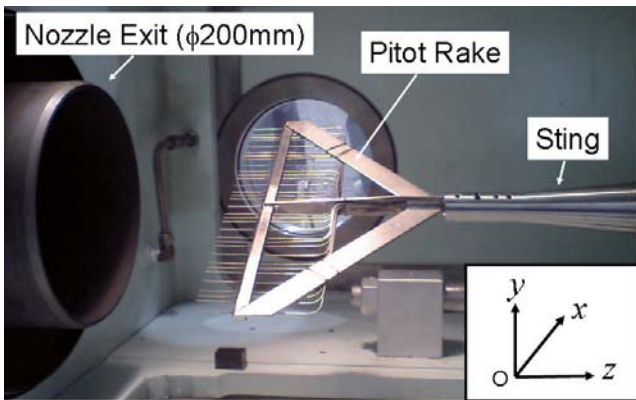


図3 櫛型ピトー管の概要

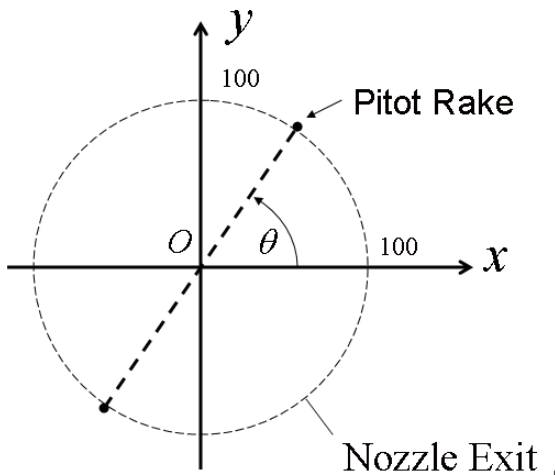


図4 櫛型ピトー管の設置角度 (ノズル下流側より)

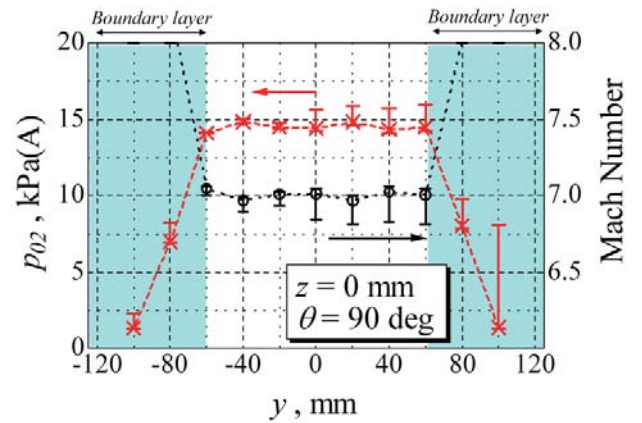


図6 ピトー圧およびマッハ数の分布

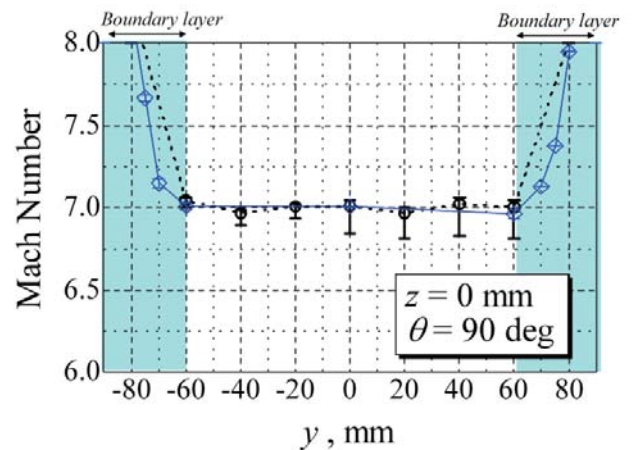


図7 気流コア外縁部のマッハ数分布(z=0)

3. ピトー圧測定と実験結果

本報告においては、極超音速気流内に櫛型ピトー管を投入して、ピトー圧およびその分布を測定した。図3に櫛型ピトー管の設置の様子、および使用した櫛型ピトー管の概略を示す。櫛型ピトー管はロール方向に任意の角度を持って固定することが可能となっている。写真に示されているピトー管のうち、11本について1回に通風試験で同時に計測をした。多くの実験においては、気流中心から20mmおきに±100mmまで計測する他、後述のように気流のコアがおおよそφ120mmであることが明らかとなったため、中心から60mmから90mmの間を重点的に計測した2ケースがある。各ピトー管は外径1.0mm、内径0.5mmであり、ビニールチューブを介して測定室外部の圧力変換器に接続されている。圧力変換器および増幅器の詳細やその校正係数、また圧力の求め方に関して、補遺Aをご参照いただきたい。

櫛型ピトー管は、水平を基準にして30度もしくは45度おきにロール角を変化させて固定し、実験を行った。(図4を参照)なお0度(水平)の実験は、今回は装置の都合により実施しなかった場合もある。また軸方向においては、ピトー管先端が測定窓の中心となる場合を $z=0$ として、上流および下流側に100mmずつ移動した場合について計測を行った。なお、下流に移動した場合($z=100\text{mm}$)においては、装置の都合上垂直の場合しか行っていない。

図5には、ピトー圧測定の時間履歴を示す。櫛形ピトー管は通風開始の後、10秒後に射出投入され13.2秒付近で気流内に到達するため、その時刻からピトー圧に変化が現れている。その後、およそ25秒をかけてピトー圧が静定している様子が見られる。静定後のピトー圧の絶対値は、中心部でおよそ14kPa(A)である。図6には $z=0$ の断面におけるピトー圧とマッハ数の垂直方向の分布を示している。気流のマッハ数 M_1 はピトー圧 p_{02} からRayleighのPitot公式

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \left[\frac{(\gamma + 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_1^2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \left[\frac{\gamma + 1}{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)} \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

を用いて求めたものである。エラーバーについては補遺Aをご参照いただきたい。この図からおおよそφ120mmの範囲において、気流のマッハ数はほぼ7で一定であることがわかる。図6および以降の図においてはφ120mmの外側は境界層内と考えられるが、比較のためその部分を影付きで示す。図6に示されている気流マッハ数は、測定室圧から求めた気流マッハ数(表1に記載)との整合が取れており、妥当といえる。なお、得られたピトー圧を表2に示す。

図7には気流コア外縁の様子を明らかにするため、気流中心から60mmから80mmのピトー管を集中的に用いて計測した結果が合わせて示されている。この図から気流マッハ数が7でほぼ一定といえるのは、中心の直径120mmであることが明らかとなった。JAXAの極超音速風洞においても、気流コアはノズル出口径の6割程度であり^{1,2)}、これからの測定したピトー圧分布は妥当といえる。

4. 気流の一様性について

4-1 測定窓中心($z=0$)の断面における一様性

図8は測定窓中心を通る断面($z=0$)におけるピトー圧の等圧線図を示している。圧力は中心のピトー圧で正規化している。この図に示されるような等圧線はほぼ気流中心軸に関して軸対称となっていることがわかる。図9は気流一様性の角度依存性を示すため、中心から60mmおよび80mmにおけるピトー圧分布が示されている。この図に示されるように中心から80mmにおいては180度方向(ノズル下流から見て左側)のピトー圧が相対的に高く、これからピトー圧が左右方向に幾分かの偏りを持っていることが示唆され

る。これは気流の偏りというよりは、据付などの機械的な誤差によるものであると予想される。ピトー管をスタンピングに固定する際に多少の遊びがあることも理由のひとつとして考えられが、本風洞では異なるマッハ数での試験を行うためノズル交換が可能となっており、極超音速ノズルはそれより上流に、測定部はそれより下流に連結され、リングジョイントやボルトで固定されている。そのため、ノズルと測定部の間で据付誤差を吸収する構造となっており、ここでの機械的な据付誤差が、上記の気流の非対称性の原因ではないかと思われる。

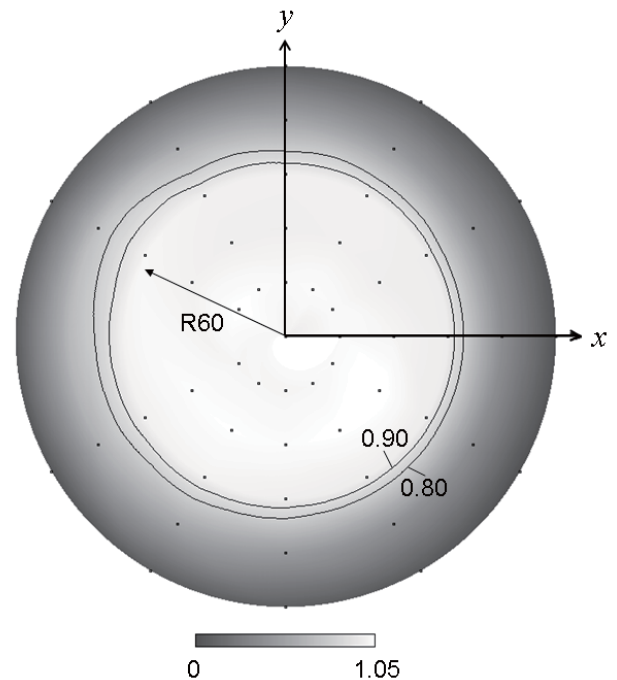


図8 $z=0$ 断面における等圧線図
(中心のピトー圧で正規化)

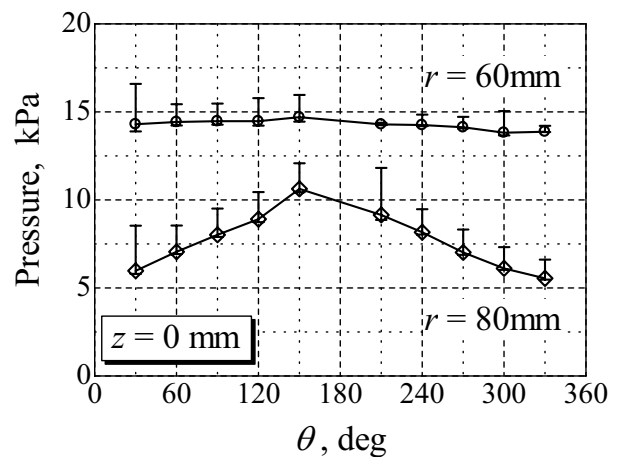


図9 気流コア外縁部のマッハ数分布の角度依存性

4-2 気流軸方向の気流の一様性

図10は気流軸方向（z軸方向）の気流一様性を示したものである。この図に示されるようにどの面においても気流コアはおおよそ直径 120mm であり、また測定されたマッハ数もほぼ等しいことから、軸方向にも一様な気流が生成しているものと推測される。図11には図7と同様に気流コア外縁でのマッハ数測定を行った結果を示している。図7と図11には顕著な差異は認められず、軸方向の気流一様性を示唆していると思われる。

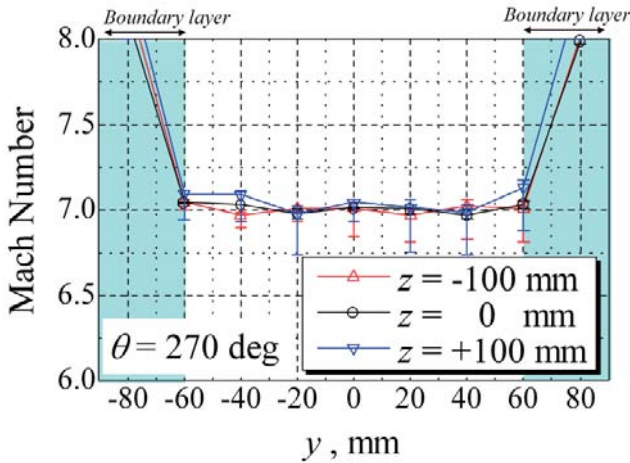


図10 軸方向のマッハ数分布

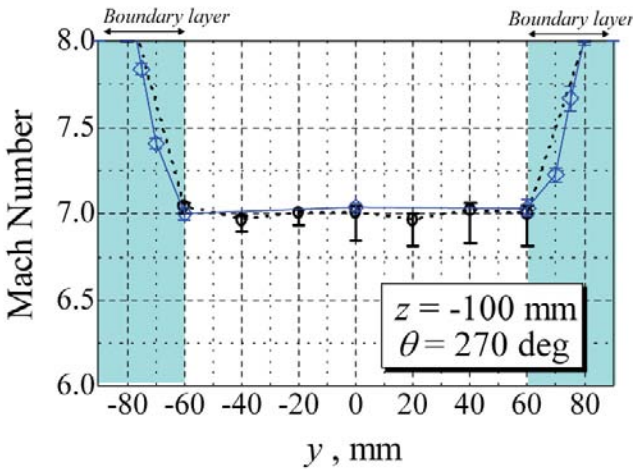


図11 気流コア外縁部のマッハ数分布(z=-100)

5. まとめ

東京大学柏キャンパスに設置されている極超音速風洞のマッハ7ノズルについて、楕型ピトー管を用いてピトー圧分布の測定を行い、気流の一様性について議論した。測定の結果、得られた主な知見は次の通りである。

1. 得られたピトー圧は中心付近で 14 k Pa 程度であり、これから気流のマッハ数が 7 程度であることが確認された。これは風洞のよどみ点圧力と測定室圧力から求めたマッハ数とも矛盾しない。

2. ピトー圧分布については、測定窓中心を通る断面において、おおよそ直径 120mm の円内ではほぼ一様な気流になっていることが確認された。また、気流軸方向についても±100mm の範囲においては、気流コアの大きさがほぼ一定であることが確認された。

以上から、マッハ7のノズルは設計点を外れたところで運用しているものの、気流の一様性は風洞試験を行うに十分、耐えるものであることが明らかとなった。

謝辞

本試験を行うにあたり、本学新領域創成科学研究科の小山将史氏に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 関根英夫、平林則明、小山忠勇、津田尚一、穂積弘一、渡利實、「0.5m 極超音速風洞マッハ数5および7ノズル校正試験」、宇宙航空研究開発機構研究開発報告、JAXA-RR-05-043、2006
- 2) 平林則明、小山忠勇、津田尚一、関根英夫、榊原盛三、「1.27m、マッハ10極超音速風洞の気流検定結果について」、航空宇宙技術研究所特別資料45号（第62回・第63回風洞研究会議論文集）、pp.113-120

表1 風洞気流条件

Exp. No	Run No	Pitot Rake			Flow Condition			Mach Number
		z, mm	θ , deg	Case	ρ_{01} , kPa	T_0 , K	ρ_{∞} , kPa	
1	#157	0	30	1	952±1	598	0.22	7.05
2	#158	0	60	1	952±1	599	0.22	7.05
3	#159	0	90	1	952±1	590	0.21	7.10
4	#160	0	120	1	952±1	614	0.21	7.10
5	#161	0	150	1	952±1	565	0.21	7.10
6	#163	0	270	1	952±1	553	0.22	7.05
7	#164	0	90	2	952±1	552	0.21	7.10
8	#215	-100	90	1	952±1	637	0.22	7.05
9	#216	-100	45	1	952±1	671	0.23	7.00
10	#217	-100	135	1	952±1	644	0.22	7.05
11	#218	-100	270	1	952±1	649	0.23	7.00
12	#219	-100	0	1	952±1	650	---	---
13	#220	-100	270	2	952±1	696	0.22	7.05
14	#221	100	270	1	952±1	665	0.22	7.05

表2 ピトー圧測定値一覧

Run No	z, mm	θ , deg	Case	Sensor Number and Pressure, kPa(A)										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
#157	0	30	1	13.69	0.87	5.60	13.69	13.89	14.43	14.21	14.58	14.05	8.66	0.54
#158	0	60	1	14.06	1.01	6.73	14.03	13.98	14.54	14.25	14.64	14.12	7.83	1.13
#159	0	90	1	14.00	1.11	7.65	13.99	13.87	14.40	14.19	14.54	13.89	6.71	1.12
#160	0	120	1	14.21	1.36	8.54	14.02	13.88	14.55	14.26	14.72	13.78	5.82	0.78
#161	0	150	1	14.32	1.23	10.24	14.25	14.04	14.73	14.49	14.86	13.70	5.27	0.07
#163	0	270	1	14.31	1.33	7.30	14.07	14.12	14.87	14.60	14.92	14.30	8.01	0.27
#164	0	90	2	14.31	2.16	8.12	11.40	13.27	14.99	14.56	13.32	9.67	7.02	3.09
#215	-100	90	1	---	0.21	5.14	11.58	11.28	13.96	13.73	13.77	13.09	6.09	1.31
#216	-100	45	1	13.63	0.37	4.48	12.26	12.41	14.10	13.76	14.05	13.11	8.07	1.18
#217	-100	135	1	13.72	0.50	4.68	12.98	13.20	14.07	13.70	14.04	13.15	9.30	1.60
#218	-100	270	1	13.68	0.90	7.06	13.43	13.15	13.91	13.59	13.97	13.18	6.60	0.09
#219	-100	0	1	13.65	0.64	5.13	13.24	13.57	14.00	13.54	13.88	13.11	9.57	1.83
#220	-100	270	2	13.82	2.28	6.53	8.48	11.00	14.02	13.69	12.19	9.17	7.55	3.74
#221	100	270	1	13.86	1.01	6.11	13.38	13.40	14.21	13.84	14.11	12.94	6.46	1.18

* Case 1, 2 については、表 A.1 を参照

補遺 A. ピトー圧の算出とその誤差について

事前の圧力校正（基準圧力計：Manoace 30-200KP-C, SAYAMA Co., Ltd.）において、圧力値と電圧出力の間に線形関係があることが確認され、また各圧力変換器-増幅器の組み合わせにおける圧力校正係数 k (単位 kPa/V, 各圧力変換器の圧力-電圧の特性を線形で近似) を表 A.1 のように求めた。電圧出力を圧力値に換算する場合の基準として、大気圧および真空(=0.2kPa)が考えられる。すなわち、以下の式による算出である。

$$p_{out} = k (E_{int}/E_{cab}) (V_{out} - V_{vac}) + p_{vac}$$

$$p'_{out} = k (E_{int}/E_{cab}) (V_{out} - V_{atm}) + p_{atm}$$

ここで、 E_{int} , E_{cab} は実験開始直前および圧力変換器の校正時の電圧増幅率, p_{out} , V_{out} は実験時の、 p_{vac} , V_{vac} は真空時の、 p_{atm} , V_{atm} は大気圧での圧力および電圧出力である。 k および E_{cab} は、表 A.1 中に示してある。上二式の p_{out} は、しかしながら実際には同じ値とならない。そのためここでは、これらの p_{out} を誤差の上下限として、圧力値はその間に含まれるように以下の式において定義した。

$$p_{pitot} = (p_{atm} - p_{vac}) / (V_{atm} - V_{vac}) (V_{out} - V_{vac}) + p_{vac}$$

これらの式の関係を図 A.1 に示す。

なお、これらの誤差の原因として、各圧力変換器および増幅器における電氣的な擾乱やドリフトの影響の他、ビニールチューブを用いた導管のため多少のリークの影響が考えられる。

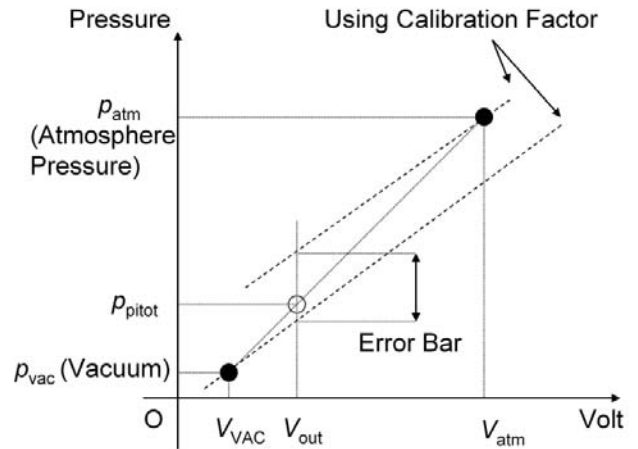


図 A.1 出力電圧より求められた圧力値と誤差範囲

表 A.1 圧力変換器および増幅器一覧

Sensor Number	Case 1	Case 2	Pressure Transducer			Amplifier			Calibration
	r, mm	r, mm	Maker	Products	Serial No.	Products	Serial No.	Amplification degree	kPa / Volt
1	0	0	KYOWA	PAB-A-1MP	FG0950003	6M92 (San-ei)	3080126	1.497V / 300 μ ϵ	39.44
2	-100	-90		PG-5KU	YK7450038		1014995	0.999V / 200 μ ϵ	24.60
3	-80	-80		PG-5KU	YK7450010		9091429	1.002V / 200 μ ϵ	24.77
4	-60	-75		PG-5KU	YK6560001	DPM-305A (KYOWA)	HA1748	0.691V / 100 μ ϵ	17.75
5	-40	-70		PG-5KU	YK7450046		HA1747	1.488V / 200 μ ϵ	16.51
6	-20	-60	TOYODA	PMS-5V 5H	4787	PD-304A (HOKUTO)	(CH1)	3.988V / 10mV	11.35
7	20	60		PMS-5 10H	5359M		(CH2)	5.000V / 10mV	13.23
8	40	70		PMS-5 500K	5564		(CH3)	4.008V / 10mV	10.31
9	60	75		PMS-5 2H	14	AA4500 (TOYODA)	6F156410	1.003V / 10mV	13.02
10	80	80		PMS-5 5H	4147M		9L100815	3.006V / 10mV	12.84
11	100	90		PD104K 1F	495		6H158306	1.003V / 10mV	13.48