

No.19

極超音速流の Air Condensation の診断

航空宇宙技術研究所 山崎 喬、中北和之
井上安敏、曾我国男

Diagnosis of Air Condensation in Hypersonic Flow

T. Yamazaki, K. Nakakita, Y. Inoue, K. Soga (NAL)

概 要

NAL 中型衝撃風洞と RCS 試験用ガス混合装置を用いて極超音速流の Air Condensation をピトー圧力波形によって診断する事を試みた。試験は衝撃風洞低圧管作動気体に乾燥空気と水蒸気を含んだ空気を用いて、風洞淀み点圧力、一様流温度、含有水蒸気量等を変化させ Air Condensation に至るピトー圧力波形の変化と Onset Point を調べた。

これらの結果、乾燥空気を用い測定部一様流静温度を変化させた場合の診断は Daum らの試験結果¹⁾ とほぼ一致し、簡便なピトー圧力波形の観測によっても比較的良好な精度で気流の診断が行え、また作動気体中の水蒸気の含有量によっては Daum らが示した Onset Point より安全側でも Condensation に至る事が判明した。

1. はじめに

マッハ数 10 のような極超音速領域の風洞試験では、表 1 に示すようにノズル前後で 300 倍を越える圧力比が必要となり、その際の風洞淀み点圧力と一様流静圧の比は 40000 倍以上となる。このため測定部より下流は真空槽に接続され、必要な圧力比を確保する。

技術的に一番問題となるのは、気流がノズル内での断熱膨張のため、静温度の比が 20 倍を越える点であり、この様な流れの一様流静圧下では 50[K]前後で Air Condensation が始まるため風洞淀み点温度は 1000[K] 以上が必要とされる事である。このため、この種の試験装置ではガス

燃焼等を用いたペブル加熱、アークヒーターによる加熱、衝撃圧縮や断熱圧縮による加熱等を用いる事により必要な風洞淀み点温度を確保している。

一方、このような極超音速流の試験装置の運用では、仕様上は気流成立条件を満足していても、装置等の劣化や故障等に基づく淀み点温度の低下や水分の混入等の事態を完全に防ぐことは難しく、風洞の機能維持のためにも簡便な方法で気流の診断を行う技術の確立が必要となる。Condensation の観測等については種々の方法²⁾ により行われているが、NAL 中型衝撃風洞では

M_∞	P_0/P	ρ_0/ρ	T_0/T	P_{t1}/P_{t2}	A/A^*
5	529	88	6	16	25
7	4139	383	11	65	104
9	21101	1227	17	201	327
10	42445	2021	21	328	536

表 1 極超音速流れのパラメータの一例

風洞運用上比較的容易に行える、一様流のピトー圧力波形の観測による Air Condensation 診断の技術確立を目指すと共に、一様流中に含まれる水蒸気量が Air Condensation に及ぼす影響を調べ、淀み点圧力に対する臨界水蒸気量を明らかにする事を目的に試験を実施した。

2. 試験装置

図1は NAL 中型衝撃風洞の概要図である。本風洞は高エンタルピー運転を行うショックタンネルモードと長持続時間運転を行う QUILC タンネルモードの2つの運転モードがあるが、今回の試験ではピトー管の圧力応答時間を確保するために後者の運転モードを用いる。この QUILC タンネルモードによる運転³⁾では圧縮管と衝撃波管を連続させて低圧管として機能させ、高圧管及び低圧管にそれぞれの圧力を設定し、第1急速開閉弁を開くことで風洞を起動させる。高圧管の駆動気体が低圧管の作動気体を準等エントロピー的に圧縮し、低圧管端の風洞淀み点圧力がほぼ一定になった時点で第2急速開閉弁を開き測定部に一様流を成立させる。

風洞淀み点圧力、淀み点温度等の風洞作動条件は高圧管初期圧力(P_0)及び低圧管初期圧力(P_1)を組み合わせることで設定する事が出来る。

水蒸気量が Air Condensation に及ぼす影響を調べる試験では、低圧管の作動気体中の水蒸気含有量を設定するために RCS 用ガス混合装置⁴⁾を用いた。本装置は RCS ガスジェット試験を行うために設置されたもので、2つの可変容量チャンバーと1つの混合チャンバーから構成され、2種類の気体を精度良く混合して任意の比熱比や気体定数をもった試験気体を生成する事が出来る。今回の試験では乾燥空気と湿度を含んだ大気とを正確に混合するために用いた。

3. 試験条件

今回の試験はマッハ数 10 ノズルを用いて行い、作動気体に乾燥空気(水蒸気量 3[ppmV])を用いた試験では $P_0=3.4$ 及び 0.85 [MPa]の2つの風洞淀み点圧力の条件において、風洞淀み点温度を $1180\sim 540$ [K]に変化させ Air Condensation に至るピトー圧力波形の変化と Onset Point を探り、Daum らの試験結果と比較した。表2(1)に

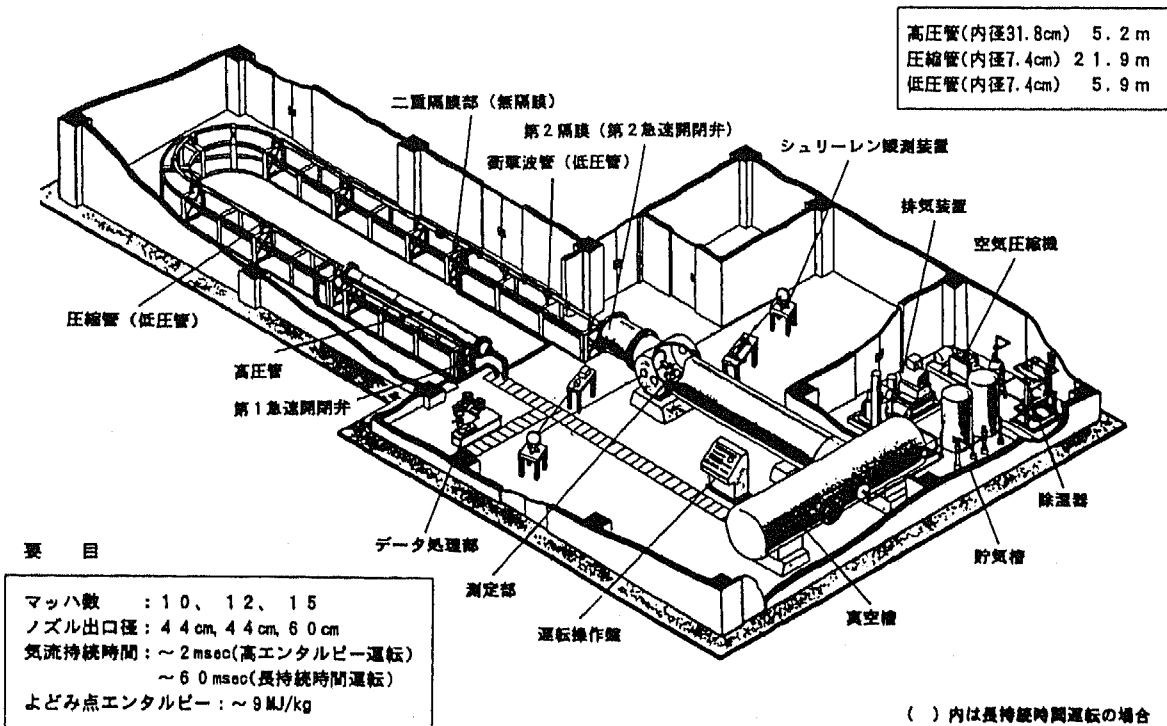


図1 NAL中型衝撃風洞概要図

◎ $P_0 = 3.4$ [MPa]、 $M_\infty = 10.4$ 、 $T_{cond} = 35$ [K]

P_{41} [MPa]	4:0.02	4:0.04	4:0.05	4:0.067	4:0.08	4:0.1	4:0.133	4:0.2	4:0.4
T_0 [K]	1180	1000	940	870	830	790	730	650	540
T [K]	52	44	42	39	37	35	32	29	24

◎ $P_0 = 0.85$ [MPa]、 $M_\infty = 9.9$ 、 $T_{cond} = 27$ [K]

P_{41} [MPa]	1:0.005	1:0.01	1:0.0125	1:0.0167	1:0.02	1:0.025	1:0.033	1:0.05	1:0.1
T_0 [K]	1180	1000	940	870	830	790	730	650	540
T [K]	57	48	46	42	40	38	35	32	26

(1) 風洞淀み点温度と一様流静温度

◎ $T_0 = 1180$ [K]

P_0 [MPa]	M_∞	ppmV of Vapor							
0.85	9.9	3	470	780	930	1090	1240	1550	
1.7	10.2	160	310	470	780				
3.4	10.4	30	80	160	210	240	270	320	480

(2) 風洞淀み点圧力と水蒸気含有量

表2 試験条件一覧

この場合の風洞初期設定圧力 P_{41} と同条件における風洞淀み点温度 T_0 及び一様流静温度 T を示す。

また、作動気体中の水蒸気の影響を調べるため、風洞淀み点温度 1180[K] の条件で、淀み点圧力を $P_0 = 3.4, 1.7, 0.85$ [MPa] の3通りに対して作動気体の水蒸気含有量をそれぞれ変化させた場合のピトー圧力波形の変化と Onset Point を調べた。表2(2)にその際の風洞淀み点圧力に対する水蒸気量を示す。

4. 試験結果

図2は NAL 中型衝撃風洞一様流中に置かれた球模型の淀み点温度から算出した空力加熱率の時間履歴と Fay-Riddell の推算式から求めた淀み点温度である。気流成立から 15[msec]程度経過した後は淀み点温度が徐々に低下している。これは低圧管端の風洞淀み点部における温度損失の影響が表れて来たもので、今回の気流診断に際しては気流成立から 15[msec]までのピトー圧力波形で判断をする。

4(1). 一様流温度低下による Air Condensation

図3に風洞淀み点圧力 $P_0 = 3.4$ [MPa]における正

常な状態の気流から一様流静温度を下げて行き Condensation を起こした状態までの一連のピトー圧力比波形の変化の様子を示す。図3(1)の正常な状態 ($T = 52$ [K]) では第2急速開閉弁が開かれ一様流が成立した後、約 40[msec]程度一定の状態が続いている。図3(4)では先に述べた一様流温度の時間経過の影響でピトー圧力比波形の一定の状態は約 25[msec]程度に短縮されている。更に温度を下げた条件 ($T = 35$ [K]) では図3(6)に示すように、一様流の成立直後から波形の乱れとレベルの低下が現れ、Condensation を起こした事が分かる。Condensation を起こしたピトー圧力比波形は図3(8)の更に温度の低い試験条

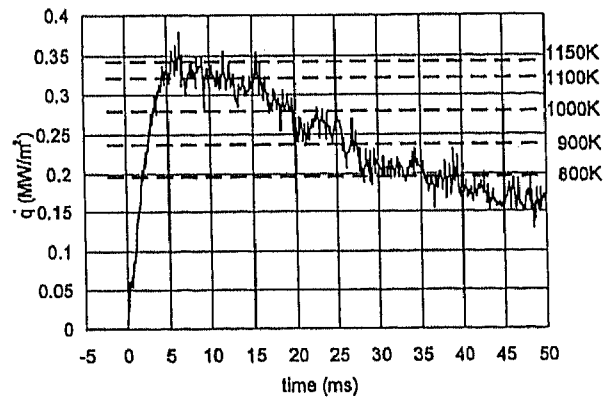


図2 球模型淀み点加熱率の時間履歴

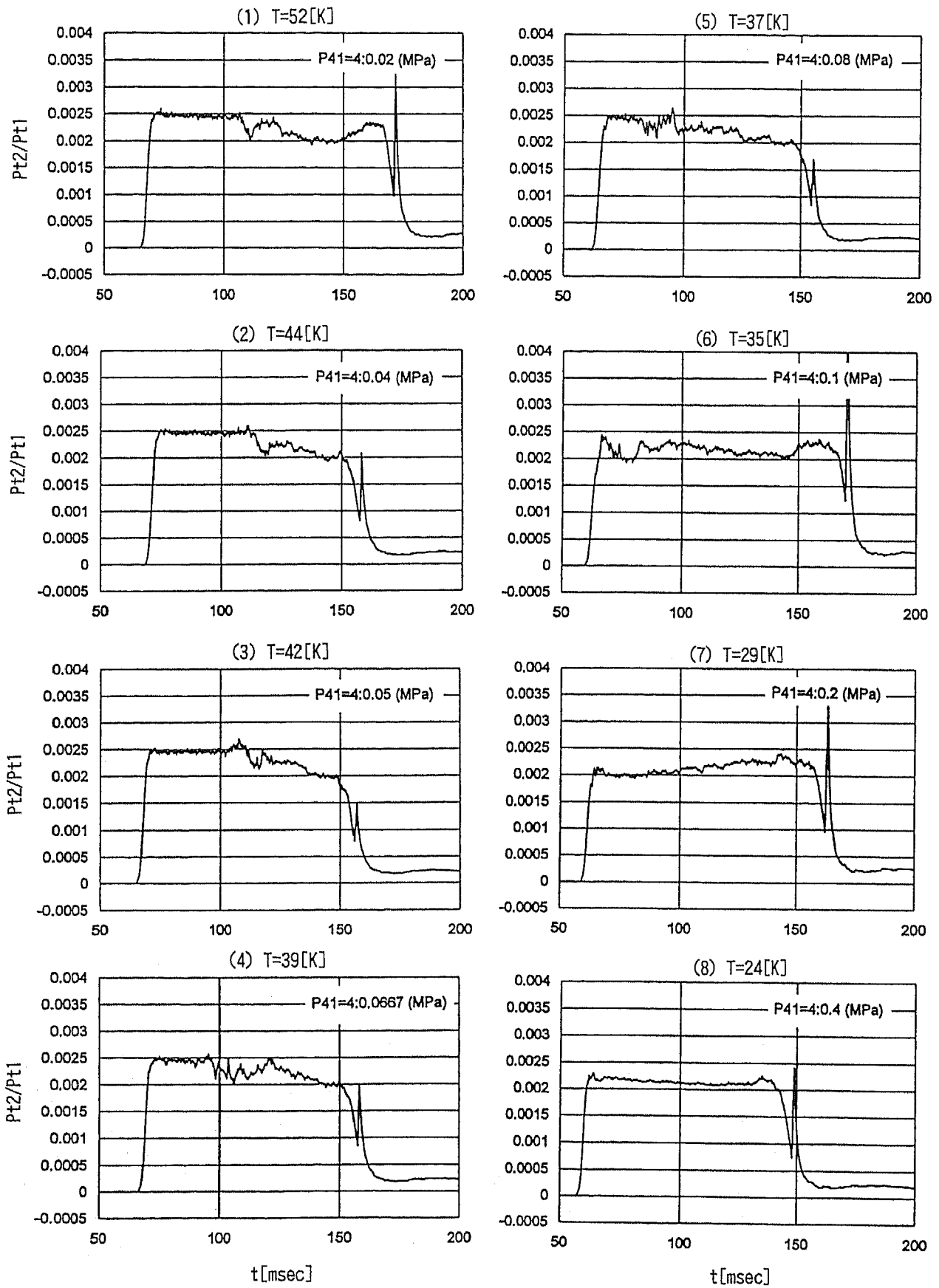


図3 ピトー圧力比波形時間履歴 ($P_0=3.4$ [MPa])

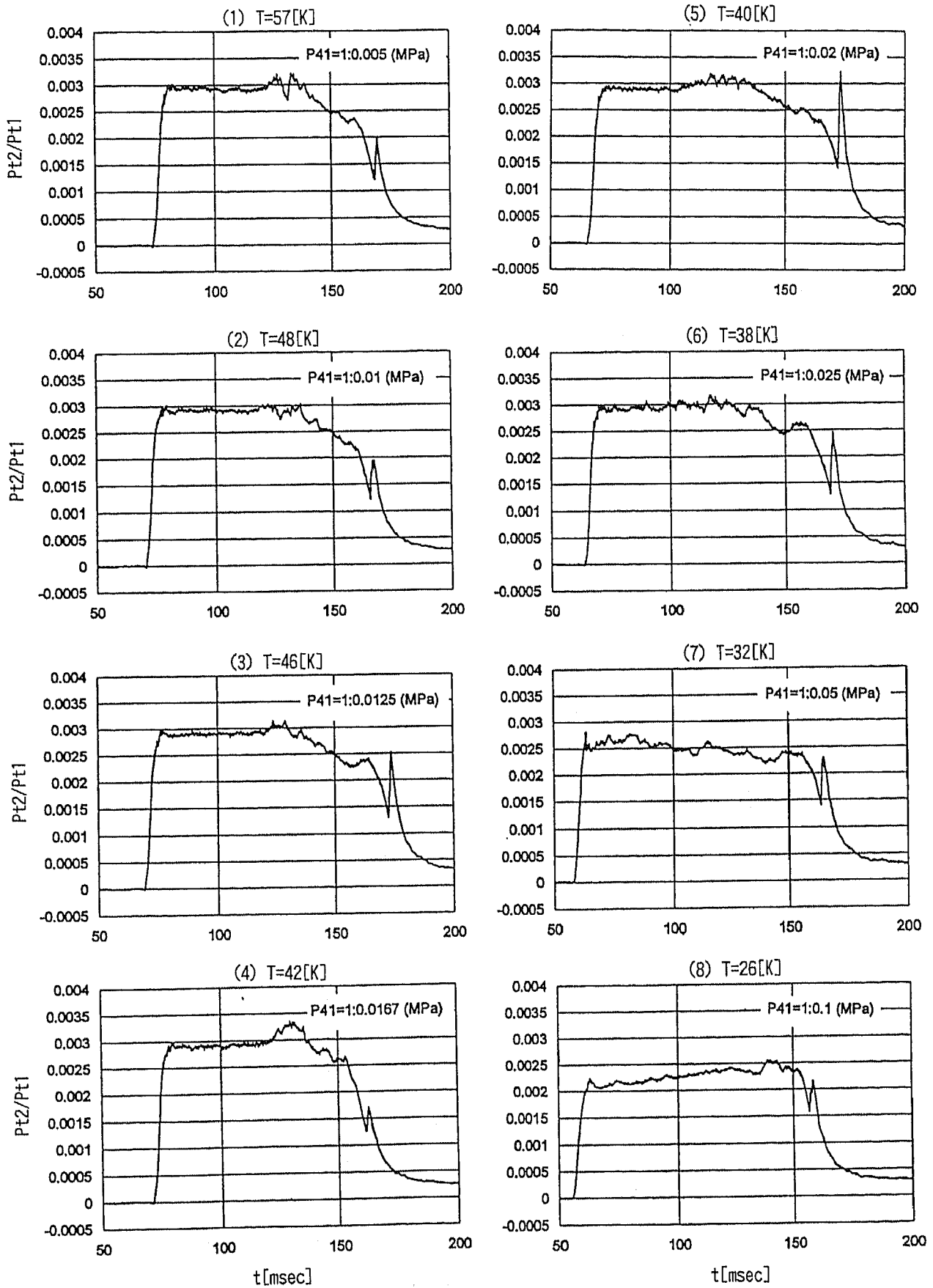


図4 ピトー圧力比波形時間履歴 ($P_0=0.85$ [MPa])

件 ($T=24[K]$) では、一見乱れの少ない一定値を表すような波形も示すので診断に際して注意を要する。図4(1)～(8)に同様に風洞淀み点圧力 $P_0=0.85[MPa]$ における一連のピトー圧力比波形の変化の様子を示す。この $P_0=0.85[MPa]$ 場合においては図4(7)に示すように $T=32[K]$ の条件において一様流の成立直後の $15[msec]$ の区間で波形の乱れとレベルの低下が現れ、Condensation を起こしたと判断出来る。

図5にこれらの試験結果を Daum らの試験結果と比較して示す。縦軸は一様性静圧、横軸は静温度で、今回行った2通りの圧力条件の全試験ケースに対し、Condensation を起こしたと判断した試験ケースを●で示した。風洞淀み点圧力 $P_0=3.4[MPa]$ における結果は Daum らの試験結果とほぼ一致し、 $P_0=0.85[MPa]$ 場合においてはやや高めの温度から Condensation を起こすという結果となった。しかしながら、最近の風洞特性試験結果から当風洞の一様流温度は風洞淀み点圧力にある程度依存する事が分かっており、淀み点圧力が低くなる程温度も低下する傾向にあ

る。この事を考慮すると $P_0=0.85[MPa]$ 場合において Condensation を起こしたとされる試験条件の温度は、今回推算した値より低かったという事が考えられ、これは Daum らの試験結果と一致する方向である。

なお、この一様流温度への淀み点圧力の影響については現在更なる風洞特性試験を進めており、その詳細については別の機会に報告したい。

4(2). 水蒸気の影響による Air Condensation

図6に風洞淀み点圧力 $P_0=3.4[MPa]$ において一様流中の水蒸気量を増して行き Condensation を起こした状態までの一連のピトー圧力比波形の変化の様子を示す。Condensation の影響は図6(7)の $320[ppmV]$ の条件から出始め、波形の乱れとレベルの上昇が現れる。更に水蒸気量を増やすと波形の乱れは大きくなると共に今度はレベルが低下する傾向も示す。

図7は風洞淀み点圧力 $P_0=1.7[MPa]$ の場合である。試験ケースが少ないので Onset Point を正確に捉えたとは言い難いが、本圧力条件では図

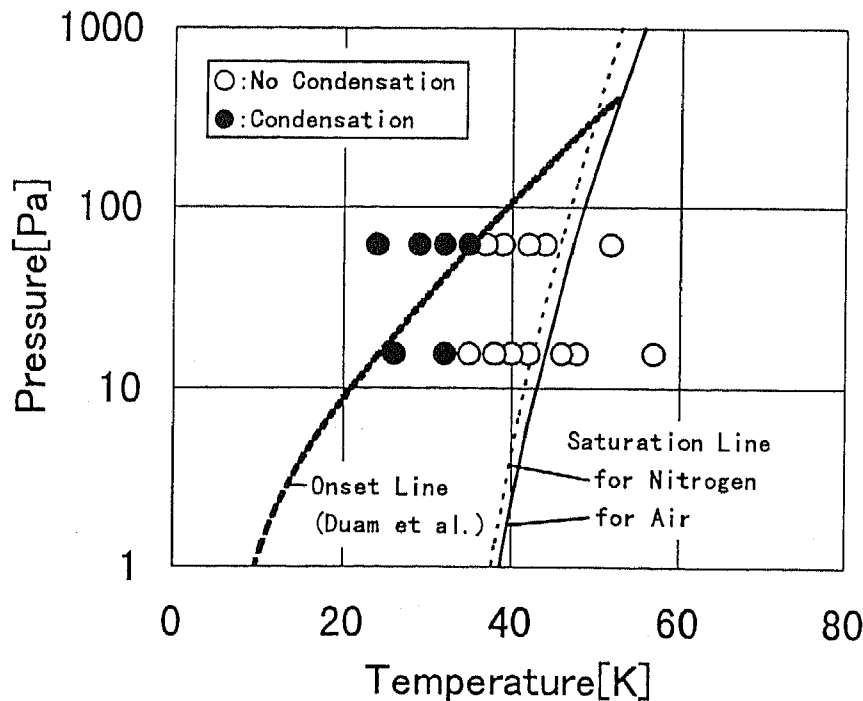


図5 Condensation 診断結果と他の試験結果との比較

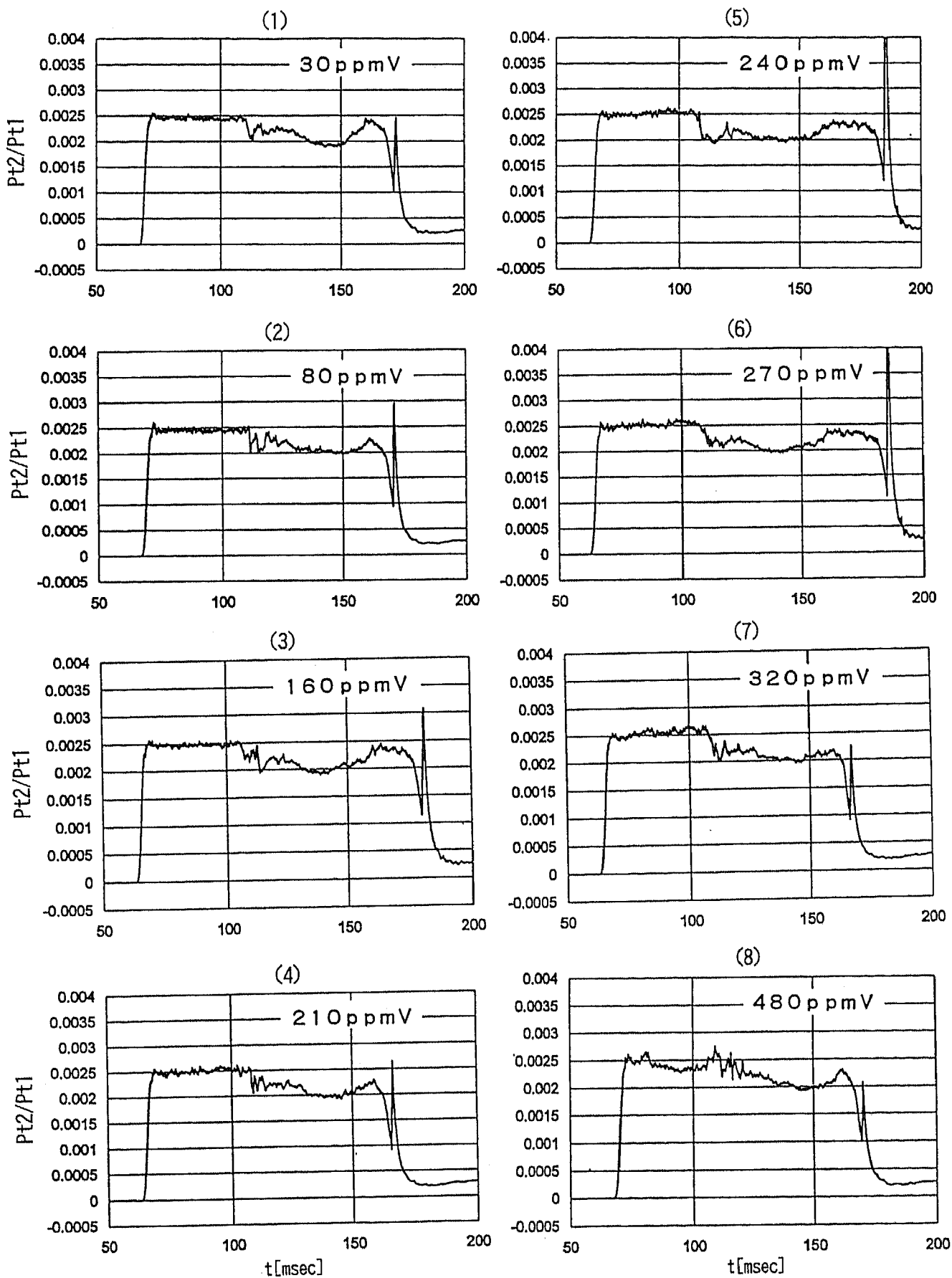


図6 ピトー圧力比波形時間履歴 ($P_0=3.4$ [MPa], $T_0=1180$ [K])

7(4)に示す 780[ppmV]の試験条件で Condensation が起きたと判断出来る。

図8は風洞淀み点圧力 $P_0=0.85$ [MPa]の場合で、Condensation の影響と考えられる波形の乱れは図8(5)に示す 1090[ppmV]の試験条件から現れ、水蒸気量を増すほどに波形の乱れは大きくなるが、先程の一樣流温度を変化させた場合と同様に淀み点圧力が低いほど Condensation が起こりにくい傾向にある事が分かる。

図9に一樣流中に水蒸気を含んだ場合の診断結果とM10 ノズルにおける風洞淀み点圧力に対する臨界水蒸気量をまとめて示す。風洞淀み点圧力に対して Condensation を起こしたケースを●で、正常な気流状態であったものを○で示しているが、 $P_0=1.7$ [MPa]の条件については試験スケジュール等の都合で4ケースしかデータがなく、また $P_0=0.85$ [MPa]の条件については水蒸気

設定範囲が広がったため、いずれも臨界値付近の水蒸気量の設定間隔が大きくなってしまった。Onset Point を正確に捉えるためには、臨界値付近のデータをもう少し詳細に取得する必要がある、今後適当な時期に追加試験等を行い、より正確なデータを蓄積して行きたい。

いずれにしても、これらの試験条件は図5に示した試験ケースの圧力条件の右端の点にあたり、窒素や空気の飽和条件よりも相当高いと考えられる温度であり、通常これらの気体の液化等は考えられない。それにもかかわらず、気流中の水蒸気が核となり Condensation が引き起こされる事を、本結果は示している。

5. まとめ

NAL 中型衝撃風洞と RCS 試験用ガス混合装置を用いて極超音速流の Air Condensation をピト

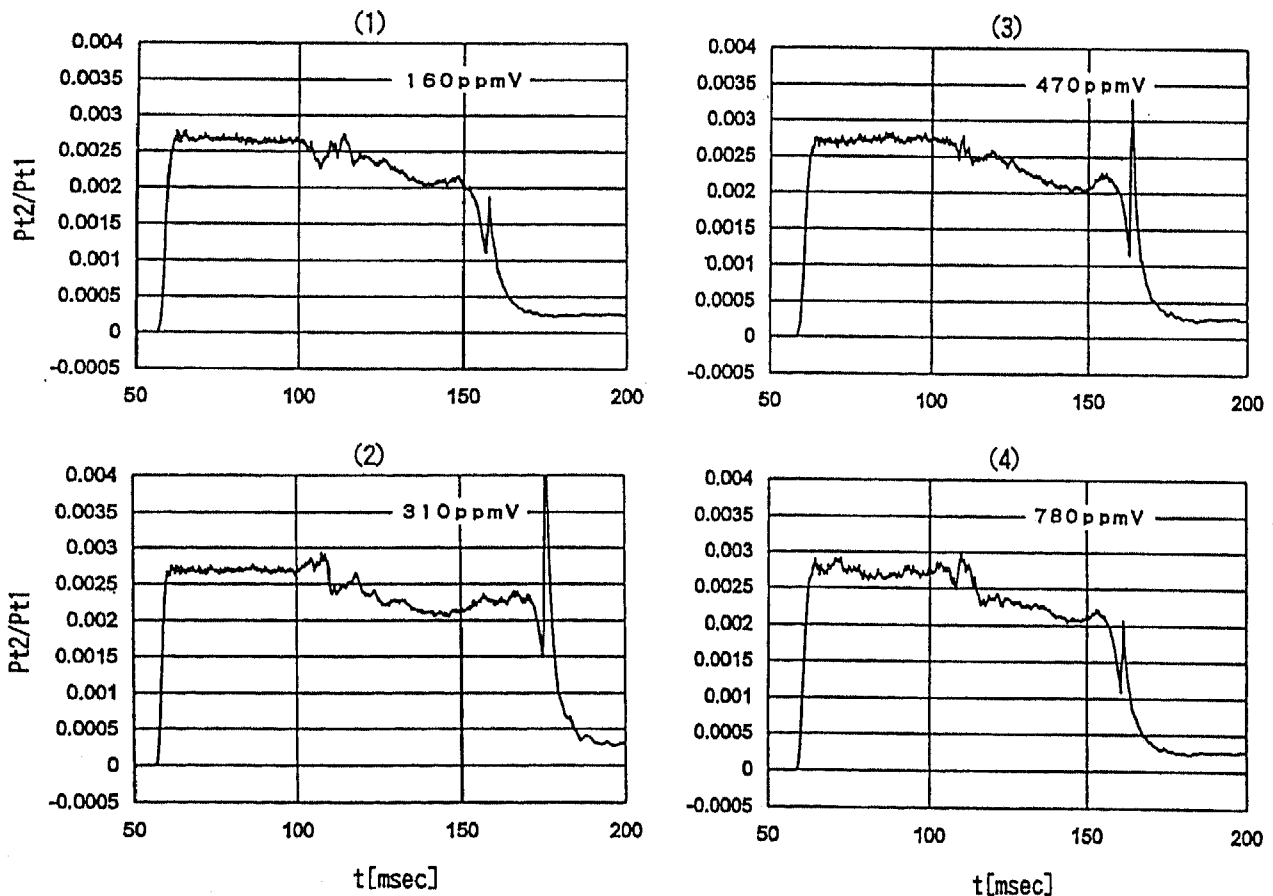


図7 ピト一圧力比波形時間履歴 ($P_0=1.7$ [MPa]、 $T_0=1180$ [K])

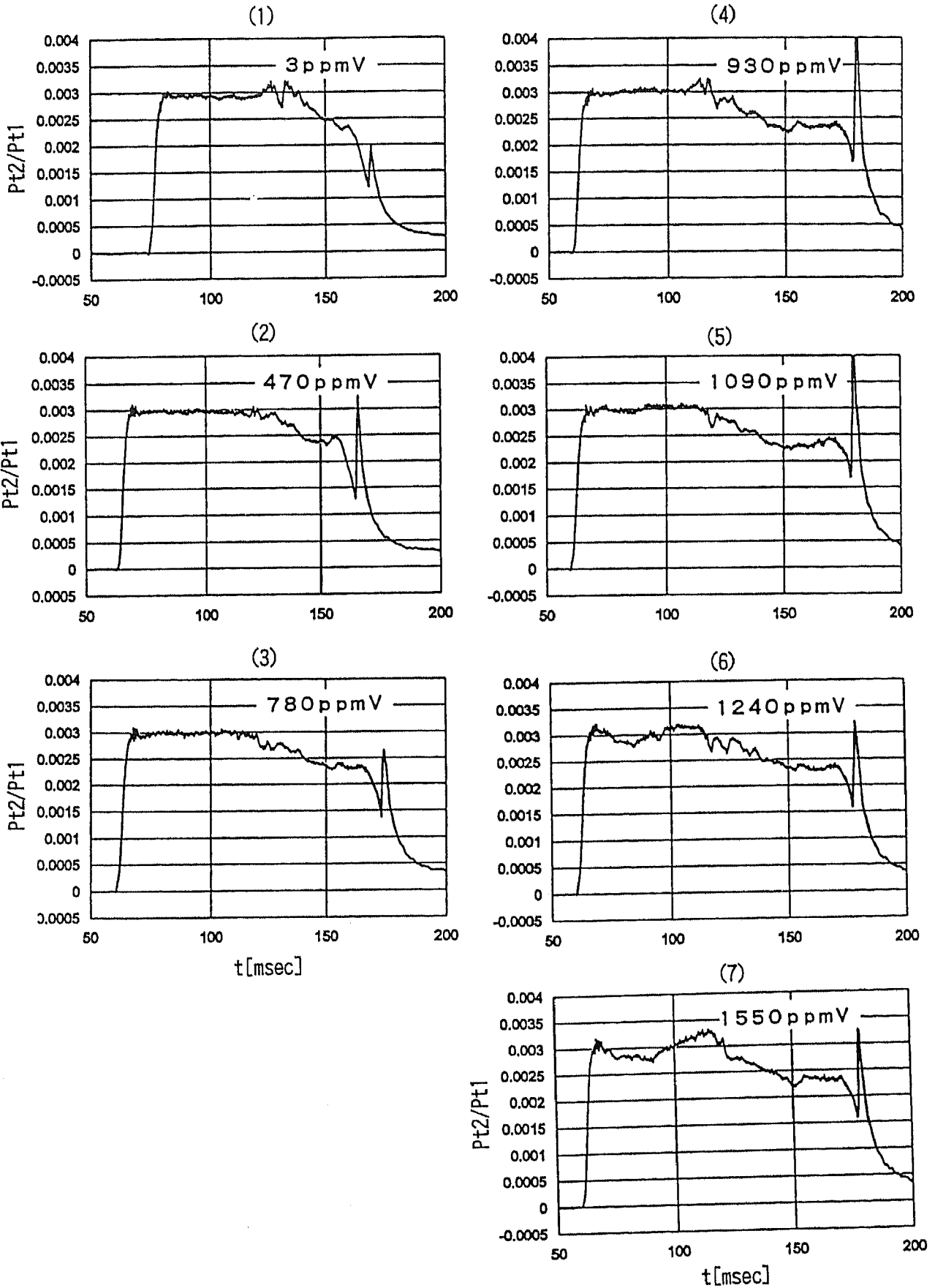


図8 ピトー圧力比波形時間履歴 ($P_0=0.85$ [MPa]、 $T_0=1180$ [K])

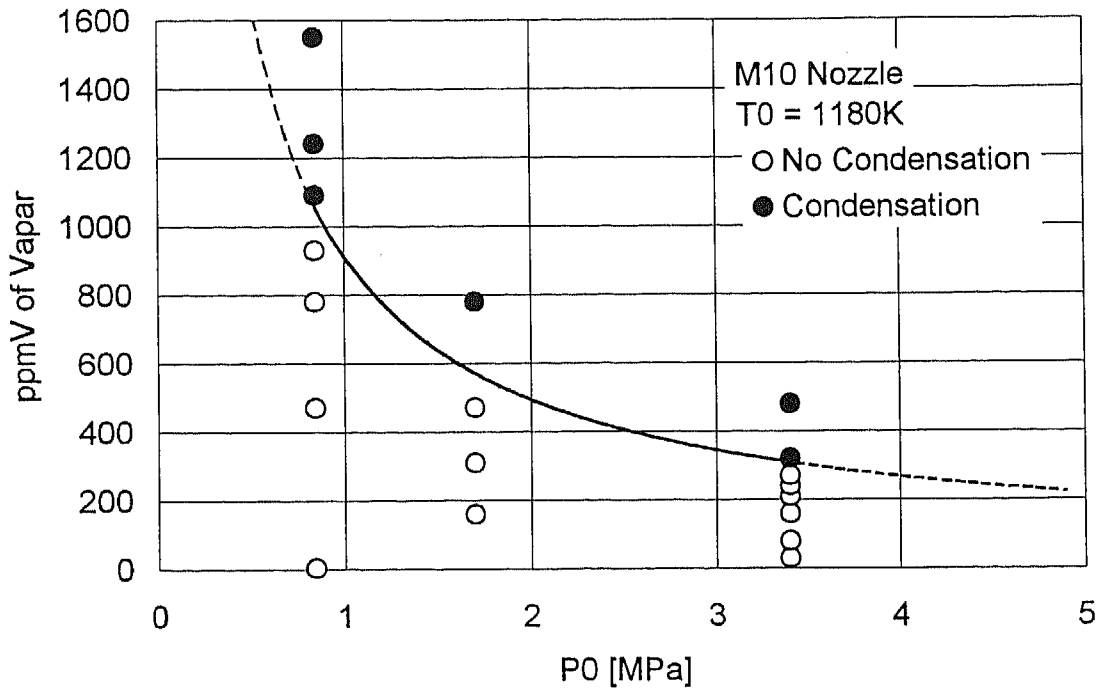


図9 風洞淀み点圧力に対する臨界水蒸気量

一圧力波形によって診断する事を試みた。

試験は乾燥空気を用い、 $P_0=3.4, 0.85$ [MPa]の2つの風洞淀み点圧力の条件において風洞淀み点温度を $T_0=1180\sim 540$ [K]に変化させ Air Condensation に至るピトー圧力波形の変化と Onset Point を探り、Daum らの試験結果と比較した。また、一様流中の水蒸気の影響を調べるため、風洞淀み点温度を 1180[K]に固定して、淀み点圧力 $P_0=3.4, 1.7, 0.85$ [MPa]の3通りに対して一様流中の水蒸気量をそれぞれ変化させた場合のピトー圧力波形の変化と Onset Point を調べた。

これらの結果、乾燥空気を用いて測定部一様流静温度を変化させた場合の診断は Daum らの試験結果とほぼ一致し、簡便なピトー圧力波形の観測によっても比較的良い精度で気流の診断が行え、また作動気体中の水蒸気の含有量によっては Daum らが示した Onset Point より安全側でも Condensation に至る事を明らかにし、当衝撃風洞 (M10 ノズル) における臨界水蒸気量を

風洞淀み点圧力に対して示した。

これらの臨界値はノズル長さや主流マッハ数、気流のクリーン度等設備によって異なるものと思われるが、極超音速流の試験装置の運用等に当たり、一つの指標になるものと考える。

参考文献

1. Daum, F.L. and Gyarmathy, G.: "Condensation of Air and Nitrogen in Hypersonic Wind Tunnels," AIAA Journal, Vol. 6, No. 3, March 1968, pp. 458-465.
2. Griffith, B.J., Deskins, H.E. and Little, H.R.: "Condensation in Hotshot Tunnels," AEDC-TDR-64-35, February 1964.
3. 曾我 国男、白水 正男、山崎 喬: 「航技研衝撃風洞高エンタルピ化改修」、日本航空宇宙学会誌、第 42 巻、第 480 号、1994 年 1 月、pp. 39-44.
4. 山崎 喬、中北 和之: 「NAL 衝撃風洞用 RCS ガスジェット試験装置」、第 33 回飛行機シンポジウム講演集、1995 年 11 月、pp. 209-212.