超音速気流変動特性に及ぼす湿度効果について*1

Humidity Effects on Unsteady Characteristics of Supersonic Flow

高 木 正 平*2・上 村 卓 也*2・平 田 裕*2・高 田 晃 輔*2

Shohei TAKAGI, Takuya UEMURA, Yutaka HIRATA and Kosuke TAKADA

Key Words: Supersonic Flow, Humidity, Condensation Shock Wave, Free-Stream Property

Abstract: Humidity in working fluid affects on supersonic flow properties. The paper is to evaluate the flow quality of the indraft supersonic wind tunnel of Muroran Institute of Technology against moisture. The static pressure fluctuation is measured by means of an unsteady pressure sensor buried in the model of 10 degree aperture cone model installed in the test section. Results show that supersonic flow at Mach 2 is contaminated by self-sustained oscillation of condensation shock wave in case of relative humidity more than approximately 50%. It is also shown that static-pressure fluctuation to the dynamic pressure below a critical point with an absolute humidity $2 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ is attained below 0.1% in Mach 2 flow. Under atmospheric conditions between absolute humidity $2 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ and $6 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, static-pressure fluctuations may increase in the frequency range of 1–30 [kHz] due to phase change of minute ice particles generated in the supersonic nozzle. Experimental observations on three-dimensional boundary-layer transition hypersensitive to free-stream humidity are exemplified.

1. は じ め に

大気吸込み式超音速風洞における主流の気流特性は、大気に含まれる水蒸気の影響を受ける。湿度の高い空気が急激に膨張した場合、露点温度以下に達しても凝縮しないで過飽和の状態となる。しかし、何らかの原因で微小な液滴が生成されると、やがて均一な凝縮が起こる。超音速ノズル内で凝縮が発生すると流れに潜熱が放出されて、その放出量が多い場合にはノズル内で周期的な振動が誘起される。その自励振動の発生機構はルートビーク管を用いた実験的研究から、ほぼ解明されている^{1,2)}。凝縮による潜熱の発生により、ピトー管あるいは静圧管を用いた Mach 数計測にも影響を及ぼすことが指摘されている^{3–5)}。遷音速粘性流れでは、凝縮衝撃波発生のため翼の揚抗比が相対湿度の増加とともに減少することが、数値計算で明示されている⁶⁾。

室蘭工業大学の中型超音速風洞は大気吸込み式の間欠風洞で、測定部上流の流路内に調圧弁など流れを乱す突起がないことから、加圧式風洞に比べて気流変動は格段に小さいことが期待される。しかし、大気湿度が新たな気流変動源になり得ることから、今後予定されている境界層遷移研究を初めとして各種試験研究に向けて、大気湿度に対する気流変動の相関関係を予め把握しておくことが求められている。

そこで、本研究は、大気圧、湿度及び気温といった大気情報をパラメータとして、湿度に対する主流の気流変動評価を行うことを目的としている。測定部主流の気流を評価するために、10 度円錐模型に埋め込んだ非定常圧力センサーを用いて静圧変動を計測する。また測定部の凝縮濃度は主流直角に微小径のレーザー光を透過させ、凝縮によるレーザー光の散乱による受光特性から評価する。境界層遷移は主流変動に極めて敏感であることは周知である。たとえば、三次元境界層を層流から乱流に導く横流れ不安定から、定在モードと進行波モードの 2 種類が成長するが⁷⁾、特に前者は気流変動に敏感^{7–9)}であることから、この性質を利用して気流変動のレベルを示す指標とする。そのために後退円柱表面に発達する三次元境界層の遷移過程で成長する横流れ定在モードを可視化した結果も併せて報告する。

2. 実 験 装 置

2.1 超音速風洞 室蘭工業大学の中型超音速風洞の測定部として、3 つのノズルブロックが用意され、マッハ数 2、3 及び 4 に固定した超音速流が実現できる。いずれのブロックも長さは 2 [m] で、上下内面を曲面とした二次元ノズルであり、測定部断面は 400 [mm] × 400 [mm] である。左右の側壁には直径 380 [mm] のシュリーレン写真用の円形ガラスが埋め込まれている。本研究ではマッハ数 2 のノズルブロックを用いた実験を行う。

気流は建物の外部に設置した外径 1 [m] の円形ベルマウスで取り込み、途中安全弁の下流には円形から正方形の変形流路でノズルブロックに接続する。ノズルブロック下流には模型固定用の支持装置、その下流には流れを制御するスタート弁が設置され、通風時に開弁される。流路の最下

*1 © 2014 日本航空宇宙学会

平成 24 年 7 月 6 日、第 44 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2012 において発表。平成 25 年 6 月 10 日原稿受付

*2 室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター

流には容量が 100 m^3 の真空タンクが5基設置され、通風時間は12秒前後である。下流部の真空タンクを除く風洞外形は既報文献10), 11)に掲載されているので参照されたい。

2.2 凝縮濃度計測と絶対湿度の算出 大気湿度が高ければ超音速ノズルで水蒸気の凝縮が発生し、気流は白濁し目視でも十分確認できる場合もある。このような凝縮した微小な氷の粒は光を散乱することから、測定部の外部から主流直角に中心波長が 650 [nm] の講演用赤色レーザーポインタ光を放射し、その透過光を浜松ホトニクス社の 970 [nm] に最大感度をもつシリコン系 PIN フォトダイオード S6775 で受光することで、レーザー光の減衰率から凝縮濃度の評価が可能となる。なお、レーザー光の波長とフォトダイオードの最大感度をもつ波長と隔たりがあるが、赤色レーザー光に対しても十分な感度があることを事前に確認済みである。また、大気湿度が高い場合には、超音速スロート近傍で自励的な凝縮衝撃波の発生から変動が生ずることが知られていることから、ダイオード出力の時間変動にも着目した。さらに、この時間変動の位相を主流方向に追跡できれば、流れ方向に設置したフォトダイオードの間隔と受光信号の位相差から、凝縮変動の移流速度を評価できるはずである。この推測に基づいて、第1図に示すようにレーザー光と受光ダイオードを組み合わせた5組を主流方向に 45 [mm] 間隔で並べ、ダイオード出力信号を同時計測した。この変動の周波数は 1 [kHz] 以下であることから、各信号を後述する NF ブロック社製のデータロガー EZ7510 を用いて 100 [kHz] ないしは 200 [kHz] で同時収録した。

大気相対湿度 [%] から絶対湿度 $[\text{g}/\text{m}^3]$ の換算は、文献12)を参照した。換算式を以下に示す。

$$\text{絶対湿度} = \text{相対湿度} [\%] \times 0.794 \times 10^{-2} \times \exp(e)/100, \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} e = & - (6096.9385/T + 21.2409642 \\ & - 2.711193 \times 10^{-2} \times T + 1.673952 \times 10^{-5} \times T^2 \\ & + 2.433502 \times \log(T)) / (1 + 0.00366 \times t), \end{aligned}$$

であり、 e は水蒸気圧 $[\text{Pa}]$ 、 T は絶対温度 $T\text{ [K]} = 273.15 +$

第1図 マッハ数2の超音速ノズル測定部下流方向に水平に 45 [mm] 間隔で並べた5組のレーザーダイオードとフォトダイオード

t , t は乾球温度 $[\text{°C}]$ である。

なお、以降絶対湿度と相対湿度をそれぞれ AH と RH と略記することとし、AH3.1 は絶対湿度 $3.1\text{ [g}/\text{m}^3]$ 、RH50 は相対湿度 $50[\%]$ を意味する。

2.3 10度円錐模型と非定常圧力センサー、斜め円柱模型 測定部内壁に発達している境界層はいずれのノズルブロックでも乱流であり、測定部気流の静圧変動評価に測定部内壁の静圧変動計測からは評価できない。そこで、静圧変動計測のために10度円錐模型を新規製作した。模型断面図を第2図(a)に示す。円錐部の流れ方向の全長は 250 [mm] 、先端から 70 [mm] まではステンレス鋼で先端半径は 0.14 [mm] である。その先端部下流端より断熱材として広く知られた金属より熱電導率が低いベスペル[®]材で製作した。先端金属部表面の中心線平均粗さ (R_a) は、 $0.21\text{ }\mu\text{mRa}$ 、ベスペル製の下流部は $0.2\text{ }\mu\text{mRa}$ であり、先端と下流部の接合部の段差は $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下に仕上げられている。Kulite 製の差動型半導体圧力センサー XCQ-62-350 mBARD (感度 $5\text{ [PSI]} = 34.5\text{ [kPa]}$) を直径 0.5 [mm] の静圧孔の下に埋め込んだ。圧力センサーの外径は 1.65 mm であり模型表面直角に、また模型表面とセンサー上面との間隔は約 0.5 [mm] である。このように圧力センサー面と模型表面までの間隔を狭め、さらに静圧孔とセンサー上面の空隙容量を小さくすることでヘルムホルツ共振周波数を圧力センサーの応答特性より高めた。静圧孔の位置は、円錐模型先端より 120 [mm] である。

計測した静圧変動の実効値を算出する手順として、通風中の全データを印刷し、通風時間内の緩やかな変化が観測された場合には、その増加減少分を除去した。動圧に対する静圧変動レベルの10度円錐模型境界層遷移に関するデータベース¹³⁾によると、変動レベルが $0.1\sim 0.3\text{ [%]}$ の環境では遷移レイノルズ数はそれぞれ約 $5 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6$ と予測されている。非定常圧力センサー位置におけるレイノルズ数

第2図 風洞模型
(a) 10度円錐模型, (b) 斜め円柱模型。単位は $[\text{mm}]$ 。

は約 0.8×10^6 であることから層流は維持されているものと推察される。Kulite 製のセンサーカタログによると、応答特性は共振周波数 150 kHz の 20[%] が目安となるので、非定常変動に対する応答限界は 30 [kHz] 程度である。このセンサーアンプとして、共和電業の直流増幅器 CDV-700A を用いた。円錐模型の先端より 245 [mm] には周方向 90 [°] 間隔に 4 箇所静圧孔を空けてあり、主流に対する迎え角 0 [°] の微調整に用いた。

三次元境界層遷移の試験には、第 2 図 (b) に示すようにステンレス製の直径 40 [mm]、軸長 500 [mm] の円柱模型を主流に対して 60 [°] の後退角をもたせ、中央部を保持して鉛直面内に設置した。模型先端と後端はいずれも流れに対して平行に切り落とした。横流れ不安定に起因して成長する定在モードの縦渦列はオイルフロー法を用いて円柱表面の可視化を行った。オイルフローで使用した材料は、酸化チタン、オレイン酸、流動パラフィンで 1 : 2 : 8 の割合で混合した。通風中にはビデオカメラで、また通風後は静止画像を取得した。

2.4 データ収録と解析 データ収録装置として NF ブロック社の EZ7510 を用いた。この装置の入力部であるアナログ信号からデジタル信号に変換する入力ポートは 8 チャンネル、各ポートは 16 ビットの分解能をもち、最高サンプリング周波数は 1 [MHz] である。本実験では、サンプリング周波数を 100 [kHz] ないしは 200 [kHz] とした。EZ7510 の前段には、日本オーディオ社製の減衰特性 100 [dB/Oct] のローパスフィルター PGF-8 を設置し、遮断周波数はサンプリング周波数の 0.5 倍とした。収録された非定常圧力センサー出力とフォトダイオード出力は、エクセルないしは Matlab を用いて周波数分析ならびに解析結果のプロットを行った。

3. 実験結果

3.1 水蒸気凝縮の定量評価 測定部の超音速流を透過しフォトダイオードで受光した信号は、超音速流が起動する時刻を挟んで、直流成分からデーターロガーに収録した。第 3 図 (a) は代表的な 4 通りの条件、すなわち (AH2.9, RH52), (AH5.0, RH44), (AH6.6, RH52) および (AH8.9, RH78) について、受光波形の時系列データを比較したものである。見やすくするために、受光の強度を示す縦軸は各信号に適当な係数をかけてあるので、波形間の強度の比較は無意味である。また各波形の時間軸 (横軸) も適当にずらしてある。風洞起動前の各信号の電圧値は一定値を示しているが、いずれの波形についてもある時点で急激に出力の低下が観測される。この時刻が通風の開始時刻に対応している。レーザー光が完全に散乱されると出力は 0 [V] であることから、いずれのケースも起動時瞬時ではあるが、完全散乱が生じていることを示している。このような透過光の変化は、風路内の空気に含まれる水蒸気の凝縮による水の粒子でレーザー光が完全散乱されたためである。なお、湿度が (AH6.6, RH52) のケースでは、通風前後を通して振幅の小さな周期変動が重畳しているが、計測時風洞の照明を消さなかつ

たために照明の強度変化をとらえたものである。

透過光特性は湿度の大きさに応じて 2 種類に分類できそうである。すなわち、絶対湿度が AH6.6 より小さい場合には、起動直後の過渡的变化の後 0.4 [秒] 以内で出力の変動も小さくほぼ一定となった。しかし、湿度が最も大きい AH8.9 のケースでは、通風後の波形の振幅が大きいことが分かる。この波形の時間軸を拡大して示したのが、第 3 図 (b) である。規則的でほぼ一定振幅の周期変動がとらえられ、その周波数は 225 [Hz] であった。通風前の透過光の強度を 100 [%] とすると、第 3 図 (a) から通風時透過光の平均値は約 48 [%] まで減少し、変動の両振幅も約 65 [%] に達し極めて大きな周期変動であることが理解できる。この周期変動の由来は、大気湿度が大きい場合、大気が超音速スロートを通過する際に起こる凝縮衝撃波の発生に伴う自励振動であることは、すでに松尾ら^{1,2)}が指摘している通りである。前掲の第 3 図 (b) あるいは第 5 図 (c) で後述するように、振動周波数の高い選択性は、松尾らが指摘した自励振動の特徴を示唆している。

ここには示していないが、絶対湿度が AH1.9 のケースでは起動直後の過渡的な変化を除外すれば、受光器の出力変化はほとんど観測されなかった。第 3 図 (c) には通風前の受光器の出力に対して、通風中の直流成分の減衰量を絶対湿度に対して図示したもので、直線は最小自乗法で求めたものである。絶対湿度が減少すると透過光はほぼ直線的な増加傾向を示している。すなわち、絶対湿度が AH18 より大きくなるとレーザー光は測定部を透過しない程度に凝縮しているが、絶対湿度が AH2 以下では透過光の減衰はほとんど見られないことを示している。一方、凝縮衝撃波の発生に起因する周期変動の周波数を絶対湿度及び相対湿度に対して整理したのがそれぞれ第 3 図 (d) と (e) である。絶対湿度に対する変動周波数の相関関係は小さいが、相対湿度で整理すると変動周波数は 1 つの関係式で整理できそうである。そこで第 3 図 (e) には松尾ら¹⁾が次元解析と彼らの実験結果から導出した相関式もプロットしてある。なお、松尾らの相関式によれば衝撃波の振動周波数は相対湿度 ϕ の 1.76 乗と総温の 0.5 乗の積に比例して高くなることを示しているが、本データの総温変化の幅は小さいため、総温に関する依存性については議論できない。しかし、本実験結果は松尾らの相関式とよく一致していることが分かる。

凝縮衝撃波の自励振動に伴って生じている凝縮濃度の流れ方向の移流速度を計測するために、流れ方向に 45 [mm] 間隔で並べたレーザー光とその受光器の 5 セットから得られた時系列データを第 4 図に示す。時系列データは前掲第 3 図 (a) の絶対湿度が最も高い (AH8.9, RH78) 流れの条件で取得したものである。受光器出力の感度はセンサーごとに異なることから、位相比較のために振幅をそろえて図示してある。上流から番号付けされた受光器出力は下流方向に位相が遅れている様子がとらえられている。各信号間の位相遅れは、相互相関から算出した。その結果、最上流と最下流の位相差は、間隔 180 [mm] に対して 0.356 [ms] であったことから位相速度は 505 [m/s] と求まる。総圧管圧力

第3図 湿度に対する通風前後の透過光の特性

(a) 出力信号の比較, (b) AH8.9 の条件における出力信号の時間軸拡大, (c) 絶対湿度に対するレーザー光の透過率, (d) 絶対湿度に対する凝縮振動周波数, (e) 相対湿度に対する凝縮振動周波数.

第4図 透過光の同時計測結果

から等エントロピー関係式を用いて求めた主流速度 507 [m/s] と同程度であることが分かった。総圧管の読みも湿度の影響を受けるが、氷の微粒子はほとんど滑ることなく主流に乗って流下していると考えられる。

3.2 円錐模型の静圧変動 湿度が高い場合には水蒸気の凝縮は時間的な変動を伴うことから、この効果は測定部の気流特性に何らかの影響を及ぼすことが懸念される。そこで、10 度円錐模型の非定常圧力センサーを用いた静圧変動の計測結果を次に示す。

湿度が異なる代表的な 4 通りの条件下で、円錐模型の非定常圧力センサーで計測した静圧変動波形を第 5 図 (a) に、またこれらの波形を周波数分析した結果を第 5 図 (b) に比較している。第 5 図 (a) も (b) も見やすくするために、変

第5図 絶対湿度に対する10度円錐模型の、(a) 静圧変動波形の比較、(b) 静圧変動のパワースペクトルの比較、(c) 静圧変動と透過光波形のパワースペクトルの比較

動波形の平均値はずらしてプロットしてあり、波形の振幅は相対比較できるが、平均値の比較は無意味である。また湿度条件 (AH1.9, RH38) で計測したスペクトルを基準に各スペクトルは +15 [dB] のオフセットをつけて図示してある。最も絶対湿度の高い条件 (AH8.9, RH78) における静圧変動は、すでに掲載した第3図に示したレーザー受光器出力と同時に取得したものである。

湿度が異なる4ケースの中で絶対湿度と相対湿度が最も低いケース (AH1.9, RH38) の条件下における静圧変動は、予測される通り波形観測からも変動の振幅が最も小さい。この結果はスペクトル解析結果とも整合しており、全周

波数帯域に渡って特徴的な変動成分もなく、周波数の増加とともに変動振幅もなだらかに減少し、その全変動の実効値は後述するように主流の動圧に対して 0.1[%] 以下である。一方、絶対湿度が最も高い AH8.9 の条件においては、静圧変動に周期的な波形が観測され、変動の全振幅は 1 [kPa] 弱で総圧のほぼ 1[%] に達していることが分かる。また、この波形を周波数解析したスペクトル分布には鋭いピーク状の成分が観測され、その基本波の周波数は 225 [Hz] である。この周波数は、前掲した第3図 (b) のレーザー受光器出力変動の周波数と同じであることから、凝縮に伴う自励振動が測定部の静圧に直接影響を及ぼしていることが明らかとなった。確認のために、レーザー受光器出力変動のスペクトルと静圧変動のスペクトルを第5図 (c) に比較した。両者の周期変動成分は高調波成分も含めて極めて強い相関が確認できる。また、興味深い点は、この自励振動に起因する離散的な基本周波数成分及びその高調波成分以外の静圧変動の連続成分は、絶対湿度が本実験の中で最も低いケース (AH1.9, RH38) の静圧変動のレベルとほとんど差異は見られないことである。このことは、第3図 (b) のレーザー透過光の変動に不規則変動がほとんど重畳していない事実からも推測できる。

一方、第5図 (b) において自励振動が観察されていない2つのケース (AH2.9, RH52) と (AH2.9, RH62) において、前者については第3図 (a) で絶対湿度が小さい例としてレーザー受光器の出力波形を示した。この前者の条件ではレーザー光の減衰は 5[%] 程度、後者の条件では減衰はほとんどなく、目視による気流の白濁はいずれの場合も観察されていない。しかし、この2つのケースの静圧変動に共通していることは、第5図 (a) に示すように正のパルス状の静圧変動が不規則に重畳していることで、パルス状の変動の頻度は、相対湿度が低い方がむしろ高い。第5図に示したスペクトル分布を比較すると、絶対湿度が本実験の中で最も低いケース (AH1.9, RH38) に比べて 1~30 [kHz] 帯域で変動レベルが相対的に高いことは明白である。これらのパルス状の変動が 1~30 [kHz] 帯域の変動成分の増大に貢献していると考えられる。パルス状信号の幅は、0.25~0.5 [ms] 程度であり、円錐模型に沿うマッハ数は 1.9 であることから、パルス状信号の主流方向の空間スケールは 120~240 [mm] である。このような空間スケールをもつ変動源として次の理由が考えられる。湿った空気が超音速ノズルを通過した際、凝縮によって作られた氷の粒子が、円錐模型の先端に生じる衝撃波を通過する際、氷から水もしくは水滴への相変化が生じ、準一次元理論によると、この際吸熱反応で相変化中の粒子は減速され、結果として静圧の上昇を伴うであろう。静圧孔付近をこのような相変化粒子が通過することでパルス状の圧力上昇が発生すると推測される。一方、凝縮衝撃波の自励振動が生じる湿度が高い条件では、振動の周期に同期して相変化が行われるために、1~30 [kHz] 帯域の静圧変動は生じないものと考えられる。また、前掲第3図 (a) の (AH2.9, RH52) の条件では、レーザー受光器出力波形に時折下向きのパルス状信号がとらえ

第6図 湿度に対する静圧変動強度の比較

(a) 絶対湿度に対する静圧変動強度, (b) 相対湿度に対する静圧変動強度.

られているが、これはある程度の空間スケールをもつ水の微粒子群がレーザー光を通過した結果であると推測される。なお、上記の正のパルス状静圧変動発生の機構に関する推測を裏付けるために、熱線あるいは冷線温度センサー等を静圧孔近傍に設置し、静圧と熱線風速計の出力の同時計測による相関計測を予定している。

絶対湿度あるいは相対湿度に対して、静圧変動の実効値を動圧で無次元化した結果を第6図(a)と(b)に示す。絶対湿度が低いほど、また相対湿度が低いほど静圧変動は小さくなる傾向を示しているが、どちらの湿度に対しても強い相関関係はない。ただ、室蘭地区の冬場では、AH2以下では気流変動レベルは0.1[%]以下¹⁴⁾が達成されており、超音速流の静粛条件の目安となる気流が実現されている。このような大気湿度の影響が比較的小さい気流ならびに凝縮振動が生じている湿度が大きい場合について、境界層遷移に関する比較実験を実施した。

3.3 斜め円柱境界層遷移 湿度条件 (AH2.6, RH56) の下でオイルフローによる円柱表面の可視化写真を第7図(a)に示す。円錐模型を用いた静圧変動計測を同時にはできないことから、第6図から静圧変動の大きさを推定すると、動圧に対して0.1~0.2%の範囲である。このような気象条件の下で、数回の通風で比較的確かな痕跡が確認できた可視化像のうちの1枚である。横流れ不安定は粗さに敏感であることから横流れ不安定の臨界点が存在する付着線近傍領域ではオイル塗布は避け、特に30~90[°]の領域を可視化した。写真上部には1[mm]単位のスケールと右側には付着線から円柱表面の角度 ϕ [°]を示す数字が映し込まれている。 $\phi = 40$ [°]より下流から多数の筋状の痕跡が認められる。そこで、 $\phi = 50$ [°]に沿って画像に書き込んだ白線方向(付着線に平行方向)に沿ってデジタル画像データをスペクトル解析することで波長 λ を算出した(第7図(b))。スペクトル解析から波長は約0.9[mm]、本実験条件で線形安定解析から得られた波長は0.82[mm]であることから、概ね両者の一致も確認され、筋状の痕跡は横流れ不安定の定在モードの存在を示唆するものと言えよう。また、0.1[%]以下の静圧変動が達成されている条件下で熱線風速計によ

第7図 オイルフローによる通風終了時の円柱表面の可視化像(a)と波長計測(b). 湿度条件 (AH2.6, RH52).

第8図 絶対湿度 6.9 [g/cm³] の条件における通風時の円柱表面のオイルの挙動
(a) 通風開始 2 秒後, (b) 通風開始 6 秒後.

る時間発展型モードの検出も行い、線形安定解析との比較検証から横流れ進行波モードと同定された。詳細は別報¹⁵⁾を参照されたい。一方、第8図に示すように相対湿度が高く凝縮衝撃波が発生する条件 (AH6.9) では通風開始時には弱いながらも筋状の痕跡が確認されたが、通風を停止するまでの間に、殆どその痕跡は消滅した。この結果は、気

流変動が大きい条件では、三次元境界層の横流れ不安定に起因する定在型モードは成長しにくいという Bippes⁸⁾ の実験結果と整合しているように見える。しかし、境界層遷移は主流変動のレベルの大きさだけでなく、どの周波数帯域の成分が遷移過程に係っているかなど、今後の詳細な調査が必要である。

4. 結 論

大気吸込み式超音速風洞は、大気に含まれる水蒸気の凝縮は避けられないため、風洞気流特性は大気湿度の影響を受ける。この影響を定量的に評価するために、大気湿度に対して測定部のマッハ数が 2 の超音速ノズルに 10 度円錐模型を設置し、模型内部に埋め込んだ非定常圧力センサーで静圧変動を計測した。また、測定部の超音速流に直角にレーザー光を照射し、透過レーザー光をシリコン系 PIN フォトダイオードで検出し、凝縮の定量評価を行った。さらに、気流変動に敏感な三次元境界層遷移過程をオイルフローで可視化することで気流の質の効果を例証する実験も行った。その結果、以下の結論が導ける。

- 1) 絶対湿度が概ね $2 \text{ [g/m}^3\text{]}$ 以下では、超音速流の動圧に対する静圧の変動は 0.1% 以下である。
- 2) 絶対湿度が $2 \sim 6 \text{ [g/m}^3\text{]}$ の範囲では、 $1 \sim 30 \text{ [kHz]}$ 帯域で静圧変動のレベルが相対的に増大するが、これは比較的低周波の静圧変動に重畳する正のパルス状変動によるもので、その空間スケールは $120 \sim 240 \text{ [mm]}$ 程度である。
- 3) この正のパルス状変動は超音速ノズルで生成された水の粒子が円錐模型の先端の衝撃波を通過する際、再び相変化する際の吸熱反応に起因するものと考えられる。
- 4) 実験した範囲で、絶対湿度が $6 \text{ [g/m}^3\text{]}$ 以上、相対湿度が 50% 以上で 90% 以下では、超音速ノズルで自励振動を伴う凝縮衝撃波が発生する。
- 5) 凝縮による自励振動の発生によって測定部にこの振動周波数をもつ静圧変動を招来し、この静圧変動と凝縮変動を検出するレーザー透過光強度と強い相関が観測された。
- 6) この凝縮変動は超音速流とともに移流している。
- 7) 絶対湿度が小さく、気流変動が比較的小さな超音速流に置かれた斜め円柱境界層には、横流れ不安定に起因した定在モード遷移が観察された。
- 8) 一方、絶対湿度が高く凝縮衝撃波が形成された超音速流では、定在モード遷移が観察されなかった。

斜め円柱表面に沿う超音速三次元境界層の安定解析は大阪府立大学の坂上昇史先生にお願いした。深甚なる感謝の意を表したい。また、データ取得・処理では、室蘭工業大学大学院生の大立目博幸君に多大なる協力を頂いた。ここに感謝を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 松尾一泰, 川越茂敏, 園田圭介, 瀬戸口俊明: 凝縮を伴うラバルノズル流れの振動 (第 1 報, 振動の発生範囲と周波数について), 日本機械学会論文集 (B 編), **49** (1983), pp. 108–114.
- 2) 松尾一泰, 川越茂敏, 園田圭介, 瀬戸口俊明: 凝縮を伴うラバルノズル流れの振動 (第 2 報, 振幅と発生機構について), 日本機械学会論文集 (B 編), **50** (1984), pp. 1319–1324.
- 3) Huang, J. C., Gault, R. I., Benard, E. and Raghunathan, S.: Effect of Humidity on Transonic Flow, *J. Aircraft*, **45** (2008), pp. 2092–2099.
- 4) 永井伸治, 津田尚一, 小山忠勇, 平林則明: 極超音速風洞の水分管理, 日本航空宇宙学会誌, **55** (2007), pp. 483–489.
- 5) Herring, G. C.: Mach-Number Measurement with Laser and Pressure Probes in Humid Supersonic Flow, *AIAA J.*, **46** (2008), pp. 2107–2108.
- 6) 入屋明広, 山本 悟, 大宮司久明: 湿度を考慮した遷音速粘性流れの数値解法, 日本機械学会論文集 (B 編), **62** (1996), pp. 3854–3859.
- 7) Saric, S. W. and Reed, H. L.: Stability of Three-Dimensional Boundary Layers, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **21** (1989), pp. 235–284.
- 8) Bippes, H.: Basic Experiments on Transition in Three-Dimensional Boundary Layers Dominated by Crossflow Instability, *Progr. Aerospace Sci.*, **35** (1999), pp. 363–412.
- 9) Takagi, S. and Itoh, N.: Observation of Traveling Waves in the Three-Dimensional Boundary Layer Along a Yawed Cylinder, *Fluid Dynamics Res.*, **12** (1994), pp. 167–189.
- 10) 湊亮二郎, 溝端一秀, 桑田耕明: 吸込み式超音速風洞におけるスターティングロードの計測と供試体の挙動, 日本航空宇宙学会論文集, **56** (2008), pp. 580–589.
- 11) Minato, R., Mizobata, K. and Kuwada, K.: Experimental Measurements of Starting Loads and Model Behaviors in the Indraft Supersonic Wind Tunnel, *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **53** (2010), pp. 54–62.
- 12) 第一科学の湿度計算式, <http://www.daiichi-kagaku.co.jp/situdo/notes/note108>
- 13) Dougherty, N. S., Jr. and Fisher, D. F.: Boundary-Layer Transition on a 10-Deg Cone: Wind Tunnel/Flight Correlation, *AIAA Paper 80-0154*, 1980.
- 14) Wolf, S. W. D., Laub, J. A. and King, L. S.: Flow Characteristics of the NASA-Ames Laminar Flow Supersonic Wind Tunnel for Mach 1.6 Operation, *AIAA Paper 94-2502*, 1994.
- 15) Takagi, S., Sakaue, S., Hirata, Y., Uemura, T. and Takada, K.: Observation of Cross-Flow Instability Mode in a Yawed Cylinder Boundary Layer at Mach 2, *AIAA J.*, in review.