



大気吸い込み超音速風洞の気流評価： 湿度の効果について

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター 公開日: 2016-04-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 高木, 正平, 上村, 卓也, 平田, 裕, 高田, 晃輔 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008774

- 高木 正平 (航空宇宙機システム研究センター 教授)
- 上村 卓也 (航空宇宙システム工学専攻 M2)
- 平田 裕 (航空宇宙システム工学専攻 M2)
- 高田 晃輔 (航空宇宙システム工学専攻 M1)

1. はじめに

室蘭工業大学の中型超音速風洞は、大気吸い込み方式を採用している。制御弁等が測定部上流にないことから高い気流の質が期待される。しかし、大気を吸い込むことによる水蒸気の影響は不可避である。相対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。超音速ノズル内でこの凝縮が発生すると、この発生に伴って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ことが知られている¹⁾。このような振動が新たな気流変動源になり得ることから、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は、今後の風洞計測の信頼性向上に向けて必要不可欠である。

そこで、大気圧、湿度及び温度計測を行うと共に、凝縮の評価と主流の気流変動評価を行った結果について報告する。

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は、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、上下内面を上げた二次元ノズルである。下流部の真空タンクを除く外形は既報文献²⁾に掲載され

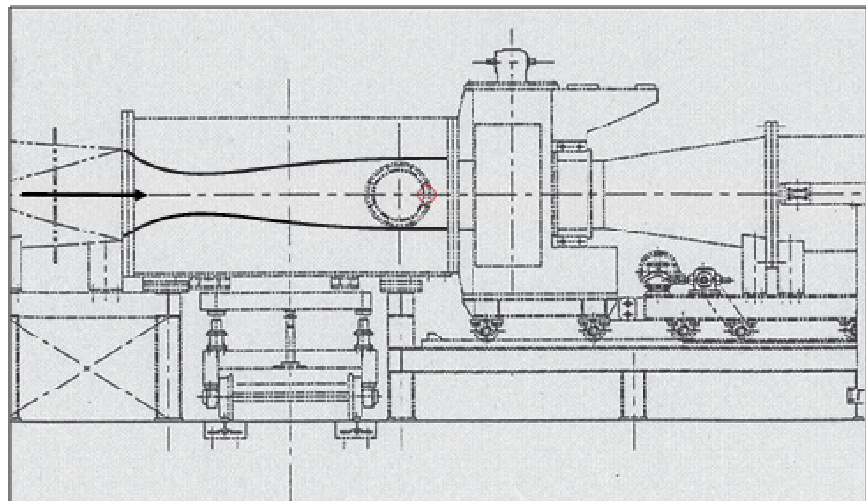


図1 室蘭工業大学中型超音速風洞の測定部

ているので参照されたい。図1にはマッハ数2のノズルブロックとノズル曲線が示され、本小論ではこのブロックを用いた実験結果について報告する。測定部の断面は400mm×400mmで、左右の側壁には直径390mmのシュリーレン写真用の円形ガラスが詰め込まれている。また、静圧孔位置も示されている。

超音速ノズルスロート位置から135mm上流の側壁に各1箇所静圧管が取付けてあり、共和電業の絶対非常圧力センサーPAB-A-200kPaと直流増幅器CDV-700Aで計測する。特に超音速ノズルスロート上流の静圧計測に対して配管は可能な限りなく短くして、応答特性を高めた。

流路の最下流には容量が百立方メートルのタンク5基が設置され、通風時間は大凡 12 秒前後である。

2.2 10 度円錐模型と非定常静圧計測

測定部内壁に発達する境界層はいずれのノズルブロックでも乱流であり、測定部気流の変動計測には測定部内壁の静圧変動計測から評価できない。そこで、本計測のために 10 度円錐模型を新規製作した。図2に示すように円錐部の流れ方向の全長は 250mm で、先端から 70mm まではステンレス鋼、それより下流部は断熱材として広く知られた VESPEL で製作した。Kulite 社製の感度 5PSI(35.4kPa)の半導体圧力センサーXCQ-62-350mBARD を直径 0.5mm の静圧孔の下に埋め込んだ。円錐の先端より 120mm の位置におけるレイノルズ数は凡そ 1.7×10^6 である。動圧に対する主流変動レベルと 10 度円錐模型境界層遷移に関するデータベース⁸⁾によると、静圧変動レベルが 0.1%-0.4%の環境では遷移レイノルズ数はそれぞれ $6-8 \times 10^6 \sim 4.5-7 \times 10^6$ と予測されることから、非定常圧力センサー位置では層流はまだ維持されていると推察される。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 150kHz の 20%が目安となるので、非定常変動に対する応答限界は 30kHz 程度である。そ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。

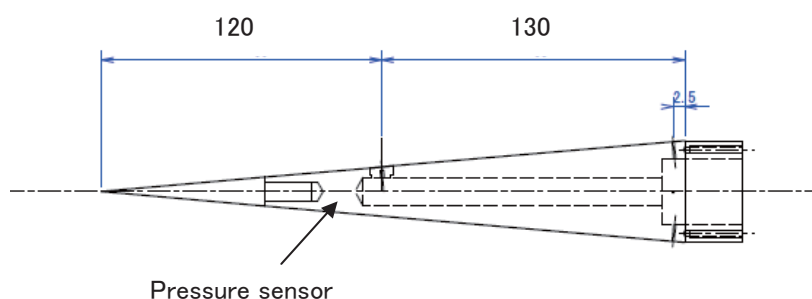


図2 気流評価のための 10 度円錐模型 [単位:mm]

2.3 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。この装置入力部であるアナログ・デジタル変換器の入力ポートは8チャンネル、各ポートは 16 ビットの分解能を持ち、最高サンプリング周波数は 1MHz である。本小論では、サンプリング周波数を 100kHz ないしは 200kHz とした。収録されたデジタルデータは、エクセル表あるいは Matlab を用いて周波数分析並びに解析結果のプロットを行った。

2.4 凝縮濃度計測と絶対湿度の算出

測定部における水蒸気の凝縮濃度を定量評価するために、測定部の主流直角に中心波長が 650nm の講演用赤色レーザーポインタ光を透過させ、その透過光を PIN フォトダイオードで受光することで、レーザー光の非定常減衰特性から凝縮濃度の評価を行った。なお、大気の相対湿度[%]から絶対湿度 $[g/m^3]$ の換算は文献 3)を用いた。

3. 実験結果

3.1 水蒸気凝縮の定量評価

大気湿度が高ければ凝縮する濃度も高くなり、水蒸気の凝縮で気流は白濁し目視で十分確認できる。この凝縮レベルを定量評価するために測定部の流れに直角にレーザー光を透過し、その透過光をフォトダイオードで受光する。図3はこのような条件で計測した透過光の時系列データの一例を示す。図中に

は時系列データの時間軸を引き伸ばした図示も同時に示している。まず通風直前の透過光を基準に取れば、通風時の透過光は平均して約 70%減少し、凝縮による微小な氷でレーザー光は散乱した結果と解釈できる。

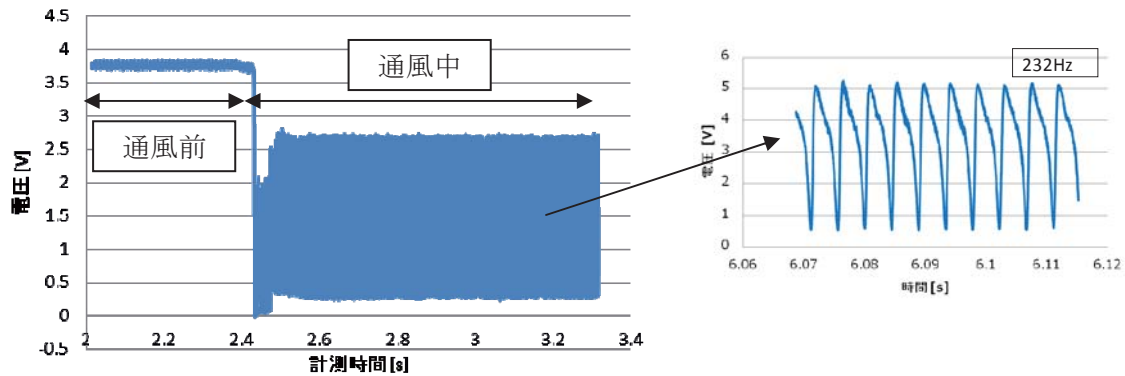


図3 受光したレーザー光の減衰と振動

一方、透過光は極めて選択性の高い230Hzの周期変動していることも分かる。このような凝縮変動は、超音速ノズル近傍の凝縮衝撃波の振動によることは説明されている⁴⁾。この振動周波数と湿度の関係を示したのが図4である。絶対湿度と周波数の相関は明白で、図中には松尾ら³⁾が次元解析的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。本計測結果もその関係式に従っていることが解る。なお、相関式は温度と絶対湿度の関数であるが、本実験では大気温度は殆ど変化していないことから、一定とした。

絶対湿度が 3g/m^3 以下では周期変動は消滅し、凝縮の効果は本ダイオード計測では検出できなかった。

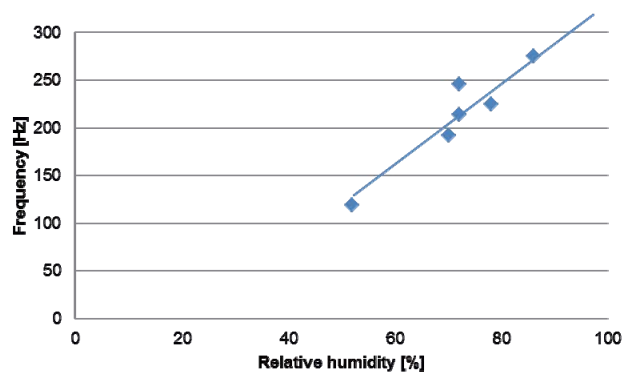


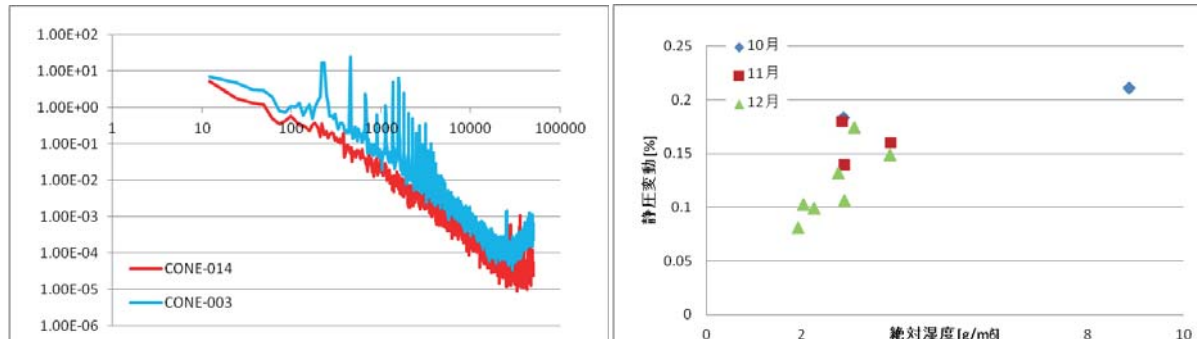
図4 相対湿度と凝縮振動

3.2 円錐模型の静圧変動

湿度が高い場合には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に何らかの影響を及ぼすことが推測される。図3を取得した通風時に 10 度円錐模型の静圧変動を同時計測し、スペクトル解析した結果を図5に示す。凝縮による周期変動と同じ周波数の静圧変動が確認できる。絶対湿度が減少し凝縮振動が観測されない場合には、結果は割愛するが、10kHz 近傍を中心とした広帯域の変動

増加することも明らかとなったが、原因を解明中である。

さらに絶対湿度が小さくなる $1.9\text{g}/\text{cm}^3$ の (図5で CONE-014 に対応) 場合にはこの高周波変動も減少し、静圧変動はさらに減少してし、動圧に対して静圧変動レベルは 0.1%以下になる。この変動レベルは通常静粛な超音速流と見なせるレベルが達成されている。



結論

大気吸い込み式超音速風洞の気流特性について、大気に含まれる水蒸気の凝縮効果に着目し、測定部の静圧変動を評価した。その結果、以下の結論が導ける。

絶対湿度が $2\text{g}/\text{m}^3$ 以上では凝縮振動が発生し、測定部の静圧も同じ周波数で変動し静圧変動を増大させる。

しかし、絶対湿度が $2\text{g}/\text{m}^3$ 以下の条件では、動圧に対する静圧変動は 0.1%以下が実現されている。

参考文献

- 1) Schmidt, B., *Jahrbuch*, WGLR, 1962, 160.
- 2) 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、Vol.56、No.659、pp.580-589、2008.
- 3) <http://www.daiichi-kagaku.co.jp/situdo/notes/note108.html>
- 4) 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巻438号、(1983) pp.108-114.