Ludwieg 管を用いた超音速風洞の始動過程に関する数値解析

A Numerical Study on Starting Process of Supersonic Ludwieg Tube

大津広敬,静岡大学工学部機械工学科,静岡県浜松市城北 3-5-1, E-mail: thootu@ipc.shizuoka.ac.jp
宮澤政文,静岡大学工学部機械工学科,静岡県浜松市城北 3-5-1, E-mail: tmmmiya@ipc.shizuoka.ac.jp
Hirotaka OTSU, Shizuoka University, Johoku 3-5-1, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561

Masafumi MIYAZAWA, Shizuoka University, Johoku 3-5-1, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561

We performed a numerical simulation to understand the principle of our supersonic Ludwieg tube, especially the starting process of this facility by using AUSM-DV scheme. From the pressure contours created by numerical results, we clearly observed the process of how the reservoir condition behind the expansion wave was created. The pressure history measured in the Ludwieg tube agreed very well with numerical results. From the above results, we conclude that our computational code can be applied for the analysis of the supersonic Ludwieg tube facility.

1. はじめに

これからの宇宙開発において、そのコスト低減のため に再使用型宇宙輸送機の必要性が高まってきている。再 使用型宇宙輸送機の開発には、再突入飛行時の空力特性 や熱環境の解析と、それに伴う超音速風洞を用いた実験による詳細な空力データが必要不可欠である。再突入飛 行時における空力特性や熱環境の解析を行うための実験 を行うことができる装置には、様々な装置が提案されて おり、実際に稼働しているものも数多くあるが、こ うし た極超音速領域の実験を簡便に行う設備のひとつとして 近年 Ludwieg 管を用いた風洞が実用化されつつある⁽¹⁾。 Ludwieg 管は、従来の風洞試験設備に比べて省エネルギー で、かう構造も比較的単純であり、また通風時間につい ては、衝撃波管及び衝撃風洞に比べて長くとることがで きるという利点がある。更に、運用コストが安く、流れ の乱れが少ないなどの特徴を備えており、大学の研究室 での運用に向いている。しかしながら、実際の設置・運 用となると、日本国内では、航空宇宙技術研究所で遷音 速領域での利用を目的とした装置が設置された例がある のみである。超音速・極超音速領域での運用例となると、 アメリカ・ドイツで数例あるのみで、日本国内ではほと んどない。

当研究室では、Ludwieg 管を用いた小型極超音速風洞の設計研究を目的とした概念設計を行ってきた⁽²⁾。その結果、この装置は運用コストなどの面で大学の研究室での運用に非常に向いていることが確認された。更に、極超音速小型風洞の設計・製作の前段階として、超音速領域での性能評価を行うために、実験装置の部分的な試作を行い、実験と理論値の比較を行った結果、Ludwieg 管内の 圧力履歴に関して良い一致を見ることができた⁽³⁾。本報告では、Ludwieg 管を用いた超音速風洞の作動原理の確認および始動過程の理解を目的として数値解析を行った。

2. Ludwieg 管の作動原理

Ludwieg 管は、膨張波管、スロート部、超音速ノズル、 ディフューザ、真空タンクの5つで構成される。初めに、 膨張波管に高圧空気を貯めておき、スロート部より下流 側を隔膜あるいは急開バルブで仕切っておき、真空にし ておく。隔膜を破膜させると、スロート部より下流側で は衝撃波の伝播と同時に超音速流れが生じる。一方、膨 張波管側には膨張波が発生し、膨張波管管端に向かって 伝播するが、膨張波背後には、圧力、温度などが一様の 領域が形成される。この領域を通常の風洞の貯気漕状態 として利用することができる。この領域は膨張波が管端 で反射され、スロート部まで戻ってくるまでの間、維持 される。その時間は、膨張波管の長さに比例し、膨張波



Fig. 1: Pressure contours around the throat during staring process



Fig. 2: Computational Grid for Supersonic Ludwieg Tube Facility

の伝播速度、即ち音速に反比例する。従って、膨張波管 を長くすることにより、通風時間を長くすることができ るのが特徴である。

3. 解析手法

流れ場は軸対称を仮定し、支配方程式には、ナビエ・ ストークス方程式を用いた。粘性係数にはサザーランド の式を用い、乱流モデルは使用していない。計算スキー ムには、AUSM-DV スキーム⁽⁴⁾を利用した。

境界条件として、膨張波管管端では反射条件を用い、 超音速ノズル出口では、超音速流出を仮定している。また、壁面の温度は室温で固定してある。

4. 結果と考察

4.1 始動過程

まず、始動時に於けるスロート部での衝撃波干渉の様子 を調べるために、始動過程に関する数値解析を行った。膨 張波管の直径は 30 [mm]、スロート部の直径は 15 [mm]、 超音速ノズルは半頂角が 5 [deg.] のコニカルノズルであ り、測定部マッハ数は 3.5 を想定した、計算格子は、流 れ方向に 150 点、壁面に対して垂直な方向に 100 点、合 計 15000 点である。時間刻みは、0.1[µs] とした。

Fig.1は破膜からの各時刻におけるスロート部付近の圧 力分布を示している。X=0.01において隔膜で高圧部と低 圧部が仕切られており、初期状態は、高圧部が5.0×10⁵ [Pa](約5.0[atm])、低圧部が1.0×10⁴[Pa](約0.1[atm]) である。この一連の図から、破膜から膨張波背後の一様 な流れが形成される様子がわかる。詳しく見てみると、ま ず、破膜直後に膨張波管側に膨張波が生じる。一方、低 圧側、即ち超音速ノズルに向かってスロート部で衝撃波 が形成される。この衝撃波は、スロート部の管壁で反射 され、中心軸方向に向かって伝播する。その後、衝撃波 の干渉に伴って高圧領域が形成され、膨張波と共に衝撃 波が膨張波管管端に向かって伝播している様子がわかる。 このとき形成された膨張波背後の一様な流れについて、 圧力履歴を膨張波管管壁において計測した結果、実験結 果と良く一致している。

従って、膨張波管側およびスロート部付近に関して、 始動直後の流れを実験的にも理論的にも検証することが できた。また、本数値解析手法が、このような領域およ び条件下での解析に有効であることがわかった。

4.2 測定部内の流れ

次に、実際に運用する際の問題点を探るために Ludwieg 管全体の流れの様子を調べるための数値解析を行った。こ の解析では、計算領域は、膨張波管、スロート、超音速 ノズル、測定部、ディフューザ、真空タンクから構成され る。膨張波管の長さは 3.0 [m]、超音速ノズルは半頂角が 4.0 [deg.] のコニカルノズルであり、測定部マッハ数は 2.5



Fig. 3: Pressure contours in the Supersonic Ludwieg Tube Facility



Fig. 4: Mach Number contours in the Supersonic Ludwieg Tube Facility

を想定している。またディフューザにおける第2スロートの断面積は、測定部断面積の約80%とした。

本研究では、Ludwieg 管内の流れの概略を調べるため に、粗い計算格子を用意して計算を行うことにした。計 算格子は、流れ方向に 237 点、壁面に対して垂直な方向 に 30 点、合計 7110 点である。計算格子を Fig. 2 に示す。 計算条件は、高圧側の圧力は 5.0×10^5 [Pa](約 5.0 [atm]) とし、低圧側の圧力を 1.0×10^4 [Pa](約 0.1 [atm])から 1.0×10^5 [Pa](約 1.0 [atm])まで変化させて解析を行っ た。これは、真空タンク内の初期設定圧力を見積もるた めである。

まず、定常な超音速流れが測定部内に形成される様子 を調べるために、0.1 [ms] 刻みで Ludwieg 管内の圧力の分 布を Fig. 3 に示す。初期圧力は、高圧部で 5.0 × 10⁵ [Pa]、 低圧部で 1.0 × 10⁴ [Pa] である。等圧線は 2000 [Pa] 刻み で描かれている。この図から、測定部内での超音速流が 形成される様子がわかる。始めに、スロートを通過した 衝撃波が超音速ノズルを伝播し、それに伴って膨張し加 速された流れが誘起される。(t=0.1[ms]~0.3[ms])衝 撃波は、測定部を通過したあと、ディフューザ部で弱い 斜め衝撃波を形成している様子がわかる。(t = 0.7 [ms] ~ 1.0 [ms])また、この図から、定常な超音速流れが形 成されるのにかかる時間は概ね 0.7 [ms] であることがわ かった。膨張波管の長さを 3.0 [m] とすると、膨張波管 内を伝播する膨張波が管端で反射されてスロート部まで 戻ってくるまでの時間は、管内の気体の温度を 300K と 仮定すると、約 17.3 [ms] となる。従って、定常な超音速 流れが形成されるのにかかる時間は、当研究室で検討し ている大きさの Ludwieg 管を用いた超音速風洞では、膨 張波管内を伝播する膨張波が管端で反射されてスロート 部まで戻ってくるまでの時間に比べて十分小さいことが わかった。

各初期圧力の時の破膜から 1.0 [ms] 後のノズルおよび測

定部内のマッハ数の分布を Fig 4 に示す。等高線は、0.05 刻みで描かれている。この図から、初期圧力が上昇する につれて、測定部内のマッハ数の分布に大きな違いが現 れることがわかる。低圧部の初期圧力 *P*_L が 10000 [Pa] の場合は、測定部内は概ねマッハ数分布は一様と見なす ことができるが、*P*_L が 100000 [Pa] の場合には、超音速 ノズル内で既に剥離しており、測定部内のマッハ数は設 計値を大きく下回っていることがわかる。したがって、低 圧部の初期圧力に関しては、実験を行うことで適正な値 を見いだす必要がある。

両方の図から、定常な超音速流れが実現している状態 における測定部内のマッハ数分布と圧力分布は、概ね一 様であることがわかった。従って、数値解析結果からは、 コニカルノズルによる測定部内の一様流れへの影響は比 較的小さいということがわかった。

5. まとめ

- 本研究では、Ludwieg 管の作動原理の確認を目的として、数値解析を行った。その結果、以下の知見を得た。
 - 始動過程におけるスロート部の流れの様子が明らかになった。
 - 膨張波管内に形成される貯気漕状態は、実験結果と も良く一致した。

また、Ludwieg 管を用いた超音速風洞内部全体の流れ 場に関する数値解析結果からは、半頂角 4.0 [deg.] のコ ニカルノズルを用いても、測定部内において比較的一様 なマッハ数および圧力分布が得られた。また、定常な超 音速流れが実現するのに必要な時間は、本解析で用いた 大きさの装置の場合、1.0 [ms] 以下であることがわかり、 超音速流れが持続する時間に比べて十分小さいことがわ かった。

以上の結果から、本数値解析手法が Ludwieg 管内の流 れ場の解析に有効であることが確認できた。今後の検討 課題としては、

- 1. 数値解析結果を基に Ludwieg 管を用いた超音速風洞 の適切な運転条件
- 2. コニカルノズルと測定部との接合部の測定部内の流 れ場への影響
- 3. 最適な超音速ノズルの半頂角の決定

があげられる。1. に関しては、真空タンクの大きさや真 空ポンプの性能に関連する問題で、運転効率を考える上 で重要である。2. に関しては、コニカルノズルと測定部 の接合部分の微分係数が異なるため、その部分から弱い 波が発生することが予想されるためである。3. に関して は、半頂角が大きすぎると剥離しやすくなるため、適切 な値を見いだす必要があるためである。これらの検討結 果をふまえて実験装置を製作し、測定部内の流れ場の検 証を行う予定である。

- 参考文献
 - Friehmelt, H., Koppenwallner, G., and Müller-Eigner, R., "Calibration and First Results of a Redesigned LUDWIEG Expansion Tube," AIAAPaper, AIAA 93-5001, November, 1993
 - 2. 宮澤,大津,山田, "Ludwieg 管を用いた極超音速風洞 の設計検討," 第43回宇宙科学技術連合講演会, (1999)
 - 3. 宮澤, 大津, "Ludwieg 管を用いた超音速風洞の性能特性について,"日本機械学会第78期流体工学部門講演会, (2000)
 - 4. Wada, Y. and Liou, M.-S., "A Flux Splitting Scheme with High-Resolution and Robustness for Discontinuities," AIAAPaper, AIAA 94-0083, January, (1994)