

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656515

研究課題名(和文) 空気液化推進を目指した低温壁面での超音速非平衡凝縮の実験的研究

研究課題名(英文) Experimental research on supersonic non-equilibrium condensation on cold wall for liquified-air propulsion

研究代表者

前野 一夫 (Maeno, Kazuo)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30133606

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)： 空気液化推進機の基本メカニズムである高速気体流の低温冷却面での液化現象に関して、極低温用小型無隔膜衝撃波管を開発し伝播衝撃波後方の超音速流の極低温壁面への非平衡現象を実験的に解明することを試みた。小型無隔膜衝撃波駆動部を開発して作動特性を解明し、既存の中型衝撃波管による低温実験と平行しながら、入射・反射衝撃波後方の流れの有無による低温壁面への凝縮現象を解明した。非平衡凝縮液膜のレーザー干渉厚み計測と白金薄膜温度計による熱流速の計測および流れの可視化計測を併せて、低温壁面での凝縮液膜成長に対する超音速流れの影響と、液膜表面の不安定化と液膜の飛散までの現象に対して一定の知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)： As for the supersonic condensation on the cold wall related to the research of liquified air cycle engine (LACE), this study has been tried to clarify experimentally the non-equilibrium supersonic condensation on cryogenic wall by an original diaphragmless shock tube. A new driver section was developed, and together with the first version driver shock tube results, non-equilibrium condensation on cold wall cooled by liquid nitrogen has been investigated. Condensing liquid film thickness was measured by laser interferometric method behind the incident and reflected shock waves in ethanol vapor of room temperature and in R-134a in cold temperature range. Also the heat flux measurement by Pt thin film on glass wall was measured. The both results were compared and discussed. Simultaneously the flow visualization clarified the instability of the surface of condensing liquid film on cold wall. These results indicated the direction of the cryogenic supersonic condensation research on LACE.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学 航空宇宙熱流体力学 空気液化推進機 熱工学 高速凝縮 極低温 凝縮液膜成長 無隔膜衝撃波管

1. 研究開始当初の背景

(1) 空気液化推進機 (LACE) は極低温液体燃料の潜熱を利用して大気飛行中の空気を液化して酸化剤の役割を担わせる、未来型の推進システムで、推進機ペイロードの自由度が高いと言う長所を有し、欧米をはじめとして各国で研究が開始された。しかし高速飛行中の大気吸込み液化過程は基礎実験そのものが困難であり、各国の研究は中断している状態で、まだ研究が極めて不十分である。

(2) 特に、高速飛行中に生じる、超音速流れ中での極低温冷却壁面への空気の液化現象に関しては、非平衡凝縮液膜成長過程や伝熱特性、さらには液膜の流れによる不安定現象や液滴への分離過程など解明すべき基礎過程がたくさん存在しており、まだ詳細な数値解析をする段階にも至っていない。これらの現象は同時に、極低温熱流体工学や高速凝縮現象、超音速流れ中の温度境界層の成長と、凝縮液膜成長における液膜表面の不安定現象と微小液滴へのブレイクアップなど極めて重要な工学的問題に直結しており、その実験的な解明の手法、装置、計測法のすべてにわたって未知の技術開発と理論的展開が必要である。

2. 研究の目的

(1) 本研究は以上の背景の下に、まず基礎実験のデータを蓄積することを目的として、極低温型の小型無隔膜衝撃波管を開発製作し、現有の装置と併せて、衝撃波管による衝撃波面背後の常温近傍あるいは低温の超音速・高速流れにおかれた低温・極低温壁面上での非平衡高速凝縮現象に関して、その実験的解明をはかる。

(2) 超音速流れ中の低温壁面上の温度境界層の発達と極低温非平衡凝縮液膜の成長、および超音速を含む高速流れにおける境界層内の成長液膜の不安定現象と微小液滴のブレイクアップへの推移等について計測手法の開発と実際の実験を試みる。特に高速凝縮における壁面熱流束の測定と、レーザー液膜干渉法と流れの可視化手法を用いてこれらの現象解明を定量的に行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 本申請研究において、極低温実験用小型無隔膜衝撃波実験装置を設計製作し、その作動特性実験を行い、断熱特性や形成衝撃波の入射・反射特性を計測把握し、次に低温での所特性を把握する。また、同時にレーザー干渉液膜成長計測法を確立し、さらに高速応答型の白金薄膜温度計を低温壁面に設置して、常温・低温時の高速凝縮現象時の壁面温度変化を計測し、熱流束計算法を確立する。

(2) また、液膜成長の結果と熱流束計測結

果の比較を行い、駅膜成長の過程と成長限界がどのように生じるかを推定する。

(3) 申請者の研究室で既設の中型低温衝撃波実験装置を併用し、エタノールおよび HFC-134a を用いて観測部の初期温度・圧力および衝撃波マッハ数と凝縮液膜特性の解明と比較をはかる。特に液体窒素冷却温度のチェック、衝撃波管作動時の温度上昇の計測、衝撃波の入射反射特性計測などを実施し、入射衝撃波後方の超音速流れと反射衝撃波後方の淀み点状態において液膜成長が計測できるかを調べる。

(4) 高速流れにおける凝縮液膜成長段階における凝縮液膜表面の不安定現象は、重要な解明要素であるが、まだ低温域では流れの可視化現象として計測する手法が充分確立していない。本申請研究ではシュリーレン法、全反射の利用あるいは干渉画像計測法を用いて入射・反射衝撃波の凝縮液膜成長の可視化計測を試みる。

4. 研究成果

(1) 本申請研究により、極低温領域の小型無隔膜衝撃波管を独自に設計開発し、衝撃波波面後方の超音速域を含む高速流れにおける低温壁面への非平衡凝縮現象を解明する実験的手段を得ることができた。計測実験用の極低温小型無隔膜衝撃波管を構築するために、独自の2重ピストン式衝撃波管駆動部を設計製作し、その作動特性を把握した。また、既設の中型低温無隔膜衝撃波実験装置を併用して、衝撃波波面後方の超音速・高亜音速流れにおけるレーザー干渉液膜成長計測法を確立した。図1は実験装置の概略である。

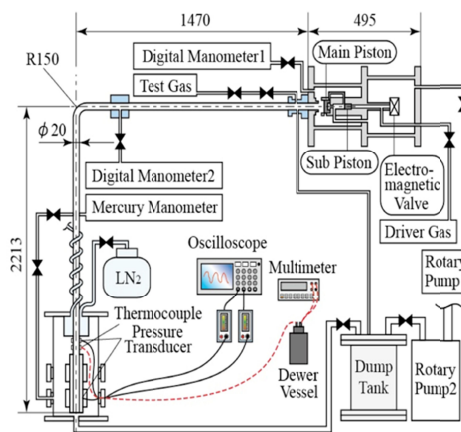


図1 低温実験用無隔膜衝撃波管概略

(2) レーザー液膜干渉計測の結果、初期低温条件での入射衝撃波背後の高亜音速・超音速流れと、衝撃波管端からの反射衝撃波後方の淀み条件における低温壁面への非平衡高速凝縮現象による液膜の時間成長を同時に計測し、高速流れの有無と初期温度・圧力

条件の異なる時系列流れ中での低温壁面に対する非平衡高速凝縮現象についてナノメートル・マイクロメートルオーダーでの液膜成長の定量的計測を行うことに成功した。図2はその結果の一例であり、初期温度 191K の HFC-134a 蒸気中の低温壁面（初期温度と同温度）への入射マッハ数 2.9 程度（衝撃波後方流れマッハ数 1.98 程度）への凝縮現象計測で、入射・反射衝撃波後方流れ内の高速凝縮液膜成長を初期圧力の違いにより、液膜成長速度が異なっていることを表している。

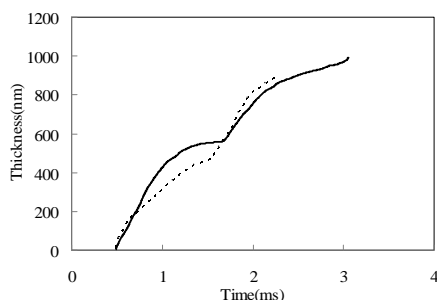


図2 液滴の時間成長データ(初期温度 191K)  
Drive gas: N<sub>2</sub>, Driven gas: HFC-134a

Dotted lines:  $p_4=401\text{kPa}$ ,  $p_1=3.7\text{kPa}$ ,  $M_1=2.86$ ,  $p_2=43.7\text{kPa}$ ,  
 $p_5=203.9\text{kPa}$ ,  $M_1=1.97$ ,  $p_2-p_{\text{sat}}=40.8$

Solid lines:  $p_4=504\text{kPa}$ ,  $p_1=4.7\text{kPa}$ ,  $M_1=2.94$ ,  $p_2=49.5\text{kPa}$ ,  
 $p_5=273.1\text{kPa}$ ,  $M_1=1.99$ ,  $p_2-p_{\text{sat}}=47.2$

この図からわかるように、凝縮液膜の成長速度は入射・反射衝撃波後方それぞれの領域内で時間的に飽和現象を示し、さらに高速流れの有無と過冷却状態（圧力による）との両方の効果で各初期の凝縮速度や飽和状況が異なっており、各々定量的な値を比較することができる。

(3) 白金蒸着装置を用いて高速応答型の低温用白金薄膜温度計を自作し、低温のガラス面において成長する高速凝縮液膜の底面（壁面上）での温度変化を計測することができた。液膜上下面の温度があまり変わらないとの過程で、半無限物体への熱伝導を仮定して、計測された温度変化から壁への熱流束を求めた。これらの結果を用いて、低温壁面への凝縮量を計算し、液膜成長率を求め、実際のレーザー干渉計測結果と比較を行った。その結果、入射衝撃波後方の超音速流れの低温壁面への高速凝縮では最初は壁面への熱流束が大きく、数 100 マイクロ秒で液膜成長計測の値が逆転し、さらにその後 400 マイクロ秒以降で熱流束によるデータが再逆転すること、また反射衝撃波後方の淀み点条件では液膜の干渉計測データは常に白金薄膜温度系による熱流束値からの液膜推定値を下回ることが判明した。初期温度や初期圧力による依存性と、データのばらつきもまだ見られ、確定的なことは言えないが、凝縮液膜の表面不

安定性と、波頭の崩れと同様な液滴飛散への推移が想定される結果となっている。

(4) 高速非平衡凝縮液膜の波打ちと、不安定性を可視化するために、フラッシュ光源とカメラ、あるいは連続光源と高速度カメラを用いた流れの可視化を試みた結果、中型無隔膜衝撃波管による実験では一部、可視化に成功した。その結果、入射衝撃波面後方の超音速凝縮では壁面の凝縮液膜表面からマッハ波に近い擾乱が多数発生すること、また、低温の透明ガラス面における非平衡凝縮では、入射衝撃波面後方のサブクール度（非平衡度）に応じて平面上の液膜成長から、波形の表面擾乱が時間とともに生じて成長し、次第に流れ方向に典型的には 20-30  $\mu\text{m}$  の振幅を有し、直角方向に 100  $\mu\text{m}$  程度の幅を持つ波が風波のように成長して行くことを歌詞化することができた。この現象は流れの条件により大きく異なるため、まだ十分な結果を得るにはいたらなかった。今後は何らかの可視化に対する工夫を行い体系的に実験を行うことが必要である。

(5) 反射衝撃波後方の淀み条件では液膜成長データは計測できるが、その速度は明らかに異なること、また、時間の経過とともに液膜表面からの蒸発が支配的になるため、液膜の擾乱や液膜そのものが消滅してゆくことが判明した。なお、管端末における反射衝撃波後方の流れの可視化はまだ成功していない。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3件)

1) Tatsuro Inage, Sunao Tsuchikura, Masanori Ota, Kazuo Maeno, Three-Dimensional Laser Interferometric CT Measurement of Shock Wave Interaction around A Circular Cylinder, Flow Measurement and Instrumentation, 査読有、2013, pp. 1-5

DOI:10.1016/J.flowmeasinst.2012.08.0003

2) 宇田川真介、稲毛達朗、太田匡則、前野一夫、小直径円管内を伝播する衝撃波の干渉計測、日本航空宇宙学会、航空宇宙技術、査読有、Vol.11、2012、pp.99-105

3) 稲毛達朗、土倉直、宇田川真介、太田匡則、前野一夫、二孔より噴出する非定常衝撃波流れのレーザー干渉 CT 計測へのハイブリッド ART の適用、日本機械学会論文集、B 編、査読有、78 巻、787 号、2012、pp.513-520

[学会発表](計 4件)

- 1) 宇田川真介、粟野敬太、吉田一樹、太田匡則、前野一夫、小直径管内を伝播する衝撃波の減衰に関する実験、平成 25 年度衝撃波シンポジウム、青山学院大学、2014 年 3 月 5 日～7 日
- 2) 朱海東、太田匡則、前野一夫、低温 HFC-134a 蒸気中を伝播する衝撃波管流れでの壁面非平衡凝縮、平成 25 年度衝撃波シンポジウム、青山学院大学、2014 年 3 月 5 日～7 日
- 3) S.Udagawa, Y.Hirose, W.Garen, T.Inage, M.Ota, and K.Maeno, Improvement of a diaphragmless driver section for a small diameter shock tube, The 29<sup>th</sup> International Symposium on Shock Waves (ISSW), Madison, USA, 2013 年 7 月 14 日～19 日
- 4) H.Zhu, H.Okuno, T.Nakajima, M.Ota, and K.Maeno, Experiment of non-equilibrium condensation on shock tube wall in supersonic flow behind shock waves, Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT-2012), Jeju Island, Korea, 2012 年 11 月 13 日～15 日

〔図書〕(計 1 件)

- 1) M.Ota, S.Udagawa, T.Inage, K.Maeno, Interferometry-Research and Applications in Science and Technology, Chapter 11, InTech Open Access Company 2012 ISBN: 978-953-51-0403-2

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前野 一夫 (MAENO, Kazuo)

千葉大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号： 30133606

(2) 研究分担者

太田 匡則 (OTA, Masanori)  
千葉大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号： 60436342