

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560204

研究課題名（和文）

炭酸ガス冷凍機に適応されるエジェクタ内に発生する二相流衝撃波に関する研究

（英文）Two-phase Flow Shock Waves Appearing in the Ejector Used for the CO₂ refrigeration Cycle

研究代表者

中川 勝文（Masafumi NAKAGAWA）

豊橋技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：50135414

研究成果の概要：地球温暖化の問題に対し、冷媒のノンフロン化は急務であるが、最も有望な炭酸ガス冷媒を使うと、成績係数が大幅に低下する。二相流エジェクタは無駄に捨てられている膨張仕事をコンプレッサ仕事に変換し成績係数を向上させることが出来る。このエジェクタの効率を高め、コンパクト化し、実用化技術を提供するため、衝撃波による圧力回復を用いるエジェクタサイクルの性能を評価した。また、臨界点近傍での高速二相衝撃波や膨張波の特性を理論的、実験的に明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：冷凍・空調，二相流

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球温暖化の防止対策として京都議定書が採択され、2012年までに1995年基準で6.0%の温室効果ガスの削減が義務づけられた。現在、空調機に使われているR-134aのような代替フロン冷媒は炭酸ガスに比べ1300倍の地球温暖化係数を持っている。将来この代替フロンの転換が進み、環境負荷の小さい炭酸ガスや炭化水素のような自然冷媒が採用される可能性が大きい。これらの冷媒では、成績係数が小さく、かえって地球の温暖化を増加させることになる。

(2) この炭酸ガスの冷凍サイクルの成績係数低下の原因は、代替フロンに比べ、コンプレッサ仕事の増大にある。この余分なコンプレッサ仕事は、冷媒の膨張時に解放されるが、現在の冷凍サイクルでは膨張弁で無駄に捨てられている。膨張弁での膨張過程は、膨張時に開放される運動エネルギーを無駄に熱エネルギーに変えてしまう等エンタルピー変化に近い。

(3) この無駄に捨てられている有効エネルギーを回収し、冷凍サイクルの効率を高める装置がエジェクタである。エジェクタは膨張時の高速二相流の運動エネルギーを圧力のエネルギーに換えコンプレッサ仕事を軽減する働きがある。

(4) このエジェクタの超音速二相流中に衝撃

衝撃を発生させることで、さらにコンパクトなエジェクタを開発出来る可能性がある。

2. 研究の目的

(1) ノンフロン自然冷媒である炭酸ガス冷凍機の効率を高めるために使われるエジェクタの高効率化、コンパクト化を目指すために二相流衝撃波を用いたエジェクタの実証試験を行うことを目的とする。

(2) 二相流エジェクタの混合部に発生する衝撃波の特性を明らかにする。そして、この衝撃波で加圧する二相流エジェクタを炭酸ガス冷凍機に組み込み、その性能である成績係数の上昇を明らかにすることを目的とする。

(3) 二相流エジェクタの混合部に発生する斜め衝撃波や2次元膨張波の特性を理論的に明らかにし、その解析方法を確立する。

(4) 炭酸ガス高速二相流に発生する斜め衝撃波の特性を実験で明らかにする。また、膨張波の減圧特性も実験で調べることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、市販されているCO₂ヒートポンプ給湯機を改造し、試作したエジェクタを取り付け、冷凍機として運転させることによりエジェクタ内の特性を調べた。実験装置の概略図をFig.1に示す。凝縮器は水冷式、蒸発器は空気加熱式であり、それぞれ水と空気の流量を変えることにより熱量を制御し、圧縮機の出力をインバータで回転数を変えることにより冷媒の流量を制御した。なお、サイクルの温度測定にはCr-Ar熱電対、圧力測定にはブルトンゲージを用い測定を行った。

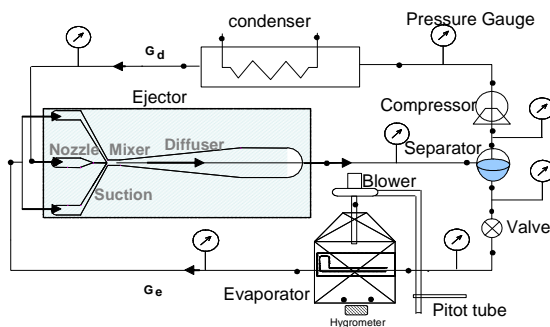


図1 作製した実験装置のループ

(2) 本研究では矩形流路を持つエジェクタを試作した。その概略をFig.2に示す。本実験では混合部長さ $l_{mix}=15$ [mm]、ディフューザ長さ $l_{dif}=30.5$ [mm]であるエジェクタと、 $l_{mix}=10$ [mm]、 $l_{dif}=100$ [mm]である二種類のエジェクタを用いた。ノズルは両者とも入口条件が10[MPa]、40[]で適正膨張するように設計された矩形流路をもつ先細末広ノズルである。このノズルは喉部で沸騰が促

進させられるようにエッジが立てられている。また、エジェクタ壁面には熱電対が取り付けられており、エジェクタの温度分布が測定できるようになっている。この二相流エジェクタを用いて、混合部に発生する衝撃波の特性を実験的に調べた。

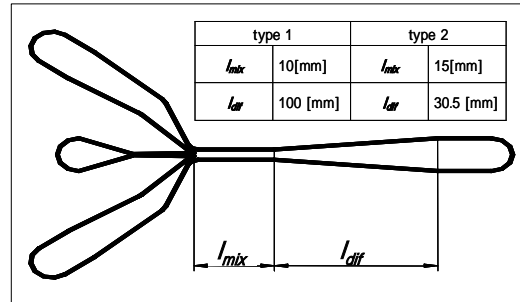


図2 試作したエジェクタの形状

(3) 斜め衝撃波の特性を調べるための理論解析が行われた。二相ミスト流中に伝播する音波の伝播速度を理論的に求め、得られる2つの音速から、斜め衝撃波の発生条件を求め、CIP法に基づいた数値解析を行った。Fig.3はその解析場の概略を示している。この場に発生する二相流斜め衝撃波の角度、厚さ、圧力比等を求めた。

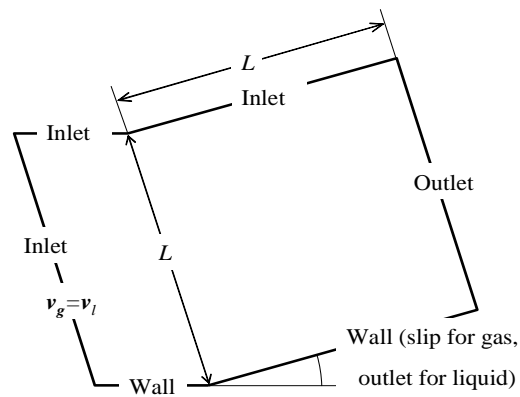


図3 角を回る二相流の解析場

(4) エジェクタの混合部に発生する斜め衝撃波を実験で捕らえるために、炭酸ガスのブローダウン実験装置を使ってノズル背後に斜めの壁を設けた測定部を作製し、斜め衝撃波背後の圧力上昇を測定した。

4. 研究成果

(1) 二相流エジェクタの混合部に発生する二相流衝撃波を実験で捕らえた。Fig.4は図2で示されるエジェクタの混合部を変化させて昇圧を測定したものである。一点鎖線がノズル出口部をそれより交流の縦線は混合部

の出口を示している．図中の点線で示される混合部の長さが 15[mm]の圧力は，混合部の出口部で急激に増加している．これが衝撃波である．これより混合部が長い場合，と実線で示される圧力分布は混合部で圧力回復が混合により徐々に進んでいる．従って，急激な圧力回復を伴う衝撃波は混合部の出口部で発生していることが明らかになった．

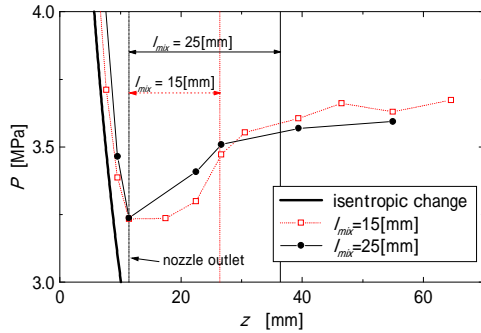


図4 混合部に表れる衝撃波

そして，この衝撃波が表れるとき，図中ののときに圧力回復が最も大きくなる結果が得られた．これは衝撃波によるエジェクタの効率化，コンパクト化の可能性を示している．

(3) このエジェクタを用いて炭酸ガス冷凍機の成績係数が実験によって調べられた．Fig.5 は成績係数をコンデンサ圧力を横軸に，中間熱交換器の長さをパラメータとして示したものである．一般に炭酸ガス冷凍機ではコンデンサは超臨界状態にあるので，圧力は運転者が設定出来る．コンデンサ圧力が 10MPa より大きく十分の長さの中間熱交換機を用いたとき，図中で点線で示される従来の膨張弁を用いた冷凍サイクルに比べ COP が 20%程度増加している．これらからこのエジェクタの有用性が実証できた．

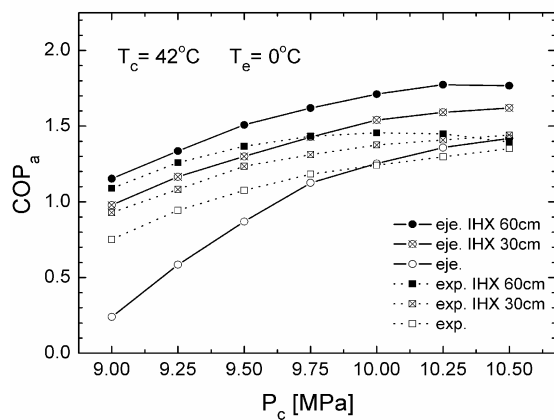


図5 エジェクタサイクルの成績係数

(5) 二相流エジェクタの混合部には，平衡音速よりも大きな流れ場では凍結音速よりも低くても斜め衝撃波が発生することが理論的に示された．二相流の平衡音速は非常に低いので，二相流の流れ場では，少し加速するだけで斜め衝撃波が発生する可能性があることが明らかになった．Fig.6 は凍結音速から見て亜音速の状態において発生する斜め衝撃波の解析例を示したものである．

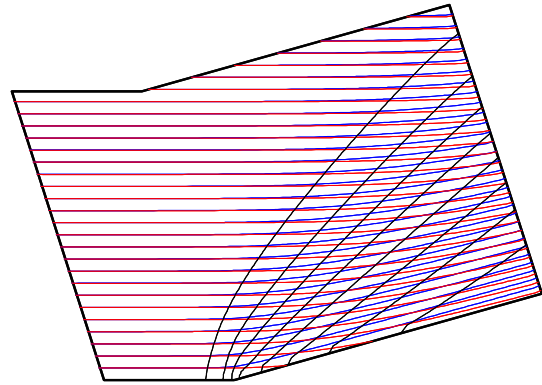


図6 二相流斜め衝撃波

図中の実線は等圧線であり，二相流の運動量緩和によって衝撃波の厚さがかなり厚くなっている．また，衝撃波の前面が音速の低下によって曲がっている特長のあることが明らかになった．

(4) 炭酸ガス二相流中に，斜め衝撃波が存在することを実験で示した．Fig.7 はノズル背後に斜めの壁を設置した場合，測定された壁に沿う圧力分布である．実線が斜めの壁がある場合，点線がない場合である．無い場合ノズルを出るとすぐに膨張波を浴びて減圧しているが，斜めの壁がある場合，斜め衝撃波による圧力上昇が存在し，その後膨張波を浴びている様子が測定できた．

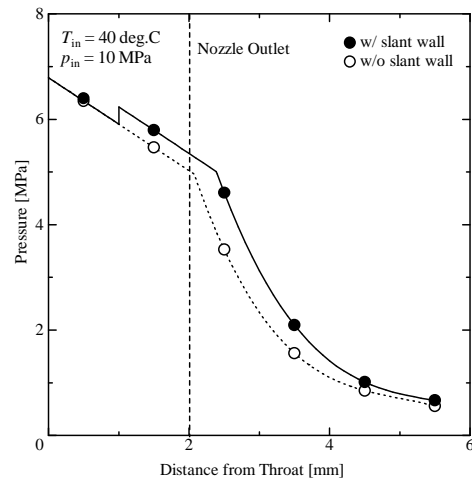


図7 測定された斜め衝撃波による

この結果、炭酸ガス二相流には、非平衡音速より小さい流速でも斜め衝撃波が存在できることが明らかになった。

この研究成果によって、二相流エジェクタの超音速流での設計方法が確立し、冷凍・空調産業における二相流エジェクタの高効率化と高速化の指針を示すことが出来た。

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4件)

中川勝文，原田敦史，高速二相流中に発生する2次元二相流膨張波に関する研究，Thermal Science & Engineering, Vol.15, No.4, 223-231, 2007, 有

Masafumi Nakagawa, Hiroki MIYAZAKI, Atsushi Harada, Zokirjon IBRAGIMOV, Expansion Waves at the Outlet of the Supersonic Two-Phase Flow Nozzle, Journal of Thermal Science and Technology, Vol.2, No.2, 291-300, 2007, 有

中川勝文，茅野浩之，原田敦史，ノズル出口に発生するCO₂二相流膨張波に関する研究，Thermal Science & Engineering, Vol.16 No.4, 139-145, 2008, 有

中川勝文，原田敦史，BERANA Menandro Serrano，高速ミスト流中に発生する斜め衝撃波に関する研究，日本機械学会論文集，75(752B)，2009，有

[学会発表](計13件)

中川勝文，原田敦史，炭酸ガス二相流ノズルの減圧沸騰に関する研究，日本伝熱学会第44回日本伝熱シンポジウム，2007年5月23日，長崎ブリックホール

中川勝文，原田敦史，高速二相流中に発生する2次元膨張波に関する研究，日本伝熱学会第44回日本伝熱シンポジウム，2007年5月23日，長崎ブリックホール

中川勝文，原田敦史，エジェクタサイクルに利用される炭酸ガス二相流ノズルの特性，日本機械学会創立110周年記念2007年度年次大会，2007年9月11日，関西大学

中川勝文，原田敦史，超音速二相流ノズル出口に発生する膨張波と衝撃波，日本機械学会熱工学コンファレンス2007，2007年11月24日，京都大学

中川勝文，倉科淳司，炭酸ガス二相流エジェクタの混合特性，日本機械学会熱工学コンファレンス2007，2007年11月24日，京都

大学

中川勝文，倉科淳司，矩形流路をもつ炭酸ガス二相流エジェクタの混合・昇圧特性，日本機械学会東海支部第57期総会講演会，2007年3月10日，名古屋大学

中川勝文，茅野浩之，原田敦史，炭酸ガス二相流ノズルの減圧沸騰に関する研究，日本伝熱学会第45回日本伝熱シンポジウム，2008年5月21日，つくば国際会議場

中川勝文，原田敦史，Analysis of Expansion Waves Appearing at the Outlet of Two-Phase Flow Nozzle, 12th International Refrigeration and Air Conditioning, 2008年7月15日，Purdue Univ.

中川勝文，Menandro Serrano Berana，Shock Waves in Supersonic Two-Phase Flow of CO₂ in Converging-Diverging Nozzles, 12th International Refrigeration and Air Conditioning 2008年7月15日，Purdue Univ.

中川勝文，MARASIGAN Ariel，Performance of Non-Freon CO₂ Refrigeration Cycle Using Two-phase Ejector, 15th Asian Symposium on Ecotechnology, 2008年10月19日，Ishikawa Industrial Promotion Center

中川勝文，Menandro Serrano Berana，Nozzle Design and Applicable Empirical Theories of Frictional Pressure Drop for Supersonic Two-Phase Flow of CO₂, International Institute of Refrigeration-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, 2008年9月7日，Copenhagen, Denmark

中川勝文，Menandro Serrano Berana，Shock Wave Analysis and CO₂ Utilization for Powerplants, 1st AUN/SEED-Net Regional Workshop on New/Renewable Energy, 2009年3月12日，Bandung, Indonesia

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1)研究代表者

中川勝文 豊橋技術科学大学工学部准教授

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし