

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 18日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560210

研究課題名（和文）

二相流膨張波の吸引力を利用したノンフロン炭酸ガス冷凍サイクルのエジェクタの研究

研究課題名（英文）

Freon Free Carbon Dioxide Ejector Refrigeration Cycle Using Suction Force by Two-phase Expansion Waves

研究代表者

中川 勝文（NAKAGAWA MASAFUMI）

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50135414

研究成果の概要（和文）：京都議定書の採択により，温室効果ガス特に代替フロン冷媒の削減が義務づけられた．これに代わる最も有望な自然冷媒である炭酸ガスは冷凍機の成績係数を悪化させる．二相流エジェクタはこのような冷媒で増加する膨張エネルギーを利用して効率を改善する働きがある．本研究はこの炭酸ガス二相流エジェクタをさらに改良するために，駆動流ノズル背後に発生する二相流膨張波の特性を調べた．理論的に，ノズル背後の膨張波のすぐ後ろにディスク型の衝撃波が発生することを明らかにした．これを利用すると膨張波の負圧で吸引し，衝撃波で加圧することが可能になる．また，二相流エジェクタを試作し，混合部の流路径と長さがエジェクタの昇圧にどのような影響を与えるかを実験的に示した．

研究成果の概要（英文）：A long term solution for global warming is now inevitable to mitigate the dilemma of climate change. Two of the most effective solutions are to increase the efficiency of a system or device and to use natural working fluids. An ejector can improve the performance of a CO₂ refrigeration system by recovering the energy lost during expansion. The theoretical studies for two-phase expansion wave at the outlet of the driving nozzle are carried out. It is shown that the disk shock wave appears just after the expansion waves. The experiments which elucidate the effect of the length and the flow area of the mixing section are also carried.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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，我が国が採択した京都議定書によって，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．これに伴い，将来，地球温暖化係数の大きな代替フロンの転換が進み，自然冷媒である炭酸ガスが採用される可能性が大きい．

(2) しかし、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。炭酸ガス冷凍機の高効率化が急務である。炭酸ガス冷凍機の効率低下の主な原因は膨張時に無駄捨てられるエネルギーの増大にある。

(3) 二相流エジェクタはこの膨張時に無駄にされている運動エネルギーを回収する働きがあるので、この運動エネルギーを圧力のエネルギーに変換しコンプレッサ仕事を軽減させることができる。その結果として、冷凍サイクルの効率である成績係数を増加することが可能である。

(4) 二相流エジェクタの最も重要な役割は吸引流を吸引し、加圧することである。エジェクタでの加圧は、混合部での高速流体と低速流体の混合作用による加圧とデヒューザ部での減速による加圧である。しかし、吸引の効果については詳しく調べられていない。

(5) 駆動流ノズルの出口部では、ノズル内流れが不足膨張の場合、急激な膨張現象のため膨張波が発生する。この膨張波の負圧を利用すれば、エジェクタの吸引力を増加させ、エジェクタの効率を増加させることが出来る可能性がある。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、二相流エジェクタを用いた冷凍サイクルの効率を高めるため、二相流膨張波を用いた新しい吸引方法を開発することである。

(2) 二相流膨張波はエジェクタのノズル出口に発生し、吸引流を減圧することが可能であることがこれまでの我々の研究で明らかになってきた。そこで、吸引部をどの程度加速すれば膨張波が発生するのか、また、発生した膨張波が混合部の壁面でどのように反射するのか等を基礎実験で明らかにする必要がある。

(3) そして、この基礎実験を基にして、高速吸引流を用いる新しいタイプのエジェクタを開発することが目的である。

(4) そして、最終的に、この新しいタイプのエジェクタの性能試験を種々の運転条件に対して行い、このエジェクタの実現性について検討し、空調・冷凍産業の中で新しい冷凍方を確立させることが目的である。

3. 研究の方法

(1) 膨張波の吸引力を明らかにするため、本研究では、まず、駆動流ノズル背後に発生する膨張波の挙動について理論的に調べた。図1は、今回の解析に用いたノズル出口部と膨張室によって構成される計算体系を示している。ミスト噴流は軸対称条件が成立すると仮定し、座標系には軸対称円筒座標系を用いた。本解析は、二相流ノズル内は直接解かず

均質平衡二相流(IHE)モデルによって計算し、このモデルによって計算されたノズル出口の結果を解析入口の条件とした。ノズル入口および出口の条件は、実際の二相流エジェクタの入口条件圧力1.6MPa、温度50°C、出口0.4MPaとした。解析入口(ノズル出口)は、流速99.6[m/sec]、運動量相平衡マッハ数1.5、クオリティ0.28となる。また、解析入口は運動量および熱平衡が成立していると仮定している。図1のFAを解析入口とし、これらの値を用いた。また、境界ABCは滑り無し条件、境界EFは対称条件、DEは自由流出の境界条件を用いている。また、境界CDは流れ場に対して十分遠方にあるとし速度は0とおいた。本解析では、不足膨張時の解析を対象とするため、境界CDにおける圧力は解析入口圧力の0.5~0.9倍として解析をおこなっている。計算格子は、流れ方向に720点、半径方向に110点配置し、計算はそろばん格子M型CIP法によって非定常計算をおこない、解が十分安定した解析結果を定常解とした。

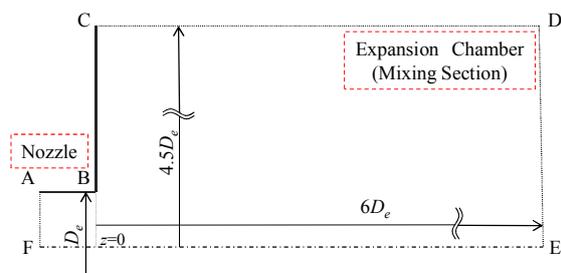
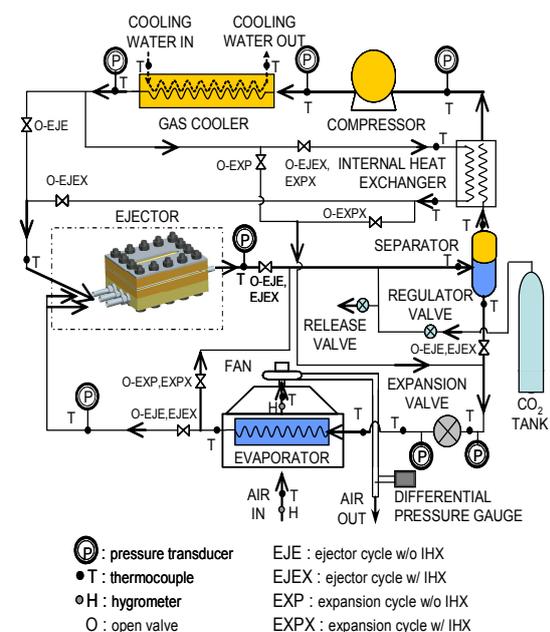


図1 計算領域と境界条件



P: pressure transducer
 T: thermocouple
 H: hygrometer
 O: open valve
 EJE: ejector cycle w/o IHX
 EJEX: ejector cycle w/ IHX
 EXP: expansion cycle w/o IHX
 EXPX: expansion cycle w/ IHX

図2 作製した実験装置

(2) 本研究では、膨張波の吸引力がどのようにエジェクタの働きに作用し、冷凍サイクルの成績係数 COP に影響を与えるのかを調べるために図 2 のような実験装置を製作した。凝縮器に相当するガスクラワーは水冷式で水の流量と温度差で冷媒のエントルピー差を測定できるようになっている。また、蒸発器は吸い込み風洞の中に入れてあるので流入し、流出する空気の温度と湿度から、冷媒の凝縮量が測定できる。また、コンプレッサ入口とガスクラワー出口に中間熱交換器が設けられており、蒸発器背後の熱が有効利用される。また、エジェクタの駆動流ノズルに流入するエントルピーが減少し、COP が増加する。これについても実験で明らかにする。

図 3 に実験で使用されたエジェクタの組立図と、エジェクタの駆動ノズルの特性を調べる実験で使用されたノズルの組立図を示す。

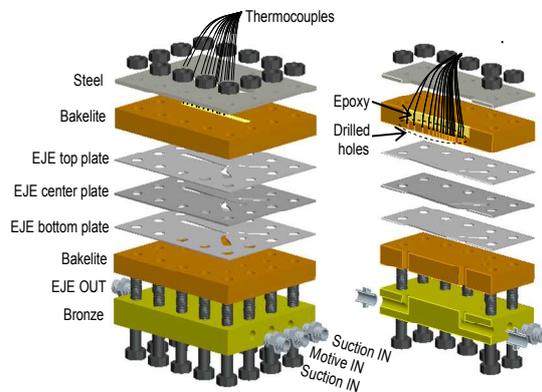


図 3 エジェクタとノズルの組立図

4. 研究成果

(1) エジェクタの駆動流ノズル出口に発生する膨張波の特性を理論的に調べ、以下に示す研究成果を得た。

背圧をノズル出口圧の 0.7 倍とした不足膨張時の解析結果を図 4 および図 5 に示す。それぞれの図の下部は流線および圧力の等値線分布、図の上部は中心軸上の各相の速度、圧力および蒸発速度の分布を示している。図 4 は液滴径が実際の流れ場の径よりも非常に小さい $0.15 \mu\text{m}$ の場合の解析結果を示す。

相間の輸送現象の度合いを示す運動量および熱緩和時間は、液滴径の関数となるため、これらの値も実際の流れ場よりも小さく、輸送過程が平衡状態に近い場合の解析結果となる。中心軸上の流速、圧力分布によって、ノズルから噴出される高速ミスト流は膨張波によって減圧加速していることが示された。

この膨張波は噴流境界上で反射し圧縮波となるため、圧力は回復し、速度は減速することになる。さらに、この圧縮波は反射し膨張波となり、膨張波と圧縮波が繰り返し発生

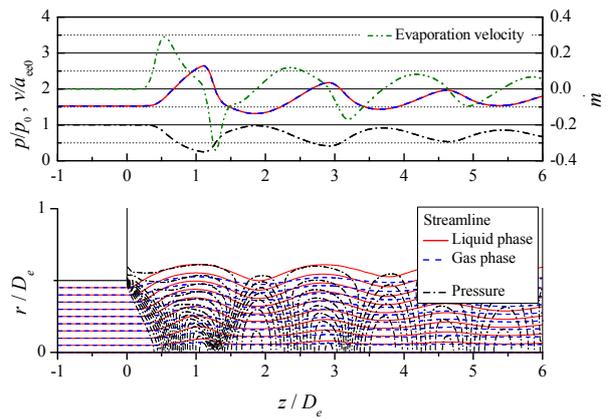


図 4 液滴径の小さい場合

する気体単相流れの超音速噴流と同様の分布となった。また、背圧をさらに下げたとき、気体単相の不足膨張噴流と同様に、本解析において、垂直衝撃波(マッハディスク)が発生することが明らかになった。

この解析は、緩和時間が非常に小さい平衡状態で相間の輸送過程が行われている。このため、非平衡性を持たず相間の輸送が活発に行われ、気相と液相の速度は等しくなる。図 4 の中心軸上の速度分布をみると、気相と液相の速度分布が重なっており、解析結果からも気液の速度が等しくなっていることがわかる。相間の熱輸送についても活発に行われるため、伝熱律速による相変化も非常に活発になる。中心軸の分布から膨張波による蒸発、圧縮波による凝縮現象が活発におこなわれていることがわかる。ミスト流中に発生する膨張波と圧縮波によって相間で質量輸送がおこなわれるため、気相と液相の等質量分布線はずれた形になることが分かった。

次に、図 5 に、液滴径 $8.0 \mu\text{m}$ の場合の解析結果を示す。この液滴の大きさは、実験から得られる液滴径のオーダーと等しいため、実際のエジェクタ内に発生する超音速噴流の条件での解析結果となる。なお、図 4 の解析と比較して、液滴径以外は同様であるため、液滴径の関数となる緩和時間のみが異なる。液滴径の増加によって超音速ミスト噴流の形状が大きく変化し、例えば、中心軸上の速度分布は図 4 とは異なり、気相と液相が独立した速度分布となる。これは液滴の増加に伴い、緩和時間が増加するため、相間の運動量輸送量が小さくなり、液滴は気相に追従することが難しくなる。したがって、ノズルから噴出された液滴は連続相中に伝わる波の影響を受けず、自身の慣性力から噴流中を直進する。実際のエジェクタ内の流れでは、相間の強い非平衡性により噴流背後において、図 4 の平衡状態に近い流れで見られた圧力振動が起こらない分布となることが明らかにされた。さらに、ノズル出口からの膨張開始

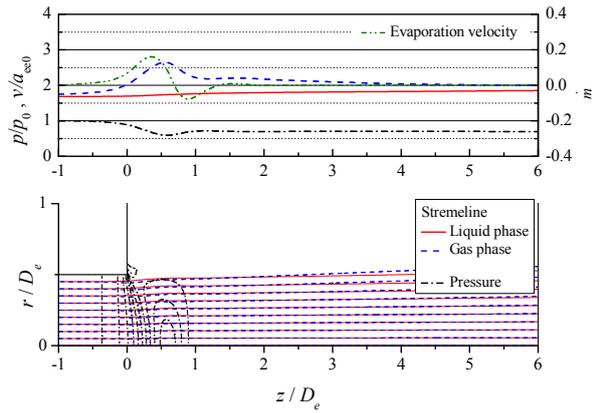


図5 液滴径が8 μ mの場合

点が2つの解析結果では異なることが示された。

図4はノズル中心軸上0.5付近となるが、図5はノズル出口からすぐに膨張を開始する。これは図4の場合は液滴が非常に小さく、運動量、熱輸送ともに平衡状態であり、この条件の二相流中の音速によるマッハ数は約1.5となる。したがって、膨張開始点となるマッハ角は、ノズル中心軸上では0.6の位置で膨張を開始することになる。この値は半無限流体中に発生する値であるため、ノズル中心軸において上流に移動しているが、膨張開始点の傾向はほぼ一致していることが明らかになった。

また、図5の場合は二相流中の音速は緩和時間の増加によって上昇することが理論解析から明らかにされており、液滴径の増加に伴い音速が上昇するため、膨張開始点が上流に移動することが分かった。

(3) 次に実験で、ノズル出口に発生する膨張波に大きな影響を与えるノズル入口での冷媒温度が、炭酸ガスエジェクタ冷凍サイクルの熱効率に効果を実験で明らかにした。

ノズル入口温度は中間熱交換器の長さに依存している。図6に中間熱交換器の長さが冷津サイクルのCOPにどのような影響を与えるか調べた結果を示す。中間熱交換器の長さが60cm、30cm、なしの場合についてCOPが調べられた。図中には、エジェクタを用いない従来の膨張弁サイクルの結果も点線で示してある。中間熱交換器が無い場合、エジェクタサイクルのCOPは圧力の低いところで従来の膨張弁サイクルに劣るが、中間熱交換器がある場合、エジェクタ冷凍サイクルのCOPが従来サイクルのものより大きくなることが分かった。

中間の熱交換器が無い場合、エジェクタから流出する二相流は気液分離機で十分に分離されずにコンプレッサに入るため、コンプレッサの効率が低下したと考えられる。しか

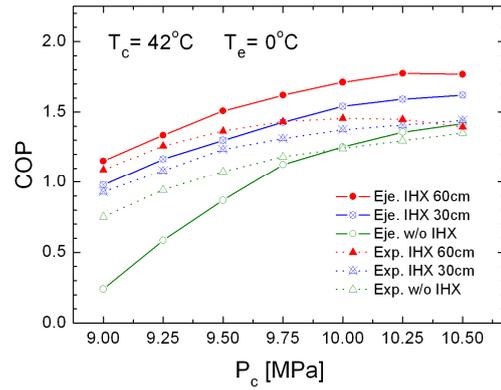


図6 中間熱交換器の効果

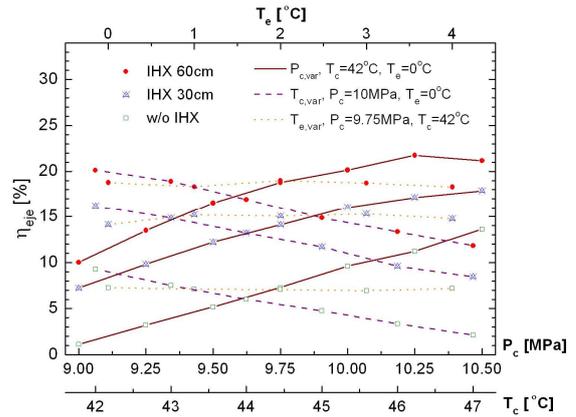


図7 エジェクタ効率

し、図7のエジェクタ効率を見ると、中間熱交換器によって冷やされた冷媒が、エジェクタのノズルに流入するとエジェクタのノズル効率が上昇し、エジェクタの効率が增加して、最終的に冷凍サイクルのCOPが改善されることが示された。

(4) また、膨張波と衝撃波が現れる混合部の長さを変化させて、冷凍サイクルのCOPを調べる実験を行った。

図8に、混合部長さを変えたとき、混合部に発生する衝撃波の大きさについて、混合部

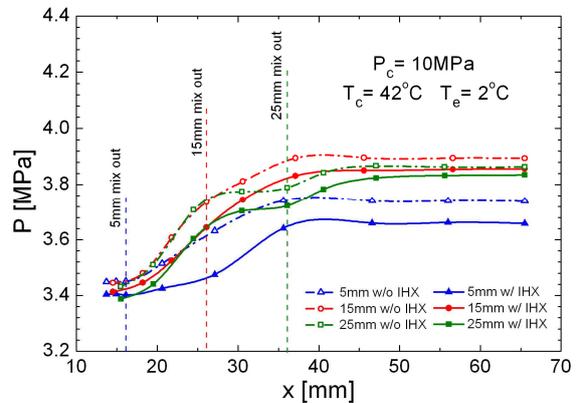


図8 衝撃波と混合部長さの依存性

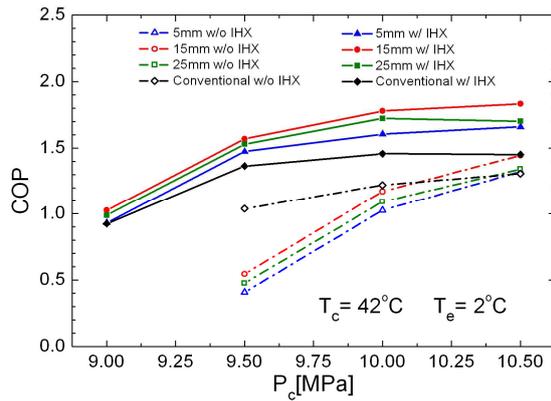


図9 混合部長さの依存性

壁面での静圧分布で示す。理論計算では、ノズル出口の中心部で、膨張波による減圧とそのすぐ後に発生するディスク型衝撃波のために、減圧してから上昇する圧力分布が得られる。一方、実験ではこの膨張波の減圧は吸引部まで至っているため現れないが、衝撃波の上昇として観察されることが明らかになった。

5cmの長さの混合部では、膨張波が壁面まで到達し真空部を発生することが出来ないため、昇圧が低い値に留まっていることが明らかになった。また、15cmの長さで十分真空部が達成され、昇圧が増加していることがわかる。さらに混合部の長さを増加させると、混合部での壁面摩擦による圧力損失が大きくなり、混合部での圧力上昇が低下していることが示された。

図9に、このとき得られる冷凍サイクルのCOPを示す。冷凍サイクルのCOPも昇圧と同様に中間の長さのときも最も熱効率が高い結果が得られた。

これらの実験結果は、炭酸ガスエJECTA冷凍サイクルの設計に利用されることを期待する。

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8件)

- ①Masafumi Nakagawa, Ariel Roxas Marasigan Experimental Investigation on the Effect of Mixing Length on the Performance of Two-Phase Ejector for CO₂ Refrigeration Cycle, International Journal of Refrigeration, Vol.34, 1604-1613, 2011, 有
- ②Masafumi Nakagawa, Ariel Roxas Marasigan, Experimental Analysis on the Effect of Internal Heat Exchanger in Transcritical CO₂ Refrigeration Cycle With Two-Phase Ejector, International Journal of Refrigeration, Vol.34,

1577-1586, 2011, 有

- ③Masafumi Nakagawa, Ariel Roxas Marasigan and Takanori Matsukawa, Experimental analysis of two-phase ejector system with varying mixing cross-sectional area using natural refrigerant CO₂, International Journal of Airconditioning and Refrigeration, Vol.18 (4) pp. 297-307, 2011, 有
- ④原田敦史, 中川勝文, Theoretical Analysis of the Two-phase Oblique Shock Waves in an Ejector with Momentum and Temperature Relaxation, Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Vol.27, N0.3 pp.13-21, 2011, 有

- ⑤ Masafumi Nakagawa, Menandro Serrano Berana and Akinori Kishine, International Journal of Refrigeration, Vol.32, 1195-1202, 2009, 有

- ⑥Masafumi Nakagawa, Ariel Roxas Marasigan and Takanori Matsukawa, Performance of non-fluorocarbon-based CO₂ refrigeration cycle using two-phase ejecto, Journal of Ecotechnology Research, Vol.15 (1) pp.17-21, 2009, 有

- ⑦ Masafumi NAKAGAWA and Atsushi HARADA, M. S. Berana, Analysis of Expansion Waves Appearing in the Outlets of Two-Phase Flow Nozzles, HVAC & R RESEARCH, Vol.15, Num.6, 1081-1098, 2009, 有

- ⑧M. S. Berana, Masafumi NAKAGAWA and Atsushi HARADA, Shock Waves in Supersonic Two-Phase Flow of CO₂ in Converging-Diverging Nozzles, HVAC & R RESEARCH, Vol.15, Num.6, 1065-1080, 2009, 有

[学会発表] (計15件)

- ①中川勝文, 川村洋介, 炭酸ガス超音速二相流ノズルの出口に発生する斜め衝撃波に関する実験的研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011, 2011年10月30日, 静岡大学

- ②中川勝文, 佐藤力, 二相流エJECTAによる無電源軽水炉緊急時炉心冷却系の理論解析, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011, 2011年10月30日, 静岡大学

- ③中川勝文, 吉岡大志, イソブタン冷媒に対するノズル内減圧沸騰二相流の流動特性, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011, 2011年10月30日, 静岡大学

- ④中川勝文, 新美貴之, CO₂エJECTA冷凍サイクルにおける液ガス熱交換器の効果について, 東海支部第60期総会講演会, 2011年3月15日, 豊橋技術科学大学

- ⑤中川勝文, 眞謝仁志, 冷媒R134a二相流ノズルの減圧沸騰に関する研究, 東海支部第60

期総会講演会，2011年3月15日，豊橋技術科学大学

⑥中川勝文，川村洋介，超音速炭酸ガス二相流に発生する斜め衝撃波に関する実験的研究，東海支部第60期総会講演会，2011年3月15日，豊橋技術科学大学

⑦中川勝文，原田敦史，超音速二相流中に発生する衝撃波に関する実験的研究，東海支部第60期総会講演会，2011年3月15日，豊橋技術科学大学

⑧中川勝文，狩谷健一，ペンタンを用いた排熱を利用するエジェクタ空調システムに関する研究，日本機械学会熱工学コンファレンス2010，2010年10月30日，長岡技術科学大学

⑨中川勝文，原田敦史，運動量と熱輸送を考慮した二次元二相流膨張波の解析炭酸ガス二相流エジェクタの混合特性，第47回日本伝熱シンポジウム，2010年5月26日，札幌コンベンションセンター

⑩中川勝文，佐藤力，水蒸気を使用したエジェクタの性能評価，東海支部第59期総会講演会，2010年3月10日，名城大学

⑪中川勝文，上田耕平，固体酸化物型燃料電池燃料リサイクル用エジェクタの性能評価，東海支部第59期総会講演会，2010年3月10日，名城大学

⑫中川勝文，原田敦史，相変化する二相流中に発生する膨張波の理論解析，第87期流体工学部門講演，2009年11月8日，名古屋工業大学

⑬中川勝文，原田敦史，相変化する二相流中に発生する斜め衝撃波の理論解析，日本混相流学会年会講演会，2009年8月9日，熊本大学

⑭中川勝文，原田敦史，運動量と熱輸送を考慮した二次元二相流膨張波の解析，第46回日本伝熱シンポジウム，2009年6月3日，京都大学

⑮中川勝文，茅野浩之，ノズル出口に発生するCO₂二相流斜め衝撃波に関する研究，第46回日本伝熱シンポジウム，2009年6月2日，京都大学

〔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（Masafumi Nakagawa）

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50135414

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし