

審査の結果の要旨

氏名 菅野 普

排熱回収用サイクルとして、熱源から作動流体への熱交換時に作動流体を液相に保ち、膨張機内で液相を減圧沸騰させて仕事を取り出すトリラテラルサイクルが注目されている。本サイクルは、高温熱源と作動流体との温度差が小さいため、熱源の熱容量が有限で、熱交換時に熱源温度が降温する条件では、エクセルギー損失が熱力学的には最も小さいという特徴を有する。トリラテラルサイクルの最大の特徴は、飽和液を膨張行程で減圧沸騰させながら仕事を取り出す気液二相断熱膨張プロセスとなることである。こうした気液二相断熱膨張からの動力回収の課題として、膨張比が非常に大きくなること、気液の非平衡性による断熱効率の低下が明らかではないこと等が挙げられる。本研究では、膨張比の設計自由度が大きく、形状がシンプルなレシプロ式膨張機を対象とし、容積型膨張機における気液二相断熱膨張について、内部現象を明らかにするとともに、膨張機駆動速度や気液の非平衡度等が断熱効率に与える影響を実験的に評価した。また、液相から気相への相変化量と非平衡度との相関を明らかにし、断熱二相膨張機における断熱効率予測手法を提案することを目的とした。

まず、レシプロ式膨張機を模擬した気液二相断熱膨張可視化装置を製作した。実験に際して、作動流体をシリンダごと予熱し、予熱直後にシリンダを真空断熱し、ピストンを移動することにより気液二相断熱膨張プロセスを再現するとともに、膨張時の沸騰流動および膨張機仕事を評価した。その結果、シリンダ底面縁部からの発泡が観察され、ピストン速度の増加に伴い発泡頻度、発泡箇所は増加することを確認した。また、作動流体にエタノールを用いた場合、水に比較して気泡径が小さく、シリンダ底面からの発泡により液面が持ち上げられるような沸騰流動が確認された。焼結金属をシリンダ底面に設置することにより、発泡箇所がシリンダ底面の全面に広がり、シリンダ内圧の低下が抑制され、断熱効率が向上した。焼結金属の平均空隙径を $5\sim 75\ \mu\text{m}$ と変化させて実験した結果、作動流体に水を用いる場合は、平均空隙径が $75\ \mu\text{m}$ のときが最も断熱効率が高く、作動流体がエタノール場合は、平均空隙径が $20\ \mu\text{m}$ 以下で断熱効率が向上した。これは、エタノールが水に比べて表面張力が小さく濡れ性が

良いため、空隙径が大きい場合、予熱時に発生した気泡を保持し続けることができなかつたためと考えられる。

続いて、実際の膨張機を想定し、作動流体の供給・排出を伴う実際のレシプロ式膨張機を模擬した気液二相断熱膨張の連続実験を行い、熱損失、気液非平衡度による損失、作動流体供給遅れに起因する損失それぞれの寄与率を分析した。ピストン最大速度が増加するに従って、前サイクルで冷却された壁面への熱損失が減少する一方で、非平衡損失が支配的となったが、断熱効率は増加した。ピストン最大速度が 300 mm/s 以上の高速となる条件では、壁面への熱損失はほとんど無視できることが確認された。

以上の結果を踏まえ、気液二相膨張の断熱効率の予測を試みた。断熱効率の予測に際しては、気液両相のバルク温度で定義される熱伝達から蒸発量を与え、気相のエネルギー保存の時間変化を解くことで、作動室内の圧力を求めた。この圧力と等エントロピー膨張時の圧力から得られる仕事の差から断熱効率を算出した。ここで気相と液相間の熱伝達については、ヌセルト数をプラントル数、気相レイノルズ数、気液密度比、ボンド数の関数として整理した。予測された断熱効率は実測値とよく一致し、本予測手法の妥当性を確認した。

このように、気液二相断熱膨張においても高い断熱効率が達成できることを確認し、気液二相膨張を利用するトリラテラルサイクルが高いエクセルギー効率を実現できることを実験的に示したことは工学的な価値が高い。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。