

博士論文（要約）

容積型膨張機における気液二相断熱膨張
に関する基礎的研究

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については、スクリュウ式やスクロール式膨張機を用いた動力回収の研究例が報告されている。しかしながら、先述の膨張機の膨張比は最大で10程度であり、構造上膨張比を大きくとることができず、設計の自由度が狭い。また、気液二相断熱膨張では、気液の非平衡状態が高い状態、即ち沸騰による気泡が十分に発生せず、気相温度が液相平衡温度に比べて低い状態となると、作動室内の圧力が低下し断熱効率が低下する。こうした気液二相断熱膨張の非平衡については、主に脱塩化の分野において、チャンバー内でのフラッシュ（減圧沸騰）の研究例があるが、気液二相断熱膨張の断熱効率を評価する上では、容積変化するチャンバー内での減圧沸騰を評価することが第一歩となる。

以上から、気液二相断熱膨張からの動力回収に対しては、膨張比の設計自由度が大きいレシプロ式膨張機が望ましく、気液二相断熱膨張の現象解明を行う上でも、形状がシンプルなレシプロ式膨張機が最も適している。その一方で、このような飽和液の減圧沸騰による動力回収の研究例はほとんどない。そこで、本研究では、レシプロ式膨張機を用いて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、トリラテラルサイクルへの適用可能性を検討した。また、液相から気相への相変化量と非平衡度との関係を明らかにし、断熱二相膨張現象のモデル化を行った。

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基礎実験装置を製作した。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。本実験で膨張機速度や沸騰の流動様式が断熱効率に与える影響を明らかにすることで、以下の知見を得た。

ピストンの移動に伴い、シリンダ底面縁部からの発泡が観察された。発泡頻度、発泡箇所はピストン速度の増加に伴い増加した。また、作動流体にエタノールを用いる場合、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。

シリンダ内圧はピストン速度の増加に従って低下し、過熱度は増加した。同じ過熱度変化となるときはほぼ同じシリンダ内圧変化となった。また、蒸発量、蒸気速度はピストン速度にほぼ比例して増加した。これは、ピストンの上昇により、気液界面温度の飽和蒸気

が作動室容積の増加分だけ液相から気相に移動しているとみなされ、そのため蒸気速度がピストン速度に追従したものと考えられる。

また、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 $5-75\ \mu\text{m}$ 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大きく、作動流体がエタノール場合は、平均空隙径が $75\ \mu\text{m}$ では沸騰が安定せず、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。また、焼結金属を用いることによりシリンダ内圧が高く維持され、過熱度が低下したが、蒸発量および蒸気速度は、焼結金属を用いたときと、用いながったときとでほぼ一致した。このことから、気液二相断熱膨張におけるシリンダ内圧の低下は、蒸発量（液相から気相へ移動する蒸気の質量）の不足ではなく、液相から気相へ移動する蒸気の温度そのものが低下しているためと考えることが妥当と言える。

以上の実験では、膨張開始時に静止した任意量の飽和液の作動流体が作動室内に存在する条件から膨張が開始した。しかしながら、実際のレシプロ式膨張機では作動流体の供給・排出を伴うため、作動流体排出時にシリンダ壁面温度が低下し、温度低下したシリンダ壁面に対して高温の作動流体が供給される。このため、作動流体からシリンダ壁面への熱ロスの影響が大きくなり、断熱効率低下の要因になると考えられる。一方で、作動流体排出時に残った気泡核や、作動流体流入時の液相内部の乱れによる液相攪拌により断熱効率が向上することも考えられる。このため、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、熱ロス、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。具体的には、先述の実験装置に対して、プランジャを用いて、予熱された作動流体をシリンダ内に供給し、減圧タンクに膨張後の作動流体を排出する構造を追加した。本実験の知見を以下に纏める。

作動流体に水を用いる場合、シリンダ底面からの発泡が観察された。作動流体にエタノールを用いる場合は、作動流体導入時に液相内が激しく発泡したと思われる現象が観察されたが、作動流体導入後は作動流体からシリンダ底面への熱ロスの影響を強く受け、発泡箇所は比較的高温な作動流体供給バルブ付近に集中した。

プランジャの圧送による作動流体の導入によりシリンダ内圧が急上昇し、プランジャ速度が減少するにつれてシリンダ内圧は急激に低下し、作動流体導入完了後は膨張行程終了にかけてシリンダ内圧が徐々に低下した。シリンダ内圧は、シリンダ底面への熱ロスの影響を強く受け、ピストン最大速度が増加するに従って、熱ロスが減少し、非平衡損失が支配的となるが、断熱効率が増加した。一方で、ピストン最大速度が $300\ \text{mm/s}$ 以上の高速となる条件では、シリンダ底面への熱ロスはほとんど無視できることが示された。

膨張行程に対して作動流体供給時間を増加させると、最大圧力が低下すると同時に圧力上昇のピークがなだらかになった。これは、作動流体供給時に、液相体積に対する作動室内容積が大きいことにより、作動流体が常に減圧される等エンタルピー膨張状態となるためと考えられる。以上から、なるべく短い時間で作動流体の供給を完了することが望ましいことが示された。

以上の実験により、ピストン速度の増加に伴い作動室内の圧力が低下することが確認されたが、単位時間当たりの蒸発量はピストン速度にほぼ比例して増加することも明らかになった。以上を踏まえ、気液界面からの蒸発による熱の移動を液相-気相間の熱伝達に相当するものとして断熱効率の予測を試みた。断熱効率の予測に際しては、気相のエネルギー保存の時間変化を解き、作動室内の圧力を求める手法を提案した。気液両相のバルク温度で定義される熱伝達から蒸発量と作動室内圧力を求め、等エントロピー膨張時の圧力との差から断熱効率を算出した。まず、実験において導出された熱伝達率を、プラントル数、気相レイノルズ数、気液密度比、ボンド数の関数とするヌセルト数の相関式で整理した。相関式が実測値をよく再現することを確認した後、気液界面温度が気相バルク温度に等しくなることを仮定して、気相エネルギー保存式を解き、作動室圧力および断熱効率を求めた。断熱効率の予測値は実測値とよく一致し、本予測手法の妥当性を確認した。

以上、本研究で得られた知見を纏める。気液二相断熱膨張において、ピストン速度の増加に伴い断熱効率が低下した。また、シリンダ底面に配置した焼結金属にトラップされた初期気泡核により、断熱効率が向上した。作動流体の供給と排出がある条件では、作動流体からシリンダ底面への熱ロスによる断熱効率の低下が懸念されたが、膨張機駆動速度が速い条件では熱ロスが無視できることが示された。さらに、液相から気相への蒸発を、高温の液相から気相への熱伝達現象として、実験結果から得られる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、ボンド数の関数とする相関式で整理した。気液界面温度が気相バルク温度に等しいと仮定し、相関式から得られるヌセルト数を用いて、気相エネルギー保存式を解くことで、気液二相断熱膨張の断熱効率が計算可能であることを示した。以上から、断熱効率の低下は液相内に生じる温度分布が主な原因であることが、実験および計算結果から推定された。

なお、従来の気相単相で断熱膨張では、乾き度低下による断熱効率の低下はあるものの、断熱効率は最大で 85%程度と報告されており、気液二相断熱膨張においてもほぼ同等の断熱効率となることが確認された。このことから、サイクルのエクセルギー解析により、特に熱源温度が 300°C以下の低い条件では、トリラテラルサイクルはランキンサイクルに比較して高いエクセルギー効率を達成でき、排熱回収における優位性が確認された。

以上