

外3-35

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

スターリングエンジンの研究開発における
性能解析モデルと特性解析に関する
研究

申請者

関谷 弘志

Hiroshi Sekiya

平成 3 年 12 月

近年の世界的な経済発展のもとで、フロンや有害な排気ガスによるオゾン層の破壊、温暖化および酸性雨などの地球環境問題が表面化し、一方、第1次石油危機に端を発したエネルギー問題によって、今日の産業界はエネルギーの高効率利用およびエネルギー源の最適選択（ベストミックス）を余儀無くされ、これらの諸問題を解決するための技術開発は今後の経済活動を促進する上で最も重要な課題となっている。

本研究で対象とするスターリングエンジンは、外燃式再生サイクル機関であり、工業用および民生用の動力源機器である出力100kW以下の小型エンジンとして用いた場合には、既存の内燃機関に比べて優れた熱効率や排気ガス特性を示し、燃料多様性、低振動・低騒音といった特徴を有することから、地球環境問題やエネルギー問題に対する解決策の一つとして最近とみに注目を集めている。しかしながら、これまでにスターリングエンジンが実用化された例はほとんど見受けられず、加熱部に用いる耐圧耐熱材料やシール技術の開発が実用段階に達していないことがハード面での大きな原因として挙げられる。加えてソフト面では、エンジン内に密封されている作動ガスが複雑な挙動を示すため、エンジン構成要素の最適化に用いる性能解析手法は確立されておらず、実用化を目指したエンジンの詳細設計における高精度な性能予測や、実験結果の十分な評価検討は現在のところ困難である。

そこで本研究では、このような背景を踏まえ、スターリングエンジンの研究開発に際してその一助となる性能解析手法を確立し、エンジン動作時の運転条件やエンジン構成要素の要目がエンジン性能に及ぼす影響を解明する。また、本手法を他サイクルに応用した例として、スターリングサイクル機関と同様の外燃式再生サイクル機関であるウィルミエサイクル機関を取り上げ、同機関を用いた空調用ヒートポンプの特性を解析する。これらの解析結果については、実験結果との比較により検証を行う。

本論文の内容を簡単に説明すると以下のようである。

まず、第1章は序論であり、本研究の背景や従来の研究、および本研究の目的について述べた。

第2章では、エンジン性能や特性の解析に必要な諸量を計算するためのスターリングエンジンの高精度な性能解析モデルを構築した。スターリングエンジンでは、サイクルを行う作動空間に作動ガスとして不凝縮性ガスが密封されている。ここでは、この作動空間を多分割した機関モデルを考え、熱流体の挙動を支配する物理学の保存則を分割された要素空間に適用することによって、本モデルで用いる基礎式を誘導する。また、エンジン構成要素である各種熱交換器における伝熱・流動特性式や数値計算法を示し、本性能解析手法の全容を明らかにした。

第3章では、30kW級の複動4シリンダ型スターリングエンジン（開発エンジン名：NS30S）を供試エンジンとして選び、複動型エンジンに不可欠な圧力調整システム（PBS）を本性能解析モデルに組み込み、実験結果との比較により計算結

果の妥当性を検証した。また、本性能解析モデルを用いて、NS30Sにおける作動ガスの挙動を解析するとともに、PBSが作動ガスの挙動やエンジン性能に及ぼす影響を考察した。この結果から、本性能解析モデルは作動ガスの挙動およびエンジン性能の詳細な解析が可能であることを実証できた。スターリングエンジンNS30Sは、ヘリウムを作動ガスとして最高熱効率37.2%、最大軸出力45.6kWのエンジン性能を示し、国内外で高い評価を受けた、実用化に近いスターリングエンジンである。

第4章では、作動ガスとしてヘリウムと水素を用いた場合と、外部設定温度（ヒータチューブ壁温とクーラ冷却水温度）および作動ガス圧力を変化させた場合について、熱交換器における伝熱・流動特性の作動ガス熱物性に対する依存性を明らかにし、作動ガスの挙動、特にエンジン性能を決定する圧力変動、またエンジン性能に及ぼすこれらの運転条件による影響を考察した。計算結果については実験結果との比較により検証を行った。

第5章では、スターリングエンジンの詳細設計において重要な検討項目である掃気容積、ピストン位相差および熱交換器要目がエンジン性能に及ぼす影響について検討した。熱効率の最適化に関しては熱交換器要目が特に重要であり、検討結果から、代表的に取り上げたヒータとクーラのチューブ内径および再生器蓄熱材のメッシュ数は、高効率化の観点からほぼ最適に設計されていることが明らかになった。

第6章では、本性能解析手法がスターリングサイクルと同様のウィルミエサイクルを用いた空調用ヒートポンプに適用できることを証明するため、両サイクル機関の基本性能とともに計算できる、等温モデルに基づいた簡易的な性能解析モデルを構築し、これらの対応関係について考察した。この結果、仮想ピストンを導入することにより、ウィルミエサイクル機関は内部的にスターリング冷凍機とスターリングエンジンに分離して取り扱えることがわかった。

第7章では、本性能解析モデルをウィルミエサイクル機関に適合するものとし、空調用の熱駆動型ヒートポンプとして開発された試験機における作動ガスの挙動やエネルギー流れなどの機関特性について、スターリングエンジンの解析結果と比較しながら検討を行い、計算結果と実験結果を比較した。これより、スターリングエンジンへの適用を目的として開発された高精度な本性能解析手法は、ウィルミエヒートポンプの特性解析や機関性能の評価検討にも有効であることが実証された。

最後に、第8章では、これまでの内容をまとめ本研究の総括とした。

以上のように、本研究は、本性能解析手法が実用化を目的とするスターリングエンジンの研究開発において有効な開発手段となり、本手法による機関特性の解析やエンジン構成要素の最適化検討はスターリングエンジンの詳細設計に大きく寄与することを明確にし、また、本手法は空調用ウィルミヒートポンプにも適用できることを実証するものである。