

内94-15

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

熱システムの力学的挙動
と制御に関する研究

申 請 者

菅 野 直 紀

Naoki Sugano

機 械 工 学 専 攻

プロセス工学研究

1994 年 11 月

近年環境問題，省エネルギーなどの観点から，熱システムの効率向上が望まれている．このためのアプローチとして次の二つの方法が考えられる．まず一つは，熱システムの個々の構成要素の性能向上を図ることである．これは具体的には，伝熱管の伝熱性能の向上，圧縮機の効率の向上などが考えられる．もう一つの方法は，システムとしての性能向上を図ることである．これは具体的には，サイクルを変更することによりシステムの性能向上を図ること，外乱によりシステムの動作点が設計点から変動した場合での性能を向上させるような制御を行うこと，構成要素の体格のバランスを最適化することによりシステムの性能を向上させることなどが考えられる．

従来の熱システムに対する研究では，熱システムの個々の構成要素の性能向上に重点がおかれているようである．これは，要素の特性の検討を行う場合は実験的な手法を適用することができるのに対して，システムとしての検討を行う場合は，実験的な検討を行うことはコストや開発時間が多大なものとなり実用的ではない．そこでシミュレーションによる検討が不可欠となるが，一方で近年開発の対象とされている熱システムは多くの要素から構成された非常に大規模なものとなっている．例えば，吸収冷凍機を例に取ると，最も単純な単効用サイクルでも5つ，二重効用サイクルでは7つの熱・物質交換器から構成されている．このため，シミュレーションモデルを構築することは非常に困難となることがシステムとしての検討を行うことを困難としている理由であると考えられる．そこで，システムの特性を検討するためには大規模な熱システムのシミュレーションモデルを容易に構築するための手法が必要となる．

そこで本研究では，まず制御ループを含む熱システム全体の静特性，動特性を解析するためのモデルを容易に構築するための手法の提案を行い，次にこれをコージェネレーションシステムの設計問題に適用することによりその有効性を示している．この手法を用いることにより，熱システムの設計段階において，外乱が加わった場合のシステムの挙動の把握，およびこのような場合でもシステムを適切に運転するための制御系の構築に関して検討することが可能となり，システムの開発時間の短縮を図ることが可能となる．また，サイクルに関する検討，各構成要素の体格のバランスの最適化を行うことにより，システムの高性能化を図ることができる．さらに，どの構成要素がシステム全体の性能に及ぼす影響が大きいについて把握することにより，構成要素の性能向上を図る上での指針を与えることができる．

現在，応力解析，流動解析，伝熱解析等の現象に関しては解析対象をコンピュータに図的に入力することにより解析を行うことのできるソフトウェアが開発されている．ところが熱システムの解析に関してはこの種のソフトウェアは開発されていない．この理由は，応力解析等の場合は解析モデルが一般的に数式化されているのに対し，熱システムの場合は，流動，伝熱のみならず，相変化，化学反

応，圧力変化等の現象が複雑に関与しているため，解析モデルの一般化が困難であるからである．つまり，モデル化を行う際は，このような現象を全て含んだ形にすると，モデルは極めて煩雑となり，解析が困難かつ演算に多大の時間を要することになり実用的でない．このため，システムの特性に対して支配的な現象のみをモデルに含めることが必要になるが，この支配的な現象は構成要素の性質によって異なる．そこで本研究では，あらゆる熱システムを一般的に解析できるようなモデルを作成するというアプローチをとるのではなく，熱システムの各種構成要素に対応する解析モデルを個別に用意し，この解析モデルをデータベース的に蓄積するというアプローチをとるものとする．これによりある熱システムの解析を行う場合は，システムの構成要素に対応する解析モデルをデータベースの中から引き出し，システムの構成要素の配管等による物理的な結合関係に対応する形で解析モデル相互間を結合することによりシステム全体の解析モデルを生成することができる．

本研究は三部から構成されている．まず第一部では，熱システムの解析モデルの構築法として，モジュール化されたモデルを接続することによりシステム全体のモデルを構築する手法を提案する．これは電気回路においてその特性を把握する場合に，まず各デバイスについて入出力の関係を明らかにし，次にデバイス相互間でこの入出力を接続することにより，回路全体の特性を把握するという手法を熱システムの解析に適用するものである．この考え方ではまず，熱システムについてその構成要素ごとにモデル化を行う．ここで，電気回路の場合と同様に構成要素の入出力関係という形でモデルを整理することによりモデルモジュールを作成する．次に，解析対象とする熱システムの構成要素の配管等による物理的な接続関係に対応する形で，各モデルモジュールの入出力間を結合しシステム全体の解析モデルを生成する．解析に際しては，非線形性の強い場合やパラメータが大きく変動した場合でも解析の精度を確保するため，線形化を行わず多変数入出力間の関係式を数値計算により解くものとする．この手法により，システム全体をまとめてモデル化する場合と比較して，多くの要素から構成される大規模なシステムの解析モデルを容易に構築することが可能となる．また，ある熱システムの解析を行う際に作成したモデルモジュールは，他の熱システムの解析を行う際，共通の要素機器が使用されている場合はこのモデルモジュールを共通資産として利用することができる．このようにしてモデルモジュールの種類を増やしていくことにより，他の熱システムを解析する際においても，新たにモデル化を行わなくても，既存のモデルモジュールを組み合わせることにより解析モデルを構築することが可能となる．また，システムの一部の構成要素を変更したり，構成要素間の接続関係を変更した場合に対応するモデルの変更も柔軟に行うことが可能となる．

第二部は，熱システムを構成する要素として3章では燃料電池電極冷却系，4，

5章では温水だき単効用吸収冷凍機を取り上げ、まずこれらの解析モデルを提案し、次に実験結果と比較することによりモデルの妥当性を確認する。このようにして構築したモデルについて入出力を定義することによりモデルモジュールの構築を行う。

3章では、燃料電池の排熱回収系の解析モデルの提案を行う。燃料電池は発電効率が高く、低公害という優れた特徴を持つ発電装置であり、実用化に向けての開発が行われている。このシステムでは、電極の酸化を防止し、かつ発電効率を高く維持するために燃料電池電極環境温度を一定に維持する必要がある。また、システムの総合効率を高めるためには、発電の化学エネルギーから電気エネルギーへのエネルギー変換の過程で発生する排熱を利用することが重要になる。以上の点から本研究では、適切な燃料電池電極冷却水系を設計するためのツールとして有効な解析モデルの提案を行い、さらに入出力間の関係式として整理することによりモデルモジュールを構築する。

4章では、温水だき吸収冷凍機の静特性モデル、5章では動特性モデルの提案を行う。吸収冷凍機は、圧縮式のように冷媒としてフロンを使用していないためオゾン層破壊の問題がない冷房機器である。また灯油、ガス等の燃焼熱や蒸気、温水などのさまざまな熱源を駆動源として利用し冷房を行うことが可能であるため、夏期の冷房用電力供給の逼迫に対して有効な対応手段となるばかりでなく、発電機排熱を駆動源として利用できることから、コージェネレーション機器としても注目されている。本研究では、この吸収冷凍機の性能の把握、制御系の構築等に利用できる静特性、動特性モデルの提案を行う。モデル化に際しては、吸収冷凍機は再生器、凝縮器、蒸発器、吸収器、溶液熱交換器から構成されていることから、この各要素ごとにモデル化を行い、モデルモジュールを構築し、これらを結合することにより冷凍機全体のモデルを生成する。さらに、この冷凍機全体のモデルについても、入出力を定義することにより、各要素ごとのモデルモジュールより一階層上のモデルモジュールである冷凍機モデルモジュールを構築する。さらに、このモデルを用いたシミュレーション結果と実験結果と比較することによりその妥当性の把握を行っている。

第三部では、本研究で提案する手法の熱システムに対する適用例として、燃料電池電極において発電を行う際の排熱を回収し、この排熱を用いて吸収冷凍機を駆動し室内の冷房を行うとともに給湯用温水を供給するコージェネレーションシステムを対象とし、第二部において構築した各構成要素に対応するモデルモジュールを結合することによりシステムの解析モデルを生成し、供給排熱量や冷房負荷の変動に対してシステムを適切に運転することができるような制御系の設計に関する検討、また構成要素の体格の最適バランスに関する検討をシミュレーションにより行う。これにより、制御系を含む熱システムの効率向上を目的とした設計を行うために、本手法を適用することが有効であることが示される。