

(6) 空調機開発における最適化問題

OPTIMIZATION PROBLEMS IN THE DEVELOPMENT OF AIR CONDITIONERS

伊藤宏幸*

康 倫明*

杉本博之**

Hiroyuki ITOH , Yoon-Myung KANG , Hiroyuki SUGIMOTO

In the development of capacity-controlled heat pump air conditioners, solving optimization problems are often required to improve energy efficiency and comfort. Recently automated optimization programs for general purpose are common in use, then complicated problems which have many design variables and constraints can be treated more easily. In this paper, two kinds of optimization problems are demonstrated. One is on shape optimization for designing rolling-piston type compressor, the other is on optimizing control of the parameters such as air flow rates in both indoor and outdoor heat exchangers and operating frequencies of the inverter system for driving compressor.

Key Words : Optimization , Air Conditioner , Compressor
Energy Efficiency Ratio , Annual Performance Factor

1. まえがき

地球規模の環境保全の観点から、特定フロン(R11、R12等)の段階的な削減が開始されている。一部の冷凍機では、これらを使用しているため、排出抑制のための使用合理化対策の明確化や代替フロン等異種の冷媒を使用する冷凍機や効果的な冷媒回収ならびに再生装置の開発が行われつつある。¹⁾ 本論文では、現在規制の対象となっていないフロン (R22)を使用する家庭用ルームエアコンをターゲットとして圧縮機、空調システムの効率を向上させるべく行われた、空調機開発における最適化問題の例を示す。

2. 汎用最適化ソフトウェア^{2, 3)}

従来、最適化手法については、シミュレーション・ソフトウェアの開発と同時に組込まれることが多く、他のソフトウェアに移植することは極めて困難であった。しかし近年、非線形数値計画法に基づく汎用性の高い最適化ソフトウェアが登場し、移植性が向上するとともに最適化手法の選択も容易になってきている。とりわけ制約条件の取扱いが簡便になっており、複数の設計変数を変化させながら線図を描き、最適解を探索する従来の設計手法と比較して、著しく開発期間を短縮する可能性が出てきている。

* ダイキン工業(株) 機械技術研究所

** 室蘭工業大学助教授 工学部土木工学科

3. ローリングピストン型圧縮機の形状最適化

家庭用ルームエアコンや業務用パッケージエアコンに幅広く使用されているローリングピストン型圧縮機の形状を図1, 2に示す。ここで図1は垂直断面図で、斜線部分が圧縮機部である。また図2は、水平断面図であるが、偏心量 $e (=R_c - R_r)$ を保持して回転するピストン(以後、ローラと称する)外周とシリンダ内壁およびブレードで囲まれた容積の変化により圧縮過程を形成する。次に冷凍サイクルを図3に示すモリエル線図上で簡単に説明する。冷凍サイクルは、図上で反時計回りに進行し、Aが冷房能力、Bが圧縮機入力、Cが暖房能力を示す。ここで、Aの蒸発過程、Cの凝縮過程上で効率100%の熱交換器が使用されるものとすれば、Energy Efficiency Ratio (EER)は、(3.1)式により表わされる。

$$EER \text{ (kcal/kW} \cdot \text{h)} = \frac{A \text{ (kcal/h)}}{B \text{ (kcal/h)}} \times 0.86 \quad (3.1)$$

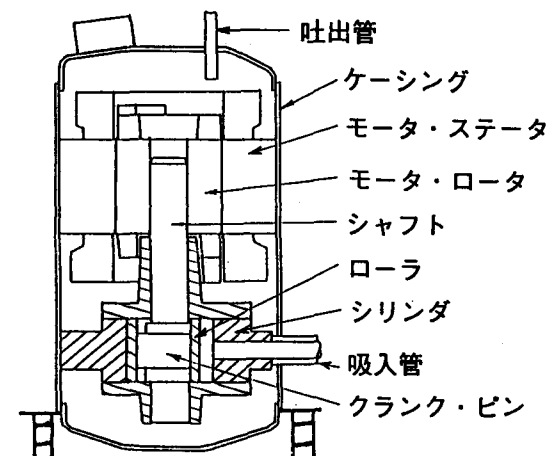


図1 圧縮機垂直断面図

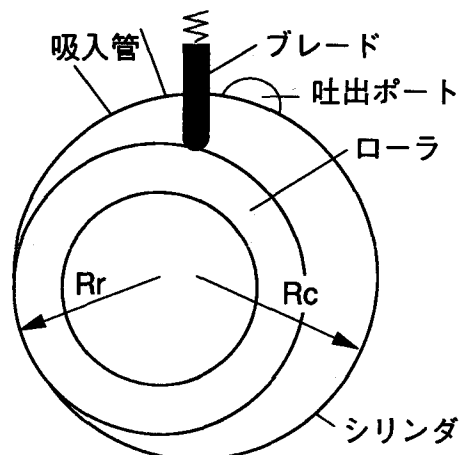


図2 圧縮機部の水平断面図

低圧0.508 MPa、高圧2.15 MPaとして、かつ完全な気化、液化のために過熱度 8°C 、過冷却度 5°C を与えた場合、効率100%の圧縮機では、EERは3.73となる。しかし、実際の圧縮機においては、モータ効率が100%ではないこと、摩擦等による機械損失、過圧縮、内部漏れ等による指示損失、またシリンダ等の熱容量に起因する容積効率の低下等の影響により、圧縮機の容量、運転周波数等によっても異なるが、通常2.3程度の値となる。⁴⁻⁷⁾

今回は、圧縮機のシリンダ半径および偏心量を設計変数とした場合に、目的関数EERを最大にする最適化問題を考える。サイド制約条件としては、(3.2)、(3.3)式を、制約条件としては、容積一定の条件から算出されるシリンダ高さ H が(3.4)式を満足させるものとする。

$$20.0 \leq R_c \leq 24.0 \text{ (mm)} \quad (3.2)$$

$$2.7 \leq e \leq 4.0 \text{ (mm)} \quad (3.3)$$

$$10.0 \leq H \quad (\text{mm}) \quad (3.4)$$

全体のフローチャートを図4に示す。ここで性能解析プロセスでは、圧縮室、吸入室、吐出室での圧力変化式、吐出弁の運動方程式、ガス流量式からなる連立微分方程式を解いている。吸入室では、逆流を考慮しており、漏れを示すガス流量式においては、ローラ側面では「圧縮性」の一次元流れを、端面では粘性流れを仮定している。なお、潤滑のため混入される冷凍機油に対する冷媒の溶解度は、温度、圧力の函数として与えている。

変換法として外点ペナルティ函数法を、最適値探索法として Davidon-Fletcher-Powell (DFP) の可変計量法を用いて最適化計算を行った結果を初期値とともに表1に示す。これによれば初期設計と比較して、約5.2%のEER向上が期待できることになる。因みに運転周波数は、120Hzとした。この結果を検討すると、1) EERの低下に大きく寄与する内部漏れの内訳が、今回の運転条件下ではローラ側面と端面とでおよそ10:1となることから、Hを小さくするべく、容積一定の条件からeを大きくさせた、2) 同時に機械損失、単位角度あたりの総合的な漏れ量低減のためにRcを初期値より大きくさせた、3) 但し、差圧自体の変化や漏れ面の円周増大によりRcに上限が与えられた、といったように解釈され、妥当性の高いものと考えられる。

表1 形状の変化とEER

	初期値	最適化後の値
Rc	22.0	22.8
e	2.75	4.0
H	25.0	17.04
EER	2.23	2.345

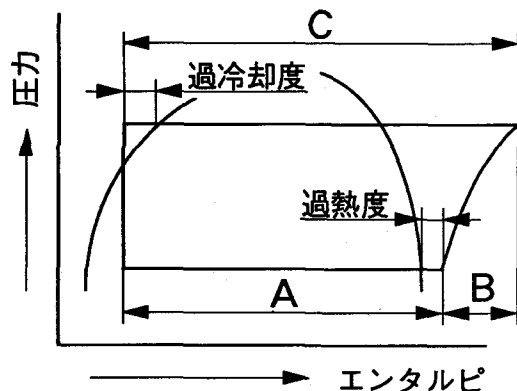


図3 モリエル線図

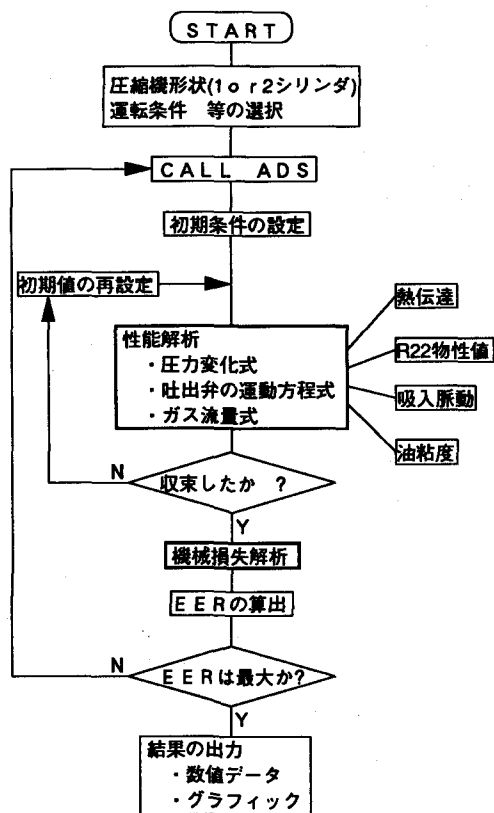


図4 圧縮機シミュレーション

4. 空調システム構成要素の動作点最適化

空調機の定常運転状態を考えれば、圧縮機容量と熱交換器の相対的な性能比が冷凍サイクルのバランス点を決定する。このことにより種々の構成要素の動作点を変化させた場合の性能計算を高速に実行することができる。⁸⁾

4. 1 室内／外風量をパラメータとした場合のCOP向上

外気温度 T_o 、室内設定温度 T_{set} を与えた場合に、成績係数COPを最大にするような室内機の風量 V_i と室外機の風量 V_o を算出する。その際に(4.1)式に示す部屋の壁面を通じて移動する熱量 Q_l と(4.2)式に示す冷凍サイクルにより移動する熱量 Q_a が等しくなるべく圧縮機の運転周波数が設定されるように収束計算を行っている。

$$Q_l = q (T_{set} - T_o) \quad (4.1)$$

$$Q_a = f (R, V_i, V_o, T_o) \quad (4.2)$$

従来は V_i, V_o の組合せによる多数の点でCOPを計算して、等高線を描き最適点を決定していた。(図5) このシミュレータに汎用最適化ソフトウェアを接続することにより同程度の精度で設計変数を決定するために必要なシミュレーション計算回数が約15分の1以下に減少した。(図6)

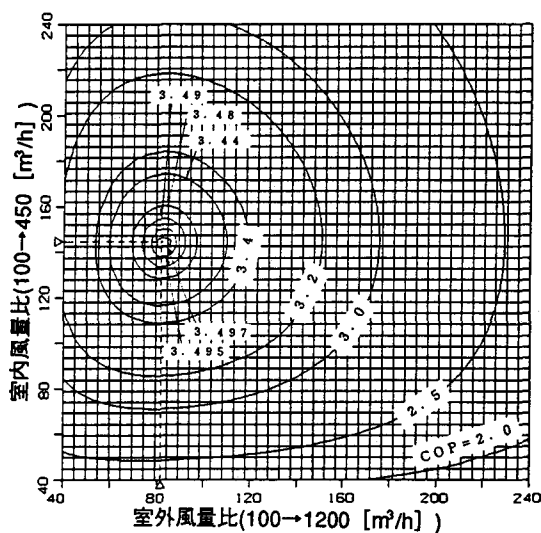


図5 等高線による最適点の決定

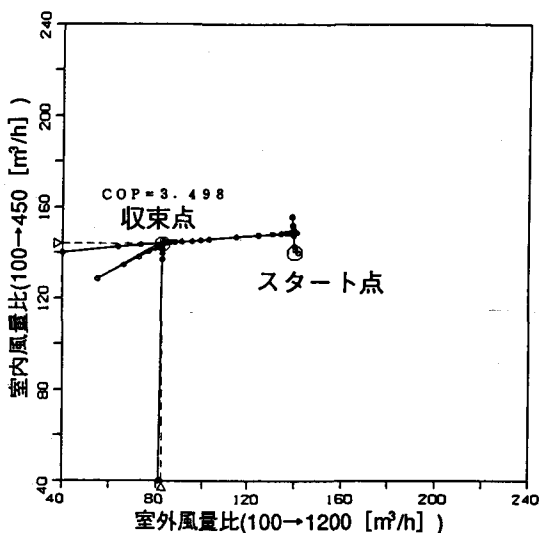


図6 最適化ソフトウェアを利用した最適点の決定

4. 2 快適性評価指標を制約条件とした場合の通年効率の向上

空調機に関しては、効率と快適性の両立が不可欠であるが、概ね両者はトレードオフの関係にある。

また、快適性の定量的評価についても、いくつかの提案がなされているが、決定的な指標として認知されているものはない。今回は、気温、風速のほか輻射等を考慮した指標を作成し、その指標を制約条件として、通年効率APF（＝SEER）を最大にするような構成要素の仕様を算出した。具体的な設計変数としては、5点の定義点における圧縮機の運転周波数を使用している（冷房／暖房運転時の最大／最小周波数ならびに冷房運転時の定格周波数）。ここでAPF算出はJIS案に基づいて行っている。計算のフローチャートを図7に、快適性指数（小さい方が良い）と効率の関係を図8に示す。A、Bは圧縮機のタイプによる違いを表わしている。何れの場合も最適化を行う前と比較して、より高い効率を示す結果が得られている。⁹⁻¹¹⁾

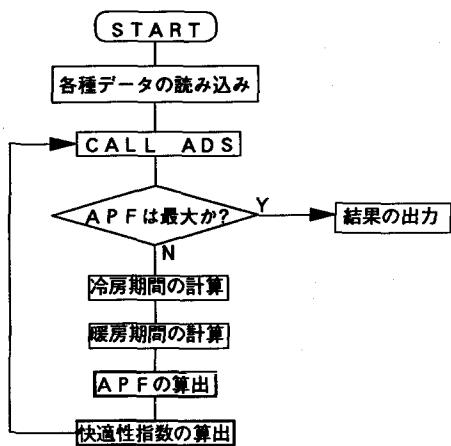


図7 空調システムシミュレーション

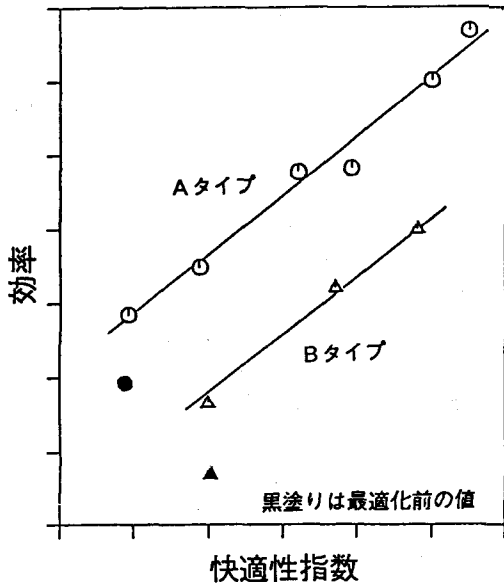


図8 快適性と効率の関係

5. あとがき

空調機開発における最適化問題の例を示した。今回使用した非線形数理計画法に基づく汎用最適化ソフトウェアは、局所最適解を求めるものであるが、工学上の最適化問題の多くはこれによって解決されるものと考えられる。初期値によらず、より大域的な最適解を自動的に求めるためには、シミュレーテッド・アニーリング法等の利用が考えられるが、¹²⁾ 現時点では、十分に実用化された技術であるとは言えない。また、今回の例で認識されたのは、そのような最適化手法の問題よりは、むしろシミュレーション自身の数値的安定性、再現性および目的函数の連続性が極めて重要であるということであった。最後に、本文中では触れなかったが、構造物や流体あるいは電磁場など「場」の解析においても最適化のニーズが高く、最適化機能を有する独自ソルバーの開発や市販の汎用ソフトウェアと最適化ソフトウェアのプロセス間通信等による結合を進めている。

謝 辞

各種のシミュレーション・ソフトウェアに対する最適化プロセスの組込みに当たって協力して頂いたダイキン工業(株)機械技術研究所の小林正博、斉藤健一、辰野 晋の3氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 冷凍と空調 '89-6 No.338 等
- 2) 杉本博之：構造最適設計の数値計画法からの脱皮
日本土木学会 構造工学論文集 Vol.35 A, pp.339-345, 1989
- 3) VANDERPLAATS, G. N., SUGIMOTO H. and SPRAGUE C. M. : "ADS-1 A New General-Purpose Optimization Program" AIAA Journal Vol.22, No.10, pp.1458-1459, 1984
- 4) 清水 孝：空調用回転圧縮機の回転ピストンの摩擦損 冷凍 第51巻第589号, pp.959-966, 1976
- 5) 柳沢 正, 清水 孝, 中村昌好：ローリングピストン形回転圧縮機の漏れ損失に関する研究 (ピストン端面すきまにおける漏れ) 日本機械学会誌(B編) 第48巻431号, pp.1256-1265, 1982
- 6) 柳沢 正：ローリングピストン形回転圧縮機の漏れ損失に関する研究 (ピストン半径すきまにおける漏れ) 日本機械学会誌(B編) 第48巻426号, pp.265-274, 1982
- 7) 藤本 悟, 大山和伸, 松皮武史, 銚谷克己：電動機-圧縮機の連成振動解析 冷凍 第64巻742号, pp.897-902, 1989
- 8) TORIKOSHI, K., UEMURA, S., YAJIMA, R. and FIJIWARA, M. : "Prediction Using Equivalent Ratio in Estimating of The Performance of Heat Pump Air Conditioner" Progress in the design and construction of refrigeration systems International Institute of Refrigeration pp.233-239, 1986
- 9) DIDION, David A., KELLY, George E. : "New Testing and Rating Procedures for Seasonal Performance of Heat Pumps" ASHRAE Journal September, pp.40-44, 1979
- 10) 関矢遼一：期間効率の試験と評価方法 (ASHRAE規格案の解説, 他) 冷凍 第58巻665号, pp.255-267, 1983
- 11) "Physiological Principles for Comfort and Health" ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS Chapter 8 1985
- 12) 上坂吉則：ニューラルネットによる最小値探索 日本音響学会誌 第45巻2号, pp.138-143, 1989