

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760132

研究課題名 (和文) 低温排熱有効利用に向けた吸着冷凍機運転パラメータの最適化

研究課題名 (英文) The optimization of operating conditions of adsorption chillers for the utilization of low-grade waste heat

研究代表者

宮崎 隆彦 (MIYAZAKI TAKAHIKO)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・助教

研究者番号：70420289

研究成果の概要：本研究では、吸着冷凍機の冷凍能力を最大化するための最適なサイクルタイム選択手法を確立し、最適サイクルタイムによる運転の結果、従来の運転条件に比べて単位吸着材質量当たりの冷凍能力が5%～30%向上する可能性があることをシミュレーションにより予測した。さらに、吸着材熱交換器の設計パラメータと最適サイクルタイムとの関係を明らかにし、吸着冷凍機の設計に有用となる指針を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,000,000	0	3,000,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	150,000	3,650,000

研究分野：熱工学

科研費の分科・細目：熱工学・機械工学

キーワード：吸着冷凍機，省エネルギー，廃熱利用，最適化，ヒートポンプ

1. 研究開始当初の背景

吸着冷凍機は、自然冷媒を用いており環境性に優れていること、100未満の低温排熱で駆動できるため省エネルギーに貢献すること等の利点を有するが、電力駆動の冷凍機に比べるとCOPが低く、また、装置が大型であるという欠点がある。

吸着冷凍機のサイクルは、吸着材が冷媒を吸着または脱着する過程（吸着過程）と吸着器の予冷または予熱を行う過程（準備過程）から構成される。従来の研究では、冷凍能力が吸着過程時間、準備過程時間に対して、それぞれピークを持つことは明らかにされていたが、吸着過程時間と準備過程時間の最適

な組み合わせという観点からの解析が行われていなかった。そこで、本研究では多変数の最適化が容易である Particle Swarm Optimization (PSO) と呼ばれる最適化手法を用いて、吸着冷凍機の冷凍能力を最大化するための最適なサイクルタイム構成を見出す。

2. 研究の目的

本研究の目的は、吸着冷凍機の主要な運転パラメータの一つであるサイクルタイム構成を最適化し、単位吸着材質量当たりの冷凍能力 (SCC: Specific cooling capacity) を最

大化することにある。SCC の向上により吸着冷凍機の小型化が可能になるため、従来型の吸着冷凍機が持つ弱点の克服につながる。併せて、吸着器の熱容量比、伝熱単位数等の設計パラメータと最適サイクルタイムとの関係を明らかにし、吸着冷凍機的设计指針を得ることも目的の一つである。

3. 研究の方法

(1) 吸着冷凍機のシミュレーション

吸着冷凍機を構成する4つの熱交換器(吸着器2つ、蒸発器、凝縮器)をモデル化し、シミュレーションにより熱交換器内の温度変化、吸着量変化を求めた。

各熱交換器の温度、吸着量変化を求める式を無次元化して表すと以下のようになる。

$$\frac{d\theta_b^d}{d\tau} = \frac{\epsilon_h}{\omega\pi_b}(1-\theta_b^d) + \frac{(1-\gamma_b)\beta}{\pi_b} \frac{d\phi_b^d}{d\tau} \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_b^a}{d\tau} = -\frac{\xi_{ca}\epsilon_{ca}}{\omega\pi_b}\theta_b^a + \frac{(1-\gamma_b)\beta}{\pi_b} \frac{d\phi_b^a}{d\tau} \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_c}{d\tau} = \frac{\xi_{cc}\epsilon_{cc}}{\omega\pi_c}(\theta_{cc,i}-\theta_c) - \frac{(\lambda-\gamma_c)\beta}{\pi_c} \frac{d\phi_b^d}{d\tau} + \frac{\gamma_e\beta}{\pi_e} \frac{d\phi_b^a}{d\tau} \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_e}{d\tau} = \frac{\xi_{ch}\epsilon_{ch}}{\omega\pi_e}(\theta_{ch,i}-\theta_e) - \frac{(\lambda-\gamma_c+\gamma_e)\beta}{\pi_e} \frac{d\phi_b^a}{d\tau} \quad (4)$$

$$\frac{d\mu_c}{d\tau} = -(C_{max}-C_{min}) \left(\frac{d\phi_b^a}{d\tau} + \frac{d\phi_b^d}{d\tau} \right) \quad (5)$$

$$\frac{d\phi_b}{d\tau} = \kappa(\phi^* - \phi_b) \quad (6)$$

式(1)および(2)は、それぞれ脱着中の吸着器、吸着中の吸着器を表す。式(3)は凝縮器、式(4)は蒸発器を表す。冷媒液の物質収支は式(5)で表される。式(6)は、吸着速度を表す。

無次元化されたパラメータの定義は、表1に示すとおりである。

シミュレーションモデルの妥当性を確認するため、吸着冷凍機実験機の運転データとシミュレーション結果との比較を行った。SCC と COP (成績係数, Coefficient of Performance) の実験結果とシミュレーション結果を図1に示す。シミュレーション値は実験値と良く一致しており、SCC, COP 共に誤差は最大で10%程度であった。

(2) PSO による最適化

PSO は、遺伝的アルゴリズムに類似した最適化手法であり、生物の群れの行動を模擬したシミュレーションを行う。最適化を実行す

表1 無次元パラメータの定義

Parameter	Definition
Heat capacity ratio	$\alpha = \frac{M_m c_{pm}}{M_s c_{ps}}$
Refrigerant heat capacity ratio	$\alpha_{rw} = c_{prw}/c_{ps}$
Latent to sensible heat ratio	$\beta = \frac{\Delta H_{ad}(C_{max}-C_{min})}{c_{ps}(T_h-T_{ca})}$
Enthalpy ratio	$\gamma = c_{prw}T/\Delta H_{ad}$
Heat exchanger effectiveness	$\epsilon = 1 - e^{-NTU}$
Latent heat ratio	$\lambda = \Delta H_{ev}/\Delta H_{ad}$
Mass ratio	$\mu = M_{rw}/M_s$
Dimensionless temperature	$\theta = \frac{T-T_{ca}}{T_h-T_{ca}}$
Dimensionless time	$\tau = t/t_{hc}$
Dimensionless water content	$\phi = \frac{C-C_{min}}{C_{max}-C_{min}}$
Mass flow ratio	$\xi = \dot{m}_{ref}/\dot{m}_h$
Switching frequency	$\omega = \frac{M_s c_{ps}}{\dot{m}_h c_{pw} t_{hc}}$

記号表

C	吸着量	下付き文字
C^*	平衡吸着量	b 吸着器
c_p	定圧比熱	c 凝縮器
ΔH_{ad}	吸着熱	ca 吸着器冷却水
ΔH_{ev}	蒸発潜熱	cc 凝縮器冷却水
k_m	物質移動係数	ch 冷水
\dot{m}	質量流量	e 蒸発器
M	質量	h 温水
NTU	伝熱単位数	hc 半サイクル
T	温度	i 入口
θ	無次元温度	m 吸着器金属部分
τ	無次元時間	o 出口
ϕ	無次元吸着量	s シリカゲル
上付き文字		rw 冷媒液
a	吸着	rv 冷媒蒸気
d	脱着	w 水

る場合には、解の存在する範囲を指定し、その範囲内で多点探索を行う。探索を行う点を Particle と呼び、最適化する変数が Particle に保持されている。PSO のアルゴリズムは、目的関数値が最大(最小)となるように変数の値を更新していく。

PSO と吸着冷凍機のシミュレーションを統合した最適化計算の流れを図2に示す。PSO のアルゴリズムは、各 Particle に与えた変数値を更新しながら吸着冷凍機シミュレーションの出力を評価し、最適解を探索する。制約条件は、ペナルティ関数を用いて目的関

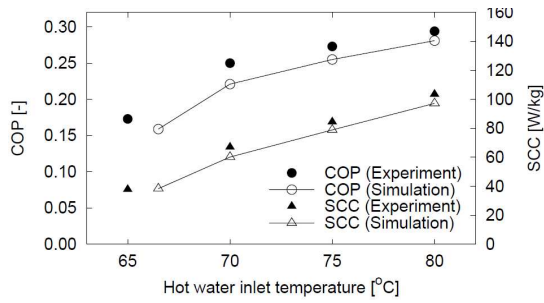


図 1 シミュレーションと実験による SCC, COP の比較

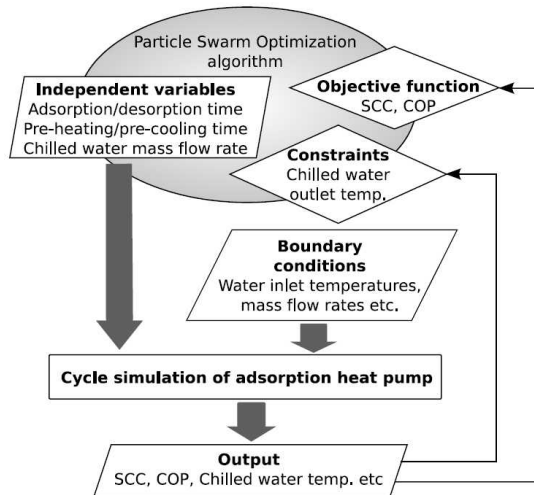


図 2 PSO による最適化の流れ

数に組み込む。変数値の更新を十分な世代まで繰り返すと、すべての Particle が持つ変数は同じ値となり、そのときの目的関数値が最大値となる。

4. 研究成果

吸着冷凍機の駆動熱源である温水入口温度が 65 ~ 90 の条件について SCC を最大化した結果を図 3, 4 および表 2 示す。比較のため、サイクルタイムを固定した場合の SCC および COP をそれぞれの図に示した。固定サイクルタイムの値は、従来の実験で採用されている吸脱着工程時間 420s, 準備工程時間 30s とした。

図 3 は、温水入口温度 65 ~ 90 における最大 SCC を示している。SCC 最大化により、固定サイクルタイムの場合よりも SCC が向上している。SCC 向上の度合いは、温水入口温度が低温であるほど大きい。表 2 から分かるように、温水入口温度が低いほど最適サイクルタイムは長くなる。そのため、最適サイクルタイムと固定したサイクルタイムとの差が大きくなり、最適化による SCC 向上の度合いが拡大した。固定サイクルタイムと比較すると、温水入口温度 90 では約 5%の向上であり、温水入口温度 70 では約 30%の向上が

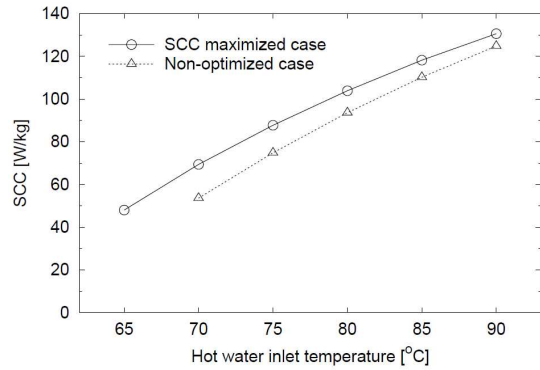


図 3 最適サイクルタイムによる SCC と固定サイクルタイムによる SCC の比較

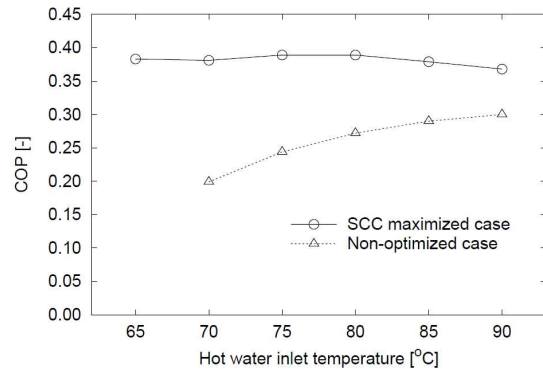


図 4 最適サイクルタイムによる最大 SCC 時の COP と固定サイクルタイムによる COP の比較

表 2 吸着過程時間, 準備過程時間の最適化結果

Hot water inlet temp. [°C]	Ad/desorption time [s]	Pre-heating/cooling time [s]	Chilled water mass flow rate [kg/s]
65	910	120	0.15
70	680	110	0.21
75	620	90	0.27
80	560	90	0.32
85	530	70	0.36
90	490	80	0.40

予測される。

図 4 は、SCC 最大化による最適サイクルタイムの場合と固定サイクルタイムの場合の COP を示している。固定サイクルタイムの場合は、温水入口温度が低くなると COP が低下する。これに対し、最適サイクルタイムでは、温水入口温度が低い場合でも COP は低下しない。固定サイクルタイムの場合の COP と比較すると、SCC を最大化した場合の COP は、温水入口温度 90 のとき約 20%, 温水入口温度 70 のとき約 90%の向上率となっている。COP の向上率が SCC の向上率を上回っているため、冷凍能力の拡大に加えて、サイクルタイムの変化が COP の向上に寄与したと考えられる。

これらの結果から、吸着冷凍機の性能向上に関する以下の知見を得た。

- ・最大化を目的としてサイクルタイムを最適化する場合、温水入口温度により最適サイクルタイムは異なる。温水入口温度 65～90 の場合について、固定サイクルタイム（吸脱着工程 420s，準備工程 30s）運転と比較すると、SCC の最大 30%向上が予測される。
- ・SCC 最大化を目的としてサイクルタイムを最適化する場合、温水入口温度が低温であるほどサイクルタイムが長くなる傾向にある。そのため、温水入口温度の低温化による COP の低下をサイクルタイムの長時間化で相殺することができ、温水入口温度によらず高い COP での運転が可能である。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Takahiko Miyazaki, Atsushi Akisawa, The influence of heat exchanger parameters on the optimum cycle time of adsorption chillers, Applied Thermal Engineering, Article in Press, 2009, 査読有
宮崎隆彦, 秋澤 淳, 柏木孝夫, 赤平 亮, 大域的最適化手法の適用による吸着冷凍機の性能向上 Particle Swarm Optimization によるサイクルタイムの最適化, 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 25, No. 1, 9-19, 2008, 査読有

〔学会発表〕(計 3 件)

森山顕仁, 宮崎隆彦, 上田祐樹, 秋澤 淳, 最適サイクルタイム構成による mass recovery 型吸着冷凍機の性能向上, 2008 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2008, 査読無
森山顕仁, 宮崎隆彦, 秋澤 淳, 柏木孝夫, 吸着・脱着時間の最適化による吸着冷凍機の性能向上, 日本機械学会第 13 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 2008, 査読無
森山顕仁, 宮崎隆彦, 秋澤 淳, 柏木孝夫, 単段型吸着冷凍機の最適運転による性能向上, 2007 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2007, 査読無

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎 隆彦 (MIYAZAKI TAKAHIKO)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・助教

研究者番号：70420289

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし