

メンブレン除湿機構の省エネルギー性能評価手法に関する研究

Study on energy-saving performance evaluation for membrane dehumidification

C. 環境工学 4. 環境工学 9. 湿気

Membrane Dehumidification Latent Heat Load

Conventional HVAC Fundamental Analysis

正会員

○ 尹 奎英*

Gyuyoung Yoon

木田 詩音*

Shion Kida

正会員

鈴木 笙悟*

Shogo Suzuki

千 成勇**

Seong-Yong Cheon

趙 慧珍**

Hye-Jin Cho

鄭 在原**

Jae-Weon Jeong

1. はじめに

近年、省エネルギー化の推進により建物の顕熱負荷は減少しており、これに伴い室内顕熱比が低下することが予想される。これに対し、従来の過冷却凝縮による除湿を前提とする空調システムでは、潜熱の処理が不十分になる可能性があり、高度な除湿技術が求められている。

メンブレン除湿機構は水分分離膜を用いて調和空気的水分を分離する(図1参照)。デシカント方式に比べて再生熱源を必要とせず、システム自体も比較的シンプルであり、次世代除湿システムとして期待されている。

Duc ら¹⁾は基礎熱力学の観点からメンブレン除湿機構の除湿性能に関する理論的分析を行い、システムの性能向上策について論じている。Cheon ら²⁾は、メンブレン除湿機構の簡易モデルを構築し、試験体の実験結果との比較によりモデルの精度確認を行った。また、Cho ら³⁾は従来の過冷却凝縮・再熱による除湿方式と比較して、メンブレン除湿機構のエネルギー利用効率が高いことを示した。

一方で、当該技術はまだ開発途上の技術であり、理論的基礎研究や実験室レベルでの実現可能性検証からシステムのコスト評価や耐久性向上へ研究開発の視点が転移し始めている⁴⁾。当該システムの研究開発を加速化し汎用化へ導くためには、エネルギー利用効率や省エネルギー性能に関する研究を積み重ねていかねばならない。また、当該システムの省エネルギー性能は従来システムの冷却熱源機器や再熱熱源機器のエネルギー効率、室内負荷性状、メンブレンの導入方法などに依存している。これらのパラメーターを考慮して省エネルギー性能を容易に評価できる手法が不可欠となる。

そこで本研究では、メンブレン除湿機構の省エネルギー性能を容易に評価できる手法を提案する。また、諸条

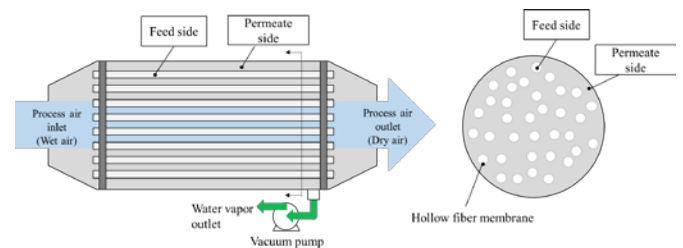


図1 メンブレン除湿機構の概念図

件が与える省エネルギー性能への影響を定量的に示すことを目的とする。

本報では、従来の過冷却除湿・再熱による除湿方式を基準ケースと置き、メンブレン除湿機構の導入に際して増減するエネルギーの収支式を導く。また、エネルギー収支式より、メンブレン導入が従来の除湿方式に比べて省エネルギーとなる諸条件を検討する。

2. 研究概要

本報ではまず、冷却除湿過程におけるシステムエネルギー消費量を簡易的に表して従来の除湿方式とメンブレン除湿方式のエネルギー収支式を導く。また、メンブレン除湿方式については、メンブレンを冷水コイルの前に導入する方法(以後、MBC(Membrane Before Coil)と記す)とメンブレンを冷水コイルの後に導入する方法(以後、MAC(Membrane After Coil)と記す)を対象とする。MBCは既往研究でよく用いられる導入方法であり、MACは著者らが提案する導入方法である。MACはMBCに比べてメンブレンの必要除湿量を軽減でき、比較的小規模でメンブレン導入を可能とするために既存空調システムへの導入に適している⁵⁾。

導いたエネルギー収支式を用いて、過冷却除湿・再熱

* 名古屋市立大学 芸術工学研究科

** 漢陽大学 工科大学

Graduate School of Design and Engineering, Nagoya City University
Department of Engineering, Hanyang University

を用いる従来除湿方式に比べてメンブレン除湿方式が省エネルギーとなる諸条件を検討する。その際、再熱熱源機器としてはボイラーと電気ヒーターを想定する。

また今回の検討では、設計負荷時のみを対象としており、TRNSYS ver.18 を用いて算出した最大熱負荷の計算結果をもとに分析を行う。東京所在の事務所建築を想定し、熱負荷条件等は一般的な条件を与えた。気象データはアメダス標準年（2001-2010）東京を用いた。詳細については紙面の関係上割愛する。

本検討に用いる設計条件は、設計外気温湿度が 32.7°C/68%で、室内顕熱負荷は 9.7W/m²、顕熱比は 0.77 である。

3. メンブレン除湿機構の省エネルギー性能評価方法

3.1 各除湿方式における冷却除湿プロセス

図 2 に湿り空気線図を示す。図中には過冷却除湿・再熱方式の採用時における調和空気の状態変化（case-0）、メンブレン除湿機構の採用時における調和空気状態変化（それぞれ MBC（case-1）と MAC（case-2））を合わせて示す。また、前述の設計条件をもとに設計給気温湿度は 15°C、9g/kg'とした。

まず case-0 は導入外気と還気との混合空気を、冷水コイルを用いて冷却除湿させる。冷水コイル出口空気の露点温度を設計値まで低下させるために、13.5°Cまで冷却する必要がある。その後、設計給気温度の 15°Cまで再熱を行う。この時、冷水コイルによる処理熱量を Q_c とし、再熱コイルによる処理熱量を Q_h とする。

次に、case-1 はメンブレン除湿機構を用いて混合空気から水蒸気を分離（除湿）する。その後、冷水コイルを用いて設定給気温度まで冷却を行う。この時、メンブレンによる潜熱処理熱量を $Q_{M,MBC}$ とし、冷却コイルによる処理熱量を $Q_{c,MBC}$ とする。

case-2 は混合空気をまず冷水コイルを用いて冷却除湿させたあと、メンブレン除湿機構に導入して設計露点温度まで除湿を行う。この時、冷却コイルによる処理熱量を $Q_{c,MAC}$ とし、メンブレンによる潜熱処理熱量を $Q_{M,MAC}$ とする。

以上に示す各ケースの冷却除湿プロセスに対して、必要とされる処理熱量を表 1 にまとめて示す。処理熱量の合計は case-0 が 11.4Wh/kg'に対して、メンブレン方式の case-1、case-2 は 9.8Wh/kg'と約 14%小さくことがわかる。これらの処理熱量を冷凍機、加熱機器、メンブレンの各要素機器が賄うことになり、各機器のエネルギー利用率の高低により各ケースのエネルギー性能が決定される。次節からは各機器のエネルギー利用率を加味して各ケースのエネルギー収支式を導く。

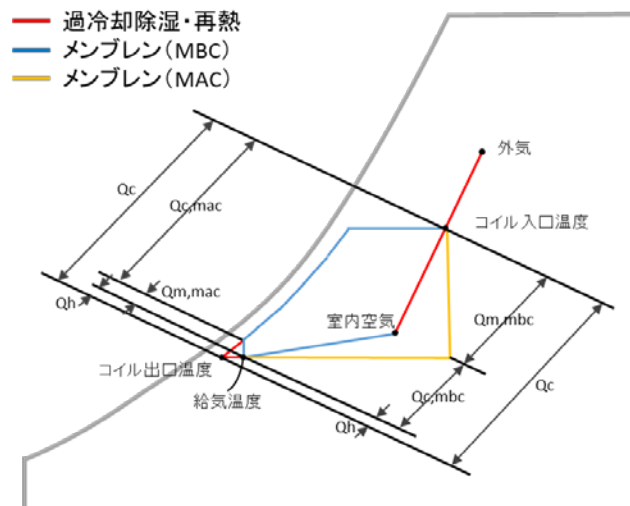


図 2 各除湿方式における空調空気の状態変化

表 1 各ケースにおける冷却除湿熱量

Case-0	Q_c	10.6 Wh/kg'
	Q_h	0.8 Wh/kg'
Case-1	$Q_{M,MBC}$	5.6 Wh/kg'
	$Q_{c,MBC}$	4.2 Wh/kg'
Case-2	$Q_{M,MAC}$	0.6 Wh/kg'
	$Q_{c,MAC}$	9.2 Wh/kg'

3.2 エネルギー収支式の導出

前述の過冷却除湿・再熱による除湿方式のシステム（前述の case-0）エネルギー消費量を W_c とおき、メンブレン除湿機構を用いるシステム（前述の case-1）のエネルギー消費量を $W_{M,MBC}$ とおく。エネルギー消費量はすべて一次エネルギー消費量で表す。また、式(1)を満足すると、メンブレン除湿機構を用いるシステムのほうが従来システムに比べて省エネルギーになる。

$$W_c \geq W_{M,MBC} \quad (1)$$

式(1)の左辺 W_c は、過冷却除湿に必要な熱量を供給する冷凍機のエネルギー消費量と再熱に必要な熱量を供給する熱源機器のエネルギー消費量の合計であり、式(2)のように表される。また、右辺の各項は処理熱量と各々のシステム効率を用いて表すことができ、式(3)のように表すことができる。

$$W_c = W_{c,cooling} + W_{c,reheat} \quad (2)$$

$$W_c = \frac{Q_c}{COP_{cooling}} + \frac{Q_h}{\beta_{reheat}} \quad (3)$$

次に、式(1)の右辺 $W_{M,MBC}$ は、式(5)のように表すことができる。式(5)右辺の第2項はメンブレン除湿機構を用いた除湿を行う際に必要とする真空ポンプの電力消費量であり、 ε はメンブレンの単位除湿量あたりに必要な真空ポンプ動力を表す。

$$W_{M,MBC} = W_{vp,MBC} + W_{M,MBC,cooling} \quad (4)$$

$$W_{M,MBC} = \frac{Q_{c,MBC}}{COP_{cooling}} + Q_{M,MBC} \cdot \frac{\varepsilon}{\gamma} \cdot p \quad (5)$$

以上より、式(1)は式(10)のように表される。

$$\frac{Q_c}{COP_{cooling}} + \frac{Q_h}{\beta_{reheat}} \geq \frac{Q_{c,MBC}}{COP_{cooling}} + Q_{M,MBC} \cdot \frac{\varepsilon}{\gamma} \cdot p \quad (6)$$

また、過冷却除湿・再熱システムにおける冷水コイル処理熱量 Q_c は再熱コイルの処理熱量とメンブレン除湿機構の処理熱量の合計と等しく、式(7)のように表すことができる。

$$Q_c = Q_{c,MBC} + Q_{M,MBC} + Q_h \quad (7)$$

式(7)を代入し整理すると式(8)を得ることができる。

$$\varepsilon \leq \frac{\gamma}{p} \left\{ \left(\frac{1}{\beta_{reheat}} + \frac{1}{COP_{cooling}} \right) \frac{Q_h}{Q_{M,MBC}} + \frac{1}{COP_{cooling}} \right\} \quad (8)$$

式(1)の右辺を、メンブレン除湿機構を用いるシステム(前述の case-2) のエネルギー消費量 $W_{M,MAC}$ に置き換えて同様に整理すると、次の式(9)を得ることができる。

$$\varepsilon \leq \frac{\gamma}{p} \left\{ \left(\frac{1}{\beta_{reheat}} + \frac{1}{COP_{cooling}} \right) \frac{Q_h}{Q_{M,MAC}} + \frac{1}{COP_{cooling}} \right\} \quad (9)$$

式(8)、式(9)の右辺は、メンブレン除湿機構の採用によって過冷却除湿・再熱を行わないことで得られる消費エネルギー削減量である。すなわち、冷却熱源(冷凍機)のエネルギー消費量と再熱に必要な加熱熱源(ボイラーまたは電気ヒーター)のエネルギー消費量の削減量の和である。また、左辺の ε はメンブレン除湿機構に要する真空ポンプのエネルギー消費量であり、メンブレン除湿機構を採用して発生するエネルギー消費量の増加分を表している。なお、本検討においてはメンブレン除湿機構の採用により見込まれる送風機動力の増分は含めていな

いが付加することもできる。よって、メンブレン導入による省エネルギー量は、右辺のエネルギー削減量と左辺のエネルギー増加量の差分で表される。

また、各式の右辺はそれぞれ $\frac{Q_h}{Q_{M,MBC}}$ と $\frac{Q_h}{Q_{M,MAC}}$ の一次方程式

式になっていることがわかる。各々はメンブレン除湿機構の要求処理潜熱量に対する再熱処理熱量の比であり、メンブレン導入により期待されるエネルギー削減量はこれらの一次方程式として表されることとなる。また、この一次式の切片は冷凍機器の効率に依存し、傾きは冷凍機器及び加熱機器の効率に依存していることがわかる。

3.3 メンブレン除湿機構の省エネルギー性能評価

ここからは、前節で導いた式(8)と(9)を用いてメンブレン除湿機構が従来システムに比べて省エネルギーとなる条件を検討する。

検討のために、再熱熱源の効率をボイラーの場合は0.9、電気ヒーターの場合は0.3とし、冷凍機の効率を1から3までと設定して、各式の右辺を求めて図3を作成した。図3の横軸はメンブレン除湿機構の要求処理潜熱量に対する再熱処理熱量の比(ϕ とおく)であり、縦軸は各式の右辺の値($f(\phi)$ とおく)である。

ここで、メンブレン除湿機構のほうが従来の除湿方式に比べて省エネルギーとなるためには、図中の $f(\phi)$ がメンブレン採用によるエネルギー増大量よりも大きくなる必要がある。先行研究⁶⁾により、メンブレン採用によるエネルギー増大量は冷房期間平均で0.5kWh/kgと試算されている。これと比較すると、冷凍機のCOPが2以下となればどの条件下でも従来の除湿方式に比べてメンブレン導入による省エネルギー効果が期待できることがわかる。また、冷凍機のCOPが3となれば ϕ が一定以上の条件下でのみ省エネルギーが期待できることがわかる。再熱熱源としてボイラーを用いる場合は、 ϕ は0.45以上、電気ヒーターの場合は、0.2以上の条件下で省エネルギーとなる。

つぎに、 ϕ は再熱熱量に比例する変数であり、室内顕熱比が低下すると再熱熱量は増大する。このため、室内顕熱比低下にともない ϕ は大きくなることが予想される。 ϕ が大きくなるにつれて $f(\phi)$ が大きくなることから、室内顕熱比低下がより進めばメンブレン除湿機構の省エネルギーとなる必要条件是緩和されるといえる。

同様に異なるメンブレンの導入方法に着目すると、MBCに比べてMACのほうが ϕ は大きく、メンブレンの採用により期待できるエネルギー削減量は多くなる。例えば、図2に示した条件下において、MBCの場合、 ϕ は0.06と

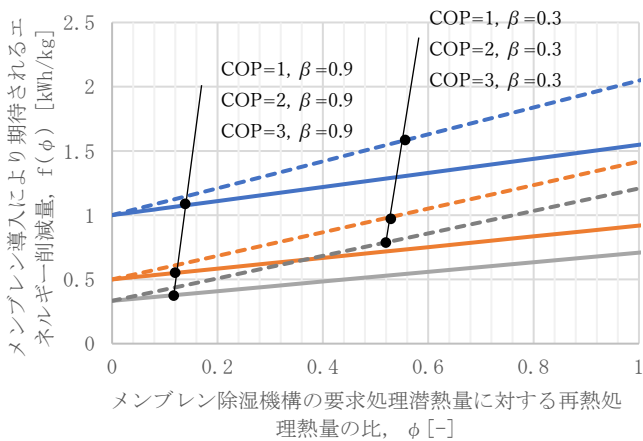


図3 メンブレン除湿機構導入によるエネルギー削減量

なり、MAC の場合は 0.6 となる。つまり、MBC に比べて MAC のほうが、 $f(\phi)$ は大きくなることとなり、より多くのエネルギー削減量を期待できることとなる。

冷凍機の COP を”1”とし再熱熱源をボイラーと仮定した場合、MBC、MAC それぞれの $f(\phi)$ は 1.03kWh/kg、1.33kWh/kg となり、先ほど述べたメンブレン採用によるエネルギー増大量 0.5kW/kg を加味して考えると、正味の省エネルギー量はそれぞれ 0.53kWh/kg、0.83kWh/kg となる。

4. まとめ

本報では、冷却除湿過程におけるシステムエネルギー消費量を簡易的に表して従来の除湿方式とメンブレン除湿方式のエネルギー収支式を導いた。また、そのエネルギー収支式を用いて、メンブレン除湿機構を用いるシステムが従来の除湿方式に比べて省エネルギーとなる諸条件を定量的に示すことができた。また、異なるメンブレン除湿機構の導入方法について検討を行い、メンブレンの要求除湿量を軽減する導入方法のほうが高い省エネルギー性能を期待できることが示された。

今回の検討は、設計条件のみを評価対象としており、今後はシステムの運転期間性能を考慮した評価を行う予定である。

記号表

W_c : 過冷却除湿・再熱方式のエネルギー消費量[kWh]

$W_{M,MBC}$: メンブレン除湿機構 (MBC 方式) のエネルギー消費量 [kWh]

$W_{c,cooling}$: 過冷却除湿・再熱方式における冷却熱源機器エネルギー消費量[kWh]

$W_{c,reheat}$: 過冷却除湿・再熱方式における再熱熱源機器エネルギー消費量[kWh]

Q_c : 過冷却除湿・再熱方式の冷却コイル処理熱[kWh]

Q_h : 過冷却除湿・再熱方式の再熱コイル処理熱量 [kWh]

$COP_{cooling}$: 冷却熱源機器の一次換算 COP [-]

β_{reheat} : 再熱熱源機器の効率 [-]

$W_{VP,MBC}$: メンブレン除湿機構方式 (MBC) の真空ポンプエネルギー消費量[kWh]

$W_{M,MBC,cooling}$: メンブレン除湿機構方式 (MBC) の冷却熱源機器エネルギー消費量[kWh]

$Q_{c,MBC}$: メンブレン除湿機構方式 (MBC) の顕熱冷却処理熱量 [kWh]

$Q_{M,MBC}$: メンブレン除湿機構方式 (MBC) の潜熱処理熱量 [kWh]

$Q_{M,MAC}$: メンブレン除湿機構方式 (MAC) の潜熱処理熱量 [kWh]

ε : メンブレン除湿機構単位除湿量あたりの真空ポンプ動力 [kWh/kg]

p : 一次エネルギー換算係数 [kJ/kWh] (9,760kJ/kWh)

γ : 水蒸気の蒸発潜熱 [kJ/kg] (2,500kJ/kg)

ϕ : メンブレン除湿機構の要求処理潜熱量に対する再熱処理熱量の比[-]

$f(\phi)$: メンブレン除湿機構の採用によって過冷却除湿・再熱を行わないことで得られる消費エネルギー削減量[kWh/kg]

参考・引用文献

- 1) Duc et al., A thermodynamic perspective to study energy performance of vacuum-based membrane dehumidification, Energy 132(2017) pp.106-115.
- 2) S. Cheon et. al., Simplified effectiveness and number of transfer unit model for a vacuum membrane dehumidifier applied to air conditioning, Applied Thermal Engineering 210 (2022) 118404.
- 3) H. Cho et al., Energy impact of vacuum-based membrane dehumidification in building air-conditioning applications, Applied Thermal Engineering 182 (2021) 116094
- 4) Chua Kian Jon et al., Advances in Air Conditioning Technologies, Improving Energy Efficiency, Springer, ISBN 978-15-8477-0, 2021
- 5) G. Yoon et al., Application of Dehumidification system Using Membrane for Conventional HVAC system, Proceedings of Annual Research Meeting of AIJ, Tokai Chapter, Vol. 60, Feb. 2022
- 6) G. Yoon et al., Study on strength measure for latent heat handling ability by using membrane unit, The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Chubu, 23. March 2022.

本研究は JSPS 科研費 22K04431 の助成を受けたものです。