

# オフィスビルにおける自然換気および空調システムに関する研究 —グラフィカルモデリングによる冷房負荷と各種影響因子との構造分析—

2010MBB001 芦谷 友美

白石研究室

Hybrid air-conditioning system using natural ventilation (hybrid A/C system) is difficult to quantitatively evaluate the performance of natural ventilation, because it depends heavily on climatic conditions, locations and surrounding buildings etc. In this paper, as a first step of this study, the structural relations between cooling load and various influence factors were clarified using "Graphical Modeling". Moreover, the database which can estimate the energy-saving effect simply in a design phase, and those practical use methods were proposed. The following results were obtained. 1) Sensible heat extraction by natural ventilation may be determined by the relations of "ventilation rate" and "difference of temperature", and had strong relations to "ventilation rate". 2) The concrete and simple estimation method of the energy-saving effect by natural ventilation in a design phase was shown using this study.

オフィスビル, 自然換気, 熱・換気回路網解析, ケーススタディ, 実験計画法, グラフィカルモデリング

## 1. はじめに

自然換気および空調システムを併用することで、室内温熱・空気環境を快適に保ちながら省エネ効果を達成する手法が提案されており、近年では更に BEMS (Building and Energy Management System) と連携することで、建物全体の消費エネルギー・温熱環境を考慮した自然換気制御が行われるに至っている。しかし、同システムの定量的効果は建物の形状、立地環境、気象条件などに左右され困難である。よって本研究では、同システムの設計手法並びに省エネ効果の推計手法の提案を主たる目的としている。本論文ではそれらの研究の一環として、グラフィカルモデリングを用いて冷房負荷削減に影響を与える各種要因との構造とその影響度を解明することを目的とする。

研究の流れとしては、まず設計・運用段階にて冷房負荷に関係すると考えられる要因を抽出し、自然換気期間である中間期を対象に、直行配列表を用いた実験計画法に基づくケーススタディを行う。尚、解析モデルは、同システムを採用したオフィスビルを対象に熱・換気回路網解析にて作成する。次にケーススタディの結果について分散分析による有意差検定を行い、この結果を基に変数間の影響度や因果の探索に有効なグラフィカルモデリングを用いて、冷房負荷と各種影響要因との構造を明らかにした。最後に、定量的評価を行うため階層的重回帰分析を実施し、自然換気処理熱量を簡易に推計可能なデータベース・手法の提案を行う。

## 2. 対象建物の概要

対象建物の外観を図1、南北断面図を図2、基準階平面図を図3、建物概要を表1に示す。対象建物では、BEMSによる中央制御が行われており、自然換気条件(表2)を満たすと、各階執務室の南北に設置された給気口より外気が導入され、室中央の吹き抜けを介し、建物上部より排気

されるシステムを導入している。尚、自然換気条件を満たさない時間帯においては全熱交換器による機械換気が行われている。

## 3. 熱・換気回路網解析によるケーススタディの概要

### 3-1. 解析モデルの概要

対象建物の解析モデルを熱・換気回路網解析プログラム NETS<sup>1)</sup>を用いて作成した。尚、運用時における実測値と解



図1 建物外観

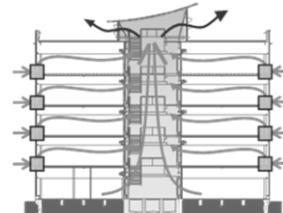


図2 南北断面図 (換気経路)

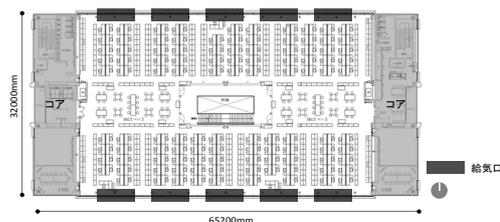


図3 基準階平面図

表1 対象建物の概要

所在地	福岡県北九州市戸畑区
構造	S造, 両端コア
階数	地上5階 (最高高さ: 27.40m)
延床面積	10,388m <sup>2</sup> (基準階面積: 約1,500m <sup>2</sup> )
敷地面積	6,649,401m <sup>2</sup>
竣工	2010年12月

表2 自然換気条件

エンタルピー条件	外気エンタルピー < 室内エンタルピー
外気温度条件	15.0°C < 外気温度 < 26.0°C
露点温度条件	5°C DP < 露点温度 < 15°C DP
室内温度条件	室内温度設定値 - 1°C < 室内温度

析値の比較による予測精度の検証は事前に行っており、自然換気時間、自然換気量、空調処理熱量ともに高精度に予測できることを確認している<sup>2)</sup>。

### 1) 自然換気および空調システムのモデル化

①自然換気モードと②通常空調モードの換気回路を作成し、自然換気条件(表2)を全て満たせば回路を切り替えることで(フィードバック制御)、給気口の開閉制御を行っている(図3)。また、対象建物の給気口は、内外差圧に応じて流量を制御する機能(P-Q特性)を有しているが、本解析でも内外差圧に対応して圧力損失係数および指数を変化させて再現している。尚、給気口の風圧係数については、開口部を設けていない解析モデルを用いた屋外CFD解析により、16風向別に算出した。空調機については、室内温度および相対湿度の設定値にあわせて除去熱量および吹出口の絶対湿度を制御している。全熱交換器は、上記の自然換気システムと同様に、①自然換気モードと②通常空調モードの換気回路を作成し、②通常空調モードの場合のみ運転するように設定している。

### 2) 内部発熱スケジュールのモデル化

人体発熱については、CO<sub>2</sub>濃度のBEMSデータから在室人数の推定を行い、顕熱60W/人、潜熱50W/人とした。また、照明およびOA機器についても、対象建物のBEMSデータより得られる電力消費量を参考に決定した。

### 3-2. 解析条件

解析条件を表3に示す。計算期間は、中間期である5/1~6/30、9/1~10/31とし、気象データは拡張アメダス標準年気象データ(八幡)を用いた。空調時間帯は、平日8:30~22:00、土曜日9:30~22:00と設定した。計算間隔は15分の非定常計算を行った。

### 3-3. 解析ケース

解析検討項目は、基準階面積、外皮性能に関する要因(窓面積比、窓性能)、給気口に関する要因(給気口個数、流量

制御機能)、内部発熱に関する要因(照明、在室人数)、室内温度設定値、自然換気条件に関する要因(外気温度条件、露点温度条件、室内温度条件)の計11要因、水準は対象建物を基準とし3水準に設定した。解析ケースは、直行配列表L<sub>27</sub>(3<sup>13</sup>)を用いた実験計画法(一部実施法)に基づき決定し、全27ケースとした。表4に解析ケースを示す。

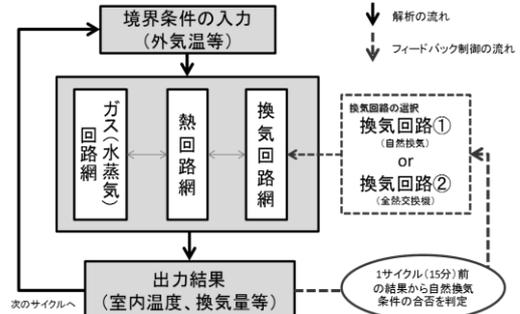


図3 フィードバック制御の概念

表3 熱・換気回路網解析の条件

計算期間	2011/10/1~2011/10/31
気象データ	拡張アメダス標準年気象データ(八幡)
空調時間帯	平日: 8:30~22:00 土曜日: 9:30~22:00
人体発熱	顕熱: 60W/人 潜熱: 50W/人
全熱交換器	全熱交換率: 70% 風量: 4.5m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ・h
熱回路網節点数	325点
換気回路網ゾーン数	13ゾーン(75流路)

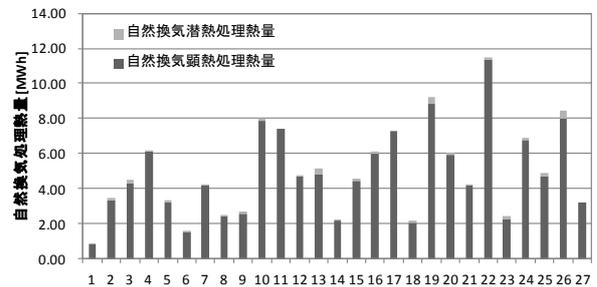


図4 自然換気処理熱量(6月)

表4 解析ケース

基準階面積	窓面積比(南北面)	窓性能	給気口個数	流量制御機能	照明	在室人数	室内温度設定値	外気温度条件	露点温度条件	室内温度条件
1000m <sup>2</sup>	30%	透明フロートガラス	20個	なし	15W/m <sup>2</sup>	0.10人/m <sup>2</sup>	22℃	17℃<外気温度<24℃	3°CDP<露点温度<13°CDP	設定値-1℃<室内温度
				小	20W/m <sup>2</sup>	0.15人/m <sup>2</sup>	24℃	15℃<外気温度<26℃	5°CDP<露点温度<15°CDP	設定値-2℃<室内温度
				大	25W/m <sup>2</sup>	0.20人/m <sup>2</sup>	26℃	12℃<外気温度<28℃	7°CDP<露点温度<17°CDP	設定値-3℃<室内温度
	60%	複層ガラス	32個	なし	15W/m <sup>2</sup>	0.10人/m <sup>2</sup>	24℃	15℃<外気温度<26℃	3°CDP<露点温度<13°CDP	設定値-1℃<室内温度
				小	20W/m <sup>2</sup>	0.15人/m <sup>2</sup>	26℃	12℃<外気温度<28℃	5°CDP<露点温度<15°CDP	設定値-2℃<室内温度
				大	25W/m <sup>2</sup>	0.20人/m <sup>2</sup>	22℃	17℃<外気温度<24℃	7°CDP<露点温度<17°CDP	設定値-3℃<室内温度
	100%	高性能反射ガラス	40個	なし	15W/m <sup>2</sup>	0.10人/m <sup>2</sup>	26℃	12℃<外気温度<28℃	5°CDP<露点温度<15°CDP	設定値-2℃<室内温度
				小	20W/m <sup>2</sup>	0.15人/m <sup>2</sup>	22℃	17℃<外気温度<24℃	7°CDP<露点温度<17°CDP	設定値-3℃<室内温度
				大	25W/m <sup>2</sup>	0.20人/m <sup>2</sup>	24℃	15℃<外気温度<26℃	3°CDP<露点温度<13°CDP	設定値-1℃<室内温度
1500m <sup>2</sup>	30%	複層ガラス	40個	なし	20W/m <sup>2</sup>	0.20人/m <sup>2</sup>	24℃	15℃<外気温度<26℃	3°CDP<露点温度<13°CDP	設定値-2℃<室内温度
				小	25W/m <sup>2</sup>	0.10人/m <sup>2</sup>	26℃	17℃<外気温度<24℃	5°CDP<露点温度<15°CDP	設定値-3℃<室内温度
				大	15W/m <sup>2</sup>	0.15人/m <sup>2</sup>	22℃	15℃<外気温度<26℃	7°CDP<露点温度<17°CDP	設定値-1℃<室内温度
	60%	高性能反射ガラス	20個	なし	20W/m <sup>2</sup>	0.20人/m <sup>2</sup>	26℃	17℃<外気温度<24℃	5°CDP<露点温度<15°CDP	設定値-3℃<室内温度
				小	25W/m <sup>2</sup>	0.10人/m <sup>2</sup>	24℃	12℃<外気温度<28℃	7°CDP<露点温度<17°CDP	設定値-1℃<室内温度
				大	15W/m <sup>2</sup>	0.15人/m <sup>2</sup>	26℃	17℃<外気温度<24℃	3°CDP<露点温度<13°CDP	設定値-2℃<室内温度
	100%	透明フロートガラス	32個	なし	25W/m <sup>2</sup>	0.20人/m <sup>2</sup>	22℃	15℃<外気温度<26℃	5°CDP<露点温度<15°CDP	設定値-2℃<室内温度
				小	25W/m <sup>2</sup>	0.10人/m <sup>2</sup>	24℃	12℃<外気温度<28℃	7°CDP<露点温度<17°CDP	設定値-1℃<室内温度
				大	15W/m <sup>2</sup>	0.15人/m <sup>2</sup>	26℃	17℃<外気温度<24℃	3°CDP<露点温度<13°CDP	設定値-2℃<室内温度
2000m <sup>2</sup>	30%	高性能反射ガラス	40個	なし	25W/m <sup>2</sup>	0.15人/m <sup>2</sup>	26℃	15℃<外気温度<26℃	3°CDP<露点温度<13°CDP	設定値-2℃<室内温度
				小	15W/m <sup>2</sup>	0.20人/m <sup>2</sup>	24℃	17℃<外気温度<28℃	5°CDP<露点温度<15°CDP	設定値-3℃<室内温度
				大	20W/m <sup>2</sup>	0.10人/m <sup>2</sup>	24℃	17℃<外気温度<24℃	7°CDP<露点温度<17°CDP	設定値-2℃<室内温度
	60%	透明フロートガラス	40個	なし	25W/m <sup>2</sup>	0.15人/m <sup>2</sup>	22℃	12℃<外気温度<28℃	5°CDP<露点温度<15°CDP	設定値-3℃<室内温度
				小	15W/m <sup>2</sup>	0.20人/m <sup>2</sup>	24℃	17℃<外気温度<24℃	3°CDP<露点温度<13°CDP	設定値-3℃<室内温度
				大	20W/m <sup>2</sup>	0.10人/m <sup>2</sup>	26℃	15℃<外気温度<26℃	5°CDP<露点温度<15°CDP	設定値-1℃<室内温度
	100%	複層ガラス	20個	なし	25W/m <sup>2</sup>	0.15人/m <sup>2</sup>	24℃	17℃<外気温度<24℃	7°CDP<露点温度<17°CDP	設定値-2℃<室内温度
				小	15W/m <sup>2</sup>	0.20人/m <sup>2</sup>	26℃	15℃<外気温度<26℃	5°CDP<露点温度<15°CDP	設定値-1℃<室内温度
				大	20W/m <sup>2</sup>	0.10人/m <sup>2</sup>	22℃	12℃<外気温度<28℃	3°CDP<露点温度<13°CDP	設定値-3℃<室内温度

尚、今回は要因同士の交互作用を考慮しておらず、要因の割付けがない列に関しては、分散分析の段階において誤差として取り扱う。

### 3-4. 解析結果

日射発熱、自然換気時間、自然換気量、自然換気処理熱量、空調処理熱量、室内外温度差、室内外絶対湿度差について着目した。今回は、6月における自然換気処理熱量の結果のみを示す(図4)。

## 4. 分散分析

### 4-1. 分散分析の特徴

分散分析は、ケーススタディ結果全体のばらつきを全体変動(=因子間変動+誤差変動)とすると、誤差変動に対する因子間変動の大きさを示す分散比から、F分布およびp値を利用して有意差検定を行う統計的分析手法である。尚、直行配列表を用いた実験計画法に基づく分散分析においては、一般的に20%有意で検定を行う<sup>3)</sup>。

### 4-2. 分析結果

表5に分散分析の有意差検定に基づく、各要因の有意水準を示す。日射発熱については、外皮性能に関する要因、自然換気関連では、流量制御機能や自然換気実行条件に関する要因、空調処理熱量については、照明や在室人数などの内部発熱に関する要因、室内温度設定値の要因が有意な差を示した。

## 5. グラフィカルモデリングによる構造分析

### 5-1. グラフィカルモデリングの特徴

グラフィカルモデリング(以下、GM)では、複数の変数が相互に関係している際に、「特定の2つの変数の関係を他の変数の影響を除去して評価する場合」に用いる偏相関係数を利用することで、事前に明確ではない変数間の因果構造を探索的にモデル化するとともに、その妥当性を検証できる因果分析手法である。またGMは、独立グラフと連鎖独立グラフに分類される。以下にそれらの概要を示す。

#### 1) 独立グラフ

独立グラフの概念図を図5(a)に示す。独立グラフでは、条件付き独立(偏相関=0)となる変数間には線がなく、条件付き独立でない(偏相関≠0)変数間のみ線が結ぶ。グラフは、因果の関係は示していないが、その結果を基に、変数間の階層性を見出すことができる。

#### 2) 連鎖独立グラフ

連鎖独立グラフの概念図を図5(b)に示す。連鎖独立グラフでは、異なる群に属する変数間の因果関係を矢線で示し、同じ群内の変数間は条件付き独立関係(偏相関=0)で表すことで、独立グラフでは表現されない因果の向きおよび因果的影響の大きさを示すことができる。モデリング方法の概念図を図6に示す。

### 5-2. モデル化の概要

解析ソフトはエクセル GM1.71<sup>4)</sup>を用いて行った。連鎖独立グラフのモデル適合度については、カイ二乗適合度検定( $\chi^2$ , 自由度, p 値), CFI, RMSEAを用いて行う。モデル化に当たっては、中間期における熱負荷及びエネルギー

表5 分散分析による各要因の有意水準

	基準階面積	窓面積比(南北面)	窓性能	給気口個数	流量制御機能	照明	在室人数	室内温度設定値	外気温度条件	露点温度条件	室内温度条件
日射発熱	*	**	***								
自然換気時間									***	***	
自然換気量	*			*	*				*	***	
自然換気顕熱処理熱量	**			*	*				**	*	
自然換気潜熱処理熱量	***				*		***	***	*		
自然換気全熱処理熱量											
空調顕熱処理熱量	***	**	*		**	***	**	***			
空調潜熱処理熱量	***				*	**	***	***			
空調全熱処理熱量											
室内外温度差	***	*						***	***	**	
室内外絶対湿度差	***	**	**	***		***	***	***	***	***	**

\*\*\*5%有意 \*\*10%有意 \*20%有意

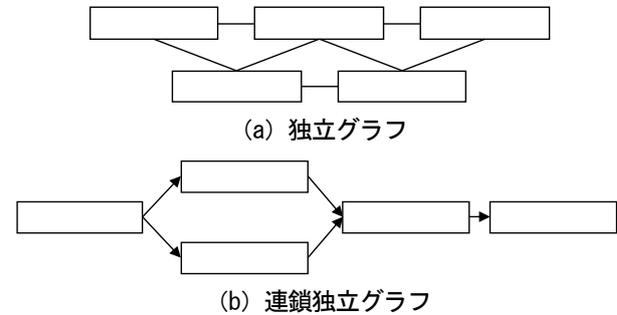


図5 グラフィカルモデリングの概念図

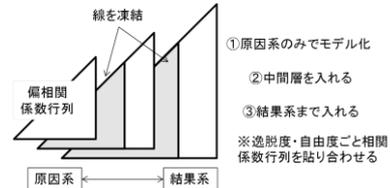


図6 連鎖独立グラフのモデリング方法

ギー消費量の削減効果を見るために、自然換気処理熱量に着目し実施する。尚、今回は自然換気顕熱処理負荷について詳細を説明する。

#### 1) 独立グラフ

事前に実施した全変数を用いた独立グラフの結果を参考に、「日射発熱」、「自然換気時間」、「自然換気量」、「室内外温度差」、「自然換気顕熱処理熱量」の項目を用いて独立グラフを作成する。図7に独立グラフによるモデル図を示す。尚、変数間の係数は偏相関係数を表している。「自然換気顕熱処理熱量」に関しては、「自然換気量」と「室内外温度差」との偏相関係数がそれぞれ0.96と0.89であり、影響が大きいことが示唆された。また、「自然換気量」については、「室内外温度差」-0.87、「自然換気時間」0.38との直接効果が大きい。「日射発熱」については、全ての変数との関係性が0.25以下であり、他の変数間と比較すると相対的に低い。以上より、「自然換気顕熱処理熱量」を最上層、その下に「自然換気量」、「室内外温度差」、続いて「自然換気時間」の階層性が想定できた。

## 2) 連鎖独立グラフ

ケーススタディで設定した 11 要因との関係性を把握するため、連鎖独立グラフを作成した。モデルの切断は、偏相関係数と相関係数を参考に実施する。独立グラフの結果より、モデルは全 4 群で構成し、最下層である第 4 群はケーススタディで用いた 11 要因、第 3 群に「自然換気時間」、第 2 群に「自然換気量」および「室内外温度差」、そして第 1 群を「自然換気顕熱処理熱量」とする。連鎖独立グラフの偏相関係数を表 6 に示す。

## 3) 因果モデルによる構造分析

連鎖独立グラフより得られたモデルを基に、最尤推定法によるパス解析を行い、因果モデルの作成を行った。自然換気顕熱処理熱量の因果モデルを図 8 に示す。尚、パス係数は全て標準化推定値とする。「自然換気時間」は、「室内温度設定値」、「外気温度条件」、「露点温度条件」、「室内温度条件」との関係性が見出され、特に自然換気条件との関わりが強いことが示唆された。また、「自然換気量」は、「給気口個数」、「流量制御機能」、「照明」、「自然換気時間」から影響を受けており、「自然換気時間」とのパス係数が 0.69 と最も大きい。「室内外温度差」に関しては、「基準階面積」、「窓面積比」、「室内温度設定値」、「外気温度条件」、「露点温度条件」より影響を受ける。最後に、「自然換気顕熱処理熱量」については、「自然換気量」および「室内外温度差」から直接効果を受けているが、「自然換気量」のパス係数が 0.92、「室内外温度差」のパス係数が 0.30 であり、「自然換気量」の影響が大きいことが示唆された。以上より、グラフィカルモデリングを基にパス解析を行うことで、自然換気顕熱処理熱量と各種影響因子との因果構造を分析することが可能であることを示した。

### 5-3. 推計手法およびデータベースの提案

設計段階において定量的評価を行うために、因果モデル(図 8)を基に階層的重回帰分析を実施し、推計手法の提案を行う。更に、因果モデルおよび推定式を利用し、自然換気処理熱量を簡易に推計可能なデータベースの提案を行う。表 7 に自然換気顕熱処理熱量の推定式を示す。どの項目に関しても、決定係数が高く、高精度に予測可能であることを示している。以下では、解析ケース 16 を基準に、データベースの使用事例を示す。まず、「自然換気時間」を増加させたい場合は、「外気温度条件」、「露点温度条件」の直接効果が大きく、現状は 1フロア当たり約 120 時間である自然換気時間が、推定式より緩和後(「外気温度条件」、「露点温度条件」の水準を 1 水準増加した場合)は約 170 時間となった。また、「自然換気時間」と「自然換気顕熱処理熱量」には 0.63 (=0.69×0.92) の間接効果があるため、自然換気顕熱処理熱量に与える影響も大きいことが示唆される。よって、現状の自然換気顕熱処理熱量は約 7.51MkW であったが、緩和後は約 10.03MWh と予測できた。以上より、因果モデルを用いて各因子との影響度を把握した上で、効果の推計を行うことが可能であることを示した。

## 6. まとめ

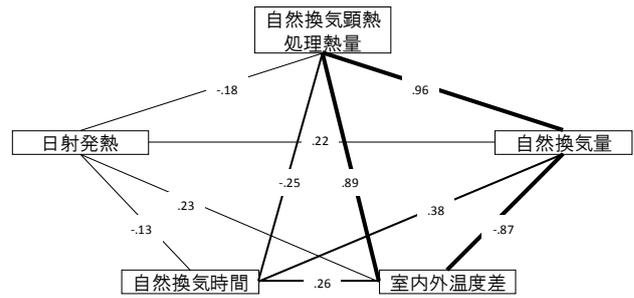


図 7 独立グラフ

表 6 連鎖独立グラフの偏相関係数

変数	偏相関係数	変数	偏相関係数
基準階面積	0.42	自然換気時間	0.83
室内温度設定値	-0.38	自然換気量	0.48
外気温度条件	0.80	室内外温度差	0.54
露点温度条件	0.83	自然換気顕熱処理熱量	0.59
室内温度条件	0.35		
給気口個数	0.63		
流量制御機能	-0.72		
照明	0.48		
自然換気時間	0.54		
基準階面積	0.65		
窓面積比	0.23		
室内温度設定値	0.68		
外気温度条件	0.54		
露点温度条件	-0.36		
自然換気量	0.83		
室内外温度差	0.59		

適合度指標:  $\chi^2=25.6$   $df=22$   $p$ 値=0.27 CFI=0.97 RMSEA=0.078

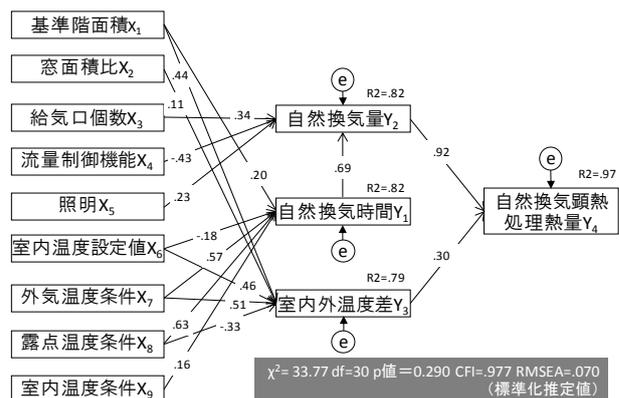


図 8 パス解析による因果モデル

表 7 推定式 (自然換気顕熱処理熱量)

自然換気顕熱処理熱量の推定式	
自然換気時間 [h]	$Y_1 = -122.30 + 34.22X_1 - 30.17X_6 + 97.78X_7 + 108.22X_8 + 27.17X_9 + 68.06$
自然換気量 [10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ]	$Y_2 = -0.52 + 0.51X_3 - 0.65X_4 + 0.30X_5 + 0.01Y_1 + 0.75$
室内外温度差 [°C]	$Y_3 = 9.39 + 2.27X_1 + 0.57X_2 + 2.40X_6 + 2.64X_7 - 1.72X_8 + 2.18$
自然換気顕熱処理熱量 [MWh]	$Y_4 = -6.45 + 1.66Y_2 + 0.24Y_3 + 1.39$

自然換気および空調システムを併用するオフィスビルを対象に、実験計画法に基づくケーススタディを熱・換気回路網解析を用いて実施した。それらの結果より、グラフィカルモデリングを用いて、自然換気処理熱量に影響を与える各種要因とその影響度の構造を明確にした。最終的に、それらの因果構造を基に階層的重回帰分析を実施し、自然換気顕熱処理熱量を簡易に推計可能な式の提案を行った。

【参考文献】1) 奥山博康: 熱・換気回路網モデル計算プログラム NETS の検証, IBPSA-Japan 講演論文集, 2002 2) 坂本知也: オフィスビルにおける自然換気併用ハイブリッド空調システムに関する研究, 北九州市立大学卒業論文, 2011.11 3) 西敏明ら: 継続的改善のための Excel 統計解析講座 4, 日科技連出版社, 2002.05 4) 小島隆夫: Excel で学ぶ分散構造分析とグラフィカルモデリング, オーム社, 2003.12