

建築における伝熱と物質移動を連成する熱・換気回路網モデル

正会員 ○奥山 博康*1 正会員 吉浦温雅*2

熱回路網	換気回路網	連成モデル
物質移動	動的断熱法	壁体内部結露

1. はじめに

伝熱と物質移動の計算機シミュレーションモデルとして熱・換気回路網モデルを展開し、計算プログラム NETS を開発してきた。本モデルは座標系の縛りが少なくモデル化の自由度が高い。また伝熱、換気、水蒸気の相互影響は、これら三者の節点間の対応を設定して考慮できる。本論では熱・換気回路網モデルの概要を述べ、伝熱と物質移動の連成に関する二つの適用例を紹介する。

2. 熱回路網モデルの概要

伝熱や換気の現象を、模擬的な電気回路を組んで予測していた時代から、熱や換気の回路網モデルという言葉が始まったと思われる。数値計算機が使われる様になっても、計算モデルの図表示は電気回路を模して行われているが、その図表示法、モデル化の概念、数式モデル、解法等は研究者によって異なる。本熱回路網モデルとは、熱容量 m_{ij} を持つ節点と、これらを一般化熱コンダクタンス c_{ij} で結んだモデルである。これらのパラメータは有限要素法によっても得られる様にしてある。一般化熱コンダクタンスとは、図 1 に示す様々な伝熱形態を一種類の記号 c_{ij} で表すことによる。

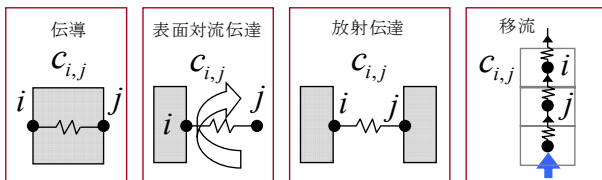


図1 一般化熱コンダクタンス

また各節点では、図 2 に示す様に全ての節点と接続している完全連結システムの節点方程式を用いる。実際に接続している節点間の c_{ij} にはその値を与え、接続していなければ $c_{ij}=0$ なので、計算機メモリの初期値 0 のままで良い。従って計算対象の形状に関わらず、常に同じ次の常微分方程式(1)が適用でき、汎用的な数式モデルと計算プログラムができる^[1]。

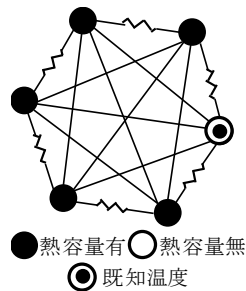


図2 完全連結節点系

$$\sum_{j=1}^n m_{i,j} \cdot \dot{x}_j = \sum_{j=1}^{n+no} c_{i,j} \cdot (x_j - x_i) + \sum_{j=1}^{ng} r_{i,j} \cdot g_j \quad (1)$$

節点 j の温度は x_j で表す。モデル図では未知温度の節点は●または○で表し、個数は n とし、節点番号は 1 から n とする。外気温の様な既知温度の節点は◎で表し、個数は no とし、節点番号は $n+1$ から $n+no$ とする。方位別の日射量や発熱量を g_j で表し、 n_g 個あるとし、節点 i に入力する率を $r_{i,j}$ で表す。この節点方程式により次の状態空間方程式とも呼ぶ連立常微分方程式が構成される^[1]。

$$\mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{C}_o \cdot \mathbf{x}_o + \mathbf{R} \cdot \mathbf{g} \quad (2)$$

熱容量 m_{ij} は \mathbf{M} の i 行 j 列要素となるが、有限体積法では対角要素だけ存在する。非対角要素は有限要素法の離散化の場合に生じる。また一般化コンダクタンスは、移流だけ非対称性を持ち、節点 j から i に流れる場合に体積流量を q 、比熱を c_p 、密度を ρ とし、 $c_{ij}=c_p \cdot \rho \cdot q$ 、 $c_{ji}=0$ となる。マトリックス \mathbf{C} の対角要素は除き、 $[\mathbf{C} \ \mathbf{C}_o]$ の i 行 j 列要素が c_{ij} となる。なお無機繊維系の断熱材の両側の圧力差で透気する状況など、節点間で伝導と移流が同時に存在する場合がある。このために全ての伝熱形態の c_{ij} を重ね合わせて一般化コンダクタンス c_{ij} を計算して用いている。この連立常微分方程式(2)の解法には、射影分解による厳密解^[1]を導いたが、固有値と固有ベクトルの数値計算に実用上課題が残るので、通常は無条件安定が数学的にも証明できて実用的な後退差分法を用いている^[1]。ここで推移マトリックスを Φ_c 、駆動マトリックスを \mathbf{U}_c と次式の様に置く。

$$\Phi_c(\Delta t) = [\mathbf{M} \cdot \Delta t^{-1} - \mathbf{C}]^{-1} \cdot \mathbf{M} \cdot \Delta t^{-1} \quad (3)$$

$$\mathbf{U}_c = [\mathbf{M} \cdot \Delta t^{-1} - \mathbf{C}]^{-1} \quad (4)$$

境界条件の入力ベクトル \mathbf{f} を次の(5)式で定義すれば Δt 毎の漸化式(6)が得られる。ここに k は時刻番号である。

$$\mathbf{f} = \mathbf{C}_o \cdot \mathbf{x}_o + \mathbf{R} \cdot \mathbf{g} \quad (5)$$

$$\mathbf{x}(k\Delta t) = \Phi_c(\Delta t) \cdot \mathbf{x}((k-1)\Delta t) + \mathbf{U}_c \cdot \mathbf{f}(k\Delta t) \quad (6)$$

この式によれば、全 m_{ij} の要素を 0 に設定すれば定常計算が行える。図 3 の様に、建物の領域に応じて、有限要素法により得られるマトリックスの i 行 j 列要素が m_{ij} と c_{ij} になる。従って有限体積法の領域と合成した全体方程式が、完全連結節点方程式(1)で構成できる^[1]。

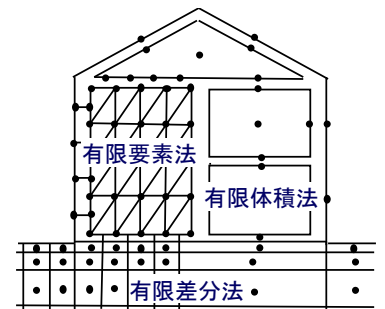


図3 異種離散化モデルの融合

建物等の CAD データから離散化して得るモデルは節点数が膨大になるが、システムの濃縮法により、少ない次数の連立常微分方程式に近似することもできる^[1]。NETS では壁体等の 1 次元や 2 次元の部品モデルを有限要素法で作成し、有限体積法の室空間モデルと一体化して全体モデルを構築できる^[1]。

3. 換気回路網の概要

一方、換気回路網モデルは図 4 に示す様に、室空間等のゾーンと、開口やダクト等の流路から成る。送風機は流路に付ける。ダクトの分岐・合流点には全圧を静圧として持つゾーンを仮定する。ゾーンの底面の高さの静圧を室内圧の節点とする^[1]。汎用性で重要なのは、各ゾーンでの風量収支の残差計算と、室内圧による残差の偏微分のヤコビ行列を計算するデータ構造とアルゴリズムである。このために各流路の両側のゾーン番号に間接アドレスする配列を利用する^{[1][2]}。

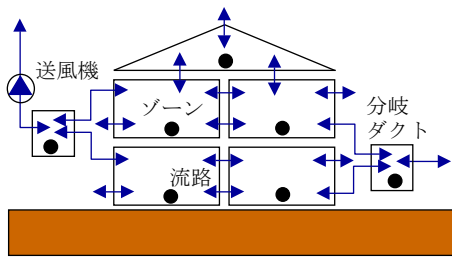


図 4 全圧節点系の換気回路網

解法の最初に全節点の静圧を仮定すれば、流路の高さと圧力損失係数と指数から通過風量が計算され、各ゾーンでの風量収支の残差が計算される。これらの残差を 0 にする室内圧を普通のニュートン法により解こうとすると、図 5 の様に振動が起きやすく収束し難い問題があるので、室内圧修正は半分で施す修正ニュートン法を適用している^[1]。

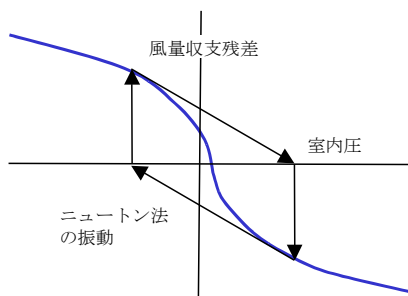


図 5 ニュートン法で起こる振動

送風機の静圧を風量の三次式で近似する。送風機の流路は二次式に近似して、カルダノの三次方程式の解法で風量を求める^[2]。

4. 伝熱と物質移動の連成

温度差による自然換気等では、熱回路網と換気回路網の連成が必要である。其々は温度と室内圧の節点系と見なせる。一方の節点番号からもう一方の節点番号を参照する配列データが作れる^[1]。この配列により、室温による

空気密度を換気回路網へ与え、換気風量を一般化熱コンダクタンスとして熱回路網に与える連成ができる。金属など、空気や水蒸気の移動が無い固体中でも熱伝導は起こる。また木材等で透湿はあっても空気移動は無いとすれば、図 6 に示す節点系の包含関係がある。

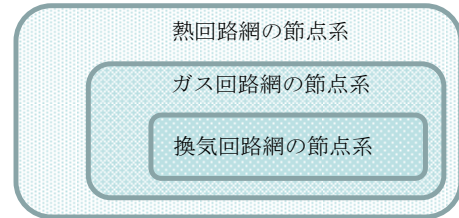


図 6 三種の節点系の包含関係

蒸発冷却等は、水蒸気回路網に飽和状態の既知節点を設けて、これに熱回路網の未知温度節点を対応して計算する。また固体材料中の熱水分同時移動を n 個の節点でモデル化した場合に、温度と湿度の $2n$ 次の状態ベクトルの連立常微分方程式で計算することも可能だが^[1]、NETS では、熱と水蒸気の二種の回路網モデルを、計算時間間隔 Δt の遅れで緩く連成している。水蒸気もガスも、熱回路網と同様な保存則の式を用いるので、質量収支も熱回路網と同様に扱うために、水蒸気移動の係数の単位は、水蒸気圧系ではなく絶対湿度系に換算して用いている。

5. 熱負荷計算とモード変化

NETS の熱負荷計算^[2]は、室空気に限らず任意の節点を任意の温・湿度にし、この負荷が装置能力を超えた時の成り行きを温・湿度を解くため、既知状態の節点番号は後ろ詰めの規約に従い、全ての m_{ij} と c_{ij} の節点番号もリナンバリングして再計算する。また床暖房^[3]の温水加熱操作で PMV を PID 制御する比例、積分、微分の係数は、装置容量の単位ステップ関数の応答を予備計算して決める。NETS で構築したモデルの構造や要素と係数はスケジュールや状態フィードバックで変えられる。これをモード変化と呼んでいる。温度による相変化物質の挙動は、節点の熱容量をフィードバック制御して模擬できる^[4]。また単位面積の壁体の法線方向一次元伝熱モデルや、多層建物の一層分の熱・換気回路網モデル等は、部品化してライブラリに登録し全体モデル構築に利用できる。

6. 動的断熱の検討事例^[5]

ダイナミックインシュレーションとも呼ばれる透気性断熱を利用した省エネ方法がある。冬季の場合は図 7 の様に送風機で室内を減圧し、無機繊維系の断熱材を透過して外気を吸い込む。室内表面温度は少し低下するが、換気の前熱効果で熱負荷は減少する。一方、夏季は送風の方向を逆にして室内を加圧し、外気に向けて壁を透気させる。この場合は、室内表面温度が冷房室温に近づき、表面熱伝達負荷が減る。ただし換気の前熱効果は無い。第一種換気で壁の透気が無い場合を基準にして、加圧換気と減圧換気による省エネ効果を比較計算すると、省エ

ネの仕組みが異なるにも関わらず、室内の加圧と減圧では同程度の熱負荷の省エネ効果が見られる。

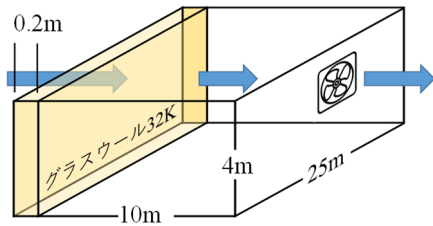


図7 動的断熱による冬季の導入外気予熱

図7の場合、熱・換気・水蒸気回路網モデルを図8に示す。建築断面図は下地に薄い色で表しモデル描画のガイドにする。また三種の連成モデルのうち編集するモデルを手前に表し、他の二種のモデルは薄い色の背景として表して三者の対応関係を分かり易くできる。

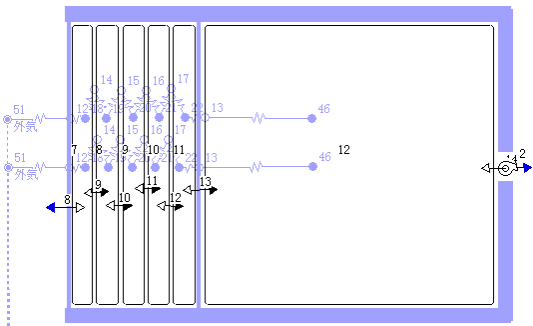


図8 減圧換気の場合の熱・換気・水蒸気回路網

断熱材は厚み 200mm で 32K のグラスウールとした。厚み方向を 5 分割して熱・換気・水蒸気回路網を作った。各セグメントの中心に熱容量等を持つ節点を設け、節点間は定常伝導としてコンダクタンスを与えた。伝熱と水蒸気の伝導率と表面伝達率は表1の様に仮定した。室内外圧力差による熱と水蒸気の移流は換気回路網で考慮される。様々な送風機風量を与え、顕熱と潜熱の全熱負荷を、定常状態で計算した。断熱材通過の気流速が 0 から 1.5mm/s まで 0.1mm/s 刻みで計算した。

表1 熱と水蒸気の伝導率と表面伝達率

単位は上 が熱で下 が水蒸気	伝導率 W/m·K kg/ms(kg/kg)	外表面伝達率 W/m ² ·K kg/m ² K(kg/kg)	内表面伝達率 W/m ² ·K kg/m ² K(kg/kg)
熱	0.0395	23.3	9.3
水蒸気	2.63×10-5	0.0167	0.00556

外気は 0℃で相対湿度 37%、室内は 22℃で 50%とした。第一種換気の場合の熱負荷に対して、減圧と加圧の全熱負荷の比率を熱負荷比率としてグラフ化すると図9となった。加圧も減圧も同程度の省エネ効果となる。換気回数、0.1mm/s で 0.036 回毎時、1.5mm/s で 0.54 回毎時である。気流速が 0.2 から 0.3mm/s の場合に最大の省エネ効果が得られた。基準となる第一種換気で壁透気が無い場合の全熱負荷は、透気の気流速が 0mm/s の時に 638W で、1.5mm/s では 7993W で線形の変化となった。

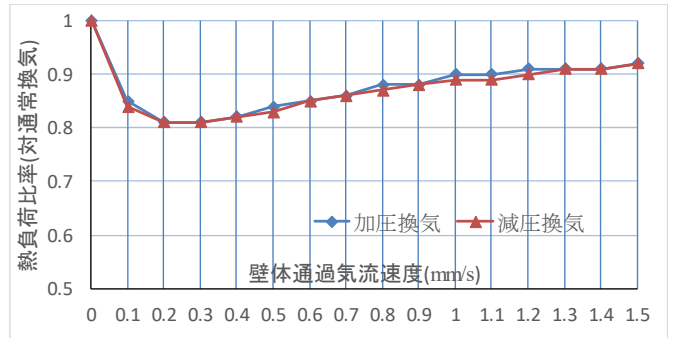


図9 断熱材通過気流速による熱負荷比率

なお加圧式では断熱材の外表面付近で結露が心配されたが、僅かに 50%を超える程度であった。実際の納まりは、断熱材の外側の外装材と間に通気層を設け、外気に開放的にする必要がある。ただし大きな屋内外差圧を維持すれば、他の予期せぬ不具合を生じる可能性がある。

7. 天井断熱と第三種換気による夏型結露⁶⁾

近年の気密化・高断熱化と第三種換気によると思われる夏型結露が検討⁷⁾されている。これは第三種換気により、高温・高湿の外気が小屋裏の換気口から吸い込まれ、天井板上面の断熱材との空隙で、22℃と低めの室温も影響した結露と考えられる。そこで今まで通気層の効果を検討していた計算モデルの屋根断熱を天井断熱に変更して本結露検討のモデルを作った。これを図10に示す。断面の横幅 10m、奥行 7m、棟高 5m、軒高 3.8m、床高 0.8m とし、室内側の通気層は常時閉鎖とし、外気側だけの通気層とした。屋根の断熱材の厚さをほぼ 0mm とし、天井板の上には野縁による 40mm の空隙の上に断熱材 100mm を載せた。節点の同一化と呼ぶ描画機能により天井板上の詳細の熱回路網を緑枠で引出し拡大している。結露の仕組みは赤枠内に描いた。隙間モデルが重要だが、場所も不確定で演繹的には作り難いので、流路を室空間外周に均等に分散させ、計算上の気密測定を行いながら、相当隙間面積の経験的な値 2cm²/m² に近くなる様にした。

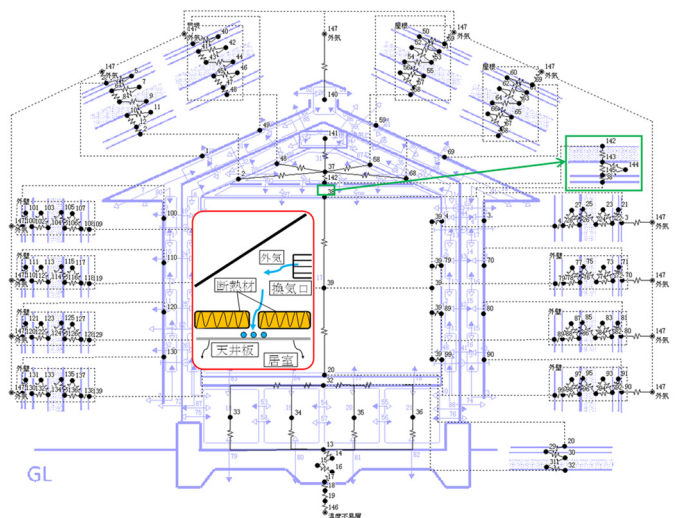


図10 熱・換気・水蒸気回路網と天井詳細図

第一種換気の場合は150m³/h (0.7回毎時)で等風量の2個の給・排気送風機とした。第三種換気の場合は排風機1台とした。天井と屋根方面の主な構成材料の物性値は表2に示す。断熱材下の空気層の対流熱伝達率及び湿気伝達率は熱流下向き1.7 [W/m²K], 0.00475 [kg/m²s(kg/kg)]とし長波長放射率は0.9とした。

表2 主な部位の構成材料と物性値

部位	構成材料	d	λ	P	P'	ε
屋根	石綿スレート	10	1.2	7.92	1.27×10 ⁻⁶	0.8
	合板	10	0.186	1.11	1.23×10 ⁻⁷	0.22
	スチレン発砲板	0	0.37	3.54	5.66×10 ⁻⁷	0.8
	合板	10	0.186	1.11	1.23×10 ⁻⁷	0.22
	石膏ボード	10	0.211	39.7	6.35×10 ⁻⁶	0.7
天井	グラスウール	100	0.38	170	2.37×10 ⁻⁵	0.99
	石膏ボード	12.5	0.211	39.7	6.35×10 ⁻⁶	0.7

※d:厚さ [mm]、λ:熱伝導率 [W/mK]、P:透湿率 [ng/msPa]、P':透湿率 [kg/ms(kg/kg)]、ε:空隙率 [m³/m³]

東京の標準気象データを用い7日間の助走期間を設けて比較的高温多湿な8月4日12時から5日12時の時間帯を検討した。連続冷房で室温は22℃あるいは26℃で湿度70%とした。第一種と第三種の換気方式での時間平均的な風量と水蒸気流の結果を図11に示す。第一種でも逆の煙突効果で下降流が起こり、第三種になれば、その4倍の下降風量になる。移流の水蒸気流も約4倍であり、伝導分は移流に対し2割から1割程度と小さい。

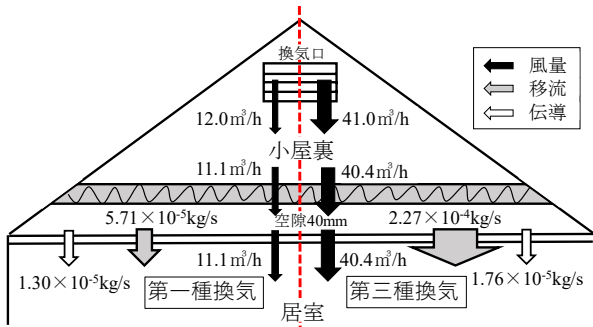


図11 各換気方式での時間平均風量と水蒸気流

次に各所の温度と絶対湿度の変化を図12に示す。室温は22℃の場合で、天井板上の空隙の絶対湿度は、第一種と第三種換気での違いを描いた。天井板の上表面温度は第三種換気の場合である。これらの条件から計算される天井板上の表面での相対湿度変化を図13に示す。室温22℃での第一種と第三種換気の場合と、室温が26℃で第三種換気の場合の三通りを描いた。外気の高湿度もあり、第三種換気で室温22℃の場合は、20時30分から7時間45分間結露を生じ、総量は0.0138kg/m²となった。第一種換気にするか、室温26℃にすれば結露しないので、通常では夏型結露は発生し難いが、第三種換気が予期せぬ具合を起した一例と言える。

8. まとめ

熱・換気回路網モデルと計算プログラム NETS の概要を述べ、透気する壁体の動的断熱法と第三種換気で生じた夏型結露の二つの検討事例を紹介した。これらの熱と水蒸気の移動は、熱伝導や水蒸気伝導だけでなく、断熱材の透気と天井板の隙間風の移流が重要な要因となる。本熱・換気回路網モデルはこうした現象の計算モデルとしても適していることを示した。

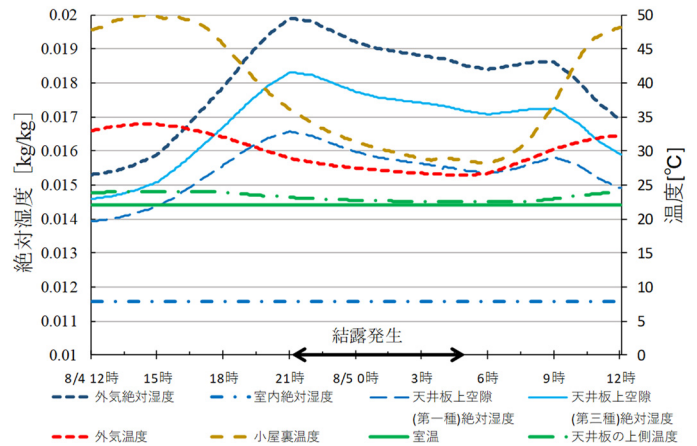


図12 各換気方式での温度と絶対湿度の変化

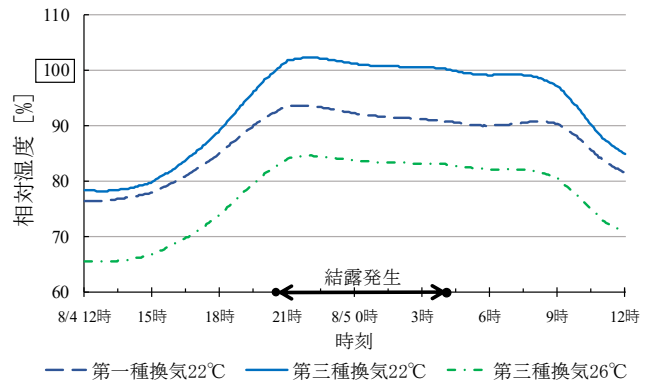


図13 各換気方式での天井板上表面の相対湿度の変化

【参考文献】

- [1]奥山博康,建築物の熱回路網モデルに関する理論的研究,博士学位請求論文(早稲田大学),1987年12月
- [2]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年6月 pp15-22
- [3]奥山博康,櫻井一樹,熱回路網モデルによる床暖房と温風暖房のエネルギー性能比較,空衛学会大会学術講演論文集,2013年9月,p473-476
- [4]森野仁夫,奥山博康,鋼管杭を用いた氷蓄熱システムの開発 第2報 シミュレーションによる熱損失の検討,建築学会大会学術講演梗概集,2003年9月,pp1249-1250
- [5]大谷祐祐,ダイナミック・インシュレーションの省エネルギー性能比較 熱・水蒸気・換気の連成モデルへの拡張,神奈川大学工学部建築学科,卒業研究論文,2015年2月
- [6]藤曲善行,天井断熱と第三種換気による夏型結露,神奈川大学工学部建築学科,卒業研究論文,2021年2月
- [7]出端祐輔・他,住宅における冷房時の夏型結露に関する研究-外気高湿度の影響-,建築学会大会学術講演梗概集,2020年9月,pp921-922

*1 神奈川大学工学部建築学科 教授・博士(工学)
*2 神奈川大学工学部建築学科 特別助教・博士(工学)

*1 Professor, Dr. Eng., Kanagawa University
*2 Assistant Professor, Dr. Eng., Kanagawa University