通気層を有する壁体の室内表面熱流の計算方法の検討

2021年1月

佐藤エネルギーリサーチ株式会社

# 通気層を有する壁体の熱的性能の計算方法

## 通気層を有する壁体の熱収支式

通気層を有する外壁、屋根の日射遮へい効果および断熱効果を定量的に評価するため、赤坂ら1)は壁体の各面の温度の熱収支式を整理し、非定常計算および定常計算のそれぞれの計算方法を示している。通気層を有する壁体の模式図を図 1に示す。



図 1　通気層を有する壁体の模式図

## 壁体内の各面の熱収支式

赤坂ら1)によるモデルを参考に立てた各部の熱収支式を式(1)～式(4)に示す。

1. 外気側表面の熱収支収支式

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

1. 通気層に面する面1の熱収支式

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

1. 通気層に面する面2の熱収支式

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

1. 室内側表面の熱収支式

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

相当外気温度は、式(5)により表される。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

ここで、

：相当外気温度（℃）

：外気温度（℃）

：外気側表面温度（℃）

：通気層に面する面1の表面温度（℃）

：通気層に面する面2の表面温度（℃）

：通気層の平均温度（℃）

：室内側表面温度（℃）

：室内温度（℃）

：外装材の熱コンダクタンス（W/(m2・K)）

：断熱層の熱コンダクタンス（W/(m2・K)）

：外気側表面に入射する日射量（W/m2）

：夜間放射量（W/m2）

：外気側表面日射吸収率（-）

：外気側表面放射率（-）

：壁体から大気を見る形態係数（-）

：室外側総合熱伝達率（W/(m2・K)）（= 25.0）

：室内側総合熱伝達率（W/(m2・K)）（= 9.0）

：通気層の対流熱伝達率（W/(m2・K)）

：通気層の放射熱伝達率（W/(m2・K)）

である。通気層の対流熱伝達率、通気層の放射熱伝達率の計算方法は1.5に後述する。

## 通気層内空気の熱収支式

通気層の模式図を図 2に示す。通気層内空気の熱収支式は、式(6)のように通気層の外気側と室内側からの対流熱取得によって空気の温度が変化するモデルより計算することができる。



図 2　通気層の模式図

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |
|  | (7) |

ここで、

：通気層の代表空気温度（℃）

：通気層に面する面1の表面温度（℃）

：通気層に面する面2の表面温度（℃）

：通気層内の通気風量（m2/s）

：通気層の平均風速（m/s）

：通気層流れ方向の長さ（m）

：通気層の長さ（m）

：通気層の幅（m）

：通気層の厚さ（m）

：通気層の対流熱伝達率（W/(m2・K)）

：通気層の放射熱伝達率（W/(m2・K)）

：空気の定圧比熱（J/(kg・K)）

：空気の密度（kg/ m3）

である。

式(6)を初期条件での境界条件で定積分すると、式(8)のように表すことができる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |
|  | (9) |

ここで、

：通気層の代表空気温度（℃）

：通気層に面する面1の表面温度（℃）

：通気層に面する面2の表面温度（℃）

：通気層の入口の空気温度（℃）

：通気層の対流熱伝達率（W/(m2・K)）

：通気層の長さ（m）

：通気層の幅（m）

：通気層内の通気風量（m3/s）

：空気の定圧比熱（J/(kg・K)）（=1.006）

：空気の密度（kg/ m3）（=1.2）

である。

式(8)で求められるは通気層の代表空気温度であるので、通気層の平均温度を求める方法を検討する。通気層入口からの距離における通気層の温度は、式(10)で表される。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |
|  | (11) |
|  | (12) |

ここで、

：通気層入口からの距離における通気層の温度（℃）

：通気層に面する面1の表面温度（℃）

：通気層に面する面2の表面温度（℃）

：通気層の入口の空気温度（℃）

：通気層の対流熱伝達率（W/(m2・K)）

：通気層の長さ（m）

：通気層の幅（m）

：通気層内の通気風量（m3/s）

：空気の定圧比熱（J/(kg・K)）

：空気の密度（kg/ m3）

である。

通気層の平均温度は、式(10)を入口（）から出口（）まで積分した温度を通気層の長さで除した式(13)で求められる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |
|  | (11)(再) |
|  | (14) |

ここで、

：通気層の平均温度（℃）

：通気層に面する面1の表面温度（℃）

：通気層に面する面2の表面温度（℃）

：通気層の入口の空気温度（℃）

：通気層の対流熱伝達率（W/(m2・K)）

：通気層の長さ（m）

：通気層の幅（m）

：通気層内の通気風量（m3/s）

：空気の定圧比熱（J/(kg・K)）

：空気の密度（kg/ m3）

である。

一方、通気層内の風速が0m/sの場合については、式(14)からとなる極値であり、式(13)は式(15)となる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (15) |

## 通気層を有する壁体の各表面温度および通気層温度を求める行列式

壁体内の各面の熱収支式（式(1)～式(4)）および通気層内空気の熱収支式（式(6)）より、通気層を有する壁体の各表面温度および通気層の平均温度を求める行列式を作成する。

式(1)～式(4)および式(13)を各表面温度、、、および通気層の平均温度を未知数とする一次方程式に変形すると、式(16)～式(20)のようになる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (16) |
|  | (17) |
|  | (18) |
|  | (19) |
|  | (20) |

これを行列化すると、式(21)のようになる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (21) |
|  | (5)  (再) |
|  | (14)  (再) |
|  | (7)  (再) |

ここで、

：室外側総合熱伝達率（W/(m2・K)）（= 25.0）

：室内側総合熱伝達率（W/(m2・K)）（= 9.0）

：通気層の対流熱伝達率（W/(m2・K)）

：通気層の放射熱伝達率（W/(m2・K)）

：外装材の熱コンダクタンス（W/(m2・K)）

：断熱層の熱コンダクタンス（W/(m2・K)）

：外気側表面温度（℃）

：通気層に面する面1の表面温度（℃）

：通気層に面する面2の表面温度（℃）

：室内側表面温度（℃）

：通気層の平均温度（℃）

：相当外気温度（℃）

：外気温度（℃）

：室内温度（℃）

：通気層の入口の空気温度（℃）

：外気側表面日射吸収率（-）

：外気側表面に入射する日射量（W/m2）

：夜間放射量（W/m2）

：壁体から大気を見る形態係数（-）

：外気側表面放射率（-）

：通気層の面積（m2）

：空気の定圧比熱（J/(kg・K)）

：空気の密度（kg/ m3）

：通気層内の通気風量（m3/s）

：通気層の平均風速（m/s）

：通気層の長さ（m）

：通気層の幅（m）

：通気層の厚さ（m）

である。

この式(21)を解くことで、各表面温度、、、および通気層の平均温度が求められる。ただし、後述するように通気層の対流熱伝達率、通気層の放射熱伝達率は、通気層内の表面温度、に依存するため、収束計算により解を求める。

## 通気層の熱伝達率の計算方法

### 通気層の放射熱伝達率

#### 放射熱伝達率の計算式

通気層に面する面1、面2の放射熱伝達率は、文献1)によると式(22)により求められる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (22) |
|  | (23) |

ここで、

：通気層の放射熱伝達率（W/(m2・K)）

：ステファン・ボルツマン定数（W/(m2・K4)）（＝5.67×10-8）

：通気層に面する面1の表面温度（K）（）

：通気層に面する面2の表面温度（K）（）

である。

式におけるは、通気層面の有効放射率である。通気層が無限の平行面であると仮定すると式(24)、通気層が通気胴縁や屋根垂木等の影響を考慮した二次元空間であるとすると式(25)により求められる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (24) |
|  | (25) |

ここで、

：通気層に面する面1の放射率（-）

：通気層に面する面2の放射率（-）

：通気層の厚さ（m）

：通気胴縁または垂木の間隔（m）

である。

#### 放射熱伝達率の計算式の検証

放射熱伝達率について、通気層が無限の平行面と仮定した場合（式(24)）と、通気胴縁や屋根垂木等の影響を考慮した有限の二次元空間と仮定した場合（式(25)）の計算結果の違いを検証した。

通気層を無限（Infinite）と仮定したの場合と有限（Finite）の二次元空間と仮定した場合の放射熱伝達率の計算結果を図 3、図 4に示す。図 3は横軸を通気層に面する面2の放射率としたもの、図 4は横軸を通気層の厚さとし、放射率別に描画したものである。

通気層を有限（Finite）の二次元空間と仮定した場合の放射熱伝達率は、放射率が大きく、かつ通気層厚さが厚くなるにつれて、無限平行面（Infinite）と仮定した場合との差が大きくなる。ただし、実際の通気層厚さは5cmよりも薄いと考えられるため、通気層の計算において両者の差は無視できる程度であるといえる。以上のことから、本検証においては、通気層は無限平行面と仮定して放射熱伝達率を計算する。

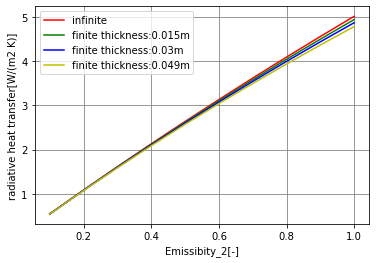


図 3　放射率別の放射熱伝達率の計算結果比較（横軸：通気層に面する面2の放射率、縦軸：放射熱伝達率）

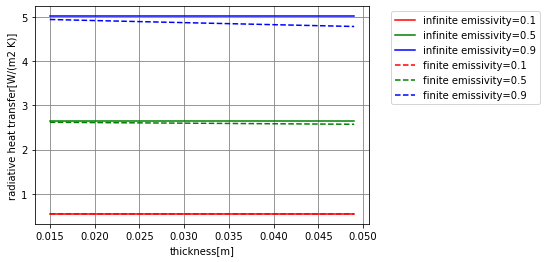


図 4　通気層の厚さ別の放射熱伝達率の計算結果比較（横軸：通気層の厚さ、縦軸：放射熱伝達率）

### 通気層の対流熱伝達率

#### 対流熱伝達率の計算式

通気層の対流熱伝達率は、ISO 15099 2)によると、自然対流熱伝達率を風速で補正する式(26)により求められる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (26) |

ここで、

：通気層の対流熱伝達率（W/(m2・K)）

：密閉空気層の自然対流熱伝達率（W/(m2・K)）

：風速係数（(W・s)/(m3・K)）（=4）

：通気層の平均風速（m/s）

である。

密閉空気層の自然対流熱伝達率は、式(27)により表される。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (27) |

ここで、

：密閉空気層の対流熱伝達率（W/(m2・K)）

：ヌセルト数（-）

：通気層内の空気の熱伝導率（W/(m・K)）

：通気層の厚さ（m）

である。

式(21)中のヌセルト数は、レーリー数と、通気層の傾斜角、通気層の長さ、通気層の厚さにより計算式が異なる。レーリー数は、式(28)により求める。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (28) |

ここで、

：レーリー数（-）

：重力加速度（m/s2）（）

：空気の体膨張率（1/K）

：通気層に面する面1の表面温度（K）（）

：通気層に面する面2の表面温度（K）（）

：通気層の厚さ（m）

：空気の密度（kg/ m3）

：空気の定圧比熱（J/(kg・K)）

：空気の粘性率（Pa・s）

：通気層内の空気の熱伝導率（W/(m・K)）（）

である。

#### ヌセルト数の計算式

##### 前提条件

文献1)によると、ヌセルト数は通気層の厚さに対する通気層の長さの比率により計算式が異なる。ここで、通気層の長さは、外壁であれば軒高、屋根であれば屋根の長さであるから、1 m以上の値となると考えられる。住宅の外壁、屋根の外気側に施工される一般的な通気層の厚さを、文献1)にならい外壁では2 cm程度、屋根では5～10 cm程度と仮定すると、本計算法で想定している通気層では常にとなる。以下、文献1)より各条件に該当するヌセルト数の計算式を引用する。

また、通気層の傾斜角は、鉛直方向の外壁と、陸屋根および勾配屋根を想定し、の範囲にあるとする。

##### 通気層の傾斜角が（水平）のときのヌセルト数

通気層の傾斜角、の場合のヌセルト数の計算式は、式(29)となる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (29) |

ここで、

：ヌセルト数（-）

：レーリー数（-）

である。

##### 通気層の傾斜角が（鉛直）のときのヌセルト数

通気層の傾斜角のときのヌセルト数は、の場合、式(30)により求められる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (30) |
|  | (31) |
|  | (32) |
|  | (33) |

ここで、

：ヌセルト数（-）

：レーリー数（-）

：通気層の厚さ（m）

：通気層の長さ（m）

である。

##### 通気層の傾斜角がのときのヌセルト数

通気層の傾斜角が、の場合のヌセルト数は、の値に応じて計算式が異なり、式(34)～式(36)となる。

のとき

|  |  |
| --- | --- |
|  | (34) |

のとき

|  |  |
| --- | --- |
|  | (35) |

のとき

|  |  |
| --- | --- |
|  | (36) |

##### 通気層の傾斜角がのときのヌセルト数

通気層の傾斜角が、の場合のヌセルト数の計算式は、式(37)となる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (37) |

ここで、

：ヌセルト数（-）

：通気層の傾斜角（°）

である。

式(37)中のは、式(38)により求める。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (38) |
|  | (39) |
|  | (40) |
|  | (41) |

ここで、

：レーリー数（-）

：通気層の厚さ（m）

：通気層の長さ（m）

である。

式(37)中のは、式(42)により求める。この式(42)は前述の式(30)と同様の式であり、、、はそれぞれ前述の式(31)、式(32)、式(33)より求める。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (42) |

#### 対流熱伝達率の計算式の検証

##### 無風の場合の自然対流熱伝達率の計算結果の比較

風速を0m/s（無風）とした場合の自然対流熱伝達率について、他文献における計算方法を調査し、本計算方法（式(26)）による計算結果の比較を行った。

既往文献による対流熱伝達率の計算方法一覧を表 1に示す。ただし、平行平板に囲われた条件での対流熱伝達率の計算式はどの文献においてもあまり定義されておらず、既往文献による対流熱伝達率は、面の片側が解放されている場合を想定していることに留意する。

表 1　既往文献による対流熱伝達率の計算方法一覧

| No. | 著者 | 文献名称 | 種類 | 計算法 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 武田仁 | 最新建築環境工学改訂4版 | 垂直壁面 |  |
| 水平面（上向き） |  |
| 水平面（下向き） |  |
| 2 | 空気調和・衛生工学会 | 空気調和・衛生工学便覧 | 垂直平板 | 層流  乱流（場所によらない） |
| 水平平板（上向き） | 層流 |
| 水平平板（下向き） | 層流  乱流  物性値は膜温度でとるが、体膨張係数は流体温度でとる |
| 3 | 木村建一 | 建築設備基礎 | 垂直平板  代表長さ：高さ | 層流  乱流 |
| 水平平板（上向き）  代表長さ：一辺の長さ | 層流  乱流 |
| 水平平板（下向き）  代表長さ：一辺の長さ |  |
| 4 | ASHRAE | ASHRAE Handbook Fundamentals 2013 | 垂直平板 | 層流  乱流  は高さ、特性値は膜温度より求める。ただし、体膨張係数はより求める |
| 水平平板（上向き熱流） | 、特性値は膜温度より求める。 |
| 水平平板（下向き熱流） | 、特性値は膜温度より求める。 |

垂直平板の場合における本計算方法による自然対流熱伝達率と、既往文献による自然対流熱伝達率の計算結果比較を図 5に示す。本計算方法による対流熱伝達率が最も小さくなる結果となった。また、計算結果のオーダーが大きくずれていないことも確認した。

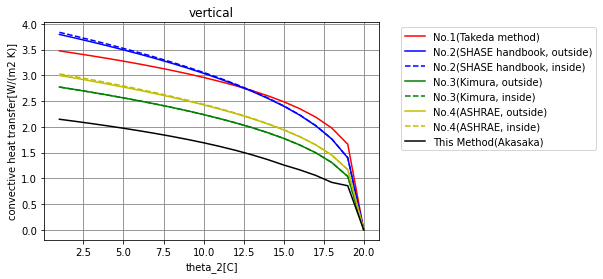


図 5　自然対流熱伝達率の計算結果比較（垂直平板、風速 = 0 m/s）

##### 有風の場合の対流熱伝達率の計算結果の比較

有風状態の場合の垂直平行平板の熱伝達率の計算方法は、「伝熱工学資料改訂第5版（日本機械学会）」に記載があるが、2平板の温度が等しいことを前提にしている。その他には、「最新 建築環境工学（田中他）」3)にユルゲスの実験による強制対流熱伝達率の計算式が示されている。ユルゲスの計算式は面の片側が解放されている場合を想定しており、普通面の場合は式(43)となる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | () |

ここで、

：強制対流熱伝達率（W/(m2・K)）

：風速（m/s）

である。

有風状態の場合の対流熱伝達率について、本計算方法とユルゲスの計算式による計算結果比較を図 6に示す。本計算方法では平行平板に囲われた条件であり、かつ2平板の温度が異なるため、正確な比較は難しいが、オーダーは大きく外れていないことを確認した。

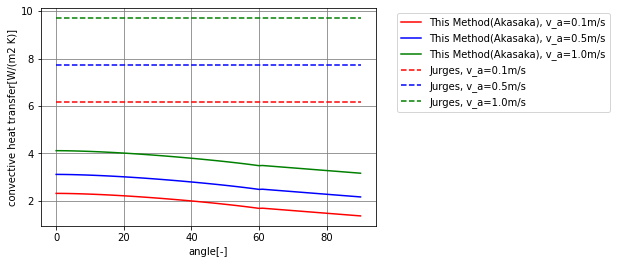


図 6　有風の場合の対流熱伝達率の計算結果比較

# パラメトリックスタディの実施

通気層を有する壁体の熱的性能には、気象条件や壁体の断熱性能、通気層の仕様など、様々な要因が関係している。通気層の熱的性能を検証するにあたり、各要因に水準として具体的な数値を与え、総当たりの水準の組み合わせによるパラメトリックスタディを実施し、その計算結果を分析することとした。これまでに述べた計算式から、通気層を有する壁体の熱的性能に影響を及ぼすと考えられる要因（パラメータ）を表 2に示す。各パラメータは、後述するように現実的に考えられる範囲の値を表 2に示すように与えることとする。

通気層の平均風速は、通気層内の密度差、摩擦損失、通気層入口・出口の摩擦損失などから計算する方法もあるが、推定が非常に困難であるので、ここではパラメータとして与えることを検討する。

表 2　通気層を有する壁体の熱的性能に影響を及ぼす要因（パラメータ）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分類 | 要因（パラメータ）名 | 記号 | 水準として与える値 | | |
| 下限値 | 中間値 | 上限値 |
| 気象条件 | 外気温度（℃）：冬期条件 |  | -10 | 0 | 10 |
|  | 外気温度（℃）：夏期条件 | 25 | 30 | 35 |
|  | 室内温度（℃）：冬期条件 |  | － | 20 | － |
|  | 室内温度（℃）：夏期条件 |  | － | 27 | － |
|  | 外気側表面に入射する日射量（W/m2） |  | 0 | 500 | 1,000 |
| 外装材の物性値 | 外装材の日射吸収率（-） |  | 0 | 0.5 | 1.0 |
|  | 外装材の熱コンダクタンス（W/(m2・K)） |  | 0.5 | 50.25 | 100 |
| 断熱層の物性値 | 断熱層の熱コンダクタンス（W/(m2・K)） |  | 0.1 | 2.55 | 5.0 |
| 通気層の仕様 | 通気層の長さ（m） |  | 3.0 | 7.5 | 12.0 |
|  | 通気層の幅（m） |  | 0.05 | 5.025 | 10.0 |
|  | 通気層の厚さ（m） |  | 0.05 | 0.175 | 0.3 |
|  | 通気層の傾斜角（°） |  | 0.0 | 45.0 | 90.0 |
|  | 通気層の平均風速（m/s） |  | 0.0 | 0.5 | 1.0 |
|  | 通気層に面する面1の放射率（-） |  | － | 0.9 | － |
|  | 通気層に面する面2の放射率（-） |  | 0.1 | 0.5 | 0.9 |

## 各水準の決定方法

パラメトリックスタディを実施するにあたり、各要因には、水準として現実的に考えられる範囲の上下限値2点、およびその中央値1点を追加した計3点の数値を原則として与えることとした。各要因における水準の上下限値についての決定根拠を以下に示す。

#### 外気温度

外気温度は、冬期条件（-10℃、0℃、10℃）と夏期条件（25℃、30℃、35℃）を想定した2パターンを与える。

#### 室内温度

室内温度は、省エネルギー基準における冬期条件（暖房時）の室温（22℃）、および夏期条件（冷房時）の室温（27℃）を与える。

#### 外気側表面に入射する日射量

日射のある場合、ない場合を想定し、0～1,000 W/m2の数値を与える。

#### 外装材の日射吸収率（-）

外装材の日射吸収率は、物理的に考えうる範囲として、0～0.9の数値を与える。

#### 外装材の熱コンダクタンス

外装材にはガルバリウム鋼板のように熱伝導率が比較的大きい製品もある一方、熱抵抗が付加された製品もあるため、外装材の熱コンダクタンスには0.5～100.0 W/(m2K) の数値を与える。

#### 断熱層の熱コンダクタンス

断熱層の熱コンダクタンスは、現実的に考えられる範囲として0.1～5.0 W/(m2K) の数値を与える。

#### 通気層の長さ

通気層の長さは、外壁の場合は戸建住宅では1階～3階までの高さがあることを想定し、3.0～12.0 mの数値を与える。

#### 通気層の幅

通気層の幅は、どの程度が現実的な数値であるか想定が難しいが、やや極端な範囲として0.05～10.0 mの数値を与え、影響を確認する。

#### 通気層の厚さ

通気層の厚さは目的により様々な厚さに設計されると考えられるが、現実的な範囲として0.05～0.3 mの数値を与える。

#### 通気層の傾斜角

通気層の傾斜角は、外壁を想定した90°、および屋根を想定した45°、0°の数値を与える。

#### 通気層の平均風速

梅野ら4)による実測結果を参考に、通気層風速は0.0～1.0 [m/s]の範囲内で数値を与えることとした。

#### 通気層に面する面1、面2の放射率

通気層の放射率は、通気層面の有効放射率の計算式（式(24)、式(25)）に用いられるが、面1の放射率と面2の放射率の組み合わせが(0.1, 0.9)の場合と(0.9, 0.2)の場合ではどちらも等価となるので、ここでは面1の放射率を0.9で固定し、面2の放射率を変化させる。面2の放射率には、物理的に考えられる範囲として0.1～0.9の数値を与える。

# 通気層の熱伝達率の固定化の検討

通気層の対流熱伝達率、通気層の放射熱伝達率は、1.5.1、1.5.2に前述したように、通気層内の表面温度に依存するため、収束計算により通気層の各面の温度を解く必要があり、室内表面熱流の計算が非常に煩雑になる。省エネルギー基準における外皮性能の評価に適用するには、より簡便な方法で室内表面熱流の計算を行うことが望ましい。

通気層の対流熱伝達率、通気層の放射熱伝達率を固定することができれば、より簡便な評価を行うことができると考えられる。そこで、本章では、通気層の熱伝達率を固定化する方法について検討する。

## 通気層の対流熱伝達率の固定化方法の検証

### 通気層の対流熱伝達率に影響を及ぼす要因の分析

通気層の対流熱伝達率は、式(26)～式(42)に示したように、通気層の傾斜角、通気層の平均風速、通気層内の表面温度差、通気層の厚さが変動要因となる。パラメトリックスタディによる収束計算により求めた対流熱伝達率を目的変数、各要因を説明変数とした線形回帰分析により、各要因の影響の大きさを確認した。ここでは、冬期条件（外気温度10℃以下かつ室内温度20℃）および夏期条件（外気温度25℃以上かつ室内温度27度）の計算結果を抽出し、それぞれの条件において分析を行った。

通気層の対流熱伝達率と、各要因（外気温度、日射量、外装材の熱コンダクタンス、断熱層の熱コンダクタンス、通気層の厚さ、通気層の傾斜角、通気層の平均風速）との関係を図 7～図 13に示す。通気層の対流熱伝達率に最も影響するのは通気層の平均風速（図 13）であり、平均風速が早くなるほど対流熱伝達率が大きくなる。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 7　通気層の対流熱伝達率と外気温度の関係

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 8　通気層の対流熱伝達率と日射量の関係

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 9　通気層の対流熱伝達率と外装材の熱コンダクタンスの関係

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 10　通気層の対流熱伝達率と断熱層の熱コンダクタンスの関係

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 11　通気層の対流熱伝達率と通気層の厚さの関係

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 12　通気層の対流熱伝達率と通気層の傾斜角

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 13　通気層の対流熱伝達率と通気層の平均風速の関係

### 室内表面熱流への影響検証

通気層の対流熱伝達率を固定化による室内表面熱流への影響を確認するため、対流熱伝達率を固定した場合（以下、簡易計算とする）と、収束計算により求めた場合（以下、詳細計算とする）のそれぞれにおける室内表面熱流の計算結果を比較した。簡易計算に用いた対流熱伝達率は、表 3に示す通り、図 13の図中に示した線形回帰式により、通気層の平均風速の水準ごとに算出した固定値とした。なお、簡易計算では対流熱伝達率のみ固定しており、放射熱伝達率は詳細計算の場合と同様に収束計算により求めている。

室内表面熱流の比較結果を図 14に示す。夏期条件のときに詳細計算の室内表面熱流がやや大きくなることがあるが、大きく外れることはなく、概ね計算結果が一致することを確認した。

表 3　簡易計算に用いた通気層の対流熱伝達率（暫定値）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 計算条件 | 通気層の平均風速  （m/s） | 通気層の対流熱伝達率  （W/(m2・K)） |
| 冬期条件 | 0.0 | 2.30 |
|  | 0.5 | 4.34 |
|  | 1.0 | 6.38 |
| 夏期条件 | 0.0 | 1.84 |
|  | 0.5 | 3.90 |
|  | 1.0 | 5.95 |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 14　対流熱伝達率の計算方法による室内表面熱流の比較（横軸：簡易計算、縦軸：詳細計算）

## 通気層の放射熱伝達率の固定化方法の検証

### 通気層の放射熱伝達率に影響を及ぼす要因の分析

通気層の放射熱伝達率は、式(22)～式(25)に示したように、通気層に面する面の放射率および表面温度が変動要因となる。パラメトリックスタディによる収束計算により求めた放射熱伝達率を目的変数、各要因を説明変数とした線形回帰分析により、各要因の影響の大きさを確認した。ここでは、冬期条件（外気温度10℃以下かつ室内温度20℃）および夏期条件（外気温度25℃以上かつ室内温度27度）の計算結果を抽出し、それぞれの条件において分析を行った。

通気層の放射熱伝達率と、各要因（外気温度、日射量、外装材の熱コンダクタンス、断熱層の熱コンダクタンス、通気層に面する面の放射率）との関係を図 15～図 19に示す。なお、放射率については通気層に面する面1の放射率を固定しているため、図 19では通気層面の有効放射率（式(24)）との関係を確認した。通気層の放射熱伝達率に最も影響するのは通気層面の有効放射率であり、有効放射率が大きくなるほど放射熱伝達率が大きくなる。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 15　通気層の放射熱伝達率と外気温度の関係

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 16　通気層の放射熱伝達率と日射量の関係

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 17　通気層の放射熱伝達率と外装材の熱コンダクタンスの関係

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 18　通気層の放射熱伝達率と断熱層の熱コンダクタンスの関係

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 19　通気層の放射熱伝達率と通気層面の有効放射率

### 室内表面熱流への影響検証

通気層の放射熱伝達率を固定化による室内表面熱流への影響を確認するため、放射熱伝達率を固定した場合（以下、簡易計算とする）と、収束計算により求めた場合（以下、詳細計算とする）のそれぞれにおける室内表面熱流の計算結果を比較した。簡易計算に用いた放射熱伝達率は、表 4に示す通り、図 19の図中に示した線形回帰式により、通気層面の放射率の水準ごとに算出した固定値とした。なお、簡易計算では放射熱伝達率のみ固定しており、対流熱伝達率は詳細計算の場合と同様に収束計算により求めている。

室内表面熱流の比較結果を図 14に示す。冬期条件、夏期条件ともに、簡易計算の室内表面熱流は詳細計算の結果から大きく外れることはなく、概ね計算結果が一致することを確認した。

表 4　簡易計算に用いた通気層の放射熱伝達率（暫定値）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 計算条件 | 通気層に面する  面1の放射率（-） | 通気層に面する  面2の放射率（-） | 通気層の放射熱伝達率  （W/(m2・K)） |
| 冬期条件 | 0.9 | 0.1 | 0.51 |
|  | 0.5 | 2.53 |
|  | 0.9 | 4.55 |
| 夏期条件 | 0.9 | 0.1 | 0.66 |
|  | 0.5 | 3.31 |
|  | 0.9 | 5.95 |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) 冬期条件 | (b) 夏期条件 |

図 20　放射熱伝達率の計算方法による室内表面熱流の比較（横軸：簡易計算、縦軸：詳細計算）

# 簡易計算法の検討

前章における検討の結果、通気層の対流熱伝達率、放射熱伝達率を固定しても、室内表面熱流の計算結果には大きな影響がないことが確認できた。本章では、通気層の対流熱伝達率、放射熱伝達率を固定することを前提とした場合に、室内表面熱流を簡易的に求める方法を検討する。

## 簡易計算法案①：簡易版の行列式による方法

通気層の放射熱伝達率、対流熱伝達率が既知の値であるとすれば、通気層の平均温度および通気層に面する面の表面温度は、前述の式(21)よりも簡略化した行列式により求めることができ、かつ収束計算も不要となる。以下、本項で提案する簡易計算法を「簡易計算法案①」と呼称する。簡易計算法案①において想定する通気層を有する壁体の模式図を図 21に示す。



図 21　通気層を有する壁体の模式図（簡易計算法案①）

外気側の熱収支式は式(44)、室内側の熱収支式は式(45)で表される。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (44) |
|  | (45) |
|  | (46) |
|  | (47) |
|  | (48) |

一方、通気層の平均温度は、1.3に前述したように、式(49)により表される。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (49) |
|  | (50) |
|  | (14)  (再) |
|  | (7)  (再) |

ここで、

：相当外気温度（℃）

：外気温度（℃）

：通気層に面する面1の表面温度（℃）

：通気層に面する面2の表面温度（℃）

：通気層の平均温度（℃）

：通気層の入口の空気温度（℃）

：室内温度（℃）

：外気側表面に入射する日射量（W/m2）

：外気側表面日射吸収率（-）

：室外側の熱抵抗（(m2・K)/W）

：室内側の熱抵抗（(m2・K)/W）

：外装材の熱コンダクタンス（W/(m2・K)）

：断熱層の熱コンダクタンス（W/(m2・K)）

：室外側総合熱伝達率（W/(m2・K)）（= 25.0）

：室内側総合熱伝達率（W/(m2・K)）（= 9.0）

：通気層の対流熱伝達率（W/(m2・K)）

：通気層の放射熱伝達率（W/(m2・K)）

：通気層の長さ（m）

：通気層の幅（m）

：通気層の厚さ（m）

：通気層内の通気風量（m3/s）

：通気層の平均風速（m/s）

：空気の定圧比熱（J/(kg・K)）

：空気の密度（kg/ m3）

である。

式(44)、式(49)、式(45)を通気層に面する面1の表面温度、通気層に面する面2の表面温度、通気層の平均温度を未知数とする一次方程式に変形すると、式(51)のように行列式となる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (51) |

式(51)の左辺の3行×3列の行列を、3行×1列の行列を、右辺の3行×1列の行列をとおくと、式(51)は式(52)のように表すことができる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (52) |

よって、、、は、式(53)により求めることができる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (53) |

ここで、行列を式(54)、行列の逆行列を式(55)のように表す。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (54) |
|  | (55) |

式(53)を展開すると、、、はそれぞれ式(56)～式(58)で表すことができる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (56) |
|  | (57) |
|  | (58) |

行列の逆行列の各要素は、式(59)～式(68)で表される。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (59) |
|  | (60) |
|  | (61) |
|  | (62) |
|  | (63) |
|  | (64) |
|  | (65) |
|  | (66) |
|  | (67) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (68) |

室内表面熱流は、式(69)により求められる。式(69)に式(58)を代入すると、式(70)となる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (69) |
|  | (70) |
|  | () |
|  | () |

式(72)の第4項においての係数がゼロとなるので、式(72)は式(73)のように整理できる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | () |

## 簡易計算法案②：簡易式による方法

省エネルギー基準における外皮性能への評価への適用するためには、室内表面熱流を貫流分と日射取得分に分離することが望ましい。ここでは、通気層内の放射伝熱がないことを前提とした簡易式により、室内表面熱流を求める方法を検討する。以下、本項で提案する簡易計算法を「簡易計算法案②」と呼称する。簡易計算法案②において想定する通気層を有する壁体の模式図を図 22に示す。



図 22　通気層を有する壁体の模式図（簡易計算法案②）

|  |  |
| --- | --- |
|  | (74) |
|  | (46)  (再) |
|  | (7)  (再) |
|  | (75) |
|  | (76) |
|  | (77) |

ここで、

：相当外気温度（℃）

：外気温度（℃）

：通気層の代表空気温度（℃）

：室内温度（℃）

：外気側表面に入射する日射量（W/m2）

：外気側表面日射吸収率（-）

：通気層内の通気風量（m2/s）

：通気層の平均風速（m/s）

：通気層流れ方向の長さ（m）

：通気層の幅（m）

：通気層の厚さ（m）

：外気側表面から通気層までの熱貫流率（W/(m2・K)）

：室内側表面から通気層までの熱貫流率（W/(m2・K)）

：外装材の熱コンダクタンス（W/(m2・K)）

：断熱層の熱コンダクタンス（W/(m2・K)）

：室外側総合熱伝達率（W/(m2・K)）（= 25.0）

：室内側総合熱伝達率（W/(m2・K)）（= 9.0）

：通気層内の総合熱伝達率（W/(m2・K)）

：通気層の対流熱伝達率（W/(m2・K)）

：通気層の放射熱伝達率（W/(m2・K)）

：空気の定圧比熱（J/(kg・K)）

：空気の密度（kg/ m3）

である。

式(74)をのときにの境界条件で定積分すると、式(78)となる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (78) |
|  | (79) |
|  | (80) |

ここで、は通気層内の等価温度であり、式(81)により表される。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (81) |
|  | (82) |
|  | (83) |

ここで、

：通気を有する壁体の総合熱貫流率（W/(m2・K)）

である。

通気層の流れ方向の平均温度は、式(78)の0～の区間における平均温度となる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (84) |
|  | (85) |

ここで、

：通気層の長さ（m）

である。

室内表面熱流は式(86)により求められる。式(86)に式(84)を代入すると式(87)となり、これを貫流分と日射取得分に分けて整理すると、式(88)となる。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (86) |
|  | (87) |
|  | (88) |

## 簡易計算法による室内表面熱流の検証

簡易計算法案①、簡易計算法案②の計算精度を確認するため、詳細計算による室内表面熱流の結果と比較した。比較結果を図 23に示す。簡易計算法案①において通気層面の放射率によりやや傾向が異なることが確認できたため、図 23では通気層に面する面2の放射率別にプロットしている。計算に使用した各パラメータの水準は表 2に示したものと同様であり、簡易計算法案①、簡易計算法案②では、対流熱伝達率、放射熱伝達率それぞれ表 3、表 4に示した値で固定した。

簡易計算法案①では、放射率が小さいときに簡易計算法による室内表面熱流がやや小さい結果となることがあるが、概ね精度よく計算できている。簡易計算法案②ではばらつきが大きくなっており、計算精度はそれほど高くないことが確認できる。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 簡易計算法案① | 簡易計算法案② |

図 23　簡易計算法による室内表面熱流の比較結果（横軸：簡易計算、縦軸：詳細計算）

# 簡易計算法における境界条件の検討

簡易計算法の提案にあたり、通気層の対流熱伝達率、放射熱伝達率が固定化できることを確認し、簡易計算法の検証では両者の暫定値を使用した。省エネルギー基準での評価への適用に際し、通気層の対流熱伝達率、通気層の放射熱伝達率はそれぞれ地域区分別の外界条件等に基づいた適切な境界条件を設定する必要がある。本章では、各伝達率の境界条件について検討する。

## 対流熱伝達率の境界条件

通気層の対流熱伝達率は、式(26)～式(42)に示したように、通気層の傾斜角、通気層の平均風速、通気層内の表面温度差、通気層の厚さが変動要因となる。このうち、通気層の傾斜角、通気層の厚さは通気層の仕様であるので、入力条件として与えられることを想定する。

通気層の平均風速は、通気層内の密度差、摩擦損失、通気層入口・出口の摩擦損失などにより変動するが、これらの要因の推定は非常に困難であるので、実測結果に基づいて設定することが望ましい。通気層を有する壁体内の通気風速の実測結果には、梅野ら4)の報告がある。

通気層内の表面温度差は、地域区分別の気象データに基づいた値を設定することを検討する。暖房期間のない8地域への適用も考慮し、冬期条件、夏期条件それぞれの値を検討するが、両者の差が小さい場合は1つの値とすることも考えられる。

## 放射熱伝達率の境界条件

通気層の放射熱伝達率は、式(22)～式(25)に示したように、通気層に面する面の放射率および表面温度が変動要因となる。このうち、通気層に面する面の放射率は通気層の仕様であるので、入力条件として与えられることを想定する。

通気層内の表面温度は、対流熱伝達率と同様に、地域区分別の気象データに基づいて、冬期条件、夏期条件それぞれの値を設定することを検討する。

# 参考文献

1. 赤坂裕、武田和大：通気層を有する外壁，屋根の遮熱・断熱効果の計算法、日本建築学会環境系論文集、2005年9月
2. ISO 15099:2003 Thermal performance of windows, doors and shading devices — Detailed calculations
3. 田中俊六、武田仁、岩田利枝、土屋喬雄、寺尾道仁：最新 建築環境工学[改訂3版]、井上書院、2008年9月
4. 梅野徹也、鉾井修一、齋藤宏昭、本間義規：壁体内通気層における防露性能の実態に関する研究 実験住宅における通気量の実態把握、日本建築学会環境系論文集、2013年12月