

CFD を用いた居室内における
気流に関する研究

5106074 藤川明代

目次

第1章 序

- 1.1 研究背景および目的
- 1.2 CFD の目的

第2章 火災と火災燃焼について

- 2.1 本章の目的
- 2.2 火災の定義
- 2.3 燃焼現象の定義
 - 2.3-1 燃焼に必要な要素
- 2.4 火災警報器について
 - 2.4-1 本章の目的
 - 2.4-2 火災報知器の種類
- 2.5 設置位置について

第3章 数値解析に必要な知識

- 3.1 ニュートンの法則
- 3.2 流体力学
 - 3.2-1 流れの特性
 - 3.2-2 ベルヌーイの方程式
 - 3.2-3 レイノルズ数
- 3.3 数値計算で扱う伝熱について
 - 3.3-1 伝熱とはなにか
 - 3.3-2 熱伝導
 - 3.3-3 対流熱伝達
 - 3.3-4 固体表面への熱伝達
- 3.4 輻射熱伝熱
 - 3.4-1 熱輻射の性質
- 3.5 FLUENT 内の伝熱の扱いについて
 - 3.5-1 伝熱のモデル化
 - 3.5-2 対流および伝導熱のモデル化
- 3.6 伝熱理論

第4章 解析概要

- 4.1 解析対象
- 4.2 ルームコーナー試験の実測値
- 4.3 解析対象
- 4.4 計算条件
- 4.5 輻射の設定について
 - 4.5-1 DTRM のおける方程式
 - 4.5-2 DTRM のおける境界条件の扱い
 - 4.5-2 DTRM のおける流入口と流出口の境界条件の扱い
- 4.6 居室条件

第5章 計算結果

- 5.1 温度について
 - 5.1-1 データの分析
 - 5.1-2 温度コンタ図
 - 5.1-2(1) Case1
 - 5.1-2(2) Case2
 - 5.1-2(3) Case3
- 5.2 気流パターンについて
- 5.3 3 ケースの比較
- 5.4 火災報知機の設置場所について

第6章 総括

- 6.1 本論文のまとめ
- 6.2 今後の課題

平成 21 年度卒業論文

CFD を用いた居室内における熱気流に関する研究

指導教官 辻本 誠
東京理科大学 工学部 第 2 部 建築学科
辻本研究室 5106074 藤川 明代

第1章 序

1.1 研究背景と目的

火災は、過去 10 年間に於いて出火件数(件)・死者数(人)・建築焼失面積(m²)・損害額(百万円)に於いて大きな変化はない。しかし平成 20 年度の消防白書によると「平成 19 年中の出火件数は昭和 42 年以降最少となった前年度に比べ、1306 件(2.5%)増加し、5 万 4582 件となった。一方、平成 19 年中の火災による死者数は、前年に比べ 62 人(3.0%)減少し 2005 人となったものの、火災による死者数は平成 9 年に 2095 人を数えて以降 11 年間 2000 人を超えている。」¹⁾とある。死者数は大きな変化はないものの 2000 人を超え多数の被害が出ている。また、火災状況に於いては建物被害が一番多く次に車両・林野と続く。また火災に於ける死亡者は、火気を取り扱うことの多い冬から春にかけてと就寝時間帯である 22 時から翌朝の 6 時までが多い。統計学上、出火件数の多い建物火災に於いてはデータが集まりやすく分析しやすい。しかし、飛行機・地下・工場・病院・大形のショッピングモールなどは出火件数が少なくデータがあまりないように感じる。

近年、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics,以下 CFD)の研究開発は活発である。火災研究の分野でも火災時の燃焼で生じる熱気流が再現されている。実際の火災のデータと整合性を取ることが出来れば費用と時間が短縮できる。また模型実験よりも手軽に実験が行えるという利点が生まれると考えた。

今回の目的は、数値解析ソフトが扱えるようになること、火災時を想定した数値解析による熱気流がどのようになっているのかを確認することである。数値計算の流れをよく表現することが出来れば火災報知機(熱感知・煙感知)をどのような場所に設置すると効率よく熱や煙を感知し、かつ迅速に避難が行えるのかを検討することができる。

1.2 CFD の目的

発火源をごみ箱とし、居室にはテーブル・カーテン・机・ソファ・パソコン・観葉植物等がある。このルームコーナー試験で行われた一般的な燃焼を『人の意図に反して発生し若しくは拡大し、または放火により発生して消火の必要がある燃焼現象であって、これを消火するために消火施設又はこれと同程度の効果のあるもの…』³⁾とし上記の二重線を燃焼現象と定義する、その現象をモデル化して CFD の境界条件とする。

第2章 火災と火災燃焼について

2.1 本章の目的

燃焼と火災のシミュレーションを行うにあたり、燃焼と火災とはどのような現象が起こっているのかを学ぶ。

2.2 火災の定義

火災報告取扱要領ハンドブックに「火災」の定義とは、『人の意図に反して発生し若しくは拡大し、または放火により発生して消火の必要がある燃焼現象であって、これを消火するために消火施設又はこれと同程度の効果のあるものの利用を必要とするもの、又は人の意図に反して発生し若しくは拡大した爆発現象をいう。』とある⁴⁾。

2.3 燃焼現象の定義

「燃焼学の分野での燃焼は、ものが燃えることである。ものが燃えるという現象は、強い発熱反応が高速で起きる現象であり、一般的に発光を伴う。」と「火災と消火の理論と応用」の専門書に書かれている¹⁾。つまり光を伴う酸化現象が起こることを燃焼反応という。燃焼過程が多様なため、燃焼現象も多様である。(図 2.1)

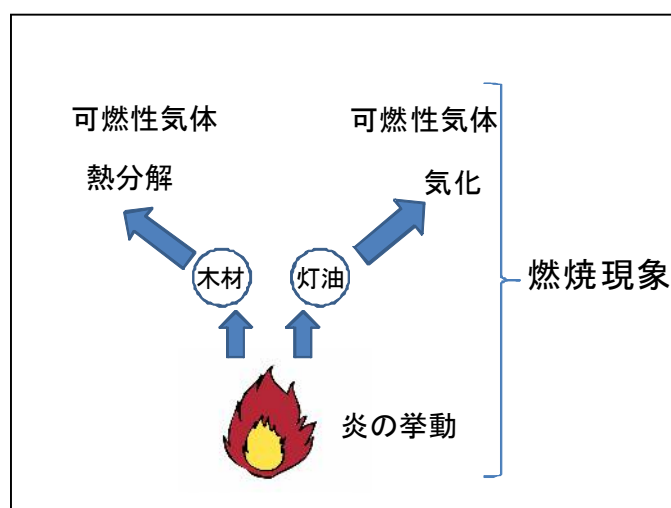


図 2.1 燃焼現象

2.3-1 燃焼に必要な要素

燃焼がおこると一瞬で終わるわけではなく、燃焼が継続する。その際に必要なものとして可燃物、酸化剤、高温熱源がある。可燃物とは、気体・固体・液体があり、一般的に酸化するものである。酸化剤とは、酸素そのものもしくは過酸化マンガンのような物質で酸素が欠乏しているところでは燃焼は起こらない。高温熱源とは、熱のことである。炎や摩擦熱などがある。

2.4 火災警報器について

2.4-1 本章の目的

本研究では、火災報知器の位置について検討する。その為、火災報知器の種類、設置場所等を知る必要がると考える。また、近年火災報知器も進化している。そのためどのようなものがあるのか知っておく必要がある。

2.4-2 火災報知器の種類

(1) 熱感知器

熱感知器には熱の検出方式によって、定温式と差動式がある。定温式の熱感知器には、火災の熱により一定の温度以上になると作動するもので、スポット型と感知線型がある。差動式にはスポット型と分布型がある。

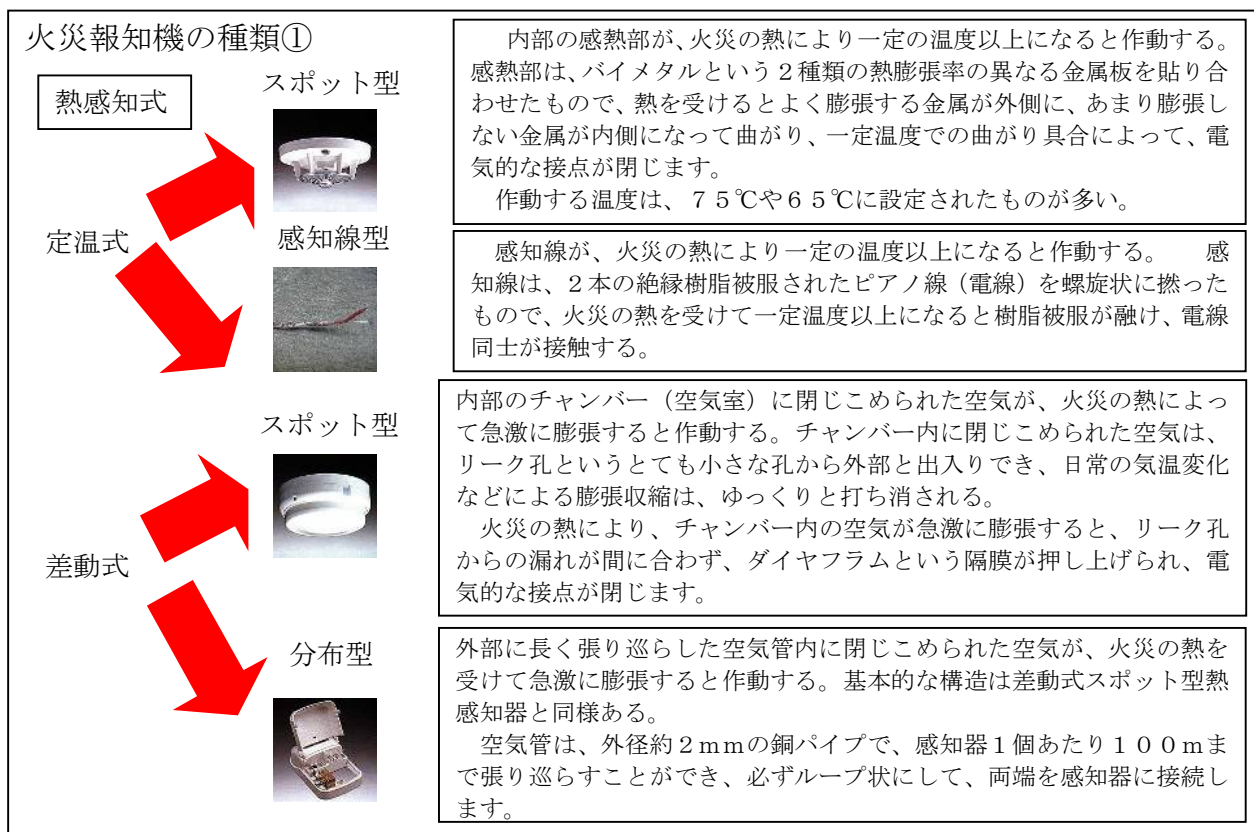


図 2.3(1) 火災警報器の種類

(2) 煙感知器

煙感知器には、煙の検出方式によって、イオン化式と光電式がある。イオン化式の煙感知器は、火災の煙による空気の電離状態の変化を検出するもので、スポット型しかない。光電式の煙感知器は、火災の煙による光の乱反射または遮光を検出するもので、スポット型と分離型がある。熱感知式よりも普及しており、こちらが主流である。

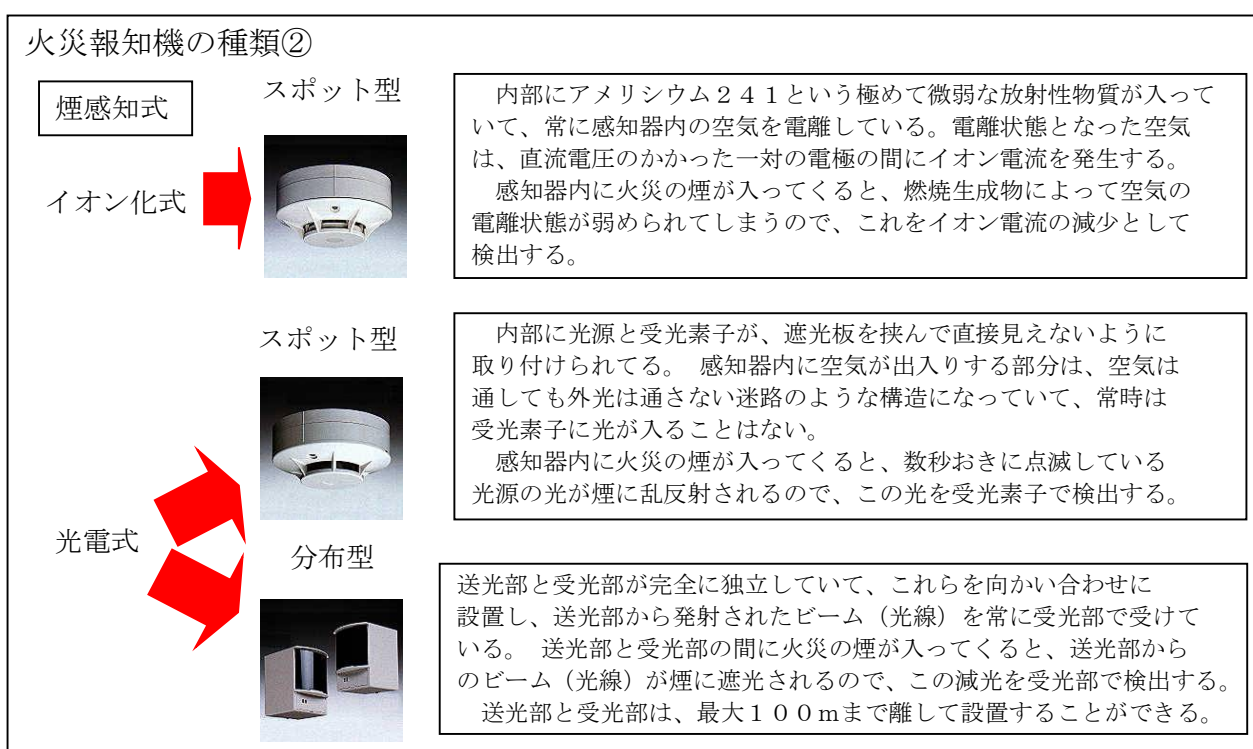


図 2.3(2) 火災警報器の種類

(3) 炎感知器

炎感知器は、検出する光の種類によって、赤外線式と紫外線式がある。赤外線式の炎感知器は、炎から発生する赤外線を検出する。紫外線式の炎感知器は、炎から発生する紫外線を検出する。

火災報知機の種類③

炎感知式

赤外線式



炎から発生する光のうち、炭酸ガス（CO₂）から共鳴放射される、波長4.4 μm付近の赤外線を検出する。炎から発生する赤外線は、人工照明や高温物体から放射される赤外線のように安定せず、ちらつく（ゆらぐ）特徴があるので、火災との区別利用されている。

太陽は実際に燃えていて、ちらつく赤外線が含まれているので、直射日光の差し込まない場所に設置される。

紫外線式



炎から発生する光のうち、波長0.2 μm付近の紫外線を検出する。

検出素子には、UVトロンと呼ばれる外部光電効果を利用した放電管が使用されていて、受光した紫外線をパルスとしてカウントし、一定値以上になると火災と断定する。

紫外線は太陽光だけでなく、ハロゲン灯や水銀灯などの照明光、アーク溶接や電車の架線から発生する青白い光などにも強く含まれているので、これらの届かない場所に設置される。

図 2.3(3) 火災警報器の種類③

2.5 設置位置について

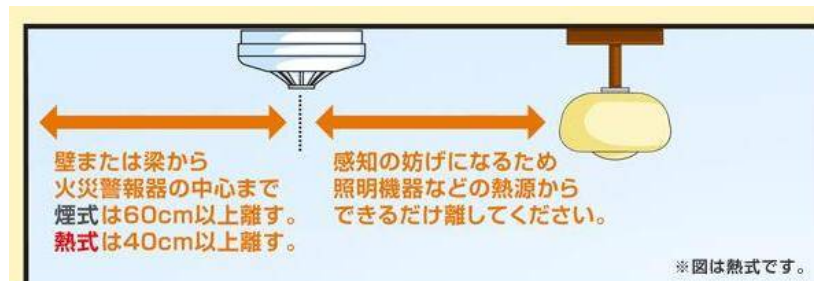
火災報知器の設置位置には法律上の決まりがある。それは総務省により決められており、法律として定められている。

位置

天井面に取り付ける場合

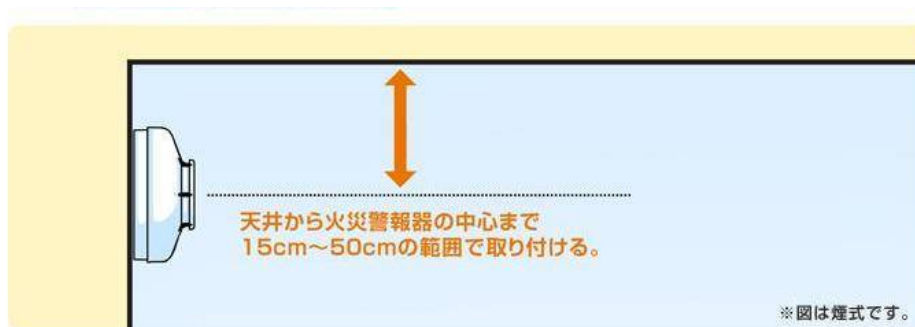
壁またははりから 60 cm以上離れた天井の屋内に面する部分

(平成 16 年総務省令第 138 号第 7 条第 2 号イ)



壁面に取り付ける場合

天井から下方 15 cm 以上 50 cm 以内の位置にある壁の屋内に面する部分
(平成 16 年総務省令第 138 号第 7 条第 2 号ロ)



換気口など吹き出し口からの位置

換気口などの空気吹き出し口から 1.5m 以上離れた位置
(平成 16 年総務省令第 138 号第 7 条第 3 号)



第3章 数値解析に必要な知識(基本方程式)

3.1 ニュートンの法則

ニュートンの運動の第1法則は慣性の法則で、物体は正味の外力(合力)を受けない限り、静止している物体は静止し続け、運動している物体は一定の速度の運動(等速直線運動)をしているとある。

第2法則は運動方程式を示したものである。第1法則は物体に作用する外力の合力がゼロであれば、その物体は停止したままであるかあるいは一定の速さで直線運動するかのいずれかであると言っている。しかし第2法則は物体にたいする合力がゼロでないときにその物体に何が起きているのかを知ることができる。これは物体の加速度はそれに作用する合力に比例し、その質量に反比例するというものである。(式3・1)

$$\Sigma \mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (3 \cdot 1)$$

第3法則は作用・反作用の法則である。これは2つの物体が相互作用するとき、物体1が物体2に及ぼす力 \mathbf{F} が、物体2が物体1に対して及ぼす力 \mathbf{F} と大きさが等しく方向が反対向きであるということをいいあらわしたものである。(式3・2)

$$\mathbf{F} = -\mathbf{F} \quad (3 \cdot 2)$$

3.2 流体力学

流体力学は運動中の流体のことを表している。流体の運動を記述するにあたり、流体が小さな要素の集団(これを流体粒子あるいは粒子と呼んでいる)であると考えて、粒子の運動を時間の関数として調べる方法がある。

3.2-1 流れの特性

流体が運動しているとき、その流れは2つの主なタイプのいずれかに特定できると言われている。流れている各流体粒子が時間に変わらない滑らかな経路をたどるとき、流れは定常流である。粒子の経路が相互に交差することはない。したがって定常流では任意の点で流体の速度が時間的に一定である。また速度の他に密度や圧力も一定である。流速がある臨界的な速さを超えると、流れは非定常的な乱流となる。乱流は不規則な流れであり、小さな渦巻き状の領域があることが特徴である。一例として溪流は岩石その他の障害物がある急流域で乱流となり、その結果泡立った白濁した水のような急流になる。

通常、流体が流れるときは隣接して流れる流体との間に摩擦が生じる。それ

が層の相対運動に対する抵抗となって現れる。この摩擦抵抗の大きさを表すのに粘性という言葉が使われる。流体の運動エネルギーの一部が粘性により熱エネルギーに変換される。また、取り扱う流体を簡単化するためにいくつかの定義がある。(表 3.1)

表 3.1 4つの理想気体

1.非粘性流体：内部摩擦が無視できる流体。非粘性流体中を運動する物体は減速の原因となる粘性力を受けない。
2.定常流：各点の流体の速度が時間的に一定な流体である。
3.非圧縮性流体：流体の密度が時間的に一定な流れを持つ流体である。それは空間的に密度が変わらない結果である。
4.非回転流：任意の点の周りの流体の角運動量がゼロである流体の流れである。流体中の任意の場所に置いた小さな物体がその質量中心のまわりに回転しないなら、流れは非回転流である。(物体が回転するときの流れは回転流である。乱流は回転流の例えである)

3.2-2 ベルヌーイの方程式

断面および高さが増えるパイプ中の流体が運動するとき、流体の圧力はパイプに沿って変化する。1738年にスイスの物理学者ダニエル・ベルヌーイ(1700-1782)は、はじめて流体の圧力を流体の速さおよび高さに関係付ける式で導いたとされる。これは理想流体にエネルギー保存則を適用した式である。

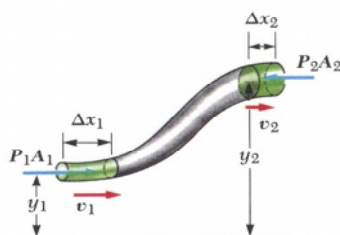


図 3.1 定常流で絞りのあるパイプを流れる非圧縮性流体

流体が非圧縮的、かつ非粘性であり流れが非回転的な定常流であると仮定する。図 3.1 に示すように時間が Δt の間に日逸様なパイプを通過する流れを考える。流体の下端にかかる力は P_1A_1 である。 P_1 は 1 点における圧力である。このときこの力がする仕事は下方の影をつけた領域の体積を ΔV とすると式 3.3 である。同様に、時間 Δt の間に上端で流体になされたしごとは式 3.4 である。

$$W_1 = F_1 \Delta x_1 = P_1 A_1 \Delta x_1 = P_1 \Delta V \quad (3.3)$$

$$W_2 = -P_2 A_2 \Delta x_2 = -P_2 \Delta V \quad (3.4)$$

時間 Δt の間に点1を通過する体積は、同じ時間の間を通過する体積に等しいということである。したがって、時間 Δt にこれらの力がした仕事の正味は式3.5である。

$$W = (P_1 - P_2) \Delta V \quad (3.5)$$

この仕事の一部は流体の運動エネルギーに変化し、一部は重力ポテンシャルエネルギーに変化している。時間 Δt の間にパイプを通過する質量が Δm であれば、その運動エネルギーの変化は、式3.6のようになる。

$$\Delta K = \frac{1}{2}(\Delta m)v_2^2 - \frac{1}{2}(\Delta m)v_1^2 \quad (3.6)$$

ポテンシャルエネルギーの変化は式3.7である。

$$\Delta U = (\Delta m)gy_2 - (\Delta m)gy_1 \quad (3.7)$$

この体積の流体に対して、 $W = \Delta K + \Delta U$ の形の仕事はエネルギーの定理を使用できることから、その結果式3.8のようになる。

$$(P_1 - P_2)\Delta V = \frac{1}{2}(\Delta m)v_2^2 - \frac{1}{2}(\Delta m)v_1^2 + (\Delta m)gy_2 - (\Delta m)gy_1 \quad (3.8)$$

式3.8を ΔV で割り、 $\rho = \Delta m/\Delta V$ であることを代入すると式3.9となる。

$$(P_1 - P_2) = \frac{1}{2}\rho v_2^2 - \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gy_2 - \rho gy_1 \quad (3.9)$$

項を整理すると式3.10のような結果が得られる。

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gy_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gy_2 \quad (3.10)$$

これはベルヌーイの定理で『非圧縮性の定常流状態で運動エネルギー・圧力エネルギー・位置エネルギーの和は、不変である』という定理である。(式 3.11)

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gy = \text{一定} \quad (3.11)$$

3.2-3 レイノルズ数

レイノルズ数(Re)とは、流体に作用する慣性力と粘性力との比である。また流体の流れが層流か乱流かを判定するのにも用いる。

表 3.2 レイノルズ数

Re < 2300	層流
Re ≤ 2300 で Re < 4000	臨界域
Re ≤ 4000	乱流

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (3.12)$$

V : 流速(m/s)

D : 管径(m)

ν : 動粘性係数(m²/s)

→動粘性係数とは、粘性係数(粘りけμ)を流体の密度(ρ)で割ったもの。

3.3 数値計算で扱う伝熱について

3.3-1 伝熱とはなにか

物質間・領域間の熱移動はこと広く一般に伝熱と呼び、対流・放射・伝導の3形態により成り立つ。対流は、煙やガス等の流体の移動に伴って生ずる熱移動である。放射は、固体表面やガス魂などから射出される電磁波による熱移動である。熱伝導は、固体内の分子運動が伝播する結果、高温部から低温部へと熱が移動する現象であるといわれている。

3.3-2 熱伝導

熱伝導は、火災現象と密接な関わりを持つ。例えば、火災内部において発生した熱が、伝導・対流・放射により移動した結果として温度分布が決定され、それに応じて燃料表面へ熱がフィードバックされる。その結果、燃料の熱分解がおり燃焼

が持続するのである。

3.3-3 対流熱伝達

対流熱伝達とは、空気や煙などの流体の移動に伴って生じる熱移動である。その伝熱量を考える際に、移流による熱移動と固体表面への熱伝達との2つに分けて考える。

3.3-4 固体表面への熱伝達

図 2.4 に示すように、固体表面近傍に流体には、速度および温度が急激に変化する部分がある。これを境界層と呼ぶ。温度と速度の分布形について厳密には、温度分布が生じる部分を温度境界層、速度分布が生じる部分を速度境界層と呼び、両者を区別して扱うが、多くの場合、速度境界層と温度境界層の厚さはほぼ同じである。

液体と物体の表面の伝熱量が単位時間当たり単位面積当たり $q(\text{W}/\text{m}^2)$ であるとき、これを流体と物体表面との温度差 $T_a - T_s(\text{K})$ で割った値

$$h = \frac{q}{T_a - T_s} \quad (3 \cdot 13)$$

を対流熱伝導率($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) という。対流熱伝導率は流体の代表速度や乱れの強さならびに温度範囲、物体の表面形状などに依存する値である。

3.4 輻射熱伝熱

輻射(Radiation)であり、電磁波(Electromagnetic wave)であり光(Light)である。輻射は電磁波の輸送を介在する伝熱機構である。輻射は電磁波によるエネルギーの移動であり、熱源と熱を受ける者の間に熱を運搬する媒体を要しない点で対流や熱伝導と異なっている。例えば、たき火をしていると木が燃えて熱を出す。熱は空間へ放射という形で伝わる。熱が伝わった空気は周囲にいる人々へ熱を輸送する。輸送された温かい空気は周囲の人々へ吸収される。このように熱が人に伝わるまでには段階を踏んでいる。輻射熱は絶対温度の4乗に比例するので、建築火災においては、温度が高くなるほど、熱移動における輻射熱伝達の比重が高まり、火災性状の支配要因の一つとなる。また、輻射熱伝達は着火や延焼拡大の機構にも大きく関係する。

3.4-1 熱輻射の性質

すべての物質は、その温度に応じて常に熱エネルギーの輻射を行っている。これは物質を構成する分子や原子の一部が励起状態となり、その状態から自発的により安定的な低いエネルギー状態に戻る際にエネルギーを電磁波の形で放出するためである。

3.5 FLUENT内の伝熱の扱いについて

3.5-1 伝熱のモデル化

伝熱は、伝導・対流・輻射という3種類の基本形態によって生じる。物理モデルのうち、伝導と対流の両方あるいはいずれか一方を含むものが最も単純といわれている。しかし、浮力支配すなわち自然対流、あるいは輻射が含まれる場合には複雑なモデルとなる。今回使用する FLUENT では、対象とする問題に応じて指定された伝熱形態を表現する、さまざまなエネルギー方程式の解法が組み込まれている。

3.5-2 対流および伝導熱のモデル化

FLUENT では、対流領域と固体領域のいずれかまたは両方における伝熱をモデルに組み込むことができると書かれている。しかたがって FLUENT では、流体内の熱的な混合から複合個体材料内の伝導まで、広範囲な問題を扱うことができる。

3.6 伝熱理論

エネルギー方程式

FLUENT では、エネルギー方程式を下記の形式で計算している。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left[k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \vec{v}) \right] + S_h \quad (3 \cdot 14)$$

ここで、 k_{eff} は有効熱伝導(= $k + k_t$, k_t は乱流熱伝導率で乱流モデルに応じて定義)、 \vec{j}_j は化学種 j の拡散流束である。式(5・1)の右辺の第3項までは、それぞれ伝導・化学種の拡散、粘性散逸によるエネルギー輸送を表している。また、 S_h には化学反応による生成熱やユーザーが定義した体積熱源を含む熱源が含まれていると記載してある。式 3.14 において、

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (3 \cdot 15)$$

ここで、 h は顕エンタルピーで、理想気体に対しては

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (3 \cdot 16)$$

と定義され、非圧縮性の流れに対しては

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (3 \cdot 17)$$

とされる。式 3.15、式 3.16 において Y_j は化学種 j の質分率、 h_j は次式で表わされる。

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j} dT \quad (3 \cdot 18)$$

ここで、 T_{ref} は 298.15K である。と記載されている。

FLUENT 6.3 ユーザーズガイドより

第4章 解析概要

4.1 解析対象

メッシュ制作ソフト Gambit(Gambit Ver2.4.6)を使い、三次元非定常の計算が可能である解析ソフト Fluent(Fluent Inc. Ver6.3.26)により行う。また温度設定の境界条件には図2のルームコーナー試験の実測値を使用する。

4.2 ルームコーナー試験の実測値

発熱源をごみ箱とし、居室内の燃焼現象の実験をした結果である。実験では発熱速度と高さごとの温度が測定され解析ソフト Fluent にはそのまま使用することができない。そのため下記の式(4.1)を使用し、発熱速度を熱流束に変換して解析ソフト Fluent に入力する。図4.1に示したように実験開始6分後に熱流束が急激に上昇している。よって数値解析においても6分程度で温度上昇するのではないかと考える。

$$\text{発熱速度 (W)} \div \text{発熱面積 (m}^2\text{)} = \text{熱流束 (W/ m}^2\text{)} \quad (4.1)$$

表 4.1 発熱速度と時間

時間(分)	発熱速度(kW)
1	1.42683
2	19.90716
3	49.86763
4	53.91313
5	88.93032
6	154.02681
7	724.21790
8	1332.49146

表 4.2 熱流束と時間

時間(分)	熱流束(W/m ²)
1	467
2	6635
3	16623
4	17971
5	29643
6	51342
7	241406
8	444164



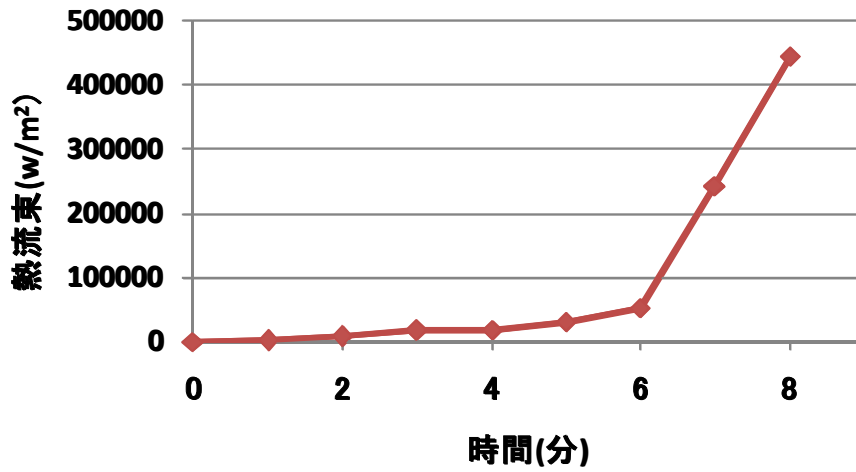


図 4.1 熱流束と時間の関係

4.3 解析対象

解析対象の居室は 4000(mm)×5000(mm)×3000(mm)とする。発熱源 3(m²)から発熱させ、居室内の対流を確認する。また開口は排気口 300(mm)×300(mm)と引き戸 2000(mm)×1000(mm)とする。(図 4.2～4.4)

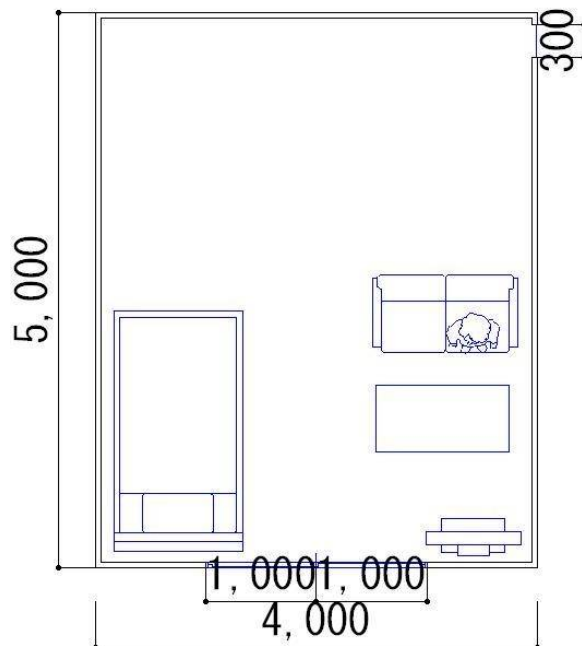


図 4.2 居室平面

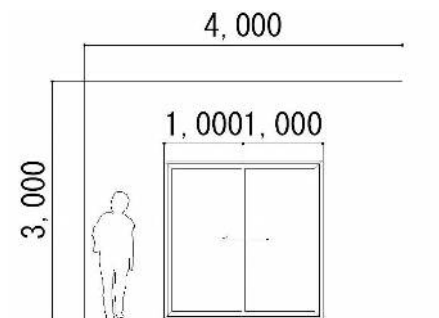


図 4.3 居室立面(引き戸)

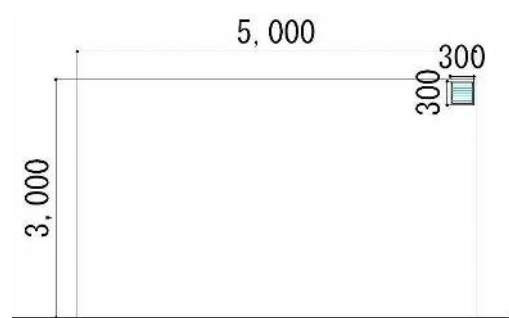


図 4.4 居室立面(排気口)

4.4 計算条件

計算に用いたパラメーターを(表 4.3)に示す。メッシュ制作ソフト **Gambit** で制作したメッシュのレイアウトを図 4.5 に示す。総メッシュ数は 7411 である。計算条件は非定常計算とし、エネルギー収支を考慮する。発熱源の温度設定は実験の実測値の発熱速度を熱流束に変換しソフトに入力する。1 分ごとに熱流束を変化させる。

重力加速度は -9.8m/s^2 とする。計算間隔は 1step を 0.5 とする。それを 8 分間 (480 秒) 行う。乱流モデルは **k- ϵ** モデルを用いた。居室内の空気は理想気体とし、引き戸は **inlet**、排気口は **outlet** とした。計算は図 6.6 に示すように熱源の位置を変えて 3 ケース行った。Case1 は引き戸に近く、Case3 は排気口に近い。Case2 は引き戸にも排気口にも遠い。熱源の位置が変わることにより周りの引き戸や排気口の位置とどのような関係があるのかを確認する。

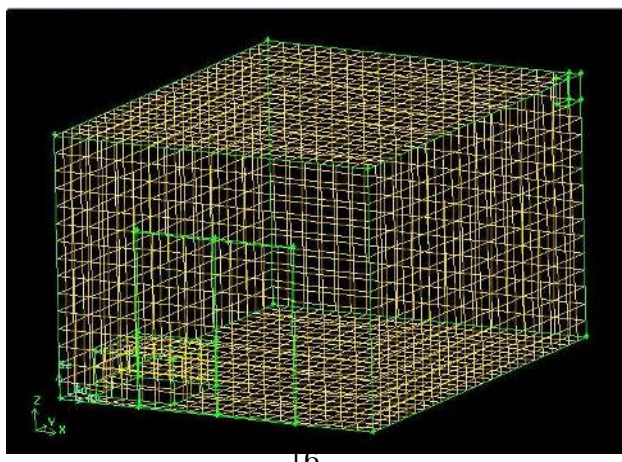


図 4.5 メッシュレイアウト

表 4.3 境界条件

解析領域	4000(mm) × 5000(mm) × 3000(mm)																		
開口	排気口 300(mm) × 300(mm) 引き戸 1000(mm) × 2000(mm)																		
メッシュサイズ	200(mm) × 200(mm) × 200(mm) (総メッシュ数 7411)																		
熱源サイズ	3(m ²)																		
発熱速度	<table border="1"> <thead> <tr> <th>時間(分)</th> <th>熱流束(W/m²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>467</td></tr> <tr><td>2</td><td>6635</td></tr> <tr><td>3</td><td>16623</td></tr> <tr><td>4</td><td>17971</td></tr> <tr><td>5</td><td>29643</td></tr> <tr><td>6</td><td>51342</td></tr> <tr><td>7</td><td>241406</td></tr> <tr><td>8</td><td>444164</td></tr> </tbody> </table>	時間(分)	熱流束(W/m ²)	1	467	2	6635	3	16623	4	17971	5	29643	6	51342	7	241406	8	444164
	時間(分)	熱流束(W/m ²)																	
	1	467																	
	2	6635																	
	3	16623																	
	4	17971																	
	5	29643																	
	6	51342																	
7	241406																		
8	444164																		
重力加速度	-9.8m/s ²																		
計算条件	非定常計算																		
計算間隔	1step→0.5秒																		
	(120×0.5=60秒, 1分×8回=480秒)																		
境界条件	熱源(黄) wall																		
	排気口 pressure outlet→17°C 風速 0m/s																		
	引き戸 pressure inlet→17°C 風速 0m/s																		
	壁(コンクリート) wall																		
乱流モデル	k-εモデル																		

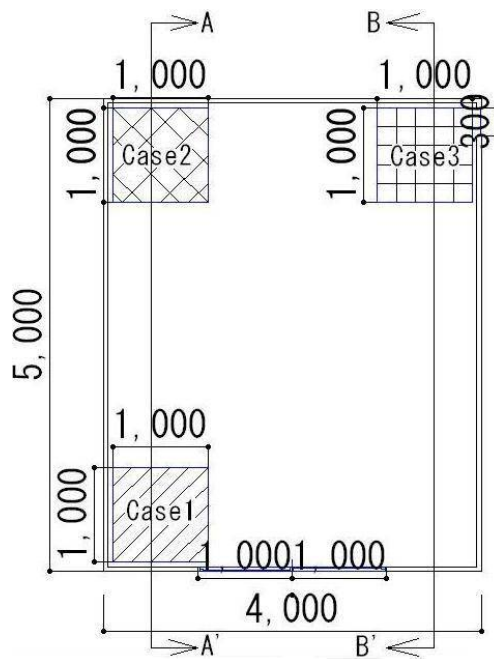


図 4.6 居室の切断面と寸法

4.5 輻射の設定について

今回の輻射の設定には DT(Discrete Transfer)輻射モデルにて行った。DTRM の特徴は、境界の各フェースからある立体角範囲内への放射・反射される輻射の輸送を 1 本の例で代表させることが、基礎となる近似であると書かれている。下記において DTRM の方程式を示す。

4.5-1 DTRM のおける方程式

経路 ds に沿った輻射強度の変化に関する方程式は式 4.2 によって表わされる。

$$\frac{dI}{ds} + aI = \frac{a\sigma T^4}{\pi} \quad (4 \cdot 2)$$

ここで、

a = 期待の吸収係数

I = 輻射強度

T = 気体の局所温度

σ = ステファン・ボルツマン定数($5.672 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

また、屈折率は 1 と仮定している。DTRM では、境界面中心を起点として配置された複数本のレイに沿って式 4.3 が積分される。A がレイに沿ってセル内で一定である場合、セル出口にて $I(s)$ は次のように計算される。

$$I(s) = \frac{a\sigma T^4}{\pi} (1 - e^{-as}) + I_0 e^{-as} \quad (4 \cdot 3)$$

ここで I_0 は注目セル入口の開始点における輻射強度で、対応する境界条件によって決定される。その上で、液体のコントロールボリューム(セル)を通して追跡される各レイの経路に沿った輻射強度の変化を合計することによって、輻射による液体中のエネルギーソース項が算出される。

4.5-2 DTRM のおける境界条件の扱い

壁の表面の一点に向かう方向の輻射強度を式 4.4 のように積分すると、入射輻射熱流束 q_{in} が求められる。

$$q_{in} = \int_{\vec{s} \cdot \vec{n} > 0} I_{in} \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega \quad (4 \cdot 4)$$

ここで、 Ω は立体角、 $I_{i n}$ は入射レイの輻射強度、 \vec{s} はレイの方向ベクトル、 \vec{n} は領域外の法線ベクトルである。積分範囲は半球方向である。したがって、正面からの正味輻射熱流束 q_{out} は、 $q_{i n}$ の反射部分の表面の放射能との和として計算される。

$$q_{out} = (1 - \epsilon_{\omega})q_{i n} + \epsilon_{\omega}\sigma T_{\omega}^4 \quad (4 \cdot 5)$$

ここで、 T_{ω} は表面上の点 P での表面温度、 ϵ_{ω} は境界条件として入力された壁面の放射率である。FLUENT では、壁面の表面温度の予測において輻射熱流束(式 4・5)が組み込まれている。式 4・5 はまた、次式の通り、点 P から射出するレイの輻射強度 I_0 に対して表面の境界条件を与える。

$$I_0 = \frac{q_{out}}{\pi} \quad (4 \cdot 6)$$

4.5-2 DTRM のおける流入口と流出口の境界条件の扱い

流れの入口と出口における正味輻射熱流束は、上記の壁面の場合と同様の方法で計算される。FLUENT では、この境界の扱いを再定義しない限り、すべての流入口と流出口の放射率 1.0(黒体吸収)と仮定している。

FLUENT 6.3 ユーザーズガイドより

4.6 居室条件

以下のように3ケース示す。下記の図は上から見た透視図である。

Case1

熱源が開口(窓)のそばにある。

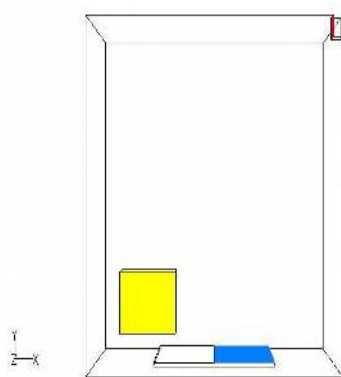


図 4.7 case1

Case2

熱源が居室内の排気口、開口ともに近くにはない。

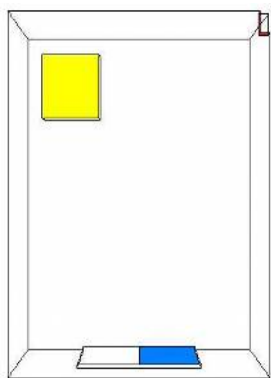


図 4.8 case2

Case3

熱源が排気口のそばにある。

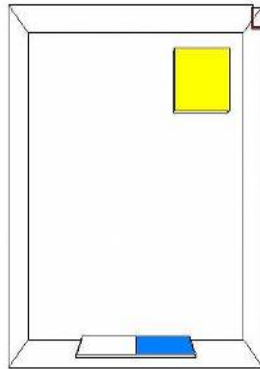


図 4.9 case3

第5 計算結果

5.1 温度について 5.1-1 データの分析

データを分析すると(図 5.1)、どこの場所で熱を発生させても 3 ケースともほぼ同じような傾きで平均温度が上昇し、初めに仮定していたように 6 分程度からの傾きが少し大きくなっている。

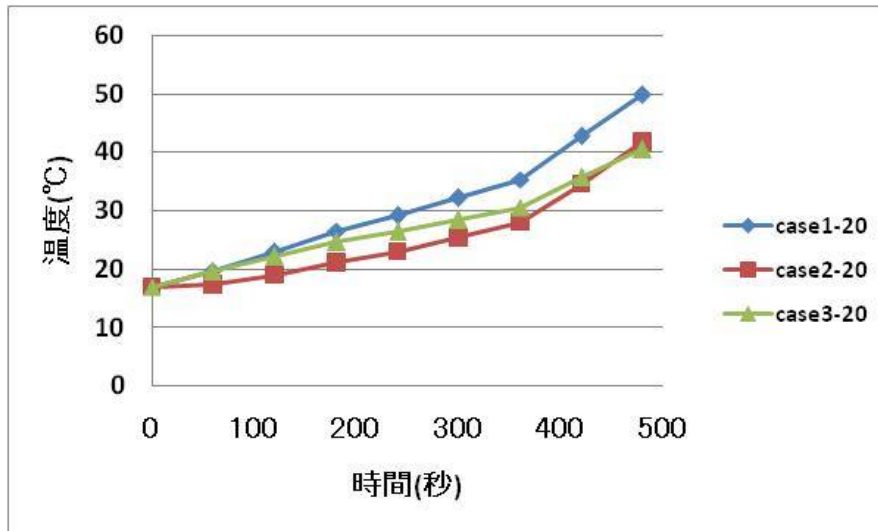
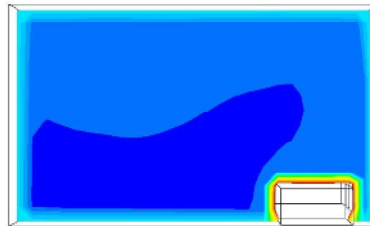


図 5.1 居室内平均温度の時系変化

5.1-2 温度コンター図

5.1-2(1) Case1

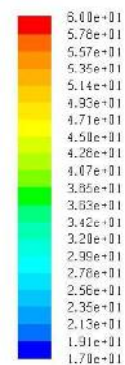
Case1 60秒 x=0



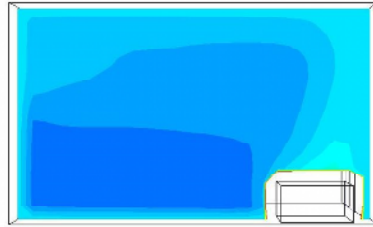
Case1 60秒 y=0



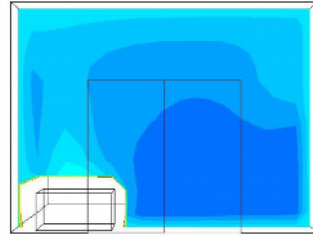
Case1 60秒 z=2900



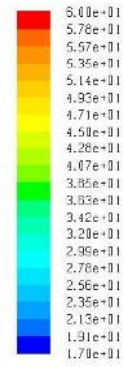
Case1 120秒 x=0



Case1 120秒 y=0

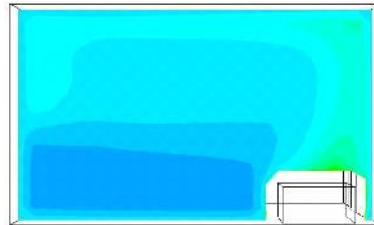


Case1 120秒 z=2900

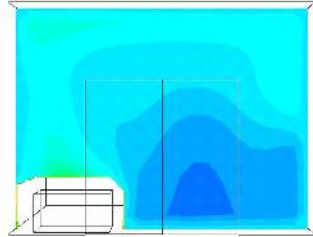


9

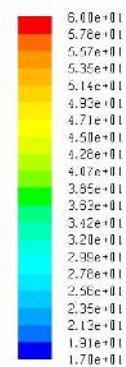
Case1 180秒 x=0



Case1 180秒 y=0

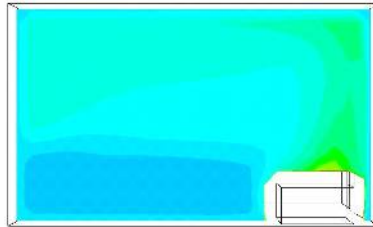


Case1 180秒 z=2900

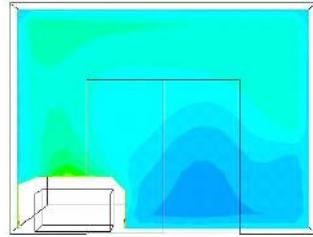


10

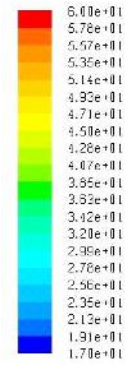
Case1 240秒 x=0



Case1 240秒 y=0

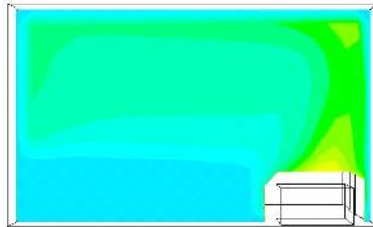


Case1 240秒 z=2900

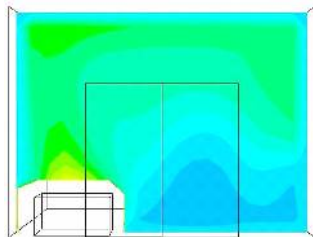


11

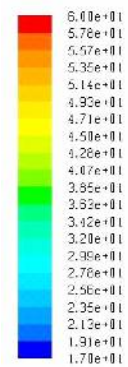
Case1 300秒 x=0



Case1 300秒 y=0

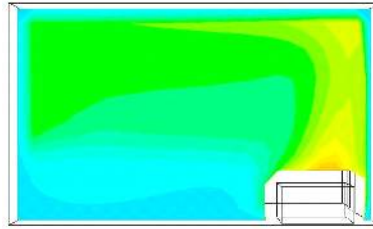


Case1 300秒 z=2900

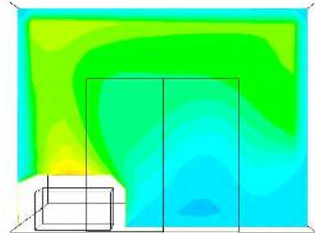


12

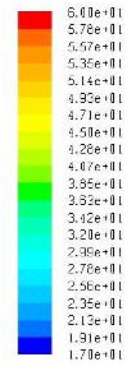
Case1 360秒 x=0



Case1 360秒 y=0

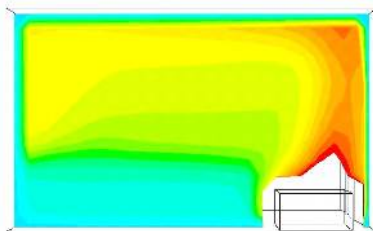


Case1 360秒 z=2900

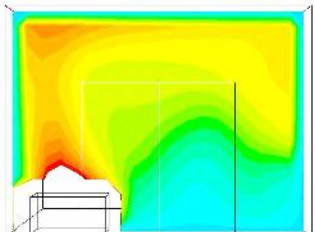


13

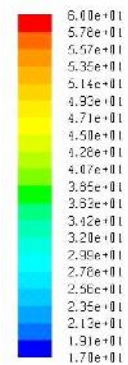
Case1 420秒 x=0



Case1 420秒 y=0

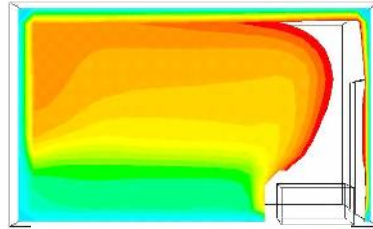


Case1 420秒 z=2900

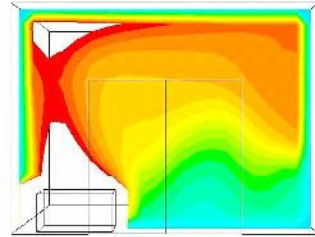


14

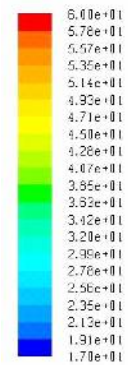
Case1 480秒 x=0



Case1 480秒 y=0



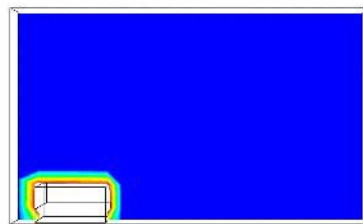
Case1 480秒 z=2900



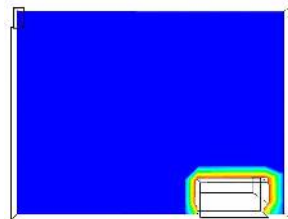
15

5.1-2(2) Case2

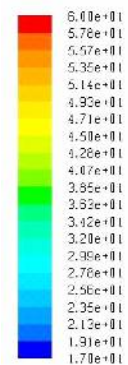
Case2 60秒 x=0



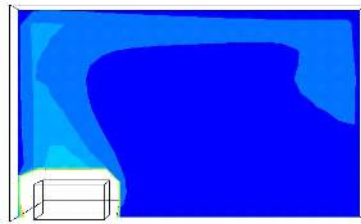
Case2 60秒 y=5000



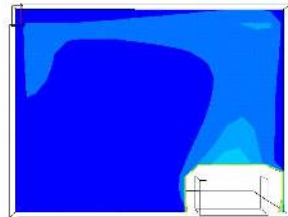
Case2 60秒 z=2900



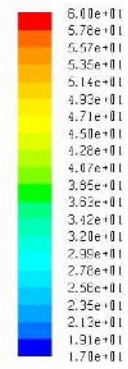
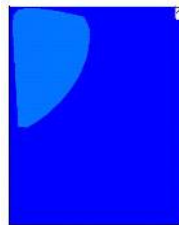
Case2 120秒 x=0



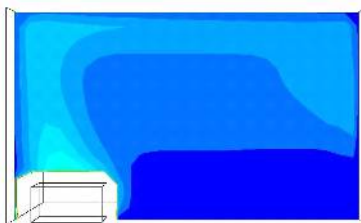
Case2 120秒 y=5000



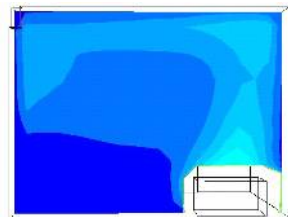
Case2 120秒 z=2900



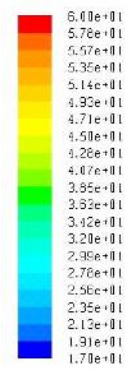
Case2 180秒 x=0



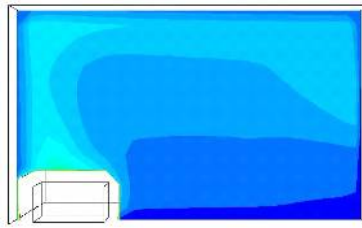
Case2 180秒 y=0



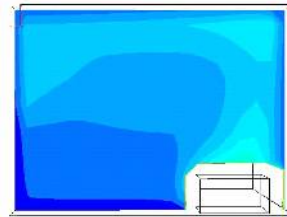
Case2 180秒 z=2900



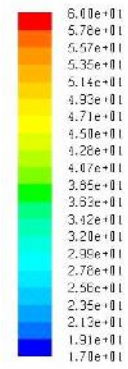
Case2 240秒 x=0



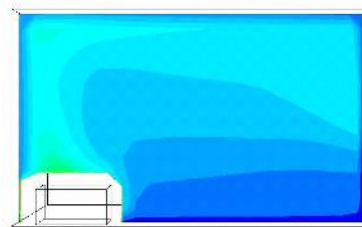
Case2 240秒 y=0



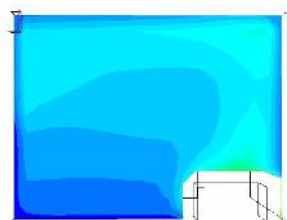
Case2 240秒 z=2900



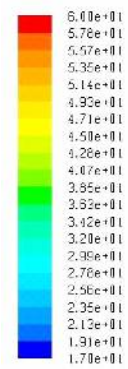
Case2 300秒 x=0



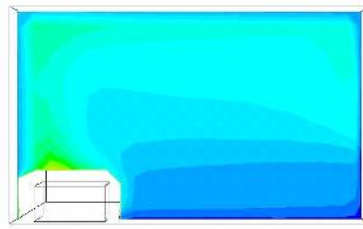
Case2 300秒 y=0



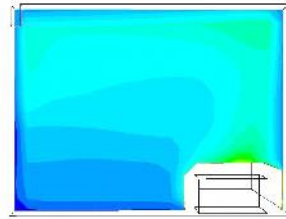
Case2 300秒 z=2900



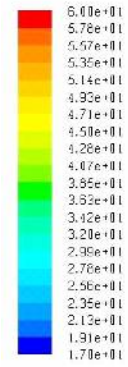
Case2 360秒 x=0



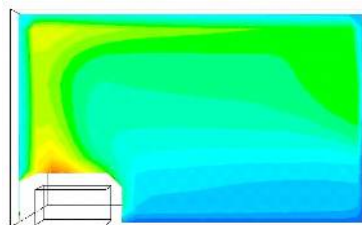
Case2 360秒 y=0



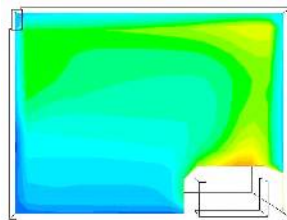
Case2 360秒 z=2900



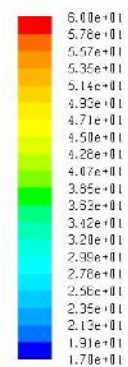
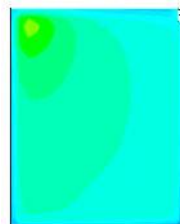
Case2 420秒 x=0



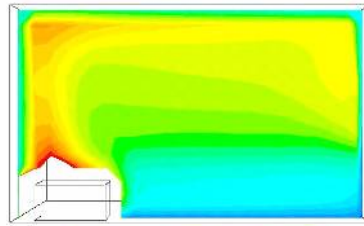
Case2 420秒 y=0



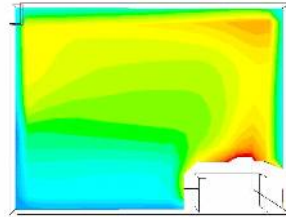
Case2 420秒 z=2900



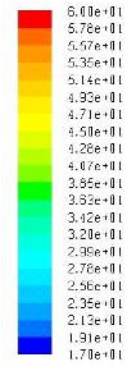
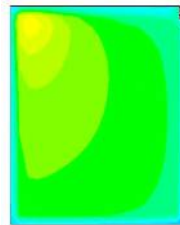
Case2 480秒 x=0



Case2 480秒 y=0

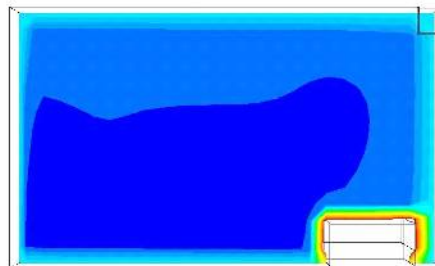


Case2 480秒 z=2900

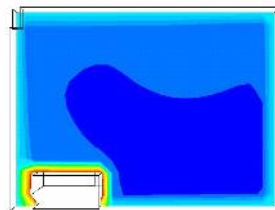


5.1-2(3) Case3

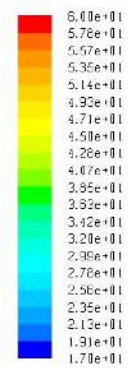
Case3 60秒 x=4000

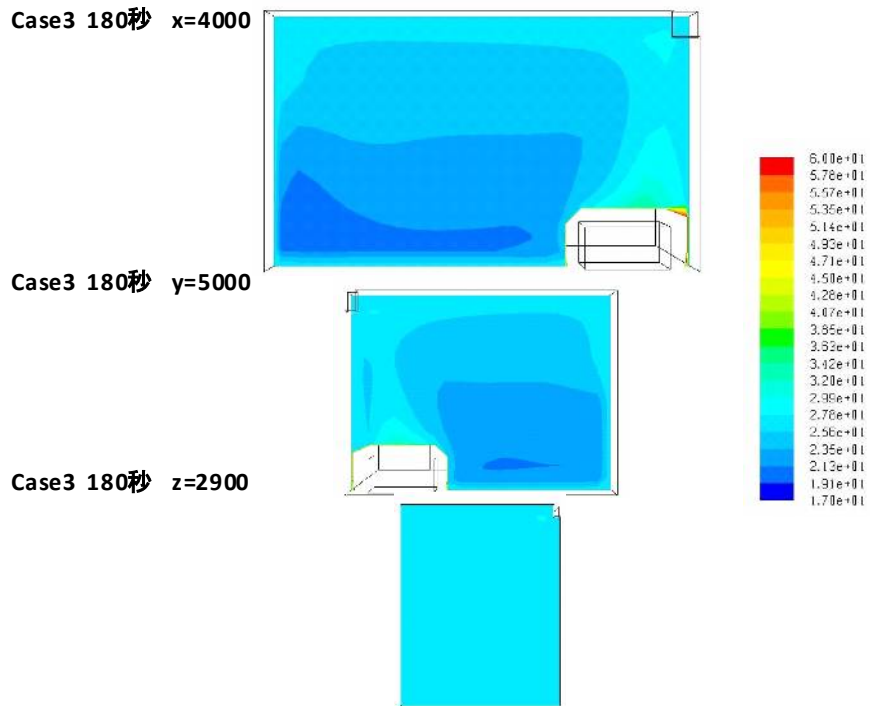
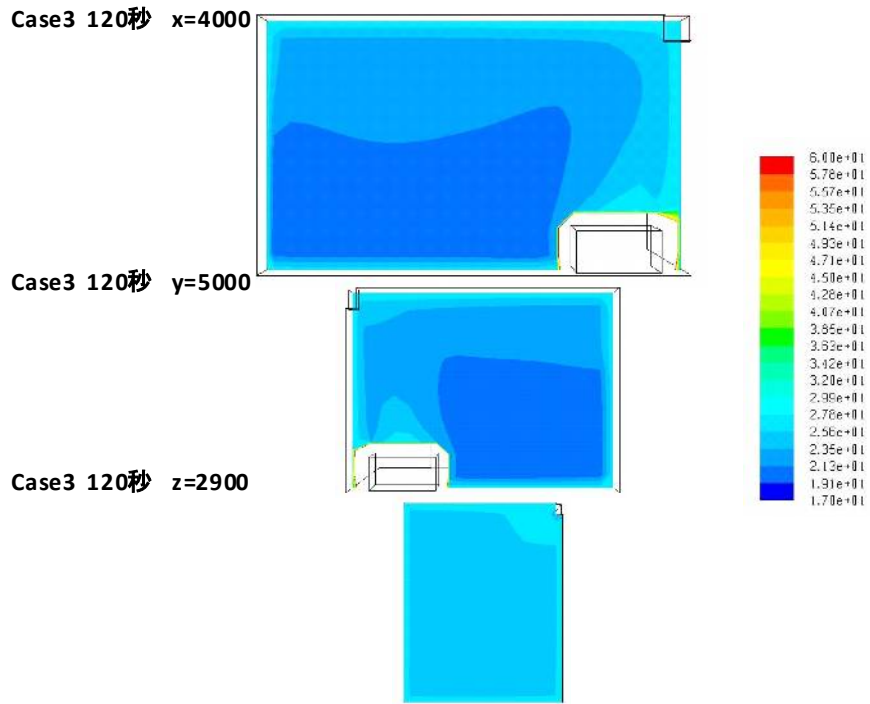


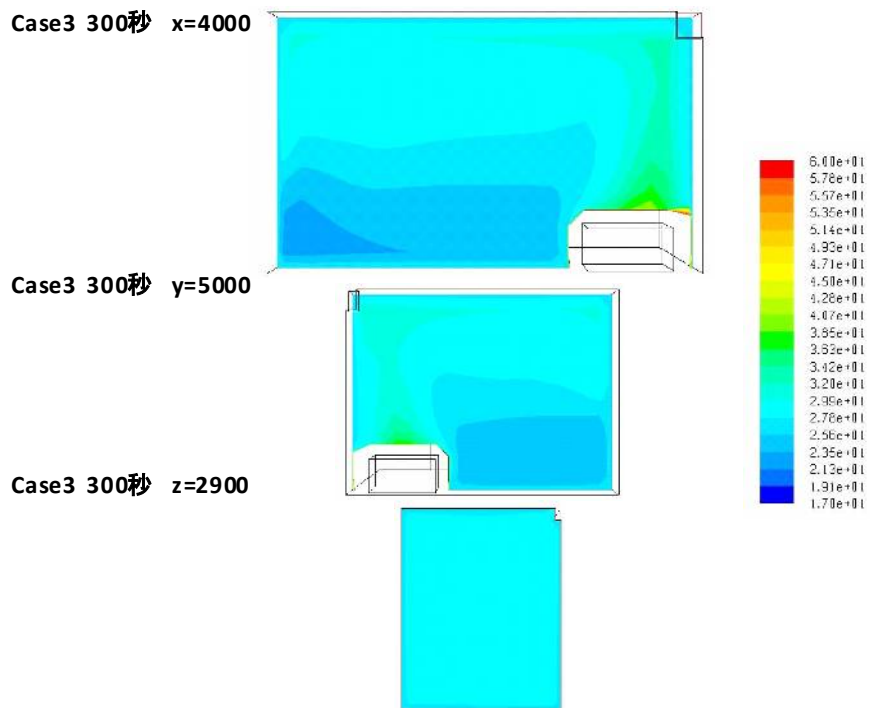
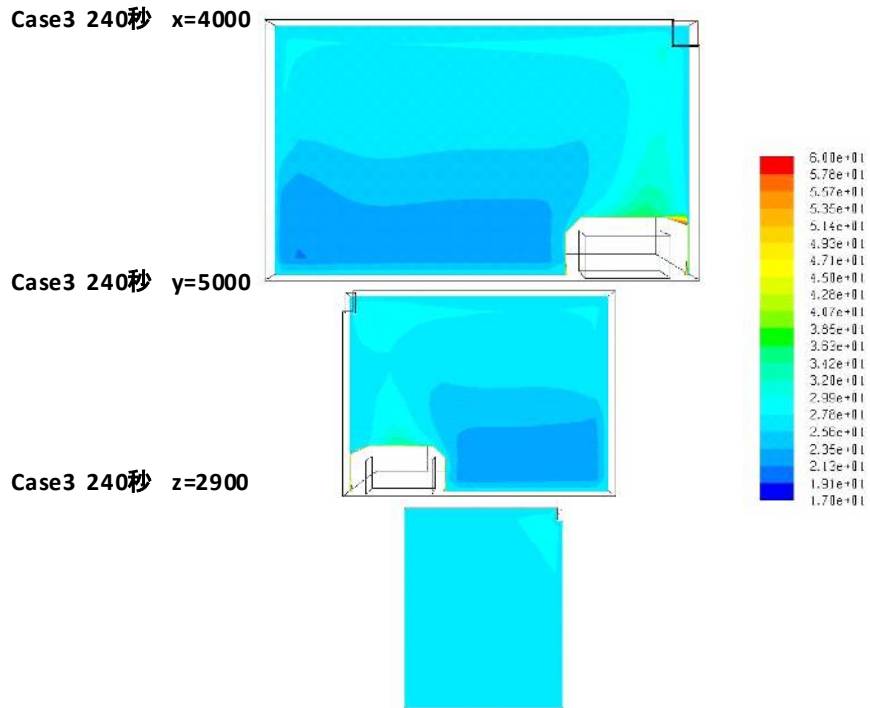
Case3 60秒 y=5000

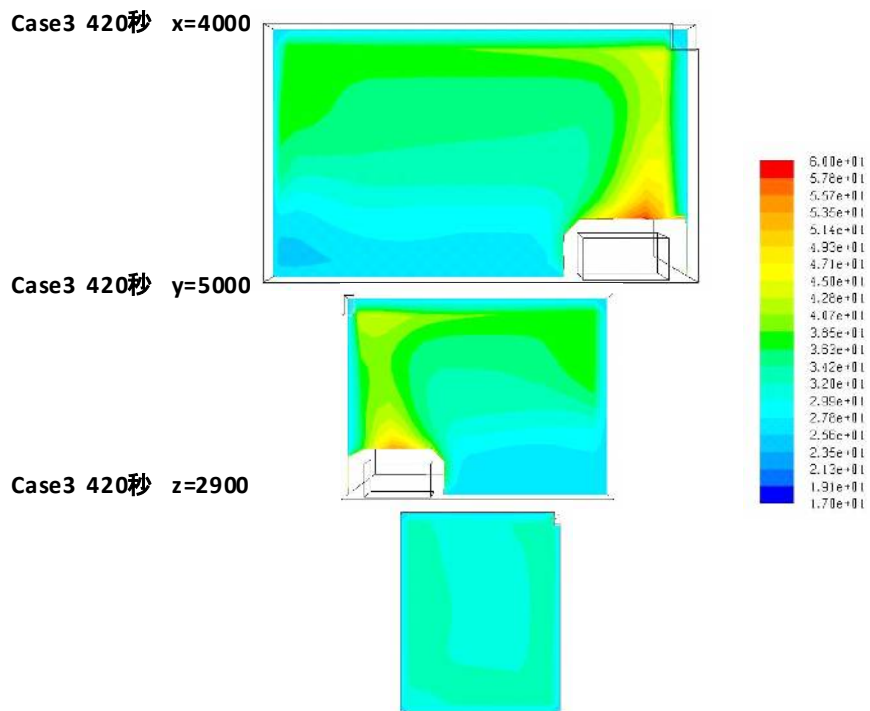
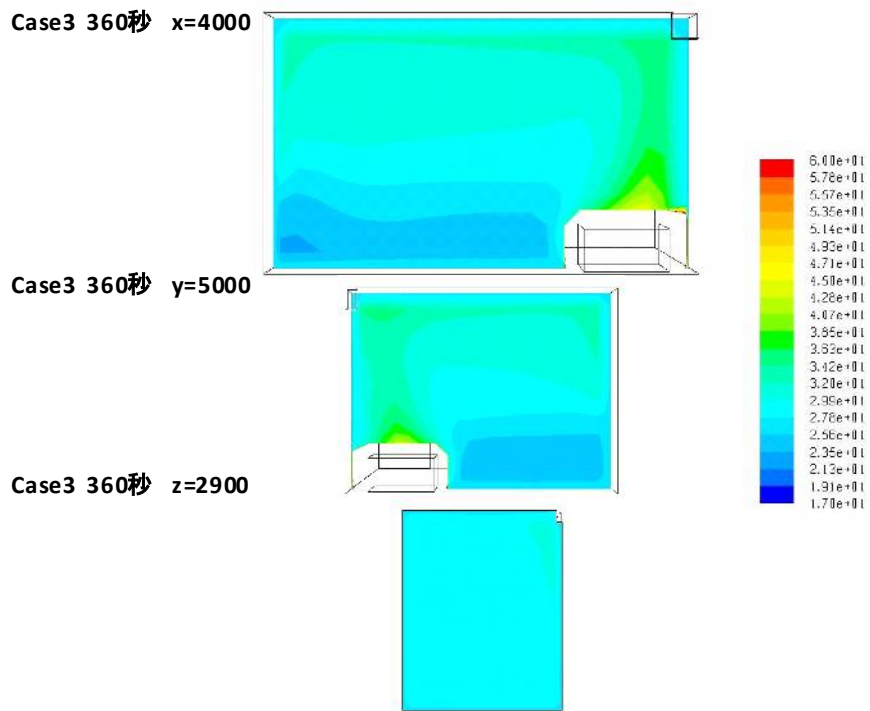


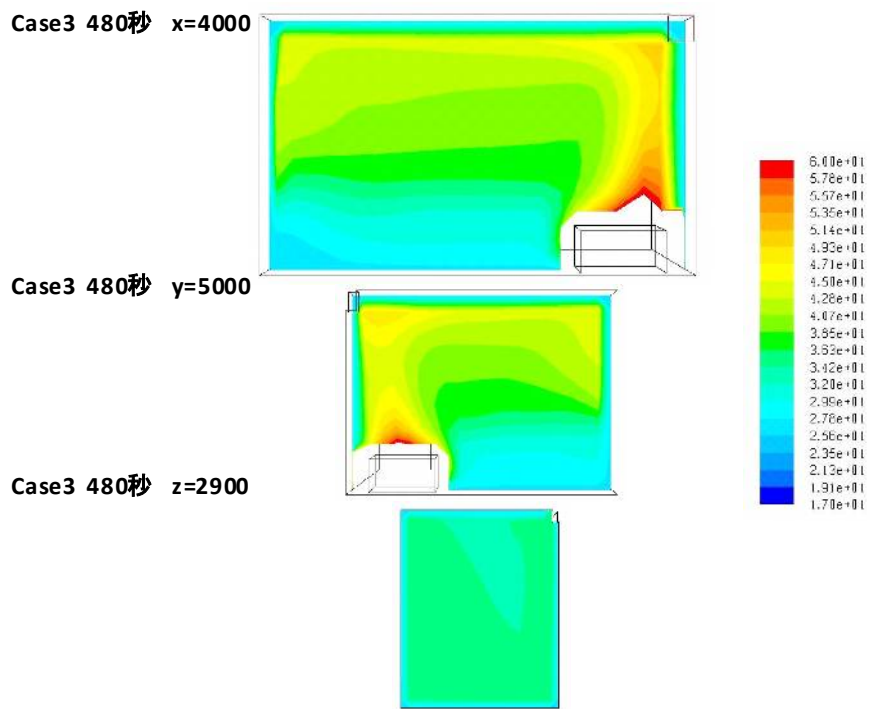
Case3 60秒 z=2900











5.2 気流パターンについて

図4.1の熱流束の図において6分程度から温度が上昇していくので解析開始から6分後速度ベクトルを表示する。気流は3ケースとも居室内において相対的に温度の高い空気が渦を巻くように上昇する。熱源の上方へ空気が押されて、居室内で全体的に対流している。発熱源から居室内の壁を伝うように循環し排気口へ流れが形成されているのがわかる。(図5.2~5.4)

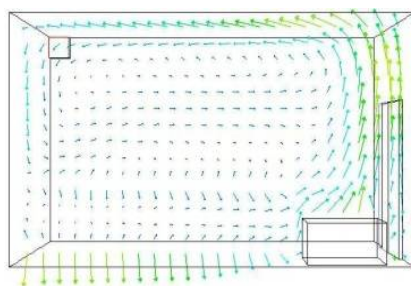


図 5.2 Case1

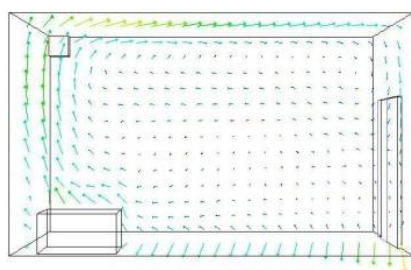


図 5.3 Case2

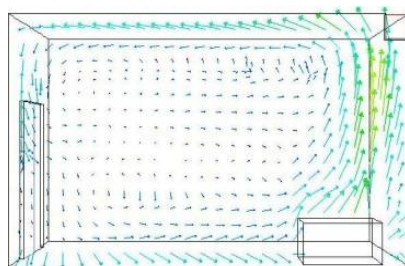
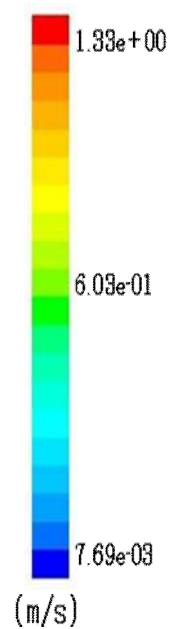


図 5.4 Case3



5.3 3 ケースの比較

Case1 は図 5.4、5.5 から排気口と引き戸での換気量が一番少ないとわかる。換気量が少ないということは暖められた空気が居室内に残り平均温度の上昇に関与していると考えられる。よって図 5.1 に示すように Case1 の平均温度が一番高くなっている。居室内の平均温度上昇は次いで Case2、Case3 となった。換気量と居室内平均温度は相関関係があるといえる。

また、熱源の位置が変わっても居室内の平均温度上昇の傾きの大きさに大きな違いは出なかった。

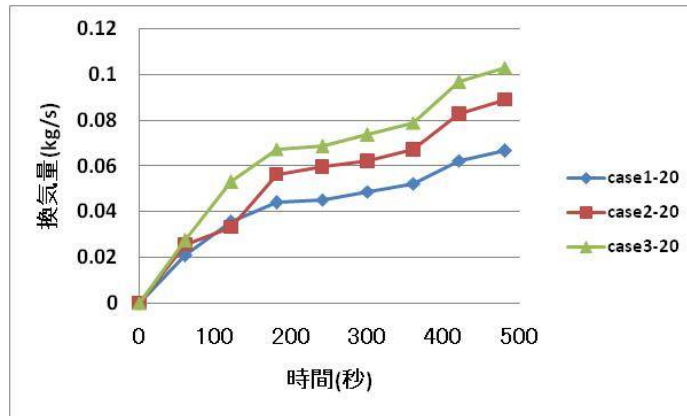


図 5.4 排気口の換気量

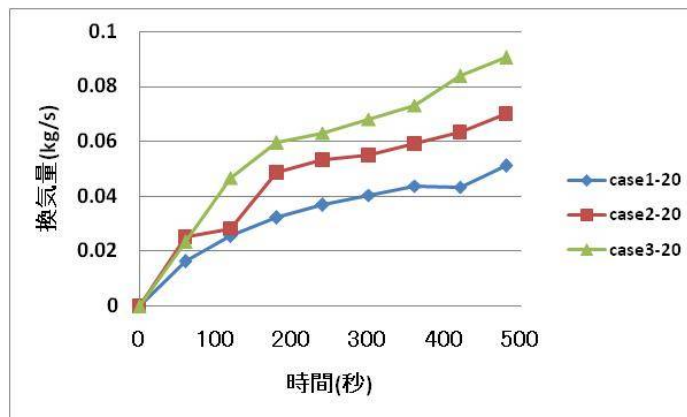


図 5.5 引き戸の換気量

5.4 火災報知機の設置場所について

警報器の位置は、窓や排気口のそばではなく居室内の一番対流の起こりやすいところに設置すると、より早く感知すると考える。図 5.6～5.8 を見ると熱源から上方に熱気流が上がっているのがわかるので、燃焼物の真上に報知器を設置すると反応時間が早くなる。床のような低い位置に設置しても温度は上昇しにくいので不適切である。また排気口や引き戸などの外気が入り出すところも、外気の影響で温度が変わるので不適切であると考えられる。熱気流は上昇する性質があるので天井に設置し排気口からも引き戸からも適度に距離をあけるとよいと考える。

『天井面に取り付ける場合：壁またははりから 60 cm 以上離れた天井の屋内に面する部分』¹³⁾
『壁面に取り付ける場合：天井から下方 15 cm 以上 50 cm 以内の位置にある壁の屋内に面する部分』¹³⁾
『換気口など吹き出し口からの位置：換気口などの空気吹き出し口から 1.5m 以上離れた位置』¹³⁾
(平成 16 年総務省令第 138 号)

とある。現法の設置の位置と比較して気流の流れと、警報器の位置を確認することができた。

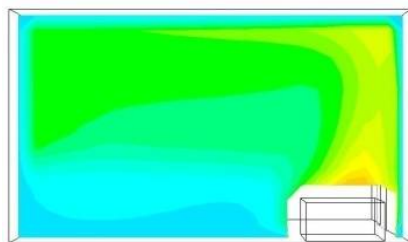


図 5.6 Case1

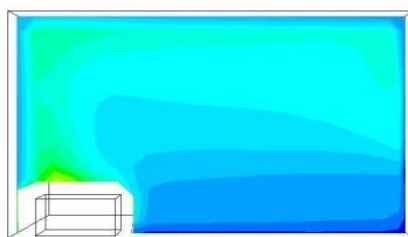


図 5.7 Case2

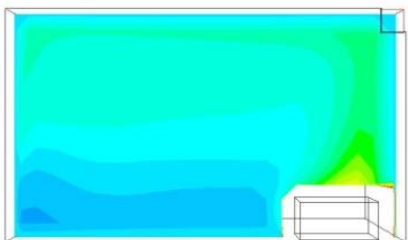


図 5.8 Case3

5.5 Case1 の最大計算回数比較

Case 1 の最大計算回数を変化させ解析ソフト FLUENT の精度を確認する。

5.5-1 方法

同じ Case1 の最大計算回数を 20 回、40 回、60 回と変化させ比較する。

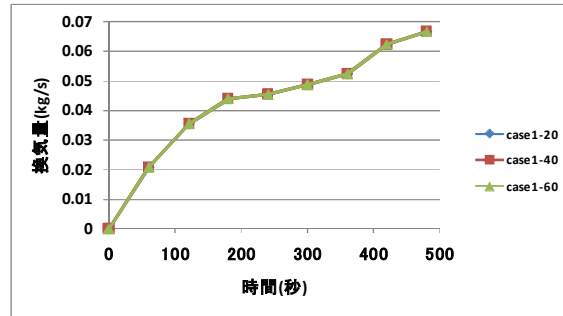


図 5.9 Case1 1step 当たりの最大計算回数比較 排気口換気量時系的变化

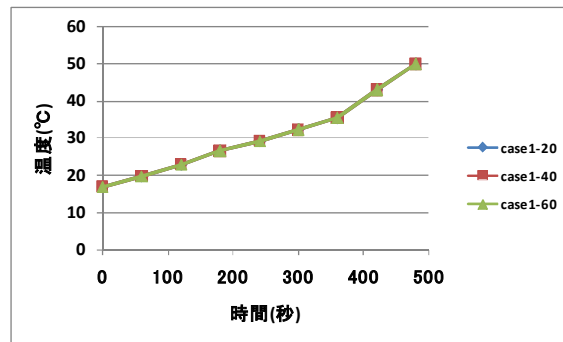


図 5.10 Case1 1step 当たりの最大計算回数比較 居室内平均温度時系の変

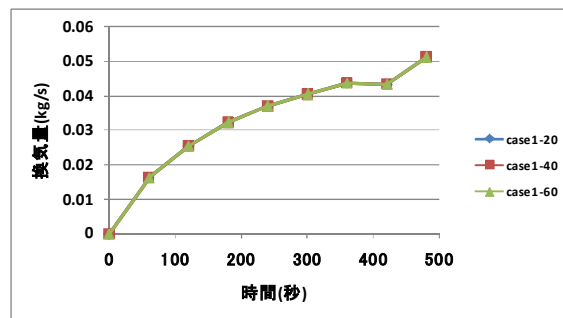


図 5.11 Case1 1step 当たりの最大計算回数比較 引き戸換気量時系の変化

5.5-2 結果

上記の図 5.9～5.11 より、三回とも同じような数値が求められた。計算によっては小数点第 5 あたりでの誤差はあったが、大きな誤差はなかったので、計算に対して信頼性があると考えられる。

第 6 章 総括

6.1 本論文のまとめ

- ①CFD により居室内の温度上昇を確認することができた。
- ②気流の居室内の対流状態を確認することができた。
- ③換気量により居室内の温度上昇に違いがあるとわかった。

6.2 今後の課題

CFD を行うにあたり、理論的な解釈が必要だと感じた。また、解析ソフト自体の理解もする必要がある。今回の解析では実際の炎を再現しておらず、対象居室に関しても実際とは違った。今後、実用的にこのソフトを使用していくためには、正確なメッシュを引き解析の精度を上げること。解析ソフトを理解し、使いこなせるようになることが必要だと感じた。

また、数値解析はソフトの誤差、実測との誤差があり、計算結果が出たとしてもそれが正しいとは言えないことがわかった。計算結果の判断とその先の実測との比較が、とても大変な作業だと感じた。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方のご指導・ご協力がありました。この場をお借りして感謝の意を述べさせていただきます。

辻本 誠先生、西田 幸夫先生には 1 年間を通してご指導を賜りました。多くの助言、丁寧かつ熱心なご指導ありがとうございました。また研究室の先輩方には作業の途中で手を止めていただき、指導していただきました。深く感謝しております。

テーマを決まるところから自分で徐々に決め、いろいろな疑問を持ちながら作業してきました。1 年間という限られた時間で自分自身が楽しみながら学んできた実感しています。その背景には、学校関係者以外の方々のご協力もたくさんありました。深く感謝しています。

ありがとうございました。

藤川 明代

参考文献一覧

- 1) 消防庁 著：消防白書.2008.株式会社ぎょうせい
- 2) 日本火災学会 監：火災と消火の理論と応用.2005.東京法令出版
- 3) 日本火災学会 編：火災と建築.2005.共立出版株式会社
- 4) 火災報告取扱要領ハンドブック 編:著:防災行政研究会.2006.東京法令出版株式会社
- 5) 倉渕隆 著：建築環境工学.2006.株式会社市ヶ谷出版社
- 6) 熊谷組設計本部 著編：建築関連法規の解説.1996.理工図書株式会社
- 7) 建築申請実務研究会 編：建築申請 memo.2004.新日本法規出版株式会社
- 8) Raymond A. Serway 著：科学者と技術者のための物理学 I a, I b.2003.学術図書出版
- 9) 木村竜治 著：流れの科学.1988.東海大学出版会
- 10) FLUENT 6.3 ユーザーズガイド
- 11) <http://www.geocities.co.jp/Technopolis/1304/index.html#menu>:自動火災報知設備
- 12) <http://www.hochiki.co.jp/>:ホーチキ株式会社
- 13) <http://www.nohmi.co.jp/>:能美防災株式会社