

室内火災を対象とした火災と避難のシミュレーション

平成25年

東京理科大学 工学部第一部建築学科
辻本研究室
4109014 入谷 真樹
4109073 高橋 亮太

目次

第1章 序論	
1-1 研究背景と目的	4
1-2 研究方法	4
第2章 火災避難シミュレーションモデル	
2-1 ゾーンモデルとフィールドモデル	5
2-2 EVATUS について	6
2-3 FDS について	7
第3章 解析概要	
3-1 計算条件	11
3-2 避難シミュレーションの条件設定	16
第4章 結果及び考察	
4-1 煙曝露者数の変化についての結果と考察	17
4-2 煙層変化についての結果と考察	24
4-3 対象空間内の温度変化についての考察	41
第5章 総括	
5-1 避難安全性について	50
5-2 煙の性状について	50
5-3 温度について	50
5-4 二層ゾーンモデルとフィールドモデルの性能特性及び正確な検証法の可能性	
5-5 今後の課題	51
参考文献	53
謝辞	54
付録	55

第 1 章

序論

1-1 研究背景と目的

現在、様々なスケールの室内火災において避難安全性を検証するには莫大な費用、時間、実験の安全性等の問題によって、実物大の模型を用いた模擬実験をすることは事実上困難である。故に、コンピューター上でのシミュレーションに頼らざるを得ないと言える。こうした現状の中、様々なシミュレーションソフトが開発され、多くの機関で利用されている。しかし、同じ条件下で火災時の火災避難シミュレーションプログラムで計算したとしても、プログラム毎で結果が全く異なってしまうのが現状である。そのため、シミュレーション結果をその都度吟味し評価する必要がある。本論では、二層ゾーンモデルとフィールドモデルの2つのシミュレーションプログラムを用いて、同じ条件下での火災についてシミュレーションを行ない、両者の比較をすることで、より精度の高い検証法の可能性を検討する。

1-2 研究方法

二層ゾーンモデルのシミュレーションソフトとして EVATUS (Evacuation program of Tokyo University of Science) を、フィールドモデルのシミュレーションソフトとして FDS (Fire Dynamics Simulator) を、この2つのシミュレーションソフトを用いて、在室者のいる居室内での火災を想定した火災避難シミュレーションを行い、対象空間の避難安全性を評価する。対象空間の高さ、開口部、火源の大きさが等しい対象空間内において火災を発生させ、対象空間の大きさ、対象空間内の人口密度を変化させてシミュレーションを行うものとする。火災進展状況の検討には FDS を、避難状況の検討には EVATUS を用いてシミュレーションを行い、それらの結果を総合的に評価する。

第2章

火災避難シミュレーションモデル

2-1 ゾーンモデルとフィールドモデル

数値シミュレーションといえば、主にゾーンモデルとフィールドモデルの2つの手法が用いられている。ゾーンモデルは古くから火災安全性の評価ツールとして活用されてきており、さまざまな実績がある。建物火災のような区画火災では、盛期火災時に見られる区画内に煙が一様に充満している場合(一層)と、初期化燃や天井高が大きい時に見られる区画の上部に高温の煙層と下部に空気層の2種類の層に分けられる場合(二層)とがある。ゾーンモデルでは、区画の煙流動性状をマクロな観点から単層もしくは二層とみなして、気体の質量や熱的なバランスから記述した実用的な数学モデルである。結果として、フィールドモデルに比べ、詳細なデータが得られないものの、火災安全性を評価する上では、煙層の温度や天井からの煙層降下速度など必要な情報は得られる。しかし、複雑な形状で構成された区画、階段やエレベーターシャフト等の縦穴区画が含まれた場合の計算が困難という側面もある。

本論では二層ゾーンモデルとしてEVATUSを、フィールドモデルであるFDSの2つのシミュレーションソフトを用いて研究を行った。以下に2つのシミュレーションソフトについて述べる。

2-2 EVATUS について

EVATUS (Evacuation program of Tokyo University of Science)は東京理科大学総合研究機構火災科学研究センターで、東京消防庁と共同で開発された建物の火災時の避難安全性評価を行うための火災避難シミュレーションである。ポテンシャル法に基づく避難行動予測プログラムと、二層ゾーン煙流動解析プログラム BRI2002 の改良版である BRI2COE を統合したものである。時々刻々での避難者の避難行動の状況だけではなく、同時に、避難者による扉等の予期せぬ開閉にも対応でき、建物内の部屋・廊下や地下街等の区画内の煙層の高さや温度・毒性のガス濃度・煙濃度等の性状が計算できるので、建物の火災安全性の評価が可能であるとともに、建物特有の避難方向を示唆することができる。さらに、避難安全時間等も計算可能であるため、多種多様の施設での避難計画のシナリオ等に適用することが可能である。

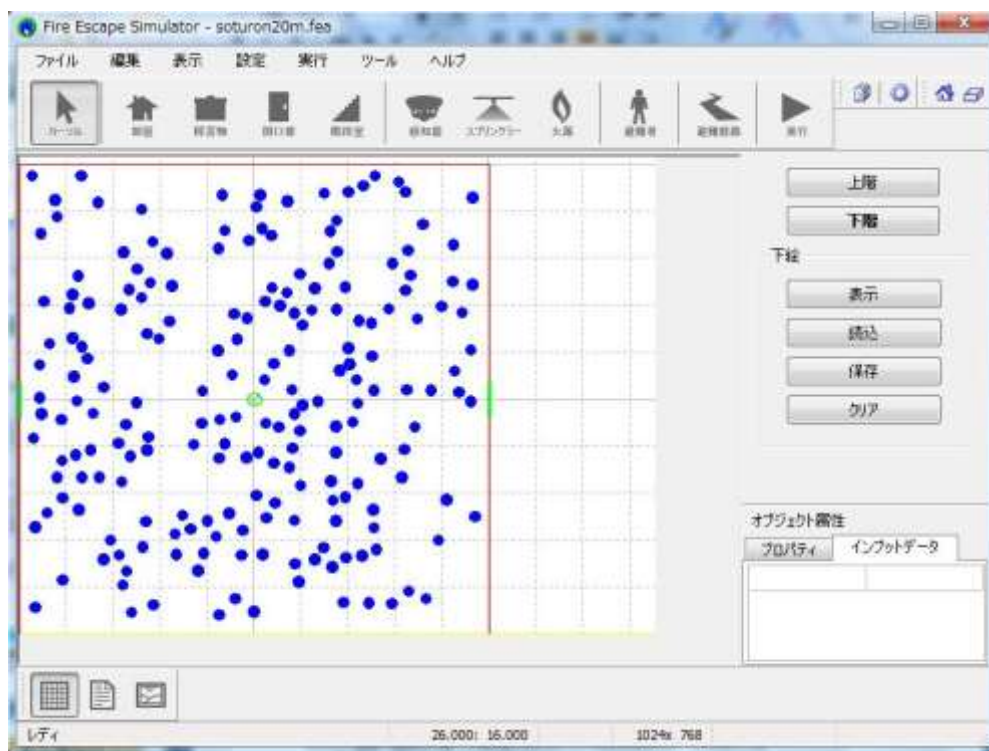


図1 EVATUS 画面

2-3 FDSについて

FDS (Fire Dynamics Simulator)はNIST(米国国立標準技術研究所)により開発されたフリーの火災避難解析ソフトウェアである。近年の計算機能力の急速な向上とCFD技術の成熟に伴い、火災現象の研究にフィールドモデルが適用されるようになってきた。最近、FDSを利用した数値解析例やFDSの性能評価を行った研究結果が報告されており、火災解析に特化した有望なCFDモデルとして評価されている。FDSでは入力データとして、計算空間寸法、計算格子数、壁等の障害物形状の座標、計算終了時刻、火源の発熱速度(単位時間あたりの発熱量)。可燃物の種類の指定等の情報を与えると、出力データとして温度や速度等の種々の参照面分布のデータや参照点時系列データが得られる。

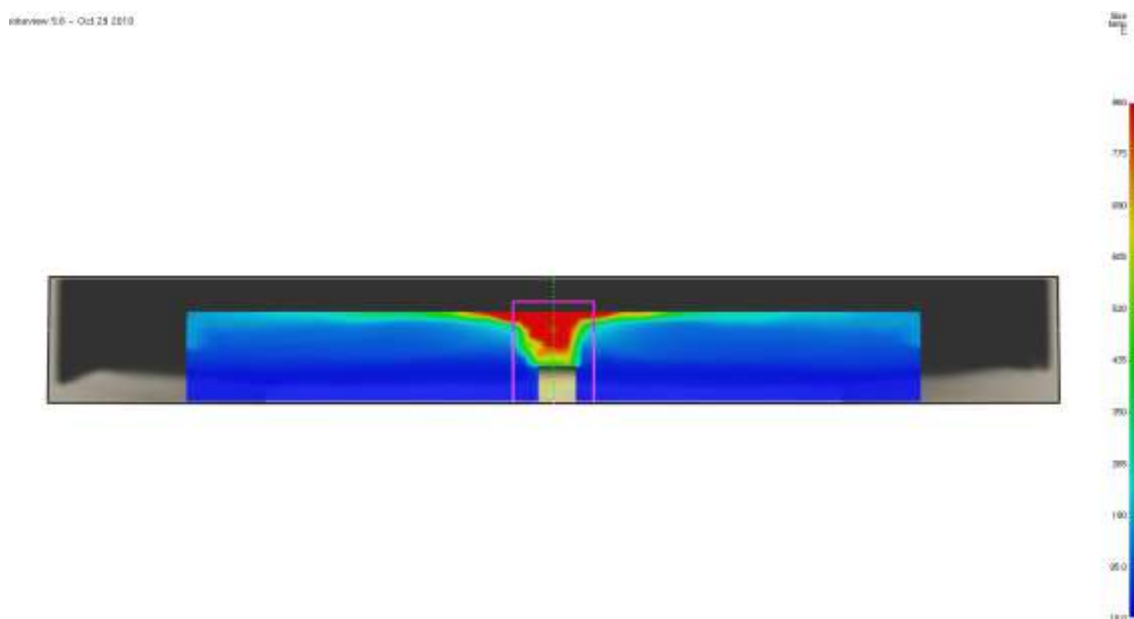


図-2 FDS画面

法に関する研究 火災成長率分布

可燃物の燃え広がり速度

Ultra Fast ($\alpha = 0.2 \text{kw/ s}^2$)

Fast ($\alpha = 0.05 \text{kw/ s}^2$)

Medium ($\alpha = 0.0125 \text{kw/ s}^2$)

Slow ($\alpha = 0.00313 \text{kw/ s}^2$) この数値を用いて火源の大きさを変える。

2-3-1. FDS の数値計算に用いられる支配方程式と離散化

FDS における数値的に解かれる支配方程式は、次のように質量保存式 (式 (1))、化学種保存式 (式 (2))、運動量保存式 (式 (3))、エネルギー保存式 (式 (4)) 及び状態方程式からなる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_l) + \nabla \cdot \rho Y_l \mathbf{u} = \nabla \cdot (\rho D)_l \nabla Y_l + \dot{W}_l''' \quad (2)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right\} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} - \frac{Dp}{Dt} = \dot{q}''' - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T + \nabla \cdot \sum_l \dot{h}_l (\rho D)_l \nabla Y_l \quad (4)$$

ここで、 ρ は気体密度、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 Y_l は化学種 l の質量分率、 \dot{W}_l''' は化学種 l の生成率、 p は圧力、 \mathbf{f} は外力、 $\boldsymbol{\tau}$ は応力テンソル、 h はエンタルピー、 \dot{q}''' は体積あたりの発熱速度、 \mathbf{q}_r は放射熱流速、 T 温度である。火災室内では気体は圧縮性ではあるものの低マッハ数近似が提案される、 Y は質量分率、 $\boldsymbol{\tau}$ は応力テンソル、 \mathbf{k} は熱伝導率、 C_p は定圧比熱、 \mathbf{q}_r は放射熱流束、 D は物質拡散係数を表す。

火災では熱による空気の密度変化を考慮しなければならないため、低マッハ数近似のもとで密度の温度依存性が考慮されている。流れ場の離散化には差分法を用いており、スカラー成分とベクトル成分を互い違いに定義するスタガード格子を使用している。移流項を除くすべての空間微分は二次精度中心差分が適用され、時間積分には二次精度の陽的予測子修正子法が適用されている。移流項は、時間積分において予測子の段階では風上差分が使用され、修正子では風上差分が適用される。ただし、格子セルごとの局所 CFL 数による重み付けがなされており、これが 1 よりも非常に小さいときには二次精度中心差分に近くなり、1 に近いときには完全な風上差分に近くなる。

2-3-2. FDS に使用される物理モデル

FDS では、乱流現象を取り扱うために標準スマゴリンスキーモデルによる LES を用いる。熱伝導率と化学種の物質拡散係数と乱流粘性係数との対応は、式 (5)、式 (6) に示すように、それぞれプラントル数 P_r とシュミット数 S_c を用いた 0 方程式モデルである。

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} C_p}{P_r} \quad (5)$$

$$\rho D_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{S_c} \quad (6)$$

ただし、 k_{LES} : 熱伝導率 [W/mk]、 ρ : 空気の密度 [kg/m³]、 D_{LES} : 物質拡散係数 [m²/s]、

μ_{LES} :粘性係数[kg/ms]、 C_p :空気の比熱[J/kgK]、 P_r :プラントル数、 S_c :シュミット数

シミュレーションでは、スマゴリンスキー定数 $C_s=0.2$ 、プラントル数 $P_r=0.5$ 、シュミット数 $S_c=0.5$ とした。燃焼モデルは、混合分率燃焼モデル (Mixture Fraction Model) である。このモデルでは燃料と酸素は出会うと瞬時に燃焼する。その結果、燃料と酸素は同時に存在できないものとする。また、熱放射も考慮して、吸収放射する媒質に対する放射輸送式と有限体積法を用いて解く。

2-3-3. FDS 初期条件

格子セル数は、高さ方向 50 セル、奥行き方向 100 セル、幅方向 100 セルの等間隔直交格子とし、格子数は 500000 セルである。全領域で速度は 0m/s、火源の形状は直交格子を使用するために四角形にした。壁面の速度境界条件はーフスリップ条件、伝熱に関しては壁面垂直方向に一次元熱伝導方程式を解くことにより、失熱を考慮した。厚み 2 cm 壁面材質のコンクリートの熱伝導率、比熱、密度はそれぞれ 0.16W/mK、1.05kJ/kg・°C、2.3kg/m³である。ただし、壁への吸熱は壁の温度を一定とした吸熱を使用する。温度境界条件は断熱とした。流入出境界では無限遠方ゼロを仮定する大気解放条件とした。

第 3 章

解析概要

3-1 計算条件

FDS と EVATUS のシミュレーションを行う上で空間の規模が避難安全性に及ぼす影響を検証するため、シミュレーションの対象空間を 100 m²、400 m²、900 m²、1600 m² の 4 つの空間を用意した。(図-3～図-6)

2 つの開口部の位置は 4 つの対象空間が相似関係とする。ただし 2 つの開口部の大きさは同じとした。

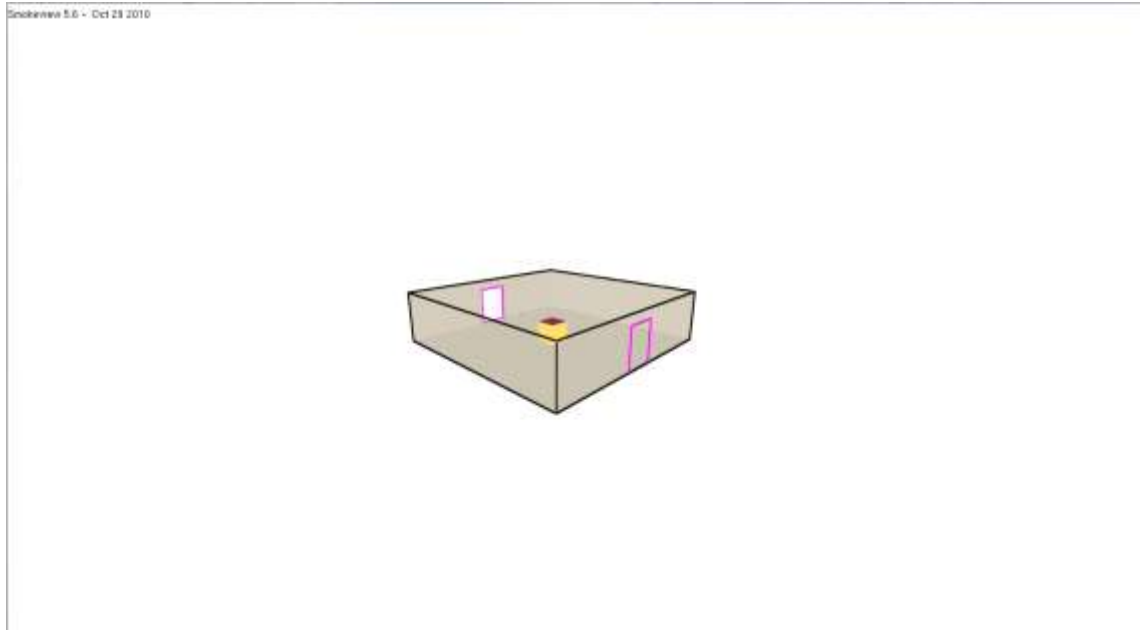


図-3 100 m² レイアウト

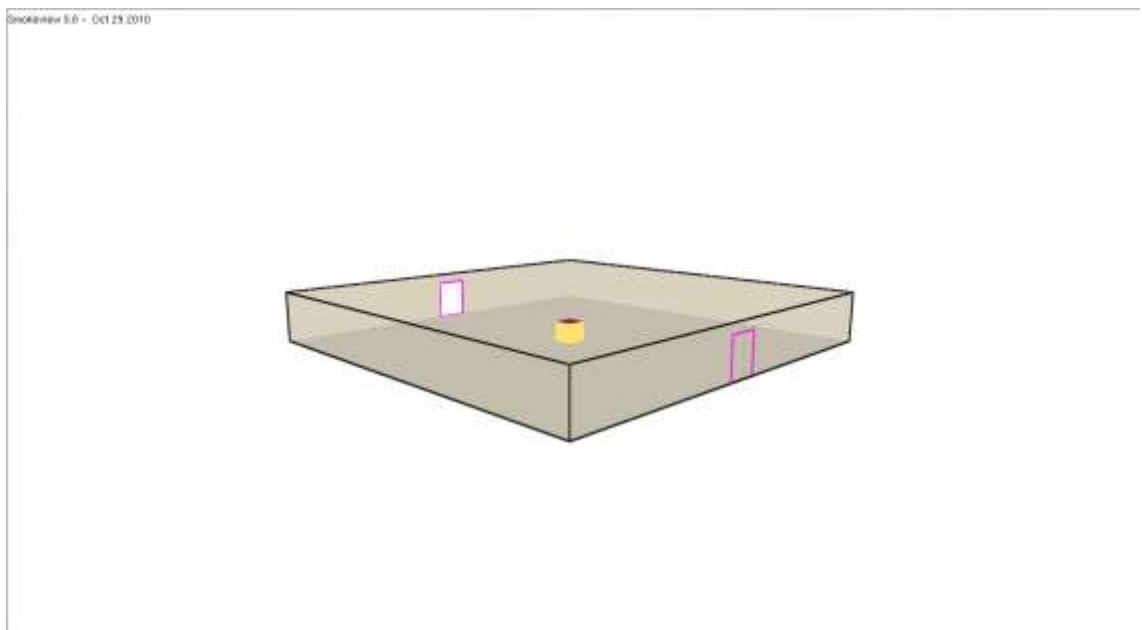


図-4 400 m² レイアウト

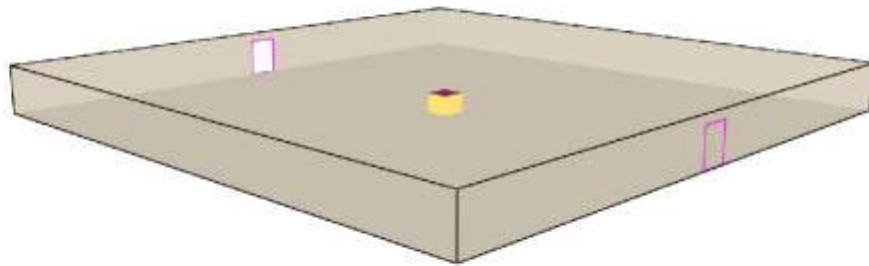


図-5 900 m² レイアウト

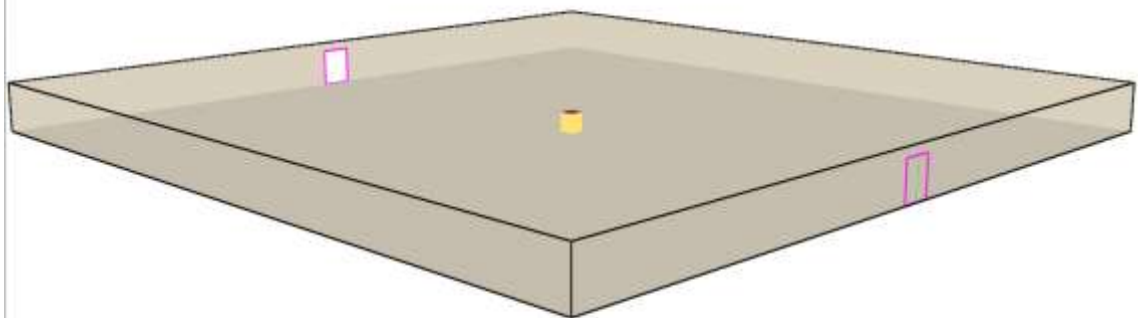


図-6 1600 m² レイアウト

そして、各対象空間における変化項目と共通項目を表-1、表-2に示す。

表-1 各対象空間の変化項目

室面積	100㎡, 400㎡, 900㎡, 1600㎡
人口密度	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5[人/㎡]

表-2 各対象空間の共通項目

初期温度	20℃	初期相対湿度	50%
開口部	2.0m × 1.5m	開口部数	計2ヶ所
天井高さ	2.5m	壁・床材質	普通コンクリート
火災成長率	0.2kW/s ² _(註1)	単位面積当たりの発熱速度	1000kW/㎡
最大発熱速度	13237kW _(註2)		
燃料	ウレタンフォーム	計算時間	t=180s

火災発生からの計算時間はFDS、EVATUSともにt=180sまでとする。最大発熱速度の値13237kWは次式から求めた。

$$\text{最大発熱速度 } Q = 3000m_a = 3000 \times 0.52A\sqrt{H} \text{ [kW]}$$

(m_a : 開口から流入する空気の質量流量, A : 開口面積㎡, H : 開口高さm) 室内で燃焼可能な発熱速度の上限を与える理論式を用いた。

火源位置は対象空間の中央に設置した。火源モデルにはEVATUSで導入されている αt^2 モデルを用いた。(図-7)FDSにも次式を導入し、シミュレーション結果から求められた発熱速度の時間変化のグラフについては後述する。

$$Q = \alpha t^2 \quad (\text{発熱速度 } Q[\text{kW}], \text{ 火災成長率 } \alpha, \text{ 時間 } t[\text{s}])$$

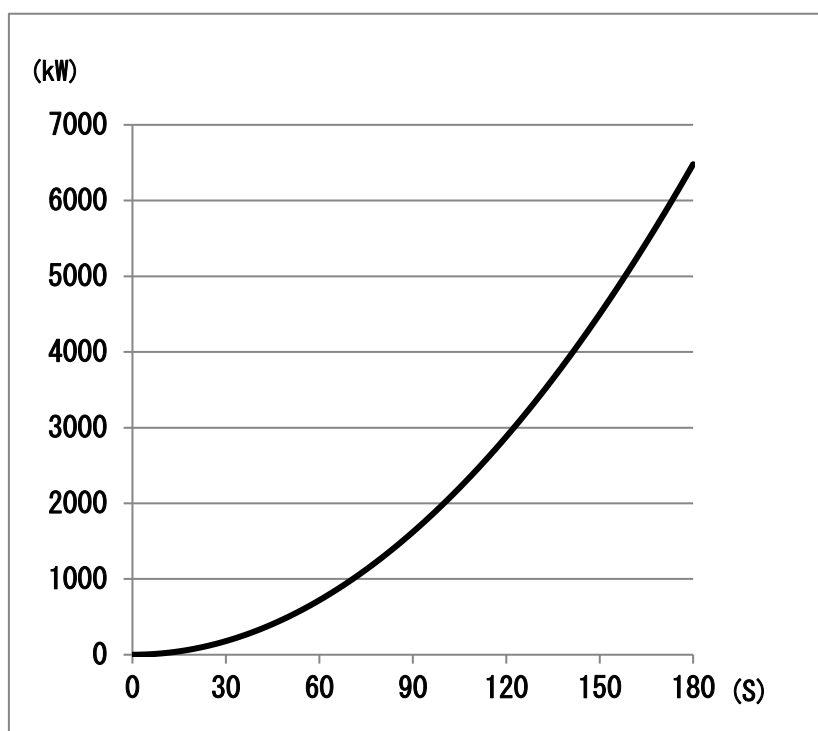


図-7 αt^2 モデル $\alpha = 0.2$

FDS では図-8 に示した位置で対象空間の温度変化を計算した。また、EVATUS では二層ゾーンモデルを用いているため、上層部、下層部共に均一な性状であるとして上層部の煙層の温度変化を求めることとした。

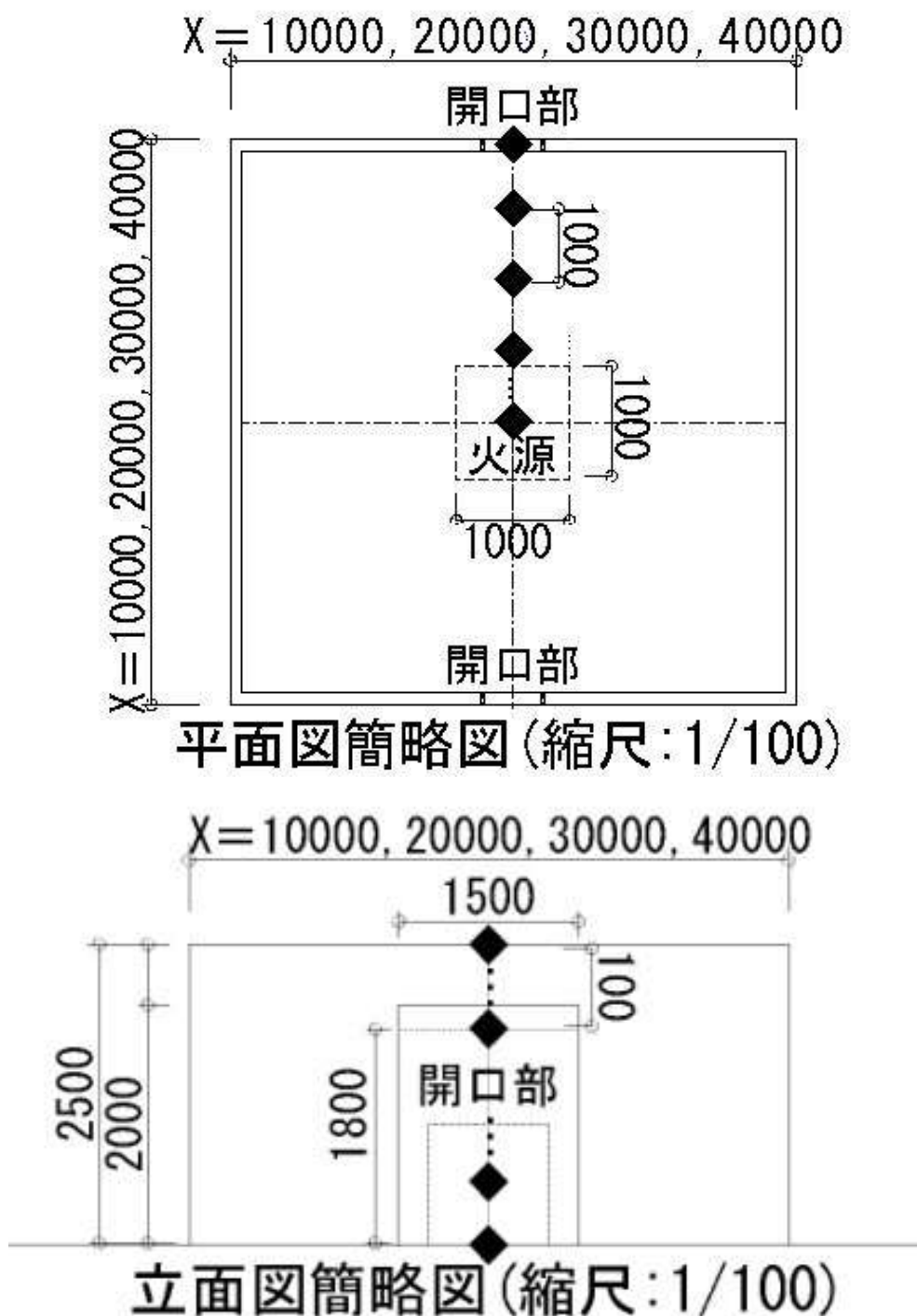


図-8 FDS での温度計算位置

※◆は温度計算位置とする

3-2 避難シミュレーションの条件設定

EVATUS を用いて避難のシミュレーションを行う。各対象空間内に人口密度 0.1~0.5 人/ m^2 の在室者をランダム配置した。在室者特性は、最大歩行速度を 1.0m/s、BS(ボディサイズ)を 0.25m、PS(パーソナルスペース)を 0.5m とした。(表-3)

表-3 在室者特性

在室者のBS(半径)	在室者のPS(半径)	在室者の最大歩行速度
0.25m	0.5m	1m/s

EVATUS では簡易マルチエージェント法を用いている。簡易マルチエージェント法は、マルチエージェント法と違い、衝突回避行動としてあらかじめ設定した移動先の候補を決定しておき、移動可能な場所を検索することで避難者を移動させることにより、計算時間の軽減を図る方法である。あらかじめ設定した移動先候補内に移動可能な場所がない場合には、避難者は移動をせず、避難者の PS(パーソナルスペース)を縮小させる方法を設定する。混雑時には BS(ボディスペース)まで PS(パーソナルスペース)を減少させ避難者同士の間隔を詰めることにした。この時、パーソナルスペースの減少に伴い、避難者の歩行速度も低下するようにした。

また、在室者は火災発生後、煙層の厚みが天井高の 10%に達した場合、若しくは火源からの最も近い在室者の輻射熱による受熱量が $2\text{kW}/\text{m}^2$ を超えた時点で、出火室の在室者全員が熱さを感じ、その場に留まる状態でないとして判断して、一斉に避難を開始する。また、煙層高さが 1.8m以下となった時点で避難が完了していない在室者を煙曝露者として扱い、避難に失敗したものとする。本論では延焼や避難の際の障害物の有無を考慮しないものとする。

第 4 章

結果及び考察

4-1 煙曝露者数の変化についての結果と考察

各対象空間の火災避難シミュレーションの結果を以下に記す。

はじめに、各対象空間の人口密度に対する非難完了時間と、煙の拡がりによって曝露された避難者の人数を表-4～表-7に記す。

100m ²		
人口密度	曝露人数	避難完了時間(s)
0.1	0(10人中)	22秒
0.2	0(20人中)	25秒
0.3	0(30人中)	27秒
0.4	0(40人中)	27秒
0.5	0(50人中)	29秒

表-4

400m ²		
人口密度	曝露人数	避難完了時間(s)
0.1	0(40人中)	32秒
0.2	0(80人中)	41秒
0.3	0(120人中)	48秒
0.4	0(160人中)	65秒
0.5	0(200人中)	70秒

表-5

900m ²		
人口密度	曝露人数	避難完了時間(s)
0.1	0(90人中)	60秒
0.2	0(180人中)	67秒
0.3	0(270人中)	94秒
0.4	0(360人中)	115秒
0.5	4(450人中)	139秒(避難失敗)

表-6

1600m ²		
人口密度	曝露人数	避難完了時間(s)
0.1	0(160人中)	93秒
0.2	0(320人中)	117秒
0.3	0(480人中)	161秒
0.4	78(640人中)	177秒(避難失敗)
0.5	268(800人中)	177秒(避難失敗)

表-7

次に、表-8 には各対象空間の煙暴露開始時刻を記す。

室面積	100m ²	400m ²	900m ²	1600m ²
煙暴露開始時刻(s)	56	99	139	177

表-8

室面積が 100 m²、400 m²の対象空間では避難完了までの時間は長くとも 60(s)程度であり、煙による曝露者も発生することはなかった。しかし、室面積が 900 m²、1600 m²の対象空間の場合、人口密度の増加につれて避難完了までの時間は増加し、同時に煙による曝露者が発生するようになった。このことは、避難に利用する開口部の面積が変化しなかったために、避難者がスムーズに避難を行えず、開口部に密集したことによって避難が遅れたものと考えられる。

以上の結果から、煙暴露者が発生したのは床面積が 900 m²で人口密度が 0.5 人/m²、床面積が 1600 m²で人口密度が 0.4 人/m²、床面積が 1600 m²で人口密度が 0.5 人/m²の 3 パターンとなった。

これら3つのパターンにおける在室者の30 s 毎の避難の様子を図-9~11 に示す。

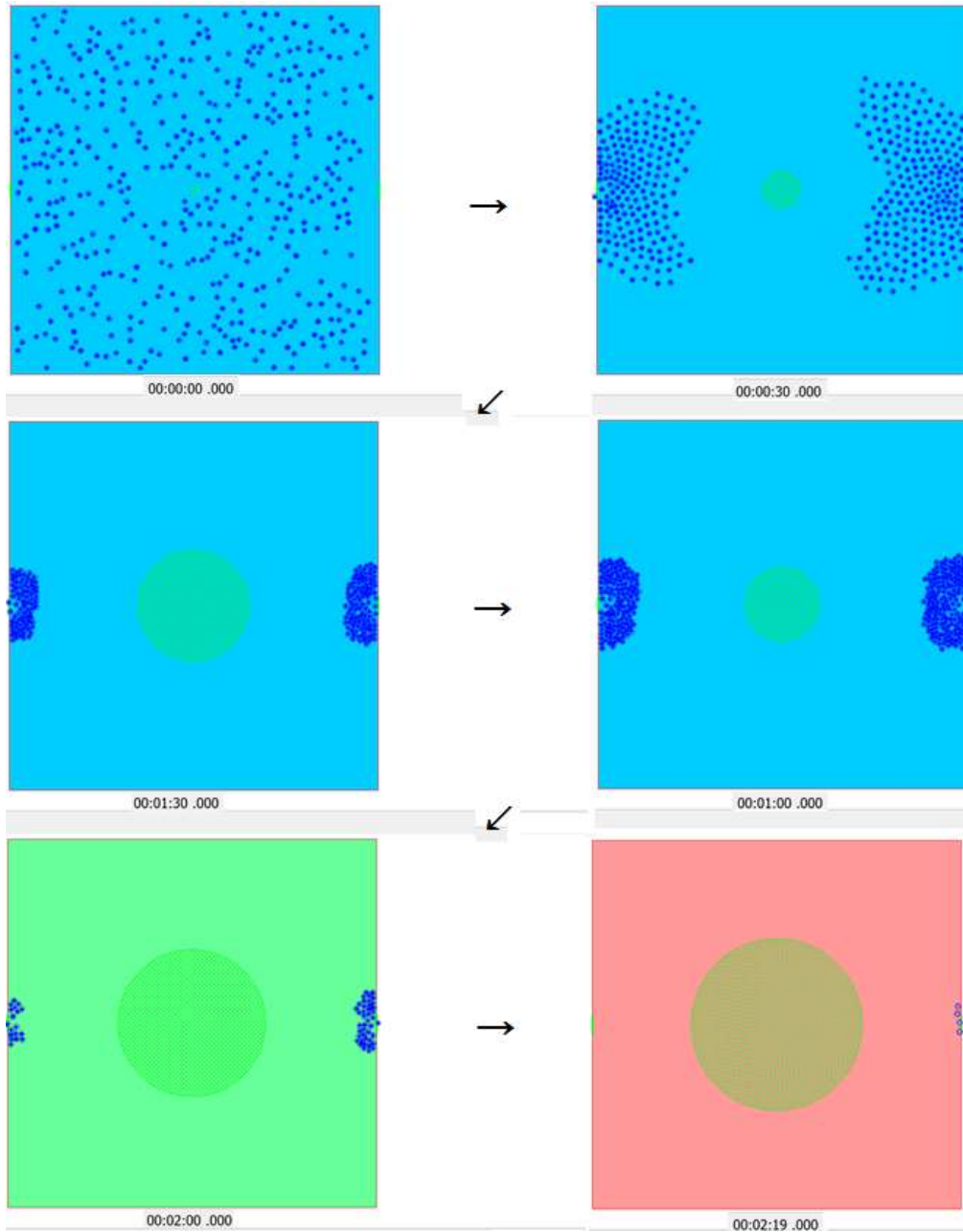


図-9 900 m²人口密度 0.5 人/m²の避難の様子

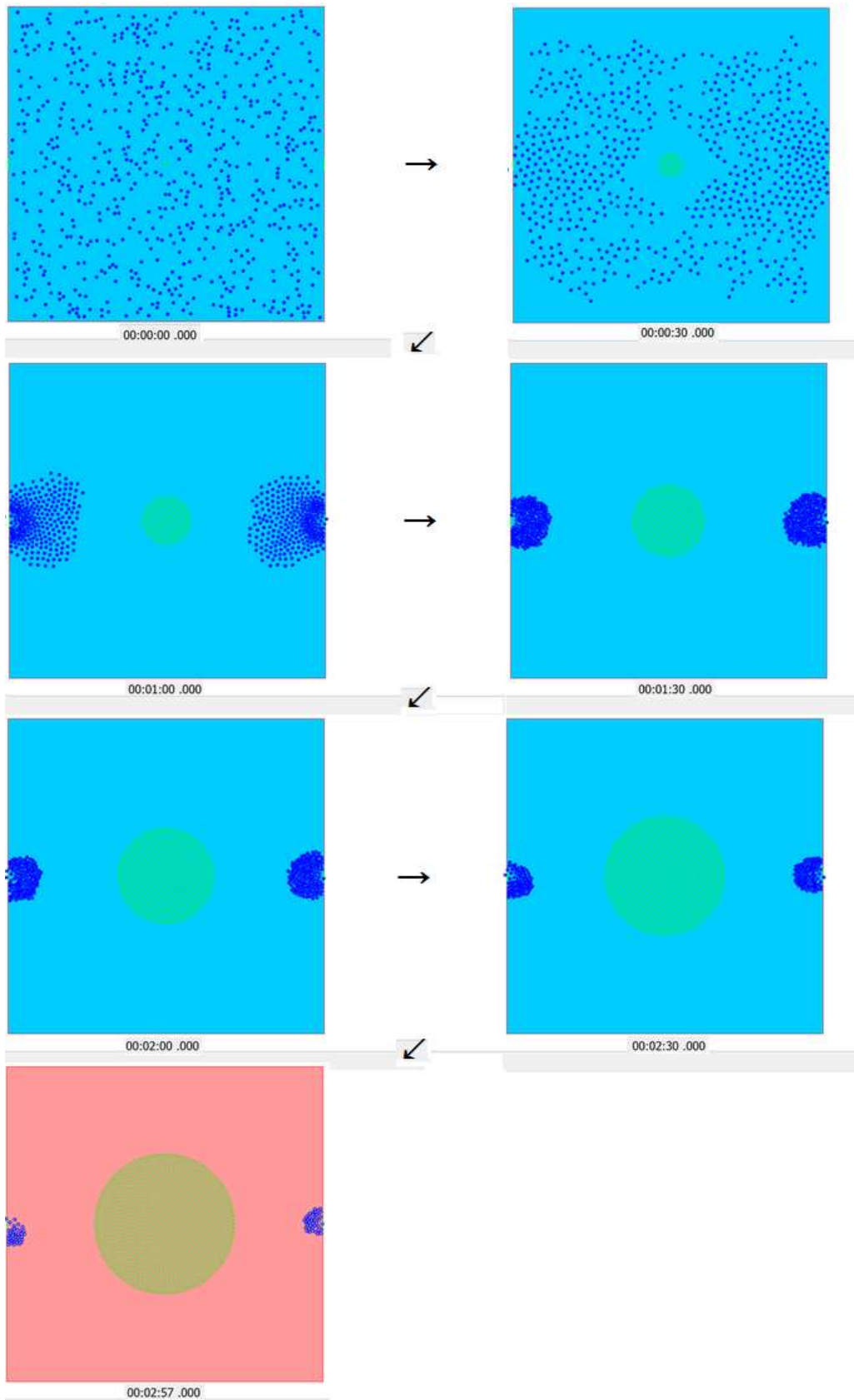


図-10 1600 m²人口密度 0.4 人/m²の避難の様子

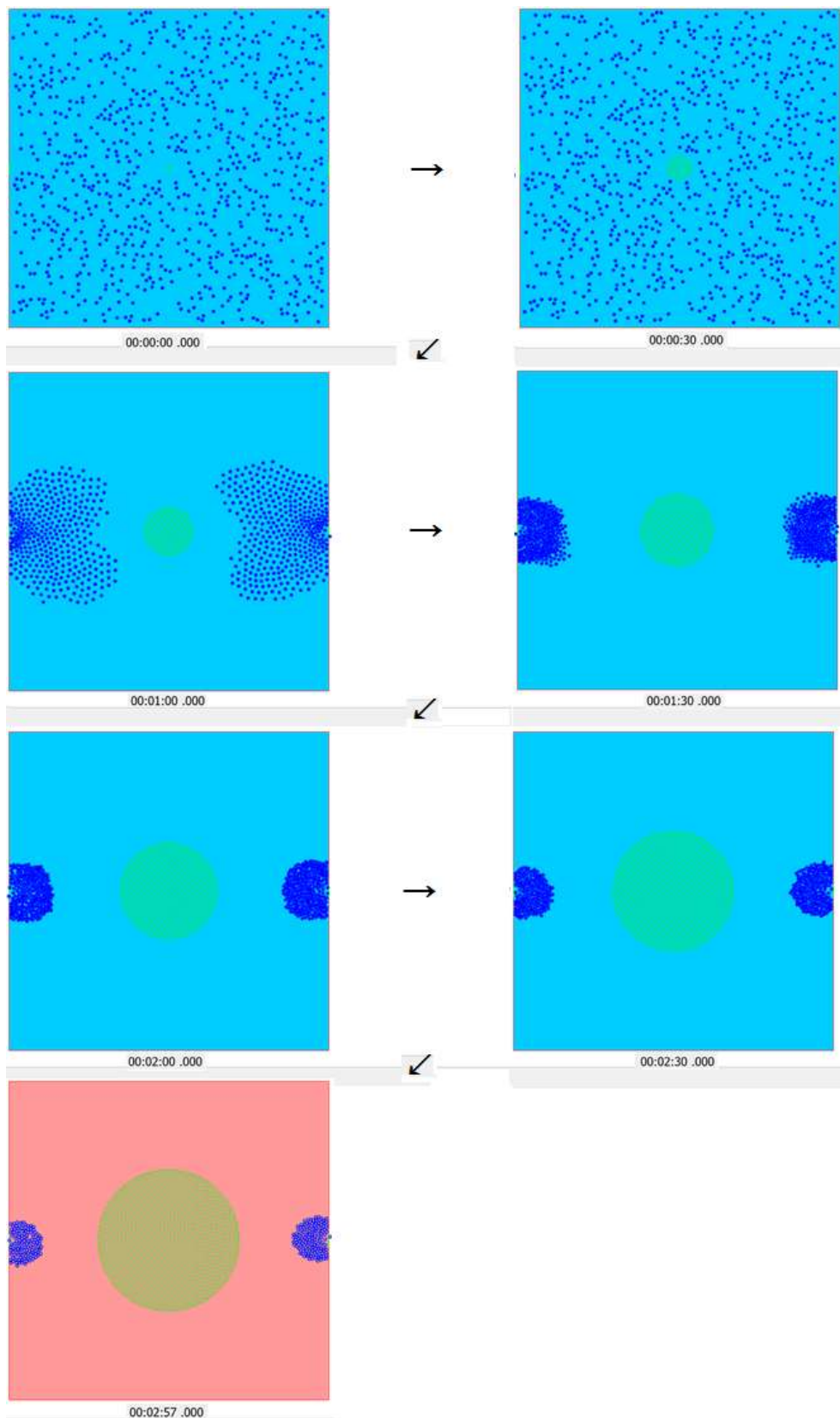


図-11 1600 m²人口密度 0.5 人/m²の避難の様子

また、各パターンにおける煙曝露者の $t=0$ 位置は図-12～図-14 の通りとなった。

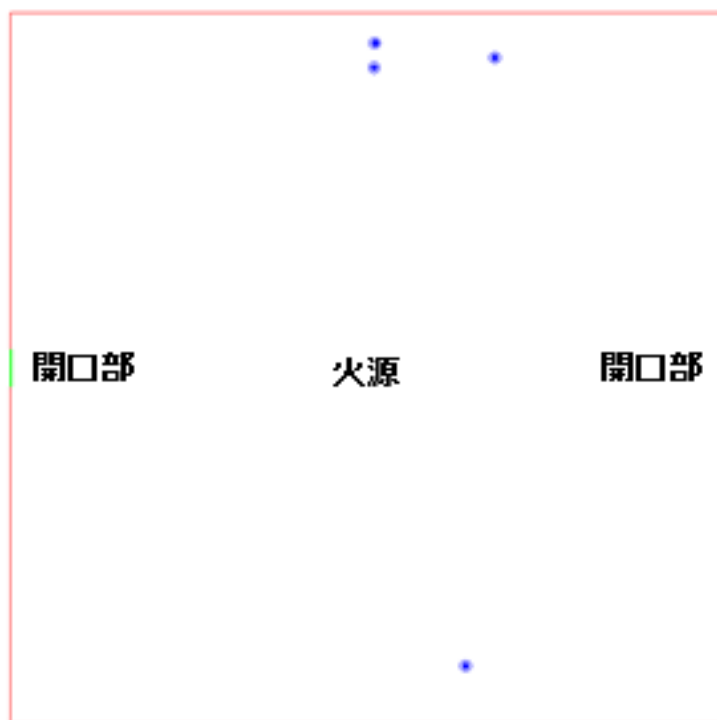


図-12 900 m²人口密度 0.5 人/m²煙曝露者の $t=0$ 位置

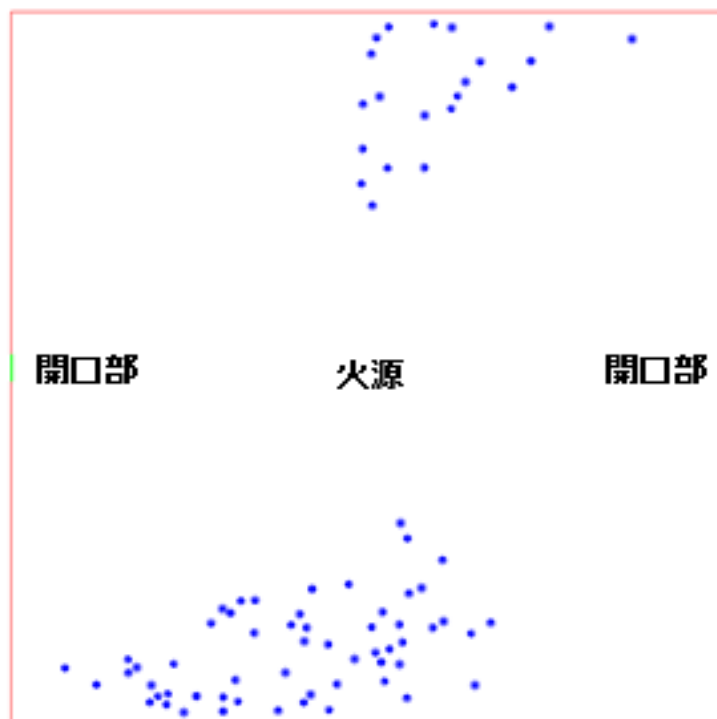


図-13 1600 m²人口密度 0.4 人/m²煙曝露者の $t=0$ 位置

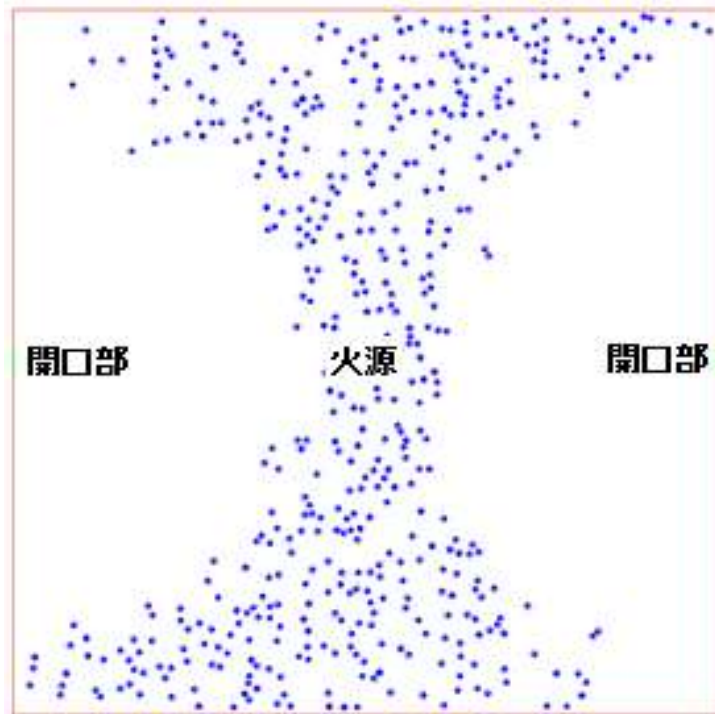


図-14 1600 m²人口密度 0.5 人/m²煙曝露者の t=0 位置

これらの結果より、曝露者が発生した3つのパターンに共通することは広い対象空間内に多くの在室者が存在していることである。また、それらが避難を開始することによって、開口部に避難者が集中した。その結果、開口部付近に避難者が滞留し、非難完了までの時間が多くかかってしまい、煙曝露者が発生したものと考えられる。

そして、煙曝露者の t=0 位置を見てわかるように、開口部から離れた位置にいた在室者の多くが煙によって曝露されたとみられる。以上の結果から、室内火災からの避難に際して、室内の床面積、人口密度、開口部の数と開口部の配置が大きく影響を及ぼすと考えられる。

4-2 煙層変化についての結果と考察

EVATUS により求めた各対象空間における床面積毎の煙層厚さの時間変化グラフを図-15に示す。煙層厚さが 1.8m 以下となった時点で、煙曝露開始とするため、下図では高さ 1.8m の破線を基準線とする。

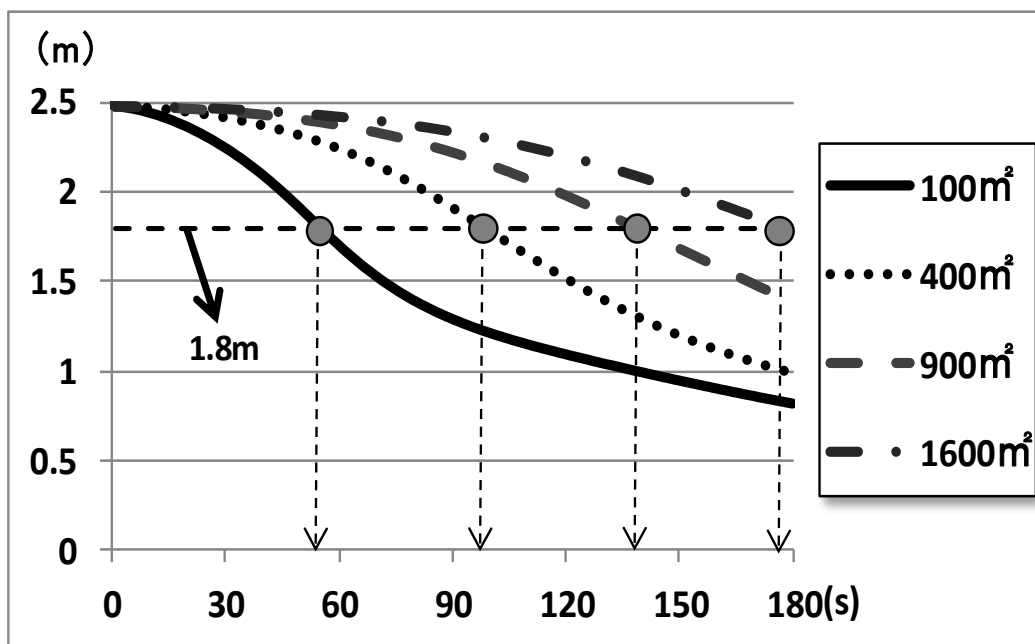


図-15 煙層厚さ変化

図を見て分かる通り、床面積が大きくなるにつれて、対象空間内の煙の降下の速度が緩やかになっていることが分かる。煙による曝露が開始された時刻を矢印で示しているが、対象空間の両辺の長さが 10m 増えるごとに煙曝露開始時刻が 40 秒ごとにほぼ均一に増加していることが分かる。

また、100 m²のグラフを見ると分かりやすいが、高さ 2m 地点を境に煙の降下の速度が著しく低下しているのが見て取れる。このことは、開口部高さが 2m に設定してあるために、溜まった煙層が開口部から流出し始めたためであると考えられる。

次に、FDS により行ったシミュレーション結果より、各対象空間の煙の性状を 30s 毎に示す。

100 m²の対象空間における煙性状の様子を図-16～22 に示す。

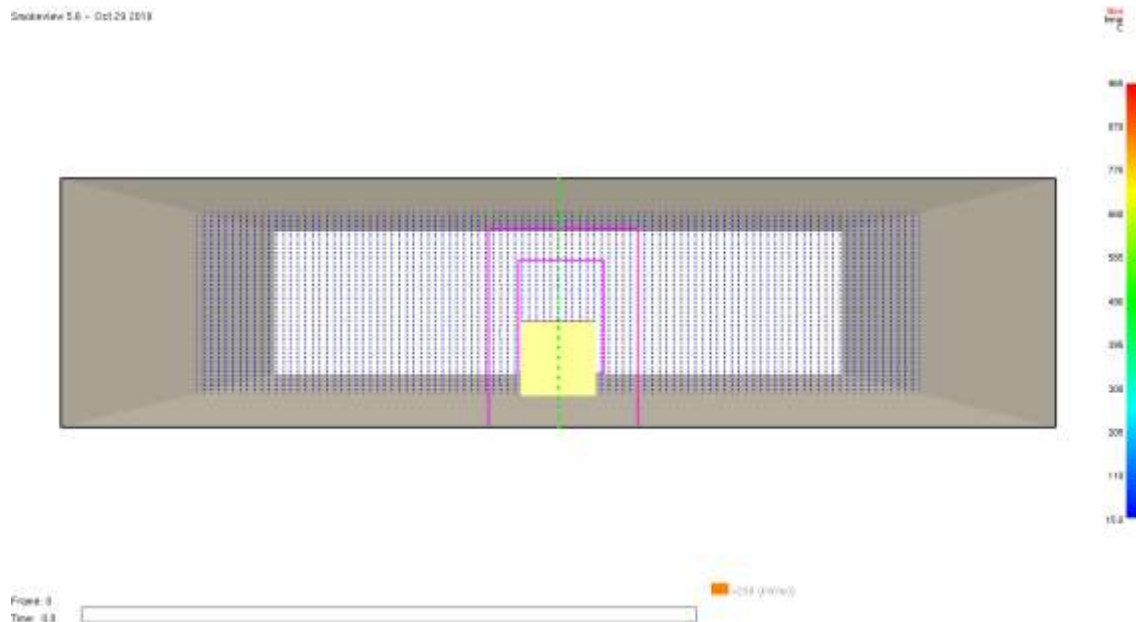


図-16 FDS 100 m²の煙性状図 0s

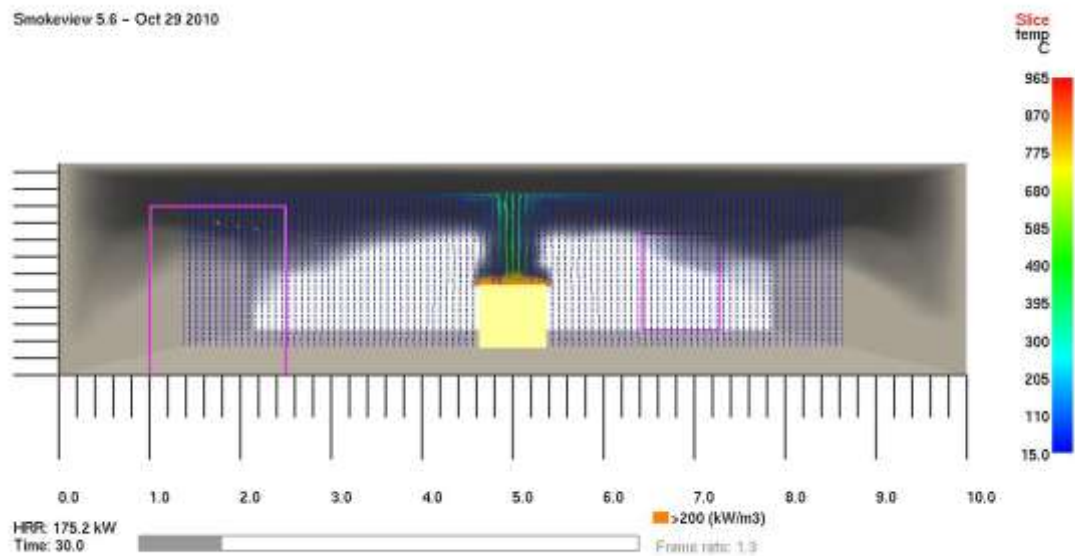


図-17 FDS 100 m²の煙性状図 30s

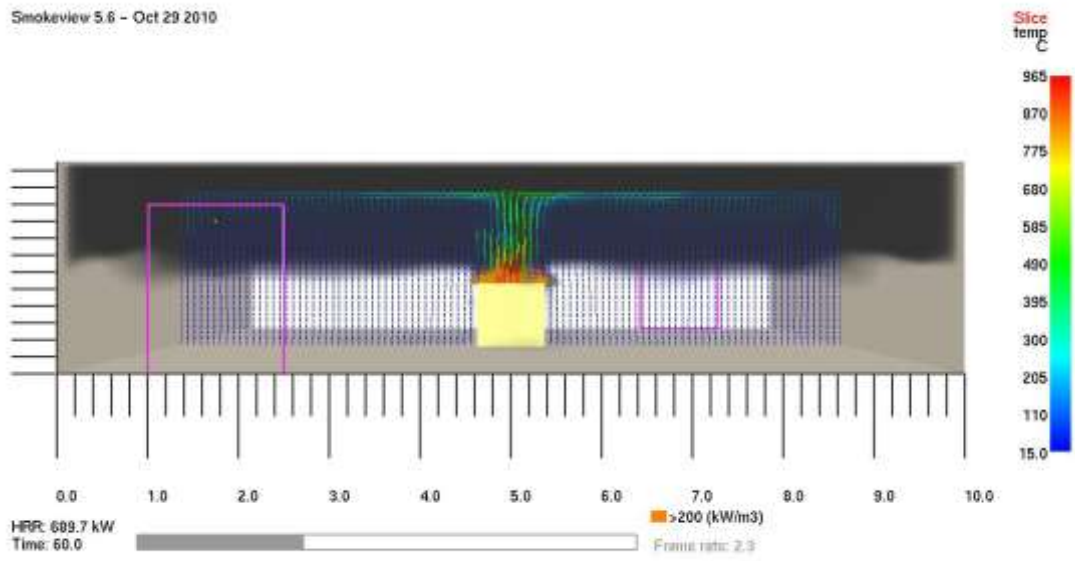


図-18 FDS 100 m²の煙性状図 60s

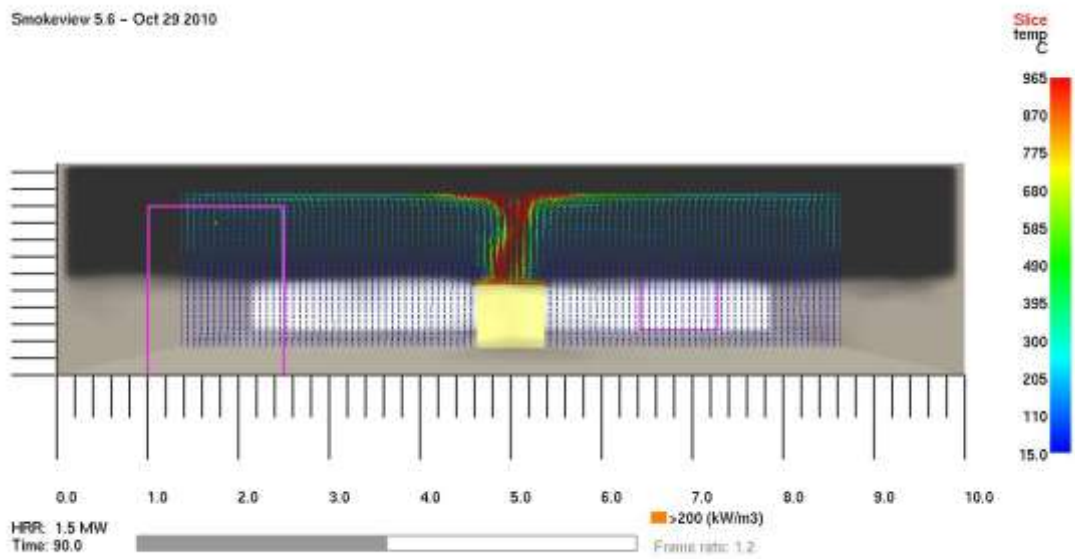


図-19 FDS 100 m²の煙性状図 90s

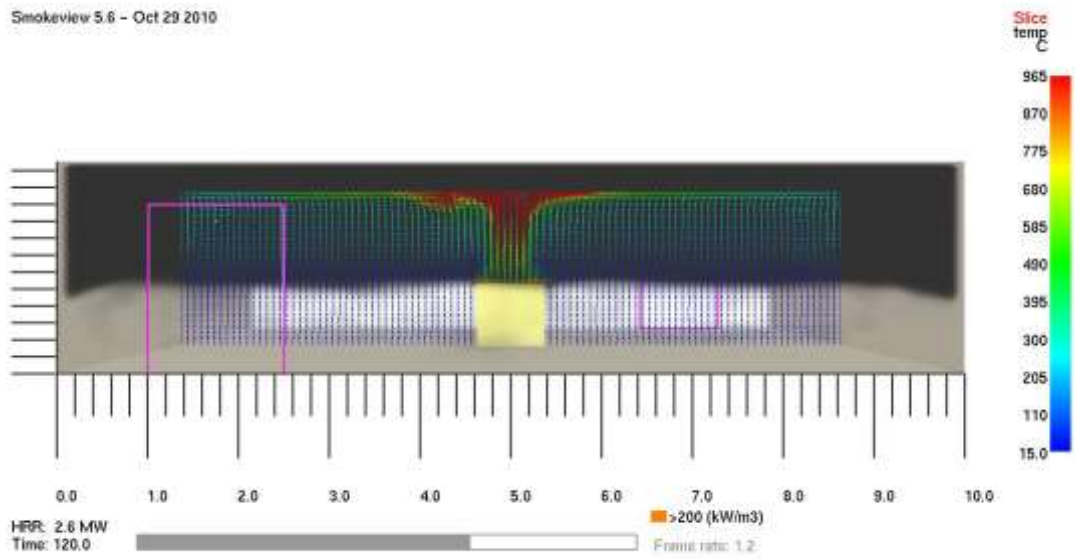


図-20 FDS 100 m²の煙性状図 120s

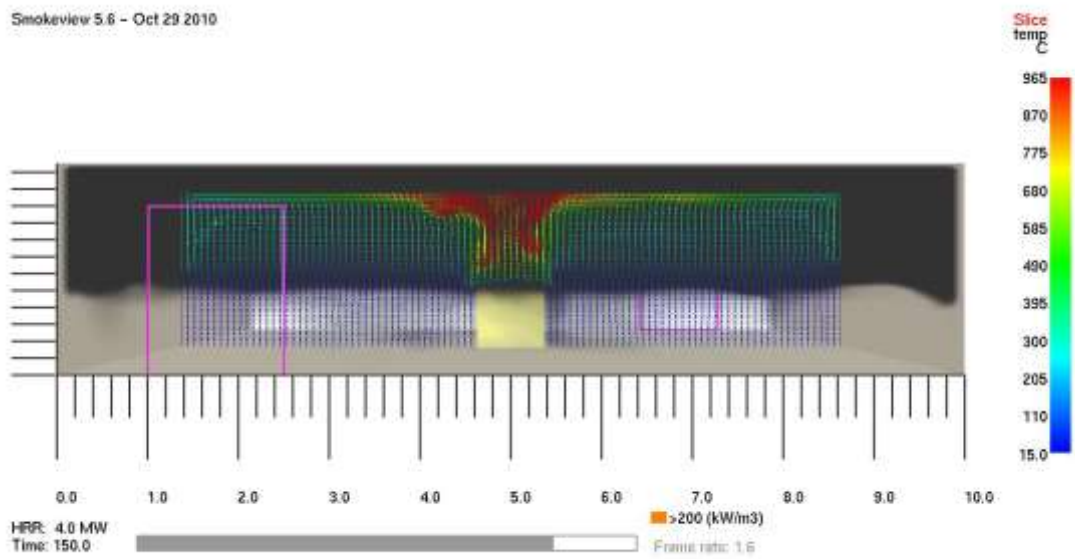


図-21 FDS 100 m²の煙性状図 150s

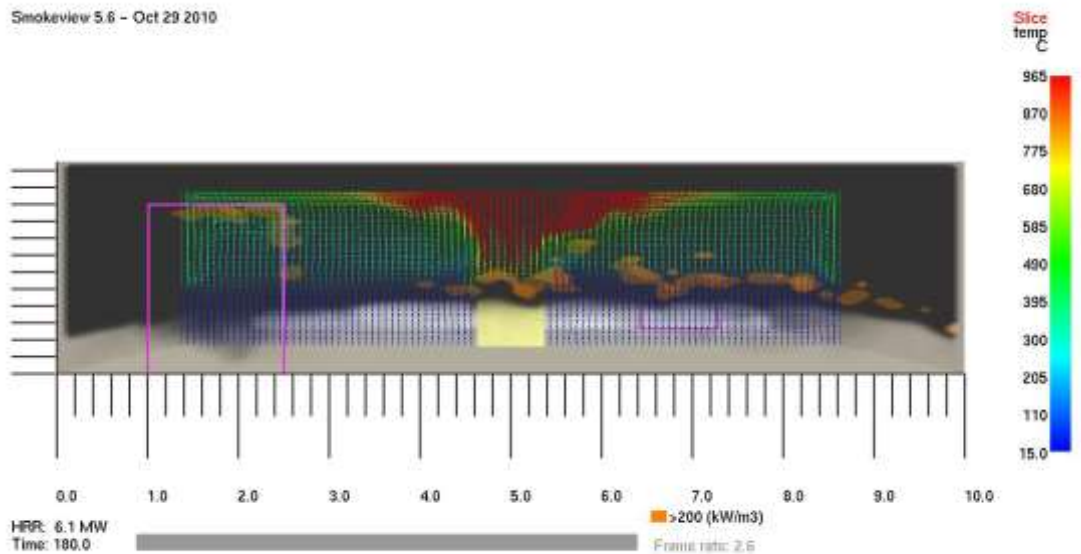


図-22 FDS 100 m²の煙性状図 180s

図-17 FDS 100 m²の 30s の煙性状図から煙が中心部に比べ、壁伝いに急速に四隅に降下していることが分かる。その後、壁面の温度と壁面に接している気体の温度の相関により、上昇流（火源からで続ける煙）と下層流（四隅の煙）が拡散した後、徐々に煙層が安定しながら降下していくことが分かった。これは初期火災を想定しているため、煙層の温度上昇に比較して、壁面の温度上昇は遅れるため、上部煙層から下部煙層への下降流を生じた後、上昇流に反転し、煙層を拡散する作用が再現されているものと考えられる。煙層の安定性は煙層と空気層の温度差が大きく、浮力が大きい程、また、煙層と空気層の相対速度が小さいほど、煙層が安定する。空間のスケールの小さい空間では時間が経過するにつれて上層部と下層部の温度差が大きくなるため、温度差が大きくなる60秒以降は比較的安定した煙層になったと考えられる。90秒の地点で高さ1.2mまで降下し120秒で1.0m、150秒で約0.8m、180秒で約0.4mまで一気に降下することが分かる。先ほどの二層ゾーンモデルの結果で得られた図-15の煙層厚さのグラフと比較して見ると煙は初期の段階では大幅に違いがでてくるが、30秒以降の煙層厚さ変化はさほど違っていないことが分かる。

400 m²の対象空間における煙性状の様子を図-23～29 に示す。

Smokeview 5.6 - Oct 29 2018



図-23 FDS 400 m²の煙性状図 0s

Smokeview 5.6 - Oct 29 2018



図-24 FDS 400 m²の煙性状図 30s

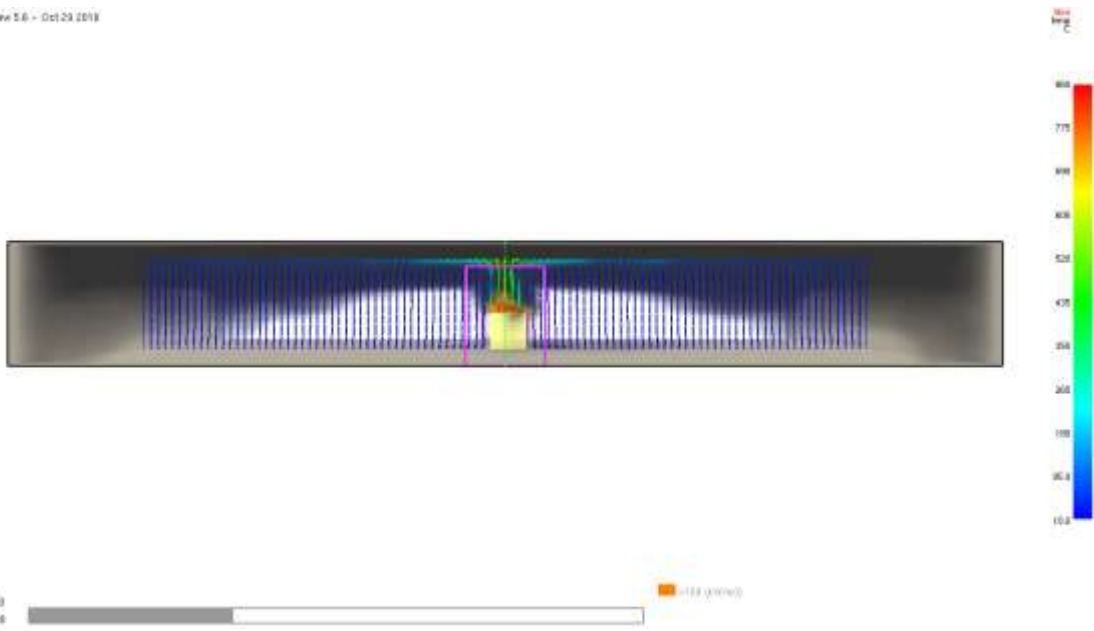


図-25 FDS 400 m²の煙性状図 60s

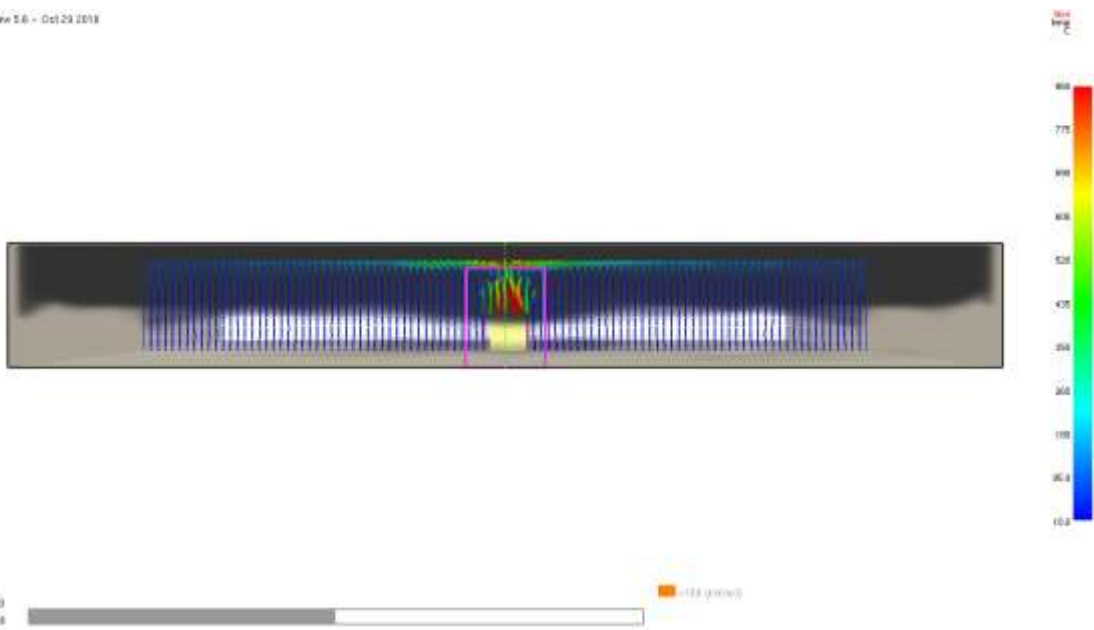
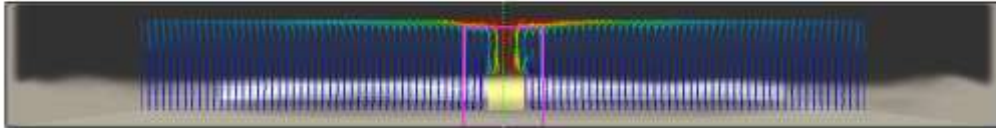


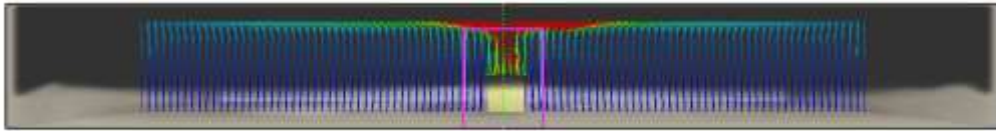
図-26 FDS 400 m²の煙性状図 90s



Frame: 120
Time: 120.0

0.000 (0.000)

図-27 FDS 400 m²の煙性状図 120s



Frame: 150
Time: 150.0

0.000 (0.000)

図-28 FDS 400 m²の煙性状図 150s

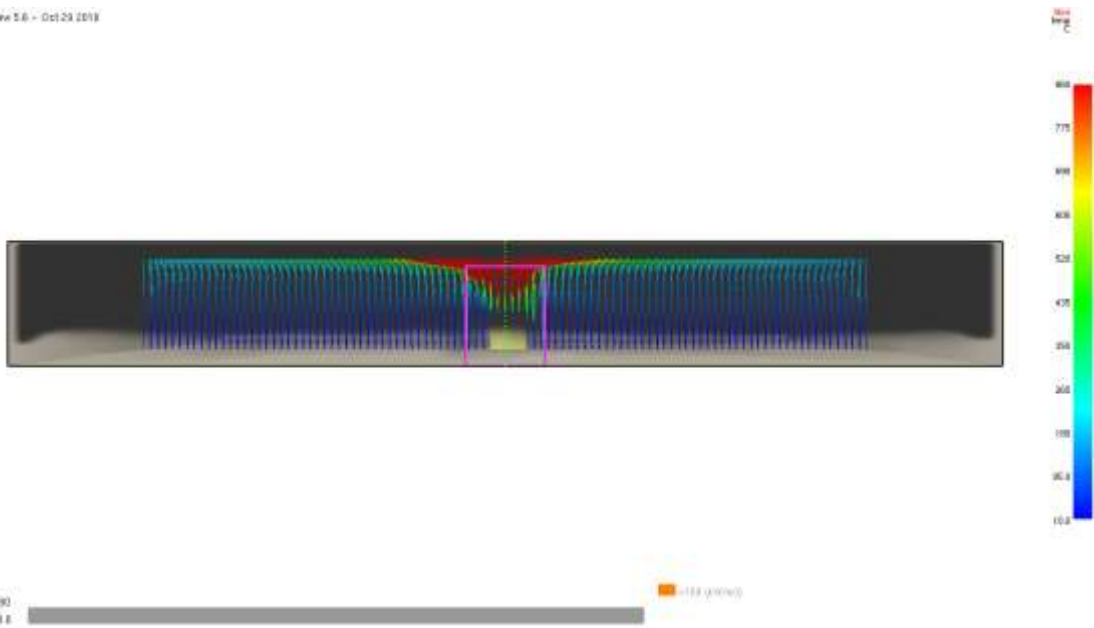


図-29 FDS 400 m²の煙性状図 180s

900 m²の対象空間における煙性状の様子を図-30～36 に示す。

Smokeview 5.6 - Oct 29 2018



図-30 FDS 900 m²の煙性状図 0s

Smokeview 5.6 - Oct 29 2018

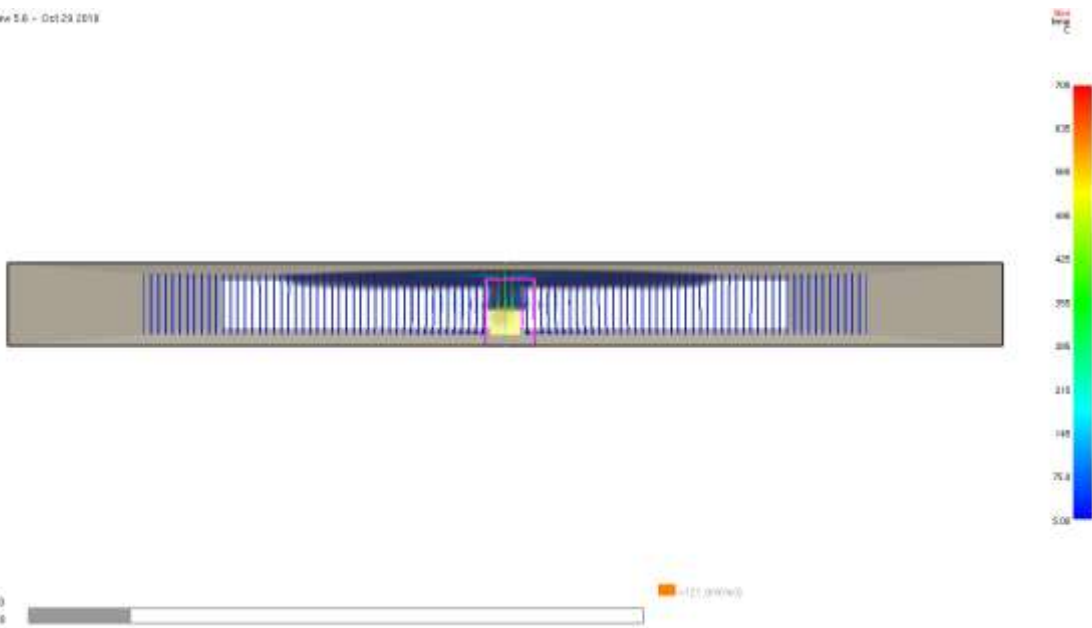


図-31 FDS 900 m²の煙性状図 30s

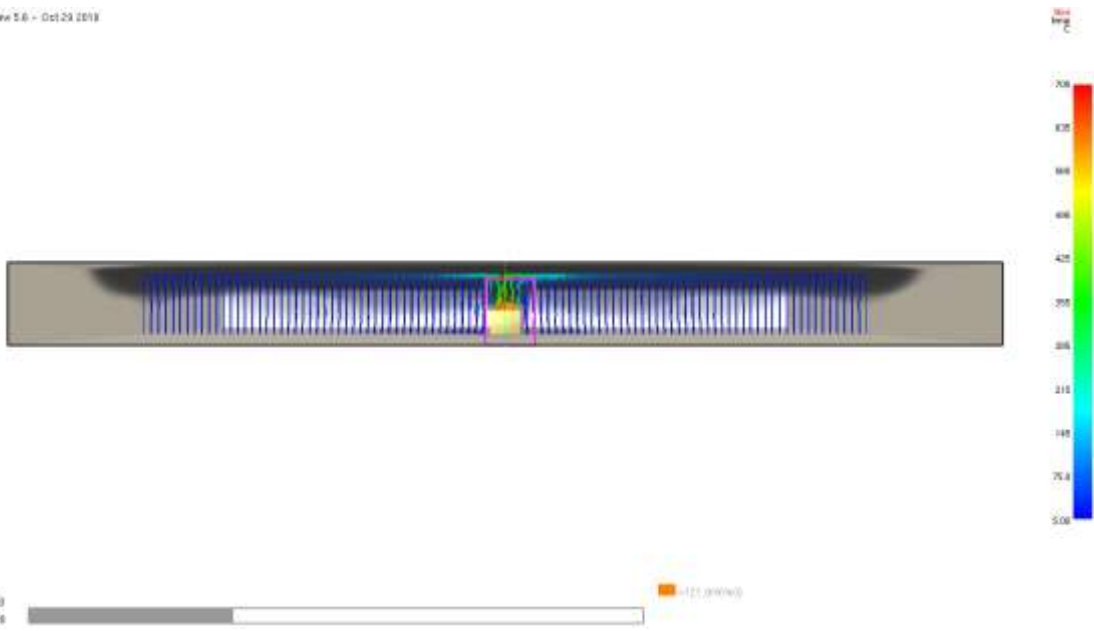


図-32 FDS 900 m²の煙性状図 60s

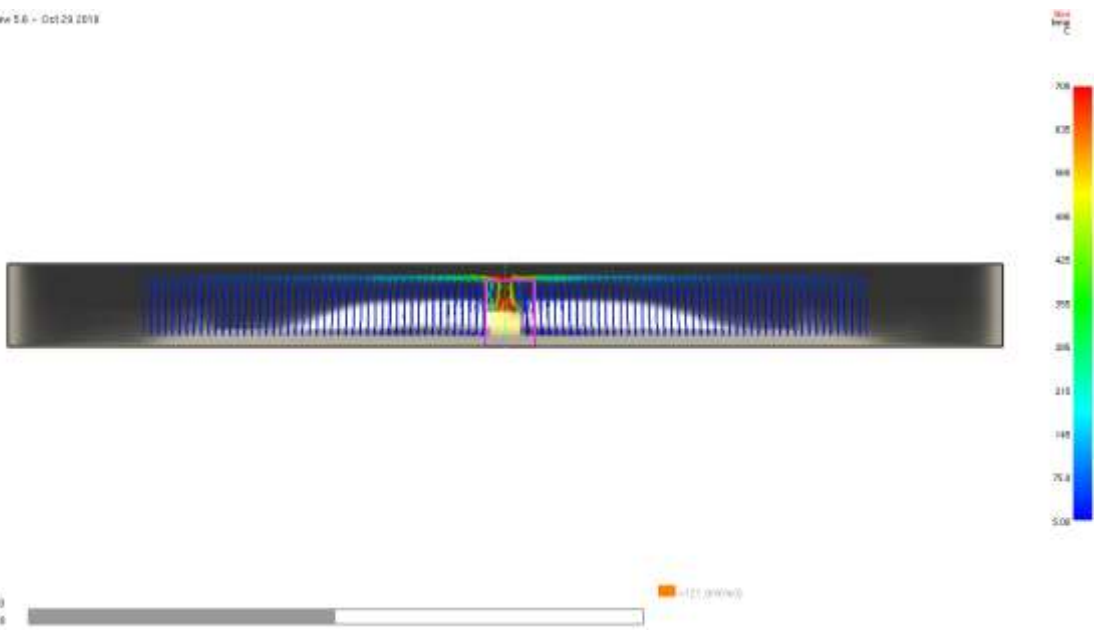


図-33 FDS 900 m²の煙性状図 90s

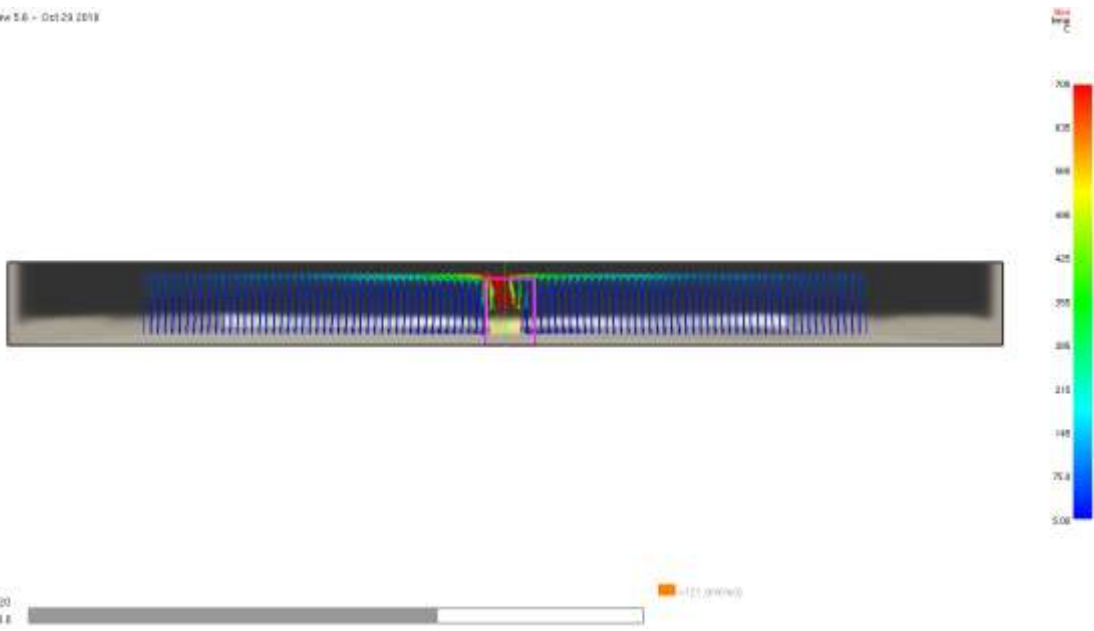


図-34 FDS 900 m²の煙性状図 120s

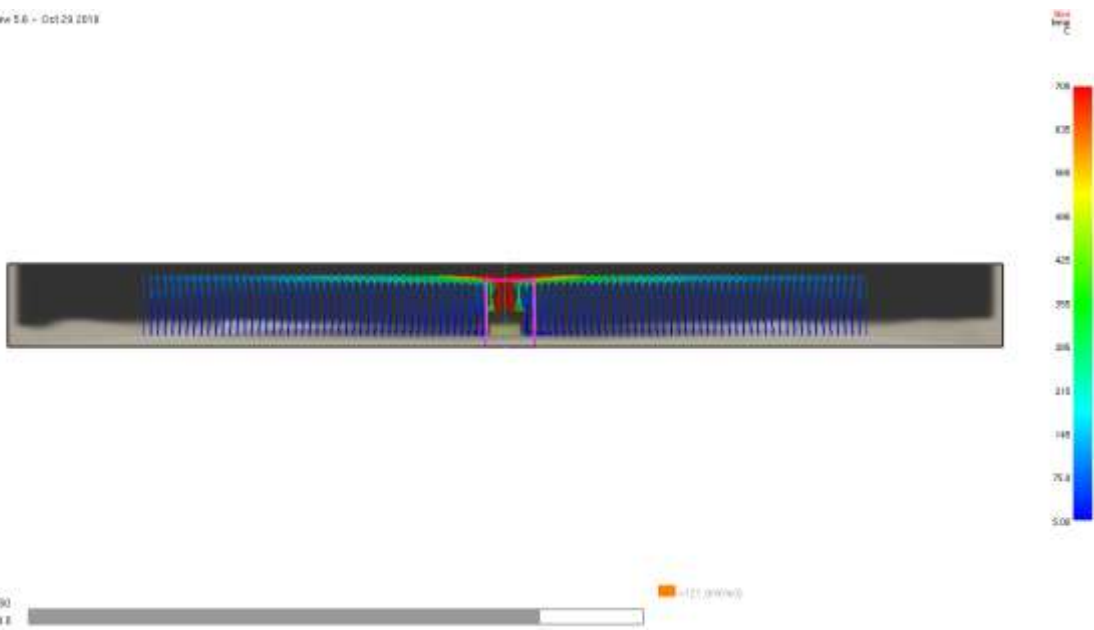


図-35 FDS 900 m²の煙性状図 150s

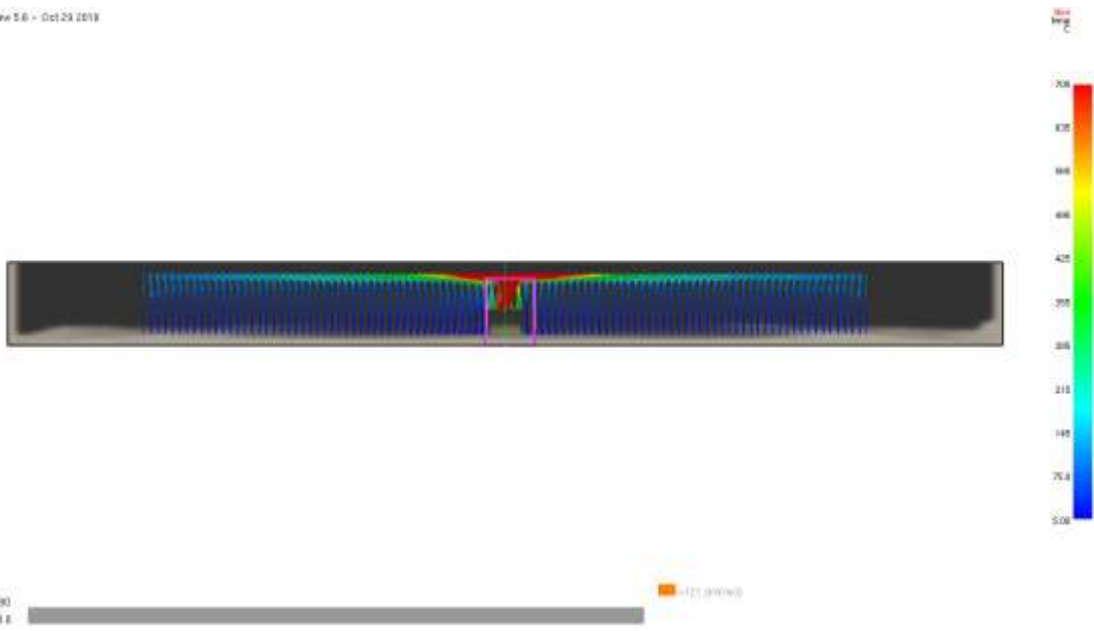


図-36 FDS 900 m²の煙性状図 180s

1600 m²の対象空間における煙性状の様子を図-37～43 に示す。

Smokeview 5.6 - Oct 29 2013



図-37 FDS 1600 m²の煙性状図 0s

Smokeview 5.6 - Oct 29 2013

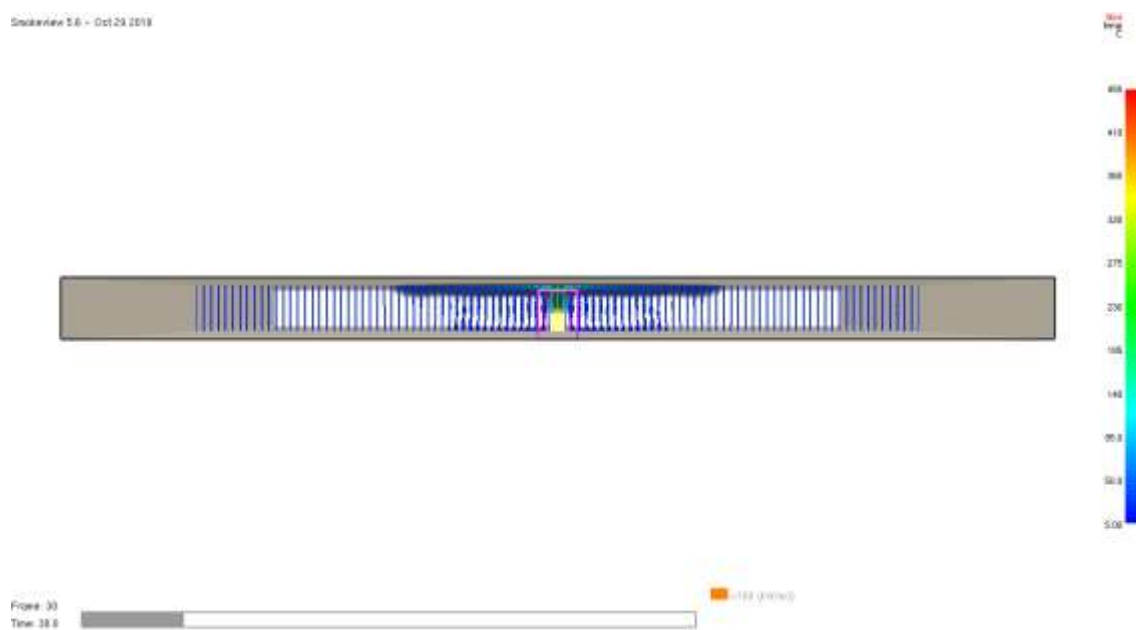


図-38 FDS 1600 m²の煙性状図 30s

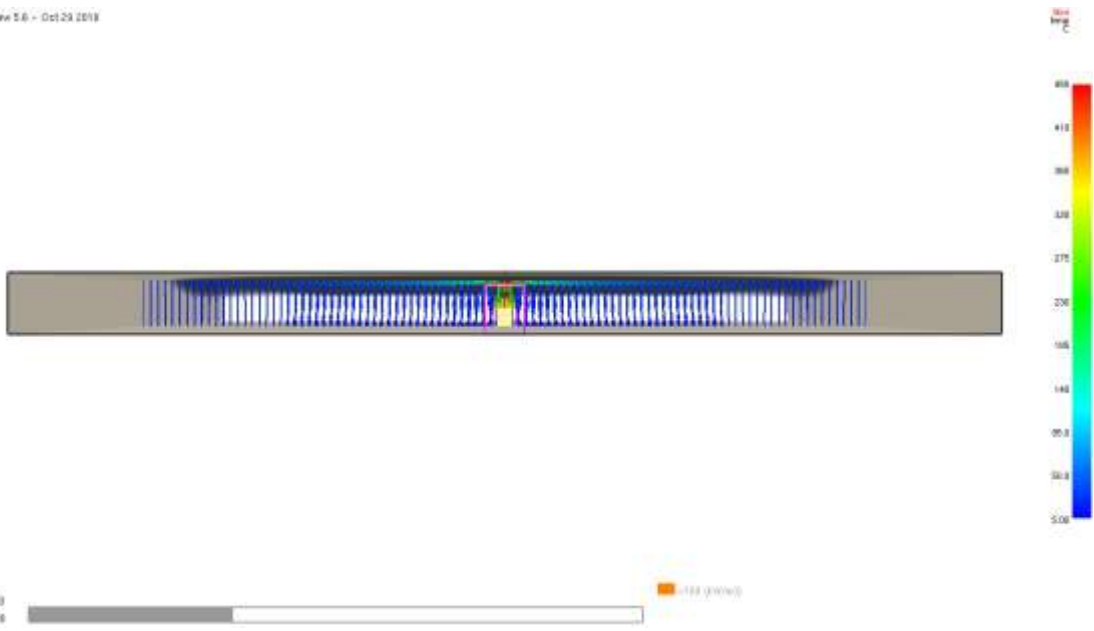


図-39 FDS 1600 m²の煙性状図 60s

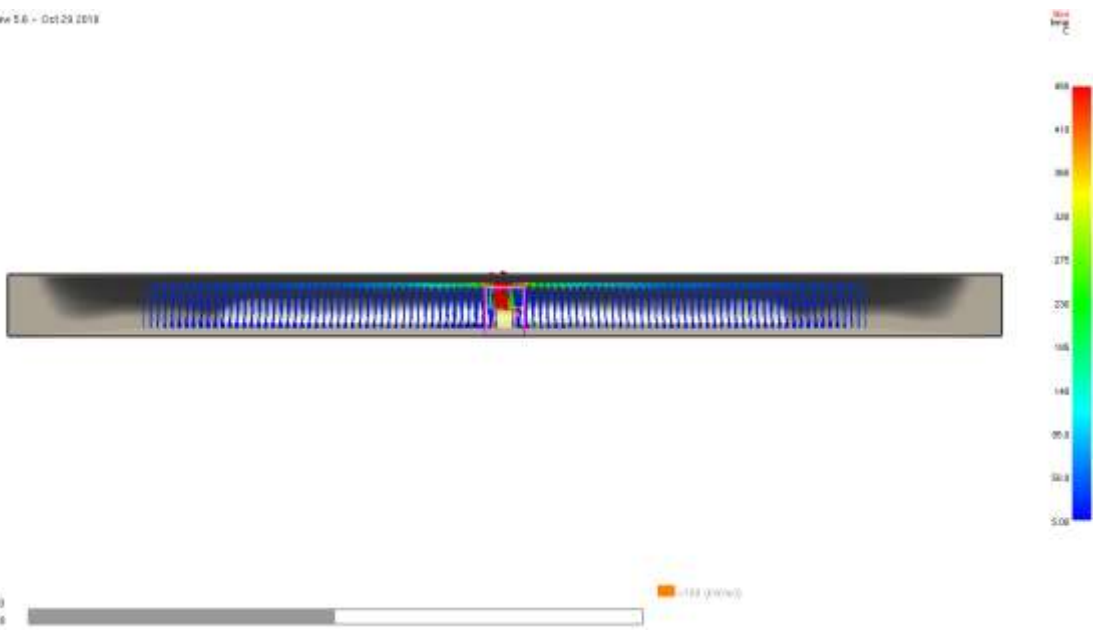
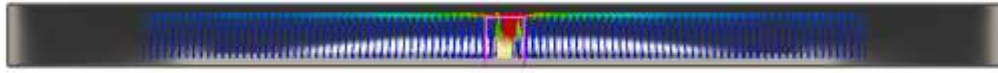


図-40 FDS 1600 m²の煙性状図 90s

Smokeview 5.6 - Oct 29 2018



Frame: 120
Time: 120.0

0.000 (ground)

図-41 FDS 1600 m²の煙性状図 120s

Smokeview 5.6 - Oct 29 2018



Frame: 150
Time: 150.0

0.000 (ground)

図-42 FDS 1600 m²の煙性状図 150s

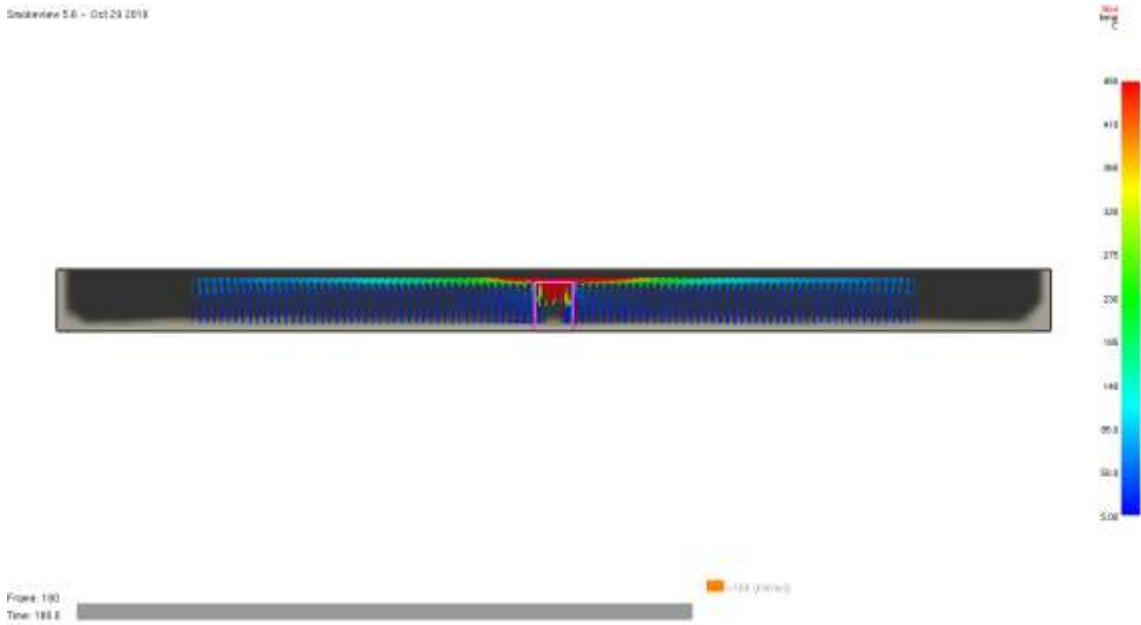


図-43 FDS 1600 m²の煙性状図 180s

1600 m²の大規模空間では煙層が壁に到達するのが遅れるため 100 m²や 400 m²のやや小規模空間と同様の煙層変化が数十秒遅れて起こる。400 m²では開口部付近高さ 1.8mの地点まで到達するのに約 60s かかる。900 m²では約 80 秒、1600 m²では約 100 秒かかる。二層ゾーンモデルの EVATUS と比べると煙曝露開始時刻よりも 40 秒近く先に降下している。特に床面積を大きくした 1600 m²では 80 秒近く違いがでる。そのため二層ゾーンモデルの EVATUS では大規模空間の精度はかなり低いと言える。1600 m²の空間では全体的に室内温度上昇が緩やかであるため（180 秒経過後も 50℃前後）煙層が 80 秒前後からやや乱れはじめることが分かった。

4-3 対象空間内の温度変化についての考察

FDS では対象空間内での火災における温度と煙層厚さの時間変化のシミュレーション結果を示す。

はじめに、FDS のシミュレーション結果より算出した、対象空間毎の発熱速度の変化グラフを図-44 に示す。

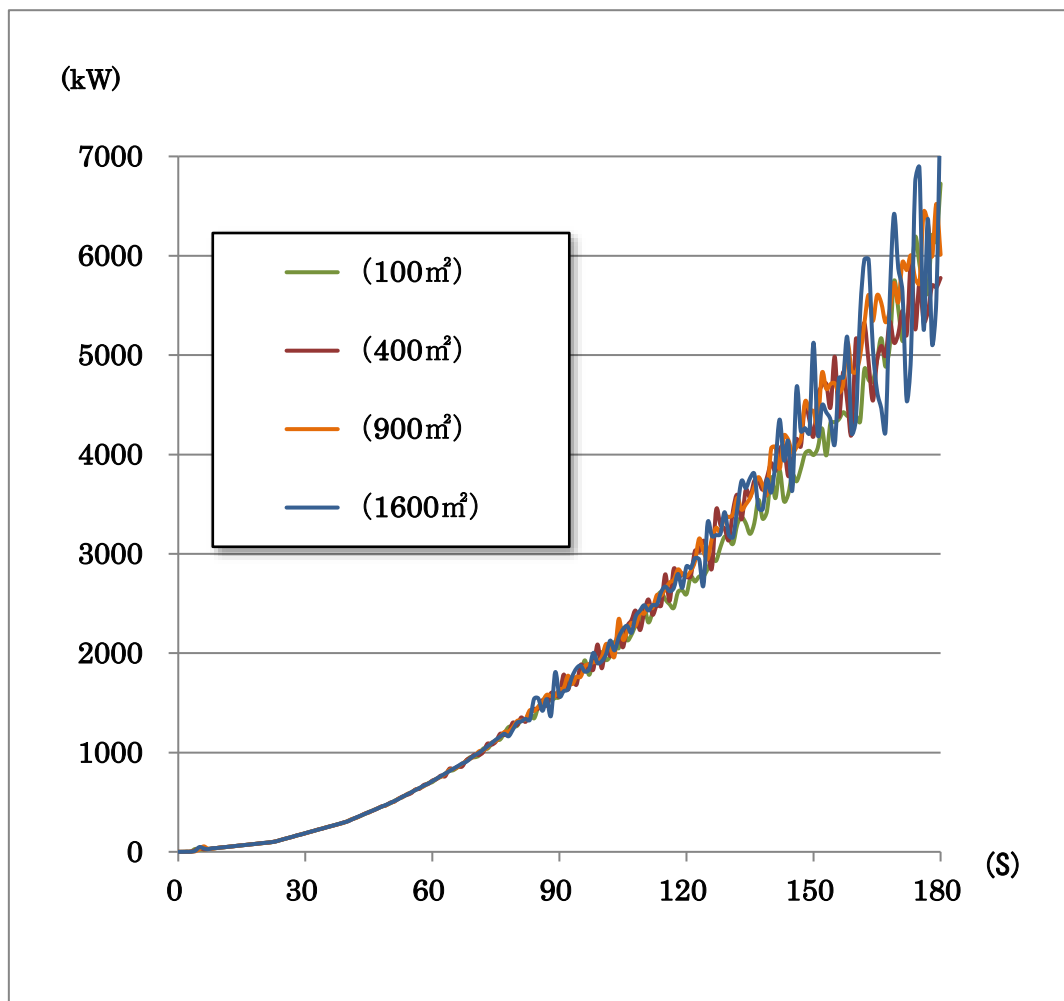


図-44

そして、先述した通り EVATUS では図-7 の αt^2 モデルを用いた。

図-44 のグラフからは 90(s) までは室面積の大きさを変えても、室面積ごとの発熱量の変化がほとんど見られないが、その時刻以降は 100 m² に比べ室面積を大きくしていくにつれて室内の発熱量の振れ幅が大きく変動していることが分かる。これは FDS の燃焼モデルが乱流火炎であり、流体解析の際、空間面積が増えるにつれて振動周期が大きく振動するためであると考えられる。もしくは空間面積が増えると解析領域が大きくなり、多少の計算誤差が生じたことによると考えられる。

EVATUSにより算出した各対象空間の30 s 毎の温度変化グラフを図-45～48に示し比較する。

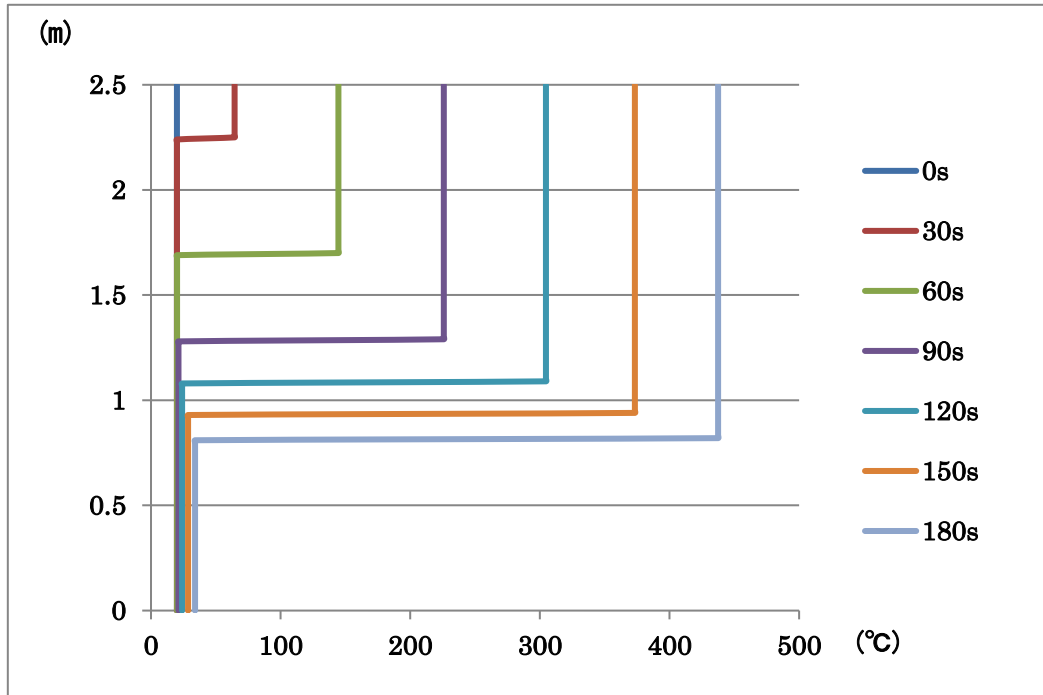


図-45 100 m²

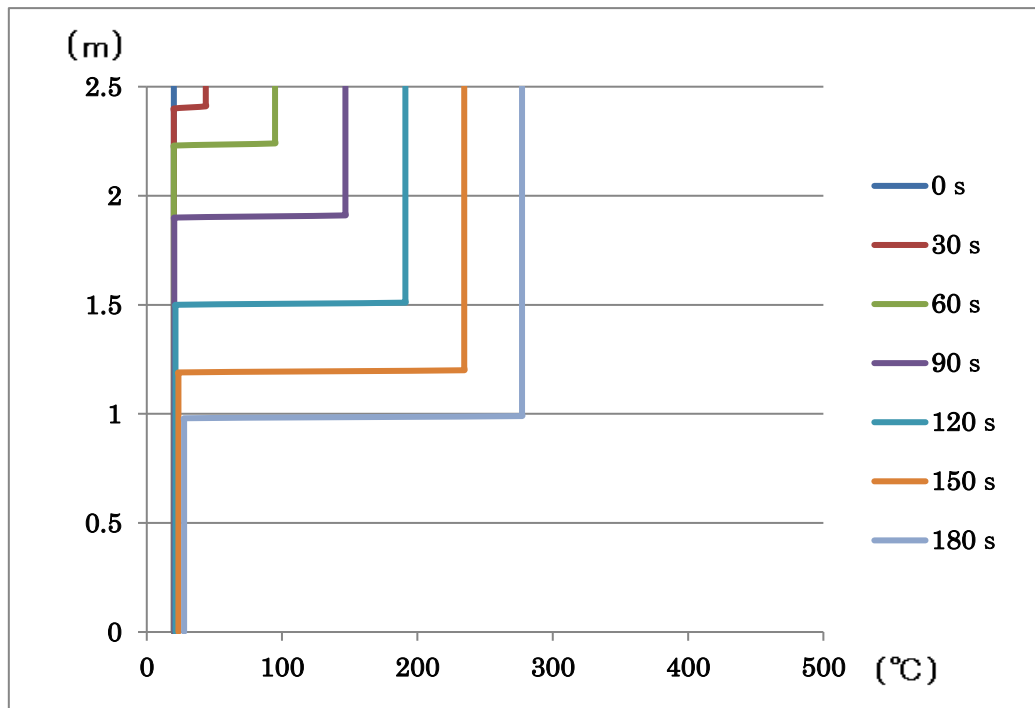


図-46 400 m²

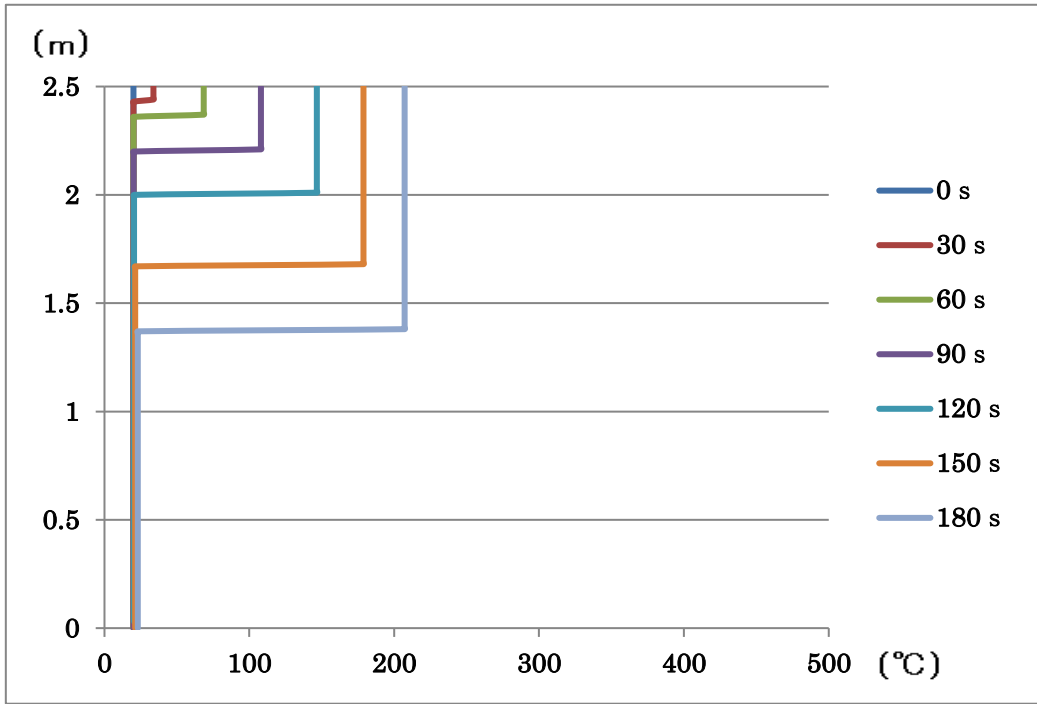


图-47 900 m²

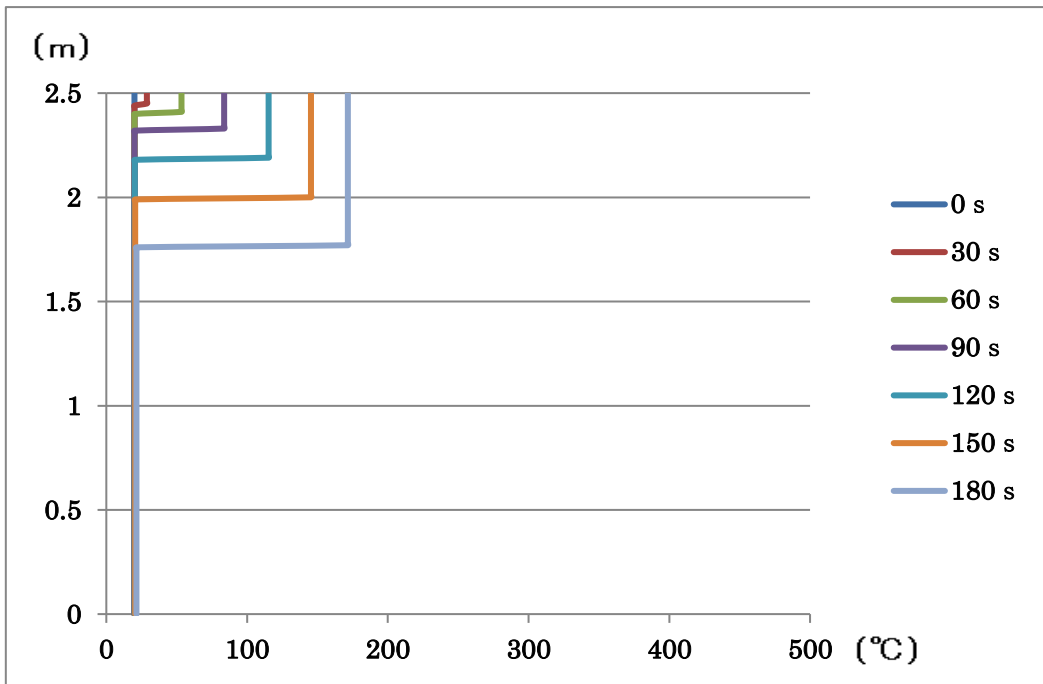


图-48 1600 m²

EVATUS は二層ゾーンモデルを利用しているため、対象空間内の温度は煙層である室内上層部と下層部に明確に分かれている。そのため、上層部、下層部の温度は均一である。また、上図を見てわかる通り先述した図-15 の煙層の変化グラフと同じように、室面積が大きくなるにつれて温度変化の幅が狭くなっていることが分かる。

そして、開口部高さまで煙層が達した場合、高さ方向の変化の幅が小さくなっていることが分かる。これは、二層ゾーンモデルであることから分かる通り、これらの温度変化のグラフは煙層の降下の様子をそのまま表すものであるため、対象空間上層部に溜まった煙層が開口部から流出し始めたためであると考えられる。

次に、FDS によって算出した値から特に変化の大きな 100 m^2 の対象空間における、開口部から 1 m 間隔での 30 s 毎の高さ方向の温度変化グラフを図-49～図-53 に示す。また、 1600 m^2 の開口部から 5 m 間隔での 30 s 毎の高さ方向の温度変化グラフを図-54～図-57 に示す。

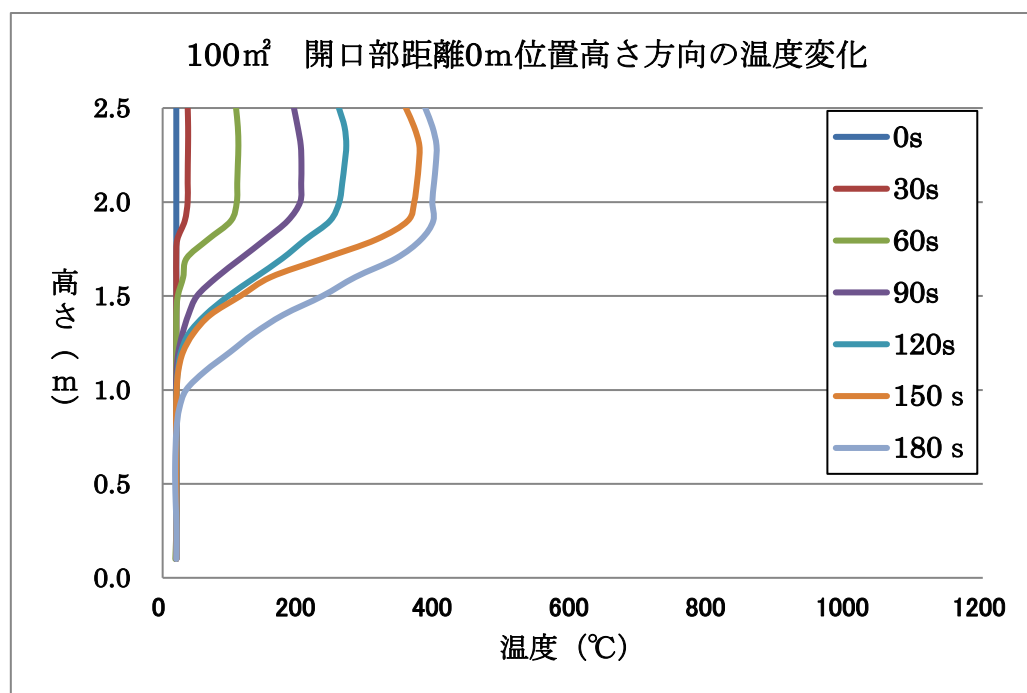


図-49

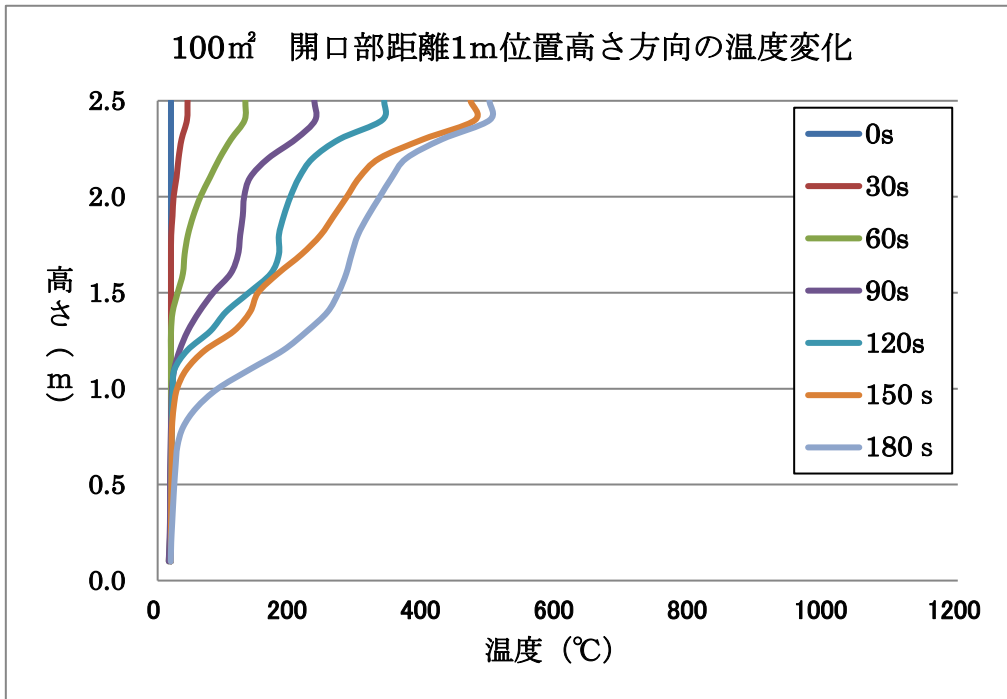


図-50

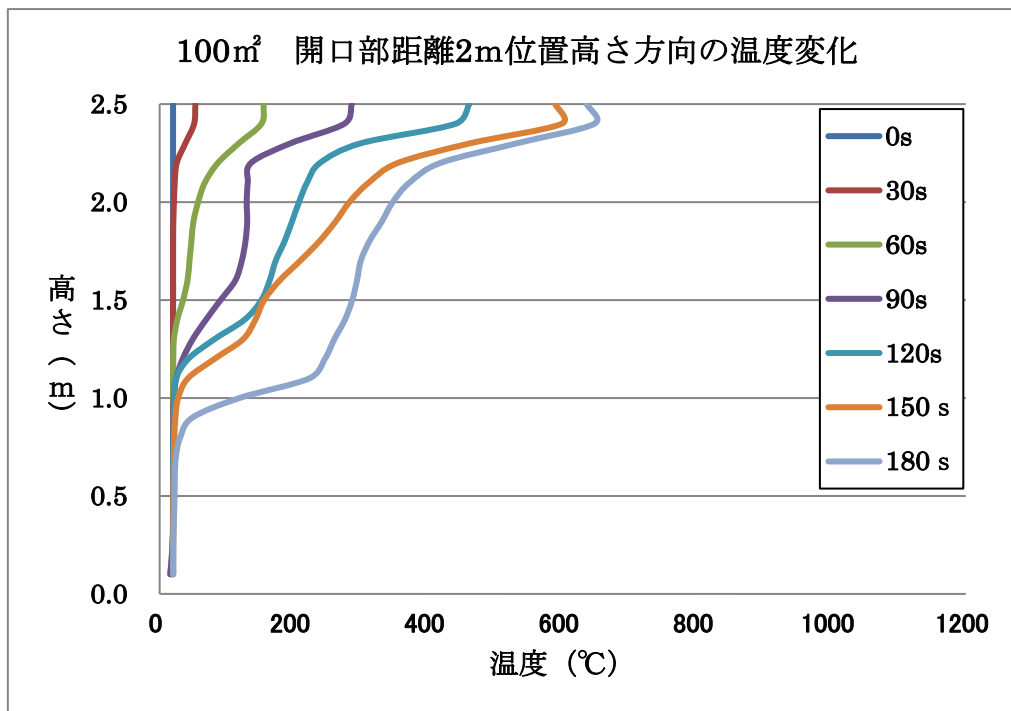


図-51

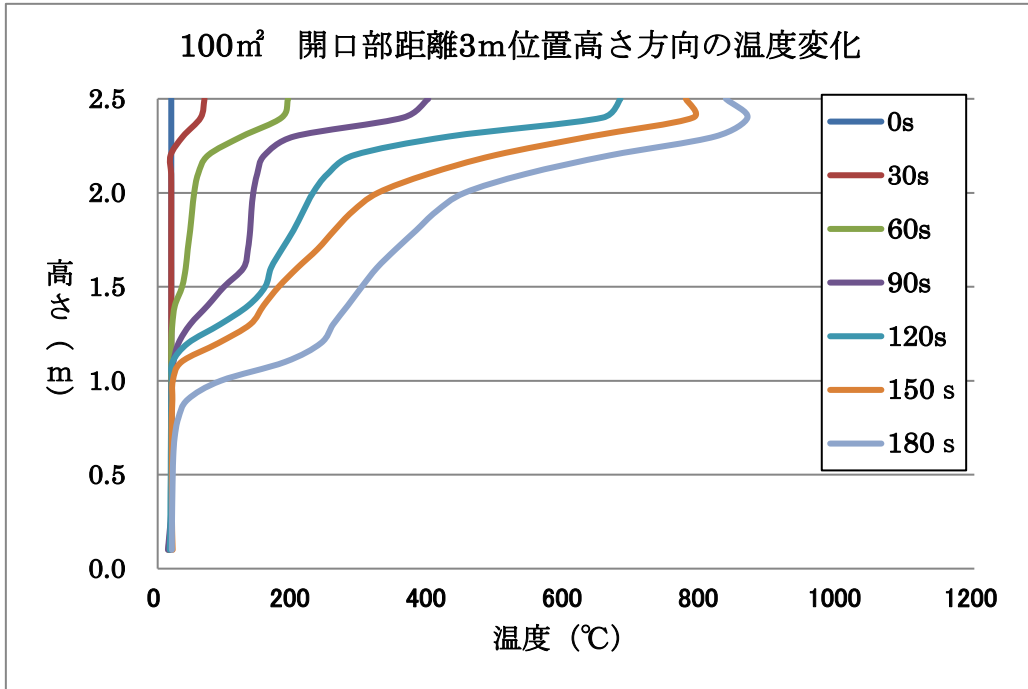


図-52

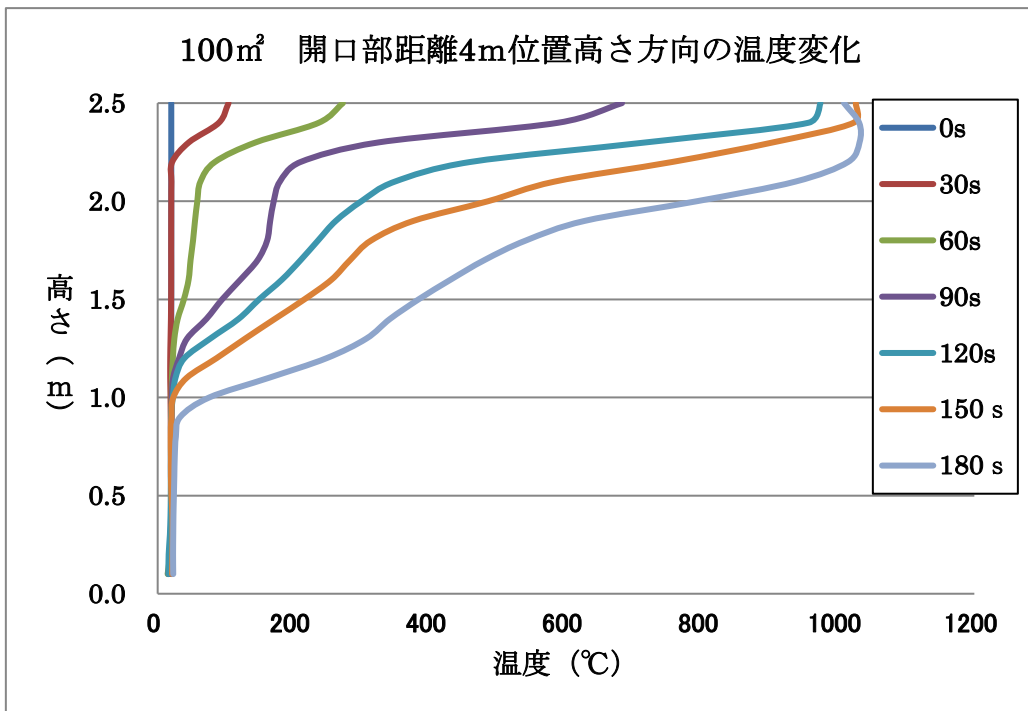


図-53

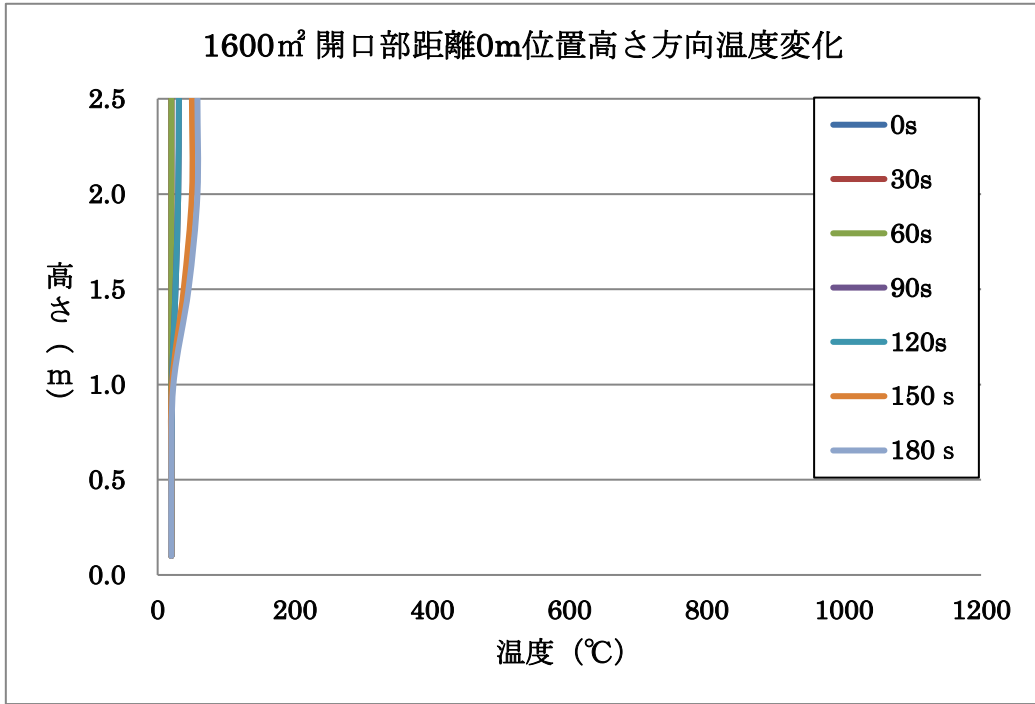


図-54

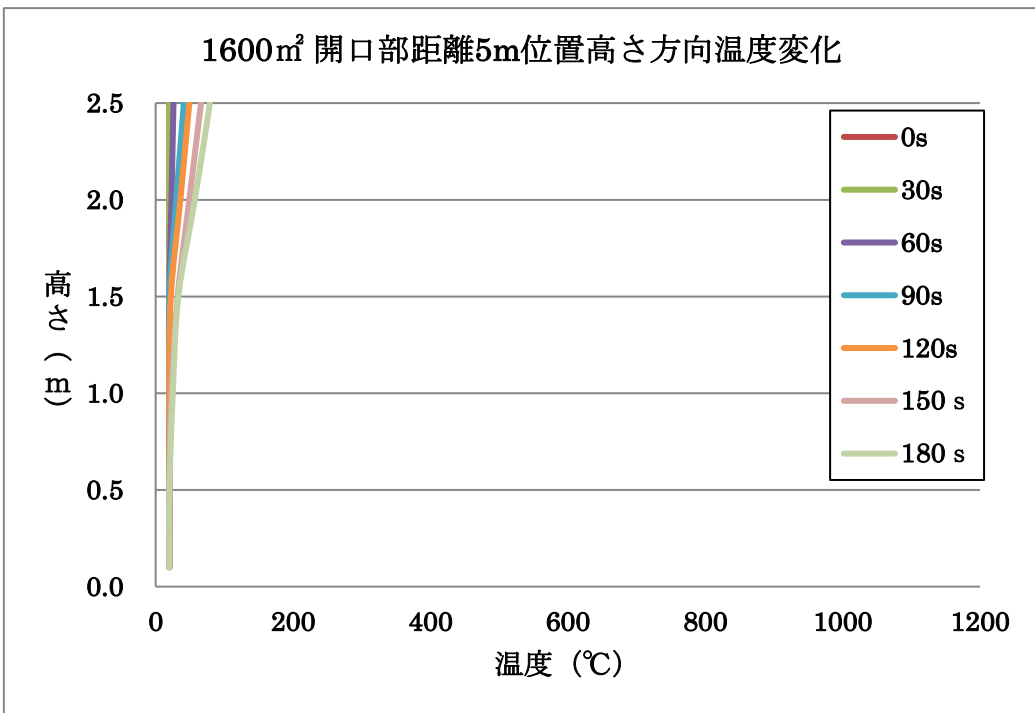


図-55

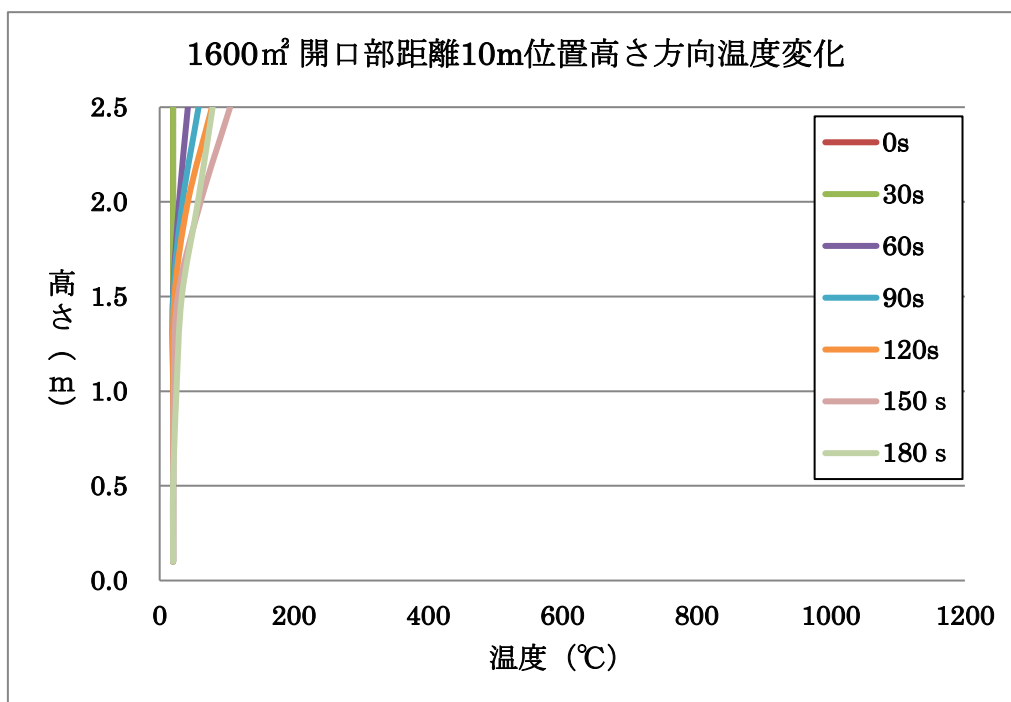


図-56

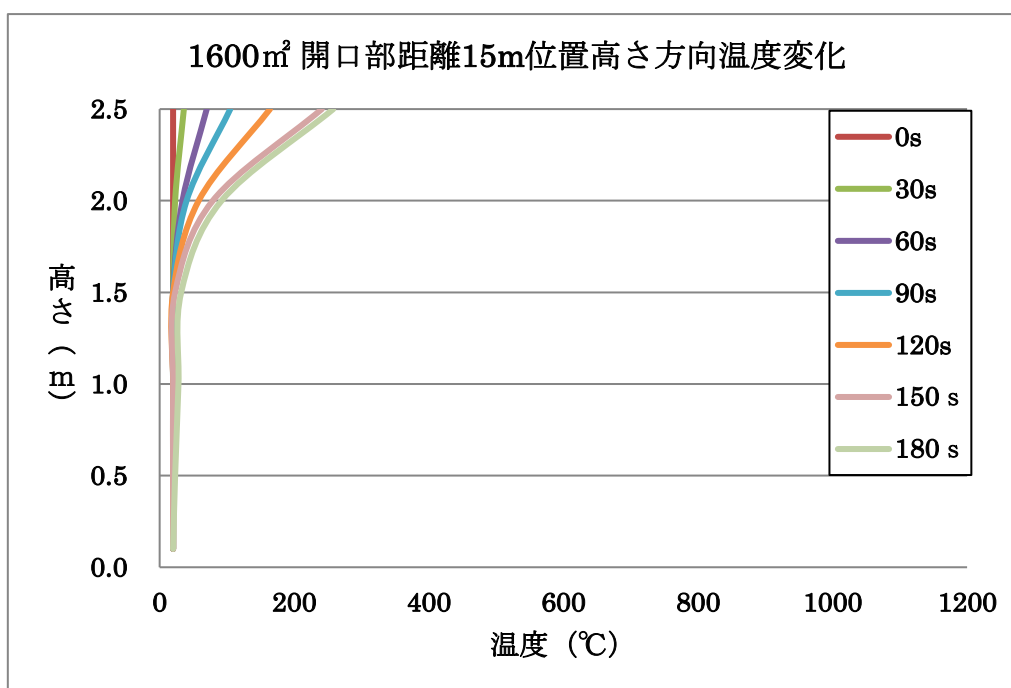


図-57

図-49～図-53 は 100 m²の対象空間において、開口部から 1m 間隔で高さ方向の温度変化を算出した結果であり、天井付近の温度変化は開口部に近づくにつれ、温度が低くなっていることが分かる。また、開口部では天井付近の温度が上昇し続けるのではなく、時間の経過と共に安定していることが分かる。これは、時間の経過と共に煙が天井全体を覆い、煙層の高さが開口部上端よりも低い高さまで至った後、煙の流入出が起こっている開口部において、冷えた外気と高温の煙層が混同していることによって温度が均衡しているものだと考えられる。そして、今回人口密度 0.5 人/m²の場合、煙による曝露者を出すことなく火災発生から 29 秒で避難が完了しているが、100 m²の対象空間では時間毎の温度上昇が大きく、開口部でさえ 180 秒後には避難者の頭の高さ付近での温度が 300℃まで上昇しており、避難が遅れることは煙の危険だけでなく温度上昇による危険性も増すという結果となった。

次に図-54～図-57 は 1600 m²の対象空間において、開口部から 5m 間隔で高さ方向の温度変化を算出した結果であり、全体を通して 100 m²の対象空間での温度変化に比べて小さな温度変化しか見受けられなかった。これは対象空間の大きさが温度変化に与える影響の大きさを示している。そして、人口密度 0.3 人/m²の場合、煙による曝露者を出すことなく火災発生から 166 秒で避難が完了しているが、1600 m²の対象空間では時間毎の温度上昇は小さく、166 秒の時点でも避難者の頭の高さ付近での温度は 100℃に満たない温度であり、避難に大きな影響を与えるものではないと考えられる。

図-45～図-57 までのグラフの枚数や形状を見てわかる通り、FDS で算出した温度変化グラフは EVATUS によって算出したグラフよりも複雑な形状をしている。これは FDS の方が EVATUS よりも微小空間の計算を行うことが可能であり、対象空間を小さなメッシュに分割して計算を行っているために、より綿密で正確な計算値を算出できていることを示している。

第5章

総括

二層ゾーンモデル EVATUS とフィールドモデル FDS を比較検討した上で、以下の点が明らかになった。

5-1 避難安全性について

今回、4つの対象空間に対して人口密度を5つのパターンに分けてEVATUSを用いることでシミュレーションを行ったが、室面積の拡大、人口密度の増加に伴い、煙曝露者の数が増加し開口部付近で避難者による滞留が生じ、避難時間に大きな遅れがでた。また、煙曝露者のt=0位置から煙曝露者の数には開口部の位置や開口部までの距離が大きく影響を与えている。

5-2 煙の性状について

煙が中心部に比べ、壁伝いに急速に四隅に降下していることが分かった。その後、壁面の温度と壁面に接している気体の温度の相関により、上昇流（火源からで続ける煙）と下層流（四隅の煙）が拡散した後、徐々に煙層が安定しながら降下していくことが分かった。

二層ゾーンモデルよりフィールドモデルの方が煙層の降下する速さは大きいということが分かった。さらに、空間面積が大きくなるほどその降下時間の違いが大きくなるということが分かった。

5-3 温度について

100 m²のような小さな対象空間では空間内の温度上昇は著しく、避難時間が遅れるようであれば在室者の避難行動に大きな影響を与え得る。1600 m²のような大きな対象空間では空間内の温度変化は小さく、温度変化が避難行動に与える影響は少ない。

5-4 二層ゾーンモデルとフィールドモデルの性能特性及び正確な検証法の可能性

大空間において煙は初期温度分布、外気、壁面流、浮力効果の不足の各外乱要因の作用が小さければ安定場となり成層下するが、大きければ不安定場となって拡散する。二層ゾーンモデル EVATUS ではこれらの作用が空間内の煙の温度、濃度、速度の分布に与える影響及び安定場から不安定場に移行する遷移状態の解析は考慮されていない。また、二層ゾーンモデルは、煙層に対しての空気層が存在しないか、わずかとなった状態での解析は困難である。さらに、実際の火災現象は、火源部分に高温域を伴うものであり、火源周辺域においては気体の圧縮性を考慮した解析が要求されるものである。

フィールドモデル FDS の解析は3次元の空間座標内において気体の圧縮性を考慮した煙流動解析が可能であり、EVATUS の概略的な煙流動の評価に比較して、定量化を含めた煙流動の構造的な詳細な評価が可能である。二層ゾーンモデル EVATUS に比べてモデリングや計算時間に関して多くの労力、時間を費やすが、建物の避難安全性を上げるために必要な詳細情報を得ることができる。

精度の高い FDS で細かいメッシュ毎の温度分布・気流速度・煙性状等を把握できることから大規模空間や複雑な形状の地下空間における性状を検証するのに FDS を併用させた上で、EVATUS を用いて避難安全時間を計算し、出口近傍など避難者が集中する場所を簡易的に特定し、避難安全性を評価することが可能である。

5-5 今後の課題

今回は空間のスケールと人口密度の違いに限定し、結果にどう影響がでるかを解析した。空間スケールをさらに大きくした 2500 m² (50m×50m) で 180 秒間解析を試みたが FDS の方では解析項目が増加したことにより、計算時間 169 秒で限界に達し、シミュレーションが終了してしまった。さらに、EVATUS の方では同様に 2500 m² で煙層が高さ 1.8m 地点に 180 秒間以内に到達せず、在室者が避難を開始しなかった。また、火災成長率を 0.05、0.0125 と変えてみたが EVATUS の方では火源が小さすぎて 180 秒以内に煙による曝露者も発生せず、避難が完了することもなかった。そのため、先述した内容の記載を割愛した。他に開口部の大きさを変えたり、天井高さを変えたりといったパラメータを増やしてさらに解析結果にどう影響していくかを調べていく必要がある。過去、実際に使われた火災実験室 (Parttern1, 2、共に天井高さ 5 m) の空間に、計算時間 600 秒として火源、材質などのパラメータを卒論と同じ条件でシミュレーションした結果を付録に記載した。

参考文献

- 1) 森田 昌宏：大規模施設の避難安全シミュレーション 2010年
- 2) 原田 和典：建築火災のメカニズムと火災安全設計 2007年12月
- 3) 田中 哮義：小規模建築物の火災のモデル化に関する研究 1980年
- 4) 田中 哮義 他：建物火災時の避難安全評価シミュレーションプログラムの開発
(その1-その3)日本建築学会大会学術講演梗概集 2005年 P219-220
- 5) 安部 伸之：CFDを用いた火災の数値シミュレーション 2004年
- 6) NIST: Fire Dynamics Simulator User's Guide
- 7) 日本流体力学会数値流体力学部門Web会誌 第12巻 第2号 2004年11月
- 8) 被験者実験による避難者モデルの定式化 ポテンシャル法に基づいた避難シミュレーションの開発 その1 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 2005年9月
- 9) CFDによる散水設備作動時のトンネル空間熱性状予測 地下空間シンポジウム論文・報告集、第9巻、土木学会【審査付論文】2005年 P69-77
- 10) 地下広場の自然排煙による火災安全計画(その2) 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 2009年 9月

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた卒業論文指導教員の教授 辻本誠 先生に深謝致します。辻本誠教授には卒業研究の約 1 年間、本論作成にあたり、テーマの決定、史料の読み方、研究の考え方、方法、まとめ方など全てにおいて、長期にわたって厳しくも熱意のあるご指導、ご鞭撻していただき、多くの御指導を賜りました。また、研究以外でも知的好奇心を刺激する話ばかりで大変楽しく、有意義な時間を過ごすことができました。特にシミュレーション解析に苦勞していた際、流体力学の本やそれに関する資料、シミュレーションに熟知した指導教員まで手配していただき、大変ご苦勞をかけてしまいましたことにも心よりお詫びを申し上げます。また、シミュレーションに関する知識は、本研究室の後輩にも伝えていきたいと思えます。

西田幸夫先生には本論文を完成させるにあたって、大変有意義且つ、的確なご意見をいただき、深く感謝しております。西田先生の研究についてのアドバイスや資料提供はこの研究を進めるにあたって大変勉強になりました。本当にありがとうございました。

水野雅之先生には、本研究の避難シミュレーション EVATUS の解析を行う際、お忙しい中、未熟な私たちのために多大なるご尽力を頂き心から深く御礼申し上げます。シミュレーションの操作を親身になって教えていただきとても頼りになる存在でした。卒論発表の際、見に来ていただいたのを知り、水野先生の人柄の良さが伝わりとても嬉しい気持ちでいっぱいになりました。

佐々木研究室の助教 飯山かほり先生にもお忙しい中、研究に関しての多大なるご指摘を頂き、深く感謝しております。

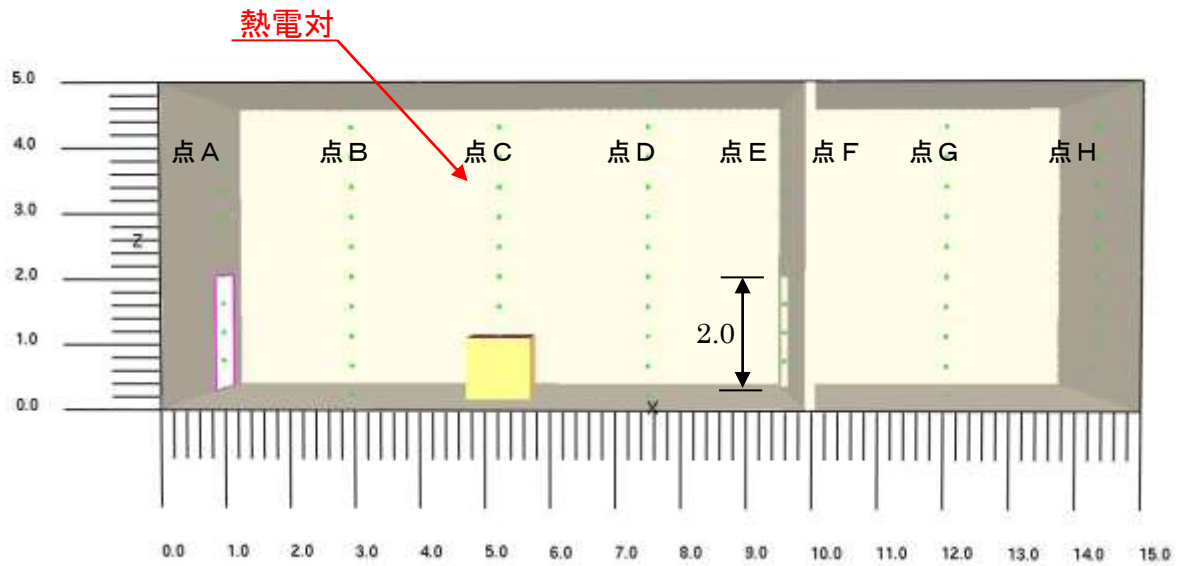
辻本研究室のユーモア溢れる大場先輩には FDS シミュレーションのインストールの仕方やプログラミングの方法などを教えて頂きありがとうございました。スムーズにシミュレーションを進めることができたのは大場先輩のおかげだと思います。辻本研究室の小林先輩や長谷川先輩のご指導には大変感謝しております。修士の先輩方から常に刺激的な議論を頂き、精神的にも支えられました。

また、辻本研究室で一緒に過ごしたメンバーと充実した大学生活を送ることができ、今後とも刺激し合える仲でいられることを願っております。

最後に、ここに書ききれなかった方々を含め、学生生活でお世話になったすべての方々に感謝の意を込めて厚く御礼を申し上げます。

2013年2月 入谷 真樹 高橋 亮太

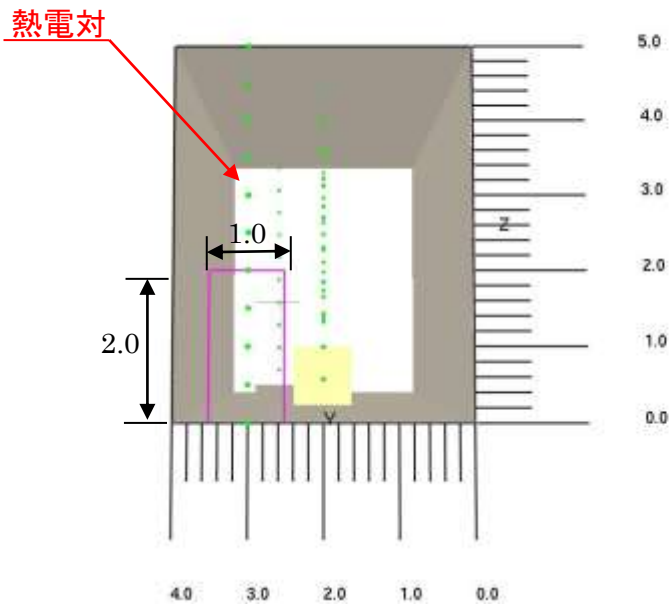
付録



平面図以外 熱電対設置位置

(X 方向設置間隔 0m, 2.5m, 5.0m, 7.5m, 9.9m, 10.10m, 12.5m, 15.0m配置)

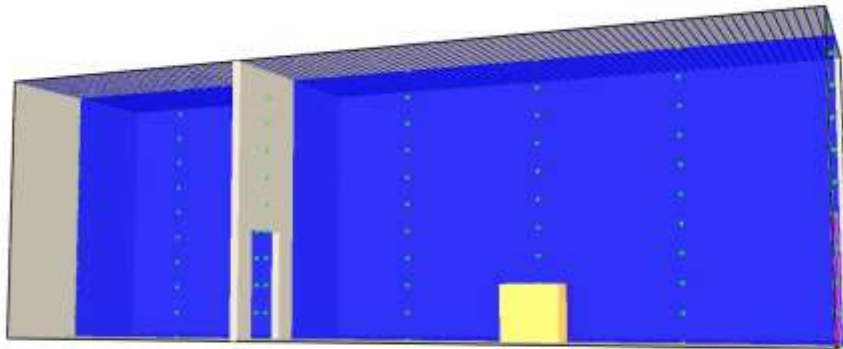
(Y 方向設置間隔 3.0m, 2.0m, 2.0m, 2.0m, 3.0m, 3.0m, 2.0m, 2.0m配置)



立面図以外 熱電対設置位置

(Z 方向 設置間隔 0m~5.0mまで 0.5m等間隔配置)

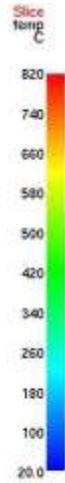
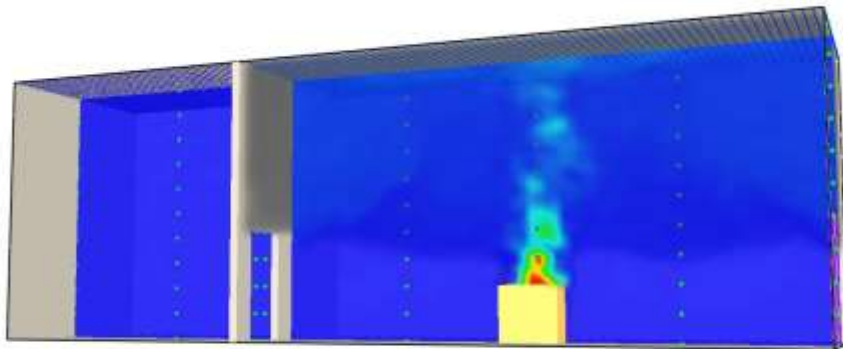
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 0
Time: 0.0



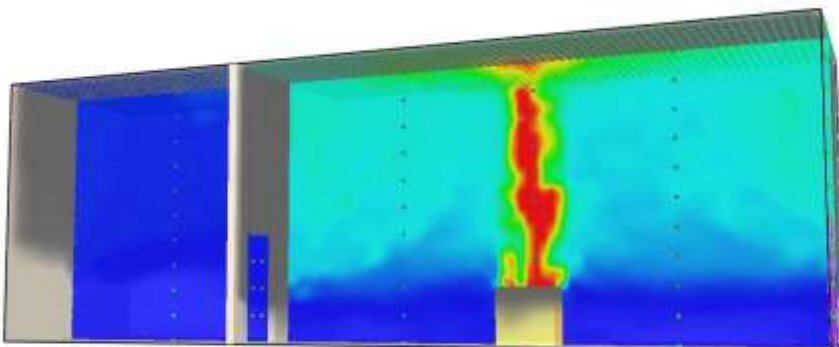
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 50
Time: 50.0



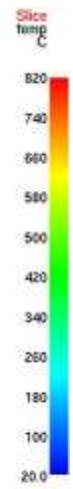
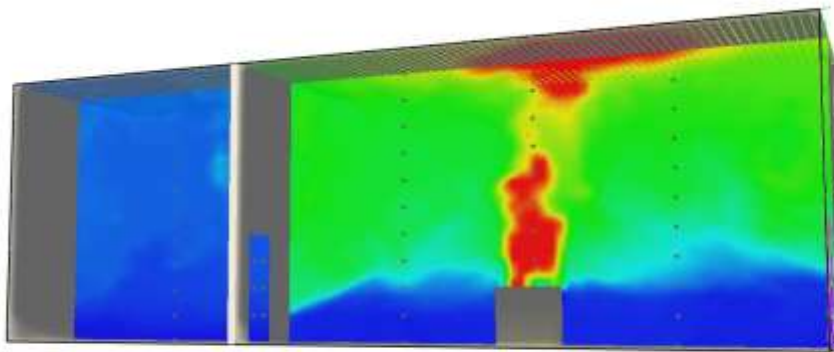
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 100
Time: 100.0



Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

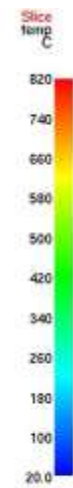
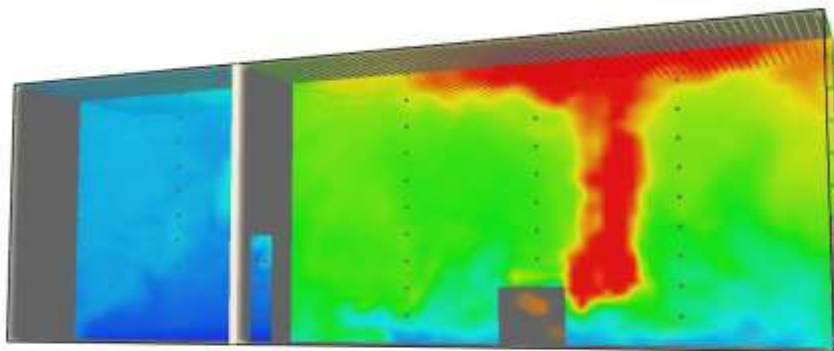


Frame: 150
Time: 150.0



>200 (kW/m2)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

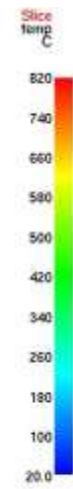
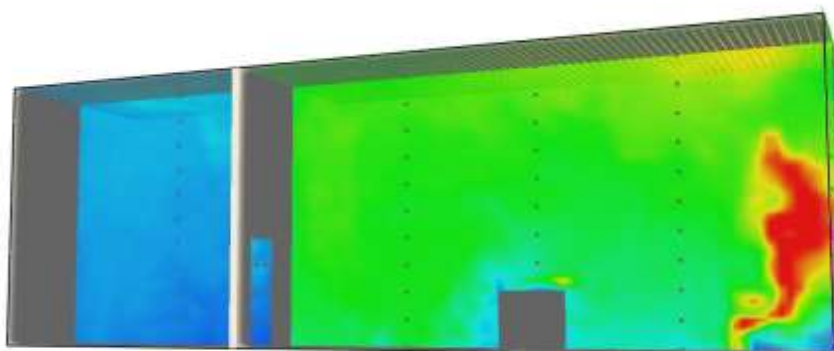


Frame: 200
Time: 200.0



>200 (kW/m2)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

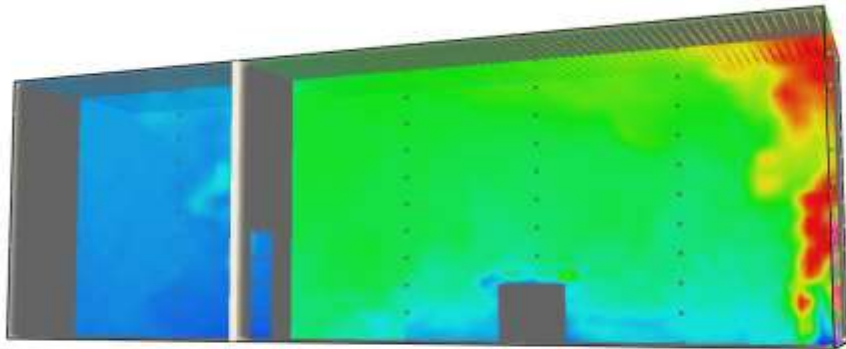


Frame: 250
Time: 250.0



>200 (kW/m2)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

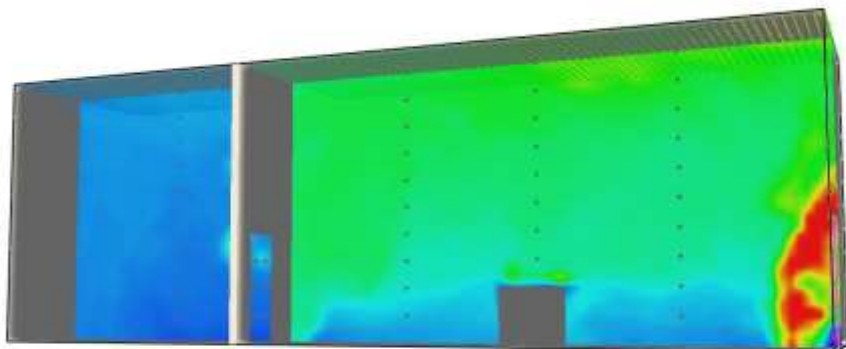


Frame: 300
Time: 300.0



>200 (kW/m3)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

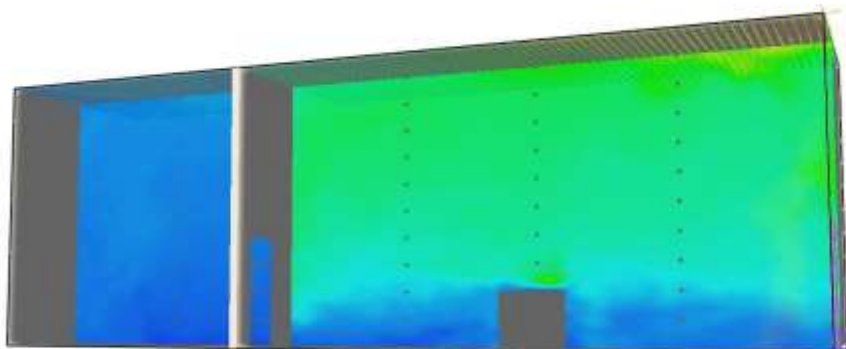


Frame: 350
Time: 350.0



>200 (kW/m3)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

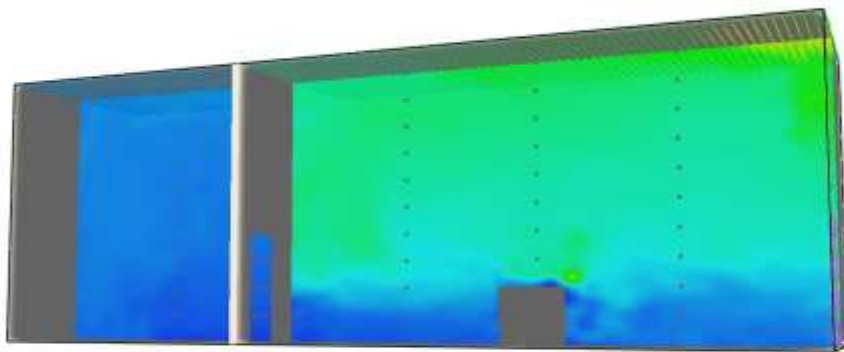


Frame: 400
Time: 400.0



>200 (kW/m3)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

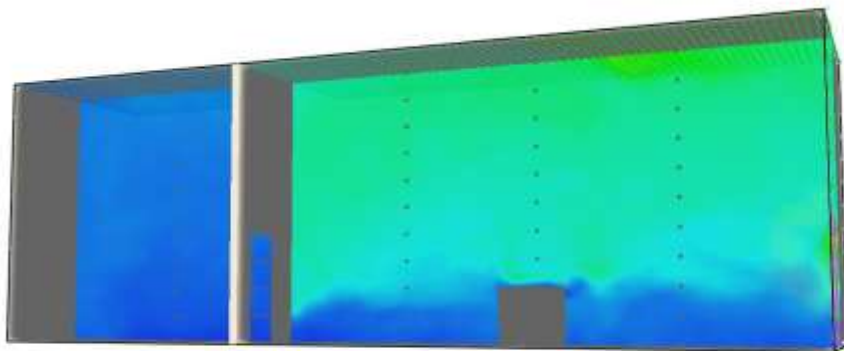


Frame: 450
Time: 450.0

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



>200 (kW/m3)

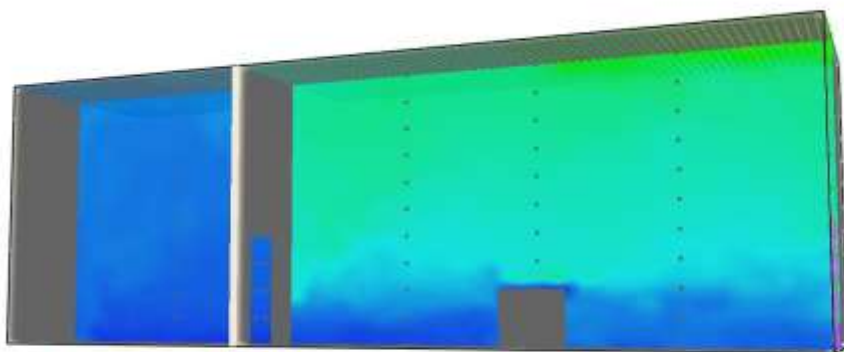


Frame: 500
Time: 500.0

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



>200 (kW/m3)

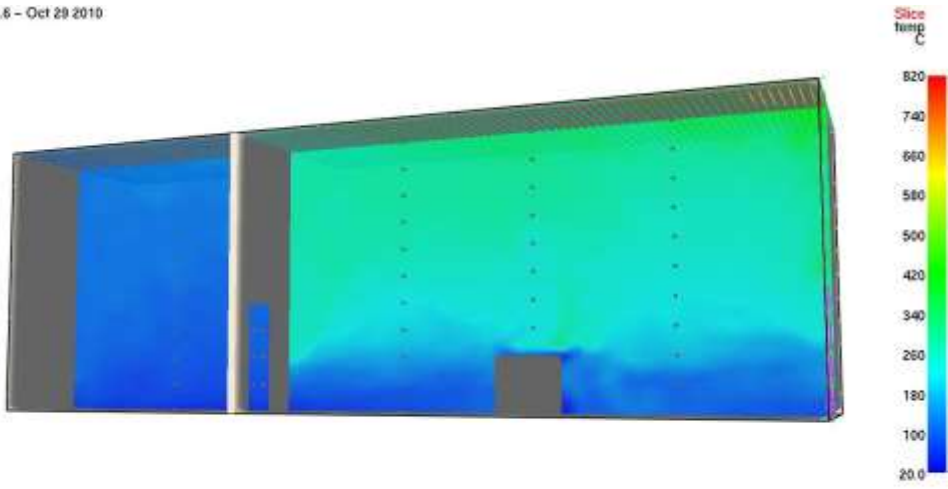


Frame: 550
Time: 550.0

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

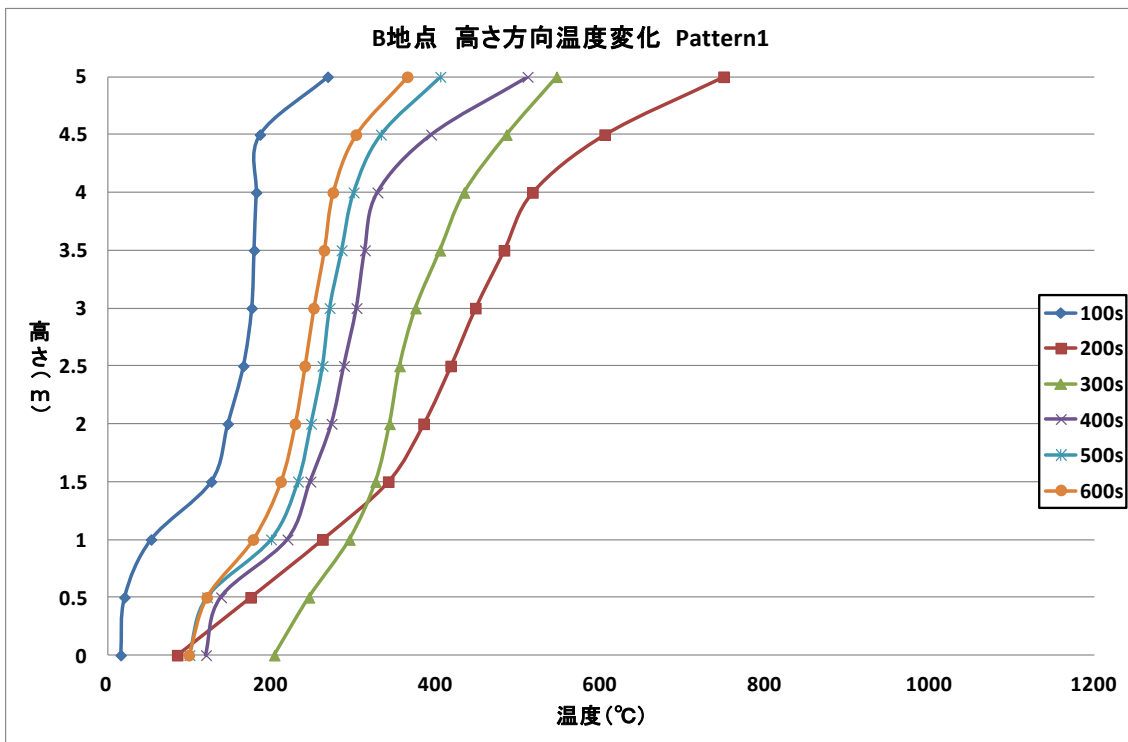
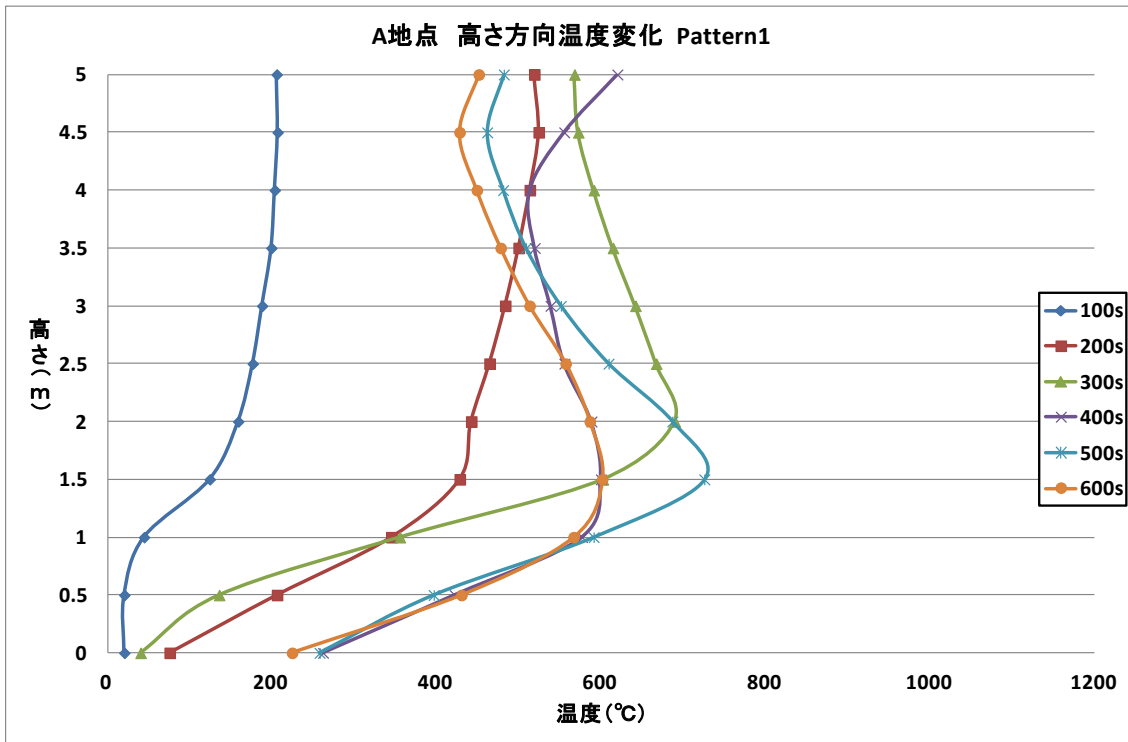


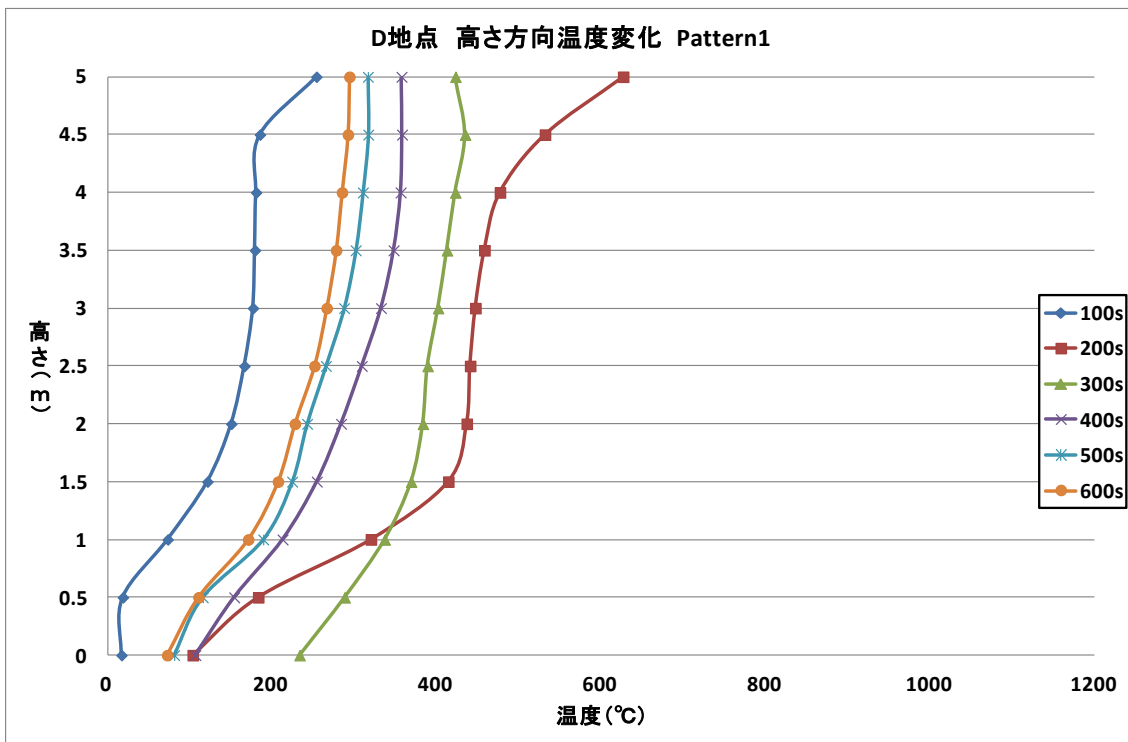
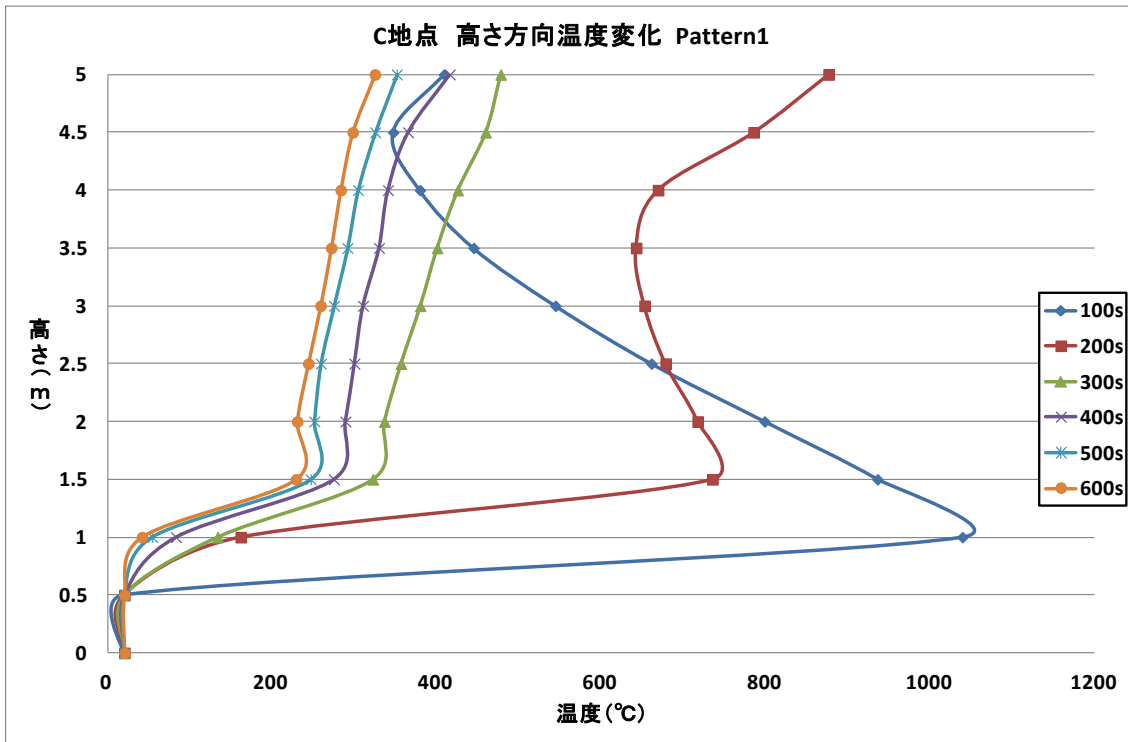
>200 (kW/m3)

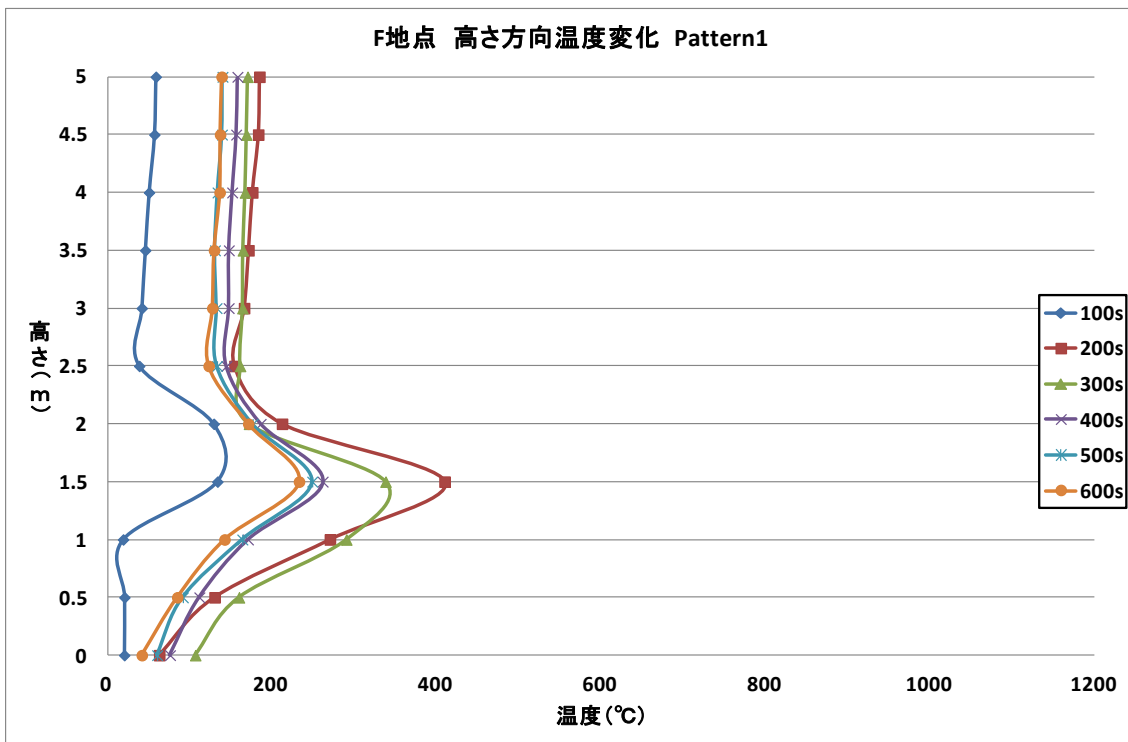
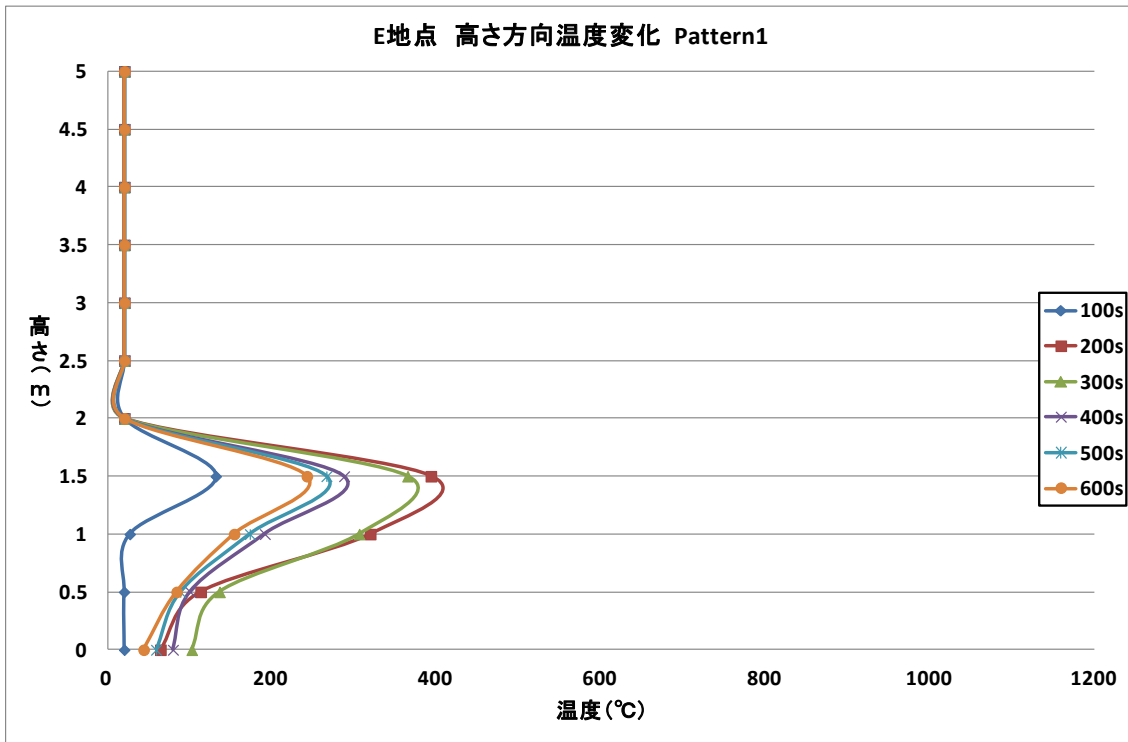


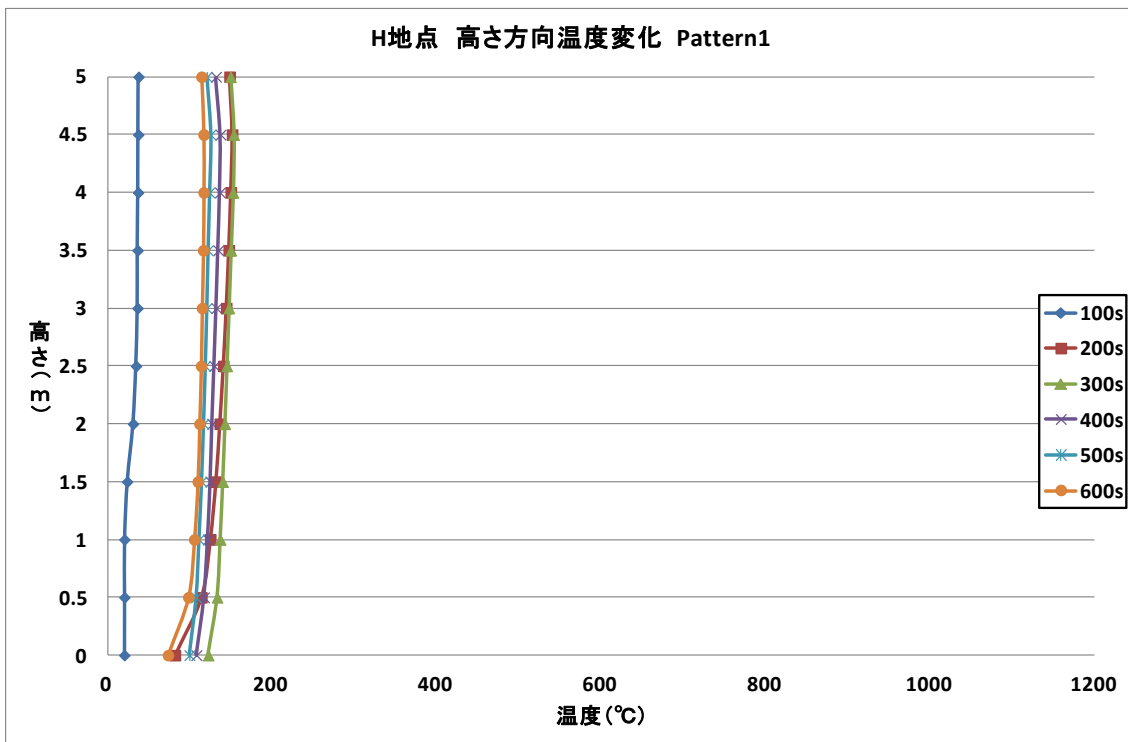
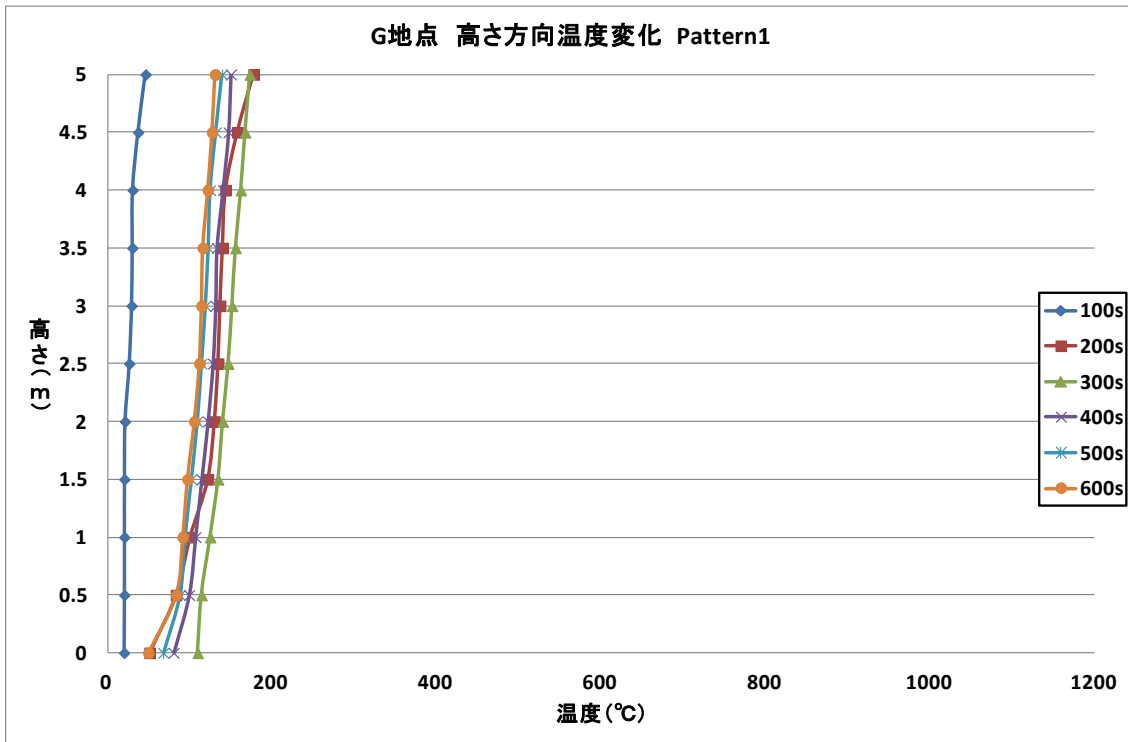
Frame: 600
Time: 600.0

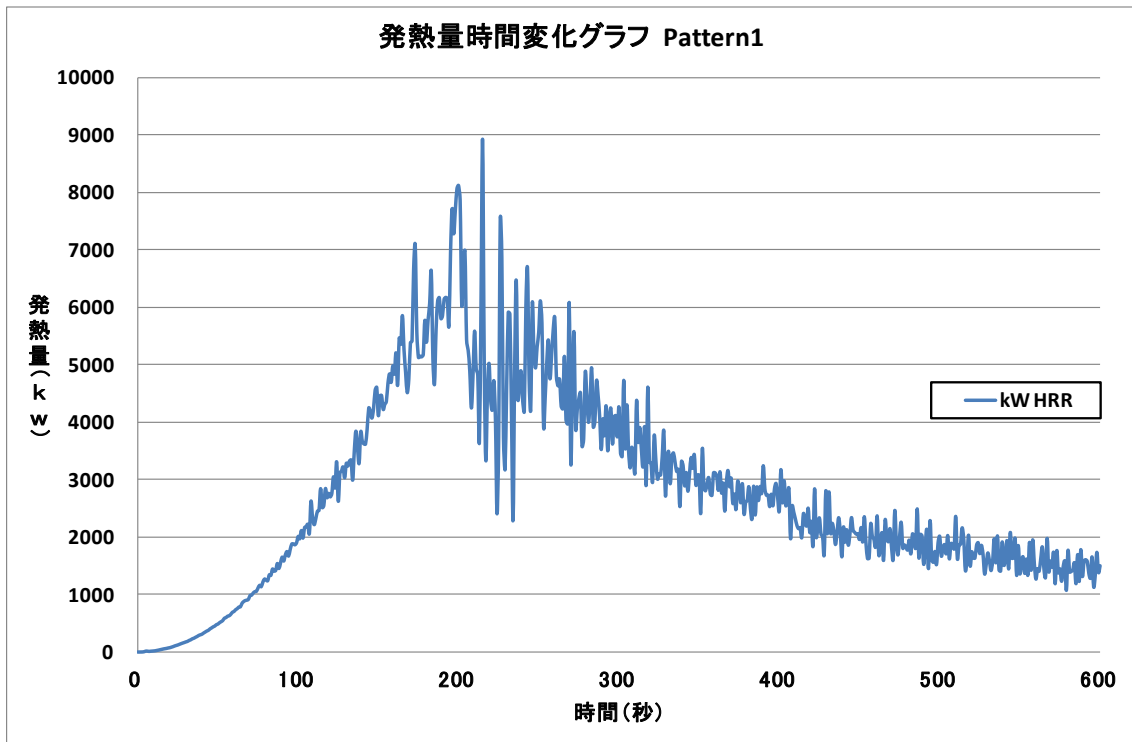


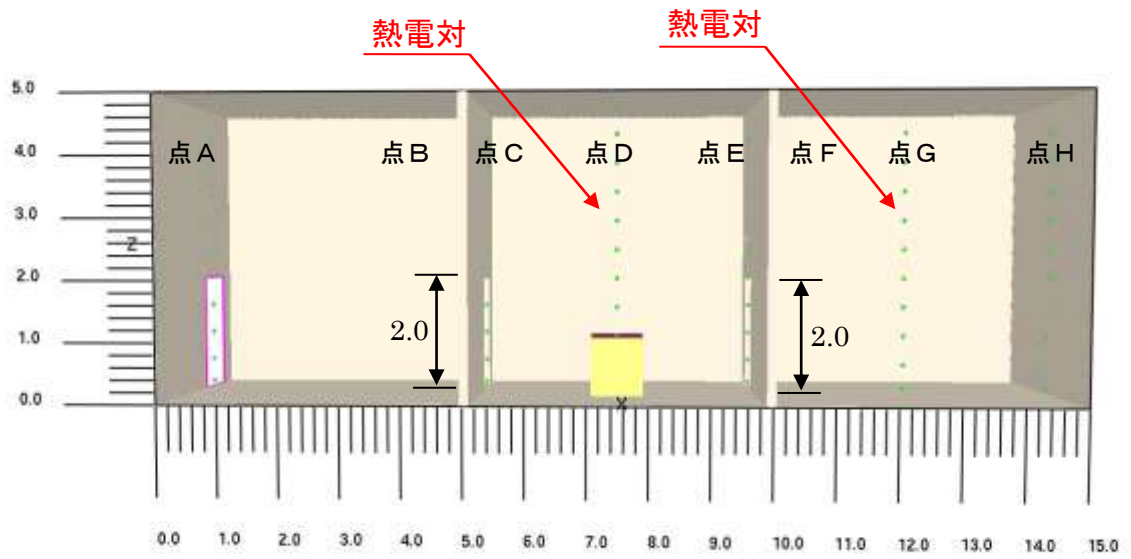








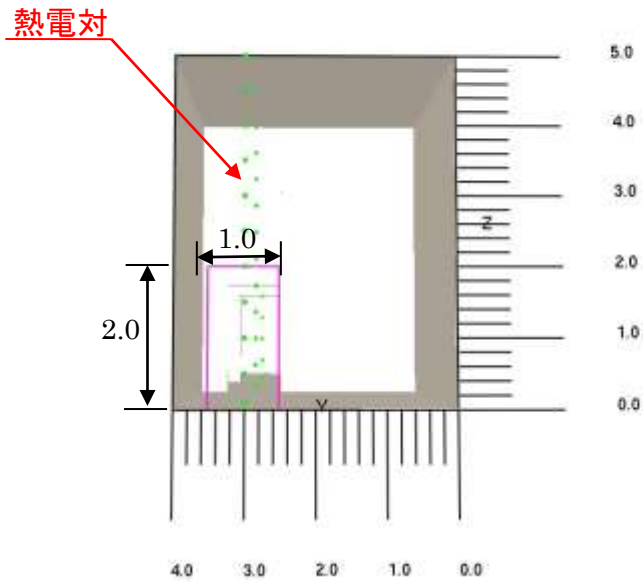




平面図以外 熱電対設置位置

(X 方向設置間隔 0m, 4.9m, 5.1m, 7.5m, 9.9m, 10.10m, 12.5m, 15.0m配置)

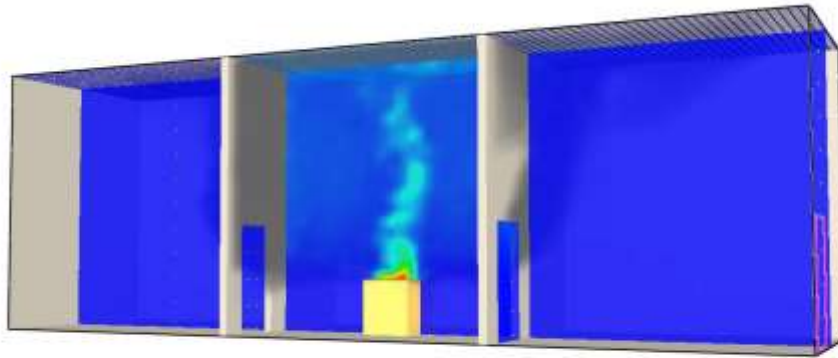
(Y 方向設置間隔 3.0m, 3.0m, 3.0m, 2.0m, 3.0m, 3.0m, 2.0m, 2.0m配置)



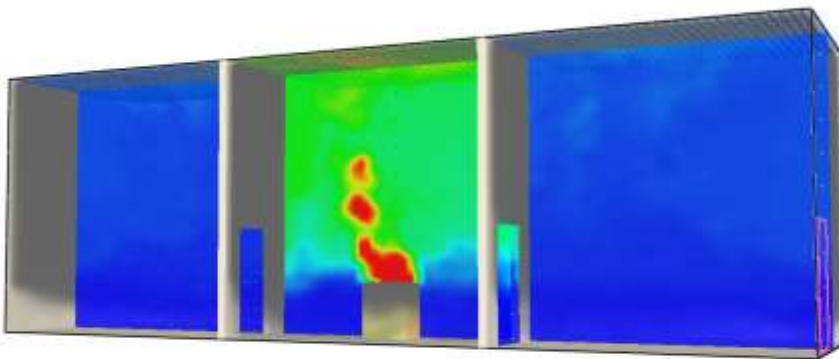
立面図以外 熱電対設置位置

(Z 方向 設置間隔 0m~5.0mまで 0.5m等間隔配置)

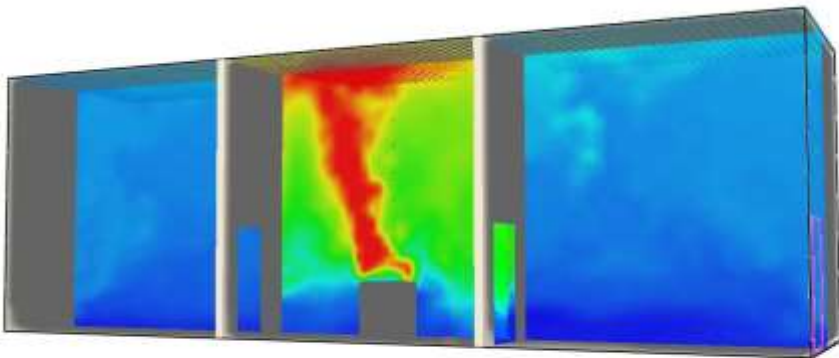
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 50
Time: 50.0
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

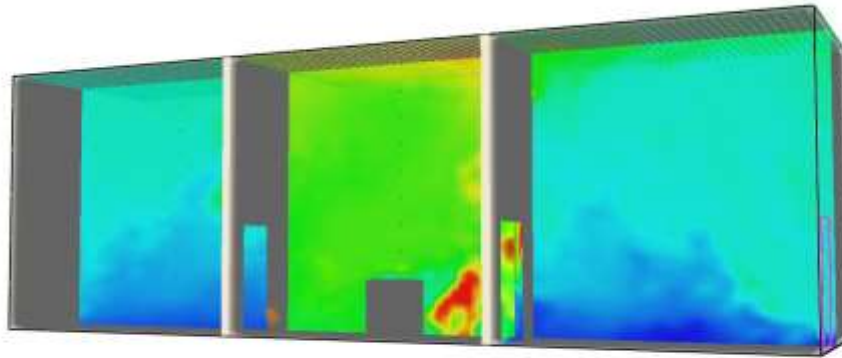


Frame: 100
Time: 100.0
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

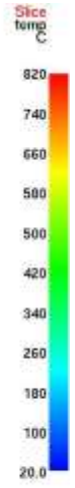
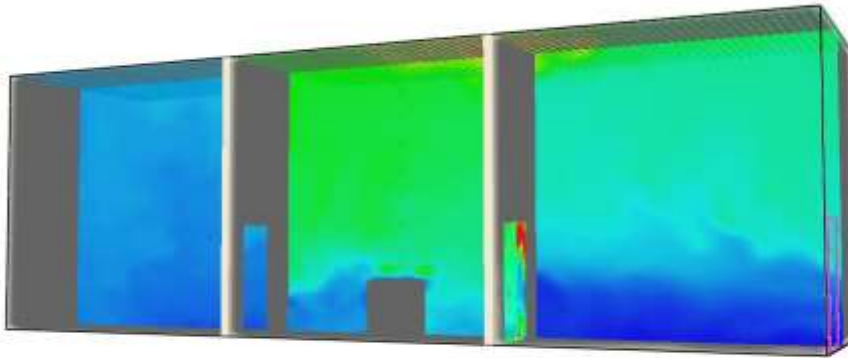


Frame: 150
Time: 150.0

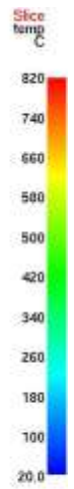
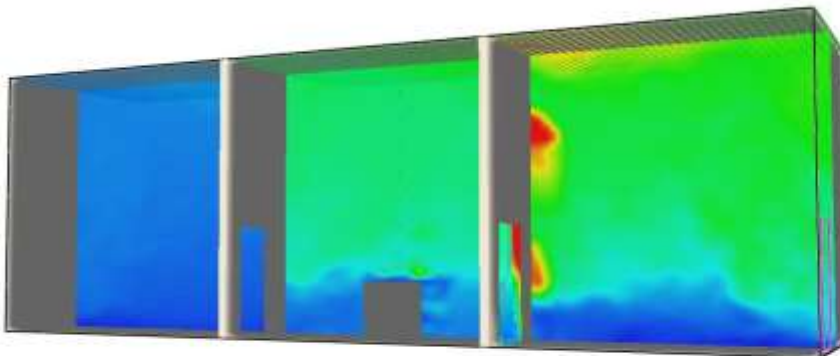
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 200
Time: 200.0
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



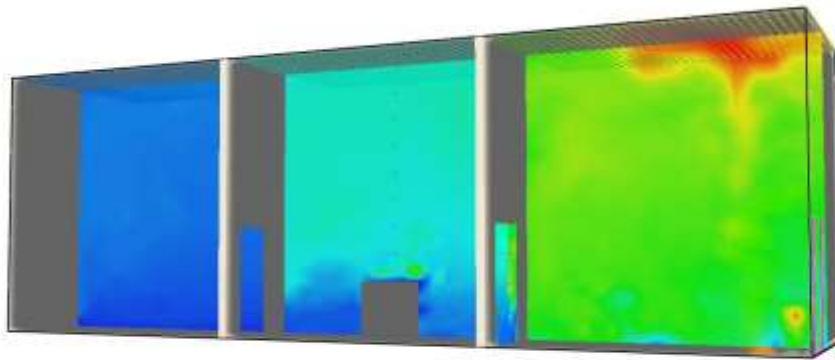
Frame: 250
Time: 250.0
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 300
Time: 300.0



Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

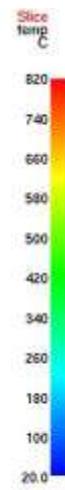
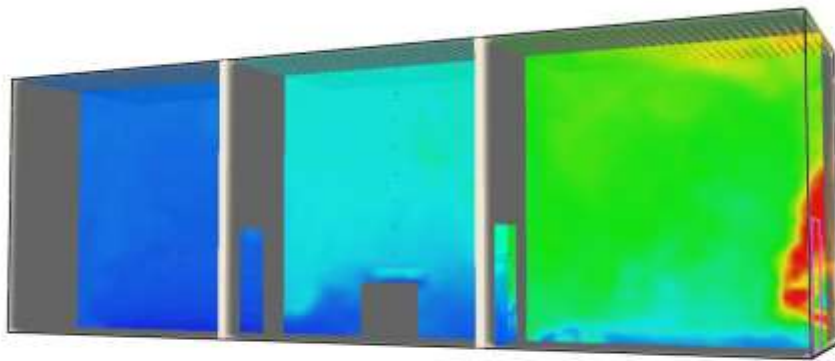


Frame: 350
Time: 350.0



>200 (kW/m3)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

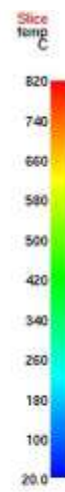
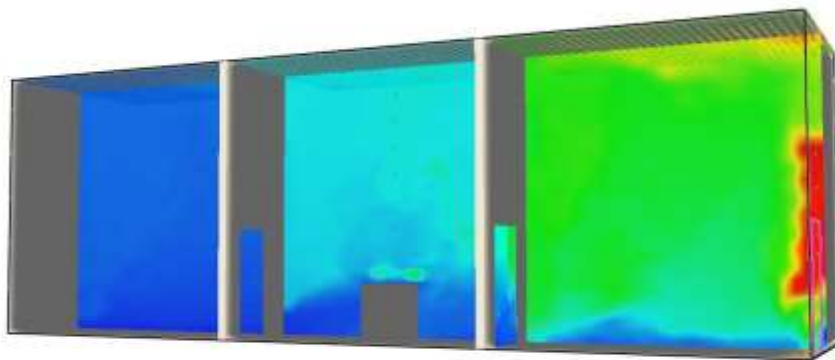


Frame: 400
Time: 400.0



>200 (kW/m3)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

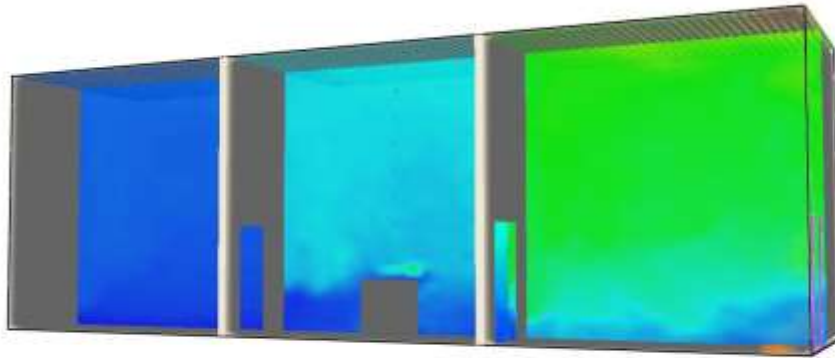


Frame: 450
Time: 450.0



>200 (kW/m3)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

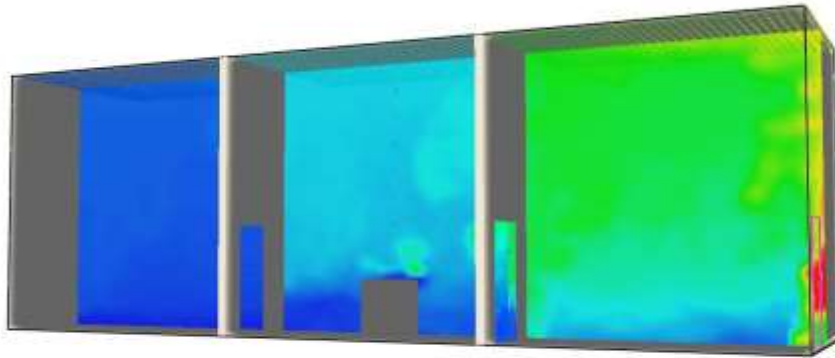


Frame: 500
Time: 500.0



>200 (kW/m3)

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

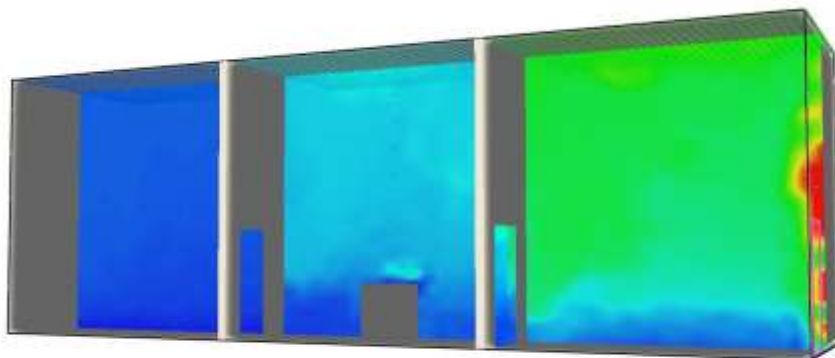


Frame: 550
Time: 550.0



>200 (kW/m3)

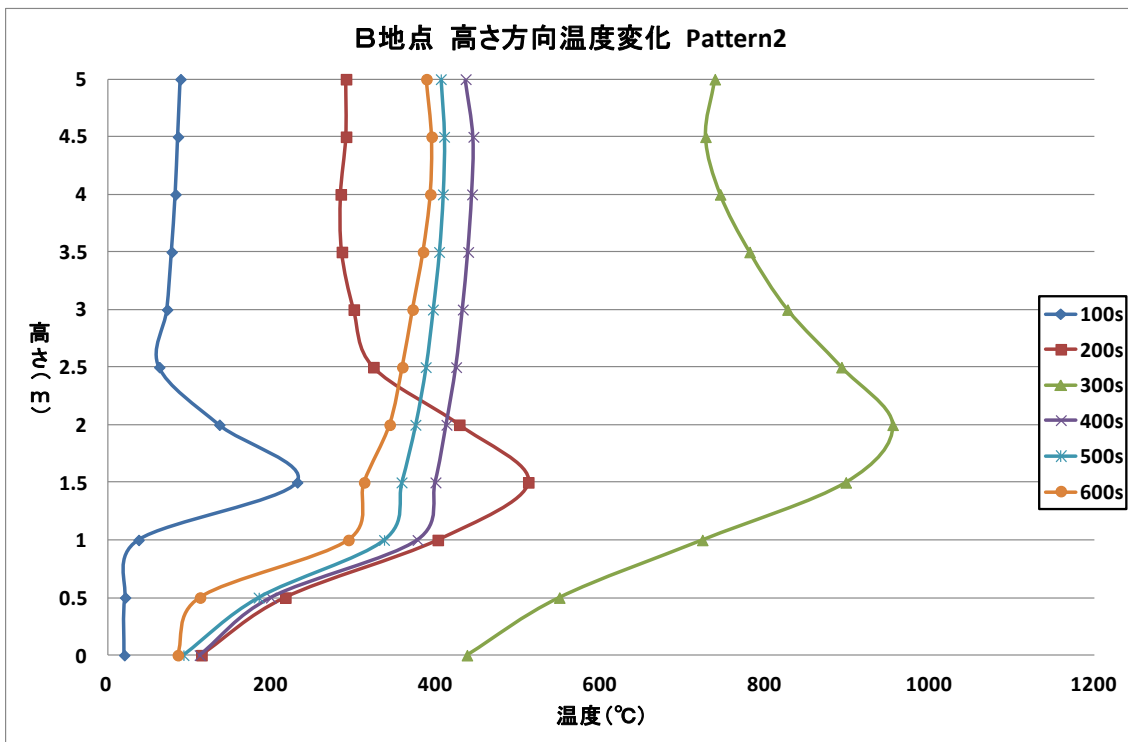
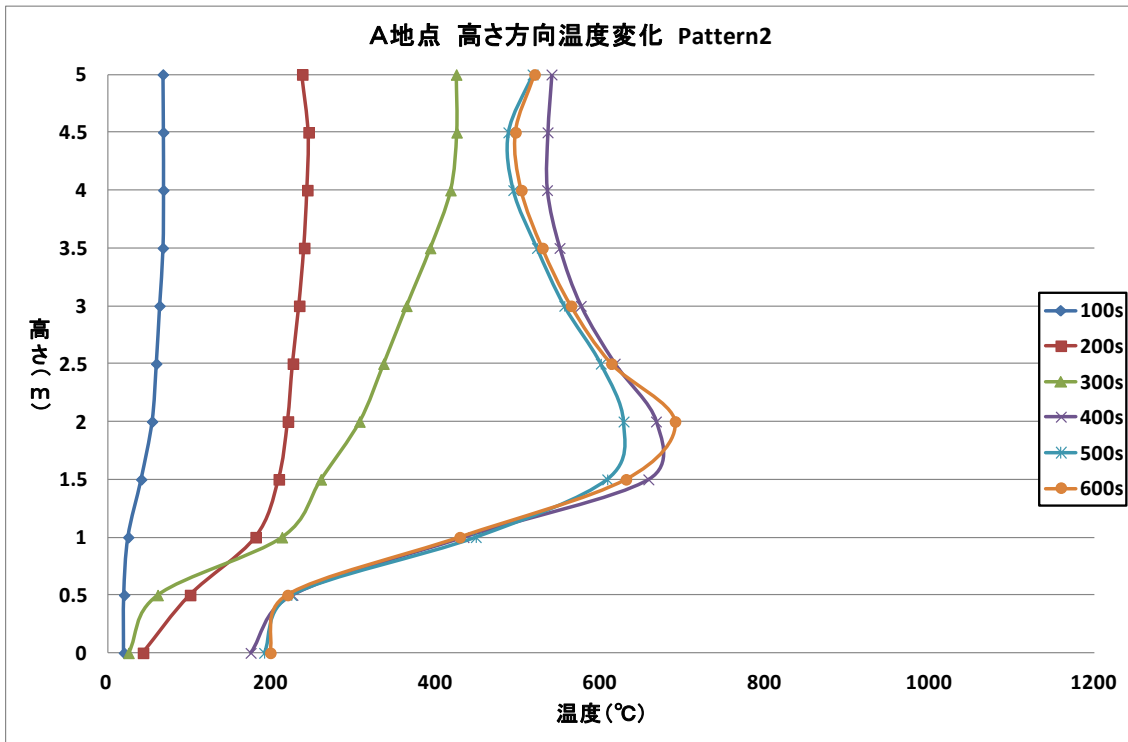
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010

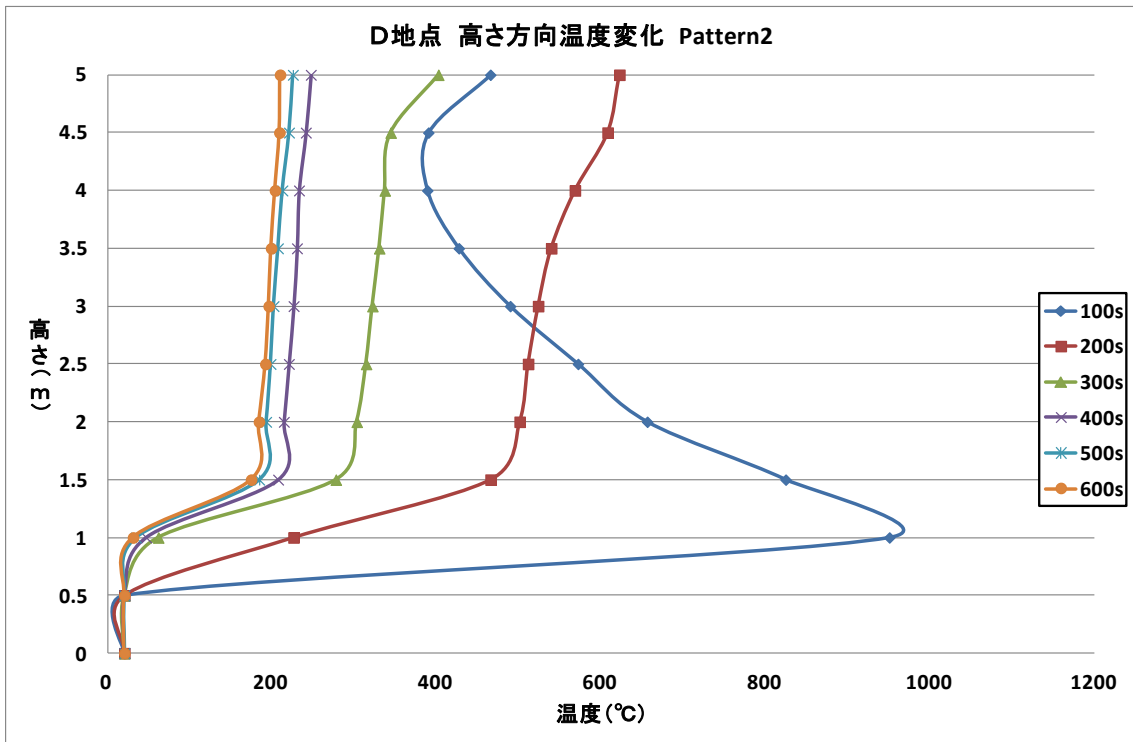
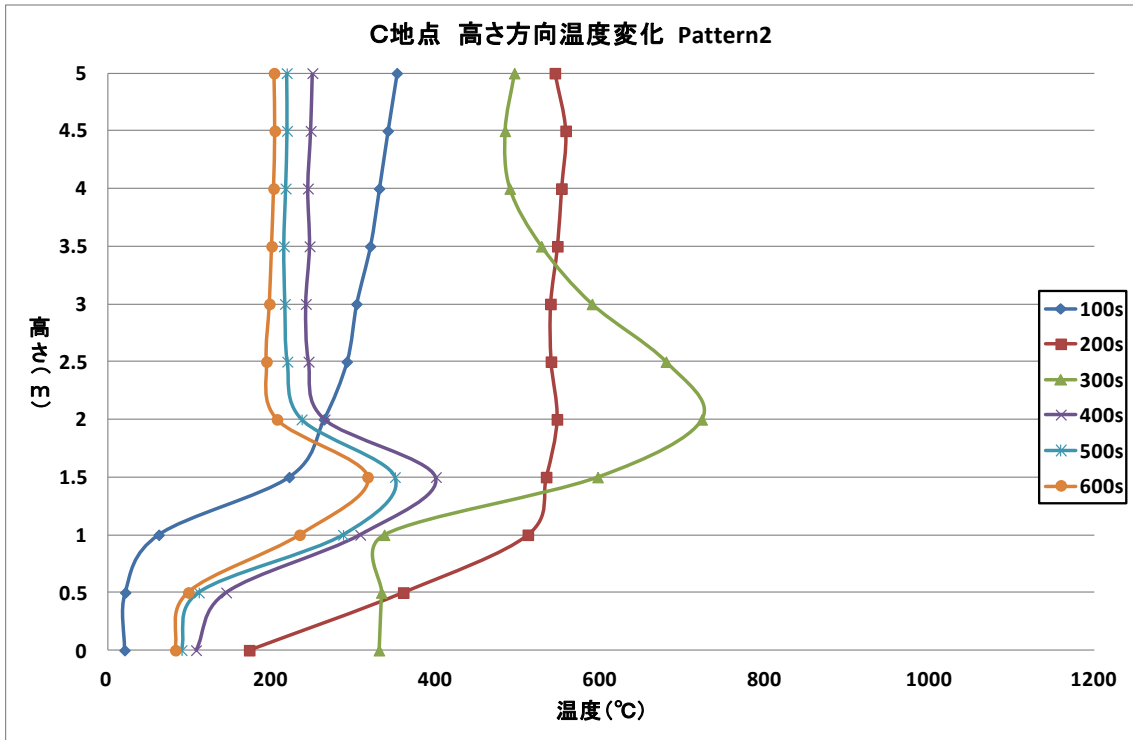


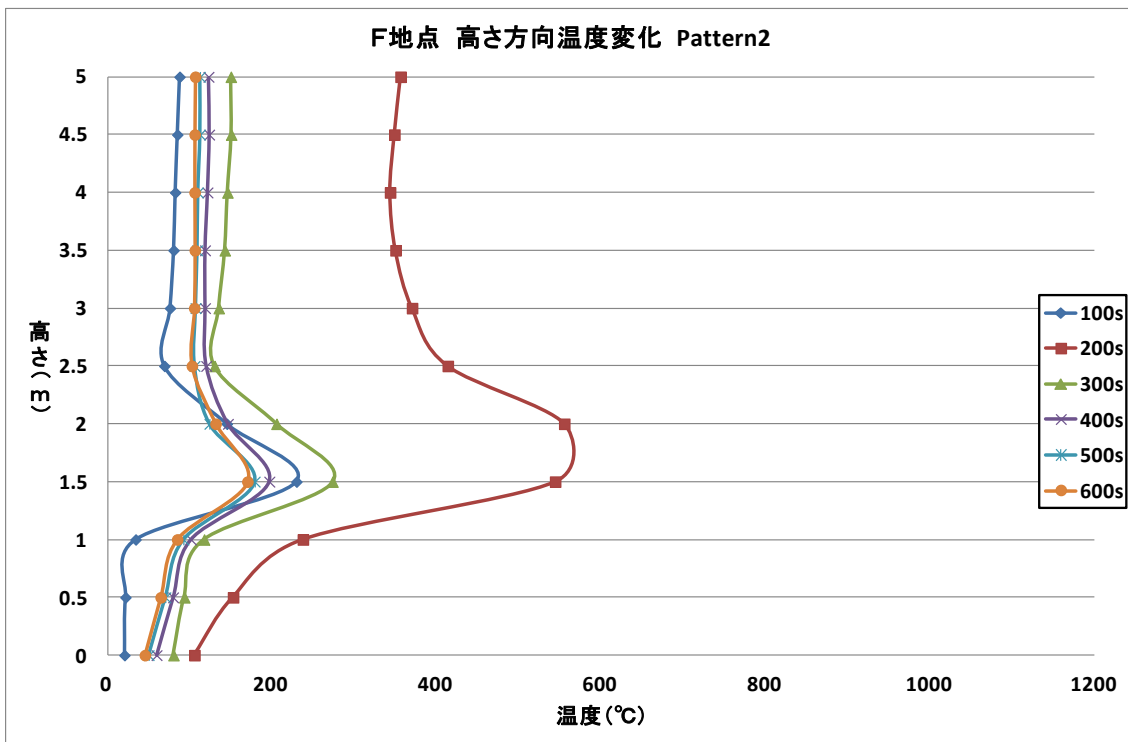
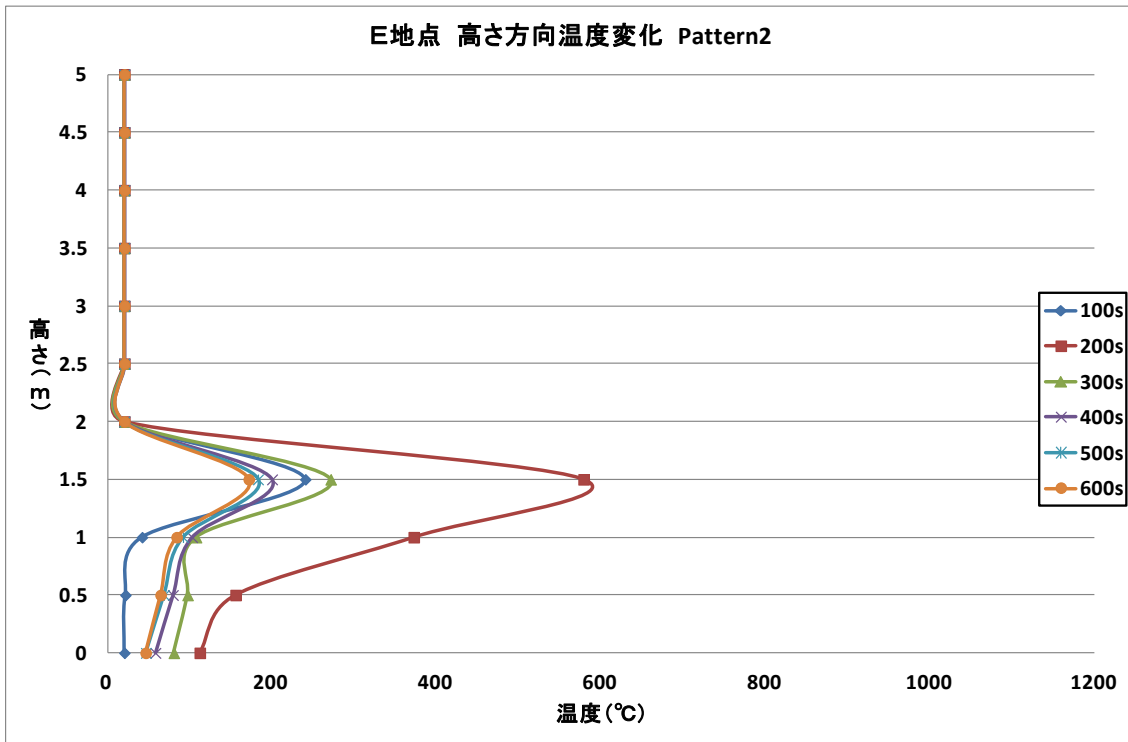
Frame: 600
Time: 600.0

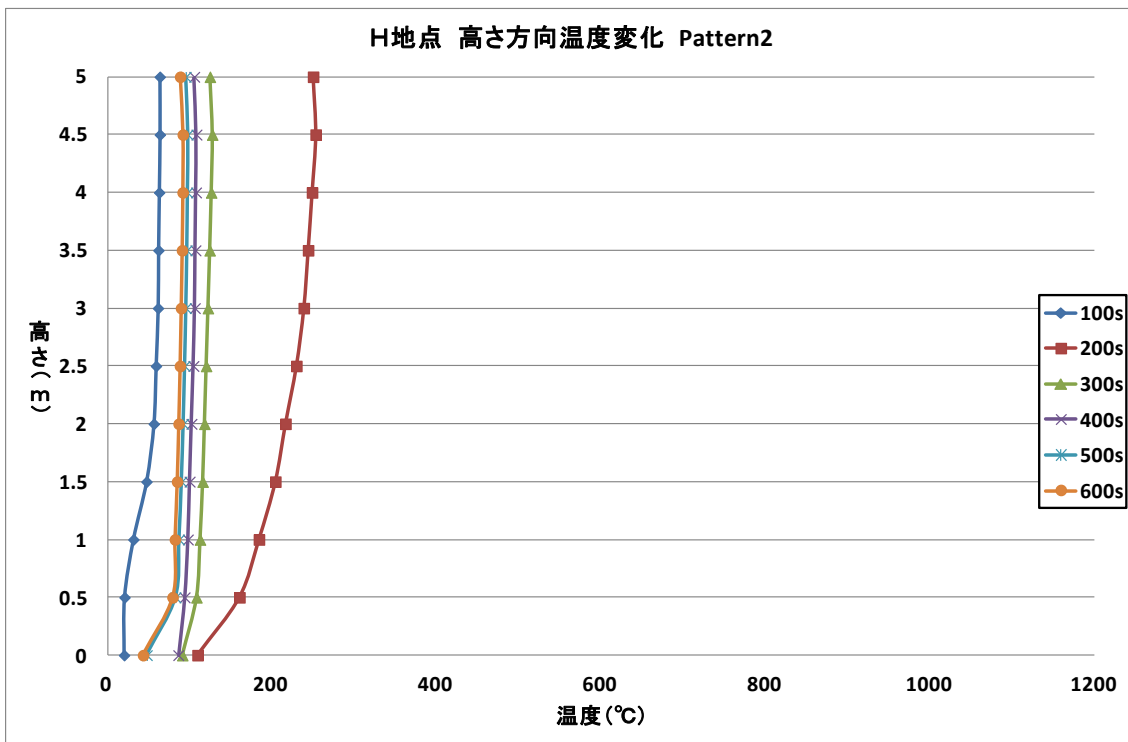
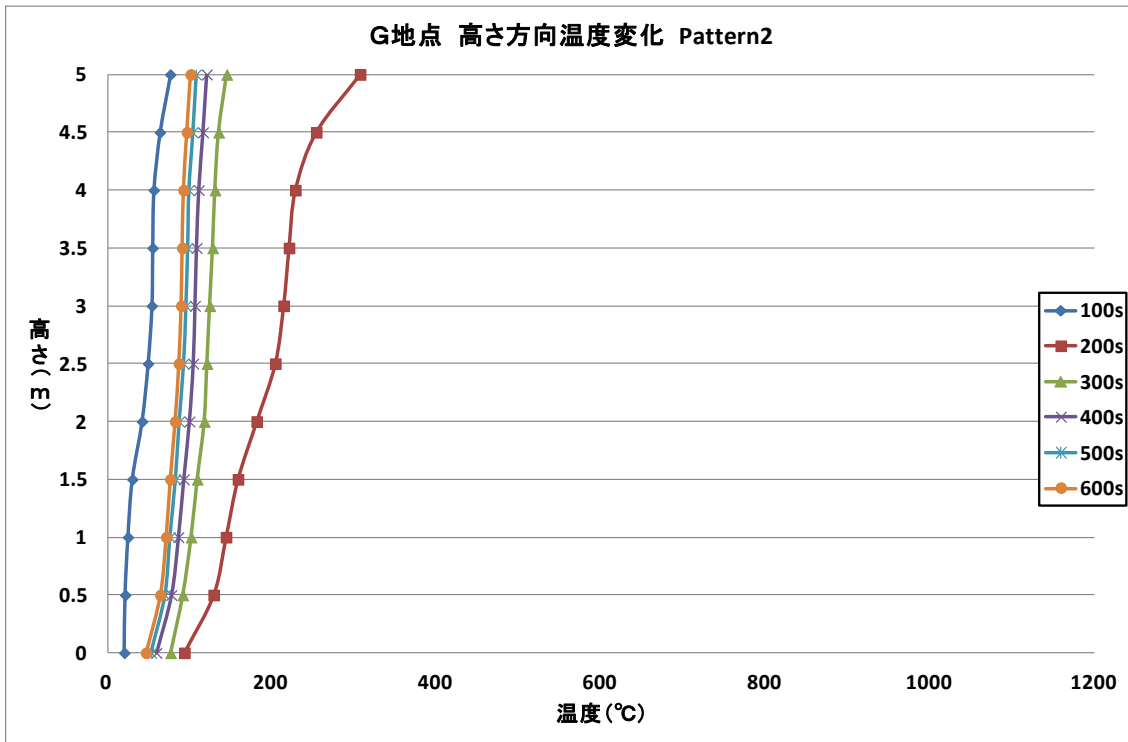


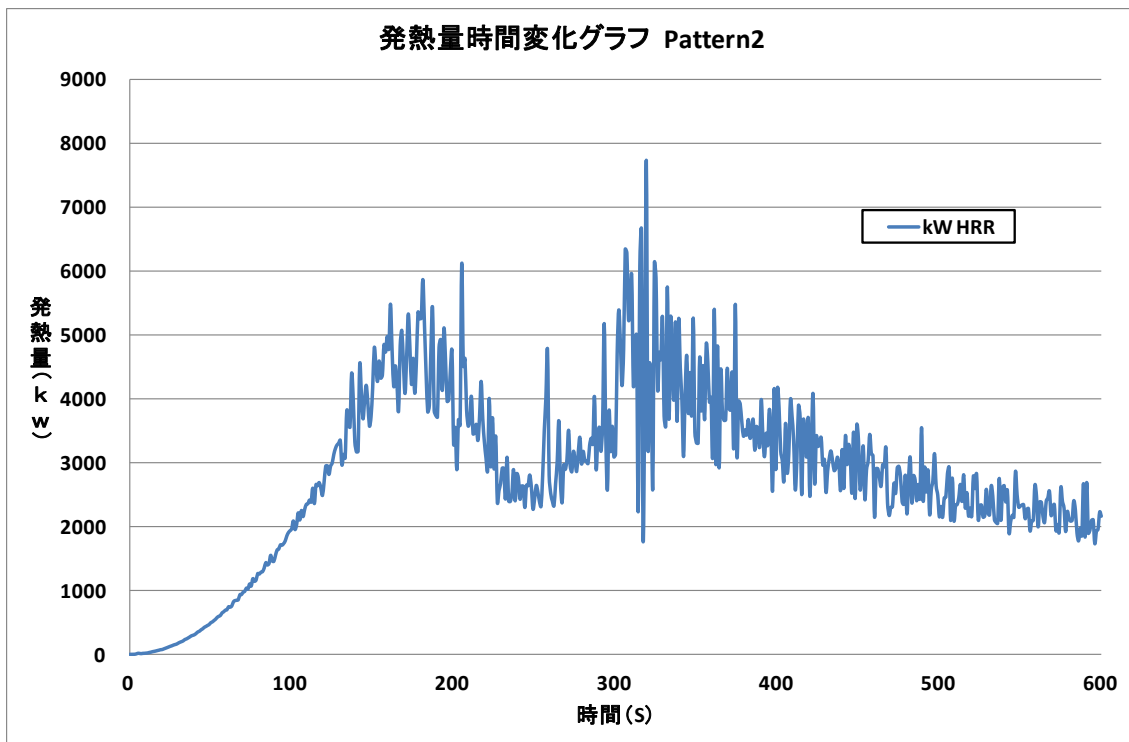
>200 (kW/m3)











100 m²の対象空間における温度と煙層厚さの算出値

時刻(s)	上層温度(°C)	下層温度(°C)	煙層厚さ	時刻(s)	上層温度(°C)	下層温度(°C)	煙層厚さ	時刻(s)	上層温度(°C)	下層温度(°C)	煙層厚さ
0	20	20	2.5	61	44.6	20	2.436	121	94.6	20.1	2.296
1	20	20	2.475	62	45.3	20	2.435	122	95.5	20.1	2.293
2	20	20	2.474	63	46.1	20	2.434	123	96.4	20.1	2.289
3	20	20	2.474	64	46.9	20	2.432	124	97.3	20.1	2.285
4	20	20	2.474	65	47.6	20	2.431	125	98.1	20.1	2.282
5	20	20	2.474	66	48.4	20	2.43	126	99	20.1	2.278
6	20.1	20	2.474	67	49.2	20	2.428	127	99.9	20.1	2.274
7	20.1	20	2.474	68	50	20	2.427	128	100.8	20.1	2.271
8	20.2	20	2.474	69	50.8	20	2.425	129	101.6	20.1	2.267
9	20.3	20	2.473	70	51.6	20	2.424	130	102.5	20.1	2.263
10	20.4	20	2.473	71	52.4	20	2.422	131	103.4	20.1	2.259
11	20.6	20	2.473	72	53.2	20	2.42	132	104.3	20.1	2.255
12	20.7	20	2.473	73	54	20	2.419	133	105.1	20.1	2.251
13	20.9	20	2.472	74	54.8	20	2.417	134	106	20.1	2.247
14	21	20	2.472	75	55.6	20	2.415	135	106.9	20.1	2.243
15	21.2	20	2.471	76	56.5	20	2.414	136	107.7	20.1	2.239
16	21.4	20	2.471	77	57.2	20	2.412	137	108.6	20.2	2.235
17	21.7	20	2.471	78	58	20	2.41	138	109.5	20.2	2.23
18	21.9	20	2.471	79	58.7	20	2.408	139	110.3	20.2	2.226
19	22.2	20	2.47	80	59.5	20	2.406	140	111.2	20.2	2.222
20	22.4	20	2.47	81	60.3	20	2.404	141	112	20.2	2.218
21	22.7	20	2.469	82	61.1	20	2.402	142	112.9	20.2	2.213
22	23	20	2.469	83	61.9	20	2.4	143	113.8	20.2	2.209
23	23.4	20	2.468	84	62.7	20	2.398	144	114.6	20.2	2.204
24	23.7	20	2.468	85	63.5	20	2.396	145	115.5	20.2	2.2
25	24	20	2.467	86	64.3	20	2.394	146	116.3	20.2	2.195
26	24.4	20	2.467	87	65.2	20	2.392	147	117.21	20.2	2.191
27	24.8	20	2.466	88	66	20	2.39	148	118	20.2	2.186
28	25.2	20	2.466	89	66.8	20	2.388	149	118.9	20.3	2.182
29	25.6	20	2.465	90	67.7	20	2.385	150	119.7	20.3	2.177
30	26	20	2.465	91	68.5	20	2.383	151	120.5	20.3	2.172
31	26.4	20	2.464	92	69.4	20	2.381	152	121.4	20.3	2.167
32	26.9	20	2.463	93	70.2	20	2.378	153	122.2	20.3	2.162
33	27.3	20	2.463	94	71.1	20	2.376	154	123.1	20.3	2.158
34	27.8	20	2.462	95	71.9	20	2.373	155	123.9	20.3	2.153
35	28.3	20	2.461	96	72.8	20	2.371	156	124.7	20.3	2.148
36	28.8	20	2.461	97	73.6	20	2.368	157	125.6	20.3	2.143
37	29.3	20	2.46	98	74.5	20	2.366	158	126.4	20.4	2.138
38	29.9	20	2.459	99	75.4	20	2.363	159	127.2	20.4	2.133
39	30.4	20	2.459	100	76.2	20	2.361	160	128	20.4	2.128
40	30.9	20	2.458	101	77.1	20	2.358	161	128.9	20.4	2.122
41	31.5	20	2.457	102	78	20	2.355	162	129.7	20.4	2.117
42	32.1	20	2.456	103	78.8	20	2.353	163	130.5	20.4	2.112
43	32.7	20	2.455	104	79.7	20	2.35	164	131.3	20.4	2.107
44	33.2	20	2.454	105	80.6	20	2.347	165	132.1	20.4	2.101
45	33.8	20	2.454	106	81.5	20	2.344	166	132.9	20.5	2.096
46	34.4	20	2.453	107	82.3	20	2.341	167	133.7	20.5	2.091
47	35	20	2.452	108	83.2	20	2.338	168	134.6	20.5	2.082
48	35.6	20	2.451	109	84.1	20	2.335	169	135.4	20.5	2.08
49	36.2	20	2.45	110	85	20	2.332	170	136.2	20.5	2.074
50	36.8	20	2.449	111	85.8	20	2.329	171	137	20.5	2.069
51	37.5	20	2.448	112	86.7	20	2.326	172	137.8	20.5	2.063
52	38.2	20	2.447	113	87.6	20	2.323	173	138.6	20.6	2.057
53	38.8	20	2.446	114	88.5	20	2.32	174	139.3	20.6	2.052
54	39.5	20	2.445	115	89.4	20	2.316	175	140.1	20.6	2.046
55	40.2	20	2.444	116	90.2	20	2.313	176	140.9	20.6	2.04
56	40.9	20	2.442	117	91.1	20	2.31	177	141.7	20.6	2.034
57	41.6	20	2.441	118	92	20	2.306	178	142.5	20.7	2.029
58	42.4	20	2.44	119	92.9	20.1	2.303	179	143.3	20.7	2.023
59	43.1	20	2.439	120	93.8	20.1	2.3	180	144.1	20.7	2.017
60	43.8	20	2.438								

400 m²の対象空間における温度と煙層厚さの算出値

時刻(s)	上層温度(°C)	下層温度(°C)	煙層厚さ	時刻(s)	上層温度(°C)	下層温度(°C)	煙層厚さ	時刻(s)	上層温度(°C)	下層温度(°C)	煙層厚さ
0	20	20	2.5	61	96.6	20	2.233	121	192.5	21.2	1.507
1	20	20	2.475	62	98.4	20	2.225	122	193.9	21.3	1.494
2	20	20	2.474	63	100.1	20	2.216	123	195.4	21.3	1.482
3	20.1	20	2.474	64	101.9	20	2.207	124	196.8	21.4	1.47
4	20.2	20	2.473	65	103.7	20	2.198	125	198.2	21.4	1.458
5	20.4	20	2.472	66	105.5	20	2.189	126	199.7	21.5	1.446
6	20.7	20	2.471	67	107.2	20	2.179	127	201.1	21.6	1.435
7	21	20	2.47	68	109	20	2.17	128	202.5	21.6	1.423
8	21.4	20	2.469	69	110.8	20	2.16	129	204	21.7	1.412
9	21.9	20	2.467	70	112.5	20	2.15	130	205.4	21.8	1.4
10	22.4	20	2.466	71	114.3	20	2.14	131	206.9	21.8	1.389
11	23	20	2.464	72	116.1	20.1	2.129	132	208.3	21.9	1.378
12	23.7	20	2.463	73	117.8	20.1	2.119	133	209.8	22	1.367
13	24.4	20	2.461	74	119.6	20.1	2.108	134	211.3	22	1.356
14	25.2	20	2.459	75	121.4	20.1	2.097	135	212.7	22.1	1.345
15	26	20	2.457	76	123.1	20.1	2.086	136	214.2	22.2	1.335
16	26.9	20	2.455	77	124.9	20.1	2.075	137	215.6	22.3	1.324
17	27.8	20	2.452	78	126.7	20.1	2.063	138	217.1	22.3	1.314
18	28.8	20	2.45	79	128.4	20.1	2.052	139	218.5	22.4	1.304
19	29.8	20	2.448	80	130.2	20.1	2.04	140	220	22.5	1.294
20	30.9	20	2.445	81	131.9	20.1	2.028	141	221.5	22.6	1.284
21	32	20	2.442	82	133.7	20.1	2.016	142	222.9	22.7	1.274
22	33.1	20	2.44	83	135.4	20.2	2.003	143	224.4	22.8	1.264
23	34.3	20	2.437	84	137.1	20.2	1.991	144	225.8	22.8	1.255
24	35.5	20	2.434	85	138.7	20.2	1.978	145	227.3	22.9	1.245
25	36.8	20	2.43	86	140.4	20.2	1.965	146	228.7	23	1.236
26	38.1	20	2.427	87	142	20.2	1.952	147	230.2	23.1	1.227
27	39.4	20	2.424	88	143.6	20.2	1.939	148	231.6	23.2	1.218
28	40.7	20	2.42	89	145.2	20.2	1.926	149	233.1	23.3	1.209
29	42.1	20	2.417	90	146.8	20.3	1.913	150	234.6	23.4	1.2
30	43.6	20	2.413	91	148.4	20.3	1.9	151	236	23.5	1.192
31	45	20	2.409	92	150	20.3	1.887	152	237.5	23.6	1.183
32	46.5	20	2.405	93	151.5	20.3	1.874	153	238.9	23.7	1.175
33	48	20	2.401	94	153	20.3	1.86	154	240.3	23.9	1.166
34	49.5	20	2.397	95	154.6	20.4	1.847	155	241.8	24	1.158
35	51.1	20	2.393	96	156.1	20.4	1.834	156	243.2	24.1	1.15
36	52.7	20	2.388	97	157.6	20.4	1.82	157	244.7	24.2	1.143
37	54.3	20	2.384	98	159.1	20.4	1.807	158	246.1	24.3	1.135
38	55.9	20	2.379	99	160.6	20.4	1.794	159	247.6	24.5	1.127
39	57.6	20	2.374	100	162.1	20.5	1.78	160	249	24.6	1.12
40	59.3	20	2.369	101	163.6	20.5	1.767	161	250.4	24.7	1.112
41	61	20	2.364	102	165	20.5	1.753	162	251.9	24.8	1.105
42	62.6	20	2.359	103	166.5	20.5	1.74	163	253.3	25	1.098
43	64.3	20	2.354	104	168	20.6	1.727	164	254.7	25.1	1.091
44	66	20	2.348	105	169.4	20.6	1.713	165	256.2	25.2	1.084
45	67.7	20	2.343	106	170.9	20.6	1.7	166	257.6	25.4	1.077
46	69.4	20	2.337	107	172.3	20.7	1.687	167	259	25.5	1.07
47	71.2	20	2.331	108	173.8	20.7	1.673	168	260.4	25.6	1.063
48	72.9	20	2.325	109	175.2	20.7	1.66	169	261.9	25.8	1.057
49	74.7	20	2.319	110	176.7	20.8	1.647	170	263.3	25.9	1.05
50	76.5	20	2.313	111	178.1	20.8	1.634	171	264.7	26.1	1.044
51	78.3	20	2.306	112	179.6	20.8	1.621	172	266.1	26.2	1.037
52	80.1	20	2.3	113	181	20.9	1.608	173	267.5	26.4	1.031
53	81.9	20	2.293	114	182.4	20.9	1.595	174	268.9	26.5	1.025
54	83.7	20	2.286	115	183.9	21	1.582	175	270.3	26.7	1.019
55	85.6	20	2.279	116	185.3	21	1.569	176	271.7	26.9	1.013
56	87.4	20	2.272	117	186.8	21	1.556	177	273.1	27	1.007
57	89.3	20	2.264	118	188.2	21.1	1.544	178	274.5	27.2	1.001
58	91.1	20	2.257	119	189.6	21.1	1.531	179	275.9	27.4	0.995
59	93	20	2.249	120	191.1	21.2	1.519	180	277.3	27.6	0.989
60	94.8	20	2.241								

900 m²の対象空間における温度と煙層厚さの算出値

時刻(s)	上層温度(°C)	下層温度(°C)	煙層厚さ	時刻(s)	上層温度(°C)	下層温度(°C)	煙層厚さ	時刻(s)	上層温度(°C)	下層温度(°C)	煙層厚さ
0	20	20	2.5	61	69.9	20	2.366	121	147.9	20.4	1.971
1	20	20	2.475	62	71.2	20	2.363	122	149.1	20.4	1.961
2	20	20	2.474	63	72.5	20	2.359	123	150.3	20.4	1.952
3	20	20	2.474	64	73.8	20	2.355	124	151.5	20.5	1.942
4	20.1	20	2.473	65	75.2	20	2.351	125	152.7	20.5	1.933
5	20.2	20	2.473	66	76.5	20	2.347	126	153.9	20.5	1.923
6	20.3	20	2.473	67	77.7	20	2.343	127	155	20.5	1.913
7	20.5	20	2.472	68	79	20	2.339	128	156.1	20.6	1.904
8	20.7	20	2.472	69	80.3	20	2.334	129	157.2	20.6	1.894
9	20.9	20	2.471	70	81.6	20	2.33	130	158.4	20.6	1.884
10	21.2	20	2.471	71	82.9	20	2.325	131	159.5	20.6	1.875
11	21.5	20	2.47	72	84.2	20	2.32	132	160.5	20.7	1.865
12	21.9	20	2.469	73	85.5	20	2.316	133	161.6	20.7	1.855
13	22.3	20	2.468	74	86.8	20	2.311	134	162.7	20.7	1.845
14	22.7	20	2.468	75	88.2	20	2.306	135	163.7	20.7	1.835
15	23.2	20	2.467	76	89.5	20	2.301	136	164.8	20.8	1.825
16	23.7	20	2.466	77	90.8	20	2.295	137	165.8	20.8	1.815
17	24.2	20	2.465	78	92.1	20	2.29	138	166.9	20.8	1.805
18	24.8	20	2.464	79	93.4	20	2.285	139	167.9	20.8	1.795
19	25.4	20	2.462	80	94.8	20	2.279	140	168.9	20.9	1.785
20	26	20	2.461	81	96.1	20	2.274	141	169.9	20.9	1.775
21	26.7	20	2.46	82	97.4	20	2.268	142	170.9	20.9	1.765
22	27.4	20	2.459	83	98.7	20	2.262	143	171.9	21	1.755
23	28.1	20	2.458	84	100	20	2.256	144	172.9	21	1.745
24	28.8	20	2.456	85	101.4	20	2.25	145	173.9	21.1	1.735
25	29.6	20	2.455	86	102.7	20	2.244	146	174.9	21.1	1.725
26	30.4	20	2.453	87	104	20	2.238	147	175.9	21.1	1.715
27	31.3	20	2.452	88	105.3	20	2.232	148	176.9	21.2	1.705
28	32.1	20	2.45	89	106.7	20.1	2.226	149	177.8	21.2	1.695
29	32.9	20	2.449	90	108	20.1	2.219	150	178.8	21.2	1.684
30	33.8	20	2.447	91	109.3	20.1	2.213	151	179.8	21.3	1.674
31	34.7	20	2.445	92	110.6	20.1	2.206	152	180.8	21.3	1.664
32	35.6	20	2.444	93	111.9	20.1	2.199	153	181.7	21.4	1.654
33	36.6	20	2.442	94	113.2	20.1	2.192	154	182.7	21.4	1.644
34	37.6	20	2.44	95	114.6	20.1	2.185	155	183.6	21.5	1.634
35	38.6	20	2.438	96	115.9	20.1	2.178	156	184.6	21.5	1.624
36	39.6	20	2.436	97	117.2	20.1	2.171	157	185.5	21.6	1.614
37	40.6	20	2.434	98	118.5	20.1	2.164	158	186.5	21.6	1.604
38	41.7	20	2.432	99	119.8	20.1	2.157	159	187.4	21.7	1.593
39	42.8	20	2.43	100	121.1	20.1	2.149	160	188.4	21.7	1.583
40	43.9	20	2.428	101	122.4	20.1	2.142	161	189.3	21.8	1.573
41	45	20	2.425	102	123.7	20.2	2.134	162	190.3	21.8	1.563
42	46.1	20	2.423	103	125	20.2	2.126	163	191.2	21.9	1.553
43	47.3	20	2.421	104	126.3	20.2	2.118	164	192.1	21.9	1.543
44	48.4	20	2.418	105	127.6	20.2	2.111	165	193.1	22	1.533
45	49.6	20	2.416	106	128.9	20.2	2.102	166	194	22	1.523
46	50.8	20	2.413	107	130.2	20.2	2.094	167	195	22.1	1.513
47	52	20	2.41	108	131.4	20.2	2.086	168	195.9	22.1	1.503
48	53.3	20	2.408	109	132.7	20.2	2.078	169	196.9	22.2	1.493
49	54.5	20	2.405	110	134	20.2	2.069	170	197.8	22.3	1.483
50	55.8	20	2.402	111	135.3	20.3	2.061	171	198.8	22.3	1.473
51	57	20	2.399	112	136.6	20.3	2.052	172	199.7	22.4	1.463
52	58.3	20	2.396	113	137.8	20.3	2.044	173	200.7	22.5	1.454
53	59.6	20	2.393	114	139.1	20.3	2.035	174	201.6	22.5	1.444
54	60.9	20	2.39	115	140.4	20.3	2.026	175	202.6	22.6	1.434
55	62.2	20	2.387	116	141.6	20.3	2.017	176	203.5	22.7	1.424
56	63.4	20	2.384	117	142.9	20.3	2.008	177	204.5	22.7	1.414
57	64.7	20	2.38	118	144.1	20.4	1.999	178	205.4	22.8	1.405
58	66	20	2.377	119	145.4	20.4	1.989	179	206.3	22.9	1.395
59	67.2	20	2.374	120	146.6	20.4	1.98	180	207.2	23	1.385
60	68.5	20	2.37								

1600 m²の対象空間における温度と煙層厚さの算出値

時刻(s)	上層温度(°C)	下層温度(°C)	煙層厚さ	時刻(s)	上層温度(°C)	下層温度(°C)	煙層厚さ	時刻(s)	上層温度(°C)	下層温度(°C)	煙層厚さ
0	20	20	2.5	61	54.4	20	2.414	121	116.3	20.2	2.191
1	20	20	2.475	62	55.4	20	2.412	122	117.3	20.2	2.186
2	20	20	2.474	63	56.4	20	2.41	123	118.4	20.2	2.18
3	20	20	2.474	64	57.4	20	2.408	124	119.4	20.2	2.174
4	20	20	2.474	65	58.5	20	2.406	125	120.4	20.2	2.169
5	20.1	20	2.474	66	59.4	20	2.404	126	121.5	20.2	2.163
6	20.1	20	2.474	67	60.4	20	2.401	127	122.5	20.2	2.157
7	20.2	20	2.473	68	61.3	20	2.399	128	123.5	20.2	2.151
8	20.4	20	2.473	69	62.3	20	2.397	129	124.5	20.2	2.145
9	20.5	20	2.473	70	63.2	20	2.394	130	125.6	20.2	2.139
10	20.7	20	2.472	71	64.2	20	2.392	131	126.6	20.3	2.133
11	20.9	20	2.472	72	65.2	20	2.389	132	127.6	20.3	2.127
12	21.1	20	2.472	73	66.2	20	2.386	133	128.6	20.3	2.121
13	21.3	20	2.471	74	67.2	20	2.384	134	129.6	20.3	2.114
14	21.6	20	2.471	75	68.2	20	2.381	135	130.6	20.3	2.108
15	21.9	20	2.47	76	69.2	20	2.378	136	131.6	20.3	2.102
16	22.2	20	2.47	77	70.2	20	2.375	137	132.6	20.3	2.095
17	22.5	20	2.469	78	71.2	20	2.372	138	133.6	20.3	2.089
18	22.9	20	2.468	79	72.2	20	2.369	139	134.6	20.4	2.082
19	23.3	20	2.468	80	73.2	20	2.366	140	135.6	20.4	2.076
20	23.7	20	2.467	81	74.3	20	2.363	141	136.6	20.4	2.069
21	24.1	20	2.466	82	75.5	20	2.36	142	137.6	20.4	2.062
22	24.5	20	2.466	83	76.3	20	2.357	143	138.6	20.4	2.055
23	25	20	2.465	84	77.4	20	2.354	144	139.5	20.4	2.048
24	25.5	20	2.464	85	78.4	20	2.35	145	140.5	20.4	2.042
25	26	20	2.463	86	79.5	20	2.347	146	141.5	20.5	2.035
26	26.5	20	2.463	87	80.5	20	2.343	147	142.5	20.5	2.028
27	27.1	20	2.462	88	81.6	20	2.34	148	143.5	20.5	2.02
28	27.6	20	2.461	89	82.6	20	2.336	149	144.4	20.5	2.013
29	28.2	20	2.46	90	83.7	20	2.333	150	145.4	20.5	2.006
30	28.8	20	2.459	91	84.7	20	2.329	151	146.4	20.6	1.999
31	29.4	20	2.458	92	85.8	20	2.325	152	147.3	20.6	1.992
32	30.1	20	2.457	93	86.8	20	2.322	153	148.3	20.6	1.984
33	30.7	20	2.456	94	87.9	20	2.318	154	149.2	20.6	1.977
34	31.4	20	2.455	95	89	20	2.314	155	150.2	20.6	1.969
35	32.1	20	2.454	96	90	20	2.31	156	151.1	20.7	1.962
36	32.8	20	2.453	97	91.1	20	2.306	157	152.1	20.7	1.954
37	33.5	20	2.452	98	92.1	20	2.302	158	153	20.7	1.947
38	34.2	20	2.451	99	93.2	20	2.298	159	154	20.7	1.939
39	34.9	20	2.449	100	94.2	20	2.294	160	154.9	20.8	1.932
40	35.6	20	2.448	101	95.3	20	2.289	161	155.8	20.8	1.924
41	36.4	20	2.447	102	96.4	20	2.285	162	156.7	20.8	1.916
42	37.2	20	2.446	103	97.4	20	2.281	163	157.7	20.8	1.909
43	37.9	20	2.444	104	98.5	20	2.276	164	158.5	20.9	1.901
44	38.8	20	2.443	105	99.5	20.1	2.272	165	159.4	20.9	1.893
45	39.6	20	2.442	106	100.6	20.1	2.267	166	160.3	20.9	1.885
46	40.4	20	2.44	107	101.6	20.1	2.262	167	161.1	20.9	1.878
47	41.3	20	2.439	108	102.7	20.1	2.258	168	162	21	1.87
48	42.1	20	2.437	109	103.8	20.1	2.253	169	162.8	21	1.862
49	43	20	2.436	110	104.8	20.1	2.248	170	163.7	21	1.854
50	43.9	20	2.434	111	105.9	20.1	2.243	171	164.5	21.1	1.847
51	44.8	20	2.432	112	106.9	20.1	2.238	172	165.3	21.1	1.839
52	45.7	20	2.431	113	108	20.1	2.233	173	166.1	21.1	1.831
53	46.6	20	2.429	114	109	20.1	2.228	174	166.9	21.2	1.823
54	47.5	20	2.427	115	110.1	20.1	2.223	175	167.7	21.2	1.815
55	48.5	20	2.426	116	111.1	20.1	2.218	176	168.4	21.2	1.807
56	49.4	20	2.424	117	112.1	20.1	2.213	177	169.2	21.3	1.799
57	50.4	20	2.422	118	113.2	20.1	2.208	178	170	21.3	1.791
58	51.4	20	2.42	119	114.2	20.1	2.202	179	170.8	21.3	1.783
59	52.4	20	2.418	120	115.3	20.2	2.197	180	171.6	21.4	1.775
60	53.4	20	2.416								