

## 危険物施設の放爆に関するシミュレーションの概要について

## 1 シミュレーションの概要

屋根に太陽電池モジュールを設置している場合と、設置していない場合の解析結果を比較し、屋根に太陽電池モジュールを設置することによる放爆性能への支障がどの程度あるのかを確認する。

シミュレーションの解析モデルは三次元モデルとし、圧縮性流体解析により、爆発エネルギーが放散される際の危険物施設内の状況を数値解析する。

## 計算環境：

使用した計算機の主な仕様を下記に示す。

OS : Windows 7 64bit, CPU : Intel Xeon X5550 (2.67GHz) , GPU : Tesla C2070 , Memory : 32GB

## 使用したコード : FLACS

FLACS は、Norway の Gexcon 社が開発した漏洩・拡散・燃焼・爆発などの災害事故シミュレーションに特化した流体解析コードである。FLACS の特徴は Gexcon 社が自社で運営する爆発実験サイトで行う膨大な実験データを背景に、火炎速度や圧力プロファイル、乱流条件の違い等の計算結果と実験データを比較し、計算結果が実験データを再現するようにチューニングされている点である。

※ 本数値解析は、実際の構造物を簡略化したシミュレーションであり実際に起こる現象を 100%再現したものではない。よって解析結果は現象の大まかな方向性は捉えていると予想されるが、本シミュレーションの内容が実際の安全性等を保証するものではないことに注意する。

## 2 シミュレーション条件

## (1) 危険物施設の仕様

## ア 危険物施設の寸法

小規模施設と中規模施設をイメージして 2 パターンで検証を行った。

小規模施設は、消防庁が実施したアンケート調査結果から、比較的小規模な施設の寸法を用いた。中規模施設は、危険物倉庫として一般的に用いられている寸法を用いた。

## 危険物施設の寸法

	容積 [m <sup>3</sup> ]	床面積 [m <sup>2</sup> ]	たて [m]	よこ [m]	高さ [m]
①小規模施設	300	100	10	10	3
②中規模施設	6000	1000	25	40	6

## イ 屋根の強度

危険物施設の屋根として多く用いられる折板屋根を想定し、最も破断しやすい折板と固定金具の強度を対象として次の 2 種類の強度で検証した。

## 屋根の強度

一般的に屋内貯蔵所を建築する際に用いられる折板屋根の数値を設定

① 4491N/m<sup>2</sup> (限界耐力)

折板屋根を上方に引っ張る耐力試験で、固定金具のかしめ部が開いた時の荷重。

② 2246N/m<sup>2</sup> (設計耐力)

耐力試験の結果(上記①)の 1/2 の値。

※ 一般的に耐力試験の 1/2 程度の値が設計値として用いられており、耐力試験の結果は設計者は把握していないことがあるため、目安として②を設定した。

(2) 太陽電池モジュールの重さ

太陽電池モジュールの重さは1枚で15~17kg程度であり、大きさは1㎡を軽く超えるくらいのサイズが主流である。太陽電池モジュールの1㎡当たりの重さを、一般的に用いられる固定金具と比較的重い市販の太陽電池モジュールの重さから想定した。

太陽電池モジュールの重さ

太陽電池モジュール 16kg/㎡ + 固定金具 0.9kg/個 × 6 = 5.4kg = 21kg/㎡ ⇒ 210N/㎡

屋根の強度との比較

- ① 4491N/㎡ (限界耐力) の約5%
- ② 2246N/㎡ (設計耐力) の約10%

なお、架台については、基本的には梁の上に設置されるものであることから屋根の放爆には影響はないものとした。

(3) 爆発エネルギー

放爆口の効果が期待できる燃焼爆発を対象とする。

爆発エネルギーは大小で次の2種類を想定する。なお、危険物施設で取り扱っている危険物のうち第4類の危険物が圧倒的に多いことから、可燃性蒸気の発生量が多いガソリンの流出事故を想定する。

爆発エネルギーの大きさ

- ① 44MJ (ガソリン 1kg 相当)  
ドラム缶等の容器で危険物を貯蔵・取扱いする施設における漏洩・爆発を想定
- ② 440MJ (ガソリン 10kg 相当)  
①の少量漏洩と比較するため、危険物を大量に取り扱う製造所等における漏洩・爆発を想定

(4) 着火位置

燃焼爆発では、燃焼時間が継続されるにつれて爆発速度が大きくなり、爆発エネルギーが大きくなる。このことから、着火位置は次の2とおりを想定する。

着火位置

- ① 建物中央  
最も爆発エネルギーが小さくなる位置を想定
- ② 建物の端  
最も爆発エネルギーが大きくなる位置を想定

(5) 燃焼速度への影響因子

一般に施設内に構造物がある場合、物体後流に形成される乱流による攪拌推進効果により、燃焼速度が早くなることが予想される。そのため、施設内の乱雑度をパラメータとした解析を行う必要がある。施設内の乱雑度が大きい場合、火炎に対する乱流の影響が大きくなり、結果として

被害が大きくなる。

施設内の乱雑度については、乱雑度がゼロ（ブランク値）と一定の乱雑度あるものの2種類を想定する。

燃焼速度への影響因子

- ① 乱雑度 なし  
最も燃焼速度が加速されない場合を想定
- ② 乱雑度 あり  
一般的にあり得る乱雑度により燃焼速度が加速される場合を想定

以上、全 20 ケースの一覧を以下に示す。

表 2-1 解析ケース一覧

Case No.	太陽電池モジュールの有無と屋根重量		施設	屋根の強度 [barg]		爆発エネルギー [MJ]	ガス領域* [m]	着火位置	燃焼速度への影響因子	
1	なし	屋根 9kg/m <sup>2</sup>	小	標準値	0.04491	44	3×3×1.5	建物中央	なし	
2						440	9.3×9.3×1.5			
3				許容値	0.02246	44	3×3×1.5			
4					2.1×2.1×1.5					
5					中	標準値	0.04491	2.25×2.25×1.5	建物端	あり
6								2.1×2.1×3		
7								440	6.6×6.6×3	建物中
8					6.7×6.7×3	中央	あり			
9					6.6×6.6×3	建物端	なし			
10					許容値	0.02246		44	2.1×2.1×3	建物中央
11	あり	屋根 9kg/m <sup>2</sup> + 太陽電池 モジュール 21kg/m <sup>2</sup>	小	標準値	0.04491	44	3×3×1.5	建物中央	なし	
12						440	9.3×9.3×1.5			
13				許容値	0.02246	44	3×3×1.5			
14					2.1×2.1×1.5					
15					中	標準値	0.04491	2.25×2.25×1.5	建物端	あり
16								2.1×2.1×3		
17								440	6.6×6.6×3	建物中
18					6.7×6.7×3	中央	あり			
19					6.6×6.6×3	建物端	なし			
20					許容値	0.02246		44	2.1×2.1×3	建物中央

※燃焼速度への影響因子を考慮したケース（Case No. 5、Case No. 8、Case No. 15、Case No. 18）では、ガス領域と構造物が重なる分ガス総量が少なくなるため、構造物なしのケースより大きい領域を設定し、ガス総量がほぼ同等になるよう調整した。

### 3 シミュレーション手法

#### (1) 屋根の強度

屋根にはFLACSのPressure Relief Panelという機能を使用する。作動圧力差（たとえば0.1気圧）を設定することで外部への気体リークをシミュレートすることができるもので、重量も考慮することが可能である。この重量をCase No. 1～No. 10では屋根の重量(9kg/m<sup>2</sup>)に、Case No. 11～No. 20ではさらに太陽電池モジュール重量(21kg/m<sup>2</sup>)を加算した値を設定することにより、太陽電池モジュールの設置状況を模擬することとした。

また、屋根の開口状況を得るため1×1mのPressure Relief Panelを屋根の面積分敷き詰めて設置した。(小規模施設100枚、中規模施設1000枚)これによりどの位置の屋根が開口したか明らかにすることが可能となる。

#### (2) 乱雑度

燃焼速度への影響因子として施設内に構造物を配置し乱雑度の高いモデルを作成した。ガス領域及び着火点周囲に、直径0.25mの円筒をX、Y、Z方向それぞれに並べた。本数は合計60本である。

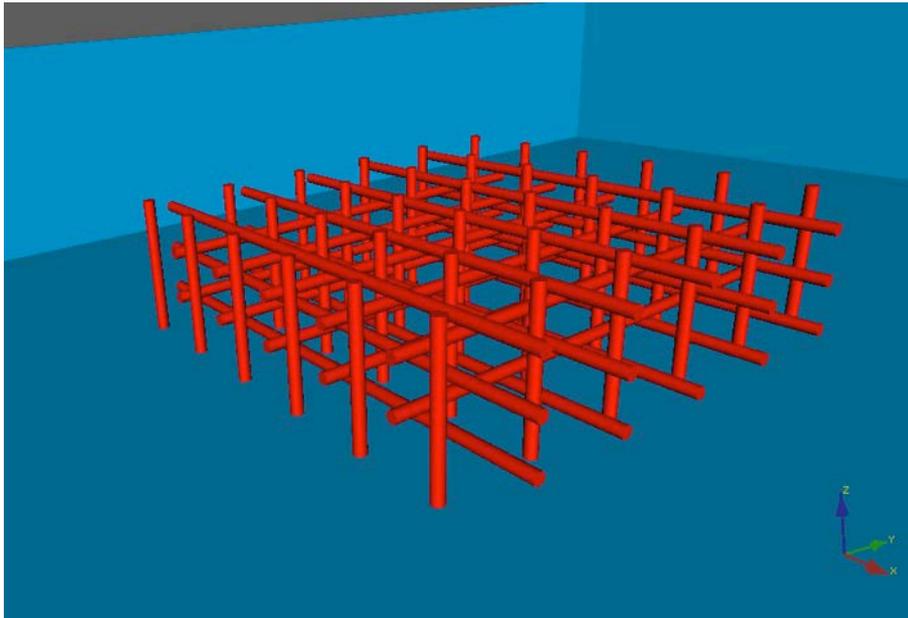


図 2-1 施設内の構造物モデル

(3) 空気混合ガスと 44MJ 相当のガス体積選定

オクタン 90.5vol%とヘプタン 9.5vol%の混合ガスを使用することとした。

表 2-2 オクタン及びヘプタンの容積比率、分子量、密度、燃焼熱

	オクタン	ヘプタン
容積比率、vol%	90.5	9.5
分子量、g/mol	114.2	100.2
密度、g/cm <sup>3</sup>	0.00466	0.00409
燃焼熱、MJ/mol	5.12	4.51

燃焼エネルギー44MJ相当のオクタン価 90.5 のレギュラーガソリンが気化した場合のオクタン +ヘプタン 8.7 モル分のガソリン気化ガスと空気の化学量論的混合ガスの体積は以下となる。

$$V_{\text{mix}}=0.213/0.0165=12.9\text{m}^3$$

(4) FLACS 解析モデル

FLACS で作成した解析モデルを以下に示す。

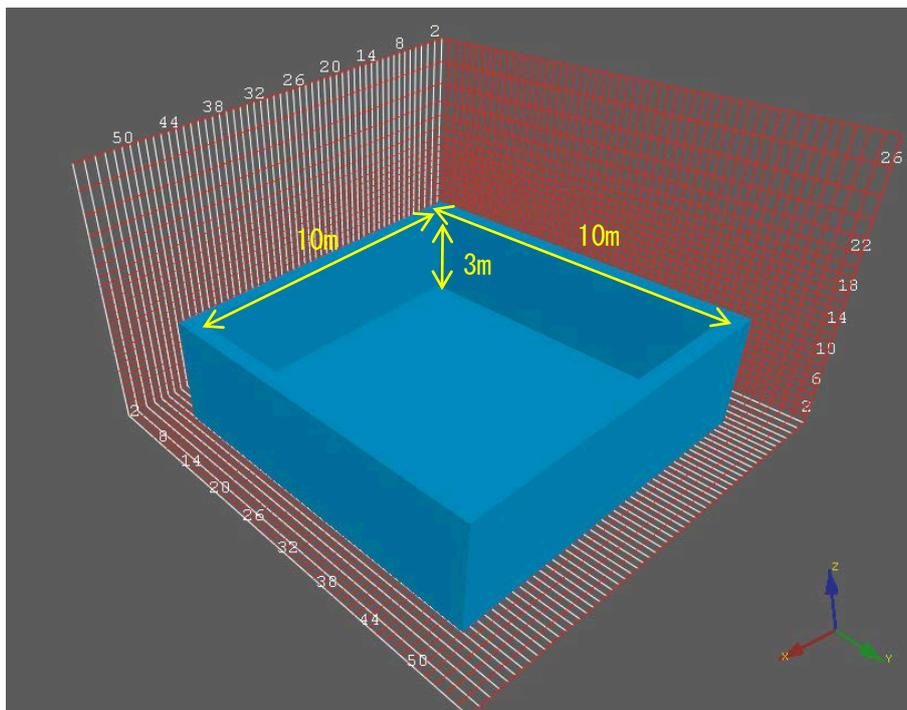


図 2-2 小規模施設モデル（空間領域 10m×10m×3m）

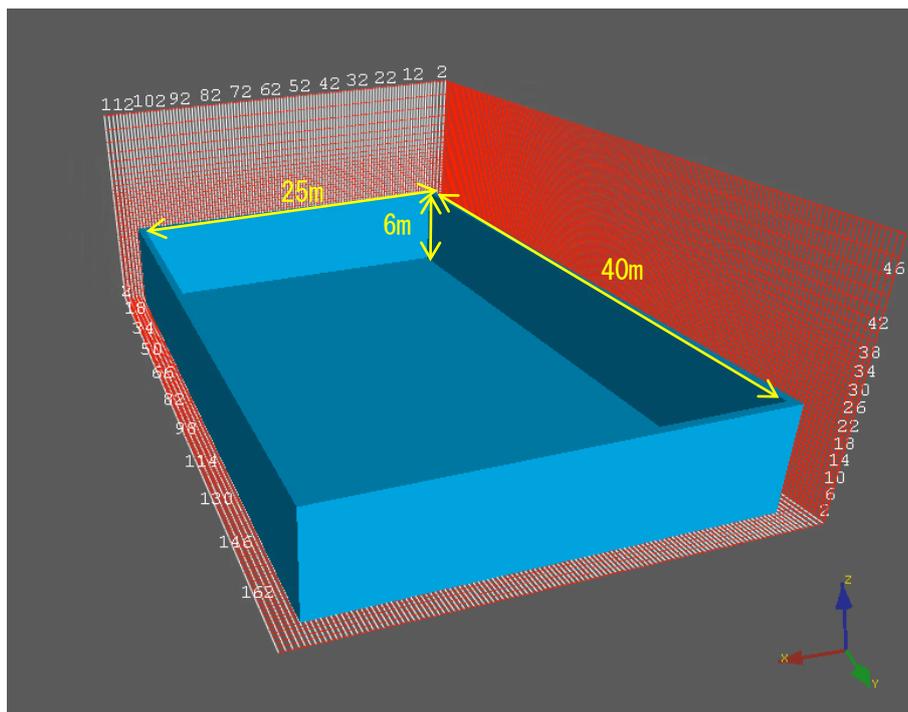


図 2-3 中規模施設モデル (25m × 40m × 6m)

(5) モニターポイント

施設内の圧力をモニターするため、施設中央と端の床付近、中央、屋根付近に計 6 ヶ所のモニターポイントを設置した。

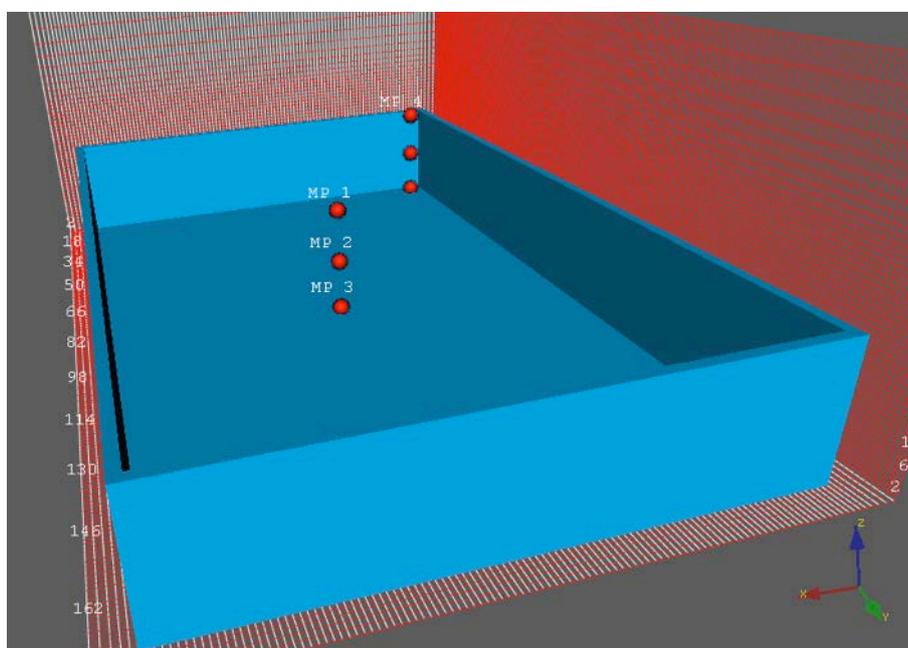


図 2-4 モニターポイント

(6) 計算条件

以下の計算条件で解析を行った。

表 2-3 計算条件

ガス種	オクタン 90.5 vol% ヘプタン 9.5 vol%	ER※	1
初期温度[°C]	20	グリッドサイズ[m]	0.25
初期圧力[Pa]	100000	要素数	小 : 75816 中 : 932292
計算時間 [sec]	1 ※No. 4、5、6、14、15、 16 は 5 秒間計算した。		

※ER=1 : 空気と可燃性ガスを量論混合比とする。

(7) 出力項目一覧

- 二次元断面コンター図 (FUEL、圧力、温度)
- 床、屋根、壁面の二次元圧力コンター図
- モニターポイントにおける圧力の時刻歴
- 屋根の開口状況
- 最大圧力値

#### 4 シミュレーション結果（一例）

##### (1) シミュレーション結果の一例（Case No.1）

表 4-1 Case No.1 条件

Case No.	太陽電池モジュールの有無と屋根重量		施設	屋根の強度 [barg]		爆発エネルギー [MJ]	着火位置	燃焼速度への影響因子
1	なし	屋根 9kg/m <sup>2</sup>	小	標準値	0.04491	44	建物中央	なし

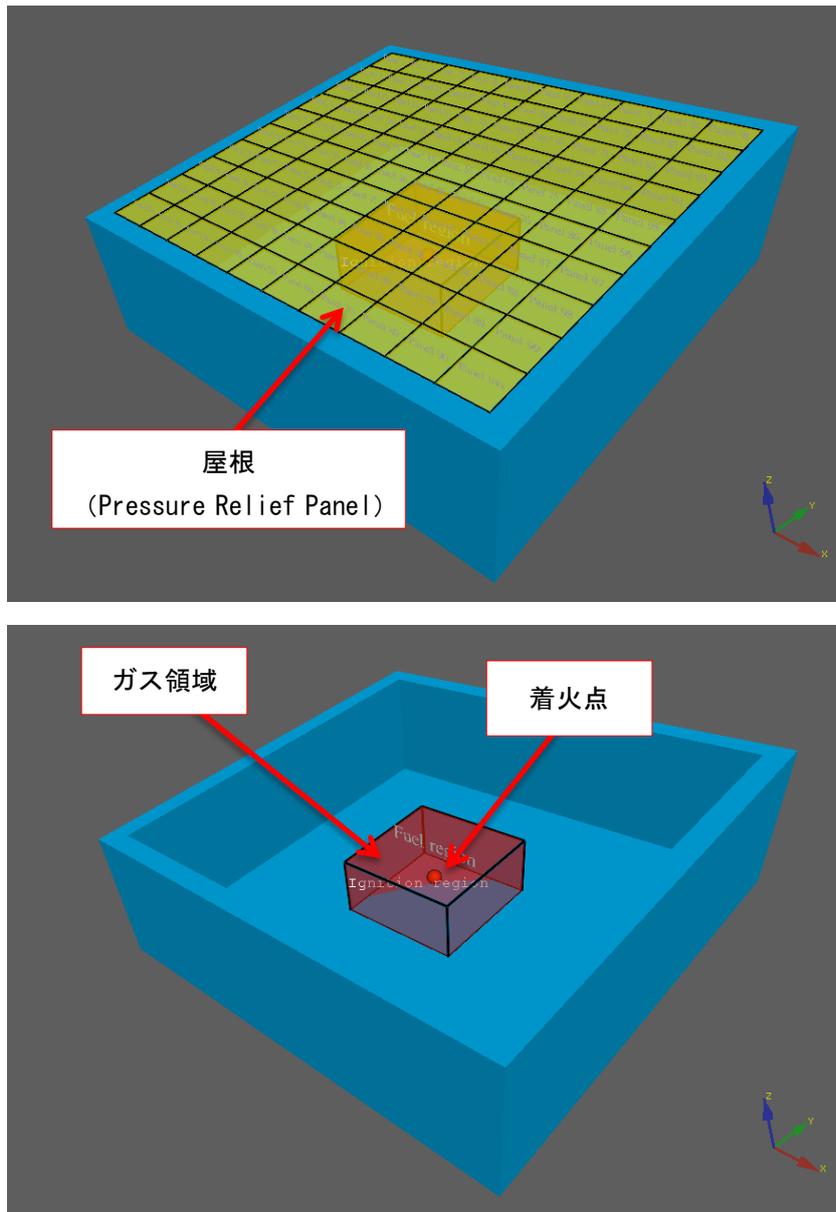


図 4-1 Case No.1 解析モデル（上：屋根表示、下：屋根非表示）  
 ガス領域：3m×3m×1.5m 着火位置：ガス領域中心

【二次元断面コンター図】

着火位置（施設中央）YZ断面におけるFUEL（燃料の体積比）、温度、圧力をそれぞれ左上、左下、右下に可視化した。

表 4-2 Case No. 1 解析結果

Case No.	最大圧力 ※[barg]	屋根			
		開口状況	開始時刻[sec]	終了時刻[sec]	開口所要時間 [sec]
1	0.060	全開	0.2364	0.2944	0.058

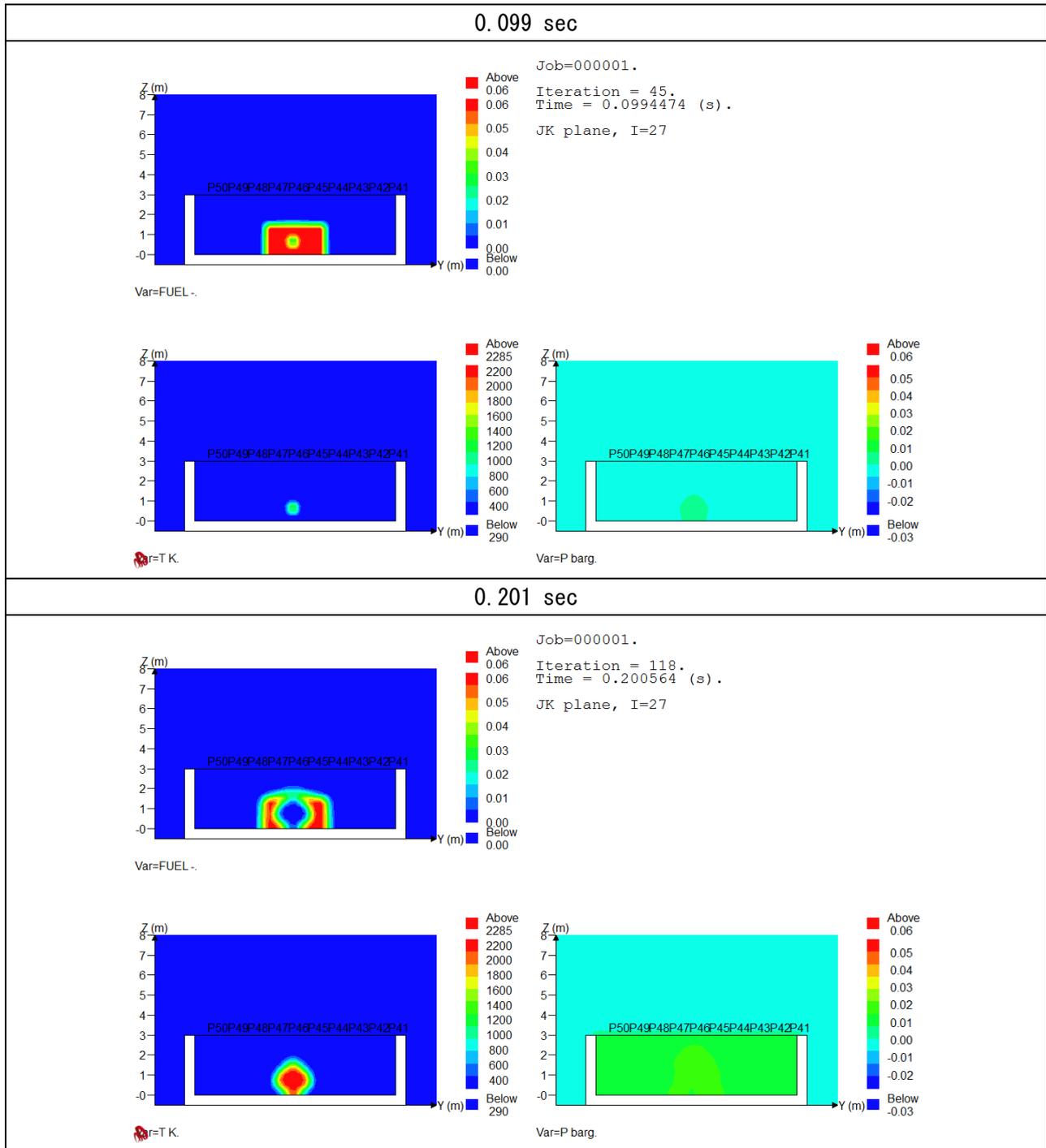


図 4-2 Case No. 1 二次元断面コンター図 1（左上：FUEL、左下：温度、右下：圧力）

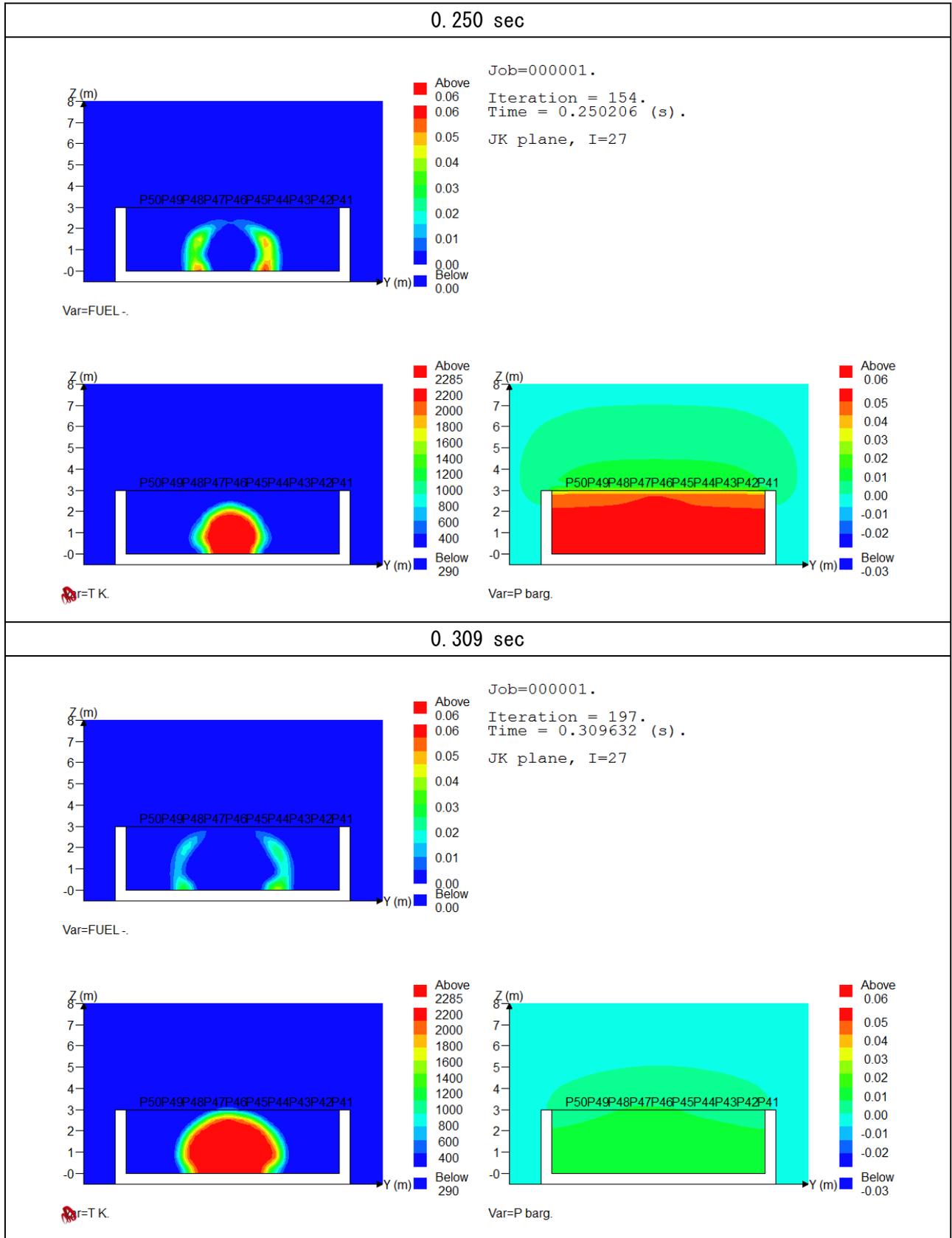


図 4-3 Case No.1 二次元断面コンター図 2 (左上: FUEL、左下: 温度、右下: 圧力)

【床、屋根、壁面における二次元圧力コンター図】

床、屋根、各壁面の6面について圧力を可視化した。下図の通り、上段左に床面、上段右に屋根、中段左に壁C、中段右に壁D、下段左に壁E、下段右に壁Fを表示。

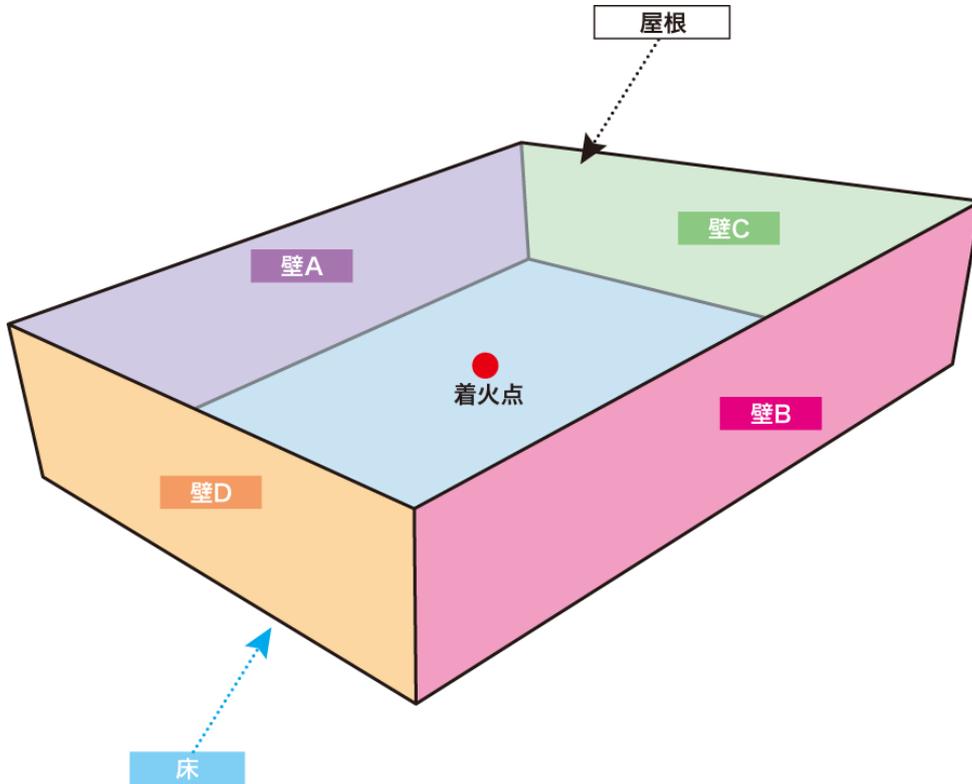


図 4-4 各面の名称

表 4-3 各面の表示位置

(上段左) 床	(上段右) 屋根
(中段左) 壁 A	(中段右) 壁 B
(下段左) 壁 C	(下段右) 壁 D

(上段左) 床	(上段右) 屋根	
(中段左) 壁 A	(中段右) 壁 B	
(下段左) 壁 C	(下段右) 壁 D	

左：表示位置 右：屋根の開口状況を示すグラフ

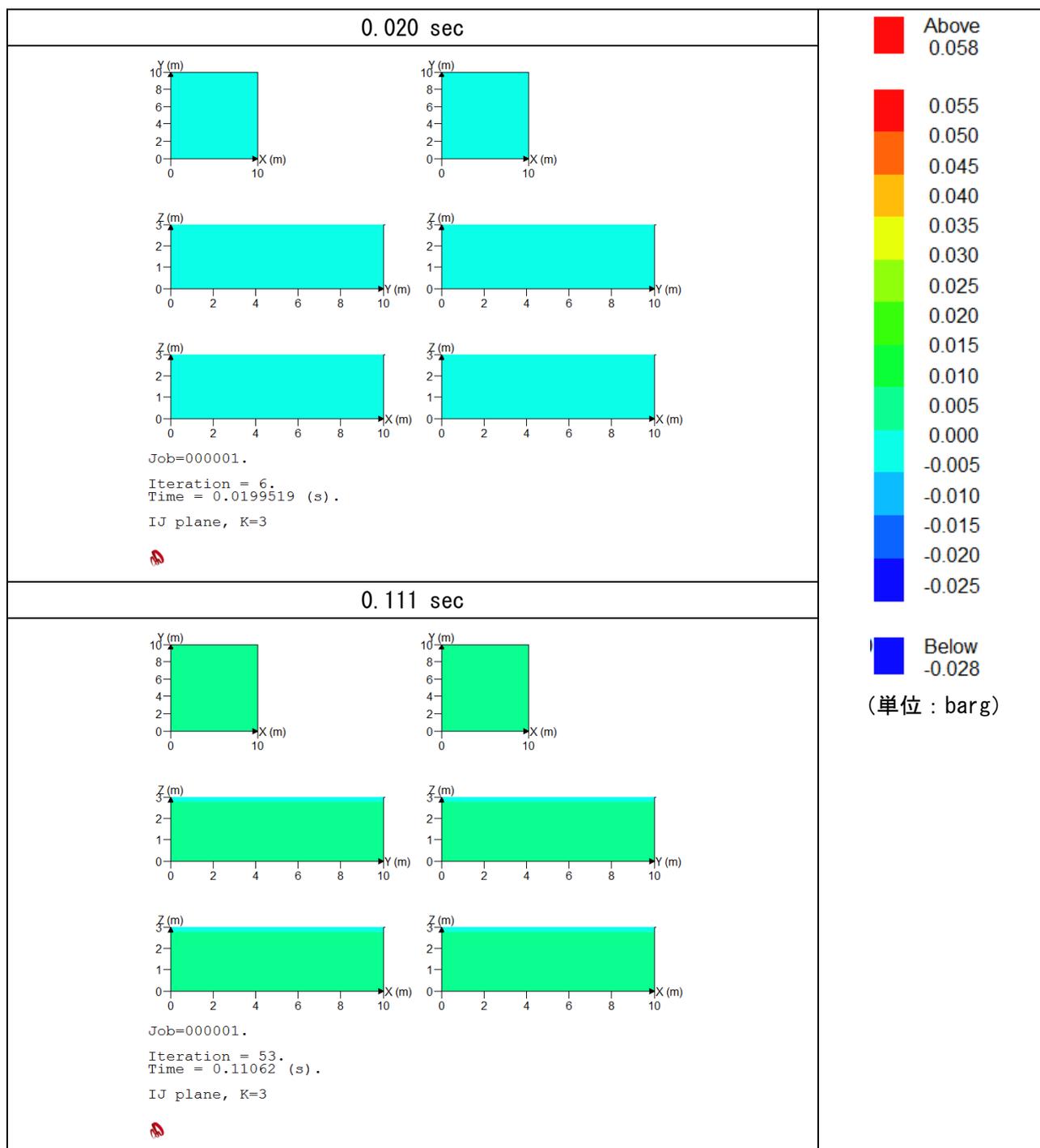


図 4-5 Case No. 1 二次元圧力コンター図 1

(上段左) 床	(上段右) 屋根	
(中段左) 壁 A	(中段右) 壁 B	
(下段左) 壁 C	(下段右) 壁 D	

左：表示位置 右：屋根の開口状況を示すグラフ

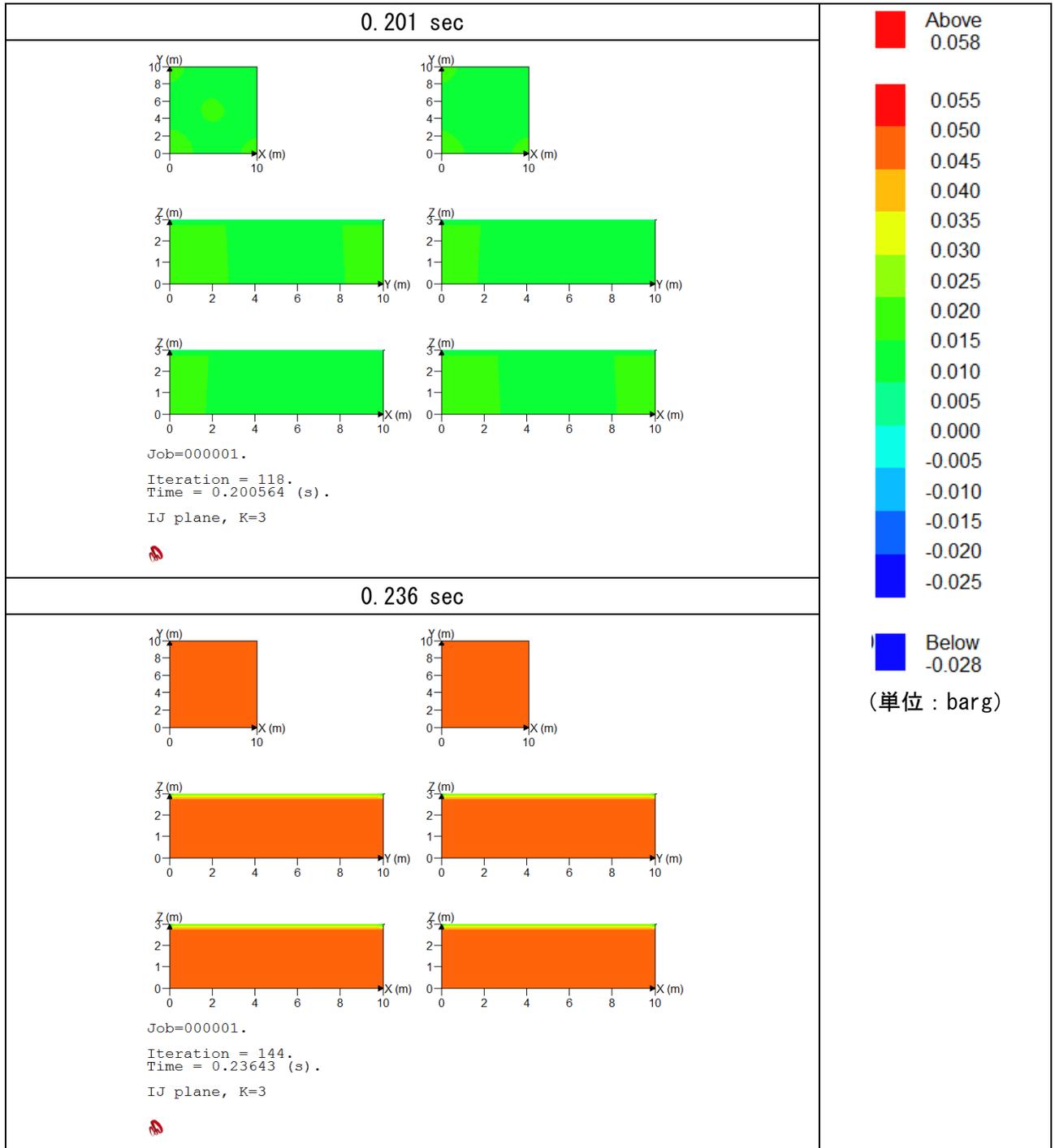


図 4-6 Case No. 1 二次元圧力コンター図 2

(上段左) 床	(上段右) 屋根	
(中段左) 壁 A	(中段右) 壁 B	
(下段左) 壁 C	(下段右) 壁 D	

左：表示位置 右：屋根の開口状況を示すグラフ

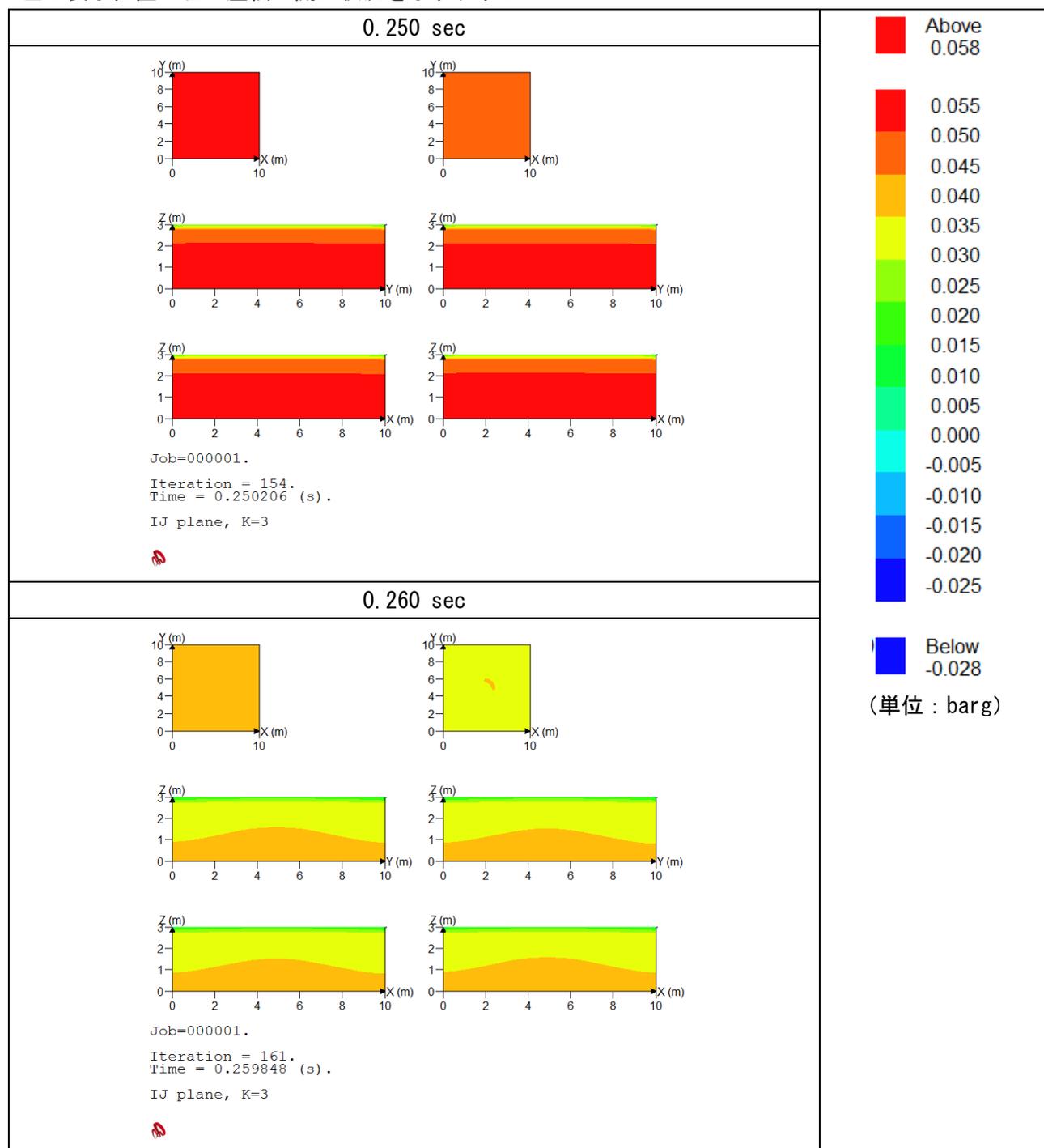


図 4-7 Case No. 1 二次元圧力コンター図 3

(上段左) 床	(上段右) 屋根	
(中段左) 壁 A	(中段右) 壁 B	
(下段左) 壁 C	(下段右) 壁 D	

左：表示位置 右：屋根の開口状況を示すグラフ

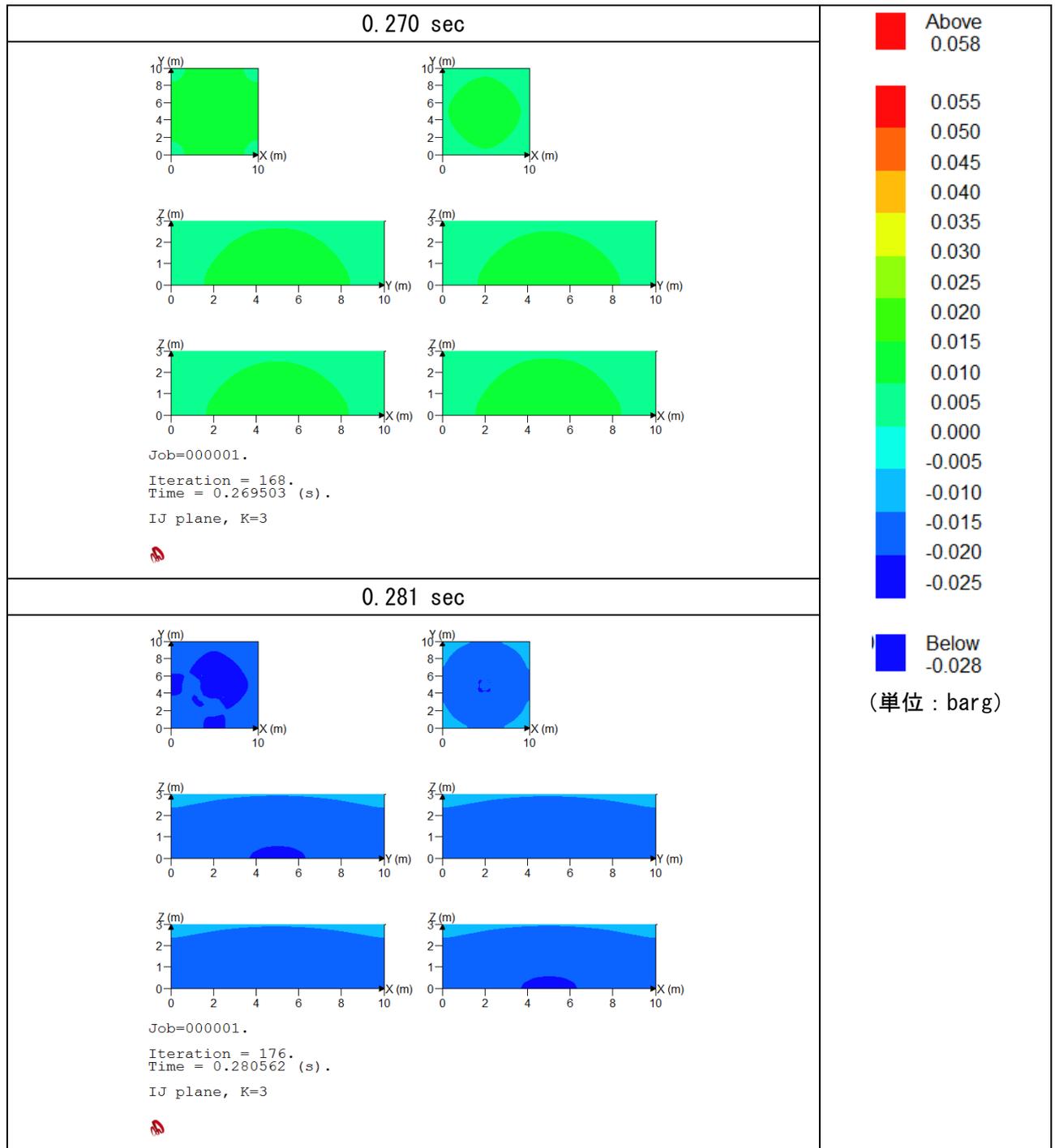


図 4-8 Case No. 1 二次元圧力コンター図 4

【モニターポイントにおける圧力の時刻歴】

各モニターポイントの圧力の時刻歴を可視化した。

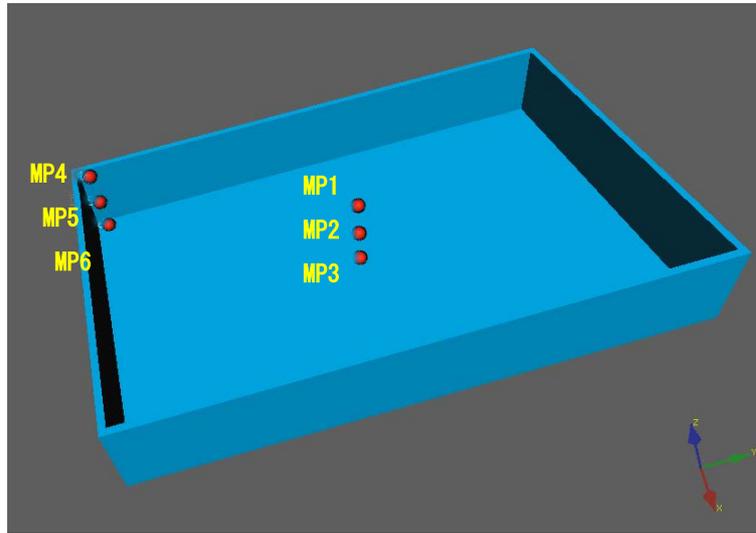
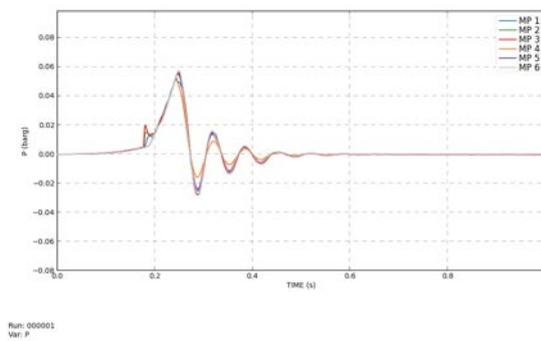


図 4-9 モニターポイント



モニターポイント		最大圧力 到達時刻 [sec]	最大圧力 [barg]
施設 中央	MP1	0.243	0.052
	MP2	0.249	0.056
	MP3	0.249	0.056
施設端	MP4	0.243	0.051
	MP5	0.247	0.055
	MP6	0.249	0.058

図 4-10 Case No. 1 圧力の時刻歴

(2) 一部開口したものの結果

Case No. 10、No. 20 ではほぼ全ての屋根が開口しなかったが、下図赤枠 施設中央の着火点を囲むように位置する箇所は僅かに開口した。

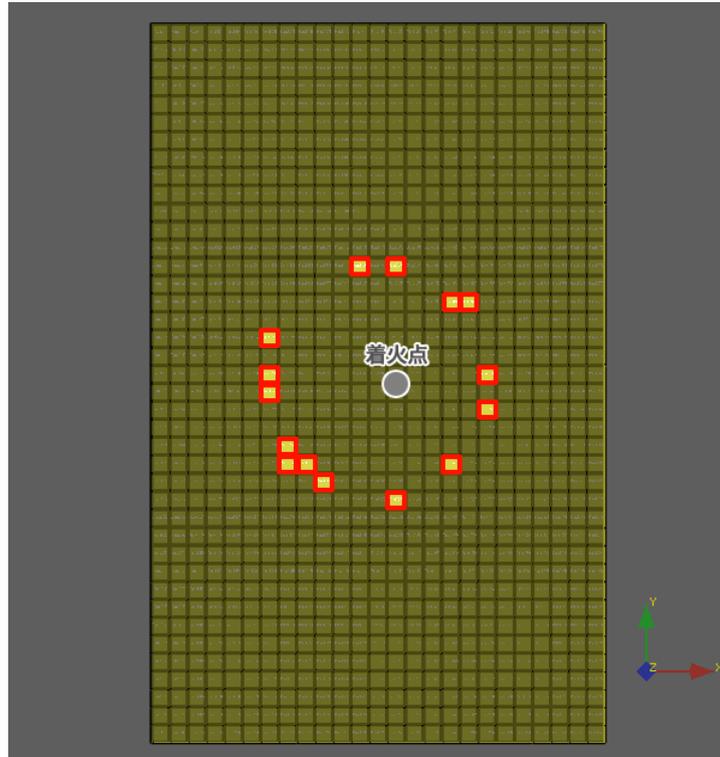


図 4-11 Case No. 10 僅かに開口した箇所

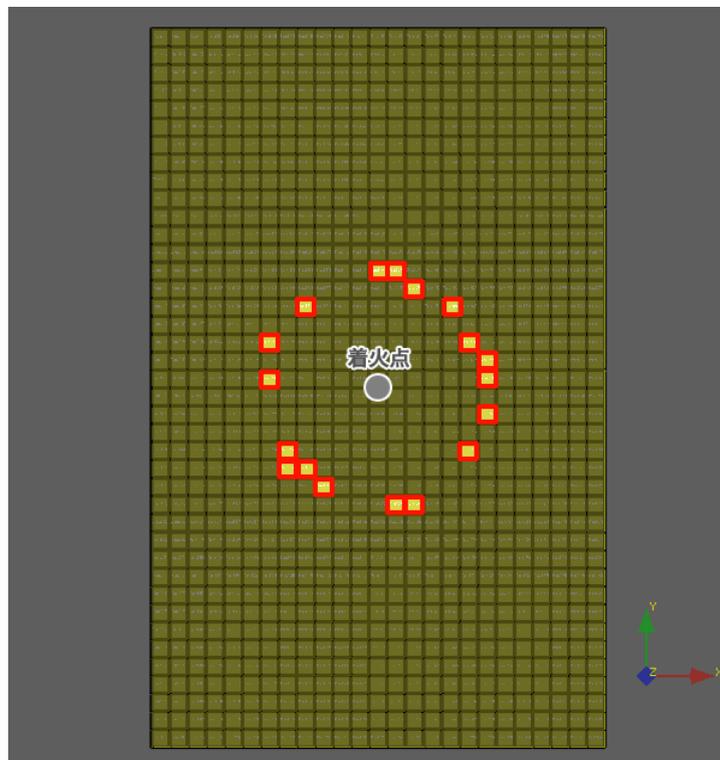


図 4-12 Case No. 20 僅かに開口した箇所

## 5 シミュレーション結果の比較

太陽電池モジュールを設置していない場合としている場合で同条件でシミュレーションした最大圧力値にどの程度影響が出ているかについて比較した結果を以下に示す。ここでの最大圧力は全解析時間の中での最大値である。

