

危険物保安に関する技術基準の性能規定
導入・推進に係る調査検討報告書

(抜粋)

平成19年3月

総務省消防庁危険物保安室

2. 2 放爆構造について

(1) 検討の目的

製造所、一般取扱所の位置、構造及び設備の技術上の基準は、明文の規定はないが、平家建ての建築物を想定して規定されており、この中で、屋根を軽量な不燃材料でふくこととされている。これは、建築物内において万一爆発が発生した場合においても、爆風を上部に抜くことにより周囲に被害が及ばないようにすることがその目的であり、通常、このような構造を放爆構造と言っている。

現在、製造所や一般取扱所では、2階建て以上のものも多く設置されており、このような建築物の場合、屋根のみを放爆構造としても、爆風を適切に上部に逃がすことができるか疑問がある。

平成17年度の検討では、そのような2階以上の製造所及び一般取扱所の建築構造の種類について把握した。その種類について図2-2-1に示す。

これらを踏まえ、本年度は、危険物施設内で爆発が生じた場合に、爆風圧を安全に放出することができる建物構造に必要とされる性能及び評価方法について検討する。

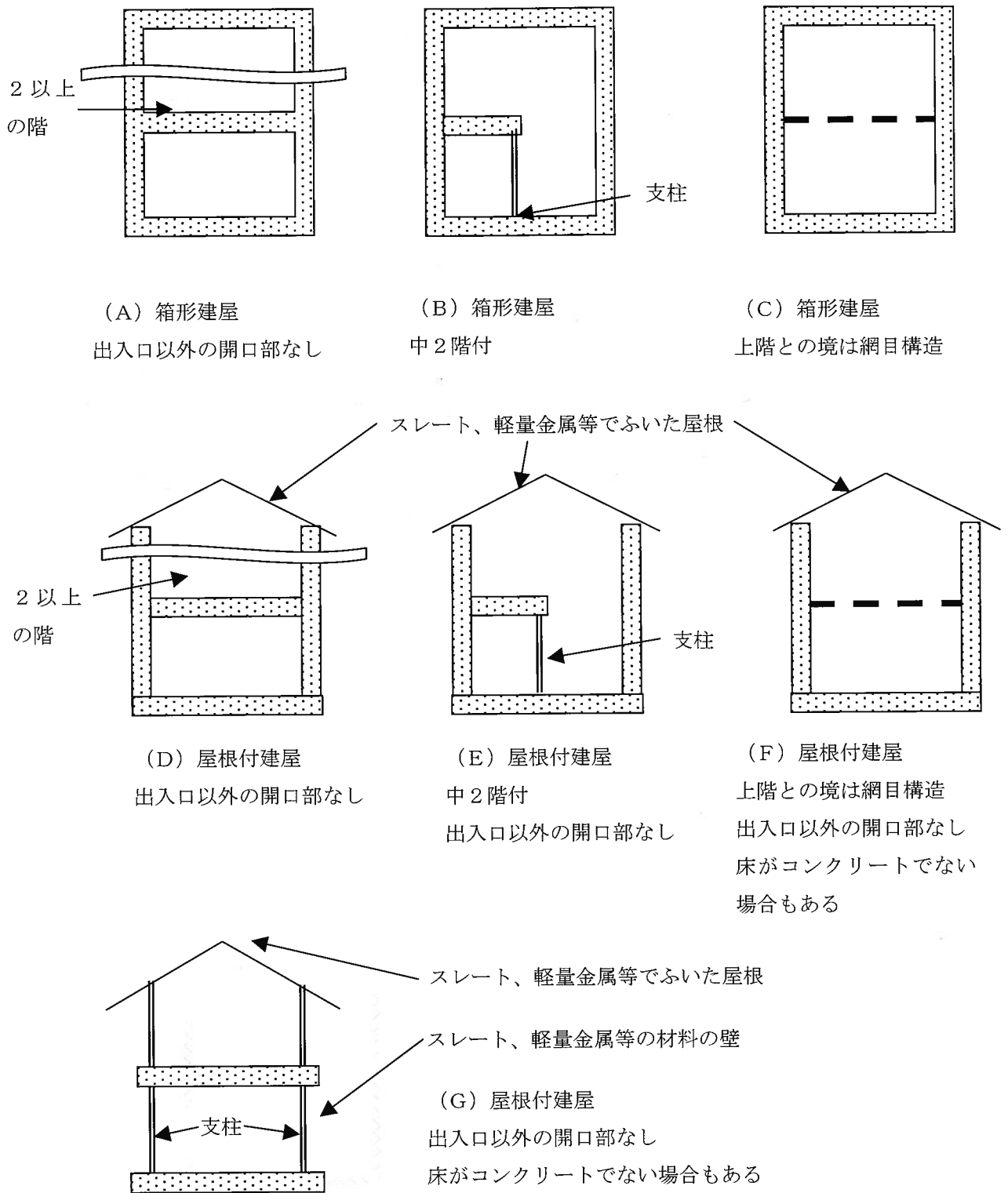


図 2-2-1 2階建て以上の製造所等のモデル

鉄筋コンクリート

(2) 現行の規定

製造所の放爆構造に関する基準（一般取扱所は当該基準を準用している）は、次のとおりである。

（政令第9条第1項第6号）

「危険物を取り扱う建築物は、屋根を不燃材料で造るとともに、金属板その他の軽量な不燃材料でふくこと。ただし、第二類の危険物（粉状のもの及び引火性固体を除く。）のみを取り扱う建築物にあつては、屋根を耐火構造とすることができる。」

(3) 検討の方法

「建築構造の種類に応じた危険物の取扱い実態の調査」、及び「現在講じられている放爆構造についての実態把握」を実施する。これらを踏まえ、単純な建物構造での基礎的シミュレーションを実施し、建物内での圧力のかかり方・開口部の影響度等、基本的なところを押さえつつ、どのような機構で放爆が起こるのかを調査することとした。また、その結果を放爆性能検討の基礎資料とする。

(4) 必要とされる放爆性能のシミュレーションによる検証

ア 各種調査等について

「建物構造の種類に応じた危険物の取扱い実態の調査」、及び「現在講じられている放爆構造についての実態把握」について実施したその結果概要および詳細を参考資料1-5に添付する。開口率（＝開口部の全面積／壁面全面積）については、建物構造には余り関係なく、数%～数十%と大きな開きがある。

なお、爆発事件事例調査については、細部の情報が得られないため、放爆構造を検討するための有用な知見を見出すには至らなかった。

イ シミュレーションについて

以下に示すような単純な建物構造とし、「床」および「窓以外の壁面」は剛体とし、爆風圧で破壊しないものとした。脆弱な部分は開口部の網入りガラス、屋根部のスレート板のみとした。開口部（窓）には複数枚の網入りガラス、屋根部には複数枚のスレート板が設置されているものとした。開口率は、調査結果を参考に、3%～50%まで変化させ、各部分にかかる圧力、脆弱部分の破壊状況等についてシミュレーションを実施した。

なお、爆発についてはエネルギー源をガソリン1ℓと想定し、相当分のエネルギー34.6MJが瞬間的に放出されるものとしている。

また、開口部（窓）と屋根部は、爆風(圧縮波)による正圧（ゲージ圧）もしくは爆風の揺り戻し(膨張波)による負圧を受けることにより破壊に至るが、この破壊過程の詳細をシミュレーションに組み込むことは、計算負荷などの面から現実的ではない。そのため、本シミュレーションで

は、窓および屋根の破壊現象をモデル化し、窓ガラス、屋根スレート板にかかる面平均ゲージ圧力がその強度の閾値を超えた時点から、短い時間遅れが経過した段階で、その窓ガラスまたはスレート板全体が一瞬に破壊し、同面積の開口部が生じるものと想定した。

窓ガラス（網入りガラス）の強度の閾値については、板ガラスの耐風圧設計に用いられる許容耐力値を選定した。但し、爆風は短時間の衝撃力として作用するため、この値は著しく過小評価されている可能性がある。そのため、この閾値の値を5倍及び10倍に変えたケースについてもシミュレーションを実施した。

屋根スレート板の強度については、JIS規格に定められた大波スレート板の曲げ破壊荷重から推定した許容等分布荷重を閾値とした。詳細は参考資料1-6参照。

(ア) 設定条件等

- ①想定建築物 : 横 50m×奥行き 20m×高さ 20m の平屋建て
- ②エネルギー放出位置（爆発物設置位置）
: 中央または隅に配置
- ③窓ガラス（網入りガラス）1枚の仕様
: サイズ 2m×2m×t6.8mm
: 強度の閾値（設定値）4406 (N/m²)
: 開口部寸法に合わせるように配置
- ④屋根部スレート板（大波スレート板）1枚の仕様
: サイズ 2.5m×1.0m
: 強度の閾値（設定値）6319 (N/m²)
: 敷設枚数 400 枚 (=50×8)
: 長手方向が建築物の短辺に平行となるように配置

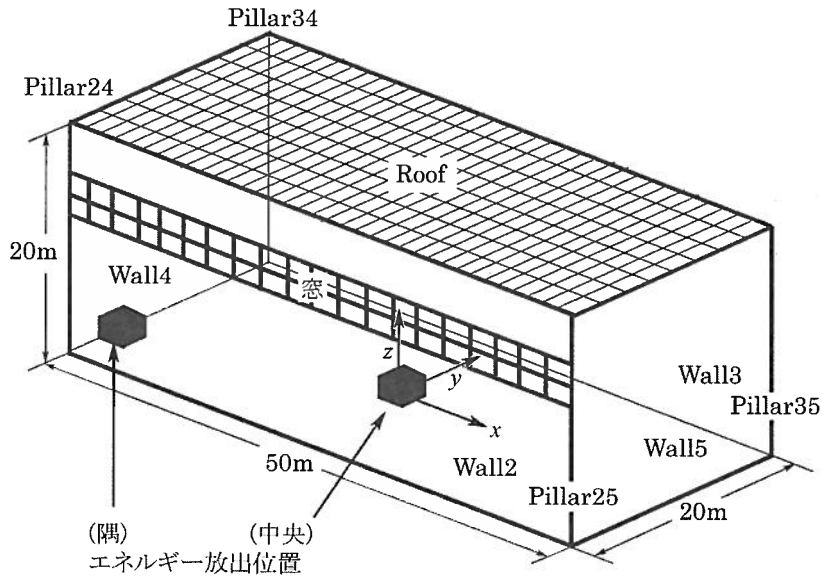


図 2-2-2 想定建築物と各部名称及び寸法

本建築物において長方形屋根を Roof、手前側の長方形壁を Wall2、奥側長方形壁を Wall3、奥側正方形壁を Wall4、手前側正方形壁を Wall5 と呼称する。

また、各壁を連結する角柱にあたる 4 箇所を垂直線を図中に示されたようにそれぞれ Pillar24~Pillar35 と呼称する。以降の記述においては、これらの表記を用いる。

本シミュレーションでは、壁に窓が設置されている状況として、表 2-2-1 に示される 6 種類について実施した。また、各条件における開口部位置等を図 2-2-3 に示す。

なお、表 2-2-1 における開口率は、(開口部の全面積)/(壁面全面積=2800m²)として定義されたものである。

エネルギー放出位置については、図 2-2-2 に示されるように、(1) 床面中央位置 (エネルギー放出位置=中央と呼称) または (2) Pillar24 から短辺方向(y 方向)に 5m ずれた位置(エネルギー放出位置=隅と呼称)の 2 箇所を想定し、その体積は $V = 2\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$ であるとした。

数値解析には 3 次元オイラー方程式が用いられている。理想気体を想定し、比熱比は一定値 1.4 とされている。数値解法には、空間的には結果的に TVD 法と同じ性質を持ち合わせたものが使用された。時間積分には、4 次のルンゲ・クッタ法が使用された。また、本計算の精度を確認するために、爆風理論との比較が行われ、数値シミュレーション結果の精度が、定量的議論に充分耐えると検証されている。

表 2-2-1 壁面の開口部条件 (6種類)

開口部 条件	Wall2 開口 面積(m ²)	Wall3 開口 面積(m ²)	Wall4 開口 面積(m ²)	Wall5 開口 面積(m ²)	開口率 (%)	備 考
1	22×4	0	0	0	3.14	
2	50×4	0	0	0	7.14	(開口部下部)
3	50×4	0	0	0	7.14	(開口部上部)
4	50×6	50×6	0	0	21.43	
5	50×4	50×4	20×4	20×4	20.00	
6	50×10	50×10	20×10	20×10	50.00	

(イ) 実施ケース (全 14 ケース)

①基本ケース (12 ケース)

- ・エネルギー放出位置

中央または隅においたケース

- ・開口部

表 2-2-1 に示す 6 条件によるケース

以上、12 ケース (エネルギー放出位置 (2 条件) × 開口部 (6 条件))
についてシミュレーションを実施した。

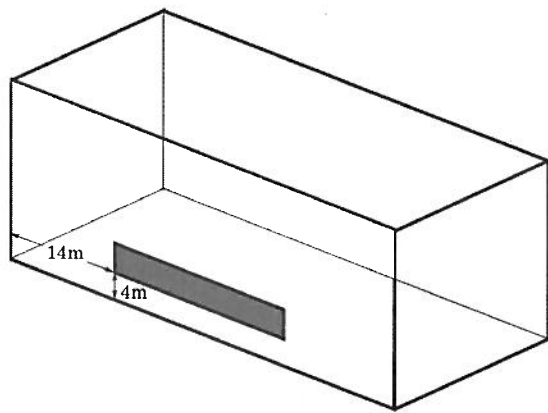
②応用ケース (2 ケース)

窓ガラス強度の閾値を変えた 2 ケースについてシミュレーションを実施した。^{*1} (なお、開口部条件は 3 とした (開口率 7.14%、開口部上部、表 2-2-1 参照。))

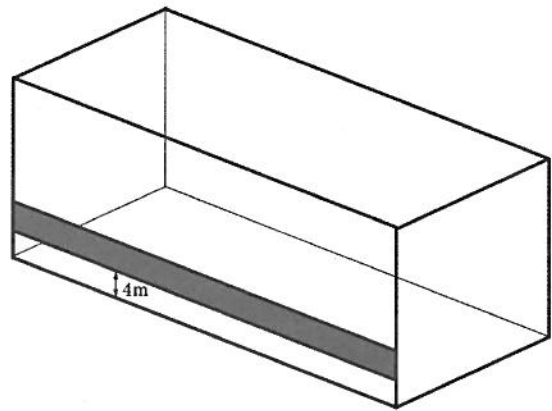
^{*1} 文献等によると、ダイナマイトによる爆風圧破壊実験結果においてピーク圧力 $0.7\text{kgf/cm}^2=68647\text{N/m}^2$ では破壊に至らず、 2.1kgf/cm^2 では破壊したと、一応の定量性を持って報告されている。上記破壊強度は、定常な風圧強度に対して 20 倍程度高い値を示している (参考資料 1-7 別添資料参照)。

基本的には Impulse 値により、破壊強度を決定するのが、合理的に一般性の有る閾値を設定するに相応しいと類推される。ピーク値が高くても持続時間が短い 3 次元爆風 (球面波) においては、Impulse 値が低いからである。このデータを再確認するためにも、今後系統的な実験研究を為す必要がある。

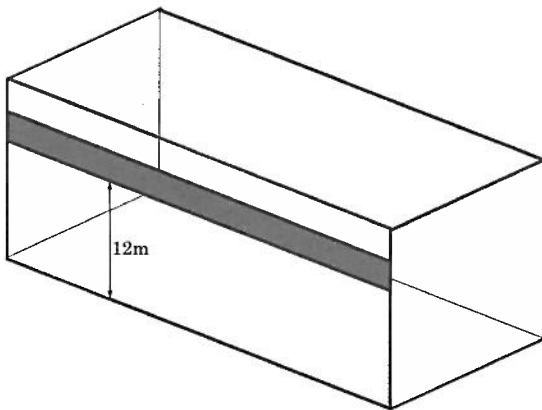
なお、本シミュレーションでは、当面の問題として、閾値 q_{\max} を許容耐力値の 5 倍および 10 倍にした条件下でシミュレーションをおこない、窓ガラスおよび屋根スレート板の破壊状況がどの程度変化するかを調査した。(参考資料 1-6 別添資料参照)



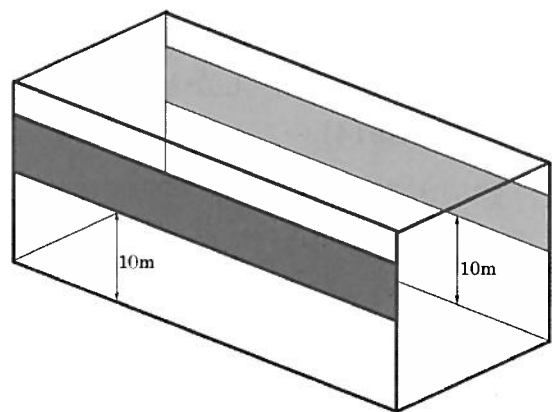
開口部条件 1 (3.14%)



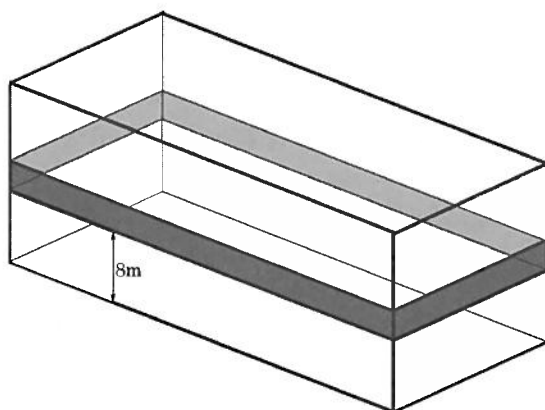
開口部条件 2 (7.14%)



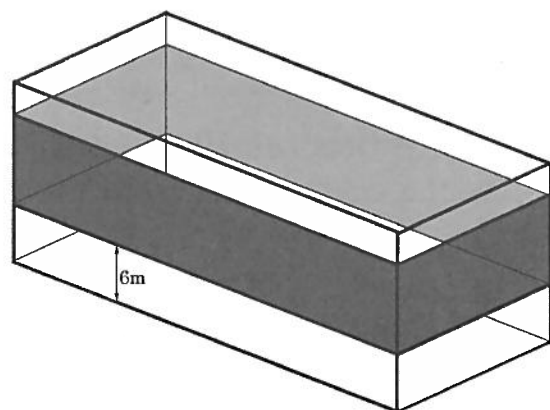
開口部条件 3 (7.14%)



開口部条件 4 (21.43%)



開口部条件 5 (20%)



開口部条件 6 (50%)

図 2-2-3 開口部条件 (6種類) における開口部 (窓) 位置
(図中灰色部が窓)

(ウ) 実施結果概要

- ① 用いられた網入りガラスとスレート屋根「破壊荷重模型」の範囲内では、計算された12ケースの全てにおいて、ガラス窓又はスレート屋根の放爆作用は十分と言えなかった。即ち、「窓の破壊がスレート屋根破壊を防ぐ」、或いは「スレート屋根破壊が窓破壊を防ぐ」というような結果は得られなかった。
- ② 基本的には、極めて爆心付近にガラス窓が存在する場合、即ち (a) 爆心が壁に近く、(b) ガラス窓が床爆心位置に近い低位置に設置されている場合には、窓ガラス破壊による放爆効果は一定の効果を発揮する。
- ③ スレート屋根破壊が放爆効果を発揮し、窓ガラス破壊を未然に防ぐには、(a) 窓ガラス強度を十分上げるか、若しくは(b) 爆心が屋根近傍である場合に限られる。
- ④ ガラス窓破壊強度閾値を5及び10倍した計算では、ガラス窓は殆ど破壊されず、屋根は完全に破壊し、その放爆によって建物内部の爆風は減衰した。しかしながらその減衰は余り速くはない。(Case13、Case14)

結果の一部を以下に示す。

< Case7 >

開口部条件 4 (開口率 21.43%), エネルギー放出位置(中央)

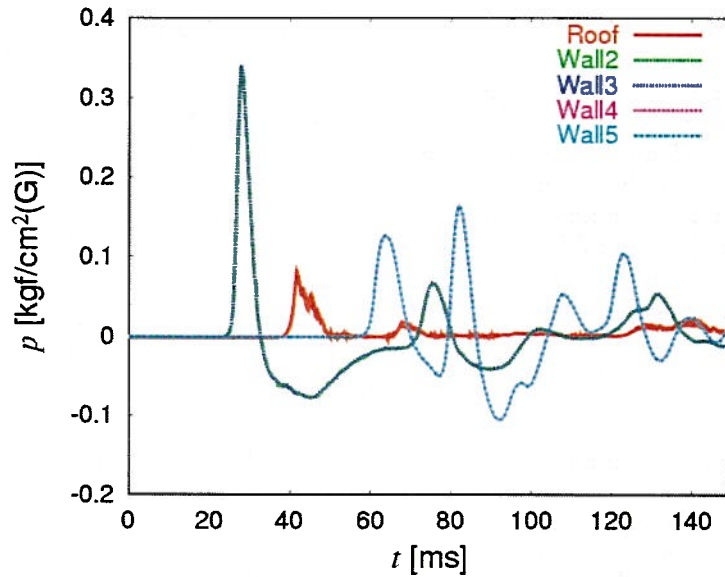


図 2-2-4 Roof および Wall2~Wall5 の各中央位置における圧力履歴

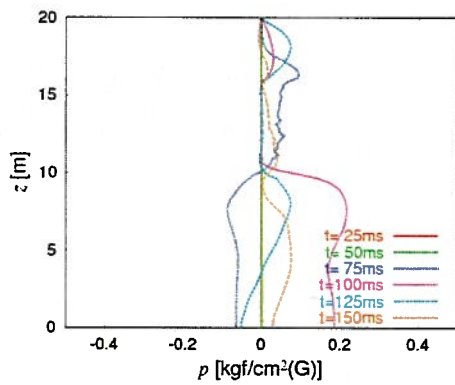


図 2-2-5 Pillar25 における圧力履歴

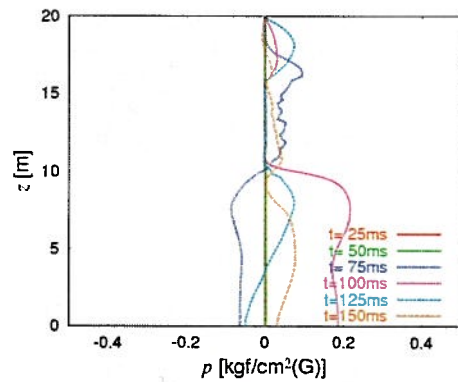


図 2-2-6 Pillar35 における圧力履歴

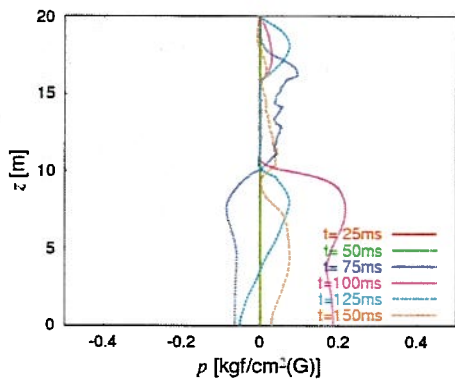


図 2-2-7 Pillar24 における圧力履歴

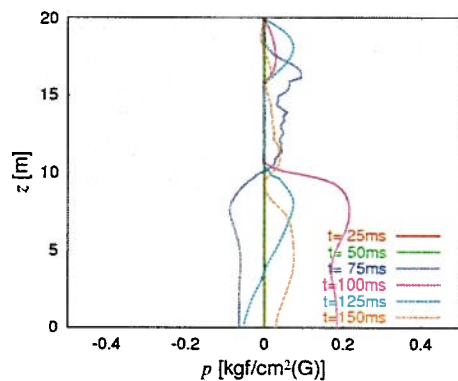


図 2-2-8 Pillar34 における圧力履歴

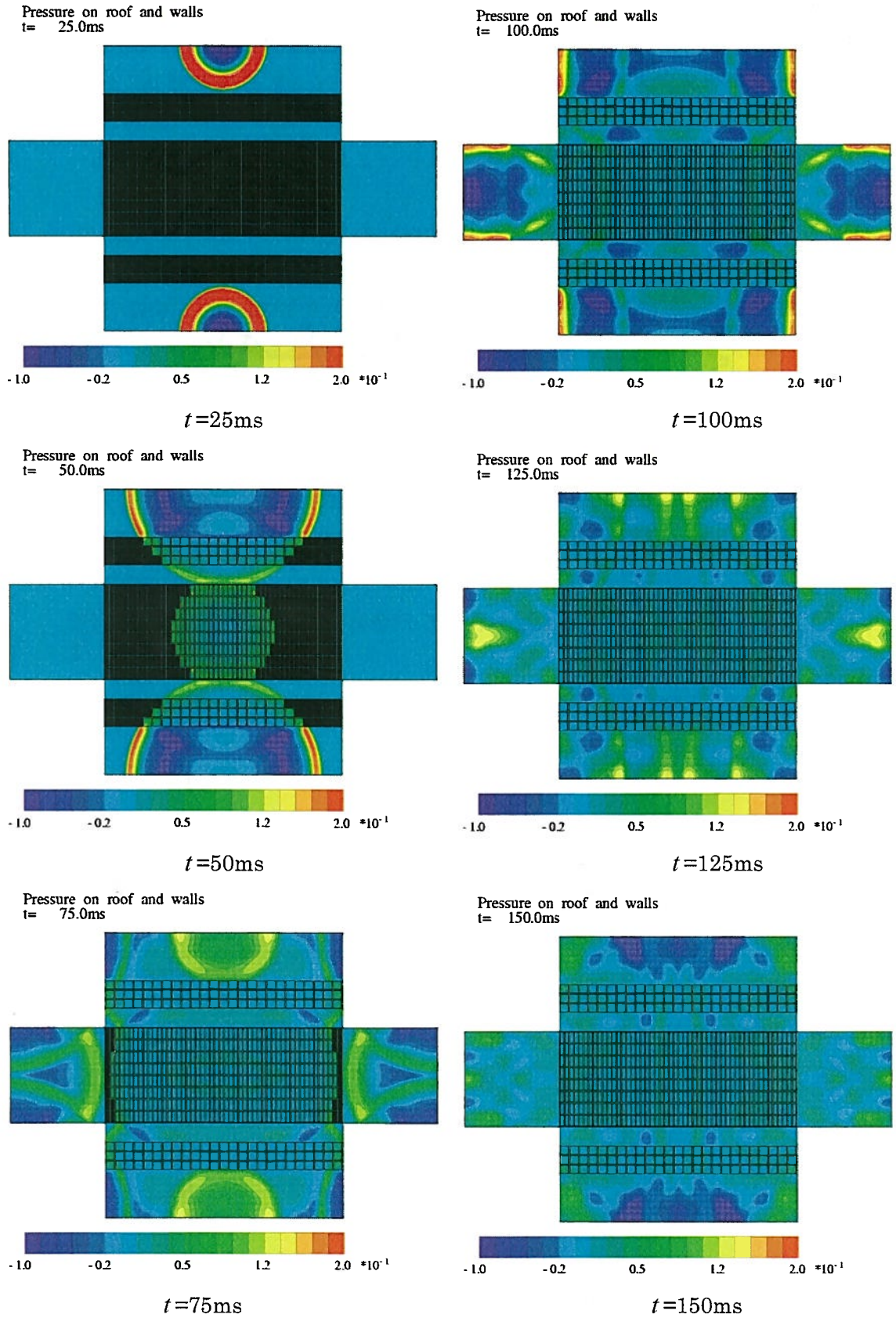
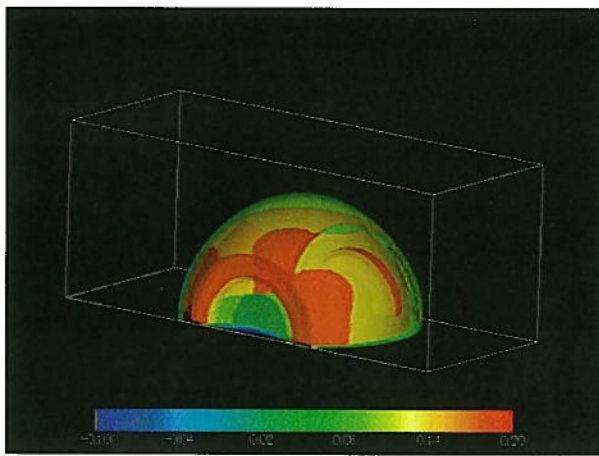
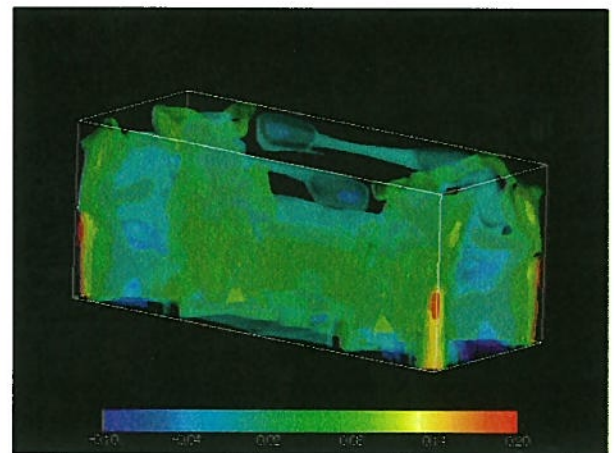


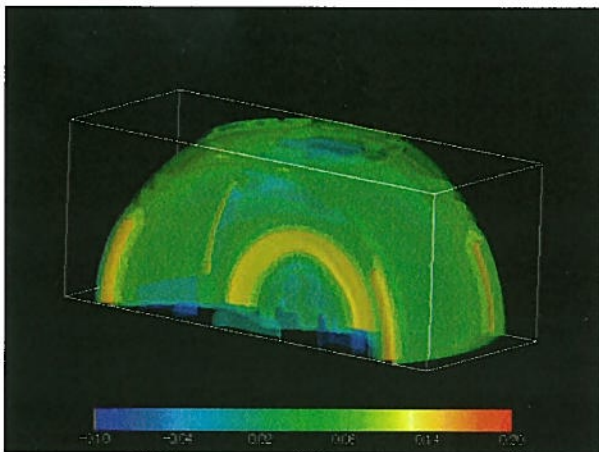
図 2-2-9 建物表面展開図：Roof および Wall2~5 上の圧力分布の履歴と破壊された窓ガラスまたはスレート板の位置(図中の■は壊れずに残った部分)



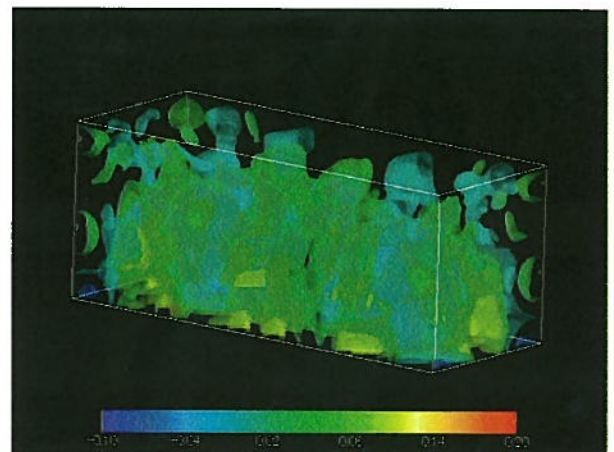
$t=25\text{ms}$



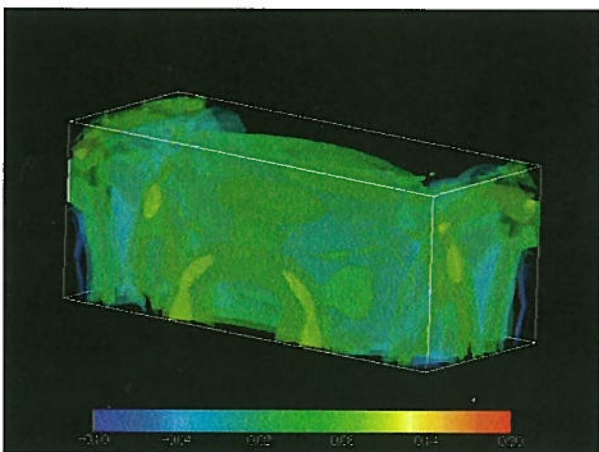
$t=100\text{ms}$



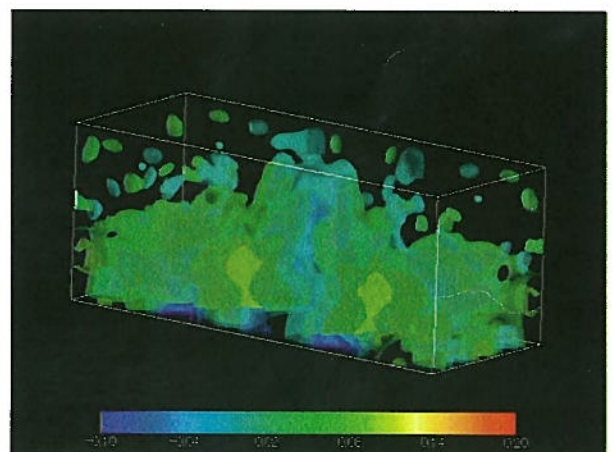
$t=50\text{ms}$



$t=125\text{ms}$



$t=75\text{ms}$



$t=150\text{ms}$

図 2-2-10 建築物内部の圧力の 3 次元空間分布

<Case7：結果>

- ① 開口率 21.43%と Case 1 の 3 倍増の場合でも、図 2-2-9 が示すように、 $t=75\text{ms}$ にて全ての窓及び屋根は破壊する。
- ② 「窓の位置」並びに「面積の大小」には関係なく、窓は最初の爆風圧により破壊される。
窓位置が上部の場合でも、破壊された窓から空気が抜けることにより、弱くなった爆風が屋根に到達する前に、最初の爆風により屋根は破壊する。
- ③ 図 2-2-10 が示すように、窓から流出入する空気により、建物内の圧力波挙動はより複雑となる。

<Case13>

開口部条件4 (開口率 21.43%)、エネルギー放出位置(中央)、 $q_{\max} = 4406\text{N/m}^2 \times 5$

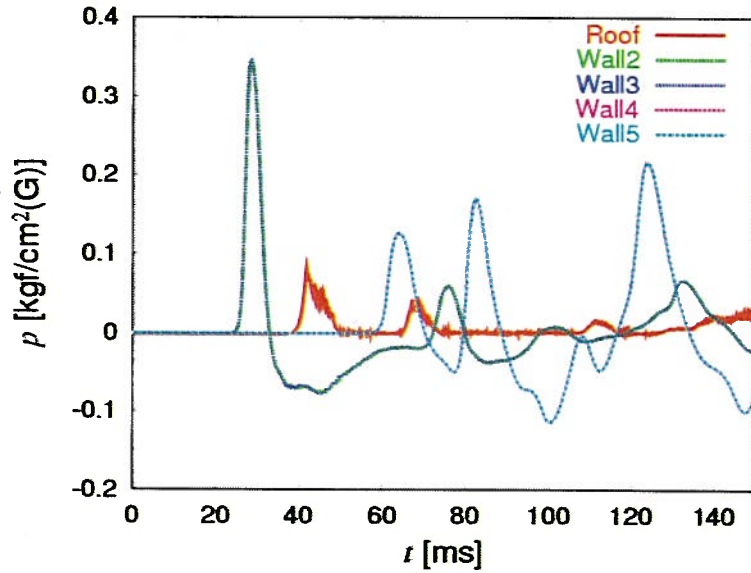


図 2-2-11 Roof および Wall2~Wall5 の各中央位置における圧力履歴

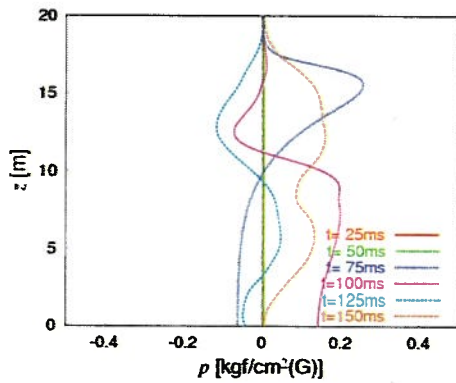


図 2-2-12 Pillar34 における圧力履歴

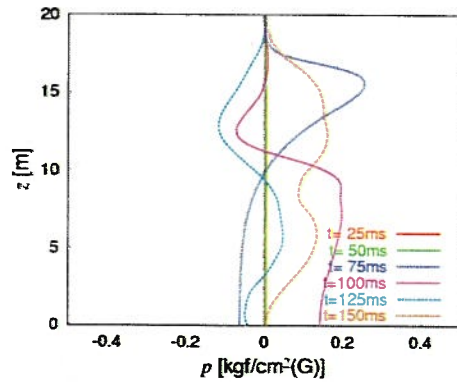


図 2-2-13 Pillar35 における圧力履歴

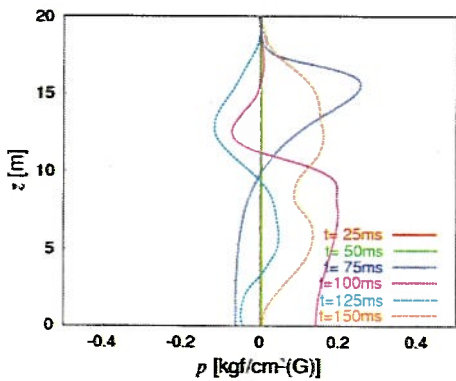


図 2-2-14 Pillar24 における圧力履歴

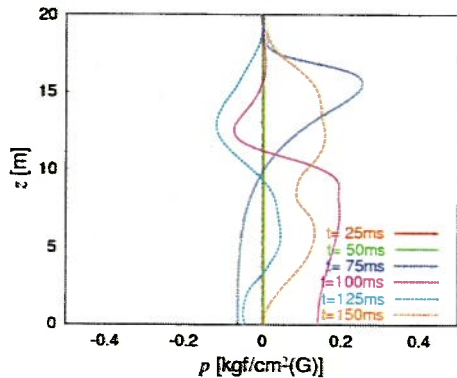


図 2-2-15 Pillar25 における圧力履歴

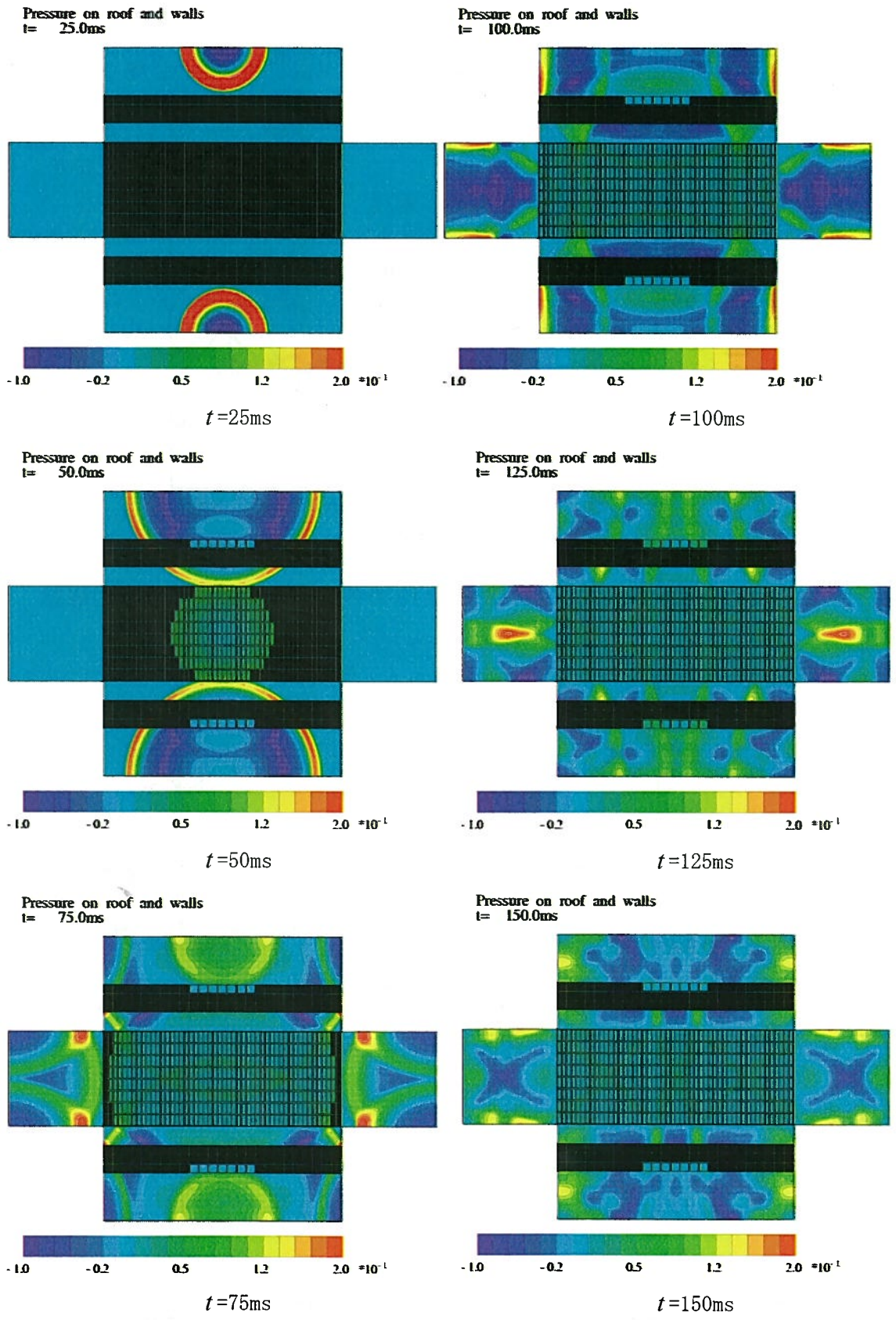
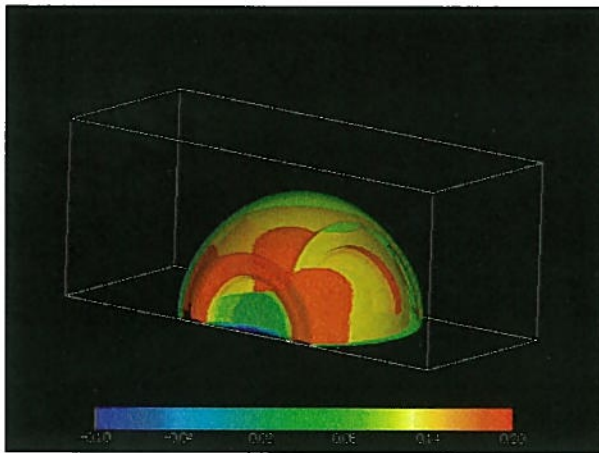
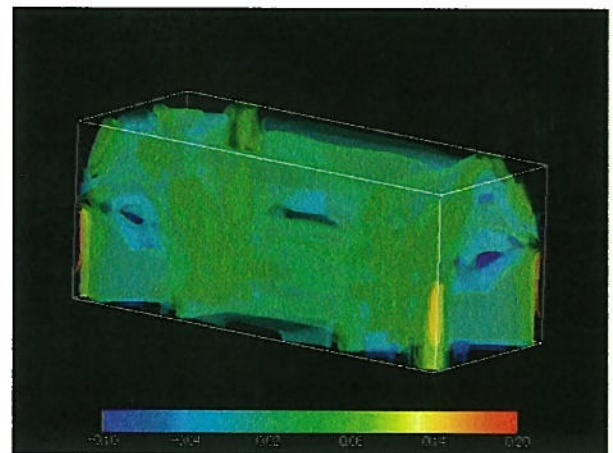


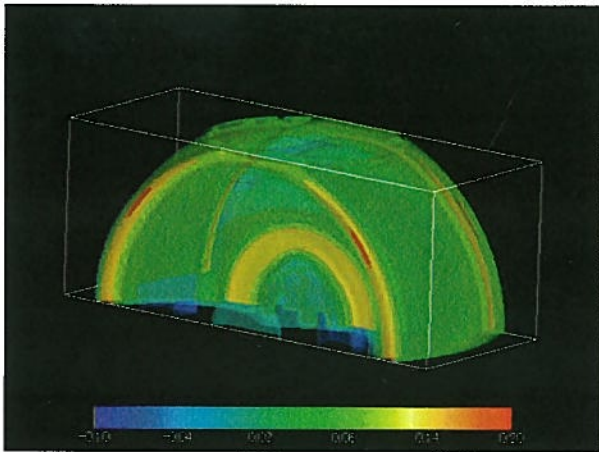
図 2-2-16 建物表面展開図:Roof および Wall12~5 上の圧力分布の履歴と破壊された窓ガラスまたはスレート板の位置(図中の■は壊れずに残った部分)



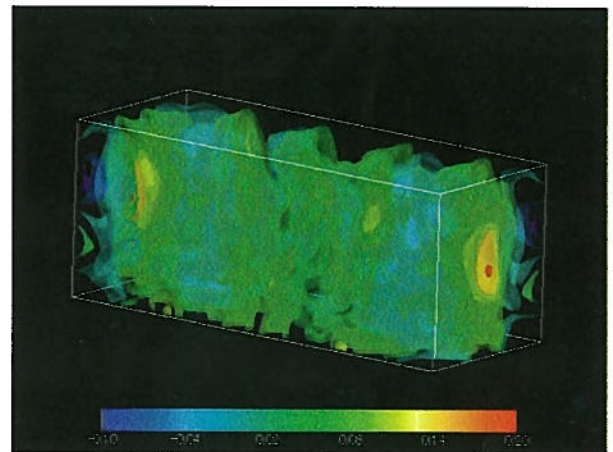
$t=25\text{ms}$



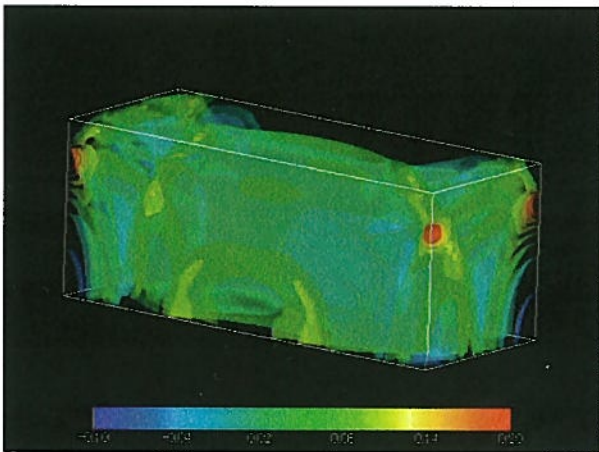
$t=100\text{ms}$



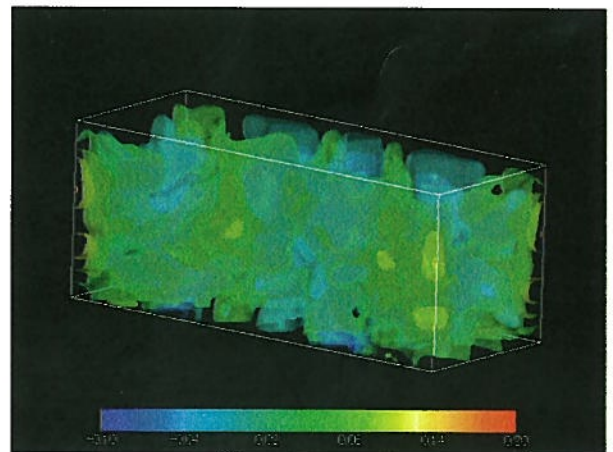
$t=50\text{ms}$



$t=125\text{ms}$



$t=75\text{ms}$



$t=150\text{ms}$

図 2-2-17 建築物内部の圧力の 3 次元空間分布

<Case13 : 結果>

① 図 2-2-11

Wall2 と Wall3、Wall4 と Wall5 への圧力曲線が重なっている。

Wall2 と Wall3 方向への爆風圧については、最初の爆風圧を除いて、屋根の放爆効果を強く受けて弱まる一方、Wall4 と Wall5 方向の爆風は放爆効果を余り受けず、爆風圧は依然として高い。

② 図 2-2-16

窓ガラス強度を 5 倍にした効果が明瞭に現れている。爆心付近の窓ガラス 1 列のみが最初の爆風圧で破壊されるが、他は全て残る。一方、屋根は全て破壊される。窓ガラス強度が十分な場合には、屋根による放爆効果が期待できる。

③ 図 2-2-17

屋根が抜けた後も、強い爆風伝播／反射が存在している。

<Case14>

開口部条件4 (開口率 21.43%), エネルギー放出位置(中央), $q_{\max} = 4406\text{N/m}^2 \times 10$

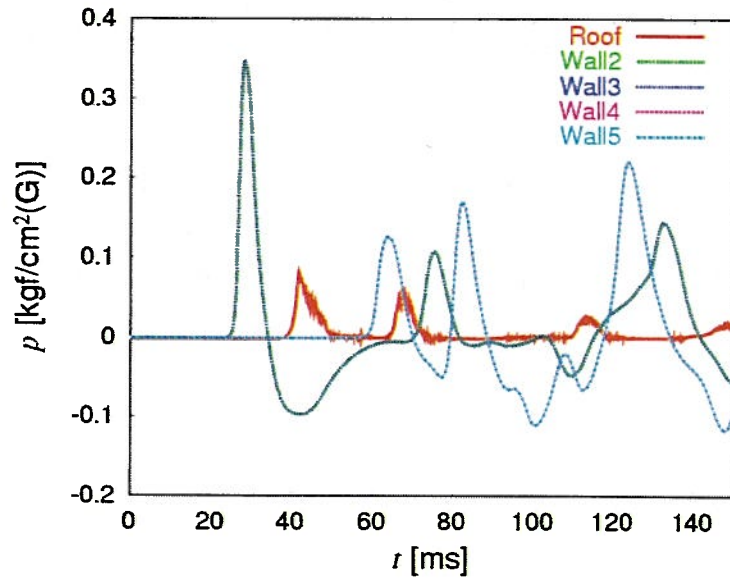


図 2-2-18 Roof および Wall2~Wall5 の各中央位置における圧力履歴

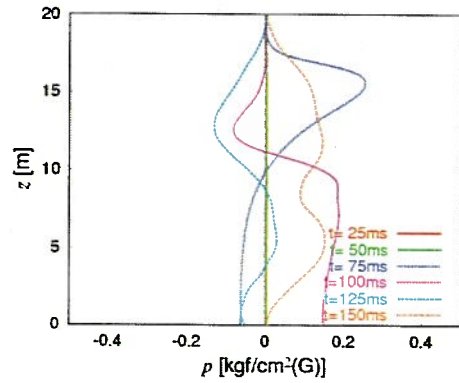
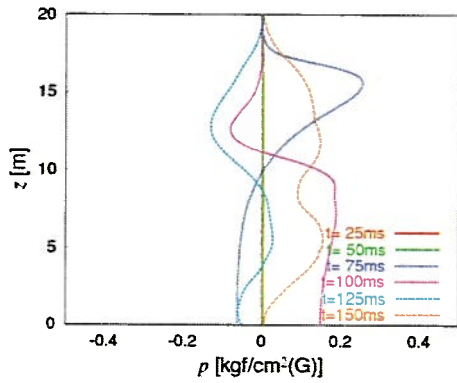


図 2-2-19 Pillar34 における圧力履歴

図 2-2-20 Pillar35 における圧力履歴

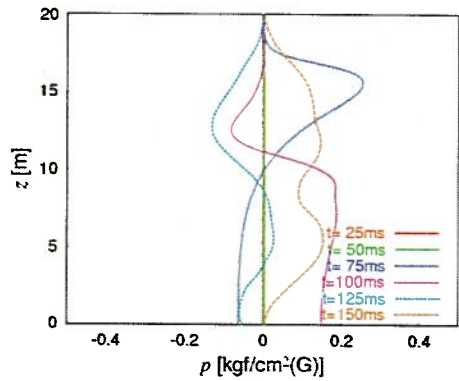
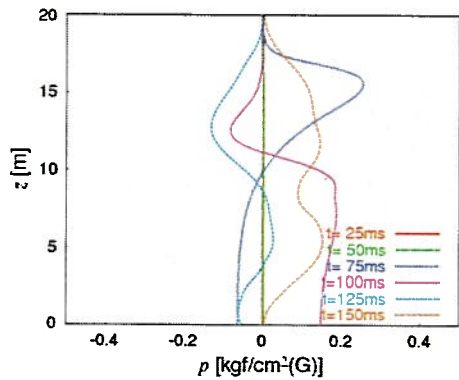


図 2-2-21 Pillar24 における圧力履歴

図 2-2-22 Pillar25 における圧力履歴

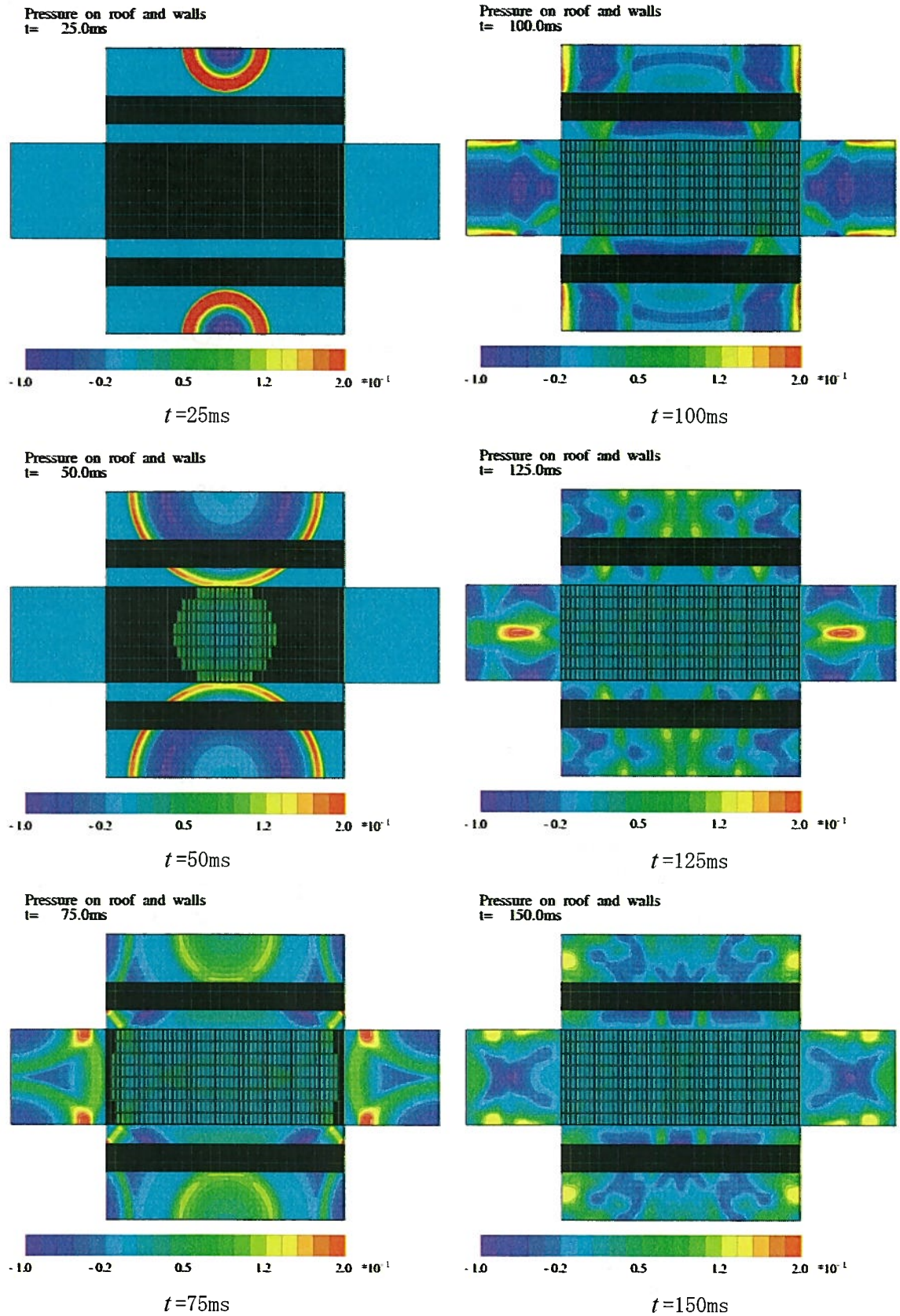
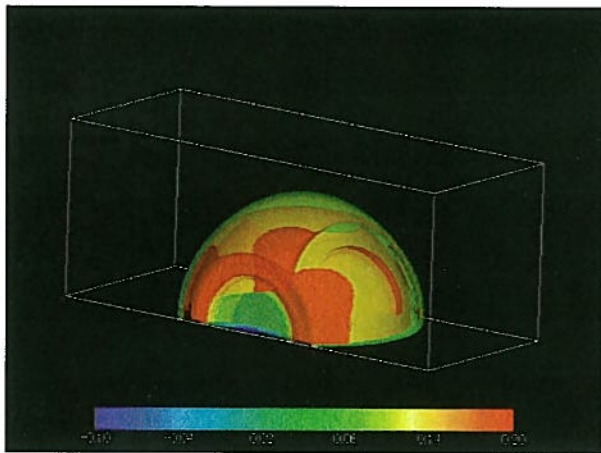
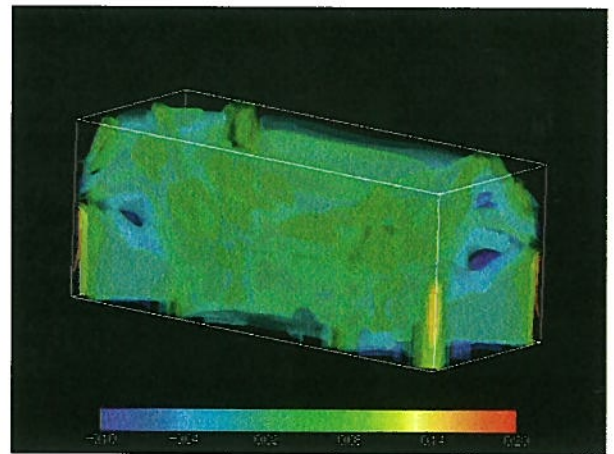


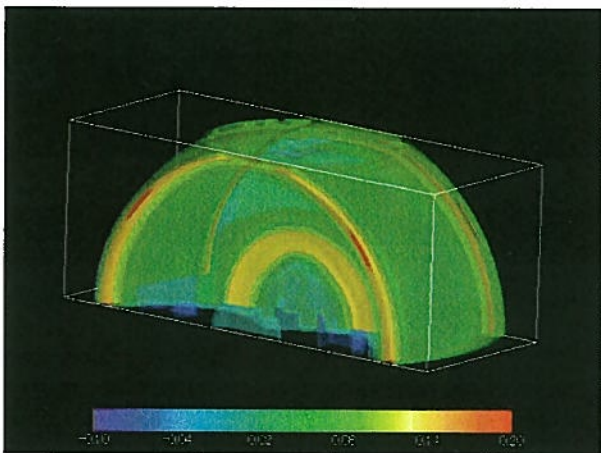
図 2-2-23 建物表面展開図:Roof および Wall12~5 上の圧力分布の履歴と破壊された窓ガラスまたはスレート板の位置(図中の■は壊れずに残った部分)



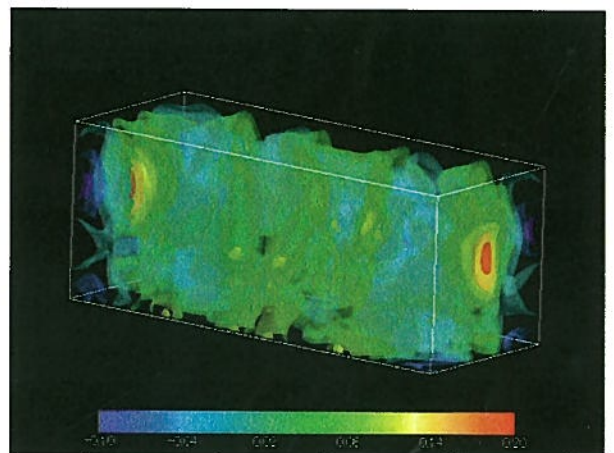
$t=25\text{ms}$



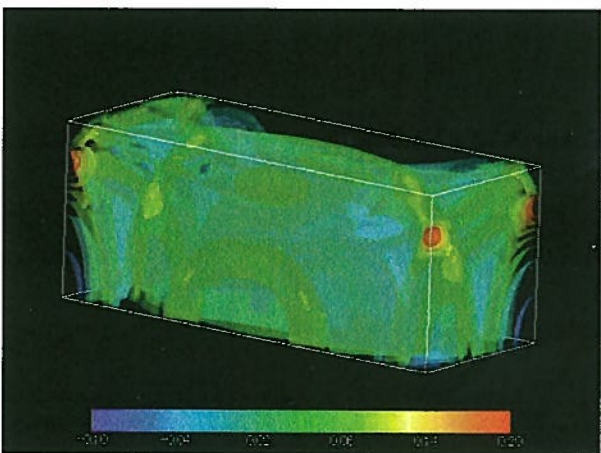
$t=100\text{ms}$



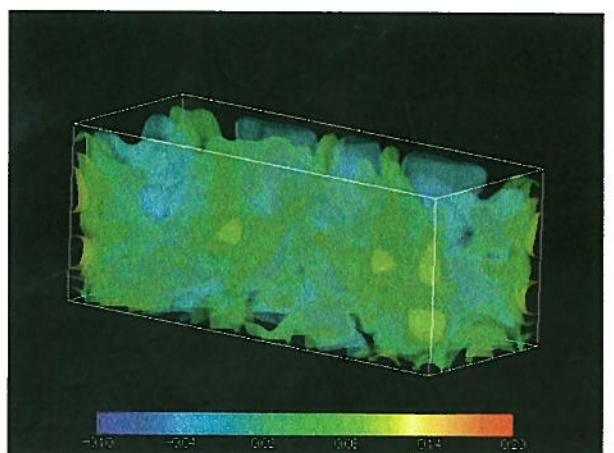
$t=50\text{ms}$



$t=125\text{ms}$



$t=75\text{ms}$



$t=150\text{ms}$

図 2-2-24 建築物内部の圧力の 3 次元空間分布

<Case14 : 結果>

① 図 2-2-18

Wall2 と Wall3 方向への爆風は、ガラス強度 5 倍の場合 (図 2-2-11) よりも減衰しない。これは僅か壁面上 7 枚の窓ガラス非破壊に起因する。強度が十分高いため、窓ガラスは全く破壊されず、屋根は完全に破壊される。

② 図 2-2-24

屋根が抜けた後にも Wall4 と Wall5 方向へは、強い 2 次元爆風が残存している。

④ 図 2-2-18

t=150ms 以降においても、爆風伝播全体が放爆されているとは言えない。

(5) シミュレーションの結果

ガラス窓又はスレート屋根の放爆作用は十分といえず、「窓の破壊がスレート屋根破壊を防ぐ」、或いは「スレート屋根破壊が窓破壊を防ぐ」というような結果は得られなかった。しかし、次のような知見は得られた。

ア 次の場合、窓ガラス破壊による放爆効果は一定の効果を発揮する。

① 極めて爆心付近にガラス窓が存在する場合

(爆心が壁に近く、ガラス窓が床爆心位置に近い低位置に設置されている場合)

イ 次の場合には、スレート屋根破壊が放爆効果を発揮し、窓ガラス破壊を未然に防ぐ。

① 窓ガラス強度を十分上げる場合

② 爆心が屋根近傍である場合

「イ①」の場合として、ガラス窓破壊強度閾値を 5 及び 10 倍にし、確認した結果、屋根から確実に抜けることが検証できた。

本手法を用いていけば将来的には、新たな放爆構造、他の軽量な不燃材で屋根を造る以外の放爆性能を確保する別の方策を見いだすことが出来るのではないかと思われる。

(6) 今後の課題

本シミュレーションでは、窓ガラス (網入りガラス) の強度の閾値については、板ガラスの耐風圧設計に用いられる許容耐力値を、屋根スレート板の強度の閾値については、J I S 規格に定められた大波スレート板の曲げ破壊荷重から推定した許容等分布荷重を設定値として、検討してきた。

しかし、これらの設定値については、著しく過小評価されている可能性があるため、今後は、ガラスやスレートの爆風破壊試験を実施し、Impulse を用いた一般的な閾値を見出し、より精度の高いシミュレーションとする必要があるものと思われる。