

有害危険物質の屋内拡散予測の解析例 - EVE SAYFAによる化学・生物テロのシミュレーション -

吉岡 逸夫* 浜野 明千宏*

Simulation for Diffusion of Harmful Materials in Enclosed Space - Simulation for Toxic- and Bio-Terrorism using EVE SAYFA -

Itsuo Yoshioka* and Achihiro Hamano*

Advance/EVE SAYFA 2.0 は、建物内の火災安全・防災のためのシミュレータである。本稿では、その特長のひとつである防災シミュレーションに関する機能について紹介する。前半は、屋内拡散予測の解析モデルについて詳述し、後半では、Advance/EVE SAYFA 2.0 を用いた事例解析について紹介する。仮想的なテロの想定として、化学剤としてシアン化水素（青酸ガス）を、生物剤として炭疽菌を使用したシミュレーションを実施した。その結果、Advance/EVE SAYFA 2.0 により有害危険物質の建屋内濃度の経時変化が迅速に算出できること、およびその結果に基づき汚染エリアと人的被害を定量的に推定できることを確認した。

Key word: Advance/EVE SAYFA 2.0、CB 兵器テロ、マクロモデル、COMIS、Newton-Raphson 法、CG 法、シアン化水素、半数致死曝露量、炭疽菌、芽胞

1. はじめに

Advance/EVE SAYFA 2.0 は、建物内の火災安全のほか、建物内の防災のためのシミュレーションを目的として開発された。その背景には、大規模な地下街や高層ビルにおいて CB（化学生物）兵器テロや大規模火災が発生した場合、建物内空間の複雑さ故に、防災設備の作動条件の違いによる災害拡大の危険性が増大していることがある。

例えば化学テロによる災害時の消防活動は、基本的には毒・劇物施設や輸送車両に起因する化学災害時の消防活動に準ずるものであるが、テロ災害時には化学剤特有の強い毒性による隊員への活動危険度も高く、さらには、多数傷病者の発生、物質特定の困難性など、通常の化学物質への対応と異なる消防活動が強いられ、高度な知識と素早い判断が求められることになる。

1995 年の東京地下鉄サリン事件において、東京

消防庁では、救急隊など総数 1,364 名が出場し、そのうち 135 名の消防職員が受傷した。受傷原因は、サリンが撒かれた場所付近で活動していたり、地下鉄の換気口から噴き上がったガス状のサリンに曝露したことなどによる[1]。

ここで、事件時に除染隊派遣の指揮をとった陸自の福山連隊長の言葉を引用する[2]。

『無差別テロと思われる事態下の有毒化学物質を除去（除染）する作戦など、自衛隊は一度も経験したことがなかったのだから。作戦の手引書である「教範」として「特殊武器防護」があったが、市街地での事態対処に関しては十分ではなかった記憶がある。しかも、化学科部隊（化学防護隊）という化学兵器（毒物）の専門部隊が、毒物処理のため市中に出動すること自体が初めてのことなのだ。』

地下鉄サリン事件は、世界的に見ても前例のない都市部での化学兵器テロであり、いかに衝撃的だったかがうかがい知れる。

Advance/EVE SAYFA 2.0 は、このような非常事

*アドバンスソフト株式会社 技術第 4 部

4th Technical Division, AdvanceSoft Corporation

態における人体への危険性を数値的に評価するシミュレータである。本稿では、Advance/EVE SAYFA 2.0 のマクロモデルによる有害危険物質拡散解析の機能と適用例を紹介する。

2. 解析モデル

2.1. 概要

Advance/EVE SAYFA 2.0 は、ネットワークシステムを利用したマクロモデルを用いている。このマクロモデルは、室内換気計算プログラム COMIS 3.0[3]～[7]と同等の機能を有している。このモデルでは、空気流動については、Bernoulli の運動方程式に基づく流量 - 圧力計算を行い、熱移動に関しては温度の 1 次遅れ系モデルを用いて有害危険物質や煙の挙動の解析を行う。

本モデルにおける、建物内の形状モデルを図 1 に示す。形状モデルは、任意個数の部屋（ないしゾーン）とリンクから構成される。リンクはドアや窓といった開口部を表現し、2 つの部屋が部屋と外部を接続する。各部屋に対してそれぞれ床・天井・壁が設定される。

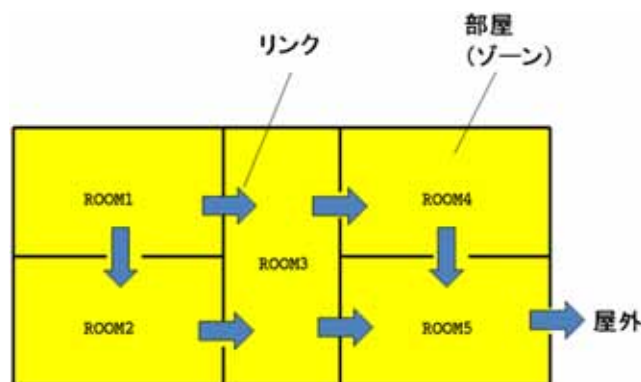


図 1 マクロモデルの形状モデル

2.2. 基礎式

各空気流動コンポーネントにおける流れは、エネルギー保存則の流体的表現式として知られる Bernoulli の方程式で記述されると仮定する。

$$\Delta P = \left(P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} \right) - \left(P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \right) + \rho g (z_1 - z_2) \quad (1)$$

ここで、

ΔP : 位置 1 と 2 の間の総圧力損失

P_1, P_2 : 入口と出口における静圧

V_1, V_2 : 入口と出口における流速

ρ : 空気密度

g : 重力加速度 (9.81 m/s²)

z_1, z_2 : 入口と出口における高度

圧力、温度および高度のパラメータがゾーンに適用される。ゾーンが部屋を表すとき、空気流動コンポーネントはその部屋の参照高度以外で結合することがある。室内の空気温度が一定としたとき、空気流動コンポーネントを横切る圧力差を、そのコンポーネント終端の高度およびゾーンの高度と関連付けるのに流体静力学の式が用いられる。建物外側の開口部に対する風圧を考慮する場合、圧力項は変形される。

$$\Delta P = P_j - P_i + P_s + P_w \quad (2)$$

ここで、

P_i, P_j : ゾーン i と j における総圧

P_s : 密度および高度差による圧力差

P_w : 風による圧力差

ゾーン j からゾーン i への空気の質量流量 [kg/s] は、空気流通経路に沿った圧力損失のある関数として表される。関数 f の内容は、隙間などの形状変化を表現する。また、ファン・ダクトなどの効果もここに反映される。

$$F_{ji} = f(P_j - P_i) \quad (3)$$

ゾーン i の空気質量は理想気体の状態方程式により与えられる。

$$m_i = \rho_i V_i = \frac{P_i V_i}{RT_i} \quad (4)$$

ここで、

V_i : ゾーン体積 [m³]

P_i : ゾーン圧力 [Pa]

T_i : ゾーン温度 [K]

R : 空気に対する気体定数 [J/(kg・K)]

時間変動解に対しては、質量保存則が用いられる。

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = \rho_i \frac{\partial V_i}{\partial t} + V_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \sum_j F_{ji} + F_i \quad (5)$$

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} \approx \frac{1}{\Delta t} \left[\left(\frac{P_i V_i}{RT_i} \right)_t - (m_i)_{t-\Delta t} \right] \quad (6)$$

ここで、

m_i : ゾーン i における空気質量

F_{ji} : ゾーン j, i 間の空気の質量流量

である。

準定常状態を仮定する場合には、次式により流量が評価される。

$$\sum_j F_{ji} = 0 \quad (7)$$

複数ゾーンに対する定常状態を仮定した空気流動解析では、すべてのゾーンに対する(7)式の連立解を求める必要がある。(3)式の関数は通常非線形となるため、連立の非線形代数方程式に対する解法が必要となる。Newton-Raphson (N-R) 法は、線形方程式解の繰り返しにより非線形問題を解く方法である。N-R 法ではすべてのゾーン圧力のベクトルの新しい推定値 $\{P\}^*$ を、現在の圧力の推定値 $\{P\}$ から次式により計算を行う。

$$\{P\}^* = \{P\} - \{C\} \quad (8)$$

ここで修正ベクトル $\{C\}$ は次の関係式により計算される。

$$[J]\{C\} = \{B\} \quad (9)$$

ここで、

$\{B\}$: 列ベクトル、 $B_i = \sum_j F_{ji}$

$[J]$: 正方の Jacobian 行列、

$$J_{ij} = \sum_j \frac{\partial F_{ji}}{\partial P_j}$$

(9)式は線形方程式系を表しており、ゾーン圧力の解が収束するまでの間、各反復において解かれる。線形方程式系の数値解法としては Skyline 法や CG(Conjugate Gradient)法などが用いられる。特に、多くのゾーンや合流・分岐を伴う問題に対しては前処理付きの CG 法が有効となる。

2.3. 隙間のモデル

開口部分を計算格子で表現する 3 次元モデルと異なり、マクロモデルではゾーンとゾーンの間は流路として明示的に表現する必要がある。閉じられた窓やドアでも非常に狭い隙間を通しての流量があり、開閉のスケジュール管理が可能な後述の「開口部」とは区別して模擬する。例えば、建物モデルの中のある部屋で窓が開いていない場合、ある程度微少な流量を発生させておきたいときには窓を隙間モデルで表したり、隣の部屋との間に隙間を設けたりする。このように、隙間の扱いは室内の換気や火災の解析において重要となる。隙間や開口部の空気流動特性を表現するのに広く利用されるモデルとして、べき乗則がある。

$$F = C_s (\Delta P)^n \quad (10)$$

ここで、

F : 質量流量 [kg/s]

C_s : 質量流量係数 [kg/s@1Pa]

ΔP : 隙間出入口の圧力差 [Pa]

n : 乗数 [-]

温度による補正、隙間長さの効果を考慮する。

$$F = C_r \frac{a}{l} C_s (\Delta P)^n \quad (11)$$

$$C_r = \left(\frac{\rho_{STD}}{\rho} \right)^{(n-1)} \left(\frac{v_{STD}}{v(T)} \right)^{(2n-1)} \quad (12)$$

ここで、

a : 有効ファクター [-] (時系列で指定可能)

l : 隙間長さ [m]

: 空気の密度 [kg/m³]

: 空気の動粘性係数 [m²/s]

添字 STD : 標準状態

参考値として、COMIS のサンプルでは、窓に対して $C_s = 0.01$ 、 $n = 0.667$ 、ドアに対しては $C_s = 0.03$ 、 $n = 0.60$ などである。

2.4. 開口部 (ドア、窓) のモデル

ドアや大開口部は、空気や汚染物質、熱エネルギーの伝達に大きな影響を及ぼす。べき乗則や 2 次式

モデルでは、流れは一度に 1 方向のみが許される。ドアなどの大開口を通る流れは、開口の異なる部分で反対方向の流れが生じる可能性があり、より複雑になる傾向がある。2 つの部屋の間の温度差とその結果による密度差は、煙突効果がドアの上部では正の圧力差を、低部では負の圧力差を引き起こし（あるいはその逆）、開口において 2 方向流を生じさせることもある。

ドアの開閉や窓ガラスの割れについては、シナリオとして計算条件で指定する方法と、計算途中でシナリオを変更する方法が考えられる。窓割れについては、指定した温度で割れるなどの簡易的なモデルも考えられる。

以下に、2 つのモデルを示す。

多重開口モデル

各部屋における空気密度が一定であるとして、各部屋の様々な高さ位置と圧力を関連付けるのに流体静力学の式が用いられる。

$$\begin{aligned} P_{0j} &= P_j + \rho_j g(h_j - h_0), \\ P_{0i} &= P_i + \rho_i g(h_i - h_0), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P_j(y) &= P_{0j} - \rho_j gy \\ P_i(y) &= P_{0i} - \rho_i gy \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、

P_{0j}, P_{0i} : ゾーン j と i における $y=0$: 開口の参照高度の圧力

ρ_j, ρ_i : ゾーン j と i の空気密度

P_j, P_i : ゾーン j と i の参照圧力

h_j, h_i : ゾーン j と i の参照高さ

h_0 : 開口の中心の高さ

高さの関数として、空気流動の速度はオリフィスの式により与えられると仮定する。

$$V(y) = C_d \left(\frac{2(P_j(y) - P_i(y))}{\rho} \right)^{1/2} \quad (15)$$

ここで、

C_d : 放出係数

ρ : 開口を通り過ぎる空気の密度

高さ H 、幅 W の開口は、高さ Δy と幅 W を持つ水平方向の薄い切れを表す、複数の開口部に分割できる。各細長い切れを通る質量流量は次式で表される。

$$F_y = C_d W \Delta y \sqrt{2\rho \Delta P} \quad (16)$$

これより、各細長い開口部のべき乗則モデルに対する係数は次式で与えられる。

$$C_0 = \sqrt{2} C_d W \Delta y \quad (17)$$

単一開口モデル (2 方向流)

隣接空間の間に温度差があるとき、これらの空間を隔てる壁に開口部があると、開口を通る流量を計算する場合に上下方向の圧力差分布が無視できない場合が多い。中性帯の位置が開口部の上・下端の間にできて、その上下で流れの方向が逆転することも通常見られる現象である。

中性帯の位置 Y は、空気流動の速度がゼロとなる位置として定義される。上で示したゾーン j, i の圧力式において、

$$P_j(y) = P_i(y) \quad (18)$$

とおくと次式になる。

$$Y = \frac{P_{0j} - P_{0i}}{g(\rho_j - \rho_i)} \quad (19)$$

開口の上端、下端の高さをそれぞれ H_u, H_l とすると (開口高さ H , 幅 W [m])

$$H_l < Y < H_u \quad (20)$$

の条件のときに、開口を通る 2 方向流となる。また

$$\rho_j = \rho_i \quad (21)$$

のとき、中性帯は計算できない。この場合は 2 方向流にならないため、簡単なオリフィス開口として扱う。

開口に沿った圧力差分布は次式で与えられる。

$$\Delta P(z) = P_j(z) - P_i(z) = -gz\Delta\rho \quad (22)$$

ここで、

$$\Delta\rho \equiv \rho_j - \rho_i$$

高さ座標 $z \equiv y - Y$

Y の値と $\Delta\rho$ の符号に依存して幾つかの式が得られる。

$$G \equiv \frac{2}{3} WC_d (2g|\Delta\rho|)^{1/2} \quad (23)$$

と定義すると、以下の流れの式が導かれる。

$Y \leq H_l$ の場合

$$F = -G\sqrt{\rho_i} \{ (H_u - Y)^{3/2} - (H_l - Y)^{3/2} \} \quad (\Delta\rho > 0)$$

$$F = G\sqrt{\rho_j} \{ (H_u - Y)^{3/2} - (H_l - Y)^{3/2} \} \quad (\Delta\rho < 0)$$

$Y \geq H_u$ の場合

$$F = G\sqrt{\rho_j} \{ (Y - H_l)^{3/2} - (Y - H_u)^{3/2} \} \quad (\Delta\rho > 0)$$

$$F = -G\sqrt{\rho_i} \{ (Y - H_l)^{3/2} - (Y - H_u)^{3/2} \} \quad (\Delta\rho < 0)$$

$H_l < Y < H_u$ の場合

$$F_a = -G\sqrt{\rho_i} (H_u - Y)^{3/2}$$

$$F_b = G\sqrt{\rho_j} (Y - H_l)^{3/2} \quad (\Delta\rho > 0)$$

$$F_a = G\sqrt{\rho_j} (H_u - Y)^{3/2}$$

$$F_b = -G\sqrt{\rho_i} (Y - H_l)^{3/2} \quad (\Delta\rho < 0)$$

以上は空間内温度が一様な場合のモデルであり、高さ方向に温度の層がある場合には開口部での圧力差分布に影響するため、より複雑になる。

3. 解析事例 1「化学テロのシミュレーション」

3.1. シミュレーションの概要

発災の概略シナリオを表 1 に、解析対象とした建物の平面図を図 2 に示す。発災場所は Room3 とし、Room3 と空気の流出入のしやすさを考慮して流動経路をモデル化した。

表 1 化学テロ事案発災の概略シナリオ

■ 散布目標	公共の建物（1F、Room3 で散布）
■ 散布物質	シアン化水素（青酸ガス）
■ 散布方法	床に置いた容器から時限装置による散布
■ 被害進展シナリオ	時限装置により、常温の状態でガス化し始めると仮定

被害の判定には、半数致死曝露量 LCt_{50} を用いた。半数致死曝露量 LCt_{50} は、無防備な集団が危険物質に吸入曝露した時に半数が死亡する曝露量（濃度と曝露時間の積）である[8]。

シアン化水素ガスの発生スケジュールを図 3 のように想定し、放出開始から 12 分後までシミュレーションした。

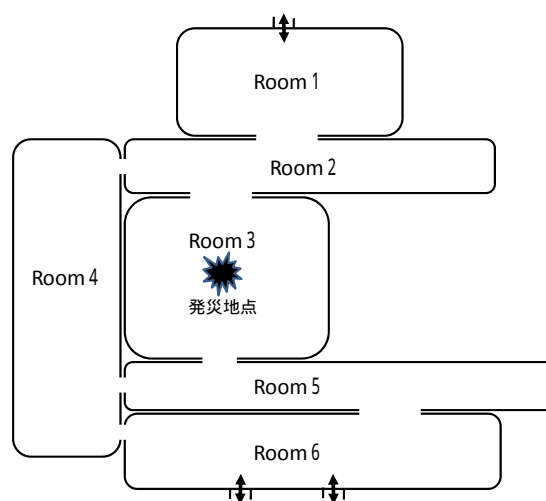


図 2 建物の平面図

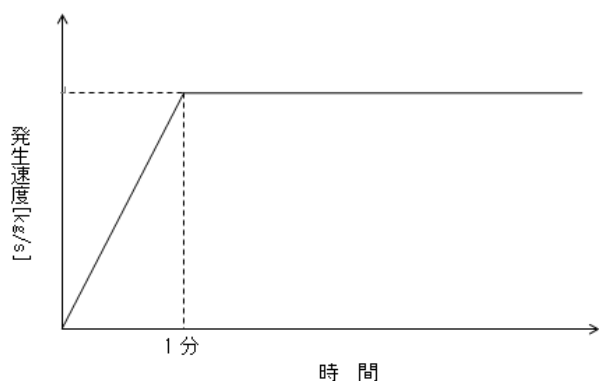


図 3 シアン化水素の発生シナリオ

3.2. シミュレーション結果

図 4 に、各部屋におけるガス濃度の経時変化を示す。発災後約 1 分で Room3 の濃度が、ほぼ一定値に達している。その後 Room2、Room5、Room1、Room6、Room4 の順に、ガス濃度が上昇している。化学剤の毒性の表現には、通常、Ct (曝露量) 及び LCt₅₀ (半数致死曝露量) が用いられる。曝露量 (Ct) は化学剤の濃度 C (ガス濃度。単位は通常 mg/m³) と曝露時間 t (分) の積で表される。LCt₅₀ は、化学剤の蒸気に吸入曝露した時に集団の半数が死亡する化学剤の曝露量 (Ct) である。例えば、シアン化水素の LCt₅₀ は 2,500mg・min/m³ である[8]。これはヒトが、同じ場所に留まってシアン化水素に曝露され続けた場合に、2,500mg・min/m³ の濃度では 1 分間で半数が死亡するという数値である。シアン化水素の LCt₅₀ は曝露時間によって大きく変動 (2,500 ~ 5,000) する。ここでは文献[8]による最小値 (最も低濃度、短時間で影響が顕れる) の 2,500mg・min/m³ を適用した。ただし、人体は一時的にならば驚くほど高濃度のシアン化水素を処理できるが、一定の時間曝されると体内に蓄積してしまうため[9]、実際の運用時には曝露時間に応じて適切にしきい値を設定する必要があることに留意されたい。

図 5 に、ガス濃度に基づく曝露量 (Ct) の経時変化を示す。この図は、発災後 9 分で Room3 における曝露量が 2,500 mg・min/m³ に達することを示している。発災元の Room3 に着目すると、2 分で

半数致死曝露量の 20%、4 分で 40%、6 分で 60%、7 分で 80%、9 分で半数致死曝露量に達すると予測される。

実際には、予告なしに危険物質が拡散し始めると想定されることから、その覚知までの時間を考慮する必要がある。その場合は、覚知可能なしきい値を設定し、図 4 から推定する必要がある。シアン化水素の覚知に関しては、以下の記述が参考となる[10]。「無色の気体もしくは液体で、苦いアーモンドのような匂いがする。60 ~ 80% の人だけがピターアーモンド (苦扁桃) の匂いを感知し、女性が匂いを感知する割合は男性の約 3 倍である。」

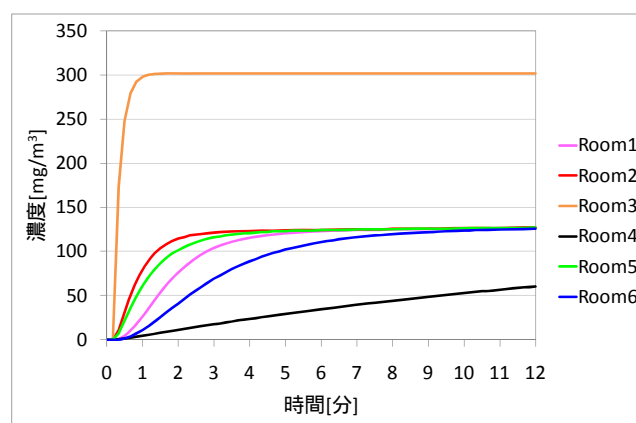


図 4 シアン化水素の濃度変化

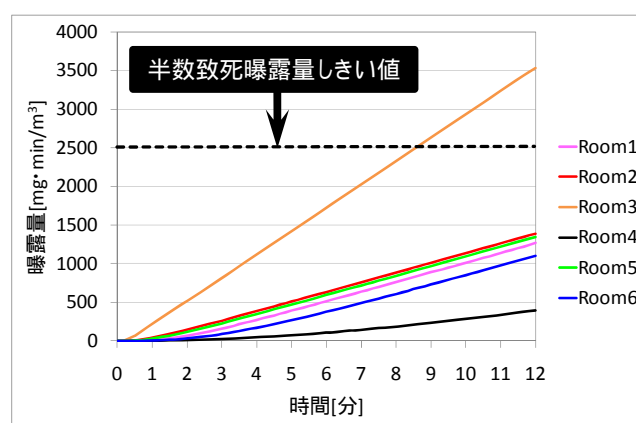


図 5 曝露量変化

4. 解析事例 2 「生物テロのシミュレーション」

4.1. シミュレーションの概要

生物剤の屋内拡散解析事例として、2 階建ての観客席からなる大規模集客施設における炭疽菌散布

のシミュレーションを行った。

換気系通常運転下で、生物剤散布後の拡散状況、すなわちホール内や換気系内に滞留する炭疽菌濃度や被災者一人当りの吸入芽胞量を算出した。図 6 に換気系を中心とした計算体系のイメージ図を示す。換気系は天井から給気し、床面から排気する方式と仮定した。

発災の概略シナリオを表 2 に示す。

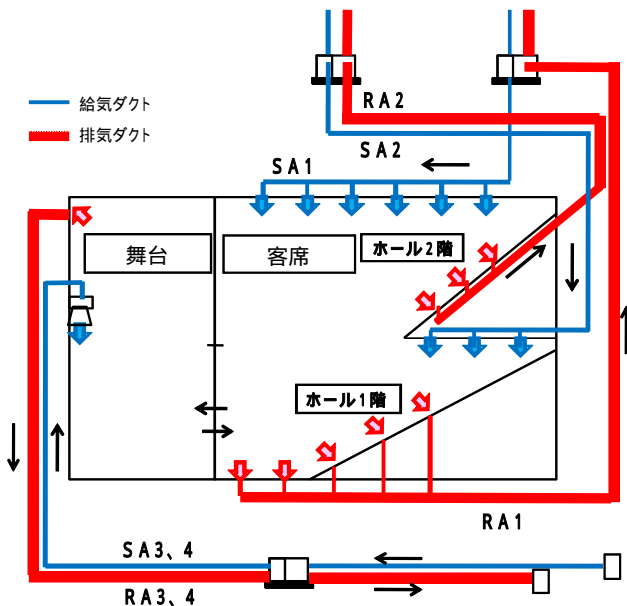


図 6 換気系のモデル（縦断面イメージ）

表 2 発災の概略シナリオ

大規模集客施設において 19:00 にイベント開始。テロリストが 19:00 に施設屋上の給気 (SA1) ラインから (吸入) 炭疽菌を混入。

■ 撒布目標

大規模集客施設（劇場形式）

■ 撒布方法

給気ラインに菌総量 3g を 10 分間にわたり混入

■ 被害進展シナリオ

空調噴出し風量のうち 70% は還気（再循環）流量として再び給気ラインへ供給される。したがって、残りの 30% が屋外へ放出される。

また、計算に際し以下の条件を想定した。

- 1g 中の芽胞数は 1 兆（ 10^{12} ）個とみなした。
- ダクト及びホールにおける菌の沈着は、ないと仮定した。
- フルイダイザー（非常に細かい無反応性の粉末）を添加する等の処置を行い、炭疽菌芽胞の静電気帯電の影響を減らして芽胞が固まることを防止する等、高度な兵器化テクニックが用いられたと想定した。
- ヒトの吸気率は人体口位置で、定常的に 6 L/min とした[11]。
- ヒトへの菌の付着量推定に関して、付着面積は 0.3m^2 とした。
- 発症のしきい値は 8,000 芽胞とした[8]。

4.2. シミュレーション結果

解析結果を図 7 に示す。横軸は、時間進行を表している。緑色の部分は炭疽菌が 10 分間にわたり平均的に吸気ラインに混入される状況を示している。青と赤のラインは、2 系統の排気ラインを通して屋外へ放出される菌の割合を示したものである。

図 8 は、ホール内および給・排気ラインにおける炭疽菌の濃度変化を示している。SA1 は混入された吸気ラインなので、高濃度で推移している。全体的には、発災後約 12 分をピークに、次第に減少していく様子が見える。

図 9 は、ホール内にいる観客が吸入する炭疽菌の芽胞数の変化を示したものである。排気口に近い 2 階の観客は発災から 127 秒後、1 階は 283 秒後に、発症のしきい値である 8,000 芽胞を吸入することがわかる。ただし、吸入芽胞数がしきい値を超えた場合でも、無症状の場合は、抗生物質を経口的に投与する治療法がある（炭疽菌が毒を分泌する前に投与する必要があるが）[12][13]。

図 10 は、排気ラインから屋外へ放出される炭疽菌量の積算値の推移を示している。換気系が停止した時点の数値を屋外拡散予測システムの入力情報に反映することで、屋内散布された生物剤が換気系から屋外に放出し、被害が拡大するシミュレーションが可能となる。

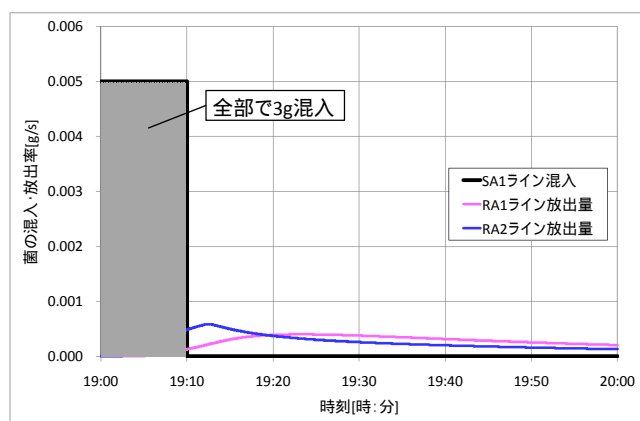


図 7 炭疽菌の混入量と換気系からの放出量

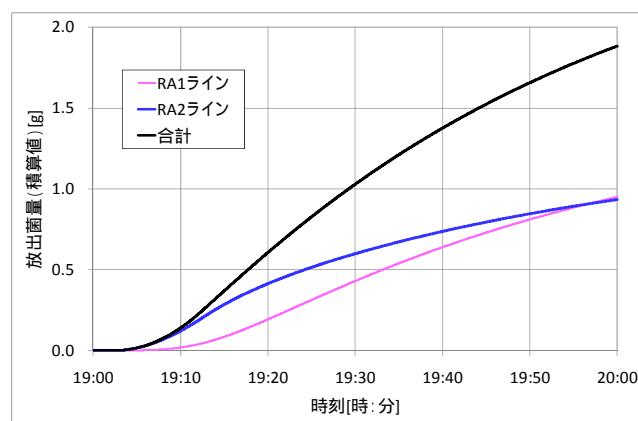


図 10 排気ダクトからの放出菌量（積算値）

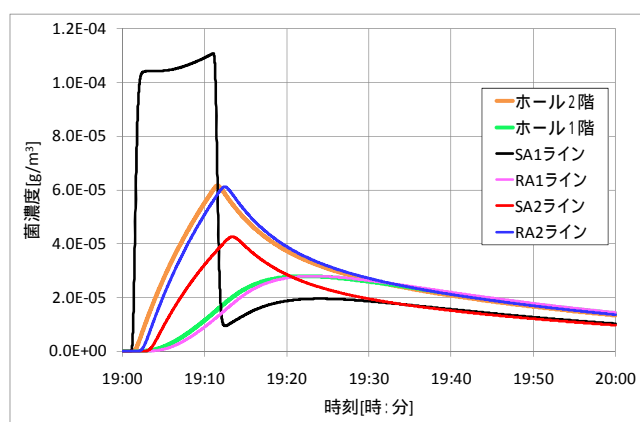


図 8 ホール内、換気系内に滞留する炭疽菌濃度

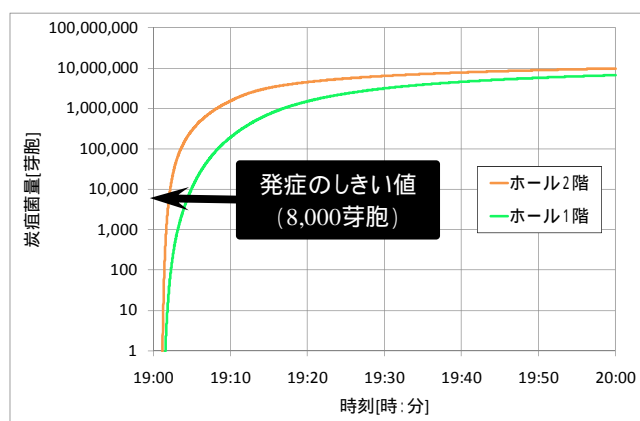


図 9 一人当たりの吸入芽胞数

今回、換気系への炭疽菌の混入を想定したシミュレーションを行ったが、解析条件設定上の留意点を以下に述べる。

炭疽菌 1g 中の芽胞数は 1 兆個とみなしたが、この想定には諸説がある。また、吸入炭疽の発症のしきい値を 8,000 芽胞としたが、1 芽胞でも発症の確率がゼロではないことに留意されたい。

さらに、本シミュレーションでは、高度な兵器化テクニックを用いて炭疽菌芽胞の静電気帯電の影響を減らすことで芽胞が固まることなく換気系を通過することを想定した。実際には、粒子が静電気を帯びたり湿気を吸収して凝集するため、ホール内に到達する芽胞数はかなり減少しているものと考えられる。ダクトやホールでの沈着なしという仮定に関しても、重力沈降のほか、慣性衝突、泳動などによりかなりの炭疽菌芽胞が沈着する可能性がある。

5. おわりに

Advance/EVE SAYFA 2.0 は、建物内の環境・安全シミュレーションを目的とした危険物質拡散解析機能を備えている。この機能を用いて、化学テロとして、公共建造物の 1 フLOORにおけるシアン化水素（青酸ガス）の散布事案、生物テロとして、大規模集客施設における炭疽菌の換気系への混入事案を解析した。今回の計算条件では、いずれのケースも解析に要した時間は、デスクトップパソコン（CPU：Intel Core 2, 1.86GHz, 2GB RAM）で数分のオーダーであった。

慈恵医大の浦島充佳先生の著書「NBC テロリズム」[14]に、次のようなエピソードが載っている。浦島先生がハーバード大学でバイオテロリズムの講義に出席した時に出された課題である。

「ボストンダウントOWNにあるケンモア・ショッピング・モールで炭疽菌が通風口からばらまかれたという設定で最善と最悪のシナリオを考えるように。その日の買い物客は1万人とする」

まさに、Advance/EVE SAYFA 2.0 にうってつけの問題である。さらに、先生はこう続けている。

『テロに関しては、常に予知、予防に徹し先手をとらなくてはならない。(中略) 実に様々なフィールドの専門家を集めて、可能性のあるシナリオを考え、被害を最小にするためのマニュアル作りに向けて実際の討論が行われるべきである。』

Advance/EVE SAYFA 2.0 を用いることで、いろいろな条件下でのシミュレーションを行い、防災設備の設計や避難計画の立案、テロ対策のマニュアル作りに役立てることができる。

参考までに、炭疽菌テロに関する知見を以下に簡単にまとめた。

炭疽菌について[8]

- 病原体：グラム陽性芽胞形成菌（*Bacillus anthracis*）、ヒトからヒトへの感染はない。
- 潜伏期間：平均5日間
- 病態：感染経路や病態から、吸入（肺）炭疽、皮膚炭疽、腸炭疽の3型に分類される。
- 初期症状：鼻閉感、関節痛、易疲労、空咳など、感冒様症状と類似する。
- 致死率：吸入炭疽では、無治療でほぼ100%死亡（集中治療では40%以下）

炭疽菌の生物兵器/テロの容易性と脅威について

- 大量生産しやすくコストが低く、取扱いが容易である。
- 安定して長期間保存でき、温度変化や爆発にも耐えられる。
- 微量の菌で発病させられる（吸入炭疽は8,000

個以上の芽胞で発病）。

- 接触・飛沫・空気・経口感染など多様な経路で感染させられる。
- 潜伏期間が短く、症状が激烈で治療が難しく、致死率が高い。

参考文献

- [1] 全国消防長会編：“実践 NBC 災害消防活動”，全国消防協会（2007）。
- [2] 福山 隆：“「地下鉄サリン事件」戦記”，光人社（2009）。
- [3] 「COMIS Multizone Air Flow Model」
<http://www-epb.lbl.gov/comis/>
（2010/11/22 アクセス）
- [4] H. E. Feustel, B. V. Smith：“COMIS 3.0 User's Guide”，IEA Annex 23（1997）。
- [5] F. Engdahl：“Executable examples for COMIS 3.0”，LBNL 021098。
- [6] V. Dorer, A. Haas, W. Keilholz, R. Pelletret, A. Weber：“COMIS 3.1 SIMULATION ENVIRONMENT FOR MULTIZONE AIR FLOW AND POLLUTANT TRANSPORT MODELLING”，7th International IBPSA Conference（2001）。
- [7] 趙雲，荏原幸久，吉野博：“住宅における換気量の簡易予測法”，日本建築学会計画系論文集 第512号（1998）p.39-44。
- [8] 生物化学テロ災害対処研究会：“必携 - 生物化学テロ対処ハンドブック”，診断と治療社（2004）。
- [9] 米国テンベスト社編，西恭之 訳，小川和久 監訳：“初動要員のための生物化学兵器ハンドブック”，啓正社（2001）。
- [10] アンジェロ・アクィスタ，楡井浩一 訳：“生物・化学・核テロから身を守る方法”，草思社（2003）。
- [11] 加藤 信介：“CFD による拡散場解析と換気効率指標を用いた人体吸気濃度の予測手法の開発”，平成10～12年度 文部科学省科学技術振興調整費生活者ニーズ対応研究生活・社会基盤

研究 TASK-3 (2000).

[12] 杜 祖健：“生物兵器、テロとその対処法”，じほう (2002).

[13] 井上 尚英：“生物兵器と化学兵器”，中公新書 (2003).

[14] 浦島 充佳：“NBC テロリズム”，角川書店 (2002).