

# 有害危険物質の屋内拡散予測システムの現状 －テロ対策の観点からみたシミュレーション－

吉岡 逸夫\*

## Prediction System for Diffusion of Harmful Materials in Enclosed Space -Simulation from the Standpoint of Counter-Terrorism-

Itsuo Yoshioka\*

本稿で扱う有害危険物質は、室内に漂う細かい埃から、炭疽菌のように殺傷力の高い生物剤兵器まで幅広い汚染物質を表す。日常生活においては、建物内の空気汚染に関して汚染物質の濃度の基準を提示しているビル管理法などの規定により、人々の健康が保障されている。一方、1990年代以降、有害危険物質が意図的に散布されるという一連のテロ行為により、危険物質が屋内でどのように拡散するかが被害の大きさに影響する重要な因子として注目されている。特に、ファーストレスポnder（初動要員）の救急活動時には、有害危険物質の屋内拡散予測により得られる情報は、大きな減災効果をもたらすだろう。

本稿では、この有害危険物質の屋内拡散現象について、現在、実用に供されているシステムの実情を国内外の調査結果に基づき解説する。

**Key word:** 有害危険物質、屋内拡散予測システム、CBRN、SBS、CAMEO、CONTAM、PROTECT、PROACT、COMIS、Visual Nets、HazMat Responder、Overt, Covert、Advance/EVE SAYFA

### 1. はじめに

1997年のリチャード・プレストンの小説「コブラの眼」は、1人のテロリストがニューヨークの地下鉄に新型ウイルスを持ちこむというプロットで、当時のクリントン大統領がこの小説を読んで、関連部署に生物兵器テロ対策を再検討させたという。また、米国のドラマ「24」シーズンVの中で

- ・ショッピング・モールの空調システム
- ・病院の空調システム
- ・CTU（テロ対策ユニット、架空の政府機関）の空調システム

の3か所で神経ガスが散布されるシーンが放映された（この人気ドラマシリーズでは、シーズンVIIでも有毒ガスが用いられ、シーズンIIIとVIIでは生物剤が登場する）[1]。

日本でも、1990年代にサリン、VXガス、ボツリヌス菌、炭疽菌を用いた事件が発生し、時代の趨勢として2004年に「国民保護法」が施行されるに至った。同時に、シミュレーションの分野においても減災の観点からさまざまな取り組みがなされてきた。

このように、地下鉄のような公共施設や建物の換気・空調システムを利用して化学剤や生物剤を散布するテロ行為は、単に物理的な被害のほかに社会不安を呼び起こすもので、近年、世界各国で巨費を投じて対策が講じられている。

本稿では、テロ対策という観点から、化学・生物剤などの有害危険物質が屋内散布された場合に適用する拡散予測システムの開発状況について概説した。なお、本稿で扱うシステムはテロ対策支援用ツールとしての利用を前提とした。すなわち、計算負荷が大きい3次元の詳細計算を行うCFD

\*アドバンスソフト株式会社 技術第4部

4<sup>th</sup> Technical Division, AdvanceSoft Corporation

(Computational Fluid Dynamics, 数値流体解析) によるものは対象外とし、計算処理が短時間で済むシステムに限定した。

## 2. 有害危険物質とは

1970年代のオイルショックは、社会にさまざまな波紋を投げかけた。建築業界に関しては、室内における省エネルギー対策の影響は、換気量の減少、外気の侵入を極めて小さくした機密ビルの建設となって現れ、いわゆるビル病、シックビル症候群(sick building syndrome ; SBS)等と呼ばれる問題を顕在化させた。また、住宅、オフィスビルなどの一般環境における新しい室内空気汚染問題として、ラドン娘核種、微生物粒子、アレルゲン、ホルムアルデヒド揮発性有機化合物などによる汚染等が挙げられる。また、これら単一の汚染質のほか、複合化した汚染質として、タバコ煙、燃焼排気汚染、臭気問題なども SBS の一つと考えられる[2]。

以上の汚染物は、居住空間に日常的に存在する物質といえる。それに対して、以下で述べる CBRNE は、テロリストが用いる非常に有害かつ危険な物質である。従来、核物質、生物・化学剤を用いるテロを NBC テロと呼んでいたが、最近は CBRNE (シーバーン) と表されることが多い。CBRNE とは、Chemical、Biological、Radiological、Nuclear、Explosives の頭文字である (これらの用語の後に Weapon が省略されている)。それぞれ、化学、生物、放射能、核、爆発物を表している。各種兵器における費用対効果では、1km<sup>3</sup> の範囲に存在する生物を殺傷する費用として一般的兵器 \$ 2,000、核兵器 \$ 800、化学兵器 \$ 600、生物兵器 \$ 1 である (生物兵器は “貧者の核兵器” と言われている) [3]。

ここでは、その拡散の特質上、爆発物以外の物質について述べることにする。また、放射性物質や核兵器に起因する有害危険物質としては、人体に長期間にわたり多大な被害を与えるホットパーティクル (プルトニウムなど放射能を持った粒子) の拡散が挙げられる。しかし、放射性物質や核兵器は厳重な管理下に置かれておりテロリストの手にわたりにくいことやその扱いにくさから、少人数のテロ集

団が利用する可能性が低いため、ここでは取り上げないこととする。

以下に、テロ攻撃に使用される可能性のある、あるいは使用された化学・生物剤について述べる。

米国疾病管理センター (Centers for Disease Control and Prevention: CDC) による生物テロに使用可能な生物剤と関連する感染症について、表 1 に示す[3][4]。

表 1 生物テロに使用される可能性のある生物剤

カテゴリーA	分類
天然痘	ウイルス
炭疽	バクテリア
ペスト	バクテリア
野兔病	バクテリア
ボツリヌス症	毒素
フィロウイルス、アレナウイルス (エボラ出血熱、マールブルグ出血熱、 ラッサ熱などのウイルス性出血熱)	
カテゴリーB	分類
Q 熱	バクテリア
ブルセラ症	バクテリア
鼻疽	バクテリア
ベネズエラ馬脳炎など	ウイルス
リシン 黄色ブドウ球菌エンテロトキシン B など	毒素
(準カテゴリーB には、腸チフス、腸管出血性大腸 菌症、コレラ、クリプトスポリジウム症がある)	
カテゴリーC	分類
ニパ脳炎	ウイルス
腎症候性出血熱 ハンタウイルス肺症候群	ウイルス
ダニ媒介脳炎	ウイルス
黄熱病	ウイルス
多剤耐性結核	バクテリア

このリストにおける3つのカテゴリーは、それぞれ  
カテゴリーA：大量の患者と死者が出やすい。

カテゴリーB：比較的大量の患者が出る場合が多いが、死者は出にくい。

カテゴリーC：将来使用される可能性があり、大量の患者と死者を出す恐れがある。

という観点での分類である[5]。

表2には、主な化学剤についてにまとめた[3][4]。

## 2.1. 有害危険物質（CB 剤）の屋内拡散

CB 剤が散布された場合どのように拡散するだろうか。実際に、CB 剤を用いた拡散実験をすることはあり得ないだろう。

化学剤に関しては、テロ攻撃とは別に偶発的な放出（化学プラントの事故等）が起こった場合に、化学物質の拡散状況が参考になる。一方、生物剤に関しては、入手可能な情報はほとんど見つからなかったが、生物剤による潜在的脅威（Health Aspects of Chemical and Biological Weapons,WHO,1970）に関して、理想的気象条件下（低風速・夜間/早朝の時間帯）で人口50万人の都市上空で50kgの炭疽菌エアロゾルを散布すると、風下20kmにわたり、死者・重傷者が125,000人発生するという知見があった[3]。

以下に紹介するのは、生物剤の屋内拡散に関する知見として、興味深い事例である。

表2 主な化学剤

分類	種類	常温（20℃前後） の状態*1	臭い	発症までの時間	持続性
神経剤	サリン	無色の液体	無臭	超即効性	一時的
	ソマン	無色の液体	果実臭	超即効性	一時的
	タブン	無色の液体	果実臭	超即効性	一時的
	VX	半透明の液体	無臭	即効性	持久性
びらん剤	マスタード	無色、黄色、茶色の液体	刺激臭	遅延	持久性
	ルイサイト	無色、茶色の液体	無臭、ゼラニウム臭	即効性	一時的
	ホスゲンオキシム	無色の固体、液体	不快臭と刺激臭	即効性	即効性 土壌中に 2h 残存
窒息剤	ホスゲン	無色の気体	刈りたての干し草か トウモロコシの臭い	即効性	一時的
	ジホスゲン	無色の油状液体	刈りたての干し草か トウモロコシの臭い	即効性	一時的
	塩素	帯緑黄色の気体	刺すような刺激臭	即効性	一時的
	クロルピクリン	無色の油状液体	刺すような刺激臭	即効性	一時性
シアン化物	シアン化水素 (青酸ガス)	無色の液体、気体	アーモンド臭	超即効性	一時的
	塩化シアン	無色の気体	刺激臭	即効性	一時的

\*1：常温時、密閉状態で液体でも、密閉を解くとすぐに気体になるものが多い。

### 2.1.1. 地下鉄での拡散実験

テロ攻撃に関して地下鉄の弱点となるのは、空間部分が比較的少なく、外から閉ざされている上、ラッシュなどの混雑する時間帯が予測できる点である。また、列車の走行に伴い発生する風により、病原菌や有毒ガスが、構内中、あるいは通風口を通じて地上へ拡散し、大勢の人々に感染や汚染被害が及ぶこととなる。さらに、生物剤の中には一定の潜伏期間を有するものが多く、知らず知らずのうちに感染が広がる危険性がある。1960年代にCIAと米国防陸軍は、生物テロによってどれほどの被害が出るかを調べるため、炭疽菌に似ているが無害な *Bacillus subtilis variant Niger*[6] という菌種の詰った電球を、走行中の列車と列車の間に投棄するという実験を、ニューヨーク市の地下鉄で行った。その結果は、類似の手口でツラレミアなど致死性の病原菌が撒かれた場合、300万人もの犠牲者が出るだろうということが判明した[7]。ツラレミアは、炭疽やペストと同じバクテリア（細菌）の一種で、米陸軍野戦マニュアルに記載されている[8]。

### 2.1.2. 米国炭疽菌事件

2001年米国のダニエル上院議員事務所に送られてきた封書に入っていた白い粉の量は約2gだった。陸軍感染症医学研究所が分析したところ、その中には少なく見積って約200億個の炭疽菌の芽胞が含まれていた。致死的な肺炭疽を発症させるのに必要な芽胞数は約1万個と推定されているから、1通の封書の中に200万人分もの致死量（成人男子）に相当する芽胞が含まれていたことになる[9]。

本来、炭疽菌の芽胞は1 $\mu$ m（1000分の1mm）程度の大きさである。だが、静電気の発生によって引き寄せ合うため、長く連なり、大きな塊になりやすい。もし生物兵器の知識に乏しい素人が芽胞を作成したのであれば、粒子は大きくならざるを得ない。粒子が大きければ重いので、空中に浮遊し続けることは困難で、人の肺には容易に入らず殺傷能力が低い。そのため、生物兵器としての威力は小さい。だが、実際に送られてきた白い粉は、直径1.5～3 $\mu$ mの微粒

子であった。これだと軽いので空中に浮遊し続ける。さらに、この直径の微粒子ならば封筒の繊維のすきま（10 $\mu$ mほどの細孔）を容易に通過してしまう。すなわち、たとえ開封しなくても、封筒を持つ時の指の圧力だけで芽胞の微粒子が紙の孔から外に出る。しかも空調設備は、ビルの1室にわずかな空気の流れを絶えず発生させている。この空気の流れに乗って微粒子が舞い上がり、浮遊を続ける。部屋にいる人たちが、呼吸によってこの微粒子を吸い込むと、口や鼻から入った芽胞が肺に定着し、致死率の極めて高い肺炭疽に罹患する。

## 3. 屋内拡散予測システムの役割

### 3.1. 屋内拡散予測シミュレーションの有用性

コンピュータによる屋内拡散シミュレーションを行うことにより、各部屋における有害危険物質の濃度の分布と時間的な変化が算出される。この情報に基づき、人体への影響を評価することで、換気の効果や、避難誘導の方針の検討など防災上の種々の検討を行うことが可能となる。

以下では、どのような方法でその影響を評価するか、具体的に示しておく。

#### 3.1.1. 化学剤による人体への影響評価

化学剤の属性としては、物理的・化学的性質のほか、使用量や濃度、純度、使用方法（そのままの形態で使用、エアロゾル化等）が重要である。ここで、エアロゾルとは、大気中に浮遊している液体または固体の微小粒子のことである。化学剤の曝露経路としては、吸入、皮膚や眼への接触、経口が考えられるが、多くの化学剤においては液体が気化した蒸気（気体）あるいはエアロゾルの吸入曝露により被害が発生する。化学剤の拡散による被害の評価に際して、曝露量モデルおよび毒性指標を利用することで現実的な処理が可能となる。

化学剤の毒性の強さを表す指標について、以下に記す。

化学剤の多くは液体が気化した蒸気またはエアロゾルの吸入によって被害が発生する。このため化

学剤の毒性の表現には、通常、Ct（曝露量）および LCt<sub>50</sub>（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（単位は通常 mg/m<sup>3</sup>）と曝露時間 t（分）の積で表す。曝露量（Ct）が一定であれば化学剤の毒性効果もほぼ一定であるとの仮定から、例えば 100mg/m<sup>3</sup> の化学剤に 1 分間曝露されても、10mg/m<sup>3</sup> に 10 分間曝露されても、毒性の強さは同じと考え、曝露量 Ct=100mg・min/m<sup>3</sup> と表現する。

LCt<sub>50</sub> は、化学剤の蒸気やエアロゾル等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、サリンの LCt<sub>50</sub> は 100 mg・min/m<sup>3</sup> であるが、これはヒトがサリンを吸入した場合、100 mg/m<sup>3</sup> の濃度では 1 分間で半数が死亡、50 mg/m<sup>3</sup> の濃度では 2 分間で半数が死亡する、という目安になる。

主な化学剤の比重と半数致死曝露量 LCt<sub>50</sub> を表 3 に示す[3]。

### 3.1.2. 生物剤による人体への影響評価

生物剤の感染経路としては呼吸系感染経路を考慮する（他に経口感染や経皮感染があるが重要性は低いといえる）。散布される生物剤の性状によって、液状生物剤と乾燥生物剤とに分けられ、散布形態と

してはエアロゾル状と考えられる。生物剤の拡散による被害エリアを評価するため、その濃度分布に基づく吸入量モデルを以下に示す。これは、生物剤濃度、ヒトの呼吸率、曝露時間、菌・ウイルスの単位重量（例えば炭疽菌ならば 1 芽胞の重量）に基づき、感染エリアを算出する方法である。

$$S = \sum_{(t \text{ について積算})} \left[ \frac{C \times Q \times t}{W} \right] \quad (1)$$

S：菌等の株数の吸入量

C：濃度[mg/m<sup>3</sup>]

Q：呼吸率[m<sup>3</sup>/min]

t：曝露時間[min]

W：単位重量[mg/個(または芽胞)]

上式において、例えば汚染物質が炭疽菌（吸入炭疽）と仮定すると、ヒトが発病する基準は炭疽菌の芽胞の 8,000 個以上の吸入である[3]。ただし、これは目安値であり、芽胞 1 個でも発病する可能性がゼロではない。

表 3 主な化学剤の比重と LCt<sub>50</sub>

	神経剤		びらん剤		窒息剤			シアン化物
	サリン	VX	マスタードガス	ルイサイト	ホスゲン	塩素	クロルピクリン	シアン化水素
蒸気比重*1	4.86	9.2	5.4	7.1	3.4	2.4	5.6	0.99
LCt <sub>50</sub> *2 (mg・min/m <sup>3</sup> )	100	50	1,500	1,400	3,200	19,000	2,000	2,500*3 ~5,000

\*1：空気の密度を 1 とした場合の比重。

\*2：化学剤の蒸気に吸入曝露した時に半数が死亡する化学剤の曝露量（=濃度×曝露時間）。

数値が小さいほど毒性が強い。

\*3：吸入時間により大きく変動する。

以上、化学剤、生物剤に関して、人体への影響の評価法について解説した。これらのモデルにより算出されるのは、有害危険物質に曝されている1人あたりの被害推定値である。実際には、有害危険物質に曝されている被災者は、(不幸にして、その場で身動きできなくなる場合は除き) その場から自力で避難したり、あるいはファーストレスポnderにより救助されるだろう。その場合には、各被災者ごとに、曝されている有害危険物質濃度に基づき、影響評価を行う必要がある。すなわち、被災者の避難経路やCB剤濃度の変化など、時々刻々と変化する条件を反映した影響評価を行う必要がある。

## 3.2. 屋内拡散予測システムが備えるべき要件

拡散予測システムに求められる要件について

- ・建築物の設計段階
- ・防災訓練のシナリオを作成する段階
- ・事象が発生した段階

の段階に分類し、各段階におけるシミュレーションの必要性について整理した。

### 3.2.1. 建築物の設計段階での利用

建築物の設計段階の要件としては、諸設備設計(検知器、空調の配備)や区画化設計検討において、テロ対策の観点から検証計算ができることが重要である。すなわち、さまざまな状況における防災・減災対策として、建築物内を区画化する方法の効果を定量的に検討できるツールが望まれる。

また、諸設備(防災扉、空調)運転に関して、テロ対策の観点から検証計算ができることが重要である。テロ対策として防災扉、空調等を操作することの効果や、効果的な操作方法を検討するツールとして、それら諸設備の設計に役立つことが望まれる。

### 3.2.2. 訓練シナリオ作成段階での利用

防災訓練においては、大型施設や地下鉄駅構内を対象とした場合、現実的な被害想定・誘導シナリオ作成に際して、屋内拡散予測システムの利用が考えられる。

また、防災設備運用、避難訓練に関してのツール

整備のニーズがある。

### 3.2.3. 事象発生段階での利用

テロ発生の現場においては、近隣の市民をどこまで逃がすかの手がかりとなる情報が必要である。当然、緊急時に信頼できる拡散計算データを瞬時に取得できればそれに越したことはない。

また、シミュレーションの精度をどの程度上げられるか、速度をどの程度上げられるか、標準化(汎用性)をどの程度図れるか等が課題である。

以上をまとめると、屋内拡散予測シミュレーションには①操作の簡便性(標準化)、②必要とする情報を抽出するさいの容易さ、③データの最新性、④迅速さと精度の確保が必要といえる。特にデータの最新性は重要であり、日常から内容を更新し、保守していく仕組みが重要と考えられる。

## 4. 既存の屋内拡散予測手法について

本節では、有害危険物質の拡散予測に関する国内外の取り組みについて概説する。

### 4.1. 屋内拡散予測モデルに関する研究

米国では、建物内のCBRテロに関しては、米国Syracuse大学などを中心として建物内の汚染拡散シミュレーション研究が進められ、Pennsylvania州立大学では、安全評価指標としてBuilding Protection Factorの開発、CIAではPentagon Shield Project、国防省ではガイドラインの策定や「免疫ビル」構想が進められている。

地下鉄、空港、オフィスビルを対象に、具体的に化学兵器攻撃を想定した研究としては、国土安全保障省(DHS)、交通省(DOT)等の支援の下にSandia及びArgonne国立研究所が中心となって実施されたPROTECT(Program for Response Options and Technological Enhancements for Chemical/Biological Terrorism) [10]がある。この研究は地下鉄サリン事件を契機に1997年に開始され、化学テロの検知及び防護対策支援を目的としたものであり、化学剤センサーや監視カメラと連動して、避難

誘導経路を図示する機能を有する。PROTECT については、4.2 節で詳述する。

簡易的モデルによる屋内拡散シミュレータとしては、米国標準技術研究所 (NIST) で開発された CONTAM[11]がある (NIST のウェブサイトからダウンロードできる) [12]。これはマルチ・ゾーンモデルによる屋内換気系解析プログラムである。特長として、室内外の空気の温度差による浮力の影響が考慮できる点や、換気の流れにより汚染物質が拡散する場合の濃度分布が計算できる点が挙げられる。その過程において、化学変化や放射化学変化を扱うことが可能である。計算モードとして、定常／過渡／日変化が選択できる。Version 2.0 では、空気／水蒸気のモデル化、汚染物質のライブラリ化、気象などの外部環境の考慮、ビル制御、部屋の温度のスケジュール化について整備された。Version 2.1 では、外部の気流や汚染物質の移流に関して、CFD やプルーム／パフモデルを利用して外部との境界圧力や汚染物質の情報を詳細に考慮する機能が追加され Version 2.4 では、沈着モデル、ダクトなど移流・拡散を考慮するエリアモデル、フィルタ・モデルが追加された。

屋内拡散予測の専用ソフトウェアではないが、米国 SAFER Systems 社の HazMat Responder [13][14]の「シェルター内濃度推定機能」にも触れておく。HazMat Responder は、テロ・地震などによる付特性地点からの化学物質の漏えいに対処するツールで、GPS 機能付移動ガス検知器と移動式気象観測装置を用いてリアルタイムに漏洩化学物質の影響範囲が把握できる。シェルター内濃度推定機能は、ユーザーが定義した換気率に基づき室内濃度の時間変化を計算するものである (建物の密閉度に応じて建物内に避難するか、他の場所へ逃げるかを判断する)。

国内における代表的なものとしては、(社)日本化学工業協会が NEDO からの受託事業で開発した意思決定支援ツール Risk Manager[15]がある。これは、主に化学物質取扱事業者がそのリスクを評価し、管理するための初期リスク評価支援ツールである。このツールには、化学物質の作業曝露濃度推定、

濃度基準値との比較といった機能がある。また、複数の発生速度推算モデル (化学物質の発生状況の数理モデル) と濃度推算モデル (発生した物質の拡散状況の数理モデル) を組合せて曝露濃度推算を行うことができる。その他には、清水建設が集合住宅の設計時に建材などから発生するホルムアルデヒドや VOC (Volatile Organic Compounds; 揮発性有機化合物) などの化学物質の濃度をパソコンで予測する室内化学物質予測システム Visual Nets[16]を開発している。

その他、建物の換気量計算に関するプログラムとして、国際エネルギー機関 (IEA) が開発した COMIS (Conjunction Of Multizone Infiltration Specialists) [17]～ [21]や (独) 建築研究所が開発した Ventsim[22]などの換気回路網計算プログラムがある。両者ともに各室を 1 つの節点として扱い、各室の床面の圧力を未知数とした換気回路網の収束計算を行う。ともに非定常計算に対応しており、気象データや建物に関するスケジュールが設定できる。また、汚染物質の濃度計算も可能である。

Advance/EVE SAYFA の有害危険物質拡散予測シミュレーション機能は、この COMIS と同等の機能といえる。COMIS に関して、もう少し触れておこう。COMIS は、1988～1989 年の国際ワークショップ (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL) で開発が始まった。その後、1990～1996 年の国際エネルギー機構 (IEA) の「建築物及びコミュニティシステムの省エネルギー研究開発計画」の一つである ANNEX 23 (多数室換気計算モデルの開発研究) プロジェクトにおいて開発された室内換気と汚染物質移動のシミュレーションプログラムである。このプロジェクトに日本からは東北大学の吉野教授、宮城高専の内海教授が参加していた。COMIS は、現在スイスの EMPA において基本部分の開発やメンテナンスが行われている。COMIS は、多数の実験結果や他の換気モデルと比較して、精度の高い換気計算モデルと評価されている。

## 4.2. 実用化された屋内拡散予測システム

ここでは、米国の空港における CB 剤によるテロ対策に関して、PROTECT および PROACT の事例を以下に紹介する[10]。

米国の航空業界における化学・生物剤を用いたテロ攻撃に対する安全性を維持するために、米国運輸保安局 (TSA) が果たす役割は大きい。

国防総省 (DOD)、エネルギー省 (DOE) 系研究機関、国土安全保障省 (DHS)、国立科学財団 (NSF) および疾病管理センター (CDC) など多数の機関がその戦略立案に関わっている。さらに、テロ対策に関する省庁間技術開発ワーキング・グループ

(TSWG) が安全保障に関する提言を行ったり、研究の助成金を拠出している。

PROTECT と PROACT (Protective and Response Options for Airport Counter-Terrorism) は典型的なテロ対策事業である。これらの事業は、1990 年代にエネルギー省の下でスタートした国家的な安全保障事業が起源であり、公共輸送機関に対する CB 剤によるテロ対策が目的であった。その後、地下鉄については PROTECT、空港については PROACT という切り分けとなり、PROACT のスポンサーは国土安全保障省 (DHS) に移っている。

PROTECT は、Washington, D.C.の地下鉄において、化学剤センサーの開発に力を入れており、約半分の地下鉄駅に化学剤センサーが設置されている。その後、生物テロにも対応できるように機能拡張されている。

一方、PROACT は、San Francisco 国際空港 (SFIA) と協力して、CB 剤が空港内のいろいろな場所で散布された場合に被害を抑える方法を検討している。PROACT は、CBR 剤を用いた攻撃から逃れる指針を示すとともに、汚染物質の除去と空気の浄化に関しても有効な情報を提供している。国防高等研究計画局 (DARPA) の事業は、建築物がテロ攻撃に関する脆弱さを示すとともに、防衛手段を提供している。しかし、DARPA は理論モデルだけではもはや不十分で、実寸法のビルを対象とした経験的な手法をテストしている。

結局、高度な化学剤センサーや生物学的 (毒性) 試験 (バイオアッセイ) よりも、初動対応としては TV カメラや生物を利用した検出法 (鉱山事故におけるカナリアを利用する例がある。ただし、カナリアは低濃度の一酸化炭素で人間が死亡した後も生存できるようだ[8]) の方が、即効性の化学剤を検出する上で有用な場合がある。言い換えると、テロ攻撃を軽減するためには、高度なセンサーを開発するよりも、よく考えてテロ対策を講じておくことが大事である、と結論づけている。

## 5. 屋内拡散予測システムの課題

有害危険物質の屋内拡散予測システムが解決すべき課題として、以下の 2 点に触れておきたい。

まず、第 1 に挙げられるのは、必要な情報をどのように入手し、整備するかという点である。

昨今の IT 化の流れや、安全・安心に関する情報整備に伴い先進的な取り組みが進行しているものの、一般的に‘作業が煩雑’とされる屋内の建物構造や空調設備などのデータ、屋外の市街地建物位置・形状データなどの、データ取得とシステムへのデータ入力をどのように処理するかが挙げられる。この点に関しては、既施設および今後デジタル設計される新規施設のそれぞれに対して対応策を講じる必要がある。既存の施設に関しては、設計図書や実地調査に基づき、建物構造や空調設備のデータを取得することになる。また、デジタル設計される新規施設についても、同様の手間が生じる (3 次元モデルの CAD データがある場合、省力化が期待できるが)。

次に述べるのは、生物テロに関する根源的な課題である。生物テロには公然攻撃 (Overt) と秘匿的攻撃 (Covert) の 2 種類のタイプがある。Overt 攻撃では、現場での状況分析・評価、検体採取、群衆管理・パニック防止が重要である。もう 1 つの Covert 攻撃は、生物テロ発生時の対応を難しくさせる要因となる。Covert 攻撃での最初の兆候は、数日後の患者発生であり、自然発生か人為的発症かどうかの判断が重要となる[3]。表 4 に生物テロ攻撃における曝露形式を示す。



仮に、Covert な生物テロが発生した場合、屋内拡散予測システムはどのような‘役立つ’情報が提供できるだろうか。テロの対象となり得る施設について、事前にシミュレーションできるならばそれに越したことはないが、現実的ではないだろう。屋内拡散予測システムの考えられる利用方法としては、センサーにより検知された（生物）剤の情報に基づき、建物内部における剤の拡散状況を予測し、被災者の避難誘導や除染といった減災活動に役立てることだろう。そのためにも、屋内拡散予測システムの高度化と並行して、有害危険物質のセンサーの高度化の研究が必要と考える。

表 4 生物テロの曝露形式

	Overt（公然）	Covert（秘匿）
予告	あり	なし
目撃者	複数～多数	少数～なし
影響出現	直後からあり	不明確～なし
初期対応機関	消防・警察・自衛隊	医療機関・学校・企業
パニック	必発	不安なし（判明後は不安増大）
避難・隔離	ときに必要	必要 ただし手遅れ
疫学調査	ときに必要	特に必要

## 6. おわりに

1995 年 3 月に発生した東京地下鉄サリン事件において、東京・築地の聖路加国際病院はその被災者救済の最前線の医療機関だった。病院に運び込まれた患者は、救急センターでは処置しきれず、多くの被災者が病院内のトイスラーホール（礼拝堂）に収容された。このホールは、酸素や吸引の配管が設置されており、災害時の利用を考慮して設計されている。実は、このトイスラーホールにおける 2 次被害が、救急室よりも多かったというのである。

救急室は、次々と搬送されてくる被災者のために、入口が開放されており、換気量が確保されていたと考えられる。トイスラーホールは、ほぼ閉鎖空間で、

被災者が身に着けていたコートを脱がせる度に、中に閉じ込められていたサリンの気体が漏れ出てきたと推測される。結果として、被災者に近い立場であればあるほど、すなわち看護助手、看護師、ボランティア、医師、事務職員の順番に 2 次被害が多かった[23]。

このような事実を目の当たりにして、病院の設計段階において、換気方法が屋内の汚染状況に及ぼす影響まであらかじめ計算しておけばよかったと結論づけるのは簡単である。だが、屋内拡散予測システムに求められる将来像は、はるかに実践的なものであるべきと考える。

20××年、〇〇施設の△△ホールで、CB 剤の混合した汚染が検知された。すぐに、屋内拡散予測システムが起動され、データベースから必要な情報が瞬時に取りこまれ、建物内の被害予測計算を行い、数分以内に各エリアにいる人々をどこに誘導すべきかが出力される。そのさいに、例えば空調の制御に関しては、排気ダクトからの生物剤の屋外拡散による被害拡大の影響、空調停止による化学剤希釈による被害軽減の割合などを算出し、最も減災効果のある選択肢が提示される。もちろん、空調以外の防災設備の運転の相乗効果も考慮し、最適な組み合わせを求める仕組みである。

このようなシナリオが実現するためには、屋内拡散予測システム一層の高度化が求められる。また、屋内拡散予測のみならず、災害時に密接に関連する、屋外拡散予測および避難誘導に関しても高度に連携したシステム化が必要となる。

関連する機関、研究者の協力の下、一刻も早い実現が望まれる。

## 参考文献

- [1] 「海外ドラマ『24 -TWENTY FOUR- シーズン V』 20 世紀フォックス ホームエンタテインメント」  
<[http://video.foxjapan.com/24\\_prev/season5/index.html](http://video.foxjapan.com/24_prev/season5/index.html)>（2010/11/19 アクセス）
- [2] 池田耕一：“室内空気汚染のメカニズム”，鹿島出版会(1999)。

- [3] 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).
- [4] “NBC テロ 対応部隊の装備と戦略”，イカロス出版(2007).
- [5] 最上丈二：“バイオテロと医師たち”，集英社新書(2002).
- [6] 杜 祖健：“生物兵器、テロとその対処法”，じほう (2002).
- [7] 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).
- [8] 米国テンペスト社編、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).
- [9] 生田 哲：“炭疽菌の恐怖”，主婦と生活社(2001).
- [10] 「DEFENDING THE U.S. AIR TRANSPORTATION SYSTEM AGAINST CHEMICAL AND BIOLOGICAL THREATS」  
<[http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=11556&page=R1](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=11556&page=R1)> (2010/11/20 アクセス)
- [11] 「Building Energy Software Tools Directry : CONTAM」  
<[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/software.cfm/ID=77/pagename=alpha\\_list](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=77/pagename=alpha_list)> (2010/11/22 アクセス)
- [12] 「CONTAM Overview」  
<<http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/CONTAM/overview/index.htm>> (2010/11/22 アクセス)
- [13] 「SAFER Hazmat/Homeland Responder」  
<<http://www.safersystemv10.com/responder.php?id=Not%20Available>> (2010/11/22 アクセス)
- [14] 「STIS SAFER システムズ」  
<[http://www.stis.co.jp/01oshirase/02s\\_safer.html](http://www.stis.co.jp/01oshirase/02s_safer.html)> (2010/11/22 アクセス)
- [15] 「化学物質のリスク評価システム Risk Manager,－システムの詳細解説－」,(社)日本化学工業協会(2005)  
<<http://chemrisk.org/pdf/01zentai.pdf>> (2010/11/22 アクセス)
- [16] 「建物内の伝熱・換気解析システム『Visual NETS』－清水建設－」  
<[http://www.shimz.co.jp/tw/tech\\_sheet/rn0164/rn0164.html](http://www.shimz.co.jp/tw/tech_sheet/rn0164/rn0164.html)> (2010/11/22 アクセス)
- [17] 「COMIS Multizone Air Flow Model」  
<<http://www-epb.lbl.gov/comis/>>
- [18] H.E.Feustel,B.V.Smith：“COMIS 3.0 User’s Guide”, IEA Annex 23 (1997).
- [19] F.Engdahl：“Executable examples for COMIS 3.0”, LBNL 021098.
- [20] V.Dorer,A.Haas,W.Keilholz,R.Pelletret,A.Weber：“COMIS 3.1 SIMULATION ENVIRONMENT FOR MULTIZONE AIR FLOW AND POLLUTANT TRANSPORT MODELLING”, 7<sup>th</sup> International IBPSA Conference (2001).
- [21] 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.
- [22] 建築研究所・国土交通省国土技術政策総合研究所:Ventsim Version 3 マニュアル,pp.1～105 (2005).
- [23] 奥村 徹：“緊急招集（スタット・コール）－地下鉄サリン，救急医は見た”，河出書房新社(1999).