

災害リスク評価におけるシミュレーションの役割 －火災、爆発事故事例について(第一報)－

吉岡 逸夫* 富塚 孝之*

Potential of Numerical Simulation as Prediction and Evaluation Method of Disaster Risk -Case Study of Fire, Explosion Accidents (Report 1)-

Itsuo Yoshioka* and Takayuki Tomizuka*

災害リスクはあらゆるところに存在する。災害リスクを軽減するためには、リスクとは何かを認識する必要がある。その原因が自明な場合はそれに対処する方法を探ればよい。一方、潜在的リスクの脅威に対処するために過去の災害事例の分析により教訓を得、さらに、潜在的な災害原因を究明することができれば、それを予測し、コントロールすることができるかもしれない。ここでは、災害リスク評価のうち、火災、爆発事故に焦点をあて、災害原因の究明および予測にシミュレーションが果たす役割について概説する。

本稿では、自然災害を除きたいわゆる建築物の火災および爆発事故の実態について述べる。

Key word:火災、爆発事故、高層ビル火災、煙流動、可燃性物質、ガス爆発、粉じん爆発、原子力施設、火災ハザード解析

1. はじめに

「災」という字は、上が川、下が火であり、自然の中で生活していた古代の人々にとって、洪水や山火事が大きな関心事であったらしい。リスクというものを簡単に表現すると、ある災害の発生頻度とその災害による損害規模の乗算といえる。その発生頻度の高さから、本稿では、火災、特に建物火災や危険物火災に着目した。一方、爆発事故はその損害規模の大きさや、社会に与える負のインパクトの大きさが脅威となる。

ここでは、現代社会の抱える問題として、特に都市における災害としての火災、爆発事故に焦点をあてた。本稿では、まず火災、爆発事故の実態について事例を紹介し、後半では火災、爆発現象について概説するものである。

2. 火災事故

本章では、これまでに国内外で発生した火災事故の事例について紹介する。

日本の公式な統計では、火災は、建物火災、車両火災、船舶火災、航空機火災、林野火災、そのほかの火災の6種類に分類される[1]。一方、平成19年の新潟県中越沖地震を契機として、わが国では原子力施設における火災防護対策の重要性が改めて認識され、関係法令や指針などの見直しが行われている。また、国際的な動向として、火災ハザード解析などの手法を活用した火災防護対策がとられるようになってきており、わが国においても導入に向けた調査・研究が進められている[2]。

このような背景から、本稿では、原子力施設における火災を1つのカテゴリーとして扱っている。

*アドバンスソフト株式会社 第2事業部

2nd Computational Science and Engineering
Group, AdvanceSoft Corporation

2.1. 建物火災

歴史的に見ると、まず市街地大火が頻発していた。次にビル火災による大量死が注目を集めたという事実がある。以下では、日本と海外に分けて建物火災の事例を紹介する。

2.1.1. 日本の火災事例

日本の火災史を見ると、例えば参考文献[1]によると西暦 552 年の大極殿火災に始まり、近年では 1995 年の兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）による広域火災のように甚大な被害をもたらす事例が発生している。

約 260 年続いた江戸時代には、直線距離にして 15 町（1.64km）にわたって焼失した火災が、約 100 回発生していた。つまり、2 年半に 1 度の頻度で大火が発生したことになる[3]。

明治時代になると、石油ランプからの出火、煙突、銭湯からの出火や炊事用かまど、火鉢、消炭

からの出火も多く、生活様式の変化が分かる。

大正期以降、東京や大阪などの大都市ではビルも増え大火は激減したが、老朽木造の密集地が数多く残されていた地方都市では経済の高度成長期まで大火が続いた。

最近の火災の特徴としては、先に述べた 6 種類の分類で考えると、建物からの出火件数が約 60%、車両が 10%強、そのほかが 20%強である[3]。船舶火災は少なく、航空機火災はほとんどない。そのほかの火災は、紙くずや布類が燃えたもので大部分は、ぼや火災である。このことから、一般に火災といえば建物火災を指すといえる。

昭和 30（1955）年以降の火災調査結果に基づき、火災の工学的研究が進展し、消防および建築関係法令の改正が図られてきた。代表的な火災について概要を表 1 に示す。

表 1 わが国における主なビル火災（昭和 30～平成 10 年代）[3]

事業所名	発生日	構造・焼損面積	死者数	備考
東京宝塚劇場	昭和 33 年 12 月 1 日 16 時 09 分	耐火 5/1 3,718m ²	3 人	吹きボヤの火の粉が緞帳などに燃え移って急速に拡大。防火管理者制度を定めるきっかけとなった。
池坊満月城 (神戸市有馬温泉)	昭和 43 年 11 月 2 日 2 時 30 分	耐火一部木造 4/2 6,950/11,258m ²	30 人	旧館木造 2 階サービスルームから出火。区画貫通部埋め戻し不備。防火戸すべて不閉鎖。急傾斜地に相次ぐ増築。
千日ビル（大阪市）	昭和 47 年 5 月 13 日 22 時 30 分ごろ	RC7/1 8,763/25,923m ²	118 人	3 階内装改修者のタバコかマッチがワゴン車の衣類に着火し、煙が瞬時に最上階の 7 階まで達した。複合用途の防火管理強化。
川治プリンスホテル (栃木県藤原町)	昭和 55 年 11 月 20 日 15 時 15 分	4 階建鉄骨造 3582.42m ²	45 人	増改築多い。浴室壁付近で鉄柵溶接火花から壁内延焼。廊下天井から管内へ延焼。シャッター閉鎖なし。屋上避難効奏。適マーク制度の契機。
ホテルニュージャパン (東京都千代田区)	昭和 57 年 2 月 8 日 3 時 24 分	10 階建鉄骨鉄筋 コンクリート造 4,186/46,697m ²	33 人	たばこ。三叉廊下で避難に支障。外国人多く避難指示不徹底。スプリンクラー・防火区画不備。
明星 56 ビル (東京都新宿区歌舞伎町)	平成 13 年 9 月 1 日 0 時 56 分ごろ	鉄骨鉄筋コンクリート造 83.1×2/500m ²	44 人	放火の疑い。階段が 1 つ。防火戸閉鎖障害あり。階段に多数の物品存置。防火管理不徹底。

2.1.2. 海外の火災事例

海外の火災史に目を向けると、紀元前 480 年のギリシャ（アテネ）におけるペルシャ軍侵入時の放火に始まり、19 世紀以降では、1812 年のロシア（モスクワ）において、市民がナポレオン軍を追い払うため市中に火を放った大火、1871 年のアメリカ（シカゴ）のシカゴ大火などがあげられる。さらに、近代において死者数が多い火災としては、1971 年の韓国（ソウル）における大然閣ホテル火災、1994 年の中国（遼寧省阜新市）のダンスホールの火災、同年、中国（新疆ウイグル自治区）の映画館の火災、1997 年のサウジアラビア（メッカ）の巡礼者用テント火災、2000 年の中国（洛陽市）の商業ビル（ディスコ）の火災などがある。

特殊な例としては、2001 年のニューヨーク市世界貿易センター（WTC）の炎上火災などの例もある。また、建物火災とはいえないが 2004 年のスペイン（マドリード）の地下鉄火災、2005 年のイギリス（ロンドン）の地下鉄の爆発火災などのテロによる事例も見られる。

以下では、詳細が判明しているブラジル、米国およびカナダにおける高層ビル火災の事例について紹介する。

(1) アンドラウスビル火災[4]

この建物は、ブラジルのサンパウロ市にある、高さ 100m、31 階建の高層ビルである。1972 年 2 月 24 日の午後 4 時ごろ、4 階のデパート部分から出火し、またたく間に上階に延焼、30 分後には最上階まで炎上した。

延床面積 28,500m²、基準階面積 930m²、RC 造、ファサード（建物の正面）は開放可能な全面スチールサッシで、木製の仮枠が天井に残っており、火災荷重を大きくしたといわれている。

8 階以上のオフィス部分には、階段が 1 カ所しかなく、しかもその幅員は約 1m という狭いものだった。

出火当日は、買物客を含めてビル内には 1,000 人から 1,500 人の人がいたと推定される。午後 4 時ごろ、店員が 4 階外部で何かが燃えているのを

見つけ、消火しようと窓を開けたため、そこから炎が室内に入り天井に燃え移った。4 時 10 分には 13 階まで燃え上がり、さらに各所におかれていた LP ガスのボンベが次々に爆発した。

人々の救出は、まず隣のビルから梯子を渡して行われたが、やがて火勢のため梯子が熱くなり中止された。その後、ヘリコプターによる救出活動が行われた。最終的に、男 12 人、女 4 人の合計 16 人が死亡した。

表 2 アンドラウスビル火災における死亡者[4]

死亡状況	人数
焼死	9 人
飛び降り	5 人
梯子の上で死亡（心臓病）	1 人
病院で死亡	1 人
合 計	16 人

火災の規模が大きくて建物人口も多く、防災設備が貧弱だったにもかかわらず、人的被害が少なかった理由として、次の点が考えられる。

- ① 7.6m/s という強風により、ビル全体が 1 本の火柱に見えるほど激しく燃えたものの、たまたま階段室が風上側だったため、その中に閉じ込められた大勢の人々は、火熱と煙の被害を免れることができた。
- ② ビルの屋上がヘリポートとして計画されていたため、ヘリコプターによる救出活動が可能だった。
- ③ 隣のビルまでの間隔が約 7m しかなかったため、その間に梯子をかけることができた。

(2) ジョエルマビル火災[4]

アンドラウスビルの火災があったサンパウロで、翌年の 1973 年に再び高層オフィスのビル火災が発生した。

このビルは新築で 25 階建、オフィス部の基準階面積は 811m²でアンドラウスビルよりひとまわり小さいビルである。8 時 50 分、12 階の部屋のウインド型のエアコンから出火した（後に、配線に問題があることが分かった）。

この火災による死者数は179人に上った(出火時756人がビル内にいた)。これは、アンドラウスビルのような風向きや屋上のヘリポートといった幸運な点が全くなかったことにもよるが、避難階段がなく、内装も燃えやすいというアンドラウスビルと同じ欠陥があったためといえる。

179人の死亡者の内訳は、139人が焼死または窒息死、このうち90人は屋根の上で、49人は室内で死亡、40人が飛び降りて死亡した。

上階にいて助かった422人の大部分はエレベーターで避難したものである。エレベーターによる避難がうまくいったのは、火災の初期に電源が生きていたこととエレベーターに運転者がついており、必要な階だけに止まり、効率よく人を運べたことによる。

また、次に紹介する北米における火災事例は、高層ビルの建築的な特徴を明瞭に示したものである。

(3) ニューヨークプラザ火災 (ニューヨーク、ニューヨーク州、1970年8月) [5]

午後5時50分、50階建てオフィスビルの33階の天井にある開口から煙が出ているのを警備員が発見した。39階の居住者に火事を知らせるため、2人の警備員と電話会社の従業員がエレベーターに乗った。エレベーターは上昇したものの、33階で停止した。ドアが開いて煙と火が侵入し、エレベーターはその階から動かなくなった。結果的に2人の警備員が死亡し、電話会社の従業員は生き延びた。他の居住者は通報により避難した。

濃い煙が建物の多くの階で確認された。消防署は警報後3分以内に対応したが、33階と34階は非常に多量の煙が充満し高温だったので、消防士は短時間しか活動できなかった。火災がコントロールできるようになるまでに5時間かかった。

火災発見後30分で、火災は33階の南セクションのすべてを巻き込み、既にその階の西セクションに広まっていた。給気ファンは火災の初期段階で停止されていたが、還気ファンはしばらくの間動き続けた。還気ファンによってセンターコアへ

向かう誘引気流で、火災は還気シャフトの方へ拡大した。火災は、電気・電話の設備室、空調のフレキシブルダクト回りの上階へ通ずる空間、メールシュート、その階の電気接続部を経て広がっていった。また、ダクト外部の発泡プラスチック断熱材の焼失で生じた空調ダクト回りのスペースから、火災は35階に広がった。この断熱材は、天井スペースへと火災を拡大する原因になった。

(4) ハイアットリージェンシー・オヘアホテル火災 (ロズモント、イリノイ州、1973年4月) [5]

10階建てのこのホテルは、アトリウムを取り巻く外壁に沿って客室が並んでいた。部屋の外側にはバルコニーがあり、階段を持つ円形のタワーがアトリウムの四隅にある。エレベーターはアトリウムの中心にあり、廊下とエレベーターは歩道橋で結ばれている。アトリウムには煙感知システムによって作動する排煙システムが設備されていたが、スイッチが切られていたため作動しなかった。

1,000人におよぶ客に死者は出なかった。この火災は、アトリウム内や、それと連なった階空間へ速やかに煙が充満することを示した事例となった。

(5) MGM グランドホテル火災 (ラスベガス、ネバダ州、1980年1月) [5]

このホテルには客室が26階分あり、1階のコンプレックス(複合建築)には、カジノ、映画館、会議施設があった。3つのウイングを持つ客室タワーは中廊下式プランで、それぞれのウイングに2つの階段があった。機械換気された附室を持つ加圧階段(防煙タワー)がウイングの端にあり、エレベーターロビーとウイング端の間には内部階段がある。居住者は、すべての階から階段に入ることができるが、避難階以外では、階への再侵入を妨げるようなドアがついていた。階段に入った居住者は1階まで降りた後、独立した通路で建物の外部に出る計画であった。これらの階段は屋上へも続いているが、屋上への入口は通常カギがかかっていた。

屋上にある空調機で、各客室の廊下とエレベーターロビーへ空気が供給されていた。客室の空気は、部屋のドアの上に設置されたグリルから、廊下を介して供給されていた。このグリルは、溶融式リンクで作動する防火ダンパーを備えていた。空気は、客室のファンコイルユニットにつながる隠ぺいされたダクトにより廊下から客室へと流れる。また、客室のバスルームにあるトイレの排気ダクトや電気配線用のシャフトが数本あった。

火災は1階のレストランが閉店した後で発生した。拡声装置でカジノからの避難誘導が行われたこと以外、警報装置は誰も作動させなかった。この火災の被害は、死者 85 人、負傷者 600 人に上った。カジノ階の 18 人が、強度の火傷と煙の吸入が原因で死亡した。ホテル棟では 16 階から 26 階の間で 61 人の死者が出た。3 人が屋上で死亡し、2 人が病院到着後に、1 人が数週間後に亡くなった。

(6) ファーストカナディアンプレース火災（トロント、オンタリオ州、1983 年 6 月）[5]

この建物は 72 階建てのオフィスビルで、シャフトへの煙流動を防止するために、コンピューター制御された給気ファンとダンパーによって、階段とエレベーターシャフトが加圧されている。建物のセンターコアには耐火壁で区画された 4 つの階段がある。セキュリティのため、階段からは 5 階おきにしか入れない。建物にはすべてスプリンクラーが設置されていた。

34 階の受付係が、サービスエレベーターロビーのドアの下から煙が出ているのに気付いた。まもなくサービスエレベーターロビーでスプリンクラーが始動する。

サービスエレベーターロビーの中のスプリンクラーが作動したとき、中央監視センターの火災報知器コントロールパネルに警報が出た。火災を発見した受付係は、監視センターにも電話をして火災の場所を確かめた。

火災は 1 個のスプリンクラーでコントロールされた。火災階と直上、直下の階は避難を命じられた。他の階の避難も火災階の 5 階上と直下階から

はじめて、20 階から 71 階まで段階的に行われた。避難計画は、非火災階のテナントが煙の臭いを感じた場合に、手動で警報を発するという想定で決定された。

最初のアラームが鳴ってから、51 階分の居住者（約 10,000 人）が 1 階まで避難するのに約 80 分を要した。

(7) カリフォルニア・ファースト・インターステイト銀行火災（ロサンゼルス、カリフォルニア州、1988 年 5 月）[5]

カリフォルニア・ファースト・インターステイト銀行は、1973 年に建てられた 62 階建てのセンターコア型のオフィスビルである。高層部のセンターコアには 4 つの階段があり、その 1 つは耐煙性階段だった。スプリンクラー装置は 90 パーセント完成していた。火災は 12 階にあるオープンプランの事務室で起きた。火元の区画には、証券取引員が使うモジュール式のオフィス家具や、多くのパーソナル・コンピューターとモニタがあった。火災は建物の外壁と床板の端部が接するあたりで 12 階から上階へ延焼した。火災は階当たり約 45 分の速さで進行し、各階では約 90 分間激しく燃え、3 時間半の消火活動の末、16 階でやっと鎮火した。スプリンクラー装置は稼働させられなかった。

最初の警報は 12 階の煙感知器で発報したが、警備員によってリセットされた。2 分後、さらに 3 つの感知器が 12 階で作動したが、またリセットされた。その 2 分後に 4 つの感知器が同じ 12 階で作動したが、再びリセットされた。最初の感知器が作動してから 6 分後、12 階から 30 階にある多数の感知器が作動したので、従業員の 1 人が火災を確認しに 12 階へ行くよう指示された。彼は、サービスエレベーターのドアが火災階で開いたときに死亡している。

この火災は、スプリンクラー設備も適切な区画もなければ、近代的な高層建築であっても鉛直・水平方向の火災の進展が速いことを示した事例である。

2.1.3. 建物火災における煙の影響

火災が建物内の居室で発生し成長する段階では、火災室の上部に高温層が形成され、下部の空気層と2層に分かれる。この高温層は、可燃物の燃焼により生じた煙を含むため、一般に煙層と呼ばれる。煙層の形成・降下、天井を流れる煙、堅穴を上昇する煙など、火災時の煙の動きを予測し制御（防煙、排煙）することができれば、建物内の人々に安全な避難経路や避難拠点を提供するという観点で有益である。このことから、以下では火災時の煙流動に着目し、その影響について述べる。また、建物内火災における煙の流動性状については、そのシミュレーションモデルを含め第二報で紹介する。

わが国の火災死者数の統計[6]から、放火自殺者を除くその主な死因は、一酸化炭素中毒・窒息や火傷である。そのうち、一酸化炭素中毒・窒息は、火災時に発生する煙の吸引によるところが大きい。近代建築では、従来の不燃材料に代わって、燃焼時に濃い煙を生成する材料が用いられるようになった。火災時に発生する煙は、流動し汚損しながら見通し距離の低下をもたらす。避難にかなりの時間が必要となる建物では、煙は特に危険である。多くの場合、高層建築物が煙に汚染される時間は避難に比べて短く、その危険性は建物の高さが増加するとともに増す。

煙は、火災で発生した熱に起因する浮力のために上昇する。煙が階段室やエレベーターシャフトなどの堅穴空間に流入すれば急速に上方に伝播することになる。これが煙突効果と呼ばれる現象である。過去に多くの死者を出した火災事例調査によれば、この煙突効果により被害が拡大したケースが多く見られる。わが国における代表的な事例は、1972年（昭和47年）に発生した大阪市の千日ビル火災である。

海外においては、2.1.2(5)で紹介した26階建てのMGM グランドホテルの火災があげられる。参考文献[5]から、煙流動に関する記述を以下に引用する。

煙は出火したカジノから高層のホテル客室階

へ広がった。カジノの階を除けば、犠牲者はすべて15階以上で発生し、その多くが中央エレベーターの近くで発見された。これは、階段や他のシャフト、そして主としてエレベーターシャフトによって、多量の煙が上の階に移動したことを示している。煙はHVAC（暖房、換気、空調）システムによって高層タワー全体に拡散したが、煙濃度は、高層階で高かった。

そのほかに、煙流動の観点で特徴的な事例として、近代的な高層ビルにおけるオープンフロア型オフィスの火災例であるニューヨークプラザ火災、煙制御設計基準に基づいて設計された高層オフィスビルにおける初めての火災であるファーストカナディアンプレース火災などがある。このトロントの火災では、煙制御設備が設計通りに機能している。

2.2. 原子力施設における火災

2章の冒頭で述べたように、平成19年の新潟県中越沖地震以降、柏崎刈羽原子力発電所において、被害は大きくないものの12件の火災が発生している[2]。この事実を受けて、原子力施設における火災防護対策の重要性が再認識されている。わが国において、その他の原子力施設で発生した火災事故を表3に示す。

表 3 わが国における原子力施設の火災事故[7]

施設・プラント名	発生日	工程装置名	事象タイトル	INES レベル*
日本原子力研究所／東海研究所	1958/9/16	原研冶金特研	ウラン切削屑の火災	—
動燃／東海事業所（再処理施設:210t/y）	1997/3/11	アスファルト固化処理施設	アスファルト固化処理施設における火災・爆発	3
日本原子力研究所／東海研究所	1997/11/20	ウラン濃縮研究棟	ウラン濃縮研究棟のウラン火災事故	—
高速実験炉（常陽）	2001/10/31	メンテナンス建屋	高速実験炉「常陽」における火災について	評価対象外
動燃／東海事業所（加工施設）	2003/4/21	プルトニウム燃料第三開発室解体設備	グローブボックス内排気用プレフィルタから発煙	—
日本原子力研究開発機構／東海研究開発センター	2006/2/13	焼却・溶融設備	日本原子力研究開発機構東海研究開発センター原子力科学研究所 減容処理棟における火災について	—
日本原子力研究開発機構／東海研究開発センター	2006/12/5	原子力科学研究所/減容処理棟	日本原子力研究開発機構東海研究開発センター原子力科学研究所 減容処理棟における火災（ブレーカーの損傷）について	—
高速実験炉（常陽）	2010/1/22	補機冷却系機器室	高速実験炉「常陽」における火災について	—
日本原燃（株）／再処理事業所（六ヶ所村）	2010/6/21	バイオアッセイ分析室	日本原燃株式会社再処理事業所出入管理建屋のバイオアッセイ分析室における火災について	—
日本原子力研究開発機構／東海研究開発センター	2010/7/23	プルトニウム燃料第一開発室	独立行政法人日本原子力研究開発機構プルトニウム燃料第一開発室における火災について	—
日本原子力研究開発機構／東海研究開発センター	2011/2/3	プルトニウム燃料第二開発室	独立行政法人日本原子力研究開発機構プルトニウム燃料第二開発室における火災について	—

* : INES（International Nuclear Event Scale、国際原子力発電所事故・故障国際評価尺度）評価レベル

上表において、INES レベル 3 と評価された動燃（現 日本原子力研究開発機構）東海事業所のアスファルト固化施設における火災・爆発事故について、概要を以下に記す[8]。

1997 年 3 月 11 日午前 10 時ごろ起きた火災の後、同日夜 8 時ごろに爆発が発生した。事故による負傷者はなかったが、作業員が若干の内部被ばくをし、環境へも若干の放射性物質が放出された。事故の原因は、固化体内部で微弱な発熱を伴う遅

い化学反応が進行し、固化体の温度が上昇し、反応が急速に進み火災に至ったこと、その消火が不十分であったため固化体内部での反応が継続し、発生した可燃性物質が爆発したものと想定されている。

一方、海外に目を向けると、米国の原子力発電所における運転経験データによれば、タービン建屋での火災発生件数が比較的多い（表 4）。タービン関係の火災事故では、タービンの潤滑油や冷

却用水素などの爆発を伴ったり、タービンブレードが破損して飛来物となり建屋内設備の損傷を招いた事例もある。例えば、1989年のスペイン・バンデロス発電所1号機で発生した火災では、発電機、主復水器、ケーブルなどの損傷を引き起こし、また、1993年のインド・ナローラ発電所1号機の火災では、電力ケーブルが燃え約17時間にわたって所内の全電源が喪失した。1991年の米国セーラム発電所2号機ならびに1993年の米国エンリコフェルミ発電所2号機で発生した事例では、破損したタービンブレードが飛来物となっ

てケーシングを突き破るという事態を招いた。

そのほか、再処理施設においても数例の火災事故が発生している。1973年の英国ウインズケール（セラフィールド）再処理施設における抽出工程溶媒供給器の火災、1980年の仏国ラアーク再処理施設において中間変圧所での短絡による停電で発生したケーブル火災、1981年のベルギーユーロケミック・アスファルト固化処理施設におけるアスファルト固化体の火災などが大きな事故といえる[7][8]。

表 4 海外における原子力施設のタービン火災事故[8]

発電所	発生日	国名	事故の概要
バンデロス1号機	1989年10月19日	スペイン	80%出力運転中、タービンが激しい振動によりトリップ。発電機から漏れ出ていた水素が燃焼し潤滑油に引火して火災発生。約6時間30分後に鎮火。発電機、復水器およびケーブルなどが損傷。循環水系配管の損傷により主冷却ポンプ区画が浸水。ケーブル焼損により炉心冷却機能が低下。火災後再起動することなく廃炉。
ピッカリング2号機	1991年9月	カナダ	発電機冷却用水素の漏えいによりタービン火災発生。煙検知器と火災検知器が素早く応答。消防隊により被害を最小限に食い止める。
チェルノブイリ2号機	1991年10月11日	ウクライナ	70%出力運転中、遮断器閉によりタービン発電機がモーター化。ローターおよび巻線の過熱・破損。ベアリングの破損により潤滑油および水素が漏えい。電気火花が引火し火災発生。約3時間20分で鎮火。タービン建屋の屋根の一部の崩落。これにより補助給水ポンプ全基が使用不能。
セーラム2号機	1991年11月9日	米国	定格出力運転中、タービン制御系故障によりタービンがオーバースピード。これによるタービンの振動で発電機の水素冷却系シールが破損。水素が漏えいし火災発生。15分で消火。低圧タービンの翼が破損しケーシングを貫通。タービン、発電機および復水器の著しい損傷。6カ月停止。
ナローラ1号機	1993年3月31日	インド	80%出力運転中、タービンの振動により発電機冷却用水素が漏えいし燃焼。ケーブルと潤滑油に引火しタービン建屋の火災。数多くのケーブルの焼損により所内電源が喪失し、崩壊熱除去機能が低下。火災は約2時間で鎮静化。
ザボロジェ5号機	1993年5月21日	ウクライナ	燃料取替のための停止中、発電機の保守を行っていた作業員のミスにより水素が漏えいし爆発・火災。火傷により作業員1名が死亡、もう1名が重傷。
エンリコフェルミ2号機	1993年12月25日	米国	93%出力運転中、発電機から漏えいした冷却用水素が燃焼し火災が発生。発電機と励磁機が焼損。低圧タービンの翼が破損しケーシングを貫通。補給水および機器冷却系配管が破損。復水器の細管が損傷し大量の水が漏えい。タービン建屋が浸水。

3. 爆発事故

本章では、これまでに国内外で発生した爆発事故の事例について紹介する。

3.1. 産業施設における爆発

一般的に、可燃性のガス、蒸気、粉じんによる爆発は、圧力の発生を伴った急速な燃焼といえる。本節では、爆発事故とあわせて火災についての事例を紹介する。

1980年代以降、化学産業では技術の高度化・複雑化に伴い、さまざまな化学物質が過酷な条件下で取り扱われるようになった。その結果、化学反応の熱的な暴走や不安定物質の生成による反応暴走による事故が増加した。その後、これらはプロセス安全対策技術の進歩および危険予測システムの開発などにより、化学物質を取り扱う施設の安全性は高くなってきたと考えられてきた。しかし、先進工業国においては重大な化学事故が未だに増加している。労働災害の統計から、死傷災害（休業4日以上）につながった火災および爆発災害の件数の年度ごとの推移を図示したものが図1である。

産業事故の中でも火災・爆発の原因として可燃性気体および液体によるものが1950年代から発

生していた。多くの安全対策が施されて一時期減少傾向にあったが、技術の進歩に伴うシステムの複雑化や扱う化学物質の多様性により、近年また多発してきている。また、可燃性気体および液体については、ガソリンや軽油など比較的身近に利用されているということからも、一般市民の周辺でも発生することが多い。

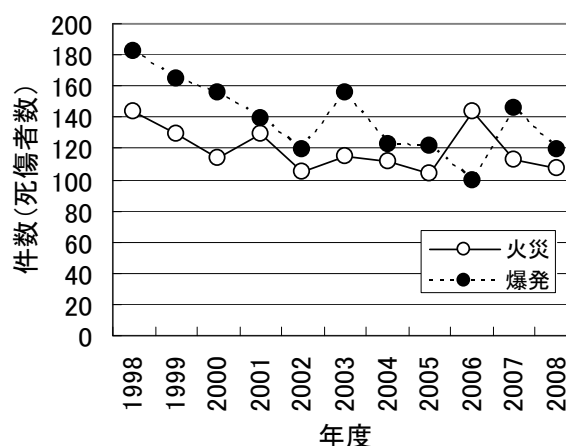


図1 火災および爆発が原因の労働災害件数の推移[9]

表5には可燃性気体および液体による最近の事故事例を示した。

表5 可燃性気体および液体による火災・爆発事故[10]

年/月	場所	事故名称	概要
2011/3	千葉	LNG タンク爆発火災	東日本震災直後に製油所のLPGタンクから漏えい火災でタンク17基を延焼した。水圧テストの水貼り中だったこと、緊急遮断弁が開放されていたことなどが原因とされた。6名が負傷し、市民千人が避難した。
2010/7	静岡	造船所で溶接中の爆発	溶接場所の近傍に塗装直後のタンクがあり、溶剤が気化したものと推定された。爆発で4人が負傷した。
2007/12	千葉	エチレンプラント工事中的事故	保守工事でフランジ部に挿入していた仕切板を取り出し中にクエンチオイル（急冷油）が流出引火して火災となった。安全文化に関する指摘がなされたが、その後類似箇所で漏えい火災が発生し4人が死亡した。
2007/8	愛知	造船所の塗装中に火災	塗装工程で塗装用剤の蒸気が充満して爆発し、2人が死亡、4人が重軽傷を負った。作業員から「いつもよりガス臭い」との苦情が出たが、塗装会社の担当者は対応しなかった。
2006/1	愛媛	原油タンク清掃中の火災	原油タンクのスラッジ排出に軽油を用いたため、タンク内で蒸気濃度が燃焼限界濃度となり、何らかの原因で着火し火災となり、作業中の5名死亡、2人が負傷した。

ガソリンスタンドにおける荷降ろし時に発生した爆発事故事例について紹介する[11]。

平成 21 年 2 月および 4 月に、都内の給油取扱所においてタンクローリーから専用タンクにガソリンの荷降ろしを行った際、屋根上の通気管先端から流出した可燃性蒸気が建物内に流入し、コンプレッサーの火花により引火、爆発した。通気管は専用タンクとつながっており、荷降ろしの際、タンク内部の気相は通気管から押し出される形となり、大半は回収装置によりタンクローリーに行くが、一部は外気に放出される。そのため、通気管先端は規制である高さ以上に配置することが義務付けられている。事故が起きた給油所では通気管先端が規制に則った高さにはあったが、建物の屋根付近に設置されていたため、空気より重い可燃性蒸気を含んだ気体は屋根と雨どいを伝い、建物内に侵入してしまったと考えられている。

このプロセスについては数値流体シミュレーションを用いた検討も行われた。

2011 年以降、大規模石油化学事業所での化学反応による事故が連続している。米国政府の CSB (Chemical Safety and Hazard Investigation) では重大化学事故の発生工程と主要な原因物質を分類した。それによると反応器での事故は全体での 1/4 で、反応を含めたプロセスが約半分を占め、残りの大半は貯蔵、輸送による。

また、以前は炭鉱における粉じん爆発が多く発

生していたが、米国では比較的湿度が低い特徴から、穀物粉じんによる爆発被害が少なくなかった。今日では、技術の進歩に伴い微小な粒子を取り扱う機会も多くなったことから、有機分体や金属粉による粉じん爆発も多くなってきた。中でもアルミニウムの場合は水や酸、アルカリなどが接触すると大きな発熱が生じ、水素が発生する場合がある。この発熱と水素の発生が粉じん爆発の着火原因となることもある。

3.2. 原子力施設における爆発

原子力施設における爆発事故は、放射性物質の拡散のリスクを考慮すると、一般の産業施設とは比較にならないほど影響が大きい。本稿では、火災と同様、他の施設と区別して述べることにする。

わが国における、原子力施設における爆発事故を表 6 に示す。表中の最後の 3 件のいわゆる福島原発事故は、まだ収束に至っていない。

一方、海外における爆発事故の事例を表 7 に示す。中でも、1986 年に起きた旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所における事故は INES レベル 7 の重大な事故である。そのほかの事例としては、再処理施設における爆発事故が多いことが分かる。表 7 以外では、2011 年 9 月に仏国マルクルの核廃棄物処理施設において爆発事故があり、1 人が死亡、4 人が負傷した[12][13]。

表 6 わが国における原子力施設の爆発事故[7]

施設・プラント名	発生日	工程装置名	事象タイトル	INES レベル*
日本原子力研究所 ／東海研究所	1963/2/21	原研再処理試験室	再処理試験室の爆発事故	—
日本原子力研究所 ／東海研究所	1979/4/3	燃焼率、測定施設	実験装置内で小爆発	—
動燃／東海事業所 (再処理施設:210t/y)	1997/3/11	アスファルト固化処理施設	アスファルト固化処理施設における火災・爆発	3
日本原子力研究所 ／東海研究所	1997/11/20	ウラン濃縮研究棟原子蒸気実験室	ウラン保管用金属缶(二重缶)の蓋が飛び、カートンボックスなどが燃焼	1
動燃／大洗工学センター(使用施設)	1998/12/25	照射装置組立検査施設	ナトリウム洗浄作業で顔に負傷	0-
核燃料サイクル開発機構/人形峠環境技術センター	2003/1/21	濃縮工学施設化学分析室	ウランを含む硝酸溶液を入れたガラス瓶が破裂し作業員が負傷	0
東京電力/福島第一原子力発電所	2011/3/12	1号機原子炉建屋	福島第一原発1号機原子炉建屋における水素爆発	7
東京電力/福島第一原子力発電所	2011/3/14	3号機原子炉建屋	福島第一原発3号機原子炉建屋における水素爆発	7
東京電力/福島第一原子力発電所	2011/3/15	4号機原子炉建屋	福島第一原発4号機原子炉建屋における水素爆発	7

* : INES (International Nuclear Event Scale、国際原子力発電所事故・故障国際評価尺度) 評価レベル

表 7 海外における原子力施設の爆発事故[8]

国名/施設名	発生日	事故の種類	原因
米国/サバンナリバー	1953	抽出工程蒸発缶の爆発	TBP-硝酸ウラン錯体の急激な熱分解反応
旧ソ連/キシュテム	1957	高レベル廃液貯槽の爆発	冷却系の故障による有機混合物(酢酸塩など)の爆発
米国/サバンナリバー	1975	転換工程脱硝器の爆発	TBP-硝酸ウラン錯体の急激な熱分解反応
ウクライナ/チェルノブイリ	1986	黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉(RBMK)の炉心溶融、爆発	試験中に原子炉が不安定になり、制御棒を挿入したところ急激な過出力が発生
ロシア/トムスク	1993	抽出工程調整貯槽の爆発	TBP-硝酸ウラン錯体の急激な熱分解反応
米国/ハンフォード・プルトニウム回収施設	1997	プルトニウム回収施設の試薬貯槽の爆発	硝酸ヒドロキシルアミン(HAN)の急激な熱分解反応

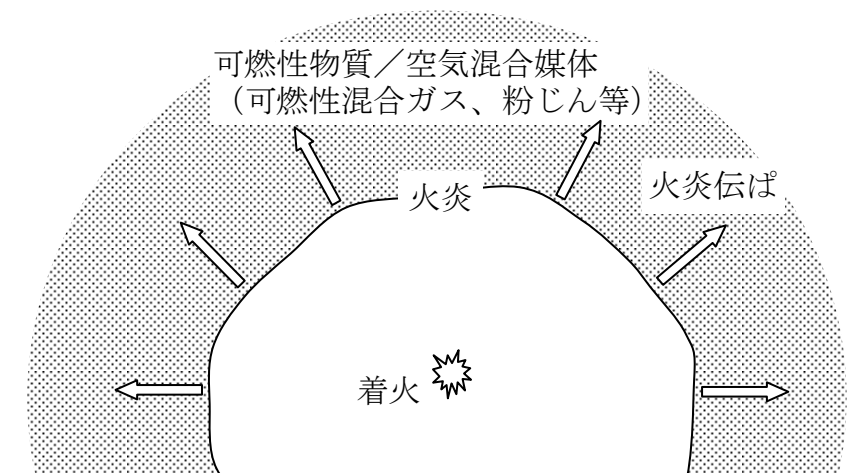
4. 火災、爆発現象における燃焼形態

火災、爆発現象を対象にした数値シミュレーションを実施するためには、その現象における燃焼形態を分類する必要がある。燃焼の形態には大きく分けて次の2種類がある（図2）。

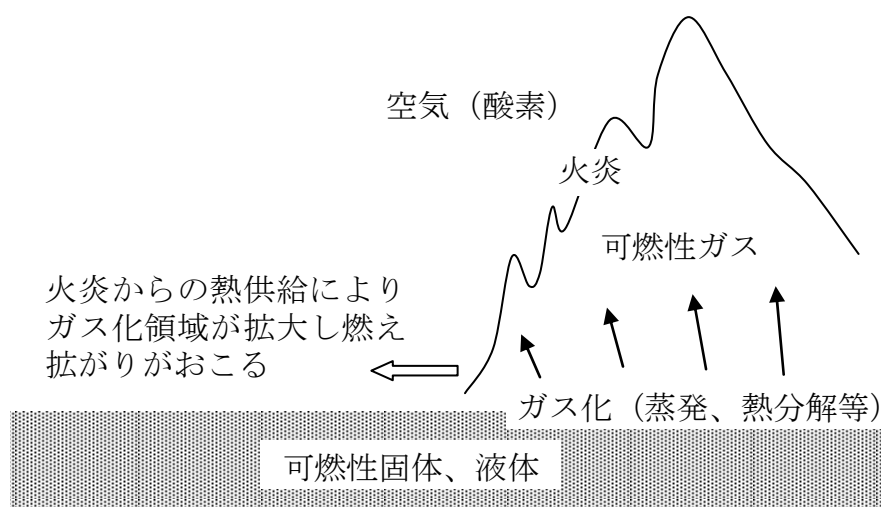
1つは拡散燃焼と呼ばれ、可燃性ガスのかたまりとその周囲の空気（空気中の酸素が酸化剤となる）の境界に火炎が形成される形態である。可燃性物質が固体や液体の場合は、熱分解や蒸発により固体表面や液体表面に可燃性蒸気が発生し、その外側にある空気との境界領域で火炎が形成される。この燃焼では火炎が未燃焼媒質中へ伝ばすることはなく、蒸発、熱分解の領域が広がることにより燃焼範囲が広がっていく。火災現象は主に

この形態である。可燃性物質が供給される条件下では長時間燃え続けることができる。

もう1つの形態は予混合燃焼と呼ばれ、可燃性物質が気体で空気（または酸素）とあらかじめ混合している状態で燃焼する。可燃性物質が微粒化された液体や固体で、空気中に分散混合した系では噴霧燃焼や粉じん燃焼となる。火炎は未燃焼の可燃性混合媒体中を伝ばし、その速度は上昇する傾向にある。ガス爆発はこの形態であり、火炎が未燃焼の可燃性混合媒体を伝ばし終わると燃焼は終了するので、現象としては比較的短時間である。



A 予め混合された可燃性物質と酸化剤が燃焼する形態



B 可燃性物質と酸化剤の境界で燃焼が起こる形態

図2 燃焼の2つの形態[9]

表 8 種々の可燃性物質による火災・爆発災害[9]

可燃性物質	燃焼の形態	災害の状況
ガス	A ガスが空気と混合した後に燃焼	爆発(ガス爆発)
	B ガスと空気の境界で燃焼	火災(ガス火災)
液体	A 蒸気が空気と混合した後に燃焼	爆発(ガス爆発)
	A 微粒化して空気中に分散して燃焼	爆発(噴霧爆発)
	B 液面上の蒸気と空気の境界で燃焼	火災(プール火災)
固体	A 微粒化して空気中に分散して燃焼	爆発(粉じん爆発)
	B 固体上の気化物と空気の境界で燃焼	火災

燃焼形態の違いは、被害の状態や度合いに大きく影響し、大型石油タンクなどの火災では長時間燃え続け、爆発災害は圧力波による破壊度合いが大きい。表 8 は可燃性物質の違いと燃焼形態の違いから起こる災害の状況を整理したものである。

燃焼を数値シミュレーションにより再現することを考えると、拡散燃焼と予混合燃焼で数値シミュレーションモデルが異なることが多い。さらには予混合燃焼の中でも火炎伝ば速度の違いにより爆轟現象と爆燃現象というように物理現象としては異なってくるため、数値モデルもこれらに適したモデルを検討する必要がある。

5. おわりに

本稿では、火災、爆発事故の事例について紹介し、また、火災、爆発現象の数値シミュレーションに必要な燃焼形態の分類について概説した。次号では第二報として、火災、爆発に対する安全対策の現状、安全工学分野におけるシミュレーション技術およびアドバンスソフトにおける災害リスク評価への取り組みについて紹介する予定である。

参考文献

- [1] 日本火災学会編: “火災と建築”, 共立出版, 2002
- [2] 経済産業省 原子力安全・保安院 原子力防災課火災対策室: “原子力施設における火災防護について ～原子力安全・保安院の取り組み～”, 2010
- [3] 日本火災学会編: “初めて学ぶ建物と火災”,

共立出版, 2008

- [4] 岡田光正: “火災安全学入門ービル・ホテル・デパートの事例から学ぶー”, 学芸出版社, 1990
- [5] G.T.Tamura 著, 吉田治典 訳: “高層ビル火災の排煙と制御”, 鹿島出版会, 2000
- [6] 総務省消防庁編: “消防白書”, 2012
- [7] 「IINET システム(Incident Information Network system)」, (公財) 原子力安全技術センター, <<http://www.n-iinet.ne.jp/>> (2013/4/15 アクセス)
- [8] 「原子力百科事典 ATOMICA」, (一財) 高度情報科学技術研究機構, <<http://www.rist.or.jp/atomica/index.html>> (2013/4/15 アクセス)
- [9] 土橋 律: “火災・爆発現象とその危険性評価・防止対策”, バルブ技法, 第 64 号, Vol.25, No.1
- [10] 若倉 正英: “最近の化学事故と安全文化”, Safety & Tomorrow, No.147, 2013
- [11] 東京消防庁予防部危険物課: “給油取扱所におけるガソリンの荷降ろし時に発生した爆発火災”, Safety & Tomorrow, No.131, 2010
- [12] 「Le Monde」 <http://www.lemonde.fr/planete/article/2011/09/13/pas-de-contamination-de-l'environnement-apres-l'accident-de-marcoule_1571811_3244.html> (2013/4/15 アクセス)
- [13] 「BBC NEWS EUROPE」 <<http://www.bbc.co.uk/news/world-europe-14883521>> (2013/4/15 アクセス)