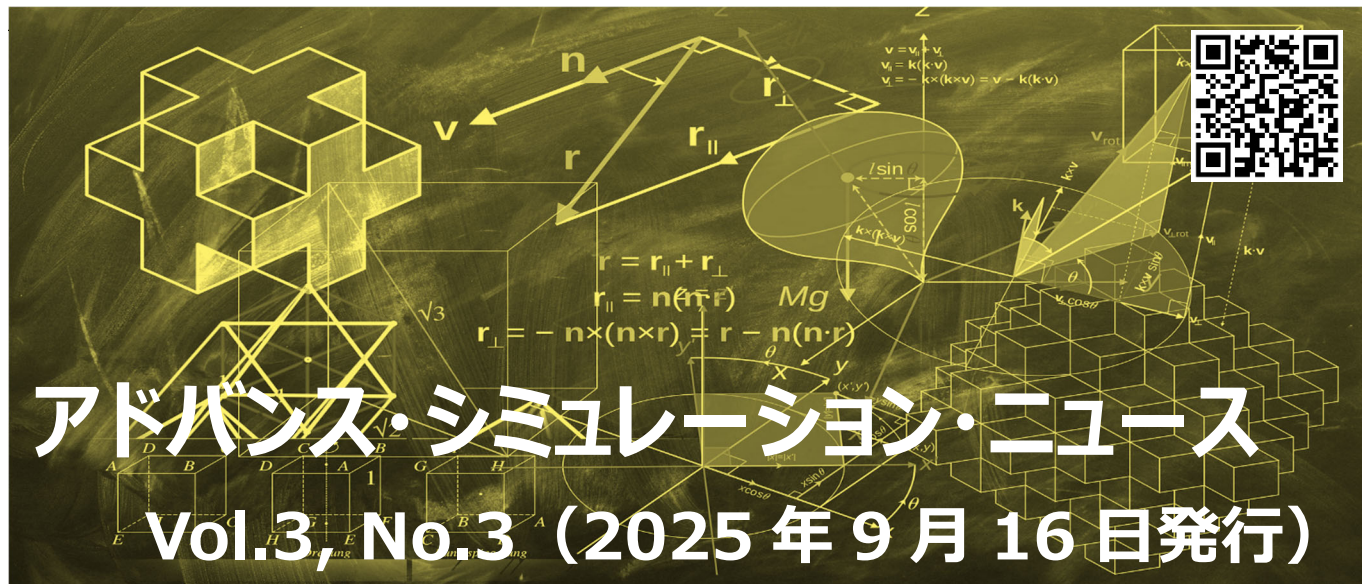




第3回アドバンス・シミュレーション・セミナー2025 開催報告 東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 土橋 律 様

「火災・爆発災害のリスク低減への燃焼研究の応用」

アドバンス・シミュレーション・ニュースは、アドバンスソフト株式会社が2021年度から、我が国における計算科学技術の振興を目的として、幅広い分野の最先端研究を対象として開催している「アドバンス・シミュレーション・セミナー」の開催報告と今後の開催予定をご案内するサービスです。

本セミナーで紹介される多種多様な最先端研究をきっかけに、企業の研究開発を担う技術者の方が新たな視点を持つこと、最先端研究を産業に応用する起点となること、長期的には計算科学シミュレーション分野の裾野が広がること等を期待しています。

開催概要

- 日時：2025年7月18日（金）14:00～15:30
- 開催方法：オンラインセミナー（Zoomにて開催）
- 主催：アドバンスソフト株式会社 出版事業部
- 講演概要

火災や爆発災害の発生防止や被害軽減をおこなうためには、現象を科学的に的確に把握する必要がある。災害の拡大過程は火災と爆発では異なっており、火災では比較的低速の可燃性固体に沿った火災の燃え広がり現象、ガス爆発・粉じん爆発では高速の可燃性混合ガス・可燃性浮遊粉じん雲中の火炎伝ば現象が重要な過程となる。

本講演では、これらの現象に関する燃焼学的な検討結果について解説する。また爆発時の爆風の発生現象についても解説する。爆風の強度予測は、保安距離を法律や基準で定める時にも必要となり、その予測精度の向上は重要な課題となっている。



本稿は、2025年7月18日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2025」において、土橋 律 様 にご講演いただいた内容をアドバンスソフトがまとめたものです。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1. 安全のための燃焼科学

燃焼は、エネルギーや動力を得るための重要な技術であり、その高性能化や効率化が追求されてきた。しかしその一方で、燃焼は火災や爆発といった甚大な災害の原因ともなりうる。本講演では、土橋先生のこれまで取り組んできた火災・爆発研究による知見に基づき、燃焼現象を科学的に解明し、その知見を安全対策に役立てる「安全への応用」という観点から、燃焼の基礎、災害メカニズム、そしてリスク評価について論じるものである。シミュレーション技術が進化する現代においても、燃焼が引き起こす特異な現象を実験的に捉え、その本質を見極めることの重要性を具体的な事例を通して示していく。安全管理における合理的な手法であるリスク評価の枠組みを理解し、その中でシミュレーションがどのように貢献で

きるかを考える一助となることを目的とする。

1.2. 燃焼の二つの基本形態

燃焼現象は、燃料と酸化剤の混合状態によって、大きく「予混合燃焼」と「非予混合燃焼（拡散燃焼）」に分類される。この違いが、災害の様相を決定づける。予混合燃焼は、燃料と酸化剤があらかじめ混合された状態で燃える形態である。理科の実験で使うブンゼンバーナーで、空気の流入量を増やした際に見られる内側の青い炎（内炎）がその典型例である。燃焼には「燃料」「酸化剤」「着火源（熱）」の三要素が必要であり、可燃性混合気に着火源が与えられると、活性化エネルギーの山を越えて高速な反応が開始される。この火炎は、未燃焼ガス中に自ら伝播していく性質を持つ。火炎の厚さは通常 0.1mm 程度と非常に薄く、その狭い領域内で温度は室温から 2000℃近くまで急上昇し、燃料と酸素が消費される。この「火炎伝播」こそが、後述するガス爆発の根本的なメカニズムとなる。

一方、拡散燃焼は、燃料と酸化剤が別々の領域に存在し、両者が出会う界面で燃焼が起こる形態を指す。ろうそくの炎や、予混合しないで燃料ガスを燃やす際の炎がこれにあたる。燃焼する速度は、分子の濃度勾配に従って燃料と酸化剤が互いに拡散していく速度（フィックの法則）に支配されるため、化学反応そのものに比べて緩やかである。このため「拡散律速」の燃焼とも呼ばれる。この形態の火炎は、予混合火炎のように未燃焼領域へ自ら伝播することはない。しかし、火炎からの輻射熱や伝導熱によって周囲の未燃物（固体や液体）が熱分解や蒸発を起こして可燃性ガスの供給が増大し、それによって燃焼範囲が拡大していく「燃え拡がり」という現象を引き起こす。これが火災の主な拡大メカニズムである。

このように、燃焼の形態は災害の種類と密接に関連しており、両者を明確に区別して理解することが、現象解明と安全対策の第一歩となる。

1.3. 火災とガス爆発の決定的差異

燃焼による災害の代表例である火災とガス爆発は、前章で述べた燃焼形態の違いによって、その様相と被害の甚大さが大きく異なる。同じ量の燃料が燃焼する場合でも、その燃え方によって単位時間あたりのエネルギー放出速度が全く違うからである。

火災は、主に拡散燃焼によって進行する。例えば引火点が約 50℃の灯油を室温でプールに満たしても、直接火はつかない。しかし芯などを介して着火すると、その上に拡散火炎が形成される。火炎からの熱がまだ燃えていない液面に伝わり、そこから可燃性蒸気を発生させることで、燃焼領域が徐々に広がっていく。これが「燃え拡がり」であり、その速度は毎秒数センチメートル程度と比較的遅い。ヒンデンプルク号の事故映像でみられる現象も、水素ガスが漏れ出しながら空気との界面で燃える大規模な火災（拡散燃焼）であり、予混合状態からの爆発ではなかった。もしあれだけの量の水素が予混合状態で爆発していれば、被害は比較にならないほど大きかったはずである。

対照的に、ガス爆発は予混合燃焼の高速な「火炎伝播」によって引き起こされる。可燃性ガスや粉塵が空

気と混ざり合った「予混合気」が形成され、そこに着火源が存在すると、火炎が球状に高速で伝播していく。このとき、燃焼による急激な温度上昇と体積膨張が圧力上昇を引き起こし「爆風」を発生させる。火炎は伝播するにつれてその表面積が急激に増大するため、発熱速度も時間とともに加速度的に増加する。例えば、1kg のヘプタンを燃焼させた場合、火災（プール火災）では毎秒数百キロワット程度の発熱速度で数分間にわたって燃え続ける。一方、気化させてガス爆発を起こした場合では、同じ量の燃料が 1 秒未満で燃焼し尽くされ、最大発熱速度は毎秒 100 メガワットに達する。これは火災の数百倍のオーダーである。この短時間での急激なエネルギー放出が、ガス爆発の被害を桁違いに大きくする。火災の場合は、燃焼時間が長いため、人が避難したり、消火活動を行ったりする時間的猶予があるが、ガス爆発はそれが許されない。この発熱速度の違いこそが、両者の危険性を決定的に分ける要因なのである。

1.4. 燃焼災害のリスク評価手法

化学プラント等における安全管理では、事故シナリオを想定し、そのリスクを定量的に評価する手法が用いられる。リスクは一般的に「事故の発生可能性」と「発生した場合の被害の大きさ」の組み合わせ（多くは積）で定義され、これを評価することで合理的なリスク低減対策を導き出す。

可燃性ガスの漏洩事故を例に事故シナリオを考えてみよう。漏洩したガスに直ちに着火した場合は、拡散燃焼による「ガス火災」となる。これは比較的遅い燃焼であり、被害は限定的である。しかし、着火せずにガスが拡散し、広範囲に可燃性の予混合気を形成した後に着火すると、高速に予混合燃焼が起こり大規模な「ガス爆発」に至り、甚大な被害をもたらす。したがって、ガス火災を発見した場合、元栓を閉められない状況で安易に消火すると、漏洩が続き、最終的にはより危険なガス爆発を誘発する二次災害のリスクを高めることになる。

ガス爆発のシナリオにおける発生可能性の評価には、ガスの「燃焼範囲（爆発範囲）」や「最小着火エネルギー」といった特性値が重要となる。燃焼範囲は、燃焼が継続できる燃料濃度の上限と下限であり、この範囲が広いほど危険性が高い。例えば水素は 4～75% と、メタン（5～15%）やプロパン（2.1～9.5%）に比べて格段に広い。最小着火エネルギーは、着火に必要な最小のエネルギーであり、この値が小さいほど静電気のような微小なエネルギーでも着火しやすい。水素の最小着火エネルギーはメタンやプロパンの 10 分の 1 以下であり、着火のしやすさも際立っている。これらの特性値は測定装置や条件によって変動するため、標準化された手法での比較が重要となる。被害の大きさの評価には、「燃焼速度」や「爆発圧力」が関わる。燃焼速度が速いほど、エネルギー放出率が高まり、爆風も強力になる。密閉空間で爆発が起きた場合、圧力は最大で初期圧力の約 8 倍に達し、その力は 1 平方メートルあたり数十トンにも相当する。これはほとんどの建物を破壊するのに十分な力である。

これらの要因を総合的に評価し、リスクが許容できないレベルにあると判断された場合は、発生可能性を低減する対策（漏洩検知など）や、被害を軽減する対策（圧力放散設備の設置など）を講じることでリスクを管理（リスクマネジメント）することができる。

1.5. 特異現象と自主保安への展開

標準的なリスク評価に加え、燃焼には予測が困難な特異現象が存在し、これらを理解することがより高度な安全対策には不可欠である。特に、火炎の「不安定化」により火炎の乱れが発生し燃焼が加速される現象と、極めて高速な燃焼である「爆轟（デトネーション）」は重要である。

通常、開放空間でのガス爆発（爆燃：デフラグレーション）の爆風は比較的弱い、実験では理論予測を大幅に上回る爆風が観測されることがある。これは、伝播する火炎面自体が、流体力学的な要因（ハイドロダイナミック不安定性）などによって自発的に乱れ、シワの多い複雑な形状になるためである。火炎面がシワだらけになると実質的な燃焼面積が増大し、火炎が自己加速する。特に水素は、この火炎の不安定性が顕著であり、燃焼速度が極めて速いため、プロパンなどに比べて数十倍も強力な爆風を生じさせる可能性があることが実験で確認されており、開放空間の爆発でもリスクが重大であることが分かっている。

さらに、この火炎加速が進行し、障害物がある場合など特定の条件下では、火炎の伝播速度が音速を超える「爆轟（デトネーション）」に遷移することがある。爆轟は、強力な衝撃波を伴う極めて破壊的な現象であり、通常の爆燃とは比較にならない被害をもたらす。配管内などでは爆燃から爆轟への遷移（DDT）が起こりやすく、特に水素やアセチレンのような燃焼速度の速いガスではその危険性が高まる。このため、水素などを扱う設備の圧力放散口の設計では、DDT の発生が否定できないため、既存の計算式が適用できないケースがあるなど、特別な配慮が求められる。

日本の安全管理は、高圧ガス保安法や消防法といった法規制の遵守が中心となる傾向がある。つまり、法規は最低限の規準であり、状況に応じて法規の要求以上の対策が望ましいが、そこまで実行しない傾向がある。米国の FM Global のような保険会社では、自ら大規模な安全研究を行い、科学的知見に基づいて顧客にコンサルティングを行い保険契約にあたり必要な安全対策を要求している。結果的に事故やその被害を減らしているとのことであり、自らの事業所のリスクを主体的に評価し、法規制に加えてプラスアルファの対策を講じる「自主保安」の重要性とその動機付けの事例を示唆している。燃焼の複雑で特異な現象を深く理解し、シミュレーションなども活用しながら、より高度で合理的な安全管理を目指していくことが、今後の重要な課題である。

1.6. 聴講における感想（アドバンスソフト）

土橋先生は燃焼科学分野を代表する研究者であり、数多くの研究成果を発表しつつ、様々な安全政策や事故安全評価に係る検討会・委員会にも参加され、科学的な機構の解明のみならず、損害評価手法の検討などにおいても社会的貢献度は大きい。損害度合いの大きい火災や爆発事故は、そのスケールの大きさ、事象の複雑さから不確定要素が大きい中、科学的知見、工学的な見解から適切な予測、評価手段を講じられる。エンジニアリングに関わる者として、土橋先生の考え方は大きな学びとなっている。

【ご経歴】

1983 年 東京大学大学院 工学系研究科 反応化学専門課程修了。同年富士写真フイルム株式会社入社。1990 年 東京大学 工学部 反応化学科 助手。1998 年 東京大学 工学系研究科 化学システム工学専攻 講師、准教授を経て、2005～2024 年 同教授。2023 年 東京理科大学 国際火災科学専攻 教授。

【ご研究内容】

専門は、燃焼学、安全工学。

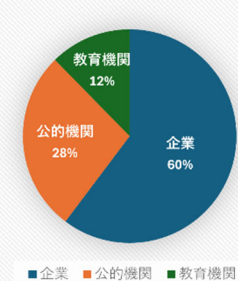
参加者のご意見

申込者は 98 名、当日の参加者（視聴者）（社外）は 82 名でした。参加者（視聴者）の内訳は、企業が 44 名、公的機関が 20 名、教育機関が 9 名でした。主な業種は、「材料/素材」、「官公庁/公的機関」、「建築/土木」でした。主な職種は、「研究/開発」でした。

セミナー後のアンケートは、50 名からご回答いただきました。満足度の平均値

は 10 点満点中 8.3 点と高評価をいただいております。燃焼や爆発の理論・分類、水素特有の危険性などに関する理解が深まり、実務にも直結する学びが多かったとお声を多くいただきました。

参加者の所属機関



公開資料

ご講演の YouTube 動画は、右の QR コードからご覧いただくことができます。



ご講演の資料は、右の QR コードの「資料をダウンロードする」からログイン後、ダウンロードすることができます。ログインアカウントをお持ちでない方は、「資料をダウンロードする」から新規メンバー登録後、ログインしてダウンロードすることができます。



右の QR コードから過去のアドバンス・シミュレーション・セミナーの YouTube 動画をご覧いただくことができます。



2024 年度に開催したセミナーの各記事の一つにまとめて、24 ページの冊子として発行いたしました。全 10 回分の記事を一度にご覧いただけますので、ぜひお手元にてご一読いただけますと幸いです。



2025 年度の開催日程

アドバンス・シミュレーション・セミナー

2025 の開催要領

<https://www.advancesoft.jp/seminar/33224/>

No.	日程 受付状況	内容	テーマ
第 1 回	5 月 30 日 (金) 終了	「太陽内部の磁気乱流シミュレーション」 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 教授 堀田 英之 様	磁気流体力学 ・ HPC
第 2 回	6 月 13 日 (金) 終了	「流体乱流における同期現象とデータ駆動型手法」 東京理科大学 理学部 第一部 応用数学科 准教授 犬伏 正信 様	データ同化、 機械学習
第 3 回	7 月 18 日 (金) 終了	「火災・爆発災害のリスク低減への燃焼研究の応用」 東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 土橋 律 様	火災・爆発 災害現象
第 4 回	8 月 1 日 (金) 終了	「AI 新時代を切り拓く政府の次世代 HPC 戦略の展望」 文部科学省 研究振興局 参事官 (情報担当) 付 計算科学技術推進室 室長 栗原 潔 様	政府の 科学技術政策
第 5 回	9 月 12 日 (金) 終了	「量子技術を応用した次世代流体解析基盤の確立に向けて」 九州大学 工学研究院 航空宇宙工学部門 准教授 久谷 雄一 様	流体理工学、 量子演算
第 6 回	10 月 17 日 (金) 受付中 お申込みはこちら 	「火災・爆発現象のモデリングおよび早期異常検知」 東京理科大学 創域理工学研究科 国際火災科学専攻 教授 桑名 一徳 様	火災科学、 燃焼理論
第 7 回	11 月 7 日 (金) 受付中 お申込みはこちら 	「AI とシミュレーションが駆動する創薬分子設計」 東京科学大学 情報理工学院 情報工学系 准教授 大上 雅史 様	AI 創薬
第 8 回	11 月 28 日 (金) 受付準備中	「原子力から考える汎用解析コードの役割と可能性」 早稲田大学 理工学術院 先進理工学研究科 共同原子力専攻 教授 山路 哲史 様	総合理工学
第 9 回	12 月 19 日 (金) 受付準備中	「(準備中)」 東京大学 情報基盤センター スーパーコンピューティング研究部門 教授 中島 研吾 様	調整中
第 10 回	2026 年 1 月 23 日 (金) 受付準備中	「(準備中)」 原子力発電環境整備機構 技術部 性能評価技術グループ グループマネージャー 石田 圭輔 様	調整中

【お問い合わせ先】

アドバンスソフト株式会社 出版事業部

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目 3 番地 新お茶の水ビルディング 17 階西

TEL : 03-6826-3971 FAX : 03-5283-6580 E-mail : office@advancesoft.jp

<https://www.advancesoft.jp/>

当社では随時人材の募集も行っております。

<https://www.advancesoft.jp/recruit/>

Copyright © 2025 AdvanceSoft Corporation. All right reserved.