



THERMAL ENGINEERING

TED Newsletter on the WEB

日本機械学会熱工学部門ニュースレター
TED Newsletter No.71 December 2013

目 次

1. TED Plaza

- ゴム風船を用いた火災消火の研究
鳥飼 宏之（弘前大学）
- FDSによる火災・安全シミュレーション
錦 慎之助（鹿児島大学）

2. 2013 年度年次大会熱工学部門報告

3. 熱工学コンファレンス 2013 開催報告

4. 熱工学コンファレンス・プレコンファレンスワークショップ 開催報告

5. 行事案内

- 部門企画行事案内
- 部門関連行事案内
- 国際会議案内

6. その他

編集後記

TED Plaza

ゴム風船を用いた火災消火の研究



鳥飼 宏之

弘前大学 准教授
 大学院理工学研究科 知能機械工学コース
 torikai@cc.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

過去に発生した大規模地震災害である関東大震災（1923年9月1日）、阪神・淡路大震災（1995年1月17日）そして東日本大震災（2011年3月11日）では、一部地域で火災が発生し地震被害を受けた地域に更なる損害を与えた。このように大規模な地震災害後にはしばしば火災が発生し延焼する。そして、その消火活動には常に多くの困難を伴う。第一には、大規模災害後に発生する火災の特徴として、多数の火災が広域にわたり同時に発生する。そのため公設消防の対応能力つまり所有する消防車両数を上回る件数の火災が同時に生じると、一部の火災対応が不可能となる[1,2]。その結果、消火活動を行えないまま延焼・拡大を許す火災が生じ、被害拡大へとつながる[1-3]。そして第二には、地震の強烈な衝撃により、また沿岸部ではそれに加えて津波の影響により、道路、電気、水道そして消防水利のようなインフラストラクチャーの破壊や機能不全が生じる。例えば道路では、路面の陥没・損壊、液状化現象の影響による路面変形、倒壊した家屋による道路閉塞また津波による路面冠水などによって車両通行が阻害される[3-5]。その結果、消防車両が火災現場へ到着できず消火活動が不可能となる。更に消防水利においても、断水そして倒壊家屋などによる消火栓の埋没により使用が不可能となる[3-5]。このように大規模災害後の火災には通常の消火法が利用できないという状況が発生する。更に第三の困難さとして、消防車両つまり消防士が火災現場に到達できない状況下では、発生した火災の延焼を許すか否かは地域住民の初期消火活動の成否に大きく依存する[1,2]。しかし緊急時に一般市民が取り得る消火手段は、各家庭に備え付けられた消火器の使用やバケツリレーで搬送した水の利用など多くはなく、またそれらの方法は火災規模が大きくなるとほとんど消火効果を期待できなくなる。

このように大規模な地震や災害の発生後に生じる火災に対する消火活動は、常に多くの困難を伴う。その問題を解決するためにも、緊急時に利用可能で、かつ一般市民にも簡単に使用でき、消火効果の高い新しい消火法そして消火機器の開発が重要であり、また必要である。

1-1. 現在使用されている消火法の利点と欠点

もっとも広く利用されている消火剤は水である。これは水が比較的簡単にそして大量に手に入れることができ、また人体に対しても環境に対しても無害であるという大きな利点があるためである。また水は、液体の場合、その蒸発潜熱そして比熱が他の物質に比べて大きく火源から熱を吸収して冷却する効果が高い[6-8]。そのため木材などの固体の可燃物が燃焼して形成される普通火災（火災区分でいうA火災）に対して優れた消火効果を発揮する。しかし火災領域へ放出された大量の水の一部は、その周囲へ流れだし水浸しにする。その結果、建築物、電気・電子機器、書籍そして衣類などに対する水損や汚損といった、火災によってではなく消火活動による二次的な被害・損害を水は引き起こす。このことは水を利用した消火法の欠点である。

他方、一般家庭に普及している消火器に充填されているリン酸二水素アンモニウムなどの粉末消火剤は、火炎中で生じている燃焼反応の進行を阻害・抑制することで消火を達成する。そのためリン酸塩を用いた粉末消火剤は消火効果が高く、普通火災（A火災）、液体燃料などの油火災（B

火災),そして電気設備で生じる電気火災(C火災)にも大きな効果を発揮する[6,7].そのためABC消火剤と呼ばれる.しかし粉末消火剤を使用した場合,その消火活動を行った空間を元の状態に戻すためには,丁寧で入念な掃除が必要となり,消火後の現状復旧は決して簡単なことではない.

ただし,窒素,二酸化炭素そしてアルゴンなどの不活性ガスを用いたガス消火法では水損・汚損が生じない.しかし気体消火剤は周囲空気と相互拡散によって容易に混合するため,消火器や消火設備から消火ガスが放出されて火源まで到達する間に濃度低下が生じる.そのためガス消火の場合,遠方火源に対して高い消火効果が得られない.そこで気体消火剤では火源のある空間中を閉鎖し,そこに大量のガス消火剤を供給する全域放出という手段がとられることがある.この場合,火災域だけでなく空間全体の酸素濃度が極端に低下するため,逃げ遅れた人がいた場合,窒息する危険性がある[6,7].そのため消火ガスの全域放出は,人の避難が十分に確認されてからしか使用することができないという欠点がある.

またウォーターミスト消火では,水を数百 μm 以下の水滴直径まで微粒化して火炎に供給することで,火炎面で水滴を瞬間的に蒸発させ,水蒸気の発生を容易にする[8,9].その結果,水としての消火効果だけでなく,水蒸気のガス消火剤としての効果も発揮され,結果としてウォーターミストは非常に高い消火効果を示す[8,9].そのため棒状注水による消火に比べて使用される水量が大きく減少し,極端な水損・汚損を回避することが可能となる.しかしウォーターミストでは,水滴質量が非常に小さいため,その慣性力も小さい.その結果,火源が大きく火炎によって生じた自然対流の流速が非常に大きい場合,ウォーターミストがその自然対流の流れに逆らって火炎面や可燃物の熱分解領域へ到達することが困難となる.従ってウォーターミストは遠方火源への輸送も簡単ではない[8,9].

他には泡消火剤もあるが,これも水による消火と同様,消火活動による2次被害を伴い,また遠方火源への輸送も簡単ではない[6].更にハロン系のガス消火剤のように,消火効果が高く,気体中のガス濃度を人間が窒息するほどに高めなくても消火を達成できるものもある.しかしハロンはオゾン層破壊という深刻な地球環境問題を引き起こすため,その利用は美術品保管・展示室,図書館そして通信機械室などに限定されている[7].

このように,どのような消火法および消火剤でも,それぞれ利点と欠点を有している.そこで,著者らはこれまであまり注目されてこなかった消火剤の輸送方法を検討・工夫することで,その消火剤の消火効果の増大と使用量の低減,水損・汚損の回避,そして,これまでに使用そして開発されてきた消火剤の汎用性や使用性を高めることを目的とした Extinguishing Agent Delivery (EAD) というコンセプトに基づいた新しい消火法の開発を目指して実験的に研究を進めている.この EAD というコンセプトは著者が現在提案しているものであり,その基本的な考え方について次節で説明する.

1-2. Extinguishing Agent Delivery (EAD)

消火剤を放出する消火機器または設備から火源までの消火剤の輸送方法を工夫することで,消火剤の利点を維持しながら同時に欠点を減らして消火効果を高めることを目的とした Extinguishing Agent Delivery (EAD) というコンセプトは,医薬品開発において使用されている Drug Delivery System (DDS) という概念[10-12]を模して著者が考え出したものである.ここではじめに DDS について簡単に説明したい.

DDS とは,薬物を人体に適用するための新しい投与方法または投与形態を開発し,薬の体の中での動き方(体内動態)を制御することを目的とした技術のことをいう.この DDS の利用により,必要最小限の量の薬物を必要な場所(臓器や組織等)に必要なタイミングと適切な期間で継続的に供給することを可能とし,同時に副作用の抑制そして薬の効果を最大限に発揮させることを目的としている.この DDS の目的を達成するために,主に3つの薬物輸送技術が重要となる.1つは薬剤放出制御技術である.これは薬剤の体内での溶解・放出挙動を空間的にまた時間的に制御することで,薬剤の体内での濃度や作用期間を調節することを可能とする.2つめは薬剤標的化技術である.これは目的の場所(部位・組織)に薬剤を局所的に輸送・到達させる技術である.この標的化技術により,他の健康組織に対する薬剤の副作用を抑制することができる.3つめは薬剤吸収改善技術である.これは有効成分の浸透・吸収を制御するものである.この技術により,従来であれば体内組織への吸収が悪く効果の低い薬剤の作用を向上させることができる.このよ

うな要素技術に支えられる DDS を使用することで、副作用の軽減、そして投薬に伴う苦痛や投薬回数の手間を減らし、患者の Quality of Life を改善することが可能となる。さらに製薬会社にとっては副作用のために開発を諦めていた薬物についても DDS によって使用の道が開かれる可能性が生まれるなどの利点が存在する。

このような DDS は火災消火の例え話をを用いて次のように説明されることがある[10].

『そのような時代の薬の使い方は、大きなビルの一室のごみ箱がたばこの吸い殻によって火がついたとき、ビル全体を水浸しにして消すことに例えられる。それを、一室だけに放水し、更にできればコップ一杯でごみ箱の火を消すようにするのが DDS のねらいである。(永井恒司, 放出制御型薬物送達システム, 薬学雑誌, Vol.108, No.7, pp.613-624, 1988.)』

この DDS のコンセプトを説明するための消火のたとえ話を、実際に火災消火で行おうとするのが、著者が提案している Extinguishing Agent Delivery (EAD) である。より具体的に言えば、EAD の使用により、消火剤を目的とする場所に適切に輸送し、そして最も効果的なタイミングで標的とする火炎位置に消火剤を放出することで消火効果を増大させ、また同時に消火に伴う 2 次的な被害である水損や汚損を回避し、更に、これまで対応が簡単では無かった遠方火源に対する消火 (長距離消火) や燃焼領域だけに消火剤を到達させるピンポイント消火などを達成することを目的としている。ちなみに EAD とは、古英語にある単語で、“Happiness”そして“Prosperity”という意味を表す。

これまでに著者の研究室では EAD のコンセプトに基づいた新しい消火法の基礎研究を進めてきている。例えば、カプセルに消火剤を充填することで周囲空気との拡散・混合を抑制し、そのカプセル壁を火炎との接触または固体壁面への衝突によって破壊することで、至近距離から高濃度の消火剤を火源へ供給して消火を達成するカプセル消火法の研究[13-17]、また、流体に追従する微粒子ならば、その渦運動の中に取り込んで遠方まで輸送可能な流体现象である渦輪を利用した渦輪消火法の研究[16,18]、そして同時多発的に火災が生じた場合、各火炎の消火を迅速に達成するために爆薬などで形成される爆発現象を利用して、ブラスト波とその背後の高速気流を利用して消火を達成する爆風消火法の研究[19]、更にウォーターミストよりも大きなミリオーダーの巨大液滴を用いて、火源によって生じる自然対流に影響を受けず、その液滴の慣性によって狙った場所に水滴を到達させ、火災現場に存在する高温壁面 (例えば、可燃性固体の熱分解領域や火炎周囲の加熱された壁、天井など) に、水滴を衝突させることで瞬間的に水滴の一部を蒸発させ、そのときに発生する水蒸気によって消火を達成するという間接消火法の研究[20]などを行っている。今回の TED Plaza ではカプセル消火法について紹介したい。特に、これまで消火カプセルとしてシャボン玉[13,14,16]や球状中空氷[17]などを用いてきているが、ここではゴム風船を利用した場合の消火法[15]について紹介する。

1-3. ゴム風船消火法について

不活性ガスを用いたガス消火法は電気絶縁性に優れ、また狭い隙間にも到達が容易であり、そして消火活動に伴う水損・汚損を回避できる利点がある。通常、消火ガスは消火機器から噴流形態で火源に向かって放出されるため、その噴流のエントレインメントによって周囲空気を巻き込み、また同時に周囲空気との相互拡散によって混合し、消火ガス濃度は空間中の進行に伴い低下し、その消火能力を大きく減少させてしまう。そこでゴム風船をカプセルとして用いて消火を行う。ゴム風船はどのような不活性ガスも充填することができ、また火炎と接触することでゴム膜が溶解して簡単に破膜する。またゴム膜に働く張力によって、ゴム風船に充填された消火ガスは周囲大気より高い圧力を有するため、その破裂と共にゴム風船から火源に向けて比較的大きな速度を有して高濃度の消火ガスを供給できる。そして不活性ガスが大きな速度を有して火炎に作用することで、燃料や酸素濃度の希釈や火炎からの熱吸収というような不活性ガスの消炎効果だけでなく、吹き飛びによる消炎効果も加わることが期待できる。以降では、ゴム風船消火法を用いた実験から、これまでに明らかになったその消火特性について詳細に説明する。

2. 実験装置および方法

2. 1 ゴム風船消火実験装置

ゴム風船消火の実験装置の概略を図1に示す。不活性ガスは高圧ボンベから供給し、ニードルバルブによって流量を調整され、マスフローメータ（山武，CMS0020）によってその流量を測定した。そして最終的に流路出口に取り付けたゴム風船に一定流量で不活性ガスを充填した。ゴム風船に充填した不活性ガスは、窒素、二酸化炭素、アルゴンそしてアルゴン80%と窒素20%の混合気を使用した。ここで、本実験で使用した不活性ガスの熱的な物性値と消火効果の大きさを示す最小消火濃度（Minimum Extinguishing Concentration: MEC）の値を表1に示す。表1には、不活性ガスの密度 ρ [kg/cm³]と定圧比熱 C_p [J/kg・K]、 ρ と C_p を掛けて算出した単位体積あたりの熱容量の値を示している。また MEC の値は Cup burner 法を使用し、n-ヘプタンで形成された火炎を用いて測定された値であり、その値が小さいほど消火効果が高い消火剤であることを意味する。表1から不活性ガスの消火効果は、単位体積あたりの熱容量の値が大きいほど高いことがわかり、その順位は二酸化炭素>窒素>アルゴンとなっていることがわかる。これは不活性ガスが、その主たる消火効果として火炎からの熱吸収によって火炎温度を低下させて消火を達成していることを意味している。

消火対象には液体燃料で形成したプール火炎を用いた。液体燃料を貯める容器は、火炎の大きさを変化させるために異なる内径を有する4つの黄銅製の円形火皿を用いた。各火皿の内径とリムの厚みは、内径47mm（リム厚さ1mm）、56mm（リム厚さ2mm）、76mm（リム厚さ2mm）そして94mm（リム厚さ3mm）とした。火炎形成には発熱量の異なる3つの液体燃料を用い、n-ヘプタン、1-ブタノールそしてエタノールとした。それら燃料の標準状態での低発熱量（気体）： Q [MJ/kg] を表2に示す。表2から、各液体燃料の発熱量の大きさは n-ヘプタン>1-ブタノール>エタノールの順となることがわかる。

カプセルとして使用したゴム風船は、図2に示すように寸法の異なる2種類のマルサ斎藤ゴム社の天然ゴムラテックス製の風船を使用した。各ゴム風船は充填できるガス量に限界があり、それを超えてガスを充填すると自然に破膜したため、燃料容器の大きさにより使用するゴム風船を変えた。火炎の大きさが比較的小さい燃料容器径47mmと56mmのプール火炎では、図2のType Aのゴム風船を用いた。他方、比較的火炎規模が大きい燃料容器径76mmと94mmのプール火炎の場合は、図2のType Bのゴム風船を使用した。ゴム風船は不活性ガスを充填して膨らませたときの形状がほぼ等しくなるように、図2のゴム風船の画像に記した線の位置を僅かに超えて不活性ガスを供給する金属パイプを差し込み、ゴム風船画像の線の位置で糸を用いて固定して不活性ガスを充填した。また不活性ガスのゴム風船への充填口は、その中心を燃料容器のリム上端と同じ高さに配置し、膨らんだゴム風船の先端中心が火炎基部に接触して破裂するようにした。火炎基部にゴム風船先端が接するように配置したのは、消炎するか否かの火炎の安定性を火炎基部が支配しているからである。

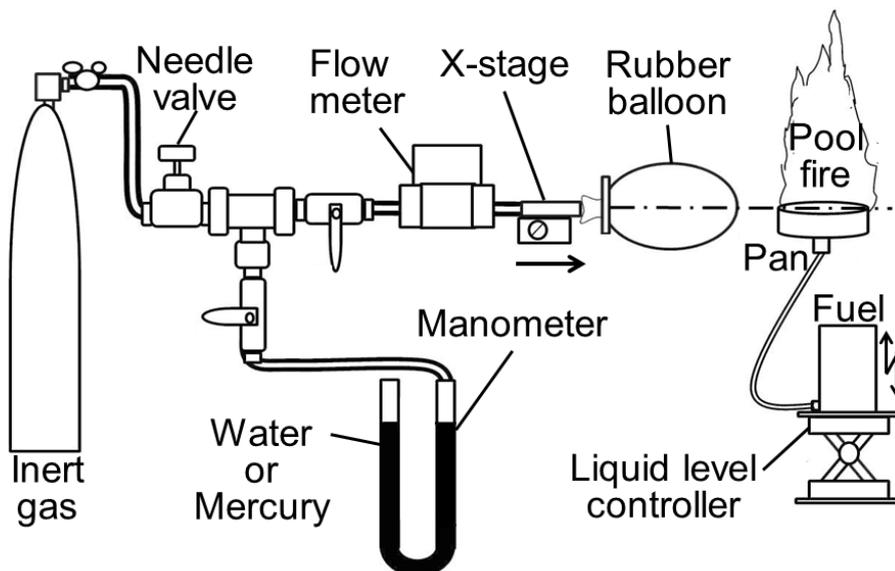


Fig. 1 Experimental setup

また燃料容器に注いだ液体燃料の液面の高さは、燃料容器のリム上端とは一致させず、リム上端から 2.5 mm 下げた位置に液面がくるように調整した。これはゴム風船が破裂したときに生じる不活性ガスの流れで液体燃料が大量に吹き飛ぶのを避けるためである。また燃焼状態と火炎高さを安定させるため、液体燃料は各燃料種で適切な余燃時間を設けて消火実験を行った。n-ヘプタンとエタノールでは全てのパン径で予燃時間を 2 分に設定した。1-ブタノールだけは全てのパン径で余燃時間を 4 分とした。



Fig. 2 Rubber balloons

Table 1 Thermal properties of inert gas at 0.1 MPa and 298.15 K and extinguishing effectiveness of inert gas evaluated with cup-burner method

Extinguishing agents	Density: ρ [kg/cm ³]	Specific heat capacity at constant pressure: C_p [J/(kg · K)]	Heat capacity per unit volume: ρC_p [J/(cm ³ · K)]	MEC [vol.%] evaluated with cup burner method (fuel: n-heptane) [21]
Carbon dioxide	1.811	0.850	1.539	22.0
Nitrogen	1.146	1.040	1.192	33.6
80% Argon +20% Nitrogen	1.531	0.626	0.958	-
Argon	1.627	0.523	0.851	43.3

Table 2 Heats of combustion at 0.1 MPa and 298.15 K [22]

Fuel species	Lower heating value (gaseous state): Q [MJ/kg]
Ethanol	27.74
1-Butanol	33.83
n-Heptane	44.93

2. 2 ゴム風船の特徴について

本研究で使用したゴム風船の特徴として、図 1 に示す液柱マンノメーターによりゴム風船にガスを充填したときのゴム風船の内圧と大気圧との差圧と充填ガス量 V [cm³] との関係調べた。その結果を図 3 に示す。ゴム風船への充填ガスは窒素を用いた。図 3 から Type A と Type B の風船とも、充填ガス量の増加に伴い差圧の値は複雑な振る舞いを示すが、定性的に同様であることがわかる。本研究では図 3 の中に破線で示したガス充填量よりも、常に値が大きい範囲で実験を行ったため、ゴム風船内と周囲大気圧との差圧はガス充填量が増加するほど増大する条件となっている。また差圧の値に注目すると、小さいゴム風船である Type A の差圧の方が、大きなゴム風船である Type B の差圧よりも 2 倍ほど値が大きいことがわかった。

2. 3 ゴム風船消火実験について

ゴム風船消火実験は次のように行った。はじめに消火対象であるプール火炎を形成した。次に、目的とする不活性ガスの体積 V [cm³] をゴム風船に充填した。充填量の決定には、不活性ガス流量を一定でゴム風船に供給し、その充填時間を計測することで行った。そしてその後、ゴム風船を送り台により火炎側方から火炎基部に風船先端が接するまで移動そして停止し、火炎によってゴム膜が融けて破裂するまで待った。ゴム風船が破裂し、火炎全体が完全に消滅した場合を消火成功とし、その判定は目視で行った。消火の確率は消火成功回数を 10 回の実験回数で除することで算出した。そして同一条件で 3 回行って得た消火確率の値を平均化したものを消火確率 P [-] として算出した。

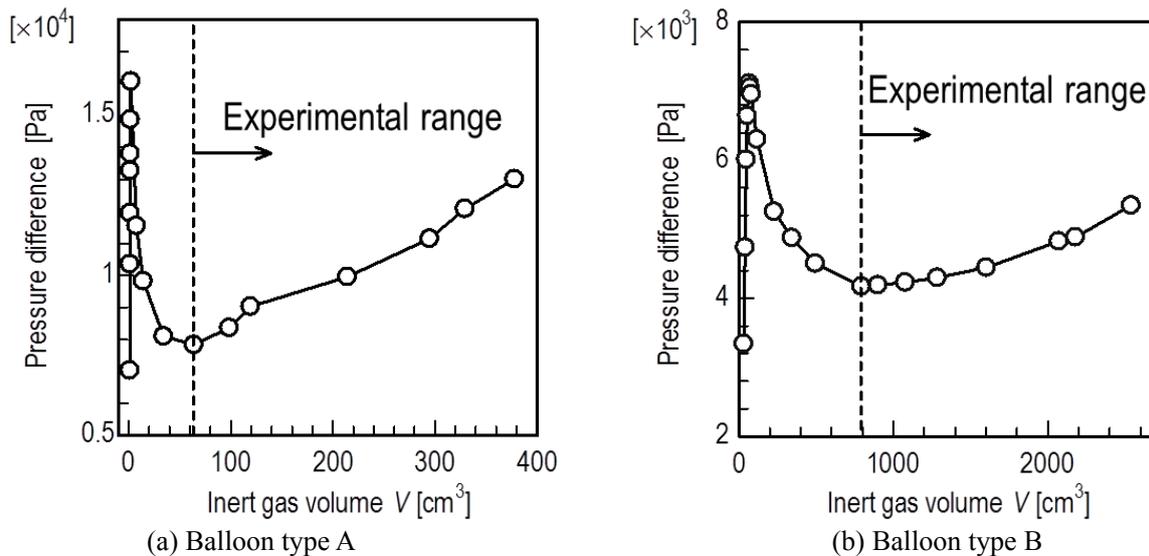


Fig. 3 Relationship between the pressure difference between the inside and outside of the rubber balloon, and the filling gas volume at 293 K and 0.1 MPa (The filling gas was nitrogen).

3. 実験結果および考察

3. 1 破裂するゴム風船から放出される流れ

ここでゴム風船が一点から破膜して破裂した場合、内部に充填されたガスがどのように放出されるかを説明する。図4は破裂するゴム風船から放出されるガスの挙動を、高速度カメラ (Keyence, VW-9000, 4000 fps, exposure time: 1/4000 s) と光源にメタルハライドランプ (Photron, HVC-UL, 250 W) を用いて撮影したものを連続画像として示したものである。ゴム風船に充填したガスは窒素であり、充填量は 2130 cm³ である。そして破膜開始はゴム風船の斜め下に置いたロウソクの火で生じた高温の燃焼ガスによって行った。また充填ガスの挙動を可視化するために、シリコンオイルをネブライザによって霧化したものを窒素ガスに添加してゴム風船に充填した。図4の画像の中で、ゴム風船が割れた後に白く見える領域が不活性ガスの流れを示す。また 0 ms はゴム風船が破裂する直前の時間としている。

まず図4の破膜後 1.25 ms の画像では、ゴム膜が裂けた部分から画像の左方向に窒素ガスが放出されていることがわかる。他方、破膜したゴム膜は収縮し始め、また同時に縮むゴム膜上を亀裂が破膜位置から画像右方向へ進展していることがわかる。ここで観察された流れはゴム風船の内圧と周囲大気との圧力差によって駆動されていると考えられる。このゴム風船の破膜位置から最初に放出される流れを本研究では First flow と呼ぶ。図4の 2.5 ms の画像では、ゴム膜上を亀裂がゴム風船の固定端へと進むのと同時に、ゴム膜も縮んでいることがわかる。そして 4 ms の画像では、ゴム膜上の亀裂が風船の固定端に到達し、また同時にゴム膜が固定端より画像右側まで縮んでいることがわかる。ゴム膜が固定端まで収縮したのと同時に、固定端の位置から、画像の右側から左側に向かって窒素ガスの流れが形成されていることがわかる。このゴム膜が収縮することで生じた流れを Second flow と呼ぶ。図4の 5 ms と 8.75 ms の画像を見ればわかるように、Second flow が形成されることでゴム風船から放出された気体はガス塊として破膜方向に移動するようになった。

以上のように、ゴム風船を一点から破裂させると、駆動原因が異なる 2 つの流れが形成されることがわかった。この図4の連続画像を利用して、流れの速度を測定した結果、First flow の初期の速度は約 30 m/s、そして Second flow の初期の速度は約 20 m/s であり、破裂するゴム風船から放出される不活性ガスの流れの速度は、数十 m/s と比較的大きいことがわかった。そこで次に、この破裂するゴム風船から放出される不活性ガス流れによって、どのようにプール火炎の消火が達成されるかを説明する。また、このような 2 つの流れは表面張力を有するシャボン玉が破裂した時にも形成されることが知られている[13,14]。

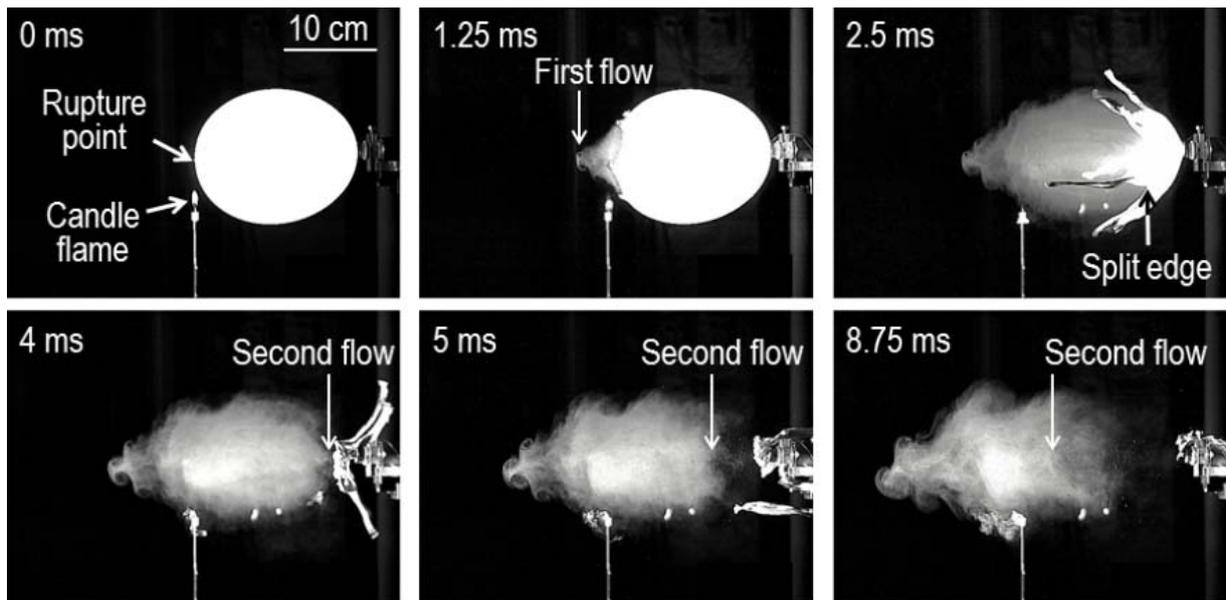


Fig. 4 Series of sequential direct images of bursting process of balloon B and flow process of the filling gas released from bursting balloon

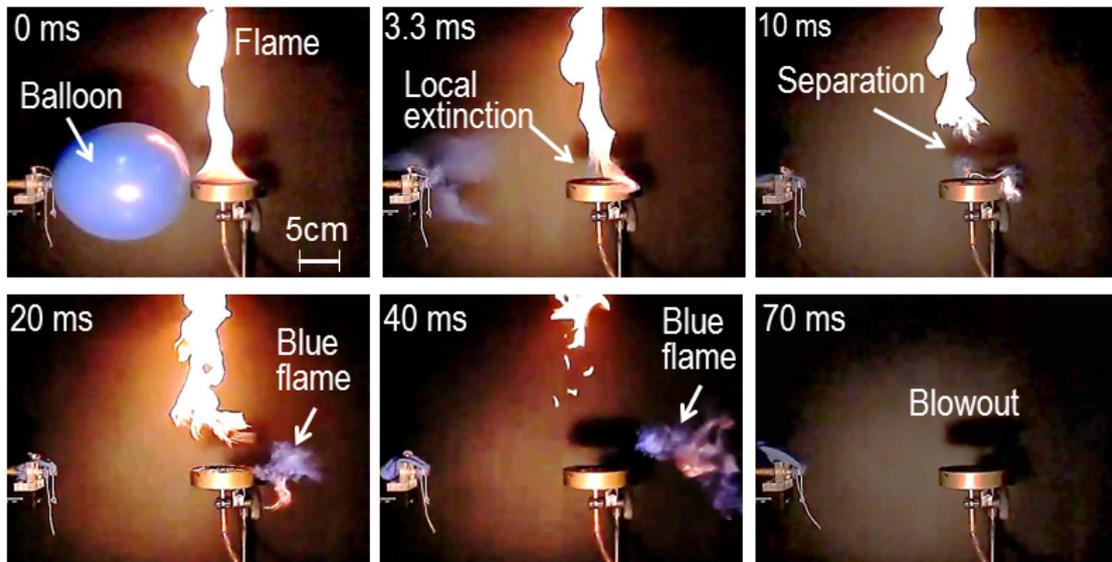
3. 2 ゴム風船によるプール火炎の消火過程

図 5 にゴム風船消火が成功した場合の消火過程を示す. この画像の記録にはデジタルカメラ (Casio, EX-F1, 300 fps, exposure time: 1/300 s) を用いた. 燃料容器直径は 76 mm, 液体燃料は n-ヘプタン, 不活性ガスは二酸化炭素を使用し, その充填量は 2050 cm^3 とした. また画像の時間はゴム風船の破膜直前を 0 ms としている.

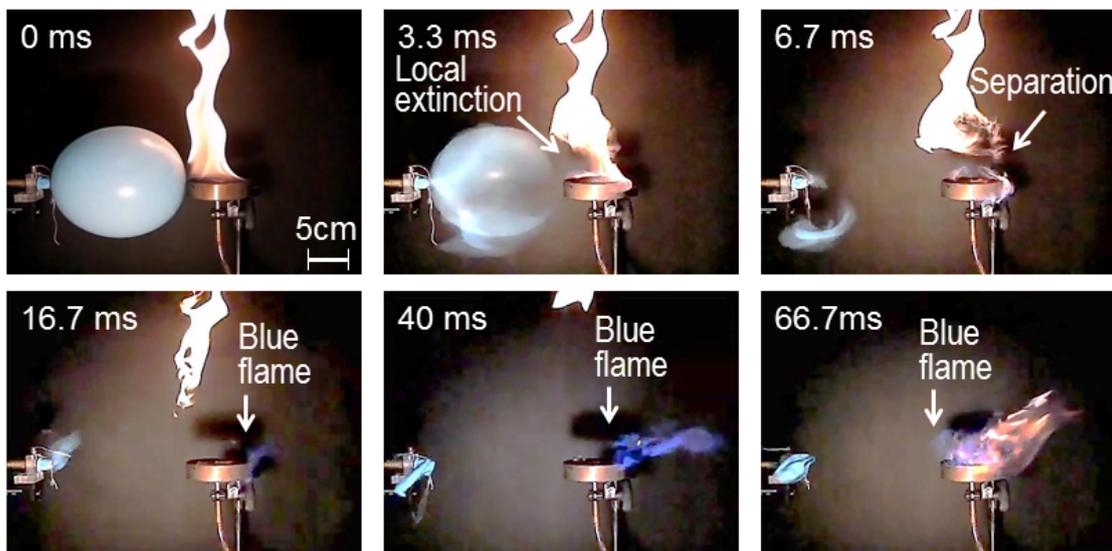
図 5(a) から, ゴム風船の破膜後 3.3 ms でゴム風船から放出された不活性ガスの流れによって, プール火炎の基部部分に局所消炎が生じていることがわかる. 10 ms の画像では, その局所消炎領域は画像右方向へ進展して, 火炎が火炎基部部分と下流の輝炎部分の 2 つの領域に分離される. そして 20 ms から 40 ms にかけて, 燃料容器上にある火炎基部部分が画像右方向へ大きく吹き飛ばされていることがわかる. 他方, 分離された輝炎部分は 20 ms から 40 ms の時間経過の中で, 徐々に火炎面積を減少させてゆくことがわかる. そして最終的に 70 ms で火炎全体が完全に消滅し, ゴム風船消火が数十ミリ秒という短い時間で達成されていることがわかる.

次に図 5(b) の消火失敗時の火炎挙動について示す. 不活性ガスの充填量だけが図 5(a) と異なり 1900 cm^3 とし, 他は全て同じ条件とした. 図 5(b) からゴム風船破裂から 16.7 ms までは消火成功である図 5(a) と火炎挙動はほとんど変わらないことがわかる. しかし 40 ms の画像では, 燃料容器上から完全に右方向に吹き飛ばされた火炎基部の青炎領域が, 画像右方向から左方向へ火炎面積を増大させて燃料容器上へ移動する現象が観察された. そして 66.7 ms の画像では更に, 火炎基部部分の青炎領域は, 燃料容器上を画像右から左方向へ移動し, その火炎面積を拡大し, 最終的に安定したプール火炎が再形成され消火失敗となった. この 40 ms から 66.7 ms における基部領域の火炎が示した振る舞いは, 不活性ガスによって消炎した燃料容器上の空間で, 燃料蒸気と空気の相互拡散によって予混合気層が形成され, その混合気層の中を火炎が予混合火炎として伝播したものと考えられる.

このように, ゴム風船によって消火が達成されるか否かは, プール火炎の基部領域に存在する火炎を側方へ完全に吹き飛ばせるか否かによって決定されていると考えることができる. そして, 火炎基部を完全に吹き飛ばせず, 空間中に残った基部領域の火炎が, 局所的に消炎した領域で形成された予混合気層中を予混合火炎として伝播することが可能となる場合, 消火は失敗となるといえる.



(a) Success case of rubber balloon extinguishment



(b) Failure case of rubber balloon extinguishment

Fig. 5 Sequential images of extinguishment process of n-heptane pool fire with rubber balloon inflated with carbon dioxide gas

3. 3 消火確率分布

ゴム風船に充填する消火ガス量 V [cm³] を変化させて得られた消火確率 P [-] の典型的な分布を図 6 に示す。燃料容器径は 76 mm, 液体燃料に n-ヘプタンそして不活性ガスには窒素を用いている。横軸は不活性ガス量 V , 縦軸は消火確率 P である。図 6 から V の値が小さすぎると, $P=0$ となり消火が全く達成されないことがわかる。そして V が増加すると, ある値で P が 0 ではなくなり, その後は V の増加に伴い単調に P も増加することがわかる。そして, 不活性ガスの充填量がある値以上になると常に $P=1$ となる不活性ガス量の条件が現れることがわかる。他方, 空気をゴム風船に充填して消火実験を行った場合についても, その結果を図 6 に示している。図 6 から空気をを用いた場合, どれほど充填ガス量を大きくしても常に $P=0$ であり, 消火が達成できないことがわかる。この空気の結果から, ゴム風船消火では不活性ガスの消火効果が重要であり, また同時に単純な流れの効果による吹き飛びによって消火が達成されているわけではないことがわかる。

ここで常に $P=1$ となる領域における最小ガス量の条件を消火限界 V_{ex} と定義する。 V_{ex} の値が小さい消火ガスほど, 火炎の完全消火を達成するのに必要なガス量がより少ないことを示し, その不活性ガスの消火能力が高いことを意味する。このように消火限界 V_{ex} の大小が, 消火において重要であるため以降の議論では V_{ex} の値に注目して検討を進める。

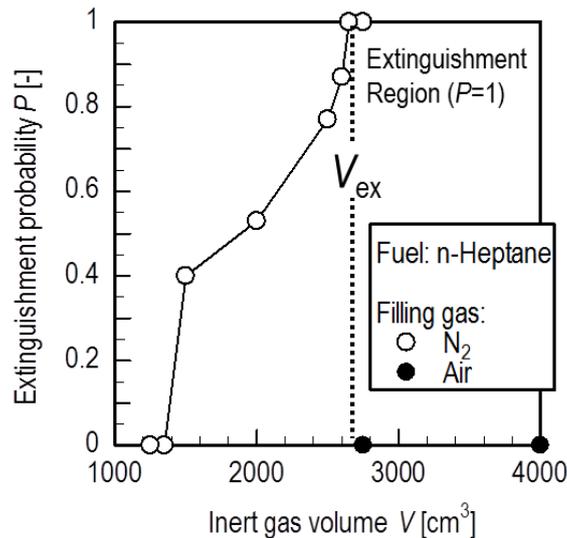


Fig. 6 Profiles of extinguishment probabilities as a function of volume of the inert gas filled into rubber balloon

3. 4 消火限界時の不活性ガス量 V_{ex} の分布

図 7 に燃料容器径を変化させた場合に得られる消火限界 V_{ex} の分布を示す. 液体燃料は n-ヘプタン, 不活性ガスは窒素, 二酸化炭素そして 80%アルゴン+20%窒素の混合気を使用している. また V_{ex} は対数軸で表している. まず図 7 から, 燃料容器径が増加すると火災規模が大きくなり, それに伴って完全消火に必要な不活性ガス量が, 不活性ガス種によらず増加することがわかる. また, 同じ燃料容器径の値で V_{ex} の大きさを比較すると, 二酸化炭素 < 窒素 < 80%アルゴン+20%窒素 混合気という順で, V_{ex} の値が大きくなっていることが分かる. 先の 3.2 項の図 5(a) で示したようにゴム風船消火は数十ミリ秒で達成される. しかし図 7 は, その短時間の消火過程において不活性ガス種の消火効果の違いが結果に明確に表れていることを示している. そして, その図 7 の結果は, ゴム風船に充填した不活性ガスの消火効果の大きさが, 二酸化炭素 > 窒素 > 80%アルゴン+20%窒素 混合気であることを意味している.

このゴム風船消火における不活性ガスの消火効果の大きさの順は, Cup burner 法を用いて決定した不活性ガスの消火効果の大きさの順番[21,23]と同じである. これらの過去の研究から不活性ガスの単位体積当たりの熱容量の大きさが, 不活性ガスの消火効果の大きさの順番を決定する要因であることが知られている. そして実際, ゴム風船消火における不活性ガスの消火効果の順位も, 表 1 に示した不活性ガス種の単位体積あたりの熱容量の値の大きさの順とも同様である.

このように本研究の消火法はゴム風船を用いた特殊な方法ではあるが, その実験結果は従来の不活性ガス消火の研究結果と変わらないことがわかった. つまり各不活性ガスの V_{ex} の値の決定には, 単位体積あたりの熱容量の大きさが重要であるといえる. そこで次に, 各不活性ガスで得られた消火限界 V_{ex} を用いて計算できる不活性ガスの熱容量に注目して議論を進める.

3. 5 消火限界における不活性ガスの熱容量の大きさと燃料容器径の関係

図 7 の結果からゴム風船消火の消火限界 V_{ex} の大きさは, 不活性ガスの単位体積あたりの熱容量の大きさに依存していると考えられる. そこで図 7 の縦軸の値を, 消火限界での不活性ガス体積 V_{ex} に密度 ρ と比熱 C_p をかけて熱容量に変更したグラフとして図 8 に示す. 横軸は燃料容器径である. この図 8 から, 消火限界での消火ガスの熱容量の値が, 不活性ガスの種類に依存せず 1 つの曲線上に統一的に表されることがわかる. この結果は, 燃料容器径つまり火源の大きさが決まると, その火源で形成される火災を完全に消火するのに必要な消火ガスの最小の熱容量の大きさが, 消火ガスの種類によらず 1 つの値に定まることを意味している. 次に, この熱容量による消火限界の整理が, 液体燃料種を変化させ, 発熱量が変わった場合でも成立するのかを検討する.

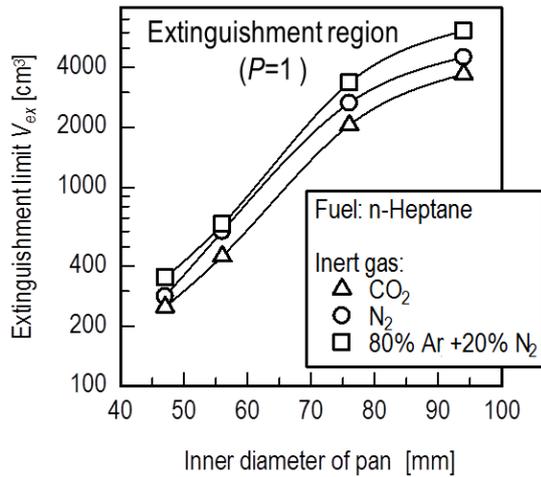


Fig. 7 Inert gas volume at extinguishment limit as a function of fuel pan diameter

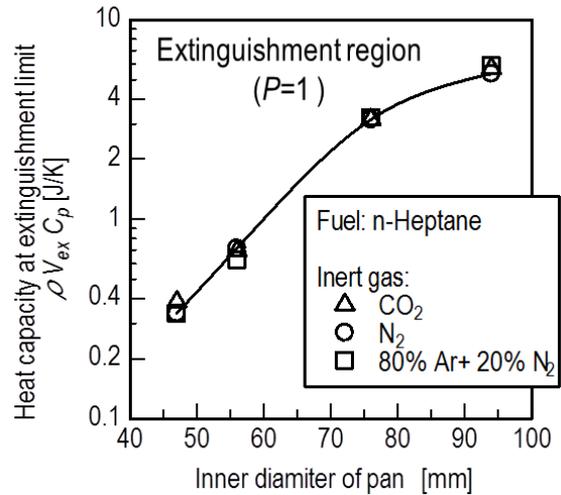


Fig. 8 Profiles of the heat capacity of inert gas at extinguishment limit as a function of fuel pan diameter

3. 6 消火限界における不活性ガスの熱容量の大きさと燃料容器径の関係

図9は、エタノールのプール火炎を窒素、二酸化炭素そして80%アルゴン+20%窒素混合気で消火して得られた消火限界 V_{ex} 、そして1-ブタノールのプール火炎を窒素、二酸化炭素そしてアルゴンで消火して得られた消火限界 V_{ex} を、熱容量 $\rho C_p V_{ex}$ の値にして図8に加えたものである。図9から、図8で示したn-ヘプタンでの消火限界時の熱容量の分布と同様に、エタノールそして1-ブタノールにおいても、燃料容器径が決まると消火に必要な不活性ガスの最小熱容量の値が不活性ガス種によらず1つの値に定まっていることがわかる。ただし、どの容器径においても消火限界時の熱容量 $\rho C_p V_{ex}$ の大きさは、エタノール火炎の値が最も小さく、そして次いで1-ブタノール火炎、そして最も大きな値はn-ヘプタン火炎が示している。この消火限界時の不活性ガスの熱容量の値の順番は、表2で示した燃料の単位質量当たりの発熱量の大きさの順番と等しく、発熱量に比例していることがわかる。つまり図9の結果は、単位質量あたりの発熱量が大きな燃料の火炎ほど、消火するのに必要となる不活性ガスの最小の熱容量が増加することを意味している。そこで次に、縦軸に発熱量の影響を反映させた結果を用いて更に議論を行う。

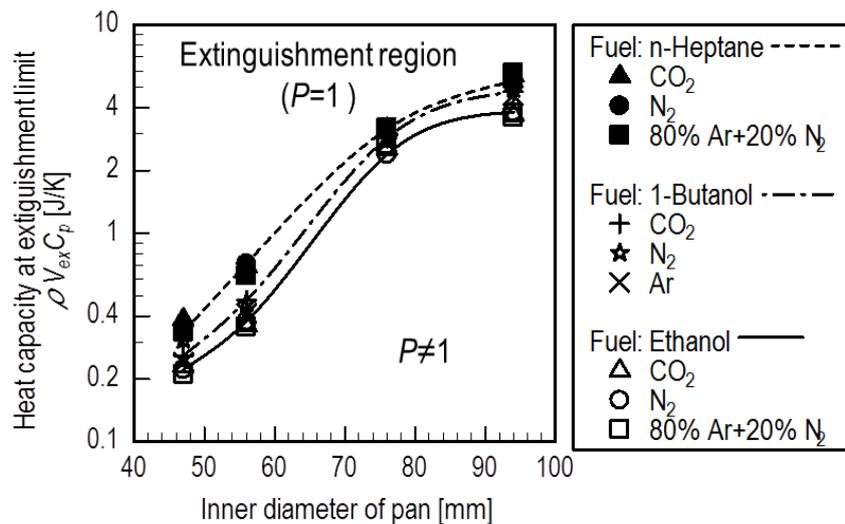


Fig. 9 Heat capacity of inert gas at extinguishment limit for different fuel species as a function of fuel pan diameter

3. 7 液体燃料の燃焼熱と消火限界時の不活性ガスの熱容量との関係

図 9 で示したように消火限界時の不活性ガスの熱容量の値は、燃料種の発熱量に比例していることがわかった。そこで単位質量当たりの燃料から燃焼反応によって生成される発熱量の値を示す低発熱量 Q を、消火限界での不活性ガスの熱容量 $\rho C_p V_{ex}$ で除した $Q/\rho C_p V_{ex}$ [K/kg] として縦軸を表したグラフを図 10 に示す。図 10 から再び全てのプロットが燃料種に依存せず 1 つの曲線上に統一的に表されることがわかる。このことは燃料容器径の大きさ、つまり火炎の大きさが決まると不活性ガス種だけでなく、燃料種にもよらず $Q/\rho C_p V_{ex}$ が 1 つの値に定まることを意味している。また図 10 から燃料容器径の値が増加すると $Q/\rho C_p V_{ex}$ の値が減少傾向を示すことがわかる。この図 10 の結果から、ゴム風船消火で得られる消火限界での不活性ガス量の決定には $Q/\rho C_p$ [K・cm³/kg] の大きさが重要であることがわかった。

不活性ガスによる拡散火炎の最小消火濃度 (MEC) は Cup burner 法を用いて決められ、消火に至るときの火炎温度がほぼ一定となることが知られている[21,23]。ゴム風船消火はカップバーナ法のように徐々に消火剤を火炎に供給するわけではないため、その消火過程の詳細は大きく異なる。しかし、もしゴム風船消火でも消火時の火炎温度が Cup burner 法と同様にほぼ一定あるならば、ゴム風船消火においても不活性ガスが火炎から熱を奪うことによって火炎温度を限界の温度まで減少させ、最終的に完全消火を達成していると考えられることができる。その場合、不活性ガスが火炎から奪う熱量の大きさは $\rho C_p V_{ex}$ に依存し、発熱量が大きい燃料の火炎ほど $\rho C_p V_{ex}$ の値が増加する必要があることになる。その考えに基づけば、図 9 に示したように同一の燃料容器径で発熱量 Q が大きい火炎ほど $\rho C_p V_{ex}$ が大きな値を示したことは理解できる。

以上のように、ゴム風船に充填した不活性ガスで消火を行った結果、その消火特性として、不活性ガスの単位体積当たりの熱容量と液体燃料の単位質量当たりの燃焼熱の大きさによって消火限界の不活性ガス量が決定されることがわかった。また、不活性ガスには酸素や燃料の希釈を通して消火をもたらす効果と火炎からの熱吸収によって火炎温度を低下させて消火を達成する熱的な消火効果の 2 通りがあるが、ゴム風船消火では熱的な消火効果によって消火が達成されていることが明らかとなった。

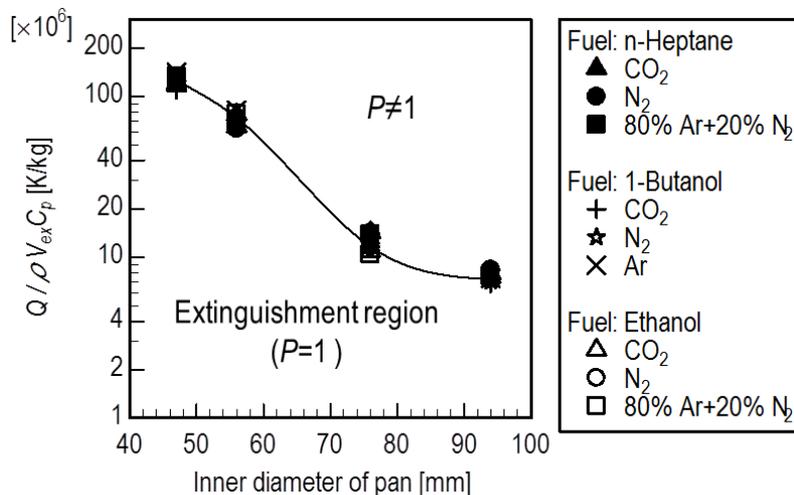


Fig. 10 Values of the lower heating value divided by the heat capacity at the extinguishment limit vs. Fuel pan diameters

4. まとめ

消火剤の輸送方法を工夫することで消火剤の消火効果の増大と消火活動による二次的な被害の抑制を目指す Extinguishing Agent Delivery (EAD) というコンセプトに基づいて、著者は新しい消火法の開発を行っている。その消火法の 1 つとして、ゴム風船を用いた不活性ガス消火法の消火実験結果について説明を行った。このゴム風船消火法は、ゴム風船に不活性ガスを充填することで周囲空気と消火ガスの混合を防ぎ、また火炎に接触することでゴム風船が破裂し充填された不活性ガスを火炎の至近距離から瞬間的に供給するという消火方法である。

結果としては、ゴム風船が破裂すると、内部に充填されたガスは 2 つの流れによって火源へと放出さ

れることがわかった。1つは、ゴム膜の張力によって生じたゴム風船内部と周囲大気圧との差圧によって駆動される流れ (First flow) で有り、もう一つは破膜したゴムが収縮することで形成される流れ (second flow) である。これら2つの流れによってゴム風船から放出された不活性ガスは、ガス塊となって火災へと供給されることになる。また、ゴム風船消火の消火実験から得られた消火特性は非常に単純で有り、Cup burner法によって決定された不活性ガスの消火効果の順位と、ゴム風船消火実験で得られた不活性ガスの消火効果の順位は全く同じであった。そして更に、完全消火が達成できる不活性ガスの最小体積つまり消火限界 V_{ex} の値によって決まる $\rho C_p V_{ex}$ の値を、液体燃料の単位質量あたりの発熱量 Q を除いた $Q/\rho C_p V_{ex}$ の値が、容器径が決まると一定の値を示すことがわかった。このことは、ゴム風船消火での消火達成が、不活性ガスの熱的な消火効果によって行われていることを意味している。

今回、紹介したゴム風船消火の研究成果では、火源へのゴム風船の輸送については全く検討していない。しかし現在、弘前大学理工学部知能機械工学科の岩谷靖准教授の協力を得て、不活性ガスを充填したゴム風船を火源へと輸送するための小型航空消火ロボットの開発を行っている[24]。この研究では、消火ガスを充填したゴム風船を抱えた複数の航空消火ロボットが、互いに連携して消火ロボットごと火源へと突入することで火災消火を達成することを目指している。

最後に、冒頭で述べたように現在の消火技術は、首都圏直下地震などの大規模災害が生じた後に発生することが予想されている火災に十分対応できているとは言いがたい。また今後高齢化社会を迎える日本において、火災が発生したときに力が弱くまた行動が機敏でない人でも簡単・迅速にそして確実に消火を達成できる技術の開発も重要であると考えている。もし本稿を読んで、少しでも火災消火の研究に興味を持ってくださる方がいれば望外の喜びである。

本研究は科学研究費補助金 挑戦的萌芽研究、課題番号：23651160 の支援を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 関澤愛, 特集: 自主防災組織の活発化と地域防災力の向上のために, 日本火災学会誌, Vol.61, No.5, pp.1-2, 2011.
- [2] 日本火災学会 地震火災専門委員会, 阪神・淡路大震災から 15 年後の地震火災研究の現況と今後 30 年の展望, Vol.61, No.1, pp.7-14, 2011.
- [3] 日本火災学会, 2011 年東日本大震災に関する消防機関からの報告 (その 1), 日本火災学会誌, Vol.62, No.4, pp.30-49, 2012.
- [4] 日本火災学会, 2011 年東日本大震災に関する消防機関からの報告 (その 2), 日本火災学会誌, Vol.62, No.5, pp.30-52, 2012.
- [5] 日本火災学会, 2011 年東日本大震災に関する消防機関からの報告 (その 3), 日本火災学会誌, Vol.62, No.6, pp.24-39, 2012.
- [6] 日本火災学会, 火災便覧 (新版), 共立出版, pp.970-1015, 1984.
- [7] 日本火災学会監修, 火災と消火の理論と応用, 東京法令出版, pp.221-230, 2005.
- [8] G. Granta, J. Brentonb and D. Drysdale, Fire suppression by water sprays, Progress in Energy and Combustion Science 26 pp.79-130, 2000.
- [9] Zhigang Liu and Andrew K. Kim, A review of water mist fire suppression systems-Fundamental studies, J. of Fire Prot. Engr., 10 (3), pp.32-50, 2000.
- [10] 永井恒司, 放出制御型薬物送達システム, 薬学雑誌, Vol.108, No.7, pp.613-624, 1988.
- [11] 特許庁, 平成 22 年度特許出願技術動向調査報告書 (概要) ドラッグデリバリーシステム (D D S), pp.1-4, 2010.
- [12] NEDO 海外レポート, 薬剤搬送システム (D D S) の技術傾向と開発 (米国), No.962, pp.62-66, 2005.
- [13] Hiroyuki Torikai, Takumi Murashita, Akihiko Ito and Takumi Metoki, Proceedings of the 10th International Symposium on Fire Safety Science. International Association for Fire Safety Science, pp.557-568, 2011.
- [14] Takumi Murashita, Hiroyuki Torikai and Akihiko Ito, Flow visualization of extinguishing gas released from bursting soap bubbles, Visualization of Mechanical Processes, Vol.2, No.2, 2012.
- [15] Hiroyuki Torikai, Manato Narita and Akihiko Ito, Extinguishment of pool fire with rubber balloon inflated with inert gas, Proceedings of the 24th International Symposium on Transport Phenomena, 2013.

- [16] Kohei Watanabe, Hiroyuki Torikai and Akihiko Ito, Extinguishment of a jet diffusion flame with an inert-gas soap bubble transported by a vortex ring, Proceedings of the 24th International Symposium on Transport Phenomena, 2013.
- [17] 鳥飼宏之, 椎橋佑至, 伊藤昭彦, 球状氷カプセルを用いた粉末消火剤による拡散火炎の消火第 50 回燃焼シンポジウム, pp.482-483, 2012.
- [18] Yuki Chiba, Hiroyuki Torikai and Akihiko Ito, Extinguishment characteristics of a jet diffusion flame with inert gas vortex ring, Proceedings of the 7th International Symposium on Scale Modeling, 2013 (on USB).
- [19] Hiroyuki Torikai, Shouta Saito, Akihiko Ito, Extinguishment of a methane air diffusion flame by using blast wave, Proceedings of the 29th International Symposium on Shock Waves, 2013.
- [20] 久野彰治, 鳥飼宏之, 伊藤昭彦, 高温壁面に衝突した単一水滴から生じた水蒸気による拡散火炎の消火, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2012 講演論文集, pp.315-316, 2012.
- [21] N. Saito, Y. Ogawa, Y. Saso, C. Liao and R. Sakei, Fire Safety Journal, 27, pp.185-200, 1997.
- [22] JSME, Combustion Handbook, Maruzen, Tokyo, p.286, 1995.
- [23] F. Takahashi, G. T. Linteris, and V. R. Katta, *Proc. Combust. Inst.* 31, pp.2721-2729, 2007.
- [24] Miku Sato, Hiroyuki Torikai and Yasushi Iwatani, Flame extinguishment by a prototype of an aerial extinguisher with an inert gas capsule, Proceedings of SICE Annual Conference, pp.2051-2056, 2013.

TED Plaza

FDSによる火災・安全シミュレーション



錦 慎之助

鹿児島大学 助教
 大学院理工学研究科 機械工学専攻
 nishiki@mech.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

近年, OpenFOAM [1] や FrontFlow [2] などのオープンソースコードを利用して熱流体現象を解析する事例が増えている. 本報では前述のソフトウェアとは異なり, 火災を対象としたシミュレーションソフト FDS(Fire Dynamics Simulator) [3] を利用して解析したトンネル火災と水素漏洩拡散挙動のシミュレーション事例について紹介する. 著者は, 2006 年 9 月から 1 年間, Guest Researcher として米国立標準技術研究所 (NIST) に滞在して FDS を利用した研究に携わる機会を得て, これ以降, FDS による火災・安全のシミュレーション研究を行っている.

トンネル火災は, 1979 年の東名高速道路日本坂トンネルでの火災事故, 1972 年の国鉄北陸本線北陸トンネルでの列車火災事故が国内の大きなトンネル火災事故として挙げられる. 最近では, 2012 年の中央自動車道笹子トンネル天井板崩落に伴う車両火災, 2011 年の JR 北海道石勝線第 1 ニニウトンネル内列車脱線火災事故が記憶に新しい. 十分な安全対策がなされていても思いがけない事故や事件等による火災事故を完全に無くすことは不可能であり, 更なる安全対策や不幸にも危険な状況に遭遇した場合に安全な避難行動を行えるような安全教育が必要であると考えられる. また, 2015 年に燃料電池自動車市場へ投入される見込みとなっている. 燃料に用いられる水素の漏洩・爆発事故が懸念されるが, 一般的に開放空間では水素は非常に軽く, 拡散速度も速いため爆発の危険はあまり大きくないと言われている. しかし, ガレージ等の閉鎖空間では水素の濃度が可燃範囲に入る可能性があり, 安全対策の検討が必要となる.

2. FDS (Fire Dynamics Simulator)

FDS(Fire Dynamics Simulator) [3] は米国商務省の標準技術研究所 (NIST: National Institute of Standards and Technology) が 2000 年に公開した火災を対象とした CFD ソフトウェアである. 最新版は FDS Version 6 がリリースされており, バージョンアップする度に継続的に改良されている. また, FDS の計算結果を可視化する Smokeview も合わせて公開されている. これらのソフトウェアは MS Windows, Mac OS X, Linux で利用可能となっている. FDS Version 5 以降は Google Developers サイトで開発が進められており [3], NIST 以外のメンバーも開発プロジェクトに参画している. FDS の開発 Web サイトの <http://code.google.com/p/fds-smv/> では, FDS・Smokeview のソフトウェアダウンロードのみならず, ソースコード, マニュアル, サンプルテストケース, validation & verification, ソースコード開発・バグ等修正履歴などが公開されている. また, Google 掲示板を利用した FDS and Smokeview Discussions [4] では, 使用上の質問などが議論されており, その内容はメーリングリストで受信でき, 検索機能により過去の情報を調査することなどが可能となっている.

FDS は低マッハ数近似を仮定した圧縮性の Navier-Stokes 方程式, 質量保存式, エネルギー保存式, 化学種保存式を解いている. 計算は, LES と DNS の選択が可能であるが, 火災シミュレーションが主要課題であるため, LES に開発の重点が置かれている. 乱流モデルは, FDS Version 5 では Constant coefficient Smagorinsky model のみであったが, FDS Version 6 では, Dynamic Smagorinsky

model, Deardorff model, Vreman's eddy viscosity model の選択肢が追加されている。燃焼モデルは、混合分率モデルと総括反応（DNS の場合のみ選択可能）がある。また、火災シミュレーションであるため輻射は重要なファクターであり、gray gas model を適応した輻射の輸送方程式を有限体積法により計算している。さらに、Lagrange 粒子の移動を追跡できるようになっており、スプリンクラーから噴射された水滴や液体燃料噴霧の計算が可能である。

3. トンネル火災の計算事例

日本の自動車用トンネル火災の 3 次元シミュレーションソフトウェアは、川端らによって開発された Fireles [5] が広く知られている。著者らは、王らの研究[6]を参考にして、FDS を利用したトンネル火災のシミュレーションを実行し、FDS のシミュレーション結果の妥当性の検討を行った[7]。一方通行の縦流換気方式のトンネルで火災が発生した場合、火災地点より出口側の車両は自走して避難が可能であるが、入り口側には車両が滞留するため、徒歩で避難する必要が生じる。このため、避難経路を確保するために換気施設により、熱気流と煙を火災地点より出口側に押し出しながら、火災を煽らない程度の低い風速、すなわち遡上阻止臨界換気風速を保つ必要があり、この風速を予め予測しておくことがトンネルの安全管理のために重要となる。

計算モデルは Fig. 1 に示すようにトンネル長さ 100m、幅 8.4m、高さ 7m の矩形断面とした。火災はトンネル中央で発生するとして熱源を配置した。なお、勾配は 0%とした。遡上阻止臨界換気風速は火災規模に応じて変化するため、熱源における発熱速度は、0.1MW, 0.3MW, 0.7MW, 1.0MW, 2.0MW, 3.36MW, 8.0MW, 15.0MW, 30.0MW および 60.0MW の 10 条件で計算を実行した。計算には FDS 5.4.0 を使用した。

発熱速度 3.36MW における、換気風速の違いによるトンネル中央断面の温度分布の違いを Fig. 2 に示す。流入風速が 2.00m/s では熱気流が出口側へ流され、1.75m/s では入口側へ進行している様子が見られる。このことから、遡上阻止臨界換気風速は 1.75m/s と 2.00m/s の間にあることが分かる。

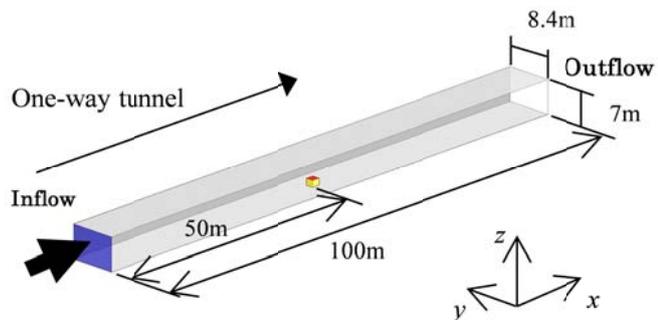


Fig. 1. Simulation domain and coordinate for tunnel fire.

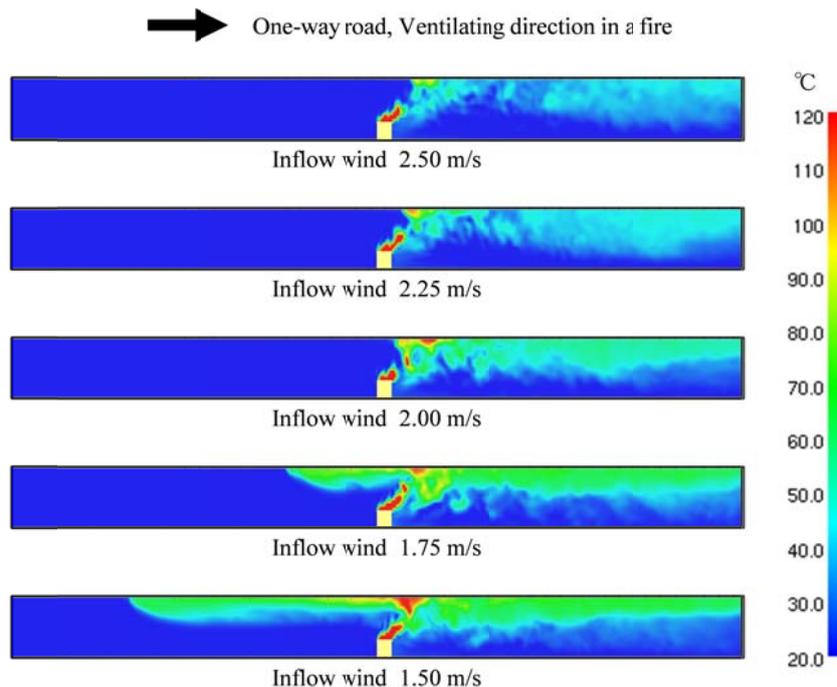


Fig. 2. Temperature distribution on the depth central cross section.

発熱速度と遡上阻止臨界風速を無次元化して整理したグラフを Fig. 3 に示す。横軸は発熱速度を、縦軸は遡上阻止臨界風速を無次元化した値で、それぞれ以下の式で定義される。

$$Q_0^* = \frac{Q_0}{C_p \rho_\infty T_\infty g^{1/2} H^{5/2}} \quad (1)$$

$$V_0^* = \frac{V_c}{(gH)^{1/2}} \quad (2)$$

ここで、 Q_0 は発熱速度、 V_c は遡上阻止臨界風速、 H はトンネル高さである。また、 C_p は定圧比熱、 ρ_∞ は周囲空気の密度、 T_∞ は周囲空気の温度、 g は重力加速度である。図中のプロットは、FDS の計算結果で示された熱気流の挙動から、遡上阻止臨界風速に近い流入風速を選んでプロットした点である。無次元化した発熱速度が 0.7 程度までは、発熱速度の上昇につれて遡上を阻止する臨界風速は速くなるが、それを超えると遡上阻止臨界風速の上昇は緩やかになる。このことは、Oka らが実験から経験的に得た式[8]と良く一致していることが分かる。また、図には示していないが王らの計算データ[6]とも FDS の計算結果は良い一致を示している。

FDS ではスプリンクラー散水のシミュレーションも可能である。最近ではウォータミスト噴霧による煙の制御のシミュレーションを行っているが[9,10]、煙が水滴に吸着する現象のモデル化などが今後の課題と考えられる。

4. 漏洩水素拡散挙動の計算事例

2015 年の燃料電池車の市場投入を目前にして、水素ステーションやガレージ、トンネル等での水素漏れ・爆発事故に対する安全対策は重要な課題となっている。開放空間では漏洩した水素は急速に上方に拡散していくため爆発の危険はあまり高くはないと言われている。しかし、閉鎖空間で漏洩した水素が外部に流出せずに水素濃度が可燃範囲に入った場合は、水素爆発の危険は十分に考えられる。

漏洩した水素をセンサーで感知する場合は最適なセンサー設置場所を決める必要があり、また、外部へ水素を逃がす場合は水素の挙動を予め把握して対策を講じる必要がある。いずれの場合も正確な水素拡散挙動を把握する必要があるが、無色透明で目に見えず、また、爆発の危険があり、実験は困難であるため、精度の良い数値シミュレーション技術の構築が必要である。そこで、FDS による水素漏洩拡散のシミュレーションの計算精度の検討を行った。計算精度を検証するために、福岡県水素戦略会議の支援で CFD 解析者の validation 用に行われた実験を FDS で再現することを試みた[11-13]。なお、計算には FDS 5.5.3 を使用した。また、壁面境界条件は滑りなし条件としたことで、下に示す水素濃度の時間履歴が実験データと非常に良く一致させることができた。

計算モデルを Fig. 4 に示す。計算は、Hallway model での水素拡散の実験[14,15]を模擬して行った。Hallway model の大きさは横(x)方向 2.90m、奥行き(y)方向 0.74m、高さ(z)方向 1.22m とし、床面に Hydrogen inlet、右側面に Door vent、天井面に Roof vent を配置した。なお、Roof vent と Door vent が計算領域最外面に配置されると、計算上の不安定性が発生す

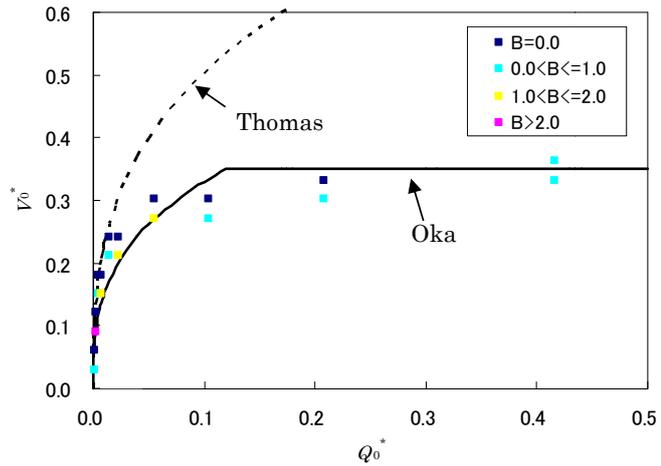


Fig. 3. Critical velocity of FDS result vs. predictive models. Where $B=X_j/H$: X_j is head current distance, H is height of tunnel.

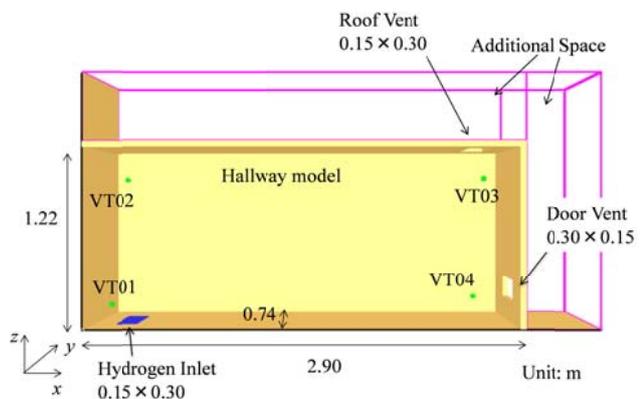


Fig. 4. Overview of numerical simulation domain for hydrogen gas leak.

るため、Hallway model の右側と上側には計算領域を付加して計算を実行した。また、水素濃度を検知するセンサーは Fig. 1 の緑色の点で、Table 1 にその座標を示す。なお、FDS ではスタッガード格子が用いられており、水素濃度は格子中央の値が記録されるため、実験のセンサー位置に最も近い計算格子の水素濃度と実験データとの比較検討を行った。

Table 1. Sensor locations.

ID	x	y	z
VT01	0.15 m	0.14 m	0.15 m
VT02	0.15 m	0.52 m	1.01 m
VT03	2.68 m	0.14 m	1.01 m
VT04	2.68 m	0.52 m	0.15 m

水素は Hydrogen inlet から実験と同様に毎分 57 リットルで 600 秒間流入させる。Fig. 5 に示すように流入した水素は浮力により上昇した後、Roof vent から Hallway model 外部に流出する。また、Door vent からは外部の空気が流入し、床面を左方向に進む様子が見られる。各センサー位置の水素濃度の時間履歴は、Fig. 6 に示すように FDS のシミュレーション結果は実験データを極めて良く再現できていることが分かる。

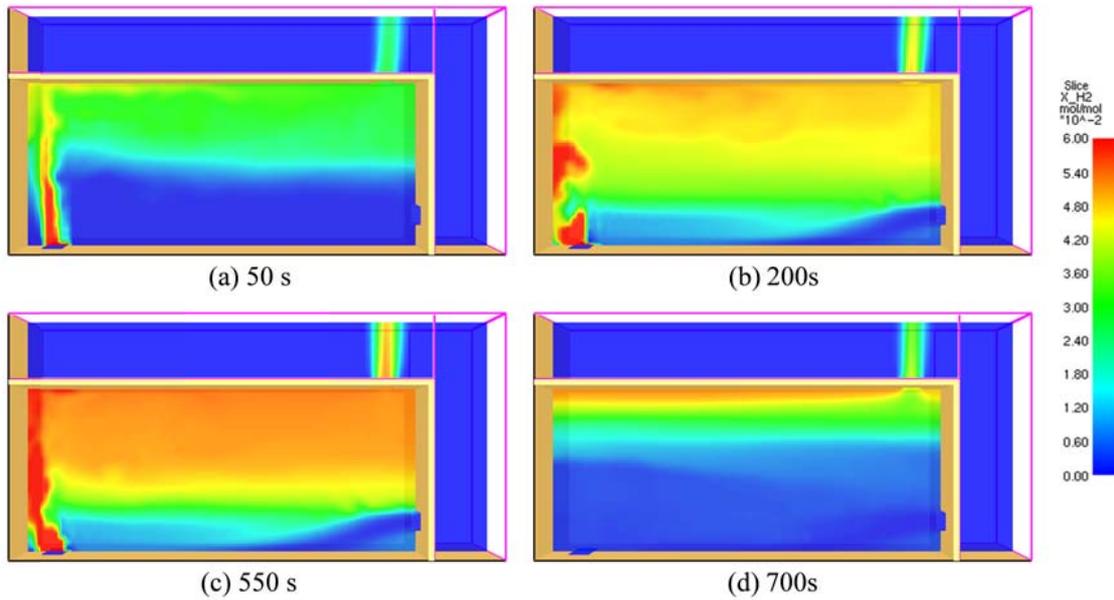


Fig. 5. Time evolution of hydrogen volume fraction on x-z plane.

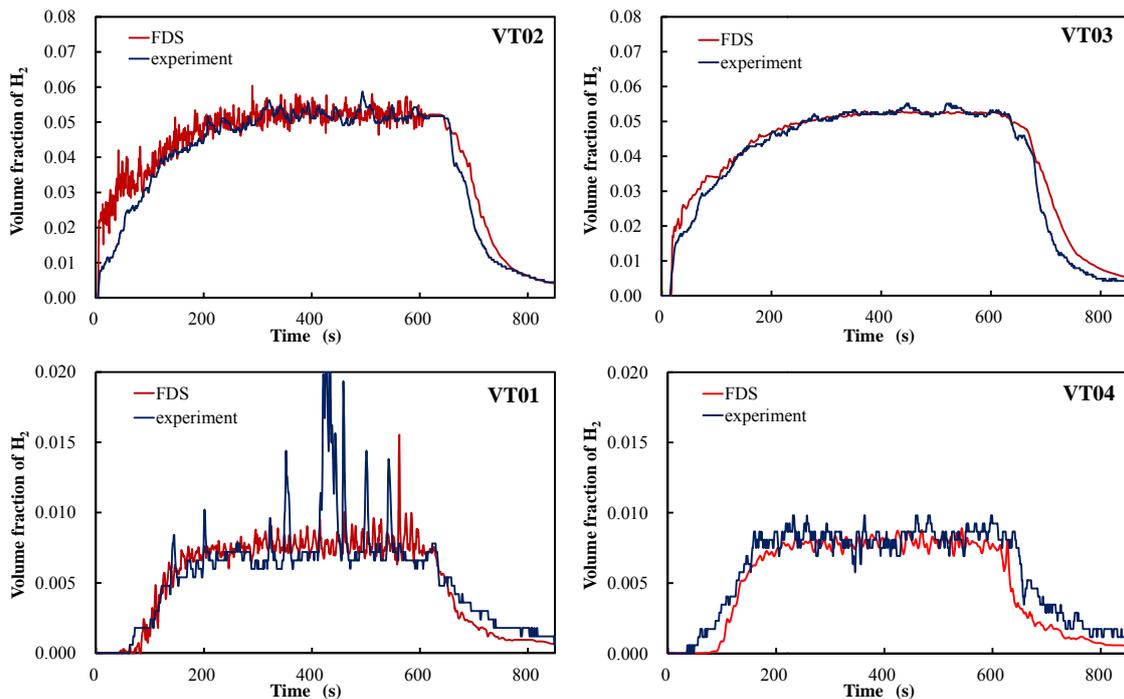


Fig. 6. Time evolution of hydrogen volume fraction at each sensor.

5. おわりに

火災を対象とした FDS(Fire Dynamics Simulator) [3] を利用して解析したトンネル火災と水素漏洩拡散挙動の事例を紹介した。シミュレーション結果は実験をうまく再現できているが、計算格子間隔や境界条件、物性値などの検討を繰り返し行い、適切に設定を行った結果であり、一般的な数値シミュレーションを行う場合と同様の苦労があることは言うまでもない。しかし、FDS は火災シミュレーションソフトウェアとしては世界的に認知されており、信頼性は非常に高いと考えられる。

FDS では、“input file” と呼ばれるテキスト形式のファイルに、計算条件を書き込んで計算を実行する。計算実行方法は非常にシンプルであるが、input file の作成に慣れるのに経験が必要である。新しく input file を作成する場合は、FDS に付属されているサンプル問題やオフィシャルサイト [3] に掲載されている Validation や Verification の input file をベースに改良していく方法が最も簡単な方法と思われる。

火災・安全の問題が世の中から無くなることはなく、防災・減災のためのツールの一つとして FDS が活用され、少しでも火災・安全のリスクを減少させることに貢献できることを期待する。

参考文献

- [1] OpenFOAM, <http://www.openfoam.com/>
- [2] FrontFlow, “マルチフィジックス流体シミュレーション”, 革新的シミュレーション研究センター, http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/project/rss/software/07_info.html
- [3] Fire Dynamics Simulator, <http://fire.nist.gov/fds/> または <http://code.google.com/p/fds-smv/>
- [4] FDS and Smokeview Discussions, <https://groups.google.com/forum/#forum/fds-smv>
- [5] 川端信義, 王謙, 佐々木啓彰, 内藤祐輔, “トンネル内火災時に発生する熱気流の挙動に関する数値シミュレーション”, 日本機械学会論文集 (B 編), 第 65 巻第 634 号, 1870-1877, 1999.
- [6] 王謙, 川端信義, 石川拓司, “トンネル火災時の熱気流の遡上を阻止する臨界縦流風速”, 日本機械学会論文集 (B 編), 第 67 巻第 656 号, 911-918, 2001.
- [7] 錦慎之助, 常谷梨津子, “FDS によるトンネル火災時の熱気流挙動の数値シミュレーション”, 門脇敏, 熱工学コンファレンス 2009 講演論文集, 1-2, 2009.
- [8] Yasushi Oka, Graham T. Atkinson, “Control of smoke flow in tunnel fires”, Fire Safety Journal, Vol. 25(4), 305-322, 1995.
- [9] 錦慎之助, “自動車トンネル火災時の熱・煙の流動とスプリンクラー散水の数値シミュレーション”, 熱工学コンファレンス 2013 講演論文集, 13-14, 2013.
- [10] Shinnosuke NISHIKI, “Numerical study of the effect of water mist spray in tunnel fire using FDS”, The 5th JAPAN/ TAIWAN/ KOREA JOINT SEMINAR for Tunnel Fire and Management・Tunnel Fire Safety Research Group of Japan, 3(21-24), 2013.
- [11] 錦慎之助, 紺屋隆馬, “FDS による室内漏洩水素拡散シミュレーション: 実験データとの比較検討”, 日本機械学会 九州支部第 65 期総会講演会, 49-50, 2012.
- [12] 錦慎之助, “水素漏洩拡散シミュレーション解析手法の紹介と解析精度の現状～ FDS による解析 ～”, 水素燃焼・安全評価検討/シミュレーション研究分科会, 福岡水素戦略会議, 2012, <http://www.f-suiso.jp/result/4487.html>
- [13] Shinnosuke Nishiki, “Numerical Prediction of Leaked Hydrogen Gas Diffusion using FDS”, Seventh International Symposium Scale Modeling (ISSM-7), USB Proceedings, ISSM7-6-04, 2013.
- [14] 月川久義, 金山寛, 井上雅弘, 松浦一雄, “部分開放空間に漏洩する水素の自然換気状態における非定常濃度変動の評価に関する検討”, 水素エネルギーシステム, Vol.33, No. 3, P28-35, 2008.
- [15] 井上雅弘, 金山寛, 月川久義, 松浦一雄, “室内における漏洩水素の拡散に関する実験的研究”, 水素エネルギーシステム, Vol.33, No. 4, 32-43, 2008.

2013 年度年次大会熱工学部門報告

第 90 期熱工学部門年次大会委員会

委員長 堀部 明彦 (岡山大学)

幹事 春木 直人 (岡山大学)

日本機械学会 2013 年度年次大会が 9 月 8 日 (日) ~ 11 日 (水) に亘り、「メカニカルイノベーションによる新エネルギー社会の実現」をキャッチフレーズに岡山大学津島キャンパスで開催されました。まず 4 日間の会期の初日には、例年と同様に市民開放行事が行われ、ロボコン、次世代モビリティ等の企画に小中学生を含めて多くの方に参加して頂きました。

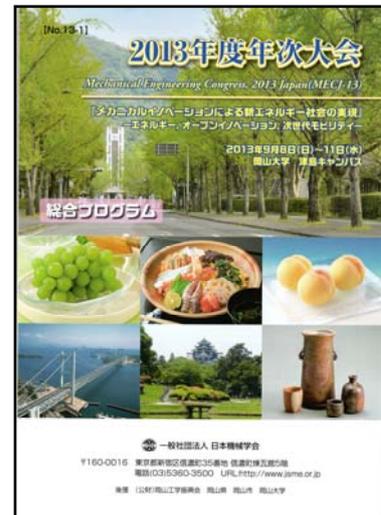
熱工学部門に関連した学術講演では、6 つのセッションからなる「熱工学一般セッション」において、37 件の講演が行われました。講演内容毎の内訳は、エネルギー利用等：6 件、沸騰・物質移動：6 件、対流熱伝達：6 件、固液相変化：6 件、ふく射・燃焼：13 件であります。また、年次大会の大きな特色である「部門横断セッション」も、以下の通り数多く実施されました。

- 次世代スパコン「京」が拓くシミュレーションの新時代(計算力学部門, 流体工学部門, バイオエンジニアリング部門, 熱工学部門), セッション数: 2, 講演数: 8
- 電子情報機器、電子デバイスの強度・信頼性評価と熱制御(計算力学部門, 熱工学部門, 材料力学部門), セッション数: 3, 講演数: 14
- 生体・生物における流れと熱・物質移動(バイオエンジニアリング部門, 流体工学部門, 熱工学部門), セッション数: 3, 講演数: 14
- 省・創エネルギー材料システムのマルチフィジックス現象評価と力学設計(材料力学部門, 計算力学部門, 熱工学部門, マイクロ・ナノ工学部門, 機械材料・材料加工部門), セッション数: 3, 講演数: 14
- マイクロ・ナノスケールの熱流体現象(流体工学部門, 熱工学部門, マイクロ・ナノ工学部門), セッション数: 4, 講演数: 20
- 乱流における運動量, 熱, 物質の輸送現象(流体工学部門, 熱工学部門), セッション数: 4, 講演数: 22
- 燃料電池・二次電池におけるナノ・マイクロ現象とマクロ性能(熱工学部門, 流体工学部門, 計算力学部門, 動力エネルギーシステム部門, 材料力学部門, マイクロ・ナノ工学部門), セッション数: 5, 講演数: 25

今回の年次大会のプログラムでは、熱工学部門に関連したセッションが 1 日目と 2 日目に配置されたため、同一の時間帯にて複数のセッションが同時進行となりました。また、各講演室や総合受付が全国有数の広さである岡山大学津島キャンパス内に点在したため、今年の猛暑の名残がある中、移動が若干のご足労となりましたことをご詫言致します。熱工学部門では、例年通り「講演論文表彰」と「若手優秀講演フェロー賞」の審査を行い、多くの先生方にご協力をお願い致しました。この場を借りまして御礼申し上げます。

部門同好会は、計算力学、流体工学、動力エネルギーシステム、バイオエンジニアリング各部門とともに 5 部門合同で 1 日目夕方に岡山大学生協で開催されました。当日は全体で約 100 名ものご参加を頂き、学会会長の矢部彰先生も熱工学部門としてのご出席をいただきました。会では各部門長の先生よりの挨拶と乾杯を皮切りに懇親に移り、皆様親交を深められていました。

最後になりましたが、今年度の年次大会の企画・運営にご尽力いただきましたオーガナイザー、講演者、座長の皆様に厚く御礼申し上げます。2014 年度に東京で開催される次回の年次大会と部門同好会では、さらに多くの皆様のご参加を賜り、研究交流と親睦を深めて頂けますよう祈念致します。



年次大会総合プログラム表紙

熱工学コンファレンス 2013 開催報告

実行委員会委員長
伊藤 昭彦 (弘前大学)

今年度の熱工学コンファレンスは、弘前大学 文京キャンパスにて、平成 25 年 10 月 19 日(土)と 19 日(日)の 2 日間にわたって開催され、398 名もの多くの皆様にご参加いただき、学術講演 225 件、懇親会参加者も 190 名と盛況のうちに終わることができました。参加者の皆様方には、みちのく弘前にお越しいただき、心よりお礼申し上げます。

本コンファレンスでは、オーガナイザーの方々のご尽力により 14 のオーガナイズドセッション(OS)を用意することができました。オーガナイザーの方々には、改めて御礼申し上げます。講演会はオーガナイズドセッションと一般講演を合わせて全 9 室の会場で行われました。いずれの会場も盛況で、活発な討論が交わされていました。これもセッションをまとめていただいた座長の方々のお蔭であり、改めて御礼申し上げます。

第 1 日目の午後のセッション終了後、弘前大学創立 50 周年記念会館(みちのくホール)にて部門賞・一般表彰贈呈式が執り行なわれ、引き続き弘前大学学長 佐藤敬先生より歓迎の挨拶をいただきました。その後、北海道大学 中垣俊之先生による「化学機械としてみた粘菌の行動知」と題した特別講演会が開催されました。夕方より開催された懇親会では、弘前大学理工学部長 吉澤篤先生のウェルカムスピーチに始まり、熱工学部門長の東北大学 小林秀昭先生からの乾杯のご発声をいただきました。懇親会では、津軽の食材をふんだんに取り入れた地元料理とお酒をご堪能いただけたと思います。また懇親会中頃には、渋谷和生氏による津軽三味線が披露され、津軽じょんがら節を始めとする力強い津軽三味線の音色が会場一杯に響き渡りました。途中、部門賞・一般表彰受賞者の方々によるスピーチ、さらに次期コンファレンス実行委員長の芝浦工業大学・山田純先生より、熱工学コンファレンス 2014 の開催案内をいただきました。最後に、弘前大学 稲村隆夫先生の中締めでお開きといたしました。会場が弘前のネオン街に近接していたせいか、ふるまわれた地酒のせい、懇親会終了後多くの方が、ネオン街に消えて行かれました。弘前でのご思い出になれば幸いです。

みちのく弘前にて、熱工学コンファレンスのような大きな大会が開催されることは珍しいことです。多くの方々に遠路お越しいただいたにも関わらず、弘前大学のキャンパス改修工事と重なり、大学食堂が縮小され、昼食などご不自由おかけしましたことをお詫び申し上げます。また、初日の 10 月 19 日(土)が大安と重なり、どのホテルも結婚式の予約で埋まっておりました。そのような中で、弘前城近くの土手町通りに、新しくコミュニティプラザができ、手狭ではありましたが何とか懇親会を開くことができました。弘前は情緒豊かな街です。またの機会に是非お越しいただけますようお願い申し上げます。

最後に、本コンファレンスを実施するにあたり、前年度ご担当の熊本大学・富村先生ならびに小糸先生から開催に関する貴重な資料をお送りいただきました。また、日本機械学会総務グループの大通千晴様には、コンファレンスで使用する備品などの準備と送付、受付業務、運営に関する助言など、様々な場面でお助けいただきました。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

さらに熱工学部門幹事の慶應義塾大学・横森剛先生から、本開催報告に掲載した写真のご提供をいただきました。ここに記して、謝意とさせていただきます。



弘前大学・佐藤敬学長からの歓迎
の挨拶



北海道大学・中垣俊之先生による
特別講演



熱工学部門長・小林秀昭先生に
よる乾杯のご発声



懇親会における津軽料理



渋谷和生氏による津軽三味線の
生演奏



芝浦工業大学・山田純先生による
次回コンファレンスの案内

熱工学コンファレンス・プレコンファレンスワークショップ 開催報告

第 91 期熱工学部門幹事 横森剛（慶應義塾大学）

これまで当熱工学部門にて開催されていた「熱工学ワークショップ」及び「熱工学コンファレンス・プレセミナー」を統合した新たな企画として、今年度は「熱工学コンファレンス・プレコンファレンスワークショップ」を開催致しました。このワークショップは、熱工学コンファレンス 2013 の前日となる平成 25 年 10 月 17 日（木）、18 日（金）の二日間に渡り、コンファレンスと同地区の青森県弘前市にある“あそべの森いわき荘”において 1 泊 2 日の合宿形式で開催され、熱工学に関連する重要テーマを題材とした講演会、合宿形式を活かしての夜分遅くにまで渡る意見交流会などの様々な企画のもと、41 名もの多くの方々にご参加を頂きました。

講演会では、本年度の熱工学コンファレンス及び当ワークショップが東北地区で開催されることを踏まえ“震災復興に向けた熱工学の貢献”をテーマとした第一部、また、今後の熱工学の発展のための人材育成に向けて“これからの人材育成－企業・公的機関・大学の立場から－”をテーマとした第二部の二部構成とし、以下のような 5 件のご講演を行なって頂きました。

・講演第 1 部 “震災復興に向けた熱工学の貢献”

①中村 直 氏（一般財団法人エンジニアリング協会）

演題：仙台港周辺地域における熱エネルギーセンターを基盤とした防災型スマートシティ構想について

②小野木 規文 氏（JFE エンジニアリング(株)）

演題：東日本大震災における災害廃棄物処理の状況

・講演第 2 部 “これからの人材育成－企業・公的機関・大学の立場から－”

③近久 武美 氏（北海道大学）

演題：大学におけるグローバル化の波と、持続可能性から見た今後の人材教育

④工藤 謙一 氏（青森県産業技術センター弘前地域研究所）

演題：青森県の産業イノベーションを支える人材育成事業

⑤深谷 直樹 氏（(株)デンソー）

演題：企業における人材育成－自動車の進化とデンソーの挑戦－

第 1 部では、まずエンジニアリング協会の中村直氏に、震災復興に際して都市全体のエネルギー供給網や防災インフラの再構築までもを含めた新たな都市再建プロジェクト「熱エネルギーセンターを基盤とした防災型新スマートシティ構想」についてご紹介を頂きました。また、JFE エンジニアリングの小野木規文氏には、震災によって発生した某大な災害廃棄物の処理について、実際に稼働している焼却炉等の紹介をもとに現在の進捗状況や課題を詳細に解説して頂きました。これら 2 件のご講演は、現在の日本の最重要課題である震災復興において、熱工学の重要性とその貢献の仕方について改めて考えさせられる非常に貴重な内容であったと思います。次に、第 2 部においては、まず北海道大学の近久武美氏より、長年にわたる研究・教育に携われた経験や国内外の動向から、これからの人材育成・教育の在り方について特に日本としてどのようなシステムを取るべきかをご講演頂きました。また、青森県産業技術センター弘前地域研究所の工藤謙一氏には、地方自治体として青森県が取り組んでいる産業の発展・創出とそのための人材育成について、種々のプロジェクト事例のご紹介と共に、個々の能力向上を目指す教育方法や産学官連携の重要性などの多岐に渡る内容をお話頂きました。最後に（株）デンソーの深谷直樹氏からは、

自社の人材育成システムの事例をもとに、企業内における技術者のモチベーションや技術力の向上、それに伴う会社自体の発展に向けた様々な取り組み内容についてご紹介を頂きました。以上3件のご講演により、大学・公的機関・企業といった様々な立場からの人材育成の考え方について知ることができ、今後の人材育成・教育の在り方を考える上で非常に有意義な内容であったと感じています。

また、初日の夜に行われた意見交流会では、参加者が一同に会し、熱工学に関する様々な話題について時間が経つのも忘れて深夜遅くまで意見交換が交わされました。今回の開催地は弘前市でも有名な温泉地であったことも幸いし、この意見交流会もくつろいだ雰囲気の中で大変盛り上がり、参加者の皆様の親睦を深めるとともに通常の学会等では味わえない非常に楽しい時間を過ごすことができたかと思えます。

最後に、このワークショップが盛会にて終わられましたのは、ご講演を頂いた5名の講師の先生方をはじめ、当ワークショップの企画・立案から実施まで全てに携わって下さった村田章先生（第90期熱工学部門講習会委員会委員長）、稲田孝明氏（同委員会幹事）、小林秀昭先生（熱工学部門長）、津島将司先生（前部門幹事）、大通千晴様（日本機械学会熱工学部門担当）、そしてご参加を頂いた皆様のご支援とご協力があったからこそに他なりません。この場をお借りして皆様には改めて心より御礼を申し上げます。また、今後の熱工学部門のさらなる発展に向けて、引き続き皆様にはご協力を賜りたくお願い申し上げます。当ワークショップの開催報告とさせていただきます。



村田章委員長による司会



小林秀昭部門長の開会挨拶



講師：中村直氏



講師：小野木規文氏



講師：近久武美氏



講師：工藤謙一氏



講師：深谷直樹氏



意見交流会の様子



参加者記念撮影

行事案内

部門企画行事案内

－2014 年度－

- [熱工学コンファレンス 2014](#)
開催日：2014年11月8日(土)～9日(日)
場 所：芝浦工業大学 豊洲キャンパス
- [日本機械学会 2014 年度年次大会](#)
開催日：2014年9月7日(日)～10日(水)
場 所：東京電機大学 東京千住キャンパス

部門関連行事案内

－2014 年度－

- [第52回燃焼シンポジウム](#)
開催日：2014年12月3日(水)～6日(金)
場 所：岡山コンベンションセンター，岡山県岡山市
主 催： [日本燃焼学会](#)
- [混相流シンポジウム2014](#)
開催日：2014年7月28日(月)，30日(水)
場 所：道民センター「かでの2・7」，北海道札幌市
主 催： [日本混相流学会](#)
- [日本冷凍空調学会 年次大会](#)
開催日：2014年9月10日(水)～12日(金)
場 所：佐賀大学 本庄キャンパス，佐賀県佐賀市
主 催： [日本冷凍空調学会](#)
- [第51回日本伝熱シンポジウム](#)
開催日：2014年5月21日(水)～23日(金)
場 所：アクトシティ浜松・コンGRESセンター，静岡県浜松市
主 催： [日本伝熱学会](#)
- [第48回空気調和・冷凍連合講演](#)
開催日：2014年4月16日(水)～18日(金)
場 所：東京海洋大学海洋工学部 85周年記念会館，東京都江東区
主 催： [日本機械学会](#)，[空気調和・衛生工学会\(幹事学会\)](#)，[日本冷凍空調学会](#)

－2013 年度－

- [第17回オーガナイズド混相流フォーラム](#)
開催日：2013年12月5日(木)，6日(金)
場 所：国民宿舎サンライズ九十九里（千葉）
主 催： [日本混相流学会](#)
- [第51回燃焼シンポジウム](#)
開催日：2013年12月4日(水)～6日(金)
場 所：大田区産業プラザPio（東京都）
主 催： [日本燃焼学会](#)
- [第34回日本熱物性シンポジウム](#)
開催日：2013年10月3日(水)～5日(金)
場 所：富山県民会館（富山）
主 催： [日本熱物性学会](#)

- [可視化情報学会全国講演会 2013 会津](#)
開催日：2013年9月27日(金)～28日(土)
場 所：会津大学（福島）
主 催：可視化情報学会
- [日本冷凍空調学会 年次大会](#)
開催日：2013年9月10日(火)～12日(木)
場 所：東海大学 高輪キャンパス（東京）
主 催：日本冷凍空調学会
- [第41回可視化情報シンポジウム](#)
開催日：2013年7月16日(火)～17日(水)
場 所：工学院大学新宿キャンパス（東京）
主 催：可視化情報学会
- [第50回日本伝熱シンポジウム](#)
開催日：2013年5月29日(水)～31日(金)
場 所：ウェスティンホテル仙台および仙台トラストシティ（宮城）
主 催：日本伝熱学会
- [第47回空気調和・冷凍連合講演](#)
開催日：2013年4月16日(火)～18日(木)
場 所：東京海洋大学海洋工学部 85周年記念会館（東京）
主 催：日本機械学会, 空気調和・衛生工学会(幹事学会), 日本冷凍空調学会

国際会議案内

—2015 年度—

- [The 9th ASME/JSME/KSME Thermal Engineering Joint Conference](#)
開催日：2015年7月12日(日)～16日(水)
開催地：Honolulu, Hawaii, USA

—2014 年度—

- [The 25th International Symposium on Transport Phenomena \(ISTP-25\)](#)
開催日：2014年11月5日(水)～7日(金)
開催地：Aonang Villa Resort, Krabi, Thailand
- [The 15th International Heat Transfer Conference \(IHTC-15\)](#)
開催日：2014年8月10日(日)～15日(金)
開催地：Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan
- [The 16th International Symposium on Flow Visualization \(ISFV16\)](#)
開催日：2014年6月24日(火)～28日(土)
開催地：Okinawa, Japan

編集後記

今回の TED Plaza 71 号では、火災をキーワードに研究例を 2 件紹介させて頂きました。火災消火の研究として、弘前大学 鳥飼宏之先生に「ゴム風船を用いた火災消火の研究」について、新たな火災消火法の研究事例をご紹介いただくとともに火災消火法の基礎についてもご解説いただきました。また、FDS(Fire Dynamics Simulator) を利用したトンネル火災と水素漏洩拡散挙動のシミュレーション事例として、鹿児島大学 錦慎之介先生に「FDS による火災・安全シミュレーション」についてご紹介いただきました。お忙しい中にも関わらず今回の TED Plaza への執筆を快くお引き受けいただきました両先生に厚く御礼申し上げます。読者の方には、本記事より熱工学のさらなる可能性を感じて頂ければ幸いです。

(編集担当委員：編集担当委員：朝原・橋本・林)

第 91 期広報委員会

委員長：	中別府 修	(明治大学)
幹事：	志村 祐康	(東京工業大学)
委員：	赤松 正人	(山形大学)
	朝原 誠	(青山学院大学)
	大西 元	(金沢大学)
	岡島 淳之介	(東北大学)
	橋本 英樹	(九州大学)
	林 潤	(大阪大学)
	元祐 昌廣	(東京理科大学)