

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月18日現在

機関番号：13401
研究種目：若手研究（B）
研究期間：2010～2011
課題番号：22760437
研究課題名（和文） 散水消火を予測する高精度数値シミュレーションツールの構築
研究課題名（英文） Development of numerical simulation tools for predicting spray extinction

研究代表者
田中 太（TANAKA FUTOSHI）
福井大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60401791

研究成果の概要（和文）：
水噴霧による火炎の減衰効果を予測する数値シミュレーションツールの構築を行った。水噴霧の影響を受ける燃料表面温度と燃料蒸気濃度を用いて、液体燃料の蒸発量を変化させた。計算と実験を比較すると、火炎の減衰率を予測できることが分かった。次に水噴霧による火炎の消火を予測する新たな数値計算プログラムを開発し、さらに酸素消費法に基づく発熱速度計測実験を実施した。開発されたプログラムは、数値的不安定性が予想以上に大きく、未だ問題が残っている。今後、数値計算の安定化のために、燃焼消火判定の計算と流れ場の計算を強連成問題として取り扱うように改良する予定である。
研究成果の概要（英文）：

A purpose of this study is the development of numerical simulation tools for predicting extinction and suppression by the water spray. Results of numerical simulation were compared with the experimental results of suppression and extinction. The numerical simulation of fire suppression was in qualitative agreement with fire suppression experiment. The simulation of fire extinction remained as the future work.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総 計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学
科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備
キーワード：火災工学、散水による消火

1. 研究開始当初の背景
現在、建築物の火災安全設計のために数多くの算定式が防災設計者に使用されている。しかし、これらの算定式の多くは既往の知見から構築されているため、研究基盤の薄弱な部分については不十分な面も見られる。特に、“水系の消火設備・防火設備（以後、散水設備とする）”の効果については、これを生かした性能設計を行うには不十分である。現状では、散水することによって炎を消し止める、あるいは炎を弱めるという当たり前の現象を、性能設計に生かせるツール（算定式やシミュレーションモデルなど）がほとんど存在しない。防災設計者が問題としている火災現象のスケールに対して、消火現象のスケールがあまりにも小さいことが消火に関する問

題を難しくしている。非常に小さなスケール（たとえば $1 \mu\text{m}^3$ といった微小空間）ならば現在のシミュレーション技術でも燃焼現象が持続できるか否か（消火できるか）を厳密に予測できるかもしれないが、防災設計者が必要としているのは、居住空間というマクロスケールの中で燃え盛っている炎を消し止められるかどうかである。これまでの研究では、散水設備による火災抑制効果（液体燃料のプール火災が対象）は徐々に明らかになりつつある。しかし、これらの知見は、ある特定の実験装置において生じる現象をまとめたものが多く、汎用性に欠ける部分もある。研究成果をより広範に応用するには、散水設備の火災抑制あるいは消火効果を予測できる数値シミュレーションモデルの開発が必須である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、散水によって炎が弱められ消し止められる様子を取り扱うことができる新しい燃焼消火モデル（火炎面を用いた改良型混合分率モデル）を開発し、散水による炎の減衰と消火を考慮できる数値シミュレーションツールを構築することである。

3. 研究の方法

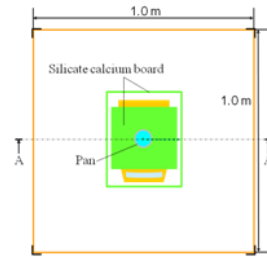
(1) 散水による火災の減衰

従来の混合分率燃焼モデルと液体燃料の蒸発モデルを組み合わせるプール火災の数値シミュレーションを行い、計算結果と実験結果との比較検討を実施した。この数値シミュレーションモデルでは、散水による発熱速度の低減について検討した。

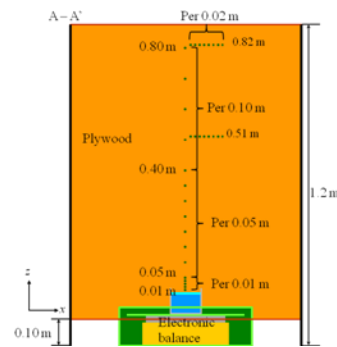
従来の混合分率モデルと蒸発モデルを組み合わせた数値シミュレーション結果と比較するためにプール火災の燃焼実験を実施した。図1に実験装置を示す。本実験は、無風状態での開区画 (W1.0 m × D1.0 m × H1.2 m) における燃焼実験である。火災の再現には火皿火災（液体燃料：ヘプタン）を用い、区画中央部に火源を設置した。天井面を開放し、周囲をベニヤ板で覆うことで区画内の空気流を一定にし、周囲外気流による火災の乱れを抑えた。また、火源より低い高さに通気口 (W1.0 m × H0.1 m) を設けることで酸素供給を絶やさないようにした。水噴霧ヘッドは区画中央部に火皿から 1.0 m の高さに 1 個設置した。ヘッド圧力 0.4 MPa、水量 13.3 L/min として、着火後 30 s で放水を行い、300 s まで続けた。

液体燃料のプール火災の場合、その発熱速度が散水によって減衰する要因として、液体燃料の蒸発速度が小さくなっていることが考えられる。蒸発速度は、液体表面の温度と液体表面の燃料蒸気濃度の関数となる。液体燃料表面の燃料蒸気の濃度は、クラウジウ

ス・クラペイロンの式により定まる。



(a) 平面図



(b) 断面図

図1 実験装置の概要

散水による火災の発熱速度の減衰を、従来の混合分率モデルで再現するために、液体燃料の表面温度を簡単な 1 次元熱伝導方程式を用いて式(1)のように表現した。図2に火皿内燃料層の熱伝導計算モデルを示す。ただし、火皿には液体燃料の下に水が敷いてある。ここで、 q_0 は液面表面に入射する放射熱流束である。熱伝導方程式(1)のソース項として、液体燃料が吸収する放射熱が与えられており、この値は液体の吸収係数 κ によって変化するものとした。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho c} \frac{\partial q}{\partial x} \quad (1)$$

$$q = q_0 \exp(-\kappa L) \quad (2)$$

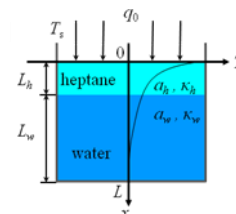


図2 液体燃料の熱伝達モデル

境界条件は、以下の式を用いた。

$$x=0; q=h(T_0-T_s), \quad x=L; \frac{\partial T}{\partial n}=0 \quad (3)$$

ここで、 T_0 は液体表面の直上セルにおける温度、 T_s は液体表面温度である。放射熱流束に対する液体燃料の吸収係数については、実験値等の知見が少ないため、本研究では試行錯

誤的に最適値 κ を 70 と定めた。

図 3 に数値シミュレーションと実験から得られた平均発熱速度の比較を示す。散水前と散水後の平均発熱速度を比較すると、数値シミュレーションは 49 %、模型実験は 56 % 減衰している。発熱速度の定量値は実験値に対して未だ過大であるが、発熱速度の減衰比に関しては、実用上十分な精度で評価できた。

以上の結果から、散水の影響を考慮して液体燃料の蒸発量を見積もることで、数値シミュレーションにおいても水噴霧設備による発熱速度逓減効果を得られることがわかった。

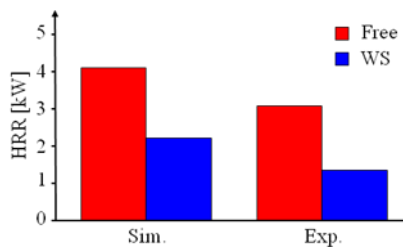


図 3 平均発熱速度低減の比較

(2) 散水による火炎の消火

散水による消火を取り扱うための新しい燃焼モデルの開発に取り組んだ。新しいモデルでは、火炎の非定常変化を火炎面で形作り、その一部が消失することで火炎の減衰や消火を表現することが特徴である。また、酸素消費法に基づく発熱速度計測の実験装置を製作し、新しい燃焼モデルを用いた数値シミュレーション結果と比較検討する。

図 4 に実験装置の概略図を示す。散水による消火実験を行う場合、散水量が増えるために、天秤による発熱速度の測定は困難と考え、酸素消費法による発熱速度測定実験装置を新たに製作した。実際に火災抑制実験を行う区画のサイズは、W1.6 m × D1.6 m × H2.3 m である。煙が区画外に出ないように高さ 1.1 m のフードを設置した。水噴霧ノズルの位置は区画中心の床から 2.05 m の高さにあり、火源の設置位置は区画中心の天井面から 1.6 m の位置である。

散水時における発熱速度測定では、噴霧した水滴が炎によって水蒸気になり、フード内の燃焼ガスには多くの水蒸気が含まれる。一方、酸素や二酸化炭素の濃度を計測する測定器では、多くの水蒸気を含む燃焼ガスを分析できないため、クーラーに燃焼ガスを通して十分に除湿してから濃度分析を行った。本研究で取り扱う火源は 10-20kW 程度の小さい規模であり、フード内の燃焼ガスに含まれる酸素の減少量はわずかな値になるため、除湿された水蒸気が計測誤差に与える影響が大きくなり、除湿の影響を補正する必要がある。図 5 に発熱速度の計測値を示す。黒線は天秤

で計測した発熱速度である。青線は除湿の影響を考慮していない発熱速度であり、赤線は除湿の影響を考慮して補正した発熱速度である。水蒸気の影響を考慮することで、天秤の計測値とほぼ一致することが分かる。

①: Electronic balance ②: Fire pane ③: Spray nozzle ④: Pressure gauge
⑤: Flowmeter ⑥: Thermocouple ⑦: Pump ⑧: Tank ⑨: Pitot tube ⑩: Fan
⑪: AD converter ⑫: Data logger ⑬: PC

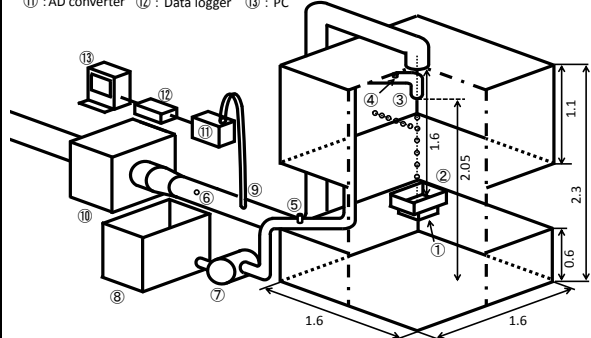


図 4 酸素消費法に基づく発熱速度測定の実験装置

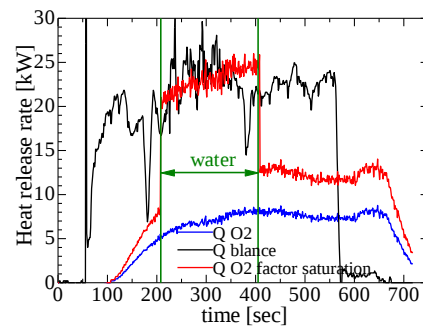


図 5 発熱速度の時間変化

本研究では、散水による消火を取り扱うために新たな数値シミュレーションコードを開発した。本コードで使用した支配方程式は、質量保存式(4)、運動量保存式(5)、エネルギー保存式(6)、化学種の保存式(7)、状態方程式(8)である。密度に対して、圧力による変化を考慮せず、温度のみが密度の変化に寄与すると仮定した弱圧縮性流れとして計算を実施した。乱流モデルには、LES の Smagorinsky モデルを使用した。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_k}{\partial x_k} = \dot{m}_b \quad (4)$$

$$\rho \frac{D u_i}{D t} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} [2(\mu + \mu_t) D_{ik}] + \rho g_i + f_i - u_i \dot{m}_b \quad (5)$$

$$\rho C_p \frac{D T_g}{D t} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(k + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T_g}{\partial x_k} \right] - p \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \dot{Q} + \dot{Q}_b \quad (6)$$

$$\rho \frac{DY_g}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\rho D_{aw} + \frac{\mu_k}{Sc_k} \right) \frac{\partial Y_g}{\partial x_k} \right] + \dot{m}_b - Y_g \dot{m}_b \quad (7)$$

$$\rho = \frac{P}{R_0 T_g \sum_{j=1}^N Y_j / M_j} \quad (8)$$

散水された液滴を取り扱うために、液滴の移動と蒸発に関する方程式（気体の運動量保存式内の液滴による抗力、各液滴の運動方程式、抗力係数、蒸発に伴う気体の増加質量、蒸発に伴う気体のエネルギー減少量）を用いた。なお、液滴の平衡蒸気体積分率は、Clausius-Clapeyron の式より求めた。物質伝達係数、熱伝達係数は、相関式により求めた。水噴霧は、液滴直径を 274 μm 、初速度を 20.4 m/s、噴霧角度を 60° とした。なお、散水は着火 60 秒後から開始するものとした。

実験の火源上部と区画外部を計算領域とした。幅(x) 3 m、奥行き(z) 3 m、高さ(y) 1.6 m で、区画は実験と同様である。時間刻み Δt を 0.0005 s、格子幅を 0.05 m $\times$ 0.05 m $\times$ 0.05 m、スマゴリンスキー定数 C_s を 0.12、乱流プラントル数 Pr_t を 0.7、乱流シュミット数 Sc_t を 0.7 とした。

計算領域中の壁境界に対して、流速は滑りなし境界条件とし、圧力と温度、化学種はノイマン境界条件とした。底面に対して、流速は滑り境界条件、圧力と温度、化学種はノイマン境界条件とした。煙フード中央の穴には、流出の流速をディリクレ境界条件とし、圧力と温度、化学種はノイマン境界条件とした。解析空間周囲の流入流出境界に対して、遠方境界条件を使用した。流入の場合は温度と化学種にディリクレ条件を適用し、流出の場合はノイマン条件を適用した。

図 5 に火炎面と温度分布、図 6 に散水された水滴と水蒸気質量分率のコンタ図を計算結果の例として示す。可視化には FIELDVIEW を使用した。図 6 から、火源直上に散水された水滴が直ちに蒸発するため、多くの水蒸気が火源直上に存在していることがわかる。この水蒸気は火源からの上昇気流に乗って押し流されてフード内に充満する。一部の水蒸気は天井の燃焼ガスの吸い込み口から吸い出されていく。散水後に広がりながら、落下していく水滴は外気温度がさほど高くなくても、徐々に蒸発する。その水蒸気は、火源の巻き込む流れに流されるため、火源周囲の水蒸気濃度が徐々に増加する。

開発した数値計算コードは、プログラムの数値的不安定性が大きく発散しやすい。そのため、現状では実験結果との十分な比較が実施できていない。

4. 研究成果

散水による火炎の発熱速度の減衰については、散水の影響を考慮して液体燃料の蒸発

量を見積もることで、数値シミュレーションにおいても水噴霧による発熱速度減衰効果を得られることがわかった。

散水による消火を予測するために開発した数値計算コードは、プログラムの数値的不安定性が予想以上に大きくなり、現状では実験結果との十分な比較が実施できていない。今後、数値計算の安定化のために燃焼消火判定の計算と、流れ場の流動の計算を順次計算する弱連成問題として取り扱わずに、同時に計算する強連成問題として取り扱うように改良する予定である。

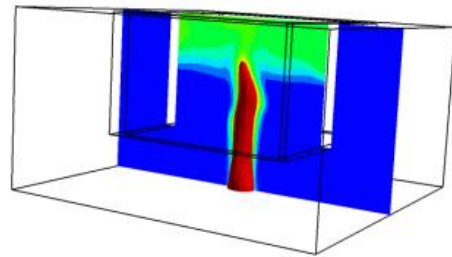


図 5 火炎面と温度分布

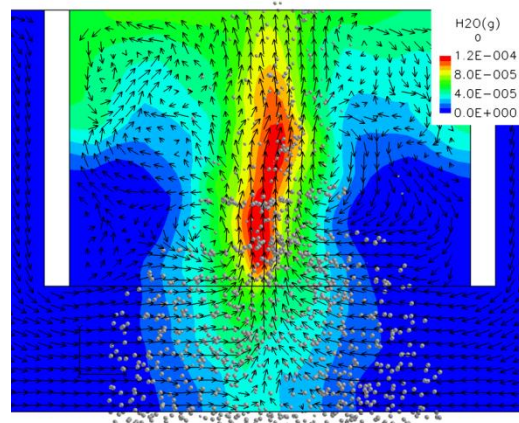


図 6 散水時の液滴と水蒸気のコンタ

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計 1 件）

- ① 尾崎啓太、田中太、プール火炎の数値シミュレーションに関する基礎研究、日本機械学会北陸信越支部第 48 期総会・講演会、平成 23 年 3 月 5 日、信州大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 太 (TANAKA FUTOSHI)

福井大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：6 0 4 0 1 7 9 1