

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

プロパン-空気予混合火炎の燃焼速度および構造に及ぼすウォーターミストの影響に関する数値解析

Numerical Simulation of the Effect of Water Mist on the Flame Speed and Structure of Propane-Air Premixed Flame

吉田 亮*・湯川 明子

YOSHIDA, Akira* and YUKAWA, Akiko

東京電機大学工学部 〒120-8551 東京都足立区千住旭町5
Tokyo Denki University, 5 Senju-Asahicho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551, Japan

2013年3月30日受付; 2013年6月25日受理/Received 30 March, 2013; Accepted 25 June, 2013

Abstract : Water mist is expected to have physical and chemical effects on the laminar flame speeds. In the present study, the effect of water mist on the flame speed and structure of propane-air premixed flames is numerically simulated by using PREMIX code of CHEMKIN package, modified to include the evaporation process of water mist. Evaporation process was assumed to follow the Arrhenius law. Chemical kinetic models for propane oxidation were evaluated by comparison of simulated flame speeds with experimental data for the case without water mist. The effects of water mist on flame speeds are separated into the dilution and chemical effects of water vapor, and the thermal effect which includes the heat of evaporation of water mist. The most effective is the sensible heat of water vapor, which is followed by the heat of evaporation. The chemical effect is relatively small but cannot be neglected. When the water mist is added, the flame temperature decreases due to thermal effect which reduces the rates of chemical reactions involving the radicals such as O and H, which have the positive sensitivity of flame speed. Furthermore, three-body reactions involving H₂O are enhanced. These reactions have high negative sensitivity of flame speed due to high chaperon efficiency of H₂O.

Key Words : Fire suppression, Water mist, CHEMKIN, Laminar flame speed

1. 緒言

近年オゾン層保護を目的としてハロン消火剤の生産の廃止が決定され、種々のハロン代替消火剤の開発が進められている[1]。中でもウォーターミストは環境負荷が低く、入手が容易であるため、ハロン消火剤の代替消火剤として注目されている[2,3]。ウォーターミストの消炎効果は、冷却効果、窒息効果および化学反応抑制効果に大別されており、ウォーターミストは、冷却効果の大きい気体消火剤であるN₂、CF₄や化学的な抑制剤であるCF₃Brよりも消炎効果が大きいことが明らかにされている[4]。ここで、燃焼現象は化学反応が温度に依存することからも明らかのように実際にはこれらが同時に起こり相互に密接に関連している。そのため、実験的にそれぞれの効果を分離してその影響の度合いを解明することはできない。

燃焼速度は燃料の持つ基本的な物理化学的特性値であり、拡散火炎の消炎を Damköhler 数で議論する際に化学反応の特性時間を評価するために用いられ、また拡散火炎の安定性が火炎基部に形成される予混合火炎の燃焼速度によって支配されること[5]を考慮すれば、火炎の消炎を議論するうえで極めて重要なパラメータである。そのためこれまでに水素およびメタンに関しては、燃焼速度に及ぼす消火剤の影響が広く研究されているが[6,7]、プロパンに関してはほとんど解明されていない。そこで本研究ではCHEMKINのPREMIXコードを用いて数値解析を行い、プロパン-空気層流予混合火炎の燃焼速度および火炎構造に及ぼすウォーターミストの冷却効果および化学反応抑制効果を数値解析により明らかにした。

* Corresponding author. E-mail: yoshida@cck.dendai.ac.jp

2. 解析手法およびモデル

2.1. 化学反応機構および計算条件

燃焼現象の諸特性を数値解析するために、これまでに多くの詳細化学反応機構が提案されており、水素あるいはメタンなどの構造の簡単な燃料についてはその反応機構はほぼ解明されたといえる[8]。しかし、C3以上の高級な炭化水素燃料に関しては使用する反応機構によって計算される燃焼特性に差異が生じる。そこで本研究では、プロパンの酸化反応として提案されている代表的な四つの反応機構を用いて燃焼速度を計算し、実験結果とよく一致する反応機構を採用することにした。用いた四つの反応機構はそれぞれ、DLW機構[9] (71化学種, 469素反応), San Diego Mech機構[10] (46化学種, 235素反応), USC Mech II機構[11] (111化学種, 784素反応), およびAramcoMech 1.3機構[12] (171化学種, 1140素反応)である。

火炎はプロパン-空気予混合火炎で一次元、定常、層流平面自由伝播火炎を考え、当量比を変化させて燃焼速度を計算した。未燃混合気温度は $T_0 = 298$ K, 圧力は $P_0 = 1$ atm である。また空気の組成は標準乾き空気の組成に準じ $N_2 : O_2 : Ar : CO_2 = 78.084 : 20.948 : 0.934 : 0.034$ とした。

常温での飽和蒸気圧は極めて低いが、火炎近傍では温度が上昇し、ほとんどすべてのミストは蒸発していることが明らかのため[13], 添加したミスト量は完全蒸発をした時の水蒸気希釈率で表した。ここで水蒸気希釈率 X_{H_2O} の定義は $X_{H_2O} = N_{H_2O} / (N_{C_3H_8} + N_{O_2} + N_{N_2} + N_{Ar} + N_{H_2O})$ であり, N は各化学種のモル数である。本研究では $X_{H_2O} = 0 \sim 0.20$ の範囲で変化させた。

2.2. ウォーターミストのモデル化

ウォーターミストの消炎効果には、前述した通り三つの効果が考えられるが、本研究では窒息効果は反応抑制効果に含めて考える。冷却効果は、ミストの蒸発過程で生じる蒸発潜熱と、蒸発した水蒸気の温度上昇に消費される顕熱が考えられる。一方、化学反応抑制効果は H_2O の分解反応および三体反応の第三体としての chaperon 効果がある。これらの効果が層流燃焼速度に及ぼす影響の程度を明らかにするために以下の四つのモデルを考える。

(1) 水蒸気無添加モデル (O)

このモデルは、ミストを添加しない場合で、プロパン-空気だけの予混合気を考える。なおこのモデルは、以下に示す三つのモデルにおいて計算された燃焼速度に基づき、ウォーターミストの影響を議論する基準となる。

(2) 水蒸気非反応モデル (V)

このモデルでは蒸発過程を無視し、添加されたミストを同量の水蒸気とみなす。また添加された水蒸気は反応には関与しない不活性物質として取り扱う。従って、このモデルでは蒸発した水蒸気の顕熱の影響のみを知ることができる。解析では添加した水蒸気をプロパンの酸化反応で生じる H_2O と区別し、完全に不活性な水蒸気 Virtual- H_2O と定

義した。この仮想的な気体 Virtual- H_2O は、 H_2O と同じ分子構造を持ち、同じ熱力学特性および輸送特性を持つ。また化学反応に関与させないように素反応式に含めていない[14]。

(3) 水蒸気反応モデル (R)

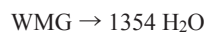
このモデルでは水蒸気非反応モデルと同様、蒸発過程は考慮していないが、添加した水蒸気の顕熱と化学反応に及ぼす影響を含めたモデルである。このモデルでは添加した水蒸気は、プロパンの燃焼反応で生じた H_2O と同様に分解や三体反応に関与する。従って、水蒸気非反応モデルと比較することで、水蒸気の化学反応抑制効果を抽出することができる。

(4) ミスト蒸発モデル (WMG)

ミストの蒸発潜熱、蒸発した水蒸気の顕熱および化学反応に及ぼす影響のすべてを考えたモデルである。CHEMKIN では気相反応しか取扱えない。そのためウォーターミストおよびその蒸発過程を CHEMKIN で取り扱うためにはモデル化が必要である。ここではウォーターミストを水と同じ物性値を持つ仮想的な理想気体と仮定し、ウォーターミストガス (WMG) と呼ぶ[15]。すなわち、圧力 $P_0 = 1$ [atm] = 101.325 [kPa], 温度 $T_0 = 298$ [K] の下で、密度 $\rho_0 = 997.047$ [kg/m³] となる理想気体であると考え。一般ガス定数は $R_0 = 8.3143$ [kJ/kmol-K] であるから、理想気体の状態方程式

$$P_0 = \rho_0 \frac{R_0}{M_{WMG}} T_0$$

よりウォーターミストガス (WMG) の分子量は $M_{WMG} = 24,380$ [kg/kmol] となる。水蒸気の分子量を M_{H_2O} とすると、1 [kmol] のウォーターミストガスは蒸発することにより M_{WMG}/M_{H_2O} [kmol] の水蒸気になるので、 $24,380/18 = 1354$ [kmol] の水蒸気が生成される。従って、ウォーターミストガスが水蒸気に変化する蒸発過程は反応式



で表すことができる。また反応速度は

$$-\frac{d[WMG]}{dt} = k[WMG]$$

で表される。ここで $[]$ は濃度を表す。この反応 (蒸発過程) は Arrhenius 則に従うと仮定し、反応速度定数 k は

$$k = A \exp(-E/R_0 T)$$

で表されるものとした。ここで A [s⁻¹] は頻度因子, E [kcal/mol] は活性化エネルギーである。なお、ウォーターミストガスの分子量 M_{WMG} は水の分子量 M_{H_2O} の 1354 倍であるので定圧比熱, 比エンタルピーおよび比エントロピーといった熱物性値は水の熱物性値の 1/1354 とし、その結果ミストの蒸

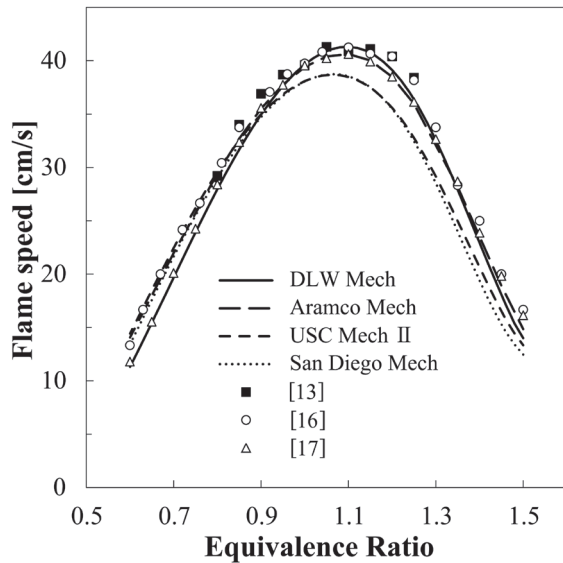


Fig. 1 Laminar flame speeds (Numerical calculations and experiments).

発潜熱は反応熱として自動的に反応計算に組み込まれることになる。

3. 解析結果および考察

3.1. 反応機構による燃焼速度の比較

プロパンに対して前述した四つの反応機構を用いて計算された層流燃焼速度と実験結果の比較を図1に示す。実験結果については、Yoshida 等[13]はよどみ流中に形成される平面火炎、Vagelopoulos 等[16]は対向流予混合火炎を用い、また Bosschaart 等[17]は平面火炎に熱流束法を適用し求めたものである。詳細にみると熱流束法による測定結果が希薄側で多少低いが、測定された燃焼速度は、実験方法に差異があるものの極めてよく一致している。また計算結果では、San Diego Mech 機構[10]と USC Mech II [11]ではほぼ等しい燃焼速度が得られ、燃焼速度に及ぼす反応機構の違いの影響はほとんど認められない。この二つの機構により得られた燃焼速度はともに希薄側では実験値とよく一致するが、量論比から過濃側では過小評価となる。一方、DLW 機構[8]による計算結果は当量比の全領域でよく一致しているが、詳細に見ると希薄側では多少低めの結果となり、熱流束法により求められた燃焼速度と一致することが分かる。また、AramcoMech 1.3 機構[12]を用いた計算結果は当量比の全領域で実験結果とよく一致しており、希薄側においても、よどみ流および対向流によって得られた結果と完全に一致する。本研究では、計算時間を考慮し、比較的少ない素反応数で実験値とよく一致する DLW 機構を用いることにする。

3.2. ウォーターミストガスの蒸発

ウォーターミストガス (WMG) の蒸発過程を支配してい

るのは頻度因子 A [s^{-1}] と活性化エネルギー E [kcal/mol] である。これらのパラメータはミスト粒径あるいは数密度といったミスト特性によって決定されることは明らかであるが、これらに関する実験データは存在しないため、物理的、化学的に矛盾のない値を見出す必要がある。そのために蒸発終了温度 T_{ev} を仮定し、その温度で蒸発が終了するような頻度因子 A と活性化エネルギー E の組み合わせを求める。まず、WMG が予熱帯で完全に蒸発するとして、蒸発終了温度を $T_{ev} = 500$ K と設定し[15]、頻度因子 A および活性化エネルギー E を求めた。その際、 $E = 26 \sim 42$ [kcal/mol] の範囲で A の値は 10^{18} [s^{-1}] 程度となるが、 A を変化させても、温度分布および水蒸気、WMG、中間生成物の濃度分布に差異が見られなかった。そこで、次に火炎帯内で完全に蒸発するよう $T_{ev} = 1000$ [K] および 1500 [K] と仮定し、同様に Arrhenius パラメータを求めた。その際、 $E = 30$ [kcal/mol] 一定にして A の値を求めた結果、それぞれ $A = 3.16 \times 10^{11}$, 1.00×10^9 [s^{-1}] となった。図2に T_{ev} を変化させた場合の温度分布および水蒸気、WMG の濃度の分布を示し、図3に中間生成物の濃度分布を示す。WMG の消滅あるいは水蒸気の生成は、頻度因子が大きくなるほど蒸発終了温度が低くなり、ほとんどが予熱帯で消滅する。これは、頻度因子が大きいかほど WMG の蒸発反応が盛んに行われるためである。また、頻度因子が大きいモデルほど蒸発による吸熱反応が盛んに行われ、予熱帯の温度が低下するが、WMG の蒸発はどの場合もほとんど予熱帯のみで行われているので、反応帯における温度分布には差が表れず、火炎構造に影響を及ぼすこともない。また、断熱火炎温度はヘスの法則により蒸発過程のいかんにかかわらずすべて一致する。これらより、蒸発終了温度を変えることにより、粒径などのミスト特性を考慮できると考えられる。図4は、各モデルにおける水蒸気の生成過程を示す。水蒸気無添加

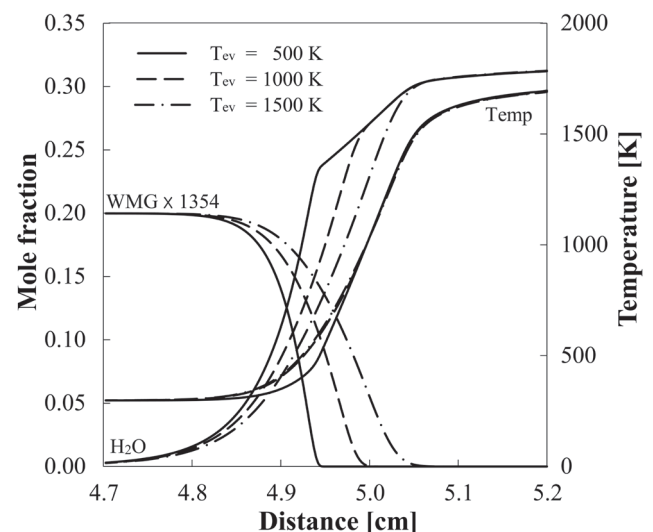


Fig. 2 Effect of T_{ev} on temperature distributions and evaporation processes for $\langle \text{WMG} \rangle$, $\phi = 1.0$ and $1354 X_{\text{WMG}} = 0.20$.

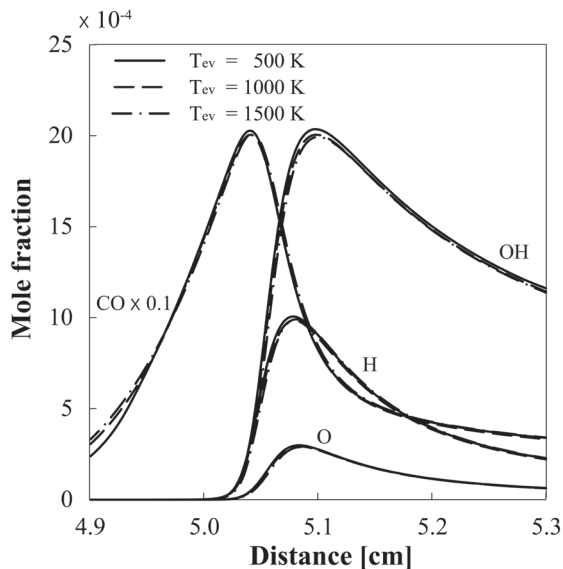


Fig. 3 Effects of T_{ev} on the major species concentrations for <WMG>, $\phi = 1.0$ and $1354X_{WMG} = 0.20$.

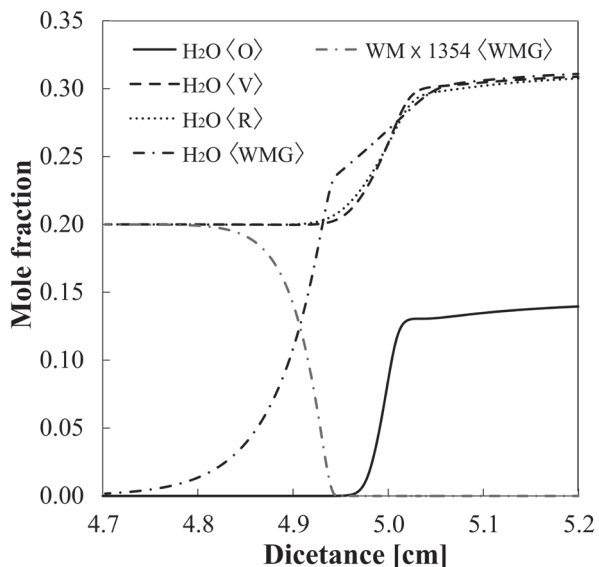


Fig. 4 Concentration distributions of water vapor and water mist gas for $\phi = 1.0$, $X_{H2O} = 0$ and 0.2 .

モデルでは、プロパンの酸化反応に伴い発生した水蒸気が燃焼ガス中では $X_{H2O} = 0.15$ に達する。水蒸気非反応モデルおよび水蒸気反応モデルでは、予め水蒸気 $X_{H2O} = 0.2$ を添加させた場合、反応後には $X_{H2O} = 0.32$ にまで増加する。これに対し、ミスト添加モデルでは WMG の蒸発により最終的には $X_{H2O} = 0.32$ にまで達する。この結果、ミストをウォーターミストガスと仮定することにより、ミストの蒸発過程を考慮した火炎構造の解析が可能であることが明らかになった。ただしこのモデルでは、ウォーターミストは予熱帯あるいは火炎帯で完全に蒸発する必要があり、粒径および滞留時間には考慮が必要である。

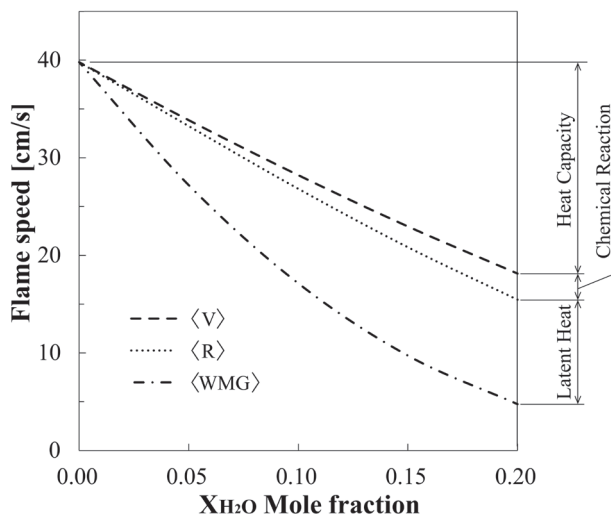


Fig. 5 Laminar flame speeds of propane/air mixture with and without water mist for $\phi = 1.0$, $X_{H2O} = 0$ and 0.2 .

3.3. 燃焼速度

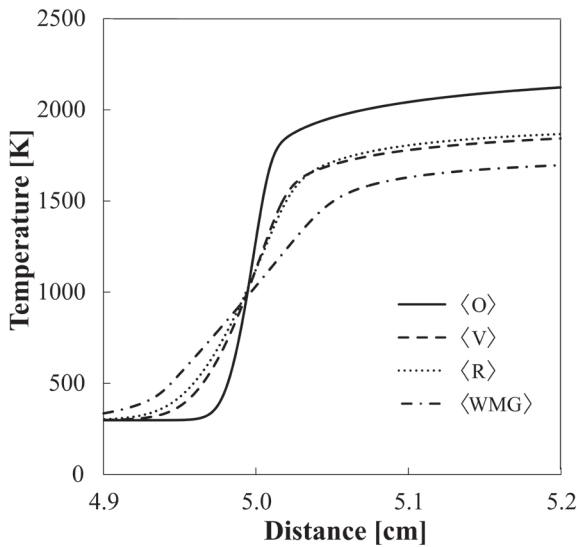
次に各モデルを用いて計算された燃焼速度を比較し、ウォーターミストが燃焼速度に及ぼす効果を調べた。水蒸気非反応モデルは添加した水蒸気を反応に関与させていないので、水蒸気無添加モデルの結果と比較することにより、水蒸気の顕熱のみによる消炎効果を抽出することができる。また、水蒸気反応モデルは水蒸気の熱的效果に加え、化学反応の効果も含まれているため、水蒸気非反応モデルとの差から化学的效果を評価できる。さらに、ミスト蒸発モデルでは、水蒸気の効果に加え蒸発に伴う潜熱の効果が含まれるため、水蒸気反応モデルとの差から蒸発潜熱の効果を求めることができる。

$\phi = 1.0$ について結果を図5に示す。 $X_{H2O} = 0$ における燃焼速度は、どのモデルでも $S_{u,O} = 39.8$ cm/s となり、また $X_{H2O} = 0.20$ においてはそれぞれ $S_{u,V} = 18.1$ cm/s, $S_{u,R} = 15.4$ cm/s, $S_{u,WMG} = 4.84$ cm/s となった。ここで、ミスト添加による燃焼速度低減量の割合を求めたところ、それぞれ水蒸気の顕熱の効果が 62.1%、化学的效果が 7.7%、蒸発潜熱の効果が 30.2% であった。これよりウォーターミストによる燃焼速度低減効果は、ほとんどが熱的效果であるが、化学的效果も決して無視できない程度に存在することが分かった。

3.4. 温度分布

次に各モデルの温度分布を比較し、ウォーターミストが火炎帯温度に及ぼす効果を調べた。図6は水蒸気無添加モデルおよび $X_{H2O} = 0.20$ における水蒸気非反応モデル、水蒸気反応モデル、ミスト蒸発モデルを用いて得られた温度分布を示す。

水蒸気無添加モデルでは、消炎効果を持つ水蒸気およびウォーターミストが添加されていないため、断熱火炎温度

Fig. 6 Temperature distributions for $\phi = 1.0$, $X_{H_2O} = 0$ and 0.2 .

ほどのモデルよりも高い $T_{ad,O} = 2270$ K となった。また、顕熱の影響を受けた水蒸気非反応モデルでは 320 K ほどの温度低下が見られ、 $T_{ad,V} = 1947$ K となり、水蒸気反応モデルでは $T_{ad,R} = 1949$ K、ミスト蒸発モデルでは潜熱の吸収が行われるため、さらに 190 K ほど温度低下して $T_{ad,WMG} = 1762$ K となった。

ここで、水蒸気非反応モデルと水蒸気反応モデルとの間は、わずか 2 K の差しかなかった。これは、Virtual- H_2O は水蒸気と同じ熱力学特性を持っており標準生成エンタルピーには差がないため、添加された水蒸気の反応への関与の有無によって断熱火炎温度に違いが現れないからであ

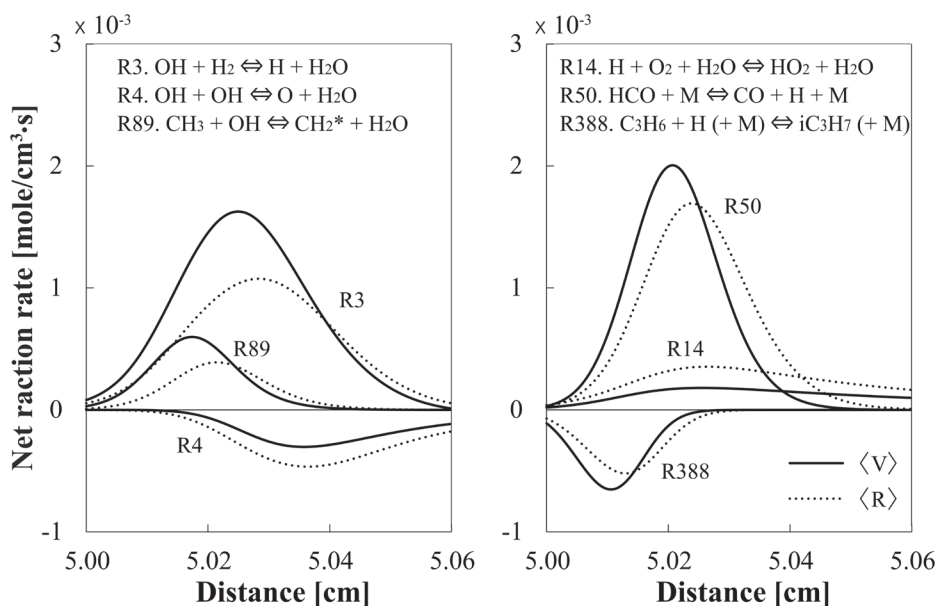
る。つまり、水蒸気の化学的効果は断熱火炎温度には現れないが、反応途中の温度や燃焼速度には影響を与えることになる。

3.4. H_2O が関与する反応の反応速度と濃度分布

水蒸気の化学的効果を調べるため、主要な素反応の正味反応速度を調べた。図 7 に、水蒸気非反応モデルと水蒸気反応モデルにおいて、 H_2O が関与する素反応のうち、反応速度の大きいものだけを示した。どちらも $X_{H_2O} = 0.20$ における値で、水蒸気非反応モデルを実線で、水蒸気反応モデルを点線で示す。

図 7 左図で表示された $OH + H_2 \rightleftharpoons H + H_2O$ (R3), $OH + OH \rightleftharpoons O + H_2O$ (R4), $CH_3 + OH \rightleftharpoons CH_2^* + H_2O$ (R89) は、 H_2O の生成分解に関する反応である。水蒸気反応モデルでは添加された H_2O は反応に関与するため、 H_2O が分解される逆方向の反応速度が増加する。そのため、R3, R89 については正味反応速度が低下し、R4 は負方向に大きくなる。一方、図 7 右図で $H + O_2 + H_2O \rightleftharpoons HO_2 + H_2O$ (R14), $HCO + M \rightleftharpoons CO + H + M$ (R50), $C_3H_6 + H(+M) \rightleftharpoons iC_3H_7(+M)$ (R388) は、第三体を伴った連鎖停止反応である。R14 は火炎中での支配的な反応であり、添加された水蒸気が反応に関与することにより、正味反応速度は増加する。また、R50 および R388 における第三体 M の chaperon 効率、R50 では $H_2 : 2.0$, $H_2O : 18.0$, $CH_4 : 2.0$, $CO : 1.5$, $CO_2 : 2.0$, $C_2H_6 : 3.0$ であり、また R388 では $H_2 : 2.0$, $H_2O : 6.0$, $CH_4 : 2.0$, $O : 1.5$, $CO_2 : 2.0$, $C_2H_6 : 3.0$, $Ar : 0.7$ である[18]。従って、 H_2O の chaperon 効率が極めて高い。その結果、これらの反応では、添加された水蒸気が化学反応に関与した場合、安定物質が生成される方向に反応が進行することになる。

これらの反応が起こること、全体的には、H, O,

Fig. 7 Net reaction rates of reactions including H_2O .

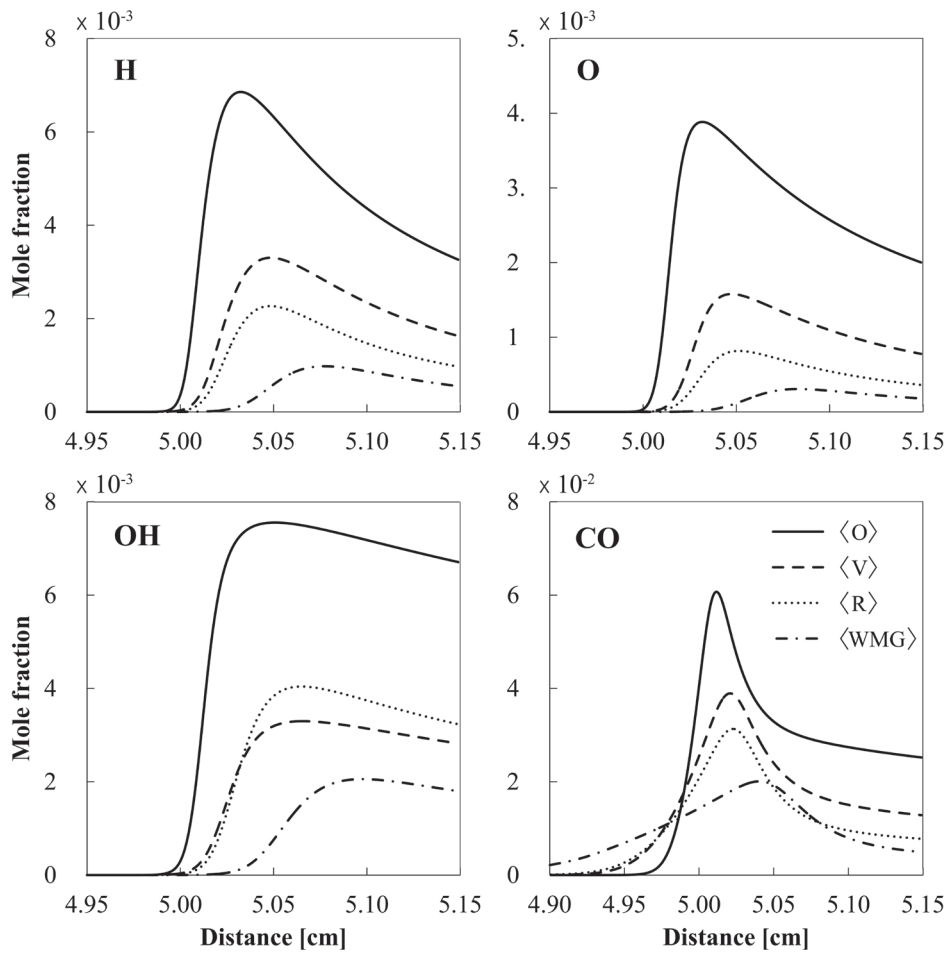


Fig. 8 Species concentration distributions for $\phi = 1.0$, $X_{H_2O} = 0$ and 0.2 .

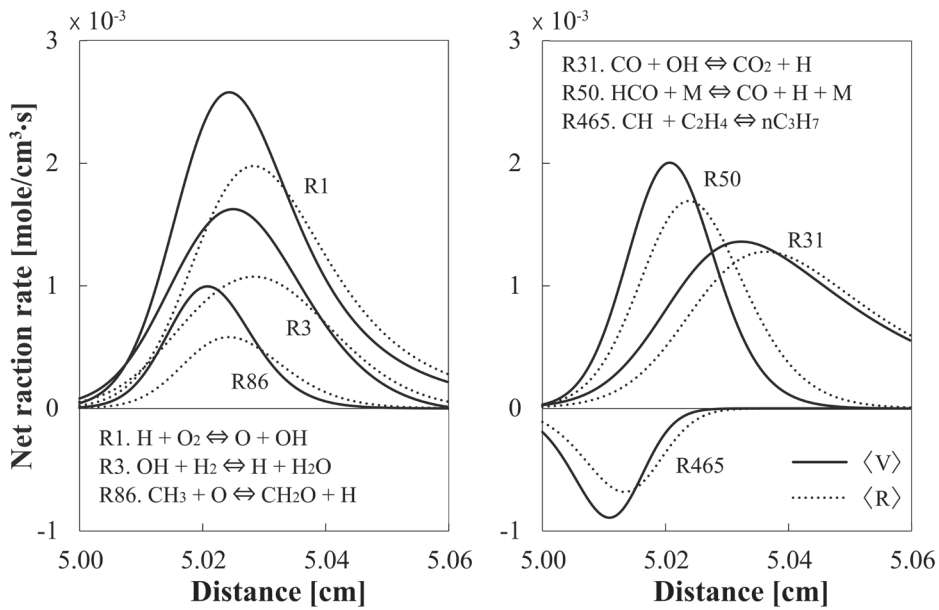


Fig. 9 Net reaction rates of predominant reactions.

CH_2^* , O_2 , C_3H_6 , CO などの化学種濃度は低下すると同時に OH , H_2 , CH_3 , HO_2 , iC_3H_7 , HCO などの化学種濃度が増加し, 燃焼中に生成される中間生成物の組成は大きく変化する. 図 8 に燃焼反応を持続させるために重要な活性基である H , O , OH , CO の濃度分布を示す. これらの化学種は, 水蒸気やウォーターミストからの熱的效果に加え, 添加した H_2O の化学反応への関与の有無によっても生成量が大きく変化していることが分かる.

火炎構造が変わることで, 他の素反応にも影響を及ぼす. 図 9 に火炎全体の主要素反応である $\text{H}+\text{O}_2\rightleftharpoons\text{O}+\text{OH}$ (R1), R3, $\text{CO}+\text{OH}\rightleftharpoons\text{CO}_2+\text{H}$ (R31), R50, $\text{CH}_3+\text{O}\rightleftharpoons\text{CH}_2\text{O}+\text{H}$ (R86), $\text{CH}_3+\text{C}_2\text{H}_4\rightleftharpoons\text{nC}_3\text{H}_7$ (R465) の正味反応速度を示す. 特に反応速度の大きい R1 は, H_2O が反応に関与することで逆反応速度が増加し, 正味反応速度は低下する. R31 は, 化学種の減少と増加が相殺し合い, 正味反応速度はあまり変化しない. R86 や R465 では, CH_2O や C_2H_4 の生成量は H_2O の反応への関与にかかわらずほぼ等しいために, H , O , CH , CH_3 の濃度に依存して反応が進行する. 反応機構全体としては, 図から分かるように, H_2O が反応に関与する場合, 反応帯で起こる主要な反応の反応速度は全体的に減少する. そのため反応帯での発熱量が減り, 温度が低下する. その結果, H_2O が反応抑制効果を持つことになる.

3.5. 感度解析

図 10 に各モデルにおける燃焼速度に対する感度係数を素反応ごとに示す. R1 は連鎖反応を維持する連鎖分枝反応で, 燃焼速度に極めて大きな影響を与える. 水蒸気およびウォーターミストを添加すると, 感度係数はさらに大きくなるが, 化学種の生成量は減少するため反応速度は低下し, 燃焼速度は減少する. また, R4 はウォーターミストの添加に伴い反応生成物濃度が増加し, 逆方向の反応速度が増加するため燃焼速度は低下する. R14 は三体反応で, 反応に関与する H_2O の増加に伴い反応速度は増加するが, 感度係数が負であり, H_2O の反応への関与に伴いその絶対値が増加するため燃焼速度は低下する.

3.6. 他の消火剤との比較

図 11 は, 現在使用されているガス系消火剤である N_2 , CO_2 および IG-541(N_2 : Ar: CO_2 = 52: 40: 8) を希釈剤として混合気添加到した際の燃焼速度を示す. X_{add} は消火剤のモル分率を表す. 400 K におけるモル比熱 c_p の大きさは, Ar: 20.81 [kJ/kmol-K], N_2 : 29.27 [kJ/kmol-K], H_2O : 36.21 [kJ/kmol-K], CO_2 : 41.44 [kJ/kmol-K] である. モル比熱が大きいことが, 水蒸気が N_2 および IG-541 よりも燃焼速度低減効果が大きい理由になっている. 二酸化炭素のモル比熱は水蒸気よりも大きい, ウォーターミストは蒸発潜熱を持ち, また高い chaperon 効率による反応抑制効果があるために, 結果的にこれらの消火剤の中で最も高い燃焼速度低減効果を持つ. この結果から, ウォーターミストはハロン系消火剤だけでなく CO_2 などのガス系消火剤の代替消火剤

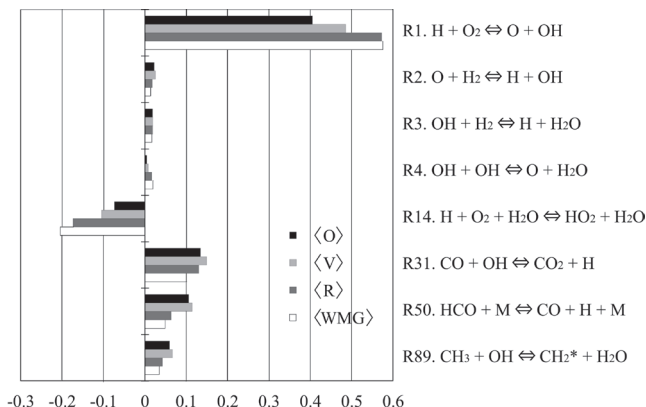


Fig. 10 Logarithmic sensitivity coefficients of flame speed.

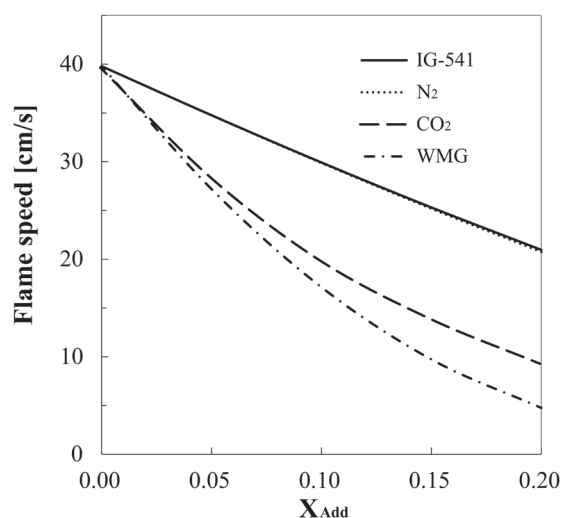


Fig. 11 Effectiveness of fire suppressants.

としても期待できる.

4. 結言

ウォーターミストがプロパン-空気予混合火炎の燃焼速度に及ぼす影響を, CHEMKIN を用いた数値計算により明らかにした. プロパンの酸化反応機構には DLW 機構を用い, またウォーターミストガスを理想気体と仮定し, 蒸発過程を Arrhenius 型の化学反応としてモデル化した. その結果, ウォーターミストの蒸発潜熱, 蒸発した水蒸気の顕熱および水蒸気が化学反応に及ぼす影響を定量的に分離することができた. ミスト量の増加とともに燃焼速度は著しく減少するが, その 62% は水蒸気を持つ顕熱の影響によるものである. また, 30% は蒸発潜熱の影響で, 化学反応抑制効果は 8% 程度である. 従って, ウォーターミストは熱的な冷却効果だけでなく, 化学反応抑制効果があり, その効果は比較的小さいものの無視することはできない. ウォーターミストは冷却効果と反応抑制効果を持つために, 消火性能は極めて高く, ガス系消火剤の代替消火剤と

して使用できる。

References

1. Linteris, G.T., Knyazev, V., and Babushok, V., *Proc. Halon Options Technical Working Conference*: 72-86 (2001).
2. Naito, H., Uendo, T., Saso, Y., Kotani, Y., and Yoshida, A., *Proc. Combust. Inst.* 33: 2563-2571 (2011).
3. Yoshida, A., Takasaki, R., Kashiwa, K., Naito, H., and Saso, Y., *Combust. Flame* 160:1357-1363 (2013).
4. Zhu, D.L., Egolfopoulos, F.N., and Law, C.K., *Proc. Combust. Inst.* 22: 1537-1545 (1988).
5. Sakurai, I., Suzuki, J., Kotani, Y., Naito, H., and Yoshida, A., *Proc. Combust. Inst.* 34: 2727-2734 (2013).
6. Qiao, L., Gu, Y., Dahm, W.J.A., Oran, E.S., and Faeth, G.M., *Proc. Combust. Inst.* 31: 2701-2709 (2007).
7. Osorio, C.H., Vissotski, A.J., Petersen, E.L., and Mannan, M.S., *Combust. Flame* 160: 1044-1059 (2013).
8. Ranzi, E., Frassoldati, A., Grana, R., Cuoci, A., Faravelli, T., Kelley, A.P., and Law, C.K., *Prog. Energy Combust. Sci.* 38: 1-34 (2012).
9. Davis, S.G., Law, C.K., and Wang, H., *Combust. Flame* 119: 375-399 (1999).
10. San Diego Mechanism web page, <http://web.eng.ucsd.edu/mae/groups/combustion/mechanism.html> (2005).
11. Wang, H., You, X., Joshi, A.V., Davis, S.G., Laskin, A., Egolfopoulos, F., and Law, C.K., USC Mech Version II, http://ignis.usc.edu/USC_Mech_II.htm (2007).
12. Metcalfe, W.K., Burke, S., and Curran, H.J., Aramco Mech 1.3, <http://c3.nuigalway.ie/> (2013).
13. Yoshida, A., Udagawa, T., Momomoto, Y., Naito, H., and Saso, Y., *Fire Saf. J.* 58: 84-91 (2013).
14. Mazas, A.N., Fiorina, B., Lacoste, D.A., and Schuller, T., *Combust. Flame* 158: 2428-2440 (2011).
15. Takahashi, F., and Katta, V., *Proc. Combust. Inst.* 32: 2615-2623 (2009).
16. Vagelopoulos, C.M., Egolfopoulos, F.N., and Law, C.K., *Proc. Combust. Inst.* 25: 1341-1347 (1994).
17. Bosschaart, K.J., de Goey, L.P.H., and Burgers, J.M., *Combust. Flame* 136: 261-269 (2004).
18. Seiser, R., and Seshadri, K., *Proc. Combust. Inst.* 30: 407-414 (2005).