散水設備作動時における区画火災性状の数値解析

NUMERICAL SIMULATION OF A COMPARTMENT FIRE IN ACTIVATION OF A SPRINKLER SYSTEM

田中 太 —*1 林 吉彦 —*2
大宮喜文 —*3

Futoshi TANAKA —*1 Yoshihiko HAYASHI —*2
Yoshifumi OHMIYA —*3

キーワード：
区画火災, 散水設備, 実大火災実験, CFD

Keywords:
Compartment fire, Sprinkler system, Full-scale experiment, CFD

The purpose of this study is to grasp the fire behavior of a compartment fire in activation of a sprinkler system. Numerical simulations using the CFD field model were conducted. The computational results were compared with the full-scale compartment fire experiment in which a sprinkler system was installed. The CFD code, which is the improved version of FDS developed in NIST, was used for numerical analysis. When a sprinkler system was not in activation, the computational results of the temperature distribution and the radiation heat flux were in agreement with the experimental results. When a sprinkler system was in activation, the computational results of the radiation heat flux were close to measurements. The computational results of the temperature distribution showed the tendency to close to experiment results in which the heat transfer coefficient on walls was adjusted. In order to improve the prediction accuracy of the temperature distribution by CFD, it is necessary to investigate further about the heat transfer mechanism on the wall covered with water films.

1. はじめに

平成 12 年 6 月に施行された建築基準法の性能規定化に伴い, 防火関連規定も仕様の記述に加え, 性能的記述が大幅に導入されることになった。防火関連規定の性能規定化により, 建築物に要求される火災安全性能が整理・明文化されたが, この防火・避難規定のほとんどにはスプリンクラー設備 (以後 SP と略記する) 等のような水系消火・防火設備の効果が充分には反映されていない。水系消火・防火設備による効果を考慮することができれば, 建築物の火災安全設計を行う上で根幹とも言えるべき, 火災外力が低減されるため, より自由度の高い設計が可能になる。しかし, 水系消火・防火設備が火災性状に及ぼす影響に関する工学的知見は十分とは言えない。

そこで, 著者らは区画火災を想定した実大火災実験を行い, SP 設備等による火災抑制効果に関する定量的な知見を得た^{1),2)}。この実験では, 火源発熱速度, 区画内温度分布, 熱流束等の測定が行われ, SP 設備の作動による火災抑制効果の定量的知見が得られている。しかし, まだ実験ケースが限られており, 火災性状に寄与する数多くのパラメータ (区画規模と形状, 可燃物量と位置, SP ヘッドの位置と散水量など) を系統的に変化させて, 数多くの比較検討を行わなければならない。しかし, これらの検討を全て実大火災実験で行うことはコスト的にも時間的にも現実的ではない。

本研究では, このような実験を補完する解析ツールとしての CFD モデルを確立することを狙い, この実大火災実験を対象とした CFD

解析を行った。実大火災実験で得られた発熱速度を火源の境界条件として与え, 火災室内の温度場や放射場を把握する際の問題点を検討した³⁾。

2. 実大火災実験の概要

図 1 に実大火災実験に使用した実験装置を示す^{1),2)}。実験装置は火災室を想定した区画 (W5.0m×D5.0m×H2.3m) であり, 独立行政法人消防研究所の総合消火研究棟に設置された。区画正面中央部には開口 (W0.9m×H2.1m) が一箇所設置されており, 区画内中央部に火源 (可燃物) が置かれている。SP 設備 (千住スプリンクラー ZQ80, 散水半径 2.6m) は火源直上の天井面に設置した。SP のヘッド圧力は 0.1MPa, 水量は 80L/min である。

2. 1 測定項目と火源の設定

温度計測は, シース型熱電対 (φ0.64mm) を使用して, 図 1 に示す区画内 4 箇所 (火源直上 C1, 区画内手前 C2, 区画内奥 C3, 開口部 C4) における垂直温度分布の測定を行った。熱流束は, 火源直上の天井, 北側の側壁面の中央部, 火源上 (測定面は天井を向いており, 火災から火源への帰還熱流束を計測) にて計測した。さらに同じ位置において壁面温度の計測を行った。火源の発熱速度は, 区画開口部から噴出したガスをフードにて採取し, 酸素消費法を用いて測定した。火源の可燃物としては n-ヘプタンと木材クリブが使用された。本論文で CFD 解析と比較する実験条件は, n-ヘプタン (2

*1 東京理科大学 COE ポストドクトラル研究員・博士(工学)
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

*2 独立行政法人建築研究所 上席研究員・工博

*3 東京理科大学理工学部建築学科 専任講師・博士(工学)

*1 COE-PD Researcher, Tokyo University of Science, Dr. Eng.

*2 Chief Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

*3 Instructor, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science, Dr. Eng.

火炎面近傍でその精度は大きく低下する。そこで火炎面が横切る計算セル内においては、放射生成項の取り扱いが以下のようにモデル化されている。

$$\kappa_d = \beta \dot{q} / 4\pi \quad (10)$$

火炎面が横切る計算セル内で生じる局所発熱速度 $\dot{q}$ の一部が放射輸送方程式の生成項として直接与えられる。放射分率 β の値は、プール火炎実験との比較により決定されており、FDS の標準設定では 0.35 が使用される⁹⁾。今回の CFD 解析においても 0.35 を使用した。

FDS で使用されている CFD モデルでは、計算負荷の軽減のために、連続的な放射スペクトルを代表的ないくつかのスペクトル帯に分割して、各スペクトル帯の放射輸送方程式を解くことで放射場を取り扱う。FDS ではスペクトル帯の分割数として 1 バンド、6 バンド、9 バンドの三種類が選択できる。本論文では、SP 不動作時は、放射に強く影響するのは煤であり、幸いにも煤の放射スペクトルは連続的であるから、1 バンドの灰色ガスモデルを使用し、SP 作動時は、大量に発生する水蒸気を考慮するために、CO₂、H₂O、煤などの放射吸収率を考慮した 6 バンドの放射モデルを使用した。

3. 5 スプリンクラーモデル

SP 作動時における CFD 解析では、SP から放出される水滴群の追跡が行われる。グリッドスケール (GS) の流れ場が水滴群から受ける影響は、それぞれの計算セル毎に、その中に存在している水滴群が周辺気体から受ける抗力の和をとり、これを計算セル体積で除して得られる単位体積あたりの力を、運動量保存式(2)の外力項 f として考慮する。乱流 SGS モデルに対する水滴群からの影響は無視した。

$$f = \frac{1}{2} \sum \frac{\rho C_d \pi r_d^2 (\mathbf{u}_d - \mathbf{u})(\mathbf{u}_d - \mathbf{u})}{\delta x \delta y \delta z} \quad (11)$$

水滴の運動方程式は、重力と周辺気体から受ける抗力を外力として以下ようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (m_d \mathbf{u}_d) = m_d \mathbf{g} - \frac{1}{2} \rho C_d \pi r_d^2 (\mathbf{u}_d - \mathbf{u})(\mathbf{u}_d - \mathbf{u}) \quad (12)$$

ここで、抗力係数 C_d は水滴レイノルズ数 Re_d の関数として取り扱われる。

$$C_d = \begin{cases} 24/Re_d & Re_d < 1 \\ 24/(1+0.15Re_d^{0.687}) & 1 < Re_d < 1000 \\ 0.44 & 1000 < Re_d \end{cases} \quad (13)$$

$$Re_d = \frac{\rho |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}| 2r_d}{\mu} \quad (14)$$

FDS では、粒子の分布関数として Rosin Rammler 分布と対数正規分布の複合形が使用されている。粒子分布関数と平均粒径との関係は、以下ようになる。

$$F(d) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^d \frac{1}{\sigma d'} \exp\left(-\frac{[\ln(d'/d_m)]^2}{2\sigma^2}\right) dd' & (d \leq d_m) \\ 1 - \exp\left(-0.693\left(\frac{d}{d_m}\right)^\gamma\right) & (d_m < d) \end{cases} \quad (15)$$

d_m は平均粒径であり、 γ と σ は分布関数の形状を定めるパラメータである。 γ と σ は水滴の直径分布を支配するので、計算結果に影響を与える。そのため、実験データを基に決定されており、それぞれ 2.4 と 0.6 である⁹⁾。

空中を飛散しているときの水滴の蒸発は、水滴の平衡水蒸気質量分率 Y_d 、周囲気体の水蒸気質量分率 Y_g 、水滴への熱伝達、水滴と周

囲気体との相対速度から求められ、以下のような半経験的な式を用いて考慮される¹⁰⁾。

$$\frac{dm_d}{dt} = -2\pi r_d \left(2 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc_d^{1/3}\right) \rho D (Y_d - Y_g) \quad (16)$$

気体の水蒸気質量分率 Y_g は質量保存式から求められる。水滴の平衡水蒸気質量分率 Y_d はクラウジウス・クラペイロンの式から以下のように温度の関数として与えられる。

$$X_d = \exp\left[\frac{h_v M_w}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_d}\right)\right] \quad (17)$$

$$Y_d = \frac{X_d}{X_d(1 - M_a/M_w) + M_a/M_w} \quad (18)$$

水滴の温度上昇は、水滴表面に対して対流熱伝達で運ばれるエネルギーから、水滴が蒸発するのに必要な潜熱分を差し引いたエネルギーにより過熱され、以下の式から計算される。

$$m_d C_{p,w} \frac{dT_d}{dt} = 4\pi r_d^2 h_d (T_g - T_d) - \frac{dm_d}{dt} h_v \quad (19)$$

ここで、 h_d は水滴表面から周辺気体への熱伝達係数であり、以下のような経験的な関係式が使用される。

$$h_d = \frac{k}{2r_d} \left(2 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr_d^{1/3}\right) \quad (20)$$

また、FDS では水滴による放射の減衰効果も考慮されており、SP 作動時の CFD 解析においてこれを使用した¹⁰⁾。

3. 6 計算条件

3. 6. 1 計算領域と格子セル数

図 3 に格子分割図を示す。通常 CFD 解析では、境界条件により流れ場が受ける影響を避けるために、開口部分と外部空間を含めた計算領域を設定する。しかし、乱流、燃焼、放射、SP など、複雑な物理モデルが多数使用されている今回の CFD 解析では、境界を開口に設定することによる影響よりも、スプリンクラーの設定や壁面熱伝達の設定が解析結果に与える影響が大きい。そこで、火災室となる区画のみを解析領域 (5m(x)×5m(y)×2.41m(z)) として計算時間を節約した。計算セル数は 36(x)×36(y)×48(z) とし、領域中央部に位置している火源近傍に計算セルを集めた不等間隔格子を使用した。この計算セル数は、十分な精度で計算を行うには少ないが、FDS では計算安定化のために CFL 数をパラメータとした移流項の風上化が行われており、少ない格子数でも安定な計算が可能である。ただし、移流項の風上化により導入された人口粘性のために流れ場の高波数成分は減衰して捉えることはできない。しかし、解析ツールとして対象としている物理量が高波数成分をそれほど含まない温度や熱流束であることから、少ない格子数でも定性的定量的に実験値との比較を行うことは可能と考えられる。人口粘性が流れ場に大きな悪影響を及ぼす場合もあるため、計算セル数を 48(x)×48(y)×64(z) に増加させた計算を実施して、計算結果の定性的な傾向は変化せず、定量的な値の変化はわずかであることを確認した。計算時間は一般的な PC (P4, 3GHz) を使用して、SP 不動作時が 12 時間、SP 作動時が 24 時間であった。

図3. 格子分割図

3. 6. 2 初期条件と境界条件, 発熱速度

初期条件としては, 速度に関しては, 自然に存在するわずかな乱れを表現するために, 乱数を用いて最大絶対値が 0.005m/s のわずかな擾乱を与えている。このような擾乱は速度場に乱れが生じるトリガーの役目をする。温度に関しては, 実験条件と同じ設定とし, SP 不作為時に 14°C , SP 作動時に 10°C とした。FDS の標準設定では, 計算セルの解像度が壁面境界層を解像するには十分ではないので, 壁面における速度境界条件として, 経験的に壁面に最も隣接している計算セルの速度の 75% を与える。本研究では速度境界条件として標準設定を使用した。このため壁面で生成される乱れは物理的根拠に基づいて取り扱われていない。今後, 壁面における速度境界条件には改善の余地がある。区画開口部は圧力 0 を指定した。温度の境界条件としては, 式(21)に示すように経験的な熱伝達係数 h_w を用いて熱流束 q_c を指定した。熱伝達係数 h_w は, 式(22)に示すように強制対流と自然対流における経験式を考慮した上で, より大きい方の値が選択される。ただし, これらは単純な平板上で成立する経験式であり, 区画火災を想定したものではない。また SP が作動しているときには, 水蒸気や SP からの水滴により壁面に水膜が形成されるため, その熱伝達特性は大きな影響を受ける。そこで, FDS のソースコードを改良して, 修正係数 α を導入した。

$$q_c = \alpha h_w \Delta T \quad (21)$$

$$h_w = \max \left[C |\Delta T|^{1/3}, \frac{k}{L} 0.037 \text{Re}^{4/5} \text{Pr}^{1/3} \right] \quad (22)$$

SP の作動圧力と流量は実験と同じ設定とし, 平均粒径は $1000 \mu\text{m}$ とした。

図2に CFD 解析で設定した発熱速度を, 自由燃焼時は□, SP 作動時は△で示す。設定された発熱速度は線形補間して使用される。ただし, FDS では火炎面の形状が非定常的に変化するため誤差が生じ, 厳密には設定した発熱速度と一致せず, 点線で示すように細かい変動成分が生じる。実験では, 火源に点火してから 29 秒後に SP が自動的に作動したが, CFD 解析では同じ条件のもと 29 秒後に強制的に SP を作動させた。

4. 計算結果と考察

実験の計測結果には高波数成分は含まれていないが, CFD の計算結果は非定常性が強く高波数成分が含まれている。そこで, 温度の計測値と計算値のスペクトル分析を行い, CFD の計算結果から高波数成分を除去するために, 着目点の前後に 7 点ずつ計 15 点の移動平均を適用した。

4. 1 SP 不作為時

図4は SP 不作為時における区画内温度分布の計算値と実験値の比較である。各測定点における計算値の温度分布は, 実験値と定性的に良く一致している。定量的には, 計算値は実験値に比べると低めの温度分布が得られた。このような定量的不一致が生じる要因は, 物理モデルに含まれている経験定数に拠るところが大きい。今回の計算において, 温度場に強い影響を与える経験定数は, 式(20)に示す熱伝達係数 h_w である。一方, 実験で温度計測に使用された熱電対は, 対流成分だけでなく放射成分の影響も受けるため, 高めの温度を計測したことも推測できる¹²⁾。

区画内手前 C2 と区画内奥 C3 に設置された熱電対ツリーの温度分布の計算値は実験値と良く一致しており, 2層化した空気層を良く捕らえていることがわかる。開口部の温度分布は, 実験値に比べると温度の変化が緩やかになる。これは, 開口部に直接設けた流出境界条件によって, ここでの圧力が大気圧に固定されることによる悪影響と考えられる。同様に, 開口部から吸い込まれる空気は初期温度の 14°C に固定されるため, 区画内部の温度分布も底面近傍の温度は上昇せず, ほぼ 14°C 近傍となる。ところで, 火源直上の温度分布 C1 のみ, 着火後 4 分 (240 秒) 経過の時点で実験値と大きく異なる傾向を見せる。図5に, 着火後 249.5 秒経過したときの火炎面の可視化を示す。火源から成長した火炎面が天井近くまで達していることがわかる。そのため, 火源直上から天井まで設置された熱電対ツリー C1 は, 火炎面にほぼ包まれてしまう。FDS に使用されている混合分率燃焼モデルでは, 火炎面近傍においてモデルの計算精度が低下するため, 実験値と異なる傾向が見られたものと考えられる。同様な理由で, 火源近くに設置されているため, 常に火炎面にさらされる高さ 0.9m での温度も他に比べると実験結果との対応がよくない。

図6は, 天井面と側壁面, そして火源に設置された熱流束計の計測値と, CFD 解析で得られた熱流束の時間履歴を比較した図である。側壁面における熱流束は実験値と計算値が良く一致する結果が得られている。天井面における熱流束の計算値は, 着火後 200 秒を超えたあたりから, 実験値よりも大きくなり, 250 秒と 290 秒近辺でピーク値をとる傾向が見られる。この原因も火源から成長した火炎面が天井近くまで達するからである。そのため, 火源直上の天井面で得られる熱流束の値は, 火炎面近傍でのモデル精度低下の影響を受けて, 実験値と異なる傾向を見せる。火源での熱流束の計算値は, 周りを取り囲む火炎面からの放射によってほぼ定まる。この値は, 放射生成項で使用されている放射分率 β の影響を強く受けるが, 本研究で使用した $\beta=0.35$ の解析結果は実験値をよく近似することから適切な値と考えられる。ところで, 火源での熱流束の実験値は 330 秒付近から減少するが, 計算値はほぼ一定値を保つ。これは, 実験と CFD 解析の火源付近での燃焼性状の違いに起因している。実験では, 燃料が残り少なくなると, 発熱速度の低下と共に燃焼面積が徐々に減少して偏っていき, 火源中心に設置した熱流計は, 火炎からの全帰還熱流束を計測できなくなる。CFD 解析では, 発熱速度が低下するとき炎の高さは小さくなるが, 燃焼面積が徐々に減少することを考慮していないため, 火炎からの全帰還熱流束を最後まで得ることができ, 熱流束はほぼ一定値を保つ。

図4. SP 不動作時の温度分布

図5. 火炎面の可視化

図6. 自由燃焼時の熱流束履歴

4.2 SP 作動時

SP 不動作時と同じ設定（熱伝達係数の修正係数 $\alpha=1$ ）で SP の追加のみを行ったときの CFD 解析結果は、温度の最大値を二倍以上高く見積もる結果となった。SP が作動している状況では、SP から放出される水滴が直接降りかかることにより区画壁面を冷却する。また、水滴が気化することで水蒸気が大量に発生し、その水蒸気が壁面に付着凝縮して水膜を形成する。このような現象は、膜状あるいは滴状凝縮熱伝達として知られており、工業的にはヒートパイプなどで応用されている。凝縮熱伝達機構では、非常に熱伝達が促進されることが従来から知られている¹³⁾。CFD による解析結果の実験値に対する定量的な不一致の原因は、壁面の温度境界条件が SP 不動作時と同じ取り扱いでは、水滴による壁面の冷却や凝縮熱伝達の効果を考慮できないためと考えられる。そこで、まずはこれらの現象を

マクロ的にモデル化することを考え、熱伝達係数が大幅に増加した壁面として取り扱うことを試みた。熱伝達係数の修正係数 α を試行的に変えていくつか計算したところ、今回の実験結果をある程度再現できる値として $\alpha=10$ を得た。

図7は、 $\alpha=10$ としたときの SP 作動時における区画内温度の実験値と計算値の比較である。また、図8は北側の側壁面中央部における壁面温度の比較である。実験で計測された壁面の初期温度は14度であり、気温は10度である。CFD 計算では、初期温度として区画内の空気温度を設定したために、初期の温度差が4度ある。各測定点における計算値は、実験値と定性的に良好に一致している。定量的にはまだその精度は十分ではないが、壁面熱伝達機構のモデル化を進めていくことで改善できる可能性が十分にある。SP 作動時における温度場の解析精度を上げるためには、壁面に形成された水膜に対する凝縮熱伝達機構やスプリンクラーの水滴が直接降りかかることによる冷却効果を考慮する必要があることが明らかになった。今回の CFD 解析では、空気塊の持つ潜熱成分や区画内空気の水分量の変化に関して考慮しておらず、これらの影響を全てまとめて熱伝達係数を修正することにより対応しているため、修正係数の物理的な意味も含めて詳細なモデリングは今後の課題として残っている。ところで、火源直上の熱電対に関しては、実験においては SP からの水滴を大量に浴びてしまうため水滴の温度を計測しており、また CFD モデルにおいては火炎面モデルの計算誤差があるため、計算値と実験値は定性的にも一致しない。

図9は、天井面と側壁面、そして火源に設置された熱流束計と CFD 解析で得られた熱流束の時間履歴を比較した図である。天井面の熱流束は、SP 不動作時に比べると発熱速度が小さいことから火炎面が天井面まで近づかないため、実験値と良好に一致した。側壁面に関しては実験値に比べて小さすぎる結果となった。これは SP 水滴による放射遮蔽モデルの精度がまだ十分でないことを示している。火源での熱流束の実験値と計算値が400秒付近から異なるのは、SP 不動作時と同様な理由である。

図7. SP 作動時の温度分布 ($\alpha=10$)

図 8. SP 作動時の壁面温度履歴

図 9. SP 作動時の熱流束履歴

5. まとめ

SP 設備作動時における区画火災性状の数値予測を目標として CFD 解析を試みた。SP 不作動時の計算値は、実験値と概ね良好に一致する結果を得ることができた。SP 作動時の計算値は、実験値と定性的には一致するが、定量的にはまだ不十分な点がある。SP 作動時における CFD モデルの計算精度を更に向上させるためには、水滴による壁面の冷却や凝縮熱伝達の効果をモデル化して組み込むことが必要である。温度境界条件を正しく取り扱うことができれば、火源の発熱速度が既知の場合には、SP 作動時においても温度場と放射場の実用的な解析ツールとして CFD モデルが使用できるものと期待できる。

今回の CFD 解析では、実大火災実験で得られた発熱速度を火源の境界条件として与えて、区画内の温度場や放射場を把握する際の問題点を検討した。CFD 解析の精度は、実験で計測された発熱速度の計測精度の影響を受けるため、今後、特に SP 作動時における発熱速度の計測精度に関して検討を行う必要がある。また、SP 設備の火災抑制効果を予測する解析ツールとして CFD を応用する際には、SP 設備作動時の発熱速度を予測することが肝要であり、大きな課題として残っている。火源の抑制は、格子解像度よりも更に小さなスケールで起きている現象であるので、そのモデル化も重要になる。

謝辞

実大火災実験においては消防研究所の斎藤直博士、鶴田俊博士にご助力を頂きました。紙面を借りてお礼申し上げます。

6. 参考文献

- 1) 大宮喜文ほか 7 名：防火・消火設備による区画火災抑制効果，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.219-202，2002.8
- 2) 大宮喜文ほか 6 名：区画火災制御に関する研究，日本火災学会研究発表会概要集，pp.4-7，2002.5

- 3) 田中太ほか 2 名：散水設備作動時における区画火災性状の数値解析，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.13-14，2003.9
- 4) URL <http://fire.nist.gov/fds/>
- 5) McGrattan, K. B. et al., Fire Dynamics Simulator (Version3)-Technical Reference Guide, NISTIR6783, 2002
- 6) Continillo, G. et al., Seventh International Conference on Numerical Combustion, p.99, 1998
- 7) Ferziger, J.H., Peric, M., Computational Methods for Fluid Dynamics 3rd Edition, Springer, P.279
- 8) Mell, W. E. et al., Second International Conference on Fire Research and Engineering(ICFRE), pp.26-36, 1997.8
- 9) Chan, T.S., Journal of Fire Protection Engineering, 6(2), pp.79-87, 1994
- 10) Chermisinoff, N., Encyclopedia of Fluid Mechanics, Volume3, Gulf Publishing Co., Houston, Texas, 1986
- 11) Yang, W. et al., Proceedings of Second NRIFD Symposium. NRIFD, pp.95-114, 2002.7
- 12) 関根章義ほか 2 名：火炎による輻射伝熱の影響下にある室内の空気温度測定法に関する実験的研究，日本火災学会研究発表会概要集，pp.94-97，1995.5
- 13) 甲藤好郎：伝熱概論，養賢堂発行，p.259，1989

記号の説明

C : 自然対流の経験定数(-)	Re : レイノルズ数(-)
Cd : 抗力係数(-)	Re _d : 水滴レイノルズ数(-)
C _{p,w} : 水滴比熱(J/kgK)	r _d : 水滴半径(m)
Cs : スマゴリンスキ定数(-)	s : 放射方向ベクトル(-)
D : 拡散係数(m²/s)	Sc : シュミット数(-)
f : SP による外力項(N/m³)	Sc _d : 水滴シュミット数(-)
g : 体積力の加速度(m/s²)	T : 絶対温度(K)
h : エンタルピー(J/kg)	t : 時間(s)
h _d : 水滴の熱伝達係数(W/m²K)	u : 速度(m/s)
h _w : 壁面の熱伝達係数(W/m²K)	u _d : 水滴速度(m/s)
h _v : 水滴の蒸発潜熱(J/kg)	X _d : 水蒸気の体積分率(-)
I : 放射強度(W/m²str)	Y : 質量分率(-)
k : 熱伝導率(W/mK)	α : 修正係数(-)
M : 分子量(-)	β : 放射分率(-)
m _d : 水滴質量(kg)	ΔT : 壁面と気体の温度差(K)
m _i : 物質生成項(N/m³)	δxδyδz : 計算セル体積(m³)
Pr : プラントル数(-)	κ : 吸収係数(-)
p : 圧力(Pa)	ρ : 密度(kg/m³)
q : 局所発熱速度(J/m²s)	σ : ステファン・ボルツマン定数 (W/m²K⁴)
q _r : 放射熱流束(W/m²)	τ : 粘性応力(N/m²)
R : 気体定数(J/kgK)	

[2003年10月20日原稿受理 2004年 2 月23日採用決定]