

[別紙 1]

論文の内容の要旨

論文題目 $k-\varepsilon$ 型2方程式乱流モデルに基づく建物内の
火災時の煙流動数値予測に関する研究

氏 名 原 哲 夫

建築物の防災計画においては、出火、煙伝播、火災拡大等の火災進展のフェーズに応じて防火・避難のシステムに関し、建築空間への配慮や建築設備による安全上の対策を講じて人命および財産の保護が行なわれている。避難については、避難安全に支障のない要求条件として、有効な避難路を確保することおよび煙の害・熱放射の害がないこと等があげられる。これらのうち特に、初期火災において避難者を煙から防護することの重要性が多くの火災事例から認識され、建築空間内の火災時の防煙・排煙が重視されている。避難者を煙から防護するための煙制御の機能には、煙の拡散および降下を抑制して視認性に優れた避難路を確保すること、火災が進展して煙が空間内に拡散した状況においては安全な濃度まで希釈すること等があげられ、消火や救助のための消防活動空間を確保する上でも不可欠である。

建物内の煙流動解析には、従来より、火災室内の熱移動に上部の煙層と下部の空気層の分離を仮定して、火災室の煙層の平均温度と平均厚みを予測する2層ゾーンモデルが用いられている。このモデルは、計算上の取扱いが容易であることから、広い範囲の条件を対象として適用が可能であり、煙制御の実設計を行う上で、有効な解析手段となっている。しかし、その一方で、煙層と空気層の明確な分離という前提条件を伴っており、この条件がどのような空間形状、火源発熱速度・位置、煙・空気の流動状況において成立するのか、十分な検討が必要とされる。

本研究は、このような2層ゾーンモデルを基調とした建物内の火災時の煙制御計画・設計手法に対して、3次元の煙流動数値予測のCFD解析に関して空間特性に応じた適用法を検討し、その計画・設計手法としての可能性を追究するものである。ここでは、CFD解析の目的を空間内における煙流動性状の解明とし、煙の発生源となる火源については、燃焼現象を単純化してガス反応を除外した発熱モデルを想定する。この発熱モデルから発生す

る上昇気流は、周辺空気を連行しながら増量し空間上部に達する。このとき、煙流動の主体は上昇気流の移流成分であるが、気流が乱流拡散性状を有していることから、拡散成分も無視し得ない影響がある。煙流動に影響を及ぼす主要な空間的な因子は、①火源周辺の空間条件すなわち壁、天井等との離隔距離、ならびに②上昇気流および壁面、天井面を周回する気流が接触または衝突する空間の形状や熱性状であり、これらの設定条件により同一強度の火源においても、空間内の煙流動性状は、異なる様相を呈する。従って、これらの空間的な因子に関してCFD解析の性能を知ることは、3次元の煙流動数値予測に際し重要な事項である。

本研究における主要な検討課題は以下の2項目である。

(1) 既往の研究によれば、自由プルーム、天井ジェット等の煙流動現象についてCFD解析が試みられているが、これらは、各研究者が実験・解析の対象とした単一の煙流動現象についてそれぞれ固有の条件の下に実施されている。従って、煙流動特性予測のCFD解析に関して、相応の予測精度が検証された解析モデルにおいては体系化されていない。本研究では、煙流動特性予測のプロセスを考察し、主要な煙流動現象について実用的な解析モデルを適用し、この体系化を検討する。CFD解析の適用法の検討として、初期火災における煙流動特性とそれらに対する影響要因が煙制御システムに及ぼす作用を整理する。次に、2層ゾーンモデルに代表される従来の火災時の煙流動数値予測法がこれらの煙流動現象に関して有している解析性能の程度を判定し、CFD解析との得失を比較検討する。これにより、3次元の煙流動数値予測法の重点とすべき解析対象およびCFD解析の体系化に必要なとされる煙流動の要素と考察のプロセスを示し、要求性能と予測精度を設定する。

(2) (1)で考察した煙流動の要素に関して、煙流動特性予測のプロセスの全体構成の有効性を検証するために、基本的なものから応用的なものについてCFD解析を行い、実験値と比較検討する。計算モデルは、実用的観点から $k-\varepsilon$ 型2方程式乱流モデル（以下、標準 $k-\varepsilon$ モデル）とする。感度分析の対象として、①解析領域の大きさ、②火源近傍の分割幅、③解析スキーム、④火源での流入 k, ε 、⑤圧縮性と非圧縮性（ブシネスク近似）、を取り上げ実用上の観点から検討を行う。防災・安全計画の実務においては、計算機能力、時間等の制約条件により火災現象のモデルの設定に何らかの簡易化が必要とされる。従って、①②③④の相違が解析結果に与える影響を定量的に把握することはモデルを簡易化する上で重要である。⑤については、非圧縮性モデルの適用限界の検討と共に、密度変化に関して定圧場を仮定する簡易圧縮性モデルを検討対象とする。放射については、対流と連成させた計算を実施すると熱量の授受が複雑となり、感度分析が困難であることから、あらかじめ火源発熱速度から放射成分を減じて対流成分のみを入力値として扱う。

本論文は以下の6章により構成されている。

第1章では、序論として本研究の背景と目的、本研究における検討課題と研究範囲、研究内容の概要を述べる。

第2章では、煙制御システムと安全計画について触れ、本研究では初期火災における避難者の防護を対象として、煙流動特性予測のCFD解析を実用的観点から検討することを述べる。煙制御システムについては、a. 蓄煙、b. 排煙、c. 希釈を定義し、これら相互の機能の関連を示す。火災時の煙流動の計画・設計手法に一般に用いられている2層ゾーンモデルについて、その性能限界を検証するために、成層化について解析上の感度が高いと考えられる大空間を対象として取り上げ、既往の煙流動の研究および煙流動特性を考察する。煙の成層化については、影響要因として次の4項目を定め、これらの定式化を示す。[① $d Ta / d Z$ (空間内初期温度勾配) のプルームに及ぼす影響 ただし、 Ta : 空気層温度、 Z : 鉛直方向の座標、②外気風速度、外気温度の開口 (自然排煙口、給気口) に及ぼす影響、③壁面流 (壁面近傍の自然対流による上昇流または下降流) の煙層に及ぼす影響、④浮力効果の不足による成層の不安定性、] ①~④を評価指標として、煙制御システムが作用した際の大空間内の煙流動性状について、2層ゾーンモデルの性能限界を単純な形状のモデル空間 (単位空間) を対象として検証する。この結果を踏まえて、安全計画の高度化のために煙流動特性予測のCFD解析に必要な煙流動の要素とその考察のプロセスおよび重点とすべき解析対象を示し、要求性能との関係を基本解析性能 (煙流動の要素) と展開解析性能 (空間形状への対応) に分けて設定する。これらの要求性能の目標とするCFD解析の予測精度を、解析結果への影響度の大きい要因を分析して設定する。煙流動の要素に関して、基本特性を有する自由プルームおよび空間的な制限事項を付加した制限プルームについて以下の章で検証を進める。

第3章では、火災時の煙流動性状の基本特性を有する自由プルームに関して既往の研究を述べ、CFD解析の実用上の予測精度の程度を実験式と比較検討する。解析には、汎用的な非圧縮標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いて、実用的な観点から、①解析対象領域の大きさ、②メッシュ分割、③解析スキーム、④火源形状、の解析結果に及ぼす影響について系統的に横井式と比較し、自由プルームの温度および速度の水平分布と流量について感度分析を行う。火源形状については、平面形状と立体形状を用いてその差を比較する。 ε 方程式の浮力項の解析結果への影響の検討のために、浮力生産項を算入しないケースと *viollet* 型とを比較する。プルーム領域のセルレイノルズ数の分布により計算の安定性を検証し、プルーム中心軸上の乱流特性を k, ε 分布により考察する。

第4章では、実火災においてコーナー近傍のプルームの火災危険度が高く、煙流動性状

の予測の必要性が高いことに着目して、既往の研究を調べ、そのプルーム特性と質量流量の実験式を述べる。解析には、標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いて、コーナー近傍のプルームの温度、速度の水平分布および流量について、実用的観点から感度分析を行い、実験値に基づき予測精度を検証する。解析で考慮する要因を、①火源位置、②メッシュ分割、③圧縮性と非圧縮性、④火源での流入 k, ε 、とし、これらが解析結果に及ぼす影響について系統的に実験値および実験式と比較する。プルーム流量については、実験値、実験式を補正して計算値と比較検討し、プルーム中心軸上の乱流特性を k, ε 分布、温度、速度分布により考察する。

第5章では、実火災において天井ジェットの煙流動性状の予測の必要性が高いことに着目して、既往の研究を調べ、CFD 解析の対象として火源発熱速度が比較的大きい実験を取り上げ、その実験値、実験式を述べる。解析には、標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いて、天井ジェットの火源発熱速度を最大 191kW として実火災規模の大きさを対象とする。解析で考慮する要因を、①圧縮性と非圧縮性、②メッシュ分割、③火源での流入 k, ε 、とし、これらが解析結果に及ぼす影響について、実験値と解析値を系統的に比較して予測精度を検証する。プルームと天井ジェットの基本構造に関して、プルームが天井面に衝突して天井ジェットへと変化する現象を考察する。

第6章では、全体のまとめを行い、本研究の成果と煙流動特性予測の高度化のための CFD 解析の今後の課題を総括する。