

Fire Dynamics Simulator とその境界条件の与え方に関する研究

辻本研究室

4110054 田坂 光司

1. 研究背景と目的

わが国では、原子力施設に対する火災安全設計について、火災の発生防止、火災の検知及び消火、火災の影響軽減の3つの考え方で対策がとられてきた¹⁾。しかし、新規制基準²⁾への移行により、火災防護対策の有効性評価を行う上で、火災影響の評価手法が問題となっているのが現状である。よって本研究は、火災ハザード解析ツールとして FDS^{註1)}を選び、その特徴及び適用範囲・能力の把握を目的とするとともに、それらを踏まえた解析結果を実証試験結果と比較することで、火災影響評価に反映させることを最終目標とする。

2. 研究方法

昭和 59 年に行われた電力共同研究「原子力プラントの油火災等の実証試験」から単純な試験区画パターンを選別し、格子解像度、時間刻み幅、壁体の熱伝導率、比熱、密度など境界条件の違いによる解析結果への影響を分析する。なお、本稿では格子解像度についてのみ報告する。

3. FDS(Fire Dynamics Simulator)の概要

FDS は米国国立標準技術研究所により開発された、火災時の熱流動や物質輸送等を主な対象とする数値流体力学(CFD)モデルである。オープンソースコードで無償での利用が可能で、一般的な WindowsPC で動作可能であること、解析結果を視覚的に確認するための Smokeview ツールがあること、上記 3 点の特徴から建築物を対象とした火災事象の評価や防火設計に世界で広く利用されている。モデル内容は FDS の Technical Reference Guide に詳しく記載されているが、使用の際は入力パラメータ、出力データ、支配方程式、解析手法、使用上の制限などユーザー自身、把握した状態であることが望ましい。

4. 計算条件

7m×6m×5m(高さ)の第1種機械換気された区画を対象に解析を行った。計算領域は 3 次元直交座標系空間で各方向に $-1\text{m} \leq x \leq 8\text{m}$ 、 $0\text{m} \leq y \leq 6\text{m}$ 、 $0\text{m} \leq z$ (鉛直方向) $\leq 5\text{m}$ の範囲とした。空間座標の原点は給気側壁面の位置である。区画内の開口は壁面に設けたダクトを介する給排気口のみであり、区画外は床面を除いて大気開放条件、壁面境界はハーフスリップ条件、伝熱に関しては壁面垂直方向に一次元熱伝導方程式を解いて、失熱を考慮している。ただし、壁への吸熱は壁の温度を一定とした吸熱を使用しており温度境界条件は断熱を適用した。FDS は HRR の入力を前提としているため、可燃物の種類による熱的影響はないものとしている。図-1~3 に幾何形状を示す。

表-1 解析条件

ケース名	換気回数 [回/h]	給排気量 [m^3/s]	HRR [kW]	着火開始時間 [s]	計算時間 [s]	格子間隔 dx [m]	$\frac{D^*}{\delta x}$
F1	0	0.000	205.0	0.000	600	0.12	4.24
F2	5	0.292	225.1	300.0	900	0.12	4.40
F3	0	0.000	205.0	0.000	600	0.06	8.48
F4	5	0.292	225.1	300.0	900	0.06	8.80
F5	0	0.000	205.0	0.000	600	0.12	4.24

表-2 解析条件共通項目

項目	設定		
初期値	<ul style="list-style-type: none"> 室内外温度 実験データの室内気温度 気圧 101300 Pa 速度 0 m/s 		
熱物性, 厚さ (天井・壁・床)	<table border="0"> <tr> <td>スーパーテンプボード³⁾ (F-1~4へ適用) 熱伝導率 0.03 W/(m K) 密度 250 kg/m³ 比熱 1.293 kJ/(kg K) 放射率 0.9 厚さ 0.025 m</td> <td>コンクリート³⁾ (F-5の床面へのみ適用) 熱伝導率 1.75 W/(m K) 密度 2200 kg/m³ 比熱 1.0 kJ/(kg K) 放射率 0.9 厚さ 0.15 m</td> </tr> </table>	スーパーテンプボード ³⁾ (F-1~4へ適用) 熱伝導率 0.03 W/(m K) 密度 250 kg/m ³ 比熱 1.293 kJ/(kg K) 放射率 0.9 厚さ 0.025 m	コンクリート ³⁾ (F-5の床面へのみ適用) 熱伝導率 1.75 W/(m K) 密度 2200 kg/m ³ 比熱 1.0 kJ/(kg K) 放射率 0.9 厚さ 0.15 m
スーパーテンプボード ³⁾ (F-1~4へ適用) 熱伝導率 0.03 W/(m K) 密度 250 kg/m ³ 比熱 1.293 kJ/(kg K) 放射率 0.9 厚さ 0.025 m	コンクリート ³⁾ (F-5の床面へのみ適用) 熱伝導率 1.75 W/(m K) 密度 2200 kg/m ³ 比熱 1.0 kJ/(kg K) 放射率 0.9 厚さ 0.15 m		
熱物性, 厚さ (ダクト)	<ul style="list-style-type: none"> 熱的な影響を受けないように設定 		
形状 (区画・ダクト)	<ul style="list-style-type: none"> 直方体の組み合わせで表現 給排気用の 3 つの開口は大きな 1 つの開口として表現 		
形状 (火皿)	<ul style="list-style-type: none"> 直方体で表現 		
HRR	<ul style="list-style-type: none"> タービン油の質量減少速度測定値と単位質量あたりの発熱量 10280 kcal/kg より推定 換気有の場合には、着火前に区画内流動が安定するよう時間(300秒)を確保 燃烧によるススの生成 あり(デフォルト) 		
時間刻み幅	<ul style="list-style-type: none"> クーラン数が 0.8~1.0 となるように設定(デフォルト) 		

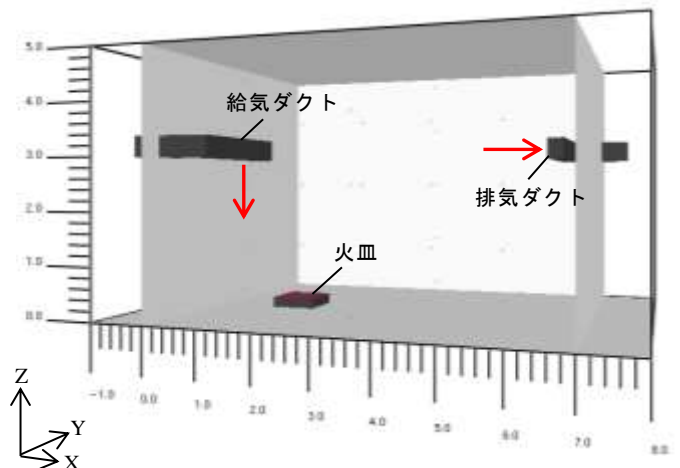


図-1 計算領域幾何形状図(矢印は風向を示す)

5. 解析結果および考察

図-4～6 は、断面 1～6 へ高さ 0.25m、1.25m、2.5m、3.75m、4.75m の位置に設置した熱電対ツリーの燃焼開始 600 秒後(換気があるケースでは着火まで 300 秒を確保)の温度解析結果を高さ毎に実験測定値と比較したものである(図-2～3)。凡例はそれぞれ熱電対の高さ(m)、破線内は実験値との乖離±15%の範囲を示している。図-4～5 のように換気の有無に関わらず、F-1～4 のすべてのケースで高さ 0.25m と断面 2 の位置において、区画内の空気温度上昇量は実験値から大幅に乖離する傾向となった。

原因として高さ 0.25m の位置については、実験時と解析時の床面物性値が大幅に異なることによる失熱の過小評価が考えられ、その点については F-1 の床面を改善した F-5 の解析により確認済みである(図-6～8)。また、断面 2 の位置については火皿直上ということもあり、気流の乱れ、時間的な変化が著しいため、F-1 及び F-3 の格子解像度では火炎を正確に捉えられていないと推測できる。しかし、図-9 を見ると断面 2 における F-1 と F-3 では、解析精度が大幅に改善されていることが分かる。つまり、格子解像度をさらに高めることにより、火炎近傍における解析精度についても改善することが期待される。F-3 以上の格子解像度については、今後の課題である。

以上のことから断面 2(火炎から直接的な影響を受ける範囲)を除き、実験値に対する解析精度は概ね±15%程度となり、F-1 以上の格子解像度における解析結果は格子解像度による依存が見られない(図-4～5)ことから、変数 $D^*/\delta x = 4$ ^{註2} 程度の格子解像度を有するモデルであれば、比較的精度のよい解析結果を得られると思われる。

6. まとめ

FDS における給排気がある区画等の気流解析については、ある程度の格子解像度(今回では $\delta x = 0.12m$) を適用しなければ現実に近い気流状態をモデル表現できないことを確認した。また、火炎近傍における熱的影響評価を必要としないケースでは、 $D^*/\delta x = 4$ 程度の格子解像度を有するモデルで解析を行えば、比較的精度のよい区画内空気温度の解析結果を得られることを確認した。よって以降の解析については $D^*/\delta x = 4$ 程度の格子解像度を有するモデルで行うこととする。

7. 今後の課題

F-3 以上の格子解像度による解析、その他条件の違いによる解析結果への影響分析について取り組む必要がある。

脚注

註1. Fire Dynamics Simulator

註2. 格子間隔については火炎特性長さ D^* で定義される

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

を用いて $D^*/\delta x$ の変数を $4 \leq D^*/\delta x \leq 16$ を満たす格子間隔に設定することが推奨されている⁴⁾。

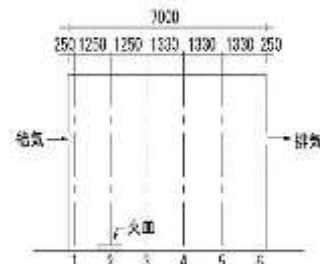


図-2 長手断面簡略図

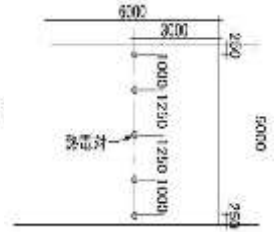


図-3 短手断面簡略図

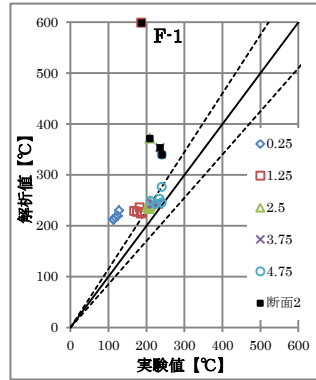


図-4 F-1 と実験値の比較

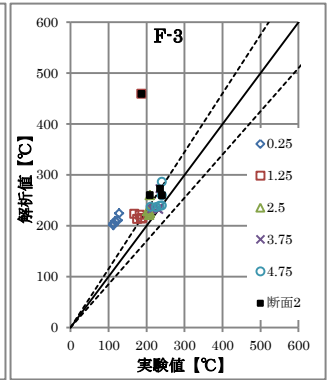


図-5 F-3 と実験値の比較

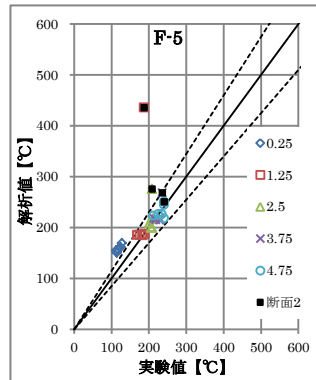


図-6 F-5 と実験値の比較

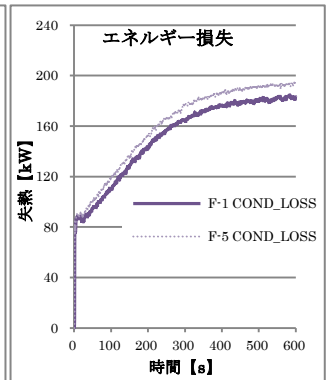


図-7 エネルギー損失の比較

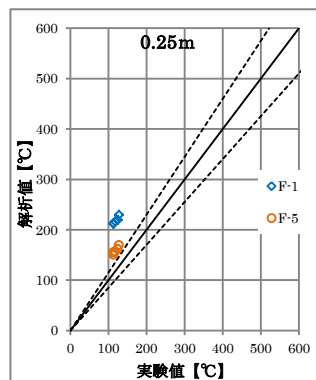


図-8 床物性値の比較

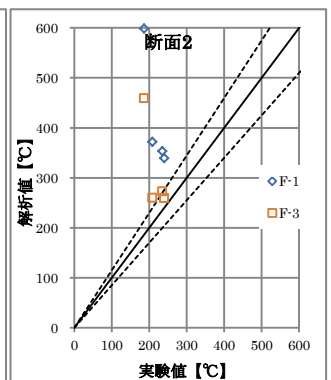


図-9 格子解像度の比較

参考文献

- 1) 電力共同研究：原子力プラントの油火災等の実証試験，昭和59年
- 2) 原子力規制委員会：原子力発電所の内部火災影響評価ガイド
- 3) 電力中央研究所：火災モデル FDS による大規模区画内火災解析(その1)-区画内空気温度評価への適用性検討-，2012，N11060
- 4) NIST：Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide
- 5) NIST：Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide