

SMARTFIRE V4.3
検証報告書

(原本: 2013 年 9 月改訂版 4.3.1)

2014 年 1 月

株式会社フォーラムエイト



免責事項

FSEG は、英語版以外の外国語版マニュアルの正確さについては責任を持ちません。
オリジナルの英語版と他の言語の翻訳版との間の矛盾や不明確さについては、英語版を優先とします。

何か疑問等ございましたら、販売ディーラーまでご連絡ください。

目次

目次	i
1 はじめに	2
2 一般的な物理特性の妥当性検査のケース	3
2.1 SMARTFIREの基本的な物理特性の検証—対流項 (Convective term)	3
2.1.1 SMARTFIREの結果	3
2.2 シンメトリ境界条件テスト	4
2.2.1 SMARTFIREの結果	5
2.3 後面の段差を越える2次元の乱流	6
2.3.1結果	7
2.4 長いダクトの乱流	9
2.4.1 結果	10
2.5 空洞における乱流の浮力流れ (Turbulent buoyancy flow in a cavity)	12
2.5.1 結果	13
2.6 2Dの空洞における流れを伴わない放射 (Radiation) の検証	16
2.6.1 SMARTFIREの結果	18
3 火災妥当性検査のケース	21
3.1 Stecklerの室内火災 (Steckler Room Fire)	21
3.1.1 結果	22
3.2 香港空港のケース	24
3.2.1 SMARTFIREの結果	24
3.3 LPC-RUN-007のシミュレーション	26
3.3.1 はじめに	26
3.3.2 結果	28
4 結論と所見	32
5 参考文献	34

1 はじめに

本書に示したテストケースは、*SMARTFIRE* CFD火災モデリングソフトウェアの検証および妥当性検査を目的とするものです。報告書は4節に分かれています。2節は、*SMARTFIRE*における基本的な物理特性が正確に実装されたことを検証するテストケースを含んでいます。3節は、*SMARTFIRE*の予測を火災実験から得られたデータおよびそのほかの火災モデルによって生成されたデータと比較するものです。最後に、6節は問題設定(テストケースに用いたメッシュなど)に関する詳細情報ならびにそのほかのユーザーが*SMARTFIRE*の結果を再現するための追加的な詳細情報を提供するものです。

妥当性検査は「1回おこなって忘れる」タスクではありません。コード開発者およびユーザーが参加すべき継続的な活動です。さらに多くのテストケースが開発され、*SMARTFIRE*の機能が拡大するに従って、本報告書が時間とともに発展していくことが期待されます。*SMARTFIRE*のユーザーは、そのほかのテストケースを開発し、結果をコード開発者に報告することが奨励されます。検証・妥当性検査を報告するときは、*SMARTFIRE*の設定に関する完全な詳細内容、および*SMARTFIRE*による予測と期待された結果を比較のために提供願います。妥当性検査のケースの報告はeメールでsmartfire@gre.ac.uk宛に送付願います。

特に記述がないかぎり、テストケースにおいて以下の材料プロパティが使用されています。

プロパティ	空気(AIR)	普通れんが(COMMON BRICK)
伝導率定数(CONDUCTIVITY CONSTANT)	0.02622	0.69
粘度定数(VISCOSITY CONSTANT)	1.56 5	1e+010
自然状態(NATURAL STATE)	気体(Gas)	固体(Solid)
熱膨張(THERMAL EXPANSION)	0.003292	0
密度(DENSITY)	理想気体法則を適用	1600
分子量(MOLECULAR WEIGHT)	29.35	なし
比熱定数(SPECIFIC HEAT CONSTANT)	1045.78	840

特に記述がないかぎり、この文書で用いるCFDコードは以下のとおりです。

SMARTFIRE v4.3 製造995、グリニッジ大学(University of Greenwich)FSEG 製作、以下「*SMARTFIRE V4.3*」または「*SMF V4.3*」と表記。

PHOENICS v2.1.3、英国CHAM Ltd社により製作、および
CFDS-FLOW3D v2.3.2、英国AEA Technology社製作。

FSEGは最近、火災モデリングのベンチマーク/標準(Fire Modelling Benchmarks/Standards)に関する成果を提出しました。このベンチマーク/標準案の目的は、特定の火災モデリングアプリケーションに関する特定のモデル使用の妥当性評価において火災安全承認機関を支援することです。このベンチマークは2段階に分かれています。第1段階の目的は、同一または同等のモデルを使用してすべてのソフトウェア製品のテストをおこなうことです。テストの第2段階では、ソフトウェアの全機能の実証実験をおこないます。それぞれの段階において、5件の非火災(CFD)および5件の火災ケースのテストがおこなわれます。さらに詳細な内容は、FSEGのウェブサイト[1]、ならびに第1段階(Phase 1)[2]および第2段階(Phase 2)[3]の各文書に掲載されています。

2 一般的な物理特性の妥当性検査のケース

2.1 SMARTFIRE の基本的な物理特性の検証—対流項(Convective term)

本テストは、SMARTFIRE V4.3における対流項が正確に機能するか否かを検証します。本テストは、単純な2-Dボックスにおける流体の流れが関係します。流体は吸気口から均一にボックスに流入し、吸気口の反対側に設置された排気口を通じて流出します(図1参照)。流体温度は均一です。本テストは、正負の方向における3つの座標方向(x、y、z)において繰り返されました。したがって、すべて同一の結果をもたらすべき6つのテストケースが生じます。これらすべてのテストは、熱伝達を用いて、さらには熱伝達および浮力を用いて繰り返されます。シンメトリな面を使用しているため、形状から流出する流れは、流入時と一様に同じ速度で出て行き、また領域全体にわたって同じ速度を維持するはずで

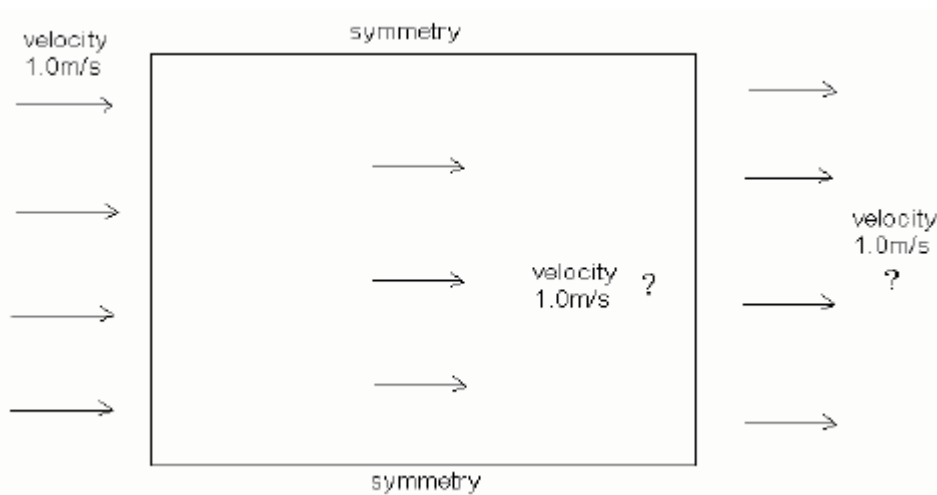


図 1 - 2D の流れのケースに関する形状

2.1.1 SMARTFIRE の結果

a) 流れのみ、熱伝達および浮力はなし

ハイブリッド: 最大速度: 1.0 m/s(秒)、最小速度: 1.0 m/s。

風上: 最大速度: 1.0 m/s、最小速度: 1.0 m/s。

指数: 最大速度: 1.0 m/s、最小速度: 1.0 m/s。

図2で結果が表示されます。SMARTFIRE V4.3の対流の処置が正しいということがわかります。流れの方向がそれぞれyとzに沿って変更されます。結果はx方向で得られたものと一致しているので、ここにそれらが存在する必要はありません。

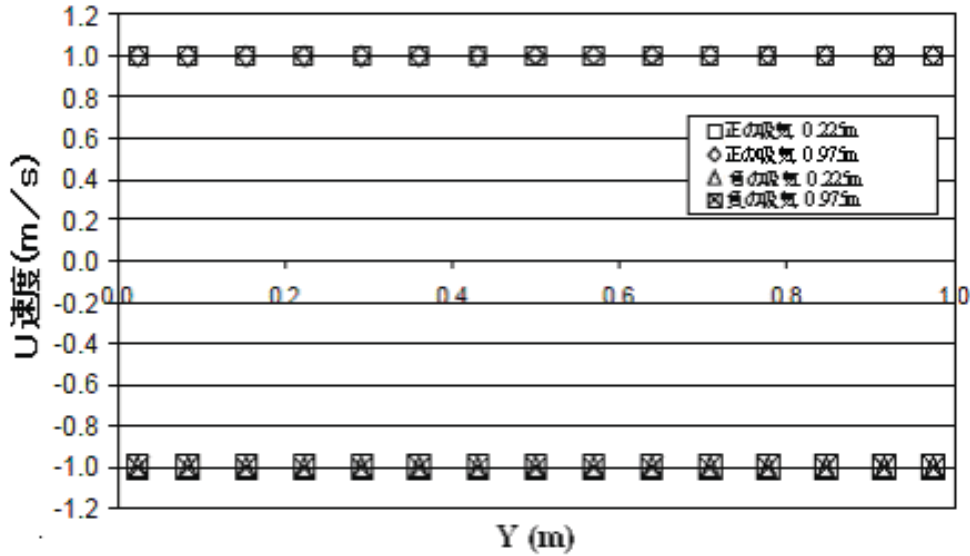


図 2- 吸気口の正負の u 速度に関するそれぞれの計算結果

b) 流れおよび熱伝達あり、浮力はなし

一般的に、結果は図2に類似しているため、類似する図を示す必要はありません。このサブセクションでは、さまざまなスキームを以下のとおり比較します。

ハイブリッド(Hybrid): 最大速度:1.0 m/s、最小速度: 1.0 m/s。

風上(Uppwind): 最大速度:1.0 m/s、最小速度: 1.0 m/s。

指数(Exponential): 最大速度: 1.0 m/s、最小速度: 1.0 m/s。

べき法則(Power Law): 最大速度: 1.0 m/s、最小速度: 1.0 m/s。

c) 流れ、熱伝達、および浮力

最大速度:1.0 m/s、最小速度: 1.0 m/s。

2.2 シンメトリ境界条件テスト

このケースは、シンメトリ(対称)条件がSMARTFIRE V4.3で正確に振る舞うかどうかを試験するものです。このケースでは、狭いダクトからさらに広いダクトに流れが拡大します。その設定を図3に示します。シンメトリによる結果とダクト全体による結果を比較するために、2通りの方法でケースをシミュレートしました。すなわち、流れの全体領域と、対称線を用いることによる領域全体の半分です。

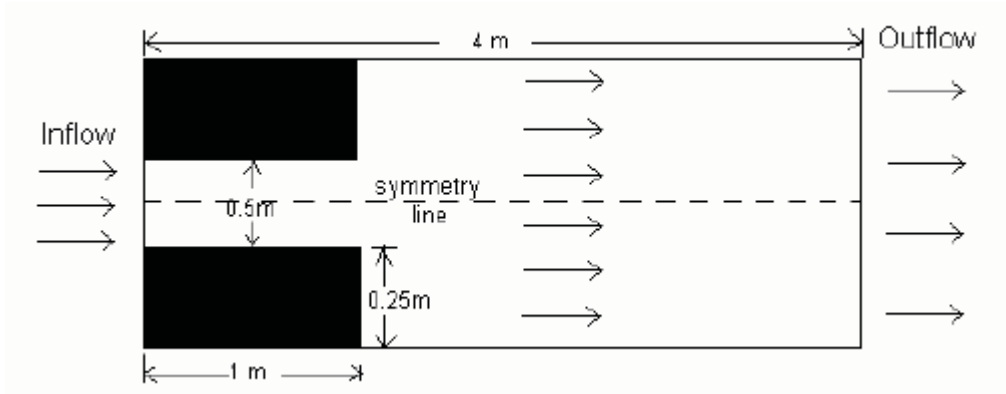


図 3 - 対称線によりダクトを拡大する

2.2.1 SMARTFIRE の結果

シムトリ条件を適用した領域の半分の流れフィールドと、領域全体のケースシステムがそれぞれ以下の図4および5にプロットされました。排気口における速度分布は図6にプロットされています。

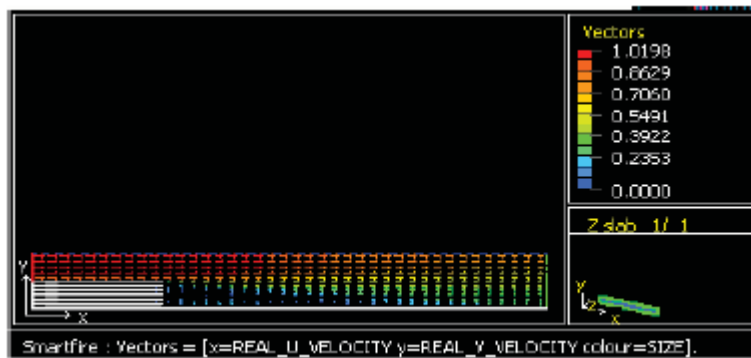


図 4 - システムの半分を用いるシミュレーションによって生成された流れフィールド

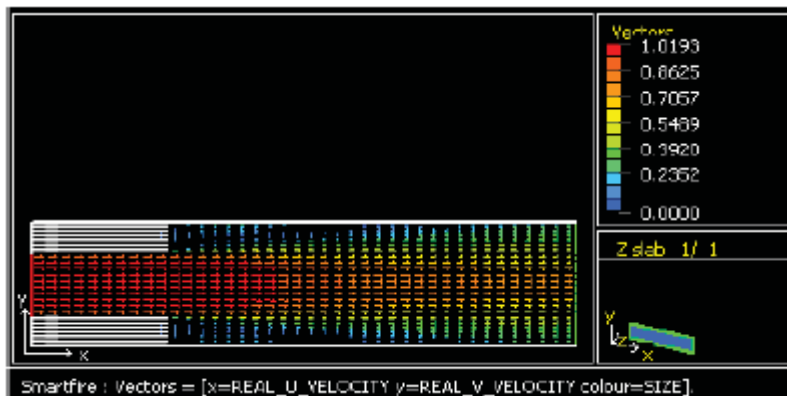


図 5 - システム全体を用いるシミュレーションによって生成された流れフィールド

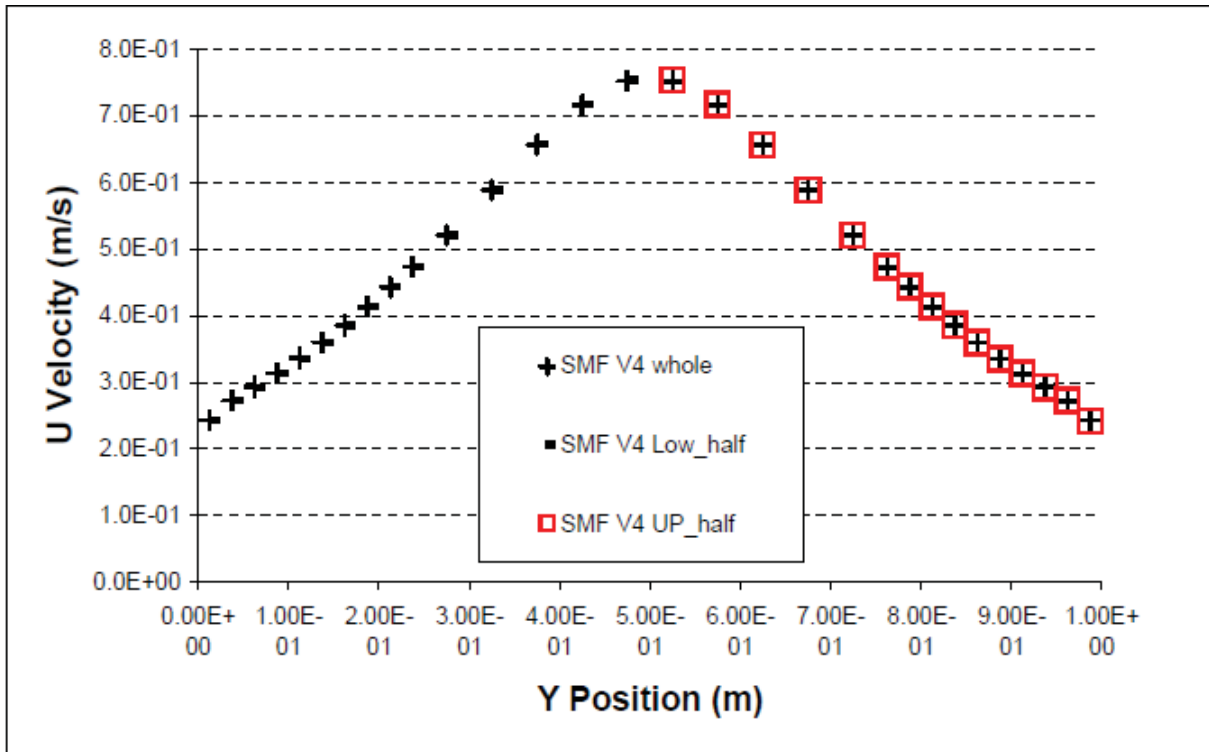


図 6-排気口におけるフィールド全体とシンメトリのケース比較

上図からの結果は、様々な検証結果が様々な研究者から得られますが、*SMARTFIRE V4.3*の機能内の対称状態が流れに対して十分意図されていることを示唆しています。

2.3 後面の段差を越える2次元の乱流

このテストは、*SMARTFIRE* k-ε 乱流モデルを検証するために提案されました。*SMARTFIRE V4.3*、*PHOENICS*および*FLOW3D*の間で比較が実行されます[14]。流れプロパティおよび境界条件を以下に記述するとともに、配置設定を図7に示します。

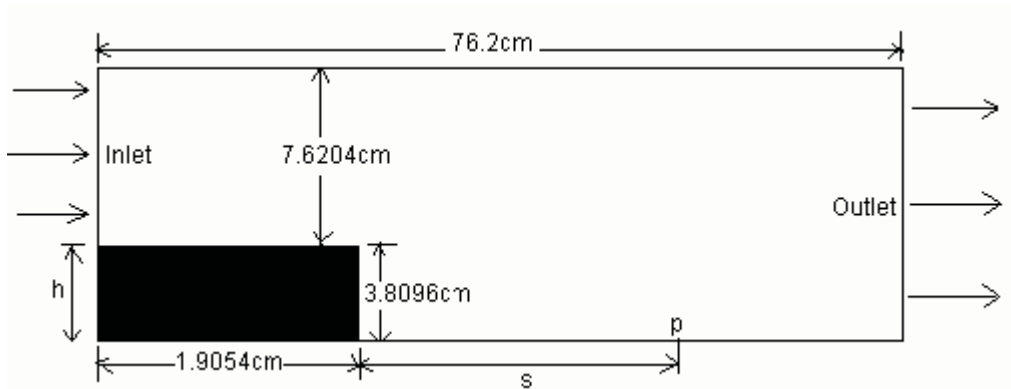


図 7- 後面の段差 (Backward facing step) の配置設定

流体プロパティ

密度: 1 kg/m^3 ,
粘度: $1.101\text{E-}5 \text{ kg/ms}$.

吸気口における境界条件

速度: 13.0 m/s ,
運動エネルギー: $0.7605 \text{ m}^2/\text{s}^2$,
消散率: $31.78 \text{ m}^2/\text{s}^3$

この問題に熱伝達はありません。*SMARTFIRE*およびFLOW3Dは、同じ壁関数公式を用います。一方、PHOENICSは、異なる壁関数公式を用います。

2.3.1 結果

再付着ポイント

再付着ポイントとは、x方向の下流に位置し、後方に面した段のために流れの再循環がまったくなくなる地点です。

下図で、再付着ポイントはPによって示され、段からポイントPへの距離はsです。以下のCFDコードによって予測された段の高さ(h) に対する比率は、*SMARTFIRE V4.3*: 5.7、PHOENICS: 6.55、FLOW3D: 5.16です。実験結果によると、この比率は7.1となるはず [4, 5]。

すべての4つのコードは類似した再付着ポイントの値を予測しています。またすべてのコードが正しい値よりも過小な予測をおこなっています。*SMARTFIRE*の予測は、PHOENICSとFLOW3Dの予測の中間にあります。これらの値は、さらなるメッシュ改良によって改善することが期待されます。

速度分布図 (Velocity profiles)

再付着距離に加えて、ダクト内のいくつかの位置における速度分布図の予測を比較することも重要です。このケースでは、*SMARTFIRE V4.3*、PHOENICS、FLOW3Dによって生成された排気口、および吸気口から0.285mの地点でのU速度の分布図を比較します。

2つの異なる位置でこのケースに対するU速度プロファイルは下記に表示されたとおりです。

*SMARTFIRE*速度プロファイルはPHOENICSとFLOW3Dのプロファイルに非常に近いです。その比較は*SMARTFIRE* k- ϵ 混乱モデルはPHOENICSあるいはFLOW3Dと同様な動作をすることを表示します。

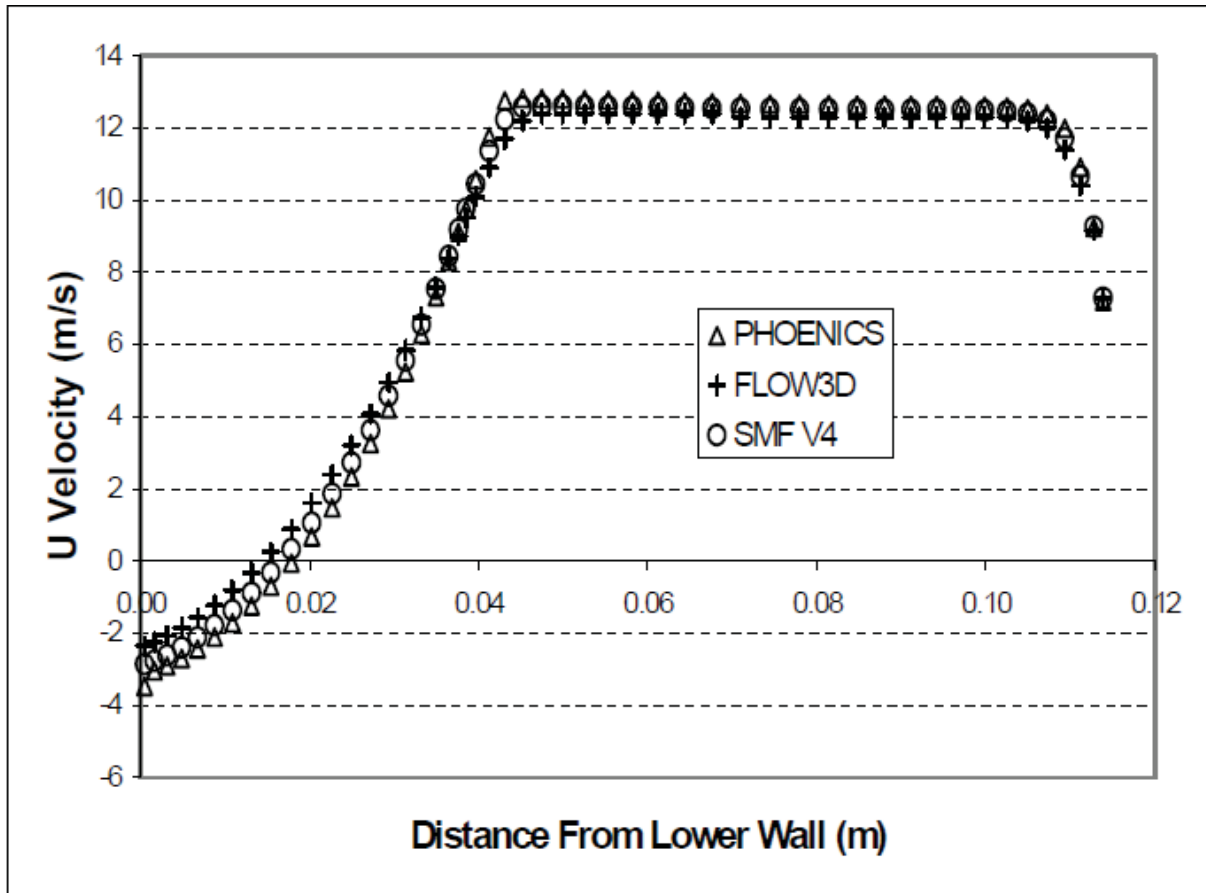


図 8 - 排気口における高さに対する速度 U

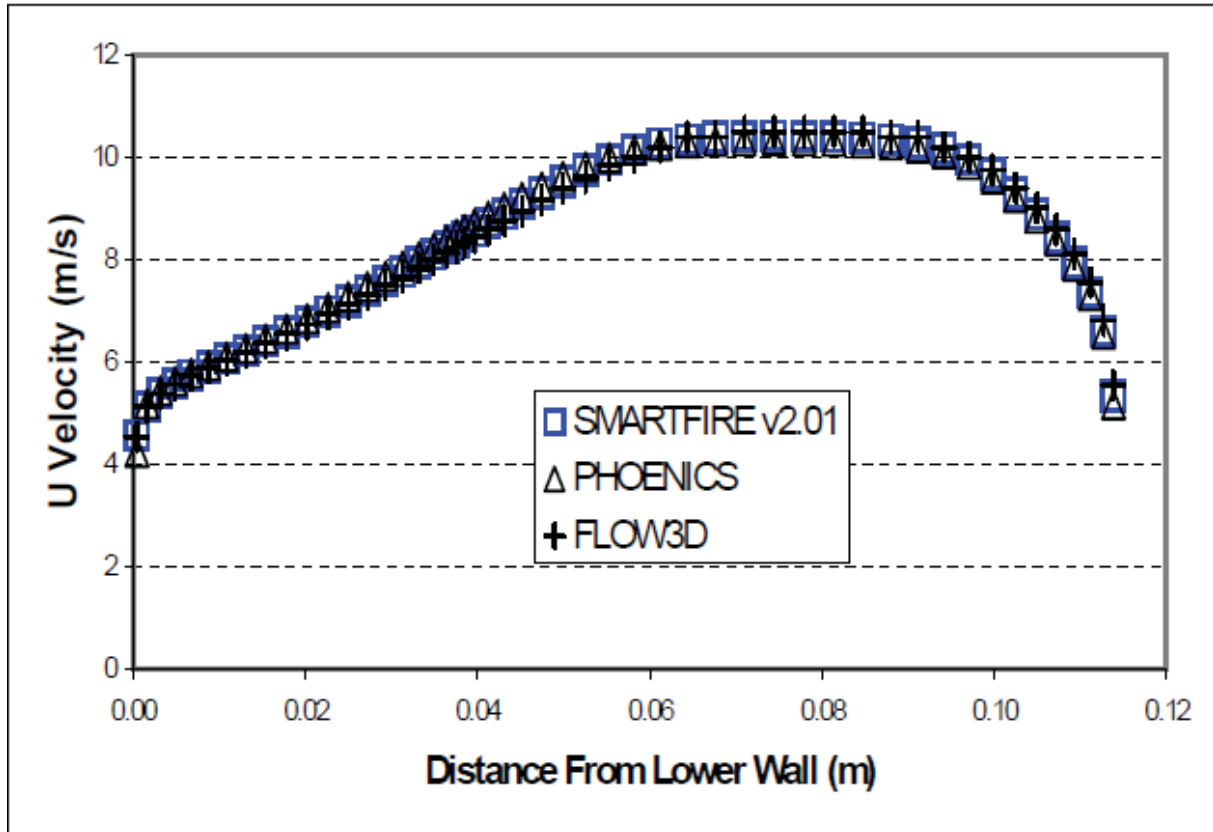


図9 -吸気口から 0.285m の高さに対する速度 U

2.4 長いダクトの乱流

このテストでは、乱流の熱伝達と関連づけたSMARTFIRE k-ε 乱流モデルを検証します。このケースは、過去にPHOENICSを用いて十分に調査され、PHOENICSのテストケースライブラリの一部となっています。ケースの形状は図1に示されています。

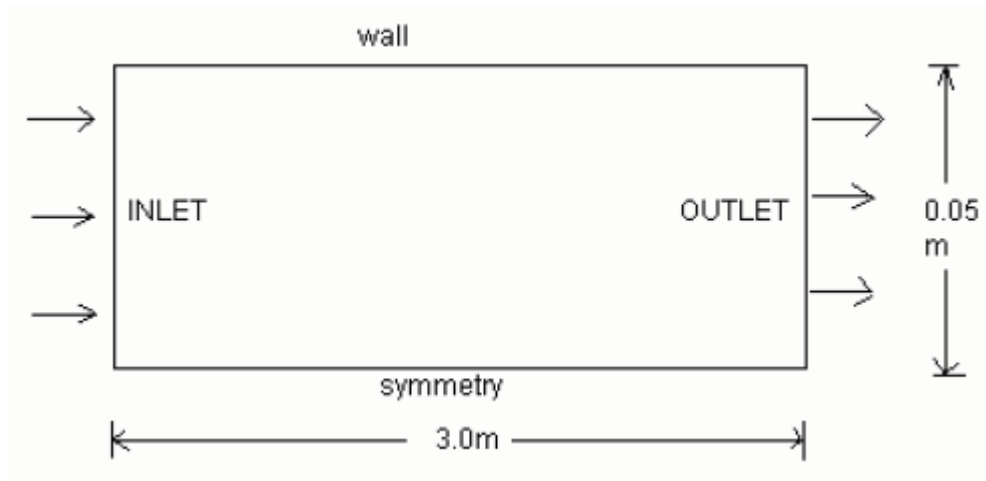


図 10 - 長いダクトの乱流の配置構成

流体のプロパティ

伝導率: 0.07179(W/mK)

密度: 1(kg/m³)

粘度: 5e-5(kg/ms)

比熱: 1005(J/kgK)

吸気口の条件

速度: 50m/s

乱流の運動エネルギー: 11.25(m²/s²)消散率: 1378.0(m²/s³)

エンタルピー: 10(J/kg)

壁の条件

固定エンタルピー値:(1J/kg)。

この問題で浮力は用いられていません。

2次元メッシュは不均一に分布し、セル割当て数は600(20×30)です。

2.4.1 結果

*SMARTFIRE*の結果を*PHOENICS*の結果と比較します。比較には、排気口においてダクトを横断するエンタルピーおよび速度の分布図が含まれます。

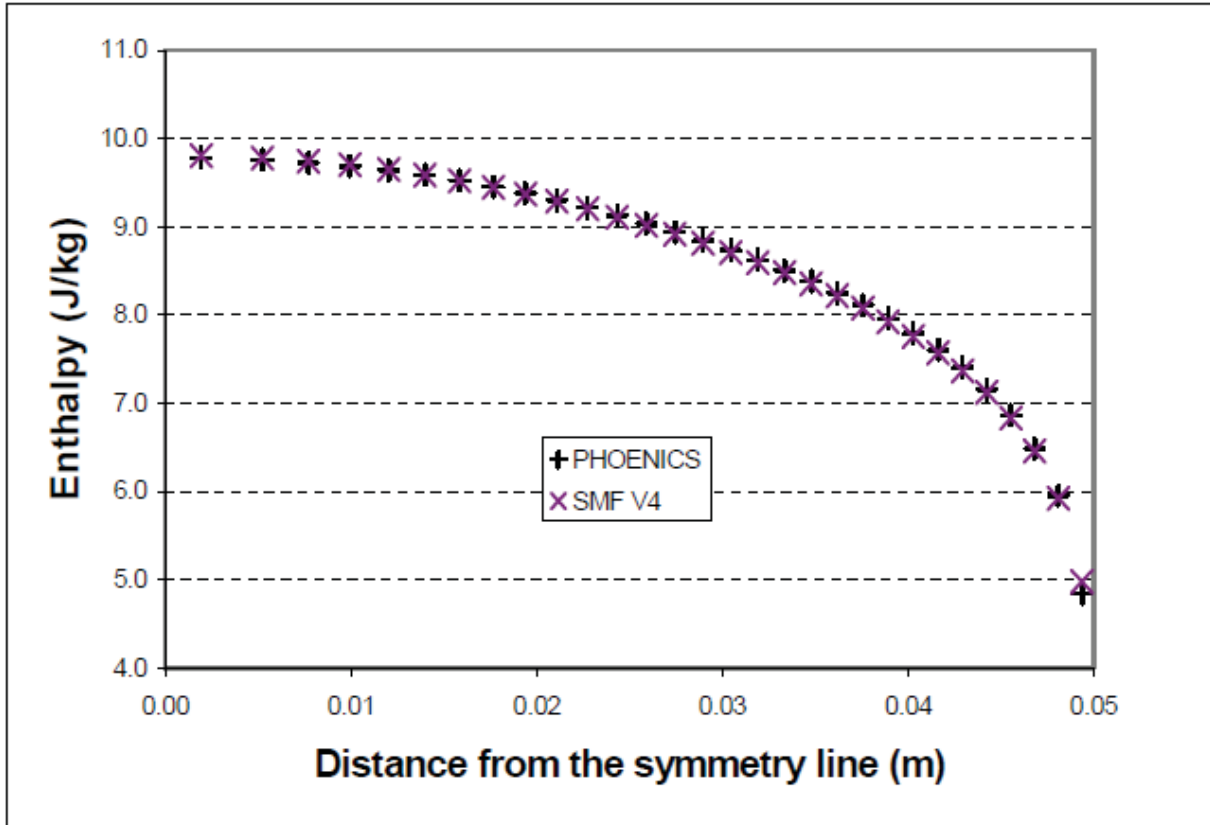


図 11 - 排気口におけるダクトの軸線からの距離に対してプロットしたエンタルピー

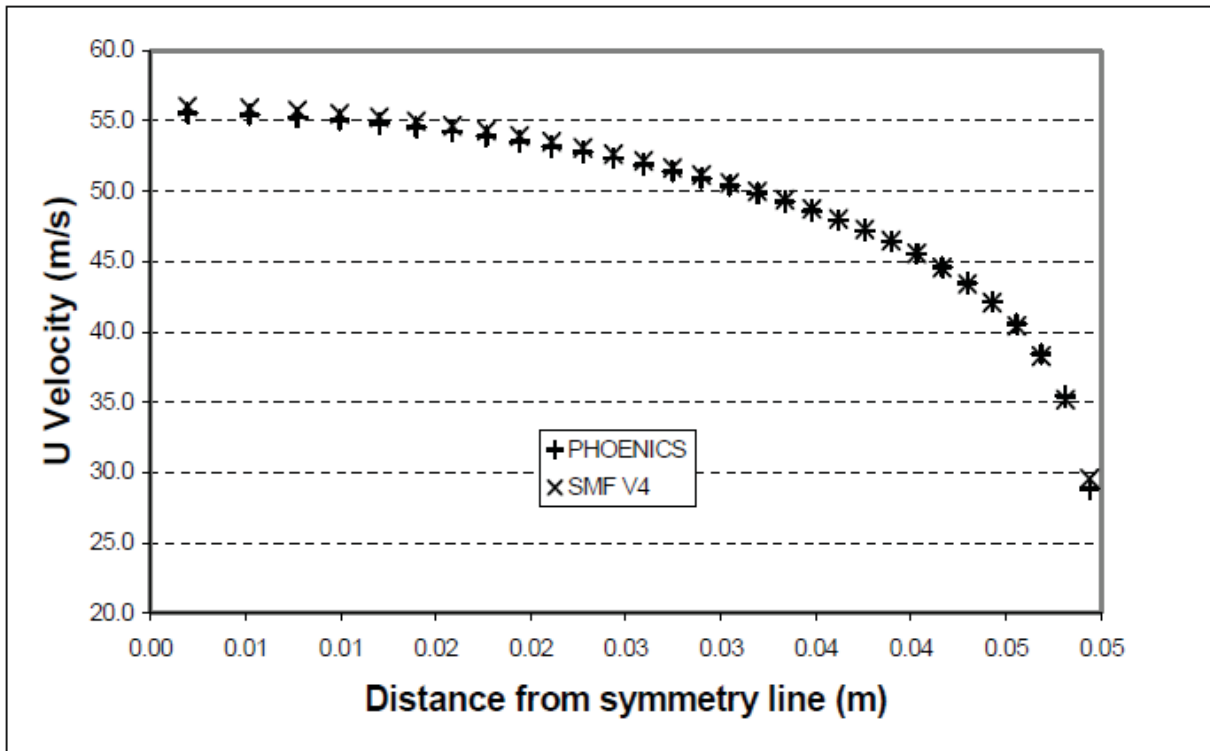


図 12 - 排気口におけるダクトの軸線からの距離に対してプロットした速度

上記の結果から、SMARTFIREおよびPHOENICSの乱流の熱伝達関数は類似の結果をもたらすことが示唆

されます。SMARTFIREは同じ結果を得ます。

2.5 空洞における乱流の浮力流れ (Turbulent buoyancy flow in a cavity)

このテストケースでは、乱流モデル、乱流の熱伝達、および浮力モデルを考察します。このテストケースは、そのほか何人かの研究者によって用いられたことがある[6]標準的なテストケースであり、PHOENICSのテストライブラリの一部を形成しています。SMARTFIREが用いた乱流モデルは、Launder および Spalding [7]のモデルにもとづくものです。

このケースに使われた形状は下の図で描写されます。

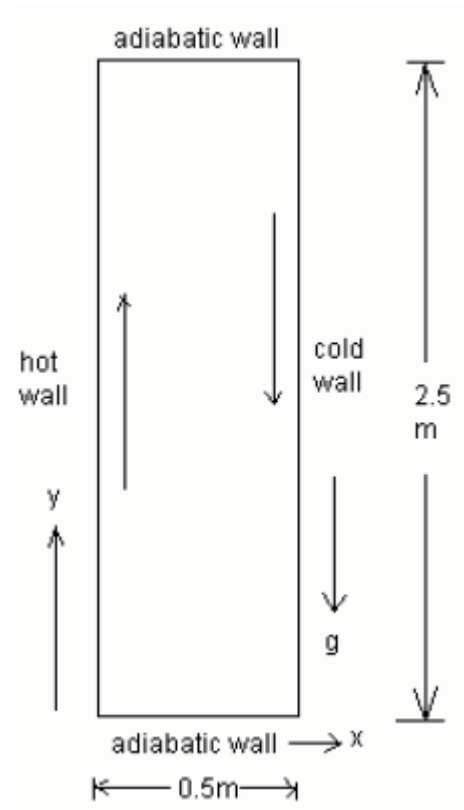


図 13. ダクト内の浮力流れの配置設定

流体のプロパティ

伝導率は2.852158 (W/mK)

密度は1.071 (kg/m³)

比熱は1.008e + 03 (J/kgK)

粘度は2.0383e-05 (kg/ms)

熱膨張は3.029385e-03 (1/K)

境界条件

高温の壁 (t_h): 定数温度 (353.0K)

低温の壁 (t_c): 定数307.2(K)

そのほかの壁は断熱です。

2通りのセル割当て量が用いられています: 1つは、14400 (120×120)で、不均一に分布したメッシュを用います。

浮力をモデル化するためにブシネスク近似値が用いられています。流れが低マッハ数の範囲(すなわち亜音速)にあり、かつ壁相互間の温度差が小さいため、ブシネスク近似値が適切です。したがって、完全な乱流処理は不用です。

2.5.1 結果

このテストケースで、垂直速度プロファイルのSMARTFIRE予測(テストセルへ上がる途中)、垂直中心線に沿った温度は実験データと比較されます。SMARTFIRE(参照[6]にある結果と比較される時)は、SMARTFIREの結果が表示する結果にとっても近いことを示します。次の図で、「EXP」はCheesewright et al [7]によって得られる実験データを表します。

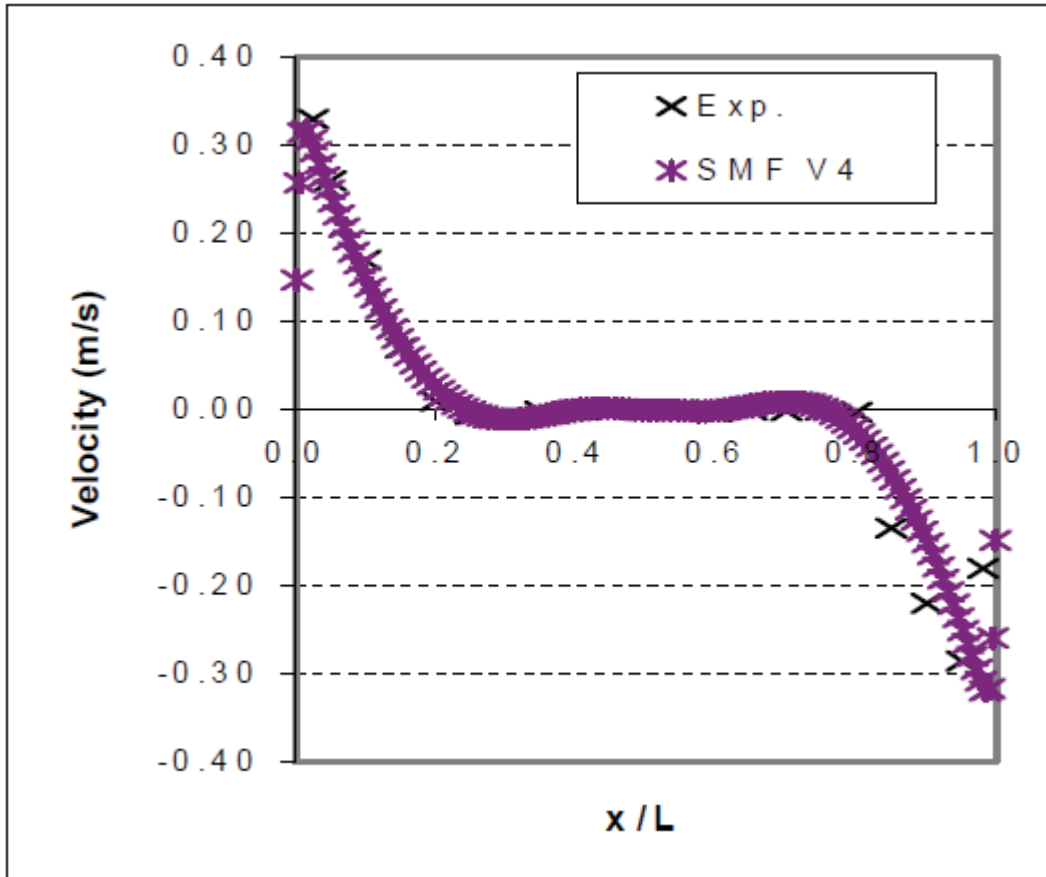


図 14 - y/H=0.5 における予測速度(y 方向)分布図

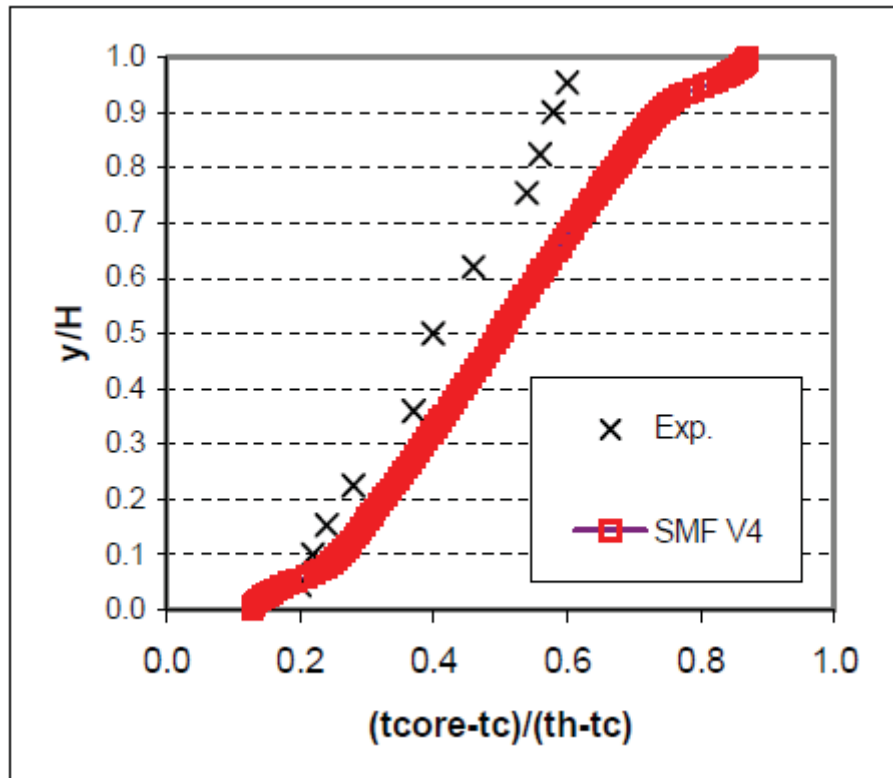


図 15 - SMARTFIRE が鉛直の中心線に沿った局所温度を予測。

注釈: T_c と T_h はそれぞれ冷間圧延と熱間圧延の温度を表します。

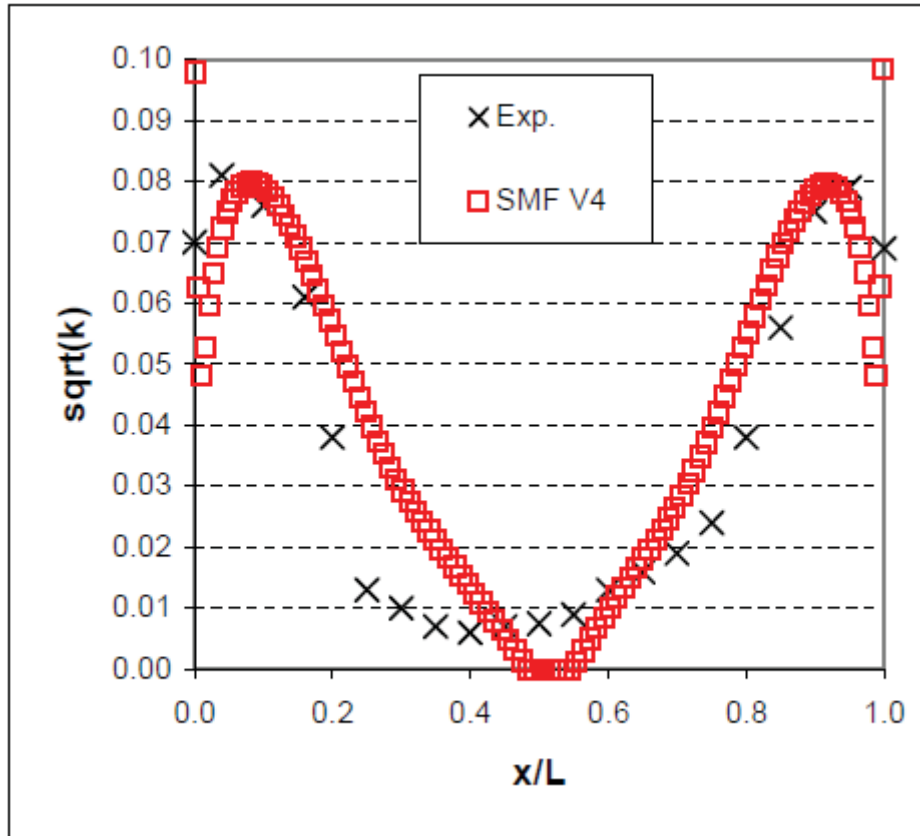


図 16 - SMARTFIRE が $y/H=0.5$ における乱流の揺動、 \sqrt{k} を予測。

備考: このケースに関して、完全な収束を達成するのは困難です。したがって、弛緩係数、特にy-方向におけるv、x-方向におけるu、運動エネルギー、およびその消散率を含めた変数に関する係数は、低めのレベルに設定します。このケースの場合、0.15に低く設定します。そうしないと、ソリューションはステップごとに変動します。SMARTFIRE V4がSMARTFIRE V2.01よりも良好な結果をもたらすことがわかります。

2.6 2D の空洞における流れを伴わない放射(Radiation)の検証

これらのテストは、SMARTFIREの6フラックス放射モデルの実装を考察するために設計され、実行されました。これらのケースは、高温および低温の壁を伴う空洞内の放射、ならびに媒体内の均一な温度分布が関係します。散乱は無視されます。テストケースで用いる形状を下の図17に示します。SMARTFIRE V4.3において用いられる放射モデルの妥当性検査は、理論的な結果と十分一致しています。

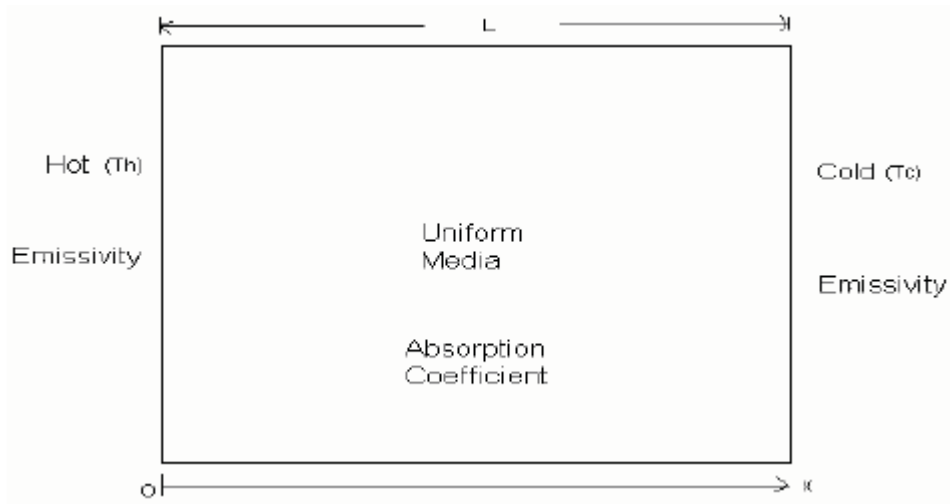


図 17 - SMARTFIRE の 6 フラックスの放射モデルの 2D 検証。

このシナリオに関して、6フラックスモデルの数式にもとづいて厳密な解析的放射フラックスを決定することが可能です。 $T_h, T_c, T_m, \varepsilon_h, \varepsilon_c$ および α はそれぞれ、高温の壁温度、低温の壁温度、媒体の温度、高温の壁の放射率、低温の壁の放射率、および、媒体の吸収係数を意味します。6フラックスモデルによる決定に従う放射フラックスの厳密な解析的ソリューションを以下に示します。

負のx方向に沿った放射フラックス F^- は、以下のとおりです。

$$F^- = D \exp(-\alpha(L-x)) + \sigma(1 - \exp(-\alpha(L-x)))T_m^4$$

ここで、

$$D = (1 - \varepsilon_c)C + \varepsilon_c \sigma T_c^4 \quad C = B/A$$

$$B = \sigma \exp(-\alpha L) [\varepsilon_h T_h^4 + (1 - \varepsilon_h)(1 - \exp(-\alpha L))T_m^4 + (1 - \varepsilon_h)\varepsilon_c \exp(-\alpha L)T_c^4] \\ + \sigma(1 - \exp(-\alpha L))T_m^4$$

$$A = 1 - (1 - \varepsilon_h)(1 - \varepsilon_c)\exp(-2\alpha L)$$

正のx方向に沿った放射フラックス F^+ は、以下のとおりです。

$$F^+ = D \exp(-\alpha x) + \sigma(1 - \exp(-\alpha x))T_m^4$$

ここで、

$$D = (1 - \varepsilon_h)C + \varepsilon_h \sigma T_h^4 \quad C = B/A$$

$$B = \sigma \exp(-\alpha L) [\varepsilon_c T_c^4 + (1 - \varepsilon_c)(1 - \exp(-\alpha L))T_m^4 + (1 - \varepsilon_c)\varepsilon_h \exp(-\alpha L)T_h^4] \\ + \sigma(1 - \exp(-\alpha L))T_m^4$$

$$A = 1 - (1 - \varepsilon_h)(1 - \varepsilon_c)\exp(-2\alpha L)$$

ここで、 σ はステファン-ボルツマン定数です。

テストは放射率および吸収係数のさまざまな値を用いて繰り返されました。

2.6.1 SMARTFIRE の結果

本モデルの予測を厳密なソリューションと比較します。これらの比較において、高温の壁、低温の壁、および媒体の温度はそれぞれ、774K、304K、および574Kです。空洞の長さLは1mです。セルのサイズは0.0222mです。

a) 媒体の吸収係数はゼロ、放射率は1.0です。

$\varepsilon_{\text{all}} = 1.0$ かつ $\alpha = 0.0$ の場合、

$$F^- = \sigma T_c^4$$

$$F^+ = \sigma T_h^4$$

結果を下の表に示します(表1)。流体流れがないこのケースに関する収束基準は、少なくとも 10^{-6} の小ささに設定しなければならないことに注意します。

表 1 - $\varepsilon_{\text{all}} = 1.0$ 、 $\alpha = 0.0$ のときの放射フラックスに関する理論的結果および SMARTFIRE の結果

放射フラックス	理論的結果	SMARTFIRE V2.01	SMARTFIRE V4.0
F-	4.8423E+02	4.826421E+02	4.826421E+02
F+	2.0348E+04	2.032181E+04	2.032182E+04

最大相対誤差 < 1%。

b) 媒体の吸収係数はゼロ、放射率は0.7です。

$\varepsilon = 0.7$ かつ $\alpha = 0.0$ の場合、

$$F^- = \varepsilon \sigma T_c^4 + \frac{(1-\varepsilon)\sigma(\varepsilon T_h^4 + (1-\varepsilon)\varepsilon T_c^4)}{1-(1-\varepsilon)(1-\varepsilon)}$$

$$F^+ = \varepsilon \sigma T_h^4 + \frac{(1-\varepsilon)\sigma(\varepsilon T_c^4 + (1-\varepsilon)\varepsilon T_h^4)}{1-(1-\varepsilon)(1-\varepsilon)}$$

結果を下の表に示します(表2)。

表 2 - $\varepsilon_{\text{all}} = 0.7$ 、 $\alpha = 0.0$ のときの放射フラックスに関する理論的結果および SMARTFIRE の結果

フラックス	理論的結果	SMARTFIRE V2.01	SMARTFIRE V4.0
F-	1.59518E+04	1.574355E+04	1.574354E+04
F+	5.060E+03	5.060915E+03	5.060914E+03

最大相対誤差<1%。

c) 媒体の吸収係数は1、放射率は1.0です。

今回は媒体からの吸収があるため、フラックスは変位に依存します。結果を下図に示します。

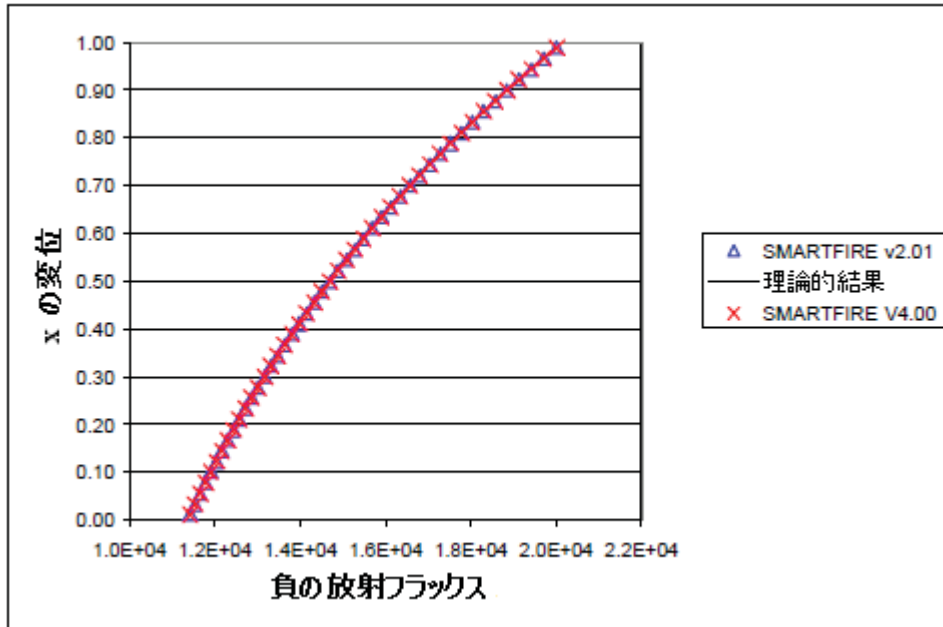


図 18 - $\epsilon_{all} = 1.0$ 、 $\alpha = 1.0$ のときの負の放射フラックスに関する理論的結果および SMARTFIRE の結果

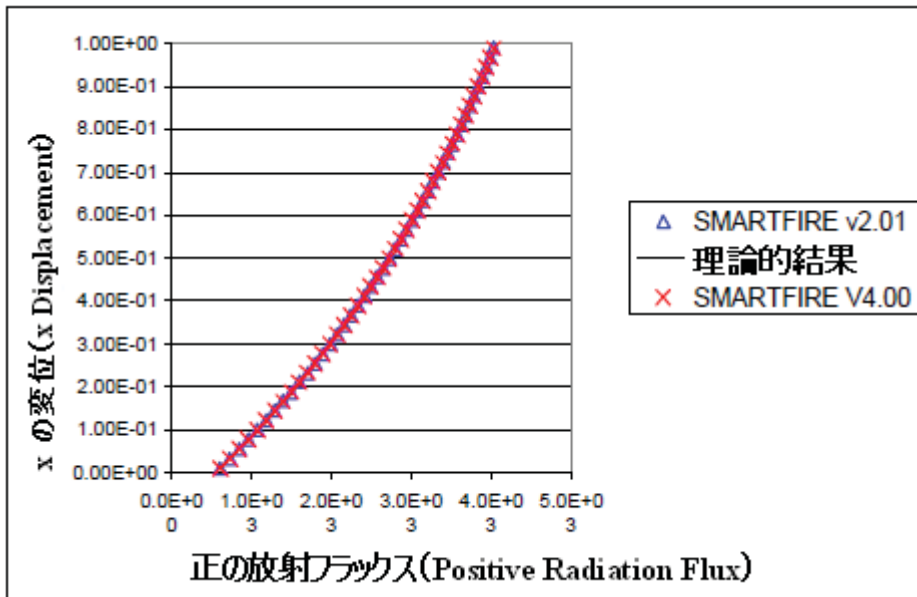


図 19 - $\epsilon_{all} = 1.0$ 、 $\alpha = 1.0$ のときの正の放射フラックスに関する理論的結果および SMARTFIRE の結果

最大相対誤差<1%。

d) 媒体の吸収係数は1、放射率は0.7です。

今回は媒体からの吸収があるため、フラックスは変位に依存します。結果を下图に示します。

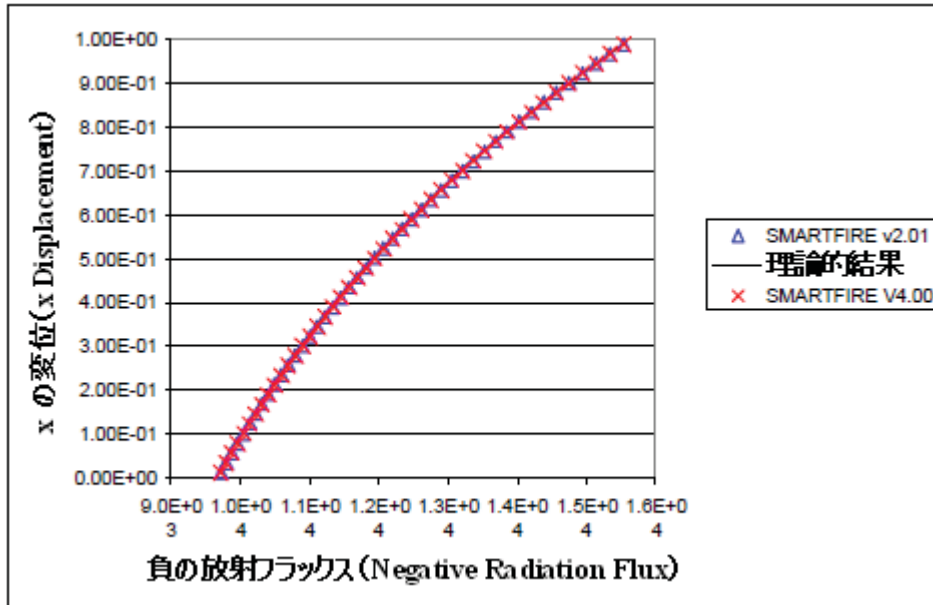


図 20 - $\epsilon_{\text{all}} = 0.7$ 、 $\alpha = 1.0$ のときの負の放射フラックスに関する理論的結果および SMARTFIRE の結果

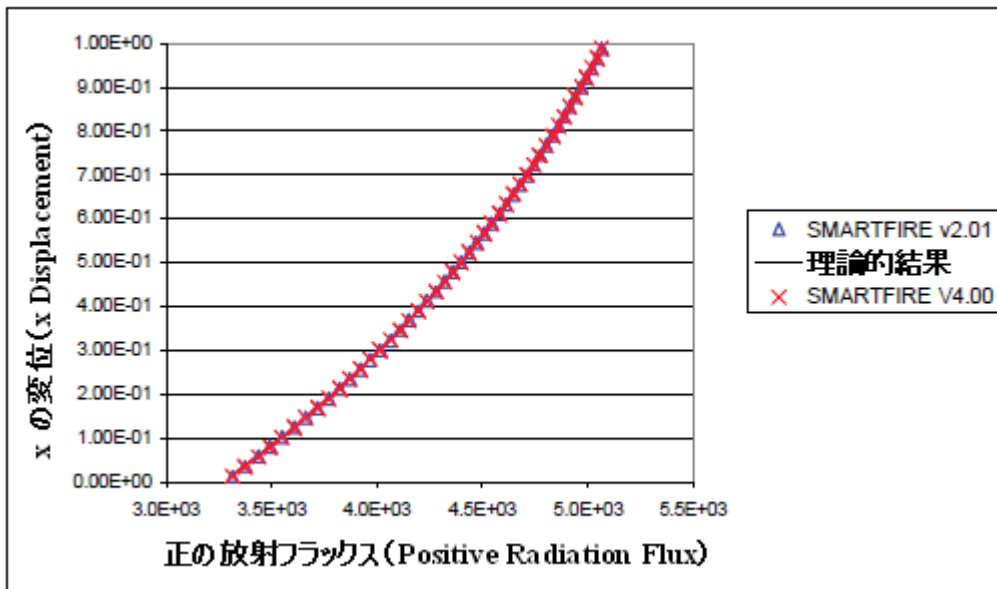


図 21 - $\epsilon_{\text{all}} = 0.7$ 、 $\alpha = 1.0$ のときの正の放射フラックスに関する理論的結果および SMARTFIRE の結果

最大相対誤差<1%。

このテストからの結果は6-フラックスモデルが正確に実行されたことを示唆します。

3 火災妥当性検査のケース

3.1 Steckler の室内火災 (Steckler Room Fire)

Stecklerら [10]は、火災に誘発された流れを調査するために、区画内部における一連の火災実験を実施しました。これらの火災テストから得られた実験データは、ゾーンとフィールド両方の火災モデルの妥当性検査手順の一環として用いられてきました。このデータは、小規模の区画における非拡散の火災を表します。一連の45件の実験がStecklerらによって、平面図において2.8m×2.8m、高さ2.18mの区画における火災に誘発された流れを調査するために実施されました(図22参照)。壁および天井は厚さ0.1mであり、セラミックファイバ一製の絶縁板で被覆されていました。実験は30分以内に「ほぼ定常状態」に達したことが観測されました。一連の実験は、小さい窓から幅の広いドアまでに及ぶさまざまな単独の区画開口部を伴う8か所のフロア位置に、体系的に配置されたガスバーナーによって構成されました。ドアの開口は0.24m から0.99mです。直径0.3mのバーナーとともに、工業用のメタンが定率で提供され、31.6 kW、62.9 kW、105.3 kW、および158 kWの一定の火災強度をもたらしました。

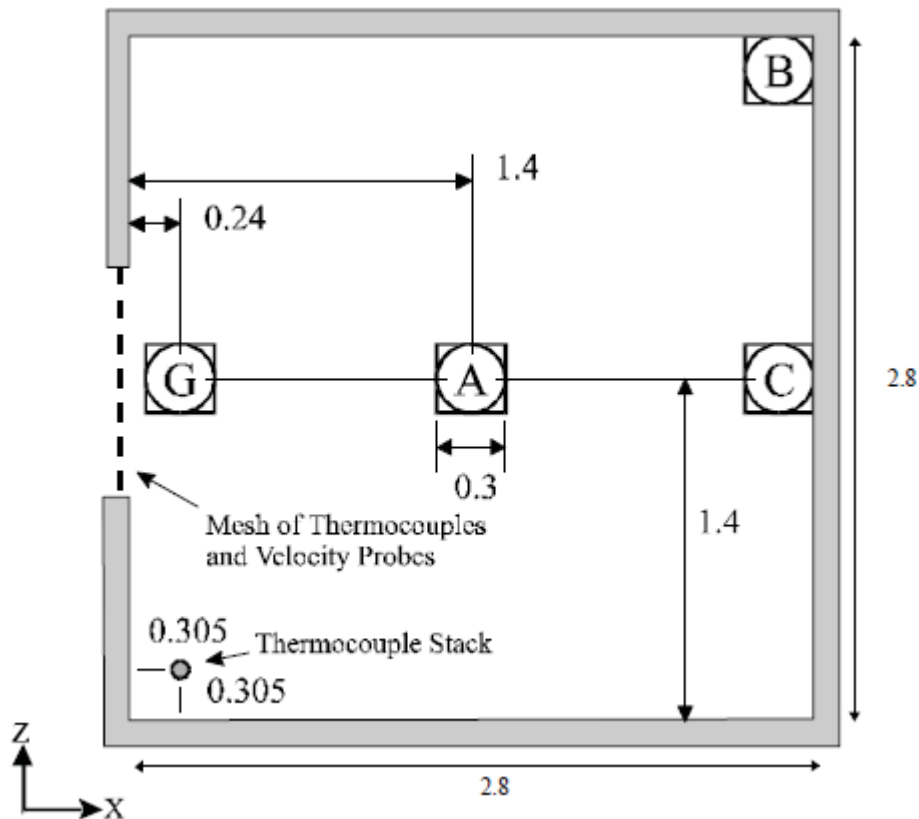


図 22 - Steckler の部屋の配置設定

ドア縦枠の中心内部の速度および温度を計測するために、部屋開口部内において、開口部のサイズに応じて28から144の2次元グリッド上に双方向速度計プローブおよび裸線の熱電対が配置されました。測定された速度は、最大10%の誤差が生じることがあります。さらに、ガス温度分布を測定するために、吸気式熱電対の排気筒が部屋の前面コーナーに置かれました。

ここで選択されたテストにおいて、ドアの幅は0.74mで高さは1.83m、また火災は、フロアの中心に配置され(図27のA位置)、直径0.3mのガスバーナーによって表されました。バーナーのパワーは62.9 kWでした。

CFDケースでは、火災は、62.9 kW の一定の放熱率を伴う0.3m x 0.3m x 0.3mの体積熱源(volumetric heat source)であると想定されます。

3.1.1 結果

*SMARTFIRE*の結果が実験データと比較されます(次の図参照)。*SMARTFIRE*は200の1秒の時間ステップを使用しました。2つのシミュレーションが2つの異なるメッシュで行なわれました。対照的な境界線のある9860(29x17x20)のセルで成り立つ粗いメッシュの量、49980(49x34x30)のセルで成り立つ他のメッシュの量は火とドアの中心の対称的な平面を使用します。これらの計算で、壁はセラミック断熱板でできていると想定されます。6-フラックスの放射モデルは吸収係数に依存する温度を使用しました。次の図で、SMFV4とSMFV4RFはそれぞれ粗いメッシュと精製されたメッシュで予測を意味します。

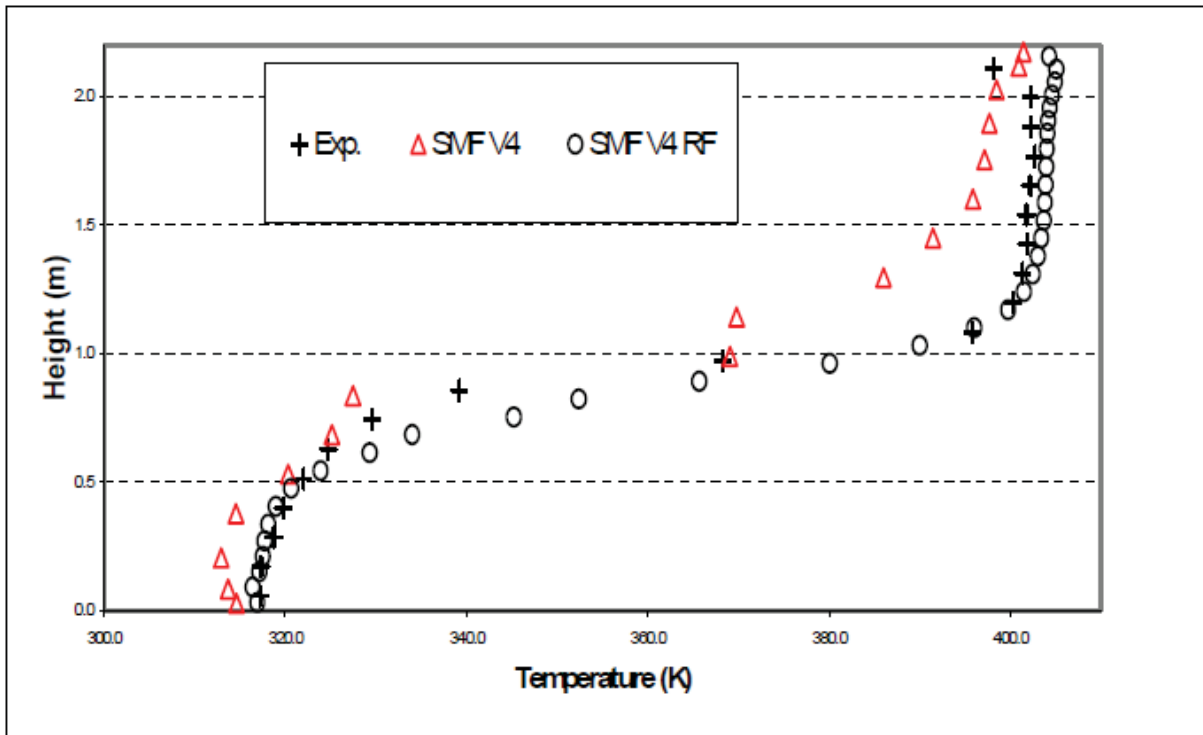


図 23 - 前の壁および側面から 0.305 における鉛直のコーナースタック (Vertical Corner Stack) の温度

両方の*SMARTFIRE*シミュレーションは部屋のコーナーで縦の熱電対スタックに対する実験結果と論理的に一致します。精製メッシュのシミュレーションによる予測が向上することは明白です。

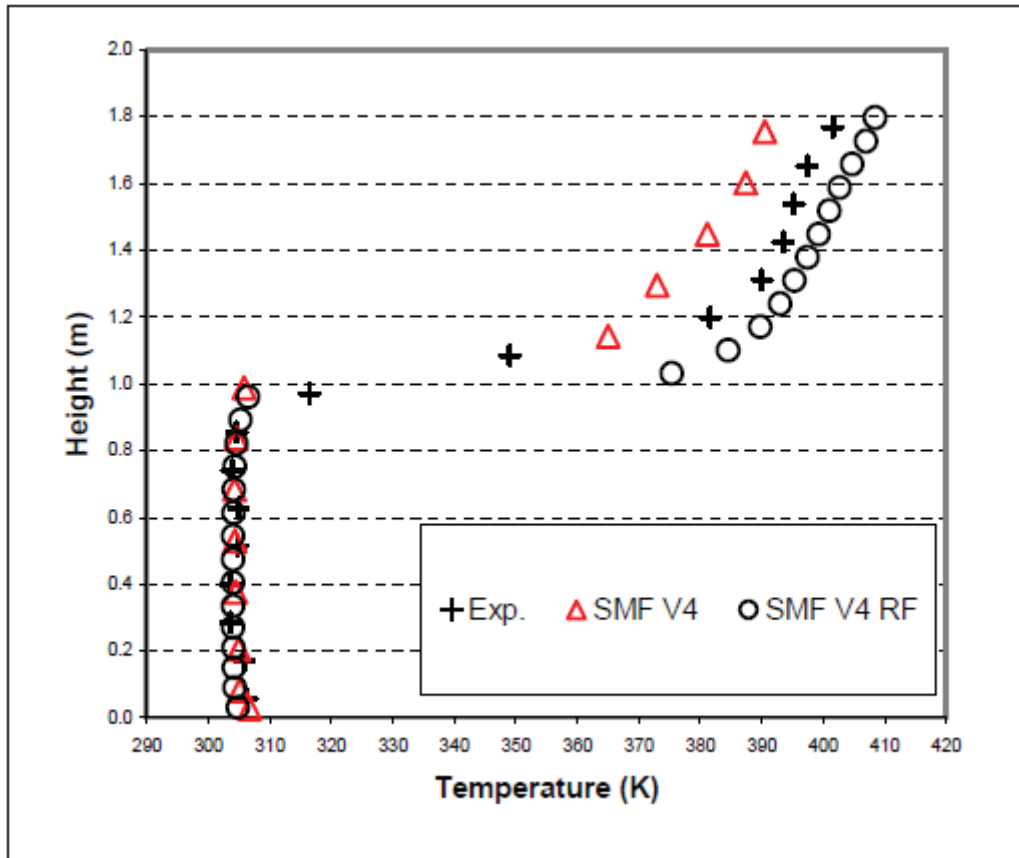


図 24 -ドア中央における鉛直の出入口の温度分布

温度のSMARTFIRE出入り口プロフィールは精製メッシュによって、改良された実験結果と一致します。

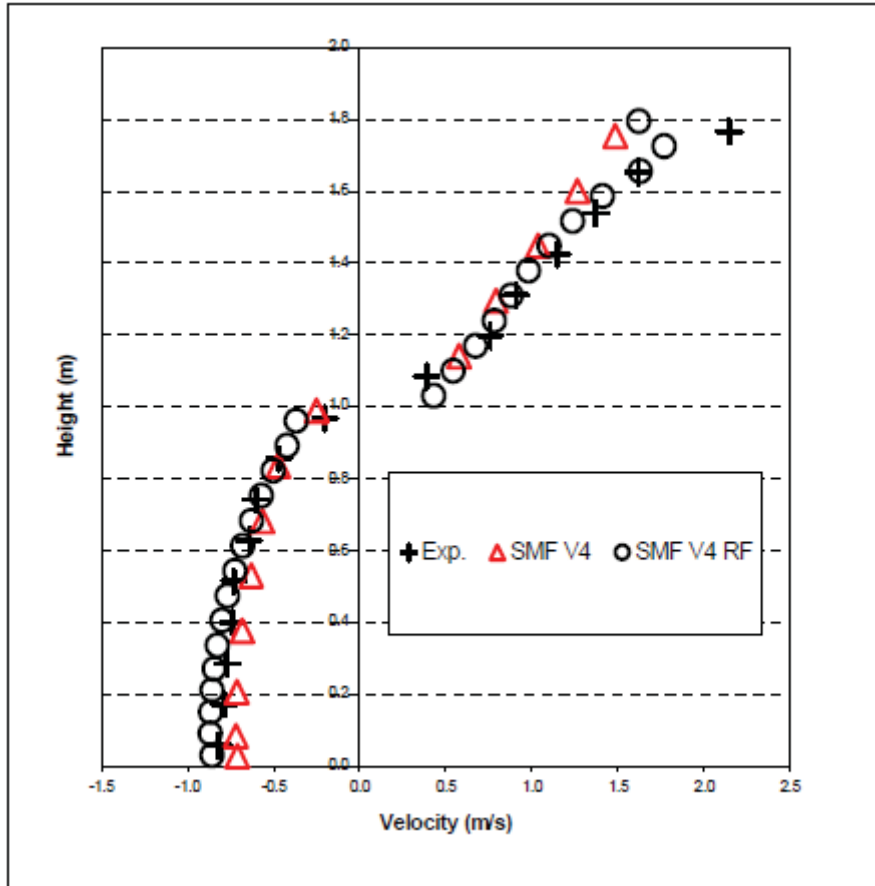


図 25 - ドア中央における鉛直のスタックの水平速度分布。

速度のSMARTFIRE出入り口プロフィールは出入り口の最上部のすぐ下に地域の例外で実験的な結果との良い合意にあります。

3.2 香港空港のケース

香港空港のテストケースは、空気火災「キャビン概念」に関わるものです。このケースは、Chow教授による雑誌論文[11]に由来します。この論文は、ゾーンモデルを用いてこのケースのシミュレートを試みるものです。区画は天井ユニット以外、完全にオープンです。火災は、建物中央の床の上に配置されます。既定の火災体積は1m x 1m x 1mです。火力は標準的な方法によって定義されます。すなわち、 $H=0.188 t^2$ (kW) (すなわちt乗の火災)です。区画は5m(幅) × 5m(長さ) × 3m(高さ)です。6フラックスの放射モデル付きのFLOW3DとSMARTFIRE(v4.3且つそれ以前のバージョン)を使用して、このケースはシミュレートされます。これは実験データを持たない仮定のケースですのでご注意ください。

3.2.1 SMARTFIRE の結果

次の図からSMARTFIREとFLOW3D両方が非常に類似の結果を見ることができます。

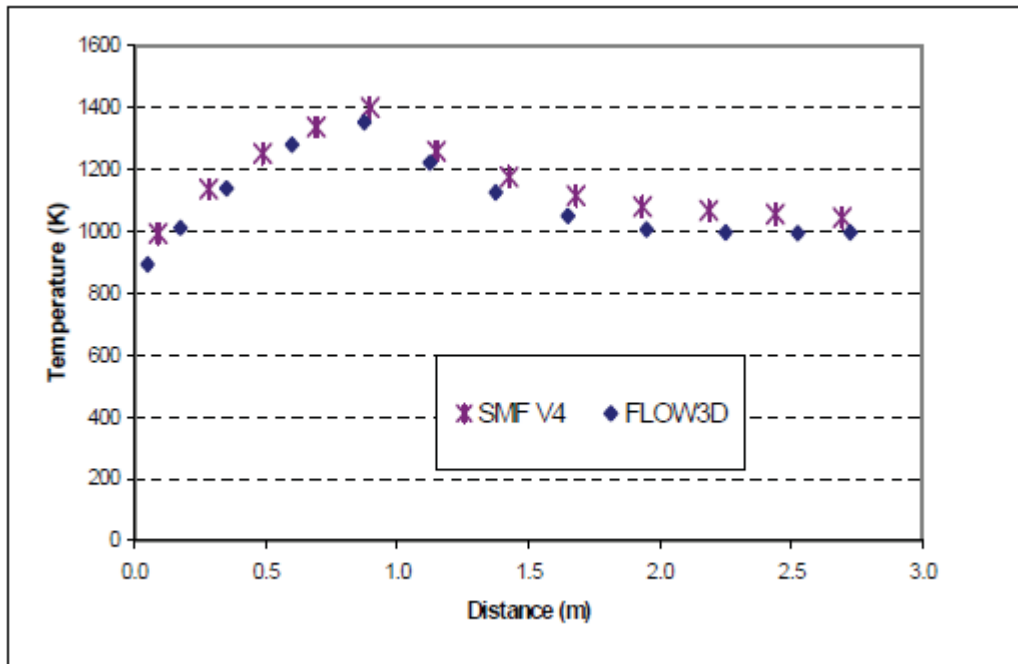


図 26 火災中心における鉛直の温度分布

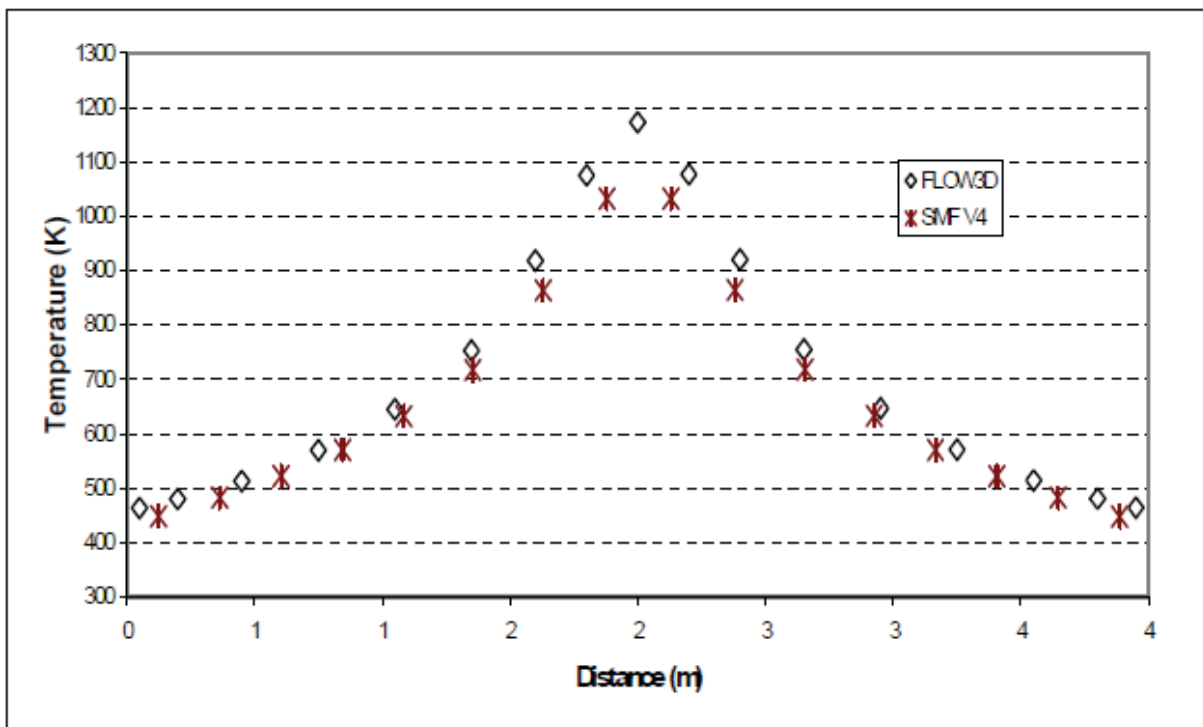


図 27 - 中央に配置された x 軸に沿った天井から 0.1m 下の温度分布

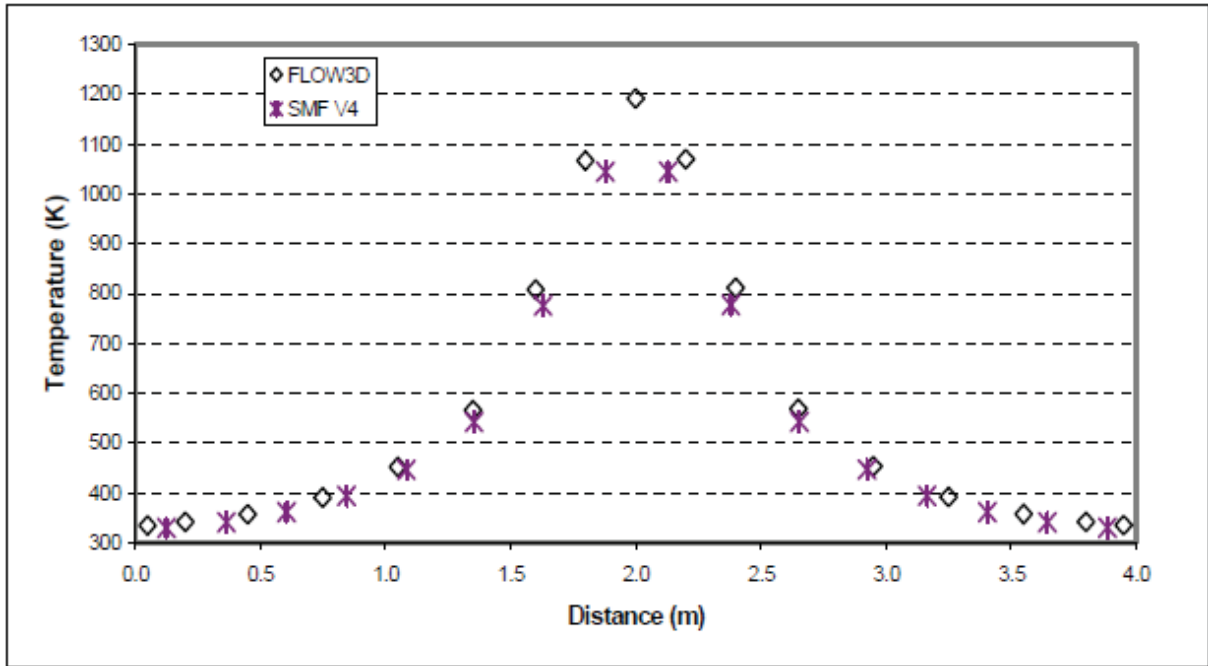
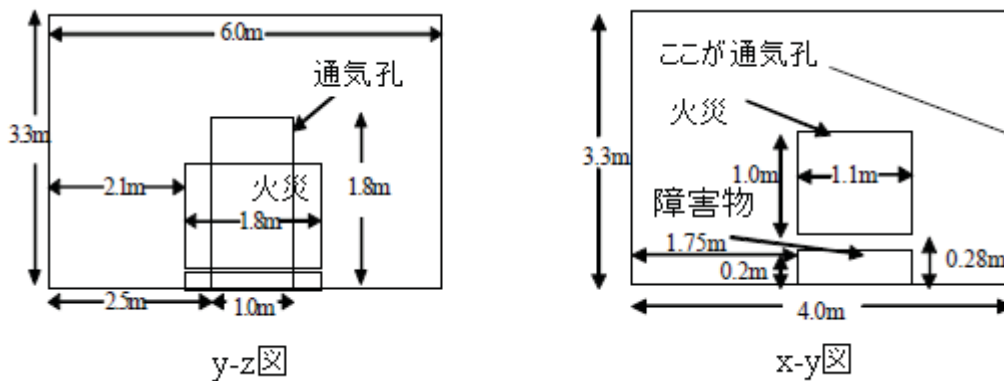


図 28 - 中央に配置された x 軸に沿った天井から 0.3m 下の温度分布

3.3 LPC-RUN-007 のシミュレーション

3.3.1 はじめに

このテストケースは、Loss Prevention Council (LPC) (損害防止評議会) [12] がおこなう火災テストに由来するものです。テストは開口部が1つの囲壁空間における木製コンテナの燃焼です。テスト区画は下に示すとおり、床面積が6m x 4m、天井の高さは3.3mです。区画には1.0m x 1.8mの出入口(通気孔)が含まれ、後ろ側の6m x 3.3mの壁に配置されていました。区画の壁および天井は、厚さ0.1mの耐火ボード(石綿)で作られていました。床はコンクリート製でした。1.1 x 1.8m、高さ0.2 mの鋼製の障害物が火災の下に置かれました。側壁から0.57m、通気孔のある前面の壁から0.5m離れたところに、熱電対のコーナースタックが配置されています。煙流温度の計測は区画の側壁から3.0m、後ろの壁から2.392m離れたところでおこなわれました。このテストケースは、本部の「火災モデリングのベンチマーク/標準(Fire Modelling Benchmarks/Standards)」プロジェクトにおいて用いられました[1, 2, 3]。



このテストケースに対して2つのシミュレーションが実行されます。一つは容積測定熱源モデル、もう一方は燃焼モデルです。

3.3.1.1 モデルの配置設定

解析では2つのメッシュが使われます。1つは約10,000のセル、もう一方は約22011のセルで構成されています。これらの2つのシミュレーションからの結果はお互いに一致します。ここに表される結果は22011で構成されるメッシュに対するものです。

下記表に詳細がある物理的なプロパティが使われます。

表 3 - テストケース 2000-2-5 で用いられた材料プロパティ

材料名 (Mat.Name)	密度 (Density)	粘度 (Viscosity)	伝導率 (Conductivity)	比熱 (Specific heat)
空気	理想気体 (分子量=29.35)	1.798E-05 + 乱流 の値	0.02622	1007.0
石綿	577	1E+10	0.15	1050.0
コンクリート	2300	1E+10	0.15	1050.0
鋼材	7850	1E+10 45	45.8	460.0

境界条件は壁(石綿)の物理的な性質を考慮に入れた熱伝導壁を使って設計されました。床(コンクリート)の性質とスチール妨害が考慮されます。

壁の放射率は0.8であると考えられます。モデルは混乱(ログ法則)モーメントと壁の熱変換を使います(詳細はSMARTFIREマニュアルを参照)。放射の影響が壁でモデル化されます。壁の熱伝達のモデルは「-」として表現されます。

$$-\lambda_w \partial T / \partial n \big|_w = H_c (T_w - T_{gas}) + \varepsilon \sigma T_w^4 - \varepsilon Q_r^m$$

ここで λ_w は壁材料の伝導性、 T_w は壁面温度、 T_{gas} は壁の隣にある気温、 H_c は対流的な ε 熱伝達係数、 Q_r は壁表面の放射熱面フラックスです。現在壁にある熱蓄積で説明する用語はありません。火の成長段階で期待される熱と同じ量を移動する影響はありません。また、火が減少する間に多すぎる熱を移動する影響もありません。

長さ1.8m、高さ1.3m、幅1.1mの範囲で規定された容積熱リリース比率として火が描かれています。寝るリリース比率は下記の通りです。

HRR = 50.0+0.0082t² (kW), for t < 300 seconds;

HRR = 3000 (kW), for t > 300 seconds.

実験の火は燃えている木造アパートによって提供されています。

FLOW3Dシミュレーションが同時に実行されます。火の処理はSMARTFIREと同じです。

FSEGによって発展した6-フラックスの放射モデルが両方のケースで使われています。吸水係数は次の式で

仮定されます:

$a = 0.01$, if $T < 323\text{K}$;

$a = 0.01 + 0.305/377(T - 323)$, if $323 \leq T < 700$;

$a = 0.315 + 0.315/700(T - 700)$, if $T > 700$.

ここでTは温度。壁放射率は0.8と仮定されます。

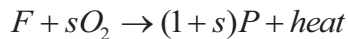
3.3.1.2 モデル形状—燃焼モデル

表 4—テストケースで使用された燃料の最大損失比率

時間 (秒)	0	150	450	460	1650
m(kg /秒)	0	0.01835	0.18636	0.1978	0.1978

SMARTFIREのガスの燃焼モデルはこのシミュレーションで使われました。容積測定質量放出はその時間がLPCレポートによって提供される質量放出のカーブに依存する木造アパートの燃焼を表すのに使われます(上の表参照)。燃焼効率は0.7だと仮定されます。シミュレーションで使われた燃焼熱は17.8MJ/kgです。

ワンステップの広範囲な化学反応が、下記のようにガス燃焼モデルで適用されます:



ここでFは燃料であり、Oはオキシダント、Pはプロダクトです、そしてsは燃料に対する化学量論の酸素比率です。1つのユニット量燃料の消費を通して放出された熱はH(J/kg)によって示されます。

燃焼モデルが使われているので、より細かいメッシュが105938(46 X 49 X 47)から成るこのシミュレーションに対して作成されます。

このシミュレーションで使われた放射モデルは24の極線を使った多極線の放射モデルです。

3.3.2 結果

3.3.2.1 容積測定熱ソースモデル

実験結果に沿ってSMARTFIREとFLOW3Dによって予測されたプルーム温度が図29で描かれます。数の予測は計測値よりも高く表示されます。

実験結果に沿ったSMARTFIREとFLOW3Dによって予測されたコーナースタックガス温度(床の様々な高さ)が図30で示されます。数値的予測が計測温度を超えるあいだ、論理的な一致としてあらわれます。600秒後に、SMARTFIREとFLOW3D_HEATシミュレーションは固定状態に達しました。モデル内の熱放射比率は300秒後一定なので、固定状態が予測数に到達することが論理的に予測されます。

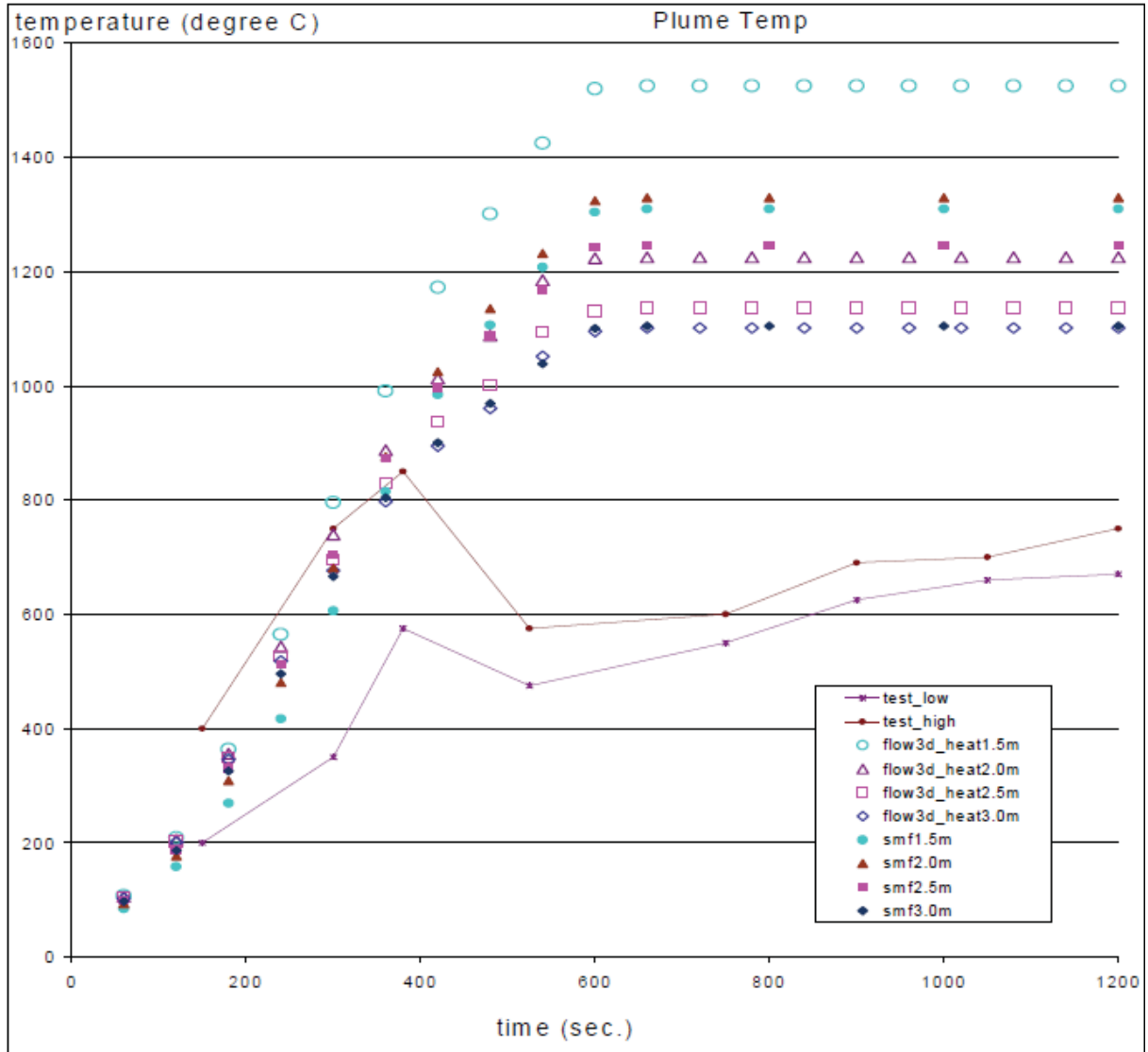


図 29:予測プルーム温度

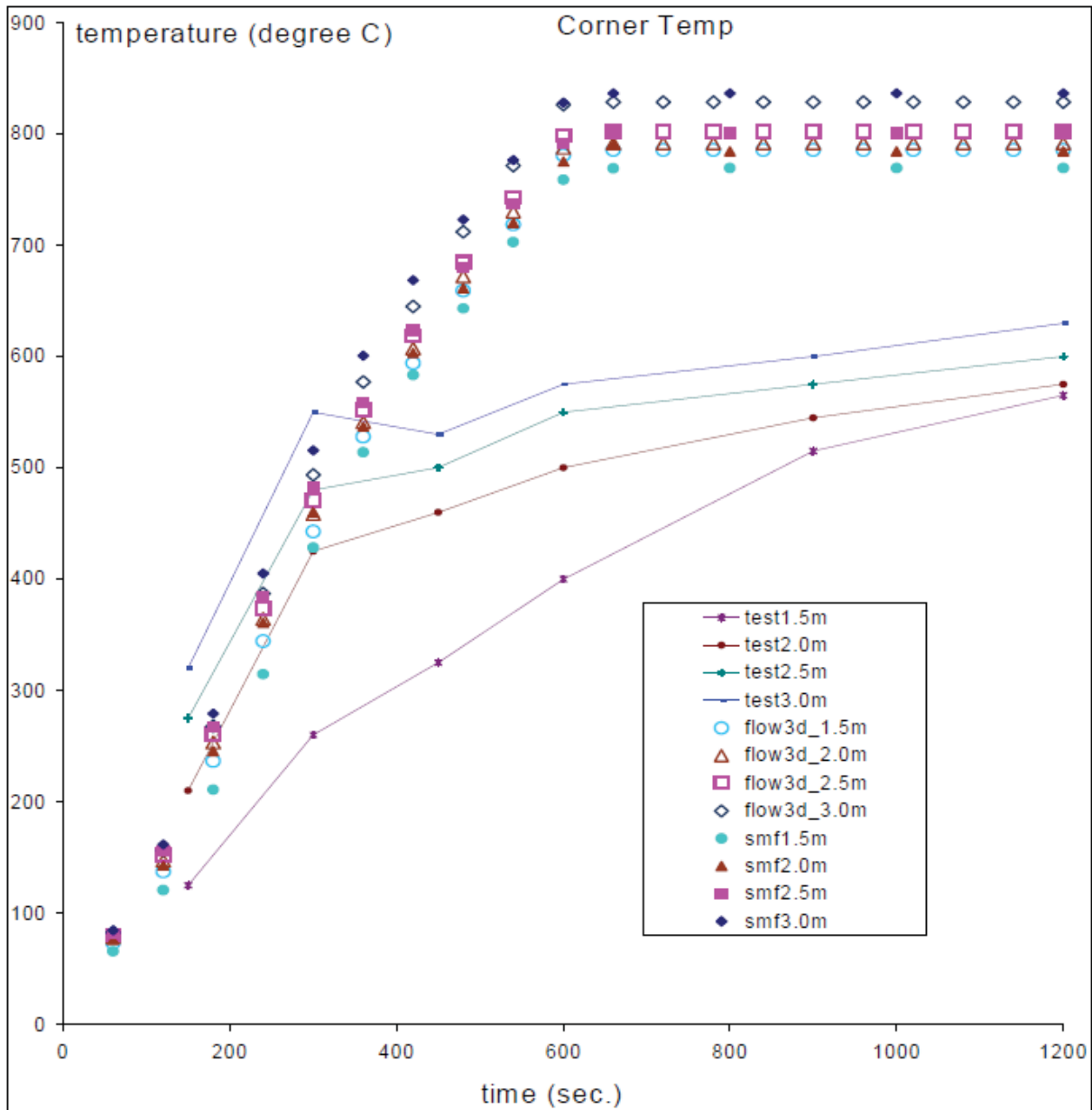


図 30: シミュレーションで予測されたコーナーガス温度

3.3.2.2 燃焼モデル

前のシミュレーションと比較して燃焼とコーナーの温度に対してより向上した予測を作成します。更に重要なことに、このシミュレーションは次の図に示されるように、プラム温度の変更に着替えの傾向を獲得しました。

プラムスタック温度予想が図31で描写されます。くぼみに続くピークの一般的な実験傾向に従います(図参照)。この傾向は単純な容積測定熱リクス比率モデルで観察されます。*SMARTFIRE*シミュレーションはこの傾向が主に火プラム形状の変更によってもたらされることを明示します。火が成長する最初の段階の後に、火は非常に大きくなり、熱い燃焼プロダクトは次第に深くなっている熱い層を作って天井の下に蓄積します。火によって区画の中に取り込まれる新鮮な空気と関連して、上にある熱い層の下方への移動は火炎プルームを後ろへ押すので後方の壁に向かって窓から離れます。火炎プルームはアパート中央の垂直線から移行します。このラインと計測装置は火炎プルームの中心にはないので、それに沿った予測・計測温度はピー

クの値に到達後減少します。

実験的な計測がプラムが下位レベルより上位レベルでより熱いことを示すことが明らかです。この現象はピークの周期の後で燃焼モデルによってキャプチャーされます。

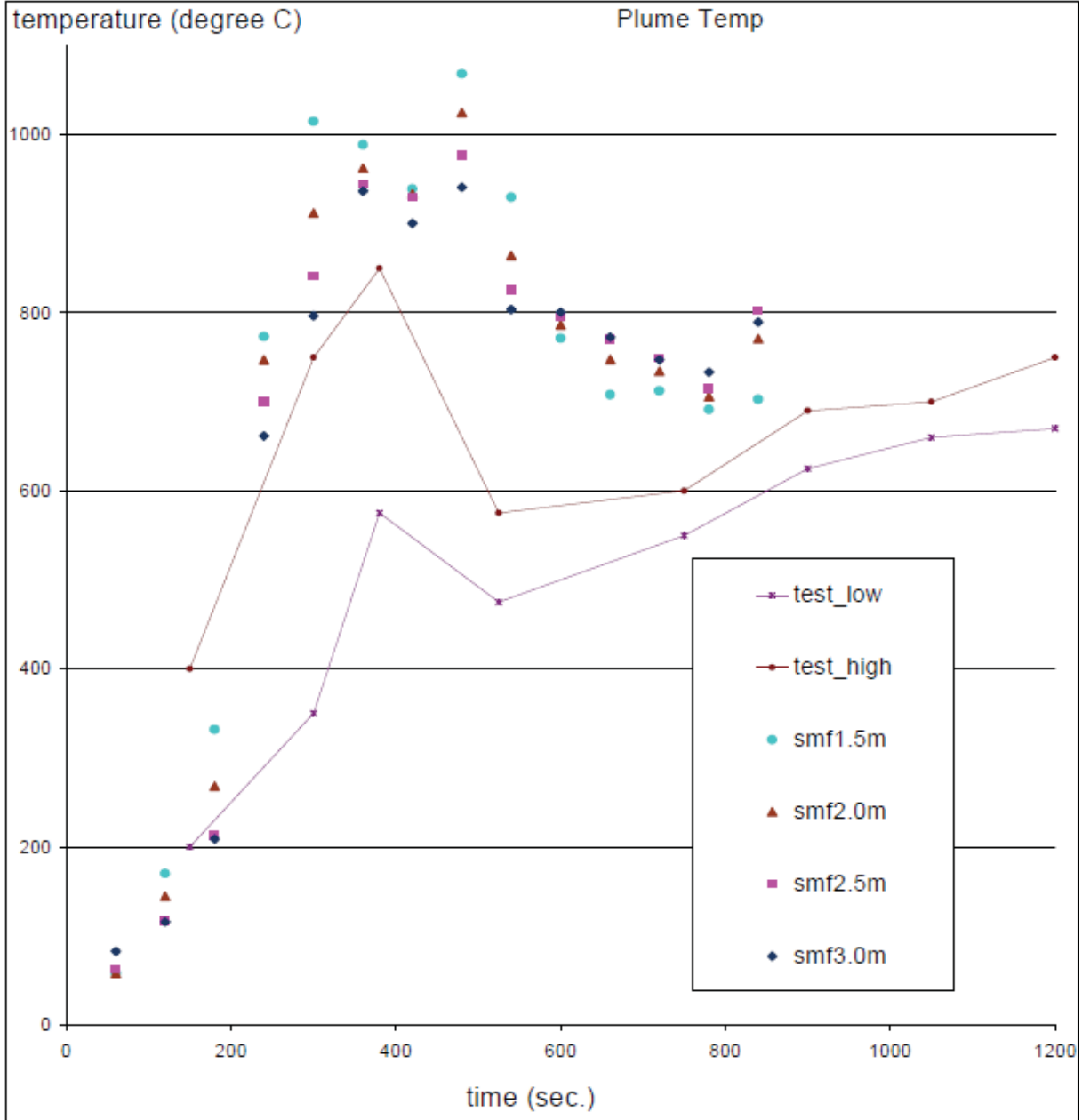


図 31: 燃焼モデルをとまなう予測ブルーム温度

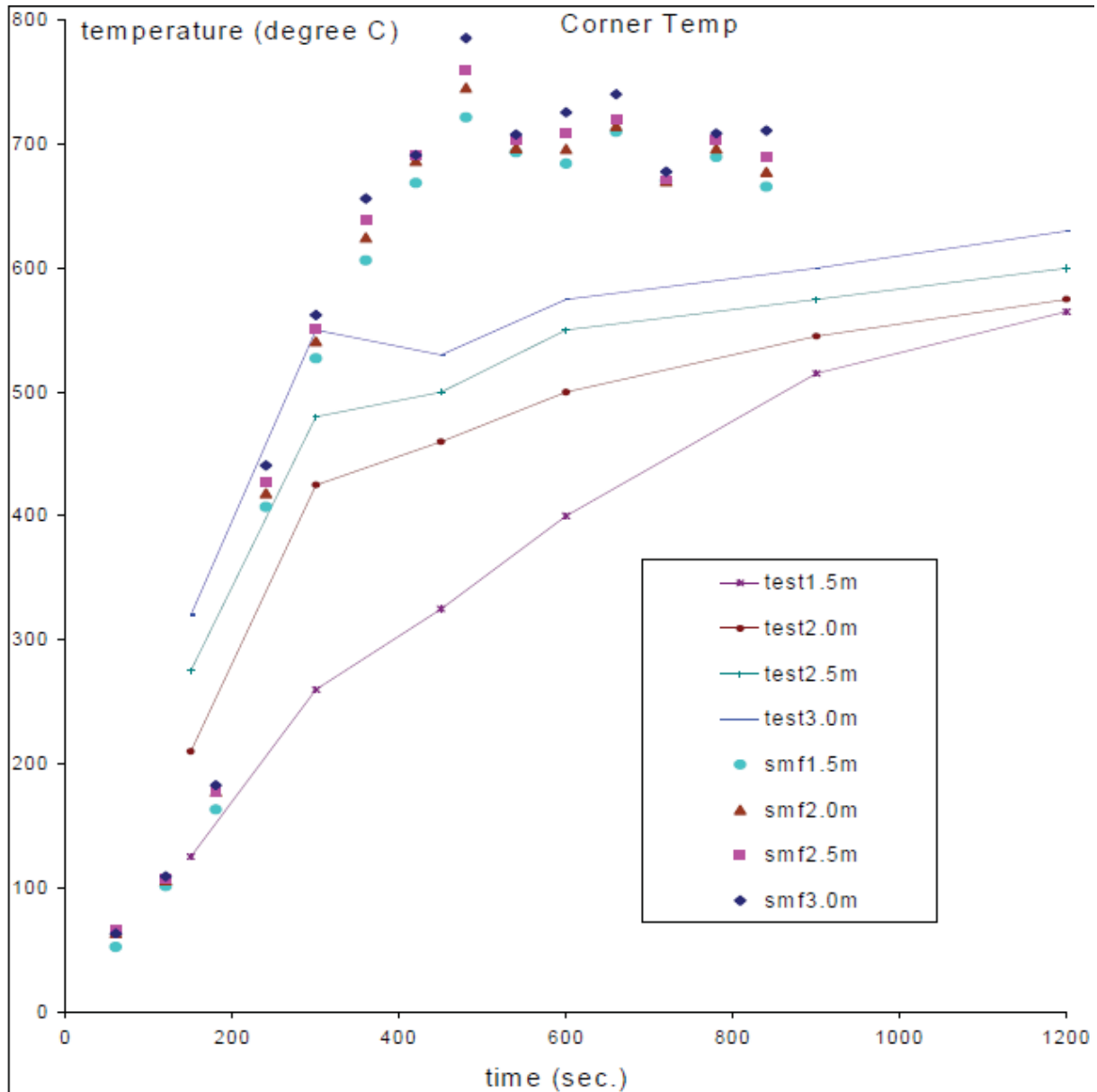


図 32: 燃焼モデルのシミュレーションで予測されたコーナーガス温度

4 結論と所見

流動量モデル(様々な方向での伝達、ステップに面した後方後の流量、フィールドソリューションの半分と全体の突然の拡大ケースを含む)、流動性の流れ、熱伝達モデル(3D空洞の放射)、熱ケース(Steckler、Hong Kongケース、LPC run)を網羅するSMARTFIRE V4.3 995の検査からレポートは成り立っています。

- 1) SMARTFIRE V4.3 995は伝達傾向の正確なシミュレーション、純粋な伝達になる独立したケース、ステップに面する後ろ向き、突然の拡大を生成します。
- 2) SMARTFIRE V4.3 995は熱伝達の変換を含む熱伝達減少の正確なシミュレーションを作成します(強制的あるいは自然の対流と熱放射)。

- 3) 高品位のメッシュおよび弛緩パラメータのコントロールを慎重かつ適切に指定することによって同じソフトウェアからよりすぐれた結果が得られることが注目されます。
- 4) 結論として、火災のシミュレーションにおいては気体燃焼モデルを導入することにより、Steckler ケースのモデリングなどにおける単純な放熱率モデルのみを利用するときと比較して、*SMARTFIRE*の予測が大幅に向上します。
- 5) これら承認手順によるケースは記述された中の他のシナリオに対して決定的あるいは、必ず適切であると判断されるべきではないことに注意してください。これらの承認はベンチマークプロセスの可能性を広げる基礎としてのみ選択されます。ここで論じられたものの間に追加テストがあることは合理的なことです。

5 参考文献

- 1) <http://fseg.gre.ac.uk/>
- 2) Grandison, A. J., Galea, E. R. and Patel, M. K., “Fire Modelling Standards/Benchmark, report on Phase 1 Simulations. (火災モデリングの基準/ベンチマーク、第1段階シミュレーションの報告書)”, University Of Greenwich report for Fire Research and Development Group, Home Office, March 2001.
- 3) Grandison, A. J., Galea, E. R. and Patel, M. K., “Fire Modelling Standards/Benchmark, report on Phase 2 Simulations. (火災モデリングの基準/ベンチマーク、第2段階シミュレーションの報告書)”, University Of Greenwich report for Fire Research and Development Group, Home Office, May 2001.
- 4) J. Kim, S. J. Kline and J. P. Johnston, “Investigation of a Reattachment Turbulent Shear Layer: Flow over a Backward-Facing Step (再付着乱流せん断カレイヤに関する調査: 後方に面した段を越える流れ)”, Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, 102, 302-308, 1980.
- 5) J. K. Eaton and J. P. Johnston, ‘A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment (亜音速乱流の再付着に関する評価と研究)’, AIAA, Paper AIAA-80-1438, 1980.
- 6) L. Davidson, “Calculation of the turbulent buoyancy-driven flow in a rectangular cavity using an efficient solver and two different low Reynolds number k- ϵ turbulence models (効率的ソルバーおよび2種類の低レイノルズ数k- ϵ 乱流モデルを用いた矩形の空洞における浮力によって引き起こされた乱流の計算)”, Numerical Heat Transfer, vol. 18, pp. 129-147, 1990.
- 7) R. Cheesewright, K. J. King, and S. Ziai, “Experimental data for the validation of Computer Codes for the prediction of Two-Dimensional Buoyant Cavity Flows (2次元の浮揚性空洞のFlowsの予測に関するコンピュータコードの妥当性検査のための実験データ)”, Significant Questions in Buoyance Affected Enclosure or Cavity Flows, vol. HTD-60, pp 75-81, ASME, New York, 1986
- 8) Steckler, K.D, Quintiere, J.G and Rinkinen, W.J.[1982], "Flow induced by fire in a compartment (区画内の火災に誘発された流れ)", NBSIR 82-2520, National Bureau of Standards.
- 9) W. K. Chow, “On the “Cabin” fire safety design concept in the new Hong Kong Airport terminal buildings (新香港空港ターミナルビルにおける「キャビン」火災安全設計概念)”, J. Fire Science, vol. 15, pp. 405-423, 1997.
- 10) Glocking, J.L.D, Annable, K., Campbell, S.C. “Fire Spread in multi-storey buidings . ‘Fire break out from heavyweight unglazed curtain wall system . Run 007’ (高層ビル内に拡大する火災— 重く光沢のないカーテン壁システムから発生した火災—Run007)“, LPC Laboratories rep. TE 88932-43, 25 Feb 1997.