定量的な再現性を有する火災シミュレーションの構築に関する検証（その２）

（定量的な火災シミュレーション作成手法の検討）

湯浅　弘章*, 佐藤　歩**, 渡邉　茂男***, 町井　雄一郎**

概　　要

本検証では、火災事例に基づく事故防止対策の検討や消防職員の教養等を支援する目的として、定量的な再現性を有する火災シミュレーションを構築する手法を確立し、これをもとに従前より正確で有用なアニメーション等の火災資料を作成、提供することを目指した。

本報では、定量的な火災シミュレーションの構築において、火源条件を合理的に決定することの重要性を示すとともに、観測される火災室内の温度を用いた非常に容易で合理的な火源発熱速度の推定手法を提案した。また、定量的なシミュレーションの有用性について実例を通しわかりやすく例示し、工学的に有用なツールであることを示した。

１　はじめに

現在、東京消防庁消防技術安全所（以後、当庁とする）では、火災シミュレーションを、主にアニメーションの作成に利用している。アニメーションは隊員の受傷事故等、庁内で重要と判断された火災発生の都度、関係課を通じて作成を依頼されることが多い。アニメーションは、事故防止対策の検討時に対象となる事象について共通認識を得るためや、職員教養などで問題となった火災性状について理解を深めるために活用されている。これらについて、今までは火災シミュレーション作成のための技術的及び時間的制約から、定性的なイメージを再現するアニメーションのみを作成することが通例であった（図１）。よって､このように作成された火災シミュレーションの結果や、出力されるデータを詳細に分析しても得るものはほとんど無いものとなっていた。もし火災シミュレーションによる定量的な解析結果を恒常的に安定した品質で得る手法を確立することができれば、問題発生時、より正確な事実確認を支援することができるようになる。その結果、問題点の的確な把握を促すことにより、対策検討に向けた議論確度の更なる向上がもたらされることが期待される（図２）。

本報では、定量的な火災シミュレーションの構築において、火源条件を合理的に決定することの重要性を示すとともに、観測される火災室内の温度を用いた非常に容易で合理的な火源発熱速度の推定手法を提案した。また、定量的なシミュレーションの有用性について実例を通しわかりやすく例示し、工学的に有用なツールであることを示す。

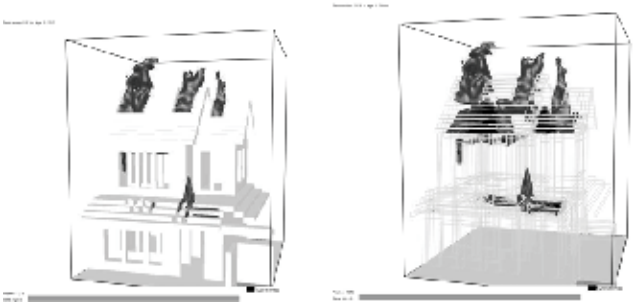


図１　アニメーションの例

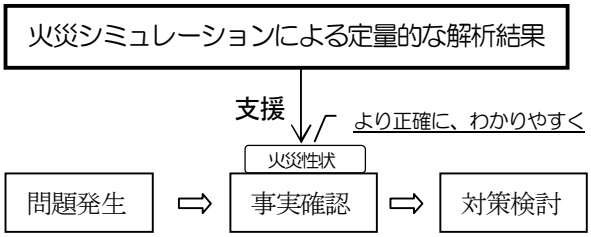


図２　検証の位置付け

＊国分寺消防署　＊＊装備安全課　＊＊＊小平消防署

2　火災シミュレーションの概要

現在、建築火災時の熱、煙の発生や建物内におけるその流動性状に関する解析が進み、数値計算により設定された火源の下で起こり得る熱、煙挙動を工学的に有意に予測できるようになった。火災安全工学の分野では、主にゾーンモデルとフィールドモデルと呼ばれる２種類の数値計算モデルが用いられており、火災シミュレーションとは一般にこれらの総称を指すことが多い。

ゾーンモデルとは、建物区画の煙流動性状をマクロな観点から単層、二層もしくは多層とみなして、気体の質量や熱的なバランスに注目してモデリングしたものである。日本では、火災安全性評価方法の避難安全検証で、BRI2/2T/2002 がデファクトスタンダードとしてすでに普及している。計算も軽く、汎用 PC でも大規模な建築物を対象に計算可能である。

フィールドモデルとは、火災の分野では CFD(Computational Fluid Dynamics)のことを指すことが一般的であり、流れの支配方程式を用いて熱や煙の挙動をモデリングしようとするものである。より解像度の高い、詳細な表現が可能なモデルであるが、汎用 PC で大規模な建築物を対象とすると１回の計算時間が数か月というオーダーになることもある。

図３、４に、室内におけるオイルパン内の油の燃焼という同一事案をゾーンモデルとフィールドモデルで計算し、結果を同一３次元可視化ソフトで表示した例を示す。

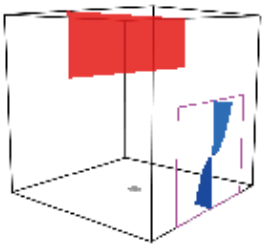


図３　ゾーンモデル

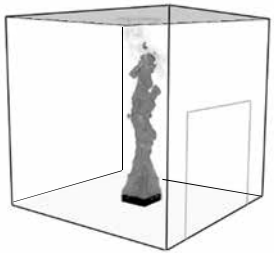


図４　フィールドモデル

当庁で火災アニメーションを作成するときは、フィールドモデルを使用している。この計算結果を３次元可視化ソフトで表示すると、見る人の視覚に訴える、リアリティのあるアニメーション資料を作成することができる。その結果、火災概要が一目瞭然となり、共通認識と問題点の的確な把握が促がされる効果が期待される。以上より、本報でも以後、フィールドモデルを検討対象とする。

3　定量的な解析に対する考え方の整理

火災シミュレーションは、前２で紹介した他にも様々な種類が開発されている。これらは全て、煙や熱気流の挙動を模擬するため、それぞれの考え方で合理的に導き出されたモデルである。モデルとは、現実の世界で観測される実現象の内、注目する現象の核心を捉えて単純化したものであるとも言える（図５）。これより、モデルは実現象を完全に再現するものでないことは自明であり、全てのモデルは完全に「正しく」はない。にもかかわらずモデリングを行う主な動機は、モデルの振る舞いから、現象の予測、現象の特徴を捉える、現象の作用について洞察を得る等の恩恵を得られることが期待されるからである（図６～８）。このような恩恵を得ることは、火災シミュレーションによる解析にも期待できる。そのためには、合理的なモデルを合理的な方法で運用しなければならない。このように、全てを合理的に積み上げていくことで、初めて合理的に説明できる計算結果を得ることができ、モデルから得られる定量的な知見に意味が生じると考えられる。

以上を踏まえ、「定量的な再現性を有する火災シミュレーションの構築」とは、計算結果を合理的に説明できるようなモデルの構築とその運用手法であると理解される。本検証では、実績がある既定のモデル[1)]を合理的に運用する手法について検討し、モデルの合理性については検討の対象外とする（図９）。

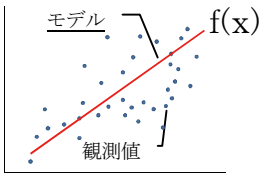


図５　モデルのイメージ

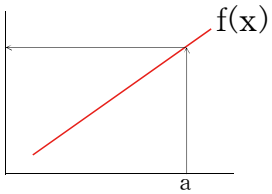


図６　現象の予測

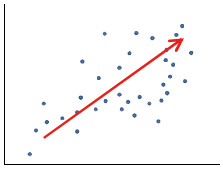


図７　特徴を捉える

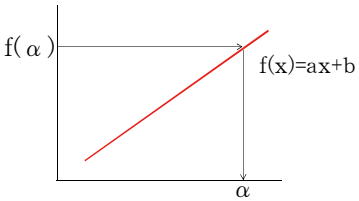


図８　洞察を得る

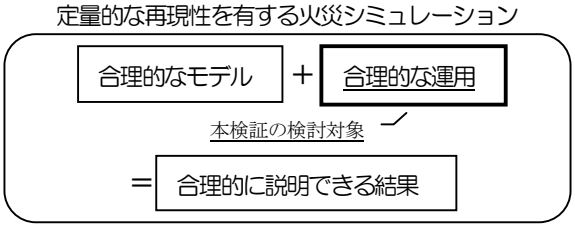


図９　定量的な解析の考え方

4　合理的な運用に対する考え方の整理

火災シミュレーションモデルを合理的に運用するということは、モデルに入力する各種の値（初期条件、境界条件、経験モデル内の定数等）を合理的に決定することと同義である。そして、火災のモデルである以上、火災そのものを定義する火源の「燃え方」に関する入力値（以後、火源条件と呼ぶ）を合理的に決めることが最も重要であることは自明である。本検証では、特に火源条件を合理的に決定する手法について検討し、火源条件以外の入力値は検討の対象外とする（図10）。

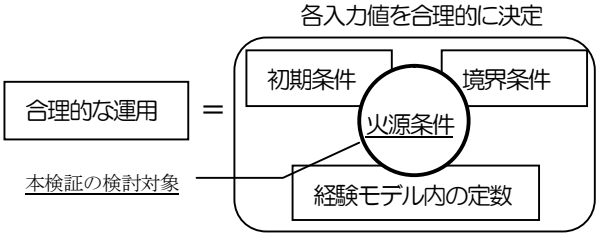


図 10　合理的な運用の考え方

5　火源条件に対する考え方の整理

火源条件に関する入力値以外が既に合理的に決定していたとする。火源条件が決定するまでは火災シミュレーションモデルは一意に決定されない（図 11）。初めの条件設定として自然なのは、可燃物の位置、形状、物性値を入力し、着火位置に微小火種を置くことである。しかし、一見素直なこの方法で一意に決定された火災シミュレーションモデルはあまり良く機能しないことが知られている[2)]。燃焼や延焼拡大を担う部分のモデリングの限界等が原因であるが、別の側面から見ると、現在の火災シミュレーションモデルは、一意に妥当なモデルを定めるためには着火前の情報だけでは少なすぎるとも考えることができる（図 12）。

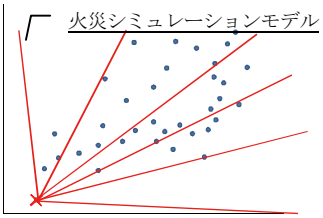


図 11　一意に決定されない

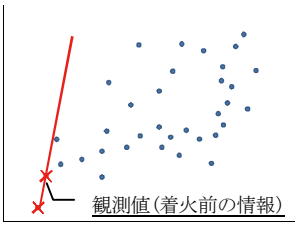


図 12 機能しない

よって、適切なモデルを定めるために利用する情報数を増やすことを考える。仮に、火災の発生から鎮火に至るまでの全ての燃焼情報が取得できた場合、これを火源条件とすれば、最も現象を反映した理想的なモデルを定められる（図 13）。現実には、そのような情報を得ることは不可能であることから、現在は、一部の情報を現場調査、実験で取得し、得られた火源条件をもとにモデルを定めることが一般的である（図 14）。

なお、この手法には一部の情報を反映したモデルで全体をどの程度妥当に表現できるのかという問題が存在するが、計算シナリオに大きな変更が生じる（他の可燃物に延焼、可燃物の崩壊、窓の開放や破壊等）までの間はある程度有効に機能することが推察される。

現場調査では火災概要、特に燃焼実体と燃焼位置、燃焼環境、延焼状況等の情報が得られる。また、これをもとに火災を再現した実験も可能となり、任意のデータが取得できる。実験で得られるデータの内、火災シミュレーションの火源条件として最も利用されているものは発熱速度時系列データである。発熱速度とは、ものが燃える時に発生する熱が、単位時間、単位面積当たりどの程度なのかを示す指標であり、単位は[kW/m²]である。発熱速度を火災シミュレーションの火源条件に指定すること

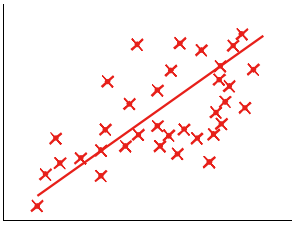


図 13　最も現象を反映

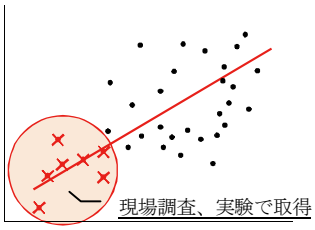


図 14　一部の情報を反映

とは、火災シミュレーション内の燃焼実体の燃え方を直接指定することを意味し、実験で観測された燃え方を忠実に火災シミュレーション内に再現したいときに利用される手法である。現実的には火源近傍の発熱速度のみを実験で取得し、火災初期の情報としてモデルに反映することが多い。取得データの位置付けのイメージを図 15 に示す。

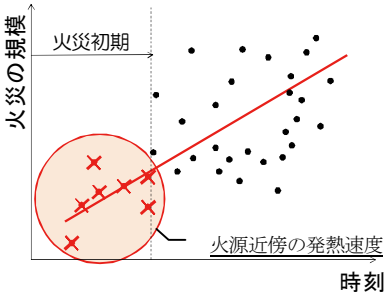


図 15　取得データの位置付けイメージ

6　実験による発熱速度の測定方法

発熱速度を実験で測定するには、一般的に２つの方法がある。一つは、燃焼物の燃焼時の重量減少を測定し、その減少量と燃焼物の単位重量あたりの発熱量との積によって発熱速度を算出する方法である。この方法では燃焼物の単位重量あたりの発熱量が既知でなければならず、火災のような複合燃焼物は発熱速度を算出できない。また室内燃焼については熱分解が促進するものの生成ガスが燃焼しないまま室外に放出されることから[3)]、発熱速度が過大評価される可能性を秘めている。

もう一つは、酸素消費法により算定する方法である。燃焼時に消費された酸素量から発熱速度を算出する方法で、燃焼時に消費される酸素の単位重量あたりの発熱量が燃焼物の材質によらずほぼ一定（13.1MJ/kg－O_2）という原理に基づいている。図 16 に測定装置の概要を示す。各材料の単位重量あたりの発熱量は材質によって異なるが、酸素消費法では燃焼により消費される酸素量に着目すればよく、その時系列変化量を把握すれば発熱速度を求めることが可能となる。この手法で算定すれば、火災のような複合物の燃焼も発熱速度が算出でき、また燃焼時に消費された酸素量から発熱速度を算出するために熱分解による未燃ガス発生の影響もないことから、現在はこの手法が一般的に用いられている。

なお、この測定方法は、図 17 に示すように可燃物に応じた大きさの敷地と集煙フード、排煙設備が必要となり、現在当庁ではこの手法では測定できない。

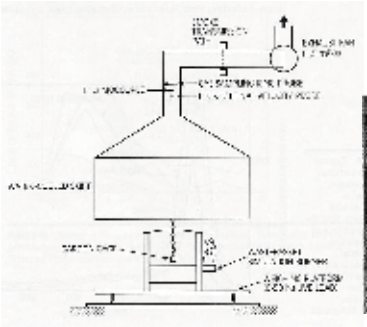


図 16　測定装置の概要[4)]

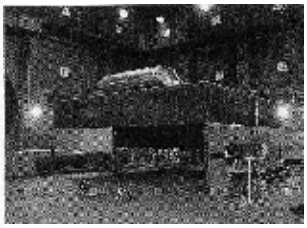


図 17　集煙フード[5)]

7　容易な発熱速度推定手法の提案

前６のとおり、現在、当庁では発熱速度は直接測定できない。しかし、図 15 に示すイメージで火災シミュレーションモデルを定める方法とその有用性は一般的に認知されていることから、当庁も準用したい。よって、当庁の実状に基づく発熱速度の推定手法を考えることとした。

通常、どのような実験環境においても雰囲気温度は手軽に測定可能である。また、火災調査時、火災室の収容物の色や形の変化を焼け具合として空間的に把握し、そこから火災当時の室内の熱的状態を直感的に推測するときは、雰囲気温度を想像していることが多い。もしこの温度から発熱速度を合理的に推測する手法があれば、当庁でも容易に妥当な火源条件を設定し、火災シミュレーションモデルを合理的に運用することが可能になると考えた。

本報では、予め行った実験で測定した温度履歴を用い、この実験を火災シミュレーション上で妥当に再現する火源の発熱速度推定手法を提案する。

(1)　提案手法の概要

予め行われた実験のうち、火災区画、火源の位置と大きさ、温度測定点を計算機上で忠実に再現し（図 18）、火源の発熱速度を様々に設定した火災シミュレーションを複数回計算する。各計算結果と実験での温度観測値を比較し、最も妥当な火源の発熱速度を選ぶ（図 19）。

(2)　具体例による検証

平成 23 年度に当庁で実施した「ドア解放がもたらす区画内火災性状の変化に関する検証」の内、「実験１」（図 18 写真）のクリブ第一模型(A-2)（以後、クリブとする）に点火後 40 秒間、各合板に大きく延焼する前を対象として、火災シミュレーションモデルの計算値と実験の観測値を比較検証した。

実験は耐火区画火災室を模擬した間口 3.3m 奥行 3.6m、高さ 2.15m の大きさの単一開口部を持つ単一区画で行った。壁、天井については軽量気泡コンクリート製、厚さ 50 mmで、内装は全面ステンレス鋼鈑、厚さ 0.6 mmで仕上げている。区画前面には、幅 1.6m、高さ 1.85mの開口部を有する。区画内には火災室内の可燃物を模擬するためにクリブ一基、縦 1820 mm、横 910 mmのラワン合板（厚さ 5.5 mm）が２枚収納されている。実験１は、クリブ点火約 90 秒後に正面合板、120 秒後に床面合板に着火した。その他、測定点の位置、名称等、実験の詳細は消防技術安全所報第 49 号[6)] を参照のこと。

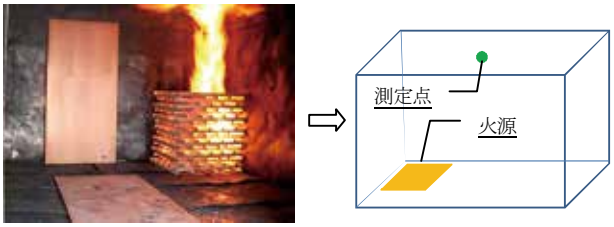


図 18　実験環境を計算機上で再現

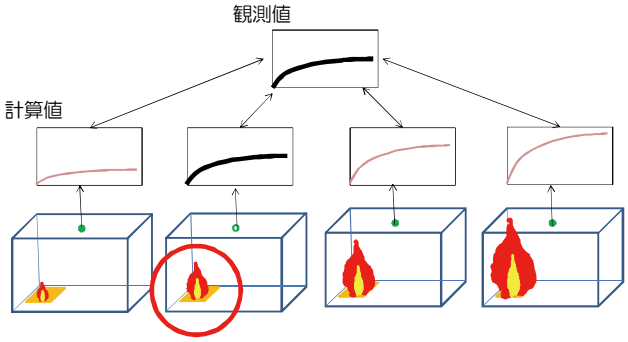


図 19　最も妥当な火源の発熱速度を選ぶ

前検証[7)]で、天井中心で測定した温度の履歴が火災室内全体の熱環境を代表する指標となり得ることを示した。よって天井中心の測定点一点が観測する温度履歴（図 20）からクリブのみが燃焼しているときの発熱速度履歴を推定することとした。

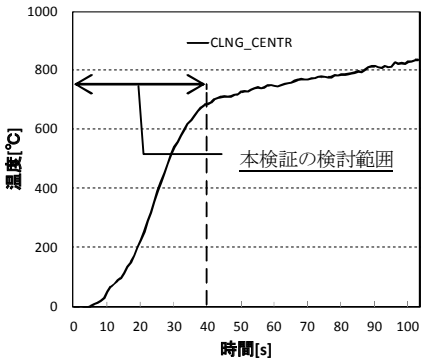


図 20　天井中心の温度履歴

(3)　発熱速度履歴推定手順

ア　火災区画、火源の位置と大きさ、温度測定点を計算機上でできるだけ妥当に再現する。今回、火源は床面から 0.1m の高さに 0.9m×0.9m の平面で設定し、クリブの燃焼を模擬した。その他、特記していない値はデフォルト値を使用し、合板のみ化学反応と燃えぬけを考慮した条件とした。表１に主要な入力値の情報を、表２に設定した材質の物性値を示す。

表１　入力値の情報

内容	設定値
格子サイズ	xyz=0.1m×0.1m×0.1m
計算領域	区画の大きさ
開口部	大気開放
輻射輸送計算	有効
初期温度	0℃

表２　設定した材の物性値

内容	設定値	根拠
軽量気泡コンクリート	密度=500[kg/m3] 比熱=1.12[kJ/kg.K] 熱伝導率=0.12 [W/m.K]	8)
ステンレス鋼鈑	密度= 7850[kg/m3] 比熱= 0.46 [kJ/kg.K] 熱伝導率=45.8 [W/m.K] 放射率=0.95 吸収係数=5×10^4[1/m]	9)
合板	密度=550[kg/m3] 比熱=1.3[kJ/kg.K] 熱伝導率=0.0946[W/m.K] REFERENCE_TEMPERATURE =326[℃] PYROLYSIS_RANGE =178[℃]	10) 11) 10) 12) (図 21)
燃料の化学種	C=1.5 H=2.1 O=1.0	13)

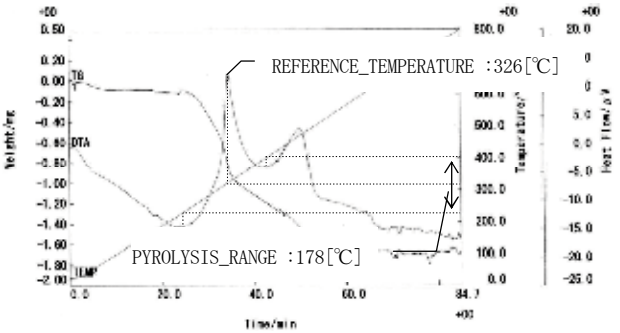


図 21　TG-DTA(合板) [12]

イ　クリブ第一模型（A-2）は木質系可燃物であり、発熱速度は過去の知見[14]では 1200[kw/㎡]程度、どんなに大きくても約 4 倍の値 4800[kw/㎡]を超えないであろうとあたりをつける。この値を火源推定のための発熱速度の基準値とする。天井中心温度履歴が上に凸となり温度上昇が以後穏やかになる時刻に火源が最大発熱速度に達したと仮定する(図 20 における 40 秒近傍)。火災シミュレーションモデルにおいて 40 秒後に火源の最大発熱速度が 0[kw/㎡]から 4800[kw/㎡]を 30 等分した各値まで線形成長するとして火源全面から指定の発熱速度を発生させ、各 30 種類の計算を行う。

ウ　各計算結果それぞれに対し、天井中心の温度について、観測値（図 20）とのユークリッド距離を式(1)により求める。

$$E_n = \sqrt{\sum_{t=0}^{T}(y_t - x_t)^2} \quad \cdot\cdot\cdot 式(1)$$

ただし、E:ユークリッド距離、y_t:観測値、x_t:計算値、t:時間、T:検討範囲の時間、n:計算種類(等分数)

各最大発熱速度とユークリッド距離の関係を図 22 に示す。2400[kw/㎡]- 3200[kw/㎡]間に最もユークリッド距離が短い火源の最大発熱速度が存在すると予想されることから、この間を新たな対象として再び最大発熱速度を 30 等分し、上記の作業を繰り返す。その結果、2747 [kw/㎡]が最もユークリッド距離の短い火源の最大発熱速度であると判別する。

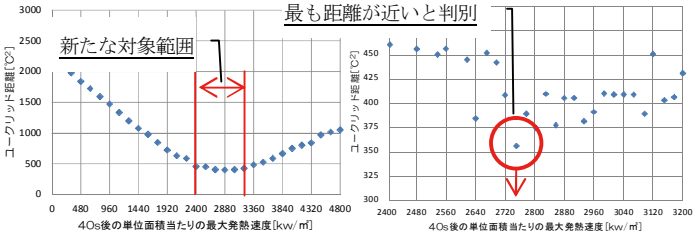
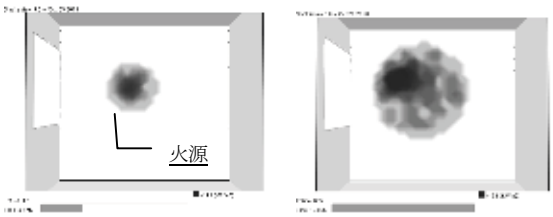


図 22　各計算値と観測値間の距離

エ　本報で使用する火災シミュレーションモデルは、燃え広がりを表現するために時間と共に同心円状に等速度で火源面を拡大させる機能が備わっており(図 23)、この速度を指定できる。火源面積は火炎の大きさを決定し、周囲への輻射熱量や火災プリュームの熱気層への熱供給量に直結すると考えられることから、非常に重要である。よって、実際の火源成長に近い表現となる本機能を利用し、更に火源条件の精度を改善する。



点火後 5 秒（速度 0.1m/s）　　点火後 10 秒

図 23　上から見たときの燃え広がり機能イメージ

上記ウで求めた発熱速度を、単位面積あたりの発熱速度として固定し、火源面中心より燃え広がらせる。燃え広がりは火源として設定した面積以上には燃え広がらない。火源中心から火源面設定面積の淵までおよそ 0.7m で、40 秒間で到着するならば燃え広がり速度は約 0.017[m/s]であることから、どんなに大きくても約 4 倍の 0.09 を超えないであろうとあたりをつける。これをもとに燃え広がり速度 0[m/s]から 0.09[m/s]を 30 等分した各 30 種類の計算を行う。図 24 より、0.012[m/s]- 0.021 [m/s]間に最もユークリッド距離が短い火源の燃え広がり速度が存在すると予想されることから、この間を新たな対象として再び燃え広がり速度を 30 等分し、上記の作業を繰り返す。その結果、図 24 より、0.01656 [m/s]が最もユークリッド距離の短い火源の燃え広がり速度であると判別する。

オ　以上より、火源は床面から 0.1m の高さに 0.9m×0.9m の平面で、単位面積あたりの発熱速度を 2747 [kw/㎡]、中心からの燃え広がり速度 0.01656 [m/s]であると推定した。

(4)　推定した火源条件の再現精度

前(3)で推定した火源条件を用いた計算結果と、実験の観測結果を比較する。図 25 に、各時間に観測した実験映像と計算結果

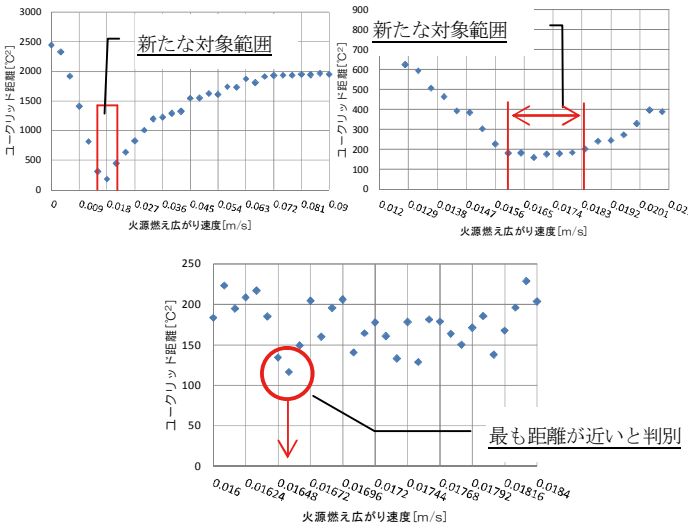


図 24　各計算値と観測値間の距離

のアニメーションを比較して示す。アニメーション内の炎を疑似した表示は、火災シミュレーションモデルが燃焼状態と判断した格子に色づけられるもので、本例では 200kW/m³以上の発熱量を持つ格子を示す。

点火後 10 秒　点火後 20 秒　点火後 30 秒　点火後 40 秒

図 25　実験映像と計算結果のアニメーションの比較

図 25 のとおり、視覚的特徴は比較的妥当に再現されている。

図 26 に、推定した火源条件用いたときの天井中心温度の計算値と観測値を比較して示す。

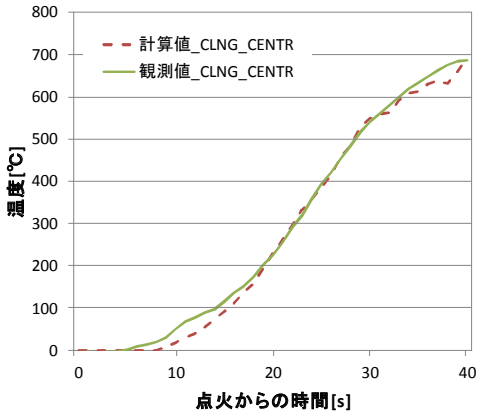


図 26　天井中心温度の計算値と観測値

図 26 の通り、天井中心温度の計算値と観測値は非常によく一致している。図 27 に、計算値と観測値の一致具合を総合的に理解するため、縦軸に計算値と観測値の相関係数、横軸に計算値と観測値のユークリッド距離をとり、点火 40 秒後まで各測定点にて計算した値をプロットする。この図では、原点に近づくほど計算値と観測値が一致していると考えることができ、計算値と観測値の一致具合の目安として理解できる。

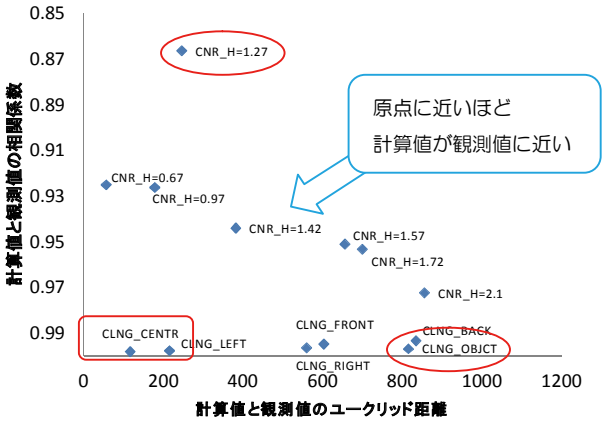


図 27　計算値と観測値の一致具合

図 27 を見ると、天井中心温度(CLNG_CENTR)（長方形で表示）の計算値と観測値が最も一致具合が良い。その他、図 27 中、特徴的な各測定点（楕円で表示）の計算値と観測値を比較して示す（図 28、図 29）。

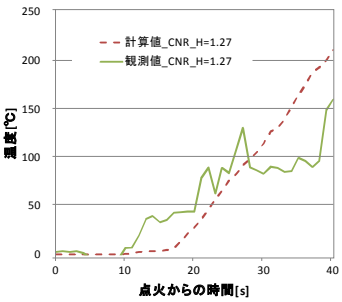


図 28　CNR_H=1.27

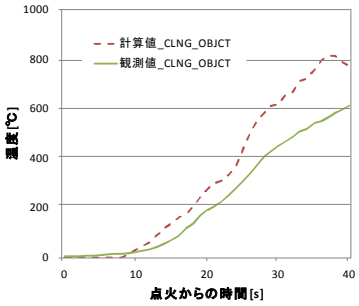


図 29　CLNG_OBJKT

図 28 は計算値が観測値の温度推移傾向と最も不一致な測定点、図 29 は計算値が観測値と最も温度差が生じた測定点の傾向である。最大でこれらのずれがあると理解できる。

(5)　再現精度における計算領域と計算格子サイズの影響

本提案手法は、ある範囲に一様分布した火源条件決定パラメータを火災シミュレーションの入力値として複数回計算する必要があるため、一計算あたりの所要計算時間を短くしなければ実務上運用できない。よって、計算領域と格子サイズを犠牲にした計算条件で火源を推定することが求められる。

ここでは、前 7 (2)における実験を対象に、狭い計算領域と大きな格子サイズという、計算領域と格子サイズを犠牲にした計算条件で推定した火源条件を、より合理的と思われる広い計算領域、小さな格子サイズの計算条件で再利用したときの影響を

検討する。表３に本検討で行った計算条件を、表４に使用したPCの概要を示す。表３に示す各計算はいずれも前７(2)で推定したクリブの火源条件を入力した。なお、ケースAが前７(2)で火源推定に用いた計算条件と同じである。ケースB～Dは正面、床面合板に着火し燃え尽きる300秒まで計算した。ケースEは計算時間の都合上90秒で打ち切った。ケースCはケースBよりも開口部周辺に計算領域をとり、より合理的な計算条件とした（図30）。ケースD、EはケースCより細かい格子サイズとし、計算の解像度を高めた。

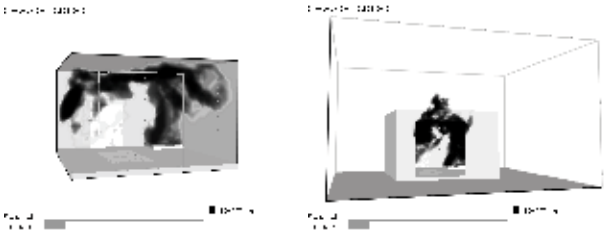
表３　計算条件

ケース	S.T.	格子サイズ	計算領域(m)	CPU Time
A	40s	10 cm	L=3.3 W=3.6 H=2.1	3.22 min
B	300s			27.16 min
C			L=7.3 W=6.7 H=4.2	4.47 hr
D		5 cm		84.58 hr
E	90 s	2 cm		748.76 hr

S.T.　　：Simulation End Time (s)
格子サイズ：立方体一辺の長さ
（MPI、openMP使用なし）

表４　使用したPCの概要

プロセッサ	Intel(R)Xeon(R)CPU E5-2687W 0 3.1GHz
実装メモリ	64GB
システム種類	64ビット　オペレーティングシステム



ケースB　　ケースC

図30　計算領域の比較

図31に点火から40秒までの天井中心温度のケースB～Eの計算値と観測値を比較して示す。

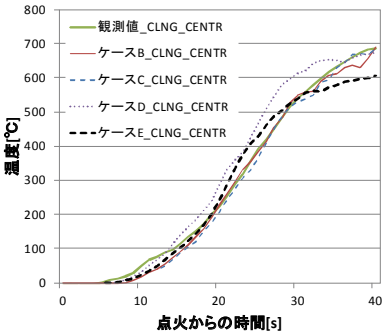
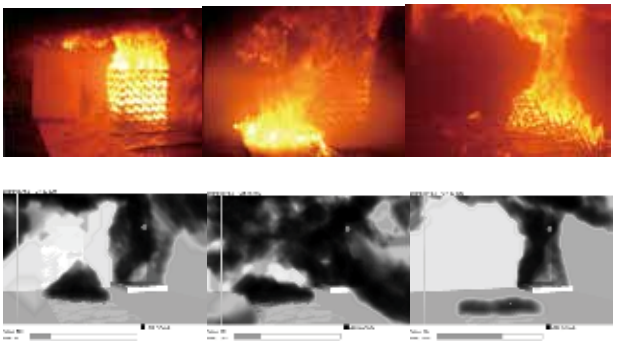


図31　天井中心温度(40秒)

図31より、ケースBと比較し、計算格子の大きさを変えずに計算領域を広げたケースCはほとんど温度推移に変化はない。これに対し、更に計算格子を小さくしたケースDでは若干温度推移が早くなった。しかし、更に計算格子を小さくしたケースEではケースDよりも精度が改善する結果となった。以上より、計算領域の取り方の変更よりも計算格子の大きさの変更の影響が大きいと推察されるが、許容範囲であると考えられる。

(6)　推定火源における火災シナリオ変化時の予測精度の検討

図32に、合板着火という予め計算シナリオに織り込んでいない現象が発生した時の点火後90秒から300秒までの各時間に観測した実験映像と表３、ケースBにおける計算結果のアニメーションを比較して示す。



点火後90秒　　点火後120秒　　点火後300秒

図32　正面、床面合板に着火し燃え尽きる様子

図32のとおり、計算結果は各合板の着火順序は再現しているものの、点火後90秒には既に床面合板が燃えており、時間推移が明らかに早い。図33に、点火から300秒までの天井中心温度のケースB～Eの計算値と観測値を比較して示す。

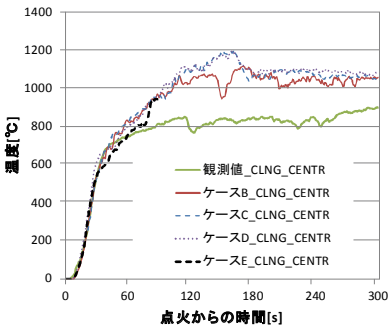


図33　天井中心温度(300秒)

図33より、40秒以降、いずれのケースにおいても計算値は観測値から外れた傾向を示している。これより、いずれのケースにおいても、各合板に着火し第二火源、第三火源が発生するシナリオの傾向は定性的に予測することができているが、本火源条件では合板着火後の室内温度履歴を精度よく予測することは同等に難しいことが確認された。図34に、計算値と観測値の一致具合を点火300秒後まで各測定点で計算した値をケースBについてプロットする。また、特徴的な各測定点（楕円で表示）の計算値と観測値を比較して図35～38に示す。

図35は火源条件の推定に利用した測定点、図36は計算値が観測値と最も一致したと思われる測定点、図37は計算値が観測値の温度推移傾向と最も不一致な測定点、図38は計算値が観測

値と最も温度差が生じた測定点の傾向である。おおよそこれらの範囲内に各測定点におけるずれが存在すると理解できる。

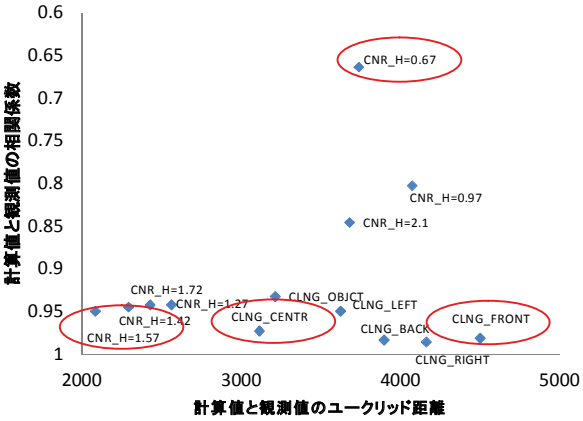


図 34　計算値と観測値の一致具合

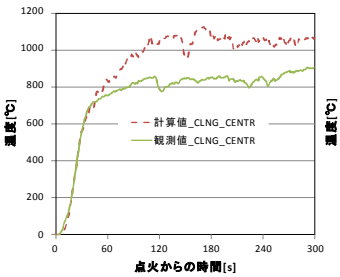


図 35　CLNG_CENTR

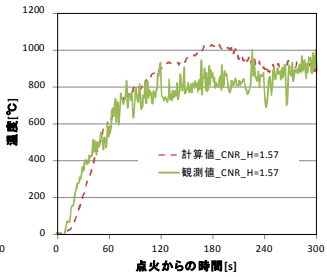


図 36　CNR_H=1.57

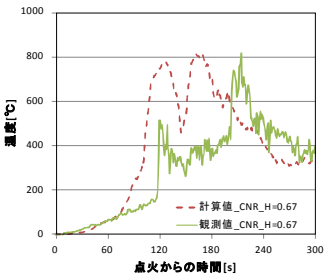


図 37　CNR_H=0.67

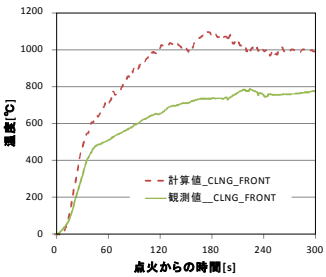


図 38　CLNG_FRONT

8　重量減少速度の実測値を用いた推定発熱速度の精度の検証

平成 22 年度に当庁で実施した「可燃物の燃え広がり現象に関するデータベース構築」の内、「天然ゴムシート__２ミリ」の「大規模試験」を対象として、実測した重量減少速度を用いて算定した火源条件と本手法を用いて推定した火源条件を比較した。

実験は前 7 (2) で示した実験区画と同条件において、開口部正面の区画奥壁に高さ約 1.8m、幅約 0.9m、厚さ 2mm の試験体を立掛け（図 18 における正面合板の位置）、燃焼させたものである。区画内部では合計 18 点で温度測定、試験体重量測定等を行った。実験の詳細は消防技術安全所報第 48 号[7] を参照のこと。

今回も燃焼の成長段階に注目し、天井中心の測定点一点が観測する温度履歴（図 39）から特に点火後 245 s から 348 s の温度上昇時の発熱速度履歴を推定することとした。

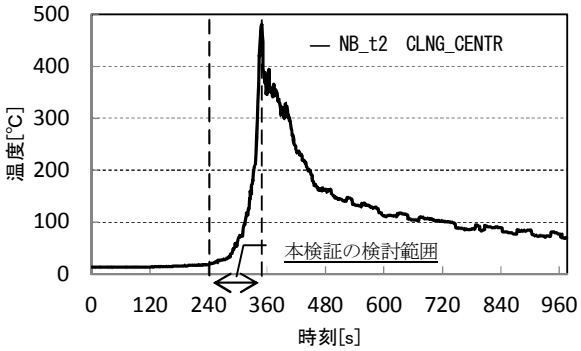


図 39　天井中心の温度履歴

(1)　測定した重量減少速度を用いた火源条件の推定

ア　正確な再現による計算結果

実験では試験体の重量変化を測定しており、単一材質の試験体であることから発熱速度を算定できる。よって、火災区画、火源の位置と大きさ、温度測定点を計算機上でできるだけ妥当に再現し、火源面よりこの算定した発熱速度を時系列で忠実に再現することから始める。今回、火源は開口部正面の区画奥壁に高さ約 1.8m、幅約 0.9m、厚さ 2mm で壁面に設定し、全面から指定の発熱速度を発生させることで試験体の燃焼を模擬した。入力値の情報、区画等の材の物性値は表１、表２の条件を準用した。変更点は初期温度を 21℃、燃料の化学種は組成が不明という設定でデフォルトのプロパンとし、その他、特記していない値もデフォルト値を使用した。

火源面から発生させる発熱速度は、ゴムの単位重量当たりの発熱量を 45.2kJ/g[15] とすると、測定した重量変化より図 40 に示す実線の時系列にて表すことができる。今回は図 40 点線で示す任意の回帰直線（245s:0kW、290s:6.064kW、330s:272.9kW、348:1059kW）を発熱速度時系列データとして採用した。図 41 に、この火源条件を用いたときの天井中心温度の計算値と観測値を比較して示す。

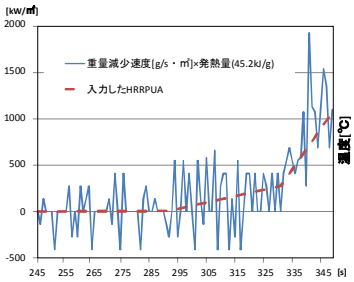


図 40　火源入力条件

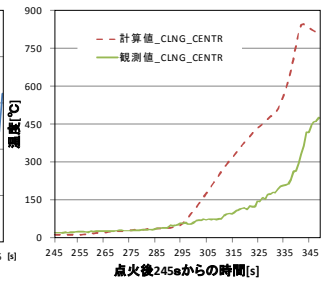


図 41　CLNG_CENTRR

図 41 のとおり、計算値と観測値は大きくずれていることから、正確に火源の位置と大きさ、発熱速度を与えただけでは妥当な計算結果は得られないことが確認された。

イ　目視による観察結果を考慮した計算結果

実験を観察すると、壁面に設定された試験体は燃焼が加速する中期以降、延焼した部位が小さな破片となって次々に床面に飛散落下する。これが繰り返されることで、徐々に燃え崩れた試験体が床面で広がりながら燃焼が急激に成長していることがわかる。以上を考慮し、火源面を試験体直下の区画奥床面に幅約 1.8m、奥行き約 0.9m で設定し、全面から図 40 で示した指定の発熱速度を発生させることで試験体の燃焼を模擬した。図 42 に、この火源条件を用いたときの天井中心温度の計算値と観測値を比較して示す。

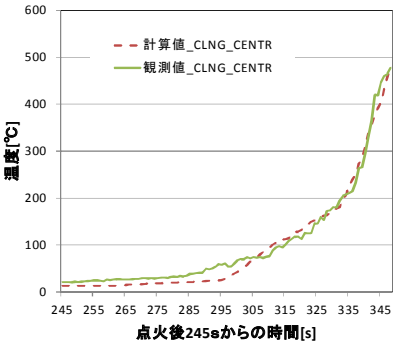


図 42　CLNG_CENTRR

図 42 のとおり、天井中心温度の計算値と観測値は非常によく一致している。目視による観察結果という観測情報を計算に取り込むことで、非常に計算精度が向上することが確認された。

(2)　温度履歴を用いた火源条件の推定

本例は、温度履歴が後半で著しい上昇がみられることから、前 7 (2) で実践した手法を追随するとともに、火源面の与え方に一部応用を加えることとする。

初めに、図 39、図 41 を確認し、最も温度の上昇率の激しい点火後 330 秒から 348 秒を対象として単位面積あたりの発熱速度を推定する。火源面は前 8 (1) イで得られた知見をもとに、床面とし、全面から指定の発熱速度を発生させる。ゴムシートはプラスティック系可燃物であり、過去の知見[14]では 900[kw/㎡] 程度、どんなに大きくても約 4 倍の値 3600[kw/㎡] を超えないであろうとあたりをつける。初期温度を点火後 330 秒の温度、180.7 度と設定し、前 7 (2) で実践した手法を追随することで、852 [kw/㎡] が観測値と最もユークリッド距離の短い火源の最大発熱速度であると判別する。これを単位面積あたりの発熱速度として固定する。

次に点火後 245 秒から 290 秒を対象とし、火源中心から燃え広がりを再現する。火源中心から火源設定面積の淵までおよそ 0.9m で、45 秒間で到着するならば燃え広がり速度は約 0.02 [m/s] であることから、どんなに大きくても約 4 倍の 0.09 を超えないであろうとあたりをつける。これをもとに前 7 (2) で実践した手法を追随し、0.0027[m/s] が観測値と最もユークリッド距離の短い火源の燃え広がり速度であると判別する。この速度で燃え広がると、45 秒間で火源中心より 0.1215m まで到達することから、図 43 に示す長方形の大きさに 0.0027[m/s] で燃え広がる火源面を設定し、固定する。

次に点火後 290 秒から 330 秒を対象とし、新たな燃え広がり速度を推定する。図 43 中、長方形の各辺の中心に新たに火源中心を設定し、図 44 の点線で示す各領域にて新たな燃え広がり速度で火源面中心より燃え広がらせる。上記と同様の作業を繰り返すことで、0.0094 [m/s] が最もユークリッド距離の短い火源の燃え広がり速度であると判別する。この速度で燃え広がると、40 秒間で火源中心より 0.376m まで到達することから、図 44 に示すそれぞれの点線の長方形の大きさに 0.0094[m/s] で燃え広がる火源面をそれぞれ設定し、固定する。

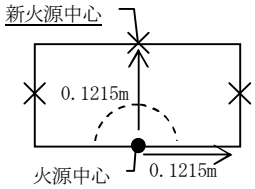


図 43　火源設定 (245～290s)

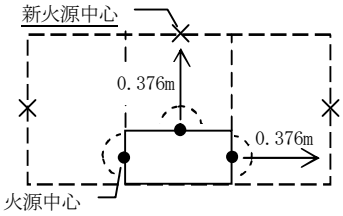
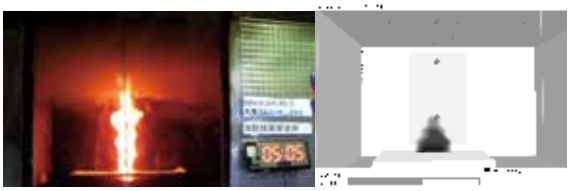


図 44　火源設定 (290～330s)

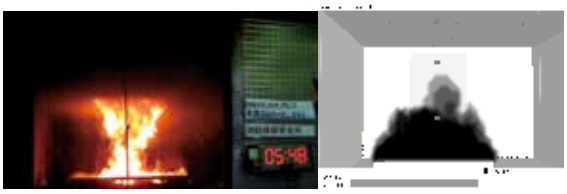
最後に点火後 330 秒から 348 秒を対象とし、同様に新たな燃え広がり速度を推定する。図 44 中、点線の長方形の各辺の中心に新たに火源中心を設定し、新たな燃え広がり速度で火源面中心より燃え広がらせる。上記と同様の作業で 0.0597[m/s] が最もユークリッド距離の短い火源の燃え広がり速度であると判別し、図 44 に準拠して火源面を設定する。

図 45 に、点火後 245 秒から 348 秒までの各時間に観測した実験映像と、上記のように推定した火源条件にて計算した結果のアニメーションを比較して示す。

点火後 275 s



点火後 305 s



点火後 348 s

図 45　実験映像と計算結果のアニメーションの比較

図 45 のとおり、燃え方に若干違いがあるものの、炎の広がりの増加という視覚的特徴が再現されている。

図 46 に、この火源条件を用いたときの天井中心温度の計算値と観測値を比較して示す。

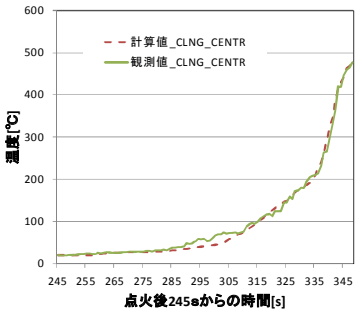


図 46　CLNG_CENTR

図 46 のとおり、天井中心温度の計算値と観測値は非常によく一致している。

図 47 に、前(1)、重量減少から計算した計算値と観測値の一致具合について、図 48 に、本発熱速度推定手法を用いて計算した計算値と観測値の一致具合について、それぞれ点火後 245 秒から 348 秒まで各測定点で計算した値をプロットする。両図にはそれぞれ全測定点の平均値も併記した。図 48 より、重量減少から計算した場合より温度履歴を用いて火源条件を推定したほうが平均値が原点に近いことが確認でき、本手法の計算精度が勝っていることが認められる。

図 49 に、温度履歴を用いた火源発熱速度の推定手法を用いて推定した発熱速度を点線で示す。図内には観測した重量変化より算定した発熱速度を実線の時系列にて併記した。図 40 と比較し、本推定手法は重量変化より算定した発熱速度データをより繊細に回帰しているように見受けられる。

以上より、温度履歴を用いた本推定手法は精度よく火源の発熱速度を推定できていると考えられる。

９　定量的シミュレーションの有用性の具体例

ここでは、同じ情報をもとに人と火災シミュレーションがそれぞれどのような予測を行うのかを確認し、人が事象を理解するに際して火災シミュレーションの利用がより有効に作用するような一例を示す。

前 7 (2) に示した区画内に可燃物を図 50 のように配置し、区画奥に配置したクリブに点火した時、どの順番で区画内の可燃物が着火するのかを実験で確認した。可燃物の配置等の平面図、正面図を図 51 に示す。後日、実験を見ていない任意の職員９名にアンケートを行い、どの順番で可燃物に着火するか、上位３つを予想してもらった。回答を表５に示す。

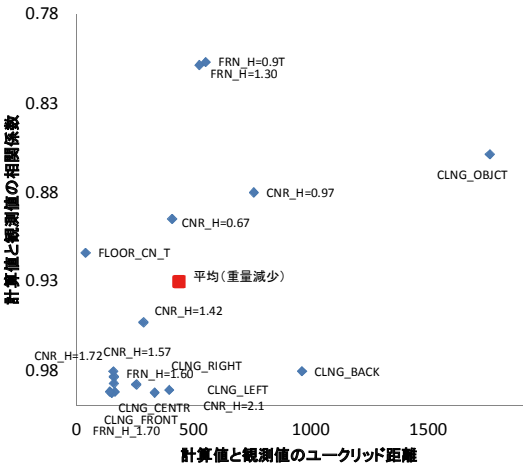


図 47　計算値と観測値の一致具合（重量減少）

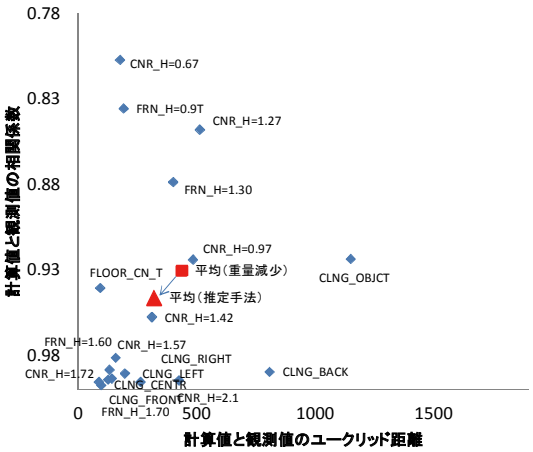


図 48　計算値と観測値の一致具合（推定手法）

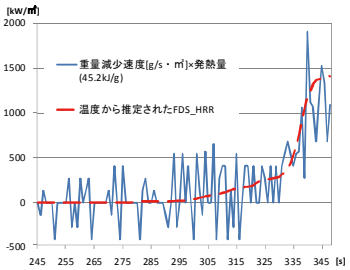


図 49　推定された発熱速度

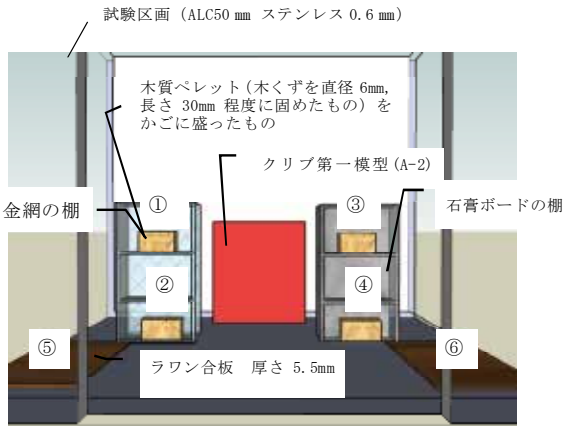


図 50　区画内の可燃物の状況

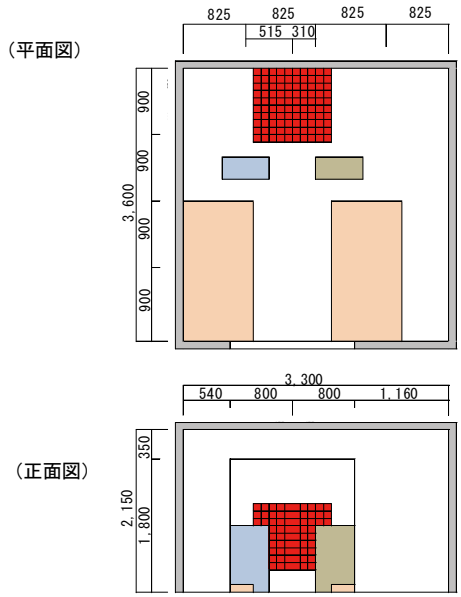


図 51　平面図と正面図

表５　アンケート結果（回答は図 51 中に示す番号）

順位	職員 a	職員 b	職員 c	職員 d	職員 e	職員 f	職員 g	職員 h	職員 i
1	①	⑤	①	①	①	①	①	①	①
2	②	⑥	③	③	②	⑤	②	②	②
3	⑤	②	⑤	②	⑤	②	⑤	⑤	③

実験の結果を図 52 に示す。可燃物の燃焼順位は図 50 中に示す番号で、①、⑥、⑤の順番であった。

152s（①ペレット着火）156s（⑥右合板着火）　163s（⑤左合板着火）

図 52　実験結果

表５より、この結果を予想できた職員はいなかった。アンケートでは、①、②、⑤を予想した職員が最も多く、その理由として、正面右の棚は石膏ボードであるのに対し、正面左の棚が金網であることから、正面左に配置された可燃物は火源からの輻射熱を正面右側の可燃物より受けるため、というものであった。この理由は合理的であり、特に実験で床面右合板が床面左合板より先に着火したことは不自然に感じられたことから、実験の再現性が疑われた。よって、本事例を火災シミュレーションで再現することとした。

火災シミュレーションは前７(2)で示した計算条件を準用した。本実験は展示用に行ったものであり、温度等のデータを測定していないことから、火源は前７(2)で推定したクリブの火源条件を流用した。区画内は木質ペレットと合板のみ化学反応と燃えぬけを考慮した条件とした。その他、火災区画、火源の位置と大きさ、可燃物の位置と物性値は計算機上でできるだけ妥当に再現した。可燃物の物性値の内、木質ペレットの入力値を表６、図 53 に示す。

表６　入力値

内容	設定値	根拠
木質ペレット	密度=1200[kg/m3] 比熱=1.3[kJ/kg.K] 熱伝導率=0.0946[W/m.K] REFERENCE_TEMPERATURE=425[℃] PYROLYSIS_RANGE=75[℃]	8) 16) (図 53)

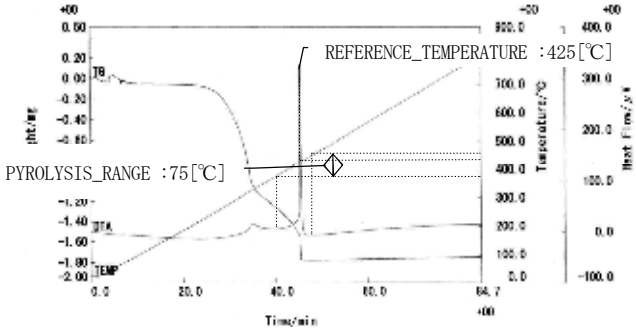
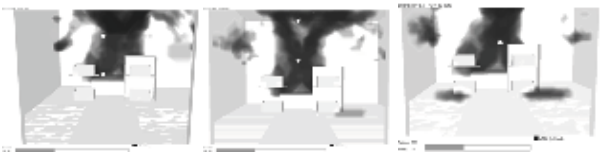


図 53　TG-DTA（木質ペレット）[16]

計算した結果のアニメーションを図 54 に示す。これより、火災シミュレーションは①、⑥、⑤と、実験結果と同様の着火順序を示した。

本計算結果は合理的な火災シミュレーション運用の結果である。よって、出力される定性的な傾向と詳細なデータを子細に検討した結果には説明力があることから、特に床面右合板が床面左合板より先に着火した理由を検討した。

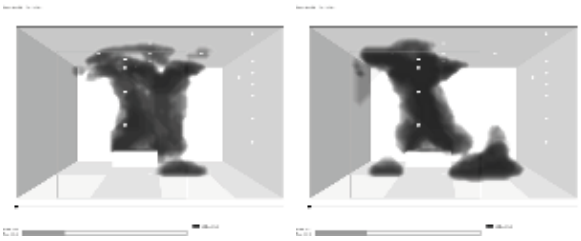
出力データの分析の結果、区画内の温度が開口部正面に対し非対称であり、正面右側のほうが若干高めであることが分かった。これは区画開口部が中心より正面左にずれていることで室内の熱気が時計回りに動いていることが主な原因であると推察された。その他、可燃物が区画中心より左側に配置されており、右側の合板が天井面からの輻射をより受ける位置であること等が複合的に作用して、床面右合板が床面左合板より先に着火したと推察された。



165s（①ペレット着火）169s（⑥右合板着火） 177s（⑤左合板着火）

図 54　計算結果

床面合板の着火順位の検討に特化するため、火災シミュレーション上で左右の棚を排除し、計算した結果を図 55 に示す。



155s（⑥右合板着火 10s 後）　　187s（⑤左合板着火 10s 後）

図 55　左右の棚を排除した計算結果

図 55 の通り、この実験条件はそもそも床面右合板に着火しやすい初期条件であり、棚の配置をもってしてもそれを阻害するだけの効果を得られなかったということが分かった。

以上より、火災シミュレーションが人の正確な事実確認を支援し、問題点の的確な把握を促すことにより、本実験結果が特異な現象ではなく再現性のある結果であることが確認された。

10　まとめ

本報では、定量的な火災シミュレーションの構築において、火源条件を合理的に決定することの重要性を示すとともに、観測される火災室内の温度を用いた非常に容易で合理的な火源発熱速度の推定手法を提案した。また、定量的なシミュレーションの有用性について実例を通しわかりやすく例示し、工学的に有用なツールであることを示した。

なお、前８でも示した通り、火災シミュレーションを運用する場合、実火災を体験した経験、現場調査を行った経験、実験で実現象を確認した経験等がなければ適切に運用することはできないと改めて感じられた。本報で提案した火源発熱速度の推定手法も、実験、もしくは現場調査で得られた情報を基礎としており、決して火災シミュレーション単体で完結するものではない。実現象を観察した人間がその要素を抽出し、モデル化したものが火災シミュレーションであるというその生い立ちを鑑みても、実験や現場調査と火災シミュレーションの主従が逆転することは決してありえず、実験、現場調査は現象把握の手段として依然として主役であり続けると考えられる。

しかしながら、火災シミュレーションを利用しないことは多大な損失であり、前９でも示した通り両者を上手に利用することで現象をより深く理解することができると考えられる。火災現場から火災性状を推察する際、現場を見ると一応理解できたような気持になる。しかし改めて火災シミュレーションで可視化することで、見逃していた実は当たり前のこと等が一目瞭然となり、新たな気づきや発見があると思われる。当庁職員がこのような恩恵を得るためには、有事の際、火災シミュレーションが問題解決方法の一つとして選択肢に入るべく常に有用で信頼できるツールである必要があり、消防技術安全所は今後も火災シミュレーションが運用可能な能力と環境を維持するよう努力し、消防の火災性状に係る問題を的確に解決できるよう支援していきたい。

11　課題

本報で提案した火源発熱速度の推定手法は、ファニチャーカロリーメーター（図 16）の代用的な意味合いの他、例えば総合操作盤を備えた自動火災報知設備が備わっているような大規模建物では、R 型受信盤より雰囲気温度のアナログデータを取得し本報の火源推定手法に応用する等、実火災に直接適用することも考えられる。

しかし、そのような設備のない建物では、一般的に当時の雰囲気温度時系列データを実際の火災現場から得ることは困難である。なお、前７冒頭で述べた通り、火災調査時、火災室の収容物の色や形の変化を焼け具合として空間的に把握し、そこから火災当時の室内の熱的状態を直感的に推測するときは、無意識に雰囲気温度の時系列変化を想像していることが多い。もし、これを「データ、測定値」という枠組みに合理的に落とすような一連の技法が提案できれば、本報で提案した火源発熱速度の推定手法が適用でき、今後非常に有用であると考えられる。

また、火災シミュレーションは前７(5)で示したように、他の可燃物に延焼する等の予め計算シナリオに織り込んでいない大きなシナリオ変化については、発生時期とその後の状態を精度よく予測することは不得手である。よって、現在は、より長期間の情報（例えば図 20 における 100 s までを利用等）をもとに火源条件を推定し精度を上げるか、観測されたシナリオの変化の都度、あらためて本提案手法等を応用することで各種入力パラメータを再設定し、再計算する必要がある。しかし、例えば住宅火災において壁間から小屋裏に延焼するといったシナリオ変化の場合、壁間という２㎝以下のスケールから建物という５ｍスケールまでの延焼を網羅する合理的な計算格子を設定することは物理的に不可能であることや、火災のシナリオの正確な変化量、変化時期が火災後に追跡不能である点などが原因で、ほとんどの場合妥当と言える火災シミュレーションを構築できない。定量的な再現性を有する一連の火災シミュレーション結果で火災全体が俯瞰可能となれば非常に有用であるだけに、上記の問題を解決した合理的な技法の提案が課題であると考えられる。

12　おわりに

本検証中、FDS[1)]の理解に際し、消防研究センターの山田常圭氏、阿部伸之氏、科学警察研究所の本間正勝氏、岡本勝弘氏、宮本寛樹氏、大成建設の中濱慎司氏、当庁飯田明彦氏よりご指導頂いたことが大きな助けとなりました。ここに深く感謝の意を表します。

[参考文献等]

1) NIST：Fire Dynamics Simulator(Version 5) Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1018-5, 2010.

2) 例えば本間正勝他：ガソリンプール火炎から立壁が受ける熱的影響のシミュレーション，第44回安全工学研究発表会講演予稿集，pp. 197-200，2011.

3) 大宮喜文他：火災区画外への余剰未燃ガスを考慮した開口噴出火炎性状，日本建築学会計画系論文集，第545号，pp. 1-8，2001.

4) James G .Quintiere：Principles of Fire Behavior, Delmar Publishers, p. 113, 1997.

5) 火災と消火の理論と応用，社団法人　日本火災学会監修，東京法令出版，p. 246，2005.

6) 湯浅弘章他：ドア解放がもたらす区画内火災性状の変化に関する検証,消防技術安全所報49号，pp. 38-46，2012.

7) 湯浅弘章他：可燃物の燃え広がり現象に関するデータベース構築，消防技術安全所報48号，pp. 68-76，2011.

8) 田中哮義：改訂版建築火災安全工学入門,日本建築センター，p.351，2002.

9) FDSデフォルトデータ”steel”(Drysdale, Intro to Fire Dynamics - ATF NIST Multi-Floor Validation)

10) 公益財団法人日本合板検査会：http://www.jpic-ew.net/article.php/qa_plywood（2015年3月4日アクセス確認）

11) 住宅性能評価機関等連絡協議会：ベンチマークテストの結果による温熱環境（年間暖冷房負荷計算方法）に関する試験ガイドライン，p. 14，2004.

12) 海和、島村による実測値：試料重量(合板）_1817mg，Atmosphere_空気，Reference_アルミナ，Sample Pan_Pt，Rate_10.0℃/min.，消防技術安全所危険物質検証課

13) 右田伸彦ほか編：木材科学,上巻,共立出版，p. 65，1968.

14) 例えば名取晶子他：実在可燃物の発熱速度曲線の推定方法,日本建築学会環境系論文集第616号，pp. 1-8，2007.

15) 耐火設計のための局所火源を考える,日本建築学会，局所火災に対する耐火設計WG，p. 20，2005.

16) 海和、島村による実測値：試料重量(木質ペレット）_1894mg，Atmosphere_空気，Reference_アルミナ，Sample Pan_Pt，Rate_10.0℃/min.，消防技術安全所危険物質検証課

Study Involving Creation of Fire Simulations with Quantitative Reproducibility (Part 2)

(Considering the Methods for Constructing Quantitative Fire Simulations)

Hiroaki YUASA*, Ayumu SATOU**, Shigeo WATANABE***, Yuuichirou MACHII**

Abstract

This study's goals were to consider the measures to prevent accidents based on the case of fires, support the education of firefighter by establishing the methods of constructing fire simulations that are reproducible in a quantitative fashion, and also create and provide more accurate and useful fire-related suggestions.

This report shows the importance of rationally determining the conditions of fire sources in the construction of quantitative fire simulations, and proposes an extremely simple and rational method for inferring the heat release rate of a fire source by using the observed temperatures of indoor fire. In addition, this report shows the usefulness of quantitative fire simulations as engineering tools by using actual examples to clearly show the value of these simulations.

＊Kokubunji Fire Station　＊＊Equipment Safety Section　＊＊＊Kodaira Fire Station