

流体乱流モデルを応用した 延焼シミュレーションの基礎的研究

Basically Study on the Numerical Spreading Fire Simulation
Applied Turbulent Flow Model

松 村 茂

BY Shigeru MATSUMURA

I basically study that the turbulent flow model
(k-e model) applying simulation of spreading fire model on
urban area.

The simulation model shows temperture mapping between
burning wood-house-building and the next wood-house-building,
and shows the surface temperture of the next house-building.

The model clears that the next house-building is burning
or not. I am able to know that difference of temperture
mapping according to the length between houses, the shape of
next house, or the differnce of wooden or concrete house.

1. はじめに

木造家屋の密集する市街地においては、耐火、防火構造物が増加してきたとはいえ、市街地延焼火災の発生する危険性は依然として変わっていない。

都市防災の分野では、延焼火災がどのくらいの速さで市街地全体に広がっていくかという、延焼速度に焦点を当てた研究が盛んである。

延焼速度の算定には、一般にパラメータとして風速、風向、純木造・防火木造・耐火造建物の建築面積比、隣棟間隔を用いている。

このことからわかるように、市街地大火の際の延焼を抑えるには、延焼速度を限りなくゼロに近づけることであり、そのためには、防火木造、耐火造建

物の建築面積比を増加させることであり、また、隣棟間隔を広げることである。

しかしながら、実際には、市街地の延焼阻止のために、このような改善は一朝一夕には進まない。

しかし、延焼阻止の改善は、こればかりでなく、家屋間にコンクリートの塀、垣根等を設けたり、家屋の壁面に耐火材料を張り付けるなどの方法もある。

現在の木造家屋の屋根材は、瓦、トタン、スエードなど耐火材料が多く利用されており、旧来の茅葺き屋根に比べ、格段に延焼性能は向上している。

さて、こうした市街地大火の延焼を阻止する手段はさまざま存在する。しかし、現在のところ、隣棟への延焼を阻止するこれらの手法を評価する方法は提案されていない。ただし、窓等の建物開口部の大きさによって、上階への延焼の模様をシミュレートした研究は報告されている。

ここでは、それらの延焼を阻止する手法を評価する方法について検討することを研究の目的とする。

*キーワード：防災、延焼、シミュレーション

**正会員 工修 東京大学助手 先端科学技術研究センター (156 目黒区駒場4-6-1)

2. シミュレーションモデル

建築材の特性、建物間の塀の有無、またその材質の特性、建物形状等々をパラメータとするモデルを考える。

ここでは、ナビア・ストークス方程式から熱の対流と放射による熱の移動を捉えることを試みる。空間はメッシュに分割され、それぞれのメッシュには、空気、あるいは建物、地面等として、物質に応じた熱伝導率、比熱、密度が与えられる。

取り扱う流れ（対流）は乱流であり何らかの乱流モデルの適用が必要である。乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデルを用いる。実際のシミュレーションでは、(株)流体コンサルタントから発売されている”FLUENT/PC”を使った。

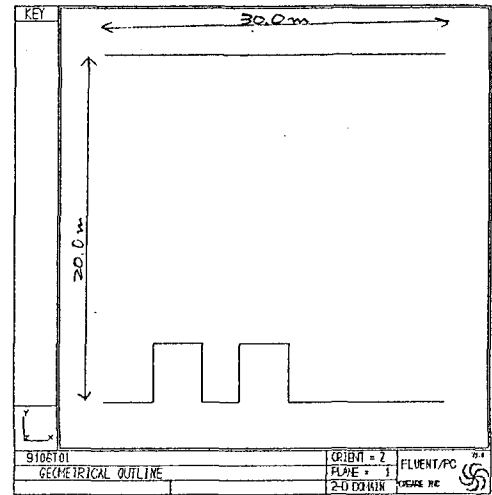


図1 対象地域

3. シミュレーションモデルの仮定条件

(1) モデルの評価方法

このモデルは、隣棟へ延焼が拡大するか否かについてその判定を検討するものである。したがって、モデルの有効性を検討するために、延焼の限界距離等を算定する既存研究との比較を行う。

浜田稔¹⁾によれば、平屋建て木造建物相互の延焼限界距離は、風速を U (m/s)として、

風下方向で

$$\text{出火より10分以内で } 5+0.5*U (=D1) \text{ (m)}$$

.....①

$$\text{出火より30分以内 } 1.5*D1$$

$$\text{出火より60分以内 } 3.0*D1$$

$$\text{出火より60分以降 } 5.0*D1$$

風上方向で

$$5+0.2*U \text{ (m)}$$

風側方向で

$$5+0.25*U \text{ (m)}$$

である。

そこで、木造建物相互間で提案するモデルを用いてシミュレーションを行い、モデルの検討を行う。

(2) 基礎設定条件

シミュレーションは、水平方向と鉛直方向の2次元空間で行う。奥行方向は考慮しない。対象空間は、水平方向に30m、鉛直方向に20mとし、1m×1mのメッシュ、総数 600個のメッシュに分割する。

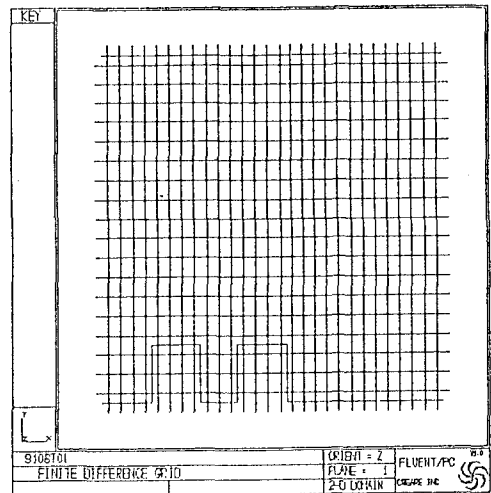


図2 メッシュ

炎上建物は、風上から5mのところに位置し、建物幅4m、高さ4mとする。延焼被検建物の建物幅も4m、高さ4mとする。隣棟間隔はシミュレーションケース毎に3～6mに設定する（図1、図2）。

実際の炎上建物は火炎が上がり、幅4mの建物の場合、その高さは2.15m（風速1m/s）から3.27m（風速5m/s）程度になる¹⁾。

火炎の形状は、無風状態で建物幅を底辺とする3角形であるが、風の影響で風速が増すにつれて風下になびいていき、風速2m/sで風下側の火炎がほぼ鉛直になる²⁾。

この火炎からの放射熱、あるいは接炎の形で延焼

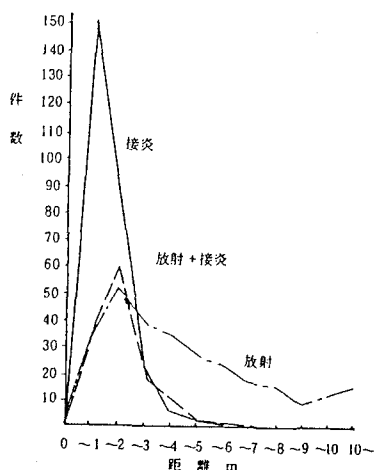


図3 延焼距離と延焼機構

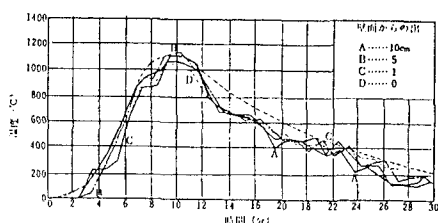


図4 屋内温度の基準と実測値

が拡大するので²⁾(図3)、延焼シミュレーションを行う場合、特に風速が大きい場合は火炎の影響を無視できない。

しかしながら、本モデルでは火炎の形状を風速に応じて求め建物形状として境界条件に与えることは可能であるが、その場合wallとして境界条件を与えることになり、風速が小さい場合はwallであるために、空気の流れに大きな影響を与えるものと思われる。ここでは風速が小さいことを条件に火炎の形状を無視した。

モデルでは、炎上中の建物上の境界条件でwallの表面温度を設定する必要がある。炎上中の屋内温度の実測値によれば、炎上10分後に温度の最大値1100℃を迎える(図4)。モデルではこれを参考に1500k(1227℃)とした。

被検建物の温度に関する境界条件には、外部熱交換係数と外部温度を与えている。地面についても同様の境界条件である。

外部熱交換係数は、wallの厚さと熱伝導係数によって決まる。

表1 外部熱交換係数

材質	熱伝導係数 $w/m\cdot k$	wall厚さ(仮想) m	外部熱交換係数 $w/m^2\cdot k$	外部温度 k
木材	0.18	0.33	0.54	400
コンクリート	1.00	0.33	3.00	400
土壌	0.14	5.00	0.028	300

表2 シミュレーションケースI・II・IIIの境界条件

境界	速度U [m/s]	境界との抵抗	速度V [m/s]	境界との抵抗	材質	温度T [k]
wall 0	0.0	有	0.0	有	土壌	-
wall 1	0.0	有	0.0	有	木材	-
wall 2	0.0	有	0.0	有	土壌	-
wall 3	0.0	有	0.0	有	木材	-
wall 4	0.0	有	0.0	有	土壌	-
wall 5	0.0	無	0.0	無	-	300
インレット	0.0	有	0.0	有	-	300

表3 各シミュレーションケースの隣棟間隔

ケース	隣棟間隔 [m]
I	3
II	6
III	9

表4 各ケースの被検建物の表面温度

ケース	材質	表面温度(対流)	表面温度(放射)
I	木造	184~145℃	726℃
II	木造	61~20	369
III	木造	61~20	219

外部熱交換係数 $[w/m^2\cdot k]$

= 熱伝導係数 $[w/m\cdot k]$ / wall厚さ[m]

ここでは、熱伝導係数、wall厚さ、外部温度を表1のようにした。

(3) シミュレーションケースの概要

シミュレーションは4ケースについて行った。各ケースの境界条件は表2の通り。建物の隣棟間隔については表3の通り。

4. 結果

図5～図12に各ケースでのシミュレーション結果として、速度ベクトルと温度分布を示す。

ケースIでは、被検建物の表面温度が 418～457[k] (145～184℃) 程度になっている。以下表4にまとめて示す。

ケースIVはコンクリートの被検建物である。ほぼケースIの木造建物と同様の温度分布を示している。

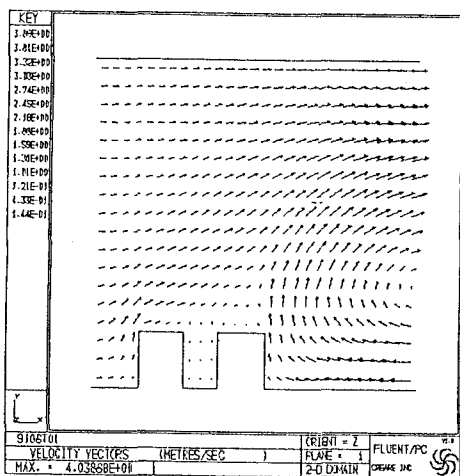


図5 ケースI 速度ベクトル

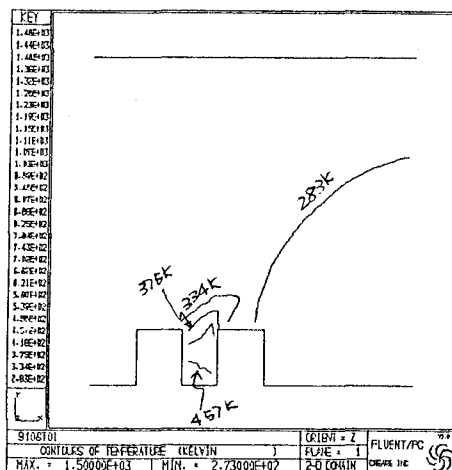


図6 ケースI 温度分布

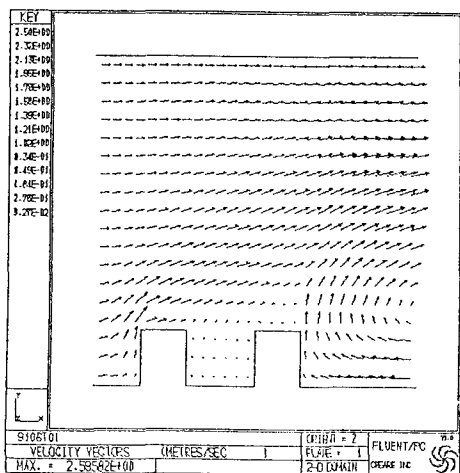


図7 ケースII 速度ベクトル

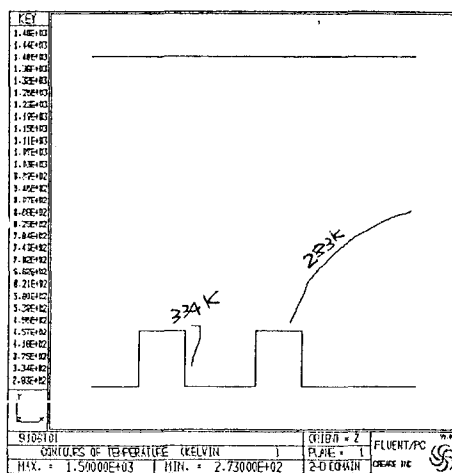


図8 ケースII 温度分布

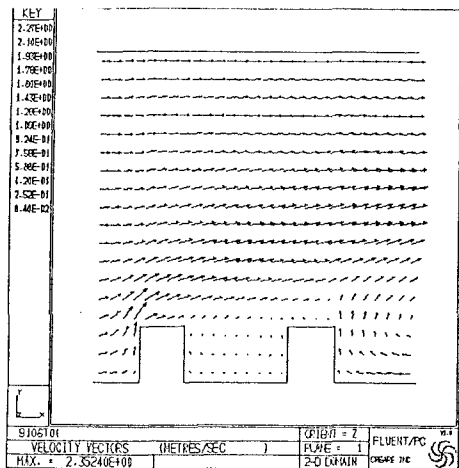


図9 ケースIII 速度ベクトル

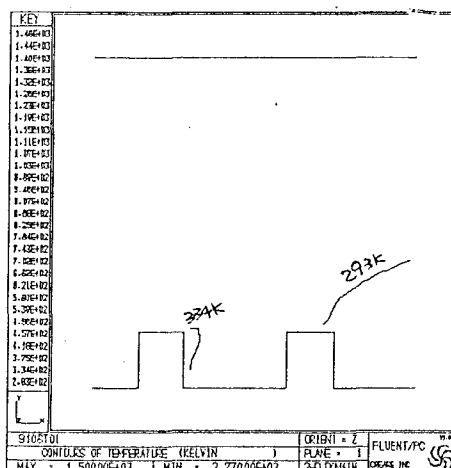


図10 ケースIII 温度分布

5. 考察

シミュレーションより被検建物の表面温度を得たが、この温度で発火するかどうかを判定しなければならない。

着火温度には、発火点と引火点がある。発火点とは、着火源が無くとも発火に至る最低温度であり、引火点とは物質を熱しつつこれに火炎を近づけると、瞬間的に引火しうる程度にまで可燃性蒸気を発生するに至る温度である（以上「理科年表」より）。

各種材木の発火点及び引火点は表5、表7の通りである。これらによれば、木材の引火点が250℃程度、発火点が430℃程度といえよう。

建設省総合技術開発プロジェクト「都市防火対策手法の開発」⁹⁾の中で行われた実験によれば、着火時の木片表面温度は、概ね200℃である（図13）。

この実験結果と木材の引火点、発火点温度とを照らし合わせれば、引火点で何がしかの飛び火、火の粉等の影響により、着火するものと考えられる。

そこで、ここでは被検建物の表面温度が200℃になったところで着火すると考えることにする。

シミュレーション結果から被検建物の表面温度を表3にまとめた。200℃を延焼する温度とすれば、シミュレーション結果からはどのケースとも、放射により延焼する。隣棟間隔3mのケースⅠの場合は、対流のみでも180℃程度まで上昇していることは、注目される。

風速1m/sの時、浜田によると延焼限界距離は、出火10分以内で5.5m、30分以内では1.5倍の8.25mとなる。

本シミュレーション結果を考察する場合において、10分以内の延焼限界距離を採用すべきか、それとも30分以内の延焼限界距離を採用すべきか、どちらかを選択しなければならない。

本シミュレーションの結果は、炎上建物の表面温度が1500[k]での定常状態であり、図3にあるように、火災発生時から10分後に屋内温度のピーク約1500[k]に達する。したがって、シミュレーションの結果は火災発生10分後の状態とみることができる。火災発生時から火源の温度が300[k]程度から1500[k]まで徐々に上がり、それにつれて被検建物の表面温度も300[k]からシミュレーションで得られた温

表 5 各種材木の発火点

樹 種	みかけの密度 (g/t.c.)	発火点 (℃)	樹 種	みかけの密度 (g/t.c.)	発火点 (℃)
アカガシ	0.97	441	シラカバ	0.66	438
ツゲ	0.86	447	ベイマツ	0.53	445
ケヤキ	0.76	426	カツラ	0.50	455
クリ	0.68	460	ツガ	0.46	445
トネリコ	0.67	416	アカマツ	0.42	430
ヤマザクラ	0.66	430	エゾマツ	0.42	437

表 6 日本産材木の引火点

樹 種	引火点 (℃)	樹 種	引火点 (℃)
スギ	240	ケヤキ	264
ヒノキ	253	カツラ	270
ツガ	253	ブナ	272
アカマツ	263	シラカバ	263
カラフトカラマツ	271	キリ	269
エゾマツ	262		
トドマツ	253		
日本産針葉樹材 8種の平均	257	日本産闊葉樹材 11種の平均	263

度まで上がっていく。その過程で図13にあるように、被検建物に熱が蓄積され、200[k]前後に達したところで延焼すると考えることが適当である。

以上の理由から、延焼限界距離は出火発生10分後の状態を見れば十分である。

風速1m/sの時の風上方向での延焼限界距離は、式①より5.5mである。したがって隣棟間隔を3mとしたケースⅠが延焼し、隣棟間隔を6m、9mとしたケースⅡ、Ⅲは延焼しない。

シミュレーション結果では、ケースⅠ～Ⅲ全て、着火する可能性が高いと出た。浜田においては同様に延焼限界距離からケースⅠが着火する。

このことからシミュレーションは浜田式よりも危険側にあると考えてよいといえよう。

6. まとめ

流体力学、ナビヤ・ストークス方程式を利用して、市街地における隣棟への延焼過程をシミュレートすることを考えてきた。延焼は、対流と放射、接炎によっておこす。今回の考察により、ここで扱った隣棟間隔では、放射の影響が強い。このことは、建物間に生け垣、コンクリート等の塀などが延焼防止に有効であることを示している。

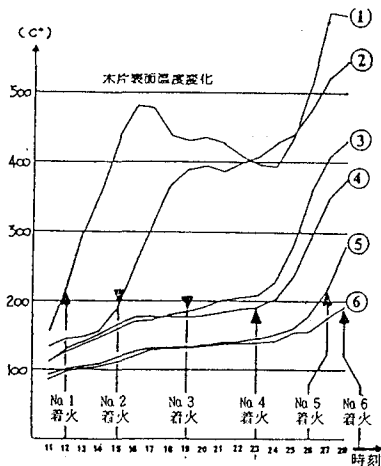


図 11 着火時の木片表面温度と輻射強度

もう一点は、今後の研究を必要とするが、隣棟間隔が狭い場合、たとえ放射熱を遮断するものがあるとしても、対流により延焼することがあり得ることを、隣棟間隔が3mのケースは示している。

ところで、延焼は隣棟間隔が小さい場合、接炎によって起こることが多く、放射の影響がより強くなるのは隣棟間隔が大きくなるにつれてである。放射の影響が出るのは図14⁵⁾にあるように、4～5m以上の隣棟間隔からである。したがって、ここでシミュレートした風速よりも大きな値での考察が必要になる。しかし、風速を大きくすると火炎の大きさが増大し、これをwallとしてでなく処理していく必要がある。また、火炎自体が風下側になびくのでその処理も必要になる。

この後はそうした影響を考慮した境界条件の与え方を研究する必要がある。

しかしながら、ここで用いたシミュレーションモデルは簡便な方法ではあるが、延焼を判断する意味において大方適当な温度分布をシミュレートすることができることが示された。

今後、メッシュ幅の縮小、メッシュ数の増加、計算時間の短縮等によりさらに詳細なシミュレーションが行えると考えられる。たとえば、隣棟間に塀を設け、塀の幅、高さ、素材（木造、コンクリート造、垣根等）により延焼の違いを見ることが可能である。

また、建物の形状、幅、高さ、軒の位置、軒の大きさ等々の延焼への影響を見ることができよう。

さらに、定常のシミュレーションを非定常化し3戸以上の家屋を同時に扱えば、街区単位の延焼の可能性を判断することも可能になる。

今後の課題としては、以上に挙げた大風速のシミュレーションを行えるようにすること、延焼防止における塀の影響を考察することなどがあろう。

【補注】

1) Thomasの式

$$\text{高さ} = 56 * \text{炎上幅} * (\text{延焼重量} / (\text{重力加速度} * \text{密度} * \text{密度} * \text{炎上幅})) 0.45 * (\text{風速} * \text{風速} / (\text{重力加速度} * \text{炎上幅})) - 0.11$$

2) Thomasの式

$$\text{角度} = \sin^{-1}(2 / \text{風速}) 0.2$$

参考文献

- 1) 大阪市防災会議：市街地の延焼危険に関する研究 1973年
- 2) 新建築学体系編集委員会編：新建築学体系建築防火論、彰国社、1982年
- 3) 4) 5) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト「都市防火対策手法の開発報告書」、pp. 244、1982年