

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 7日現在

機関番号：82115

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760600

研究課題名（和文）市街地情報の不完全性を考慮した市街地火災による建築物の火災被害  
リスク評価研究課題名（英文）Fire Damage Risk Assessment for Buildings by a City Fire in  
Consideration of Imperfection of City Information

研究代表者

岩見 達也（IWAMI TATSUYA）

国土技術政策総合研究所・総合技術政策研究センター・主任研究官

研究者番号：20370744

研究成果の概要（和文）：本課題では、市街地火災シミュレーションの実用性向上のため、計算時間の短縮及びデータを効率よく取得する手法の提案を行うこととしている。主な成果として、①各受熱点から見た遮蔽物の存在位置を前計算する処理を実装、及び複数 CPU コアによる並列計算処理の実装、これらによる計算効率の検証、②開口部位置情報の不完全性を考慮した延焼モデル構築、③開口部の位置による延焼性状への影響の検証、④ステレオ画像による隣棟間の相対的な開口部設置状況を簡易に取得する手法の提案、等が得られた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to reduce of computation time, and to propose of the efficient data acquisition technique because of improvement in the practicality of a city fire simulation. As a result, (1)the city fire simulation program was Improved of efficient radiant heat transfer calculation methods and the multi-core parallel processing, (2)the city fire model in consideration of imperfection of city information was developed, (3)an influence which the position of openings has on fire spread was verified, (4)an efficient city data acquisition technique by a stereo picture was proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
総計	3,300,000	0	3,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、都市計画・建築計画

キーワード：防災計画、市街地火災

## 1. 研究開始当初の背景

中央防災会議が行った被害想定では、首都直下地震や東海地震、東南海・南海地震の発生時には、火災により最大で数十万棟の焼失、数千人もの死者の発生が想定されている。我が国では、地震時には多数の火災が発生し、大規模に延焼拡大する危険性が多く残されている。

また、都市再生本部が指摘しているように、地震時に大火の危険性がある危険な密集市街地が全国で約 8,000ha 存在し、平成 23 年度までにその解消を目指して、「密集市街地の緊急整備」を 2 度に渡って都市再生プロジェクトとして決定しているにもかかわらず、達

成の見込みは立っていない。

大火の危険性の高い市街地に対して、大規模な道路拡幅や耐火建築物帯による延焼遮断帯を形成して大規模な延焼を阻止するような根本的な解決ができればよいが、全国に広範囲にわたるすべての密集市街地に対して、実行できるわけではなく、地域住民の協力を得ながら、新築時の少しの防火性能の上乗せ、改修時の少しの防火補強など、経済的な負担の少ない小規模な対策を少しずつ積み重ねて安全性の水準を向上させていかざるを得ない。

これまでに、上記のような小規模な対策による効果を定量的に把握することを目指し

て、詳細なシミュレーションモデルの開発を行い、火災安全工学的な知見の蓄積などを背景に、シミュレーション技術の向上も図られ、精緻な予測が可能となってきている。しかしながら、精緻な予測ゆえに、その実用に当たっては(1)計算時間が長時間必要(2)精緻な計算に耐える精度の高いデータの入手が困難、という大きな2つの課題がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、背景に示したこれら2つの課題に対応するため、計算時間を短縮するための評価モデルの構築、並びに、データ精度と予測精度の関係分析及び予測精度を保つために必要なデータを比較的入手可能なデータに基づいて効率よく取得する手法の提案を行うことで、市街地における地震時火災リスクを精度良く迅速に評価可能とすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1)高速化のための新たな評価モデルの構築

新たな評価モデルの構築に関しては、遠方火源からの放射熱の影響を計算する際の、受熱点から見た放射源の見通し判定（他の建築物等の遮蔽物によって遠方の火炎が遮蔽されるかどうかの判定）における計算負荷が最も大きいことを考慮して、共通して必要となる前処理として各受熱点から見た遮蔽物の存在位置を計算する処理を既存の市街地火災シミュレーションプログラムに実装した。

また、複数 CPU コアによる並列計算処理ができるよう改良を行った。

その上で、東京都を対象に、現状の市街地火災シミュレーションプログラムを用いた精緻な計算結果と改良したプログラムによる計算結果を比較し、計算精度に大きな影響が無いことを確認した。

さらに、開口部の対面状況に応じて開口部を透過して建物内部へ入射する熱を正確に予測するための火災実験を行い、開口部熱透過モデルを新たに構築するとともに、開口部の位置情報が不完全である場合でも平均的な対面状況を想定して計算を行うための改良を行った。

### (2)効率的なデータ取得手法の提案

効率的なデータ取得手法の提案に関しては、開口部の位置を恣意的に変動させた仮想市街地データを作成し、シミュレーションを実行することにより、開口部の対面性（受熱側開口部から加害側開口部を見るときに距離及び対面角度）による延焼性状への影響を確認した。

また、市販の3次元ステレオ撮影が可能なデジタル写真画像を用いて隣棟間の相対的な開口部設置状況を簡易に取得する手法について検討を行った。

## 4. 研究成果

### (1)高速化のための新たな評価モデルの構築

#### ①遮蔽物の前処理による高速化

市街地火災シミュレーションでは建物間の延焼を判定する際、受熱側建物の各壁面及び各開口部に受熱流束計測点（受熱点）を配置し、周囲の火災建物から噴出する火炎や高温部等の熱源を点熱源群としてモデル化することで、点から点への熱移動として計算を行っている。このとき、各点熱源と受熱点の間に遮蔽物（他の建物や塀柵等）があるかどうかを幾何学的に計算し、受熱点への到達熱流束を計算している。

従来手法では、各計算ステップごとに、遮蔽物の有無を確認するための幾何学計算を行うため、計算処理量が多くなっていた。そこで、計算ステップごとの処理量の削減のため、各受熱点における遮蔽状況をあらかじめ計算しておく方法に変更した。具体的には、図1に示すように、受熱点を中心に、半球を想定し、半球上の微小面に向けてレイを射出し、レイが周囲の建物と交わる場合に、その距離を微小面に保存しておく。これにより、当該処理より近い物体は見通せること、遠い物体は見通せないことが瞬時に判定できる。

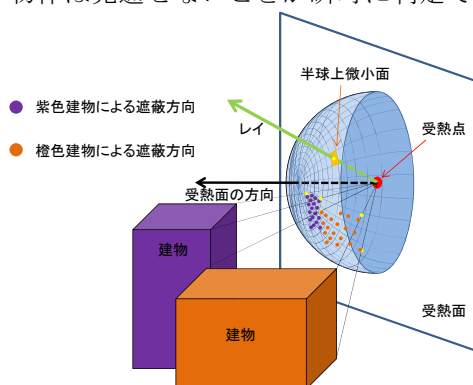


図1 新たな遮蔽状況の計算方法

#### ②マルチコアの活用による高速化

近年のマルチコア CPU の普及により、マルチコア CPU の利用が一般的になりつつある。逆に、CPU コア 1 つあたりの計算能力は頭打ちとなっており、計算速度の向上には、マルチコアに対応した並列処理の実装が不可欠である。

市街地火災シミュレーションでは、計算ステップごとに、

- i)火災建物一棟ずつ建物内の火災進行計算
- ii)火災建物群の火炎合流計算
- iii)受熱建物一棟ずつ受熱・延焼計算
- iv)火災状態出力

という計算過程を繰り返すことにより、市街地火災の延焼状況を計算している。ここで、i)及びiii)について、建物一棟ずつの処理であり、一棟の計算結果が他の建物の計算に影響

することが無い（すなわち順不同で処理可能である）ことから並列処理を行うこととした。なお、並列化処理の実装には OpenMP を用いた。

### ③高速化及び計算精度の検証

シミュレーションの改良（遮蔽状況の前処理及び並列計算の実装）による効果を検証するため、改良前後のシミュレーションの計算時間及び計算結果の比較を行った。

#### i)計算条件

対象地区：東京都墨田区全域（56335 棟）

風向：東西南北 4 方向

風速：0m/s、5m/s、10m/s

出火建物：対象地区内の建物の中からランダムに 1 棟を選択

シミュレーション時間：2 時間

計算回数：9000 回（出火建物を 1 回選択ごとに、風条件 9 回（風速 0m/s、風速 5m/s 及び風速 10m/s を東西南北の各風向 1 回ずつ）計算し、これを 1000 回繰り返す。）

#### ii)計算結果

##### ・計算時間の比較

改良前 103 時間 25 分 1 秒

改良後 40 時間 2 分 29 秒

（速度比：2.58 倍）

##### ・計算精度の比較

図 2 及び図 3 は、モデル改良前後のシミュレーション結果を比較している。

図 1 は、2 時間後の焼失棟数について、改良前後のモデルで同一条件（出火建物及び風向・風速）で計算した結果を比較しており、9000 回の計算がプロットされている。改良前後でほぼ同等の結果であることを示している。

図 2 は、9000 回の計算を重ねる間の、焼失棟数の平均値の変動を示したものである。改良前後どちらの結果でも、100 回程度でおおむね収束し、その後の変動は大きくない。

9000 回計算した平均焼失棟数は、改良前 54.86 棟に対して、改良後 55.02 棟であり、誤差は極めて小さいことを示している。

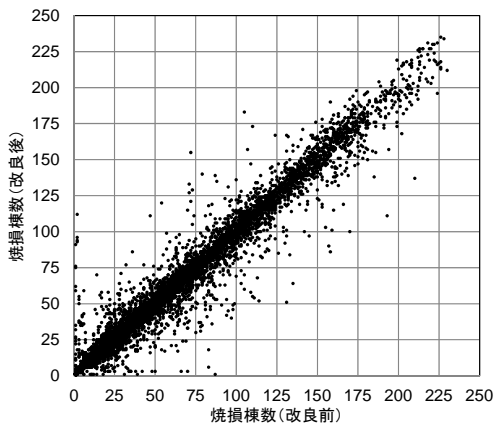


図 2 改良前後の焼失棟数の比較

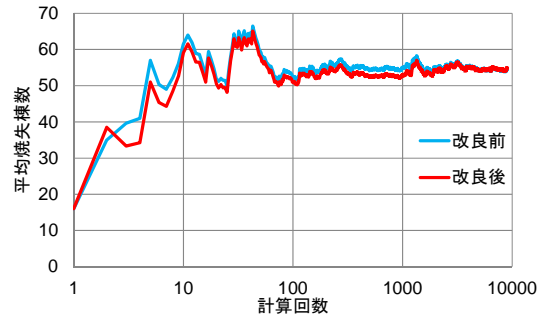


図 3 改良前後の平均焼失棟数の比較

### ④開口部熱透過性実験及びモデル化

開口部への放射熱の入射角度に応じた受熱流束の違いを把握するため、以下の条件で計測を行った。（写真 1、図 4）

#### i)実験条件

・実験場所：建築研究所実大火災実験棟

・実験実施日時：2012 年 10 月 15 日（月）

14:30～16:00

・気象状況（14:30 実験棟内で計測）：

晴れ、気温 21.6°C(294.6 K)、湿度 60%

・バーナー：15cm 角バーナー（火源面は床面から 0.25m）

・バーナー発熱速度：LPG を燃料に 16.6kW（10L/min）

・ガラス：フロートガラス 980mm×980mm×厚 3mm

・ガラスへの入射角度：以下のように、0 度（正対）から徐々に角度を変え、75 度で折り返してまた 0 度（正対）に戻るようにガラスの角度を変化させた。なお、75 度を超える角度では計測機器がガラス枠と干渉し、計測できなかった。

ガラスなし→0 度（正対）→15 度→30 度→45 度→60 度→70 度→75 度→70 度→65 度→60 度→45 度→30 度→15 度→0 度

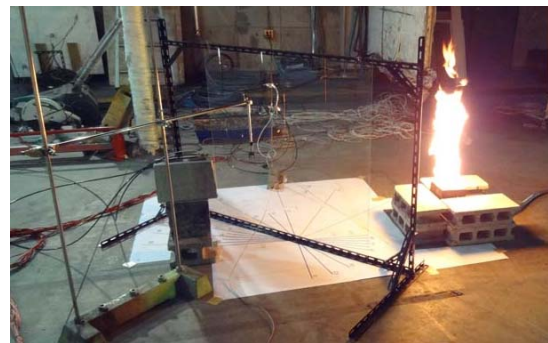


写真 1 実験状況

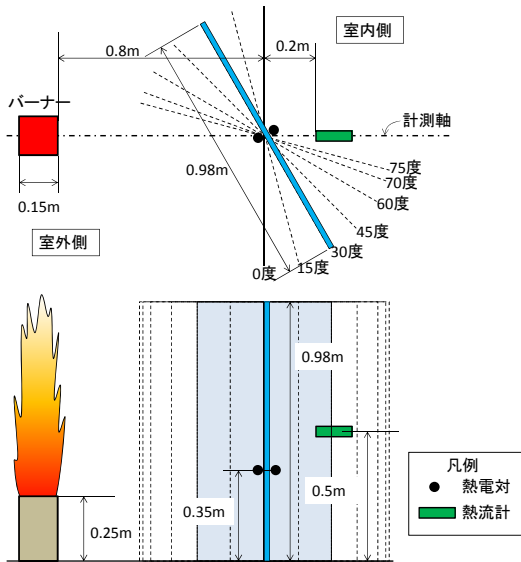


図4 実験配置図

ii)計測内容

- ・透過熱流束：米国メドサム社製熱流計 GTW-40-40-484 を用いて火源から距離 1.0m、床面から高さ 0.5m の位置で火源中心方向に向けて計測
- ・反射熱流束：透過側と同型の熱流計を用いてガラス面に映る火炎の像の中心からの距離 0.8m、床面から高さ 0.5m の位置で火炎の像の中心に向けて計測
- ・ガラス温度：ディスク熱電対（ガラス中央、床面から高さ 0.35m にガラスを両側から挟むように設置）
- ・各ケースの計測時間：3 分間（但し 75 度は 2 分 52 秒）とし、計測時間の平均値をもって計測値とした。

iii)実験結果及びモデル化

透過熱流束( $t \cdot R$ )を式 1 により求めると図 5 となる。

$$t \cdot R = I - f_g \sigma (T_g^4 - T_0^4) \quad \text{式 1}$$

$t$ :透過率

$R$ :ガラスなしの場合の熱流束計の計測値 (0.3435 kW/m<sup>2</sup>)

$I$ :熱流束計の計測値[kW/m<sup>2</sup>]

$f_g$ :ガラス面の形態係数(本検討では、1 とした。)

$\sigma$ :ステファンボルツマン定数(5.67×10<sup>-11</sup> kW/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

$T_g$ :ガラス室内側表面温度[K]

$T_0$ :周囲温度(気温 +273 = 294.6 K)

透過熱流束(1)は、ガラス角度を増加する方向で変化させる順番で計測、透過熱流束(2)は、ガラス角度を減少する方向で変化させる順番で計測した結果である。実線はこれらの平均値を示している。

式 2 の関数形を仮定して最小 2 乗法により

$n$  を求めると、 $n = 4.34$  となった。

$$t = t_{\max} \{1 - (\lambda/90)^n\} \quad \text{式 2}$$

$t_{\max}$ :透過率の最大値(0.435)

$\lambda$ :入射角度[度]

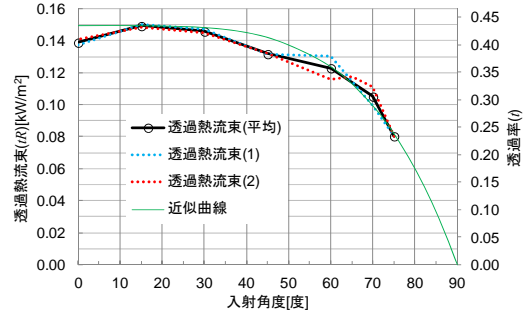


図5 入射角度に応じた放射熱流束と透過率

⑤開口部位置情報の不完全性を考慮した延焼モデル構築

上記の熱入射角度に応じた透過熱流束及び次項に示す開口部ランダム配置に関する理論的検討を踏まえ、開口部位置情報が不完全であることを前提とした隣棟間の熱移動モデルを構築した。具体的には、  
i)隣棟間で開口部間の熱移動を計算する際、開口部間の壁面に沿った距離が式3の $\bar{d}$ に満たない場合に、これが $\bar{d}$ となるよう割り増す。

ii)受熱側が開口部（ガラス）を経由して室内可燃物により延焼の判定をする際、受熱点から点放射源を見る方向と、受熱側ガラス面法線との角度 $\lambda$ を計算し、式2により透過率を補正する。

という手順を追加し、受熱点における熱流束を計算することとした。

これにより、開口部の位置情報が不完全であっても、すべての建物の壁面中央に一律に開口部が存在すると仮定した計算ではなく、一定の散らばりを前提とした計算が可能となる。

(2)効率的なデータ取得手法の提案

①開口部の対面性による延焼性状への影響

i)開口部ランダム配置の影響に関する理論的検討

壁面内に開口部が存在する位置は、一定ではなく、各建物ごとに当然に異なる。壁面内の水平位置がランダムであると仮定した場合に、互いに平行な対面壁面が水平方向にどの程度ずれるかの期待値は、図6において $x$ 及び $y$ が $-v$ から $+v$ の範囲で任意のランダム値をとるときの $d$ の期待値 $\bar{d}$ として求められ、これを解析的に求めると式3及び図7となる。図7は、壁面長を1としたとき、壁面長に対する開口部の幅が横軸であり、そのときの互



この開口部が正面からずれる距離の壁面長に対する比の期待値が縦軸で示されている。

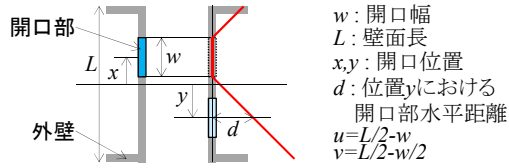


図 6 対面開口部の水平距離模式図

$$\bar{d} = (u + v)^3 / (12v^2) \quad \text{式 3}$$

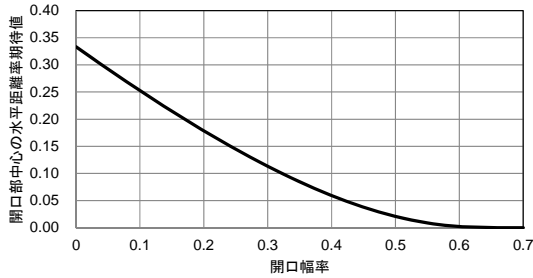


図 7 開口幅と対面開口部の相対位置期待値

例えば、壁面長が 10m、開口部の幅が 3m（開口幅率 0.3）のとき、相互の開口部が正面からずれる距離の期待値は、 $0.113 \times 10\text{m} = 1.13\text{m}$ であることを示している。

なお、ここで、開口部が正面にあるとは、一方の開口部の中心から法線方向に出る線分が、対面開口部と交わることをいう。

このように、開口幅率が 2/3 未満では、相対する開口部が必ずしも正面にはなく、壁面の中心に一律に開口部を想定した場合と比較して、開口部を経由する延焼が緩和されることが示唆される。

ii)シミュレーションによる開口部対面性の延焼性状への影響の確認

建物 1 辺の長さが 8m、高さ 6m、2 階建て防火木造住宅が、東西及び南北にそれぞれ 101 棟ずつ計 10201 棟並ぶ仮想的市街地を想定し、以下の計算を行い開口部対面性の延焼性状への影響を確認した。

建物配置ケース：図 8(a)~(i)に示すうちの 1 種のみが 10201 棟並ぶ市街地（「単純市街地 a」～「単純市街地 i」という。）

ランダム市街地：図 8(a)~(i)に示す 9 種の建物がランダムに並ぶ市街地（「ランダム市街地」という。）

なお、ランダム市街地の焼失棟数は中央の 51 棟×51 棟の 2601 棟の中から順に 1 棟ずつ出火点として選択した計算を 2601 回繰り返して行い、その平均値及び最大値を求めた。

その結果、開口部の配置条件により延焼性状が大きく異なることが示された（図 9、表 1）。

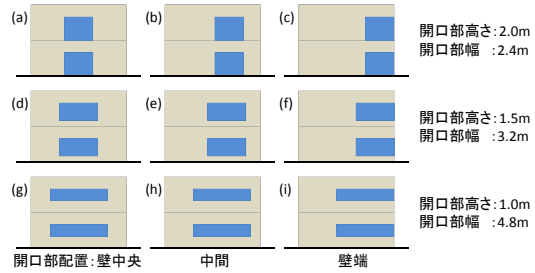


図 8 開口率 20%の開口部の配置（立面図）

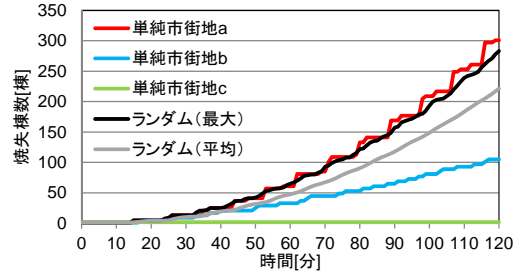


図 9 開口部の配置と焼失棟数

表 1 市街地種別ごとの 2 時間後焼失棟数

市街地 種別	単純市街地									ランダム	
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	最大	平均
焼失棟数	301	105	1	317	305	1	261	265	261	283	221.3

②ステレオ画像を用いた開口部の相対的配置状況取得手法の提案

一つの被写体を異なる 2 つの位置から撮影することにより、擬似的に立体画像を作成することができる。このとき、異なる 2 つの撮影位置の相対的關係が明らかであれば、両画像内に写る物体の空間的位置關係が計算可能である。

近年、立体撮影を目的として左右 2 つのレンズを持ち、1 台でステレオ撮影可能なデジタルカメラが一般に流通しており、これを用いれば、相互のレンズの位置關係が固定されていることから、高度な計測を行うことなく、簡易な空間計測が可能となる。

ステレオ画像を用いた開口部の相対的配置状況の取得可能性を検証するため以下の検討を行った。

i)実市街地における開口状況調査

ステレオ計測の実用性を検証するため、実市街地において開口状況調査を実施し、隣棟間の空間に着目してステレオ画像を取得した。調査の概要は以下の通り。

- ・調査日時：2012 年 5 月 15 日
- ・調査場所：神奈川県横浜市内
- ・使用機器：富士フイルム社製  
FinePix Real 3D W3

ii)計測実施

ここでは、ステレオ計測の実施状況の一例を示す。

写真2は、隣棟間空間を撮影したものである。計測対象開口部として①～③の3つの開口部とした。

計測にあたり、図10に示すプログラムを作成し、左右画像上の開口部四隅の位置をマウスクリック操作により取得することでカメラ位置からの相対位置を自動的に求め、開口部相互の相対位置も計算可能とした。

表2は計測結果である。個別開口部の中心座標、法線ベクトル及び面積、任意の2つの開口部についての開口部中心間距離及び開口部の相対角度の計算が有効に行われていることを示している。デジタルカメラで撮影するのみで、相対する開口部間の相対位置関係を取得可能であり、効率的にデータ収集を行うことが期待できる。



写真2 計測対象ステレオ画像

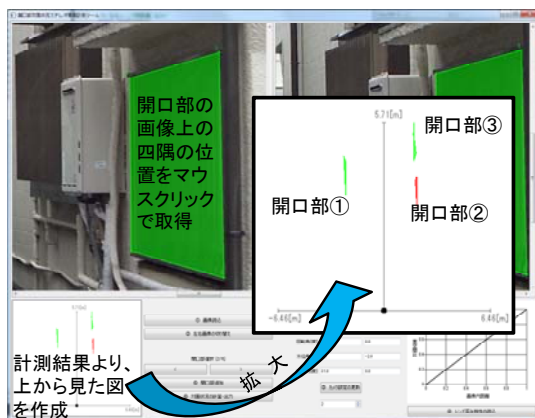


図10 ステレオ画像による計測状況

表2 ステレオ画像による計測結果

開口部番号	開口部中心座標[m]			開口部法線ベクトル			開口部面積 [m <sup>2</sup> ]
	鉛直上方向	水平方向 (奥方向)	水平方向 (右方向)	鉛直上方向	水平方向 (奥方向)	水平方向 (右方向)	
1	-0.08	3.98	-1.16	-0.03	0.01	1	1.69
2	-0.2	3.58	0.98	-0.1	0.02	-0.99	1.07
3	-0.09	5.07	0.92	-0.13	-0.02	-0.99	1.26

開口部番号	開口部番号	開口部間の距離[m]	開口部のなす角[度]
1	2	2.18	7.58
1	3	2.34	9.12
2	3	1.49	180

### (3)研究成果のまとめ

本課題では、市街地火災シミュレーション

を用いた精緻な予測を行う際の、①計算時間が長時間必要、②精緻な計算に耐える精度の高いデータの入手が困難、という大きな2つの課題に対応するため、計算時間を短縮するための新たな評価モデルの構築、並びに、データ精度と予測精度の関係分析及び予測精度を保つために必要なデータを効率よく取得する手法の提案を行うこととしている。

新たな評価モデルの構築に関しては、

- ・各受熱点から見た遮蔽物の存在位置を前計算する処理を実装
- ・複数CPUコアによる並列計算処理の実装
- ・これらによる計算効率及び計算精度の検証
- ・開口部熱透過性実験に基づく開口部経路の熱移動のモデル化
- ・開口部位置情報の不完全性を考慮した延焼モデル構築

を行い、これにより、計算速度の高速化及び、開口部位置情報が不完全である場合の計算精度の向上が図られた。

また、効率的なデータ取得手法の提案に関しては、

- ・開口部が壁面内にランダム的に配置される場合の延焼性状への影響に関する理論的検討
- ・開口部の位置を恣意的に変動させた仮想市街地でのシミュレーションにより、開口部の対面性による延焼性状への影響の確認
- ・開口部の設置状況に関する実態調査による実市街地における開口部位置に関するデータを収集
- ・ステレオ画像による隣棟間の相対的な開口部設置状況を簡易に取得する手法の提案を行い、これにより、取得が難しい開口部の位置情報の取得可能性が高まり、データ精度を高めることによりシミュレーション精度の向上が期待できる。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計1件)

岩見達也、鍵屋浩司、吉岡英樹：開口部の火災からの放射熱透過性に関する実験的検討、一般社団法人日本建築学会、2013、北海道大学

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

岩見 達也 (IWAMI TATSUYA)

国土技術政策総合研究所・総合技術政策研究センター・主任研究官

研究者番号：20370744