

## 第 4 章

### 密集市街地における街区性能水準の簡易予測・評価プログラムの開発

---

## 第4章 密集市街地における街区性能水準の簡易予測・評価プログラムの開発

本研究では、評価対象となる市街地データに対して、街区性能水準の簡易予測・評価を行うためのプログラムの作成を行った。作成にあたっては、国土技術政策総合研究所がすでに開発した「市街地火災総合対策支援ツール」を活用し、本研究で必要な機能を追加開発することとした。追加開発した機能は多岐にわたるが、本章ではその概要を報告する。

### 1. 開発の経緯

#### 1. 1. 密集市街地における街区性能水準の簡易予測・評価プログラムに必要な機能

図4-1は、密集市街地における街区性能水準の簡易予測・評価プログラム（以下、「本プログラム」という。）を利用して地域の理解が得られる協調的建て替えルールづくりを行う場合を想定したフローを示す。この中で本プログラムは、データ編集、シミュレーション実施、及びシミュレーション結果の整理（結果検討の材料提示）を支援することを想定しており、各段階に応じた機能が求められる。

本プログラムに求められる機能のうち、市街地の防火性能水準の評価に特化した機能を持つプログラムとして、国土技術政策総合研究所では「市街地火災総合対策支援ツール」を保有しており、本プログラムは市街地火災総合対策支援ツールに機能追加して開発することとした。

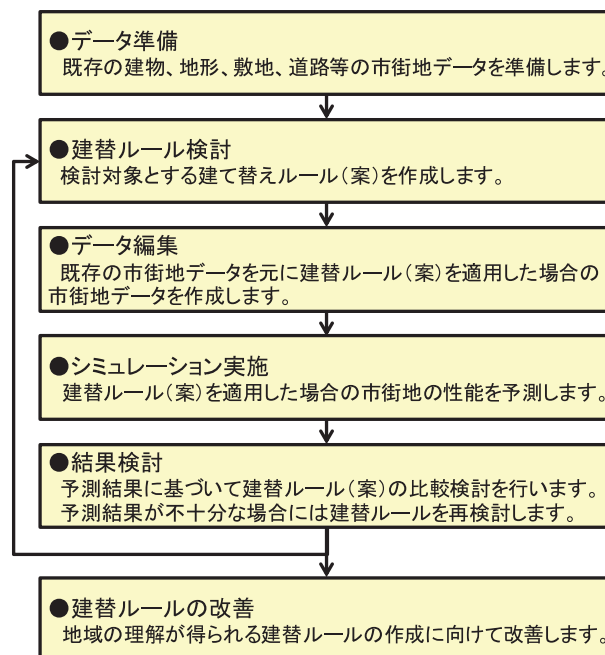


図4-1 協調的建て替えルールづくりのフロー

#### 1. 2. 市街地火災総合対策支援ツールの概要

市街地火災総合対策支援ツールは、国土交通省総合技術開発プロジェクト「高度な画像処理による減災を目指した国土の監視技術の開発」（平成19年度～平成21年度）において国土技術政策総合研究所が開発したプログラムであり、『火災発生時の自宅や自宅周辺への影響、自宅や市街地の改善によってどれだけ火災安全性が向上するのかを、住民が現実感を持って視覚的に体感出来るソフトウェア』を目指して開発された。さらに、プロジェクト終了後に火災からの住民の避難安全性を評価する機能が追加された。主な機能を以下に示す。

### 1. 2. 1 高度な市街地火災シミュレーション

上層階セットバック等、複雑な形状の建物の防火性能水準の評価や、内装、床、外壁、内壁、屋根等の部材に応じたキメの細かな防火性能水準の評価を可能とする高度な市街地火災シミュレーションの条件設定及び実行・終了を行う。

### 1. 2. 2 市街地火災避難シミュレーション

上記、高度な市街地火災シミュレーションと連動して、市街地内の滞在者が火災から安全に避難できるかどうかを評価可能な避難シミュレーションを実行する。

### 1. 2. 3 市街地火災映像化

住民が現状市街地の危険性を実感し、自宅や市街地を改善した際の危険性の低減を実感できるよう、シミュレーション結果をリアリティのある映像として表示を行う。

### 1. 2. 4 市街地データ・建築物データの編集・管理

シミュレーションの実行に必要な市街地データ・建築物データについて、市販の GIS ソフト等で扱うことのできるデータ形式によるインポート・エクスポート、編集、保存を行う。

## 1. 3 本研究での機能拡張の方針

市街地火災総合対策支援ツールは市街地データのインポート、建築物データの編集、壁面後退等の基礎的な市街地編集機能と出火点を選択して市街地火災シミュレーションプログラム及び市街地火災避難シミュレーションプログラムを実行、表示する機能が備わっている。本研究では、防火性能水準及び避難性能水準以外にも、採光性能水準、日影状況、換気性能水準、通風性能水準の各要素に関する評価を行う機能が必要となるとともに、様々な協調的建て替えルールを検討し、ルールに基づいて市街地データの作成、シミュレーションの実行、ルールの違いによる性能水準の比較等が容易に行えることが必要となる。また、防火性能水準及び避難性能水準に関して、既存の市街地火災シミュレーション及び市街地火災避難シミュレーションの機能を活用して得られる計算結果から街区の性能水準を計算する必要がある。

そのため、以下の項目について機能拡張を行うこととした。

- 1) 市街地データのインポートや協調的建て替えルール適用市街地データの自動生成等、データ作成・編集のための市街地データ管理機能の拡張
- 2) 防火性能水準、避難性能水準、採光性能水準、日影状況、換気性能水準、通風性能水準の各要素に関する評価プログラムの組み込み
- 3) シミュレーション結果の検索・比較等の計算結果管理機能の拡張
- 4) 上記 1) ～ 3) に付随する表示や操作関連機能の拡張

## 2. 密集市街地における街区性能水準の簡易予測・評価プログラムの概要

本プログラムの実行時の画面の例を図 4-2 に、各機能の構成を図 4-3 に示す。

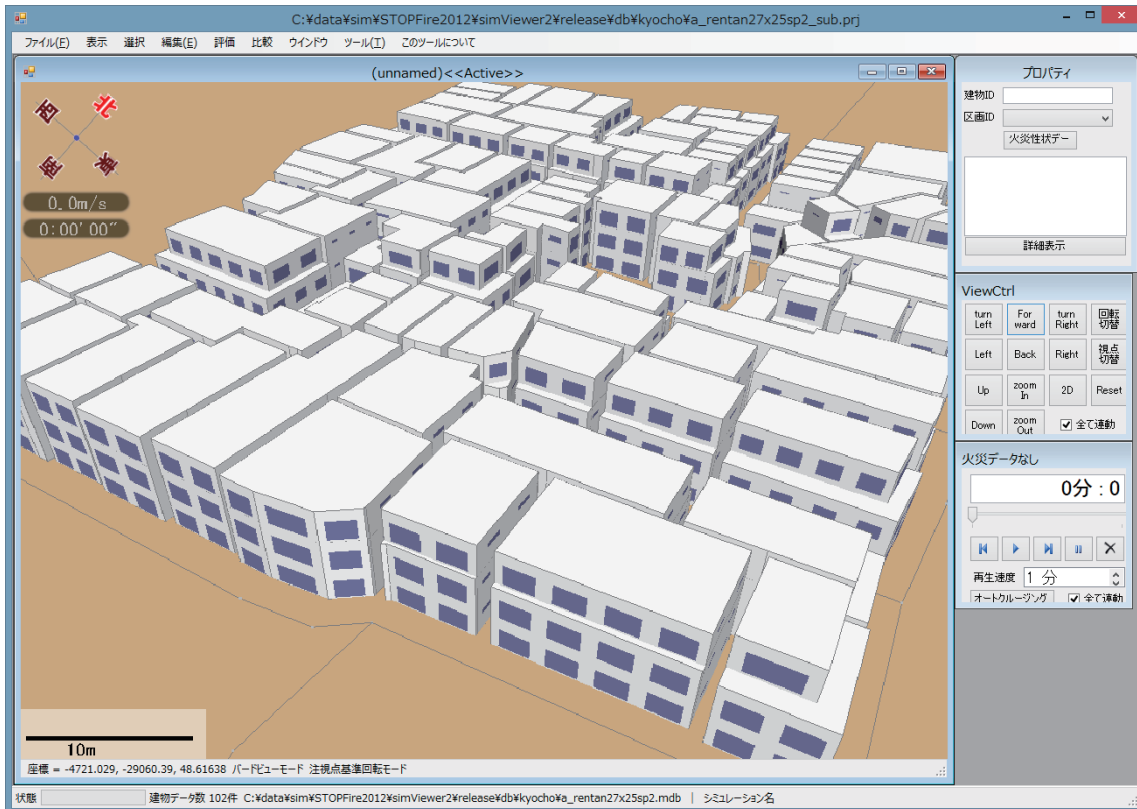


図 4-2 本プログラムの実行画面の例

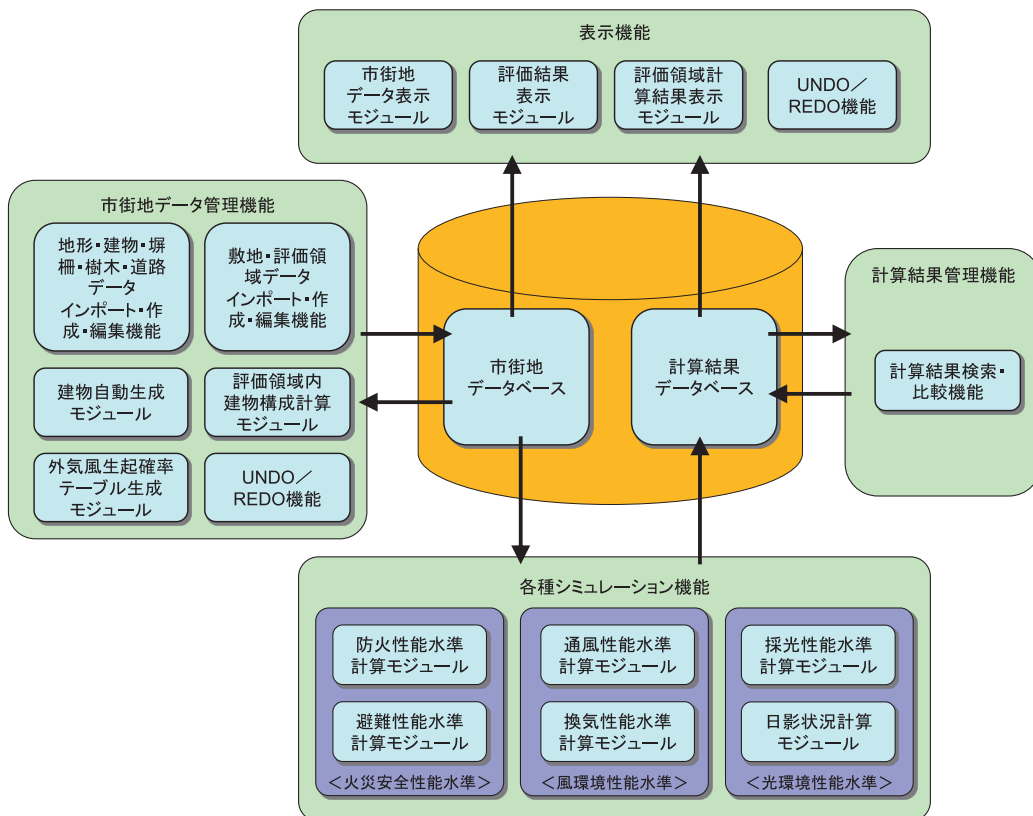


図 4-3 本プログラムの各機能の構成

### 3. 市街地データ管理機能の開発

#### 3. 1 市街地データのインポート・エクスポート・作成・編集機能

##### 3. 1. 1 街区データの種類

街区データは以下の項目により構成する。

- ・地形

データが無ければ標高 0m の平面と見なして計算される。

- ・建物（必須）

建物の各階の形状及び高さを示す多角柱の集合として表現される。いずれのシミュレーションでも計算の基礎データとして必要となる。

- ・塀柵・樹木

建物と同様に多角柱の集合として表現される。火災安全性計算の際の延焼遮蔽物、光環境計算の際の光の遮蔽物として計算に用いられる。データが無ければ遮蔽物が無い状態での計算結果となる。

- ・敷地

標高情報を持つ多角形の集合として表現される。建物データを編集する際に、敷地境界線を基準としたセットバック処理（後述）等の基準となる。

- ・道路ネットワーク（ノード及びリンク）

交差点を示すノード及び交差点間の経路を示すリンクにより表現される。建物データを編集する際に、道路線を基準としたセットバック処理（後述）や道路斜線処理（後述）等の基準となる。避難安全性を検討する際に必要となる避難経路データ。

- ・評価領域

多角形の集合として表現される。建物単位で得られるシミュレーション結果を集計する際の集計単位となる領域データ。

- ・その他

空中写真等の画像：データがあれば地形に画像テクスチャとして貼り付けられる。

行政界等の領域データ：データがあれば領域境界線が地図上に表示される。

##### 3. 1. 2 市街地データのインポート・エクスポート

本プログラムにおいてインポート・エクスポート可能なデータ形式を表 4-1 に示す。

建物データ、塀柵・樹木データ、敷地データ、道路ネットワークデータ、評価領域データについては、それぞれ形状情報及び属性情報を新規作成、編集、保存する機能が備わっている。

表 4-1 市街地データのインポート・エクスポート対応形式

|             | インポート可能形式                                     |        | エクスポート可否 | 備考                           |
|-------------|-----------------------------------------------|--------|----------|------------------------------|
|             | 形状情報                                          | 属性情報   |          |                              |
| 地形データ       | 基盤地図情報 (GML)<br>10m メッシュ標高                    | なし     | ×        |                              |
| 建物データ       | シェープ形式                                        | CSV 形式 | ○        | 属性情報はシェープの属性ファイルからユーザーが作成する。 |
|             | 基盤地図情報 (GML)<br>建築物の外周線                       | CSV 形式 | ×        | 属性情報はユーザーが作成する。              |
|             | CSV 形式                                        |        | ○        | 形状と属性を含む独自形式                 |
|             | DXF 形式                                        |        | ○        | 形状と属性を含む独自形式                 |
| 塀柵・樹木データ    | シェープ形式                                        | CSV 形式 | ○        | 属性情報はシェープの属性ファイルからユーザーが作成する。 |
|             | CSV 形式                                        |        | ○        | 形状と属性を含む独自形式                 |
| 敷地データ       | シェープ形式                                        | CSV 形式 | ×        | 属性情報はシェープの属性ファイルからユーザーが作成する。 |
|             | CSV 形式                                        |        | ○        | 形状と属性を含む独自形式                 |
| 道路ネットワークデータ | CSV 形式                                        |        | ×        | 形状と属性を含む独自形式                 |
| 評価領域データ     | シェープ形式                                        | なし     | ○        |                              |
|             | CSV 形式                                        |        | ○        | 形状と属性を含む独自形式                 |
| 空中写真等       | ワールドファイル付き<br>JPEG 形式                         | なし     | ×        |                              |
| 行政界等        | 基盤地図情報 (GML)<br>行政区画の境界線及び代表点又は市町村の町若しくは字の境界線 | なし     | ×        |                              |

### 3. 2 自動生成機能

#### 3. 2. 1 壁面セットバック、斜線カット、構造変更等適用建物の生成

建物データの自動生成機能として、以下の 3 種の機能を有している。

- 1) 既存の建物データに対して、建物の壁面を敷地境界線から一定距離以内の部分を削除して、後退した建物データを自動生成する機能 (図 4-4)。
- 2) 道路や敷地境界線を基準として、一定比率の斜線を仮想的に作成し、斜線に掛かる部分を削除して、階毎に壁面の後退距離が異なる階段状の建物データを自動生成する機能 (図 4-5)。なお、建物データは多角柱の集合として表現されることから、壁面は常に鉛直面、屋根面は水平面となり、道路斜線、隣地斜線に応じた傾斜壁面や傾斜屋根は生成されない。
- 3) 防火上の構造種別や用途種別を選択すると、選択に応じて壁面、床、屋根等の各構造部材の防火性能水準等を自動的に割り当てた建物データを自動生成する機能。

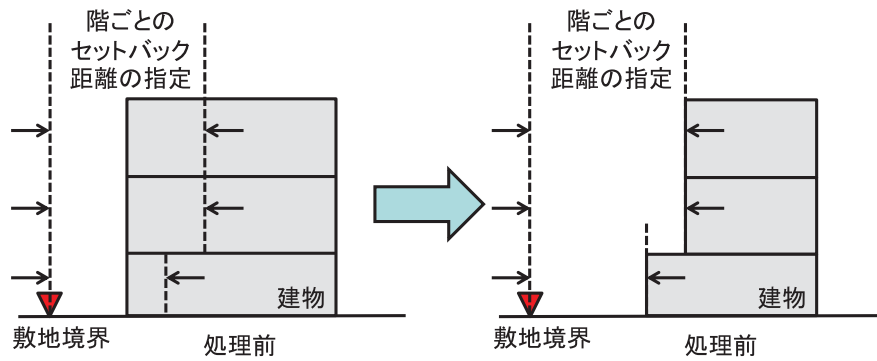


図 4-4 壁面セットバック機能

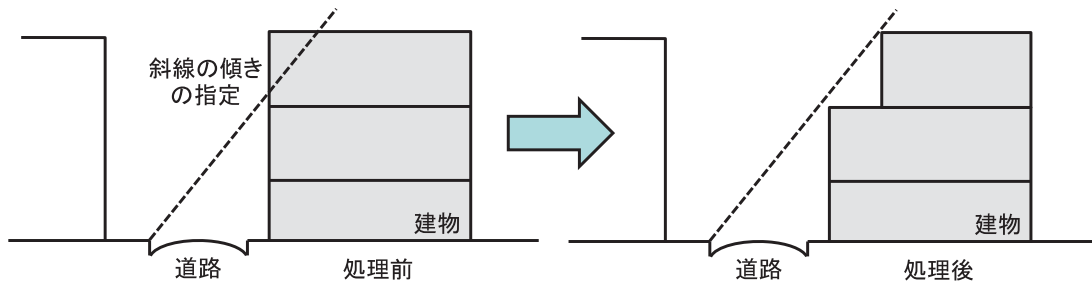


図 4-5 斜線カット機能

### 3. 2. 2 建築ルールに基づく地区内建物の自動生成

斜線制限や壁面後退距離等の建築ルールを設定し、選択した地区内のすべての建物にそのルールを適用して建物を建て替えた場合の建物データを自動的に生成することができる。

この機能を用いる際には敷地データと道路データが必要となる。これらのデータがあれば、図 4-6 のフローに従って処理を行い自動的に建物データが生成される。自動生成に必要なパラメータは図 4-7 に示す設定フォームでユーザーが設定する。

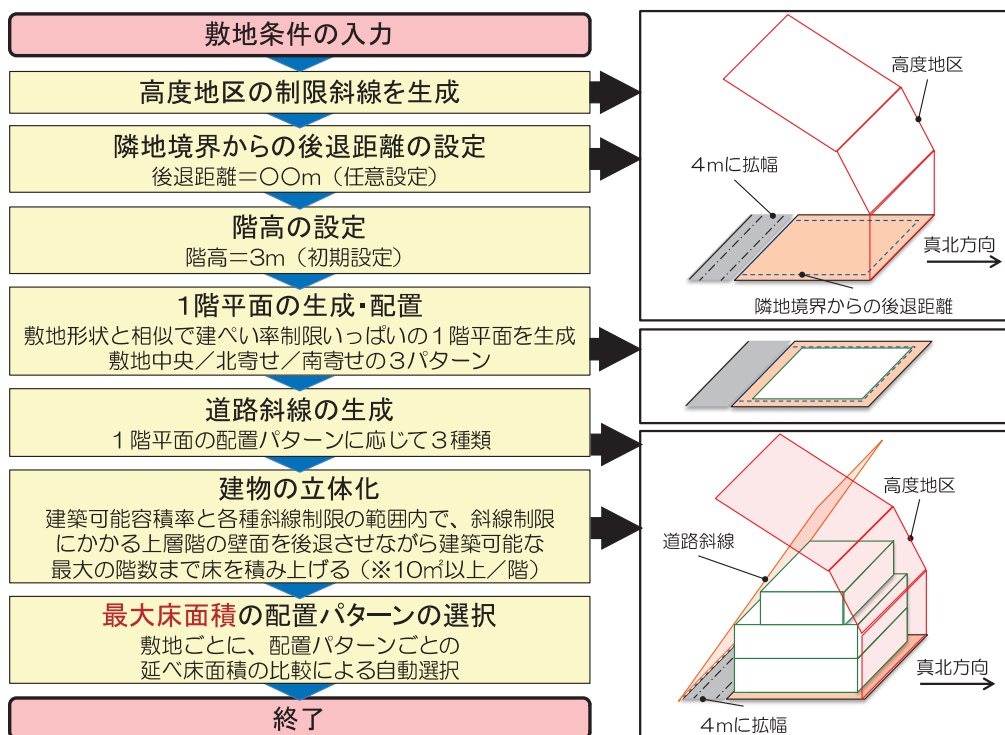


図 4-6 建築ルールに基づく地区内建物の自動生成フロー

**建物自動生成**

斜線制限:  道路斜線  
 立ち上がり高さ(m): 0.0 勾配(%): 1.25 有効距離(m): 25.0

北側斜線(1段)  
 立ち上がり高さ(m): 5.0 勾配(%): 1.25 有効距離(m): 8.0

北側斜線(2段)  
 立ち上がり高さ(m): 15.0 勾配(%): 0.60 有効距離(m): 8.0

隣地斜線  
 立ち上がり高さ(m): 20.0 勾配(%): 1.25 有効距離(m): 25.0

敷地境界線からの後退距離(m):

道路境界線 4.0

隣地境界線 4.0

建物の階高(m): 3.0 建ぺい率(%): 60

容積率(%): 200

1階平面の形状: 敷地形状と相似で建ぺい率いっぱい

建物の位置

敷地中央  北寄せ  南寄せ

高さの最高限度(m): 9.0

最上階最小床面積(m<sup>2</sup>): 0.0

最上階最小短辺長さ(m): 0.0

実行 キャンセル

図 4-7 地区内建物の自動生成の設定フォーム



#### 4. 街区性能水準の評価機能の開発

第3章に示した密集市街地の街区性能水準の計算を行うための各要素性能水準の評価機能を作成した。各要素性能水準の評価機能は、メニューから「街区性能水準評価」を選択して表示される図4-8に示すフォームより呼び出すことができる。

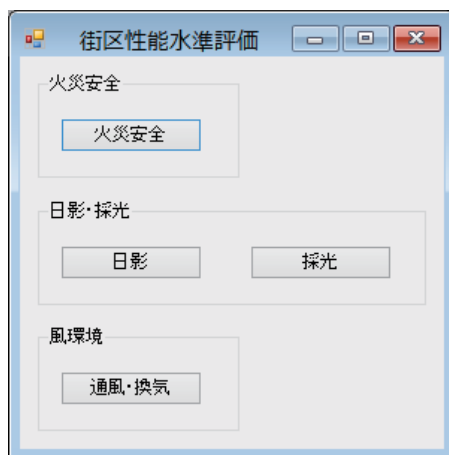


図 4-8 街区性能水準評価項目選択フォーム

以下、4.1節～4.6節に要素毎に機能の概要を示す。また、4.7節では、街区の面積や建物棟数・床面積などの基礎データを集計する機能の概要を示す。

#### 4. 1 防火性能水準評価機能

街区性能水準評価項目選択フォームにおいて「火災安全」を選択すると、図 4-9 に示すフォームが表示される。このフォームは避難性能水準評価機能と共通となっているが、「防火・避難安全性能水準評価」において「防火性能水準評価」を選択すると、防火性能水準評価のみが行われ、避難性能水準評価に関連する項目は設定できないようになる。各項目を設定し、「開始」ボタンをクリックすることで既開発の市街地火災シミュレーションプログラムを利用してシミュレーションが開始される。

街区性能水準の評価を行う場合には、単一回のシミュレーション結果ではなく、様々な条件（出火場所や気象条件）を想定し、その発生頻度と被害量を組み合わせて評価を行う必要がある。

「連続実行あり」を選択すると、複数の条件でのシミュレーションを連続自動実行し、その計算結果を集計することで防火性能水準を評価することが可能となる。「連続実行なし」を選択することにより、単一回のシミュレーションを実行することができる。

以下では、市街地火災シミュレーションプログラムの概要及びその計算結果の集計方法について示す。

火災安全性評価設定

共通

市街地名: original

計算条件名: [ ] 設定

防火・避難性能水準評価:  防火性能水準評価  
 避難性能水準評価(避難遁予時間)  
 避難性能水準評価(避難成功率)

連続実行:  連続実行なし  連続実行あり

平常時・地震時フラグ:  平常時

評価領域群名称: [ ] 検索 作成

評価領域名: [ ]

計算領域設定フラグ: 全データ

計算時間(分): 120

火災

出火建物設定フラグ: 全建物出火 直接指定

気象条件設定フラグ: 全風向風速処理 直接指定

風向クラス数: 4

風速クラス数: 3

風速ステップ(m): 4.0

気象参照日時: 開始: 2016/06/24 10:12:01 終了: 2016/06/24 10:12:01 詳細...

避難

エージェント配置フラグ: 評価領域(群)選択

ネットワーク領域設定フラグ: [ ]

被害計算フラグ:  被害なし

被害回数: 1

避難者出発時間間隔(分): 5

避難者最終出発時刻(分): 60

計算条件読み込み 開始 キャンセル

図 4-9 火災安全性能水準評価設定フォーム（防火性能水準評価選択時）

##### 4. 1. 1 市街地火災シミュレーションの概要

防火性能水準の評価を行う際に、既開発の市街地火災シミュレーションプログラムを利用している。市街地火災シミュレーションプログラムは、建物や塀柵等の市街地データや風向・風速、出火点の位置などの計算条件を設定すると、周辺への放熱状況を計算し、市街地内の各建物への

着火時刻等の延焼性状が得られるプログラムである。市街地火災シミュレーションプログラムにおける計算内容は「国土交通省総合技術開発プロジェクト高度な画像処理による減災を目指した国土の監視技術の開発総合報告書」（平成22年12月、国土地理院技術資料 C・1-No.400）に記載されている。以下に抜粋して引用掲載する。

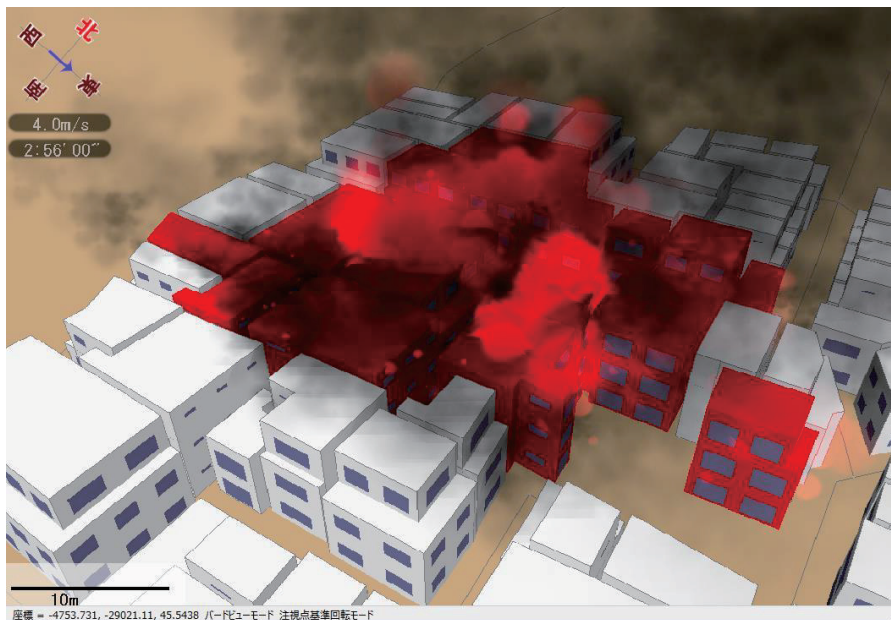


図 4-10 市街地火災シミュレーションプログラムの実行画面の例

## 2-1. 高度な市街地火災シミュレーション技術

上層階セットバック等、複雑な形状の建物の防火性能水準評価や、内装、床、外壁、内壁、屋根等の部材に応じたキメの細かな防火性能水準評価を実施可能な高度な市街地火災シミュレーション技術の開発を行った。

なお、市街地火災モデルは、単体建築物の火災進行モデルと建物間の延焼モデルに分けて検討を行っている。以下では、それぞれについて概要を示す。

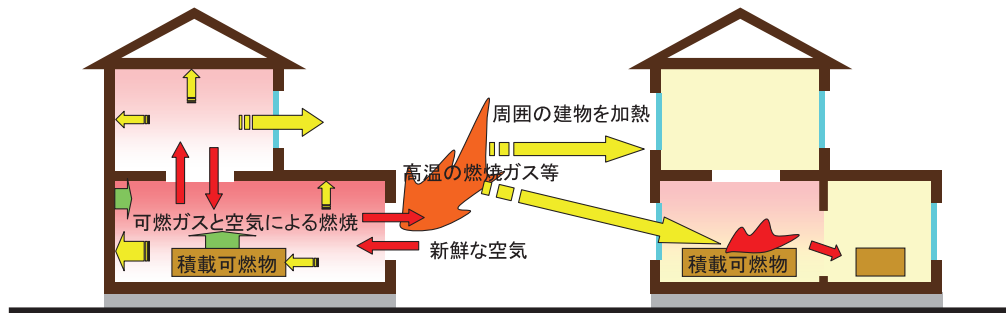


図 2-1-1 市街地火災の評価モデルの概要

### 2-1-1. 単体建築物の火災進行モデル

建築物は壁、床・天井、屋根などの面材（以下、「面材」という。）と、家具やその他の物品などの積載可燃物の集合で構成されるものとし、面材で囲まれた空間（以下、「ゾーン」という。）ごとに、内部ガスの温度や化学種濃度を逐次計算して火災性状を求める。

#### (1) 面材及び積載可燃物の表面積

面材及び構成材料（以下、「面材等」という。）は、複数の構成材料を組み合わせで構成される。面材及び構成材料の主な属性は表 2-1-1 の通り。

面材等の表面積は、初期には面材等の見つけ面積  $A_{m0}$  であるが、面材等の燃抜に伴って減少する。

$$A_m = A_{m0} - A_{bm} \quad (\text{式 1})$$

面材等の燃え抜けは、面材等が面する室内の温度時間面積により求める。屋外に面している面材は、外部からの受熱流束を雰囲気温度に換算して室内同様に取り扱う。

式 2 は面材等の燃え抜け面積を求める式である。 $B^*$  は、標準火災温度曲線による  $t^*$  経過後の温度時間面積である。ここで、 $B_s$  は、式 3 の  $t^* = t_{bs}$  の場合の  $B^*$  であり、 $B_e$  は、式 3 の  $t^* = t_{be}$  の場合の  $B^*$  である。

$$A_{b,m} = \left\{ 1 - \frac{\int_0^{t^*} (T_m(\tau) - T_\infty) d\tau - B_s}{B_e - B_s} \right\} A_{m0} \quad (\text{式 2})$$

$$B^* = \int_0^{t^*} \{345 \log_{10}(8\tau + 1)\} d\tau \quad (\text{式 3})$$

積載可燃物表面積は式 4 による。

$$A_f = \begin{cases} A_{f,0} & (W_f/W_{f,0} \geq 0.2) \\ 5A_{f,0} \times W_f/W_{f,0} & (W_f/W_{f,0} < 0.2) \end{cases} \quad (\text{式 4})$$

$$A_{f,0} = 0.61(W_{f,0}/A_{floor})^{1/3} A_{floor}$$

なお、面材等や積載可燃物の可燃物重量は熱分解に伴って減少する。 $W_m$ 、 $W_f$ が 0 となった時点で当該面材等の燃焼は終了する。

$$W_m = W_{m0} - \int_0^t \dot{m}_m dt \quad (式 5)$$

$$W_f = W_{f0} - \int_0^t \dot{m}_f dt \quad (式 6)$$

表 2-1-1 面材の主な属性

|            |                   |
|------------|-------------------|
| 面材全体としての属性 |                   |
|            | 燃抜開始時間 $[t_{bs}]$ |
|            | 燃抜完了時間 $[t_{bc}]$ |
|            | 酸素消費係数 $[\phi_b]$ |
| 個別の構成材料の属性 |                   |
|            | 燃抜開始時間 $[t_{ss}]$ |
|            | 燃抜完了時間 $[t_{ss}]$ |
|            | 熱伝導率 $[k]$        |
|            | 密度 $[\rho]$       |
|            | 比熱 $[c]$          |
|            | 厚さ $[l]$          |
|            | 木材重量 $[W_{m0}]$   |
|            | 出火温度 $[T_{ig}]$   |
|            | 酸素消費係数 $[\phi_s]$ |

## (2) 熱分解速度及び発熱速度

積載可燃物、面材等の熱分解の起こり易さは、木材のそれとの比（酸素消費係数）で表す。

初期には、 $t^2$ に比例する発熱源となることを想定し、可燃物ごとに式 7 の通り熱分解されるものとする<sup>6)7)</sup>。なお、面材等の火災成長率は、個別の構成材料の露出面積に応じて加重平均をとる。

$$\dot{m}_f = \alpha_f t^2 / HR_f$$

$$\dot{m}_{m,j} = \alpha_{m,j} t^2 / HR_f \quad (式 7)$$

$$\alpha_f = \begin{cases} 0.0125 & (w_f HR_f \leq 170) \\ 2.6 \times 10^{-6} (w_f \Delta HR_f)^{5/3} & (w_f HR_f > 170) \end{cases}$$

$$\alpha_m = \sum_j \alpha_{m,j}$$

$$\alpha_{m,j} = 0.35 \phi_{s,j}^2 A_{m,j,s} / \sum_j A_{m,j}$$

これより、初期の燃焼部分の表面積は式 8 となる。

$$A_{burn,f} = \dot{m}_f / \dot{m}_b''$$

$$A_{burnm,j} = \dot{m}_{m,j} / (\phi_{s,j} \dot{m}_b'') \quad (式 8)$$

なお、燃焼部分の表面積は  $A_m$ 、 $A_f$  を超えないものとした。

熱分解速度は式 9 とした。

$$\dot{m}_b^n = \min \left[ \begin{array}{l} k \cdot \dot{m}_{in,eff} / (A_{burn,f} + \sum_j A_{burn,m,j}), \\ 0.007, \\ 0.003 + 0.12\chi \exp(-11\chi) \end{array} \right] \quad (式 9)$$

$$\chi = A\sqrt{H_{eff}} / (A_{burn,f} + \sum_j A_{burn,m,j})$$

$$\dot{m}_{in,eff} = (\sum_j \dot{m}_{ji} Y_{O,i} + \rho_i V_i Y_{O,i} / \Delta t) / Y_{O,\infty}$$

$$A\sqrt{H_{eff}} = \frac{\sum_j \dot{m}_{in} (T_j - T)}{T_\infty - T} \bigg/ \frac{2}{3} \alpha \rho_\infty \sqrt{\frac{2g(1-T_\infty/T)}{[1 + \{(1+k)^2 T/T_\infty\}^{1/3}]^3}} \quad (式 10)$$

式 7 は、元々単一開口区画に関する実験式であるが、開口部の条件が複雑な条件に適用するため、流入ガスのエンタルピー量が等しくなるよう換算した値  $A\sqrt{H_{eff}}$  を導入して近似的に求められるよう拡張したものである。

$k$  は、外気に面した単一開口の場合に式 9 における  $\dot{m}_b^n = 0.1\chi$  となるように、 $k \cdot \dot{m}_{in,eff} = 0.1A\sqrt{H_{eff}}$  を変形して得られる、式 11 を満たすように求めた。

$$k \cdot \dot{m}_{in} = 0.1 \dot{m}_{in} \bigg/ \frac{2}{3} \alpha \rho_\infty \sqrt{\frac{2g(1-T_\infty/T)}{[1 + \{(1+k)^2 T/T_\infty\}^{1/3}]^3}} \quad (式 11)$$

なお、 $k$  は温度依存性があるが、温度上昇が 200K 以上であれば、ほぼ一定値をとることから、計算上は、 $k=0.22$  (定数) として扱っている。

### (3) 水分蒸発

可燃性材料の場合は、可燃物の熱分解に比例して水分が蒸発するものとし、式 12 とした。

$$\dot{m}_{H_2O,c} = \frac{r_{H_2O}}{1-r_{H_2O}} \dot{m}_b^n \cdot A_m \quad (式 12)$$

不燃性材料の場合は、温度時間面積に応じて水分が蒸発するものとした。材料の含有する全ての水分が、燃抜開始時間  $t_s$  と燃抜完了時間  $t_e$  のちょうど中央の時間までに蒸発するとして、式 13 とした。

$$\dot{m}_{H_2O,u} = \frac{w \cdot r_{H_2O}}{\int_0^{t_s+t_e} (T_\tau - T_\infty) d\tau} (T_i - T_\infty) \cdot A_{m0} \quad (式 13)$$

### (4) 室内温度・化学種濃度

室内温度及び化学種濃度は式 14～17 に示す保存式及び状態式を解いて求める。

$$\frac{d}{dt} (\rho_i V_i) = \sum_j (\dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij}) + \dot{m}_b \quad (式 14)$$

$$\frac{d}{dt} (c_p \rho_i T V_i) = \dot{Q}_{b,i} - \dot{Q}_{f,i} - \sum_j (\dot{Q}_{d,ji} + \dot{Q}_{m,ji}) + \sum_j c_p (\dot{m}_{ji} T_j - \dot{m}_{ij} T_i) + c_p \dot{m}_b T_b \quad (式 15)$$

$$\frac{d}{dt} (\rho_i V_i Y_{X,i}) = \sum_j (\dot{m}_{ji} Y_{X,j} - \dot{m}_{ij} Y_{X,i}) + \dot{\Gamma}_{X,i} \quad (式 16)$$

$$\rho_i T_i = \rho_\infty T_\infty \quad (式 17)$$

室内に流入流出する熱量及びガス量は式 18～21 による。

$$\dot{Q}_{b,i} = \min[HR_o(\sum_j \dot{m}_{ji} Y_{O,j} + \rho_i V_i Y_{O,i} / \Delta t), HR_f(\dot{m}_b + \sum_j \dot{m}_{ji} Y_{F,j} + \rho_i V_i Y_{F,i} / \Delta t) - \dot{m}_b L_b] \quad (\text{式 18})$$

$$\dot{Q}_{f,i} = \{\epsilon_f \sigma (T_i^4 - T_f^4) + h(T_i - T_f)\} A_f \quad (\text{式 19})$$

$$\dot{Q}_{d,ji} = \{\sigma (T_i^4 - T_j^4) + \dot{q}_{OUT}''\} A_{d,ji} \quad (\text{式 20})$$

$$\dot{Q}_{m,ji} = \{\epsilon_m \sigma (T_i^4 - T_{m,ji}^4) + h(T_i - T_{m,ji})\} A_{m,ji} \quad (\text{式 21})$$

各開口部の流入流出ガス量  $\dot{m}_{ji}, \dot{m}_{ij}$  の算出式は次項に示す。

### (5) 流入流出ガス量

#### a) 圧力差と中性帯高さ

図 2-1-2 は、外気風による圧力を考慮した区画内外の圧力分布を図示したものである。中性帯高さ ( $z = Z_n$ ) では、式 22 が成り立つ。

$$P_j + P_w - \rho_j g Z_n = P_i - \rho_i g Z_n \quad (\text{式 22})$$

$\Delta P = P_j - P_i$  とすると、中性帯高さ  $Z_n$  は式 23 として得られる。

$$Z_n = \frac{\Delta P + P_w}{(\rho_j - \rho_i)g} \quad (\text{式 23})$$

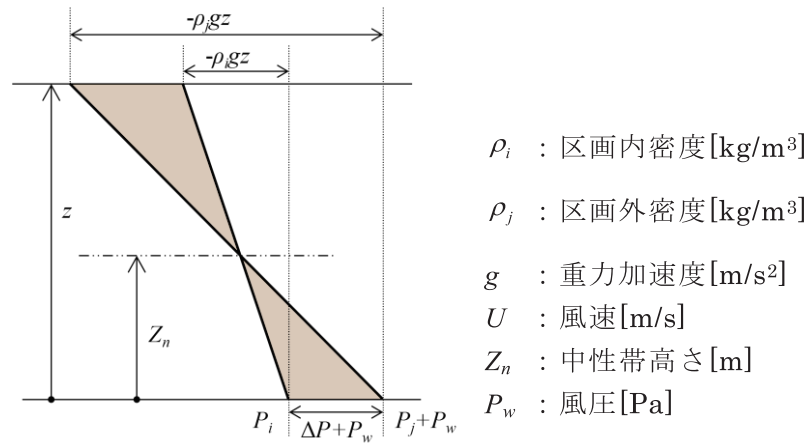


図 2-1-2 区画内外の圧力差

ここで、 $\Delta P$  は未知であるが、式 23 および次の b) から  $\Delta P$  に依存して各開口部に関する  $\dot{m}_{ji}$  および  $\dot{m}_{ij}$  を求めることができ、ゾーン内の質量保存則式 15 の左辺を 0 と置き、左右の辺を入れ替えた式 24 を各ゾーンが満足すると仮定して連立一次方程式を解けば  $\Delta P$  を求めることができる。

$$\dot{Q}_{b,i} - \dot{Q}_{f,i} - \sum_j (\dot{Q}_{d,ji} + \dot{Q}_{m,ji}) + \sum_j c_p (\dot{m}_{ji} T_j - \dot{m}_{ij} T_i) + c_p \dot{m}_b T_b = 0 \quad (\text{式 24})$$

なお、風圧  $P_w$  は式 25 として得られる。 $c$  は風圧係数 [-] であり、同一壁面上でも位置によって異なるが、風向と壁面の成す角  $\theta$  を用いて、式 26 とした。

$$P_w = c \frac{1}{2} \rho_\infty U^2 \quad (\text{式 25})$$

$$c = \begin{cases} 0.1 & (-1 < \cos \theta < -0.9) \\ -\frac{0.15}{0.9} \cos \theta - 0.05 & (-0.9 \leq \cos \theta \leq 0) \\ -0.05 & (0 < \cos \theta < 1) \end{cases} \quad (\text{式 26})$$

#### b) 個別開口部の開口流量

開口部の上下端高さ、中性帯高さ等の関係から、個別開口部の流入・流出量が式 27～30 の通り得られる。ただし、 $\rho_j - \rho_i < 0$  の場合は、 $i$  と  $j$  を入れ替えて適用する。

##### ・ 垂直開口流量

$$\begin{cases} \dot{m}_{ij} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_i(\rho_j - \rho_i)} \left\{ (H_u - Z_n)^{\frac{3}{2}} - (H_l - Z_n)^{\frac{3}{2}} \right\} & (Z_n \leq H_l) \\ \dot{m}_{ji} = 0 \end{cases} \quad (\text{式 27})$$

$$\begin{cases} \dot{m}_{ij} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_i(\rho_j - \rho_i)} (H_u - Z_n)^{\frac{3}{2}} & (H_l < Z_n < H_u) \\ \dot{m}_{ji} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_j(\rho_j - \rho_i)} (Z_n - H_l)^{\frac{3}{2}} \end{cases} \quad (\text{式 28})$$

$$\begin{cases} \dot{m}_{ij} = 0 \\ \dot{m}_{ji} = \frac{2}{3} \alpha B \sqrt{2g\rho_j(\rho_j - \rho_i)} \left\{ (Z_n - H_l)^{\frac{3}{2}} - (Z_n - H_u)^{\frac{3}{2}} \right\} & (H_u \leq Z_n) \end{cases} \quad (\text{式 29})$$

##### ・ 水平開口流量

$$\begin{cases} \dot{m}_{ij} = \alpha A_{floor} \sqrt{2\rho_i \{ -(\Delta P + P_w) + gH_c(\rho_j - \rho_i) \}} \\ \dot{m}_{ji} = 0 \end{cases} \quad (\text{式 30})$$

$\alpha$  : 流量係数 (= 0.7) [-]、 $H_u$  : 開口部上端高さ [m]、 $H_l$  : 開口部下端高さ [m]、 $B$  : 開口幅 [m]

#### (6) 面材・積載可燃物の表面温度

面材・積載可燃物の表面温度  $T_f, T_{m,ji}$  は式 21 より得られるゾーン内ガスからの流入熱流束を境界条件とする差分法により求める<sup>8)</sup>。

#### (7) 室間の延焼

室間の延焼は開口部（面材の燃え抜け部を含む）を通して発生する。開口部を火災室温の輻射面として、隣室の可燃物を加熱し、可燃物表面が 593K 以上となった時点で当該隣室が出火するものとした。なお、可燃物表面温度の計算には、次項の(3)②の着火判定点の温度上昇計算式を用いる。

### 2-1-2. 建物間の延焼モデル

#### (1) 放射熱による熱移動

放射源としては、開口部面及び噴出火炎を対象とする。

##### ① 噴出火炎の方向

噴出火炎の方向は、図 2-1-3 の通り座標軸をとり、水平方向の  $x$  軸からの角度を  $\alpha$ 、水平面からの仰角を  $\phi$  とすると、式 31 により表すことが出来る。

$$(f_x, f_y, f_z) = (\cos \alpha \cdot \cos \phi, \sin \alpha \cdot \cos \phi, \sin \phi) \quad (\text{式 31})$$



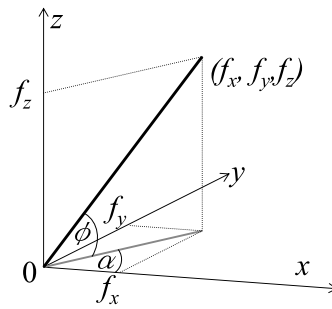


図 2-1-3 火炎の方向ベクトル

本モデルでは、 $\alpha$  は風向と同一方向をとることとし、 $\phi$  は式 32<sup>9)</sup>、33、34 による。

$$\begin{cases} \sin \phi = 1 & F_r^2 / Q_f^{*2/3} \leq 0.98^5 \\ \sin \phi = 0.98 \left( F_r^2 / Q_f^{*2/3} \right)^{1/5} & 0.98^5 < F_r^2 / Q_f^{*2/3} \leq 20 \\ \sin \phi = 3.97 \left( F_r^2 / Q_f^{*2/3} \right)^{-2/3} & 20 < F_r^2 / Q_f^{*2/3} \end{cases} \quad (式 32)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gD}} \quad (式 33)$$

$$Q_f^* = Q / \rho_\infty C_p T_\infty g^{1/2} D^{5/2} \quad (式 34)$$

$$D = 2 \times rf \quad (式 35)$$

$$rf = \sqrt{A_{op} / \pi} \quad (式 36)$$

$C_p$  : 空気の比熱 [kJ/kgK]、 $D$  : 火源の代表長さ [m]、 $A_{op}$  : 開口部面積 [m<sup>2</sup>]

### ② 噴出火炎の長さ

噴出火炎の長さは風による影響を無視しうることが示されている<sup>9)</sup>。

無風時の自由空間中の火炎高さについて提案されている式<sup>10)</sup>を応用し、火炎基点の違いによる補正、 $Q_f^* < 0.3$  の範囲への拡張を行い、式 37 とした。

$$L_{f,c} = 3.3 Q_f^{*n} D \quad \begin{cases} n = 2/3 & Q_f^* < 1.0 \\ n = 2/5 & 1.0 \leq Q_f^* \end{cases} \quad (式 37)$$

以上により、火炎先端位置が求まるが、これが噴出面の内側へ入るときは、噴出面を含む平面上に火炎先端を投影した位置とし、方向、長さを修正する。

また、火炎軸が他の壁面や他の区画、塀柵等の障害物に交わる場合には、その交点から先は鉛直方向に火炎軸の向きを修正する。

### ③ 放射源の設定

ある開口部及び当該開口部から噴出する火炎による任意の受熱点（受熱面の向きは一定とする）への放射受熱流束 $\dot{q}_r''$ は、受熱点からどれだけ見通せるかに依存する。そのため、見通し計算する部分 ( $i=0 \sim N$ ) ごとに得られる値の和として式 38～式 44 により得られる。

ここで、 $\tau_i$  は、見通し計算の結果得られる透過率である。

$$\dot{q}_r'' = \sum_{i=0}^N \tau_i \dot{q}_i'' \quad (式 38)$$

$$\dot{q}_0'' = F_0 \left[ (1-r_m) \varepsilon_m \sigma T_m^4 + \left\{ (1-r_m) \tau_m + r_m \varepsilon_j \right\} \sigma T_j^4 \right] \quad (式 39)$$

$$F_0 = \frac{A_m}{\pi d_0^2 + A_m} \cos \alpha_0 \cdot \cos \theta_0 \quad (式 40)$$

$$\dot{q}_i'' = \frac{\chi \dot{Q}_i}{4\pi d_i^2} \cos \theta_i \quad (式 41)$$

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_g T_{fi}^4 / \sum_{i=1}^N T_{fi}^4 \quad (式 42)$$

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_{i,j} \left\{ c_p (T_i - T_\infty) + Y_{F,i} \cdot HR_F \right\} \quad (式 43)$$

$$T_{fi} = \begin{cases} 900 + T_\infty & (\Delta L < 0.4L_f) \\ 72L_f / (0.2\Delta L) + T_\infty & (0.4L_f \leq \Delta L < L_f) \\ T_\infty & (L_f \leq \Delta L) \end{cases} \quad (式 44)$$

ここで、 $N$  が小さいと、受熱点との距離が短い場合や火炎が長い場合に誤差が生じやすくなることから、計算上は、式 45 により、受熱点での受熱流束と火炎長さに応じて求めることとした。

$$N = \min(q_{f1}/q_{\min}, l_f/l_{\min}) \quad (式 45)$$

## (2) 熱気流による熱移動

単一火源の場合、火源を通る風向に平行な鉛直断面における風下気流の温度上昇は下式で計算される<sup>11)</sup>。

$$\Delta T_c(x, z) = \Lambda^{-3} Fr^{-1} \left[ 1.7 \exp \left\{ -1.5^2 \left( \frac{z}{x} \Lambda^k Fr^n - 0.37 \right)^2 \right\} + 0.05 \right] \times \left( \frac{\dot{Q}_c^2 T_\infty}{C_p^2 \rho_a^2 g} \right)^{1/3} D_c^{-1/3} x^{-4/3} \quad (式 46)$$

$$\Lambda = \frac{U D_c^{1/3}}{\left\{ \dot{Q}_c g / (C_p \rho_a T_\infty) \right\}^{1/3}}$$

$x$  : 火源から受熱点までの水平距離[m]、 $z$  : 火源から受熱点までの鉛直距離[m]、 $\dot{Q}_c$  : 火源の発熱速度[kW]、 $D_c$  : 火源の代表径[m]

火源を通る風向に平行な鉛直断面から水平方向にずれると温度上昇幅は減少するが、式 46 では計算できない。そこで、気流主軸（高さ方向で最も高温の位置）からの距離に応じた温度上昇幅の減少程度は、鉛直断面上の気流主軸高さからの  $z$  方向のずれによる温度上昇幅と同一と見なして式 46 を適用することとする。

また、複数火源の場合には、それぞれ単一火源と見なした場合の温度上昇を下式により合成する方法が提案されている<sup>12)</sup>。

$$\Delta T_{c,eff} = \left( \sum_j \Delta T_{c,j}^{3/2} \right)^{2/3} \quad (式 47)$$

以上より、受熱点での熱気流による受熱流束は、式 47 で表す。

$$\dot{q}_r'' = h \times \Delta T_{c,eff} \quad (式 48)$$

## (3) 温度上昇と着火判定モデル

着火は、着火可能領域に存在する可燃物が熱せられ、着火温度に達した時点で発生する。本モデルでは、木材の着火温度を 593[K] とし、着火の判定を 48 式により行う。

① 放射受熱点の設定

式 38 による計算は、受熱点の数だけ行う必要があり、受熱点の省略は計算負荷軽減効果の高い方法である。

最も不利な（出火温度に早く到達する）位置が事前に明らかにできれば 1 点のみの計算が良いが、その位置を正確に予測することは困難である。

本稿では、受熱点を受熱壁面上に、幅と高さ方向に一定間隔  $p[m]$  に配置し、 $p \times p[m^2]$  の担当面内での最大受熱流束を推定し、表面温度の応答を計算することとした。

予測自体の計算負荷を小さくすることを考慮して、1 ステップ前の計算ステップにおいて、周囲の火源の中で受熱点での熱流束が最大のものを探しておき、次のステップで、事前に探しておいた火源について、放射源の重心位置を式 50 により計算しさらに受熱壁面へ正投影した点を求め、担当面内でこの点と最も近い点を求める。

$$\vec{f}_g = \vec{f}_0 + \sum_{i=0}^N \left\{ \vec{r}_i q_i \times (\vec{f}_i - \vec{f}_0) \right\} / \sum_{i=0}^N q_i \quad (式 50)$$

なお、熱流束が最大の火源の検出の際にも、当該ステップの受熱点位置での熱流束ではなく、上記式 50 を用いて担当面内で放射源の重心位置に最も近い位置での受熱流束を式 38 により求めて、周囲の全ての火源の中で受熱流束が最大となる火源を特定する。

② 温度上昇

ある時刻  $t$  における、放射および熱気流による着火判定点への入射熱流束は、それぞれの合計として得られ次式で表される。

$$\dot{q}_{OUT}''(t) = \sum \dot{q}_r''(t) + \dot{q}_{c,err}''(t) \quad (式 51)$$

一定の入射熱流束  $\dot{q}_{OUT}''$  を定常的に受けたときのある受熱点の温度応答は、式 52 で近似的に与えられる<sup>3)</sup>。

$$1 / \sqrt{\frac{h^2}{k\rho c} t} = 1.18 \{ \varepsilon \dot{q}_{OUT}'' / h(T_s(t) - T_0) - 1 \} \quad (式 52)$$

$k\rho c$ : 受熱点の熱慣性 [ $kW^2s/m^4K^2$ ]、 $T_0$ : 受熱点の初期温度（本モデルでは外気温度と同一で  $T_0 = T_\infty$  とした）

入射熱流束が時刻により変動する場合、式 52 はそのまま使えないが、入射熱流束を受けて、表面温度が  $\Delta T_s(t - \Delta t)$  まで上昇するのに要する時間として、式 53 に示す等価受熱時間  $t_s[s]$  を導入し、式 52 を変形することで、近似的に式 54、55 により入射熱流束の変化に対応した温度応答と表面温度を求める式とした。

$$t_s = \frac{k\rho c}{\left\{ 1.18 \cdot \left( \frac{\dot{q}_{OUT}''(t)}{\Delta T_s(t - \Delta t)} - h \right) \right\}^2} \quad (式 53)$$

$$\Delta T_s(t) = \frac{1.18 \dot{q}_{OUT}''(t)}{\sqrt{\frac{k\rho c}{t_s + \Delta t} + 1.18h}} \quad (式 54)$$

$$T_s(t) = T_0 + \Delta T_s(t)$$

(式 55)

【記号】

$t$  時刻、 $T$  温度、 $A$  面積、 $W$  重量、 $m$  ガス質量、 $\alpha$  火災成長率、 $HR$  ガス質量当たり発熱量、 $\phi$  酸素消費係数、 $Q$  発熱量、 $\rho$  密度、 $V$  室体積、 $L$  熱分解潜熱、 $\varepsilon$  輻射率、 $\sigma$  ステファンボルツマン定数

【添字記号】

$i, j$  対象室、隣室のサフィックス、 $m$  面材、 $f$  積載可燃物、 $b$  室内燃焼、 $d$  開口部、 $X$  化学種、「 $\cdot$ 」は単位時間当たりを示す。

【参考文献・引用文献】

- 1)国土交通省：循環型社会および安全な環境形成のための建築・都市基盤整備技術の開発 まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発報告書、2003.3
- 2)樋本、田中：区画間の火災拡大を考慮した建築物燃焼性状予測モデル、日本建築学会環境系論文集第 573 号、2003.11
- 3)岩見達也、萩原一郎：準耐火建築物の火災性状モデル化の試行、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.165-166、2007.8
- 4)岩見達也：小規模木造建築物の火災性状モデルに関する基礎的検討、日本火災学会研究発表会概要集、pp.194-195、2008.5
- 5)岩見達也：建築物の火災時の熱分解速度に関する基礎的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.29-30、2008.9
- 6)2001 年版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説、2001.3
- 7)2001 年版耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説、2001.3
- 8)建設省建築研究所：建築研究報告 No.123 <二層ゾーン概念に基づく>建物内煙流動予測計算モデル、1989.10
- 9)大宮喜文、林吉彦、岩見達也：有風下における建物周囲に形成される火災性状・立方体模型を用いた実験に基づく火災性状モデル、第 17 回風工学シンポジウム論文集、pp.179~184、2002.12
- 10)長谷見雄二他：屋根が崩壊した建築物から噴出する火災性状、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.293~296、1988
- 11)林吉彦、佐賀武司：有風下の火災気流の温度分布に関する実験的検討、日本建築学会環境系論文集、No.566、pp.25-32、2003
- 12)土橋常登、田坂茂樹、吉田正友、田中哮義：複数火源の火災気流の曝される受熱点の温度上昇の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.13-14、2000.9

## 4. 1. 2 計算結果の集計

### (1) 集計プログラムの概要

市街地火災シミュレーションプログラム及び市街地火災避難シミュレーションプログラムを用いて、予め設定した条件に基づいて気象条件や出火場所を自動的に又は無作為に設定して多数回のシミュレーションを実行し、その結果を集計するプログラム「市街地火災シミュレーションランダム実行・集計プログラム」(以下、「ランダム実行・集計プログラム」という。)を作成した。以下では、集計プログラムの概要を示す。

ランダム実行・集計プログラムは図 4-11 に示すように、気象条件や出火建物を無作為に設定して市街地火災シミュレーションプログラム及び市街地火災避難シミュレーションプログラムを複数回実行し、出力された計算結果ファイルから必要なデータを抽出して計算結果総合ファイルを生成する。また計算結果総合ファイルを用いて、シミュレーション時刻別の平均焼失棟数や指定された超過確率に対する超過焼失棟数などを集計し、集計ファイルに出力する。

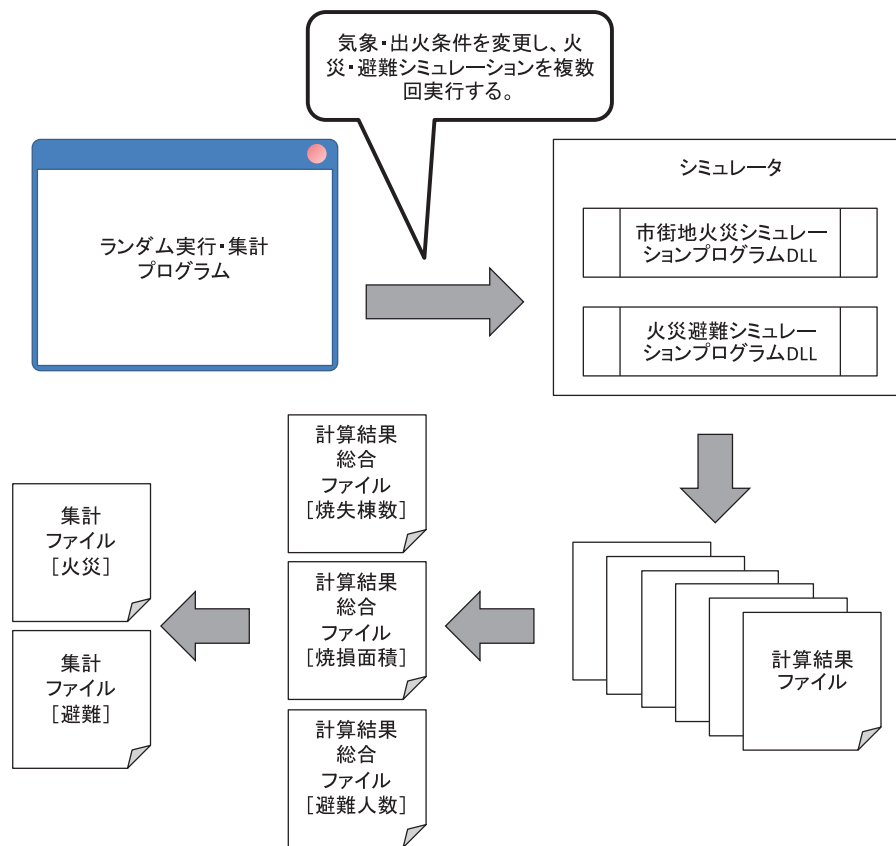


図 4-11 ランダム実行・集計プログラムの構成

## (2) 連続計算機能の概要

市街地火災シミュレーション及び火災避難シミュレーションプログラムを連続実行する際に変化させるパラメータは出火建物と風向風速である。

出火建物は、出火対象建物リストとしてランダム実行・集計プログラムに渡す必要がある。ランダム実行・集計プログラムは、出火対象建物リストに並ぶ建物から1つ取り出して、出火建物として設定してシミュレーションを実行する。ユーザーは、全ての建物を取り出されるまで連続実行するか、ユーザーが指定した回数だけ無作為に抽出して連続実行するかを選択することができる。

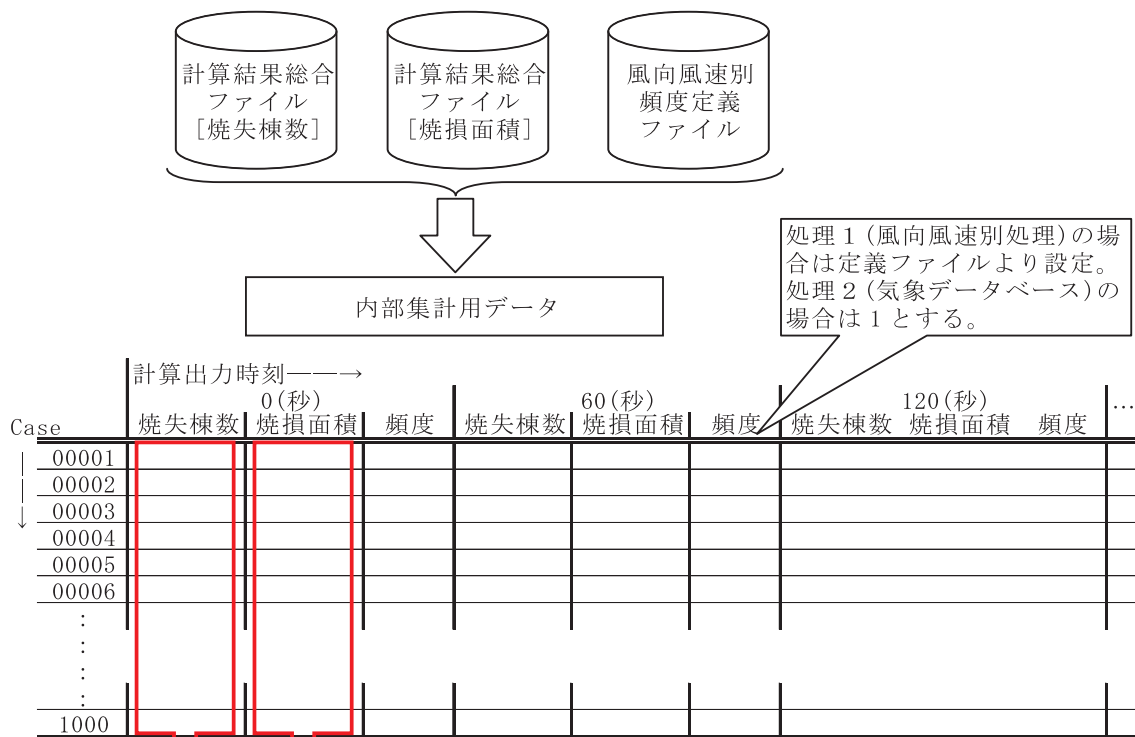
風向風速の設定については、風向風速別に頻度を設定する方法と実測の気象データベースを参照する方法がある。風向風速別に頻度を設定する方法（設定時のファイルフォーマットを表4-2に示す。）では、各風向階級、各風速階級の全ての組み合わせ（頻度0が設定された組み合わせはスキップされる）について自動的に風向風速が設定されて連続実行される。実測の気象データベースを参照する方法では、ユーザーが指定した回数だけ無作為にデータベース内の日時を抽出し該当する日時の気象条件を適用したシミュレーションが実行される。

表 4-2 風向風速別頻度定義ファイルフォーマット

|          | 1列目           | 2列目       | 3列目       | 4列目                | 5列目                | 6列目                | ... | $m+1$ 列目               |                                  |
|----------|---------------|-----------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|-----|------------------------|----------------------------------|
| 1行目      | 風向<br>風速      | 0         | $360/m$   | $2 \times (360/m)$ | $3 \times (360/m)$ | $4 \times (360/m)$ | ... | $(m-1) \times (360/m)$ |                                  |
| 2行目      | 0             | $R_{0,0}$ | $R_{1,0}$ | $R_{2,0}$          | $R_{3,0}$          | ...                | ... | $R_{(m-1),0}$          | $R_{i,j}$ : 風向 $i$ 、風速 $j$ の発生頻度 |
| 3行目      | $dV$          | $R_{0,1}$ | $R_{1,1}$ |                    |                    |                    |     | ...                    |                                  |
| 4行目      | $2 \times dV$ | $R_{0,2}$ |           | ...                |                    |                    |     | ...                    | $m$ : 風向区切りの数                    |
| 5行目      | $3 \times dV$ | $R_{0,3}$ |           |                    | ...                |                    |     | ...                    |                                  |
| 6行目      | $4 \times dV$ | ...       |           |                    |                    | ...                |     | ...                    | $n$ : 風速区切りの数                    |
| ...      | ...           | ...       |           |                    |                    |                    | ... | ...                    |                                  |
| $n+2$ 行目 | $n \times dV$ | $R_{0,n}$ | ...       | ...                | ...                | ...                | ... | $R_{(m-1),n}$          | $dV$ : 風速の区切り幅[m/s]              |

## (3) 計算結果総合ファイル集計処理の概要

1回のシミュレーションが終了する度に、シミュレーション計算開始から終了までの各時刻における焼失棟数や焼損面積、避難状況が記録された結果ファイルが出力される。出力される計算結果ファイルより、必要なデータを抽出して計算結果総合ファイル[焼失棟数]、[焼損面積]、[避難人数・グループ数]を作成する。計算結果総合ファイルのフォーマットは表4-3に示す。全てのシミュレーションを実行した後、作成された計算結果総合ファイルから集計ファイルを作成する。集計処理の概要は図4-12に示す。図中の内部集計用データはプログラム内部でメモリ上に作成され、集計結果を表4-4の形式でテキストファイルに出力する。



平均などの算出

$$\text{平均 } E(x_t) = \frac{1}{N_t} \sum_{\text{case}} \{f_{c,t} x_{c,t}\}$$

$x_{c,t}$ : 焼失棟数又は焼損面積  
 $f_{c,t}$ : 風向風速別発生頻度(処理2の場合は1)  
 添字:  $c$ =ケース番号  $t$ =出力時刻  
 $\sum_{\text{case}} f_{c,t} = N_t$  = 総ケース数

$$\text{標準偏差 } Sdv(x_t) = \sqrt{V(x_t)}, \quad V(x_t) = E(x_t^2) - \{E(x_t)\}^2 = \frac{1}{N_t} \sum_{\text{case}} \{f_{c,t} x_{c,t}^2\} - \{E(x_t)\}^2$$

- 超過確率の%値の算出 (t=0 としたときの例)
- ①  $x_{c,0}$  を昇順にソートする。
  - ② ソート結果の小さい方から  $f_{c,0}$  を合計して、累積頻度を求めてゆく。
  - ③ 累積頻度が指定された超過確率を超えた時の  $x_{c,0}$  を出力する。

図 4-12 集計処理の概要

表 4-3 計算結果総合ファイルフォーマット

|               |             | フォーマット | 終結文字           | 備考                           |
|---------------|-------------|--------|----------------|------------------------------|
| ヘッダー情報        |             | 文字列    | リターン           |                              |
| 対象市街地名        |             | 文字列    | ,              |                              |
| 出火建物範囲        |             | 文字列    | ,              |                              |
| 出火建物数         |             | int    | ,              |                              |
| 風向・風速処理選択     |             | int    | ,              | 1:風向・風速別頻度処理、2:実測データベース処理    |
| 気象参照日時範囲      |             | 文字列    | ,              | 風向・風速別処理の場合は“-”              |
| 気象データ時系列参照の有無 |             | int    | ,              | 0:時系列参照なし、1:時系列参照あり          |
| 計算時間          |             | int    | ,              |                              |
| 出力時間間隔        |             | int    | ,              |                              |
| 予定計算回数        |             | int    | ,              |                              |
| 計算開始時刻(実時刻)   |             | 文字列    | リターン           |                              |
| 計算ケース数分繰返す    | 計算ケース番号     | 文字列    | ,              | "CASE#="n"[n:ケース番号]          |
|               | 計算開始時刻(実時刻) | 文字列    | ,              |                              |
|               | 気象参照日時      | int    | ,              | 風向・風速別処理の場合は0                |
|               | 計算開始時風向     | double | ,              |                              |
|               | 計算開始時風速     | double | ,              |                              |
|               | 出火建物数       | int    | ,              | 0~                           |
|               | 出火建物数分繰返す   | 出火建物ID | 文字列            | ,                            |
| 出力回数分繰返す      | s×i分後焼失棟数   | int    | 、;リターン<br>(*1) | s:出力時間間隔<br>i:0~m (m=計算時間÷s) |
| 計算終了時刻(実時刻)   |             | 文字列    | リターン           |                              |

(\*1)最後の出力時間はリターンとする。

表 4-4 集計ファイルフォーマット

|             |          | フォーマット | 終結文字 | 備考             |
|-------------|----------|--------|------|----------------|
| 計算回数        |          | int    | リターン |                |
| 計算ステップ数分繰返す | 時刻       | int    | ,    | 出火からの経過時間[分]   |
|             | 平均焼失棟数   | double | ,    | 棟              |
|             | 平均焼損面積   | double | ,    | m <sup>2</sup> |
|             | 超過焼失棟数   | double | ,    | 棟              |
|             | 超過焼損面積   | double | ,    | m <sup>2</sup> |
|             | 焼失棟数標準偏差 | double | ,    | 棟              |
|             | 焼損面積標準偏差 | double | ,    | m <sup>2</sup> |

(\* )焼失棟数=焼損棟数+燃え尽き棟数



#### (4) ユーザーインターフェース

集計処理の流れは図 4-13 のような手順で実施する。ランダム実行・集計プログラムにおいては、気象条件・出火建物等を設定してシミュレーションを複数回実行して集計処理を行う一連の流れをまとめて **JOB** と呼称する。

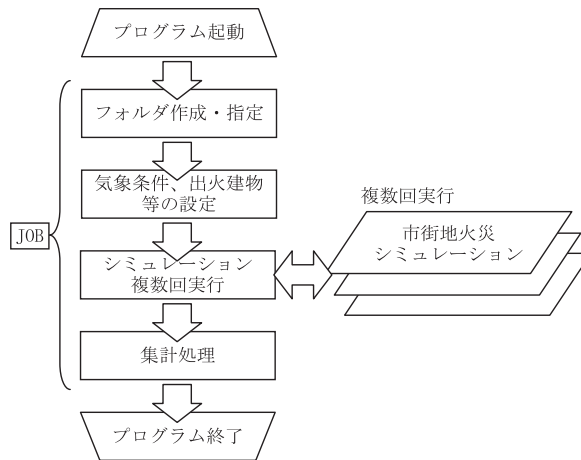


図 4-13 ランダム実行・集計プログラム操作の流れ

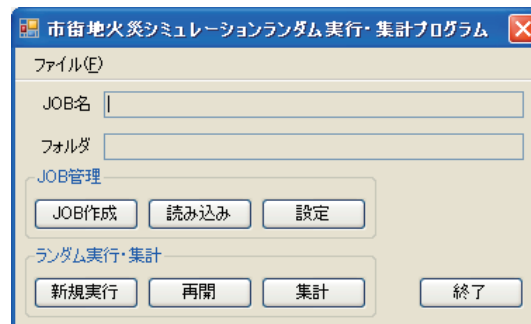


図 4-14 メインダイアログ

ランダム実行・集計プログラムを起動すると図 4-14 に示すダイアログが表示される。

「JOB 作成」ボタン、「読み込み」ボタン、「設定」ボタンを押し下げるとそれぞれ新規 JOB の作成、既存 JOB の読み込み、計算条件の設定等を行うことができる。ただし、本プログラムからランダム実行・集計プログラムを起動する場合は、本プログラム側の設定フォームにより JOB 名や各種設定を行うため、「JOB 作成」、「読み込み」、「設定」の各ボタンは使用できず、本プログラム側で設定した内容が自動的に適用される。

「新規実行」ボタンを押し下げると図 4-15 の JOB 実行管理ダイアログが表示され、シミュレーションの連続実行が開始される。実行途中の JOB を再開する場合は再開ボタンを押し下げる。図 4-15 の各ボタンの機能について、中断ボタンは実行中の市街地火災シミュレーションを直ちに中断し、計算途中の結果は破棄してメインダイアログに復帰する。待機ボタンは実行中のシミュレーションが終わるまで待機して、終わり次第メインダイアログに復帰する。待機状態を解除する場合はキャンセルボタンを用いる。

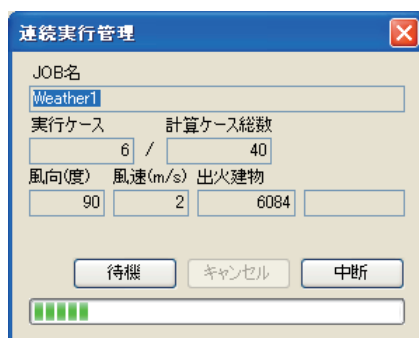


図 4-15 連続実行管理ダイアログ

全ての市街地火災シミュレーションが実行された後、「集計」ボタンにて図 4-16 の集計ダイアログを表示させ、指定された JOB フォルダにある計算結果総合ファイルと風向風速別頻度定義ファイルより集計ファイルの作成を行う。超過確率は 0~1 の実数とし、集計ファイル名を指定して集計ボタンを押し下げると、集計処理を実行する。

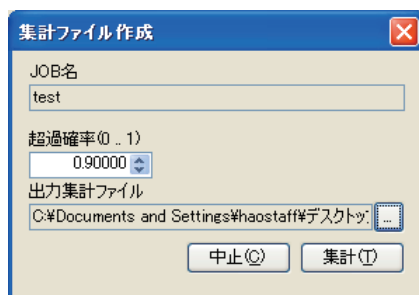


図 4-16 集計ダイアログ

最後にメインダイアログの終了ボタンで集計プログラムを終了する。

#### (5) 集計結果の保存ファイル・フォルダ構成

1 回の実行結果は一つの JOB フォルダにまとめて収録され、そのフォルダ内に計算結果総合ファイルや風向風速別頻度定義ファイルが収録される (図 4-17)。さらに延焼経路出力ありの場合は、計算ケース毎に"00000"等の連番を割り振った延焼経路ファイルを出力する。計算結果ファイルのフォーマット表 4-5 に示す。

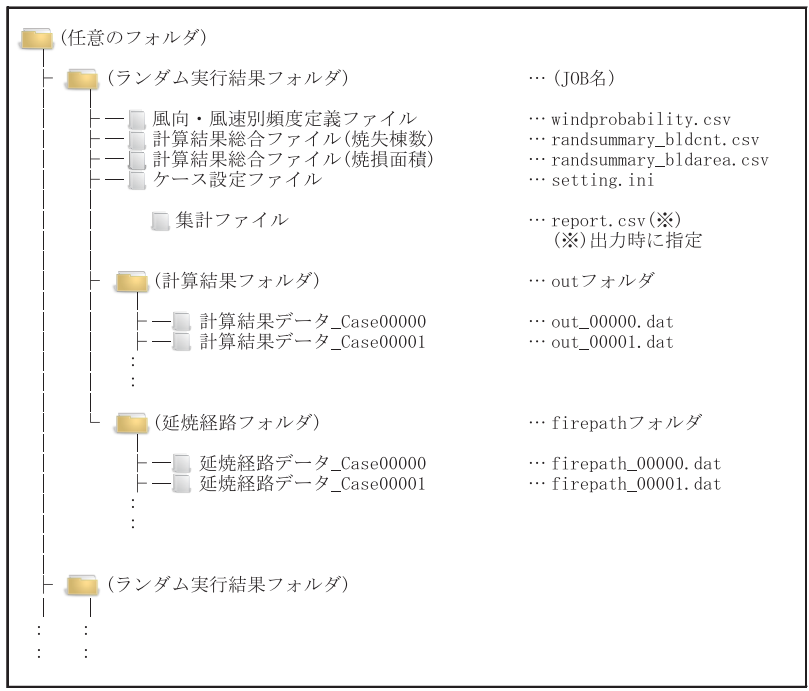


図 4-17 フォルダ構成

表 4-5 計算結果ファイルフォーマット

| 項目名              |        | フォーマット     | 終結文字 | 備考                |
|------------------|--------|------------|------|-------------------|
| ヘッダー情報           |        | 文字列        | リターン | 座標系番号等            |
| 計算<br>繰返時<br>す刻分 | 延焼時刻   | [TIME=int] | ,    | シミュレーション開始からの経過時間 |
|                  | 焼損棟数   | int        | ,    |                   |
|                  | 燃え尽き棟数 | int        | ,    |                   |
|                  | 受熱棟数   | int        | ,    |                   |
|                  | 焼損面積   | double     | ,    |                   |
|                  | 火面周長   | double     | ,    | 0                 |
|                  | 鎮火周長   | double     | リターン | 0                 |

## 4. 2 避難性能水準評価機能

避難性能水準評価機能は、防火性能水準評価機能と同様、街区性能水準評価項目選択フォームにおいて「火災安全」を選択すると、図 4-18 に示すフォームが表示される。このフォームは防火性能水準評価機能と共通となっているが、「防火・避難性能水準評価」において「避難性能水準評価（避難猶予時間）」又は「避難性能水準評価（避難成功率）」を選択すると、避難性能水準評価に関連する項目が設定できるようになる。各項目を設定し、「開始」ボタンをクリックすることで既開発の市街地火災シミュレーションプログラム及び地震火災マルチエージェントシミュレーションプログラムを利用してシミュレーションが開始される。

街区性能水準の評価を行う場合には、単一回のシミュレーション結果ではなく、様々な条件（出火場所や気象条件）を想定し、その発生頻度と被害量を組み合わせて評価を行う必要がある。

「連続実行あり」を選択すると、複数の条件でのシミュレーションを連続自動実行し、その計算結果を集計することで避難性能水準を評価することが可能となる。「連続実行なし」を選択することにより、単一回のシミュレーションを実行することができる。

以下では、地震火災マルチエージェントシミュレーションプログラム（以下、「火災避難シミュレーションプログラム」という。）の概要及びその計算結果の集計方法について示す。

The image shows a software dialog box titled "火災安全性評価設定" (Fire Safety Evaluation Settings). It is divided into three main sections: "共通" (Common), "火災" (Fire), and "避難" (Evacuation).  
- In the "共通" section, "市街地名称" (City Area Name) is "original". "計算条件名" (Calculation Condition Name) is empty. "防火・避難性能水準評価" (Fire and Evacuation Performance Level Evaluation) has three radio buttons: "防火性能水準評価" (Fire Performance Level Evaluation), "避難性能水準評価(避難猶予時間)" (Evacuation Performance Level Evaluation (Evacuation Allowance Time)) which is selected, and "避難性能水準評価(避難成功率)" (Evacuation Performance Level Evaluation (Evacuation Success Rate)). "連続実行" (Continuous Execution) has "連続実行あり" (Continuous Execution Yes) selected. "平時時・地震時フラグ" (Normal/Earthquake Flag) is "平常時" (Normal). "評価領域群名称" (Evaluation Area Group Name) is empty. "評価領域名" (Evaluation Area Name) is empty. "計算領域設定フラグ" (Calculation Area Setting Flag) is "全データ" (All Data). "計算時間(分)" (Calculation Time (min)) is 120.  
- In the "火災" section, "出火建物設定フラグ" (Fire Building Setting Flag) is "全建物出火" (All Buildings Fire) with a "直接指定" (Direct Designation) button. "気象条件設定フラグ" (Weather Condition Setting Flag) is "全風向風速処理" (All Wind Direction/Wind Speed Processing) with a "直接指定" button. "風向クラス数" (Wind Direction Class Count) is 4. "風速クラス数" (Wind Speed Class Count) is 3. "風速ステップ(m)" (Wind Speed Step (m)) is 4.0. "気象参照日時" (Weather Reference Date/Time) has "開始" (Start) at 2016/06/24 10:12:01 and "終了" (End) at 2016/06/24 10:12:01. A "詳細..." (Details...) button is present.  
- In the "避難" section, "エージェント配置フラグ" (Agent Configuration Flag) is "評価領域(群)選択" (Evaluation Area (Group) Selection). "ネットワーク領域設定フラグ" (Network Area Setting Flag) is "評価領域(群)選択". "被害計算フラグ" (Damage Calculation Flag) is checked "被害なし" (No Damage). "被害回数" (Damage Count) is 1. "避難者出発時間間隔(分)" (Evacuee Departure Time Interval (min)) is 5. "避難者最終出発時刻(分)" (Evacuee Final Departure Time (min)) is 60. A "詳細..." button is present.  
At the bottom, there are buttons for "計算条件読込" (Load Calculation Conditions), "開始" (Start), and "キャンセル" (Cancel).

図 4-18 火災安全性評価設定フォーム（避難性能水準評価選択時）

### 4. 2. 1 地震火災マルチエージェント避難シミュレーションプログラムの概要

地震火災マルチエージェントシミュレーションプログラム（以下、「火災避難シミュレーション

プログラム」という。)は、市街地火災時の避難行動を計算するプログラムであり、マルチエージェントモデルを採用している。シミュレーションでは、市街地内に配置された様々な属性を持つ避難者が自身の能力、地形や道路の状況、周囲の火災による熱の影響や建物倒壊による通行可否等を踏まえて自律的に行判断（避難開始や避難経路・避難先の決定）して行動する。

避難経路、地震被害、火災被害、避難者の属性及び避難行動モデルの概要を以下に示す。

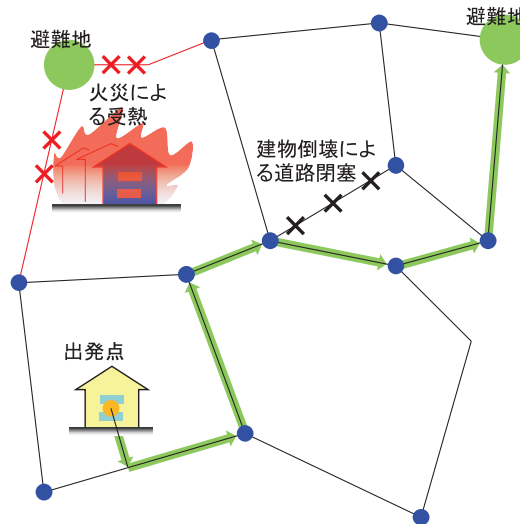


図 4-19 避難経路

### (1) 避難経路のモデル

避難経路として利用可能な空間は、交差点を表すノードと 2 つの交差点を結ぶ経路を表すリンクから構成されるネットワークによって表現する。

ノード種別としては、一般交差点、目的地、避難者出発点等があり、避難者は、初期位置である避難者出発点ノードから目的地ノードまでをノード及びリンクに沿って移動する。

リンクの属性としては、幅員、長さ、傾斜や段差等を設定する。

### (2) 地震被害のモデル

地震によって建物が倒壊する場合に建物高さの 1/2 の幅でガレキが道路網へ流出することとした。リンク上の 1 カ所でもガレキ流出幅がリンク幅員以上となった場合にはリンクが切断（道路閉塞）されるものとし、リンク幅員未満でも、沿道建物のガレキの流出状況に応じてリンクの有効幅員が減少するものとした。

個別の沿道建物については、地表面最大速度及び建物の構造に応じて倒壊確率を求め、さらに 0~1 の範囲で乱数を生成し、倒壊確率未満が得られた場合に当該建物が倒壊するとする。

建物倒壊によるリンクの閉塞状況は、式 4-1~式 4-4 により計算する。リンクの移動速度、混雑状況の計算では、建物倒壊を考慮した平均道路幅員  $W_{average}$  を用い、リンクの通行可否の判定では、建物倒壊を考慮した最小残存道路幅員  $W_{min}$  を必要幅員  $W_{check}$  と比較して残存幅員が必要幅員以上であれば通行可と判定する（図 4-20）。

$$n = L/\Delta l_c \quad \text{式 4-1}$$

$$W_{min} = \min(w_i) \quad \text{式 4-2}$$

$$W_{average} = \sum_i w_i / n \quad \text{式 4-3}$$

$$W_{min} < W_{check} \quad \text{式 4-4}$$

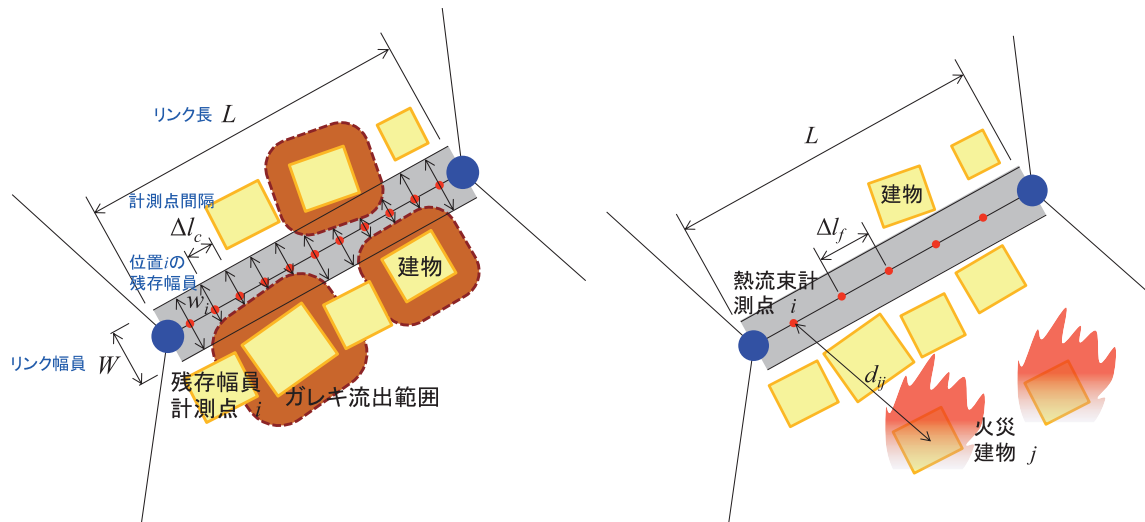


図 4-20 地震被害・火災被害による閉塞状況の概念図

### (3) 火災被害のモデル

火災被害は、建物の構造に応じて建物内部の延焼及び建物間の延焼を予測する市街地火災シミュレーションモデル（詳細は 4.1.1 に示す。）を用いた。市街地火災シミュレーションモデルにより得られる、火災建物から外部へ放出される放射熱及び熱気流温度を用いて、各ノード及び各リンクをおよそ 10m 間隔で設定する受熱流束計測点における受熱流束を式 4-5 により算出する。ただし、放射の影響については、他の建物によって遮蔽される効果は考慮せず、代わりに、影響範囲を 50m に限定した。

火災によるリンクの閉塞状況は、式 4-5～式 4-7 により計算する。リンクの通行可否の判定では、火災による最大受熱流束  $Q_{\max}$  を許容受熱流束  $Q_{\text{check}}$  と比較して最大受熱流束が許容受熱流束未満であれば通行可と判定する（図 4-20）。

$$Q_i = \sum_f Q_{f,i} + h \times (T_{c,i} - T_{out}) \quad \text{式 4-5}$$

$$Q_{\max} = \max(Q_i) \quad \text{式 4-6}$$

$$Q_{\max} > Q_{\text{check}} \quad \text{式 4-7}$$

### (4) 避難者モデル

避難者属性としては、目的地選好（一時集合場所又は広域避難地のいずれを目指すか）、乗り越え可能な段差及び傾斜、歩行速度などを設定する。避難者は 1 人～数人のグループで行動する。グループ行動の場合の歩行速度はグループ内で最も歩行速度の遅い避難者に制限される。

避難者は、a.避難開始の意志決定、b.目的地の選択、c.移動経路の選択、d.避難地到着後の再避難の意志決定、の各段階で周辺状況に関して取得した情報に基づいて自立的に判断を下して避難行動を行う。

入手する情報としては、位置に無関係に取得できる情報と、近づかなければ取得できない情報がある。位置に無関係に取得できる情報は、火災による受熱状況を踏まえた道路網情報（煙等により火災の位置、規模が概ね予想できることを想定）、近傍（数カ所）の一時集合場所及び広域避難地の位置であり、近づかなければ取得できない情報は、目的地の混雑状況、リンクの混雑状況、

建物倒壊による道路閉塞状況である。

#### (5) 避難行動モデル

##### i) 避難開始の意志決定

避難開始の意志決定は、避難者出発点ノードにおける受熱流束が一定以上の場合又は火災建物が一定距離以内に存在する場合に行う。

$$\min(d_{ij}) < d_{start} \quad \text{又は} \quad Q_i > Q_{start} \quad \text{式 4-8}$$

##### ii) 目的地の選択

避難開始の意志決定を行った避難者は、まず目的地の選択を行う。その際、避難者毎に設定した目的地選好属性に基づいて、一時集合場所か広域避難地のいずれに向かうかを決定し、目的地の安全性（火災からの距離）及び目的地までの移動コストを踏まえて、式 4-9 及び式 4-10 により得られる目的地コストが最小となる目的地を選択する（目的地近傍では目的地の混雑状況も踏まえて決定する）。

$$C_{goal} = \alpha \text{MIN}(D_f) + C_{link} \quad \text{式 4-9}$$

$$C_{link} = \sum_l d_l (Q_{l,average} + \beta) \quad \text{式 4-10}$$

##### iii) 移動経路の選択

目的地決定後、その目的地までの移動コストが最小となる経路を検索して決定する。移動経路上において、一定以上の強い熱流束を受けると移動不能になる。なお、目的地の選択及び移動経路の選択は、避難者がノードに到着する度に行い、周辺状況に応じて移動経路を修正しつつ避難行動を行う。

##### iv) 目的地到着後の再避難の意志決定

目的地到着により一旦避難行動は終了するが、i)に示す条件により再避難の意志決定を行う。

## 4. 2. 2 計算結果の集計

計算結果は 4. 1. 2 で既述した集計プログラムを用いて集計する。

### 4.3 日影状況評価機能

街区性能水準評価項目選択フォームにおいて「日影状況」を選択すると、図 4-21 に示すフォームが表示される。各項目を設定し、「開始」ボタンをクリックすることでシミュレーションが開始される。

シミュレーションは、複数の直方体により構成される複数建物に関して、任意の計測面における日影図（時刻日影線、等時間日影図）及び任意の地点における日影時間を簡易に計算する「日影状況簡易計算プログラム」を用いて日影状況の計算を行う。

日影状況簡易計算プログラムは山崎・笠原(1979)による計算手法を用いている。

以下では、日影状況簡易計算プログラムの機能の概要を示す。

なお、本ツールにおいては、時刻日影図や等時間日影図に関して画面表示は行わず、画像ファイルとして保存することとし、指定位置日影時間計算機能に関しても画面表示は行わず、日影時間データとしてファイル出力することとしている。

図 4-21 日影状況評価設定フォーム



#### 4. 3. 1 時刻日影図計算機能

計算条件設定ファイルにより、計算対象とする緯度経度、日影計算の開始時刻、終了時刻、計算時間間隔を設定し、建物情報ファイルに記録された建物（群）が計測面に落とす影の形状（時刻毎の時刻日影線）を重ねて画面出力又は画像出力する。

図 4-22 及び図 4-23 は、サンプル建物群について、冬至における 8 時から 16 時の間を 1 時間間隔で時刻日影線を計算・出力した例である。図 4-22 は、計測面を高さ 5.0m における水平面とした場合、図 4-23 は、垂直面（垂直面の位置を図 4-22 黒線で示す。）とした場合である。

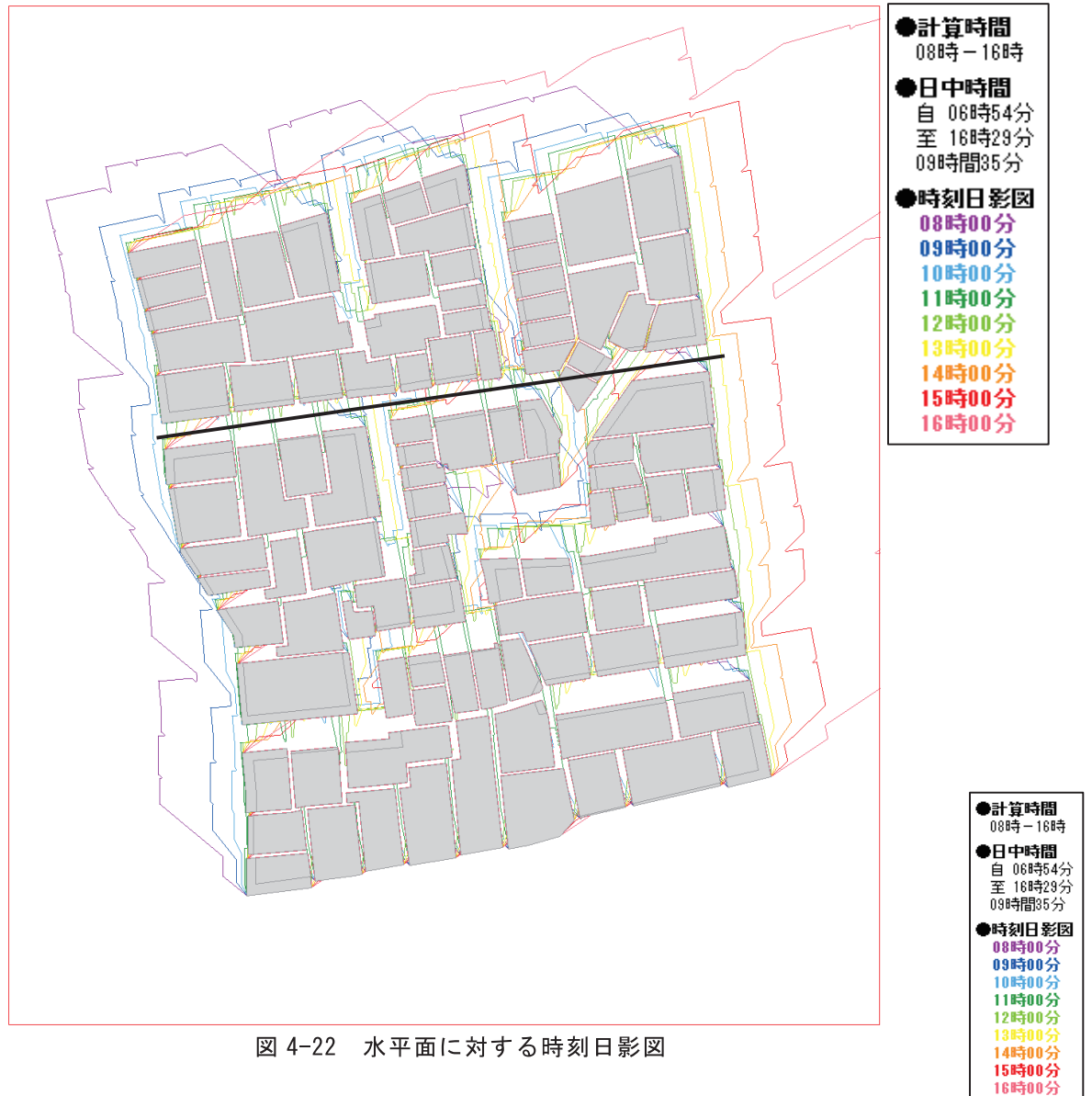


図 4-22 水平面に対する時刻日影図

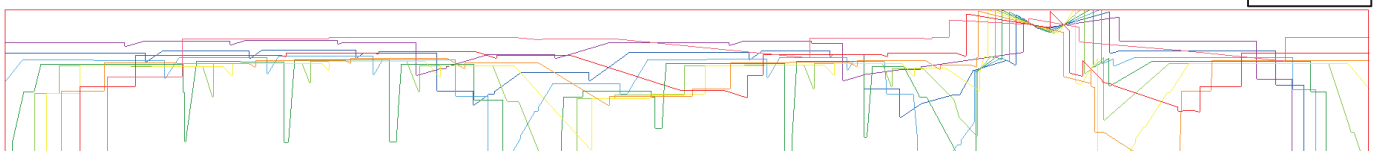


図 4-23 垂直面に対する時刻日影図

#### 4. 3. 2 等時間日影図計算機能

時刻日影図計算機能により計算した時刻毎の日影状況に基づいて日影時間が等しい地点を結ぶことにより等時間日影図を作成し、画面出力又は画像出力する。

図 4-24 及び図 4-25 は、サンプル建物群について、冬至における日影時間が 1 時間から 8 時間の等時間日影図を 1 時間間隔で計算・出力した例である。図 4-24 は、計測面を高さ 5m における水平面とした場合、図 4-25 は、垂直面（垂直面の位置を図 4-24 黒線で示す。）とした場合である。

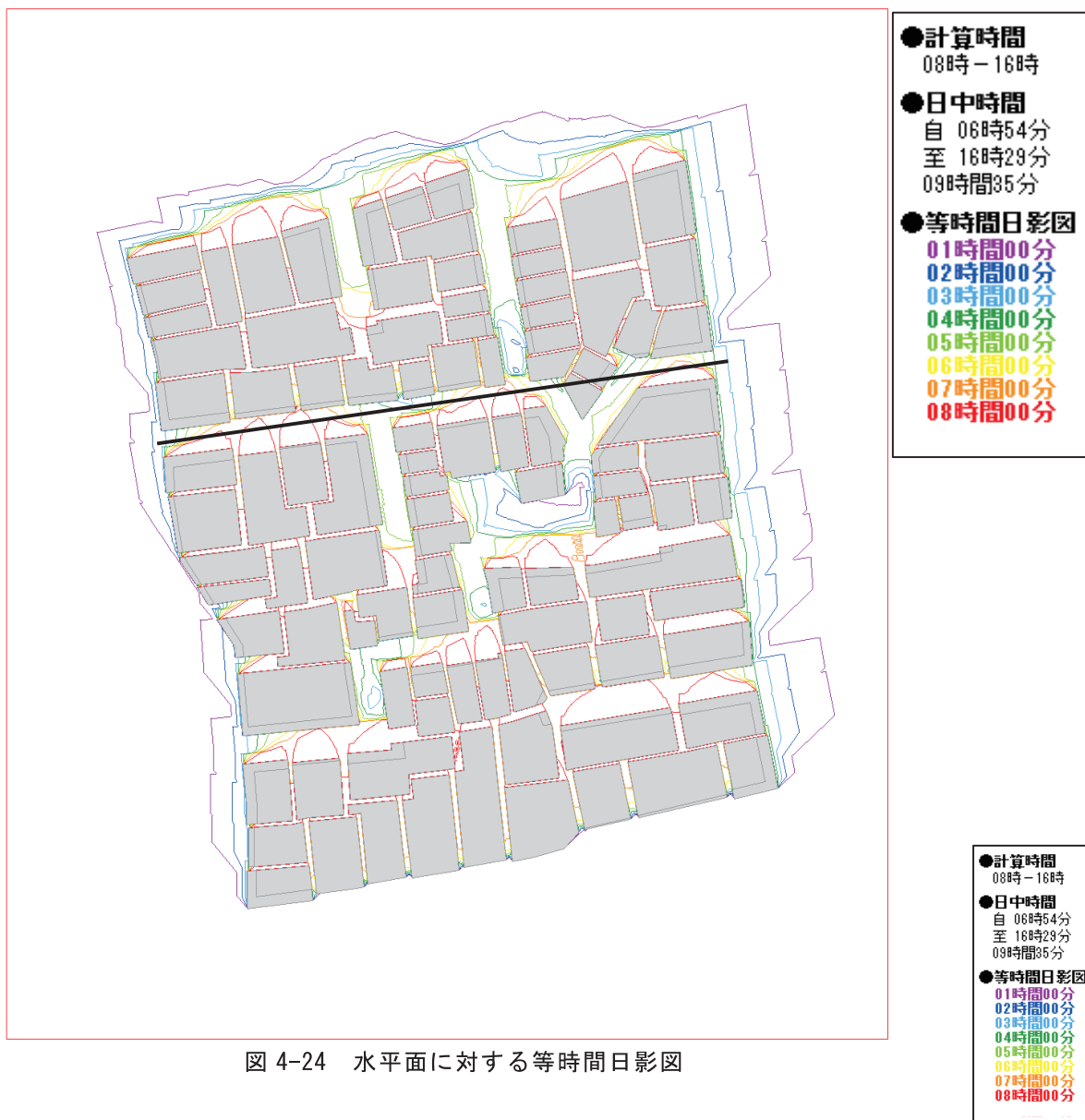


図 4-24 水平面に対する等時間日影図

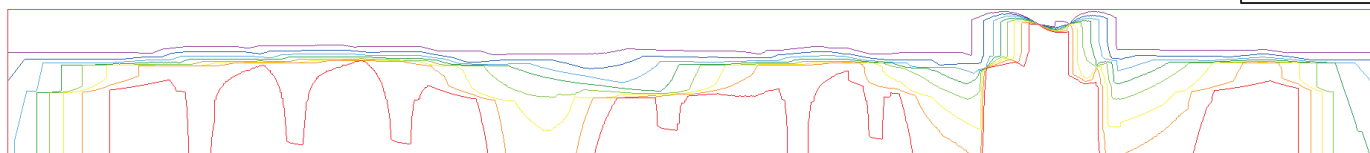


図 4-25 垂直面に対する等時間日影図

### 4. 3. 3 指定位置日影時間計算機能

時刻日影図計算機能により計算した時刻毎の日影状況に基づいて指定位置における日影時間を求め、画面出力又は画像出力する。

図 4-26 は、サンプル建物群について、冬至における A 地点（高さ 0 m）の日影時間を求めた例であり、8 時間 00 分であることを示している。

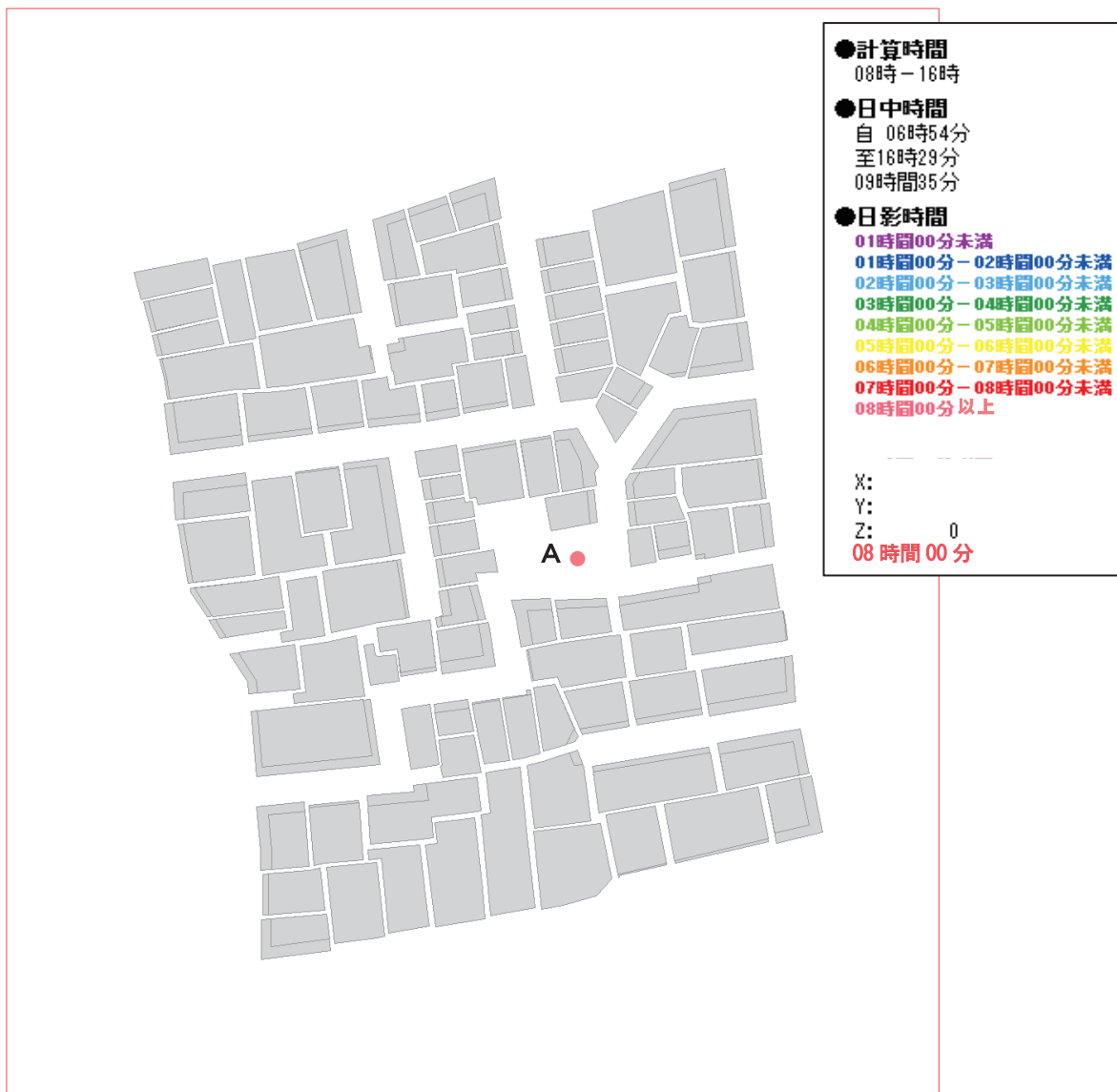


図 4-26 指定位置日影時間計算結果

### 4. 4 採光性能水準評価機能

街区性能水準評価項目選択フォームにおいて「採光」を選択すると、図 4-27 に示すフォームが表示される。各項目を設定し、「開始」ボタンをクリックすることでシミュレーションが開始される。

シミュレーション機能として、複数の多角柱により構成される複数建物に関して、任意の計測点における照度を簡易に計算する機能を開発した。

この機能は、市街地データ（建物データ、地形データ等）の他、表 4-6 に示す計測点リスト、市街地構成要素別標準反射係数リストを読み込み、計測点ごとの照度計算値を計算結果ファイルに出力する機能である。

以下では、採光性能水準評価機能の概要を示す。

図 4-27 採光性能水準評価設定フォーム

表 4-6 採光性能水準評価のデータ形式

| 計測点リスト          |        |      |              |
|-----------------|--------|------|--------------|
| 項目              | 形式     | 終結文字 | 備考           |
| ヘッダー情報          | 文字列    | リターン | 座標系番号等       |
| 全天空照度係数         | double | リターン |              |
| 計測点個数           | int    | リターン |              |
| 計測点<br>返す<br>数分 | 位置     | X座標  | double, 単位:m |
|                 |        | Y座標  | double, 単位:m |
|                 |        | Z座標  | double, 単位:m |
|                 | 方向     | X座標  | double, 単位:m |
|                 |        | Y座標  | double, 単位:m |
|                 |        | Z座標  | double, リターン |

| 市街地構成要素別標準反射係数リスト                              |           |        |                                                 |
|------------------------------------------------|-----------|--------|-------------------------------------------------|
| 項目                                             | 形式        | 終結文字   | 備考                                              |
| ヘッダー情報                                         | 文字列       | リターン   |                                                 |
| 市街地構成要素数                                       | int       | リターン   |                                                 |
| 分<br>成<br>市<br>街<br>地<br>構<br>成<br>要<br>素<br>数 | 地物種別番号    | int    | 1: 天空、2: 地面、3: 建物平面形状、4: 建物付属面、5: 建物開口部、6: 塀柵樹木 |
|                                                | 市街地構成要素番号 | int    | -1: デフォルト値、0~: 地物種別内の番号                         |
|                                                | 名称        | 文字列    |                                                 |
|                                                | 標準反射係数    | double | リターン                                            |

| 計測結果                            |              |        |        |
|---------------------------------|--------------|--------|--------|
| 項目                              | 形式           | 終結文字   | 備考     |
| ヘッダー情報                          | 文字列          | リターン   |        |
| 全天空照度係数                         | double       | リターン   |        |
| 計測点個数                           | int          | リターン   |        |
| 分<br>計<br>測<br>点<br>返<br>す<br>数 | 計測点番号        | int    |        |
|                                 | 照度           | double |        |
|                                 | 市街地構成要素数分線返す | 立体角投影率 | double |

#### 4. 4. 1 照度計算式

計測点は位置と方向で表し、方向を法線ベクトルとする計測面における照度を式 4-11 により計算する。

$$\begin{aligned}
 (\text{照度簡易計測値}) &= (\text{輝度分布を考慮した天空照度}) \\
 &\times (\Sigma \{(\text{遮蔽物 } i \text{ の立体角投影率}) \times (\text{遮蔽物 } i \text{ の反射係数}) \\
 &\times (1 - (\text{計測面法線の高度角}) / 2)\} + 1) \\
 &(\textit{i} \text{ は遮蔽物種別を表すサフィックス、} \Sigma \text{ は } i \text{ に関する総和})
 \end{aligned}
 \tag{式 4-11}$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 (\text{輝度分布を考慮した天空照度}) &= 15000 \times \Sigma \{(\text{天空要素 } m \text{ の立体角投影率}) \\
 &\times 3 \times (1 + 2 \times \sin \theta m) / 7\} \\
 &(\textit{m} \text{ は天空要素を表すサフィックス、} \Sigma \text{ は } m \text{ に関する総和、} \\
 &\theta m \text{ は天空要素 } m \text{ の高度角})
 \end{aligned}
 \tag{式 4-12}$$

本来照度は厳密には式 4-13 により求めるが、次式中の「遮蔽物 i の照度」を求めるためには遮蔽物 i から見通すことができる別の面の照度が必要となり計算量の増大を招くこととなる。ここでは、ある面の照度の大部分が天空からの照度に支配されることを考慮して、計算量の削減のため、式 4-11 により簡易に計算することとした。

$$\begin{aligned} \text{(照度)} = & \text{(輝度分布を考慮した天空照度)} + \\ & \Sigma \{ \text{(遮蔽物 i の立体角投射率)} \times \text{(遮蔽物 i の反射係数)} \times \text{(遮蔽物 i の照度)} \} \end{aligned}$$

式 4-13

(i は遮蔽物種別を表すサフィックス、 $\Sigma$  は i に関する総和)

$$\text{(遮蔽物 i の照度)} \sim \text{(輝度分布を考慮した天空照度)} \times (1 - (\text{計測面法線の高度角}) / 2)$$

なお、(輝度分布を考慮した天空照度) は、計測点における天空照度であり、遮蔽物 i におけるそれとは異なるが、比較的均質な市街地における建物間の空間を評価対象としていることから、遮蔽物 i における天空照度が計測点における天空照度で近似できると見なしている。また、計測面が水平面の場合には計測点における天空照度をそのまま遮蔽物 i の天空照度として用いると過大となることから  $(1 - (\text{計測面法線の高度角}) / 2)$  により補正している。

#### 4. 4. 2 計算方法

簡易ツールでは、計測面上に半径が単位長さの半球を仮想し、ユーザーが指定する分割数にて半球面を概ね等しい立体角になるように分割した上で、計測点から各分割面に向けて放射状に多数の半直線 (以下、「レイ」という。) を伸ばし、各レイが地面や建物等の地物 (以下、「遮蔽物」という (図 4-29)) に交差しない場合には天空照度を、交差する場合には交差した遮蔽物が受ける照度の反射成分を足し合わせることで数値的に計算する。

数値計算では、式 4-11 中の (遮蔽物 i の立体角投射率) 及び (輝度分布を考慮した天空照度) は、次式に基づいて計算される。

$$\text{(遮蔽物 i の立体角投射率)} = \Sigma \{ \text{(遮蔽物 i に交差するレイ n の立体角投射率)} \} \quad \text{式 4-14}$$

$$\begin{aligned} \text{(輝度分布を考慮した天空照度)} = & 15000 \times \Sigma \{ \text{(遮蔽物に交差しないレイ n の立体角投射率)} \\ & \times 3 \times (1 + 2 \times \sin \theta_n) / 7 \} \end{aligned}$$

式 4-15

(n はレイを表すサフィックス、 $\Sigma$  は n に関する総和、 $\theta_n$  はレイ n の高度角)

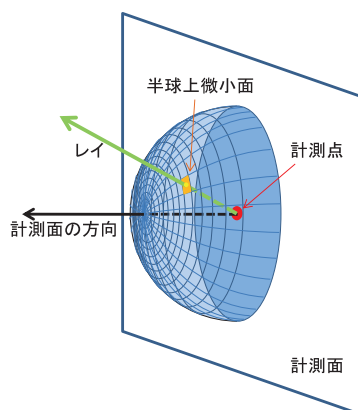


図 4-28 計測点等のイメージ

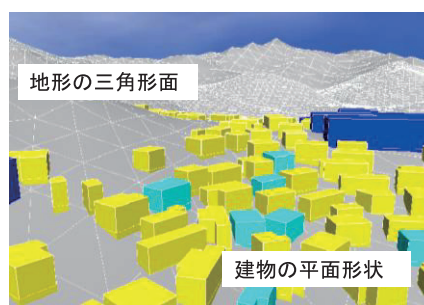


図 4-29 地形の三角形面、建物の平面形状のイメージ

## 4.5 換気・通風性能水準評価機能

### 4.5.1 機能の概要

換気・通風性能水準の簡易評価ツール(以下、本ツール)は数値流体力学をもとにした解析プログラムであり、所定のフォーマットに従った設定ファイル群を用意することで、単独での計算も可能となっている。本ツールの開発にあたっては、専門的な知識を要せず実務で使用できるように、「計算時間短縮」と「操作の簡略化」が検討の要点となっていた。

図 4-30 に本ツールで実現する評価手法についてのフローの概略を示す。

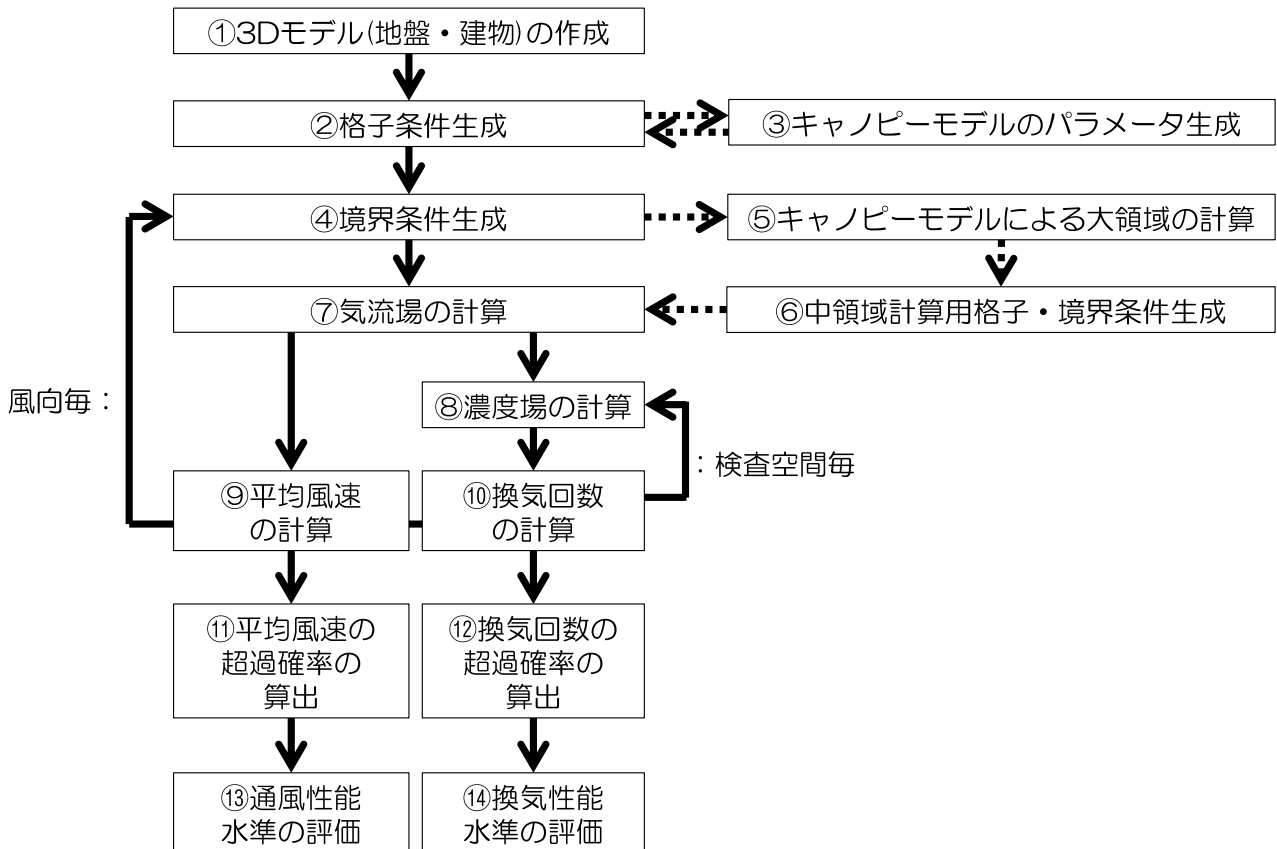


図 4-30 換気・通風性能水準評価の流れ

図 4-30 のとおり、換気性能水準評価と通風性能水準評価は、使用する計算(CFD)が共通であることから並行して行うこととしており、この評価手法を以下のように実装している。

換気・通風性能水準簡易評価ツールは、「プリ処理部分」「流体計算部分」「ポスト処理部分」から構成される。

「プリ処理部分」には図 4-30 の①②③④⑥に該当する機能を実装しており、街区の建物等形状モデル及び地形モデルの 3 次元データを読み込み、計算領域の自動設定、計算に対応した形状データへの変更、メッシュデータの作成、境界条件等の初期条件の割り当て、検査空間の読み込みを行い、「流体計算部分」にデータを引き継ぐ。

「流体計算部分」には図 4-30 の⑤⑦⑧に該当する機能を実装しており、数値流体力学に基づいた計算を行う。本ツールにおいては、計算時間の短縮を図るために、大領域をキャンピーモデルで計算した後に、評価対象市街地となる中領域について精緻な計算を行うことを基本としている。その後、中領域で求めた定常気流場において、検査空間で汚染質を発生させた際の濃度計算を行っている(図 4-31)。

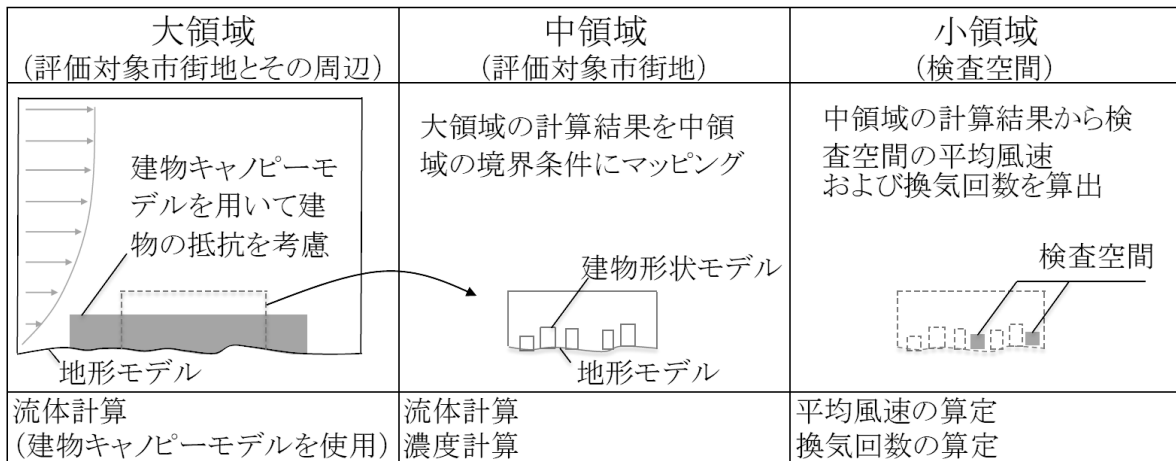


図 4-31 キャノピーモデルを用いた計算時間の短縮

「ポスト処理部分」には図 4-30 の⑨⑩⑪⑫に該当する機能を実装しており、「流体計算部分」の計算結果を受けて、検査空間における平均風速、換気回数の算出を行い、換気・通風性能水準評価のための超過確率の算出を行っている。

#### 4. 5. 2 換気・通風性能簡易評価ツールの構成

##### (1) ツール構成

換気・通風性能水準の簡易評価ツールの「流体計算部分」には、オープンソース CFD ツールキット OpenFOAM を使用している。OpenFOAM は、GPL ライセンスに基づき公開されているオープンソースコードであり、完成したツールを地方公共団体等に配布する際に妨げとならない。また、他のプログラムに関しても可能な限りオープンソースのものを利用するようにし、利用できないものに関しては新規に開発した(表 4-7)。

表 4-7 換気・通風性能水準簡易評価ツールの構成

| No | プログラムの構成        |                         | 入力データ                       | 出力データ                                          |                                                |
|----|-----------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|    | プログラムの種類        | 開発方針                    |                             |                                                |                                                |
| 1  | プリ<br>処理<br>部分  | 3次元CADモデル作成             | 新規にプログラムを開発(C++)            | 建物形状モデル※1、地形モデル※1                              | STL形式のCADデータ                                   |
| 2  |                 | 計算格子生成                  | OpenFOAM標準ユーティリティを利用        | STL形式のCADデータ                                   | OpenFOAM用格子データ                                 |
| 3  |                 | キャンピーモデルのパラメータ分布作成      | 新規にOpenFOAMユーティリティを開発       | OpenFOAM用格子データ、建物形状のCADデータ(STL形式)              | 各格子の $\gamma_\theta$ 、 $l_\theta$ 、 $C_f$      |
| 4  |                 | 検査空間の定義                 | 新規にプログラムを開発(C++)            | 評価対象領域のみの建物等形状モデル※1                            | STL形式のCADデータ                                   |
| 5  |                 | 境界条件などの各種条件設定           | 非標準ライブラリ funkySetFieldsを用いる | 基準地盤面高さ                                        | OpenFOAM用計算条件設定ファイル                            |
| 6  | 流体<br>計算<br>部分  | 流体計算実行                  | OpenFOAM標準ソルバーを一部改良         | 計算格子、境界条件、計算条件                                 | 各格子の $U$ 、 $p$ 、 $k$ 、 $\varepsilon$ 、 $\nu_t$ |
| 7  |                 | 濃度計算実行                  |                             | 各格子の $U$ および $\nu_t$ 、計算格子、境界条件、計算条件、検査空間STL※3 | 各格子の $C$                                       |
| 8  |                 | 平均運動エネルギーの算出            | 新規にOpenFOAMユーティリティを開発       | 各格子の $U$ および $k$ 、検査空間STL※3                    | 各検査空間の $KE$                                    |
| 9  |                 | 換気回数算出                  |                             | 各格子の $C$ 、検査空間STL※3                            | 各検査空間の $PFR$                                   |
| 10 | ポスト<br>処理<br>部分 | 分布画像の作成(風速、濃度)          | 既存プログラムを利用※2                | 各格子の $U$ および $C$ 、分布図出力位置の条件※1                 | bmp形式の分布画像(風速、濃度)                              |
| 11 |                 | 風速分布および濃度分布の数値出力        | OpenFOAM標準ユーティリティを利用        | 各格子の $U$ および $C$ 、出力位置の条件※1                    | CSV形式の数値データ(風速、濃度)                             |
| 12 |                 | 超過確率の算定( $KE$ 、 $PFR$ ) | 新規にプログラムを開発(python)         | 各検査空間の $KE$ および $PFR$ 、ワイルドパラメーター※1            | 各検査空間の超過確率の数値データ                               |

※1 コアシステムから送られるデータ

※2 オープンソース可視化ソフトParaViewの自動可視化ツールpvbatch

※3 検査空間を定義したCADデータ(STL形式)

※4  $U$ :風速、 $p$ :圧力、 $k$ :乱流エネルギー、 $\varepsilon$ :散逸率、 $\nu_t$ :渦粘性係数、 $C$ :濃度、 $PFR$ :換気回数、 $KE$ :平均運動エネルギー、 $\gamma_\theta$ :建物占有率、 $l_\theta$ :建物長さスケール、 $C_f$ :建物等価抗力係数

既往のソースコードの選定及び改変の経緯を以下に示す。

「流体計算部分」に、オープンソース CFD ツールキット OpenFOAM を選定した理由としては以下の通りである。

- ・本ツールを一般に公開する際に妨げとならないことが求められ、OpenFOAM のライセンスである GPL はそれを満たす。
- ・OpenFOAM は四面体の自動メッシュを有するため、計算精度が良く格子数が少ない効率的な格子が自動的に作成できる。
- ・OpenFOAM は Linux、Windows、Mac OS など複数の OS 上で動作させることが可能であるため、コアシステムが稼働する OS 上で動作が可能である。

また、OpenFOAM の標準のユーティリティやソルバー、ライブラリおよび、ParaView の自動可視化ツール pvbatch 等のオープンソースツールを最大限活かして本評価ツールを開発した。しかし、以下のプログラムについては新規に開発または既存のツールの改良が必要となった。

- ・3次元 CAD モデル作成(表 4-7 No.1)、評価対象空間の定義(No.4)については、建物形状モデルや地形モデルから STL 形式の CAD データを出力するプログラムを、C++で作成した。
- ・キャンピーモデルのパラメータ分布作成(No.3)については、榎木・石原(2012)の手法を用いて、計算格子生成プログラム(No.2)で生成した各格子における建物占有率、建物代表長さ、および建物等価抗力係数を出力する OpenFOAM ユーティリティとして作成した。
- ・境界条件などの各種条件設定(No.5)については、OpenFOAM 用の非標準ライブラリ groovyBC を用いて作成した。
- ・流体計算実行(No.6)については、新規に作成した榎木・石原(2012)における一般化キャンピー



- モデルを実装した乱流モデルのライブラリを用いて定常解析を行うソルバーを作成している。
- ・濃度計算実行(No.7)については、評価対象空間で一様に濃度を発生した場合のパッシブスカラー移流拡散方程式を解析するソルバーを作成している。
  - ・平均運動エネルギーの算出(No.8)、換気回数の算出(No.9)、平均運動エネルギーや換気回数の超過確率の算定(No.12)については、OpenFOAMのユーティリティとして作成した。

## (2) データの流れ

換気・通風性能水準簡易評価ツール内でのデータの流れを図4-32に示す。計算実行から結果出力まで自動的に処理が進むように考慮している。また、以前の実行結果が存在し、活用できる場合には、その処理をスキップすることができるようになっている。

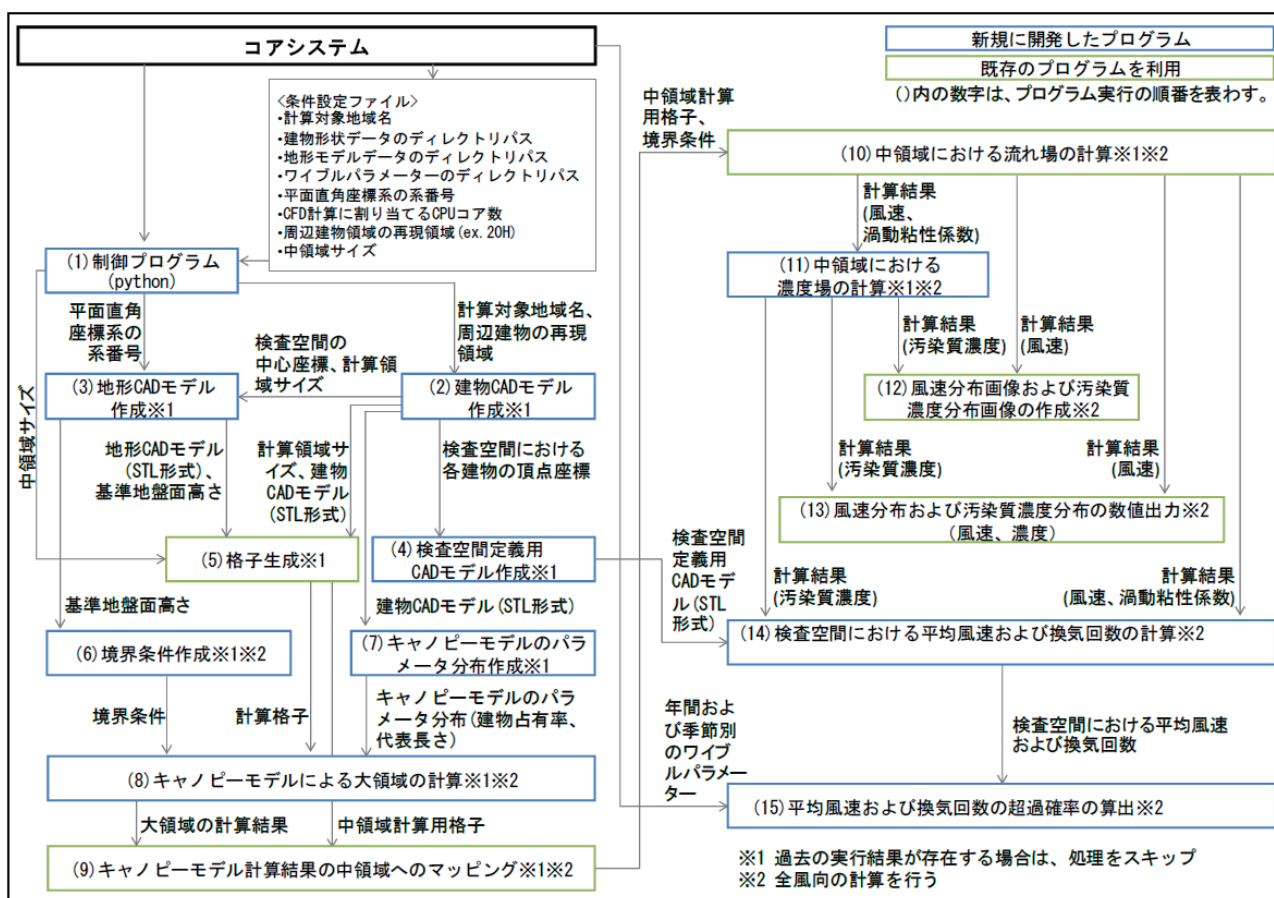


図 4-32 換気・通風性能水準簡易評価ツールにおけるデータの流れ

### 4. 5. 3 計算精度とのバランスを考慮した計算時間の短縮方法

換気・通風性能水準簡易評価ツールの構築にあたり、専門的な知識を要せずとも実務で使用できるように、「計算時間短縮」と「操作の簡略化」を主眼として検討を行ってきた。以下に、本ツールに導入した手法の概要を示す。

#### (1) 建物キャノピーモデルの導入

##### 1) キャノピーモデルの概要

計算精度とのバランスを考慮した計算時間の短縮方法の一つとして一般化キャノピーモデルを導入している。キャノピーモデルは解析格子内に存在する障害物による流体力、及び乱流の生成と消散をモデル化し輸送方程式に組み込むもので広域風環境予測に広く使用されている。以下に

使用しているキャノピーモデルの概要を示す。

一般化キャノピーモデルでは式 4-16～式 4-18 に示すようにレイノルズ平均した速度  $u_i$ 、乱流エネルギー  $k$ 、乱流エネルギー消失率  $\varepsilon$  の輸送方程式に建物などの障害物による流体力及び乱流の生成と消散の影響を加味した項を加えている。

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + f_{\bar{u},i} \quad \dots\dots\dots \text{式 4-16}$$

$$\frac{\partial \rho \bar{k}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{k}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \bar{\varepsilon} + f_k \quad \dots\dots\dots \text{式 4-17}$$

$$\frac{\partial \rho \bar{\varepsilon}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{\varepsilon}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\bar{\varepsilon}}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \bar{\varepsilon}^2}{k} + f_\varepsilon \quad \dots\dots\dots \text{式 4-18}$$

ここで、一般化キャノピーモデルの付加項  $f_{\bar{u},i}$ 、 $f_k$ 、 $f_\varepsilon$  は式 4-19～式 4-21 のように表される。

$$f_{\bar{u},i} = -\frac{1}{2} \rho C_f \frac{\gamma_0}{l_0} |\bar{u}| \bar{u}_i \quad \dots\dots\dots \text{式 4-19}$$

$$f_k = \frac{1}{2} \beta_p \rho C_f a |\bar{u}|^3 - \frac{1}{2} \beta_d \rho C_f a |\bar{u}| \bar{k} \quad \dots\dots\dots \text{式 4-20}$$

$$f_\varepsilon = \frac{1}{2} C_{p\varepsilon 1} \beta_p \rho \frac{\bar{\varepsilon}}{k} C_f a |\bar{u}|^3 - \frac{1}{2} C_{p\varepsilon 2} \beta_d \rho C_f a |\bar{u}| \bar{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots \text{式 4-21}$$

$$\text{等価抗力係数} : C_f = \frac{1}{(1-\gamma_0)^3} \min \left( \frac{1.53}{(1-\gamma_0)}, 2.75(1-\gamma_0) \right)$$

$$\text{代表長さ} : l_0 = \frac{V_u}{A_u} \quad \text{占有率} : \gamma_0 = \frac{V_u}{V_{grid}} \quad \text{建物表面積密度} : a = \frac{\gamma_0}{l_0(1-\gamma_0)}$$

$$\beta_p = 1.0 \quad \beta_d = \min \left( 4.0, \alpha_{k1} \exp \left( \frac{1-\gamma_0}{\gamma_0} \right) + \alpha_{k2} \right) \quad \alpha_{k1} = 0.5 \quad \alpha_{k2} = -0.5$$

$$C_{p\varepsilon 1} = 1.5 \quad C_{p\varepsilon 2} = \begin{cases} 0.7 & (\gamma_0 \leq \gamma_c) \\ \alpha_{\varepsilon 1} \sqrt{\sin \left( \frac{\pi(\gamma_0 - \gamma_c)}{2(1-\gamma_c)} \right)} + \alpha_{\varepsilon 2} & (\gamma_0 > \gamma_c) \end{cases} \quad \alpha_{\varepsilon 1} = 0.8 \quad \alpha_{\varepsilon 2} = 0.7$$

ここで、 $\gamma_0=0.312$  は  $\beta_d = \alpha_{k1} \exp \left( \frac{1-\gamma_0}{\gamma_0} \right) + \alpha_{k2} = 4.0$  となる時の  $\gamma_0$  の値。

代表長さ  $l_0$  と占有率  $\gamma_0$  は障害物に関し定義されるパラメータであり、そこから等価抗力係数  $C_f$  及びその他のモデル係数を導いている。

式 4-20 の右辺第 1 項は乱流エネルギーの生成を、第 2 項は消散を表しており、 $\beta_d$  及び  $C_{p\varepsilon 2}$  は占有率が高い時は乱流エネルギーの生成と消散がバランスしている事を考慮した解析から導いている。

一般化キャノピーモデルの付加項に必要なパラメータのうち占有率  $\gamma_0$  と代表長さ  $l_0$  が障害物から得られればその他のパラメータを算出することが出来るが、建物毎に全てのセルの内外判定を行うと計算時間が膨大になってしまうことから、解析領域全体で建物内に完全に含まれるセルと建物境界面に重なるセルにそれぞれ一律の値を与える方法を用い、時間短縮を図った。

占有率は式 4-22 によって定義される。ここで  $V_u$  はセル内を占める障害物の体積、 $V_{grid}$  はセルの体積である。

$$\gamma_o = \frac{V_u}{V_{grid}} \quad \dots \dots \dots \text{式 4-22}$$

建物内に完全に含まれるセルの占有率  $\gamma_{o,in}$  は 1 であるとし、建物境界面に重なるセルの占有率  $\gamma_{o,s}$  は建物全体の体積の和  $V_{build}$  から建物に含まれるセルの体積の和  $V_{u,in}$  を引き、建物境界面に重なるセルの体積  $V_{grid,s}$  で除することにより算出している。

$$\gamma_{o,in} = 1 \quad \dots \dots \dots \text{式 4-23}$$

$$\gamma_{o,s} = \frac{V_{u,s}}{V_{grid,s}} \quad \dots \dots \dots \text{式 4-24}$$

$$V_{u,s} = V_{build} - V_{u,in} \quad \dots \dots \dots \text{式 4-25}$$

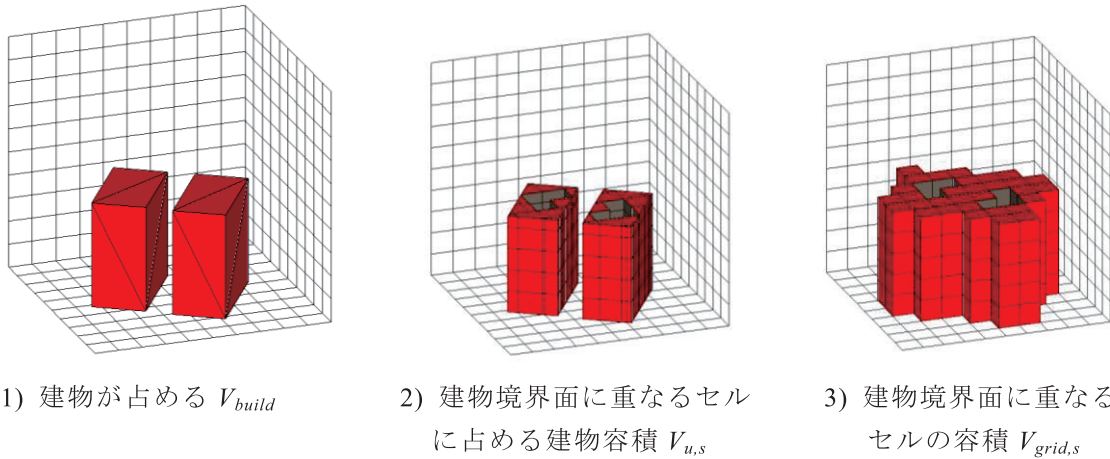


図 4-33 占有率算定のための容積の取り方

代表長さ  $l_0$  は式 4-26 によって定義され、障害物の奥行き長さに対応している。ここで建物群の見つけ面積  $A_u$  は障害物を正方形水平断面を持つ角柱として仮定することで計算格子内の建物壁面面積の和  $S_u$  を用いて式 4-27 により算出される。

$$l_0 = \frac{V_u}{A_u} \quad \dots \dots \dots \text{式 4-26}$$

$$A_u = \frac{S_u}{4} \quad \dots \dots \dots \text{式 4-27}$$

建物内に完全に含まれるセルの代表長さ  $l_{o,in}$  は  $V_{u,in}$  の三乗根とし、建物境界面に重なるセルの代表長さ  $l_{o,s}$  は建物境界面を含むセル内の建物部分の体積の和  $V_{u,s}$  を建物壁面面積の和  $S_u$  の 4 分の 1 で除して算出している。

$$l_{o,in} = \sqrt[3]{V_{u,in}} \quad \dots \dots \dots \text{式 4-28}$$

$$l_{os} = \frac{V_{build}}{\frac{S_u}{4}} \quad \dots \dots \dots \text{式 4-29}$$

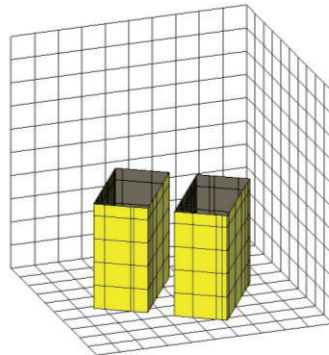


図 4-34 建物壁面面積の和  $S_u$  の取り方

以上のキャノピーモデルを使用して、精度検証を行った。以下に概要を示す。

2) キャノピーモデル導入時の精度検証

精度検証は、まず、「日本建築学会：市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブックーガイドラインと検証用データベースー2007年」の風洞実験結果をもとに、単純な形状である 2:1:1 角柱周辺流れについて、キャノピーモデル使用時と非使用時で計算して行った。次に、新潟市内低層建物密集地において異なるメッシュ分割数でのキャノピーモデルの計算精度と計算時間の比較を行った。

2-1) 角柱周辺流れでの検証

計算条件はベンチマーク用の標準計算条件に従い、表 4-8、図 4-35 のように設定した。乱流モデルは一般化キャノピーモデルの既往の論文に従い LK モデルを使用している。キャノピーモデルと建物を再現したモデルで建物内のセルの有無を除きメッシュは同じものを使用している。セルが全て建物の中に含まれるか全く含まれないかのどちらかであるようメッシュ分割を行っているため、占有率は建物内のセルは 1、それ以外は 0 となっている。

表 4-8 2:1:1 角柱周辺流れ計算条件

|                |                                                                                                 |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 計算領域           | $21b$ (xdir) $\times$ $13.75b$ (ydir) $\times$ $11.25b$ (zdir)<br>$b=0.08\text{m}$ (風洞実験と同じ大きさ) |
| メッシュ分割         | $60(\text{xdir}) \times 45(\text{ydir}) \times 39(\text{zdir}) = 105,300$ メッシュ                  |
| 移流項差分スキーム      | U、k、 $\varepsilon$ すべて QUICK                                                                    |
| 側面、上空境界条件      | Slip 壁                                                                                          |
| 建物、風洞面床境界条件    | 粗度長 $z_0=1.8 \times 10^{-4}$ とする一般化対数則                                                          |
| 流入境界条件         | U、k は実験結果を補間<br>$\varepsilon$ は局所平衡仮定による                                                        |
| 周出境界条件         | 勾配ゼロ                                                                                            |
| 乱流モデル          | LK モデル                                                                                          |
| 占有率 $\gamma_0$ | 0 または 1                                                                                         |
| 代表長さ $l_0$     | 0 または 0.08                                                                                      |
| 収束判定条件         | 相対残差ノルム $5 \times 10^{-4}$                                                                      |

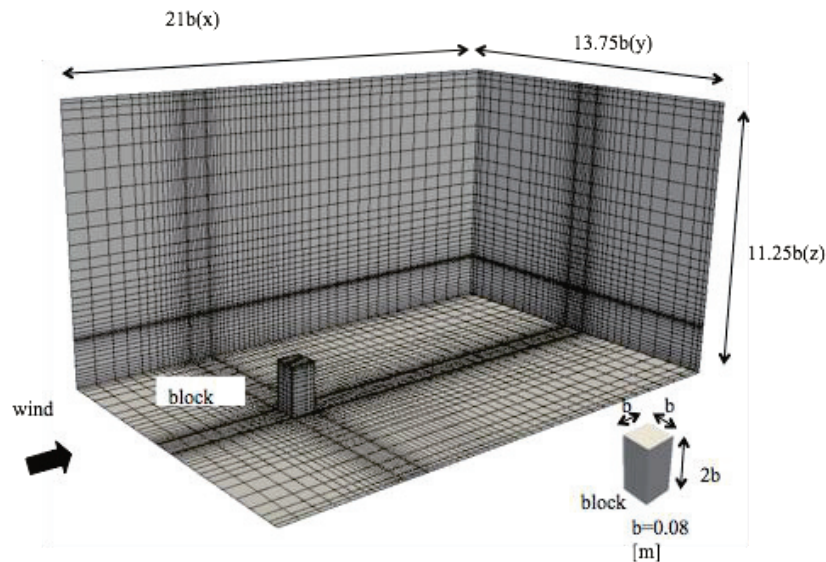


図 4-35 2:1:1 角柱周辺流れ計算格子

建物中心を通る x-z 断面における x 成分風速と乱流エネルギーの分布を図 4-36、図 4-37 に示す。実験値を円でプロットし、キャノピーモデルを実線、建物を再現したモデルを破線で表してある。

風速分布を比較すると、キャノピーモデルと建物を再現したモデルともに実験値と比較的によく一致していることが分かる。ただし、屋根面付近においてキャノピーモデルによる風速が実験値と比べて変化がなだらかになる点で違いが生じている。これはキャノピーモデルでは実験値と比べて屋根面付近で乱流エネルギーが過大になっていることから、乱流拡散により平均風速の変化が緩やかになったためと考えられる。

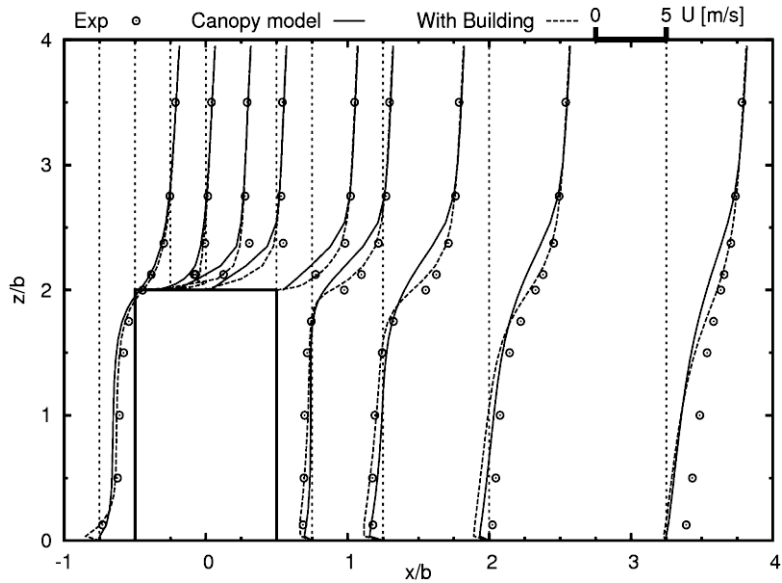


図 4-36 角柱中心断面における x 成分風速分布

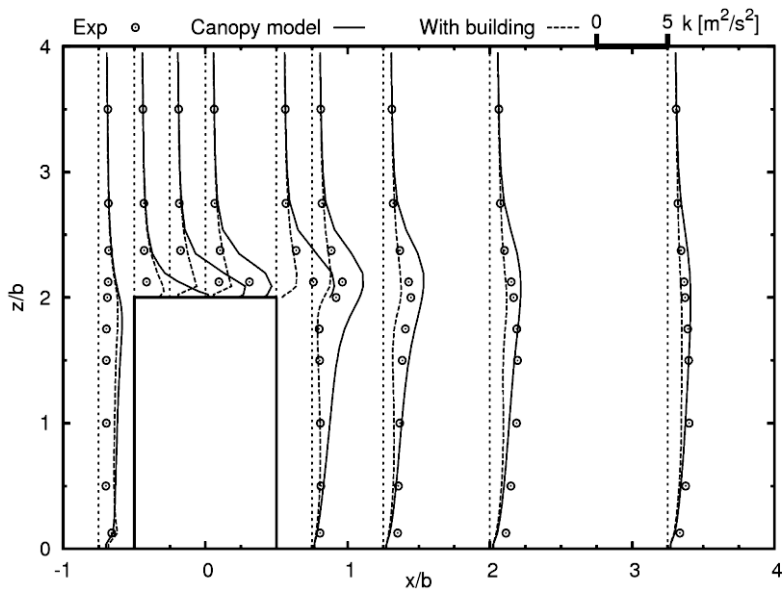


図 4-37 角柱中心断面における乱流エネルギー分布

## 2-2) 新潟市内低層建物密集地モデルでの検証

新潟市内低層建物密集地では建物再現モデルとメッシュ分割粗さの異なるキャノピーモデル 4 ケースの計 5 ケースの計算を行った。メッシュ分割は建物再現モデルとキャノピーモデル Case1 のメッシュサイズが同程度になるようにし、キャノピーモデルは Case1 から Case4 へ徐々にメッシュが粗くなるようにしている(表 4-9)。

計算モデルは風洞実験と同じ 1/250 のスケールで建物を再現し、風洞模型範囲を全て含む領域の計算を行っている。移流項差分スキームは安定的に計算できる一次精度風上差分とした(表 4-10)。計算環境は CPU が Intel(R) Core2 Quad Q8200 2.33GHz、メモリ容量が 6GB であり、1 コアで計算を行っている。

表 4-9 計算ケースとメッシュ数、基準メッシュサイズ

|          |       | メッシュ数     | 基準メッシュサイズ |
|----------|-------|-----------|-----------|
| 建物再現モデル  |       | 2,226,196 | 1.32m     |
| キャンピーモデル | Case1 | 1,732,608 | 1.32m     |
|          | Case2 | 700,416   | 2.64m     |
|          | Case3 | 184,320   | 5.27m     |
|          | Case4 | 55,296    | 10.54m    |

表 4-10 新潟市内低層建物密集地流れ計算条件

|                |                                                                   |
|----------------|-------------------------------------------------------------------|
| 計算領域           | 2m(xdir) × 2m(ydir) × 1m(zdir)<br>(風洞実験ターンテーブル直径 1.6m 模型縮尺 1/250) |
| 移流項差分スキーム      | U、k、ε すべて一次風上                                                     |
| 上空境界条件         | slip 壁                                                            |
| 建物,地表面境界条件     | 一般化対数則                                                            |
| 流入境界条件         | 風向:NNE<br>U、k は実験結果を補間<br>ε は局所平衡仮定による                            |
| 流出境界条件         | 勾配ゼロ                                                              |
| 乱流モデル          | LK モデル                                                            |
| 占有率 $\gamma_0$ | 図 4-38 参照                                                         |
| 代表長さ $l_0$     | 図 4-39 参照                                                         |
| 収束判定条件         | 相対残差ノルム $1 \times 10^{-3}$ 以下                                     |

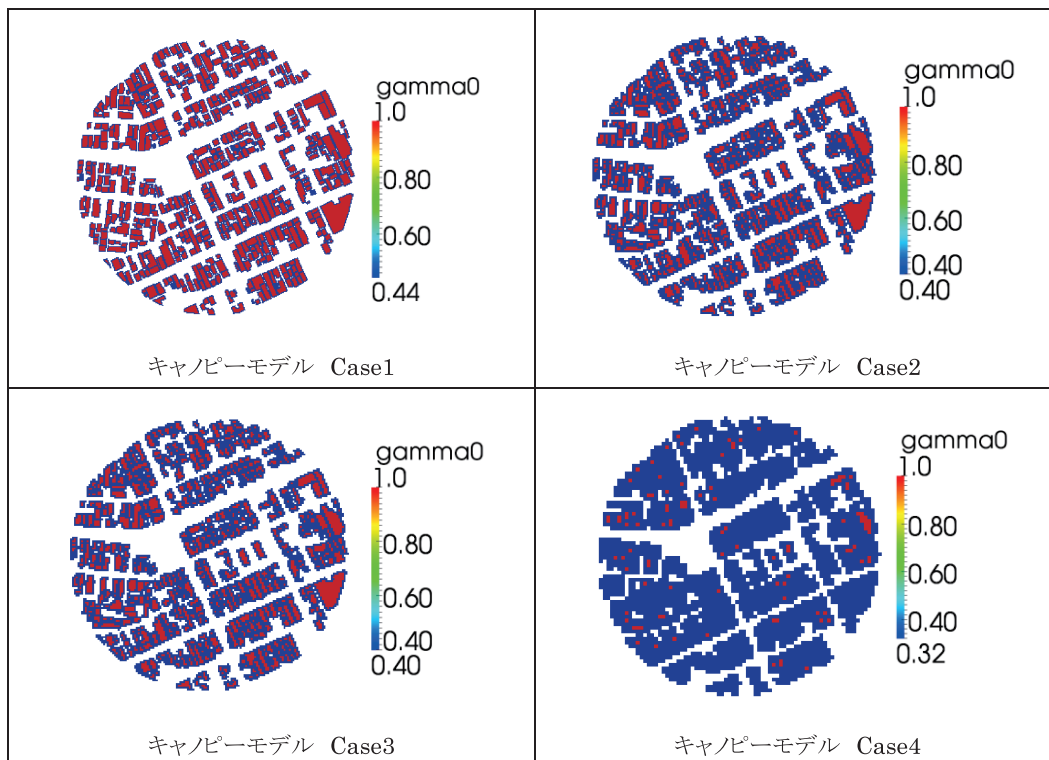


図 4-38 占有率  $\gamma_0$  の分布

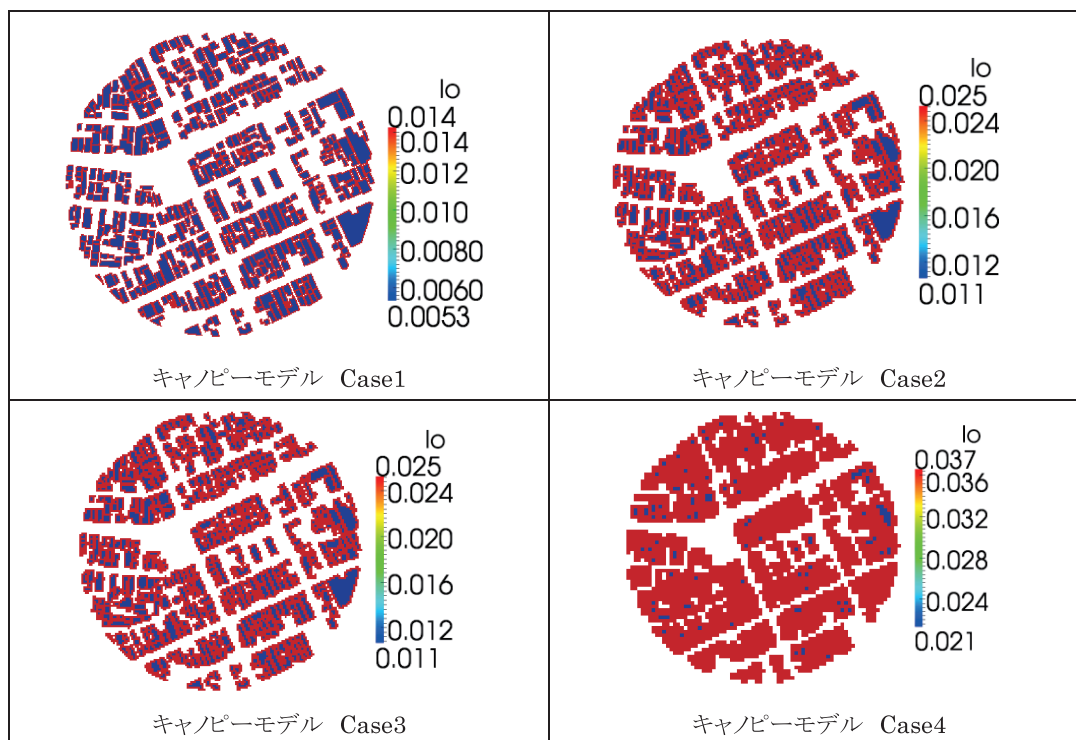


図 4-39 代表長さ  $l_0$  の分布

高さ 8mm(実スケール 2m)において、この高さの流入風速を基準風速とした風速比の比較を行った(図 4-40～図 4-46)。建物再現モデルと同じメッシュサイズであるキャノピーモデル Case1 は風洞実験と概ね良い相関が見られている。建物再現モデルと比較するとキャノピーモデルの方が全体的に小さい風速となる傾向にあることが分かる。メッシュを粗くするに従って道路の精度性が低下し流れが遅くなると考えられる。最も粗いケースではほとんどの測定点でほぼ同じ風速比となっている。

CFD と風洞実験、キャノピーモデルと建物再現モデルについて、それぞれの相関と二乗平均平方根誤差 (RMSE) を図 4-45、図 4-46 に示す。キャノピーモデル Case1 と建物再現モデルは良い相関が得られている。



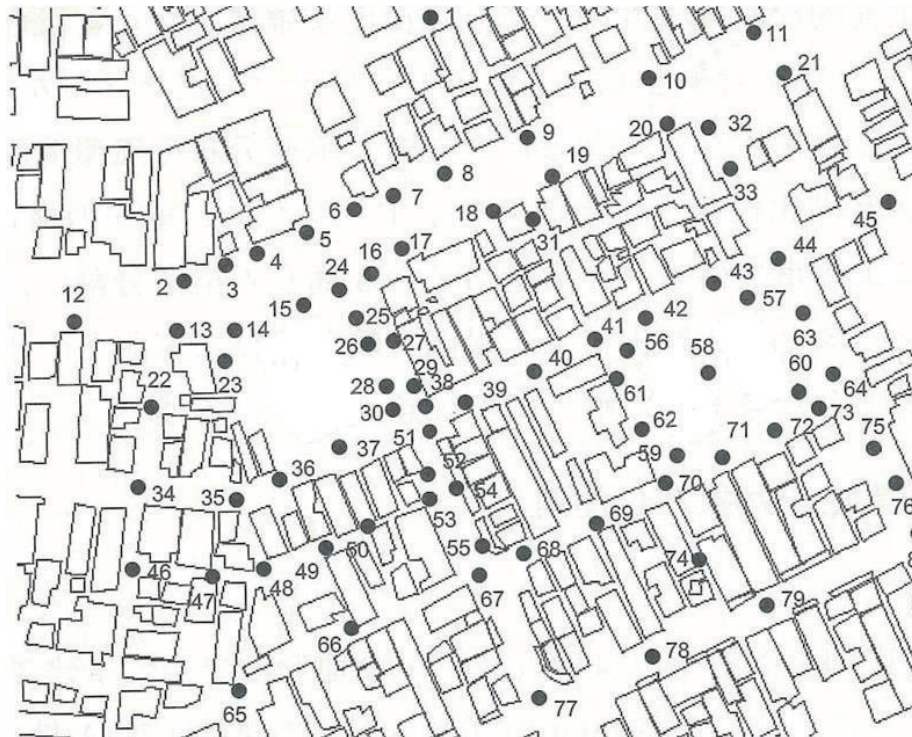


図 4-40 風洞実験測定点位置

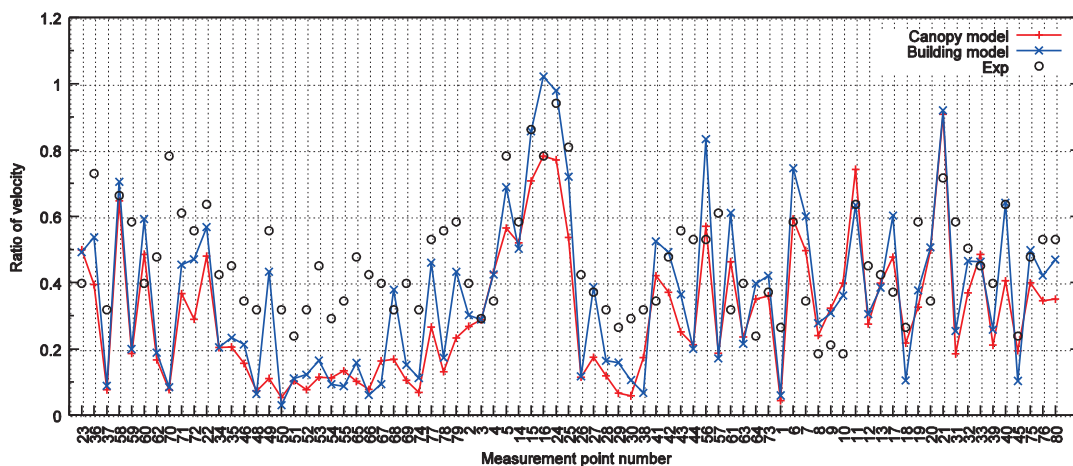


図 4-41 キャノピーモデル Case1 と建物再現モデル、風洞実験の風速比

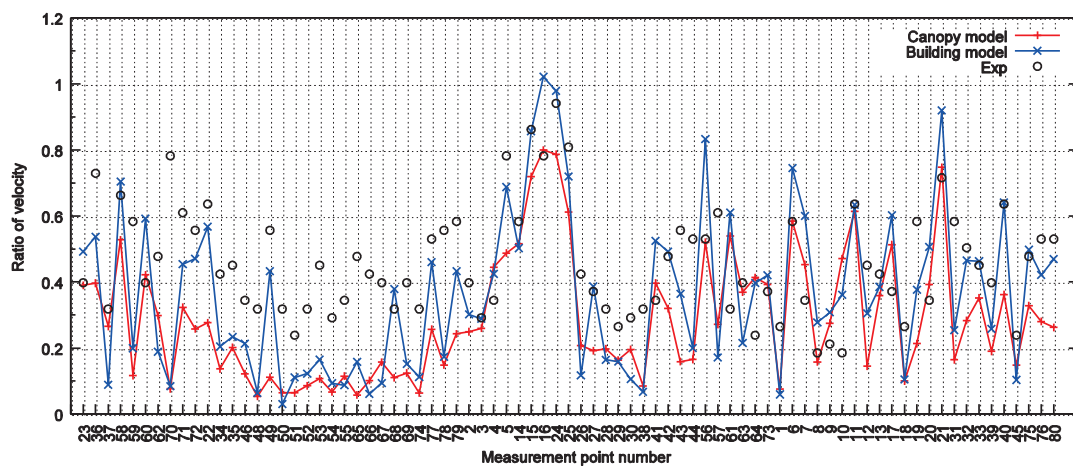


図 4-42 キャノピーモデル Case2 と建物再現モデル、風洞実験の風速比

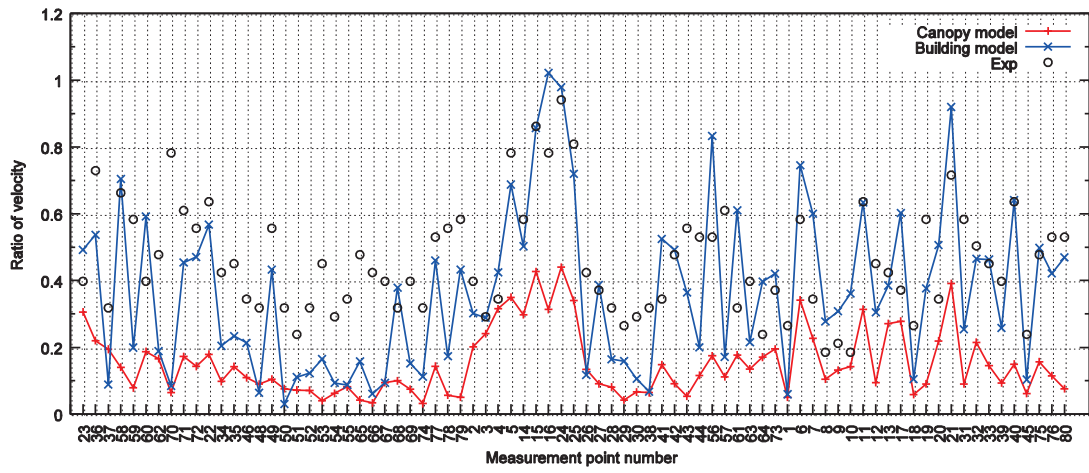


図 4-43 キャノピーモデル Case3 と建物再現モデル、風洞実験の風速比

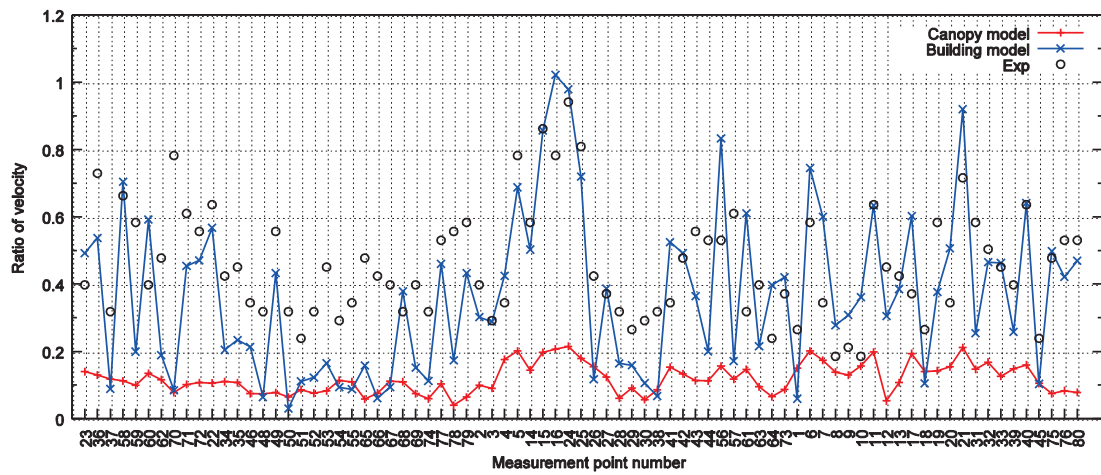
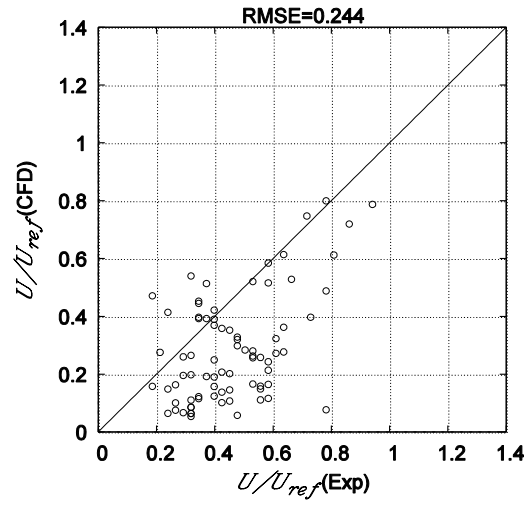
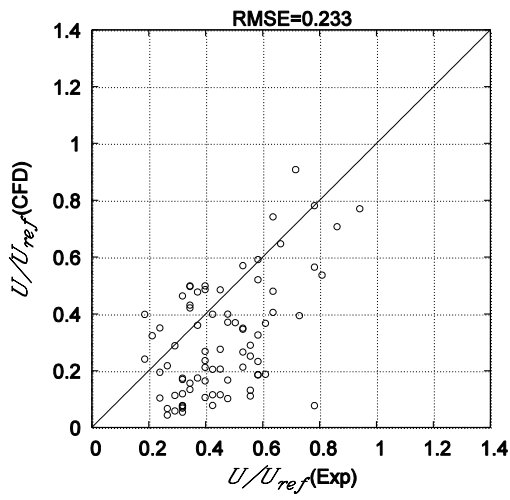
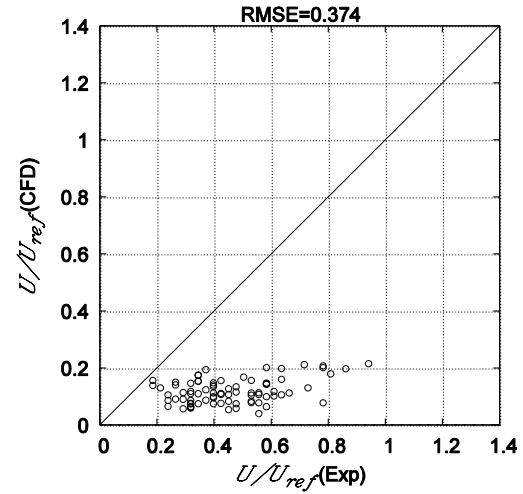
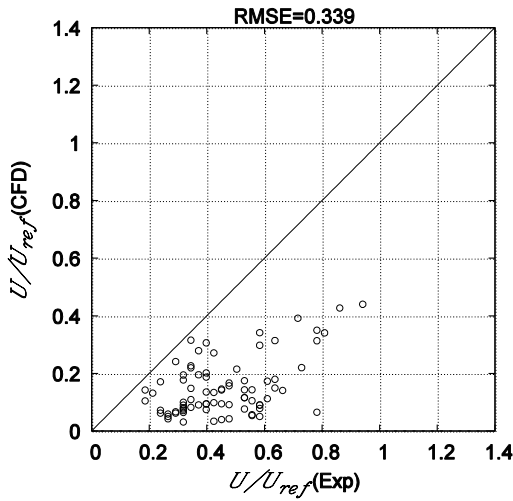


図 4-44 キャノピーモデル Case4 と建物再現モデル、風洞実験の風速比



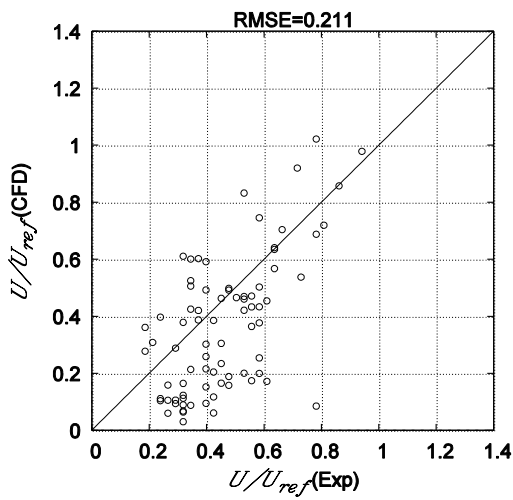
キャノピーモデル Case1

キャノピーモデル Case2



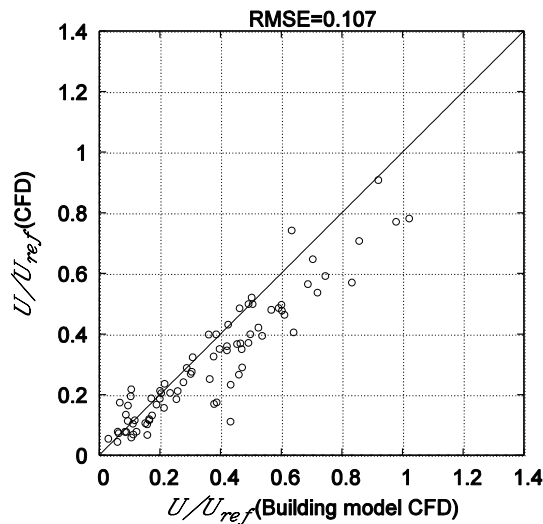
キャノピーモデル Case3

キャノピーモデル Case4

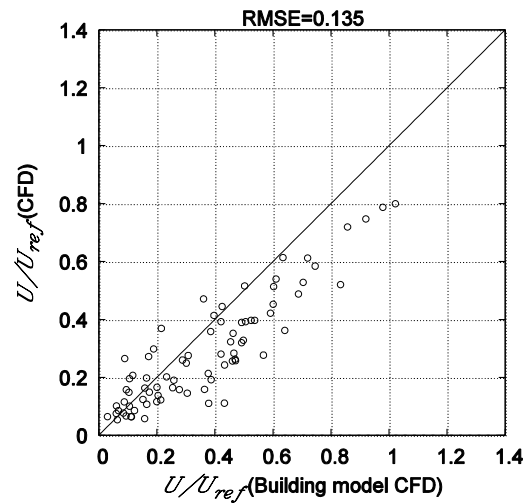


建物再現モデル

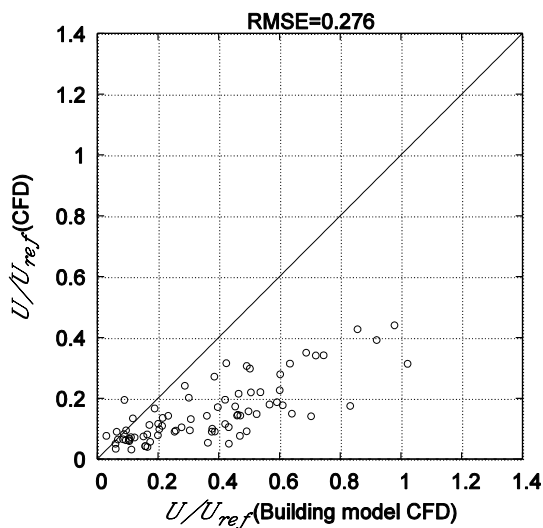
図 4-45 CFD と風洞実験の風速比の相関



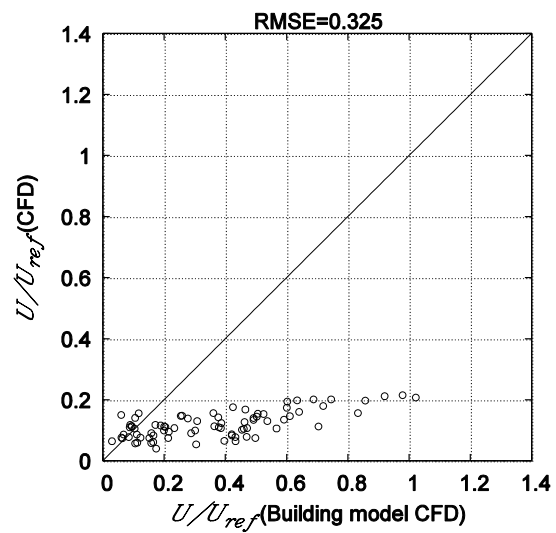
キャノピーモデル Case1



キャノピーモデル Case2



キャノピーモデル Case3



キャノピーモデル Case4

図 4-46 キャノピーモデルと建物モデルの風速比の相関

計算時間は計算環境によって異なってくるため、建物再現モデルの計算時間を 1 とした基準化計算時間により比較することとした。各ケースの基準化計算時間とキャノピーモデルと建物モデルの RMSE を比較すると、キャノピーモデルの Case1 と Case2 では計算時間が凡そ半分になるが、RMSE はそれほど大きくなっていない。Case2 から Case3 になるとさらに計算時間が 8 分の 1 程度になるが、RMSE が大きくなってしまう。

今回の結果では Case2 が計算精度、計算時間ともに適度な範囲に収まっていると考えられる。

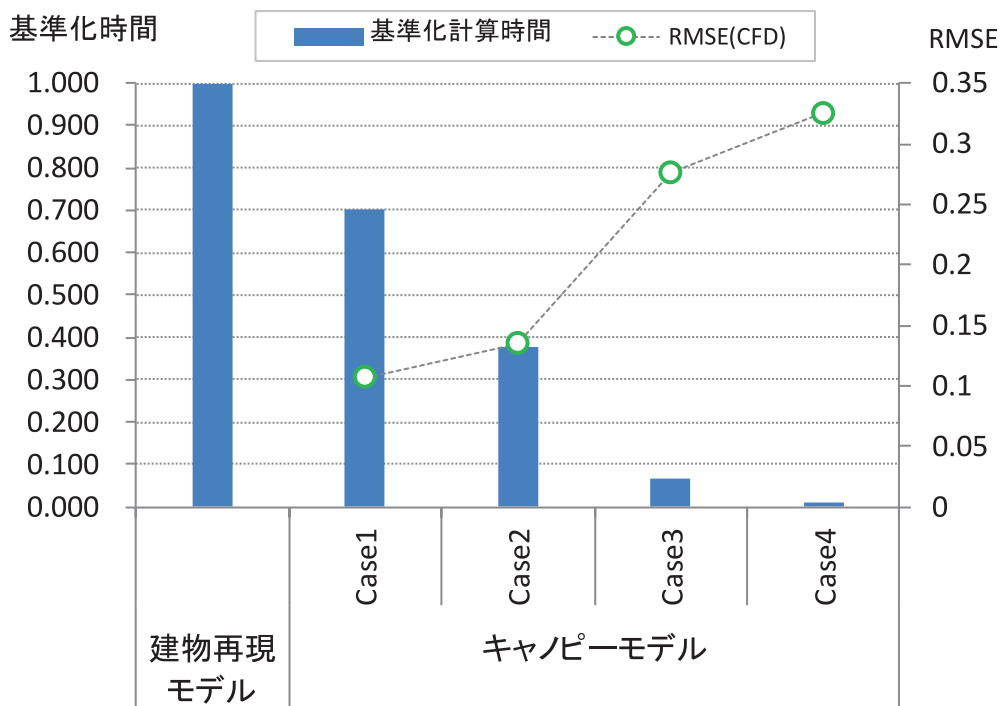


図 4-47 各ケースの標準化計算時間と RMSE (CFD)

表 4-11 各ケースのメッシュ数、RMSE、反復回数、計算時間、標準化計算時間

|          | メッシュ数     | RMSE (実験) | RMSE (CFD) | 反復回数 | 計算時間      | 標準化計算時間 |
|----------|-----------|-----------|------------|------|-----------|---------|
| 建物再現モデル  | 2,226,196 | 0.211     |            | 676  | 22812.78s | 1.000   |
| キャンピーモデル | Case1     | 0.233     | 0.107      | 563  | 15992.39s | 0.701   |
|          | Case2     | 0.244     | 0.135      | 500  | 8554.02s  | 0.375   |
|          | Case3     | 0.339     | 0.276      | 254  | 1509.59s  | 0.066   |
|          | Case4     | 0.374     | 0.325      | 155  | 179.96s   | 0.008   |

計算環境 CPU : Intel (R) Core2 Quad Q8200 2.33GHz、メモリ容量 : 6GB

## (2) 計算領域および計算格子の自動設定

計算にあたり、計算領域の設定と計算格子の作成を合理的に行うことは容易ではない。計算領域の拡大や計算格子の細密化は計算自体の信頼性向上につながるが、同時に計算時間を増大させることになることから、適切な計算領域の設定、計算格子の作成を避けることはできない。また、先述のキャノピーモデルの導入は、大領域と中領域の二つの領域において計算領域、計算格子を、計算時間の短縮を念頭におきながら設定する必要が生じることを意味する。本ツールでは、計算領域、計算格子の細密度を変えて計算して得られた結果の精度と計算に要した時間を比較検討することで、計算領域および計算格子のデフォルトとなる設定方法を導入している。以下にデフォルト設定とその検証過程について示す。

### 1) デフォルトとなる計算領域、計算格子の設定方法

本ツールにおいてデフォルトとなる計算領域、計算格子は、以下の手順により生成される。

- ①中領域の範囲は、評価対象領域を取り囲み 32m 以上外延した領域として設定する(なお、中領域となる範囲においては、建物の3次元モデルの作成が必須となる)。
- ②中領域を取り囲む領域として大領域(キャノピーモデルにより計算を行う領域)を設定する。
- ③大領域に基準格子サイズを 16m とした基準格子の設定を行う。
- ④基準地表面+128m の範囲の格子において細分化を適用する(細分化 Lv.1)。細分化とはここでは八分木分割を行うことを指す。すなわち、細分化 Lv.1 とは 16m 立方のセルを 8m 立方のセル 8 個に分割することを指す。この細分化 Lv.1 適用後の計算格子をキャノピーモデルによる大領域計算に用いる。
- ⑤中領域の範囲に、順次、基準地表面+64m、32m、16m の範囲の格子に細分化を適用する(細分化 Lv.2、3、4)。細分化 Lv.4 適用後の計算格子サイズの最小幅は 1m となる。
- ⑥建物間の空隙を再現する必要がある箇所には、細分化 Lv.5、6 を適用する。細分化 Lv.6 適用後の計算格子サイズの最小幅は 0.25m となる。細分化 Lv.6 適用後の計算格子を中領域計算に用いる。

計算格子に適用する細分化の概要をまとめると表 4-12 のようになる。

表 4-12 計算格子設定における細分化

| 細分化段階 | 適用範囲                    | 適用後の最小格子幅 | 備考       |
|-------|-------------------------|-----------|----------|
| 基準格子  | 大領域全体(含む中領域)            | 16m       |          |
| Lv.1  | 大領域の基準地表面+128mの範囲       | 8m        | 大領域計算に使用 |
| Lv.2  | 中領域の基準地表面+64mの範囲        | 4m        |          |
| Lv.3  | 中領域の基準地表面+32mの範囲        | 2m        |          |
| Lv.4  | 中領域の基準地表面+16mの範囲        | 1m        |          |
| Lv.5  | 中領域内で建物間の空隙を再現する必要がある箇所 | 0.5m      | 中領域計算に使用 |
| Lv.6  |                         | 0.25m     |          |

### 2) 計算領域、計算格子のデフォルト設定に関する検証

前述の通り、デフォルトの中領域の範囲は、建物の基準高さ H を 6m(2階建想定)として、評価対象領域を+5H(格子間隔の関係から+5H→+32m としている)外延した領域としている。また、大領域計算に用いる計算格子幅の最小値は細分化 Lv.1 適用後の 8m、中領域計算に用いる計算格子幅の最小値は Lv.6 適用後の 0.25m としている。この設定に至った検証結果について以下に示す。

中領域のサイズに関しては、H=6m として、評価対象領域のみ、評価対象領域+約 5H(32m)、+

約 10H(+64m)、+16H(96m)について検討した。また、細分化段階については、大領域については Lv.1、Lv.2 適用後、中領域については Lv.5、Lv.6 適用後の二段階について検討した。計算ケースを表 4-13 に、計算範囲を図 4-48 に、計算格子を図 4-49 に示す。

表 4-13 計算ケース

|                            | 大領域基準最小<br>メッシュサイズ       | 大領域<br>計算格子数 | 中領域基準最小<br>メッシュサイズ          | 中領域の計算領域大きさ       | 中領域<br>計算格子<br>数 |
|----------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------------|-------------------|------------------|
| 中領域のメッシュ細分化 5 段階(Lv.5)のケース |                          |              |                             |                   |                  |
| case1-1                    | 8m<br>細分化 1 段階<br>(Lv.1) | 20 万         | 0.50m<br>細分化 5 段階<br>(Lv.5) | 評価対象領域のみ          | 74 万             |
| case1-2                    |                          |              |                             | 評価対象領域+約 5H(32m)  | 132 万            |
| case1-3                    |                          |              |                             | 評価対象領域+約 10H(64m) | 206 万            |
| case1-4                    |                          |              |                             | 評価対象領域+16H(96m)   | 293 万            |
| case2-1                    | 4m<br>細分化 2 段階<br>(Lv.2) | 82 万         |                             | 評価対象領域のみ          | 74 万             |
| case2-2                    |                          |              |                             | 評価対象領域+約 5H(32m)  | 132 万            |
| case2-3                    |                          |              |                             | 評価対象領域+約 10H(64m) | 206 万            |
| case2-4                    |                          |              |                             | 評価対象領域+16H(96m)   | 293 万            |
| 中領域のメッシュ細分化 6 段階(Lv.6)のケース |                          |              |                             |                   |                  |
| case3-1                    | 8m<br>細分化 1 段階<br>(Lv.1) | 20 万         | 0.25m<br>細分化 6 段階<br>(Lv.6) | 評価対象領域のみ          | 102 万            |
| case3-2                    |                          |              |                             | 評価対象領域+約 5H(32m)  | 173 万            |
| case3-3                    |                          |              |                             | 評価対象領域+約 10H(64m) | 282 万            |
| case3-4                    |                          |              |                             | 評価対象領域+16H(96m)   | 387 万            |
| case4-1                    | 4m<br>細分化 2 段階<br>(Lv.2) | 82 万         |                             | 評価対象領域のみ          | 102 万            |
| case4-2                    |                          |              |                             | 評価対象領域+約 5H(32m)  | 173 万            |
| case4-3                    |                          |              |                             | 評価対象領域+約 10H(64m) | 282 万            |
| case4-4                    |                          |              |                             | 評価対象領域+16H(96m)   | 387 万            |

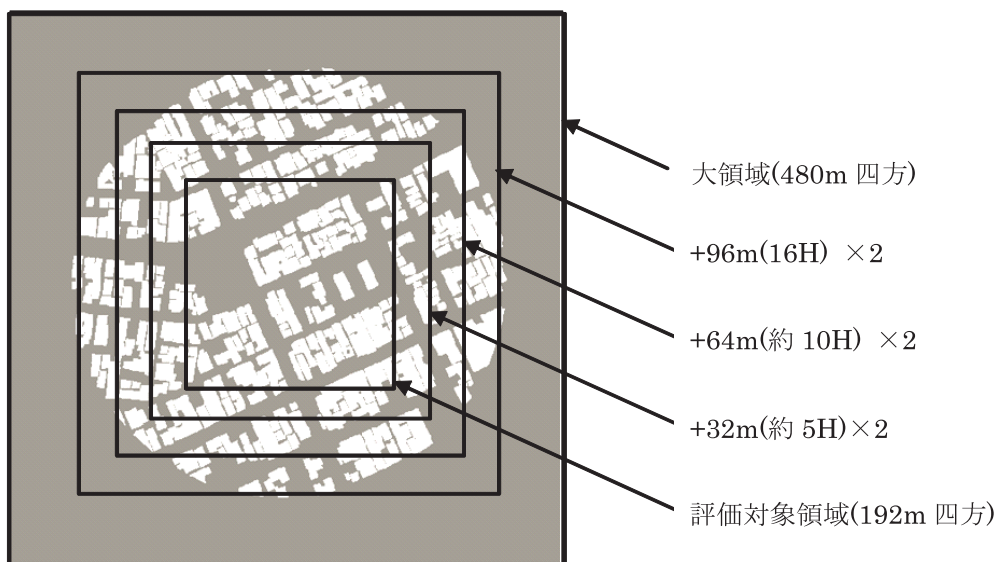


図 4-48 計算範囲

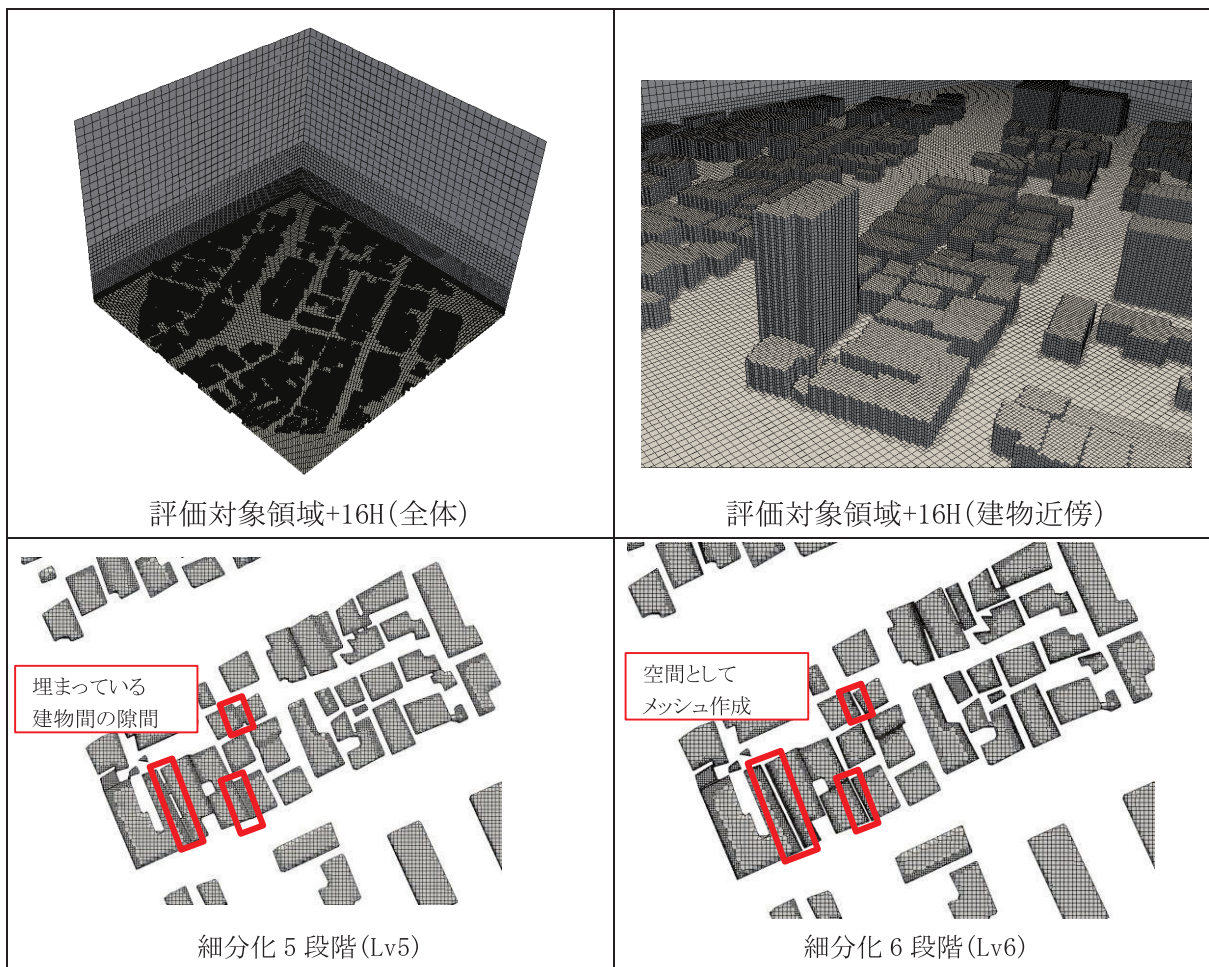


図 4-49 計算格子

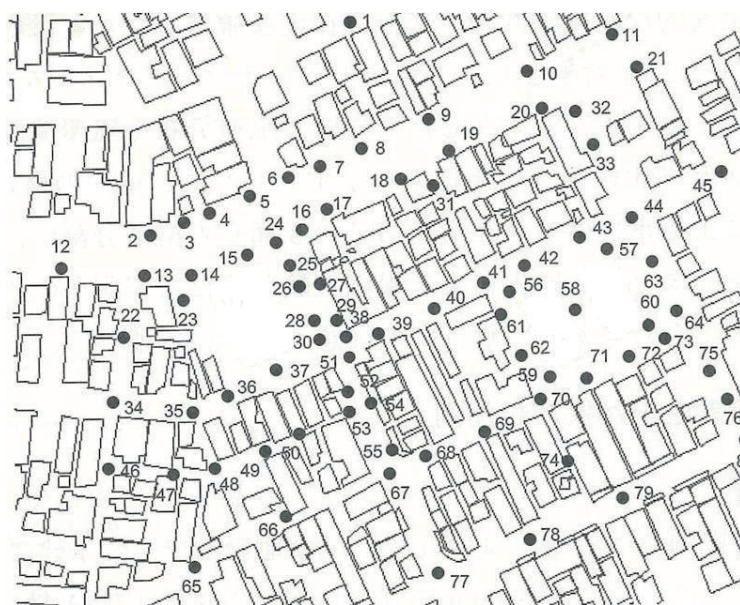


図 4-50 風洞実験測定点位置



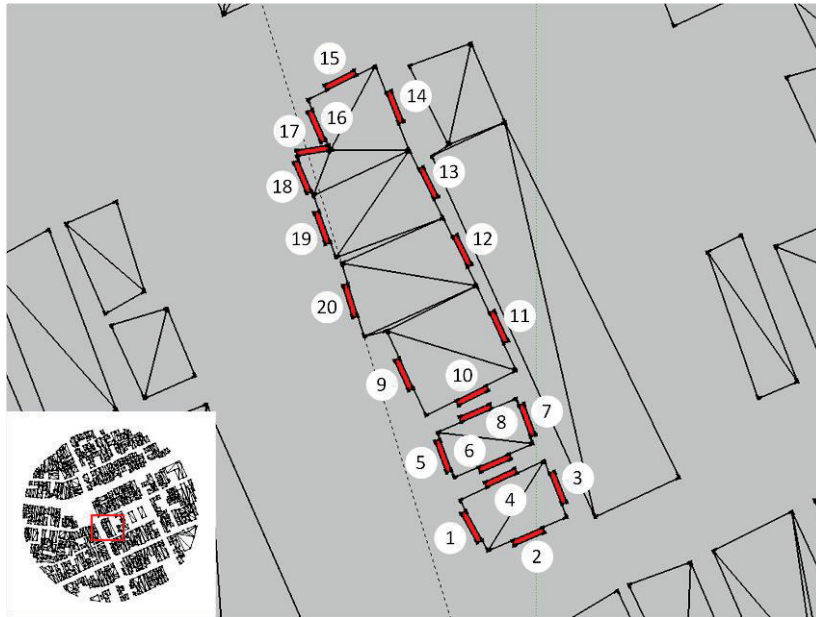


図 4-51 建物近傍の検査空間(幅 3m×高さ 3m×奥行き 0.5m)

計算は、前述の「日本建築学会：市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブックーガイドラインと検証用データベースー2007年」記載の新潟市内低層建物密集地のモデルを用いて行った。計算においては、大領域の計算結果を中領域の流入境界面にマッピングし、流出条件は勾配ゼロとしている。

図 4-50 の測定点での風速比(流入風速に対する風速の比)について風洞実験及び比較基準 CFD との比較を行った。また、中領域の風速、渦粘性係数の結果を用いて図 4-51 の建物近傍の検査空間から汚染質を定常発生したときの濃度を逐次計算し、その領域の運動エネルギー(KE)の平均値と換気回数を算出した。

運動エネルギー $KE[m^2/s^2]$ 、換気回数  $N[回/h]$ は以下の式より算出した。換気回数は風洞実験と実スケールの時間スケール比で補正している。

$$KE = \frac{1}{V_P} \int \left[ \frac{1}{2} \times (U^2 + V^2 + W^2) + k \right] dV$$

$$N = \frac{PFR}{V_P} \times 3600, \quad PFR = \frac{q_P V_P}{C_P}$$

$$t = \frac{l}{v}, \quad N_{act} = \frac{t_{exp}}{t_{act}} \times N_{exp}$$

$V_P$ : 汚染質発生領域の体積 $[m^3]$ 、 $U, V, W$ : X, Y, Z 成分の風速 $[m/s]$ 、 $k$ : 乱流エネルギー $[m^2/s^2]$ 、 $q_P$ : 汚染質発生量 $[kg/m^3s]$ 、 $C_P$ : 汚染質発生領域の平均濃度 $[kg/m^3]$ 、 $t$ : 時間スケール、 $l$ : 代表長さ、 $v$ : 代表風速 $[m/s]$

地表面高さ 2m において、図 4-50 の測定点での風速比(流入風速に対する風速の比)について風洞実験及び比較基準 CFD との二乗平均平方根誤差(RMSE)の比較を行った(図 4-52)。中領域サイズが大きいく程 RMSE が小さくなるが、風洞実験との RMSE は中領域サイズの違いによる差が小

さい。また、格子サイズ違いによる RMSE の差は比較的小さい結果となった。

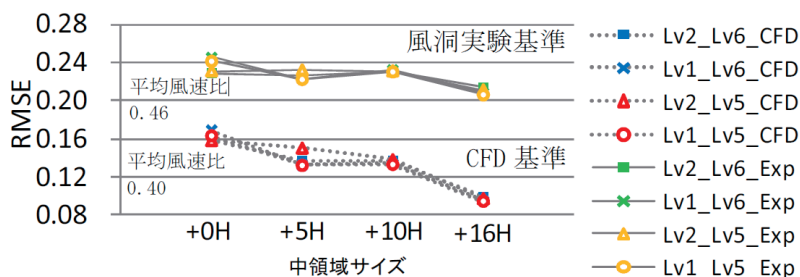


図 4-52 風速比の RMSE の比較

図 4-51 の検査空間における平均運動エネルギーと換気回数の比較基準 CFD との RMSE を図 4-53、図 4-54 に示す。運動エネルギー、換気回数ともに中領域サイズが評価領域+16H の RMSE が最も小さいものの、中領域サイズと RMSE の関係に明確な傾向は見られなかった(図 4-54 における数値の欠落は濃度計算が収束しなかったことによる)。

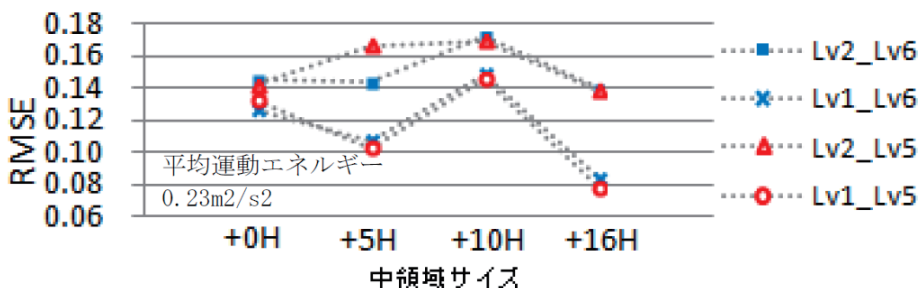


図 4-53 平均運動エネルギーの RMSE の比較

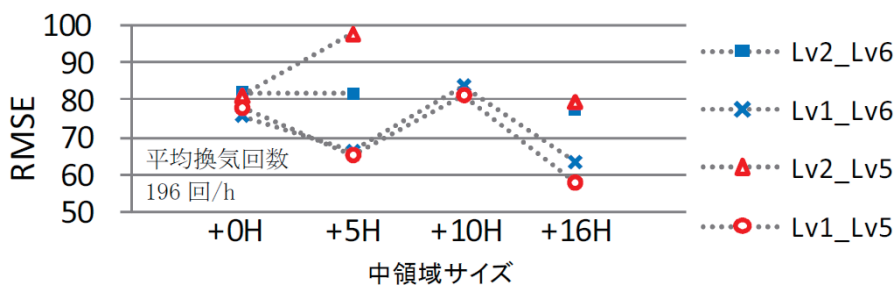


図 4-54 換気回数の RMSE の比較

各ケースの基準化計算時間（大領域と中領域の合計計算時間を比較基準 CFD の計算時間(29 時間 15 分 10 秒<sup>(※注 4-1)</sup>)で除した値)の比較を図 4-55 に示す。どのケースも比較基準 CFD の計算時間の 25%以下の計算時間となり大幅な時間短縮となっている。また、大領域、中領域の格子サイズによる計算時間の違いは比較的小さく、中領域サイズによる違いが大きい結果となっていることが分かる。

※注 4-1 計算環境は CPU が Intel® Xeon X5680 3.33GHz、メモリ容量は 48GB。

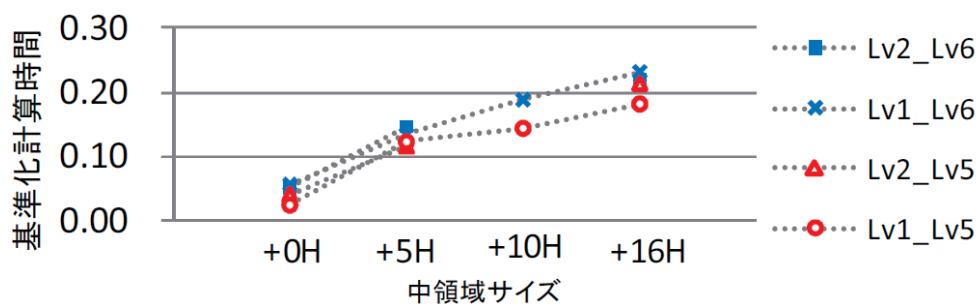


図 4-55 基準化計算時間の比較

建物近傍の運動エネルギーと換気回数の比較においても、中領域のメッシュの細分化による結果の差異は小さい。運動エネルギーの大きいところでは大領域 Lv.2 が大領域 Lv.1 よりも小さな値になった。また、中領域の再現領域の大きさが大きくなる程、大領域で建物を再現したときの計算値に近くなる結果となった。

以上の検討から、中領域サイズのサイズについては大きい方が精度が良くなる傾向にあることから評価領域+16H が望ましいと考えられるが、計算時間の短縮を図ることを考え、評価領域+5H を本ツールの中領域サイズのデフォルトとすることとした。また、格子サイズについては、大領域は Lv.1 でも大きく精度が下がらないことから Lv.1 を、中領域は密集市街地形状をより詳細に再現できる Lv.6 をデフォルトとすることとした。

### (3) その他の計算時間の短縮方法

以上の他に、格子設定や計算結果を再利用することで、計算時間を短縮できるようにしている。建物に即して生成した既成の格子や計算結果を初期値として用いることを可能としており、建て替えルール案に対する格子生成や CFD 計算に要する時間を短縮できるようにしている。

また、複数の CPU コアをもつコンピュータを使用する際に、ユーザーが明示的に設定をしなくても、自動的にコア数分の並列計算を行える機能を持たせ、シームレスに計算時間の短縮を図ることを可能としている。

#### 4. 6 街区構造基礎集計機能

市街地データに、1つ又は複数の評価領域を設定した上で、評価領域ごとに、当該領域内の建物構成に関して、a-1)～a-4)及びb-1)～b-9)に示す内容の計算を行う。

計算結果については、

- ①マップウィンドウへの表示（表示内容を選択するインターフェイス及び凡例画像を作成する）
- ②評価領域ごとの集計値 b-1)～b-9)についてのファイル出力
- ③市街地概要集計テーブル（表 4-15）への計算結果のデータベース登録を行うことが可能である。

表 4-14 街区構造基礎集計内容

| 分類                    | 項目                                       | 単位             |
|-----------------------|------------------------------------------|----------------|
| a)個別建物・個別敷地の基礎情報の計算内容 | a-1)1階部分の面積                              | m <sup>2</sup> |
|                       | a-2)各階面積の合計（以下、「延べ床面積」という。）              | m <sup>2</sup> |
|                       | a-3)敷地面積                                 | m <sup>2</sup> |
|                       | a-4)建ぺい率・容積率                             | -              |
| b)評価領域ごとの集計値の計算内容     | b-1)評価領域面積                               | m <sup>2</sup> |
|                       | b-2)評価領域内建物棟数（全数及び建物構造種別）                | 棟              |
|                       | b-3)評価領域内建物面積（1階部分の面積、延べ床面積）（全数及び建物構造種別） | m <sup>2</sup> |
|                       | b-4)評価領域内敷地面積                            | m <sup>2</sup> |
|                       | b-5)評価領域内道路面積（評価領域面積－評価領域内敷地面積）          | m <sup>2</sup> |
|                       | b-6)評価領域内建ぺい率、容積率、道路面積率                  | m <sup>2</sup> |
|                       | b-7)塀柵樹木数                                | 個              |
|                       | b-8)ノード（交差点）数及びリンク（2つの交差点間の道路）数          | 個              |
|                       | b-9)評価領域内の最大及び最小標高値                      | m              |

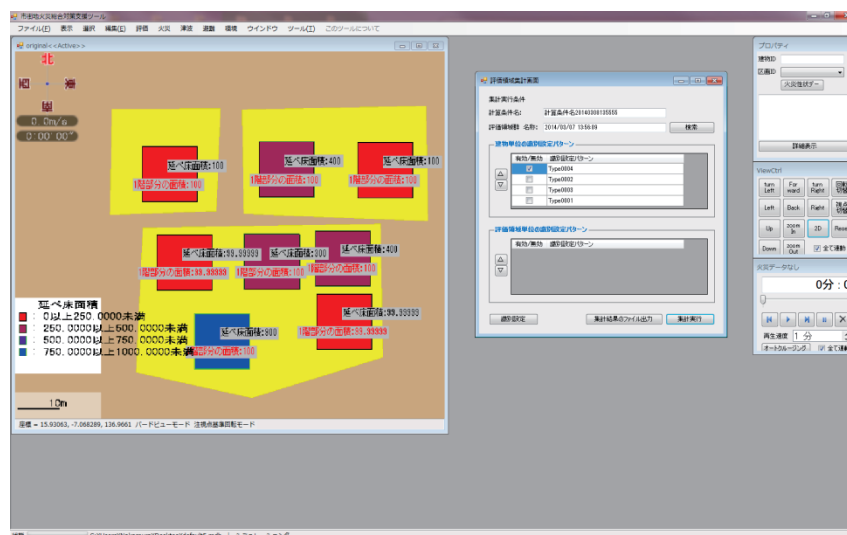


図 4-56 評価領域集計（個別建物・個別敷地単位）結果画面表示例

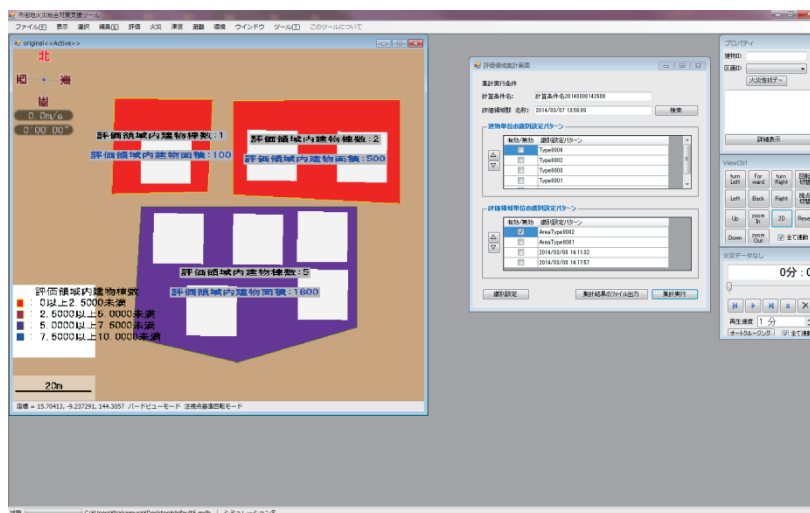


図 4-57 評価領域集計（評価領域ごと）結果画面表示例

表 4-15 市街地概要集計テーブル<フォーマット>

| No. | 項目                          | 列          | 備考               |
|-----|-----------------------------|------------|------------------|
| 1   | 評価領域 ID                     | 1          |                  |
| 2   | 評価領域面積                      | 2          |                  |
| 3   | 評価領域内建物数(全数)                | 3          |                  |
| 4   | 評価領域内建物数<br>(建物構造種別)        | 4~6        | 列数は建物構造種別の数による   |
| 5   | 評価領域内建物面積<br>(1階部分：全数)      | 7          |                  |
| 6   | 評価領域内建物面積<br>(延べ床面積：全数)     | 8          |                  |
| 7   | 評価領域内建物面積<br>(1階部分：建物構造種別)  | 9 ~<br>11  | 列数は建物構造種別の数による   |
| 8   | 評価領域内建物面積<br>(延べ床面積：建物構造種別) | 12 ~<br>14 | 列数は建物構造種別の数による   |
| 9   | 評価領域内敷地数                    | 15         |                  |
| 10  | 評価領域内敷地面積                   | 16         |                  |
| 11  | 評価領域内道路面積                   | 17         | 評価領域面積－評価領域内敷地面積 |
| 12  | 評価領域内建ぺい率                   | 18         |                  |
| 13  | 評価領域内容積率                    | 19         |                  |
| 14  | 評価領域内道路面積率                  | 20         |                  |
| 15  | 評価領域内堀柵樹木数                  | 21         |                  |
| 16  | ノード(交差点)の数                  | 22         |                  |
| 17  | リンク(2つの交差点間の道路)の数           | 23         |                  |
| 18  | 評価領域内の最大標高値                 | 24         |                  |
| 19  | 評価領域内の最小標高値                 | 25         |                  |

## 5. シミュレーション結果の検索・表示・比較等の計算結果管理機能の開発

本プログラムは防火・避難・日影状況・採光・換気・通風の6種のシミュレーションを用いて様々な市街地条件や計算条件に基づいて計算・評価を行うプログラムであり、必要な計算結果を容易検索できるように管理する必要がある。また、街区性能水準を適切に把握するためには複数の計算結果を並列、一覧して計算結果を表示・比較できることも重要である。

そのため、下記の機能を開発した。

- 1) 一覧表示する計算結果の数をユーザーが選択し、選択した数の複数の窓を並べて表示する機能
- 2) 表示された各窓に対して、任意の条件に基づく既存の計算結果を検索する機能
- 3) 表示された各窓に、検索された計算結果を画像及びデータシートで表示機能

複数の計算結果の表示例を図4-58に示す。

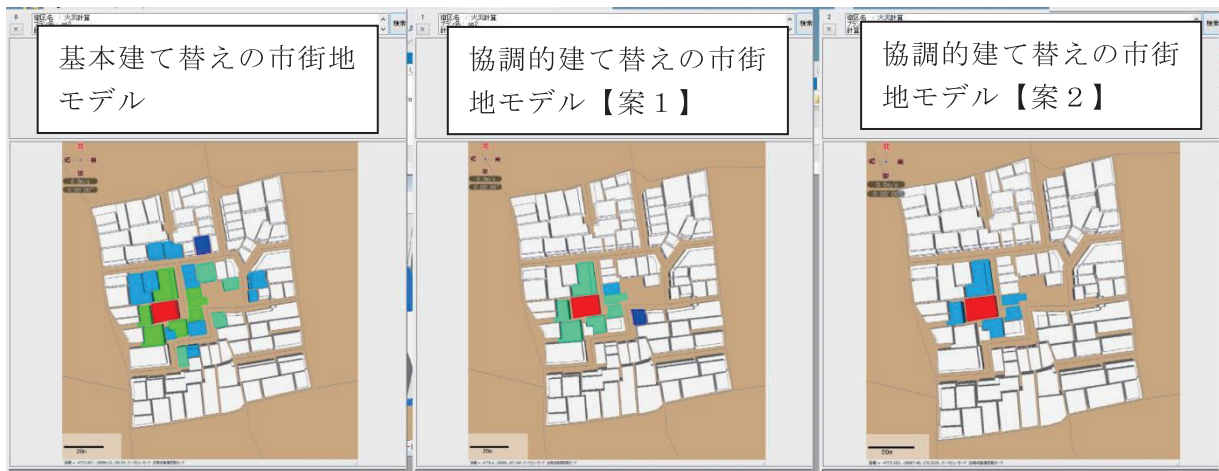


図4-58 複数計算結果の表示例（各建物の出火時刻を30分ごとに色付け）

## 6. その他の機能の開発

以上の機能の他、本プログラムを操作・評価を補助する機能として以下の機能を開発した。

### 6. 1 計測機能

地図画面上にて、2点を選択し、その間の距離（x軸方向距離、y軸方向距離、z軸方向距離及び最短距離）を計測する機能。

### 6. 2 UNDO/REDO 機能

ユーザーの操作を補助するため、次の2種のUNDO機能及びREDO機能を作成した。

#### 6. 2. 1 建物編集のUNDO/REDO 機能

直前の建物データの編集操作をキャンセルする機能及びキャンセルした操作を再度実行する機能。

#### 6. 2. 2 地図表示位置のUNDO/REDO 機能

地図画面に直前に表示していた範囲（視点の位置、向き及び画角等）に戻す機能及び戻す前の状態に戻る機能。

#### 【第4章の参考文献】

##### <火災>

- ・ 国土交通省総合技術開発プロジェクト高度な画像処理による減災を目指した国土の監視技術の開発総合報告書, 国土地理院技術資料 C・1 - No.400, pp.145-192, 2010.12

##### <避難>

- ・ 岩見達也, 竹谷修一: マルチエージェント手法を用いた広域火災時の避難シミュレーションモデルの構築, 日本建築学会 2012 年度大会学術講演梗概集 A-2, 日本建築学会, pp.7-8, 2012.7
- ・ 岩見達也, 竹谷修一: 津波と火災を考慮した避難シミュレータのプロトタイプ, 日本火災学会 平成 26 年度研究発表会概要集, 日本火災学会, pp. 24-25, 2014.5

##### <日影>

- ・ 山崎均, 笠原信一: 環境情報の図形表示に関する研究 その4 - 解析的計算方法による等日影時間図の作成 -, 日本建築学会九州支部研究報告第 24 号・2 計画系, pp. 29-32, 1979.2

##### <換気・通風>

- ・ 榎木康太, 石原孟: 一般化キャノピーモデルの提案と都市域における風況予測への応用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No.1, pp.28-47, 2012.2