

広域避難シミュレーションのためのモデル記述言語と 高速化のための並列分散環境の構築

Building a model description language for wide-area evacuation simulation and parallel-distributed environment for Speed-up

山崎淳城[†], 飯島 正[‡]

Junki YAMASAKI[†], and Tadashi IJIMA[‡]

[†]慶應義塾大学大学院 理工学研究科

[‡]慶應義塾大学 理工学部

[†]Graduate School of Science and Technology, Keio Univ.

[‡]Faculty of Science and Technology, Keio Univ.

要旨

本論文では広域災害避難シミュレーションに関する2つの取り組みに関して報告する。1つ目は、広域災害避難シミュレーションモデルを作成する際の支援ツールであるモデル記述言語の構築に関してである。避難者エージェントや地理空間のモデリングをより容易に構築することを可能にし、特にソフトウェアやプログラミングに精通していない人でも簡単にシミュレーションを行えるようにすることが目的である。2つ目の取り組みは、シミュレーションの高速化に関する取り組みである。この種のシミュレーションは計算量が多く多大な計算時間がかかることが多い。そこで並列分散化による高速化を試みている..

1. はじめに

日本は災害が頻繁に起こる国であり、その対策は不可欠である。特に市町村などの広域での災害による人的・物的被害の大きさをあらかじめ予測するためにコンピュータシミュレーションが用いられている。コンピュータ上で仮想的に津波・噴火などの災害を起し、被害状況を予測する。特にこのような広域避難シミュレーションの場合、Multi-Agent Simulation(MAS)が多く用いられている。MASとは、あらかじめルールを与えることで自律的に振る舞う“エージェント”と、そのエージェントが存在する“環境”を定義した上で、エージェント同士の協調や環境からの情報取得を通してエージェントが状態を変化させていくことで、全体の現象を表現する手法である。本研究においてもMASベースの広域災害避難シミュレーションをターゲットに据え、シミュレーションモデルを構築するが、その際に行うべきことは大きく分けて3つあり、避難者、地理空間、災害(津波など)のモデリングである。

本研究では避難者のモデリングに特に焦点を当てているが、広域災害における避難者エージェントのモデリングに関しての研究は数多くある。例えば現在位置から避難所までの最短距離経路を通るようなモデル([9],[10])、道路上での混雑があった場合に回避するようなモデル([11])など様々存在する。2つ目の地理空間のモデリングとはエージェントが存在する環境として実際の物理空間を模した空間をコンピュータ上に作成することを意味する。3つ目の災害のモデリングは災害の時系列の動きを表現することである(本報告では津波による災害を想定しているが、その限りではない)。

こういった避難者エージェントモデルを構築しシミュレーションを行う場合、モデル構築からそれを実装するところまで全て人出で行う必要がある。これは、防災の専門家であっても、ソフトウェアやプログラム構築の技術が充分でない場合には負担になる可能性が高い。また、膨大なプログラムの中にモデルの各要素が埋没してしまうために、モデル間の相違点が明確にならなくなりがちである。そのため本研究では、広域災害避難シミュレーションをより容易に構築するための支援ツールとしてモデル記述言語を構築することを試みている。特にDSL(Domain Specific Language)の考え方を導入することで、今までのモデリングやコード生成の負担を軽減することが目的である。

防災シミュレーションにとって、シナリオの設定-発災時間(朝・昼・夜)、避難開始時刻、訪問者の比率、災害の種類等々のパラメータを容易に設定可能とし、それらのパラメータの適切さを評価したり、比較実験できる機能は望ましいものといえる。しかし、広域避難シミュレーションにおける全てのパラメータやモデルのタイプを事前に列挙し、そのすべてを構築可能な万能なモデリング言語を構築するのは難しい。そこで、まずはよく使われているモデルから出発し、実際にシミュレーションとして稼働させつつ、機能を追加していくことを現段階では目標として設定している..

次に高速化の必要性に関して述べる。本研究室では広域災害避難シミュレーションの構築を継続的に行ってきたが、その利用対象として想定しているのは、第一に地方自治体である。特に災害時などの緊急避難計画の立案などの際に有効に活用できるものとした。実際の被災時に、被害状況の予測や意思決定の支援のためにシミュレーションを利用する場合を想定する。この場合、シミュレーションに多大な時間がかかると、意思決定の遅延につながる事が予想される。災害の種類にも依るが、数日前に事前シミュレーションが可能なものから、数時間程度のリアルタイムシミュレーションが非常に有効なものもある。しかし、いずれにしろできるだけ高速に実行できることが望ましい。

一方で、広域災害避難シミュレーションというのは粒度や設定にもよるが計算量が多いのが一般的である。数万人単位での人の避難行動の計算や地理空間の状態の変化(例えば地形の変化、道路の状態の変化など)、また津波などの災害の状態の変化(粒子法などにおいては1つ1つの粒子の状態の計算)など多大な計算時間が必要となる¹。そこで、シミュレーションを複数台のコンピュータを用いて並列分散化して実行することで、高速化を図るプラットフォームの実現を試みている。そこでは、スーパーコンピュータなどではなく、地方自治体が保有し日常的に利用しているPCのうち、緊急時に利用できる複数のPC(それも性能が異なる異種PC)をアドホックに、連携させることを想定している。但し、今回は、特に避難者エージェントが道路上を移動する広域避難シミュレーションに限定し、道路ネットワークモデルに着目して、その特性を活かす形で高速化を試みた。

本論文の構成は次のようになっている。まず次節からシミュレーションモデルについて論じ、その後でそのシミュレーションモデルを実現するモデル記述言語に関して述べる。第4節では高速化実現のための並列分散環境の概要に関して記述する。第5節以降では、並列分散環境の設計実装と、十分な評価には至っていないが現状での実行状況を示す。

2. よく知られている避難シミュレーションモデル要素と想定するシナリオ

2.1. 避難エージェントモデル

2.1.1. 本研究での避難エージェントモデル

本章では、具体的な避難エージェントモデル構築に関して記述する。まず、避難とは何かを定義する必要があるが、ここでは“元々の知識や新たに得られる情報を元に、可能な限り安全で短時間に現在地から目的地まで行くこと”とする。この定義に則り、決定すべき要素を定めると、知識とその取得手段・避難経路・避難速度であると考えられる。これらの要素に関して詳述する。

まず、避難エージェントの知識に関して検討する。避難エージェントが持つ情報は大きく分けて2つに分けられる。一つは予め持っている知識であり、もう一つは動的に得られる情報である。予め保持している知識は、特に地域性のある情報に関しては、地域住民と訪問客/観光客で大きく異なる。たとえば、[地理情報(標高情報/海岸線/道路情報)、避難場所情報、防災知識]などが考えられる。動的な取得情報とは、エージェントが移動している中で視覚や情報端末、周囲のエージェントから取得できる情報であり、具体的には、避難場所の情報(案内図や掲示、放送車のアナウンスなど)や、探索的に見つけられる避難経路の情報などが想定できる。

次に避難経路決定に関して検討する。経路の設定に関して[11]では内生型・外生型という2種類に分類している²。本研究では、予め経路を決める場合には、後述する2.1.2節の図1のプランニングにおいて決定し、内生的な行動決定は、後述する2.1.2節の図1でタイムステップ毎に実行されるActualBehaviorの中で決定するものとする。但しプランニングで意思決定した経路から変更する場合も考慮に入れると、双方を同時に並行的に動かすことのできるモデルがより現実的であり、今後の拡張課題である。

まず、行動開始前に行うプランニングにおいて、従来のよく知られているエージェントモデルで採用されてきた主なプランのタイプを列挙する。

¹もっとも、災害自体の物理シミュレーションに関しては、発災前に予め種々の条件下で計算をしておき、避難シミュレーションと組み合わせることができると考えている。人は津波の進路などによって行動が変化するが、津波の側は、人や物の状況による影響は皆無ではないが、ある程度、独立して扱えると考えている

²内生型とはモデル内でその場の条件・避難者の知識・認識などにより順次経路を選択させる方式であり、外生型とは出発地から避難地までの経路を予め入力情報(与条件)として与える方式である([11]より引用)

- 最短距離経路プラン:
[14]の住民の経路選択基準に関する調査の中でも最も選ばれた要素である。また、避難者エージェントモデルの研究でもよく使われているモデルである。
- よく使っている道を選択するプラン: 人の避難時の特性として [13] で説明されている。
- 逆戻り行動プラン:
今まで来た道をたどっていくという経路選択モデルである。この経路選択モデルも [13] で説明されている。
- no-planning:
特にプランニングすることなく、その時その時の状況判断で経路を決定していくモデル。

次に、行動中の状況下での経路選択モデル (図1の ActualBehavior における行動モデル) について記述する。過去の研究の事例なども参考に、本研究で取り扱う避難エージェントの振る舞いを列挙していく。ここでは抽象的な説明にとどめ、より具体的な設定に関しては次節で詳述する。

- 目的地を定めず、ただ歩きまわる行動モデル:
特に観光客/訪問客のような土地勘のない人の行動として目的地を定めず歩きまわるというモデルが考えられる。ランダムに歩きまわる。
- 道路混雑回避行動モデル:
混雑している道路を避け、空いている道路を通ったほうが短時間で目的地につく場合に経路を変更するモデル。本研究では [15] を参考に群集密度と歩行速度の関係から速度の大小を決定し、あるしきい値より速度が小さい場合にはルートを再検索するというモデルとする。
- 安全なところへ向かう行動モデル:
特に災害として津波を想定した場合には標高の高いところを目的地とする向かうモデルである。本研究では [16] のように、選択できる道の中で、一番標高の高いルートを選ぶ行動モデルとする。
- 追従行動モデル:
この要素も [13] で説明されている。特に知識のない訪問客/観光客などは誘導者・地域住民等の避難場所・経路に関する知識を持っている人に追従すると考えられる。
- 上記のモデルの組み合わせモデル:
上記の Behavior モデルを組み合わせることで、より高度な判断を可能にする。各行動モデルを階層化し、それぞれのトリガーが発火するとその行動モデルがアクティブになるという設計とする。

2.1.2. 内部モデル構成

2.1.1. で述べたエージェントを構築するための内部処理の流れを図1に示す。各エージェントは避難開始時刻、避難場所 (なしの場合もあり)、プランニング、ActualBehavior を指定されていると仮定する (DSL により指定する)。各エージェントは設定された避難開始時刻になると避難行動を開始し³、指定されたプランで避難する。エージェントの実挙動を表現する部分である Actual Behavior で状態を変化させていき、最終目的地や安全な場所に避難した場合に停止する。

2.2. 地理空間モデル

特に広域避難シミュレーションを構築するにあたり最低限必要になる地理情報は標高情報、道路情報、避難所情報と考えられる。将来的に様々な地理空間モデルを利用可能にすることを目標とするが、本研

³必ずしも発災直後に避難行動を開始するわけではないことはよく知られている

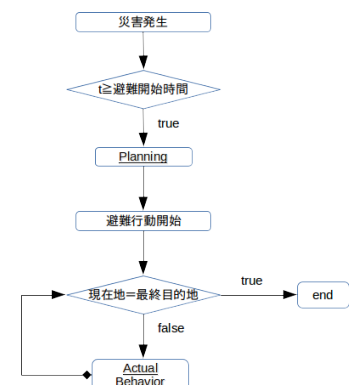


図1: 避難エージェントモデルの内部処理の流れの概念図

究では限定的なモデルのみ扱う。標高情報は空間をメッシュに区切ったモデルを利用する。道路モデルの表現には大きく2つあり、それはメッシュとネットワークである。ネットワークモデルを利用している例としては、[9], [10], [11] などがあり、本研究ではまずはネットワークモデルを利用することにする。避難所情報は実際の市町村の指定避難所と標高が高いところであるとする。

2.3. シナリオ・シチュエーションの設定

広域避難シミュレーションがこういった状況のもとで行われるかという想定が必要である。災害に関する想定や、場所、天候等の条件から、人の性質や属性に関する想定など多岐にわたる。しかし、全てを網羅するのは不可能なので、ここでは大きく2つに分けて取り上げる。1つは外的な状況に関する情報(場所、時間帯)であり、もうひとつは避難者の内部状態等に関する設定(年齢、初期位置、性別、情報端末の保持の有無、同行者など)である。

2.3.1. 外的な状況に関する情報

場所(シミュレーション対象領域)に関する情報は、シミュレーション空間を構築するために必須である。時間帯も、エージェントを発生させるための人口(昼間と夜とで人口とその構成が異なる)、避難速度、避難開始時間の遅れ等に影響を与える。例えば、夜間を想定したシミュレーションであれば、暗闇のため移動速度が落ちることを考慮しなければならない。また、昼であれば地域によっては通勤通学による人口の流入・流出で人口が増減することが考えられ、総人口の変化を想定する必要がある。これらを勘案し、特に先に上げた3つの要素に関しては設定項目として与えるパラメータとする。

2.3.2. 避難者の内部状態に関する設定

基本的な避難者エージェントの属性としては、年齢、性別等が挙げられる。年齢は人の移動速度と関連があるとされている[15]。性別による違いは[?]等で指摘されているが、その影響の有無は状況次第である。避難者に関する設定に関しては、より現実に近い設定にするために、統計情報等を用いられることが望ましい。そのため、先に挙げた5つの要素の内、年齢、初期位置、性別、人口に関しては統計情報と関連付けられる仕様とした。情報端末の保有者比率に関しても、各種の政策決定の根拠となるようなシミュレーションも行えるよう外部から与えられるパラメータとしている。

3. 広域避難シミュレーションモデル記述言語

前章で定義したモデルを記述するためのモデル記述言語を構築する。本研究では Scala を用いて記述する。考えるべきものは、避難者に関する記述、地理空間に関する記述、シナリオに関する記述の三種類である。ここでは具体的なシナリオを想定し、それを本研究ではどのように DSL に記述したのかを提示する。避難者とシナリオのモデルの内容を定義したクラスがあり、それらを拡張した形で DSL を記述した。

簡単に想定した仮想シナリオを説明する。登場する避難エージェントのタイプ(クラス)は、住民タイプ1、住民タイプ2、誘導者である。住民タイプ1は基本的に最短経路で避難するが、道路混雑などがあった場合にはそれを避けるよう行動する。また人の流れがあった場合には追従するという性質がある。住民タイプ2はよく通る道をルートとして選択する。誘導者は各地にランダムに数十人おり、かつ初期位置に静止し、避難ルートと避難場所を全ての人に教える。場所は鎌倉市相模湾沿岸、朝7時頃、沿岸付近で地震等が起きて避難する状況である。以下、DSLで記述するが、同様の記述が繰り返すところは省略している。

```
//住民1を作る
class 住民 extends 避難者{
  //速度に関するルールの記述
  速度{
    //デフォルトの速度の設定と、参照する表の設定。
    基本速度は ("性別・年齢に依存する") で表の参照先 ("home/tanaka/ ../.txt")
    //速度と混雑の変化に関してはいくつかモデルがあるので、
    //そのなかで負の線形関数に従うモデルを選択。
    速度変化のトリガーは ("混雑") でその変化は ("線形モデル") 従う。
  }

  //避難行動に関するルール
  避難行動{
    //ベースとなる避難ルートの方針
    基本避難ルートは ("最短距離経路")
  }
}
```

```

//このエージェントが動く前にする行動（情報提供/収集）と実際の動き。
毎回の行動{
    情報収集{
        //端末から近くの避難場所に関する情報を取得し、そこに向かう。
        情報源（端末）から取得する（近くの避難場所）で行動への影響は（そこに向かう）
        //周囲に住民2か誘導者が1人以上いれば危険な場所に関する情報をもらい、その場所を避ける。
        情報源（周囲（1,住民2,誘導者）から取得する（危険な場所）で行動への影響は（その場所を避ける）
        //周囲に住民2と誘導者があわせて6人以上いればより近くの避難所を取得して彼らに追従する。
        情報源（周囲（6,住民2,誘導者）から取得する（より近くの避難所）で行動への影響は（追従する）
    }
    情報提供{
        周囲の人（住民2,観光客）に提供する（避難場所,避難経路）
    }
    行動パターン{
        基本行動 は（基本ルートに従う）
        追加行動1 は（混雑回避）でトリガーは（混雑比率）でその条件は（2）人/m2以上である場合
        追加行動2 は（追従行動）でトリガーは（情報の取得（より近くの避難所））
    }
}
}
}

//住民2・誘導者1・観光客1も同様に定義

class シナリオ1 extends シナリオ{
    //統計情報の設定
    統計情報設定{
        名前（"統計情報1"）{
            ファイル場所（"/home/tanaka/ ..... /~1.txt）
        }
        名前（"統計情報2"）{
            ファイル場所（"/home/tanaka/ ..... /~2.txt）
        }
    }
    //対象とする領域の設定
    対象領域設定{
        最南西緯度経度（35.2342,139.42342）
        最北西緯度経度（35.2555,139.64299）
    }
    //避難場所の設定
    避難場所設定{
        //避難場所（名前）{避難所タイプ}
        避難場所（"広域指定避難場所"）{
            タイプ（広域避難場所）
        }
        避難場所（"標高が高いと場所"）{
            タイプ（標高が高い場所）条件は（30）m以上
        }
    }
    //時間帯設定とその時間帯の影響を定義。
    時間帯（朝）{
        避難開始時刻を（5）分遅くする。
        人口数を（0）割増やす。
        避難速度を（0）割増やす。
    }
    //避難者内部的な属性の設定
    避難者設定{
        避難者（住民1）{
            情報端末保持（0.6）
            移動手段_歩き（0.8）
            移動手段_車（0.2）
            //0~5分の間でRandom
            避難開始時間（[0,5],0.5）
            //5~10分の間でRandom
            避難開始時間（[5,10],0.5）
        }
        避難者（住民2）{
            情報端末保持割合（0.3）
            移動手段割合（歩き,1）
            避難時間割合（.....）
        }
        避難者（誘導者）{
            //上記同様
        }
    }
    人口分布{
        //統計情報1に依存して決定する場合。
        統計情報（"統計情報1"）{
            //統計情報1に依存するエージェントは住民1と住民2で、その比率は60%と40%である。
            比率は（避難者（住民1）は（60）%,避難者（住民2）は（40）%）
        }
        //統計情報によらずランダムに人口・配置を設定する場合。
        ランダム{
            //誘導者は20人ランダムな位置に配置する。
            人数（避難者（誘導者）は（20）人）
        }
    }
    避難場所設定{
        避難者（住民1）{
            //最も近いところへ行く
            最も近い{
                //基本的に優先1を目的地とするが、優先2の中で条件のよいものがあればそちらに行く
                優先1("広域指定避難場所")
            }
        }
        避難者（住民2）{
            最も近い{
                優先1("標高が高い場所")
            }
        }
    }
}
}
}

```

4. 並列分散シミュレーションプラットフォーム

広域避難シミュレーションの計算量の多さを考慮し、より高速な計算が可能なプラットフォームの構築を行う。本研究では複数のコンピュータを用いて並列分散環境を構築することで高速化を図った。本システムでは、現時点では、対象とするマルチエージェントシミュレーションモデルは道路ネットワーク上を避難エージェントが移動するというモデルに限定しており、その特性を活かした高速化を図っている。並列分散化するために、シミュレーションモデルの要素を何らかの観点で分割することが必要である。相互依存関係が低くなるような分割が望ましいが、その方式として、幾つかの分割モデルが知られている。

4.1. 分割モデル

複数の異種PCで分散並列計算させるという方針の元でシステムを設計した。各マシンにどのようなデータやタスクを割り当てるのかを検討する。本研究ではシミュレーション空間を複数の小領域に分割し、その各小領域をPCに割り当てるという方式 (Space-Partitioning とする) を採用する。

他の手法としては各マシンに決まった数のエージェントを割り当てるという方式 (Agent-Partitioning とする) がある。しかし、この方式には、毎回のシミュレーションの更新の際に、各PCが他のすべてのPCからエージェントに関する情報を収集しなくてはならないという欠点がある。各エージェントが周囲のエージェントと協調し、情報の収集提供を行う際に、周囲のエージェントに関する情報を各PCから取得しなくてはならないためである。

それに対して、Space-Partitioning の場合には、近接しているエージェントは同じPCにいる可能性が高いという局所性が有効に作用する。しかし、その代償として考慮すべき事項があるので、以下にその対処法と共に列挙する。

1. エージェントの領域間移動

シミュレーションが進行していくと、避難者エージェントや津波粒子等が領域間を移動することが想定される。その場合、エージェントの移動に、PC間通信が関与する。但し、その際の通信の相手としては、領域が隣接しているマシン同士も限定できるので、通信量を低減させることが可能になる (near-Neighbor communication)。

2. マシン性能の考慮

ここでは、必要に応じて、各種の性能の異なるPCをかき集めて、アドホックにネットワークを構築して、その上で分散並列計算を行うことを想定している。この場合、各マシン性能に応じて、負荷量を割り当てることで、より高速化できる。並列分散環境におけるシミュレーションの実行時間は、特に同期処理を繰り返す場合に、処理の遅いPCの実行時間に依存してしまう。そこで、マシン性能に応じて負荷を配分することによって、同期間隔の処理単位を有効に活用し、性能の高いPCノードに遊休時間を設けないことを目指す。

3. 進行途中での負荷の偏り

領域間通信が行われると、時間の進行に応じてマシンの負荷の偏りが発生するかもしれない。多くのエージェントが移動することで初期状態から変化が起これば、マシンにかかる負荷が変動するため、性能が落ちることが予想される。それを避けるために、例えばエージェントの数がある一定の閾値を超えた場合に負荷を均等化させるためのアルゴリズムを導入する。

4.2. ネットワークモデル特性の利用

最後にネットワークの特性とシミュレーションの高速化の関連について述べる。マシン間通信を行う際に、エージェントを領域間移動させるかどうかというタスクが発生するが、ネットワーク上を移動するモデルの場合、そのタスクを減少させることが可能であると考えている。というのも、このモデルの場合、エージェントが移動する空間が限定されているので、領域間通信が必要なのは異なる領域間をまたいでいるネットワークの辺 (edge) 上 (またはその周辺) に滞在もしくは移動中のエージェントに限定できる。ただし、これはエージェントの移動速度に依存し、1タイムステップでエージェントが多くの距

離を 進んでしまう場合には当てはまらない。しかし、そのような状況ではシミュレーションの結果自体にあまり意味が見いだせなくなってしまうので、通常は、そのようなことが起こりにくいよう、タイムステップを設定する。

以上のような特性を利用して、並列分散をより高速化することを試みる。

5. 設計・実装

5.1. 設計

並列分散環境の設計に関して述べる。

複数のコンピュータを使用するにあたり、計算を担当する複数のマシン (Worker) と、シミュレーションをコントロールする1台のマシン (Manager) からなる構成を採用した。Manager マシンは、主にシミュレーションの同期を適切に取りつつ開始・一時停止・停止などの制御を行う役割を持つ。また、全体のシミュレーション空間の作成や複数の小領域への分割、Worker マシンに対して領域を割り当てるなどの役割も持たせている。Worker マシンは Manager マシンからの命令を受けて自分が担当する領域の状態を更新する。状態を更新した後に、その時点で滞在していた領域から、他の領域へ移動する避難エージェントを送信/受信するフェーズがある。

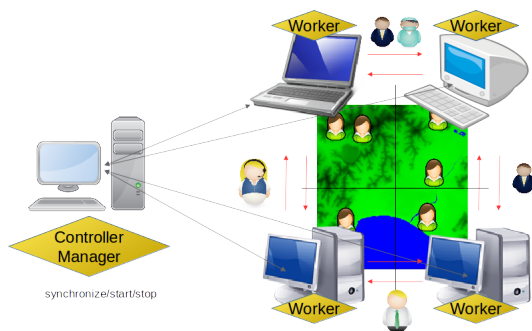


図 2: 並列分散の設計

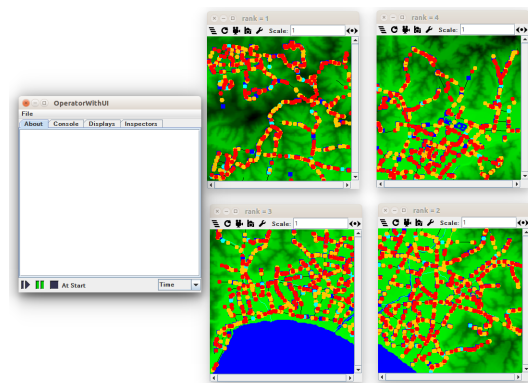


図 3: Manager と複数台の Worker

次に地理空間構築に関して述べる。コンピュータ上に地理空間を構築するために、本研究室で構築している地理情報システム [1] を拡張して利用した。利用した情報としては基盤地図情報、数値地図 25000、総務省統計局が発行している統計情報である。これらの情報は事前に読み込みシミュレーションで利用しやすい形に変換しておく。

実装には Java 言語を用いている。シミュレーションモデル構築には Java 言語で書かれた Multi-Agent Simulation のためのライブラリである Mason を用いている [8]。また、並列分散環境アーキテクチャ実現するにあたり、マシン間の通信には MPI(Message Passing Interface) を用いるためのミドルウェアとして MPJ-Express[7] を用いている。

5.1.1. モデル記述言語

モデル記述言語は Scala で書いており、コンパイルした Scala のプログラムを Java で呼び出して利用するという設計になっている (図 4)。

6. 実行結果・評価

鎌倉市の相模湾沿岸地域を対象に広域避難シミュレーションを行った。実際の様子が図 5 である。

7. まとめ

本論文では広域災害避難シミュレーションのためのモデル記述言語と高速化のための並列分散環境の構築に関して述べた。モデル記述言語に関しては現段階では取り扱えるモデルが非常に限られており、実用性はまだ少ないと考えられるため、今後より多くの避難行動モデル、地理空間モデルに適用できるよう拡張していく所存である。

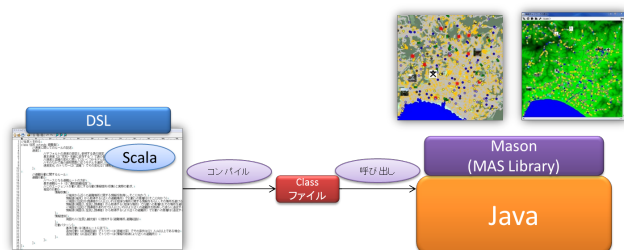


図 4: DSL の設計

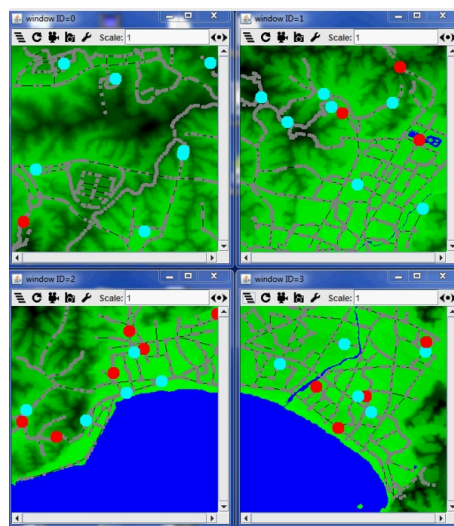


図 5: 並列分散シミュレーションの実行時の様子

謝辞

当研究室・SIM/GIS 班 (シミュレーション/地理情報システムグループ) のこれまでの卒業生の皆さん (八島 敬暁 (2012 年度修士了), 藤田 智紀 (2012 年度学部卒), 瀬良 篤 (2012 年度学部卒), 久光 遼平 (2011 年度学部卒), 岡野 智哉 (2010 年度修士了), 松田 匠未 (2009 年度学部卒)) に感謝します。

参考文献

- [1] 八島敬暁, 岡野智哉, 飯島正: “シミュレーション機能を備えた地理情報システム構築のための支援ライブラリ,” 第 6 回全国大会・研究発表大会, 情報システム学会, 2010.
- [2] 八島敬暁, 山崎淳城, 久光遼平, 飯島正: “建造物の設計図情報と広域の地理情報を活用したマルチエージェントシミュレーション環境の構築,” 第 7 回全国大会・研究発表大会, 情報システム学会, 2011.
- [3] 広瀬弘忠, 杉森伸吉: “正常性バイアスの実験的検討,” 東京女子大学心理学紀要, pp.81-86, 2005.
- [4] 桑沢敬行, 金井昌信, 細井教平, 片田敏孝: “津波避難の意思決定構造を考慮した防災教育効果の検討,” 土木計画学研究論文集, Vol.23, no2, pp.345-354, 2006.
- [5] Cosenzak, B.: “Distributed Load Balancing for Parallel Agent-Based Simulations,” 19th Euromicro International Conference on Parallel Distributed and Network-Based Processing, 2011, pp.62-69, 9-11 Feb. 2011.
- [6] Bo, Zhou. Suiping, Zhou.: “Parallel Simulation Of Group Behaviors’. Proceedings of the 2004 Winter Conference, 2004.
- [7] MPJ Express, <http://mpj-express.org/>, 閲覧日 2014/10/20
- [8] Mason, <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>, 閲覧日 2014/10/20
- [9] 渡辺公次郎, 近藤光男: “津波防災まちづくり計画支援のための津波避難シミュレーションモデルの開発,” 日本建築学会計画系論文集, No637, pp.627-634, 2009.
- [10] 片田俊孝, 桑沢敬行, 金井昌信, 細井教平: “津波災害シナリオ・シミュレータを用いた尾鷲市民への防災教育の実施とその評価,” 社会技術研究論文集, Vol.2, pp.199-208, 2004.
- [11] 今村文彦, 鈴木介, 谷口将彦: “津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適応,” 自然災害科学, 20-2, pp.183-195, 2001.
- [12] R, Brooks.: “A Robust Layered Control System For A Mobile Robot. IEEE JOURNAL OF ROBOTICS AND AUTOMATION,” Vol.RA-2, No.1, 1986.
- [13] 日本建築学会: “建築人間工学辞典,” 彰国社 p59, 1999.
- [14] 西村秀人, 栗俣恒平, 岩崎義一, 山口行一: “津波災害に対する避難先及び避難経路の認知と選択要因に関する研究,” 10 回関西支部研究発表会講演概要集, 日本都市計画学会関西支部, 2012.
- [15] 岡田光正: “群衆安全工学,” pp119-140, 鹿島出版会.
- [16] 齋藤崇, 鏡味洋史: “マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーション-奥尻島青苗地区を例として-,” 日本建築学会計画系論文集, 第 597 号, pp229-234, 2005.