

地理的条件を有するマルチエージェントシミュレーションにおける エージェントの移動に関する基礎的研究

A Basic Study of Movement of Agent for a Multi-Agent Simulation with Geographical Conditions

白山 晋*, 山出真也**

Susumu SHIRAYAMA and Shinya YAMADE

*工博, 東京大学助教授, 人工物工学研究センター (〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

**工学, 東京大学大学院, 環境海洋工学専攻 (〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

In order to correlate a multi-agent simulation with real system, it is important to put an environment in which agents exist into a real world. In the case that the effect of geographical conditions plays an important role on the simulation, effective modelling of such effect is necessary to enhance the accuracy and to improve the results. In this paper, we consider some methods to give geographical information to an agent that moves in a simulation space. A new method to move the agent on multi-networks generated by following geographical conditions is proposed. Numerical experiments for information propagation in a region and evacuation simulation are presented using our method. It is shown that a part of the obtained results is good agreement with both the previous result and theoretically analysis, and elicits dependency of the network structure.

Key Words: Multi-Agent Simulation, Movement of Agent, Geographical Conditions, Network

キーワード: マルチエージェントシミュレーション, 移動エージェント, 地理的条件, ネットワーク

1. はじめに

近年, コンピュータの中の環境に自らの判断基準のもとに自分で行動を決定するエージェントを創り出し, それが多数共存している世界を模擬するマルチエージェントシミュレーション (MAS: Multi Agent Simulation) が, 多くの分野で行われるようになってきている¹⁾. しかしながら, MASにおいては, 扱う対象によっては実世界に近いシステムの構築が難しくなってしまう. その原因として, 以下のようないくつかの問題点が指摘されている.

1つは, 現在使われている多くの手法では, 前もって決められた範囲内の限られたエージェントの状態を, 行動決定の際の判断材料にしているという点である. このため, 実世界において, 近傍にあるエージェントと, 遠距離にあるエージェントとの相互作用を同時に取り入れるためのモデル化が複雑になる.

また, 多くの MAS においては, KISS 原理 (Keep It Simple, Stupid)²⁾に基づいて, できるだけ簡単なルールを用いて相互作用や意思決定の機構がモデル化される. ルールを複雑にすると, MASによって得られる「実世界に対応する何かしらの数値解」が収束しないということが KISS 原理を拠り所にする1つの理由である. しかしながら, 簡単なルールだけでは実世界を表し得ないという指摘もある. 一方, 計算時間の問題も大きい. 相互作用や判断基準を複雑にすると計算量が膨大になり, 現状の計算資源では対応ができなくなる. ここにジレンマが

存在する. これらの問題を解決するために, KISS 原理の見直し³⁾や, 地球シミュレータなどのスーパーコンピュータの利用という手段が考えられているが, 基礎研究の段階にあるものが多い.

本研究は, MASを実世界のシステムに対応づけるために, エージェントが存在する環境を現実に近いことを目標として始められた. 環境因子として, 様々なものが考えられるが, 地理的な情報に着目することにした. 地理的情報が重要になるものには, 伝染病の伝播⁴⁾, 火災の発生と拡大⁵⁾, 交通流シミュレーション⁶⁾, 群集の避難シミュレーション⁷⁾などがある. 例えば, 初期条件 (人口密度, 森林や湖などの可燃物の有無という属性), 境界条件や地形 (道路や障害物など) として, 地理的条件がエージェントの存在する環境に加えられ, エージェントは環境から間接的に地理的条件の影響を受ける. しかしながら, 地理的条件の直接的な影響が, 高精度, かつ効率的なシミュレーションにとって重要になる MAS も少なくない. エージェントの移動が鍵となる MAS である.

本稿では, 扱う対象が空間構造と関連する MAS におけるエージェントの移動に対して, 直接的に地理的情報を与える方法について検討し, エージェントが存在する環境を効率的に構築し, 移動させるための方法論を提案する.

2章では関連研究として, 既存の MAS をエージェン

トの移動方法という視点からまとめ、問題点とその解決の方向性を述べる。3章に、移動エージェントの移動方法と、環境となるネットワークの生成方法を示す。4章は、提案手法の有効性を確認するための数値実験の結果であり、5章がまとめである。

2. 関連研究

扱う対象が空間構造と関連する MAS において、エージェントの移動方法は、エージェントの移動（特に位置）に対して自由度を制約しないものと、格子やセルなどで空間を離散化し移動を制約するものに大別される。本稿では、前者を「連続的な移動を許す方法」、後者を「空間中心の方法」と呼ぶことにする。空間中心の方法は、さらに空間を分割したセルの属性として移動エージェントを表すものと、粒子的にエージェントを表すものに分けられる。

2.1 連続的な移動を許す方法

エージェントに連続的な移動を許す方法に属するものとして、交通流のシミュレーション⁶⁾や、人をエージェントとした群衆の行動のシミュレーション^{15),16)}などがある。この方法では、各エージェントに連続的な移動をさせ、その上でエージェント間の相互作用、また環境からの作用を加味してシミュレーションを行うという方法である。あるエージェント A は他のエージェント B と相互作用を行い、その後、推移則に従って連続的な移動を行う。推移則は、運動方程式を基本とする微分方程式であることが多い。

また、エージェントは、その移動する空間から影響を受け、移動する空間に影響を与える。これが環境因子である。連続的な移動を許す方法では、このモデル化のために、重ね合わされたポテンシャル場を用い、ポテンシャルによって、移動を制御するといった方法が採られることが多い。牧野らは、エージェントの協調作業に次のようなポテンシャル場を用いている⁸⁾。移動の目標とする位置に対して、ポテンシャルを低く（あるいは高く）、障害物の存在というような地理的情報に対して、高く（低く）設定することで、移動を制御するというものである。ポテンシャル場の多くは、

$$U(x,y) = Ce^{a(x^2+y^2)^d} \quad (1)$$

のような距離を独立変数とする指数関数型の関数を重ね合わせることによって形成される。この方法の問題は、重ね合わされた場の制御が難しいということ、エージェントの位置でのポテンシャル場の計算に時間がかかることである。そこで、エージェントが移動する空間を格子やセルによって離散化することによって、エージェントが存在するセルから環境情報を得る、あるいは環境情報を与えるという方法も提案されているが、その方法は複雑になる。

2.2 空間中心の方法

空間中心の方法は、各エージェントの移動と相互作用、環境からの作用を格子（あるいはセル）上に限定し、その記述を簡便にする方法である。推移則には、連続な移動を許す方法と同様のものがあるが、エージェントの移動は格子上に限定される。エージェントの移動には主として2つの表現形式がある。

(a) 状態量の変化による移動エージェントの表現

エージェントの存在する空間（図-1 のような格子状に分割された空間：グラフ理論では正方格子⁹⁾と呼ぶが、位相以外の情報を含むので標準格子と呼ぶことにする）の状態量の変化によって、エージェントの移動を表現する。図-1 に示すように、標準格子上で定義された状態量 $q_{l,m}$ をエージェントとみなし、状態量がある規則（推移則）に従って変化することで、エージェントの移動を表現するというものである。

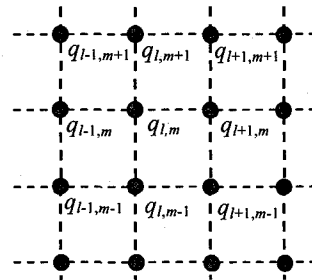


図-1 格子上的状態量

この方法は、Conway の提案したライフゲームがもとになっている¹⁾。通常は、セルオートマトン¹⁰⁾として扱われるが、セルを空間におかれたエージェントとみなし、その変化がシステムを表すことから、MAS とみなす場合も多い¹¹⁾。また、ライフゲームは、抽象化された空間でのものであり、実空間を意識したものではないが、本稿では、空間中心の方法として位置付けることにする。

(b) セル上を移動する粒子的な移動エージェントの表現

空間中心の方法におけるエージェントのもう1つの移動方法は、推移則を2段階に分けるものである。第1段階では、連続の移動を許す方法と同様のものとすることが多い。第2段階で、格子やセルによって離散化された空間（ブロック密度法¹²⁾のように道路をセル状に分割するものも含む）を環境とみなし、エージェントの移動を、格子やセル内に限定する。後述する広域を対象とした避難シミュレーションでは、この方法を採用するものが多い。また、伝染病や感染症の伝播シミュレーションでは、場所からの感染と、エージェント同士の接触感染を、第2段階で考える格子やセルに基づいて行っている。

空間中心の方法は、生態系における棲み分けのシミュレーション¹⁾、感染症の伝播シミュレーション⁴⁾、火をエージェントとした火災の拡大のシミュレーション⁵⁾、避難シミュレーションなどに用いられている¹³⁾。また、先述したように、セルオートマトンとして扱われることも多く、複雑系を扱った事例も多い。

2. 3 混合型

実用的な問題に対して、対象が空間構造と関連する MAS において用いられる方法は、連続的な移動を許す方法と空間中心の方法の混合型である。特に、環境との相互作用を考える場合は、環境をエージェントとみなし、移動エージェントとの干渉によって、それぞれの状態を変化させるということが行われる¹⁴⁾。避難シミュレーションを例として、そのような方法を説明する。

松倉らは、車いす利用者が歩行者とともに避難する際に、車いすの介在の避難行動への影響に関する研究を行っている¹⁶⁾。歩行者と車いす利用者を移動エージェントとし、連続な挙動を許す方法によって移動させる。また、空間をいくつかの領域に分割し、領域毎に地理的情報を与え、その情報に従って異なる移動方法となるように、環境から移動エージェントの行動を制御している。

新井らは、高齢者や電動車いす利用者などの災害弱者を考慮した、地下街等の閉鎖された空間における避難シミュレーションを行っている¹³⁾。避難者のエージェントは、セル状に分割された空間を動く（前節の(b)の方法に相当する）。また、セルの一つ一つに地理的情報を属性として与えている。ただし、移動エージェントの振る舞いによって、その属性は変化しない。

これらは、室内などの狭い領域を対象にしたものである。広域の避難シミュレーションに適用する場合、計算時間や計算結果の解釈の問題が大きく、実問題へ適用するためには何かしらの工夫が必要になる。村木と狩野は、広域災害時の避難シミュレーションを、道路をセルに分割し、人を移動エージェントとし、移動エージェントは、与えられたルールに従ってセルを移動するという方法で行った¹⁷⁾。セルを環境エージェントとみなし、その状態を群集密度などによって変化させ、その変化を、移動エージェントの行動ルールに反映させるという移動エージェントと環境エージェントの相互作用も含めた方法になっている。ただし、移動はセルに依存し、相互作用は近傍に限定される。

2. 4 問題点と解決の方向性

前節までに示した既存研究では、移動エージェントの移動の方法と、移動エージェントと環境との相互干渉の中に、地理的な影響が含まれる。この点に着目し、地理的条件を考慮したエージェントの移動に関する問題点を纏めておく。

連続な移動を許す方法には、以下のような問題があると考えられる。

- A1) 個々のエージェントが連続的な移動、相互作用を行うため、エージェントの数が増えると距離計算を中心として計算量が膨大になる。
- A2) エージェント同士の相互作用と同様に、地理的情報をポテンシャルの重ね合わせのような連続関数として表現する場合には、計算時間がさらに大きくなる。

A3) 遠隔地の移動エージェント間の直接的な情報のやり取りのモデル化が不十分である。

一方、空間中心の方法の問題点は以下のようなものである。

B1) エージェントの移動、相互作用の局所的なルールの記述は簡便になるが、空間の分割によって移動や、相互作用が近傍に限定されることが多い。

B2) 移動に対する空間分割の依存性が大きい。また、地理的情報に対してサンプリングの問題が生じる。

B3) 移動エージェント間の直接的な情報のやり取りのモデル化が不十分である。特に遠距離にあるエージェント間の情報伝達の効果を含めることが難しい。

A3)と B3)の問題は共通するものでもある。これらの問題の多くは、混合法によって解決が試みられているが十分とはいえない。扱う対象が空間構造と関連する MAS には、少なくとも、

- i. 遠距離、遠隔地にあるエージェント同士の相互作用のモデル化が不十分である
 - ii. 情報伝達という観点からは、エージェント間の直接的な情報のやり取りのモデル化が不十分である
 - iii. 空間中心の方法に関しては、近傍への移動に対する等方性や一様性が確保することが難しい
- という問題が残されているものと考えられる。iiiは B2)に関連し、
- iv. 問題によっては、異方性や非一様性が重要になり、それらを陽に与えることが難しい
- という課題も生じる。

これらの問題に対する直接的な解決策の提案という形ではないが、解決の糸口を与えるいくつかの方法が提案されている。例えば、iとiiに関しては、ネットワーク構造の導入が有用である^{4),18)}。iiiとivは、セルオートマトンの研究における近傍の選択法が有効であると考えられる¹⁰⁾。本研究では、これらをiからivの問題の解決策の方向性を示すものと考え、次章において、エージェントの移動に対する環境の役割に注目し、エージェントが存在する環境を効率的に構築し、移動させるための方法論を提案する。なお、本稿では、大規模な問題を前提として、計算時間の面で有利な空間中心の方法を扱う。

3. 提案手法

3. 1 移動エージェントの移動方法

繰り返しになるが、問題点iとiiに関しては、既存研究^{4),18)}にあるようにネットワーク構造の導入によって解決できるものと考えられる。問題点iiiは、格子系や近傍の取り方を工夫することによって、ある程度は解決できる¹⁰⁾。しかしながら、ivの問題を同時に解決するためには、局所局所で非均一な格子（あるいはセル）を生成する必要がある、その生成が難しい。一方、空間中心の方法であっても、格子系（あるいはセル系）は、構造計算や流体計算における格子とは異なり、セル形状や格子の位置情報よりも、位相構造としての接続情報が重要であ

る。これは、ネットワークとみなすことができる。そこで、i や ii の問題の解決のために提案されているネットワーク構造を、移動エージェントの移動に対して利用する。

移動エージェントを表す方法として、2.2 節で述べた (a) と (b) の 2 通りのものを採用する。(a) の方法で、多種類のエージェントを扱う場合は、ラベルによってエージェントを識別し、ノードが移動エージェントのラベルを持つことになる。(b) の方法では、各移動エージェントが存在するノードの番号を持つことになる。

推移則は、扱う問題毎で異なるので、ここでは基本となるランダムウォークについて述べる。エージェントを 4 角形で、あるノード i のリンクを矢印で示す (図-2 左図)。

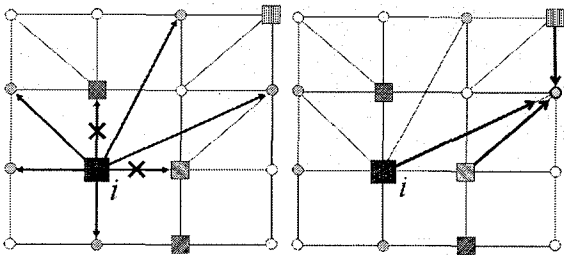


図-2 移動先の選択と移動先が重複した場合の処理

はじめに、自分がいるノード (図中の i) とリンクしているノードに他のエージェントがいるかどうかを調べる。もし、他のエージェントが存在する場合、そのノードは移動候補から除外する (図-2 左図の禁止マーク)。次に、自分のいるノードと、リンクしているノードの中の他のエージェントが存在しないノードから移動先をランダムに選択する。

定式化すると、以下のようなものである。自分のいるノードを v_i とする。また、このノードの次数を k_i とする。はじめに、 v_i に接続する k_i 個のノードの中で、移動エージェントが存在するノードの数 a_i を求める。移動先の候補は、自身を含めて、 $(k_i - a_i + 1)$ 個のノードになる。それらのノードに、0 から $(k_i - a_i)$ の局所番号を割り当てる。この番号を n_R とする。次に、移動先の候補となるノードを v_j とし、 $v_j = T_i(n_R)$ という関係をおく。[0, 1] の一様乱数 p を発生させ、 p を利用して、移動先のノードを、

$$n = \text{int}((k_i - a_i + 1) \cdot (p - \epsilon)), \quad v_j = T_i(n) \quad (2)$$

で決定する。ここで、 ϵ は十分小さい正数とする。2.2 節の (a) の方法では、 q をラベルを示す変数とすれば、

$$q_{v_j} = q_{v_i}, \quad q_{v_i} = 0, \quad (3)$$

が移動を示すことになる。ここで、ラベル 0 は、エージェントが存在しないことを示すものとする。

このような移動方法では、複数のエージェントが同一の移動先を選択する可能性がある。例えば、図-2 右図のような場合である。その場合は、ルーレット方式¹⁹⁾によ

って移動させるエージェントを選択する。選ばれなかったエージェントは移動せず、自分のいたノードに留まるものとする。

以上述べた方法は、最も単純なものである。リンクに距離という属性を加えると、図-2 に示すように、移動に際して、距離の違いを加味することが重要になる。この場合は、距離に応じた確率分布を設定し、ルーレット方式によって移動先の選択や、移動先の重複の処理を行う。

3. 2 移動エージェントに対する環境の表現

扱う対象が空間構造と関連する MAS の精度の向上や効果的な実行のためには、前章で述べたように、地理的な影響を正しく扱うということが 1 つの鍵になる。特に、地理的条件を移動に反映させることが重要になる。

本稿では、前節で述べたネットワーク構造を環境と結びつけるという方法を提案する。環境の構築は、先述した i から iv の問題の解決に関連するものでもある。この際、ネットワークの構成方法が問題になる。ここでは、地理的情報に従ってネットワークを構成する一つの方法論を具体例で示す。

具体的には、図-1 で示した標準格子を基準として、地理的情報に従って局所的なリンクを加えて、ネットワークを形成するというものである。以下に示すように、4 つの手続きによって、移動エージェントの環境を構築する。この操作に対して地理情報システム (GIS) を援用する。

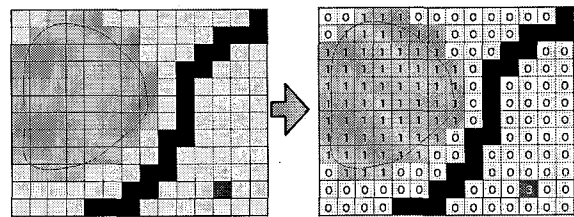


図-3 格子に分割された空間と地形を表す属性

第 1 に、GIS のラスタ化機能などを用いて、シミュレーションの対象となる空間を含む領域を格子状に分割する (図-3 左図)。同時に、GIS を用いて指定した属性値を求める (図-3 右図)。この属性値は地理的属性を表すものであり、例えば、海や山、市街地といったその格子の位置での地形や、人口密度や老年人口比率などのデータなどを表すものである。

第 2 に、この格子の上に、シミュレーションの対象となる空間を示す格子状のネットワークを重ね (図-4)、移動エージェントと相互作用を行う。基本となる環境をネットワークとして形成する (GIS からの格子データは間引いてある)。この格子状のネットワークでは、それぞれのノードが上下左右の 4 つの近傍のノードとの間にリンクを持つ。辺にあるノードを除くと、次数 4 のネットワークである。これを、基準ネットワークと呼ぶことにする。

第 3 に、基準ネットワークのノードに、先に求めた属

属性値を補間によって与える。この属性値に基づいて、基準ネットワークのノード、リンクの追加・削除を行う。例えば、エージェントの移動が地形の影響を受け、市街地であれば、他のエージェントとの干渉が多く、山間部では少ないというような仮定をおく。このような仮定に基づいて、属性値と次数の関係を設定し、次数の分布を求める。属性値が海を表すものであればノードを削除し、山間部であればリンクを削除し、市街地であればリンクを増やし、障害物や横断できない道路があればリンクを削除するということで、各ノードの次数を決める。図-5に、図-4のノードの位置での属性値に基づいて、リンクの増減を行った後の次数の分布を示す。図-5では、ノードを表す丸印の大きさを次数に比例させることで、ノードの次数分布を示している。

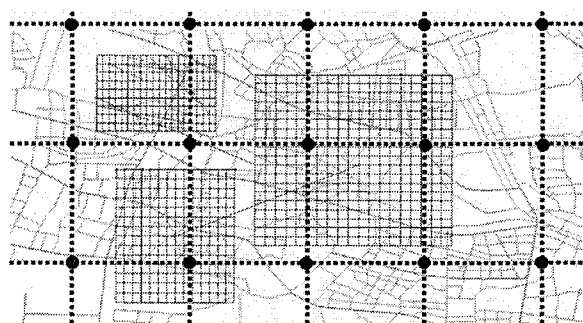


図-4 GISからの格子データに重ねた3つのネットワーク

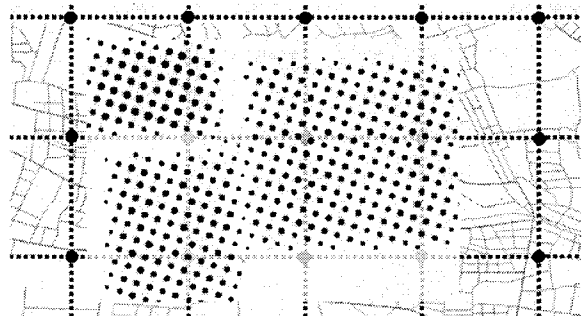


図-5 シミュレーションのためのネットワークの次数分布

最後に、次数分布と付加的な情報（別の地理的情報から得られるもの）に基づいて、リンクを作成する。ここでは、ノードの次数を基準とした単純な方法を示す。

- (1) 図-6で点線によって示したブロックを、第1の手続きで作られた格子を基準として決める。
- (2) 次数3以下のノードに関しては、ランダムに選んだリンクを削除する。
- (3) 次数5以上のノードに関しては、次数の大きいノードから、ブロック毎に、同じブロック内の他のノードとの間にリンクを加えていく。この際、リンク先は左図のようにランダムに選ぶか、右図のように規則的に選ぶかは問題毎に決める。また、リンク先は所与の次数を超えないようにする。

ブロックを設定した理由は、局所の移動の表現のためであるが、ブロックの選び方に対する依存性が生じる。そこで、ブロック間のリンクの作成を行う。これは、近

傍への移動に対する等方性や一様性（問題iii）、異方性や非一様性（問題iv）に柔軟に対応するためにも必要である。Sanderらは、伝染病の伝播シミュレーションに対して、遠方と近傍の中間領域に対して、ブロック間のリンクの作成方法を提案した¹⁸⁾。本稿においても、Sanderらの方法に従って、リンクを追加することにする（図-7左図）。

また、障害物や横断できない道路などの属性値の空間分布によって、リンクに非等方性を与えるなどの方法が考えられる。例えば、図-7右図のように障害物が領域があり、障害物に沿った移動が他の方向に比べて容易であるとする。このような場合、異方性を与えたネットワークを作成することで環境を表現する。

また、遠距離にある2つのノードを結ぶリンク（ショートカット⁹⁾と呼ぶ）によって、遠距離のエージェント間の相互作用のモデル化（問題i）のための環境を構築する。

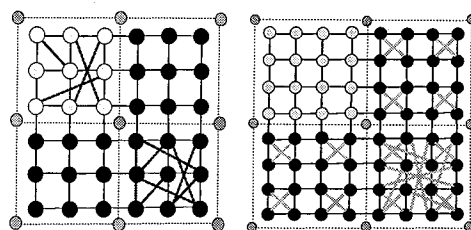


図-6 ランダムなリンク追加と規則的なリンク追加

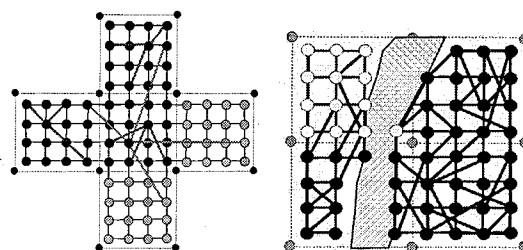


図-7 Sanderらの方法によるリンク追加と、異方性を考慮したリンクの設定

以上述べた方法を用いて、いわき市の人口密度から形成されたネットワークを図-8と図-9に示す。

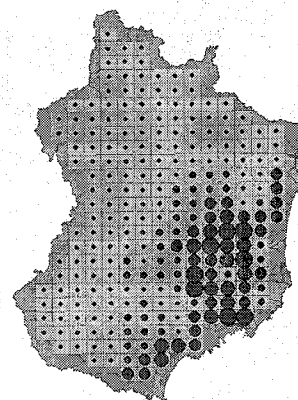


図-8 いわき市の人口密度にもとづく次数分布

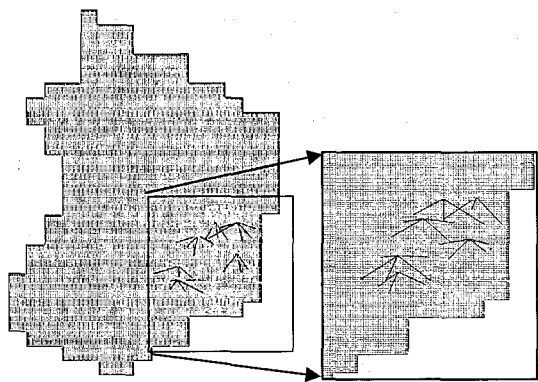


図-9 度数分布から作成したネットワーク

3. 3 多重ネットワーク構造の導入

前節で述べた方法は、基準ネットワークに対して、いくつかの属性に従って、ノードとリンクの削除・追加を行い、新たなネットワークを構築し、それを移動エージェントの環境とするものである。この環境は、ソフトウェアの観点からは、ノードの位置情報と接続関係を基本的な構造とし、次数などのネットワークの指標、シミュレーションの対象となる属性値、GISからの地理的情報を、属性情報として持つようなクラスによって定義できる。このようなクラスを用いると、1つの属性値に対して、1つのネットワーク構造を与えるオブジェクト（インスタンス）を生成することで、ノードの位置は同じでも、ネットワーク構造の異なる環境を作ることができる。

また、谷本と藤井の提案²⁰⁾のように、問題iiの解決のために移動エージェント間の直接的な情報交換を行う情報ネットワークを導入する。このネットワークは、移動エージェント間の関係性を位相構造として示すものである。移動エージェントの識別番号を参照することで、上記の環境を表すクラスとも情報のやり取りを行う。

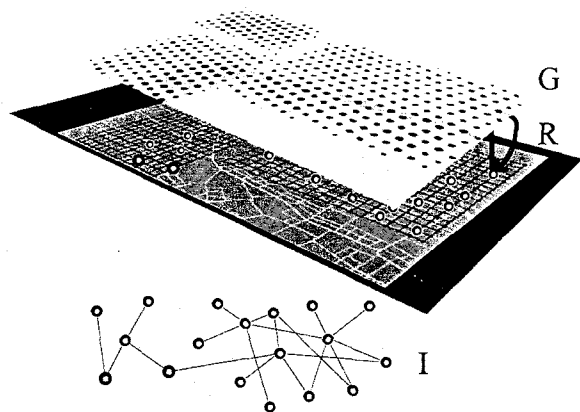


図-10 多重ネットワーク構造

図-10 に多重ネットワーク構造の模式図を示す。図中のRは対応する実空間、Gは移動エージェントの行動を制御するネットワーク層（リンクは描いていない）、Iは情報ネットワークである。GとIは、複数のネットワ

ークによって構成されるが、図中では一層のみ示している。また、RとIに示されている○が移動エージェントである。

なお、問題iに対しては、移動エージェントの環境の中のショートカットと、情報ネットワークを介在とした相互作用によって解決を試みる。

4. 数値実験と考察

4. 1 情報伝播シミュレーション

はじめに、谷本と藤井によるMASによる情報伝播のシミュレーション²⁰⁾との比較を行う。なお、文献20には、情報ネットワークの接続情報が示されておらず、定性的な比較となることを断っておく。

この数値実験では、移動と情報交換のために2つのネットワークを構築する。移動エージェントは、3.1節で示したランダムウォークによって移動する。他のエージェントが近傍に存在するときに情報の接触伝播が行われる。接触伝播は、移動のためのネットワークにおいて、リンクの存在する2つのノードに、移動エージェントが存在するときに、双方の情報を交換するものとする。2つのエージェントを、 a, b とし、エージェント a の情報量を $I(a)$ 、 b の情報量を $I(b)$ とする。また、情報量 I は、0から1の実数値をとるものとする。このとき、以下のように情報を交換する。

$$\begin{aligned} \text{if } I^n(a) \geq I^n(b), \quad I^{n+1}(a) &= I^n(a) \\ I^{n+1}(b) &= \begin{cases} I^n(a) & I^n(a) > p_c \\ I^n(b) & \text{else} \end{cases} \\ \text{if } I^n(a) < I^n(b), \quad I^{n+1}(a) &= \begin{cases} I^n(b) & I^n(b) > p_c \\ I^n(a) & \text{else} \end{cases}, \quad (4) \\ I^{n+1}(b) &= I^n(b) \end{aligned}$$

ここで、 n は時間ステップ、 p_c は閾値となる $[0,1]$ の乱数であり、情報交換の機会毎に生成される値である。例えば、エージェント a の情報量が b 以上の場合、 a の情報量は変化しない。 b の情報量は、 a の情報量が p_c よりも大きければ、 a の情報量となり、そうでない場合は、変化しないという確率的選択によって求められる。

また、情報ネットワークを利用した情報伝播も行う。これを情報ネットワーク伝播と呼ぶことにする。情報ネットワーク伝播によって、遠隔地のエージェント同士の情報交換をモデル化することができる。移動エージェントの数を N とし、成分が0、あるいは1の $N \times N$ の行列を考える。この行列の要素を (i, j) とし、エージェント i に対してエージェント j が知人であった場合、要素 (i, j) を1とし、知人でなければ0とする。このような行列を隣接行列と呼び、本稿では、行列 R で示す。

情報交換の方法は接触伝播と同様である。行列 R の要素 (i, j) が1の場合、以下のように情報が交換される。

$$\begin{aligned}
&\text{if } I^n(i) \geq I^n(j), \quad I^{n+1}(i) = I^n(i) \\
&\quad I^{n+1}(j) = \begin{cases} I^n(i) & I^n(i) > p_N \\ I^n(j) & \text{else} \end{cases} \\
&\text{if } I^n(i) < I^n(j), \quad I^{n+1}(i) = \begin{cases} I^n(j) & I^n(j) > p_N \\ I^n(i) & \text{else} \end{cases}, \quad (5) \\
&\quad I^{n+1}(j) = I^n(j)
\end{aligned}$$

ここで、 p_N は閾値となる $[0,1]$ の乱数である。

計算の諸条件は以下のとおりである。

人口密度が一定の空間領域と中心部分に人口密度の高い部分があるものを考える。リンク密度と人口密度が比例するものと仮定し、移動エージェントの環境を表すネットワークを形成する。24×24, 48×48の基準ネットワークに対して、中心部分の人口密度が高い空間領域を扱う場合、該当部分に規則的にリンクを追加する。移動エージェントの数は、25, 50, 75の3種類、エージェント間のリンクの数が、5, 20, 45になるように3種類の情報ネットワークをランダムネットワークによって形成する。エージェントの初期配置は、空間にランダムに配置するものと、中央部に40%のエージェントを集めるものの2種類とした。表-1に計算の種別を示す。

表-1 計算の種別

種別	ネットワーク	初期配置
A	中心部にリンクを追加	ランダム
B	基準ネットワーク	ランダム
C	中心部にリンクを追加	中心部に集中
D	基準ネットワーク	中心部に集中

初期条件として、情報量1を持ったエージェントを1人だけ配置し、情報伝播がネットワーク構造の違いによって、どのように変化するかを観察した。それぞれの計算条件に対して、20回試行し、得られた数値解を平均する。図-11は初期状態の一例である。背景の線が移動エージェントが移動する環境を表すネットワーク、●印が移動エージェント、移動エージェント間の線が情報ネットワークを表している。また、◎印が情報量1の移動エージェントを示している。

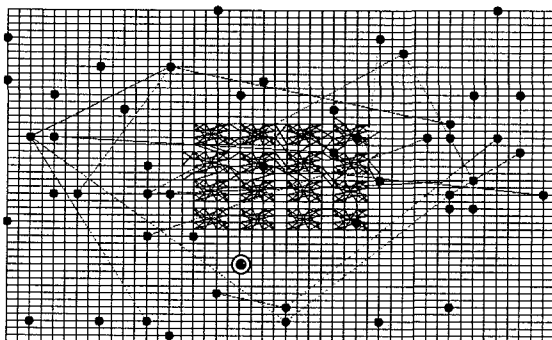


図-11 情報伝播シミュレーション

次に、全エージェント中における情報を持ったエージェントの割合を情報伝播率として、時間変化を調べる(図

-12)。横軸がステップ数、縦軸は情報伝播率であり、20回の平均を示している。なお、20回の試行のそれぞれを調べているが、同じ傾向であることを確認している。

文献20図2の谷本と藤井による数値実験では、初期になだらかに情報伝播率が上昇し、全ステップ数の中間の時間帯で急激に上昇、その後、一定値に収束するという様子が示されている。図-12右図のBが谷本と藤井による数値実験に相当し、グラフの傾きを含めて、その傾向が一致している。また、図-12左図のCは、彼らが導いた理論解²⁰⁾(初期にステップ状に立ち上がり、すぐに収束する)に良く一致していることがわかる。なお、多くの結果は、彼らの数値計算の結果と理論解の範囲にあることを確認している。

また、A,CとB,Dの結果を比べると、中心部分にリンクを追加したものでは、接触伝播の機会が増えるため、基準ネットワークだけの場合と伝播の挙動が異なることがわかる。ネットワーク構造の違いによって情報伝播が異なることは予想できるものではあるが、どのようにネットワークを作成し、どのようにシミュレーションを行うのかという部分で未知の部分も少なくない。上述した結果によって、提案したアルゴリズムの基本性能は確認できたと考えている。

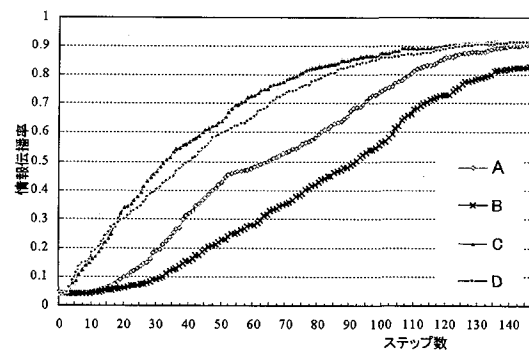
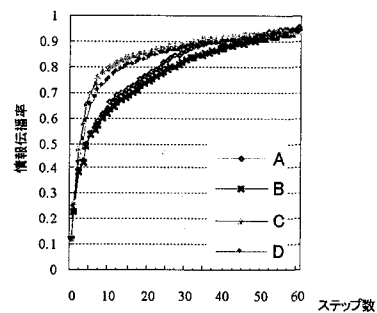


図-12 情報伝播率の時間変化、上図(24×24, エージェント数25)、下図(48×48, エージェント数75)

4. 2 避難シミュレーション

前節の情報伝播シミュレーションに対して、情報ネットワークに、移動エージェントの行動を制御する情報を与え、移動エージェントがその情報に従って行動するというシミュレーションを行う。具体的には、情報ネットワークに避難すべき方向を情報として与え、その情報に応じてエージェントの行動が制御されるという避難シミュレーションを行う。

ュレーションを行った。

情報伝播シミュレーションと同様の方法で情報を得た移動エージェントは、移動する際に、自分の持つ情報量と[0,1]の一樣乱数を比べ、情報量のほうが大きければ目的の方向へと移動し、一樣乱数の方が大きければランダムウォークによる移動を行うものとした。また、空間領域中に目的地を設定し、目的地に入ったエージェントは避難完了とみなすことにした。

環境を形成するネットワークは、48 x 48 の基準ネットワークを基本としたもの、移動エージェント数は 50、情報ネットワークのリンク数は 20 とした。計算の種別 A,B,C,D は、表-1 と同じである。初期条件として、ランダムに配置した 5 人のエージェントに初期値を 0.7 とする情報を与え、シミュレーションを開始し、避難人数の時間的変化を求めた。その結果を図-13 に示す。

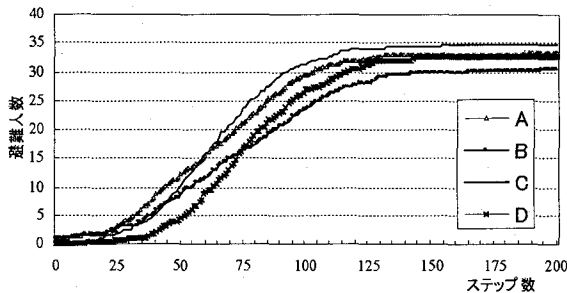


図-13 避難人数の時間変化

全般的には、中心部分にリンクを追加することで、避難人数は増加するといえるが、その増加の仕方が特徴的である。40~60 ステップに注目すると、この時点では基準ネットワークだけのものの方が避難人数は多い。つまり、リンクの追加による避難人数の増加効果は、一定時間の経過後に現れることがわかる。人口密度の高い地域の存在は、災害時の避難においては、一時的に避難を阻害するような、いわば抵抗のような効果をもたらす。一方で、接触伝播による情報が伝わると、全体としては避難人数が増える。情報による影響が大きいものと考えられる。

5. まとめ

地理的条件を有する MAS における移動エージェントの移動方法の考察のために、はじめに、扱う対象（エージェントや環境）が空間構造と関連するような MAS における問題点を調べ、4つの問題点としてまとめた。

それらの問題を解決するために、地理的条件にもとづくネットワーク構造を導入した新しい MAS の手法を提案した。提案手法は2つの部分からなる。1つは、基準ネットワークに対して、GIS から得られる地理的属性に従って局所的なリンクやショートカットを加えて、エージェントが移動するネットワークを形成するというものである。もう一つは、谷本と藤井の方法に倣い、移動エージェント間の直接的な情報のやり取りを行う情報ネットワークを導入し、多重のネットワークを形成するとい

うものである。

提案手法にもとづき、情報伝播シミュレーション、避難シミュレーションを行った。数値実験の結果の一部は、従来の研究結果とよく一致しており、さらにネットワーク依存性を顕在化させるものである。基礎的な段階ではあるが、提案手法の有効性が示唆できたと考えている。

参考文献

- 1) Epstein, J.M. and Axtell R., 服部, 木村訳: 人工社会 - 複雑系とマルチエージェント・シミュレーション, 共立出版, 1999.
- 2) Axelrod, R.: Advancing the Art of Simulation in the Social Science, Simulating Social Phenomena, pp.21-40, 1997.
- 3) 寺野隆雄: エージェントベースモデリング: KISS 原理を超えて. 人工知能学会誌, 18.6, pp.710-715, 2003.
- 4) Newman, M.E.J., Jensen, I., and Ziff, R. M.: Percolation and epidemics in a two-dimensional small world, Phys. Rev. E 65, 021904, 2002.
- 5) Muzy, A., Innocentia, E., Aello, A., Santucci, J.-F., Santoni, P.-A. and Hill, D.R.C.: Modelling and simulation of ecological propagation processes: application to fire spread, Environmental Modelling & Software, 20.7, pp. 827-842, 2005.
- 6) Li, M., Chan, S. V., Chong, K. W. and Hallam, J.: Agent-oriented urban traffic control simulation, Proceedings of 1st Annual International Conference on Industrial Engineering Applications and Practice, 1996.
- 7) 大飼洋平, 小国健二, 堀宗朗: 計測に基づく避難行動マルチエージェントシミュレータの開発, 土木学会応用力学論文集, 8, pp.629-636, 2005.
- 8) 牧野勤, 成瀬継太郎, 横井浩史, 嘉数侑昇: ポテンシャル場によるエージェントの協調作業の導入に関する研究, 情報処理学会・数理モデル化と応用, 44, SIG07, pp.69-81, 2003.
- 9) 増田直紀, 今野紀雄: 複雑ネットワークの科学, 産業図書, 2005.
- 10) 加藤恭義, 光成友孝, 築山 洋: セルオートマトン法, 森北出版, 1998.
- 11) 車谷浩一: マルチエージェント社会シミュレーション展望, システム/制御/情報, 46.9, pp.518-523, 2002.
- 12) 桑原雅夫, 吉井稔雄, 堀口良太: ブロック密度法を用いた交通流の表現方法について, 交通工学, 32.4, pp.39-44, 1997.
- 13) 新井 健, 増田浩通, 落合哲郎: 災害弱者を考慮したマルチエージェント避難シミュレーションモデル, 第3回KKMASコンペティション論文集, pp.117-125, 2003.
- 14) 白山 晋, 市橋 立: 自然環境への影響を考慮したミクロ交通流モデルの新しい妥当性検証手法, 土木学会応用力学論文集, 8, pp.259-266, 2005.
- 15) 南一久, 村上陽平, 河添智幸, 石田亨: マルチエージェントシステムによる避難シミュレーション, 第16回人工知能学会全国大会講演論文集, CD-ROM, 2B1-04, 2002.
- 16) 松倉洋史, 勝原光治郎, 宮崎恵子, 池本義範, 今里元信, 太田進, 正田賢次郎, 宮田修, 桐谷伸夫, 平田宏一: 車いすと群集流の避難シミュレーション, 平成14年度(第2回)海上技術安全研究所研究発表会講演集, pp.233-237, 2002.
- 17) 村木雄二, 狩野 均: マルチエージェントモデルを用いた広域災害避難シミュレーションにおける情報伝達の有効性, 情報処理学会・数理モデル化と問題解決研究会, MPS-52-18, pp.69-72, 2004.
- 18) Sander, L.M., Warren, C.P., and Sokolov, I.M.: Epidemics, disorder, and percolation, Physica A 325, pp.1-8, 2003.
- 19) 伊庭齊志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1994.
- 20) 谷本 潤, 藤井晴行: マルチ・エージェント・シミュレーションによる情報伝播特性に関する一考察, 2001, www2.kke.co.jp/mas/output/tanimoto20010823.pdf

(2006年4月13日受付)