

テロ対策についてのコンピュータ・シミュレーション分析*

——GPGSiMを使った政策指向シミュレーションの検討——

瀬島 誠*¹

要 約

この論文は、反乱勢力に対する平和維持部隊の掃討作戦についてのシミュレーション研究である Wheeler 2005 論文に依拠しながら、それをテロ行為とそれに対抗する防衛側の行動とのモデルに変更し、そのプロセスと結果をシミュレーション分析したものである。使用したシミュレーション環境は、GPGSiM というシミュレータであった。スーパーコンピュータなどの大規模計算環境を使用しない、単体のコンピュータで行った実験であったが、それでも一定の知見を得ることができた。そこでは、攻撃側と防御側の力関係について、均衡点辺りで発生する結果の不安定さや力の比率が 2 対 1 や 3 対 1 ではどのような結果になるかを具体的に考えることができた。特に、政策研究という点では、シミュレーションによってどのような人数比を用いればいいのかを具体的に考える材料が提供できた。このことは、この種のシミュレーション研究が重要であることを示したものである。

キーワード：テロリズム，シミュレーション，GPGSiM

JEL Classification：C63，C88，F52

I. 問題の所在

9月11日のアメリカにおける同時多発テロ以後、テロに関する研究は盛んであり、歴史研究、事例研究、数理的手法、ゲーム理論などを用いた様々な研究が行われてきた。コンピュータ・シミュレーションを使ったテロ研究も幾つか行われてきた。コンピュータ・シミュレーションを使ったテロ研究には大きく分けて二つの流れがある。その一つは、社会ネットワーク分析を使った、テロ組織の研究と対策について

のシミュレーション分析であろう。そのようなものとしては、例えば、カーネギー・メロン大学の社会シミュレーション研究所が有名である (Dombroski, Fischbeck, and Carley (2003) など)。その他に、Raczynski (2004)、Penzar and Srblijinovic (2005) や日本では山本 (2009) などがある。それらは、ほぼ全てテロ組織のネットワークについてのシミュレーション分析である。もちろん、それらのシミュレーション研究

* 本論文は科学研究費補助金 (基盤研究 (S)) 「グローバル公共財としての地球秩序に関するシミュレーション分析」課題番号: 17103002 (研究代表者, 京都大学大学院経済学研究科吉田和男教授) の研究成果の一部である。

* 1 大阪国際大学現代社会学部准教授

は幾つかの重要な指摘を生み出してきた。しかし、それを実際の政策に反映させるには、重要な限界が存在する。

その重要な限界とは、テロ組織のネットワーク構造を分析するためには、それについての多くの正確な情報が必要だということである。一般に、テロ組織がそれよりも強力な軍事力や警察力を持つ国家や政府に対して有する強みは、情報の非対称性である。特にアメリカや日本のような民主主義国家では重要な情報を入手するのは比較的容易であろう。指導者の仕事の日程や重要な建築物の所在などは公に知られている情報となっている。他方、テロ組織についての情報、誰が指導者でどこにいるのか、どこに重要な拠点があるのか、活動資金はどのように流れているのか、何を目標としてどのような部隊が活動しているのか、などの情報はオープンではないし、入手するためには膨大なコストがかかる。テロ組織についての詳細な情報が明らかになれば、そのテロ組織を殲滅することは可能となるが、そうでない限り、殲滅は難しい。

さらに、テロ組織を分析してそれに対抗する手法の研究が行われたとしても、テロ組織も自らについての正確な私的情報を使ってその弱点を分析し、対応策を既に講じてしまっているかも知れない。つまり、テロ組織の破壊を目指したシミュレーション研究は、本質的にテロ組織の対応よりも後れをとってしまう可能性が高い。

テロ組織についてのシミュレーション分析を行って、組織のどこに弱点があるかを分析して政策に役立てるためには、タイムリーでホットな情報が必要である。そのような情報の収集とタイムリーな分析を目指した研究はその端緒にすぎたばかりである。データマイニングなどの手法を用いて、情報構造からテロや犯罪に対処しようとする、安全保障インフォマティクスという研究分野が次第に注目を集めるようになってきている（Chen 2006など）。しかし、その研究

は始まったばかりである。

この論文は、テロ組織についての多くのネットワーク分析のシミュレーション研究を行うものではなく、もう一つのテロについてのシミュレーション研究の流れに属するものである。それはテロの発生に対抗するための方策を考えるシミュレーションである。前者のシミュレーション研究がテロ組織に対する攻撃的な性格のものであるとすれば、これはテロの発生に備えてそれを抑止しようとする、防御的な性格のものである。前記の攻撃的なシミュレーション研究を政策に反映させることは難しいが、ここで取り上げる防御的なシミュレーション研究は、抑止効果を狙ったものであり、それを政策に反映させることは比較すればより困難ではない。攻撃的対策では、テロ組織側に私的情報の優位があったが、この抑止的対策では、防御側が地理情報や気象情報、町や道路などのインフラ情報を持っており、情報面の優劣では同等かまたはより優位である。

この種のシミュレーション研究の1つとしては、バイオテロについての研究がある。有名なシミュレーションの1つにカーネギーメロン大学のBioWarがある。それはスーパーコンピュータ上に1つの町を作り、人の流れ、交通網、公共組織などをデータを元にして詳細を作り上げ、その仮想空間でバイオテロが行われたときの影響と対策をシミュレートするためのものである¹⁾。日本でも、バイオテロではないものの、新型インフルエンザの爆発的な流行に対処するためのシミュレーション研究が国立感染症センターや東京工業大学などによって行われ始めている。それをバイオテロに応用することはそれほど難しいことではあるまい。

戦闘シミュレーションから発展してきた研究もこの第二の流れに属するものであろう。アメリカ軍ではこの種のシミュレーション研究が盛んに行われている（例えば、Ilachinski (2004)など）。特に、アフガニスタンやイラクでの戦

1) <http://www.casos.cs.cmu.edu/projects/biowar/index.html>

闘経験から、どのように敵対勢力と戦闘を行うのかの研究は盛んである。そこでは、スパコンなどの大規模なコンピュータが利用されているが、筆者は現在そのようなシミュレーション環境を利用する状況にはない。そこでこの論文は、大規模な戦闘シミュレーションをどこまで簡略化して単体のマシンで実行できるかを検証しようとした研究 (Wheeler 2005) に着目して、シミュレーション研究支援環境GPSiMを使ってどこまでその試みに近づけられるのかそうでないのかを検証するものである (この種のシミュレーション研究としては、Benett (2008) などもある)。

Wheeler 2005は平和維持部隊によるイラクやアフガニスタンでの武装勢力の掃討作戦をシミュレートして分析したものであり、本論文のシミュレーション・モデルはこのWheelerモデルを出発点とする。本論文が想定する状況は、例えば日本のある町や地域にテロ組織やゲリラ部隊が侵入した状況である。侵入したテロ組織やゲリラ部隊がその目的を実現するのをどのように防ぐのかをシミュレートして、その対策を検討することがその目的である。そのため、対テロ戦用にWheeler 2005のモデル仕様を変更する必要がある。とはいえ、シミュレーション研究で出てきた結果の妥当性を判断する基準として、Wheeler論文は役に立つ。そのため、戦闘結果の判断、エージェントの移動方法、視線確定方法、損害率の計算など結果に重要な影響を与えそうなモデル部分については、そのまま実装するように試みた。もちろん、そのソースコードを見ることはできないので正確にそのまま再現したものにはなっていないが、論文の記述に依拠しながら、分からない点はできるだけ推定をおこなってそれに近づけた²⁾。

この論文におけるシミュレーションは、敵対勢力の侵入または上陸から始まる。上陸人数は

判明しているとする。さらに、防御側は敵対勢力の目標地点を知らないものと想定している。敵対勢力の目標は一般には明らかである場合もあるが、必ずしも明らかでないかも知れない。目標が明らかならば、その目標の周辺や目標への経路を重点的に監視・防衛すれば良い。その場合には、対策はさほど困難でないかも知れない。しかし、攻撃目標が必ずしも明らかではない場合でも安全保障上重要な拠点は存在するので、その周辺やアクセスルートを重点的に防御することは考えられる。この論文では、以下の二つの理由から、敵対勢力の攻撃目標が全くわからない状況を想定している。第一の理由は、この論文が準拠しようとしているWheelerのモデルでは、攻撃側の目標は存在しないからである。第二は、最悪の状況についての研究を目指したからである。目標が推定可能な状況であれば、解決策はこの最悪事態のモデルよりも容易なものになる。

攻撃目標が必ずしも明らかではない場合には、どこにどれだけの人数を配置すればよいか、どのように探索するのかなどは実際にシミュレートしてみないと分からない。加えて、それぞれの土地の状況や天候、時間、季節など複数の複雑な要因の影響をも考慮しなければならない。そのためには事前のシミュレーションが欠かせない。しかし、各地の住民や警察、消防、自衛隊、市役所職員を巻き込んだ、本格的な模擬訓練や演習等を行うことは難しい。コンピュータ・シミュレーションはそのための有力な代替的な手段を提供する。この論文はそのことを実証することを目指すものである。

以下では、最初にこのシミュレーション研究が使用するシミュレータである、GPSiMについて概略を説明する。その後、このシミュレーションモデルの詳細について説明する。その上でシミュレーションの試行結果について検

2) このシミュレーションモデルはWheeler 2005のモデルを修正したものであり、空間やエージェントの行動などの設定や実行の手順などについては、その基本形を踏襲した。Wheelerモデルを参照することによって、Rouchier, Cioffi-Revilla, Polhill and Takadama 2008が主張するモデル間比較のメリットの一つである、結果の妥当性の検証が行われている。

討し、最後に今回のシミュレーション研究について議論を行い、今後の展開について論じる。

II. GPGSiM³⁾

GPGSiMはjava言語によるシミュレーション支援環境である。科学研究費補助金（基盤研究(S)）「グローバル公共財としての地球秩序に関するシミュレーション分析」のプロジェクトにおいて、グローバル公共財の分析のために最適なシミュレーション環境を提供することを目的に開発されたコンピュータシミュレーション支援環境である。

コンピュータシミュレーションの研究上の有用性については次第に関心が高まっているが、本格的なコンピュータシミュレーションを行う上で大きな障害となるのはプログラミングである。プログラミング言語で 사용되는コマンドは単純なもので、その習得にはそれほどの努力を有しない。もちろん、最近のコンピュータ能力の向上に伴って、マルチスレッド技術、コンピュータ間通信、分散並列処理、グラフィカル・ユーザ・インタフェースなどを使う際には、高度なプログラミング言語の取得が要求される。しかし、一般に社会科学のシミュレーションにはそれほど高度な技術は要求されない。

とはいえ、シミュレーションの結果を分析するためには、結果データの処理やパラメタ入力、そして特にグラフィカル・ユーザ・インタフェースは重要である。特に、最後のグラフィカル・ユーザ・インタフェースは複雑で、研究者が自らそれに手を染めて製作することは余り生産的ではない。画面上の表示配置を考え、シミュレーションの進捗とともに表示内容を調整し、必要な情報を適切に表示する。そのためのプログラミング作業には繰り返しも多く、ま

た、煩雑である。

さらに、研究のためのコンピュータプログラミングにおいて最も厄介なのは、単純なコンピュータ言語のコマンドをどのように組み合わせ、思った通りの実験を行うかである。コマンドは単純なだけに、思った通りのシミュレーションを行うためには、コマンドをどのように組み合わせるかという点で、プログラマの能力と創意工夫が要求される。その作業には幾つかの定石のようなものがあるが、その多くはプログラマの癖や性向が色濃く反映される。最初にコンピュータのプログラミングを行う人が困るのが、そこである。

GPGSiMは、コマンドの組み合わせを最適化して、このプログラミング作業を軽減化してくれると共に、シミュレーション研究において重要な結果分析の道具、特にグラフィカル・ユーザ・インタフェースなどを充実させている。GPGSiMによるコーディング作業では、GPGSiMが雛形としてそろえるModelクラス、Agentクラス、Spaceクラス、Dyadクラスなどの基盤クラスを継承（extends）する。各クラスから作成するインスタンスはGPGSiMが管理しているので、その管理の手間は省ける。クラスとインスタンスを管理するための様々なメソッドが提供されており、複雑なコーディングを容易なものにしている。

また、結果の分析を充実させながら、その利用は極めてシンプルなものである。GPGSiMが提供するクラスを継承しておけば、結果分析で使用する変数名のアクセス指定子をpublicと宣言するだけで、その結果は最適なグラフや図

3) GPGSiMについては（斎藤ほか2009）および（吉田・井堀・瀬島2009）に詳しい。

の入力データとして蓄えられる。結果は、全ての試行が終了した段階でゆっくりと分析することが可能である。さらにはシミュレーションの途中経過を全てcsvファイルとして出力することもできて、別のスプレッドシートなどで分析することもできる。データをcsvファイルから読み込むこともできる。結果の分析において最も重要なものの一つとして、シミュレーション試行と結果の再現性を実現することがある。予想外の興味深い結果が観測されても、その再現性が確保されない限り、詳細な分析が難しくなる。そのために必要なのは乱数の管理である。GPGSiMでは、乱数のシード管理を徹底して

おり、GPGSiMが提供する乱数関数を使用する限り、結果の再現性は保障されている。

GPGSiMは、グローバル公共財問題を解明するためのシミュレーション研究を促進することを目的として構築されてきたのであり、そのためのモデルの蓄積などは進んでいるが、モデルの再利用性を高めるための工夫には、さらなる検討が必要となっている。とはいえ、GPGSiMには上記のようなプログラミングを支援する強力な仕組みが備わっており、本論文の副次的な目的はGPGSiMの能力の評価を行うことである。

Ⅲ. シミュレーション・モデル

Ⅲ-1. 概要

このシミュレーション・モデルにおけるエージェントには3つのタイプがある。それは攻撃側エージェント、防御側エージェント、そして市民エージェントである。攻撃側エージェントは、テロ部隊などを想定してモデル化したエージェントである。防御側エージェントは、防御側の警察組織や軍事組織部隊などを想定している。市民エージェントは攻撃と防御に直接関係しないが、情報の提供などを行うエージェントである。

各エージェントにはそれぞれ独自の属性(java言語ではフィールドと呼ぶ)がある。攻撃側エージェントには、攻撃能力と目標座標⁴⁾、そして目標座標から計算される移動方位をその属性として持つ。攻撃側エージェントは、攻撃側エージェントの私的情報である、目標座標に到達することがその第一目標である。また、その目標達成を妨害する防御側エージェントとの戦闘には勝つことが必要となる。さらには、移

動に際して、シミュレーション空間を移動する市民エージェントに発見されることをできるだけ回避する必要がある。

防御側エージェントは攻撃側エージェントの目標座標を知らない。彼らは攻撃側エージェントの排除を目的としている。防御側エージェントの属性は、防御側独自の攻撃能力と移動方位である。

そして、市民エージェントには特に目的はないが、攻撃側エージェントを発見すると、確率的に防御側エージェントに報告するか、またはその場から逃避する。全ての市民が必ずしも警察などに通報するとは限らないからである。市民エージェントの属性としては、移動方位がある。

シミュレーションの一試行は、以下の4つの条件の1つでも実現した場合に終了する。一つは、攻撃側エージェントがそのうち一つでもその目標とする座標が位置するセルに到達した場合である。第二の終了条件は、防御側エージェ

4) この試行では一貫して(364, 457)の座標を攻撃側の目標座標として使った。

ントが全て排除された場合である。その場合、攻撃型エージェントが目標座標に到達することを阻止することができなくなり、第一の終了条件が実現されたとみなすことができる。第三の終了条件は、攻撃側エージェントが全て排除された場合である。この場合、攻撃は失敗したとみなされる。第四の終了条件は、ターン数が1万を超えると、結果が確定しないままに終了することである。1万ターンという数字に特別の意味はないが、結果が確定しないままに一つの試行を長時間にわたった行われる事態を回避するため、十分長いターン数を指定した、便宜的な措置である。

全てのエージェントに共通する属性である移動方位は、以下のような特性を持つ。方位はシミュレーション空間の北（二次元空間上の上）が0度で、各エージェントは0度から360度の移動方位を整数値で持つ。シミュレーションが進展するのに従い、様々な条件によってその移動方位は変更される。全てのエージェントに共通する移動方位の変更は、シミュレーション空間の四方の境についてである。エージェントがシミュレーション空間の四方を超えて枠外に出ることはなく、四方の境界においては、エージェントは物理的な反射の動きを行って、移動方位を変更する。それ以外の移動方位の設定や変更はエージェントのタイプによって異なる。

攻撃側は、基本的に目標座標に向けた移動方位を採用するが、移動に際して、シミュレーション空間に定められた植生密度の平均を下回るセルには80%の確率で進入をさける。それは、防御側エージェントや市民エージェントに発見されることを避けるためである。また、市民エージェントが近くに接近すると、その地点から離れるように移動方位に修正を加える。

防御側は、組み込まれた探索方法によって、移動方位を決定する。攻撃側エージェントの位置情報が明らかでない段階では、このシミュレーション試行では、Ⅲ-4-1で説明する、フロッキングのアルゴリズムを使って移動方位を決定していく。移動しながら、防御側エー

ジェントは攻撃側エージェントの発見に努める。攻撃側エージェントの位置がわかっただけで、防御側エージェントはフロッキングを中止し、明らかになった位置に方位を修正して移動する。

攻撃側エージェントの座標が明らかになるケースには3つの場合がある。1つは、目視によって攻撃側エージェントが発見された場合である。第2は、仲間の防御側エージェントや市民エージェントからの情報提供によって攻撃側エージェントの座業が判明する場合である。第3は、攻撃側エージェントや防御側エージェントの戦闘行動（発砲）によってその位置情報が明らかになる場合で、その発砲エージェントの半径30単位以内の範囲にいる防御側エージェントがその発砲行為を行ったエージェントの座標を入手する。

市民エージェントは、初期値として、乱数で移動方位を設定する。その後、シミュレーション空間四方の境界、攻撃側エージェントの存在、防御側エージェントの存在などによって、その移動方位を修正していく。

Ⅲ-2. 地形情報

このシミュレーションの空間は二つの層から構成される。ひとつは50×50のセルで構成された地形空間層で、そこには、植生密度や都市などの地形情報が入れられている。もう一つは、縦0～500×横0～500の座標空間層であり、各エージェントはその座標空間のどこかに位置しており、この座標空間によって移動などを行う。エージェントが存在する座標空間と地理空間はオーバーラップしており、各エージェントは、その座標に対応する50×50の地理セルにある地理情報によってその行動が影響される。例えば、あるエージェントが座標（134, 345）に位置したとすると、そのエージェントは、対応する（13, 34）の位置にあるセルの地理情報の影響を受ける、という具合である。これら二つの層の空間は閉じたものである。つまり、この空間はトーラス型ではなく、その周囲

は境界線となっている。そのため、境界線におけるエージェントの動きなどで上記のような特別の配慮が必要となる。

50×50の地形空間は、植生や都市など、そのシミュレーション空間の地理情報を持っている。各セルには、地理情報として植生密度が設定されている。植生密度は0～100の間の整数値をとる。さらに、50×50の地形空間には町が構築されており、町のセルと町に隣接するセルの植生密度は0に設定される。植生密度は、Wheeler 2005に従い、以下のように構築した。最初に50×50の各セルに0から100の間の整数値を一樣乱数で割り当てる。その上で、隣接するセル同士の植生密度分布がなだらかになるように、スムーズ化した。

スムーズ化は以下のように行った。まず、乱数で2500個のセルの一つを選び、その周辺の8個のセルの植生密度の平均を計算し、それをその選んだセルの植生密度値として再設定する。境界周辺のセルについては、その周辺のセル（それが合計で8個以下でも）の植生密度の平均値を設定する。この操作を全てのセルについて1回行う。この作業を3回繰り返す。そうして、スムーズ化された植生密度をもつ空間を得ている。

さらに、その上で、都市を乱数によって、建設する。パラメタとして与える数（ここでは10個）の都市を構築するが、それは、乱数で選んだ10個のセルを都市として設定し、その上で、10個の都市それぞれについて、その周辺の8個のセル（境界周辺のセルが選ばれたときには、8個以下のセル）を選び、一樣乱数によって80%の確率で都市にするかどうかを決定する。都市の植生密度は0に設定され、また、都市として設定されたセルの周辺全てのセルの植生密度も0に設定する。

このようにして作成された地形空間が図1と図2に示されている。図1は植生密度を示したもので、黒い部分（GPGSiMの初期設定では青）が植生密度0のセルであり、色が明るい色に近づくほど植生密度の値が大きくなる。直感

に反するが、薄いグレー（GPGSiMの初期設定では緑）よりも濃いグレー（GPGSiMの初期設定では黄色）セルの方が植生密度が高い。このセル空間の中で、最も高い植生密度の値を変数vMaxとして、シミュレーションのプロセスで使用する。図2は都市地図である。濃いグレー（GPGSiMの初期設定では青）の部分に都市が建設されている。

今回のモデルで使用する地理情報は以上である。これは比較のため、Wheeler 2005のモデル設定に従ったからであり、より複雑な地理情報を組み込むことは難しくない。また、空間を50×50以上に広げて、より細密な地理空間を構成することも可能であるし、新しい空間の層を追加することも簡単である。プログラミング上はそれは大して難しい作業ではない。ソースコード上では、配列変数を一つ設けて、それに適切な値を初期値として与え、その値を読み取る関数（メソッド）を組み込むだけである。

問題となるのは、複数の地理情報が存在するときに、それらをどのように組み合わせ、優先順位をつけ、エージェントがその行動決定に利用するかをコード化するかである。そのためには、警察、消防、自衛隊、市役所などの現場の専門家を意見や評価を参照する必要がある。

さらに困難な問題は、地理情報を複雑にすればするほど、その処理にコンピュータのマシン・パワーが必要になることである。地理空間が拡大しそれが重層化すればするほど、記憶領域が必要になるし、その処理を記録し再現するために、多くのマシン・パワーが必要になるのは想像に難くない。実際、今回のシミュレーション研究は僅か50×50と500×500のセル空間の2層しか使っていないが、それを何ターンも実行すると、そのデータの画像処理とデータ入出力にマシンパワーが多く消費され、スムーズな結果分析が望めなくなる。この点については、本論文の最後のところでもう一度立ち戻って今後の課題として検討を行う。

図1：植生密度（黒い部分が0；濃いグレー<薄いグレー）

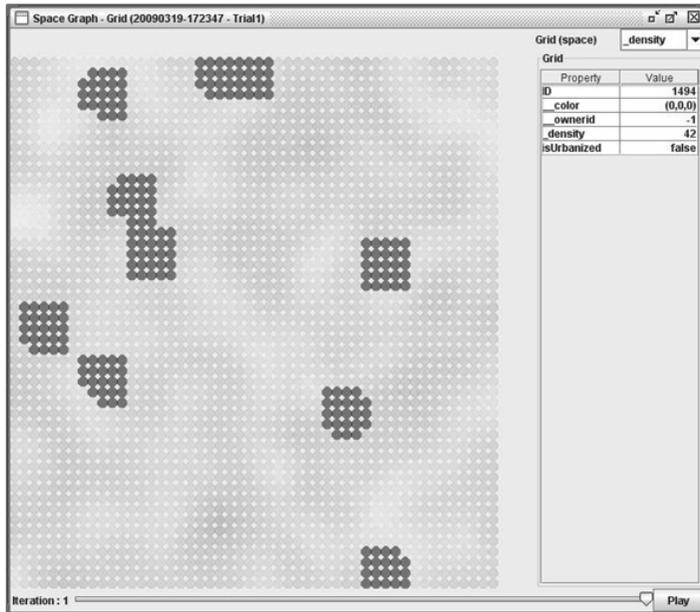
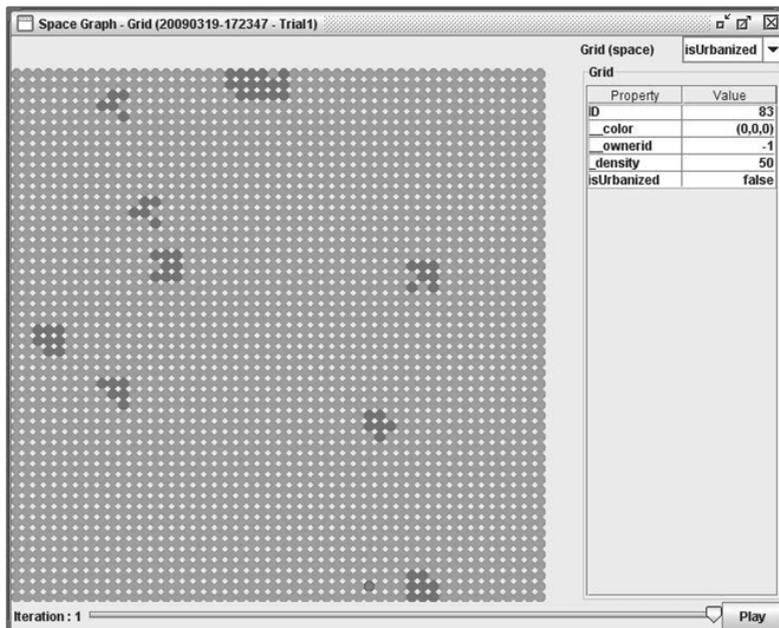


図2：都市の配置（濃いグレーのセルが都市）



Ⅲ-3. 初期状態

シミュレーション開始段階では、エージェントの初期位置が初期状態として設定される。攻撃側エージェントは、シミュレーションの開始時点ではシミュレーション空間の北辺に位置する。北辺のセル50個の平均植生密度を計算し、その平均よりも植生密度が高いセルのうちでどれかが乱数で選ばれる。さらに、そのセルの中の座標のどこかに乱数で配置される。

防御側エージェントについては、シミュレーション空間の南辺の中央に位置する。その中心のセルのうち、パラメタで指定された数のインスタンスが10×10の座標空間上に乱数で配置される。

そして、市民エージェントは、都市セルのどれかに乱数で配置される。

Ⅲ-4. 各エージェントの動き⁵⁾

シミュレーションの時間制についてであるが、GPSiMはターン制を採用しているので、それに従う。各ターンでは、乱数で一つのエージェントが選ばれ、それが以下に説明するような行動を行う。

エージェントの行動には大きく分けて移動、観測、報告、戦闘という4種類の行動モードがある。各行動モードは、ある種の状態遷移マシンとしてコード化されており、一つのモードから他のモードへの移行は、エージェントのタイプと状況、乱数によって決定される。一つのターンで活性化されたエージェントが一連の行動モードを実行することによって、そのターンは終了する。あるターンのあるエージェントがどの行動モードから始まりどの行動モードで終了するかは、そのエージェントの属性、そのターン開始時点でのエージェントの置かれた状況、行動開始後の状況変化、乱数などに依存する。全ての行動モードを行う場合もあるし、い

くつかの行動モードに至らずに終了する場合もある。例えば、移動、観測、報告、戦闘という一連の流れを実行する場合もあるし、移動と観測だけで一つのターンを終了する場合もある。また、戦闘だけでターンを終了する場合もある。図3から図5はこのモデルの3つのエージェントタイプ毎に記した行動モードの遷移の図である。

エージェントの種類によって、優先的に行う状態が異なる。攻撃側は個別に移動し、発見されることを回避するように行動アルゴリズムが組み込まれているので、移動モードの前に観測モードを行うように設定されている。観測モードで何も観測されなければ、移動を行って、そのターンを終了する。防御側エージェントと市民エージェントは最初に行動モードに入って、移動後に観測モードに入る。観測行為の結果何も発見されなければ、そのターンは終了する。以下では、各モードについて、説明する。

Ⅲ-4-1. 移動モード

移動モードでは、エージェントは内部状態として持つ移動方位に従って座標空間上を10単位の移動を行う。各エージェントは独自の仕様によって移動を行う。

攻撃側エージェントは、その目標座標を目指して個別に移動する。基本的に最短距離を移動するが、防御側エージェントや市民エージェントから発見されることを避けるために、確率的に植生密度が低いセルには侵入しない。具体的には空間内での最大植生密度 v_{Max} の半分の値よりも密度が小さいセルには80%の確率で侵入せず、20%の確率で侵入する。侵入しない場合には、シミュレーション空間の境界にぶつかった時と同じように、そのセルに対して反射行動を行う。

市民エージェントも同じような動きをする

5) シミュレーションのこの部分については、Wheelerの説明は必ずしも網羅的ではないため、筆者独自でいくつかの推定を行っている。そのため、便宜上、以下に示すように新たに退避モードを作成するなどの変更を行っている。

図3：防御側エージェント

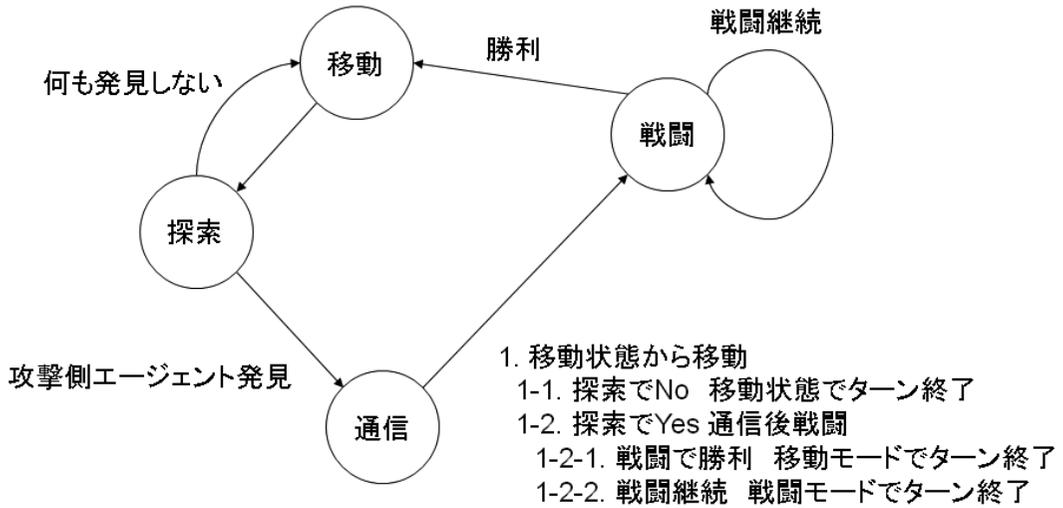
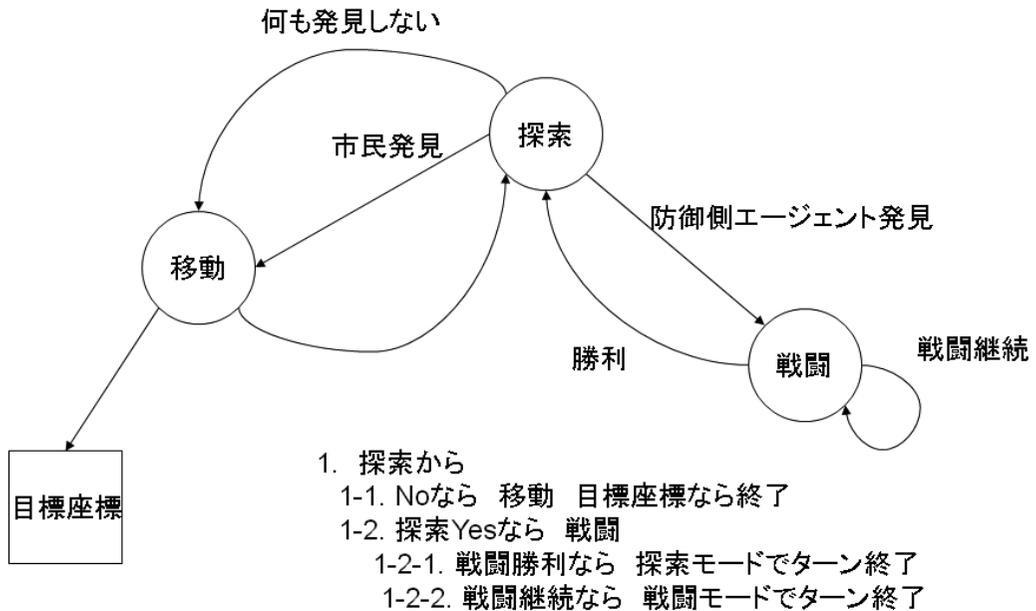


図4：攻撃側エージェント

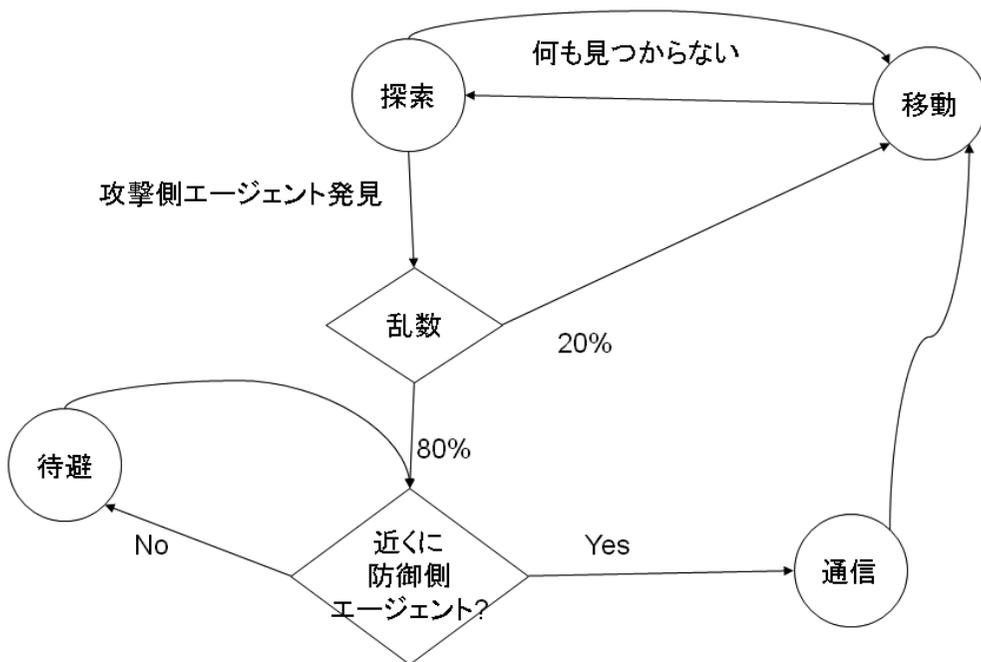


が、攻撃側エージェントとは異なり、vMaxの半分の値よりも植生密度が高いセルには確率80%で侵入しない。

防御側エージェントの行動は若干複雑である。どれかの攻撃側エージェントの座標情報が入手できればその座標に向けて一直線に移動するが、そうでない場合、探索のための何らかの

移動アルゴリズムが必要である。ここでは、フロッキングという移動アルゴリズムを使う。このアルゴリズムは、鳥の群れの飛行をシミュレートした boid モデルに従っている (Reynolds 1987)。それは以下の3つの動きを合成したものである。その1つは、群れの集まりを維持しようとする動きで、全体のグループの中心に向

図5：市民エージェント



かおうとする動きとして計算される。2つ目の動きはグループ全体が向かおうとする方向に自分の方位を合わせようとする動きである。そして、3つ目の動きは、他のエージェントに近づきすぎてぶつかることがないように、その進行方向を修正する動きである。これらを総計してフロッキングのエージェントの動きが実現する。⁶⁾

攻撃側エージェントの位置座標が判明すると、防御側エージェントはフロッキングを中止して、その座標に移動しようとする。防御側エージェントが排除されるなど、その情報が消滅すると、再び、防御側エージェントはフロッキングの行動を行う。移動モードが終了すると、全てのエージェントは次の行動モードとして探索モードを設定する。

Ⅲ-4-2. 探索モード

探索モードは周囲に他のエージェント（特に敵となるタイプのエージェント）がないかどうかを観測する行為のモードである。エージェントのタイプによってその観測結果をどう利用するかが決まってくるが、何も発見されない場合には、全てのエージェントについて、次の行動モードとして移動モードが設定される。観測行為においては、観測するエージェントと観測されるエージェントの間にあるセルの植生密度と都市が大きな影響を与える。相手がみえるかどうかは以下のような計算によって決定される。

観測エージェントから出発して、この地形空間の最大植生密度値 (vMax) の3倍の値を視覚能力として設定する。それは、観測エージェントと被観測エージェントの間の植生密度と都

6) つかず離れずに移動する防御側エージェントの動きを実現するためには、これらの3種類の力を計算する際に必要な様々なパラメタの値を調整する必要がある。この現在のモデルに搭載するため、事前に最適なパラメタを推定する必要から、フロッキングだけのモデルを作って検討した。

市によってその値は削減されていく。被観測エージェントに到達するまでその視覚能力が0以下にならなければ、その被観測エージェントは見えると判断される。しかし、その視覚能力が0以下になれば、その被観測エージェントは見えないとされる。

座標空間において観測エージェントの座標から被観測エージェントの座標までを直線で結び、観測エージェント座標から座標空間で1単位ずつ被観測エージェントまでその直線に沿って辿っていく。地形空間で見て新しい地形セルに移動するたびに、視覚能力の値からその新しい地形セルの植生密度の値を引く。都市については、その地理空間の最大植生密度値 v_{Max} を引く。そうして、被観測エージェントの座標に到達するまでかまたはその視覚能力がマイナスの値になるまで、その作業を繰り返す。⁷⁾ 視覚能力がゼロになる前に被観測エージェントに到達すれば、被観測エージェントは観測エージェントから見えたこととなる。他方、それ以前に視覚能力がゼロ以下になった場合には、被観測エージェントは観測エージェントからは見えていないと計算される。攻撃型エージェントは植生密度が高いセルを志向するので、市民エージェントや防御側エージェントよりも見つけられなくなる。

攻撃側エージェントが防御側エージェントを発見した場合、戦闘モードに移行する。防御側エージェントが見あたらない場合には、市民エージェントが近くにいるかどうかを探索する。座標系で20単位以内の距離に市民エージェントがいれば、これまでの進行方向を180度逆転させて、座標系で50単位分だけそのまま移動する。座標系で30単位以内に市民エージェントがいれば、相手からこちらが見えるかどうかの観測を行う。座標系で1単位毎ではなく3

単位毎の大まかな視線設定アルゴリズムを使って推定を行う。相手から見えると思えば、前述と同様に逆方向に移動する。

防御側エージェントの場合、攻撃側エージェントを発見したら、一旦は他の防御側エージェントに情報を伝達するため連絡モードに移行し、その後、戦闘モードに移行する。発見できなければ、そのままフロッキングの行動を継続する。

市民エージェントが攻撃側エージェントを発見した場合、パラメタで与える確率（このシミュレーションでは80%）で防御側エージェントへ報告するためのモードに移行する。それ以外の場合はその発見を無視する。前者の場合、10座標単位以内に防御側エージェントがいれば、その市民エージェントは報告モードに移行する。10座標単位以内に防御側エージェントがいない場合、視認できる防御側エージェントがいるかどうかを確認する。いれば、そのエージェントに向けて移動を行う。いなければ、市民エージェントは移動モードの一種である回避モードに移る。回避モードは移動モードと同じであるが、攻撃側エージェントの情報を持った市民エージェントが防御側エージェントに向けて移動する特別なモードである⁸⁾。防御側エージェントの10単位以内に近づいた時には連絡モードに移行する。さもなければ回避モードを維持して視認できる防御側エージェントに接近を続ける。視認できる防御側エージェントがいない場合には、攻撃側エージェントの位置座標とは180度逆の方向に移動方位を設定して、敵情報を廃棄して通常の移動モードに復帰する。

Ⅲ-4-3. 連絡モード

連絡モードについて、攻撃側エージェントは

7) なお、コンピュータでは角度計算を実数値で計算する際に、微妙な計算誤差が発生するため、厳密に被観測エージェントの座標に到達することが不可能な場合がある。従って、被観測エージェントが位置するセルに到達して、そのセルの植生密度値が計算された段階で、視認確認のアルゴリズムを終了する。

8) これは準拠したWheeler 2005にはないモードであるが、シミュレーションモデル作成の便宜上設定した。シミュレーションの結果には大きな影響を与えない。

相互の通信を行わないものと想定しているため、該当しない。連絡を行うのは、防御側のエージェントと市民エージェントである。攻撃側エージェントを発見した防御側エージェントまたは市民エージェントは、その座標情報を防御側エージェントに連絡する。

防御側エージェントが攻撃側エージェントを発見した場合には、そこから半径10座標単位の距離内にいる別の防御側エージェントを探す。その範囲内で視認することができる防御側エージェントがいれば、そのエージェントに攻撃側エージェントの位置情報を渡す。その後情報を伝達した防御側エージェントは戦闘モードに移行する。連絡を受けたエージェントは、当該攻撃側エージェントを発見できれば次の行動モードとして戦闘モードを設定するが、そうでなければ、その攻撃側エージェントの方角に移動方位を修正して、移動モードに再設定する。

市民エージェントは、防御側エージェントに10単位の距離に近づいた段階で、その観測情報を渡す。受け渡した後は、その市民エージェントはその情報を忘れて（情報インスタンスをnullに設定する）、再び移動モードに復帰する。

Ⅲ-4-4. 戦闘モード

最後は戦闘モードである。戦闘は攻撃側エージェントと防御側エージェントのみが採用して

いるモードである。戦闘で死亡したエージェントは、それ以後のシミュレーション実行には関与しない。

攻撃側エージェントの場合、相手が気づいていない場合（相手から攻撃を受けていなければ相手が気づいていないと設定している）の待ち伏せ攻撃では、30単位の距離にある相手を80%の確率で排除できる。それ以外の場合には、確率20%で相手の防御側エージェントを排除できる。決着がつかなければ、そのまま戦闘モードが維持される。勝利すれば、攻撃側エージェントは次ぎに探索モードに移行する。ただし、戦闘行為によって、攻撃側エージェントの位置座標が暴露されてしまう。戦闘が起きた場所から半径30座標単位以内にいる防御側エージェントはその攻撃側エージェントの位置情報を入手できる。

防御側エージェントが攻撃する場合には、30%の確率で相手に勝利できる。待ち伏せ攻撃は行えない。決着がつかなければそのまま戦闘モードを維持し、決着がつけば、移動モードに復帰する。

攻撃側にしろ防御側にしろ、先に攻撃を受けたエージェントは、その攻撃を行ったエージェントの位置情報を入手し、次の行動モードとして戦闘モードを設定する。

Ⅳ. シミュレーション結果

ここでは、実施したシミュレーションの結果についての二つの観点から報告と説明を行う。以下では、まず第一に、どのようにして各シミュレーションの試行が終了したか（攻撃側の目標が達成されたか、攻撃側が全て排除されたかなど）を説明する。第二に、攻撃側と防御側の被害率について検討する。

Ⅳ-1. 終了条件

一般にコンピュータシミュレーションでは乱数が多用されているので、安定した結果を得るためには複数回の試行を行う必要がある。ここでは、準拠した論文（Wheeler 2005）の結果との比較を行うため、攻撃側の数（1から10）と防御側の数（1から10）の100個の組み合わせパターンについて、論文と同じそれぞれ20回

の繰り返し試行を行った。20回では必ずしも安定した結果を得ることはできないが、飽くまでも暫定的なものである。それに関わらず、結果に一定の傾向を見て取れる。市民エージェントの数についてはWheeler論文と同様に20に固定している。

表1はその結果を示したものである。表のDは防御側エージェントの数、Oは攻撃側エージェントの数、No Ofは攻撃側エージェントが全て排除されて終了した試行数、No Deは防御側エージェントが全て排除されて終了した試行数、MCは防御側エージェントが目標セルに到達して試行が終了した試行数、UNは1万ターンまで具体的な結果がでなかった試行数である。1試行の最大ターン数を便宜的に1万ターンに限定しているため、最終的に結果が出ていないものが幾つかある。

この結果についてまず第一に気づくのは、結果が直感に沿ったパターンを示していることである。つまり、防御側のエージェントの数の方が攻撃側エージェントの数よりも多ければ、攻撃側エージェントが全て排除されて終了する試行数が多い。そして、攻撃側エージェントの数が増えるほど、No Ofで終了する試行数が減り、その代わりにMC（またはそれにNo Deを加えたもの）で終了する試行数が増える。そして、ある閾値を超えるとNo Ofの場合の数とMCの場合の数が逆転する。表1ではその行をイタリック表示してある。攻撃側と防御側の人数比が1：2の辺りにその閾値があることが分かる。結果は全ての組み合わせに一貫したものであり、このシミュレーションの結果にある程度の頑強性（robustness）があることの判断基準の一つとなる。もちろん、この結果は、防御側と攻撃側の戦闘能力の設定や地理状況などの要因によって決まってくるので、この結果がどの場合にも適用できるわけではない。シミュレーション結果を実用にともすためには、具体的な地理情報や専門家のアドバイスなどによって現実的な推定を行う必要がある。

第二に、興味深いことに、攻撃側有利の結果

と防御側有利の結果が転移する辺り（イタリックの辺り）で結果が不安定化することが見て取れる。例えば、表1の左上の結果（防御側が10名の場合）についてみると、攻撃側の人数が1から次第に増えるにつれて、MCで終了する試行の数が増えていく。攻撃側の人数が5名の時に、MCで終了する試行の数が増加の傾向を超えて増えている（表1では、そのような行を網掛けで示している）。このことは、力が拮抗しているような状況では、戦闘が乱数などの偶然に左右されるため、結果が不安定化しやすいことを物語っている。このことは政策的にも理論的にも非常に興味深いものかもしれない。特に、政策面では、テロ対策においては、テロ勢力の能力を判断して、それを圧倒するだけの準備をしておくことが重要であることを意味する。この場合でいうと、防御側が2倍程度の力を持ってしても、その結果は不安定であることが分かる。このことは、もちろんシミュレーション実験上のことであるが、防御の結果を確実なものにするためには、3倍程度の力を動員する必要があることを示している。

IV-2. 被害率

次に、攻撃側と防御側の被害の程度を検討する。終了条件についての結果は直感的に納得のいくものであったが、ここでの結果は必ずしもそうではなかった。図6と図7には、攻撃側の数と防御側の数の組み合わせによって、攻撃側と防御側の被害の程度がどう変化するかが示されている。被害程度は、Wheeler 2005に従い、被害人員数を相手側人数で割った値を使っている。つまり、敵側1人に対して、味方が何人の被害を平均で出しているかの数字であり、単なる被害者数の平均とは違う。

まず攻撃側エージェントの被害程度（図6）であるが、サンプル数が少ないにもかかわらず、ほぼ直感に沿った形を示している。つまり、攻撃側人数と防御側人数の比率で攻撃側が優位であると被害率は低い（図では右手前）。しかし、それが不利に傾くと被害率は増大する

表1 終了条件の比較

D	O	No Of	No De	MC	UN	
10	1	14	0	6	0	20
10	2	13	0	7	0	20
10	3	12	0	7	1	20
10	4	12	0	7	1	20
10	5	5	0	14	1	20
10	6	7	0	11	2	20
10	7	7	0	12	1	20
10	8	4	0	16	0	20
10	9	7	0	12	1	20
10	10	3	0	14	3	20

D	O	No Of	No De	MC	UN	
5	1	10	1	7	2	20
5	2	13	0	7	0	20
5	3	8	0	12	0	20
5	4	5	0	15	0	20
5	5	5	0	14	1	20
5	6	2	0	17	1	20
5	7	3	0	16	1	20
5	8	0	0	18	2	20
5	9	0	0	20	0	20
5	10	0	2	16	2	20

D	O	No Of	No De	MC	UN	
9	1	15	0	4	1	20
9	2	12	0	8	0	20
9	3	7	0	13	0	20
9	4	10	0	10	0	20
9	5	7	0	13	0	20
9	6	6	0	14	0	20
9	7	4	0	16	0	20
9	8	2	0	18	0	20
9	9	2	0	18	0	20
9	10	2	0	18	0	20

D	O	No Of	No De	MC	UN	
4	1	11	0	9	0	20
4	2	8	2	9	1	20
4	3	0	7	11	2	20
4	4	5	0	13	2	20
4	5	1	0	17	2	20
4	6	2	1	15	2	20
4	7	1	0	18	1	20
4	8	1	0	19	0	20
4	9	1	1	17	1	20
4	10	1	1	17	1	20

D	O	No Of	No De	MC	UN	
8	1	18	0	2	0	20
8	2	14	0	6	0	20
8	3	10	0	10	0	20
8	4	12	0	8	0	20
8	5	7	0	13	0	20
8	6	6	0	14	0	20
8	7	5	0	15	0	20
8	8	6	0	14	1	21
8	9	1	0	19	0	20
8	10	0	1	19	0	20

D	O	No Of	No De	MC	UN	
3	1	11	0	6	3	20
3	2	9	0	9	2	20
3	3	1	0	18	1	20
3	4	3	1	14	2	20
3	5	3	0	17	0	20
3	6	0	2	16	2	20
3	7	0	3	16	1	20
3	8	0	0	20	0	20
3	9	1	1	16	2	20
3	10	0	2	18	0	20

D	O	No Of	No De	MC	UN	
7	1	16	0	4	0	20
7	2	10	0	10	0	20
7	3	9	0	10	1	20
7	4	8	0	12	0	20
7	5	5	1	14	0	20
7	6	5	0	14	1	20
7	7	1	0	17	2	20
7	8	1	1	15	3	20
7	9	1	1	18	0	20
7	10	3	0	16	1	20

D	O	No Of	No De	MC	UN	
2	1	11	1	7	1	20
2	2	6	1	12	1	20
2	3	2	1	15	2	20
2	4	1	5	14	0	20
2	5	0	4	16	0	20
2	6	0	1	19	0	20
2	7	1	6	13	0	20
2	8	0	4	15	1	20
2	9	0	5	14	1	20
2	10	0	4	16	0	20

D	O	No Of	No De	MC	UN	
6	1	14	0	5	1	20
6	2	9	0	10	1	20
6	3	10	0	10	0	20
6	4	8	0	10	2	20
6	5	4	0	16	0	20
6	6	1	1	18	0	20
6	7	2	0	17	1	20
6	8	2	0	17	1	20
6	9	0	1	19	0	20
6	10	1	1	15	3	20

D	O	No Of	No De	MC	UN	
1	1	14	2	4	0	20
1	2	3	9	7	1	20
1	3	3	5	11	1	20
1	4	0	6	13	1	20
1	5	0	10	10	0	20
1	6	0	8	11	1	20
1	7	0	8	12	0	20
1	8	0	8	12	0	20
1	9	0	10	10	0	20
1	10	0	8	12	0	20

図6 攻撃側エージェントの被害程度

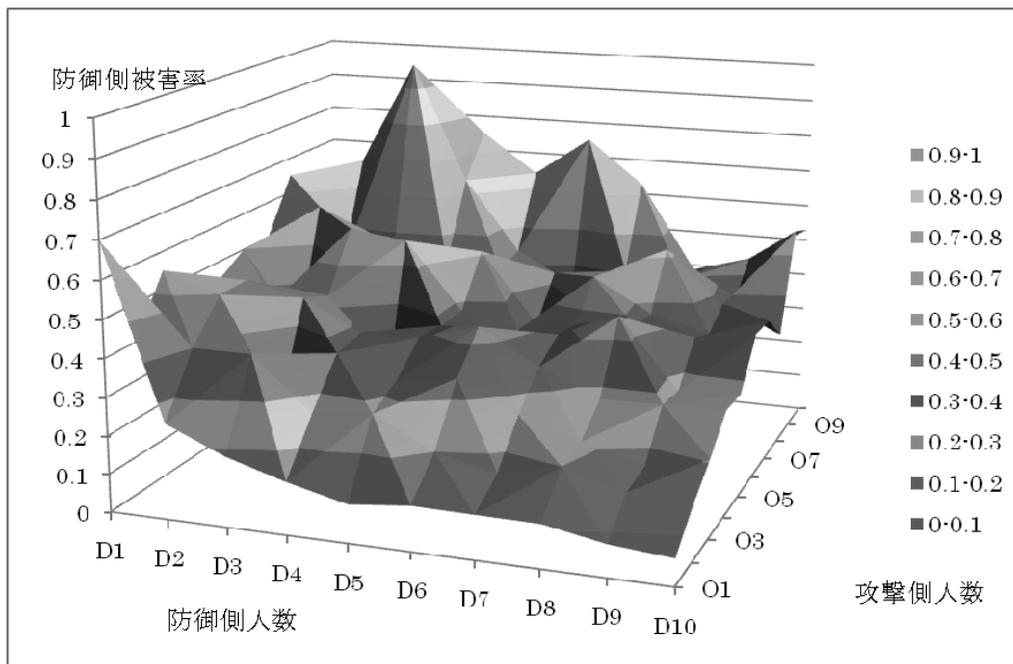
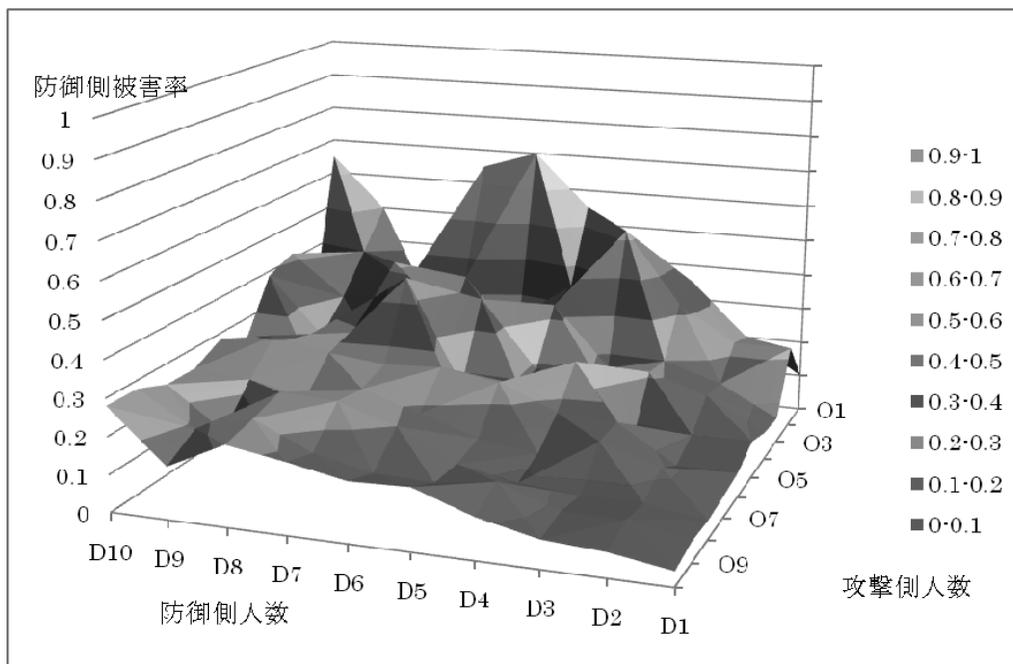


図7 防御側エージェントの被害程度



(図では左右奥に向けて)。このグラフの形状は Wheeler 2005 が国連平和維持部隊の損害率について示しているグラフの形状にほぼ一致する。従って、この結果にはある程度の妥当性があると考えられる。

問題は、防御側の被害率の図(図7)であり、この形状は簡単に説明することは難しい。なお、図6と図7では、図を見やすくするため、座標の値の配置が異なっている。防御側の被害率は極めて不確定である。例えば、攻撃側の数が8名以上の場合、防御側の人数が増えるに従い防御側の被害は減るが、防御側の人数が9名の時には防御側の被害が減少している。攻撃側の人数が1名や2名などと少ない場合、防御側の被害は防御側の人数によって大きく変動している。特に説明を必要とすることは、攻撃

側の人数が多い方が防御側の人員の増加にともなう防御側の被害率が低くなることである。攻撃側の人数が多くなると、防御側の被害率が高くなると予想されるが必ずしもそうではない。逆に、攻撃側の人数が少ない方が、防御側の被害率が高い。

結果については、別の設定やパラメタによる詳細な分析が必要となるが、このような結果になって理由について、以下のように暫定的に考えられる。防御側の被害率では、攻撃側の人数が多いほど、戦闘が頻発する前に攻撃側エージェントがその目標座標に到達してシミュレーションが終了するからである。攻撃側の人数が少なくなるほど、目標達成で終了することが少なくなり、その結果、戦闘数が多くなって防御率も高くなると考えられる。

V. 議論

この論文は、反乱勢力に対する平和維持部隊の掃討作戦についてのシミュレーション研究である Wheeler 2005 に依拠しながら、それをテロ行為とそれに対抗する防衛側の行動とのモデルに変更し、そのプロセスと結果をシミュレーション分析したものである。使用したシミュレーション環境は、GPGSiM というシミュレータであった。スーパーコンピュータなどの大規模計算環境を使用しない、単体のコンピュータで行った実験であったが、それでも一定の知見を得ることができた。そこでは、攻撃側と防御側の力関係の均衡点辺りで発生する結果の不安定さや力の比率1対2や1対3という現象などを分析することができた。特に、政策研究という点では、シミュレーションによってどのような人数比を用いればいいのかを具体的に考える材料が提供できた。このことは、この種のシミュレーション研究が重要であることを示したものであり、このような研究による知見は軍事

組織などの占有知識とされるべきではなく、政府や地方公共団体が研究しておくべき重要事項である。この点では、GPGSiM の潜在能力を示すことができたし、この種の簡易的なものであっても、政策指向シミュレーションがある程度可能であることがわかった。

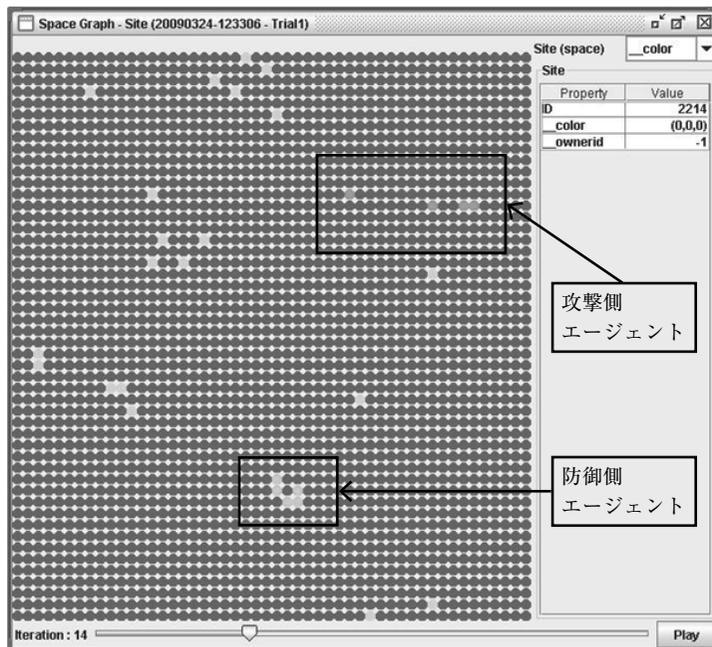
このモデルをさらに拡張する方向を考えると、例えば、夜間になったり雨が降ったりして情報の入手が困難さを増す状況をモデルに組み込むことが考えつく。市民エージェントは夜間には外出しないため、攻撃側エージェントについての情報が集まらない。防御側エージェントによる攻撃側エージェントの探索は困難になり、防御側エージェント間の相互通信も滞るかも知れない。これらについて、実際に人々が直接に模擬演習が行えればいいのだが、夜間や雨の中で実際に人間が参加して演習を行うわけにはいかない。実際の現場では、情報不足が発生すると、防御側にはパニックのような状況が発

生することが多いが、人間が実際に参加する模擬訓練でパニックを引き起こすわけにも行かない。このような制約があるため、コンピュータによる、より現実的なモデルを使ったシミュレーション研究が欠かせない。夜になったり雨が降ったなど、防御側の発見が困難な状況をモデルに作成して、そのような場合にどれだけの追加人員が必要になりそうかを具体的に考えることができよう。さらには、不測の事態やパニックが発生すると、政府や地方公共団体などの対応も混乱をおこすかも知れない。これも、乱数によって、シミュレーションモデルに組み込むことも可能であろう。

とはいえ、このモデルを実行するには、多くの試行時間が必要であることが分かった。ここで行ったシミュレーション研究では、50×50の地形空間をコンピュータ画面上に表示してエージェントの動きを逐一目視で検討することが結果分析には重要である。図8は、その一例である。図中50×50のセルが表示されている。各セルの範囲内にエージェントが存在すれば、

そのセルの色をエージェントの色とした。この試行では、攻撃側エージェント（四角で囲み。GPGSiM上では赤。）は4人、防御側エージェント（四角で囲み。GPGSiM上では緑）は5人、市民エージェント（図8では、残りのライトグレーのエージェント）は20人である。攻撃エージェントの目標座標は空間の右下に位置している。終了条件と被害状況という最終条件だけではなく、数値化しにくいシミュレーションの途中経緯を確認することは重要である。しかし、それには多くの時間と労力が必要である。また、50×50の地形空間でも、コンピュータのメモリ能力にはかなり負担となり、力の弱いマシンでは表示がうまくできなかつたり、メモリが少ないマシンではメモリ不足などの問題を引き起こした。実際の政策にこのようなシミュレーション研究を役立たせるためには、より粒度の細かい地理情報が必要となる。そうすると、単体のコンピュータマシンでは、このようなシミュレーション・モデルは処理できない。スーパーコンピュータやグリッドコン

図8：途中経過の一例



ピューティングなどの大規模シミュレーション環境がどうしても必要である。そのための研究は今後の課題としたい。

また、政策決定に役立てるためのシミュレーション研究を行うためには、そのためのデータ

を収集する必要がある。しかし、研究者がそれを行うことにはコストや情報管理など様々な問題があり容易なことではない。政府・地方公共団体やしっかりした研究機関の協力が必要となろう。

参 考 文 献

- 齋藤宗香, 山口裕, 八槇博史, 秋山英三, 瀬島誠, 吉田和男 (2008) 「国際政治・経済研究のためのシミュレーション環境 GPGSiM の開発」 *The Proceedings of the Joint Agent Workshop (JAWS 2008) (USB メモリ)*。
- 山本和也 (2009) 「シミュレーション」 田中明彦・中西寛・飯田敬輔編『日本の国際政治学』有斐閣, 209-227。
- 吉田和男・井堀利宏・瀬島誠, 編著 (2009) 『地球秩序のシミュレーション分析』日本評論社。
- Benett, D. Scott (2008) “Governments, Civilians, and the Evolution of Insurgency: Modeling the Early Dynamics of Insurgencies,” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11 (4) <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/7.html>>.
- Chen, Hsinchun (2006) *Intelligence and Security Informatics for International Security: Information Sharing and Data Mining*, New York. Springer.
- Dombroski, Matthew, Paul Fischbeck, Kathleen M. Carley (2003) “Estimating the Shape of Covert Networks,” *Proceedings of the 8th International Command and Control Research Control Research and Technology Symposium*, Washington, DC.
- Ilichinski, Andrew (2004) *Artificial War: Multiagent-Based Simulation of Combat*, New Jersey, World Scientific.
- Penzar, Drazen, and Armano Srdljcinovic (2005) “About Modelling of Complex Networks with Applications to Terrorist Group Modelling,” *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 3 (1) : 27-43.
- Raczynski, Stanislaw (2004) “Simulation of The Dynamic Interactions Between Terror and Anti-Terror Organizational Structures,” *Journal of Artificial and Social Sciences*, 7 (2) <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/2/8.html>>.
- Reynolds, Craig W. (1987) “Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavior Model,” *Siggraph*, accessed at <<http://www.red3d.com/cwr/boids/>>.
- Rouchier, Juliette, Claudio Cioffi-Rivilla, Jr., J. Gary Polhill and Keiki Takadama (2008) “Progress in Model-To-Model Analysis,” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11 (2), <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/2/8.html>>.
- Wheeler, Scott (2005) “It Pays to Be Popular: A Study of Civilian Assistance and Guerilla Warfare,” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 8 (4), <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/9.html>>.