

マルチエージェントシステムと物流解析への応用

間島 隆博*、高玉 圭樹**

Multi-Agent System and its Application to Logistics

by

Takahiro MAJIMA and Keiki TAKADAMA

1. まえがき

近年、マルチエージェントシステムやその応用に関する研究が盛んに報告されている。これらは従来の集中管理型システムとは反対に、ボトムアップ的なアプローチに基づいている。マルチエージェントシステムでは、自律した多数の主体（すなわちエージェント）が与えられた環境の中で局所的な情報をもとに行動するが、環境自体がエージェントの活動により変化し、エージェント自身もその変化や他のエージェントの影響を相互に受けながら自らの振る舞いを決定する。このボトムアップ的なアプローチから創発や帰納といった興味深く、有益な知見が蓄積されつつある。

例えば、集中管理を担うコンピューターを持たないインターネットを一つのシステムと考える。このシステムはネットワークで結線されたコンピューターをエージェントとしたマルチエージェントシステムとして捉えることができる。一部のエージェントの故障により、全システムの機能停止に至らないことから、集中管理型システムにはない頑強性や柔軟性がマルチエージェントシステムの特徴として挙げられている。

物流に深く関連するマルチエージェントシス

テムの応用例として交通シミュレーションが挙げられる¹⁾。これは、交通流を微視的な観点で捉え、1台1台の車をエージェントとしてその挙動を表現することで、渋滞発生メカニズムの解明や交通計画などに活用しようという狙いがある。また、船舶の分野においても同様に、海上交通流シミュレーションとしてマルチエージェントシステムが応用されている²⁾。

しかしながら、明確に物流問題への応用として貨物や人の輸送を表現したマルチエージェントシステムに関する報告は少なく、次節に示す河川舟運を活用した輸送シミュレータはその数少ない一つの例である。このような現状を踏まえ、マルチエージェントシステムが開拓すべき新たな分野として物流が挙げられており³⁾、今後の発展が期待されている。本報告ではその数少ない物流を表すマルチエージェントシステムである災害時における河川舟運輸送シミュレータを紹介する。

2. 災害時、河川舟運シミュレータ

災害時における陸路に代わる輸送経路として、河川舟運に期待が寄せられている（図1に、対

象とする東京を流れる河川とその船着場を示す)。ここでは、(1)舟運輸送能力の定量化と輸送を妨げる要因となるボトルネック解析、(2)首都直下型地震における帰宅困難者が大きな問題として取り上げられており、この問題に対して河川と水上バス、屋形船を組み合わせた輸送システムが注目されている。本論文では、筆者らが開発したシミュレータの概要を物資輸送、被災者輸送、それぞれの観点から記す。なお、物と人の輸送を分離して考慮した理由は、輸送媒体となる船舶の運航形態が大きく異なるためである。物資輸送では、各物資の輸送毎に行き先が異なり、被災者輸送では決められた経路を往復、循環する、いわゆる路線バスと同様な運航形態を前提としている。



図-1 解析対象河川

2. 1 物資輸送

2. 1. 1 解析手法

本シミュレーション手法はマルチエージェントシステムを採用しており、主なエージェントは司令官、被災地（荷降ろし地点）、船舶である。前述の通り、エージェントは周囲の状況や条件に応じて自律主体として行動するが、ある規則に従ってエージェント同士の相互関係が構築されている。例えば、「司令官エージェントが示す被災地船着場に船舶エージェントは向かう」といった具合である。エージェントは自らの状態（航行中、荷役中など）を認識し、その状態に対応した判断、行動を行う。司令官エージェントの配船アルゴリズムは以下の通りである。

- 1) 任務が割り当てられていない船舶（無任務船舶とする）が出現した場合、下記の手順2)～6)で配船する。
- 2) 後述する被災地優先順位表1位～n位（n

は任意）を作成する。

- 3) 被災地優先順位表で、対象となる物資を供給できる供給地をすべてリストアップする。
- 4) 1)でリストアップされた無任務船舶と2)でリストアップされた被災地、3)でリストアップされた供給地の組み合わせで、すべての航路について航行の可否も含めて P_c を計算する。なお、 P_c は下式の通り、単位時間当たりの輸送量を表す。

$$P_c = L_{cjk} / T_{ikl} \quad \text{式(1)}$$

ここでの L_{cjk} 、 T_{ikl} の意味は下記の通りである。

L_{cjk} : 船舶 k の荷種 j の最大積載量

T_{ikl} : 船舶 k の供給地 l を経由する被災地 i への航行予測時間と供給地と被災地での荷役時間の和

- 5) 4)の船舶、被災地、供給地、航路の組み合わせの中で、被災地優先順位1位の物資について、 P_c が最大となる供給地、船舶、航路を選択する。ただし、該当する組み合わせが存在しない場合、要求地優先順位を1つ落として考える。
- 6) P_c が最大となる組み合わせで輸送任務を開始するが、任務開始時に供給地の物資貯蔵量を減じ、被災地の予定荷受け量を増加させて2)の被災地優先順位表を更新する。
- 7) 船舶は被災地での揚げ荷役が終了すると任務完了となり、無任務船舶であることを提示する。この無任務を示す船がなくなるまで、2)～6)の処理を繰り返す。

司令官は上記2)の通り、物資を配送する24ヶ所の被災地の優先順位表を作成する。この表の中で、高順位の被災地に対して優先的に船舶を配船する指令を出す。また、物資が水とダンボール箱の2種類であることから、2物資 x 24被災地=48より、1～48位までの表を更新して、最新情報を保持する。順位の基準となる発送率 P_s は以下の式により求める。発送率 P_s が小さいほど順位は高くなる。

$$P_s = D_{ij} / R_{ij} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 D_{ij} 、 R_{ij} 、 i 、 j の意味は下記の通りである。

D_{ij} : 被災地 i への荷種 j の発送量
 R_{ij} : 被災地 i の荷種 j の初期要求物資量
 i = 被災地番号
 j = 荷種番号 (0→ダンボール箱、1→水)

よって、この優先順位表は各被災地に対して平等に物資を輸送することを意図していることになる。

2. 1. 2 解析条件

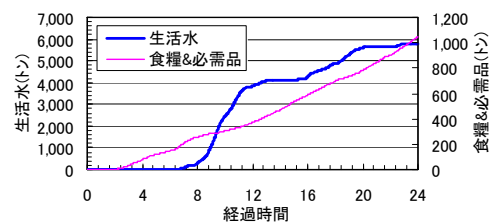
ここでは解析条件の概略を記すにとどめる。詳細については文献⁴⁾を参照されたい。輸送対象となる物資は、1日分の食料や生活必需品が詰め込まれたダンボール箱と生活水の2種を考慮し、実在する船舶を用いて、生活水は白油タンカー(19隻)、ダンボールはそれ以外の船種(屋形船、水上バス等、80隻)で輸送することとした。被災地船着場は図-1に示す24箇所、輸送すべき物資の総量は船着場周辺の人口を考慮して生活水が6,600トン、ダンボールが2,800トンである。供給地は複数ある耐震強化岸壁を利用する前提で羽田沖に1箇所設定し、岸壁長を考慮して10隻同時荷役が可能とした。一方、被災地側では1隻が着桟、荷役可能とした。また、荷役速度について、生活水は使用されているポンプ能力から250kL/hr、ダンボール箱は人海戦術で荷役するものと仮定して、0.17ton/hrとした。

2. 1. 3 解析結果

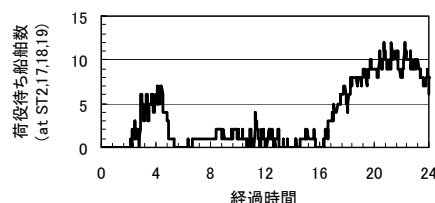
図-2(a)に、生活水とダンボール箱(食糧および生活必需品)の全被災地船着場への輸送量を時間履歴として示す。1日の総輸送量は生活水が5,800トン、ダンボール箱は1,050トンとなり、それぞれ総要求量に対して9割、4割の輸送率ということになる。生活水については、作業開始から20時間以降、輸送量の変化がにぶる。これは生活水輸送船が比較的大型の船舶で構成されているためである。20時間を過ぎるとこのような大型船舶が到達できる要求地はほぼ要求量が満たされて作業が割り当てられなくなるため、少数の小型水輸送船のみが機能することによる。

また、前述の配船アルゴリズムでは要求量が多い要求地にはより多くの船舶が配船される。ST2,17,18,19は要求量が多い被災地であり、図-2(b)はこれらの船着き場の揚げ荷役を待つ合計船舶数の推移を示している。図より4カ所の合計で最高10隻程度の滞留が記録されている。一方、図-2(c)は供給地で積み荷役を待つ

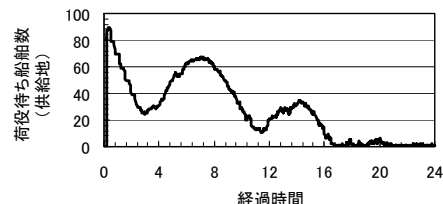
船舶数の推移を示している。荷役待ち船舶数は17時間程度経過しないと0隻にならない。これより、ここで投入している100隻以上の船舶を運航させると、供給地における滞留が常時起こり、無駄な船舶が生じることになる。つまり、本解析条件では、供給地の荷役能力がボトルネックになりやすい傾向を示している。



(a) 総輸送量の履歴



(b) 被災地船着場における荷役待ち船舶数 (ST2,17,18,19の合計)



(c) 供給地における荷役待ち船舶数

図-2 輸送量、荷役待ち船舶数の時間履歴

2. 2 被災者輸送

2. 2. 1 解析手法

次に、被災者輸送を考える。ここでは、物資輸送の運航形態と異なり、船舶は陸上のバス路線と同様、与えられた経路を往復あるいは循環することとした。これは、水上バスの場合、定員が100人程度になるため、あらかじめ設定した路線を提示する方法が、利用者、運行者にとって混乱を避け、現実的な対処方法と考えたためである。本シミュレータもマルチエージェントシステムを採用し、被災者エージェントと被災者輸送船エージェントを導入した。以下各エージェントの概略を記すにとどめる。詳細は文献⁴⁾を参照されたい。

被災者輸送船は路線に沿って各駅停車で往復、循環を繰り返すが、移動需要を満たすべく路線ネットワークを図-3のように構成し、外性的に与えた。一方、被災者エージェントは路線ネットワークと自らの発着地を考慮し、乗換を含めた旅程を自律的に決定しなければならない。この方法は、まず「乗換回数に係わらず、最短距離となる経路沿いの路線を選択」するものとし、この方法に合う旅程が見出せない場合は「最小の乗換回数となる経路を選択」するものとした。

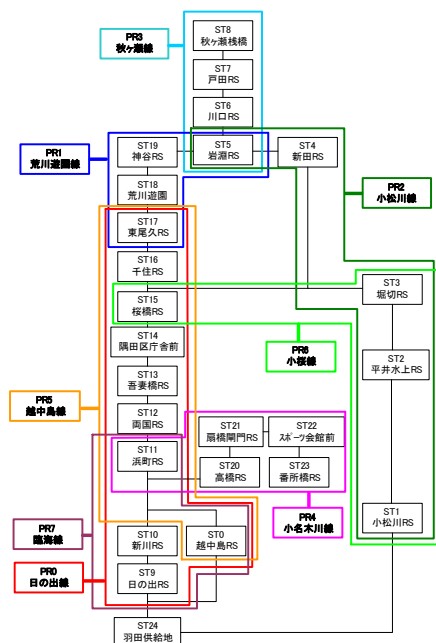


図-3 被災者輸送船の路線ネットワーク

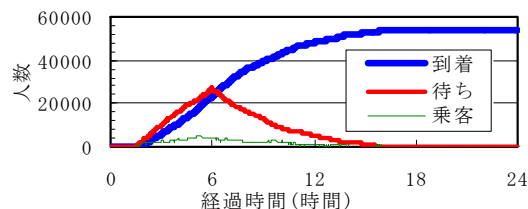
2. 2. 2 解析条件

被災者の移動需要を OD（発着地）別に求めたところ⁴⁾、総数 54 千人程度と見積もられた。特に、大きな需要は隅田川下流域に集中している。この需要に相当する人数が 4.5 時間の間、均一に発生するとした。船舶は実在する水上バスと屋形船の利用を考慮し（平均の定員は 100 人程度である）、航行速度は 10 ノット、被災者の乗降速度は実状に近いと思われる 100 人/分とした。

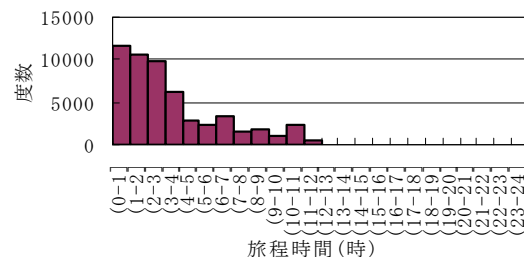
2. 2. 3 解析結果

船舶数を 57 隻とした時の解析結果を図-4 にまとめる。後述するように、船舶数が 57 隻のケースというのは、全被災者の輸送平均所要時間が最小となる結果に相当する。図(a)は、目的地への到着人数、待ち人数、乗船人数の時系

列を示す。54 千人の被災者エージェントは図(a)で 1.5~6 時間の間に均一に発生している。図から分かるように、被災者全員が 17 時間程度で目的地へ到達することが出来た。一方、乗船待ち人数が発着地への人の集合完了時間（図中 6 時間）で 2 万人以上に達する。この人数は発着地への集合終了時間まで単調増加していることから、時間あたりの集合人数と乗船人数の釣り合いがとれていないことが分かる。この状態は需要が集中している隅田川沿い下流域の船着場で発生している。また、図(b)は所要時間（発着地への到着から着駅までの下船まで）の頻度分布を示したもので、多くの被災者が数時間で目的地へ到達している。この結果、全被災者の輸送平均所要時間は 3.4 時間であった。



(a) 到着、乗船待ち、乗船人数



(b) 所要時間の度数分布

図-4 船舶数 57 隻とした場合の解析結果

図-5 は船舶数を増減させた時の人の所要時間を表す。図から分かるように、得られた結果は極小値を持つ曲線であり、最適船舶数が 55~60 隻程度となっている。

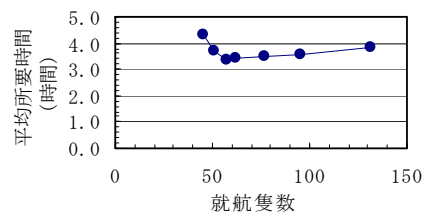


図-5 船舶数と所要時間の関係

船舶数を増加させると、所要時間が増大する理由は次の通りである。本解析では、各船着場に接岸できる船舶数を1隻に限定している。このため、船舶数の増加により、複数の路線が乗り入れるST11（浜町）（図－3の路線図を参照のこと）で大きな滞留が起こる。この際、ST11を目的地とする乗船者は直ちに下船できないため、所要時間の悪化をもたらす。以上のことから、船舶数を増加させる場合は、船着場の滞留状況を勘案した上で行うことが重要となる。

3. まとめ

本稿では、物流問題を扱うマルチエージェントシステムとして、物資輸送と被災者輸送の二つのシステムを紹介し、有益な情報や知見を導くことに成功したことを示した。物流問題へのマルチエージェントシステムの応用は未開拓な分野であり、それだけに今後の発展が期待される。

謝辞

本研究は国土交通省技術研究開発委託費（総合政策局）の支援を受け、「災害時緊急輸送システムの技術構築に関する研究」として平成14～16年度に実施されたものである。

参考文献

- 1) F. Klügl, A. Bazzan, S. Ossowski, Eds. Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation, Birkhäuser, Whitestein Series in Software Agent Technologies, (2005)
- 2) 稲石正明, 近藤逸人, 近藤正樹, 川口 明: 「船舶エージェントによる東京湾海上交通流シミュレーション」, 日本航海学会論文集, Vol.116, (2007), pp.45-51
- 3) M. Tarver, M.I. Faé: Applications of multiagents in transport and logistics, Int. J. Logistics Systems and Management, Vol. 3, No. 4, (2007), pp.445-418
- 4) 間島隆博, 樋富和夫, 勝原光治郎: 「災害時緊急輸送システムの技術開発に関する研究」海上技術安全研究所報告, 第6巻, 第1号, (2006), pp. 11-14