ショートノート

支援物資の継続的な供給を目指した災害対応システムの提案 -アリの反応閾値モデルを基にした自律分散型システム-†

佐藤 祐亮*¹・岩津 智士*²・伊藤 一之*³

大規模災害時には、多数の避難所が開設されるとともに、避難生活も長期化することが予想され、それぞれの避難所に、絶えず必要な量の食料を供給し続けることが必要とされる。しかし、実際の災害時には、混乱のなかで情報を一元管理し、必要な場所に必要の救援物資を送るためのプランニングを行うことは現実的ではなく、救援物資を如何にして、必要とされる場所に必要とされる時間に届けるかは、早急に解決しなければならない重要な課題の一つとなっている。この問題に対し、本研究では、アリがコロニーを維持するために用いているとされるアルゴリズムを応用し、分散型の支援物資供給システムの基礎構造を提案する。また、提案したシステムを用いることで、情報を管理する中央集権型のシステムを用いることなく、非常に簡単な仕組みで、必要とされる場所に必要とされる時間に救援物資を届けることが可能となることを簡略化されたモデルを用いてシミュレーションにより示す。

キーワード：反応閾値モデル、災害対応、自律分散型システム

1. はじめに

大規模災害時には、多数の避難所が開設されるとともに、避難生活も長期化することが予想され、それぞれの避難所に、絶えず必要な量の食料を供給し続けることが必要とされる。しかし、従来の支援体制は、行政などが司令塔となる中央集権的な体制となっており、大規模な災害時には、情報や支援物資が一時的かつ局所的に集中してしまい、それを管理する支援本部の処理能力を超えてしまうことから、本部自体が機能不全に陥り、一か所に過剰な支援物資が滞る一方で、それを必要とする場所や人に分配することができないといった問題が懸念されている。

2016年に発生した熊本地震では、一部の避難所に救援物資が集中してしまい、劣化した大量の食料が破棄されたことも報告されている[1, 2]。このように、混乱のなかで情報を一元管理し、必要な救援物資を必要な場所・時間に送るためのプランニングを行うということは、大規模災害時には、現実的ではなく、救援物資を如何にして、必要とされる場所に必要とされる時間に届けるかは、早急に解決しなければならない重要な課題の一つとなっている。

この問題に対し、本研究では、これまでの中央集権的な支援

体制の欠点を補うシステムとして、各ボランティアが自律分散的に、必要なタイミングで必要な場所に支援物資を送ることが可能な支援システムについて考え、その最初のステップとしてシステムの基本構成について提案するとともに、簡略化されたモデルを用いてシミュレーションによりその有用性を検証する。この分散システムの構築にあたり、本研究では、昆虫のアリがコロニーの維持に用いていると考えられているアルゴリズムを用いる。

働きアリは、処理されなければならない仕事の量に応じて、働くか否かを各アリが判断しており、その閾値はアリごとに異なることが報告されている。通常の状態では、閾値の低いアリのみが働き、一定数のアリはさぼっているかのように見える。しかし、外敵の侵入などにより、これまで働いていたアリが働くことができない状態になると、徐々に仕事が溜まってゆき、それに合わせ、閾値が高いアリも働き始め、コロニーを維持するための仕事は常に維持される。つまり、異なる閾値をもつアリを余剰にコロニーに抱えることで、不測の事態においてもコロニーの維持を可能にしている[3, 4]。本論文では、支援物資を供給するボランティアも、災害時にすぐに物資を送りたいと思う人から、事態の深刻度に心を打たれて重い腰を上げる人まで、それぞれが、異なる感受性を持っていることに注目して、このボランティアが物資を送ってくれる際の閾値を、アリが仕事を開始するときの閾値に対応させることで、アリのアルゴリズムを支援システムの実現に応用する。

2. アリの反応閾値モデル

アリの脳は小さく、人間のように高度な知的判断をすることができないと考えられている[3]。しかし、アリは小さな脳でも実行可能な単純なルールに従って各々が行動することで、全体が、まるで一つの生き物であるかのように機能し、コロニー

† Proposal of Sustainable Relief Goods Supply System for Large Scale Disaster -Autonomous Distributed System Based on the Response Threshold Model for Ant Colonies -
Yusuke SATO, Satoshi IWATSU, and Kazuyuki ITO

*1 法政大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Hosei University

*2 株式会社インテック
INTEC Inc.

*3 法政大学理工学部
Faculty of Science and Engineering, Hosei University

を適切な状態に保つことができる。

このルールをモデル化したものの一つに反応閾値モデルがある [3, 4]。反応閾値とは、アリが仕事を行うか否かを判断するための閾値であり、これと環境からの刺激を比較することで動作が決まる。ここで環境からの刺激とは、具体的には、幼虫の世話、巣の維持、餌探索など、アリのコロニーの維持に関わる仕事に起因するものであり、これらの仕事が滞ると刺激は増加する。各アリは、異なる大きさの閾値をもっており、通常は閾値の低いアリが働くことでコロニーが維持され、閾値の高い一定割合のアリは、通常は働いていないことが報告されている。

この閾値のばらつきは、緊急事態時への備えとして機能していると考えられており、例えば疲労や天敵からの襲撃などにより、それまで働いていた閾値の低いアリが働けなくなった場合に、仕事の滞りに伴って刺激値が増加し、その結果、閾値の高いアリが働くようになり、緊急時にも卵や幼虫の世話などコロニーを維持するために必要な作業を維持することが可能となっていると考えられている [3, 4]。

本研究では、この仕組みを災害時の救援物資供給システムに応用する。

3. 提案手法

3.1 概要

アリの反応閾値モデルを基にした物資供給システムを提案する。図 1 に提案するシステムの概要を示す。提案システムでは、被災地の食料充足率をもとに、被災地がどの程度危機的状況にあるのかを表す深刻度を生成する。この深刻度は単なるスカラーの情報であり、ホームページなどに直観的に伝わるようメーターのようなものを用いて視覚的に提示することとする。つまり、被災者の数や食料の数などの詳細な情報を提示するのではなく、深刻度という一つの値のみを提示するだけで分散的に機能するシステムを目指す。

物資提供者であるボランティアは、ホームページに掲載された深刻度を参照し、支援物資を送りたいと思いついた段階で各自の判断により物資を発送する。これが、物資を発送するか否かを決める閾値に相当し、各ボランティアが異なる感受性を持っていることから、この閾値にもばらつきがあると考えられる。

この想定のもとで、物資提供者の数や感受性に合わせて、適切な刺激値を生成し、それを被災地の状況に合わせてリアルタイムに変化させることができれば、救援物資が到着する時間と量を平滑化することが可能であり、救援食料の一時的な集中に伴う劣化と廃棄や、一時的な欠乏による飢餓状態などを防止することが可能となり、限られた物資で可能な限り長く避難所を維持することができる。

本研究では、物資提供者の感受性の分布は、国民性や地域性などから予め推定されているものと仮定し、これを図 2 に示すようなヒストグラムを用いて表し、これをもとにボランティアに提示する刺激値を算出する方法を提案する。異なる様々な分布に対する提案手法の有用性や、推定された分布と実際の分布に誤差がある場合の影響については、第 4 章のシミュレーションにおいて検証する。

図 1 提案するシステムの概要

図 2 反応閾値のヒストグラム

3.2 刺激値の生成方法

避難所に備蓄しておくべき食料の量を F_{max} 、時刻 t における備蓄量を $F(t)$ 、このときの充足率を $F(t)/F_{max}$ とし、不足率 $L(t)$ を以下のように定義する。

$$L(t) = 1 - \frac{F(t)}{F_{max}} \quad (1)$$

また、刺激値を更新する間隔を Δt とし、この間に N_E 人の被災者が n 回の食事をとることとすると、 Δt 後には、食料は $N_E \times n$ だけ減少する。さらに、 Δt 後までの間に、消費期限切れを迎える食料を考慮し、これを $F_e(t)$ とすると、 Δt 後の食料の不足率は

$$L(t + \Delta t) = 1 - \frac{F(t) - N_E \times n - F_e(t)}{F_{max}} \quad (2)$$

と表すことができる。

また、食料を発送してくれる物資提供者の数を $N_V(t)$ とし、一人の物資提供者が発送する食料の量を F_d とすると、発送される食料の総数は、 $N_V(t) \cdot F_d$ となる。

したがって、 Δt 後に不足する食料と Δt 後に届く食料が等しくなるように物資提供者の数を設定すればよく、各時刻に食料を発送してほしい物資提供者の数は、 $N_V(t) \cdot F_d = F_{max} \cdot L(t + \Delta t)$ より

$$N_V(t) = \frac{F_{max}}{F_d} \left(1 - \frac{F(t) - N_E \times n - F_e(t)}{F_{max}} \right) \quad (3)$$

となる。

次に、 $N_V(t)$ 人の物資提供者に物資を送ってもらうために必要な刺激値を求める。刺激値は、避難所に全く食料がない状態を 0、備蓄可能量と同数の食糧がある状態を 1 として、0 か

図3 刺激値の導出

ら1の間の値に標準化して表すこととする。よって、刺激値が取り得る範囲は $0 \leq s(t) \leq 1$ となる。時刻 t における刺激値を $s(t)$ で表し、(4) 式のように、一定時間ごとに更新されるものとする。

$$s(t) = s(t - \Delta t) + \Delta s(t - \Delta t) \quad (4)$$

食料を発送する物資提供者の数が $N_V(t)$ となるような $\Delta s(t - \Delta t)$ を求めるため、まず、物資提供者の閾値の分布を表すヒストグラムの概形を (5) 式により近似する。次に、近似式を (6) 式に示すように順次積分し、積分された面積が $N_V(t)$ となるような $\Delta s(t - \Delta t)$ を求める。

なお、ここでは、ヒストグラムが既知である前提で説明を行ったが、実際には未知であるため、運用にあたっては、国民性や地域性などから、予め (5) 式を仮定して用いることになる。実際の分布と推定値である (5) 式との間に誤差がある場合については、4 章のシミュレーションのところで検証する。

$$f(s) = \frac{a}{b + e^{-cs}} \quad (5)$$

$$N_V(t) = \int_{s(t-\Delta t)}^{s(t-\Delta t) + \Delta s(t-\Delta t)} f(s) ds \quad (6)$$

4. シミュレーション

4.1 共通設定

提案手法の有効性を検証するために、シミュレーションを行う。このシミュレーションで用いる共通のパラメータを表1に示す。

4.2 シミュレーション結果

物資提供者の閾値の分布として、一様分布ならびに分散の異なる正規分布を想定した。ヒストグラムでは、横軸は深刻度（刺激値）を表しており、0 から 1 の範囲を 1000 分割して用いた。縦軸は、横軸の各範囲に対応する閾値を持つ人の人数を表している。また、それぞれの分布に合わせて刺激値を生成する場合に加え、比較実験として、分布を考慮せずに刺激値を生成した場合の合計5つの設定でシミュレーションを行った。各設定の詳細およびシミュレーション結果は下記のとおりである。

設定1 一様分布

図4に示す一様分布を用いる。この場合、 $f(s)=10$ となる。

表1 共通パラメータ

名称	設定値
物資提供者の人数 [人]	10000
被災者の人数 N_E [人]	100
物資提供者一人が 1 回に供給する食糧 F_d [食]	2
試行時間 [時間]	14[日]×24[時間]=336
刺激値を更新する間隔 Δt [時間]	24
被災者が Δt 間に食事を行う回数 n [回]	3
配達時間 [時間]	24
食糧の消費期限 [時間]	4[日]×24[時間]=96
被災地の倉庫の容量 [食]	被災者の人数 × 10 日分
被災地の初期の備蓄量 F_{max} [食]	被災者の人数 × 4 日分
各物資提供者が 食料を送る回数 [回]	1
ヒストグラムの分割数	1000

図4 一様分布

図5 シミュレーション結果（一様分布）

図5にシミュレーション結果を示す。この結果から、分布が一様な場合には、刺激値を線形に増加させていだけで、閾値の低い物資提供者から、高い物資提供者にかけて、順に食料の供給があり、予め想定した2週間の間、絶えず適切な量の食料が供給され続けることが確認できる。

設定2 正規分布（偏差 0.125, 偏差 0.25）

図6, 図7に示す正規分布を用いる。ここでは、 s の 0 から

図 6 正規分布 (偏差 0.125)

図 7 正規分布 (偏差 0.25)

図 8 シミュレーション結果 (偏差 0.125)

図 9 シミュレーション結果 (偏差 0.25)

図 10 正規分布 (偏差 0.1)

図 11 正規分布 (偏差 0.15)

0.5 の範囲を近似し、それぞれ

$$f(s) = \frac{33.05}{1 + 911.71e^{-19.32s}}, f(s) = \frac{17.21}{1 + 7.35e^{-9.16s}}$$

とした。

図 8 および図 9 にシミュレーション結果を示す。この場合にも、事前に分布を推定し、それをもとに刺激値の増加量を決めることで、食料が発送されるタイミングと量を適切に調整可能であることが分かる。

設定 3 正規分布 (推定誤差が含まれる場合)

図 10 および図 11 に示した正規分布を用いる。ただし、刺激値を算出するために用いた分布は図 6 に示す偏差 0.125 の

分布であり、推定した分布と実際の分布が異なる設定となっている。

図 12 および図 13 にシミュレーション結果を示す。推定値に誤差があるため、図 12 の場合は、最初に、食料を発送した物資提供者の数が想定よりも少なくなるため、一時的に充足率がさがり、図 13 の場合は、逆に、充足率が一時的に増加するものの、フィードバックが働くことで、食料の過不足が調整され、2 週間の間、避難所を維持可能であることが分かる。

設定 4 比較実験

図 14 に、比較実験として、刺激値として食料の不足率をそ

図 12 シミュレーション結果（偏差 0.1）

のまま提示した場合のシミュレーション結果を示す。この場合には、ある程度フィードバックが働くものの、食料の量が適切に制御されていないため、一時的に食料が過剰となり、消費期限を迎えて破棄される一方で、その後は、食料が不足するという事態が発生することが確認できる。したがって、単に食料の不足率を提示するだけでは、うまく機能せず、提案手法を用いて、不足率を深刻度（刺激値）に置き換えて提示することの効果が確認できる。

4.3 考察

シミュレーションの結果から、提案手法を用いることで、閾値の小さい物資提供者から大きい物資提供者にかけて順に物資供給を行うこととなり、その結果、閾値の違いによって物資供給を行うタイミングがずれ、継続的な物資供給が可能となることが確認できる。また、刺激値の増加量は、事前に推定した物資提供者の閾値の分布をもとに算出されるが、現在の食料の不足量を刺激値の算出に含めることでフィードバックループが構成され、分布の推定に誤差がある場合にも対応可能であることが確認できる。また、パラメータに被災者数が含まれており、この値を実際の避難所の状況をもとに設定することで、様々な規模の災害に対して対応可能である。

したがって、提案手法を用いることで、単なるスカラー値を物資提供者に提示するという非常に簡単な仕組みで、適切に救援物資を分配可能であると考えられる。

5. 結論

本研究では、アリの反応閾値モデルを基にした、救援物資の継続的な供給システムを提案し、シミュレーションを通して提案システムの有効性を検証した。その結果、刺激値を物資提供者の規模や閾値の分布に応じて決定することで、物資の過不足を抑制し、限られた食料を有効に分配して継続的に供給可能であることを確認した。今後は、複数の被災地を想定し、実際に起こった災害のデータを用いて、より実際の運用に近い状況を再現して提案手法の有効性を検証していく予定である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 15KK0015 及び 18K11445 の助成を受けたものである。

図 13 シミュレーション結果（偏差 0.15）

図 14 シミュレーション結果
(偏差 0.125, 不足率を刺激値としてそのまま提示)

参考文献

- [1] (時時刻刻) 物資、避難所に届かない 尽きる 備蓄、長期化を危惧、朝日新聞、2016 年 4 月 18 日。
- [2] 支援物資供給の手引きⅡ. 事前準備編 - 国土交通省: 2013, www.mlit.go.jp/pri/houkoku/gaiyou/pdf/kkk111-1-2.pdf
- [3] Y. Ishii and E. Hasegawa: "The mechanism underlying the regulation of work-related behaviors in the monomorphic ant, *Myrmica kotokui*," *J. of Ethology*, Vol.31, Issue1, pp. 61-69, 2013.
- [4] 長谷川英祐: 働かないアリに意義がある, メディアファクトリー新書, 2010.

(2018 年 9 月 12 日 受付)

(2018 年 12 月 5 日 採録)

[問い合わせ先]

〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

法政大学

伊藤 一之

TEL: 042-387-6093

E-mail: ito@hosei.ac.jp

— 著 者 紹 介 —

さとう ゆうすけ
佐藤 祐亮 [学生会員]

2018 年法政大学理工学部電気電子工学科卒業。同年法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程に入学。現在に至る。

いわつ さとし
岩津 智士 [非会員]

2018 年法政大学理工学部電気電子工学科卒業。同年株式会社インテック入社。第二金融ソリューション事業本部 NI 東京第二ソリューション部に所属。現在に至る。

いとう かずゆき
伊藤 一之 [正会員]

2002 年 3 月東京工業大学大学院知能システム科学専攻博士後期課程修了，博士（工学）。同年 4 月岡山大学工学部助手。法政大学工学部専任講師を経て，2016 年 4 月より同大学理工学部教授。日本ロボット学会研究奨励賞，船井情報科学奨励賞，競基弘賞（学術業績賞）などを受賞。主に知能ロボットに関する研究に従事。

Proposal of Sustainable Relief Goods Supply System for Large Scale Disaster -Autonomous Distributed System Based on the Response Threshold Model for Ant Colonies -

by

Yusuke SATO, Satoshi IWATSU, and Kazuyuki ITO

Abstract:

In large scale disasters, many evacuation sites should be set up immediately, and relief goods including foods should be being supplied to every site for a certain period. However, in large scale disaster, it is difficult to collect reliable information and to distribute necessary goods to appropriate site in allowable timing. To solve this problem, we employ the response threshold model for ant colonies, and we propose a sustainable relief goods distribution system in large scale disaster. To demonstrate the effectiveness of the proposed system, simulation was conducted.

Keywords: response threshold model for ant colonies, disaster response, autonomous distributed system

Contact Address: **Kazuyuki ITO**

Hosei University

3-7-2 Kazino-cho, Koganei City, Tokyo 184-8584, Japan

TEL: +81-42-387-6093

E-mail: ito@hosei.ac.jp