

保険をかける社会性蜂

Insurance developed by Social Wasps

新馬場翔¹, 佐藤真史², 豊泉洋³

早稲田大学大学院基幹理工学研究科数学応用数理専攻^{1,3}

早稲田大学理工学術院総合研究所²

Sho Shimbaba¹, Masahumi Sato² and Hiroshi Toyoizumi³

Department of Pure and Applied Mathematics, Waseda University^{1,3}

Waseda Research Institute for Science and Engineering²

1. はじめに

人間や蟻などの生物は様々な社会性を有し、それぞれの社会組織を形成して生活を営んでいる。本研究では、真社会性を有するスズメバチの一種である社会性蜂(*Liostenogaster flavolineata*)に注目し、この蜂の保険的行動の Benefit, Cost を比較することで、保険的行動を評価した。

本研究で注目する社会性蜂では、働き蜂(以下, Helper)になった個体は繁殖活動を行わずに女王蜂(以下, Queen)のためにリスクを冒して狩りに専念する。このような真社会性の起源や維持については進化生物学の大きな問題となっている[1]。真社会性を有する昆虫は、成虫(以下, Adult)の寿命に対して、幼虫(以下, Brood)の期間が長いことが特徴的であり、さらに Brood は成長期間において Adult の継続的な世話を必要としている[2][3][4][5]。19 種のアシナガバチの Adult が 1 匹のみの巣において、38~100% の巣で Adult が死亡することにより、Brood を Adult に成長させる事に失敗した事が確認されている[6]。単体の Adult で Brood を育てていくことが厳しいことから、Adult になった個体は新たな巣を探し飛び立つのではなく、保険的な存在として巣に残されていると考えられており、この行動(保険的行動)に関しては複数の研究がされている[1][7]。

先行研究では、複数の Adult が巣にい

ることにより、他の Adult が死亡した場合でも、残された Adult が Brood の世話を継続させる事で、より多くの Brood を Adult に成長させる事が確認されている[1]。しかしこの先行研究においては、保険的行動の利得部分(Benefit)に関しては研究されているが、保険的行動の Cost との比較が行われていない。したがって、本研究においては、保険的行動の Benefit, Cost の定義を行い、エージェントシミュレーションを用いて複数条件下での保険的行動の Benefit, Cost を求める。それらの比較を行うことにより、この保険的行動を評価する。

2. 社会性蜂と保険

本研究では保険を”万が一の事態に備えてあらかじめ Cost を払うことで、万が一の事態(確率 p)が起きた時に Benefit を得ることのできるシステム”とする。

社会性蜂の Brood は Adult になった時に、2 つの選択をされると言われている[8][9]。(1): 巣に残る(Helper になる)、(2): 巣から飛び立つ(Leaving Wasp になる)、である。(1)を選択した蜂に関しては、Helper となり Queen の Brood の為に狩りに専念をする。一般的な蜂の Helper と異なり、この蜂の Helper は繁殖機能を有しているのにも関わらず、繁殖活動を行わずに Queen の Brood の為に狩りを行うなど利他的行動をする事が知られている[10]。(2)を選択した蜂に関しては、生まれた巣から飛び

立ち、新たな巣の Queen として、繁殖活動を行なっていく。自分の遺伝子の繁栄を考えれば、(2)を選択すると思われるが、(1)を選択する蜂が一定数いる事が分かっている[11]。これは、社会性蜂の Brood には継続した世話が必要であるのにも関わらず、巣に 1 匹しか Adult がいない時には Adult の寿命が Brood の成長期間に比べて短いことから、Helper が労働的役割だけでなく、保険的役割を果たしている為だとも言われている[1]。Adult が Queen のみの場合、Queen が狩り等によって死亡すれば、世話を行う個体がいなくなり Brood もすぐに死亡する。しかし仮に Helper がいれば Queen が死亡した場合でも、Helper が Queen を継ぐことで、Brood の世話を継続することができる。しかし Helper になった個体は繁殖活動を行うことはなくなり、Queen の遺伝子を拡散する機会を失ってしまう反面もある。つまりこれは、“Adult になった個体の、繁殖活動による Queen の遺伝子を拡散させる機会を犠牲にすること (Cost を支払うこと)”で、“Queen が死亡した場合(万が一の事態が発生)”でも “Helper がいることで Brood の世話を継続させ、Queen の遺伝子を拡散する (Benefit を得る)”システムであると考え事ができる。よって

$$\text{Cost} = \text{Helper を残らせたことで拡散する機会を失った遺伝子の総量}$$

$$\text{Benefit} = \text{Helper がいたことによって拡散された遺伝子の総量}$$

p = Helper を巣に残らせた Queen がシミュレーション終了までに死亡する確率とすることで、上記のシステムを保険と同じシステムであるとみなすことができる。Queen が死亡した場合の保険として、Adult になった Brood に Helper として巣に残らせる Queen の行動を、本研究では“保険的行動”と定義する。

3. 保険的行動の Benefit, Cost

保険的行動を行った Queen の index を i , L_i^B を Queen i 死亡後に、Helper がいたことで Leave した Brood 数、 H_i' を Queen i 生存期間中に Helper となった

Queen i 以外の Brood 数、 H_i を Queen i 生存期間中に Helper となった Queen i の Brood 数、 R_i を Helper H_i' 匹の Average Relatedness、 L_i を Leaving Wasp となった Queen i の Brood 数、 L_{LQ} を Helper なし Queen が生きている間に Leave させられる Brood 数の期待値とする。この時、Queen i が行った保険的行動の Benefit B_i , Cost C_i は一般的に以下の式のように表せる。

$$B_i = 0.5L_i^B$$

$$C_i = R_iH_i' + 0.5\{H_i - (L_i - L_{LQ})\}$$

Benefit は“保険的役割の Helper がいたことで拡散した遺伝子量”であり、また Cost は“Helper として残らせたことで拡散する機会を失った遺伝子量 ($R_iH_i' + 0.5H_i$) から Helper の労働によって増加した遺伝子量 ($0.5(L_i - L_{LQ})$) の差”と考える。

4. エージェントシミュレーションを用いた保険的行動の Benefit, Cost 比較

エージェントシミュレーションを用いて複数条件下で、それぞれ 9000 巣のシミュレーションを行った。環境の厳しさの指標である Helper の平均寿命と Benefit, Cost の平均 \bar{B} , \bar{C} の関係が図 1 である。図中の緑点、赤点がそれぞれシミュレーションから得られた \bar{B} , \bar{C} であり、図中の直線は、得られた値から求めた回帰直線である。図 1 からわかるように、環境が厳しくなろうが、易しくなろうが、Benefit, Cost には大きな変化はみられなかった。しかし、環境が厳しくなる方が Benefit, Cost は若干減少した。しかしどのような環境においても、 \bar{C} は \bar{B} を上回っており、保険の為に支払った Cost に見合う Benefit は得られていない。

図 2 は Helper の平均寿命 58 日に設定したシミュレーションから得たデータでの (1) $B_i = 0$ (Benefit が得られない), (2) $B_i > 0$ (Benefit が得られた), (3) $B_i > 0, C_i \geq B_i$ (得をした), (4) $B_i > 0, C_i > B_i$ (損をした), における B_i , C_i の箱ひげ図である。図 3 は (1)~(4) における、

保険的行動を行った Queen が死亡した時に生存していた Brood 数の箱ひげ図である。Benefit を得られるかどうかは、支払った Cost ではなく、いかに Brood 数を多く保つかが重要であることが読み取れる。また Benefit を大きくすることで得をしているのではなく、Cost を抑えることで Queen は得をしていることがわかる。保険的行動で得をする為には一定数の Brood が必要だが、多くすれば得をするわけではないことがわかる。

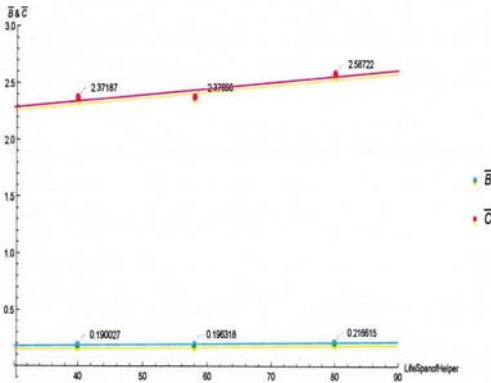


図 1 複数条件下での Benefit, Cost の比較

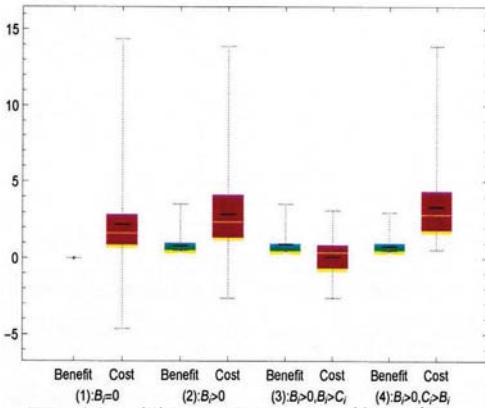


図 2 (1)~(4)における B_i, C_i の箱ひげ図

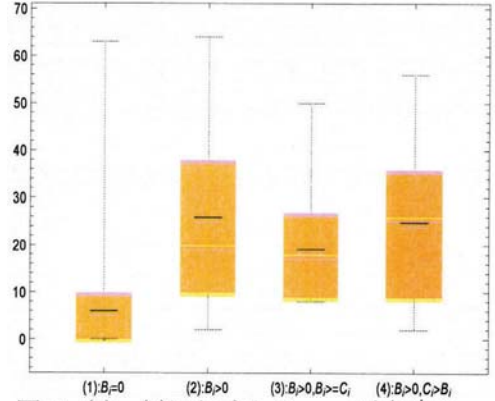


図 3 (1)~(4)における, Queen 死亡時の Brood 数の箱ひげ図

5. 保険的行動の評価

Queen の Helper を巣に残らせる保険的行動において、得られる Benefit は支払う Cost に見合っていないことがわかった。Queen は自分の Brood には Helper にさせるよりも leave させた方が良いと思われる。しかしこれは Queen の遺伝子からの拡散を考えた場合であり、巣の継続、種の繁栄を考えれば変わってくる可能性もある。本研究では、保険をかけた Queen の Brood の中から何匹 leave したかのみが、Benefit に影響した。しかし保険をかけることで、Adult になり Helper となった個体もいる。このような Helper は主に次の Queen の利益となるので、今回はこのような Helper を Benefit にはカウントしていない。しかし、この Helper は次の Queen の労働力にもなり、Queen の寿命を延ばすことで、巣を長く継続させる。実際に LoneQueen の巣に比べ、Helper のいる Queen の巣の方が約 1.4 倍長く継続している事がシミュレーションを通して確認された。したがって、社会性蜂の保険的行動は 1 匹の Queen から見れば機能しづらくプラスの効果を得ることは少ないが、巣や種全体として見た時には、巣の継続時間を増加させており、種全体の繁栄には必要なシステムと考えることができる。また LoneQueen (Helper のいない Queen) が長く生き残れないような厳しい環境下においては、保険的行動を行わなければ種全

体が絶滅してしまう。そのような環境下では、種存続の為に保険的行動が必要なのではないだろうか。

参考文献

- [1] J.Field, Gavin Shreeves, Seirian Sumner, & Maurizio Casiraghi. Insurance-based advantage to helpers in a tropical hover wasp. *Nature*, 869–871 (2000)
- [2] Queller, D. C. in *Natural History And Evolution Of Paper-Wasps* (eds Turillazzi, S. & West-Eberhard, M. J.) 218–234 (Oxford Univ. Press, Oxford, 1996)
- [3] Queller, D. C. The evolution of eusociality: reproductive head starts of workers. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 86, 3224–3226 (1989).
- [4] Gadagkar, R. Evolution of eusociality: the advantage of assured fitness returns. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 329, 17–25 (1990).
- [5] Queller, D. C. Extended parental care and the origin of eusociality. *Proc. R. Soc. Lond. B* 256, 105–111 (1994).
- [6] Queller, D. C. The origin and maintenance of eusociality : the advantage of extended parental care. In *Natural history and evolution of paper wasps* (ed. S. Turillazzi, & M. J. West-Eberhard), pp. 218–234. Oxford University Press (1996)
- [7] Gavin Shreeves, Michael A. Cant, Alan Bolton & Jeremy Field. Insurance-based advantages for subordinate co-foundresses in a temperate paper wasp. *The Royal Society*, 1617–1622 (2003)
- [8] J.Field. The Ecology and Evolution of Helping in Hover Wasp (Hymenoptera : Stenogastrinae). In *Ecology of Social Evolution* (ed. J. Korb & J. Heinze), pp. 85–107, Springer (2008)
- [9] A.L. Cronin, C. Bridge, J. Field. Climatic correlates of temporal

demographic variation in the tropical hover wasp *Liostenogaster flavolineata*. Springer (2010)

- [10] J. Field, W. Foster. Helping behaviour in facultatively eusocial hover wasps: an experimental test of the subfertility hypothesis. *The Association for the Study of Animal Behaviour* (1999)
- [11] H. Toyozumi, J. Field. *Queueing Dynamics of Social Queues* (2011)