

警備ゲームモデルに基づく警備戦略と犯罪抑制効果

01205430 筑波大学 *鈴木 勉 SUZUKI Tsutomu

1. はじめに

警備計画問題は、ゲーム理論を警備問題へと発展させた Stackelberg security game (SSG)と呼ばれる警備ゲームモデルとして多く取り扱われてきた。Garnaev ら[1]はネットワーク上における守備側と攻撃側による警備ゲームモデルのナッシュ均衡解を導出し、ネットワークセキュリティへ適用している。Kiekintveld ら[2]は警備ゲームモデルの解を線形計画法によって導出するための ERASER アルゴリズムを提案した。また、このアルゴリズムを警備空間の特徴に合わせて拡張した Pita ら[3]の GUARDS システムなど、実際の警備計画への適用も見られる。

本研究では、川西・鈴木[4]のシミュレーションによるアプローチに対して、犯罪者と警備員による警備ゲームを用いて、被害抑制のための警備員の最適な資源配分の基本的性質を明らかにすることにより、警備の存在が犯罪分布やそのホットスポットを左右することを示すとともに、警備資源（警備員数）に応じた被害量を減らすための（被害の）ターゲット分布の管理方策を明らかにすることを目的とする。

2. 警備ゲーム

S 個の地区からなる地域があり、各地区に犯罪企図者と警備員が訪問することを考える。犯罪企図者は P 人、警備員は Q 人いて、それぞれ地区毎にある確率で互いに独立に訪問することを考える。各地区に同時に 2 人以上が訪問することはないものとする。各地区には潜在的に被害に遭う可能性のあるターゲットがあるとし、犯罪企図者のみが訪問したとき被害が発生する。犯罪企図者と警備員の両方が訪問した場合は犯罪が抑制され、被害は発生しないとする。

いま全体の地域を連続空間と考え、 $[0, S]$ の線分上に、ターゲットの分布 $a(x)$ 、犯罪企図者と警備員の訪問確率が $p(x), q(x)$ （ただし、 $0 \leq p(x) \leq 1, 0 \leq q(x) \leq 1$ ）の関数で表されるとしよう。双方はお互いの各ターゲットへの訪問確率を知ることができるとする。期待被害量の総和は

$$D = \int_0^S a(x)p(x)(1 - q(x))dx \tag{1}$$

と表すことができ、犯罪企図者側は D を最大化、警備員側は D を最小化するように訪問確率を決定するゼロ和ゲームを想定すると、ナッシュ均衡は混合戦略となり、均衡条件

$$a(x)p(x) = C_p \tag{2}$$

$$a(x)(1 - q(x)) = C_q \tag{3}$$

より、 $p(x)$ および $q(x)$ が定まる。

3. 警備資源配分・犯罪分布と被害量

ターゲットの分布 $a(x)$ が、図 1 上に示すような指

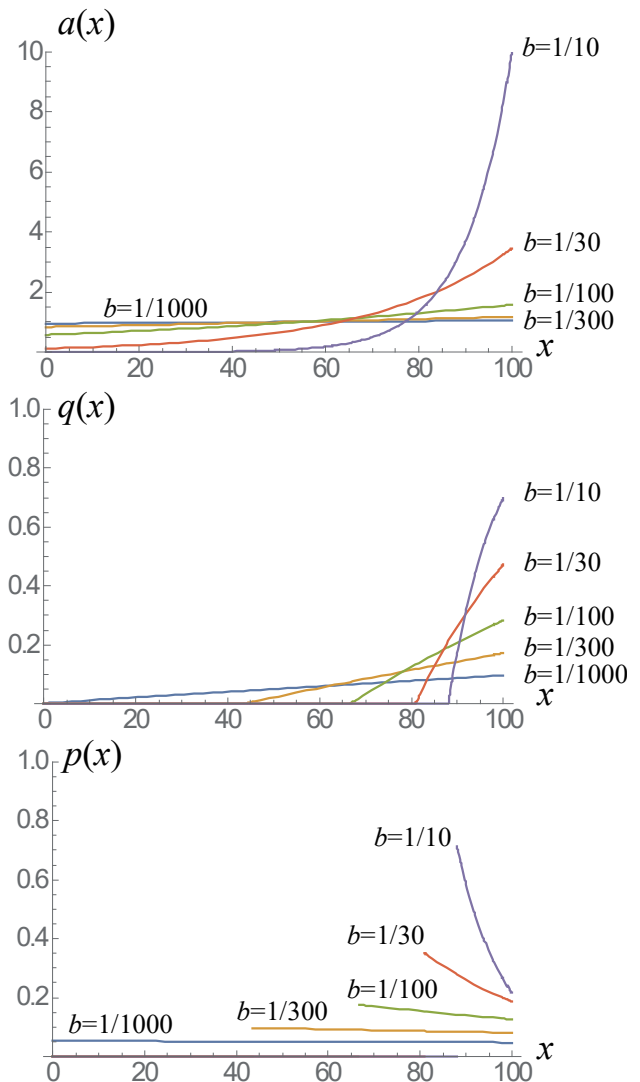


図 1 ターゲット分布 (上) と警備員 (中)・犯罪企図者 (下) の訪問確率分布

数関数に従うとする。被害となりうるターゲットの総量が $\int_0^S a(x)dx = A$ となるように

$$a(x) = \frac{Ab}{e^{bs}-1} e^{bx} \tag{4}$$

とおく。 $b(>0)$ は分布の偏りのパラメータであり、大きいほど不均等な分布であることを示す。このとき、

$$b_0 = \frac{1}{s(s-Q)} \left\{ S + (S-Q)W \left(-\frac{s}{s-Q} e^{-\frac{s}{s-Q}} \right) \right\} \tag{5}$$

とおく（ただし、 $W(x)$ はランベルトの W 関数）と、

(i) $b < b_0$ のとき

$$C_q = \frac{Ab^2(s-Q)}{2(\cosh bs - 1)} \tag{6}$$

となり、警備員・犯罪企図者の訪問確率は以下の通りとなり、いずれの地区においても正値をとる。

$$q(x) = 1 - \frac{be^{-bx}(e^{bS}-1)(S-Q)}{2(\cosh bS-1)} \quad (7)$$

$$p(x) = \frac{be^{-bx}(e^{bS}-1)P}{2(\cosh bS-1)} \quad (8)$$

このとき、被害量の総和は以下となる。

$$D = \frac{Ab^2P(S-Q)}{2(\cosh bS-1)} \quad (9)$$

(ii) $b \geq b_0$ のとき

$$x_0 = \frac{1}{b} \log[-e^{bS}W(-e^{-1-bQ})] \quad (10)$$

とおくと、

$$C_q = \frac{Abe^{bS}W(-e^{-1-bQ})}{1-e^{bS}} \quad (11)$$

となり、各訪問確率は以下の通りとなる。

$$q(x) = \begin{cases} 0, & x < x_0 \\ 1 + e^{b(S-x)}W(-e^{-1-bQ}), & x \geq x_0 \end{cases} \quad (12)$$

$$p(x) = \begin{cases} 0, & x < x_0 \\ -\frac{bPe^{b(S-x)}W(-e^{-1-bQ})}{1+W(-e^{-1-bQ})}, & x \geq x_0 \end{cases} \quad (13)$$

このとき、被害量の総和は以下となる。

$$D = \frac{AbPe^{bS}W(-e^{-1-bQ})}{1-e^{bS}} \quad (14)$$

ただし、犯罪企図者数 P が大きい場合や、ターゲットの偏り b が大きい場合は、(8)や(13)において $p(x) > 1$ となり、上式は成立しないので注意を要する。

図1に $S = A = 100, P = 5$ としたときのターゲット分布(上)と警備員(中)・犯罪企図者(下)の訪問確率分布の関係を示す。ターゲットの偏り b が小さく、空間的に分散しているときは犯罪企図者も警備員も訪問先は分散するが、ターゲットの偏り b が大きく集中するほど、ターゲットの多く存在するところに犯罪企図者も警備員も集中し、ターゲットが一定水準よりも少ないところには双方とも訪問しないことがわかる。警備員はターゲットの多いところほど高い確率で訪問するため、犯罪企図者はターゲットの最も多い地区を訪問する確率を下げ、その代わりにそれに準ずる地区を高い確率で訪問するようになる。すなわち、警備の存在により必ずしもターゲットの最も多いところが犯罪のホットスポットになるわけではないことがわかる。

図2に、 $S = A = 100, P = 5$ のときの警備員数 Q と被害量 D との関係を示す。ターゲットの偏りが小さいと、警備員を増やしても犯罪企図者は他の地区を訪問するため、被害量を減らす効果はあまりないが、偏りを高めて、ターゲットを集中させることにより、警備員数を高めることによる被害量削減の効果を上げることができることがわかる。

図3に、潜在的被害量分布の偏り b と被害量 D との関係を示す。ターゲットの偏りを制御できる場合は、警備員数が少ない場合にはターゲットの偏りを高めることは被害抑制には逆効果であるが、警備員数を一定水準以上に多くすることができれば、ターゲットの分布を集中させた方が被害量を低く抑えることができることがわかる。

4. おわりに

犯罪者と警備員の各ターゲットにおける訪問確率を明らかにし、被害抑制のための適切な警備員配置を求めた。警備員数の増加によって、犯罪者がターゲットの少ない地区へと追いやられ、警備員の投入量によって犯罪ホットスポットの遷移の可能性があることが確認された。また、犯罪分布と被害量・被捕捉率との関係を分析することで、警備員や犯罪者の人数によって、集中的・分散的配置のどちらが有効であるかが異なることが明らかになった。

本研究は、筑波大学と日本パナユーズ株式会社の共同研究「警備業の最適化のための産学共同研究」および JSPS 科研費 19H02374 による成果の一部である。

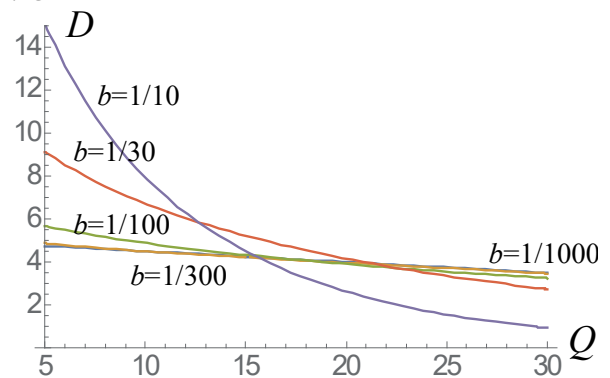


図2 警備員数と被害量

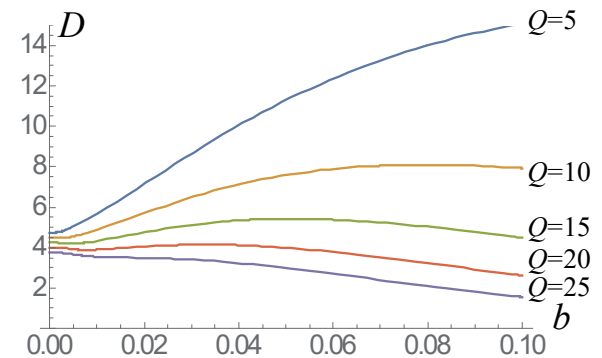


図3 潜在的被害量分布の偏りと被害量

参考文献

- [1] Garnaev, A., Baykal-Gursoy, M. and Poor, H.V. (2014): Incorporating attack-type uncertainty into network protection, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, **9**(8), 1278-1287.
- [2] Kiekintveld, C., Jain, M., Tsai, J., Pita, J., Ordóñez, F., and Tambe, M. (2009): Computing Optimal Randomized Resource Allocations for Massive Security Games, *Proc. of the 8th International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS 2009)*, 1, 689-696.
- [3] Pita, J., Tambe, M., Kiekintveld, C., Cullen, S., and Steigerwald, E. (2011): GUARDS: Game theoretic security allocation on a national scale, *Proc. of the 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2011)*, 1, 37-44.
- [4] 川西勇輔・鈴木勉 (2018): 犯罪の空間分布と警備戦略：警備ゲームのシミュレーション分析, *地理情報システム学会講演論文集*.