

<研究ノート>

## 警備ゲームにおける警備ネットの現実性拡張とその適用

宝崎 隆祐\*

### Realistic enhancements of network attributes in security games and their applications

Ryusuke HOHZAKI \*

#### 抄 録

警備問題をそのプレイヤーである侵入者と警備側の間のゲームとして考えるのが警備ゲームである。施設や公共交通網といった警備空間をネットワークとして表現し、その上で定義される警備ゲームは、感染症の感染拡大阻止等の適用例をもつネットワーク阻止問題と呼ばれる大きな学術分野の重要な問題である。著者らはネットワーク上での警備ゲームを、プレイヤー間の干渉が両者の損耗をもたらすシュタッケルベルグ・ゲームとしての新たなモデルとして開発し、ゲーム理論を用いて均衡解を導出する解法を提案してきた。警備問題も社会問題の一つである以上、次のステップとして、モデルや解法の現実適応性を拡大することが求められる。前回の筑波学院大学紀要18集[4]での報告は、ゲーム理論による解の導出を現実的なものとするべく、解導出のリアルタイム性を追及して解法を改善し、数値実験でその効果を実証した。今回の報告では、問題の環境を与える警備ネットワークに関し、これまで仮定してきた有向グラフや閉路無しグラフといった制限を無くすことで提案手法の適応範囲を拡張するとともに、実際どのような警備計画が最適となるのかを数値実験により検証した。

キーワード：ゲーム理論、警備ゲーム、損耗、ネットワーク阻止

#### 1. はじめに

この報告は、施設警備へのゲーム理論応用に関する我々の一連の研究[1, 2, 3, 4]を進展させ、提案手法の適用範囲を拡張すべく、警備ネットワークの属性を多様化するモデルを新たに提案しようとするものである。また提案手法を現実の空港警備に適用し、施設が被るリスク分析と最適な警備計画を作成し分析した。

ネットワーク上での悪意のある主体に対する対処法を議論する学術分野にネットワーク阻止モデルと呼ばれるモデル群がある[5]。世界で蔓延した新型コロナの感染拡大を防止する問題などにもこのモデルが利用できる。悪意ある侵入者から施設その他を守るための警備問題も、このモデルの重要な適用問題である。米国における9.11テロをきっかけに、テロ犯等の非合法活動を科学的に取り扱うための警備問題に

\* 筑波学院大学 経営情報学部、Tsukuba Gakuin University

ゲーム理論を適用した警備ゲームは、世界中の多くの数理科学研究者の研究テーマとなった [6]。ロサンゼルス国際空港での警備計画に実際に利用された Paruchuri et al. [7] の研究は有名である。

警備ゲームに関する Hohzaki and Sakai [1] の研究では、警備ネットワーク上で定義した警備ゲームの新しいモデルを提案したが、侵入者及び警備側の評価尺度はどちらも施設への被害量としたゼロ和ゲームとして定義していた。この評価尺度、すなわちゲーム理論でいう支払関数をゼロ和から非ゼロ和にすることでプレイヤーの意図や動機の設定に柔軟性をもたせたのが宝崎 [2] である。報告 [3] では、それまでの基本モデルを現実的に拡張するためのアイデアを述べたが、その具体策として、前回の報告 [4] では、解法の定式化をそれまでの 2 次計画問題から線形計画問題とすることで計算時間を短くし、リアルタイムに最適警備計画を作成することを目指した。今回の報告では、警備ネットワークの属性の現実性を追求し、それまで有向アークのみで取扱っていたネットワークに無向アークを取り入れることでプレイヤーのアークでの双方向移動を可能とするとともに、侵入者の侵入ルートに閉路設定を許すことで、侵入者タイプや侵入経路設定において現実的な拡張を与えた。警備ネットワークにおけるこの現実適応性の拡張により、多様性に富んだ警備問題を扱えるようになる。

次節の 2 節では非ゼロ和警備ゲームの基本モデルを記述し、3 節でこの警備ゲームの均衡解を成す警備側の警備計画と侵入者の侵入経路を導出する定式化について解説する。基本モデルにはこれまで様々な修正をほどこし、警備側、侵入者側のタイプと性格を特徴づけることができるようにしたが、4 節でその工夫を説明する。5 節ではこの報告の主題である警備ネットワークの現実性をさらに拡張するための工夫と、そのために施す解法の修正について提案

する。以上の提案を、密輸者、テロ犯及び置き犯の侵入の可能性のある実際の空港警備へ応用した例を 6 節で述べる。

## 2. 警備ゲームの基本モデル

ここでは、ネットワークで表現された施設内空間における侵入者と警備側の間でプレイされる次のような警備ゲームを考える。このゲームでは侵入者の様々なタイプと複数タイプの警備体制を考慮する。例えば、空港であれば犯罪人や密輸者、テロリスト等が侵入者のタイプであり、警備側は通常警備班やテロ対策警備班といったタイプを考えようとするものである。侵入者は警備体制の弱点を突くために警備情報の一部を予め収集でき、警備側がとろうとする戦略を予め知った上でみずからの侵入経路を決めるというシュタッケルベルグ型ゲームが本モデルである。

(A1) 問題が定義される空間は、ノード集合  $\mathbf{N}$  と有向アーク集合  $\mathbf{A}$  から成る警備ネットワーク  $G(\mathbf{N}, \mathbf{A})$  であり、ゲームのプレイヤーは侵入者及び警備側である。

(A2) 侵入者はタイプ集合  $\mathbf{H}$  で表されるいくつかのタイプをもつ。タイプ  $h \in \mathbf{H}$  の侵入者は、初期人数  $R_0^h$  で侵入する。侵入者は警備側との交戦により次第に人数を減らしていくが、生き残ったタイプ  $h$  の侵入者が侵入経路上のノード  $i$  に到達すれば、1 人あたり物的・人的被害  $d_i^h$  を施設側に与え、同時に、1 人あたり  $p_i^h$  の利益を得る。

タイプ  $h \in \mathbf{H}$  の侵入者の戦略は、その目的ノード到達までの利益の和(総利益)を最大にすべく、侵入ノードから目的ノードに至る閉路の無い侵入経路全体  $\Omega_h$  から 1 本のパスを選択することである。

- (A3) 警備側は、警備ネットワーク上に集合  $\mathbf{W}$  で表わされるいくつかの待機場所をもつ。警備側は複数の警備体制をもち、その集合を  $\mathbf{S}$  で表す。警備側は、警備体制  $s \in \mathbf{S}$  をとる頻度（確率） $g(s)$  を決め、また警備体制  $s$  においてはその初期警備人数  $B_0^s$  のノード、アーク及び待機場所への配備計画を立案して、侵入者の阻止を企図する。ただし、人目に立つノード、アークへの配備人数は  $M^s$  人を上限とし、残りは待機場所で待機するものとする。また、警備レベルの高い体制は一般に負担が大きいため、警備体制  $g(s)$  の使用頻度にはその負担に応じた上限  $U(s)$  がある。

警備計画におけるノード、アークへの配備人員は後で移動できないが、待機場所での待機警備員は、防犯カメラ等による侵入情報を得て、ノードやアークに急派できる。

警備側は、過去の事案発生データから、侵入者がタイプ  $h$  である確率  $f(h)$  の確率分布  $\{f(h), h \in \mathbf{H}\}$  を知っている。

- (A4) ネットワーク上をタイプ  $h$  の侵入者がパス  $l$  をとった場合に、防犯カメラ等による最初の視認場所からノード  $j$  までの移動時間を  $t_{hl}^A(j)$ 、アーク  $e$  までの移動時間を  $t_{hl}^A(e)$  で表す。一方、タイプ  $s$  の警備員の待機場所ノード  $r \in \mathbf{W}$  からノード  $j$  までの移動時間を  $t_s^D(r, j)$ 、アーク  $e$  までの移動時間を  $t_s^D(r, e)$  で表す。

- (A5) ノード  $i \in \mathbf{N}$  及びアーク  $e \in \mathbf{A}$  での  $x$  人の侵入者と  $y$  人の警備員との交戦の結果生じる損耗は線形モデルに従い、どちらかが全滅するまで戦われる。ノード  $i$  及びアーク  $e$  での侵入者の残存人数  $f_i^{hs}(x, y)$  及び  $f_e^{hs}(x, y)$  は、侵入者のタイプ  $h$  及び警備体制  $s$  に依存し、次式で与えられる。

$$f_i^{hs}(x, y) = \max\{0, x - \gamma_i^{hs}y\}$$

$$f_e^{hs}(x, y) = \max\{0, x - \gamma_e^{hs}y\}$$

ただし、係数  $\gamma_i^{hs}, \gamma_e^{hs}$  は、ノード  $i$ 、アーク  $e$  における侵入者に対する警備側の相対的な強さを表し、これを戦力交換比と呼ぶ。

- (A6) 侵入者側は、警備体制  $s \in \mathbf{S}$  における警備員配備とそれをとる確率  $g(s)$  が分かるものとするが、実際に侵入を実行する時点における警備体制については知らないとする。

一方の警備側は、防犯カメラ設置場所において侵入情報として侵入者タイプ  $h$  と経路を入手でき、待機場所の警備員を現場に適宜派遣できる。

- (A7) 警備側は侵入者による被害を最小化する警備計画を立案し、侵入者は各タイプごとに自らの総利益を最大化するように侵入経路を決定する。

詳細は省くが、前提 (A2) や (A3) により施設警備における様々な様相を表現可能である。前提 (A7) で明示したように、侵入者及び警備側が意思決定を行うための評価尺度は異なり、かつ意思決定には順番があるため、この問題は非ゼロ和のシュタッケルベルグゲームとなる。

まずプレイヤーの戦略を明示的に定義する。タイプ  $h \in \mathbf{H}$  の侵入者の純粋戦略は全パス  $\Omega_h$  から1つのパスを選択することであり、その混合戦略をパス  $l$  の選択確率  $\pi_h(l)$  で表す。その実行可能性条件は次式で与えられる。

$$\sum_{l \in \Omega_h} \pi_h(l) = 1, \quad \pi_h(l) \geq 0, \quad l \in \Omega_h.$$

戦略の集合として、タイプ  $h$  侵入者の混合戦略  $\pi_h = \{\pi_h(l), l \in \Omega_h\}$ 、全タイプの混合戦略  $\pi = \{\pi_h, h \in \mathbf{H}\}$  の記号を用いる。

一方の警備側は、警備体  $a$  制  $s \in \mathbf{S}$  をとる確率  $g(s)$  とその総員  $B_0^s$  の配備として、 $\mathbf{y}^s = \{\{y_i^s, i \in \mathbf{N}\}, \{y_e^s, e \in \mathbf{A}\}, \{y_r^s, r \in \mathbf{W}\}\}$  を計画する。 $y_i^s, y_e^s, y_r^s$  は、それぞれノード  $i$ 、アーク  $e$  及び待機ノード  $r$  への配備人員数である。さらに、侵入事案発生直後に侵入者のタイプ  $h$  とそのパス  $l$  の情報を得て、各待機場所  $r$  から各ノード  $i$ 、各アーク  $e$  への派遣人員数である  $z_l^{hs} = \{\{z_l^{hs}(r, i), r \in \mathbf{W}, i \in \mathbf{N}\}, \{z_l^{hs}(r, e), r \in \mathbf{W}, e \in \mathbf{A}\}\}$  の計画も必要である。またこれらの集合体として、 $g = \{g(s), s \in \mathbf{S}\}$ 、 $\mathbf{y} = \{\mathbf{y}^s, s \in \mathbf{S}\}$  や  $\mathbf{z}^s = \{z_l^{hs}, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}\}$ 、 $\mathbf{z} = \{\mathbf{z}^s, s \in \mathbf{S}\}$  といった表記も適宜用いる。モデルの前提から、警備側戦略に関する実行可能性条件は次のように表される。

$$\sum_{s \in \mathbf{S}} g(s) = 1, \quad 0 \leq g(s) \leq U(s), \quad s \in \mathbf{S},$$

$$\sum_{i \in \mathbf{N}} y_i^s + \sum_{e \in \mathbf{A}} y_e^s + \sum_{r \in \mathbf{W}} y_r^s \leq B_0^s, \quad s \in \mathbf{S}, \quad (1)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{N}} y_i^s + \sum_{e \in \mathbf{A}} y_e^s \leq M^s, \quad s \in \mathbf{S}, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{N}} z_l^{hs}(r, i) + \sum_{e \in \mathbf{A}} z_l^{hs}(r, e) = y_r^s,$$

$$r \in \mathbf{W}, s \in \mathbf{S}, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, \quad (3)$$

$$y_i^s, y_e^s, y_r^s, z_l^{hs}(r, i), z_l^{hs}(r, e) \geq 0, \quad i \in \mathbf{N},$$

$$e \in \mathbf{A}, r \in \mathbf{W}, s \in \mathbf{S}, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}. \quad (4)$$

### 3. プレイヤーの評価尺度と解法

ここでは各プレイヤーの行動の動機を与える評価尺度（ゲーム理論における支払関数）を導出する。記号として、パス  $l$  上のノード集合とアーク集合をそれぞれ  $\mathbf{V}_l$ 、 $\mathbf{E}_l$  で表す。また、 $\mathbf{V}_l^i$  を、パス  $l$  上での出発ノードからノード  $i$  に到るまでに通過する  $i$  自身を含むノード集合、 $\mathbf{E}_l^i$  を、パス  $l$  上での出発ノードからノード  $i$  に到るまでに通過するアーク集合とする。

タイプ  $h$  の侵入者がパス  $l$  をとり、警備体制  $s$  が配備計画  $\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^{hs}$  をとることにより、パス  $l$  上のノード  $i \in \mathbf{V}_l$  での侵入者残存数は次式で書ける。

$$D_{hsi}^+(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s))$$

$$\equiv \max \{0, D_{hsi}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s))\} \quad (5)$$

ただし、

$$D_{hsi}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s))$$

$$\equiv R_0^h - \sum_{j \in \mathbf{V}_l^i} \gamma_j^{hs} \left( y_j^s \right.$$

$$\left. + \sum_{r \in \mathbf{W} | t_{hl}^A(j) \geq t_s^D(r, j)} z_l^{hs}(r, j) \right)$$

$$- \sum_{e \in \mathbf{E}_l^i} \gamma_e^{hs} \left( y_e^s \right.$$

$$\left. + \sum_{r \in \mathbf{W} | t_{hl}^A(e) \geq t_s^D(r, e)} z_l^{hs}(r, e) \right) \quad (6)$$

第2項はノード  $j$  での事前配備と待機所からの派遣人数の総警備員数による損耗、第3項はアーク  $e$  における同様の損耗である。式 (5) は侵入者の残存数が正の場合のみを考慮するものであるが、現実には計算どおりに状況が推移するものでもなく、次節以降で述べるように、残存数が負となる場合の考慮によって柔軟性のある状況設定が可能となる。したがって、以下の定式化では負の残存侵入者も考慮した指標を提示する。ちなみに、残存量  $D_{hsi}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s))$  の  $g(s)$  による期待値は次式で表される。

$$D_{hi}(l, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z})) = \sum_{s \in \mathbf{S}} g(s) D_{hsi}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s))$$

$$= R_0^h - \sum_{s \in \mathbf{S}} \sum_{j \in \mathbf{V}_l^i} \gamma_j^{hs} \left( g(s) y_j^s \right.$$

$$\left. + \sum_{r \in \mathbf{W} | t_{hl}^A(j) \geq t_s^D(r, j)} g(s) z_l^{hs}(r, j) \right)$$

$$- \sum_{s \in \mathbf{S}} \sum_{e \in \mathbf{E}_l^i} \gamma_e^{hs} \left( g(s) y_e^s \right.$$

$$\left. + \sum_{r \in \mathbf{W} | t_{hl}^A(e) \geq t_s^D(r, e)} g(s) z_l^{hs}(r, e) \right) \quad (7)$$

タイプ $h$ の侵入者がパス $l$ をとった場合の期待利得と混合戦略 $\pi_h$ による期待利得は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} R_h(l, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z})) &= \sum_{s \in S} g(s) \sum_{i \in V_i} p_i^h D_{hsi}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)) \\ &= \sum_{i \in V_i} p_i^h D_{hi}(l, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z})) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} R_h(\pi_h, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z})) &= \sum_{l \in \Omega_h} \pi_h(l) R_h(l, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z})) \\ &= \sum_{l \in \Omega_h} \pi_h(l) \sum_{i \in V_i} p_i^h D_{hi}(l, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z})) \end{aligned} \quad (9)$$

したがって、タイプ $h$ 侵入者は、警備情報 $(g, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ を得て、自らの利益を最大化しようとする次の問題を解くことになる。

$$(PA) \quad \max_{\pi_h} R_h(\pi_h, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z})) \\ = \max_{l \in \Omega_h} R_h(l, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z}))$$

また、施設の被る被害量の期待値は次式となり、警備側が最小化したい評価尺度を与える。

$$\begin{aligned} N(\pi, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z})) &= \sum_{h \in H} f(h) \sum_{l \in \Omega_h} \pi_h(l) \\ &\quad \times \sum_{i \in V_i} d_i^h D_{hi}(l, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z})) \end{aligned} \quad (10)$$

式(7)から分かるように、変数 $\mathbf{y}, \mathbf{z}$ は $g(s)$ と掛けられて使用されるから、 $\mathbf{y}, \mathbf{z}$ の代わりに次の変数を用いれば変数の数を減らすことができる。

$$\begin{aligned} x_i^s &\equiv g(s)y_i^s, \quad x_e^s \equiv g(s)y_e^s, \quad x_r^s \equiv g(s)y_r^s, \\ v_i^{hs}(r, i) &\equiv g(s)z_i^{hs}(r, i), \\ v_i^{hs}(r, e) &\equiv g(s)z_i^{hs}(r, e) \end{aligned}$$

これらの新しい変数により、支払計算の基礎となる式 $D_{hi}(l, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z}))$ は $g(s)$ を含まない次の式 $D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v}))$ となる。

$$\begin{aligned} D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) &= R_0^h - \sum_{s \in S} \sum_{j \in V_i^s} \gamma_j^{hs} \left( x_j^s \right. \\ &\quad \left. + \sum_{r \in W | t_{hl}^A(j) \geq t_s^D(r, j)} v_i^{hs}(r, j) \right) \\ &\quad - \sum_{s \in S} \sum_{e \in E_i^s} \gamma_e^{hs} \left( x_e^s \right. \\ &\quad \left. + \sum_{r \in W | t_{hl}^A(e) \geq t_s^D(r, e)} v_i^{hs}(r, e) \right) \end{aligned}$$

この関数を基礎として、(8)–(10)式による計算式をそのまま使えば、 $R_h(l, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z}))$ 、 $R_h(\pi_h, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z}))$ 及び $N(\pi, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z}))$ は、変数 $\mathbf{x}, \mathbf{v}$ に対し定義された関数として、 $R_h(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v}))$ 、 $R_h(\pi_h, (\mathbf{x}, \mathbf{v}))$ 及び $N(\pi, (\mathbf{x}, \mathbf{v}))$ と書き代えることができる。

警備側の戦略は連続戦略 $(g, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ であり、侵入経路 $l$ をとるタイプ $h$ の侵入者は次式で表される利得を最大化する問題(PA)を解こうとする。

$$\begin{aligned} R_h(\pi_h, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) &= \sum_{l \in \Omega_h} \pi_h(l) \sum_{i \in V_i} p_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \end{aligned} \quad (11)$$

一方の警備側は、各タイプの侵入者の最適戦略を推測した上で、(10)式と同等な次式で表現される期待被害量を最小化する警備計画を立案しようとする。

$$\sum_{h \in H} f(h) \sum_{l \in \Omega_h} \pi_h(l) \sum_{i \in V_i} d_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \quad (12)$$

リーダー及びフォロワーのいるこのようなシュタッケルベルク型ゲームの均衡解導出に関しては、すでにParuchuriら[7]が2次計画問題による解法を提案しており、詳細は省くが、これまで導出した式を彼らの解法に挿入すると、均衡解を導出する次の定式化が得られる。

(P<sub>D</sub>)

$$\min_{g, \mathbf{x}, \mathbf{v}, \pi, \eta, \zeta, \xi} \sum_{h \in \mathbf{H}} f(h) \sum_{l \in \Omega_h} \pi_h(l) \sum_{i \in V_l} \eta_{li}^h \quad (13)$$

制約条件:

$$\eta_{li}^h = d_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})), \quad i \in V_l, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, \quad (14)$$

$$\sum_{l \in \Omega_h} \pi_h(l) = 1, \quad h \in \mathbf{H}, \quad (15)$$

$$\pi_h(l) \in \{0, 1\}, \quad l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}$$

$$0 \leq a_h - \sum_{i \in V_l} \zeta_{li}^h \leq (1 - \pi_h(l))M, \quad l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, \quad (16)$$

$$\zeta_{li}^h = p_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})), \quad (17)$$

$$\sum_{s \in \mathbf{S}} g(s) = 1, \quad 0 \leq g(s) \leq U(s), \quad s \in \mathbf{S}, \quad (18)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{N}} x_i^s + \sum_{e \in \mathbf{A}} x_e^s + \sum_{r \in \mathbf{W}} x_r^s \leq g(s)B_0^s, \quad s \in \mathbf{S}, \quad (19)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{N}} x_i^s + \sum_{e \in \mathbf{A}} x_e^s \leq g(s)M^s, \quad s \in \mathbf{S}, \quad (20)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{N}} v_i^{hs}(r, i) + \sum_{e \in \mathbf{A}} v_e^{hs}(r, e) = x_r^s,$$

$$r \in \mathbf{W}, s \in \mathbf{S}, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H},$$

$$x_i^s, x_e^s, x_r^s, v_i^{hs}(r, i), v_e^{hs}(r, e) \geq 0, \quad i \in \mathbf{N},$$

$$e \in \mathbf{A}, r \in \mathbf{W}, s \in \mathbf{S}, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}.$$

(16) 式の M はいわゆる Big M と呼ばれる十分な大きな値であるため、 $\pi_h(l) = 1$  のときに等式  $a_h = \sum_{i \in V_l} \zeta_{li}^h$  を与える効果がある。(19) 式以下の条件は、実行可能性条件：(1), (2), (3) 及び(4) 式を新しい変数  $\mathbf{x}, \mathbf{v}$  の実行可能性条件に書き直したものである。この定式化を他のモデルに拡張し易いように、(12) 式と同値な目的関数(13) 式に(14) 式で定義される変数  $\eta_{li}^h$  を使い、また(11) 式の表現にも定義式(17) による変数  $\zeta_{li}^h$  を導入し(16) 式を作っている。

#### 4. 侵入阻止の成否により被害率・利益率を変化させるモデル

侵入者の阻止が成功するか否かに依存して被害率  $d_i^h$  や利益率  $p_i^h$  を変化させることで、侵入者、警備側の性格をモデルに組み入れることができる。

パス  $l \in \Omega_h$  上をノード  $i \in V_l$  まで進んだ侵入者の正負を問わない残存数は、(6) 式で与えられる  $D_{hsi}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s))$  であり、これを警備側混合戦略  $g$  により期待値をとった期待残存数は  $D_{hi}(l, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z})) = D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v}))$  で表現できる。この期待残存数が正であれば  $d_i^h$ 、負であればより小さな被害率  $d_i^h (< d_i^h)$  をとるものとする、ノード  $i$  での被害量は次式で表される。

$$\max \left\{ \underline{d}_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})), \quad d_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \right\}$$

これにより、期待残存数が負と予想されるカ所への警備資源の配備が控えられ、警備コストの省力化を組み込むことができる。この変更は、定式化 (P<sub>D</sub>) の (14) 式を次式に置き換えればよい。

$$\eta_{li}^h = \max \left\{ \underline{d}_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})), \quad d_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \right\} \quad (21)$$

同様のパラメータ設定を侵入者の利益率に適用すれば、侵入者の性格も定式化できる。

- (i) 負値無関心なタイプ：期待残存数が正であれば  $p_i^h$  を、負であれば小さな利益率  $\underline{p}_i^h (< p_i^h)$  を設定することで、侵入者は自らの侵入が阻止されても意に介しない性格をもつ。このとき、ノード  $i$  での利益は次式で表される。

$$R_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) = \max \left\{ \underline{p}_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})), \quad p_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \right\}$$

このケース( $IT_h = 1$ で表す)では、定式化( $P_D$ )の(17)式を次式で置換すればよい。

$$\zeta_i^h = \max \left\{ \underline{p}_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})), p_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \right\} \quad (22)$$

- (ii) 負値嫌いなタイプ：期待残存数が正の場合の利益率 $p_i^h$ に対し、負の場合にはより大きな利益率 $\underline{p}_i^h$  ( $> p_i^h$ )を設定することで、侵入が阻止され期待残存数が負となることをよりデメリットと感じるタイプの侵入者を表現できる。このときノード $i$ での利益は次式で表される。

$$R_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) = \min \left\{ \underline{p}_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})), p_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \right\}$$

$IT_h = 2$ で表すこのケースでは、定式化( $P_D$ )の(17)式を次式で置換すればよい。

$$\zeta_i^h = \min \left\{ \underline{p}_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})), p_i^h D_{hi}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \right\} \quad (23)$$

## 5. 警備ネットワークの現実性拡張

2節の基本モデルでは、前提(A1)でアークを有向とし、前提(A2)で侵入経路には閉路が無いと仮定していた。ここでは、これらを緩和することで、より現実的な警備状況を考慮することができることを説明し、それを3節での定式化に反映させる。すなわち、警備ネットワークが無向グラフで、侵入経路が閉路をもつ場合に拡張した定式化をここでは提案する。

侵入者が施設に侵入した経路を逆にたどって出ようとする場合等、無向グラフ上で侵入経路が閉路をもつケースでは次の事態に対する対処が必要となる。

- (1) 事前にノード $i$ やアーク $e$ への警備員配備

$y_i^s$ 、 $y_e^s$ は、侵入者がそこを最初に通過した時点での阻止資源として役立つが、2回目以降での通過では役立たない。

- (2) (1)項の考慮の下、アーク $(i, j)$ への配備量 $y_{(i,j)}^s$ と逆向きアークへの配備量 $y_{(j,i)}^s$ は同じ値であり( $y_{(i,j)}^s = y_{(j,i)}^s$ )、侵入者の $(i, j)$ 方向への通過でも、逆向き方向への通過でも同じ阻止効果をもつ。ただし、警備人数 $B_0^s$ にカウントするのは一方のみである。

- (3) 侵入者の同じノード、アークの通過であっても通過回数によって通行時間が異なるから、待機場所からそこへの派遣計画 $\{z_i^{hs}(r, i)\}$ 、 $\{z_i^{hs}(r, e)\}$ では、同じ場所への派遣を何度でも計画できる。ただし、一度派遣した要員は次の派遣では使用できない。

(2)項に関しては、そのままを制約条件とすればよい。その他の項目への対処として、記号、定式化そのものの修正が必要である。

- (i) タイプ $h$ 侵入者のパス $l$ が同じノード、同じアークを通る可能性があるため、 $l$ 中のノード数を $n_l^h$ として、ノードを通過順に番号 $k = 1, \dots, n_l^h$ を付け、通過アークにも番号 $k = 1, \dots, n_l^h - 1$ を付ける。パス $l \in \Omega_h$ の $k$ 番目ノードを $q_l^h(k)$ で、 $k$ 番目アークを $a_l^h(k)$ で表す。それに対応して、 $t_{hl}^A$ を再定義する。

- $t_{hl}^{AN}(k)$ : タイプ $h$ 侵入者のパス $l$ 上に設置された最初の防犯カメラ位置から $k$ 番目ノードまでの移動時間,  $k = 1, \dots, n_l^h$
- $t_{hl}^{AA}(k)$ : タイプ $h$ 侵入者のパス $l$ 上に設置された最初の防犯カメラ位置から $k$ 番目アークまでの移動時間,

$$k = 1, \dots, n_l^h - 1$$

また、待機所からの派遣計画  $z_l^{hs}$  を次に  
より再定義する。

- $z_{iN}^{hs}(r, k)$ : 待機所  $r$  からパス  $l$  上の  $k$  番  
目ノードへの派遣人数
- $z_{lA}^{hs}(r, k)$ : 待機所  $r$  からパス  $l$  上の  $k$  番  
目アークへの派遣人数

(ii) ノード  $i$ 、アーク  $e$  への直接配備員は、パ  
ス  $l$  の侵入者が最初に当該ノード、アーク  
の  $i$ 、 $e$  を通過する際にのみ損耗を与え、2  
度目以降の通過では対抗勢力とはならない  
から、それを区別するため、次のパラ  
メータを用いる。

- $I_l^N(k) \in \{0, 1\}$ : パス  $l$  上の  $k$  番目ノ  
ード通過が1度目であれば1、そうでな  
ければ0
- $I_l^A(k) \in \{0, 1\}$ : パス  $l$  上の  $k$  番目ア  
ーク通過が1度目であれば1、そうでな  
ければ0

これに伴い、侵入者残存量計算の基本  
式である (6) 式の  $D_{hsi}$  を次式に代える。  
 $D_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s))$  は、タイプ  $h$  の侵入者  
がパス  $l$  をとり、警備体制  $s$  が配備計画  
 $\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^{hs}$  をとることによるパス  $l$  上の  $k$  番目  
ノードでの侵入者の正負を問わない残存  
数である。

$$\begin{aligned} & D_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)) \\ \equiv & R_0^h - \sum_{k'=1}^k \gamma_{q_l^h(k')}^{hs} \left( I_l^N(k') y_{q_l^h(k')}^s \right. \\ & \left. + \sum_{r \in W | t_{hl}^{AN}(k') \geq t_s^D(r, q_l^h(k'))} z_{iN}^{hs}(r, q_l^h(k')) \right) \\ & - \sum_{k'=1}^{k-1} \gamma_{a_l^h(k')}^{hs} \left( I_l^A(k') y_{a_l^h(k')}^s \right) \end{aligned}$$

$$+ \sum_{r \in W | t_{hl}^{AA}(k') \geq t_s^D(r, a_l^h(k'))} z_{lA}^{hs}(r, a_l^h(k')) \Big)$$

パス  $l$  の  $k$  番目ノードでのタイプ  $h$  侵入者による  
被害量と利益は次式となる。

$$\begin{aligned} & N_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)) \\ = & \max \left\{ \frac{d_{q_l^h(k)}^h}{d_{q_l^h(k)}^h} D_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)), \right. \\ & \left. \frac{d_{q_l^h(k)}^h}{d_{q_l^h(k)}^h} D_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)) \right\} \\ & R_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)) \\ = & \max \left\{ \frac{p_{q_l^h(k)}^h}{p_{q_l^h(k)}^h} D_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)), \right. \\ & \left. p_{q_l^h(k)}^h D_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)) \right\} \quad (IT_h = 1 \text{ なら}) \\ = & \min \left\{ \frac{p_{q_l^h(k)}^h}{p_{q_l^h(k)}^h} D_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)), \right. \\ & \left. p_{q_l^h(k)}^h D_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)) \right\} \quad (IT_h = 2 \text{ なら}) \end{aligned}$$

タイプ  $h$  侵入者のパス  $l$  と警備体制  $s$  の警備計  
画  $(\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)$  による被害量及び侵入者利得は次式  
で表される。

$$\begin{aligned} N_{hs}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)) &= \sum_{k=1}^{n_l^h} N_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)) \\ R_{hs}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)) &= \sum_{k=1}^{n_l^h} R_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s)) \end{aligned}$$

これ以降の警備側の混合戦略  $\{g(s)\}$  や侵入  
者側混合戦略  $\{\pi_h(l)\}$  を考慮した利得に関して  
は、これまでと同様に扱えばよい。

$D_{hk}(l, (g, \mathbf{y}, \mathbf{z})) = \sum_s g(s) D_{hsk}(l, (\mathbf{y}^s, \mathbf{z}^s))$   
の式は、

$$\begin{aligned} x_i^s &\equiv g(s) y_i^s, \quad x_e^s \equiv g(s) y_e^s, \quad x_r^s \equiv g(s) y_r^s, \\ v_{iN}^{hs}(r, k) &\equiv g(s) z_{iN}^{hs}(r, k), \\ v_{lA}^{hs}(r, k) &\equiv g(s) z_{lA}^{hs}(r, k) \end{aligned}$$

で定義された新しい変数  $\mathbf{x}, \mathbf{v}$  を使えば、次式  
で再定義できる。



$$\begin{aligned}
 & D_{hk}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \\
 = & R_0^h - \sum_{s \in \mathbf{S}} \sum_{k'=1}^k \gamma_{q_l^h(k')}^{hs} \left( I_l^N(k') x_{q_l^h(k')}^s \right. \\
 & \left. + \sum_{r \in \mathbf{W} | t_{hl}^{AN}(k') \geq t_s^D(r, q_l^h(k'))} v_{lN}^{hs}(r, k') \right) \\
 & - \sum_{s \in \mathbf{S}} \sum_{k'=1}^{k-1} \gamma_{a_l^h(k')}^{hs} \left( I_l^A(k') x_{a_l^h(k')}^s \right. \\
 & \left. + \sum_{r \in \mathbf{W} | t_{hl}^{AA}(k') \geq t_s^D(r, a_l^h(k'))} v_{lA}^{hs}(r, k') \right)
 \end{aligned}$$

前節での修正 (21)、(22)、(23) 式及び本節での修正を考慮すれば、無向グラフ上で閉路の侵入経路が存在する場合の最適警備計画は、定式化( $P_D$ )を次のように修正した問題を解けば求められる。

$$\begin{aligned}
 & (P_D^M) \\
 \min_{g, \mathbf{x}, \mathbf{v}, \pi, \eta, \mathbf{a}, \zeta, \xi} & \sum_{h \in \mathbf{H}} f(h) \sum_{l \in \Omega_h} \pi_h(l) \sum_{k=1}^{n_l^h} \eta_{lk}^h
 \end{aligned}$$

制約条件：

$$\begin{aligned}
 d_{q_l^h(k)}^h D_{hk}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) & \leq \eta_{lk}^h, \\
 k = 1, \dots, n_l^h, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, & \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d_{q_l^h(k)}^h}{d_{a_l^h(k)}^h} D_{hk}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) & \leq \eta_{lk}^h, \\
 k = 1, \dots, n_l^h, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, & \quad (25)
 \end{aligned}$$

$$\pi_h(l) \in \{0, 1\}, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H},$$

$$\sum_{l \in \Omega_h} \pi_h(l) = 1, h \in \mathbf{H},$$

$$\begin{aligned}
 0 \leq a_h - \sum_{k=1}^{n_l^h} \zeta_{lk}^h & \leq (1 - \pi_h(l))M, \\
 l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, &
 \end{aligned}$$

$IT_h = 1$ ならば、

$$\begin{aligned}
 0 \leq \zeta_{lk}^h - p_{q_l^h(k)}^h D_{hk}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \\
 \leq (1 - \xi_{lk}^h(1))M, \\
 k = 1, \dots, n_l^h, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, & \quad (26)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0 \leq \zeta_{lk}^h - p_{q_l^h(k)}^h D_{hk}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \\
 \leq (1 - \xi_{lk}^h(2))M, \\
 k = 1, \dots, n_l^h, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, & \quad (27)
 \end{aligned}$$

$IT_h = 2$ ならば、

$$\begin{aligned}
 0 \leq p_{q_l^h(k)}^h D_{hk}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) - \zeta_{lk}^h \\
 \leq (1 - \xi_{lk}^h(1))M, \\
 k = 1, \dots, n_l^h, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, & \quad (28)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0 \leq p_{q_l^h(k)}^h D_{hk}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) - \zeta_{lk}^h \\
 \leq (1 - \xi_{lk}^h(2))M, \\
 k = 1, \dots, n_l^h, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, & \quad (29)
 \end{aligned}$$

$$\xi_{lk}^h(1), \xi_{lk}^h(2) \in \{0, 1\},$$

$$k = 1, \dots, n_l^h, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H},$$

$$\xi_{lk}^h(1) + \xi_{lk}^h(2) = 1,$$

$$k = 1, \dots, n_l^h, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, \quad (30)$$

$$\begin{aligned}
 \xi_{lk}^h(1) \leq \xi_{lk'}^h(1), k' \leq k, k = 1, \dots, n_l^h, \\
 l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, & \quad (31)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \xi_{lk}^h(2) \leq \xi_{lk'}^h(2), k' > k, k = 1, \dots, n_l^h, \\
 l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}, & \quad (32)
 \end{aligned}$$

条件式(18)、(19)、(20)に同じ、

$$\begin{aligned}
 \sum_{k=1}^{n_l^h} v_{lN}^{hs}(r, k) + \sum_{k=1}^{n_l^h-1} v_{lA}^{hs}(r, k) = x_r^s, \\
 r \in \mathbf{W}, s \in \mathbf{S}, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_i^s, x_e^s, x_r^s \geq 0, i \in \mathbf{N}, e \in \mathbf{A}, r \in \mathbf{W}, \\
 s \in \mathbf{S}, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_{lN}^{hs}(r, k) \geq 0, r \in \mathbf{W}, k = 1, \dots, n_l^h, \\
 s \in \mathbf{S}, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_{lA}^{hs}(r, k') \geq 0, r \in \mathbf{W}, k' = 1, \dots, n_l^h - 1, \\
 s \in \mathbf{S}, l \in \Omega_h, h \in \mathbf{H}.
 \end{aligned}$$

式 (24)、(25) の不等式と目的関数に関する最小化の結果、この問題が解かれたときには、変数  $\eta_{lk}^h$  は (21) 式を与えることになる。また、(26)、

(27) 及び (30) 式から、 $p_{q^h(k)}^h D_{hk}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \leq \zeta_{lk}^h$ ,  $\underline{p}_{q^h(k)}^h D_{hk}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) \leq \zeta_{lk}^h$  が成り立ち、かつ  $\xi_{lk}^h(1) = 1$  あるいは  $\xi_{lk}^h(2) = 1$  の場合に限って、それぞれの等式  $p_{q^h(k)}^h D_{hk}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) = \zeta_{lk}^h$  あるいは  $\underline{p}_{q^h(k)}^h D_{hk}(l, (\mathbf{x}, \mathbf{v})) = \zeta_{lk}^h$  となる。つまり、 $\zeta_{lk}^h$  は (22) 式となる。同様に、(28)、(29) 及び (30) の条件式により、 $\zeta_{lk}^h$  は (23) 式で評価される。

条件 (31) は以下の知見を表す条件である。すなわち、 $\xi_{lk}^h(1) = 1$  となることで  $k$  番目ノードでの侵入者残存量が正であれば、パス  $l$  上をこのノード以前に通過している  $k'$  番目ノードでは必ず侵入者は残存しており、 $\xi_{lk'}^h(1) = 1$  であるはずである。同様に、条件式 (32) は以下を意味する。 $\xi_{lk}^h(2) = 1$  となることで  $k$  番目ノードでの侵入者残存量が負であれば、それ以降の  $k'$  番目ノードでも残存量は負となり、 $\xi_{lk'}^h(2) = 1$  である。この条件により、この2次混合整数計画問題を解く際の分枝限定法が効率良く機能する。

## 6. 数値例

ここでは、日本の沖縄県にある石垣空港を警備施設とした警備ゲームを取り上げる。

### 6.1 パラメータの設定

施設の空間と侵入者の侵入経路 石垣空港ターミナル [8] の1, 2階部分を、15個のノードと16本の無向アークから成る図1のような警備ネットワーク  $G(\mathbf{N}, \mathbf{A})$  で表す。ノード番号をノードの中に、アーク番号をアークの横に記している。ただし、アーク上で侵入者が一方向のみ移動するのであれば、それが分かるように矢印を付けてある。侵入者のタイプは3種類  $\mathbf{H} = \{1, 2, 3\}$  あり、タイプ  $h = 1$  の密輸者は、到着航空機の降客ゲート (ノード5-8) から手荷物受取所及び空港検査所 (ノード1) を抜けて空港ターミナルビルを出た時点で被害を出す。タイプ  $h = 2$  のテロ犯は、ターミナル1階の出入口 (ノード13-15) からターミナル内に侵入し、2階にある搭乗待合室 (ノード4) で籠城する目

的をもつが、その移動途中でも多くの被害を出すことができる。タイプ  $h = 3$  の置引き犯は施設内を徘徊しながら置き引きを行い、施設を出た時点で被害が確定する。表1のノード列で示したように、密輸者の侵入経路として4本の、テロ犯は9本の、置引き犯は5本の選択肢を考える。侵入者のタイプと被害率及び利益率 侵入者タイプの発生確率は  $f(1) = 0.3$ ,  $f(2) = 0.1$ ,  $f(3) = 0.6$ 、侵入者数は  $R_0^1 = 5$ ,  $R_0^2 = 10$ ,  $R_0^3 = 15$  とする。表2は、被害率  $d_i^h$  及び  $\underline{d}_i^h$  を示している。密輸者  $h = 1$  及び置引き犯  $h = 3$  は、ターミナル出口ノード13-15を出た時点で被害を発生させる。テロ犯  $h = 2$  は目的ノード4へ行く途中でも被害を及ぼし、特に旅客の多い到着ロビー (ノード10-12) で被害率  $d = 15$  を、出発ロビー (ノード2, 3, 9) や搭乗待合室では  $d = 10$  の被害率をもつ。

侵入者の残存量が負と想定される場合の被害率  $\underline{d}$  は、密輸者に関してはターミナル出口のみ  $\underline{d} = 0.3$  とし、テロ犯に関しては到着ロビーで  $\underline{d} = 3$ 、出発ロビー (ノード9) や搭乗待合室で  $\underline{d} = 1.5$  と設定した。

利益率  $p_i^h$  に関する設定は次のとおりである。密輸者  $h = 1$  及び置引き犯  $h = 3$  は拿捕を嫌うと想定し、 $p_i^h = \underline{d}_i^h$ ,  $\underline{p}_i^h = d_i^h$  と設定して  $p_i^h < \underline{p}_i^h$  とした。テロ犯  $h = 2$  に関しては負値無関心なタイプを考え、 $p_i^h = d_i^h$ ,  $\underline{p}_i^h = \underline{d}_i^h$  と設定することで  $p_i^h > \underline{p}_i^h$  とした。

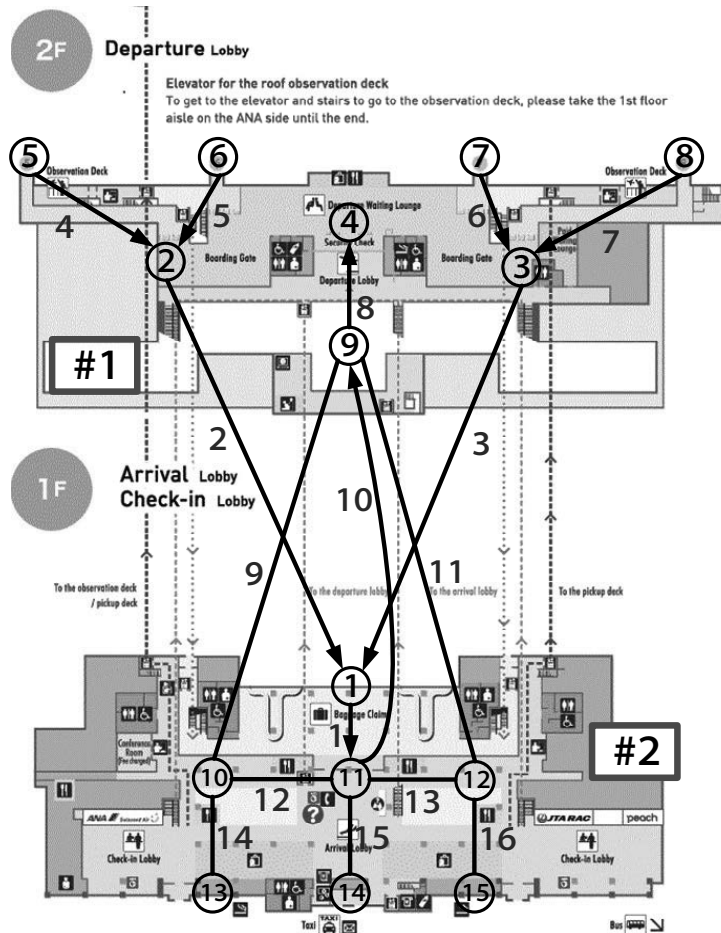
警備体制の強さと移動時間 警備側は  $\mathbf{S} = \{1, 2\}$  の2種類の警備体制をもつ。 $s = 1$  は主として軽微な事案に対処する通常警備であり、 $s = 2$  は阻止能力の高いテロ対処警備である。 $s = 2$  の警備体制の使用頻度は  $U(2) = 0.3$  を上限とするが、通常警備体制の使用頻度には制限はなく  $U(1) = 1$  である。

侵入者に対する警備体制の強さを表す戦力交換比  $\gamma_i^{hs}$  を表3に記した。アークの戦力交換比  $\gamma_e^{hs}$  はそこに近いノードの  $\gamma_i^{hs}$  とほぼ同じ値を設定している。数値計算結果では侵入経路

の交差するノードでの警備のみが重要視され、アークへの警備配備も派遣も計画されないため、アークでの戦力交換比の記述は省略する。 $s = 1$ の通常警備体制は密輸者と置き引き犯に対してはほとんどの阻止効果があるが、テロ犯に対してはほとんど無力であり、 $\gamma = 0.1 \sim 0.3$ 程度である。テロ対策班  $s = 2$ のテロ犯  $h = 2$ に対する阻止効率は、出発ロビーから搭乗待合室への密閉区域では  $\gamma = 0.8$ であるが、到着ロビーのようなオープンな区画では  $\gamma = 0.4$ 程度である。一般に、警備体制  $s = 2$ は  $s = 1$ に比べ、密輸者と置き引き犯に対しては2倍-3倍程度の戦力交換比をもち、テロ犯  $h = 2$ に対して

は、特殊装備の関係で、2倍-5倍程度の抑止力をもつ。

2カ所ある警備員待機所  $W = \{1, 2\}$ は、 $r = 1$ がターミナル2階の左翼に、 $r = 2$ が1階の右翼にあり、その概略の位置は図1の#1及び#2にある。待機場所から各ノードへの移動時間である  $t_s^D(r, j)$ はほぼ平面図にみる距離に比例する時間(秒)で設定したが、煩雑となるその記述は省略する。テロ対策警備員  $s = 2$ は  $s = 1$ 警備員のおよそ2/3程度の時間で移動できるとした。



\*) Copyright is reserved to Ishigaki Air Terminal Co., Ltd.

図1 石垣空港の警備ネットワーク [8]

表 1 侵入者の侵入パス

h	パス	ノード列	h	パス	ノード列	h	パス	ノード列
h=1	1	5,2,1,11,14	h=2	1	13,10,9,4	h=3	1	10,9,12,11,10,13
	2	6,2,1,11,14		2	13,10,11,9,4		2	12,9,10,11,12,15
	3	7,3,1,11,14		3	13,10,11,12,9,4		3	11,9,11,14
	4	8,3,1,11,14		4	14,11,9,4		4	11,9,10,11,14
		5		14,11,10,9,4	5		11,9,12,11,14	
		6		14,11,12,9,4				
		7		15,12,9,4				
		8		15,12,11,9,4				
		9		15,12,11,10,9,4				

表 2 被害率 ( $d_i^h, \underline{d}_i^h$ )

h \ i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
$d_i^h$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2
	2	15	10	10	10	0	0	0	0	10	15	15	15	15	15	15
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5
$\underline{d}_i^h$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.3	0.3
	2	3	2	2	1.5	0	0	0	0	1.5	3	3	3	3	3	3
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1

表 3 ノードでの戦力交換比 ( $\gamma_i^{hs}$ )

(h,s) \ i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
(1,1)	0.8	0.5	0.5	1	0	0	0	0	1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
(1,2)	1.2	1	1	2	0	0	0	0	2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
(2,1)	0.2	0.2	0.2	0.3	0	0	0	0	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
(2,2)	0.5	0.5	0.5	0.8	0	0	0	0	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
(3,1)	0.8	0.5	0.5	1	0	0	0	0	1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
(3,2)	1.2	1	1	2	0	0	0	0	2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

6.2 最適警備計画に対する侵入情報量の影響

ここでは、侵入情報量の多さが警備計画に及ぼす影響を分析するため、防犯カメラの設置ノードを変えた2つのケースを考える。警備側は、設置ノードを通過する侵入者情報を取得できる。もちろんこの設定は、設置ノード付近に警備関係者の注意が集中していることを暗喩しており、実際に防犯カメラの設置の有無の事実を意味するものではない。ケース1ではノード1, 11に防犯カメラを設置し、ケース2ではそれにノード10と12への設置も加わえ、ター

ミナル正面出入口をすべて見張ることが可能とする。警備員数は  $B_0^1 = 20$ ,  $B_0^2 = 60$ である。

いずれの場合でもテロ対策班  $s = 2$ の配備確率は上限一杯の  $g(s = 2) = 0.3$ となった。表4は、両ケースにおける2つの警備班員のノード及び待機所への配備人数計画  $y$ 、式(12)で与えられる全期待被害量とその構成要素であるタイプ別の期待被害量  $\sum_{l \in \Omega_h} \pi_h(l) \sum_{i \in V_l} d_i^h D_{hi}(l, (x, v))$ を示したものである。

表 4 最適警備計画と予想される被害量

Case	配備人数										期待被害量			
	s=1				s=2						全体	h=1	h=2	h=3
	i=9	11	r=1	r=2	i=10	11	12	13	15	r=2				
1	13	7	-	-	14	25	14	3	3	-	36.8	-0.3	368.6	0
2	-	-	10	10	-	19	-	-	-	41	32.5	-7.3	363.0	-2.7

表 4 からは次のことが読み取れる。

- (1) テロ犯  $h = 2$  以外の侵入者による期待被害量は負値かゼロであり、現在の警備により完全に封じ込めが可能である。それに対し、テロ犯による被害予測量は突出して高く、予想される全被害量はテロ犯によるものである。したがって、テロ対策班  $s = 2$  の使用頻度も上限の  $g(s = 2) = 0.3$  である。
- (2) ケース 1 に比べ侵入情報を多く取得できるケース 2 の被害量は意外に減少せず、減少率は  $(36.8 - 32.5)/36.8 = 11\%$  程度である。
- (3) テロ犯の侵入経路の一部が監視できないケース 1 では、到着ロビーでのテロ犯による被害を抑えるため、テロ犯侵入経路が始まる到着ロビーのノード 10、11、12 に多くのテロ対策班  $s = 2$  を配備した水際作戦をとる。特に到着ロビーの要の位置にあるノード 11 への配備量は最も多い。これらの配備はテロ対策班  $s = 2$  が担当し、通常警備  $s = 1$  の一部はテロ対策班とともにノード 9 を守るが、主として密輸者  $h = 1$  に対処するために要の場所であるノード 11 への配備が重要となる。一方、どの侵入経路も監視できるケース 2 では、事前の警備配備はノード 11 の  $y_{11}^2 = 19$  のみであり、残りは待機所

$r = 1, 2$  に待機させる待受け作戦をとることで、数に制限のある警備員の効果的な活用が志向されている。どの侵入経路に対しても侵入情報を得て待機要員を派遣して侵入者の中途進行阻止が可能であるものの、テロ犯が移動途中で引き起こす損害が大きな脅威となっている。

以上の分析は、侵入情報の多い少ないが及ぼす影響に関する簡単な感度分析にすぎない。このモデルが含む他のパラメータによる感度分析を用いれば、様々な角度からの分析が可能である。例えば、全体の警備コストが限られている場合の効果的な警備員数  $B_0^*$  の組合せ、予測被害量を許容内に納めるための警備コストの範囲、効果的な情報収集の場所、警備側にとってリスクの高い侵入経路、警備側の人的損耗、事案が生じた際の警備員派遣に適した待機場所の位置、などなどである。

## 7. まとめ

この報告では、警備空間をネットワークで表現し、その上で侵入者と警備側が戦う警備ゲームに関し、過去の提案手法の実用性を高める工夫を解説した。警備ネットワークを侵入経路に閉路を含む可能性のある無向グラフで表現することにより、これまで取り扱えなかった警備状況も分析可能となる。この提案手法を実際の空港警備に適用することで、最適警備計画に関する分析をさらに豊かにできることも示した。

### 謝辞

この研究の一部は、2021年度筑波学院大学共同研究資金の補助を受けて実施されています。ここに感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] R. Hohzaki and G. Sakai, Securitygames taking account of invasion routtn, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 60, pp.156–177, 2017.
- [2] 宝崎隆祐, 非ゼロ和の施設警備ゲーム, 京都大学数理解析研究所講究録, 2126, pp.35–43, 2019.
- [3] 宝崎隆祐, 非ゼロ和警備ゲームの現実適用性の拡張, 京都大学数理解析研究所講究録, 2220, pp.167–174, 2022.
- [4] 宝崎隆祐, 警備ゲームの大規模ネットワークへの現実的適用, 筑波学院大学紀要, 18, pp.96–106, 2023.
- [5] 宝崎隆祐, 社会の安全とネットワーク阻止モデル, オペレーションズ・リサーチ, 60, pp.266–273, 2015.
- [6] J. Herrmann (ed.), *Handbook of Operations Research for Homeland Security*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [7] P. Paruchuri, J.P. Pearce, J. Marecki, M. Tambe, F. Ordonez, and S. Kaus, Playing games for security: An efficient exact algorithm for solving Bayesian Stackelberg games, *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, 2, pp.895–902, 2008.
- [8] 石垣空港ホームページ, <http://www.ishigaki-airport.co.jp> (2015.10 閲覧) .