

令和 2 年 9 月 9 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01285

研究課題名(和文) 警備問題に対する数理手法開発と警備計画立案システムの構築

研究課題名(英文) Development of mathematical solvers and a security planning system for security problems

研究代表者

宝崎 隆祐 (Hohzaki, Ryusuke)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・電気情報学群
・教授

研究者番号：20546048

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：警備問題解決のための数理モデルと解法ツールを開発した。具体的には、実際の施設警備に応用できるように、施設空間を一般的なネットワークで表現し、警備費用、警備人員といった限られた警備資源量の制約の下で、複数警備体制及びその帰属警備員の配置、犯罪人や密輸者、テロリストといった複数種の侵入者とその意図、さらには警備の一部情報が侵入者に漏れる等の侵入者の情報優位の状況や防犯カメラ等の情報利用に関する様々な考慮がなされた警備ゲームモデルを提案し、そのゲームの解として、警備員配備と緊急時における警備員派遣計画を提示する警備計画立案システムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

警備問題に対するこの数理的手法研究では、侵入者と警備側との対決問題としての警備ゲームと呼ばれる研究群と、マルウェアに代表される情報ネットワークでの悪意のあるエンティティの侵入阻止のためのネットワーク阻止モデルと呼ばれる研究群を組み合わせ、現実の施設警備において有限な警備資源の効果的使用を図る警備計画立案システムを提案した点に学術的意義がある。この科研費研究には様々な適用例が想像されるが、来る東京オリンピック・パラリンピックや大阪万国博覧会といった大勢の海外参加者が予想される大イベントを開催する日本においては、これらイベントの成功に役立つ計画立案ツールを提供できる。

研究成果の概要(英文)：We developed mathematical models and their solution methods to solve security problems. Specifically, we represent a facility space as a general network so that it can be applied to actual facilities in a general way, and model the security problem as an optimal problem under the constraints of limited security resources such as security costs and security personnel. In the model, we involve the configuration of multiple security teams, the characteristics of intruders such as criminals, smugglers and terrorists, and their intentions, as well as the intruder's superiority to the security side on security information acquisition. We also consider the security side's clever usage of some security devices like security cameras. For the security problem, we proposed a security planning system to give advices on an optimal deployment of security staffs and an optimal dispatch of them in an emergency.

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

キーワード：探索理論 ゲーム理論 警備ゲーム ネットワーク阻止モデル

1. 研究開始当初の背景

2001年9月の米国同時多発テロ以来、他の先進国でもテロが発生し、各国はテロ対策強化を打ち出してきている。これにより、テロ事案発生件数は減少したものの、死者数は2013年以降急激に増加して3万人に近い現状から、テロ問題は依然として大きな世界的課題である。警備問題に限った場合、警備情報取得に関して優位性をもつテロ犯への臨機応変な計画の提示とテロ犯の意図に関する正確な推測を可能とする科学的な対応策として、ゲーム理論を応用した研究が海外では盛んになっている。特に、2020年の東京オリンピックを控えていた日本では、このような一大イベントにおける安全対策を目的とした警備問題への科学的取組みが学術界でも急務になっていた。この科研費研究は、以上の問題の解決策を提示するために開始された。

2. 研究の目的

2020年の東京オリンピック・パラリンピックや2025年開催予定の大阪万国博覧会などの大イベントを成功裏に終わらせるためには、テロ対策を含めた警備問題が極めて重要である。特に、強硬的な手段や目立った警備を嫌う日本社会の風潮にあっては、予想される事案に対し効果的な警備資源の有効活用を事前に提示する警備計画立案システムの構築が必要である。この研究の目的は、このシステム構築のため、警備計画立案の理論とアルゴリズムの開発、及びその現実的な有効性を検証するための現実的イベントへの適用研究や事例研究を行うことである。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するため、以下の5つの具体的な研究項目に対し、主としてオペレーションズ・リサーチ(OR)やゲーム理論によるアプローチ法を用いた。

- (1) 侵入者と警備側の対峙する警備問題の基本的なモデリングと最適な警備計画を導出する解法の提案のため、ゲーム理論を用いた。
- (2) ネットワーク上で対峙する2者間の損耗に焦点を当てたネットワーク損耗モデルを扱うため、ネットワーク理論及び損耗モデルを用いた。
- (3) 侵入者その他の対象物の効果的発見方法を提示するため、探索理論を用いた。
- (4) その障害が一般社会に及ぼす影響が大である鉄道、電力網等の公共施設のリスク分析のため、実データによる統計的手法を用いた。
- (5) 警備を含む緊急事態対処のため、救急車両や無人航空機の効率的活用に関するOR的数理手法を用いた。

4. 研究成果

前項で述べた5つの研究項目の中で、(1)項が本研究の主要テーマである。他の項目はその周辺の関連テーマであり、その進捗によっては警備問題の今後の新展開を促す要素ともなる。したがって、以下では、(1)項に関する最終研究成果のみを記述する。

以下の警備モデルは次の性質をもつ。(1) ネットワークで表現された警備空間(施設)へ侵入する侵入者と警備側が対峙する非ゼロ和のシュタッケルベルグ・ゲームである。(2) 密輸者やテロリストなど、侵入者には複数のタイプが存在し、自らの利益に関するタイプ別の差異を考慮する。(3) 通常警備班やテロ対策班など、警備側は複数の警備体制をもつ。(4) 侵入者は一部の警備情報を収集して警備体制の弱点を突くことができる。(5) 侵入者側、警備側の警備空間での移動時間が考慮されている。(6) 警備側は防犯カメラによる侵入情報取得後、警備員を派遣できる。上記の特徴をもつ警備ゲームのモデルの詳細は以下のとおりである。

- A1 警備空間をノード集合 N とアーク集合 A から成るネットワーク $G(N, A)$ とし、プレイヤーは侵入者及び警備側である。
- A2 侵入者のタイプ集合を H とする。タイプ $h \in H$ の侵入者は、その侵入ノードから初期人数 R_0^h で侵入し、目的ノードに向かう。警備側との衝突に生き残ったタイプ h 侵入者は、途中ノード i で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 侵入者の純粋戦略は、その侵入経路全体 Ω_h から1本のパスを選択することである。
- A3 警備側は幾つかの警備体制の集合 S をもつ。警備体制 $s \in S$ の警備人数は B_0^s で、これをアーク、ノード及び待機場所に配備し、侵入者の阻止を図る。待機場所の集合を $W \subseteq N$ で表す。予算制約から、警備体制 $s \in S$ の使用頻度 $g(s)$ に上限 $U(s)$ がある。ノード、アークへ事前に配備した人員は再配置できないが、待機人員は、防犯カメラからの侵入者情報を得てノード、アークへ派遣可能である。過去の事案発生データによって、警備側は侵入者タイプ h の発生確率 $\{f(h), h \in H\}$ を知っている。

警備側の戦略は、体制 s の配備頻度 $g(s)$ と、人員数 B_0^s のノード、アーク、待機場所への配備計画及び待機場所からの派遣計画の決定である。

A4 侵入者の移動時間と警備員派遣時間として次が計算できる：タイプ h の侵入者がパス l をとった場合、最初に通過する防犯カメラの設置ノードからその後のノード j までの移動時間 $\hat{t}_{hl}^A(j)$ 及びアーク e までの移動時間 $\hat{t}_{hl}^A(e)$ 、体制 s の警備員の待機ノード $r \in \mathbf{W}$ からノード j あるいはアーク e までの移動時間 $t_s^D(r, j)$ 及び $t_s^D(r, e)$ 。

A5 ノード i またはアーク e で、タイプ h の侵入者 x 人と体制 s の警備員 y 人の衝突により、侵入者の残存数は次の線形モデルに従う。

$$f_i^{hs}(x, y) = \max\{0, x - \gamma_i^{hs} y\} \quad (1)$$

$$f_e^{hs}(x, y) = \max\{0, x - \gamma_e^{hs} y\} \quad (2)$$

パラメータ γ_i^{hs} 、 γ_e^{hs} は、ノード i またはアーク e での侵入者に対する警備側の強さを表す。

A6 侵入者は、警備体制 $s \in \mathbf{S}$ の使用頻度 $g(s)$ とその配備計画 \mathbf{y}^s を知る。ただし、侵入実行時の警備体制については確信を持ってない。

守備側は、カメラ設置ノードを通過した侵入者のタイプ h と侵入ルート情報をリアルタイムに入手でき、それに基づき待機要員を現場に派遣できる。

A7 警備側は施設被害を小さくしようと、侵入者は自らの利得を大きくしようとする。

前提 A2 における侵入者による時系列的な被害や利益の前提により、例えば空港における密輸者が空港出口を出て初めて利益を得る状況や、目的場所までの移動途中で様々な人的・物的被害を与えるテロの状況を表現できる。また、利益率 $\{p_i^h\}$ により侵入者の性格を表現できる。例えば、通過場所における自らの期待残存数の正・負によりこのパラメータを変化させ、正の期待残存数に対する利益率 p_i^h と負値の場合の利益率 \underline{p}_i^h とが $\underline{p}_i^h < p_i^h$ であれば、侵入不成功を示す負の残存量を気にせず、死に物狂いで侵入計画を実行しようとする強い侵入動機をもつ性格、いわば負値無関心な性格を表せる。逆の関係 $\underline{p}_i^h > p_i^h$ であれば、この侵入者は負値嫌いであり、逮捕されること（負の残存量）を嫌う性格であるとできる。また、前提 A6 は侵入者の情報優位とゲームのプレイにおける先手、後手を示している。

この非ゼロ和シュタッケルベルグ・ゲームの定式化や最適戦略導出の解法は詳細には解説しないが、プレイヤーの戦略が何か、また侵入者及び警備側の行動する際の評価尺度を再確認しよう。

各タイプの侵入者の純粋戦略は許容パスの中から1つのパスを選択することであるが、最適戦略は各パスの選択確率で表した混合戦略で表現できる。一方の警備側の戦略は、各警備体制をとる確率（頻度）と各警備体制に属する警備員のノード、アーク及び待機場所への配備人数計画、さらには、防犯カメラからの侵入者情報を得た後の各待機場所からノード及びアークへの派遣人数計画である。この侵入者、警備側の最適戦略により、侵入者のタイプ別の利得が計算でき、また施設被害が推定できる。このようなプレイヤーの戦略立案にあたって考慮される評価基準はゲームの支払と呼ばれる。実際の解法では、このゲームの支払を各プレイヤーが最適化しようとする結果としての最適戦略を求めることになる。上記の警備ゲームの適用例として、解説記事の文献①の適用例を紹介する。

図1は15個のノード、16本のアークと#1、#2の2か所ある待機ノードで表現した石垣空港の1階、2階部分のフロアマップである。タイプ $h=1$ の密輸者 $R_0^1=5$ 人は2階到着ゲートのノード5~8から1階ターミナル出口に向かう4本のルートをとる、タイプ $h=2$ のテロ犯 $R_0^2=10$ 人は、2階の搭乗待合室で籠城しようと、ターミナル入口のノード13, 14, 15からノード4への9本のルートをとる。侵入者タイプの発生比率は $f(1)=0.8$ 、 $f(2)=0.2$ である。密輸者はターミナルを出て初めて被害と利益を発生させるが、テロ犯は移動途中においても比較的大きな被害、利益を生じさせる。侵入者の性格を、密輸者は負値嫌いとし、テロ犯は負値無関心と負値嫌いの両方を考える。侵入者に係わるパラメータ p_i^h 、 \underline{p}_i^h 、 d_i^h 、 \underline{d}_i^h の設定値の説明は省略する。

警備側は通常警備班 $s=1$ とテロ対策班 $s=2$ の2種類の警備体制をもつ。通常警備班は密輸者の取締りには有効であるが、テロ対策には無力に近い。テロ対策班は両タイプの侵入者に抑止力があるものの警備コストが高く、使用頻度に上限 $U(2)=0.3$ をもつ。侵入者に対する各警備班の強さは、各ノード i やアーク e の特性を考慮したパラメータ γ_i^{hs} 、 γ_e^{hs} で表されるが、この設定値の説明も省略する。図1の#1、#2は、2階と1階にある2か所の警備員待機所 $r \in \mathbf{W} = \{1, 2\}$ である。警備員の派遣所要時間 $t_s^D(r, j)$ 、 $t_s^D(r, e)$ や侵入者の移動所要時間 $\hat{t}_{hl}^A(j)$ 、 $\hat{t}_{hl}^A(e)$ は移動距離と速度に準じて適切に設定した。後者の移動所要時間は防犯カメラの設置場所に依存す

るが、ここではノード $C = \{1, 11\}$ に 2 台のカメラが設置された場合 (2CM) と $C = \{1, 11, 10, 12\}$ に 4 台のカメラが設置された場合 (4CM) を考える。

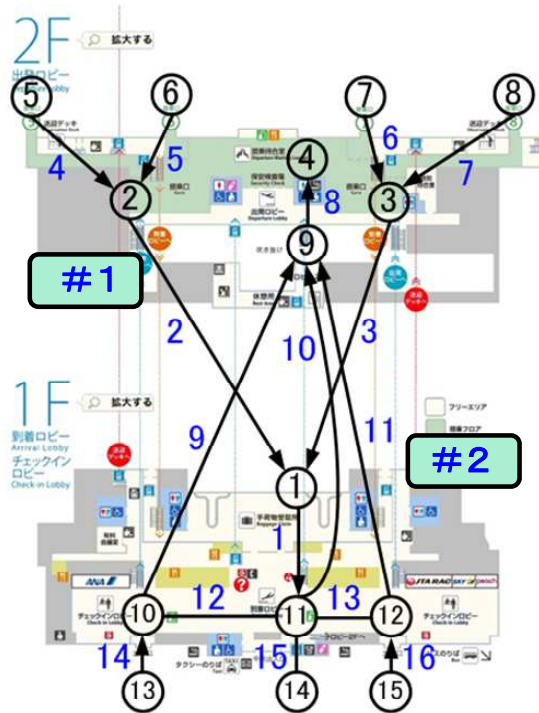


図1 石垣空港ターミナルの警備ネットワーク
*) 図の著作権は石垣空港ターミナル (株) にある

最適警備配備に関する分析 図2には、テロ犯の性格が負値無関心で 2CM の場合、通常警備班 $s = 1$ とテロ対策班 $s = 2$ の警備人数 $B_0^1 = 10$, $B_0^2 = 72$ の最適配備位置と配備数を棒グラフで示しているが、事案発生時の最適派遣計画の提示は煩雑であるので省略する。

このケースにおけるテロ犯の最適行動を施設の被害の観点から解説すれば、次のようになる。負値無関心なテロ犯は、ターミナル入口から入り、利益率及び被害率の大きな到着ロビーでうろつきながら利益をあげるように移動しがちとなる。一方の警備側の最適警備では、テロ犯による被害局限のため、テロ対策班はその上限である $g(2) = 0.3$ の頻度で配備される。配備は阻止効果の高いノードのみに行われる。2 台のカメラしか設置されていないこのケースでは、一部の侵入経路情報は取得できないので、警備側は侵入経路の集まる到着ロビーの重要ノード 10、11、12 での水際作戦（前進配備による早い段階での被害局限）をとる。また、一部の配備をノード 9 に置き、テロ犯に対する最後の阻止線を張る。この場合は密輸者による被害はなく、テロ犯による期待被害量 70 が予想される。

4 台のカメラが設置され、すべての侵入路が監視できるケースの最適警備配備を示したのが図3である。警備員の前進配備は侵入者ルート的重要な交点であるノード 11 のみに対し行われ、残りの警備員は侵入情報を得た後の派遣に期待する待機戦略を採ることで、警備員資源の柔軟な活用が図られる。このケースでは前のケースよりやや軽微な期待被害量 61 が予想される。

パラメータによる感度分析 図4は、警備員数、テロ犯の性格及びカメラ台数を変化させたときの期待被害量を示した図である。横軸に通常警備班の人数 B_0^1 を示している。ただし、テロ対策班員の警備コストは通常警備班の 2 倍掛かると仮定して、全体の期待警備コスト $g(1) * B_0^1 + g(2) * 2 * B_0^2$ が一定値 50 となるように、 B_0^1 , B_0^2 を連動して変化させている。

第1の数値例でみたとおり、テロ犯による被害が大きいため、テロ対策班の人員 B_0^2 が少ないほど (B_0^1 が多いほど) 期待被害量が増加する。図の丸印付き実線と四角印付き実線の差及び丸印付き破線と四角印付き破線の差が、それぞれカメラ台数を 2 台から 4 台に増設した場合の被害の減少効果を示している。このカメラ台数増加による侵入情報取得の効果は、どこでも被害を与えるテロ犯対策に効くため、 B_0^1 の増加（テロ対策班員数の減少）とともに減少する。特に負値無関心なテロ犯のケースを示す上 2 本の曲線では、到着ロビーでうろつきなが

ら被害を与えるこのテロ犯には通常警備員は有効な対処ができないため、カメラ台数増加による被害の減少効果は B_0^1 の増加とともに急速に失われる。同じ理由から、2CMでも4CMでも上2本の曲線における期待被害量は B_0^1 とともに急激に増加する。

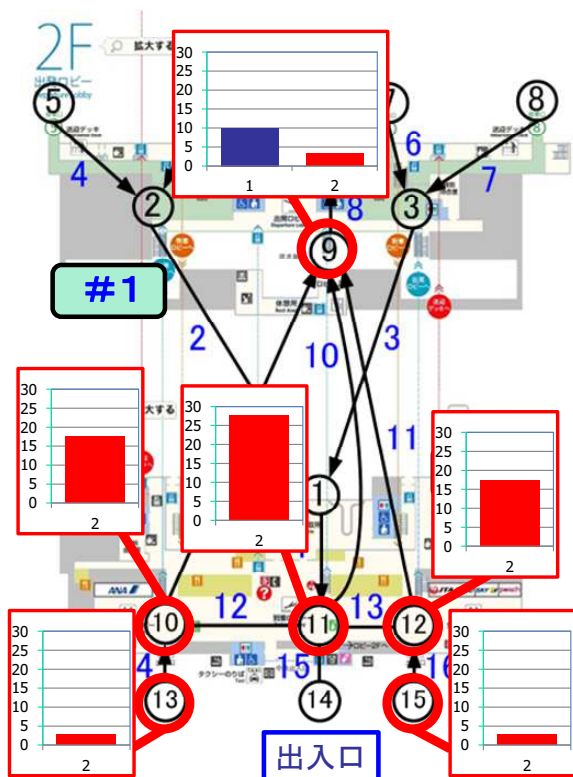


図2 防犯カメラ2台の場合の最適警備員配置

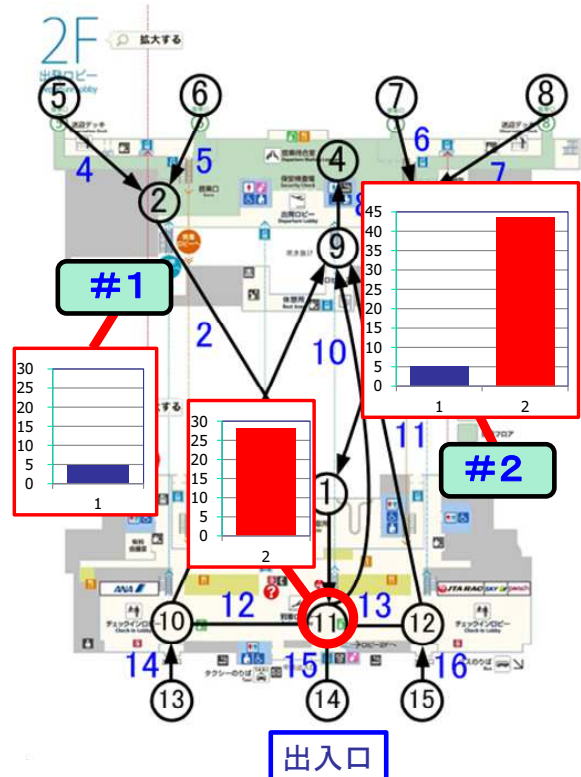


図3 防犯カメラ4台の場合の最適警備員配置

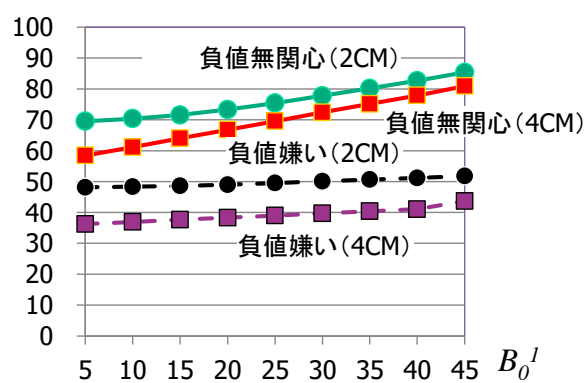


図4 警備員数、テロ犯の性格及びカメラ台数による期待被害量の変化

<引用文献>

① 宝崎隆祐, 警備ゲームの動向, オペレーションズ・リサーチ, Vol.64, No.10, 2019. 614-621.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計31件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Hozumi Morohosi	4. 巻 -
2. 論文標題 Network-Based Multiple UAVs Search Planning for Disaster Relief	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Operations Research Society of China (Online)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40305-019-00283-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 三和雅史, 大山達雄	4. 巻 75
2. 論文標題 列車脱線事故に関するリスクを考慮した軌道保守計画最適化モデルの構築と検証	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3	6. 最初と最後の頁 11-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 宝崎隆祐	4. 巻 63
2. 論文標題 探索理論とその応用 (解説記事)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 システム/制御/情報 (システム制御情報学会誌)	6. 最初と最後の頁 377-382
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 宝崎隆祐	4. 巻 64
2. 論文標題 警備ゲームの動向 (解説記事)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 オペレーションズ・リサーチ (日本OR学会誌)	6. 最初と最後の頁 614-621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 宝崎隆祐	4. 巻 2126
2. 論文標題 非ゼロ和の施設警備ゲーム	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 京都大学数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 35-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Hohzaki and G. Sakai	4. 巻 60
2. 論文標題 Security games taking account of invasion routes and attrition	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. of the Operations Research Society of Japan	6. 最初と最後の頁 155-177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計34件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Ryusuke Hohzaki
2. 発表標題 A dynamic security game considering cameras and invaders' passage time
3. 学会等名 The 29th European Conference on Operational Research (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Morohosi and T. Furuta
2. 発表標題 A robust covering model for ambulance location problem
3. 学会等名 International Symposium on Location Decisions (ISOLDE XIV) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宝崎隆祐
2. 発表標題 巡回経路選択問題と警備員配置問題に関する幾つかの試み
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会「危機管理と防衛のOR」研究部会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三和雅史、大山達雄
2. 発表標題 軌道状態の維持・改善とリスク管理 を考慮した軌道狂い保守計画モデルの構築
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2018年春季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宝崎隆祐
2. 発表標題 警備ゲームに関する最近の話題
3. 学会等名 日本OR学会「不確実状況下における意思決定とその周辺」研究部会及び国際数理科学協会「確率モデルと最適化」分科会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宝崎隆祐
2. 発表標題 搜索資源配分ゲームに関する研究の変遷
3. 学会等名 日本OR学会関西支部シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 宝崎 隆祐, 飯田 耕司	4. 発行年 2019年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 283
3. 書名 搜索理論における確率モデル	

〔産業財産権〕

〔その他〕

最終年度の4 / 四半期においてはコロナ禍にあって、予定した東京オリンピックへの適用研究や事例研究が実施できなかった。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大山 達雄 (Oyama Tatsuo) (30134323)	政策研究大学院大学・政策研究科・名誉教授 (12703)	
研究分担者	諸星 穂積 (Morohosi Hozumi) (10272387)	政策研究大学院大学・政策研究科・教授 (12703)	
研究協力者	宮田 鉄矢 (Miyata Tetuya)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力 者	黒須 敦史 (Kurosu Atusi)		