

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月12日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22510169

研究課題名（和文）

安全対策の計画立案を支援するソリューション・ツールの開発

研究課題名（英文）

Development of solution tools to support the decision-making on safety plans

研究代表者

宝崎 隆祐 (HOZAKI RYUSUKE)

防衛大学校・電気情報学群・教授

研究者番号：20546048

研究成果の概要（和文）：

3年間にわたる研究の結果、安全対策の計画立案に資する次の成果を得た。(1)実データの収集と分析に関するもの：鉄道事故・補修，東日本大震災の捜索救難その他の実データ，(2)モデル構築と解法に関する提案：施設警備問題，捜索問題，救急医療施設の配置問題，(3)インフラネットに関する研究：交通網，鉄道網，電源網，日本の食料政策に関連する貿易網，ネット上での損耗現象の取扱い。このような多種多様な問題発掘と提案した解法の幾つかはコンピュータ上での計画立案ツールとして実現した。また学会発表会，研究会を主催することで，専門家間の問題共有，意見交換に貢献できた。

研究成果の概要（英文）：

Through our activities on safety-plan making for three years, we contributed to the following individual field. (1) Data-gathering and data-analysis on the followings: railway accident and maintenance, the search and rescue operation in the 2011 Tohoku earthquake. (2) Proposition of modeling and solution methodology for the followings: security problem in facilities, search problem, facility allocation problem in emergency medicine. (3) Research on infra-networks such as transportation net, railway net, electric power net and trade net between Japan and foreign countries and analysis on attrition on networks. Through our activities above, we developed some computer-aided planning systems for the problems. We also sponsored a conference for the Operations Research Society of Japan and research meetings to exchange opinion of professionals about the topics above.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、社会システム工学・安全システム

キーワード：オペレーションズ・リサーチ、ゲーム理論、数理計画法、鉄道重大事故

1. 研究開始当初の背景

- (1) 当時阪神・淡路大震災(1995年)や中国の四川大地震(2008年)、米国のハリケーン・カトリーナ被害(2005年)のような

自然災害が頻発し、各国でその対策が喫緊の課題となっていた。一方、代表者達は日本オペレーションズ・リサーチ(O.R.)学会を主体に活動し、その研究部会

等で救難活動の効率化に関する研究や様々な災害関連の実データ収集と分析を実施していた。

- (2) 以上の状況にあって、全般的な安全対策の計画立案に関し、モデルの構築、最適化手法の適用と解決策の提示、得られた解決策のシミュレーションによる有効性の評価といったORの手法を組み込んだ効果的な計画立案システムの構築を実現することを本科研費で計画するに至った。

2. 研究の目的

CO₂排出量削減などの環境対策に関して、ITを駆使した数理工学的なアプローチが解決に対する強力な道具立てを提供している。本研究では、国民生活における防犯対策、安全対策及び災害対策等の各種計画の立案に際し、数理的なソリューション・ツールの提案・開発を行い、その解決に資することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 22年度は、地域防犯対策のためのハザードマップや効果的な巡視ルート作成、建物内の効果的な警備ルートの作成などの計画立案システムを構築する。
- (2) 23、24年度は、①施設配置問題・最適資源配分問題手法を用いた防災輸送計画、防災組織の配置計画立案システムの構築、②ネットワーク理論、探索理論、ゲーム理論、GIS技法を用いた計画立案システムの構築を実施する。

4. 研究成果

「研究成果の概要」の項で述べた多くのテーマに関して成果を得たが、ここでは各テーマの位置づけとインパクト、今後の展望について記述する。

・近年問題となっている古い道路の点検・保守と同じく、鉄道事故・補修に関する実データ収集は、大衆の生活に大きな影響をもつインフラの安全対策問題に他ならない。今後はインフラ維持管理政策をライフサイクルの中で考える必要がある。東日本大震災での搜索救難に関して収集した実データからは、特に海での搜索救難の困難性が浮き彫りになった。今後は災害シミュレーションを活用した、陸、海両面での救難オペレーションの計画立案に対する展開が必要である。

・施設警備計画立案に関するコンピュータ支援システムの研究を最も進めることができた。計算幾何学等による静的警備員配置から動的なスケジューリング機能を考慮した手法を提案でき、警備の自動化にも対応できるシステム構築が実現できた。今後は現場への適用が必要となる。搜索理論に関する本研究成果は国際的にも先端を行っており、引き続

き研究努力が必要であるが、警備問題のように現場に直結した応用を目指す時期にある。救急医療施設の配置問題は従来と同様、引き続き最適化手法による理論的なアプローチが必要である。このような数理的なアプローチは地方自治体で時折試行されており、実証検証の域にあると考えられる。

・交通網、鉄道網、電源網、貿易網といったインフラネットの数理的解析手法の開発に関しては、グラフ・ネットワーク理論のようにその理論的な基礎には長い歴史がある。しかしながらこれらのネットワークは膨大なものであり、理論の検証を容易には実施できない事情がある。したがって引き続き実データの収集とそれによる間接的な検証作業が必要とされる。最後にそれらを包括的に分析するためのネットワーク上での損耗モデルの研究は着手されたばかりであり、モデル構築の進展とそれに基づく解法の提案へと進んでいく必要がある。

さて、上記の研究成果をすべて記述することはできないため、2つだけを抜粋して述べることとする。

(1) ゲーム理論を用いた交通変動予測

道路における利用者心理を考えた交通量予測として、ゲーム理論を利用したナッシュフローが用いられることが多い。ナビゲーション情報や渋滞情報から、利用者が情報取得時点での移動時間最小の経路を取ろうとするために渋滞が起これ、その結果どの経路も同じ移動時間となってしまうものである。ナッシュフローは、出発ノードと目的ノード間の流量(OD交通量)が様々な経路をとってやや長い時間をかけて到達する均衡流であると言える。しかし実際の道路では、例えば朝の出勤ラッシュ、昼間のビジネスラッシュや夕方の帰宅ラッシュ等、時間帯によってOD交通量は変化し、それに伴ってナッシュフローも変化するものと思われる。この研究では、OD交通量の変化によるナッシュフローの時間変化が各道路に引き起こすフローの局所的な変動を求め、時々刻々の交通量脈動を予測しようとしたものであり、次のようなアルゴリズムにより、個々の道路における交通変動を求める。ただし、交通網をノードとアークからなるグラフで捉える。

まずノード対間のOD交通量を交通調査の実データから調べる。このOD交通量は時間帯によって異なり、時点 t_j でのOD交通量からノード対 (r, s) 間のルート k に沿ったナッシュフローの量を $f(r, s, j)$ とすると、次の時点 t_{j+1} での間で、差分流 $f(r, s, j+1) - f(r, s, j)$ がルート k に沿って流れる。この差分流をノード s から r まで追跡することで、時間帯ごとの交通変動を求める。

この分析法を用い下図で示した都心環状線での交通変動を、朝のラッシュ時から午前

10 時の間で求めた。その結果次の知見を得た。



(ア) 渋滞が予想される朝のラッシュ時には、OD 対間に代替ルートが多くあっても、交通流はそれらの間に広くは分散せず、主に最短時間ルートを利用して流れる。複数のルートに分散する場合でも、高々2~3本ほどである。

(イ) 朝のラッシュ時では、個々のアークでの渋滞率（基本走行時間に対する現実走行時間の倍率）に差があり、1倍から8倍ほどの幅広い範囲内での渋滞率が見られる。しかし、平均的には OD 間通過時間の平均渋滞率（約 4.5）とほぼ同じ程度となった。特に渋滞率の高いカ所としては、四谷-三宅坂間の約 8 倍、江戸橋-箱崎、浜崎橋-芝浦及び神田橋-竹橋間の約 6 倍の渋滞率がある。

(ウ) ネットワーク全体で、朝のラッシュが落ち着くまでに約 40 分を要する。各アークでは交通変動が落ち着くまでに平均 25 分掛かり、脈動が平均 2.4 回起こる。汐留や丸の内界隈では交通流の変動回数が 5 回程度と大きく、また平衡になるまでに 30 分から 40 分と最も時間を要する。

(2) 探索理論を用いた施設警備問題

この研究は、一般的な施設の警備巡回路に関する意思決定問題を数理計画法によって支援し、現在進行しているロボット等による警備の自動化に対処しようとするものである。セキュリティ上脆弱な施設のカ所を調査した結果幾つかの侵入ルートが見積もられたとし、これら侵入路に対する巡回路の脆弱性を、侵入者及び警備側双方の立場から考慮して、より良い巡回路計画立案に資することを研究の目的とした。

施設警備の状況設定の概要は次のとおりである。(a) 空間は 2 次元ユークリッド空間、

時間は離散と考え、侵入者の目的地到着期限を T とする。(b) 警備員は複数本のスケジュールされた巡回路をもつ。(c) 侵入者には複数本の侵入路がありその経由地点は決まっているが、そこでの待ち時間を含むスケジュールは未定である。(d) 施設に侵入した侵入者は、現に行われている警備員の巡回行動を観察でき、経由地点での停留時間（侵入スケジュール）を適応的に決めることができる。(e) 侵入者、警備員双方とも、侵入者に対する警備員からの視認度に興味がある。視認度は、侵入者が警備員の視界内にあるかどうかの 0-1 パラメータ (δ)、双方の距離 (d) 及び侵入者のいる地点の明るさ (α) の 3 項目に依存する値 $\delta \alpha / d^2$ によって定義される。

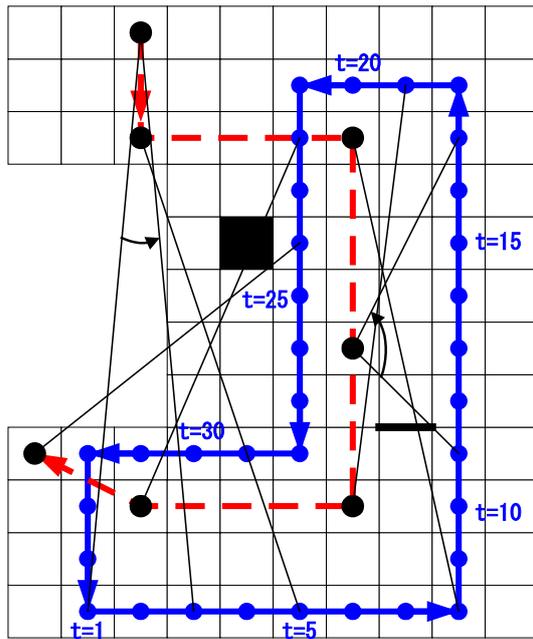
以上の問題設定において、次の 3 つの問題を考える。まず個々の警備巡回路に対し、想定された侵入路が用いられた場合の警備側にとって最悪の侵入スケジュールを求める問題（侵入スケジュールリング問題）、次に上記問題により計算された巡回路と侵入路との組合せの相性を考慮して、巡回路をどのように採用するかの問題（巡回路選択問題）、最後に想定される最悪の侵入スケジュールを考慮して、巡回中の警備員はどの方向に注意を払えばよいかの問題（注視配分問題）である。第 2 と第 3 の問題は、警備員、侵入者双方の対応を考慮したゲームとして取り扱われる。

侵入スケジュールリング問題に対しては、視認度を最小にする各経由地点での最適な待ち時間を求める問題を動的計画法により定式化し、巡回路 p に対する侵入路 q での最小視認度 $R(p, q)$ を求めることができる。この値を用い、縦に可能な侵入路 q を、横に巡回路 p を羅列し、 p, q のすべてのペアに対し $R(p, q)$ を計算した表を支払行列としてもつ 2 人ゼロ和ゲームを解くことで、巡回路に関する合理的な巡視計画を立てることができる。

下図は、 $t=1$ の記述のある左下のノードから出発して反時計回りに 1 巡して戻ってくる巡視路と、施設上部から侵入し左下の目的地に至る侵入路との間の侵入スケジュールリング問題を $T=35$ として解いた結果を図示している。両経路上の点を結んだ直線が同時刻における警備員と侵入者の位置対応を示したものであり、この図から、障害物を利用した移動、警備員との近接を経由地でやり過ぎやり方、暴露状態にある場合にはできるだけ警備員とは遠距離になるようにタイミングを図る手法等、まるで人間が行いそうな知能的な侵入者の移動が実現している。

注視配分問題は、各時点における警備員の注意をどちらに、どの程度向ければよいかを警備員側の戦略とし、進入経路の選択を侵入者の戦略とするゲームであり、この問題を解くことでロボットやそこに装備した各種セ

ンサーの時間制御に役立てることができる。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 22 件)

- ① Ryusuke Hohzaki, A nonzero-sum search game with two competitive searchers and a target, *Annals of Dynamic Games*, 査読有, Vol.12, 2013, pp.351-373
- ② 三和雅史、大山達雄、鉄道線路保守計画の最適化システム、*オペレーションズ・リサーチ*、査読有、57 巻 8 号、2012、pp.427-432
- ③ 宝崎隆祐、探索救難における探索理論の役割、*オペレーションズ・リサーチ*、査読有、56 巻 12 号、2012、pp.705-710
- ④ Maxensius Tri Sambodo, Tatsuo Oyama, Investigating Economic Growth, Energy Consumption and Their Impact on CO2 Emissions Targets in China, *Journal of Asian Public Policy*, 査読有, Vol.4, No.3, 2011, pp.279-306
- ⑤ 森田修平、宝崎隆祐、畠山雄介、数理計画法を用いた警備員の巡視路選択問題、*情報処理学会論文誌「数理モデル化と応用」*、査読有、4巻、2011、pp.19-35

[学会発表] (計 36 件)

- ① 大山達雄、村木宏壽、東日本大震災被害の概要とサーベイ調査分析、*日本オペレーションズ・リサーチ学会第 67 回シンポジウム*、2012 年 3 月 26 日、防衛大学校
- ② 古田壮宏、諸星穂積、空間的な需給バランスを考慮した救急車再配備計画モデルの

提案、*日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会*、2011年9月16日、甲南大学

- ③ 宝崎隆祐、上温湯翼、ナッシュフローを用いた交通量変動の予測、*日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会*、2011年9月15日、甲南大学
- ④ 樋口英樹、宝崎隆祐、相手の位置を不完備情報とする移動目標探索ゲーム、*京大数理解析研共同研究集会「不確実性下における意思決定問題」*、2010年11月24日、京大数理解析研究所
- ⑤ 三和雅史、大山達雄、軌道狂いにより発生する列車脱線事故のリスク推計モデルの構築、*日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会*、2010年9月16日、コラッセふくしま(福島市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

研究代表として京大数理解析研共同研究集会「不確実性下における意思決定問題」開催
http://www.nda.ac.jp/~hohzaki/H22RIMS/H22rims_HP.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宝崎 隆祐 (HOHZAKI RYUSUKE)
 防衛大学校・電気情報学群・教授
 研究者番号：20546048

(2) 研究分担者

大山 達雄 (OYAMA TATSUO)
 政策研究大学院大学・政策研究科・教授
 研究者番号：30134323
諸星 穂積 (MOROHOSHI HOZUMI)
 政策研究大学院大学・政策研究科・教授
 研究者番号：10272387

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

防衛大学校・理工学研究科学生
樋口 英樹 (HIGUCHI HIDEKI) (H22)
森田 修平 (MORITA SYUHEI) (H22)
千葉 隆司 (CHIBA TAKASHI) (H23)
寺島 芳晴 (TERASHIMA YOSHIHARU) (H23)