

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K19960

研究課題名（和文）準無限スケジューリング問題の分析と応用

研究課題名（英文）Analysis of unbounded scheduling problems

研究代表者

河村 彰星（Kawamura, Akitoshi）

京都大学・数理解析研究所・准教授

研究者番号：20600117

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の対象は、目標に無限・未知の側面を含む数理計画の問題、すなわち多くの地点を時間的・空間的に万遍なく被覆するための戦略や、多くの主体が関わり合う中での最適化などであった。各種アルゴリズム設計・解析手法を応用することで、以下の状況設定において、理論的保証や困難さの解明を中心に進展を得た。グラフを網羅的に探索する問題、グラフ上の一定周期を保って警邏する問題、グラフ上の警備と侵入者との間のゲーム、グラフ上の拡散競争ゲーム、グラフ上の提携形成ゲーム、グラフ上の遷移可能性の判定や最短遷移の問題、仕事の周期的スケジューリング。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、問題設定の記述そのものは単純だが、満すべき目標として「恒常的に保守する」「連続的に漏れなくカバーする」といった安全・安定の要求を課する問題、あるいは多主体がおのおのの自己の利益を求めて行動することが最適化に新たな複雑さを呈する問題について、理論的分析を行った。現実的な状況を含んでいると考えられるこれらの問題のいくつかについて、計算手法と困難さの両面から解明が進んだ。

研究成果の概要（英文）：We studied algorithmic techniques and hardness of several problems related to infinite scheduling, covering problems, and optimization in multi-party settings. We obtained some new algorithms and theoretical bounds for problems of the following types: searching problems on graphs, patrolling problems on graphs, games between the patrollers and the intruder on graphs, competitive diffusion on networks, hedonic games on graphs, reconfiguration problems on graphs, and periodic scheduling of jobs.

研究分野：理論計算機科学

キーワード：スケジューリング 遷移可能性 ヘドニックゲーム 仕事割当 警邏問題

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

典型的な組合せ最適化アルゴリズムは、問題設定がすべて有界的・組合せ的なものである。そうでない応用状況に対しては個別のヒューリスティクスを用いる等さまざまな努力が払われてきたが、無限・連続・多主体といった側面をもつ問題にも、純粋な理論解析が可能な範囲を少し広げる形での進展が多く分野に広がっており、本計画ではその幾つかに着目した。

### 2. 研究の目的

本研究は、多くの地点を時間的・空間的に万遍なくカバーするための戦略や、多くの主体が関わり合う中での最適化について、理論的保証や困難さの解明を中心に、様々な状況設定に対して分析しようとするものである。

### 3. 研究の方法

研究対象となる問題群の無限・未知の側面が、どのような場合に有限の設定に帰着されるかを見極めることにより、グラフ構造の利用をはじめとする各種の典型的な最適化手法や、困難性、パラメタ計算量解析、困難さの分析などの既知の道具を、理論的に自然な形で延長することを試みる。

### 4. 研究成果

(1) 主にグラフ上の探索に関する既存手法を調査し、このうち各頂点を一定期間内に訪れることを目標とするグラフ上の周期潜伏問題と呼ばれる問題群について、単純な方法で最適解が得られる場合と、厳密な最適値を得るのが NP 困難である場合とを、或る程度分類することができた。この結果、探索者が単独で行動する場合と高度な協力を試みる場合との比較や、指定された周期ちょうどで行動する場合とそれにとらわれずに最適の方法を探す場合との比較に関して、新たな違いが発見された。

(国際会議 JCDCGGG など で発表)

(2) 被覆型の周期スケジューリングである「警邏問題」では、複数のエージェントが協力して全地点を頻りに訪問することを目指す。単エージェントの場合の最適解から簡単に得られる自明な運行に比べて、どれほど良い効率を達成できるかという視点から、新たな効率限界や困難性、他の問題との関係を明らかにした。この成果の一部は既に本計画開始前に国際会議で発表していたが、より精密な限界評価を行い、最近の進展を採り入れ、解析手法を整理した論文にまとめた。また、この成果を含め関連問題の現状と課題をまとめて紹介する総括的発表を国内学会で数件行った。

(Theoretical Computer Science 誌などで発表)

(3)(2) のように一定の頻度で動きまわる(警備する)問題に関連して、警備を出し抜こうとする侵入者を防ぐというゲーム理論的な状況設定での最適戦略の分析に取り組んだ。そのような設定にした場合、もとの問題と大きく様相が変わる場合と変わらない場合があることが、幾つかの単純な状況において明らかとなった。特に線分上の警邏という最も基本的な場合について詳しく上下界を分析した。

(電子情報通信学会総合大会などで発表)

(3) 拡散競争ゲームはネットワーク上を複数の情報等が拡散する様子をゲームとしてモデル化したもので、各プレイヤーの目的は自らの持つ情報をネットワーク構造を介してできるだけ多くのノードに拡散することである。このゲームの挙動は対象とするネットワークの構造に依存し、2人ゲームであってもサイクル構造のためプレイヤーの行動が循環し純粋ナッシュ均衡が存在するとは限らない。本研究ではサイクル構造が限定される強弦グラフであっても純粋ナッシュ均衡が存在しない例が存在すること、より制限された区間グラフなどでは必ず純粋ナッシュ均衡が存在することを示した。

(国際会議 SOFSEM および Discrete Applied Mathematics 誌などで発表)

(4) 通常の場合最適化問題では解を一つ求めることが目的であるが、実社会においては解を適切に変化させながら維持することが必要とされる場面が数多く存在する。この状況のモデル化として、組合せ最適化問題における解同士の遷移可能性の研究が近年盛んに行われている。本研究では、マッチングの遷移可能性の判定や最短遷移長の計算について、アルゴリズムの設計お

よび計算複雑度の解析を行った。  
(国際会議 ESA および MFCS など で発表)

(5) グラフ上にエージェントを配置する形のヘドニックゲームの安定性・周期性に関して、計算困難性・容易性に関する分離定理を得た。ヘドニックゲームとは個人の選好に基づいた提携形成をゲームとしてモデル化したものである。本研究ではグラフ上の頂点にエージェントを配置する問題をゲームとして定式化したものであり、安定配置の存在の有無、存在するときはその発見が興味の対象となる。安定配置が存在しない場合は、エージェントが頂点の選択が周期化する形をとる。上述の分離定理は次数あるいは連結成分のサイズに関するものであり、グラフが次数 1 以下の場合あるいは連結成分のサイズが 2 以下の場合には多項式時間で、そうでない場合は NP 困難であること、また PLS 完全性等などの結果を得た。  
(国際会議 AAMAS など で発表)

(6) グラフヘドニックゲームの安定性・周期性に関して考察した。ヘドニックゲームとは個人の選好に基づいた提携形成をゲームとしてモデル化したものである。本研究で扱うヘドニックゲームはグラフの分割問題を定式化したものであり、個人効用に関する好分割を求める各エージェントが逸脱するモデルについて周期的なエージェントの逸脱や安定性を考察した。スプリットグラフとスプリットブロックグラフにおいて、安定解の精度比がそれぞれ平方根のオーダーと 3 に収まることを示した。  
(LA シンポジウムなど で発表)

(7) 幾つかの仕事それぞれを行うべき最低頻度が指定されているとき、毎時刻に一つだけ仕事を行うことで頻度の要件を満し続けるようにする、という基本的な無限スケジューリング問題の性質について調べた。特に、仕事全体の「密度」が 6 分の 5 以下ならば必ずスケジューリング可能である、という単純な十分条件を証明し、陳・銭による予想 (1992) を解決した。これは、本研究の初期に得られていた手法により無限個あり得る頻度の組合せを有限個に帰着するとともに、その有限個の場合については新たな探索手法により計算機実験で解を見出すことによりなされた。  
(電子情報通信学会総合大会など で発表)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Naoka Fukuzono, Tesshu Hanaka, Hironori Kiya, and Hiroataka Ono	4. 巻 321
2. 論文標題 The existence of a pure Nash equilibrium in the two-player competitive diffusion game on graphs having chordality	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Discrete Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 281-294
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dam.2022.04.025	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 Akitoshi Kawamura and Makoto Soejima	4. 巻 839
2. 論文標題 Simple strategies versus optimal schedules in multi-agent patrolling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 195-206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2020.07.037	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 -
1. 著者名 Hans L. Bodlaender, Tesshu Hanaka, Lars Jaffke, Hiroataka Ono, Yota Otachi, Tom C. van der Zanden	4. 巻 -
2. 論文標題 Hedonic Seat Arrangement Problems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems	6. 最初と最後の頁 1777-1779
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 該当する
1. 著者名 Yoichi Iwata and Yusuke Kobayashi	4. 巻 148
2. 論文標題 Improved analysis of highest-degree branching for feedback vertex set	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th International Symposium on Parameterized and Exact Computation (IPEC 2019) / Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)	6. 最初と最後の頁 22:1-22:11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.IPEC.2019.22	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 -

1. 著者名 Hiroshi Eto, Tesshu Hanaka, Yasuaki Kobayashi, and Yusuke Kobayashi	4. 巻 148
2. 論文標題 Parameterized algorithms for maximum cut with connectivity constraints	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th International Symposium on Parameterized and Exact Computation (IPEC 2019) / Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)	6. 最初と最後の頁 13:1-13:15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.IPEC.2019.13	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 -

1. 著者名 Takehiro Ito, Naonori Kakimura, Naoyuki Kamiyama, Yusuke Kobayashi, and Yoshio Okamoto	4. 巻 144
2. 論文標題 Shortest reconfiguration of perfect matchings via alternating cycles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 27th European Symposium on Algorithms (ESA 2019) / Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)	6. 最初と最後の頁 61:1-61:15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.ESA.2019.61	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 -

1. 著者名 Marthe Bonamy, Nicolas Bousquet, Marc Heinrich, Takehiro Ito, Yusuke Kobayashi, Arnaud Mary, Moritz Muhlenthaler, and Kunihiro Wasa	4. 巻 138
2. 論文標題 The perfect matching reconfiguration problem	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 44th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS 2019) / Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)	6. 最初と最後の頁 80:1-80:14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.MFCS.2019.80	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 該当する

1. 著者名 Naoka Fukuzono, Tesshu Hanaka, Hironori Kiya, Hirotaka Ono, and Ryogo Yamaguchi	4. 巻 12011
2. 論文標題 Two-Player Competitive Diffusion Game: Graph Classes and the Existence of a Nash Equilibrium	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 46th International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Informatics (SOFSEM 2020) / Lecture Notes in Computer Science (LNCS)	6. 最初と最後の頁 627-635
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-38919-2_52	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 Tesshu Hanaka, Hironori Kiya, Yasuhide Maei, and Hirotaka Ono	4. 巻 11873
2. 論文標題 Computational Complexity of Hedonic Games on Sparse Graphs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA 2019) / Lecture Notes in Computer Science (LNCS)	6. 最初と最後の頁 576-584
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-33792-6_43	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 木谷裕紀, 小野廣隆	4. 巻 2088
2. 論文標題 2人単貧民の必勝判定とその拡張	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 23 ~ 26
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 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 河村彰星
2. 発表標題 周期的な仕事の割当について
3. 学会等名 第8回山陰基礎論と数学およびその周辺の研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河村彰星
2. 発表標題 輪番詰込スケジューリングの密度限界
3. 学会等名 応用数学合同研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池山愛梨、土中哲秀、小野廣隆
2. 発表標題 スプリットグラフにおける分数型ヘドニックゲームの安定性の代償
3. 学会等名 冬のIAシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河村彰星
2. 発表標題 輪番詰込の密度閾値について
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河村彰星
2. 発表標題 輪番スケジューリングと密度限界
3. 学会等名 Japanese Conference on Combinatorics and its Application
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河村彰星
2. 発表標題 輪番スケジューリングと密度限界
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会「超スマート社会のシステムデザインのための理論と応用」研究部会第8回研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河村彰星
2. 発表標題 警邏スケジュールリング問題
3. 学会等名 日本オペレーションズリサーチ学会九州支部総会講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林佑輔
2. 発表標題 最小スパナ問題の困難性と固定パラメータ容易性
3. 学会等名 応用数理学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Kawamura
2. 発表標題 Simple strategies versus optimal schedules in multi-agent patrolling
3. 学会等名 Ninth Workshop on Graph Searching, Theory & Applications (GRASTA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Kawamura
2. 発表標題 Optimization in multi-agent patrolling on graphs
3. 学会等名 Second Workshop on Self-organization in Swarm of Robots (WSSR) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 木谷裕紀, 小野廣隆
2. 発表標題 手札公開ハバ抜きについて
3. 学会等名 第23回ゲームプログラミングワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林佑輔
2. 発表標題 A weighted linear matroid parity algorithm
3. 学会等名 電子情報通信学会コンピューテーション研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥村恭平, 河村彰星
2. 発表標題 複数の巡査による線分警邏のゲーム理論的分析
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会COMP学生シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Kawamura
2. 発表標題 Bounds on optimal patrolling schedules
3. 学会等名 Banff International Research Station (BIRS) Workshop on Extremal Problems in Combinatorial Geometry (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河村彰星
2. 発表標題 恒常的スケジューリングの未解決問題
3. 学会等名 離散構造処理系プロジェクト秋のワークショップ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Kawamura and H. Noshiro
2. 発表標題 Multi-agent cooperative patrolling of designated points on graphs
3. 学会等名 20th Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, Graphs, and Games (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	小野 廣隆  (Ono Hirotaka)  (00346826)	名古屋大学・情報学研究所・教授   (13901)	
研究 分担者	小林 佑輔  (Kobayashi Yusuke)  (40581591)	京都大学・数理解析研究所・准教授   (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------