

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 10 月 3 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25240004

研究課題名(和文) 建築・都市分野における離散数理基盤の構築と大規模最適化への展開

研究課題名(英文) Establishing the foundation of discrete mathematics in the field of architecture and urban planning and its application to large-scale optimization

研究代表者

加藤 直樹 (Katoh, Naoki)

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号：40145826

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,100,000円

研究成果の概要(和文)：得られた成果は以下の通りである。

1. 動的フローモデルによる緊急避難計画モデルにおいて、辞書式最速流による避難の有効性を実験的に検証した。2. 梅田地下街全体における洪水や津波による浸水を想定して、接続ビルへの垂直避難のマルチエージェントシミュレーションを行い、避難完了時間や混雑する場所を把握した。3. 歩車混合型最速輸送問題に対するアルゴリズムを提案した。4. 剛体ヒンジ構造の大域剛性の組合せ的特徴付けを導いた。5. 剛体ヒンジ構造の冗長剛性とグラフの混合連結度の関係を導いた。6. 穴付き2次元格子型bar-joint構造を極小剛とする筋交い配置アルゴリズムを提案した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have obtained the following results.

1. In an emergent evacuation planning model based on dynamic flow model, the effectiveness of evacuation by a lexicographically quickest flow was demonstrated. 2. Assuming the situation that Umeda underground mall is inundated due to tsunami and/or flood, we carried out a multi-agent simulation of vertical evacuation to connected buildings to compute the evacuation completion time and to obtain the knowledge of crowded areas. 3. We proposed an algorithm for a quickest transshipment problem that models an emergent situation in which people can evacuate on foot or by car. 4. We derived a combinatorial characterization of global rigidity of body-hinge frameworks. 5. We characterized the redundant rigidity and the redundant global rigidity of body-hinge graphs in terms of graph connectivity. 6. We presented an algorithm for adding braces to a square grid framework possibly with holes in order to make the framework minimally rigid.

研究分野：離散アルゴリズム

キーワード：最速フロー 組合せ剛性理論 大域剛性 避難計画 ブレース追加問題 普遍的最速フロー 冗長剛性

1. 研究開始当初の背景

(1) 東日本大震災以降、防潮堤、防波堤等による物理的対策の限界が露呈し、日本全土における災害予測および防災計画の見直しが進められ、避難経路や避難場所等に代表される避難計画の重要性が認識され、全国で整備されつつある。その際には、避難時間、避難所の容量などの避難計画の妥当性を判断する必要がある。通常、妥当性検証には、計算機シミュレーションが用いられているが、大規模な避難シミュレーションの実行にはペタ級のスーパーコンピュータの処理能力が必要となる。一方、本研究ではシミュレーションとは異なる数理モデルを用いた避難計画問題に対する理論的なアプローチを採用する。その利点は、得られた結果は、数学的な理論を元とした定量的なものであるため、公平性や再現性を有している点である。しかしながら、現在最速の Hoppe, Tardos [1] による多項式時間アルゴリズムは非常に複雑で、実装が困難である。よって現状では、実装が容易である時間拡大ネットワークを用いる方法が主流であるが、記憶領域の問題等で大規模な問題に対して扱うことが非常に困難である。

(2) トラス構造などの bar-joint フレームワークは、bar (棒材) と joint を点と辺とするグラフによって抽象化される(図1)。

フレームワークが安定であるための必要条件が、J.C. Maxwell (電磁気学で著名) [2] によって 1864 年に明らかにされた。それは、グラフの点数と辺数の関係によって簡潔に表現された組合せ的条件である。さらに 100 年後の 1970 年に Laman はマックスウェルの条件を精密化し、2 次元フレームワークの剛性に対する組合せ的な必要十分条件 (Maxwell/Laman の定理) を与えた [3]。しかし、応用上重要な 3 次元フレームワークに対しては、その一般剛性の離散数論的特徴付けは明らかではなく最大の未解決問題である。他方、生物学に重要な応用が期待される原子間の共有結合をモデル化した分子フレームワークに対しては、Maxwell/Laman の定理と同様の定理が成立するという予想 (Molecular conjecture) が立てられ、理論・応用両面から重要な問題として考えられてきたが、最近、代表者の加藤、分担者の谷川が肯定的に解決した。一方、対称性を考慮した一般剛性理論の拡張が盛んにおこなわれており、対称性を有する分子フレームワークへ拡張することが大きな課題である。また大

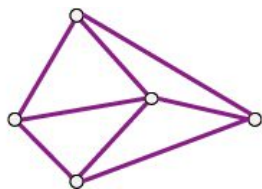


図1. 2次元 bar-joint フレームワーク

規模なフレームワークの剛性判定も対称性を利用すると小さな問題に分割でき、大規模分子構造の剛性計算の高速化や構造物生成の限界打破が期待できる。他方、剛性理論を建築工学等の分野の構造物生成に応用する研究は大崎らを中心に進められているが、小規模な例で既に計算限界に陥っており、その限界打破が重要な課題である。

規模なフレームワークの剛性判定も対称性を利用すると小さな問題に分割でき、大規模分子構造の剛性計算の高速化や構造物生成の限界打破が期待できる。他方、剛性理論を建築工学等の分野の構造物生成に応用する研究は大崎らを中心に進められているが、小規模な例で既に計算限界に陥っており、その限界打破が重要な課題である。

2. 研究の目的

(1) 避難計画の数理モデルとして動的ネットワークフローを用いる。このモデルにおける最も基本的な問題である最速フロー問題に対して、大規模なネットワークにも適用可能な、簡便かつ効率的な最速フローアルゴリズムの開発をおこなう。また、実用上の観点から、災害の大きさ、災害発生時間帯、また建物倒壊による道路閉塞などの不確定要素を考慮した適切なモデル化をおこない、大都市を中心とした実データに基づき、避難経路、避難時間、避難所の評価など現実問題への応用を目指す。

(2) 3次元フレームワークの一般剛性や対称剛性の離散数論的構造の解明を目指す。これらの理論を基礎に建築分野への応用を見据えた構造物列挙アルゴリズムの開発を行う。

(3) 目的(1)、(2)で開発したアルゴリズムを実装し、大規模データを対象として高速実行が実現可能な最適化・列挙ソフトウェア基盤を最新計算技術(高速かつ省電力)の効果的な融合により構築する。同時にスーパーコンピュータ上での実証実験も行う。

<引用文献>

[1] B. Hoppe and E. Tardos, The quickest transshipment problem, *Math. of Oper. Res.*, Vol. 25, No. 1, pp. 36-62, 2000.

[2] J. C. Maxwell, On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames. *Philosophical Magazine*, Vol. 27, pp. 294-299, 1864.

[3] G. Laman, On graphs and rigidity of plane skeletal structures, *J. of Engineering Mathematics*, Vol. 4, pp. 331-340, 1970.

3. 研究の方法

(1) 最速避難計画に関連する災害対策に関連する最適化問題や列挙問題を効率よく解くアルゴリズムを開発する。具体的には、大規模ネットワークに対する最速フロー問題を(近似的に)解くことのできる簡便なアルゴリズムの開発と避難時間の最小化の

みではなく、他の望ましい性質を満たす高品質な避難を実現する問題のモデル化およびそのモデルに対するアルゴリズムの開発をおこなう。

(2) 3次元フレームワークの一般剛性と対称剛性・大域剛性・冗長剛性の離散数論的特徴付けを解明する。また一般の配置でないフレームワークの剛性についても離散数論的特徴付けを解明する。さらに得られた理論を基礎に高速な構造物生成アルゴリズムを開発し、建築工学分野への応用をおこなう。

(3) 上記の(1)、(2)で開発したアルゴリズムを実装し、ポストペタスケールスパコン上で高性能な最適化・列挙ソフトウェア基盤として整備する。

4. 研究成果

(1) 動的ネットワークにおける最速輸送問題は、避難計画を理論的に扱う上で最も基本的な問題である。本研究では、各避難者が避難手段として徒歩か車かを選択できる状況をモデル化した歩車混合型最速輸送問題を提案した。理論的成果として、ソース数とシンク数の総和が $O(\log n)$ 個(n はネットワークの頂点数)の場合、問題が多項式時間で解けることを示した。また、実験的成果としては、和歌山県みなべ町を対象に提案モデルに基づくシミュレーションを行った(図2)。

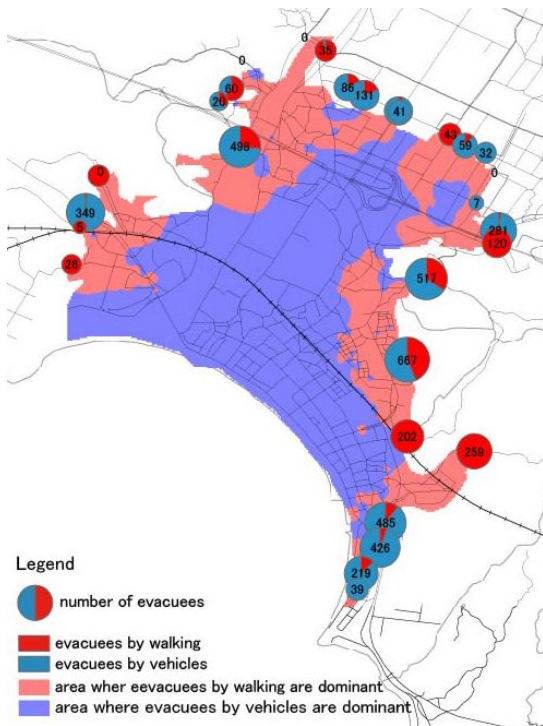


図2. 最適避難における徒歩と車の分布結果

(2) 本研究では、都市ネットワーク上における避難計画作成に係りの深い、Kempe, Kleinberg, Kumar によって提案された temporal network 上の有向木詰込み問題に関する以下の成果を得た。まず、与えられた有向グラフが有向閉路を含まない場合でも、Edmonds の有向木詰込み定理の自然な一般化が成り立たないことを示した。続いて、与えられた有向グラフが pre-flow という条件を満たしかつ有向閉路を含まないならば、Edmonds の有向木詰込み定理の自然な一般化が成り立つことを示した。さらに、与えられた有向グラフが pre-flow という条件を満たす場合でも有向閉路を含むならば、Edmonds の有向木詰込み定理の自然な一般化が成り立たないことを示した。

(3) 津波や地震などの災害発生時、被害が予想される地域にいる人々が迅速に安全な場所に避難できる計画を立てることを、緊急時避難計画とよぶ。緊急時避難計画のための数論的手法の研究には、様々なものがある。その中の代表的なものとして、マルチエージェントを用いた手法と、ネットワークフローモデルを用いた手法が挙げられる。マルチエージェントを用いた手法では、各エージェントを避難者と見立て、その避難者に詳細な行動モデルを設定することができる。これにより、各避難者が局所的に判断し、行動するという意味で、現実の状況をよく模したシミュレーションが可能となる。これに対して、ネットワークフローモデルを用いた手法では、避難者が全体として最も効率よく避難する計画を得ることができる。このモデルでは、各避難者が計画者の指示通りに行動すると仮定するため、理想的な避難状況を模することが可能となる。したがって、マルチエージェントを用いた手法とネットワークフローモデルを用いた手法を補完的に用いることで、有効な避難計画の作成・評価が可能となる。

本研究では動的ネットワークフローモデルを用いた緊急時避難計画モデルを扱った。特に、避難場所の収容者数に上限が設けられている状況では、辞書式最速流によって効率的な避難が定式化可能であり、その有効性を実際の地理情報を用いた実験的解析により検証することができた。

(4) 大阪市の梅田地下街は世界でも有数の規模・複雑さ・利用者数を誇っており、大阪市内の中心的な場所の一つである。しかしこの地域の北側には淀川が流れており、浸水のリスクにさらされている。そのため、梅田地下街全体を対象としてデータ整理を行い、接続ビルへの垂直避難のマルチエージェントシミュレーションを行い、避難完了時間や混雑する場所を把握した。

本研究では、平日の夕方 18 時頃に、淀川から氾濫した水が、梅田地下街へ浸水する状況を仮定し、地下街の歩行者や地下鉄・鉄道の利用者が、地下街の接続ビルの避難階まで避難するシナリオを設定した。空間データの構築を行い、接続ビル 33 棟を避難場所とした。次に、地下街等の滞留者の分布を推定した結果、避難者数は 20,761 人となった。シミュレーションの結果、駅の改札に近い接続ビルに避難者が集中する傾向があった。避難完了時間は約 24 分だった。二つの接続ビルでは収容率を上回る避難者が避難しており、周囲のビルへの避難者の分散を検討する必要があることなどが明らかになった。

(5) グラフの大域剛性は、グラフ剛性理論における中心的話題の一つであり、その 3 次元特徴付け問題は最も難しい未解決問題の一つであると認識されている。本研究では、建築構造力学への応用上特に重要な body-hinge フレームワークへ対象を制限し、その大域剛性の簡潔な組合せ的特徴付けを導くことに成功した。具体的には、Connelly-Jordan-Whiteley によって予想された十分条件が実は必要十分条件として成立することを証明した。また大域剛性の文脈において、Connelly による Hendrickson 予想の反例の構築以降、Hendrickson 予想に対する反例の無限族を構築することは重要な課題であった。5 次元以上では Frank-Jiang によって、そのような無限族が知られていたが、特に 3 次元に対しては唯一 10 頂点完全二分グラフのみが反例として知られていたため、Connelly は 3 次元 Hendrickson 予想の判別は有限であると予想した。本研究では、上記の body-hinge フレームワークの組合せ的特徴付けの系として 3 次元 Hendrickson 予想の反例の無限族を構築し、Connelly による予想に対する反例を与えた。

(6) 2 次元 bar-joint フレームワークについて、各 joint が一般の位置にある場合、その剛性の組合せ的特徴付けが知られている。一方で、都市工学や建築工学などにおける応用を考慮すると、各 joint が非一般の位置にある場合に対する知見が必要となる。そこで本研究では、穴付き格子型 2 次

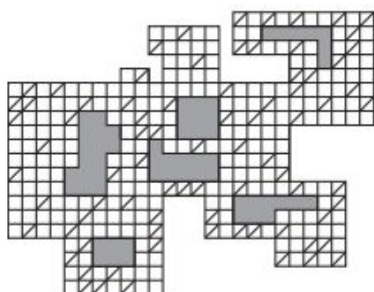


図 3. 格子型 2 次元フレームワーク

元 bar-joint フレームワーク(図 3)を最小本数の筋交いによって極小剛にする問題に対する最適配置アルゴリズムを与えた。またさらに、穴付き格子型 2 次元 bar-joint フレームワークにおける極小剛性に対する陽な特徴付けを与えることに成功した。

(7) 冗長剛性は建築設計において考慮すべき重要な性質であるが、例えば、極小剛な 2 次元 bar-joint フレームワークを最小本数の bar によって冗長剛にする問題は NP 困難であることが知られている。本研究では、任意の d 次元 body-hinge フレームワークの冗長剛性と対応する body-hinge グラフの混合連結度の関係を明らかにした。この成果により、極小剛な d 次元 body-hinge フレームワークを最小個数の hinge によって冗長剛にする問題に対しては多項式時間アルゴリズムが存在することが明らかになった。

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 76 件)

S. Cheng, Y. Higashikawa, N. Katoh, and A. Sijoka, Characterizing brace-minimal rigidity of square-grid frameworks with holes, JH 2017, 2017, pp. 93-102, URL:cs.bme.hu/jh2017/jXaio4T11ygd57.pdf (査読有)。

小林和博, 成澤龍人, 安井雄一郎, 藤澤克樹, 辞書式最速流による避難計画作成モデルの実験的解析, 日本オペレーションズ・リサーチ学会論文誌, Vol.59, 2016, pp. 86-105, URL:www.orsj.or.jp/~archive/pdf/j_mag/Vol.59_J_086.pdf (査読有)。

T. Jordan, C. Kiraly, and S. Tanigawa, Generic global rigidity of body-hinge frameworks, Journal of Combinatorial Theory, Series B, Vol 117, 2016, pp. 59-76, DOI:10.1016/j.jctb.2015.11.003 (査読有)。

Y. Kobayashi, Y. Higashikawa, N. Katoh, and A. Sijoka, Characterizing Redundant Rigidity and Redundant Global Rigidity of Body-Hinge Graphs, Information Processing Letters, Vol. 116, No. 2, 2016, pp. 175-178, DOI:10.1016/j.ipl.2015.08.011 (査読有)。

Y. Hanawa, Y. Higashikawa, N. Kamiyama, N. Katoh, and A. Takizawa, The Mixed Evacuation Problem, COCOA 2016, pp. 18-32,

DOI:10.1007/978-3-319-48749-6_2

(査読有).

E. Demaine, M. Demaine, J. Itoh, and C. Nara, Continuous flattening of orthogonal polyhedra, JCDCCG 2015, Revised Selected Papers, LNCS, vol. 9943, 2016, pp. 85-93,

DOI:10.1007/978-3-319-48532-4_8

(査読有).

N. Kamiyama and Y. Kawase, On Packing Arborescences in Temporal Networks, Information Processing Letters, Vol. 115, 2015, pp. 321-325, DOI:j.ipl.2014.10.005 (査読有).

瀧澤重志, 高木尚哉, 谷口与史也, 浸水被害を想定した梅田地下街の垂直避難シミュレーション, 大阪市立大学都市防災研究プロジェクト, 都市防災研究論文集, 第2巻, 2015, pp. 35-38, URL:docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbnxkc3NjIYmM3ODU3NzU3MGI (査読有).

Y. Ito, Y. Kobayashi, Y. Higashikawa, N. Katoh, S. Poon, and M. Saumell, Optimally bracing grid frameworks with holes, Theoretical Computer Science, Vol. 607, 2015, pp. 337-350, DOI:10.1016/j.tcs.2015.07.062 (査読有).

古田理恵, 山川誠, 加藤直樹, 荒木慶一, 大崎純, 組合せ剛性理論に基づく冗長性を考慮したトラス構造物の最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 79, No. 699, 2014, pp. 583-592, DOI:10.3130/aijs.79.583 (査読有).

[学会発表] (計 143 件)

J. Itoh, Applications of cut locus and Intuitive Geometry -continuous flattening of polyhedra-, ICMMA2016: Origami-Based Mathematical Modeling and Analysis, 明治大学 (東京都・中野区), 2016年11月12日

奈良知恵, ケルヴィン予想と最小表面積の空間充填立体 二重多面体の展開立体と石鹸膜実験, 日本数学会 2016年度年会, 招待講演, 関西大学 (大阪府・吹田市), 2016年9月15日

古田理恵, 山川誠, 加藤直樹, 荒木慶一, 大崎純, 組合せ剛性理論に基づく冗長性を付与したトラス構造物の最適設計法 その1 理論の提案, 日本建築学会大会(北海道)学術講演会・建築デザイン発表会, 北海道大学 (北海道・札幌市), 2013年8月30日

山川誠, 古田理恵, 加藤直樹, 荒木慶一, 大崎純, 組合せ剛性理論に基づく冗長性を付与したトラス構造物の最適

設計法 その2 数値例の検討, 日本建築学会大会(北海道)学術講演会・建築デザイン発表会, 北海道大学 (北海道・札幌市), 2013年8月30日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]
出願状況 (計 1 件)

名称: 折畳構造体
発明者: 萩原一郎, 奈良知恵
権利者: 株式会社デンソー, 学校法人明治大学
種類: 特許
番号: 特許願 2016 - 223337 号
出願年月日: 2016年11月16日
国内外の別: 国内

取得状況 (計 0 件)

[その他]
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 直樹 (KATOH, Naoki)
関西学院大学・理工学部・教授
研究者番号: 4 0 1 4 5 8 2 6

(2) 研究分担者

藤澤 克樹 (FUJISAWA, Katsuki)
九州大学・マス・フォア・インダストリ
研究所・教授
研究者番号: 4 0 3 0 3 8 5 4

神山 直之 (KAMIYAMA, Naoyuki)
九州大学・マス・フォア・インダストリ
研究所・准教授
研究者番号: 1 0 5 4 8 1 3 4

伊藤 仁一 (ITOH, Jin-ichi)
熊本大学・教育学部・教授
研究者番号: 2 0 1 9 3 4 9 3

谷川 眞一 (TANIGAWA, Shin-ichi)
京都大学・数理解析研究所・助教
研究者番号: 3 0 6 2 3 5 4 0

東川 雄哉 (HIGASHIKAWA, Yuya)
中央大学・理工学部・助教
研究者番号: 2 0 7 4 9 4 8 6

瀧澤 重志 (TAKIZAWA, Atsushi)
大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 4 0 3 0 4 1 3 3

山川 誠 (YAMAKAWA, Makoto)
東京電機大学・未来科学部・准教授
研究者番号：50378816

奈良 知恵 (NARA, Chie)
明治大学・研究・知財研究機構・研究推
進員
研究者番号：40147898

小林 祐貴 (KOBAYASHI, Yuki)
東京工業大学・環境・社会理工学院・助
教
研究者番号：70756668

(3)連携研究者

湊 真一 (MINATO, Shin-ichi)
北海道大学・情報科学研究科・教授
研究者番号：10374612

宇野 毅明 (UNO, Takeaki)
国立情報学研究所・情報学プリンシプル
研究系・教授
研究者番号：00302977

(4)研究協力者

鈴村 豊太郎 (SUZUMURA, Toyotaro)
米国 IBM・ワトソン研究所・Research
Staff Member