

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651177

研究課題名(和文)安全性から見たネットワークフローモデルの開発とその応用

研究課題名(英文)Multi-objective risk-minimization network flow problems and their applications

研究代表者

田中 健一 (TANAKA, Ken-ichi)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：90408724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：下校時の児童の安全性を確保するための集団下校に着目し、安全性の高い経路設計のための数理最適化モデルを構築した。学校から帰宅する際の下校経路の評価尺度として、一人で歩く距離を全児童について合計したものと、学校から家までの移動距離を全児童について合計したものを採用した。提案モデルを道路網データに適用した結果、最短経路からの迂回の度合いが極めて小さくても、一人で歩く距離を大幅に削減するような下校経路案を得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：This study addressed the design of safe walking routes from school to home for school children. Children are considered to be safer when walking together in groups rather than alone. We proposed a bi-objective optimization model where both the total risk (defined as the total distance walked alone) and the total walking distance traveled by children are minimized. We applied the problem to road networks and analyzed Pareto optimal solutions. The result shows that the proposed method provides solutions in which only a small deviation from the shortest path results in a significant reduction of the total distance walked alone.

研究分野：複合領域

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 数理最適化 安全性 都市・地域計画 ネットワーク最適化 整数計画法 多目的最適化 数理モデル

1. 研究開始当初の背景

近年、登下校時の児童が事件や事故に巻き込まれる被害が報告されている。この問題に対し、様々な対策が講じられているが、その一つとして集団登下校が挙げられている。集団登下校では、家が近い児童同士がまとまって歩くことにより、一人で長い距離を歩く児童が生じることを避けて、安全性を確保することを目的とする。一方、最短経路からの迂回の度合いが大き過ぎる児童が生じることは好ましくないため、安全性の尺度である一人で歩く距離を小さくすることと、児童の移動距離を抑えることをバランス良く達成することが重要である。

このような登下校経路は、従来から人間の手により作成されているが、これには大きな労力が必要である。また、最良の経路案を手作業により見つけるのは必ずしも容易ではない。このような背景から、登下校経路に関する安全性や児童の移動距離負担を定量的に表す尺度を導入し、安全な登下校経路を作成するためのモデル分析手法を開発することには重要な意義がある。そこで本研究では、登下校経路設計のための数理最適化モデルを構築することを目的とした。さらに、構築したモデルの妥当性を、現実の道路網データを用いて検証し、モデルの実用性や有用性を示すことを目指した。

また、児童が安全に登下校する場面に限らず、流れの安全性を確保することが重要な局面では、流量が大きいほどリスクを低減できるという構造が共通して存在する。そこで、安全な登下校経路設計を第一の応用とした上で、幅広い場面に適用可能な基礎的なモデルを構成することを目標とした。

2. 研究の目的

本課題は、人の移動や物の輸送に伴うリスクに着目し、これを最小化する流れを求める問題を追求することを目的とする。特に、児童が集団登下校する場面では、ある道路区間を移動する児童の人数が多いほど危険に遭遇する確率は低いと考えられる。このように、ある区間を流れる量の増加に伴いリスクが減少する構造は、様々な実際問題に共通する点であるが、既存のネットワークフローモデルの研究では、十分に考慮されていない。

そこで本研究では、リスクが流量に依存して減少する構造をもつ最適化問題を構築し、数理的性質を追求する。さらに、様々な状況設定に応じた発展的モデルを作成し、実道路網データを用いた分析を行う。

3. 研究の方法

安全性に着目したネットワークフローモデルについて、様々な状況設定に応じたモデ

ルを提案し、実道路網データへの適用と分析を行った。数理最適化モデルを構築して分析するため、整数計画法およびネットワーク最適化を専門とする二名の連携研究者と協力して研究を進めた。

対象をどのようにモデル化するかについて多くの議論を重ね、リスクと移動距離の二目的の問題を構築した。その問題を、整数計画問題として定式化し、道路網データをもとに作成した例題ネットワークに適用し、パレート最適解の性質を分析した。最適解を道路網上に表示して解の性質を分析し、得られた知見を整理した。さらに、種々の状況設定を考慮したモデルの拡張を複数提案した。

4. 研究成果

以下では、主に児童が学校から家へ帰宅する下校の場面を想定する。

(1) 基本モデルの設計

安全性の高い下校経路設計のための土台となる数理モデルとして、二目的の最適化問題を構成した。一番目の目的関数は学校から家までの経路に付随するリスクを全児童について合計したものであり、二番目の目的関数は学校から家までの各児童についての移動距離を合計したものである。道路網をモデル化したネットワーク上で以下の状況を仮定した。

- ・ 学校を表す単一ノードと各児童の目的地(自宅)を表す複数のノードが与えられている。
- ・ 各道路リンクの長さが与えられている。
- ・ 各道路リンクの単位距離を、一人で歩く場合のリスクと、二人以上で歩く場合のリスクが設定されており、前者の方が大きな値をもつ。
- ・ ある児童(または複数人の児童)がリンクを通過する際のリスクは、リンクの長ささと単位距離当たりのリスクを掛け合わせた値で与えられる。
- ・ 下校経路は学校を根とする有向木とする。

この問題に対する、整数計画問題としての定式化を提案した。下校経路が学校を根とする有向木であるという仮定を設けたことにより、比較的簡潔に定式化を記述することができた。

提案モデルの妥当性を検証するために、現実の道路網をもとに、例題ネットワークデータを作成し数値実験を行った。例題データのサイズは、頂点数が数十程度のもので、数百程度のものを複数作成した。前者の例題は、モデルの性質を詳細に分析する目的に適している。後者の例題は、現実の都市部におけ

る小学校区に近いサイズであり、モデルの応用可能性を検討する目的に適している。

数値実験では、リスクを評価する際に、一人で歩く距離が最も重要であると考え、全児童の一人で歩く距離の合計をリスクとして採用した。リスクと移動距離の両面から下校経路の望ましさを分析するために、パレート最適解を求めて分析を行った。頂点数が数十程度の例題では、数理最適化ソルバーを用いてすべてのパレート最適解を列挙することができた。その結果、リスクと移動距離のトレードオフ構造を詳細に分析することに成功した。数十程度のパレート最適解が得られたが、汎用ソルバーを用いて一分程度の計算時間ですべての解を列挙することができた。

頂点数が数百程度の例題では、すべてのパレート解を列挙することは困難であるため、移動距離に対してリスクを重視する度合いを表す重みパラメータを導入し、一目的の最適化問題を構成した。重みの値を変化させ、複数のパレート最適解を数理計画ソルバーで解いた。重みを固定して一つのパレート最適解を得るために必要な時間は、重みの値に大きく依存することが判明した。リスクの最小化を極端に重視する特殊な場合を除き、多くのケースにおいて数秒程度でパレート最適解を得ることができた。

得られたパレート最適解のなかには、一人で歩く距離と移動距離の双方から見て、優れた性質をもつ解が存在することが判明した。具体的には、すべての児童が最短経路に沿って学校から家まで帰宅する場合と比較して、(i)一人で歩く距離を著しく減少させることができるとともに、(ii)移動距離の合計は最短経路の場合と比較してごくわずかしかな増加していないことが分かった。最短経路に沿って帰宅する場合は、集団下校を実施しない場合に対応する。提案モデルによるアプローチは、集団下校を実施する際の下校経路案を検討する際の有用な方法であると考えられる。

基本モデルでは、下校経路に対するリスクや移動距離を、すべての児童について合計した関数として定義したが、このアプローチではある特定の児童に大きな負担を強いる場合も考えられる。この点を検討するために、基本モデルで得られた下校経路案を、各児童のリスクと移動距離から評価した。結果として、一部の児童に負荷を強いるような解はまれであり、多くのケースにおいて個別の児童の視点からも良い下校経路となっていることが確認できた。

また、以下の理論的成果を得ることができた。基本モデルで想定している「リスク最小化」という視点は、ある自然な仮定のもとで「全児童が学校から家まで安全に下校することができる確率の最大化」に一致するとい

う事実を示した。ある道路区間を一人（複数人）で歩く場合に、危険に遭遇する回数が、その道路区間を一人（複数人）で歩く場合のリスクを平均値とするポアソン分布に従うと仮定する。このとき、どの道路区間でも危険に遭遇しない確率が、基本モデルの目的関数に一致することが示される。全児童が学校から家まで安全に下校することができる確率を最大化することは、現場で求められている状況を端的に表現しており、実用的な観点からも提案モデルの有用性を表している。

(2) 各児童の移動距離制約を考慮したモデル

現実には、児童の学年や家の位置などの属性に応じて、個別の状況を考慮した下校経路案を作成する必要も生じる。そこで、個別の児童の状況を制約式に反映させることができる定式化についても考案した。この定式化では、各枝を通過する流量を目的地ごとに異なる変数を導入して表現しており、多くの状況設定を柔軟に記述することができる。例えば、各児童の移動距離の上限や、一人で歩く距離の上限などを状況に応じた形で設定することには大きな意味がある。この定式化を利用して、各児童の移動距離の上限を設定した例題を作製し、結果から得られた知見を整理した。例えば、基本モデルにおいて一人で歩く距離の最小化を重視するケースでは、学校から遠くに住む児童が、他の児童の家まで見送るために大きな迂回を強いられるケースも見られたが、大きな迂回が発生しないような制約を追加しても、リスクをかなり小さく抑えられるという結果が得られた。

(3) 下校経路が木でない場合への拡張

基本モデルでは、下校経路は学校を根とする有向木であると仮定した。これにより、整数計画問題としての簡潔な定式化が実現でき、数理最適化ソルバーで比較的短時間で最適解が得られた。その一方で、この仮定により、いくつかの下校方法は解から排除されてしまう。例えば、一旦分岐した流れが別の地点で再度合流する場合や、途中で経路からはずれて一人で帰る児童を家まで送り、再度移動を継続する場合などのケースが存在する。

このような移動を表現可能なモデルに拡張することは、実的にも学術的にも重要な意味をもつ。これを実現するために、元のネットワークのコピーを複数配置する多層ネットワークモデルを構成した。このモデルにより、ある頂点で一度分岐した流れが再合流するケース（ただし合流後は異なる流れとして扱うケース）などを表現することができ、記述可能な下校経路が大幅に広がった。

道路網をもとにした例題を用いて、基本モデルと多層ネットワークモデルを用いて数

値実験を行い，両者の最適解を詳細に比較した．その結果，以下のような知見を得ることに成功した．

- ・ 一人で歩く距離の最小化を極度に重視するケースにおいては，実際に再合流が起きるケースがいくつか確認された．
- ・ 一人で歩く距離の最小化と移動距離の最小化をバランス良く達成する現実的な設定では，多層ネットワークモデルの最適解は基本モデルの最適解と一致した．
- ・ 計算時間は，多層ネットワークモデルを用いる場合，基本モデルよりも大幅に増加した．

この結果は，現実の応用においては，下校経路を木に限定することには，実用上の利点があることを示している．

以上の成果のいくつかについては，施設配置問題やオペレーションズ・リサーチ関連の国際会議において発表した．問題設定のオリジナリティや結果の有用性などの点で，既存モデルにはない新しい成果であるといえる．

(4) 研究の展望

本研究で提案した，安全な登下校経路設計のための数理最適化モデルを用いた数値実験を通じて，安全性と移動距離の両面から望ましい計画案を得ることができ，提案モデルの有用性が確認された．これらの成果を土台として，今後は次のような展開が考えられる．

児童の安全性を確保するための方策として，児童の登下校を地域全体で見守る体制の整備の重要性が指摘されている．例えば，道路網の交差点や定められた場所に監視員が立ち見守る際に，どの場所に監視員を配置すると安全上最も効果があるかを議論するための数理最適化モデルを構築することには大きな意義がある．

様々な現実的要素をモデルに組み込んだり，適用する地域の規模が大きくなったりすると，最適解の求解が困難になることが予想される．そのような問題に対し，精度の高い解を短時間で算出するための解法的设计も重要である．

提案モデルは，現実への応用を念頭に，ネットワーク空間でモデル構築を行ったが，連続平面上でのモデル化も興味深い展開である．学校と児童の家を連続平面上の点として表現し，学校と各点を連結する下校経路を求める問題は，これまでのネットワーク上の問題と同様に定義することができる．連続空間における性質を追求することで，最適解のもつ構造を幾何学的に提示し，現実問題に対する知見を得ることができると期待される．

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)

[学会発表](計5件)

Ken-ichi Tanaka, Ryuhei Miyashiro, Yuichiro Miyamoto: A bi-objective optimization model for designing safe walking routes for school children, INFORMS (The Institute for Operations Research and the Management Sciences) Annual Meeting 2013, October 8, 2013, Minneapolis Convention Center, Minneapolis, USA.

田中健一, 宮代隆平, 宮本裕一郎: 安全な集団登下校のための整数計画モデル, 九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所主催: 最適化ワークショップ 整数計画法の発展と応用 2013年5月22日, 九州大学.

Ken-ichi Tanaka, Ryuhei Miyashiro, Yuichiro Miyamoto: Safe walking route design problem, Proceedings of the 20th EURO Working Group on Locational Analysis, pp. 63-64, April 18, 2013, TOBB University of Economics and Technology, Ankara, Turkey.

田中健一, 宮代隆平, 宮本裕一郎: 流れの安全性に着目したネットワーク設計 - 安全下校問題への応用 - 第24回数理計画(RAMP)シンポジウム, 2012年9月27日, 東北大学片平キャンパス.

Ken-ichi Tanaka, Ryuhei Miyashiro, Yuichiro Miyamoto: A multi-objective minimum cost flow problem to design safe walking-routes for school children, 25th European Conference on Operational Research, July 11, 2012, Radisson Blu Hotel Lietuva, Vilnius, Lithuania.

6．研究組織

(1)研究代表者

田中 健一 (TANAKA, Ken-ichi)
電気通信大学・大学院情報理工学部研究科・助教
研究者番号: 90408724

(3)連携研究者

宮代 隆平 (Miyashiro Ryuhei)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 50376860

宮本 裕一郎 (Miyamoto Yuichiro)
上智大学・理工学部・准教授
研究者番号: 20323850