

規範的避難オペレーションに基づく柏崎地域の総避難完了時間推計シミュレーション

長岡技術科学大学大学院 原子力システム安全工学専攻 非会員 南裕也

長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 正会員 佐野可寸志

長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 正会員 伊藤潤

長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 正会員 川端光昭

1. 研究背景と目的

近年、2011年に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故を受け、政府・各自治体及び発電会社は二度とこのような事故が発生しないように現在、安全管理の見直し、発電所の安全設備の強化などが行われている。しかし福島事故により原子力発電所の安全神話は崩壊し、発電会社や自治体が安全に努めても今後もこのような事故が発生する恐れがある。よって現在、原子力発電所を持つ各自治体は事故が発生した場合に備えて原子力災害時の避難計画策定に着手している。

現在、原子力災害時の避難計画策定には災害が発生した際の避難状況を再現するシミュレーションモデルが数多く用いられている。しかしシミュレーション結果は仮定した避難行動（避難出発時刻、避難者の割合、避難者行動モデル等）に大きく左右されるため、限定的な避難行動を仮定した場合の結果となってしまう。すなわち、特定の避難行動であるため、どの程度効率よく避難行動を行った結果なのか、またさらに避難時間を短縮することはできるのか等を検討することは難しい。

またこれまで避難シミュレーションモデル構築の研究は大石・桑原¹⁾、安藤ら²⁾、加藤・瀧澤³⁾などによって行われているが、いずれの研究も避難者の行動モデル及び津波の影響度の定式化をおこなったモデルの構築にとどまっており、原子力災害を対象としたモデルの開発は進展がないのが現状である。

そこで、本研究では原子力災害に対応したシミュレーションモデルを開発するためにまず基本となる規範的な避難行動を仮定し、避難行動の不確実性を取り除いた**First-Best**な避難シナリオを提供するモデルを定式化する。さらに新潟県柏崎市周辺のネットワーク、柏崎市の避難計画及び世帯データから作成したODデータを用いて、避難シミュレーションを行う事で本提案手法の計算可能性を検証する。

2. モデルの定式化

(1) 本モデルの特徴

本研究では、規範的モデルとして、避難者の避難行動において起点出発時間、避難経路等を完全に制御できる状況を仮定する。すなわち、シミュレーション上のネットワークに待ち行列つまり渋滞を作ってしまうと、渋滞によりその上流部の道路容量を低減させてしまう危険性がある。よって本研究ではネットワーク上に渋滞を発生させないように、トリップの経路と出発時間を制御する。

(2) 基本モデルの定式化

研究背景と目的でも述べたように原子力災害に対応したモデルの開発を行うために、まずは基本となる規範的避難オペレーションに基づいた避難計画モデル（以下、基本モデルとする）を定式化する。

1) 定式化の問題設定

総避難完了時間を最小化する目的関数を定式化する。また避難需要は柏崎市の住民基本台帳人口・世帯数（平成27年度）より作成した。また避難需要の発生・集中地点も同様に、柏崎市広域避難計画から設定し、避難経路は最短経路とした。

2) 定式化

総避難完了時間とは全ての避難需要が終点である集中地点に辿り着いた時間となる。ただし、ネットワーク上に待ち行列（渋滞）が発生しないように出発時刻を制御するため起点での待機時間が発生する。よって総避難完了時間は待機時間と避難完了までの移動時間の和となる。

以上のことを踏まえて問題の定式化を行うと、次のような線形最適化問題となる。

・目的関数

$$\min \sum_t \sum_o r_o(t) \cdot (t + t_o) \quad (1)$$

・制約条件

$$\sum_t r_o(t) = Q_o \quad \forall_o \in O \quad (2)$$

$$\sum_t \sum_o r_o = \sum_o Q_o \quad (3)$$

$$\lambda_{ij}(t) \leq v_{ij} \quad v_{ij} = \text{given}, \forall(i, j) \in L, \forall_t \quad (4)$$

$$\lambda_{ij}(t) \geq 0 \quad \forall(i, j) \in L, \forall_t \quad (5)$$

$$r_o(t) \geq 0 \quad \forall_d \in P, \forall_t \quad (6)$$

ただし、

O : 起点集合, L : リンク集合,

t : 災害発生からの経過時刻,

t_o : 起点 o から終点までの到着にかかる所要時間,

Q_o : 起点 o が所与の避難需要(所与),

$\lambda_{ij}(t)$: 時刻 t にリンク (i, j) に流入する交通量,

$v_{ij}(t)$: 時刻 t にリンク (i, j) の容量(所与),

$r_o(t)$: 時刻 t に起点 o を出発する交通量

以上の定式化では、時間軸を等しい間隔の Δt 単位に離散化しており、起点 o から終点までの到着にかかる所要時間、災害発生からの経過時刻等は Δt 間隔で表現される。

まず目的関数(1)であるが、 $r_o(t)$ は起点 o より発生した累積交通量を表しており、交通量が発生した時刻 t に終点までにかかる所要時間 t_o を足すことで、終点に到着する時刻を表現している。

次に式(2)及び(3)は、発生交通量が交通需要と等しくなるための制約条件、式(4)はリンクの容量制約条件、式(5)、(6)はそれぞれ未知数の非負条件である。したがって、基本モデルは $\lambda_{ij}(t)$ 、 $r_o(t)$ を未知数として、式(2)~(6)の制約下で目的関数を最小化する線形最適化問題となる。

3. 総避難完了時間算出モデル

(1) 最短経路探索の定式化

基本モデルの定式化で総避難完了時間を求める式を定式化した。総避難完了時間を算出するにあたり、各交通需要がどのような経路を用いて避難行動を行うかを設定しなければならない。そこで今回は、各交通需要は最短経路で避難を行うと仮定し、各需要の最短経路探索問題を定式化する。

・目的関数

$$\min \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \quad \forall(i, j) \in E \quad (1)$$

・制約条件

$$\sum_j x_{sj} - \sum_j x_{js} = 1 \quad \forall(s, j) \in E \quad (2)$$

$$\sum_j x_{oj} - \sum_j x_{jo} = -1 \quad \forall(o, j) \in E \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ij} - \sum_i \sum_j x_{ji} = 0, i \neq o, i \neq d \quad (4)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad (5)$$

ただし、

s : 始点 s , o : 終点 o ,

c_{ij} : (i, j) 間の距離(コスト),

x_{ij} : (i, j) 間移動の有無

まず目的関数(1)であるが、 c_{ij} がリンク (i, j) 間の距離を表しており、 x_{ij} によってそのリンクを通過するかの有無を決定し、出発地点から到着地点までの通過合計距離を表現している。

次に式(2)は始点(出発地点)の制約条件であり、始点においては他の1地点へ出るだけで、他の地点から出発地点へ入ることはないことを示している。式(3)は終点(到着地点)の制約条件であり、終点においては他の1地点から入るだけで、終点から他の地点へ出ることはないことを示している。式(4)は始点、終点以外の地点での制約条件であり、他の1地点から入って、別の1地点から出ることを示している。式(5)は上記でも述べたように、あるリンクを通過するかの有無であるため通過する場合は、 $x_{ij} = 1$ 、通過しない場合は、 $x_{ij} = 0$ となる。したがって、最短経路探索モデルは x_{ij} を未知数として、式(2)~(5)の制約下で目的関数を最小化する線形最適化問題となる。

(2) 総避難完了時間算出フロー

以上の基本モデル、最短経路探索を用いて総避難完了時間を算出を行う。図-1にこのシミュレーションモデルのフローを示す。まず予め設定されたODデータ、ネットワークデータから各交通需要の最短経路の探索を行う。その後、ODデータ毎に最短経路をマッチングしたデータ及び、ネットワークデータを用いて総避難完了時間を算出する。

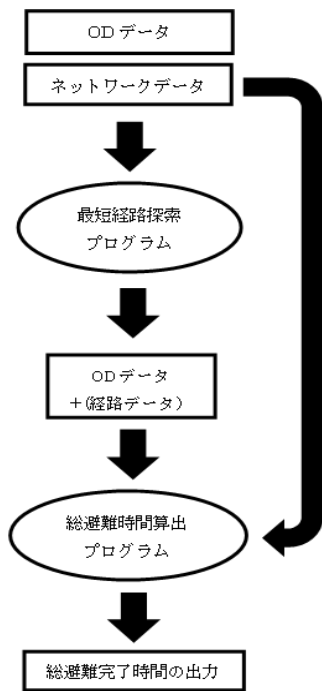


図-1 総避難完了時間シミュレーションモデルフロー

4. 柏崎市のネットワークを用いた計算可能性の検討

本研究で作成した総避難完了時間シミュレーションモデルの計算可能性を検討するために検証モデルとして新潟県柏崎市周辺のネットワークモデルを用いて計算を行った。なお、本検討は作成したシミュレーションモデルの計算可能性に関する検討が目的であるためネットワーク内におけるリンク容量、自動車速度などの設定は、実際の柏崎市を忠実に再現したものではないので、シミュレーションにより得られた結果が必ずしも実際の総避難完了時間を表すわけではないことをここで断っておく。

(1) 対象地域：新潟県柏崎市周辺について

今回対象地域に設定した新潟県柏崎市周辺には日本最大級である柏崎刈羽原子力発電所が存在している。しかし現在は、発電所内、全発電機が機能停止中である。

(2) 使用データ・ネットワーク

図-2 が今回使用した柏崎市のネットワークである。OD データは PAZ 地域を対象として、柏崎市の「住民基本台帳人口・世帯数（平成 27 年度）」⁴及び、刈羽村の人口を用いた。各避難需要の始点・終点は柏崎市の「原子力災害に備えた柏崎市広域避難計画」⁵及び刈羽村の「原子力災害避難するための行動指針と避難計画」⁶を用いて作成した。

その結果、避難需要は 6988 台となり、ネットワーク内の有効リンク数は 6,418、ノード数 3,144、そのうち起点ノード 105、避難ノード 3 となった。

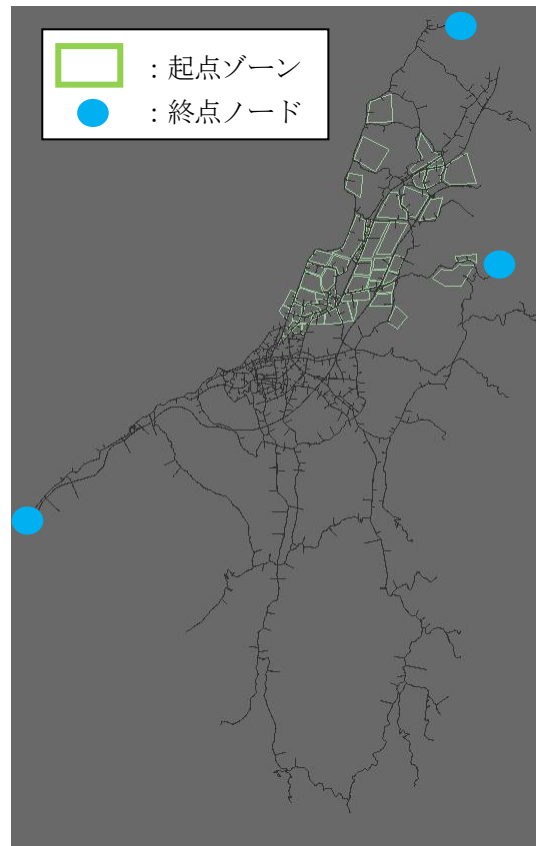


図-2 柏崎市周辺のネットワーク

(3) シミュレーション条件

本シミュレーションモデルは柏崎・刈羽村の PAZ 地域住民がそれぞれ柏崎・刈羽村の避難計画に従って、避難地域まで避難することを想定したシミュレーションである。時刻 t の微小区間 Δt に分けて離散化するが、今回は計算精度を保つため、 $\Delta t = 60 \text{ (sec)} = 1.0 \text{ (min)}$ とした。また、全ての自動車速度は 60 (km/h)、ネットワーク内道路は全て 1 車線のみとし、各道路の交通容量は 1800 (veh/h)、と設定した。これらの条件で python から数理最適化ソルバー(Gurobi Optimizer) を呼び出して計算を行う。

(4) シミュレーション結果と考察

今回設定した条件下での総避難完了時間シミュレーションモデルの計算結果としては、186.6(分)であった。この結果の考察としては、避難計画の設定より避難方向が三方向となり、避難需要の経路選択が最短経路であるため、各方向における避難経路は初動を除いて一致した。よって交通容量設定より 3 時間は妥当であると思われる。

5. 今後の予定

本研究では総避難完了時間を算出するために基本モデルの定式化及び、交通需要の経路選択に最短経路探索モデルの定式化を行いシミュレーションを行った。しかし、現状の基本モデルは避難需要は最短経路でしか避難することができない、高速道路と一般道路を区別することができないといった問題があるため非現実的なモデルであると言える。よって今後の研究方針としては避難需要の経路選択として確率的利用者均衡モデルを定式化することが課題である。

その後、基本モデルが完成したのち原子力災害時の目的関数（人体への放射線影響、土砂災害や洪水による複合災害等）の検討を行う。

参考文献

- 1) 大石雪絵, 桑原雅夫: 規範的オペレーションに基づく避難インフラの限界能力評価. 第 52 回土木計画学研究発表会・講演集, pp.2553-2560
- 2) 安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志: 時間拡張ネットワークを用いたリンクベース最適避難計画モデルの構築. 第 52 回土木計画学研究発表会・講演集, pp.369-377.
- 3) 加藤直樹, 瀧澤重志: 最速避難計画のモデリングと解法. オペレーション・リサーチ, 2015 年 8 月号, pp.437-442, 2015 年
- 4) 住民基本台帳人口・世帯数 (平成 27 年度)
<http://www.city.kashiwazaki.lg.jp/toke/shise/toke/jinko/daicho/1604131100.html>
- 5) 原子力災害に備えた柏崎市広域避難計画
<http://www.city.kashiwazaki.lg.jp/atom/genshiryoku/taisaku/documents/kouikihinankeikaku2712.pdf>
- 6) 原子力災害避難するための行動指針と避難計画
<http://www.vill.kariwa.niigata.jp/www/info/detail.jsp?id=33>