

# 規範的避難行動に基づく原子力災害時の避難需要最適配分

長岡技術科学大学大学院 原子力システム安全工工学専攻 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 鳩山紀一郎

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

## 1. 背景・目的

近年、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このような事故が発生しないように発電所の安全設備の強化や、安全管理の見直されている。また、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。

一般的に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想定するために避難シミュレーションモデルが用いられている。これまで災害時の避難シミュレーションモデル構築の研究は大石・桑原<sup>1)</sup>、安藤ら<sup>2)</sup>、加藤・瀧澤<sup>3)</sup>などによって行われているが、いずれも避難者の行動モデル及び津波や土砂災害等の影響度の定式化をおこなっているが、原子力災害を対象としたモデルの開発は行われていないのが現状である。各自治体の避難計画は既存の避難シミュレーションモデルを用いているため、原子力災害時を想定する際に避難需要の被ばく線量といった原子力災害特有の要素について考慮が不十分である。

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として避難需要は規範的な避難行動を行うとした上で、最も効率的な避難シナリオである避難者の総被ばく線量を最小化する避難需要の最適配分を算出するモデルを定式化する。

本研究では、柏崎刈羽原子力発電所で災害が起こることを想定し、原発から半径 5km 圏内（新潟県柏崎市周辺）をシミュレーション対象として、柏崎市周辺のネットワーク、放射性物質拡散シミュレーション結果、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、避難需要を最適配分した場合の避難需要の総被ばく線量及び避難完了時間を算出する。

## 2. 避難需要最適配分モデル

### (1) モデルの特徴

まず原子力災害においては避難需要の受ける放射線量、すなわち被ばく線量を最小化することが最重要である。そのため一般的な災害時に行う最短時間で避難するための経路が必ずしも最適解となるとは限らないため、本モデルの避難経路は最短経路だけではなく、最小被ばく線量となる経路を選択する場合も考える。またネットワークの時間的变化に対応するため、一定時間ごとにリンクの残留交通量から各リンクの速度低下を算出し、その値を用いて各避難経路を算出する。

また規範的モデルとして、避難者の避難行動（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「交通密度による車両の速度低下は考慮するが、渋滞を発生させない」モデルを考える。シミュレーション上のネットワークに渋滞を発生させると、渋滞によりその上流部の交通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、各避難需要の被ばく線量が最小になるように避難経路と出発時間を制御する。

### (2) モデルの定式化

本モデルは避難時総被ばく線量を目的関数とし、これを最小化する。避難時総被ばく線量とは各避難需要が終点である集中地点に辿り着くまでに受けた線量の合計値となる。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。同様に避難時総被ばく線量は待機時によって発生する総被ばく線量（待機時総被ばく線量）と避難時被ばく線量の和となる。また待機時被ばく線量は屋内待機、避難時被ばく線量は自動車による避難を踏まえて各低減率を考慮する。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

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

・制約条件

$$\sum_o r_o(t - t_{oi}) \cdot x_{oij} = \lambda_{ij}(t) \quad (2)$$

$$t_{oi}, x_{oij} = \text{given}, \forall_o \in O, \forall_t$$

$$\sum_t r_o(t) = Q_o \quad \forall_o \in O \quad (3)$$

$$\sum_t \sum_o r_o(t) = \sum_o Q_o \quad (4)$$

$$\lambda_{ij}(t) \leq v_{ij} \quad v_{ij} = \text{given}, \forall(i, j) \in L, \forall_t \quad (5)$$

$$\lambda_{ij}(t) \geq 0 \quad \forall(i, j) \in L, \forall_t \quad (6)$$

$$r_o(t) \geq 0 \quad \forall_o \in O, \forall_t \quad (7)$$

$$\sum_t y_o(t) \cdot I = W_o(t) \quad \forall_o \in O, \forall_t \quad (8)$$

ただし、

$o$  : 起点,  $O$  : 起点集合,  $L$  : リンク集合

$t$  : 災害発生からの経過時刻(分)

$t_{oi}$  : 起点  $o$  からノード  $i$  までの所要時間(分)

$x_{oij}$  : 起点  $o$  の発生交通量がリンク  $(i, j)$  の使用有無

$Q_o$  : 起点  $o$  の避難需要 (所与) (台)

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

$v_{ij}$  : リンク  $(i, j)$  の交通容量 (所与) (台)

$r_o(t)$  : 時刻  $t$  に起点  $o$  を出発する交通量(台)

$C_o(t)$  : 時刻  $t$  に起点  $o$  を出発して終点に

到着するまでに受ける被ばく線量(Sv)

$W_o(t)$  : 時刻  $t$  に起点  $o$  における待機時被ばく線量(Sv)

$y_o(t)$  : 単位時間当たりの起点  $o$  の被ばく線量(Sv)

$I$  : 室内における放射線量の低減率(0.4)<sup>4)</sup>

以上の定式化では交通需要の時間軸を等間隔の  $\Delta t$  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この  $\Delta t$  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  $o$  より発生した交通量を表しており、起点  $o$  から終点に到着するまでに受ける被ばく線量  $C_o(t)$  に、時刻  $t$  まで待機していたことで受ける線量である待機時被ばく線量  $W_o(t)$  を足すことで、終点に到着するまでに受ける総被ばく線量を表現している。次に式(2)は、任意のリンク  $(i, j)$  における交通量保存則を表しており、 $r_o(t - t_{oi})$ は起点  $o$  から時刻  $t$  にリンク  $(i, j)$  に流入する交通量を表している。式(3)及び(4)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(5)はリンクの容量制約条件、式(6)、(7)はそれぞれ未知数の非負条件である。式(8)は待機時に受ける総被ばく線量であり、待機時は室内待機として起点  $o$  で待機時総被ばく線量に室内待機による被ばく線量低減率 0.4 を乗した値となる。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)~(8)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. 最小被ばく線量経路探索

前項で避難者の避難時被ばく線量を求める式を定式化した。避難時被ばく線量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。本モデルではモデルの特徴でも述べたように、避難者が最小被ばく線量で避難を行うと仮定し、各需要の最小被ばく線量経路探索問題を定式化する。

・目的関数

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

・制約条件

$$\sum_j x_{oj} - \sum_j x_{jo} = 1 \quad \forall(o, j) \in E \quad (2)$$

$$\sum_j x_{dj} - \sum_j x_{jd} = -1 \quad \forall(d, j) \in E \quad (3)$$

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

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

ただし、

$o$  : 起点,  $d$  : 終点,  $E$  : 起終点集合

$x_{ij}$  :  $(i, j)$  間移動の有無

$C_{ij}(t)$  : 単位時間当たりのリンク  $(i, j)$  間の被ばく線量(Sv)

また  $C_{ij}(t) = y(t) \cdot K$

$y(t)$  : リンク通過時被ばく線量(Sv)

$K$  : 自動車による被ばく線量低減率(0.6)

まず目的関数(1)であるが、 $c_{ij}$ がリンク  $(i, j)$  間の通過時被ばく線量を表しており、 $x_{ij}$  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時合計被ばく線量を表現している。この時、 $c_{ij}$ は避難時に自動車を使用するとしてリンク間の被ばく線量に自動車による被ばく線量低減率 0.6 を乗して計算を行った。

次に式(2)は起点 (出発地点) の制約条件であり、起点に

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。また自動車による被ばく線量低減率は実測値を参考にして値を決定した。よって、最小被ばく線量経路探索モデルは $x_{ij}$ 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。

#### 4. シミュレーションモデルの実装

本研究で作成した避難時総被ばく線量シミュレーションモデルの検証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検証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ことをここで断っておく。

##### (1) 対象地域

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。1号機から7号機までの7基の原子炉を有し、合計出力は約821万キロワットである。この値は福島第一発電所の約1.7倍の出力であり、この原子力発電所で福島第一と同様の事故が発生した場合、福島以上の被害が発生することが想定される。

##### (2) 使用データ・ネットワーク

ODデータはPAZ地域(原発より半径5km圏内)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)」<sup>4)</sup>及び、刈羽村の人口を用いた。各避難需要の起点・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」<sup>5)</sup>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」<sup>6)</sup>を用いて作成した。

避難需要は9,028台(村上方向:1937台、湯沢方向:660台、上越方向:6501台)、ネットワーク内の有効リンク数は12,872、ノード数7,859、起点ノード104、終点ノード3(村上方向、湯沢方向、上越方向)である。またネット

ワーク内における各リンクの単位時間当たりの被ばく線量の設定であるが、新潟県が平成27年12月17日に公表したSPEEDIを用いた放射性物質拡散シミュレーション結果の「ケース1・北西・強風・雨なし」<sup>7)</sup>におけるAM7:00からPM19:00までの全13時間分のデータを使用した。

##### (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 $\Delta t$ に分けて離散化するが、今回は計算精度を保つため、 $\Delta t=1.0$ (分)とした。他に自動車速度は各道路の制限速度とし、各道路の交通容量は1200(veh/h)と設定した。各リンクの被ばく線量及び、各リンクの残留交通量によるリンク速度低下は1時間ごとに更新を行った。

また比較のため同条件で避難需要が最短経路で避難した場合のシミュレーションも同様に行った。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

まず本シミュレーション結果の考察を行うにあたり、今回使用した放射線量データは図-1に示すように湯沢方向が主に高線量である。よって結果の考察としては、シミュレーション結果全体及び湯沢方向のみの結果の避難完了時間、総被ばく線量の比較・検討を行った。

本シミュレーション結果を図-2に示す。湯沢方向のみでは最小被ばく線量経路は最短経路と比較して、

- ・避難完了時間は、**1.3倍**増加した
- ・総被ばく線量は、**0.6倍**減少した

しかし、全体では最小被ばく線量経路は最短経路と比較して、総被ばく線量は**0.8倍**となったが避難完了時間にほとんど差が無い結果となった。

これは本シミュレーションで使用した放射線量データが図-1のように、全時間帯を通して発電所から湯沢方向に放射性物質が飛散する結果であるため、湯沢方向の避難経路は、最小被ばく線量経路の方が被ばくを避けるため迂回する経路となった。しかし湯沢方向の避難需要は660台と全体の7.3%であるため全体の避難時間には影響が小さいためである。

以上の事から原子力災害時には最短経路ではなく、最小被ばく線量経路で避難する事が重要であるといえる。

また最大被ばく線量が規定値である 20(mSv)以下であったことから、全ての避難需要は規定値以下の被ばく線量で避難が可能であることが考えられる。

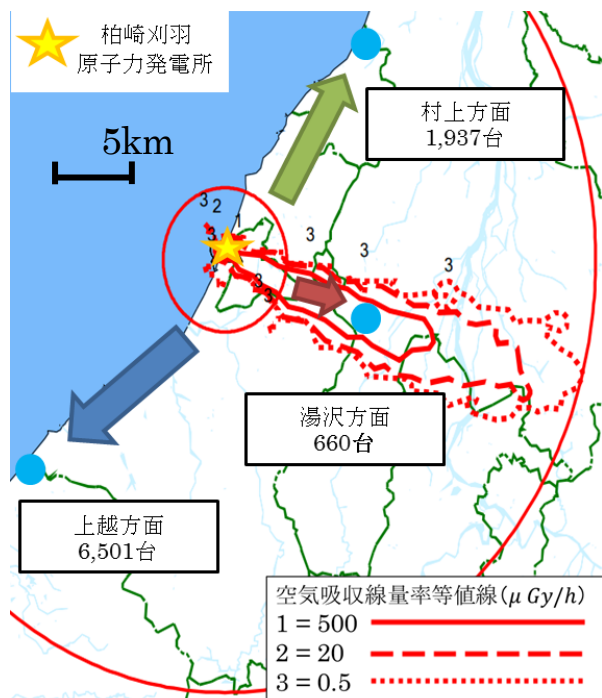


図-1 線量及び避難需要のシミュレーション条件

表-2 シミュレーション結果比較

	最短経路	最小被ばく線量経路
避難完了時間 (湯沢方向のみ)	38.9(分)	50.6(分)
避難完了時間	346.2(分)	348.1(分)
総被ばく線量 (湯沢方向のみ)	289.1(mSv)	195.5(mSv)
総被ばく線量	1398.1(mSv)	1109.6(mSv)
最大被ばく線量	8.1(mSv)	2.2(mSv)

## 5. まとめ

本研究では避難時総被ばく線量を算出するためモデルの定式化及び、交通需要の経路選択に最小被ばく線量経路探索モデルの定式化を行い最短経路及び最小被ばく線量経路の 2 パターンのシミュレーションを行った。その結果、本シミュレーション条件では両者の避難完了時間にはほとんど差が無いが、総被ばく線量の結果から最小被ばく線量経路での避難の重要性が示せる可能性がわかった。

今後の課題としてはまず本シミュレーション条件として避難需要を PAZ 地域と限定して行ったが、発電所の周囲 30km 圏内である UPZ 地域の住民が避難する場合も考慮してシミュレーションを行う必要性があり、それに伴いネットワークを柏崎周辺だけではなく 30km 圏内に拡張する必要がある。また OD データについても UPZ 地域住民に対応したデータを作成する必要がある。

また本シミュレーションモデルを用いて、①避難需要が任意に避難する場合、②避難需要が市の避難計画に沿って避難する場合(PAZ 地域住民 → UPZ 地域住民の順)、③避難需要完全制御モデル(本シミュレーション条件)の 3 パターンのシミュレーションを行い、各パターンの避難完了時間、総被ばく線量の比較検討を行う。

## 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, 2015 年
- 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, 2015 年
- 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, pp.437-442, 2015 年
- 4) 放射線リスクに関する基礎的情報 - 復興庁  
[http://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat1/sub-cat1-1/20140218\\_basic\\_information\\_all.pdf](http://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat1/sub-cat1-1/20140218_basic_information_all.pdf)
- 5) 柏崎市住民基本台帳人口・世帯数 (平成 27 年度)  
<http://www.city.kashiwazaki.lg.jp/toke/shise/toke/jjnko/daicho/1604131100.html>
- 6) 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/genshiryog/utaisaku/documents/kouikihinankeikaku2712.pdf>
- 7) 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>
- 8) 放射性物質拡散シミュレーション結果 ケース 1・北西・強風・雨なし  
[http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML\\_Article/706/996/case1-nw-h.pdf](http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/706/996/case1-nw-h.pdf)