

規範的避難行動原理に基づく 原子力災害時の避難需要の避難開始時刻最適化

南 裕也¹, 佐野 可寸志², 鳩山 紀一郎³, 伊藤 潤⁴

¹非会員 長岡技術科学大学大学院 原子力システム安全工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: s143327@stn.nagaokaut.ac.jp

²正会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: sano@nagaokaut.ac.jp

³正会員 長岡技術科学大学 産学融合トップランナー養成センター (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: kii@vos.nagaokaut.ac.jp

⁴正会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: j_ito@vos.nagaokaut.ac.jp

本研究では、原子力災害時の避難行動を対象として、避難者の被ばく線量を最小化する「最小被ばく線量経路探索モデル」、避難者全体の総被ばく線量を最小化するように避難開始時間を配分する「最小被ばく線量配分モデル」を軸とした規範的避難行動に基づく避難シミュレーションモデルの構築を行った。そして、柏崎刈羽原子力発電所から半径 30km 圏内を対象とした避難シミュレーションを実行した。結果として、原子力災害の場合、最短経路ではなく最小被ばく線量経路を用いて避難することの有効性が確認でき、また多くの条件のシミュレーションを行うことで、避難計画に定められた避難方向を変更しなくても安全な避難が可能な条件を示せることがわかり、避難計画作成時に検討すべき点を示唆することができた。

Key Words: nuclear disaster, optimal allocation, exposed radiation dose, evacuation route

1. はじめに

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、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新潟県柏崎市¹⁾、福島県いわき市²⁾のように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。これまでの災害時の避難シミュレーションモデル構築に関する研究には、大石・桑原³⁾、安藤ら⁴⁾、加藤・瀧澤⁵⁾の研究などが挙げられる。これらは避難者の行動モデル及び津波の影響度を定式化することでモデル構築を行っており、津波による被害を最小化する避難行動を表現するものとなっている。原子力災害を対象としたものとしては、長井ら⁶⁾や藤田ら⁷⁾の

研究や、県の避難計画として鹿児島県⁸⁾や青森県⁹⁾において原子力災害時の避難シミュレーションが行われている。これらは災害時の風向きを考慮することで間接的に原子力災害時において最も重要となる避難者の被ばく線量の最小化を目指している。しかし、いずれも既存のシミュレーションソフトウェアを用いて分析が行われているため、用いた手法で実際に避難者の被ばく線量が最小化されているかを確認することはできていない。従って、現在用いられている避難シミュレーションモデルでは原子力災害時を取り扱う際に重要となる避難需要の被ばく線量について考慮が不十分といわざるを得ず、避難時の被ばく線量を最小化するという観点から避難行動、避難経路等を求めようとする避難シミュレーションモデルの開発が急務といえる。

また、一般的に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)によって大きく変動する。そのため、様々な避難計画を評価するためにはベンチマークとなる避難シナリオが必要である。本研究では、現存インフラにおいて全避難者の避難行動を最適に制御できたとした場合、即ち全避難者が「規範的避難行動」を行うとした場合がベンチマークになりうると考え、規範的避難行動に基づく原子力災害に対応した避難シミュレーションモデルを構築することとした。

以上より、本研究では、まず避難者の被ばく線量を最小化する避難経路及び避難開始時刻を算出するために①避難需要の避難時被ばく線量が最小となる経路探索を行う「最小被ばく線量経路探索モデル」と②避難需要の避難開始時刻を最適に制御し、避難需要全体の被ばく線量である総被ばく線量を最小化する「最小被ばく線量配分モデル」の定式化を行い、更にこれらを用いて規範的避難行動に基づく原子力災害時に対応した避難シミュレーションモデルを構築する。そして、新潟県柏崎刈羽原子力発電所の半径 30km 圏内を避難対象として避難シミュレーションを実行することで、本研究で構築した「原子力災害に対応した避難シミュレーションモデル」の有用性について検証し、シミュレーション結果の考察から原子力災害時の避難計画作成に関して示唆を与えることを目的とする。

2. 規範的避難行動に基づく原子力災害に対応した避難シミュレーションモデルの構築

(1) 本モデルの基本的考え方

まず、避難シミュレーションモデルを構築するうえでの基本的考え方について以下に示す。

(a) 渋滞を発生させない

本研究では避難者は規範的避難行動をとるとしており、避難行動における起点出発時刻、避難経路等は完全に制御できる状況を仮定する。そのため、交通密度による車両の速度低下は考慮するが、渋滞は発生させないものとする。具体的には、ネットワーク上の各リンクに交通容量以上の車両が流入しないように各避難者は避難経路と出発時刻を制御する。

(b) 総被ばく線量の最小化を目的とする

原子力災害においては避難者の被ばく線量を最小化することが最も重要であり、最短時間で避難することが必ずしも最適解となるとは限らない。そのため、本モデルでは最短経路ではなく、最小被ばく線量となる

経路を避難経路として各避難者は選択するものとする。更に、規範的避難行動下では、各避難者の避難開始時刻は避難需要全体の被ばく線量を最小化するように制御されるものとする。

(c) 動的な交通量配分を考える

原子力災害の場合、放射線量は刻一刻と変動するため、経過時間を考慮する必要がある。従って本モデルでは、交通ネットワークデータにおける交通量データや線量データを動的に更新し、避難需要の配分を行うものとした。

(2) 避難シミュレーションの流れ

図-1 に本研究で構築した原子力災害に対応した避難シミュレーションモデルの流れを示す。本モデルは、前述の通り「最小被ばく線量経路探索」、「最小被ばく線量配分」を軸に、「入力データ処理」と「ネットワークデータの更新」を行うものとしている。また、最終的な出力としては「総被ばく線量」、「最大被ばく線量」、「避難完了時間」を算出することとした。最大被ばく線量を考慮するのは、最小被ばく線量配分を行った結果として著しく不公平な状態が生じていないことを確認するためである。

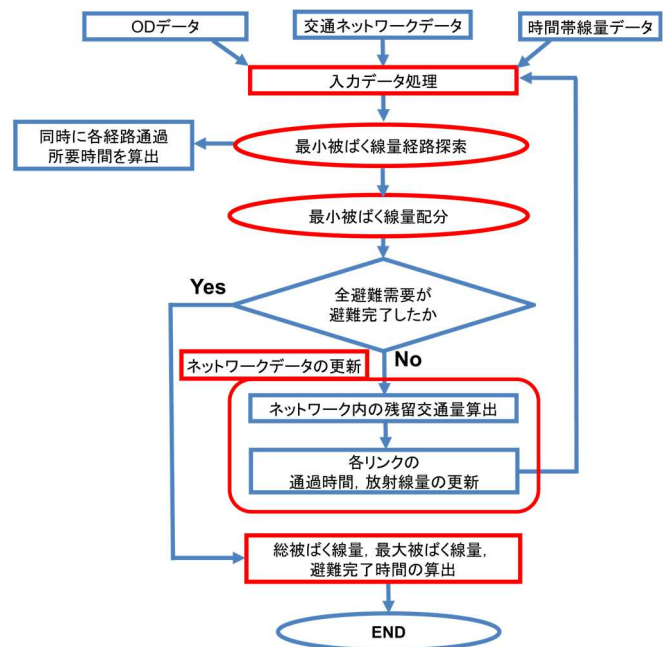


図-1 避難シミュレーションの流れ

シミュレーションの計算プロセスとしては、本モデルは災害後の経過時間を考慮するため、1時間毎に各ODの避難経路の算出と避難需要の避難開始時刻の決定を行い、避難需要が全て避難完了するまでこの処理を繰り返し行う。

まず、ある時間帯の各避難者が最小被ばく線量となる避難経路を「最小被ばく線量経路探索」により決定する。この経路を用いて、その時間帯の避難者全体の被ばく線量である総被ばく線量が最小となるように避難需要の避難開始時刻を「最小被ばく線量配分」により決定する。その後、避難需要が全て避難完了していない場合はこの時間帯の避難需要の避難状況により交通ネットワークデータを更新し、次の時間帯のリンク通過時間を算出する。このとき、次の時間帯における各リンク通過時間は、以下の式(1)に示すBPR関数を用いた。パラメータは、松井らによる既往研究¹⁰⁾を参考にして定めた。

$$T_{ij}(t) = T_{ij}^0 \cdot \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{\lambda_{ij}(t)}{v_{ij}} \right)^\beta \right\} \quad (1)$$

ただし、

$T_{ij}(t)$: 時刻 t におけるリンク (i, j) の通過時間、

T_{ij}^0 : リンク (i, j) の自由通過時間(所与)、

$\lambda_{ij}(t)$: 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)、

α, β : パラメータ($\alpha = 0.48, \beta = 2.89$)¹⁰⁾。

T_{ij}^0 は交通ネットワークデータ、 v_{ij} はシミュレーション条件により決定され、各時間帯において値は一定である。この計算結果及び事前に算出してある次の時間帯の線量データから、次の時間帯の計算を行い、避難需要が全て避難完了したら、総被ばく線量、最大被ばく線量、避難完了時間を算出し、避難シミュレーションを終了する。

(2) 最小被ばく線量経路探索モデル

本研究では既存の最短経路探索問題^{例えば 11)}を援用することで各避難需要が使用する最小被ばく線量経路を決定する「最小被ばく線量経路探索モデル」を作成する。具体的には以下の通りである。

・目的関数

$$\min \sum_i \sum_j (D_{ij}(t) \cdot T_{ij}(t)) \cdot x_{ij}(t) \quad (2)$$

・制約条件

$$\sum_j x_{Rj}(t) - \sum_j x_{jR}(t) = 1 \quad \forall (R,j) \in E \quad (3)$$

$$\sum_j x_{Sj}(t) - \sum_j x_{jS}(t) = -1 \quad \forall (S,j) \in E \quad (4)$$

$$\sum_j x_{ij}(t) - \sum_k x_{ki}(t) = 0 \quad (5)$$

$i \neq R \text{ and } i \neq S, \forall (i,j,k) \in E$

$$x_{ij}(t) = 0 \text{ or } 1 \quad (6)$$

ただし、

$T_{ij}(t)$: 時刻 t におけるリンク (i, j) の通過時間、

$D_{ij}(t)$: 時刻 t におけるリンク (i, j) 上の放射線量、

$x_{ij}(t)$: 時刻 t におけるリンク (i, j) 間の移動の有無、

R : Origin(起点), S : Destination(終点), E : ノードペア集合。

まず目的関数(2)は、ある車両が起点 R から様々なリンク (i, j) を通過して終点 S に到着するまでに受ける被ばく線量を表現している。制約条件(3)は起点においては他の1ノードへ出るだけであることを、制約条件(4)は終点においては他の1ノードから入るだけであることを示している。また、制約条件(5)は起点、終点以外のノードでは他の1ノードから入って、別の1ノードへ出ることを示している。制約条件(6)はあるリンクを実際に経路が通過するかどうかを表し、通過する場合は $x_{ij}(t) = 1$ 、通過しない場合は $x_{ij}(t) = 0$ となることを示している。従って、最小被ばく線量経路探索モデルは $x_{ij}(t)$ を未知数として、式(3)~(5)の制約下で目的関数(2)を最小化する0-1整数計画問題となる。また後述する避難シミュレーションの比較を行うため $D_{ij}(t) = 1$ として最短経路を用いて避難するとした場合を「最短経路探索モデル」とする。

(3) 最小被ばく線量配分モデル

次に、最小被ばく線量配分問題を定式化し、「最小被ばく線量配分モデル」を作成する。

・目的関数

$$\min \sum_t \sum_o r_o(t) \cdot (C_o(t) + W_o(t)) \quad (7)$$

・制約条件

$$\sum_o r_o(t - t_{oi}) \cdot x_{oij} = \lambda_{ij}(t) \quad (8)$$

$t_{oi}, x_{oij} = \text{given}, \forall o \in O, \forall t$

$$\sum_t r_o(t) = Q_o \quad \forall o \in O \quad (9)$$

$$\lambda_{ij}(t) \leq v_{ij} \quad \forall (i, j) \in L, \forall t \quad (10)$$

$$\lambda_{ij}(t) \geq 0 \quad \forall (i, j) \in L, \forall t \quad (11)$$

$$r_o(t) \geq 0 \quad \forall o \in O, \forall t \quad (12)$$

$$\sum_t y_o(t) \cdot I = W_o(t) \quad \forall o \in O, \forall t \quad (13)$$

$$C_o(t) + W_o(t) \leq Rad \quad \forall o \in O \quad (14)$$

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間,
 t_{oi} : 起点 o からノード i までの所要時間,
 x_{oij} : 起点 o の発生交通量のリンク (i, j) 使用の有無,
 Q_o : 起点 o 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} : リンク (i, j) の交通容量(所与)
 $r_o(t)$: 時刻 t に起点 o を出発する交通量,
 $C_o(t)$: 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,
 $W_o(t)$: 時刻 t までに起点 o における待機時被ばく線量,
 $y_o(t)$: 単位時間当たりの起点 o の被ばく線量,
 I : 室内における放射線量の低減率(0.4)¹²⁾,
 Rad : 避難時の被ばく量上限(20mSv).

以上の定式化では避難需要を Δt 間隔に離散化しており、起点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間はこの Δt 間隔で表現される。

まず目的関数(7)は、起点 o で自宅待機して時刻 t で出発した交通量 $r_o(t)$ が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。次に制約条件(8)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、時刻 t のリンク (i, j) の交通量が時刻 $t - t_{oi}$ に起点 o を出発した交通量の和であることを示している。制約条件(9)は、各起点 o から出発する交通量の和がその点の避難需要と等しくなることを、制約条件(10)はリンクの交通容量制約を示している。式(13)は起点 o で待機している間に受ける被ばく線量であり、避難開始まで木造家屋の自宅で室内待機していると仮定し、低減率0.4を乗じた値¹²⁾としている。式(14)は避難時被ばく線量の上限值であり、避難需要の最大被ばく線量が国の定めた¹³⁾基準値である20mSv以下とならなければならないことを示している。以上より、最小被ばく線量配分モデルは $\lambda_{ij}(t)$, $r_o(t)$ を未知数として、式(8)~(14)の制約下で目的関数を最小化する線形計画問題となる。

この「最小被ばく線量経路探索モデル」と「最小被ばく線量配分モデル」を用いた避難シミュレーションを以下では「最適制御モデル」と呼ぶことにする。

(4) 段階的避難行動モデル

現在、多くの地域の避難計画はPAZ（発電所から5km 圏内の区域）に居住する住民の避難が完了した後にUPZ（発電所から30km 圏内の区域）に居住する住民が避難を開始する段階的避難を計画している。この場合、PAZの避難はUPZの避難に影響されないため迅速に行うことができ、PAZの被ばく線量を減少させることが可能な避難方法である。この段階的

避難は前項の最小被ばく線量配分モデルに以下の制約条件式(15)を追加することで再現可能であり、この制約式を加えたモデルを「段階的避難行動モデル」と呼ぶことにする。

・制約条件

$$\sum_U r_U(t) = 0 \quad \sum_P r_P(t) > 0, \forall_U = \text{UPZ}, \forall_P = \text{PAZ} \quad (15)$$

ただし、

UPZ : UPZ 地点の起点集合, PAZ : PAZ 地点の起点集合,

$r_U(t)$: 時刻 t にUPZ 地点の起点 U を出発する交通量,

$r_P(t)$: 時刻 t にPAZ 地点の起点 P を出発する交通量.

3. 対象地域の設定とデータの作成

(1) 対象地域の設定

本研究では、避難シミュレーションの対象を図-2に示すように柏崎刈羽原子力発電所から30km 圏内とした。



図-2 対象地域に含まれる市町村

対象地域設定理由は、本発電所は福島第一発電所より規模が大きいこと、福島以上の災害発生が予想されるためである。この地域には図に示すように9つの市町村が存在するため、各市町村の避難計画（柏崎市¹⁾、刈羽村¹⁴⁾、長岡市¹⁵⁾、小千谷市¹⁶⁾、見附市¹⁷⁾、出雲崎町¹⁸⁾、燕市¹⁹⁾、十日町市²⁰⁾、上越市²¹⁾よりODデータを作成した。

(2) ODデータの作成

OD データは PAZ 及び UPZ を対象に、避難需要を 1 世帯あたり 1 台の交通量が発生すると仮定した。また各市町村の避難計画から避難需要の避難方面として 3 方面を設定した。例えば柏崎市の避難計画¹⁾では各地区別に避難先を設定しており、避難先は図-3 に示すように村上方面、妙高・糸魚川・上越方面（以下、上越方面）、湯沢・南魚沼方面（以下、魚沼方面）に分類されている。そのため、柏崎市の行政区別人口・世帯数から各行政区の避難需要を算出し、各避難先は避難計画から設定すれば OD データを作成することができる。

各市町村について作成した OD データの避難需要発生地点数は PAZ で 131 地点、UPZ で 117 地点の計 248 地点、総避難需要は村上方面：99,038 台、魚沼方面：37,577 台、上越方面：31,720 台の計 168,335 となった。

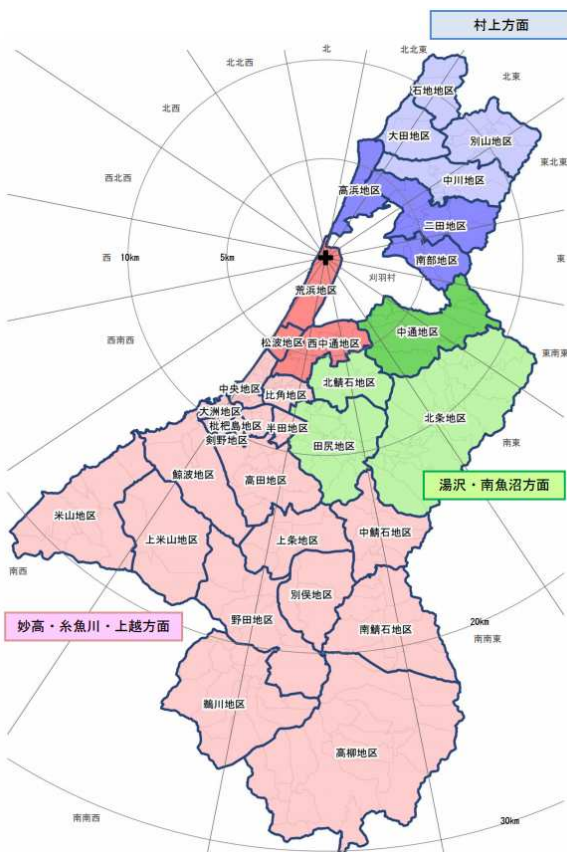


図-3 柏崎市の各地区の避難方面¹⁾

(3) 交通ネットワークデータの作成

図-4 が本避難シミュレーションに用いた交通ネットワーク全体図であり、国道・県道・市道を中心に、幹線道路の接続道路などの細い道路については、市街地部で特に細かく作成した。ノード数は 9,870、リンク数は 20,909 となった。起点ゾーンは前述の通り 248、終点ゾーン数は 3 (村上方面、魚沼方面、上越方面) である。

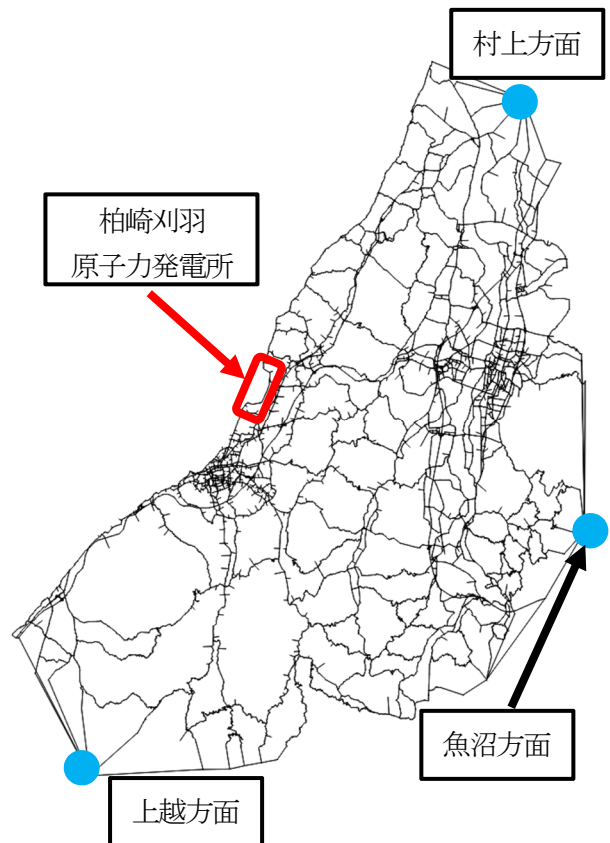


図-4 交通ネットワーク全体図

(4) 時間帯別放射線量データの作成

次に、ネットワーク内における各リンクの単位時間被ばく線量の設定については、新潟県が平成 27 年に公表した SPEEDI を用いた放射性物質拡散シミュレーション結果を参考にした。具体的には、気象条件として風向が南西、北東、北西の 3 パターンがある中で、市街地への被ばく線量領域が最も高かった「ケース 1・北西・強風・雨なし」²⁾における 7:00 から 19:00 までの全 13 時間分のデータを使用した。また、この結果は 13 時間分のデータしか存在しないため、それ以降は全て 13 時間目のデータを使用する。この場合、全時間帯を通して魚沼方面が高線量であることになる。なお、SPEEDI の結果は放射線のエネルギー量であるグレイ(Gy)で表現されるため、人体への影響評価を行うためシーベルトに変換した値を放射線量データとして扱う。以下がグレイからシーベルトへの変換式³⁾である。

$$\mu\text{Gy/h} \times 0.8 \times 10^{-3} = \text{mSv/h} \quad (15)$$

SPDEEI の結果は原子力発電所が最大値線量率として、3 種類の空気吸収線量率等値線 (500 $\mu\text{Gy/h}$, 20 $\mu\text{Gy/h}$, 0.5 $\mu\text{Gy/h}$) によって表現される。しかし最大線量値である発電所から最初の等値線である 500 $\mu\text{Gy/h}$ までにはある程度の距離があり、この区間を全て一律 500 $\mu\text{Gy/h}$ と扱うのは非現実的である。そこで、図-5 に示すように等値線区間を X 軸方向(風向き)と

Y軸方向に分離し、区間内の補完データの作成を行った。X軸方向の補完方法として図-6に示すように、X軸方向に原子力発電所、500 μ Gy/h等値線地点、20 μ Gy/h等値線地点、0.5 μ Gy/h等値線地点をそれぞれ4点設定し、発電所を基準として各点の発電所からの距離を求める事で区間内の近似曲線を作成し、近似曲線をもとに発電所から5km間隔で補完データを作成した。またY軸方向も同様に500 μ Gy/h等値線地点、20 μ Gy/h等値線地点、0.5 μ Gy/h等値線地点をそれぞれ3点設定し、最も外側である0.5 μ Gy/hを基準として各点の0.5 μ Gy/h地点からの距離を求めることで区間内の近似曲線を作成し、近似曲線を基に0.5 μ Gy/h地点から0.5km間隔で補完データを作成した。そして各リンクについて、両端がどの補完データに近いかを判断し、その平均値をそのリンクを通過した場合に受ける線量と定義した。

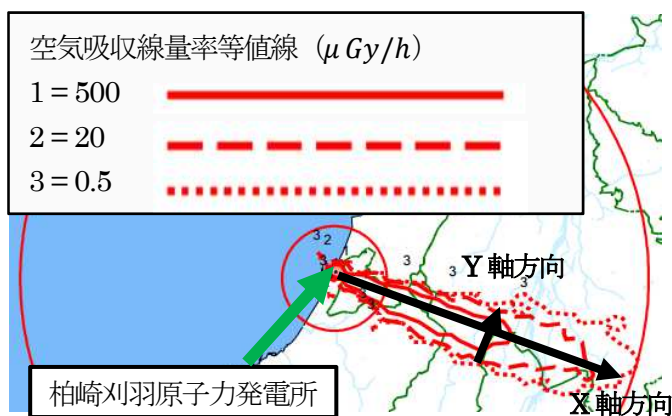


図-5 SPEEDIの補正結果について

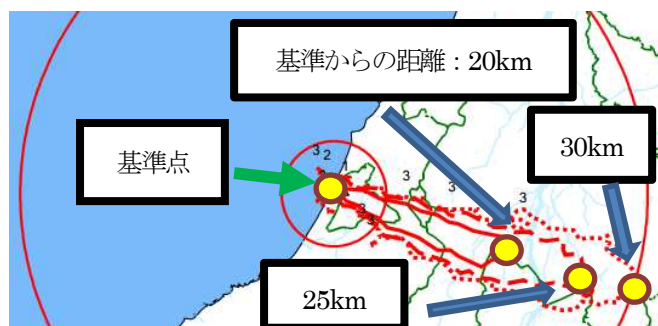


図-6 X軸方向における補完について

4. 避難シミュレーションの実行

(1) シミュレーション条件

以上のデータを用いて、避難シミュレーションを実行する。まず避難需要発生間隔 Δt は10(分)とした。また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基本的に一般

道は1,720(veh/h/車線)、高速道路は1,800(veh/h/車線)、高速道路合流部は1,400(veh/h)と設定した。なお、本避難シミュレーションに用いる道路ネットワークは広大なため交差点ごとに交通容量設定を行うことが難しい。そこで試行的に上記の設定で避難シミュレーションを行い、需要率の高い交差点23箇所を抽出した。そして抽出した高需要率交差点については測定を行って、各信号現示の有効青時間から当該交差点の交通容量を設定することで、リンク流出部の交通容量を現実の値に近づけている。具体的には、高需要率交差点の交通容量は、

$$(\text{有効青時間} / \text{サイクル長}) \times 1,800(\text{veh/h})$$
 として算出した。

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である「最短経路探索モデル」、段階的避難行動を再現した場合である「段階的避難行動モデル」の避難シミュレーションも行った。

(2) 各モデルのシミュレーション結果

表-1が今回避難シミュレーションを行った3つのモデルの結果である。総被ばく線量は段階的避難行動モデルが最小値を示し、最大被ばく線量は最適制御モデルと段階的避難行動モデルが共に最小値、避難完了時間は最短経路モデルが最小値であった。この結果をもとに、次項より最適制御モデルと最短経路モデル、最適制御モデルと段階的避難行動モデルの比較・考察を行う。

表-1 各モデルのシミュレーション結果

モデル名	総被ばく線量 (mSv・台)	最大被ばく 線量(mSv)	避難完了 時間
最適制御 モデル	253.69	0.45	20時間11分
最短経路 モデル	531.12	0.58	19時間01分
段階的避難 行動モデル	232.63	0.45	21時間26分

(3) 最短経路探索モデルとの比較

図-7がシミュレーションの結果として得られた最短経路と最小被ばく線量経路の比較の例である。これにより、最短経路の場合は高線量区間を通過しているが、最小被ばく線量経路の場合は高線量区間を迂回して線量の低い区間を通過していることがわかる。原子力災害の場合、最短経路ではなく最小被ばく線量経路で避難することが重要であることが確認できたといえる。一方で、この最小被ばく線量経路は低線量区間を通過していることも見て取れる。これは現状の避難計画

では避難方向が固定されているため、決められた方向にしか避難ができないためである。

ここで避難方向を村上方面から上越方面に変更した場合の避難シミュレーション結果が図-8 である。上越方面に避難することで初動以外被ばく線量区間を通過しないため、被ばく線量を大幅に抑えることが可能になると想定したが、村上方面に避難する場合の被ばく線量は 231.95(μSv)であったのに対し、上越方面に避難した場合の被ばく線量は 231.37(μSv)となり、避難方向の変更効果は限定的であることも分かった。一方、原子力災害の状況によっては、避難方向を変更した方が良い場合も十分に考えられるため、多くの条件のシミュレーションを事前に行うことにより、避難方向を変更しなくても安全な避難が可能である条件を示すことが可能となる。

(4) 段階的避難行動モデルにおける PAZ 避難完了時間

表-2 に段階的避難行動モデルにおける PAZ の避難結果を示す。PAZ の避難需要 7,032 台の避難完了時間は 144 分であったが、避難方面別に見ると、PAZ の避難完了時間は上越方面の避難行動に依存することがわかる。また、図-9 に示すように上越方面は被ばく線量区間を通過しないため、最小被ばく線量経路には最短経路を用いたと考えられる。よって避難需要が規範的行動を行い、UPZ 避難需要が自主避難などの避難行動を一切起こさなければ、PAZ の避難需要が避難を完了するまで 144 分必要であることが分かった。

表-2 各方面別の避難完了時間

	避難需要(台)	避難完了時間(分)
PAZ全体	7032.0	144.0
村上方面	1943.0	70.5
魚沼方面	510.0	79.3
上越方面	4579.0	144.0

(5) 段階的避難行動モデルとの比較

表-1 によると、段階的避難行動モデルは最適制御モデルと比較して総被ばく線量が小さくなっている。この結果について以下で考察する。まず、表-3 に各モデルで得られた PAZ と UPZ の被ばく線量の比較を示した。これによると、PAZ の被ばく線量は両モデルで値が似通っているのに対し、UPZ の被ばく線量は大きく異なっていた。

これは各モデルで PAZ の避難行動に大きな変化はないものの、UPZ の避難行動は、最適制御モデルの場合はシミュレーション開始時から避難が開始されていたのに対し、段階的



図-7 最短経路と最小被ばく線量経路の比較



図-8 避難方面変更前後の比較



図-9 PAZ 上越方面避難需要の避難経路

避難行動モデルではPAZの避難が完了した後となるので約2時間後から避難が開始されることとなる。また本避難シミュレーションに用いた放射線量データは、図-10に示すように原子力発電所から発生する放射線量が時間経過とともに減少するデータを用いており、特に最初の1時間が非常に高い値となっている。従って、最適制御モデルは段階的避難行動モデルと比較して線量の最も高い最初の1時間からUPZも避難行動を行っていたため、UPZの被ばく線量が増加し、全体の値である総被ばく線量が増加したこととなる。そのため、もし放射線量が時間経過とともに増加するようなケースで避難シミュレーションを行った場合は、段階的避難行動モデルではUPZの避難行動に遅れが生じるため、被ばく線量が大きくなる可能性がある。

表-3 各モデルのPAZ・UPZ別被ばく線量

線量	最適制御モデル	段階的避難行動モデル
総被ばく線量(mSv)	253.69	232.63
PAZ被ばく線量(mSv)	228.04	228.29
UPZ被ばく線量(mSv)	25.66	4.35

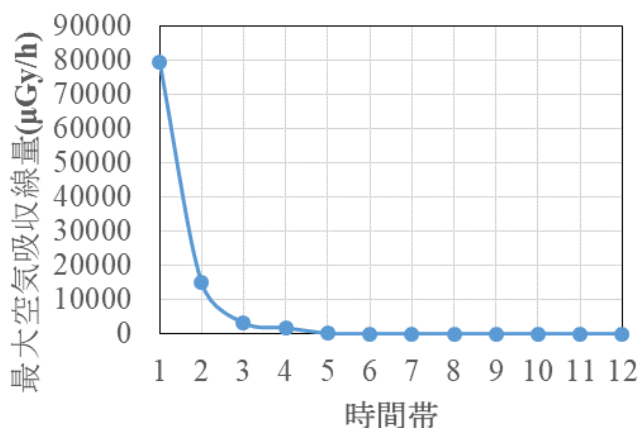


図-10 時間帯毎の最大放射線量

5. まとめと今後の課題

本研究では、避難需要の避難経路として被ばく線量が最小となる経路を探索する「最小被ばく線量経路探索モデル」、避難需要の避難開始時間を最適に制御することで、総被ばく線量を最小化する「最小被ばく線量配分モデル」の定式化を行うことで、原子力災害に対応した避難シミュレーションモデルの構築した。また構築したモデルを用いて避難シミュレ

ーションを行った結果、原子力災害時の避難経路において最小被ばく線量経路を用いることの有用性を確認できた。また、避難方向を変更した場合もシミュレーションを行えることを確認し、変更した方が良い場合も十分に考えられる多くの条件のシミュレーションを事前に行うことで、避難方向を変更しなくても安全な避難が可能である条件を示すことが可能となることがわかった。以上の結果より構築した避難シミュレーションモデルの有用性について検証することができ、また原子力災害時の避難計画作成時に検討すべき点を示唆することができたといえる。

今後の課題としては、まず避難シミュレーションモデルのシステム面の改善が挙げられる。本モデルは各時間帯のネットワークを表現しているため、大規模なネットワークを想定すると変数の数が膨大になり計算が困難となる。そのため、より大規模なネットワークに対応するにはより計算コストの小さい効率的なアルゴリズムの開発が必要となる。また、本避難シミュレーションモデルが対象とした原子力災害は、主に原子力発電所の事故のみによって発生しているが、2011年の東日本大震災によって発生した福島第一原子力発電所の事故のように原子力発電所の事故は地震や津波などの別の災害によって引き起こされる複合災害である。今後は地震や津波などによって避難経路が使用できなくなる場合等を考慮した複合災害に対応したモデル開発も必要となる。

参考文献

- 1) 柏崎市 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>
(2018年2月23日現在)
- 2) いわき市 原子力災害広域避難計画
<http://www.city.iwaki.lg.jp/www/contents/1458275313484/index.html> (2018年2月23日現在)
- 3) 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53回土木計画学会・講演集, pp53-60, 2016
- 4) 安藤宏志, 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
- 5) 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
- 6) 長井大樹, 佐野可寸志, 西内裕品: 柏崎刈羽原子力発電所の事故発生時避難行動分析とボトルネック対策による早期渋滞完了の可能性検討, 修士論文, 2015年
- 7) 藤田雅久, 高山純一, 中山晶一郎, 牛場高志: 原子力発電所災害における避難計画策定のための支援システム開発, 土木学会論文集D3, Vol.67, No.5, p. 67_I_25-67_I_34, 2011
- 8) 鹿児島県 避難時間シミュレーション結果の概要
https://www.pref.kagoshima.jp/aj02/bosai/sonae/simulation/documents/39451_20140530101001-1.pdf (2018年2月23日現在)
- 9) 青森県 避難時間シミュレーション解析結果
http://www.pref.aomori.lg.jp/nature/kankyohinanjikan_gaiyo.pdf

- (2018年2月23日現在)
- 10) 松井寛, 山田周治: 道路交通センサデータに基づく BPR 閾数の設定, 交通工学, No.6, Vol.33, pp.9-16, 1998
- 11) 最短経路探索問題
http://www.cs.tsukuba.ac.jp/~takahito/sys_math/part3.pdf
 (2018年2月23日現在)
- 12) 室内退避による被ばく低減効果の評価
https://www.jaea.go.jp/04/anzen/archives_seikahoukoku/h29/pre4_Hirouchi.pdf (2018年2月23日現在)
- 13) 緊急避難時被ばく線量基準値
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130314_01a.pdf
 (2018年2月23日現在)
- 14) 刈羽村 原子力災害避難するため行動指針と避難計画
<http://www.vill.kariwa.niigata.jp/www/info/detail.jsp?id=5064>
 (2018年2月23日現在)
- 15) 長岡市 原子力災害に備えた避難計画
http://www.city.nagaoka.niigata.jp/shisei/cate01/nuclear-safety/file/hinan_20151215-01.pdf (2018年2月23日現在)
- 16) 小千谷市 原子力災害に備えた小千谷市広域避難計画
<http://www.city.ojya.niigata.jp/uploaded/attachment/6617.pdf>
 (2018年2月23日現在)
- 17) 見附市 原子力災害に備えた屋内退避・避難計画
<http://www.city.mitsuke.niigata.jp/secure/17008/hinankeikaku.pdf>
- (2018年2月23日現在)
- 18) 出雲崎町 原子力災害に備えた屋内退避・避難計画
http://www.town.izumozaki.niigata.jp/_files/00016858/hinank-eikaku-ver1.pdf (2018年2月23日現在)
- 19) 燕市 原子力災害に備えた燕市避難計画
<http://www.city.tsubame.niigata.jp/content/100785917.pdf>
 (2018年2月23日現在)
- 20) 十日町市 原子力災害に備えた避難計画
http://www.city.tokamachi.lg.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/31/tokamachishi_hinankeikaku.pdf
 (2018年2月23日現在)
- 21) 上越市 原子力災害に備えた屋内退避・避難計画
<http://www.city.joetsu.niigata.jp/uploaded/attachment/132012.pdf>
 (2018年2月23日現在)
- 22) 新潟県: 放射性物質拡散シミュレーション結果
http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/706986/case1-nw-h.pdf
 (2018年2月23日現在)
- 23) 放射線の単位
http://www.aomori-hb.jp/ahb4_5_6_06.html
 (2018年2月23日現在)
- (2018. 2. 23 受付)

OPTIMIZATION OF EVACUATION START TIME IN NUCLEAR DISASTER BASED ON THE NORMATIVE EVACUATION BEHAVIOR PRINCIPLE

Yuya MINAMI, Kazushi SANO, Kiichiro HATOYAMA and Jun ITO

In this research, as a creation of evacuation simulation corresponding to nuclear disaster based on normative evacuation behaviors, "Model of search the route less exposed to radiation" which minimizes radiation exposed of evacuees. Optimal control of evacuation start time of evacuees, we created an evacuation simulation model centered on the formulation of "Model of distribution for minimum radiation exposure" that minimizes total exposure radiation. In addition, using the evacuation simulation we created a simulation was carried out with the area within a radius of 30 km from the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station as evacuation targets. From this result it is confirmed that in the case of nuclear disaster, it is possible to confirm the effectiveness of evacuation by using the minimum radiation exposure route rather than the shortest route, and by simulating many conditions, it is safe without changing the evacuation direction. It was found that it is possible to indicate the conditions under which evacuation is possible. Therefore, it was possible to suggest the points to consider in verifying the usefulness of the constructed evacuation simulation model and planning the evacuation plan.