

公共施設更新における平常時の利便性と 洪水避難条件のトレードオフ構造

須ヶ間 淳¹・奥村 誠²

¹学生会員 東北大学 工学部建築・社会環境工学科(〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1, S502b)
E-mail:atushi1741@dc.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所(〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1, S502b)
E-mail:makoto.okumura.b6@tohoku.ac.jp

高度経済成長期に建設された多数の公共施設が寿命を迎えるため、各自治体は、施設削減等を含む更新計画の策定を行っている。一方、洪水等の災害時には公共施設が避難場所の機能を持つことから、平常時の利便性の確保と洪水避難条件の確保を両立させるような更新計画を立案することが望まれる。本研究では、その基礎となる両機能のトレードオフの構造を分析するモデルを提案する。すなわち、外生的に与えた洪水避難条件と総予算を制約として、平常時の利便性を最大化する施設更新シナリオを求める混合整数計画法モデルを作成する。その上で両機能のトレードオフの構造を分析した。その結果、浸水想定区域内での、①近隣に代替施設が存在しない場合の施設削減、②小規模施設の配置、が両機能のいずれにも好影響を与えないことを明らかにした。

Key Words : *renewal policy of public facility, evacuation sites, flood disaster*

1. はじめに

我が国では高度経済成長期に建設された多数の公共施設が、今後次々と寿命を迎える。各自治体は、人口分布や年齢構成が建設当時とは大きく異なってくることを踏まえ、施設削減や機能の変更を含む施設更新計画を策定する必要がある。

その際、公共施設が、洪水等の災害発生時に一時的に身を守るための避難場所の機能を持つことから、平常時の利便性の確保と災害時の避難機能の確保を両立させるような施設更新計画を策定することが望まれる。そのため基礎情報として、施設の更新における、平常時の利便性と災害時の機能の間のトレードオフの関係を明らかにする必要があるものの、研究はいまだ進んでいない状況にある。

個別の公共施設の平常時の機能と災害時の機能の関係を扱ったものとして、平山ら¹⁾は、上水道の配水管網に関して、自己洗浄機能と耐震機能、自己洗浄機能と消火機能がトレードオフの関係にあることを明らかにした。根市ら²⁾は、コンパクトシティ施策に関して、都市機能の維持費用と震災時の被災リスクとのトレードオフ関係を分析した。

本研究は、これらとは異なり、公共施設の更新時に施

設の立地場所や規模を変更する際に発生する、平常時の利便性と災害時の避難機能との関係に着目し、トレードオフ構造の分析方法の提案と、具体的な地域における分析を行うことを目的とする。

本論文は5章で構成されている。第1章では本研究の背景と目的、既往研究について述べた。第2章では本研究のアプローチの説明と使用するモデルの構築を行う。第3章では本研究の対象地域の説明と、計算に用いるパラメータ設定を行う。第4章では計算結果を基に両機能のトレードオフの構造を考察する。第5章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

2 本研究のアプローチ

(1) 本研究で取り上げる問題

本研究では、公共施設の中でも特に災害時に避難場所として利用されることの多い公立小学校、公立中学校に着目し、それらが日常的に果たしている教育機能に着目する。今後、教育機能の利用者である年少人口の減少や分布の変化を見越しながら、学校施設の更新計画を立てる必要がある。ここでは1期間を10年間とし、5期間を考えて、その間の平常時の住民(小中学生)の利便性を最大

化するように施設更新シナリオを設定する。その際、自治体の更新予算の制約および、地域住民の洪水からの避難条件の双方を満足するものとする。

以上の施設更新シナリオを効率的に計算するために、本研究では混合整数計画モデルを構築する。ここで施設更新シナリオとは、耐用年数を迎えた施設の建替え・廃止の判断、及び建替え後の床面積の設定のことであり、計画期間中各期の施設の立地・床面積が決定される。このモデルに対して、洪水避難条件を与えて施設更新シナリオの計算を行い、平常時の利便性と避難条件のトレードオフ構造を分析する。

(2) 平常時の利便性と洪水避難機能の評価

平常時の利便性は小中学生の登校距離の総和で表す。小・中学校の1㎡当りに収容できる人数を予め定め、期別・居住地別に外生的に与えた小・中学生数をそれぞれ収容する。その際に最大通学可能距離の制約を考慮する。登校距離の総和が小さいほど利便性が大きいことを示す。

洪水からの避難場所として、本研究では小・中学校の非水没床を考える。避難条件は、先行研究³⁾で許容避難距離とされる1km以内に避難できない人口の多寡により表す。避難場所の立地だけでなく、非水没の床面積から算出される収容量を考慮する。施設は直方体形状と仮定し、各期の1階当たり床面積は初期時点の1階当たり床面積と同一とする。想定浸水深が2m未満の場合は1階まで浸水、5m未満の場合は2階まで浸水、それ以上の場合は3階まで浸水と考える。またダミー避難場所を設定し、

表-1 操作変数一覧

操作変数名	変数	種類	単位
居住地別・機能別・施設別の利用人数	$\check{p}_{t,i,u,j} \quad \forall t \in T, i \in I, u \in U, j \in J$	連続	人
居住地別・避難先別の避難人数	$p_{t,i,j}^{eva} \quad \forall t \in T, i \in I, j \in J$	連続	人
施設の床面積	$a_{t,j} \quad \forall t \in T, j \in J$	連続	㎡
機能別の施設の床面積	$\tilde{a}_{t,u,j} \quad \forall t \in T, u \in U, j \in J$	連続	㎡
避難場所として使用可能な床面積	$a_{t,j}^{eva} \quad \forall t \in T, j \in J$	連続	㎡
期別の施設有無	$x_{t,j} \quad \forall t \in T, j \in J$	0-1	
期別・機能別の施設有無	$\tilde{x}_{t,u,j} \quad \forall t \in T, u \in U, j \in J$	0-1	
期別・施設別の非水没床の有無	$x_{t,j}^{sub} \quad \forall t \in T, j \in J$	0-1	

避難距離に含まれなかった人数を吸収する。

自治体の予算条件は施設の維持費用と建替え費用の和を考える。本研究では、維持費用は期ごとに施設数に比例して発生し、建替え費用は更新時に建替え後の床面積に比例して発生すると仮定する。各施設の期ごとの施設数が少ないほうが維持費用を小さくできる。一方で、総床面積は小・中学生数の総和に応じて決まるため、施設の数や立地に関わらず概ね一定値を示す。ただし、社会的割引率を考えるため、後ろの期に建替えたほうが建替え費用は小さくできる。

表-2 パラメーター一覧

パラメータ名	パラメータ	種類	単位
居住地別・機能別の需要量	$P_{t,i,u} \quad \forall t \in T, i \in I, u \in U$	連続	人
居住地別の避難需要量	$P_{t,i}^{eva} \quad \forall t \in T, i \in I$	連続	人
期別に許容される避難不可能な人数	$\tilde{l}_t^{eva} \quad \forall t \in T$	連続	人
許容される避難不可能な人数	l^{eva}	連続	人
割引率	δ	連続	
自治体の維持・建替え予算	B	連続	万円
期別・施設別の耐用年数を迎えるか否か	$R_{t,j} \quad \forall t \in T, j \in J$	0-1	
ペナルティ付きの平常時のij間距離	$D_{i,u,j} \quad \forall i \in I, u \in U, j \in J$	連続	m
居住地別・避難先別の避難可否	$D_{i,j}^{eva} \quad \forall i \in I, j \in J$	0-1	
機能別の床面積当たり利用可能人数	$E_u \quad \forall u \in U$	連続	人/㎡
施設立地点別の最大床面積	$A_j^{max} \quad \forall j \in J$	連続	㎡
施設立地点別の最大水没床面積	$A_j^{sub} \quad \forall j \in J$	連続	㎡
機能別の最大床面積	$\tilde{A}_u^{max} \quad \forall u \in U$	連続	㎡
機能別の最小床面積	$\tilde{A}_u^{min} \quad \forall u \in U$	連続	㎡
施設の維持費用単価	C^{sus}	連続	万円/期
施設の建替え費用単価	C^{re}	連続	万円/㎡

(3) 集合・変数・パラメータの定義

定式化で用いる添え字として、時期を $t \in T$ 、居住地を $i \in I$ 、機能を $u \in U$ 、施設立地点を $j \in J$ と定義する。これらの集合の要素は、時期集合 T のみ0を含む非負整数、その他は0を含まない非負整数である。操作変数を表-1のように、パラメータを表-2のように表す。小学生・中学生の通学距離の限界値を取り入れるため、それぞれ一定距離を超える場合に、 ij 間距離にペナルティを加え、 $D_{i,u,j}$ を設定する。また、避難可否を表現するため、 ij 間距離が1kmを超えるか否かを示す0-1変数 $D_{i,j}^{eva}$ を設定する。施設立地点別の最大水没床面積 A_j^{sub} は、想定浸水深から想定される水没階数に初期時点の1階当たり床面積を乗じたものである。初期時点の1階当たり床面積は外生的に得た初期時点の床面積と施設階数を用いて算出する。

初期条件として既存の床面積 $a_{0,j}$ 、既存の機能別床面積 $\tilde{a}_{u,0,j}$ 、既存の機能別の施設有無 $\tilde{x}_{0,u,j}$ という外生変数を設定する。

(4) 目的関数と制約条件

以下に本モデルの目的関数と制約条件を示す。

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} D_{i,u,j} \cdot p_{t,i,u,j} \quad (1)$$

$$\sum_{t \in T} \delta^{t-1} \left\{ \sum_{j \in J} C^{sus} \cdot x_{t,j} + \sum_{u \in U} \sum_{j \in J} C^{re} \cdot R_{t,j} \cdot \tilde{a}_{t,u,j} \right\} \leq B \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} \tilde{p}_{t,i,u,j} = P_{t,i,u} \quad \forall t \in T, i \in I, u \in U \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \tilde{p}_{t,i,u,j} \leq E_u \cdot \tilde{a}_{t,u,j} \quad \forall t \in T, u \in U, j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{u \in U} \tilde{a}_{t,u,j} = a_{t,j} \quad \forall t \in T, j \in J \quad (5)$$

$$a_{t,j} - a_{t-1,j} \leq R_{t,j} (A_j^{max} - a_{0,j}) \quad \forall t \in T, j \in J \quad (6)$$

$$a_{t,j} - a_{t-1,j} \geq R_{t,j} (-a_{0,j}) \quad \forall t \in T, j \in J \quad (7)$$

$$(\tilde{a}_{t,u,j} - \tilde{a}_{t-1,u,j}) \cdot (1 - R_{t,j} \cdot \tilde{x}_{0,u,j}) \leq 0 \quad \forall t \in T, u \in U, j \in J \quad (8)$$

$$(\tilde{a}_{t-1,u,j} - \tilde{a}_{t,u,j}) \cdot (1 - R_{t,j} \cdot \tilde{x}_{0,u,j}) \leq 0 \quad \forall t \in T, u \in U, j \in J \quad (9)$$

$$\tilde{a}_{t,u,j} \geq \tilde{x}_{t,u,j} \cdot \tilde{A}_u^{min} \quad \forall t \in T, u \in U, j \in J \quad (10)$$

$$\tilde{a}_{t,u,j} \leq \tilde{x}_{t,u,j} \cdot \tilde{A}_u^{max} \quad \forall t \in T, u \in U, j \in J \quad (11)$$

$$\tilde{x}_{t,u,j} \leq x_{t,j} \quad \forall t \in T, u \in U, j \in J \quad (12)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{i,j}^{eva} \cdot p_{t,i,j}^{eva} \leq I^{eva} \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{i,j}^{eva} \cdot p_{t,i,j}^{eva} \leq \tilde{I}_t^{eva} \quad \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J} p_{t,i,j}^{eva} = p_{t,i}^{eva} \quad \forall t \in T, i \in I \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} p_{t,i,j}^{eva} \leq a_{t,j}^{eva} \quad \forall t \in T, j \in J \quad (16)$$

$$-A_j^{sub} (1 - x_{t,j}^{sub}) \leq a_{t,j} - A_j^{sub} \quad \forall t \in T, j \in J \quad (17)$$

$$a_{t,j} - A_j^{sub} \leq A_j^{max} \cdot x_{t,j}^{sub} \quad \forall t \in T, j \in J \quad (18)$$

$$a_{t,j}^{eva} \leq a_{t,j} - A_j^{sub} \cdot x_{t,j}^{sub} \quad \forall t \in T, j \in J \quad (19)$$

$$a_{t,j}^{eva} \leq A_j^{max} \cdot x_{t,j}^{sub} \quad \forall t \in T, j \in J \quad (20)$$

$$\tilde{p}_{t,i,u,j} \geq 0 \quad \forall t \in T, i \in I, u \in U, j \in J \quad (21)$$

$$p_{t,i,j}^{eva} \geq 0 \quad \forall t \in T, i \in I, j \in J \quad (22)$$

$$a_{t,j} \geq 0 \quad \forall t \in T, j \in J \quad (23)$$

$$\tilde{a}_{t,u,j} \geq 0 \quad \forall t \in T, u \in U, j \in J \quad (24)$$

$$a_{t,j}^{eva} \geq 0 \quad \forall t \in T, j \in J \quad (25)$$

$$x_{t,j}, \tilde{x}_{t,u,j}, x_{t,j}^{sub} \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, u \in U, j \in J \quad (26)$$

式(1)は目的関数であり、式(2)-(25)の制約条件の下で小・中学生の通学距離の総和を最小化する。式(2)は自治体の予算制約を表す。左辺は施設の維持費用・建替え費用の和である。式(3)は機能別の利用者数に関するフロー保存条件を表す。式(4)は利用者数が施設の容量を超えない条件を表す。

次の式(5)-(12)は施設の更新時の条件を表現している。まず、式(5)は各施設において当期機能別床面積 $\tilde{a}_{t,u,j}$ の和が当期床面積 $a_{t,j}$ に等しいという条件を表す。式(6)(7)は、耐用年数途中のため更新を検討しない非更新期

($R_{t,j} = 0$)には当期床面積 $a_{t,j}$ と前期床面積 $a_{t-1,j}$ の値が等しいこと、耐用年数を迎える更新検討期($R_{t,j} = 1$)には、当期床面積(更新後の床面積) $a_{t,j}$ が0以上、かつ最大可能床面積 A_j^{max} 以下の値をとるという条件を表す。

式(8)(9)において、各施設立地点に初期時点で存在しない機能について期によらずに($1 - R_{t,j} \cdot \tilde{x}_{0,u,j} = 1$)となり、各施設立地点に初期時点で存在する機能についても非更新期には($1 - R_{t,j} \cdot \tilde{x}_{0,u,j} = 1$)となる。これらの場合には当期機能別床面積 $\tilde{a}_{t-1,u,j}$ と前期機能別床面積 $\tilde{a}_{t,u,j}$ が等しいという条件を表す。他方、各施設立地点に初期時点で存在する機能について更新検討期には($1 - R_{t,j} \cdot \tilde{x}_{0,u,j} = 0$)となるため、当期機能別床面積 $\tilde{a}_{t-1,u,j}$ と前期機能別床面積 $\tilde{a}_{t,u,j}$ の差は他の制約を満たす範囲内で任意の値をとるという条件を表す。

式(10)(11)は、施設に機能が存在する場合($\tilde{x}_{t,u,j} = 1$)に、機能別床面積 $\tilde{a}_{u,t,j}$ が最小延床面積 $\tilde{A}_{u,t,j}^{min}$ 以上かつ最大延べ床面積 $\tilde{A}_{u,t,j}^{max}$ 以下になるという条件を表す。施設に機能が存在しない場合($\tilde{x}_{t,u,j} = 0$)に機能別床面積は $\tilde{a}_{u,t,j} = 0$ となるという条件を表す。

式(12)は施設に少なくとも1つの機能が存在する($\tilde{x}_{t,u,j} = 1$)ためには、施設が存在($x_{t,j} = 1$)しなければならないという条件を表す。

次の式(13)-(16)は各期に存在する施設配置の下での避難条件を計算している。まず、式(13)は1km以内に避難できない人数の1期から5期までの総和が、 I^{eva} 以下に収まっていることを表す。式(14)は期別の1km以内に避難できない人数が、期別に与えた許容限界 \tilde{I}_t^{eva} 以下に収まっていることを表す。式(15)は避難者数に関するフロー保存条件、式(16)は避難者数が施設容量を超えない条件を表す。

さらに式(17)-(20)で、施設の床面積のうち避難場所として利用できる非水没床の量を求めている。式(17)(18)は、非水没床の有無を示す0-1変数 $x_{t,j}^{sub}$ と内生的に得られる施設の床面積 $a_{t,j}$ 、外生的に与える施設立地点別の最大水没床面積 A_j^{sub} の関係を表す条件である。

非水没床が存在するとき($x_{t,j}^{sub} = 1$)、式(17)(18)は式(27)となる。

$$A_j^{sub} \leq a_{t,j} \leq A_j^{sub} + A_j^{max} \quad \forall t \in T, j \in J \quad (27)$$

これは、 $a_{t,j}$ が A_j^{sub} より大きいことを意味し、非水没床が存在できる条件を表している。

また、非水没床が存在しないとき($x_{t,j}^{sub} = 0$)、式(17)(18)は式(28)となる。

$$0 \leq a_{t,j} \leq A_j^{sub} \quad \forall t \in T, j \in J \quad (28)$$

すなわち、 $a_{t,j}$ が A_j^{sub} より小さいことを意味し、非水没床が存在しない条件を表す。

式(19)(20)では避難場所として使用可能な床面積 $a_{t,j}^{eva}$ を求めている。

非水没床が存在するとき($x_{t,j}^{sub} = 1$)、 A_j^{max} は十分に大きいため、式(19)(20)は式(28)となる。

$$a_{t,j}^{eva} \leq a_{t,j} - A_j^{sub} \quad \forall t \in T, j \in J \quad (29)$$

すなわち避難場所として使用可能な床面積は、施設の床面積から、外生的に与えた最大水没床面積を引いたものである。

また、非水没床が存在しないとき($x_{t,j}^{sub} = 0$)、 $a_{t,j}$ は0未満にはならないことから、式(19)(20)は式(30)となる。

$$a_{t,j}^{eva} \leq 0 \quad \forall t \in T, j \in J \quad (30)$$

$a_{t,j}^{eva}$ は式(25)より0以上であるため、非水没床が存在しないときには、避難場所として使用可能な床が存在しないという条件を表す。

式(21)-(26)は操作変数の定義域である。

なお、本モデルは混合整数計画問題として定式化されており、本研究では数値最適化ソルバーGurobi8.1.0 (Win64)を用いて計算を行った。

(5) 避難条件の表現方法

避難条件は、許容される避難不可能人数 I^{eva} により表す。本研究では、式(14)の I^{eva} を標準値の1.00倍から、諸制約条件内での施設数・立地の変更で達成しうる限界の小ささまで0.01ポイント刻みで動かし、それぞれ施設更新シナリオを計算した。

3 対象地域とパラメータの設定

(1) 分析対象地域

本研究では埼玉県川越市の図-1に示す地域を参考にモデルを適用し、分析を行った。

埼玉県川越市は、東京都心から約30kmに位置する衛星都市であり、ベッドタウンとして人口が急増した高度経済成長期に多数の公共施設が建設された。川越市は、川越市公共施設マネジメント白書⁴や川越市公共施設等総合管理計画⁵などの策定を通して、施設更新に関する積極的な情報公開を行っており、本研究ではそれらの資料を参考に外生変数・パラメータの設定を行った。

半島状に北にせり出した台地上に中心市街地があり、その周囲に低地と複数の河川が位置する。本研究では、およそ市域外縁を流れる入間川・荒川の洪水について分析を行う。浸水想定区域は、想定最大規模降雨(入間川流域の72時間総雨量740mm)に基づいて作成された荒川水系入間川洪水浸水想定区域図⁶(図-2)を用いた。なお、

想定最大規模降雨とは、日本を降雨特性が似ている15の地域に分け、それぞれの地域において観測された最大の降雨量を基本に設定されたものである。

(2) パラメータ設定

本研究では、対象地域地域を参考に、以下のようにパラメータを設定する。

期間 $t \in T$ は1期から5期までとし、1期間は10年、1期期首を2010年4月に設定した。居住地 $i \in I$ は、図-1に示す範囲内の、昭和48年7月12日行政管理庁告示第143号に基づく標準地域メッシュに基づく2分の1地域メッシュとした。機能 $u \in U$ は、災害時に避難場所として利用されることの多い小学校機能・中学校機能の2つを設定した。施設立地点 $j \in J$ は、1期期首(2010年4月)に市立小学校、または市立中学校が存在する立地点である。初期時点での立地を図-3に示す。

居住地別・機能別の需要量 $P_{t,i,u}$ は、各機能を使用する期別の人数である。国土数値情報ダウンロードサービスの500mメッシュ別将来推計人口(H29国政局推計)から取得した居住地の期別の年少人口を用いて、以下のように設定した。

$$\begin{aligned} \text{小学校機能需要量 } P_{t,i,1} &= \text{年少人口} \times \text{小学生割合} \\ &= \text{年少人口} \times 0.4 \quad [\text{人}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{中学校機能需要量 } P_{t,i,2} &= \text{年少人口} \times \text{中学生割合} \\ &= \text{年少人口} \times 0.2 \quad [\text{人}] \end{aligned}$$

居住地別の避難人口 P_i^{eva} は、浸水想定区域内に居住する全人口である。荒川水系入間川洪水浸水想定区域図⁶⁾と国土数値情報の500mメッシュ別将来推計人口(H29国政局推計)⁷⁾を用いて設定した。

許容される避難不可能人数 J^{eva} 、期別に許容される避難不可能人数 \tilde{J}_t^{eva} の値は、既存の行政計画などで明らかにされているわけではない。そのため、本研究では、第2章のモデルを分割して2段階の計算を行った結果を用いて設定した。

すなわち、第1の手順として避難に関する制約式(13)-(20)を省いたモデルを用いて各施設の床面積を計算した。次いで、避難に関する制約条件式(14)-(20)の下で避難人数である式(13)を最小化するモデルを考え、これに第1の手順の結果得られた各期の各施設の床面積を与えて計算した。その結果、許容される避難不可能人数 J^{eva} 、期別に許容される避難不可能人数 \tilde{J}_t^{eva} は以下のように設定した。

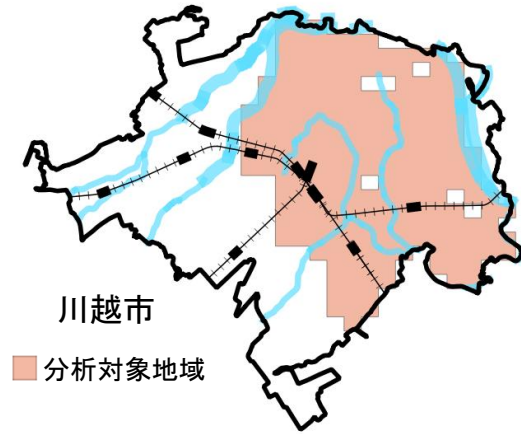


図-1 分析対象地域図

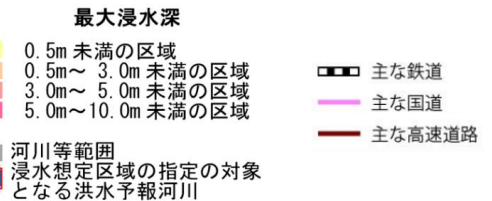
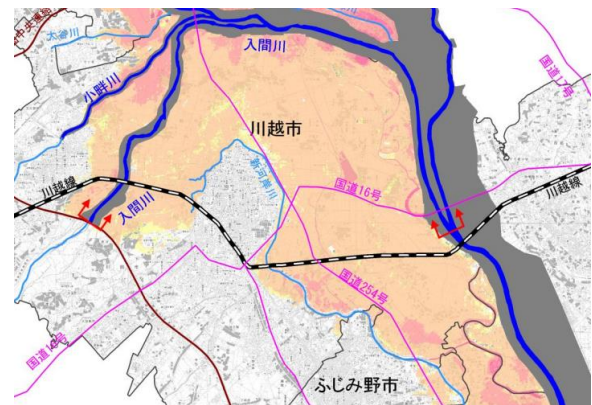


図-2 荒川水系入間川洪水浸水想定区域図⁶⁾ 抜粋

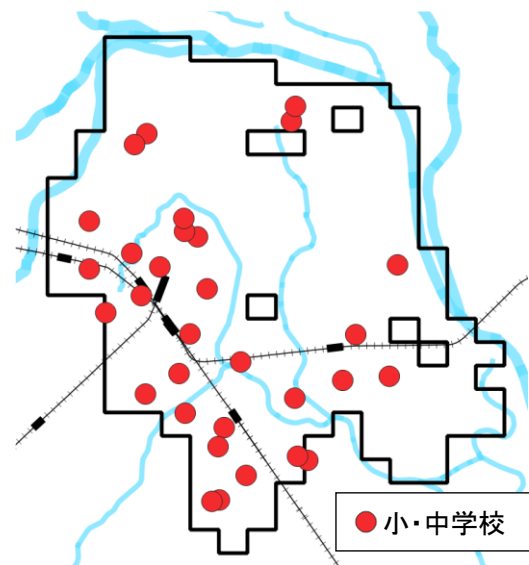


図-3 初期時点における小・中学校の立地

$$\begin{aligned}
 I^{eva} &= 160,718 \quad [\text{人}] \\
 \tilde{I}_1^{eva} &= 21,651 \quad [\text{人}] \\
 \tilde{I}_2^{eva} &= 25,483 \quad [\text{人}] \\
 \tilde{I}_3^{eva} &= 33,186, \quad [\text{人}] \\
 \tilde{I}_4^{eva} &= 41,784 \quad [\text{人}] \\
 \tilde{I}_5^{eva} &= 38,614 \quad [\text{人}]
 \end{aligned}$$

割引率 δ は、1期は10年であることから、以下のように設定した。

$$\delta = \left(\frac{1}{1 + 0.03} \right)^{10} \approx 0.74$$

自治体の維持・建替え予算 B は、全期を通して公共機能の維持・建替えに使用可能な予算である。川越市公共施設マネジメント白書⁹⁾には公共施設の整備・更新に支出できる経費は年間約30~40億円であると記載されている。本研究は1期から5期までの50年間を対象としている。ただし、本研究の対象地域は川越市のおよそ半分ほど(中心市街地を含む)であり、対象機能も2つの学校機能のみである。そこで本研究では割引率を踏まえて以下のように設定した。

$$\begin{aligned}
 \text{予算} B &= \sum_{t=0}^5 \delta^{t-1} (30 \text{億円} \times 10 \text{年間} \times 35\%) \\
 &\approx 3,140,000 \quad [\text{万円}]
 \end{aligned}$$

期別施設別に耐用年数を迎えるか否かを示す0-1変数 $R_{t,j}$ は、建設後50年を迎えた次の期に $R_{t,j} = 1$ となるように設定した。なお、小学校・中学校の建設年は川越市公共施設マネジメント白書⁹⁾を参考に設定した。

ij 間距離は、居住地と施設立地点の座標を用いて算出する。居住地の座標は2分の1地域メッシュの中心座標で代表させる。施設立地点の座標はGoogle マップ⁹⁾から取得した。さらに $D_{i,u,j}$ には、公立小学校・中学校の適正規模・適正配置等に関する手引¹⁰⁾を参考に、小学校機能ならば4km、中学校機能ならば6kmを超える場合に、20km分のペナルティを加え、利用可能距離を表現した。なお、実距離の最大値は15km程度であり、20kmは十分に大きな値である。

居住地別・避難先別に避難可否を示す0-1変数 $D_{i,j}^{eva}$ は、 ij 間距離が1kmを超える場合に $D_{i,j}^{eva} = 1$ となるように設定した。なお、ダミー避難場所への避難可否は、いずれの居住地からも $D_{i,j}^{eva} = 1$ となるように設定した。

機能別の床面積当たり利用可能人数 E_u は、それぞれ川越市公共施設マネジメント白書⁹⁾に記載されている小学生数・中学生数・定員及び床面積を参考にして、以下のように設定した。

$$\begin{aligned}
 \text{小学校機能の床面積当たり利用可能人数} E_1 \\
 = 0.110 \quad [\text{人}/\text{m}^2]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{中学校機能の床面積当たり利用可能人数} E_2 \\
 = 0.080 \quad [\text{人}/\text{m}^2]
 \end{aligned}$$

施設立地点別の最大床面積 A_j^{max} は、施設立地点に、初期時点(2010年4月)に存在している床面積の3倍とした。

施設立地点別の最大水没床面積 A_j^{sub} は、想定浸水深から想定される水没階数に初期時点の1階当たり床面積を乗じて設定した。

機能別の最大床面積 \tilde{A}_u^{max} 、最小床面積 \tilde{A}_u^{min} は、1つの施設立地点に存在できる各機能の最大床面積と最小床面積である。公立小学校・中学校の適正規模・適正配置等に関する手引¹⁰⁾を参考に以下のように設定した。

$$\begin{aligned}
 \text{小学校機能の最大床面積} \tilde{A}_1^{max} \\
 &= \text{クラス人数} \times \text{最大クラス数} \times 6 \text{学年} / M_1 \\
 &= 40 \times 6 \times 6 / 0.110 \\
 &= 13,090 \quad [\text{m}^2]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{小学校機能の最小床面積} \tilde{A}_1^{min} \\
 &= \text{クラス人数} \times \text{最小クラス数} \times 6 \text{学年} / M_1 \\
 &= 40 \times 1 \times 6 / 0.110 \\
 &= 2,181 \quad [\text{m}^2]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{中学校機能の最大床面積} \tilde{A}_2^{max} \\
 &= \text{クラス人数} \times \text{最大クラス数} \times 6 \text{学年} / M_2 \\
 &= 40 \times 7 \times 3 / 0.080 \\
 &= 10,500 \quad [\text{m}^2]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{中学校機能の最小床面積} \tilde{A}_2^{min} \\
 &= \text{クラス人数} \times \text{最小クラス数} \times 6 \text{学年} / M_2 \\
 &= 40 \times 1 \times 3 / 0.080 \\
 &= 1,500 \quad [\text{m}^2]
 \end{aligned}$$

施設の維持費用単価 C^{sus} 、施設の更新費用単価 C^{re} は、川越市公共施設マネジメント白書⁹⁾を参考に、以下のように設定した。

$$\begin{aligned}
 \text{維持費用単価} C^{sus} &= 16,000 \quad [\text{万円}/\text{期}] \\
 \text{維持費用単価} C^{re} &= 35 \quad [\text{万円}/\text{m}^2]
 \end{aligned}$$

なお、初期条件の、既存の床面積 $a_{0,j}$ 、既存の機能別床面積 $\tilde{a}_{u,0,j}$ 、既存の機能別の施設有無 $\tilde{x}_{0,u,j}$ は、川越市公共施設マネジメント白書⁹⁾を参考に設定した。

4. 避難条件が平常時の利便性に与える影響

2(5)で示したように、モデル上の許容される避難不可能人数を標準値の1.00倍から諸制約条件内での施設数・立地の変更で達成しうる限界の小ささ(0.48倍)まで0.01ポイント刻みで動かした。

避難条件(許容される避難不可能人数に掛け合わせた倍率の大きさ)と小・中学校への登校距離の総和の関係を図-4に示す。許容される避難不可能人数が小さいほど登校距離の総和が大きくなっており、平常時の利便性と災害時の機能がトレードオフの関係にあることが確認できる。

避難条件と小・中学校数の関係を図-5に、避難条件と小・中学校の非水没床率の関係を図-6に示す。非水没床率とは、全期間の全小・中学校の床面積を足し合わせたもののうち、非水没の面積が占める割合のことである。

また、図-4、図-5、図-6中の点A,Dのシナリオにおける5期目の立地状況と人口分布を図-7に、点A,B,C,Dのシナリオにおける5期目の床面積と避難可能地域例を図-8に示す。

避難条件を厳しくすると、維持される小・中学校数は概ね減少する(図-5)。小・中学校数を減らすことで施設当たりの床面積が大きくなり、水没する床が減少するた

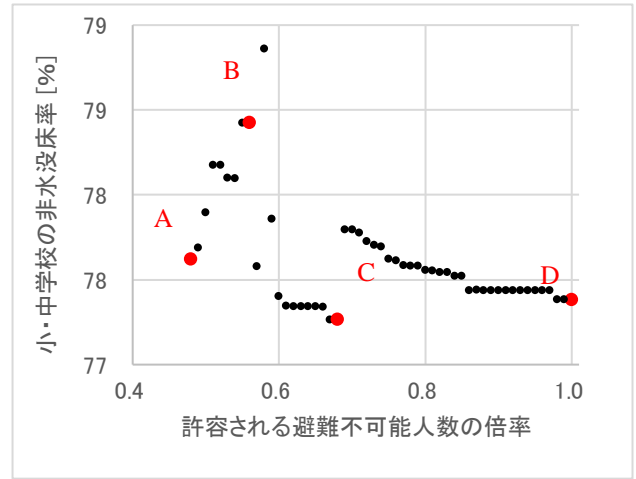


図-6 許容される避難不可能人数の大きさと非水没床率

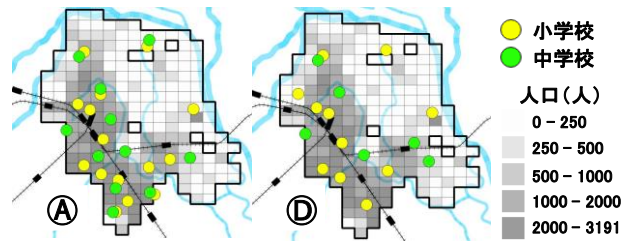


図-7 各シナリオにおける5期目の立地状況と人口分布

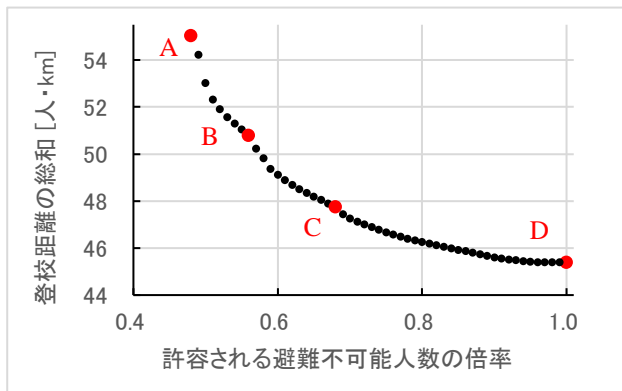


図-4 許容される避難不可能人数の大きさと登校距離の総和

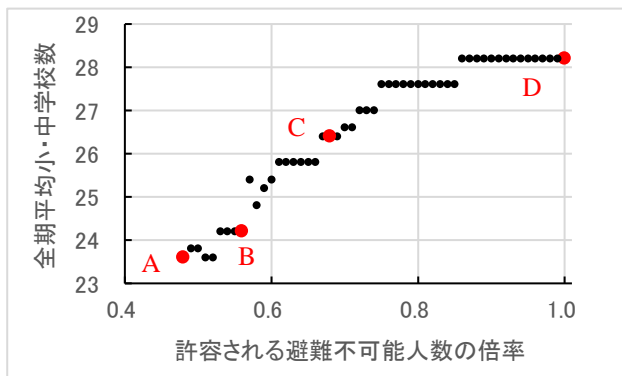


図-5 許容される避難不可能人数の大きさと小・中学校数

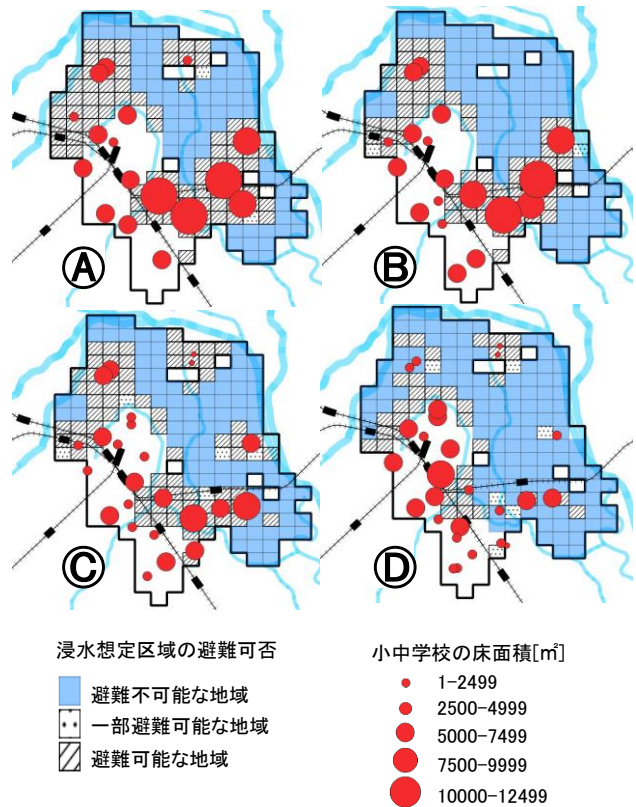


図-8 各シナリオにおける5期目の床面積と避難可能地域例

めと考えられる。図-6からも、避難条件を厳しくすると非水没率が上昇する傾向にあることが読み取れる。

本研究では、周辺部での浸水が想定される洪水を扱った。そのため避難条件を厳しくすると、浸水想定区域内の人口が比較的多い地域を中心に大規模な施設が集中配置される一方、中心部（浸水想定区域外）で施設数・床面積が大きく削減される結果となった(図-7, 図-8)。図-6の非水没率が滑らかに推移しないのは、避難条件を厳しくすることでより多くの施設・床面積が浸水想定区域内に配置されるようになるためであり、その点からも、避難条件に応じた中心部の施設・床面積の削減が読み取れる。その結果、特に中心部の登校距離が伸長するため、平常時の利便性と避難条件はトレードオフの関係性を有する。

図-4のように、トレードオフの関係は必ずしも滑らかな曲線ではない。ゆえに、施設更新計画の策定時には、図中の点B,Cのように平常時の利便性と避難機能のいずれにも好影響を与えないようなシナリオは避ける必要がある。

点B,Cそれぞれのシナリオについて分析を行った。

点Bのシナリオを、より避難条件の厳しい点Aのシナリオと比較する。中心部(浸水想定区域外)で施設が増加する一方、浸水想定区域内の比較的人口の少ない地域で施設が削減されていることが分かる(図-8)。浸水想定区域内の比較的人口の少ない地域は、すなわち近隣に代替施設が存在しない地域であり、該当地域の避難条件を悪化させるだけでなく、平常時の利便性も大きく悪化させるシナリオとなっている。中心部の施設が増えるため対象地域全体としては平常時の利便性の向上が見られるものの、平常時の利便性と避難機能のいずれにも好影響を与えていない。

点Cのシナリオを、より避難条件の緩い点Dと比較する。浸水想定区域内の床面積が増加し、区域外の床面積が減少していることが分かる(図-8)。しかし、浸水想定区域内の施設規模は十分に大きいとはいえず、水没する床の割合は大きい(図-6)。すなわち、中心部の床面積が減少して対象地域全体の利便性が損なわれる一方で、非水没床率が小さいために十分に避難機能を改善するに至っていない。このことは、浸水想定区域内に施設を配置する際に、一定規模以上の床面積を確保すべきであることを示唆している。

5. まとめ

本研究では、利便性の確保と洪水避難条件の確保を両立させるような更新計画を立案するための基礎となる、両機能のトレードオフの構造を分析するモデルの提案を行った。その上で、具体的な地域における両機能のトレードオフ構造を分析した。その結果、浸水想定区域内で

の、①代替施設が近隣に存在しない施設の削減、②小規模施設の配置、は平常時の利便性・避難機能のいずれにも好影響を与えないことが明らかになった。

本研究では、周辺部に浸水被害をもたらす洪水災害を扱った。中心部が浸水するような洪水災害では、両機能間に異なる関係があると考えられる。また、施設更新計画を作成する際には、洪水だけでなく他の災害についても考慮する必要があり、さらに、異なる災害の避難条件との関係についても考える必要がある。今後はそれらの分析を進める必要がある。

参考文献

- 1) 根市政明・土屋貴佳・室町泰徳：都市のコンパクト化による都市施設マネジメント費用の変化に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.24，pp.217-222，2007.
- 2) 平山修久・山田武史・越後信哉・伊藤禎彦：人口減少社会における配水管網の再構成のあり方に関する検討，土木学会論文集 G，Vol.72，No.8，III_467-III_474，2016
- 3) 小芝弘道，片田敏孝，及川康：河川洪水時における避難計画に対する住民の受容実態，土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.74-75，1999
- 4) 川越市：川越市公共施設マネジメント白書，川越市HP，2013
<http://www.city.kawagoe.saitama.jp/shisei/seisakushi-saku/hoshinkeikaku/shiseizenpan/syakaisihon.files/hakusyo-all.pdf> (参照2019-02-05)
- 5) 川越市：川越市公共施設等総合管理計画，川越市HP，2016
<http://www.city.kawagoe.saitama.jp/shisei/seisakushi-saku/hosh-inkeikaku/shiseizenpan/shama0616.files/sogokan-rikeikaku.pdf> (参照2019-02-05)
- 6) 国土交通省関東地方整備局荒川上流河川事務所：荒川水系入間川洪水浸水想定区域図(想定最大規模)，荒川上流河川事務所HP，2016
http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000659396.pdf (参照2019-02-05)
- 7) 国土交通省国土政策局国土情報課：国土数値情報ダウンロードサービス，2019，
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (参照2019-02-05)
- 8) 文部科学省：公立小学校・中学校の適正規模・適正配置等に関する手引，2018
http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/_icsFiles/afield-file/2015/07/24/1354768_1.pdf (参照2019-02-05)
- 9) ZENRIN：Google マップ，2019
<https://www.google.co.jp/maps/?hl=ja> (参照2019-02-05)

(2019.??受付)

TRADE-OFF STRUCTURE BETWEEN DAILY-USE ACCESSIBILITY AND FLOOD EVACUATION ACCESSIBILITY, TO BE REGARDED IN FACILITY RENEWAL POLICY

Atsushi SUGAMA and Makoto OKUMURA

In Japan, many public facilities constructed during high economic growth era will reach the end of service life in near future. Coping with population decrease and social environment changes, number of public facilities may be reduced. On the other hand, in the flat area with flood risk, public facilities also provide a function of evacuation sites. We need to consider the impact of facility reduction policy on the accessibility of flood evacuation. In this research, we proposed an optimization model to analyze the trade-off structure between daily-use accessibility and flood evacuation accessibility. The model calculates the facility renewal and reduction scenario that aims to maximize the daily-use accessibility in normal time, under the given budget and the given percentage of residents successfully find their evacuation space in the facilities.

Moreover, we analyzed the trade-off structure based on this model. In anticipated flood area, decreasing facilities which don't have nearby alternative facilities and establishing small facilities will make not only daily-use accessibility but also evacuation accessibility worse.