

博士論文

避難時の他者同調作用に着目した交通流の動的制御

浦田 淳司

東京大学大学院工学系研究科

2015年8月

論文要旨

避難計画の目標は、全員が被災しないことであり、これは住民と計画者の両者に共通する。特に、東日本大震災以降、この目標のためにはインフラ整備に加えて、住民避難の必要性が指摘されている。一方で、リスク認知、避難方法や他者支援といった問題が複雑に絡む中で、いかに早期避難を達成するかは明らかではない。

日本で多く生じる数時間以内の避難猶予時間の災害からの避難において、全員への避難指示の伝達は困難である。同時に、事前計画を地域の全員が知ることも現実的には難しい。そうした中で、こうした災害からの避難を考える上では、住民の避難行動選択を前提とした制御を導入する必要がある。そこで、本研究では、避難猶予時間が短い災害からの避難に焦点をあて、現実に即した避難行動を考慮した上で、避難最適を達成するための方策に関する知見を蓄積することを目的とする。そのための理論モデルの構築と、モデルを用いた評価を行う。

現実に即した避難行動のモデル化において、稀少事象であるために経験が少なく、非常時で限られた時間しかないために情報が十分でない災害時行動を表す行動原理を導入する。具体には、将来リスクを考慮した避難意思決定、他者との協調行動形成、他者避難の影響を受けた避難意思決定の3つである。災害避難は将来のリスクを回避するための行動選択であり、将来状態の想定が重要となる。同時に、経験不足などから個人での意思決定の不安があるため、他者の行動に同調した行動が生まれる。

最適制御の導入にあたっては、一部の空間利用者に対する交差点制御を検討する。一部のネットワーク上で、その部分のネットワークを利用する避難者を制御することは、全員への伝達に比べれば伝達コストは小さい。また、その空間以外での行動は避難者の選択に委ねられる。また、制御にあたっては、他者同調による避難の一つである共同避難に着目する。東日本大震災においても、世帯内のピックアップ行動に代表されるように、多くの共同避難行動が行われた。ただし、こうした行動は災害時要援護者の避難の支援ができるといった正の効果がある一方で、避難以外の移動の発生による混雑や避難遅れといった負の側面もある。こうした正負の影響を踏まえ、共同避難の効果を最大化するための最適制御方策を検討する。

第1章では、本研究の背景および目的について述べる。

第2章では、本研究が取り扱う避難開始選択モデル、動的離散選択モデル、他者の影響を評価する相互作用モデルについて既往研究を整理する。また、災害時の最適制御に関しては、制御方策の整理、制御変数と目的関数の整理を行った上で、動的交通流の最適制御に関する研究について整理する。

第3章では、将来効用の完全合理性を緩和した動的避難開始選択モデルの構築とモデルを用いた実証分析を行う。避難行動は将来に被るリスクを回避するための行動であり、将来効用を考慮した意思決定が必要である。一方で、災害時は稀少事象であり、将来に関する情報を十分にもてないため、完全合理的な将来効用を持つことは不可能である。そこで完全合理性を緩和した将来効用をもつと仮定し、動的離散選択モデルを構築する。完全合理性の緩和にあたって、従来の期待値関数の等式制約を領域制約として定式化する。緩和型の動的離散選択モデルの実証パラメータの推定は、MPEC型の解法を用いることで求解

可能となる。また、MPEC の求解には逐次二次計画法を適用する。対象とする問題は、パラメータ数が多く、非線形制約を持つ問題であるため、局所解に陥りやすい。その回避のためのヒューリスティクスを導入する。2011 年陸前高田市東日本大震災避難行動データを用いた実証分析により、災害時行動は完全合理的な期待価値を持つ行動選択が行われていないことを示す。算出した期待価値の分布についての分析を行い、個人属性や時空間特性による期待価値のバラつきを明らかにする。

第 4 章では、他者同調ネットワークを考慮した避難開始選択の動的推移の実証分析を行う。分析のため、他者同調を考慮した避難開始選択モデルと他者同調ネットワーク形成モデルを構築する。構築した二つのモデルについて実証分析を行い、得られたパラメータを用いたシミュレーションにより、避難勧告や率先避難の影響を評価する。まず、他者同調を考慮した避難開始選択モデルとして、人的ネットワーク上でのローカルインタラクションモデルを適用する。他者同調の重みの構造化により、二者関係に応じた影響度合の違いを評価する。重みの構造化に着目した数値計算により、災害弱者の未避難によりネットワーク全体の避難が遅れる多数派同調の負の影響を再現性などを確認する。また、2004 年新居浜市豪雨災害避難行動データを用いた実証分析により、世帯属性や同調する他者との属性差による避難開始選択への影響を明らかにする。擬似最尤推定法を用いた重みの推定により、実際に災害弱者世帯の未避難状態が健常者世帯の避難選択確率を低下させることを示す。次に、二者間と空間特性を考慮した他者同調ネットワーク形成モデルを構築する。ここでは、他者との同調は、協調行動を形成した相手と生じると想定し、二者間の協調行動形成有無を評価する。また、二者間の協調行動形成有無は、集団内他者の行動に影響を受けると仮定し、集団全体におけるネットワーク形成モデルを導入する。二者間特性の考慮にあたっては、不平等回避型の効用関数を用いる。空間特性は、空間的に近い二者ペアは周辺他者による影響等に起因する誤差項の相関により表現する。このモデルを用いた実証分析により、二者間の協調行動形成は、距離や住宅密度等の空間的要因や二者間の属性差といった社会的要因が影響することを示す。最後に、ネットワーク形成モデルと避難開始選択モデルを合わせたシミュレーション評価により、ネットワークの動的推移の確率と世帯の避難確率の推移を合わせて評価する。これにより、同調ネットワーク形成による負の効果や率先避難の伝播特性を明らかにする。

第 5 章では、共同避難による避難促進の効果を最大化するための動的制御方策の評価を行う。共同避難により避難確率の低い人の避難促進という正の影響がある一方で、共同避難のための移動の長期化や混雑によりリスク増大や避難完了が遅れるという負の影響がある。負の影響を抑え、正の影響を最大限活かすために、適したタイミングで共同避難移動を停止する制御方策が必要となる。また、その制御方策は限られた時間での求解が必要であり、演繹的な解法を持つことが望ましい。まず、制御方策を検討するための目的関数の特徴についての整理する。その上で、避難完了時刻を最小化する動的流入制御方策と総被災リスクを最小化する共同避難制御方策について評価する。評価にあたり、1 交差点の単純なネットワークにおける基本的特性を示す。最適制御理論を用いることで、避難完了時刻最小化のための合流部の動的制御の解の領域を得る。解の領域により、固定型制御に比べて動的制御による優位性を示す。共同避難交通の動的制御では、リスクが単調増加する等の仮定の下で、動的最適制御の解は共同避難の通行をあるタイミングで停止する問題となることを示す。最後に数値計算により、総被災リスク最小化と避難完了時刻最小化の二つの目的関数について、最適共同避難制御の特性を示す。ここで提案した二つの制御の型は、個人の意思決定による行動が許容される範囲を示した上で、それを超える交通流に対する制御を行うという型である。これにより、全員制御が困難な状況の下での空間制御による最適避難の達成を図っている。

最後に第 6 章では、本論文で得られた知見を整理し、今後の展望と課題について述べる。

目次

論文要旨	i
第1章 序論	1
1.1 最適避難と行動選択	1
1.1.1 避難計画の目標と住民行動	1
1.1.2 行動フローと避難猶予時間	1
1.1.3 最適避難のための制御方法	3
1.2 対象とする災害時行動と制御	4
1.2.1 将来リスクを考慮した避難意思決定	4
1.2.2 他者の影響を考慮した意思決定	4
1.2.3 他者同調と避難行動	5
1.2.4 通行者に対する空間制御	6
1.3 想定する避難促進対策	7
1.3.1 避難促進対策と行動	7
1.3.2 避難促進対策による正負の影響	8
1.4 本研究の目的と構成	9
第2章 既往研究の整理	12
2.1 避難開始行動に関する研究	12
2.1.1 集計型の避難開始モデル	12
2.1.2 非集計型の避難開始選択モデル	12
2.2 動的離散選択モデル	13
2.2.1 動的離散選択モデルの定式化	13
2.2.2 解法アルゴリズム	15
2.3 相互作用モデル	16
2.3.1 他者による影響評価	17
2.3.2 ネットワーク形成における影響評価	18
2.4 災害時最適制御に関する研究	19
2.4.1 制御方策の整理	19
2.4.2 制御変数の整理	22
2.4.3 制御の目的関数の整理	23
2.4.4 動的交通流の最適制御研究	24
2.4.5 動学的最適化の解法	27

2.5	本研究の位置づけ	28
第3章	完全合理性を緩和した動的避難開始選択	30
3.1	避難開始選択における将来効用の導入	30
3.1.1	将来効用の導入の必要性	30
3.1.2	完全合理性の緩和した将来効用の導入	31
3.1.3	完全合理性を緩和した定式化	31
3.2	パラメータ推定手法	32
3.2.1	解法アルゴリズムの比較検討	32
3.2.2	制約領域の設定	32
3.2.3	MPECの基本的な求解アルゴリズム	33
3.2.4	局所解回避のための計算アルゴリズム	34
3.3	実証分析	36
3.3.1	データ概要	36
3.3.2	効用関数の設定	37
3.3.3	計算結果と考察	38
3.4	本章のまとめと課題	44
第4章	他者同調ネットワークを考慮した避難開始選択の動的推移	46
4.1	他者同調と避難遅れ	46
4.2	他者同調作用による避難開始選択への影響	47
4.2.1	避難開始選択モデルのフレームワーク	47
4.2.2	数値計算による他者避難の影響評価	49
4.2.3	実証分析	52
4.3	二者間特性と他者同調ネットワーク形成	65
4.3.1	二者間協調行動形成モデルのフレームワーク	65
4.3.2	実証分析	68
4.3.3	ネットワーク形成と避難確率の推移シミュレーション	72
4.4	本章のまとめと課題	75
第5章	避難完了時刻とリスクに着目した共同避難の最適制御	78
5.1	共同避難と避難遅れ	78
5.1.1	目的関数の特徴の整理	79
5.2	交通流の動的制御の基本的特性	80
5.2.1	避難完了時刻最小化のための流出交通の動的制御	81
5.2.2	共同避難交通の動的制御	89
5.3	数値計算による最適共同避難制御とその特性	92
5.4	本章のまとめと今後の課題	96
第6章	結論	98
6.1	本研究の成果のまとめ	98
6.2	今後の課題	100

目次	v
参考文献	103
謝辞	110

第 1 章

序論

1.1 最適避難と行動選択

1.1.1 避難計画の目標と住民行動

避難計画には、単純かつ究極の目標が存在する。全員が被災しないこと、全員が安全な状態にあることである。これは、計画者・住民に共通する最大の目標である。この目標の達成にむけ、全員避難を迅速に達成できる計画が必要である。本研究では、全員避難に寄与する住民行動の解明と制御方策の提案を行う。

災害時特有の特徴として、“住民全員の選択結果が均質であることが望ましい状態であり、全員避難のために必須である”ということがある。行動目的、目的地、目的地到達時間は、均質な選択結果が必須となる。例えば、行動目的が避難であること、目的地が安全な場所であること、〇分以内に避難完了することが住民全員に求められる。ここで均質という言葉について説明する。目的地は同じ施設・位置ではなくてもよいが、災害から安全であるという質をもった施設が必要である。つまり、全く同じ選択結果は求めないが、安全という同じ質を提供する選択を全員が選ぶ必要がある、この均質な選択を全員に求めることが、災害時特有の事象である。

しかし、住民の選択結果は不均質となる。これには、様々な理由が考えられる。例えば、災害時は低頻度現象であるために完全情報ではないこと、個々人によって異なる状態にあり、また異なる選好を持つこと、合理的ではない選択が行われることなどである。理由はどうであれ、住民の選択結果が不均質であれば、全員被災しないという目標は達成されない。それを防ぐために有効なアプローチとして、次の二つがある。1つは、住民間で不均質な選択結果を防ぐために働く他者との協調行動の利用である。ただし、災害時には多数派同調バイアスといった現象も生じるため、協調行動によって必ずしも全員が被災を免れるとは限らない。もう1つは、計画者による住民行動の制御である本研究では、災害時の住民の不均質な選択の状況下において、避難を早期化するための、住民間の協調行動と計画者の最適制御をモデル化し、その効果を明らかにする。

1.1.2 行動フローと避難猶予時間

避難猶予時間に着目し、災害種別ごとの行動フローを大きく3つに整理する。まず、災害種別 D の避難猶予時間と必要距離を図 1.1 に示す。横軸が避難猶予時間 T_{dis} 、縦軸が避難必要距離 d である。避難猶予時間の厳密な定義は難しいが、避難の必要性に(最も早い部類の人が)気づいた瞬間を0とし、そこからの経過時間と考える。もちろん、災害規模により猶予時間 T_{dis} 、必要距離 d とともに上下するが、図 1.1 に示

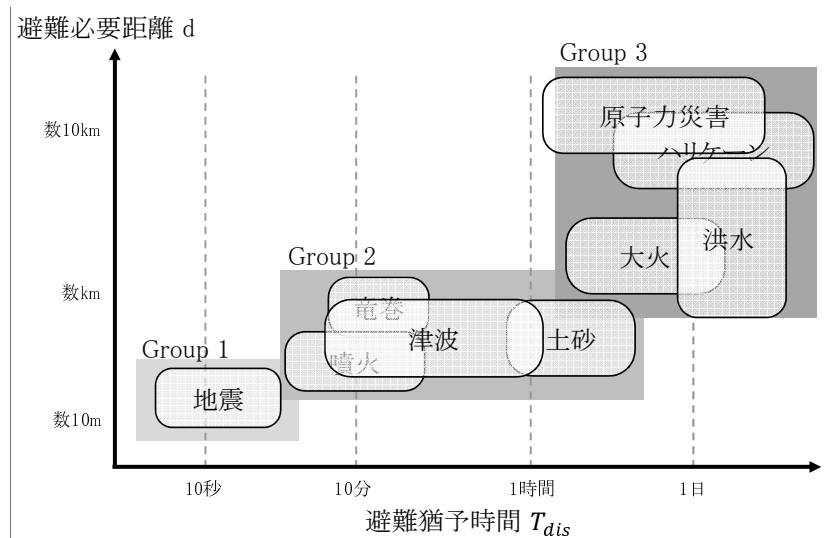


図 1.1 災害種別と避難猶予時間，必要距離の整理

す通り，大まかに整理する．地震 (Group1) による建物倒壊からの避難の猶予時間は非常に短い，避難に必要な距離も短い．ハリケーンや洪水 (Group3) は数日前から被害の危険性の予測は可能であり，猶予時間は長い．これらの被害は広範囲に及ぶため，避難必要距離は長い．津波や土砂・豪雨災害 (Group2) は数時間前にならなければ被害危険性の予測は難しい．被害を受ける範囲は限定的であり，避難必要距離は比較的短い．この Group2 の災害が，近年の日本で数多く起こっており，その対策が求められる．

次に，図 1.1 に示した 3 つのグループについて，避難行動の標準的なフローを整理する．

- Group 1 気づき 避難開始 避難場所
- Group 2 気づき 避難準備・支援 避難開始 避難場所
- Group 3 気づき 避難準備・支援 避難開始 (・集団避難) 避難場所

Group1 は猶予時間 T_{dis} と必要距離 d とともに短く，被災危険性に気づいてから即座の避難開始が必要となる．Group2 は猶予時間 T_{dis} は 1 時間程度，必要距離 d は数キロ程度であり，避難準備や他者支援を行った後の避難が可能である．Group3 は猶予時間 T_{dis} は数時間以上，必要距離 d は数キロ以上である．猶予時間 T_{dis} が長く，集団避難を伝達する猶予があるため，住民が集合した上で，バスなどの公的交通を使った避難が可能である．必要距離 d が長いため，公的交通の利用による混雑緩和や交通弱者の避難支援が必要である．ただし，災害発生の中心地点からの距離により，必要距離や猶予時間は異なる．そのため，個々の災害や避難者により，行動フローや猶予時間・必要距離は異なる．

被災を免れるために必要な行動時間は次のように整理できる．

$$\begin{aligned} \text{Group 1} \quad & t_{noti} + t_{ev}(d(D_1)) \leq T_{dis}(D_1) \\ \text{Group 2} \quad & t_{noti} + t_{prop} + t_{ev}(d(D_2)) \leq T_{dis}(D_2) \\ \text{Group 3} \quad & t_{noti} + t_{prop} + t_{ev}(d(D_3)) \leq T_{dis}(D_3) \end{aligned}$$

t_{noti} は被災危険性に気づくまでの時間， t_{prop} は避難準備・支援にかかる時間である． t_{ev} は避難開始から避難場所までの移動にかかる時間であり，避難必要距離 d に正比例する．また，図 1.1 からわかるように，猶予時間 T_{dis} と必要距離 d は両者とも災害種別 D に正比例しており， $T_{dis}(D) \propto t_{ev}(d(D))$ となる．

ここで，移動や情報伝搬までを含めた避難計画が有効である Group2, 3 に特に着目する． t_{noti} は情報

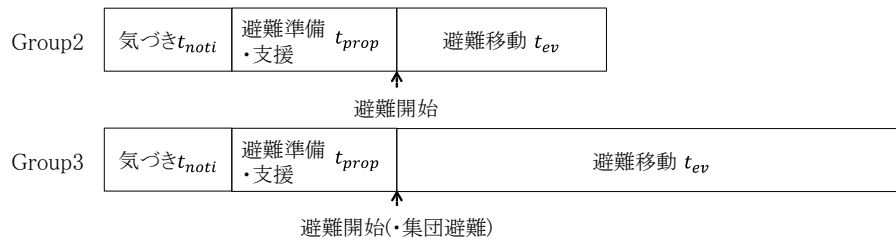


図 1.2 行動フローと所要時間のイメージ

伝搬や災害意識に基づくものであり、災害規模により大きくは変わらない。 t_{prop} も同様に、避難移動のための自宅での準備や自宅への帰宅行動、家族との合流行動にかかる時間であり、災害規模により大きくは変わらない。この行動フローとそれぞれにかかる時間を図示したのが、図 1.2 である。行動時間と避難猶予時間の関係性については、次が成立する。

$$\frac{t_{noti} + t_{prop}}{T_{dis}(D_2)} \gg \frac{t_{noti} + t_{prop}}{T_{dis}(D_3)} \quad (1.1)$$

Group2 や Group3 の災害において、 t_{noti} や t_{prop} を短縮することで全体の避難の所要時間を短縮することができる。特に、Group2 の災害では、全体の避難の所要時間には t_{noti} や t_{prop} の短縮が必要である。ただし、準備・支援のための移動が発生することで、避難移動との錯綜が生じ、避難時間 t_{ev} が増大するという問題もある。本研究では、猶予時間 T_{dis} は 1 時間前後、必要距離 d は数キロ程度である Group2 の災害における最適避難を考える。こうした災害からの避難では、避難移動のみでなく、避難開始前の行動にも着目する必要がある。

1.1.3 最適避難のための制御方法

次に、行動選択の制御について、避難猶予時間と制御の対象に着目して整理する。

まず、個人に直接働きかける制御方法には、大きく分けて、事前計画による制御と個別指示による制御がある。事前制御(計画)とは、災害前から避難計画・方法を地域内各個人で共有し、災害時にはその計画通りに行動するというものである。課題としては、地域での計画に無関心な層や地域外の人とは計画を共有できないため、行動の制御ができない点である。また、避難猶予時間の長い災害の場合は、全ての時間内の行動を事前から計画しきれないため、個人の選択に委ねる部分が大きくなる。次に、指示制御とは、災害時中に指示により行動を指定し、指定を受けた避難者はその通りに行動するというものである。こちらの課題としては、猶予時間が短い災害の場合には指示伝達の時間が不足し、制御対象が限定的となるという点がある。

避難猶予時間に基づいて、制御手法ごとに対象割合の変化を示したものが図 1.3 である。横軸は避難猶予時間、縦軸は制御対象の割合を示している。避難猶予時間が長い場合は、指示制御が伝搬する時間が十分にあるため、多くの人に対する制御が可能となる。一方で、指示するための猶予時間が短くなれば、指示制御により制御できる対象割合が減少する。避難猶予時間が短い場合は、指示制御を伝搬する時間はなく、事前制御(計画)によって行動選択の制御を行う必要がある。ただし、上述した通り、事前制御を全員に伝えることは難しく、個々の住民の選択行動に委ねられる割合が生じる。ここで、図 1.3 の白色の部分は、事前制御や指示制御が及ばない範囲であることを示す。また、猶予時間がある程度長くなる図 1.3 の中央では、選択行動による割合が大きくなる。この範囲では、住民の行動は個々の選択に委ねられ、そのため、不均質な選択結果が生じやすい。

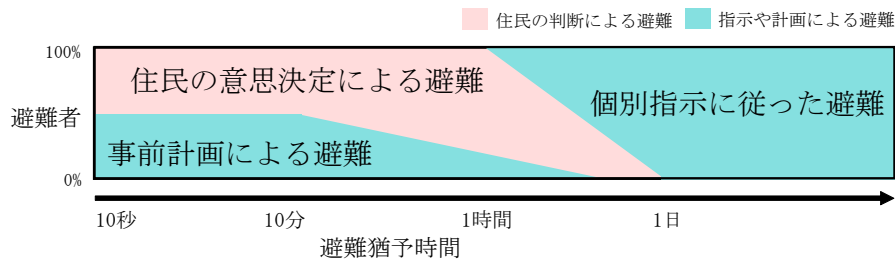


図 1.3 避難猶予時間と制御方法の関係

本研究で対象とする避難猶予時間が数時間程度の場合は，図 1.3 の中央に該当する．事前制御と指示制御だけでは制御しきれない住民の行動選択に委ねられる割合が大きい．こうした災害における避難の促進のためには，住民の意思決定とそれに対する制御の両者を考える必要がある．そこで，本研究は，住民の行動選択を前提とした交通流制御を研究対象とする．こうした行動選択と制御を同時に考える既存の研究は少なく，そのためのモデル構築と評価を行う．

1.2 対象とする災害時行動と制御

本研究では，住民の行動選択を前提とした交通流制御を研究対象とし，そのモデル構築と評価を行う．ここでは，本研究で対象とする住民行動と制御の具体について説明する．また，想定する住民行動に対する避難促進対策について説明する．

住民の行動選択としては，避難開始までの行動選択の短縮を評価するため，避難開始選択に着目する．特に，災害時は経験や情報が不足するため，意思決定が難しくなるといった状況を想定し，将来や他者の影響を捉えたモデルを構築する．交通流制御についての制御方法として，ある空間上での制御を導入する．全員に指示を伝えるのが困難な状況であっても，ある空間の利用者に対してはその空間上で指示を伝えることは可能である．そこで，交差点上での空間制御を導入する．

それぞれの内容の詳細について，以降で説明する．

1.2.1 将来リスクを考慮した避難意思決定

災害避難は将来の被災を避けるための行動であり，将来状態の影響が大きい．そのため，将来リスクを考慮した避難意思決定が求められる．特に，洪水，ハリケーン，大火や津波，火砕流といった時々刻々での状態の変化が比較的予測しやすいまたは観察可能な災害においては，将来リスクを想定した意思決定を行いやすい．また，楽観的な将来の想定により意思決定の先延ばしをしたために被災してしまう場合もあり，こうした個々人の将来予測が必ずしも有効とならない場合もある．将来リスクの評価の大小を含めて，現時点での避難の意思決定を行うため，将来リスクの評価を正しく行うことは重要である．こうしたリスクの将来予測には，それまでの経験の有無や限られた情報の入手のほか，近隣からの口伝えの情報に拠る場合もある．将来リスクを導入した検討は第 3 章で行う．

1.2.2 他者の影響を考慮した意思決定

前述した将来リスクを考慮した避難意思決定はあくまで個人内の意思決定である．対して，稀少事象であり，限られた時間しかない災害時において，独力での意思決定ができないため，他者から影響を受けた

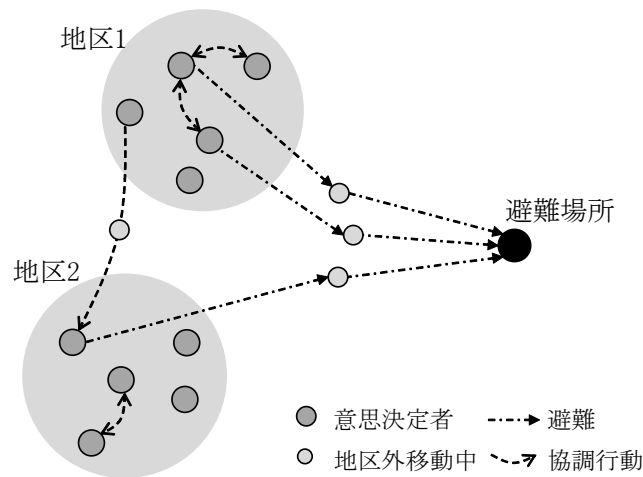


図 1.4 他者同調と避難行動のイメージ

意思決定を行うこともある。

近くにおいて、同様の被災リスクをもつ個人間であっても実際には異なる選択結果を持ちうる。その場合、独力での意思決定が難しい場合は、他者の選択に影響を受ける。これは他者との選択の差に不効用を感じ、その解消のために他者の選択結果との同調が生じる。こうした他者の選択との同調により生じる災害時特有の現象が、多数派同調バイアスであり、率先避難である。

一方で、こうした避難選択との同調の前段階で、他者との協調行動形成の意思決定がある。この場合は、他者からの影響をより直接的に受ける。現時点での効用の差を解消するための交換行動として、他者との協調行動を形成する。また、将来生じうる選択結果の差を予想し、その差による不効用の回避のための協調行動形成とも捉えられる。具体には、災害弱者を支援する利他的行動や被災リスクを認知していない相手への情報伝搬行動は、こうした協調行動の一種である。協調行動の形成により将来の避難意思決定にあたっての影響を受ける可能性が高い。ただし、こうした協調行動により避難が遅れてしまって被災することもあり、協調行動の生起が必ずしも避難を促進するとは言えない。一方で、地区内や世帯内での個人間の選択の差の解消を図ることができる点では、協調行動には正の効果がある。他者の影響を考慮した検討は第4章で行う。

また、他者の避難意思決定に対して、強制的な働きかけを行うのが共同避難である。これは、協調行動の形成を行った上で、そのまま一緒に避難する行動といえる。災害時要援護者や世帯内の避難において、共同避難は観察される。避難の意思が強い一人により、相手の意思決定に拠らず、避難者を増やすことができる点が長所である。ただし、その影響相手は極めて限定的である。また、世帯内の場合を考えると、相手との距離が遠い場合は協調行動形成までに時間がかかりすぎるため、有効に機能しない。共同避難については、第5章で検討する。

1.2.3 他者同調と避難行動

ここで、図 1.4 を用いて、本研究で対象とする他者の影響を考慮した災害時の行動について具体的に説明する。なお、ここでは将来リスクを考慮した意思決定は個人内で完結した意思決定メカニズムであるため、図には表現していない。ここでは、2つの地区(出発地)と1つの安全な避難場所(目的地)を想定している。2つの地区を設定することで、地区間の協調行動形成とそのための移動を表現できる。また、避

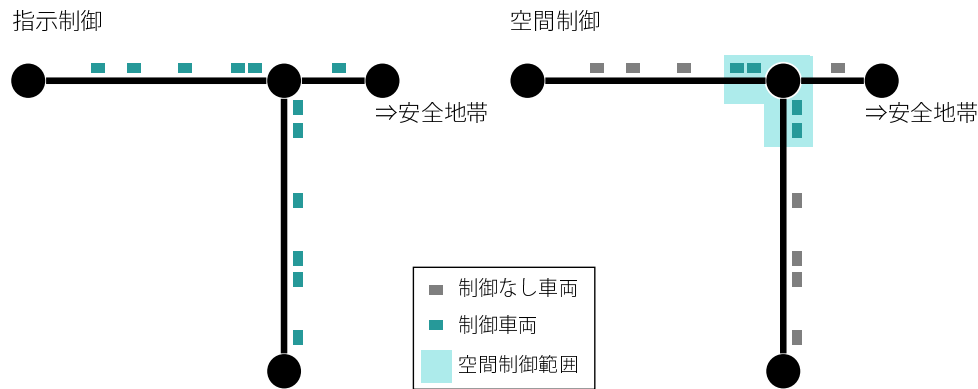


図 1.5 指示制御と空間制御の比較

難場所を一つとし、避難目的地選択の問題は扱わない。避難目的地の選択にあたり、早期に安全な場所に行くためには最も近い場所を選択するのが自然である。一方で、最も近い場所を選択しない場合もあり、これは避難目的地の効用（自宅や家族との距離、リスクの認知）が影響していると考えられる。ここでは避難目的地の選択効用の議論は行わないため、避難目的地を一つとする。

図 1.4 において表現している行動は、「地区内の他者との協調行動形成」、「地区外の他者との協調行動形成」、「避難」の3つである。地区外の他者との協調行動形成と避難は、地区外移動が生じる。地区1では2つ、地区2では1つの協調行動が形成されている。地区1では、協調行動を形成している二者がともに避難し、相手の避難の影響を受けた避難選択を表現している。また、地区1から地区2への協調行動形成とその個人の避難を図中央部に示している。これは、他地区の個人との共同避難を示している。ここで示したように、本研究では、避難時の他者同調行動として、他者との協調行動形成、他者の避難に影響を受けた避難意思決定、共同避難の3つを対象とする。

共同避難においては、他地区への移動までを含めた評価を行う。避難者の避難場所到達までの移動の過程は、最初にいた地区から直接避難の1トリップ型と、他地区に移動してからの共同避難の2トリップ型（トリップチェーン型）の二つがある。2トリップ型の場合は、他者の避難促進に貢献できる反面、トリップが余計に生じるために道路混雑や避難遅れが生じる可能性が高い。そこで移動も含めた評価を行う。また、道路混雑による避難の遅れは移動の過集中により生じるため、避難開始選択タイミングが集中すれば、道路混雑とそれによる避難遅れは生じうる。そのため、移動も含めて評価対象とすることの重要性は高い。

1.2.4 通行者に対する空間制御

1.1.3 では事前制御と指示制御による制御では、避難猶予時間が短い場合に、全員の選択行動の制御が難しいことを説明した。これは事前制御と指示制御が個人への働きかけによってとるべき行動を指定する形の制御であり、その伝達に問題が生じるためである。対して、道路ネットワーク上のあるノード・リンクの通行者に対する規制型の空間制御によれば、伝達の問題はなくなる。空間制御は、制御ノード・リンクを通行する個人に対する規制であり、それ以外のネットワーク上にいる個人への働きかけは必要はない。そのため、その場所での指示伝達によるため、伝達による問題は小さい（ただし、事中の混乱を防ぐため、規制に関する事前からの認知向上は必要である）。

指示制御と空間制御のイメージは図 1.5 である。図 1.5 左は指示制御のイメージであり、道路ネット

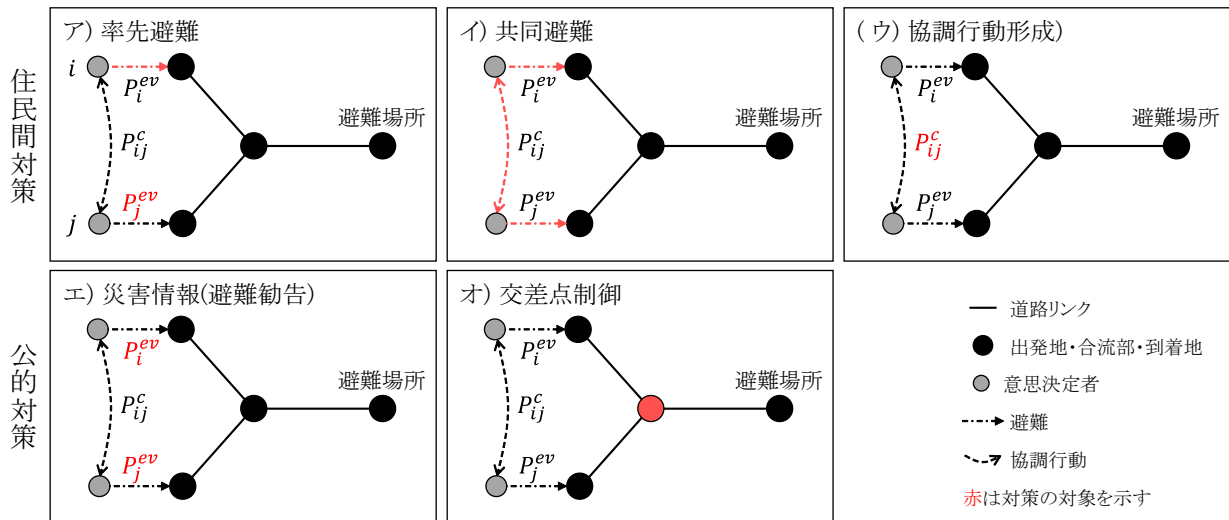


図 1.6 避難促進対策の対象

ワークの全ての車両が制御対象となっている．図 1.5 右は空間制御のイメージである．中央のノードが制御対象であり，そのノード手前を通行する車両のみが制御車両となる．ノード手前の車両のみを制御対象とし，他の車両は制御対象とはしない．そのため，制御内容の伝達に関する労力は小さく，制御車両に伝達する内容もノードの通行に関する単純な内容となる．ノードを通行する車両に対する制御により，最短時間での通過を実現する．空間制御を導入した検討は第 5 章で行う．

なお，本研究では一部の避難者への制御として，一部への伝達かつ被伝達者の違反なしという状況を想定する．違反なしを想定し，理想的な状況の下での制御方策を検討する．実用的には違反者を想定した制御が求められ，その点では課題がある．全員への伝達かつ一部違反という状況も，一部の避難者への制御として成立するが，本研究では想定しない．

1.3 想定する避難促進対策

1.3.1 避難促進対策と行動

次に，本研究で想定する 5 つの避難促進対策について説明する．ここまでで示した本研究で対象とする災害時行動の生起を前提とした対策である．

具体的には，ア) 率先避難，イ) 共同避難，ウ) 他者状態・関係，エ) 避難勧告 (災害情報)，オ) 交差点制御の 5 つである．ア)~ウ) は住民間による避難促進対策，エ)，オ) は公共によって実施可能な避難促進対策である．なお，ア) ウ) エ) は第 4 章，イ) オ) は第 5 章で具体的に検討する．図 1.6 では，5 つの対策とその対策の対象 (赤部分) を示している．また，右側を避難場所とした横 Y 字型のネットワークを想定して，示している．左側のノードは地区 (出発地) である．左側の出発地の横に意思決定者 i, j を載せている．意思決定者 i は避難確率 P_i^{ev} に従って避難を選択した場合は，道路リンク上を移動し，避難場所に到達する．これは他者 j の避難確率 P_j^{ev} に影響する．また，協調行動形成確率 P_{ij}^c に従い，協調行動を ij 間で形成する． i, j が同じ地区にいる場合は道路リンク上の移動は必要ないが，異なる地区にいる場合は道路リンク上の移動が必要となる．また， i, j の地区内外に関わらず，協調行動の形成によって避難確率 P_i^{ev}, P_j^{ev} の間に影響が生じる．

次に，各対策とその対象について説明する．図 1.6 のア) 率先避難では，意思決定者 i が率先避難を選

択した場合を示す。iは避難するため、出発ノードへの矢印を赤くしている。iの避難により、iと接続するjの避難確率 P_j^{ev} も影響を受ける。率先避難は、iの避難とそれによるjの避難への影響を想定した対策である。なお、ここでjはiと同地区・他地区のどちらでも構わない。ただし、iと接続している必要があり、近い場所にいるまたは遠い場所にいる場合は家族のような強い関係性があるということとなる。離れた場所にいる家族を想定した場合は、津波てんでんこと同様のメカニズムとなる。

イ) 共同避難では、iとjが共同で避難した場合を示す。ij間の協調行動を形成した上で、i,jともに避難していることを赤線により示す。i,jが異なる地区にいる場合は、道路リンクを利用した移動が必要となる。区内での近所の人との乗合による避難行動や他地区から家族と合流し避難するピックアップ行動がこれにあたる。共同避難は、車避難が必要な災害状況下で、運転できない人と運転できる人との間で生じやすい。

ウ) は他者との協調行動の促進を示す。直接的な避難促進対策ではないため、ウ)のみでは避難促進対策とはならない。ただし、例えばリスク・コミュニケーションや防災訓練等により、他者の状況理解を深めることにより、他者との協調行動は形成されやすくなる。こうした対策を想定する。協調行動の形成確率が増加すれば、災害時要援護者を支援しうる人の割合が増え、避難促進につながる。もちろん、協調行動形成により多数派同調バイアスが生じる可能性もあり、必ずしも避難促進につながるわけではない。

エ) 避難勧告は避難勧告(災害情報)による避難促進対策を示す。この対策は、災害に関する情報の伝播により、意思決定者の避難確率 P^{ev} の増加を図っている。災害情報の伝播や被災リスク(認知)の状況は、地区や個人によって異なってしまうため、全ての地区・個人に対して平等に影響を与えるわけではない。

オ) 交差点制御(空間制御)は交差点制御による避難促進対策を示す。ア)~エ)は避難需要(避難開始行動)に対する対策であったのに比べて、オ)は避難完了時刻(避難完了行動)に対する対策である。避難場所に移動するトリップの交差点流出量を制御する場合は、避難完了時刻の早期化に寄与する。共同避難等の他地区への移動を制御する場合は、避難完了時刻早期化に加えて、避難開始時刻にも影響を与える。

既存研究として、第2章の表2.1で示す制御方策のうち、オ)は道路対策の適応型信号制御、イ)は交通対策の他者支援、エ)はリスク認知対策の災害情報・避難勧告に該当する。ア)ウ)は災害情報(リスク認知)と他者支援の両方に関わる内容である。ア)の率先避難により他者のリスク認知に影響を与えることで効用を変化させる。また、本研究では言及しないが、他者同調によって避難開始タイミング以外にも交通手段や経路への影響も生じうる。ウ)の協調行動形成により情報の伝播やその後の共同避難などを生じうる。ア)イ)ウ)は災害時中に状況に応じて指示を出すといった方法で対策を実施することは難しく、事前からのマネジメント計画が必要になる。対して、エ)オ)は災害時中に生じる状況に合わせた制御による対策である。

1.3.2 避難促進対策による正負の影響

ここでは、上記で示した避難促進対策による正負の影響について、災害時行動メカニズムと移動混雑を考慮して、説明する。ここで、説明する二つの正負の影響については、図1.7に示す。

一つ目は図1.7左の地区内の避難伝播とリスク認知についてである。第4章で示す協調行動形成と率先避難の関係である。協調行動形成は正の影響のみが生じるわけではなく、避難確率の低い意思決定者同士で集合すると多数派同調バイアスにより避難が進まない状況が生まれる。それを避けるために、率先避難の対策が行われる。率先避難は、一部の人の避難確率が高まる(1となる)ことを意味し、避難者の周辺他者はその避難者に追従する避難が選択されやすくなる。一方で、率先避難者に影響を受ける周辺他者がいない場合は、周辺への追従者の波及は生じない。その場合は、率先避難が伝播するための他者との協調行

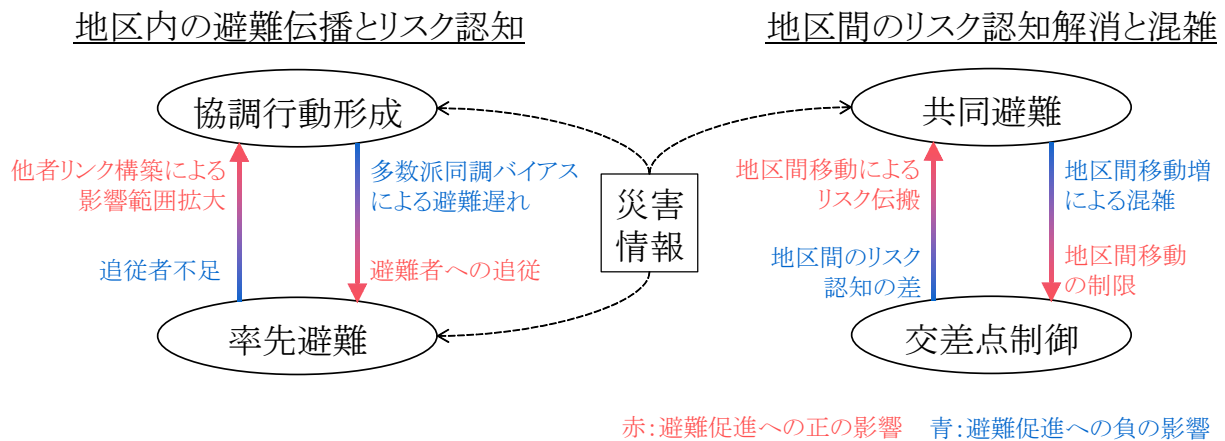


図 1.7 避難促進対策による正負の影響

動ネットワークの形成が先に必要となる。

二つ目は図 1.7 右の地区間のリスク認知解消と混雑についてである。これは、共同避難と交差点制御の関係を示し、詳細は第 5 章で説明する。地区間の共同避難が促進されると、地区間の移動が増えるために道路リンク上で混雑が発生する。混雑防止のためには、地区間移動方向のリンク利用を交差点制御により防ぐことが有効となる。一方で、地区の間でリスク認知の差などがあって避難確率に大きな差がある場合に、交差点制御により通行を防いでしえばリスクのバラつきは是正されない。こうした場合には、共同避難による地区間のリスク伝搬が有効となる。このように、交差点制御と共同避難はその移動量によって、正負の影響が生じる。なお、共同避難以外でも地区間の移動が生じる協調行動形成では同様の正負の影響は生じる。

ここまでで 4 つの避難促進対策について、正負の影響を説明したが、図 1.6 の 5 つの避難促進対策のうち、災害情報は入っていない。災害情報は、率先避難や共同避難、協調行動形成といった意思決定を促す補完的な位置づけにある。共同避難や率先避難にはその避難促進の影響範囲が周辺他者又は共同避難相手に限られるという点で弱点がある。一方で、災害情報は広範な範囲の相手に伝えることができる。ただし、情報の伝わり方には個人差があり、不十分なリスク認知となるために結局避難が遅れてしまう個人が生じる。そうした個人の認知リスクを高めるために、有効な方法として率先避難や共同避難がある。このように、災害情報は、率先避難や共同避難と補完的な関係となる。

1.4 本研究の目的と構成

本研究では、比較的避難猶予時間が短い災害において、現実に即した避難行動を考慮した上で、避難最適を達成するための方策に関する知見を蓄積することを目的とする。住民の行動選択を前提とした交通流の制御を行うことを大きな研究目的とし、そのためのモデル構築とモデルを用いた評価を行う。

住民の行動選択については、避難開始選択行動に着目する。1.1.2 で述べたとおり、避難開始時刻の早期化が避難猶予時間が短い災害においては重要である。ただし、個別への具体的な指示は難しく、避難開始は個人の意思決定に大きく依存する。そのため、個人の選択モデルとして避難開始選択を記述する。災害発生の稀少性のために経験や情報が不足し、意思決定が難しくなる状況を想定し、その際に将来状況や他者の影響を強く受けると仮定する。この将来と他者を意思決定メカニズムに入れ込んだ避難開始選択モ

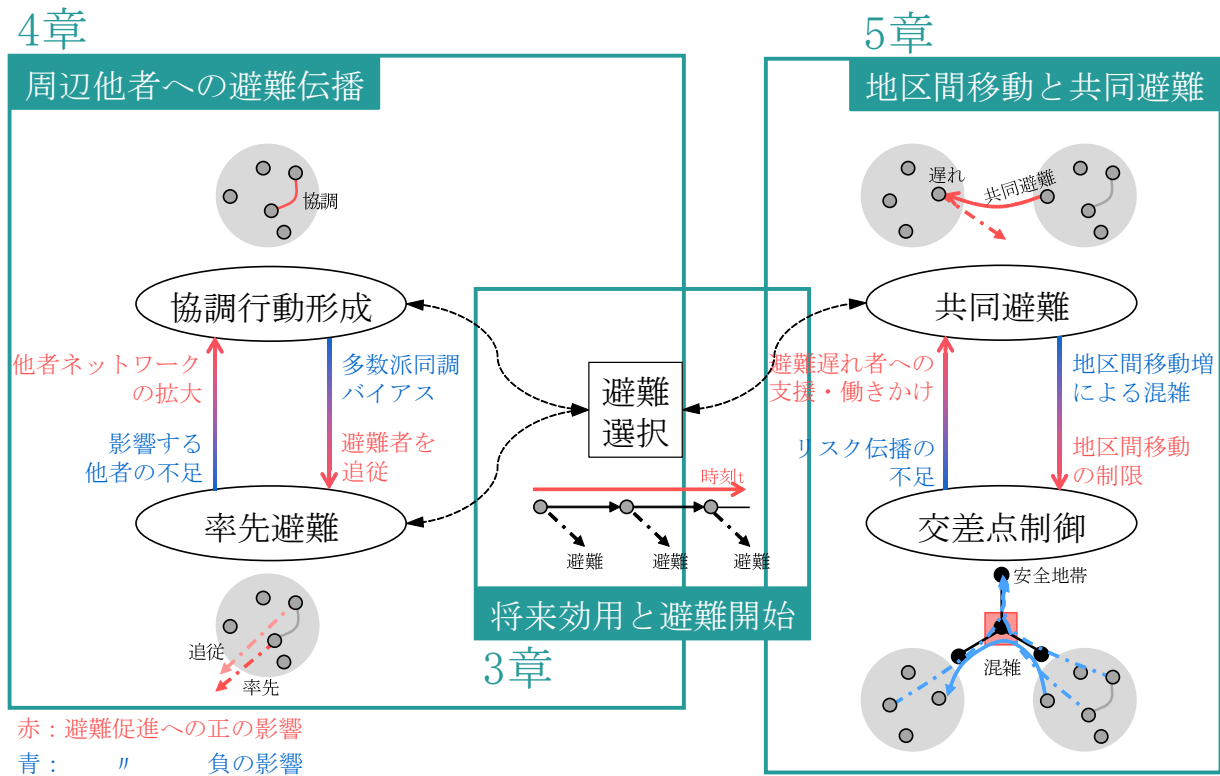


図 1.8 本研究の構成と避難促進対策の関係

デルを構築する。

交通流の制御については、全員への指示・制御の伝達が難しい状況を想定しており、ある空間の通行者に対する空間上での制御を想定する。ある空間上の通行者に対しては、その場所での直接的な指示は比較的伝達は行いやすい。そこで、具体的に1交差点を想定し、空間制御による避難促進方策とその評価を行う。

本研究の構成は大きく3つに分かれる。構成を図1.8に示す。

第3章は、将来効用と避難開始の関係の記述である。災害避難は、将来リスクの回避行動であるため、自分の将来状態を想定した意思決定となる。ただし、稀少事象であり、かつ情報が十分でない災害状況下では、将来状態の想定は難しい。そこで、将来状態の想定に完全合理的ではない状況を仮定した動的離散選択モデルを構築し、避難開始選択行動を記述する。これにより、災害時の現実に即した行動として、将来状態の想定とその不確かさを考慮した行動記述を行う。

第4章は、周辺他者への避難伝播の記述と避難促進対策による影響の評価である。具体には、構築したモデルにより、他者同調ネットワークの構築と他者同調を考慮した避難開始選択行動の記述を行う。災害下で単独での行動選択が難しい場合に生じる他者との同調行動に着目する。避難開始選択に影響を与える他者との関係性をネットワークとして記述した上で、他者同調型の避難開始選択モデルを構築する。これにより、率先避難や多数派同調バイアスといった災害時に生じる現象を再現し、評価する。また、具体的協調行動ネットワークの構造と生じる現象の関係性を明らかにする。

第5章は、共同避難の効果の最大化を図るための交差点制御方法を検討する。まず、交差点制御にあたり、必要となる目的関数や制御特性を整理して示す。次に、共同避難に対する最適制御の方策の基本特性を理解するための定式化を行う。また、数値計算により、目的関数や共同避難選択割合の影響により、生

じる結果の違いを考察する。

本研究の各章の構成としては、第 1 章は序論、第 2 章は既往研究の整理、第 3 章は将来状態を想定した避難開始選択、第 4 章は他者の影響を考慮した避難開始選択、第 5 章は共同避難の動的制御、第 6 章は結論である。

第2章

既往研究の整理

2.1 避難開始行動に関する研究

まず、本節では避難開始行動に関する研究についての整理を行う。まず、避難開始選択のモデル構造に着目して、整理する。

2.1.1 集計型の避難開始モデル

ある地域・災害において、住民の避難反応曲線 (Evacuation response curve) を求める集計モデル [99][83][113] について説明する。Sequential travel demand model と呼ばれ、実際の避難行動データを用いた回帰計算により、パラメータを推定する。Tweedie et al. (1986)[99] で横軸に時間、縦軸に出発時間をとる形式の避難反応曲線が導入されて以降、研究の蓄積は多い。後述の 2.4.4 で整理する災害時の SO-DTA 研究においても、多くはこのモデルが採用されている。避難反応曲線の形状には、ワイブル分布を用いた場合 (式 (2.1)) とシグモイド曲線を用いた場合 (式 (2.2)) がある。

$$D(t) = 1 - \exp(-\beta t^\gamma) \quad (2.1)$$

$$D(t) = (1 + \exp(-\alpha(t - h)))^{-1} \quad (2.2)$$

$D(t)$ は時刻 t までに避難した住民の割合を示す。式 (2.1) は、 β と γ はパラメータであり、大きいほど避難の反応は早くなる。全員避難が完了する直前で、 $D(t)$ の傾きは緩やかになる。式 (2.2) は、パラメータ α は曲線の傾き、パラメータ h は半数の住民が避難開始する時刻を表す。避難開始直後と全員避難直前の $D(t)$ の傾きは緩やかになる。避難反応曲線を用いたモデルは、過去の避難行動データを基に作成されており、災害規模や地域性によって、パラメータ値のチューニングが必要となる。また、マクロ指標であるために避難計画の観点からは取り扱いがしやすいが、避難行動の個人ベースのメカニズムとの関連はない。つまり住民行動に立脚したモデルとはなっておらず、個人間や集落内での同調行動や災害情報伝搬、災害教育の効果などを反映することはできない。

2.1.2 非集計型の避難開始選択モデル

まず、非集計型の避難開始モデルについて説明する。これは、個人の意思決定構造を鑑み、避難 / 非避難の二項選択の意思決定構造をモデル化している。Sequential travel demand model と呼ばれ、こちらは非集計型のモデルである。図 2.1 に示すように、個人はある時刻 t で避難 / 非避難を選択する。非避難を選択した場合は、次の $t + \Delta t$ 期で再度、避難 / 非避難の選択を行う。このモデルの適用を行った最初

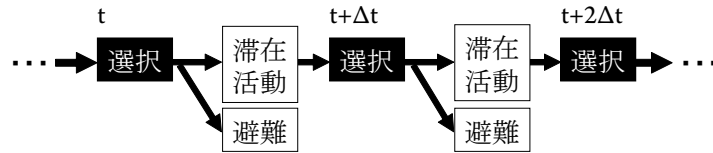


図 2.1 個人の避難開始選択構造

の研究として，Fu&Wilmot(2004)[35]がある． t 期において避難を選択する確率を二項ロジットモデルを用いて，次式で表す．

$$p_{ev}(t) = \frac{\exp(V_{ev}(t))}{\exp(V_{ev}(t)) + \exp(V_{st}(t))} \quad (2.3)$$

また， t 期での避難は，それ以前において非避難を選択した結果として生じるため，その確率は次式で表す．

$$\begin{aligned} P_{ev}(t) &= Pr\left((U_1^{st} \geq U_1^{ev}) \cap (U_2^{st} \geq U_2^{ev}) \cap \dots \cap (U_t^{st} \leq U_t^{ev})\right) \\ &= p_{ev}(t) \prod_{t'}^{t-1} (1 - p_{ev}(t')) \end{aligned} \quad (2.4)$$

ロジットモデルを用いており，避難開始選択の説明変数には被災リスクや個人属性，地域特性といった様々なものを用いることができる．

他にも避難開始選択に関する非集計モデルに関する研究に，Sequential travel demand modelの時系列上の選択構造をNested logit modelで表した研究[38]やHazard-based modelの援用モデル(Hasan et al.(2013)[39])がある．こうしたモデルも含めた非集計モデルでの課題としては，避難開始選択行動は将来のリスク回避行動であるにも関わらず，時間軸上の変化による影響を考慮したモデルとなっていない点があげられる．そのためには，災害状態予測やトリップチェーンの考慮等の説明変数の改善による方法がある．他には，動的離散選択モデル[16][90][95]を導入し，モデル構造そのものを将来状態を予測する形とする方法も考えられる．こうした避難開始選択モデルの動学化に関する課題はPel et al. (2012)[86]でも指摘されている．本研究の第3章では，動的構造推定を用いて，将来状態を含めた避難開始選択モデルを構築する．そこで，次節では動的離散選択モデルについて説明する．

2.2 動的離散選択モデル

2.2.1 動的離散選択モデルの定式化

まず，動的離散選択モデルの基本的な定式化[16][90]を説明する．

価値関数

まず，時刻 τ における価値関数の定式化を行う．最終の選択タイミングは時刻 T とする．

$$\begin{aligned} V(x_t, \epsilon_t) &= \max_{d_t} E\left(\sum_{t=\tau}^T \beta^{t-\tau} u(x_t, d_t; \theta)\right) \\ &= \max_{d_t} \left(v(x_t, d_t; \theta) + \epsilon(d_t) + \beta \int_{x'} \int_{\epsilon'} v(x', \epsilon') p(x', \epsilon' | x, \epsilon, d_t, \theta_2) dx' d\epsilon' \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

d_t は選択肢, t は時刻, β は時間割引率, u は効用, x_t は t 期 (今期) の状態, $x' = x_{t+1}$ は $t+1$ 期 (次期) の状態を示す. ϵ_t は誤差項, $\epsilon' = \epsilon_{t+1}$ は次期の誤差項, θ は効用に関するパラメータ, v は効用の確定項, p : 状態の推移確率, θ_2 は推移確率に関するパラメータを示す.

推移確率

推移確率は次のように定式化される. 誤差項の推移確率と状態の推移確率には条件つき独立性を仮定する. なお, 災害時の行動選択において, 意思決定者が状態の推移確率に影響を与えることはできない. そのため, 推移確率は外生的に付与する. なお, ここでは t の記述は省略している.

$$p(x', \epsilon' | x, \epsilon, d, \theta_2) = p_2(\epsilon' | x'; \theta_2) p_3(x' | x, d) \quad (2.6)$$

p_2 は誤差項 ϵ の推移確率, p_3 は状態 x の推移確率である.

期待値関数

期待値関数の定義は式 (2.5) と式 (2.6) より次となる.

$$EV(x) = \int_{\epsilon} V(x, \epsilon) p_2(\epsilon | x; \theta_2) d\epsilon \quad (2.7)$$

また, このとき, 選択肢 d の期待値関数は次となる.

$$EV(x, d) = v(x, d; \theta) + \epsilon(d) + \beta \int_{x'} EV(x') p_3(x' | x, d) dx' \quad (2.8)$$

式 (2.5)(2.7)(2.8) より, 状態 x の期待値関数は次となる.

$$EV(x) = \int_{\epsilon'} \max_d (EV(x, d)) p_2(\epsilon' | x; \theta_2) d\epsilon' \quad (2.9)$$

選択確率

式 (2.9) において, $\epsilon \sim \text{i.i.d Gumbel}$ として, 選択肢 d の選択確率は次となる.

$$P(d | x, \theta) = \frac{\exp(v(x, d; \theta) + \beta EV(x, d))}{\sum_{\forall d} \exp(v(x, d; \theta) + \beta EV(x, d))} \quad (2.10)$$

また, 誤差項に Gumbel 分布を仮定した場合, 式 (2.8) は次となる.

$$EV(x, d) = \int_{x'} \left(\log \left(\sum_{\forall d'} \exp(v(x', d'; \theta) + \beta EV(x', d')) \right) \times p_3(dx' | x, d) \right) \quad (2.11)$$

連続量による積分計算が難しい場合は, 状態 x を J 分割し, 離散化することで近似する.

$$EV(x_k, d) = \sum_{j=0}^J \left(\log \left(\sum_{\forall d'} \exp(v(x'_j, d'; \theta) + \beta EV(x'_j, d')) \right) \times p_3(x'_j | x_k, d) \right) \quad (2.12)$$

これを次とおく.

$$\begin{aligned} EV(x_k, d_h) &= T(EV, \theta, x_k, d_h) \quad \forall x_k, \forall d_h \\ EV &= T_{\theta}(EV) \end{aligned} \quad (2.13)$$

尤度関数

尤度関数は次となる．パラメータ算出は，次の尤度 l (対数尤度 L) の最大化により行う．

$$\begin{aligned} l(\theta) &= \prod_i^N \prod_{t=1}^T l_i^t(x_t^i; \theta) = \prod_i^N \prod_{t=1}^T P(d_t^i | x_t^i; \theta) \\ L(\theta) &= \log l(\theta) \end{aligned} \quad (2.14)$$

i は個人， N は全選択者を示す．ただし，この最大化にあたって用いる期待値関数 EV は式 (2.12) を満たす必要がある．式 (2.12) は非線形関数であり， (x_k, d) の数の連立方程式となるため，その求解コストは大きい．特に，状態 x の数が多いほど，計算コストが大きくなるという性質を持つ．

2.2.2 解法アルゴリズム

次に，動的離散選択モデルの実証計算におけるパラメータ同定のための解法アルゴリズムについて説明する．解法アルゴリズムには NFXP(Rust(1987))[90] と NPL(Aguirregabiria & Mira(2002))[1]，MPEC(Su & Judd(2010))[95] があり，それぞれを簡潔に説明する．

NFXP (Nested Fixed Point algorithm)

まず，NFXP アルゴリズム [90][91] を説明する．NFXP は，式 (2.12) を満たす EV を求めるための Inner Fixed Point Algorithm と式 (2.14) の尤度最大化するパラメータ θ を求めるための Outer BHHH optimization Algorithm の 2 つのアルゴリズムにより構成される．

まず，Inner Fixed Point Algorithm は，パラメータ θ を固定のもとで不動点 $EV_\theta = T_\theta(EV_\theta)$ を求める．式 (2.13) は，収縮写像 (Contraction mapping) であり，次を満たす．

$$\|T_\theta(W) - T_\theta(V)\| \leq \beta \|W - V\| \quad (2.15)$$

この性質を利用し， $k+1$ 番目の期待値関数を次式により更新する．

$$EV_{k+1} = T_\theta(EV_k) \quad (2.16)$$

すると， $k \rightarrow \infty$ において $EV_k \rightarrow EV_\theta$ を得ることができる．ただし，この不動点への収縮速度は β であるため，不動点周辺では変化が小さくなる．そこで，不動点を得るために，Newton-Kantorovich 法を用いる．これは一次近似と逆行列を用いて，不動点への収束を行う方法である．恒等写像 I を用いると $EV_\theta = T_\theta(EV_\theta)$ は $(I - T_\theta)EV_\theta = 0$ となる．このとき， EV_{k+1} の一次近似は式 (2.17) となり，この解は逆行列を用いて，式 (2.18) となる．

$$0 = (I - T_\theta)EV_{k+1} \sim (I - T_\theta)EV_k + (I - T'_\theta)(EV_{k+1} - EV_k) \quad (2.17)$$

$$EV_{k+1} = EV_k - (I - T'_\theta)^{-1}(I - T_\theta)EV_k \quad (2.18)$$

ただし，不動点の近傍以外では，式 (2.18) では不動点に近づけない．そこで，Inner Fixed Point Algorithm では不動点近傍までは式 (2.16) により EV_k を更新する．この収縮速度が遅くなった段階で，式 (2.18) により EV_k を更新することで，不動点 EV_θ を得る．

次に，Outer BHHH optimization Algorithm は不動点 EV_θ の下でパラメータ θ を求める．これは無制約最適化問題であり，準ニュートン法を用いて，最適なパラメータ θ_t を求める．準ニュートン法の二

次導関数には BHHH 法又は BFGS 法を用いたアルゴリズムとなっている。 θ_t において、対数尤度の一次微分と二次微分の積が十分小さければ収束と判定し、パラメータ θ_t を最終的な解とする。収束していない場合は、 θ_t を Inner Fixed Point Algorithm に代入し、再度不動点 EV_{θ_t} を求める。収束するまでこれを繰り返すことで、尤度最大化するパラメータ θ を得る。このアルゴリズムは、不動点 EV を得ており、厳密解法となる。

NPL (Nested Pseudo-Likelihood algorithm)

次に、NPL アルゴリズムについて説明する。この方法では、step1 としてランダムに期待値関数の初期値 EV_0 を与える。次に、 k 回目と $k+1$ 回目の更新について説明する。step2 では、 EV_k を式 (2.10) の右辺に代入することで求めた選択確率を用い、式 (2.14) により尤度最大化するパラメータ θ_k を求める。step3 では、パラメータ θ_k と EV_k を用いて、式 (2.12) により EV_{k+1} を算出する。十分小さな ϵ, ϵ' に対して、 $|EV_{k+1} - EV_k| < \epsilon$ とパラメータ $|\theta_k - \theta_{k-1}| < \epsilon'$ となり、収束していれば計算終了となる。収束していない場合は、step2 に戻る。この繰り返し計算により、パラメータ θ を得る。このアルゴリズムは、無限回の繰り返し計算によって不動点を得ることができ、NFXP の解と漸近等価となる。ただし、NFXP と計算負荷の点で比べると、不動点を得るための Inner algorithm を経ずにパラメータ θ を求めるため、計算負荷が軽減している。Aguirregabiria & Mira(2002)[1] では、NFXP と比べて 1/9 倍の時間短縮が報告されている。

MPEC (Mathematical Program with Equilibrium Constraints)

次に、MPEC 型のアルゴリズムについて説明する。このアルゴリズムでは、期待値関数をもつ尤度関数最大化問題を制約条件付きの最適化問題に読み替えることで NFXP の等価の解を得ることと計算コストの減少を両立させている。尤度最大化 (式 (2.14)) と期待値関数 (式 (2.13)) を用いて、次の制約付き非線形計画問題を得る。

$$\min_{\theta, EV} A(\theta, EV) \quad (\text{なお}, A(\theta, EV) = -L(\theta)) \quad (2.19)$$

$$\text{subject to } c_i(\theta, EV) = EV - T(\theta, EV) = 0, \quad i \in \forall(x_k, d_h) \quad (2.20)$$

ここでは、期待値関数 EV をパラメータと捉えることで、問題全体を制約付き最適化問題として定式化している。つまり、式 (2.13) を不動点を得るために解くことなく、評価することだけに用いている。それにより計算負荷を軽減することができる。Su & Judd(2010)[95] では、NFXP と比較して、1/180 倍の時間短縮が報告されている。

以上の通り、3 つの動的離散選択モデルのパラメータ同定のためのアルゴリズムについて整理した。厳密解が得られる解法として NFXP と MPEC がある。NFXP は離散化した状態数が多い場合には連立方程式を解くことが難しくなり、計算速度が速くかつ漸近等価な解が得られる NPL が用いられる。一方で、近年、より早い解が得られる解法として MPEC 型が提案されている。ただし、状態数が多くなる場合には、MPEC を解くための解法の設定自体が課題となる。

2.3 相互作用モデル

前述したように、災害時には個人間の不均質性が存在し、その不均質性を解消するために他者との同調行動が生起する。他者行動の影響は、Baker(1979)[11], Baker(1991)[12], Aguirre et al.(1998)[2], 羽藤 & 中川 (2005)[40], 山田 & 中島 (2006)[116], 本間 & 片田 (2008)[42], 中島ら (2008)[76], 神谷ら (2012)[46],

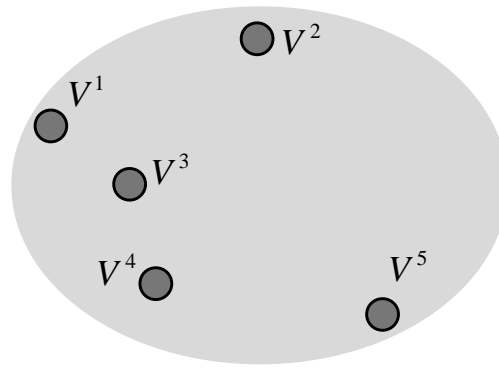


図 2.2 Collective model における他者からの影響のイメージ

King and Jones(2015)[53] などの多数の研究で指摘されている．こうした他者との同調行動が避難開始に与える影響は，2.1.2 で説明したシンプルな個人の意思決定モデルでは考慮できていない．そこで，災害時・平時を問わず，他者からの相互作用 (インタラクション) の影響を考慮するモデルについて整理する．

2.3.1 他者による影響評価

他者による影響を効用関数の中で考慮した選択モデルについて整理する．まず，行動選択と他者影響の関係性についてのレビュー論文として，Ben-Akiva et al.(2012)[17] や Draganska et al.(2008)[30] がある．ここでは，次の 3 つのモデルについて説明する．まず，世帯内の相互作用と世帯意思決定を扱った Collective model(Chiappori(1988)[21], Chiappori&Ekeland[22]) である．次に，個人間の利他的選好 (不平等回避選好) として他者からの影響を考慮した利他型モデル (Fehr&Schmidt(1999)[33]) である．最後に，個人間の相互作用と意思決定を扱った Interaction model(Brock&Durlauf(2000)[18], Fukuda&Morichi(2007)[37], Dugundji&Gulyas(2008)[31], Walker et al. (2011)[109]) である．この 3 つのモデルについて，個人間の不均質性のある状況を仮定した下で，説明する．

Collective model は世帯の行動選択を対象としている．世帯は複数人で構成され，各個人は個別効用をもつ．世帯は，個別効用の重みづけにより世帯効用を決定した上で，1 つの意思決定を行う．つまり，世帯構成員の効用の足しあわせた効用による意思決定となる．同時に，意思決定に影響を及ぼす他者は世帯構成員に限定される．この定式化は次となる．

$$U(i) = \sum_{j \in N_n} J_n V^n(i) + \epsilon_n \quad (2.21)$$

集団 N_n 全体で一つの意思決定を行うモデルとなっている．これは，個人間で異なる選択を行った場合に大きな不効用が生じる集団 (もしくは異なる選択ができない集団) であると仮定し，集団で同調して一つの意思決定を行うモデルである．図 2.2 に示すように，集団内の個人の効用を用いて，集団の意思決定を行う．

次に，利他モデルについて説明する．このモデルでは利他行動の対象は世帯内に限らない．自分と相手の効用の差分が大きいほど不効用が生じるという枠組みである．このモデルの基本的な定式化は次である．

$$U(i_n) = V^n(i_n) - \sum_{j \in N_n} J_{n,m} |V^n(i_n) - V^m(i_m)| + \epsilon_n \quad (2.22)$$

J は重みである． N_n は不効用が生じる他者の集合を示す．個人 n と m の効用の差の絶対値を重みと掛

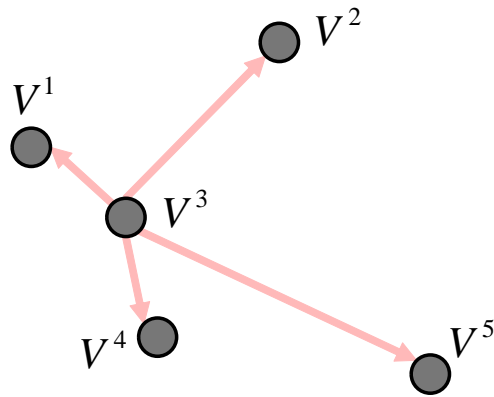


図 2.3 利他モデルにおける他者からの影響のイメージ

け、これを不効用として、 $U(i_n)$ に加えている。効用の差が不効用として、意思決定に影響を与えている。そのため、差を減らす同調行動が選択されやすくなる。例えば、図 2.3 で示すように、意思決定者 3 は自分と他者の効用 V の差によって、その選択が影響される。ただし、図 2.3 のように必ずしも全員が利他効用の対象である必要はなく、対象は N_n で決まる。

次に、Interaction model について説明する。個人の意思決定を対象とし、他者の意思決定が個人の意思決定に影響を及ぼす。他者と自分の意思決定に違いがある場合に、個人が負の効用 (社会的効用) を受けるとして、他者の影響をモデル化している。つまり、他者との意思決定の差をなくす影響が働くことを仮定しており、意思決定の同調が生じる現象を表すことができる。2 肢選択の場合の基本的な定式化は次である。

$$U(i_n, \mu_n(i_{-n}), \epsilon_n) = V^n(i_n) + S(i_n, \mu_n(i_{-n})) + \epsilon_n \quad (2.23)$$

$$S(i_n, \mu_n(i_{-n})) = -E_n \sum_{j \in N_n} J_{n,m}(i_n - i_m)^2 \quad (2.24)$$

μ_n は他者の選択を示し、 S は社会的効用である。 S により、他者との選択結果の違いによって受ける不効用を表す。式 (2.24) は選択結果が違う場合に不効用 $J_{n,m}$ が生じることを示す。その不効用の集団全体での和の期待値を社会的効用 S としている。他者との選択結果の違いを不効用とするため、他者と異なる選択の効用は低下し、他者と同じ選択肢が選ばれやすくなる。他者の影響の与え方の定義により、Global Interaction と Local Interaction の二つがある。Global Interaction では、他者集合全体の行動選択割合を他者からの影響と定義している。影響を及ぼす他者集合は、地区や社会階層 (Walker et al. (2011)[109]) や同じ施設の利用者全体 (Fukuda and Morichi(2007)[37]) といった形で集計的に与えている。Local Interaction では、他者のそれぞれの行動選択が個人の意思決定に影響する。他者と自分の行動選択結果の違いによる影響を重みづけをして評価する。また、影響を受ける他者の範囲を N_n により限定する。図 2.4 で示すように、選択結果の差によって他者からの影響を受ける。また、図 2.4 ではノード 3 にとってノード 5 は影響範囲 N_n の外であるために影響を受けないことを示している。第 3 章では、Local Interaction を用いて、他者の影響を考慮した避難開始選択モデルを構築する。

2.3.2 ネットワーク形成における影響評価

2.3.1 の利他モデル、Interaction model では影響を受ける他者集合形成をモデルの対象としていない。災害時は行動・認知の時空間的制約が強く、影響を受ける範囲は限定的となる。そこで、集合内において

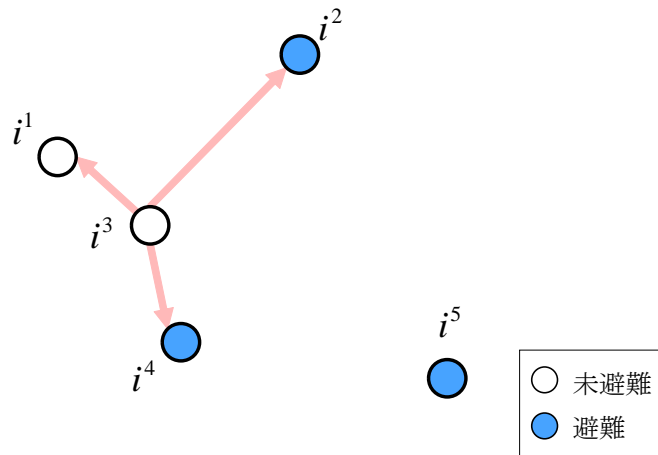


図 2.4 Local Interaction モデルにおける他者からの影響のイメージ

影響を受ける他者を記述することが重要となる．その方法として，(人的) ネットワーク形成に関する研究があり，ここで整理する(詳細は浦田(2009)[102]を参照のこと)．

まず，全体のネットワーク形状に着目した研究には，Random Graph model (Erdos and Renyi (1961)[32], Newman et al.(2002)[77]) ,Small world model(Watts and Strogatz(1998)[111]がある [67]．これらは，ランダムリンクの組み替えにより複雑ネットワークを構築するモデルである．また，BA model (Barabasi and Albert(1999)[14]) や閾値モデル (Caldarelli et al. (2002)[19]) は，複雑ネットワークのスケールフリー性を再現するモデルである．リンクの形成確率をノード・リンクの特性に応じた設定とし，good-get-rich といったメカニズムも再現している．次に，統計的社会ネットワークモデル (Wasserman and Pattison(1996)[110], Anderson et al.(1999)[9]) では，部分ネットワーク形状の生起確率をロジットモデルにより与え，全体ネットワークを形成する [47]．これらは，ネットワーク形状や形成過程をモデル化しており，日常的なリンク蓄積を表現できる．しかし，リンクを形成しないという選択は想定されず，災害時の限定的なネットワーク形成過程への適用には課題がある．次に，Network formation game(Jackson(2010)[44]) は，1対1のリンクに着目し，形成有無の効用を比較し，リンク形成を決定する．全てのリンクにおいて比較することで，全体のネットワーク形状が決定される．個別の効用に着目し，形成しないという選択も含めたモデルである．

2.4 災害時最適制御に関する研究

2.4.1 制御方策の整理

ここでは，災害時における行動制御方策を整理する．まず，その性質に着目し，制御方策を分類する．次に，実際の災害時制御方策の内容について整理する．

制御のアプローチ

制御の直接性と間接性に着目し，制御のアプローチを整理する．

まず，制御と選択は，次のように示すことができる．

$$\text{制御: } i^n \quad (2.25)$$

$$\text{選択: } i^n \in C^n \quad (2.26)$$

式(2.25)の”制御”では、個人 n の行動 i^n が一意に決められており、確定的制御といえる。この決め方には、事前の計画の中で行動を決定する事前制御と、災害中に行動を決定する指示制御の二つがある。例としては、計画により避難場所を予め指定する場合、災害発生後に避難場所を割り当てる場合に対応する。これらは、直接的に個人 n の行動 i を決定しており、直接制御である。

式(2.26)の”選択”では、選択肢集合 C^n から一つの行動 i を個人 n が選択する。こうした行動選択の基本的な枠組みについては、平常時行動研究により、長年の蓄積がある。ここで、その枠組みを簡単に説明する。行動選択の理論には、確率効用最大化 [98][66][29][54] がある。人は完全合理的であると仮定し、個人 n は効用 U_{in} を最大化する行動を選択するというもので、確率効用と選択確率の定式化は次となる。

$$U_{in} = V_{in} + \epsilon_{in}, \quad i \in C^n \quad (2.27)$$

$$P_n(i) = \Pr(U_{in} \geq U_{jn}, \text{ for } \forall j, i \neq j) \quad (2.28)$$

V は効用の確定項、 ϵ は効用の確率項である。平常時の交通需要予測では、調査データを用いて効用の確定項のパラメータを推定し、そのモデルを用いて交通需要を予測する。また、将来予測にあたって、所要時間短縮がなされる場合は、 V_{in} が変化し、選択交通手段が変化する。新たな交通手段が導入されれば、選択肢集合 C^n が変化し、やはり、選択交通手段が変化する。こうした将来状況の変化による手段変更も予測可能である。

この考え方を災害時の行動制御に当てはめる。確定項 V_{in} や選択肢集合 C^n を変化させることで、個人の選択を変化させることができる。例えば、情報伝達によって個人の被災確率が変化すれば、確定項が変化する。また、道路ネットワーク上の一方通行指定は、経路選択肢集合を変化させる。これは、個人の行動選択を直接的に一意に与えておらず、確定的制御・直接制御とは異なる。しかし、効用や選択肢集合といった選択構造を変化させることで、個人の意思決定に(計画者にとって望ましい)変化を促すという点では制御と言える。ここでは、これを間接制御と呼ぶ。また、間接制御は、確率的な避難者の意思決定に準拠した制御方策であり、確率的制御である。

あらためて、直接制御と間接制御について、式(2.25)-(2.28)に照らして、整理する。直接制御とは、計画者が最適避難のために望ましい行動 i^n を直接的に個人に対して指定することである。間接制御とは、個人 n の行動 i^n の選択効用 V_{in} や選択肢集合 C^n を制御することで、全体の最適避難のために望ましい行動 i^n の選択を促すことである。行動 i^n を直接的に指定しておらず、これは間接制御と言える。

制御の対象

次に、制御すべき対象に着目して、制御方策を全体制御と部分制御に分類する。全体制御とは、全ての個人を制御対象とする方策である。つまり、 $\forall n$ に対する i^n を決定する必要がある。部分制御とは、一部の個人を制御対象とする方策である。つまり、 $\exists n$ に対する i^n のみを決定すればよい。大きくわけて、直接制御は被災エリア内の全員を制御対象とする全体制御となりやすい。例えば、避難場所指定の事前計画において、被災エリアの一部は全員避難場所を指定するのに、他のエリアは指定なしとすることは、計画の有効性と公平性の観点から問題がある。また、計画の遵守率も低下する可能性が大きい。ただし、直接制御の中でも、ある空間を通行する交通のみを制御対象とする場合は部分制御となる。間接制御は、確率的な制御であるため、部分制御として導入可能である。制御の影響は確率的であり、全員を制御対象とする必要はない。また、間接制御を受けた人から受けていない人への伝搬による早期避難の効果を想定しており、全員を制御対象とする必要はない。

表 2.1 制御方策の整理

対策	制御	対象	実施時期		時間短縮		
			事前	事中	t_{noti}	t_{prop}	t_{ev}
道路対策							
交差点通行方向指定	C^n	部分	-	-	-	-	-
一方通行規制	C^n	部分	-	-	-	-	-
適応型信号制御	i^n	部分	-	-	-	-	-
交通対策							
避難場所指定	i^n	全体	-	-	-	-	-
経路指定	i^n	全体	-	-	-	-	-
交通手段指定	i^n	全体	-	-	-	-	-
車両制御	i^n	全体	-	-	-	-	-
出発時刻制約	C^n	全体	-	-	-	-	-
他者支援	i^n, V_{in}	部分	-	-	○	-	-
リスク認知対策							
災害情報・避難勧告	i^n, V_{in}	全体	-	-	-	-	-
災害教育	V_{in}	部分	-	-	-	-	-

: 該当, - : 該当しない, i^n : 直接制御, V_{in}, C_n : 間接制御

制御方策の分類

具体的な制御方策を、ここまで整理した制御の分類に基づき、整理する。なお、具体的な方策は Pel(2014)[87] に追加する形で列挙している。表 2.1 に整理する。表 2.1 の主な制御対象において、 i^n は直接制御、 V_{in} は効用関数の変更による間接制御、 C^n は選択肢集合の変更による間接制御を示す。交差点通行方向指定と一方通行規制は、道路利用者の経路選択肢に影響を与えるため、間接制御である。それらのリンクを通行しない人にとっては影響はないため、部分制御である。適応型信号制御は、交通状況に合わせた信号制御であり、交差点の通行を直接制御する。ただし、対象は交差点を通行する交通だけであり、部分制御である。避難場所指定、経路指定、交通手段指定、車両制御は、全員に行動を指定する必要があり、直接制御かつ全体制御となる。他者支援は事前に要援護者支援の相手を具体的に決めておけば直接制御といえるが、具体的に決めないでおく形もあり、 i^n, V_{in} の二つを併記している。また、全員が他者支援行動を行うわけではなく、部分制御である。災害情報・避難勧告については、例えば、日本でも避難準備情報・避難勧告・避難指示の順に拘束力の強さが異なる。そのため、 i^n, V_{in} の二つを併記している。災害情報・避難勧告は、全員への伝達を基本的に想定しているが、全員への伝達を行わなくても、二次伝搬・三次伝搬によって効果を上げることもできる。災害教育は、全員への教育が理想であるが、現実的には不可能であり、部分制御としている。

制御時期は、事前から対策内容を周知する（又は対策を実施する）ことで効果がある対策は事前のみにとする。災害事中にしか対策を実施できない対策は事中のみに としている。どちらのタイミングに実施しても効果がある対策は事前・事中の両方に をしている。他者支援・要援護者支援は、事中にも数多く生じているが、制御として計画者側から事中に働きかけることは難しい。避難場所指定・経路指定・交通手段指定が事中を○としているが、実際には現在の技術では、事中に最適な指定を全個人に対して行う

ことは難しい。

時間短縮効果は、1.1.2 で整理した避難行動フローごとの所要時間の短縮効果について整理する。全ての道路対策は、避難準備・支援の移動と避難移動の錯綜を防ぐ効果を発揮するため、 t_{prop} と t_{ev} の両方に短縮効果がある。しかし、これらの対策は道路マネジメントであり、危険性に気づくまでの時間 t_{noti} への影響はない。全ての交通対策は避難移動に対する対策であり、 t_{ev} を短縮する。他者支援・要援護者支援は、支援する相手を予め定めることで、 t_{prop} を短縮できる。支援相手にとっては t_{noti} の短縮となる。出発時刻制約は、出発時刻を分散させることで、避難移動時間 t_{ev} も短縮することができる。同時に、避難開始時刻の制約を設定することで t_{noti}, t_{prop} を短縮する。ただし、この対策は、地域全体で最適な分布を事前に設定することの難しさや地域住民間の公平性の問題がある。車両制御は、移動車両の経路・速度を指定する対策であり、自動運転の状況を想定している。これは事中の t_{ev} を短縮させる対策である。リスク認知対策は、被災リスクの認知を高めることで避難開始を早めることができ、 t_{noti}, t_{prop} が短縮する。また、交通対策に関する教育を行うことで、総合的な対策となり、 t_{ev} の短縮ともなる。災害教育による対策は、東日本大震災においても「釜石の奇跡」を始めとして、その成果が目撃された。一方で、人の認知に拠っているため、災害事前にその効果を把握することは難しい。

1.1.3 と 1.2.4 で整理した指示制御は全体を対象に i^n を事前に指定する制御である。事前制御は全体を対象に i^n を事前に指定する制御である。空間制御は部分を対象に i^n または C^n を事前に指定又は規制する制御である。表 2.1 の道路対策の 3 つが該当する。

制御方策に着目した既往研究の分類

交通対策の制御に関する既存研究について整理する。Paz and Peeta(2009)[82] や Fu et al.(2013)[36] は、避難者の反応を考慮したうえで経路情報を提供する制御方策について検討している。Hsu and Peeta(2014)[43] は時空間上のリスクの違いを考慮して経路情報を提供する方策、Shi et al. (2014)[93] はエリアによって利用可能交通手段制約を設ける制御方策を検討している。これらは情報提供・空間特性と経路・交通手段選択に着目した制御であり、避難者の意思決定を包含した制御としている。自動運転による制御を想定すれば、制御範囲は広がり、自動車速度などを含めた完全制御が可能である (Yueming and Deyun(2008)[118])。次に、道路対策による制御の既存研究には、一方通行規制による制御については、Kalafatas and Peeta(2009)[49] や Xie et al.(2010)[114] がある。交差点での進行方向規制には Xie and Turnquist(2011)[115] がある。合流部 (ランプ・交差点) での流量規制については、So and Daganzo(2010)[96] や Daganzo and So(2011)[26]、Liu et al.(2007)[64] がある。ここで、道路対策による制御とは道路リンクへの流入制御方策である。

2.4.2 制御変数の整理

次に、道路対策の流入制御方策の制御変数について整理する。制御できる解の範囲の違いにより、離散量制御と連続量制御の二つに分類できる。制御量の制約としては、離散量制御 $\eta \in 0, 1$ と連続量制御 $\eta \in (0, 1)$ がある。連続量制御は離散量制御を包含する。一方通行規制と進行方向規制は離散量制御である。通行有無の規制により、避難者の経路選択を制御し、渋滞の発生を間接的に制御している。合流部流量規制は連続量制御である。通行可能量を制御することで、渋滞の発生を直接的に制御できる。連続量制御は離散量制御を包含しており、より最適な避難状態への到達が可能である。一方で、連続量制御の社会実装のコストは大きく、災害時運用にあたって制御システムの高い頑健性が求められるという難点もある。

制御変数を時間軸上での変更可能性の違いにより、動的制御と静的制御の二つに分類できる。時間軸上で固定した制御である静的制御 η と時間軸上で可変の制御である動的制御 $\eta(t)$ がある。動的制御 $\eta(t)$ は、当然静的制御 η を含む。時間軸上で制御内容を変化させる動的制御方策に関する既存研究には、Hsu and Peeta(2014) 等 [43][50][119] がある。動的制御は静的制御を包含しており、静的制御よりも動的制御のほうがより最適な避難状態への到達が可能である。動的制御を行う場合は、災害時における避難開始時刻や経路混雑状態の分布の予測不可能性を考えれば、リアルタイム観測 [72][79] との組み合わせによる運用の必要性が大きい。Liu et al.(2007)[64] では、車両位置観測と動的制御の組み合わせによる制御システムが提示されている。災害避難の短時間で、リアルタイム観測と合わせて動的制御を行うためには、動的制御の最適解をごく短時間で決定する必要がある。つまり、最適解の求解のために繰り返し計算を用いることはできず、演繹的に求解する必要がある。もちろん、観測と組み合わせた動的制御にはシステムの頑健性が求められ、社会実装のコストも大きい。また、実装事例として、避難を対象としていないが、メリーランド州では CHART[20][52] というシステムにより、交通状態観測とそれを元にした平常時イベントに対するリアルタイムの救急や復旧関係車両への指示制御を行っている。ハリケーンからの避難を対象として、リンクの一方通行規制への変更とその実施を知らせるというシステム [13] にも事例がある。

2.4.3 制御の目的関数の整理

ここでは、避難制御の目的関数についての整理を行う。

早期避難の目的関数についての整理を行う。目的関数を得るための終端時刻 T を設定有無により大きく2つに分けられる。まず、終端時刻 T の設定が必要となる目的関数には次の3つがある。一つ目は総旅行時間最小化 (Ziliaskopoulos(2000)[120]) である。これは次式で表される。

$$\min \int_0^T \sum_a x_a(t) dt \quad (2.29)$$

これは、総旅行時間をリンク a における時刻 t での交通量 x_a の全リンクでの合計を終端時刻 T までの積分で示している。その積分の最小化問題となっている。二つ目は避難完了人数最大化 (Fu et al. (2013)[36]) である。

$$\max \int_0^T \mu_{out}(t) dt \quad (2.30)$$

これは、時刻 t での安全地帯への流出交通流率 $\mu_{out}(t)$ を終端時刻 T までの積分の最大化問題となっている。三つ目は総被災リスク最小化 (Hsu and Peeta(2014)[43]) である。これは次式で表される。

$$\min \int_0^T \sum_e R_e(t) x_e(t) \quad (2.31)$$

R_e はゾーン e の時刻 t でのリスク、 x_e はゾーン e 内の時刻 t における交通量である。リスクと存在量を掛けたものを全ゾーンで合計し、それを終端時刻までで積分する。この積分の最小化問題となっている。総旅行時間最小化に関する研究は多いが、それ以外の目的関数に関する研究は少ない。

次に、終端時刻 T の設定が必要ない避難最適の目的関数として、避難完了時刻最小化の目的関数 (So and Daganzo(2010) など [96]) がある。これは、次式で表される。

$$\min T \quad (2.32)$$

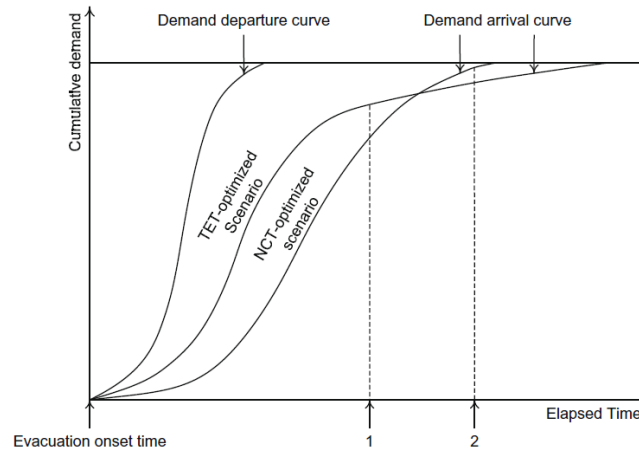


図 2.5 総旅行時間最小化と避難完了時刻最小化の比較 (Xie et al.(2010)[114] より転載)

避難完了時刻 (終端時刻) T を最小化する問題であり, 非常にシンプルな定式化である. Xie et al.(2010)[114] や倉内 (2014)[58] 等は, 避難完了時刻最小化を目的関数とした研究である. これらの解法は制御変数を繰り返し変えて計算し, その結果, 終端時刻 T が一番短かったものを解とするという帰納的解法を用いている. これらは繰り返し計算に時間がかかるため, リアルタイム観測を元にした動的制御の解を求めることは難しい. つまり, 動的制御において, 避難完了時刻最小化の目的関数とする場合には, 演繹的な求解方法が必要となる.

目的関数の設定による計算結果の比較については, Ozbay and Yazici(2006)[81], Pel et al.(2010)[84], Xie et al.(2010)[114] で行われている. 図 2.5 は総旅行時間最小化と避難完了時刻最小化の場合の避難完了割合の比較を行っている. 縦軸は避難完了割合, 横軸は時間を表している. TET(Total Evacuation Time) は総旅行時間最小化による最適化を行った場合の避難完了割合の推移, NCT(Network Clearance Time) は避難完了時刻最小化による場合の避難完了割合の推移を示している. この図からもわかるように, 避難完了する前に被災した場合, 2つの目的関数間の避難完了割合の大小は, 被災時刻により異なる. 被災時刻が早い場合は, 総旅行時間最小化のほうが避難完了割合が高くなる. もちろん, この結果は出発時刻分布によっても異なり, 一概にどちらがよいとは言えない.

2.4.4 動的交通流の最適制御研究

災害からの避難時は, 道路の混雑状況や渋滞列が時々刻々と変化し, それによって利用者の経路選択が影響を受ける. そのため, 最適な交通制御方策の評価のためには, 交通流モデルとして動的配分モデル [6][71](以下, DTA) を用いた検討が必要である. 本項では, DTA を用いた交通最適制御 (SO-DTA) に関する研究を中心にレビューを行う.

車両制御による最適制御

まず, 車両制御 (道路利用者の直接制御) により, システム最適を達成する研究を整理する. Ziliaskopoulos(2000)[120] では, CTM モデル [24][25] を用い, 単一目的地の SO-DTA 問題を線形計画問題として定式化している. 目的関数は総旅行時間最小化であり. 線形計画問題を双対問題として再定式化を行い, 簡易なネットワークでの数値計算例を示している. Chiu et al.(2007)[23] では, Ziliaskopoulos(2000)[120] の SO-DTA モデルを突発災害からの避難に適用している. Qian et

al.(2012)[88]では、DTAにPoint Queueモデルを導入し、渋滞の発生による下流への影響を明示的に捉えた定式化を行っている。計算アルゴリズムとしてMSAを改良した方法を用い、単一目的地の中規模なネットワークで数値計算している。Ma et al.(2013)[65]では、DTAに渋滞の延伸を評価でき、かつ連続時間で評価できるモデルを導入している。全道路利用者の目的地到達までの合計時間の最小化を目的関数としている。解の計算のため、離散時間モデルでの線形計画問題として再定式化を行い、解の存在を示した上で、2リンクネットワークでの数値計算を行っている。これらは、利用経路・車両速度を特定する最適化であり、自動車の完全制御を想定している。

ボトルネック対策による最適制御

次に、ボトルネックや交差点での流量制御により、システム最適を達成する研究を示す。ランプでの流入制御方策に関する研究として、Zhang and Shen(2010)[119]がある。ここでは、ネットワークへの流入時の制御により、総旅行時間を最小化するためのモデルを定式化している。DTAには、CTMとPoint Queueモデルの二つを導入している。また、流入前の待機時間を不公平性の指標と捉え、待機時間最小化を上位問題の目的関数としたモデルを構築し、大域解の存在も示している。また、ボトルネックでの渋滞の回避のために、渋滞メカニズムを考慮したネットワーク通行権取引制度に関する研究 [7][108]がある。ここでは、ボトルネック容量と等しい通行権を道路管理者が発行し、市場で自由に売買することで、社会的最適な状況が達成可能であることが示されている。流入制御に関しては、So and Daganzo(2010)[96]は、流入率とリンク容量の関係に着目し、全員の最短時間避難のためのシンプルな定式化を行っている。ここでは、DTA等の複雑な交通モデルを用いず、流出入に関する簡易な交通モデルを用いている。これを複数経路ネットワークに拡張したDaganzo and So(2011)[26]では、リンク容量と交差点での合流率・分岐率の関係をモデル化している。Daganzoらの研究では、ランプの利用可能性に関する状況は時刻によって変化し、それに対応する制御を定めており、動的制御といえる。

次に、動的制御についての理論的研究を整理する。まず、交通流の再現にexit function[68][69]を用い、Pontryaginの最大値原理 [28]により最適値を求めるFriesz et al.(1989)など [34][118]の研究がある。交通流モデルにFIFO原則を満たさないモデルを用いており、課題がある。河上・劉(1993)[51]ではFIFOを満たす交通流モデルを用いているが、解の収束性については厳密には明らかにされていない。2リンクネットワークにおいて、動的ランプ制御ルール・パターンを解析的に明らかにする研究 [62][74]もある。

交差点制御による避難最適計画に関する研究として、Liu et al.(2007)[64]がある。ここでは、緊急避難を円滑に行うために、GPSによる車両位置観測とあわせてリアルタイム交通マネジメントの枠組みを提示している。ここでは、DTAにはミクロ交通シミュレーションモデルを用いている。各期ごとに観測する車両位置情報を活用し、DSOモデルにより当該期の最適な交差点制御戦略を決定する。DSOモデルは非線形計画問題として定式化し、GRG法を用いて解を求めている。また、ここでは制御可能な交差点数に限界があるため、制御数上限を考慮したモデル化の必要性が指摘されている。交差点制御を決定しても、ミクロシミュレーションモデルの速度差により、DSOで想定した状態が次の期では生じていない場合があり、また次の期でそのときの位置情報よりDSOを想定し、交差点制御割合を決めている。

上記の車両制御やボトルネック制御は、制御が連続的かつ動的であるため、機械による制御が必要となる。そのため、早期の実用化が難しいこと、全ネットワークでの整備には莫大なコストがかかることが課題となる。

ネットワーク計画による最適制御

次に、離散的かつインフラ整備による制御方策であるネットワーク計画問題 (以下, NDP) を整理する。NDP に関する SO-DTA 研究として, Ukkusuri and Waller(2008)[100] がある。DTA として CTM モデルを用い, 予算制約がある中での道路容量拡張の最適戦略を算出するモデルを構築している。目的関数は総旅行時間の最小化であり, OD 需要の不確実性を考慮し, 確率的線形計画問題として定式化している。Lin(2011)[63] は, DTA に CTM モデルを用い, VI と近似, メタヒューリスティクスの導入により計算の効率化を図っている。Kalafatas and Peeta(2009)[49] では, DTA に CTM モデルを用い, 総旅行時間最小化問題を定式化し, 格子状の小規模ネットワークで数値計算を行っている。制御戦略はリンクの一方通行規制とし, 規制実施の上限を定め, 制約条件としている。人口分布や避難人口, 安全地帯の範囲等の分布によるシナリオを設定し, 比較を行っている。また, 一方通行規制を制御方策とした災害時避難の研究もあり, Xie et al.(2010)[114] では, DTA には CTM モデルを用い, 総旅行時間を最小化するための制御方策をモデル評価している。Karooonsoontawong and Lin(2011)[50] では, DTA としてシミュレーションモデルを用い, 制御方策は一方通行規制としている。一方通行制御の規制の時間的な変化を含めた検討をしている。一方通行規制に加えて, 交差点での進入方向規制に特に着目している Xie and Turnquist(2011)[115] では, 同様の制御方策を交通流モデルには SUE を用いて評価している。どちらも解法アルゴリズムとして, ラグラジアン緩和とタブーサーチを組合せた方法を提案し, 中規模ネットワークでの計算を可能としている。NDP とは異なるが, 空間的規制による交通制御を検討した研究として Shi et al.(2014)[93] がある。制御のために自動車を使えないエリアを設定し, 交通手段の限定による制御方策の有効性を示している。下位問題は DTA ではなく, マルチクラスの需要変動型 SUE モデルを用い, 交通手段制限エリアの最適な範囲を求める問題を定式化している。これは, 利用者の選択肢集合の制約による交通制御モデルである。

情報提供による最適制御

次に, 逐次的な経路選択と情報認知に関する研究を整理する。Pel et al.(2011)[85] では, 道路利用者の経路選択行動には逐次選択型と事前決定型の2種類があると仮定し, 避難経路指示方策の効果を検証している。災害時の避難経路指示に全員が従わなくても, 従う割合が高ければ全員避難の所要時間は全員が従う場合と大きく変わらないことを示している。また, Unnikrishnan and Lin(2012)[101] では, 静的な均衡配分を下位問題とし, その中でリンク旅行時間の認知は直前ノードでのみ可能であるとした経路選択機構を設定している。実際に, 旅行時間の設定の違いに大きく計算結果が異なると指摘している。Paz and Peeta(2009)[82] では, ドライバーの情報感度と経路選択を捉えるモデルと, 管理者側の最適情報戦略構築のための SO-DTA モデルを用いて, ネットワークパフォーマンスの向上を試みている。

目的関数・制御変数に着目した整理

ここまで整理した動的交通流の制御に関する既存研究を中心に, 目的関数・制御変数の観点から整理する。目的関数と制御変数に着目した既往研究の整理を表 2.2 に示す。[s/d,e/o] と列で制御変数と対象交通(平時/避難)を示す。Xie et al.(2010)[114] は2種類の目的関数を設定しているため, 表の2つのセルに掲載している。

表 2.2 に示す通り, 動的制御に関する研究は平時交通を対象とした既往研究の蓄積は多い。平時交通を対象とする場合は, 総旅行時間最小化が目的関数となる。まず, 表右上セルの動的連続量制御で, 目的関数が総旅行時間最小化のものについて整理する。Friesz et al.(1989)[34] は FIFO を再現しない exit

表 2.2 目的関数と制御変数に着目した既往研究の整理

目的関数	離散量制御	連続量制御
総旅行時間 最小化	[s,e]Ukkusuri&Waller(08), [s,e]Kalafatas&Peeta(09), [s,e]Xie et al.(10), [s,o]Shi et al.(14), [d,o]Karooonsoontawang&Lin(11) 等	[d,o]Friesz et al.(89), [d,o]Ziliaskopoulos(00), [d,o] 桑原ら (01), [d,o] 長江ら (07), [d,o]Qian et al. (12) [d,o] 朝倉ら (96), [d,o]Ma et al. (13), [d,e]Liu et al. (07) [d,e]Chiu et al. (07), [d,e]Yueming&Deyun(08) 等
避難完了人数 最大化		[d,e] Fu et al.(13)
避難完了時刻 最小化	[s,e] 倉内 (14), [s,e]Xie et al.(10)	[d,e]So&Daganzo(10), [d,e]Daganzo&So(11),
総被災リスク 最小化	[d,e] Hsu&Peeta(14)	

s: 静的制御, d: 動的制御, e: 避難交通, o: 平時交通, () 内の二桁の数字は西暦の下二桁を示す

function を交通流モデルに用いている。Ziliaskopoulos(2000)[120] は全車両の完全制御 (holding) を前提としており、実行可能性の観点から問題がある。他の 4 つの平時交通を対象とした既往研究では、FIFO 原則を満たし、かつ車両の完全制御を前提とせずに DSO モデルを構築している。桑原ら (2001)[62] や長江ら (2007)[74] では車両の出発時刻を所与としており、Qian et al.(2012)[88] や Ma et al.(2013)[65] では出発時刻制御を行っている。災害時の避難では、出発時刻の分布は未知であり、かつ制御は極めて難しく、これらのモデルの適用は難しい。

また、これら以外の動的制御に関する既往研究に関しては、Liu et al. (2007)[64] と Yueming and Deyun (2008)[118] は Friesz et al. (1989) と同様の交通流モデルを用いて最適化計算を行っている。Chiu et al. (2007)[23] は Ziliaskopoulos (2000)[120] と同様である。Karooonsoontawang and Lin (2011)[50] は、制御変数をレーンの進行方向とし、DTA の再現にマイクロシミュレーションモデルを用い、メタヒューリスティクス (Particle Swarm Optimization) により最適解を求めている。Fu et al. (2013)[36] は、出発時刻規制と経路誘導を制御変数とし、DTA にはマイクロシミュレーション、解法にはメタヒューリスティクス (GA) を用いている。Hsu and Peeta(2014)[43] は、避難優先地域を決定するため、DTA の再現にマイクロシミュレーションを用い、Branch-and-Bound により最適解を求めている。メタヒューリスティクスや Branch-and-Bound による方法は、繰り返し計算が必要であり、帰納的な解法となる。また、Fu et al. (2013)[36] と Hsu and Peeta (2014)[43] は出発時刻制御、Karooonsoontawang and Lin (2011)[50] は出発時刻を所与としている。

2.4.5 動学的最適化の解法

本節では、動的最適制御問題の演繹的解法について整理する。動的連続量制御問題の演繹的解法には、動的計画法 (Dynamic Programming)、変分法、最適制御理論 (Pontryagin's Maximum Principle) の 3 つがある [28]。

動的計画法の定式化は、次である。

$$V(x(t)) = v_{it}(x(t)) + \beta \int V(x(t+1))p'(dx(t+1)|x(t), i_t) + \epsilon_t \quad (2.33)$$

$V(x(t))$ は時刻 t における効用 (価値関数), v は時刻 t における効用の確定部分である。 β は時間割引率, $x(t)$ は時刻 t の観測可能な状態変数, p' は状態の推移確率である。右辺第2項が将来に得る効用を示している。この効用を用いて、将来の効用を踏まえた選択を行う。動的計画法は多段階の意思決定モデルである。計算のアルゴリズムとしては、まず次期の将来状態の効用を計算し、効用に加える次に、次期の将来状態の効用を計算するためには次々期の将来状態の効用を計算する。これを繰り返し、最終的には、最終状態からの再帰的計算過程が必要となる。そのため、避難完了時刻最小化のように終端時刻 T が定まっていない問題には適用できない。一方で、将来状態の確率的な状態変化を想定した上での意思決定を表現できる。

次に、変分法について説明する。変分法の定式化は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \max_y V(y) &= \int_0^T F(t, y(t), y'(t)) dt \\ \text{subject to } &y(0) = C, y(T) = Z \end{aligned} \quad (2.34)$$

ここで、目的関数を $V(y)$, 時刻 t での状態を $y(t)$ としている。 A, Z は初期値・終端値の条件である。変分法は物理学の分野で最速降下曲線の求解などに使われ、終端時間 T を自由とすることも可能である。ただし、 $y'(t)$ が目的関数に入っている。そのため、全ての関数が連続であることが必要であり、制御が非連続的に入れ替わる信号などへの適用はできない。

最後に最適制御理論について説明する。定式化は次となる。

$$\begin{aligned} \max_u V(y) &= \int_0^T F(t, y(t), u(t)) dt \\ \text{subject to } &y(0) = C, y'(t) = f(t, y(t), u(t)) \end{aligned} \quad (2.35)$$

ここで、 μ は制御変数である。変分法に制御変数 $u(t)$ を追加し、この $u(t)$ を求める問題である。変分法と違い、目的関数の中に微分は入っておらず、非連続な制御 (スイッチング) にも対応できる。関数 f は状態 y の運動方程式と呼ばれ、時刻 t の状態 $y(t)$, $u(t)$ が決まれば、次期 t' での状態 $y(t')$ は一意に定まる。そのため、変分法と同様に、終端時刻 T は自由でも計算可能であり、各時間帯の最適化計算に分解できるという利点がある。

また、制御変数を決定するための解法として、繰り返し計算を行うことで、帰納的に求める最適解を求めることもできる。その場合の最適化手法には、目的関数の傾き等を用いて求解する厳密解法 [48] と経験的に近似解が得られるとわかっている方法を用いて求解する近似解法 [57] がある。

2.5 本研究の位置づけ

本研究における各章の位置づけを簡潔に説明する。

第3章、第4章で対象とする避難開始選択行動のモデル化については、非集計モデルを適用した既存研究は非常に少ない。国外における災害避難研究の対象となる災害はハリケーンや山火事、洪水といった比較的避難猶予時間と避難必要距離が長い災害である。そのため、避難開始タイミングによる被災リスクの変化による影響は小さかったため、集計モデルによる評価で充分であった。しかし、ハリケーンカトリーナ等の災害では災害時要援護者の避難等が問題視され、個人属性や周辺からの影響に応じた避難開始タイ

ミングの非集計型のモデリングに関する研究が近年進んでいる。ただし、そうした研究ではまだ将来予測や他者の影響の定量的な評価は行われていない。そこで、本研究では交通分野で用いられているモデルの拡張と適用により、その評価を試みる。

第 3 章では、将来の避難効用を考慮した動学的な避難開始時刻選択モデルの定式化と実データを用いた実証分析を行う。動学的離散選択モデルでは、将来効用を取り入れた意思決定を取り扱っているが、その将来効用は完全合理性を仮定し、求めている。一方で、災害時の意思決定者は、将来効用を完全合理的に評価することは難しい。そこで、その完全合理性を緩和した動的離散選択モデルを構築し、適用する。また、動的離散選択モデルの適用にあたっては、実証パラメータの同定のための計算アルゴリズムに課題がある。MPEC 型の計算アルゴリズムは計算時間を短縮できる点に大きな長所があり、その適用を行う。

第 4 章では、同調する他者の影響を考慮するため、Local Interaction モデルを避難開始選択に適用する。Local Interaction モデルのパラメータ推定を実データを用いた研究はこれまでにない。自分と他者の組み合わせによって異なる影響の重みを評価する。また、同調する他者はネットワーク形成モデルにより記述する。これにより同調する他者は時空間上で変化する具体的な集団として捉える。ネットワーク形成モデルは、集団として望ましい二世帯間のインタラクションが形成されると考え、全体効用を用いて、network-GEV 型 [27] のモデルを定式化する。これにより、ネットワークを形成しない時間帯についても記述できる。また、インタラクションは二世帯間で形成されるため、共通する特徴を持った世帯を含むペアの相関を考慮する。ペアの相関は空間的特徴に応じて設定する。これにより、ネットワーク形成モデルに空間的要素を導入することができる。また、他者同調を考慮した避難開始選択モデルと同調する相手の選択モデルを二つ合わせることで、影響を受ける相手とその相手との関係性によって、避難開始選択のタイミングがずれることを表現する。これにより、率先避難や多数派同調バイアスといった災害時に観測される他者同調による真逆の影響を評価する。

第 5 章では、避難最適を達成するための動的連続量制御を対象とする。避難猶予時間の短い災害からの避難において、確率的な行動の予測とあわせた制御を導入することで、被災を減らすことができる。ここでは、共同避難と交差点制御に着目し、動的制御のモデル構築を行う。目的関数の一つは避難完了時刻最小化とし、解法としては、目的関数との相性が良い最適制御理論を用いる。表 2.2 が示す通り、避難完了時刻最小化を目的とした動的連続量制御に関する研究はこれまでほとんどない。最適制御理論を用いることで、演繹的な求解を行うことができ、実践的にも有効である。また、総被災リスク最小化の目的関数についても、解の範囲の限定によって演繹的な求解方法により、解を求める。また、避難促進方策の一つである共同避難と動的制御との間の正負の影響の評価を行う。こうした避難以外の行動を取り入れた中での最適制御研究はこれまでにない。

第3章

完全合理性を緩和した動的避難開始選択

3.1 避難開始選択における将来効用の導入

3.1.1 将来効用の導入の必要性

避難行動は、現在地から移動しなければ被害を受ける場合にその被害を避けるために生じる行動である。これは、現在地の将来リスクを回避する行動が避難行動といえる。被害を受ける前の時点までは避難以外の行動も実施可能である。同時に、避難以外の行動を実施する場合にも、将来の避難や将来のリスクを想定した行動選択を行っている。つまり、意思決定者は、将来の避難行動選択を想定した上で、避難以外の行動を実施する。本章では、こうした将来効用を考慮した避難行動選択をモデル化する。単純な逐次選択型のモデルでは、将来の行動選択は想定できない。行動開始時点での行動チェーンの選択では、将来の行動選択が出発時点で確定し、確率的な将来状態を表現できない。そこで、将来の行動選択効用と確率的将来状態を記述できる動的離散選択モデルを本章では導入する。

まず、基本的な選択構造のイメージを図 3.1 に示す。ここで示したのは、時系列上での避難 / 非避難の選択構造である。図 3.1 は、避難者が時間軸上で連続的に避難・非避難の意思決定を行っていること、非避難を選択した場合は次期以降にも選択を行うことを示している。非避難を選択した場合は、次期以降に避難または非避難の選択が可能であり、最適停止問題の枠組みとなっている。この意思決定構造が示す通り、非避難を選択肢とする場合でも将来の避難の選択が可能である。実際の避難においても、将来避難 (= 将来のリスク回避) を想定して、現時点での非避難を選択していると考えられる。しかし、将来行動の効用の考慮は通常型の逐次型の離散選択モデルでは考慮できない。

そこで、動的離散選択モデルを導入する (定式化の詳細は 2.2 を参照)。動的離散選択モデルにおける選択効用のイメージを図 3.2 に示す。非避難選択をする場合に次期以降での選択が生じるため、次期以降の行動から得る効用を加える。この将来効用を図 3.2 では期待価値関数 EV として右側の緑色の四角により示す。期待価値関数 EV を現時点での非避難選択の単独の効用に加えたものが実際の非避難選択の効用となる。

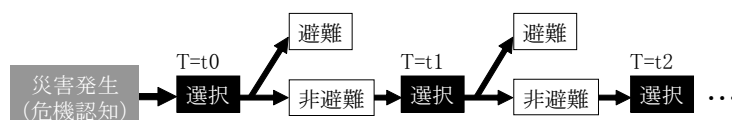


図 3.1 時系列上での避難 / 非避難の選択

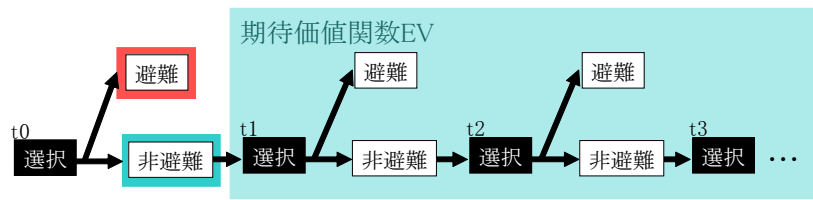


図 3.2 将来効用を考慮した避難 / 非避難の選択

3.1.2 完全合理性の緩和した将来効用の導入

ここでは、将来行動の効用を考慮した期待価値関数の完全合理性を緩和する。前項では、災害避難時の時系列上での逐次的意思決定において将来効用の考慮の必要性を説明した。しかし、既存の動的離散選択モデルをそのまま導入すると、期待価値関数は完全合理的なものとなる。つまり、それは、次期以降の効用と推移確率を全て正しく認識し、かつ将来効用が経過時間と時間割引に従って得られることを理解している完全合理的な行動主体を想定していることを意味する。Rust(1987)[90]では、バス会社という経済主体の平時における選択行動を対象にモデル化を行っており、こうした仮定は十分に成立しうる。対して、本章では、個人の空間上の行動選択を対象としており、また選択を行う状況は災害時である。そのため、認識能力と意思決定の限界のために、完全合理的な期待価値関数を持つことは極めて難しい。意思決定の際の期待価値関数は完全合理性を仮定した値から乖離が生じる可能性が高い。つまり、災害時の意思決定において、完全合理的な状況を想定しない期待価値関数に導入する必要がある。

そこで、本節では、完全合理性を緩和した動的離散選択モデルを定式化する。また、災害時は時空間上でのリスクと情報の偏りは大きい。そのため、完全合理性からの乖離度合は、個人とその個人の置かれた状況によって、異なると想定する。そこで、個人の状態による完全合理性からの乖離の程度を評価できるモデルを構築する。

3.1.3 完全合理性を緩和した定式化

まず、完全合理性の緩和を導入した動的離散選択モデルの定式化は次となる。

$$\min_{\theta, EV'} A(\theta, EV') \tag{3.1}$$

$$\text{subject to } c(\theta, EV') \in \Omega \quad (c = (c_1, \dots, c_i, \dots, c_M)^T) \tag{3.2}$$

制約領域 Ω は c と同次元であり、かつ 0 ベクトルを含む連続した領域とする。ここで、 $\Omega = 0$ の時は完全合理的な期待価値関数を持つ解を得る。完全合理的な意思決定を含む制約領域とする。式 (2.20) の完全合理的な期待価値関数 EV を、制約条件の緩和により $EV' - T(\theta, EV') \in \Omega$ を満たす EV' で代替している。 EV' は、領域 Ω の存在により必ずしも $T(\theta, EV')$ と一致しないため、完全合理的な期待価値関数とはなっていない。ここで、式 (3.1) の求解により、完全合理性を緩和した期待価値関数 EV' のうち、尤度を最大化する期待価値関数を求めることができる。これは、完全合理的ではない $EV' - T(\theta, EV') \in \Omega$ という状況の下で、各個人が行動選択を行っているとは仮定し、尤も確からしい θ と EV' を求めることを意味する。つまり、得られた EV' は各個人が完全合理的ではない状況下で想定する尤も確からしい期待価値関数である。

3.2 パラメータ推定手法

前節で定式化を行った完全合理性を緩和した動的離散選択モデルについて、そのパラメータ推定の手法について説明する。

3.2.1 解法アルゴリズムの比較検討

ここでは、パラメータ推定にあたり、2.2 で示した MPEC 型を元に構築する。導入する MPEC 型の定式化の特徴を、他の手法と比較することで説明する。

NFXP では Inner Algorithm において、期待値関数の更新過程を $EV'_{k+1} - T(EV'_k) \in \Omega$ を満たした場合に停止することで、完全合理性を緩和した EV' を得ることができる。ただし、次のステップの Outer Algorithm では EV' は固定して、尤度最大化の計算が行う。そのため、MPEC 型とは違い、 EV'_{k+1} は完全合理的な期待値 $T(EV'_k)$ から単に Ω の範囲内の誤差を持った値という意味しかない。つまり、MPEC 型で得た各個人の選択結果を考慮した尤も確からしい EV' とは異なる。

次に、NPL においても期待値関数 EV_{k+1} を $T(EV_k)$ から求める計算過程とパラメータ θ を対象にして尤度を最大化する計算過程は別となっており、同様のことがいえる。以上より、完全合理性を緩和した期待値関数を記述する動的離散選択モデルのパラメータ推定手法として MPEC 型を用いる。

3.2.2 制約領域の設定

次に、具体的な制約領域 Ω の設定を示す。最適化計算によりパラメータ (EV', θ) を求める際には、具体的設定が必要である。

設定の検討のため、次に3つを比較する。

$$1. \quad c(\theta, EV') \in R^M \quad (3.3)$$

$$2. \quad |c_i(\theta, EV')| < \phi, \quad \forall i \quad (3.4)$$

$$3. \quad \sum_{\forall i} |c_i| < \Phi \quad (3.5)$$

1. の式 (3.3) は、 Ω を全状態空間とし、特に制約がない場合である。2. の式 (3.4) は、各状態 i ごとの期待値関数の完全合理性からの乖離度合に制約を設定している。3. の式 (3.5) は、全ての期待値関数の完全合理性からの乖離度合の和に制約を設定している。なお、どの設定においても Ω は 0 ベクトルを含む。

まず、1. の設定について説明する。1. では、 EV' に特に制約がないため、自由に尤度最大化する EV' を求めることができる。また、 EV' は全ての状態空間 (x_k, d_h) それぞれについて与えており、 θ の値にかかわらず、 EV' を適切に設定することで尤度を最大化することができる。これは、式 (2.10)、(2.14) において、 θ と EV' が識別できないことを意味する。この問題を $EV' = \sum \alpha x'$ と次期状態 x' により構造化することで解決できる。ただし、これは今期の選択 d は次期の状態 x' と全く関係がない場合のみ、 $\Omega = R^M$ となる。これは当初想定していた動的避難開始行動の意思決定の仮定とは異なる。以上より、1. の設定は導入には適さない。

次に、2. と 3. について、特徴を比較しながら、説明する。2. では状態 i の期待値関数 EV'_i は $|EV'_i - T(EV', \theta)| < \phi$ を満たせばよい。この設定では、個々の状態における期待値関数の完全合理性からの乖離度合について制約を置いている。これは全ての状態で同程度の緩和型の状況までを想定していることを意味する。3. は 2. とは違い、個々の期待値関数 EV' についての制約ではない。そのため、完

完全合理性からの乖離 c_i は個々の状態 i によって散らばりを持ちやすい。 Φ によって全体の完全合理性からの乖離の和を制約し、今期の選択と次期の状態の関係を規定している。なお、ここで $\Phi \rightarrow \infty$ とすれば、1. と同じ設定となる。本章では、完全合理性からの乖離度合は個々の状況によって異なることを想定する。また、その程度を評価することで避難者のもつ完全合理性を緩和した将来効用についての理解を深めることを目的とする。そこで、3. の設定を制約領域の設定として導入する。また、2. の制約を用いる場合は、不等式制約を微分可能とするために $c^T c - \phi^2 I \leq 0$ と等価な変換を行う必要がある。しかし、この不等式制約は非線形制約の二乗となり、下記の3. の求解アルゴリズムと比べて、さらに煩雑な計算が必要となる。

3.2.3 MPEC の基本的な求解アルゴリズム

本項では MPEC(非線形制約付き最適化問題) の求解アルゴリズムについて説明する。まず、基本的な求解アルゴリズムについて説明する。

制約つき非線形計画問題に対して、有効な解法とされる逐次2次計画法 (SQP: Sequential Quadratic Programming) を適用する [48][78]。逐次2次計画法は、ある γ^k における目的関数 A の最急降下方向 s^k を部分問題を用いて求め、 s^k を用いて、ペナルティ法により逐次的に γ を更新を繰り返し、最適なパラメータを得る方法である。なお、ここでパラメータ $\gamma = (\theta, EV')$ である。なお、Su and Judd(2012)[95] では、動的離散選択モデルを制約つき最適化問題と読み替えた時の解法については特に言及していない。

前節で述べたように、完全合理性を緩和した元の問題は式 (3.5) の不等式制約付きの最適化問題となっている。この問題の最適解をメリット関数により求めるとする。その定式化は次となる。

$$\min_{\gamma^k} \left(A(\gamma^k) + r^k \max \left(\sum_i |c_i| - \Phi, 0 \right) \right) \quad (3.6)$$

ここで、 r^k はペナルティパラメータである。上式は制約条件を満たさない場合 ($\sum_i |c_i| > \Phi$)、次となる。

$$\min_{\gamma^k} \left(A(\gamma^k) + \sum_i r^k |c_i| - r^k \Phi \right) \Leftrightarrow \min_{\gamma^k} \left(A(\gamma^k) + \sum_i r^k |c_i| \right) \quad (3.7)$$

$r^k \Phi$ は定数であるため、式 (3.7) が成立する。式 (3.7) の右辺は、 $c_i = 0$ の等式制約付きの $A(\gamma^k)$ の最小化問題のメリット関数の定式化と同じである。そのため、等式制約付き最適化問題として求解することができる。このとき、最適解 γ^* は、 $\sum_i |c_i(\gamma^*)| \leq \Phi$ かつ $\nabla A(\gamma^*)$ 、 $\nabla^2 A(\gamma^*) \succ O$ を満たす解である。制約条件を満たす場合には、 $\min_{\gamma^k} A(\gamma^k)$ となるため、上記の式展開は成立しない。この場合は、解の最小化の探索方向として ∇A を用いる。以降では、等式制約付き最適化問題 (式 (2.19), (2.20)) の求解アルゴリズムを説明する。

部分問題の定式化 (最急降下方向の決定)

逐次2次計画法の定式化について説明する。まず、等式制約付き最適化問題の部分問題の定式化は次となる。

$$\min_s \nabla A(\gamma^k)^T s_k + \frac{1}{2} s_k^T B^k s_k \quad (3.8)$$

$$\text{subject to } c_i(\gamma^k) + \nabla c_i(\gamma^k) s_k = 0, \quad \forall i \quad (3.9)$$

なお、 $B^k(\gamma^k)$ は目的関数 $A(\gamma^k)$ のラグランジュ関数 $L = A(\gamma^k) - \nu^T c$ のヘッセ行列の近似行列であり、BFGS 公式を用いて算出する。また、 $\nabla c(\gamma^k)^T = (\cdot, \nabla c_i, \cdot)$ とする。

上記の等式制約付き最適化問題を 2 乗のメリット関数を用いて求解する．式 (3.8), (3.9) を解くことは，次の Q_b の最小化問題を解くことと同値である．

$$Q_b(s_k) = (\nabla A(\gamma^k))^T s_k + \frac{1}{2} s_k^T B^k s_k + \frac{b_1}{2} \sum_i (c_i(\gamma^k) + \nabla c_i(\gamma^k) s_k)^2 \quad (3.10)$$

式 (3.10) の無制約最適化問題では，最急降下法により最適解 s_k を求める．最急降下法では， ∇Q を用いて降下方向 d_k を求め，線形探索によりステップ幅 $a_k (> 0)$ を求め， s_k を更新する．

$$d_k = -\nabla Q_b(s_k) \quad (3.11)$$

$$(\nabla Q_b(s_k) = \nabla A(\gamma_k) + \frac{1}{2} (B_k + B_k^T) s_k + b_1 \sum_i (c_i(\gamma^k) + \nabla c_i(\gamma^k) s_k) \nabla c_i(\gamma^k))$$

$$s_{k+1} = s_k + a_k d_k \quad (3.12)$$

次式を収束条件とし，満たせば s_k の最適解を得る．

$$\|c_i(\gamma^k) + \nabla c_i(\gamma^k) s_{k+1}\| < \epsilon, \quad \forall i \quad (3.13)$$

なお，ここで $b_1 (> 0)$ はペナルティ・パラメータである．反復を行っても残差 $\|c_i(\gamma^k) + \nabla c_i(\gamma^k) s_{k+1}\|$ が十分に小さくならない場合は， b_1 をより大きな値とする．これにより， b_1 が有限の下で最適解 s^* を得ることができる．

元の問題におけるペナルティ法による解の更新

式 (3.10) の最小化問題より求めた $s^* = s_k$ とし，これを用いて元の問題について更新幅 α^k を求め， γ^{k+1} を得る．

ペナルティ関数 F_r (メリット関数ともいう) は次と置く．

$$F_r(\gamma^k) = A(\gamma^k) + \sum_i r^k |c_i(\gamma^k)| \quad (3.14)$$

ここで， $r > 0$ はペナルティパラメータである．ペナルティ・パラメータは十分大きくすれば解を得られるが，前もって，どの程度大きくすればいいかを知ることはできない．

F_r と外生パラメータ $b \in (0, 1)$ を用いて，線形探索より更新幅 α^k を得る． α^k と s_k を用いて，次のように γ^k を更新する．

$$\gamma^{k+1} = \gamma^k + \alpha^k s_k \quad (3.15)$$

十分小さい δ に対して， $|c_i(\gamma^k)| < \delta$ ($\forall i$) が成立すれば，収束とする．これは SQP の収束条件であるが，本モデルでは，本項冒頭で説明した収束条件を用いる．収束していない場合は， γ^{k+1} を用いて，部分問題に戻る．

3.2.4 局所解回避のための計算アルゴリズム

基本的な MPEC の求解アルゴリズムを適用し，パラメータ推定による実証分析を行う場合に，局所収束の問題が生じる．特に，推定するパラメータ数が多くなるほど離散化状態数が増加し，かつそれぞれの制約は非線形であるため，局所解に陥りやすい．そのため，局所解回避は重要な課題となる．局所解回避のためには，理論的にはペナルティパラメータを増加させることで大域的最適解を得ることができる．しかし，そのペナルティパラメータの増加速度はヒューリスティクスに委ねられている．本アルゴリズムに

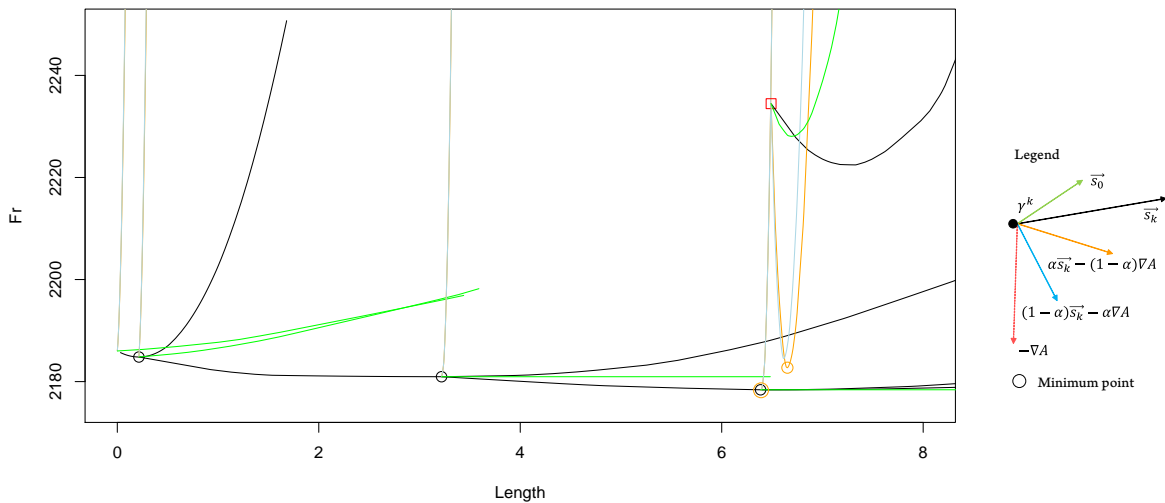


図 3.3 線形探索の過程と局所解への対応

おいては、式 (3.14) のペナルティパラメータ r^k は対数尤度と制約条件の減少速度の比に影響を与える。また、局所解から脱却するために r^k を大きくしすぎると、 F_r の中で $A(\gamma^k)$ が占める割合は小さくなるため、 $A(\gamma^k)$ が減少する方向には動かない。

そこで、最急降下方向 s_k 以外のベクトルを用いることで、局所解から脱却するアルゴリズムを構築・適用する。これは、信頼領域法で用いられるドッグレッグ法 [78] にヒントを得たものである。ドッグレッグ法では、制約条件下での最急降下方向ベクトルとその制約条件がない場合の最急降下方向ベクトルを組み合わせた方向に降下させることで、収束速度を高めている。ここでは、降下方向の探索には、 s_k に加えて $-\nabla A$ と s_k を組み合わせたベクトル (2 つ) と $s_0 (= -\nabla c^T [\nabla c \nabla c^T]^{-1} c)$ の 4 つのベクトルを用いた線形探索を行い、近傍の更新幅を決定し、 γ^k を更新する。なお、ベクトルのイメージは図 3.3 の凡例に示す。線形探索の結果、4 つのベクトルを用いても、近傍に留まる解しか得られない場合は、 ∇A または $|c_i| > 1$ となる ∇c_i の合成ベクトルを用いて、制約条件が小さくなるように一定距離 (0.1) 以上移動する。

図 3.3 にこの過程を示す。横軸は γ^k からの移動距離、縦軸は式 (3.14) の F_r の値を示す。なお、ここではペナルティパラメータ $r^k = 8$ としている。1 回目の探索は左端 (Length=0) から開始している。黒線は s_k ベクトルの線形探索の結果を示しており、Length=0 から離れるほど s_k 方向に離れていくことを示す。最初の探索では、緑線の s_0 ベクトルはやや右上方向、水色線と橙色線の s_k と ∇A を組み合わせたベクトルは真上方向に進んでいる。ここで、横軸は γ^k からの移動距離により一元化しているが、4 つのベクトルはそれぞれ異なる方向に進んでいることに留意する。白抜きの \circ は 4 つのベクトルによる線形探索の最小点を示す。1 回目の探索では s_k ベクトルによる線形探索が最小点 ($x = 0.2$ 程度) となっている。この点を γ^k として更新し、再び同様の線形探索を行う。その結果、図より 2 回目の探索の最小点は $x = 3.2$ 程度、3 回目は $x = 6.4$ 程度となり、全て s_k ベクトルにより得ている。4 回目の最小点は、橙色の \circ が示す点であり、3 回目の点とほぼ同じ点である。4 つのベクトルによる線形探索によっても前回の点の近傍の点しか得られない場合は、上述したように ∇A 又は ∇c から得たベクトルを用いて、一定距離以上移動する。その点が (6.5, 2234) 付近の赤四角の点である。この点から、次の線形探索を元の 4 つのベクトルにより行い、次に (6.7, 2183) 付近の点を得る。これを続けていき、最適解の求解を行う。ま

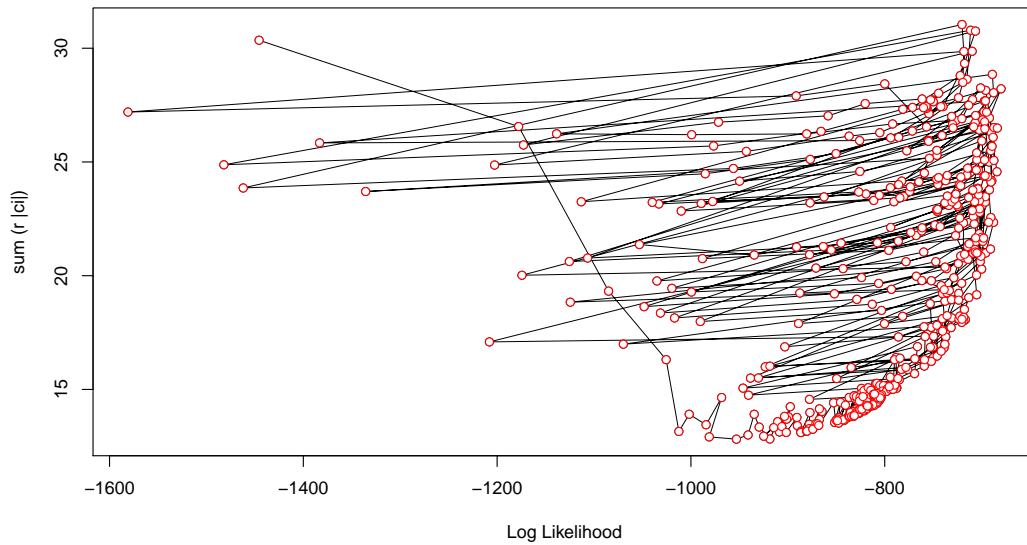


図 3.4 最適化の繰り返し計算における対数尤度と制約条件の推移

表 3.1 陸前高田市の東日本大震災における被害状況

総人口	24,246 名
死亡者・行方不明者	1,757 名
浸水面積	13km ²
被災戸数	3,368 戸

た、近傍の点しか得られない時に、元の 4 つのベクトルによる一定距離の移動では、その次の探索時に元に戻ってくる可能性が大きく、異なるベクトルを用いる。以上を、局所解を抜け出すためのアルゴリズムとして用いる。局所解に陥った際の繰り返し計算の計算コストに比べて、線形探索による計算コストは小さいため、こうした複数ベクトルによる線形探索を行う方法をとるほうがリーズナブルである。

最後に、図 3.4 に最適化の繰り返し計算における対数尤度 $A(\gamma^k)$ と制約条件によるペナルティ値 $(\sum r^k |c_i(\gamma^k)|)$ の推移を示す。赤丸が各 γ^k による結果を示し、連続する k を黒線で結んでいる。なお、ここでは常に等式制約を持つ場合について、500 回分の繰り返し計算の結果を示している。 $(-1400, 30)$ 程度の点から始まり、すぐに右下方向 ($(-1000, 13)$ 付近) に移動する。その後は、 A と $\sum r^k |c_i|$ の値は小さな変化を繰り返しながら、右やや上方向に移動する。 $A > -750$ の範囲では、一度左側に移動する解の更新が生じ、局所解から抜け出すための更新が頻繁に表れている。

3.3 実証分析

3.3.1 データ概要

東日本大震災における陸前高田市内の避難行動データを用い、前述したモデルによる実証分析を行う。陸前高田市の東日本大震災における被害状況 [89] を表 3.1 に示す。当時の総人口のうち約 7.2% が震災で死亡または行方不明となっている。中心市街地のほぼ全域や沿岸の集落地の大半を含む範囲で浸水し、

表 3.2 陸前高田市の東日本大震災における被害状況

	国交省調査	研究室調査
調査時期	2011年9月下旬～12月	2012年9月
調査対象	津波浸水被害を受けた青森・岩手・宮城・福島・茨城・千葉県6県の太平洋側62市町村に住む成人	陸前高田市内の行政区の地理的バランスを考慮して抽出した世帯
調査方式	避難所、仮設住宅、自宅などへの訪問聞き取り調査	1) 聞き取り調査：調査員による対話型ヒアリング 2) 郵送配布郵送回収
回答者数	10,603名(陸前高田市は227名)	1) 31名, 2) 342名
調査項目	地震発生から当日の日没までの行動, 当日・事前の津波認識, 当日の警報などの情報入手	地震発生後1時間の行動, 日常的な一日の過ごし方, よく利用する公共施設, 公共交通への要望

また低地部に位置する市役所や住宅などの多くが最上階まで浸水した。また、用途地域の浸水面積率は今回の被災地の中で最大規模である。津波到達時刻は、牛山ら(2011)[107]では、最も到達が早かった地点では地震発生から37分後、最も遅かった地点では45分後に到達したと報告されている。避難行動データは、表3.2で示す2011年に国土交通省が行った津波被災現況調査及び2012年に著者らの研究室が主体となって行った避難行動・交通行動調査で取得されたデータである。

国土交通省の津波被災現況調査は訪問聞き取り方式で、東日本の津波被災地域全域を対象として、2011年9月～12月の期間に行われた。地震発生以後の避難行動や危機認識などについての調査となっている。陸前高田市における総回答者数は227名である。研究室調査は訪問聞き取り方式と郵送配布郵送回収方式の両方式で2012年9月に行われた。日常生活での移動行動や地震発生以後の避難行動などについての調査となっている。研究室調査の回答者数は373名である。避難行動に関する設問内容はほぼ同様の内容であり、地震発生時にいた場所とそれ以降の移動目的・手段・出発時刻・到着時刻・同行人数等を調査している。

3.3.2 効用関数の設定

まず、避難選択の効用関数は次のように設定する。

$$v^{ev}(x_{j,t}) = \theta_{time} time_t + \theta_{dis} dis_{j,t} \quad (3.16)$$

$$v^{no}(x_{j,t}) = \theta_{wm} wm_j + \theta_{car} car_j + \theta_{with} with_j + \theta_{hm} hm_{j,t} + \theta_{old} old_j + \theta_{as} as_j \quad (3.17)$$

θ はパラメータである。 $time$ は地震発生後の経過時間である。 dis は所在地の海からの距離である。避難効用はリスク回避効用であり、この二つに影響を受ける。次に、非避難の効用関数の説明変数は次とする。 wm は対象者が女性であれば1とするダミー変数、 car は対象者が移動に自動車を利用している場合に1とするダミー変数、 $with$ は移動に同行者がいる場合に1とするダミー変数、 hm は地震発生後に自宅に滞在・立寄していれば1とするダミー変数、 old は対象者が60歳以上であれば1とするダミー変数、 as は他者支援行動を行った場合に1とするダミー変数である。時刻 t における行動 $d_{j,t}$ の選択確率は次

となる．

$$P^{ev}(x_{j,t}, \theta) = \frac{\exp v^{ev}(x_{j,t})}{\exp v^{ev}(x_{j,t}) + \exp(v^{no}(x_{j,t}) + \beta EV(x_{j,t}, no))} \quad (3.18)$$

$$P^{no}(x_{j,t}, \theta) = \frac{\exp(v^{no}(x_{j,t}) + \beta EV(x_{j,t}, no))}{\exp v^{ev}(x_{j,t}) + \exp(v^{no}(x_{j,t}) + \beta EV(x_{j,t}, no))} \quad (3.19)$$

尤度関数 L は次となり，尤度を最大化するパラメータを求める．

$$L(\theta) = \prod_j \prod_T (\delta_{t,ev}^j P^{ev} + \delta_{t,no}^j P^{no}) \quad (3.20)$$

なお， δ_t^j は時刻 t での個人 j の選択結果を表す．ここで，時間割引率は $\beta = 0.80$ とする．

次に，連続量の説明変数の離散化について説明する．式 (2.12) への適用のために離散的な状態空間が必要となる．連続量の説明変数である経過時間 $time$ と海からの距離 dis については，離散化する必要がある．ここでは，経過時間は 5 分，15 分，25 分を閾値とした 4 期に分割する．避難者の意思決定もこの 4 期で行われると仮定する．陸前高田市内の最も早い津波到達時刻が 37 分と報告されており [107]，最終期は津波到達以降・津波遡上中の選択行動となる．海からの距離は 400m，1000m，1500m を閾値とした 4 分割とする．これらを用いて離散化状態空間を設定する．

次に，推移確率の設定について説明する．式 (2.12) への適用のためには，次期状態への推移確率 p_3 の設定が必要である．しかし，災害時は稀少事象であり，行動分析において活用できるデータは限られているため，正確な状態推移確率を求めることは難しい．そこで，今回は状態 $x_k(t)$ からの推移確率は，個人属性が同じで 1 期間分進んだ状態 $x_{k'}(t+1)$ の集合に等確率で推移するとし，設定する．その際に，履歴に関する説明変数の状態については，不可逆方向に戻る状態は除外する．

次に，期待値関数の設定について説明する．まず，対象とする動的離散選択モデルは終端時刻のある問題であり，最終時間帯 (時間帯 4) の次に推移する状態はない．そのため，時間帯 4 の期待値関数は次期の行動選択による制約式 $T(\theta, EV)$ が内生的に与えられない．そこで本章では，一律に外生的に -0.1 を与える．時間帯 1 の期待値関数は，次期による制約式は内生的に与えられるが，前期への制約式とはならない．そのため，最適化計算にあたって，ペナルティ項への影響が小さく，尤度最大化において，制約の緩いパラメータとなる．特に，その状態において，避難または滞在 (非避難) の片方しか選択されていない場合は，他のパラメータが有意とならない (t 値が算出できない) という問題が生じる．そこで，ここでは時間帯 1 の状態変数については，両方の選択結果をもつように離散化状態を集約する．

以上の設定により，状態空間の離散化数は 386 となる．また，算出する期待値関数の数は最終時間帯を除いた 288 となる．非線形等式制約の条件式の数も同じく 288 となる．

3.3.3 計算結果と考察

パラメータ推定結果

パラメータ推定を行い，その推定結果を考察する．推定結果を表 3.3 に示す．左列が動的離散選択モデルの完全合理性を緩和し，MPEC 型のアルゴリズムを用いて求めたパラメータである．中央列が動的離散選択モデルの完全合理性を仮定し，NPL 型のアルゴリズムを用いて求めたパラメータである．右列が通常の将来効用を考慮しない静的な二項選択モデルの推定パラメータである．まず，モデルの比較を行う．最終尤度は，動的・緩和型が最も良く，次に動的完全合理型，最後が静的モデルとなっている．静的モデルの場合よりも動的モデルのほうが良い結果となっている．また，完全合理性を緩和した方が緩和しない場合よりも最終尤度はよく，完全合理的ではない期待値関数を持つとした意思決定メカニズムの妥

表 3.3 パラメータ推定結果

	動的・緩和型		動的・完全合理型		静的	
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値
経過時刻	0.666	10.17*	0.687	10.84*	0.838	12.72*
海からの距離	-0.673	-13.42*	-0.369	-7.53*	-0.632	-14.51*
女性	0.057	0.45	-0.012	-0.09	0.426	4.98*
自動車利用	-0.210	-1.75†	-0.087	-0.71	0.557	4.84*
同行者あり	-0.499	-3.26*	-0.327	-2.08*	0.185	1.43
自宅経験	-0.025	-0.19	-0.026	-0.19	0.204	1.59
高齢者	-0.287	-1.65†	-0.260	-1.52	-0.341	-1.97*
他者支援経験	0.433	3.01*	0.437	2.99*	0.615	4.55*
サンプル数		1591		1591		1591
初期尤度		-1102.8		-1102.8		-1102.8
最終尤度		-700.0		-732.0		-885.8
ρ^2 値		0.365		0.336		0.197
修正済 ρ^2 値		0.358		0.328		0.190

*:5% 有意, †:10% 有意

当性が示された。次に、得られたパラメータ推定結果について説明する。経過時間のパラメータが正で有意となっており、時間経過するほど避難効用が高まることを示している。海からの距離のパラメータが負で有意となっている。海から遠いほうが避難効用が小さくなり、避難開始選択がされづらいことを示す。ただし、陸前高田市内でも平野が広がる高田地域と広田半島などのリアス部では避難必要距離は異なっていることに留意する必要がある。また、同行者のパラメータは負で有意となっており、同行者がいる場合は非避難効用は小さくなる。他者支援行動のパラメータは正で有意となっており、他者支援を行った場合はより非避難効用は大きくなり、避難が生じづらくなる。

動的・緩和型の時間帯 1~3 の離散化状態の避難選択確率の平均は 0.389、標準偏差は 0.226 となる。対して、動的・完全合理型の避難選択確率の平均は 0.308、標準偏差は 0.135 となる。また、動的・緩和型と動的・完全合理型の同じ離散化状態での避難の選択確率の差は、平均は 0.028、標準偏差は 0.171 となる。緩和型の方が、状態による差が大きく現れ、避難選択確率のバラつきが大きくなる。

緩和型の期待値関数の分布

次に、期待値関数 EV の分布を完全合理性を仮定した場合と緩和した場合で比較する。完全合理性を仮定した場合の EV は、表 3.3 のパラメータを用いて $T(\theta)$ から算出した値である。完全合理性の緩和を仮定した場合の EV は、MPEC 型のアルゴリズムにおいてパラメータ θ と同時に算出した値である。図 3.5 は横軸に離散化状態、縦軸は EV である。完全合理性の緩和を仮定した場合は、-5.5~3.5 の間で期待値関数は広く分布している。また、完全合理性の緩和を仮定した場合は、時間帯 3 の期待値関数の分布は時間帯 1,2 よりも幅広くなっている。一方、完全合理性を仮定した場合は、1.3~2.5 の間に収まっており、ほとんど分布していない。これにより、完全合理性の緩和を仮定した場合は、期待値関数が行動選択に与える影響が状態によって大きく異なる。

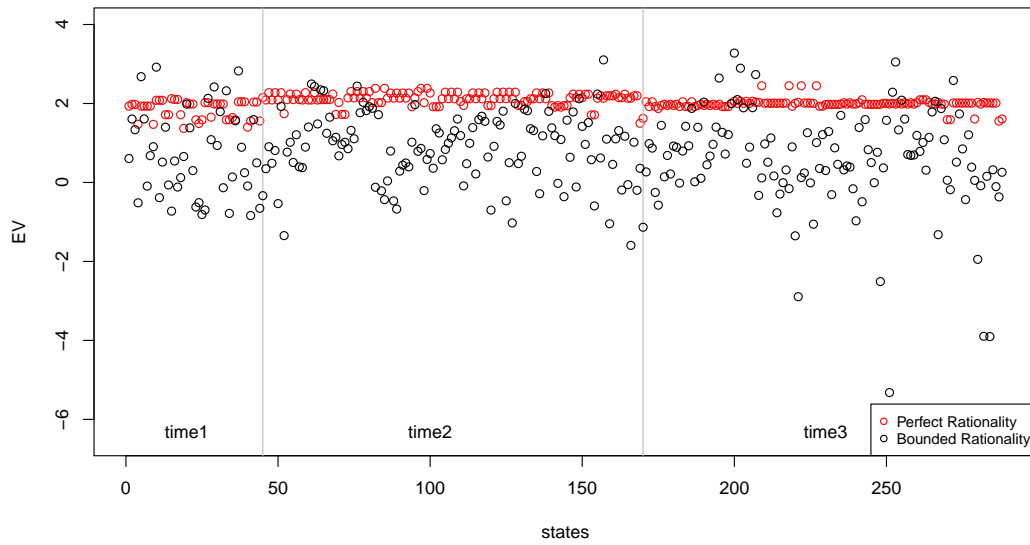


図 3.5 完全合理性 / 緩和型の期待値関数 EV の比較

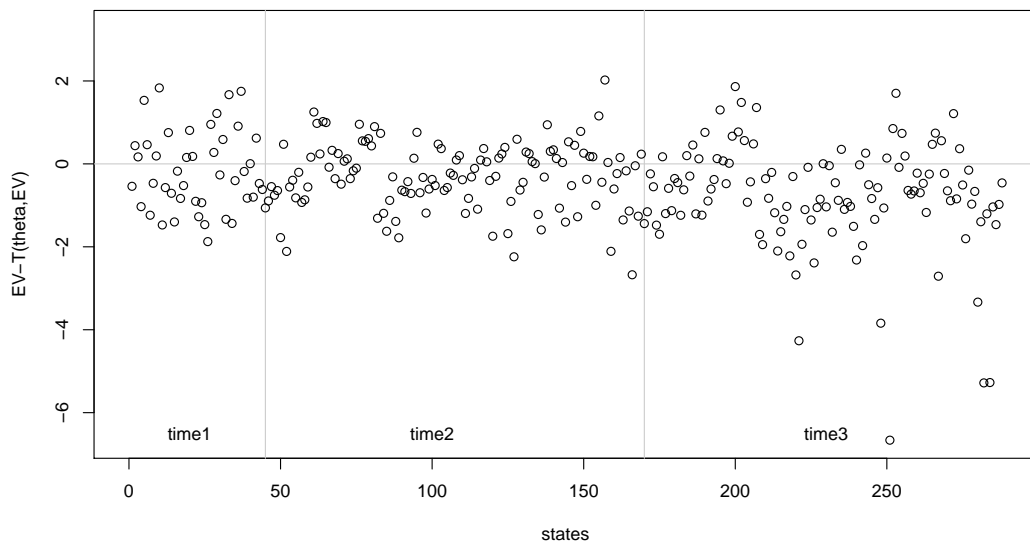


図 3.6 完全合理性からの乖離

次に、完全合理性の緩和した場合について、各状態における完全合理性からの乖離度 ($c_i = EV' - T(\theta, EV')$) を図 3.6 に示す。時間帯 2・時間帯 3 では、完全合理的な状況よりも緩和型の価値関数 EV' は小さく評価されていることがわかる。この度合いは時間帯 3 のほうが大きい。これは、今期の非避難効用は緩和型の期待値関数のために (完全合理的な状況よりも) 小さく評価されている。つまり、時間が経過するほど、今期の非避難効用は将来効用を踏まえて小さく評価され、その下で行動選択が行われることを意味する。 c_i の平均と中位値は時間帯 1: -0.18/-0.40, 時間帯 2: -0.31/-0.31, 時間帯 3: -0.78/-0.65 であり、時間経過にあわせて小さくなっている。なお、分析対象のデータは全て生存者の行動データであ

表 3.4 属性別の期待値関数・乖離度の平均と標準偏差

		期待値関数 EV		乖離度 c_i		サンプル数
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	
経過時間	時間帯 1	0.67	1.08	-0.18	0.95	45
	時間帯 2	0.88	0.89	-0.30	0.81	125
	時間帯 3	0.55	1.30	-0.78	1.31	118
海からの 距離 (km)	-0.4	1.06	0.84	-0.21	0.89	67
	0.4-1.0	0.90	1.09	-0.33	1.09	71
	1.0-1.5	0.37	1.27	-0.77	1.26	82
性別	1.5-	0.60	1.04	-0.55	0.95	68
	男性	0.82	0.96	-0.41	0.96	136
	女性	0.62	1.23	-0.55	1.20	152
車利用	なし	0.84	1.01	-0.41	0.99	156
	あり	0.57	1.21	-0.57	1.20	132
同行者	なし	0.76	0.95	-0.44	0.91	149
	あり	0.67	1.26	-0.53	1.26	139
自宅滞在	なし	0.73	1.28	-0.49	1.24	135
	あり	0.70	0.95	-0.48	0.94	153
年齢	非高齢者	0.85	1.07	-0.43	1.06	208
	高齢者	0.36	1.14	-0.63	1.15	80
他者支援	なし	0.61	1.25	-0.53	1.26	167
	あり	0.86	0.88	-0.41	0.81	121

り、これが徐々に期待値関数を下げる要因となっている可能性もある。

緩和型の期待値関数の分布

次に属性別に期待値関数 EV と乖離度 c_i の平均と分散を比較する。まず、全属性についての結果を表 3.4 に示す。経過時間の c_i については、前述したとおり、時間がたつほど小さくなっている。ただし、 c_i の標準偏差は時間帯 3 では大きくなり、バラつきも大きい。海からの距離については、距離帯が 1.0 ~ 1.5km の属性で、 EV と c_i がともに小さく、かつ標準偏差が大きくなっている。海からの距離が 0.4km 未満と 0.4 ~ 1.0km の距離帯では c_i の標準偏差が小さく、完全合理的に近い期待値関数を持っていることがわかる。経過時間と海からの距離の関係性の分析は後述する。他の属性の EV 、 c_i の平均について考察する。車利用ありや高齢者は EV が小さく、次期の効用を小さく捉えていることがわかる。また、他者支援ありのほうが EV は大きく、次期の効用を大きく捉えている。なお、 EV の値は $EV - T(\theta, EV)$ の制約式によりパラメータ θ に間接的に影響を受けている。次に、他の属性の標準偏差について考察する。まず、 EV と c_i の標準偏差はほぼ同程度となっている。標準偏差の差が大きいのは、同行者あり・自宅滞在なし・他者支援なしである。こうした属性では、次期の効用の評価にバラつきが生じている。そのため、行動選択にもバラつきが生じていると考えられる。

ここまで、期待値関数 EV と乖離度 c_i の平均と分散についての考察を行ったが、 $EV \cdot c_i$ の大小や標準偏差のバラつきの大きさが意思決定上の適切さに直結するわけではない。前提として、完全合理的な

判断を行っていれば被災しないと仮定すると、完全合理性からの乖離度 c_i は小さいほうが望ましいといえる。ただし、 c_i が負の場合は非避難効用が完全合理的な場合よりも低く評価され、意思決定者自身の避難選択の可能性は高まる。これにより被災を免れる可能性は大きいと考える。逆に言えば、正に乖離する場合は、非避難効用が高く評価されるために避難遅れが生じる可能性が高まる。また、負に乖離している場合や EV が小さい場合であっても、標準偏差が大きい場合には正側に乖離する又は大きな EV を持つ属性があることを意味しており、避難遅れが生じる可能性が高い。

次に、海からの距離帯と時間経過を合わせた分析を行う。まず、時間帯と海からの距離の関係について、 EV の具体の分布を示す。図 3.7 は、縦軸に EV 、横軸に完全合理的な価値関数 $T(\theta, EV)$ を示す。上から順に時間帯 1, 2, 3 となっている。同じ距離帯の状態の (T, EV) を同じ色で示している。それぞれの図の斜めの線は、 $EV = T(\theta, EV)$ を満たす完全合理的な期待価値関数を示す線である。時間帯 1 と時間帯 2 については、距離帯による分布の違いはそれほど見られない。時間帯 1 よりも時間帯 2 のほうがやや完全合理性を示す線の下側に点が増えている。また、時間帯 2 では海から 0.4km 未満の距離帯を示す濃青色の点が完全合理性を示す線の近くに位置している。時間帯 3 については、 EV の分布が縦に大きく広がっている。特に、1.0~1.5km の距離帯の橙色の点が下方向に大きく広がっている。なお、時間が進むごとに $T(\theta, EV)$ の値は増加しているが、これは T は次期の避難効用と非避難効用を合わせて算出されており、時間経過とともに避難効用が大きくなる影響によって、この傾向が生じている。

次に、図 3.8、図 3.9 は横軸に EV または c_i の平均、縦軸に標準偏差をとり、距離帯ごとに色を変えてその時間推移を示している。各距離帯の時間帯 1 は で囲った点であり、線でつながった点は連続する時間帯であることを示す。横軸の平均値は各状態がどういった値をもつのかを示し、縦軸の標準偏差は同じ距離・時間の全ての状態にある中で値がどの程度分布しているかを示す。まず、図 3.8 について述べる。海からの距離が 1km 未満では、 EV が小さくなる方向に推移している。対して、海からの距離が遠い場合は、時間帯 1 から 2 にかけて、いったん EV が大きくなってから、減少している。 EV は今期に非避難を選択した場合の次期の効用を示しており、海に近い距離帯では時間帯 2(時間帯 1 の次期)の効用、海に遠い距離帯では時間帯 3 の効用を最も大きく評価していることがわかる。これは直感と一致する。標準偏差は、1.5km 以上の距離帯では時間帯 1 から 2 にかけて上昇し、0.4km 未満の距離帯では減少している。時間帯 2 から 3 にかけてはどの距離帯でも上昇している。時間が経過するほど、その切迫さのため、情報伝搬や共有は限られるために、 EV の標準偏差も大きくなると考えられる。ただし、海に近い距離帯(1km 未満)では、時間帯 2 では標準偏差は低下しており、リスクの高い海に近い距離帯では早い時間帯において情報の伝搬・共有が進んだ可能性が考えられる。次に、図 3.9 について述べる。距離帯が 0.4km 未満では $\sqrt{\quad}$ 型で右から左に推移している。時間帯 2 では標準偏差が小さくなり、時間帯 3 ではまた上昇する。ただし、時間帯 3 の標準偏差は時間帯 1 よりも小さく、これは他の時間帯とは異なる特徴となっている。時間が経過するほど、情報認識・入手は限られ、完全合理的ではない状態に近づくと考えられるが、 c_i の絶対値は小さくなっており、その標準偏差も時間帯 1 よりも小さい。ここでも上記の情報伝搬・共有の仮定を裏付ける傾向がみられる。ただし、これは生存者のみのデータを分析した結果であることに留意する必要がある。他の距離帯については、1.5km 以上の距離帯のみが、時間帯 1 から 2 にかけて、一旦完全合理的な状況に近づいている。他の距離帯・時間帯については、完全合理性から離れ、またその乖離度の標準偏差も時間推移とともに大きくなっている。特に、1.0~1.5km の距離帯の時間帯 3 の標準偏差は特に大きくなっている。

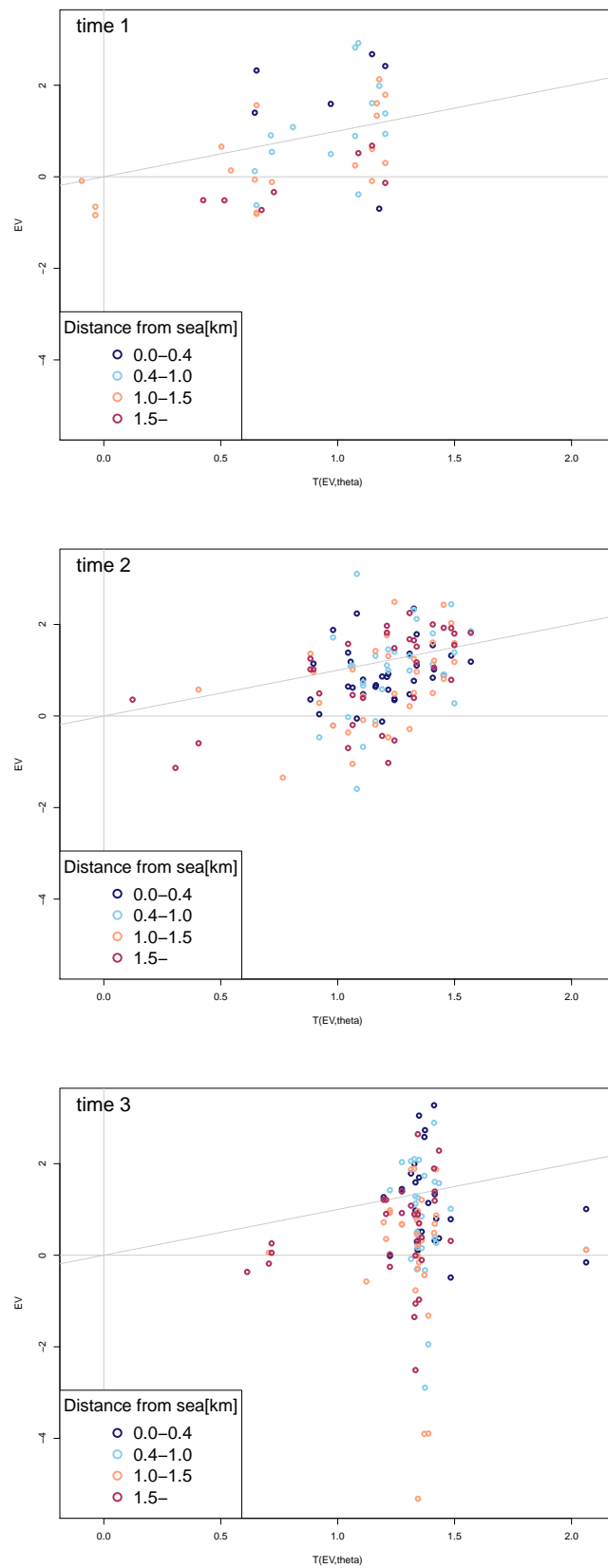
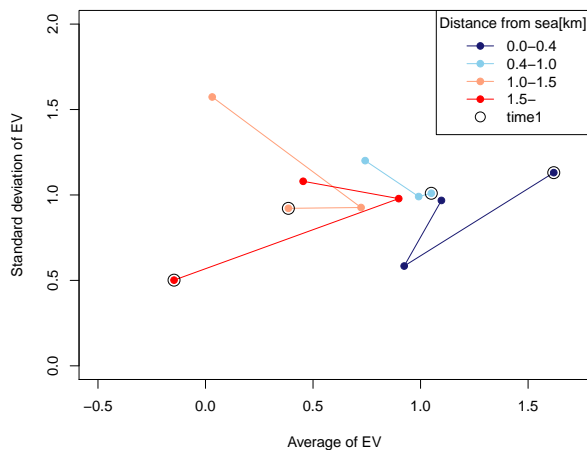
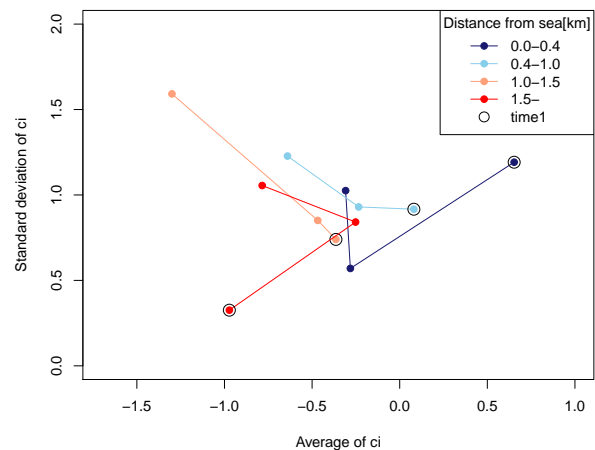


図 3.7 距離帯別の EV の分布の時間推移

図 3.8 距離帯別の EV の平均・標準偏差の時間推移図 3.9 距離帯別の c_i の平均・標準偏差の時間推移

3.4 本章のまとめと課題

本章では、完全合理性を緩和した動的離散選択モデルの構築と構築したモデルを用いた実証分析を行った。

モデルの構築にあたっては、まず災害時行動において、将来状態を考慮した意思決定が重要であるため、将来状態を考慮できる動的離散選択モデルを導入した。ただし、従来の動的離散選択モデルでは、将来予測について完全合理的な状況を仮定している。稀少事象である災害において、個人が時空間上での行動選択を決定する今回の問題への完全合理性の仮定の適用は難しい。そこで、完全合理性を緩和した動的避難開始選択モデルを構築した。従来の期待値関数の等式制約を領域制約とすることで、完全合理性の緩和を図った。また、本章の定式化の求解に適したアルゴリズムとして MPEC 型のアルゴリズムを適用する。実証分析に向け、等式制約を緩和した制約領域を具体的に設定した。この領域は、各状態空間の完全合理性の緩和の度合の分散を評価できる点を重視し、設定した。同時に、この設定は元の MPEC 型と同様の等式制約付きの最適化問題として求解できる点でも優れている。具体的 MPEC の求解アルゴリズムとしては、パラメータ数を考慮し、逐次二次計画法を導入した。また、パラメータ数の多さと非線形型制約のために局所解に陥りやすいため、その回避のためのヒューリスティクスを導入した。ただし、このアルゴリズムにより局所解回避はできるが、最終的に大域的最適解への到達は保証できておらず、課題である。

構築した完全合理性の緩和を導入した動的離散選択モデルによる避難行動データを用いた実証分析により、災害時行動は完全合理的な期待値を持って行動選択が行われていないことを明らかにした。一方で、その完全合理的ではない状態が生じやすくなる要因については、期待値関数自体をパラメータとした今回の分析からは特定できない。その中で、期待値 EV の分布に着目して、同じ属性・状態の中での EV の分布を分析することで、分布が他よりも大きな属性が存在することを明らかにした。自宅未滞在や同行者の存在、他者支援行動の実施といった属性では EV の分布は大きく、こうした個人属性に起因する分布は個人の意思決定能力に影響を受けたためであると想定する。この場合は、災害事前からの防災減災教育により分布を小さくできた可能性がある。また、時空間的に同じ属性であっても EV の分布が大きい場合があり、こうした空間に起因する分布は空間内の情報伝搬・共有の不足により、情報認識にバラ

つきが生じたためであると想定する。この場合は、発災時の情報伝搬の工夫により分布を小さくできた可能性がある。

また、今回の実証分析では避難促進政策に関わる説明変数を導入できていない点でも課題がある。ただし、説明変数の数が増えるほど、離散化した状態数が増えるためにパラメータ推定が困難になるという問題がある。そのため、政策に関連する説明変数と行動に影響する説明変数のうちで実証分析に導入する変数については、サンプル数との兼ね合いも含めた検討をする必要がある。

また、制約領域の設定や時間割引率の設定によってパラメータ推定結果が変わりうる。そのため、設定値による変化傾向の把握や設定方法の検討が必要である。また、実証計算において、推移確率と終端時刻での期待値関数は外生的に与えており、この点も課題である。避難開始の逐次選択では状態は時間推移し、バスエンジン交換の問題 [90] と違い、循環しない。そのため、終端時刻の設定が必要であるが、津波避難の場合は終端時刻は予め明らかではない。その問題に対して、時間経過に従って時間割引率を低下させることで、将来効用を小さくする（終端時刻付近で将来効用を大きく割引く）という方法がある。しかし、MPEC 型の推定手法では、時間割引率は外生的に与えるしかなく、課題が残る。もう一つの方法としては、終端の期待値関数の設定を工夫する方法がある。終端時刻を本来よりも早く見込んでいる場合を、終端の期待値関数はより小さく見込んでいる状態と対応させる。ただし、この場合も終端時刻での期待値関数パラメータは推定できないため、分布などにより外生的に与える必要がある。

最後に、今回の分析は生存者の行動データのみを対象としたものであり、実際の災害時の全員の行動を代表する結果となっていない可能性が高い。ただ、その中でも、完全合理性の緩和のために EV が分布していることを明らかにした。初期の時間帯では、 EV の分布は、完全合理的な場合を中心に対称に分布する傾向があるが、時間とともにより避難選択を行いやすい次期選択効用を小さく評価する方向に分布が移っている。これは、避難遅れの可能性が徐々に減少したことを示す。一方で、初期の時間帯の完全合理性を対称とした EV の分布が継続した場合は、今回のデータよりも避難開始選択が遅れた割合が高まる。こうした次期の期待値関数の分布を用いることで、災害時の完全合理性の欠如を考慮した上で、避難遅れの割合を検証することが可能となる。

第4章

他者同調ネットワークを考慮した避難開始選択の動的推移

4.1 他者同調と避難遅れ

本章では、他者同調作用による災害時避難開始への影響を評価する。災害時は稀少事象であり、過去の経験や将来予測が不足するために自分自身単独の意思決定への不安が大きく、行動生起にあたって他者の影響が大きい。そこで、本章では災害時避難開始選択の他者同調作用による影響を分析・評価する。

東日本大震災以降、率先避難者という言葉が浸透し、災害教育の中にも取り入れられるようになった。これは災害時に生じる他者同調の心理を見越し、先に避難を始める人がいることで他の人の避難を促す効果を狙ったものである。また、災害時の避難選択による他者同調の影響を表す現象として、多数派同調バイアスがある。これは、被災の危険性が高いにも関わらず、他の人達が避難しない様子を見て、自分も安全だと思ってしまうというバイアスを表す。バイアスのために避難は生じづらくなり、率先避難とは全く逆の避難開始選択の推移が集団において生じる。

他者の避難行動への影響として、災害時要援護者に関する問題がある。高齢者が増えれば、自力での避難が困難な災害時要援護者が多くなる。避難時はそうした人たちへの援護が必要となるが、一方で他者支援のために逃げ遅れた事例も数多い。逃げ遅れは、他者支援のために他者と同調した行動をとった結果として生じたと言える。

このように被災者を減らすために同調行動が必要であるが、逆にそのために避難開始が遅れてしまい、被災者が増える事象もある。そこで、本章ではこうした他者同調の正負の相互作用の影響を分析・評価する。同調する他者との関係性や同調他者の人的ネットワーク構造に着目して、評価する。本章では、まず、4.2 で他者同調の避難開始への影響評価を行う。次に、4.3 で他者同調ネットワーク形成への二者間特性・空間特性の影響評価を行う。最後に、4.3.3 で、協調行動形成と避難意思決定の時系列上での推移について、分析する。

最後に、本章で考える他者同調作用は次に二種類の他者との相互作用である。一つは、二者間で財(効用)の交換・授受が行われることを(直接的な)相互作用が生じた結果として捉える方法である。4.3 では、利他的な不平等回避選好が働くために二者間での協調行動が生起すると仮定し、分析する。不平等回避選好による協調行動の生起は、自分と相手の効用の差を縮小する行為であり、財の交換・授受と同様の現象である。要援護者支援等は不平等回避選好のために生じる行動であると考えられる。もう一つは、他者の行動選択が自分の行動選択に影響することを(間接的な)相互作用が生じた結果として捉える方法である。4.2 では、周囲の世帯の避難/非避難選択が自分の選択に影響を及ぼすと仮定し、分析する。率先避難や多数

派同調バイアスは，こうした周辺他者の行動による自身の行動選択への影響の顕在化である．

4.2 他者同調作用による避難開始選択への影響

本節では，他者同調作用を考慮した避難開始選択モデルを構築する．構築したモデルを用い，避難開始選択における他者の影響を評価する．災害時であるため，意思決定者が影響を受ける他者の範囲を限定し，また利他選好により相手によって受ける影響は異なると仮定し，他者の影響を記述する．4.2.1では，避難開始選択モデル構築の考え方と具体の定式化を示す．4.2.2では，利他選好とネットワーク構造により生じる避難開始選択確率への影響の変化をシンプルな設定と数値計算により示す．4.2.3では，2004年新居浜市豪雨災害時の住民行動データを用いて，実証分析を行う．モデルのパラメータ推定結果を用いて，避難確率とネットワーク構造の関係と同調相手の追加による避難確率への影響について分析する．

4.2.1 避難開始選択モデルのフレームワーク

本節では，他者同調を考慮した避難開始モデルについて説明する．避難開始選択において，周辺他者が避難していれば自分も避難しやすくなるという同調作用を Local Interaction model[18]を用いて記述する．同調作用が生じる周辺他者の範囲を限定し，自分と他者の行動選択（この場合は避難有無）に違いが生じた場合には不効用が生じるとして定式化する．まず，定式化を行った上で，本モデルで考慮している利他選好による他者の性質による影響の違い，ネットワーク構造による影響の違いの考え方について説明する．最後に，Local Interaction modelの実証分析にあたって用いたパラメータ推定手法を説明する．

定式化

避難開始モデルは，時間帯 t における”避難する”又は”避難しない”の二項選択モデルとする．まず，世帯 i について，選択肢 $\omega_{it} \in \{0: \text{避難しない (no)}, 1: \text{避難 (ev)}\}$ の効用は次となる．

$$V(\omega_{it}, \mu_{it}(\omega_{-it}), \epsilon_{it}(\omega_{it})) = u(\omega_{it}) + S(\omega_{it}, \mu_{it}(\omega_{-it})) + \epsilon_{it}(\omega_{it}) \quad (4.1)$$

u は個人効用， S は社会的効用， $\mu_{it}(\omega_{-it})$ は他者選択， ϵ_{it} は誤差項である．選択肢 ω_i の効用は，個人効用 u に社会的効用 S が加わる．社会的効用 S は，次となる．

$$S(\omega_{it}, \mu_{it}(\omega_{-it})) = -E_{it} \sum_{j \in N_{it}} J_{ijt} (\omega_{it} - \omega_{jt})^2 \quad (4.2)$$

J_{ijt} は ij 間の重み， N_{it} は時刻 t において個人 i が影響を受ける他者集合である．社会的効用は，他者 j の選択 ω_{jt} が自分の選択 ω_{it} と異なる場合に，不効用が重みづけ J_{ijt} に応じて生じる．社会的効用は， N_{it} 内の他者との選択結果の差異の重みづけ和の期待値として記述する．誤差項に i.i.d ガンベル分布を仮定すると，個人 i が避難を選択する確率 $P_{i=ev}$ は次となる．

$$P_{i=ev} = \frac{\exp(u_{it,ev} - \sum_{N_{it}} J_{ijt} P_{jt=no})}{\exp(u_{it,ev} - \sum_{N_{it}} J_{ijt} P_{jt=no}) + \exp(u_{it,no} - \sum_{N_{it}} J_{ijt} P_{jt=ev})} \quad (4.3)$$

他者 j との選択に差があることへの期待値は，個人 i が避難を選択する場合は，他者 j が避難しないを選択する確率となる．

利他選好による影響

ここでは，利他選好の考え方を導入し，他者同調作用の大きさを相手の性質による違いを表現する．4.1で他者同調による負の相互作用の例として，他者支援による避難遅れを挙げた．こうした同調による避難

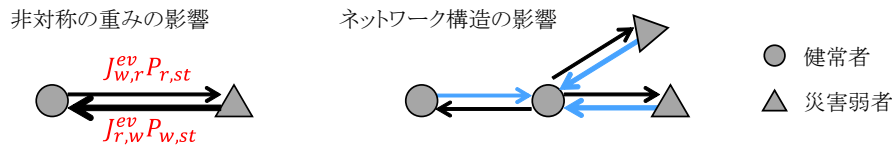


図 4.1 非対称の重み / ネットワーク構造の影響のイメージ

遅れは、こういった二者関係でも生じるわけではない。例えば、高齢者などの災害弱者は避難していない間は健常者も避難しづらいということが考えられる。つまり、非避難選択をした相手が災害弱者であるほど影響を受ける他者は避難選択がしづらくなる。これは自分の避難効用と相手の非避難効用の差を負の影響を受けた結果であり、利他的な不平等回避選好といえる。

これを社会的効用 S に反映する。 i, j 間の重みを J_{ij} を次のように構造化する。

$$J_{ijt}(\omega_{it}, \omega_{jt}) = \sum_l \gamma_l f_l(x_{lit}, x_{ljt}, \omega_{it}, \omega_{jt}) \quad (4.4)$$

x_{lit} は個人 i の時刻 t における個人属性 l を示す。 J_{ij} は二者間の属性差と二者の行動選択により構造化する。また、関数 f_l において、特定の属性差において、ある行動選択ペアが生じたの時のみに影響する非対称な重みの設定も可能である。例えば、先ほど述べたように、 i が災害弱者で非避難を選択し、 j が健常者で避難を選択する場合にのみ不効用が生じるといった重みづけである。

次に、具体的に避難確率を用いて、利他選好と非対称の重みによる負の相互作用を説明する。健常者 r の災害弱者 w の影響を考慮した避難確率は次となる。なお、ここでは健常者 r と災害弱者 w の二者間の影響だけを想定する。

$$P_{r,ev} = \frac{\exp(u_{r,ev} - J_{rw}^{ev} P_{w,no})}{\exp(u_{r,ev} - J_{rw}^{ev} P_{w,no}) + \exp(u_{r,no} - J_{rw}^{no} P_{w,ev})} \quad (4.5)$$

この時、非対称の重みが存在し、 J_{rw}^{ev} が大きいほど、避難確率が低下する。 $J_{rw}^{ev} > J_{wr}^{ev}$ であるので、災害弱者 w の避難確率が受ける影響は小さい。このため、上記の状況が生じる場合は、健常者のほうが避難しづらくなるという非対称な関係が生じる。このイメージは図 4.1 左に示す。

ネットワーク構造による影響

ここでは、ネットワーク構造を他者集合の表現に導入することで、影響を受ける他者の範囲を限定する。また、これにより、接続する他者ネットワークにより意思決定への影響は異なることが表現できる。4.1 で他者同調による負の相互作用の例として多数派同調バイアス、正の相互作用の例として率先避難を挙げた。こうした正負の相互作用の生じやすさは意思決定者の持つ他者ネットワークにより異なる。また、他者からの影響は隣接リンク上を伝搬してくため、全体のネットワーク形状により影響が異なる。そのため、本モデルでは、隣接ネットワークを他者集合の表現に導入する。

ここで、具体的に避難確率を用いて、ネットワーク構造による影響の大きさについて説明する。式 (4.3) は、個人 i の避難選択確率を示している。この時、個人 i が接続する他者集合 N_{it} が大きいほど、負の影響 $\sum_{N_{it}} J P_{no}$ は大きくなり、避難選択がしづらくなる。このイメージは図 4.1 右の中央の健常者である。他者との接続が多く、その他者の非避難確率が大きければ、自身の避難確率も低下する。これは多数派同調バイアスのメカニズムである。対して、中央の健常者の避難確率が高い又は避難実施をした場合は、その影響が周辺他者に及ぶため、その影響で避難確率が高まる。これは率先避難の他者同調のメカニズムである。

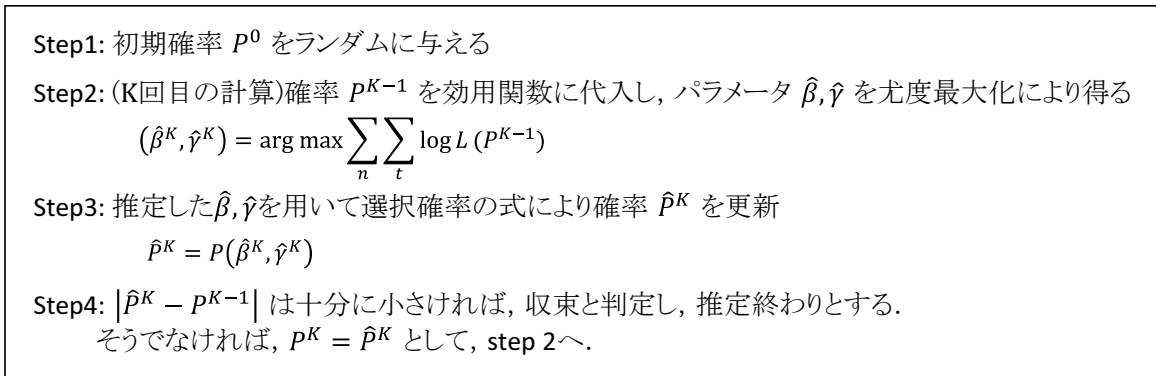


図 4.2 擬似最尤推定法のアルゴリズム

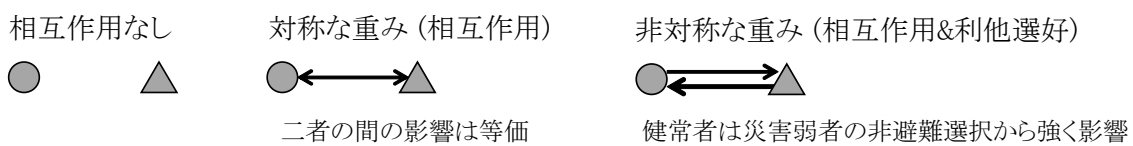


図 4.3 非対称の重みの影響評価の数値計算の設定

推定方法 (擬似最尤推定)

ここでは, Local Interaction model を用いた避難開始選択モデルのパラメータ推定方法について説明する. まず, 避難開始選択モデルの選択確率は式 (4.3) である. 尤度は, 次式で定義できる.

$$L(\beta, \gamma) = \prod_i \prod_t (\delta_{t,ev}^i P_{i=ev}^t + \delta_{t,no}^i P_{i=no}^t) \tag{4.6}$$

ここで, 効用 u のパラメータを β , 重み J のパラメータを γ としている. 式 (4.3) は右辺に P_j が入っているため, 通常の方法ではパラメータを求めることができない. そこで, 擬似最尤推定法 [1] を用いたパラメータ推定を行う. アルゴリズムは図 4.2 の通りである. $K-1$ 回目の求めた選択確率 P^{K-1} を, K 回目の計算にあたり, 効用関数に代入し, 尤度最大化により u と J のパラメータ $(\hat{\beta}^K, \hat{\gamma}^K)$ を求める. このパラメータ $(\hat{\beta}^K, \hat{\gamma}^K)$ と P^{K-1} を用いて選択確率 \hat{P}^K を算出する. \hat{P}^K と P^{K-1} の差が十分小さければ, 収束となる.

4.2.2 数値計算による他者避難の影響評価

本項では, 利他選好による非対称の重みとネットワーク構造により生じる避難開始選択確率への影響の変化を数値計算により示す. 数値計算の対象は, 二者または三者のネットワークとすることで, 生じている他者の影響をシンプルに示す.

数値計算 1: 非対称の重みの影響評価

ここでの数値計算の目的は, 非対称の重みによる避難選択への影響の評価である. 二者間の影響を評価する. 比較するケースは, 図 4.3 に示すように, 相互作用なし, 相互作用あり (対称な重み), 相互作用あり (非対称な重み) の3つである. 相互作用あり (非対称な重み) は利他選好が働き, 健常者が災害弱者の非避難選択に影響を強く受ける場合を想定する. 効用 u の設定は, $u_{r,ev} = u_{r,no} = u_{w,no} = 1$ とし, 災害弱

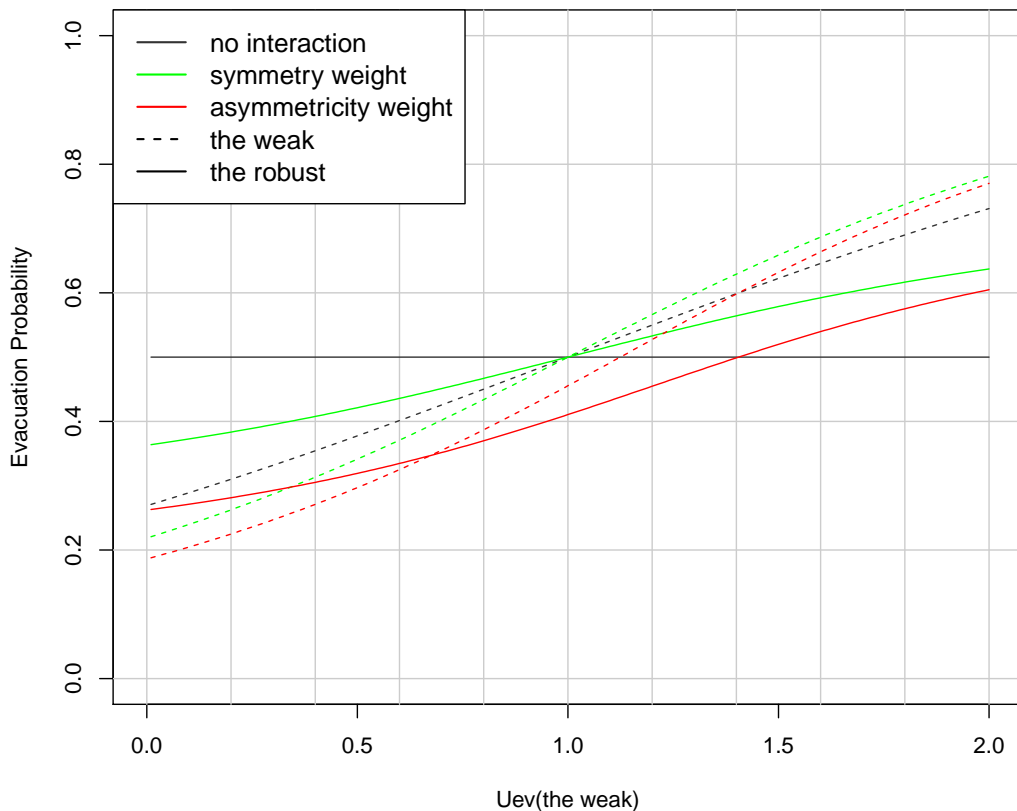


図 4.4 非対称の重みの影響評価 (数値計算結果)

者の効用 $u_{w,ev}$ を $u_{w,ev} \in (0, 2)$ とする．重み J の設定は，相互作用がある場合は $J_{rw}^{no} = J_{wr}^{ev} = J_{wr}^{no} = 1$ とする．対称な重みの場合は $J_{rw}^{ev} = 1$ ，非対称な重みの場合は $J_{rw}^{ev} = 1.5$ とする．相互作用なしの場合は $\forall J = 0$ である．

数値計算の結果を図 4.4 に示す．図の横軸は災害弱者の避難効用 $u_{w,ev}$ を示す．縦軸は避難確率 P_{ev} である．図の実線は健常者を示し，破線は災害弱者を示す．黒線は相互作用なしの場合，緑線は相互作用あり (対称な重み)，赤線は相互作用あり (非対称な重み) を示す．相互作用なしはベースであり，健常者は効用が変化しないために横軸に平行な線となり，災害弱者は横軸の効用変化に合わせて避難確率が上昇している．次に，相互作用あり (対称な重み) は， $u_{w,ev} = 1.0, P_{ev} = 0.5$ の点に対して，点対称となっている．健常者の u は変化しないが，災害弱者の P_{ev} の変化にあわせて，避難確率が上昇している．この場合，健常者の避難確率は， $u_{w,ev} < 1.0$ の範囲では，相互作用なしの場合よりも小さくなっており，災害弱者に引っ張られた避難確率の低下が現れている．次に，相互作用あり (非対称な重み) は，相互作用あり (対称な重み) と同様の増減の傾向を示している． $u_{w,ev} > 1.0$ の領域で避難確率が 0.5 以下となっている．両者ともに，相互作用あり (対称な重み) よりも下側に避難確率の曲線がある．また， $u_{w,ev} < 1.0 = u_{r,ev}$ の領域で $P_{ev}^w > P_{ev}^r$ となっており，非対称な重みの影響により健常者がより避難しづらくなっている状況が生じている．

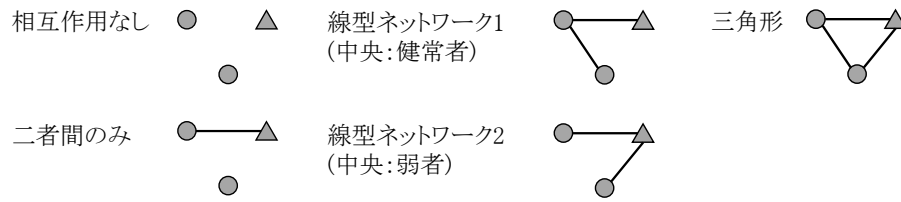


図 4.5 ネットワーク構造の影響評価の数値計算の設定

数値計算 2: ネットワーク構造の影響評価

ここでの数値計算の目的は、ネットワーク構造による避難選択への影響の評価である。三者間の影響を評価する。比較するケースは図 4.5 に示すように、相互作用なし、二者間のみ相互作用あり、線形ネットワーク 1(中央: 健常者)、線形ネットワーク 2(中央: 災害弱者)、三角形の 5 つである。健常者の重み J は非対称とし、 $J_{rw}^{no} = J_{wr}^{no} = J_{wr}^{ev} = 1, J_{rw}^{ev} = 1.5$ と設定する。避難効用はリンク数 n によるとし、 $u_{r,ev} = 1 + \frac{1}{2}n, u_{w,ev} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}n$ と設定する。これにより、ネットワーク形成による社会的効用(不効用)を緩和する。非避難の効用は $u_{r,no} = u_{w,no} \in (0.5, 2)$ とし、0.1 刻みで設定し、計算を行う。

数値計算の結果を図 4.6 に示す。図の横軸は災害弱者の避難確率 P_{ev}^w 、縦軸は健常者の避難確率 P_{ev}^r を示す。黒線は相互作用なし、紫線は二者間のみ相互作用、赤線は線形ネットワーク 1(中央: 健常者)、緑線は線形ネットワーク 2(中央: 災害弱者)、青線は三角形型のネットワークを示す。なお、二者間のみ相互作用の場合は相互作用のある健常者、線形ネットワーク 1 は中央の健常者の避難確率を図示している。左下方向に進むごとに、 u_{no} は 0.1 刻みで増加する。各線の薄灰色の円は、右上から $u_{no} = (0.6, 1.0, 1.4, 1.8)$ の値であることを示す。 $u_{no} \leq 1.2$ の小さい範囲では、相互作用なし(黒線)に比べて他の線は右上にあり、両者ともに避難確率が高まっている。他者同調作用による正の相互作用が表れているといえる。二者間のみ相互作用の場合(紫線)と比べて、三者のネットワークの $u_{no} \leq 1.3$ の範囲では、両者ともに避難確率が高い。リンク数が高ければ、非避難効用がある程度大きくなっても、正の相互作用が表れることがわかる。ただし、線形ネットワークの場合は $u_{no} > 1.1$ 、三角形ネットワークの場合は $u_{no} > 1.4$ で避難確率の大きな低下が生じている。特に三角形型の場合は、 $u_{no} = 1.4$ から $u_{no} = 1.6$ にかけて、避難確率が大きく低下している。また、低下後の避難確率は他のネットワークよりもやや小さい。非避難効用が高まっても ($u_{no} < 1.5$)、他者同調作用による正の影響が現れ、避難確率は高く維持される。反面、さらに非避難効用が高い場合は、避難確率が急激に小さくなり、負の影響(多数派同調バイアス)が表れる。二つの線形ネットワークについて比較する。中央が弱者の場合は、 $u_{no} < 1.4$ の範囲では、弱者の避難確率のほうが健常者の避難確率よりも大きくなる。一方で、中央が健常者の場合は、弱者の避難確率のほうが小さい。ネットワークの構造により、他者同調作用の正の影響が表れる非避難効用の大きさが異なることがわかる。

この数値計算結果をネットワーク構造別に図 4.7 に示す。最右端のカラーレーダーが非避難効用を示す。縦軸は避難確率を示し、 \bullet は健常者、 \blacktriangle は災害弱者を示す。 \bullet や \blacktriangle をつなぐ点は、二者間のリンクを示す。相互作用なしは明示していないが、二者間のみ相互作用の一番左のケースの孤立点は相互作用なしを示している。基本的な特徴は前述した内容と変わらない。ネットワーク構造の推移に着目すると、孤立点から二者間相互作用、線形、三角形という順番で進んでいく。この時に、 $u_{no} \leq 1.4$ の場合はネットワーク形成が進むと避難確率が高まり、正の影響が生じている。一方で、 $u_{no} \geq 1.6$ ではネットワーク形成が進むと避難確率が低下しており、負の影響が生じている。

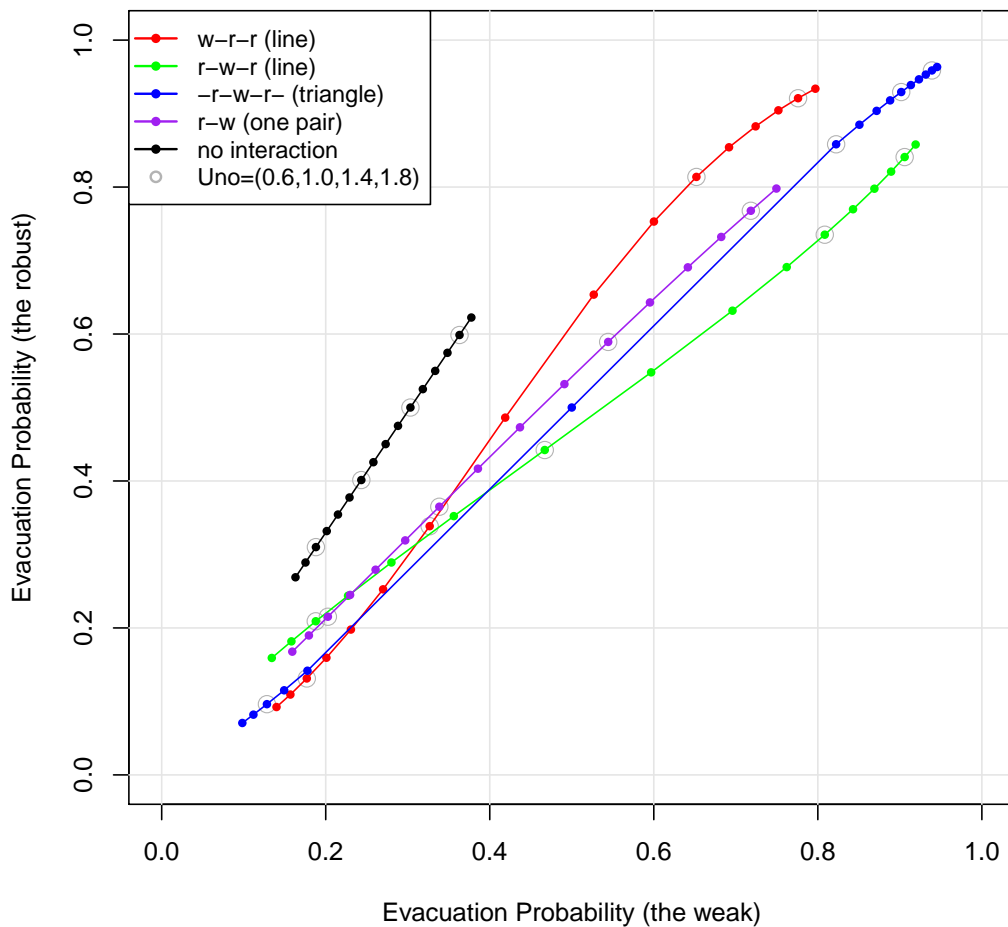


図 4.6 ネットワーク構造の影響評価 (数値計算結果)

非対称の重みがある状況において、ネットワーク構造と効用関数の関係によって避難が促進される場合と停滞する場合がある。非避難効用が大きい状態でネットワークが形成されるとより避難選択が起きづらい状況が生まれる。一方で、非避難効用が小さければ、ネットワークの形成により、避難選択が強く促進される。このように避難意思決定にあたり、効用と他者からの影響に加えてネットワーク構造による影響も大きく、行動分析において考慮する必要性が高い。

4.2.3 実証分析

被害状況と行動データ概要

本章で扱う避難行動データは、2004年8月から9月にかけて、愛媛大学工学部環境建設工学科都市環境計画研究室防災グループによって、取得・作成されたものである [40][75][102]。調査は、2004年8月18日の台風15号と9月29日の台風21号の上陸時における愛媛県新居浜市の西楠崎、東楠崎、唐津山、白浜、大生院の地区の住民の行動を対象としている。8月18日の台風による豪雨は、最大時間雨量が55mm/hr(11時~12時)に達し、新居浜市内の被害は、全壊が13戸、半壊が80戸、人的被害は死者3人、重傷1人であった。9月29日の台風被害は、大雨が長時間続き、28日~29日にかけての連続雨量は

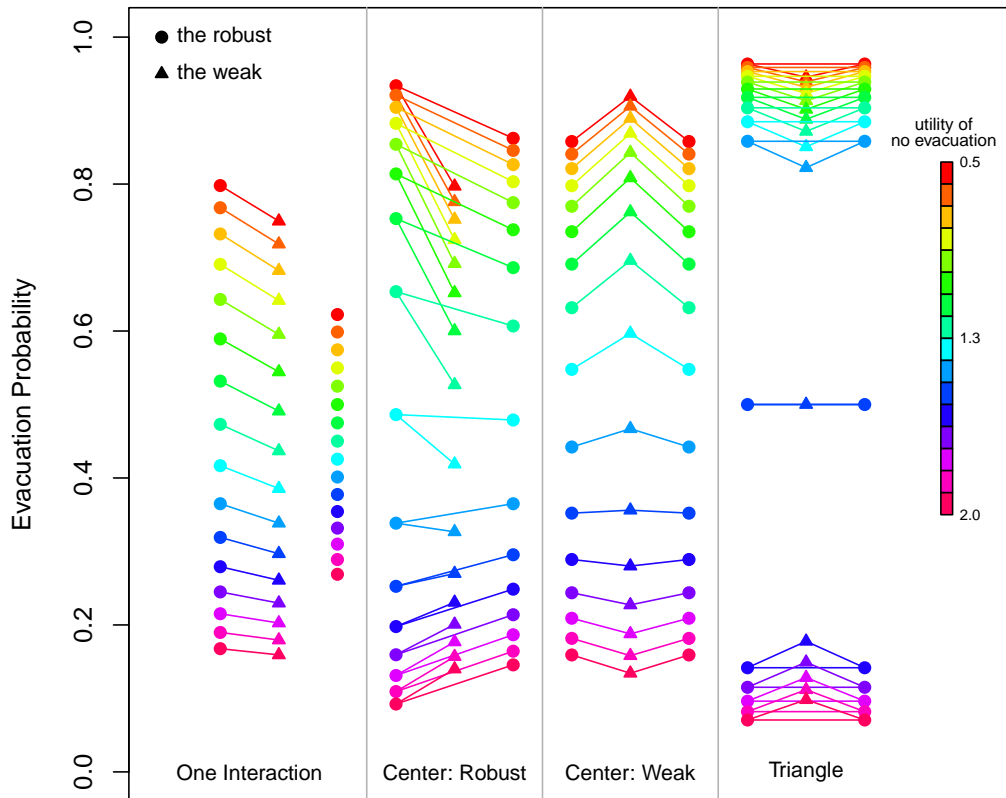


図 4.7 ネットワーク構造別の比較 (数値計算結果)

281mm，全壊が 8 棟，半壊が 132 棟，死者 5 人であった．調査対象地区の特徴は，白浜地区以外の 4 つの地区は 100 戸以下の小規模集落であり，白浜地区は比較的住宅が密集した市街地の中にある．調査地区の住戸数や調査数の概要は表 4.1 に示す．避難行動データは，地区住民へのインタビュー調査により収集されている．これは，短時間に变化する災害状況と詳細な避難行動を把握するためである．インタビュー調査では時系列に沿った当日の一連の行動を収集し，特に誰とどういった協調行動 (ネットワーク形成行動) を行ったかについても調査している．なお，同世帯内の協調行動は意識せずに行われており，インタビュー調査で同世帯内での協調行動の有無や回数，実施時間等を把握することは難しい．そのため，ここでは世帯外の相手との協調行動のみを分析対象とし，世帯を 1 単位とする．なお，地区外に外出中している世帯構成員を除き，全ての世帯で世帯構成員全員で一度に避難している．また，分析対象とするのは，8 月 18 日の西楠崎地区・東楠崎地区・唐津山地区の住民行動とする．

ここでは，具体的に人的被害の生じた西楠崎地区の災害状況・避難行動の概要を説明する．地区には，121 戸の住宅があり，うち 83 戸が実際に利用されていた (図 4.8)．全壊住宅は 7 戸，半壊は 5 戸，床上浸水は 11 戸，床下浸水は 2 戸である．図の中央の川よりも西側を池地区と称する．協調行動形成の主な内容は南側のため池の氾濫に備えた行動である．池地区の溜池決壊の可能性が高まったのは 9 時頃であり，

表 4.1 対象地区の総住戸数と調査数

調査対象	地区	総住戸数	調査数	調査率
8 月 18 日 台風 15 号	西楠崎	90 戸	49 戸	54%
	東楠崎	43 戸	9 戸	21%
	唐津山	13 戸	6 戸	46%
9 月 29 日 台風 21 号	白浜	396 戸	60 戸	15%
	西楠崎	90 戸	28 戸	31%
	大生院	47 戸	17 戸	36%



図 4.8 西楠崎地区における住戸の被害状況

ほとんどの世帯は昼過ぎまでに避難をしている。東側を土石地区と称する。紫色の星の南側の地点で土石流が発生した。土石流は 10 時半頃に発生し、巻き込まれた被害者が 1 名あり、その後、被災世帯の救助・捜索活動や周辺の増水により自力では避難できなくなった世帯の救助活動などが行われた。また、救助・捜索活動は 15 時頃まで続けられた。無線による避難勧告は 14 時 30 分頃に放送されたが、ほとんど避難する世帯はなく、17 時過ぎから消防による各戸への避難勧告の伝達が行われた。協調行動形成の主な内容は土石流の被害世帯への救助行動などである。

東楠崎地区は、10 時頃に地区の中央を流れる川が氾濫し、地区内の道路ネットワークが分断された。17 時過ぎには主に無線による避難勧告が放送された。また、地区内の住戸の具体的な被害はなかった。協調

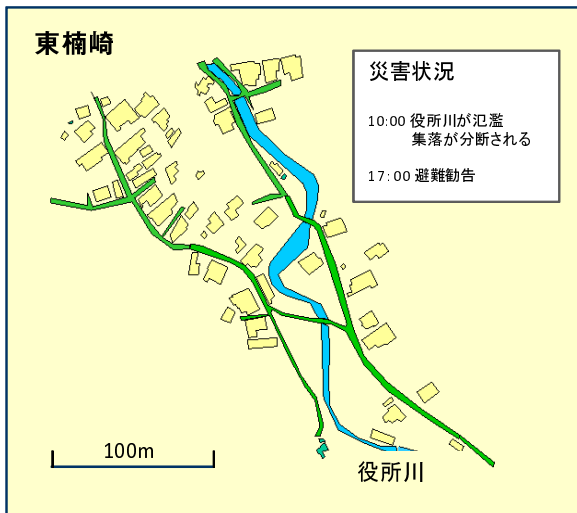


図 4.9 東楠崎地区の概況 (中川 (2005) より)

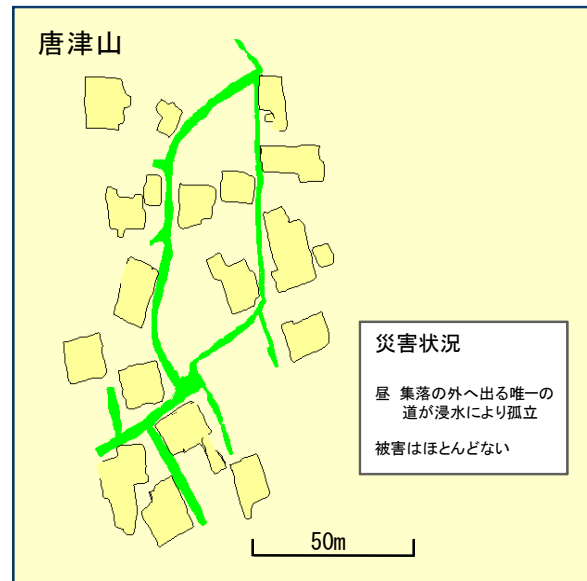


図 4.10 唐津山地区の概況 (中川 (2005) より)

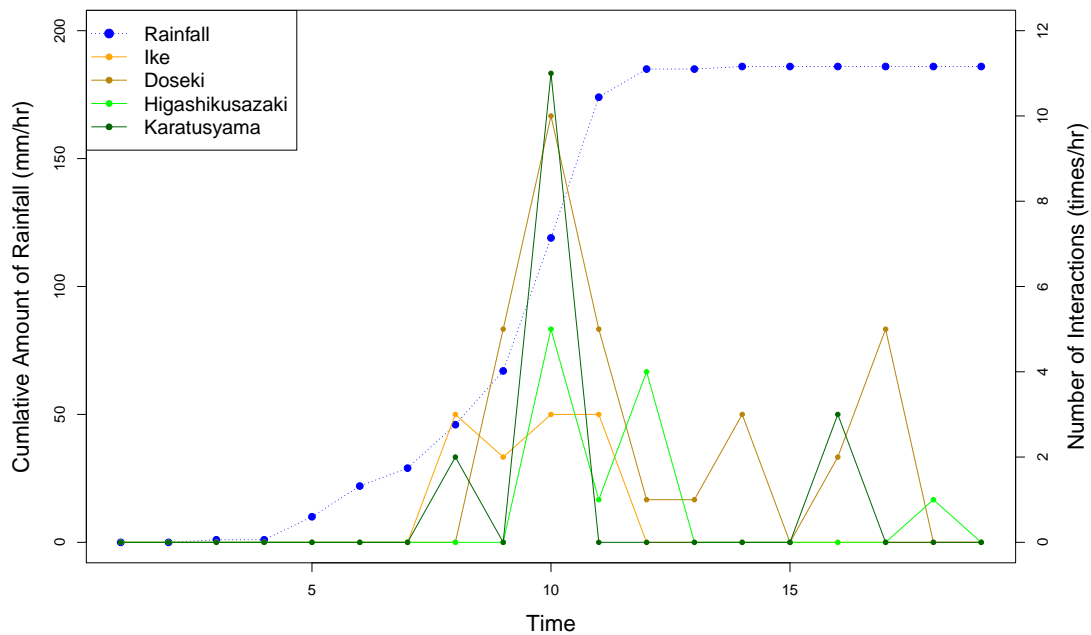


図 4.11 雨量と協調行動形成数の時間推移

行動形成の主な内容は避難開始の相談や地区内の被害状況の伝達等の行動である。唐津浜地区は、昼頃に川の増水により、唯一の地区外への道路が断絶した。そのため、地区外に避難することができなくなった。ただし、それ以外の被害はなかった。協調行動形成の主な内容は高齢者世帯への声掛けや地区内の被害状況の伝達等の行動である。

協調行動の形成数と雨量の時系列の状況を示す。図 4.11 の青破線は、1 日の累積雨量を示す。図の左側の縦軸に対応する。横軸は時系列推移である。9 時台、10 時台が降雨量が最も激しかった時間である。協調行動の形成数は図の右側の縦軸に対応する。オレンジ色の線は池地区、茶色の線は土石地区、黄

表 4.2 被災リスクの回帰分析

説明変数	推定値	t 値
C_0	6.916	9.17*
β_w	-0.597	-4.37*
β_r	-0.962	-8.66*
サンプル数		65
修正済 ρ^2 値		0.565

*は 1% 有意

緑色の線は東楠崎地区，濃緑色の線は唐津山地区を示す．雨量のピーク時間帯の前後に協調行動の形成が多くなっている．池地区は 13 時までにはほとんどの世帯が避難しており，午後の協調行動形成は少ない．土石地区は全員避難したのが 19 時頃であり，午後も形成が続いている．東楠崎地区，唐津山地区は 10 時台に形成が集中し，東楠崎地区は 12 時台にも形成が生じている．

被災リスクの定量化

他者との同調行動の形成や協調行動形成は利他的な不平等回避選好により影響を受ける．不平等回避選好に影響を及ぼす要因の一つとして，被災リスクの差がある．被災している人や危険な場所にいる人への安全な場所にいる人からの支援（移動支援や注意喚起）は不平等回避の選好が働くために生じる行動である．本章で対象とする土石流災害では，同じ集落の中でも川からの距離や標高により被災リスクは異なる．一方で，詳細にどの程度の被災リスクを個々の世帯が持っていたのかは観測できない．そこで，本項では，最終的な被害状況と雨量を用いて，被災リスクを回帰的に定量化する．生じた被害は最終的な結果であり，時系列上の被災リスクとして，そのまま用いることはできない．つまり，最終的に被害を受けなかった場所も，時系列上では被災リスクがあったわけである．そこで，最終被害，空間要素と降雨量を用いて，被災リスクを算出する式を与え，それを用いて，時空間上の被災リスクを簡易に設定する．また，算出にあたっては，具体的に被害が生じた西楠崎地区のデータを用いる．

まず，空間上の被災リスクを算出する．標高の低い下流側の線路からの距離 dis_w と南北方向の川からの距離 dis_r に応じて，最終被災リスク $D(s, T)$ が地区内の各住宅 s に分布していると仮定する．ここで， T は対象とする災害における雨が降りやんだ時刻とする．実際の災害被害の結果を被説明変数とし，二つの距離を説明変数として重回帰モデルを構築する．重回帰モデルが各世帯のもつ最終の被災リスクである．重回帰モデルの結果は次である．被説明変数となる最終の被災リスクの値は，全壊・半壊・床上浸水・床下浸水・被害なしの 5 段階 (0-4) を用いている．

$$D(s, T) = C_0 + \beta_w \log dis_w(s) + \beta_r \log dis_r(s) \quad (4.7)$$

サンプル数は 65 であり，修正済み決定係数は 0.565 である．説明変数の t 値は全て 1% 有意である．説明力が十分高いと言えないが，被災リスクが川からの距離に影響を受けており，直感と一致する．

次に，時間軸上の被災リスクの変化を定義した上で，時空間上の被災リスクの算出式を与える．被災リスクの時間変化には累積降雨量 $Rc(t)$ を用いる．被災確率は，当日の累積降雨量に比例して，発生確率が高まると仮定する．また，対象とする被害集落の降雨量と地形（2 次谷），地質から，この地域の土石流による被災確率は 40% と国土技術政策総合研究所 [94] から報告されている．これを被災確率の上限値 Pd とする．被災確率 $P(t)$ は，上限に各時刻までの累積降雨量を最終累積降雨量で割った値を掛けることで

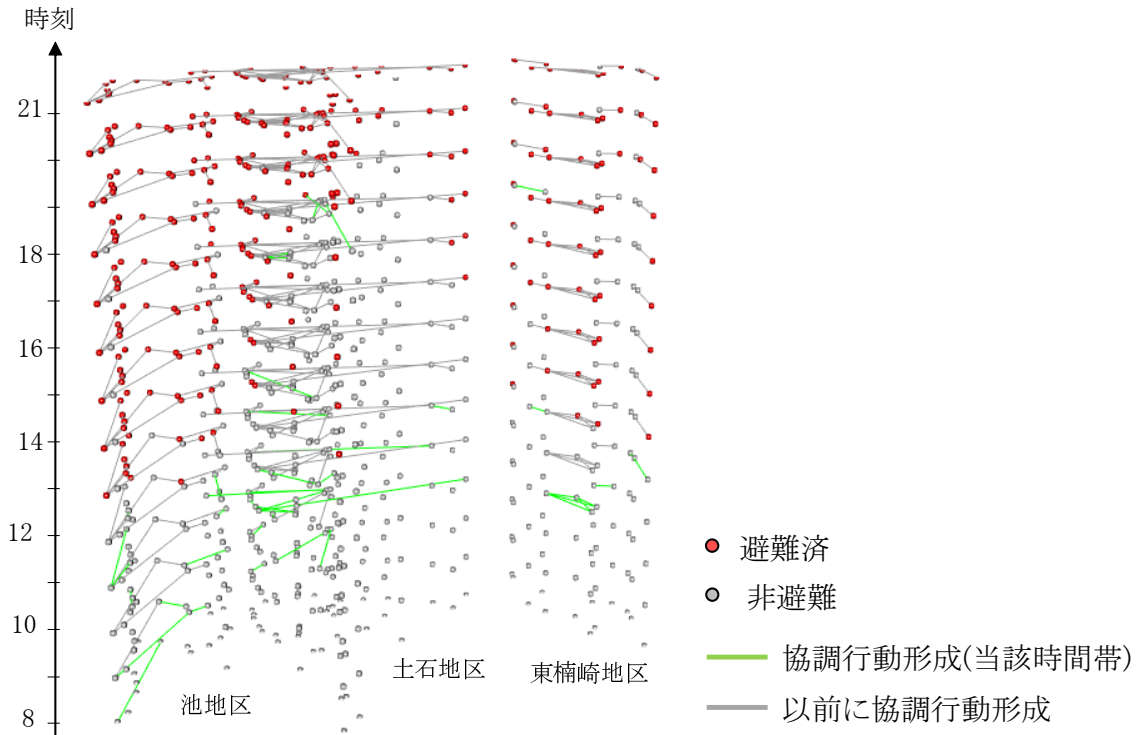


図 4.12 避難開始とネットワーク形成の時間推移

与える。被災リスク $D(s, t)$ は場所ごとの最終被災リスク $D(s, T)$ と累積降雨量 $Rc(t)$ に応じた被災確率を掛けた値により定義する。

$$P(t) = Rc(t)/Rc(T) \quad (4.8)$$

$$D(s, t) = D(s, T) * P(t) \quad (4.9)$$

被災確率は時間変化するため、被災リスクは時間変化する変数となる。

ここで定量化した被災リスクを以降の分析では用いる。なお、被害を受けた世帯は、被害発生以降は被災確率 $P(t)$ は降雨量に関係なく 1 とする。ただし、ここで算出した被災リスクと個人が持っていた認知リスクは必ずしも一致しない点に留意が必要である。

避難開始と周辺他者の関係

次に避難開始と周辺他者の関係についての基礎分析を示す。なお、ここでは増水のために避難できなかった唐津山地区は分析対象から除き、池地区・土石地区・東楠崎地区の世帯を分析の対象とする。

まず、図 4.12 は、対象とする 3 地区の世帯の避難開始タイミングとネットワーク形成を 3 次元で示している。縦軸が時刻であり、世帯の位置は緯度経度にあわせた位置としている。赤丸はその時刻では避難済であること、灰色は非避難であることを示す。灰色の線が協調行動形成リンクを示し、緑色の線が協調行動を形成した時刻を表す。世帯数は全部で 62 世帯であり、協調行動形成数は 51 である。池地区は午前中のうちに溜池決壊に関する情報伝搬と避難が生じている。そのため、午前中の協調行動形成と避難が多く観測されている。土石地区は正午前頃から救助のための協調行動形成が多く生じ、避難開始は夜のほうが多い。東楠崎地区は他 2 地区と比べると、協調行動形成数は少なく、避難を行わなかった世帯もある。

次に、避難開始タイミングと周辺他者の避難割合について分析する。ここで、周辺他者とは、3 番目ま

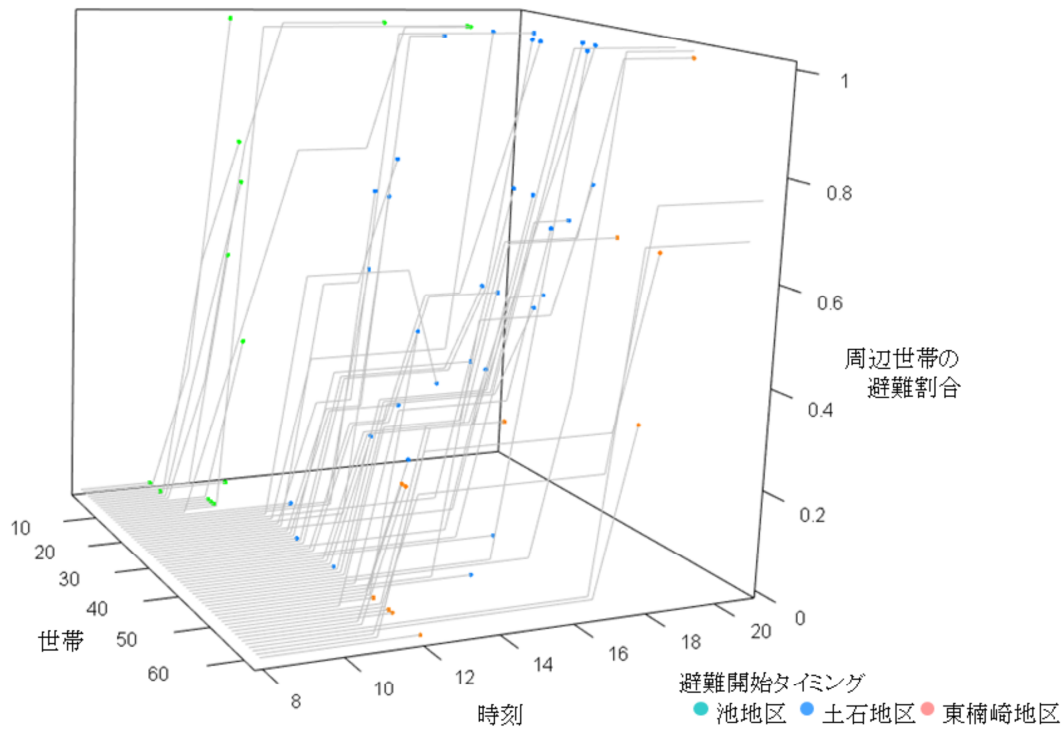


図 4.13 周辺他者の避難状況と避難開始選択の推移

でに近い世帯と各時刻までに協調行動を形成した世帯の集合とする．図 4.13 は，横軸の左から右にかけて時刻経過を表し，縦軸は周辺他者の避難割合，奥行きは世帯 ID を示している．時刻は 1 時間刻みである．各 ID の灰色線は，時系列上の周辺他者の避難割合の変化を示しており，緑点・青点・橙色点は避難開始タイミングを示す．一番右側の側面まで灰色線が到達している場合は，避難を行わなかったことを示している．池地区は全員避難しており，残り二つの地区は，避難しなかった世帯があるため，点のない世帯がある．図 4.13 の上側に点があれば，周辺他者の避難割合が高まってから避難するという同調効果が生じていることを意味する．図の奥の池地区 (黄緑点) は，11 時頃の周辺他者の避難割合が急上昇したタイミングで避難開始している．図の中央の土石地区 (水色点) は，14 時頃または 17 時頃の周辺他者の避難割合が急上昇したタイミングで避難開始している．東楠崎地区は，避難していない割合も高く，そうした傾向はみられない．実際の集計値としては，周辺世帯の避難割合が 0.6 以上で避難している割合が約 63%(62 世帯中 39 世帯) となっている．周辺世帯の避難割合が高まった段階で避難を行っている傾向があるといえる．一方で，避難開始時刻は避難勧告認知のタイミングとの兼ね合いもあり，以降のモデル分析により詳細な分析を行う．

避難開始選択モデルの設定

以降では，避難開始選択モデルのパラメータ推定結果を示し，避難開始選択行動の特徴を明らかにする．ここでは，まず，モデル推定にあたって必要となる効用関数と周辺他者の設定について説明する．

まず，効用関数の定式化を行う．なお，個人を表す i ，時刻 t は省略する．

$$u_{ev} = \beta_{c1}x_{c,res-w} + \beta_{c2}x_{c,oth} + \beta_a x_a + \beta_r x_r + \beta_h x_h + \beta_m x_m + \beta_w x_w + \beta_I \log(x_I + 1) \quad (4.10)$$

$$u_{no} = \beta_{rain}x_{rain} + \beta_p x_p + \beta_{res}x_{res} \quad (4.11)$$

具体的に説明変数の内容を説明する． $x_{c,res-w}$ は弱者世帯 (世帯構成員に高齢者又は子供を含む世帯) が消

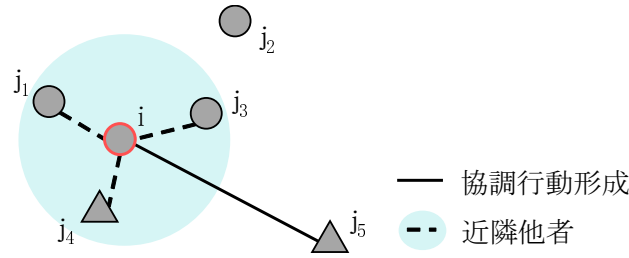


図 4.14 他者同調の影響を受ける範囲の設定の例

防隊からの避難勧告を聞いた場合を 1 とするダミー, $x_{c,oth}$ は上記以外で避難勧告を聞いた場合を 1 とするダミー, x_a は被災リスク, x_h は世帯人数, x_m は世帯の男性人数, x_w は世帯の災害弱者人数 (高齢者又は子供), x_I は協調行動形成数, x_{rain} は降水量 (10^{-1} mm/h), x_p は西楠崎池地区ダミー, x_{res} は西楠崎土石地区の救助・捜索活動中時間帯ダミーである。避難しなければ他者支援などの利他行動の実施が可能だが, 避難すれば集落内での利他行動実施は不可能である。こうした利他行動の不可能性も避難実施の心理的コストとなる。 x_I や x_{res} の説明変数がこれに該当する。なお, 世帯人数も途中での外出先からの帰宅により時間変化するため, 池地区ダミーと世帯間距離以外は全て時間変化する変数となる。

次に, 他者からの影響の重みを表す J_{ijt} を定式化する。なお, ここでも時刻 t の表記は省略する。

$$J_{ij}^{no} = \gamma_w^{10} y_{wr}^{ij} + \gamma_m y_m^{ij} + \gamma_{dis} 1/y_{dis}^{ij} + \gamma_{It} \log(y_{It}^{ij} + 1) \quad (4.12)$$

$$J_{ij}^{ev} = J_{ij}^{no} + \gamma_w^{01} y_{rw}^{ij} + \gamma_r y_r^{ij} \quad (4.13)$$

具体的に説明変数の内容とその重みに与える影響の想定を説明する。まずは, 避難選択・非避難選択の両方に共通する変数について説明する。 y_{wr}^{ij} は $x_w^i - x_w^j > 0$ かつ $x_w^j = 0$ であれば 1 となるダミー変数を示す。つまり, 世帯 i に災害弱者がいて, 世帯 j に災害弱者がいない場合である。自世帯に災害弱者がいる場合には, 災害弱者のいない他世帯の意思決定に同調が生じやすいと想定する。 y_m^{ij} は $x_m^i = x_m^j = 0$ であれば 1 となるダミー変数を示す。つまり, 世帯 $i \cdot j$ とともに女性のみの世帯である場合である。同じ属性の世帯のほうが同調が生じやすいと想定する。 y_{dis}^{ij} は世帯 ij 間の距離 (m) を示す。距離が短いほうが同調が大きくなると想定する。 y_{It}^{ij} は世帯 ij 間の協調行動形成後の経過時間 (h) を示す。協調行動から時間が経過するほど同調作用は薄れると想定する。次に, 避難選択のみに影響する変数 (非対称の重み) について説明する。 y_{rw}^{ij} は $x_w^i - x_w^j < 0$ かつ $x_w^i = 0$ であれば 1 となるダミー変数を示す。自世帯 i に災害弱者がおらず, 相手世帯 j にいる場合には, 避難が実施しづらいと想定する。 y_r^{ij} は $x_a^j - x_a^i \geq 1$ であれば 1 となるダミー変数を示す。相手世帯 j のもつリスクが自世帯 i のもつリスクより大きい場合には, 避難が実施しづらいと想定する。

最後に, 他者同調の影響を受ける範囲 (他者集合) の設定を行う。ここでは次の 2 つの集合を導入する。一つ目は, 協調行動を行った世帯の集合である。1 日の行動の中で直接的に協調行動を行った世帯は, そうした行動により互いのリスク・リスク認識を共有しており, 意思決定にあたって, 同調作用を受ける。二つ目は, 空間的に近くに住む世帯の集合である。近隣世帯の行動は観察可能であり, またリスクを共有している。そのため, 意思決定にあたって, 同調作用を受ける。この二つの集合を合わせた集合に影響を受ける他者集合として設定する。近くに住む世帯は, 近い順に上位 3 世帯として, 設定する。図 4.14 は, 世帯 i の他者集合の設定例である。 j_5 とは協調行動形成により他者集合に含める。 j_1, j_3, j_4 は近隣世帯であるため他者集合に含める。

表 4.3 パラメータ推定結果 (避難開始選択モデル)

説明変数	他者同調なし		他者同調あり		
	パラメータ	t 値	パラメータ	t 値	
避難効用	避難勧告 (消防 弱者世帯)	1.961	3.848*	1.347	2.361*
	避難勧告 (上記以外)	0.519	1.441	0.567	1.548
	見回り	-0.223	-0.779	-0.132	-0.383
	被災リスク	0.108	0.639	0.00656	0.035
	世帯人数	-0.235	-1.438	-0.0889	-0.547
	世帯内男性人数	-1.344	-4.462*	-0.840	-2.625*
	世帯内弱者人数	-1.430	-4.100*	-2.102	-4.606*
	協調行動数	0.989	3.168*	1.353	4.109*
非避難効用	降水量	0.608	5.041*	0.230	1.940†
	池地区ダミー	0.226	0.615	0.509	1.259
	救助中ダミー (土石地区)	2.268	4.815*	1.377	2.302*
重み	弱者人数差あり (1+ 人 0 人)	-	-	0.435	1.844†
	女性のみ世帯	-	-	0.261	0.838
	1/世帯間距離	-	-	2.273	1.331
	協調行動形成後経過時間	-	-	-0.275	-2.072*
非対称 の重み	弱者人数差あり (0 人 1+ 人)	-	-	1.314	4.953*
	被災リスク差 1 以上	-	-	0.0252	0.055
サンプル数		950		950	
初期尤度		-658.49		-658.49	
最終尤度		-202.08		-173.94	
ρ^2 値		0.693		0.736	
修正済 ρ^2 値		0.676		0.710	

*: 5% 有意, †:10% 有意

避難開始モデルのパラメータ推定結果

パラメータ推定結果について説明する。まず、パラメータ推定は、西楠崎地区 (池地区、土石地区) と東楠崎地区の世帯別避難行動データを用いて行った。この際に、世帯意思決定主体とし、30 分ごとに避難/非避難の意思決定を繰り返すと仮定する。ただし、13 時以降は雨が止み、状況の変化が少なくなっているため、意思決定の間隔は長くなると考えられる。そこで、避難勧告を認知していない世帯は、30 分ごとに意思決定を行う確率は 50% と設定して、計算する。これにより、データセットのサンプル数は少なくなる。また、他者の避難確率は同時刻のものを用いる。その時間帯で既に避難実施済の世帯の避難確率は 1 とする。

表 4.3 の左側が他者同調作用の影響を無視した場合、右側が他者同調作用の影響を考慮した場合である。まず、他者同調ありの場合のほうが最終尤度・修正済 ρ^2 値はともに大きくなっており、モデルとしての妥当性が高い。

次に、避難効用のパラメータ推定結果について考察する。消防隊から災害弱者世帯への避難勧告のパラメータは正で有意となっている。それ以外の避難勧告は有意となっていない。災害弱者世帯の避難促進に消防隊からの避難勧告が有効であるといえる。世帯内男性人数・弱者人数のパラメータは負で有意となっている。世帯内の弱者人数が多いほど避難開始が遅れている。また、男性人数が多いほど避難開始が遅れている。これは男性が集落内の他世帯への支援などに回ることや男性人数が多いために避難コストを低く評価していることが理由と考えられる。協調行動形成数のパラメータは正で有意となっている。これは協調行動形成を多くしている世帯のほうが避難効用が高まっていることを意味する。協調行動を形成している世帯ほど避難の必要性を高く感じていることや利他選好を満たしたために避難できる心理状態となっていることが理由と考えられる。

次に、非避難効用のパラメータ推定結果について考察する。降水量と救助中ダミーのパラメータが正で有意となっている。前者は、雨が降っているほど避難開始しづらくなっていることを示す。後者は、他の人が救助している最中に、自世帯が避難するといった行動をとりづらくなっていることを示す。ただし、降雨量推移は全地区に共通しており、そのまま雨が降り続いた場合でも避難が始まった可能性も否定できない。降雨量と避難効用の関係は、今回の避難行動データに対する結果分析に留まることに留意する。

最後に、他者の影響の重みのパラメータ推定結果について考察する。世帯 i に災害弱者がいて世帯 j に災害弱者がいない場合のパラメータは正で有意となっている。自世帯に災害弱者がいる場合は、災害弱者のいない世帯との間に意思決定の同調作用が働いていることを示す。避難選択確率にかかる非対称の重みとして設定した世帯 i に災害弱者がおらず世帯 j に災害弱者がいる場合のパラメータは、正で有意となっている。また、パラメータ値は先ほどより大きい。つまり、災害弱者のいない世帯は災害弱者が避難していない状況では避難しづらくなっていることがわかる。また、この影響は災害弱者がいる世帯がいない世帯に同調する影響よりも大きいため、数値計算で示した健常者世帯の避難遅れが生じやすい状況になっているといえる。協調行動形成後経過時間のパラメータは負で有意となっている。これは、協調行動形成による他者からの影響はその形成からの時間とともに影響が小さくなることを示す。

以上より、世帯内の弱者人数の差により利他的な不平等回避選好が生じるため、健常者世帯の避難選択が躊躇される負の相互作用が生じていることが確認できた。こうした不平等回避選好は、救助中といった集落全体の状態からも影響を受けることがわかった。また、災害弱者世帯も他者の避難に同調する選好をもつこと、消防からの弱者世帯への避難勧告や協調行動形成により避難効用が高まることが明らかになった。つまり、こうした選好の傾向を利用して災害弱者の避難効用を高めることができれば、災害弱者も含めた早期避難を達成することができる。

避難確率とネットワーク構造の関係

本節の最後に推定パラメータを用いて、ネットワーク構造と避難確率の関係とその時間推移について考察する。ここでは、3つの地区の実際の行動データとネットワーク形成状況をインプットとし、モデルの定式化とパラメータを用いて、各時間帯の避難確率を算出した。それぞれのネットワーク構造と避難確率を各時間帯で示した図を示す。1時間ごとの状況を図示し、左上から右下方向に時系列に並べる。各図の縦軸は避難確率で、横軸は世帯 ID である。避難を実施した世帯の避難確率は1とし、図示する。各世帯の次数は塗りつぶしの色で示している。

まず、西楠崎 池地区の結果は図 4.15 である。10時の時点では全ての世帯の避難確率は0.1以下となっている。11時では2世帯が避難を行い、12時ではさらに3世帯が避難をしている。避難した世帯の影響や降水量低下が働き、12時の時点では他の世帯の避難確率が大きく上昇している。ここで、0.2以下と低い避難確率を保ったままの世帯が4つあり、この4つの世帯は弱者あり世帯であり、互いにネットワーク

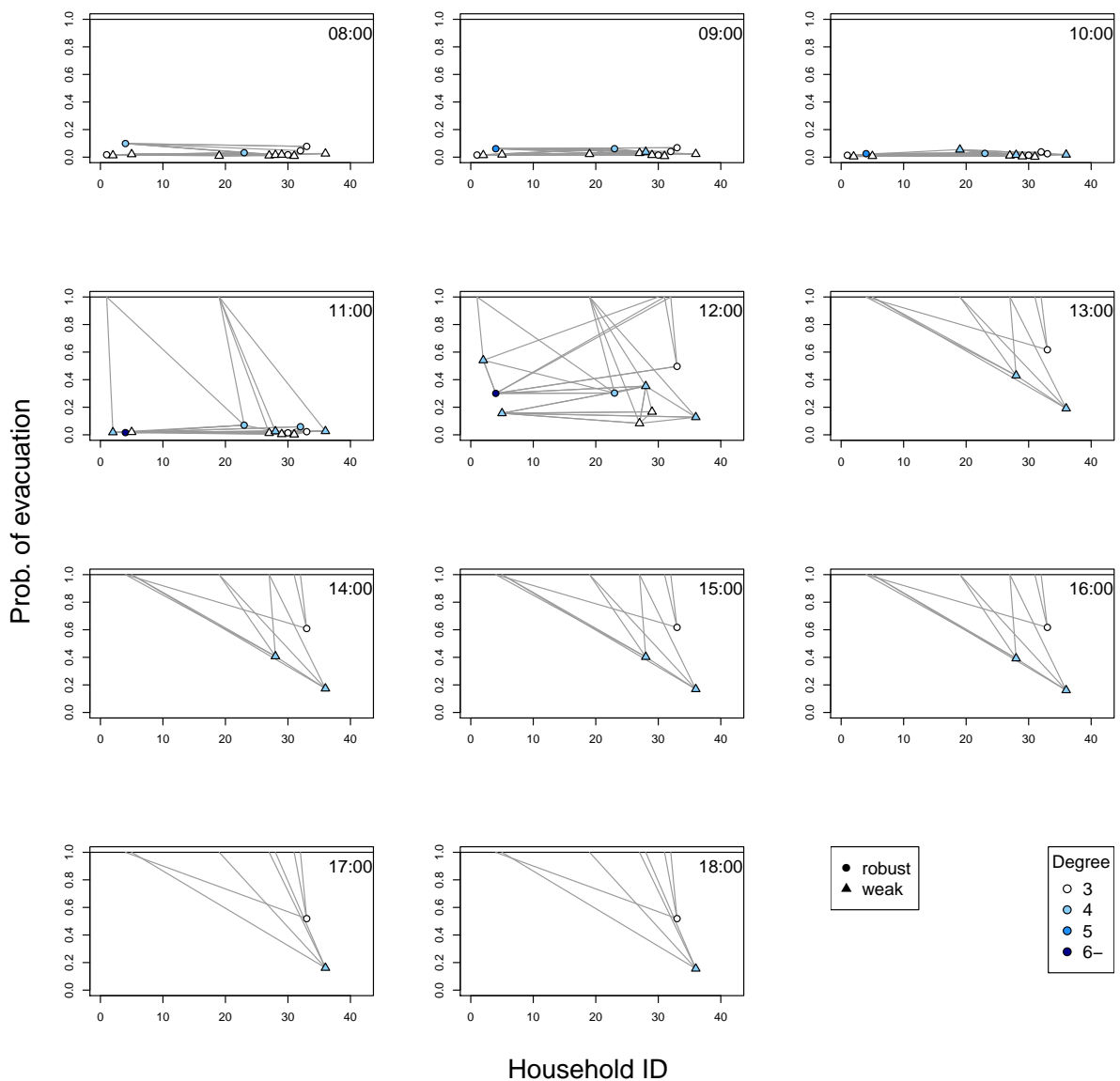


図 4.15 避難確率とネットワーク構造の推移 (西楠崎 池地区)

が接続している．負の相互作用が働き，避難確率が低くなっている状況が発生していることがわかる．

次に，西楠崎 土石地区の結果は図 4.16 である．14 時までにはほとんどの世帯は避難確率は 0.2 以下となっている．これは，11～14 時までには救助中であるために個々の世帯の非避難効用が高く，さらに集落全体として，その影響がネットワークにより伝搬しているためである．15 時にはいくつかの世帯で避難確率が上昇しているが，そのほとんどが避難した世帯や避難確率の高い世帯と連結している．つまり，ネットワークの次数が高いノードである．率先避難者による正の影響が表れているといえる．対して，避難確率が低いままの世帯は，次数が少ない世帯が多くなっている．次に，17 時では，避難確率が 0.2 以下の世帯のほとんどが弱者世帯となっており，また互いにリンク接続している．また，その層より少し上の 0.4 以下の避難確率を持つ弱者なし世帯は複数の弱者あり世帯とリンク接続している．こうしたネットワーク構造とその接続相手の影響により避難確率は低下する．

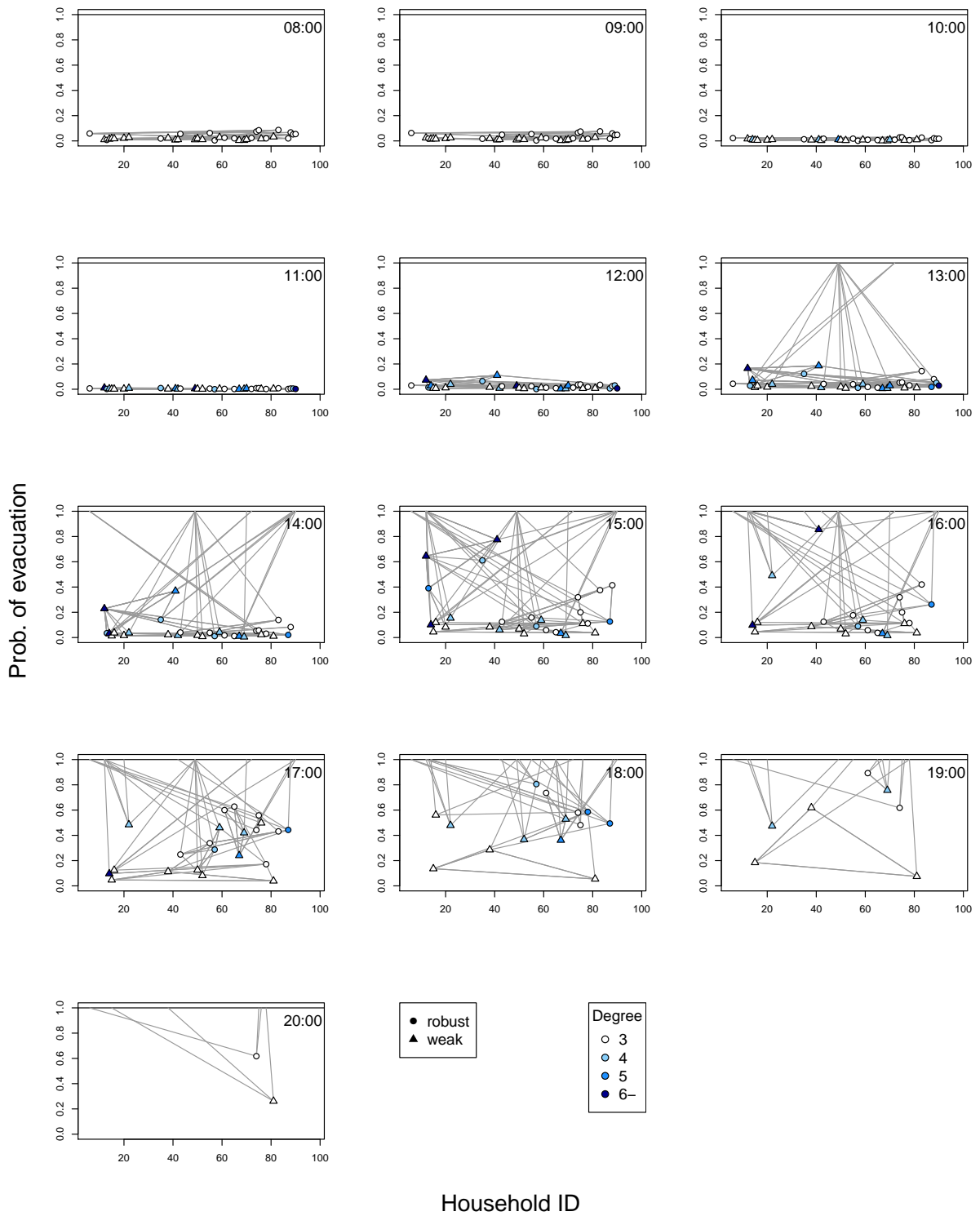


図 4.16 避難確率とネットワーク構造の推移 (西楠崎 土石地区)

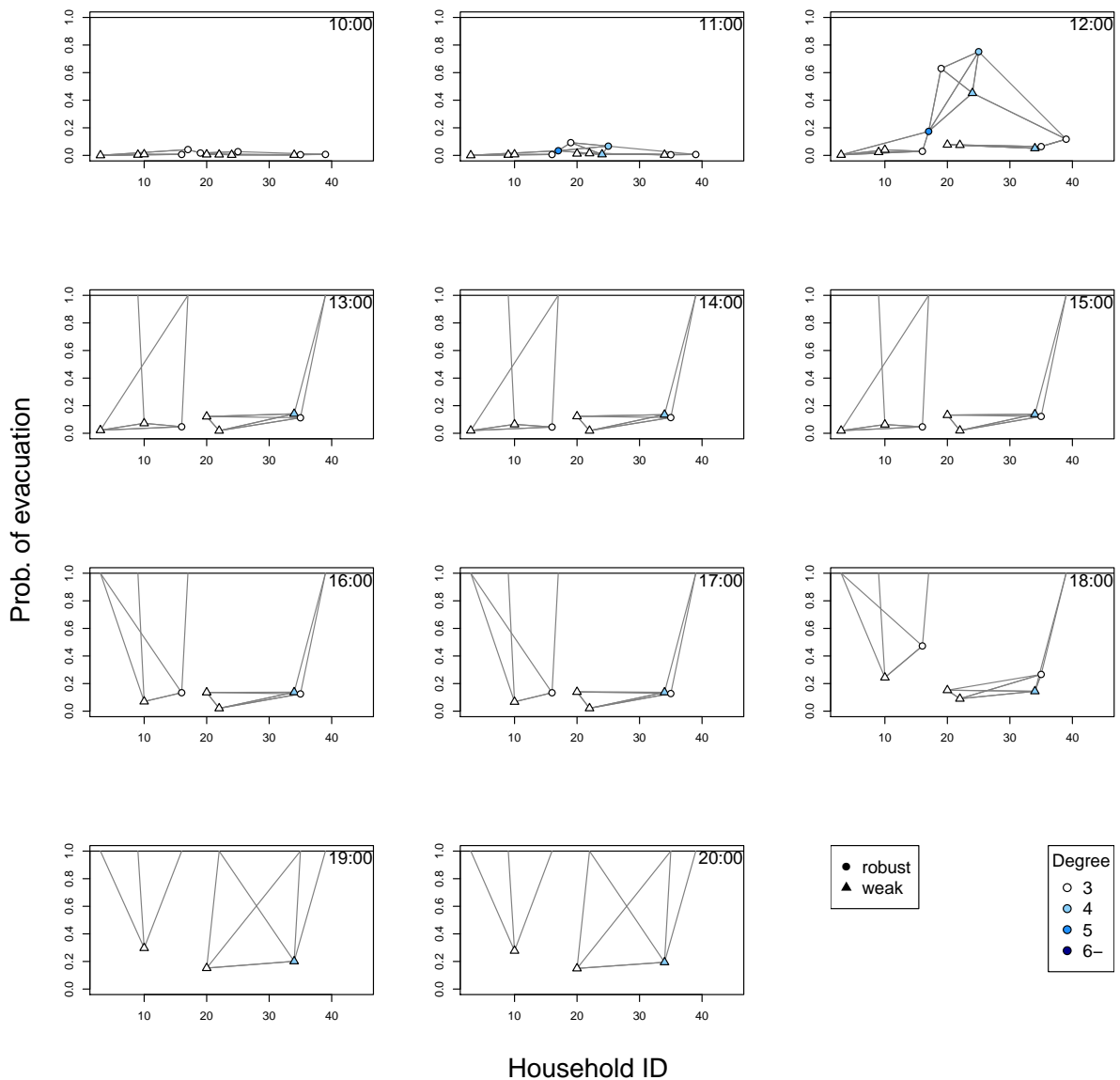


図 4.17 避難確率とネットワーク構造の推移 (東楠崎地区)

最後に、東楠崎地区の結果は図 4.17 である。12 時の時点で中央の 3 つの世帯の避難確率が高くなっている。この 3 世帯は互いに接続し、正の相互作用が生じている。13 時では、この 3 世帯と接続する 2 世帯が避難している。しかし、これら 5 世帯は避難時点で、避難していない世帯と 4 本のリンクしかない。そのため、他の世帯への作用が限定的となり、非避難世帯の避難確率は低いままとなっている。避難世帯の避難前のリンク接続状況は、避難開始以降の他の世帯の避難確率に影響を与えている。

最後に、シミュレーション計算における全地区の合計値で避難時の避難確率の平均値は 0.338、標準偏差は 0.262 となっている。避難時の避難確率は 0.5 よりも小さくなっている。ただし、分散は大きく、避難確率が 0.1 未満で避難している場合が避難した世帯のうち 29% であるものの、0.4 以上で避難した世帯は 41% となっている。また、避難選択時の避難確率とその 1 時間前の避難確率を比較すると、平均して 0.109 増加し、標準偏差は 0.139 となっている。0.1 以上増加している場合は、全体の 38% となっている。

以上の分析により、弱者あり世帯同士のリンク接続により避難確率が低いままとなっていること、接続次数が大きいほうが避難確率が高まりやすいが弱者世帯との連結により避難確率が低下すること、救助活動中は集落全体の避難確率が低下状態にあること、避難前のネットワーク構造が避難後の居残り世帯の避難確率に影響することが明らかにした。

4.3 二者間特性と他者同調ネットワーク形成

本節では、二者間の空間相関を考慮した世帯間協調行動形成モデルを構築する。モデル構築により、他者との協調行動の形成確率と形成する他者の特徴を評価できる。空間相関を考慮したモデルとすることで、周辺他者からの影響を誤差相関として記述する。4.3.1では、形成モデル構築の考え方と具体の定式化を示す。4.3.2では、構築したモデルにより、2004年新居浜市豪雨災害時の住民行動データを用いて、実証分析を行う。また、モデルのパラメータ推定結果を用いて、形成確率と形成相手の評価を行う。前節では、他者との協調行動の形成や形成相手の避難確率が自身の避難意思決定に影響を及ぼすことを明らかにした。避難の意思決定モデルと組み合わせた評価により、協調行動形成と避難意思決定の時系列上での推移を記述できる。

4.3.1 二者間協調行動形成モデルのフレームワーク

選択肢の設定

災害時は連続した空間に対して一定以上の災害圧がかかるため、その空間内の滞在者全員は被災を避けるための行動が必要となる。その際に、個人が独力で避難できない場合やリスクを十分に認知していない場合、避難の意思決定が単独ではできない場合などに他者との協調行動が必要となる。他者との協調行動を生じる相手は事前から決まっているわけではなく、相手の選択が必要となる。相手の選択の際には、まず、協調行動を形成する相手がどのような状態にあるのかを考慮する。例えば、自分が健常者で、相手が高齢者であれば、避難支援のための協調行動形成相手となる。ただし、その相手と他の人との協調行動の形成有無により、相手の状態は異なる。このように、二者間特性を考慮した協調行動形成にあたっては、二者間の特性だけでなく、集団全体からの影響を踏まえた協調行動形成の評価が必要となる。

そのために、集落内における時系列上の協調行動形成モデルを構築する。ここで構築するモデルは集団全体の効用を考慮した形成モデルとする。二者間の協調行動の形成の積み重ねにより集団内のネットワーク形成と捉える。関連する研究には、全体ネットワークの形状に着目したネットワーク形成モデルがあり、こうしたモデルは複雑ネットワークモデル分野を中心に研究が進んでいる[67]。しかし、複雑ネットワークモデルは日常的なリンク蓄積や変化を前提としており、時間軸上での形成数の変化や形成しないという選択は設定されない。時系列上での協調行動形成を考えると、災害時の避難猶予時間が長い豪雨や洪水等の災害の場合は、協調行動形成をしない時間帯も存在する。そこで形成しない場合を評価するために、離散選択モデルを拡張する形でモデルを構築する。モデルは、集団内他者間の協調行動形成を考慮するため、個人の個別的な効用に基づく意思決定ではなく、集団を単位とし、その集団全体の協調行動形成効用に着目したモデルとする。

選択肢としては、二者ペアを設定する。これには二つの利点がある。一つは、ペアの二者間特性を記述でき、選択効用として表現できる点である。利他選好の働きにより協調行動が形成される場合に、形成効用は二者間特性により生じる。それは移動能力や被災リスクの差がある場合に、利他的な不平等回避選好が生じ、二者間で協調行動が形成される。もう一つは、多体の意思決定問題をシンプルに記述できる点で

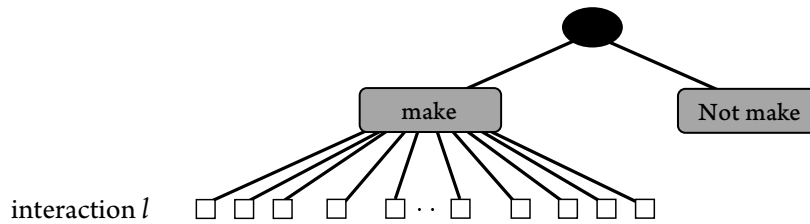


図 4.18 協調行動形成モデルの原型

ある．上述したように，個別の意思決定問題とすると，協調行動相手の選択には自分と他者の関係と他者と他者の関係を比較した意思決定が必要となり，そのまま記述すれば多体問題となる．集団を単位とし，選択肢を二者ペアとすることで，自分と他者，他者と他者の状態差の比較を行った形で，協調行動を形成する二者を決定できる．

形成モデルの基本的な構造

次に協調行動形成モデルの定式化を行う．形成モデルの原型は，協調行動形成有無の選択と形成候補からの選択の 2 段階の Nested logit model である (図 4.18)．効用 U ，観測できる効用項 V, V' をログサム変数とすると，協調行動 l の選択確率 $P(l)$ は次式となる．

$$P(l) = P(\text{make})P(l|\text{make}) = \frac{V'(\text{make})}{V'(\text{make}) + V'(\text{no})} \frac{V(l)}{\sum_{\forall l} V(l)} \tag{4.14}$$

なお，ここで誤差項に i.i.d ガンベル分布を仮定している．

二者間特性の空間相関

上述した原型モデルの二者ペアの空間相関を誤差項に導入する．ここでは，空間相関の考え方を説明する (図 4.19)．空間上の近接性を考慮して，世帯をグループに分割する．まず，同じグループ内の空間的に近い世帯同士は，同様の周辺世帯を持つ．そのために，周辺世帯から受ける行動選択への影響は相関を持つ．つまり，同じグループペアで形成される二者ペアは他者からの影響に関して相関を持つ．ここでの影響とは，災害時は意思決定者は周辺他者の状況を考えた行動をするために生じる．この影響は個々のグループに固有のものである．また，空間的に近いために同じグループの世帯は同様の空間リスクを持つ．そのため，同じグループによるペアで形成される二者ペアのリスク差は相関を持つ．また，二者ペアが形成される際には移動を伴い，その際のグループ間を接続する道路リンクは共通する．そのため，二者ペアの形成にあたって，接続する道路ネットワークについての相関も生じる．こうした空間リスクや周辺世帯からの影響は完全な観測は困難であり，非観測である．そのため，集団を空間的に近接するグループに分割し，同じグループによる二者ペアの効用の誤差相関として記述する．

二者間の協調行動形成における誤差相関を具体的に図 4.19 により説明する．ここでは，1 つの空間をグループに分割した上で，他者の影響に絞った説明を行う．世帯 1,2,3 はグループ a，世帯 4,5,6,7 はグループ b，世帯 8,9,10 はグループ c に属する．まず，周辺他者の影響による相関については，図左下に示す．世帯 1-5 間の協調行動形成と世帯 2-4 間の協調行動形成は，世帯 1, 2 が所属するグループ，世帯 3, 4 が所属するグループが共通している．世帯 1 と 2 は周辺他者 3 を共通してもち，世帯 4 と 5 は周辺他者 6,7 を共通してもつ．この他者からの影響を精緻には把握できないため，非観測の部分が生じ，これを誤差の相関として表現する．リスク差の相関については，図下中央に示し，リスクは青色の濃さで示している．

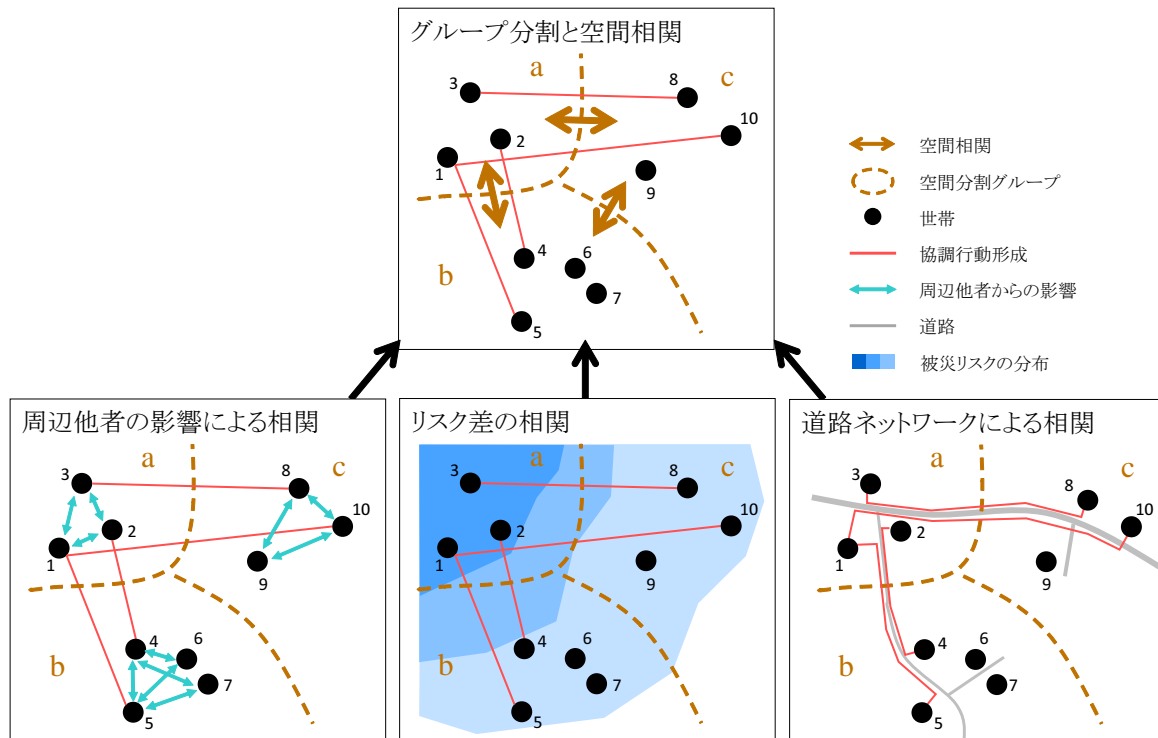


図 4.19 空間相関の構成要素

二者ペア 1-5 と 2-4 については、さきほどと同様に世帯 1 と 2，世帯 4 と 5 がもつリスクが相関しており，二者ペアのもつリスクも相関する．道路ネットワークによる相関については，図右下に示す．グループ a とグループ b を接続するリンクは共通しており，非観測部分の誤差相関として表現する．また，二者ペア 1-5 と二者ペア 3-8 と同程度の距離であるが，接続リンクの特徴は異なっている．グループによる分割を行うことで，単なる距離に拠らない誤差相関を記述することができる．

ただし，空間相関の導入には一つの問題がある．実際には，図 4.19 のように空間上でグループの分割を一意に決めることはできない．そこで，グループへの所属確率は，空間グループの代表点からの距離に応じて，各世帯に与える．これにより，グループを上位ネストとした GNL 型の誤差構造を与える．

定式化

空間相関を考慮した協調行動形成モデルの定式化を行う．ここでは，誤差の相関を考慮するため，Generalized Nested Logit(GNL) model[112][15] を用いる．モデル全体のネスト構造は，図 4.20 となる．上述した通り，所属する空間上のグループが一意に定まらない．そこで，グループへの所属確率を確率的に与えるため，下位ネストは GNL 型の構造とする．形成なしの選択肢と空間グループが同じ階層に並んでいるため，IIA 特性を持ち，グループ数が増えるほど形成確率が高まることを意味する．これは，対象とする集団の中の全世帯数とグループ数の比を一定に保つとすれば，大きな問題とならない．集団内の世帯数が増えた場合には協調行動形成数が増えると考えられ，それをグループ数の増加として表し，形成確率の増加に繋がる．モデルの定式化は，次となる．

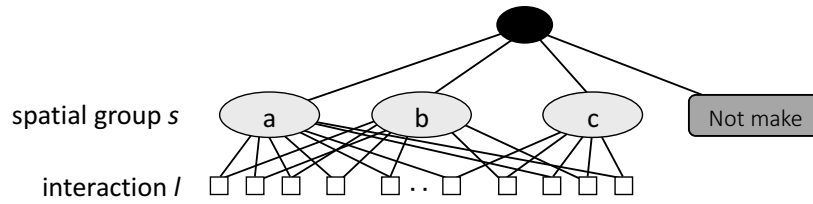


図 4.20 空間相関を考慮したネスト構造

$$G(\mathbf{v}_1) = \sum_s \left(\sum_l (\alpha_{ls} v_l)^{\frac{1}{\mu_s}} \right)^{\mu_s} \tag{4.15}$$

$$P(l) = \sum_s P(l|s)P(s) \tag{4.16}$$

$$P(l|s) = \frac{(\alpha_{ls} \exp(v_l))^{\frac{1}{\mu_s}}}{\sum_l (\alpha_{ls} \exp(v_l))^{\frac{1}{\mu_s}}} \tag{4.17}$$

$$P(s) = \frac{\left(\sum_l (\alpha_{ls} \exp(v_l))^{\frac{1}{\mu_s}} \right)^{\mu_s}}{\sum_s \left(\sum_l (\alpha_{ls} \exp(v_l))^{\frac{1}{\mu_s}} \right)^{\mu_s}} \tag{4.18}$$

$$B_{is} = \frac{1/d_{is}}{\sum_{h \in \forall s} 1/d_{ih}} \tag{4.19}$$

$$\alpha_{ls} = \frac{B_{is} + B_{js}}{\sum_s B_{is} + B_{js}}, \quad ij \in l \tag{4.20}$$

式 (4.15) は G 関数を示す。 v_l は協調行動形成の二者ペア l の形成効用， α_{ls} はアロケーションパラメータである。 μ はスケールパラメータであり， $0 \leq \mu_s \leq 1$ の大小関係となる。式 (4.16)(4.17)(4.18) は選択確率の定式化である。 d_{is} は世帯 i の空間グループ s の中心点からの距離を示し，距離の逆数を用いて，アロケーションパラメータを定める (式 (4.19)，式 (4.20))。また，効用 v_l は二者ペア l を構成する世帯 ij の関係により与える。

$$v_{l=ij} = \sum \alpha^z f^z(x_i^z, x_j^z) \tag{4.21}$$

ここで，世帯 i の属性 z の値を x_i^z で示し，パラメータは α^z で示す。

また，尤度関数 L は次となる。

$$L(\alpha^z, \mu_s) = \prod_t \prod_{k \in (\forall l, s=not)} (P(k) \sigma_t^k) \tag{4.22}$$

最尤法により，尤度 L を最大化するパラメータ α^z, μ_s を求める。 σ_t^k は二者ペア k の時刻 t での形成有無を表す。ただし，世帯が所属する空間上のグループ分割が一つに定まらないため，モンテカルロ法を導入する。具体的には，代表点をランダムに選定し，そのケースでのパラメータの算出を繰り返し，パラメータの平均・分散を求める。

4.3.2 実証分析

本項の実証分析では，前節と同じく 2004 年新居浜市豪雨災害における住民避難行動データを用いる。

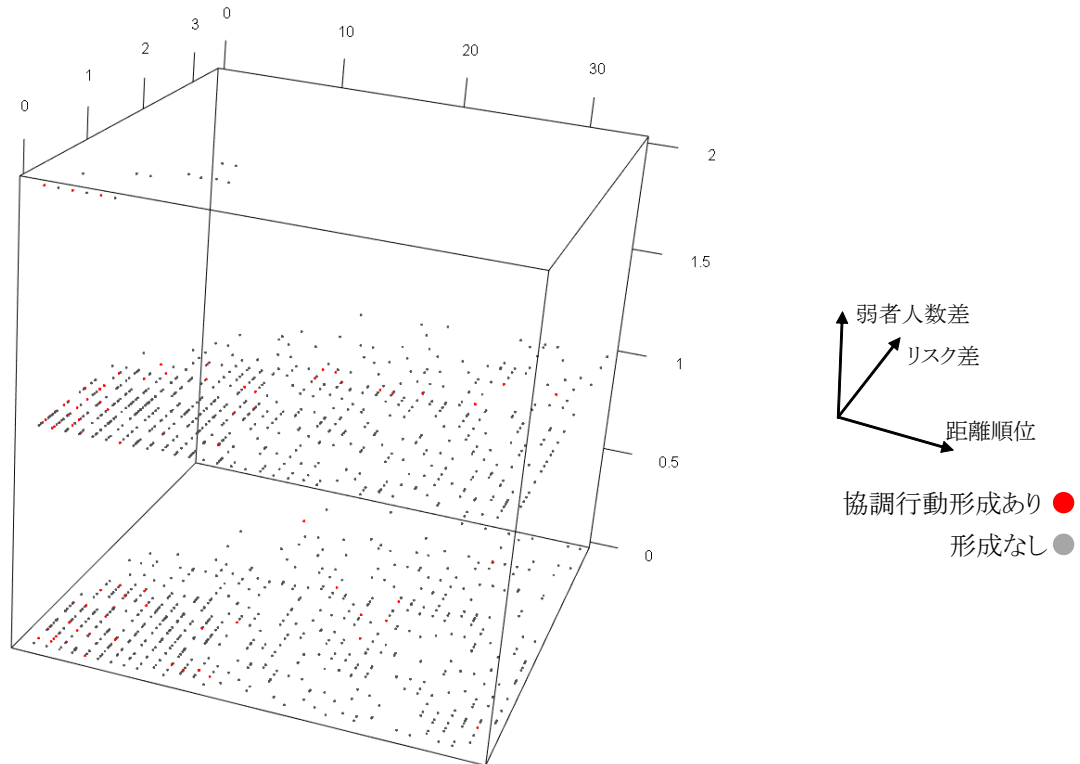


図 4.21 二者間特性 (弱者人数・被災リスク・距離) と協調行動形成

協調行動形成と二者間特性

ここでは、二者間特性と協調行動形成の基礎的な分析を行う。図 4.21 では、全協調行動形成候補の二者ペアの形成有無を赤点 (形成あり)、灰色の点 (形成なし) で示している。図 4.21 の横軸に距離順位、奥行きは被災リスクの差、鉛直方向は世帯内の災害弱者人数の差を示す。距離順位を用いているため、候補ペアは方向を持ち、全部で 1600 の点が図上にプロットされている。うち、リンク形成を示す赤丸は 126 である。ここで、災害弱者とは高齢者 (60 歳以上) と子供とする。この集計の対象は、西楠崎池地区、土石地区、東楠崎地区、唐津山地区の 4 つである。

まず、赤点は距離順位の小さい左側に多く固まっており、近隣世帯同士で協調行動が形成されている傾向がわかる。この近隣世帯同士の協調行動形成は、災害弱者の人数差がある方 (図の上側) が赤点の密度が高くなっている。近隣世帯の災害弱者の傾向は認識しやすく、利他的な不平等回避選好が働きやすいためと考える。この傾向を確かめるために、表 4.4 に属性別の協調行動形成割合に示す。距離順位 4 位以上では災害弱者差の有無別の形成割合は同程度だが、距離順位 3 位以下の場合には弱者差がある方がない場合に比べて、形成割合が 0.1 程度高くなっている。次に、リスク差に着目する。距離順位が大きい範囲においては、リスク差が高い方が赤点が多くなっている。距離が遠くてもリスク差は認識しやすく、差を埋めるための協調行動が行われている。ただし、リスク差は空間に依存しており、距離が近い場合はリスク差が小さくなる傾向がある点に留意が必要である。表 4.4 では、距離順位が小さい場合はリスク差が 1 未満の場合の形成割合が 1 以上の場合の 3 倍程度となっているが、距離順位が 4 以上の場合は同程度となっている。

表 4.4 二者間特性と協調行動形成割合

	距離 3 位以下	距離 4 位以上
弱者差あり	0.33 (37/112)	0.049 (37/762)
弱者差なし	0.24 (24/101)	0.051 (28/554)
リスク差あり	0.10 (2/21)	0.046 (28/601)
リスク差なし	0.31 (59/192)	0.052 (37/715)

*下段の括弧内の数字は (形成数 / 形成候補数) を示す

協調行動形成モデルの設定

次に、協調行動形成モデルのパラメータ推定結果を示し、協調行動形成の特徴を明らかにする。ここでは、モデル推定にあたって必要となる効用関数と空間グループの代表点、選択過程の設定について説明する。

まず、効用関数の定式化を行う。なお、ここでは時刻 t の表記を省略する。

$$v_{l=ij} = \alpha_{dis} y_{dis}^{ij} + \alpha_h y_h^{ij} + \alpha_r |x_r^i - x_r^j| + (\alpha_h |x_h^i - x_h^j| + \alpha_m |x_m^i - x_m^j| + \alpha_w |x_w^i - x_w^j|) * \frac{10}{y_{dis}^{ij}} \\ + \alpha_{did} y_{did}^{ij} + \alpha_{mx} \log(y_{mx}^{ij} + 1) + \alpha_{mn} y_{mn}^{ij} * \frac{y_{dis}^{ij}}{10} \quad (4.23)$$

$$v_{l=no} = \alpha_{rain} x_{rain}^{S_{ij}} + \alpha_{ca} x_{ca}^{S_{ij}} + C_{no} \quad (4.24)$$

α は推定パラメータ、 i, j は世帯を示す。

まず、協調行動形成効用 $v_{l=ij}$ について説明する。 y_{dis}^{ij} は ij 間の経路距離 (10m)、 y_h^{ij} は ij 経路上の利用されている住宅の線密度 (戸/m) を示す。これらは ij 間の移動コストを表す。 $|x_r^i - x_r^j|$ は ij 間の被災リスクの差を表す。差が大きいほど不平等回避選好が働きやすいと想定する。 $|x_h^i - x_h^j|$ 、 $|x_m^i - x_m^j|$ 、 $|x_w^i - x_w^j|$ は ij 間の世帯人数、世帯内男性人数、世帯内弱者人数を表す。差が大きいほど不平等回避選好が働きやすいと想定する。ただし、前述の基礎分析でも示したように、世帯属性に関する差は距離が離れると影響が薄れると考えられ、距離の逆数をかけている。 y_{did}^{ij} は ij 間で既に 1 度以上の協調行動が形成済みであることを示す。これは、不平等回避選好が形成により満たされていることを示す。 y_{mx}^{ij} は $\max(k_i, k_j)$ を示し、 k_i は世帯 i の協調行動形成数である。なお、これらの効用の設定は、人数の閾値の設定とその組み合わせからダミー変数を与えるなどのパターンも試し、試行錯誤の上で設定している。ネットワーク形成にあたり、ハブがよりリンクを集める性質がある場合はこのパラメータ α_{mx} は正になる。 y_{mn}^{ij} は $\min(k_i, k_j) \leq 1$ であれば 1 となる変数である。ネットワーク形成にあたり、形成数の少ない孤立点・端点はリンクを形成しづらい性質がある場合はこのパラメータ α_{mn} は負になる。なお、協調行動形成過程の初期段階では全ての世帯は形成数は 0 であるため、11 時以降のみに働くパラメータとする。また、 ij 間の距離が離れるほど孤立点・端点は認知されづらくなると考え、距離をかけている。

次に、非形成効用 $v_{l=no}$ について説明する。 S_{ij} は世帯 ij の所属する地区に共通の説明変数であること

を示す。地区の中での協調行動形成をモデル化しており、非形成効用は地区で共通する。 $x_{rain}^{S_{ij}}$ は降水量 ($10^{-1}\text{mm}/15\text{min}$)、 $x_{ca}^{S_{ij}}$ は地区内の世帯が避難勧告を入手している割合、 C_{no} は非形成の選択肢固有定数を示す。なお、世帯人数も地区外の外出先からの帰宅などにより時間変化するため、時間変化しない変数は距離 y_{dis}^{ij} 、住宅線密度 y_h^{ij} 、選択肢固有定数 C_{no} の3つのみである。

次に、各地区の空間グループの代表点の設定の仕方について説明する。代表点は地区内の世帯の緯度経度座標をランダムに抽出し、設定する。地区ごとの代表点の数は、地区内分析対象世帯数を代表点の数で割った値が3~5の間に収まるように設定する。それぞれの代表点の数は、西楠崎土石地区が8~9つ、池地区・東楠崎地区は3~4つ、唐津山地区は2~3つである。なお、隣接する世帯同士が同時に代表点に選定されないこととする。ランダムに抽出した代表点を用いた説明変数を算出し、パラメータ推定を行う。モンテカルロ法により、50回繰り返し行った結果について、パラメータ値・t値の平均・分散を求める。

次に選択過程を説明する。各地区で協調行動の形成有無は15分おきに選択されると仮定する。ある時間帯で二者ペア l の形成が選択された場合は引き続き選択が行われ、形成なしが選択されるまで続く。これにより、地区での協調行動の形成数を評価することができる。

協調行動形成モデルのパラメータ推定結果

パラメータ推定結果について説明する。モンテカルロ法を用いて算出しており、表4.5はパラメータ値とt値の平均と標準偏差を示す。なお、モンテカルロ法においては、全てのパターンでt値は得られている。まず、スケールパラメータは1以下で有意となっている。これは、空間相関を考慮したネスト構造が成立していることを示す。最終尤度も初期尤度に比べて大きく向上している。次に、形成ペア効用のうち、二者ペアの形成コストにかかわる説明変数である距離と住宅密度については、どちらも有意となっている。距離のパラメータは負となっており、離れるほど形成がしづらくなることを示す。経路上の住宅線密度は正となっており、利用されている住宅が経路上に多くある場合は距離が遠い負の影響を軽減することがわかる。次に、利他的な不平等回避選好に関するパラメータについて説明する。被災リスク差・世帯人数差・弱者人数差のパラメータは正で有意となっており、差が大きいほど、差を埋めるための協調行動形成が生じやすくなっている。ただし、男手人数差のパラメータは負で有意となっており、男手人数に差がないほど協調行動が形成しやすいことを示す。女性のみ世帯同士の協調行動形成（避難の相談など）が生じており、こうした影響だと考えられる。協調行動形成済のパラメータは負であるが、有意となっていない。複数回の協調行動形成を行う二者ペアもあるためだと考える。ネットワーク構造（次数）に関する二つもパラメータも有意となっていない。ただし、ハブ集中性は正、孤立性は負であり、パラメータの正負は想定と一致している。これは、協調行動形成数が多い世帯ほどより協調行動を形成しやすく、少ない世帯は形成しづらいという傾向である。形成なしの効用については、降水量のパラメータは負で有意となっている。これは降水量が多い時間に協調行動が形成されやすい傾向を示す。t値の標準偏差は0.1~0.3程度となっており、住宅線密度・弱者人数差は代表点の選定の仕方によっては有意とならない場合がある。逆に形成済のパラメータは代表点の選定の仕方によっては有意となる場合がある。この点については留意が必要である。

パラメータ推定によるモデル分析の結果をまとめる。まず、リスク差や世帯人数差、弱者人数差がある場合に協調行動が形成がされやすくなっている。これは利他的な選好が働くためであると考えられる。一方で、前節で分析したように、こうした協調行動形成により避難開始が遅れる場合がある。つまり、避難開始の早期化という観点からは必ずしも協調行動形成が正の影響を及ぼすとは言い切れない。降水量について、前節と合わせた考察としては、降水量が多い時間帯に協調行動が形成し、少なくなってから避難が始まったという傾向がモデルにより確認できた。ただし、ここではひとつの災害を対象としたケーススタ

表 4.5 パラメータ推定結果 (ネットワーク形成モデル)

	説明変数	パラメータ	(標準偏差)	t 値	(標準偏差)	
形成ペア	距離	-0.0673	(0.009)	-3.115*	(0.214)	
	効用	住宅線密度	4.838	(0.731)	1.866†	(0.321)
		被災リスク差	0.385	(0.025)	5.590*	(0.310)
		世帯人数差	0.0388	(0.006)	2.228*	(0.259)
		男手人数差	-0.0661	(0.010)	-2.110*	(0.255)
		弱者人数差	0.0466	(0.006)	1.708†	(0.173)
		形成済	-0.405	(0.044)	-1.542	(0.109)
	ハブ集中性	0.0174	(0.003)	0.794	(0.142)	
	孤立性	-0.332	(0.026)	-1.462	(0.085)	
形成なし	降水量	-1.266	(0.014)	-3.957*	(0.043)	
	効用	避難勧告入手割合	-1.812	(0.122)	-1.362	(0.090)
		形成なし固有定数	4.367	(0.230)	9.175*	(0.269)
		スケールパラメータ	0.573	(0.063)	7.166*	(0.359)
	サンプル数			199		
	初期尤度			-714.60		
	最終尤度			-439.54	(2.07)	
	ρ^2 値			0.385		
	修正済 ρ^2 値			0.367		

*: 5% 有意, †:10% 有意

ディであり、降雨量の推移や降雨時間帯の異なる他の豪雨災害に共通するとは限らない。また、空間構造については、距離が離れるほど協調行動が形成にくくなるが、経路上に住人がいる住宅があれば、距離の影響は薄まる。逆に捉えると、今後、集落内で空き家が増えると、災害時の協調行動が減る可能性があることを示唆している。

4.3.3 ネットワーク形成と避難確率の推移シミュレーション

ネットワーク形成と避難確率の推移のシミュレーションを行い、率先避難と避難勧告の影響を評価する。今節で構築した協調行動形成モデルにより世帯間のネットワーク構造とその形成確率を求める。そのネットワーク構造をインプットとし、前節の他者同調を考慮した避難開始選択モデルにより避難確率を求める。これにより、ネットワーク構造と避難確率の関係、またそのネットワーク構造の形成確率をあわせて分析する。

シミュレーションは、結果を簡潔に分析するため、3世帯に限定して行う。その設定は表 4.6 に示す。設定のイメージは図 4.22 である。世帯 1(図 4.22 の) は弱者世帯で被災リスク高い場所におり、世帯 2(図 4.22 の) は健常者世帯であるが被災リスクが高い場所におり、世帯 3(図 4.22 の) は健常者世帯で被災リスクが低い場所にいる。なお、雨量は 2mm/hr とし、各パラメータはモデル推定により得た結果を用いる。避難勧告はシナリオ設定に拠る。

シナリオとしては、次に 5 つを設定する。(1) が通常ケースである。

表 4.6 推移シミュレーションの設定

世帯	人数	男性人数	弱者人数	被災リスク	見回り	距離
H1	1	0	1	1.3	0	H1-H2: 25m
H2	2	1	0	1.3	1	H2-H3: 50m
H3	2	1	0	0.5	1	H3-H1: 50m

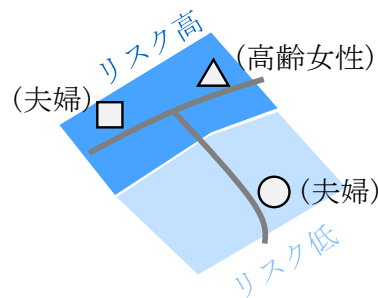


図 4.22 推移シミュレーションの設定イメージ

- (1) 避難勧告・率先避難なし
- (2) 世帯 2 が避難勧告入手
- (3) 世帯 1 が消防から避難勧告入手
- (4) 世帯 1 が率先避難
- (5) 世帯 2 が率先避難

推移シミュレーションの結果は図 4.23 となる。左上から右下方向にシナリオ (1) ~ (5) を並べる。は世帯 1, は世帯 2, は世帯 3 を示し、世帯間を結ぶリンクは協調行動形成を意味する。縦軸は世帯の避難確率 P_{ev} を示しており、率先避難者は確率を 1 とする。横軸はネットワーク構造の推移確率 P_{ij} を負の対数で示しており、横軸方向に離れるほどネットワーク構造の推移確率が低いことを意味する。3 者間で協調行動形成がない場合を $-\log P_{ij} = 0$ としている。世帯・リンクが同じ色の場合は、ネットワーク構造の組が同じであることを意味する。ネットワーク構造は、ノード 3 つを区別しており、全部で 8 つとなる。

まず、シナリオ (1) は、世帯間のリンクが増えることで、逆に避難確率が低くなる世帯が生じている。世帯 2 と世帯 3 が世帯 1 と協調行動を形成することで、避難確率は減少している。これは、弱者世帯 (世帯 1) の避難確率が低いことと健常者世帯の弱者世帯への不平等回避選好によって、協調行動形成に伴って健常者世帯の避難確率が低くなる多数派同調バイアスが生じている。三角形のネットワークと協調行動なしのネットワークを比較すると、避難確率の上昇は世帯 1 で 0.07、世帯 2 と 3 は 0.04 程度となっている。また、世帯 1 を中央とした線形ネットワークの場合は、協調行動なしの場合よりも世帯 2 と世帯 3 の避難確率が低下している。

次に、シナリオ (2) と (3) は、避難勧告を世帯 2 あるいは世帯 1 が入手した場合である。避難勧告の情報は、入手世帯との協調行動形成により伝搬する。まず、シナリオ (1) との比較すると、グラフ全体が左側に寄っており、協調行動形成の確率が高まっていることがわかる。避難確率もシナリオ (1) と比較して、全体的に上昇している。シナリオ (2) の場合は、世帯 1 を中央とした線形ネットワークの避難確率

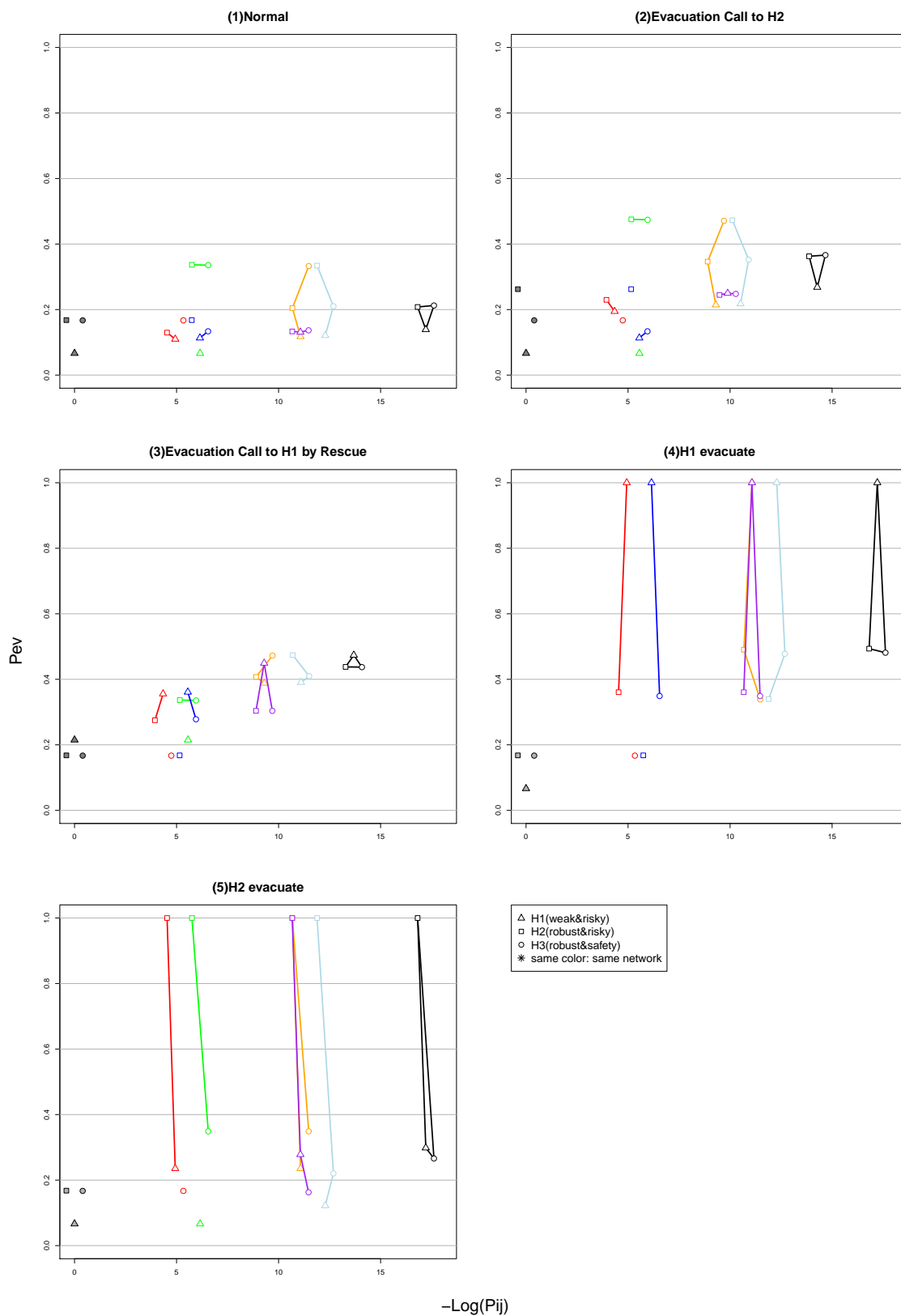


図 4.23 ネットワーク形成と避難確率の推移

は、協調行動なしの場合よりも世帯2は0.02程度低下しているが、他の2世帯は増加している。三角形のネットワークと協調行動なしのネットワークを比較すると、避難確率の上昇は世帯1で0.2、世帯2は0.1、世帯3は0.2程度となっており、避難確率が高まっている。シナリオ(3)の場合は、弱者世帯1への消防からの避難勧告の伝搬をシナリオとしており、さらに避難確率の上昇幅が大きい。弱者世帯1の避難確率が高まることで、健常者世帯の不平等回避選好による避難確率の低下を免れている。リンク0本よりもリンク1本、リンク1本よりもリンク2本のほうが避難確率が高い。三角形ネットワークの場合は、健常者世帯を中央とした線形ネットワークの端点となる健常者世帯のみ避難確率は低下する。三角形のネットワークと協調行動なしのネットワークを比較すると、避難確率の上昇幅は世帯1, 2, 3は0.26程度となっている。

最後に、シナリオ(4)と(5)は、率先避難を世帯1あるいは世帯2が行った場合である。なお、協調行動なしのネットワークでは、率先避難をしていない。また、ネットワークの推移確率は、その一つ手前のネットワーク状態では避難していないシナリオ(1)の状態を前提とし、推移確率を設定する。まず、率先避難により、ネットワーク構造の推移確率は変化していない。避難確率の上昇幅は、シナリオ(2)(3)よりも大きくなっている。次に、シナリオ(4)の世帯1が率先避難した場合とシナリオ(3)の世帯1が避難勧告を得た場合を比較する。ほぼすべてのケースで世帯の避難確率は増加している。例外となるのは、2リンクの線形ネットワークで、世帯1と逆側の端点となる世帯である(オレンジ線の点と水色線の四角点)。率先避難した世帯1と直接つながっていないため、影響が小さくなっている。次に、シナリオ(5)の世帯2が率先避難した場合とシナリオ(2)の世帯2が避難勧告を得た場合を比較する。世帯3の避難確率はシナリオ(5)のほうが全ての場合で小さい。次に、世帯1の避難確率は、三角形ネットワークと世帯2と直接リンクがない線形ネットワーク(水色)では低下し、他のネットワークでも上昇幅は小さい(0.05以下)。これは、健常者世帯2への他者同調の重み J が小さいため、相手が避難することによって自分の選択に影響する度合いが小さいためである。また、率先避難に関しては、1度避難を開始をしてしまえば、避難していない他世帯とのネットワーク形成は追加されない点にも留意が必要である。

以上をまとめる。まず、シナリオ(1)で示したように、避難確率が低い世帯間のネットワーク構築は、多数派同調バイアスに準じる状況を作り出しやすく、避難確率の向上にはつながらない。避難勧告の入手・伝搬と伴う場合は、ネットワークの形成推移も進みやすく、全般的に避難確率が上昇する。率先避難の場合は、他者の避難には他者同調の重みの大きさが影響するため、災害弱者の率先避難には他の健常者世帯が追従し、避難確率が大きく増加する。一方で、健常者世帯同士の同調作用は大きくないため、健常者1世帯のみの避難では連鎖しない可能性が高い。

4.4 本章のまとめと課題

本章では、他者同調ネットワークを考慮した避難開始選択の動的推移の実証分析を行った。また、分析にあたり、他者同調を考慮した避難開始選択モデルと空間上の二者間特性を考慮した協調行動形成モデルを構築した。モデル分析により得たパラメータを用いて、三世帯の関係ネットワークと避難開始選択の推移をシミュレーションし、多数派同調バイアス・避難勧告・率先避難の再現とその影響についての考察を行った。

他者同調を考慮した避難開始選択モデルは、協調行動ネットワーク上で隣接する他者から影響を受けるLocal Interaction modelを構築した。二者関係に応じた影響の度合いを定量化するため、他者同調の重みを構造化したモデルを構築し、実証分析を行った。まず、数値計算により、健常者の災害弱者に対する不平等回避選好により健常者の避難遅れが生じる現象や、災害弱者の未避難によりネットワーク全体の避

難が遅れる多数派同調の負の影響を、構築したモデルが再現できることを確かめた。2004年の新居浜市豪雨災害時の避難行動データを用いた実証分析により、他者同調を考慮したモデルが考慮しないモデルよりも妥当性が高く、想定していた他者同調が実際に生じていることを実証した。また、他者同調の重みに関する構造化については、世帯内の弱者人数の差が影響を及ぼすことがわかり、災害弱者世帯の未避難により健常者世帯の避難確率が低下している。また、推定したパラメータを用いた対象地区内の避難確率の推移の分析により、災害弱者同士のネットワークにより避難確率が低下しやすいこと、救助活動時間帯に地区全体の避難確率の低下が生じていること、避難世帯の避難前の他者ネットワークが限定的であるために居残り世帯への影響が限定されていることを明らかにした。

二者間特性を考慮した協調行動形成モデルとして、周辺他者による影響やリスク差の空間相関を考慮したモデルを構築した。ここでは、他者との同調は、協調行動を形成した相手と生じると想定し、二者間の協調行動形成有無を評価した。二者間の協調行動形成有無は集団内他者の行動に影響を受けると仮定し、集団全体における効用を定義し、かつ形成なしを評価可能なネットワーク形成モデルを構築した。さらに、空間的に近い二者ペア間での誤差項の相関を導入することで、空間特性を考慮した地区内の協調行動形成ペア選択モデルをGNL型の離散選択モデルで表現した。2004年の新居浜市豪雨災害時の避難行動データを用いた実証分析により、空間相関を考慮したモデル構造が妥当であることを示した。協調行動形成に影響を与える空間要因については、二者間経路距離はコストとなる一方で、経路上に住宅が多い場合はコストは軽減される。これは、逆に今後空き住宅が増えることで、協調行動が生じづらくなる可能性を示唆している。二者の属性差については、弱者人数・世帯人数の差が大きいほど協調行動が形成されやすいことを実証した。これらの属性の差や被災リスク差といった不平等回避選好に関わる要因が協調行動形成に寄与していることを明らかにした。

本章の最後では、協調行動形成モデルと避難開始選択モデルを合わせたシミュレーション評価を行った。シミュレーション評価では、避難確率の低い災害弱者世帯とのネットワーク接続により接続した健常者世帯の避難確率も低下する同調パイアスが生じること、避難勧告の入手・伝搬により協調行動形成が活発になり避難確率が增加すること、率先避難は二者間の同調作用の大きさが影響するために災害弱者の率先避難のほうが正の影響が大きいことを明らかにした。ただし、ここでの結果は対象とした避難行動データによるパラメータ推定結果を用いたシミュレーションであり、影響の感度については留意が必要である。

本章では、モデル構築と実証分析により、ネットワーク構造と他者同調作用による避難開始選択の推移構造を明らかにした。ただし、実証分析の範囲はひとつの災害に限定されており、それぞれの説明変数のパラメータが即座に他地区・他災害に適用できるわけではない。ここで、仮定したモデル構造の妥当性を実証分析を通じて明らかにしたことで、意思決定者のどの程度の避難確率を持っているかとその伝搬がどのように生じるかの理解が、避難の早期化にむけて重要であることが分かった。つまり、避難確率が低い世帯同士で集まる場合は多数派同調性によって避難遅れがより生じやすい。それに対して、避難実施上の課題となる災害弱者が先に避難すれば、周囲の健常者の避難確率を高めることができる。しかし、こうした率先避難も周囲への十分な伝搬がない場合は、あまり有効とはならない。また、同調を生む協調行動の形成は、避難勧告といった情報リソースの存在や属性の差といった利他的な不平等回避選好により促進される。こうした協調行動形成と避難開始選択のメカニズムを本章では明らかにした。

今後の課題を整理する。まず、適用面では、避難開始選択のLocal Interaction modelにおいて、影響を及ぼす他者の範囲をネットワークと空間近傍から外生的に与えているが、妥当な範囲についての検証が必要となる。ネットワーク形成モデルを用いて他者同調の範囲を与えることも必要となる。またこうした他者同調の範囲は、避難の動きが他者から観測しにくいために他者同調が生じづらい豪雨災害と避難の様

子が伝搬しやすい津波・火山等の災害で異なると考えられ、幅広い災害での検証が必要となる。モデル推定したパラメータによる施策評価などを行う場合にも、他地区他災害での検証が必要となる。協調行動形成により避難が促進されており、協調行動形成のルール構築も適用上は有効であると確認された。一方で、形成ルール構築は避難開始の早期化と協調行動形成の所要時間を正負の影響を考慮して評価すべきであり、適用上は協調行動の所要時間までを考慮する必要がある。

また、減災教育やリスクコミュニケーションといった取り組みの中で行われている普段からの防災コミュニティの形成や地域の中における役割分担といった内容については、今回の実証分析では利用データの関係で評価できていない。地域におけるコミュニティの形成については、ネットワーク形成モデルにおいて住民間の協調行動形成の生じやすさに反映する説明変数となりうる。また、普段からの二者の関係性や相手の立場が避難の他者同調にあたって影響を及ぼす可能性がある。利用データの不足を補うために、他者同調ネットワークにおけるロールや中心性を活用することも可能である。

次に、理論的には、まず、被災リスクなどの認知は個人特性に大きく依存すると考えられ、個人ごとの認知誤差を考慮したモデル構築も課題である。また、Interaction model は複数均衡解を持つ可能性があるモデルであり、均衡解を持つ場合と持たない場合の条件の整理が必要となる。ただし、ネットワーク構造の推移を前提とした Local Interaction model であり、静的な均衡解の持つ意味は比較的小さい。逆に、ネットワーク形成が確率的に推移していく中で、個々または全体の避難確率の推移の分岐や収束が生じることが想定される。そうしたネットワーク形成モデルとノードの状態変位を合わせた理論的発展が考えられる。

また、避難選択にあたって、全ての意思決定者が常に避難と非避難の選択肢をもつ状況を仮定している。しかし、実際は早い時間帯は避難の選択を考えていない人もおり、これは前章と共通の課題と言える。また、本章で扱っている避難の他者同調は、相手の避難選択への心理的な反応を対象としており、一緒に避難する又は一緒に避難したいができないという身体的な問題は扱えない。これも選択肢集合をいかに設定するかという問題と関係する。また、一緒に避難する/しないは協力関係の構築と関係あり、本章で用いた不平等回避の非協力ゲームによる記述ではなく、協力ゲームによる記述も可能である。

第5章

避難完了時刻とリスクに着目した共同避難の最適制御

5.1 共同避難と避難遅れ

本章では、共同避難による避難促進の効果を最大化するための動的制御方策の評価を行う。

第1章で示したように、共同避難には正負の影響がある。地区間や避難者間でリスク認知がある場合に、リスク認知が高い人が低い人と共同避難することで全体の避難が促進される。また、独力での避難が困難な災害弱者との共同避難でも同様である。東日本大震災でも世帯内のピックアップ行動という形で、避難時に家族と共同避難するために他の場所から自宅に戻る行動が多く行われた。こうした行動は、避難確率の低い人の避難を促進する反面、避難以外の移動発生により避難遅れや混雑が生じる。こうした負の影響をなくすためには、交差点や道路上で非避難方向の移動を制限する交通流制御方策がある。しかし、移動制限によって共同避難が行えなくなれば、避難確率が低下し、避難遅れが生じる。これが共同避難と交通流制御による正負の影響である。

そこで、本章では、移動制限を行うタイミングを最適化することで、共同避難の効果を最大化する制御方策を検討する。まず、制御を行うために必要となる目的関数についての整理を行う。その上で、避難完了時間最小化と総被災リスク最小化の目的関数について、動的制御を行うにあたっての基本的特性を示す。特に避難開始確率が低い状況では、共同避難による避難促進が必要になり、制御による負の影響が発生する。そのため、201Dのネットワークにおける数値計算により、最適な制御方策とその特性を示す。

本章では、制御方策と避難確率・共同避難の単純な関係を示すため、201Dの1交差点のシンプルなネットワークを用いる。意思決定者が避難場所に到達するまでの移動の過程は、最初にいた地区から直接避難の1トリップ型と、他地区に移動してから避難の2トリップ型(トリップチェーン型)の二つとする。トリップチェーン型の場合は、他地区(他者)の協調行動形成・避難促進に貢献できる反面、トリップが余計に生じるために道路混雑や避難遅れが生じる可能性が高い。1トリップ型の場合は、他地区への影響は生じない。また、避難トリップのみであり、道路混雑への影響は最小限に抑えられる。ただし、道路混雑は移動の過集中により生じるため、避難開始選択タイミングが集中すれば、道路混雑とそれによる避難遅れは生じうる。トリップチェーンによる移動を導入し、道路ネットワーク上の混雑の問題を定量化することで、共同避難の正負の効果を評価する。

なお、ここでの移動手段は車を想定しており、交通手段分担についての検討は行わない。避難にあたって、一定層の車利用者は存在せざるえず、それによる渋滞は生じうると考える。そのため、手段分担を考慮しない点に大きな問題はないと考える。また、経路選択の問題も扱わない。これにより避難選択の時間

の集中性と共同避難の評価をシンプルに行う。災害時の経路選択行動は、非均衡状態における意思決定者のリンクの旅行時間認知の記述方法によって、そのメカニズムは大きく異なるため、ここでは導入しない。

5.1.1 目的関数の特徴の整理

本項では、共同避難の制御にあたって、用いる目的関数の設定を行う。本章では動的交通流の評価を行うため、第2章2.4.3で整理した目的関数を活用する。既存研究を基に整理した目的関数は、総旅行時間最小化 $\min \int_0^T \sum_a x_a(t) dt$ 、避難完了人数最大化 $\max \int_0^T \mu_{out}(t) dt$ 、総被災リスク最小化 $\min \int_0^T \sum_e R_e(t) x_e(t) dt$ 、避難完了時刻最小化 $\min T$ の4つである。ここでは、まず、目的関数の特徴を整理する。

まず、総旅行時間最小化について説明する。この目的関数は被害あるいは被災リスクの最小化を直接的に意図していない。避難交通の所要時間の最小化が目的であり、これにより避難移動の効率化が達成される。これは被災リスクの空間的バラつきが小さく、被災リスクが一定の状態が長い時間続く場合に重要である。被災リスクが時空間上で変化しない場合は、移動の時刻や居場所によるリスクの違いは生じない。特に、移動に伴うリスク・コストが避難待ちのリスク・コストよりも大きい場合は、総旅行時間最小化の目的関数による評価が妥当である。具体には、ハリケーンからの避難が該当する。ハリケーンの到達は数日前から予測可能であるが、避難による経済活動の停止による損失を抑えるためにも避難移動の効率化が求められる。原子力災害からの避難においても適用可能であるが、その場合は、移動開始までにかかる時間を含めた評価とする必要がある。

次に、避難完了人数最大化と避難完了時刻最小化について説明する。両者ともに被災者数の最小化を直接的に意図している点が特徴である。また、最終的な避難完了人数又は避難完了時刻のみを対象としており、最適避難達成までの間の混雑状況等についてを規定する変数がない。そのため、最適解を満たす交通流の通行経路は複数となりうる。まず、避難完了人数最大化の目的関数はある時刻 T までの避難完了人数の最大化を目的としている。被災時刻 T が予測できる場合に、その時刻までの避難人数最大化 = 被災者最小化を達成できる。一方で、時刻 T 以降の避難は考慮しておらず、これにより全員の避難を前提としていない点は課題である。これは、時刻 T までに避難が不可能な人は全く避難しないほうが全体の避難完了人数最大化のためにはよいという解を持つことを意味する。そのため、避難によって全員が助かることを前提とすれば、この避難不可能な人の被災を防ぐために、避難場所や避難経路の増強といった交通管制に拠らない対策と合わせた検討が必要となる。次に、避難完了時刻最小化の目的関数について説明する。全員の避難を前提としている点が特徴となるが、図2.5に示すように、早い時間帯で被災すると、他の目的関数による対策よりも避難完了人数が少なくなる場合がある。この目的関数は、全員が避難できるという前提のない避難猶予時間が短い災害での適用が妥当である。また、被災リスクを考慮していないため、時空間上での被災リスクのバラつきが小さい、または被災リスクの変化が急激である災害への適用に適している。被災時刻の予測ができない、または制限時間以内での全員の避難が可能である場合には、避難完了時刻最小化による制御が妥当である。一方で、被災時刻 T が予測でき、限られた時間の中での全員の避難が難しい場合は、避難完了人数最大化による制御が考えられる。こうした目的関数を適用しうる具体の災害として、津波や土砂崩れ、火砕流を伴う噴火等が挙げられる。

最後に、総被災リスク最小化について説明する。この目的関数は、時空間上の被災リスクのバラつきを考慮できる点に特徴がある。時空間上の被災リスクのバラつきが大きい災害の場合は、被災リスクが大きい場所にいる人から避難する(又は被災リスクの小さい場所へ移動する)ことが必要となる。具体には、大規模洪水や山火事・大火からの避難が該当する。こうした災害は災害元(川や出火範囲)に近い場所は

表 5.1 目的関数の特徴の整理 (避難猶予時間の短い災害に着目)

	猶予時間短 への対応	全員避難の 方策検討	リスク分布 の表現	パラメータ 設定の課題
総旅行時間最小化 $\min \int_0^T \sum_a x_a(t) dt$	×		×	-
避難完了人数最大化 $\max \int_0^T \mu_{out}(t) dt$		×	×	T の設定
避難完了時刻最小化 $\min T$			×	-
総被災リスク最小化 $\min \int_0^T \sum_e R_e(t) x_e(t) dt$				R_e の設定

: 適, ×: 不適

被災リスクが大きく、離れた場所は被災リスクは小さい。また、リスクの時間変化も比較的遅いため、被災リスクの変化に対応した移動が可能となる。一方で、原子力災害からの避難等のように、リスクの時間変化が移動時間に比べて早い場合は、被災リスクの変化に対応した移動が難しい。また、この目的関数は、リスクを全ての場所・時間で等しいとすれば、総旅行時間最小化と同じ解を持つ。被災時刻 T 以降のリスクを無限大とすれば避難完了人数最大化と同じ解を得る。このようにリスクの設定によって表現の柔軟性は高まるが、時空間上でのリスクの設定が困難という問題がある。

本研究で想定している避難猶予時間が比較的短く (数時間程度)、避難必要距離が数 km 程度の災害からの避難への適用の観点から、目的関数の特徴を表 5.1 に整理する。整理の一つ目の項目は、避難猶予時間が短い災害への対応である。総旅行時間最小化が全員が避難できる前提での効率的な避難を行うための目的関数であり、不適である。次は、全員避難の方策検討である。避難完了人数最大化は前述したように全員避難を前提としていない。そのため、本研究で対象とする交通流制御方策や避難促進方策による避難計画の目的関数としては適さない。また、目的関数の算出にあたっては、被災時刻 T の設定が課題となる。次に、リスク分布については、総被災リスク最小化のみが対応している。本研究で対象とする災害の避難必要距離は数キロ程度と空間上の広がりがあるため、リスク分布を考慮することによる利点がある。リスクの時間変化は、災害種別や空間構造により異なり、リスク分布を考慮しなくてもよい場合もあると考える。また、リスク分布 R_e の設定は大きな課題となる。以上の整理から、本章では、避難完了時刻最小化と総被災リスク最小化を目的関数として用い、評価を行う。

5.2 交通流の動的制御の基本的特性

本節では、定式化により、避難完了時刻最小化と総被災リスク最小化を目的関数とした合流部制御の基本的な特性を示す。図 5.1 に示すように、2 起点 1 終点のネットワークにおける合流部制御を対象とする。制御としては、安全地帯への流出交通の制御と共同避難交通の制御を検討する。制御変数は動的連続量とする。2.4.2 で整理したように、動的連続量制御は静的離散量制御を包含し、静的離散量制御よりも最適な状態を達成できる。また、動的制御にはリアルタイムの観測情報が必要になるが、災害時においても活用可能性 [72][79] が示唆されている。災害時行動の予測の困難性や災害発生前の居場所自体が確率的であることを考えると、観測情報を用いた動的制御の必要性は大きい。

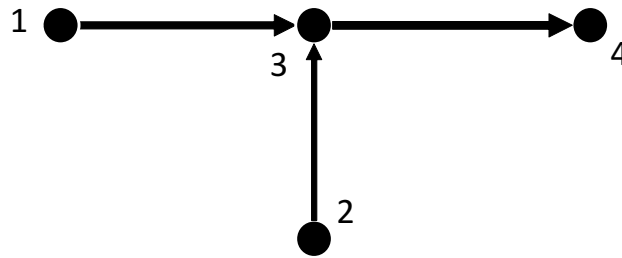


図 5.1 2 起点 1 終点のネットワーク

本節では、まず、5.2.1 において合流部における安全地帯への流出交通の動的制御の基本的特性を示す。最適解を得るために必要となる合流部における流出割合と残存交通量の関係性を得る。また、最適解を得るためには、ある条件を満たす避難開始時刻の分布が必要となる。避難開始時刻の分布が緩やかな場合には、最適解を得られず、避難開始の促進のための共同避難が必要となる。一方で、前述した正負の影響の問題により共同避難のためのトリップチェーンの制御が必要である。そこで、次に、5.2.2 において共同避難交通の動的制御の基本的特性を示す。共同避難トリップの交通量制御と目的関数値の関係の単調性を示し、単純な制御方策を得る。

本章で対象とする具体のネットワークは、図 5.1 の通りである。2 起点 1 終点の分岐のないネットワーク (合流部ボトルネック) である。起点ノード 1, 2 と合流ノード 3, 終点ノード 4 を設定する。リンク 34 から右側を安全地帯と想定し、全ての需要は最終的には終点ノード 4 に向かうとする。なお、分岐がないため、経路選択行動は生じない。

5.2.1 避難完了時刻最小化のための流出交通の動的制御

ここでは、安全地帯の流出交通の動的制御を検討する。時刻 t におけるリンク 13 とリンク 23 からリンク 34 への流出交通流率 $\mu_{13}(t)$, $\mu_{23}(t)$ の制御を考える。

動的交通流の記述

動的交通流の再現にあたり、交通量保存則、FIFO 原則、物理的な長さを持つ待ち行列 (Physical Queue) を既存研究 [61] に則り、導入する。それぞれの説明を簡単に行う。

まず、記号の定義を説明する。一般化した定式化を説明するため、ノードを i, j, k で示す。時刻 t までに起点 i から出発する累積交通量は $Q_i(t)$ とする。リンク ij への流入を表す累積交通量を次で定義する。

$A_{ij}(t)$: リンク ij に時刻 t までに流入した台数

$D_{ij}(t)$: リンク ij から時刻 t までに流出した台数

時刻 t での交通流率は、それぞれを微分して次となる。

$\lambda_{ij}(t)$: 時刻 t でリンク ij への流入交通流率 ($= \frac{dA_{ij}(t)}{dt}$)

$\mu_{ij}(t)$: 時刻 t でリンク ij からの流出交通流率 ($= \frac{dD_{ij}(t)}{dt}$)

交通流率は非負である。

$$\lambda_{ij}(t) \geq 0 \tag{5.1}$$

$$\mu_{ij}(t) \geq 0 \tag{5.2}$$

また，累積交通量と交通流率の関係は，微小時間 Δt を用いて，次となる．

$$A_{ij}(t + \Delta t) = A_{ij}(t) + \lambda_{ij}(t)\Delta t \quad (5.3)$$

$$D_{ij}(t + \Delta t) = D_{ij}(t) + \mu_{ij}(t)\Delta t \quad (5.4)$$

$A_{ij}(t)$ または $\lambda_{ij}(t)$ を定めることで，ネットワーク上の交通流配分を行う．終点は 1 つであり，ここでは目的地別の定式化は行わない．

次に，ノードにおける交通量保存則を説明する．ノード i における保存則は，次となる．

$$-\sum_h D_{hi}(t) + \sum_j A_{ij}(t) = Q_i(t) \quad (5.5)$$

ノード i への流入量は D_{hi} と Q_i ，流出量は A_{ij} で表す．ノード i が起点でない場合は， $Q_i(t) = 0$ である．単位時間あたりのノード i を起点とする交通量を $q_i(t) = \frac{dQ_i}{dt}(t)$ とし，式 (5.5) は次式と等価である．

$$-\sum_h \mu_{hi}(t) + \sum_j \lambda_{ij}(t) = q_i(t) \quad (5.6)$$

次に，リンクにおける First-In-First-Out 原則 (FIFO 原則) を説明する．リンクの FIFO とは，車両のリンクからの流出順序と流入順序は等しいということである．時刻 t にリンク ij を通過した車両の経験リンク旅行時間 $T_{ij}(t)$ を用いて，次式が成立する．

$$A_{ij}(t) = D_{ij}(t + T_{ij}(t)) \quad (5.7)$$

累積交通量 A, D は交通流率 λ, μ の関数である．そのため，リンク旅行時間は交通流率 λ, μ と関連付いた定義となる．

最後に，動的交通流における渋滞の再現のため，物理的な長さを持つ待ち行列 (Physical Queue) を説明する．Physical Queue を導入することで，渋滞の待ち行列が上流に向かって延伸する状況を再現できる．また，下流側リンクが渋滞の待ち行列により一杯になった場合 (先詰まりが生じた場合) に，上流側リンクからの流出が影響を受ける状況を再現できる．

まず，渋滞判定と可能流出入交通流率を説明する．Physical Queue の記述に關係するパラメータを定義する．

l_{ij} : リンク ij のリンク長

f_{ij}^{max} : リンク ij の最大交通流率

k_{ij}^{max} : リンク ij の渋滞時の交通密度

w_{ij} : リンク ij の自由流側の Wave Speed

w'_{ij} : リンク ij の渋滞流側の Wave Speed

なお，ここでリンク内はすべて同じ道路状況である．リンク jk が全体が渋滞しているかを判定する $\beta_{jk}(t)$ は次式で与えられる．

$$\beta_{jk}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } A_{jk}(t) > D_{jk}(t - \frac{l_{jk}}{w'_{jk}}) + k_{jk}^{max} l_{jk} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5.8)$$

リンク jk の累積流入台数 A と，累積流出台数 D とリンク上がすべて渋滞列で占められた場合の車両台数の和を比較して，判定する．この先詰まり判定パラメータ $\beta_{jk}(t)$ を用いて，下流リンク jk への可能流出交通流率 Y_{jk} は次で与える．

$$Y_{jk}(t) = (1 - \beta_{jk})f_{jk}^{max} + \beta_{jk}(t)\mu_{jk}(t - l_{jk}/w'_{jk}) \quad (5.9)$$

先詰まりが生じていない場合は最大交通流率により与える．先詰まりが生じている場合は，リンク上流端からの流出台数により与える．次に，時刻 t でリンク ij から可能流入交通流率 $X_{ij}(t)$ は次で与える．

$$X_{ij}(t) = \begin{cases} f_{ij}^{\max} & \text{if } A_{ij}(t - l_{ij}/w_{jk}) > D_{ij}(t) \text{ or } \lambda_{ij}(t - l_{ij}/w_{ij}) > f_{ij}^{\max} \\ \lambda_{ij}(t - l_{ij}/w_{ij}) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5.10)$$

リンク ij 上で渋滞が発生している場合は，最大交通流率が上流リンクから下流リンクへの流入可能交通流率となる．それ以外の場合は，リンク ij の下流端の流入交通流率と上流端への伝搬速度を用いて与える．

リンク ij の流出交通流率 $\mu_{ij}(t)$ を定式化する．流出交通流率 $\mu_{ij}(t)$ は，下流リンクへの可能流出交通流率 $Y_{jk}(t)$ と上流リンクからの可能流入交通流率 $X_{ij}(t)$ を比較し，与える．まず，単純に，ノード j が2本のリンクを結合する直線ノードの場合は次となる．

$$\mu_{ij}(t) = \min\{X_{ij}(t), Y_{jk}(t)\}, \quad j : \text{line} \quad (5.11)$$

可能流出交通流率 $Y_{jk}(t)$ と可能流入交通流率 $X_{ij}(t)$ を比較し，小さいほうの値がリンク ij の流出交通流率 $\mu_{ij}(t)$ となる．次に，本章で対象とするノード j が合流ノードの場合は次となる．

$$\mu_{ij}(t) = \min\{X_{ij}(t), \eta_{ij}(t)Y_{jk}(t)\}, \quad j : \text{merge} \quad (5.12)$$

$$\eta_{ij}(t) = \begin{cases} 1 - \sum_{i' \neq i} X_{i'j}(t)/Y_{jk}(t) & \text{if } \sum_{i' \neq i} X_{i'j}(t) < (1 - \eta_{ij}^*)Y_{jk}(t) \\ \eta_{ij}^* & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5.13)$$

η_{ij}^* は，ノード j におけるノード i からの交通流の合流率の参照値パラメータであり，本来は交差点形状等で決定する．可能流出交通流率 $Y_{jk}(t)$ を下流側の各リンクで分配する形となっている．式 (5.13) は，分配された流出交通流率に満たない流入交通流率の合流リンクがある場合は，それ以外の合流リンクからの流入が増加する形となっている．本章では，この $\eta_{ij}(t)$ ， $\mu_{ij}(t)$ の制御により，避難完了時刻最小化を達成する．

以上のように，Physical Queue と交通流率の関係を記述する．なお，分岐部の流出交通流率やリンク旅行時間の定義も可能である．しかし，以降では特に用いないため，ここでは言及しない．それらも含めた詳細な定式化は，Kuwahara and Akamatsu(2001)[61] を参考とする．

最適制御理論の導入

本項では，避難完了時刻最小化を目的関数として，安全地帯への流出交通の最適動的制御を検討する．終端時刻が定まらない問題において，動的制御の最適解の求解とその実装を行うためには，演繹的(前向き)な解の導出方法が必要となる．そこで，ここでは避難完了時刻最小化の動的制御の最適解の導出には最適制御理論を用いる．これにより，避難完了時刻 T の最小化が可能であり，制御のスイッチングにも対応できる．

まず，最適制御理論の定式化について，詳述する．なお，以降では，複数の状態変数，複数の制御変数の場合についての最適制御理論の定式化を説明する．

最適制御理論では時間変数 t と状態変数 $y(t)$ 以外に制御変数 $u(t)$ を導入し，時間軸上の最適制御変数経路 $u^*(t)$ を求める．これにより，最適状態変数経路 $y^*(t)$ が導出され，また時間軸上での目的関数の最適化を行う．最適化にあたって Pontryagin の最大値原理を用い，最適制御変数経路を求める．なお，制御変数は非連続であってもよい．状態変数は連続である(ただし鋭点が存在してもよく，状態変数は区分的に連続となる)．制御変数が非連続でもよい点が，このアプローチの利点の一つである．また，制御変数を直接求める形の問題構造となっている．また，後述するが，連続時間の積分形の最適化問題の目的関数を，非積分系の全ての時間における最適化問題へと変換できる点も，利点である．

まず、最適制御の最も基本的な問題を記述する．状態変数ベクトル $\mathbf{y}(t) = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)(t)$ と制御変数ベクトル $\mathbf{u}(t) = (u_1, \dots, u_i, \dots, u_n)(t)$ を用いて、次となる．

$$\max_{\mathbf{u}} \left(V = \int_0^T F(t, \mathbf{y}, \mathbf{u}) dt \right) \quad (5.14)$$

subject to

$$\frac{dy_j}{dt}(t) = f^j(t, \mathbf{y}, \mathbf{u}), \quad \forall j \quad (5.15)$$

$$\mathbf{y}(0) = C, \quad \mathbf{y}(T) = \text{自由} \quad (C, T \text{ は所与}) \quad (5.16)$$

$$\mathbf{u}(t) \in \mathcal{U} \quad (5.17)$$

式 (5.14) は目的関数の最大化、式 (5.15) は状態変数の運動方程式、式 (5.16) は初期条件と終端条件、式 (5.17) は制御変数の範囲を示している．運動方程式により、最適制御変数経路 \mathbf{u}^* と最適状態変数経路 \mathbf{y}^* は 1 対 1 に対応する．

最大値原理を用いて、この問題は次の最大化問題となる．ハミルトニアン H を導入する．

$$\max_{\mathbf{u}} H(t, \mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{s}), \quad \forall t \in [0, T] \quad (5.18)$$

$$(H \equiv F(t, \mathbf{y}, \mathbf{u}) + \sum_j s_j f^j(t, \mathbf{y}, \mathbf{u})) \quad (5.19)$$

subject to

$$\frac{dy_j}{dt} = \frac{dH}{ds_j}, \quad \forall j \quad (5.20)$$

$$\frac{ds_j}{dt} = -\frac{dH}{dy_j}, \quad \forall j \quad (5.21)$$

$$[H]_{t=T} = 0 \quad (y_T \text{ 固定の場合}) \quad (5.22)$$

$$s_j(T) = 0 \quad (T \text{ 固定の場合}) \quad (5.23)$$

\mathbf{s} は随伴変数である．式 (5.20) は状態変数の運動方程式である．式 (5.21) は随伴変数の運動方程式である．式 (5.22)、式 (5.23) は横断性条件である．元の問題が時間積分した関数の最大化であるのに対し、最大値原理を用いたハミルトニアンの最大化は時間積分のない最大化問題となる．

問題の定式化

避難完了時刻最小化のための動的流入制御問題を定式化する．避難交通流には動的交通流を用い、求解には最適制御理論を用いる．対象とするネットワークは図 5.1 であり、リンク 34 への流出交通流率 $\mu_{13}(t)$ 、 $\mu_{23}(t)$ を制御対象とする．

まず、状態変数、運動方程式と目的関数を設定する．状態変数は、リンク 34 の累積流入交通量 $A_{34}(t)$ とする．運動方程式にはノード 3 の交通量保存則を用い、次となる．

$$\frac{dA_{34}(t)}{dt} = \lambda_{34}(t) = \mu_{13}(t) + \mu_{23}(t) \quad (5.24)$$

目的関数は全員避難完了時刻 T の最小化である．

$$\min T = \min \int_0^T 1 dt \Leftrightarrow \max(-T) = \max \int_0^T -1 dt \quad (5.25)$$

これは、式 (5.19) の場合の $F = -1$ の形である．最適制御理論において、時間最適化問題と呼ばれる問

題である．また，終端時刻は定められず，全員避難完了が終端となる．終点条件は次である．

$$A_{3,4}(T) = \sum_{1,2} Q_i(T) \quad (T \neq 0) \quad (5.26)$$

全起点からの交通量がノード 3 を通過した時点で全員避難完了となる．なお， $Q_i(t)$ は所与とする．

ハミルトニアンを与え，最大値原理により最適制御問題を定式化する．まず，ハミルトニアンは次となる．

$$H = -1 + s_{34}(t)(\mu_{13}(t) + \mu_{23}(t)) \quad (5.27)$$

最適制御問題は次となる．

$$\max_{\mu} H \quad \forall t \in [0, T] \quad (5.28)$$

subject to

$$\frac{dA_{34}}{dt} = \frac{dH}{ds_{34}} \quad (5.29)$$

$$\frac{ds_{34}}{dt} = -\frac{dH}{dA_{34}} \quad (5.30)$$

$$[H]_{t=T} = 0 \quad (5.31)$$

水平的終点直線問題であるため，横断性条件は式 (5.22) の y_T 固定の場合の条件となる．また，状態変数 $A_{34}(t)$ の端点条件は次となる．

$$A_{34}(0) = 0, \quad A_{34}(T) = Q_{14}(T) + Q_{24}(T) \quad (5.32)$$

解の導出

動的流入の最適制御の解（以降では，最適制御経路と呼ぶ）を導出する．まず，動的交通流の制約条件から解の範囲を限定する．合流ノード 3 における可能流出流入交通流率の制約式 (5.12) と非負制約 (式 (5.2)) により，全ての $t \in [0, T]$ において次の制約条件が必要となる．

$$0 \leq \mu_{13}(t) \leq X_{13}(t), \quad 0 \leq \mu_{23}(t) \leq X_{23}(t) \quad (5.33)$$

$$\mu_{13}(t) + \mu_{23}(t) \leq Y_{34}(t) \quad (5.34)$$

流出交通流率 μ_{13}, μ_{23} はリンク 13, 23 の可能流入交通流率以下である必要がある．また，流出交通流率の和が可能流出交通流率 Y_{34} 以下であることも同時に必要である．

次に，不等式制約を持つハミルトニアン H をラグランジアン L に拡張する．

$$L = H + \theta_{13}(t)(X_{13}(t) - \mu_{13}(t)) + \theta_{23}(t)(X_{23}(t) - \mu_{23}(t)) + \theta_3(t)(Y_{34}(t) - \mu_{13}(t) - \mu_{23}(t)) \quad (5.35)$$

ここで， θ はラグランジュ乗数であり， t の関数である． L の最大化の条件は KKT 条件と非負制約により，全ての $t \in [0, T]$ に対して，次となる．

$$\frac{dL}{d\mu_{ij}} \leq 0, \quad \mu_{ij} \geq 0, \quad \mu_{ij} \frac{dL}{d\mu_{ij}} = 0 \quad (ij : 13, 23) \quad (5.36)$$

$$\frac{dL}{d\theta_{ij}} \geq 0, \quad \theta_{ij} \geq 0, \quad \theta_{ij} \frac{dL}{d\theta_{ij}} = 0 \quad (ij : 13, 23, 3) \quad (5.37)$$

$$\frac{dA_{34}}{dt} = \frac{dL}{ds_{34}}, \quad \frac{ds_{34}}{dt} = -\frac{dL}{dA_{34}} \quad (5.38)$$

式 (5.31), 式 (5.32)

以上から求められる最適制御経路が十分であるために、制約条件が制約限定条件を満たすこととアローの十分条件を満たすことが必要となる。前者については、制約条件式 (5.33), (5.34) が制御変数 μ_{ij} に対して線形であるため、満たされる。後者については、ラグランジアン L が、全ての $t \in [0, T]$ に対して、 (A, μ) について線形であるため、満たされる。

次に、横断性条件に着目する。 H は時刻 t を明示的に含んでいない自律的問題であり、式 (5.31) より、次が成り立つ。

$$\frac{dH}{dt} = 0, \forall t \Leftrightarrow H(t) = H(T) = 0, \forall t$$

式 (5.27) と非負制約 (式 (5.2)) より、次となる。

$$s_{34}(t) = \frac{1}{\mu_{13}(t) + \mu_{23}(t)} > 0 \quad (5.39)$$

また、式 (5.36) の第 3 式は、 L の微分を展開すると次となる (t の表記は省略)。

$$\mu_{13} \frac{dL}{d\mu_{13}} = \mu_{13}(s_{34} - \theta_{13} - \theta_3) = 0 \quad (5.40)$$

ここで、 $s_{34} > 0$ より、 $\mu_{13} > 0$ のとき、 $\theta_{13} = 0$ と $\theta_3 = 0$ は同時に成立しないことがわかる。これは、 θ_{23} と θ_3 の関係についても同様である。この関係を条件 A とする。

次に、ラグランジュ乗数に着目する。まず、式 (5.37) の第 3 式の微分を展開する。

$$\theta_{13} \frac{dL}{d\theta_{13}} = \theta_{13}(X_{13} - \mu_{13}) = 0 \quad (5.41)$$

$$\theta_{23} \frac{dL}{d\theta_{23}} = \theta_{23}(X_{23} - \mu_{23}) = 0 \quad (5.42)$$

$$\theta_3 \frac{dL}{d\theta_3} = \theta_3(Y_{34} - \mu_{13} - \mu_{23}) = 0 \quad (5.43)$$

このとき、仮に $\theta_3 = 0$ とすると、条件 A より、 $\theta_{13} \neq 0$ かつ $\theta_{23} \neq 0$ となる。式 (5.41)、式 (5.42) より、 $\mu_{13} = X_{13}$ 、 $\mu_{23} = X_{23}$ を得る。式 (5.34) が常に成立するためには、 $\mu_{13} + \mu_{23} = X_{13} + X_{23} \leq f_{13}^{max} + f_{23}^{max} \leq Y_{34}$ が成り立つ必要がある。ここで、リンク 34 の先づまりは考えないため、 $Y_{34} = f_{34}^{max}$ である。 $\theta_3 = 0$ とした場合は、 $f_{13}^{max} + f_{23}^{max} \leq f_{34}^{max}$ が成り立てば、解として $\mu_{13} = X_{13}$ 、 $\mu_{23} = X_{23}$ を得る。

次に、 $f_{13}^{max} + f_{23}^{max} \geq f_{34}^{max}$ の場合は、 $Y_{34} - \mu_{13} - \mu_{23} < 0$ となる。このとき、式 (5.37) の第 2 式である $\frac{dL}{d\theta_3} \geq 0$ に矛盾する。よって、背理法により、 $\theta_3 \neq 0$ となる。このとき、式 (5.43) と式 (5.33) より次の関係が成立する。

$$\mu_{13} + \mu_{23} = Y_{34} \quad (5.44)$$

$$\max(0, Y_{34} - X_{23}) \leq \mu_{13} \leq X_{13} \quad (5.45)$$

$$\max(0, Y_{34} - X_{13}) \leq \mu_{23} \leq X_{23} \quad (5.46)$$

これらは、最適制御経路の必要条件となる。

最適制御経路の特性

ここまで整理したように、リンク 13,23,34 の容量の大小関係によって最適制御経路は異なる。共通して必要となる条件は、上流側または下流側のうち、最大容量が少ない側の最大容量を流出させることで

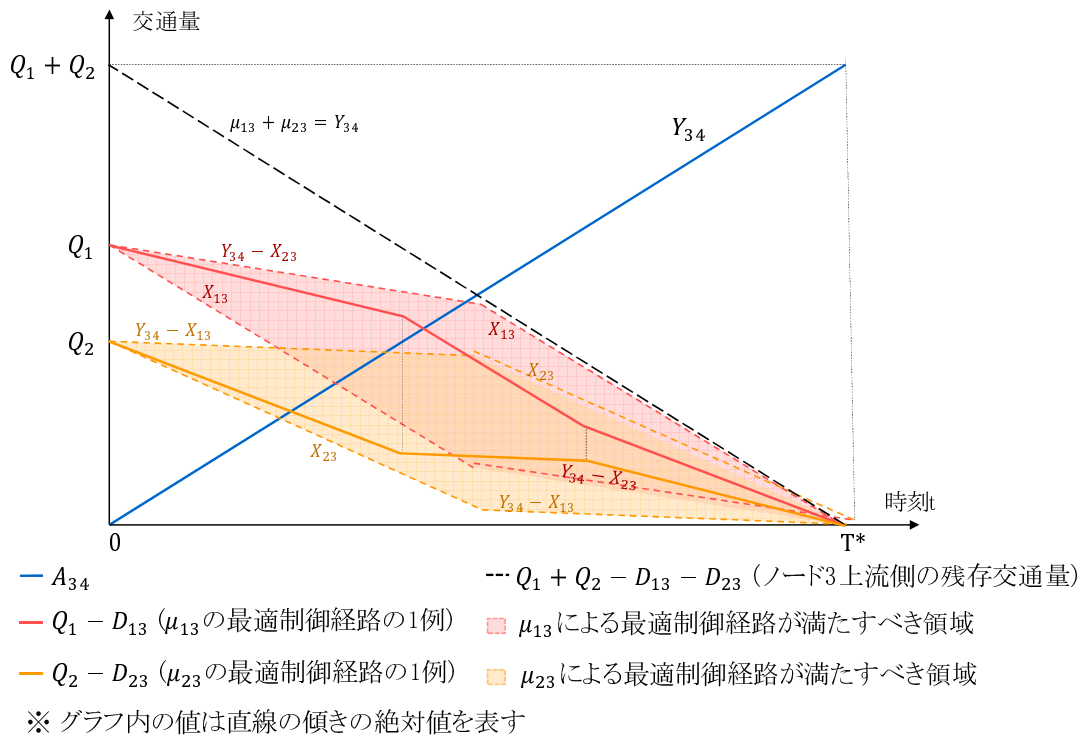


図 5.2 必要条件を満たす最適制御経路の領域

ある．また，リンク 13,23 からの流入量に対してリンク 34 の容量が小さい場合 ($f_{13}^{max} + f_{23}^{max} \geq f_{34}^{max}$) は，上流リンクからの流出交通流率の最適制御経路は幅を持つ．

ここでは，式 (5.44) ~ (5.46) を用いて，最適制御経路が幅を持つ場合の解の特性を明らかにする．なお，ここでは， $0 \leq Y_{34} - X_{23}$ かつ $0 \leq Y_{34} - X_{13}$ を仮定する．このとき，リンク 13 からの流出とリンク 23 からの流出が同時に終わることが必要となる．そのため，次式も必要条件となる．

$$Q_1 - D_{13}(t) > 0 \quad (0 \leq t < T) \tag{5.47}$$

$$Q_2 - D_{23}(t) > 0 \quad (0 \leq t < T) \tag{5.48}$$

これらの必要条件を満たす μ_{13} と μ_{23} の最適制御経路の領域が図 5.2 である．まず，式 (5.44) より $\mu_{13} + \mu_{23}$ は黒太破線と一致する．このとき，リンク 34 の累積流入交通量 A_{34} は青線となり，全員避難完了時刻の最適解は $T^* = \frac{Q_1 + Q_2}{Y_{34}}$ となる．次に，図 5.2 の薄赤色の平行四辺形は μ_{13} の最適制御経路の領域，薄橙色の平行四辺形は μ_{23} の最適制御経路の領域である．領域の外周の破線は，式 (5.45)，式 (5.46) より与えている．最適制御経路の領域とは，この領域内に制御経路が入っていれば最適解 T^* を達成できることを意味する．図 5.2 の赤実線と橙実線は最適制御経路の 1 例である．式 (5.44) の条件により，最適制御経路は μ_{13} が変化すれば μ_{23} も同時に変化する経路となる．

最適制御経路が領域をもつ意味を明らかにするため，動的制御と静的制御 (固定型制御) の最適経路を比較する．これは，リンク 13, 23 とともに待ち行列ができていない状況である．動的制御と静的制御の比較を図 5.3 に示す．図中の赤破線・橙破線は静的制御による最適経路を示す．静的制御において，避難完了時刻 T^* を達成できる経路は破線で示す 1 つのみである．また，図 5.3 の鎖線で示す流入交通量であった場合は，静的制御では T^* を達成できない．これは， $0 \leq t \leq t_1$ における流入交通流率 λ_{13} が静的最適制御 μ_{13} よりも小さいからである．つまり，流入量よりも (最適制御による) 流出量が多くなってしまっており，最適制御は実現不可能である．対して，動的制御の場合は領域内に最適制御経路が入ればよく， T^*

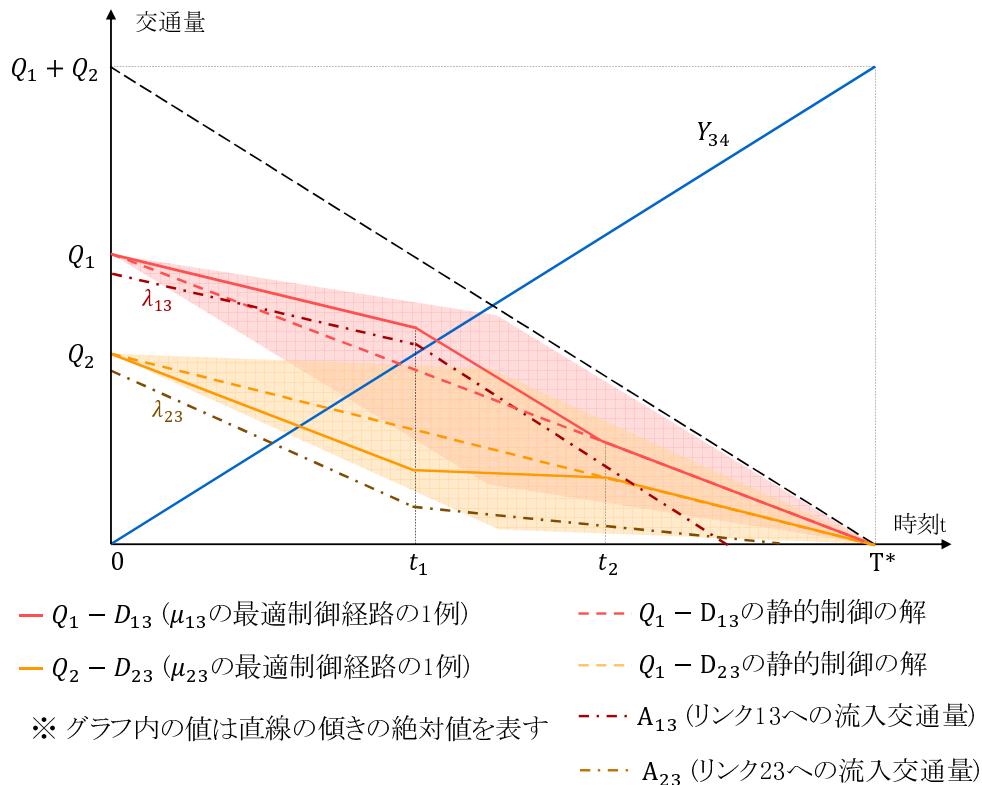


図 5.3 動的制御と静的制御 (固定型制御) の比較

をこうした流入交通量においても達成できる．図 5.3 では，次のように制御している．まず， $0 \leq t \leq t_1$ における流入交通流率 λ_{13} が小さい時間帯は μ_{13} を小さくし，その分， μ_{23} を大きくする．次に， t_1 以降は λ_{13} が大きくなるため， T^* で同時に避難完了するように， μ_{13} を大きく， μ_{23} を小さくしているまた，図の動的最適制御経路は 1 例であり，これ以外の経路でも T^* を達成できる．動的制御により最適制御経路の領域をもつため，流入交通流率が小さい時間帯があったとしても，避難完了時刻の最小化 T^* を達成することができる．ただし，領域に入らない流入交通流率の場合は，避難完了時刻 T^* を達成できない．流入交通流率はノード 1 又は 2 における避難開始確率によって定まり，そうした場合は避難完了時刻の最小化のためには避難開始の促進が必要となる．

なお，ここで検討の対象としなかった $0 \geq Y_{34} - X_{23}$ または $0 \geq Y_{34} - X_{13}$ の場合は，一方の上流リンクにより下流リンクの容量を上回っており，同時に流出を終える制御は必要ない．また， $f_{13}^{max} + f_{23}^{max} \leq f_{34}^{max}$ となる場合，上流リンクからの流出量が常に最大となる場合が $\min T$ であり，上流側の 2 本のリンクの交通流率の間に相互作用は生じない．こうした場合についても，流入交通流率が小さい場合は避難完了時刻の最小化は達成されない．そのため，避難完了時刻の最小化には，避難開始の促進が必要となる．

総被災リスク最小化を目的関数とした場合

次に，総被災リスク最小化の目的関数とした場合を考える．ここでは，次項と合わせて，簡単にリンク 13 の被災リスクを $r_{13} = R_{13}t$ ，リンク 23 の被災リスクを $r_{23} = R_{23}t$ と，時間に比例とする．また，リスクの大小関係は $R_{13} \leq R_{23}$ とする．この状況で， $X_{13} + X_{23} \geq Y_{34}^{max} (f_{13}^{max} + f_{23}^{max} \geq f_{34}^{max})$ となる場合は，リンク 23 側の交通流を優先して流出させればよい．これは，次の二つの式を用いて説明できる．

まず，時刻 t において，流出により減少するリスクは次となる．

$$r_{red} = R_{13}t * \mu_{13} + R_{23}t * (Y_{34} - \mu_{13}) \quad (5.49)$$

これは， μ_{13} が最小のときに最大となる．また，次期に生じるリスクは次となる．

$$r_{res} = R_{13}(t + \Delta t) * (Q_1(t) - \mu_{13}) + R_{23}(t + \Delta t) * (Q_2(t) - Y_{34} + \mu_{13}) \quad (5.50)$$

これは， μ_{13} が最小のときに最小となる． μ_{23} を優先し， μ_{13} を最小とすることで，減少リスクの最大化（残留リスクの最大化）を得ることができる．また，図で示した領域の中で， μ_{13} を制御する場合は，避難完了時刻最小化の解の中での総被災リスクの最小化の解を得る．また，これ以外のリンク容量の大小関係の場合でも，同様の解を得る．

5.2.2 共同避難交通の動的制御

次に，共同避難による避難促進を考慮した場合の動的制御について検討する．前項で示したように避難開始割合が小さい場合には最適解を得ることはできないため，避難促進方策が必要となる．その中でも，共同避難は非避難者と合流して一緒に避難するという直接的な避難促進方策である．これは世帯内のピックアップ行動といった形で東日本大震災において多く見られ，災害弱者の避難のためにも共同避難は必要である．また，移動コストの大きい地区間移動の動機づけとしては，（間接的な避難促進行動である）情報伝搬よりも（直接的な避難促進行動である）共同避難のほうが強い．そこで，ここでは共同避難を地区間の避難促進方策と捉え，その評価を行う．

共同避難選択の設定

リスクと共同避難トリップの設定について説明する．まず，リスクの設定は，前項と同様にリンク 13 の被災リスクを $r_{13}(t) = R_{13}t$ ，リンク 23 の被災リスクを $r_{23}(t) = R_{23}t$ とし，リスクの大小関係は $R_{13} \leq R_{23}$ とする．時間に正比例し，リンク 23 のほうがリスクが大きいとする．リンク内の位置によりリスクは変わらない設定としており，十分大きい終端時刻 T までの総被災リスクの合計 R は次となる．

$$R = \int_0^T \left(N_{13}(t)r_{13}(t) + N_{23}(t)r_{23}(t) \right) dt \quad (5.51)$$

ここで，時刻 t におけるリンク ij 上の移動者数と滞在者数の和を $N_{ij}(t)$ とする．この N では，特に共同避難交通か通常の避難交通かを区別しない．

次に，共同避難トリップを選択するのは，リスクの小さいノード 1 から出発した避難者のみとする．ノード 1 から出発する避難者は 1-3-4 又は 1-3-2-3-4 の移動を行い，ノード 2 から出発する避難者は 2-3-4 の移動を行う．共同避難に対する制御としては，共同避難トリップ 1-3-2-3-4 の移動を制限するためにノード 3 からノード 2 への移動を制限する．また，リンク 13 を通行する避難者の量，またそのうち共同避難を選択する割合は制御の対象外とする．選択した避難者の実際のノード 3 からノード 2 への移動を制限し，そのままノード 4 に向かわせることのみが制御によってできることである，つまり，各時刻で共同避難を選択する避難者数は外生的に決まり，ノード 3 から 2 への交通量は制御により決定できる．また，共同避難は，ノード 2 において 1 人の避難者をピックアップし，一緒に避難する行動とする．なお，ノード 2 到着以前のノード 2 の避難者には影響を与えない．また，共同避難の必要性がある状況を想定しており，各時刻において，ノード 1 の避難・共同避難選択確率のほうがノード 2 の避難選択確率よりも高いとする．

総被災リスク最小化における共同避難制御

ここでは、目的関数を総被災リスク最小化とした場合の動的制御について検討する。

前項で述べたように、終端時刻が定まらない問題において、動的制御の最適解の求解とその実装を行うためには、演繹的(前向き)な解の導出方法が必要となる。目的関数を総被災リスク最小化とする場合は、積分区間を $0 \sim T$ とするため、終端時刻 T を便宜的に設定する。一方で、全員避難を前提とする避難行動の終端時刻は本来は明らかではない。そこで、まず、総被災リスク最小化における共同避難制御の問題は、今期と次期の比較による演繹的(前向き)な求解が可能であることを示す。

まず、ある時刻 t において、ノード 3 において共同避難制御を行った結果、避難トリップを行うリンク 32 への流入量を $s'_{32}(t) > 0$ とする。ここで、仮に、 $s_{32}^{max}(t) > s'_{32}(t)$ と $s(t + \Delta t) = \Delta s > 0$ 、 $s_{32}^{max}(t) = s'_{32}(t) + \Delta s$ とする。 $s_{32}^{max}(t)$ は共同避難トリップの最大量を示す。時刻 t において s' 、時刻 $t + \Delta t$ において Δs の共同避難トリップが生じた場合(ケース A)と、時刻 t において s 、時刻 $t + \Delta t$ において 0 の共同避難トリップが生じた場合(ケース B)に受けるリスクを比較する。

まず、共同避難トリップの避難者が受けるリスクは、 $\int_t^{t'} s' r_{23}(t) dt + \int_{t+\Delta t}^{t''} \Delta s r_{23}(t) dt \geq \int_t^{t'''} s r_{23}(t) dt = \int_t^{t'} s' r_{23}(t) dt + \int_{t+\Delta t}^{t'''} \Delta s r_{23}(t) dt$ ($t' \leq t''' \leq t''$) が成り立つ。共同避難は、ノード 2 到着以前のノード 2 の避難者には影響を与えないため、共同避難者より前方の混雑状況は変わらない。そのため、避難完了時刻は、それぞれのノード 2 到着時刻の関係と同様に、 $t' \leq t''' \leq t''$ の関係が成り立つ。そのため、ケース B の受けるリスクのほうが小さい。

次に、ノード 2 上の避難者の受けるリスクを示す。ケース A の時刻 t で出発した共同避難交通 s' とケース B の時刻 t で出発した共同避難交通 s のうちの s' は、ノード 2 上の避難者に全く同じ影響を及ぼし、リスクも等しい。ケース A の時刻 $t + \Delta t$ で出発した共同避難交通 Δs のノード 2 への到着時刻は、ケース B の時刻 t で出発した残りの共同避難交通 Δs の到着時刻と等しいか遅い。このとき、交通量の容量制約のみにより流出交通量が定まるため、ノード 2 での避難開始が遅い又は等しい場合は、それぞれの避難完了時刻は遅い又は等しくなる。リスクは時間に比例して増加するため、ケース A のほうが受けるリスクは大きくなる。

次に、リンク 13 からの避難について示す。ケース A の時刻 t において、共同避難の移動を行わなかった $\Delta s (= s^{max} - s')$ は時刻 t で避難している。それと同じ交通量 Δs が時刻 $t + \Delta t$ で避難するとすれば、その間に生じるリスクは $\int_t^{t+\Delta t} \Delta s r_{13}(t) dt$ である。このリスクの分だけ、ケース B のほうがリスクが大きくなる。この積分区間は単位時間 Δt と小さいため、 s_{max} や $\frac{r_{13}(t)}{r_{23}(t)}$ が小さい範囲ではケース A のほうがケース B よりもリスクが大きくなる。一方で、共同避難の選択割合が高まると、ケース A のほうがケース B よりリスクが小さくなる場合がある。

ここでは、ケース A のほうがケース B よりもリスクは大きい場合を考える。総被災リスク最小化の目的関数の下で、リスクが時間に単調に増加する場合は、今期の共同避難の最大量を通行させずに、次期に共同避難交通を通行させる制御は最適解とならない。そのため、今期の最適制御は、” (I) 共同避難トリップを全て通行させる” または ” (II) 共同避難トリップ全ては通行させず、以降の共同避難トリップは全く通行させない ” の 2 つに限定される。ある時刻 t において (II) を選んだ場合は、 t 以降の制御は ” 共同避難トリップは全く通行させない ” と自動的に定まる。そのため、総被災リスク最小化の目的関数でパラメータ設定が必要となっている終端時刻 T の値は、これには影響しない。ここで、単位時間を十分短くした場合、動的制御の決定問題は、共同避難交通の通行を停止する時刻の決定問題となる。

(I) と (II) の制御によって生じるリスクを比較し、最適制御を決定する。まず、共同避難交通量 s に

よって生じる正負の影響について説明する．共同避難トリップが生じることにより，ノード1からの共同避難者の被るリスクが増加する．これは，リンク2の通行時に受けるリスクである．一方で，この s によりノード2の避難者との共同避難により，ノード2の共同避難者の避難完了が早くなり，被るリスクが減少する．また，ノード2の共同避難者の早期避難により，以降のノード2の避難者への同調効果・避難促進によって被るリスクが減少する．ただし，先ほど述べたように，ノード2からの避難集中によりリンク23流出時の混雑が大きくなると，共同避難者のリンク2の通行時間が長くなるため，リスクがより大きくなる．こうした正負の影響の中で，共同避難交通の通行停止時刻の決定が必要となる．

時刻 t で制御(I)をとった場合に生じるリスクの増減は，時刻 t 以降の制御に影響を受けない．そのため，制御(I)(II)の決定は，(I)の場合も時刻 t 以降に全く共同避難トリップを通行させないとして，リスクを計算・比較すればよい．この考え方を説明する．まず，時刻 t のノード1からの共同避難者の被るリスクは，共同避難者の避難完了時刻によって定まり，これは前方の交通状況のみに依存する．同様に，ノード2上の共同避難者の避難完了時刻の短縮の度合も前方の交通状況のみに依存する．時刻 t 以降のノード2上の避難者への同調による避難促進については，避難確率の設定に拠る．時刻 t 以降の共同避難と今期の共同避難が相乗効果を持ち，避難確率に影響を与える場合は，時刻 t 以降の制御に影響を受ける．相乗効果を持たない場合は，共同避難交通量 s の避難確率への影響は，時刻 t 以降の制御に影響を受けない．相乗効果とは，今期までの避難割合が高まるほど非線形に次期の避難割合が高まる状況である．ここでは，線形を仮定し，相乗効果がない場合とする．例えば，ノード2の避難確率 P_2^{ev} の推移は次のように設定する．

$$P_2^{ev}(t_n) = \alpha_2 P_2^{ev}(t_{n-1}) + \frac{s(t_n)}{N_2(t_n)} + \beta_2 \quad (5.52)$$

α は前期の避難確率が今期の避難確率に与える影響を示すパラメータ， β は前期の避難確率からの単位時間当たりの増加分を示すパラメータ， $N_2(t_n)$ は，時刻 t_n におけるノード2の残りの避難者数である．この設定の場合は，今期と次期の共同避難交通量 s は互いに独立であり，相乗効果はない．

こうした場合は，時刻 t の制御(I)によるリスクの増減は，時刻 t 以降の制御に影響を受けない．そのため，制御(I)による被災リスクの増減についても時刻 t 以降に全く共同避難トリップを通行させないと仮定して算出し，制御(II)と比較し，リスクが小さいほうを選択する．また，このとき，制御(I)(II)ともに終端時刻 T は影響しておらず，前向きに全員避難完了時刻までをリスク計算の対象とすればよい．これにより，時刻 t における最適制御は，各時刻において，それまでの避難状況の推移の情報のみを用いて，二つの制御方策を比較する逐次的な計算により決定できる．

避難完了時刻最小化における共同避難制御

避難完了時刻最小化を目的関数とする場合についての共同避難制御について説明する．避難完了時刻最小化問題は避難完了車両の最後尾の流出時刻の最小化である．そのため，避難開始時刻は早いほどよく，なるべく早く多くの共同避難を行い，ノード2の避難を促進すればよい．その上で，前項で示した合流部の流出制御を行うことで，避難完了時刻最小化を達成できる．そのため，総被災リスク最小化と同様に，各時刻の制御は(I)または(II)に限られる．避難完了時刻最小化を達成できないのは，共同避難を選択したが，ノード2に到着した際には共同避難を行う相手が残っていない場合のみである．ノード3上の共同避難制御にあたっては，この状況を防ぐことが必要となる．また，こうした状況になる前に，十分に避難確率が上昇し，出発台数が増えた時点で共同避難を停止することで最小解を得ることができる．このタイミングで停止することで，余分な移動をなくすることができる．

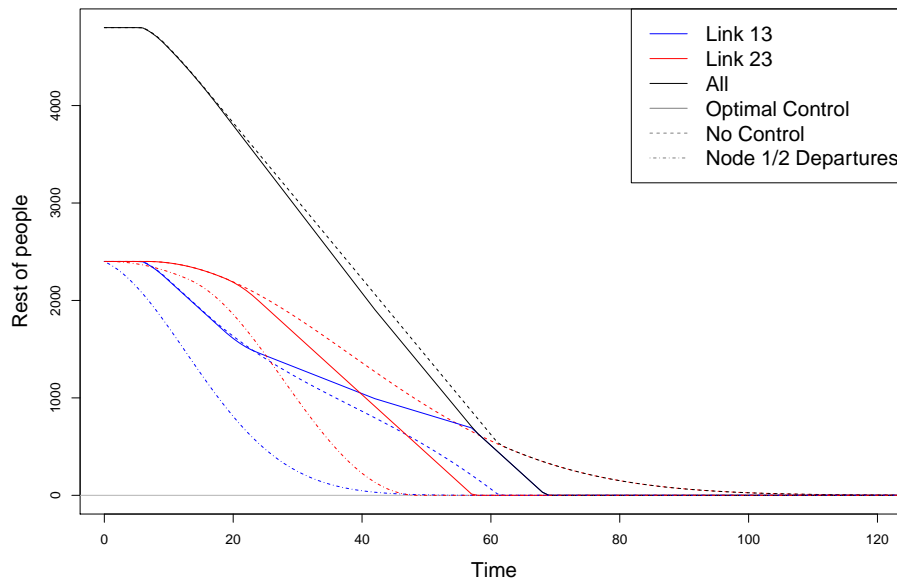


図 5.4 総被災リスク最小化を目的関数とした場合の残留者数曲線

5.3 数値計算による最適共同避難制御とその特性

本節では、数値計算により共同避難の動的制御のシナリオ別の結果を示し、その特性を考察する。

数値計算の設定

まず、数値計算にあたっての設定を示す。リンク 13, 23 の距離はともに 4.0km とする。自由流速度を 40km/h とし、ここでは渋滞列は長さを持たない Point Queue を想定する。リンク 13, 23, 32 の容量は 3600 台/h, リンク 34 の容量は 4800 台/h とする。t = 0 でのノード 1, 2 の滞在人口 2400 人とする。t = 0 において、リンク上の車両はないものとする。単位時間 Δt は 1 分とする。

リスクと避難開始確率の設定については次とする。まず、リスクのパラメータは $R_{13} = 0.5, R_{23} = 1.0$ とする。次に、避難開始確率のパラメータは次とする。ノード 1 は $\alpha_1 = 1, \beta_1 = 0.004, P_1^{ev}(0) = 35/2400$ とする。ノード 2 は $\alpha_2 = 1, \beta_2 = 0.001, P_2^{ev}(0) = 0$ とする。ノード 1 から避難開始した人がノード 2 を経由した共同避難を行う確率 $P_{12}^j = 0.1$ とする。なお、 R_{13} と P_{12}^j は変化させ、シナリオ別の比較を行う。

2つの目的関数における残留者数の推移

まず、上記の設定によるリンク 13・23 の残留者数の推移を示す。図 5.4 が総被災リスク最小化を目的関数とした場合、図 5.5 が避難完了時刻最小化を目的関数とした場合である。図の横軸は時間、縦軸が残留者数を示す。青線がリンク 13、赤線がリンク 23、黒線がリンク 13 と 23 の合計である。実線が共同避難制御を行った場合、破線が共同避難を行わない場合の残留者数を示す。鎖線はノード 1 とノード 2 の残存者数を示す。

まず、総被災リスク最小化を目的関数とした図 5.4 について説明する。共同避難を行わない場合は、赤の破線で示すリンク 23 から流出が緩やかになっている。そのため、全体の残留者数の減少（黒破線）も緩やかになっている。次に、共同避難を行った場合は、t=20 前後からリンク 23 の赤線の傾きが急となり、

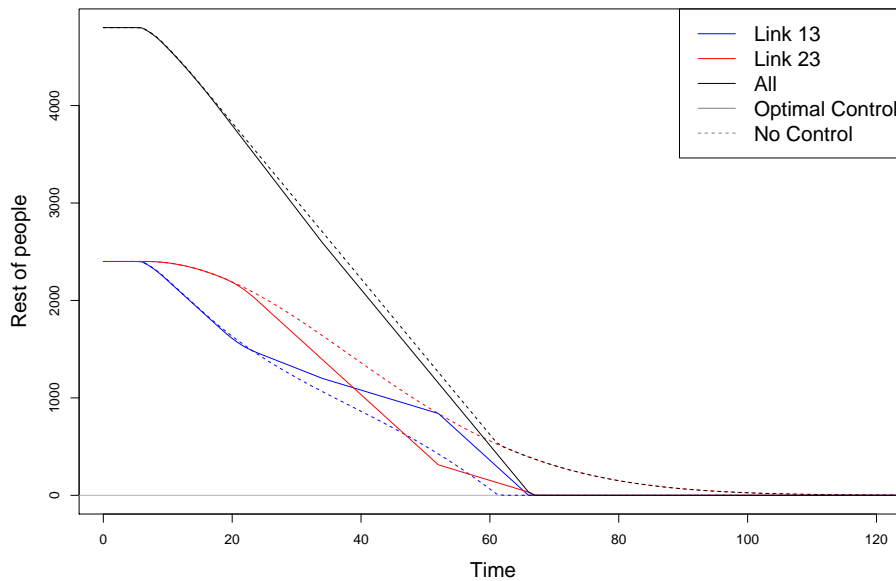


図 5.5 避難完了時刻最小化を目的関数とした場合の残存交通量曲線

青線が緩やかになっている。これは、共同避難によりノード 2 からの避難者数が増え、リスク最小化のためにリンク 23 側が優先して安全地帯に流出している。また、先にリンク 23 からの流出が終了し、最後にリンク 13 からの流出が終了した時点で全体の流出が終了する。ここでは、共同避難への流出は $t=43$ までとなり、合計で 217 人が共同避難に回っている。総被災リスクは 2,863,751 であり、最終避難完了時刻は 69 分となっている。共同避難を行わない場合は、避難完了時刻は 129 分であり、大きく短縮している。総被災リスクは 0.75 倍となっている。また、同時刻の鎖線と実線の差は、リンク上の交通量を示す。ただし、リンク 13 を出発した避難者のうち 1 割はリンク 23 側に共同避難のために流入する。

次に、避難完了時刻最小化を目的関数とした図 5.5 について説明する。ここでは、図 5.4 と異なり、リンク 13 とリンク 23 でほぼ同時に避難完了している。避難完了時刻最小化と関係しない時間帯（避難完了直前以外）では、リスクの大きいリンク 23 を優先して流出させているため、 $t=50$ 過ぎあたりで残留者数の傾きに転換が生じている。ここでは、共同避難への流出は $t=35$ までとなり、合計で 169 人が共同避難に回っている。総被災リスクは 2,923,789 であり、最終避難完了時刻は 67 分となっている。共同避難を行わない場合と比べて、総被災リスクは 0.77 倍となっている。総被災リスク最小化の場合と比べて、避難完了時刻は小さく、総リスクは大きくなっている。総被災リスク最小化に比べて、共同避難は早くに制限が始まっている。これは、総被災リスクを最小化するために猶予のある段階で、避難完了時刻最小化のために十分な避難確率に達していることを示す。

目的関数のパレート性

次に、 $R_{13} = 1/3$ (緑色) と $R_{13} = 1/2$ (紫色) とした場合の二つの目的関数の値を図 5.6 により比較する。図 5.6 の横軸は避難完了時刻、縦軸は総被災リスクを示す。線上の点のプロットは、共同避難移動の停止タイミングを 1 分ずつずらした場合の避難完了時刻最小化の値を示す。右上が 0 分であり、左下方向に 1 分ずつ停止タイミングが遅れている。点のプロットは、総被災リスク最小化の値を示す。点の左上方向に、点の避難完了時刻最小となる点があり、二つの目的関数による制御の結果はパレート最適の関係性を持つ。また、点の推移をみると、紫色の $R_{13} = 1/2$ の場合は、最後の部分が下方向に垂れている。これは、避難完了時刻最小化に到達した上で、さらに次期まで共同避難を続けると総被災リスク

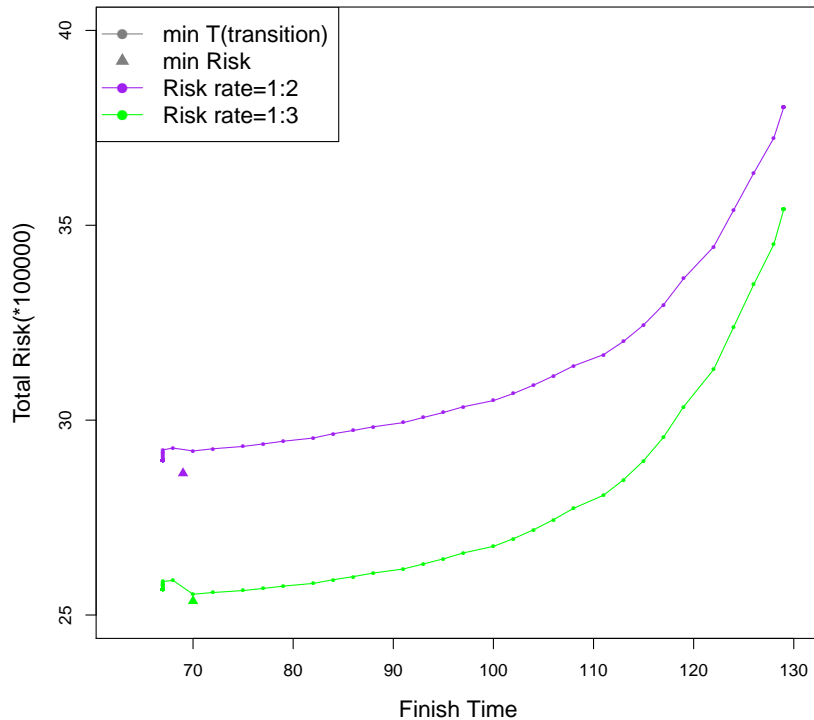


図 5.6 リスク比の違いによる目的関数値の比較

最小化方向解が動いていることを意味する．このリスク比の場合は，二つの目的関数値について，単調な関係を持っている．次に，緑色の $R_{13} = 1/2$ の場合は，避難完了時刻 $t = 70$ から左上方向に移動し，避難完了時刻最小化の解を得ている．これは，総被災リスク最小化する共同避難制御停止のタイミングより後に避難完了時刻最小化する共同避難制御停止のタイミングが表れていることを示す．このリスク比の場合には，二つの目的関数値について，パレートな関係を持っている．

共同避難選択確率による影響

最後に，共同避難選択確率を変化させた場合の残留者推移の違いを比較する．図 5.7 と図 5.8 を用いる．横軸は時間，縦軸は残留者数である．青色は $P_{12}^j = 0.05$ ，緑色は $P_{12}^j = 0.15$ ，ピンク色は $P_{12}^j = 0.25$ の場合を示す．ここではリンク 13 の残留者数の推移に特に着目しており，実線で示している．破線はリンク 23，鎖線は 2 リンクの合計を示す．

図 5.7 は目的関数を総被災リスク最小化とした場合である．青線と緑線の推移はほとんど変わらない．避難完了時刻は $P_{12}^j = 0.15$ は 68 分， $P_{12}^j = 0.05$ は 70 分となっている．見た目の推移は差は小さいが，共同制御の停止タイミングは $P_{12}^j = 0.05$ では $t=53$ (共同避難者数は 119 人)， $P_{12}^j = 0.15$ は $t=42$ (共同避難者数は 316 人) と大きく異なる． $P_{12}^j = 0.05$ では，共同避難を行う人の量が少ないため，遅いタイミングまで共同避難を続けている．避難促進が遅くなっており，総被災リスクも $P_{12}^j = 0.05$ のほうが大きく，共同避難なしと比べて 0.78 倍となっている． $P_{12}^j = 0.15$ は 0.73 倍である．次に， $P_{12}^j = 0.25$ の場合であるが，総被災リスクは 0.79 倍であり，他のケースより総被災リスク・避難完了時刻ともに悪い結果となっている．共同避難制御の停止タイミングは $t=16$ までとかなり早いタイミングでの停止となっている(共同避難者数は 137 人)．これは，共同避難選択の割合が大きいため早くからリンク 23 の流出量が大きくなり，そして，リンク 23 からの流出を優先するため，リンク 13 からの流出が少ない時間帯が長くなっているためである．そのため，リンク 13 からの流出が進まず，全体の避難完了が遅くなり，総被

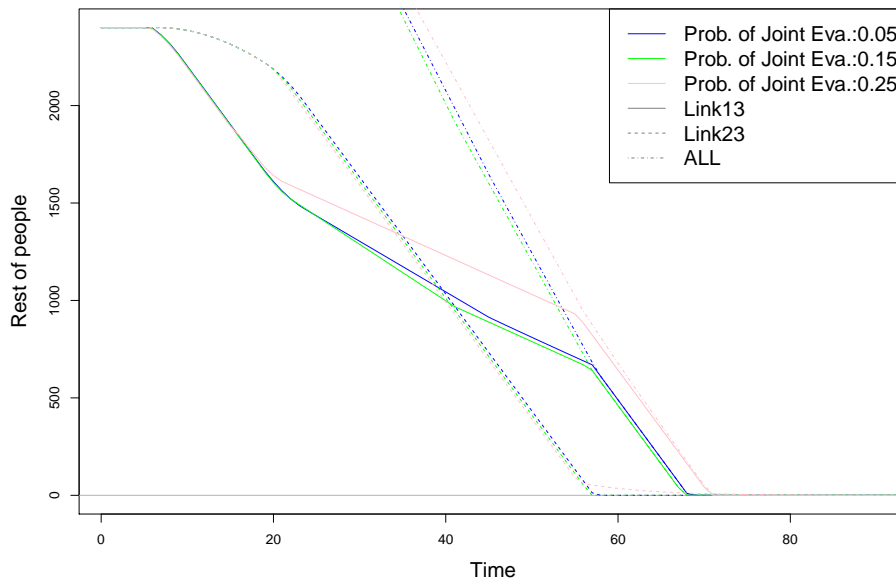


図 5.7 共同避難選択確率による残留者推移の比較 (目的関数：総被災リスク最小化)

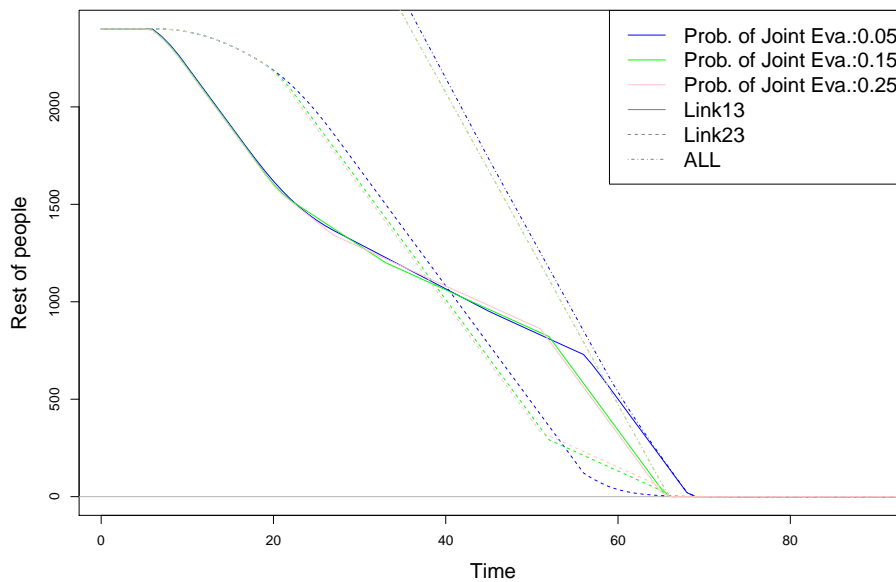


図 5.8 共同避難選択確率による残留者推移の比較 (目的関数：避難完了時刻最小化)

災リスクも大きくなっている。ただし、共同避難の選択確率が大きい場合 ($P_{12}^j = 0.25$) は、小さい場合 ($P_{12}^j = 0.15$) を包含しており、制御 (I)(II) に拠らない正しい制御をすれば、このような結果とはならない。 $P_{12}^j = 0.25$ の場合は前節で示した共同避難の最大量が多いケースに該当し、共同避難の最大値を流入させない制御が必要となる。

図 5.8 は目的関数を避難完了時間最小化とした場合である。ピンク線と緑線の推移はほとんど変わらない。避難完了時間は両者ともに 67 である。 $P_{12}^j = 0.25$ の場合は、共同避難は $t=28$ までで、共同避難者数は 317 人となっている。 $P_{12}^j = 0.15$ の場合は、共同避難は $t=34$ までで、共同避難者数は 244 人となっている。総被災リスクは両者ともに共同避難なしの場合と比べて 0.755 倍である。共同避難選択確率が高い場合には、早期に共同避難が進んでいるが、結果的に同じ完了時刻となる。対して、 $P_{12}^j = 0.05$ の

場合は、初期段階でのリンク 23 の避難確率の増加が緩やかとなるため、やや避難完了が遅くなり、69 となる。共同避難は $t=54$ までで、共同避難者数は 120 人、リスクは 0.78 倍となっている。避難完了時刻に大きな違いはないが、共同避難者数は少なく、リスクは少し大きくなっている。

共同避難選択割合が大きいほうが、リスクはやや小さくなりやすいが、避難完了時刻は大きく変わらない。こうした結果は変わらなくても、共同避難者数と共同避難制限のタイミングは大きく異なる。そのため、こうした選択割合を考慮した制御が必要だと言える。また、選択割合が高い場合に、総被災リスク最小化を行う場合には、これまでの 0/1 型の制御ではない制御が必要であり、その最適タイミングの決定は複雑となる。

5.4 本章のまとめと今後の課題

本章では、共同避難による避難促進の効果を最大化するための動的制御方策の評価を行った。共同避難により避難確率の低い人の避難が促進されるという正の影響がある。一方で、共同避難のための移動の長期化や混雑によりリスク増大や避難完了が遅れるという負の影響がある。そこで、その負の影響を抑え、正の影響を最大限活かすためには、適したタイミングで共同避難のための移動を止める制御方策が必要となる。まず、制御方策を検討するための目的関数についての整理を行った。その上で、避難完了時刻を最小化するための動的流入制御方策と総被災リスクを最小化するための共同避難制御方策の単純なネットワークにおける基本的特性を示した。最後に、リスクの低い地域からリスクの高い地域への共同避難が行われる場合に、必要となる共同避難の動的制御についての数値計算を行った。

目的関数の整理においては、既存研究から整理した 4 つの目的関数について、それぞれ制御にあたって適用できる状況の整理を行った。特に、本研究で対象とする災害避難への適用にあたっての視点を中心に整理した。総旅行時間最小化の目的関数は、全員の避難の移動時間の効率化であり、全員が確実に避難できる災害に対する適用に適している。避難完了人数最大化は、現状のネットワークと想定災害到達時間以内で避難できる人数を最大化するための目的関数であり、避難できない人は何もしない解を得る。そのため、現状の減災インフラの拡充や投資計画の立案までを含めた計画検討に適した目的関数となる。避難完了人数最小化と総被災リスク最小化は避難猶予時間が短い中での全員避難のための計画や制御の検討に適している。特に時空間上でリスクがばらばらしている場合は、総被災リスク最小化の目的関数の適用が望ましい。ただし、リスクの設定方法に関する問題は残る。

次に、交通流の動的制御の基本的特性を示した。避難完了時間最小化のための合流部の動的制御の解を最適制御理論により示した。最適制御理論のハミルトニアンを用いた求解において、 t を明示的に含まない自律的問題として横断性条件に着目することで、最適解の必要条件を満たす解の領域を得た。解の領域を持つことにより、固定型制御に比べて動的制御による優位性を示した。共同避難交通の動的制御にあたっては、リスクが時間に単調増加する仮定とある条件の下で、最適な動的制御を求める問題が共同避難の通行のあるタイミングで停止する問題となることを示した。これにより、各時刻以降の制御方策を想定せずに、通行停止タイミングを判断することができ、簡易な制御が可能となる。二つの制御に共通しているのは、個人の意思決定に任される許容範囲があり、それを超える交通流に対する制御を行っているという点である。

最後に数値計算により、総被災リスク最小化と避難完了時刻最小化の二つの目的関数について、最適共同避難制御の特性を示した。この二つの目的関数の最適値はパレート性を持つ。そのため、ひとつの制御を定めるためには、両者の重みづけが必要となる。また、共同避難の選択確率により、避難完了時刻に大きな差は違いは生じない。ただし、共同避難通行の停止タイミングは選択確率により大きく異なるため、

最適制御を行うためには、選択確率の予測や観測が必要となる。

次に本章の課題を示す。

まず、目的関数については、総被災リスクの計算にあたり、時空間上のリスクの算出をどのように得るのかは大きな課題となる。数値計算で示したように、総被災リスクの与え方により制御の内容は大きく異なるため、非常に重要である。また、総被災リスクの設定により、最終避難間際のリスクの上昇などを記述できれば、避難完了人数最大化や避難完了時刻最小化の目的関数と同様の解を得ることができる。その場合は、パレート性により解を得るために重みの設定が必要となる課題を克服できる。また、各個人の出発時刻に拠らずに全体最適となる制御の適用することが個人間の公平性の観点からは課題がある。これはどのような目的関数を用いても抱える課題である。特に、制御により待たされた側が被災してしまった場合には、大きな問題は生じる可能性がある。

また、目的関数の設定の下での最適制御自体は万能ではなく、最適制御した場合の目的関数値は一つの目安である。これは、最適制御の下でも許容可能な避難完了時刻や総リスクを超える状況が発生する場合は、許容可能な範囲に収めるための制御方策が必要となる。例えば、一定時間内の最大累積交通量を超える避難交通流が発生する場合には、避難車両の乗合利用による対策が求められる。その場合は、乗合のピックアップのための車両経路の制御を検討する必要がある。こうした異なる制御方策により目的関数値が減少する場合は、許容可能範囲とは関係なく、導入を検討すべきだといえる。

本章で示した結果は、単純な 1 交差点によるネットワークにおけるものであり、実際の適用にあたっての課題は大きい。まず、限られたネットワーク・状況のみを想定した求解を行っており、さらに一般化した状況での求解が必要となる。また、マクロの視点で、避難確率や共同避難、交差点制御を捉えている点も課題である。避難者同士の共同避難は、ミクロスコピックの 1 対 1 の関係性の上に成り立っており、1 対 1 の関係における他者の行動の想定が避難確率または共同避難の選択確率に影響する。交差点通行についても、非常に混雑した災害時の状況がどの程度平時の通行とかけ離れたものであるのかは明らかになっておらず、理論的な最適制御の実装までの課題は大きい。また、シンプルなネットワークにおいても、避難開始時刻の分布を変えた場合や実データを用いて設定した場合などを計算することで、多くの知見を得ることができる。

実装にあたっては、実際の避難行動や車両位置をいかに観測するかが重要となる。車両位置や避難行動については、GPS や上空からの撮影により把握可能性がある。しかし、実際に全員の完全な情報を取得することは難しく、確率的な観測に留まる。そのため、制御側も観測情報や行動選択に対して、確率的な状況を仮定する必要がある。こうした確率的な状況での制御には、確率制御やロバスト制御といった機械制御の分野での理論の適用可能性がある。

第6章

結論

6.1 本研究の成果のまとめ

本研究の全体像

本研究では、避難猶予時間が比較的短く、避難必要距離が数キロ程度の災害からの避難を想定する。こうした災害では、避難移動の所要時間、被災リスクに気づくまでの時間、避難準備のための時間が同程度となる。そのため、避難移動の所要時間のみでなく、被災リスクに気づくまでの時間や避難準備のための時間といった避難開始までの時間を短縮することが被災の最小化のためには必要となる。そこで、第3章、第4章では避難開始の意思決定に着目し、その選択構造の定式化と実証分析を行った。第5章では避難完了時刻の最小化のための動的交通制御のモデル構築と数値計算による評価を行った。

まず、災害時の行動選択メカニズムを明らかにするにあたり、災害時下の状況の特殊性に着目した。災害避難は稀少事象であるため、過去の経験に乏しく、また時間が限られているために行動選択のための情報が不十分になりやすい。こうした不確実な状況における選択構造の特徴として、将来効用の考慮と他者からの影響に着目し、モデル構築を行った。

また、災害時は”助かる”という共通の価値観を多くの人が持ち、また自分と他者の価値観が共通していることを認めやすい状況である。その共通する価値観に照らして、自分と相手に差がある場合に不効用を感じる不平等回避選好が働きやすい。そのため、不平等回避選好による他者との協調行動を形成する。そこで、本研究では、協調行動形成に着目したモデル構築とその評価を行った。ただし、必ずしも、協調行動形成が多いほど避難促進に良い影響を与えるわけでない。地区内の他者との協調行動形成であれば、多数派同調バイアスによる避難確率の低下の可能性がある。他地区の他者との共同避難であれば、交通混雑による避難遅れの可能性がある。本研究では、こうした他者との協調行動による正負の影響に着目し、その評価を行った。

災害時の不確実状況下における避難開始の選択構造

ここでは、災害時の不確実な状況における避難開始の選択行動の記述に関する研究成果を示す。

まず、第3章では、将来効用を考慮した避難開始選択モデルを構築した。将来効用を考慮するため、動的離散選択モデルを導入する。しかし、動的離散選択モデルにおける将来効用は、完全合理的な状態を想定した定式化により与えられている。これは情報が限られる災害時の意思決定には適さない。そこで、完全合理性を緩和した動的離散選択モデルを定式化した。また、定式化にあわせて、その求解に適した解法として MPEC 型の解法を開発した。これまでの擬似最尤法と比べて、MPEC 型の解法では、個々の将来効用をパラメータとして扱うため、完全合理性を緩和した将来効用を尤度最大化の枠組みの中で柔軟に求

めることができる。東日本大震災における陸前高田市の住民避難行動データを用い、構築したモデルによる実証分析を行った。その結果、完全合理性を緩和したモデルのほうが完全合理的なモデルよりも尤度比が改善し、災害時の避難者の持つ将来効用は完全合理的な値ではないことを示した。将来効用の分散を分析し、自宅未滞在・同行者あり・他者支援実施済、海からの距離が1.0~1.5kmといった属性の場合に大きい。事前教育や情報伝搬の促進によりバラつきを抑えることによって、避難を促進できた可能性がある。

次に、第4章では、他者の影響として他者の避難確率を考慮した避難開始選択モデルを構築した。ここでは、避難意思決定の効用関数において、他者の避難確率と相手の影響の重みを導入する。他者の避難確率が高ければ自分の避難確率も高まる他者同調作用と、その作用の影響は相手との関係によって変化するという利他的な不平等回避選好を表現した。また、同調する他者のネットワーク構造による避難確率の変化を記述した。2004年の新居浜市の豪雨災害時の住民行動データを用いて実証分析を行った。他者同調作用を考慮した場合に尤度比が改善しており、他者の行動による影響を受けた避難確率をもつことを明らかにした。また、利他的な不平等回避選好のために、災害弱者世帯の未避難により健常者世帯の避難確率は低下する。避難促進のためには、災害弱者世帯を先に避難させることが有効となる。

これらのモデル構築と分析により、避難開始選択に対して、将来効用と他者同調が影響を与えていることを明らかにした。災害時下は平時の均衡状態が崩れており、現在の自分自身の効用のみを用いた単純な意思決定ではなく、他者の行動選択や将来効用を考慮した意思決定が行われていることを意味する。もちろん、こうした行動メカニズムは災害時以外にも生じており、日常時においても、不確実な状況下では生じている行動である。そのため、本研究における行動モデル構築や実証パラメータの推定技術は、日常行動の行動予測への適用も十分に可能である。また、実証パラメータの推定に関しては、第3章ではMPEC型の解法、第4章では擬似最尤推定法を用いた。それぞれ、尤度の高い現実的な将来効用の求解のため、二者間の関係性に応じた影響の違いの把握のために導入した。これにより、将来効用と他者同調の影響を精緻に評価することを可能とした。

協調行動形成によって生じる正負の影響の評価

次に、協調行動形成によって生じる正負の影響の評価に関する成果について説明する。

まず、第4章では、地区内の二者間特性を考慮した協調行動ネットワーク形成モデルを構築した。周辺他者による影響やリスク差の空間的な誤差相関をモデルに導入し、二者間特性を表現した。新居浜市の避難行動データを用いた実証分析により、協調行動形成には、二者間の経路距離や経路上の住宅密度といった空間指標、弱者人数や被災リスク差といった利他的指標が影響することを明らかにした。この協調行動形成確率と他者の影響を考慮した避難選択モデルをあわせたシミュレーション計算により、協調行動ネットワークの構造と避難促進の正負の影響の関係を評価した。この評価により、避難確率の低い災害弱者世帯との協調行動形成による避難低下の多数派同調の存在、災害弱者の率先避難が全体の避難確率の増加に寄与することを明らかにした。そのため、他者同調による避難促進は、ネットワーク構造と避難順序により正負の影響が生じる。また、他者の避難確率を含んだ効用関数による避難確率の定式化とネットワークの形成確率を合わせたシミュレーションモデルの構築によって、率先避難や多数派同調の影響評価を可能とした点が本研究の成果の一つである。

次に、第5章では、共同避難による避難促進と渋滞による避難遅れの正負の影響を評価した。まず、1交差点のシンプルなネットワークにおける共同避難交通の動的制御を行うための演繹型アルゴリズムの構築を行った。避難完了時刻最小化のための合流部の動的制御の解を最適制御理論により示した。また、総被災リスク最小化のための共同避難交通の動的制御が最適停止タイミングを求める問題と一致する条件を示した。これら二つをあわせて、共同避難交通の動的制御に関する数値計算を行った。共同避難選択確率

を変化させた場合に、避難完了時刻最小化の目的関数値に違いはないが、共同避難交通の停止タイミングには大きな差が生じる。これは、共同避難選択確率が高い状況において、長時間の共同避難選択を認めると、混雑による避難遅れが生じうることを意味している。つまり、共同避難の負の影響の発生を防ぐためには適したタイミングでの共同避難交通の停止が必要である。本研究の成果は、仮想的な設定とシンプルなネットワーク上での共同避難の正負の影響を考慮した動的制御方を示した点である。

第5章で示した制御の型は、一定時間と一定の空間では住民意思によって行動選択することが可能であり、許容範囲を超える場合の住民行動を制御する型となっている。そこで、本研究では制御する箇所を限定した制御を導入している。これは前提とした住民の選択行動（全員制御は困難であること）と統合的な制御の型となっている。対して、第4章の他者同調ネットワーク上の避難開始選択では、避難選択の個人差に応じた避難の伝播を想定したモデルを構築した。その結果、明らかになった点は、災害弱者の率先避難による正の影響の伝播がある。人的ネットワーク上の弱い人を先に取り除く（避難する）ことにより全体に正の影響が及ぶということである。これは、ネットワーク上の一部に対する働きかけという点で、交通流の交差点制御と同様の枠組みである。つまり、選択行動を前提としたネットワーク制御においては、ネットワーク上の問題箇所の特定制御が有効となる。

6.2 今後の課題

動的制御の実用にむけての課題

まず、動的制御に関する課題を示す。避難最適のための交通流制御の実用は、津波避難対策が必要な日本の各自治体において、重要度が高い。そのためには、より大きなスケールのネットワークにおいて、観測と組み合わせた制御のアルゴリズムが必要である。観測と組み合わせるためには、観測した一部の避難者の行動拡大や未観測の避難者の行動予測が必要となる。また、観測による誤差を想定した制御を行う必要がある。このためには、ロボットや機械の制御に導入されている実時間最適化によるモデル予測制御の考え方の導入が求められる。行動の予測に関しては、避難開始だけではなく、経路や目的地に関する行動選択までを対象としたモデル化が必要である。

観測方法については、GPSによる観測が現在最も進んでおり、導入可能性が大きい。しかし、GPSだけでは地域内の全数の把握が難しい場合が想定される。その場合は、上空からの撮影による交通流の観測も適用可能性がある。GPSの場合は全メーカーによる全国的な対応が必要となるが、撮影による場合は各地域ごとでの導入が可能となる。ただし、撮影による場合は、移動体による移動体の観測に関する新たな技術開発が必要となる。

制御場所の選定も課題となる。ネットワーク上の全ての交差点で制御を行うことは難しく、効果の高い制御交差点を求める必要がある。地域内の発生交通の分布とネットワーク構造に応じて、有効な制御交差点は異なる。そのため、シンプルな導出であれば、社会ネットワーク分析による方法も適用可能性がある。また、空間上のリスクの設定や具体の制御方法が人力か、機械式かによっても、制御交差点は異なる。

本研究では、動的制御や動的選択モデルの構築にあたって、それぞれが将来想定をもった計算を導入したことで、目的関数を改善することができた。また、将来想定 of 列挙を簡易に行うことが重要であった。実用のためには、大規模ネットワークやより詳細な行動記述においても、いかに簡易に将来想定を得るかが課題となる。そのためには、近似型動的計画法 (Approximate Dynamic Programming) の考え方も適用可能性がある。

また、制御を考える上で、交差点やリンク通行の評価にあたって、平常時の通行挙動と同様の関係式を活用可能かも検証が必要である。災害時の交通密度は、平時の交通密度をはるかに上回るため、平時と同

様の通行挙動とはなっていない可能性が高い。この検証のためには、災害時特有の超混雑下における車両のミクロ挙動を把握・分析する必要がある。

推定パラメータの活用に関する課題

本研究では、第 3 章と第 4 章で実データを用いたパラメータ推定を行った。ここで推定したパラメータは、一つの地域の避難行動データを用いて得た値である。そのため、実際にここで得たパラメータが他の地区での行動記述に活用できるかは定かではない。他の地区における避難行動データを用いて同様の計算を行い、得たパラメータを比較することで、算出パラメータの安定性を確認する必要がある。ただし、災害を経験するたびに対応行動は変わるために、過去の避難行動による実証パラメータの有効性については留意が必要である。

次に、本研究では、協調行動ネットワーク形成モデルに空間要素を導入し、また、制御の目的関数においても時空間リスクの評価を行った。誤差項として空間要素を表現した点が特徴である。こうした時空間リスクの導入は、行動評価やその制御において重要であり、評価できる。ただし、本研究における時空間リスクの評価はまだ十分ではない。例えば、滞在によって受けるリスクは評価しているが、避難の際に生じるリスクは評価していない。避難時のリスク評価は目的地選択や経路選択と関係しており、合わせた評価が必要となる。これにより、津波や土砂災害時の垂直避難までを評価することが可能となる。このように、他地区での活用のためには対象地の空間的特徴や災害の時間的特徴を精緻に評価することが必要となる。また、評価を精緻化していく際には、過去の経験や災害教育を評価することができない点が課題となる。

次に、実際には他者の避難確率や他者属性の認知などには個人差が生じている。パラメータの移転性の確認や個人差の表現のモデルへの導入は、他地区での実用展開のために必要である。また、個人差や認知の表現するためには、MXL 型の誤差項を仮定するなどの工夫を行う必要がある。ただし、Local Interaction model の構造推定における計算は複雑な入れ子の関係を持つため、推定アルゴリズムの工夫が必要となる。また、災害への気づきについては本研究では取り扱っていない。災害認知と情報関連の避難促進方策は強く関係している。そのため、気づきの早期化により避難促進を図る方策も実用可能性があり、その評価も必要となる。

将来効用の完全合理性からの緩和度の同定

第 3 章の将来効用の完全合理性を緩和した動的離散選択モデルの課題について述べる。本研究では、MPEC 型のアルゴリズムを導入し、各状態の将来効用をパラメータとして扱うことで完全合理的でない将来効用を算出した。一方で、各状態についてパラメータとして設定しており、属性と完全合理性からの離れの関係は同定できない。また、一つの地区でのケーススタディを行っただけであり、緩和度合の分布の特性も明らかではなっていない。そのため、実際に他の地区やこれからの災害避難におけるシミュレーション計算を行う場合、完全合理性を緩和した将来効用の与え方は課題となる。また、緩和度と属性の関係を求めるためには、属性と緩和度の間にある関数を設定する必要がある。しかし、その場合、今回のアルゴリズムを適用した計算を行うとすると設定時点で完全合理的な将来効用の存在を否定することになる。それを防ぐためには、異なる定式化やアルゴリズムの開発が必要であり、この問題は理論的課題を含んでいる。

動的状況下における均衡解の問題

均衡解の導出は本研究の理論的課題である。

第 4 章で Local Interaction model を用いた避難確率の導出を行っている。Interaction model は、その定式化の性質上、均衡解を持つ。Local Interaction model の安定均衡解については、Brock and Durlauf (2000)[18] や Fukuda and Morichi (2007)[37] など示されている。本研究は Local Interaction model を用いており、他者同調を行う相手によって均衡解は異なる。そのため、集団全体ではなく、個々人が均衡解を持つこととなる。均衡解の導出により、政策シナリオによる変化を安定均衡解との関係から予測することができ、政策的インプリケーションの面で利点は大きい。また、同調相手により避難確率が変化するという事は、ネットワーク上のある一人の避難確率の変化はネットワーク上の全員の避難確率の変化へと伝搬することを意味する。この際、安定均衡解を持つ場合は、それぞれの変化は、避難確率を安定均衡解に近づける。そのため、ネットワーク構造が一定の場合は、そのネットワークによる組み合わせの下では個々人は安定均衡解を持ち、その分析の有用性は高い。一方で、ネットワークの構造自体が動的に変化するため、個々人の均衡解も動的に変化する。そのため、最終的に到達する均衡状態の導出にはネットワーク推移と合わせた評価が必要となる。ネットワーク推移自体には均衡状態や終点はないため、ネットワーク推移の分岐にあわせた避難確率の推移の分析が必要となる。加えて、避難したノードへのネットワーク接続は生じないため、この点も含めた動的推移に着目した整理が必要である。また、集団全体のネットワークの次数の分布は一定の傾向を持った推移が想定されるため [104]、ネットワーク構造の集計的な傾向を取り入れた均衡解に関する理論的解析にも可能性がある。

第 3 章では完全合理性を緩和した動的離散選択モデルを構築し、避難確率の導出を行っている。完全合理性をもつ状況は、ある面では、均衡状態であるといえる。前述した Local Interaction model でも同じことがいえるが、災害時は猶予時間が少なく、経験も少ない中では均衡状態に達しづらい。そのため、本研究では、完全合理性の緩和を試み、この緩和により得られる解の範囲は広がると考えた。一方で、非均衡状態を仮定してしまうと、解として生じうる状態を一つに限定することは困難であり、解の記述には理論的かつ実用的に課題を持つこととなる。理論的には、確率的な状態の記述のために、解の領域制約や終端の期待値関数について、確率分布の設定を導入した上で評価する枠組みが必要となる。また、実用的には、災害時に生じうる状態とその推移の予測は一つではないことを表すために、確率的な状態の記述を行い、それに対する制御方策の検討が求められる。

参考文献

- [1] Aguirregabiria, V., Mira, P.: Swapping the nested fixed point algorithm: A class of estimators for discrete Markov decision models, *Econometrica*, Vol. 70(4), pp. 1519-1543, 2002.
- [2] Aguirre, B.E., Wenger, D., Vigo, G.: A test of the emergent norm theory of collective behavior, *Sociological Forum*, Vol. 13 (2), pp. 301-320, 1998.
- [3] 赤松 隆: 交通流の予測・誘導・制御と動的なネットワーク配分理論, 土木計画学研究・論文集, Vol. 13, pp. 23-48, 1996.
- [4] 赤松隆: 交通ネットワーク流の動的制御モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol. 35, CD-ROM, 2007.
- [5] 赤松隆, 太田敏史: 3つの動的交通配分原則の特性比較, 土木計画学研究発表会講演集, Vol. 17, pp. 419-422, 1995.
- [6] 赤松隆: 交通流の予測・誘導・制御と動的なネットワーク配分理論, 土木計画学研究・講演集, Vol.13, pp.23-48, 1996.
- [7] 赤松隆: 一般ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度, 土木学会論文集 D, Vol. 63, pp. 287-301, 2007.
- [8] Akerlof, G.A.: The Market for "Lemons": Quality Uncertainty and the Market Mechanism, *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 84(3), pp. 488-500, 1970.
- [9] Anderson, C. J., Wasserman, S., Crouch, B.: A p^* primer: logit models for social networks, *Social Networks*, Vol. 21(1), pp. 37-66, 1999.
- [10] 朝倉康夫, 柏谷増男, 山内敏通: 観測データの利用による都市高速道路の動的な LP 型流入制御モデル, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.923-931, 1996.
- [11] Baker, E.J.: Predicting response to hurricane warnings: a reanalysis of data from four studies, *Mass Emergencies*, Vol. 4(1), pp. 924, 1979.
- [12] Baker, E. J.: Hurricane evacuation behavior, *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, Vol. 9, pp. 287-310, 1991.
- [13] Balland, A.J., Ullman, B.R., Trout, N.D., Venglar, S.P., Borchardt, D.W., Voigt, A.P., Obeng-Boampong, K., Rajbhandari, R.: Hurricane Evacuation Traffic Operations, Texas Transport Institute, Report 0-4962-1(Project 0-4962), 2008.
- [14] Barabasi, A. L., Albert, R.: Emergence of scaling in random networks, *Science*, Vol. 286(5439), pp. 509-512, 1999.
- [15] Bekhor, S., Prashker. J.: Stochastic user equilibrium formulation for generalized nested logit model, *Transportation Research Record*, Vol. 1752, pp. 84-90, 2001.
- [16] Bellman, R. : *Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton, 1957.
- [17] Ben-Akiva, M., Palma, A., McFadden, D., Abou-Zeid, M., Chiappori, P. A., Lapparent, M.,

- Durlauf, S., Fosgerau, M., Fukuda, D., Hess, S., Manski, C., Pakes, A., Picard, N., Walker, J.: Process and context in choice models, *Marketing Letters*, Vol. 23, pp. 439-456, 2012.
- [18] Brock, WA., Durlauf, SN.: Interactions-based models, National Bureau of Economic Research, Technical working paper No. 258, 2000.
- [19] Caldarelli, G., Capocci, A., De Los Rios, P., Munoz, M. A.: Scale-free networks from varying vertex intrinsic fitness, *Physical review letters*, Vol. 89(25), 258702, 2002.
- [20] CHART - Coodinated Highways Action Response Team: <http://www.chart.state.md.us/> (on July 30, 2015)
- [21] Chiappori, PA.: Rational household labor supply, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, Vol. 56(1), pp. 63-90, 1988.
- [22] Chiappori, P.A., Ekeland, I.: The micro economics of effecient group behavior: identification., *Econometrica*, Vol. 77(3), pp. 763-799, 2009.
- [23] Chiu, Y., Zeng, H., Villalobos, J., Gautam, B.: Modeling no-notice mass evacuation using a dynamic traffic flow optimization model, *IIE Transaction*, Vol. 39, pp. 83-94, 2007.
- [24] Daganzo, C.F.: The Cell Transmission Model. Patr I: A Simple Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory, *Transportation Research Part B*, Vol. 28, pp.269287, 1994.
- [25] Daganzo, C.F.: The Cell Transmission Model, Part II. Network Traffic, *Transportation Research Part B*, Vol. 29, pp.7993, 1995.
- [26] Daganzo, C.F., So, Sk.: Managing Evacuation Networks, *Transportation Research Part B*, Vol. 45, pp. 1424-1432, 2011.
- [27] Daly, A., Bierlaire, M.: A general and operational representation of Generalised Extreme Value models, *Transportation Research B*, Vol. 40, pp. 285-305, 2006.
- [28] A. C. チャン (訳 小田正雄, 仙波憲一, 高森寛, 平澤典男): 動学的最適化の基礎, シーエーピ 出版, 2006.
- [29] Domencich, T., McFadden, D.: Urban Travel Demand-A Behavioral Analysis, 1975.
- [30] Draganska, M., Misra, S., Aguirregabiria, V., Bajari, P., Einav, L., Ellickson, P., Horsky, D., Narayanan, S., Orhun, Y., Reiss, P., Seim, K., Singh, V., Thomadsen, R. and Zhu, T.: Discrete choice models of firms, strategic decisions, *Marketing Letters*, Vol. 19, pp. 399-416, 2008.
- [31] Dugundji, E.R., Gulyas, L.: Sociodynamic Discrete choice on networks in space: impacts of agent heterogeneity on emergent outcomes, *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 35, pp. 1028-1054, 2008.
- [32] Erdos, P., Renyi, A.: On the evolution of random graphs, *Bull. Inst. Internat. Statist*, Vol. 38(4), pp. 343-347, 1961.
- [33] Fehr, E., Schmidt, K.M.: A Theory of Fairness, Competition and Cooperation, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 114, 817-868, 1999.
- [34] Friesz, T.L., Luque, J., Tobin, R.L., Wie, B-W.: Dynamic network traffic assignment considered as a continuous time optimal control problem, *Operations Research*, Vol. 37(6), pp. 893-901, 1989.
- [35] Fu, H., Wilmot, C.G.: A sequential logit dynamic travel demand model for hurricane evacuation, *Transportation Research Record*, Vol. 1882, pp. 19-26, 2004.

- [36] Fu, H., Pel, A.J.: Optimal traffic management to ensure emergency evacuation compliance, *Proceedings of 13th IEEE ICNSC, Paris, France*, pp. 532-537, 2013.
- [37] Fukuda, D., Morichi, S.: Incorporating aggregate behavior in an individual 's discrete choice: An application to analyzing illegal bicycle parking behavior, *Transportation Research Part A*, Vol. 41(4), pp. 313-325, 2007.
- [38] Gudishala, R., Wilmot. C: Comparison of Time-Dependent Sequential Logit and Nested Logit for Modeling Hurricane Evacuation Demand, *Transportation Research Record*, Vol. 2312, pp. 134-140, 2013.
- [39] S. Hasan, R. Mesa-Arango, S. Ukkusuri : A random-parameter hazard-based model to understand household evacuation timing behavior, *Transportation Research Part C*, Vol. 27, pp. 108-116, 2013.
- [40] 羽藤英二, 中川周郎: 被災時の避難行動のグループダイナミクス, 土木計画学研究・講演集, Vol. 31, CD-ROM, 2005.
- [41] J.P. クライン, M.L. メシュベルガー: 生存時間解析, 丸善出版, 2012. (打波 守 (訳))
- [42] 本間基寛, 片田敏孝: 津波防災における災害事前情報と住民避難の関係に関する考察, 災害情報学会誌, No. 6, pp. 61-72, 2008.
- [43] Hsu, YT., Peeta, S.: Risk-based spatial zone determination problem for stage-based evacuation operations, *Transportation Research Part C*, Vol. 41, pp. 73-89, 2014.
- [44] Jackson, M. O.: *Social and economic networks*, Princeton University Press, 2010.
- [45] Kahneman, D. and Tversky, A.: Prospect theory: an analysis of decision under risk, *Econometrica*, Vol.47, pp.263-291, 1979.
- [46] 神谷大介, 赤松良久, 板持直希, 竹林洋史, 二瓶泰雄: 小規模集落における豪雨災害に対する課題と支援方策 ~ 奄美大島豪雨災害を事例として ~, 土木学会論文集 G, Vol. 68(5), pp. 305-312, 2012.
- [47] 金光淳: 社会ネットワーク分析の基礎, 勁草書房, 2003.
- [48] 寒野善博, 土谷隆: 基礎系 数学 最適化と変分法 (東京大学工学教程), 丸善出版, 2014.
- [49] Kalafatas, G., Peeta, S.: Planning for Evacuation Insights from an Efficient Network Design Model, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 15, pp.21-30, 2009.
- [50] Karoonsoontawong, A., Lin, D.-Y.: Time-Varying Lane-Based Capacity Reversibility for Traffic Management, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 26, pp.632-646, 2011.
- [51] 河上省吾, 劉正凱: 動的なシステム最適化交通量配分モデルとその解法の開発, 土木計画学研究・論文集, Vol. 11, pp.121-128, 1993.
- [52] Kim, W., Chang, GL.: Review and enhancement of chart operations to maximize the benefit of incident response and management, State highway administration research report, MD-12-SB009B4U, 2012.
- [53] King, J., Jones, N.: Simulation of information spreading following a crisis, In *City Evacuations: An Interdisciplinary Approach*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 39-62, 2015.
- [54] 北村隆一, 森川高行, 佐々木邦明, 藤井聡, 山本俊行: 交通行動の分析とモデリング: 理論/モデル/調査/応用, 技報堂出版, 2002.
- [55] Knight, F.: *Risk, Uncertainty, and Profit*, Boston, MA, Houghton Mifflin, 1921.
- [56] 小林潔司, 横松宗太: カタストロフ・リスクと防災投資の経済評価, 土木学会論文集, No.639/IV-46,

- pp.39-52, 2000.
- [57] 久保幹雄, J.P. ペドロソ: メタヒューリスティクスの数理, 共立出版, 2009.
- [58] 倉内文孝: STEN (Space-Time Extended Network) を用いた最適津波避難計画モデルの構築, 第50回土木計画学研究発表会, CD-ROM, 2014.
- [59] 例えば, 楠見孝: 不確実事象の認知と決定における個人差, 心理学評論, Vol. 37, No. 3, pp. 337-356, 1994. 等
- [60] 桑原雅夫, 赤松隆: 多起点多終点 OD における渋滞延伸を考慮したリアクティブ動的利用者最適交通量配分, 土木学会論文集, No.555/IV-34, pp.91-102, 1997.
- [61] Kuwahara, M., Akamatsu, T.: Dyanmic User Optional Assignment with Physical Queues for a Many-to-many OD Pattern, *Transportatiton Research Part B*, Vol. 35, pp. 461-479, 2001.
- [62] 桑原雅夫, 吉井稔雄・熊谷香太郎: 動的システム最適配分とランプ流入制御に関する研究: 簡略ネットワークにおける基礎的分析, 土木学会論文集 IV, Vol.50, pp.59-71, 2001.
- [63] Lin, D.-Y.: A dual variable approximation-based descent method for a bi-level continuous dynamic netowrk design problem, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 26, pp. 581-594, 2011.
- [64] Liu, H.X., Ban, J.X., Ma, W., Mirchandani, P.B.: Model Reference Adaptive Control Framework for Real-Time Traffic Management under Emergency Evacuation, *Journal of Urban Planning and Development*, Vol.133, pp.43-50, 2007.
- [65] Ma, R., Ban, X., Pang J.S., Liu, H.: Continuous-Time Dynamic System Optimal for Single-Destination Traffic Networks Considering Queue Spillbacks, *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, Washington*, No. 01478179, 2013.
- [66] Marschak, J.: Binary choice constraints on random utility indicators, In *Stanford Symposium on Mathematical Methods in the Social Science*, K. Arrow(ed.), Stanford University Press, Stanford, 1960.
- [67] 増田直紀, 今野紀雄: 複雑ネットワーク 基礎から応用まで, 近代科学社, 2010.
- [68] Merchant, D.K., Nemhauser, G.L.: A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problem, *Transportation Science*, Vol.12 (3), pp. 183-199, 1978.
- [69] Merchant, D.K., Nemhauser, G.L.: Optimality conditions for a dynamic traffic assignment model, *Transportation Science*, Vol.12 (3), pp. 200-207, 1978.
- [70] Moshkin, N.V., Shachar, R.: The asymmetric information model of state dependence, *Marketing Science*, Vol. 21(4), pp. 435-454, 2002.
- [71] Mun, J.S.: Traffic Performance Models for Dynamic Traffic Assignment An Assessment of Existing Models, *Transport Reviews*, Vol. 27, pp.231-249, 2007.
- [72] 村上圭子: "災害ビッグデータ"活用の今後, 都市計画, Vol.62-6, pp.28-33, 2013.
- [73] Murray-Tuite, P. M., Mahmassani, H. S.: Model of household trip-chain sequencing in emergency evacuation, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1831(1), pp. 21-29, 2003.
- [74] 長江剛志, 赤松隆: リアルタイム観測情報を活用した動的なシステム最適交通配分: 確率制御アプローチ, 土木学会論文集 D, Vol. 63(3), pp.311-327, 2007.
- [75] 中川周郎: コミュニケーションネットワークの構造的制約が避難行動に与える影響, 愛媛大学修士論文, 2005.1.

- [76] 中島悠, 椎名宏徳, 服部宏充, 八槇博史, 石田亨: マルチエージェントシミュレーションを用いた避難誘導実験の拡張, 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 6, pp. 1954-1961, 2008.
- [77] Newman, M. E., Watts, D. J., Strogatz, S. H.: Random graph models of social networks, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 99(1), pp. 2566-2572, 2002.
- [78] Nocedal, J., Wright, S.J.: Numerical Optimization, Springer, 2006.
- [79] 大畑 長, 浦山 利博, 花井 健太, 彦坂 健太, 花房 比佐友, 今井 武, 津田 博之, 江藤 和昭: 災害時と平常時の交通マネジメントのためのデータ融合解析システムの紹介, 第 47 回土木計画学研究発表会, CDROM, 2013.
- [80] 及川康, 児玉真, 片田敏孝, 水害進展過程における住民対応行動の形成に関する研究, 土木学会論文集 No.786, pp.89-102, 2005.
- [81] Ozbay, K., Yazici, A.M.: Analysis of network-wide impacts of behavioral response curves for evacuation conditions. In: Proceedings of the IEEE Intelligence Transportation Systems Conference, Toronto, Canada, 2006.
- [82] Paz, A., Peeta, S.: Behavior-consistent real-time traffic routing under information provision, *Transportation Research Part C*, Vol. 17, pp. 642-661, 2009.
- [83] PBS&J: Southwest Louisiana hurricane evacuation study: transportation model support document. PBS&J Inc., Tallahassee, 2000.
- [84] Pel, A.J., Hoogendoorn, S.P., Bliemer, M.C.J.: Impact of variations in travel demand and network supply factors for evacuation studies, *Transportation Research Record*, Vol. 2196, pp. 45-55, 2010.
- [85] Pel, A., Bliemer, M., Hoogendoorn, S.: Modeling traveller behavior under emergency evacuation conditions, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, Vol.11, pp.166-193, 2011.
- [86] Pel, A.J., Bliemer, M.C. J., Hoogendoorn, S.P.: A review on travel behavior modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations, *Transportation*, Vol.39, pp.97-123, 2012.
- [87] Pel, A.: Route Choice Behaviour and Optimal Traffic Management during Evacuation, The 1st International BinN research seminar, Tokyo, Japan, 2014.
- [88] Qian, Z., Shen, W., Zhang H.M.: System-optimal dynamic without queue spillback: Its path-based formulation and solution cost, *Transportation Research Part B*, Vol. 46, pp.874-893, 2012.
- [89] 陸前高田市: 陸前高田市東日本大震災検証報告書, 2014 年 7 月 .
- [90] Rust, J., Optimal Replacement of GMC Bus Engines: An Empirical Model of Harold Zurcher, *Econometrica*, Vol.55, pp.999-1033, 1987.
- [91] Rust, J., Nested Fixed Point Algorithm Documentation Manual, 2000.10. ([https://editorialexpress.com/jrust/nfxp.pdf\(22/6/2015\)](https://editorialexpress.com/jrust/nfxp.pdf(22/6/2015)))
- [92] 佐藤太一, 河野達仁, 越村俊一, 山浦一保, 今村文彦, 認知的不協和を考慮した津波避難行動モデルの開発, 地域安全学会論文集, No. 10, pp. 393-400, 2008.
- [93] Shi, F., Xu, G., Liu, B., Huang, H.: Optimization Method of Alternate Traffic Restriction Scheme based on Elastic Demand and Mode Choice Behavior, *Transportation Research Part C*, Vol. 39, pp. 36-52, 2014.
- [94] 篠崎嗣浩, 内田太郎, 林真一郎, 岡本敦, 清野耕史, 高濱洋介, 小野寺智久: 降雨規模と斜面崩壊・土

- 石流の発生確率の関係分析について, 平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, No. 66, pp. 458-459, 2012.
- [95] Su, C.J., Judd, K.L.: Constrained optimization approaches to estimation of structural models, *Econometrica*, Vol. 80, pp. 2213-2230, 2012.
- [96] So, Sk., Daganzo, C.F.: Managing Evacuation Routes, *Transportation Research Part B*, Vol. 44, pp. 514-520, 2010.
- [97] 多々納裕一: 災害リスクの特徴とそのマネジメント戦略, *社会技術研究論文集*, Vol. 1, pp.141-148, 2003.
- [98] Thurstone, L.: A law of comparative judgement, *Psychological Review* Vol. 34, pp. 273-286, 1927.
- [99] Tweedie, S., Rowland, J., Walsh, S., Rhoten, R.: A methodology for estimating emergency evacuation times, *Social Science Journal*, Vol. 23(2), pp. 189-204, 1986.
- [100] Ukkusuri, S.V., Waller, S.T.: Linear Programming Models for the User and System Optimal Dynamic Network Design Problem: Formulations, Comparisons and Extensions, *Network and Spatial Economics*, Vol. 8, pp.383-406, 2008.
- [101] Unnikrishnan, A., Lin, D-Y.: User Equilibrium with Recourse: Continuous Network Design Problem, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 27, pp. 512-524, 2012.
- [102] 浦田淳司: 豪雨災害避難時における微視的な相互協調作用とネットワーク複雑性, 東京大学工学系研究科都市工学専攻 修士論文, 2009.
- [103] 浦田淳司, 羽藤英二: 動的交通制御による最適避難ネットワーク計画, 第 49 回土木計画学研究発表会, CDROM, 2014.
- [104] Urata, J., Hato, E.: Modeling the Cooperation Network Formation Process for Evacuation Systems Design in Disaster Areas with a Focus on Japanese Megadisasters, *Leadership and Management in Engineering*, Vol. 12, pp.231-246, 2012.
- [105] 浦田淳司, 羽藤英二: 複雑ネットワークモデルを用いた豪雨災害時の協調行動形成に関する研究, 土木学会論文集 D3, Vol. 69, pp. 29-40, 2013.
- [106] 浦田淳司, 羽藤英二, 植村恵里: 将来リスクの動的変化を考慮した逐次型避難開始時刻選択モデル, 第 33 回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 255-260, 2013.
- [107] 牛山素行, 横幕早季: タイムスタンプデータによる津波到達直前の陸前高田市内の状況推定, 日本災害情報学会第 13 回研究発表大会予稿集, pp. 297-300, 2011.
- [108] 和田健太郎, 赤松隆: 単一ボトルネックにおける渋滞と混雑を解消する情報効率的メカニズムの設計, *土木学会論文集 D*, Vol.66, pp. 160-177, 2010.
- [109] Walker, J., Ehlers, E., Banerjee, I., Dugundji, ER.: Correcting for endogeneity in behavioral choice models with social influence variables, *Transportation Research Part A*, Vol. 45, pp. 362-374, 2011.
- [110] Wasserman, S., Pattison, P.: Logit models and logistic regressions for social networks: I. An introduction to Markov graphs and p^* , *Psychometrika*, Vol. 61(3), pp. 401-425, 1996.
- [111] Watts, D. J., Strogatz, S. H.: Collective dynamics of 'small-world' networks, *Nature*, Vol. 393(6684), pp. 440-442, 1998.
- [112] Wen, C., Koppelman, F.: The generalized nested logit model, *Transportation Research Part B*, Vol. 35, pp. 627-641, 2001.

- [113] Wilmot, C.G., Mei, B.: Comparison of alternative trip generation models for hurricane evacuation, *Proceedings of the 82nd Annual Meeting Transportation Research Board*, Washington, DC, USA, 2003.
- [114] Xie, C., Lin, D.Y., Waller, S.T.: A Dynamic Evacuation Network Optimization Problem with Lane Reversal and Crossing Elimination Strategies, *Transportation Research Part E*, Vol. 46, pp. 295-316, 2010.
- [115] Xie, C., Turnquist, M.A.: Lane-based Evacuation Network Optimization: An Integrated Lagrangian Relaxation and Tabu Search Approach, *Transportation Research Part C*, Vol. 19, pp. 40-63, 2011.
- [116] 山田昌和, 織田澤利守: 災害避難時における群集行動形成メカニズムのモデル化とその厚生分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 34, CD-ROM, 2006.
- [117] 横松宗太, 小林潔司: 防災投資による物的被害リスクの軽減便益, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp. 111-123, 2000.
- [118] Yueming, C., Deyun, X.: Emergency Evacuation Model and Algorithms, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol.8(6), pp. 96-100, 2008.
- [119] Zhang, H.M., Shen, W.: Access Control Policies without inside Queues: Their Properties and Public Policy Implications, *Transportation Research Part B*, Vol. 44, pp. 1132-1147, 2010.
- [120] Ziliaskopoulos, A.K.: A Linear Programming Model for the Single Destination System Optimumdynamic Traffic Assignment Problem, *Transportation Science*, Vol. 34, pp.37-49, 2000.

謝辞

本論文を結ぶにあたり、本研究を遂行する上で、ご指導、ご支援を頂いた皆様に対して、この場を借りて感謝の意を表します。

東京大学大学院 羽藤英二教授には、温かく厳しい指導を頂き、大変感謝しています。朝早くから夜遅くまで、研究室の片隅から旅先での船の上まで、いつでもあらゆるところで、研究や都市、人や将来について、多様な議論をして頂きました。そうした議論を通じて、自分でよく学び、考え、行っていくことの大切さが身に沁みていったように思います。また、羽藤さんが研究において何事も面白がりながら突き進んでいく姿を、身近で感じられたことは率直にとっても良かったです。そうした貴重な経験を今後の自分の研究生活においても活かしていきたいと思えます。

また、副査の先生方にも大変お世話になりました。東京大学大学院 原田昇教授には、モデルの軸となる部分から細かな部分まで質問していただき、研究にあたって、よく考え、しっかりと伝えることの重要性を認識しました。また、学部・修士時代から時折いただける筋の通ったコメントは、自分のやっていることを振り返ることができ、大変有難かったです。東京工業大学大学院 朝倉康夫教授には、副査に加え、合同ゼミや研究集会においても大変お世話になりました。行動とそのモデル化をいかに捉えているのか、どう捉えるとより面白くなるのかを常に聞かせていただいていたように思います。そうした議論は、研究をより深く考えることに繋がる貴重な機会であり、大変感謝しています。東京大学大学院 清水英範教授からは、どういった問題を持ち、いかに解決していくのかを常に考えることが研究的にも工学的にも重要であることを教わりました。これからの研究生活でも重要となる内容であり、大変有難かったです。東京大学大学院 高見淳史准教授には、都市工学の中で生かしていく視点や求められる視点について、幅広く議論させていただき、大変貴重な機会でした。研究からいかにインプリケーションを出し、実用に繋げていくのかは非常に重要な視点であり、今後の糧にしていきたいと思えます。また、副査説明にも関わらず、一緒に悩んでいただき、大変感謝しています。広島大学大学院 塚井誠人准教授には、避難やその制御に関する研究の持つ発展可能性について、研究的又は実用的視点からご指摘いただきました。議論を通じて、博士研究の理解を深め、今後の方向性についても示唆を得ることができ、大変有難かったです。

本研究で使用したデータは、2011年の東日本大震災の津波被災現況調査によるものであり、データを提供いただいた国土交通省都市局様に深く感謝を申し上げます。また、合わせて陸前高田市で行いました避難行動調査に協力していただきました復建調査設計の三谷卓摩さん(当時)、吉野大介さん、東京大学の植村恵里さん(当時)をはじめとする研究室メンバーに深く感謝を申し上げます。また、大変厳しい状況の中で、協力してくださった陸前高田市様やインタビュー・アンケートに応じてくださった陸前高田市民の皆様に対しましても、感謝の念に堪えません。同時に、早く望ましい復興がなされますように、祈念しております。また、2004年の新居浜市豪雨災害の避難行動データは、災害後の非常に困難な中で取得された記録であり、記録を作成された中川周郎さん、南信治郎さんをはじめとする愛媛大学工学部環境建設工学科都市環境計画研究室防災グループの皆様にも深く感謝を申し上げます。

また、主査・副査をしていただいた先生方以外の各大学の先生方にも様々な機会に研究のご指導・議論をしていただきました。東京工業大学の福田大輔准教授は、学会や研究会において、常に気にかけてくださり、研究の相談に乗ってくださり、大変感謝しております。神戸大学の井料隆雅教授には、ゼミや研究会、学会の機会において、研究へのアドバイスをくださり、また、研究への厳しい姿勢は大変勉強になりました。熊本大学の円山琢也准教授には、時折、個別の研究内容や博士論文に対するアドバイスをいただきました。また、熊本大学にも滞在させていただき、充実した刺激的な生活を送らせていただき、大変感謝しております。山梨大学の佐々木邦明教授、名古屋大学の山本俊行教授、愛媛大学の倉内慎也准教授には行動モデル夏の学校や学会、研究会において、研究に対するご意見をいただくのみならず、行動モデルの捉え方や研究の面白さについてもご指導いただき、大変勉強になりました。東北大学の桑原雅夫教授、京都大学の多々納裕一教授、金沢大学の中山晶一朗教授には、研究会や学会の場で研究に対する貴重なご意見やご助言をいただいたように思います。また、研究発表の場において、数多くの先生方から貴重なご意見を頂きました。厚くお礼を申し上げます。

また、東京大学の柳沼秀樹助教には、研究上の刺激的なアドバイスから博士研究への激励まで、身近な頼りになる存在として支えていただきました。東北大学の原祐輔助教、広島大学の力石真特任准教授、東京大学の Giancarlo Troncoso Parady 助教、東京大学の中西航助教にも大変お世話になりました。面白い研究に関する様々な議論をしていただき、大変刺激を受けました。今後ともよろしくお願ひします。

また、復興デザイン研究体の窪田亜矢特任教授、本田利器教授、大月敏雄教授、井本佐保里助教にも大変お世話になりました。復興デザイン研究体のスタジオや勉強会に参加させていただく中で、避難、復旧、復興の計画や現状を学ばせていただき、視野を広げる貴重な機会になりました。京都大学の山口敬太助教、愛媛大学の片岡由香助教には、風景づくり夏の学校やセミナーなどでお会いするたびに気にかけてくださり、大変有難かったです。

BinN のメンバーの方々にも研究を進める上で大変お世話になりました。ゼミや輪読、日々の議論などの中で、自分や相手の研究を通じて、学び、考え、理解を深めていく過程を共にできたことは大変有難いことだったと思います。大山雄己、伊藤創太、今泉孝章、若林由弥、伊藤篤志、芝原貴史、笠原和、佐津川功季、森部伸一、田子裕亮、山本萌美、林剛史、近松京介、三木真理子には口うるさい先輩にいつも付き合っていたことに感謝します。また、福山祥代さん、永杉博正さん、吉野大介さん、斉藤いつみさんには、社会人でありながら研究に取り組む姿を勉強させていただきました。研究室事務員である岡田舞さん、竹内直子さんには、研究室生活を問題なく送れるように日々研究室の環境を守っていただき、感謝しています。

また、博士課程に進む前に勤務しておりましたパシフィックコンサルタンツの河村成人氏、竹之内篤氏をはじめとする皆様には快く送り出していただき、また応援していただきました。深く謝意を表します。

本研究にあたり、日本学術振興会化学研究費補助金(特別研究員奨励費)のご支援を受けました。深く感謝いたします。

最後になりましたが、筆者の学生生活を、精神的にも経済的にも支えてくれた妻 遥に、本当に感謝いたします。

2015年8月 研究室にて