

同時多発出火時における避難距離の
分布に関する理論的考察

1999

石井 義光

同時多発出火時における避難距離の分布に関する理論的考察

筑波大学 社会工学研究科
都市・地域計画学専攻

石井 儀光

1999年1月 提出

13	日
	平成
	年
	月
	日

目次

第1章 研究の目的と構成	1
1.1 研究の目的と背景	1
1.2 既存研究	2
1.3 研究のフレームワーク	3
第2章 被災距離分布の導出	7
2.1 はじめに	7
2.2 モデルの仮定	7
2.3 被災距離分布の導出	8
2.4 避難開始時間に遅れがある場合の被災距離分布	17
2.5 途中で進路変更する場合の被災距離分布	21
2.6 境界周辺部での被災距離分布	27
2.6.1 最短距離で避難する場合	27
2.6.2 最短距離で避難出来ない場合	38
2.7 避難経路が直線でない場合の被災距離分布	43
2.8 まとめ	45
第3章 避難距離分布の導出	47
3.1 はじめに	47
3.2 避難路までの避難距離分布	47
3.2.1 最短距離で避難する場合	47
3.2.2 4方向へ避難する場合	51
3.2.3 任意の一方方向へ避難する場合	54
3.2.4 3つの距離分布の比較	58

3.3	避難地までの避難距離分布	60
3.4	まとめ	68
第4章	被災率の導出	69
4.1	はじめに	69
4.2	非施設的対策に対する評価への応用例	70
4.3	施設的対策に対する評価への応用例	76
4.4	誤差関数の近似について (補足)	79
4.5	まとめ	84
第5章	避難方向を選択した場合の避難距離分布	85
5.1	はじめに	85
5.2	ハザード比による分析	87
5.3	シミュレーションによる分析	89
5.4	ワイブル分布による推定	94
5.5	まとめ	97
第6章	本研究の結論および今後の課題	99
6.1	結論	99
6.2	今後の課題と展望	102
6.3	都市防災計画への適用可能性	103
	参考文献	105
	謝辞	108

目 次

1.1	同時多発出火モデルのイメージ図	4
2.1	延焼領域に入らない場合	8
2.2	延焼領域に入る場合	9
2.3	模式図	9
2.4	領域 D_1	10
2.5	被災距離分布 $F(l)$	12
2.6	被災距離分布 $f(l)$	12
2.7	出火密度による平均値 $E(l)$ の変化	13
2.8	出火密度の変化による平均値 $E(l)$ の変化率	14
2.9	平均値 $E(l)$	15
2.10	α と β との関係	15
2.11	領域 D_d	17
2.12	避難開始時間による $f(l)$ の違い	19
2.13	避難開始時間の遅れによる平均値 $E(l)$ の変化	20
2.14	面積の重複部分	21
2.15	$F_\theta(l)$ および $F(l)$	22
2.16	$F_\theta(l)$ に対する $F(l)$ の相対較差	23
2.17	α を変化させた場合の相対較差の最大値	24
2.18	θ を変化させた場合の相対較差の最大値	24
2.19	$f_\theta(l)$ および $f(l)$	25
2.20	$f_\theta(l)$ に対する $f(l)$ の相対較差	26
2.21	境界に向かう場合の領域 D_1	27
2.22	$F_2(l)$ および $F(l)$	29

2.23	$F_2(l)$ に対する $F(l)$ の相対較差	29
2.24	相対較差の最大値	30
2.25	$f_2(l)$ および $f(l)$	31
2.26	三角形で近似した場合の領域 D_1	31
2.27	$F_2(l)$ および $F_3(l)$	33
2.28	$f_2(l)$ および $f_3(l)$	33
2.29	$F_2(l)$ に対する $F_3(l)$ の相対誤差	34
2.30	相対誤差の最大値	35
2.31	$f_2(l)$ に対する $f_3(l)$ の相対誤差	35
2.32	区画の隅に向かう場合	36
2.33	区画の隅に向かう場合の領域 D_1	37
2.34	境界に向かう場合の領域 $D_1(1)$	38
2.35	境界に向かう場合の領域 $D_1(2)$	39
2.36	$F_4(l)$ および $F(l)$	41
2.37	$f_4(l)$ および $f(l)$	41
2.38	$F_4(l)$ に対する $F(l)$ の相対較差	42
2.39	避難経路が直線でない場合の例 (1)	43
2.40	避難経路が直線でない場合の例 (2)	44
3.1	最短距離避難のモデル	48
3.2	避難距離が r 以下となる領域	48
3.3	距離分布 $g(r)$	49
3.4	4方向への避難	51
3.5	距離が r 以下となる領域	52
3.6	距離分布 $g_2(r)$	53
3.7	境界に向かう移動の図	54
3.8	距離が r 以下となる領域	54
3.9	場合分けの範囲	55
3.10	距離分布 $g_3(r)$	57

3.11	距離分布の比較	58
3.12	γ の値による期待値の変化	59
3.13	避難地型整備のモデル	61
3.14	避難距離が r 以下となる領域	61
3.15	避難距離が r 以下となる領域	62
3.16	距離分布 $g(r)$	64
3.17	避難距離が r 以下となる領域	65
3.18	平均距離 $E(x, y)$	65
3.19	平均距離 $E(x, y)$ の等高線	66
4.1	被災率 H_1	72
4.2	被災率の相対誤差	72
4.3	被災率 H_2	75
4.4	被災率の相対誤差	75
4.5	中心部に避難地をもつ領域	76
4.6	被災率 H_3	78
4.7	被災率の相対誤差	78
4.8	$\text{Erf}(z)$ および近似式 $\text{Erf1}(z)$	80
4.9	$\text{Erf}(z)$ に対する近似式 $\text{Erf1}(z)$ の相対誤差	80
4.10	$\text{Erf}(z)$ および近似式 $\text{Erf2}(z)$	82
4.11	$\text{Erf}(z)$ に対する近似式 $\text{Erf2}(z)$ の相対誤差	82
4.12	$\text{Erf}(z)$ と近似式の比較	83
5.1	3方向避難	85
5.2	出火密度の違いによる分布の変化	90
5.3	出火密度の違いによるハザード比の変化	90
5.4	速度比の違いによる被災距離の変化	92
5.5	速度比の違いによるハザード比の変化	92
5.6	迂回した回数	93
5.7	ワイブル分布による推定	95

表 目 次

5.1	ワイブル分布による最尤推定量	96
5.2	ρ を変化させた場合の最尤推定量	96
5.3	ρ を変化させた場合の最尤推定量	96

第1章

研究の目的と構成

1.1 研究の目的と背景

本研究の第1の目的は、都市部において同時多発出火した場合の避難の状況をモデル化し、避難者が延焼に巻き込まれて被害に遭う確率を理論的に導出することである。

日本の都市は過去の歴史において多くの大火に見まれてきた。その規模は世界的に見ても大きなものである。その原因の一つとして都市を構成する建築物の多くが木造であり、それらが密集して建設されてきたために延焼が拡大しやすい状況にあったことが考えられる。また、我が国は地震国であり1923年の関東大震災にみられるように大地震による同時多発出火を原因とする都市大火を経験し、多くの人的、物的被害を被ってきた。都市大火を防止するためには都市を構成する建築物そのものを不燃化し、出火と延焼の拡大を阻止することが重要であり、その対策のための事業が行われてきている。現状において都市部のどこがどの程度危険であるかということを知るために危険度算定が行われているが、危険度の算定に当たっては様々な要素が考慮され、コンピュータシミュレーションによる詳細な計算がなされている。被害の予測のためにこれまでに様々な手法が開発されてきたが([建設省 1982]), 用いられている手法としてはコンピュータシミュレーションが殆どである。その場合、様々な要素が複雑に絡み合うためどの要素が決定的に効いてくるのかと言ったことが見えなくなってしまう、大局的な構造を把握しづらくなっている。そこで、本研究では解析的なアプローチを行うことにより、大局的に見たときの被害の構造を把握することを目的としている。

次に、本研究の第2の目的は延焼遮断帯や避難路によって囲まれた領域内で同時多発出火する事態を想定し、避難者が延焼に巻き込まれてしまう確率と区画の規模との関係についても解析的な研究を行い、その構造を把握することとする。

地震時の同時多発出火を考えると消防能力を上回ることや消防設備が正しく機能しないこと

などが予想されるため、消火作業だけで延焼の拡大を阻止することは困難であると予想される。そこで、広幅員道路や不燃建築物群などの延焼遮断帯によって囲まれた区画をつくる都市防火区画計画が進められている。これは、その区画内部から外部に火を出さない、外部から火をもらわないという構想の計画であり、通常の規模を越えるような出火がおこり消火活動が困難である場合にはこの延焼遮断帯の整備が極めて重要な役割を果たしてくると考えられる。実際、1995年の阪神淡路大震災における延焼の焼け止まり線を見ても延焼遮断帯の効果が現れている([火災学会 1996])。既存研究の節で述べるように延焼遮断帯の効果の測定に関しては既にいくつかの研究がなされているが、コンピュータによるシミュレーションが主流であり、そのため、様々なデータをそろえたケーススタディーは可能であっても、より一般的にその効果を論じることは困難な状況にある。そこで、延焼遮断帯や避難路、避難地の整備状況が同時多発出火時の避難に関してどのような影響を与えるかということについて解析的に考察を行い、大局的にその構造を把握することができれば、都市防災対策の効果についてより一般的な考察を加えることができる。都市防災対策事業に無尽蔵に資本を投下できれば問題はないが、限られた資本の中で事業を行う場合にはその効果に対する評価基準を設け、より効果的な事業に対して資本を投下していくことが重要であると考えられる。この様に、事業の評価に用いることができるようなマクロ的評価関数を導出することの意義は大きいと考えられる。

解析的に構造を把握する場合、避難行動や延焼動態などのどの要素に焦点を当てるかによってモデルが異なるため、本研究において全ての場合を尽くしているわけではない。しかし、本研究の目的はコンピュータシミュレーションが中心である現状においてこれとは別な解析的アプローチで都市防災に関する考察を行うことの足がかりを得ようとするものである。

1.2 既存研究

火災や避難に関しては、実際の建築物の状況や個人の動きなどを考慮した精緻なマイクロモデルによるシミュレーションが多数行われている([建設省 1982])。しかしながら、本研究のように避難者が火災に巻き込まれてしまう状況や、火災に巻き込まれるまでの時間の分布を確率論的に論じることはこれまでになされてきてはいない。

本研究では延焼速度および避難者の歩行速度は外生変数として扱うため、パラメトリックな計算を行う場合にはこれらの値を与える必要がある。火災の延焼速度および延焼動態に関しては、

第1章 研究の目的と構成

過去のデータ等を分析することによって経験的、確率論的に得られた延焼速度式が開発されている ([堀内 1994]). 代表的なものとしては浜田式や東京消防庁式があるが、これらは風速風向や市街地属性を入力すると延焼速度が一意に定まるものであり、本研究でパラメトリックな計算を行う場合にはこれらの式を参考に値を設定することにする。なお、これらの方式では時々刻々の風速や風向の時間的変化に対応できないため、[藤本, 熊谷 1989] では風速風向の変化に対応し、飛び火や耐火建築物による延焼遅延効果、延焼遮断帯の効果まで考慮した延焼予測シミュレーションモデルが提案されている。なお、解析的なアプローチとしては、[糸井川, 塚越 1989] においては風速の変化や飛び火を考慮して建物単位での着火確率の変化を記述する微分方程式に基づくモデルが提案されているし、[青木 1987],[青木 1989a] は確率論的延焼拡大モデルを構築している。

次に、地震時の出火件数を予測することに関しては、河角式による出火率と倒壊率との関係式が有名であるが、倒壊率もまた地震の状況によって変化するものであることから、[難波, 他 1992] では地震の力から直接出火率を予測するモデルが提案されている。また、[青木 1990] においては確率論的なアプローチによって出火率と倒壊率との関係が示されている。

都市防火区画計画については、[水野 1981] によって、関東大震災規模の地震が起こった場合に東京をどの程度の規模の防火区画によって分割しておけばどの程度の効果があるかという視点から論じられており、その重要性が示されているが、時間経過を伴う避難の状況までは記述されていない。

また、避難路の整備の効果という点に関しては、地区内の細街路に関して [熊谷 1987] によって避難の観点から細街路整備の基準について議論されている。

次章以降でも必要に応じて既存研究の紹介を行うこととする。

1.3 研究のフレームワーク

本研究では延焼に巻き込まれて被害に遭うまでの避難距離の分布を導出するため、図 1.1 に示すように同時多発出火の状況をモデル化し、考察を加えていくこととする。

コンピュータシミュレーションだけでは避難においてどの要因が決定的に効いているのかということが把握しづらいため、本研究では理論モデルを構築することで解析的に全体の構造を把握することを目的としている。そこで、解析性を失わないために、出火の密度および火災の

延焼速度と避難者の移動速度の比率という要素を主軸としてモデルを構築することとする。

モデル化の詳細に関しては第2章以降の各章で論じることとし、以下では各章の構成について述べる。

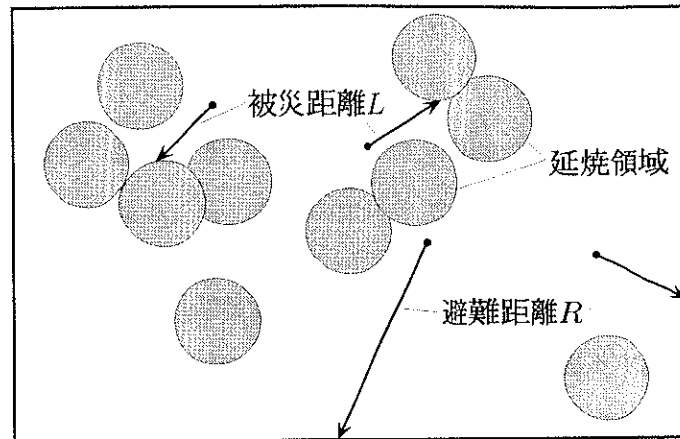


図 1.1: 同時多発出火モデルのイメージ図

まず第2章では、全く安全な場所が無いという状況での同時多発出火を想定する。そのような状況で直線的に逃げ続けた場合に、最終的に火災に巻き込まれるまでの距離を被災距離と定義し、被災距離の分布を導出することを主目的とする。この場合は安全な領域がないため、最終的には必ず火災に巻き込まれる事になる。また、途中で進行方向を転換する場合や、避難の開始時刻に遅れが生じる場合、安全な領域が存在する場合に被災距離分布がどのように変化するかということについても考察を加えることとする。

第3章では、火災が発生していない状況の下で安全な場所にたどり着くまでの移動距離を避難距離と定義し、避難距離の分布を導出する。なお、安全な領域として避難路のように線的に張り巡らされた領域と、避難地や避難所のように局所的に存在する領域の2種類の場合を考える。

まず、火災が発生していない状況においてある領域内部の任意の地点からその領域の境界線までの移動にかかる距離を避難距離と定義し、避難距離分布を導出する。その際、避難方向に対する情報が有るか無いかによって避難距離分布にどのような違いがあるかを明らかにする。次に、領域内部にある避難地に向かって避難する場合の避難距離分布を導出する。また、避難距

第1章 研究の目的と構成

離の平均値を最小化する避難地の最適配置問題についても考察を加える。

第4章では、安全な場所に辿り着く前に火災に巻き込まれてしまう確率を被災率 H と呼ぶこととし、第2章および第3章で導出した被災距離分布および境界までの距離分布を用いてこの被災率 H を計算する。被災率 H の計算においては、ある距離 l までに避難を完了していないという条件の下である距離 l において延焼に巻き込まれてしまうという条件付き確率密度を $h(l)$ とおき、 $h(l)$ を積分することによって被災率 H を導出する。そして、被災率が対象領域の出火点の個数に比例するという簡単な関係式を導く。また、政策評価の評価関数の一つとして被災率を利用する場合の事例として施設の防災対策の評価と非施設の防災対策の評価の例を示す。

第5章では、第2章において導出した被災距離分布を拡張し、避難する方向をその状況に応じて判断しながら避難する場合の被災距離分布について計算機シミュレーションによる分析を行う。被災距離分布の分析にあたり、生物学や医学、信頼性工学の分野で用いられるハザード比の考え方を導入する。ハザード比によって被災距離分布を眺めると、以前よりも見通しがよくなる部分がある。計算機シミュレーションの結果を元にハザード比を計算し、ハザード比が距離に関する増加関数となっていることを示す。また、その結果を受けてワイブル分布を仮定し、最尤法によるパラメータ推定を行う。

なお、本研究の第2章の一部は[石井, 腰塚 1997a]で、第2章と第3章の一部は[石井, 腰塚 1997b]で、第3章と第4章の一部は[石井, 腰塚 1998a]で、第5章の一部は[石井, 腰塚 1998b]で、第2章から第4章までの内容の一部は[石井, 腰塚 1998c]で発表したものである。

第2章

被災距離分布の導出

2.1 はじめに

本章ではまず、無限に広がる都市領域の中で火災が発生するものと仮定して、避難者が直線的に避難した場合に延焼領域に入るまでの被災距離 l の分布 $f(l)$ を理論的に導出することとする。

まず、2.2 節においてモデルの仮定を述べ、2.3 節で具体的に被災距離分布の導出とその考察を行う。2.4 節では出火から避難開始までの時間の遅れによって生じる被災距離分布の変化について考察を加える。2.5 節では直線的に避難する場合と途中で進行方向を変更する場合とで被災距離分布にどのような違いがあるかを考察する。2.6 節では有限領域の中で火災が発生していると仮定して、火災のない領域に向かって避難する場合の被災距離分布を導出し、無限領域を仮定した場合との違いについて論じる。

2.2 モデルの仮定

まず、都市領域内のあらゆる地点から出火する可能性があるものと仮定して、出火点の分布を特定せずに密度 ρ で一様にランダムに出火点が分布しているものとする。延焼動態に関しては、時刻 $T = 0$ で出火してから同心円状に等速度で延焼が拡大するものと仮定する。[堀内 1994]によれば、延焼は一般的には風速風向によって変化し、ほぼ卵形の形状で拡大することが知られており、様々な延焼モデルが提案されているが、ここでは出火点が一様にランダムに分布するという仮定と延焼が同心円状に拡大するという仮定を設けることで、どの避難方向にも適用できる被災距離分布を導出する。なお、延焼領域の半径が拡大する速度は人の歩行(避難)速度を v として、その α 倍 ($0 \leq \alpha \leq 1$) と仮定する。よって、時刻 t における 1 箇所当たりの延焼領域の半径は αvt と表される。次節ではこれらの仮定の下で、都市領域内の任意の地点 O を避難開始地点として任意の方角に向かって半直線上を移動した場合に、延焼に巻き込まれるまでの被

災距離 L が l 以下となる確率 $F(l)$ を導出し、被災距離分布 $l(t)$ の分布を求める。

2.3 被災距離分布の導出

まず、避難開始時刻を出火時刻と同じ $T = 0$ として時刻 t における避難者の位置を P_t で表し、 P_t を中心とした半径 αvt の円を C_t で表すことにする。このとき図 2.1 のように、 C_t (図 2.1 の網掛けの円内) に出火点が存在しなければ、避難者が位置 P_t に到着した際にまだ延焼がその地点まで及んでいないことになり、延焼領域 (出火点を中心とした半径 αvt の円内) に入らずにすむ。逆に、図 2.2 のように、位置 P_t から半径 αvt の円内に出火点が存在する場合には避難者が地点 P_t に到着した際には、出火点から距離 αvt 以内となり延焼が及んだことになり、避難者は時刻 t までの間に延焼領域に巻き込まれてしまうことになる。

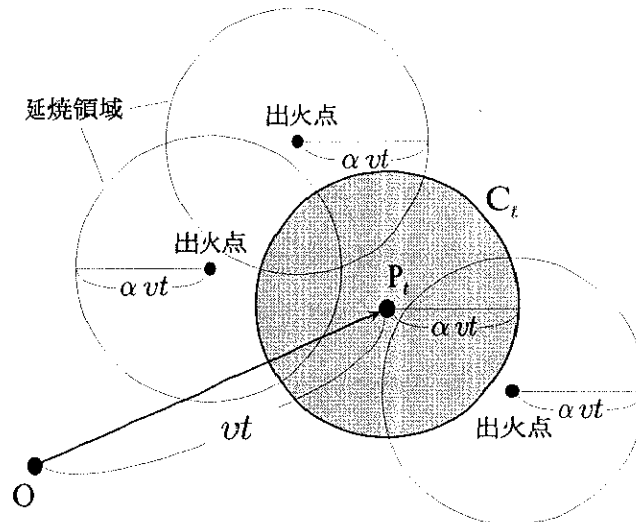


図 2.1: 延焼領域に入らない場合

図 2.3 において時刻 $T = 0$ の位置 O から微小時間 Δt 移動した地点 $P_{\Delta t}$ まで延焼領域に入らずに移動するためには $C_{\Delta t}$ 内に出火点が無ければよく、 $P_{\Delta t}$ から更に微小時間 Δt 移動して $P_{2\Delta t}$ まで無事に避難することを考えると、円 $C_{2\Delta t}$ 内に出火点がなければよい。つまり、 O から $P_{2\Delta t}$ まで延焼領域に入らずに避難するためには円 $C_{\Delta t}$ と $C_{2\Delta t}$ の内部に出火点がなければよい。

よって、時刻 $T = 0$ から t までの移動の間に避難者が延焼領域に入らないための条件は、 $T = 0$ から t まで連続的に T を変化させたときにそれぞれの円 C_T の内に出火点の一つも存在しないことである。 $T = 0$ から t まで連続的に T を変化させたときに出来る各円 C_T の包絡線によってできる図形は図 2.4 の太い実線に示す様な滴型の図形となる。この滴型の領域を領域

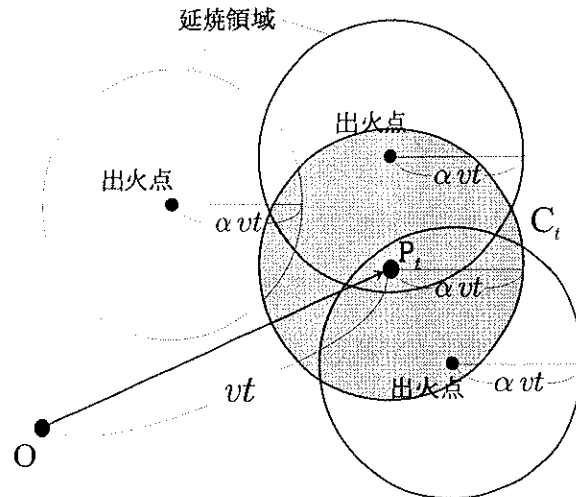


図 2.2: 延焼領域に入る場合

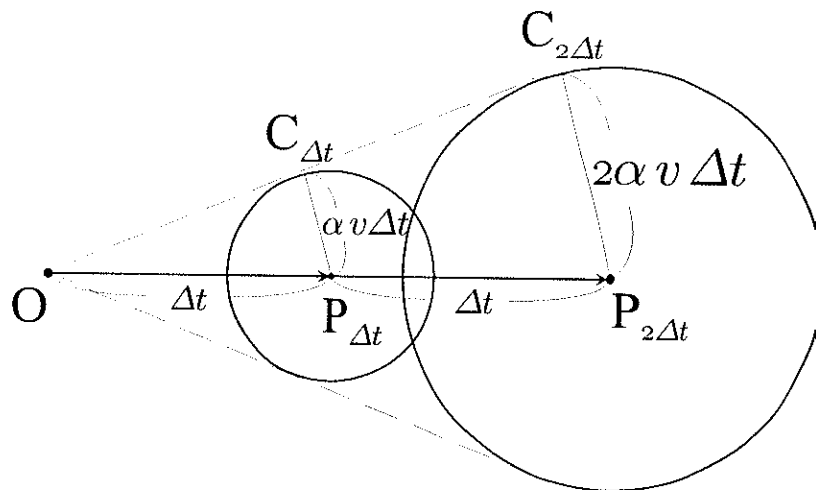
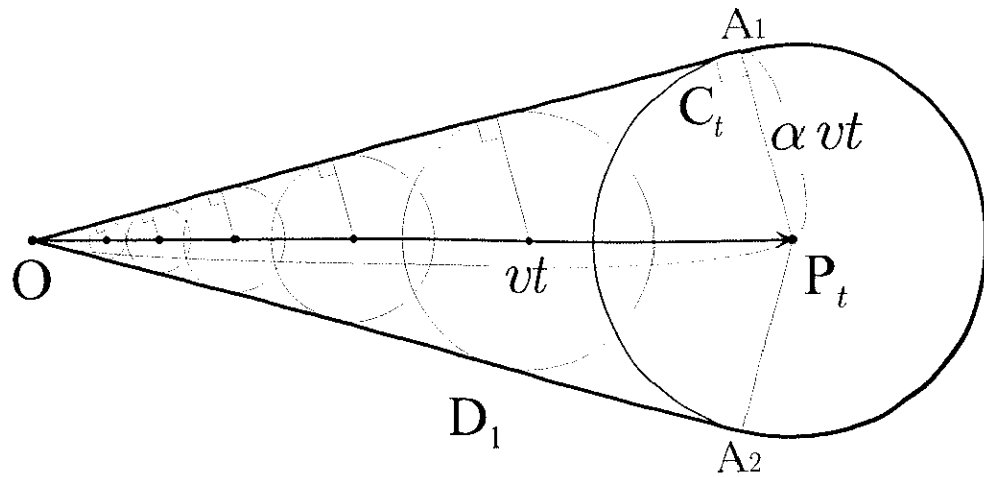


図 2.3: 模式図

D_1 として、この中に出火点が1つもなければ、避難者は時刻 t までの間、延焼領域に巻き込まれずに移動することができる。

なお、避難者は等速度 v で移動するという仮定から、時刻 t までの移動距離 l は t を用いて、 $l = vt$ と表せる。今後は明示的に時間 t を用いることなく、被災距離 l で移動距離と同時に時間の経過も示すこととする。

ここで、領域 D_1 の面積を s_1 とおき、 s_1 の導出を行う。まず、図 2.4 において C_t の外接線で点 O を通るものと C_t との接点を A とおく。この条件を満たす点は2つあるので、図の上側の点を A_1 、下側の点を A_2 とおく。すると、領域 D_1 は三角形 OP_tA_1 と三角形 OA_2P_t 、扇形

図 2.4: 領域 D_1

$P_t A_1 A_2$ の3つの部分に分けることができる。

$|\overrightarrow{OP_t}| = l$, $|\overrightarrow{P_t A_1}| = \alpha l$, $\angle P_t A_1 O = \pi/2$ より, $\angle OP_t A_1 = \arccos \alpha$ である。よって, 三角形 $OP_t A_1$ および三角形 $OA_2 P_t$ の面積はそれぞれ,

$$\frac{1}{2} \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} l^2$$

である。次に, 扇形 $P_t A_1 A_2$ の面積は,

$$(\pi - \arccos \alpha) \alpha^2 l^2$$

である。よって, s_1 は,

$$s_1 = \left\{ \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha) \alpha^2 \right\} l^2 \quad (2.1)$$

と表せる。密度 ρ で一様にランダムに分布している点が面積 S の領域の中に x 個含まれる確率 $P(x, S)$ は, ポアソン分布に従うことが知られており ([谷村, 他 1986] 参照),

$$P(x, S) = \frac{(\rho S)^x}{x!} e^{-\rho S}$$

と表すことができる。よって, 面積 s_1 に出火点が1つも無い確率 $P(0, s_1)$ は,

$$P(0, s_1) = e^{-\rho s_1}$$

である。

第2章 被災距離分布の導出

被災距離が l 以下となるのは面積 s_1 の中に少なくとも 1 個の出火点が含まれている場合である。よって、避難者が延焼領域に入るまでの距離が l 以下である確率 $F(l)$ は、1 から $P(0, s_1)$ を引いて、

$$\begin{aligned} F(l) &= 1 - e^{-\rho s_1} \\ &= 1 - e^{-\rho \beta l^2} \end{aligned} \quad (2.2)$$

と求められる。ただし、表記を見やすくするために

$$\beta = \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha) \alpha^2 \quad (2.3)$$

とおいている。

この $F(l)$ は求める距離分布 $f(l)$ の累積であるから、 $f(l)$ は $F(l)$ を l で微分して、

$$f(l) = 2\rho\beta l e^{-\rho\beta l^2} \quad (2.4)$$

と求められる。よって、被災距離 l の平均値 $E(l)$ は、

$$\begin{aligned} E(l) &= \int_0^\infty l f(l) dl \\ &= \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\rho\beta}} \\ &= \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\rho \left(\alpha \sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha) \alpha^2 \right)}} \end{aligned} \quad (2.5)$$

と求められる。このように、被災距離分布は出火点の密度 ρ と、避難速度と延焼速度の比 α によって表される。また、被災距離の平均値は ρ と α の積の平方根に反比例する事が分かる。

念のためコンピュータシミュレーションの結果との比較を行うため、[堀内 1994]を参考にして具体的に変数に値を代入してみる。混雑現象を考慮して歩行速度 $v = 2500$ m/h、延焼速度 $\alpha v = 50$ m/h と仮定すると、速度比 $\alpha = 0.02$ となる。出火密度は阪神淡路大震災時の神戸市長田区での D.I.D. における出火確率 4.2×10^{-4} 件/世帯を参考として、世帯密度を 50 世帯/ha と考えて、 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ 件/m² とする。この設定で $F(l)$ をプロットしたものが図 2.5、 $f(l)$ をプロットしたものが図 2.6 である。実線で示しているのが理論値であり、破線で示しているものがコンピュータによる 1 万回の試行結果である。図 2.6 をみると平均値の付近で若干シミュレーション結果の値が低い値を示しており、その後はシミュレーション結果の方が高い値を示しているのであるが、その差は僅かである。

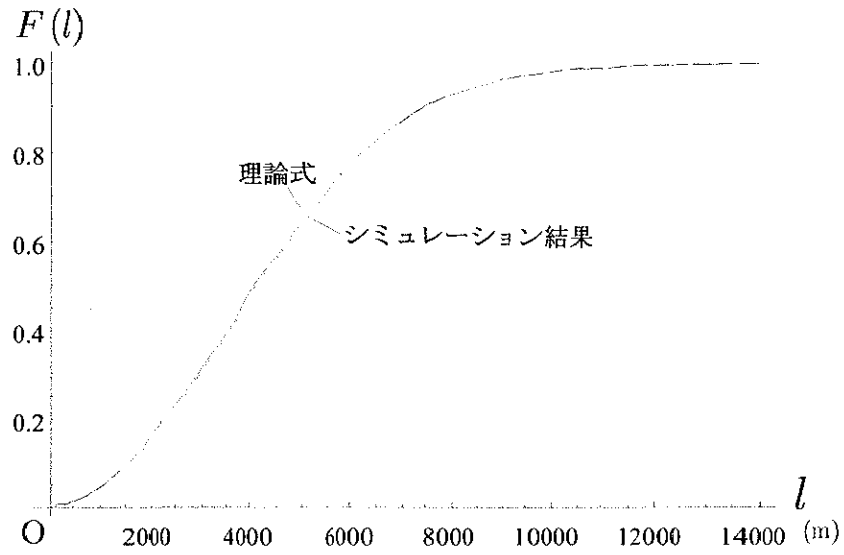


図 2.5: 被災距離分布 $F(l)$

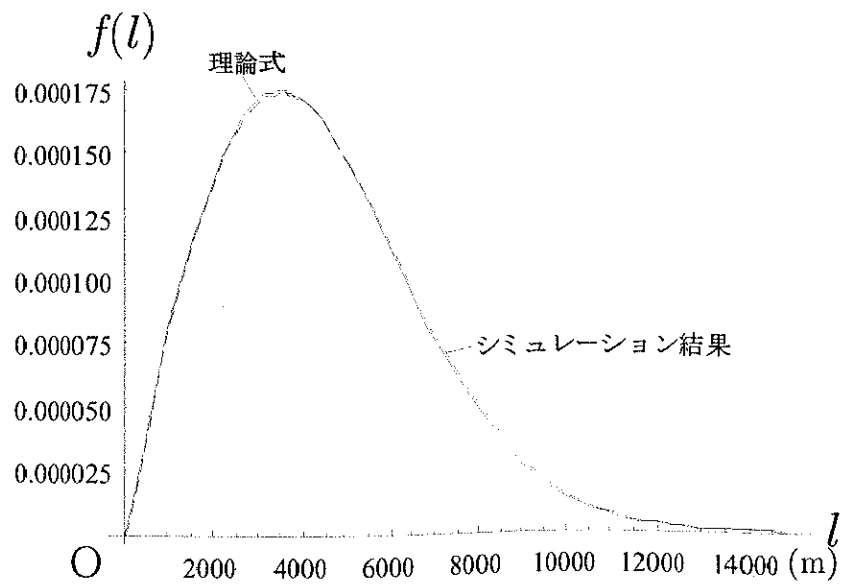


図 2.6: 被災距離分布 $f(l)$

第2章 被災距離分布の導出

図2.6に示した $f(l)$ のグラフは確率的に一人の避難者が様々な出火パターンの中で避難を行ったときの被災距離の分布を示している。このときの被災距離の平均値を計算すると、

$$E(l) = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{0.000002(0.02\sqrt{1-0.02^2} + (\pi - \arccos 0.02)0.02^2)}} \sim 4363$$

であることから、延焼の状況が判断できずにただ闇雲に逃げた場合には平均的には約4.4kmほどの移動で延焼領域に巻き込まれてしまうことが分かる。また、約15km以上逃げられる確率は極めて低いことが読みとれる。

次に、出火密度 ρ を変化させたときの被災距離の平均値 $E(l)$ の変化をみると、(2.5)式から明らかなように $E(l)$ は $1/\sqrt{\rho}$ に比例するため、 ρ を2倍しても $E(l)$ は $1/\sqrt{2}$ にしかならない。そこで、例として実際にパラメータに値を代入して被災距離の平均値の変化を見ることにする。出火確率は先ほどと同様に 4.2×10^{-4} 件/世帯とし、世帯密度を良好な環境といえる30世帯/haから、高密といえる100世帯/ha程度まで変化させて、 $1 \times 10^{-6} \leq \rho \leq 4 \times 10^{-6}$ の範囲で平均値 $E(l)$ をプロットしたものを図2.7に示す。

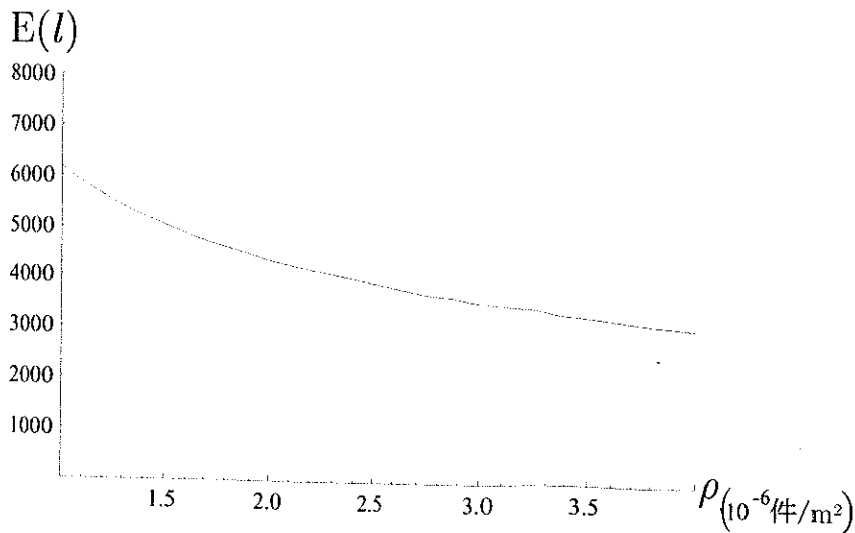


図 2.7: 出火密度による平均値 $E(l)$ の変化

図2.7を見ると、 ρ が増加したときの $E(l)$ の変化率が次第に小さくなっていくことが読みとれる。

実際,

$$\frac{\partial}{\partial \rho} E(l) = -\frac{\sqrt{\pi}}{4\sqrt{\beta}\rho^{3/2}}$$

と計算できることから、被災距離の平均値の変化率は $\rho^{-3/2}$ に比例することが分かる。この変化率をプロットしたものを図 2.8 に示すが、 ρ の増加に伴い平均値の変化率の絶対値が小さくなっていく様子が分かる。

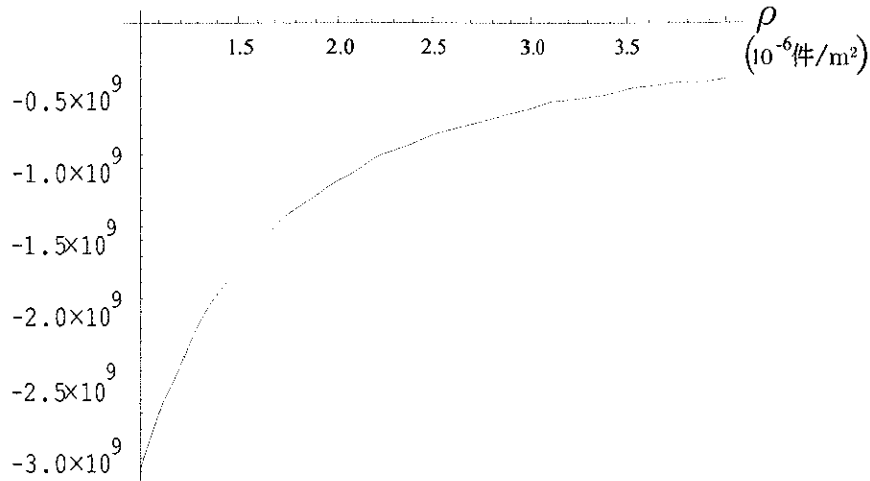


図 2.8: 出火密度の変化による平均値 $E(l)$ の変化率

次に、速度比 α を変化させた場合について考察してみる。先ほど用いた α を $1/2$ から 2 倍まで変化させた場合、即ち $0.01 \leq \alpha \leq 0.04$ の場合の $E(l)$ の値をプロットしたものを図 2.9 に示す。

図 2.9 をみると、先ほど ρ を変化させた場合と殆ど同じグラフとなっていることが分かる。これは、 α と β の関係から明らかになる。ここで、 α と β との関係を再掲すると、

$$\beta = \alpha\sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha)\alpha^2$$

である。この関係をプロットしたものを、図 2.10 に示す。

この様に、 β は α が 1 に近づくにつれて π に近づいていく値である。しかし、 β を級数展開してみると、

$$\beta = \alpha + \frac{\pi}{2}\alpha^2 + O(\alpha^3)$$

であることから、 $\alpha^2 \sim 0$ と見なしていいところでは近似的に、

$$\beta \sim \alpha$$

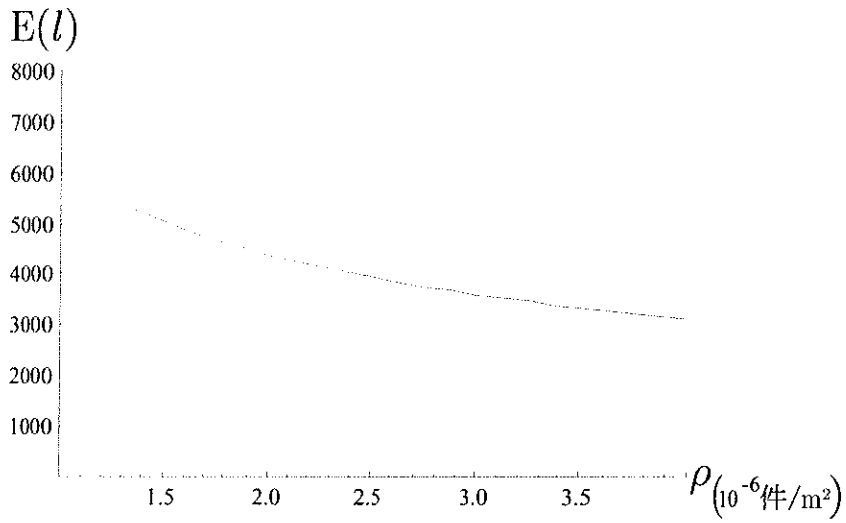


図 2.9: 平均値 $E(l)$

と考えてよいであろう。この例で示すように $\alpha = 0.02$ の場合には $\beta = \alpha$ で近似した場合の相対誤差は約 3.1 % である。よって、本節で用いた数値例では ρ を変化させた場合と α を変化させた場合の $E(l)$ の変化の図がほぼ同じ図となったのである。よって、 $\beta \sim \alpha$ と考えられる場合には、被災距離の平均値 $E(l)$ は速度比 α の平方根に反比例すると考えてよいだろう。

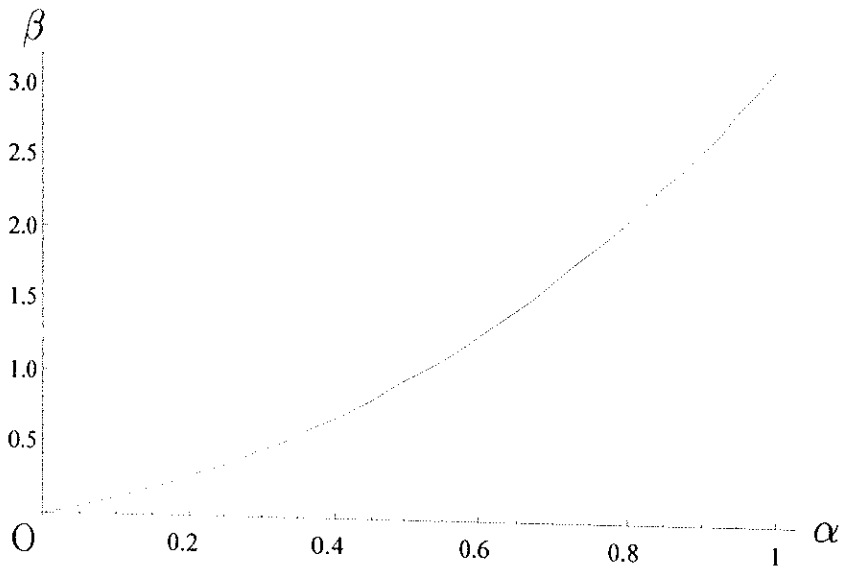


図 2.10: α と β との関係

2.4 避難開始時間に遅れがある場合の被災距離分布

2.3節では出火と同時に避難を開始するという仮定の下での被災距離分布を導出した。理想的なのは出火と同時に避難を開始することであるが、現実には火災が発生していることを認識するまでに時間がかかったり、まず様子を見てから避難するかどうかを判断しようとする場合があるために避難開始時刻に遅れが生じると予想される。そこで、本節では避難開始時刻が出火時刻から t_1 だけ遅れた場合に被災距離分布がどう変化するか考察していく。なお、避難開始時刻が出火時刻と同時の $T = 0$ ではなく、時刻 t_1 であるという点を除いてその他の設定は全て2.2節で述べたモデルの仮定に従うこととする。

まず、避難を開始するまでの間に既に延焼が拡大しているため、時刻 t_1 までに延焼に巻き込まれないためには避難開始地点 O を中心として半径 αvt_1 の円内に出火点が一つもなければよい。次に、時刻 t_1 から t 時間後まで無事に避難できるためには、前節と同様に考えると図 2.11 に示す領域 D_d の内部に出火点が一つもなければよい。そこで、 D_d の面積を s_d とおくと s_d は、

$$s_d = \left\{ \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha) \alpha^2 \right\} (l^2 + 2l_1 l) + \pi \alpha^2 l_1^2 \quad (2.6)$$

と表せる。ただし、 $vt = l$ 、 $vt_1 = l_1$ とおいている。

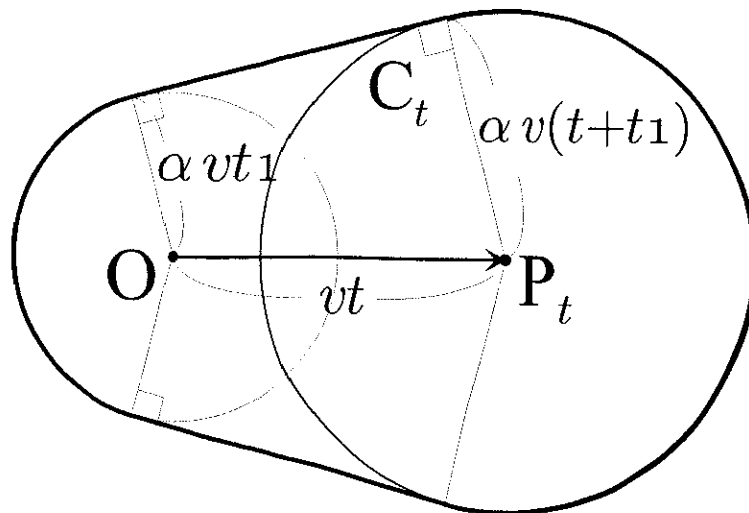


図 2.11: 領域 D_d

よって、面積 s_d に出火点が 1 つもない確率 $P(0, s_d)$ は、出火点が一様に分布しているという仮定から、

$$P(0, s_d) = e^{-\rho s_d}$$

2.4. 避難開始時間に遅れがある場合の被災距離分布

となる.

被災距離が l 以下となるのは面積 s_d の中に少なくとも 1 個の出火点が含まれている場合である. よって, 避難者が延焼領域に入るまでの距離が l 以下である確率 $F(l)$ は, 1 から $P(0, s_d)$ を引いて,

$$\begin{aligned} F(l) &= 1 - e^{-\rho s_d} \\ &= 1 - e^{-\rho(\beta l^2 + 2\beta l_1 l + \pi \alpha^2 l_1^2)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

と求められる. ただし, 表記を見やすくするために

$$\beta = \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha) \alpha^2$$

とおいている.

よって, 求める距離分布 $f(l)$ は $F(l)$ を l で微分して,

$$f(l) = 2\rho\beta(l + l_1) e^{-\rho(\beta l^2 + 2\beta l_1 l + \pi \alpha^2 l_1^2)} \quad (2.8)$$

と求められる.

そこで, 前節と同様に, 出火密度 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ (件/ m^2), 避難歩行速度 2,500 m/h, 延焼速度を 50 m/h と仮定し, 避難開始時間が 0 分, 30 分, 1 時間, 1 時間 30 分, 2 時間と遅れた場合について被災距離分布をプロットしたものを, 図 2.12 に示す.

出火と同時に避難を開始した場合には $f(0) = 0$ であったが, 避難開始時刻が遅れる場合 ($l_1 > 0$) には,

$$f(0) = 2\rho\pi\alpha^2 l_1 e^{-\rho\pi(\alpha l_1)^2} > 0$$

であり, l_1 が大きくなるにつれて $f(0)$ の値も大きくなる. 図 2.12 をみるとその様子が分かる. また, 避難開始時間の遅れの増加に伴って被災距離分布の裾も次第に原点よりに引っ張られていく様子が読みとれる. そこで, 被災距離分布の平均値の変化を見てみることにする.

被災距離 l の平均値 $E(l)$ を計算すると,

$$\begin{aligned} E(l) &= \int_0^{\infty} l f(l) dl \\ &= \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\rho\beta}} \left(1 - \text{Erf}\left(\sqrt{\rho\beta} l_1\right)\right) e^{\rho(\beta - \pi\alpha^2) l_1^2} \end{aligned} \quad (2.9)$$

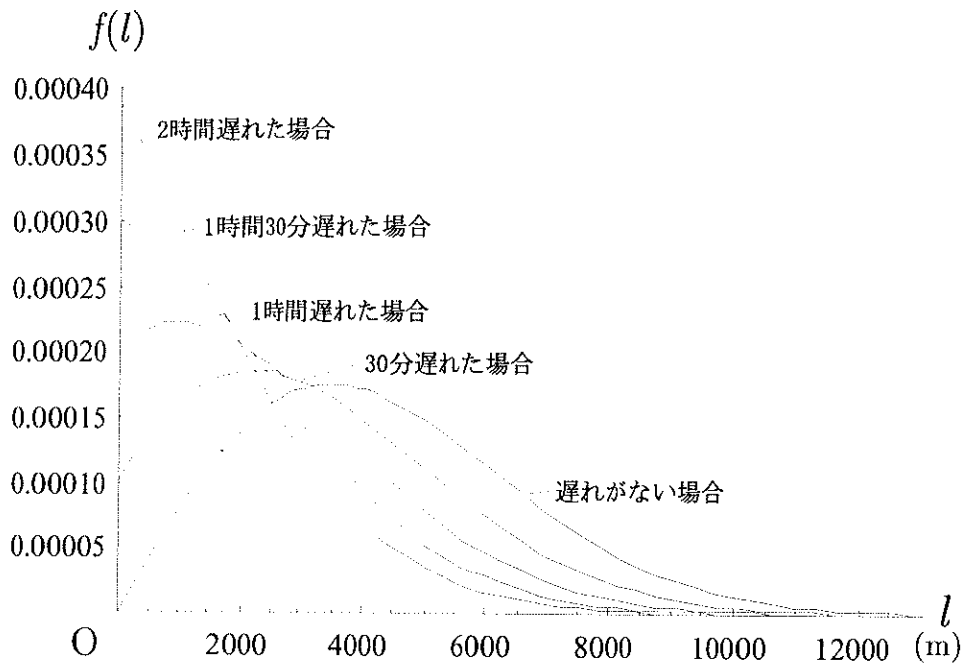


図 2.12: 避難開始時間による $f(l)$ の違い

と求められる。ここで、Erf はガウスの誤差関数として知られているものであり、

$$\text{Erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-r^2} dr$$

で定義される。この積分結果は解析的には得られないため数値積分に頼るしかない。そこで、 l_1 を変化させたときの $E(l)$ の値を数値計算した結果をプロットしたものを図 2.13 に示す。ただし、グラフの横軸としては避難開始時間の遅れ t_1 (時間) を取っている。計算結果を見ると、全く遅れがない場合、即ち $t_1 = 0$ の場合には $E(l) = 4362.71(\text{m})$ であるが、30分遅れとなる $t_1 = 0.5$ の場合には $E(l) = 3335.00(\text{m})$ 、1時間遅れとなる $t_1 = 1.0$ の場合には $E(l) = 2627.04(\text{m})$ 、1時間30分遅れとなる $t_1 = 1.5$ の場合には $E(l) = 2116.72(\text{m})$ 、2時間遅れとなる $t_1 = 2.0$ の場合には $E(l) = 1734.42(\text{m})$ と、次第に平均距離が減少していくことが分かる。延焼領域に巻き込まれるまでの平均距離が減少して行くということは、避難の開始が遅れると遠くまで避難することが困難になってくるということである。また、避難の開始が遅れば遅れるほど平均値の変化の割合が減少していく様子も読みとれる。

2.4. 避難開始時間に遅れがある場合の被災距離分布

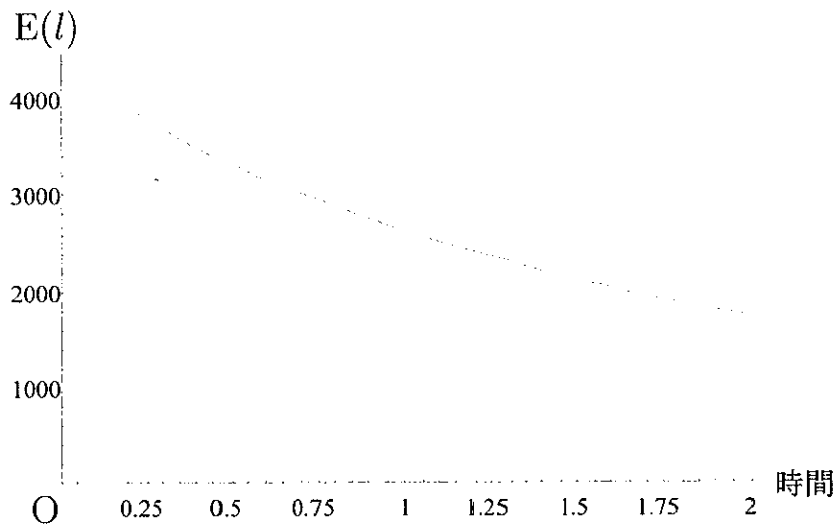


図 2.13: 避難開始時間の遅れによる平均値 $E(l)$ の変化

2.5 途中で進路変更する場合の被災距離分布

2.3節では直進移動を行った場合の被災距離分布を導出したが、本節では移動の途中で進行方向を変更した場合について考えてみる。例えば、図2.14に示す地点OからPまでレクティニア移動を行う場合を想定する。2.3節の場合と同様に考えると、延焼に巻き込まれることなく移動を行うためには図2.14の太線で囲まれた領域の内部に出火点が1つも存在しないことが必要となる。この太線で囲まれた領域の面積は2.3節の図2.4に示した領域の面積 s_1 と比較すると図2.14に示した網点部分の面積分少ない。

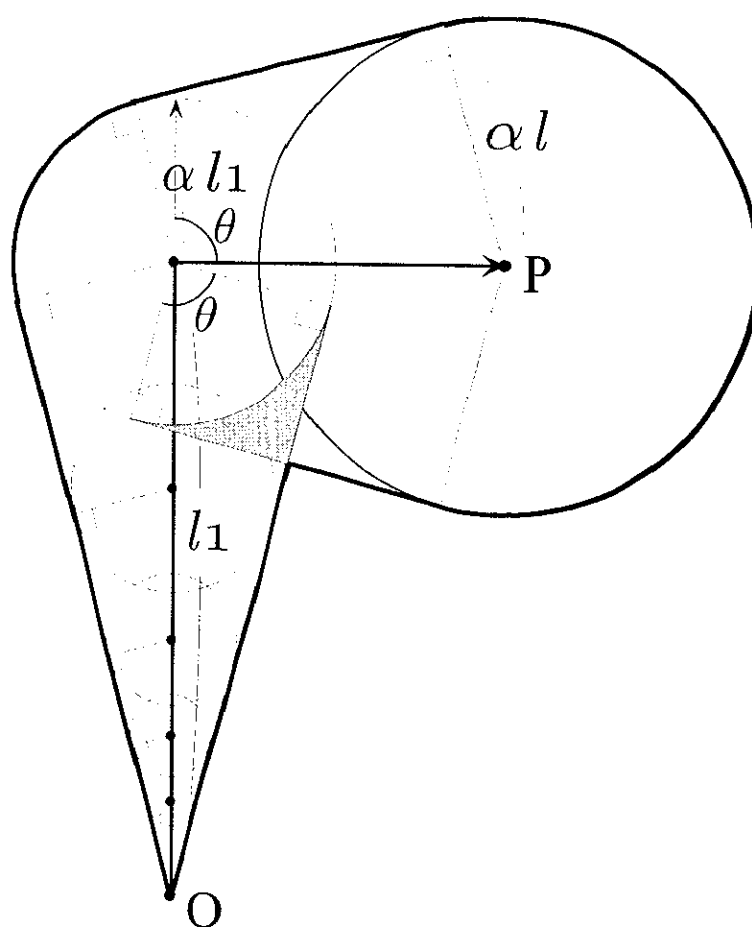


図 2.14: 面積の重複部分

図2.14では進行方向を90度変更した場合の例を示しているが、進行方向を右あるいは左側に θ ラジアンだけ曲げた場合にも同様に考えることができる。このときの重なり部分の面積 $s(\theta)$

を計算すると、

$$\begin{aligned} s(\theta) &= a l \tan \frac{\theta}{2} \times \alpha l - \pi \alpha^2 l^2 \times \frac{\theta}{2\pi} \\ &= \left(\tan \frac{\theta}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \alpha^2 l^2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

となる.

よって、途中で角度 θ ラジアンだけ進路変更を行った場合に被災距離が l 以下となる確率 $F_\theta(l)$ は、2.3 節と同様の方法により、

$$F_\theta(l) = 1 - e^{-\rho \left\{ \alpha \sqrt{1-\alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha) \alpha^2 - \left(\tan \frac{\theta}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \alpha^2 \right\} l^2} \quad (2.11)$$

と計算できる. 一例として前節までと同様に、出火密度 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ (件/m²), 速度比 $\alpha = 0.02$ として、90 度方向転換した場合 ($\theta = \pi/2$ ラジアン) の $F_\theta(l)$ および直進した場合の $F(l)$ をプロットしたものを図 2.15 に示す.

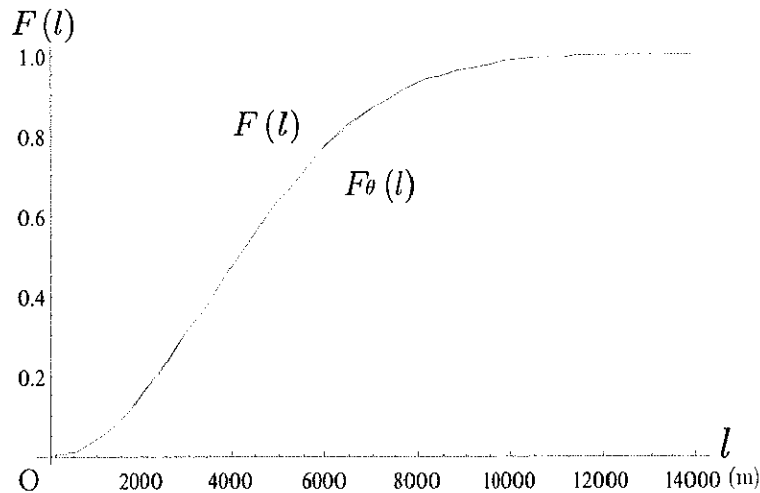


図 2.15: $F_\theta(l)$ および $F(l)$

グラフからその違いを読みとることは難しいが、わずかながら $F(l)$ の方が $F_\theta(l)$ に比べて高い値を示しており、延焼に巻き込まれやすいことを表している. そこで、 $F_\theta(l)$ に対する $F(l)$ の相対的な較差を計算してみると、

$$\frac{F(l) - F_\theta(l)}{F_\theta(l)} = \frac{1 - e^{\frac{1}{2} \rho \alpha^2 l^2 (\theta - 2 \tan \frac{\theta}{2})}}{e^{\frac{1}{2} \rho \alpha^2 l^2 (2\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi + \theta) \alpha + 2\alpha \arcsin \alpha - 2\alpha \tan \frac{\theta}{2})} - 1} \quad (2.12)$$

となる.

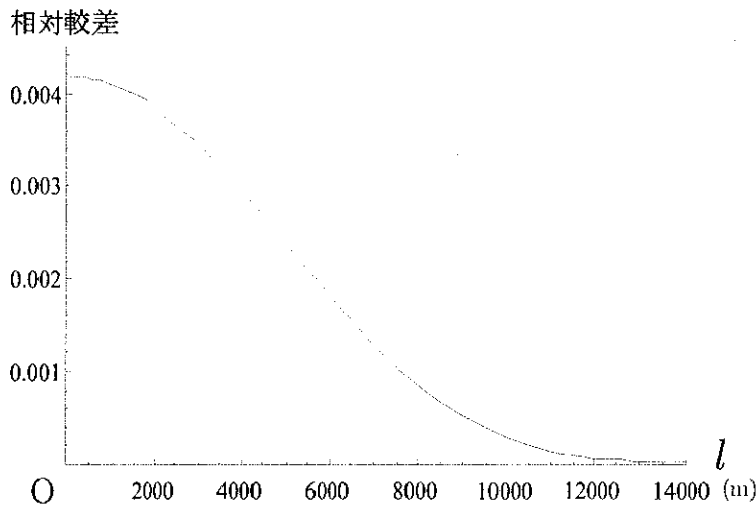


図 2.16: $F_\theta(l)$ に対する $F(l)$ の相対較差

先ほどと同様に、出火密度 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ (件/m²)、速度比 $\alpha = 0.02$ 、 $\theta = \pi/2$ ラジアンの場合の相対較差をプロットしたものを図 2.16 に示す。

図 2.16 を見ると、 l が小さい部分ほど、延焼に巻き込まれる確率が高く計算されることが分かる。また、この数値例の場合の相対較差は最大でも約 0.4% 程度であることが読みとれる。なお、この相対較差は l が 0 の近傍で最大となり、そのときの値は (2.12) 式で $l \rightarrow 0$ とした時の極限を取って、

$$\frac{\alpha \left(\theta - 2 \tan \frac{\theta}{2} \right)}{2\sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi + \theta)\alpha + 2\alpha \arcsin \alpha - 2\alpha \tan \frac{\theta}{2}} \quad (2.13)$$

と計算できる。式を見るとこの相対較差の最大値は出火密度 ρ に依存せず、速度比 α と角度 θ によって決定されることが分かる。そこで、まず $\theta = \pi/2$ ラジアンに固定して α を 0 から 0.1 まで変化させた場合の相対較差の最大値をプロットしたものを図 2.17 に示す。グラフから α の増加に伴って相対較差の最大値が増加していく様子が読みとれる。避難速度をかなり遅めの 1,000m/h とし、延焼速度を 100m/h と考えた場合でも $\alpha = 0.1$ 程度であり、この場合の相対較差の最大値は 1.9 % である。

次に、 α を 0.02 に固定して、進路を変更する角度 θ を 0 から $\pi/2$ ラジアンまで変化させた場合の相対較差の最大値をプロットしたものを図 2.18 に示す。先ほどと同様にグラフから θ の増加に伴って相対較差の最大値が増加していく様子が読みとれるが、進路を変更する角度が $\pi/2$ ラジアンまでであれば、相対較差は高々 0.4 % 程度であることがわかる。

2.5. 途中で進路変更する場合の被災距離分布

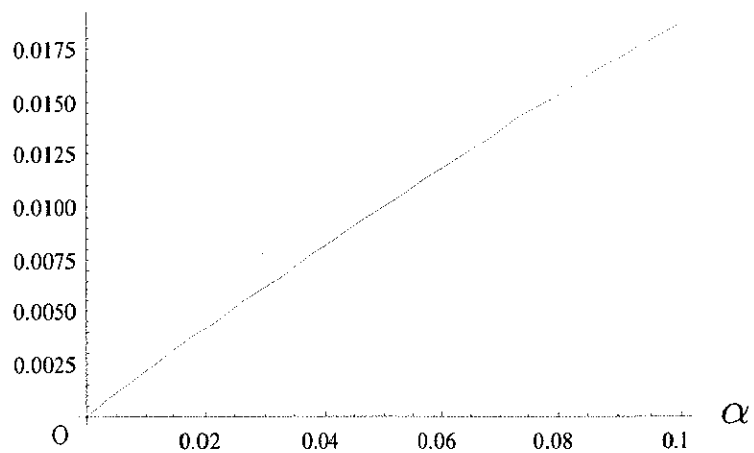


図 2.17: α を変化させた場合の相対較差の最大値

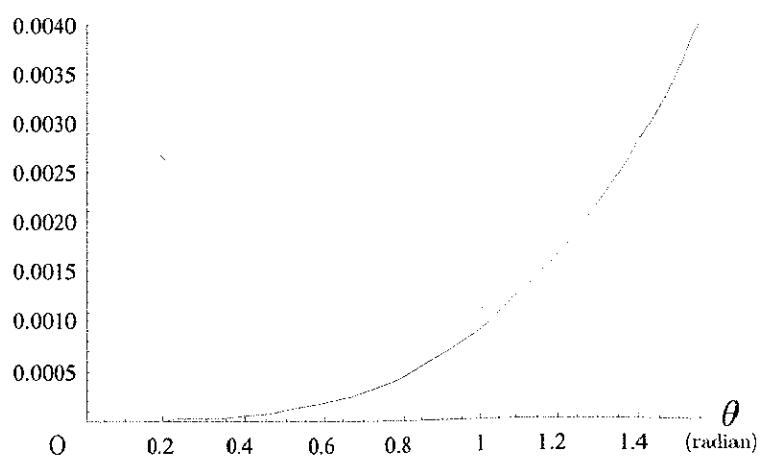


図 2.18: θ を変化させた場合の相対較差の最大値

第2章 被災距離分布の導出

次に、角度 θ ラジアンだけ進路変更を行った場合の被災距離分布 $f_{\theta}(l)$ は、 $F_{\theta}(l)$ を l で微分して、

$$f_{\theta}(l) = 2\rho \left\{ \alpha\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha) \alpha^2 - \left(\tan \frac{\theta}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \alpha^2 \right\} l \times e^{-\rho \left\{ \alpha\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha) \alpha^2 - \left(\tan \frac{\theta}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \alpha^2 \right\} l^2} \quad (2.14)$$

と計算できる。先ほどと同様に、出火密度 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ (件/m²)、速度比 $\alpha = 0.02$ として、90度方向転換した場合 ($\theta = \pi/2$ ラジアン) の $f_{\theta}(l)$ および直進した場合の $f(l)$ をプロットしたものを図 2.19 に示す。

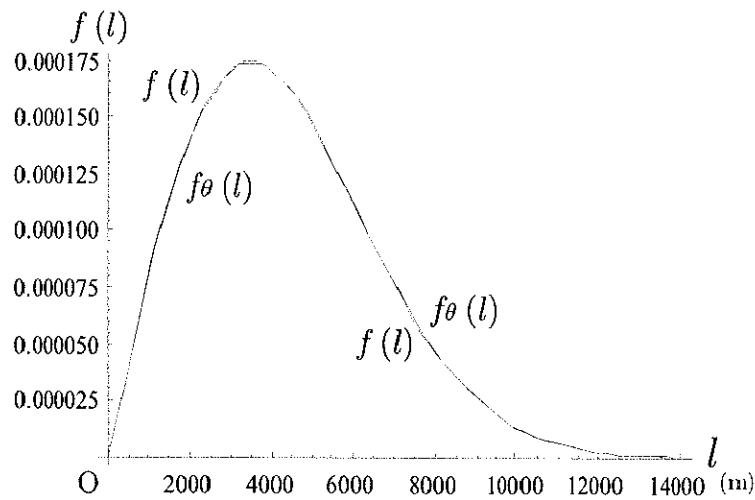


図 2.19: $f_{\theta}(l)$ および $f(l)$

先ほどと同様にグラフからその違いを読みとることは難しいのであるが、 l が小さい部分では $f(l)$ が $f_{\theta}(l)$ より高い値を取るものの、途中で逆転して $f(l)$ が $f_{\theta}(l)$ より低い値を取ることが分かる。そこで、 $f_{\theta}(l)$ に対する $f(l)$ の相対的な較差を計算してみると、

$$\frac{f(l) - f_{\theta}(l)}{f_{\theta}(l)} = \left(\frac{\theta\alpha - 2\alpha \tan \frac{\theta}{2}}{2 \left(\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha) \alpha \right)} \right) e^{(\tan \frac{\theta}{2} - \frac{\theta}{2}) \rho \alpha^2 l^2} - 1 \quad (2.15)$$

となる。先ほどと同様に、出火密度 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ (件/m²)、速度比 $\alpha = 0.02$ 、 $\theta = \pi/2$ ラジアンの場合の $f_{\theta}(l)$ に対する $f(l)$ の相対較差をプロットしたものを図 2.20 に示す。

図からも、 $f(l)$ と $f_{\theta}(l)$ の値の大小関係が変化し、 l の増加と共に相対誤差の絶対値が拡大していく様子を読みとれるが、最大でも 3% 程度の誤差である。

以上のことから、通常考えられる α の範囲内において移動の途中で進行方向を変更する場合

2.5. 途中で進路変更する場合の被災距離分布

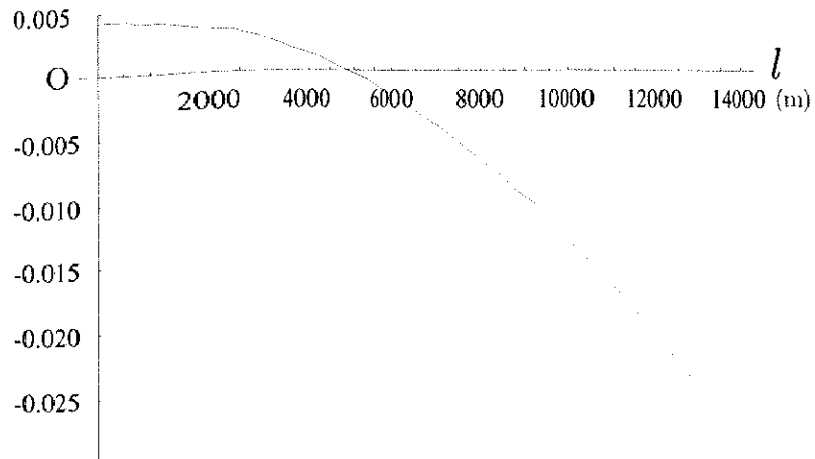


図 2.20: $f_0(l)$ に対する $f(l)$ の相対較差

でもレクティリニア移動のように90度以内の方向転換であれば2.3節で導出した被災距離分布を近似的に使用しても問題ないと考えられる。

2.6 境界周辺部での被災距離分布

本節では火災の発生している領域から、火災の発生していない領域に向かって避難する状況について考察を加える。それ以外の設定については2.2節の設定に従うものとする。まず2.6.1では最短距離で避難できる場合について考察し、2.6.2では最短距離で避難できない場合について考察を加える。

2.6.1 最短距離で避難する場合

まず、火災の発生していない領域に最短距離で向かう場合について説明する。例えば、防火区画の内部で火災が発生し、外部の避難路に向かって最短距離で避難するような場合を想定する。図2.21に示す延焼領域内部の点Oから領域外部の点Pまで最短距離で避難する場合には、 \vec{OP} と境界線のなす角度が直角となる。このとき、防火区画の外部から内部には延焼が及ばないと仮定すると安全に避難するために出火点が存在しないことが要求される領域 D_1 は図2.21に太線で示す三角形に似た領域となる。これは、2.3節で被災距離分布を導出する際に図2.4に示した領域と比べると面積が小さくなっている。具体的には、図2.21に示した D_1 は、図2.4に示したもののから半径 αl の半円部分を取り除いた形状である。

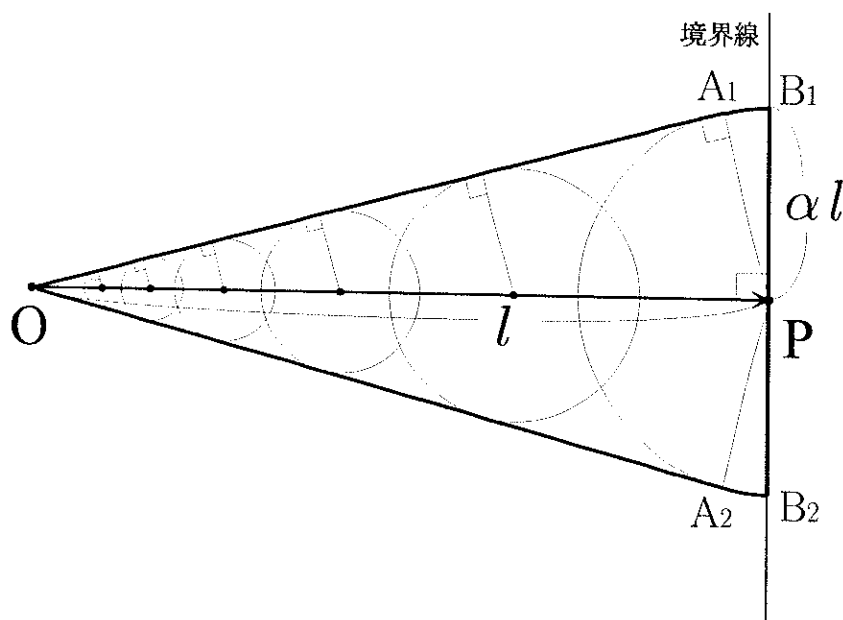


図 2.21: 境界に向かう場合の領域 D_1

図 2.21 に示した D_1 の面積を s_2 とおくと、 s_2 は s_1 から半径 αl の半円部分の面積 $\pi\alpha^2 l^2/2$ を引けばよいので、

$$s_2 = \left\{ \alpha\sqrt{1-\alpha^2} + \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \alpha \right) \alpha^2 \right\} l^2 \quad (2.16)$$

と求められる。

よって、境界に向かって避難する場合の被災距離が l 以下である確率 $F_2(l)$ は 2.3 節と同様にして、

$$F_2(l) = 1 - e^{-\rho\{\alpha\sqrt{1-\alpha^2} + (\frac{\pi}{2} - \arccos \alpha)\alpha^2\}l^2} \quad (2.17)$$

と計算できる。よって、被災距離分布 $f_2(l)$ は $F_2(l)$ を l で微分して、

$$f_2(l) = 2\rho \left\{ \alpha\sqrt{1-\alpha^2} + \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \alpha \right) \alpha^2 \right\} l e^{-\rho\{\alpha\sqrt{1-\alpha^2} + (\frac{\pi}{2} - \arccos \alpha)\alpha^2\}l^2} \quad (2.18)$$

と求められる。

ここで、比較のために 2.3 節で導出した $F(l)$ ((2.2) 式) および $f(l)$ ((2.4) 式) を β を用いずに表すと、

$$\begin{aligned} F(l) &= 1 - e^{-\rho\{\alpha\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha)\alpha^2\}l^2} \\ f(l) &= 2\rho \left\{ \alpha\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha)\alpha^2 \right\} l e^{-\rho\{\alpha\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha)\alpha^2\}l^2} \end{aligned}$$

である。

前節までと同様に、出火密度 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ (件/m²)、速度比 $\alpha = 0.02$ の場合の $F_2(l)$ および $F(l)$ をプロットしたものを図 2.22 に示す。

グラフからは、僅かながら $F(l)$ の方が $F_2(l)$ よりも大きな値を示していることが読みとれる。そこで、 $F_2(l)$ に対する $F(l)$ の相対的な較差を計算してみると、

$$\frac{F(l) - F_2(l)}{F_2(l)} = \frac{1 - e^{-\frac{1}{2}\rho\pi\alpha^2 l^2}}{e^{\rho\alpha(\sqrt{1-\alpha^2} + \alpha \arcsin \alpha)l^2} - 1} \quad (2.19)$$

となる。先ほどと同様に、出火密度 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ (件/m²)、速度比 $\alpha = 0.02$ の場合の相対誤差をプロットしたものを図 2.23 に示す。

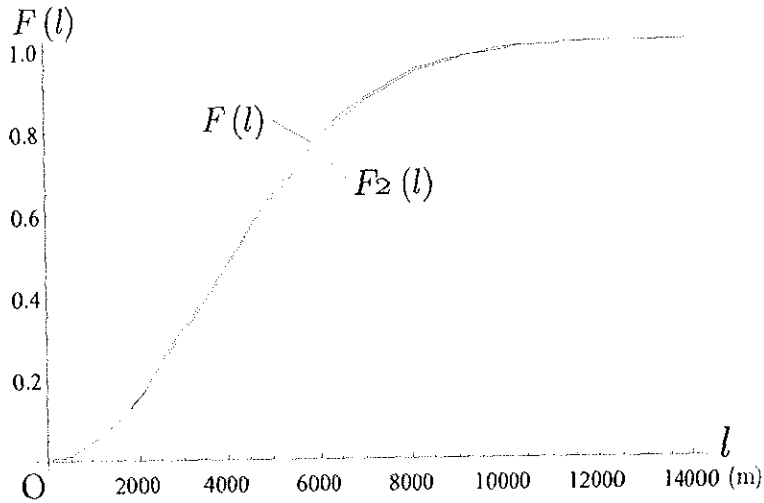


図 2.22: $F_2(l)$ および $F(l)$

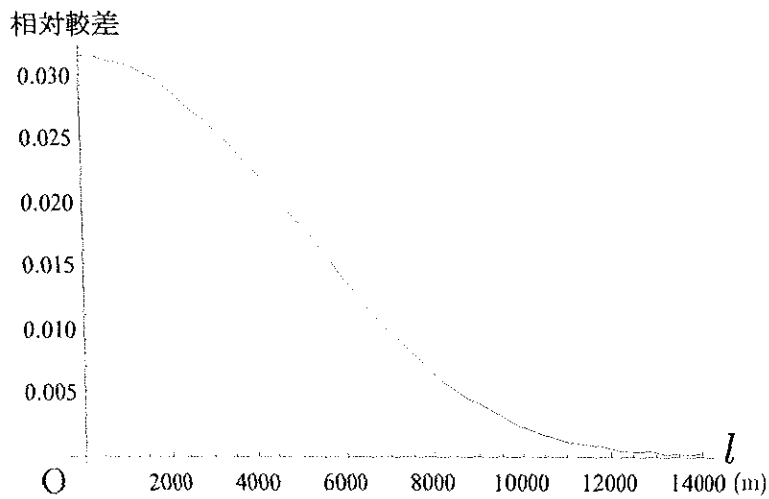


図 2.23: $F_2(l)$ に対する $F(l)$ の相対較差

図 2.23 を見ると、 l が小さい部分ほど、延焼に巻き込まれる確率が高く計算されていることが分かる。この数値例の場合では周辺部の状況を考慮していない式を用いた場合と、周辺部の状況を考慮した式を用いた場合とでは最大でも約 3 % 程度の相対較差であることが読みとれる。なお、この相対較差は l が 0 の近傍で最大となり、そのときの値は (2.19) 式で $l \rightarrow 0$ とした時の極限を取って、

$$\frac{\pi\alpha}{2\sqrt{1-\alpha^2} + 2\alpha \arcsin \alpha} \quad (2.20)$$

と計算できる。式を見るとこの相対較差の最大値は出火密度 ρ に依存せず、速度比 α のみによって決定されることが分かる。そこで、 α を 0 から 0.1 まで変化させた場合の相対較差の最大値をプロットしたものを図 2.24 に示す。グラフから α の増加に伴って相対較差の最大値が増加していく様子を読みとれる。避難速度をかなり遅めの 1,000m/h、延焼速度を 100m/h と考えた場合には $\alpha = 0.1$ 程度であり、この場合の相対較差の最大値が 15.6 % と高い値となるが、通常考えられる範囲のパラメータ設定で境界条件を考慮しない $F(l)$ を使用する場合には相対較差約 5 % 程度までで近似できることが分かる。

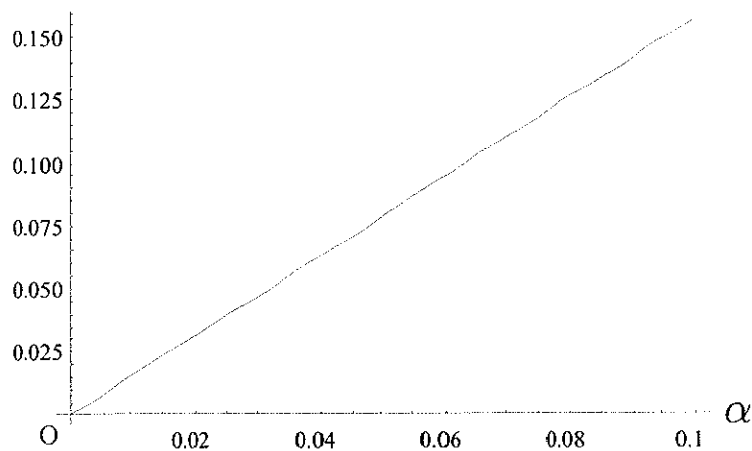


図 2.24: 相対較差の最大値

また、 $f_2(l)$ に対する $f(l)$ の相対的な較差を計算してみると、

$$\frac{f(l) - f_2(l)}{f_2(l)} = \left(1 + \frac{\pi\alpha}{2(\sqrt{1-\alpha^2} + \alpha \arcsin \alpha)} \right) e^{-\frac{1}{2}\rho\pi\alpha^2 l^2} - 1 \quad (2.21)$$

であり、先ほどとおなじ設定で被災距離分布 $f_2(l)$ および $f(l)$ をプロットしたものを図 2.25 に示すが、やはりその差が小さいことが読みとれる。なお、 l が小さい部分では $f(l)$ は $f_2(l)$ に対

して高い値であるが、途中で逆転がおり $f_2(l)$ に対して低い値となることが分かる。

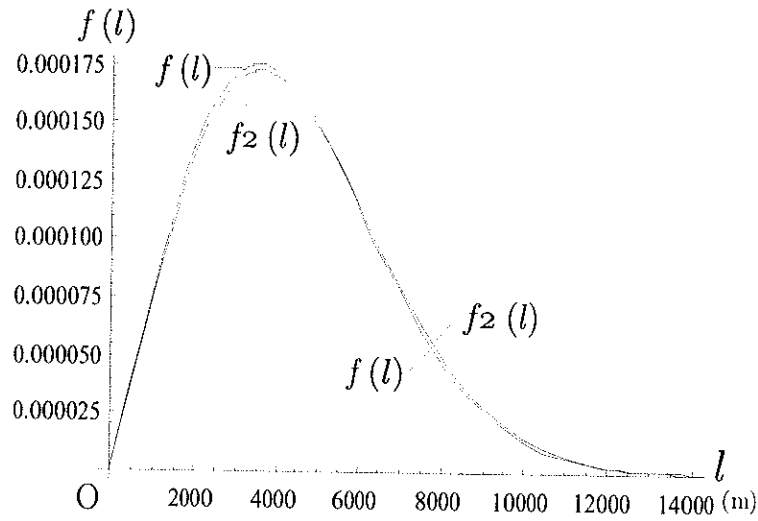


図 2.25: $f_2(l)$ および $f(l)$

当然、相対較差は用いるパラメータ (ρ, α) の値によって変化するため、(2.19) 式を用いてその都度確認しておく必要はあるが、この相対較差が許容されるような精度で議論を行う場合には境界条件を考慮しない式を用いてもよいであろう。

次に、図 2.21 に示した領域 D_1 が三角形に近いことから、図 2.26 に示すような三角形で近似を行う場合について考察を加える。

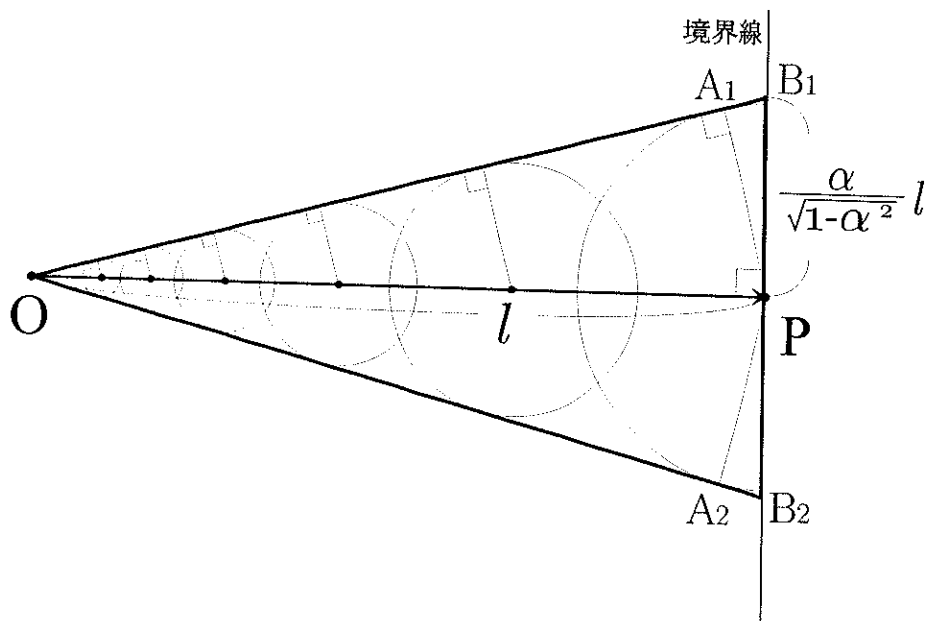


図 2.26: 三角形で近似した場合の領域 D_1

図 2.26 に示した D_1 の面積を s_3 とおき、 s_3 の導出を行う。まず、点 P を中心とした半径 αl の円を C_P とおく。 C_P の外接線で点 O を通るものと C_P との接点を A とおく。この条件を満たす点は 2 つあるので、図の上側の点を A_1 、下側の点を A_2 とおく。次に領域 D_1 と境界線との交点を B とおく。これも交点は 2 つあるので図の上側の点を B_1 、下側の点を B_2 とおくこととする。三角形 OPA_1 と三角形 OA_2P の部分に変化はないのであるが、先ほどは扇形であった部分を三角形で近似することとする。すると、三角形 OPA_1 と三角形 PB_1A_1 が相似形であることから、

$$|\overrightarrow{PB_1}| = \frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} l$$

である。よって、求める面積 s_3 は、

$$s_3 = \frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} l^2 \quad (2.22)$$

となり、 s_1 および s_2 に比べると簡潔な式で表現することができる。すると、被災距離が l 以下である確率 $F_3(l)$ は 2.3 節と同様にして、

$$F_3(l) = 1 - e^{-\frac{\rho\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} l^2} \quad (2.23)$$

と計算できる。よって、被災距離分布 $f_3(l)$ は $F_3(l)$ を l で微分して、

$$f_3(l) = \frac{2\rho\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} l e^{-\frac{\rho\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} l^2} \quad (2.24)$$

と求められる。

そこで、前節までと同様に出火密度 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ (件/m²)、速度比 $\alpha = 0.02$ の場合の $F_2(l)$ および $F_3(l)$ をプロットしたものを図 2.27 に、 $f_2(l)$ および $f_3(l)$ をプロットしたものを図 2.28 に示す。

図 2.27 を見ると $F_3(l)$ の方が若干高い値を示しているのであるが、このグラフからその違いを読みとることは困難である。また、 $f_3(l)$ については l が小さい部分では $f(l)$ に対して $f_3(l)$ の方が若干高い値を示し、途中で逆転して $f_3(l)$ の方が低い値をとっているのであるが、図 2.28 からその違いを読みとることは難しい。

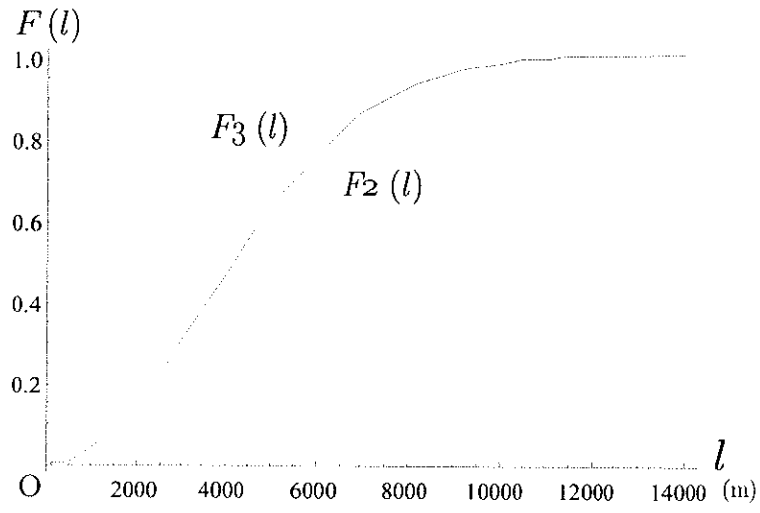


図 2.27: $F_2(l)$ および $F_3(l)$

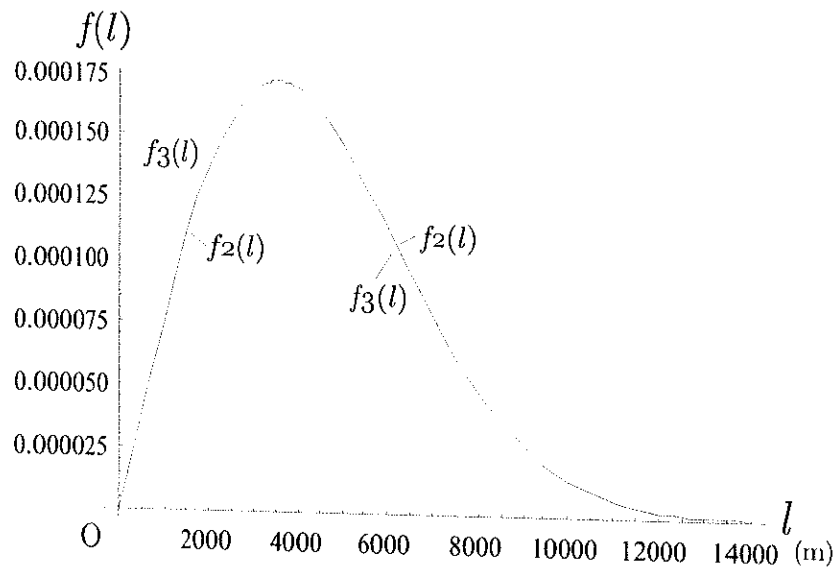


図 2.28: $f_2(l)$ および $f_3(l)$

そこで、領域 D_1 の形状を三角形で近似した場合と厳密に計算した場合との差がどの程度であるのかを確認するために $F_2(l)$ に対する $F_3(l)$ の相対誤差を計算すると、

$$\frac{F_3(l) - F_2(l)}{F_2(l)} = \frac{1 - e^{\rho\alpha^2 \left(-\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} + \arcsin \alpha \right) l^2}}{e^{\rho\alpha(\sqrt{1-\alpha^2} + \alpha \arcsin \alpha) l^2} - 1} \quad (2.25)$$

と計算できる。先ほどと同様に、出火密度 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ (件/m²)、速度比 $\alpha = 0.02$ の場合の $F_2(l)$ に対する $F_3(l)$ の相対誤差をプロットしたものを図 2.29 に示す。

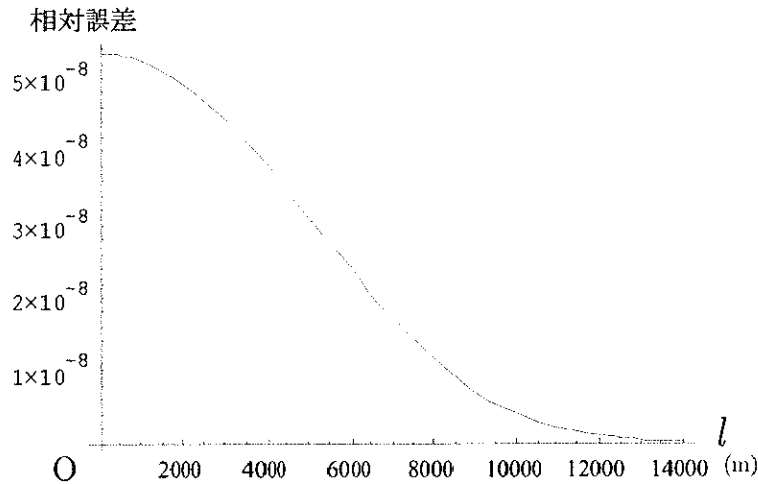


図 2.29: $F_2(l)$ に対する $F_3(l)$ の相対誤差

図 2.29 を見ると相対誤差は極めて小さく、最大でも $5.3 \times 10^{-6}\%$ 程度であり、その差は殆ど無視できる程度のものであると言ってもいいだろう。

なお、この相対誤差は l が 0 の近傍で最大となり、そのときの値は (2.25) 式で $l \rightarrow 0$ とした時の極限を取って、

$$\frac{\frac{\alpha^2}{\sqrt{1-\alpha^2}} - \alpha \arcsin \alpha}{\sqrt{1-\alpha^2} + \alpha \arcsin \alpha} \quad (2.26)$$

と計算できる。式を見るとこの相対誤差の最大値は出火密度 ρ に依存せず、速度比 α のみによって決定されることが分かる。そこで、 α を 0 から 0.1 まで変化させた場合の相対誤差の最大値をプロットしたものを図 2.30 に示す。グラフから α の増加に伴って相対誤差の最大値が増加していく様子を読みとれる。避難速度をかなり遅めの 1,000m/h、延焼速度を 100m/h と考えた場合でも $\alpha = 0.1$ 程度であり、この場合の相対誤差の最大値が $3.3 \times 10^{-3}\%$ とかなり小さい値である。

次に、 $f_2(l)$ に対する $f_3(l)$ の相対誤差を計算すると、

第2章 被災距離分布の導出

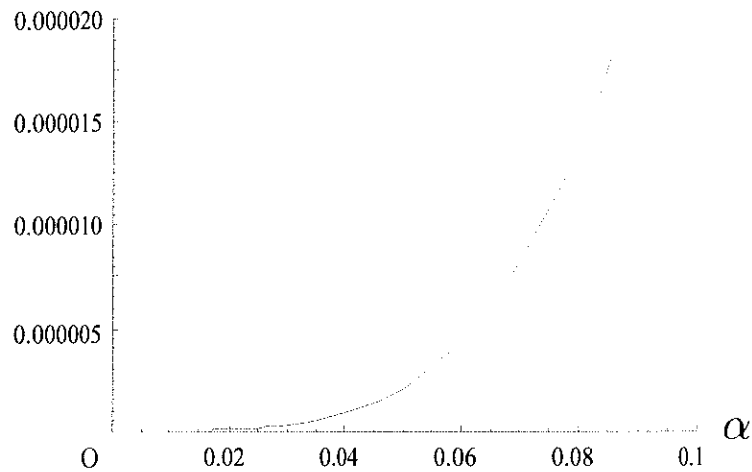


図 2.30: 相対誤差の最大値

$$\frac{f_3(l) - f_2(l)}{f_2(l)} = \frac{e^{-\rho} \left(\frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} - \arcsin \alpha \right) \alpha^2 l^2}{1 - \alpha^2 + \sqrt{1 - \alpha^2} + \alpha \arcsin \alpha} - 1 \quad (2.27)$$

と計算できる. 先ほどと同様に, 出火密度 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ (件/m²), 速度比 $\alpha = 0.02$ の場合の $f_2(l)$ に対する $f_3(l)$ の相対誤差をプロットしたものを図 2.31 に示す. l の増加につれて相対誤差の絶対値が拡大していく様子が読みとれるが, 高々 4×10^{-5} % 程度の大きさであり, 殆ど無視できる程度の大きさであると考えられる.

これらのことから, 通常考えられる範囲のパラメータ設定では, $F_2(l)$ の近似式として $F_3(l)$ を使用できると考えられる.

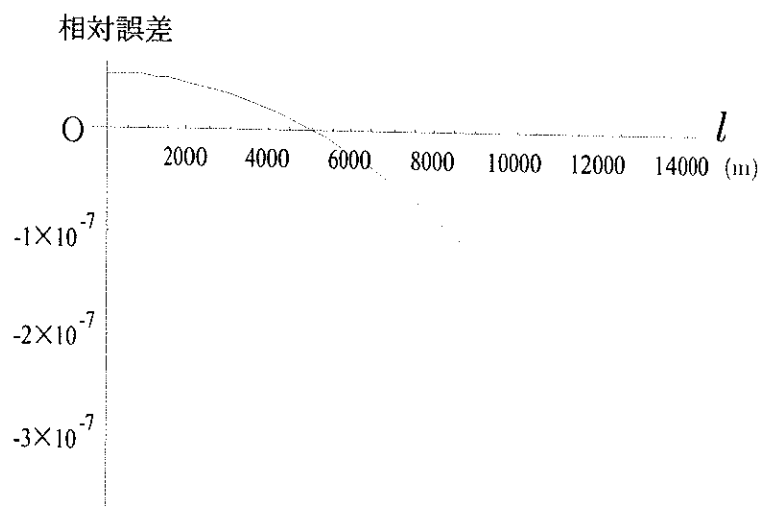


図 2.31: $f_2(l)$ に対する $f_3(l)$ の相対誤差

次に、区画の隅に近い場合について考えてみる。すると、状況によっては図 2.33 に示すように、区画まで安全に逃げるために必要とされる領域 D_1 の面積が更に少なくて済むように思われる。しかし、最短距離で避難できる場合にはこの様な状況は起こらない事を示す。

まず、図 2.32 に示すように区画の隅を原点とする直交座標系をとり、避難開始地点の座標を (x, y) とおく。最短距離で境界線まで避難することを考えると x か y のどちらか距離の短い方向に向かうこととなる。そこで、図 2.32 に示すように隅から 45 度線を引き、 $x < y$ となるエリアに避難開始地点がある場合について考えてみる。図 2.33 に示すように領域 D_1 の面積が更に少なくて済む場合は、 y の値が αx 以下となる場合である。しかしながら、 $0 < \alpha < 1$ という条件と $x < y$ と仮定したことにより、

$$y > \alpha x$$

であるため、最短距離で境界線まで避難する場合には図 2.33 に示すような状況にはならない。もしも図 2.33 に示すような状況である場合には進路を 90 度転換して別な方向に向かった方が(図 2.33 の場合、下方にある境界線に向かった方が)より早く避難できるのである。

また、避難開始地点が図 2.32 の $x > y$ となるエリアにある場合にも全く同様に考えることができる。

よって、境界線に向かって最短距離で避難することが可能である場合には図 2.33 に示すような状況にはならず、図 2.26 に示したような状況だけを考えればよい。距離分布の式としては (2.18) 式に示した $f_2(l)$ あるいはその近似式である $f_3(l)$ を用いればよいことが分かる。

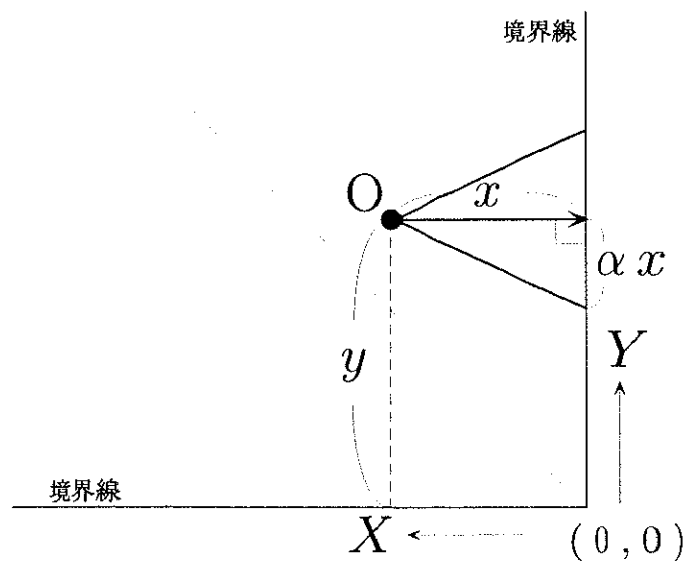


図 2.32: 区画の隅に向かう場合

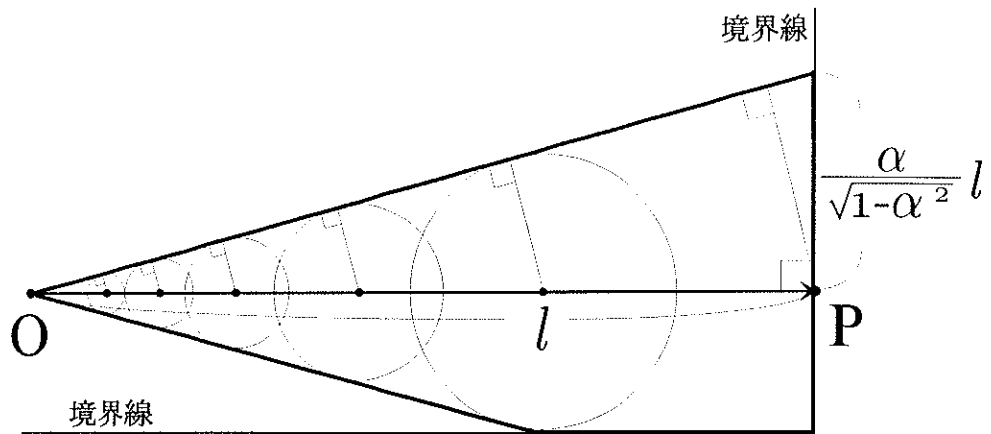


図 2.33: 区画の隅に向かう場合の領域 D_1

2.6.2 最短距離で避難出来ない場合

本小節では、火災の発生している領域から火災の発生していない領域に向かって避難する際に最短距離で避難できない場合について考察を加える。2.6.1 節と同様に防火区画の内部で火災が発生し、外部の避難路に向かって避難するような場合を想定する。最短距離で避難できる場合には図 2.21 に示した避難開始地点 O から避難地点 P を結ぶ \overrightarrow{OP} と境界線のなす角度が直角であったが、ここでは、ここでは図 2.34 に示すように、 \overrightarrow{OP} と境界線のなす角度を θ とした場合について考える。

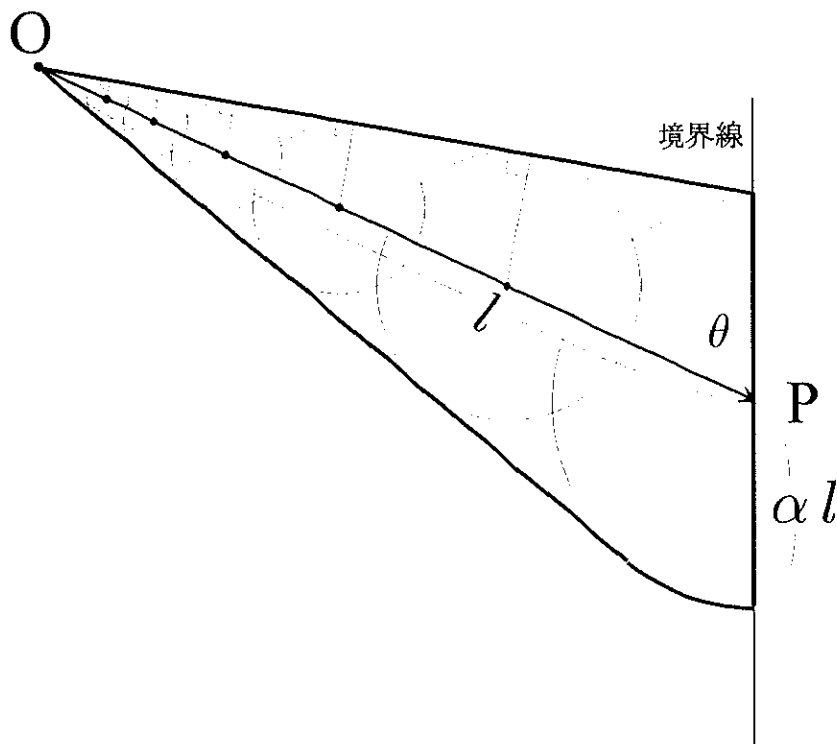


図 2.34: 境界に向かう場合の領域 $D_1(1)$

2.3 節と同様に考えると、点 O から点 P まで安全に避難するために出火点が存在しないことが要求される領域 D_1 は図 2.34 に太線で示した領域となる。この領域の面積を s_4 とおき、計算式の導出を行う。

ここでは、図 2.35 に示すように便宜上いくつかの点に名前を付けて説明する。まず、点 P を中心とした半径 αl の円を C_P とおく。 C_P の外接線で点 O を通るものと C_P との接点を A とおく。この条件を満たす点は 2 つあるので、図の上側の点を A_1 、下側の点を A_2 とおく。次に領域 D_1 と境界線との交点を B とおく。これも交点は 2 つあるので図の上側の点を B_1 、下側の点

を B_2 とおくこととする。次に、点 P を通り \overrightarrow{OP} に垂直な直線と、 C_P との交点を I とおく。これも交点は2つあるので図の上側の点を I_1 、下側の点を I_2 とおくこととする。

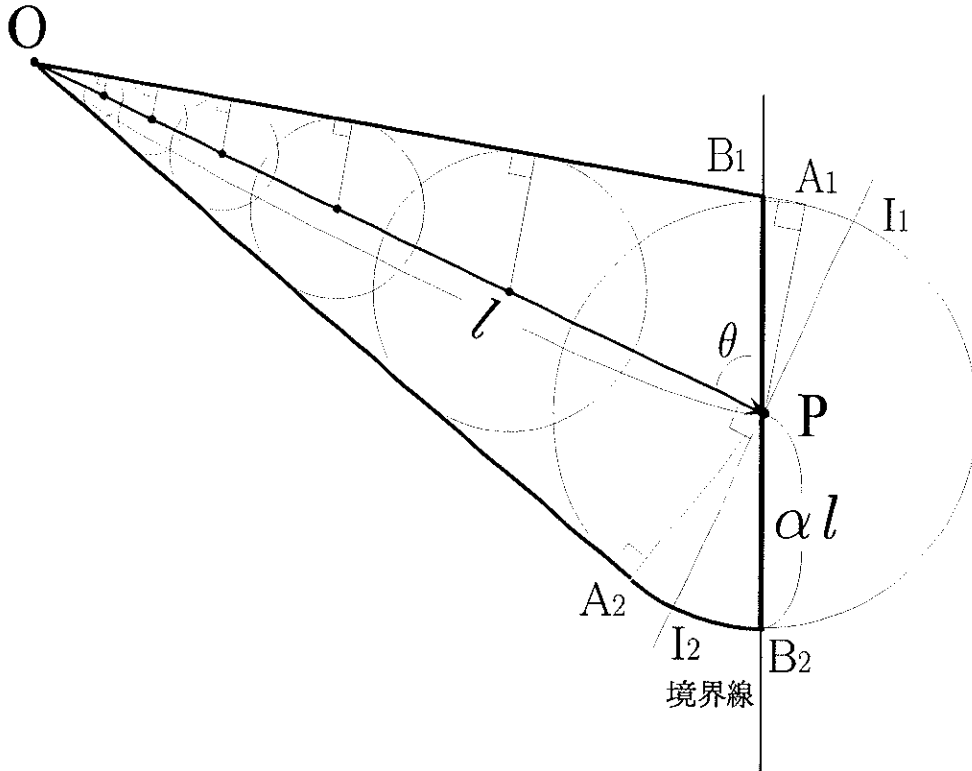


図 2.35: 境界に向かう場合の領域 $D_1(2)$

$|\overrightarrow{OP}| = l$, $|\overrightarrow{PA_1}| = \alpha l$, $\angle PA_1O = \pi/2$ より, $\angle OPA_1 = \arccos \alpha$ である。よって, θ が

$$\arccos \alpha \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

の範囲では s_4 は s_2 に等しい。しかしながら,

$$0 \leq \theta < \arccos \alpha$$

の範囲では図 2.34 に示すように $\overrightarrow{OA_1}$ が境界線と交差する。そこで、このときの s_4 をいくつかの部分に分けて計算する。まず、三角形 B_1PA_1 に着目すると、

$$|\overrightarrow{PB_1}| = \frac{1}{\cos(\arccos \alpha - \theta)} \alpha l$$

であるから、三角形 OPA_1 の面積は、

$$\frac{\sin \theta}{2 \cos(\arccos \alpha - \theta)} \alpha l^2$$

である。次に、三角形 OPA_2 と扇形 I_2PA_2 によってできる図形の面積は 2.6.1 節において導出した s_2 の $1/2$ であるから、

$$\frac{1}{2} \left\{ \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} + \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \alpha \right) \alpha^2 \right\} l^2$$

である。最後に、

$$\angle B_2PI_2 = \angle I_1PB_1 = \frac{\pi}{2} - \theta$$

より、扇形 B_2PI_2 の面積は、

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \alpha^2 l^2$$

である。

以上のことから領域 D_1 の面積 s_4 は、

(i) $0 < \theta < \arccos \alpha$ の場合

$$s_4 = \frac{1}{2} \left\{ \left(\sqrt{1 - \alpha^2} + \frac{\sin \theta}{\cos(\arccos \alpha - \theta)} \right) \alpha + (\pi - \arccos \alpha - \theta) \alpha^2 \right\} l^2 \quad (2.28)$$

(ii) $\arccos \alpha \leq \theta \leq \pi/2$ の場合

$$s_4 = \left\{ \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} + \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \alpha \right) \alpha^2 \right\} l^2 \quad (2.29)$$

と求められる。ここで、 s_2 と s_4 の差をとると、

$$s_2 - s_4 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 - \alpha^2} + (\theta - \arccos \alpha) \alpha - \frac{\sin \theta}{\cos(\theta - \arccos \alpha)} \right) \alpha l^2$$

であり、これを θ で微分すると、

$$\frac{d}{d\theta} (s_2 - s_4) = -\frac{1}{2} \tan^2(\theta - \arccos \alpha) \alpha^2 l^2 \leq 0$$

である。よって、 $0 < \theta < \arccos \alpha$ の範囲では s_2 と s_4 の差は θ の単調減少関数となっていることが分かる。

よって、境界線に対して θ ラジアン ($0 \leq \theta < \pi/2$) の角度で避難する場合に被災距離が l 以下である確率 $F_4(l)$ は、2.3 節と同様にして、

$$F_4(l) = 1 - e^{-\frac{\rho}{2} \left\{ \left(\sqrt{1 - \alpha^2} + \frac{\sin \theta}{\cos(\arccos \alpha - \theta)} \right) \alpha + (\pi - \arccos \alpha - \theta) \alpha^2 \right\} l^2} \quad (2.30)$$

第2章 被災距離分布の導出

と計算できる。よって、被災距離分布 $f_4(l)$ は $F_4(l)$ を l で微分して、

$$f_4(l) = \rho \left\{ \left(\sqrt{1-\alpha^2} + \frac{\sin \theta}{\cos(\arccos \alpha - \theta)} \right) \alpha + (\pi - \arccos \alpha - \theta) \alpha^2 \right\} l \times e^{-\frac{\rho}{2} \left\{ \left(\sqrt{1-\alpha^2} + \frac{\sin \theta}{\cos(\arccos \alpha - \theta)} \right) \alpha + (\pi - \arccos \alpha - \theta) \alpha^2 \right\} l^2} \quad (2.31)$$

と求められる。

そこで、前節までと同様に出火密度 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ (件/m²)、速度比 $\alpha = 0.02$ とし、 $\theta = 0, \pi/4$ ラジアンの場合の $F_4(l)$ および $F(l)$ をプロットしたものを図 2.36 に、 $f_4(l)$ および $f(l)$ をプロットしたものを図 2.37 に示す。

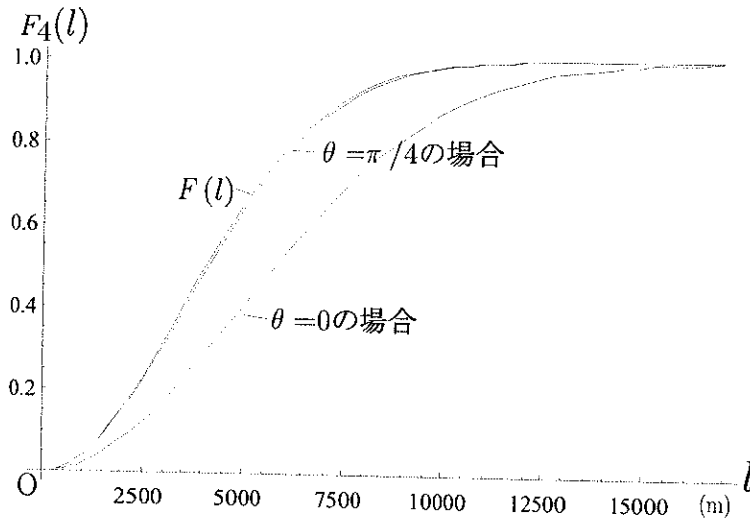


図 2.36: $F_4(l)$ および $F(l)$

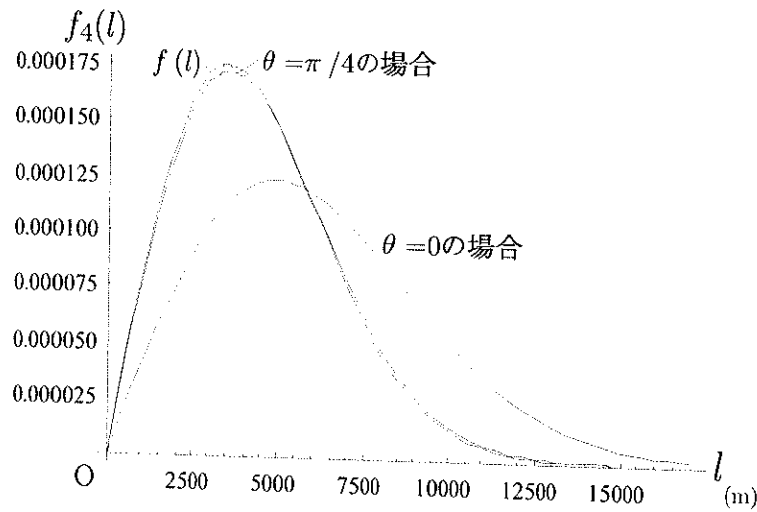


図 2.37: $f_4(l)$ および $f(l)$

$\theta = 0$ ラジアンの場合には, $F_4(l)$, $f_4(l)$ とともに大きな差が生じていることが分かる. しかしながら, この場合には $\theta = \pi/4$ 程度のときには通常の被災距離分布と大きな違いがないことが分かる.

そこで, $F_4(l)$ と $F(l)$ との差がどの程度であるのかを確認するために $F_4(l)$ に対する $F(l)$ の相対較差を計算すると,

$$\frac{F(l) - F_4(l)}{F_4(l)} = \frac{1 - e^{-\frac{1}{2}\rho\alpha l^2(\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi + \theta - \arccos \alpha)\alpha - \sec(\theta - \arccos \alpha)\sin \theta)}}{e^{\frac{1}{2}\rho\alpha l^2(\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi - \theta - \arccos \alpha)\alpha + \sec(\theta - \arccos \alpha)\sin \theta)} - 1} \quad (2.32)$$

と計算できる. 先ほどと同様に, 出火密度 $\rho = 2 \times 10^{-6}$ (件/m²), 速度比 $\alpha = 0.02$ とし, s と s_4 の差が最大となる $\theta = 0$ ラジアンの場合の相対較差をプロットしたものを図 2.38 に示す.

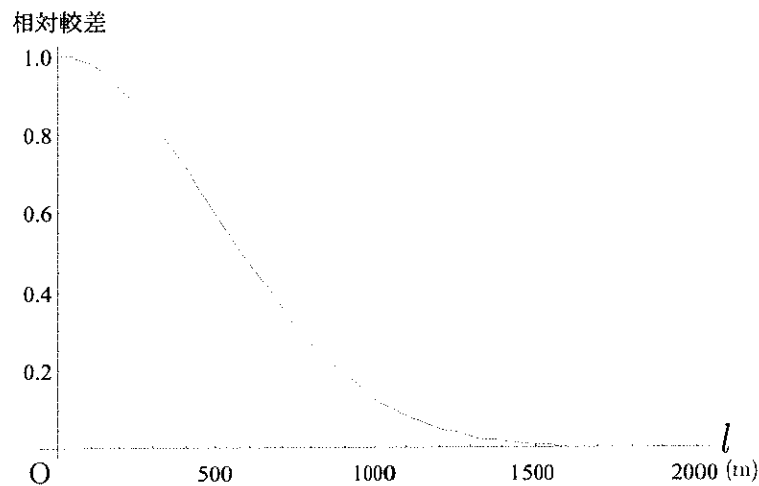


図 2.38: $F_4(l)$ に対する $F(l)$ の相対較差

なお, この相対較差は l が 0 の近傍で最大となり, そのときの値は (2.32) 式で $l \rightarrow 0$ とした時の極限を取って,

$$\frac{\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi + \theta - \arccos \alpha)\alpha - \sec(\theta - \arccos \alpha)\sin \theta}{\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi - \theta - \arccos \alpha)\alpha + \sec(\theta - \arccos \alpha)\sin \theta} \quad (2.33)$$

と計算できる. (2.33) 式を見るとこの相対較差の最大値は出火密度 ρ に依存せず, 速度比 α と角度 θ によって決定されることが分かる. 角度が $\theta = 0$ ラジアンである場合には $F_4(l)$ に対する $F(l)$ の相対較差は 100% となる. このことは, $\theta = 0$ ラジアンの場合の s_4 が s の $1/2$ であることから明らかである. 局所的に見ると相対較差が 100% もあるということは決して無視できない違いであり, 注意しておかなければならないが, 全体的に見ると $\theta = 0$ ラジアンで境界線に向かう場合は少ない.

2.7 避難経路が直線でない場合の被災距離分布

2.3節で導出した被災距離分布は直線的な避難を仮定したものであった。しかしながら、2.5節で示したように進路変更を行う場合にも、大局的に見て後退していなければ通常 of 被災距離分布を適用しても大きな問題はない。本節ではさらにそれを拡張して、避難経路が直線的でない場合について考察を加える。

図 2.39 に示すように、避難開始地点 O から避難地点 P までの経路が直線ではない場合について考える。この場合、図 2.40 に示すようにこの経路を示折れ線で近似し、2.5節で示したように各屈曲点において延焼領域に巻き込まれないために出火点が存在しないことが要求される円形領域をプロットし、各円間の共通外接線を描いていくと 2.3節で示した領域 D_1 と似た図形となる。そこで、2.5節で示したように D_1 の面積を計算すれば被災距離の分布を導出することは可能である。しかしながら、2.5節で示したように、進路を変更する場合にはその角度が $\pi/2$ 程度まで、即ち大局的に見て後戻りしていない程度であれば直進している場合との被災距離分布の誤差は殆ど無視できる程度の大きさである。図 2.39 に示すように避難経路が直線的ではない場合でも、大局的に見て後戻りをしていない場合には 2 地点 OP 間の経路距離を被災距離 l と考えれば、近似的に通常 of 被災距離分布の式を用いることができる。

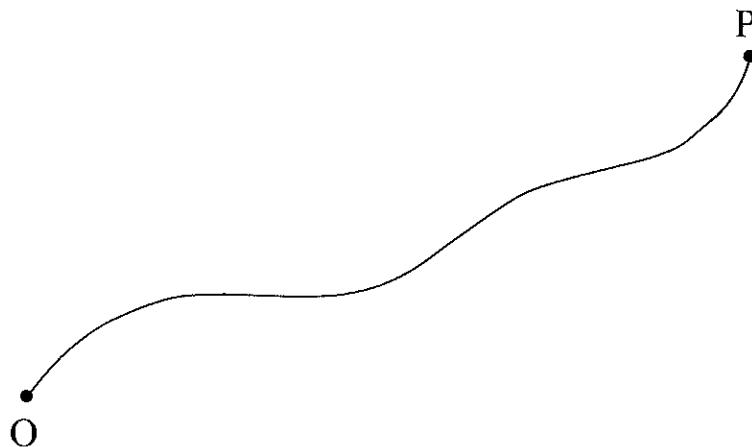


図 2.39: 避難経路が直線でない場合の例 (1)

2.7. 避難経路が直線でない場合の被災距離分布

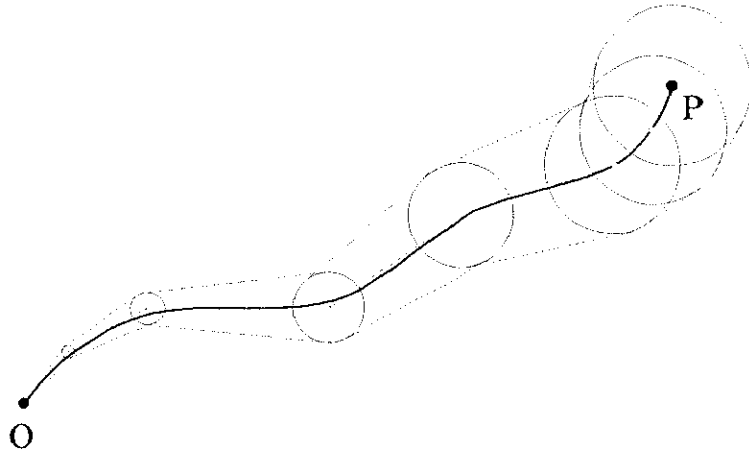


図 2.40: 避難経路が直線でない場合の例 (2)

2.8 まとめ

本章では、同時多発出火が発生した場合に直線的に避難を行った場合に延焼に巻き込まれて被災するまでの移動距離の分布を被災距離と定義してその導出と考察を行った。

ここでは、その要点を箇条書きで示す。

- 被災距離分布の平均値は出火密度と速度比の平方根に反比例することを明らかにした。
- 避難開始時間に遅れがある場合の被災距離分布を導出し、避難開始が遅れば遅れるほど逃げられる距離が減少するものの、その変化率は逓減する傾向があることを明らかにした。
- 避難する際に進行方向を変更する場合の被災距離分布を導出し、歩行速度に対する延焼速度の比 α が 0.02 程度で方向転換の角度が 90 度以内であれば通常の被災距離分布との相対誤差は最大でも約 3 % 程度であり、近似式として使用しても問題ないことを明らかにした。
- 有限領域において境界周辺部を考慮した被災距離分布を導出した。また、無限領域における被災距離分布を有限領域において使用した場合の相対誤差の最大値が速度比 α のみで決定される事を示し、速度比 α が 0.02 程度であれば相対誤差は最大でも約 3 % 程度であることから、無限領域における被災距離分布の式を有限領域において近似式として使用しても問題ないことを明らかにした。
- 避難経路が直線でない場合でも、大局的に見て後退していなければ近似的に通常の被災距離分布の式を用いて被災距離分布を導出することが可能であることを示した。

なお、本章では避難速度 v が一定であると仮定したが、これが時間とともに減少するような値であると考えた場合にも本章と同様の議論が可能であると考えられる。具体的には被災距離分布を計算する際に用いた領域 D_1 の輪郭線が歩行速度と時間の関係式によって変化すると予想されるため、今後歩行速度の式を仮定して分析を行いたい。

第3章

避難距離分布の導出

3.1 はじめに

前章では、安全な領域がないことを前提にして被災距離分布を導出したが、本章では逆に火災が発生していない状況において、安全な場所にたどり着くまでの距離の分布について考察を加える。

避難すべき安全な領域としては大きく分けて、避難路のように線的に張り巡らされた領域と、避難地や避難所のように局所的に存在する領域の2種類があると考えられる。

そこでまず、3.2節では延焼遮断帯や避難路のように区画を取り囲むように線的に張り巡らされた施設に向かって避難する場合の距離分布の基本的な導出方法とその応用例について述べる。

次に、3.3節では避難地や避難所のように避難路や延焼遮断帯によって囲まれた区画の内部にある施設に向かって避難する場合の距離分布の基本的な導出方法について述べるとともに、避難路に対する避難の場合との違いについて考察を加える。

3.2 避難路までの避難距離分布

3.2.1 最短距離で避難する場合

本節では区画を取り囲むような避難路や延焼遮断帯に向かって最短距離で避難する状況を想定する。これを簡単なモデルによって表現し、図3.1に示すように避難路によって囲まれた長辺 a (m)、短辺 γa (m) の矩形領域が形成されていることとする。なお、 $0 < \gamma \leq 1$ とし、以後この領域を領域 D_2 と呼ぶこととする。この領域 D_2 内の人々は領域の境界線まで避難できれば生命が担保されるものと仮定し、領域内の任意の地点 $O(x, y)$ から避難路、即ち領域の境界線までの最短距離を R とおく。以下ではこの避難距離 R の分布の基本的な導出方法を示す。

3.2. 避難路までの避難距離分布

まず、避難距離 R が r 以下となる確率を $G(r)$ と定義する。すると、 R が r 以下となるのは、
 図 3.2 の網点部以外の領域に避難開始地点 $O(x, y)$ がある場合である。

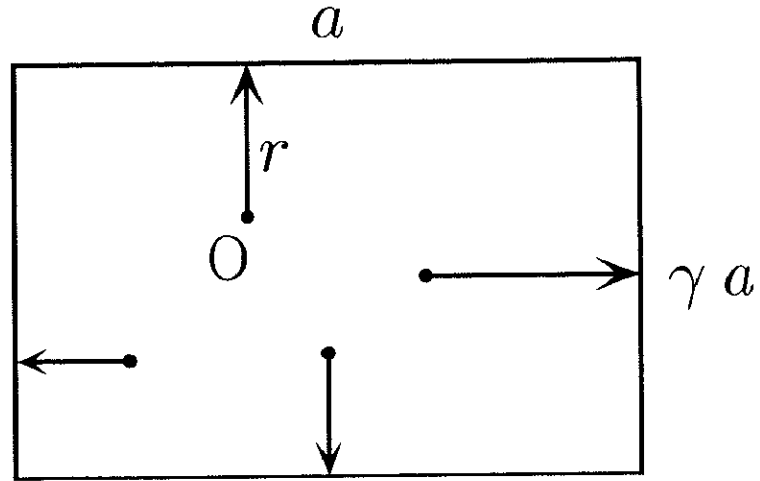


図 3.1: 最短距離避難のモデル

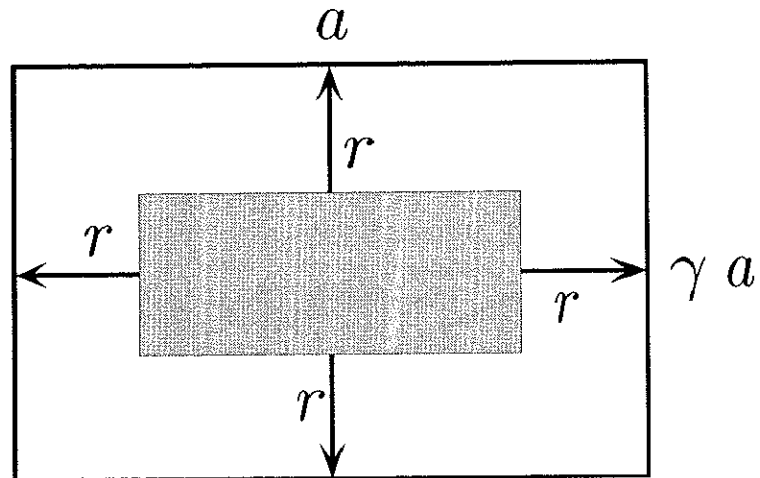


図 3.2: 避難距離が r 以下となる領域

第3章 避難距離分布の導出

よって、距離 R が r 以下となる確率 $G(r)$ は、図 3.2 の網点部以外の領域 D_2 の面積を領域の総面積で割ることによって導出できるので、

$$\begin{aligned} G(r) &= \frac{1}{a \times \gamma a} \{a \times \gamma a - (a - 2r)(\gamma a - 2r)\} \\ &= \frac{1}{\gamma a^2} \{-4r^2 + 2(1 + \gamma)ar\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

と求められる。ただし、 r の最長距離は短辺の長さの半分 ($\gamma a/2$) であるから、 r の定義域は $0 \leq r \leq \gamma a/2$ である。

この $G(r)$ を r で微分したものが求める距離分布であり、

$$0 \leq r \leq \frac{1}{2}\gamma a \text{ のとき}$$

$$g(r) = \frac{1}{\gamma a^2} \{-8r + 2(1 + \gamma)a\} \quad (3.2)$$

と求められ、 r の一次関数であることが分かる。

一例として、長辺 1000m、短辺 500m のときの $g(r)$ のグラフを図 3.3 に示す。

避難距離分布の式が r の一次関数であることから明らかであるが、図からも直線的な分布となることが確認できる。

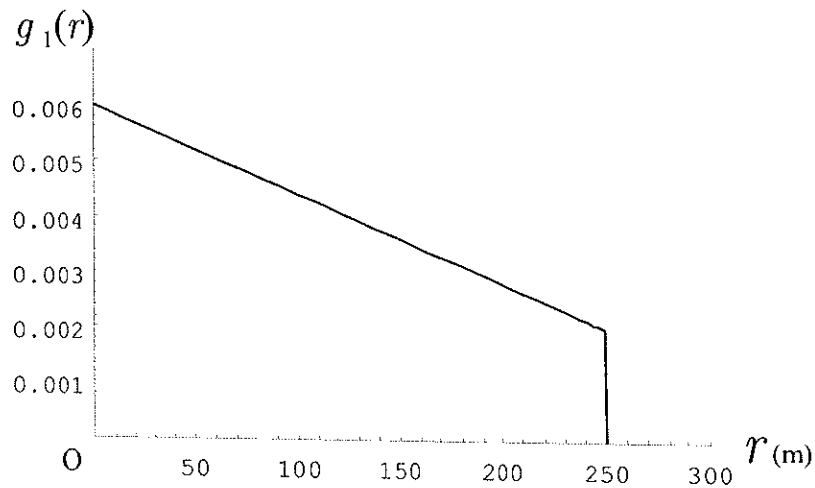


図 3.3: 距離分布 $g(r)$

避難距離 r の平均値 $E(r)$ を計算すると、

$$\begin{aligned} E(r) &= \int_0^{\infty} r g(r) dr \\ &= \frac{1}{12}(-\gamma^2 + 3\gamma)a \end{aligned} \quad (3.3)$$

と求められ、平均値が長辺 a の一次関数であることが分かる。先ほどの図 3.3 の場合の平均値を計算すると約 104.2m である。

特に、一辺の長さが a の正方形領域の場合の避難距離の平均値は、

$$E_1(r) = \frac{1}{6}a \quad (3.4)$$

と計算できる。このことから、正方形領域の内部から外部に向かって最短距離で避難を行った場合には、平均的には領域の一辺の長さの $1/6$ 進むと境界に到達できることが分かる。

なお、 $0 < \gamma \leq 1$ であることから、

$$0 < E_1(r) \leq \frac{1}{6}a$$

であり、 r の平均値は領域の形状が正方形 ($\gamma = 1$) の場合に最大値 $a/6$ となり、 γ の値が小さくなるにつれて r の平均値は小さくなることが分かる。

なお、安全な領域として延焼遮断帯に対して避難を行う場合は、延焼遮断帯そのものが生命を担保できるだけのスペックを持っていない場合にはとりあえず延焼遮断帯に避難することによってある程度の安全を確保してから、更に避難地に向かう必要がある。

また、本節では矩形領域の場合の例を示したが、領域が不定型である場合にも同様の手法によって避難距離の分布を導出することは可能である。ただし、矩形領域の場合のように簡単な式で表現できるとは限らないので、領域の形に応じて場合分けなどに注意しながら導出する必要がある。

この様に、避難距離分布を導出することができれば避難距離の平均値や分散を導出することが可能であるためそれらを領域の安全性評価の指標の 1 つとして用いることも可能であると考える。しかしながら、距離分布の関数型によっては平均値や分散などを解析的に導出できない場合もある。

3.2.2 4方向へ避難する場合

前小節では最短距離で避難できる場合の避難距離分布の基本的な導出方法を示したが、本小節ではその導出方法を応用して最短距離で避難できない場合の避難路までの距離分布について考察する。

なお、現実の避難方向の選択がどのようになされているかということは難しい問題であり、ヒアリング調査による分析や人間の本能に基づく分析など様々な研究がなされている。シミュレーションモデルの多くは避難時に最短距離で避難できるという仮定が設けられているが、[青木, 他 1992]のように住民へのアンケート調査によって避難方向選択をモデル化し避難シミュレーションの中に取り込んでいるものもある。本研究では理論化のために、最短方向以外は選択可能な方向を等確率で選ぶという仮定を設けることとした。

まず、避難者が最寄りの安全な方角がどの方角であるかという情報を持たず(あるいは判断できず)に、任意の方向に避難する場合をモデル化する。ただし、格子状の道路網を考慮して、移動方向は東西南北のいずれかの方向に限定する。そこで、図 3.4 に示すように D_2 内の避難者が $O(x, y)$ から東西南北のいずれかの方角に向かって避難する場合(図 3.4 の r_1, r_3, r_4, r_2) の避難距離 R が r 以下である確率を $G_2(r)$ と定義し、避難距離分布 $g_2(r)$ を導出する。

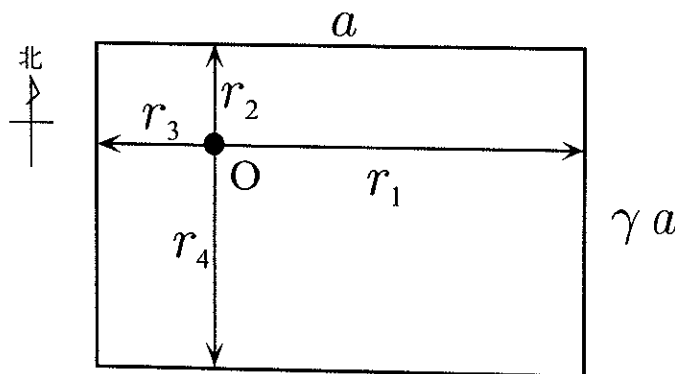


図 3.4: 4方向への避難

まず、図 3.4 の左肩に示したように方位を設定し、東に向かって避難する場合に R が r 以下となる確率は、点 $O(x, y)$ が図 3.5-(i) の網点部以外にある確率なので、

$$\frac{1}{a}r \quad (0 \leq r \leq a)$$

である。西に避難する場合も全く同様である。次に、北に避難する場合に R が r 以下となる確

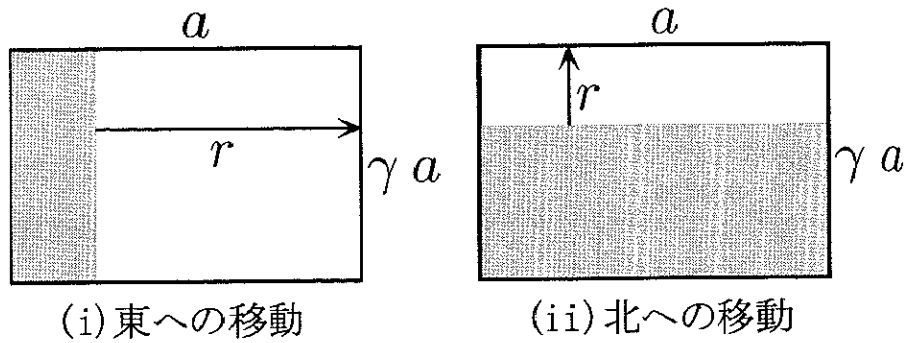


図 3.5: 距離が r 以下となる領域

率は、点 $O(x, y)$ が図 3.5-(ii) の網点部以外にある確率なので、

$$\frac{1}{\gamma a} \quad (0 \leq r \leq \gamma a)$$

である。南に避難する場合も全く同様である。ここで、 $\gamma a < r \leq a$ の場合は南北方向の移動は必ず r 以下であることに注意すると $G_2(r)$ は、

(i) $0 \leq r \leq \gamma a$ のとき

$$\begin{aligned} G_2(r) &= \frac{1}{4} \left(2 \times \frac{1}{a} r + 2 \times \frac{1}{\gamma a} r \right) \\ &= \frac{1}{2a} \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) r \end{aligned} \quad (3.5)$$

(ii) $\gamma a < r \leq a$ のとき

$$\begin{aligned} G_2(r) &= \frac{1}{4} \left(2 \times \frac{1}{a} r + 2 \times 1 \right) \\ &= \frac{1}{2a} r + \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

であり、 r の一次関数であることが分かる。求める距離分布 $g_2(r)$ は $G_2(r)$ を r で微分して、

(i) $0 \leq r \leq \gamma a$ のとき

$$g_2(r) = \frac{1}{2a} \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (3.7)$$

(ii) $\gamma a < r \leq a$ のとき

$$g_2(r) = \frac{1}{2a} \quad (3.8)$$

と求められ、 r の定数関数であることが分かる。

第3章 避難距離分布の導出

一例として、長辺 1000m、短辺 500m のときの $g_2(r)$ のグラフを図 3.6 に示す。階段状の分布を示すことが分かる。

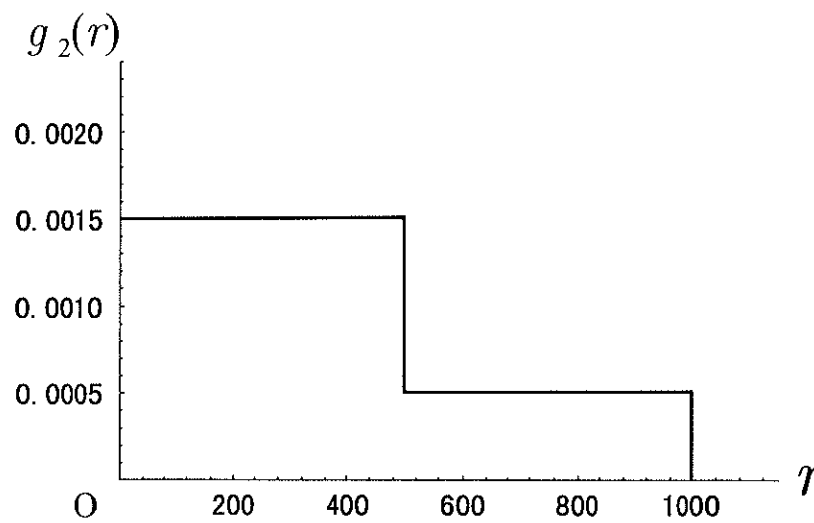


図 3.6: 距離分布 $g_2(r)$

r の期待値 $E_2(r)$ を計算すると、

$$E_2(r) = \frac{1}{4}(1 + \gamma)a \quad (3.9)$$

となる。特に一辺の長さ a の正方形領域 ($\gamma = 1$) の場合は、

$$E_2(r) = \frac{1}{2}a = 3E_1(r) \quad (3.10)$$

であり、前小節で導出した最短距離避難の場合と比べると平均値が 3 倍になることが分かった。

3.2.3 任意の一方方向へ避難する場合

前小節と同じように、領域内の避難者が最寄りの安全な方角が分からずに、任意にいずれかの方角に向かって避難する状況を想定する。前小節では道路網を考慮して避難可能方向を4方向に限定したのに対して、本小節では道路網の密度が上がったことによって一様に全ての方向へ避難する事が可能な状況を想定する (図 3.7).

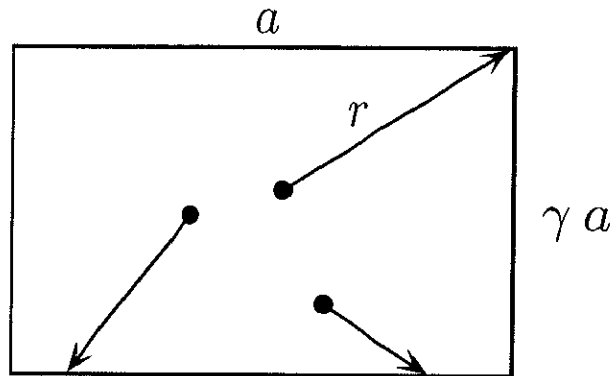


図 3.7: 境界に向かう移動の図

避難者が点 $O(x, y)$ からある角度 θ の方向に移動した場合の避難距離 R が r 以下であるのは、図 3.8 において領域 D_2 内で網点部以外の場所に点 $O(x, y)$ がある場合である。

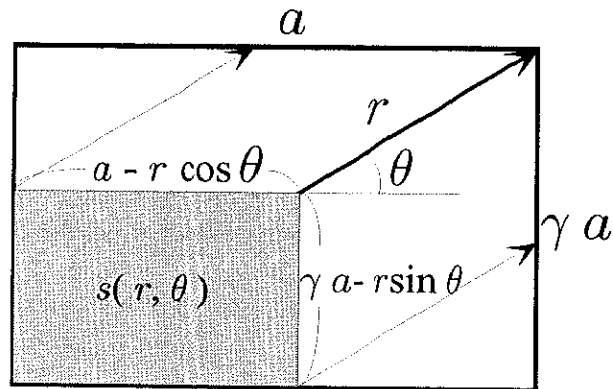


図 3.8: 距離が r 以下となる領域

よって、ある θ の下で距離 R が r 以下である確率 $G_3(r)$ は領域 D_2 内の網点部以外の面積を D_2 の総面積で除したものである。ここで、網点部の面積を $s(r, \theta)$ とおくと、

$$s(r, \theta) = (a - r \cos \theta)(\gamma a - r \sin \theta)$$

第3章 避難距離分布の導出

であるから、これを領域 D_2 の面積 γa^2 から引いたものを θ で積分すればよい。即ち、

$$\frac{1}{\gamma a^2} \int_{(r,\theta) \in D_2} \{ \gamma a^2 - (a - r \cos \theta)(\gamma a - r \sin \theta) \} d\theta$$

を計算すればよい。

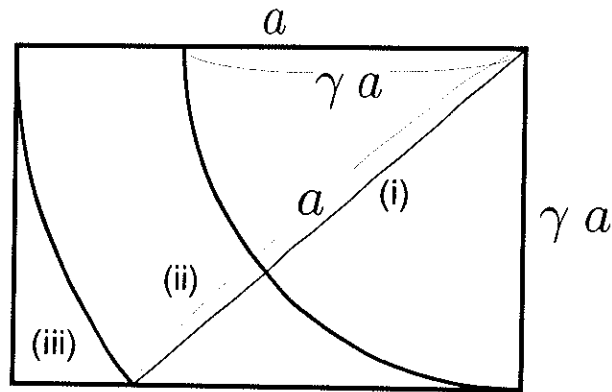


図 3.9: 場合分けの範囲

なお、対称性を考慮して θ を 0 から $\frac{\pi}{2}$ まで積分したものを 4 倍すれば $G_3(r)$ を得られる。ただし、積分区間によっては $s(r, \theta)$ が定義されない部分があるので注意が必要である。 $s(r, \theta)$ が定義されるのは、図 3.9 に示すように、

(i) $0 \leq r \leq \gamma a$ のとき、 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ の区間

(ii) $\gamma a < r \leq a$ のとき、 $0 < \theta < \arcsin \frac{b}{r}$ の区間

(iii) $a < r \leq a\sqrt{1+\gamma^2}$ のとき、 $\arccos \frac{a}{r} < \theta < \arcsin \frac{\gamma a}{r}$ の区間

である。

このことに注意して $G_3(r)$ および $g_3(r)$ を求めると、

(i) $0 \leq r \leq \gamma a$ のとき

$$\begin{aligned}
G_3(r) &= \frac{4}{2\pi\gamma a^2} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}} \gamma a^2 d\theta \right. \\
&\quad \left. - \int_0^{\frac{\pi}{2}} (a - r \cos \theta)(\gamma a - r \sin \theta) d\theta \right\} \\
&= \frac{1}{\pi\gamma a^2} \{-r^2 + 2(1 + \gamma)ar\} \tag{3.11}
\end{aligned}$$

$$g_3(r) = \frac{2}{\pi\gamma a^2} \{-r + (1 + \gamma)a\} \tag{3.12}$$

(ii) $\gamma a < r \leq a$ のとき

$$\begin{aligned}
G_3(r) &= \frac{4}{2\pi\gamma a^2} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}} \gamma a^2 d\theta \right. \\
&\quad \left. - \int_0^{\arcsin \frac{\gamma a}{r}} (a - r \cos \theta)(\gamma a - r \sin \theta) d\theta \right\} \\
&= \frac{2}{\pi\gamma a} \left\{ r - \sqrt{r^2 - \gamma a^2} \right. \\
&\quad \left. - \gamma a \arcsin \frac{\gamma a}{r} + \gamma a^2(\pi + \gamma) \right\} \tag{3.13}
\end{aligned}$$

$$g_3(r) = \frac{2}{\pi\gamma ar} \left(r - \sqrt{r^2 - (\gamma a)^2} \right) \tag{3.14}$$

(iii) $a < r \leq a\sqrt{1 + \gamma^2}$ のとき

$$\begin{aligned}
G_3(r) &= \frac{4}{2\pi\gamma a^2} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}} \gamma a^2 d\theta \right. \\
&\quad \left. - \int_{\arccos \frac{a}{r}}^{\arcsin \frac{\gamma a}{r}} (a - r \cos \theta)(\gamma a - r \sin \theta) d\theta \right\} \\
&= \frac{1}{\pi\gamma a^2} \left\{ r^2 - 2a \left(\gamma\sqrt{r^2 - a^2} + \sqrt{r^2 - (\gamma a)^2} \right) \right. \\
&\quad \left. + 2\gamma a^2 \left(\frac{\pi}{2} + \arccos \frac{a}{r} - \arcsin \frac{\gamma a}{r} \right) \right. \\
&\quad \left. + (1 + \gamma^2)a^2 \right\} \tag{3.15}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
g_3(r) &= \frac{2}{\pi\gamma a^2} \left\{ r \left(1 - \frac{a}{\sqrt{r^2 - (\gamma a)^2}} - \frac{\gamma a}{\sqrt{r^2 - a^2}} \right) \right. \\
&\quad \left. + \frac{\gamma a^3}{r} \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 - a^2}} + \frac{\gamma}{\sqrt{r^2 - (\gamma a)^2}} \right) \right\} \tag{3.16}
\end{aligned}$$

と求められる。

第3章 避難距離分布の導出

一例として、長辺 1000m、短辺 500m のときの $g_3(r)$ をプロットしたものを図 3.10 に示す。 $g_3(r)$ の式は $g_1(r), g_2(r)$ に比べるとかなり複雑であるが、大凡の傾向としては、図の破線で示した $g_2(r)$ の簡単なグラフに近いことが分かる。

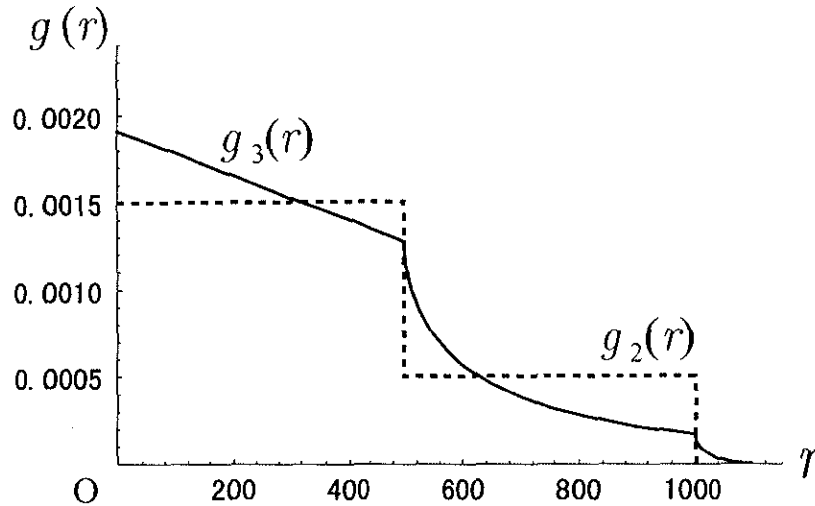


図 3.10: 距離分布 $g_3(r)$

ここで、 r の平均値 $E_3(r)$ を計算すると、

$$\begin{aligned}
 E_3(r) &= \int_0^{\infty} r g_3(r) dr \\
 &= \left\{ \frac{\sqrt{1+\gamma^2}}{3\pi\gamma} (2\gamma^2 - 3(1+\gamma^2) + 2) \right. \\
 &\quad + \frac{1}{3\pi} \left(\gamma^2 - 3\gamma (\log \gamma - \log (1 + \sqrt{1+\gamma^2})) \right) \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\gamma} + 3 \log (\gamma + \sqrt{1+\gamma^2}) \right\} a \tag{3.17}
 \end{aligned}$$

と求められる。

なお、領域が一辺の長さ a の正方形の場合には平均値 $E_3(r)$ はより簡単に、

$$E_3(r) = \frac{2a}{3\pi} \{ 1 - \sqrt{2} + 3 \log (1 + \sqrt{2}) \} \tag{3.18}$$

$$\simeq 0.47a \tag{3.19}$$

と求められる。この結果から、任意の方向に向かって避難を開始した場合でも平均的に領域の一辺の長さの約半分の距離進むと領域の外側に出られることが分かる。

3.2.4 3つの距離分布の比較

広幅員道路や不燃建築物群などの延焼遮断帯で街区を囲み、火災をその内部で食い止めようという計画として都市防火区画計画などがあるが、その区画の大きさはおおむね 1km^2 とされている ([堀内 1994]). 一例として、この規模に相当する一辺が $1,000\text{m}$ の正方形都市領域の場合の避難距離分布 $g_1(r)$, $g_2(r)$, および $g_3(r)$ をプロットしたものを図 3.11 に示す。

式からも明らかであるが、避難すべき方向が分かっている、最短距離で避難できる場合の避難距離の平均値は約 167m であり、方向が分からずに任意の方向に避難した場合の平均値 500m の $1/3$ に短縮される。また、任意の一方向に避難した場合と 4 方向中の 1 方向に限定して避難した場合の距離分布はかなり似た動きを示している点が興味深く、距離分布の複雑な式 ((3.11)–(3.16) 式) を用いなくとも、4 方向中の 1 方向避難の簡単な計算式 ((3.5)–(3.8) 式) から任意の方向への避難距離分布の大凡の形を推定できると考えられる。

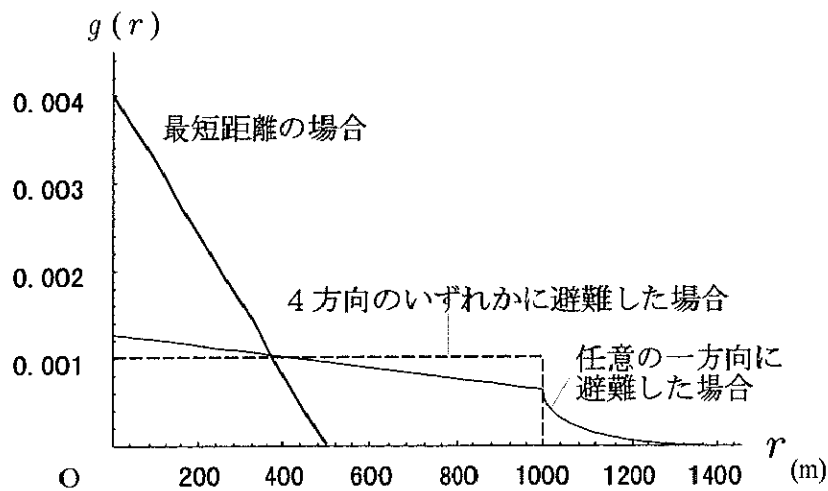


図 3.11: 距離分布の比較

ここで、期待値の式を並べてみると、

$$\begin{aligned}
 E_1(r) &= \frac{1}{12}(-\gamma^2 + 3\gamma)a \\
 E_2(r) &= \frac{1}{4}(1 + \gamma)a \\
 E_3(r) &= \left\{ \frac{\sqrt{1 + \gamma^2}}{3\pi\gamma} (2\gamma^2 - 3(1 + \gamma^2) + 2) \right. \\
 &\quad + \frac{1}{3\pi} \left(\gamma^2 - 3\gamma \left(\log \gamma - \log \left(1 + \sqrt{1 + \gamma^2} \right) \right) \right) \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\gamma} + 3 \log \left(\gamma + \sqrt{1 + \gamma^2} \right) \right\} a
 \end{aligned}$$

第3章 避難距離分布の導出

であり、避難距離分布の期待値 $E_1(r)$, $E_2(r)$, $E_3(r)$ はそれぞれ矩形都市領域 D_2 の長辺の長さ a の1次関数であることが分かったが、短辺の長さの比 γ の値によってどのように変化するかを見るために、 $a = 1,000\text{m}$ の場合に γ を0から1まで変化させたときの期待値の変化を図3.12に示す。

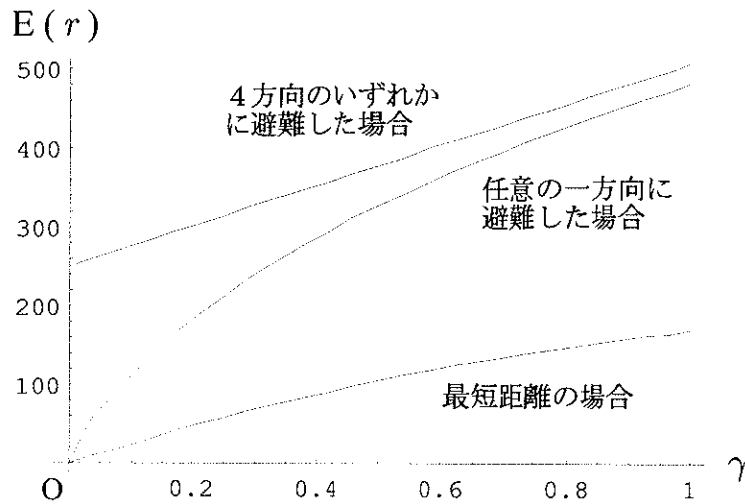


図 3.12: γ の値による期待値の変化

これをみると、任意の一方方向に避難する場合の期待値は γ が0の近傍では最短距離の場合の期待値に近いが、 γ が1に近づくにつれて次第に4方向中のいずれかの方向に避難する場合の期待値に近づいていくことが分かる。4方向中のいずれかの方向に避難する場合に比べて、任意の一方方向に避難する場合の避難距離の期待値の方が小さくなるという点が興味深い。

3.3 避難地までの避難距離分布

本節では、そこまで来れば生命が担保されるような要求を満たす避難地や避難所等の施設に向かって避難する場合の避難距離分布を導出する方法を示す。まず、簡単なモデル化を行い、長辺 a 、短辺 γa の矩形領域 D_2 の中心に避難所があると仮定してそこまでの距離分布を導出する。なお、避難距離はレクティリニア距離とする。当然の事ながら、避難所の位置によって避難距離分布は変化するのであるが、ここでは領域内の任意の地点に避難所がある場合にも適用可能な方法によって、一例として中心部分に避難地がある場合の避難距離分布を導出することとする。なお、詳細は後述するが直感的にも明らかなように避難地が領域の中心部にある場合が平均距離が最小であることを述べておく。

まず、避難距離 R が r 以下となる確率を $G(r)$ と定義する。すると、避難地までのレクティリニア距離 R が r 以下となるのは、図 3.14 の網点部の領域に地点 $O(x, y)$ がある場合である。よって、距離 R が r 以下となる確率 $G(r)$ は、境界までの距離分布と同様に図 3.14 の網点部の領域の面積を領域の総面積で割ることによって導出できる。この方法によって、避難地が中心にある場合の避難距離分布を直接計算してもよいのであるが、前述したように避難地が領域内のどの場所にあっても計算できるように、より一般的な計算方法によって避難距離分布を導出する。

まず、図 3.14 の破線で示すように避難地を通り境界線に平行な直線分を 2 本引く。すると、避難地を領域の隅に持つ 4 つの領域に分割することができる。避難地が領域の中心にある場合は、分割した 4 つの領域は全て対称形であるが、避難地の位置によっては 4 つの領域の面積と縦横比が変化してくる。しかしながら、分割された 4 つの領域は避難地を隅に持つ矩形領域となるという点では共通しているため、図 3.15 に示すような長辺 a 、短辺 b の矩形領域において隅の部分に避難する場合の規準化しない距離分布を導出しておくと、分割する前の領域における距離分布を容易に計算することができる。

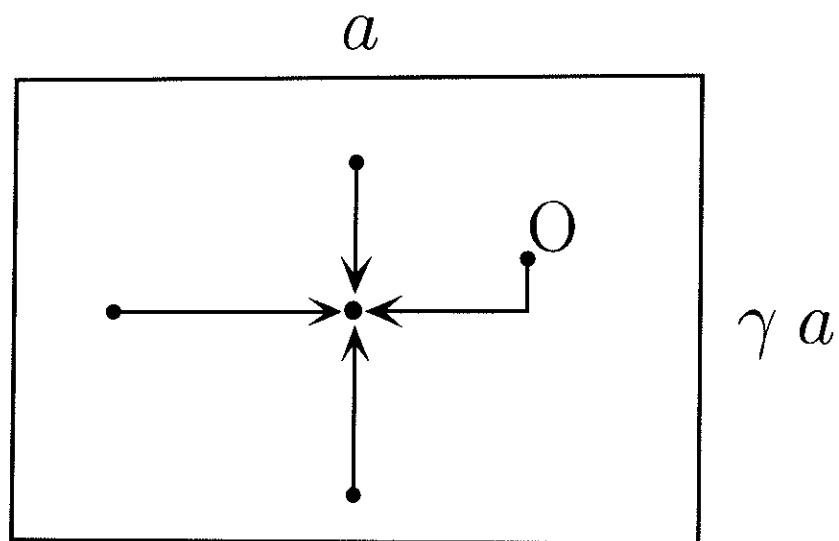


図 3.13: 避難地型整備のモデル

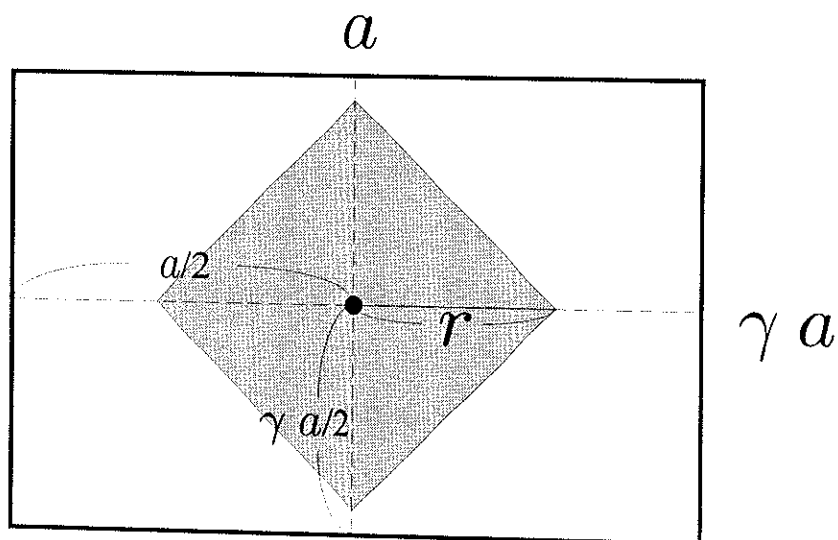
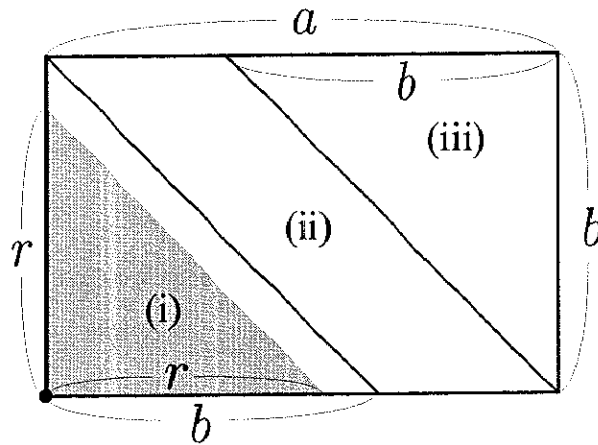


図 3.14: 避難距離が r 以下となる領域

図 3.15: 避難距離が r 以下となる領域

そこで、図 3.15 に示すような長辺 a 、短辺 b の矩形領域で左下隅の避難地に避難する場合の避難距離 R が r 以下となる部分の面積を $J(r)$ とおくと、 r の値に応じて 3 つの場合分けが必要になり、

(i) $0 \leq r \leq b$ のとき

$$J(r) = \frac{1}{2}r^2 \quad (3.20)$$

(ii) $b \leq r \leq a$ のとき

$$J(r) = \frac{1}{2}(2br - b^2) \quad (3.21)$$

(iii) $a \leq r \leq a+b$ のとき

$$J(r) = -\frac{1}{2}\{r^2 - 2(a+b)r + a^2 + b^2\} \quad (3.22)$$

となる。 $J(r)$ を r で微分したものを $j(r)$ とおくと、

(i) $0 \leq r \leq b$ のとき

$$j(r) = r \quad (3.23)$$

(ii) $b \leq r \leq a$ のとき

$$j(r) = b \quad (3.24)$$

(iii) $a \leq r \leq a+b$ のとき

$$j(r) = -r + a + b \quad (3.25)$$

と計算できる。これら a, b の値に分割した領域の辺の長さを代入して組み合わせることによって求める距離分布を導出してゆく。

第3章 避難距離分布の導出

図 3.14 に示したようにもとの領域を 4 分割した領域は全て長辺 $a/2$, 短辺 $\gamma a/2$ であることから, $G(r)$ は先ほどの $J(r)$ の式の a に $a/2$ を, b に $\gamma a/2$ を代入して 4 倍したものを領域 D_2 の総面積 γa^2 で割ることによって計算できる. よって, 求める $G(r)$ は,

(i) $0 \leq r \leq \gamma a/2$ のとき

$$\begin{aligned} G(r) &= \frac{1}{\gamma a^2} \left(\frac{1}{2} r^2 \times 4 \right) \\ &= \frac{1}{\gamma a^2} 2r^2 \end{aligned} \quad (3.26)$$

(ii) $\gamma a/2 \leq r \leq a/2$ のとき

$$\begin{aligned} G(r) &= \frac{1}{\gamma a^2} \left\{ \frac{1}{2} \left(2 \frac{\gamma a}{2} r - \left(\frac{\gamma a}{2} \right)^2 \right) \times 4 \right\} \\ &= \frac{1}{\gamma a^2} \left\{ 2\gamma a r - \frac{1}{2} (\gamma a)^2 \right\} \end{aligned} \quad (3.27)$$

(iii) $a/2 \leq r \leq (1+\gamma)a/2$ のとき

$$\begin{aligned} G(r) &= -\frac{1}{\gamma a^2} \frac{1}{2} \left\{ r^2 - 2 \frac{(1+\gamma)a}{2} r + \left(\frac{a}{2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma a}{2} \right)^2 \right\} \times 4 \\ &= -\frac{1}{\gamma a^2} \left\{ 2r^2 - 2(1+\gamma)ar + \frac{1}{2} (1+\gamma^2) a^2 \right\} \end{aligned} \quad (3.28)$$

となる. よって, 求める距離分布 $g(r)$ は $G(r)$ を r で微分して,

(i) $0 \leq r \leq \gamma a/2$ のとき

$$g(r) = \frac{4}{\gamma a^2} r \quad (3.29)$$

(ii) $\gamma a/2 \leq r \leq a/2$ のとき

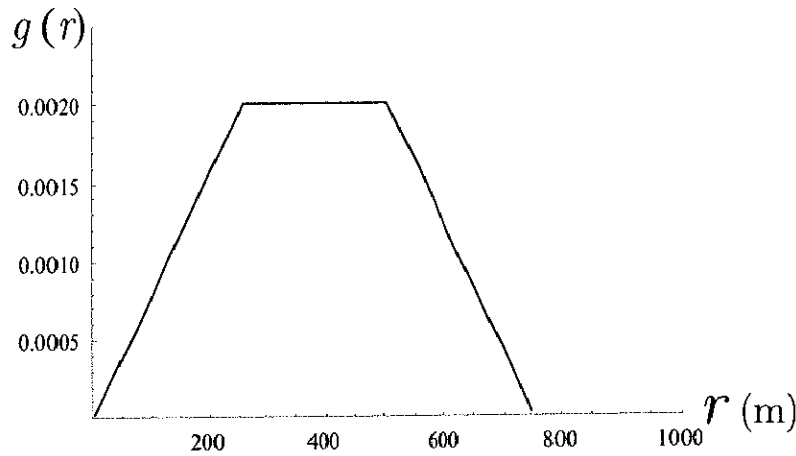
$$g(r) = \frac{2}{a} \quad (3.30)$$

(iii) $a/2 \leq r \leq (1+\gamma)a/2$ のとき

$$g(r) = -\frac{1}{\gamma a^2} \{4r - 2(1+\gamma)a\} \quad (3.31)$$

となる.

一例として, 長辺 1000m, 短辺 500m のときの $g(r)$ のグラフを図 3.16 に示すが, 台形の分布となることが分かる.

図 3.16: 距離分布 $g(r)$

得られた距離分布を元にして、避難地が領域の中心にある場合の r の平均値 $E(r)$ を計算すると、

$$\begin{aligned} E(r) &= \int_0^{\infty} r g(r) dr \\ &= \frac{1}{4}(1 + \gamma)a \end{aligned} \quad (3.32)$$

と求められ、平均値が領域の周長の $1/8$ となることが分かる。

特に一辺の長さが a の正方形領域の場合の避難距離の平均値は、

$$E(r) = \frac{1}{2}a \quad (3.33)$$

であり、平均的には領域の一辺の長さの $1/2$ 進むと避難地に到達できることが分かる。

本節の冒頭でも述べたように、避難所の位置によって避難距離分布は変化する。そこで、図 3.17 に示すように、領域の左下隅を原点とした直交座標系で $P(x, y)$ の地点に避難地がある場合の避難距離の分布は前に導出した $J(r)$ を用いて、4つの領域の短辺と長辺の長さを代入することによって導出することができるが、場合分けに注意しなくてはならない。さて、避難地を選定する際には領域内の住民がいかに早く避難できるかが重要であるため、ここでは避難地の位置 $P(x, y)$ の変化による避難距離の平均値の変化をみることにする。

場合分けの数が多くなりの紙面を必要とするため詳細な導出過程は省略するが、上述した方法によって注意深く場合分けを行い、 $P(x, y)$ を変化させた場合の避難距離分布を導出し、そ

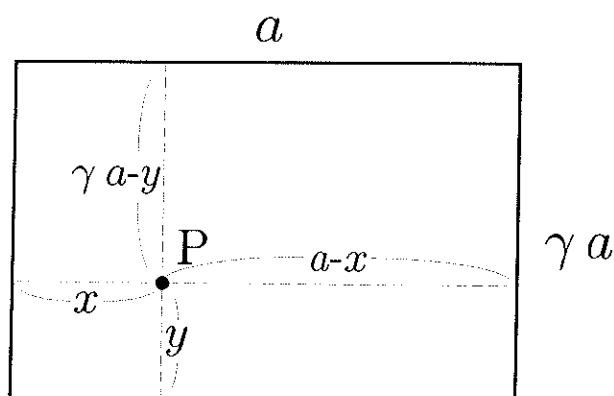


図 3.17: 避難距離が r 以下となる領域

の平均値を (x, y) の関数と見なし, $E(x, y)$ とおくと,

$$E(x, y) = \frac{1}{\gamma a} (\gamma x^2 + y^2) - (x + y) + \frac{1}{2}(1 + \gamma)a \quad (3.34)$$

という比較的簡単な式で表すことができる.

一例として, 領域 D_2 が長辺 1000m, 短辺 500m のときの $E(x, y)$ のグラフを図 3.18 に示す.

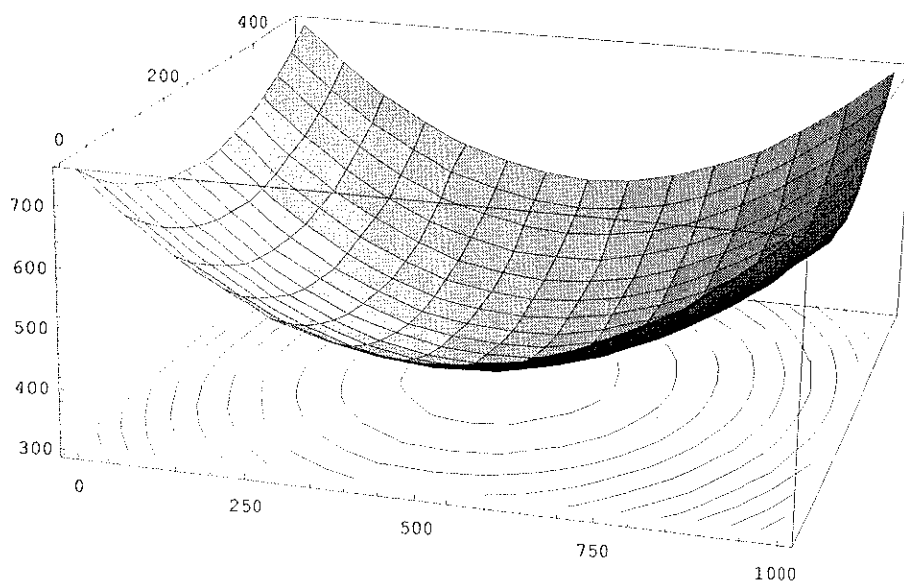


図 3.18: 平均距離 $E(x, y)$

また, $E(x, y)$ の等高線をプロットしたものを図 3.19 に示す.

図からも明らかではあるが, $E(x, y)$ が最小となる地点 (x, y) と最小値を求めてみる. $E(x, y)$

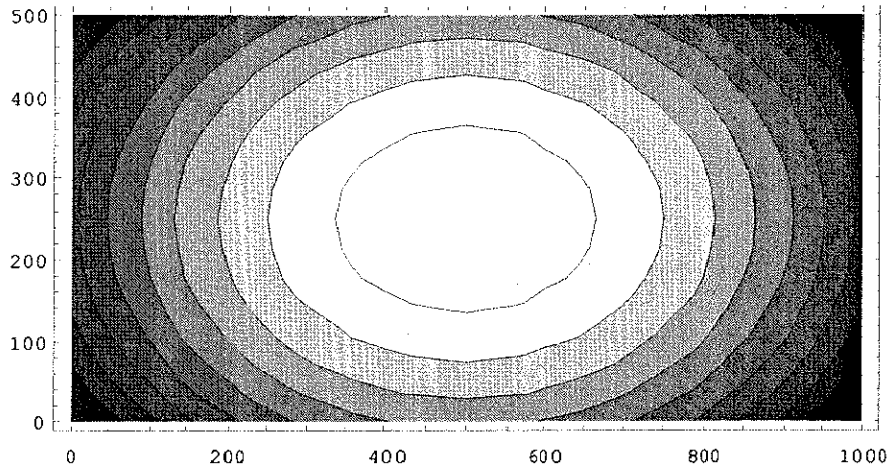


図 3.19: 平均距離 $E(x, y)$ の等高線

の1階の偏導関数を計算すると,

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial x} &= \frac{2}{a}x - 1 \\ \frac{\partial E}{\partial y} &= \frac{2}{\gamma a}y - 1\end{aligned}$$

であり, $\partial E/\partial x = 0$, $\partial E/\partial y = 0$ を満たすのは,

$$(x, y) = \left(\frac{a}{2}, \frac{\gamma a}{2} \right)$$

のとき, 即ち領域の中心となるときである. また,

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{2}{a} > 0$$

であり, ヘシアン D を計算すると,

$$D = \frac{4}{\gamma a^2} > 0$$

であることから, 避難地が領域の中心となる地点 $(a/2, \gamma a/2)$ にある場合において避難距離の平均値 $E(x, y)$ は極小かつ最小となる. そこで, (3.34) 式に

$$(x, y) = (a/2, \gamma a/2)$$

を代入すると,

$$E(x, y) = \frac{1}{4}(1 + \gamma)a$$

第3章 避難距離分布の導出

であり、(3.32)式の結果と一致していることが確認できる。

避難地を配置する場合には、避難距離の平均値が最小になるような位置に配置することが望ましいが、等高線を書いてみると明らかなように領域の中心部では E の勾配が緩やかであり、中心部から少々はずれても期待値の変化は少ないことが分かる。

3.4 まとめ

本章では、火災が発生していない状況の下で安全な場所にたどり着くまでの避難距離の分布を導出した。なお、安全な領域として避難路のように線的に張り巡らされた領域と、避難地や避難所のように局所的に存在する領域の2種類の場合を考えた。

以下に本章の要点を箇条書きで示す。

- 矩形領域を取り囲むような避難路に対して最短距離で避難を行う場合の距離分布を導出した。また、最短距離で避難できない場合に避難可能な方向を4方向に限定した場合と、任意の方向に避難可能とした場合との避難距離分布も導出し、比較を行った。
- 避難地や避難所のように避難路や延焼遮断帯によって囲まれた区画の内部にある施設に向かって避難する場合の距離分布の基本的な導出方法を示した。
- 矩形領域の内部に避難地を設ける場合に、避難地の位置を変化させた場合の避難地までの平均距離を避難地の位置の関数として導出した。

第4章

被災率の導出

4.1 はじめに

本章では安全な場所に辿り着く前に火災に巻き込まれてしまう確率を被災率 H と呼ぶこととし、第2章および第3章で導出した被災距離分布および境界までの距離分布を用いてこの被災率 H を定義し、計算する。

まず、ある距離 l までに避難を完了していないという条件の下である距離 l において延焼に巻き込まれてしまうという条件付き確率密度を $h(l)$ とおく。すると、第2章で導出した被災距離分布と、第3章で導出した避難距離分布を用いて、 $h(l)$ は、

$$h(l) = (1 - G(l))f(l)$$

と書ける。

よって、被災率 H は条件付き被災確率密度 $h(l)$ を積分することによって導出され、

$$H = \int_0^{\infty} (1 - G(l))f(l)dl \quad (4.1)$$

と計算できる。

例えば、防災対策の違いを $G(l)$ あるいは $f(l)$ に反映させることによって被災率をそれらの対策を比較する際の一つの指標として使用することができる。

そこで、まず4.2節では非施設的な防災対策の評価に対する応用例として、避難すべき方向に対する情報があり最短距離で避難できる場合と避難すべき方向に対する情報が無い場合の被災率を導出し、正方形都市領域においては最短距離方向へ避難できる場合の被災率が、最短距離で避難できない場合の被災率に比べて約1/8となる事を示し、避難路に関する情報が提供されることや、避難路を正しく把握できることの重要性を示す。

次に4.3節では施設の防災対策の評価の応用例として避難地までの避難路が整備されている場合と整備されていない場合との被災率の違いを導出し、避難地までの避難路が整備されていることの重要性を示すこととする。

4.2 非施設の対策に対する評価への応用例

本節では3.2節で示したような区画を取り巻く避難路に向かって避難する場合に、最短距離で避難できる方向を知らずに避難する場合と、最短距離で避難できる場合とそれぞれの被災率を導出し、その違いによって避難方向が明らかであることの効果を測ることを目的とする。

まず、第3章で設定した長辺 a 、短辺 γa の矩形都市領域においてその境界線が避難路となっている場合に、最も近い避難路の方角を知っていて最短距離で避難できる場合について考える。

なお、このときの $f(l)$ としては2.6節で述べたように通常の距離分布を近似的に用い、 $G(l)$ としては3.2節で導出した $G_1(l)$ を用いることとする。このときの被災率 H_1 は、

$$\begin{aligned} H_1 &= \int_0^{\frac{\gamma a}{2}} f(l)(1 - G_1(l))dl \\ &= \frac{1}{\gamma a^2 \rho \beta} \left(4 - 4e^{-\frac{1}{4}\rho\beta(\gamma a)^2} + \gamma a^2 \rho \beta \right. \\ &\quad \left. - (1 + \gamma)a\sqrt{\pi\rho\beta} \operatorname{Erf}\left(\frac{\gamma a}{2}\sqrt{\rho\beta}\right) \right) \end{aligned} \quad (4.2)$$

と計算できる。なお、変数の定義を再度述べておくと、 α は避難歩行速度に対する延焼速度の比であり、 β は α の関数で、

$$\beta = \alpha\sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha)\alpha^2$$

である。 ρ は出火密度で、 1m^2 あたりの出火件数である。

なお、 Erf はガウスの誤差関数として知られているものであり、

$$\operatorname{Erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-r^2} dr \quad (4.3)$$

で定義される。この積分結果は解析的には得られないため数値積分に頼るしかない。そこで、このガウスの誤差関数の近似を行うことを考える。なお、誤差関数の近似の詳細については4.4節で述べることにし、ここでは省略する。4.4節では(4.3)式の z の値に応じて2種類の近似式を導出しているが、ここでは、

$$\operatorname{Erf}\left(\frac{\gamma a}{2}\sqrt{\rho\beta}\right) < 1$$

第4章 被災率の導出

である場合について近似を行う。

この場合、級数展開によって $\text{Erf}\left(\frac{\gamma a}{2}\sqrt{\rho\beta}\right)$ を近似的に、

$$\text{Erf}\left(\frac{\gamma a}{2}\sqrt{\rho\beta}\right) \sim \frac{\gamma a\sqrt{\rho\beta}}{\sqrt{\pi}} - \frac{(\gamma a)^3(\rho\beta)^{\frac{3}{2}}}{12\sqrt{\pi}}$$

とおけるので、

$$H_1 \sim \frac{4}{\gamma a^2 \rho \beta} \left(1 - e^{-\frac{1}{4}(\gamma a)\rho\beta}\gamma\right) + \frac{1}{12}(1 + \gamma)(\gamma a)^2 \rho \beta - \gamma \quad (4.4)$$

と計算できる。

ここで更に $\rho\beta$ の級数展開による近似を行うと、

$$H_1 \sim \frac{1}{24}(2 - \gamma)\gamma^2 \rho \beta a^2 \quad (4.5)$$

と計算できる。

ここで、都市領域が正方形である場合には (4.5) 式に $\gamma = 1$ を代入して、

$$H_1 \sim \frac{1}{24}\beta\rho a^2 \quad (4.6)$$

となる。 ρa^2 は領域内の出火点の個数を表しているため、被災率が出火点の個数に比例するという大変簡単な関係式を得ることができた。

ここで、実際にパラメータに値を代入して被災率を計算してみる。出火密度は阪神淡路大震災時の神戸市長田区での DID における出火確率 0.00042 件/世帯を参考として、世帯密度を 50 世帯/ha と考えて、 $\rho = 0.000002$ 件/m² とし、速度比 $\alpha = 0.02$ とする。この設定の下で区画の一边の長さ a を 4,000m まで変化させた場合の被災率 H_1 と近似式の値をプロットしたものを図 4.1 に示す。

a の増加に伴って被災率が拡大していく様子を読みとれるが、骨格延焼遮断帯によって囲まれる程度の規模を想定した $a = 4,000m$ の場合では被災率が約 2.7 % であることが分かる。

4.2. 非施設の対策に対する評価への応用例

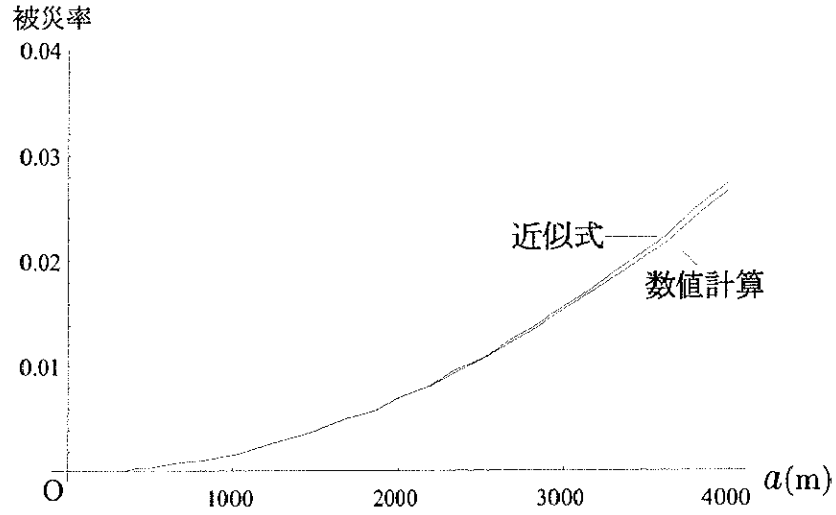


図 4.1: 被災率 H_1

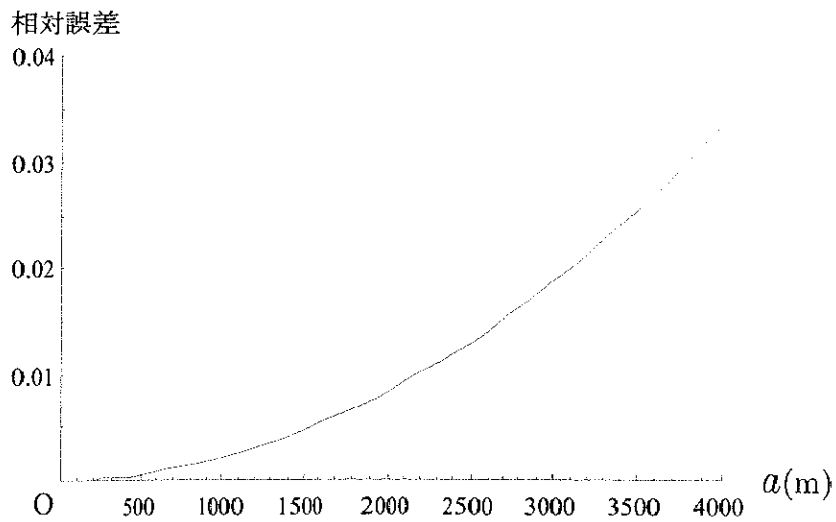


図 4.2: 被災率の相対誤差

第4章 被災率の導出

また、このときの相対誤差を図4.2に示す。

この様に、相対誤差は a の増加に伴って拡大していくことが分かるが、この場合には相対誤差約 3.3 %以下で近似できていることが分かる。

また、 a を ρ と β の関数 $a_1(\rho, \beta)$ と考えると式4.6より、

$$a_1(\rho, \beta) = \sqrt{\frac{24}{\rho\beta}} H_1 \quad (4.7)$$

となり、正方形の街区の場合、 ρ と β が与えられたときに被災率を H_1 以下にするためには、1辺の長さが $a_1(\rho, \beta)$ 以下になるように避難路等を配置すればよいということが分かる。

次に、先ほどと同様に長辺 a 、短辺 γa の矩形都市領域をとりまく避難路に向かって避難する場合に、最も近い境界の方向が分からずに4方向中の1方向に向かって避難する場合を考える。このときの被災率を H_2 とすると、

$$\begin{aligned} H_2 &= \int_0^{\gamma a} f(l) \left(1 - \frac{1 + \gamma l}{2\gamma a}\right) dl + \int_{\gamma a}^a f(l) \left(1 - \left(\frac{1}{2a}l + \frac{1}{2}\right)\right) dl \\ &= 1 - \frac{\sqrt{\pi}}{4\sqrt{\rho\beta}} \left(\frac{1}{a} \text{Erf}(a\sqrt{\rho\beta}) + \frac{1}{\gamma a} \text{Erf}(\gamma a\sqrt{\rho\beta})\right) \end{aligned} \quad (4.8)$$

である。

ここで、

$$\text{Erf}(a\sqrt{\rho\beta}) < 1$$

である場合を想定し、先ほどと同様に誤差関数を級数展開により近似して、

$$\begin{aligned} \text{Erf}(a\sqrt{\rho\beta}) &\sim \frac{2a\sqrt{\rho\beta}}{\sqrt{\pi}} - \frac{2a^3}{3\sqrt{\pi}}(\rho\beta)^{\frac{3}{2}} \\ \text{Erf}(\gamma a\sqrt{\rho\beta}) &\sim \frac{2\gamma a\sqrt{\rho\beta}}{\sqrt{\pi}} - \frac{2(\gamma a)^3}{3\sqrt{\pi}}(\rho\beta)^{\frac{3}{2}} \end{aligned}$$

とおくと、

$$H_2 \sim \frac{1}{6} (1 + \gamma^2) \beta \rho a^2 \quad (4.9)$$

と求められる。

4.2. 非施設の対策に対する評価への応用例

ここで ρa^2 は領域内の出火点の個数であるから、前節の場合と同様に被災率が出火点の個数に比例するという大変簡単な関係式を得ることができた。

ここで、都市領域が正方形である場合には式 (4.9) に $\gamma = 1$ を代入して、

$$H_2 \sim \frac{\beta}{3} \rho a^2 \quad (4.10)$$

と求められる。

そこで、先ほどと同様に実際にパラメータに値を代入して被災率を計算してみる。出火密度は $\rho = 0.000002$ 件/m² とし、速度比 $\alpha = 0.02$ とする。この設定の下で区画の一辺の長さ a を 4,000m まで変化させた場合の被災率 H_2 と近似式の値をプロットしたものを図 4.3 に示す。 a の増加に伴って被災率が拡大していく様子が読みとれるが、骨格延焼遮断帯によって囲まれる程度の規模を想定した $a = 4,000m$ の場合では被災率が約 18.3 % となり、最短距離で避難できる場合に比べかなり高くなってしまふことが分かる。

また、このときの相対誤差を図 4.4 に示す。図から、相対誤差は a の増加に伴って拡大していくことが分かるが、この場合には相対誤差約 20.1 % 以下で近似できていることが分かる。

さて、(4.10) 式を見ると、

$$H_2 \sim 8H_1 \quad (4.11)$$

となっていることが分かる。なお、近似式がオーバーエスティメイトとする傾向があることから、 H_2 は最大で H_1 の 8 倍程度になると言える。このことから正方形都市領域においては a, ρ, β のパラメータの設定が同じであっても、最も近い方向が分からずに 4 方向中の 1 方向にむかって避難する場合は、最短距離で避難できる場合に比べて被災率が最大で 8 倍になってしまうことが分かった。第 3 章で導出した避難距離をみると、4 方向中の 1 方向に向かう場合の平均値は最短距離の場合に比べて 3 倍であったが、火災が発生し、避難を行う場合の被災率をみると最短距離の場合に比べて 8 倍となっており、延焼の状況を判断せずに避難をおこなう場合には最短距離で避難できる方向が分かっていることがより重要であることを示すことが出来たと考えられる。

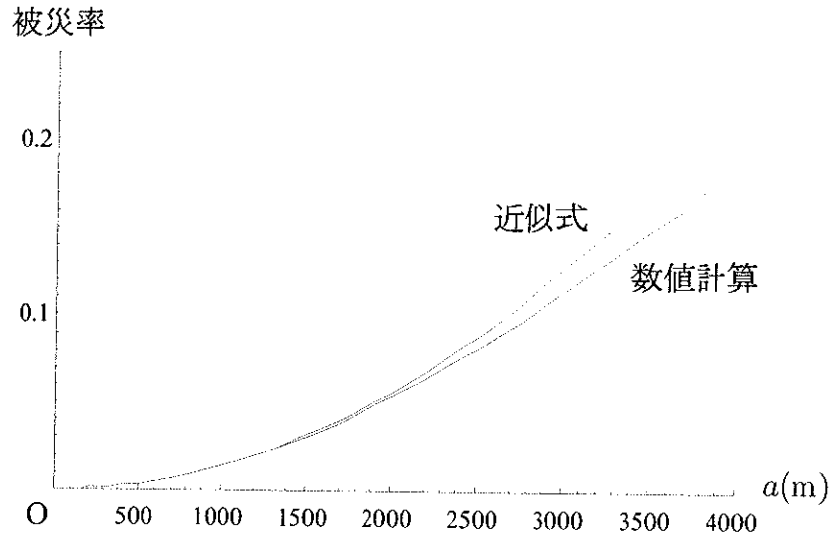


図 4.3: 被災率 H_2

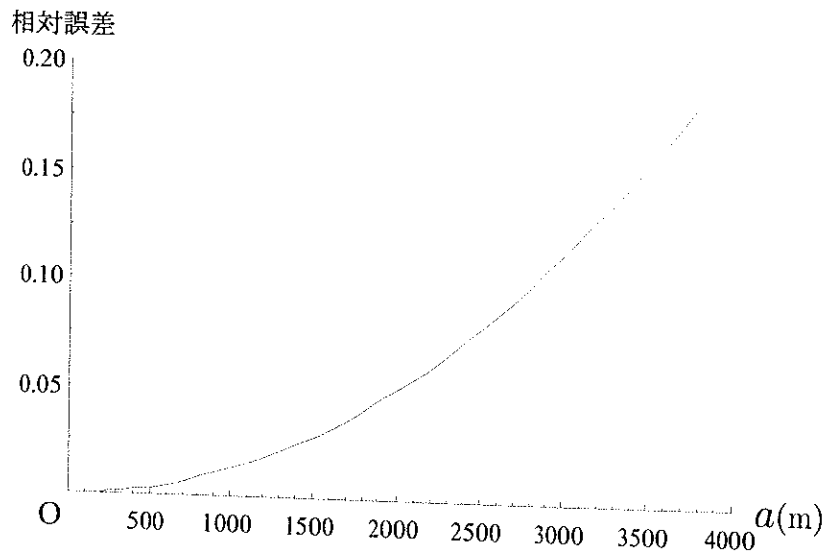


図 4.4: 被災率の相対誤差

4.3 施設の対策に対する評価への応用例

本節では被災率の応用例として、都市領域内部の避難所まで避難する場合に、避難所までの避難路が整備されている場合と整備されていない場合の被災率の違いを導出し、それを避難路整備効果の指標として用いる場合の例を示す。

まず、図4.5に示すように矩形領域の中心にある避難地までレクティリニアに避難する場合の被災率 H_3 を導出する。

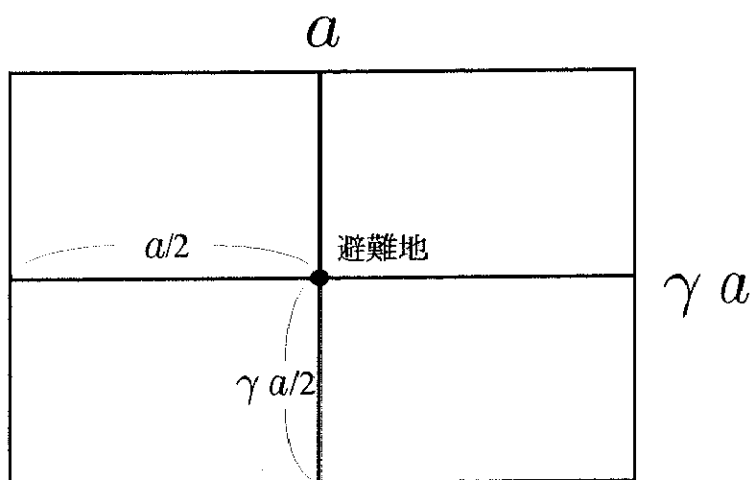


図 4.5: 中心部に避難地をもつ領域

なお、このときの被災距離分布 $f(l)$ としては2.6節で述べたように有限領域に対して通常の距離分布を近似的に用いる。また、レクティリニアに避難することを仮定しているため1回程度の進路変更で避難すると仮定すれば、2.5節で述べたように通常の距離分布を近似的に使用することができる。 $G(l)$ としては3.3節で導出した避難地に避難する場合の $G(l)$ を用いることとする。また、簡単化のために $\gamma = 1$ の正方形領域の場合について考えると、このときの被災率 H_3 は、

$$\begin{aligned}
 H_3 &= \int_0^a f(l)(1 - G(l))dl \\
 &= \frac{1}{a^2 \rho \beta} \left(-2 - 2e^{-\rho \beta a^2} + 4e^{-\frac{1}{4} \rho \beta a^2} + a^2 \rho \beta \right. \\
 &\quad \left. + 2a \sqrt{\pi \rho \beta} \left(\operatorname{Erf} \left(\frac{a}{2} \sqrt{\rho \beta} \right) - \operatorname{Erf} \left(a \sqrt{\rho \beta} \right) \right) \right) \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

と計算できる。前節と同様に

$$\operatorname{Erf} \left(a \sqrt{\rho \beta} \right) < 1$$

第4章 被災率の導出

である場合を想定し，誤差関数を級数展開により近似して，

$$\begin{aligned} \operatorname{Erf}(a\sqrt{\rho\beta}) &\sim \frac{2a\sqrt{\rho\beta}}{\sqrt{\pi}} - \frac{2a^3}{3\sqrt{\pi}}(\rho\beta)^{\frac{3}{2}} \\ \operatorname{Erf}\left(\frac{a}{2}\sqrt{\rho\beta}\right) &\sim \frac{a\sqrt{\rho\beta}}{\sqrt{\pi}} - \frac{a^3(\rho\beta)^{\frac{3}{2}}}{12\sqrt{\pi}} \end{aligned}$$

とおくと，

$$\begin{aligned} H_3 \sim \frac{1}{a^2\rho\beta} &\left(-2 - 2e^{-\rho\beta a^2} + 4e^{-\frac{1}{4}\rho\beta a^2} + a^2\rho\beta \right. \\ &\left. - 2a^2\rho\beta + \frac{7}{6}a^4(\rho\beta)^2 \right) \end{aligned}$$

と計算できる．

ここで更に $\rho\beta$ の級数展開による近似を行うと，

$$H_3 \sim \frac{7}{24} \beta\rho a^2 \quad (4.13)$$

と計算できる．前節と同様に被災率が出火点の個数に比例するという関係式を得ることが出来た．

そこで，先ほどと同様に実際にパラメータに値を代入して被災率を計算してみる．出火密度は $\rho = 0.000002$ 件/ m^2 とし，速度比 $\alpha = 0.02$ とする．この設定の下で区画の一边の長さ a を 4,000m まで変化させた場合の被災率 H_3 と近似式の値をプロットしたものを図 4.6 に示す． a の増加に伴って被災率が拡大していく様子が読みとれるが，骨格延焼遮断帯によって囲まれる程度の規模を想定した $a = 4,000\text{m}$ の場合では被災率が約 16.7 % となり，避難すべき方向が分からずに周囲の避難路に向かって避難する場合と同程度の大きさになってしまうことが分かる．

また，このときの相対誤差を図 4.7 に示す．図から，相対誤差は a の増加に伴って拡大していくことが分かるが，この場合には相対誤差約 15.0 % 以下で近似できていることが分かる．

さて次に，図 4.5 に示すように中心の避難地を通るような十字型の避難路と領域を取り囲むような避難路の整備を行う場合を考える．この場合，直接避難地に向かうのではなく，一旦最寄りの避難路に逃げることで安全を確保してから中心部の避難地に向かうことができる．そこで，この場合の被災率を導出してみる．これは，図 4.5 に示す領域の内部で更に避難路に囲まれた小領域の内部から周辺の避難路まで最短距離で避難する場合の被災率となり，4.2 節で導出した (4.6) 式において a の部分に $a/2$ を代入すればよく，

4.3. 施設の対策に対する評価への応用例

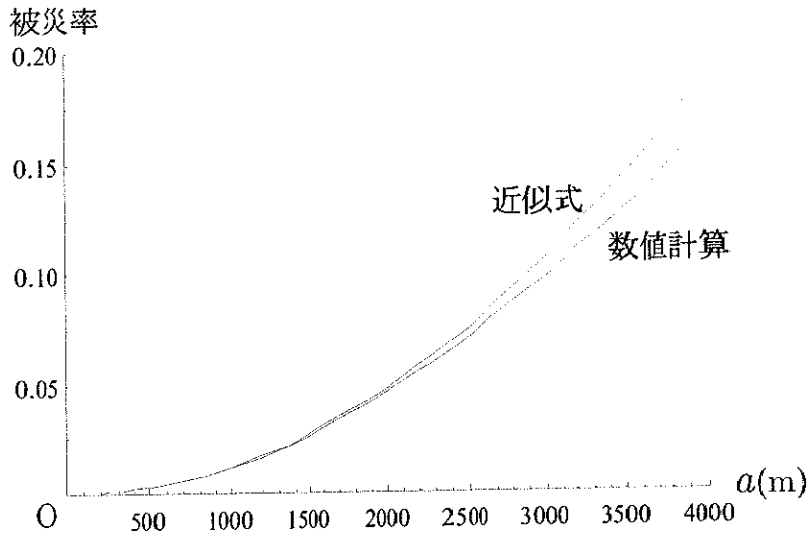


図 4.6: 被災率 H_3

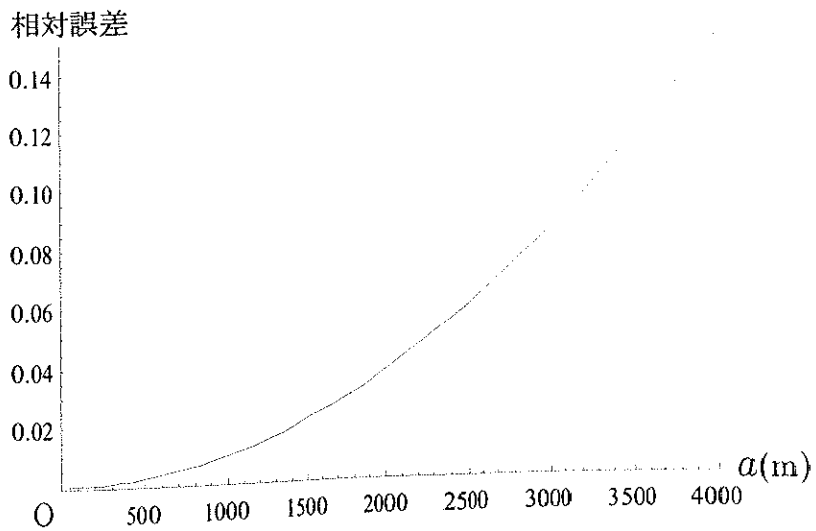


図 4.7: 被災率の相対誤差

$$H_4 \sim \frac{1}{96} \beta \rho a^2 \quad (4.14)$$

と計算できる。よって、(4.13)式と(4.14)式を比較してみると、

$$H_4 \sim \frac{1}{28} H_3 \quad (4.15)$$

であり、領域の内部に避難路を整備することによって、避難路を通らずに直接避難地を目指す場合に比べて被災率を1/28にするだけの効果があることが分かった。

4.4 誤差関数の近似について(補足)

本文中で使用している Erf はガウスの誤差関数として知られているものであり、

$$\text{Erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-r^2} dr \quad (4.16)$$

で定義される。この積分結果は解析的には得られないため数値積分に頼るしかない。そこで、このガウスの誤差関数の近似を行うことを考える。以下では、(4.16)式の z の値に応じて2種類の近似式を導出する。

まず、 z が1以下である場合には、 $\text{Erf}(z)$ を級数展開して、

$$\begin{aligned} \text{Erf}(z) &= \frac{2z}{\sqrt{\pi}} - \frac{2z^3}{3\sqrt{\pi}} + O(z^5) \\ &\sim \frac{2z}{\sqrt{\pi}} - \frac{2z^3}{3\sqrt{\pi}} \end{aligned}$$

と計算できることから、 $\text{Erf}(z)$ の近似関数として、

$$\text{Erf1}(z) = \frac{2z}{\sqrt{\pi}} - \frac{2z^3}{3\sqrt{\pi}} \quad (4.17)$$

を定義することとする。 $\text{Erf}(z)$ とこの近似式 $\text{Erf1}(z)$ をプロットしたものを図4.8に、相対誤差をプロットしたものを図4.9に示す。なお、ここでは $\text{Erf}(z)$ に対する $\text{Erf1}(z)$ の相対誤差を、

$$\frac{|\text{Erf1}(z) - \text{Erf}(z)|}{\text{Erf}(z)}$$

と定義することとする。

図4.8を見ると、 z がおよそ0.6以下の場合にはかなりよく近似できていることが分かる。相対誤差を計算すると $z=1$ では約11%であるが、 $z=0.56$ の場合は相対誤差が約1%であることから、 z が0.56以下の場合には相対誤差が1%以下となる精度で近似できることが分かる。

4.4. 誤差関数の近似について (補足)

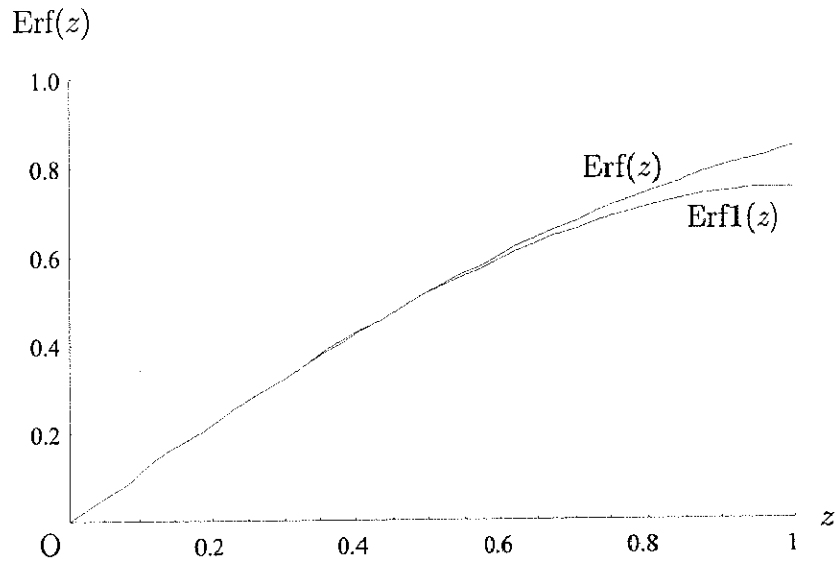


図 4.8: $\text{Erf}(z)$ および近似式 $\text{Erf1}(z)$

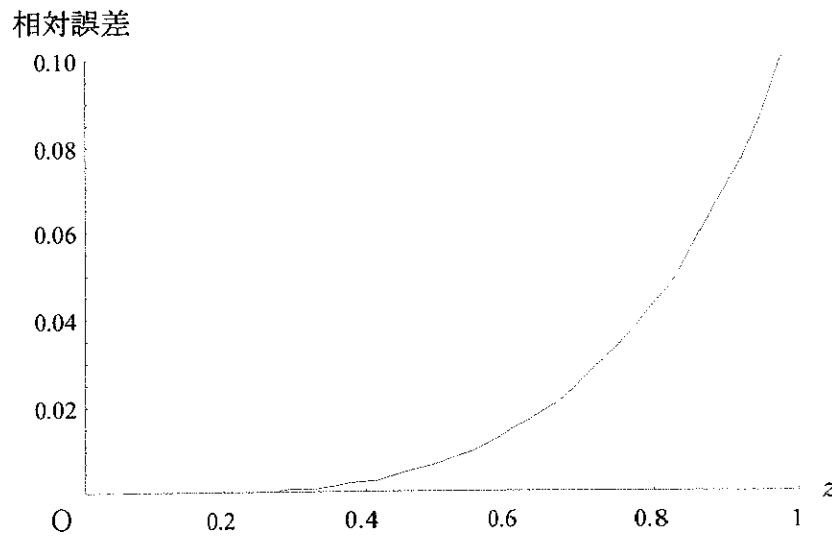


図 4.9: $\text{Erf}(z)$ に対する近似式 $\text{Erf1}(z)$ の相対誤差

しかしながら、近似式 Erf1(z) は $z = 1$ において極大となり、 $z > 1$ になると次第に減少してゆく関数である。これに対して Erf(z) は次第に 1 に近づいて行く関数であるため、 $z > 1$ になると相対誤差が次第に拡大し、うまく近似できなくなる。よって、 $z > 1$ となる場合には別の近似式を用いる必要がある。そこで、Erf(z) を変形していくと、

$$\begin{aligned}
 \text{Erf}(z) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-r^2} dr \\
 &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\int_0^\infty e^{-r^2} dr - \int_z^\infty e^{-r^2} dr \right) \\
 &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} - \int_z^\infty e^{-r^2} dr \right) \\
 &= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-r^2} dr \\
 &= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty \left(-\frac{1}{2r} \right) (-2re^{-r^2}) dr \\
 &= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\left[-\frac{1}{2r} e^{-r^2} \right]_z^\infty - \int_z^\infty \frac{1}{2r^2} e^{-r^2} dr \right) \\
 &= 1 - \frac{1}{z\sqrt{\pi}} e^{-z^2} + O\left(\frac{1}{z^3}\right) \\
 &\sim 1 - \frac{1}{z\sqrt{\pi}} e^{-z^2} \tag{4.18}
 \end{aligned}$$

と計算できることから、Erf(z) の近似関数として、

$$\text{Erf2}(z) = 1 - \frac{1}{z\sqrt{\pi}} e^{-z^2} \tag{4.19}$$

を定義することとする。Erf(z) とこの近似式 Erf2(z) をプロットしたものを図 4.10 に、相対誤差をプロットしたものを図 4.11 に示す。なお、Erf(z) に対する Erf2(z) の相対誤差は先ほどと同様に、

$$\frac{|\text{Erf2}(z) - \text{Erf}(z)|}{\text{Erf}(z)}$$

で定義するものである。

図 4.10 を見ると、 z が 1 以下の場合にはあまりよい近似とは言えないが、 z が 1 以上の場合にはかなりよく近似できていることが分かる。相対誤差を計算すると $z = 1$ の場合には相対誤差約 6% であるが、 $z = 2$ の場合には相対誤差は約 0.05% となることから、かなりよく近似できていると言える。

4.4. 誤差関数の近似について (補足)

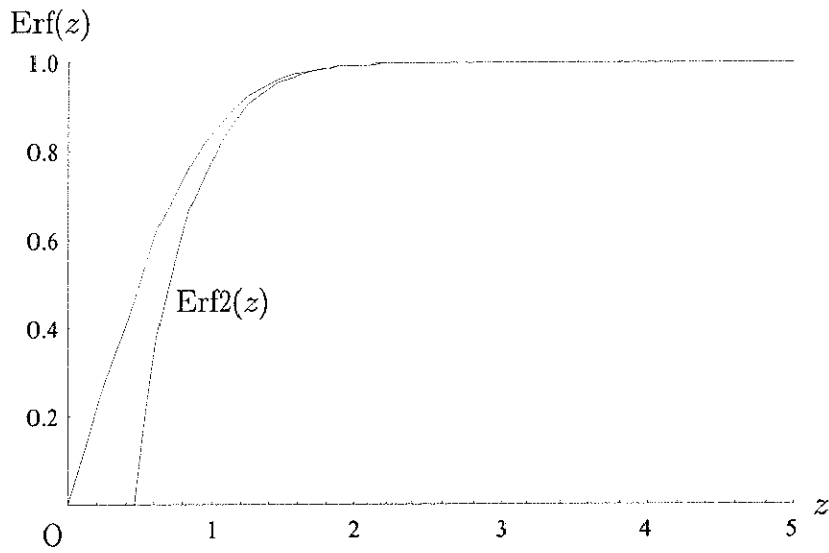


図 4.10: $\text{Erf}(z)$ および近似式 $\text{Erf2}(z)$

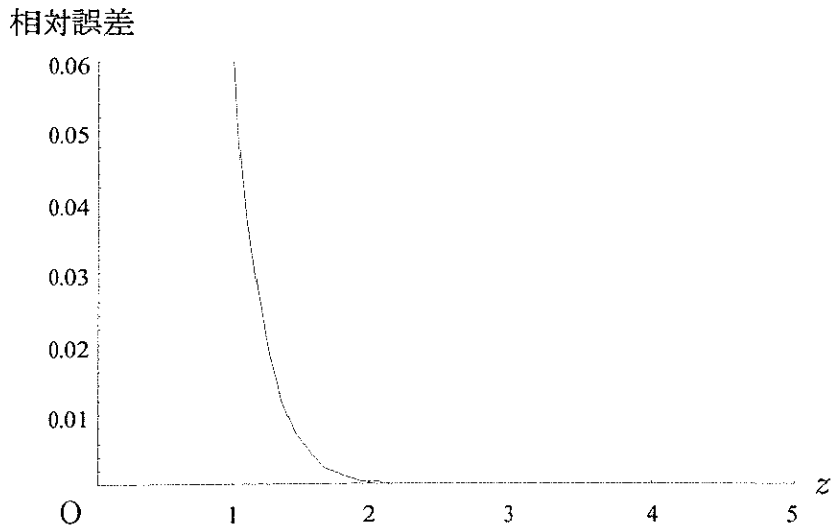


図 4.11: $\text{Erf}(z)$ に対する近似式 $\text{Erf2}(z)$ の相対誤差

第4章 被災率の導出

このように、 $\text{Erf}(z)$ の近似を行う場合の2種類の近似式を導出したのであるが、 z の値に応じて使い分けることを考え、2種類の近似の相対誤差が等しくなるような z の値を数値計算によって求めると、 $z = 0.93$ となる。よって、およそ $z \leq 0.93$ の範囲では最初に導出した $\text{Erf1}(z)$ ((4.17) 式) を用い、 $z \geq 0.93$ の範囲では2番目に導出した $\text{Erf2}(z)$ ((4.19) 式) を用いるようにすればよい。 $z = 0.93$ における相対誤差は8.1%であることから、この様な使い分けによって相対誤差約8%以下で誤差関数を近似することができる。

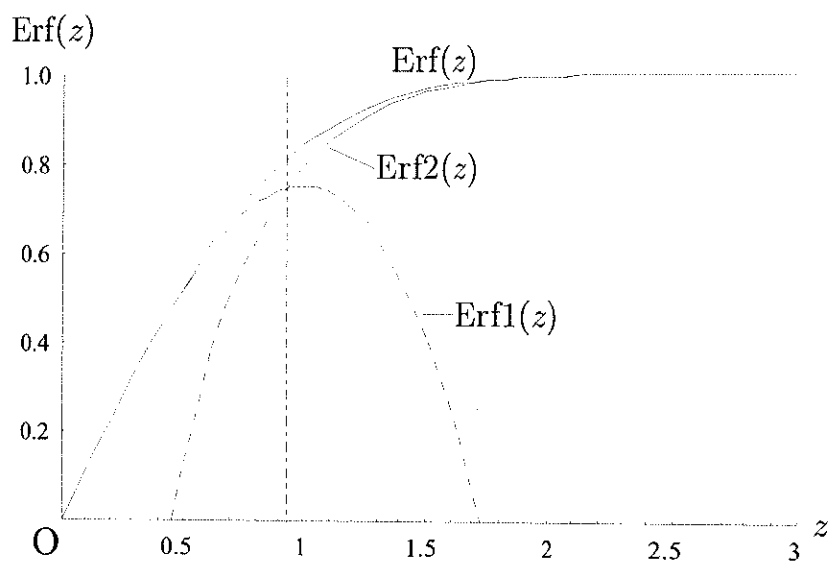


図 4.12: $\text{Erf}(z)$ と近似式の比較

4.5 まとめ

本章の要点を箇条書きで示す.

- 安全な場所に辿り着く前に火災に巻き込まれてしまう確率として被災率 H を導出し, 政策評価の評価関数の一つとして被災率を利用できる事を提案した.
- 正方形領域を取り囲むような避難路に向かって避難する場合に, 最短距離で避難できる方向が分かっている場合の被災率は避難すべき方向が分かっていない場合の被災率に比べて約 $1/8$ となることを明らかにし, 避難路の情報を提供するという非施設的政策の効果を測定する例を示した.
- 正方形領域の中心部にある避難地に向かって避難する場合, そこまでの避難路が整備されている場合の被災率は避難路が整備されていない場合の被災率の約 $1/28$ となる事を明らかにし, 避難路整備という施設的政策の効果を測定する例を示した.
- 通常の被災距離分布を元に導出した被災率の近似式は全て β を含んだ式で表現できるため, 第2章において導出したいくつかの被災距離分布に関しても β の部分を読み替えることによって同様の議論を行うことが可能であることを明らかにした.

第5章

避難方向を選択した場合の避難距離分布

5.1 はじめに

第2章では、延焼に対する情報を持たずに、あるいは判断できずにただただ最初に定められた方向に向かって直線的に避難するという仮定の下での被災距離分布を導出した。実際の避難の際にも最初に決めた方向に対して避難をし続け、避難方向を変えることは少ないという研究結果が報告されているが ([望月, 中林編 1998]), 通常は最初に逃げる際に避難方向に対して何らかの判断が下されているはずである。そこで、本章では延焼の状況を判断して安全な方向に避難した場合の被災距離分布について考察を加えることを目的とする。

なお、本章では図 5.1 に示すように都市領域内に格子状の道路網が張り巡らされていることを想定し、避難する際に交差点において周囲の状況を判断してから進行方向に対して直進、右折、左折することで延焼に巻き込まれることを回避し、後戻りをしないモデルを考える。

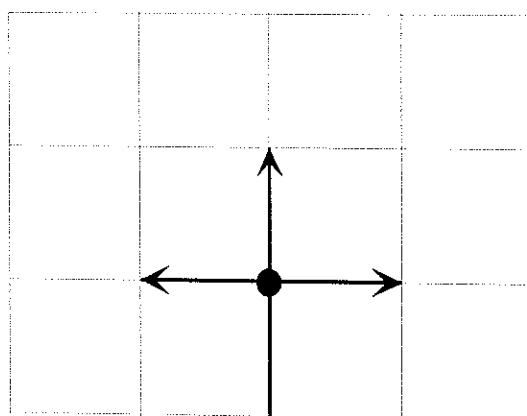


図 5.1: 3 方向避難

なお、このように避難路を選択する場合の避難距離分布に関してはこれまでのような理論化に未だ至っていないため、シミュレーションによる分析を行うことによって避難距離分布を推

定することとする。

そこでまず、シミュレーションの主要な部分に関して説明する。シミュレートする内容の設定は避難路を選択できるという点を除いて第2章の場合と同様であり、出火点の分布を特定せずに密度 ρ で一様にランダムに出火点が分布しているものとする。延焼動態に関しては、出火してから同心円状に等速度で延焼が拡大し、出火と同時に避難を開始すると仮定している。なお、先程述べたとおり避難路の選択は3方向とし、後退はしないものとする。

以下に、シミュレーションの概要について流れに従って説明する。

- (1) 出火点の個数、延焼速度と避難速度の比、試行回数、格子状道路網の格子の間隔を入力する。
- (2) 一様乱数を発生させて出火点の位置を決定する。
- (3) 避難者の避難開始点の座標を一様乱数を発生させて決定する。
- (4) 最初に避難する方向を一様乱数によって決定する。
- (5) 避難開始地点を格子の交点とするような格子状道路網において最初に決めた方向に向かって避難を開始する。なお、避難者の移動に伴って、延焼も同心円状に拡大していく。
- (6) 交差点に辿り着いたら直進方向に火災が無いかどうか調査を行う。火災がない場合には直進を続ける。火災を発見した場合には進行方向に対して左手の方向を調べ、火災がなければ左折して直進する。火災があった場合には初期の進行方向に対して右手の方向を調べ、火災がなければ右折して直進する。
- (7) 上記(6)の操作を繰り返し、最終的に進める方向が無くなった場合には進行方向に対して直進し、延焼領域に入った時点で移動終了とし、延焼領域に入るまでの総移動距離を記録する。

以上が、シミュレーションの概要である。

5.2節では、シミュレーション結果から得られた被災距離分布を分析する手法として生存時間解析に用いられるハザード比を用いることとし、ハザード比の説明を行う。

5.3節では、シミュレーションから得られた被災距離分布を図示するとともに、ハザード比を用いた分析結果を示す。

5.4節では、ハザード比の分析結果に基づき、ワイブル分布によって被災距離分布の推定を行う。

5.2 ハザード比による分析

本節では、シミュレーション結果の分析に用いるハザード比 (hazard rate) について説明を行うとともに、第2章で導出した直線的避難の場合の被災距離分布のハザード比について理論的に説明を行う。

まず、ハザード比の定義を述べる。ある確率の累積分布関数 $F(t)$ が、密度関数 $f(t)$ を持つとき、

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (5.1)$$

をハザード比と呼ぶ (危険率や故障率とも呼ばれる)。これは、ある時刻 t までは無事であったという条件の下でちょうど時刻 t で死亡するという条件付き確率密度を表すものである。また、この $\lambda(t)$ のことを t のハザード関数と呼ぶ。

ハザード比の概念は近年、生物学や医学の分野における生存時間解析に用いられて成果を上げている。また、信頼性工学の分野では故障率と呼ばれ、製品の寿命解析に用いられるものである ([竹内, 他 1989] 参照)。

信頼性工学の分野では、この $\lambda(t)$ が t に関して増加関数となる場合には、 t の増加に伴い故障率が上昇していくので、時間が経つほど壊れやすくなるというモデルを表す。逆に、 $\lambda(t)$ が t に関して減少関数となる場合には、 t の増加に伴い故障率が減少していくので、時間が経つほど壊れにくくなるというモデルを表す。また、 $\lambda(t)$ が t に関係なく一定の値をとる場合には、時間の経過が故障率に影響せずいつでも一定の率で故障するモデルとなり、この場合には $F(t)$ は指数分布となる。過去の時間の経過に関係なく故障することから指数分布は無記憶性分布とも呼ばれる。

ここで、第2章で導出した被災距離分布のハザード比 $\lambda_1(l)$ を求めてみると、

$$\begin{aligned} \lambda_1(l) &= \frac{f(l)}{1 - F(l)} \\ &= \frac{2\rho \left(\alpha\sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha)\alpha^2 \right) l e^{-\rho \left(\alpha\sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha)\alpha^2 \right) l^2}}{1 - \left(1 - e^{-\rho \left(\alpha\sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha)\alpha^2 \right) l^2} \right)} \\ &= 2\rho \left(\alpha\sqrt{1 - \alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha)\alpha^2 \right) l \end{aligned} \quad (5.2)$$

となり、避難距離 l の1次関数となっていることが分かる。即ち、距離の増加に伴い延焼領域に巻き込まれやすくなっていることを示している。

また、別な視点で考えるとこの式は、

$$\frac{d}{dl} \left(\rho(\alpha\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha)\alpha^2)l^2 \right)$$

の値であり、第2章の図2.4に示した領域に入る出火点の個数の変化率を表している。移動距離の増加に伴い、少し移動した場合により多くの出火点が図2.4に示した領域に入るようになるのであり、時間の経過に伴い、より延焼に巻き込まれやすくなるという関係を表している。

よって、逆に考えてみると第2章において導出した被災距離の確率分布関数は、

$$\frac{F'(l)}{1-F(l)} = 2\rho \left(\alpha\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha)\alpha^2 \right) l$$

という微分方程式の解としても導出できるのである。

5.3 シミュレーションによる分析

本節では、実際にシミュレーションを行った結果について代表的なものを例にとって説明し、考察を加える。

まず、パラメータの設定であるが、これまでの設定とは異なり、歩行速度については混雑を考慮して2880m/h、延焼速度を50m/hと仮定して速度比は $\alpha = 0.017$ としている。また、出火密度はこれまでよりも高密な1haあたり1件の出火を仮定すると、 $\rho = 0.0001$ 件/m²となる。これを基準として出火密度を2倍して $\rho = 0.0002$ 件/m²とした場合と、出火密度を1/2倍して $\rho = 0.00005$ 件/m²とした場合のそれぞれの被災距離をシミュレーションによって計算した。なお、それぞれのケースにおいて試行回数は10,000回とした。試行結果を区間ごとに集計し、プロットした結果を図5.2に示す。

図5.2から分かるように、出火密度を下げていくと被災距離分布も次第に右側にのびていく傾向があり、より長く避難し続けられることが分かる。

また、直線的な移動を行った場合の被災距離分布が左右非対称な分布であったのに対して、分布の形状が左右対称な分布に近づいてきていることが分かる。

次に、これら3つの場合についてハザード比を計算し、プロットしたものを図5.3に示す。

この場合、離散的なデータであるからハザード比の意味としては、ある距離 l までは無事であったが、距離 l になった瞬間に延焼領域に巻き込まれてしまう確率を表していることとなる。

これを見ると、全ての場合において距離の増加に伴ってハザード比が上昇していく傾向があることが分かる。上昇していく傾きも出火密度の高いものほど大きく、出火密度の低いものほど傾きが小さくなっていることが分かる。つまり、出火密度が高いほど距離の増加に伴い延焼領域に巻き込まれやすくなるということを表している。また、ハザード比の上昇する傾きが直線的ではなく、距離の2乗に比例して増加していくような傾向が分かる。

また、ハザード比が1を越えてくると値がばらつき始める傾向が見られるのであるが、離散データにおいてハザード比が1を越えるということは瞬間被災率が1を越えることとなり、必ず延焼領域に巻き込まれてしまうという状態を表している。よって、これらのデータにおいてハザード比が1を越える部分に関しては理論的にはおかしい値を出していることになる。

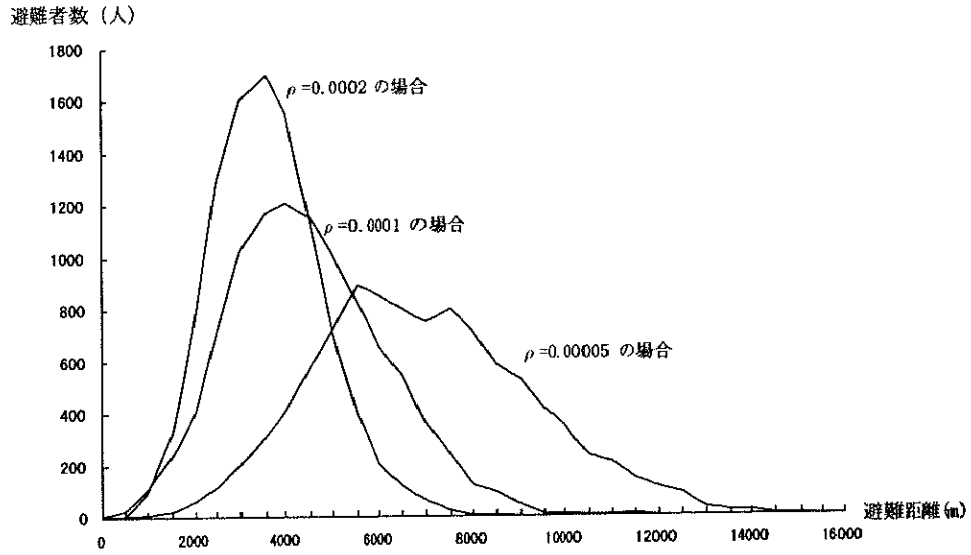


図 5.2: 出火密度の違いによる分布の変化

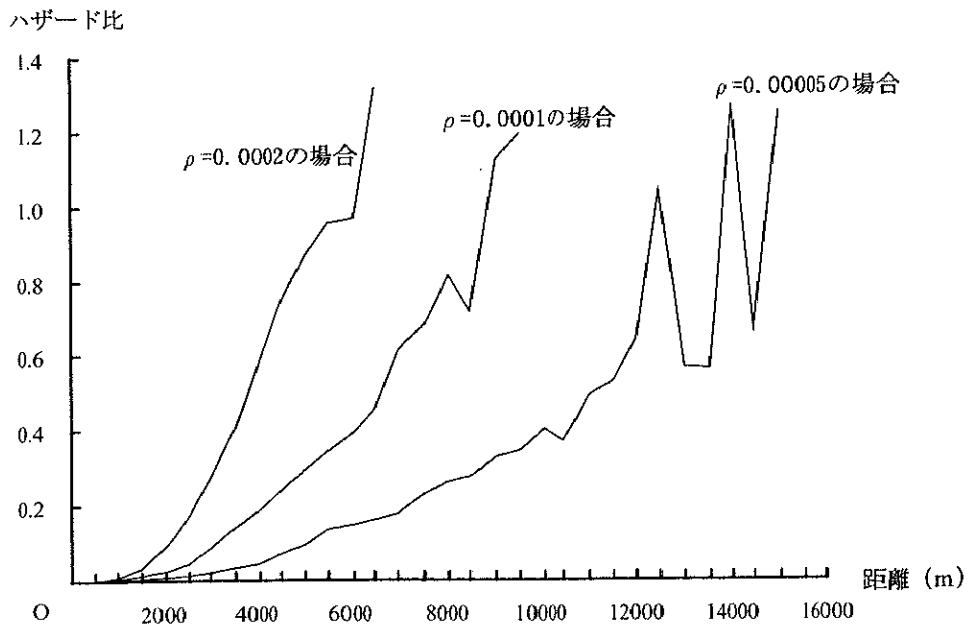


図 5.3: 出火密度の違いによるハザード比の変化

第5章 避難方向を選択した場合の避難距離分布

次に、出火密度 ρ を固定して、延焼速度比 α を変化させた場合のシミュレーション結果を示す。出火密度は 1ha あたり 1 件の出火を仮定して、 $\rho = 0.0001$ 件/m² とした。延焼速度比の変化に対する被災距離分布の変化を見るために、 $\alpha = 0.2$, $\alpha = 0.4$, $\alpha = 0.6$, $\alpha = 0.8$ と変化させたときの被災距離分布を図 5.3 に示す。今回も各ケースにおいて試行回数は 10,000 回である。 α を減少させると延焼速度が遅くなることからより長く生存できるようになり、被災距離分布が次第にグラフの右側にシフトしてくる様子が見られる。

それぞれの場合においてハザード比を計算し、プロットしたものを図 5.5 に示す。それぞれの場合についてハザード比が単調増加傾向にあることが分かるが、やはりハザード比が 1 を越えるあたりから値がばらつくようになる傾向が分かる。また、ハザード比の増加が直線的ではなく、距離の 2 乗に比例するような傾向を示していることがこのグラフからも分かる。傾きの大きさは α の値が小さくなるほど小さくなることが分かる。これは、速度比が減少したことによって火の手が迫るよりもより早く避難できるようになるために被災距離が増加していることを表している。

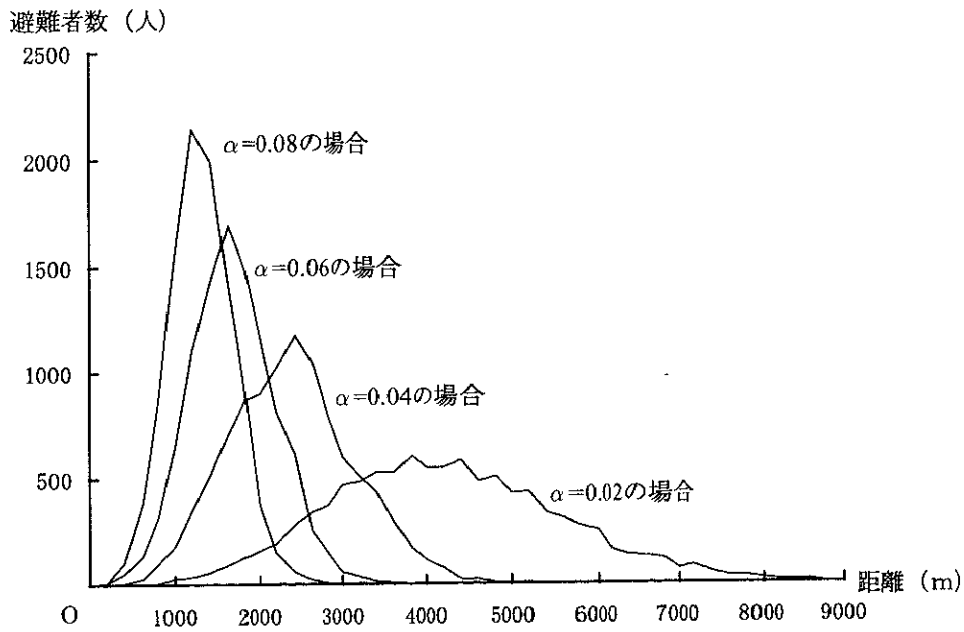


図 5.4: 速度比の違いによる被災距離の変化

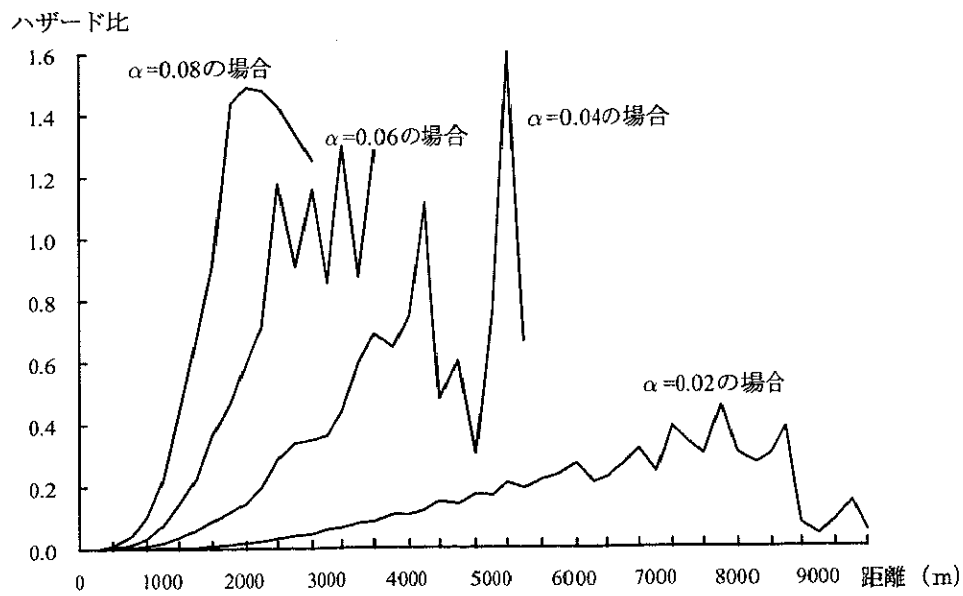


図 5.5: 速度比の違いによるハザード比の変化

第5章 避難方向を選択した場合の避難距離分布

避難路を選択して移動した場合には交差点において火災を避ける判断をしているのであるが、最終的に延焼に巻き込まれるまでに何回の迂回をしたことになっているか、いくつかの ρ と α の組み合わせについてシミュレーションを行い、それぞれのケースごとに迂回した回数の平均値を計算した。その結果について、 α の値を横軸にとってプロットしたものを、図5.6に示す。また、同一の α の値の上に2個の点をプロットしているが、これは上の方の点が出火密度 $\rho = 0.00001$ 件/m²の場合であり、下の方の点 $\rho = 0.0001$ 件/m²の場合を表している。 α の値が1に近づいてくるに従って密度の変化による迂回回数の変化は少なくなり、 $\alpha = 1$ の場合にはその差はほとんどない。そのため、 $\alpha = 0.4$ 以降は2個の点がほとんど1点に見えるようなプロット結果となっている。

なお、この迂回回数には延焼が及んでいないブロック内部を周回する行動を行っている場合があることを注意しておく。

迂回回数

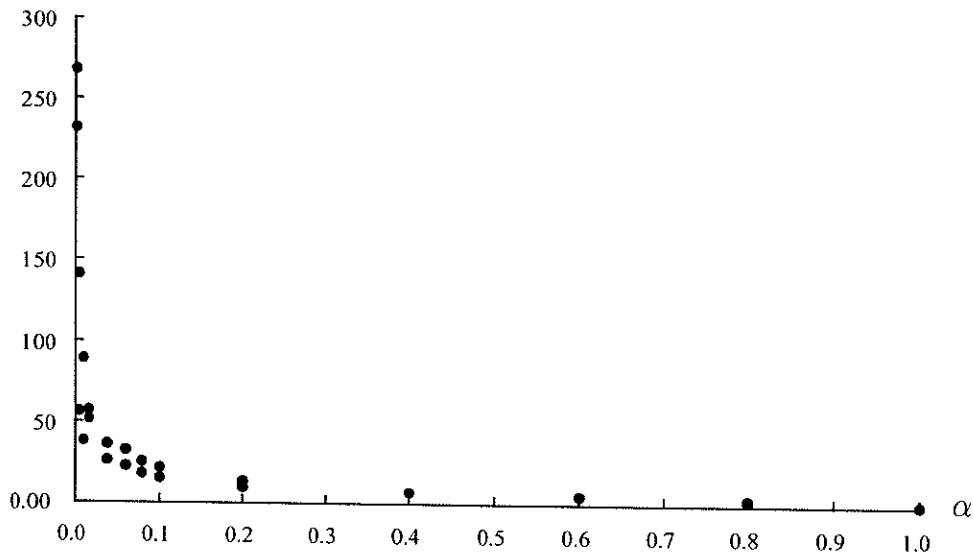


図 5.6: 迂回した回数

5.4 ワイブル分布による推定

前節のシミュレーション結果のハザード比を計算すると、被災距離の増加に伴い単調増加傾向があることが分かった。さらに、直線的な増加というよりは被災距離の2乗に比例して増加しているのではないかという予想が得られた。ハザード比が、距離 l の c 乗に比例しているのではないかと仮定すると、

$$\frac{f(l)}{1-F(l)} = m l^c$$

というモデルが考えられる。これを、 $F(0) = 0$ という条件の下で解くと、

$$F(l) = 1 - e^{-\frac{m}{c+1} l^{c+1}}$$

となる。これを含む一般形として、ワイブル分布がある。

なお、ワイブル分布の確率分布関数 $F_w(l)$ は、

$$F_w(l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{b}\right)^c} \quad (5.3)$$

であり、確率密度関数は、

$$f_w(l) = \frac{c}{b^c} l^{c-1} e^{-\left(\frac{l}{b}\right)^c} \quad (5.4)$$

と表せる。

尤度関数 L は、サンプル数を n として、

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{c}{b^c} l_i^{c-1} e^{-\left(\frac{l_i}{b}\right)^c}$$

と表せる。このとき、尤度方程式は、

$$\begin{cases} b^c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i^c \\ c = n / \left(\frac{1}{b^c} \sum_{i=1}^n l_i^c \log l_i - \sum_{i=1}^n \log l_i \right) \end{cases}$$

である。

実際にパラメータ推定を行った結果について例を挙げて説明する。

まず、これまでの数値例で用いてきた値を使用すると、歩行速度については混雑を考慮して 2880m/h とし、延焼速度を 50m/h と仮定すると速度比は $\alpha = 0.017$ となる。出火密度は 1ha あたり 1 件の出火を仮定すると、 $\rho = 0.0001$ 件/m² となる。この設定のもとで試行回数

第5章 避難方向を選択した場合の避難距離分布

10,000回のシミュレーションを行った結果をワイブル分布に当てはめ、最尤法によりパラメータ推定を行った。その結果、式5.4におけるパラメータ b, c のそれぞれの最尤推定量 \tilde{b}, \tilde{c} の値は $\tilde{b} = 5233.81, \tilde{c} = 3.03$ であり、被災距離分布の推定式は、

$$f_w(l) = \frac{3.03}{5233.81^{3.03}} l^{2.03} e^{-\left(\frac{l}{5233.81}\right)^{3.03}} \quad (5.5)$$

となる。この結果をプロットしたものと、実際のシミュレーションの結果をプロットしたものを図5.7に示す。

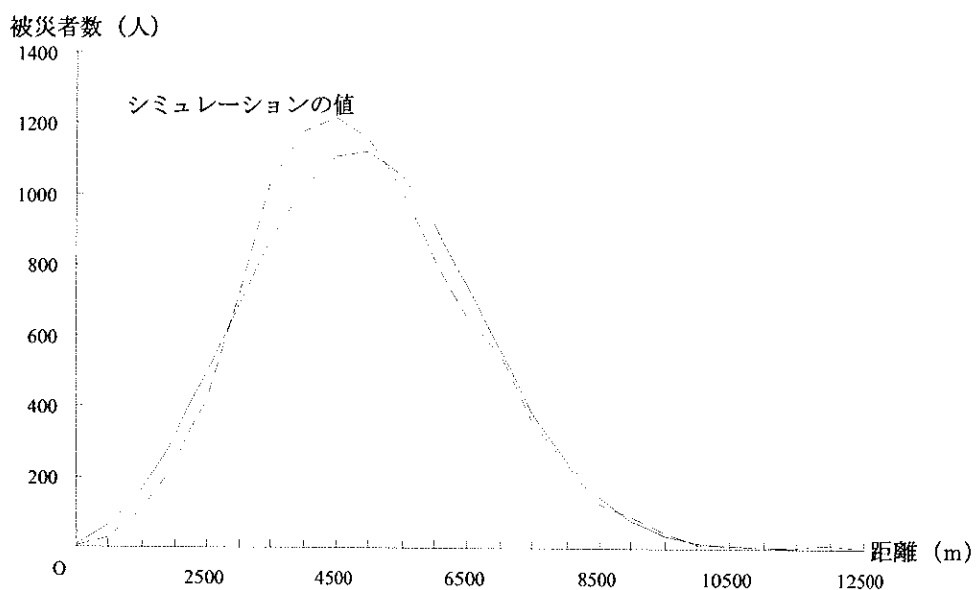


図 5.7: ワイブル分布による推定

結果を見ると、かなりよく当てはまっていると言える。また、ハザード比で見ると、ハザード比はほぼ距離の2乗に比例していると言える。

次に、出火密度を $\rho = 0.0001$ 件/ m^2 に固定して α の値を変化させてシミュレーションを行い、その結果を式5.4に示すワイブル分布に当てはめた場合のパラメータ b, c のそれぞれの最尤推定量 \tilde{b}, \tilde{c} の値を表5.1に示す。なお、各ケースにおける試行回数は10,000回である。

表5.1をみると、 α の値が増加するにつれて \tilde{c} の値、 \tilde{b} の値がともに減少していくことが分かる。

次に、延焼速度比 α を固定して、出火密度 ρ を変化させた場合について、図5.2に示した3つのパターンについての推定結果を表5.2に示す。

$\alpha = 0.017$ を固定して、 $\rho = 0.0001$ 件/ m^2 を基準として出火密度を1/2, 2倍としてみても、

ρ	α	\tilde{c}	\tilde{b}
0.0001	0.30	3.00	358.16
0.0001	0.40	2.76	262.01
0.0001	0.50	2.62	203.59
0.0001	0.60	2.53	162.54
0.0001	0.70	2.49	133.22
0.0001	0.80	2.40	108.13

表 5.1: ワイブル分布による最尤推定量

ρ	α	\tilde{c}	\tilde{b}
0.00005	0.017	3.12	7470.92
0.0001	0.017	3.03	5233.81
0.0002	0.017	3.07	3722.70

表 5.2: ρ を変化させた場合の最尤推定量

\tilde{c} の値はほぼ 3 に近い値を保っている。この場合、ハザード比は距離の 2 乗に比例して増加していることになる。

同様に、延焼速度比 α を 1 に固定して、出火密度 ρ を変化させた場合についての推定結果を表 5.3 に示す。

ρ	α	\tilde{c}	\tilde{b}
0.00001	1	1.86	218.71
0.00010	1	2.09	70.32
0.00100	1	2.45	23.58

表 5.3: ρ を変化させた場合の最尤推定量

このように、 $\alpha = 1$ においては、出火密度を変化させても、 \tilde{c} の値はほぼ 2 に近い値を保っている。この場合のハザード比を考えると、距離に比例してハザード比が増加する傾向があるといえる。この場合には、ほぼ直線移動による被災距離分布に近い値を示していることになる。

これらのことが理論的にどのような現象を説明していることになるのか現在の段階では解明できていないのであるが、規則性が見られることから何らかの理論的根拠があると考えられるので、今後、解明していきたい。

5.5 まとめ

現実の避難問題を考える際に、人間が実際に避難行動を行うときにその経路選択がどのように行われているのかという問題に対してはこれまでに多くの研究がなされてきており、様々な場合が考えられると言うことが分かってはいるもののその構造を正確に把握することは困難を極めている。コンピュータシミュレーションによる避難モデルでは、避難地までの最短経路を選択するモデルや、粒子モデルなど有る程度避難行動を限定した分析が行われているが、人々が安全に避難できるようにするために、どういう対策を講じることが決定的な効果を持つかという問題に対しては未だ決定的な分析は行われていないのが現状である。

安全かつ迅速な避難を可能にするためには重点的にどのような対策を講じる必要があるのかということが明らかになれば、より効果的な都市防災事業を行うことが可能になると考えられるため、避難経路選択の理論モデルを構築することの意義は大きいと考えられる。

本研究では避難に関連する要素をかなり絞って理論化することを試みたものの、避難経路を選択しながら避難する場合の避難距離分布の導出は困難を極めた。そこで、コンピュータシミュレーションの結果を理論化の手がかりとして使用するために分析を行った。

本章では、避難時に経路を選択できる場合の被災距離をコンピュータシミュレーションによって求め、ハザード比を用いた分析を行った。その結果、ハザード比が被災距離の増加とともに距離の2乗に比例して増加する傾向を明らかにした。その結果を踏まえてハザード比が被災距離の2乗に比例して増加するという微分方程式を解いた結果がワイブル分布の一般形に含まれることから、シミュレーションデータを用いて最尤法によるワイブル分布のパラメータ推定を行った。その結果、避難速度に対する延焼速度の比である α の値が1に近づくほどハザード比は被災距離の1乗に比例し、第2章で導出した被災距離分布に近づいてくる傾向を明らかにした。また、速度比が0に近づくほどハザード比は被災距離の2乗に比例する傾向があることが明らかにした。このことを手がかりとして、避難経路を選択する場合の理論モデルを構築できるのではないかと予想される。

第6章

本研究の結論および今後の課題

6.1 結論

本研究は、同時多発出火時における避難問題の大局的な構造を解析的に把握することを主目的として理論モデルを構築し、考察を行った。その結果の1つとして、延焼の状況を判断せずに避難を行った場合に延焼に巻き込まれて被害に遭う確率は出火点の個数に比例するという結論を得ることが出来た。これは直観的にも予想できることであり当然のことと思われるかもしれないが、その当たり前である現象の構造を理論モデルを用いて把握することが出来たことは意義のあることであると考えている。

次に、その他の主要な結果について述べる。まず、第2章においては避難の際に延焼の状況に関して判断を行わずに避難を行った場合の被災距離分布を導出し、その拡張を行った。その結果、避難経路が大局的に見て後退していないような場合には、直線的な避難を仮定した被災距離分布の式を近似的に使用しても問題ないことを示すことが出来た。避難の際には延焼の状況を考慮して避難路を決定すると考えられるが、安全な経路を選んで避難する場合の被災距離分布の理論化は予想以上に困難であった。そこで、コンピュータシミュレーションにより被災距離分布を計算し、その結果からハザード比が被災距離の2乗に比例する傾向があることは分かった。延焼の状況を判断しない場合の被災距離分布のハザード比は被災距離の1乗に比例していることから、これを手がかりとしてより一層理論化を進めることができるのではないかと考えている。

また、理論モデルを現実の都市防災計画に適用する例として、避難路や避難地の整備といった施設の防災対策や避難路や避難地までの避難経路情報の提供といった非施設の防災対策の効果に対するマクロ的評価指標として被災率を使用する事例を示した。

以下に各章における本研究の主要な結果を箇条書きでまとめる。

第2章においては、

- 同時多発出火をモデル化した無限領域において直線的に移動を行った場合に最終的に延焼に巻き込まれてしまう距離の分布を導出した。
- 被災距離分布の平均値は出火密度と速度比の平方根に反比例することを明らかにした。
- 避難開始時間に遅れがある場合の被災距離分布を導出し、避難開始が遅れば遅れるほど逃げられる距離が減少するものの、その変化率は逓減する傾向があることを明らかにした。
- 避難する際に進行方向を変更する場合の被災距離分布を導出し、歩行速度に対する延焼速度の比 α が 0.02 程度で方向転換の角度が 90 度以内であれば通常の被災距離分布との相対誤差は最大でも約 3 % 程度であり、近似式として使用しても問題ないことを明らかにした。
- 有限領域において境界周辺部を考慮した被災距離分布を導出した。また、無限領域における被災距離分布を有限領域において使用した場合の相対誤差の最大値が速度比 α のみで決定される事を示し、速度比 α が 0.02 程度であれば相対誤差は最大でも約 3 % 程度であることから、無限領域における被災距離分布の式を有限領域において近似式として使用しても問題ないことを明らかにした。

第3章においては、

- 矩形領域を取り囲むような避難路に対して最短距離で避難を行う場合の距離分布を導出した。また、最短距離で避難できない場合に避難可能な方向を4方向に限定した場合と、任意の方向に避難可能とした場合との避難距離分布も導出し、比較を行った。
- 避難地や避難所のように避難路や延焼遮断帯によって囲まれた区画の内部にある施設に向かって避難する場合の距離分布の基本的な導出方法を示した。
- 矩形領域の内部に避難地を設ける場合に、避難地の位置を変化させた場合の避難地までの平均距離を避難地の位置の関数として導出した。

第4章においては、

第6章 本研究の結論および今後の課題

- 安全な場所に辿り着く前に火災に巻き込まれてしまう確率として被災率 H を導出し、政策評価の評価関数の一つとして被災率を利用する事を提案した。
- 正方形領域を取り囲むような避難路に向かって避難する場合に、最短距離で避難できる方向が分かっている場合の被災率は避難すべき方向が分かっていない場合の被災率に比べて約 $1/8$ となることを明らかにし、避難路の情報を提供するという非施設的政策の効果を導出する例を示した。
- 正方形領域の中心部にある避難地に向かって避難する場合、そこまでの避難路が整備されている場合の被災率は避難路が整備されていない場合の被災率の約 $1/28$ となる事を明らかにし、避難路整備という施設的政策の効果を導出する例を示した。

第5章においては、

- 避難時に経路を選択できる場合の被災距離をコンピュータシミュレーションによって計算し、ハザード比を用いた分析を行った結果、ハザード比が被災距離の増加とともに距離の2乗に比例して増加する傾向を明らかにした。
- ハザード比が被災距離の2乗に比例して増加するという微分方程式を解いた結果がワイブル分布の一般形に含まれることから、シミュレーションデータを用いて最尤法によるワイブル分布のパラメータ推定を行った。その結果、避難速度に対する延焼速度の比である α の値が1に近づくほどハザード比は被災距離の1乗に比例し、第2章で導出した被災距離分布に近づいてくる傾向を明らかにした。また、速度比が0に近づくほどハザード比は被災距離の2乗に比例する傾向があることがを明らかにした。仮にコンピュータシミュレーションからの推定ではあるが、避難路を選択しながら避難する場合には出火密度 ρ が1haあたり1件という高い値であっても被災距離の平均値は約4.6Kmであり、延焼の状況を判断しない場合に比べて約8倍となることから、延焼状況を判断できることの効果が大きいことが予想される。

6.2 今後の課題と展望

本節では今後の課題と展望に関して理論的な面について述べ、現実の都市防災計画への適用可能性等については次節で述べることとする。

まず、第2章において導出した被災距離分布についてであるが、これは延焼が同心円状に拡大する事を前提としていたが、距離分布の導出過程において延焼領域が円形であるという仮定を一般的にいわれるような卵形、あるいは長形状に延焼が拡大していく場合について拡張することの可能性について考察したい。また、理論的に導出が不可能な場合にはコンピュータによる数値計算によって延焼領域が卵形や長方形型となる場合の被災距離分布を導出し、円形の延焼領域を仮定する場合との誤差について議論を行いたい。

また、同様に火災が同時刻ではなく、タイムラグがある場合の被災距離分布についても、同時出火の場合の避難距離分布を用いて導出することが出来ないか考察していく予定である。

避難速度に関しては一定の値として分析したが、これが時間とともに減少するような値であると考えた場合にも第2章と同様の議論が可能であると考えられる。具体的には被災距離分布を計算する際に用いた領域 D_1 の輪郭線が歩行速度と時間の関係式によって変化すると予想され、領域 D_1 の面積が解析的に表現可能であれば被災距離分布が導出できると期待できるため、今後は歩行速度の式を仮定して分析を行いたい。

上記のような被災距離分布の拡張を行った場合には、被災率も変化してくることが予想されるため、被災率と延焼領域の形状および出火時刻の変化との関係についても考察を加えたい。また、今回の研究では一例を示すに留まったが、被災率を導出する際の関数 $f(l)$ および $G(l)$ はさまざまなもの想定することが可能であり、マクロ的な政策評価の指標としてさらに応用していくことを考えたい。また、被災率が持つ理論的特性についても考察を加えたい。

第5章において避難路を選択した場合の被災距離分布をシミュレーション結果から予測したが、これを理論的に導出する事を行いたい。そのためには、避難路を選ぶということが視点を変えるとどのような現象として捉えることができるかということについて理論的に考察を加える必要があると考えられる。また、その際に街区内の道路密度との関連についても理論的に考察を加えていきたい。

以上、コンピュータシミュレーションが中心である現状においてこれまでとは違う解析的な

アプローチで都市防災に関する考察を行うことの足がかりを得られるよう、更に考察を加えていきたい。

6.3 都市防災計画への適用可能性

本論文では理論的な面を中心に考察を加えてきたが、本節では現実の都市防災計画への適用可能性について述べる。

建設省の都市防災構造化推進事業に見られるように、多くの都市防災事業が行われてきているが、限られた資本の中で効果的に事業に投資するためにはそれらの評価を行う必要があると考えられる。そこで、第4章で導出した被災率を評価関数として使用し、避難路や避難地、延焼遮断帯の整備効果の評価に応用することが期待できる。具体的には、第3章で示したような手法を用い、対象領域内部から避難地あるいは避難路までの避難距離分布を計算する。このとき領域の形状は矩形である必要はなく、式は煩雑になる可能性があるものの、領域の形状に応じて距離分布を導出すればよい。また、避難距離を直線距離とするか、レクティリニア距離とするかという点についても対象領域の規模と道路密度との関係から判断することができると考えられる。

次に、避難距離分布を導出する場合に出火密度を設定しなくてはならないが、この場合には出火率の予測式と対象領域における世帯密度から計算することで求められる。本論文では出火密度を一定と仮定しているが、対象領域内の出火密度に違いがある場合でも、異なる密度ごとに理論分布を特定し、それを統合すれば十分対応できる。その場合、解析的には計算が不可能になることもあるかもしれないが、本論文の理論を元に、数値計算によって導出することが可能である。このように、避難距離分布と被災距離分布が計算できれば被災率を計算することができる。

また、現状の評価を行うために使用するだけでなく、避難地を配置することを考えた場合には避難地の位置を関数として被災距離分布の中に取り込むことで被災率にも反映されるため、被災率を最小化するような避難地配置の問題を考えることも可能である。さらに、避難地の整備を行うか、避難路の整備を行うかという政策決定を行う場合でも、それぞれの被災率を計算することで比較を行うことができる。そして、避難地整備にかかる費用と避難路整備にかかる費用を変数として被災率を計算し、その投資効果を比較するという応用も考えられる。

6.3. 都市防災計画への適用可能性

また、理論モデルによって最適配置問題を解くことができれば、それを元にシミュレーションを行うことによってより詳細な避難地や避難路の整備計画を行うことが可能になるということも考えられよう。

参考文献

- [Dacey 1965] M.F.Dacey(1965): Order Distance in an Inhomogeneous Random Point Pattern. *Canadian Geographer*, Vol.9, pp.144-153.
- [Ghosh 1951] B.Ghosh(1951): Random Distances within a Rectangle and between two Rectangles. *Bull. Calcutta Math. Soc.*, Vol.43, pp.17-24.
- [Kendall, Moran 1963] M.G.Kendall and P.A.P.Moran(1963): Geometrical Probability. Charles Griffin & Company Limited.
- [Santaló 1976] Santaló,L.A.(1976): Integral Geometry and Geometric Probability. Addison-Wesley Publishing Company.
- [青木 1987] 青木 義次 (1987): 都市火災拡大の一次元離散型確率モデル. 日本建築学会計画系論文報告集, 第 381 号,pp.111-121.
- [青木 1989a] 青木 義次 (1989): 都市火災拡大の二次元一様空間確率モデル. 日本建築学会計画系論文報告集, 第 396 号,pp.27-35.
- [青木 1989b] 青木 義次 (1989): 類焼確率関数の導出とその性質. 日本建築学会計画系論文報告集, 第 402 号,pp.45-51.
- [青木 1990] 青木 義次 (1990): 地震時出火の確率構造. 日本建築学会計画系論文報告集, 第 412 号,pp.53-60.
- [青木, 他 1992] 青木 義次, 大佛 俊泰, 他 (1992): 情報伝達と地理イメージを考慮した地震時避難行動シミュレーションモデル. 日本建築学会計画系論文報告集, 第 440 号,pp.111-118.
- [飯島, 他 1996] 飯島 広文, 廣田 篤彦, 他 (1996): 延焼遮断帯の適正配置に関する研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.201-202.
- [石井 1995] 石井 儀光 (1995): 高層建築物における避難時間について. 筑波大学社会工学研究科 Second Year Essay.
- [石井, 腰塚 1997a] 石井 儀光, 腰塚 武志 (1997): 不通領域がある場合の移動距離の分布について. 日本 OR 学会春季研究発表会アブストラクト集,pp.16-17.
- [石井, 腰塚 1997b] 石井 儀光, 腰塚 武志 (1997): 有限領域内の直線的避難距離について. 日本 OR 学会秋季研究発表会アブストラクト集,pp.158-159.
- [石井, 腰塚 1998a] 石井 儀光, 腰塚 武志 (1998): 同時多発出火時の避難と街区面積に関する基礎的考察. 日本 OR 学会春季研究発表会アブストラクト集,pp.220-221.

- [石井,腰塚 1998b] 石井 儀光, 腰塚 武志 (1998): 同時多発出火時の避難可能時間に関する基礎的考察. 日本 OR 学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.136-137.
- [石井,腰塚 1998c] 石井 儀光, 腰塚 武志 (1998): 同時多発出火時における直線的避難距離の分布に関する理論的考察. 日本都市計画学会学術研究論文集, 第 33 号, pp.331-336.
- [糸井川,塚越 1988] 糸井川 栄一, 塚越 功 (1988): 飛火を考慮した市街地火災の確率的延焼モデル. 日本都市計画学会学術研究論文集, pp.469-474.
- [糸井川,塚越 1989] 糸井川 栄一, 塚越 功 (1989): 市街地火災の延焼速度予測に関する研究. 日本都市計画学会学術研究論文集, pp.79-84.
- [大野,加藤 1987] 大野 栄治, 加藤 晃 (1987): 住民の避難行動を離散的に捉えた避難シミュレーションシステム. 日本都市計画学会学術研究論文集, pp.571-576.
- [岡崎,松下 1992] 岡崎 甚幸, 松下 聡 (1992): 巨大迷路探索歩行実験における経路イメージおよび歩行経路のためのシミュレーションモデルの研究. 日本建築学会計画系論文報告集, 第 441 号, pp.71-79.
- [岡田,吉田 1979] 岡田 光正, 吉田 勝行, 他 (1979): 大震火災による人的被害の推定と都市の安全化に関する研究. 日本建築学会論文報告集, 第 275 号, pp.141-148.
- [熊谷 1987] 熊谷 良雄 (1987): 避難から見た地区内細街路整備方策に関する研究. 日本都市計画学会学術研究論文集, pp.553-558.
- [熊谷 1996] 熊谷 良雄 (1996): 阪神・淡路大震災における出火の分析. 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.39-41.
- [建設省 1982] 建設省建築研究所 (1982): 建設省総合技術開発プロジェクト 都市防火対策手法の開発報告書. 建設省.
- [腰塚 1985] 腰塚 武志 (1985): 都市施設の密度と利用者からの距離との関係について. 日本都市計画学会学術研究論文集, 第 20 号, pp.85-90.
- [小林 1990] 小林 正美 (1990): 建築空間における災害時の人間行動と建築計画 - 1982 年浦河沖地震住宅内滞在者の行動分析. 日本建築学会計画系論文報告集, 第 408 号, pp.43-52.
- [佐々木,他 1974] 佐々木 弘明, 神 忠久, 他 (1974): 都市における延焼確率とその地域適用性について (その 5). 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1329-1330.
- [神,佐々木 1974] 神 忠久, 佐々木 弘明 (1974): 都市における延焼確率とその地域適用性について (その 4). 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1327-1328.
- [新谷,他 1987] 新谷 景一, 忠末 裕美, 他 (1987): 地区レベルでの経路選択に関する研究. 日本都市計画学会学術研究論文集, pp.558-564.
- [竹内,他 1989] 竹内 啓, 他 (1989): 統計学辞典. 東洋経済新報社.

参考文献

- [忠末, 他 1987] 忠末 裕美, 新谷 景一, 他 (1987): 避難からみた地区防災計画の研究. 日本都市計画学会学術研究論文集, pp.565-570.
- [建部, 他 1996] 建部 謙治, 久野 修司, 他 (1996): 阪神大震災における避難路の被害状況と避難行動に関する研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.41-42.
- [谷村, 他 1986] 谷村 秀彦, 腰塚 武志, 他 (1986): 都市計画数理, pp.1-49. 朝倉書店.
- [塚越 1985] 塚越 功 (1985): 地震都市火災に対する延焼遮断帯の設計風速. 日本都市計画学会学術研究論文集, pp.49-54.
- [難波, 他 1992] 難波 義郎, 保野 健治郎, 他 (1992): 地震時出火件数の推定に関する一考察. 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1345-1346.
- [火災学会 1980] 日本火災学会編 (1980): 新版 建築防火教材. 工業調査会.
- [火災学会 1996] 日本火災学会編 (1996): 1995年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書. 日本火災学会.
- [藤本, 熊谷 1989] 藤本 幸洋, 熊谷 良雄 (1989): 全風向対応型延焼予測モデルの開発と延焼遮断帯整備の効果分析. 日本都市計画学会学術研究論文集, pp.85-90.
- [堀内 1994] 堀内 三郎 (1994): 新版 建築防火. 朝倉書店.
- [松下, 岡崎 1991] 松下 聡, 岡崎 甚幸 (1991): 巨大迷路における歩行実験による探索歩行の研究. 日本建築学会計画系論文報告集, 第 428 号, pp.93-100.
- [水野 1981] 水野 弘之 (1981): 地震時の同時多発火災に対する都市防火区画の効果に関する研究. 日本都市計画学会学術研究論文集, pp.217-222.
- [望月, 中林編 1998] 望月 利男, 中林 一樹 編 (1998): 大都市と直下の地震 - 阪神・淡路大震災の教訓と東京の直下の地震 -. 東京都立大学都市研究所.
- [森口, 他 1992a] 森口 繁一, 他 (1992): 岩波 数学公式 I. 岩波書店.
- [森口, 他 1992b] 森口 繁一, 他 (1992): 岩波 数学公式 II. 岩波書店.
- [森口, 他 1992c] 森口 繁一, 他 (1992): 岩波 数学公式 III. 岩波書店.

謝辞

私がここに博士論文をまとめることが出来たのは、これまでお世話になった本当に多くの方々のおかげです。少ない紙面ではとても全ての方のお名前を書き尽くすことは出来ませんが、心より御礼申し上げます。

特に、筑波大学社会工学系の腰塚武志先生には社会工学研究科入学以来5年間に渡りご心配のかけ通しであったにもかかわらず、大変根気強くご指導していただきました。腰塚先生に巡り会うことが出来なければおそらく私がこの様に博士論文を著すことは出来なかったと思います。先生からは研究者として、また教育者として大変多くのことを学ばせていただきました。心より感謝致しております。私が腰塚先生から受けた感動の僅かでも人に伝えることができるような研究者となるべく精進することで少しでも御恩に報いることができればと思います。

筑波大学社会工学系の大澤義明先生には研究面での確かなアドバイスを頂いたのみならず、生活面でもご心配頂きました。また、研究に行詰まったときにも非常にいいタイミングでご助言下さいました。深く感謝いたしております。また、筑波大学社会工学系の鈴木勉先生には折に触れてアドバイスを頂き、激励して頂きました。深く感謝いたしております。

筑波大学社会工学系の熊谷良雄先生からは都市防災の現場の視点から非常に貴重なご指摘とご助言を頂きました。また、防災関連の貴重な資料等を提供して下さい、深く感謝いたしております。そして、建設省建築研究所の糸井川栄一先生には草稿段階から論文をお読み頂き、大変丁寧なコメントを頂きました。また、研究の方向性やまとめ方などについて多くの貴重なアドバイスを下さり、本論文をまとめるに当たって大変お世話になりました。深く感謝いたしております。筑波大学社会工学系の石田東生先生からは非常に的確で厳しいコメントを頂いただけでなく、大学を離れた場所では博士論文に関して悩んでいた際に貴重なご助言を頂きました。深く感謝いたしております。その他にも、既に筑波大学を去られた先生方を含めて多くの先生方にご指導いただいたおかげでこのように博士論文をまとめることができました。深く感謝いたしております。

また、匿名の査読者の方々には的確なアドバイスを頂き、深く感謝いたしております。

東京大学の伏見正則先生と中央大学の田口東先生には、研究の方向性や手法などに関して折に触れて貴重なご助言を頂きました。深く感謝いたしております。また、東京工業大学の青木義次先生には都市防災の問題に解析的なアプローチを行う上での貴重なご助言を頂きました。深く感謝いたしております。

また、沖縄大学の吉川博也先生には大学4年生のときにご指導を頂き、筑波大学を離れてからも折に触れて激励して下さいました。先生の地域社会に対する情熱と計り知れない行動力には学ぶべき点が多く、深く感謝いたしております。

慶應義塾大学の栗田治先生、東北芸術大学の古藤浩先生には研究室の後輩としていろいろな

面でご心配をおかけしてしまい、折に触れて激励の言葉を頂きました。両先生の研究姿勢や学会での発表などは学ぶべき点が非常に多く、深く感謝いたしております。

また、腰塚研究室において素晴らしい先輩、後輩、同輩のみなさんと机を並べることが出来たことは何ものにも代え難い経験であったと思います。出水田智子先輩（現 会津大学）には常日頃から議論することの楽しさと研究の厳しさを教えていただきました。三浦英俊先輩（現 明海大学）には研究室の内外において大変多くのことを教えて頂きました。研究面にとどまらず、研究者としての立ち居振る舞いについても丁寧にそして厳しく指導して頂きました。特に研究者として長距離を走り抜くための姿勢を教えて頂いたことは私の研究生活の大きな転機となりました。さらに、お忙しい中本論文の草稿を一字一句丁寧に読み下さり貴重なアドバイスを下さいました。深く感謝致しております。同期の今井昭文氏、北国大太氏、有井良仁氏と共に論文に取り組むことが出来たことは大きな励みでもあり、喜びでもあり、大変感謝しています。また、大津晶氏をはじめとする研究室の後輩の皆さんからも学ぶべき点が多く、共に研究することが出来たことを大変ありがたく思います。

また、社会工学研究科同期の斉藤光久氏、小出利昭氏、浅井学氏には都市計画の分野とは違った視点からのコメントを頂き、有益で新鮮な議論をすることが出来ました。また、研究の場を離れたところでも大いに私の視野を広げてくれた三氏に深く感謝しています。

そして、学群生時代に所属していた吉川研究室では文化人類学をはじめとして都市計画以外の様々な分野の先輩方と都市について議論させていただきました。そのときの議論は大変新鮮なものであり、都市に対する視野を大きく広げてくれました。

また、大学以外の場所でも、社会工学類の都市計画同窓会を通じて知り合うことが出来た先輩方にご心配いただき、折に触れて激励の言葉を頂きました。大きな励みとなり、大変感謝いたしております。

最後に私事ではありますが、9年間という長い大学生活を送ることを許し、見守ってくれた父儀麿、母 勝子、祖母 フチ、橘木フヂノには大変感謝しています。また、私に代わって家を支えてくれた妹 明子には大変な苦勞をかけてしまいました。言葉に尽くせないほどの感謝の気持ちで一杯です。そして、挫けそうになる度に精神的に支え、励ましてくれた石島厚子さんとそのご家族の皆さんには大変お世話になりました。研究の場を離れた所で、厳しく暖かい声援を送り続けてくれた私の家族に心から感謝します。

ありがとうございました。

1999年1月 石井 儀光

筑波大学附属図書館



1 00990 12311 3

本学関係
