

移動距離に着目した不確実性に対する
施設配置および道路網の頑健性

システム情報工学研究科

筑波大学

2005年3月

宮川 雅至

目次

第1章 はじめに	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.1.1 施設	2
1.1.2 道路網	3
1.2 研究の特徴	6
1.3 論文の構成	7
 第I部 施設配置の頑健性	 9
第2章 施設閉鎖時のアクセス距離	11
2.1 はじめに	11
2.2 k 次近隣距離分布	13
2.3 頑健な配置	23
2.4 実際の施設配置	27
2.5 まとめ	34
2.A 付録	35
 第3章 計画的な施設閉鎖の効果	 45
3.1 はじめに	45
3.2 計画的な施設閉鎖	46
3.3 計画的な施設開設	51
3.4 頑健な配置	55
3.5 計画の効果	58
3.6 まとめ	60
 第4章 施設閉鎖情報の効果	 61
4.1 はじめに	61
4.2 k 次近隣距離	62
4.3 頑健な配置	65
4.4 情報の効果	67
4.5 実際の施設配置	68

目次

4.6	まとめ	71
第5章	移動途中の寄り道施設	73
5.1	はじめに	73
5.2	楕円モデル	76
5.3	俵型モデル	80
5.4	施設閉鎖と計画の効果	84
5.5	道路網上の移動	88
5.6	まとめ	91
第II部	道路網の頑健性	93
第6章	道路閉塞時の迂回距離	95
6.1	はじめに	95
6.2	仮想道路網	98
6.2.1	格子状道路網	98
6.2.2	放射環状道路網	99
6.2.3	稠密道路網	101
6.3	実際の道路網	102
6.3.1	都道府県レベルの道路網	102
6.3.2	市町村レベルの道路網	107
6.4	検証	109
6.5	まとめ	115
第7章	迂回距離分布	117
7.1	はじめに	117
7.2	格子状道路網	118
7.2.1	迂回距離分布の導出	118
7.2.2	道路密度・断面交通量との関係	126
7.3	放射環状道路網	128
7.3.1	迂回距離分布の導出	128
7.3.2	道路密度・断面交通量との関係	138
7.4	実際の道路網	140
7.4.1	総迂回距離	140
7.4.2	道路密度・断面交通量との関係	142
7.5	まとめ	149

第 8 章 不完全情報時の迂回距離	151
8.1 はじめに	151
8.2 仮想道路網	153
8.2.1 格子状道路網	153
8.2.2 放射環状道路網	154
8.3 実際の道路網	156
8.3.1 不完全情報時の迂回距離	156
8.3.2 出やすい都市, 入りやすい都市	162
8.4 まとめ	165
第 9 章 道路閉塞情報の効果	167
9.1 はじめに	167
9.2 格子状道路網	167
9.2.1 交差点情報の迂回距離分布	168
9.2.2 情報なしの迂回距離分布	171
9.3 放射環状道路網	176
9.3.1 交差点情報の迂回距離分布	176
9.3.2 情報なしの迂回距離分布	180
9.3.3 環状路配置	185
9.4 実際の道路網	188
9.4.1 情報の効果	188
9.4.2 道路密度・断面交通量との関係	190
9.5 まとめ	194
第 10 章 施設閉鎖と道路閉塞	195
10.1 はじめに	195
10.2 施設閉鎖	197
10.3 道路閉塞	203
10.4 施設・道路の同時閉鎖	210
10.5 まとめ	214
第 11 章 おわりに	215
11.1 結論	215
11.2 今後の展望	217
参考文献	219
謝辞	229

目 次

図 1.1	全国の小学校数の推移	2
図 1.2	全国の老人福祉施設数の推移	2
図 1.3	阪神・淡路大震災時の道路網の被害	4
図 1.4	論文の構成	8
図 2.1	規則的配置とランダム配置	11
図 2.2	k 番目に近い施設を利用する確率 (幾何分布)	13
図 2.3	距離分布の導出	15
図 2.4	施設が $1, 2, \dots, 7$ 番目に近い領域	16
図 2.5	施設が k 番目に近い領域 ($k = 1, \dots, 4$)	17
図 2.6	施設が k 番目に近い領域 ($k = 5, \dots, 7$)	18
図 2.7	k 次近隣距離分布	20
図 2.8	k 番目に近い施設までの平均距離	21
図 2.9	k 番目に近い施設までの標準偏差	22
図 2.10	施設が k 番目に近い領域	23
図 2.11	円の内部に含まれる施設	23
図 2.12	施設閉鎖時の平均距離	26
図 2.13	施設閉鎖時の標準偏差	26
図 2.14	つくば市小学校	27
図 2.15	最も近い小学校までの距離分布	28
図 2.16	2 番目に近い小学校までの距離分布	28
図 2.17	3 番目に近い小学校までの距離分布	28
図 2.18	4 番目に近い小学校までの距離分布	29
図 2.19	5 番目に近い小学校までの距離分布	29
図 2.20	6 番目に近い小学校までの距離分布	29
図 2.21	7 番目に近い小学校までの距離分布	29
図 2.22	小学校閉鎖時の平均距離	30
図 2.23	つくば市北部の小学校	31
図 2.24	北部小学校閉鎖時の平均距離	32
図 2.25	有限平面上のランダム配置	32
図 3.1	正方格子状配置での閉鎖配置	46

図目次

図 3.2	閉鎖による勢力圏の分割 (a) と閉鎖前の勢力圏 (b)	47
図 3.3	三角格子状配置での閉鎖配置	48
図 3.4	閉鎖による勢力圏の分割 (a) と閉鎖前の勢力圏 (b)	48
図 3.5	三角格子状配置での 1/3 閉鎖配置	48
図 3.6	六角格子状配置での閉鎖配置	49
図 3.7	閉鎖による勢力圏の分割 (a) と閉鎖前の勢力圏 (b)	50
図 3.8	正方格子状配置での開設配置	51
図 3.9	開設した格子 (a) と開設前の格子 (b)	52
図 3.10	三角格子状配置での開設配置	53
図 3.11	開設した格子 (a) と開設前の格子 (b)	53
図 3.12	六角格子状配置での開設配置	54
図 3.13	開設した格子 (a) と開設前の格子 (b)	54
図 3.14	計画的な施設閉鎖・開設における平均距離	56
図 3.15	計画的な施設閉鎖・開設における標準偏差	56
図 3.16	平均距離・標準偏差のランダム配置との比較	57
図 3.17	計画的な閉鎖による平均距離・標準偏差の削減効果 (正方格子)	58
図 3.18	計画的な閉鎖による平均距離・標準偏差の削減効果 (三角格子)	59
図 3.19	計画的な閉鎖による平均距離・標準偏差の削減効果 (六角格子)	59
図 4.1	情報提供と施設への移動 (正方格子)	62
図 4.2	k 番目に訪れる施設までの平均距離 (情報なし)	64
図 4.3	施設閉鎖時の平均距離 (情報なし)	66
図 4.4	情報提供による平均距離の削減効果	67
図 4.5	情報提供と施設への移動 (実際の配置)	68
図 4.6	情報提供による平均距離の削減効果 (小学校)	69
図 4.7	有限平面上のランダム配置	70
図 5.1	日本橋本石町エコ給油所	73
図 5.2	全国の給油所数の推移	73
図 5.3	全国の道の駅数の推移	74
図 5.4	道の駅にのみや (栃木県二宮町)	74
図 5.5	寄り道方法	75
図 5.6	楕円	76
図 5.7	寄り道距離分布 (楕円モデル)	78
図 5.8	k 番目に近い施設までの寄り道距離分布 (楕円モデル)	79
図 5.9	俵型	80
図 5.10	寄り道距離分布 (俵型モデル)	81
図 5.11	k 番目に近い施設までの寄り道距離分布 (俵型モデル)	82
図 5.12	楕円と俵型の比較	82

図目次

図 5.13 平均寄り道距離	83
図 5.14 施設閉鎖時の寄り道距離分布（楕円モデル）	84
図 5.15 施設閉鎖時の寄り道距離分布（俵型モデル）	85
図 5.16 施設閉鎖時の平均寄り道距離	85
図 5.17 対応前後の平均寄り道距離（楕円モデル）	86
図 5.18 対応前後の平均寄り道距離（俵型モデル）	87
図 5.19 道路網上の寄り道距離（楕円モデル）	89
図 5.20 道路網上の寄り道距離（俵型モデル）	89
図 5.21 寄り道距離 10, 20, 30km で立ち寄り可能な部分（楕円モデル）	90
図 5.22 寄り道距離 10, 20, 30km で立ち寄り可能な部分（俵型モデル）	90
図 6.1 格子状道路網と放射環状道路網	95
図 6.2 田園調布	96
図 6.3 新富谷ガーデンシティ	96
図 6.4 格子状道路網での迂回	98
図 6.5 放射環状道路網での迂回	100
図 6.6 稠密道路網での迂回	101
図 6.7 茨城県道路網	103
図 6.8 長野県道路網	103
図 6.9 栃木県道路網	103
図 6.10 千葉県道路網	103
図 6.11 つくば・水戸間の迂回経路	104
図 6.12 迂回距離のメディアン（茨城県）	105
図 6.13 迂回距離のメディアン（長野県）	105
図 6.14 迂回距離のメディアン（栃木県）	105
図 6.15 迂回距離のメディアン（千葉県）	105
図 6.16 迂回距離の最大値（茨城県）	106
図 6.17 迂回距離の最大値（長野県）	106
図 6.18 迂回距離の最大値（栃木県）	106
図 6.19 迂回距離の最大値（千葉県）	106
図 6.20 京都市中心部道路網	107
図 6.21 土浦市中心部道路網	107
図 6.22 多摩 NT 中心部道路網	107
図 6.23 迂回距離のメディアン（京都市）	108
図 6.24 迂回距離のメディアン（土浦市）	108
図 6.25 迂回距離のメディアン（多摩 NT）	108
図 6.26 迂回距離と最短距離（茨城県）	112
図 6.27 迂回距離と最短距離（長野県）	112
図 6.28 迂回距離と最短距離（栃木県）	112

図目次

図 6.29 迂回距離と最短距離 (千葉県)	112
図 6.30 迂回距離と最短距離 (京都市)	114
図 6.31 迂回距離と最短距離 (土浦市)	114
図 6.32 迂回距離と最短距離 (多摩 NT)	114
図 7.1 $n \times n$ 格子状道路網	118
図 7.2 迂回 1)	119
図 7.3 迂回 2)	119
図 7.4 迂回 3)	120
図 7.5 迂回 4)	120
図 7.6 迂回 5)	121
図 7.7 迂回 6)	121
図 7.8 迂回 7)	122
図 7.9 迂回 8)	122
図 7.10 迂回 9)	123
図 7.11 5×5 格子状道路網	124
図 7.12 格子状道路網の迂回距離分布 ($u = a/2$)	124
図 7.13 格子状道路網の総迂回距離 (内部道路)	125
図 7.14 格子状道路網の総迂回距離 (外周道路)	125
図 7.15 道路密度の計算 (格子状道路網)	126
図 7.16 格子状道路網の最小断面交通量	127
図 7.17 n 放射 m 環状道路網	128
図 7.18 放射環状道路網における最短経路	128
図 7.19 迂回 1)	129
図 7.20 迂回 2)	130
図 7.21 迂回 3)	130
図 7.22 迂回 4)	131
図 7.23 迂回 5)	132
図 7.24 迂回 6)	132
図 7.25 迂回 7)	133
図 7.26 迂回 8)	133
図 7.27 迂回 9)	134
図 7.28 迂回 10)	134
図 7.29 迂回 11)	135
図 7.30 迂回 12)	136
図 7.31 迂回 13)	136
図 7.32 8 放射 3 環状道路網	137
図 7.33 放射環状道路網の迂回距離分布 ($u = 3\ell/2$)	137
図 7.34 放射環状道路網の総迂回距離	138

図目次

図 7.35 道路密度の計算（放射環状道路網）	139
図 7.36 放射環状道路網の断面交通量	139
図 7.37 茨城県の総迂回距離	140
図 7.38 長野県の総迂回距離	140
図 7.39 栃木県の総迂回距離	141
図 7.40 千葉県の総迂回距離	141
図 7.41 道路密度の推定	142
図 7.42 リンク周辺の道路密度（茨城県）	143
図 7.43 リンク周辺の道路密度（長野県）	143
図 7.44 リンク周辺の道路密度（栃木県）	143
図 7.45 リンク周辺の道路密度（千葉県）	143
図 7.46 断面交通量（茨城県）	145
図 7.47 断面交通量（長野県）	145
図 7.48 断面交通量（栃木県）	145
図 7.49 断面交通量（千葉県）	145
図 7.50 総迂回距離と道路密度・断面交通量（茨城県）	146
図 7.51 総迂回距離と道路密度・断面交通量（長野県）	146
図 7.52 総迂回距離と道路密度・断面交通量（栃木県）	147
図 7.53 総迂回距離と道路密度・断面交通量（千葉県）	147
図 8.1 格子状道路網での迂回（情報なし）	154
図 8.2 放射環状道路網での迂回 1（情報なし）	155
図 8.3 放射環状道路網での迂回 2（情報なし）	155
図 8.4 つくば・水戸間の迂回経路（情報なし）	157
図 8.5 水戸市と他都市間の移動距離	158
図 8.6 水戸市と他都市間の迂回距離	158
図 8.7 長野市と他都市間の移動距離	159
図 8.8 長野市と他都市間の迂回距離	159
図 8.9 宇都宮市と他都市間の移動距離	160
図 8.10 宇都宮市と他都市間の迂回距離	160
図 8.11 千葉市と他都市間の移動距離	161
図 8.12 千葉市と他都市間の迂回距離	161
図 8.13 都市 i の出やすさ，入りやすさ	162
図 8.14 出るときと入るときの移動距離（茨城県）	163
図 8.15 出るときと入るときの移動距離（長野県）	163
図 8.16 出るときと入るときの移動距離（栃木県）	164
図 8.17 出るときと入るときの移動距離（千葉県）	164
図 9.1 情報提供と迂回経路（格子状道路網）	168

図目次

図 9.2 最短路が一意に定まらない場合	168
図 9.3 迂回 10)	169
図 9.4 迂回 11)	169
図 9.5 情報提供による総迂回距離の削減効果（格子状道路網，内部道路）	175
図 9.6 情報提供による総迂回距離の削減効果（格子状道路網，外周道路）	175
図 9.7 情報提供と迂回経路（放射環状道路網）	176
図 9.8 情報提供による総迂回距離の削減効果（放射環状道路網）	185
図 9.9 8 放射 2 環状道路網	186
図 9.10 環状路間隔と総迂回距離	186
図 9.11 環状路間隔と平常時の総移動距離	187
図 9.12 茨城県の総迂回距離（情報なし）	188
図 9.13 長野県の総迂回距離（情報なし）	188
図 9.14 栃木県の総迂回距離（情報なし）	189
図 9.15 千葉県の総迂回距離（情報なし）	189
図 9.16 情報の効果と道路密度・断面交通量（茨城県）	191
図 9.17 情報の効果と道路密度・断面交通量（長野県）	191
図 9.18 情報の効果と道路密度・断面交通量（栃木県）	192
図 9.19 情報の効果と道路密度・断面交通量（千葉県）	192
図 10.1 格子状道路網上の施設配置	196
図 10.2 施設閉鎖（1 箇所）	197
図 10.3 施設閉鎖時の迂回（水平リンク）	198
図 10.4 施設閉鎖時の迂回（垂直リンク）	198
図 10.5 施設閉鎖時の総迂回距離（1 箇所）	199
図 10.6 施設閉鎖（2 箇所）	200
図 10.7 施設閉鎖時の迂回（2 箇所）	201
図 10.8 施設閉鎖時の総迂回距離（2 箇所）	202
図 10.9 道路閉塞（1 箇所）	203
図 10.10 道路閉塞時の迂回（水平リンク）	204
図 10.11 道路閉塞時の迂回（垂直リンク）	205
図 10.12 道路閉塞時の総迂回距離（1 箇所）	206
図 10.13 道路閉塞時の総迂回距離の最大値（1 箇所）	207
図 10.14 道路閉塞（2 箇所）	207
図 10.15 道路閉塞時の迂回（隣接 2 箇所）	208
図 10.16 道路閉塞時の総迂回距離（2 箇所）	209
図 10.17 施設・道路の同時閉鎖	210
図 10.18 施設・道路の同時閉鎖時の迂回（水平リンク）	211
図 10.19 施設・道路の同時閉鎖時の迂回（垂直リンク）	212
図 10.20 道路閉塞時の総迂回距離（2 箇所）	213

表 目 次

表 1.1	モデルの特徴	6
表 2.1	k 番目に近い施設までの平均距離	21
表 2.2	k 番目に近い施設までの標準偏差	22
表 2.3	k 番目に近い小学校までの平均距離 (km)	29
表 2.4	有限平面と無限平面の平均距離	33
表 4.1	k 番目に訪れる施設までの平均距離 (情報なし)	64
表 4.2	k 番目に訪れる小学校までの平均距離 (情報なし) (km)	69
表 4.3	有限平面と無限平面の平均距離 (情報なし)	70
表 6.1	迂回距離	102
表 6.2	標準誤差 (茨城・長野・栃木・千葉) (km)	110
表 6.3	パラメータ推定値 (茨城・長野・栃木・千葉) (km)	111
表 6.4	標準誤差 (京都・土浦・多摩) (m)	113
表 6.5	パラメータ推定値 (京都・土浦・多摩) (m)	113
表 7.1	決定係数	148
表 7.2	パラメータ推定値	148
表 9.1	決定係数	193
表 9.2	パラメータ推定値	193

第1章 はじめに

1.1 研究の背景と目的

都市地域を取り巻く諸条件が日々変動する中、公共サービスをいかに安定的に提供するかは都市計画の大きな課題の一つである。都市に関わる不確実性の例として第一に、地震、台風、火山噴火等様々な自然災害や火事、事故等人為的な災害が発生している。これらを予期することはほとんど不可能であり、しかも都市化が急速に進行している地域では、防災対策が後手に回り被害が甚大になる場合も見受けられる。1995年の阪神・淡路大震災では改めて我が国の都市の災害に対する脆弱性が露呈した。

第二に、少子高齢化、情報化、価値観の多様化等の社会的な構造変化が急速に進展しており、地域に求められる公共サービスも日々変化を続けている。これらの変化に対応するために都市計画や地域計画に変更・修正の余地を残す等の柔軟性が必要とされている。筑波研究学園都市においても、都市の成熟と共に当初の計画理念である研究・教育機能に加えて、高度の商業機能やより安全で快適な生活環境が求められるようになっている。

第三に、景気の動向も重要である。十分な税収が得られないのであれば、都市インフラストラクチャーの新規建設はもちろん、その維持管理も不可能になる。

このような社会的要請を踏まえれば、災害の発生や必ずしも予期できない社会の変化を前提として、それらによるサービスの低下を回避もしくは低減させる視点から都市インフラストラクチャーを整備する必要がある。このような不確実性に対するリスク管理においては、都市システムにバックアップ機能や冗長性（リダンダンシー）を確保することが重要である。その際、予算の制約や住民への説明責任を考えれば、客観的な評価が求められる。本研究は不確実性による損失を定量的に把握し、計画の効果を評価することにより、不確実性に強い頑健な都市の設計に資することを目的とする。

都市インフラストラクチャーは学校や病院のような点的施設と道路網のようなネットワークの2種類に大別できる。まず、施設、道路網それぞれについて災害や社会変化の具体例を挙げ、それら不確実性に関連する既存研究を概観する。

第1章 はじめに

1.1.1 施設

阪神・淡路大震災では避難所として利用される教育施設や医療機関等の緊急対応施設にも大きな被害が生じ、その機能が長期的に低下した。被災地域内で構造的被害のあった公立小・中学校は66校(13.4%)に上り、倒壊・全焼・大破という重大な被害を被ったものは25校(5.1%)であった。被災地の182病院では、61%が病院建築物にかなりの補修を必要とする被害を受けた。また、病院のライフライン被害によって39%が手術室の使用不能、37%の人工透析装置が使用不能となった。その結果、被災地内の医療機関は緊急手術や人工透析を必要とする重傷負傷者には十分に対応することができなかった[阪神・淡路大震災(1999)]。

社会的変化の具体例として、近年の少子化の進展による学齢人口の減少に伴い、学校統廃合が全国的に進められている。図1.1に示すように、全国の小学校数は1995年の24,548から2002年には23,808へ3.0%減少している。一方で、施設によっては需要が急速に伸びており、例えば、老人福祉施設は急速な高齢化の進展に伴って顕著な増加傾向にある。図1.2より、1995年の12,904から2002年には33,419へ159.0%の増加を示している。

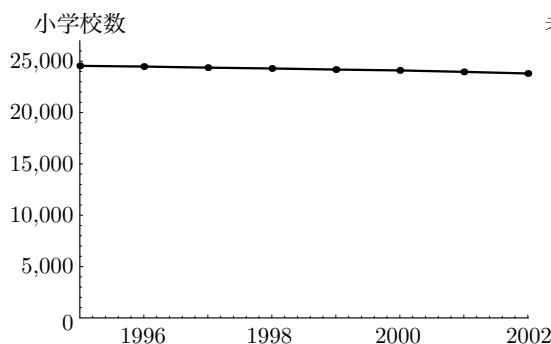


図 1.1: 全国の小学校数の推移

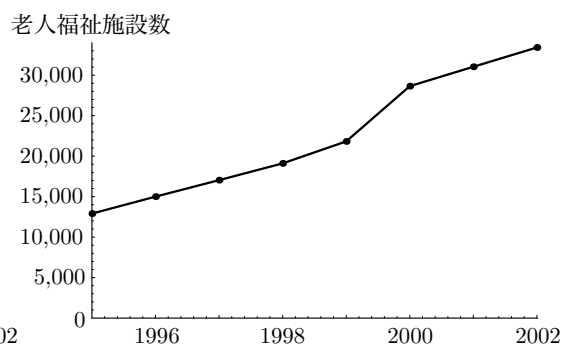


図 1.2: 全国の老人福祉施設数の推移

つくば市においても、児童数が少なく、複式学級編成をしている筑波第一小（今年度児童数：12人）、大杉小（21人）、山口小（45人）で近隣小学校との統合が検討されている。対照的に、大曾根小、吾妻小、葛城小ではつくばエクスプレス開通に伴って児童数の急増が見込まれ、沿線開発地区では学校を新設する計画もある。

したがって、施設配置計画においても施設数が変化することを前提として、災害による被害を最小限にとどめる、あるいは社会的変化に柔軟に対応できる計画をつくる必要がある[日本建築学会(1995)]。

1.1. 研究の背景と目的

施設配置問題は都市計画分野以外にも、オペレーションズ・リサーチ、都市経済学、地理学等多くの分野で研究されている[谷村 (1986)], [杉浦 (1989)], [大澤 (1992)], [岡部, 鈴木 (1992)], [Daskin (1995)], [Drezner (1995)], [Beckmann (1999)], [Schöbel (1999)], [Sule (2001)], [Drezner, Hamacher (2002)], [Klamroth (2002)], [石崎 (2003)]. 特に, [Daskin (1995)] ではメディアン問題, センター問題等古典的な施設配置問題の定式化と解法が紹介されている. 演習問題も豊富に用意されている. [Drezner, Hamacher (2002)] ではウェーバー問題から最新の研究まで施設配置問題の概要と様々なアプリケーションが紹介されている. これら既存研究では, 一定の制約条件の下で最適化を行う数理計画問題として定式化がなされており, ある一時点に対して最適化が行われていることがほとんどである. このような時間軸を考慮していない既存の研究方法で精緻に求められた施設配置は, 施設数の変化に対して脆弱である可能性が高い. 都市という社会的な対象を扱っている以上, 需要の変化, 予算制約の変化, データの誤差等は避けることができず, 求めた最適解が実際には実行不能になることもあるだろう.

施設の閉鎖・開設を扱った数少ない研究として, [Wang, et al. (2003)] では閉鎖・開設に要する費用を明示的に取り入れ, 与えられた予算と施設数の下で, 利用者の総移動距離を最小にするように既存施設の閉鎖と新規施設の開設を同時に決定する問題の定式化と近似解法の提案がなされている. [大谷, 他 (2002)] は徳島県上勝町の小学校統廃合計画案を通学距離の総和の最小化, 通学先が変更される児童数の最小化, 教職員数の最小化等の多様な指標を用いて評価している. [鈴木 (1988)], [Suzuki, et al. (1991)], [大澤 (1996)] は施設を逐次的に建設していく過程をモデルで表現し, 最適な順序や配置を求めている.

1.1.2 道路網

阪神・淡路大震災では道路網も大きな被害を受けた. 主要な幹線道路は兵庫県南部に集中していたために, 重要な東西基幹交通が長期に亘って遮断された. 100 箇所以上の高速道路・有料道路が被害を受け, 阪神高速は全路線が通行止めとなった. 直轄国道も図 1.3 に示すように, 上下線通行止め 17 箇所, 一部通行規制 11 箇所, 全体で 28 箇所について通行規制を実施した. 被害は地区内の街路にも及び, 家屋の崩壊・電柱の倒壊等によって自動車の通行が阻害された. その結果, 自動車によってアクセスできない区域が存在し, 救助・消火活動に大きな障害が生じた [阪神・淡路大震災 (1998)].

第1章 はじめに

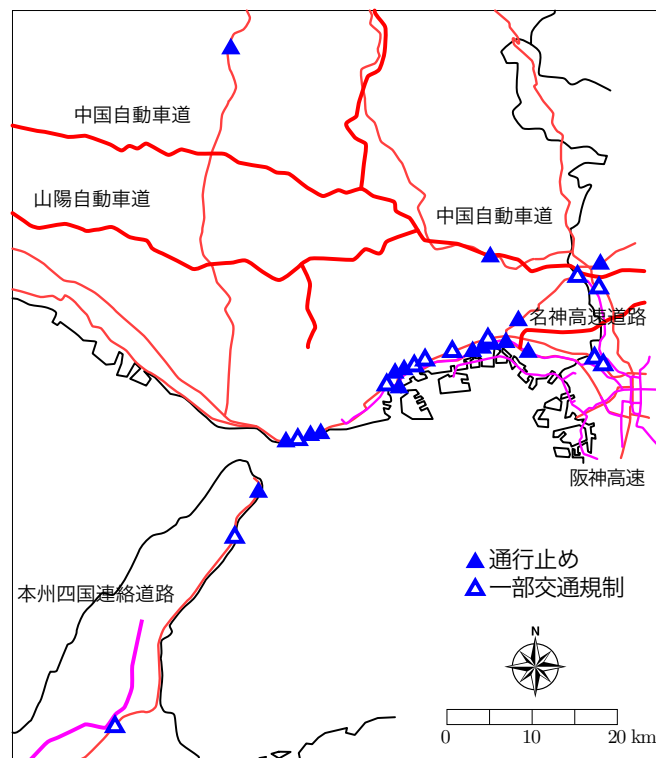


図 1.3: 阪神・淡路大震災時の道路網の被害

一度道路閉塞が生じると、道路の分布が偏っていたり、密度が低かったりすると大きな迂回を強いられる。最悪の場合にはネットワークから孤立してしまう地域が出てしまう。2004 年の新潟県中越地震では山古志村の全 14 集落が道路の寸断により孤立したのを始め、十日町市、小千谷市等で最大 61 集落が孤立した。避難が困難となったのに加えて、救援物資の搬入やライフラインの復旧を遅らせる要因ともなった。

また、日常的にも交通事故や道路工事による道路閉塞がたびたび発生している。こうした交通障害は局所的領域のみならず、地域全体までも機能低下を招く。加えて、予測できない自然災害の場合にはそれが長期間に亘ることも多い。

したがって、道路網計画においても災害や事故による道路閉塞の発生を考慮し、迂回等により交通機能が全うできるようなりダンダンシーを持ったネットワークの構築が求められる [日本都市計画学会 (1995)], [日本都市計画学会 (1999)]。

1.1. 研究の背景と目的

これまでも、道路閉塞を考慮した道路網評価に関する研究は数多くなされている。最も代表的な研究はネットワークフロー分析を用いたもので、[飯田, 若林 (1988)], [嶋田, 他 (1995)], [朝倉 (1999)], [Yin, Ieda (2001)], [Chen, et al. (2002)], [Lo, Tung (2003)] 等がある。特に最近の研究では利用者均衡：「均衡状態においては、もはやどの利用者也経路を変更することによって自己の旅行時間をそれ以上短縮することはできない」[土木学会 (1998)] が成立している状況を想定し、道路網の一部区間が通行不能になったときのネットワークフローの変化を扱っている。混雑やトリップの中止等を考慮した多様なパフォーマンス指標を求めることができるという利点があるものの、多くの計算費用を必要とし、現実適合させようとする程多くのパラメータや仮定を含んだものとなり、モデル作成者以外には内容の理解や結果の直観的解釈も困難になる。

一方、道路網特性を分析した研究として、[堀井 (1996)] は計量地理学で用いられる迂回度指標を応用し、災害時の代替機能という観点から道路網を評価している。リダンダンシーを有する道路網の構成方法に関しては、南らによる一連の研究 [南, 他 (1996a)], [南, 他 (1996b)], [南, 他 (1997)] がある。[朝倉, 他 (1997)] は OD ペアの連結度指標を平常時と異常時の最短距離の比が基準値を上回らない確率として考察している。[Chang, Nojima (2001)] は被災後のアクセシビリティに着目した道路網の性能評価指標を提案し、阪神・淡路大震災での神戸市の道路網に適用している。[山田, 他 (1986)] は地震後の最適な復旧順序を平均走行時間の回復率から求め、平常時の交通量や被害の程度が復旧順序に及ぼす影響について論じている。[Oyama, Taguchi (1996)] は道路区間の重要性を測るための最短路数え上げ問題を定式化し、[Oyama (2000)] ではネットワーク連結問題へ応用している。さらに、[大山, 諸星 (2003)] は 2 点を結ぶ経路の本数に着目し、安定連結関数を用いて道路網の連結性の強さを評価している。

詳細なデータを用いて個別の地区を対象とした研究としては、[家田, 他 (1997)], [今泉, 浅見 (2000)] がある。[吉川, 他 (2003)] は建物倒壊や路上駐車に起因する道路閉塞の詳細なモデルを構築し、避難場所への距離に関して分析している。[Cho, et al. (2001)] はロサンゼルスにおいて地震による経済損失を道路網と生産施設の被害から産業連関分析を用いて算出している。

第1章 はじめに

1.2 研究の特徴

本研究では、施設配置ならびに道路網の頑健性を数理モデルを用いて評価する。それぞれのモデルの特徴は表 1.1 に示す通りである。施設に対しては、連続平面を仮定し、施設までの距離を直線距離で測る。そして、施設閉鎖に伴う最寄り施設までの距離の増加を把握し、計画の効果を移動距離の削減という観点から評価する。道路網に対しては、ネットワーク上の移動を考え、2 点間の距離を最短経路距離で測る。そして、道路閉塞に伴う迂回距離に着目して、道路閉塞による損失および計画の効果を評価する。

いずれの分析も移動距離に着目したものであり、その理由として利用者の利便性を表現する最も重要な評価指標であること、空間を表現する基本概念であり様々な都市分析への応用性が高いことが挙げられる。

表 1.1: モデルの特徴

	施設	道路網
空間	連続平面	ネットワーク
移動	平面上の点 → 施設	ネットワーク上の点同士
距離	直線距離	最短経路距離
変動要素	施設閉鎖	道路閉塞
評価指標	最寄り施設までの距離	迂回距離

本研究は現象の本質をモデル分析によって大胆に単純化している、という点において特徴付けられる。つまり、現象を忠実に再現することを必ずしも目的とはせず、現実の複雑な現象を規定する基本的な構造を把握し、本質的な結果の方向を与えることに主眼を置いている。このようなモデル分析の意義・役割は、得られた結果を直観的に理解し説明できること、ならびに実際の問題に対する基本的なベンチマークとなり得ることにある。

[栗田 (2004)] は都市の事物の本質を解明したり設計の指針を得るためには、事物の大切な部分や性質だけを取り出し、取り出したパーツ同士の関係を考察することが重要であると述べている。そして、都市の数理モデルが持つ利点として次の 4 点を挙げている：

- (1) 要因同士の関係を（定性的な思考では到達し得ないレベルまで）同定することが可能である。
- (2) 制御変数を明示的に組み込むことによって、政策の効果を予測できる。
- (3) モデルの前提条件や制約条件が共通であれば、時間的／空間的に異なる対象に対して、モデルを移植して利用することができる。
- (4) 現実には存在しない（あるいはかつて存在した）都市構造を前提として、都市住民

1.3. 論文の構成

が享受するサービスの水準やエネルギーの消費水準などを把握することができる。

実務家にとっても単純明快な仮定・原則の下で得られた結果は、経験に頼らずに都市問題を解決するための有用な知見となり得ることが期待できる。1つのものの見方、考え方として都市計画分野においても共通の理解としての基礎となる理論を構築する必要がある、そのためには、理論的成果を積み重ね、一般的真理や法則を追求することが極めて有効であるといえよう。

1.3 論文の構成

本論文の構成は図 1.4 に示す通りである。第 I 部は施設配置の頑健性を議論する。第 2 章では施設が閉鎖された場合に、最寄り施設までの距離がどの程度増加するのかを分析する。第 2 章の結果を基に、施設閉鎖に対する計画の効果を実第 3 章と第 4 章にて評価する。第 3 章では耐震補強を行うこと等の閉鎖施設の計画的なコントロールによる効果、第 4 章では施設閉鎖情報の提供効果を測る。第 5 章では移動途中に立ち寄る施設が閉鎖されたときのサービス低下および補強の効果を寄り道に要する距離に着目して議論する。

第 II 部は道路網の頑健性について述べる。まず、第 6 章と第 7 章にて道路が閉鎖された場合に、移動距離がどの程度増加するのかを把握する。第 6 章では最短距離に比してどの程度の迂回を強いられるかを分析する。第 7 章では迂回距離分布を導出し、道路網上のどこで閉塞が起こった場合に大きな迂回を強いられるのかを明らかにする。道路閉塞に対する計画の効果を実測るため、第 8 章と第 9 章では道路閉塞情報が得られない状況を想定する。第 8 章では情報が得られない場合の迂回距離の性質を議論する。第 9 章では道路閉塞情報の提供効果を評価する。

第 10 章では第 I 部と第 II 部を統合し、施設閉鎖と道路閉塞の関係をそれぞれがもたらす損失の比較等を通して考察する。最後に第 11 章では本研究の結論として、不確実性に強い頑健な都市設計への示唆を述べる。

なお、本研究で得られた新しい知見は本文中に命題として示されている。

各章の内容の一部は以下の論文で報告済みである：

2, 3 章 [宮川, 大澤 (2002)], [宮川, 他 (2004)]

5 章 [宮川, 大澤 (2000)], [宮川, 大澤 (2001)]

6 章 [宮川, 大澤 (2003)]

7, 9 章 [宮川, 他 (2003)], [Miyagawa, Ohsawa (2003)], [宮川, 大澤 (2004)],
[宮川, 他 (2004)]

第1章 はじめに

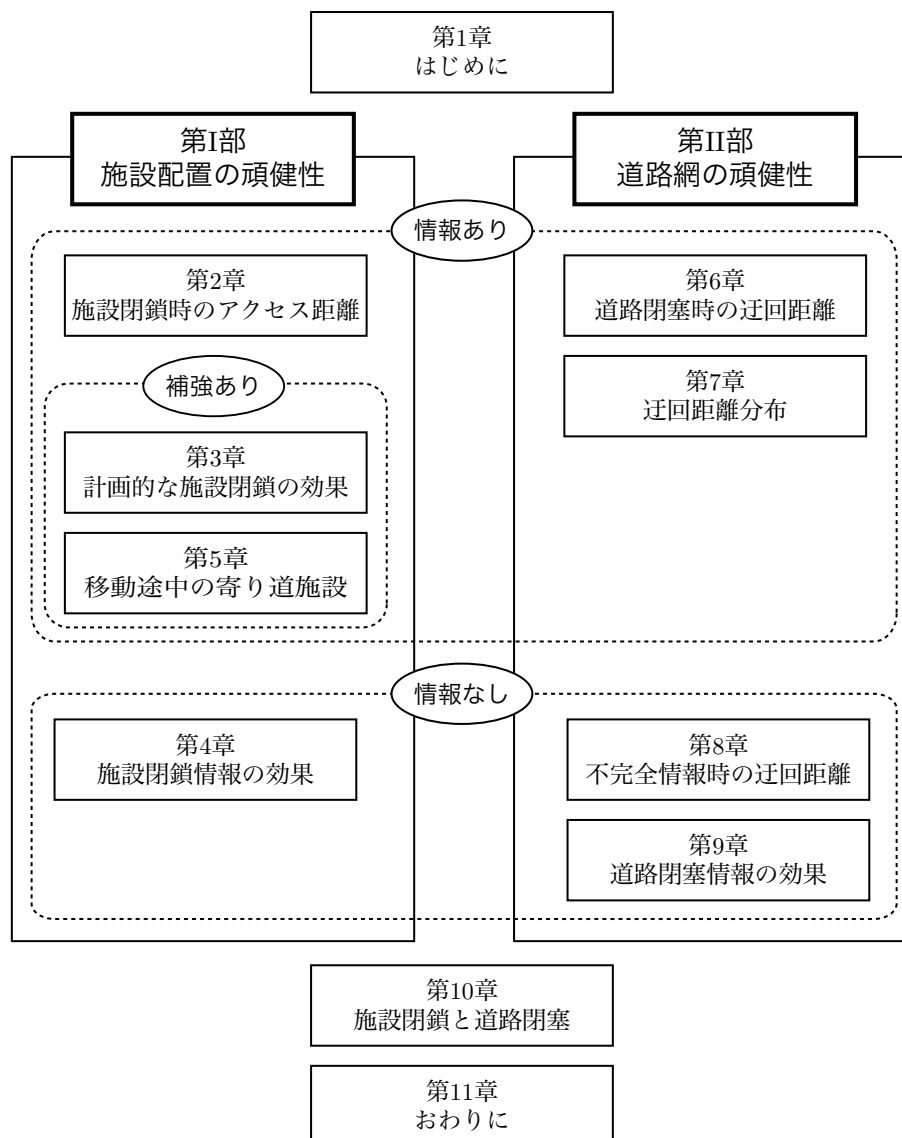


図 1.4: 論文の構成

第I部

施設配置の頑健性

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

2.1 はじめに

第I部では、施設配置の頑健性を評価する。具体的には、施設の閉鎖に伴って利用者から最寄り施設への距離がどの程度増加するのかを明らかにする。対象領域は無限に広がっており、人口は一様に分布していると仮定する。施設は全て同質で利用者は最寄りの施設を使うものとする。施設までの距離は直線距離で測る。図 2.1 に示す平面上の規則的配置(正方格子, 三角格子, 六角格子) およびランダム配置を分析の対象とする。

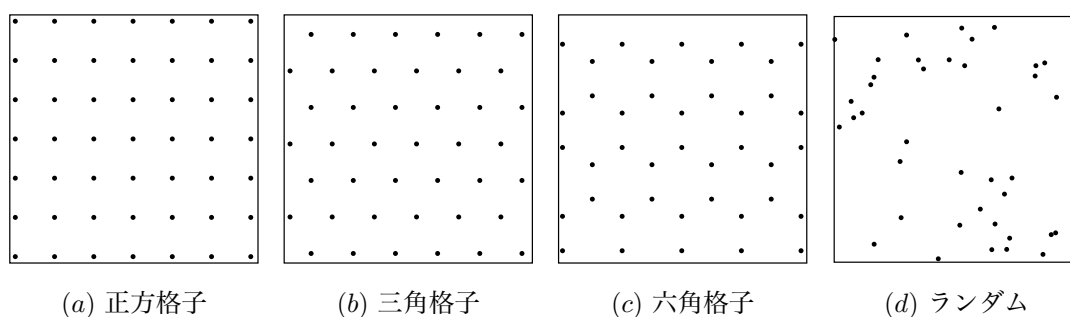


図 2.1: 規則的配置とランダム配置

規則的な施設配置を対象とする理由は次の通りである：

(1) 単純な空間構造である

規則的配置は明快に理解できる上に理論化が容易であり、厳密な結果を得ることができる。なお、1種類の正多角形で平面を埋め尽くすことができるのは正方形、正三角形、正六角形の3種類であることが知られており [Grünbaum, Shephard (1987)], 図 2.1 (a), (b), (c) の規則的配置はこの平面分割パターンに対応する。

(2) 地域特性を考慮しなければ規則的配置が総移動距離最小化問題の最適解となる

利用者分布の偏り、交通条件、地形条件等の地域特性を考慮する必要がない程等質な地域を考えれば、規則的な配置が利用者全体にとって最も利便性が高くなることは直観と合致する。例えば、利用者が連続型一様分布で与えられる地理的最適化問題では、

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

三角格子状配置が最適であることが知られている [Leamer (1968)], [大澤, 腰塚 (1982)], [Iri, et al. (1984)], [Du, et al. (1999)].

(3) 中心地理論において中心地が規則的に分布することが演繹的に示されている

[Christaller (1933)] の中心地理論では、1) 人口の均等分布、2) 交通条件の一様性、3) 地形条件の一様性、4) 人口特性の一様性、5) 合理的行動、を仮定した上で、中心地が三角格子状（市場領域が正六角形）に分布することが示されている。さらに、彼は理論の検証を 1930 年代の南ドイツで試みており、特にニュルンベルクやミュンヘンを中心とするバイエルン地方で中心地理論が示唆するような分布パターンが観察されることを示している。[Hoover (1971)] は市場領域の形として四角形を提案している。その理由として、アメリカのタウンシップ・システム等人為的な土地制度の中には四角形の格子状システムを形成するものが多いこと、および多くの都市では四角形格子状の道路網が見られることを挙げている。正六角形市場が正三角形や正方形よりも事業所に多い利潤をもたらすことは [Lösch (1940)] によって明らかにされている。

実際の施設配置計画を立案するに当たっては、地理的条件、敷地条件、都市の歴史、輸送技術、社会経済、環境問題、さらには政治や世論等様々な要因を考慮しなければならない [大澤 (1992)]。そのために、現実の施設配置では図 2.1 のような完全に規則的なパターンが現れることはない。しかし、[柏原 (1991)] は公共施設の配置は公平性に配慮するため規則的配置に近いと想定し、大阪市の区役所の分布を例としてそれを実証している。さらに、効率の良い配置の代表として規則的配置、効率の悪い配置の代表としてランダム配置という最も極端な場合に関して、直観的な解釈を可能とする厳密な結果を得ることで、実際の施設配置に対する基本的かつ汎用的なベンチマークとなり得ることが期待できる。

本章では、施設閉鎖によるサービス低下を把握するため、施設が一様にかつ独立に閉鎖された場合に、最寄り施設までの距離がどの程度増加するのかを分析する。これは地震等の災害によって施設が被害を受けた場合、あるいは計画者が施設を閉鎖する際に移動効率性等の空間的関係を考慮せずに行う場合を想定している。

以下では、正方格子、三角格子、六角格子状配置、およびランダム配置の k 番目に近い施設までの距離の分布を求める。そして、施設を閉鎖した際の平均距離、距離の標準偏差を比較することにより、頑健な配置を明らかにする。平均距離は小さい程望ましく、効率性の指標として捉えることができる。標準偏差は利用者からの距離のばらつき具合を表しているため、公平性の指標として考えられ、標準偏差が小さい程公平性が高いといえる。さらに、実際の施設配置での分析を通して、規則的配置やランダム配置での分析が現実問題にも適用可能であることを確認する。

2.2 k 次近隣距離分布

まず，施設が閉鎖されたために，利用できる最も近い施設が元の配置の 2 番目, 3 番目, ... に近い施設となる状況を明らかにしよう．ここで，施設残存率を次のように定義する．

定義 2.1 施設が閉鎖されずに残る確率を施設残存率と呼び p ($0 \leq p \leq 1$) で表す．

残存率 p は全ての施設に対して同一であり，施設の閉鎖は互いに独立であると仮定する．最も近い施設を利用できるのはそれが閉鎖されずに残存している場合であり，その確率は p である．2 番目に近い施設を利用するのは，最も近い施設が閉鎖され，かつ 2 番目に近い施設は残存している場合であり，その確率は $(1-p)p$ である．3 番目以降に近い施設に関しても同様に考えれば利用する確率が求まり， k 番目に近い施設を利用する確率は $(1-p)^{k-1}p$ となる．このように施設利用に対して単純な幾何分布 [蓑谷 (2003)] を仮定する．

図 2.2 は k 番目に近い施設を利用する確率を 4 種類の残存率 $p = 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ に関して表したものである．残存率 p が大きいときは最も近い施設までの距離が重要であるが， p が小さくなるに従って 2 番目以降の距離も考慮しなければならないといえる．

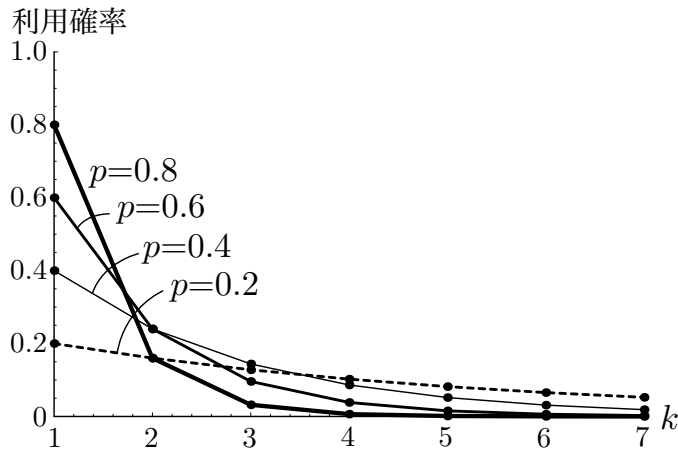


図 2.2: k 番目に近い施設を利用する確率 (幾何分布)

そこで，正方格子，三角格子，六角格子状配置における k 次近隣距離分布を導出し， k 番目に近い施設までの距離がどの位になるのかを明らかにする．距離分布 $f(r)$ は施設までの距離が r である利用者の密度を表す関数であり，施設までの距離 R が $r \leq R \leq r + dr$ の範囲にいる利用者の割合を $f(r)dr$ と表すことができる．同様に， k 次近隣距離分布は次のように定義される．

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

定義 2.2 k 次近隣距離分布 $f_k(r)$ は利用者から k 番目に近い施設までの直線距離 R の確率密度関数である.

利用者から最も近い施設までの距離分布（最近隣距離分布） $f_1(r)$ は以下のように求められる．最近隣距離の累積分布関数，すなわち施設までの距離が r 以内である確率を $F_1(r)$ とし，図 2.3 のように施設から距離 r 以内にある領域の面積を $S(r)$ ，対象領域の面積を S とする．このとき， $F_1(r)$ は利用者が施設から距離 r 以内の領域に存在する確率に等しく，

$$F_1(r) = \frac{S(r)}{S} \quad (2.1)$$

が成立する．両辺を r で微分すれば，最近隣距離の確率密度関数 $f_1(r)$ が

$$f_1(r) = \frac{S'(r)}{S} \quad (2.2)$$

と得られる．ここで，施設から距離 r 以内の領域の境界の長さ，つまり施設から距離が丁度 r である軌跡の長さを $L(r)$ とすると，

$$S(r + \Delta r) - S(r) \simeq L(r)\Delta r \quad (2.3)$$

が成り立つので，

$$S'(r) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{S(r + \Delta r) - S(r)}{\Delta r} = L(r) \quad (2.4)$$

となり，

$$f_1(r) = \frac{L(r)}{S} \quad (2.5)$$

が導かれる [奥平, 他 (1979)], [腰塚 (1986)]．つまり，最近隣距離分布 $f_1(r)$ は施設から距離が丁度 r である軌跡の長さを対象領域の面積で割ることで求まる．この式からボロノイ図を利用して最近隣距離分布を算出し，施設配置を分析した研究としては [腰塚, 大澤 (1983)], [Okabe, et al. (2000)] がある．

2.2. k 次近隣距離分布

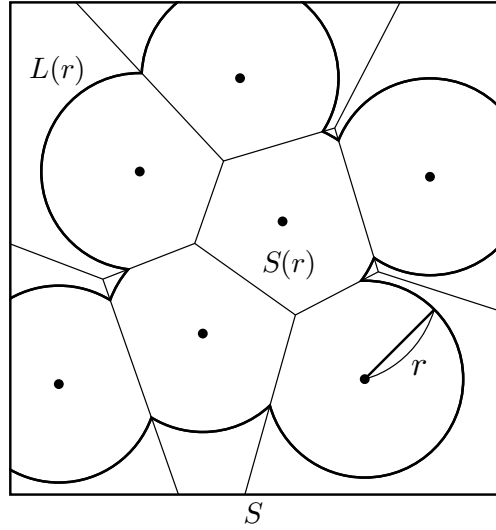


図 2.3: 距離分布の導出

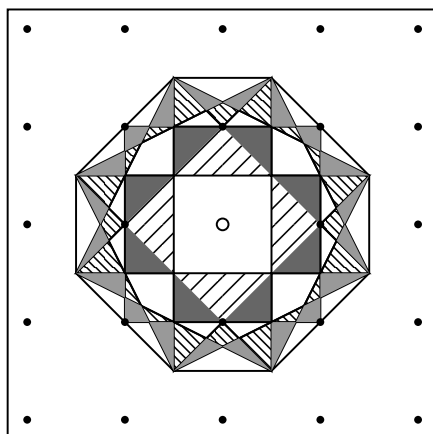
k 次近隣距離分布 $f_k(r)$ も同様に、施設が k 番目に近い領域内で施設から距離 r 以内にある領域の境界の長さを $L_k(r)$ とすると、

$$f_k(r) = \frac{L_k(r)}{S} \quad (2.6)$$

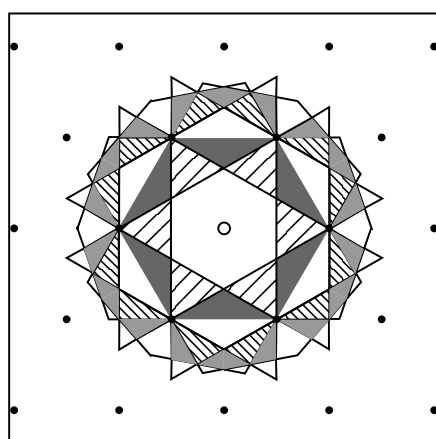
より導かれる。

図 2.4 は正方格子，三角格子，六角格子における中央の施設○が 1, 2, ..., 7 番目に近い領域を表している。1 番内側の正方形，正六角形，正三角形がそれぞれの施設が最も近い領域であり，外側に向かって 2, 3, 4, 5, 6, 7 番目に近い領域となっている。この領域は k 次ボロノイ多角形に対応する [Okabe, et al. (2000)]。各領域を k の値で並べると図 2.5, 図 2.6 のようになる。 k 次近隣距離分布 $f_k(r)$ は中央の施設○を中心とする半径 r の円弧の内でそれぞれの領域内に存在する部分の長さ $L_k(r)$ を求め，それを領域の面積 S で割ることで導出できる。

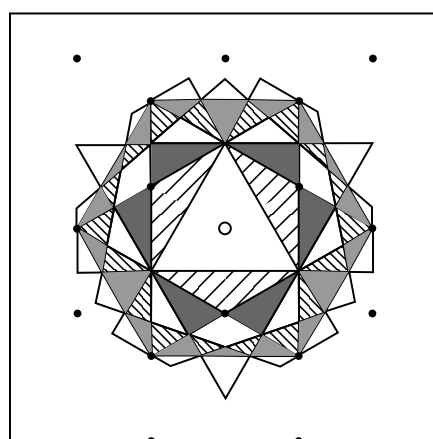
第2章 施設閉鎖時のアクセス距離



(a) 正方格子



(b) 三角格子



(c) 六角格子

図 2.4: 施設が 1, 2, ..., 7 番目に近い領域

2.2. k 次近隣距離分布

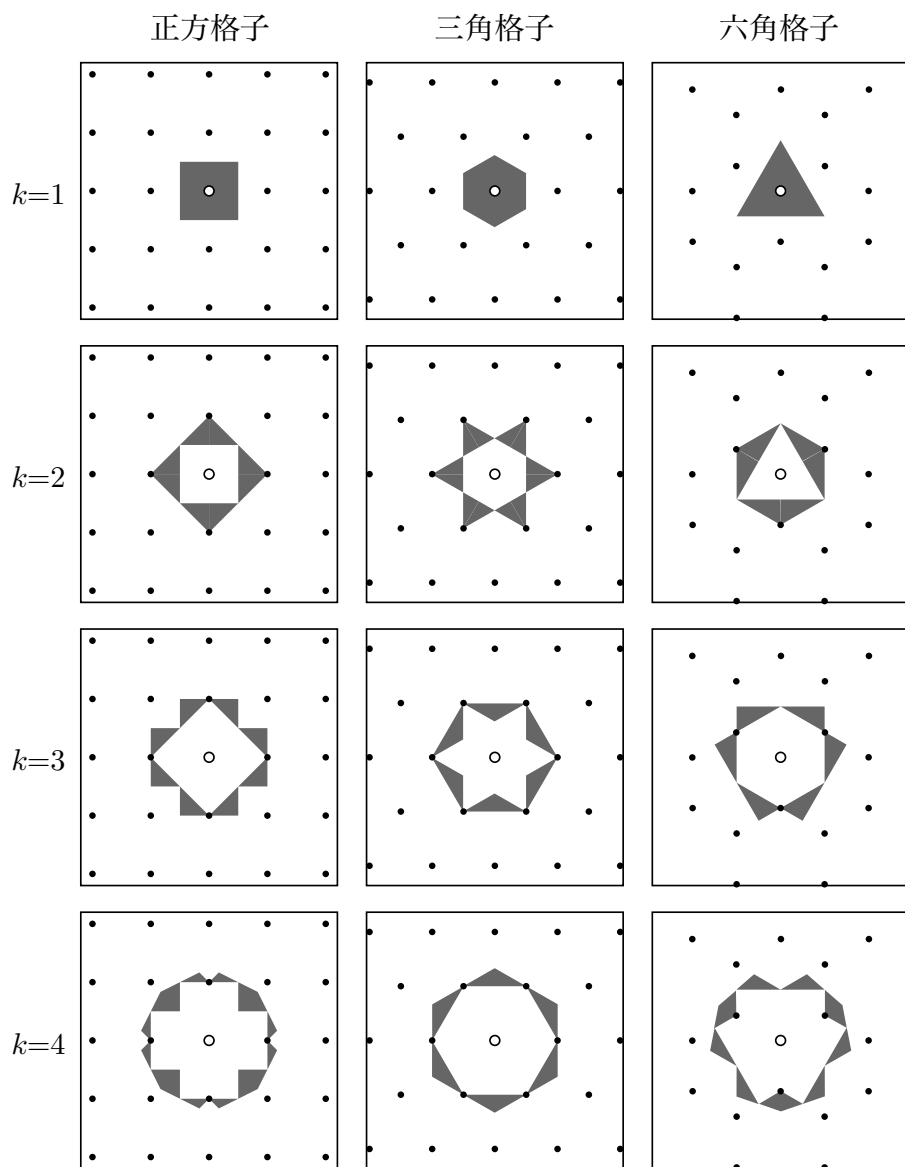


図 2.5: 施設が k 番目に近い領域 ($k = 1, \dots, 4$)

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

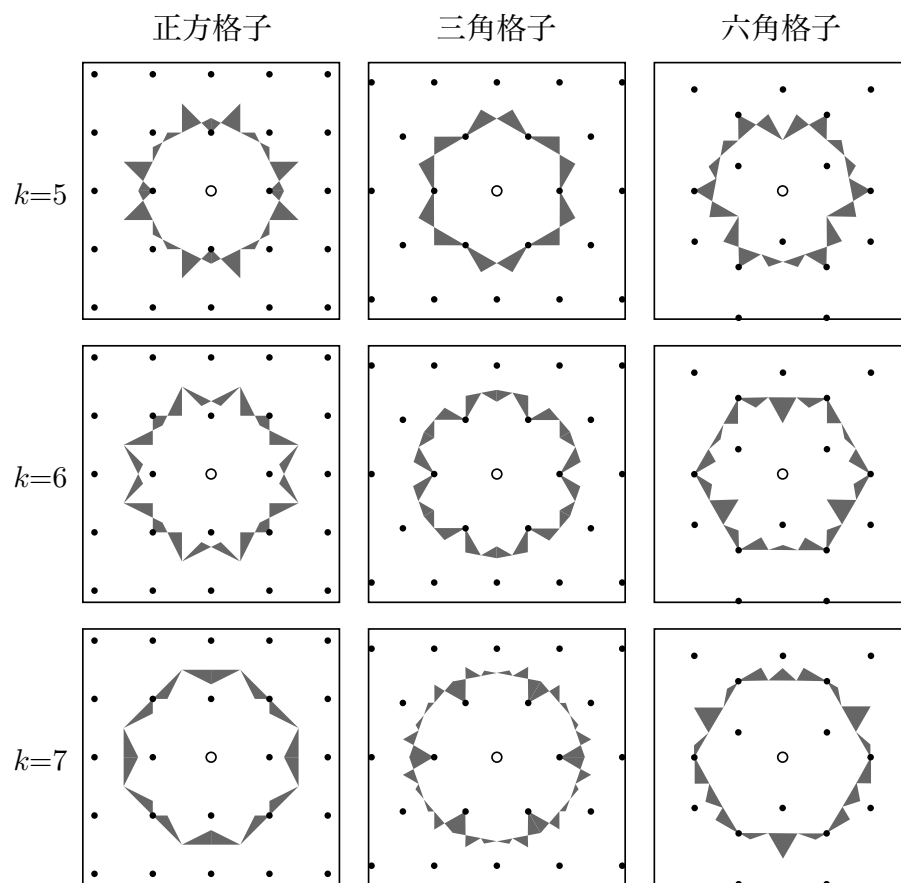


図 2.6: 施設が k 番目に近い領域 ($k = 5, \dots, 7$)

2.2. k 次近隣距離分布

k 次近隣距離の平均値 $E_k(R)$ は距離分布 $f_k(r)$ を用いて

$$E_k(R) = \int_0^\infty r f_k(r) dr \quad (2.7)$$

と得られる．これより楽な平均距離の計算方法として，直接施設までの総距離を求め，それを利用者数（ここでは領域面積）で割ることも算出できる．施設までの総距離は[腰塚, 大澤 (1983)]で示されているように，領域を直角三角形に分割することで容易に計算できる．

命題 2.1 利用者が一様に分布する無限平面上に施設が規則的に配置されているとする．利用者から施設までの距離を直線距離で測るとき， k 次近隣距離分布 $f_k(r)$ および平均値 $E_k(R)$ ，2乗の平均値 $E_k(R^2)$ ($k = 1, \dots, 7$) は解析的に求まり，付録 2.A のようになる．

正方格子の $f_1(r)$ は [Persson (1964)] で既に求められており，[腰塚 (1985)] ではさらに $f_2(r)$ も導出されている．三角格子の $f_1(r)$ は [Holgate (1965)], [腰塚 (1992)] で求められている．3つの規則的配置の $E_1(R)$ は例えば [Puu (1997)] で得られている．また，[腰塚 (1985)] では正方格子の $E_1(R), E_2(R), E_3(R)$ が求められている．さらに，[Stone (1991)] は長方形と六角形の内部の点から中心までの平均距離を，[Mathai (1999)] は三角形の内部の点から頂点までの距離分布を求めている．[Koshizuka, Kurita (1991)] は円盤上で一様に分布する点と固定点との平均距離を用いてウェーバー問題を解いている．任意の多角形上で一様に分布する点と固定点との平均距離は [栗田 (2001b)] で算出されている．

施設が密度 ρ でランダムに配置されているとき， k 次近隣距離分布 $f_k(r)$ と平均距離 $E_k(R)$ ，分散 $V_k(R)$ は [Dacey (1968)] で次のように導出されている

$$f_k(r) = \frac{2\rho\pi r(\rho\pi r^2)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\rho\pi r^2} \quad (2.8)$$

$$E_k(R) = \frac{(2k-1)!!}{(2k-2)!!} \frac{1}{2\sqrt{\rho}} \quad (2.9)$$

$$V_k(R) = \left[\frac{k}{\pi} - \left\{ \frac{(2k-1)!!}{2(2k-2)!!} \right\}^2 \right] \frac{1}{\rho}. \quad (2.10)$$

ランダム配置の距離分布は，規則的配置のように具体的な配置から計算するのではなく，施設の分布が一様にランダムであることを用いて確率論的アプローチから得られる．

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

以上求めた k 次近隣距離分布を図 2.7 に示す。ただし、施設密度は $\rho = 1$ としている。どの配置パターンにおいても分布は単峰であり、 k が大きくなるに従い全体が右へシフトする様子が分かる。また、規則的配置の距離分布は山頂が鋭いが、ランダム配置の分布は規則的配置に比べて山頂が丸く、分布の裾が長くなっており、施設から相当遠い利用者也存在する。

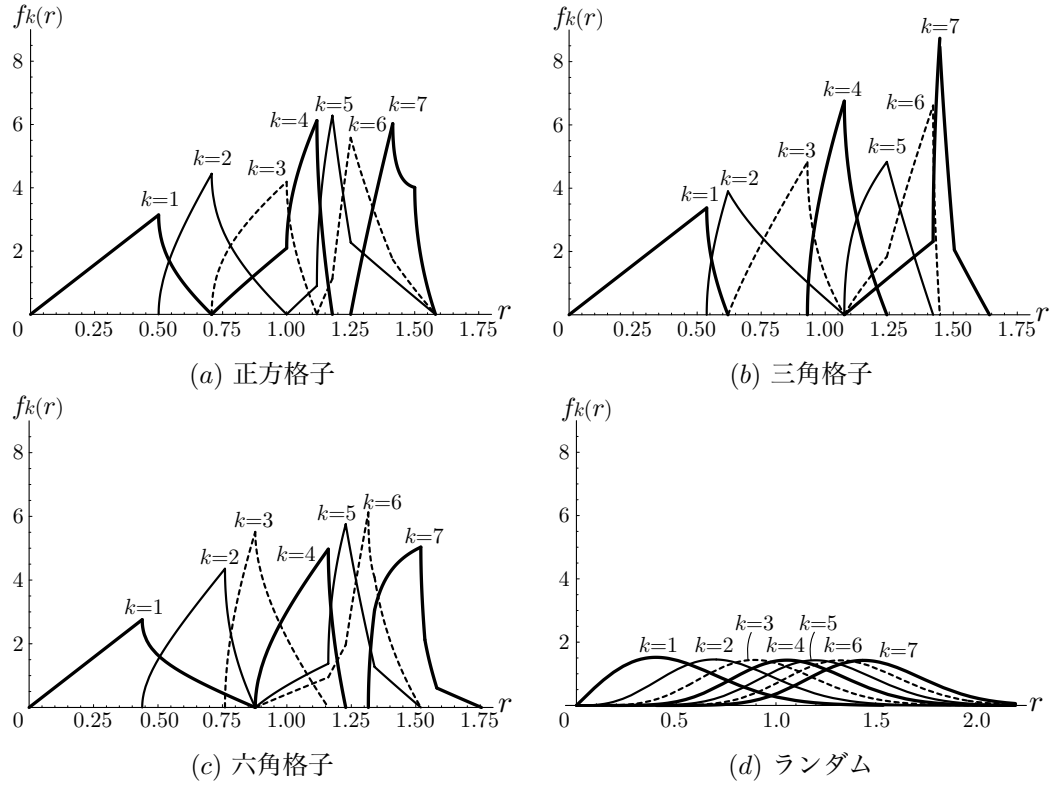


図 2.7: k 次近隣距離分布

2.2. k 次近隣距離分布

平均距離を数値で表現したものが表 2.1, 図示したものが図 2.8 である. 平均距離は全て施設密度 ρ の平方根に逆比例する. 最も近い施設までの平均距離 $E_1(R)$ は三角格子が最小となっているが, 2 番目 $E_2(R)$ は六角格子, 3 番目 $E_3(R)$ は三角格子, 4 番目 $E_4(R)$ は正方格子が小さくなっていることが分かる. さらに, 5, 6 番目 $E_5(R), E_6(R)$ は六角格子, 7 番目 $E_7(R)$ は三角格子が小さくなる. つまり, 施設の代替性を考慮すると, 三角格子は必ずしも最適な配置ではないといえる. k が大きくなると規則的配置とランダム配置の差も小さくなり, 正方格子の $E_5(R)$ がランダム配置の値を超えるように, これら 4 つの配置の違いはそれ程大きくないことが分かる.

表 2.1: k 番目に近い施設までの平均距離

平均距離	$E_1(R)$	$E_2(R)$	$E_3(R)$	$E_4(R)$	$E_5(R)$	$E_6(R)$	$E_7(R)$
正方格子	$0.383 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.700 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.908 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.023 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.243 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.309 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.413 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$
三角格子	$0.377 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.729 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.854 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.058 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.225 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.326 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.408 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$
六角格子	$0.404 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.663 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.909 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.066 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.220 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.282 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.453 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$
ランダム	$0.500 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.750 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.938 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.094 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.230 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.354 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.466 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$

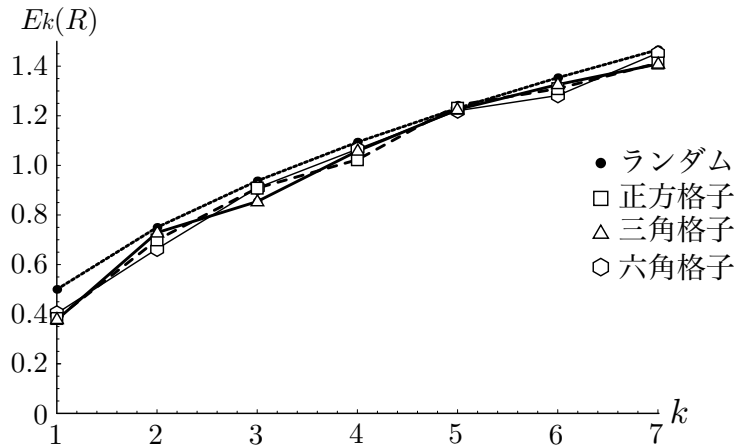


図 2.8: k 番目に近い施設までの平均距離

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

一方，標準偏差は表 2.2, 図 2.9 に示すようにランダム配置が明らかに大きい．最も近い施設までの距離の標準偏差 σ_1 は三角格子が最も小さく，2, 3 番目 σ_2, σ_3 は六角格子，4, 5, 6 番目 $\sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$ は三角格子，7 番目 σ_7 は正方格子が小さくなっている．

表 2.2: k 番目に近い施設までの標準偏差

標準偏差	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7
正方格子	$0.142 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.103 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.092 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.098 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.108 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.088 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.068 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$
三角格子	$0.135 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.119 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.091 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.064 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.077 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.080 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.106 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$
六角格子	$0.172 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.096 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.086 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.081 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.109 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.111 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.076 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$
ランダム	$0.261 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.272 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.276 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.277 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.278 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.279 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$0.279 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$

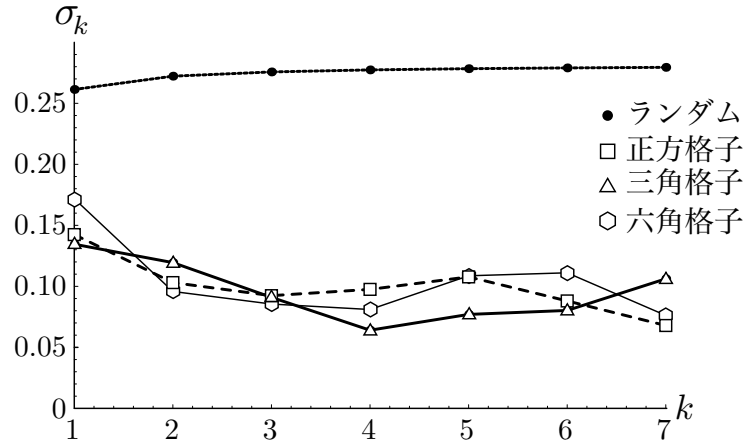


図 2.9: k 番目に近い施設までの標準偏差

既存研究では最近隣距離の平均値 $E_1(R)$ の比較だけで三角格子の最適性を論じているに過ぎなかった．本研究では平均値と標準偏差を 7 番目まで解析的に求めることにより，3 つの規則的配置の差は小さく，三角格子の最適性は必ずしも安定していないことを示すことができた．

2.3 頑健な配置

施設残存率と平均距離との関係を見ることによって配置の頑健性を評価しよう。どの施設も一様にかつ独立に利用できなくなると仮定する。そのときの利用可能な最寄り施設までの平均距離 $E(R)$ は k 次近隣距離の平均値 $E_k(R)$ に k 番目に近い施設を利用する確率を乗ずることにより

$$E(R) = p \sum_{k=1}^{\infty} (1-p)^{k-1} E_k(R) \quad (2.11)$$

と表される。これを最小とする配置が最適であるとしよう。しかし、全ての $E_k(R)$ を求めることは実質上不可能なので、 $E(R)$ も厳密に求めることはできない。その一方で、少なくとも $p = 1$ のときは三角格子が最適であることが分かっており、また式 (2.11) は p に関して連続関数である。より高次の距離に対応する重みは一定比率 $(1-p)$ で逓減する。そこで、前節で求めた 7 番目までの $E_k(R)$ の厳密な値とそれ以降の高次の距離については上限値と下限値を用いることにより、三角格子が最適となり得る p の下限値を求めることで目的の一部を果たすことにしよう。

k 次近隣距離の平均値 $E_k(R)$ の上限値と下限値は、それぞれ施設が k 番目に近い領域からその施設までの距離の上限値と下限値とみなすことができる。ここで、施設が k 番目に近い領域とは、図 2.10 のように領域内に中心を持つ円を描いたとき、円周上にその施設があり、円の内部に他の $k-1$ 個の施設が含まれるようにできる領域である。したがって、 k 番目に近い領域から施設までの距離の上限値と下限値は、円周も含めて内部に k 個の施設を含む円の半径の上限値と下限値であるといえる。これは、ある半径 r の円を与えたときにその内部に含まれる施設数 k の上限値と下限値を求めることに帰着する。

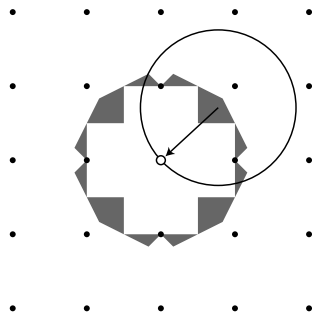


図 2.10: 施設が k 番目に近い領域

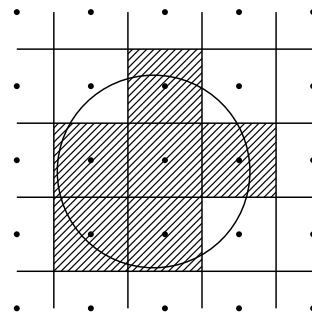


図 2.11: 円の内部に含まれる施設

さて、円の内部に含まれる施設を中心とする正方形の面積の総和と、円の面積との関係を見てみよう (図 2.11)。両者の差は高々円周と交わる全ての正方形の面積の和である。正

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

方形の1辺の長さを a とすると、正方形内の最大距離は $\sqrt{2}a$ であるから、円周と交わる正方形は全て、半径がそれぞれ $r + \sqrt{2}a, r - \sqrt{2}a$ である2つの円の間に挟まれた幅 $2\sqrt{2}a$ の円環の中に含まれている [Hilbert, Cohn-Vossen (1932)]. したがって、

$$\pi(r - \sqrt{2}a)^2 < ka^2 < \pi(r + \sqrt{2}a)^2 \quad (2.12)$$

という関係が成立する. これを変形して r を $E_k(R)$ とし、施設密度 ρ を用いて表現すると

$$\left(\sqrt{\frac{k}{\pi}} - \sqrt{2} \right) \frac{1}{\sqrt{\rho}} < E_k(R) < \left(\sqrt{\frac{k}{\pi}} + \sqrt{2} \right) \frac{1}{\sqrt{\rho}} \quad (2.13)$$

と得られる. 上式の右辺と左辺をそれぞれ $k = 8$ 以降の k 次近隣距離の平均値 $E_k(R)$ の上限値と下限値とみなす.

式 (2.13) より、正方格子における平均距離の上限値は

$$\begin{aligned} E(R) &< p \sum_{k=1}^7 (1-p)^{k-1} E_k(R) + p \sum_{k=8}^{\infty} (1-p)^{k-1} \left(\sqrt{\frac{k}{\pi}} + \sqrt{2} \right) \frac{1}{\sqrt{\rho}} \\ &= p \sum_{k=1}^7 (1-p)^{k-1} E_k(R) + \frac{p(1-p)^7}{\sqrt{\rho}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \Phi \left(1-p, -\frac{1}{2}, 8 \right) + \frac{\sqrt{2}}{p} \right\} \end{aligned} \quad (2.14)$$

とできる. ここで $\Phi(\cdot)$ はレルヒの超越関数 $\Phi(z, s, a) = \sum_{k=0}^{\infty} z^k / (a+k)^s$. 一方下限値は、 $E_8(R) > E_7(R), E_9(R) > E_7(R), E_{10}(R) > E_7(R), \dots$ であり、 $k = 25$ までは $E_7(R)$ の方が式 (2.13) の左辺よりも大きいので、両者の大きい方を用いることにすると、

$$\begin{aligned} E(R) &> p \sum_{k=1}^7 (1-p)^{k-1} E_k(R) + p \sum_{k=8}^{25} (1-p)^{k-1} E_7(R) \\ &\quad + p \sum_{k=26}^{\infty} (1-p)^{k-1} \left(\sqrt{\frac{k}{\pi}} - \sqrt{2} \right) \frac{1}{\sqrt{\rho}} \\ &= p \sum_{k=1}^7 (1-p)^{k-1} E_k(R) + p \sum_{k=8}^{25} (1-p)^{k-1} E_7(R) \\ &\quad + \frac{p(1-p)^{25}}{\sqrt{\rho}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \Phi \left(1-p, -\frac{1}{2}, 26 \right) - \frac{\sqrt{2}}{p} \right\} \end{aligned} \quad (2.15)$$

となる. 三角格子、六角格子についても同様に平均距離の上限値と下限値を求めることができる. これより三角格子の上限値が正方格子の下限値、および六角格子の下限値よりも小さくなる p の範囲は p に関する不等式を解くことにより、

$$0.6869 < p \leq 1 \quad (2.16)$$

2.3. 頑健な配置

と求まる．単純な論法ではあるが，少なくとも残存率が68.7%以上のときには三角格子が正方格子や六角格子よりも効率の良い配置になることを証明できた．

命題 2.2 利用者が一様に分布する無限平面上に施設が規則的に配置されているとする．施設が一様にかつ独立に閉鎖される場合，施設残存率が68.7%以上のときには三角格子の平均距離が正方格子や六角格子の平均距離よりも小さい．

また，標準偏差で同様の範囲を求めると， $0.8875 < p \leq 1$ と得られる．図 2.12, 図 2.13 はそれぞれ上で求めた平均距離と標準偏差の三角格子の上限値，および正方格子・六角格子の下限値を表しており，上の範囲で三角格子の上限値が正方格子や六角格子の下限値よりも小さくなっていることが読み取れる．

施設が密度 ρ で一様にランダムに分布しているとき，施設残存率が p であるときの平均距離 $E(R)$ と分散 $V(R)$ は [Clark, Evans (1954)] から

$$E(R) = \frac{1}{2\sqrt{p\rho}} \quad (2.17)$$

$$V(R) = \frac{4 - \pi}{4\pi p\rho} \quad (2.18)$$

となる．平均距離を規則的配置と比較すると， $p = 1$ のときには正方格子は 23.5%，三角格子は 24.6%，六角格子は 19.3% ランダム配置より効率が良いことが分かる． p が小さくなるとその差は縮まり， $p = 0.5$ のときには上限値で見ると正方格子は 9.7%，三角格子は 10.0%，六角格子は 9.1% となる．

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

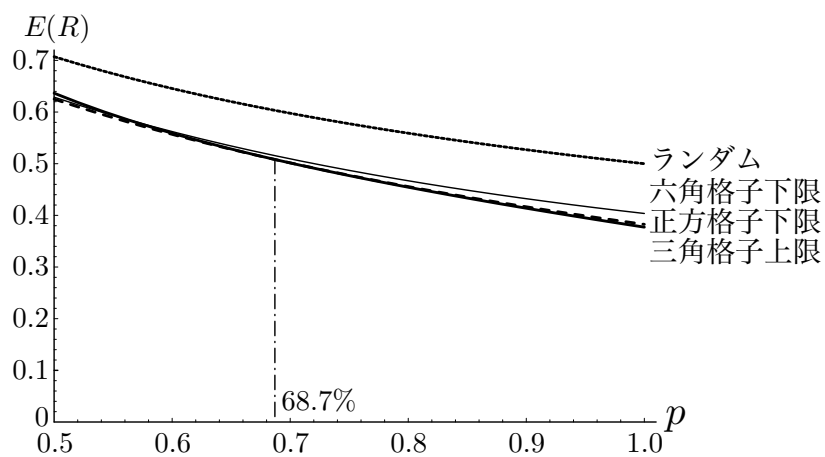


図 2.12: 施設閉鎖時の平均距離

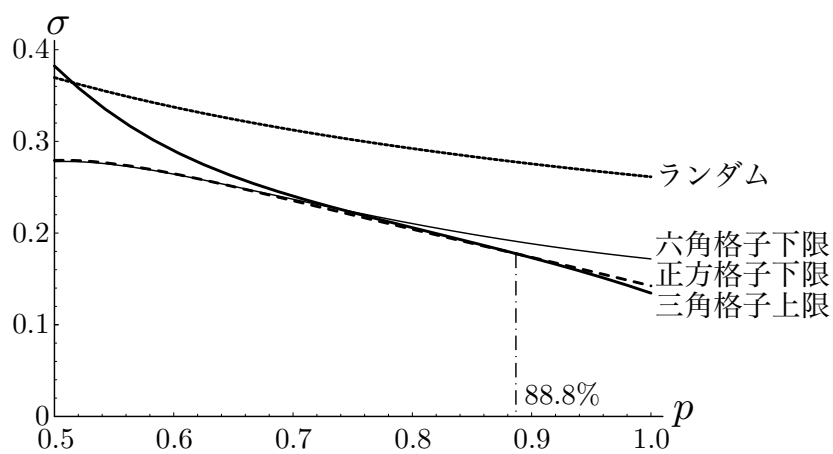


図 2.13: 施設閉鎖時の標準偏差

2.4 実際の施設配置

実際の施設配置は規則的配置でもランダム配置でもなく、両者の中間的な配置であることが多い。人口分布も一様ではなく、地域によって偏りがある。また、公共施設の場合には利用できる施設が行政界で囲まれた有限の領域に限定されていることも多い。本節では、規則的配置やランダム配置を用いて得られた結果が、どの程度実際の施設に対しても成立するのかを検証する。

図 2.14 に示すつくば市小学校配置を対象とする。小学校は人口の集中している学園地区に多くあるものの、市域全体に広がっていることが分かる。人口分布は町丁目別人口を用い、全て町丁目の代表点に居住していると仮定する。施設までの距離は町丁目の代表点からの直線距離とする。そして、人口分布を考慮して施設までの距離分布、平均距離を求める。

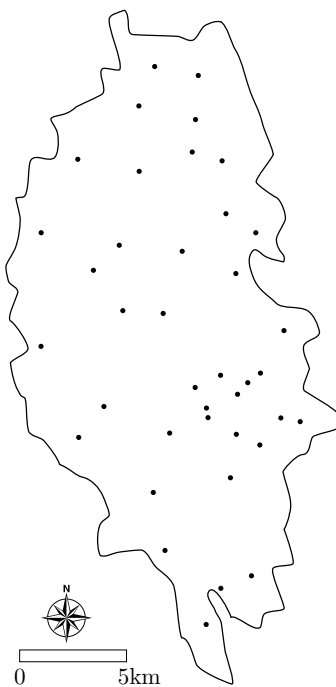


図 2.14: つくば市小学校

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

図 2.15～図 2.21 は実際のつくば市小学校配置, および等しい施設密度での正方格子, 三角格子, 六角格子, ランダム配置における k 次近隣距離分布である. ただし, 施設密度 ρ は小学校数が 39, つくば市の面積が 284.07km^2 であることから, $\rho = 39/284.07$ とする.

図 2.15 の最近隣距離分布より, 小学校から近いところにいる利用者が規則的配置・ランダム配置よりも多くなっていることが分かる. これは, 人口が多い学園地区に小学校が多くあるためであろう. $k = 2$ 以降では, 実際の配置での距離分布は規則的配置よりもランダム配置に近いといえる. ただ, ランダム配置と比べても分散が大きく, 小学校から近い利用者と遠い利用者の両方が多いことが読み取れる.

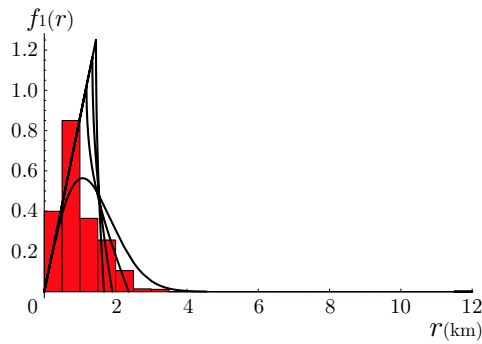


図 2.15: 最も近い小学校までの距離分布

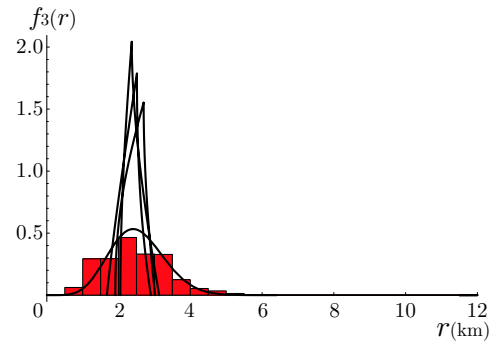
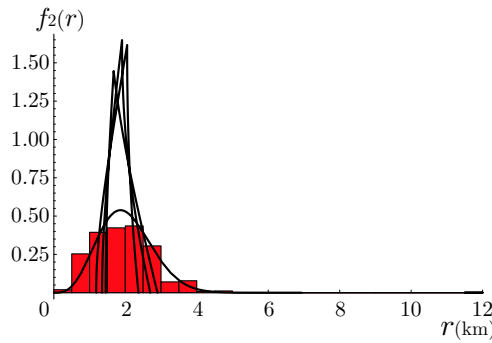


図 2.16: 2 番目に近い小学校までの距離分布 図 2.17: 3 番目に近い小学校までの距離分布

2.4. 実際の施設配置

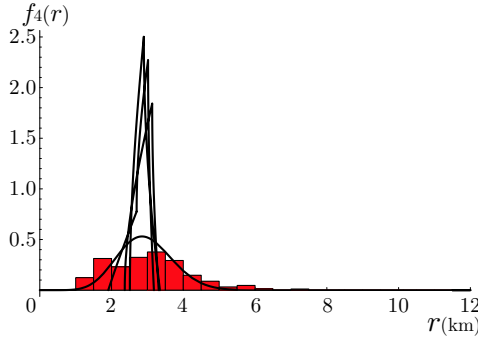


図 2.18: 4 番目に近い小学校までの距離分布

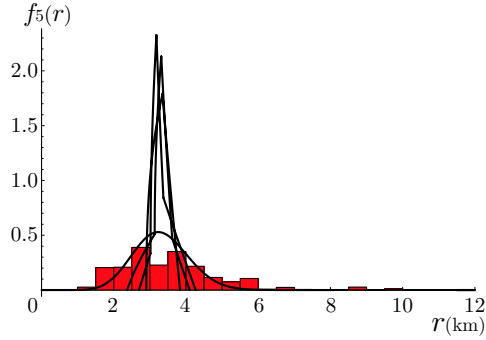


図 2.19: 5 番目に近い小学校までの距離分布

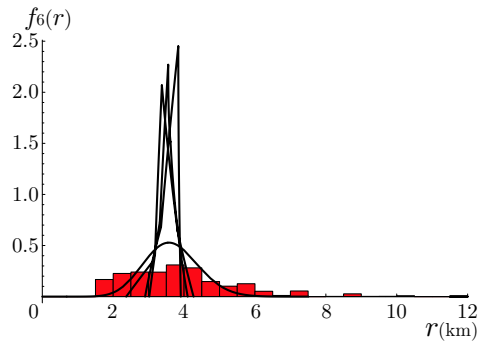


図 2.20: 6 番目に近い小学校までの距離分布

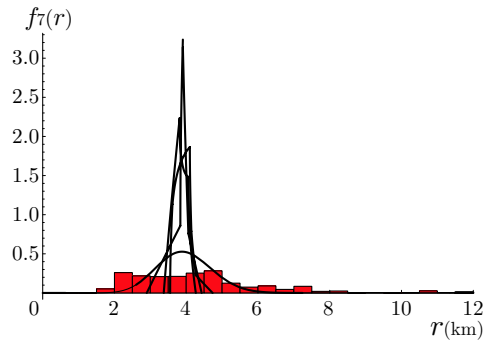


図 2.21: 7 番目に近い小学校までの距離分布

表 2.3 はつくば市の小学校配置, および等しい施設密度での正方格子, 三角格子, 六角格子, ランダム配置における k 番目に近い小学校までの平均距離 $E_k(R)$ ($k = 1, \dots, 7$) を表している. つくば市の平均距離を規則的配置・ランダム配置と比較すると, 距離分布と同様に, k が小さいときは小さく, k が大きいときは大きくなる傾向がある. しかし, $k = 4$ くらいまでは規則的配置・ランダム配置と比較的近い値が出ている.

表 2.3: k 番目に近い小学校までの平均距離 (km)

配置	$E_1(R)$	$E_2(R)$	$E_3(R)$	$E_4(R)$	$E_5(R)$	$E_6(R)$	$E_7(R)$
つくば市	0.97	1.91	2.42	3.03	3.54	3.90	4.29
正方格子	1.03	1.89	2.45	2.76	3.35	3.53	3.81
三角格子	1.02	1.97	2.31	2.85	3.31	3.58	3.80
六角格子	1.09	1.79	2.45	2.88	3.29	3.46	3.92
ランダム	1.35	2.02	2.53	2.95	3.32	3.65	3.96

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

図 2.22 は小学校を一様にかつ独立に閉鎖した際の平均距離を同一密度の三角格子，ランダム配置と比較したものである．つくば市の配置の平均距離は閉鎖施設数を $0, 1, \dots, 19$ としたときの閉鎖の組合せパターンをランダムに与えて求め，それぞれの計算過程を 10,000 回繰り返すシミュレーションの平均値をとっている．三角格子状配置については導出済みの上限値と下限値，ランダム配置については無限平面での理論式を用いている．小学校配置の平均距離は人口分布を考慮しているために，三角格子よりも小さくなっているが，その差は僅かであり p が小さくなるに従って縮小している．

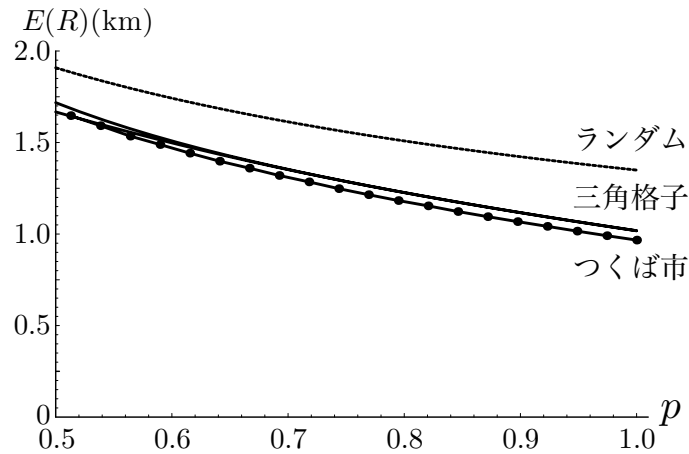


図 2.22: 小学校閉鎖時の平均距離

小学校配置の k 次近隣距離は k が大きいときに，規則的配置やランダム配置からの乖離が大きくなっていたため，残存率 p がさらに小さくなると，平均距離は急速に大きくなることが予想される．ただ，残存率が 0.5 程度までの閉鎖であれば，理論的に得られた結果は実際の配置に対してもある程度成立し，現実に応用する際にも十分意味があるといえるだろう．

2.4. 実際の施設配置

次に、配置の違いによる影響に注目するため、図 2.23 (b) に示すつくば市北部の小学校 (13 校) の配置を考える。図 2.23 (a), (c) はそれぞれ密度を等しくした三角格子、ランダム配置である。これより、北部小学校の配置は三角格子とランダム配置のほぼ中間にあることが見て取れる。ここでは、3つの配置において利用者が正方形領域内に一様に分布していると仮定した上で、小学校を閉鎖した際の平均距離を比較する。

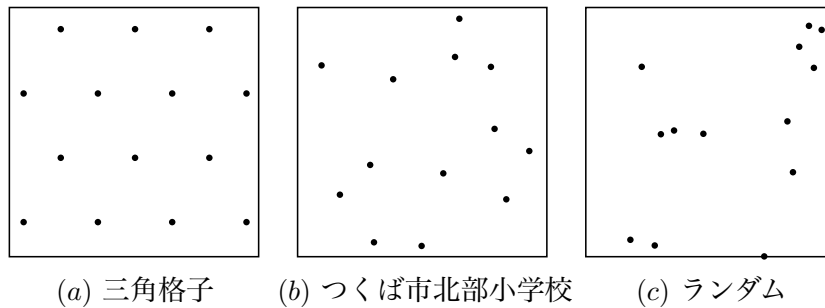


図 2.23: つくば市北部の小学校

図 2.24 は北部小学校を閉鎖した際の平均距離を同一密度の三角格子、ランダム配置と比較したものである。ただし、北部小学校配置の平均距離は閉鎖施設数を 1, 2, ..., 6 としたときの閉鎖の組合せパターンをランダムに与えて求め、それぞれの計算過程を 10,000 回繰り返すシミュレーションの平均値をとっている。また、利用者は領域内にランダムに発生させた 1,000 点で代表させた。三角格子とランダム配置については理論式を用いている。北部小学校配置の平均距離は三角格子とランダム配置のほぼ中間にあることが分かる。したがって、実際の施設配置に多く見られる規則的配置とランダム配置の中間的な配置は、施設閉鎖時の平均距離という点においても、両者の中間となることが推測できる。

なお、実際の施設配置には商業施設に見られるような集中型の配置も存在する。しかし、公共施設のように全ての住民にサービスを提供することが求められる場合には、集中型配置はランダム配置よりもさらに効率が悪い。その上、災害発生時には被害が集中して全ての施設が閉鎖されてしまう可能性もある。それゆえ、集中型配置は頑健な配置とはなり得ない。

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

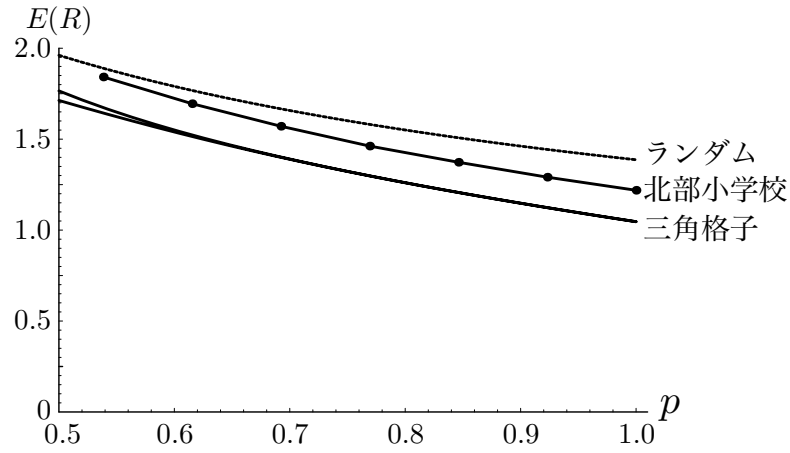


図 2.24: 北部小学校閉鎖時の平均距離

前節までの規則的配置やランダム配置での分析では無限平面を仮定しており，任意の地点で近い施設を全方向に亘って探すことができる．一方，実際の配置は有限の領域で考えるため，境界付近では全方向を同じように探すことができない．そのために， k が大きいときの距離が大きくなる．そこで，施設までの k 次近隣距離に境界が及ぼす影響に注目しよう．

図 2.25 のような 1 辺の長さが 10 である正方形領域に n 個の施設をランダムに配置し，利用者から k 番目に近い施設までの平均距離を求める．利用者は正方形領域内にランダムに発生させた 1,000 点で代表させる．この結果を無限平面でのランダム配置を仮定している式 (2.9) から得られる平均距離と比較する．

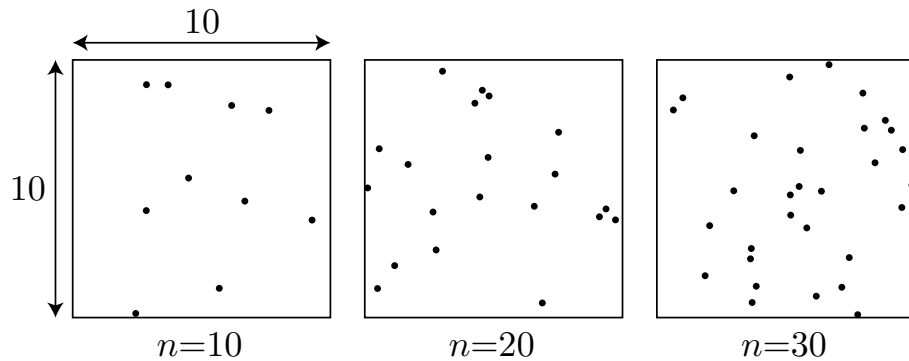


図 2.25: 有限平面上のランダム配置

2.4. 実際の施設配置

表 2.4 は施設数 n を 10, 20, 30 と変化させたときの、有限平面と無限平面の平均距離を示している。 n が大きいとき最近隣距離の平均値 $E_1(R)$ は近い値が出ているが、 k が大きくなるにつれ有限平面の距離は無限平面に比べて大きくなる傾向にある。特にそれは施設数 n が小さいときに顕著である。したがって、施設数が少なく、施設残存率が小さいときには理論的に得られた結果を実際に適用すると移動距離を過小評価してしまう可能性がある。

表 2.4: 有限平面と無限平面の平均距離

施設数		$E_1(R)$	$E_2(R)$	$E_3(R)$	$E_4(R)$	$E_5(R)$	$E_6(R)$	$E_7(R)$
$n = 10$	有限	1.47	2.46	3.44	4.06	4.63	5.35	5.97
	無限	1.58	2.37	2.96	3.46	3.89	4.28	4.64
$n = 20$	有限	1.20	1.91	2.30	2.74	3.14	3.51	3.95
	無限	1.12	1.68	2.10	2.45	2.75	3.03	3.28
$n = 30$	有限	0.95	1.47	1.99	2.29	2.61	2.94	3.27
	無限	0.91	1.37	1.71	2.00	2.25	2.47	2.68

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

2.5 まとめ

本章では、平面上に点的に分布する施設が閉鎖されたときのサービス低下を把握するために、施設閉鎖に伴って利用可能な最寄り施設までの距離が増加する状況を考察した。本章で得られた知見は以下の3点である。

- (1) 施設の立地場所として規則的配置とランダム配置を考え、1～7番目に近い施設までの距離分布ならびに平均距離、距離の標準偏差を解析的に導いた。これら高次での結果は既存研究では知られていない。そして、2番目に近い施設までの平均距離は三角格子が最小とはならず、「三角格子状配置が最適である」という通説は施設が閉鎖される場合には必ずしも成立しないことを示した。
- (2) どの施設も一様にかつ独立に閉鎖されるという仮定の下で、最寄りの利用可能な施設までの平均距離の上限値・下限値を求めた。施設残存率が少なくとも68.7%以上のときには三角格子が正方格子や六角格子よりも効率の良い配置になることを証明した。
- (3) 無限平面や人口分布の一様性を仮定して得られた結果の有効性や安定性を検証するため、実際のつくば市小学校配置で人口分布を考慮して小学校までの距離分布や小学校を閉鎖させた際の平均距離を求めた。これらを規則的配置やランダム配置で得られた結果と比較することにより、強力な仮定の下での分析がある程度現実の問題に適用可能であることを確認した。

なお、平面上の人口密度を扱いやすい関数で再現することができれば、人口分布に基づいたモデルへの拡張も可能である。そのような人口密度分布としてはClark型、Sherratt-Tanner型、Newling型が代表的である[奥平(1976)]。

2.A 付録

平面上の規則的配置における k 次近隣距離分布 $f_k(r)$ と平均値 $E_k(R)$, 2 乗の平均値 $E_k(R^2)$ ($k = 1, \dots, 7$) を以下に示す. ただし, 施設密度を ρ とする.

正方格子

$$f_1(r) = \begin{cases} 2\rho\pi r & \left(0 < r \leq \frac{1}{2\sqrt{\rho}}\right) \\ 2\rho\pi r - 8\rho r \arccos \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} & \left(\frac{1}{2\sqrt{\rho}} < r < \frac{1}{\sqrt{2\rho}}\right) \end{cases} \quad (2.19)$$

$$f_2(r) = \begin{cases} 8\rho r \arccos \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} & \left(\frac{1}{2\sqrt{\rho}} < r \leq \frac{1}{\sqrt{2\rho}}\right) \\ 2\rho\pi r - 8\rho r \arccos \frac{1}{\sqrt{2\rho r}} & \left(\frac{1}{\sqrt{2\rho}} < r < \frac{1}{\sqrt{\rho}}\right) \end{cases} \quad (2.20)$$

$$f_3(r) = \begin{cases} 2\rho\pi r + 8\rho r \left(\arccos \frac{1}{\sqrt{2\rho r}} - \arccos \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} \right) & \left(\frac{1}{\sqrt{2\rho}} < r \leq \frac{1}{\sqrt{\rho}}\right) \\ 8\rho r \left(\arcsin \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{\rho r}} \right) & \left(\frac{1}{\sqrt{\rho}} < r < \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho}}\right) \end{cases} \quad (2.21)$$

$$f_4(r) = \begin{cases} 8\rho r \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} \right) & \left(\frac{1}{\sqrt{2\rho}} < r \leq \frac{1}{\sqrt{\rho}}\right) \\ 8\rho r \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} + \arccos \frac{1}{\sqrt{\rho r}} \right. \\ \quad \left. - \arccos \frac{1}{\sqrt{2\rho r}} \right) & \left(\frac{1}{\sqrt{\rho}} < r \leq \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho}}\right) \\ 8\rho r \left(\frac{\pi}{2} - 2 \arccos \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{2\rho r}} \right) & \left(\frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho}} < r < \frac{5\sqrt{2}}{6\sqrt{\rho}}\right) \end{cases} \quad (2.22)$$

$$f_5(r) = \begin{cases} 8\rho r \left(-\frac{\pi}{4} + \arccos \frac{1}{\sqrt{2\rho r}} \right) & \left(\frac{1}{\sqrt{\rho}} < r \leq \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho}}\right) \\ 8\rho r \left(\frac{\pi}{4} + 2 \arccos \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho r}} + \arccos \frac{1}{\sqrt{2\rho r}} \right. \\ \quad \left. - \arccos \frac{1}{\sqrt{\rho r}} - \arccos \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} \right) & \left(\frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho}} < r \leq \frac{5\sqrt{2}}{6\sqrt{\rho}}\right) \\ 8\rho r \left(\frac{5}{4}\pi - 2 \arccos \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{\rho r}} \right. \\ \quad \left. - \arccos \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{2\rho r}} \right) & \left(\frac{5\sqrt{2}}{6\sqrt{\rho}} < r \leq \frac{5}{4\sqrt{\rho}}\right) \\ 8\rho r \left(\frac{3}{4}\pi - \arccos \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{2\rho r}} \right) & \left(\frac{5}{4\sqrt{\rho}} < r < \frac{\sqrt{10}}{2\sqrt{\rho}}\right) \end{cases} \quad (2.23)$$

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

$$f_6(r) = \begin{cases} 8\rho r \left(\arccos \frac{1}{\sqrt{\rho r}} - \arcsin \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} \right) & \left(\frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho}} < r \leq \frac{5\sqrt{2}}{6\sqrt{\rho}} \right) \\ 8\rho r \left(-\frac{\pi}{2} + 2 \arccos \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho r}} + \arccos \frac{1}{\sqrt{\rho r}} \right. \\ \quad \left. + \arccos \frac{1}{\sqrt{2\rho r}} - \arcsin \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} \right) & \left(\frac{5\sqrt{2}}{6\sqrt{\rho}} < r \leq \frac{5}{4\sqrt{\rho}} \right) \\ 8\rho r \left(\arccos \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} + \arccos \frac{1}{\sqrt{2\rho r}} \right. \\ \quad \left. - \arccos \frac{1}{\sqrt{\rho r}} - 2 \arccos \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho r}} \right) & \left(\frac{5}{4\sqrt{\rho}} < r \leq \sqrt{\frac{2}{\rho}} \right) \\ 8\rho r \left(-\frac{\pi}{4} + \arccos \frac{1}{2\sqrt{\rho r}} + \arccos \frac{1}{\sqrt{2\rho r}} - 2 \arccos \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho r}} \right) & \left(\sqrt{\frac{2}{\rho}} < r < \frac{\sqrt{10}}{2\sqrt{\rho}} \right) \end{cases} \quad (2.24)$$

$$f_7(r) = \begin{cases} 8\rho r \left(-\frac{\pi}{2} + \arccos \frac{1}{\sqrt{\rho r}} + 2 \arccos \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho r}} \right) & \left(\frac{5}{4\sqrt{\rho}} < r \leq \sqrt{\frac{2}{\rho}} \right) \\ 8\rho r \left(-\frac{\pi}{4} + 2 \arccos \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho r}} - \arccos \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\rho r}} \right) & \left(\sqrt{\frac{2}{\rho}} < r \leq \frac{3}{2\sqrt{\rho}} \right) \\ 8\rho r \left(-\frac{\pi}{4} + 2 \arccos \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{\rho r}} - \arccos \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\rho r}} - \arccos \frac{3}{2\sqrt{\rho r}} \right) & \left(\frac{3}{2\sqrt{\rho}} < r < \frac{\sqrt{10}}{2\sqrt{\rho}} \right) \end{cases} \quad (2.25)$$

$$E_1(R) = \frac{1}{6\sqrt{\rho}} \left\{ \sqrt{2} + \log(1 + \sqrt{2}) \right\} \quad (2.26)$$

$$E_1(R^2) = \frac{1}{6\rho} \quad (2.27)$$

$$E_2(R) = \frac{1}{6\sqrt{\rho}} (2\sqrt{2} - 1) \left\{ \sqrt{2} + \log(1 + \sqrt{2}) \right\} \quad (2.28)$$

$$E_2(R^2) = \frac{1}{2\rho} \quad (2.29)$$

$$E_3(R) = \frac{1}{6\sqrt{\rho}} \left\{ -4 - \sqrt{2} + 4\sqrt{5} - (1 + 2\sqrt{2}) \log(1 + \sqrt{2}) \right. \\ \left. + \log(2 + \sqrt{5}) + 8 \log \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right\} \quad (2.30)$$

$$E_3(R^2) = \frac{5}{6\rho} \quad (2.31)$$

$$E_4(R) = \frac{1}{6\sqrt{\rho}} \left\{ -4 + 11\sqrt{2} - 4\sqrt{5} + 2\sqrt{2} \log(3\sqrt{2} - 3) \right. \\ \left. + 10\sqrt{5} \log \frac{1 + \sqrt{10}}{3} - 8 \log \frac{1 + \sqrt{5}}{2} - \log \frac{2 + \sqrt{5}}{1 + \sqrt{2}} \right\} \quad (2.32)$$

$$E_4(R^2) = \frac{19}{18\rho} \quad (2.33)$$

$$E_5(R) = \frac{1}{6\sqrt{\rho}} \left\{ 24 - 20\sqrt{2} - 4\sqrt{5} + 7\sqrt{10} + 10\sqrt{5} \log \frac{9(5 + \sqrt{5})}{20\sqrt{2} + 22\sqrt{5}} \right. \\ \left. + 8 \log \frac{4}{1 + \sqrt{5}} + \log \frac{3 + \sqrt{10}}{2 + \sqrt{5}} + 2\sqrt{2} \log \frac{2 + \sqrt{5}}{9(\sqrt{2} - 1)} \right\} \quad (2.34)$$

$$E_5(R^2) = \frac{14}{9\rho} \quad (2.35)$$

$$E_6(R) = \frac{1}{6\sqrt{\rho}} \left\{ -40 + 18\sqrt{2} + 4\sqrt{5} + 3\sqrt{10} + 8 \log \frac{(1 + \sqrt{2})(1 + \sqrt{5})}{8} \right. \\ \left. - \log \frac{3 + \sqrt{10}}{2 + \sqrt{5}} - 2\sqrt{2} \log \frac{2 + \sqrt{5}}{3} + 10\sqrt{5} \log \frac{4\sqrt{5}(1 + \sqrt{2})(5\sqrt{2} + \sqrt{5})}{30(3 + \sqrt{5})} \right\} \quad (2.36)$$

$$E_6(R^2) = \frac{31}{18\rho} \quad (2.37)$$

$$E_7(R) = \frac{1}{6\sqrt{\rho}} \left\{ 20 - 8\sqrt{2} - 3\sqrt{10} + 16\sqrt{2} \log \frac{1 + \sqrt{5}}{2} + 27 \log \frac{1 + \sqrt{10}}{3} \right. \\ \left. - 8 \log \frac{1 + \sqrt{2}}{2} - 10\sqrt{5} \log \frac{2\sqrt{5}(1 + \sqrt{2})}{5 + \sqrt{5}} \right\} \quad (2.38)$$

$$E_7(R^2) = \frac{2}{\rho} \quad (2.39)$$

三角格子

$$f_1(r) = \begin{cases} 2\rho\pi r & \left(0 < r \leq \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 2\rho\pi r - 12\rho r \arccos \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho}} & \left(\frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho}} < r < \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \right) \end{cases} \quad (2.40)$$

$$f_2(r) = \begin{cases} 12\rho r \arccos \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho}} & \left(\frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho}} < r \leq \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 4\rho\pi r - 12\rho r \arccos \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho}} & \left(\sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} < r < \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\rho}} \right) \end{cases} \quad (2.41)$$

$$f_3(r) = \begin{cases} 12\rho r \left(-\frac{\pi}{6} + \arccos \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho}} \right) & \left(\sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2\rho}} \right) \\ 12\rho r \left(-\frac{\pi}{6} + \arccos \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho}} - \arccos \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho}} \right) & \left(\sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2\rho}} < r < \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\rho}} \right) \end{cases} \quad (2.42)$$

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

$$f_4(r) = \begin{cases} 12\rho r \arccos \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} & \left(\sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2\rho}} < r \leq \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 12\rho r \left(\frac{\pi}{6} - \arccos \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\rho}} < r < \sqrt{\frac{8}{3\sqrt{3}\rho}} \right) \end{cases} \quad (2.43)$$

$$f_5(r) = \begin{cases} 12\rho r \left(\frac{\pi}{6} + \arccos \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\rho}} < r \leq \sqrt{\frac{8}{3\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 12\rho r \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\sqrt{\frac{8}{3\sqrt{3}\rho}} < r < \sqrt{\frac{7}{2\sqrt{3}\rho}} \right) \end{cases} \quad (2.44)$$

$$f_6(r) = \begin{cases} 12\rho r \left(\frac{\pi}{6} + \arccos \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\rho}} < r \leq \sqrt{\frac{8}{3\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 12\rho r \left(\arccos \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} + \arccos \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\sqrt{\frac{8}{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \sqrt{\frac{7}{2\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 12\rho r \left(\frac{\pi}{6} + \arccos \frac{3\sqrt{21}}{14} + \arccos \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} - 2 \arccos \frac{\sqrt{7}}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\sqrt{\frac{7}{2\sqrt{3}\rho}} < r < \frac{7}{3} \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \right) \end{cases} \quad (2.45)$$

$$f_7(r) = \begin{cases} 12\rho r \left(-\frac{\pi}{3} + \arccos \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\rho}} < r \leq \sqrt{\frac{7}{2\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 12\rho r \left(2 \arccos \frac{\sqrt{7}}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} + \arccos \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} - \arcsin \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{7}} \right) & \left(\sqrt{\frac{7}{2\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{7}{3} \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 12\rho r \left(\frac{7}{6}\pi - 2 \arccos \frac{\sqrt{7}}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{7}{3} \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{7}{5} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 12\rho r \left(\frac{2}{3}\pi - \arccos \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{7}{5} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\rho}} < r < \frac{\sqrt{14}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \right) \end{cases} \quad (2.46)$$

$$E_1(R) = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} \log \sqrt{3} \right) \quad (2.47)$$

$$E_1(R^2) = \frac{5}{18\sqrt{3}\rho} \quad (2.48)$$

$$E_2(R) = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \left\{ \sqrt{3} - \frac{2}{3} + \frac{1}{2} \log(2 + \sqrt{3}) - \log \sqrt{3} \right\} \quad (2.49)$$

$$E_2(R^2) = \frac{17}{18\sqrt{3}\rho} \quad (2.50)$$

$$E_3(R) = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{1+3\sqrt{3}}{2} \log \sqrt{3} - \frac{1}{2} \log(2 + \sqrt{3}) \right\} \quad (2.51)$$

$$E_3(R^2) = \frac{23}{18\sqrt{3}\rho} \quad (2.52)$$

$$E_4(R) = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \left\{ \frac{8}{3} - \sqrt{3} + \left(4 - \frac{3\sqrt{3}}{2} \right) \log \sqrt{3} \right\} \quad (2.53)$$

$$E_4(R^2) = \frac{35}{18\sqrt{3}\rho} \quad (2.54)$$

$$E_5(R) = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \left(-\frac{16}{3} - \sqrt{3} + 2\sqrt{21} + 4 \log \frac{\sqrt{3} + \sqrt{7}}{6} + \frac{3\sqrt{3}}{2} \log \frac{2 + \sqrt{7}}{3} \right) \quad (2.55)$$

$$E_5(R^2) = \frac{47}{18\sqrt{3}\rho} \quad (2.56)$$

$$E_6(R) = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \left(\frac{87}{9} - 2\sqrt{21} + 7\sqrt{7} \log \frac{1+2\sqrt{7}}{3\sqrt{3}} - 4 \log \frac{3+\sqrt{21}}{6} \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \log \frac{9}{3+2\sqrt{3}} - \frac{3\sqrt{3}}{2} \log \frac{2+\sqrt{7}}{3} \right) \quad (2.57)$$

$$E_6(R^2) = \frac{55}{18\sqrt{3}\rho} \quad (2.58)$$

$$E_7(R) = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \left\{ -14 + 8\sqrt{3} + \frac{13\sqrt{7}}{3} - 2\sqrt{21} + 7\sqrt{7} \log \frac{27(14+\sqrt{21})}{5(28+29\sqrt{7})} \right. \\ \left. + \frac{3\sqrt{3}}{2} \log \frac{5}{2+\sqrt{7}} + 4 \log \frac{4+2\sqrt{7}}{3+\sqrt{21}} + \frac{1}{2} \log \frac{(3+2\sqrt{3})(5+2\sqrt{7})}{81} \right\} \quad (2.59)$$

$$E_7(R^2) = \frac{311}{90\sqrt{3}\rho} \quad (2.60)$$

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

六角格子

$$f_1(r) = \begin{cases} 2\rho\pi r & \left(0 < r \leq \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}}\right) \\ 2\rho\pi r - 6\rho r \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} & \left(\frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r < \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}}\right) \end{cases} \quad (2.61)$$

$$f_2(r) = \begin{cases} 6\rho r \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} & \left(\frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{1}{\sqrt{\sqrt{3}\rho}}\right) \\ 6\rho r \left(\arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} - 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{1}{\sqrt{\sqrt{3}\rho}} < r < \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}}\right) \end{cases} \quad (2.62)$$

$$f_3(r) = \begin{cases} 12\rho r \arccos \frac{1}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} & \left(\frac{1}{\sqrt{\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}}\right) \\ 6\rho r \left(\arcsin \frac{1}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r < \sqrt{\frac{7}{3\sqrt{3}\rho}}\right) \end{cases} \quad (2.63)$$

$$f_4(r) = \begin{cases} 6\rho r \arccos \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} & \left(\frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \sqrt{\frac{7}{3\sqrt{3}\rho}}\right) \\ 6\rho r \left(\frac{\pi}{2} - 2 \arccos \frac{\sqrt{7}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\sqrt{\frac{7}{3\sqrt{3}\rho}} < r < \frac{14}{5\sqrt{3\sqrt{3}\rho}}\right) \end{cases} \quad (2.64)$$

$$f_5(r) = \begin{cases} 6\rho r \left(\frac{\pi}{6} + \arccos \frac{1}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \sqrt{\frac{7}{3\sqrt{3}\rho}}\right) \\ 6\rho r \left(\frac{2}{3}\pi + 2 \arccos \frac{\sqrt{7}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right. \\ \quad \left. - \arccos \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\sqrt{\frac{7}{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{14}{5\sqrt{3\sqrt{3}\rho}}\right) \\ 6\rho r \left(\frac{5}{3}\pi - 2 \arccos \frac{\sqrt{7}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right. \\ \quad \left. - 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{14}{5\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{2\sqrt{7}}{3\sqrt{\sqrt{3}\rho}}\right) \\ 6\rho r \left(\frac{2}{3}\pi - 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{2\sqrt{7}}{3\sqrt{\sqrt{3}\rho}} < r < \frac{2}{\sqrt{\sqrt{3}\rho}}\right) \end{cases} \quad (2.65)$$

$$f_6(r) = \begin{cases} 6\rho r \left(-\frac{\pi}{3} + \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \sqrt{\frac{7}{3\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 6\rho r \left(-\frac{\pi}{3} + \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} + \arccos \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right. \\ \quad \left. - \arcsin \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\sqrt{\frac{7}{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{14}{5\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 6\rho r \left(-\frac{4}{3}\pi + \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} + \arccos \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right. \\ \quad \left. + 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} + 2 \arccos \frac{\sqrt{7}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{14}{5\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 6\rho r \left(-\frac{4}{3}\pi + \arccos \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} + 2 \arccos \frac{\sqrt{7}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right. \\ \quad \left. + 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} + \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} - 2 \arccos \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{2\sqrt{7}}{3\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 6\rho r \left(-\frac{\pi}{3} + 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} - 2 \arccos \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{2\sqrt{7}}{3\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r < \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \right) \end{cases} \quad (2.66)$$

$$f_7(r) = \begin{cases} 12\rho r \arccos \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} & \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{2\sqrt{7}}{3\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 6\rho r \left(\pi - \arccos \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} + 2 \arccos \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right. \\ \quad \left. - 2 \arccos \frac{\sqrt{7}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{2\sqrt{7}}{3\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 6\rho r \left(\frac{4}{3}\pi - \arccos \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} - 2 \arccos \frac{\sqrt{7}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right. \\ \quad \left. - 2 \arccos \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} - \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{7}{2\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 6\rho r \left(\frac{\pi}{3} - \arccos \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} + \arcsin \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right. \\ \quad \left. - \arccos \frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{7}{2\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r \leq \frac{\sqrt{13}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \right) \\ 6\rho r \left(\frac{\pi}{3} - \arccos \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho r}} \right) & \left(\frac{\sqrt{13}}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} < r < \frac{4}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \right) \end{cases} \quad (2.67)$$

第2章 施設閉鎖時のアクセス距離

$$E_1(R) = \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{1}{6\sqrt{3}} \log(2 + \sqrt{3}) \right\} \quad (2.68)$$

$$E_1(R^2) = \frac{1}{3\sqrt{3}\rho} \quad (2.69)$$

$$E_2(R) = \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \left\{ \frac{1}{3} + \log \sqrt{3} - \frac{1}{6\sqrt{3}} \log(2 + \sqrt{3}) \right\} \quad (2.70)$$

$$E_2(R^2) = \frac{7}{9\sqrt{3}\rho} \quad (2.71)$$

$$E_3(R) = \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \left(-1 + \frac{2\sqrt{7}}{3} - \log \sqrt{3} + \frac{4}{3\sqrt{3}} \log \frac{\sqrt{3} + \sqrt{7}}{2} + \frac{1}{2} \log \frac{2 + \sqrt{7}}{3} \right) \quad (2.72)$$

$$E_3(R^2) = \frac{13}{9\sqrt{3}\rho} \quad (2.73)$$

$$E_4(R) = \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \left(\frac{7}{3} - \frac{2\sqrt{7}}{3} + \frac{7\sqrt{7}}{3\sqrt{3}} \log \frac{\sqrt{3} + 2\sqrt{7}}{5} - \frac{1}{2} \log \frac{5}{2 + \sqrt{7}} - \frac{4}{3\sqrt{3}} \log \frac{\sqrt{3} + \sqrt{7}}{2} \right) \quad (2.74)$$

$$E_4(R^2) = \frac{89}{45\sqrt{3}\rho} \quad (2.75)$$

$$E_5(R) = \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \left(-\frac{14}{3} + 2\sqrt{3} - \frac{2\sqrt{7}}{3} + \sqrt{21} + \frac{7\sqrt{7}}{3\sqrt{3}} \log \frac{25\sqrt{21}}{28\sqrt{3} + 31\sqrt{7}} + \frac{4}{3\sqrt{3}} \log \frac{4 + 2\sqrt{7}}{3 + \sqrt{21}} + \frac{1}{2} \log \frac{9(7 + 4\sqrt{3})}{25(2 + \sqrt{7})} + \frac{1}{6\sqrt{3}} \log \frac{5 + 2\sqrt{7}}{3 + 2\sqrt{3}} \right) \quad (2.76)$$

$$E_5(R^2) = \frac{13}{5\sqrt{3}\rho} \quad (2.77)$$

$$E_6(R) = \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \left(\frac{8}{3} + \frac{2\sqrt{7}}{3} - \sqrt{21} + \frac{3\sqrt{3}}{2} \log 3 - \frac{7\sqrt{7}}{3\sqrt{3}} \log \frac{5\sqrt{21}}{14 + \sqrt{21}} - \frac{4}{3\sqrt{3}} \log \frac{4 + 2\sqrt{7}}{3 + \sqrt{21}} - \frac{1}{2} \log \frac{21 + 12\sqrt{3}}{5(2 + \sqrt{7})} - \frac{1}{6\sqrt{3}} \log \frac{5 + 2\sqrt{7}}{3 + 2\sqrt{3}} \right) \quad (2.78)$$

$$E_6(R^2) = \frac{43}{15\sqrt{3}\rho} \quad (2.79)$$

$$\begin{aligned}
E_7(R) = \frac{2}{\sqrt{3}\sqrt{3}\rho} & \left(\frac{22}{3} - 2\sqrt{3} + \frac{2}{3}\sqrt{13} - \sqrt{21} - 3\sqrt{3}\log\sqrt{3} + \frac{4}{3\sqrt{3}}\log\frac{3+2\sqrt{3}}{2+\sqrt{7}} \right. \\
& \left. + \frac{7\sqrt{7}}{3\sqrt{3}}\log\frac{3+\sqrt{21}}{6} + 4\log\frac{1+\sqrt{13}}{3} + \frac{1}{6\sqrt{3}}\log\frac{6+\sqrt{39}}{5+2\sqrt{7}} \right) \quad (2.80)
\end{aligned}$$

$$E_7(R^2) = \frac{11}{3\sqrt{3}\rho} \quad (2.81)$$

第3章 計画的な施設閉鎖の効果

3.1 はじめに

災害による施設被害を軽減するための施策として、例えば公立学校の耐震補強が全国的に進められている。学校施設は地域の重要な防災拠点でもあるが、文部科学省の調査によると、2004年4月現在で全13万1,819棟の校舎の内、耐震性に問題がないと判断されたのは49.1%に当たる6万4,751棟であり、残りの50.9%は耐震性が確認されていない状況にある。老朽化校舎の改築には1m²当たり16万7,000円、補強でも4万4,000円かかり、全ての学校の耐震化には7兆9千億円が必要と試算されているため、改善は容易に進みそうにない。したがって、優先順位を決めて計画的に耐震化を行っていく必要がある。

本章では、閉鎖施設を計画的にコントロールすることによって、施設閉鎖に伴う移動距離の増加をどの程度抑えられるのかを論じる。2章では施設が一様にかつ独立に閉鎖される、すなわち計画が全くない状況を想定していた。これに対して、本章で考察する計画的な閉鎖は耐震補強をする等して災害に備えた場合、あるいは学校を統廃合する場合のように計画者が閉鎖施設を選定できる場合を想定している。閉鎖施設のコントロールによって、施設閉鎖が空間的に集中し、サービスの空白地域が生じるのを防ぐことができる。また、1章で述べた老人福祉施設のように需要が伸びている施設を想定して、新規施設を開設した場合についても最寄り施設までの距離の変化を考察する。

以下では、正方格子、三角格子、六角格子状配置において施設を計画的に閉鎖・開設した際の平均距離、標準偏差を求め、頑健な配置を明らかにする。そして、2章の計画がないときの閉鎖から得られた結果と比較することにより、計画の効果を数値的に評価する。

3.2 計画的な施設閉鎖

施設を計画的に閉鎖した場合に対する施設配置の頑健性を評価する。施設を0～50%まで計画的に閉鎖する状況を考え、そのときの最寄り施設までの距離の増加を比較する。閉鎖方法は移動効率性の減少が最も少なくなるように次のように決める。

定義 3.1 計画的な施設閉鎖は以下の2つのルールを満たす：(1) 正方格子，六角格子の場合は施設を50%閉鎖した時点でそれぞれ図3.1，図3.6の50%閉鎖配置となるように閉鎖候補施設を決め，その候補施設を1つずつ閉鎖していく，(2) 三角格子の場合は丁度1/3の施設を閉鎖した時点で図3.5のような六角格子になるように閉鎖し，その先は六角格子のルールを適用する。また，閉鎖施設の元の施設に占める割合を施設閉鎖率と呼び α ($0 \leq \alpha \leq 1/2$) で表す。

この方法は隣り合う施設が同時に閉鎖されないようにすることで，施設閉鎖によって施設から最も遠くなる利用者までの距離が最小になることを目指したものである。

図3.1は正方格子状配置から既存施設を12.5%，25%，50%閉鎖したときの配置例である。実際には無限平面を仮定しているので，このパターンが無限に繰り返される状況を想定している。○が閉鎖した施設，●が残った施設，破線が残った施設の勢力圏（施設が最も近い領域）の境界を表している。

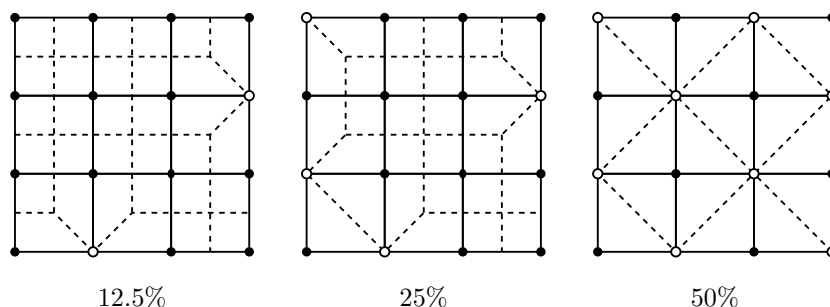


図 3.1: 正方格子状配置での閉鎖配置

3.2. 計画的な施設閉鎖

正方格子から施設を閉鎖したときの平均距離，分散は元の配置の勢力圏に着目して次のように求められる．対象領域の面積を S ，施設密度を ρ とすると，対象領域内には ρS 個の施設があり，その内で閉鎖された $\alpha\rho S$ 個の施設の勢力圏は周囲の4施設に分割され図 3.2 (a) のようになる．最寄りの利用可能な施設までの距離を求めるためには，閉鎖施設の元の勢力圏内では隣接する施設までの距離を測り，残存施設の元の勢力圏内では閉鎖前と同様に施設までの距離を測ればよい．

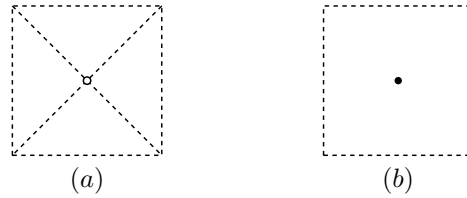


図 3.2: 閉鎖による勢力圏の分割 (a) と閉鎖前の勢力圏 (b)

このようにして式 (2.5) より最近隣距離分布 $f_1(r)$ を求めれば，それを用いて平均距離，分散が得られる．

命題 3.1 (a) 利用者が一様に分布する無限平面上に施設が正方格子状に配置されているとする．施設を計画的に閉鎖したときの平均距離 $E(R)$ ，分散 $V(R)$ は施設閉鎖率を α とすると次式で表される：

$$E(R) = \frac{1}{6\sqrt{\rho}} \left[\sqrt{2} + 2(2 - \sqrt{2})\alpha + \left\{ 1 + 2(\sqrt{2} - 1)\alpha \right\} \log(1 + \sqrt{2}) \right] \quad (3.1)$$

$$\approx \frac{1}{\sqrt{\rho}} (0.317\alpha + 0.383)$$

$$V(R) = \frac{1 + 2\alpha}{6\rho} - [E(R)]^2 \quad (3.2)$$

$$\approx \frac{1}{\rho} (-0.100\alpha^2 + 0.091\alpha + 0.020)$$

平均距離は α の 1 次式，分散は α の 2 次式で表現できる．導出方法から明らかなように，閉鎖施設数が同じ，すなわち α が一定であれば，隣り合う施設が同時に閉鎖されないというルールに従っている限り，閉鎖箇所に依存せず上式は成立する．

第3章 計画的な施設閉鎖の効果

図 3.3 は三角格子状配置から既存施設を 12.5%, 25%, 50% 閉鎖したときの配置例である。三角格子で施設を $1/3$ 以上閉鎖するためには、隣り合う施設の閉鎖を許さなければならない。

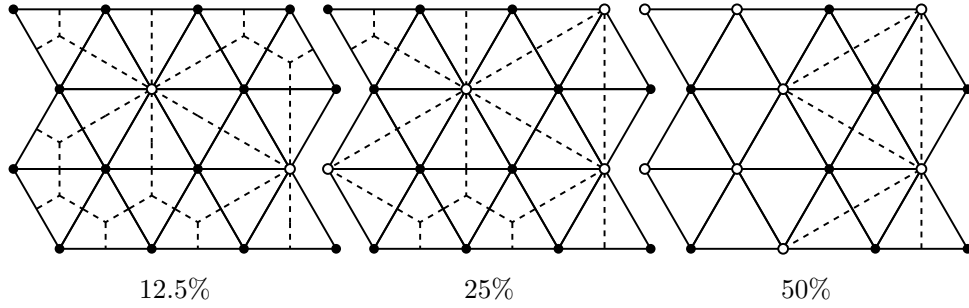


図 3.3: 三角格子状配置での閉鎖配置

三角格子から施設を閉鎖したとき, $0 \leq \alpha \leq 1/3$ ならば, 閉鎖された $\alpha\rho S$ 個の施設の勢力圏は周囲の 6 施設に分割され図 3.4 (a) のようになる。

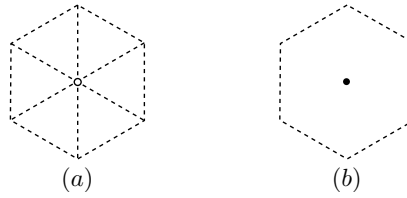


図 3.4: 閉鎖による勢力圏の分割 (a) と閉鎖前の勢力圏 (b)

三角格子は $\alpha = 1/3$ で図 3.5 のように見かけ上六角格子となるため, $1/3 < \alpha \leq 1/2$ ならば, α が $1/3$ を超えて新たに閉鎖された $(\alpha - 1/3)\rho S$ 個の施設の勢力圏は, 後述する六角格子の場合と同様に周囲の 3 施設に分割され図 3.7 (a) のようになる。

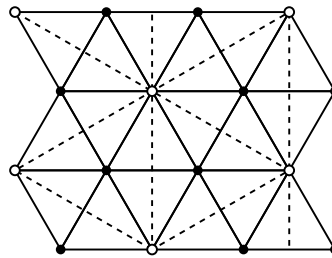


図 3.5: 三角格子状配置での $1/3$ 閉鎖配置

3.2. 計画的な施設閉鎖

命題 3.1 (b) 利用者が一様に分布する無限平面上に施設が三角格子状に配置されているとする．施設を計画的に閉鎖したときの平均距離 $E(R)$ ，分散 $V(R)$ は施設閉鎖率を α とすると次式で表される：

$$E(R) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \left\{ \frac{1}{3} + (\sqrt{3} - 1)\alpha + \frac{1-3\alpha}{2} \log \sqrt{3} + \frac{\alpha}{2} \log(2 + \sqrt{3}) \right\}, & (0 \leq \alpha \leq \frac{1}{3}) \\ \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \left\{ \frac{\sqrt{3}}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2}(3\alpha - 1) \log \sqrt{3} - \frac{3\alpha-2}{6} \log(2 + \sqrt{3}) \right\}, & (\frac{1}{3} < \alpha \leq \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} &\approx \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\rho}}(0.352\alpha + 0.377), & (0 \leq \alpha \leq \frac{1}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{\rho}}(0.477\alpha + 0.377), & (\frac{1}{3} < \alpha \leq \frac{1}{2}) \end{cases} \\ V(R) &= \begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{54\rho}(5 + 12\alpha) - [E(R)]^2, & (0 \leq \alpha \leq \frac{1}{3}) \\ \frac{\sqrt{3}}{18\rho}(1 + 6\alpha) - [E(R)]^2, & (\frac{1}{3} < \alpha \leq \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (3.4) \\ &\approx \begin{cases} \frac{1}{\rho}(-0.124\alpha^2 + 0.120\alpha + 0.018), & (0 \leq \alpha \leq \frac{1}{3}) \\ \frac{1}{\rho}(-0.227\alpha^2 + 0.257\alpha - 0.016), & (\frac{1}{3} < \alpha \leq \frac{1}{2}) \end{cases} \end{aligned}$$

図 3.6 は六角格子状配置から既存施設を 12.5%，25%，50%閉鎖したときの配置例である．50%閉鎖すると，六角格子は見かけ上三角格子になることが分かる．

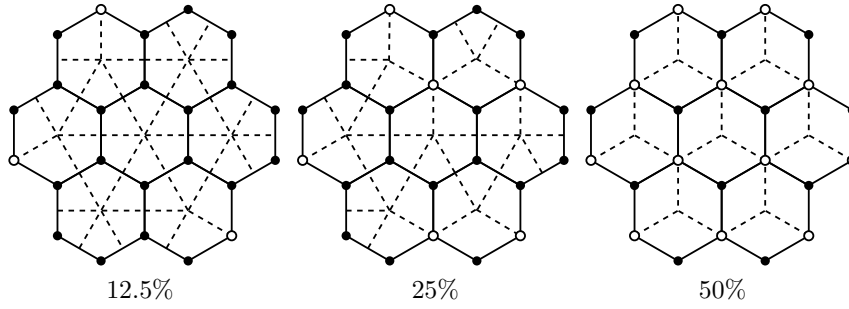


図 3.6: 六角格子状配置での閉鎖配置

第3章 計画的な施設閉鎖の効果

六角格子から施設を閉鎖したとき，閉鎖された $\alpha\rho S$ 個の施設の勢力圏は周囲の3施設に分割され図 3.7 (a) のようになる．

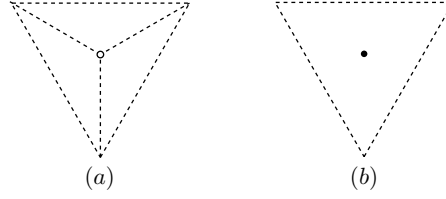


図 3.7: 閉鎖による勢力圏の分割 (a) と閉鎖前の勢力圏 (b)

命題 3.1 (c) 利用者が一様に分布する無限平面上に施設が六角格子状に配置されているとする．施設を計画的に閉鎖したときの平均距離 $E(R)$ ，分散 $V(R)$ は施設閉鎖率を α とすると次式で表される：

$$E(R) = \frac{2}{\sqrt{3}\sqrt{3}\rho} \left\{ \frac{1}{3} + \alpha \log \sqrt{3} + \frac{1-2\alpha}{6\sqrt{3}} \log(2 + \sqrt{3}) \right\} \quad (3.5)$$

$$\approx \frac{1}{\sqrt{\rho}} (0.260\alpha + 0.404)$$

$$V(R) = \frac{\sqrt{3}}{27\rho} (3 + 4\alpha) - [E(R)]^2 \quad (3.6)$$

$$\approx \frac{1}{\rho} (-0.067\alpha^2 + 0.047\alpha + 0.030)$$

3.3 計画的な施設開設

新規施設の開設によっても最寄り施設までの距離は変化する。本節では、施設を計画的に開設した場合に対する施設配置の頑健性を評価する。施設を開設する場合には、計画者が開設場所を選定できることから、計画的な閉鎖と同じフレームで議論できる。施設を0～50%まで開設する状況を考え、そのときの最寄り施設までの距離の変化を比較する。開設方法は移動効率性を考慮して次のように決める。

定義 3.2 計画的な施設開設は以下の2つのルールを満たす：(1) 施設は格子の中央に開設する，(2) 三角格子に限り隣り合う格子には開設しない。また，開設施設の元の施設に占める割合を施設開設率と呼び α ($0 \leq \alpha \leq 1/2$) で表す。

ルール (1) は既存施設から最も遠い地点に開設することにより，施設から最も遠い利用者までの距離の減少を目指したものである。ルール (2) は三角格子の場合には，図 3.11(a) のように開設した施設の勢力圏が開設した格子の隣の格子にも現れることから，効率的に開設を行うために付加するものである。

図 3.8 は正方格子状配置へ新規施設○を 12.5%，25%，50%開設したときの配置例である。50%開設を実現するためには，半分の格子に開設すればよい。

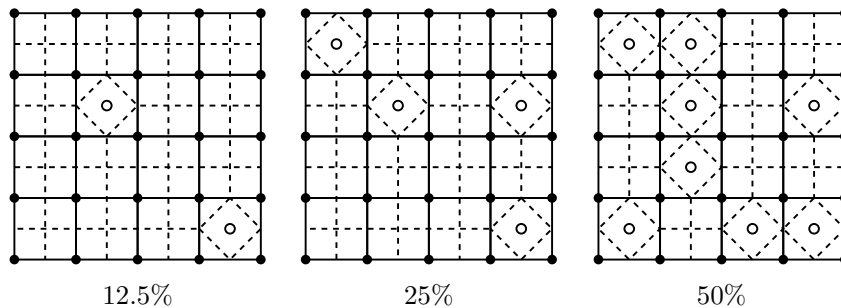


図 3.8: 正方格子状配置での開設配置

第3章 計画的な施設閉鎖の効果

正方格子に施設を開設したときの平均距離，分散は次のように求められる．閉鎖の場合と異なり，施設の勢力圏ではなく，格子に着目する方が導出が容易である．対象領域の面積を S ，施設密度を ρ とすると，対象領域内には施設数と同じ ρS 個の格子があり，その内で開設をした $\alpha \rho S$ 個の格子は図 3.9 (a)，開設をしなかった $(1 - \alpha) \rho S$ 個の格子は図 3.9 (b) のようになる．最寄りの施設までの距離を求めるためには，それぞれの格子において最も近い施設までの距離を測ればよい．

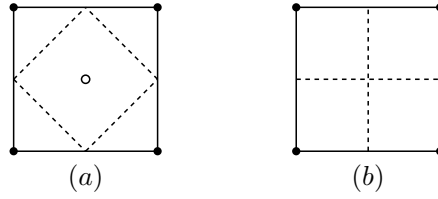


図 3.9: 開設した格子 (a) と開設前の格子 (b)

式 (2.5) より最近隣距離分布 $f_1(r)$ を求めれば，それを用いて平均距離，分散が得られる．

命題 3.2 (a) 利用者が一様に分布する無限平面上に施設が正方格子状に配置されているとする．施設を開設したときの平均距離 $E(R)$ ，分散 $V(R)$ は施設開設率を α とすると次式で表される：

$$E(R) = \frac{1}{6\sqrt{\rho}} \left[\sqrt{2} + (1 - \sqrt{2})\alpha + \frac{1}{2} \left\{ 2 + (\sqrt{2} - 2)\alpha \right\} \log(1 + \sqrt{2}) \right] \quad (3.7)$$

$$\approx \frac{1}{\sqrt{\rho}} (-0.112\alpha + 0.383)$$

$$V(R) = \frac{2 - \alpha}{12\rho} - [E(R)]^2 \quad (3.8)$$

$$\approx \frac{1}{\rho} (-0.013\alpha^2 + 0.002\alpha + 0.020)$$

平均距離は α の 1 次式，分散は α の 2 次式で表現できる．上式は開設施設数が同じ，すなわち α が一定であれば，開設箇所に依存せず成立する．

3.3. 計画的な施設開設

図 3.10 は、三角格子状配置へ新規施設を 12.5%, 25%, 50%開設したときの配置例である。50%開設を実現するためには、4つの格子に対して1つ開設すればよい。

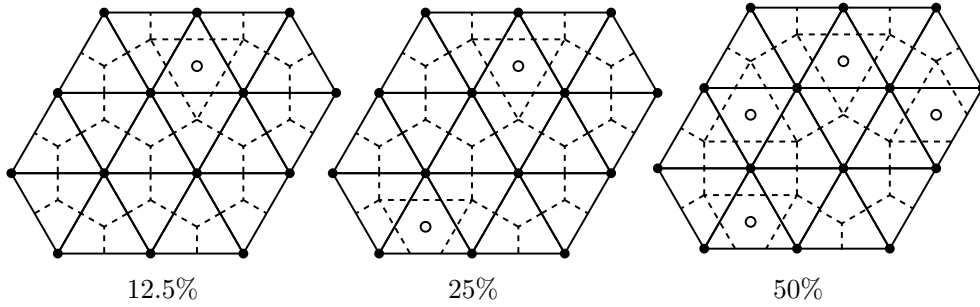


図 3.10: 三角格子状配置での開設配置

三角格子の場合、4つの格子をまとめたものは対象領域内に $\rho S/2$ 個ある。その内、開設をした格子が含まれている図 3.11 (a) は $\alpha\rho S$ 個、含まれていない図 3.11 (b) は $(1/2-\alpha)\rho S$ 個存在する。

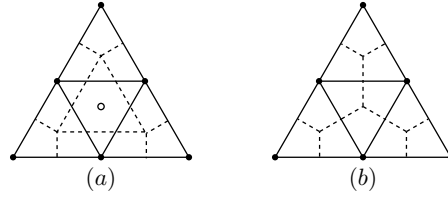


図 3.11: 開設した格子 (a) と開設前の格子 (b)

命題 3.2 (b) 利用者が一様に分布する無限平面上に施設が三角格子状に配置されているとする。施設を開設したときの平均距離 $E(R)$ 、分散 $V(R)$ は施設開設率を α とすると次式で表される：

$$E(R) = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{1-\alpha}{2} \log \sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{18} \alpha \log(2 + \sqrt{3}) \right\} \quad (3.9)$$

$$\approx \frac{1}{\sqrt{\rho}} (-0.092\alpha + 0.377)$$

$$V(R) = \frac{5-2\alpha}{18\sqrt{3}\rho} - [E(R)]^2 \quad (3.10)$$

$$\approx \frac{1}{\rho} (-0.008\alpha^2 + 0.005\alpha + 0.018)$$

第3章 計画的な施設閉鎖の効果

図 3.12 は，六角格子状配置へ新規施設を 12.5%，25%，50%開設したときの配置例である．50%開設を実現するためには，全ての格子に開設しなければならない．50%開設すると，六角格子は見かけ上三角格子になることが分かる．

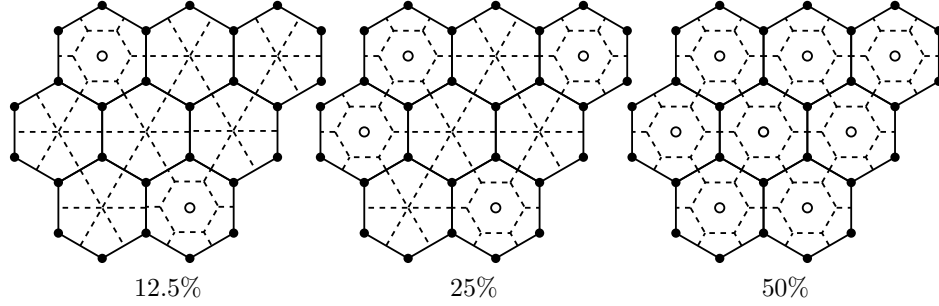


図 3.12: 六角格子状配置での開設配置

六角格子の場合，対象領域内には施設数の半分の $\rho S/2$ 個の格子があり，その内で開設をした $\alpha \rho S$ 個の格子は図 3.13 (a)，開設をしなかった $(1/2 - \alpha)\rho S$ 個の格子は図 3.13 (b) のようになる．

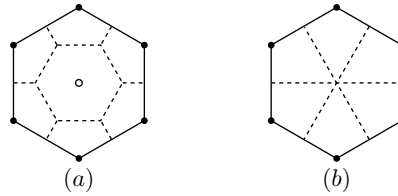


図 3.13: 開設した格子 (a) と開設前の格子 (b)

命題 3.2 (c) 利用者が一様に分布する無限平面上に施設が六角格子状に配置されているとする．施設を開設したときの平均距離 $E(R)$ ，分散 $V(R)$ は施設開設率を α とすると次式で表される：

$$E(R) = \frac{2}{\sqrt{3}\sqrt{3}\rho} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{2(1-\sqrt{3})}{3\sqrt{3}}\alpha + \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \log \sqrt{3} + \frac{1-2\alpha}{6\sqrt{3}} \log(2+\sqrt{3}) \right\} \quad (3.11)$$

$$\approx \frac{1}{\sqrt{\rho}}(-0.191\alpha + 0.404)$$

$$V(R) = \frac{\sqrt{3}}{81\rho}(9 - 8\alpha) - [E(R)]^2 \quad (3.12)$$

$$\approx \frac{1}{\rho}(-0.037\alpha^2 - 0.017\alpha + 0.030)$$

3.4 頑健な配置

施設を計画的に閉鎖・開設したときの平均距離 $E(R)$ と標準偏差 $\sigma (= \sqrt{V(R)})$ の変化はそれぞれ図 3.14, 図 3.15 のようになる。ただし、施設密度は $\rho = 1$ としている。施設閉鎖率 α は $-\alpha$ として表現し、 $\alpha = -0.5$ が 50% の施設を閉鎖した場合に相当する。規則的配置の平均距離は閉鎖も開設もしない状態 ($\alpha = 0$) から、施設閉鎖によって線形に増加し、開設によって線形に減少することが分かる。三角格子が望ましいのは施設数の増減が小さいとき（閉鎖 15.6% 未満，開設 26.6% 未満）だけであることが分かる。逆に増減が大きいとき（閉鎖 36.7% 以上，開設 26.6% 以上）は六角格子が望ましい。これは、六角格子の配置が閉鎖・開設によって次第に三角格子に近付いていくためである。正方格子は施設を閉鎖する場合には三角格子と六角格子の間に現れ、開設する場合には最適な配置とはなり得ない。

命題 3.3 利用者が一様に分布する無限平面上に施設が規則的に配置されているとする。施設を計画的に閉鎖・開設する場合、平均距離が最も小さくなる配置は、閉鎖率 15.6% 未満・開設率 26.6% 未満のときは三角格子、閉鎖率 15.6% 以上 36.7% 未満のときは正方格子、閉鎖率 36.7% 以上・開設率 26.6% 以上のときは六角格子である。

一方、標準偏差は施設を開設しても必ずしも小さくならず、閉鎖しても必ずしも大きくならない。最適な配置が現れる順序は平均距離の場合と同じで、増減が小さいとき（閉鎖 8.1% 未満，開設 35.9% 未満）は三角格子、増減が大きいとき（閉鎖 35.9% 以上，開設 36.4% 以上）は六角格子となる。

図 3.14, 図 3.15 から、施設数の変化に対して三角格子の平均距離・標準偏差の変化が大きく、一方で正方格子や六角格子の値は相対的に安定していることが分かる。三角格子は現状では最適であっても、施設数が変化する場合には不安定であるといえる。

第3章 計画的な施設閉鎖の効果

図 3.14: 計画的な施設閉鎖・開設における平均距離

図 3.15: 計画的な施設閉鎖・開設における標準偏差

3種類の規則的配置において施設を閉鎖・開設した場合には、元の配置とは異なる配置が現れる。しかし、ランダム配置の場合には、施設の開設や閉鎖を行っても、ランダムであることに変わりはない。そこで、ランダム配置との比較によって規則的配置の違いを見てみよう。施設が密度 ρ で一様にランダムに分布しているとき、施設を閉鎖・開設したときの平均距離、標準偏差は式 (2.17), (2.18) から得られる。これらをそれぞれ $E_r(R), \sigma_r$ として、規則的配置との比率を表したものが図 3.16 である。

3.4. 頑健な配置

図 3.16 (a) にて規則的配置の平均距離をランダム配置の場合と比較すると、閉鎖・開設を行わないときは正方格子は 23.5%，三角格子は 24.6%，六角格子は 19.3%ランダム配置よりも効率が良い。差が最も小さくなるのは三角格子で 43.2%閉鎖したときと六角格子で 14.8%閉鎖したときの 18.4%である。したがって、閉鎖・開設を行っても、規則的配置は少なくとも 18.4%ランダム配置より効率が良いといえる。

図 3.16 (b) にて標準偏差を比較すると、閉鎖・開設を行わないときは正方格子は 45.5%，三角格子は 48.5%，六角格子は 34.3%ランダム配置よりも公平性が高い。差が最も小さくなるのは三角格子で 26.1%閉鎖したときと六角格子で 10.9%開設したときの 33.5%である。平均距離の場合と比べると、規則的配置が特に公平性という点で有効であることが分かる。

(a) 平均距離

(b) 標準偏差

図 3.16: 平均距離・標準偏差のランダム配置との比較

3.5 計画の効果

計画的な施設閉鎖で得られた結果を2章の計画がないときの施設閉鎖の結果と比較しよう。例えば20%の施設が利用できない場合、計画がない場合には図2.12より三角格子の平均距離が他の配置に比べて小さくなる。しかし、同じ20%であっても、計画的な閉鎖の場合には図3.14より正方格子が最適となる。このことは、計画者のコントロールが存在するか否かで、最適な配置が異なるということを示唆している。

図3.17～図3.19は施設を0～50%まで閉鎖した場合の平均距離、標準偏差の変化を表している。上から計画なし閉鎖の上限値・下限値、計画的な閉鎖の順になっている。計画的な閉鎖の閉鎖率 α は $p = 1 - \alpha$ という関係を用いて施設残存率 p で表現し、したがって3本は $p = 1.0$ で同一の値をとる。平均距離、標準偏差のいずれも常に計画的な閉鎖の方が小さく、 p が小さくなるにつれて両者の差が大きくなることが確認できる。50%の施設が利用できない場合($p = 0.5$)、計画的閉鎖の平均距離は計画がない場合の下限値に比べて、正方格子では86.6%、三角格子では91.9%、六角格子では84.8%となる。一方、標準偏差は正方格子では72.1%、三角格子では83.6%、六角格子では68.5%となる。1章で述べたように阪神・淡路大震災では4割の病院で手術室が使用不能になったので、これに対応する残存率 $p = 0.6$ のときを比較すると、平均距離は正方格子91.5%、三角格子94.5%、六角格子90.3%となり、標準偏差は正方格子76.0%、三角格子84.4%、六角格子73.3%となる。計画者のコントロール、例えば震災時に隣り合う施設が同時に利用不可能とならないように耐震補強を行うこと等によってこれらの差の分だけサービスレベルの低下を抑えることができるといえる。

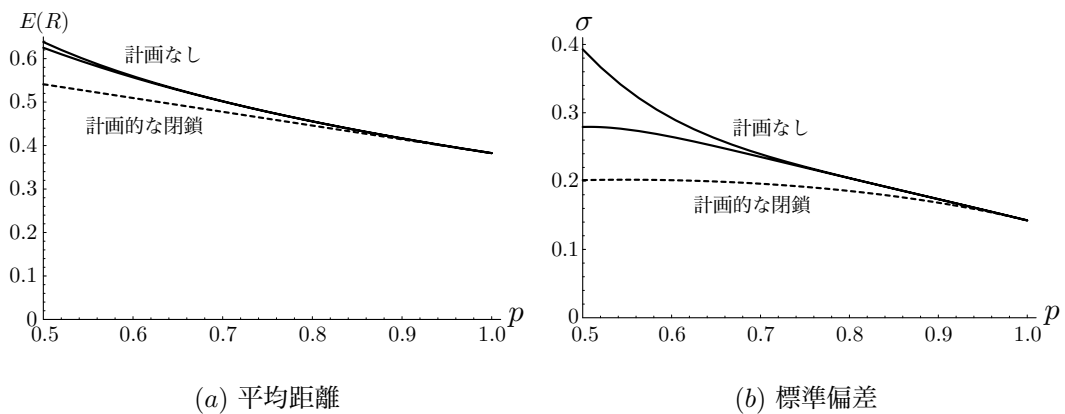


図 3.17: 計画的な閉鎖による平均距離・標準偏差の削減効果 (正方格子)

3.5. 計画の効果

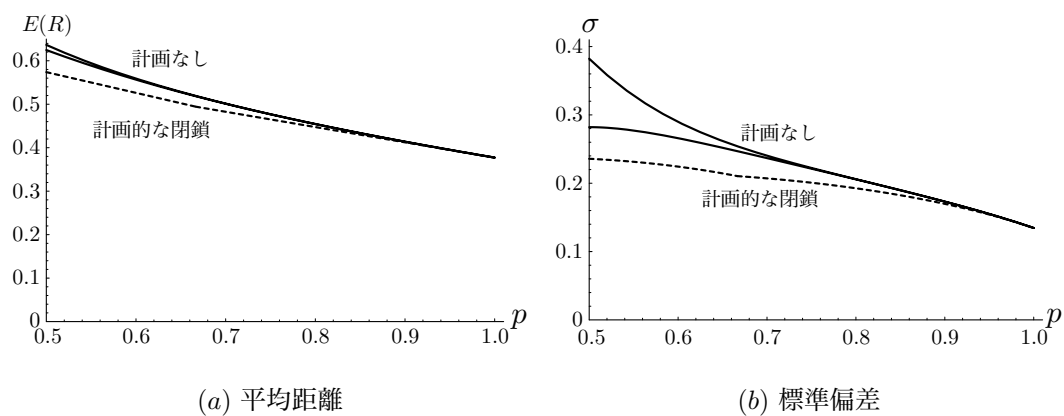


図 3.18: 計画的な閉鎖による平均距離・標準偏差の削減効果 (三角格子)

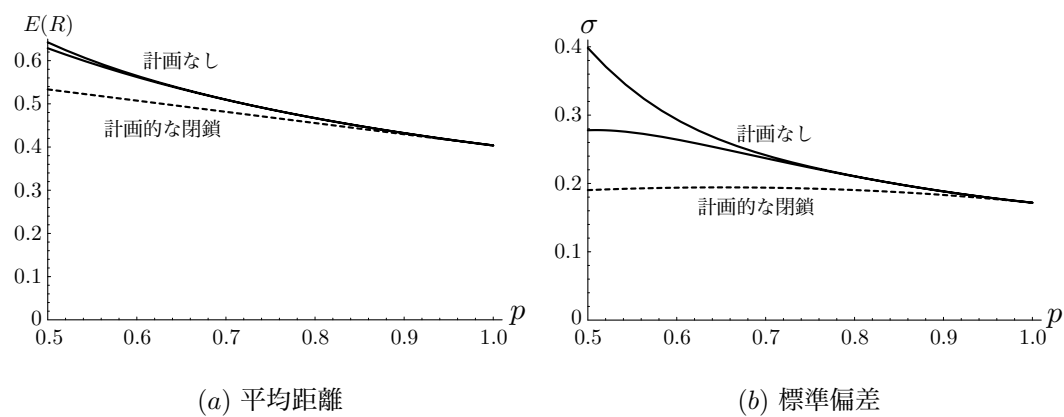


図 3.19: 計画的な閉鎖による平均距離・標準偏差の削減効果 (六角格子)

第3章 計画的な施設閉鎖の効果

3.6 まとめ

本章では、計画の効果として耐震補強等を用いた計画的な施設閉鎖の効果の評価した。本章で得られた知見は以下の3点である。

- (1) 規則的配置に対して計画的に施設閉鎖・開設を行った際の平均距離ならびに標準偏差を導いた。三角格子が効率の良い配置であるのは施設数の変化に関して増減が小さいとき（閉鎖 15.6%未満，開設 26.6%未満）だけであること，増減が大きいとき（閉鎖 36.7%以上，開設 26.6%以上）は六角格子が望ましいことを示した。
- (2) 三角格子は施設数の変化に対して平均距離，標準偏差の変化が大きく，一方で正方格子や六角格子の値は相対的に安定していることが分かった。このことから，「三角格子状配置は施設閉鎖を考慮した際には必ずしも最適ではない」という2章での結論が支持された。
- (3) 計画者が意図して閉鎖する場合と計画者のコントロールが働かない場合との平均距離を数値的に比較し計画の効果を示した。例えば 50%の施設が閉鎖される状況において，計画者が隣り合う施設が同時に利用不可能にならないようにすれば，平均距離を正方格子で 86.6%，三角格子で 91.9%，六角格子で 84.8%に抑えられることが分かった。耐震補強等の計画の効果用最寄り施設までの距離という指標で単純に計測することができた。計画者のコントロールが存在することで，最適な配置が変化することも確認された。

ここでは、厳密な結果を得るために「隣り合う施設が同時に閉鎖されないように耐震補強等の防災対策をする」という計画の効果を実測した。実際の施設配置に対しては、圏域人口が多い施設から補強する、避難所になるような他の施設が近くにない場合に堅牢施設とする、等様々な視点からの施策が考えられる。それらに関しても、本章と同じく計画の効果を評価することが可能である。

第4章 施設閉鎖情報の効果

4.1 はじめに

前章までの分析では、利用者は施設の開閉に関する情報を完全に認知していることを前提にしており、居住地から直接最寄りの利用可能な施設へ向かうことができた。しかし、災害発生直後のような混乱した状況の中では、被害を受けた施設に関する情報が十分に得られないことも多い。情報がなければ、利用可能な施設を探すための無駄な移動が発生する可能性がある。阪神・淡路大震災では電話の輻輳や故障のため病院間あるいは病院消防間の医療情報交換が非常に制限され、33%の医療機関が情報交換が不能で孤立した。その結果、重傷負傷者を搬送する際に、市内の医療機関の受入状況が把握できず直近の医療機関への搬入が繰り返され、大混乱に陥った [阪神・淡路大震災 (1999)]。

つくば市では災害時に災害情報や避難場所等の連絡、避難命令を携帯電話に電子メールで配信するサービスを行っている。また、インターネットでは危険地域や安全地域、避難地区等を地図上に表示して情報を提供している。

本章では、施設が一様にかつ独立に閉鎖される状況において、施設閉鎖情報の提供が移動距離をどの程度減らせるのかを分析する。3章での耐震補強というハード面の施策に対して、ソフト面の施策の効果を測る。施設閉鎖情報の提供によって、負傷者の病院への搬送や避難誘導が円滑に行われることが期待できる。

以下では、情報が得られない場合の正方格子、三角格子、六角格子状配置の k 次近隣距離を求める。そして、施設が閉鎖された際の平均距離を比較することで、頑健な配置を明らかにする。さらに、2章の完全情報の場合と結果を比較することにより、情報提供効果を数値的に評価する。また、実際の施設配置としてつくば市小学校配置を対象とした分析も行う。

第4章 施設閉鎖情報の効果

4.2 k 次近隣距離

情報が得られるときと得られないときの施設への移動を図4.1に示す。○が閉鎖した施設、●が残った施設を表している。最寄り施設が利用できないとき、完全情報の場合には、最初から利用できる最も近い施設に向かうことができる。しかし、情報がなければ、施設に到着して初めて閉鎖されていることを知り、そこから別の施設に向かうことになる。そのため、完全情報の場合に比べて移動距離が大きくなる。さらに、移動先の施設も利用できなければ、また別の施設に向かうことになる。したがって、利用者は閉鎖されずに残った施設に到達するまで、施設を順に辿るような移動を行うことになる。ここでは、一度訪れた施設には戻ってこないものとする。このような移動の下で、利用者が k 番目に訪れる施設までの平均距離を正方格子、三角格子、六角格子状配置について求める。

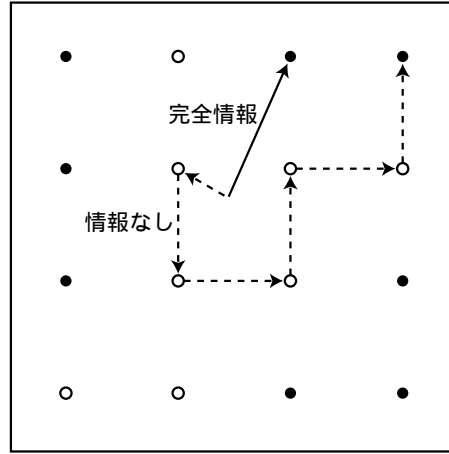


図4.1: 情報提供と施設への移動（正方格子）

2番目に訪れる施設までの距離は最も近い施設までの距離に施設間距離を加えたものになり、3番目に訪れる施設までの距離はそれにさらに施設間距離を加えたものになる。一般に、 k 番目に訪れる施設までの平均距離 $E_k(R)$ は、最も近い施設までの平均距離を $E_1(R)$ 、施設間距離を a とすると、

$$E_k(R) = E_1(R) + (k-1)a \quad (4.1)$$

として求まる。ここで、正方格子、三角格子、六角格子状配置の施設間距離 a は施設密度を ρ としてそれぞれ

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho}}, \quad a = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\rho}}, \quad a = \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \quad (4.2)$$

4.2. k 次近隣距離

となる．各配置の $E_1(R)$ は 2 章で導出済みであるので，これらを式 (4.1) に代入することにより，規則的配置の k 番目に訪れる施設までの平均距離 $E_k(R)$ が以下のように求まる．

命題 4.1 利用者が一様に分布する無限平面上に施設が規則的に配置されているとする．施設を順に辿るような移動を行う場合， k 番目に訪れる施設までの平均距離 $E_k(R)$ は次のようになる：

正方格子

$$\begin{aligned} E_k(R) &= \frac{1}{6\sqrt{\rho}} \{ \sqrt{2} + \log(1 + \sqrt{2}) \} + (k-1) \frac{1}{\sqrt{\rho}} \\ &\approx \frac{1}{\sqrt{\rho}} (k - 0.617) \end{aligned} \quad (4.3)$$

三角格子

$$\begin{aligned} E_k(R) &= \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} \log \sqrt{3} \right) + (k-1) \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\rho}} \\ &\approx \frac{1}{\sqrt{\rho}} \{ 1.075k - 0.698 \} \end{aligned} \quad (4.4)$$

六角格子

$$\begin{aligned} E_k(R) &= \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{1}{6\sqrt{3}} \log(2 + \sqrt{3}) \right\} + (k-1) \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \\ &\approx \frac{1}{\sqrt{\rho}} \{ 0.877k - 0.473 \} \end{aligned} \quad (4.5)$$

第4章 施設閉鎖情報の効果

表 4.1, 図 4.2 は 3 種類の規則的配置の k 番目に訪れる施設までの平均距離 $E_k(R)$ ($k = 1, \dots, 7$) を表している. 最初に訪れる施設 (最も近い施設) までの平均距離は三角格子が最小となっているが, 2 番目以降は六角格子が最小となっている. これは, 式 (4.1) は k について 1 次関数であり, その傾きに相当する施設間距離 a が 3 種類の規則的配置の中で六角格子が最も小さいためである. 図 2.8 の完全情報の場合と比較すると, $E_1(R)$ は同一の値を取っているが, $k = 2$ 以降の平均距離は大きくなっている. 両者の差は k が大きくなるにつれて拡大していくことが分かる.

表 4.1: k 番目に訪れる施設までの平均距離 (情報なし)

平均距離	$E_1(R)$	$E_2(R)$	$E_3(R)$	$E_4(R)$	$E_5(R)$	$E_6(R)$	$E_7(R)$
正方格子	$0.383 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.383 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$2.383 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$3.383 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$4.383 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$5.383 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$6.383 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$
三角格子	$0.377 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.452 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$2.526 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$3.601 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$4.675 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$5.750 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$6.825 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$
六角格子	$0.404 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$1.281 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$2.158 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$3.036 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$3.913 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$4.791 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$	$5.668 \frac{1}{\sqrt{\rho}}$

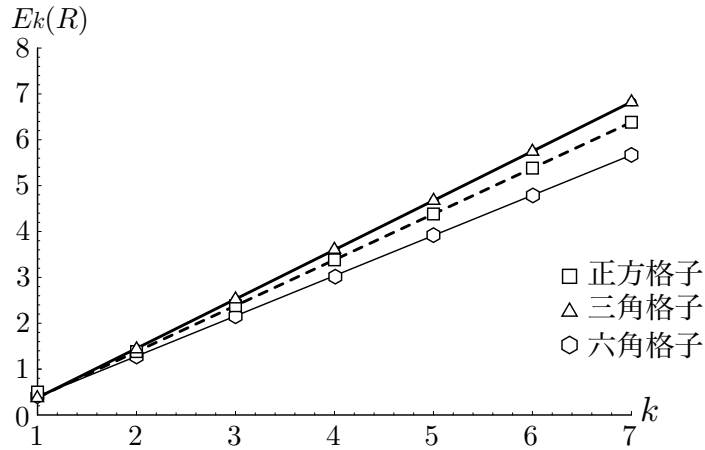


図 4.2: k 番目に訪れる施設までの平均距離 (情報なし)

4.3 頑健な配置

2章と同様にどの施設も一様にかつ独立に利用できなくなると仮定すると、残存率 p を用いた平均距離 $E(R)$ は式 (2.11) に式 (4.1) を代入することで、簡潔に

$$E(R) = E_1(R) + a \left(\frac{1}{p} - 1 \right) \quad (4.6)$$

と得られる。ここでは全ての k に関して $E_k(R)$ が算出されているので、平均距離も解析的に表現することができる。上式に各配置における最も近い施設までの平均距離 $E_1(R)$ 、施設間距離 a を代入すれば、平均距離 $E(R)$ が以下のように求まる。

命題 4.2 利用者が一様に分布する無限平面上に施設が規則的に配置されているとする。施設が一様にかつ独立に閉鎖され、施設閉鎖情報が得られない場合の平均距離 $E(R)$ は施設残存率を p とすると次のようになる：

正方格子

$$\begin{aligned} E(R) &= \frac{1}{6\sqrt{\rho}} \left\{ \sqrt{2} + \log(1 + \sqrt{2}) + 6 \left(\frac{1}{p} - 1 \right) \right\} \\ &\approx \frac{1}{\sqrt{\rho}} \left\{ 0.383 + \left(\frac{1}{p} - 1 \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.7)$$

三角格子

$$\begin{aligned} E(R) &= \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}\rho}} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{1}{2} \log \sqrt{3} + \sqrt{3} \left(\frac{1}{p} - 1 \right) \right\} \\ &\approx \frac{1}{\sqrt{\rho}} \left\{ 0.377 + 1.075 \left(\frac{1}{p} - 1 \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.8)$$

六角格子

$$\begin{aligned} E(R) &= \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}\rho}} \left\{ \frac{1}{3} + \frac{1}{6\sqrt{3}} \log(2 + \sqrt{3}) + \frac{1}{p} - 1 \right\} \\ &\approx \frac{1}{\sqrt{\rho}} \left\{ 0.404 + 0.877 \left(\frac{1}{p} - 1 \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.9)$$

第4章 施設閉鎖情報の効果

図 4.3 は 3 つの規則的配置において、施設が一様にかつ独立に閉鎖されたときの平均距離を表している。残存率が 93.2% 以上であれば三角格子，85.3% 以上 93.2% 未満であれば正方格子，85.3% 未満であれば六角格子の平均距離が最も小さくなる。

命題 4.3 利用者が一様に分布する無限平面上に施設が規則的に配置されているとする。施設が一様にかつ独立に閉鎖され、施設閉鎖情報が得られない場合、平均距離が最も小さくなる配置は、残存率が 93.2% 以上のとき三角格子，85.3% 以上 93.2% 未満のとき正方格子，85.3% 未満のとき六角格子である。

2 章の完全情報の場合には、図 2.12 より残存率が少なくとも 68.7% 以上のときには三角格子の平均距離が最も小さくなっていたので、情報の有無によって望ましい配置も変化することが分かる。

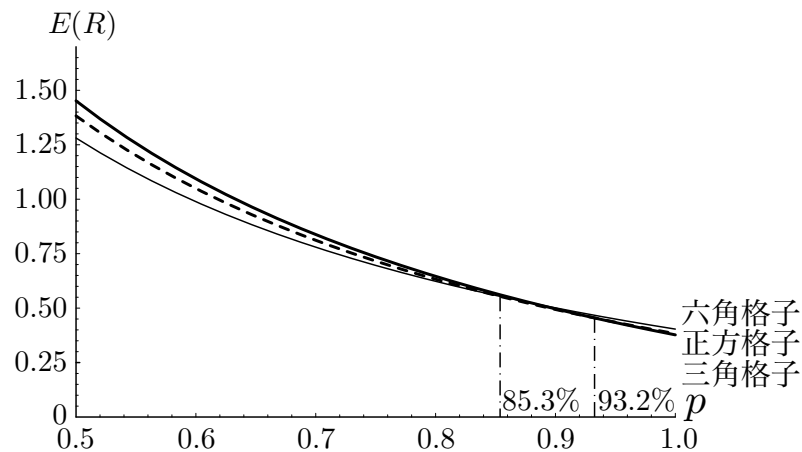


図 4.3: 施設閉鎖時の平均距離（情報なし）

4.4 情報の効果

完全情報の場合と情報なしの場合の平均距離を比較したものが図 4.4 である。ただし、完全情報の平均距離は 2 章で求めた上限値のみを示した。すべての施設が利用できる場合 ($p = 1.0$)，完全情報と情報なしの平均距離は一致し， p が小さくなるに従って，両者の差が大きくなることを確認できる。50%の施設が利用できない場合 ($p = 0.5$)，完全情報の平均距離は情報なしに比べて，正方格子 46.2%，三角格子 43.8%，六角格子 50.2%となっている。施設閉鎖情報の提供によって，移動距離を約 50%削減できることが分かる。残存率 $p = 0.6$ のときで比較しても，正方格子 53.3%，三角格子 51.1%，六角格子 57.1%と効果は大きい。

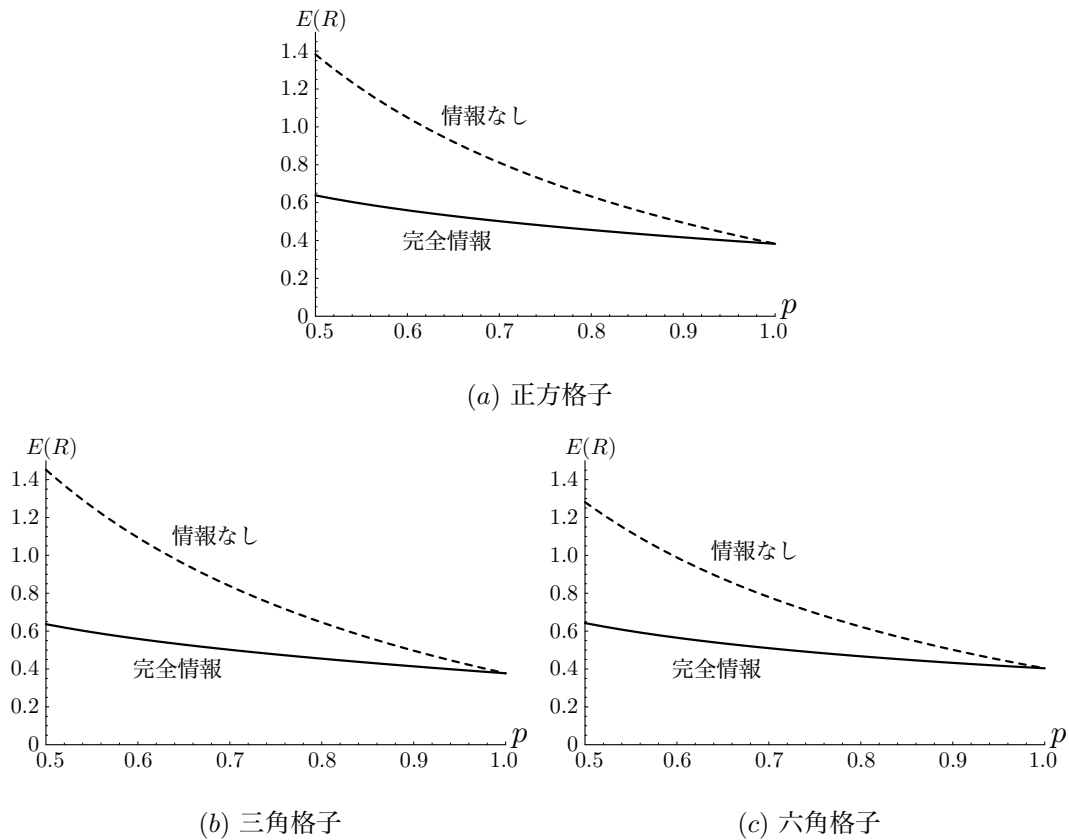


図 4.4: 情報提供による平均距離の削減効果

第4章 施設閉鎖情報の効果

4.5 実際の施設配置

人口分布の一様性，無限平面を仮定して得られた結果の妥当性を検証する．実際の施設配置における閉鎖情報が得られない場合の行動として，図4.5に示すように，まず最寄りの施設へ向かい，最寄りの施設が閉鎖されていた場合にはそこから最も近い別の施設へ向かう．これを閉鎖されていない施設に到達するまで繰り返すものとする．すなわち，施設の位置は分かっているが，そこが閉鎖されているかどうかは分からない状況を想定する．また，一度訪れた施設には戻ってこないものとする．

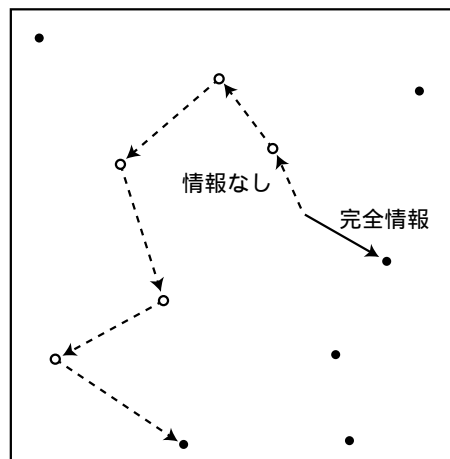


図 4.5: 情報提供と施設への移動（実際の配置）

つくば市の小学校（図2.14）を対象にする．2.4と同様に，町丁目別人口を用い，人口分布を考慮して施設までの距離を計測する．表4.2はつくば市の小学校配置，および等しい施設密度での正方格子，三角格子，六角格子における k 番目に訪れる小学校までの平均距離 $E_k(R)$ ($k=1, \dots, 7$)を表している． k が大きくなると平均距離は規則的配置と比べてかなり大きな値になることが分かる．これは，施設を辿って市境界付近まで来てしまうと，そこから大きく引き返さなければならず，距離が大きくなってしまうためである．表2.3の完全情報の場合と比べてもより顕著に現れているといえる．

4.5. 実際の施設配置

表 4.2: k 番目に訪れる小学校までの平均距離 (情報なし) (km)

配置	$E_1(R)$	$E_2(R)$	$E_3(R)$	$E_4(R)$	$E_5(R)$	$E_6(R)$	$E_7(R)$
つくば市	0.97	2.69	4.54	6.53	8.55	10.77	12.43
正方格子	1.03	2.03	3.03	4.03	5.03	6.03	7.03
三角格子	1.02	2.09	3.17	4.24	5.32	6.39	7.47
六角格子	1.09	1.97	2.84	3.72	4.60	5.48	6.35

小学校が閉鎖された際に、閉鎖情報の提供が移動距離をどの程度減らせるのかを分析する。平均距離は閉鎖施設数を $0, 1, \dots, 19$ としたときの閉鎖の組合せパターンをランダムに与えて求め、それぞれの計算過程を 10,000 回繰り返すシミュレーションの平均値をとる。完全情報の場合と情報なしの場合の平均距離を比較したものが図 4.6 である。完全情報の平均距離は図 2.22 の結果を用いている。規則的配置の場合と同様、残存率 p が小さくなるに従って両者の差が拡大し、情報の効果が大きくなることが分かる。19 校が閉鎖された場合 (残存率 $p = 0.51$)、完全情報の平均距離は情報なしの 63.2% となっている。このように小学校配置における情報の効果が規則的配置よりも小さい理由としては、配置の違いと人口分布の偏りが考えられる。施設が密に配置されている地域では隣の施設までの距離が小さいことから情報の効果は小さい。つくば市の学園地区では、小学校が集まっているために、情報がなくても距離がそれ程増えないのである。さらに、人口が学園地区に集中していることがこの傾向を助長している。

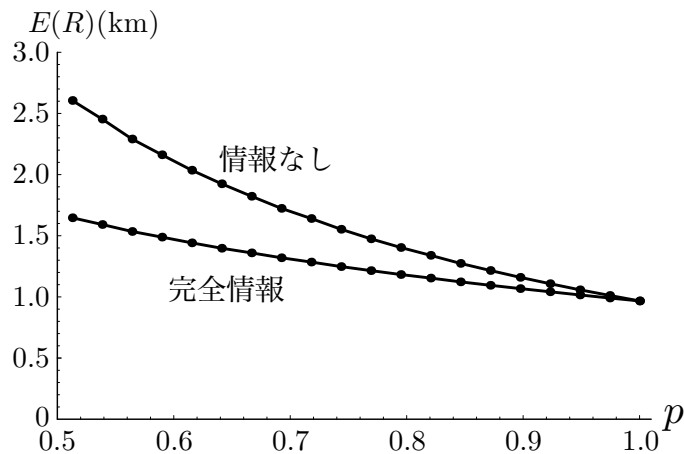


図 4.6: 情報提供による平均距離の削減効果 (小学校)

第4章 施設閉鎖情報の効果

施設閉鎖情報が得られず、施設を順に辿る移動を行う場合には、境界の影響が完全情報の場合に比べてより顕著に現れることが予想される。そこで、2.4と同様に、有限平面上のランダム配置を用いて境界の影響を見る。ただし、無限平面での結果が得られていないため、これもシミュレーションから求める。図4.7に示す1辺の長さが50である正方形領域を考える。利用者は中央の1辺10の正方形領域内のみ発生させる。施設までの k 次近隣距離を求める際に、中央の正方形領域内の施設以外は利用できないとした場合を有限平面での距離、全ての施設を利用可能とした場合を無限平面での距離とみなす。

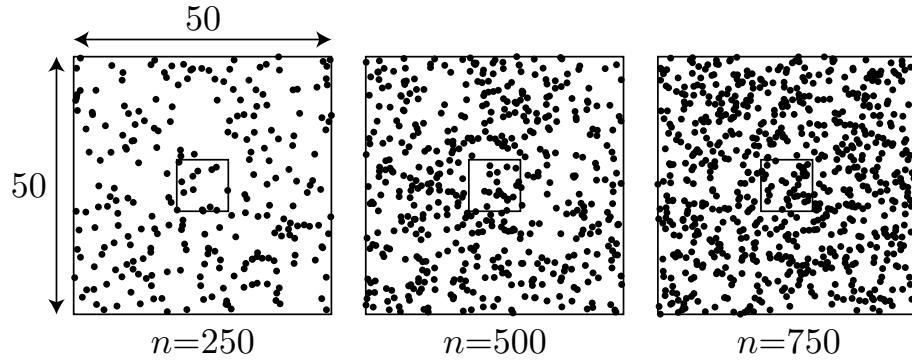


図 4.7: 有限平面上のランダム配置

表 4.3 は施設数 n を 250, 500, 750 と変化させたときの、有限平面と無限平面の平均距離を示している。完全情報の場合の表 2.4 と施設密度は同一であるが、情報が得られないために平均距離は大きくなっている。やはり、施設数 n が小さく、 k が大きいときに有限平面と無限平面の距離の差が大きくなることが分かる。

表 4.3: 有限平面と無限平面の平均距離（情報なし）

施設数		$E_1(R)$	$E_2(R)$	$E_3(R)$	$E_4(R)$	$E_5(R)$	$E_6(R)$	$E_7(R)$
$n = 250$	有限	1.40	3.36	5.66	7.22	9.65	12.68	14.64
	無限	1.39	3.05	5.24	6.98	9.72	11.86	13.65
$n = 500$	有限	1.33	2.75	4.20	5.66	6.77	7.87	9.03
	無限	1.13	2.49	3.90	5.19	6.23	7.37	8.71
$n = 750$	有限	0.89	1.87	2.92	3.93	5.18	6.27	7.25
	無限	0.88	1.85	2.82	3.83	5.05	5.96	6.94

4.6 まとめ

本章では、計画の効果として施設閉鎖情報の提供効果を計測した。本章で得られた知見は以下の3点である。

- (1) 閉鎖情報が得られない場合に施設を巡る利用行動を仮定し、 k 番目に訪れる施設までの平均距離を導いた。そして、2 番目以降に訪れる施設までの平均距離は六角格子が最も小さくなることを示した。また、どの施設も一様にかつ独立に閉鎖されるという仮定の下で、最寄りの利用可能な施設までの平均距離を施設残存率を用いて表現した。平均距離を比較することにより、残存率が93.2%以上であれば三角格子、85.3%以上93.2%未満であれば正方格子、85.3%未満であれば六角格子が最も小さくなることを示した。この結果は三角格子状配置が常に最適とは限らないという前章までの結果とも矛盾しない。
- (2) 完全情報の場合と情報が得られない場合とを比較することにより、施設閉鎖情報の提供効果を評価した。例えば50%の施設を閉鎖する状況において、施設閉鎖情報を提供すれば、情報が得られないときと比べて平均距離を正方格子で46.2%、三角格子で43.8%、六角格子で50.2%と約半分に抑えられる。情報が提供されるか否かによって、最適な配置が変化することも確認された。
- (3) つくば市小学校配置での分析を通して、実際の施設配置での情報提供効果を評価した。シミュレーションの結果から、ほぼ半数に当たる19校が閉鎖された場合には、情報提供によって平均距離を63.2%にまで削減できることが分かった。また、情報が得られない場合には、完全情報の場合と比べて境界の影響が大きく、無限平面を仮定しているモデルとの乖離が大きくなることを示した。

第5章 移動途中の寄り道施設

5.1 はじめに

阪神・淡路大震災では西宮市から神戸市須磨区にかけての 316 の給油所の内、1/3 以上が建物倒壊、計量器破損等の重大な被害を被った。地震発生当日はほとんどの給油所が休業を余儀なくされ、営業できたのは 5.4% に当たる 17 箇所のみであった。そのため、消防車両等の緊急自動車の燃料補給に支障が生じたばかりでなく、疎開や物資輸送の自動車の燃料が欠乏した [阪神・淡路大震災 (1999)]。

資源エネルギー庁は 1996 年から、災害に強い給油所として災害対応型給油所の普及と整備を実施している。災害対応型給油所とは、災害時に電力供給がストップした場合でも、自家発電設備や貯水設備等の整備により、緊急車両等への燃料供給ができる自立機能を持った給油所である。主な設備としては、(1) 太陽光発電設備、(2) 貯水設備、(3) 内燃式火力発電設備がある。東京都日本橋の本石町エコ給油所 (図 5.1) をはじめ、2001 年時点で全国に 15 施設が整備されている。また、全国の給油所数の推移を見ると、図 5.2 より 1994 年の 60,421 をピークに減少傾向にあることが分かる。



図 5.1: 日本橋本石町エコ給油所

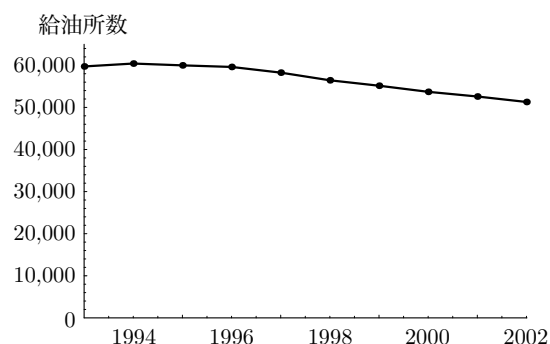


図 5.2: 全国の給油所数の推移

給油所は別の目的で移動途中に寄り道をして利用する施設である。本章では、移動途中に立ち寄る施設が閉鎖されたときのサービス低下および計画の効果寄り道に要する距離

第5章 移動途中の寄り道施設

に着目して考察する。

日常生活の移動でも時間に余裕を持って出発し、途中で寄り道をするのがよくある。仕事からの帰宅途中に買い物をしたり、銀行や郵便局等を利用することがその例である。観光目的の移動においても近年の泊まり込み型レジャーの増加による移動の長距離化に伴い、途中で道の駅等の休憩施設や別の観光施設に立ち寄ることが多い。このように、寄り道行動による施設利用は基本的な行動パターンである。施設への寄り道行動に基づいて施設配置を論じた研究としては、[Hodgson (1981)], [松戸, 他 (2000)], [鈴木 (2002)] 等がある。

道の駅は1993年に事業化されて以来急速に整備が進み、2004年4月1日時点で742駅が全国に登録されている（図5.3）。道の駅は道路交通の円滑な「ながれ」を支える「たまり」空間として、休憩機能だけでなく沿道地域の道路情報・文化・歴史等を伝える情報提供機能、地域の核として地域づくりを行うための地域連携機能を有している[道路保全技術センター (1998)]。道の駅に関する研究には休憩機能を論じた[大泉, 他 (1999)], 地域振興効果を計測した[飯田 (2000)] 等がある。

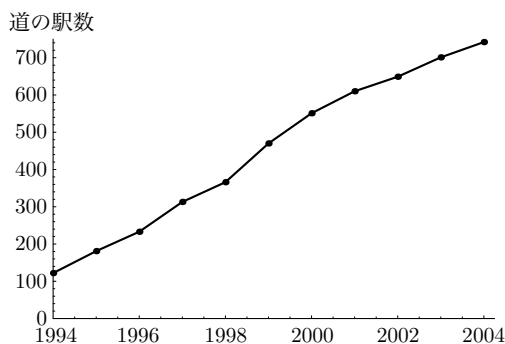


図 5.3: 全国の道の駅数の推移



図 5.4: 道の駅にのみや（栃木県二宮町）

本章では、寄り道施設が一様にかつ独立に閉鎖される状況を想定し、その際に施設に立ち寄るための寄り道距離がどの程度増加するのかを論じる。また、計画の効果として、災害対応型給油所のように計画者が閉鎖施設をコントロールできる場合との比較を行う。したがって、本章は利用者と施設との間の移動のみを扱っていた2, 3章の寄り道行動への拡張として位置付けられる。

5.1. はじめに

図 5.5 を通して本章で考察する 2 種類の寄り道方法を説明する. (a) は移動の起点 O から直接寄り道施設へ向かい, その後終点 D へ向かう場合である. 施設の位置が分かっており, 出発前からあらかじめ立ち寄る施設が決まっているときになされる移動である. (b) は起点 O から終点 D へまずは最短経路を進み, その経路上から寄り道を開始し, 施設利用後に再び元の経路に戻る場合である. 沿道から見える施設に立ち寄るような行動に対応する. (a) は 2 節で楕円モデル, (b) は 3 節で俵型モデルとして示される.

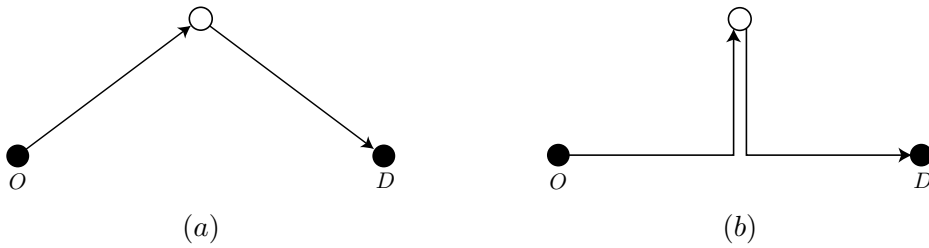


図 5.5: 寄り道方法

以下では, 直線で自由に動ける連続平面上にて楕円モデル, 俵型モデルを構築する. そして, 施設が一様にランダムに分布しているという仮定の下で, 立ち寄る施設までの寄り道距離の分布を導出する. 得られた寄り道距離分布を用いて, 施設が閉鎖されたときの平均距離を求め, いくつかの施設を補強した場合と比較することにより, 計画の効果を評価する. さらに, 連続平面を仮定したモデルが実際の道路網上の移動に対しても成立することを確認する.

第5章 移動途中の寄り道施設

5.2 楕円モデル

移動の起点 O から直接寄り道施設へ向かい、その後終点 D へ向かう移動を考える。起終点間距離を T 、途中の施設での滞在時間を考えず、時間を限界まで使って余計に走ることのできる距離を $2r$ とおく。この移動距離の増分を寄り道距離と定義する。

定義 5.1 施設への寄り道行動による移動距離の増分を寄り道距離と呼ぶ。

このとき総移動距離が等しくなる寄り道地点の軌跡は図 5.6 のように起点と終点を焦点とする楕円になる。つまり、楕円の境界上の施設へ立ち寄るときの総移動距離は $T + 2r$ となる。

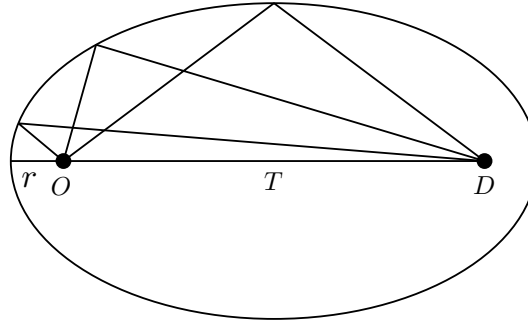


図 5.6: 楕円

移動の起終点から最も近い施設、すなわち立ち寄るための寄り道が最も小さくて済む施設までの寄り道距離分布を導出する。

定義 5.2 寄り道距離分布 $f(r)$ は移動の起終点から最も近い施設までの寄り道距離 R の確率密度関数である。

施設は図 2.1 (d) のように平面上に一様にランダムに分布していると仮定する。なお、移動の起終点が一致する場合には、施設を利用するためだけに移動することになり、[腰塚 (1985)] の状況に帰着する。したがって、以下で求める距離分布は既存研究での結果を一般化している。このことを明示するために寄り道距離 $2r$ の分布ではなく、 r の分布を求める。

寄り道距離の累積分布関数を $F(r)$ 、寄り道距離が r 以下である領域の面積を S 、この領域に施設が x 個ある確率を $P(x, S)$ と表す。このとき、 $F(r)$ は領域内に少なくとも 1 つの施設がある確率に等しく、

$$F(r) = 1 - P(0, S) \quad (5.1)$$

5.2. 楕円モデル

が成立する．両辺を r で微分すれば，寄り道距離の確率密度関数 $f(r)$ が

$$f(r) = -\frac{dP(0, S)}{dr} \quad (5.2)$$

と得られる．ここで，施設密度を ρ とすれば， $P(x, S)$ は

$$P(x, S) = \frac{(\rho S)^x}{x!} e^{-\rho S} \quad (5.3)$$

というポアソン分布に従うから [Clark, Evans (1954)],

$$f(r) = -\frac{d}{dr} e^{-\rho S} \quad (5.4)$$

となる．

楕円モデルにおいて，寄り道距離が r 以下である領域の面積 S は楕円の面積として

$$S = \pi \left(\frac{T}{2} + r \right) \sqrt{Tr + r^2} \quad (5.5)$$

と表される． S は r が大きいときには r についてほぼ2次の関数 $S \simeq \pi r^2$ となり，また起終点間距離 T に関しては， T が大きくなるにつれ1.5次関数 $S \simeq \frac{\pi}{2} \sqrt{r} T^{3/2}$ として表される．これより，寄り道距離が大きくなる程立ち寄り可能な領域は大きくなり，その傾向は起終点間距離が大きいとき程顕著になるといえる．式 (5.4) より，楕円モデルの寄り道距離分布は

$$f(r) = \rho \pi \left\{ \sqrt{Tr + r^2} + \left(\frac{T}{2} + r \right)^2 \frac{1}{\sqrt{Tr + r^2}} \right\} \exp \left\{ -\rho \pi \left(\frac{T}{2} + r \right) \sqrt{Tr + r^2} \right\} \quad (5.6)$$

と求まる．図 5.7 は $\rho = 1$ として $T = 0, 1, 2, 3$ と変化させたときの寄り道距離分布を表している． T が大きくなるにつれて寄り道距離分布は左側にシフトすることが分かる．つまり，長距離移動になる程寄り道距離が小さくても途中で施設に立ち寄れる確率が高くなることを示している．これは直観と合致する． $T = 0$ は移動の起終点が一致し，楕円が円になる場合であり，既存研究の結果，すなわち式 (2.8) において $k = 1$ としたもの的一致する．図から， $T = 0$ の分布は $T = 1, 2, 3$ の分布と大きく異なっているので，起終点間距離 T を考慮する意義が大きいことが分かる．

第5章 移動途中の寄り道施設

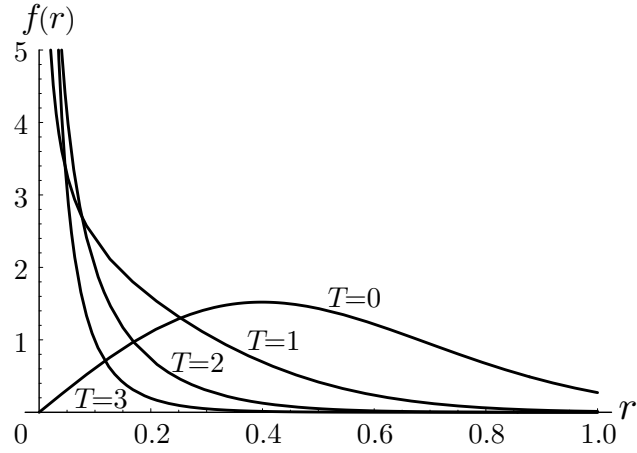


図 5.7: 寄り道距離分布（楕円モデル）

次に，立ち寄るための寄り道距離が k 番目に小さい施設までの距離分布を求める．これにより，2 番目，3 番目に近い施設を利用するためにはどれだけ寄り道をしなければならないかが分かる．逆に，寄り道できる時間が決まっている場合に，立ち寄り可能な施設がいくつあるかという選択肢の数を知ることができる．

k 番目に近い施設までの寄り道距離分布 $f_k(r)$ は，累積分布関数を $F_k(r)$ とすると，先程と同様の議論から， $F_k(r)$ は領域内に少なくとも k 個の施設がある確率に等しく，

$$F_k(r) = 1 - \sum_{x=0}^{k-1} P(x, S) \quad (5.7)$$

より，両辺を r で微分して

$$f_k(r) = -\frac{d}{dr} \sum_{x=0}^{k-1} P(x, S) \quad (5.8)$$

から導出される [Dacey (1968)]．

命題 5.1 寄り道施設が無限平面上にランダムに配置されているとする．楕円モデルに対応する寄り道行動の下での k 番目に近い施設までの寄り道距離分布 $f_k(r)$ は次式で表される：

$$f_k(r) = \frac{\rho\pi}{(k-1)!} \left\{ \sqrt{Tr + r^2} + \frac{(T/2 + r)^2}{\sqrt{Tr + r^2}} \right\} \left\{ \rho\pi \left(\frac{T}{2} + r \right) \sqrt{Tr + r^2} \right\}^{k-1} \exp \left\{ -\rho\pi \left(\frac{T}{2} + r \right) \sqrt{Tr + r^2} \right\} \quad (5.9)$$

5.2. 楕円モデル

当然だが，上式で $k = 1$ とおくと式 (5.6) に帰着する． $T = 1, \rho = 1, k = 1, 2, 3$ のときの k 次近隣距離分布を図 5.8 に示す． k が大きくなるにつれ，立ち寄るためには大きな寄り道距離が必要になることが読み取れる．

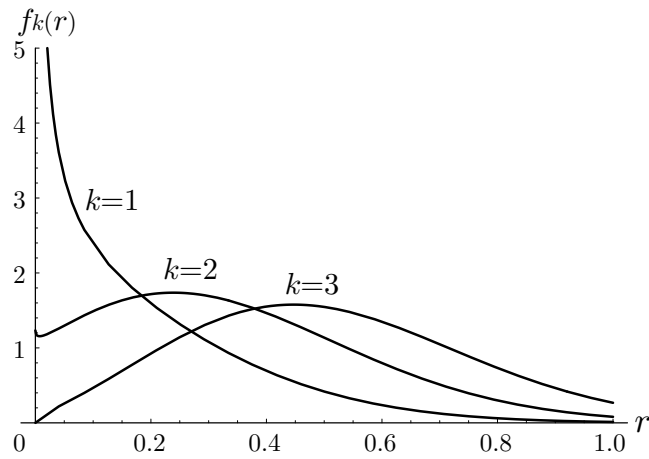


図 5.8: k 番目に近い施設までの寄り道距離分布（楕円モデル）

5.3 俵型モデル

起点 O から終点 D へ最短経路で移動し，その経路上から寄り道を開始し，施設利用後に再び元の経路に戻る移動を考える．このとき，総移動距離が等しくなる寄り道地点の軌跡は図 5.9 のような俵型になる．つまり，俵型の境界上にある施設に立ち寄るときの総移動距離は $T + 2r$ となる．

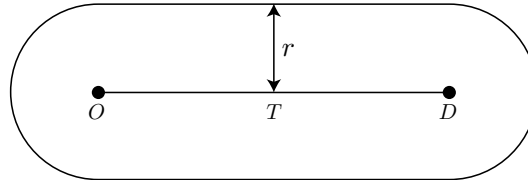


図 5.9: 俵型

俵型モデルにおいて，寄り道距離が r 以下である領域の面積 S は俵型の面積として

$$S = 2Tr + \pi r^2 \quad (5.10)$$

と表される．楕円の面積は起終点間距離 T の 1.5 次関数であったのに対し，俵型の面積は T の 1 次関数である．したがって， T が大きくなるにつれ，両者の差は拡大していく．俵型モデルの寄り道距離分布は式 (5.4) より，

$$f(r) = 2\rho(T + \pi r) \exp\{-\rho(2Tr + \pi r^2)\} \quad (5.11)$$

と求まる．図 5.10 は $\rho = 1, T = 0, 1, 2, 3$ のときの寄り道距離分布を表している．図 5.7 の楕円モデルの分布と比較すると，俵型の方が寄り道距離は大きく，この傾向は起終点間距離 T が大きくなる程顕著である．楕円モデルと同様に， $T = 0$ の結果は既存研究のものと一致するので，ここで導出した距離分布はその一般化である．

5.3. 俵型モデル

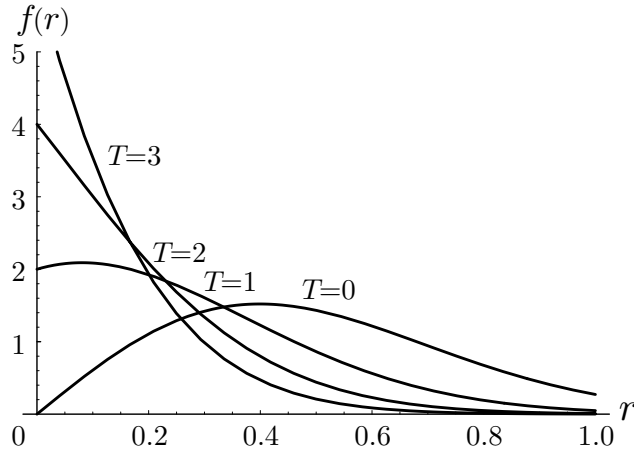


図 5.10: 寄り道距離分布（俵型モデル）

k 番目に近い施設までの寄り道距離分布も式 (5.8) より以下のように求まる.

命題 5.2 寄り道施設が無限平面上にランダムに配置されているとする. 俵型モデルに対応する寄り道行動の下での k 番目に近い施設までの寄り道距離分布 $f_k(r)$ は次式で表される:

$$f_k(r) = \frac{2\rho}{(k-1)!} (T + \pi r) (2\rho T r + \rho\pi r^2)^{k-1} \exp\{-\rho(2Tr + \pi r^2)\} \quad (5.12)$$

上式で $k = 1$ とおくと式 (5.11) に帰着する. $T = 1, \rho = 1, k = 1, 2, 3$ のときの k 次近隣距離分布を図 5.11 に示す. 図 5.8 の楕円モデルと比べると, 俵型モデルの方が施設への立ち寄りが困難であることが分かる.

第5章 移動途中の寄り道施設

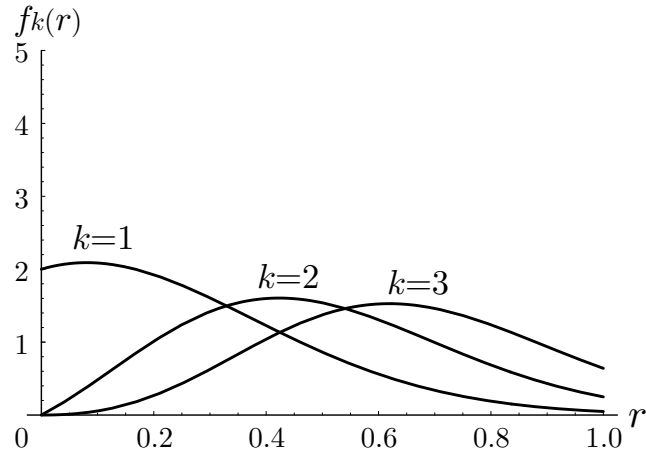


図 5.11: k 番目に近い施設までの寄り道距離分布 (俵型モデル)

楕円モデル，俵型モデルにおける寄り道距離に関する差異をより吟味するために，起終点間距離と寄り道距離を同一の値としたときに立ち寄り可能な領域を比較すると図 5.12 のようになる．経路中央部の膨らみの分だけ楕円の方が俵型よりも立ち寄り可能な領域が大きく，施設利用の際に選択の幅が大きいことが分かる．

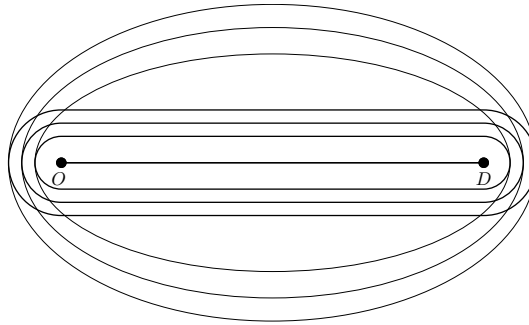


図 5.12: 楕円と俵型の比較

次に，最も近い施設までの平均寄り道距離を比較する．最も近い施設までの平均寄り道距離 $E(R)$ は，寄り道距離分布 $f(r)$ から

$$E(R) = \int_0^{\infty} r f(r) dr \quad (5.13)$$

として得られる．しかし，楕円モデル，俵型モデルのいずれの場合も一般に初等関数では表すことができない．そこで， $\rho = 1, 2, 3$ のときの数値積分による結果を図 5.13 に載せた．実線は楕円モデル，破線は俵型モデルの平均寄り道距離である． $T = 0$ の平均値は両

5.3. 俵型モデル

モデルで一致しているが，起終点間距離 T が大きくなるに従い楕円モデルの方が急速に小さくなっていく．つまり，利用者の寄り道方法として直接施設へ向かう楕円モデルの方が，最短経路に沿ってそこから寄り道を開始し戻る俵型モデルより距離が短縮できる様子が見て取れる．また，当然のことだが施設密度が高くなれば，いずれのモデルでも寄り道距離は小さくなることも確認できる．

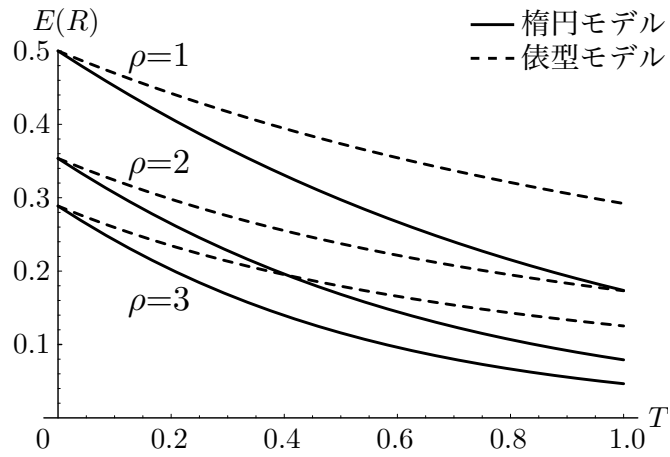


図 5.13: 平均寄り道距離

5.4 施設閉鎖と計画の効果

施設が一様にかつ独立に閉鎖されたときに，利用可能な施設に立ち寄るための寄り道距離がどの程度増加するのかを考える．施設残存率を p とすると，利用可能な最寄り施設までの寄り道距離分布は式 (5.6), (5.11) において密度 ρ を $p\rho$ に置き換えることで以下のようになれる．

命題 5.3 寄り道施設が無限平面上にランダムに配置されているとする．施設が一様にかつ独立に閉鎖されたとき，最も近い施設までの寄り道距離分布 $f(r)$ は施設残存率を p とすると次のようになる：

楕円モデル

$$f(r) = p\rho\pi \left\{ \sqrt{Tr + r^2} + \left(\frac{T}{2} + r \right)^2 \frac{1}{\sqrt{Tr + r^2}} \right\} \exp \left\{ -p\rho\pi \left(\frac{T}{2} + r \right) \sqrt{Tr + r^2} \right\} \quad (5.14)$$

俵型モデル

$$f(r) = 2p\rho(T + \pi r) \exp\{-p\rho(2Tr + \pi r^2)\} \quad (5.15)$$

図 5.14, 図 5.15 は $T = 1, \rho = 1, p = 1.0, 0.7, 0.4$ のときの寄り道距離分布を表している．残存率 p が小さくなるにつれて分布が右にシフトし，施設に立ち寄るための距離が大きくなっていく様子が見て取れる．また，俵型モデルの方が楕円モデルに比べて施設への立ち寄りがより困難であることが分かる．

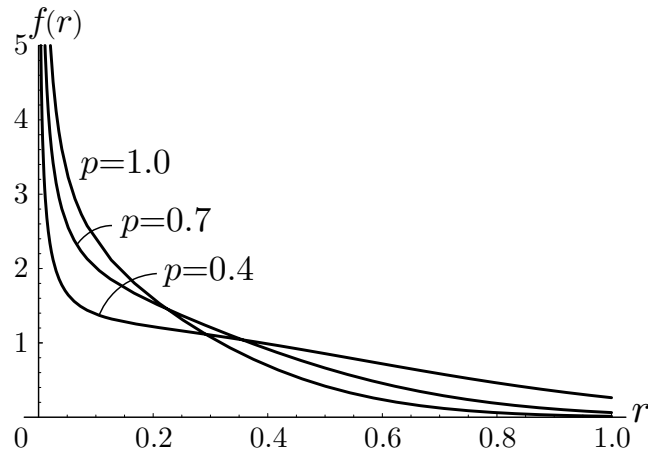


図 5.14: 施設閉鎖時の寄り道距離分布（楕円モデル）

5.4. 施設閉鎖と計画の効果

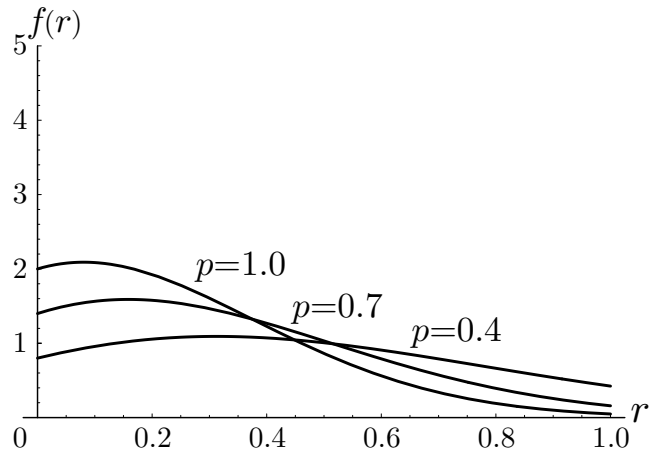


図 5.15: 施設閉鎖時の寄り道距離分布（俵型モデル）

最も近い施設までの平均寄り道距離を表すと図 5.16 のようになる。寄り道距離は残存率が小さくなるにつれて増加し、全ての施設が利用できない ($p = 0$) 場合には無限大になることが分かる。また、常に楕円モデル方が俵型モデルよりも平均寄り道距離が小さく、50%の施設が閉鎖されたとき ($p = 0.5$) で比較すると、楕円モデルは俵型モデルの 70.9%となっている。

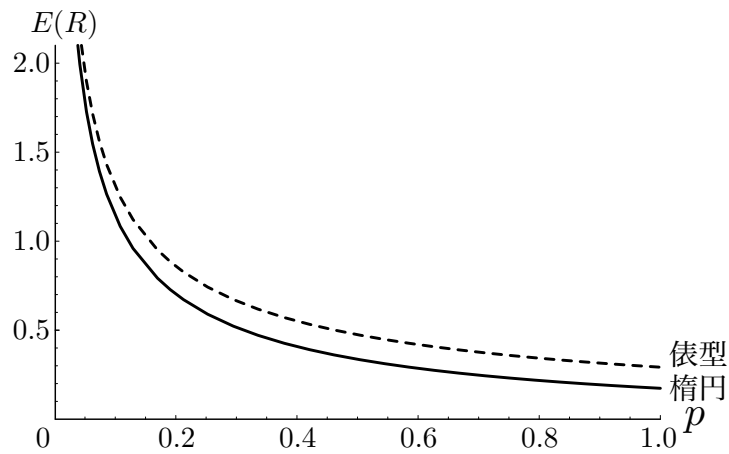


図 5.16: 施設閉鎖時の平均寄り道距離

第5章 移動途中の寄り道施設

計画の効果として、先に述べた災害対応型給油所の整備効果を検証する。災害によって給油所が一様にかつ独立に閉鎖される状況において、対応型給油所は閉鎖されないものとする。そして、対応型給油所を整備することで寄り道距離の増加をどの程度抑えられるのかを考える。

対応型給油所の割合を α とすると、対応後の施設残存率 p' は、災害の規模が同じであっても対応前の残存率 p よりも大きくなり、 $p' = p + \alpha(1 - p)$ となる。すなわち、対応前には被害を受けて閉鎖していた $1 - p$ の給油所の内で、 α の割合の給油所が対応型になったために閉鎖されずに残ることになる。

対応前と20%の給油所が災害対応型である場合の平均寄り道距離を、楕円モデル、俵型モデルのそれぞれについて図5.17, 図5.18に示す。ただし、 $T = 1, \rho = 1$ としている。全ての給油所が利用可能であるとき対応前と対応後の平均距離は一致するが、残存率が小さくなるに従って、差が大きくなることが分かる。特に $p = 0$ のとき、対応前の給油所は全て閉鎖されてしまうことから平均距離が無限大となるのに対し、対応後は $p' = \alpha$ となり、対応型給油所が残存するので有限の値で抑えられる。災害対応型の整備効果を $p = 0.5$ のときで評価すると、対応後の平均距離は対応前に比べて、楕円モデルで84.9%、俵型モデルで88.3%となっている。

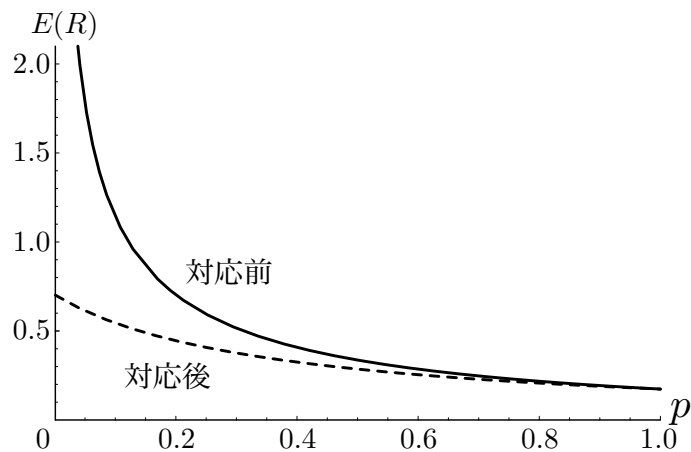


図 5.17: 対応前後の平均寄り道距離（楕円モデル）

5.4. 施設閉鎖と計画の効果

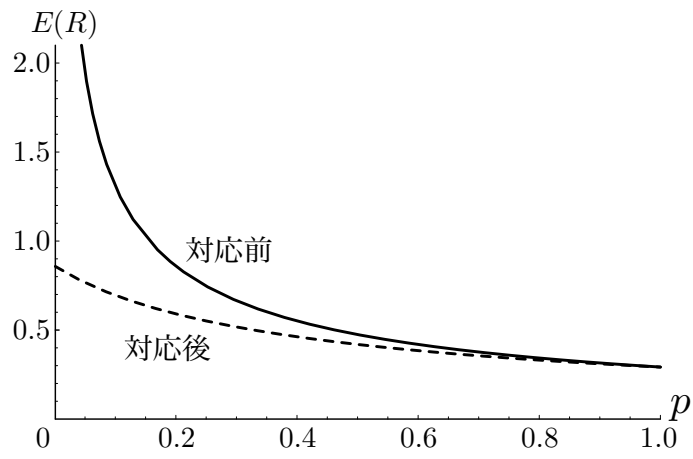


図 5.18: 対応前後の平均寄り道距離（俵型モデル）

5.5 道路網上の移動

最後に、図 5.6 や図 5.9 のように連続平面上で定まる楕円や俵型形状が実際の道路網でも現れることを観察する。つまり、楕円モデル、俵型モデルが実際の道路網上でも成立することを確かめる。

ここでは、茨城県の国道・主要地方道から成る道路網を用いる。茨城県では国道 6 号線に沿った南北方向の移動が卓越しているため、出発地を取手市にある千葉県との県境、目的地を北茨城市にある福島県との県境とする。これら出発地と目的地との間の最短経路は国道 6 号線と一致する。

まず、楕円モデルに従う寄り道方法の下で、道路網上のある地点に立ち寄るための寄り道距離を求めるには、出発地からその地点までの道路距離およびその地点から目的地までの道路距離を求める。そしてその和から、出発地と目的地との間の最短経路距離を引いたものがその地点の寄り道距離となる。本研究では、[田村, 腰塚 (2000)] が示した場合分けの方法を応用し、リンク上のすべての地点での寄り道距離を求める。リンク上で寄り道距離は隣接ノードからの距離に比例して増加する。

各リンクにおける寄り道距離を 3 次元的に表したものが図 5.19 である。高さがその地点に立ち寄るために必要な寄り道距離を表している。これから、県西地域や南東部の鹿行地域に加え、道路密度の低い県北西部では最短経路である国道 6 号線からさほど離れていない地点でも寄り道距離が大きくなっており、時間的余裕が少ないときには立ち寄れないことが分かる。

一方、俵型モデルに従う寄り道方法の下では、寄り道距離はその地点から起終点間の最短経路上にあるノードへの最短距離で与えられる。図 5.20 は各リンクにおける寄り道距離を 3 次元的に表している。楕円モデルの図 5.19 と比較すると、どのリンクでも寄り道距離が大きくなっており、特に、経路中央部の谷の深さが強調されていることが分かる。

5.5. 道路網上の移動

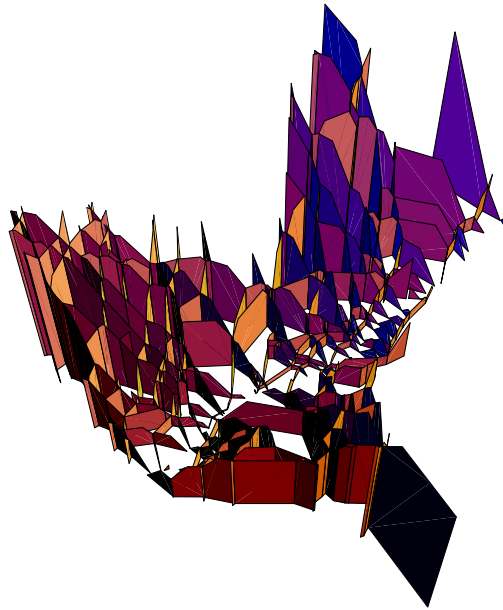


図 5.19: 道路網上の寄り道距離（橢円モデル）

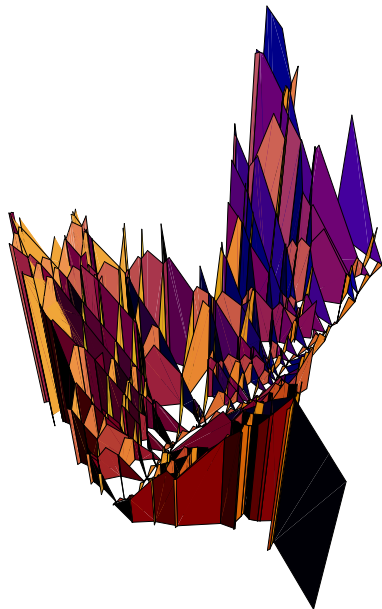


図 5.20: 道路網上の寄り道距離（俵型モデル）

第5章 移動途中の寄り道施設

許容できる寄り道距離が与えられれば，立ち寄り可能な地点はその値以下の値を持つリンクの集合となる．そこで，図 5.19 や図 5.20 を一定の高さで水平に切った断面の形が連続平面上で得られた楕円や俵型に対応するかどうかを確認しておこう．図 5.21, 図 5.22 はそれぞれ寄り道距離を 10, 20, 30km とした際に，立ち寄り可能な道路網の部分を表している．図 5.21 から，道路密度の低い県北部を除けば，断面の形はほぼ楕円とみなすことができる．また，図 5.22 では福島県側や千葉県側のリンクが含まれていないので，俵型の曲部の形状を確認できないが，断面の形はほぼ俵型とみなすことができよう．楕円モデルと比べて，経路中央部の膨らみがないことが見て取れる．

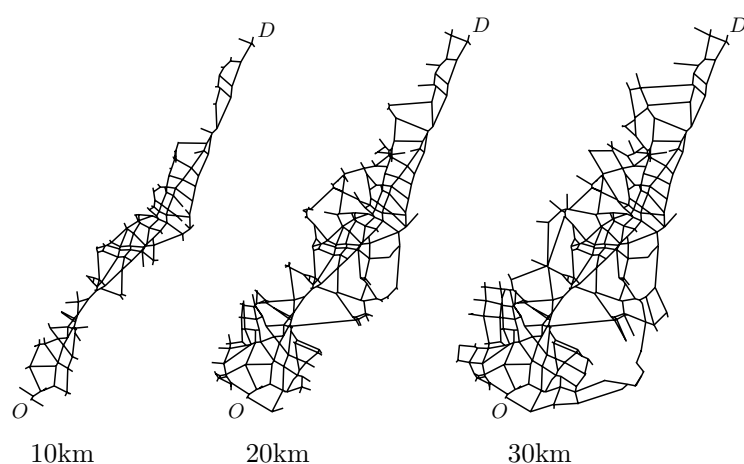


図 5.21: 寄り道距離 10, 20, 30km で立ち寄り可能な部分（楕円モデル）

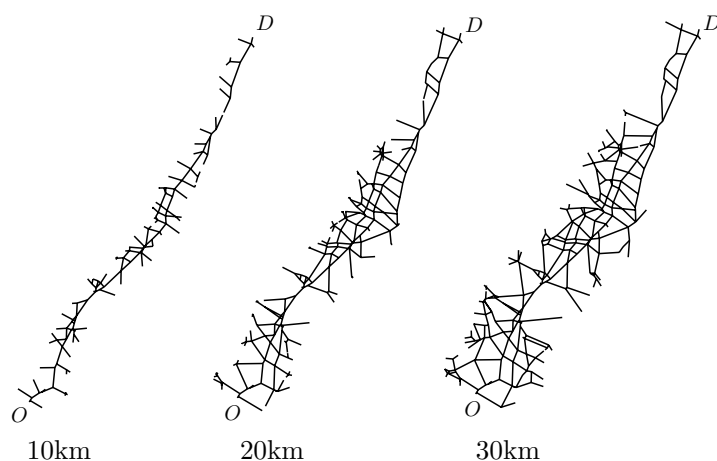


図 5.22: 寄り道距離 10, 20, 30km で立ち寄り可能な部分（俵型モデル）

5.6 まとめ

本章では、移動途中の寄り道施設が閉鎖されたときのサービス低下と計画の効果を評価するため、別の目的で移動途中に寄り道をして施設を利用するという状況を考えた。すなわち、移動という観点から出発地・目的地の2地点からの距離で施設サービスを評価している。本章で得られた知見は次の2点である。

- (1) 2種類の寄り道パターンに対応する楕円モデルと俵型モデルを提案した。それぞれのモデルにおいて最も近い施設までの寄り道距離分布を導出し、長距離移動になる程、施設の密度が高くなる程施設への立ち寄り可能性が増加することを示した。また、直接施設へ向かう楕円モデルの方が最短経路上から寄り道を開始する俵型モデルよりも施設への立ち寄りが容易であることが分かった。本章で得られた結果は既存研究において利用者と施設との間の移動のみを想定して得られた結果を特別な場合として含んでいる。さらに、これら直線移動が可能な連続平面で定まるモデルが実際の道路網上でも成り立つことを茨城県の道路網を用いて確認した。
- (2) 施設が閉鎖された場合の平均寄り道距離を求め、施設閉鎖による損失について論じた。施設が閉鎖される状況においても、楕円モデルの方が寄り道に要する距離が小さいことを示した。そして、いくつかの施設を補強した場合と比較することにより計画の効果を評価した。例えば、20%の施設が災害対応型である場合には、対応型が整備されていなければ50%の施設が閉鎖される状況において、施設に立ち寄るための平均距離を楕円モデルで84.9%、俵型モデルで88.3%に抑えられる。

第II部

道路網の頑健性

第6章 道路閉塞時の迂回距離

6.1 はじめに

第II部では、道路網の頑健性を評価する。具体的には、災害や事故のために道路閉塞が発生した際に、迂回によって移動距離がどの程度増加するのかという単純な問題を分析する。日常的に最短経路を利用しており、この経路上で道路閉塞が発生したときには最短移動として定まる代替経路を利用するものとする。なお、分析を単純化するために、道路混雑は生じないと仮定する。実際の道路網での分析に加えて、図6.1の格子状道路網、放射環状道路網等の仮想道路網も考察の対象とする。

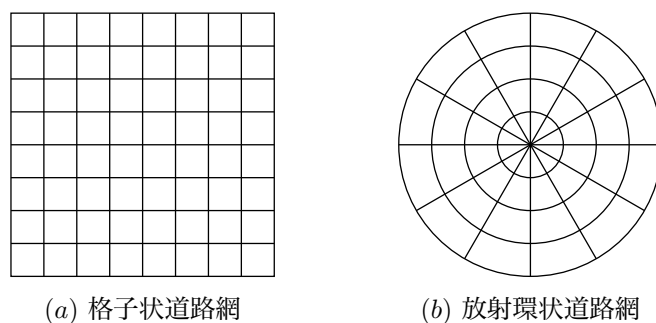


図 6.1: 格子状道路網と放射環状道路網

格子状道路網、放射環状道路網はいずれも都市交通網の典型的パターンである。格子状パターンは京都や札幌の中心部、アメリカのマンハッタンやロサンゼルス、北京に見られる。放射環状パターンは東京の主要幹線道路、宇都宮市周辺、規模の小さいものでは田園調布（図 6.2）や宮城県富谷町の新富谷ガーデンシティ（図 6.3）に見られる。海外ではロンドン、モスクワ、ワルシャワ、ブカレスト、ドイツのカールスルーエが代表的である[秋山 (1990)]。もちろん、実際の道路網は図 6.1 のような完全な格子状や放射環状ではあり得ないが、理想状態としてこれらのパターンが持つ性質を解明しておくことは、実際の道路整備計画にも良い見通しを与えるであろう。

第6章 道路閉塞時の迂回距離



図 6.2: 田園調布

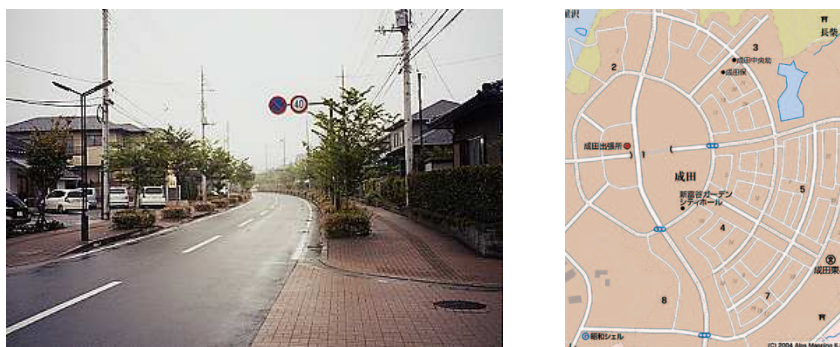


図 6.3: 新富谷ガーデンシティ

このような道路網パターンが移動の効率に与える影響については、多くの研究蓄積がある。[腰塚, 栗田 (1986)] は環状路の役割を異なる放射路間の移動に着目して論じている。[柳井 (1995)] は放射環状道路網ではたとえ出発地と目的地が一様に分布しているとしても、環状路が混雑するという性質を解明している。[島川, 他 (2001)] では首都高速中央環状線の建設による混雑緩和効果について詳しく推測されている。[腰塚 (1999)] は放射状パターンと格子状パターンを距離分布と通過量分布という2つの指標を用いて比較している。任意の道路網での距離分布と通過量分布については[田村, 腰塚 (2000)] にて導出方法が示されている。[栗田 (2001a)] は道路が無限に稠密に存在するとの仮定の下で、直線距離、直交距離、放射・環状距離の分布を算出している。無限に稠密な放射環状道路網を有する扇形都市での移動距離分布は[鵜飼, 栗田 (2002)] にて、通過量分布は[田中, 栗田 (2001)] にて求められている。[Vaughan (1987)] は格子状パターンや放射状パターンを含む様々な移動方法を直線距離との比較から特徴付けている。[腰塚, 小林 (1983)] は直線距離と道路距離が比例関係にあることを理論的に示しており、さらに[田村, 他 (2001)] はその比を迂回率と定義し、迂回率を用いて道路網を評価している。

6.1. はじめに

本章では、最短経路上の1箇所のリンクが通行不能となった場合、移動距離が最短距離と比較してどの程度大きくなるのかを理論的および実証的に明らかにする。このときの移動距離の増分を迂回距離と定義する。

定義 6.1 道路閉塞時の迂回による最短経路距離の増分を迂回距離と呼ぶ。

移動者は出発前に道路閉塞に関する情報を完全に認知していると仮定する。そして、この完全情報を基に最短となる代替経路を選択するものとする。

第I部「施設配置の頑健性」では、施設までの距離を全て直線距離で計測しており、災害時の道路閉塞等によるアクセス障害は考慮されていなかった。もし仮に、道路閉塞時の移動距離が直線距離から大きく外れるようであれば、直線距離を仮定していた第I部の分析を災害時に適用するのは難しくなる。逆に、直線距離との間に明確な関係が確認できれば、直線距離を用いることの後ろめたさも多少は解消することができよう。本章にて迂回距離と最短距離との関係を議論するのは、このことを確認するためでもある。

以下では、代表的な道路網パターンである格子状道路網、放射環状道路網、さらに任意方向へ直線で進める稠密道路網を用いて迂回距離と最短距離との関係を理論化する。次に、実際の道路網における迂回距離と最短距離との関係を観察する。そして、仮想道路網から得られた迂回距離と最短距離との関係式を用いて、最小二乗法により回帰式のパラメータを推定し、実際の道路網から得られたデータの適合度や係数を吟味する。

6.2 仮想道路網

仮想的な道路網を用いて迂回距離と最短距離との関係を理論化する．その際，代表的な道路網パターンである格子状道路網，放射環状道路網，さらに任意方向へ直線を進める稠密道路網を対象とする．ただし，放射環状道路網では道路網中心でのアクティビティが高いと想定されるので，道路網中心への移動を考える．他の2つの道路網については，道路網が空間的に一様であるので任意の2点間の移動を考える．

6.2.1 格子状道路網

1辺の長さが ℓ である格子状道路網（図6.4）を考える．起終点 OD 間の最短移動に関して，起点と終点との相対的位置関係から2つの場合分けを考える．第一の場合は図6.4で示した起点 O から終点 D_1 への移動のように最短経路が複数あるときである．このときは，ある1つの最短経路上にてどのリンクが閉鎖されたとしても別の経路を使うことができるので，迂回をせずに済み，迂回距離 y_L は

$$y_L = 0 \quad (6.1)$$

となる．第二の場合は図6.4で示した起点 O から終点 D_2 への移動のように最短経路が一意に決まるときである．このときは，最短経路上にてある1本のリンク（図中 \times ）が閉鎖された場合の迂回距離 y_L は，閉鎖リンクの位置に依存せず，

$$y_L = 2\ell \quad (6.2)$$

となる．

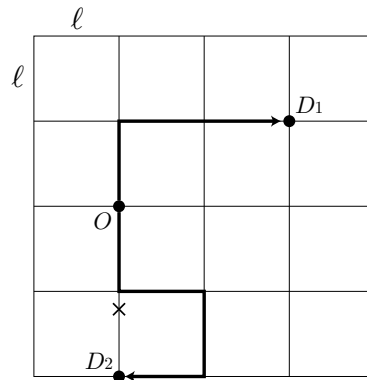


図6.4: 格子状道路網での迂回

6.2. 仮想道路網

このように、2つの場合ともに迂回距離は最短距離によらない。したがって、式(6.1)、(6.2)を含む一般形として、次のように表現できる。

命題 6.1 格子状道路網における任意の起終点間の最短経路上にて1本のリンクが閉鎖された場合の迂回距離 y_L は、定数 α を用いて

$$y_L = \alpha \quad (6.3)$$

と表現することができる。

では、 $n \times n$ 格子状道路網上であらゆるノード間に移動が発生する場合に、迂回距離の平均値を求めてみよう。移動の起点を1つのノードに固定すると、終点ノードは $n^2 - 1$ 存在する。その内で、迂回距離が $y_L = 0$ となるのは最短経路が複数ある場合でその数は $(n-1)^2$ 、一方、 $y_L = 2\ell$ となるのは最短経路が一意に定まる場合でその数は $2(n-1)$ である。したがって、迂回距離の平均値は

$$\bar{y}_L = \frac{4\ell}{n+1} \quad (6.4)$$

となる。

6.2.2 放射環状道路網

隣り合う放射路のなす角が φ である放射環状道路網（図6.5）を考える。ただし、道路網中心でのアクティビティが高いと想定されるので、道路網中心への移動のみを考える。この場合、起終点 OD 間の最短経路は起点 O から中心 D までの放射路として一意に決まる。この放射路上のリンクが閉鎖された状況を考えると、図6.5から読み取れるように、迂回距離は閉鎖リンクの中心 D からの距離に正比例する。例えば、 OD 間の中間の位置（図中×）で通行不能となった場合、迂回距離 y_R は、最短距離 x_R に対し、

$$y_R = \frac{\varphi}{2} x_R \quad (6.5)$$

となる。また、終点 D に最も遠いリンク（図中□）での閉鎖の場合、

$$y_R = \varphi x_R \quad (6.6)$$

と最悪のケースとなる。

第6章 道路閉塞時の迂回距離

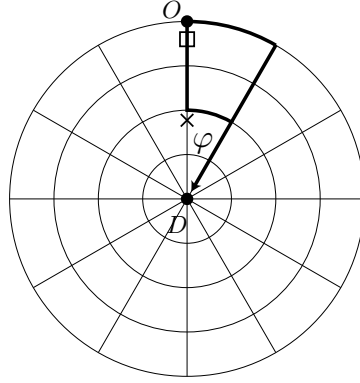


図 6.5: 放射環状道路網での迂回

このように，迂回距離は閉鎖リンクの位置と終点 D との距離に正比例する．式 (6.5), (6.6) を包含する形として，次のように表現できる．

命題 6.2 放射環状道路網における道路網中心への最短経路上にて 1 本のリンクが閉鎖された場合の迂回距離 y_R は，最短距離 x_R と定数 β を用いて

$$y_R = \beta x_R \quad (6.7)$$

と表現することができる．

つまり，迂回距離は最短距離に比例して大きくなることが分かる．

では，道路閉塞の起こりやすさが最短経路上のどこでも一定である場合に，迂回距離の平均値を求めてみよう．環状路が無限に稠密に存在すると仮定すると，迂回距離は閉鎖地点が中心から離れるにつれて，中心からの距離に比例して 0 から最悪のケース φx_R まで連続的に増加する．したがって，迂回距離の平均値は

$$\bar{y}_R = \frac{\varphi}{2} x_R \quad (6.8)$$

となる．

6.2.3 稠密道路網

直線で自由に動ける無限に稠密な道路網を考える．この道路網での起終点 OD 間の最短経路は OD を結ぶ線分となる．ここで，図 6.6 のようにこの線分上の起点 O から距離 s の地点を中心とする半径 r の円盤領域が通行不能となった場合を考える．ここで r は面的な道路閉塞の大きさに対応する値である．迂回距離 y_E は，最短距離 x_E に対し，

$$y_E = \sqrt{s^2 - r^2} + \sqrt{(x_E - s)^2 - r^2} + r\theta - x_E, \quad (6.9)$$

$$\text{ただし, } \theta = \pi - \arccos \frac{r}{s} - \arccos \frac{r}{x_E - s}$$

となる．したがって， x_E が r に対して十分大きいときには，冪級数展開によって

$$y_E \simeq \frac{r^2 x_E}{2s(x_E - s)} \quad (6.10)$$

と表現できる．よって，通行不能円盤の中心が起終点の中点の位置，つまり $s = x_E/2$ のとき $y_E \simeq 2r^2/x_E$ となる．円盤の中心が起終点間の $1/4$ ($3/4$) の位置，つまり $s = x_E/4$ のとき $y_E \simeq 8r^2/(3x_E)$ となる．

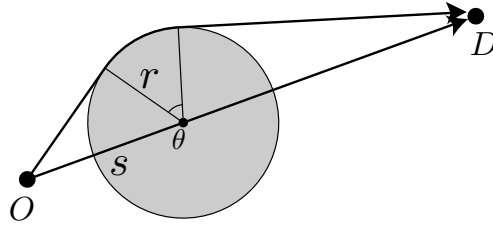


図 6.6: 稠密道路網での迂回

このように，迂回距離は円盤の中心の位置 s に依存するが，最短距離 x_E が大きいときに限り一般形として，次のように表現できる．

命題 6.3 稠密道路網における任意の起終点間の最短経路上にて円形の通行不能領域が発生した場合の迂回距離 y_E は，最短距離 x_E と定数 γ を用いて，最短距離 x_E が大きいときに限り

$$y_E = \frac{\gamma}{x_E} \quad (6.11)$$

と表現することができる．

つまり，迂回距離は最短距離に逆比例する．これは，長距離移動になる程経路選択の幅が広がり，迂回距離が小さくなると解釈できよう．

第6章 道路閉塞時の迂回距離

以上の結果をまとめると、表 6.1 のようになる。3つの道路網パターンに対して、迂回距離 y を最短距離 x を用いて示した。迂回距離 y はそれぞれ最短距離 x の一定、増加、減少関数になっていることに留意されたい。このことから、3つの道路網パターンは迂回に対して全く異なる特性を持つことが分かる。

表 6.1: 迂回距離

道路網	迂回距離
格子状	$y = \alpha$
放射環状	$y = \beta x$
稠密	$y = \frac{\gamma}{x}$

6.3 実際の道路網

6.3.1 都道府県レベルの道路網

都道府県レベルとして茨城県、長野県、栃木県、千葉県 of 国道・主要地方道から成る道路網（図 6.7～図 6.10）を考察の対象とする。茨城県は平地が多く、道路網が比較的発達している。一方、長野県は山地が多く、南北に細長い形とも相まって、南北方向の道路が卓越している。栃木県は宇都宮市の中心性が高く、道路形態は宇都宮市を中心とする放射環状パターンに近い。千葉県は道路網が発達している北部に対して、南部は密度が低く、道路網の濃淡がはっきりしているという特徴がある。

移動の起終点は 2000 年時点で人口 5 万人以上の都市（茨城県：15 都市、長野県：11 都市、栃木県：10 都市、千葉県：28 都市）の市役所に最も近いノード（図中○）とし、これらの都市間（茨城県：105 ペア、長野県：55 ペア、栃木県：45 ペア、千葉県：378 ペア）で移動が一様に発生するものとする。

6.3. 実際の道路網

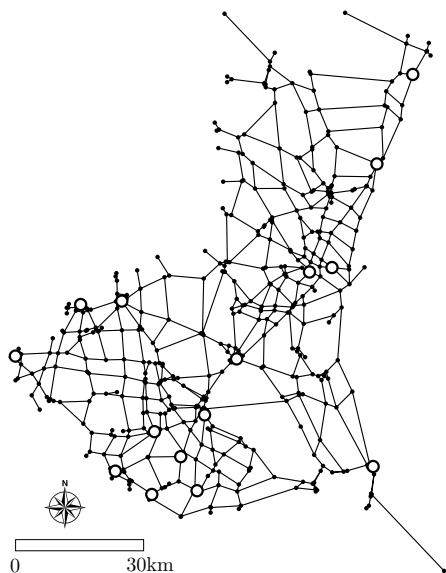


図 6.7: 茨城県道路網
ノード数：470, リンク数：705

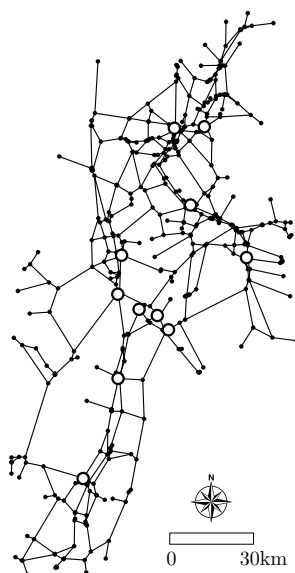


図 6.8: 長野県道路網
ノード数：428, リンク数：574

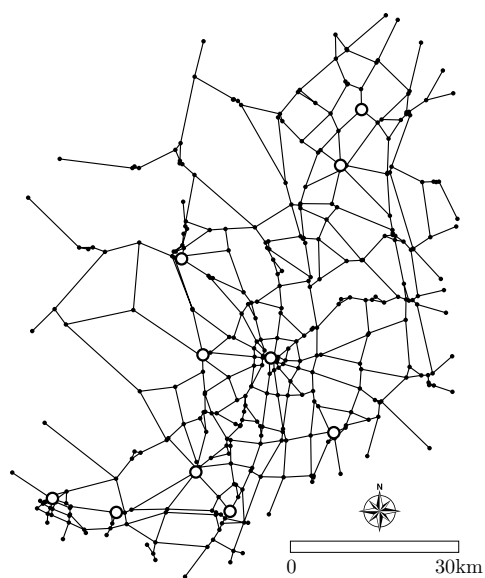


図 6.9: 栃木県道路網
ノード数：368, リンク数：554

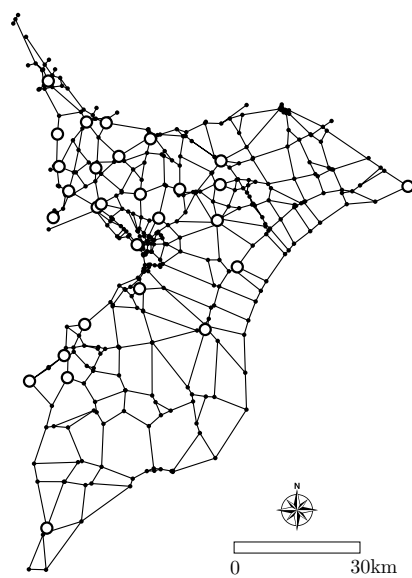


図 6.10: 千葉県道路網
ノード数：416, リンク数：646

第6章 道路閉塞時の迂回距離

迂回距離の計算方法をつくば市から水戸市への移動を例に説明する。図 6.11 は移動の起終点をそれぞれつくば市役所に最も近いノード、水戸市役所に最も近いノードに固定し、これらノードを結ぶ最短経路とその経路上で閉鎖リンクを変化させたときの迂回経路を表している。最短経路距離 58.5km に対し、最短経路上の 1 箇所のリンクが閉鎖された場合の迂回距離は、閉鎖リンクがつくば市役所周辺 (a) のとき 2.5km、中間の霞ヶ浦付近 (b) のとき 16.0km、水戸市役所周辺 (c) のとき 6.5km となる。つくば市、水戸市周辺は道路網が密に整備されているため、閉鎖で生じる迂回距離は小さい。一方、霞ヶ浦付近のように片側周辺に道路が全くなく、かつ反対側周辺でも道路密度が低ければ閉鎖による迂回距離は大きくなる。

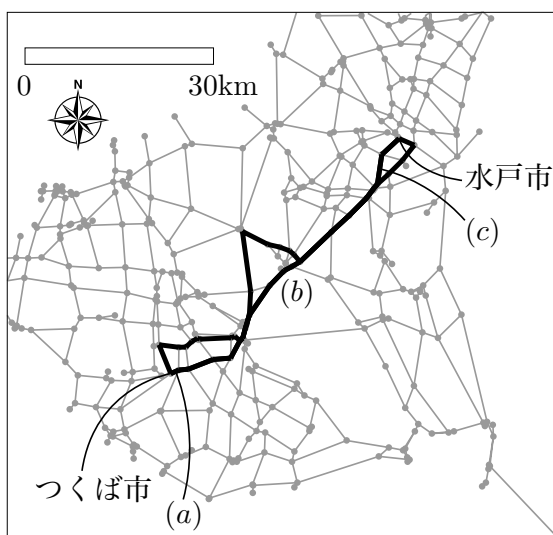


図 6.11: つくば・水戸間の迂回経路

このように、迂回距離は閉鎖リンクの位置によって様々な値をとる。そこで、各起終点ペアについての迂回距離の代表値として、中間的水準でのシナリオを想定して迂回距離のメディアン、ならびに最悪のシナリオを想定して迂回距離の最大値を用いる。すなわち、起終点ペアの最短経路上にあるリンクを 1 本ずつ閉鎖し、各リンクの迂回距離を小さい方から順に並べたものからメディアン・最大値を求め、それらをその起終点ペアについての代表値とする。メディアン・最大値の求め方に関して、各リンク長に応じて重みを付けることも可能であるが、ここでは単純にリンクの長さは考慮しないこととする。

6.3. 実際の道路網

図 6.12～図 6.15 は横軸に起終点間の最短距離 x ，縦軸に迂回距離のメディアン y をプロットしたものである。茨城県，栃木県では全て 8km 以内の迂回に収まっているのに対し，長野県は 10km を超えるものも存在する。例えば，塩尻・佐久間では 12.8km，塩尻・岡谷間では 11.9km となる。千葉県では，浦安・市川間が到達不能となるために迂回距離が無限大（図中○で示す）となってしまう。起終点ノードにリンクが 1 本しか接続していない場合には，そのリンクが閉鎖されると到達不能となるため，迂回距離は無限大となる。また，浦安・流山間では 18.4km，流山・松戸間で 17.4km と大きくなる。つまり，メディアンという代表値から見ると，長野県や千葉県の道路網が道路閉塞に対して脆弱であるといえる。

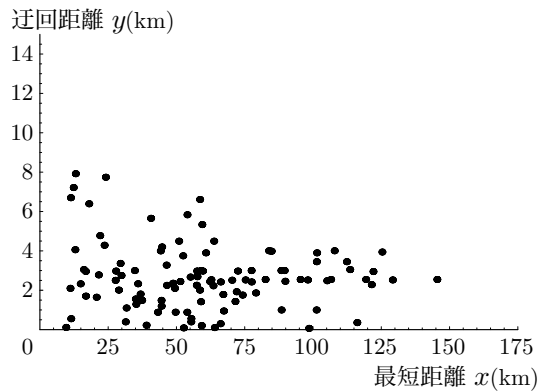


図 6.12: 迂回距離のメディアン（茨城県）

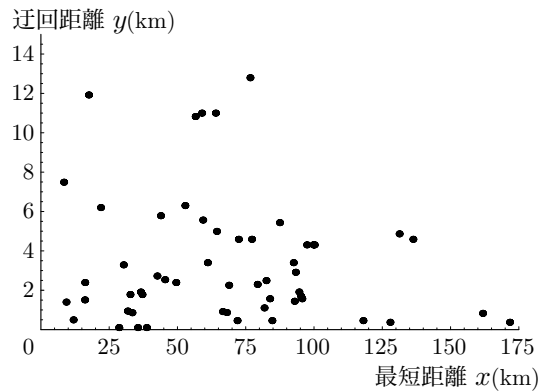


図 6.13: 迂回距離のメディアン（長野県）

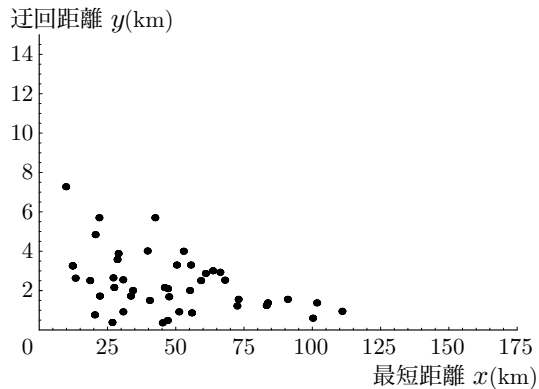


図 6.14: 迂回距離のメディアン（栃木県）

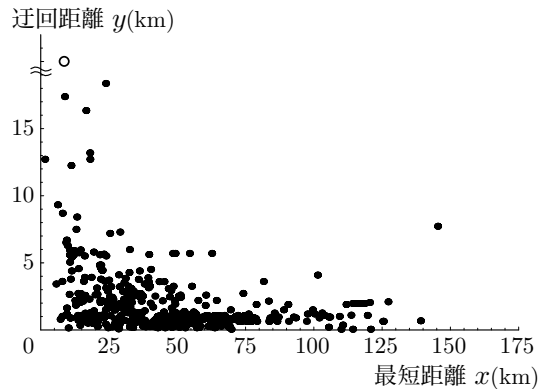


図 6.15: 迂回距離のメディアン（千葉県）

第6章 道路閉塞時の迂回距離

図 6.16～図 6.19 は横軸に起終点間の最短距離 x ，縦軸に迂回距離の最大値 y をプロットしたものである。茨城県では古河市，結城市，鹿嶋市が含まれるペア，千葉県では浦安市が含まれるペアの最大値が無限大となる。このことから，最大値はメディアンに比べてローカルな事情により左右されることが分かる。長野県では迂回距離が無限大となるペアはないが，茅野・諏訪間の 62.1km，飯田・茅野間の 59.9km のような非常に大きな迂回を強いられるペアがある。栃木県は全て 20km 以内の迂回に収まっており，最大値で見ても頑健であることが分かる。

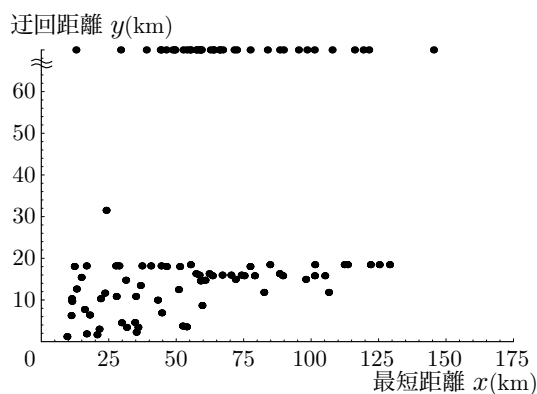


図 6.16: 迂回距離の最大値（茨城県）

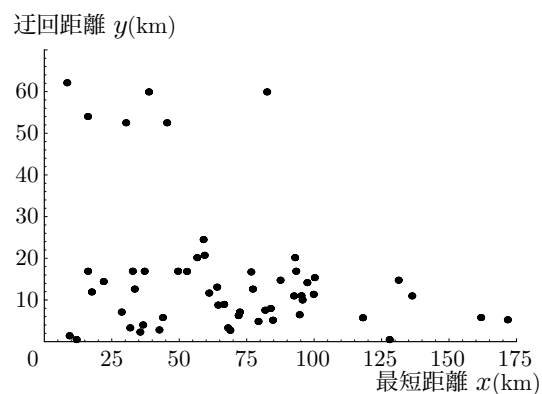


図 6.17: 迂回距離の最大値（長野県）

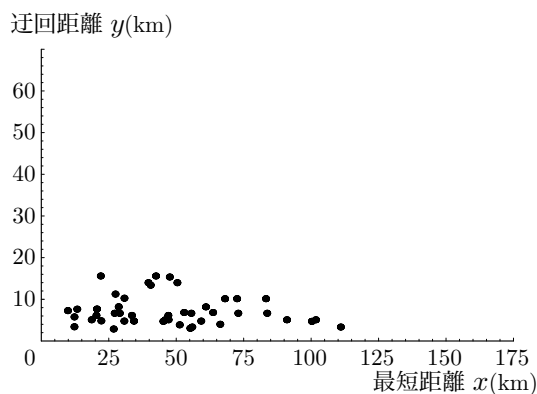


図 6.18: 迂回距離の最大値（栃木県）

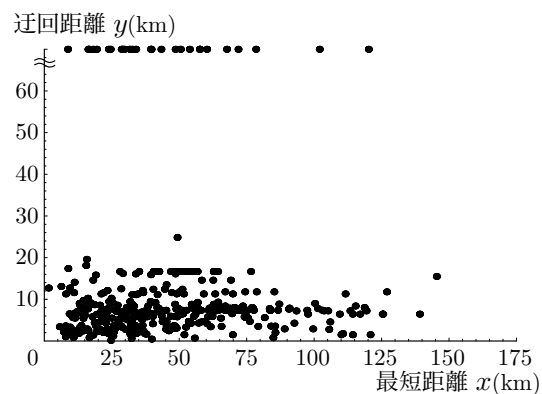


図 6.19: 迂回距離の最大値（千葉県）

6.3. 実際の道路網

6.3.2 市町村レベルの道路網

市町村レベルとして京都市，土浦市，多摩ニュータウン中心部の道路網（図 6.20～図 6.22）を用いる。京都市の道路は整然とした格子状である。これとは対照的に，土浦市はかつては水郷であり，現在の道路の多くが水路を埋め立てて建設された。一方，多摩ニュータウンは近隣住区論に基づき，幹線道路で囲まれた街区内部では通過交通を排除するように意図されている。このように，これらの道路網の形成過程は全く異なるので，分析の対象とした。

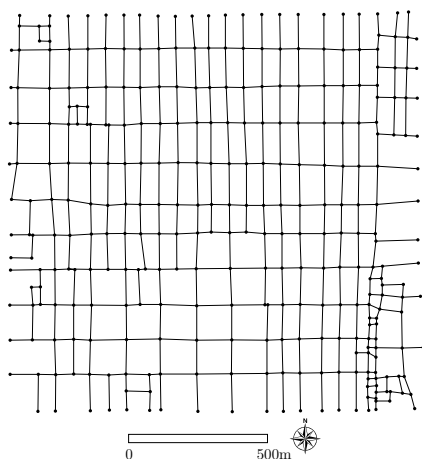


図 6.20: 京都市中心部道路網
ノード数：319，リンク数：504

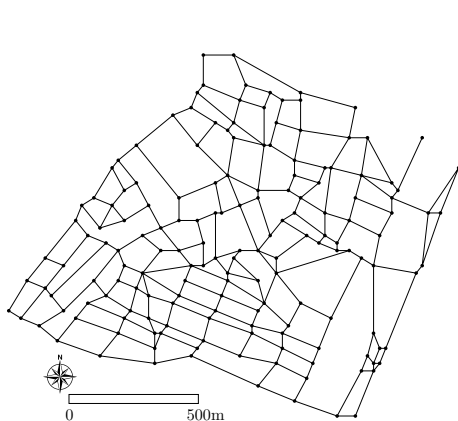


図 6.21: 土浦市中心部道路網
ノード数：163，リンク数：273

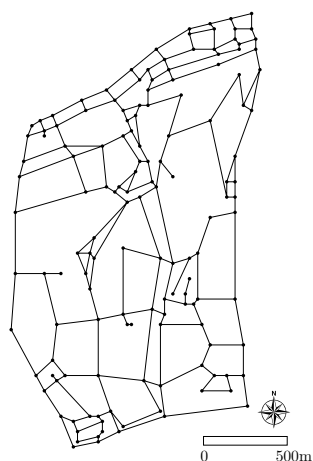


図 6.22: 多摩 NT 中心部道路網
ノード数：145，リンク数：212

第6章 道路閉塞時の迂回距離

図 6.23～図 6.25 はそれぞれの道路網上のノードから 100 個の起終点ペアをランダムに選び、横軸に起終点間の最短距離 x ，縦軸に迂回距離のメディアン y をプロットしたものである。京都市の迂回距離はほとんどが 20m 以下に収まっているのとは対照的に、多摩ニュータウンの迂回距離は起終点ペアによっては相当大きいものがある。このことから設計思想の差異を見ることができよう。土浦市は結果として京都市と多摩ニュータウンのほぼ中間的な特徴を持っている。

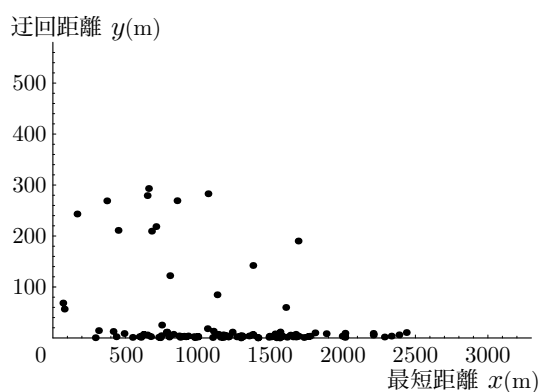


図 6.23: 迂回距離のメディアン（京都市）

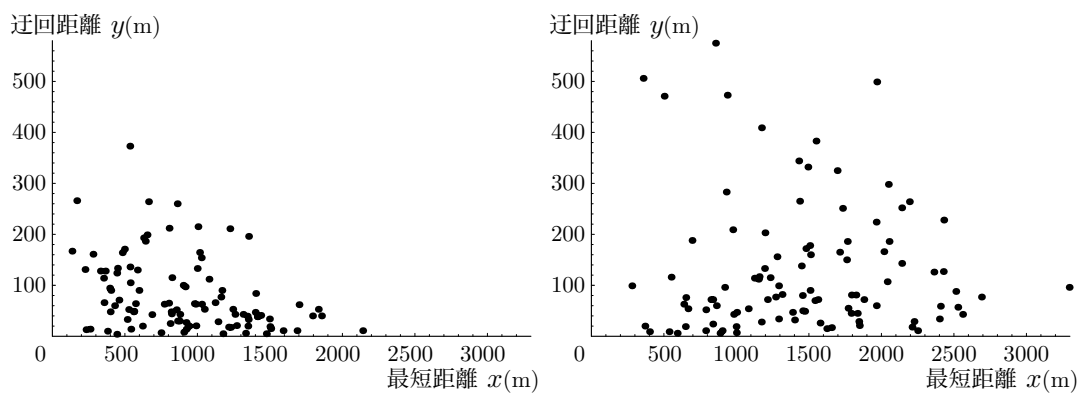


図 6.24: 迂回距離のメディアン（土浦市） 図 6.25: 迂回距離のメディアン（多摩 NT）

6.4 検証

仮想道路網上での関係式 (6.3), (6.7), (6.11) が実際の道路網でどの程度成立するか確認しよう。データからパラメータ α, β, γ を最小二乗法によって推定する。中間的水準を評価するために、データとして迂回距離のメディアンを用いる。なお、千葉県の浦安・市川間は迂回距離のメディアンが無限大となるためデータから除外する。また、稠密道路網で求めた関係式 (6.11) は離れた起終点ペアに限り成り立つ近似式なので、最短距離が大きい起終点ペアに限定した場合の分析も同時に行う。

パラメータ α, β, γ の推定値は、各起終点ペア i ($= 1, \dots, n$) の最短距離 x_i , 迂回距離 y_i に対して、それぞれ

$$\hat{\alpha} \equiv \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (6.12)$$

$$\hat{\beta} \equiv \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (6.13)$$

$$\hat{\gamma} \equiv \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (6.14)$$

で与えられる。したがって、迂回距離の予測値 \hat{y}_i はそれぞれ

$$\hat{y}_i = \hat{\alpha} \quad (6.15)$$

$$\hat{y}_i = \hat{\beta} x_i \quad (6.16)$$

$$\hat{y}_i = \frac{\hat{\gamma}}{x_i} \quad (6.17)$$

となる。また、データの適合度を確認するために、標準誤差

$$SE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (6.18)$$

を用いる。決定係数ではなく標準誤差を用いるのは、 $y = \alpha$ という回帰式に対して決定係数が常に 0 となるためである。本来、決定係数は単に平均を取ったときに比べて回帰式がどの程度当てはまるかを表すものであり、それゆえ $y = \alpha$ という回帰式には適用できない。標準誤差は推定値との差が平均してどの程度であるかを表しており、小さいほど当てはまりが良い。

第6章 道路閉塞時の迂回距離

茨城県，長野県，栃木県，千葉県における標準誤差を表6.2に示す．標準誤差はいずれの場合も小さく，回帰式の当てはまりが良いことが読み取れる．また，どの回帰式でも起終点ペアを最短距離の大きいものに限定する程よく当てはまることが確認できる．これは，短距離移動では迂回の際に周辺の限られた道路だけを利用することになるので，経路選択の自由度が少なく，迂回距離が大きくなったり，小さくなったりと不安定になるからである．さらに，全ての移動を考えると， $y = \alpha$ の関係式の適合度が高いが，長距離移動のみに限定すると，長野県，栃木県のように $y = \gamma/x$ の関係式の当てはまりが良くなる． $y = \beta x$ の式は全ての移動を考えたときには栃木県以外の道路網において， $y = \alpha$ と $y = \gamma/x$ の中間にある．また，千葉県では3つの回帰式の標準誤差に大きな違いは見られない．

表 6.2: 標準誤差（茨城・長野・栃木・千葉）(km)

	回帰式	全	$x \geq 25\text{km}$	$x \geq 50\text{km}$
茨城	$y = \alpha$	0.16	0.14	0.17
	$y = \beta x$	0.21	0.17	0.19
	$y = \frac{\gamma}{x}$	0.34	0.21	0.20
長野	$y = \alpha$	0.43	0.43	0.55
	$y = \beta x$	0.50	0.48	0.65
	$y = \frac{\gamma}{x}$	0.82	0.54	0.49
栃木	$y = \alpha$	0.16	0.14	0.16
	$y = \beta x$	0.23	0.19	0.22
	$y = \frac{\gamma}{x}$	0.21	0.16	0.13
千葉	$y = \alpha$	0.09	0.06	0.06
	$y = \beta x$	0.11	0.07	0.06
	$y = \frac{\gamma}{x}$	0.11	0.06	0.07

6.4. 検証

推定した α, β, γ は表 6.3 のようになる. パラメータ α は茨城県, 長野県では 3km 台, 栃木県では 2km 台, 千葉県では 1~2km 台となった. つまり, 道路閉塞時の移動距離は起終点間距離によらず, 最短距離にこれらの迂回距離が付加されることが分かる. β を見ると, 迂回距離はそれぞれ最短距離の 3%, 3~4%, 2~3%, 1~3%であることが分かる. γ についてはいずれの場合にも千葉県の係数が小さく, 次いで栃木県, 茨城県, 長野県の順に大きくなる. このように, 長野県の道路網が他県の道路網に比べて脆弱であることが確認でき, 前節での分析とも矛盾しない.

表 6.3: パラメータ推定値 (茨城・長野・栃木・千葉) (km)

	回帰式	全	$x \geq 25\text{km}$	$x \geq 50\text{km}$
茨城	$y = \alpha$	2.66	2.43	2.51
	$y = \beta x$	0.033	0.031	0.029
	$y = \frac{\gamma}{x}$	151.2	167.8	200.6
長野	$y = \alpha$	3.38	3.22	3.72
	$y = \beta x$	0.036	0.035	0.034
	$y = \frac{\gamma}{x}$	213.7	234.7	294.3
栃木	$y = \alpha$	2.40	2.11	2.01
	$y = \beta x$	0.034	0.031	0.024
	$y = \frac{\gamma}{x}$	97.4	107.7	132.2
千葉	$y = \alpha$	2.11	1.47	1.09
	$y = \beta x$	0.025	0.020	0.014
	$y = \frac{\gamma}{x}$	72.2	78.1	85.8

第6章 道路閉塞時の迂回距離

図6.26～図6.29はそれぞれの道路網における3つの回帰曲線を表している。いずれにおいても最短距離が小さい起終点ペアの迂回距離を $y = \beta x$ の式は過小推定, $y = \gamma/x$ の式は過大推定していることが読み取れる。最短距離を固定すれば3つの回帰式の推定値を比較することもできる。茨城県では, 最短距離が50kmの起終点ペアの迂回距離は $y = \gamma/x$ が最も大きく, $y = \beta x$ が最も小さくなっている。最短距離が100kmのペアに対しては, この関係が逆転する。

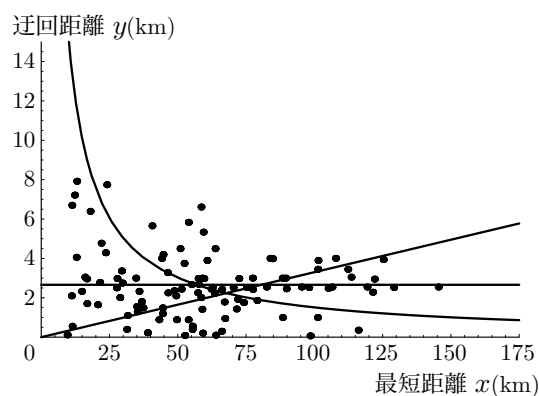


図 6.26: 迂回距離と最短距離 (茨城県)

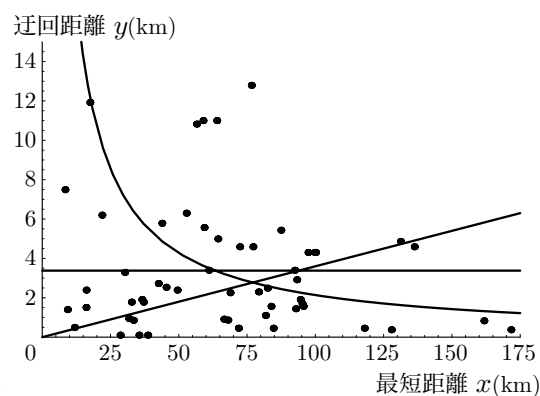


図 6.27: 迂回距離と最短距離 (長野県)

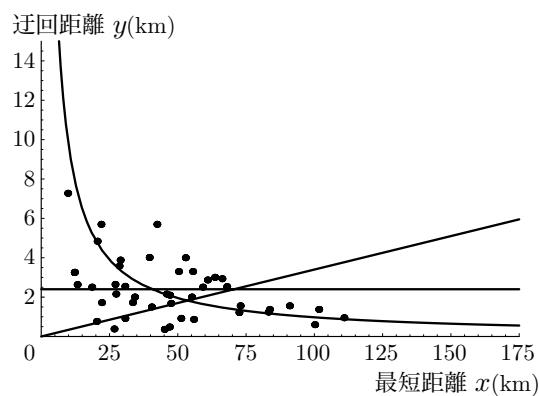


図 6.28: 迂回距離と最短距離 (栃木県)

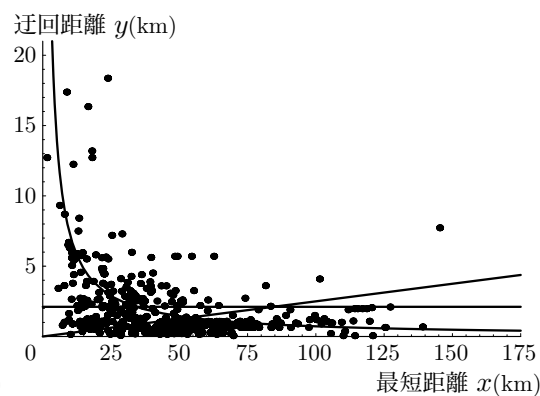


図 6.29: 迂回距離と最短距離 (千葉県)

6.4. 検証

次に，京都市，土浦市，多摩ニュータウンにおける標準誤差を表 6.4 に示す．やはり，全ての移動では $y = \alpha$ の関係式の適合度が高いが，京都市，土浦市では長距離移動のみに限定した場合に $y = \gamma/x$ の関係式の当てはまりが良くなる．

表 6.4: 標準誤差（京都・土浦・多摩）(m)

	回帰式	全	$x \geq 500\text{m}$	$x \geq 750\text{m}$	$x \geq 1000\text{m}$
京都	$y = \alpha$	7.50	7.23	6.09	6.36
	$y = \beta x$	7.95	7.50	6.22	6.46
	$y = \frac{\gamma}{x}$	8.28	7.03	6.01	6.29
土浦	$y = \alpha$	7.15	8.09	7.49	8.95
	$y = \beta x$	8.81	9.32	8.29	9.79
	$y = \frac{\gamma}{x}$	8.30	7.62	7.18	8.31
多摩	$y = \alpha$	12.57	12.36	12.77	12.38
	$y = \beta x$	13.61	13.24	13.59	13.07
	$y = \frac{\gamma}{x}$	16.20	14.49	13.95	13.20

パラメータ推定値は表 6.5 のようになり， α はそれぞれ 18～34m，58～80m，126～127m となった． β を見ると，迂回距離がそれぞれ最短距離の 1～2%，4～6%，7% となっていることが分かる． γ もいずれも京都が最も小さく，土浦，多摩ニュータウンの順で大きくなっている．

表 6.5: パラメータ推定値（京都・土浦・多摩）(m)

	回帰式	全	$x \geq 500\text{m}$	$x \geq 750\text{m}$	$x \geq 1000\text{m}$
京都	$y = \alpha$	34.0	27.9	19.7	17.5
	$y = \beta x$	0.016	0.015	0.011	0.010
	$y = \frac{\gamma}{x}$	27490	27659	23907	24427
土浦	$y = \alpha$	79.8	73.7	62.5	58.4
	$y = \beta x$	0.060	0.055	0.046	0.038
	$y = \frac{\gamma}{x}$	61335	68311	68890	73363
多摩	$y = \alpha$	127.2	125.9	127.4	126.1
	$y = \beta x$	0.074	0.073	0.072	0.067
	$y = \frac{\gamma}{x}$	182383	187699	200484	217139

第6章 道路閉塞時の迂回距離

図 6.30～図 6.32 はそれぞれの道路網における 3つの回帰曲線を表している．京都市では迂回距離の小さなペア（これは格子状道路網において最短経路が複数ある場合に対応する）に引っ張られ，最短経路が一意に定まるペアに対しては過小推定となっていることが分かる．土浦市，多摩ニュータウンでは最短距離が中程度のペアの迂回距離が過小推定になっている．

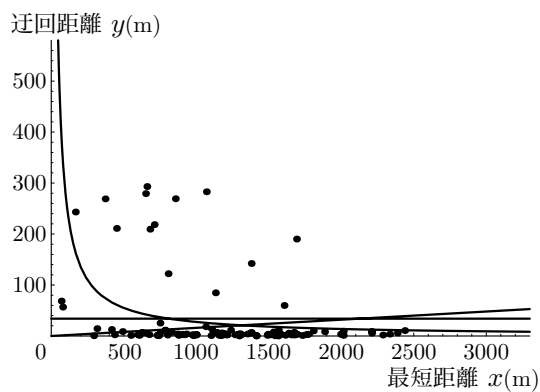


図 6.30: 迂回距離と最短距離（京都市）

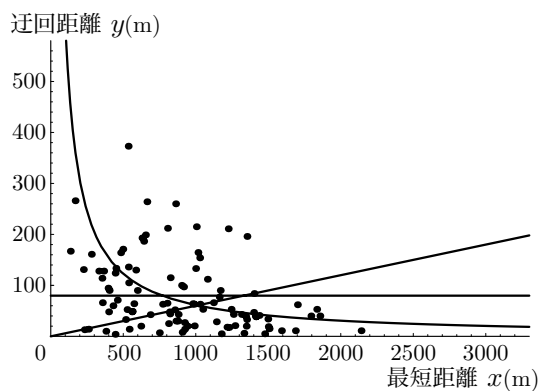


図 6.31: 迂回距離と最短距離（土浦市）

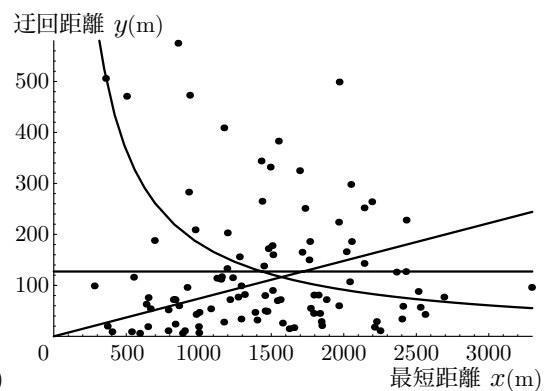


図 6.32: 迂回距離と最短距離（多摩 NT）

6.5 まとめ

本章では、道路網の頑健性評価の第一歩として、道路閉塞が生じたときの迂回距離を最短距離との比較から特徴付けた。本章で得られた知見は次の2点である。

- (1) 迂回距離が格子状道路網、放射環状道路網、稠密道路網においてそれぞれ定数、最短距離に比例、最短距離に逆比例の形で単純に表現できることを理論的に導いた。そして、都道府県レベルとして茨城県、長野県、栃木県、千葉県、市町村レベルとして京都市内、土浦市内、多摩ニュータウン中心部の道路網上にて迂回距離と最短距離との関係を把握し、仮想道路網で導いた関係が実際の道路網上での迂回をよく説明していることを確認した。
- (2) 実際の様々な道路網においては、特に迂回距離が最短距離に関係なく定数で表現できる場合が多いこと、長距離移動に限れば最短距離に逆比例する形で表される場合が多いことを示した。この結果は直観とも合致する。

第I部「施設配置の頑健性」にて施設までの距離を全て直線距離で計測することの妥当性も確認することができた。すなわち、本章にて迂回距離と最短道路距離との間の明確な関係性が明らかになり、[腰塚, 小林 (1983)] では平常時の道路距離は直線距離に比例することが示されている。このことから、迂回距離と直線距離の間にも関係性を見出すことができ、直線距離を仮定していた第I部の分析も大局的にはそれほど的外れではないということができよう。

第7章 迂回距離分布

7.1 はじめに

本章では、道路閉塞による損失の大きさを把握するため、道路網上の1地点が閉塞した際に全体としてどの位の迂回が発生するのかを明らかにする。また、道路閉塞が起こった場合に大きな迂回を強いられる箇所の特性を把握する。そのための基礎となる迂回距離分布を格子状道路網と放射環状道路網について導出し、迂回距離と道路密度・断面交通量との関係を理論化する。

道路密度は道路網のリダンダンシーに大きく関わる指標である。新潟県中越地震では高速道路が大きな被害を受け、首都圏との交通網が寸断された。関越自動車道は上りの長岡JCTから湯沢ICまで、下りの月夜野ICから長岡JCTまで、北陸自動車道は上下線の柏崎ICから三条・燕ICまで通行止めとなった。しかし、北陸自動車道は早期に復旧したため、首都圏からは東北自動車道・磐越自動車道を経由するルートと上信越自動車道・北陸自動車道を経由するルートが迂回経路としての機能を果たすことができた。実際、日本道路公団の調査により、被災後の磐越自動車道、上信越自動車道の1日の交通量が前年同月よりもそれぞれ3,200台、2,700台増加したことが報告されている。これは高速道路網がネットワークとして整備されていたことが大きい。

以下では、格子状道路網、放射環状道路網について迂回距離分布を導出する。さらに、迂回距離分布から総迂回距離を求め、総迂回距離と道路密度・断面交通量との関係を議論する。また、実際の道路網上で1箇所が閉鎖された場合の総迂回距離を求め、それを格子状道路網や放射環状道路網で得られた結果から説明することを試みる。

第7章 迂回距離分布

7.2 格子状道路網

図7.1に示す1辺の長さが a である $n \times n$ 格子状道路網上での移動を考える．移動の起終点は格子状道路網上で一様にかつ独立に発生するものとする．すなわち，6章のようなノード間の移動だけではなく，リンク上でも移動が発生・集中する状況を想定している．移動の一様性を仮定することは必ずしも現実的ではないが，ここでは現実の移動パターンを再現するのではなく，移動の密度による影響を排除し，純粋に道路網構造の持つ性質を解析することを目指している．当然ながら，移動密度を考慮した分析への発展も可能であり，そのための基礎としても位置付けられる．

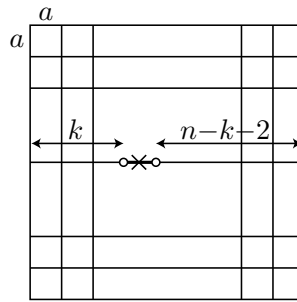


図 7.1: $n \times n$ 格子状道路網

7.2.1 迂回距離分布の導出

道路閉塞は6章のようなリンクの除去ではなく，リンク上の1地点の通行止めとして表現する．また，移動者は出発前に道路閉塞に関する情報を完全に認知しているものとする．そして，道路閉塞に伴う移動距離の増分，つまり代替経路距離と最短経路距離との差を迂回距離と呼び， Y で表す．そして，迂回距離分布 $F(y)$ を次のように定義する．

定義 7.1 迂回距離分布 $F(y)$ は迂回距離 Y が y 以下であるような交通量である．

当然だが，この分布は道路閉塞の場所に依存する．距離分布は[腰塚 (1999)]のように距離帯ごとに交通量がどの位あるかという密度で表すことが一般的ではあるが，後述するように $F(y)$ が不連続であることから，距離分布を累積で表現する．

迂回移動は起終点の位置に応じて，以下の9パターン S_i ($i = 1, 2, \dots, 9$) に分類できる．1)～4) が起終点のいずれも閉鎖地点を含むリンク（閉鎖リンクと呼ぶ）上にない場合，5)～9) が少なくともいずれかが閉鎖リンク上にある場合に相当する．

7.2. 格子状道路網

1) 図 7.2 のように起終点が閉鎖リンクを挟んで、同じ側の垂直方向のリンク上にある場合がこのパターンに属する。移動の起点と終点の位置をそれぞれ s, t を用いて表すと、2 リンク間の任意の移動は s - t 平面上の 1 点として表現できる。迂回を強いられるのは、閉鎖リンクを最短経路として利用する $s + t \leq a$ となる移動であり、そのときの迂回距離は $Y_1 = 2(a - s - t)$ となる。迂回距離 Y_1 が y 以下であるような交通量 $F_1(y)$ は、 $Y_1 \leq y \Leftrightarrow t \geq -s + a - y/2$ より、図 7.2 の斜線部の面積として

$$F_1(y) = \frac{y}{2} \left(a - \frac{y}{4} \right), \quad (0 \leq y \leq 2a) \quad (7.1)$$

と表される。このパターン S_1 に属する迂回移動の起終点が存在するリンクの組合せの数 $|S_1|$ は、図 7.1 のように閉鎖リンクの左側にある水平方向のリンクの本数を k とすると、往復を考慮して $|S_1| = 4(k+1)(n-k-1)$ と表される。

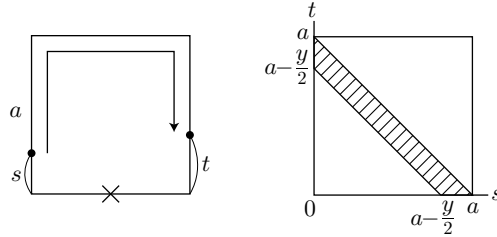


図 7.2: 迂回 1)

他のパターンについても迂回距離分布 $F_i(y)$ が同様の方法により、以下のように求まる。

2) $Y_2 = 2(a - s)$

$$F_2(y) = \frac{a}{2}y, \quad (0 \leq y \leq 2a) \quad (7.2)$$

$$|S_2| = 4\{k(n - k - 1) + (k + 1)(n - k - 2)\}$$

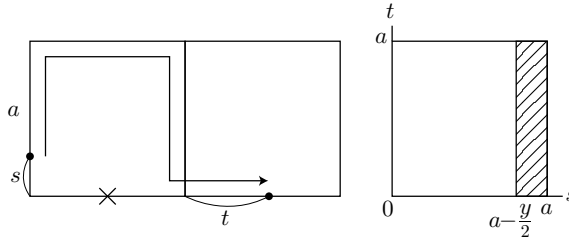


図 7.3: 迂回 2)

第7章 迂回距離分布

$$3) Y_3 = 2(a - s), \quad (s \geq t), \quad Y_3 = 2(a - t), \quad (s < t)$$

$$F_3(y) = y \left(a - \frac{y}{4} \right), \quad (0 \leq y \leq 2a) \quad (7.3)$$

$$|S_3| = 4(k + 1)(n - k - 1)$$

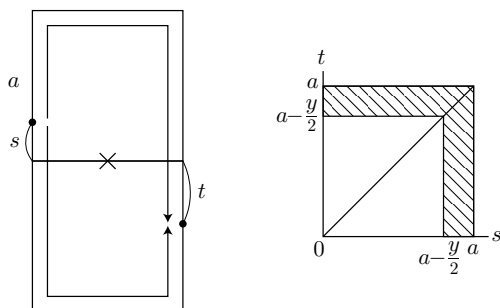


图 7.4: 迂回 3)

$$4) Y_4 = 2a$$

$$F_4(y) = a^2, \quad (y = 2a) \quad (7.4)$$

$$|S_4| = 2k(n - k - 2)$$

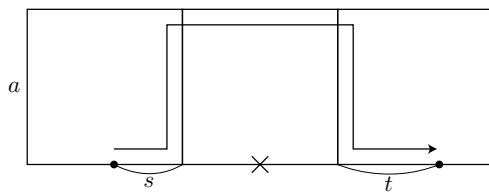


图 7.5: 迂回 4)

7.2. 格子状道路網

5) $Y_5 = 2(s + t + a)$

閉鎖リンク左側の端点から閉鎖地点までの距離を u とすると,

$0 \leq u < a/2$ のとき ($a/2 \leq u \leq a$ のときも同様)

$$F_5(y) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{y}{2} - a \right)^2, & (2a \leq y < 2(a+u)) \\ \frac{1}{2} u(y - 2a - u), & (2(a+u) \leq y < 2(2a-u)) \\ u(a-u) - \frac{1}{2} \left(2a - \frac{y}{2} \right)^2, & (2(2a-u) \leq y \leq 4a) \end{cases} \quad (7.5)$$

$|S_5| = 2$

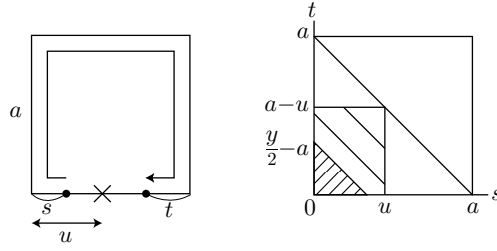


図 7.6: 迂回 5)

6) $Y_6 = 2(s - t + a)$

$$F_6(y) = \begin{cases} \frac{y^2}{8}, & (0 \leq y < 2u) \\ \frac{u}{2}(y - u), & (2u \leq y < 2a) \\ au - \frac{1}{2} \left(a + u - \frac{y}{2} \right)^2, & (2a \leq y \leq 2(a+u)) \end{cases} \quad (7.6)$$

$|S_6| = 4\{(n - k - 1) + (k + 1)\}$

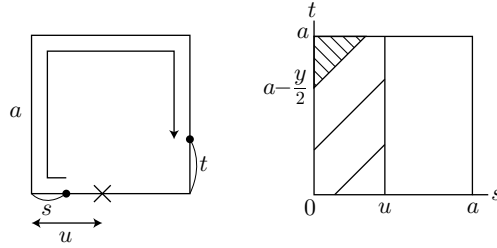


図 7.7: 迂回 6)

第7章 迂回距離分布

7) $Y_7 = 2(s - t), (s \geq t)$

$$F_7(y) = \frac{y}{2} \left(u - \frac{y}{4} \right), \quad (0 \leq y \leq 2u) \quad (7.7)$$

$$|S_7| = 4(n - 1)$$

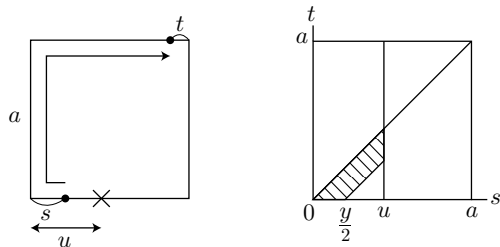


図 7.8: 迂回 7)

8) $Y_8 = 2(s + a)$

$$F_8(y) = a \left(\frac{y}{2} - a \right), \quad (2a \leq y \leq 2(a + u)) \quad (7.8)$$

$$|S_8| = 2\{(n - k - 2) + k\}$$

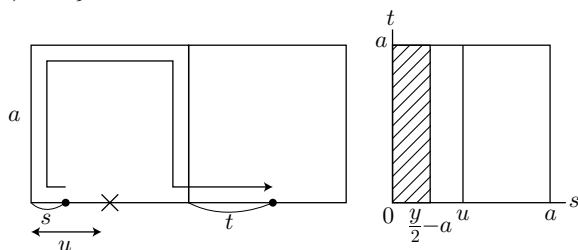


図 7.9: 迂回 8)

$$9) Y_9 = 2s$$

$$F_9(y) = \frac{a}{2}y, \quad (0 \leq y \leq 2u) \quad (7.9)$$

$$|S_9| = 2\{(n-k-2)(n-1) + (n-k-1)(n-3) + k(n-1) + (k+1)(n-3)\}$$

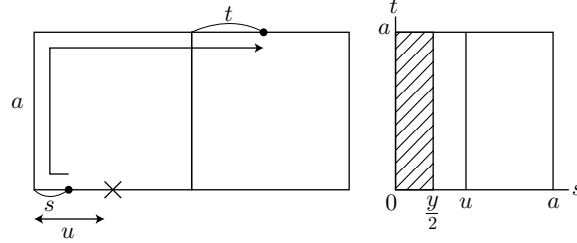


図 7.10: 迂回 9)

迂回距離分布 $F(y)$ は上で求めた各パターンの $F_i(y)$ ($i = 1, 2, \dots, 9$) を区間ごとに組合せの数だけ足し上げることで次のように得られる.

命題 7.1 格子状道路網上で移動が一様にかつ独立に発生するものとする. 道路網上の 1 地点が閉塞したときの迂回距離分布 $F(y)$ は次式で表される:

$$F(y) = \sum_{i=1}^9 |S_i| F_i(y) \quad (7.10)$$

図 7.11 の 5×5 格子状道路網において, 閉鎖地点を $u = a/2$ としたときの迂回距離分布を図 7.12 に示す. ここで, u は道路網の中心 O から閉鎖地点までの道路沿いで測った長さである. 図 7.12 より, 迂回距離分布は $y = 2a$ でジャンプすることが分かる. これは, 迂回パターン 4) が $y = 2a$ という値しかとらないためであり, このパターンに属する交通量の分だけジャンプすることになる. 最も大きな迂回を強いられるのは閉鎖地点をちょうど挟む起終点を結ぶ移動であり, 迂回距離は $4a$ となる. 迂回を強いられる交通量は $F(4a) = 211a^2/2$ となり, 総交通量 $(40a)^2 = 1600a^2$ の約 6.6% である.

第7章 迂回距離分布

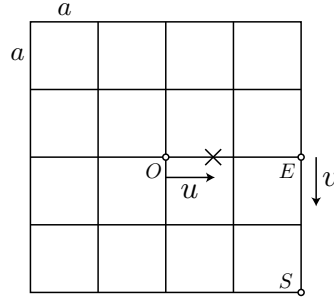


図 7.11: 5×5 格子状道路網

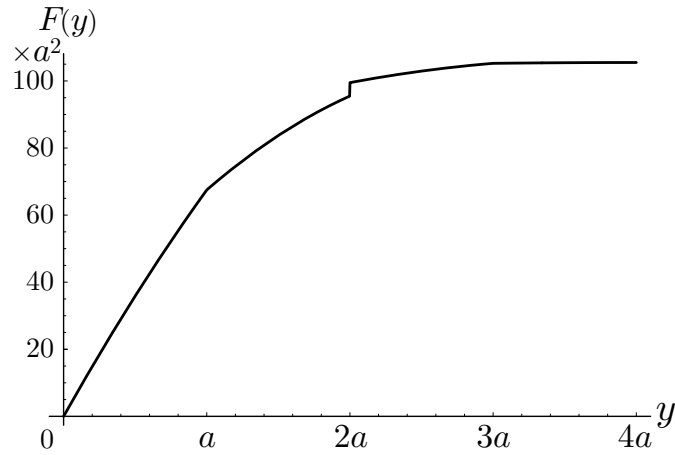


図 7.12: 格子状道路網の迂回距離分布 ($u = a/2$)

総迂回距離 Ψ は迂回距離分布 $F(y)$ を用いて次のように導出される

$$\Psi = \int_0^{\infty} y dF(y). \quad (7.11)$$

5×5 格子状道路網（図 7.11）において，閉鎖地点を道路網の中心 O から道路網の東端 E まで，さらに E から道路網の南端 S まで変化させたときの総迂回距離 Ψ を図 7.13, 図 7.14 に載せる．ここで， u, v はそれぞれ道路網の中心 O あるいは道路網東端の中心 E から閉鎖地点までの距離である．

導出方法から明らかなように，迂回距離分布は閉鎖リンクの左側にある水平方向のリンクの本数 k に依存して定まるため， k の値が等しいリンクは総迂回距離も等しくなる．したがって，内部道路は全て図 7.13 で表現することができる．ただし，外周道路は迂回パターン 3) に属するものがないため，内部道路とは異なる結果となる．以上より，内部道路と外周道路の 2 つの場合だけで全てのリンクの結果を表現し尽くすことができる．

7.2. 格子状道路網

総迂回距離は外周道路の方が小さくなるものの、関数の形状は内部道路と類似している。いずれも、閉鎖地点が基準点 O, E から離れるにつれて減少し、交差点に近付くと増加し U 字型となる。そして、 $u = a, v = a$ でジャンプし、その後単調に減少する。これより、リンクの内部よりも交差点の近くで道路閉塞が起こった場合の方が総迂回距離が大きくなることが分かる。総迂回距離が交差点で連続にならないのは、閉鎖地点が交差点を越えて隣のリンクへ移るときに、閉鎖リンクの左側にある水平方向のリンクの本数 k が変化し、各迂回パターンに属するリンクの組合せの数 $|S_i|$ が変化するためである。なお、各移動が平均してどの程度迂回をしているかは、総迂回距離を総交通量で割ることにより、 $u = a/2$ の場合 $0.06a$ となる。

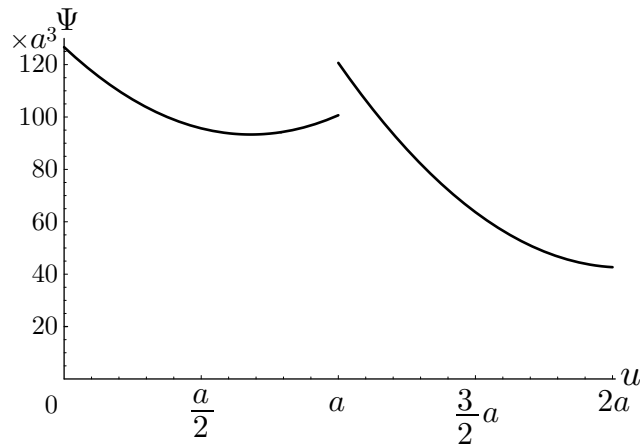


図 7.13: 格子状道路網の総迂回距離（内部道路）

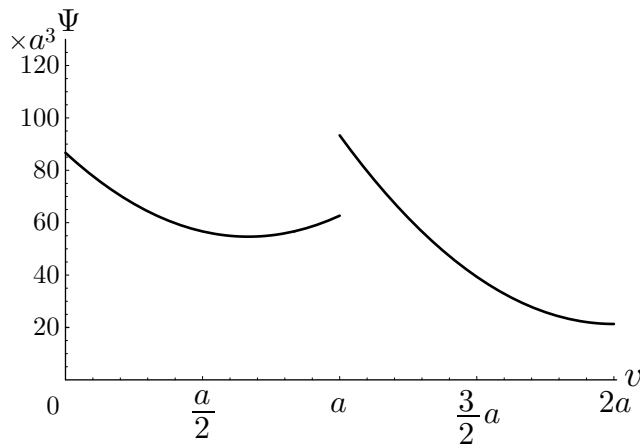


図 7.14: 格子状道路網の総迂回距離（外周道路）

第7章 迂回距離分布

7.2.2 道路密度・断面交通量との関係

道路閉塞時の損失が大きい箇所の特徴を把握するため、総迂回距離と道路密度・断面交通量との関係を見てみよう。道路があまり整備されていない場合、経路変更の選択肢が少ないことから総迂回距離は大きくなる。また、閉鎖地点を最短経路として通る交通量が多ければ、迂回を強いられる量が増えることから、総迂回距離は大きくなると予想できる。

まず、1辺 a の格子状道路網の道路密度（道路延長／領域面積） Λ/S は、図 7.15 の交差点を中心とする 1 辺 a の正方形領域に着目して

$$\frac{\Lambda}{S} = \frac{2}{a} \quad (7.12)$$

と表せる。つまり、道路密度と格子の 1 辺の長さの間には

$$\frac{\Lambda}{S} \propto \frac{1}{a} \quad (7.13)$$

という逆比例の関係がある。

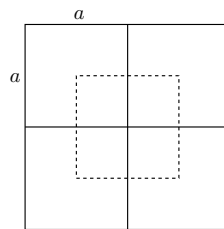


図 7.15: 道路密度の計算（格子状道路網）

総迂回距離は迂回距離に迂回を強いられる交通量を乗ずることで得られる。すなわち、

$$(\text{総迂回距離}) = (\text{迂回距離}) \times (\text{迂回を強いられる交通量}) \quad (7.14)$$

なる関係がある。既に見たように、迂回距離は a の 1 次式で表現できるから a に比例する。ゆえに、式 (7.13) より、迂回距離は道路密度に逆比例する。迂回を強いられる交通量は閉鎖地点を通る断面交通量に相当する。したがって、式 (7.14) から、総迂回距離は道路密度に逆比例し、断面交通量に比例することが分かる。

命題 7.2 格子状道路網において、道路網上の 1 地点が閉塞したときの総迂回距離は道路密度に逆比例し、断面交通量に比例する。

7.2. 格子状道路網

断面交通量 Φ は，迂回を強いられる交通量として迂回距離分布 $F(y)$ の定義から次式のように求まる

$$\Phi = F(\infty). \quad (7.15)$$

図 7.16 は 5×5 格子状道路網（図 7.11）において，閉鎖地点を道路網の中心 O から道路網の東端 E まで変化したときのこの交通量 Φ を表している．図 7.13 の総迂回距離と同様に，交差点 $u = a$ でジャンプすることが読み取れる．なお，格子状道路網では最短路が一意に定まらない場合がある．そのため，最短路配分でも配分方法により断面交通量は異なるが，この交通量は当該リンクを通る最小の断面交通量と一致する．

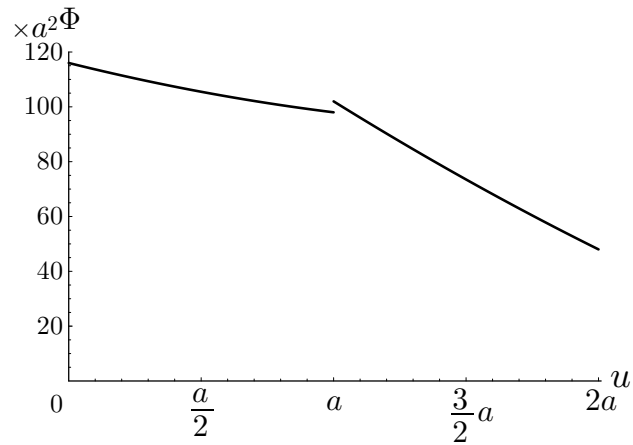


図 7.16: 格子状道路網の最小断面交通量

7.3 放射環状道路網

図 7.17 に示す隣り合う放射路のなす角 φ ，環状路の間隔 ℓ である n 本の放射路と m 本の環状路から成る放射環状道路網上での移動を考える．移動の起終点は放射路上で一様にかつ独立に発生するものとする．本来ならば，環状路上で発生・集中する移動に関しても扱う必要があるが，ここでは環状路の役割を単純に議論するために，放射路上での移動についてのみ議論する．

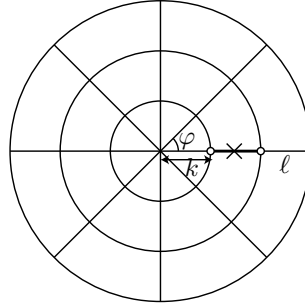


図 7.17: n 放射 m 環状道路網

放射環状道路網における最短経路は，起点のある放射路と終点のある放射路のなす角を θ とおくと， $0 \leq \theta < 2$ のとき図 7.18 O_1 から D_1 への移動のように環状路を用いた経路， $2 \leq \theta \leq \pi$ のとき O_2 から D_2 への移動のように中心を通る経路となる [Puu (1997)]．

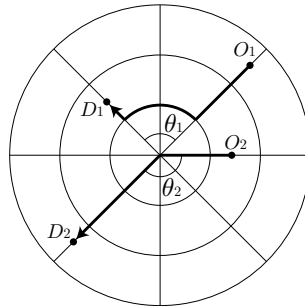


図 7.18: 放射環状道路網における最短経路

7.3.1 迂回距離分布の導出

迂回移動は起終点の位置に応じて，以下の 13 パターン S_i ($i = 1, 2, \dots, 13$) に分類できる．1)～7) が $0 \leq \theta < 2$ ，すなわち最短経路が環状路を使う場合，8)～13) が $2 \leq \theta \leq \pi$ ，

7.3. 放射環状道路網

すなわち最短経路が中心を通る場合に相当する。さらに、8)~13) の内、8)~11) は迂回経路が中心を通らない $2 \leq \theta < 2 + \varphi$ の場合、12), 13) は迂回経路が中心を通る $2 + \varphi \leq \theta \leq \pi$ の場合に相当する。

最短経路と迂回経路による分類に対応して、以下の記号を定義する。ただし、 $[x]$ は x を超えない最大の整数を表す。

$n_1 = 2[2/\varphi]$: 閉鎖箇所がある放射路からの角度 ω が $0 < \omega < 2$ である放射路の本数

$n_2 = 2[(2 + \varphi)/\varphi] - n_1$: $2 \leq \omega < 2 + \varphi$ である放射路の本数

$n_3 = n - n_1 - n_2 - 1$: $2 + \varphi \leq \omega \leq \pi$ である放射路の本数

1) 図 7.19 のように起終点が位置する場合がこのパターンに属する。格子状道路網と同様に、移動の起終点の位置を s, t を用いて表すと、2 リンク間の移動は s - t 平面上の 1 点として表現できる。迂回が生じるのは閉鎖リンクを最短経路として利用する $t < \ell\theta/2$ のときである。迂回経路は $t < \ell(\theta - \varphi)/2$ のとき内回り、 $t \geq \ell(\theta - \varphi)/2$ のとき外回りとなるから、迂回距離 Y_1 は

$$Y_1 = \begin{cases} \ell\varphi, & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta - \varphi)) \\ \ell\theta - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta - \varphi) \leq t \leq \frac{\ell\theta}{2}) \end{cases}$$

となる。迂回距離 Y_1 が y 以下である交通量 $F_1(y)$ は $\ell\theta - 2t \leq y \Leftrightarrow t \geq (\ell\theta - y)/2$ より図中斜線部の面積として

$$F_1(y) = \begin{cases} \frac{\ell}{2}y, & (0 \leq y < \ell\varphi) \\ \frac{\ell^2\theta}{2}, & (y = \ell\varphi) \end{cases} \quad (7.16)$$

と表現できる。 $F_1(y)$ は θ に依存するので、同一のパターンに含まれる移動であっても終点の位置によって分布は異なる。全ての移動の内、このパターン S_1 に含まれる組合せの数は、図 7.17 のように閉鎖リンクの内側にある放射リンクの本数を k とすると、往復を考慮して $|S_1| = 2(m - k - 1)n_1$ となる。

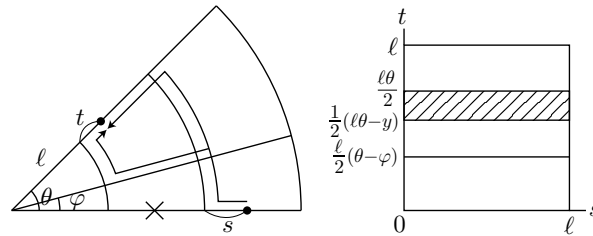


図 7.19: 迂回 1)

他のパターンについても迂回距離分布 $F_i(y)$ が同様の方法により、以下のように求まる。

第7章 迂回距離分布

2) 終点リンクの内側にある放射リンクの本数を j とすると,

$$Y_2 = \begin{cases} (k-j+1)\ell\varphi, & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta - \varphi)) \\ (k-j)\ell\varphi + \ell\theta - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta - \varphi) \leq t < \frac{\ell\theta}{2}) \\ (k-j)\ell\varphi, & (\frac{\ell\theta}{2} \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

$$F_2(y) = \begin{cases} \frac{\ell}{2}\{y + \ell(2 - \theta) - (k-j)\ell\varphi\}, & ((k-j)\ell\varphi \leq y < (k-j+1)\ell\varphi) \\ \ell^2, & (y = (k-j+1)\ell\varphi) \end{cases} \quad (7.17)$$

$$|S_2| = 2k(m - k - 1)n_1$$

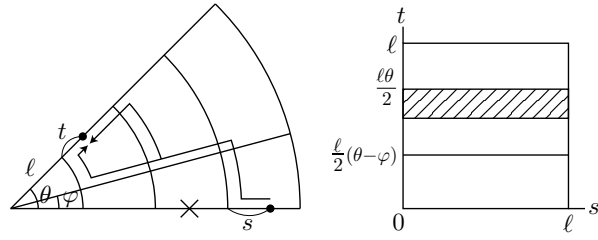


図 7.20: 迂回 2)

3)

$$Y_3 = \begin{cases} (k+j+1)\ell\varphi + 2t, & (0 \leq t < \frac{\ell\varphi}{2}) \\ (k+j+2)\ell\varphi, & (\frac{\ell\varphi}{2} \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

$$F_3(y) = \begin{cases} \frac{\ell}{2}\{y - (k+j+1)\ell\varphi\}, & ((k+j+1)\ell\varphi \leq y < (k+j+2)\ell\varphi) \\ \ell^2, & (y = (k+j+2)\ell\varphi) \end{cases} \quad (7.18)$$

$$|S_3| = 2k(m - k - 1)$$

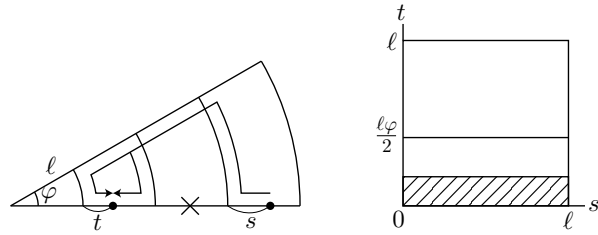


図 7.21: 迂回 3)

7.3. 放射環状道路網

4) $Y_4 = (2k+1)\ell\varphi + 2(s+t)$

閉鎖リンク左側の端点から閉鎖地点までの距離を u とすると,
 $0 \leq u < \ell/2$ のとき

$$F_4(y) = \begin{cases} \frac{1}{8}\{y - (2k+1)\ell\varphi\}^2, & ((2k+1)\ell\varphi \leq y < (2k+1)\ell\varphi + 2u) \\ \frac{u}{2}\{y - (2k+1)\ell\varphi - u\}, & ((2k+1)\ell\varphi + 2u \leq y < (2k+1)\ell\varphi + 2(\ell-u)) \\ u(\ell-u) - \frac{1}{8}\{2\ell + (2k+1)\ell\varphi - y\}^2, & ((2k+1)\ell\varphi + 2(\ell-u) \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2\ell) \end{cases} \quad (7.19)$$

$|S_4| = 2$

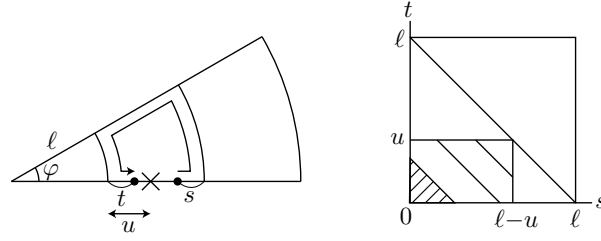


図 7.22: 迂回 4)

5)

$$Y_5 = \begin{cases} \ell\varphi + 2s, & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta - \varphi)) \\ \ell\theta + 2(s-t), & (\frac{\ell}{2}(\theta - \varphi) \leq t \leq s + \frac{\ell\theta}{2}) \end{cases}$$

$0 \leq u < \ell(\theta - \varphi)/2$

$$F_5(y) = \begin{cases} \frac{y}{8}\{y + 2\ell(2 - \theta)\}, & (0 \leq y < \ell\varphi) \\ \frac{\ell}{8}\{4y - \ell\varphi(2\theta - \varphi)\}, & (\ell\varphi \leq y < \ell\theta - 2u) \\ \frac{\ell}{4}(y - \ell\varphi)(\theta - \varphi) + \frac{\ell(\ell-u)}{2}(2 + \varphi - \theta) \\ \quad - \frac{1}{8}[\ell^2(2 - \theta)^2 + \{2(\ell - u) + \ell\varphi - y\}^2], & (\ell\theta - 2u \leq y \leq \ell\varphi + 2(\ell - u)) \end{cases} \quad (7.20)$$

$|S_5| = 4n_1$

第7章 迂回距離分布

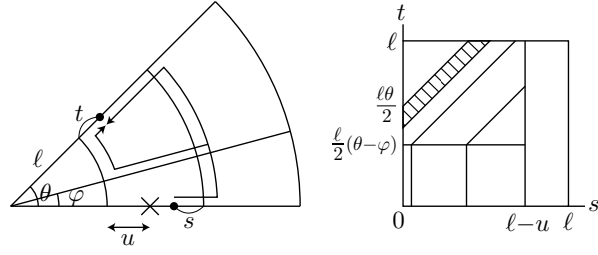


图 7.23: 迂回 5)

6)

$$Y_6 = \begin{cases} (k-j+1)\ell\varphi + 2s, & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta - \varphi)) \\ \ell\{(k-j)\varphi + \theta\} + 2(s-t), & (\frac{\ell}{2}(\theta - \varphi) \leq t < \frac{\ell\theta}{2}) \\ (k-j)\ell\varphi + 2s, & (\frac{\ell\theta}{2} \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

$$0 \leq u < \ell - \ell\varphi/2$$

$$F_6(y) = \begin{cases} \frac{1}{8}\{y - (k-j)\ell\varphi\}\{y + 2\ell(2 - \theta) - (k-j)\ell\varphi\}, & ((k-j)\ell\varphi \leq y < (k-j+1)\ell\varphi) \\ \frac{1}{4}\{\ell(2 - \theta) + \ell\varphi\}\{y - (k-j)\ell\varphi\} + \frac{\ell(\theta - \varphi)}{4}\{y - (k-j+1)\ell\varphi\} - \frac{1}{8}\ell^2\varphi^2, & ((k-j+1)\ell\varphi \leq y < (k-j)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \\ \ell(\ell - u) - \frac{1}{8}\{(k-j+1)\ell\varphi + 2(\ell - u) - y\}^2 & - \frac{\ell(\theta - \varphi)}{4}\{(k-j+1)\ell\varphi + 2(\ell - u) - y\}, \\ & ((k-j)\ell\varphi + 2(\ell - u) \leq y \leq (k-j+1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \end{cases} \quad (7.21)$$

$$|S_6| = 2(m-1)n_1$$

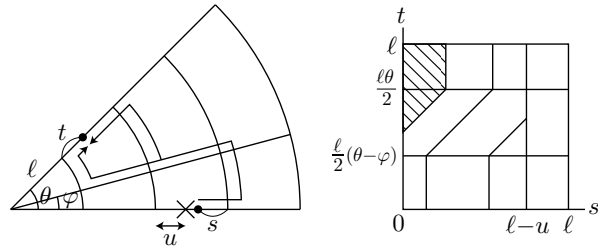


图 7.24: 迂回 6)

7.3. 放射環状道路網

7)

$$Y_7 = \begin{cases} (k+j+1)\ell\varphi + 2(s+t), & \left(0 \leq t < \frac{\ell\varphi}{2}\right) \\ (k+j+2)\ell\varphi + 2s, & \left(\frac{\ell\varphi}{2} \leq t \leq \ell\right) \end{cases}$$

$$0 \leq u < \ell - \ell\varphi/2$$

$$F_7(y) = \begin{cases} \frac{1}{8}\{y - (k+j+1)\ell\varphi\}^2, & ((k+j+1)\ell\varphi \leq y < (k+j+2)\ell\varphi) \\ \frac{\ell}{2}\{y - (k+j+2)\ell\varphi\} + \frac{1}{8}\ell^2\varphi^2, & ((k+j+2)\ell\varphi \leq y < (k+j+1)\ell\varphi + 2(\ell-u)) \\ \frac{\ell}{4}(2-\varphi)\{y - (k+j+2)\ell\varphi\} + \frac{\ell\varphi}{2}(\ell-u) - \frac{1}{8}\{2(\ell-u) - y + (k+j+2)\ell\varphi\}^2, & ((k+j+1)\ell\varphi + 2(\ell-u) \leq y \leq (k+j+2)\ell\varphi + 2(\ell-u)) \end{cases} \quad (7.22)$$

$$|S_7| = 2(m-1)$$

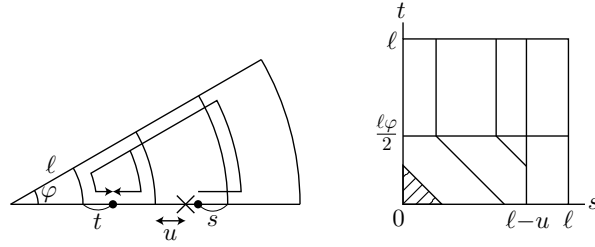


図 7.25: 迂回 7)

$$8) Y_8 = (k+1)(\theta-2)\ell$$

$$F_8(y) = \ell^2, \quad (y = (k+1)(\theta-2)\ell) \quad (7.23)$$

$$|S_8| = 2(m-k-1)^2 n_2$$

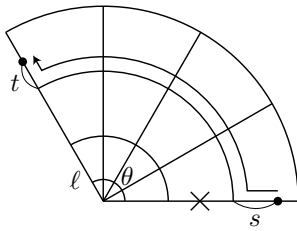


図 7.26: 迂回 8)

第7章 迂回距離分布

9)

$$Y_9 = \begin{cases} (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2), & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta-\varphi)) \\ (k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell\theta - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta-\varphi) \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

$$F_9(y) = \begin{cases} \frac{\ell}{2}\{y + (j-1)\ell(\theta-2) - (k-j)\ell\varphi\}, & ((k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell(\theta-2) \leq y < (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2)) \\ \ell^2, & (y = (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2)) \end{cases} \quad (7.24)$$

$$|S_9| = 2(k+1)(m-k-1)n_2$$

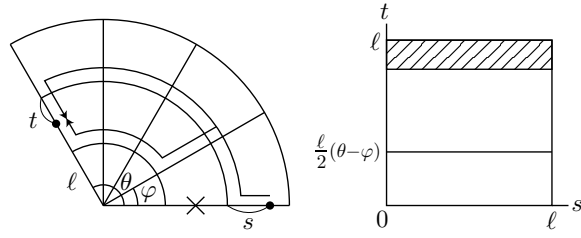


图 7.27: 迂回 9)

$$10) Y_{10} = (k+1)\ell(\theta-2) + 2s$$

$$F_{10}(y) = \frac{\ell}{2}\{y - (k+1)\ell(\theta-2)\}, \quad ((k+1)\ell(\theta-2) \leq y \leq (k+1)\ell(\theta-2) + 2(\ell-u)) \quad (7.25)$$

$$|S_{10}| = 2(m-k-1)n_2$$

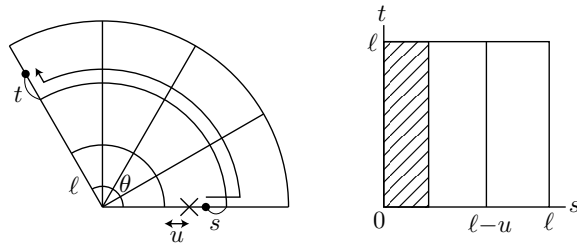


图 7.28: 迂回 10)

11)

$$Y_{11} = \begin{cases} (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + 2s, & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta-\varphi)) \\ (k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell\theta + 2(s-t), & (\frac{\ell}{2}(\theta-\varphi) \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

$$0 \leq u < \ell(\theta-\varphi)/2$$

$$F_{11}(y) = \begin{cases} \frac{1}{8}\{y + \ell(2-\theta) - (k-j)\ell\varphi - j\ell(\theta-2)\}^2, & ((k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell(\theta-2) \leq y < (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2)) \\ \frac{\ell}{2}\{y - (k-j+1)\ell\varphi - j\ell(\theta-2)\} + \frac{\ell^2}{8}(2+\varphi-\theta)^2, & ((k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) \leq y < (k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell\theta - 2u) \\ \frac{\ell}{4}(2+\varphi-\theta)\{(k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + 2(\ell-u) - y\} \\ + \frac{\ell}{2}\{y - (k-j+1)\ell\varphi - j\ell(\theta-2)\} \\ - \frac{1}{8}\{(k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + 2(\ell-u) - y\}^2, & ((k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell\theta - 2u \leq y \leq \\ & (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + 2(\ell-u)) \end{cases} \quad (7.26)$$

$$|S_{11}| = 2(k+1)n_2$$

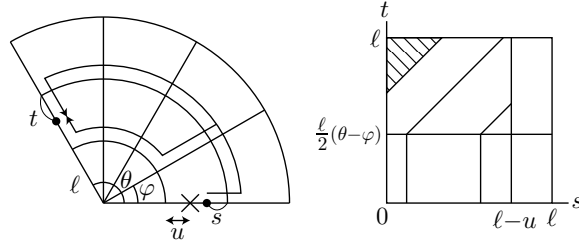


図 7.29: 迂回 11)

第7章 迂回距離分布

12) $Y_{12} = (k+1)\ell\varphi$

$$F_{12}(y) = \ell^2, \quad (y = (k+1)\ell\varphi) \quad (7.27)$$

$$|S_{12}| = 2(m-k-1)mn_3$$

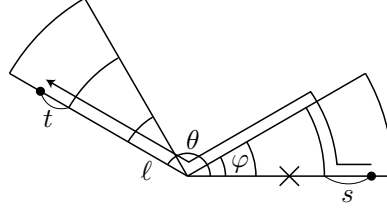


図 7.30: 迂回 12)

13) $Y_{13} = (k+1)\ell\varphi + 2s$

$$F_{13}(y) = \frac{\ell}{2}\{y - (k+1)\ell\varphi\}, \quad ((k+1)\ell\varphi \leq y \leq (k+1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \quad (7.28)$$

$$|S_{13}| = 2mn_3$$

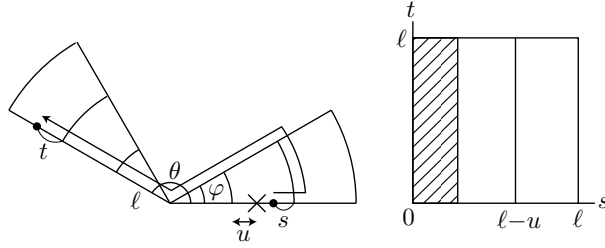


図 7.31: 迂回 13)

迂回距離分布 $F(y)$ は上で求めた各パターンの $F_i(y)$ ($i = 1, 2, \dots, 13$) を区間ごとに組合せの数だけ足し上げることで次のように得られる.

命題 7.3 放射環状道路網の放射路上で移動が一様にかつ独立に発生するものとする. 道路網上の 1 地点が閉塞したときの迂回距離分布 $F(y)$ は次式で表される:

$$F(y) = \sum_{i=1}^{13} |S_i| F_i(y) \quad (7.29)$$

7.3. 放射環状道路網

図 7.32 の 8 放射 3 環状道路網において，閉鎖地点を $u = 3\ell/2$ としたときの迂回距離分布を図 7.33 に示す．ここで， u は道路網の中心 O から閉鎖地点までの道路沿いで測った長さである．図 7.12 の格子状道路網と比べると，分布の形状はかなり複雑である．最も大きな迂回を強いられるのは閉鎖地点をちょうど挟む起終点を結ぶ移動であり，迂回距離は $\ell(2 + 3\varphi)$ となる．迂回を強いられる交通量は総交通量 $(24\ell)^2 = 576\ell^2$ の 9.0% である．

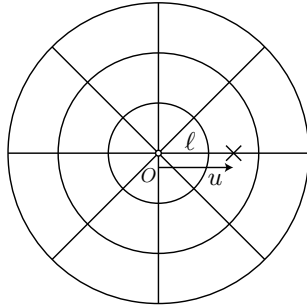


図 7.32: 8 放射 3 環状道路網

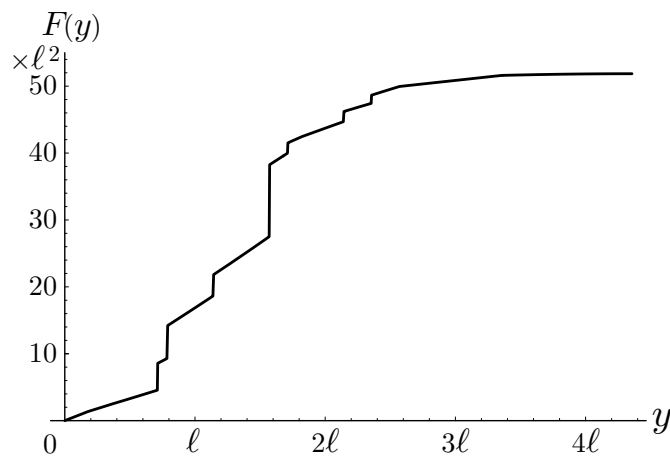


図 7.33: 放射環状道路網の迂回距離分布 ($u = 3\ell/2$)

第7章 迂回距離分布

8放射3環状道路網（図7.32）において，閉鎖地点を道路網の中心 O から道路網の東端まで変化させたときの総迂回距離 Ψ を図7.34に載せる．総迂回距離は基準点 O から離れるにつれて減少し，交差点に近付くと増加しU字型となる．そして， $u = \ell$ でジャンプした後，単調に減少し，再び $u = 2\ell$ でジャンプする．図7.13の格子状道路網と異なり，総迂回距離は道路網中心でそれ程大きくならず，また，交差点の内側と外側の差が非常に大きいのが特徴的である．なお，各移動が平均してどの程度迂回をしているかは，総迂回距離を総交通量で割ることにより， $u = 3\ell/2$ の場合 0.12ℓ となる．

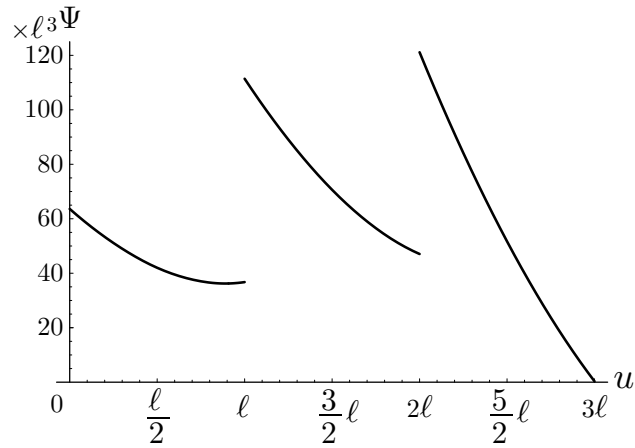


図 7.34: 放射環状道路網の総迂回距離

7.3.2 道路密度・断面交通量との関係

格子状道路網の場合と同じく，総迂回距離と道路密度との関係を見てみよう．まず，図7.35の破線で囲まれた交差点を中心とする領域を考える．道路網の中心から交差点までの距離を $k\ell$ とすると，道路密度（道路延長／領域面積） Λ/S は

$$\frac{\Lambda}{S} = \frac{k\varphi + 1}{k\ell\varphi} \quad (7.30)$$

と表せるから，

$$\frac{\Lambda}{S} \propto \frac{1}{\ell} \quad (7.31)$$

となり，環状路の間隔 ℓ に逆比例することが分かる．

7.3. 放射環状道路網

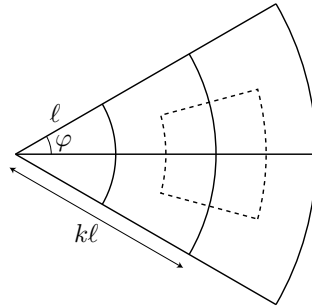


図 7.35: 道路密度の計算 (放射環状道路網)

一方、迂回距離は ℓ の 1 次式で表現できるから ℓ に比例する。ゆえに、式 (7.31) より、迂回距離は道路密度に逆比例する。格子状道路網の場合と同様の議論から、式 (7.14) を用いれば、総迂回距離は道路密度に逆比例し、断面交通量に比例することが分かる。

命題 7.4 放射環状道路網において、道路網上の 1 地点が閉塞したときの総迂回距離は道路密度に逆比例し、断面交通量に比例する。

図 7.36 は 8 放射 3 環状道路網 (図 7.32) において、閉鎖地点を道路網の中心 O から道路網の東端まで変化させたときの迂回を強えられる交通量 Φ を表している。放射環状道路網では最短路が一意に定まるため、迂回を強えられる交通量と断面交通量が等しくなる。図 7.34 の総迂回距離と同様に、交差点 $u = \ell, 2\ell$ でジャンプすることが読み取れる。

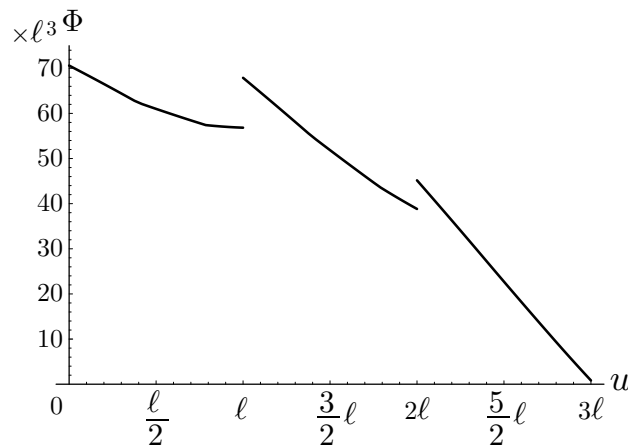


図 7.36: 放射環状道路網の断面交通量

第7章 迂回距離分布

7.4 実際の道路網

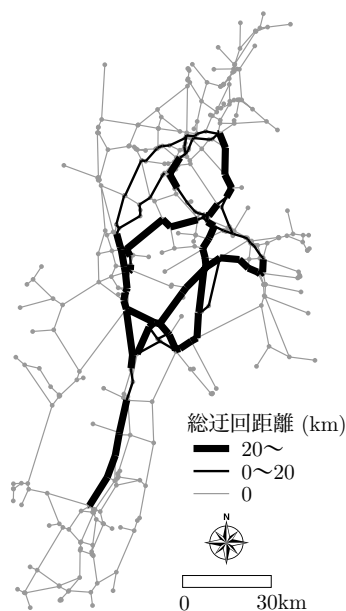
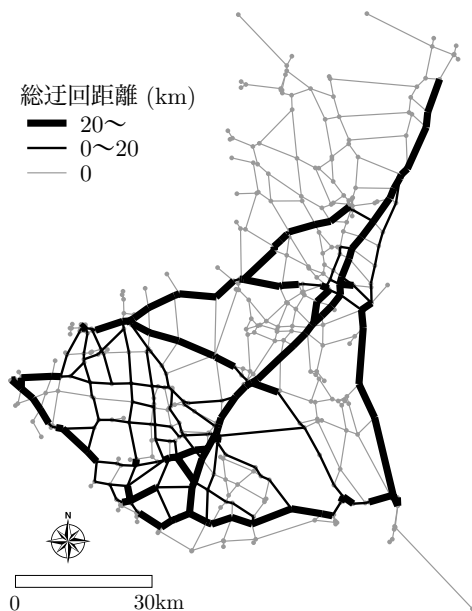
茨城県，長野県，栃木県，千葉県の国道・主要地方道から成る道路網（図 6.7～図 6.10）での移動を考える．移動は人口 5 万人以上の都市間で一様に発生するものとする．

7.4.1 総迂回距離

1 本のリンクを閉鎖したときの総迂回距離を全てのリンクについて求める．すなわち，閉鎖リンクが最短経路に含まれる起終点ペア毎に迂回距離を求め，その迂回距離の総和を当該リンクが閉鎖されたときの総迂回距離とする，という操作を全てのリンクについて行う．結果を図 7.37～図 7.40 に示す．

図 7.37 より，茨城県において総迂回距離が大きくなるのは，取手市と北茨城市を結ぶ国道 6 号，水戸市と結城市を結ぶ国道 50 号，鹿嶋市から太平洋岸を北上する国道 51 号，古河市の南東の国道 354 号，石岡市と下館市を結ぶ主要地方道石岡下館線，鹿嶋市と牛久市を結ぶ道路等である．

図 7.38 より，長野県において総迂回距離が大きくなるのは，飯田市と松本市を結ぶ国道 153 号および 19 号，岡谷市と佐久市を結ぶ国道 142 号，上田市の南の国道 152 号，上田市と須坂市を結ぶ国道 406 号，松本市と上田市を結ぶ国道 143 号等である．



7.4. 実際の道路網

図 7.39 より、栃木県において総迂回距離が大きくなるのは、今市市、鹿沼市、小山市を通る環状道路（国道 121 号、293 号、352 号、4 号、461 号）、そこから北東の黒磯市に至る国道 4 号、南西の足利市に至る国道 293 号、栃木市と佐野市に至る主要地方道宇都宮栃木線および栃木藤岡線、小山市北側の国道 4 号である。

図 7.40 より、千葉県において総迂回距離が大きくなるのは、北西部の道路、東京湾岸の国道 16 号および 127 号、木更津市と茂原市を結ぶ国道 409 号、千葉市と茂原市を結ぶ主要地方道千葉茂原線、館山市から北東に向かう国道 128 号、銚子市の西側の 126 号等である。

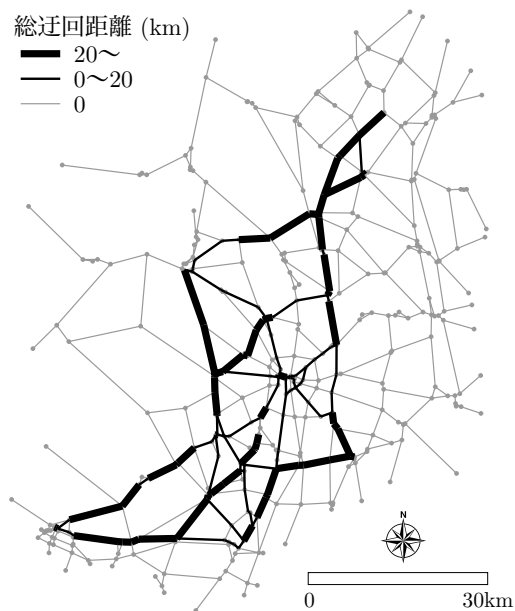


図 7.39: 栃木県の総迂回距離

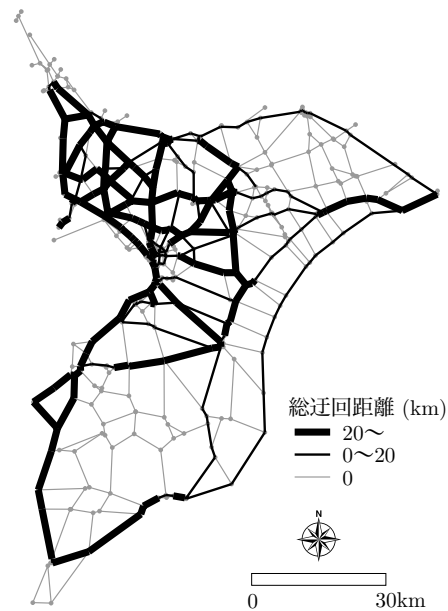


図 7.40: 千葉県の総迂回距離

第7章 迂回距離分布

7.4.2 道路密度・断面交通量との関係

格子状道路網および放射環状道路網での分析では、総迂回距離は道路密度に逆比例し、断面交通量に比例することが分かった。この関係が実際の道路網でどの程度成立するか確認しよう。

そのためには、各道路網における道路密度と断面交通量を求める必要がある。閉鎖リンク周辺の道路密度を求めるために、道路延長の簡便な推定法として、ルート n の法則 [腰塚 (1978)] を用いる。ルート n の法則は道路延長が交差点数 n のルートに比例することからその名が付けられており、領域面積を S 、交差点の数を n 、その内の三差路の数を n_3 、三差路の割合を $c (= n_3/n)$ とすると、領域内の道路延長 Λ は

$$\Lambda = \left(1 - \frac{c}{4}\right) \sqrt{n\pi S} \quad (7.32)$$

と推定される。[腰塚 (1976)] はまず図 7.41 のようなランダムな直線に関してルート n の法則を導いた。直線同士の交点は必ず四差路であるが、現実の道路網には三差路も存在するから、 c を用いてその分だけ長さを割り引いている。道路密度は上式を S で割ることで得られる。以下では、道路密度を各リンクの中点を中心とする半径 10km の円に含まれる交差点の数を計算して推定する。

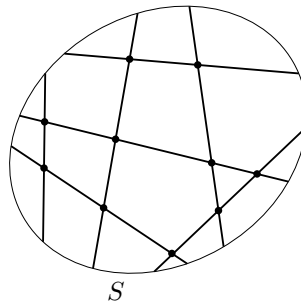


図 7.41: 道路密度の推定

図 7.42～図 7.45 は茨城県、長野県、栃木県、千葉県各リンク周辺の道路密度の推定結果である。茨城県では水戸市周辺および土浦市からつくば市の間で密度が高くなっている。長野県は茨城県に比べて密度が低く、0.45 以上になるのは長野市と上田市の周辺のみである。栃木県は密度の高いリンクが宇都宮市を中心としてほぼ同心円状に分布している。千葉県は千葉市から成田市にかけての地域で密度が高い。簡便な推定法であるにもかかわらず、直観と一致する結果が得られている。

7.4. 実際の道路網

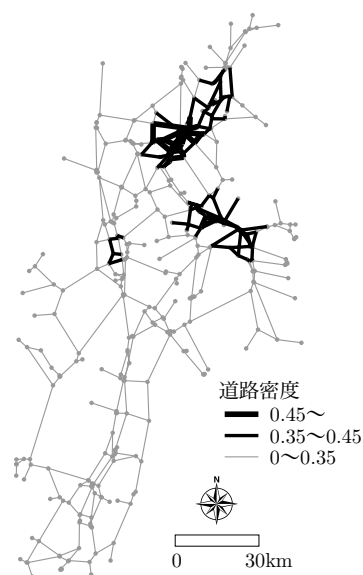
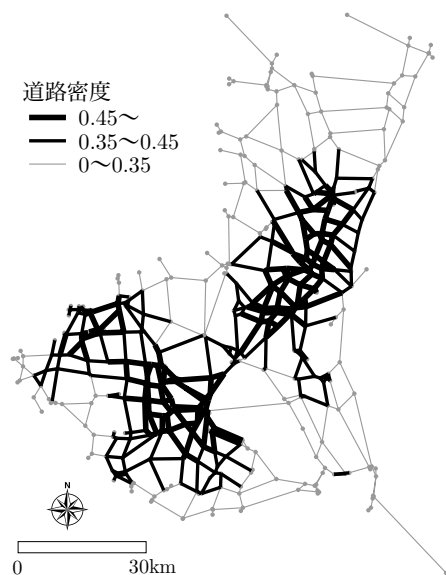


図 7.42: リンク周辺の道路密度（茨城県） 図 7.43: リンク周辺の道路密度（長野県）

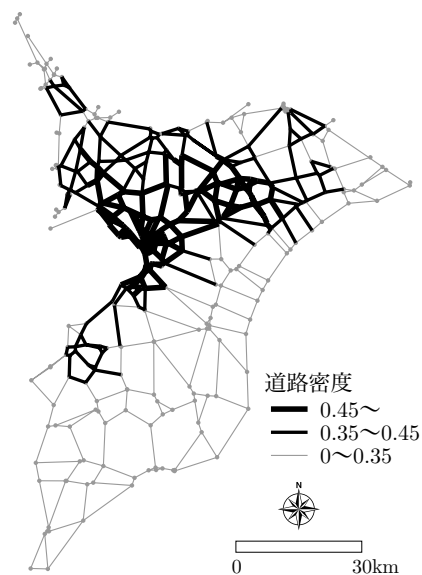
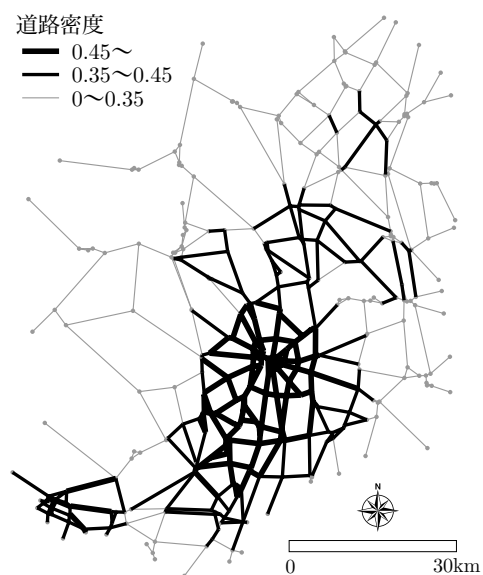


図 7.44: リンク周辺の道路密度（栃木県） 図 7.45: リンク周辺の道路密度（千葉県）

第7章 迂回距離分布

次に、断面交通量は各移動が最短経路を選択するという仮定の下で図 7.46～図 7.49 のように求まる。ここではノード間の移動のみを扱っているため、断面交通量を求めることは、最短路数え上げ問題 [Oyama, Taguchi (1996)] と等価であり、断面交通量はリンクを最短路に含む起終点ペアの数に等しい。

茨城県で断面交通量が大きいののは、取手市と北茨城市を結ぶ国道 6 号、水戸市と結城市を結ぶ国道 50 号、古河市の南東の国道 354 号、鹿嶋市と牛久市を結ぶ道路等である。これらはいずれも都市間移動の際に重要な役割を果たす道路である。

長野県で断面交通量が大きいののは、飯田市と松本市を結ぶ国道 153 号および 19 号、岡谷市と佐久市を結ぶ国道 142 号、長野市と上田市を結ぶ国道 18 号、須坂市と上田市を結ぶ国道 406 号、上田市の南の国道 152 号等である。

栃木県で断面交通量が大きいののは、宇都宮市と黒磯市を結ぶ国道 4 号、宇都宮市から栃木市を経由して佐野市に至る主要地方道宇都宮栃木線および栃木藤岡線、今市市と足利市を結ぶ国道 121 号および 293 号である。

千葉県で断面交通量が大きいののは、移動の起終点が多く存在する北西部の道路、利根川沿いの国道 356 号、東京湾岸を館山市まで結ぶ国道 16 号および 127 号、太平洋岸から 1 本内陸に入った国道 126 号、そこから木更津市に至る国道 409 号である。

7.4. 実際の道路網

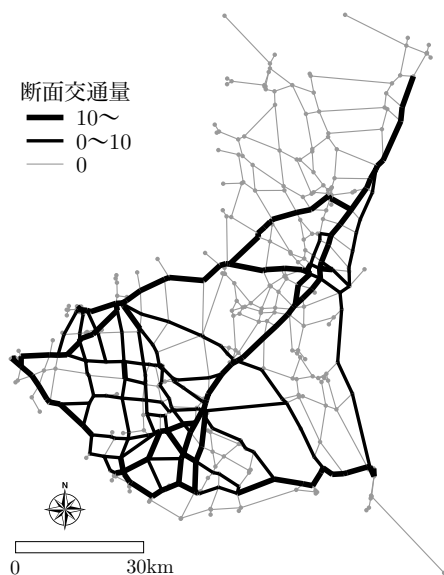


図 7.46: 断面交通量（茨城県）

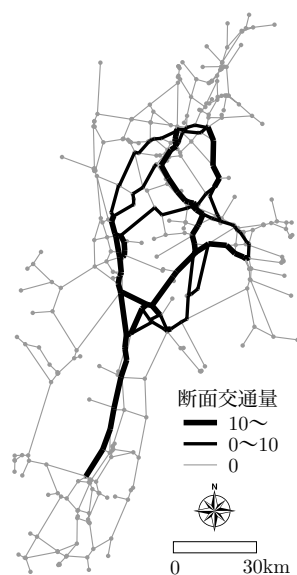


図 7.47: 断面交通量（長野県）

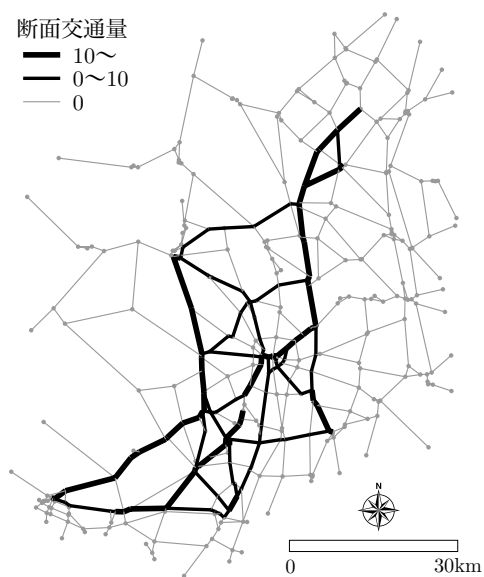


図 7.48: 断面交通量（栃木県）

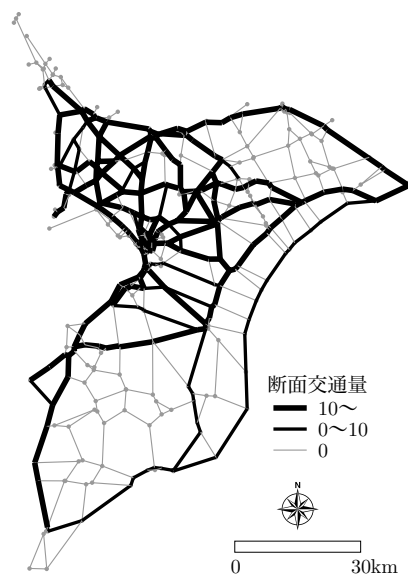


図 7.49: 断面交通量（千葉県）

第7章 迂回距離分布

図7.50～図7.53は各リンクの道路密度 Λ/S ，あるいは断面交通量 Φ を横軸に取り，総迂回距離 Ψ を縦軸に取ったものである．道路密度が低くても総迂回距離が小さいリンクがあるようにばらつきが大きくなっているが，総迂回距離が大きいリンクの多くは道路密度が低く，負の関係が見て取れる．一方，断面交通量と総迂回距離には正の関係があることが分かる．

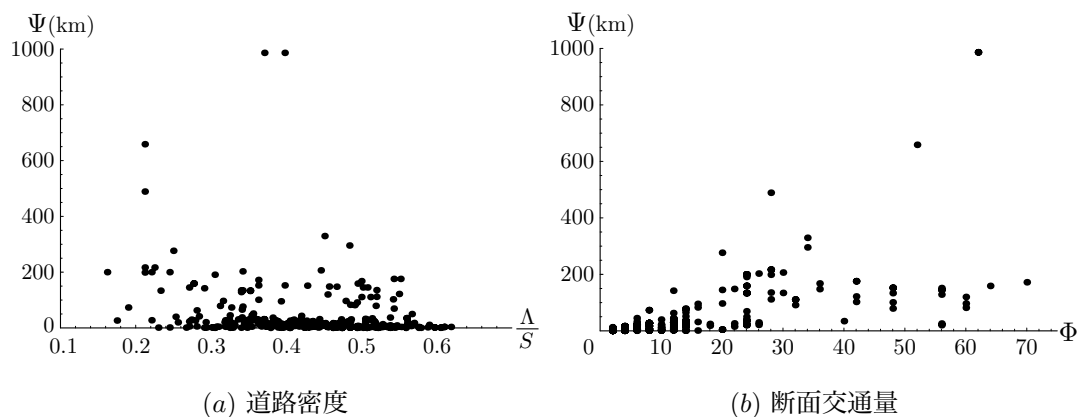


図 7.50: 総迂回距離と道路密度・断面交通量（茨城県）

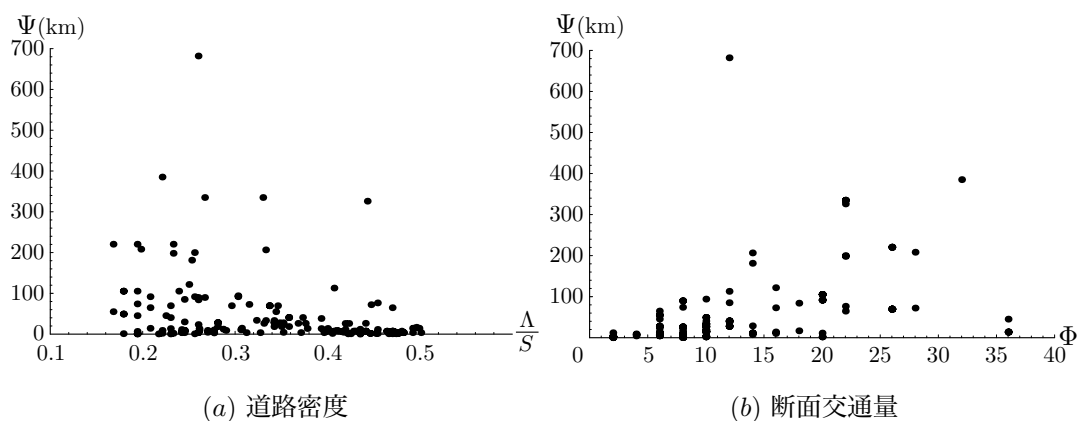


図 7.51: 総迂回距離と道路密度・断面交通量（長野県）

7.4. 実際の道路網

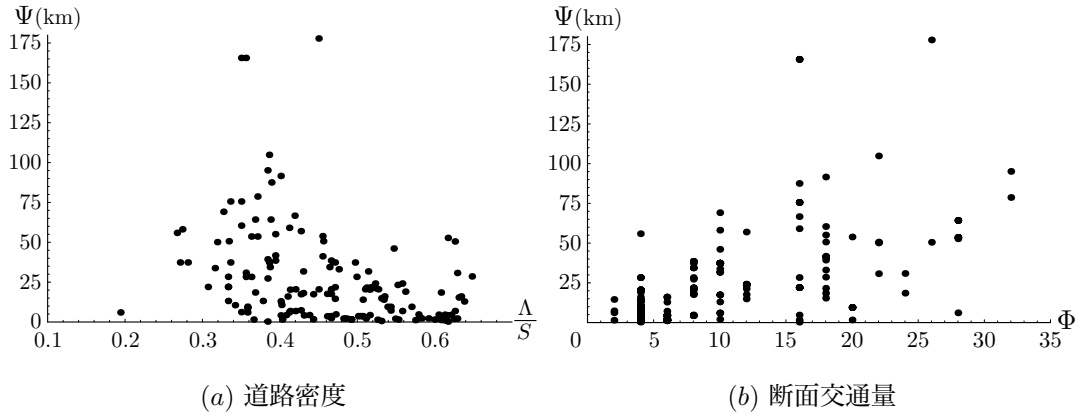


図 7.52: 総迂回距離と道路密度・断面交通量（栃木県）

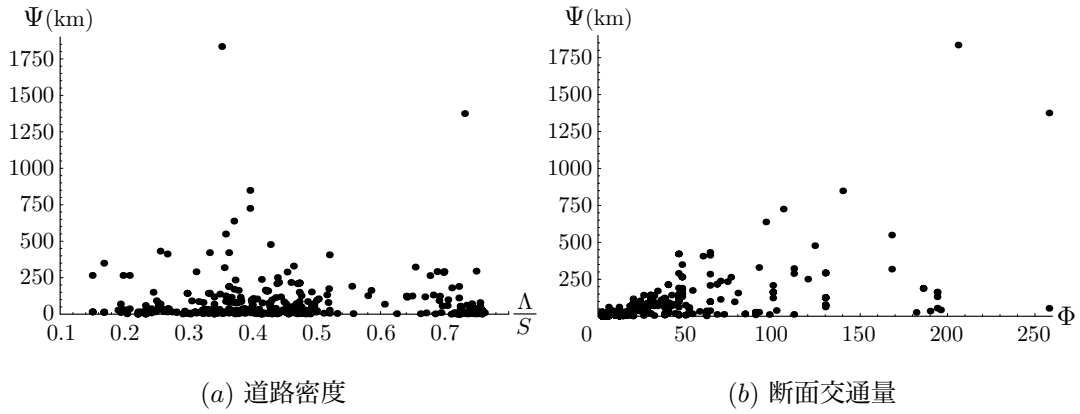


図 7.53: 総迂回距離と道路密度・断面交通量（千葉県）

以上のデータを用いて，総迂回距離 Ψ は道路密度 Λ/S に逆比例し，断面交通量 Φ に比例するという推定式

$$\Psi = \alpha \frac{1}{\Lambda/S} \Phi \quad (7.33)$$

におけるパラメータ α を最小二乗法によって推定する．また，説明変数として道路密度と断面交通量のそれぞれを個別に用いた場合の分析も併せて行う．決定係数 R^2 を表 7.1, パラメータ推定値を表 7.2 に示す．

第7章 迂回距離分布

決定係数はそれほど高くない。推定が過大になるのは、海岸線や山地等の地形条件が道路の方向を規定しているためであると考えられる。つまり、閉鎖リンクに平行するような道路が存在する場合には、それが代替路となり、道路密度や断面交通量に関わらず迂回距離が小さくなるため、推定値との乖離が大きくなる。特に、長野県の南部においては道路が南北方向に沿っているため、過大推定となり、決定係数が小さくなっている。道路密度、断面交通量で個別に推定した場合を比較すると、どの道路網においても断面交通量の方が説明力が高いことが分かる。千葉県では道路密度のみの場合の決定係数が0.000となっており、道路密度ではほとんど説明できていない。

表 7.1: 決定係数

道路網	$\alpha/(\Lambda/S)\Phi$	$\alpha_1/(\Lambda/S)$	$\alpha_2\Phi$
茨城県	0.486	0.055	0.383
長野県	0.213	0.067	0.492
栃木県	0.388	0.104	0.325
千葉県	0.432	0.000	0.317

道路密度のパラメータ α_1 は茨城県と千葉県で大きくなっている。これは図 7.50, 図 7.53 に見られるように道路密度が比較的高いにもかかわらず総迂回距離が大きいリンクがあるためである。また、断面交通量のパラメータ α_2 は茨城県と長野県で大きくなっている。 α_2 は1つの起終点ペアの迂回距離を表しているため、茨城県と長野県では4km以上の迂回を強いられることが分かる。

表 7.2: パラメータ推定値

道路網	$\alpha/(\Lambda/S)\Phi$	$\alpha_1/(\Lambda/S)$	$\alpha_2\Phi$
茨城県	1.70	21.38	4.17
長野県	1.14	15.29	4.38
栃木県	1.02	11.95	2.42
千葉県	1.06	27.19	2.05

7.5 まとめ

本章では、道路閉塞による損失を移動距離の増加という観点から把握した。本章で得られた知見は次の2点である。

- (1) 格子状道路網と放射環状道路網に対して迂回距離分布、総迂回距離を厳密に導いた。そして、交差点の近くで道路閉塞が起こったときに総迂回距離が大きくなることを示した。さらに、総迂回距離と道路密度・断面交通量との関係を議論し、総迂回距離は道路密度に逆比例し、断面交通量に比例することが分かった。つまり、道路網上で密度が低く、交通量の多い箇所が重要であるという直観を裏付けることができた。
- (2) 都市間移動を想定した茨城県、長野県、栃木県、千葉県道路網での分析では、リンクが閉鎖された際の総迂回距離を求めた。そして、道路密度や断面交通量との関係を見ることにより、格子状道路網や放射環状道路網で解析的に得られた総迂回距離と道路密度・断面交通量との関係が実際の道路網上においてもある程度成立することを実証した。

7.4 の実際の道路網での分析では、県内の道路のみを利用すると仮定しているために、県境付近の道路は不利になっている。茨城県や千葉県の海に面している箇所は問題ないものの、茨城県と栃木県の境界付近では実際に迂回する際には県外の道路も利用可能である。より現実 に即した分析を行うためには、対象とする道路網を拡大することも考えられる。

第8章 不完全情報時の迂回距離

8.1 はじめに

道路閉塞時には、ドライバーへの情報提供が迂回交通を適切な迂回経路へ誘導することに寄与している。高速道路での通行止めはラジオの交通情報やインターチェンジの情報板で知ることができるし、集中工事の場合にはテレビでも情報を得ることができる。近年の情報・通信技術の劇的な進歩に伴い、路車間情報システム等を用いて交通情報をリアルタイムで提供することが可能になれば、道路閉塞による損失を最小限に抑えることもできるかもしれない。

宮崎県では異常気象時における事前通行規制区間に指定されている国道 220 号において、規制情報をリアルタイムに提供するシステム「アメールシステム」を 2004 年 3 月から導入している。「アメールシステム」は通行規制情報をシステム登録者の携帯電話などに電子メールで自動配信するシステムである。電子メールの配信は (1) 通行注意、(2) 通行止め開始時、(3) 通行止め解除時の 3 つの区分で行われる [佐々木 (2004)]。

また、国土交通省中国地方整備局では 2003 年 4 月から路上工事に伴う規制情報をリアルタイムに現場から収集管理し、道路利用者に VICS やインターネット、携帯電話で提供している。さらに、リアルタイムに得られた工事規制情報や各種センサーによって得られる道路気象情報を道路情報板に提供するシステムの構築、試験運用も行われている [松本 (2004)]。

事故発生時の情報提供が移動時間に与える影響については、[Sansò, Milot (1999)] が事故が取り除かれるまでの時間の長さをも取り入れた動的な利用者均衡配分を用いて考察している。[梶 (1989)] は災害被害情報の取得が安全な避難経路の選択に及ぼす効果を災害体験ゲームという防災訓練法を用いて検証している。[熊谷 (1992)], [秋月, 他 (2004)] は災害時に住民を避難場所まで安全に誘導するという観点から、道路標識の有効性や視認性を調査している。[酒井, 他 (1997)] は高速道路上での通行止め情報の最適提供位置をドライバーの交通対応行動、通行止めの継続時間、交通量の大小の 3 点に基づいて評価する方法を提案している。災害や事故を考えない平常時における情報提供効果は [Arnott, et al. (1991)], [Mahmassani, Peeta (1993)], [森地, 他 (1995)], [飯田, 他 (1996)], [溝上, 他 (2000)] 等にて考察されている。

第8章 不完全情報時の迂回距離

本章では、道路閉塞に関する情報が全く得られない場合、移動距離が最短距離に比べてどの程度大きくなるのかを明らかにする。道路閉塞情報が得られない場合には、移動者は出発地からまずは最短経路を目的地に向かって進み、閉鎖地点に到達した後に代替経路を選択するものとする。移動開始前に情報が得られている場合には、最初から別の経路を選択することができるため、それに比べて大きな迂回を強いられることになる。そして、このときの迂回距離はODペア間の迂回距離が行きと帰りで異なるという非対称性を有する。道路閉塞情報の提供効果については次章で考察することにして、その前に不完全情報時の迂回距離の基本的性質を把握するために、本章ではこの非対称性について議論する。

以下では、格子状道路網、放射環状道路網を用いて情報が得られない場合の迂回距離の性質を明らかにする。ここでは、迂回距離の非対称性が道路密度と関係することを示す。また、実際の道路網にて情報が得られない場合の迂回距離を求め、迂回距離が非対称となることを観察する。そして、その非対称性が仮想道路網から得られた結果で説明できることを確認する。さらに、迂回距離の応用例として、都市からの「出やすさ」、都市への「入やすさ」という視点から都市間移動の特性を把握する。

8.2 仮想道路網

格子状道路網および放射環状道路網にて道路閉塞情報が得られない場合の迂回について考察する。

8.2.1 格子状道路網

図 8.1 に示す 1 辺の長さが ℓ である格子状道路網上での移動を考える。点 i から点 j への移動のように最短経路が複数あるとき、完全情報の場合には式 (6.1) で表されるように、1 つの最短経路上でリンクが閉鎖されたとしても別の経路を使うことができるため、迂回をする必要はなかった。しかし、情報が得られなければ閉鎖地点を含む経路を選択してしまう可能性もある。最悪のシナリオを想定して迂回距離の最大値を考えるならば、 i から j への迂回距離 y_{ij} は

$$y_{ij} = 2\ell \quad (8.1)$$

となる。一方、 j から i へ向かう移動を考えると、同様に迂回距離の最大値 y_{ji} は

$$y_{ji} = 2\ell \quad (8.2)$$

となり、

$$y_{ij} = y_{ji} \quad (8.3)$$

が成立する。点 i から点 k への移動のように最短経路が一意に定まる場合に関しても迂回距離は

$$y_{ik} = y_{ki} = 2\ell \quad (8.4)$$

となる。つまり、迂回距離に非対称性は存在しない。

第8章 不完全情報時の迂回距離

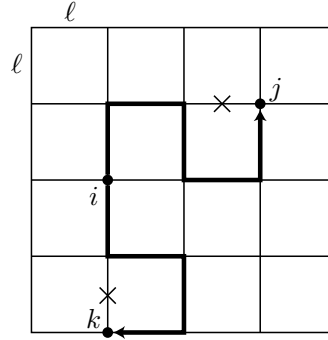


図 8.1: 格子状道路網での迂回（情報なし）

命題 8.1 格子状道路網における任意の起終点 i, j 間の最短経路上にて 1 本のリンクが閉鎖され、道路閉塞情報が得られない場合の迂回距離の最大値は

$$y_{ij} = y_{ji} = 2\ell \quad (8.5)$$

となり、迂回距離は対称性を持つ。

8.2.2 放射環状道路網

図 8.2 に示す隣り合う放射路のなす角 φ 、環状路の間隔 ℓ である放射環状道路網上での移動を考える。6 章と同様に道路網中心への移動を考える。図 8.2 (a) のような点 i から中心 j への移動において、迂回距離が最大となるのは起点 i に最も近いリンク（図中 \times ）が閉鎖されたときである。このときの迂回距離 y_{ij} は最短距離を x_{ij} とすると、

$$y_{ij} = x_{ij}\varphi \quad (8.6)$$

となる。一方、図 8.2 (b) のように中心から外へ向かう移動を考えると、やはり i に最も近いリンクが閉鎖されたときに迂回距離が最大となり、

$$y_{ji} = (2x_{ij} - \ell)\varphi \quad (8.7)$$

と y_{ij} よりも大きくなる。すなわち、放射環状道路網は道路閉塞時に中心へ入りやすく、逆に中心から出るのは難しいという性質がある。

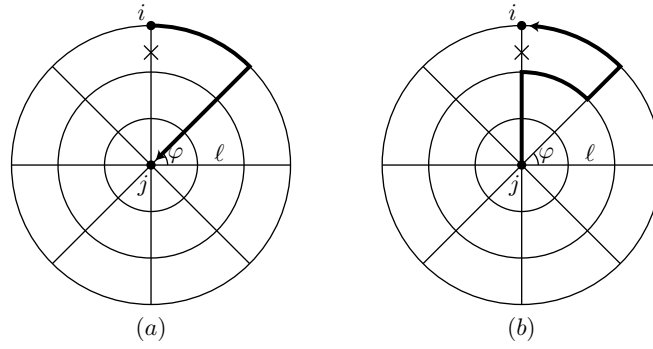


図 8.2: 放射環状道路網での迂回 1 (情報なし)

命題 8.2 放射環状道路網における周辺の点 i と中心 j の間の最短経路上にて 1 本のリンクが閉鎖され，道路閉塞情報が得られない場合の迂回距離の最大値は，最短距離を x_{ij} とすると

$$y_{ij} = x_{ij}\varphi \quad (8.8)$$

$$y_{ji} = (2x_{ij} - \ell)\varphi \quad (8.9)$$

となり，迂回距離は対称性を持たない．

一方，図 8.3 の点 i と点 k の間の移動のように周辺から周辺への移動を考えると，迂回距離の最大値は

$$y_{ik} = y_{ki} = (2x_{ik} - \ell)\varphi \quad (8.10)$$

と対称になる．

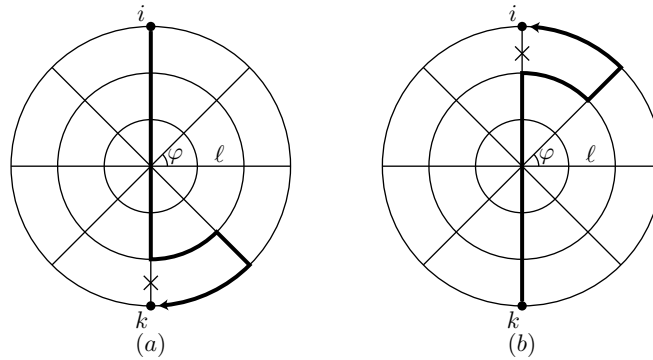


図 8.3: 放射環状道路網での迂回 2 (情報なし)

第8章 不完全情報時の迂回距離

格子状道路網，放射環状道路網での分析から，迂回距離の非対称性は移動の出発地と目的地の道路密度の差によって生じることが分かる．すなわち，放射環状道路網における中心から周辺への移動のように密度の高いところから低いところへ移動する場合，目的地周辺で道路閉塞が起こると，道路が少ない上に，すでに目的地に近付いているために経路選択の幅が限られ，大きな迂回を強いられる．逆に，密度の低いところから高いところへ移動する場合には，出発地周辺で道路が閉鎖されてもまだ目的地まで距離があり，目的地周辺で閉鎖されても道路が多くあることから，それほど大きく迂回をせずに済む．そのため，出発地と目的地の道路密度の差が大きい場合には迂回距離の非対称性が大きくなる．出発地と目的地の道路密度が等しい場合には，格子状道路網での移動，あるいは放射環状道路網での周辺から周辺への移動のように，往路と復路で同じように迂回を強いられることから迂回距離は対称となる．

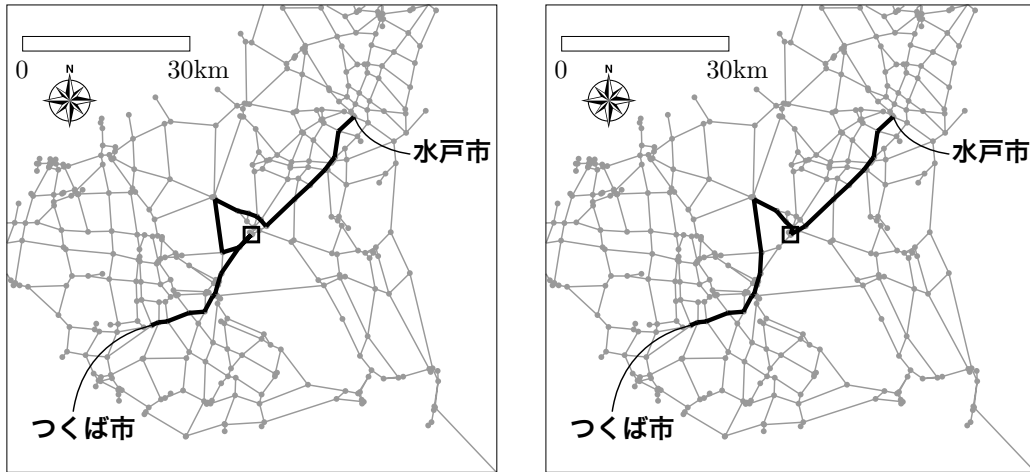
8.3 実際の道路網

茨城県，長野県，栃木県，千葉県の国道・主要地方道から成る道路網（図 6.7～図 6.10）での移動を考える．移動の起終点は人口 5 万人以上の都市とする．

8.3.1 不完全情報時の迂回距離

道路閉塞情報が得られないときの迂回距離の計算方法をつくば・水戸間の移動を例に説明する．図 8.4 は最短経路上の 1 箇所のリンク（図中□）が閉鎖されたときの迂回経路を表しており，閉鎖地点に到達した後に代替経路に移る様子が分かる．また，つくばから水戸へ行く場合と水戸からつくばへ行く場合の迂回経路が異なることも見て取れる．迂回距離はつくば → 水戸が 27.2km，水戸 → つくばが 18.2km となっている．図 6.11 の完全情報の場合の迂回距離は 16.0km であったので，情報が得られないことによっていずれも大きくなることが確認できる．

8.3. 実際の道路網



(a) つくば → 水戸

(b) 水戸 → つくば

図 8.4: つくば・水戸間の迂回経路（情報なし）

都市 i から都市 j へ向かうときの迂回距離を y_{ij} ，逆に都市 j から都市 i へ向かうときの迂回距離を y_{ji} とし，迂回距離と最短距離 x_{ij} との関係を観察しよう．上で見たように迂回距離は一般に対称性を持たないが，最短距離は $x_{ij} = x_{ji}$ となり対称性を持つ．6章で示したように迂回距離は閉鎖リンクの位置によって様々な値をとる．災害時の避難の場合には，最悪の事態にどの位迂回を強いられるかが重要になるので，以下では2都市間の迂回距離の代表値として最大値を用いる．

図 8.5 は茨城県において水戸市 i と他都市 j との間の移動距離を，横軸に水戸市から出るときの移動距離 $x_{ij} + y_{ij}$ ，縦軸に水戸市へ入るときの移動距離 $x_{ij} + y_{ji}$ をプロットしたものである．迂回距離が対称であるならば 45 度線上に乗るはずだが，非対称であるために 45 度線からずれている．各点と 45 度線とを結ぶ線分は移動距離が最短距離に比べてどの程度大きくなるかを表している．左下から右上にかけて，水戸市から地理的に近い都市から遠い都市へと移っていくことが分かる．ただ，日立市は水戸市から出るときの迂回距離が大きく，45 度線から大きく外れている．そのため，土浦市と日立市を比べた場合，出るときの移動距離は土浦市の方が小さいが，入るときは日立市の方が小さいという現象が見られる．古河市，結城市，鹿嶋市は市役所ノードにリンクが 1 本しか接続していないために，迂回距離の最大値が無限大になる．無限大となる 3 市を除くと，出るときの移動距離が大きいのが 94.4km の北茨城市，入るときの移動距離が大きいのが 101.3km の守谷市である．ひたちなか市は出るとき 12.4km，入るとき 20.4km といずれも小さい．

第8章 不完全情報時の迂回距離

迂回距離の大きな都市を把握するため、移動距離の増分のみに着目すると、図8.6のようになる。横軸は水戸市から出るときの迂回距離 y_{ij} 、縦軸は水戸市へ入るときの迂回距離 y_{ji} を表している。無限大となる3市を除くと、出るときの迂回距離が最も大きいのは35.4kmとなる日立市である。日立市は入るときは10.9kmとなっており非対称性が大きい。入るときの迂回距離はつくば、守谷、取手等の6市で27.2kmと大きくくなっている。6市の迂回距離が等しくなっているのは、起終点間で迂回距離が最大となるリンクが同一であるためである。出るときの迂回距離が最も小さいのは2.9kmのひたちなか市、入るときが最も小さいのは5.4kmの石岡市である。

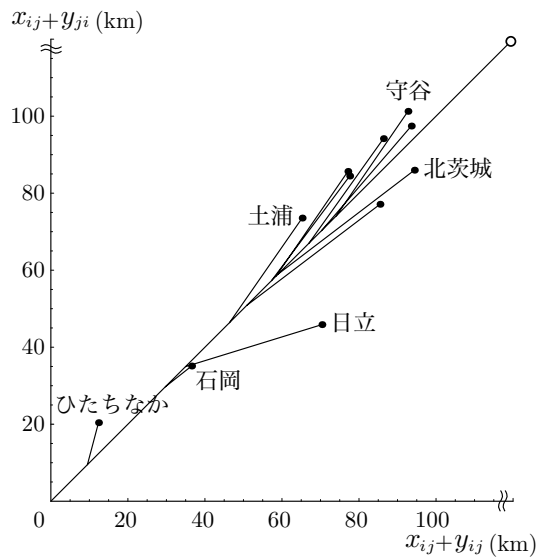


図 8.5: 水戸市と他都市間の移動距離

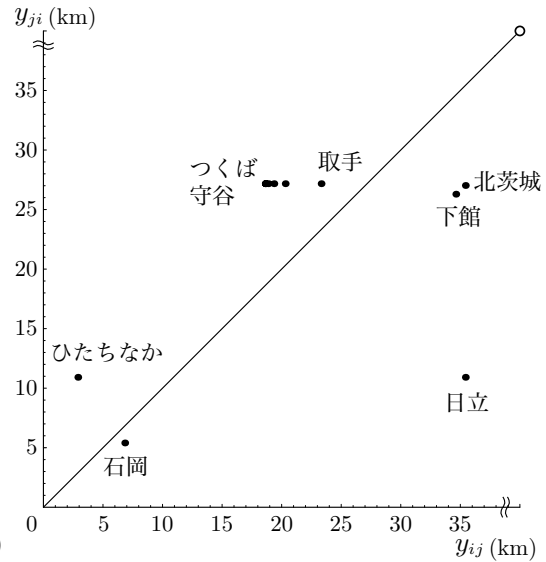


図 8.6: 水戸市と他都市間の迂回距離

8.3. 実際の道路網

図 8.7 は長野県において長野市 i と他都市 j との間の移動距離を、横軸に長野市から出るときに移動距離 $x_{ij} + y_{ij}$ 、縦軸に長野市へ入るときに移動距離 $x_{ij} + y_{ji}$ をプロットしたものである。長野市から茅野市へ出るときに迂回距離が特に大きいことが分かる。茅野市以外の都市は出るときよりも入るときの方が迂回距離が大きいため、45 度線より上の領域に属している。つまり、長野市は他都市へ出の方が他都市から入よりも容易であるといえる。地理的に離れている飯田市は出るとき 193.3km、入るとき 204.1km と非常に大きくなっている。移動距離が最も小さいのは、出るとき 21.4km、入るとき 27.7km の須坂市である。

移動距離の増分のみに着目すると、図 8.8 のようになる。横軸は長野市から出るときに迂回距離 y_{ij} 、縦軸は長野市へ入るときに迂回距離 y_{ji} を表している。迂回距離が無限大となる都市はないが、茅野市は出るときに迂回距離が 69.4km と相当大きくなっている。一方で入るときは 43.6km で 45 度線からの乖離が大きい。入るときに迂回距離が大きいのは 56.0km となる岡谷市・諏訪市である。須坂市は出るときが 9.6km、入るときが 15.9km といずれも小さい。

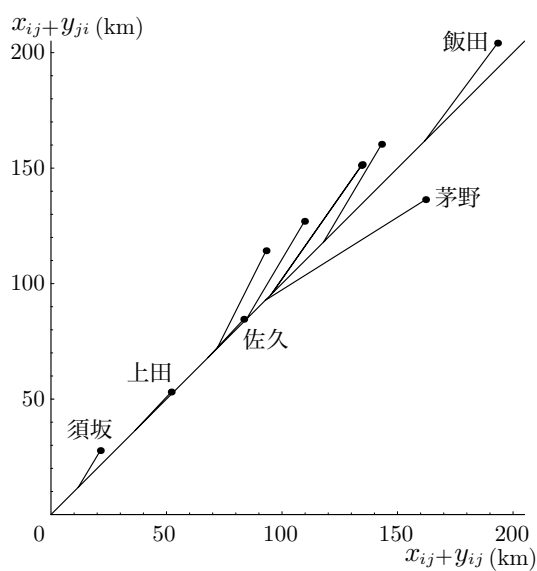


図 8.7: 長野市と他都市間の移動距離

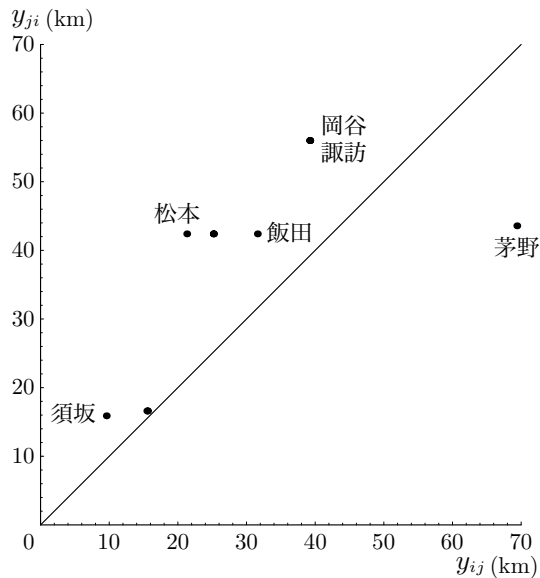


図 8.8: 長野市と他都市間の迂回距離

第8章 不完全情報時の迂回距離

図8.9は栃木県において宇都宮市 i と他都市 j との間の移動距離を、横軸に宇都宮市から出るときの移動距離 $x_{ij} + y_{ij}$ 、縦軸に宇都宮市へ入るときの移動距離 $x_{ij} + y_{ji}$ をプロットしたものである。黒磯市以外の都市が45度線より下にあり、入るときよりも出るときの方が移動距離が大きいことが分かる。長野市とは対照的に、宇都宮市は他都市から入りやすい都市であるといえる。前節での分析から、これは栃木県の道路網が放射環状パターンに近く、宇都宮市がその中心に位置することに起因することが分かる。最短距離は黒磯市が最も大きいのだが、足利市は迂回距離が大きいため合計したものは最も大きくなっている。地理的に近い鹿沼市は出るとき33.9km、入るとき22.0kmといずれも小さくなっている。茨城県、長野県と比べても全体的に移動距離は小さく、宇都宮市は他の都市と行き来がしやすいといえる。

移動距離の増分のみに着目すると、図8.10のようになる。横軸は宇都宮市から出るときの迂回距離 y_{ij} 、縦軸は宇都宮市へ入るときの迂回距離 y_{ji} を表している。迂回距離が大きいのは出るとき29.6km、入るとき24.4kmの足利市、小さいのは出るとき9.6km、入るとき6.7kmの小山市である。出るときと入るときの迂回距離の差が最も大きいのは出るとき20.7km、入るとき8.9kmとなる鹿沼市である。

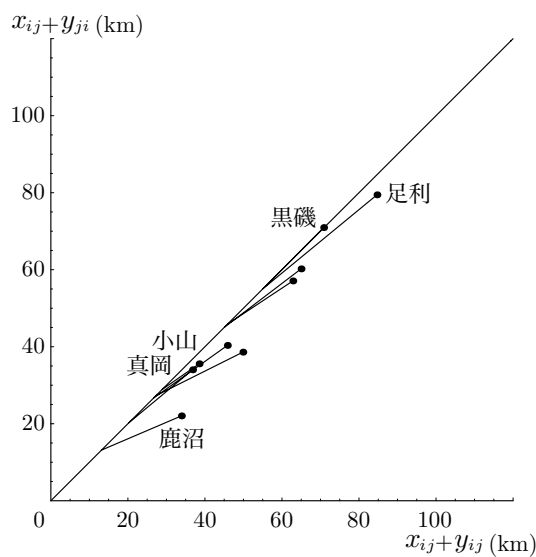


図8.9: 宇都宮市と他都市間の移動距離

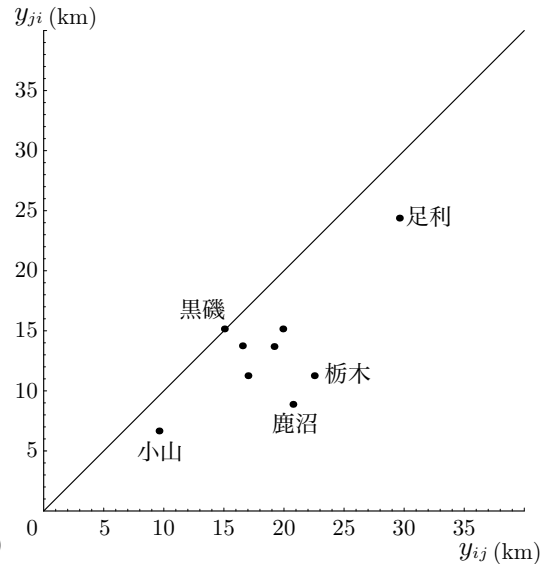


図8.10: 宇都宮市と他都市間の迂回距離

8.3. 実際の道路網

図 8.11 は千葉県において千葉市 i と他都市 j との間の移動距離を、横軸に千葉市から出るときの移動距離 $x_{ij} + y_{ij}$ ，縦軸に千葉市へ入るときの移動距離 $x_{ij} + y_{ji}$ をプロットしたものである。浦安市は迂回距離が無限大になる。最短距離が大きな館山市は迂回距離も大きくなっている。出るときの移動距離が最も小さいのは 16.5km の船橋市，入るときの移動距離が最も小さいのは 13.1km の四街道市である。最短距離は船橋市よりも四街道市の方が小さいのだが，船橋市の出るときの迂回距離が小さいために移動距離が小さくなっている。

移動距離の増分のみに着目すると，図 8.12 のようになる。横軸は千葉市から出るときの迂回距離 y_{ij} ，縦軸は千葉市へ入るときの迂回距離 y_{ji} を表している。無限大となる浦安市を除くと，出るときの迂回距離が最も大きいのは 26.0km の館山市，入るときの迂回距離が最も大きいのは 28.1km の流山市である。逆に，出るときの迂回距離が最も小さいのは 3.5km の船橋市，入るときの迂回距離が最も小さいのは 3.6km の四街道市である。非対称性が最も大きいのは出るとき 9.0km，入るとき 19.4km の佐倉市である。

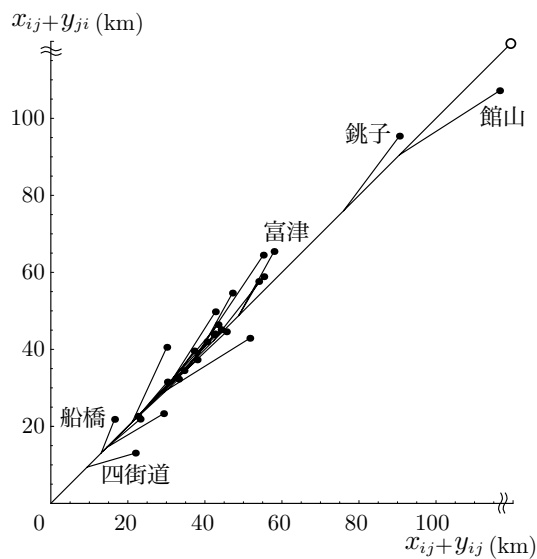


図 8.11: 千葉市と他都市間の移動距離

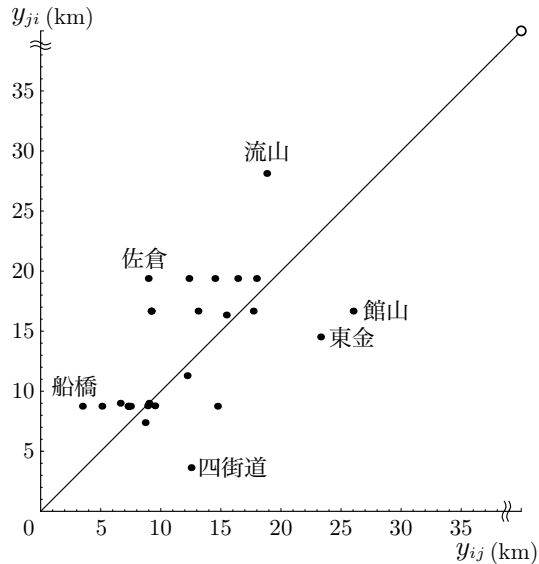


図 8.12: 千葉市と他都市間の迂回距離

8.3.2 出やすい都市，入りやすい都市

本節では，都市から出るときと都市へ入るときの迂回距離を用いて，災害や事故によって道路閉塞が発生したときの都市の「出やすさ」，「入りやすさ」について論じる．例えば，災害時に都市外へ避難したり他都市へ疎開したりする場合には，都市から出るときの距離が小さい方が良好であろう．通勤移動を考えれば，出勤時の都市へ入るときの距離が重要である．このような視点から都市間移動の特性を把握するための指標を提案する．

図8.13において，都市 i からの出やすさ δ_i^{out} を都市 i から他の都市 j へ行くときの最短距離 x_{ij} と迂回距離 y_{ij} の和を全ての j について平均した

$$\delta_i^{out} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} + y_{ij}) \quad (8.11)$$

で定義する．ここで， n は目的地となる都市の数である． δ_i^{out} は他都市へ出るときに迂回を含めてどの程度の移動距離を要するかを表している．

同様に，都市 i への入りやすさ δ_i^{in} を他の都市 j から都市 i へ来るときの移動距離 $x_{ij} + y_{ji}$ を全ての j について平均した

$$\delta_i^{in} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} + y_{ji}) \quad (8.12)$$

で定義する． δ_i^{in} は他都市から入るときに迂回を含めてどの程度の移動距離を要するかを表している．

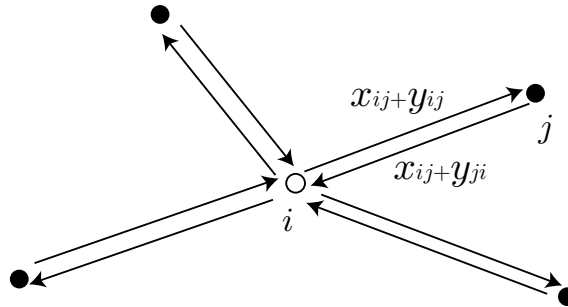


図8.13: 都市 i の出やすさ，入りやすさ

8.3. 実際の道路網

図 8.14 は茨城県の各都市に対して、横軸に出るときの移動距離 δ^{out} ，縦軸に入るときの移動距離 δ^{in} をプロットしたものである。 $\delta^{out}, \delta^{in}$ の 2 指標で都市を評価したときにパレート最適 [中山, 谷野 (1994)] となるのは石岡，土浦，つくばの 3 市である。これらの都市は茨城県内で他の都市へ行くにも，他の都市から来るにも便利であることが分かる。一方，迂回距離が無限大となる古河市，結城市，鹿嶋市に加え，北茨城市，日立市は出るときと入るときのいずれの移動距離も大きく，県境に近く他都市から離れている都市は不利になることが分かる。

図 8.15 は長野県の各都市に対して、横軸に出るときの移動距離 δ^{out} ，縦軸に入るときの移動距離 δ^{in} をプロットしたものである。塩尻市が出るときと入るときのいずれの移動距離も小さく，松本市，諏訪市，岡谷市といった長野県の地理的中心に近い都市が左下に集まっている。中心から遠い飯田市，須坂市は右上にあり，他都市との行き来が不便だといえる。

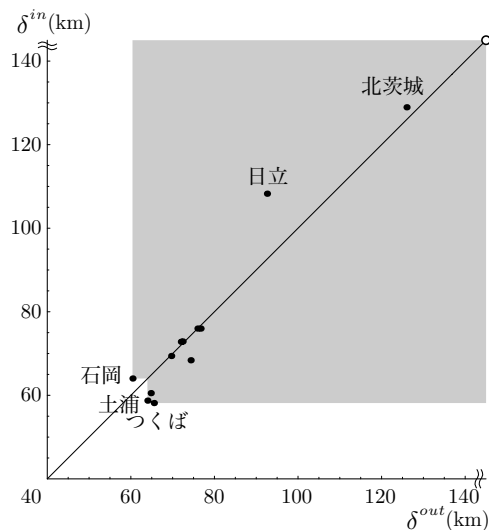


図 8.14: 出るときと入るときの移動距離
(茨城県)

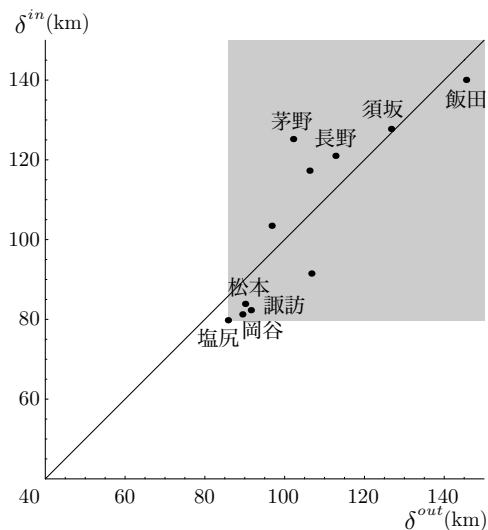


図 8.15: 出るときと入るときの移動距離
(長野県)

第8章 不完全情報時の迂回距離

図8.16は栃木県的各都市に対して、横軸に出るとき移動距離 δ^{out} 、縦軸に入るとき移動距離 δ^{in} をプロットしたものである。パレート最適となるのは栃木、鹿沼、宇都宮の3市である。移動距離が大きいの黒磯市、大田原市、足利市である。

図8.17は千葉県各都市に対して、横軸に出るとき移動距離 δ^{out} 、縦軸に入るとき移動距離 δ^{in} をプロットしたものである。パレート最適となるのは千葉、八千代の2市である。浦安市は迂回距離が無限大になる。他都市から離れた館山市、銚子市は出るときと入るときのいずれの移動距離も大きくなっている。

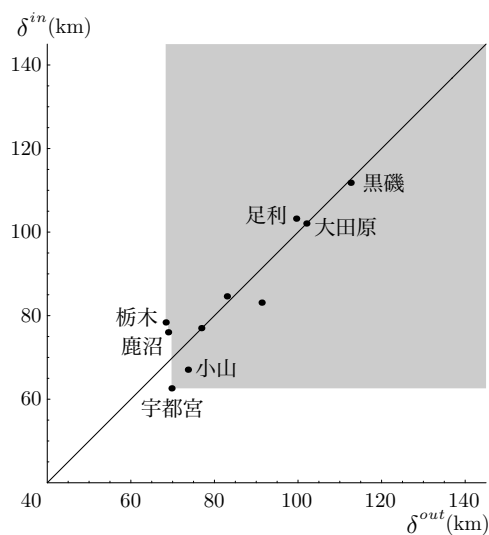


図8.16: 出るときと入るときの移動距離
(栃木県)

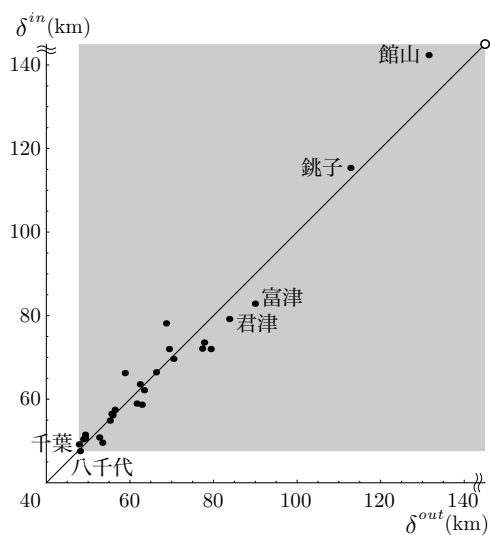


図8.17: 出るときと入るときの移動距離
(千葉県)

8.4 まとめ

本章では、道路閉塞情報が得られない場合の迂回距離について論じた。本章で得られた知見は以下の3点である。

- (1) 情報が得られない場合の迂回距離に、往路と復路の迂回距離が異なるという非対称性が発現することを観察した。格子状道路網、放射環状道路網での分析を通して、出発地と目的地の道路密度が大きく異なる場合に、迂回距離の非対称性が大きくなることを示した。すなわち、道路密度の低い都市は入るときの迂回距離が大きく、密度の高い都市は入るときよりも出るときの方が迂回距離が大きいことが分かった。このことは情報が得られない場合の迂回距離が持つ1つの性質として捉えることができる。
- (2) 茨城県、長野県、栃木県、千葉県道路網を用いて道路閉塞情報が得られない場合に迂回距離が最短距離に比べてどの程度大きくなるかを把握した。そして、他都市から宇都宮市へ入るときの迂回距離が小さいことが放射環状道路網での分析から説明できることを示した。したがって、実際の道路網上における迂回距離の非対称性は仮想道路網で示した道路密度との関係である程度記述できる。
- (3) 他都市へ出るときの迂回距離、他都市から入るときの迂回距離を用いて、都市の出やすさ、入りやすさを計測した。この指標は都市の位置と道路網の整備状況を反映しており、災害時には入りやすい都市へ避難させるというように避難誘導先を知る上でも重要な意味を持つ。そして、地理的中心に近い都市が道路閉塞時にも他都市と行き来する際に利便性が高いことを示した。

第9章 道路閉塞情報の効果

9.1 はじめに

本章では、道路閉塞情報の提供が迂回距離をどの程度減らせるのかを分析する。具体的には、完全情報、交差点情報、情報なしの3種類の情報提供効果を比較検討する。完全情報はカーナビゲーションシステム等を用いたリアルタイムの情報提供、交差点情報は閉鎖地点近くでの情報板による案内を想定している。

以下では、格子状道路網と放射環状道路網について交差点情報および情報なしの場合の迂回距離分布を導出する。7章の完全情報の場合と合わせて、道路閉塞時の総迂回距離を3種類の情報提供方法で比較することにより情報の効果を評価する。情報提供が有効な箇所を把握するため、情報の効果と道路密度・断面交通量との関係についても考察する。さらに、実際の道路網上で道路閉塞情報が得られない場合の総迂回距離を求め、情報の効果を格子状道路網や放射環状道路網で得られた結果から説明することを試みる。

9.2 格子状道路網

1辺の長さが a である $n \times n$ 格子状道路網（図 7.1）上で移動が一様に発生するものとする。道路網上の1地点が閉塞したときの損失の大きさを、3種類の情報提供方法の下で比較する。

定義 9.1 道路閉塞に関する3種類の情報提供方法を次のように定義する：

完全情報 移動開始前に情報が入手済みの場合

交差点情報 閉鎖地点を含むリンク両端の交差点で初めて情報が得られる場合

情報なし 情報が全く得られない場合

それぞれの情報提供の下での迂回経路を図 9.1 に示す。完全情報の場合には最初から別の経路を選択することが可能であるが、交差点情報や情報なしの場合にはまずは最短経路に沿って移動し、情報が得られた地点から代替経路を選択する。特に、情報なしの場合には、閉鎖地点から一度引き返さなければならず、大きな迂回を強いられる。

第9章 道路閉塞情報の効果

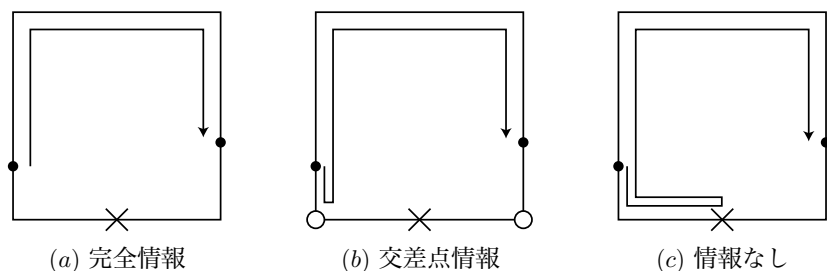


図 9.1: 情報提供と迂回経路（格子状道路網）

格子状道路網では図 9.2 のように最短路が一意に定まらない場合がある。道路閉塞時に完全情報があれば閉鎖地点を通らない経路を選択することにより、迂回をせずに済む。しかし、情報がなければ、最短経路の選択によっては閉鎖地点を含む経路を選択する可能性がある。そこで、最短経路選択方法を次のように設定する：(1) 曲がる回数が最小の経路を選択する、(2) 同一の曲がる回数の経路が複数ある場合には移動の起点から可能な限り直進する。この経路選択方法の下では、図 9.2 のような OD ペア間の移動は迂回を強いられる。

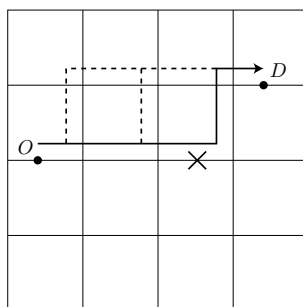


図 9.2: 最短路が一意に定まらない場合

9.2.1 交差点情報の迂回距離分布

交差点情報や情報なしの場合の迂回距離分布を求めるためには、完全情報の場合の図 7.2 ～図 7.10 の 9 つの迂回パターンに加えて、新たに図 9.3, 図 9.4 の 2 パターンを考慮する必要がある。これらは完全情報では迂回が生じないが、交差点情報や情報なしでは迂回を強いられる移動パターンである。これらのパターン S_{10}, S_{11} に属する迂回移動の起終点が存在するリンクの組合せの数は、図 7.1 のように閉鎖リンクの左側にある水平方向のリンク

9.2. 格子状道路網

リンクの本数を k とすると, $|S_{10}| = 2\{k(n-k-1)(n-3) + (n-k-2)(k+1)(n-3)\}$, $|S_{11}| = 2k(n-k-2)(n-1)$ となる.

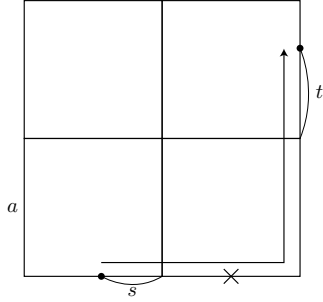


図 9.3: 迂回 10)

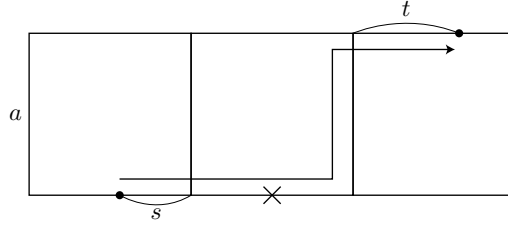


図 9.4: 迂回 11)

また, 8 章で述べたように, 交差点情報や情報なしの場合には往路と復路の迂回距離が異なるため, 迂回距離分布も往路と復路を区別して求める必要がある.

交差点情報の場合の迂回距離は最短経路をそれぞれ閉鎖リンク両端の交差点まで移動し, そこから代替経路を選択したときの移動距離から最短経路距離を引くことで得られる. ただし, 移動の起点が閉鎖リンク上にあるときには, 後述する情報なしの場合と同様に閉鎖地点で引き返すものとする. 迂回距離分布 $F(y)$ は迂回距離が y 以下であるような交通量として以下のように求められる.

1) 往路: $Y_1 = 2(a-t)$, $s+t \leq a$

$$F_1(y) = \frac{y^2}{8}, \quad (0 \leq y \leq 2a) \quad (9.1)$$

復路: 往路と同じ

2) 往路: $Y_2 = 2a$

$$F_2(y) = a^2, \quad (y = 2a) \quad (9.2)$$

復路: $Y_2 = 2(a-s)$

$$F_2(y) = \frac{a}{2}y, \quad (0 \leq y \leq 2a) \quad (9.3)$$

3) 往路: $Y_3 = 2(a-t)$

$$F_3(y) = \frac{a}{2}y, \quad (0 \leq y \leq 2a) \quad (9.4)$$

第9章 道路閉塞情報の効果

復路：往路と同じ

4) 往路： $Y_4 = 2a$

$$F_4(y) = a^2, \quad (y = 2a) \quad (9.5)$$

復路：往路と同じ

5) 往路： $Y_5 = 2(a + u + t)$

$$F_5(y) = u \left(\frac{y}{2} - a - u \right), \quad (2(a + u) \leq y \leq 4a) \quad (9.6)$$

復路： $Y_5 = 2(2a - u + s)$

$$F_5(y) = (a - u) \left(\frac{y}{2} - 2a + u \right), \quad (2(2a - u) \leq y \leq 4a) \quad (9.7)$$

6) 往路： $Y_6 = 2(a + u - t)$

$$F_6(y) = u \left(\frac{y}{2} - u \right), \quad (2u \leq y \leq 2(a + u)) \quad (9.8)$$

復路： $Y_6 = 2(a + s)$

$$F_6(y) = a \left(\frac{y}{2} - a \right), \quad (2a \leq y \leq 2(a + u)) \quad (9.9)$$

7) 往路： $Y_7 = 2(u - t), (s \geq t)$

$$F_7(y) = \frac{y^2}{8}, \quad (0 \leq y \leq 2u) \quad (9.10)$$

復路： $Y_7 = 2(a + s), (s \geq t)$

$$F_7(y) = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{2} - a \right)^2, \quad (2a \leq y \leq 2(a + u)) \quad (9.11)$$

8) 往路： $Y_8 = 2(a + u)$

$$F_8(y) = au, \quad (y = 2(a + u)) \quad (9.12)$$

復路： $Y_8 = 2(a + s)$

$$F_8(y) = a \left(\frac{y}{2} - a \right), \quad (2a \leq y \leq 2(a + u)) \quad (9.13)$$

9.2. 格子状道路網

9) 往路： $Y_9 = 2u$

$$F_9(y) = au, \quad (y = 2u) \quad (9.14)$$

復路： $Y_9 = 2(a + s)$

$$F_9(y) = a \left(\frac{y}{2} - a \right), \quad (2a \leq y \leq 2(a + u)) \quad (9.15)$$

10) 往路：迂回なし

復路： $Y_{10} = 2a$

$$F_{10}(y) = a^2, \quad (y = 2a) \quad (9.16)$$

命題 9.1 格子状道路網上で移動が一様にかつ独立に発生するものとする．道路網上の 1 地点が閉塞し，道路閉塞情報が閉鎖地点手前の交差点で得られる場合の迂回距離分布 $F(y)$ は次式で表される：

$$F(y) = \sum_{i=1}^{10} |S_i| F_i(y) \quad (9.17)$$

9.2.2 情報なしの迂回距離分布

情報なしの場合の迂回距離は最短経路を閉鎖地点まで移動し，そこから代替経路を選択したときの移動距離から最短経路距離を引くことで得られる．迂回距離分布 $F(y)$ は迂回距離が y 以下であるような交通量として以下のように求められる．

1) 往路： $Y_1 = 2(a + u - t)$, $s + t \leq a$

$$F_1(y) = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{2} - u \right)^2, \quad (2u \leq y \leq 2(a + u)) \quad (9.18)$$

復路： $Y_1 = 2(2a - u - s)$

$$F_1(y) = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{2} + u - a \right)^2, \quad (2(a - u) \leq y \leq 2(2a - u)) \quad (9.19)$$

2) 往路： $Y_2 = 2(a + u)$

$$F_2(y) = a^2, \quad (y = 2(a + u)) \quad (9.20)$$

第9章 道路閉塞情報の効果

復路： $Y_2 = 2(2a - u - s)$

$$F_2(y) = a \left(\frac{y}{2} + u - a \right), \quad (2(a - u) \leq y \leq 2(2a - u)) \quad (9.21)$$

3) 往路： $Y_3 = 2(a + u - t)$

$$F_3(y) = a \left(\frac{y}{2} - u \right), \quad (2u \leq y \leq 2(a + u)) \quad (9.22)$$

復路： $Y_3 = 2(2a - u - s)$

$$F_3(y) = a \left(\frac{y}{2} + u - a \right), \quad (2(a - u) \leq y \leq 2(2a - u)) \quad (9.23)$$

4) 往路： $Y_4 = 2(a + u)$

$$F_4(y) = a^2, \quad (y = 2(a + u)) \quad (9.24)$$

復路： $Y_4 = 2(2a - u)$

$$F_4(y) = a^2, \quad (y = 2(2a - u)) \quad (9.25)$$

5) 往路： $Y_5 = 2(a + u + t)$

$$F_5(y) = u \left(\frac{y}{2} - a - u \right), \quad (2(a + u) \leq y \leq 4a) \quad (9.26)$$

復路： $Y_5 = 2(2a - u + s)$

$$F_5(y) = (a - u) \left(\frac{y}{2} - 2a + u \right), \quad (2(2a - u) \leq y \leq 4a) \quad (9.27)$$

6) 往路： $Y_6 = 2(a + u - t)$

$$F_6(y) = u \left(\frac{y}{2} - u \right), \quad (2u \leq y \leq 2(a + u)) \quad (9.28)$$

復路： $Y_6 = 2(2a - u + s)$

$$F_6(y) = a \left(\frac{y}{2} - 2a + u \right), \quad (2(2a - u) \leq y \leq 4a) \quad (9.29)$$

7) 往路： $Y_7 = 2(u - t), (s \geq t)$

$$F_7(y) = \frac{y^2}{8}, \quad (0 \leq y \leq 2u) \quad (9.30)$$

9.2. 格子状道路網

復路： $Y_7 = 2(2a - u + s)$, ($s \geq t$)

$$F_7(y) = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{2} - 2a + u \right)^2, \quad (2(2a - u) \leq y \leq 4a) \quad (9.31)$$

8) 往路： $Y_8 = 2(a + u)$

$$F_8(y) = au, \quad (y = 2(a + u)) \quad (9.32)$$

復路： $Y_8 = 2(2a - u + s)$

$$F_8(y) = a \left(\frac{y}{2} - 2a + u \right), \quad (2(2a - u) \leq y \leq 4a) \quad (9.33)$$

9) 往路： $Y_9 = 2u$

$$F_9(y) = au, \quad (y = 2u) \quad (9.34)$$

復路： $Y_9 = 2(2a - u + s)$

$$F_9(y) = a \left(\frac{y}{2} - 2a + u \right), \quad (2(2a - u) \leq y \leq 4a) \quad (9.35)$$

10) 往路： $Y_{10} = 2u$

$$F_{10}(y) = a^2, \quad (y = 2u) \quad (9.36)$$

復路： $Y_{10} = 2(2a - u)$

$$F_{10}(y) = a^2, \quad (y = 2(2a - u)) \quad (9.37)$$

11) 往路： $Y_{10} = 2u$

$$F_{11}(y) = a^2, \quad (y = 2u) \quad (9.38)$$

復路：迂回なし

命題 9.2 格子状道路網上で移動が一様にかつ独立に発生するものとする．道路網上の1地点が閉塞し，道路閉塞情報が得られない場合の迂回距離分布 $F(y)$ は次式で表される：

$$F(y) = \sum_{i=1}^{11} |S_i| F_i(y) \quad (9.39)$$

第9章 道路閉塞情報の効果

では、3種類の情報提供方法を総迂回距離に着目して比較しよう。交差点情報や情報なしの総迂回距離も、完全情報の場合と同様に、迂回距離分布から式(7.11)を用いて算出できる。5×5格子状道路網(図7.11)において、閉鎖地点を道路網の中心 O から道路網の東端 E まで、さらに E から道路網の南端 S まで変化させたときの総迂回距離 Ψ を図9.5, 図9.6に載せる。上から情報なし、交差点情報、完全情報の順になっている。総迂回距離は基準点 O, E から離れるにつれてU字型となり、交差点 $u=a, v=a$ でジャンプし、その後単調に減少する。情報なしでは下にジャンプするが、完全情報と交差点情報はいずれも上へジャンプしている。また、中心に近いリンクの方が情報提供による総迂回距離の減少が大きく、情報提供が有効であることが分かる。

情報の効果を $u=a/2$ という特定の地点で評価すると、情報なしに比べて交差点情報は58.3%、完全情報は25.8%の迂回で抑えられる。これより、交差点情報だけでも迂回距離を大きく減らせることが分かる。なお、各移動が平均してどの程度迂回をしているかは、総迂回距離を総交通量で割ることにより、 $u=a/2$ の場合、完全情報 $0.06a$ 、交差点情報 $0.14a$ 、情報なし $0.23a$ となる。

9.2. 格子状道路網

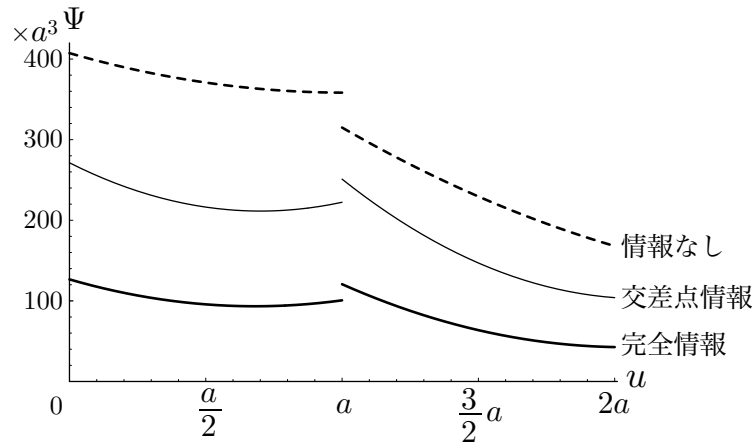


図 9.5: 情報提供による総迂回距離の削減効果 (格子状道路網, 内部道路)

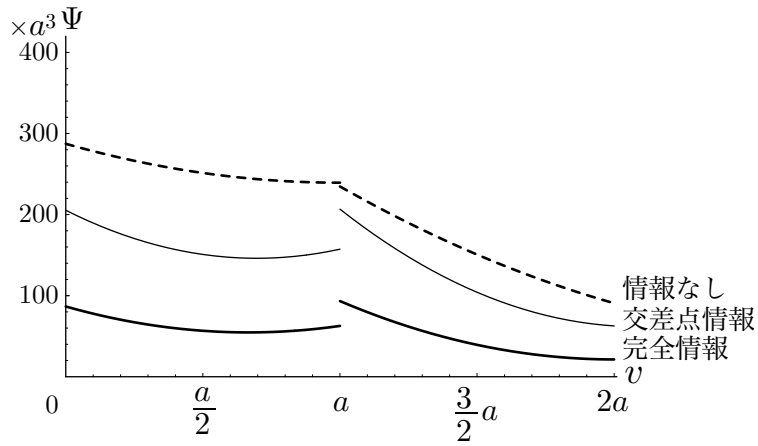


図 9.6: 情報提供による総迂回距離の削減効果 (格子状道路網, 外周道路)

9.3 放射環状道路網

隣り合う放射路のなす角 φ ，環状路の間隔 ℓ である n 本の放射路と m 本の環状路から成る放射環状道路網（図 7.17）上で移動が放射路上で一様に発生するものとする．格子状道路網と同様に，図 9.7 に示す 3 種類の道路閉塞に関する情報提供方法を比較する．

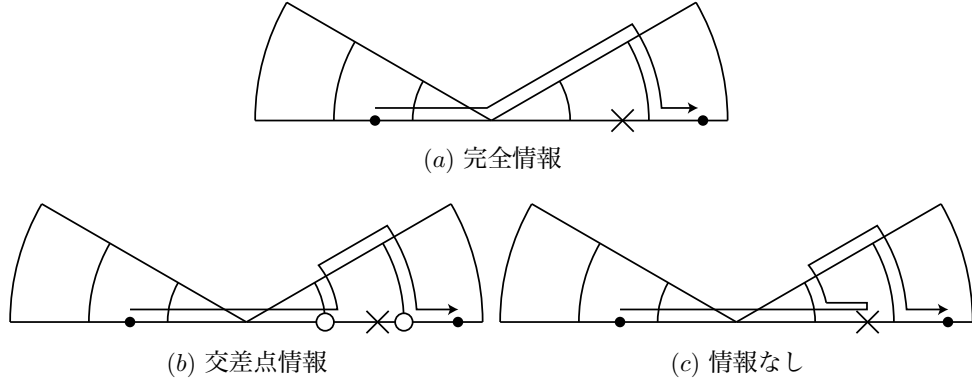


図 9.7: 情報提供と迂回経路（放射環状道路網）

9.3.1 交差点情報の迂回距離分布

交差点情報の迂回距離分布は以下のように求まる．

1) 往路：

$$Y_1 = \begin{cases} \ell\varphi, & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta - \varphi)) \\ \ell\theta - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta - \varphi) \leq t \leq \frac{\ell\theta}{2}) \end{cases}$$

$$F_1(y) = \begin{cases} \frac{\ell}{2}y, & (0 \leq y < \ell\varphi) \\ \frac{\ell^2\theta}{2}, & (y = \ell\varphi) \end{cases} \quad (9.40)$$

復路： $Y_1 = (2k+1)\ell\varphi$

$$F_1(y) = \frac{\ell^2\theta}{2}, \quad (y = (2k+1)\ell\varphi) \quad (9.41)$$

2) 往路：

$$Y_2 = \begin{cases} (k-j+1)\ell\varphi, & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta - \varphi)) \\ (k-j)\ell\varphi + \ell\theta - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta - \varphi) \leq t < \frac{\ell\theta}{2}) \\ (k-j)\ell\varphi, & (\frac{\ell\theta}{2} \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

9.3. 放射環狀道路網

$$F_2(y) = \begin{cases} \ell \left[\ell - \frac{1}{2} \{ (k-j)\ell\varphi + \ell\theta - y \} \right], & ((k-j)\ell\varphi \leq y < (k-j+1)\ell\varphi) \\ \ell^2, & (y = (k-j+1)\ell\varphi) \end{cases} \quad (9.42)$$

復路： $Y_2 = (2k+1)\ell\varphi$

$$F_2(y) = \ell^2, \quad (y = (2k+1)\ell\varphi) \quad (9.43)$$

3) 往路：

$$Y_3 = \begin{cases} (k+j+1)\ell\varphi + 2t, & \left(0 \leq t < \frac{\ell\varphi}{2} \right) \\ (k+j+2)\ell\varphi, & \left(\frac{\ell\varphi}{2} \leq t \leq \ell \right) \end{cases}$$

$$F_3(y) = \begin{cases} \frac{\ell}{2} \{ y - (k+j+1)\ell\varphi \}, & ((k+j+1)\ell\varphi \leq y < (k+j+2)\ell\varphi) \\ \ell^2, & (y = (k+j+2)\ell\varphi) \end{cases} \quad (9.44)$$

復路： $Y_3 = (2k+1)\ell\varphi$

$$F_3(y) = \ell^2, \quad (y = (2k+1)\ell\varphi) \quad (9.45)$$

4) 往路： $Y_4 = (2k+1)\ell\varphi + 2(\ell - u) + 2t$

$$F_4(y) = (\ell - u) \left[\frac{1}{2} \{ y - (2k+1)\ell\varphi \} - \ell + u \right], \\ ((2k+1)\ell\varphi + 2(\ell - u) \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2\ell) \quad (9.46)$$

復路： $Y_4 = (2k+1)\ell\varphi + 2u + 2s$

$$F_4(y) = u \left[\frac{1}{2} \{ y - (2k+1)\ell\varphi \} - u \right], \\ ((2k+1)\ell\varphi + 2u \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2\ell) \quad (9.47)$$

5) 往路：

$$Y_5 = \begin{cases} \ell\varphi + 2(\ell - u), & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta - \varphi)) \\ \ell\theta + 2(\ell - u) - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta - \varphi) \leq t \leq s + \frac{\ell\theta}{2}) \end{cases}$$

$0 \leq u < \ell\theta/2$

$$F_5(y) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{\ell\theta}{2} - u + \frac{y}{2} \right) \left\{ u - \frac{1}{2}(\ell\theta - y) \right\}, & (\ell\theta - 2u \leq y < 2(\ell - u)) \\ (\ell - u) \left\{ u - \frac{1}{2}(\ell\theta - y) \right\} - \frac{1}{2} \left(\ell - \frac{\ell\theta}{2} \right)^2, & (2(\ell - u) \leq y < \ell\varphi + 2(\ell - u)) \\ \ell(\ell - u) - \frac{1}{2} \left(\ell - \frac{\ell\theta}{2} \right)^2, & (y = \ell\varphi + 2(\ell - u)) \end{cases} \quad (9.48)$$

第9章 道路閉塞情報の効果

復路： $Y_5 = (2k+1)\ell\varphi + 2s$

$0 \leq u < \ell\theta/2$

$$F_5(y) = \begin{cases} \frac{\ell\theta}{4}\{y - (2k+1)\ell\varphi\} + \frac{1}{8}\{y - (2k+1)\ell\varphi\}^2, \\ \quad ((2k+1)\ell\varphi \leq y < (2k+1)\ell\varphi + 2(\ell - \ell\theta/2)) \\ \frac{\ell}{2}\{y - (2k+1)\ell\varphi\} - \frac{1}{2}\left(\ell - \frac{\ell\theta}{2}\right)^2, \\ \quad ((2k+1)\ell\varphi + 2(\ell - \ell\theta/2) \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \end{cases} \quad (9.49)$$

6) 往路：

$$Y_6 = \begin{cases} (k-j+1)\ell\varphi + 2(\ell - u), & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta - \varphi)) \\ (k-j)\ell\varphi + \ell\theta + 2(\ell - u) - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta - \varphi) \leq t < \frac{\ell\theta}{2}) \\ (k-j)\ell\varphi + 2(\ell - u), & (\frac{\ell\theta}{2} \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

$$F_6(y) = \begin{cases} (\ell - u) \left[u - \frac{1}{2}\{(k-j)\ell\varphi + \ell\theta - y\} \right], \\ \quad ((k-j)\ell\varphi + 2(\ell - u) \leq y < (k-j+1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \\ \ell(\ell - u), \quad (y = (k-j+1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \end{cases} \quad (9.50)$$

復路： $Y_6 = (2k+1)\ell\varphi + 2s$

$$F_6(y) = \frac{\ell}{2}\{y - (2k+1)\ell\varphi\}, \quad ((2k+1)\ell\varphi \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \quad (9.51)$$

7) 往路：

$$Y_7 = \begin{cases} (k+j+1)\ell\varphi + 2(\ell - u) + 2t, & \left(0 \leq t < \frac{\ell\varphi}{2}\right) \\ (k+j+2)\ell\varphi + 2(\ell - u), & \left(\frac{\ell\varphi}{2} \leq t \leq \ell\right) \end{cases}$$

$$F_7(y) = \begin{cases} (\ell - u) \left[\frac{1}{2}\{y - (k+j+1)\ell\varphi\} - \ell + u \right], \\ \quad ((k+j+1)\ell\varphi + 2(\ell - u) \leq y < (k+j+2)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \\ \ell(\ell - u), \quad (y = (k+j+2)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \end{cases} \quad (9.52)$$

復路： $Y_7 = (2k+1)\ell\varphi + 2s$

$$F_7(y) = \frac{\ell}{2}\{y - (2k+1)\ell\varphi\}, \quad ((2k+1)\ell\varphi \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \quad (9.53)$$

8) 往路： $Y_8 = (k+1)\ell\theta - 2(k\ell + u)$

$$F_8(y) = \ell^2, \quad (y = (k+1)\ell(\theta - 2)) \quad (9.54)$$

9.3. 放射環状道路網

復路： $Y_8 = (2k+1)\ell\varphi$

$$F_8(y) = \ell^2, \quad (y = (2k+1)\ell\varphi) \quad (9.55)$$

9) 往路：

$$Y_9 = \begin{cases} (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2), & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta-\varphi)) \\ (k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell\theta - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta-\varphi) \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

$$F_9(y) = \begin{cases} \ell \left[\ell - \frac{1}{2} \{ (k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell\theta - y \} \right], \\ ((k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell(\theta-2) \leq y < (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2)) \\ \ell^2, & (y = (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2)) \end{cases} \quad (9.56)$$

復路： $Y_9 = (2k+1)\ell\varphi$

$$F_9(y) = \ell^2, \quad (y = (2k+1)\ell\varphi) \quad (9.57)$$

10) 往路： $Y_{10} = (k+1)\ell\theta - 2(k\ell + u)$

$$F_{10}(y) = \ell(\ell - u), \quad (y = (k+1)\ell\theta - 2(k\ell + u)) \quad (9.58)$$

復路： $Y_{10} = (2k+1)\ell\varphi + 2s$

$$F_{10}(y) = \frac{\ell}{2} \{ y - (2k+1)\ell\varphi \}, \quad ((2k+1)\ell\varphi \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \quad (9.59)$$

11) 往路：

$$Y_{11} = \begin{cases} (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + 2(\ell - u), & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta-\varphi)) \\ (k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell\theta + 2(\ell - u) - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta-\varphi) \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

$$F_{11}(y) = \begin{cases} (\ell - u) \left[u - \frac{1}{2} \{ (k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell\theta - y \} \right], \\ ((k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell\theta - 2u \leq y < (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + 2(\ell - u)) \\ \ell(\ell - u), & (y = (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + 2(\ell - u)) \end{cases} \quad (9.60)$$

復路： $Y_{11} = (2k+1)\ell\varphi + 2s$

$$F_{11}(y) = \frac{\ell}{2} \{ y - (2k+1)\ell\varphi \}, \quad ((2k+1)\ell\varphi \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \quad (9.61)$$

第9章 道路閉塞情報の効果

12) 往路： $Y_{12} = (k+1)\ell\varphi$

$$F_{12}(y) = \ell^2, \quad (y = (k+1)\ell\varphi) \quad (9.62)$$

復路： $Y_{12} = (2k+1)\ell\varphi$

$$F_{12}(y) = \ell^2, \quad (y = (2k+1)\ell\varphi) \quad (9.63)$$

13) 往路： $Y_{13} = (k+1)\ell\varphi + 2(\ell - u)$

$$F_{13}(y) = \ell(\ell - u), \quad (y = (k+1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \quad (9.64)$$

復路： $Y_{13} = (2k+1)\ell\varphi + 2s$

$$F_{13}(y) = \frac{\ell}{2}\{y - (2k+1)\ell\varphi\}, \quad ((2k+1)\ell\varphi \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \quad (9.65)$$

命題 9.3 放射環状道路網の放射路上で移動が一様にかつ独立に発生するものとする。道路網上の1地点が閉塞し、道路閉塞情報が閉鎖地点手前の交差点で得られる場合の迂回距離分布 $F(y)$ は次式で表される：

$$F(y) = \sum_{i=1}^{13} |S_i| F_i(y) \quad (9.66)$$

9.3.2 情報なしの迂回距離分布

情報なしの迂回距離分布は以下のよう求める。

1) 往路：

$$Y_1 = \begin{cases} \ell\varphi + 2(\ell - u), & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta - \varphi)) \\ \ell\theta + 2(\ell - u) - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta - \varphi) \leq t \leq \frac{\ell\theta}{2}) \end{cases}$$

$$F_1(y) = \begin{cases} \ell\left(\frac{y}{2} - \ell + u\right), & (2(\ell - u) \leq y < \ell\varphi + 2(\ell - u)) \\ \frac{\ell^2\theta}{2}, & (y = \ell\varphi + 2(\ell - u)) \end{cases} \quad (9.67)$$

復路： $Y_1 = (2k+1)\ell\varphi + 2u$

$$F_1(y) = \frac{\ell^2\theta}{2}, \quad (y = (2k+1)\ell\varphi + 2u) \quad (9.68)$$

2) 往路：

$$Y_2 = \begin{cases} (k-j+1)\ell\varphi + 2(\ell-u), & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta-\varphi)) \\ (k-j)\ell\varphi + \ell\theta + 2(\ell-u) - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta-\varphi) \leq t < \frac{\ell\theta}{2}) \\ (k-j)\ell\varphi + 2(\ell-u), & (\frac{\ell\theta}{2} \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

$$F_2(y) = \begin{cases} \ell \left[u - \frac{1}{2} \{ (k-j)\ell\varphi + \ell\theta - y \} \right], & ((k-j)\ell\varphi + 2(\ell-u) \leq y < (k-j+1)\ell\varphi + 2(\ell-u)) \\ \ell^2, & (y = (k-j+1)\ell\varphi + 2(\ell-u)) \end{cases} \quad (9.69)$$

復路： $Y_2 = (2k+1)\ell\varphi + 2u$

$$F_2(y) = \ell^2, \quad (y = (2k+1)\ell\varphi + 2u) \quad (9.70)$$

3) 往路：

$$Y_3 = \begin{cases} (k+j+1)\ell\varphi + 2(\ell-u) + 2t, & \left(0 \leq t < \frac{\ell\varphi}{2} \right) \\ (k+j+2)\ell\varphi + 2(\ell-u), & \left(\frac{\ell\varphi}{2} \leq t \leq \ell \right) \end{cases}$$

$$F_3(y) = \begin{cases} \ell \left[\frac{1}{2} \{ y - (k+j+1)\ell\varphi \} - \ell + u \right], & ((k+j+1)\ell\varphi + 2(\ell-u) \leq y < (k+j+2)\ell\varphi + 2(\ell-u)) \\ \ell^2, & (y = (k+j+2)\ell\varphi + 2(\ell-u)) \end{cases} \quad (9.71)$$

復路： $Y_3 = (2k+1)\ell\varphi + 2u$

$$F_3(y) = \ell^2, \quad (y = (2k+1)\ell\varphi + 2u) \quad (9.72)$$

4) 往路： $Y_4 = (2k+1)\ell\varphi + 2(\ell-u) + 2t$

$$F_4(y) = (\ell-u) \left[\frac{1}{2} \{ y - (2k+1)\ell\varphi \} - \ell + u \right], \\ ((2k+1)\ell\varphi + 2(\ell-u) \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2\ell) \quad (9.73)$$

復路： $Y_4 = (2k+1)\ell\varphi + 2u + 2s$

$$F_4(y) = u \left[\frac{1}{2} \{ y - (2k+1)\ell\varphi \} - u \right], \\ ((2k+1)\ell\varphi + 2u \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2\ell) \quad (9.74)$$

第9章 道路閉塞情報の効果

5) 往路：

$$Y_5 = \begin{cases} \ell\varphi + 2(\ell - u), & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta - \varphi)) \\ \ell\theta + 2(\ell - u) - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta - \varphi) \leq t \leq s + \frac{\ell\theta}{2}) \end{cases}$$

$$0 \leq u < \ell\theta/2$$

$$F_5(y) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{\ell\theta}{2} - u + \frac{y}{2} \right) \left\{ u - \frac{1}{2}(\ell\theta - y) \right\}, & (\ell\theta - 2u \leq y < 2(\ell - u)) \\ (\ell - u) \left\{ u - \frac{1}{2}(\ell\theta - y) \right\} - \frac{1}{2} \left(\ell - \frac{\ell\theta}{2} \right)^2, & (2(\ell - u) \leq y < \ell\varphi + 2(\ell - u)) \\ \ell(\ell - u) - \frac{1}{2} \left(\ell - \frac{\ell\theta}{2} \right)^2, & (y = \ell\varphi + 2(\ell - u)) \end{cases} \quad (9.75)$$

$$\text{復路：} Y_5 = (2k + 1)\ell\varphi + 2u + 2s$$

$$0 \leq u < \ell\theta/2$$

$$F_5(y) = \begin{cases} \frac{\ell\theta}{2} \left[\frac{1}{2} \{ y - (2k + 1)\ell\varphi \} - u \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \{ y - (2k + 1)\ell\varphi \} - u \right]^2, & ((2k + 1)\ell\varphi + 2u \leq y < (2k + 1)\ell\varphi + 2u + 2(\ell - \ell\theta/2)) \\ \ell \left[\frac{1}{2} \{ y - (2k + 1)\ell\varphi \} - u \right] - \frac{1}{2} \left(\ell - \frac{\ell\theta}{2} \right)^2, & ((2k + 1)\ell\varphi + 2u + 2(\ell - \ell\theta/2) \leq y \leq (2k + 1)\ell\varphi + 2\ell) \end{cases} \quad (9.76)$$

6) 往路：

$$Y_6 = \begin{cases} (k - j + 1)\ell\varphi + 2(\ell - u), & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta - \varphi)) \\ (k - j)\ell\varphi + \ell\theta + 2(\ell - u) - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta - \varphi) \leq t < \frac{\ell\theta}{2}) \\ (k - j)\ell\varphi + 2(\ell - u), & (\frac{\ell\theta}{2} \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

$$F_6(y) = \begin{cases} (\ell - u) \left[u - \frac{1}{2} \{ (k - j)\ell\varphi + \ell\theta - y \} \right], & ((k - j)\ell\varphi + 2(\ell - u) \leq y < (k - j + 1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \\ \ell(\ell - u), & (y = (k - j + 1)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \end{cases} \quad (9.77)$$

$$\text{復路：} Y_6 = (2k + 1)\ell\varphi + 2u + 2s$$

$$F_6(y) = \ell \left[\frac{1}{2} \{ y - (2k + 1)\ell\varphi \} - u \right], \quad ((2k + 1)\ell\varphi + 2u \leq y \leq (2k + 1)\ell\varphi + 2\ell) \quad (9.78)$$

7) 往路：

$$Y_7 = \begin{cases} (k + j + 1)\ell\varphi + 2(\ell - u) + 2t, & (0 \leq t < \frac{\ell\varphi}{2}) \\ (k + j + 2)\ell\varphi + 2(\ell - u), & (\frac{\ell\varphi}{2} \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

9.3. 放射環狀道路網

$$F_7(y) = \begin{cases} (\ell - u) \left[\frac{1}{2} \{y - (k + j + 1)\ell\varphi\} - \ell + u \right], \\ \quad ((k + j + 1)\ell\varphi + 2(\ell - u) \leq y < (k + j + 2)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \\ \ell(\ell - u), \quad (y = (k + j + 2)\ell\varphi + 2(\ell - u)) \end{cases} \quad (9.79)$$

$$\text{復路: } Y_7 = (2k + 1)\ell\varphi + 2u + 2s$$

$$F_7(y) = \ell \left[\frac{1}{2} \{y - (2k + 1)\ell\varphi\} - u \right], \quad ((2k + 1)\ell\varphi + 2u \leq y \leq (2k + 1)\ell\varphi + 2\ell) \quad (9.80)$$

$$8) \text{ 往路: } Y_8 = (k + 1)\ell\theta - 2(k\ell + u)$$

$$F_8(y) = \ell^2, \quad (y = (k + 1)\ell\theta - 2(k\ell + u)) \quad (9.81)$$

$$\text{復路: } Y_8 = (2k + 1)\ell\varphi + 2u$$

$$F_8(y) = \ell^2, \quad (y = (2k + 1)\ell\varphi + 2u) \quad (9.82)$$

$$9) \text{ 往路: }$$

$$Y_9 = \begin{cases} (k - j + 1)\ell\varphi + j\ell(\theta - 2) + 2(\ell - u), & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta - \varphi)) \\ (k - j)\ell\varphi + j\ell(\theta - 2) + \ell\theta + 2(\ell - u) - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta - \varphi) \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

$$F_9(y) = \begin{cases} \ell \left[u - \frac{1}{2} \{ (k - j)\ell\varphi + j\ell(\theta - 2) + \ell\theta - y \} \right], \\ \quad ((k - j)\ell\varphi + j\ell(\theta - 2) + \ell\theta - 2u \leq y < (k - j + 1)\ell\varphi + j\ell(\theta - 2) + 2(\ell - u)) \\ \ell^2, \quad (y = (k - j + 1)\ell\varphi + j\ell(\theta - 2) + 2(\ell - u)) \end{cases} \quad (9.83)$$

$$\text{復路: } Y_9 = (2k + 1)\ell\varphi + 2u$$

$$F_9(y) = \ell^2, \quad (y = (2k + 1)\ell\varphi + 2u) \quad (9.84)$$

$$10) \text{ 往路: } Y_{10} = (k + 1)\ell\theta - 2(k\ell + u)$$

$$F_{10}(y) = \ell(\ell - u), \quad (y = (k + 1)\ell\theta - 2(k\ell + u)) \quad (9.85)$$

$$\text{復路: } Y_{10} = (2k + 1)\ell\varphi + 2u + 2s$$

$$F_{10}(y) = \ell \left[\frac{1}{2} \{y - (2k + 1)\ell\varphi\} - u \right], \quad ((2k + 1)\ell\varphi + 2u \leq y \leq (2k + 1)\ell\varphi + 2\ell) \quad (9.86)$$

第9章 道路閉塞情報の効果

11) 往路：

$$Y_{11} = \begin{cases} (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + 2(\ell-u), & (0 \leq t < \frac{\ell}{2}(\theta-\varphi)) \\ (k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell\theta + 2(\ell-u) - 2t, & (\frac{\ell}{2}(\theta-\varphi) \leq t \leq \ell) \end{cases}$$

$$F_{11}(y) = \begin{cases} (\ell-u) \left[u - \frac{1}{2} \{ (k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell\theta - y \} \right], & ((k-j)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + \ell\theta - 2u \leq y < (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + 2(\ell-u)) \\ \ell(\ell-u), & (y = (k-j+1)\ell\varphi + j\ell(\theta-2) + 2(\ell-u)) \end{cases} \quad (9.87)$$

復路： $Y_{11} = (2k+1)\ell\varphi + 2u + 2s$

$$F_{11}(y) = \ell \left[\frac{1}{2} \{ y - (2k+1)\ell\varphi \} - u \right], \quad ((2k+1)\ell\varphi + 2u \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2\ell) \quad (9.88)$$

12) 往路： $Y_{12} = (k+1)\ell\varphi + 2(\ell-u)$

$$F_{12}(y) = \ell^2, \quad (y = (k+1)\ell\varphi + 2(\ell-u)) \quad (9.89)$$

復路： $Y_{12} = (2k+1)\ell\varphi + 2u$

$$F_{12}(y) = \ell^2, \quad (y = (2k+1)\ell\varphi + 2u) \quad (9.90)$$

13) 往路： $Y_{13} = (k+1)\ell\varphi + 2(\ell-u)$

$$F_{13}(y) = \ell(\ell-u), \quad (y = (k+1)\ell\varphi + 2(\ell-u)) \quad (9.91)$$

復路： $Y_{13} = (2k+1)\ell\varphi + 2u + 2s$

$$F_{13}(y) = \ell \left[\frac{1}{2} \{ y - (2k+1)\ell\varphi \} - u \right], \quad ((2k+1)\ell\varphi + 2u \leq y \leq (2k+1)\ell\varphi + 2\ell) \quad (9.92)$$

命題 9.4 放射環状道路網の放射路上で移動が一様にかつ独立に発生するものとする．道路網上の1地点が閉塞し，道路閉塞情報が得られない場合の迂回距離分布 $F(y)$ は次式で表される：

$$F(y) = \sum_{i=1}^{13} |S_i| F_i(y) \quad (9.93)$$

9.3. 放射環状道路網

3種類の情報提供方法の下で、8放射3環状道路網（図7.32）にて閉鎖地点を道路網の中心 O から道路網の東端まで変化させたときの総迂回距離 Ψ を図9.8に載せる。ここで、 u は道路網の中心 O から閉鎖地点までの距離である。総迂回距離はいずれも O から離れるにつれて減少し、交差点に近付くと増加しU字型となる。そして、 $u = \ell$ でジャンプした後、単調に減少し、再び $u = 2\ell$ でジャンプする。

最も外側のリンク端点で、交差点情報と情報なしの総迂回距離が一致する。一方で、最も内側のリンクでは交差点情報と情報なしの差は大きく、情報の効果は中心に近いリンクの方が大きいことが分かる。情報の効果を $u = 3\ell/2$ という特定の地点で評価すると、情報なしに比べて交差点情報は71.6%、完全情報は47.6%の迂回で抑えられる。なお、各移動が平均してどの程度迂回をしているかは、総迂回距離を総交通量で割ることにより、 $u = 3\ell/2$ の場合、完全情報 0.12ℓ 、交差点情報 0.18ℓ 、情報なし 0.26ℓ となる。

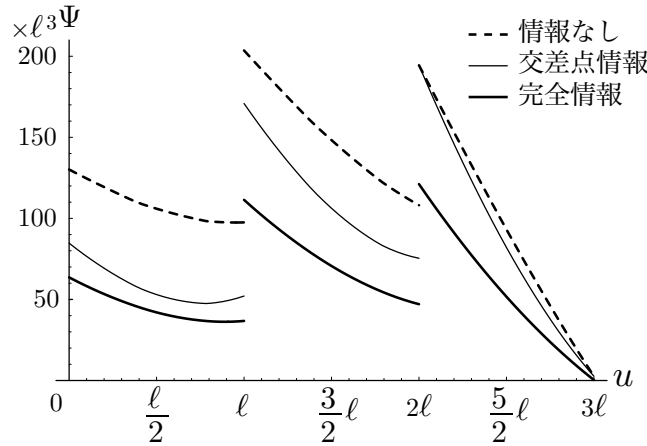


図9.8: 情報提供による総迂回距離の削減効果（放射環状道路網）

9.3.3 環状路配置

では、放射環状道路網における迂回距離分布を用いて、道路閉塞時の総迂回距離を最も小さくする環状路の配置を求めよう。なお、道路閉塞を考えない平常時における最適な環状路配置に関しては、[河上, 竹内 (1972)], [Pearce (1974)], [Smith (1976)], [Smith (1979)], [腰塚, 栗田 (1986)], [Vaughan (1987)], [藤田, 鈴木 (2003)] 等に考察されている。

第9章 道路閉塞情報の効果

図9.9の8放射2環状道路網において、外側の環状路を固定したときに、総迂回距離を最小にする内側の環状路の配置を求める。すなわち、環状路の間隔を ℓ_1, ℓ_2 ($\ell_1 + \ell_2 = 1$) とし、総迂回距離を最小にする ℓ_1 を求める。環状路が等間隔でない場合の迂回距離分布や総迂回距離も前節までに述べた方法において ℓ を ℓ_1, ℓ_2 に置き換えることで得られる。

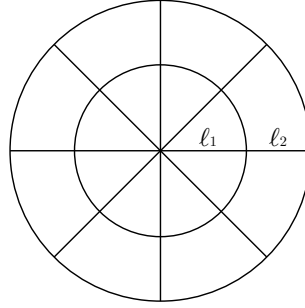


図9.9: 8放射2環状道路網

総迂回距離は閉鎖箇所によって異なるため、代表値としてその平均値を考える。完全情報と情報なしの場合に、環状路の位置 ℓ_1 を変化させたときの総迂回距離の平均値 $\bar{\Psi}$ は図9.10のようになる。完全情報の場合には $\ell_1 = 0.508$ で、情報なしの場合には $\ell_1 = 0.483$ で最小値をとる。これより、情報提供によって望ましい環状路の配置が外側に向かうことが分かる。 $\ell_1 = 0.5$ の等間隔の場合に比べて、完全情報は外寄り、情報なしは内寄りになっている。

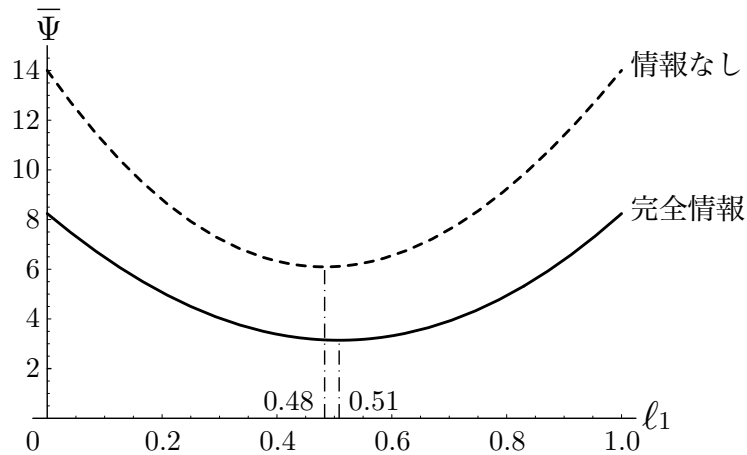


図9.10: 環状路間隔と総迂回距離

9.3. 放射環状道路網

平常時との比較のために道路閉塞が起こっていないときの総移動距離 T を最小にする配置を求めよう．図 9.11 より，総移動距離は $\ell_1 = 0.409$ で最小となる．図 9.10 と比較すると最適配置は中心に近付いている．つまり，平常時の効率性だけでなく，災害や事故による道路閉塞の発生を考慮するならば，環状路は平常時に最適な位置よりも外側に配置すればよいことになる．

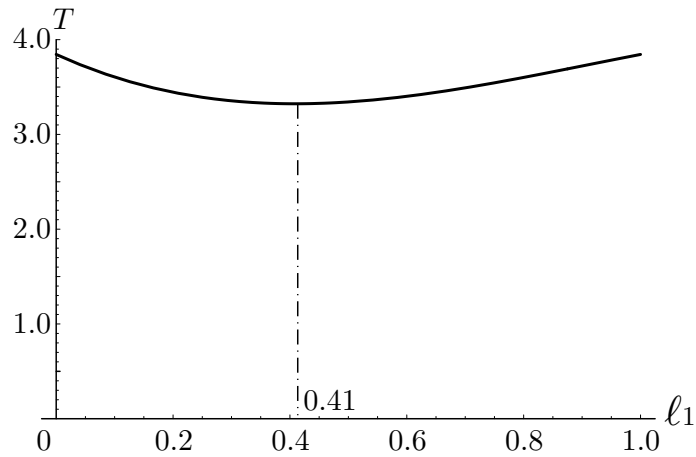


図 9.11: 環状路間隔と平常時の総移動距離

第9章 道路閉塞情報の効果

9.4 実際の道路網

茨城県、長野県、栃木県、千葉県の国道・主要地方道から成る道路網（図 6.7～図 6.10）での移動を考える。移動は人口 5 万人以上の都市間で一様に発生するものとする。

9.4.1 情報の効果

情報の効果を評価するため、情報が得られない場合に関して、1 本のリンクを閉鎖したときの総迂回距離を全てのリンクについて求める。結果を図 9.12～図 9.15 に示す。

茨城県において情報が得られないことで総迂回距離が 20 km 以上と大きくなるのは、図 7.37 の完全情報の場合と比較することにより、霞ヶ浦東岸の国道 355 号、ひたちなか市から太平洋岸を北上する国道 245 号、国道 294 号等県西地域の道路等である。これらの道路では、道路閉塞情報の提供が特に効果的であるといえる。

長野県において情報の効果が大きいのは、図 7.38 の完全情報の場合との比較から、松本市と長野市を結ぶ国道 19 号および 403 号、長野市と上田市を結ぶ国道 18 号、諏訪湖の南側主要地方道諏訪辰野線および岡谷茅野線等である。

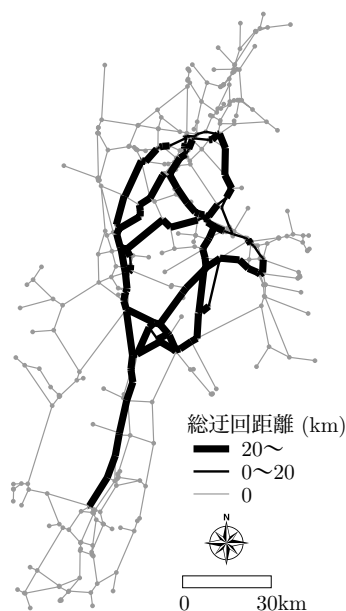
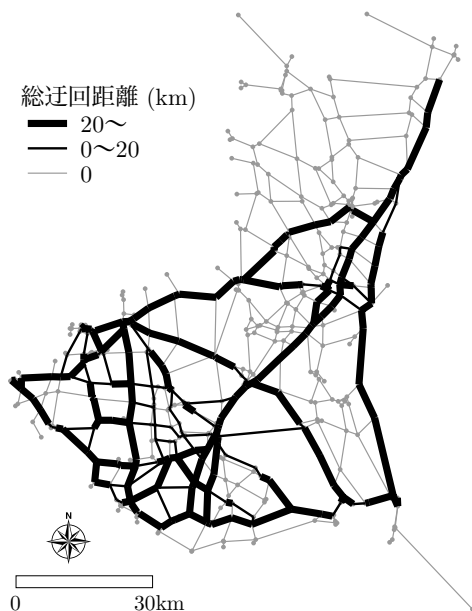


図 9.12: 茨城県の総迂回距離（情報なし） 図 9.13: 長野県の総迂回距離（情報なし）

9.4. 実際の道路網

栃木県において情報の効果が大きいのは、図 7.39 の完全情報の場合との比較から、宇都宮市周辺の国道 4 号、栃木市北側の国道主要地方道栃木栗野線および国道 293 号、今市市周辺の国道 119 号および 461 号等である。

千葉県において情報の効果が大きいのは、図 7.40 の完全情報の場合との比較から、利根川沿いの国道 356 号、太平洋岸の主要地方道飯岡一宮線、東金市の北東の国道 126 号、茂原市から南に向かう主要地方道茂原大多喜線等である。

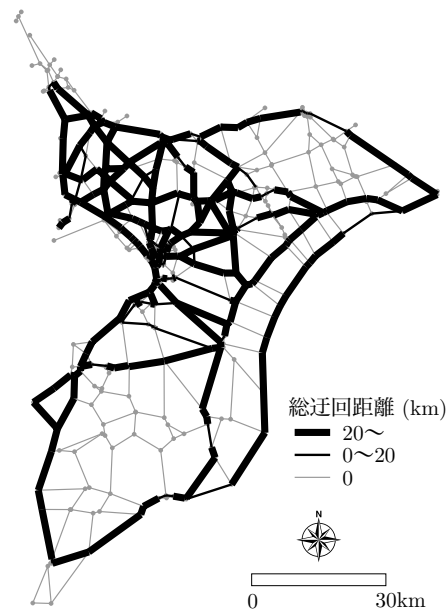
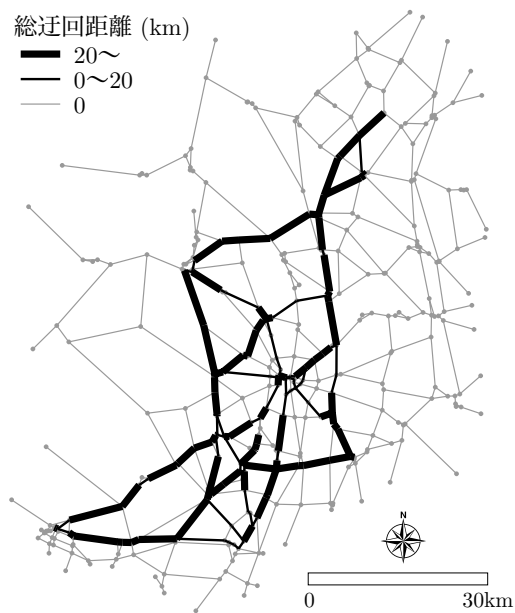


図 9.14: 栃木県の総迂回距離（情報なし） 図 9.15: 千葉県の総迂回距離（情報なし）

第9章 道路閉塞情報の効果

9.4.2 道路密度・断面交通量との関係

情報の効果が大きい箇所の特性を把握するため、情報の効果と道路密度・断面交通量との関係を見てみよう。道路があまり整備されていない場合、経路変更の選択肢が少なく、閉鎖地点において迂回を強いられることから情報の効果は大きくなる。また、閉鎖リンク上の交通量が多ければ、情報提供によって恩恵を受ける移動者が増えることから、情報の効果は大きくなると予想できる。

ここでは情報の効果を情報なしの総迂回距離から完全情報の総迂回距離を引いたもので測る。このように情報の効果を総迂回距離の差で測る理由としては、第一に総迂回距離と次元が同じ絶対量であるために直観的に理解しやすいこと、第二に情報の効果と道路密度・断面交通量との関係を導く際に、7章で導いた総迂回距離と道路密度・断面交通量との関係をそのまま拡張できる、という2点が挙げられる。7章の結果から、総迂回距離は道路密度に逆比例し、断面交通量に比例することが分かっているので、その差である情報の効果とも同様の関係があり、道路密度に逆比例し、断面交通量に比例する。

この関係が実際の道路網でどの程度成立するか確認しよう。図9.16～図9.19は各リンクの道路密度 Λ/S 、あるいは断面交通量 Φ を横軸に取り、情報の効果すなわち情報なしの総迂回距離 Ψ_b から完全情報の総迂回距離 Ψ_a を引いた $\Psi_b - \Psi_a$ を縦軸に取ったものである。道路密度との関係を見ると、茨城県と長野県では負の関係が見られるのに対し、栃木県と長野県はばらつきが大きい。断面交通量に関しても正の関係が見て取れるが、千葉県においてばらつきが大きくなっている。

9.4. 実際の道路網

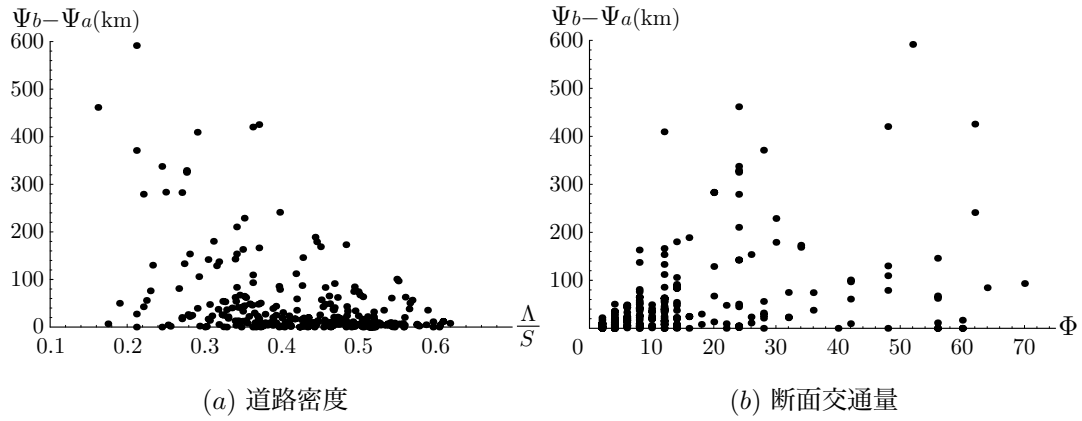


図 9.16: 情報の効果と道路密度・断面交通量（茨城県）

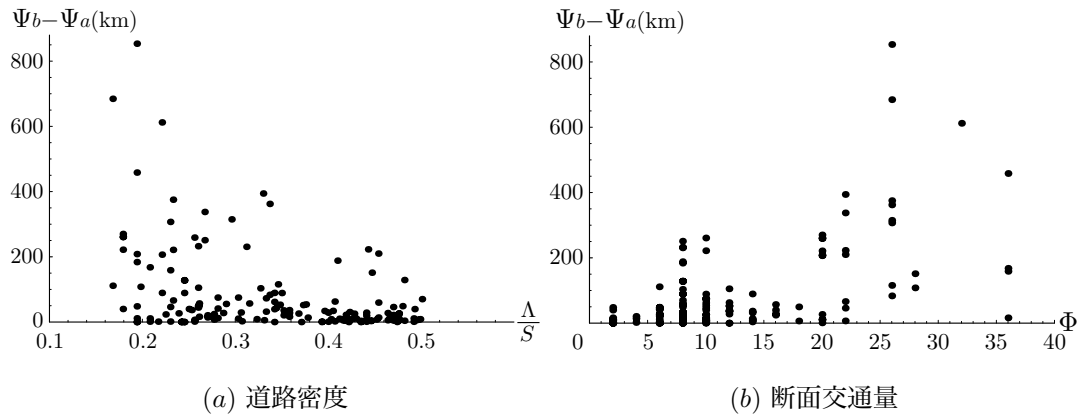


図 9.17: 情報の効果と道路密度・断面交通量（長野県）

第9章 道路閉塞情報の効果

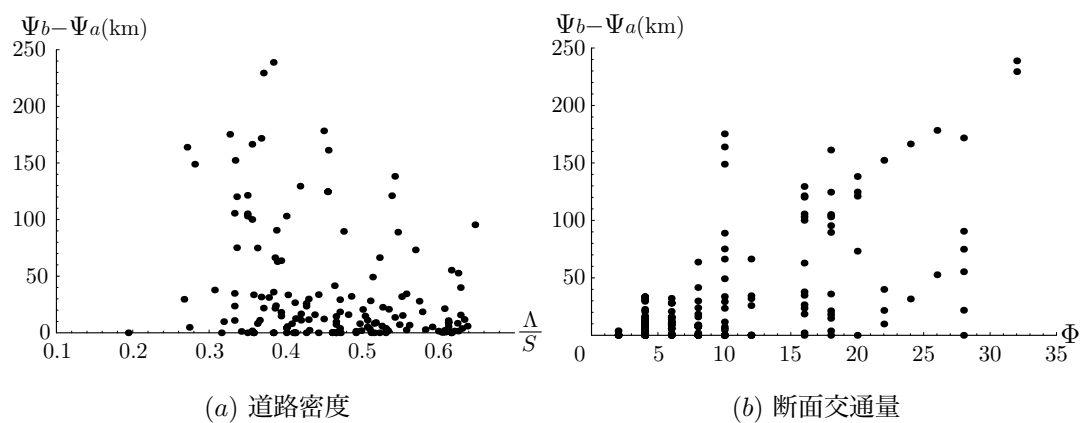


図 9.18: 情報の効果と道路密度・断面交通量（栃木県）

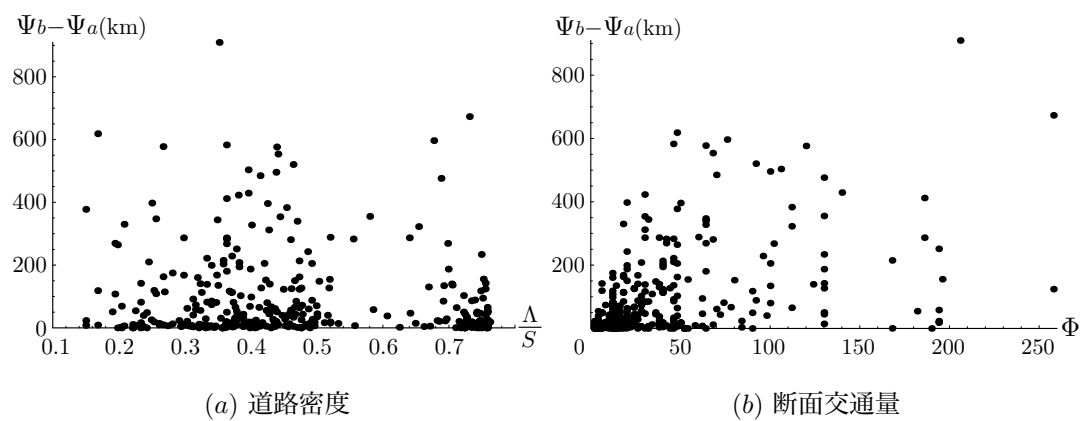


図 9.19: 情報の効果と道路密度・断面交通量（千葉県）

9.4. 実際の道路網

データから情報の効果 $\Psi_b - \Psi_a$ は道路密度 Λ/S に逆比例し、断面交通量 Φ に比例するという推定式

$$\Psi_b - \Psi_a = \alpha \frac{1}{\frac{\Lambda}{S}} \Phi \quad (9.94)$$

におけるパラメータ α を最小二乗法によって推定する。また、説明変数として道路密度と断面交通量のそれぞれを個別に用いた場合の分析も併せて行う。決定係数 R^2 を表 9.1, パラメータ推定値を表 9.2 に示す。

決定係数はそれほど高くなく、7 章の総迂回距離の場合と同様に地形条件が影響していることが原因として考えられる。それでも道路密度と断面交通量を用いた単純な関係がある程度は成立するといえよう。道路密度、断面交通量で個別に推定した場合を比較すると、やはり断面交通量の方が説明力が高いことが読み取れる。

表 9.1: 決定係数

道路網	$\alpha/(\Lambda/S)\Phi$	$\alpha_1/(\Lambda/S)$	$\alpha_2\Phi$
茨城県	0.363	0.130	0.160
長野県	0.447	0.143	0.321
栃木県	0.422	0.068	0.377
千葉県	0.337	0.000	0.183

道路密度のパラメータ α_1 は長野県と千葉県で大きい。これは図 9.17, 図 9.19 に見られるように情報の効果が特に大きなリンクが存在するためである。また、断面交通量のパラメータ α_2 は長野県で大きくっており、各起終点ペアが情報提供によって大きな恩恵を受けていることが分かる。

表 9.2: パラメータ推定値

道路網	$\alpha/(\Lambda/S)\Phi$	$\alpha_1/(\Lambda/S)$	$\alpha_2\Phi$
茨城県	1.30	21.48	2.89
長野県	2.16	27.24	7.73
栃木県	1.56	16.56	3.70
千葉県	0.97	32.68	1.84

第9章 道路閉塞情報の効果

9.5 まとめ

本章では、道路閉塞情報の迂回距離削減効果を測るため、完全情報、交差点情報、情報なしの3種類の情報提供方法を比較した。本章で得られた知見は以下の3点である。

- (1) 格子状道路網と放射環状道路網において閉鎖地点手前の交差点で情報を提供した場合と情報が全く得られない場合の迂回距離分布を導いた。これら不完全情報の場合にも、完全情報の場合と同じく、交差点の近くで道路閉塞が起こったときに総迂回距離が大きくなることが分かった。
- (2) 7章の完全情報の場合も含めた3種類の情報提供方法の下での総迂回距離を比較し、情報の効果を評価した。ある特定の地点で測ると、格子状道路網では情報なしに比べて交差点情報は58.3%、完全情報は25.8%の迂回で抑えられ、放射環状道路網では交差点情報は71.6%、完全情報は47.6%となる。交差点での情報提供はリアルタイムの完全情報には劣るものの、総迂回距離を大きく減らすことができる。
- (3) 茨城県、長野県、栃木県、千葉県道路網でのマクロな分析を通して、情報が得られない場合の総迂回距離を求めた。そして、格子状道路網や放射環状道路網で解析的に得られた情報の効果と道路密度・断面交通量との関係式が実際の道路網上においてもある程度成立することを実証した。

携帯電話やカーナビゲーションシステムの普及によって、リアルタイムの情報取得が容易になってはいるものの、機器を持たない人々や操作に不慣れな利用者の存在を考慮すると、道路情報板の果たす役割も大きい。ここでは、交差点情報として情報板を閉鎖地点手前の交差点に設置して情報を提供する場合を考えたが、情報板の数や設置場所に関する議論も同じ枠組みで議論できることを申し添えておく。

第10章 施設閉鎖と道路閉塞

10.1 はじめに

これまで第I部と第II部において施設配置と道路網それぞれの頑健性を個別に評価してきた。施設配置に対しては連続平面を仮定し、移動距離を直線距離で測っている。一方、道路網に対してはネットワークを仮定し、移動距離として最短経路距離を用いている。このように第I部と第II部では想定している状況や移動距離の測り方が全く異なる。不確実性に対する都市全体の頑健性を評価するためには、両者を統合して考える必要がある。災害時には施設が利用可能でも施設に至る道路が閉鎖されていたり、逆に道路は通行可能でも施設が閉鎖されていたりすることも多いからである。

ただ、移動距離の測り方に関しては、6章で見たように道路閉塞時の迂回距離と直線距離との間には明確な関係性がある。そのため、第I部の直線距離を用いた分析にも十分意味がある。しかし、施設閉鎖と道路閉塞のそれぞれが都市全体に与える損失の大きさを比較したり、両者が同時に起こった場合の相乗効果を測ったりするためには、やはり同一のモデルの中で扱うことが求められる。

本章では、施設とそのアクセスとしての道路網を一体として考えることで、施設閉鎖と道路閉塞の関係について考察する。図10.1のように、無限に広がる格子状の都市を想定し、1辺の長さが a の格子状道路網の交差点に施設が間隔 na (n : 自然数) で正方格子状に配置されていると仮定する。利用者は道路網上に一様に分布しており、最寄り施設まで道路網上を最短経路で移動するものとする。

第 10 章 施設閉鎖と道路閉塞

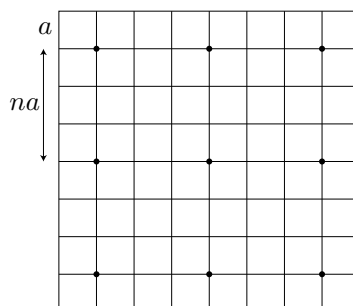


図 10.1: 格子状道路網上の施設配置

施設閉鎖や道路閉塞による損失の大きさを最寄り施設までの最短経路距離の増分という共通の指標で比較する。この移動距離の増分を迂回距離と定義する。

定義 10.1 施設閉鎖ならびに道路閉塞による利用可能な施設までの最短経路距離の増分を迂回距離と呼ぶ。

利用者は施設閉鎖や道路閉塞に関する情報を完全に認知しており、最初から別の利用可能な施設へ向かうことができると仮定する。

以下では、1 施設が閉鎖されたとき、ならびに道路網上の 1 箇所が閉鎖されたときの総迂回距離を求める。そして、施設閉鎖と道路閉塞のどちらが大きな損失をもたらすのかを明らかにする。また、複数の施設や道路網上の複数箇所が閉鎖された場合について、閉鎖施設や閉鎖地点同士が近い場合と遠く離れている場合の損失の大きさを比較する。さらに、施設閉鎖と道路閉塞が同時に起こった場合についても考察する。

10.2 施設閉鎖

図 10.2 は道路網上で中央の施設○の勢力圏（施設が最も近い領域）を太線で表したものである．この領域はネットワーク上のボロノイ領域に対応する [Okabe, et al.(2000)]．領域の境界は (a) のように施設間隔 n が奇数のときにはリンクの midpoint にあり，(b) のように n が偶数のときには交差点にあることが分かる．施設○が閉鎖されたときには，この領域内の利用者は隣の施設を利用しなければならない．図中破線で示されている残った施設の勢力圏に応じて，それぞれ隣接する 4 つの施設に振り分けられることになる．

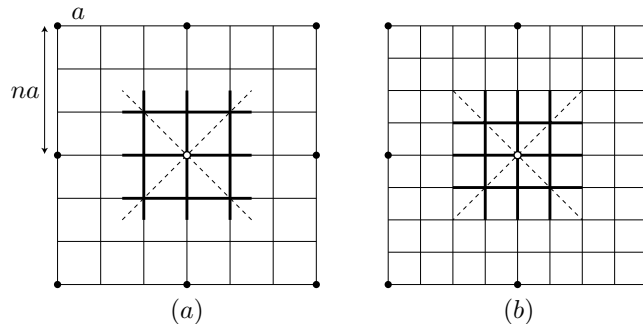


図 10.2: 施設閉鎖（1 箇所）

ここでは，施設○が閉鎖されたときに右隣の施設が最寄りとなる領域に着目する．総迂回距離は水平方向のリンクと垂直方向のリンクに分けて以下のように求められる．

水平リンク

図 10.3 において閉鎖施設と右隣の施設を結ぶ道路上で，施設から距離 s ($0 \leq s \leq na/2$) の地点における迂回距離 y は

$$y = na - 2s \quad (10.1)$$

と表される．したがって，施設と j 本のリンクを隔てた水平リンクの総迂回距離 H_j は上式を積分することで

$$\begin{aligned} H_j &= \int_{ja}^{(j+1)a} y \, ds \\ &= (n - 2j - 1)a^2 \end{aligned} \quad (10.2)$$

第10章 施設閉鎖と道路閉塞

と得られる．ただし， n が奇数の場合には最も右側のリンクのみ積分範囲が異なるため

$$\begin{aligned} H_{\frac{n-1}{2}} &= \int_{(n-1)a/2}^{na/2} y \, ds \\ &= \frac{a^2}{4} \end{aligned} \quad (10.3)$$

となる．また，閉鎖施設と隣の施設を結ぶ道路上にないリンクに関しても，閉鎖施設との間にある水平リンクの本数 j が同じであれば全く同様の迂回距離となるため，上の2式で全ての水平リンクを表現することができる．

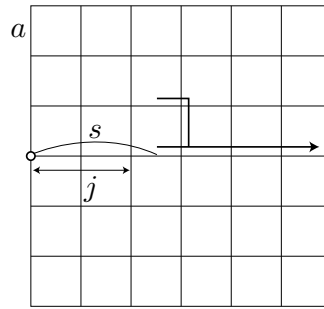


図 10.3: 施設閉鎖時の迂回（水平リンク）

垂直リンク

施設と j 本のリンクを隔てた垂直リンクの迂回距離は式 (10.1) に $s = ja$ を代入したもののになる．したがって，総迂回距離 V_j は

$$V_j = (n - 2j)a^2 \quad (10.4)$$

と得られる．

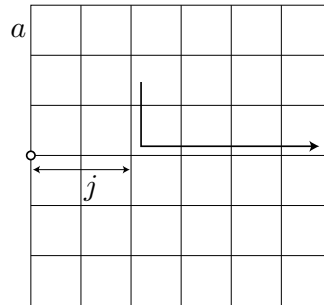


図 10.4: 施設閉鎖時の迂回（垂直リンク）

10.2. 施設閉鎖

以上より，総迂回距離 Ψ はリンクの総迂回距離を各リンクの本数だけ足し上げること
で次のように得られる．

命題 10.1 利用者が一様に分布する格子状道路網上に施設が正方格子状に配置されて
いるとする．施設が 1 箇所閉鎖されたときの総迂回距離 Ψ は次式で与えられる：

$$\begin{aligned}\Psi &= \begin{cases} 4 \sum_{j=0}^{\frac{n-1}{2}} \{(2j+1)H_j + 2jV_j\}, & (n : \text{奇数}) \\ 4 \sum_{j=0}^{\frac{n}{2}-1} \{(2j+1)H_j + 2jV_j\}, & (n : \text{偶数}) \end{cases} \\ &= \begin{cases} \frac{1}{3}n(2n^2+1)a^2, & (n : \text{奇数}) \\ \frac{2}{3}n(n^2-1)a^2, & (n : \text{偶数}) \end{cases} \end{aligned} \quad (10.5)$$

総迂回距離は施設間隔 n の 3 次関数になっていることが分かる．図 10.5 は様々な n に
対する施設が閉鎖されたときの総迂回距離を表している．この図からも施設間隔が大きくな
る，すなわち施設密度が低くなると施設閉鎖による迂回が急速に大きくなる様子が見て
取れる．

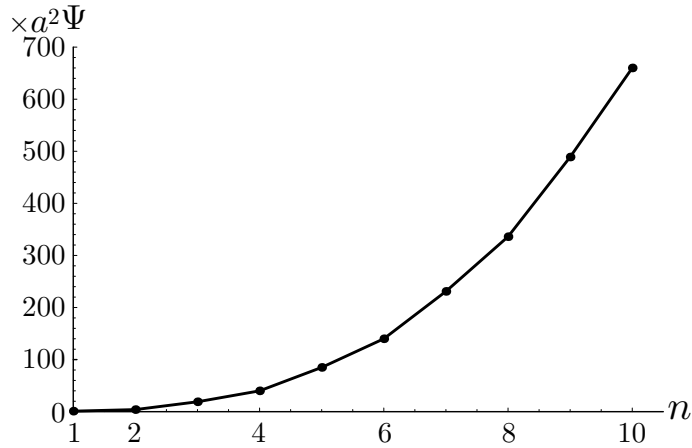


図 10.5: 施設閉鎖時の総迂回距離 (1 箇所)

第10章 施設閉鎖と道路閉塞

次に，複数の施設が閉鎖された場合を考えよう．図 10.6 は 2 つの施設が閉鎖されたときに，迂回を強いられる利用者の位置を太線で表している．(a) のように閉鎖施設が互いに離れている場合には，総迂回距離は単純に 1 つの施設が閉鎖されたときの 2 倍になる．しかし，(b) のように隣接する 2 つの施設が閉鎖されれば，それらの間の利用者が大きな迂回を強いられるため，総迂回距離は 2 倍よりも大きくなる．

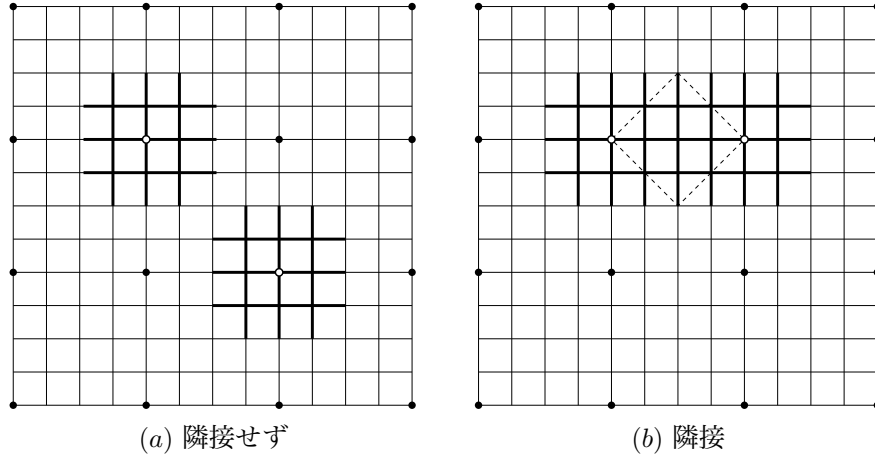


図 10.6: 施設閉鎖 (2 箇所)

隣接する施設 2 箇所が閉鎖された場合の総迂回距離は以下のように求められる．1 箇所の場合と異なるのは，図 10.6 (b) の破線で囲まれた 2 つの閉鎖施設のいずれかが最寄り，あるいは 2 番目に近い領域である．この領域内の利用者は 3 番目に近い上隣や下隣の施設を使わなければならない．図 10.7 (a) において施設と j 本の垂直リンクを隔てた水平リンクの総迂回距離 H'_j は

$$H'_j = (n - 2j)a^2 \quad (10.6)$$

となる．一方，図 10.7 (b) の垂直リンクの総迂回距離 V'_j は

$$V'_j = (n - 2j - 1)a^2 \quad (10.7)$$

と表される．

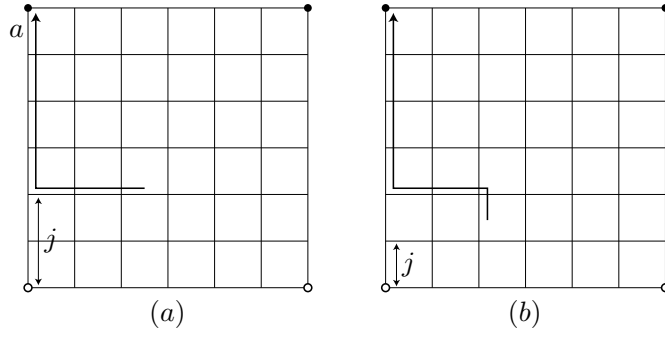


図 10.7: 施設閉鎖時の迂回 (2 箇所)

これと先に求めた 1 箇所の場合のリンクの総迂回距離を用いて、隣接する 2 施設が閉鎖されたときの総迂回距離 Ψ は次のように導かれる：

$$\begin{aligned}
 \Psi &= \begin{cases} 6 \sum_{j=0}^{\frac{n-1}{2}} \{(2j+1)H_j + 2jV_j\} + nH'_0 + 2(n-1)V'_0 \\ \quad + 2 \sum_{j=1}^{\frac{n-1}{2}} \{(n-2j)H'_j + (n-2j-1)V'_j\}, & (n : \text{奇数}) \\ 6 \sum_{j=0}^{\frac{n}{2}-1} \{(2j+1)H_j + 2jV_j\} + nH'_0 + 2(n-1)V'_0 \\ \quad + 2 \sum_{j=1}^{\frac{n}{2}-1} \{(n-2j)H'_j + (n-2j-1)V'_j\}, & (n : \text{偶数}) \end{cases} \\
 &= \begin{cases} \frac{5}{6}n(2n^2+1)a^2, & (n : \text{奇数}) \\ \frac{1}{3}n(5n^2-2)a^2, & (n : \text{偶数}) \end{cases} \quad (10.8)
 \end{aligned}$$

第10章 施設閉鎖と道路閉塞

図10.8は2箇所の施設が閉鎖された場合の総迂回距離を表している。閉鎖施設が隣接しているときの方が離れているときよりも総迂回距離が大きくなるのが分かる。この結果は隣り合う施設は閉鎖しないように補強することで移動距離の増加を抑えられるという3章の結果とも整合する。図10.6に対応する $n = 4$ のときで比較すると、隣接しない2箇所の施設閉鎖の総迂回距離は1箇所閉鎖の2倍になるのに対し、隣接2箇所では2.6倍となる。

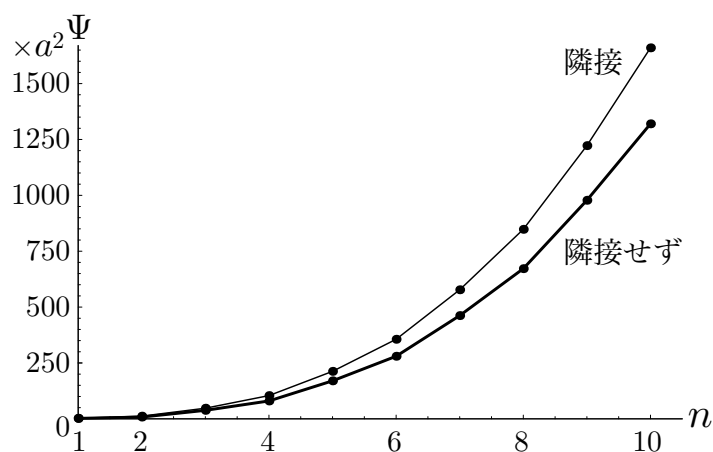


図10.8: 施設閉鎖時の総迂回距離 (2箇所)

10.3 道路閉塞

図 10.9 は道路網上の 1 箇所×が通行不能となったときに，迂回を強いられる利用者の位置を太線で表している．中央の施設の勢力圏内で，閉鎖地点を最短経路に含む利用者は迂回をしなければならない．

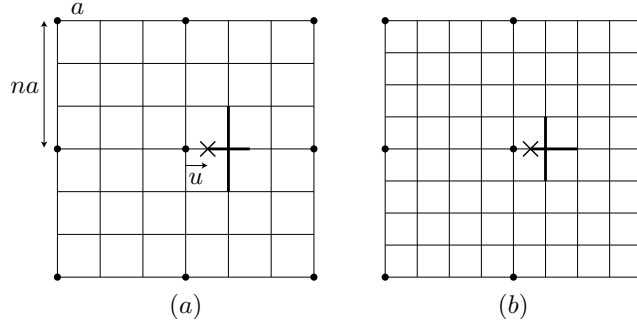


図 10.9: 道路閉塞 (1 箇所)

ここでは，道路閉塞による損失が最も大きくなる場合として，施設同士を結ぶ道路上で通行止めが生じる状況を考える．総迂回距離は水平方向のリンクと垂直方向のリンクに分けて以下のように求められる．

水平リンク

図 10.10 において施設から閉鎖地点までの距離を u ，施設と閉鎖リンクとの間にある水平リンクの本数を k とする．(a) の閉鎖リンク上で元の最寄り施設から距離 s ($u \leq s \leq (k+1)a$) の地点での迂回距離 y は， $k \leq n/2 - 2$ のときは元の施設の方が近く， $k > n/2 - 2$ のときは隣の施設の方が近くなることから，

$$y = \begin{cases} 2(k+2)a - 2s, & (k \leq \frac{n}{2} - 2) \\ na - 2s, & (k > \frac{n}{2} - 2) \end{cases} \quad (10.9)$$

となる．したがって，閉鎖リンクの総迂回距離 H_c は上式を積分することで

$$\begin{aligned} H_c &= \int_u^{(k+1)a} y \, ds \\ &= \begin{cases} \{(k+1)a - u\}\{(k+3)a - u\}, & (k \leq \frac{n}{2} - 2) \\ \{(k+1)a - u\}\{(n-k-1)a - u\}, & (k > \frac{n}{2} - 2) \end{cases} \end{aligned} \quad (10.10)$$

と求まる．ただし， n が奇数の場合には最も右側のリンクのみ次式で表される

$$H_c = \left(\frac{n}{2}a - u\right)^2. \quad (10.11)$$

第10章 施設閉鎖と道路閉塞

続いて, (b) の閉鎖リンク以外の水平リンク上で元の最寄り施設から距離 s ($(k+1)a < s \leq na/2$) の地点は $s \leq (n/2 - 1)a$ のときは元の施設の方が近く, $s > (n/2 - 1)a$ のときは隣の施設の方が近くなる. すなわち, n が奇数のときには右から2番目のリンクの中央に元の施設と隣の施設との境界があり, n が偶数のときには最も右側のリンク上で隣の施設の方が近くなる. それぞれの迂回距離 y は

$$y = \begin{cases} 2a, & (s \leq (\frac{n}{2} - 1)a) \\ na - 2s, & (s > (\frac{n}{2} - 1)a) \end{cases} \quad (10.12)$$

と表されるから, 施設と j 本のリンクを隔てた水平リンクの総迂回距離 H_j は n が奇数のとき

$$H_j = \begin{cases} 2a^2, & (j < \frac{n-3}{2}) \\ \frac{7}{4}a^2, & (j = \frac{n-3}{2}) \\ \frac{a^2}{4}, & (j = \frac{n-1}{2}) \end{cases} \quad (10.13)$$

n が偶数のとき

$$H_j = \begin{cases} 2a^2, & (j < \frac{n}{2} - 1) \\ a^2, & (j = \frac{n}{2} - 1) \end{cases} \quad (10.14)$$

と得られる.

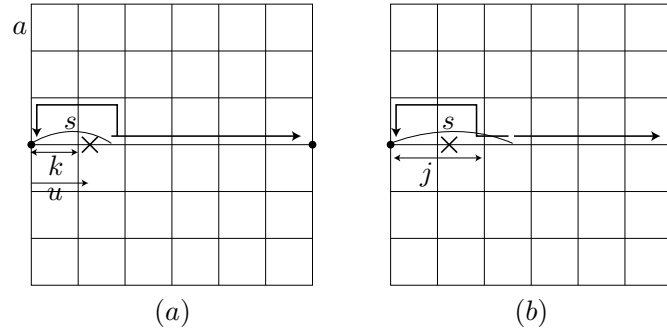


図 10.10: 道路閉塞時の迂回 (水平リンク)

10.3. 道路閉塞

垂直リンク

図 10.11 において施設と j 本の水平リンクを隔てた垂直リンク上で施設同士を結ぶ道路から距離 s ($0 \leq s \leq a$) の地点は $s \geq (j - n/2 + 1)a$ のときは元の施設の方が近く、 $s < (j - n/2 + 1)a$ のときは隣の施設の方が近くなる。すなわち、 n が奇数のときには最も右側のリンクの中央に元の施設と隣の施設との境界があり、 n が偶数のときには全てのリンクで元の施設の方が近くなる。それぞれの迂回距離 y は

$$y = \begin{cases} 2(a - s), & (s \geq (j - \frac{n}{2} + 1)a) \\ (n - 2j)a, & (s < (j - \frac{n}{2} + 1)a) \end{cases} \quad (10.15)$$

と表される。したがって、総迂回距離 V_j は

$$V_j = a^2 \quad (10.16)$$

と求まり、 n が奇数の場合には最も右側のリンクのみ

$$V_{\frac{n-1}{2}} = \frac{3}{4}a^2 \quad (10.17)$$

となる。

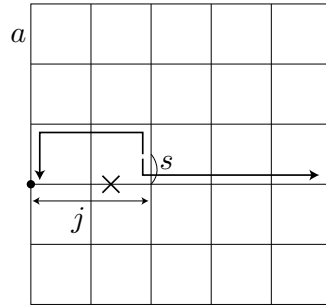


図 10.11: 道路閉塞時の迂回（垂直リンク）

以上より、総迂回距離 Ψ は水平リンクと垂直リンクの総迂回距離の和として次のように得られる。

第10章 施設閉鎖と道路閉塞

命題 10.2 利用者が一様に分布する格子状道路網上に施設が正方格子状に配置されているとする．道路が1箇所閉塞したときの総迂回距離 Ψ は次式で与えられる：

$$\Psi = \begin{cases} H_c + \sum_{j=k+1}^{\frac{n-1}{2}} (H_j + 2V_j), & (n : \text{奇数}) \\ H_c + \sum_{j=k+1}^{\frac{n}{2}-1} (H_j + 2V_j), & (n : \text{偶数}) \end{cases} \quad (10.18)$$

図 10.12 は $n = 4$ とし，閉鎖地点を施設立地点から勢力圏の端点まで変化させたときの総迂回距離を表している．総迂回距離は閉鎖地点が施設から離れるに従って単調に減少する．そして，交差点 $u = a$ で下にジャンプした後に， $u = 2a$ では 0 となる．一方，施設が閉鎖されたときの総迂回距離は図 10.5 より $n = 4$ のとき $40a^2$ であったので，これと比較すると道路閉塞の方が損失がかなり小さいことが分かる．道路閉塞による総迂回距離は最も大きくなる $u = 0$ の地点で比較しても施設閉鎖の 15% となっている．

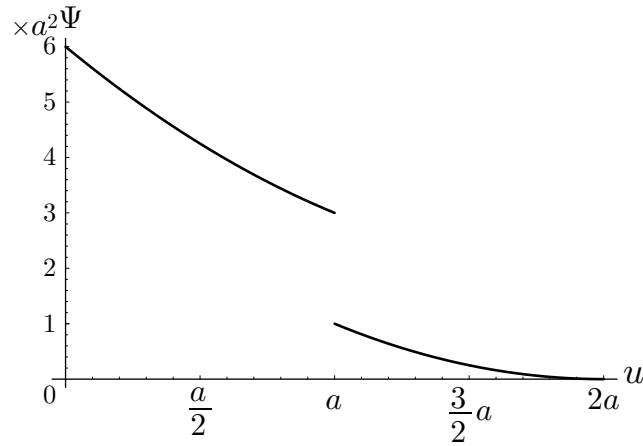


図 10.12: 道路閉塞時の総迂回距離（1 箇所）

図 10.13 は様々な施設間隔 n に対する道路が閉鎖されたときの総迂回距離の最大値，すなわち $u = 0$ のときの値を表している．図 10.5 との比較から，1 箇所の道路閉塞による総迂回距離は $n = 1, 2$ のときに 1 施設が閉鎖されたときの 25% となり，さらに n が大きくなると両者の差は広がっていくことが分かる．したがって，1 箇所の道路閉塞が都市にもたらす損失は 1 箇所の施設閉鎖の高々 25% であるといえる．

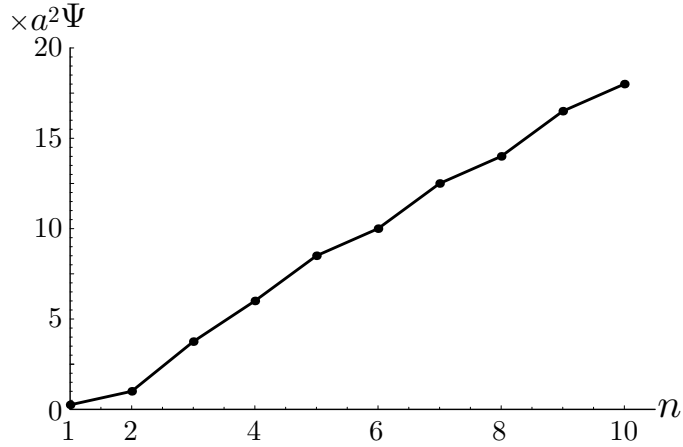


図 10.13: 道路閉塞時の総迂回距離の最大値 (1 箇所)

次に，道路網上で複数箇所が閉鎖された場合を考えよう．図 10.14 は道路網上の 2 箇所が通行止めとなったときに，迂回を強いられる利用者の位置を太線で表している．(a) のように閉鎖地点が施設を挟んで対面する道路にあれば，総迂回距離は単純に 1 箇所が閉鎖されたときの 2 倍となる．一方，(b), (c) のように閉鎖地点が隣接する道路や同一方向の道路にあれば，迂回を強いられる利用者は 2 倍よりも増えることが分かる．これら 3 つの閉鎖パターンを比較するために，施設から 2 つの閉鎖地点までの距離が等しい場合を考える．

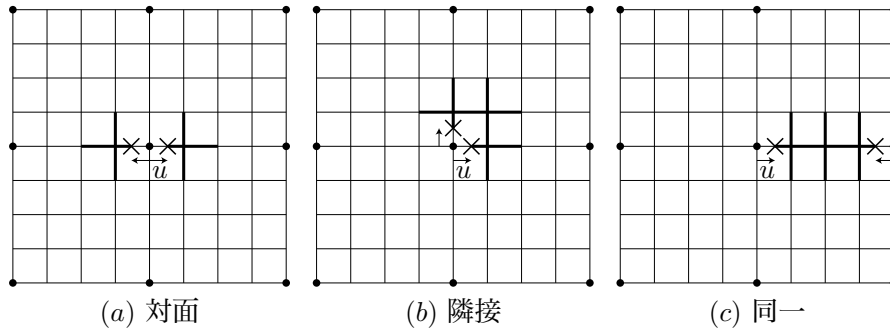


図 10.14: 道路閉塞 (2 箇所)

(b) の隣接する道路 2 箇所が閉鎖された場合の総迂回距離は以下のように求められる．施設と閉鎖リンクとの間にある水平リンクの本数が $k \geq 1$ のときは (a) の対面 2 箇所閉鎖と等しくなるので， $k = 0$ のときのみについて求める．1 箇所の場合と異なるのは，閉鎖リンク右上の垂直リンクである．図 10.15 において施設と j 本のリンクを隔てた垂直リンクでは $j \leq n/2 - 1$ のときは元の施設の方が近く， $j > n/2 - 1$ のときは隣の施設の方が

第10章 施設閉鎖と道路閉塞

近くなる．すなわち， n が奇数のときには最も右側のリンクのみ隣の施設が近く， n が偶数のときには全てのリンクで元の施設が近くなる．この総迂回距離を V'_j とおくと，

$$V'_j = 2a^2 \quad (10.19)$$

となり， n が奇数の場合には最も右側のリンクのみ

$$V'_{\frac{n-1}{2}} = a^2 \quad (10.20)$$

となる．

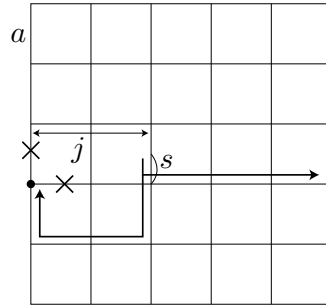


図 10.15: 道路閉塞時の迂回（隣接 2 箇所）

これと先に求めた 1 箇所の場合のリンクの総迂回距離を用いて，隣接する道路が 2 箇所閉塞したときの総迂回距離 Ψ は次のように導かれる：

$$\Psi = \begin{cases} 2H_c + 2 \sum_{j=1}^{\frac{n-1}{2}} \{(j+1)H_j + V_j + jV'_j\}, & (n : \text{奇数}) \\ 2H_c + 2 \sum_{j=1}^{\frac{n}{2}-1} \{(j+1)H_j + V_j + jV'_j\}, & (n : \text{偶数}) \end{cases} \quad (10.21)$$

(c) の同一方向の道路 2 箇所が閉鎖された場合には，全てのリンクで元の施設の方が近くなることから，閉鎖リンク，水平リンク，垂直リンクの総迂回距離 H_c, H, V はそれぞれ

$$H_c = \{(k+1)a - u\}\{(k+3)a - u\} \quad (10.22)$$

$$H = 2a^2 \quad (10.23)$$

$$V = a^2 \quad (10.24)$$

となる．これより，同一方向の道路が 2 箇所閉塞したときの総迂回距離 Ψ は次式で与えられる：

$$\Psi = 2H_c + (n - 2k - 2)H + 2(n - 2k - 1)V \quad (10.25)$$

10.3. 道路閉塞

図 10.16 は $n = 4$ とし、2 箇所の閉鎖地点を施設立地点から勢力圏の端点まで変化させたときの総迂回距離を表している。対面 2 箇所閉鎖 (a) は図 10.12 の 1 箇所閉鎖の 2 倍になっていることが分かる。隣接 2 箇所閉鎖 (b)、同一方向 2 箇所閉鎖 (c) は $u = a/2$ の地点で比較すると、いずれも 1 箇所閉鎖の 3 倍となる。つまり、同じ 2 箇所の閉鎖でも閉鎖地点が近いときの方がより大きなサービス低下をもたらすといえる。

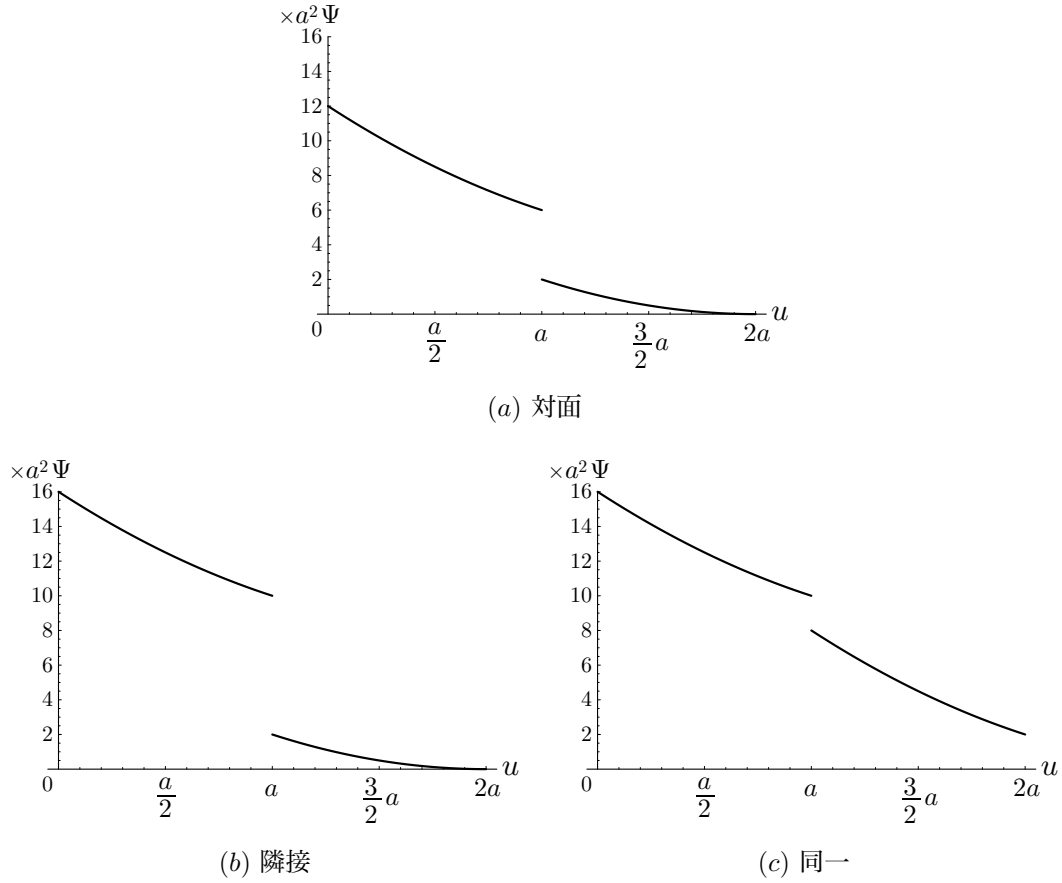


図 10.16: 道路閉塞時の総迂回距離 (2 箇所)

10.4 施設・道路の同時閉鎖

施設閉鎖と道路閉塞が同時に集中して発生した場合を考えよう．図 10.17 は中央の施設 ○ が閉鎖され，道路網上の 1 箇所 × が閉塞した際に迂回を強いられる利用者の位置を示している．(a) のように閉鎖施設と閉鎖地点が離れている場合には，総迂回距離は個別の値を合計したものになる．しかし，(b) のように閉鎖施設と隣の施設の間で道路閉塞が起こった場合には，間に挟まれた利用者は大きな迂回を強いられるため，総迂回距離は単なる合計よりも大きくなることが予想される．

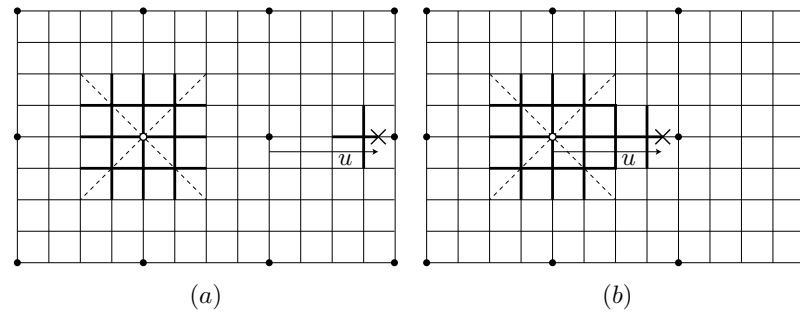


図 10.17: 施設・道路の同時閉鎖

(b) の閉鎖施設と閉鎖地点が近い場合の総迂回距離は施設閉鎖時からの距離の増分に着目して以下のように求められる．(a) と異なるのは，右隣の施設が最寄りとなる領域の中で，閉鎖地点を通過する領域である．

水平リンク

図 10.18 において閉鎖施設から閉鎖地点までの距離を u ，施設と閉鎖リンクとの間にある水平リンクの本数を k とする．(a) の閉鎖リンク上で施設から距離 s ($ka \leq s \leq u$) の地点は $k \leq 1$ のときは右隣以外の隣接施設の方が近く， $k > 1$ のときは右隣の施設の方が近くなる．したがって，迂回距離 y は施設閉鎖のみの場合からの距離の増分として，

$$y = \begin{cases} 2s, & (k \leq 1) \\ 2\{s - (k - 1)a\}, & (k > 1) \end{cases} \quad (10.26)$$

と表現できる．閉鎖リンクの総迂回距離 H_c は

$$H_c = \begin{cases} (u + ka)(u - ka), & (k \leq 1) \\ (u - ka)\{u - (k - 2)a\}, & (k > 1) \end{cases} \quad (10.27)$$

と得られる．

10.4. 施設・道路の同時閉鎖

次に, (b) の閉鎖リンク以外の水平リンク上で閉鎖施設から距離 s ($0 \leq s < ka$) の地点は $s \leq a$ のときは上下の隣接施設の方が近く, $s > a$ のときは右隣の施設の方が近くなる. それぞれの迂回距離 y は

$$y = \begin{cases} 2s, & (s \leq a) \\ 2a, & (s > a) \end{cases} \quad (10.28)$$

と表される. したがって, 閉鎖施設と j 本のリンクを隔てた水平リンクの総迂回距離 H_j は

$$H_j = \begin{cases} a^2, & (j = 0) \\ 2a^2, & (j \geq 1) \end{cases} \quad (10.29)$$

と求まる.

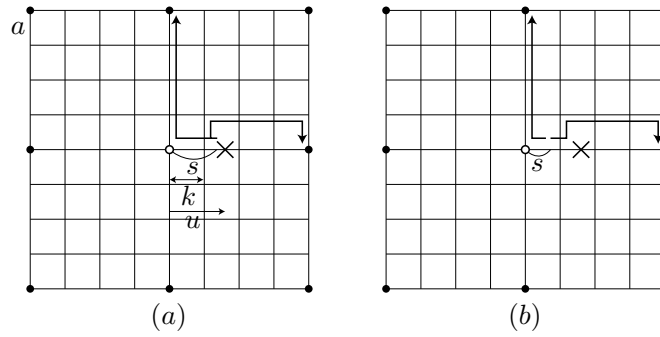


図 10.18: 施設・道路の同時閉鎖時の迂回（水平リンク）

第 10 章 施設閉鎖と道路閉塞

垂直リンク

図 10.19 において垂直リンク上で施設同士を結ぶ道路から距離 s ($0 \leq s \leq a$) の地点の迂回距離 y は、すべての垂直リンクで右隣の施設の方が近くなり

$$y = 2(a - s) \quad (10.30)$$

となる。したがって、閉鎖施設と j 本の水平リンクを隔てた垂直リンクの総迂回距離 V_j は

$$V_j = a^2 \quad (10.31)$$

と得られる。

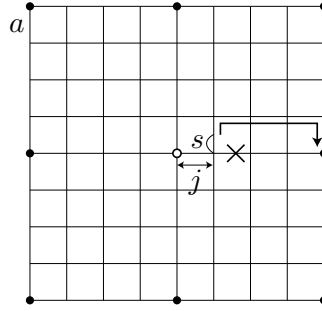


図 10.19: 施設・道路の同時閉鎖時の迂回（垂直リンク）

以上より、施設閉鎖時からの総迂回距離の増分 Ψ' は水平リンクと垂直リンクの総迂回距離の和として次のように得られる：

$$\Psi' = H_c + \sum_{j=0}^{k-1} H_j + \sum_{j=1}^k 2V_j \quad (10.32)$$

施設・道路の同時閉鎖時の総迂回距離は上式に施設閉鎖時の総迂回距離 (10.5) を加えることで導出できる。

10.4. 施設・道路の同時閉鎖

図 10.20 は $n = 4$ とし、閉鎖地点を閉鎖施設から隣の施設まで変化させたときの総迂回距離を表している。(a) の閉鎖施設と閉鎖地点が離れている場合には、総迂回距離は施設閉鎖のみの $40a^2$ に道路閉塞の図 10.12 を加えたものになることが確認できる。(b) の両者が近い場合には、閉鎖地点が閉鎖施設の勢力圏を越えたとき ($2a < u \leq 4a$)、大きな迂回が発生している。 $u = 7a/2$ のときで比較すると、閉鎖施設と閉鎖地点が近い (b) は離れている (a) の 1.2 倍になっている。

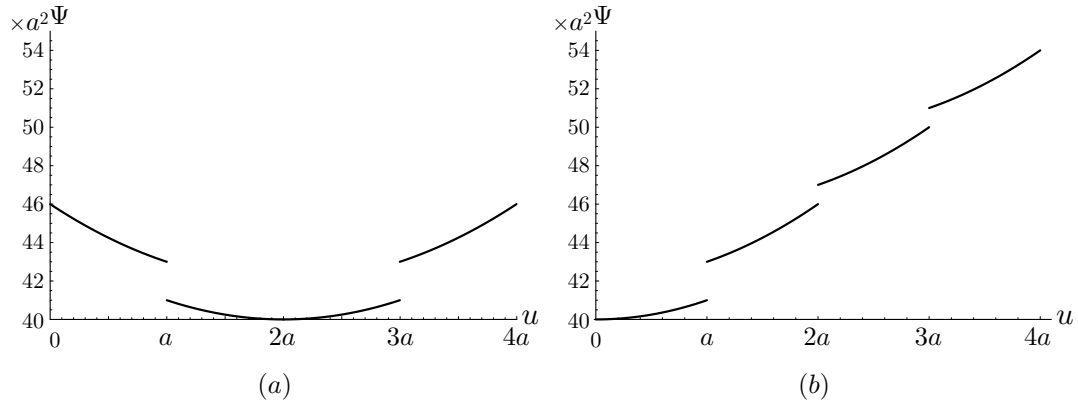


図 10.20: 道路閉塞時の総迂回距離 (2 箇所)

第10章 施設閉鎖と道路閉塞

10.5 まとめ

本章では、施設と道路網を一体として考えることで、施設閉鎖と道路閉塞の関係について議論した。本章で得られた知見は以下の3点である。

- (1) 格子状道路網上に施設が格子状に配置され、施設利用のために道路上を移動する状況を考え、施設が閉鎖されたとき、ならびに道路が閉鎖されたときの総迂回距離を理論的に導いた。そして、1箇所の道路閉塞による総迂回距離は1施設が閉鎖されたときの高々25%であることが分かった。また、施設に近い地点で道路が閉鎖された場合に迂回距離が大きくなることを示した。
- (2) 複数の施設や道路が閉鎖される状況において、閉鎖箇所が隣接しているときの方が遠く離れているときよりも大きな迂回が生じることを明らかにした。例えば、2つの施設が閉鎖された場合、ある特定の点で比較すると、閉鎖施設同士が隣接していれば総迂回距離は1.3倍になる。また、道路網上の2箇所が閉鎖された場合、閉鎖地点が近ければ総迂回距離が1.5倍になる。
- (3) 施設閉鎖と道路閉塞が同時に集中して発生した場合の総迂回距離を求めた。そして、閉鎖施設の近くの道路が閉塞した場合に迂回距離が大きくなることが分かった。

第11章 おわりに

11.1 結論

都市計画は将来に予測される変化を前提として、その変化に対応することを課題としている。それゆえ、災害や社会的変化等の不確実性によるサービス水準の低下を把握すること、それを計画によってどの程度軽減できるかを明らかにすることには、都市リスクを管理する上で、また都市計画の可能性を測る上でも重要な価値がある。

本研究では、施設配置ならびに道路網の頑健性を移動距離の変化に着目した単純なモデルを用いて評価した。施設閉鎖、道路閉塞による損失を把握し、それぞれに対する計画の効果を客観的に測ることができた。得られた結果は直観的理解が可能で、しかも実際の現象をある程度記述できることも確認した。施設と道路という最も基本的な都市インフラストラクチャーでの分析は、その他都市における様々な不確実性を評価する基礎となることが期待できる。いまいちど、本研究で得られた主たる成果をまとめた上で、不確実性に強い頑健な都市設計への示唆を述べる。

施設配置の頑健性

- 施設数変動する状況での最寄り施設までの距離の変化を連続平面上の規則的配置とランダム配置を用いて分析した。 k 次近隣距離分布、平均距離を求めることで、施設閉鎖・開設の影響について厳密に議論した。
- 3種類の規則的配置で得られた結果を比較し、既存研究で主張されていた三角格子状配置の最適性は、施設が閉鎖される場合には必ずしも安定していないことを明らかにした。ただ、3種類の規則的配置にはそれ程大きな差がないことも確認された。
- 計画の効果として、耐震補強等を想定した計画的な施設閉鎖、ならびに施設閉鎖情報の提供効果を移動距離の削減という観点から客観的に評価した。

道路網の頑健性

- 道路閉塞が発生した場合の移動距離の増加を格子状道路網、放射環状道路網を用いて分析した。迂回距離分布、総迂回距離を導出し、道路閉塞がもたらす損失について定量的な議論を展開した。

第11章 おわりに

- 迂回距離に関する基本的性質を明らかにした。最短距離との関係、道路密度や断面交通量との関係、および道路閉塞情報が得られない場合に迂回距離が非対称性を持つ状況を単純に表現することができた。
- 情報の効果として、カーナビゲーションシステム等を用いたリアルタイムの情報提供、ならびに交差点での道路情報板による情報提供効果を迂回距離の削減という点で評価した。また、情報提供が有効な箇所を道路密度と断面交通量から特徴付けた。

施設閉鎖と道路閉塞

- 施設配置と道路網を統合して考えることで、施設閉鎖と道路閉塞が都市全体にもたらすサービス低下を施設までの移動距離の増分という共通の切り口で理論的に把握した。さらに、複数の施設や道路が閉鎖される場合において、閉鎖箇所が近接することによる損失の増大を観察した。

実際に施設配置計画や道路整備計画を立案するに当たっては、モデル分析に含められなかった様々な要因を考慮する必要がある。それゆえ、本研究の結果は実際の問題に対するベンチマークとして、また意思決定のための情報を提供するものとして位置付けられる。

施設配置に関しては、3種類の規則的配置を比較したが、実際には現存する配置を前提として整備方針を決定することになる。その際にも、実際の配置は規則的配置とランダム配置の間にあることが明らかになったので、施設閉鎖時のサービスの低下や耐震補強の効果、あるいは情報提供効果を大まかに見積もることができる。

道路網に関しては、実際の道路網は格子状・放射環状のいずれかを基本パターンとしていることから、その結果を基にして道路閉塞による損失の大きさや道路網上の弱い箇所を知ることができる。道路情報の提供についての完全情報という理想状態での分析は、情報提供だけではここまでにしかないという限界を与えてくれる。

不確実性に強い都市を計画する上で、頑健性と整備費用とのトレード・オフ関係を考える際、あるいは都市住民への説明の際にも、本研究で得られた客観的に理解し説明できる結果が果たす役割は極めて大きいといえよう。さらに、都市計画において平常時の効率性だけではなく、災害の発生や社会の変化を前提として、それらに備えることの重要性も改めて確認することができた。

11.2 今後の展望

本研究で扱ったモデルは単純であるがゆえに、これを基礎としてより複雑な要因を考慮した分析への発展性を有している。今後の発展の方向性の例を以下に述べる。

- 施設配置と道路網の両方に共通することは、閉鎖直後の評価のみならず、時間変化の中で動的に頑健性を評価することが考えられる。災害によって施設や道路が被害を受けた場合には直ちに復旧活動が始まるし、補強をする際にも時間をかけて逐次的に行われることが通例である。このような復旧過程、計画の実行過程といった期間の中で動的に頑健性を評価するためには、サービスの低下期間を設定し、時間の長さに応じて重み付けをする必要がある。
- 市役所の本庁舎と出張所、病院と診療所のように施設の規模や階層構造を分析対象に含めることも可能である。その場合の最適な配置は、[鈴木 (1990)] で述べられているように、各サービス階層毎に最適配置を求め、上位階層の施設は高次のサービスと低次のサービスを制約として一致させたものとみなすことにより求められる。
- 道路網に関しても、国道・主要地方道・県道といった階層構造を取り入れることも重要である。道路幅員や区間の長さに応じて閉塞する確率を設定することができれば、より一般的な枠組みでの頑健性評価が可能となり、優先的に補強すべき重要な区間を見出すこともできる。
- 道路閉塞による移動距離の増加だけではなく、移動時間の増加を考慮して頑健性を評価することが考えられる。日常的な移動でも経路選択を行う際には道路混雑を考慮することが多いし、災害や事故発生時には迂回交通の集中による道路混雑が特に問題となる。交通量とサービス水準が相互依存関係にあることは、交通をネットワークフローとして扱うことで表現できる。
- 本研究の主題である不確実性に対する頑健性評価というアプローチは、施設配置や道路網のみならず、公共交通や電気・ガス等のライフライン、さらには人口予測の不確実性等の計画に伴うリスクのような様々な都市リスク分析への応用が考えられる。また、不確実性に強い頑健な解を必要とする都市計画分野での問題解決に相応しい最適化手法を構築することも可能であると考えている。

参考文献

- [秋山 (1990)] 秋山政敬: 図説都市構造, 鹿島出版会, 1990.
- [秋月, 他 (2004)] 秋月有紀, 田中孝義, 岩田三千子: 災害時の避難誘導に関する行政管轄下の標識の視認性: 京都市東山区を対象とした実態調査, 都市計画論文集, 39-3, pp.589–594, 2004.
- [Arnott,et al.(1991)] Arnott, R., de Palma, A., and Lindsey, R.: Dose Providing Information to Drivers Reduce Traffic Congestion?, *Transportation Research A*, 25A(5), pp.309–318, 1991.
- [朝倉 (1999)] 朝倉康夫: 交通ネットワークフロー分析と災害時の信頼性評価, 応用数理, 9, pp.40–49, 1999.
- [朝倉, 他 (1997)] 朝倉康夫, 柏谷増男, 藤原健一郎: 交通ネットワークにおける迂回の限度を考慮した OD ペア間信頼度の指標, 土木学会論文集, 555, IV–34, pp.41–49, 1997.
- [Beckmann (1999)] Beckmann, M.J.: *Lectures on Location Theory*, Springer-Verlag, 1999.
- [Chang,Nojima (2001)] Chang, S.E. and Nojima, N.: Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective, *Transportation Research A*, 35, pp.475–494, 2001.
- [Chen,et al.(2002)] Chen, A., Yang, H., Lo, H.K., and Tang, W.H.: Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results, *Transportation Research B*, 36, pp.225–252, 2002.
- [Cho,et al.(2001)] Cho, S., Gordon, P., Moore, J.E. II, Richardson, H.W., Shinozuka, M., and Chang, S.E.: Integrating Transportation Network and Regional Economic Models to Estimate the Costs of a Large Urban Earthquake, *Journal of Regional Science*, 41(1), pp.39–65, 2001.

参考文献

- [Christaller (1933)] Christaller, W.: *Die zentralen Orte in Süddeutschland*, Gustav Fische, 1933 (江沢譲爾訳: 都市の立地と発展, 大明堂, 1969).
- [Clark, Evans (1954)] Clark, P.J. and Evans, F.C.: Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations, *Ecology*, 35, pp.85–90, 1954.
- [Dacey (1968)] Dacey, M.F.: Two-Dimensional Random Point Patterns: A Review and an Interpretation, *Papers of the Regional Science Association*, 13, pp.41–55, 1968.
- [Daskin (1995)] Daskin, M.S.: *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*, John Wiley & Sons, 1995.
- [土木学会 (1998)] 土木学会土木計画学研究委員会, 編: 交通ネットワークの均衡分析: 最新の理論と解法, 土木学会, 1998.
- [道路保全技術センター (1998)] 道路保全技術センター, 編: 道の駅の本: 個性豊かなにぎわいの場づくり, ぎょうせい, 1998.
- [Drezner (1995)] Drezner, Z., editors: *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*, Springer-Verlag, 1995.
- [Drezner, Hamacher (2002)] Drezner, Z. and Hamacher, H.W., editors: *Facility Location: Applications and Theory*, Springer-Verlag, 2002.
- [Du, et al. (1999)] Du, Q., Faber, V., and Gunzburger, M.: Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms, *SIAM Review*, 41(4), pp.637–676, 1999.
- [藤田, 鈴木 (2003)] 藤田学洋, 鈴木勉: 複数の環状路をもつ円盤都市における平均移動距離と流動量, 都市計画論文集, 38-3, pp.421–426, 2003.
- [Grünbaum, Shephard (1987)] Grünbaum, B. and Shephard, G.C.: *Tilings and Patterns*, Freeman, New York, 1987.
- [阪神・淡路大震災 (1998)] 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会, 編: 交通施設と農業施設の被害と復旧. 阪神・淡路大震災調査報告, 丸善, 1998.
- [阪神・淡路大震災 (1999)] 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会, 編: 都市安全システムの機能と体制. 阪神・淡路大震災調査報告, 丸善, 1999.
- [Hilbert, Cohn-Vossen (1932)] Hilbert, D. and Cohn-Vossen, S.: *Anschauliche Geometrie*, Springer, 1932 (芹沢正三訳: 直観幾何学, みすず書房, 1966).

参考文献

- [Hodgson (1981)] Hodgson, M.J.: The location of public facilities intermediate to the journey to work, *Regional Studies*, 15, pp.493–506, 1981.
- [Holgate (1965)] Holgate, P.: The distance from a random point to the nearest point of a closely packed lattice, *Biometrika*, 52, pp.261–263, 1965.
- [Hoover (1971)] Hoover, E.M.: *An Introduction to Regional Economics*, Alfred A. Knopf, New York, 1971.
- [堀井 (1996)] 堀井雅史: 迂回度を用いた自然災害時における道路網の代替機能に関する評価方法, 都市計画論文集, 31, pp.769–774, 1996.
- [家田, 他 (1997)] 家田仁, 上西周子, 猪俣隆行, 鈴木忠徳: 阪神大震災における「街路閉塞現象」に着目した街路網の機能的障害とその影響, 土木学会論文集, 576, IV–37, pp.69–82, 1997.
- [飯田 (2000)] 飯田克弘: 利用者の評価・行動結果に基づく道の駅の基本施設・サービスのあり方に関する考察, 都市計画論文集, 35, pp.421–426, 2000.
- [飯田, 他 (1996)] 飯田恭敬, 藤井聡, 内田敬: 動的交通流シミュレーションを用いた道路網における情報提供効果に関する分析, 交通工学, 31(6), pp.19–29, 1996.
- [飯田, 若林 (1988)] 飯田恭敬, 若林拓史: OD パターンと道路網パターンの相違による道路網信頼性のマクロ的研究, 交通工学, 23(3), pp.9–19, 1988.
- [今泉, 浅見 (2000)] 今泉恭一, 浅見泰司: 震災時の道路閉塞推定に関する研究: 防災街づくりのための密集住宅市街地整備方策の定量的比較分析, 日本建築学会計画系論文集, 529, pp.225–231, 2000.
- [Iri, et al.(1984)] Iri, M., Murota, K., and Ohya, T.: A fast Voronoi diagram algorithm with applications to geographical optimization problems In Throft-Christensen, P., editors, *Proceedings of the 11th IFIP Conference on System Modelling and Optimization*, pp.273–288, Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- [石崎 (2003)] 石崎研二: 立地・配分モデル, 杉浦芳夫, 編, 地理空間分析, pp.61–83, 朝倉書店, 2003.
- [梶 (1989)] 梶秀樹: 災害被害情報の安全避難への効果, 都市計画論文集, 24, pp.73–78, 1989.

参考文献

- [柏原 (1991)] 柏原土郎: 地域施設計画論: 立地モデルの手法と応用, 鹿島出版会, 1991.
- [河上, 竹内 (1972)] 河上省吾, 竹内伝史: 放射環状輸送路の最適配置に関する研究, 交通工学, 7 増刊号, pp.27-39, 1972.
- [Klamroth (2002)] Klamroth, K.: *Single-Facility Location Problems with Barriers*, Springer-Verlag, 2002.
- [Koshizuka, Kurita (1991)] Koshizuka, T. and Kurita, O.: Approximate formulas of average distances associated with regions and their applications to location problems, *Mathematical Programming*, 52, pp.99-123, 1991.
- [腰塚 (1976)] 腰塚武志: 積分幾何学について (3), オペレーションズ・リサーチ, 21(11), pp.654-659, 1976.
- [腰塚 (1978)] 腰塚武志: 道路網と交差点, 都市計画, 103, pp.36-41, 1978.
- [腰塚 (1985)] 腰塚武志: 都市施設の密度と利用者からの距離との関係について, 都市計画論文集, 20, pp.85-90, 1985.
- [腰塚 (1986)] 腰塚武志: 都市平面における距離の分布, 都市計画数理, pp.1-55, 朝倉書店, 1986.
- [腰塚 (1992)] 腰塚武志: 空間分布モデル, 日本建築学会, 編, 建築・都市計画のためのモデル分析の手法, pp.35-50, 井上書院, 1992.
- [腰塚 (1999)] 腰塚武志: 移動からみた放射状と格子状ネットワークの比較, 都市計画論文集, 34, pp.763-768, 1999.
- [腰塚, 小林 (1983)] 腰塚武志, 小林純一: 道路距離と直線距離, 都市計画論文集, 18, pp.43-48, 1983.
- [腰塚, 栗田 (1986)] 腰塚武志, 栗田治: 放射・環状ネットワークにおける環状路の役割について, 都市計画論文集, 21, pp.217-222, 1986.
- [腰塚, 大澤 (1983)] 腰塚武志, 大澤義明: 距離分布による施設配置の分析, 都市計画論文集, 18, pp.25-30, 1983.
- [熊谷 (1992)] 熊谷良雄: 避難道路標識の設置基準に関する実験的研究, 都市計画論文集, 27, pp.571-576, 1992.

- [栗田 (2001a)] 栗田治: 円盤都市における道路パターンの理論: 直線距離, 直交距離ならびに放射・環状距離の分布, 都市計画論文集, 36, pp.859–864, 2001.
- [栗田 (2001b)] 栗田治: 多角形領域で一様に分布する点から固定点への直線距離の平均値と2次の積率: 平均直線距離の等高線の描画法, GIS-理論と応用, 9(1), pp.29–37, 2001.
- [栗田 (2004)] 栗田治: 都市モデル読本, 共立出版, 2004.
- [Leamer (1968)] Leamer, E.E.: Locational Equilibria, *Journal of Regional Science*, 8(2), pp.229–242, 1968.
- [Lo,Tung (2003)] Lo, H.K. and Tung, Y.K.: Network with degradable links: capacity analysis and design, *Transportation Research B*, 37, pp.345–363, 2003.
- [Lösch (1940)] Lösch, A.: *Die räumliche Ordnung der Wirtschaft*, Gustav Fische, 1940 (篠原泰三訳: レッシュ経済立地論, 大明堂, 1968).
- [Mahmassani,Peeta (1993)] Mahmassani, H.S. and Peeta, S.: Network Performance Under System Optimal and User Equilibrium Dynamic Assignments: Implications for Advanced Traveler Information Systems, *Transportation Research Record*, 1408, pp.83–93, 1993.
- [Mathai (1999)] Mathai, A.M.: *An Introduction to Geometrical Probability: Distributional Aspects with Applications*, Gordon and Breach Science Publishers, 1999.
- [松戸, 他 (2000)] 松戸利一, 大津晶, 腰塚武志: 通勤行動と施設配置: 千葉市を事例に, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集, pp.94–95, 2000.
- [松本 (2004)] 松本治男: 路上工事規制情報のリアルタイム管理の取り組み, 交通工学, 39(4), pp.30–35, 2004.
- [南, 他 (1997)] 南正昭, 高野伸栄, 加賀屋誠一, 佐藤馨一: 拠点的医療施設へのアクセスを2系統で保証する道路ネットワーク構造, 土木計画学研究・論文集, 14, pp.679–686, 1997.
- [南, 他 (1996a)] 南正昭, 高野伸栄, 佐藤馨一: リダンダントな道路網の構成方法に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, 13, pp.733–742, 1996.
- [南, 他 (1996b)] 南正昭, 高野伸栄, 佐藤馨一: 道路網における代替ルートの整備水準の一評価法に関する研究, 土木学会論文集, 530, IV–30, pp.67–77, 1996.

参考文献

- [蓑谷 (2003)] 蓑谷千風彦: 統計分布ハンドブック, 朝倉書店, 2003.
- [Miyagawa,Ohsawa (2003)] Miyagawa, M. and Ohsawa, Y.: Detour Distance Distribution in the Grid Type Network, *International Workshop on Urban Operations Research*, pp.42–43, 2003.
- [宮川, 他 (2003)] 宮川雅至, 腰塚武志, 大澤義明: 格子状道路網における迂回距離分布, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.268–269, 2003.
- [宮川, 他 (2004)] 宮川雅至, 腰塚武志, 大澤義明: 放射環状道路網における迂回距離分布, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.98–99, 2004.
- [宮川, 大澤 (2000)] 宮川雅至, 大澤義明: 迂回距離と旅行自由度との関係について, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.232–233, 2000.
- [宮川, 大澤 (2001)] 宮川雅至, 大澤義明: 移動途中の寄り道行動から見た施設への距離分布, 都市計画論文集, 36, pp.847–852, 2001.
- [宮川, 大澤 (2002)] 宮川雅至, 大澤義明: 利用者からの距離に着目した規則的施設配置の頑健性, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.154–155, 2002.
- [宮川, 大澤 (2003)] 宮川雅至, 大澤義明: 迂回距離と最短距離, 都市計画論文集, 38-3, pp.439–444, 2003.
- [宮川, 大澤 (2004)] 宮川雅至, 大澤義明: 道路閉塞情報の迂回距離削減効果, 都市計画論文集, 39-3, pp.793–798, 2004.
- [宮川, 他 (2004)] 宮川雅至, 大澤義明, 腰塚武志: 施設の開設・閉鎖に伴う移動距離変化と頑健な規則的配置, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, 47, pp.1–24, 2004.
- [溝上, 他 (2000)] 溝上章志, 柿本竜治, 柴木雅也: 情報提供下での動学的経路選択行動に関する実験分析, 交通工学, 35(3), pp.9–19, 2000.
- [森地, 他 (1995)] 森地茂, 兵藤哲朗, 小川圭一: 情報提供システム評価のための交通行動分析手法に関する研究, 交通工学, 30(3), pp.21–29, 1995.
- [中山, 谷野 (1994)] 中山弘隆, 谷野哲三: 多目的計画法の理論と応用, 計測自動制御学会, 1994.

- [日本建築学会 (1995)] 日本建築学会, 編: 地域施設の計画: 21 世紀に向けた生活環境の創造, 丸善, 1995.
- [日本都市計画学会 (1995)] 日本都市計画学会, 編: 阪神淡路大震災 都市の再生: 報告・提言・資料, 日本都市計画学会, 1995.
- [日本都市計画学会 (1999)] 日本都市計画学会防災・復興問題研究特別委員会, 編: 安全と再生の都市づくり: 阪神・淡路大震災を超えて, 学芸出版社, 1999.
- [大澤 (1992)] 大澤義明: 施設配置理論モデル, 日本建築学会, 編, 建築・都市計画のためのモデル分析の手法, pp.136-149, 井上書院, 1992.
- [大澤 (1996)] 大澤義明: 地域施設計画モデルにおける計画施設数と最適配置及び最適距離との関係, 日本建築学会計画系論文集, 482, pp.165-174, 1996.
- [大澤, 腰塚 (1982)] 大澤義明, 腰塚武志: 点の分布パターンと最近隣距離, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.42-43, 1982.
- [大泉, 他 (1999)] 大泉剛, 安藤昭, 佐々木栄洋, 赤谷隆一: 東北地方における道の駅の現況および地域振興効果の計測について, 都市計画論文集, 34, pp.487-492, 1999.
- [Okabe, et al. (2000)] Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K., and Chiu, S.N.: *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*, John Wiley & Sons, 2000.
- [岡部, 鈴木 (1992)] 岡部篤行, 鈴木敦夫: 最適配置の数理, 朝倉書店, 1992.
- [奥平 (1976)] 奥平耕造: 都市工学読本, 彰国社, 1976.
- [奥平, 他 (1979)] 奥平耕造, 腰塚武志, 他: 地域研究 (その 1), オペレーションズ・リサーチ, 24(3), pp.152-159, 1979.
- [大谷, 他 (2002)] 大谷博, 近藤光男, 廣瀬義伸, 高橋啓一: 少子化時代における学校統廃合計画案の評価に関する研究, 都市計画, 235, pp.44-53, 2002.
- [Oyama (2000)] Oyama, T.: Weight of Shortest Path Analyses for the Optimal Location Problem, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 43, pp.176-196, 2000.
- [Oyama, Taguchi (1996)] Oyama, T. and Taguchi, A.: Application of the Shortest Path Counting Problem to Evaluate the Importance of City Road Segments in Japan In

参考文献

- Matsuda, Y. and Fushimi, M., editors, *Perspectives of Advanced Technology Society 3: Urban Life and Traffic*, pp.3–20, Maruzen Planet Co., Tokyo, Japan, 1996.
- [大山, 諸星 (2003)] 大山達雄, 諸星穂積: 経路数え上げによるネットワークシステムの連結性の定量的評価とわが国道路網への応用, *オペレーションズ・リサーチ*, 48(7), pp.472–478, 2003.
- [Pearce (1974)] Pearce, C.E.M.: Locating concentric ring roads in a city, *Transportation Science*, 8, pp.142–168, 1974.
- [Persson (1964)] Persson, O.: Distance methods: the use of distance measurements in the estimation of seedling density and open space frequency, *Studia Forestalia Suecica*, 15, pp.1–68, 1964.
- [Puu (1997)] Puu, T.: *Mathematical Location and Land Use Theory: An Introduction*, Springer-Verlag, 1997.
- [酒井, 他 (1997)] 酒井大輔, 高山純一, 川上光彦, 永田恭裕: 高速道路の通行止情報の最適提供位置決定のための検討手法, *都市計画論文集*, 32, pp.97–102, 1997.
- [Sansò, Milot (1999)] Sansò, B. and Milot, L.: Performability of a Congested Urban Transportation Network when Accident Information is Available, *Transportation Science*, 33(1), pp.68–79, 1999.
- [佐々木 (2004)] 佐々木英明: 事前通行規制情報の提供について: 「アメールシステム」の導入, *月刊建設*, 48(9), pp.18–20, 2004.
- [Schöbel (1999)] Schöbel, A.: *Locating Lines and Hyperplanes: Theory and Algorithms*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [嶋田, 他 (1995)] 嶋田喜明, 加藤哲男, 本多義明: 自然災害を考慮した道路網評価に関する基礎的考察: 福井都市圏におけるケーススタディー, *都市計画論文集*, 30, pp.97–102, 1995.
- [島川, 他 (2001)] 島川陽一, 林美沙, 田口東: 首都高速道路の環状線建設による交通混雑の緩和予測, *オペレーションズ・リサーチ*, 46(3), pp.139–148, 2001.
- [Smith (1976)] Smith, M.J.: The location of two ring roads and the control of traffic speed which together minimizes radial travel in a town, *Transportation Research*, 10, pp.201–207, 1976.

- [Smith (1979)] Smith, M.J.: The optimal location of a single ring road, *Transportation Research B*, 13, pp.151–154, 1979.
- [Stone (1991)] Stone, R.E.: Some Average Distance Results, *Transportation Science*, 25(1), pp.83–90, 1991.
- [杉浦 (1989)] 杉浦芳夫: 立地と空間的行動, 古今書院, 1989.
- [Sule (2001)] Sule, D.R.: *Logistics of Facility Location and Allocation*, Marcel Dekker, 2001.
- [Suzuki, et al. (1991)] Suzuki, T., Asami, Y., and Okabe, A.: Sequential location-allocation of public facilities in one- and two-dimensional space: Comparison of several policies, *Mathematical Programming*, 52, pp.125–146, 1991.
- [鈴木 (1988)] 鈴木勉: 利用者の移動費用最小化による施設の最適な建設順序と配置, 都市計画論文集, 23, pp.61–66, 1988.
- [鈴木 (1990)] 鈴木勉: 施設の最適な階層構造に関する考察, 都市計画論文集, 25, pp.331–336, 1990.
- [鈴木 (2002)] 鈴木勉: フロー需要に基づく施設配置モデルと需要構成が施設配置に与える影響, 都市計画論文集, 37, pp.115–120, 2002.
- [田村, 腰塚 (2000)] 田村一軌, 腰塚武志: 道路網上の距離分布と流動量分布に関する基礎的研究, 都市計画論文集, 35, pp.1021–1026, 2000.
- [田村, 他 (2001)] 田村一軌, 腰塚武志, 大澤義明: 道路ネットワーク上の道路距離と直線距離, 都市計画論文集, 36, pp.877–882, 2001.
- [田中, 栗田 (2001)] 田中健一, 栗田治: 放射・環状道路網を有する扇形都市平面上の通過交通量の分布: 渋滞のない都市設計のための道路面積の適正割り当て分析, 都市計画論文集, 36, pp.865–870, 2001.
- [谷村 (1986)] 谷村秀彦: 施設配置計画の数理, 都市計画数理, pp.56–95, 朝倉書店, 1986.
- [鵜飼, 栗田 (2002)] 鵜飼孝盛, 栗田治: 放射・環状道路網を有する扇型都市における移動距離の分布, 都市計画論文集, 37, pp.43–48, 2002.
- [Vaughan (1987)] Vaughan, R.J.: *Urban Spatial Traffic Patterns*, Pion, 1987.

- [Wang,et al.(2003)] Wang, Q., Batta, R., Bhadury, J., and Rump, C.M.: Budget constrained location problem with opening and closing of facilities, *Computers & Operations Research*, 30, pp.2047–2069, 2003.
- [山田, 他 (1986)] 山田善一, 家村浩和, 野田茂, 伊津野和行: 道路交通網の最適な震後復旧過程の評価, 土木学会論文集, 368, I-5, pp.355–362, 1986.
- [柳井 (1995)] 柳井浩: 環状路の混雑, オペレーションズ・リサーチ, 40(2), pp.117–122, 1995.
- [Yin,Ieda (2001)] Yin, Y. and Ieda, H.: Assessing Performance Reliability of Road Networks Under Nonrecurrent Congestion, *Transportation Research Record*, 1771, pp.148–155, 2001.
- [吉川, 他 (2003)] 吉川徹, 阪田知彦, 横田敬司: 個別建物の倒壊危険性を考慮した地震避難危険度算定のためのシミュレーションシステムの開発, 第一住宅建設協会, 2003.

謝辞

このように博士論文を完成させることができたのは、多くの皆様に支えて頂いたおかげです。ここに深遠なる感謝の意を表したいと思います。

大澤義明先生には先生の人柄と面倒見の良さに惹かれて卒論指導をお願いして以来、6年間の長きに亘り御指導を賜りました。先生には研究の進め方から論文のまとめ方、学会でのプレゼンテーションの仕方に至るまで大変親身に教えて頂きました。先生が研究において基礎体力を養うことの重要性を幾度となく強調されていたことが強く心に残っています。先生の叱咤激励がなければ、この論文を完成させることはできなかったと思います。また、研究のみならず、日頃から社会人としての気配りや心掛けまで御指導頂きました。良き師に巡り会えたことは研究者を志す私にとって大きな幸運でした。先生の筑波大学社会工学類に対する思いを受け継ぎ、研究に邁進することで少しでも恩返しができればと思っています。

腰塚武志先生には大学の運営等で大変お忙しいこともあり、御指導頂ける機会が少なかったのは大変残念ですが、都市解析の講義や卒論生のゼミを通して、何より自分自身が面白がって研究することの大切さを教えて頂きました。また、飲み会の席で聞いた先生の豪快なエピソードは今後の生き方に多くの示唆を与えてくれるような気がします。

石田東生先生には論文発表会の際に毎回の確なコメントを頂き、また都市交通研究室のゼミで発表する機会を与えて頂きました。学類1年生のときに受講した先生の都市構造論は（2年生向けだったためかなり苦労しましたが）このような研究分野に興味を持つ最初のきっかけとなりました。

糸井川栄一先生には論文の内容に関して、都市防災計画の観点はもとより数理的観点からも詳細な御助言を頂きました。鈴木勉先生には学類3年生の都市計画実習でお世話になって以来、研究室のゼミや研究発表会等でお会いする機会も多く、多くの励ましのお言葉を頂きました。高木英明先生には幾何確率のゼミを御一緒させて頂き、数理的な思考技術を学びました。

学会や都市のOR研究会では（夜の懇親会も含めて）、他大学の先生方からも数多くの有益な御意見を頂戴しました。特に、中央大学の田口東先生にはOR学会論文誌へ投稿す

る際に表現を適切にすべく詳細な御指摘を頂き、また進路に関しても格別なる御配慮を頂きました。慶應義塾大学の栗田治先生には研究だけでなく、広い教養を身に付けることが豊かな人生を過ごすために必要であることを教えて頂きました。

腰塚・大澤研究室の先輩・同期・後輩の皆さんからも多くの知的な刺激を受けました。特に、博士課程の先輩である大津晶さん、田村一軌さん、中川享規さんは卒業後も研究の進捗状況や卒業後の進路を常々気にかけて下さいました。博士論文にも多くの有益なコメントを頂きました。同期の尾崎尚也君、小林隆史君の存在は大変心強く、助けられることもしばしばでした。3人の性格は全く異なっていましたが、それがかえって良い効果を生み出したのではないかと思います。研究室では興味のあることは何でもやらせてもらえる自由な雰囲気とパワー溢れる院生に囲まれて、研究に対する真摯な態度と飲み会の楽しさを学びました。この研究室で過ごした6年間は私にとって貴重な財産です。

また、糸井川研の阿部英樹君には特に \TeX に関して技術的なサポートをお願いしました。鈴木研の渡部大輔さんには研究に関連する様々な情報を提供して頂きました。山本研・吉瀬研の学生と組合せ最適化のゼミをやったことは、数学の証明における論理の厳密さ、明快さを知る良い経験になりました。

そして、長い学生生活を送ることを快く許してくれ、常に温かく支え続けてくれた家族に感謝します。

皆様、これまで本当にありがとうございました。これからも様々な面でお世話になるとありますが、何卒宜しく願い申し上げます。最後に、元プロレスラーのアントニオ猪木氏の名言を紹介し、今後の決意表明とさせていただきます。

この道を行けば どうなるものか 危ぶむなかれ 危ぶめば道はなし
踏み出せば その一足が道となり その一足が道となる
迷わず行けよ 行けば分かるさ

2005 年 3 月
宮川 雅至